ISSN 1340-4482

INSS JOURNAL

Journal of the Institute of Nuclear Safety System

Vol.28 2021

株式会社 原子力安全システム研究所
Institute of Nuclear Safety System, Incorporated

目　　次

巻 頭 言

F-1　ポストコロナ時代におけるシニアの活力 ……石井　威望　1

論　　文

社会システム研究所

SR-1　身近な緊急事態への対応と個人特性との関係
……松井　裕子　2

SR-2　安全志向的モチベーションと安全風土の関連についての考察
……河合　学　11

SR-3　自由記述回答の評価極性と安全文化醸成の関連
……西田　豊　17

SR-4　脱炭素化に向けた原子力発電による石炭火力発電代替の受容性
……北田　淳子　22

SR-5　使用済燃料の中間貯蔵施設に対する人々の受け止め
……原　吉平　38

SR-6　使用済燃料の中間貯蔵施設に関する世論調査結果
……幸前　秀治　44

SR-7　エネルギー問題関連冊子の印象に残るクリエイティブ－中間層４分類の視点－
……夛田　幹宏　55

技術システム研究所

NT-1　T字配管における衝突型逆流現象の数値シミュレーション
……歌野原　陽一　ほか　75

NT-2　T字管合流部の熱疲労評価のための熱伝達率の解明
……三好　弘二　ほか　83

NT-3　ステンレス鋼溶接金属のPWR1次冷却水模擬環境中の腐食特性への熱時効と照射の影響
……藤井　克彦　ほか　95

NT-4　エルボ管テーパ部の軸方向欠陥に対する超音波探傷試験条件の検討（第３報）
－フェーズドアレイ探触子の最適化検討－
……石田　仁志　ほか　104

NT-5　SUS630の高温水中SCC挙動に及ぼす微細組織の影響
……山田　卓陽　ほか　113

NT-6　TT690合金冷間加工材の粒界キャビティ生成型による亀裂発生時間の評価
……大厩　徹　ほか　121

NT-7　TT690合金のPWR1次系模擬水中の腐食挙動への溶存水素濃度と温度の影響
……笹岡　孝裕　ほか　131

NT-8　サポートベクターマシンを用いた加圧水型原子炉の冷却材喪失事故時の漏洩口径推定手法の開発
……中村　晶　ほか　141

NT-9　統計的安全評価における代替統計モデルの適用
（実機条件の不確かさ解析に対する適用性の検討）
……木下　郁男　151

NT-10 MAAPにおけるISLOCAのモデル化
……楠木　貴世志　ほか　163

NT-11 シビアアクシデント演習ツールの改良
……川崎　郁夫　ほか　169

資　　料

R-1　ルール逸脱防止のための職場討議用事例集の作成
……彦野　賢　ほか　174

R-2　潜在リスク気付き支援研修における発想の転換を促すための工夫の検討
……作田　博　ほか　178

R-3　原子力発電所における安全文化の自己評価方策の検討(2)
情報収集のための質問紙調査の試行
……高城　美穂　ほか　185

R-4　コロナ禍においてテレワークはどれだけ浸透したのか？
……後藤　学　ほか　192

R-5　コロナ禍におけるオンラインコミュニケーションツールの
利用状況と利用者の受け止め
……濵野　和佳　ほか　204

R-6　エネルギー環境教育関西ワークショップ研究会活動への
オンラインミーティングシステムの導入
……西野　加奈江　ほか　227

R-7　エネルギー環境教育を指向する自由研究のテーマとその内容
……小鍛治　優
大磯　眞一　234

R-8　放射線および原子力防災学習モデルの作成と実践
……大磯　眞一　240

解　　説

C-1　亀裂構造物評価のためのJ積分算出方法
……釜谷　昌幸　245

C-2　超微小引張試験法を用いた中性子照射ステンレス鋼の粒界劣化要因の検討
……三浦　照光　ほか　264

C-3　鉛直管における蒸気と空気の混合気体からの凝縮伝熱
……村瀬　道雄　ほか　277

CONTENTS

Foreword

F-1 The vitality of seniors in the post-COVID-19 era
…… Takemochi Ishii 1

Articles

Institute of Social Research

SR-1 Relationship between individual traits and responses to everyday emergencies
…… Yuko Matsui 2

SR-2 Consideration on the Relationship between Safety Work Motivation and Safety Climate
…… Manabu Kawai 11

SR-3 Relationship Between Semantic Orientations of Free Description Answers and Safety Culture
…… Yutaka Nishida 17

SR-4 Acceptability of Using Nuclear Power as an Alternative to Coal-fired Power to Achieve Decarbonization
…… Atsuko Kitada 22

SR-5 Change in perception of people towards information about interim storage facility for spent fuel
…… Yoshihei Hara 38

SR-6 Results of Public Opinion Survey on Spent Fuel Interim Storage Facilities
…… Hideharu Kouzen 44

SR-7 Creativity in preparing public relations booklets on energy issues
– Four categories of attitudes by the intermediate group readers to the booklets –
…… Mikihiro Tada 55

Institute of Nuclear Technology

NT-1 Numerical simulation of impinged penetration into T-junction branch lines
…… Yoichi Utanohara et al. 75

NT-2 Heat transfer coefficient suitable for thermal fatigue assessment at a T-junction
…… Koji Miyoshi et al. 83

NT-3 Effects of Thermal Aging and Irradiation on Corrosion Behavior
of Austenitic Stainless Steel Weld Metals in Simulated PWR Primary Water
…… Katsuhiko Fujii et al. 95

NT-4 Study on Ultrasonic Testing Conditions for an Axial Flaw in a Taper of Pipe Elbow
on Weld Piping (III) - The phased array probe specifications -
…… Hitoshi Ishida et al. 104

NT-5 The Effect of Microstructure on SCC behavior of SUS630 in High-temperature Water
…… Takuyo Yamada et al. 113

NT-6 Evaluation of crack initiation time due to grain boundary cavity formation
for cold worked Alloy 690TT
…… Toru Oumaya et al. 121

NT-7 Influences of dissolved hydrogen and temperature on corrosion behavior
of Alloy 690 TT in simulated PWR primary water condition
…… Takahiro Sasaoka et al. 131

NT-8 Estimation development using support vector machine
to evaluate the break diameter during PWR loss-of-coolant accident
…… Akira Nakamura et al. 141

NT-9 Application of Surrogate Models for Statistical Safety Evaluation
(Investigation of Applicability to Uncertainty Analysis for PWRs)
…… Ikuo Kinoshita 151

NT-10 Modeling an interface system LOCA in the severe accident analysis code “MAAP”
…… Takayoshi Kusunoki et al. 163

NT-11 Improvement of the severe accident practice tool
…… Ikuo Kawasaki et al. 169

Reference

R-1 Preparation of Case Studies for Discussion to Prevent Rule Deviations
…… Masaru Hikono et al. 174

R-2 An Examination of Measures to Promote a Change in Mindset for Training to Support Potential Risk Awareness
…… Hiroshi Sakuda et al. 178

R-3 Examination of self-assessment of safety culture in nuclear power plants (2) Trial of the questionnaire survey for information collecting
…… Miho Takagi et al. 185

R-4 How Much Has Teleworking Penetrated During the COVID-19 Pandemic?
…… Manabu Goto et al. 192

R-5 Status for Usage of Online Communication Tools in the COVID-19 Pandemic and How Users Feel Towards Them
…… Waka Hamano et al. 204

R-6 Introduction of the online meeting system to the meeting of Kansai Workshop for Energy and Environmental Education
…… Kanae Nishino et al. 227

R-7 Themes and Contents of Student-generated Research Aimed at Energy and Environmental Education Topics
…… Masaru Kokaji, Shinichi Oiso 234

R-8 Development and Implementation of Radiation and Nuclear Disaster Prevention Learning Models
…… Shinichi Oiso 240

Commentary

C-1 Ways of Obtaining J-integrals for Assessment of Cracked Components
…… Masayuki Kamaya 245

C-2 Micro-mechanical investigations about grain boundary degradation factors in neutron-irradiated stainless steels
…… Terumitsu Miura et al. 264

C-3 Condensation heat transfer from steam-air mixture in a vertical pipe
…… Michio Murase et al. 277

── 巻頭言 ──

ポストコロナ時代におけるシニアの活力

The vitality of seniors in the post-COVID-19 era

石井　威望（Takemochi Ishii）*1



2021年6月18日総務省発表の「通信利用動向調査」によると，2020年８月末時点でテレワークを導入した企業の割合は47.5%と約半数に迫り，前年の20.2％から２倍以上増えている．新型コロナウイルスの感染拡大により，働き方をはじめ，生活様式など様々な変化がもたらされ，加速している．

緊急事態宣言発令など外食が制限される中，料理をオンライン注文し届けてもらうフードデリバリーサービスの利用が増えているが，自宅に来るのは食事だけではない．病院も，歯科も，美容院も自宅へ「来る時代」である．自宅へ「来る」ということは，行く時間も待つ時間もなく，１つ１つは小さいがトータルで時間効率がよく生産性が高くなる．サービスの質も「行く」時と変わらない．宇宙技術と同じく，レントゲンなどの医療機器も技術革新により小型化・高性能化し，自宅で提供するのは水など最小限である．医療も含めて，サービス，ビジネスが，「来る時代」という新しいニーズ，方向にシフトしている．

「行く」から「来る」へ変化・反転したのが「テレワーク」であろう．筆者は2007年のiPhone登場によりモバイル技術の進化が生活を一変させる「住と職」の変革への好機到来として，「MONHO（モバイルオフィス・ニューホームオフィス）」というワークスタイルを提唱し，実際にオフィスに「行き」実行していたが，それはビジネスの世界で完結したシステムだった．それが，新型コロナウイルスの感染拡大を契機に，自宅へ「来る」ことで「暮らし」へ拡大している．従来のビジネスの中だけではなく，「暮らし」へ拡大するということは，ビジネスマンのみならず，赤ちゃんや子ども，高齢者まで含めて暮らし全体に広がるわけである．また，コンピュータープログラムのように，強制的に外から与えられた固定的な反復動作・ロボットのようなものが中心だったのに対して，より自律的（オートノマス）で，クリエイティブ，中央集権型ではなく自律分散型スタイルになる．「変化の兆し」を感じ取り，実際に自分の暮らしが変わり，新しい産業，新しい経済活動へのドライブとなる．かつて商業車が「暮らし」の車に使われるようになったのがモータリゼーション．「暮らし」が変わると「産業」が変わり，「産業」が変わると「暮らし」が変わるといえよう．

「暮らし」は高齢者，高齢化社会に密着している．ビジネスでは高齢者は定年退職でいなくなるという前提だが，「暮らし」のMONHOでは高齢者が活きてくる．「行く」ことがなければ，心身ともに一番調子のいい時間を有効活用できる．また，情報ネットワークを活用し，ヤングと組み，協働・共生することで，シニアの数々の失敗例などの経験・環境情報と，ヤングの感受性･適応能力のシナジー・相乗効果により，極めて質の高いアウトプットを生み出すことが可能になってきた．

2021年6月11日内閣府発表の「高齢社会白書」でも，60歳以上で「収入の伴う仕事をしたい（続けたい）」と回答している割合は，日本は40.2％と最も高い．コロナ禍においても日本の高齢者の就労意欲の高さが表れており，高齢者に対して多様なニーズに対応した就業機会の提供を図るとともに，テレワークの一層の推進など就労が継続できる社会基盤が求められている．

新型コロナウイルスの感染拡大による社会構造，生活様式の変化は，既に高齢者の活力を有効活用する契機となっている．また，人生100歳時代といわれる今日，シニアは新しいマーケットにほかならない．ポストコロナ時代における高齢者活力の有効活用が，超高齢化先進国における活力になることを期待したい．

＊1　(株)原子力安全システム研究所　最高顧問
東京大学名誉教授

INSS JOURNAL Vol. 28 2021 SR-1

身近な緊急事態への対応と個人特性との関係*1

Relationship between individual traits and responses to everyday emergencies

松井　裕子（Yuko Matsui）*2

要約　緊急事態への反応や対処の仕方には個人差があるとされる．組織やチームでの緊急時対応のための教育・訓練やチームのメンバー間の支援のあり方を考えるために，個人差の規定因を明らかにすることは重要である．本研究では，比較的経験する機会が多い日常的な場面での緊急事態への対応経験を質問紙によって収集し，対応時の反応や対応の結果と個人特性との関係を検討した．その結果，メタ認知の２つの下位尺度と自己効力感（困難への挑戦）が対応時の情動的反応の強さと対応の結果に共通して有意な相関を示した．これらの要因は，緊急事態への遭遇から対処の過程において広く影響を及ぼしている可能性がある．

キーワード　緊急時対応，個人特性，メタ認知

Abstract　There are individual differences in the responses to emergencies and how to deal with them. It is important to clarify the determinants of individual differences in order to consider education and training for emergency response in organizations and teams, as well as how to provide support among team members. In this study, we used a questionnaire to collect information on the experiences of responding to emergencies in everyday situations, which are relatively common, and examined the relationships between individual characteristics and the emotional reactions and outcomes of the responses. We found metacognition and self-efficacy(challenging difficulties)showed significant correlations with both the strength of the emotional reactions and the outcomes of the responses. These factors may have a widespread influence on the process of coping with an emergency situation from the time of encounter.

Keywords　emergency response, individual characteristics, metacognition

1. はじめに

緊急事態における人間特性については，航空機パイロット（黒田，1986）や鉄道運転士（小木他，1968）の緊急時の対応や災害時の避難行動（たとえば横山他，1992；釘原・三隅，1984）を対象とした研究をはじめ，多くの研究が行われている．個人の反応や行動を対象とした研究では，緊急時には入力段階，情報処理段階，出力段階のそれぞれで行動パターンが変化すること（黒田，1986）や緊急事態では危険回避行動や活動停止，無関心と抑圧，依存性，攻撃的傾向といった情緒的行動のパターンが見られること（Janis，1954；安倍，1988）などが指摘されている．また池田（1986）は日常および緊急事態の情報処理過程をモデル化し，状況を判断し予期を構成するプロセス，その判断に基づき自分の外的環境あるいは内的状態に対する対応（それぞれ外的対応，内的対応）を判断するプロセス，実際の反応の３つのプロセスで構成されるとした．加えて，現状の認知や予期に関する認知をモニターし，モニタリングの情報に基づいて注意容量・範囲や時間などの資源を効率的に配分する制御機構がメタ認知的に機能しているとした．そして，緊急時には，平常時に比べ制御機構の影響が大きくなるとしている．

このような緊急時における様々な変化には，一般的な傾向性が見出される一方で，個人差の存在も指摘されている．黒田（1986）は緊急時行動パターンの変化は，ストレスの強度，環境条件に加え，個人特性の影響を受けると指摘している．また横山他（1992）は性格特性が模擬的な火災における避難行

＊1　本研究の一部は日本心理学会第81回大会で発表したデータ（松井，2017）を再分析したものである。
＊2　（株）原子力安全システム研究所　社会システム研究所

動のパターンの一部を予測することを示した.

大規模な事故や災害の発生時には，多くの人が緊急時対応を行うことになるが，特にチームや組織として効果的に緊急事態に対応するためには，緊急事態への対応の個人差を把握し，個人差に影響を与える要因を明らかにする必要があると考える．そのうえで，各職員が自分自身の特徴を知り，学習や訓練で向上できる要素は向上させ，向上の難しい要素は組織やチーム内で補いあうことが重要と思われる.

本研究では，緊急事態への対処事例の収集と緊急事態の情報処理過程に関連すると考えられる複数の個人特性の測定をあわせて行うことによって，緊急事態への反応や対処の成否に影響を及ぼす個人特性を明らかにすることを目的とする．そのために，大規模プラントの事故や災害に比べて遭遇する機会が比較的多い日常場面での緊急事態に着目することとした．緊急事態の特徴は「事態の重大性」と「時間の切迫感」であるとする池田（1986）に倣い，本研究では「緊急事態」を「そのままにしておくと重大な身体的・物理的・社会的被害あるいは影響を生じ，ある程度以上の時間的切迫がある事態」と定義する.

2. 緊急事態と個人特性

前述の緊急事態の情報処理過程を参考にし，緊急事態での対応に関係すると考えられる個人特性について検討した.

2.1 曖昧性耐性

特に緊急事態の初期においては，状況の把握や予期の産出に必要な，状況を理解するためのスクリプト*3の欠如（池田，1986）や情報不足によって，不確定で曖昧な状態になりやすいと予想される．このような曖昧さに対する体系的で安定した個人の傾向は「曖昧性耐性」（Budner, 1962）や「曖昧さへの態度」（西村，2007）*4と呼ばれる．西村（2007）は曖昧さへの態度が５因子構造であることを示した．すなわち，①曖昧さを排除し白黒をつけたい（排除），②曖昧さを否定的に評価し知的に対処しようとする（統制），③曖昧さをそのまま受け入れられる（受容），④曖昧さに情緒的混乱と対処の難しさを感じる（不安），⑤曖昧さに魅力を感じ，積極的にかかわることを楽しむ（享受）．排除や統制，不安のように曖昧さに対して否定的な態度が強いと，曖昧さを解消するために事態を単純化したり拙速に状況認識を確定しようとする傾向が強まると推測される．一方で，普段から曖昧さを肯定的にとらえ積極的にかかわっていると，緊急事態で曖昧さの高い状況になっても，影響をうけにくくなると思われる.

2.2 自己効力感

対応の判断にあたっては，資源不足などによって実行可能な行動が制限され，外的対応が困難になりやすいと推測される．そのような状況では，無力感を感じて対応をあきらめたり，内的対応に偏ることが起こり得ると考えられる．ある結果を生み出すために自分自身が必要な行動をうまく遂行できると確信できなければ，選択肢は狭まるとされる（池田，1986）．個人がある状況で必要な行動を効果的に遂行できる可能性の認知を自己効力感という（Bandura, 1977；成田他，1995）．自己効力感には，当面の特定の行動に影響を及ぼすものと，より一般的な傾向性として長期的に影響を与えるものの二水準があるとされる（Bandura, 1977；坂野・東條，1986；成田他，1995）．本研究では個人差に焦点を当てるため，特定の場面での自己効力感ではなく，個人の一般的な傾向性である「特性的自己効力感」（成田他，1995）に着目する．普段から自己効力感の高い人は，緊急事態においても自己効力感の低い人に比べて多くの選択肢を用意することができ，外的対応も実行できる可能性が高まると考えられる．また，自己効力感が低い人は不安や恐怖反応が強く生じやすいとされ（Bandura, et al., 1982），緊急事態において強い情動反応の影響を受けやすくなると予想される.

2.3 セルフコントロール

困難な課題に直面したとき，ストレスをうまく処理して課題に向き合えるように自分をコントロールする人もいるであろう．このように自発的に自己

＊3　定型的な行為の系列で構成される日常的な行動や出来事に関する構造化された知識（Schank & Abelson, 1977）のこと.
＊4　「曖昧性耐性」は，曖昧さを「脅威の源」（Budner,1962）と見なし，曖昧さに対する否定的な態度に焦点を当てた用語とされる（西村，2007）．「曖昧さへの態度」は，曖昧さに対する肯定的な態度も含んだ多次元構造であること（西村, 2007）を前提とした用語である.

を統制することを「セルフコントロール」と呼ぶ（Thoresen & Mahoney, 1974　上里監訳，1978　引用は杉若，1995による）．杉若（1995）は，セルフコントロールには，ストレス場面における情緒的・認知的反応の制御である調整型セルフコントロールと，自分の行動方略を自発的な問題設定に基づき望ましい方向へ変容させる改良型セルフコントロールの２つがあることを示した．加えて，セルフコントロールを行わず，他者に依存したり，自発的に行動しないといった消極的な対処方略も存在することを示している．調整型は情動や認知の制御という点で前述の内的対応に，改良型は課題へのアプローチ方法を変えるという点で外的対応と共通すると考えられる．緊急事態にもよく対応できる人は，消極的な対処方略を採用せず，調整型と改良型のセルフコントロールによって，ストレスに対処しながら事態に対処していくと考えられる．

2.4　認知的熟慮性－衝動性

時間的に切迫した状況では情報処理資源も制限を受けるため，深く考えない傾向が強くなったり（上田他，2013），ヒューリスティクスなどの定型的な認知的枠組みへの依存度が高まりやすいと考えられる．曖昧な状況も同様の傾向を強めると考えられる．判断にあたってより多くの情報を収集し慎重に結論をくだすか，ある程度の情報で早急に結論を出すかの違いを表す特性に「認知的熟慮性－衝動性」がある（岩男，2001）．熟慮的な人は判断課題や広告の選好性において多様な情報への接触傾向が強いことが示されている（岩男，2001）．緊急事態においても，認知的熟慮性が高い人は衝動性の高い人に比べて多様な情報から意思決定を行う傾向があると予想される．

2.5　メタ認知

最後に，緊急事態にその役割が大きくなるとされるメタ認知的な制御機構（池田，1986）である．メタ認知は，自らの認知過程をひとつ高い次元から知覚，記憶，学習，思考することであり（阿部･井田，2010），自分や他者に固有の認知傾向や方略の有効性に関する知識などの知識的側面と，認知プロセスや状態のモニタリングやコントロールを行う活動的側面の大きく二つに分けられる（三宮，1995）．モニタリングでは，課題遂行中から終了後までの自分の認知活動を振り返り，チェックと評価を通じて省察し，コントロールでは，目標の認知的達成に向けて設定した計画や手法等を実行しながら適宜修正しようと認知活動を制御するとされる（阿部･井田，2010）．緊急時の情報処理プロセスでは，状況の認識や予期に関する認知をモニターし，自身の情報処理資源をより効率よく配分しようとするメタ認知的な機構が主要な役割を担うと考えられており（池田，1986），本研究ではメタ認知的活動の側面に焦点を当てる．メタ認知がよく機能している人は，緊急事態においても状況を再定義し資源配分を修正することによって，継続的に事態に対処していくことができると考えられる．

3.　方法

3.1　概要

（株）三菱総合研究所の生活者市場予測システムmif（Market Intelligence & Forecast）によるweb調査を行った．調査対象者はmifの登録者のうち，製造・工事関連の職業に携わる男性200名であった．調査期間は2016年２月10日～12日とした．

3.2　調査項目

3.2.1　緊急事態への対処経験に関する項目

まず，回答者に対して，緊急事態を「生命・健康・財産などに危険が差し迫っている事態や思いがけない事態」と定義し，複数の例を示した上で，緊急事態に遭遇した経験を尋ねた．具体的には，遭遇した緊急事態について，発生した事態の内容と見通し，対処行動，その対処行動を行った理由について，自由記述での回答を求めた（３項目）．

次に，記述した事態について，対処できる自信の程度，事態発生から対処までの冷静さ，時間に対する焦りの程度，被害程度の予測（生命，健康，財産，社会的信用，その他），および対処の結果の成否について，それぞれ５段階尺度での評定を求めた（14項目）．

あわせて，類似経験の有無，事前の予測・準備の有無等についても回答を求めた（５項目）．

3.2.2　個人特性に関する項目

緊急事態への対応に影響すると考えられる個人特性として，曖昧性耐性，自己効力感，セルフコントロール，認知的熟慮性，メタ認知に関する自己評価を求めた（113項目）．

曖昧性耐性に関する項目は，「曖昧さへの態度尺度」（西村，2007）の全26項目（下位尺度「曖昧さの享受」「曖昧さへの不安」「曖昧さの受容」「曖昧さの統制」「曖昧さの排除」）を用いた．自己効力感に関する項目は「特性的自己効力感尺度」（成田他，1995）の全23項目を用いた．セルフコントロールに関する項目は“Regressive- Reformative Self-Control Scale”（杉若，1995）の全20項目（下位尺度「調整型」「改良型」「外的要因」）を用いた．認知的熟慮性に関する項目は「認知的熟慮性-衝動性尺度」（滝聞・坂元，1991）の全10項目を用いた．メタ認知に関する項目は，「成人用メタ認知尺度」（阿部･井田，2010）の下位尺度のうち「コントロール」９項目と，「モニタリング」尺度のうち10項目を有職者向けに表現を改めたものを用いた．回答はすべて「あてはまる」から「全くあてはまらない」の５段階評定とした．

あわせて，年齢，性別，職業，および緊急時の情報処理の初期的な制約条件の一つとされる体力（池田，1986）と運動習慣についても回答を求めた．

4.　結果

4.1　緊急事態の記述内容

200名のうち157名から157件の事例が得られた．そのうち，記述内容から，回答者が事態に主体的に対処していない事例および被害の程度や時間の制約が著しく低いと判断された事例を除く122件の事例を分析対象とした．122件の回答者の年齢分布は，10代０名，20代 12名，30代 33名，40代 51名，50代 24名，60代以上 ２名であった．記述された事例の内容を分類したところ，14カテゴリーに分類された（図１）．交通事故（39件），病気（14件），犯罪（12件），自然災害（12件），傷害（９件），作業事故（９件）が多く記述された．

また遭遇した事態に対して，時間についての焦りを感じた程度，および生命，健康，財産，社会的信用に対する危険性を感じた程度をそれぞれ５段階評定した結果を図２に示す．「全く感じなかった」を１点，「強く感じた」を５点とした平均値は，それぞれ3.5（SD=1.19），2.7（SD=1.36），3.0（SD=1.43），2.6（SD=1.42），2.3（SD=1.26）であった．

4.2　個人特性得点の算出

各回答者について，各尺度の下位尺度ごとに平均得点を算出した．得点化にあたっては，各尺度名の示す特性に一致する回答が５点，一致しない回答が１点となるようにした．

特性的自己効力感尺度のみ，他の尺度に比べて多い項目数で一因子構造となっていたため，次元分解を試みた．スクリープロットから３因子が適当と判断し，因子数を指定して最尤法，プロマックス回転による因子分析を行った．その結果，以下の３つの因子が抽出された（付表，累積寄与率48.1%）．第一因子は，困難な状況を回避したりすぐにあきらめたりすることを示す項目を多く含んでおり，「困難の回避」と命名した（10項目，α=.878）．第二因子は，対人場面に困難を感じたり消極的になる傾向を

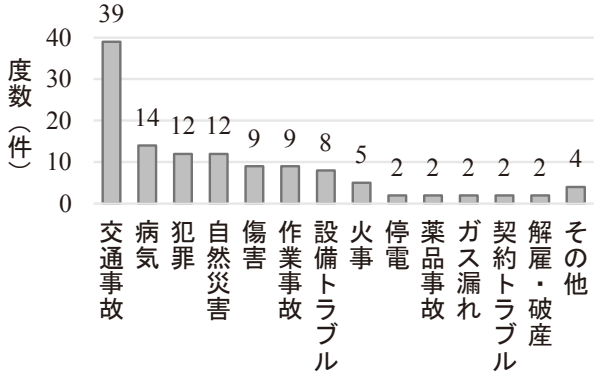


図１　記述された事例の内容

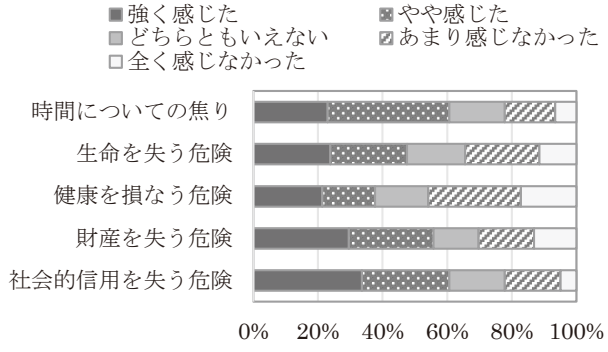


図２　緊急事態への焦りおよび危険性の認知

表す項目が中心となったため，「対人関係への態度」と命名した（６項目，α=.311）．第三因子は，困難な状況でも積極的に取り組む傾向を表す項目を多く含んでおり，「困難への挑戦」と命名した（７項目，α=.755）．この結果に基づき，特性的自己効力感尺度については，３因子それぞれの平均得点を算出した．

4.3　対処時の反応と個人特性

本研究では，緊急事態に対応する際の反応および対処の結果と個人特性との関係について分析した．

4.3.1　対処時の反応

事態発生から対処までの冷静さについて６つの選択肢から回答を求めた．結果として，「①終始，呆然として何も考えられなかった」６名，「②何かしなければと思ったが，終始，焦りや不安で考えがまとまらなかった」16名，「③最初は呆然として何も考えられなかった．途中から，何かしなければと思ったが，焦りや不安で考えがまとまらなかった」８名，「④最初は呆然として何も考えられなかったが，途中から冷静になれた」33名，「⑤最初は焦りや不安などで考えがまとまらなかったが，途中から冷静になれた」27名，「⑥終始，冷静であった」32名となった．

4.3.2　対処時の反応と個人特性

事態発生から対処までの冷静さの選択肢のうち，事態の初めから終わりまで落ち着いた対応ができなかった①②③を「終始呆然・混乱」群（n=30），途中から冷静になった④⑤を「途中から冷静」群（n=60），初めから終わりまで冷静だった⑥を「終始冷静」群（n=32）とし，３群間で各個人特性尺度の平均評定値を比較した（図３）．

一元配置分散分析の結果，メタ認知（モニタリング，コントロール），曖昧さへの態度（享受），セルフコントロール（改良型，外的要因），自己効力感（困難の回避，困難への挑戦）において，３群間に有意差が認められた（順に，$F(2,119)=5.008$, $p<.01$, $\eta^2=.078$; $F(2,119)=5.228$, $p<.01$, $\eta^2=.081$; $F(2,119)=3.182$, $p<.05$, $\eta^2=.051$; $F(2,119)=3.105$, $p<.05$, $\eta^2=.050$; $F(2,119)=11.835$, $p<.001$, $\eta^2=.166$; $F(2,119)=7.101$, $p<.001$, $\eta^2=.107$; $F(2,119)=6.352$, $p<.01$, $\eta^2=.096$）．下位検定の結果，いずれの項目についても「終始冷静」は「途中から冷静」との間に有意差が認められ（曖昧さへの態度（享受）・セルフコントロール（改良型）$p<.05$；その他は$p<.01$），加えて，セルフコントロール（外的要因），自己効力感（困難の回避，困難への挑戦）では「終始混乱・呆然」との間にも有意差が認められた（順に，$p<.001$, $p<.01$, $p<.01$）．また，認知的熟慮性について３群間に傾向差が認められた（$F(2,119)=2.959$, $p<.1$, $\eta^2=.047$）．

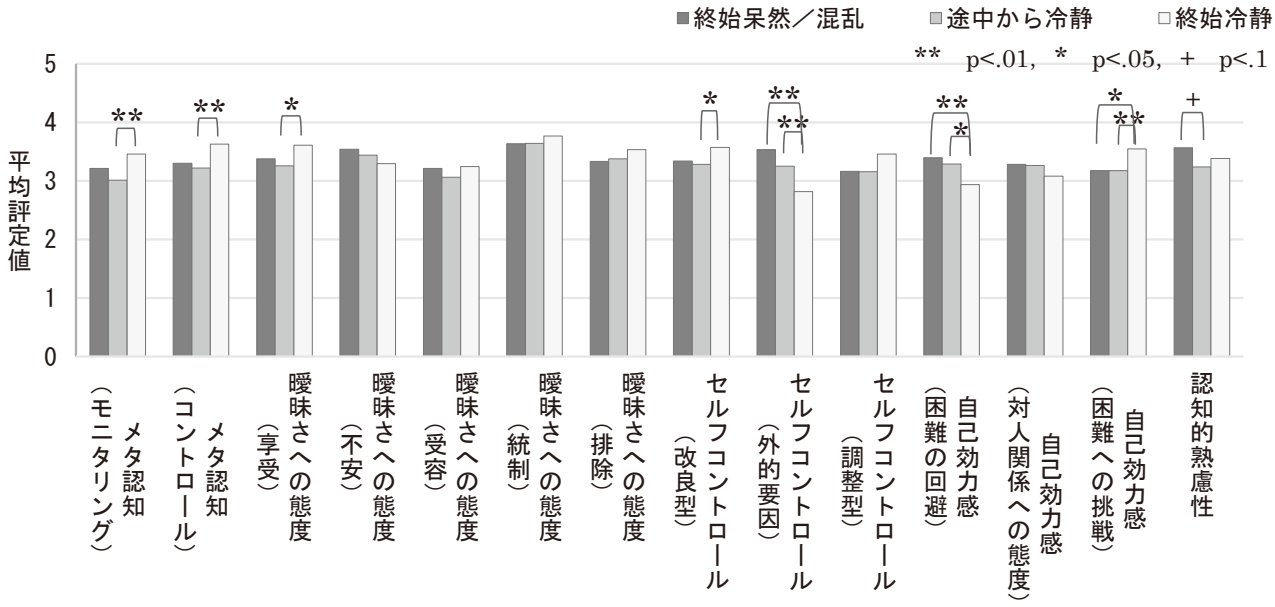


図３　対処時の情動的反応による個人特性の比較

これらの結果から，緊急事態に遭遇しても終始冷静でいた人は，途中から冷静になった人よりも，曖昧さや困難な課題に自発的に関与し，自分の思考や行動をモニターしながら適宜計画を修正し，他者への依存など消極的方略をとらない傾向にあるといえる．一方，終始呆然としたり混乱していた人は，終始冷静だった人に比べ，普段から困難な課題を避け，消極的な方略をとる傾向にあるといえる．

4.4 対処の結果と個人特性

4.4.1 対処の結果

事態に対処した結果について，５つの選択肢で評価を求めた．その結果，「①良い結果となった」43名，「②どちらかといえば良い結果となった」47名，「③どちらともいえない」29名，「④どちらかといえば悪い結果となった」3名，「⑤悪い結果となった」０名となった．

4.4.2 対処の結果と個人特性

対処の結果，良い結果となった①②を「良い結果」群（n=90），良い結果とならなかった③④を「良くない結果」群（n=32）とし，両群間で各個人特性尺度の平均評定値を比較した（図４）．t検定の結果，メタ認知（モニタリング，コントロール），曖昧さへの態度（排除），自己効力感（困難への挑戦）において有意差（順に，$t(120)=2.931$, $p<.01$, $d=.603$; $t(72.13)=2.886$, $p<.01$, $d=.520$; $t(120)=2.446$, $p<.05$, $d=.503$; $t(120)=2.410$, $p<.05$, $d=.496$），セルフコントロール（調整型；$t(120)=1.898$, $p<.1$, $d=.496$）において傾向差が認められた．

これらの結果から，最終的に良い結果となった人は，自分の思考や行動をモニターしながら適宜計画を修正し，曖昧さを排除し，困難に積極的に取り組む傾向があるといえる．

4.5 対処時の反応と対処の結果

対処時の情動的な反応と対処の結果との間の相関関係の有無を確認するために，χ^2検定を行ったところ，有意傾向を示した（$\chi^2(2)=4.847$, $p<.1$, $V=.199$）．残差分析の結果，終始呆然としたり混乱していた人は，良くない結果となる傾向にあった（表１）．

表１　対処時の反応と対処の結果

	良い結果	良くない結果	計
終始冷静	27	5	32
調整済み残差	1.6	-1.6	
途中から冷静	45	15	60
調整済み残差	.3	-.3	
終始混乱・呆然	18	12	30
調整済み残差	-2.0	2.0	
計	90	32	122

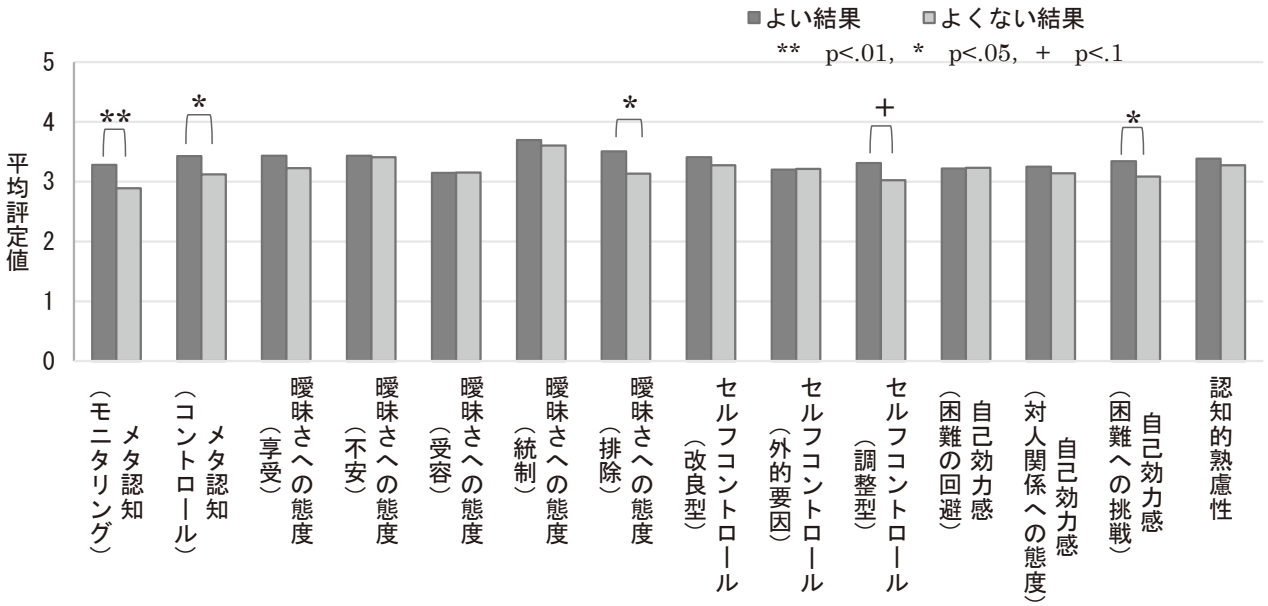


図４　対処の結果と個人特性

5. 考察

緊急事態に対して終始冷静であったと回答した群と途中から冷静になったと回答した群との間で，いくつかの個人特性に差が認められた．これらの個人特性から，本研究では緊急事態に遭遇した際に強い情動的反応が生じにくかった回答者の特徴は，曖昧さに積極的にかかわる（曖昧さへの態度（享受）），課題に対して消極的にならず，自発的な問題意識で良い方向へ変化させようとする（セルフコントロール（改良型，外的要因）），普段から，困難があっても回避したりあきらめたりせず，積極的に取り組めると感じている（自己効力感（困難からの回避，困難への挑戦），自分の活動をモニタリングしながら柔軟に計画を変更する（メタ認知（モニタリング，コントロール）こといえる．これらの多くは困難な課題や曖昧な状況に対して積極的に向き合うことを示す特性であり，日常的な行動や意識に対する評価であることを考えると，普段から困難に取り組む経験を重ねることで，セルフコントロールの方略を学習したり自己効力感が向上し，緊急事態に遭遇しても強い情動的反応が生じにくくなる可能性があるといえる．

このうちメタ認知の２側面と自己効力感（困難への挑戦）は，事態が良い結果となったと回答した群においても評定値が有意に高かった．メタ認知は緊急事態への対応中の自分の状況理解や資源配分を見直し調整する制御機構としての役割を果たしているとされ，本研究の結果は，緊急事態への遭遇から対処が一段落するまでの過程全体において，制御機構が継続的に機能することの重要性を示すものと考えられる．他方，自己効力感は情動反応の生起との関係が指摘されており，緊急事態においても強い情動反応を抑えることによってメタ認知の機能を支えているのかもしれない．

一方，曖昧さへの態度（排除）は，対処の結果についてのみ有意差が認められた．不確実な状況下で意思決定し，実際に対応行動をとるためには，その時点での情報に基づき自分なりの想定を行い，具体的な行動の実行可能性について検討する必要がある．その過程では，曖昧さを排除し明確にできることは明確にしていくことも必要になると考えられる．

6. まとめ

質問紙によって収集した日常的な緊急事態への対応経験と個人特性の関係について検討した．結果から，困難な課題に対し積極的に関わろうとすること，メタ認知によるモニタリングとコントロールをうまく行えることが，緊急時対応では特に重要になると考えられた．本研究で用いた質問紙は日常における行動や考え方を問う質問文で構成されていることを考慮すると，普段から曖昧さや困難な課題に積極的にかかわることによって改良型セルフコントロールを学習し，自己効力感が高まることにより，緊急事態においても強い情動反応が抑制され，メタ認知がうまく機能する可能性があるといえる．このことは，日常生活において曖昧な状況や困難な課題に積極的に取り組むことの有効性とともに，緊急時対応訓練などで，曖昧で困難な状況に直面し，積極的に解決に取り組む経験を重ねることの有効性も示唆する．特に，資源や条件の整った環境で手順を確認するために行う訓練ではなく，近年増えている，ストレスのかかる状況や使用できる資源に制約のあるブラインド方式の訓練（たとえば彦野他，2017;野々瀬他，2017）の反復が有効であると考えられる．

ただし，対処の成否については遭遇した事態そのものの特性や周辺の環境や使用可能な資源などの影響を考慮する必要があり，個人特性に焦点を当てすぎることには注意が必要である．また，本研究の分析は単純な平均値の比較にとどまっているが，具体的な緊急事態の特性や実際の対処行動と個人特性の関係を，因果関係や相互作用も含めて明らかにし，それらの変容可能性や変容方法を検討していく必要があると考える．

引用文献

安倍北夫（1988）．危機場面における人間行動　安倍北夫・三隅二不二・岡部慶三（編）自然災害の行動科学（pp.10-25）福村出版

阿部真美子・井田政則（2010）．成人用メタ認知尺度の作成の試み－ Metacognitive Awareness Inventoryを用いて－　立正大学心理学研究年報創刊号，23-34.

Bandura, A.（1977）. Self-efficacy: Toward a unifying theory of behavioral change. Psychological Review, *84*, 191-215.

Bandura, A., Reese, L., & Adams, N.E.（1982）: Microanalysis of action and fear arousal as a function of differential levels of perceived self-efficacy. Journal of Personality and Social Psychology, *43*, 5-21.

Budner, S.（1962）. Intolerance of ambiguity as a personality variable. Journal of Personality, *30*, 29-50.

彦野　賢・松井裕子・金山正樹（2017）. ノンテクニカルスキルに着目した緊急時対応訓練の開発－（1）「たいかん訓練」の開発と試行 INSS Journal, *24*, 32-41.

池田謙一（1986）. 緊急時の情報処理　東京大学出版会

岩男征樹(2001). 認知的熟慮性－衝動性尺度(滝聞・坂元，1991）堀　洋道（監修）心理測定尺度集Ⅰ　人間の内面を探る＜事故・個人内過程＞（pp.195-198）サイエンス社

Janis, I. L.（1954）. Problems of theory in the analysis of stress behavior. Journal of Social Issues, *10*, 12-24.

小木和孝･斎藤良夫･遠藤敏夫･橋本邦衛(1968). 二，三の事例からみた緊急時の生理的反応　産業医学，*10*，381-386.

黒田　勲（1986）. 航空機における緊急状況下の人間の心理と行動　社会心理学研究，*1*，4-11.

釘原直樹・三隅二不二（1984）. 緊急恐怖状況下の迷路脱出に及ぼすリーダーシップ条件効果に関する実験的研究. 心理学研究，*55*，214-220.

松井裕子（2017）. 緊急事態への対応と個人特性との関係－身近な緊急時対応経験に着目して－　日本心理学会第81回大会発表論文集，1013.

成田健一・下仲順子・中里克治・河合千恵子・佐藤眞一・長田由紀子（1995）. 特性的自己効力感尺度の検討－生涯発達的利用の可能性を探る－　教育心理学研究，*43*, 306-314.

西村佐彩子（2007）. 曖昧さへの態度の多次元構造の検討－曖昧性耐性との比較を通して　パーソナリティ研究，*15*, 183-194.

野々瀬晃平・渋江尚夫・長坂彰彦（2017）. ノンテクニカルスキルを活かしたヒューマンパフォーマンスの向上　電中研TOPICS, *23*, 11-14.

坂野雄二・東條光彦（1986）. 一般性セルフ・エフィカシー尺度作成の試み　行動療法研究，*12*, 73-82.

三宮真智子（1996）. 第７章　思考におけるメタ認知と注意　市川伸一（編）認知心理学４　思考　東京大学出版会

Schank, R. C., & Abelson, R. P.（1977）. Scripts, plans, goals and understanding: An inquiry into human knowledge structures. Lawrence Erlbaum.

杉若弘子（1995）.日常的なセルフコントロールの個人差評価に関する研究　心理学研究，*66*, 169-175.

滝聞一嘉・坂元　章（1991）. 認知的熟慮性－衝動性尺度の作成－信頼性と妥当性の検討　日本グループダイナミクス学会第39回大会発表論文集，39-40.

Thoresen, C. E. & Mahoney, M. J.（1974）. Behavioral self-control. New York: Holt, Rinehart & Winston.
（ソレセン，C. E.・マホーニィ，M. J. 上里一郎（監訳）（1978）. セルフコントロール　福村出版）.

上田真由子・和田一成・臼井伸之介（2013）. 緊急事態における行動特性－より高難度課題の作業パフォーマンスについて－　人間工学，*49*（特別号）116-117.

横山秀史・永田　茂・山崎文雄・海老原学（1992）. 迷路実験による緊急時の人間行動特性. 土木学会論文集，441／I-18，107-115.

付表　特性的自己効力感尺度の因子分析結果

	第１因子	第２因子	第３因子
新しいことを始めようと決めても，出だしでつまづくとすぐにあきらめてしまう	.786	−.234	.029
すぐにあきらめてしまう	.779	−.163	−.211
何かを終える前にあきらめてしまう	.750	−.107	−.069
重要な目標を決めても，めったに成功しない	.696	−.110	−.171
思いがけない問題が起こった時，それをうまく処理できない	.681	−107	−.044
難しそうなことは，新たに学ぼうとは思わない	.638	−.068	−.110
人生で起きる問題の多くは処理できるとは思えない	.615	.101	−.094
しなければならないことがあっても，なかなかとりかからない	.487	.236	.103
非常にややこしく見えることには，手を出そうとは思わない	.440	.415	−.053
困難に出合うのを避ける	.349	.284	.136
私は自分から友達をつくるのがうまい	.233	−.987	.217
最初は友達になる気がしない人でも，すぐにあきらめないで友達になろうとする	.421	−.684	.187
新しい友達を作るのが苦手だ	.229	.677	.099
友達になりたい人でも，友達になるのが大変ならばすぐに止めてしまう	.202	.645	.190
人の集まりの中では，うまく振る舞えない	.406	.496	.048
何かしようとする時，自分にそれができるかどうか不安になる	.428	.452	.274
失敗すると一生懸命やろうと思う	−.010	−.168	.737
初めはうまくいかない仕事でも，できるまでやり続ける	−.090	.095	.726
自分が立てた計画はうまくできる自信がある	−.158	−.232	.602
何かをしようと思ったら，すぐにとりかかる	−.141	−.173	.499
面白くないことをする時でも，それが終わるまでがんばる	−.069	.094	.496
人に頼らないほうだ	−.110	.200	.378
会いたい人を見かけたら，向こうから来るのを待たないでその人のところへ行く	.069	−.309	.332
因子間相関　第１因子	—	.454	−.086
第２因子	—	—	−.031
第３因子	—	—	—
累積寄与率			48.1

安全志向的モチベーションと安全風土の関連についての考察

Consideration on the Relationship between Safety Work Motivation and Safety Climate

河合　学（Manabu Kawai）*1

要約　労働災害ゼロを達成するため安全に作業を続けられる状態を維持することは重要である．どのような状態がよいのかを測るものさしとして,「安全志向的モチベーション」が提案され，その測定尺度が開発された．一方，原子力安全分野における組織風土を測定するために開発された代表的なものとして「安全風土」の測定尺度がある．これら２つの測定尺度における関連を調査データの分析を通して明らかにする．「安全志向的モチベーション」と「安全風土」は関連があり，「安全志向的モチベーション」は「誇り」などにより高められ，「人材尊重」や「安全配慮行動」を後押しすると考えられる．また，リーダーシップは組織文化を変える役割を担っており，リーダーの振る舞いを通してモチベーションを向上させる取り組みを行うことで労働災害が起こりにくい組織が形成されるものと考えられる．

キーワード　安全志向的モチベーション，労働災害，リーダーシップ

Abstract　It is important to maintain a state in which work can be continued safely in order to achieve zero occupational accidents. “Safety work motivation” was proposed as a measure of what kinds of conditions are good, and a measurement scale was developed. On the other hand, a “safety climate measurement scale” has been developed as a typical scale for measuring the organizational climate in the field of nuclear safety. In this report the relationship between these measurement scales was clarified through the analysis of survey data. A relationship was identified between “safety work motivation” and the “safety climate measurement scale,” and “safety work motivation” was enhanced by the item of “pride.” “Respect for human resources” and “safety-conscious behavior” was considered to be supported as well. In addition, leadership played a role in changing the organizational culture, from which we argue that an organization that does not lead to occupational accidents would be formed by making efforts to improve motivation through the behavior of the organization’s leaders.

Keywords　safety work motivation, occupational accident, leadership

1.　問題設定

安全に関する諸施策の積み重ねや徹底した人を介さないで機械による自動化を進めてきているものの，労働災害件数は依然減少していないのが現状である．多くの企業が労働災害ゼロを目標として掲げる中で，それを達成するため安全に作業を続けられる状態を維持することは重要であるが，どのような状態がよいのかそれらを測るものさしとして，「安全志向的モチベーション」が提案され，その測定尺度が開発された（池田ほか，2021）．一方，従前より安全風土の測定･評価手法が開発されてきた．原子力安全分野における組織風土を測定する代表的な尺度として，福井（2014）によって開発された「安全風土」の測定尺度がある（西田，2017）．

本稿の目的は，「安全志向的モチベーション」と「安全風土」の２つの測定尺度において関連があるのか否かについて，１つの調査データの分析を通して明らかにするものである．

2.　データと分析のモデル

2.1　使用するデータ

使用するデータは，原子力産業従事者に対して実施された安全にかかわる意識調査（2020年）から

＊1　（株）原子力安全システム研究所　社会システム研究所

得られたものである．サンプルサイズは，n = 1737であり十分であると考えられる．

2.2 使用する変数

設問群は，表１に示す「安全志向的モチベーション」の３設問，および「安全風土」の下位尺度である「組織の安全姿勢」,「直属上司の姿勢」,「安全の職場内啓発」,「安全配慮行動」,「モラル」,「人材育成」,「人材尊重」,「現場重視」,「仲間意識」,「意思疎通」,「精神衛生」を測定する46設問に,「誇り」を加えた47設問を使用した．なお，福井（2014）の「人材育成・尊重」は人材の「育成」と「尊重」の２つの概念に関する設問が混在していると考えられるため，本研究では「人材育成」と「人材尊重」の別々の２つの下位尺度として取り扱う．

「そう思う」「どちらかというとそう思う」「どちらともいえない」「どちらかというとそう思わない」「そう思わない」の５件法で尋ねており，５点から１点までを割りあて，逆転項目の場合否定的回答をした方が点数が高くなるように処理している．「安全志向的モチベーション」を変数として用いる場合，関連する３設問の平均値を「安全志向的モチベーション」得点とした．「安全風土測定尺度」の下位尺度を変数として用いる場合，各下位尺度を構成する設問群の平均値を尺度得点とした．

表１　安全志向的モチベーションの設問

あなたは，安全を確保するための手続きや基本ルールがどのような経緯で定められているか明確に理解している
あなたは，安全を確保することに向けて高い緊張感を持って業務に取り組んでいる
あなたは，安全が脅かされていないか、絶えず緊張感を持続して業務に取り組んでいる

2.3 分析の方法とモデル

「安全志向的モチベーション」と安全風土測定尺度の関連を確認するため,以下の３つの分析を行う．

はじめに,「安全志向的モチベーション」と「安全志向的モチベーション」から影響を受ける要因の関係について考える．池田ら（2021）において,「安全志向的モチベーション」は安全参加行動と安全遵守行動を後押しするという結果が得られており,「安全風土」の下位尺度である安全配慮行動はそれらと同じと考えた．また人材尊重については,設問が「少数の異なる意見も取り上げ議論されている」「安全についてのマイナス情報が言いやすい職場環境である」などであり,「安全志向的モチベーション」が後押しすると考えられるので,「安全志向的モチベーション」を独立変数,「安全配慮行動」と「人材尊重」をそれぞれ目的変数とした回帰分析を行う．

次に,「安全志向的モチベーション」と「安全志向的モチベーション」へ影響を与える要因の関係について考える．「安全風土」の下位尺度の中から前述の「安全配慮行動」と「人材尊重」を除いた「組織の安全姿勢」,「直属上司の姿勢」,「安全の職場内啓発」,「モラル」,「人材育成」,「現場重視」,「仲間意識」,「意思疎通」,「精神衛生」および「誇り」を独立変数候補としてステップワイズ法により重回帰分析を行う．

最期に,「安全志向的モチベーション」と関連の深い設問を探るため，安全配慮行動と人材尊重に関する設問を除いたすべての設問を独立変数候補とし,「安全志向的モチベーション」を目的変数としたステップワイズ法による重回帰分析を行う．また，重回帰分析や判別分析の場合，独立変数が多い方が良いモデルとは限らない．独立変数の候補から，予測や判別に有用な順に独立変数を採用するための方法を用いた．まず，最も有用な独立変数を１個採用する．次の段階では，まだ採用されていない独立変数のうちで最も有用な独立変数を１個採用するという手順を繰り返す．独立変数の選択基準はあくまでも統計的な指標に基づくため，選択された独立変数が解釈可能であるかは別途判断が必要である．

3. 結果と考察

安全志向と関連する安全風土要因について重回帰分析により行った分析の結果と考察を示す．

3.1 安全志向が影響を及ぼす安全風土要因

「安全志向的モチベーション」を独立変数,「安全配慮行動」と「人材尊重」をそれぞれ目的変数とした回帰分析を行ったのが表２，表３である．双方とも「安全志向的モチベーション」と関連が強いことがわかる．

表２　安全志向的モチベーションと安全配慮行動

変数名	非標準化係数	標準誤差	標準化係数	t値	有意確率
（切片）	1.46	.08		19.31	<.001
安全志向的モチベーション	.67	.02	.67	37.77	<.001

R^2 = .45

表３　安全志向的モチベーションと人材尊重

変数名	非標準化係数	標準誤差	標準化係数	t値	有意確率
（切片）	1.12	.08		14.00	<.001
安全志向的モチベーション	.69	.02	.64	34.70	<.001

R^2 = .41

3.2　安全志向が影響を受ける安全風土要因

表４は，「安全風土」の下位尺度の中から「安全配慮行動」と「人材尊重」を除き，「組織の安全姿勢」，「直属上司の姿勢」，「安全の職場内啓発」，「モラル」，「人材育成」，「現場重視」，「仲間意識」，「意思疎通」，「精神衛生」および「誇り」を独立変数候補としてステップワイズ法により重回帰分析を行った結果である．「安全志向的モチベーション」と関連が強いのは，人材育成，安全の職場内啓発，誇り，組織の安全姿勢，モラル，現場重視，仲間意識となった．安全配慮行動と人材尊重に関する設問を除いたすべての設問を独立変数候補，「安全志向的モチベーション」を目的変数としたステップワイズ法による重回帰分析を行った結果が表５になる．標準化係数の値が大きかったのは，人材育成，モラル，組織の安全姿勢，誇り，仲間意識，現場重視，安全の職場内啓発であった．池田ら（2021）の研究によると，誇りが「安全志向的モチベーション」を高めるというがわかっている．モラルの設問である「あなたの職場では，仕事に対して社会的責任をもつ一専門家としての自負心を持っている人が多い」と「あなたの職場では，組織の常識にとらわれず，一般市民の視点も重視して仕事をすることが大切だと思っている人が多い」については，社会的貢献感と解釈でき，社会的貢献感も誇りと同様に「安全志向的モチベーション」を高めるという池田らの研究と整合する．

ここで着目したいのは仲間意識と組織の安全姿勢の設問である．仲間意識の設問は「あなたの職場では，お互いがベストをつくすように励まし合う」であり，組織の安全姿勢の設問は「安全に対する姿勢や取り組みを直属上司は認めてくれる」である．仲間意識や組織の安全姿勢は「安全志向的モチベーション」に誇りや社会的貢献感と同程度に正の影響を与えている．

3.3　環境の違いによる影響の違い

3.2節では，サンプル全体での分析の結果を示したが，環境の違いにより結果が変化するかどうかを確認するため，「安全志向的モチベーション」が高い事業所について，安全配慮行動と人材尊重に関する設問を除いたすべての設問を独立変数候補，

表４ 安全志向的モチベーションとの安全風土下位尺度

変数名	非標準化係数	標準誤差	標準化係数	t値	有意確率
（切片）	.98	.08		12.54	<.001
人材育成	.25	.03	.26	9.10	<.001
安全の職場内啓発	.15	.03	.16	5.75	<.001
誇り	.08	.01	.12	5.52	<.001
組織の安全姿勢	.08	.03	.09	3.34	.001
モラル	.08	.02	.09	3.95	<.001
現場重視	.07	.02	.09	3.36	.001
仲間意識	.07	.02	.08	3.11	.002

R^2 = .55 , adjR^2 = .55

表５　安全志向的モチベーションとの関連設問（全データ使用）

変数名	設　問	非標準化係数	標準誤差	標準化係数	t値	有意確率
（切片）		1.05	.07		14.07	<.001
人材育成	業務手順に関する教育・訓練では、なぜそうするのか理由が十分に教えられている	.11	.02	.15	6.00	<.001
モラル	あなたの職場では、仕事に対して社会的責任をもつ一専門家としての自負心を持っている人が多い	.11	.02	.13	5.76	<.001
組織の安全姿勢	安全に対する姿勢や取り組みを直属上司は認めてくれる	.11	.02	.11	5.27	<.001
誇り	あなたは、今の職場で働いていることを誇りに思っている	.07	.01	.11	5.41	<.001
仲間意識	あなたの職場では、お互いベストをつくすように励まし合う	.09	.02	.13	5.39	<.001
現場重視	あなたの組織では、いかなる場合も、原子力発電所に関して安全側に立った意思決定がされている	.07	.02	.10	4.53	<.001
安全の職場内啓発	あなたの職場では、安全性・作業性向上に役立つ改善提案が提起されている	.06	.02	.08	3.54	<.001
モラル	あなたの職場では、組織の常識にとらわれず、一般市民の視点も重視して仕事をすることが大切だと思っている人が多い	.06	.02	.09	4.04	<.001
人材育成	教育・訓練は、業務の安全性向上のために十分に役に立っている	.08	.02	.09	3.75	<.001

R^2 = .57 , adjR^2 = .57

「安全志向的モチベーション」を目的変数としたステップワイズ法による重回帰分析を行った結果が表６になる．サンプルサイズは，n = 500である．標準化係数を見るとモラル，人材育成，意思疎通，仲間意識，現場重視の値が高かった．また，誇りは独立変数として選択されなかった．ここで着目したいのは意思疎通と現場重視の設問である．これらは意思疎通の設問「あなたの直属上司は，その直属上司と連絡をうまくとっている」，および，現場重視の設問「あなたの職場では，業務を遂行する上で必要な要員が確保，配分されている」である．意思疎通や現場重視は「安全志向的モチベーション」に正の影響を与えている．

4.　総合考察

「安全志向的モチベーション」と，「安全風土」の下位尺度である「組織の安全姿勢」，「直属上司の姿勢」，「安全の職場内啓発」，「安全配慮行動」，「モラル」，「人材育成」，「人材尊重」，「現場重視」，

表６ 安全志向的モチベーションとの関連設問（安全志向的モチベーションが高い事業所のみ）

変数名	設　問	非標準化係数	標準誤差	標準化係数	t値	有意確率
（切片）		1.17	.18		6.39	<.001
モラル	あなたの職場では、仕事に対して社会的責任をもつ一専門家としての自負心を持っている人が多い	.23	.04	.31	6.62	<.001
人材育成	教育・訓練は、業務の安全性向上のために十分に役に立っている	.16	.04	.18	3.72	<.001
意思疎通	あなたの直属上司は、その直属上司と連絡をうまくとっている	.13	.04	.15	3.57	<.001
仲間意識	あなたの職場では、お互いがベストをつくすように励まし合う	.11	.03	.15	3.25	.001
現場重視	あなたの職場では、業務を遂行する上で必要な要員が確保、配分されている	.05	.02	.10	2.44	.015
人材育成	あなたの職場では、事故・トラブル事例の教訓が周知されている	.10	.04	.11	2.39	.017
モラル	あなたの職場では、個人的な感情や利害を職場に持ち込んでいる人がいる（逆転項目）	-.04	.02	-.08	-2.15	.032

R^2 = .55 , adjR^2 = .54

「仲間意識」,「意思疎通」,「精神衛生」,「誇り」とを回帰分析し，その結果をパス図として図１に整理した.「安全志向的モチベーション」は人材育成，安全の職場内啓発，誇り，組織の安全姿勢，モラル，現場重視，仲間意識により高められ，人材尊重，安全配慮行動を後押しすると考えられる.

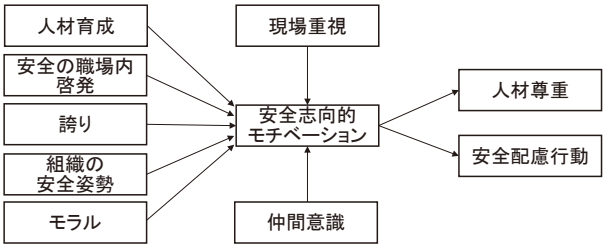


図１　安全志向的モチベーションと安全風土要因のパス図

サンプル全体の分析結果に基づいて,「安全志向的モチベーション」と関連がある項目について，仲間意識の設問「あなたの職場では，お互いがベストをつくすように励まし合う」，組織の安全姿勢の設問「安全に対する姿勢や取り組みを直属上司は認めてくれる」について考察した.

「お互い励ましあう」については，人は褒められると受け身になるより，むしろ積極的でエネルギッシュになるとされる．反対に批判したり口やかましく言ったりすると，受け身になり，活力は枯渇するとされる．自分は何ひとつとしてまともにできないと感じたら，やる気はなくなるものである（Schaufeli & Dijkstra，2010　島津・佐藤訳2012, pp. 107-111）．一方,「直属上司の承認」については，上司からの承認は自己効力感，満足感を高め，自己効力感は自分の環境をコントロールできているというという感覚であり，人間が働き，生きていくうえでとても大切な要素である．そのため自己効力感の向上は，内発的・外発的なモチベーションにつながるうえにメンタルヘルスにも役立つなど，さまざまな効果をもたらす（太田，2011, pp. 158-161）．また，組織や上司からのポジティブメッセージが組織内自尊心を高め，それが組織や同僚に貢献する自発的な支援行動や組織への愛着を意味する組織コミットメントを引き出すことを明らかにしている．組織内で必要とされているという自己認識や存在意義を感じる組織内自尊心は，組織の特性いかんにかかわらず,「モチベーション」を高めると予想できる（池田，2021）.

「安全志向的モチベーション」が高い事業所についての分析に基づいて,「安全志向的モチベーション」と関連がある項目の中から,意思疎通の設問「あなたの直属上司は，その直属上司と連絡をうまくとっている」について考察した.

「直属上司間の連絡」については，コミュニケーションがよい組織は，上層部とのコミュニケーションが活発に行われるため，なにか疑問や問題点があった際に，その情報が垣根なく伝わり，速やかに解決できるという特徴を持ち，それが安心感につながるという好循環が生まれるのであろう．これは心理的安全性が，高まっている状態といえるのではないだろうか.

心理的安全性とは，率直に発言したり懸念や疑問やアイデアを話したりすることによる対人関係のリスクを，人々が安心して取れる環境のことである（Edmondson，2019　野津訳2021, pp. 24-49）．人々が率直に発言できない場合，組織の革新・成長する力が脅かされる．リーダーは心理的安全性をつくるうえで重要な役割を果たす．リーダーはメンバーを尊敬していることを，とりわけメンバーが持っている専門知識やスキルを認めることによって，はっきり伝えなければならない．率直に話したり，ミスを報告することを大いに促す必要もある．そんなふうにメンバーを導くと，リーダーは心理的に安全な環境を生み出し，支援していけるようになる．対照的に，リーダーが独裁者のような態度をとったり，なかなか会えなかったり，自分の弱さを認められなかったりすると，メンバーはアイデアを共有したりミスを検証したりしなくなってしまう（Edmondson，2012　野津訳2014, pp. 179-194）．したがって「モチベーション」が上がらない状況が続くということであろう．また，現場重視の設問「あなたの職場では，業務を遂行する上で必要な要員が確保，配分されている」については，経営層や上司が安全第一の姿勢を取っていても，人員不足に問題があり，安全第一の姿勢に実態が伴わない場合は「モチベーション」が上がらないということが考えられる.

近年，職場に活気が感じられない，若手に元気がないとの声が聞こえているが，これは個人の問題であろうか，組織の問題であろうか，個人のパーソナリティーの問題はあるとも考えるが，ほとんどの場合は組織に根づく文化の問題であると考えられる．それでは組織文化を形成するのはなにであろうか，組織文化は組織のメンバーに共有された信念，価

値観，規範の総体である．「信念」は世界観であり，人間とは，社会とはいかなるものかなど根本的な問題に対する基本的な考え方であり，「価値観」は物事の善悪・大切さなどの基準であり，「規範」は成員が如何に行動すべきかに関わるルールである．信念は価値観や規範をより深いレベルで正当化する根拠になり，価値観や規範は信念を具体化したものとして妥当性を示す根拠になる（加護野，2003, pp. 55-61）．いずれにしても組織は自然発生的に生まれるわけではなく，文化は創設者やリーダーの行動を通じて生み出され維持されるものである．したがって組織文化を変えるのも創設者やリーダーの役割ということになる．創設者である経営層や彼らを支えるリーダーの振る舞いが組織文化を変え，求められる方向へ向かわせることになる．職場に活気が感じられない等の状況は経営層やリーダーが変革を意識して取り組むことで徐々に変えていくことが可能であると考えるべきであろう．

5. 最後に

組織文化を変えるのは創設者やリーダーの役割であることを述べたが，これはなにも役職者だけが汗をかけと言っているわけではない．目標に対して組織のメンバーが納得のいく道筋や方向性を示すこと，目標を達成するための資源は不足していないか，ルール等は整っているかを常に確認し，メンバーが同じ目線で汗をかくことができる状態を保つことが求められるということである．そのうえで社会的貢献感や誇りを高めることやお互いベストを尽くすよう励ましあう職場環境を醸成することで安全志向的モチベーションが向上し，労働災害等の問題が起こりにくい組織が形成されるものと考える．

引用文献

Edmondson,A.C.（2012）．Teaming: How organizations learn, innovate, and compete in the knowledge economy. San Francisco: John Wiley & Sons.（野津智子［訳］（2014）．チームが機能するとはどういうことか 英治出版）．

Edmondson,A.C.（2019）．The fearless organization: Creating psychological safety in the workplace for learning,innovation,and growth. San Francisco: John Wiley & Sons.（野津智子［訳］（2021）．恐れのない組織「心理的安全性」が学習・イノベーション・成長をもたらす 英治出版）．

福井宏和(2014). 安全風土調査の充実に関する検討. -海外の安全文化の視点を参考として- INSS JOURNAL, 21, 2-12.

池田浩・秋保亮太・金山正樹・藤田智博・後藤学・河合学安全の現場に求められるワークモチベーション：安全志向的モチベーションの効果とその源泉としての自己価値充足モデル（2021）．産業・組織心理学研究，34(2)，133-146.

加護野忠男（2003）．企業の戦略 八千代出版.

西田豊（2017）．安全風土と安全文化 -概念，測定と理論，醸成について- INSS JOURNAL, 24, 21-31.

Schaufeli, W.B. & Dijkstra, P.（2010）．Bevlogen aan het werk. Uitgeverij van Schouten & Nelissen.（島津明人･佐藤美奈子［訳］（2012）．ワーク・エンゲイジメント入門 星和書店）．

太田肇（2011）．承認とモチベーション 同文館出版株式会社.

自由記述回答の評価極性と安全文化醸成の関連

Relationship Between Semantic Orientations of Free Description Answers and Safety Culture

西田　豊（Yutaka Nishida）*1

要約　安全文化を評価するとき質問紙調査が用いられることが多い．通常リッカート尺度などを用いた選択式設問のほかに自由記述による回答を求める設問が設定されることが多い．質問紙設定者の想定していない意見を回答者から引き出そうとするには良い方法である．自由記述回答はテキストデータであるため，通常の統計的アプローチをとることができず，従来は分析者の主観に依った分析がなされることが多かった．近年は，テキストデータに対する統計的方法論や解析ツールの開発が進み，テキストデータ解析を実行しやすい環境が整ってきている．本研究では，単語に対して評価極性が対応付けられた極性辞書を用いることによって，自由記述の内容が肯定的であるのか否定的であるのかの判定を行うセンチメント分析を実行した．また，質問紙調査で得られた安全文化の程度を評価する得点と自由記述の極性値との関連を検討した．安全文化の得点に依らず使用している語の平均極性値は正の値であった．さらに，自由記述の評価極性と安全文化の得点には正の相関関係がみられた．この結果は，安全文化の程度に依らず肯定的な語を使用していると考えられ，安全文化が醸成しているほど，肯定的な語を使用することが多くなっていることが示されたといえる．

キーワード　安全風土，安全文化，自由記述，評価極性，センチメント分析

Abstract　Questionnaire surveys are often used to assess safety culture. In addition to selective questions using a Likert scale, free description questions are often included. This is a good way to elicit opinions from the respondents that the questionnaire designer had not expected. Since free description answers are textual data, they cannot be subjected to the usual statistical approach, and in the past, their analysis was often based on the subjectivity of the analyst. In recent years, the development of statistical methods and analysis tools for text data has progressed, creating an environment that facilitates text data analysis. In this study, we performed sentiment analysis to determine whether the content of free description is positive or negative by using a sentiment polarity dictionary, in which semantic orientations are assigned to words. In addition, we examined the relationship between the semantic orientation scores of the free descriptions and the scores obtained from the questionnaire to assess the degree of safety culture. The mean polarity score of words used regardless of the safety culture score was positive. Furthermore, there was a positive correlation between the semantic orientation scores of the free descriptions and the safety culture scores. This result suggests that positive words are used regardless of the degree of safety culture, and that the more safety culture is fostered, the more positive words are used.

Keywords　safety climate, safety culture, free description answer, semantic orientations, sentiment analysis

1.　はじめに

事故を防ぎ安全性を向上させるためには，技術要因，人的要因，組織要因を考慮する必要があるが，事故の要因を考える際には文化の影響についても考慮する必要がある（原子力安全システム研究所，2019）．安全性を高めるうえで安全文化の醸成が重要であることは認識され始めているが，どのようにすれば安全文化の評価や育成ができるのかについては，試行錯誤を繰り返しているように思われる．安全文化の評価方法にはいくつかのアプローチがあり（竹内，2012），インタビュー調査などの方法がとられることもあるが，組織全体を対象とするにはコストが大きいため，多くの場合，質問紙調査での評価が用いられる（西田，2017）．

職場の安全性を質問紙調査により評価しようとする試みは，安全風土という概念の導入とともに Zohar（1980）によって始められた．安全風土や安全文化という概念はもちろん広く産業界に共通するが，原子力産業分野に限っても質問紙調査を用いた研究が増えてきている．例えば，近年では回答者の属性に関する回答傾向の違いや（藤田，2017; 福井，2012; 西田，2018），属性による影響の程度が事業所間で異なること（藤田，2018）が報告されている．経時データを用

＊1　(株)原子力安全システム研究所　社会システム研究所

いて従業員の意識の変化を検証した研究（河合, 2020）や，質問項目を見直すことにより調査自体の精度向上を目的とした研究も実施されている（西田，2019）．

通常，質問紙調査では，5 件法などのリッカート尺度を用いた選択式の質問項目が設定され，そのデータは量的に扱われ分析されることが多い．選択式の設問は質問紙設計者の意図を反映するものであるから，設計者の想定していない事柄について回答者から意見を引き出そうとすると，自由記述回答を求めることになる．自由記述回答は質的なテキストデータであるから，従来の統計的データ解析を適用することが難しく，分析は分析者の主観に頼らざるを得ないところが多くあった．

近年では統計的なテキストデータ解析の方法やツール，解説書が整備されつつあり，テキストデータ解析を実行しやすい環境ができつつある（樋口，2014; 石田，2017; 岩田，2015; 金，2009; 佐藤，2015）．組織研究におけるテキストデータを扱った計量的研究として，工藤（2015）は組織内の縦コミュニケーションについて自由記述と評定値から考察をおこなっている．また，藤田（2019）では，職場に対する評定値と文字数や使用される語に関連があることが指摘されている．

2. 自由記述テキストの評価極性判定

西田（2020）では，トピックモデルを用いた解析により安全文化の評定値と記述のトピックに関連があることが示されたが，同様に評定値とトピックを構成する単語とも関連があることが予想される．語には評価的意味内容を持つものがあり，語の特性として肯定的意味内容を持つ語であるのか，否定的意味内容を持つ語であるのかを考えることができる．例えば，「安全」という語は肯定的な意味内容を示していると考えられ，「危険」という語は否定的な意味内容を示していると考えられる．自由記述における，このような肯定的もしくは否定的意味内容を持つ語の使用頻度などが安全文化に関する意識と関連している可能性が考えられる．

2.1 センチメント分析

センチメント分析とは，テキストの内容に対する評価を，構成する語をもとに判定する手法のことである（石田, 2020）．基盤となる研究の動向については乾・奥村（2006）が詳しい．特にテキストの内容を望ましい（肯定極性），望ましくない（否定極性）またはいずれでもない（ニュートラル）の3種類の属性値（評価極性）を自動判定する技術の需要が高まっている（東山・乾・松本, 2008）．本研究では，自由記述中に出現する語とその頻度から，その自由記述が肯定的であるのか否定的であるのかの判断を行う．

2.2 極性辞書

センチメント分析を行うためには語ごとに評価の極性を対応させた辞書が必要になる．本研究では日本語評価極性辞書（名詞編）ver.1.0（東山・乾・松本, 2008）を使用する．日本語評価極性辞書では肯定極性の単語には+1の値が，否定極性の単語には-1の値が，ニュートラルの単語には0の値が付与されている．

2.3 目的

本研究では質問紙調査における自由記述から得られたテキストデータと、語と肯定的や否定的などの意味内容が対応付けられた極性辞書とを用いて，自由記述の意味内容を判断するセンチメント分析を行う．また，量的な安全文化の評定値と語の意味内容との関連を検討する．

3. 方法

3.1 自由記述データ

2018年5月から9月にかけて原子力産業従事者に対して実施された調査票調査で得られた24,503名のデータのうち電力会社に所属し，自由記述設問に回答していた2,955名のデータを解析対象とした．自由記述の設問は「安全文化について，日頃感じていることがありましたら，500文字以内で自由にご記入ください」というものであった．

3.2 安全文化総合得点

量的データについては全78項目の設問があり，「そ

表 1　総合得点の記述統計量

最小値	中央値	最大値	平均値	標準偏差
1.24	3.92	4.99	3.89	0.63

表 2　肯定極性を持つ出現頻度の高い上位 10 語

	肯定極性	頻度
1	安全	3993
2	文化	1854
3	大切	173
4	情報	171
5	十分	115
6	雰囲気	107
7	大事	105
8	コミュニケーション	104
9	技術	97
10	人員	78

表 3　否定極性を持つ出現頻度の高い上位 10 語

	否定極性	頻度
1	事故	204
2	コスト	167
3	リスク	166
4	問題	145
5	非常	91
6	危険	83
7	不安	82
8	課題	70
9	費用	57
10	災害	55

う思う」～「そう思わない」の5段階で評定をしてもらい，5点から1点を割り当てた．逆転項目は安全に関する状態が良いほど得点が高くなるよう反転し処理を行った．全78項目の全平均を算出し，総合得点とした．総合得点の記述統計量を表1に示す．

3.3　自由記述データの分類

総合得点と自由記述における単語評価極性との関連を検討するため，総合得点をもとに自由記述を10グループに分類する．各グループに含まれる回答者数がおよそ等しくなるよう，総合得点の値の順に自由記述を10グループに分類した．総合得点の値が元も低いグループをG0とし，値が高くなるにつれてグループ番号が大きくなり，総合得点が最も高いグループをG9とした．

3.4　分析方法

自由記述データから解析用データ行列の作成にあたり，日本語形態素解析エンジンMeCab Ver. 0.996（工藤, 2013）およびR言語のパッケージ RMeCab ver.1.04（Ishida, 2019）を使用した．2回以上出現した名詞のみを指定し1,495語が抽出された．極性辞書において肯定極性の単語および否定極性の単語のそれぞれにおいて出現した頻度の高い上位10語を表2および表3に示す．

極性辞書には自由記述中に出現したすべての単語に対して極性値が与えられているわけではないため，抽出された1,495語からさらに極性辞書にリストされている単語について抽出した結果となる．

4.　結果と考察

4.1　平均極性値

文書中に含まれる語の出現頻度に極性値をかけ，極性値を持つすべての単語について平均したものを文書の平均極性値とし，総合得点グループごとに算出した．総合得点グループを横軸に，平均極性値を縦軸に取ったグラフを図1に示す．平均極性値はすべての得点グループにおいて正の値となっており，自由記述で使用された語は肯定極性に偏っていたことを意味する．

4.2　総合得点と平均極性値との関連

総合得点グループと平均極性値との相関係数は r=.87 (95%CI = [.54, .97]) となり正の相関関係があることが示された．これは総合得点が高いほど，平均極性得点も高いことを意味する．

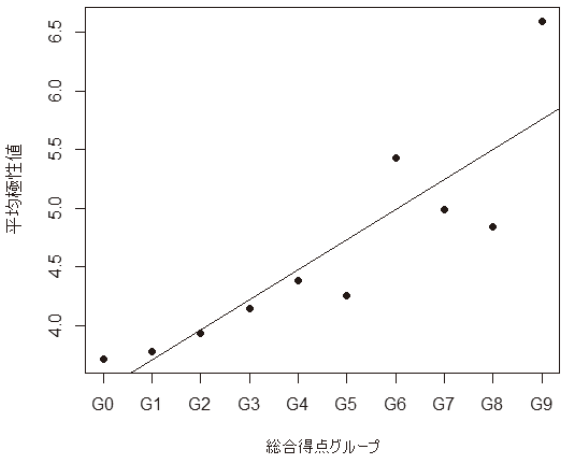


図 1　得点グループと平均極性値の関係

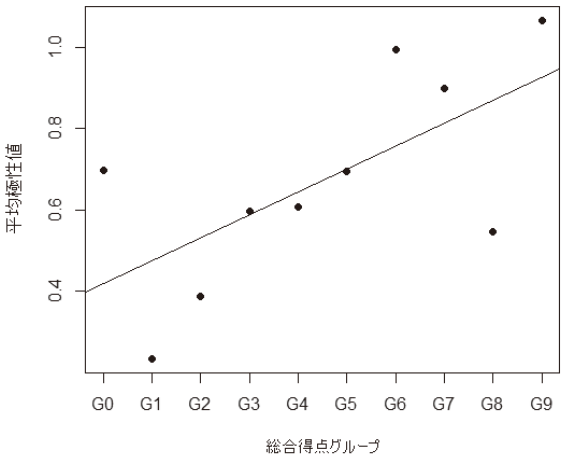


図 2　得点グループと平均極性値の関係
（高頻度語を除いた場合）

4.3　高頻度語の影響

頻出語のうち「安全」と「文化」は他の語と比べ非常に使われる頻度が高い．安全文化について尋ねている設問であるから当然といえば当然であるが，これら2つの語は肯定極性を持つため，平均極性値が大きく肯定に偏っている可能性がある．また，西田（2020）では「安全文化」のトピックと総合得点が相関することが示されている．前節で平均極性値と総合得点が相関することが確認されたが，「安全」と「文化」の2語が含まれているため総合得点と相関しているのではないかと考えることもできる．

そのため本節では，安全文化について尋ねている設問において当然出現すると考えられる「安全」と「文化」の2つの語を除いて再分析を行う．

総合得点グループを横軸に，平均極性値を縦軸に取ったグラフを図2に示す．平均極性値はすべての得点グループにおいて正の値となっており，自由記述で使用された語は肯定極性に偏っていたことを意味する．高頻出の2語を取り除くことによって，含まれている場合よりも平均極性値が大きく低下したが，これは自由記述回答中に必然的に登場する「安全」，「文化」が平均を大きく上側へシフトさせていたと考えられる．高頻出語を除いた場合の相関係数はr=.66 (95%CI = [.05, .91]) となり，正の相関関係があることが示された．したがって，総合得点と高い正の相関が予測される「安全」と「文化」を除いた場合でも，総合得点が高いほど自由記述で使用される語の極性が肯定的であることが示されたといえる．

5.　まとめ

本研究では，センチメント分析を実行し，自由記述がどのような極性値を持つのか，また，その極性の値が安全文化醸成の程度とどのような関係にあるのかを検討した．平均極性値は，総合得点の値に限らず正の値となっており，安全文化の程度に依らず，肯定的な語が使用される傾向があることが示された．また，総合得点と極性値とは正の相関関係が見いだされ，安全文化の程度が高いほど肯定的な語を使用する傾向が強くなることが確認された．

高頻度語を取り除いた場合でも総合得点と語の極性には有意な相関関係があることが示された．西田（2020）においても「安全文化」のトピックと総合得点には強い相関関係があることが示されていたが，高頻度の2語を除いた場合の結果が含めた場合の結果よりも相関係数が大きく低下したことと整合的であるといえる．

センチメント分析の結果は使用する極性辞書によって結果が変わることが予想される．本研究では名詞の使用についてのみ分析対象としているが，用言に関する極性辞書（小林・乾・松本・立石・福島, 2005）を用いたり，原子力安全に関する語を対象とした極性辞書を作成したりすることができれば，より正確な結

果を得られる可能性がある．また本研究では，語が使用される文脈については考慮されていないため，文脈についての情報を活用することでさらなる精緻化が見込まれる．

謝辞

本研究は一般社団法人原子力安全推進協会（JANSI）と各事業所のご協力のもとに実施できたものである．厚く感謝申し上げる．

引用文献

藤田 智博(2017).安全確認を抑制するメカニズム －知識・技能への自信に注目して－ INSS JOURNAL, 24, 48-57.

藤田 智博（2018）．原子力産業の安全風土調査へのマルチレベル分析の適用 INSS JOURNAL, 25, 17-24.

藤田 智博（2019）．テキストデータが映し出す「安全」－自由記述の活用－ INSS JOURNAL, 26, 2-9.

福井 宏和（2012）．原子力発電所の安全風土に関する質問紙調査 集団力学, 29, 69-86.

原子力安全システム研究所 社会システム研究所（編著）（2019）．安全文化をつくる －新たな行動の実践－ 日本電気協会新聞部.

東山 昌彦・乾 健太郎・松本 裕治（2008）．述語の選択選好性に着目した名詞評価極性の獲得，言語処理学会第14回年次大会論文集，584-587.

樋口 耕一（2014）．社会調査のための計量テキスト分析 －内容分析の継承と発展を目指して－ ナカニシヤ出版.

石田 基広（2017）．Rによるテキストマイニング入門（第2版） 森北出版株式会社.

Ishida, M.（2019）．RMeCab: interface to MeCab. R package version 1.04.

石田 基広（2020）．実践 Rによるテキストマイニング －センチメント分析・単語分散表現・機械学習・Pythonラッパー－ 森北出版株式会社.

乾 孝司・奥村 学（2006）．テキストを対象とした評価情報の分析に関する研究動向 自然言語処理，13（3），201-241.

岩田 具治（2015）．トピックモデル 講談社.

河合 学（2020）．原子力産業に従事する組織成員意識の変化に関する探索的検討 INSS JOURNAL, 27, 38-42.

金 明哲（2009）．テキストデータの統計科学入門 岩波書店.

小林 のぞみ・乾 健太郎・松本 裕治・立石 健二・福島 俊一（2005）．意見抽出のための評価表現の収集 自然言語処理，12（3），203-222.

工藤 直志（2015）．自由回答を用いた組織内コミュニケーションの分析 INSS JOURNAL, 22, 2-12.

工藤 拓（2013）．MeCab ver. 0.99636.（https://taku910.github.io/mecab/）.

西田 豊（2017）．安全風土と安全文化 －概念，測定と理論，醸成について－ INSS JOURNAL,24, 21-31.

西田 豊（2018）．スパース判別分析による属性別安全風土の特徴抽出 INSS JOURNAL, 25, 25-30.

西田 豊（2019）．項目反応理論による安全風土調査の項目分析 INSS JOURNAL, 26, 18-26.

西田 豊（2020）．トピックモデルによるアンケート自由記述回答の潜在意味解析 INSS JOURNAL, 27, 31-37.

佐藤 一誠（2015）．トピックモデルによる統計的潜在意味解析 コロナ社.

竹内 みちる（2012）．組織の安全文化（安全風土）評価・測定の手法に関する試論 INSS JOURNAL, 21, 10-19.

Zohar, D.（1980）．Safety climate in industrial organizations: Theoretical and applied implications. Journal of Applied Psychology, 65, 96-102.

脱炭素化に向けた原子力発電による石炭火力発電代替の受容性

Acceptability of Using Nuclear Power as an Alternative to Coal-fired Power to Achieve Decarbonization

北田　淳子（Atsuko Kitada）*1

要約　脱炭素のために，政府は古い非効率な石炭火力発電所を休廃止する方針を 2020 年 7 月に発表した．意識調査を実施し，原子力発電による代替の受容性について検討した結果を報告する．(1) 高効率の石炭火力発電所の建設も認めない人は，温室効果ガスの削減に積極的な層でも 2 割以下であり，政府方針への反対は少なかった．(2) 原子力発電による代替には，肯定が 23%，否定が 36%，態度保留が 40%であった．この賛否は，原子力発電の利用についての基本的態度に強く規定されており，温室効果ガスの削減に積極的な層ほど原子力による代替に否定的な傾向があった．(3) 再生可能エネルギーと原子力発電の共存を肯定する人は 7 割を超え，代替発電についても再生可能エネルギーか原子力発電かの二者択一としては考えていないことが示唆された．(4) 原子力発電は CO_2 排出が少ないことについての認知は，高学歴層や新聞やテレビニュースをよく見る層でも高くなかった．各発電方法の 1kWh あたりの CO_2 排出量の情報を提示するだけでは，原子力発電による代替に対する肯定は増えなかった．以上の結果から，CO_2 を排出しないエネルギーへの転換が地球温暖化対策・気候変動対策の核心であり，原子力は低炭素の発電手段であることをわかりやすく説明する必要がある．

キーワード　原子力発電　意識調査　石炭火力発電所の廃止　発電方法の CO_2 排出量　情報提供の効果

Abstract　In July 2020, the Japanese government announced a policy to achieve decarbonization that includes shutting down old inefficient coal-fired power plants. In this paper, we report the results of conducting an awareness survey about the policy and examining the acceptability of nuclear power generation as an alternative to these old coal-fired plants. (1) Opposition to the construction of high-efficiency coal-fired power plants was less than 20% even among those who had positive opinions toward reducing greenhouse gases, and there was little opposition to the government policy. (2) As for the alternative to use nuclear power generation, 23% of respondents were affirmative, 36% were negative, and 40% were neither. This opinion was strongly stipulated in the basic attitude regarding the use of nuclear power generation, and the more positive were the persons replying to reduce greenhouse gases, the more negative they were to the nuclear power alternative. (3) More than 70% of respondents affirmed the coexistence of renewable energy and nuclear power and did not consider alternative power generation to be a choice between renewable energy and nuclear power. (4) Nuclear power generation was not well recognized as a low-carbon power source, even by highly educated people and those who often read newspapers and watch television news. Providing information on CO_2 emissions per kWh for each generation method did not increase the affirmation of using nuclear power as an alternative to coal-fired power. Therefore, it is necessary to explain to the public in an easy-to-understand manner that the conversion to energy that does not emit CO_2 is at the core of measures against global warming and climate change, and that nuclear power is a means of low-carbon power generation.

Keywords　nuclear power generation, awareness survey, closure of coal-fired power plant, CO_2 emissions per kWh for each generation method, effect of providing information

1. はじめに

政府は，2050 年の温室効果ガスの排出を実質ゼロにする，すなわち「2050 年カーボンニュートラル」の目標を発表した（2020. 10. 26）．従来の 80%削減から排出ゼロへの引き上げで，脱炭素化の加速である．これにあわせ，2030 年までの中期目標も 2013 年度比で従来の 26%減から 46%減に引き上げられた(2021. 4. 22)．10 年という短期間での大幅な削減には，未知数の革新的技術の進展を待つ余裕はなく，既存技術の活用が必要と考えられる．

日本の温室効果ガス排出量は発電分野，具体的には

＊1（株）原子力安全システム研究所 社会システム研究所

火力発電からの排出量が 4 割を占める．なかでも石炭火力発電は CO_2 を最も多く排出し，2018 年時点で火力発電全体からの CO_2 排出量の 6 割近くを占める排出源となっている（環境省，2020）．

政府は，古い石炭火力発電所を休廃止し，一部は超々臨界圧（USC）など発電効率の高い最新鋭に更新して，CO_2 排出量を減らす方針を表明している（2020.7.3）．資源の供給安定性とコスト面から，日本のみならず発展途上国の電力需要を賄ううえでも石炭火力発電は必要とされ，バイオマス燃料との混焼や，石炭ガス化複合発電，石炭ガス化燃料電池複合発電など，石炭火力発電の CO_2 を減らす技術革新の取り組みも行われている．

一方，世界では先進国を中心に全廃の方針の国が多く[*2]，高効率かどうかにかかわらず石炭火力発電には厳しい目が注がれている．グテーレス国連事務総長は先進国に対し石炭火力発電の 2030 年までの段階的廃止を要請している（2021.3.2）．ESG 投資の広がりやダイインベストメント（投資撤退）の圧力により，日本でも，石炭火力発電所の新規建設にかかわる事業や融資の原則中止を表明するメガバンクや大手商社が現れている（環境省，2020）．

地球温暖化に関する意識調査は多く実施されている．内閣府の調査では，地球温暖化の影響の実感や消費や省エネ，熱中症や気象災害などについての意識・行動を質問している（内閣府，2016；2021）．人々の行動を規定する要因を探り，個人の適応行動の向上につなげる目的がある．また，企業に対する期待を把握し，企業の適応行動の向上につなげる目的でも実施されている（みずほ情報総研，2020）．

このような個人や企業レベルの取り組みは，地球温暖化対策においてもちろん重要であるが，CO_2 削減の実効性の点からは，化石燃料に依存しないエネルギーシステムの構築，なかでもどのような電源構成にするかが鍵を握る．原子力発電を主テーマとする意識調査では，温暖化対策の面からの質問も行われている（北田，2019；北田，2020b；桑垣・服部，2021）．しかし，地球温暖化を主テーマとする意識調査では，再生可能エネルギーに多くの質問が割かれる一方，原子力発電にはほとんど触れられていない．

自由回答形式で CO_2 削減方法を問うと，電気自動車や省エネ・節電などの環境配慮行動は多く記述されるが，「火力発電を減らす」や「原子力発電を利用する」はきわめて少なかったことが報告されている（北田，2020a）．若年層を対象にした意識調査であるが，CO_2 排出削減のために進めるべき取り組みとして選択肢を示して複数回答で問う場合でも，「原子力発電の利用」は 1 割で最も少なかったと報告されている（日本財団，2021）．

先行研究では，温暖化対策としての原子力発電の利用の賛否以前の問題として，原子力発電は CO_2 排出が少ないという基本的知識の不足が指摘されている．深江（2004，2006）は，原子力発電が発電時に温室効果ガスを排出しないと思う人は 3 割にとどまること，加えて，原子力発電の温暖化対策としての有用性評価には，知識不足よりも大事故や放射性廃棄物という原子力発電の負のイメージの影響が支配的であったと報告している．それから 10 数年後の北田の報告（2020a）においても，原子力発電は CO_2 排出が少ないという認知は低く，CO_2 より放射性廃棄物が増えるほうが環境問題として深刻だと思う人が 6 割を占めていた．この 10 数年の間には猛暑や集中豪雨など地球温暖化の影響とみられる被害が顕在化したが，人々の温暖化対策としての原子力発電の評価は変化していないといえる．

パリ協定の発効により，世界で温室効果ガス削減の取り組みが加速し，日本でも企業が自社の脱炭素化目標や先進的取組を打ち出すなど，脱炭素という困難な目標に向かって社会が動き出している．原子力発電は脱炭素の手段の 1 つになり得る．CO_2 削減という目的を明確に示せば原子力発電を石炭火力発電の代替に使うことは受容されるのか，原子力発電は CO_2 排出が少ないことを客観的データで示し，人々の知識不足を補えば受容は高まるのかを検討する必要がある．

地球温暖化に関連しては，定義や意味の違いが明確でないままいくつかの言葉が使用されている．「気候変動」も多く使われているが，本稿では地球温暖化を用いる．カーボンゼロ，ネットゼロという表現もあるが，本稿ではカーボンニュートラルを用いる．

2. 目的

本稿の目的は次の 3 つである．

第一に，石炭火力発電の休廃止や，その代替として

＊2　石炭火力発電全廃の目標年は，イギリスは 2025 年，フランスは 2022 年，石炭火力依存度の高いドイツも 2038 年としている（資源エネルギー庁，2020）．

原子力発電を使うことの受容性を把握する．また，その受容性が温室効果ガス削減についての態度や原子力発電の利用についての基本的態度とどう関連しているのかを明らかにする．加えて，石炭火力発電の代替として，再生可能エネルギー（太陽光・風力）と原子力発電が二者択一的にとらえられているのかどうかを分析する．

第二に，原子力発電は CO_2 排出量が少ないことが人々に認知されていないとの先行研究(北田，2020a)をふまえ，発電方法ごとの CO_2 排出量という客観的情報を提示した場合に，石炭火力発電の代替として原子力発電を使うことの受容性が高まるかどうかを分析する．

第三に，結果の先取りになるが，上記の情報提示効果が得られなかった要因を探索する．具体的には，原子力発電は CO_2 排出量が少ないという認知について，温室効果ガス削減態度との関係や，人口統計的属性やマスメディアの情報接触度との関係を分析する．

3. 方法

3.1 調査実施概要

意識調査は，第 23 回 INSS 継続調査として実施された．関西電力供給地域から無作為に 100 地点を抽出し，18 歳以上 79 歳以下を対象に，性年代の割当法により対象者を抽出し，訪問留置法により実施した．調査期間は 2020 年 10 月 9 日～11 月 8 日である．なお，「2050 年カーボンニュートラル」の政府方針が発表された時点では，回答者の 9 割が回答済みであった．調査票 A で 507 人，調査票 B で 500 人の回答を得た．本稿で示す時系列調査結果の実施概要は，北田（2020a）を参照されたい．

3.2 調査票と質問項目

調査票は A と B の 2 種類とし，図 1 に示すように，石炭火力の実績とメリット，および発電方法ごとの CO_2 排出量の情報は調査票 B で提示した．主な質問項目は，温室効果ガス削減態度，原子力発電の温暖化対策有効性，原子力発電利用態度，石炭火力発電の休廃止とその代替の発電方法についての賛否である．

要因の検討のための質問項目は，再生可能エネルギーと原子力発電の共存（調査票 A のみ），原子力発電の低炭素性の認知（調査票 A と B で質問が異なる[*3]），人口統計的属性，マスメディアの情報接触，およびマスメディアで見聞きした原子力関連の内容の自由記述などである．主な項目の質問文と回答比率は Appendix を参照されたい．

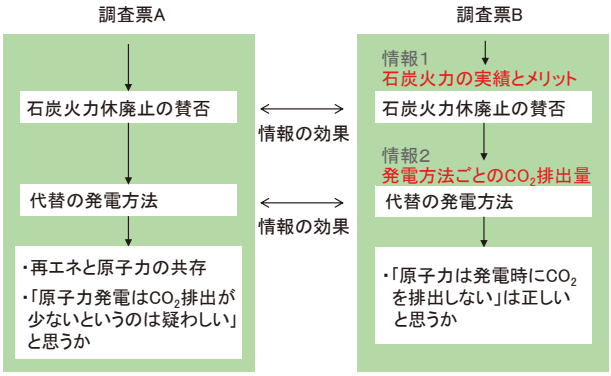


図 1　調査票 A と調査票 B の相違点と分析

3.2 質問文と提示情報

(1) 石炭火力の実績とメリットの情報

石炭火力発電の休廃止の質問文は以下の通りである．「石炭火力発電は火力発電のなかでも CO_2 を最も多く排出します．(▼情報挿入)　政府は温暖化対策として，旧式の石炭火力発電所およそ 100 基を 2030 年までに休廃止し，石炭による発電量の 9 割を削減する方針です．ただし，CO_2 排出量をおさえた新型の石炭火力発電所の建設は認める方針です．このような方針についてどう思いますか．」これに対する回答として，「このような方針でよい」「旧式のものを休廃止するだけでなく，新型の建設も認めないほうがよい」「無理して石炭火力発電所を減らさなくてよい」「いちがいにいえない」の 4 選択肢から 1 つを選んでもらった．

調査票 B では▼の位置に「石炭火力発電は日本の発電量の 32%をまかなう主力電源です．石炭は資源が豊富で安いので，電気の安定供給や料金の抑制に役立っています」との情報を挿入した．

(2) 発電方法ごとの CO_2 排出量の情報

石炭火力発電の代替の発電方法についての質問文

＊3　継続調査で質問量を増やせないため，調査票 A と調査票 B に質問を振り分けた．

は，「(▼情報挿入) 石炭火力発電の代わりに次の発電方法を使うことをどう思いますか」とし，天然ガス（LNG）火力発電，太陽光・風力，原子力発電の 3 種類に対して「どんどん使う」から「使うべきでない」の 5 段階で回答を求めた．なお，太陽光・風力については「ただし，曇天や無風など天候によっては天然ガス（LNG）火力発電で発電して補わざるをえません」とカッコ書きで補足した．

調査票 B では▼の位置に図 2 の情報を挿入した．

発電時だけでなく発電所の建設から廃棄されるまでを含めると、同じ量の電気（1kWh）を発電するために排出されるCO_2は、次のように発電方法によって大きく異なります。

火力			再生可能エネルギー			
石炭	石油	天然ガス(LNG)	太陽光	風力	水力	原子力
943g	738g	474g	38g	26g	11g	20g

出典：資源エネルギー庁の資料より

図 2　発電方法ごとの CO_2 排出量の情報

4.　石炭火力休廃止と代替についての賛否

4.1　背景となる認識

(1) 温室効果ガス削減態度

温室効果ガスの削減については（図 3），「世界に率先してたくさんの量を削減する（積極層）」が 18%，「国際的に公平な量を削減する（中庸層）」が 43%で，削減は支持されている．「経済や国民生活に影響のない量を削減する（消極層）」は 36%にとどまり，「削減する必要はない」はほとんどない．

この 1 年で有意な変化*4はない．この調査は「2050 年カーボンニュートラル」発表時点で多くが回答済みであったため，発表の影響は含まれていない．前回調査以降，新型コロナウイルスによって経済や国民生活は深刻な影響を受けているが，人々の CO_2 削減態度は特に後退していない．

(2) 原子力発電の温暖化対策有効性

原子力発電の温暖化対策としての有効性については（図 4），「有効・どちらかといえば有効」は 37%にとどまり，「どちらともいえない」が 48%を占める．この 1 年で有意な変化はない．

2012 年調査までは，この質問より調査票の前方に各発電方法の長所・短所，発電実績，発電規模の目安を

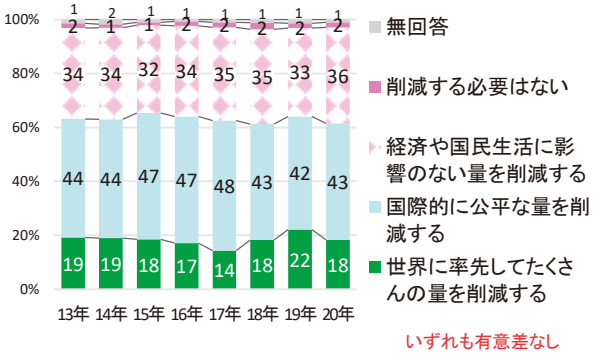


図 3　温室効果ガス削減態度

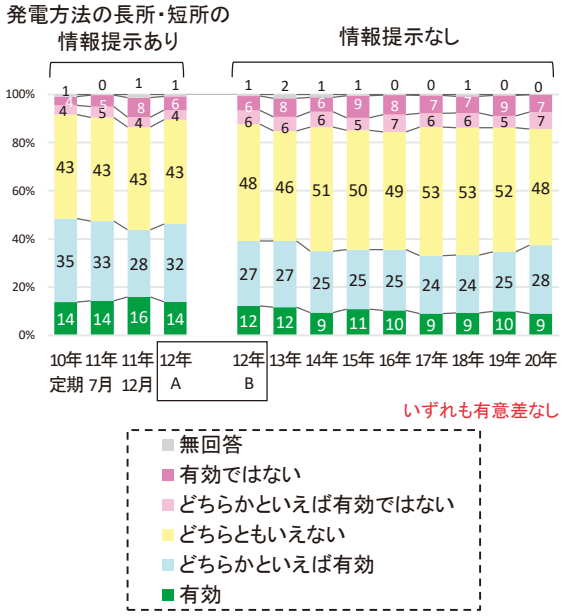


図 4　原子力発電の温暖化対策有効性

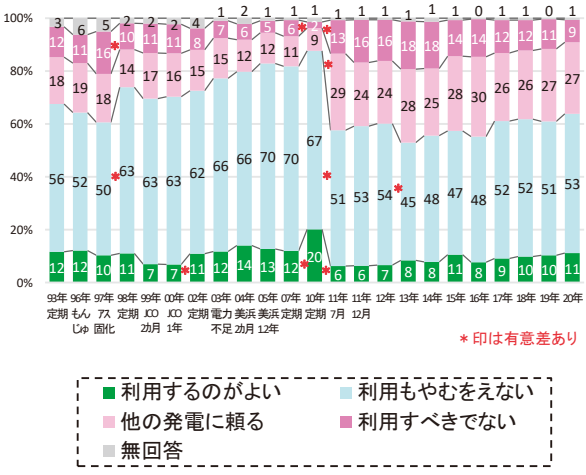


図 5　原子力発電利用態度

＊4　互いに独立なパーセントの差を有意水準 5%で検定する．ただし，地点と個人の 2 段抽出をしているために，杉山（1992，p. 162），鈴木・高橋（1998，p. 182）により，サンプリングによる誤差を単純ランダムサンプリングの場合の$\sqrt{2}$倍にする．

一覧表で提示した質問があった．水力，原子力，太陽光・風力，地熱については，長所の 1 つに「CO_2 の排出が少ない」と記載されていた．2012 年調査では，調査票 A は従来どおり一覧表を提示し，調査票 B は一覧表の提示なしで結果を比較した．情報提示なしで「有効・どちらかといえば有効」が 7 ポイント少なかったものの，統計的に有意なレベルには至らなかった（北田，2013）．その理由の 1 つとして，一覧表には多くの情報が含まれていたために，「CO_2 の排出が少ない」という項目に着目されなかった可能性が考えられた．

(3) 原子力発電利用態度

図 5 は，原子力発電の利用についての態度である．「利用するのがよい」が 11%，「利用もやむをえない」が 53%で，利用肯定層は計 64%である．一方「他の発電に頼る」は 27%，「利用すべきでない」は 9%で，利用否定層は計 36%である．

この 1 年で特に変化はないが，「利用すべきでない」という強い否定意見は，2013 年の 18%をピークに徐々に減少している．

4.2 石炭火力休廃止の賛否とメリット情報の効果

以下，本稿の第 5.4 項までの記述では，各発電方法について「発電」という語を適宜省略する．

石炭火力休廃止については（図 6），「このような方針（旧式を休廃止するが，新型の建設は認める）でよい」が 45%，「いちがいにいえない」が 33%であった．「新型も認めない」という強硬な廃止は 13%，逆に，「無理して減らさなくてよい」という否定的意見も 8%で，政府方針への反対は少なかった．

なお，質問文の「発電量の 9 割」は，正しくは「旧型の石炭火力による発電量の 9 割」である．説明が適切でなかったために「すべての石炭火力による発電量の 9 割」と，ほぼすべてを削減する方針だと受け止めて，その前提でわずかな新型の建設まで否定しなくてよいと判断された可能性もある．

情報提示による差はなかった．電力の 32%を賄う実績と，資源が豊富で安いというメリットの情報を提示しても，石炭火力休廃止の賛否は変わらなかった．

図 7 は石炭火力休廃止の賛否を，温室効果ガス削減態度別に示している．石炭火力休廃止の賛否は，積極層と中庸層に差はなかった．消極層は「政府の方針でよい」が少なく，「いちがいにいえない」という態度保留が 10 ポイント以上多かった．

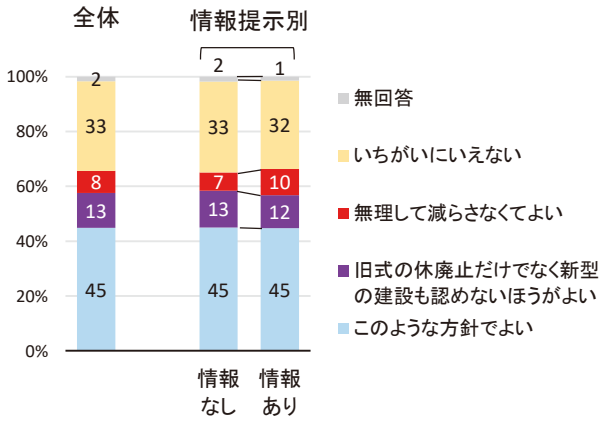


図 6　石炭火力休廃止の賛否

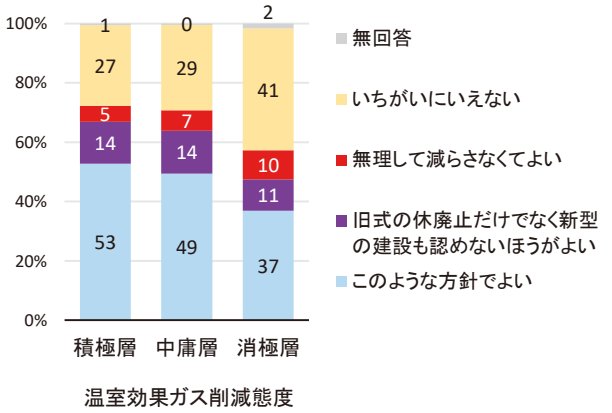


図 7　温室効果ガス削減態度別　石炭火力休廃止の賛否

積極層でも「新型も認めない」は 14%，一方，消極層でも「無理して減らさなくてよい」は 10%だった．つまり，世界に率先して温室効果ガスを削減すべきと思う人も，CO_2 排出量を抑えた新型も認めないというほど強硬ではないし，経済や国民生活に影響のない範囲で温室効果ガスを削減すればよいと思う人も，石炭火力を無理に減らさなくてよいとまでは思っていない．石炭火力休廃止の賛否は温室効果ガス削減態度にあまり関連していない．

4.3 代替に望まれる発電方法

第 4.3 項から第 4.7 項までは，情報提示の影響を受けていない調査票 A の結果を分析する．

石炭火力の代替としての発電方法として，「どんどん使うのがよい・使ってもよい」という肯定的意見は（図 8）太陽光・風力の 78%，天然ガス火力の 58%に対し，原子力は 23%で大幅に少なかった．原子力については「使うべきでない・使わないほうがよい」という否定的意見が 36%あり，肯定的意見を上回った．「どちらともいえない」も 40%で多かった．

温室効果ガス削減態度の層別に代替の賛否を示したのが図 9 である．天然ガス火力と太陽光・風力については，どの層でも代替としての賛否は異ならなかった．しかし，原子力については，否定的意見は積極層で 51%，中庸層で 38%，消極層で 27%であり，温室効果ガスの削減に積極的なほど，原子力による代替に否定的な傾向がみられた．原子力が低炭素電源であることから予想される方向とは逆の関係である．

4.4　代替の賛否は何に関連しているか

表 1 は原子力による代替の賛否と他の質問項目とのスピアマンの相関係数である．原子力による代替の賛否は，a 群の「経済より環境優先の意識」とは-0.34，温室効果ガス削減態度とは-0.16 の有意な負の相関があった．環境優先意識が強いほうが，また，温室効果ガスの削減に積極的なほうが，原子力による代替に否定的な関係が認められる．

原子力による代替の賛否は，b 群の原子力発電利用態度とは 0.69，再稼動の賛否とは 0.60 の正の相関があった．この相関は，原子力発電の温暖化対策有効性との相関（0.45）や a 群の相関より強い．原子力による代替の賛否は，環境や温暖化対策としての観点よりも，原子力発電を利用するかどうかについての基本的態度に規定されるといえる．

原子力発電利用態度別に代替の賛否の分布をみると（図 10），代替に否定的な意見は利用肯定層で 14%，利用否定層で 76%と，顕著に異なった．ただし，利用肯定層でも原子力による代替を肯定する人は 34%にとどまり，「どちらともいえない」が 52%を占めた．利用肯定層とは，図 5 で示したように，大部分は原子力の利用をやむをえないと容認する人々である．利用はやむをえないと容認しても，脱炭素化に位置づけて前向きに活用すべきとは認識していない．

表 1 に戻ると，原子力による代替の賛否は，c 群の太陽光・風力による代替の賛否とは-0.19 の有意な負の相関があった．太陽光・風力による代替に肯定的な

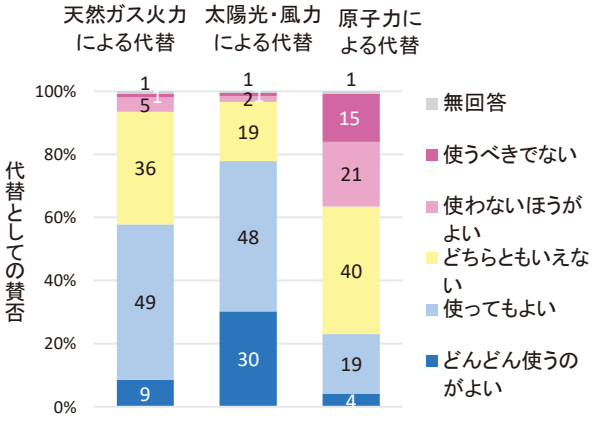


図 8　各発電方法による代替の賛否

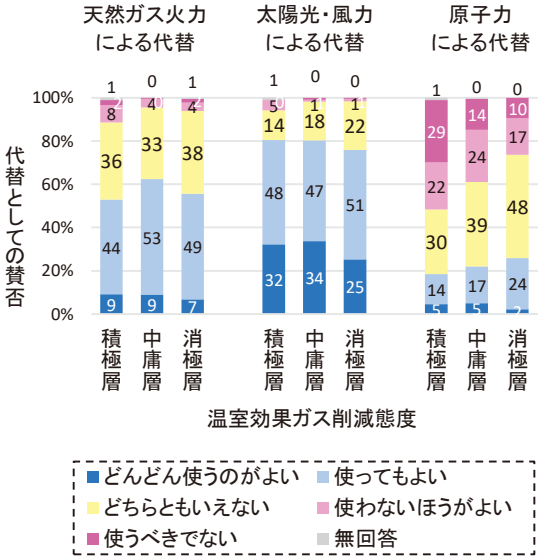


図 9　温室効果ガス削減態度別　代替の賛否

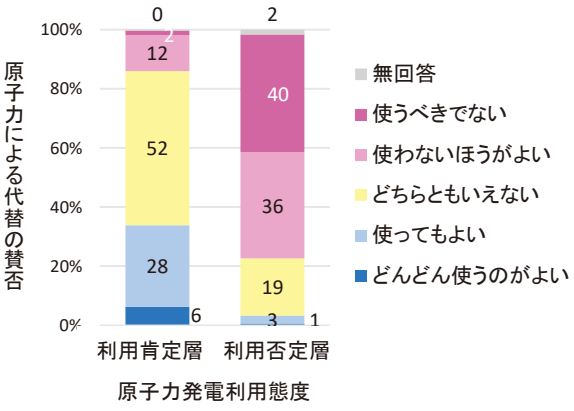


図 10　原子力発電利用態度別　原子力による代替の賛否

ほうが，原子力による代替に否定的な傾向がある．この傾向は，再生可能エネルギー（以下「再エネ」と略す）と原子力が二者択一のものととらえられていることを意味するのだろうか．次項で検討する．

表 1　原子力による代替の賛否と他の質問項目との相関係数（調査票 A）

	質問項目	相関係数
a 群	経済より環境優先の意識	−0.34**
	温室効果ガス削減態度	−0.16**
b 群	原子力発電利用態度	0.69**
	再稼動についての賛否	0.60**
	原子力発電の温暖化対策有効性	0.45**
c 群	石炭火力休廃止の賛否	−0.08
	天然ガス火力による代替の賛否	0.01
	太陽光・風力による代替の賛否	−0.19**

＊ p<0.05　　＊＊ p<0.01

注：相関係数が正の値ならば，各質問項目に肯定的・積極的なほうが原子力による代替に肯定的な傾向をあらわし，負の値ならば，各質問項目に肯定的・積極的なほうが原子力による代替に否定的な傾向をあらわす．

4.5　再エネか原子力かの選択か？

図 11 は再エネと原子力の共存に関する認識である．最も同意できる意見として，アの原子力単独支持はほとんどいなかった．オ・カの「原子力が再エネの発展を妨げる」「再エネの発展は確実で原子力が失われても将来困らない」という再エネ単独支持は計 22%で，意外に少なかった．イ・ウ・エの「原子力も維持」「組み合わせて長所を活かす」「両方に分散してそなえる」という共存を肯定する人が計 74%の多数であった．

この回答を用いて共存肯定層と再エネ単独支持層に分けて，発電方法についての代替の賛否のスピアマンの相関係数を比較した（表 2）．原子力による代替と太陽光・風力による代替の間に有意な負の相関があるのは，再エネ単独支持層（相関係数は−0.28）においてのみであり，共存肯定層に有意な相関はなかった．

表 2　共存肯定層と再エネ単独支持層の比較

	共存肯定層	再エネ単独支持層
「原子力による代替の賛否」と「天然ガス火力による代替の賛否」の相関	0.02	−0.05
「原子力による代替の賛否」と「太陽光・風力による代替の賛否」の相関	−0.06	−0.28**

＊ p<0.05　　＊＊ p<0.01

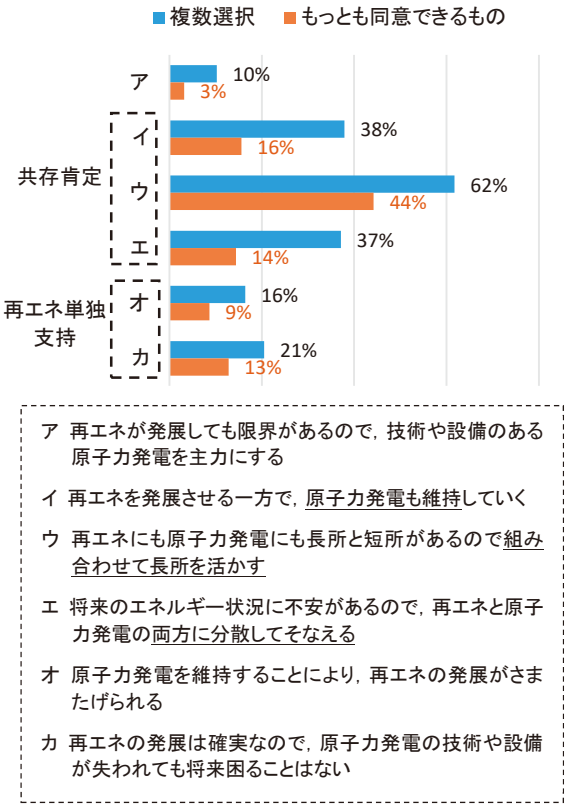


図 11　再エネと原子力の共存に関する認識

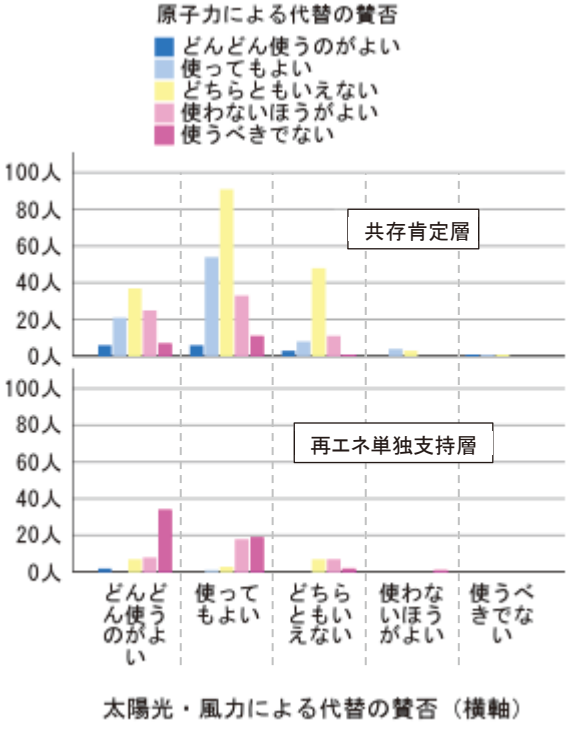


図 12　共存肯定層と再エネ単独支持層の回答分布

2 つの層の具体的な回答分布を示したのが図 12 である．再エネ単独支持層では，太陽光・風力による代替に肯定的な側に，原子力による代替に否定的な回答が分布している．しかし，共存肯定層では，太陽光・風力による代替に肯定的な側においても，原子力による代替については肯定・否定の偏りがないことが確認できる．

したがって，第 4.4 項において回答者全体では原子力による代替と再エネによる代替に負の相関が認められたが，負の相関は再エネ単独支持層に起因するといえる．前段で述べたように，再エネ単独支持層は全体の 2 割程度であり，再エネと原子力の共存を肯定する人が多数である．多くの人は二者択一的にはとらえていないことが示唆される．

5. CO_2 排出量の情報提示効果

5.1 各発電方法にとっての効果

図 2 に示した発電方法ごとの CO_2 排出量の情報を提示する効果の分析は，各発電方法についての代替としての賛否の「どんどん使う」から「使うべきでない」まで，肯定的選択肢が大きな値になるよう 5 点から 1 点のスコアを与え，情報提示なし（調査票 A）と情報提示あり（調査票 B）で平均値の差を有意水準 5%で検定した．

図 13 は平均値の比較である．太陽光・風力と原子力は，情報提示の有無で有意差はなかった．提示した情報は，原子力の CO_2 排出量が，天然ガス火力より 1 桁少なく，太陽光・風力と同等に少ないという内容であったが，それにもかかわらず，原子力による代替についての賛否は変わらず，情報の効果はなかった．

天然ガス火力は，情報提示でスコアが 0.1 有意に低かった．具体的な回答分布であらわすと，肯定的意見が 58%から 51%への減，否定的意見が 6%から 8%への増であり，若干の効果がみられた．

5.2 原子力発電利用態度と効果の関係

図 14 は原子力発電利用態度別の平均値の比較である．原子力による代替についてのみ，かつ利用否定層においてのみ，情報提示の有無で有意差があった．

回答分布をみると（図 15），利用否定層でも代替に肯定的な意見は増えていないが，否定的意見が 76%から 64%に減り，「どちらともいえない」が増えた．利用否定層は原子力による代替に元々否定的意見が圧倒

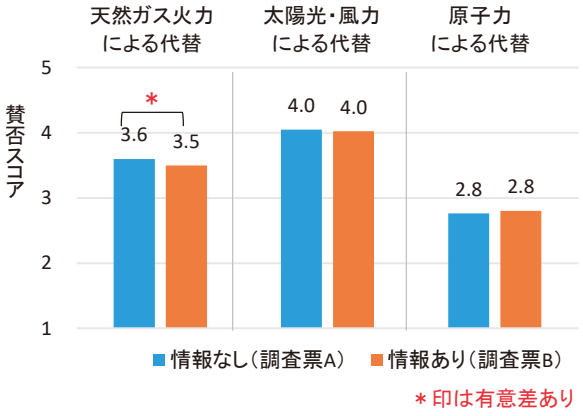


図 13　情報提示効果

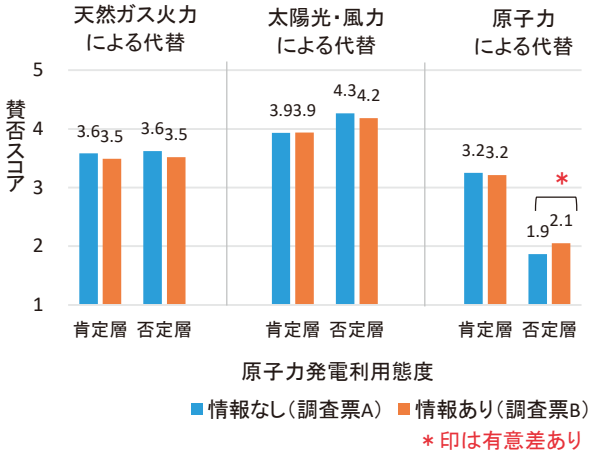


図 14　原子力発電利用態度別　情報提示効果

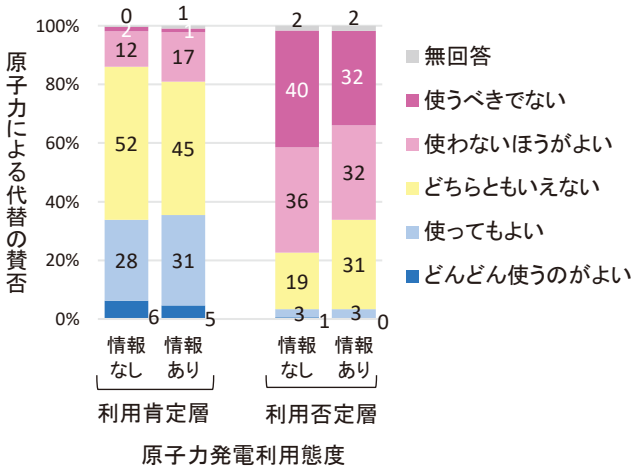


図 15　原子力発電利用態度別　情報提示の有無と原子力による代替の賛否

的に多いが，CO_2排出量が少ないという情報によって，否定的意見が少し和らいだと考えられる．

事前予想では，利用肯定層は基本的に原子力の利用を容認しているのだから，CO_2 排出量が少ないという長所を知れば，石炭火力の代替に使うことについても態度保留から賛成に変わる可能性があると思われた．しかし，利用肯定層では情報提示の効果はなかった．

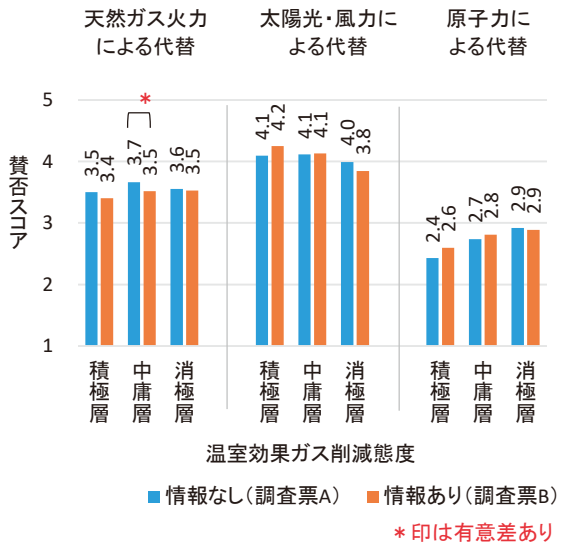


図 16　温室効果削減態度別　情報提示効果

5.3　温室効果ガス削減態度と効果の関係

図 16 は温室効果削減態度別の比較である．有意差があるのは中庸層の天然ガス火力による代替についてのみで，情報提示でスコアが 0.2 低かった．参考までに具体的な回答分布であらわすと，肯定的意見が 62%から 55%に減り，否定的意見が 4%から 9%に増えた．原子力による代替についてはどの層でも有意差がなかった．積極層というのは「世界に率先して温室効果ガスを削減する」という層である．削減効率を優先するならば，原子力は CO_2 排出が少ないという情報の効果も現れやすいのではないかと考えられたが，その積極層においてさえ効果は有意ではなかった．

5.4　属性や情報接触と効果の関係

表 3 は人口統計的属性やマスメディア接触度別に代替の賛否スコアを比較している．スコアは大きいほど代替に肯定的なことをあらわす．情報なしの欄でスコアのレンジ（最大値と最小値の差）を比較すると，天然ガス火力は 3.5～3.8，太陽光・風力は 3.9～4.2，原子力は 2.6～3.1 であった．レンジは，人口統計的属性やマスメディア接触度別にみても，それほど異なら

表 3　人口統計的属性・情報接触度別　賛否スコアでみる情報提示効果

		人数		賛否スコア					
				天然ガス火力による代替		太陽光・風力による代替		原子力による代替	
		情報なし	情報あり	情報なし	情報提示効果	情報なし	情報提示効果	情報なし	情報提示効果
性別	男性	243	243	3.7	−0.11	4.1	−0.12	2.9	−0.01
	女性	259	248	3.5	−0.09	4.0	0.06	2.7	0.08
年齢	10 代, 20 代	83	77	3.6	−0.11	4.1	−0.15	3.1	−0.18
	30 代	77	72	3.5	−0.12	3.9	0.08	2.9	0.16
	40 代	90	107	3.6	−0.11	4.1	−0.05	2.7	0.06
	50 代	88	80	3.5	0.09	4.0	0.14	2.6	0.14
	60 代	83	79	3.7	−0.32*	4.2	−0.09	2.6	−0.06
	70 代	81	76	3.7	0.00	4.0	−0.11	2.6	0.11
学歴	高卒まで	216	206	3.6	−0.13	4.0	−0.01	2.8	−0.03
	専修学校卒	57	60	3.5	−0.04	4.0	0.05	2.7	0.28
	短大・高等専門学校卒	75	71	3.6	−0.13	4.2	−0.26	2.6	0.22
	大学院・大卒以上	152	150	3.6	−0.05	4.1	0.02	2.8	−0.06
新聞	よく読む	85	97	3.8	−0.15	4.0	0.07	2.7	−0.07
	やや読む	122	104	3.7	−0.14	4.0	0.06	2.8	−0.11
	あまり読まない	293	287	3.5	−0.07	4.1	−0.07	2.8	0.14
ＴＶニュース	よく見る	175	174	3.6	−0.07	4.0	0.05	2.7	−0.12
	やや見る	229	213	3.6	−0.09	4.0	0.03	2.7	0.04
	あまり見ない	96	103	3.6	−0.17	4.1	−0.27*	2.9	0.27

注：「情報なし」は調査票 A，「情報あり」は調査票 B.
注：「情報提示効果」は情報ありと情報なしの賛否スコアの差．値が正ならば肯定方向への変化を，負ならば否定方向の変化をあらわす．＊印はスコアの差が有意．

なかった．レンジが相対的に大きいのは，原子力についての年齢層で，10 代・20 代が 3.1 で肯定的，50 代以上が 2.6 で否定的であった．

「情報提示効果」の欄は，情報ありと情報なしの賛否スコアの差であり，正の値ならば肯定方向への変化を，負の値ならば否定方向への変化を意味する．有意差があるのは，60 代の天然ガス火力と，テレビニュースをあまり見ない層の太陽光・風力のみで，それぞれ -0.32 と-0.27 の否定方向へのわずかな変化であった．原子力はどの層でも情報提示効果はなかった．つまり，人口統計的属性やマスメディア接触度によって肯定・否定の効果の方向が異なるために，全体では相殺されて効果が検出されなかったというのではなく，どの層にも情報は影響しなかったことが確認できる．

「大学院・大卒以上」の高学歴層でも効果がなかったことは，表形式で提示された CO_2 排出量の数値の解釈が難しいために効果がなかったという説明は成り立ちにくいと思われる．

6. 情報提示効果がなかった要因の探索

6.1 情報提示後の低炭素性の認知

情報を提示した調査票 B では，その後方に位置する質問で「原子力発電では，発電時に地球温暖化の原因物質とされる CO_2 が排出されていない」について正誤をたずねた．「正しいと思う」は 27%にとどまり，「正しくないと思う」が 32%，「わからない」が 38%を占めた．次項の質問と比べて「わからない」がやや多いのは，「発電時」や「排出しない（＝ゼロ）」を厳密にとらえて判断された影響も考えられる．

調査票 A とは質問が異なるので，情報提示が認知に与えた効果は把握できないが，少なくとも，図 2 の原子力の CO_2 排出量が少ないという数値情報を見ても，発電時に CO_2 を排出しないという認識にはならないことが確認できる．これは，原子力による代替の賛否に情報提示による効果がなかったことと整合する．

6.2 低炭素性の認知と態度の関係

情報を提示していない調査票 A では，「原子力発電は CO_2 の排出が少ないというのは疑わしい」と思うかをたずねた．「強く・ややそう思う（懐疑層）」は 32%，「あまり・全くそう思わない（非懐疑層）」は 42%，「わからない」は 26%であった．前項の正誤の質問に比べると「わからない」は少ないが，原子力発電の低炭素性に懐疑的な人は，前項で「正しくない」とした人とほぼ同程度である．

図 17 は低炭素性の認知別に原子力による代替の賛否を示している．「懐疑層」と「わからない層」の賛否に違いはない．「非懐疑層」では肯定は約 20 ポイント多いが，それでも 35%しかなかった．原子力発電の低炭素性に特に疑いを持たない層でも，原子力による代替を肯定しない人のほうが多い．

図 18 は低炭素性の認知別の原子力発電の温暖化対策有効性の評価である．図 17 と同様に，「懐疑層」と「わからない層」の有効性評価に大きな違いはなく，「非懐疑層」では有効性を認める人が約 30 ポイント多いが，それでも 54%であった．人々にとって「CO_2 排出が少ない」と「温暖化対策として有効」は同義ではないことを示している．

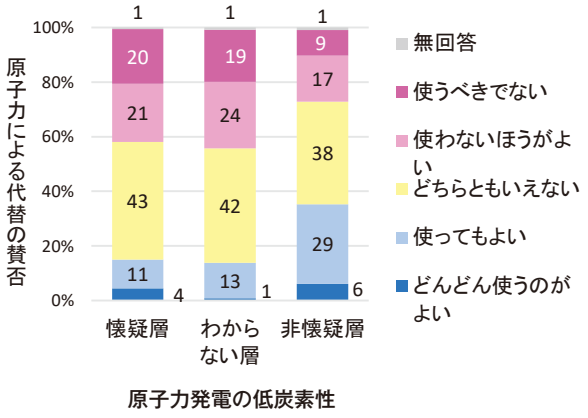


図 17　低炭素性の認知別　原子力による代替の賛否

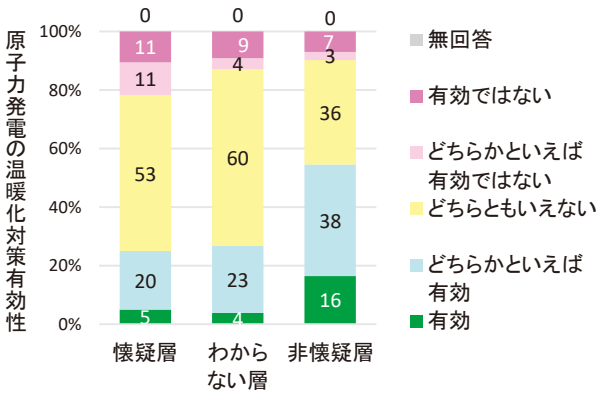


図 18　低炭素性の認知別　原子力発電の温暖化対策有効性

6.3 原子力発電の低炭素性はどの層で認知されているか

低炭素性の認知を人口統計的属性やマスメディア接触度別に示したのが図 19 である．どの層においても，「強くそう思う」も「全くそう思わない」もわずかであり，原子力発電は CO_2 排出が少ないのかどうかに確信がないことがうかがえる．

非懐疑層の比率は，男性では 51%で女性より 18 ポイント多かった．年齢では 60 代で 47%，10 代・20 代で 46%と多く，70 代では 34%で相対的に少なかった．これまでの研究では，原子力発電の利用態度は女性より男性のほうが肯定的，年齢では若年層が肯定的で，60 代が否定的な傾向が認められている（北田，2019）．男性や若年層で低炭素性の認知が高いことは，利用態度が肯定的な傾向に一致するが，60 代の利用態度が否定的なのは，低炭素性の認知が他の層より低いという理由ではないといえる．

「大学院・大卒以上」の高学歴層でも非懐疑層は 45%にとどまる．原子力の CO_2 排出量が少ないことは，教育課程で学んだ知識ではなく，その知識から単純に類推できるものでもないことを示している．

また，新聞やテレビニュースによく接する層でも非懐疑層は 41%，42%であり，接触度の低い層より多いわけではない．むしろ，テレビニュースをあまり見ない層のほうが 47%で若干多かった．日ごろ新聞やテレビニュースに接していても，原子力は CO_2 排出量が少ないという情報には触れていないことが示唆される．

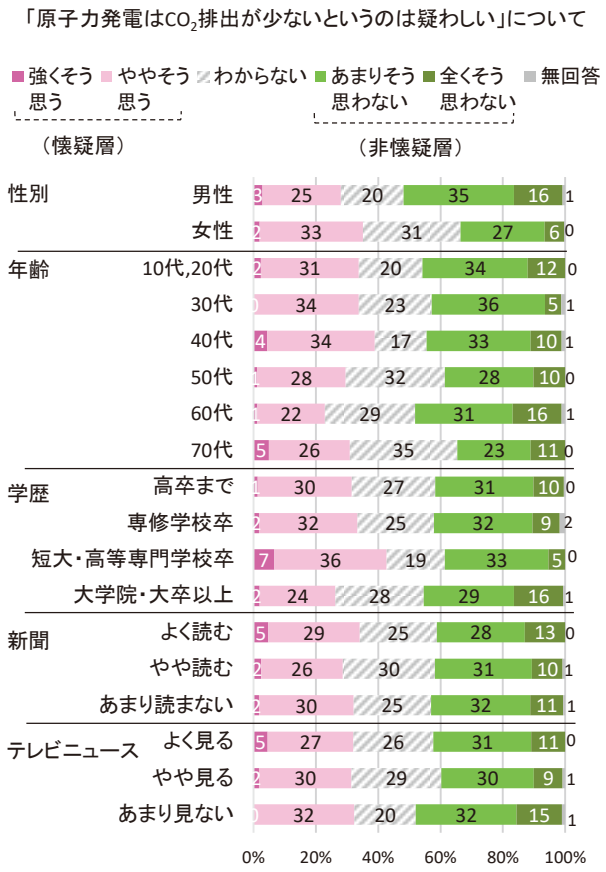


図 19　属性・情報接触別　低炭素性の認知

6.4 人々がニュースで接した情報

「最近，原子力に関して，テレビや新聞，インターネットのニュースなどで見聞きして印象に残っていることがあれば，なんでもご自由にお書きください」という質問に，「覚えていない」「あまり見ない」も含めて何らかの記述をしたのは 1007 人中，389 人であった．

記述内容は，福島第一原子力発電所事故の処理水に関するものや放射性廃棄物に関するものが相対的に多かった．これは調査実施時期に，処理水の海洋放出や，高レベル放射性廃棄物の最終処分地選定の文献調査に寿都町と神恵内村が応募するという報道があったためと思われる．福島第一原子力発電所事故から 9 年半経過したが，「福島」の文字列を含む記述も 73 人であった．

一方，「温暖化」「温室」「炭素」「CO_2」の文字列をいずれか 1 つでも含む記述はわずか 1 人であった．具体的には「原子力発電を取り巻く環境の変化，地球温暖化や経済への影響」（女性 70 代）という記述で，唯一，地球温暖化にとって原子力発電を肯定的にとらえているとみられる内容であった．

「環境」の文字列を含む記述は，前段の 1 人を除けば 4 人であり，いずれも原子力発電が環境汚染や環境破壊をもたらすととらえる内容であった．

以上の結果は，原子力発電を温暖化対策に関連づけたり，環境の文脈で原子力発電を肯定したりする内容を，人々がマスメディアで見聞きしていないことを示している．

7. まとめ

7.1 原子力による石炭火力代替の受容性

CO_2 排出の多い旧式の石炭火力発電所を廃止し，CO_2

排出を抑えた新型（高効率）の建設は認めるという政府方針に反対する人は少なく，おおむね支持されていた．新型の建設も認めない人は 1 割であり，国際社会では石炭火力発電の全廃を求める声が強いが，日本の世論における石炭火力発電に対する忌避感はそこまで強くないといえる．

質問文のなかで休廃止の目的は温室効果ガスの削減であり，石炭火力発電は CO_2 排出が多いことを説明していたので，温室効果ガスの削減に積極的であれば新型の建設も認めず，削減に消極的であれば休廃止に否定的というような関係を想定していた．しかし，そのような関係は認められず，石炭火力発電の休廃止の賛否に温室効果ガス削減態度はあまり関係していないことがわかった．

さらに，石炭火力発電が電力の 32%を賄う実績と資源が豊富で安いというメリットの情報を提示しても，休廃止についての賛否は変わらなかった．この結果からは，人々は石炭火力発電を減らす是非を判断しているだけで，それによる減少分をどうするか，何で代替するか，安い石炭を使わなければ電気料金はどうなるかなど，電力供給の問題としてとらえて判断しているのではないことが示唆される．

石炭火力発電の代替として肯定する人の割合は，太陽光・風力発電については 8 割，天然ガス火力発電は 6 割だが，原子力発電は 2 割と大幅に少なかった．原子力発電については，否定する人が 3 割台で肯定より多く，態度保留が 4 割を占めた．この原子力発電による代替の賛否は，原子力発電の利用についての基本的態度に強く規定されているものの，基本的態度は利用もやむをえないと容認していても，石炭火力発電の代替として使う，すなわち脱炭素化に位置づけて活用するとまでは認識されていないことが明らかとなった．

原子力発電による代替の賛否は，温室効果ガス削減態度と弱い負の相関があり，削減に積極的なほうが原子力発電による代替に否定的であった．これは，先行研究における，環境優先意識が強いほど原子力発電の利用に否定的であるとの結果（北田． 2019； 北田，2020a）と整合する．

7.2 再生可能エネルギーとの関係

回答者全体では原子力発電による代替の賛否と太陽光・風力発電による代替の賛否には負の相関があり，再生可能エネルギーによる代替を肯定するほうが原子力発電による代替に否定的な傾向があった．しかし，再生可能エネルギーと原子力発電の共存についての考え方で層別すると，負の相関は再生可能エネルギー単独支持層のみにあり，共存を肯定する層に負の相関はなかった．全体の 7 割以上を占める共存肯定層は，再生可能エネルギーと原子力発電のどちらで代替するかというような二者択一ではとらえてはいないことが示唆された．再生可能エネルギーを否定できなければ原子力による代替が人々に受け入れらないと考えるのは適切ではないと思われる．

再生可能エネルギーの可能な限りの拡大は政策目標である．再生可能エネルギーの短所を必要以上に強調することは，むしろ、再生可能エネルギーか原子力発電かの選択の問題であるかのような誤ったメッセージになる可能性がある。再生可能エネルギーと原子力発電を対立させる構図にしないことが重要と考えられる．

7.3 CO_2 排出量の情報を提示する効果

北田（2020a）と同様に，今回の調査でも原子力発電は CO_2 排出が少ないことに懐疑的，あるいは判断保留が 6 割を占め，低炭素性の認知が低いことが再確認された．そこで，CO_2 排出削減が目的であることを説明し，判断材料となる情報として，各発電方法の 1kWh 当たりの CO_2 排出量の比較表を提示した．しかし，原子力発電の CO_2 排出量が太陽光・風力発電と同等に少ないことが数値で示されていても，原子力発電で代替することへの肯定は増えず，天然ガス火力発電の CO_2 排出量が原子力発電より 1 桁多いことが数値で示されていても，天然ガス火力発電による代替にそれほど否定的にはならなかった．

温室効果ガスの削減に積極的であれば，CO_2 排出量を判断基準に用いるのではないかと予想したが，積極層においてさえも CO_2 排出量の情報に効果はなかった．

さらに，CO_2 排出量の比較表を見た後も，「原子力は発電時に CO_2 を排出していない」を正しいと思う人は 3 割しかなかった．CO_2 排出量の情報だけでは代替発電方法の賛否に影響しないばかりか，原子力発電は CO_2 排出が少ないことが認知される，すなわち正確な知識を付与するという目的においても効果が得られにくいことがわかった．

7.4 情報提示効果がなかった要因

7.4.1 原子力発電の低炭素性の納得

高学歴層でも原子力発電は CO_2 排出が少ないことに懐疑的あるいは，判断保留が過半数であったこと，また，高学歴層でも CO_2 排出量の情報を提示しても代替発電についての賛否が変わらなかったことから，次の2点が示唆される．1つは，効果がなかった理由として，今回の提示情報が説明文もなく CO_2 排出量の数値を表で示すものであったために内容が理解されなかったというような，数値情報を読み取るリテラシーの不足とは考えにくい．

もう1つは，原子力の低炭素性は，教育課程で学ぶ知識ではなく，その知識から類推できるものでもないということである．化石燃料を燃焼させると，化石燃料に含まれる炭素と空中の酸素が結合して CO_2 が発生することは理科の知識である．しかし，原子力発電の基本的なしくみのイメージがない人にとって，この知識だけでは原子力発電が CO_2 を排出するのかしないのかはわからない．火力発電は化石燃料の燃焼で発生する熱でタービンを回して発電するのに対し，原子力発電はウラン燃料の核分裂で発生する熱でタービンを回して発電すること，原子力発電の発電過程に化石燃料の燃焼はないこと，ウラン燃料は化石燃料ではないこと，ウラン燃料の核分裂では CO_2 も他の温室効果ガスも発生しないことなど，説明する側が基本知識で説明するまでもないと思うことでも，受け手に応じて説明し，知識を補うことによって原子力発電の低炭素性が了解されるかもしれない．検討の余地がある．

原子力発電の低炭素性の認知がマスメディア接触度の高い層でも同様に低かったこと，また，原子力発電に関連してマスメディアで見聞きしたことの自由記述において，「温暖化」「CO_2」「炭素」という言葉や，「環境」の文脈で原子力を肯定的にとらえた内容がほぼなかったことは，人々が原子力発電の低炭素性や有効な温暖化対策であるという情報をマスメディアから得ていない実態を示すと考えられる．裏返せば，マスメディアが伝えていないことがうかがえる．

なぜ，知識にならなかったのかを考えると，原子力発電には放射性廃棄物など環境にとっての負の側面があることが，温暖化対策として受け入れられにくい要因であることが指摘されている（深江，2006；北田，2020a）．そもそも人々は CO_2 排出量を判断基準として重視していなかったうえに，情報提示の質問は調査票の最後部に置かれており，回答疲れの状態にあったと考えられる．そのような状況で CO_2 が判断基準と言わんばかりに各発電方法の CO_2 排出量の比較表を提示されても，情報に対する関心や動機付けが弱いために，認知処理されなかったと考えることができる．納得の過程もなく，与えられた情報を鵜呑みにして判断規準に採用しないことは，情報に対するリテラシーとして必ずしも不適切ともいえない．少なくとも，発電方法の CO_2 排出量の比較という今回の情報には，一見するだけで人々の認識を変えるほどの説得力はなかったといえる．

7.4.2 温暖化対策の全体像の理解

原子力発電は CO_2 排出が少ないということに疑いをもたない層においても，原子力発電が温室効果ガスの削減に有効だと思う人は54％であった．人々にとって「CO_2 排出が少ない」と「温暖化対策として有効」は同義ではないといえる．CO_2 排出が少ないというのは原子力発電の性質の1つでしかなく，温暖化対策として有効かどうかは，放射性廃棄物など切り離すことのできない環境負荷を差し引いた総合評価なのかもしれない．

CO_2 排出量の情報が，石炭火力発電の代替の発電方法の賛否にほとんど影響しなかったことは，人々が CO_2 排出量の違いに着目していないこと，CO_2 排出量を基準に発電方法を選択する構えがないことを示すと考えられる．これは，CO_2 削減方法として発電分野が特に認識されているわけではなく（北田，2020a），電源選択において CO_2 排出量の多い発電方法を避けることはそれほど重視されていない（北田，2019）という先行研究の結果とも整合する．

本稿の結果から，温室効果ガス削減における石炭火力発電削減の重要性が十分認識されていないことが浮かび上がる．CO_2 削減方法としては，運輸部門の電化，省エネルギー，省資源，ごみの削減，再生可能エネルギーの拡大，緑化・森林保護など，社会のすべての分野にわたってさまざまな取り組みが存在する．個々の取り組みによって削減できる CO_2 の量の規模感はなく，CO_2 削減方法としての軽重はわからない．大多数の人にとって石炭火力発電を減らすことは，それら無数に存在する削減方法の1つに過ぎないために，その賛否が温室効果ガス削減態度に強く結びついていないと

考えられる．

7.5　今後に向けて

現状では原子力発電を石炭火力発電の代替とすることには態度保留が多く，受容性は高くない．原子力発電は CO_2 排出が少ないことが認知されておらず，単に CO_2 排出量の比較表を示せば了解されて判断材料になるというものでもないことがわかった．

温暖化対策，気候変動対策，脱炭素化，カーボンゼロ，カーボンニュートラル，温室効果ガス削減などさまざまな言葉で語られ，人々は変化を迫られていることは感じている．それらは具体的には CO_2 の削減であり，核心は CO_2 を排出しないエネルギーへの転換であることが認識される必要がある．そのうえで，原子力発電の低炭素性と CO_2 削減における価値が納得されるような説明が可能となると思われる．

引用文献

深江　千代一（2004）．原子力発電が地球温暖化の原因と考える人々の認識　INSS JOURNAL, 11, 50–61.

深江　千代一（2006）．地球温暖化防止対策としての原子力発電の有用性に関する意識構造　INSS JOUNAL, 13, 64–77.

環境省（2020）．電気事業分野における地球温暖化対策の進捗状況の評価結果について（参考資料集）2020年７月14日 <https://www.env.go.jp/press/files/jp/114277.pdf>（2021年８月３日）.

北田　淳子（2011）．エリア・サンプリングの実践的検討 ――INSS'07における「地図DB法」と「現地積上法」の比較　行動計量学, 38(1), 13–32.

北田　淳子（2013）．継続調査における質問変更と時系列比較可能性の検討 ―― 発電方法の特徴についての情報が電源選択に及ぼす影響　日本行動計量学会第41回大会抄録集，338–341.

北田　淳子（2019）．原子力発電世論の力学 ――リスク・価値観・効率性のせめぎ合い　大阪大学出版会.

北田　淳子（2020a）．温暖化対策として原子力発電の受容が高まらない要因　INSS JOURNAL, 27, 43–57.

北田　淳子（2020b）．原子力発電世論の力学　日本調査協会報よろん，126, 20–48.

桑垣　玲子・服部　徹（2021）．日英国民の原子力発電と気候変動に関する意識 ―― 福島原子力事故前後に実施された先行研究と2020年調査結果の比較を中心に　電力中央研究所研究資料，Y20503 <https://criepi.denken.or.jp/jp/serc/source/pdf/Y20503.pdf>（2021年８月３日）.

みずほ情報総研株式会社　環境エネルギー第１部（2020）．「気候変動に関する国民の意識調査」報告書 <https://www.mizuho-ir.co.jp/publication/report/2020/pdf/climate1222.pdf>（2021年８月３日）.

内閣府（2016）．「地球温暖化対策に関する世論調査」の概要　平成28年８月調査 <https://survey.gov-online.go.jp/h28/h28-ondanka/gairyaku.pdf>（2021年８月３日）.

内閣府（2021）．「気候変動に関する世論調査」の概要　令和２年11月調査 <https://survey.gov-online.go.jp/r02/r02-kikohendo/gairyaku.pdf>（2021年８月３日）.

日本財団（2021）．18歳意識調査「第34回　脱炭素」詳細版 <https://www.nippon-foundation.or.jp/app/uploads/2021/02/new_pr_20210225_6.pdf>（2021年８月３日）.

杉山　明子（1992）．社会調査の基本 現代人の統計３　朝倉書店.

鈴木　達三・高橋　宏一（1998）．標本調査法 シリーズ調査の科学２　朝倉書店.

Appendix

質問文と 2020 年の回答比率（本稿関連のみ）

問　あなたはふだん新聞をよくお読みになりますか，それともあまりお読みになりませんか.

1. よく読むほう　18.4%
2. やや読むほう　23.0%
3. あまり読まないほう　58.1%
   無回答　0.5%

問　あなたはふだんテレビでニュースや報道番組をよく見ますか，それともあまり見ませんか.

1. よく見るほう 35.3%
2. やや見るほう 44.5%
3. あまり見ないほう 20.0%
   無回答 0.3%

問　電力の供給を増やせば，経済のゆとりや快適な生活ができるが，環境汚染，自然破壊がそれに伴うおそれがあります．電力の供給を増やさなければ，環境汚染，自然破壊が抑えられますが，経済力が低下し生活の不便をがまんしなければならないおそれがあります．この点についてあなたのお考えをお聞かせください.

ここにある５枚のシールを，あなたの気持ちに応じてＡ，Ｂ２つの意見にふりわけ，下の枠内に貼りつけてください．シールは５枚すべてを使いきってください.

Ａ：ある程度の環境汚染・自然破壊がともなうことがあっても，経済のゆとりや快適な生活のため，電力供給を増やす.
Ｂ：環境汚染・自然破壊を抑えるため，経済力が低下し生活の不便をがまんしなければならなくなるとしても，電力供給を増やさない.

	Ａの意見	Ｂの意見
０枚	7.4%	5.2%
１枚	15.4%	11.1%
２枚	31.2%	29.6%
３枚	29.7%	31.2%
４枚	11.1%	15.4%
５枚	5.0%	7.3%
無回答	0.2%	0.2%
平均	2.37 枚	2.63 枚

問　原子力発電についていろいろおたずねしましたが，全体としてあなたのお考えに近いものを次の中から１つだけ選んでその番号に○をつけてください.

1. 安全性には配慮する必要があるが，原子力発電を利用するのがよい 11.1%
2. 安全性には多少不安があるが，現実的には原子力発電を利用するのもやむを得ない　52.7%
3. 高いコストや環境への悪影響が伴うとしても，原子力発電よりも安全な発電に頼るほうがよい　27.0%
4. 不便な生活に甘んじても，原子力発電は利用すべきではない　8.5%

無回答　0.6%

問　最近，原子力発電に関して，テレビや新聞，インターネットのニュースなどで見聞きして印象に残っていることがあれば，なんでもご自由にお書きください.

問　原子力発電は，地球温暖化対策として有効だと思いますか，有効ではないと思いますか.

1. 有効　9.1%
2. どちらかといえば有効　28.4%
3. どちらともいえない　48.2%
4. どちらかといえば有効ではない 7.1%
5. 有効ではない　7.1%
   無回答　0.2%

問　日本は温室効果ガスの排出量の削減にどの程度取り組むのがよいと思いますか．あなたのお気持ちに最も近いものを１つ選んでください.

1. 世界に率先してたくさんの量を削減する　18.3%
2. 国際的に公平な量を削減する 43.2%
3. 経済や国民生活に影響のない量を削減する　35.6 %
4. 削減する必要はない　1.9%

   無回答　1.1%

【調査票 A のみ】問　原子力発電と再生可能エネルギーの関係について，次のような意見があります.
（ア）あなたが同意できるものをいくつでも選んで，その番号に○をつけてください.

（イ）アで○をつけたなかで，あなたが最も同意できる意見の番号を１つ下の枠内に書いてください.

（ア，　イ）

1. 再生可能エネルギーがさらに発展しても限界があるので，技術や設備のある原子力発電を主力にする　10.3%　3.2%
2. 再生可能エネルギーを発展させる一方で，原子力発電も維持していく　37.9%　15.6%
3. 再生可能エネルギーにも原子力発電にも長所と短所があるので，組み合わせて両方の長所を活かす　61.7%　44.2%
4. 将来のエネルギーの状況に不安があるので，再生可能エネルギーと原子力発電の両方に分散してそなえるのがよい　37.1%　14.4%
5. 原子力発電を維持することにより，再生可能エネルギーの発展がさまたげられる　16.4%　8.7%
6. 再生可能エネルギーがさらに発展するのは確実なので，原子力発電の技術や設備が失われても将来にわたって困ることはない　20.5%　12.8%

   無回答　－　1.2%

【調査票 A】問　石炭火力は火力発電のなかでも CO_2 を最も多く排出します．政府は温暖化対策として，旧式の石炭火力発電所およそ 100 基を 2030 年までに休廃止し，石炭による発電量の 9 割を削減する方針です．ただし，CO_2 排出量をおさえた新型の石炭火力発電所の建設は認める方針です．このような方針についてどう思いますか．1 つ選んでください.

【調査票 B】問　石炭火力は火力発電

のなかでも CO_2 を最も多く排出します．一方，石炭火力は日本の発電量の 32%をまかなう主力電源です．石炭は資源が豊富で安いので，電気の安定供給や料金の抑制に役立っています．政府は温暖化対策として，旧式の石炭火力発電所およそ 100 基を 2030 年までに休廃止し，石炭による発電量の 9 割を削減する方針です．ただし，CO_2 排出量をおさえた新型の石炭火力発電所の建設は認める方針です．このような方針についてどう思いますか．１つ選んでください．

（調査票 A，　調査票 B）

1. このような方針でよい　45.0%　44.8%
2. 旧式のものを休廃止するだけでなく，新型の建設も認めないほうがよい　13.4%　12.0%
3. 無理して石炭火力発電所を減らさなくてよい　6.7%　9.6%
4. いちがいにいえない　33.1%　32.2%

無回答　1.8%　1.4%

【調査票 A】問　石炭火力の代わりに次の発電方法を使うことをどう思いますか．

【調査票 B】問　発電時だけでなく発電所の建設から廃棄されるまでを含めると，同じ量の電気（1kWh）を発電するために排出される CO_2 は，次のように発電方法によって大きく異なります．石炭火力の代わりに次の発電方法を使うことをどう思いますか．

火力			再生可能エネルギー			
石炭	石油	天然ガス(LNG)	太陽光	風力	水力	原子力
943g	738g	474g	38g	26g	11g	20g

出典：資源エネルギー庁の資料より

〈上段は調査票 A，下段は調査票 B〉

	代わりにどんどん使うのがよい	代わりに使ってもよい	どちらともいえない	代わりに使わないほうがよい	代わりに使うべきでない	無回答
（ア）天然ガス（ＬＮＧ）火力	8.5	49.3	35.7	4.5	1.2	0.8
	7.2	44.4	38.6	6.4	1.6	1.8
（イ）太陽光・風力（ただし，曇天や無風など天候によっては天然ガス（ＬＮＧ）火力で発電して補わざるをえません）	30.2	47.7	18.7	1.8	1.0	0.6
	31.4	42.8	21.6	2.0	1.2	1.0
（ウ）原子力発電	4.1	18.9	40.4	20.5	15.2	0.8
	3.0	21.0	40.2	22.2	12.2	1.4

問　安全審査に合格した原子力発電所のプラントは，運転を再開してよいと思いますか，それとも，運転を再開すべきでないと思いますか．

1. 運転を再開してよい　28.4%
2. どちらともいえない　53.0%
3. 運転を再開すべきでない　18.2%

無回答　0.4%

【調査票 A のみ】問　CO_2 の削減に関連してさまざま意見があります．ア～コのそれぞれについて，そう思うか思わないか，あなたのお気持ちに近い番号を 1 つ選んでください．

（ウ）原子力発電は CO_2 の排出が少ないというのは疑わしい

1. 強くそう思う　2.6%
2. ややそう思う　29.0%
3. あまりそう思わない　31.4%
4. 全くそう思わない　10.7%
5. わからない　25.8%

無回答　0.6%

【調査票 B のみ】問　電気やエネルギー，原子力発電にかかわる以下の記述について，正しいと思いますか，正しくないと思いますか．深く考えずに率直にお答えください．

（ウ）原子力発電では，発電時に地球温暖化の原因物質とされる CO_2 が排出されていない

1. 正しいと思う　27.4%
2. 正しくないと思う　32.2%
3. わからない　38.2%

無回答　2.2%

問　あなたの性別をお聞かせください．

1. 男性　48.8%
2. 女性　51.2%

無回答　－

問　あなたの年齢をお聞かせください．

□□ 歳

18～29 歳　16.0%
30～39 歳　14.9%
40～49 歳　19.8%
50～59 歳　16.9%
60～69 歳　16.3%
70～79 歳　16.2%

無回答　－

問　あなたが最後に卒業された学校はどちらですか．（中退・在学中も卒業としてお答えください．）

1. 小学校・中学校卒　3.2%
2. 高校卒　39.6%
3. 専修学校卒（通称専門学校）　11.6%
4. 短大・高等専門学校卒　14.7%
5. 大学院・大学卒以上　30.2%

無回答 0.7%

INSS JOURNAL Vol. 28 2021 SR-5

使用済燃料の中間貯蔵施設に対する人々の受け止め

Change in perception of people towards information about interim storage facility for spent fuel

原　吉平（Yoshihei Hara）*1

要約　関西地域の都市部に住む市民20名を対象に，国や電力会社から公開されている使用済燃料の中間貯蔵施設に関する資料を用いてインタビュー調査を実施し，使用済燃料の中間貯蔵施設に対する情報の受け止め方を，説明前と説明後を比較して把握した．使用済燃料の中間貯蔵施設について聞いたことがあるという人は，説明前にも少数いたものの，詳しい内容を知っている人は殆どいなかった．また，使用済燃料の中間貯蔵施設に不安を感じますかと質問したところ，「非常に不安だ」，「かなり不安だ」という人は説明前では８人（40%）であったが，説明後では１人（5%）に減少し，「それほど不安はない」という人は説明前では０人であったが，説明後では12人（60%）に増加した．殆どの人が説明を聞いて説明前の時点で思っていた不安が減少したことがうかがえる．このように都市部の人々には，使用済燃料の中間貯蔵施設の必要性や安全性を確保するための対策が実施されていることが殆ど知られていない可能性がある．

キーワード　使用済燃料，中間貯蔵施設，中間貯蔵の必要性，安全性，インタビュー調査

Abstract　An interview investigation was carried out for 20 adult subjects living in urban areas in the Kansai region. Materials on interim storage facilities of spent fuel disclosed by the government and electric power companies were explained to the subjects and their perception of the received information on these facilities was compared between before and after the explanation. There were a few persons who had heard about the intermediate storage facilities before the present explanation, but even fewer of those persons knew the detailed contents. When asked whether they felt uneasy about interim storage facilities for spent fuel, eight persons (40%) answered “very uneasy” before the explanation but the number decreased to one person (5%) after the explanation and the number who answered “not so worried” increased from no one before the explanation to 12 persons (60%) after the explanation. It can be seen that the anxiety that most people had felt before the explanation decreased after listening to the explanation. Hence, it is possible to conclude that the people in urban areas hardly know anything about the measures to ensure the necessity and safety of interim storage facilities for spent fuel that have been implemented.

Keywords　spent fuel, interim storage facility, need for intermediate storage, safety, interview survey

1. はじめに

エネルギー基本計画（2018年７月閣議決定）では，我が国は，資源の有効利用，高レベル放射性廃棄物の減容化・有害度低減等の観点から，使用済燃料を再処理し，回収されるプルトニウム等を有効利用する原子燃料サイクルの推進を基本的方針としている．

また，使用済燃料を安全に管理することは原子燃料サイクルの重要なプロセスであり，対応の柔軟性を高め，中長期的なエネルギー安全保障に資するべく，発電所の敷地内外を問わず，中間貯蔵施設や乾式貯蔵施設等の建設・活用を促進することにより，使用済燃料の貯蔵能力の拡大を進めることとしている．

関西電力株式会社では，このような国の方針のもとあらゆる可能性を検討することにより，福井県外における中間貯蔵施設について，理解活動，可能性調査等を計画的に進め，2020年末*2までに計画地点を確定し，2030年頃に２千トンU規模で操業開

＊1　元(株)原子力安全システム研究所　社会システム研究所　現（公財）若狭湾エネルギー研究センター

始することとしている.

以上のような状況を踏まえ，今後，使用済燃料の中間貯蔵施設（以下「中間貯蔵施設」という）について，人々の関心が高まっていくことが予想される.

今回の調査では，中間貯蔵施設に関する資料を用いて，被験者一人ずつに説明と質疑応答を行うインタビュー調査を実施し，中間貯蔵施設に関する情報を提示する前と後での受け止めについての調査結果を報告する.

2. 中間貯蔵施設に関する資料

本調査で用いた情報提供資料について説明する.

高浜発電所など新規制基準に適合すると認められた原子力発電所については，原子力規制委員会による新規制基準適合性に係る審査結果に関する資料（原子力規制委員会，2016）が公表されている.

また，関西電力株式会社からは，原子力発電のしくみ，福島第一原子力発電所事故の教訓と新規制基準，新規制基準を踏まえた原子力発電所の安全対策，原子力発電所の使用済燃料対策，エネルギーの安定確保と原子力発電の必要性に関するコミュニケーションに活用することを目的とした資料（関西電力，2018）（関西電力，2019）が公表されている．これらの資料を，本調査において提供する情報を作成する際に参考資料として活用した.

3. 調査方法

3.1 調査概要

関西地域の都市部に住む被験者一人ずつに対して，インタビュー調査を計画した.

調査は，のべ10日間で実施した．調査時間は各回とも２時間とし，70分程度説明を行い，その後に50分程度意見を聞く時間を設けた．調査時期とサンプル数の実績は，以下のとおりである.

・調査時期：2020年９月～10月
・サンプル数：男性10人，女性10人

3.2 情報提供資料の作成

この調査では，上述の資料を参考にして，表１に示す情報提供資料を作成した.

情報提供資料は５部構成とした.

表１　提示した資料一覧

１．原子力発電のしくみ
- 原子力発電のしくみ（加圧水型炉）
- 原子力発電所のしくみ

２．福島第一原子力発電事故の教訓と新規制基準
- 福島第一原子力発電所事故における教訓
- 従来の規制基準と新規制基準

３．新規制基準を踏まえた原子力発電所の安全対策
- 事故発生防止
- 事故進展防止
- 重大事故に備えた訓練

４．原子力発電所の使用済燃料対策
- 原子燃料サイクルの概要
- 中間貯蔵施設の必要性
- キャスクの輸送
- キャスクの基本的安全機能
- 中間貯蔵施設の構造と貯蔵方式
- 中間貯蔵施設の安全性
- 国内外での中間貯蔵施設の実績
- 国内各社の使用済燃料対策方針

５．エネルギーの安定確保と原子力発電の必要性
- エネルギーの安定確保（1）
- エネルギーの安定確保（2）
- 各電源の発電（燃料）コスト
- 各電源のCO_2（二酸化炭素）排出量

最初に，「原子力発電のしくみ」と題して，原子力発電所のしくみ（加圧水型炉）など原子力発電に関する基礎的な事柄を説明し，以降の説明の参考とした.

第二に，「福島第一原子力発電所事故の教訓と新規制基準」と題して，福島第一原子力発電所事故の教訓に基づいて，従来の規制基準から重大事故の発生を防止するために強化された新規制基準の策定を紹介した.

第三に，「新規制基準を踏まえた原子力発電所の安全対策」と題して，新規制基準を踏まえて大飯発電所で行われている安全対策などについて具体的な内容を説明した.

第四に，「原子力発電所の使用済燃料対策」と題して，原子燃料サイクルの概要，原子力発電所で行

＊2　現在は，2023年末に計画が変更されている（関西電力（株）は，2021年２月24日，使用済燃料対策推進計画（2015年11月20日策定）を改訂し，経済産業省に報告している）

われている使用済燃料対策，中間貯蔵施設の必要性および安全性，国内外での中間貯蔵施設の実績，国内各社の使用済燃料対策方針などについて説明した．

最後に，「エネルギーの安定確保と原子力発電の必要性」と題して，主要国のエネルギー自給率や各資源の主な輸入先，各電源の発電（燃料）コスト，各電源のCO_2（二酸化炭素）排出量，原子力発電のベネフィットおよび必要性について説明した．

3.3　調査の内容

本調査では，前項で示した情報提供資料を配付し，説明台本により順を追って説明した．各説明の後に，資料の内容について質問があった場合には，出来る限り補足説明を行うなど双方向的な質疑応答を行った．

その上で，次に示すインタビュー調査，質問紙調査を実施した．

(1) インタビュー調査

資料を前述の順に説明した後，被験者に，それぞれの項目の内容や提示資料について意見を求めた．

(2) 質問紙調査

インタビュー調査の前後における被験者の意識変化を把握するため，説明の前後において，事前アンケート，事後アンケートを実施した．事前アンケートは被験者に事前に送付し，インタビュー調査当日の受付時に回収した．事後アンケートは，インタビュー調査における全ての質疑応答が終了した後に配付して，記入を求めた．

4.　調査結果

インタビュー調査および質問紙調査を実施した結果から得られた意見は以下のように整理できる．

4.1　原子力発電の利用態度

説明の前後において，原子力発電の利用についての意見（以下「利用態度」と略す）を，「利用するのがよい」，「利用もやむを得ない」，「安全な発電に頼るほうがよい」，「利用すべきでない」という４択で質問した．

得られた結果を図１に示す．

説明前では，原子力発電の利用態度が「利用するのがよい」，「利用もやむを得ない」（以下，利用肯定層）という人が85%であり，説明後は，全員が利用肯定層になった．

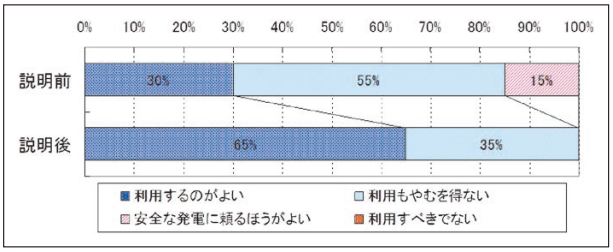


図１　原子力発電の利用態度

この質問は，北田（2019）が2016年10月に実施した世論調査と同一の質問文としており，北田の結果（利用肯定層が56%）と比較すると，利用肯定層が約３割多く，サンプルに偏りがあることが示されている．

本調査では，原子力発電をテーマとするインタビュー調査であることを事前に示し，調査会場に来場可能な調査協力者であることを要件として調査会社に依頼し募集を行ったため，原子力発電について肯定的な態度の人が多く参加していること，また，原子力発電を利用すべきでないと考える人が含まれていないことが推定される．本稿の議論は，このような偏りを踏まえて理解されるべきである．

4.2　使用済燃料の安全性に対する受け止め

説明後において，使用済燃料を安全に貯蔵・管理できると思うかについての意見を，「出来ると思う」，「どちらかというと出来ると思う」，「どちらともいえない」，「どちらかというと出来ないと思う」，「出来ないと思う」，「わからない」という６択で質問した．得られた結果を図２に示す．

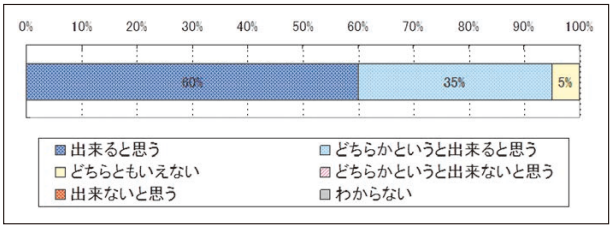


図２　使用済燃料の安全性に対する受け止め

説明後には「出来ると思う」が60%と最も多く，「どちらかというと出来ると思う」を合わせて95%の人が，使用済燃料を安全に貯蔵・管理できると認識している．

4.3　中間貯蔵施設に対する不安

説明の前後において，中間貯蔵施設に対してどの程度不安を持っているのかを，「それほど不安はない」，「少し不安だ」，「かなり不安だ」，「非常に不安だ」，「知らなかった」という５択で質問した．

得られた結果を図３に示す．

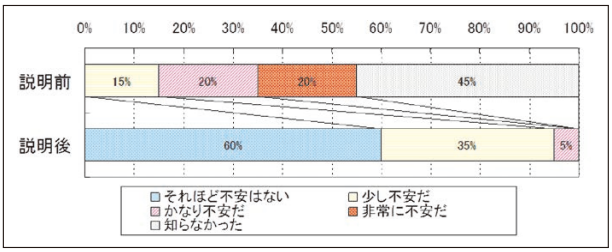


図３　中間貯蔵施設に対する不安

説明前では，「知らなかった」という人が45%と最も多く，次いで，「かなり不安だ」，「非常に不安だ」という人が，それぞれ20%であった．

説明後に，「かなり不安だ」，「非常に不安だ」という強い不安を持つ人が5%に減少し，「それほど不安はない」という人がゼロから60%に増加した．

資料と説明によって，中間貯蔵施設に対する不安が大幅に軽減されているといえる．

4.4　中間貯蔵施設に対する認知・理解

説明の前後において，中間貯蔵施設の説明内容について，どの程度認知・理解しているのかを，「以前から知っていた（分かっていた）」，「今日の話を聞いて初めて分かった」，「今日の話を聞いても分からない」という３択で質問した．得られた結果を図４に示す．

説明前の時点で，以前から知っていた（分かっていた）という項目は，「使用済燃料を再利用できること」が35%であったが，その他の項目は10%以下であり，中間貯蔵施設や使用済燃料については，殆ど知られていない．

説明後は，各項目とも「今日の話を聞いて初めて分かった」という人が殆どであり，説明内容が概ね理解されていると考えられる．

ただし，「使用済燃料プールが満杯になれば，原子力発電所を運転できなくなること」や「使用済燃料を収納したキャスクを，中間貯蔵施設に輸送する際，放射線や密封性が検査され，安全が確認されること」については，説明後でも理解できない人がいたことから，理解しにくい点があると考えられる．

4.5　中間貯蔵施設の必要性に対する受け止め

説明後において，中間貯蔵施設の必要性（必要・不必要）についての意見を，「必要」，「どちらかといえば必要」，「どちらでもない」，「どちらかといえば不必要」，「不必要」という５択で質問した．

得られた結果を図５に示す．

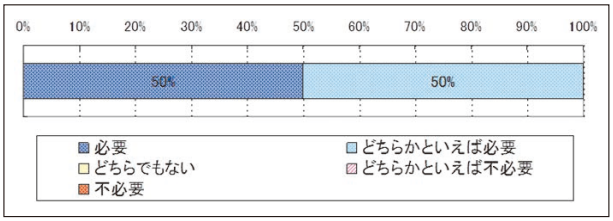


図５　中間貯蔵施設の必要性に対する受け止め

「必要」，「どちらかといえば必要」という人がともに50%であり，全員が中間貯蔵施設は必要であ

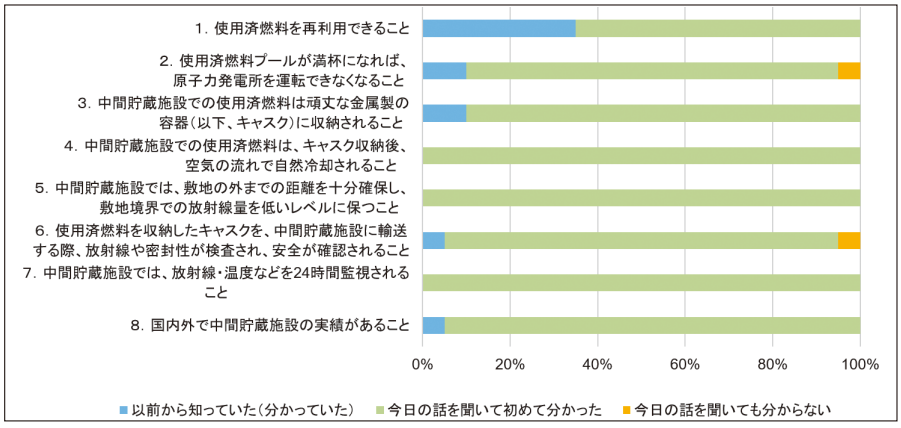


図４　中間貯蔵施設に対する認知・理解

ると認識している.

4.6 居住地域が中間貯蔵施設の候補地になった場合の賛否

説明後において，居住地域が中間貯蔵施設の候補地になった場合の賛否についての意見を，「賛成」,「どちらかといえば賛成」,「どちらでもない」,「どちらかといえば反対」,「反対」という５択で質問した.

得られた結果を図６に示す.

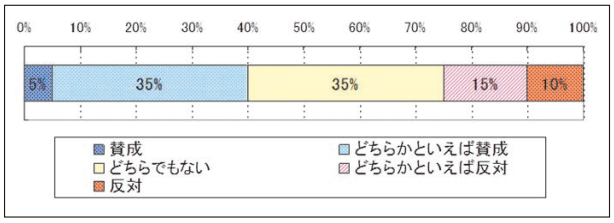


図６　居住地域が中間貯蔵施設の候補地になった場合の賛否

「どちらかといえば賛成」,「どちらでもない」という人がともに35%と最も多く，次いで「どちらかといえば反対」が15%,「反対」が10%,「賛成」が5%と意見が分かれている.

4.7 中間貯蔵施設に対する主な意見

次に，インタビュー調査において得られた意見のうち，中間貯蔵施設に対する主な意見を区分毎に整理した．その結果を表２に記す.

今回の被験者には，中間貯蔵施設について詳しい知識を持っていると思われる人は殆どいなかった.

使用済燃料プールが満杯になると原子力発電所を運転できなくなること，使用済燃料がリサイクル（再利用）できることを知っている人は，説明前には殆どいなかった．また，使用済燃料がリサイクル（再利用）できることについて，殆どの人が肯定的に受け止めていた.

キャスク保管等の安全性については，原子力発電所と比べると比較的安全な施設であると受け止められていた．その理由を明確に述べる人は少ないが，放射線がキャスクによって遮蔽されて，さらに距離によってレベルが低減されていること，人が監視していることなどをあげる人がみられた.

一方，使用済燃料がキャスクに入れられているにも関わらず，放射線がキャスクの外側に出ていることに不安を感じる人や，キャスク輸送中の事故が心配という人がいた.

表２　中間貯蔵施設に対する主な意見

区分	中間貯蔵施設に対する主な意見
認知	・中間貯蔵施設が，どのような施設なのか知らなかった
	・関西電力が福井県外に中間貯蔵施設を建設する計画があることは知らなかった
必要性	・使用済燃料プールが満杯になると原子力発電所を運転できなくなることは知らなかった
	・使用済燃料がリサイクル（再利用）できることは知らなかった
	・使用済燃料がリサイクル（再利用）できることは良いと思う
安全性	・放射線がキャスクによって遮蔽されて，さらに距離によってレベルが低減されていることや，人が監視していることが分かって安心した
	・使用済燃料がキャスクに入れられているにも関わらず，放射線がキャスクの外側に出ていることに不安を感じる
	・キャスク保管等の安全性について難しいことは分からない
	・キャスク輸送中の事故が心配
	・船でキャスクを輸送するので，地震による津波が心配
	・原子力発電所と比べると比較的安全な施設であると思う
	・原子力発電所より中間貯蔵施設の安全性の方が不安である
建設場所	・原子力発電所の敷地内に中間貯蔵施設を建設した方が，目が届きやすく，輸送も安心だと思う
	・中間貯蔵施設は，必要な施設であると思うが，自分が住んでいる所の近くに建設することは反対
	・原子力発電所で事故があった場合のことを考えると，リスク低減のために原子力発電所の敷地外に建設する方が良い

また，キャスクを船で運搬することから，中間貯蔵施設は海の近くに設置することになるのかと質問する人が複数いた．船によるキャスク輸送や地震の時の津波の危険性を危惧している様子であった.

原子力発電所の敷地内に中間貯蔵施設を建設した方が，「目が届きやすい」,「輸送も安心」などの理由で，良いと思うという意見の人が多かった.

一方で，原子力発電所で事故があった場合のことを考えると，リスク低減のために原子力発電所の敷地外に建設する方が良いという意見を持つ人は少数

であった.

中間貯蔵施設を建設するとなった場合は,「必要な施設であると思うが，自分が住んでいる所の近くに建設することは反対」など，NIMBYの観点から否定的な意見の人が多かった.

5. 考察

図４および表２で示したように，説明前の中間貯蔵施設に対する受け止めでは，原子力発電に肯定的な人々であっても，使用済燃料や中間貯蔵施設について詳しく知っている人は殆どいなかった.

説明後は，使用済燃料や中間貯蔵施設について,「説明を聞いて初めて分かった」という人が殆どであり，説明内容は概ね理解されていた.

説明後の中間貯蔵施設に対する受け止めでは,安全性の認識については,使用済燃料を安全に貯蔵・管理できると思う人は95%であった.

中間貯蔵施設に対する不安は，説明後には，強い不安を持つ人が大幅に減少し,「それほど不安はない」とする人がゼロから60%に増加した.

中間貯蔵施設に対する必要性の認識については,全員が中間貯蔵施設は「必要」または「どちらかといえば必要」という回答であり，必要性を認めていた.

居住地域が中間貯蔵施設の候補地になった場合の賛否については,「賛成」または「どちらかといえば賛成」という人は40%に留まった．このため，中間貯蔵施設の候補地になった地域では，本調査で用いた資料や説明よりも，さらに詳しい資料や丁寧な説明が必要であるとも考えられる．ただし，資料を詳しくしたり，説明を丁寧にするだけでは違いはないかもしれない．また，NIMBYは感情的な問題なので，詳しく説明することにより，逆にますます望ましくないと思われる可能性もあると考えられる.

本調査の被験者は，一般的な世論調査のサンプルに比較して，原子力発電に対して肯定的な人が多数を占めているものの，表１で示した資料を用いて,被験者一人ずつに双方向的な説明・質疑応答を行ったところ，中間貯蔵施設に対する不安が低減し，中間貯蔵施設に対する態度が肯定側に変化している.

このことから，本調査で用いた資料による双方向的な説明・質疑応答により,中間貯蔵施設の必要性や安全性を確保するための対策が実施されていることの知識が得られ，中間貯蔵施設に対する不安が低減し，態度が肯定側に変化する傾向がみられたと考えられる．ただし，匿名性を確保しない状況で説明後のアンケートを行ったことが，数値に若干の影響を与えた可能性は否定できない.

6. おわりに

東京電力ホールディングス株式会社と日本原子力発電株式会社が共同出資して，青森県むつ市に建設している中間貯蔵施設「リサイクル燃料備蓄センター」が2023年度に事業開始予定である.

また，1. 項で記したとおり，関西電力株式会社では，福井県外における中間貯蔵施設について，理解活動，可能性調査等を計画的に進め，2020年末[*2]までに計画地点を確定し，2030年頃に２千トンU規模で操業開始することとしており，今後，これらの動向等を踏まえ，中間貯蔵施設に対する人々の関心が高まっていくことが予想される.

本調査は少人数を対象としており，またサンプルのランダム性を確保していないなどの点で限界がある．しかし，説明前には，中間貯蔵施設について不安や疑問を持つ人も，国や電力会社などから公表されている情報を知り，自分自身で考える機会が設けられることによって，中間貯蔵施設に対する理解が広がる可能性は十分に示されているように思われる.

引用文献

原子力規制委員会（2016）．高浜発電所１・２（３・４）号機の設置変更に関する審査書の概要.
<https://www.nsr.go.jp/data/000148305.pdf>

関西電力株式会社（2018）．冊子「リサイクル燃料貯蔵センター」(2018年11月).
<https://www.kepco.co.jp/energy_supply/energy/nuclear_power/shikumi/pdf/cycle_pamphlet.pdf>

関西電力株式会社(2019)．冊子「かんでんエル・メッセージ」(2019年３月).

北田淳子（2019）．原子力発電世論の力学リスク・価値観・効率性のせめぎ合い，大阪大学出版会，p153, 2019.

INSS JOURNAL Vol. 28 2021 SR-6

使用済燃料の中間貯蔵施設に関する世論調査結果

Results of Public Opinion Survey on Spent Fuel Interim Storage Facilities

幸前　秀治（Hideharu Kouzen）*1

要約　関西地域に住む市民1,000人を対象に，使用済燃料を貯蔵する中間貯蔵施設に関するWeb調査を実施した．中間貯蔵施設に関する詳しい説明を読んだ後に，中間貯蔵施設の必要性を判断する理由として，「使用済燃料プールが満杯になると新しい燃料に交換できなくなり，原子力発電所が運転できなくなります」（41%），「使用済燃料には，リサイクル可能なウランなどの資源が約95%残っているため」（40%）を選択した人が多かった．また，中間貯蔵施設の安全性を判断する理由として，「その場所で考えられる最大級の地震や津波が起きた場合でも安全性が確保できるように設計，製作します」（35%），「異常のないことを24時間監視します」（32%）を選択した人が多かった．中間貯蔵施設について詳しく知る人は少なく，これらの説明によって中間貯蔵施設への理解が広がる可能性があると考えられる．

キーワード　使用済燃料，中間貯蔵施設の必要性と安全性，Web調査

Abstract　A Web survey on spent fuel interim storage facilities was carried out for 1,000 adult persons living in Kansai area. After reading the detailed explanation about the interim storage facility, 41% selected “When the spent fuel pool is full, the spent fuel in the reactor core cannot be replaced with new fuel and nuclear power plants cannot operate” and 40% selected “About 95% of the spent fuel remains as recyclable resources including uranium” as the reasons for judging the necessity of the interim storage facility. In addition, as reasons for judging the safety of interim storage facility, 35% selected “It is designed and built to ensure safety even in the event of the largest possible earthquake or tsunami in the area” and 32% selected “Monitoring for abnormalities 24 hours a day.” Few people are familiar with interim storage facilities, and these explanations may increase understanding of them.

Keywords　spent fuel, necessity and safety of spent fuel interim storage facilities, Web survey

1. はじめに

原子力発電所を運営する電力会社によって，原子力発電所で使用した使用済燃料の貯蔵対策についての取り組みが進められている（電気事業連合会，2020）．関西電力株式会社では，「福井県外における中間貯蔵について，共同・連携を含むあらゆる可能性を検討・対応していく」こととしており，今後，使用済燃料の中間貯蔵施設（以下，中間貯蔵施設とする．）に関する計画地点が確定するなど事業の進展に伴い人々の関心が高まっていくことが予想される．

このような状況を踏まえ，本調査では関西地域の人々を対象に，中間貯蔵施設に関する説明文を用いたWeb調査を実施した．中間貯蔵施設に関する詳しい説明文を提示する前と後での中間貯蔵施設に対する人々の意識と情報を提供することが望ましいと思われる項目についての調査結果を報告する．

2. 先行研究調査

2.1 中間貯蔵施設に関するインタビュー調査

原子力安全システム研究所では，中間貯蔵施設に関するインタビュー調査（原，2021）を実施している．

このインタビュー調査から得られた中間貯蔵施設に対する主な意見を参考にして，本調査で用いる質問を設定し人々の意識を把握することとした．

＊1　元(株)原子力安全システム研究所　社会システム研究所　現 関西電力送配電(株)

2.2 原子力発電に関する世論調査

2020年10月に一般財団法人 日本原子力文化財団が実施した原子力発電に関する世論調査（一般財団法人 日本原子力文化財団，2021）では，原子燃料サイクルに関する質問項目があり，調査結果を参考にした．

3. 本調査の構成と中間貯蔵施設に関する説明文

3.1 本調査の構成

本調査の構成について説明する．

中間貯蔵施設について質問を行う前に，中間貯蔵施設に関する簡単な説明文を提示し，中間貯蔵施設に関する質問に回答を求めた．その後，原子力発電と使用済燃料，および中間貯蔵施設の必要性と安全性について詳しい説明文を提示し，中間貯蔵施設に関する質問に対して回答を求めた．

質問の内容は説明の前後において基本的に同一とした．

なお，詳しい説明文では，中間貯蔵施設の必要性と安全性については，2つずつ説明文を作成し，それを組み合わせることで4種類の説明文を，250人ずつに提示して回答を得た．

3.2 中間貯蔵施設に関する説明文

中間貯蔵施設について詳しく知っているという人は少ない（原，2021）．また，Webサイト上で「中間貯蔵施設」をキーワードとして検索を行うと，環境省が福島県内において整備している福島第一原子力発電所事故に伴う除染で発生した土壌や廃棄物等を貯蔵する中間貯蔵施設が上位に表示されることが多いことから，混同を避けるため，原子力発電の運転に伴って発生する使用済燃料の中間貯蔵施設について簡単な説明文（付録１）を作成した．

さらに，原子力発電と使用済燃料，および中間貯蔵施設の必要性と安全性について詳しい説明文（付録２）を作成した．この説明文については，Webで被験者が長い説明文を読む負担を考慮して1000文字程度とした．

なお，これらの説明文は，原（2021）の調査で得られた中間貯蔵施設の必要性と安全性について，表１に示す主な意見を参考にして２種類の説明文を作成した．

なお，中間貯蔵施設に関する説明文の作成にあたっては，関西電力株式会社が公表しているパンフレット（関西電力，2018）を参考資料として活用した．

表１　中間貯蔵施設に対する主な意見

１．中間貯蔵施設の必要性
- 使用済燃料プールが満杯なると原子力発電所を運転できなくなることは知られていない．
- 使用済燃料がリサイクルできることは知られていない．

２．中間貯蔵施設の安全性
- 中間貯蔵施設の安全性については，放射線がキャスクによって遮蔽されて，さらに距離によってレベルが低減されていること，人が監視していることなどを理由に，概ね肯定的に捉えられる．
- 使用済燃料がキャスクに入れられているにも関わらず，放射線がキャスクの外側に出ていることに不安を感じるという人がいた．
- 輸送中の事故が心配という人がいた．
- 船で輸送することから，海の近くに設置されるのかと質問する人がいた．（地震による津波への懸念）

4. 調査概要

4.1 ねらい

中間貯蔵施設の必要性，安全性に関する説明文を提示し，被験者の意見の変化や，説明内容に対する受け止めを把握する．

4.2 Web調査の概要

関西地域における成人男女1,000人を対象にWebで質問紙調査を実施した．主な仕様を表２に示す．

5. 調査結果

5.1 原子力発電の利用態度

付録１の説明を示す前において，原子力発電の利用についての意見（以下「利用態度」と略す）を，「利用するのがよい」，「利用もやむをえない」，「他の発電に頼る」，「利用すべきでない」という４択で質問した．

得られた結果を図１に示す．

表２　Web調査の主な仕様

項目	内　　容
調査地域	関西地域（２府４県）
調査対象者	20歳代から60歳代の男女　1,000人 （４種類の調査票に，性・年代別に25人ずつ割当て）
募集方法	調査会社のモニターから協力者を募集
調査方法	Web調査
調査時期	2020年12月

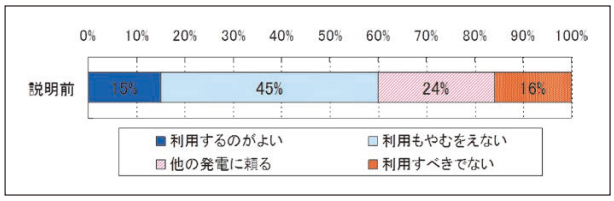


図１　説明前の原子力発電の利用態度

「利用するのがよい」と「利用もやむをえない」を合わせて「利用肯定」とし，「他の発電に頼る」と「利用すべきでない」を合わせて「利用否定」とすると，利用肯定は60%，利用否定40%であった．

この質問は，北田（2020）が2019年10月に実施した世論調査と同一の質問文としており，北田の調査結果においても，利用肯定が61%，利用否定は38%であり，ほぼ同様の結果であった．今回のWeb調査は調査会社のモニターを対象に実施したものであり，サンプルにランダム性はないが，本調査の被験者が持つ原子力発電の利用態度には，大きな偏りはなかったと考えられる．

5.2　説明前の中間貯蔵施設に対する意見

付録１の説明文を示した後に，中間貯蔵施設に対する質問をした．その結果を以下に示す．

5.2.1　中間貯蔵施設について見聞きするか

図２に示すように，「やや見聞きする」という人が最も多く（36%）が，「よく見聞きする」という人は7%に留まる．

「よく見聞きする」と「やや見聞きする」合わせて43%であり，中間貯蔵施設について見聞きしたことがあるという人は少ないが，「見聞きしない」人より多い．

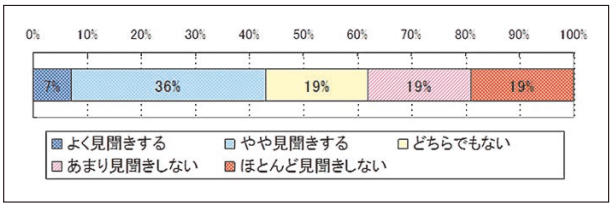


図２　見聞きするか

5.2.2　どの程度関心があるか

図３に示すように，中間貯蔵施設に，「関心がある」，「やや関心がある」という人はあわせて42%である．

一方，原子力発電についてどの程度関心があるのか質問したところ，「関心がある」，「やや関心がある」という人はあわせて50%であり，中間貯蔵施設は原子力発電に比べて関心があるという人がやや少ない．

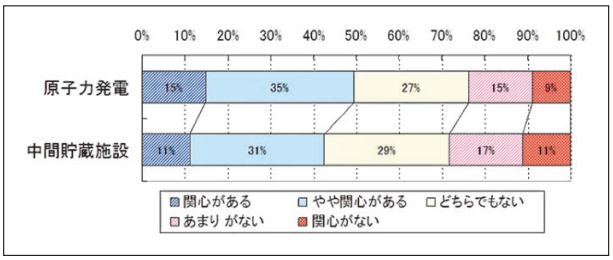


図３　どの程度関心があるか

5.3　説明前後における中間貯蔵施設に対する意見

中間貯蔵施設について付録１の説明文を示した後，付録２の説明文を示す前に得た回答（「説明前」とする）と，付録２の説明文を示した後に得た回答（「説明後」とする）の結果を示す．

5.3.1　使用済燃料を安全に貯蔵・管理できると思うか

図４に示すように，説明後は，「どちらかというと」を含め，安全に貯蔵・管理できると思う人は，説明前の23%から30%に有意に増えた．詳しい説明文（付録２）を読んだことによって，使用済燃料を安全に貯蔵･管理できると思う人が増加したといえる．

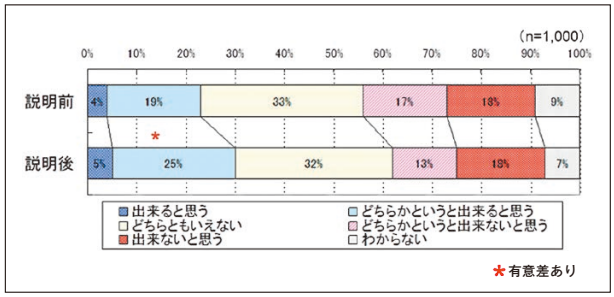


図４　安全に貯蔵・管理できると思うか

5.3.2　中間貯蔵施設に不安を感じるか

図５に示すように，説明前は，「それほど不安はない」，「少し不安だ」，「かなり不安だ」，「非常に不安だ」，「わからない」の５択で回答を求めた．説明後は，「わからない」を除く４択で回答を求めた．

説明前後とも，「少し不安だ」という人が最も多く，説明前の40%から8%増加し48%である．

説明後も，「かなり不安だ」，「非常に不安だ」という強い不安を持つ人が38%であり，一方，「それほど不安はない」という人は15%であり少数である．

これらの数値は，説明前が５択，説明後が４択の回答であることにより影響を受けている可能性がある．

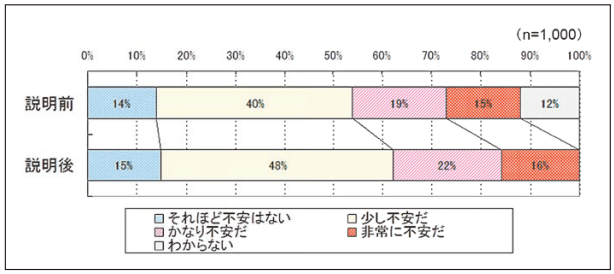


図５　不安を感じるか

5.3.3　中間貯蔵施設の必要性の判断

図６に示すように，説明前は，「必要」，「どちらかというと必要」を合わせて中間貯蔵施設の必要性を認める人は49%であったが，説明後は7%増加し，56%である．説明文を読むことで必要という人が増加したといえる．

さらに，付録２に示す説明文の組み合わせによって，必要性の判断の変化に違いがあるのか分析を行った．必要から不必要までの回答を５点から１点として平均値を算出し，説明後の値から説明前の値を引いた変化量を表３に示す．

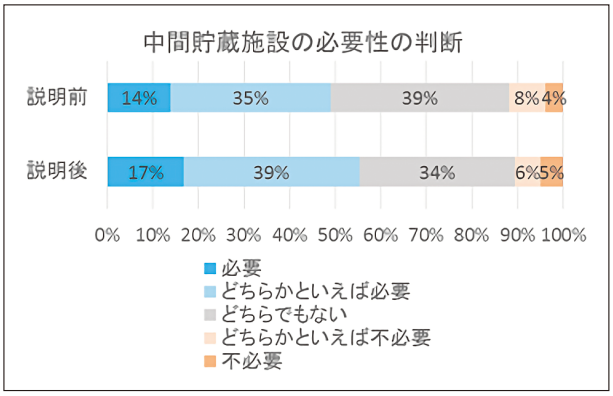


図６　必要性の判断

表３　必要性の判断の変化量

変化量（各n=250）	必要性１（プールが満杯になる）	必要性２（使用済燃料の再利用）
安全性１（放射線）	0.056	0.060
安全性２（地震・津波・輸送時）	0.116	0.148

この４種類の説明の組み合わせについて平均点がどのように変化したのかを検証するために，４群×段階（説明前，説明後）の２元配置分散分析（対応のない因子と対応のある因子）を実施した結果を，次の表４に示す．

表４　必要性の判断の変化量の分析結果

交互作用	必要性と安全性の説の組み合わせにより，変化量に差があるか	なし
主効果の検定	必要性の説明および安全性の説明の種類により，変化量に差があるか	傾向あり p= .091） 安全性２＞安全性１

必要性と安全性の説明の組み合わせによる交互作用は見られなかったため，主効果の検定を行ったところ，付録２に示す安全性１（放射線等の安全性）を説明した場合に比べて，安全性２（地震・津波・輸送時等の安全性）を説明すると，必要性を認める人が増加する傾向が見られた．

地震・津波・輸送時等の安全性の説明によって，中間貯蔵施設の必要性を認める人が増加する傾向があるといえる．

5.3.4 居住地が候補地となった場合の賛否

図７に示すように，説明前は，「賛成」，「どちらかといえば賛成」を合わせて自らの居住地が中間貯蔵施設の候補地となった場合は賛成という人は12%であったが，説明後は2%増加し14%である．説明前後とも「どちらでもない」という人が40%から1%減少し39%，「反対」，「どちらかといえば反対」を合わせて中間貯蔵施設の候補地となった場合は反対という人は49%から2%減少し47%であった．

説明文を読むことで，自らの居住地が中間貯蔵施設の候補地となった場合は賛成という人は2%増加したものの，有意の変化はみられなかった．

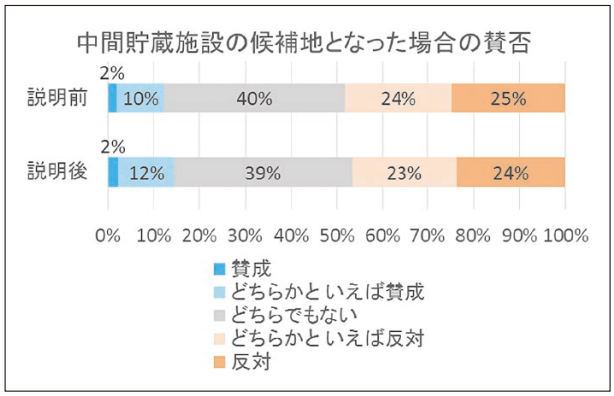


図７　居住地が候補地となった場合の賛否

さらに，付録２に示す説明文の組み合わせによって，居住地が候補地となった場合の賛否の判断の変化に違いがあるのか分析を行った．賛成から反対までの回答を５点から１点として平均値を算出し，説明後の値から説明前の値を引いた変化量を表５に示す．

表５　安全性の判断の変化量

変化量（各n=250）	必要性１（プールが満杯になる）	必要性２（使用済燃料の再利用）
安全性１（放射線）	0.024	0.028
安全性２（地震・津波・輸送時）	0.060	0.092

分析の結果を表６に示す．変化量に統計的な差はなかったものの，必要性２（使用済燃料の再利用等の必要性），安全性２（地震・津波・輸送時等の安全性）を組み合わせて説明すると，居住地が中間貯蔵施設候補地になった場合に賛成側への変化が最も大きかった．

表６　安全性の判断の変化量の分析結果

交互作用	必要性と安全性の説の組み合わせにより，変化量に差があるか	なし
主効果の検　定	必要性の説明および安全性の説明の種類により，変化量に差があるか	なし

5.3.5 中間貯蔵施設の必要性について回答の決め手となった情報

中間貯蔵施設の必要性の説明文に，選択肢を設定し，中間貯蔵施設の必要性について回答する決め手となった情報を複数回答で求めた．

まず，必要性１で提示した選択肢を表７に，結果を図８に示す．

表７　必要性１で提示した選択肢

(1)	使用済燃料プールの容量には限りがあり，原子力発電所によっては数年でプールが満杯になる可能性があると新聞等で報道されています
(2)	使用済燃料プールが満杯になると新しい燃料に交換できなくなり，原子力発電所が運転できなくなります
(3)	使用済燃料は長期的に増加する見通しです
(4)	原子力発電所を安定して運転するため
(5)	現在，工事中である再処理工場へ搬出するまでの間，使用済燃料を一時的に敷地外に貯蔵できる中間貯蔵施設を設置する必要があります
(99)	該当する情報なし

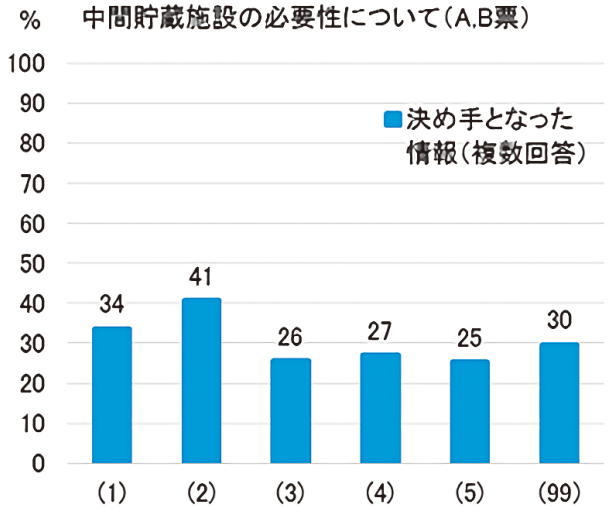


図８　必要性１について決め手となった情報

「使用済燃料プールが満杯になると新しい燃料に交換できなくなり，原子力発電所が運転できなくなります」（41%）を選択した人が最も多く，次に「使用済燃料プールの容量には限りがあり，原子力

発電所によっては数年でプールが満杯になる可能性があると新聞等で報道されています」(34%) が多く，これらの情報が回答の参考になっていると考えられる．

次に，必要性２で提示した選択肢を表８に，結果を図９に示す．

表８　必要性２で提示した選択肢

(1)	使用済燃料には，リサイクル可能なウランなどの資源が約95%残っているため
(2)	日本では使用済燃料を再処理して，将来，燃料として再利用する方針です
(3)	使用済燃料を再処理すると長期間にわたって強い放射線を出す高レベル放射性廃棄物の体積を減らし，有害度を低減することができます
(4)	使用済燃料は長期的に増加する見通しです
(5)	原子力発電所を安定して運転するため
(6)	現在，工事中である再処理工場へ搬出するまでの間，使用済燃料を一時的に敷地外に貯蔵できる中間貯蔵施設を設置する必要があります
(99)	該当する情報なし

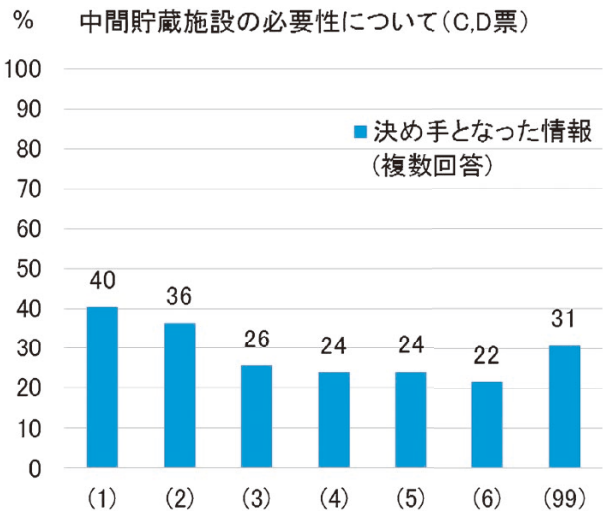


図９　必要性２について決め手となった情報

「使用済燃料には，リサイクル可能なウランなどの資源が約95%残っているため」(40%) を選択した人が最も多く，次に「日本では使用済燃料を再処理して将来，燃料として再利用する方針です」(36%) が多かった．

なお，一般社団法人日本原子力文化財団 (2021) は，2020年10月に全国で実施した意識調査において，原子力発電の使用済燃料から回収したプルトニウムは，再び原子力発電の燃料として利用されていることを聞いたことがあるか質問したところ，「聞いたことがある」という人は18.7%，「説明できる」という人は2.6%と少数であることを明らかにしている．

このように，使用済燃料がリサイクルできることや，わが国が使用済燃料を再処理し再利用することは広く知られていないため，今回提示した説明文を読んで，これらの情報を回答の決め手とした人が多くなったと考えられる．

5.3.6　中間貯蔵施設の安全性について回答の決め手となった情報

中間貯蔵施設の安全性の説明文に，選択肢を設定し，中間貯蔵施設の安全性について回答する決め手となった情報を複数回答で求めた．

まず，安全性１で提示した選択肢を表９に，結果を図10に示す．

表９　安全性１で提示した選択肢

(1)	中間貯蔵施設では，使用済燃料を頑丈な金属製の専用容器（キャスク）に収納して貯蔵・管理します
(2)	中間貯蔵施設は国内外で多くの実績があります
(3)	キャスクには放射性物質を閉じ込める機能
(4)	放射線をさえぎる機能
(5)	使用済燃料から発生する熱を逃がす機能
(6)	放射線は，距離が離れると弱くなる性質があるため，敷地の外までの距離を十分確保する等により敷地境界での放射線量を法令で定められた値よりも十分低いレベルに保ちます
(7)	キャスクの密封状態を測定する装置
(8)	表面温度を測定する装置
(9)	施設内外の放射線を測定する装置
(10)	異常のないことを24時間監視します
(99)	該当する情報なし

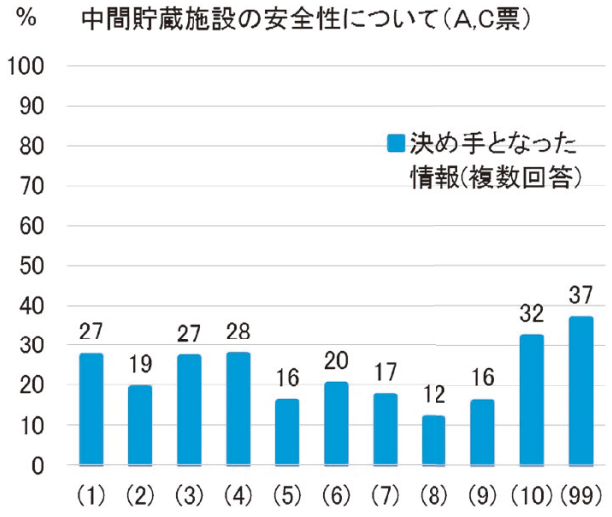


図10　安全性１について決め手となった情報

「該当する情報なし」(37%) を選択した人が最も多かった．本調査のようにWebサイト上で中間貯蔵施設に関する説明文を自分自身で読んでもらうことでは，安全性についての回答に決め手となる情報であるとの認識に至らなかった人が多いことが伺える．なお，原子力発電の利用態度とのクロス分析を行ったところ，利用否定の人が68%であった．

具体的な説明を記載した選択肢の中では，「異常のないことを24時間監視します」(32%) を選択した人が最も多く，次に「放射線をさえぎる機能」(28%) が多く，これらの情報が回答の参考になっていると考えられる．

中間貯蔵施設や原子力発電所などの原子力関連施設では，周辺住民の健康，周辺環境を守るため，24時間，管理・監視を行っているが，これらの事実は広く知られていないため，今回提示した説明文を読んで，これらの情報を回答の決め手とした人が多くなったと考えられる．

次に，安全性２で提示した選択肢を表10に，結果を図11に示す．

表10　安全性２で提示した選択肢

(1)	中間貯蔵施設では，使用済燃料を頑丈な金属製の専用容器（キャスク）に収納して貯蔵・管理します
(2)	中間貯蔵施設は国内外で多くの実績があります
(3)	中間貯蔵施設やキャスクは，福島第一原子力発電所事故を踏まえて見直した基準で
(4)	その場所で考えられる最大級の地震や津波が起きた場合でも安全性が確保できるように設計，製作します
(5)	キャスクは輸送中のトラブルを想定して
(6)	荷物を積んだトラック同士が正面衝突した際の衝撃力を想定した試験
(7)	トンネルの中など厳しい条件で起こる火災を想定した試験
(8)	水中に沈んだ場合においても放射性物質が漏れ出さないことを確認する試験
(9)	健全性を確認します
(99)	該当する情報なし

「該当する情報なし」(36%) を選択した人が最も多かった．安全性１と同様に，安全性についての回答の決め手となる情報であるとの認識に至らなかった人が多いことが伺える．なお，原子力発電の利用態度とのクロス分析を行ったところ，利用否定の人が67%であった．

具体的な説明を記載した選択肢の中では，「その場所で考えられる最大級の地震や津波が起きた場合

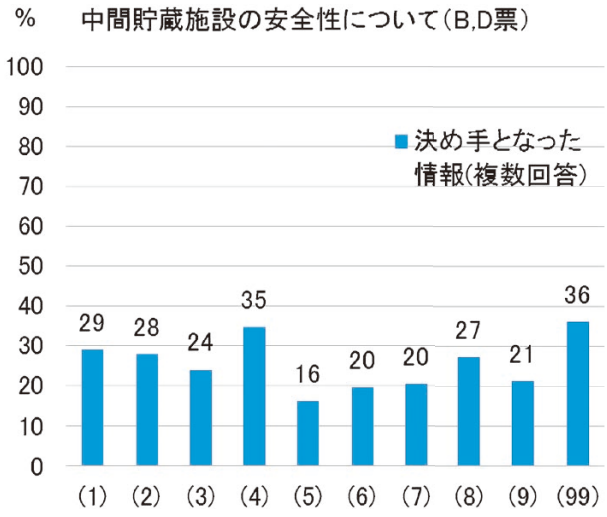


図11　安全性２について決め手となった情報

でも安全性が確保できるように設計，製作します」(35%) を選択した人が最も多く，次に「中間貯蔵施設では，使用済燃料を頑丈な金属製の専用容器（キャスク）に収納して貯蔵・管理します」(29%) が多く，これらの情報が回答の参考になっていると考えられる．

5.3.7　中間貯蔵施設の安全性に関する自由記述から不安な理由を抽出

中間貯蔵施設の安全性について回答の決め手となった情報に対して自由に記述するよう求めたところ，「特になし」等を含めて，838人から回答を得た．この自由記述のテキストの分析にKH Coder（樋口，2019）を用いて．中間貯蔵施設に対する不安な理由を抽出した．

KH Coderの分析にあたり，「中間貯蔵施設」，「使用済燃料」などを強制抽出語として指定し，例えば，「中間貯蔵施設」が「中間」，「貯蔵」，「施設」という最小単位に分割されないようにした．

表11に，２人以上により４回以上記述された抽出語を降順に示す．リストの上位５語では，「安全」，「安全性」が多く出現し，安全性についての意見が最も多い．

次いで，「実績」が多く，中間貯蔵施設の実績についての意見が多い．さらに，「地震」，「想定外」が多いことから，非常時の安全性についての意見が多いことが伺える．

次に，KH Coderを用いて，抽出語が共通に出現する関係（共起関係）を円と線で示す共起ネットワー

表11　抽出語（２人以上に記述された語）

抽出語と出現回数							
安全	49	管理	9	原子力	6	施設	4
安全性	44	原発	9	原子力発電	6	事態	4
実績	20	事故	9	対応	6	重要	4
地震	18	信頼	9	対処	6	条件	4
想定外	16	想定	9	基準	5	状態	4
安心	15	日本	9	技術	5	人間	4
監視	15	今	8	自然災害	5	専門	4
信用	15	絶対	8	処理	5	選択肢	4
必要	13	放射能	8	心配	5	多く	4
確保	12	24時間	7	対策	5	津波	4
危険	12	確認	7	反対	5	放射線	4
不安	12	使用済燃料	7	理解	5	予想	4
中間貯頑施設	11	情報	7	完全	4	抽出条件： 最小出現数＝4回 最小回答者数＝2人	
災害	10	貯蔵	7	疑問	4		
福島	10	健全	6	興味	4		

クを作成した結果を図12に示す．この共起ネットワークに共起関係を持つ抽出語のまとまりとして７グループが色分けされた．　この７グループのうち中間貯蔵施設に対する不安の理由に該当すると思われる５グループについては，「24間監視していても事態に対処できるのか」，「地震，津波などの自然災害」「中間貯蔵施設，使用済燃料の処理，管理，貯蔵」，「健全性をどのように確認するのか」，「多くの実績（があっても今後の保証にはならない）」が読み取れるため，筆者が，これらの分類を書き加えた．なお，各抽出語のまとまりのうち，例えば「多く」と「実績」の単語が一つの文の中に現れた場合，「多くの実績があり，安心」という記述もあったが，ここでは，不安な理由に該当する記述だけを示した．

6.　考察

本調査の被験者には，中間貯蔵施設について見聞きしたことがあるという人は少なく，また，原子力発電に比べて中間貯蔵施設に関心を持つ人は少な

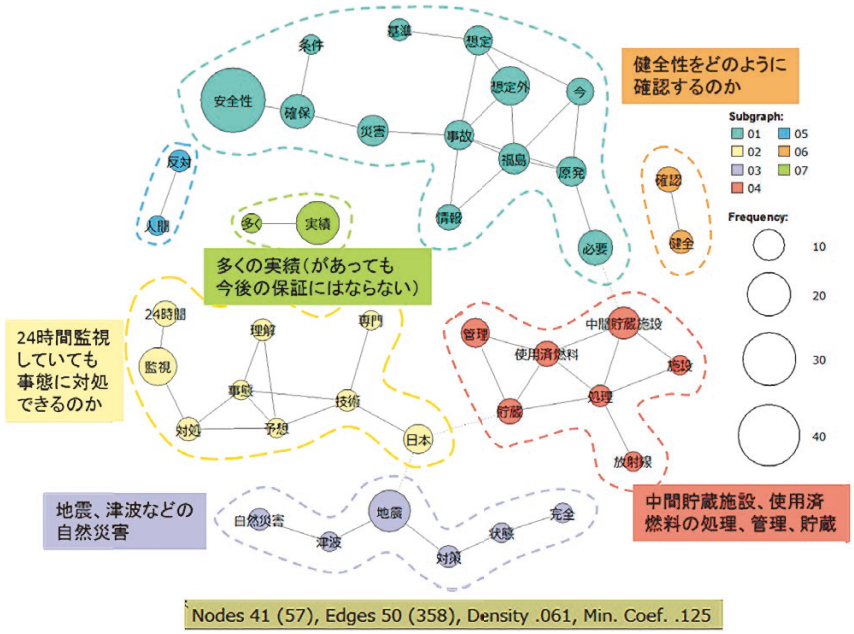


図12　安全性に関する自由記述における共起ネットワーク

い．そのため，中間貯蔵施設の必要性や安全性を判断する上での詳しい知識を持っている人は少なかったと思われる．

本調査で提示した中間貯蔵施設に関する説明文による被験者の意見の変化や，受け止め，不安の理由は以下のように整理できる．

6.1　安全性認識の変化

説明後に，「どちらかというと」を含め，安全に貯蔵・管理できると思う人は，7ポイント有意に増えて30％になっており，中間貯蔵施設の必要性や安全対策が実施されていることを知って，安全性を認識する人が増加する傾向がみられる．

6.2　不安感の変化

説明後に，「それほど不安はない」という人は1%増であり，殆ど変化しなかった．一方，対面での双方向性を持つインタビューでは，説明後に「それほど不安はない」は60%増加している（原，2021）．双方向的なコミュニケーションによって情報を提供した場合と，今回の調査のようにWeb上で説明文を読むように指示され，一方向的に中間貯蔵施設に関する情報を提供された場合とでは，不安感に対する意見の傾向が異なる可能性が強い．

6.3　必要性の判断の変化

必要性，安全性についての全ての説明の組み合わせによって，必要性を認める人は増加しているが，安全性２（地震・津波・輸送時等の安全性）の説明（特に，「その場所で考えられる最大級の地震や津波が起きた場合でも安全性が確保できるように設計，製作する」）によって，中間貯蔵施設は必要という人が有意に増加した．中間貯蔵施設の説明を実施する場合は，必要性だけではなく安全性についても取り上げていくことが重要である．

6.4　候補地となった場合の賛否の変化

説明後に，「どちらかといえば賛成」を含めて「賛成」という人は２％増であり，殆ど変化しなかったが，必要性，安全性を組み合わせた全ての説明とも，有意差はないものの賛成側に変化している．

その中で，必要性２（使用済燃料の再利用等の必要性），安全性２（地震・津波・輸送時等の安全性）を組み合わせた説明により，居住地が中間貯蔵施設候補地になった場合の賛成側への変化がみられた．中間貯蔵施設の説明では，特にこれらの内容を説明することが考えられる．

なお，リスクコミュニケーションのプロセスは，「情報の公正性の認知から始まり，情報共有，共考，相互理解，信頼の構築へとすすむ」（平川・奈良，2018）とされている．同書によれば，「とりあえずステイクホルダーに情報が提供できる」ことを目的とする場合は，印刷物への掲載，ホームページなどの媒体によって，「受け手のリスク理解」というプロセスまで到達することが可能であることが示されている．一方，「利害調整をしながらあくまでも合意形成を目指す」ことを目的とする場合は，地元説明会，個別訪問，ワークショップなどによって「態度変容（リスク受容）」というプロセスまで到達することが可能であることが示されている．

この議論に基づけば，本調査はWeb画面上の説明文によって情報を一方向的に被験者に伝えた上で回答を求めた結果であるため，被験者と中間貯蔵施設の必要性や安全性についての情報共有の段階までは到達できるが，候補地になった場合の賛否の変化など合意形成を目的とする態度変容は起こりにくいことが示唆される．

6.5　必要性について参考となった情報

「使用済燃料プールが満杯になると原子力発電所が運転できなくなる」，「使用済燃料には，リサイクル可能な資源が約95%残っている」という説明が決め手となったと回答する人が多かった．これらの情報が広く知られていない可能性がある．中間貯蔵施設の説明を実施する場合は，これらの内容を優先して説明していくことが考えられる．

6.6　安全性について参考となった情報

「その場所で考えられる最大級の地震や津波が起きた場合でも安全性が確保できるように設計，製作します」，「異常のないことを24時間監視します」という説明が決め手となったと回答する人が多かったことから，これらの情報が広く知られていない可能性がある．中間貯蔵施設の説明を実施する場合は，

これらの内容を優先して説明していくことが考えられる.

6.7 中間貯蔵施設に対する不安の理由

「24時間監視していても事態に対処できるのか」,「地震，津波などの自然災害」,「中間貯蔵施設，使用済燃料の処理，管理，貯蔵」,「健全性をどのように確認するのか」,「多くの実績があっても今後の保証にはならない」という理由が抽出された．中間貯蔵施設に関する説明を実施する場合は，説明後にもおそらくこのような疑問や不安が抱かれていることを前提に，さらに質疑応答を行うなど丁寧に説明していく必要がある.

7. おわりに

本調査は，説明文の文字数の制約のため，原子燃料サイクルの説明のうち，不安を持つ人が多いとされている高レベル放射性廃棄物の最終処分についての説明を省略して，中間貯蔵施設に関する説明文を読み回答を求めたものであり,その点で限界がある.

また，実際に人々に中間貯蔵施設に関する説明を実施する場合は，必要性１と２，および安全性１と２で説明した内容を合わせて情報提供することが考えられるため，現実に行われると思われる説明内容とは異なっている.

しかし，中間貯蔵施設について詳しく知る人は少なく，本調査で示した中間貯蔵施設の必要性や安全性の説明が回答する時の決め手となったとの答えが,各説明項目とも２割から４割程度あった．まず,中間貯蔵施設の必要性や安全性について情報が共有され，自分自身で考える機会が設けられることによって，中間貯蔵施設への理解が広がる可能性が示されているように思われる.

引用文献

電気事業連合会（2020）．使用済燃料貯蔵対策への対応状況について（2020.7.2）.
<https://www.fepc.or.jp/about_us/pr/oshirase/__icsFiles/afieldfile/2020/07/13/press_3_20200702.pdf>（2021年６月21日）.

原　吉平（2021）．使用済燃料の中間貯蔵施設に対する人々の受け止め　INSS JOURNAL, 28, 38-43.

樋口　耕一（2019）．KH Coder 3 リファレンス・マニュアル2019年９月17日版.

平川秀幸･奈良由美子（2018）．リスクコミュニケーションの現在，放送大学教育振興会，238-239, 2018.

関西電力株式会社（2018）．パンフレット「リサイクル燃料貯蔵センター」(2018.11).
<https://www.kepco.co.jp/energy_supply/energy/nuclear_power/shikumi/pdf/cycle_pamphlet.pdf>（2021年６月21日）.

北田　淳子（2020）．温暖化対策として原子力発電の受容が高まらない要因　INSS JOURNAL, 27, 46.

日本原子力文化財団（2021）．2020年度原子力に関する世論調査，18.
<https://www.jaero.or.jp/data/01jigyou/pdf/tyousakenkyu2020/results_2020.pdf>（2021年６月21日）.

付録１　簡単な説明文

区分	Ａ～Ｄ票　共通
原子力発電と使用済燃料の中間貯蔵施設	原子力発電ではウラン燃料を使用しますが,数年間運転すると新しい燃料に交換する必要があります．この運転に伴い使い終わったウラン燃料のことを使用済燃料といいます．現在,日本では,原子力発電所で発生した使用済燃料を青森県六ヶ所村の再処理工場へ搬出するまでの間，発電所の敷地外に使用済燃料を一時的に貯蔵する施設を設置する計画が検討されています．

付録２　詳しい説明文

<table>
<tr><td>区分</td><td colspan="4">Ａ～Ｄ票　共通</td></tr>
<tr><td>原子力発電と使用済燃料</td><td colspan="4">日本はエネルギー資源に恵まれず，そのほとんどを海外から輸入し，エネルギー自給率は12%程度です．このため，日本では，資源をいかに確保するかという問題とともに，特定のエネルギーに依存するのではなく，「安全性」を前提とした上で，「エネルギーの安定供給」を第一とし，「経済効率性の向上」による低コストでのエネルギー供給を実現し，同時に，「環境への適合」を図るため，バランスのとれたエネルギー構成を目指してきました．さらに，国は2050年までに地球温暖化の原因となる二酸化炭素など温室効果ガスの排出量を実質ゼロにする目標を示しています．一方，2017年度には，二酸化炭素を排出する石炭，石油，天然ガスなどの化石燃料が約87%を占めています．国のエネルギー基本計画では，原子力発電は，国内にある燃料だけで数年間発電が可能で，優れた安定供給性を持ち，運転コストが安くて，発電時に二酸化炭素を排出しないことから，安全性の確保を大前提に，エネルギー需給の安定性に寄与する重要な電源として位置付けられています．また，2030年度に発電電力量の約20%を担う計画です．原子力発電所の運転に伴って発生する使用済燃料は多量の熱と強い放射線を発生するため，発電所内の使用済燃料プールの水の中に一定期間貯蔵して，熱や放射線を少なくした後に，再処理工場へ搬出されます．</td></tr>
<tr><td>区分</td><td>Ａ票
（必要性１×安全性１）</td><td>Ｂ票
（必要性１×安全性２）</td><td>Ｃ票
（必要性１×安全性２）</td><td>Ｄ票
（必要性２×安全性２）</td></tr>
<tr><td rowspan="2">中間貯蔵施設の必要性</td><td colspan="2">必要性１
（使用済燃料プールが満杯になると発電できなくなる）</td><td colspan="2">必要性２
（使用済燃料を貯蔵するベネフィット）</td></tr>
<tr><td colspan="2">使用済燃料プールの容量には限りがあり，原子力発電所によっては数年でプールが満杯になる可能性があると新聞等で報道されています．使用済燃料プールが満杯になると新しい燃料に交換できなくなり，原子力発電所が運転できなくなります．使用済燃料は長期的に増加する見通しであり，原子力発電所を安定して運転するために，現在，工事中である再処理工場へ搬出するまでの間，使用済燃料を一時的に敷地外に貯蔵できる中間貯蔵施設を設置する必要があります．</td><td colspan="2">使用済燃料には，リサイクル可能なウランなどの資源が約95%残っているため，日本では使用済燃料を再処理して，将来，燃料として再利用する方針です．また，使用済燃料を再処理すると長期間にわたって強い放射線を出す高レベル放射性廃棄物の体積を減らし，有害度を低減することができます．使用済燃料は長期的に増加する見通しであり，原子力発電所を安定して運転するために，現在，工事中である再処理工場へ搬出するまでの間，使用済燃料を一時的に敷地外に貯蔵できる中間貯蔵施設を設置する必要があります．</td></tr>
<tr><td rowspan="2">中間貯蔵施設の安全性</td><td colspan="2">安全性１
（放射線等の安全性）</td><td colspan="2">安全性２
（地震・津波・輸送時等の安全性）</td></tr>
<tr><td colspan="2">中間貯蔵施設では，使用済燃料を頑丈な金属製の専用容器（キャスク）に収納して貯蔵・管理します．中間貯蔵施設は国内外で多くの実績があります．キャスクには放射性物質を閉じ込める機能や，放射線をさえぎる機能，使用済燃料から発生する熱を逃がすなどの機能があります．また，放射線は，距離が離れると弱くなる性質があるため，敷地の外までの距離を十分確保する等により敷地境界での放射線量を法令で定められた値よりも十分低いレベルに保ちます．さらに，施設全体の安全管理を徹底するために，キャスクの密封状態を測定する装置，表面温度を測定する装置，施設内外の放射線を測定する装置などが取り付けられ，異常のないことを24時間監視します．</td><td colspan="2">中間貯蔵施設では，使用済燃料を頑丈な金属製の専用容器（キャスク）に収納して貯蔵･管理します．中間貯蔵施設は国内外で多くの実績があります．中間貯蔵施設やキャスクは，福島第一原子力発電所事故を踏まえて見直した基準で，その場所で考えられる最大級の地震や津波が起きた場合でも安全性が確保できるように設計，製作します．また，キャスクは輸送中のトラブルを想定して，例えば，荷物を積んだトラック同士が正面衝突した際の衝撃力を想定した試験や，トンネルの中など厳しい条件で起こる火災を想定した試験，水中に沈んだ場合においても放射性物質が漏れ出さないことを確認する試験などを行い，健全性を確認します．</td></tr>
</table>

エネルギー問題関連冊子の印象に残るクリエイティブ
－中間層４分類の視点－

Creativity in preparing public relations booklets on energy issues
－ Four categories of attitudes by the intermediate group readers to the booklets －

多田　幹宏（Mikihiro Tada）*1

要約　中間層を対象にして，エネルギー問題に関する広報冊子の伝え方についての印象を把握するデプスインタビュー調査（合計34人）を行った．目的は，印象に残る伝え方を整理し，中間層を分類して，対象層毎の受止めを考察し，最後に広報冊子作成の際に心掛けることをまとめるためである．印象に残る伝え方のために，表紙のデザインの重要性が確認され，どのようなことが書いてあるのかが想像できるものが手に取りやすいことが明らかになった．構成面では，選択肢を明示したクイズ形式により興味・関心が高まることを確認した．冊子の各要素の伝え方として，様々なリスクの提示が必要になる分野であるため，適切な両面的情報提示が求められる．また，将来の姿を表すグラフも印象に残る．その他，地図を使ったもの，大きな写真で登場人物が何をしているかわかるものは印象に残るようである．次に中間層を，代表性のある４つの層に分類し，層毎に冊子を見た印象を整理し，対話の方向性についてまとめた．第１層「社会課題アンテナ層」には，適切な両面的情報提示が特に重要であり，起きると考えられるリスクを提示し，対話を積み重ねることが大切である．第２層「暮らしの安心重視層」では，生活に身近な内容に関連する表現が求められ，説明の流れに配慮し，手順を踏んで，納得性の高い対話をすることが求められる．第３層「バランス重視スマート層」では，情報がコンパクトに絞られているものが好印象を受ける．第１層と同様に，両面的情報提示を適切に行い，根拠としての数字・グラフを直感的にわかりやすい形で伝えることが重要である．第４層「無関心おまかせ層」では，エネルギー問題はイメージしにくいものであるからこそ，興味・関心を高めるような伝え方が求められる．視認性の確保や受け止め切れる情報量に配慮しながら，取り上げるテーマを明快にし，答えの選択肢を明示しながら対話を進めることが大切である．最後に，広報冊子作成の際に心掛けるべきことと冊子作成の際に活用できるチェックリストをまとめた．受け手にとっての冊子の魅力を整理し，冊子の目的や位置付けに応じた表現を選択することが求められる．中間層全体に対するコミュニケーションを考える際には，第４層を意識することで，他層にとっても印象に残る伝え方につながることが明らかになった．

キーワード　デプスインタビュー調査，エネルギー問題，広報冊子，クリエイティブ，中間層４分類

Abstract　We conducted an in-depth interview survey（34 persons in total）to grasp the impressions of the intermediate group, who had various ambiguous attitudes, on energy issues and we used the survey results to make a checklist for preparing information booklets on these issues for public relations. Specifically four points were considered: to identify impressionable ways of presenting the information, to categorize attitudes of the intermediate group booklet readers, to evaluate the dialogue of acceptance by members of each attitude category, and to summarize what should be considered when preparing the information booklets. In identifying the impressionable ways of presenting the information, we confirmed two points: the design of the cover page was important, and the information should be presented in a clear and easy to grasp manner. We confirmed that a quiz form which clearly indicated energy issue options increased interest among readers. Regarding the ways of conveying each issue of the booklets, this required presentation of various risks and appropriate two-sided information. Next, we classified the attitudes of the intermediate group readers into four categories, arranged the impressions of the booklets according to these attitudes, and summarized the direction of the dialogue that resulted from the presented information about energy issues. For members of the first category of “People who strive to solve social issues”, it was particularly important to

＊1　（株）原子力安全システム研究所　社会システム研究所

present appropriate two-sided information, and it was important to present risks that may occur, and to promote dialogues. For members of the second category of “People who have a strong risk avoidance”, expressions related to the content that readers were familiar with in their daily life were required, the flow of explanations and their logic needed to be taken into account, and highly persuasive dialogues were required. For the third attitude category of “Smart People with an open mind”, members wanted the presented information to be focused and concise. The third category members wanted booklets that gave good impressions by appropriately presenting two-sided information and intuitively using figures and graphs, points that were also true for the first category. Again, it was seen that it was important to convey information in an easy to understand manner. For the fourth category of “People who are indifferent toward social issues”, it was necessary to convey information in a way that increased interest or the readers because it is difficult to imagine energy issues which are abstract concepts. It was important to promote dialogues by clarifying the topics to be covered and the options for answers, while taking into account transparency and the amount of information that can be received. Finally, we summarized what should be considered when creating public relations booklets on energy issues. It is necessary to enhance the attractiveness of the booklets for readers and to select expressions that correspond to the purpose and positioning of the booklets. When considering the booklets as communication tools for the entire intermediate group, we found that awareness of the fourth attitude category can lead to conveying information in a way that will leave an impression on members in the other attitude classes also. Based on the results of this survey, we proposed a checklist that can be used when creating public relations booklets on energy issues.

Keywords in-depth interview survey, energy issues, public relations booklet, creativity, attitudes of the intermediate group

1. はじめに

エネルギー問題におけるコミュニケーションの研究が重要視され，最近は，世論形成において最大の層となる，中間的な人々[*2]（中間層）に着目した研究が進められている．

例えば，夛田（2020）では，中間層を一括りで捉えて，コミュニケーションを行うには限界があることから，中間層を代表性のある４層に分類することが提案されている．さらに，リスク・コミュニケーションを行う組織をはじめとする送り手がこの分類の考え方を共有しやすいようにペルソナが作成された．この４層分類を対話の想定に活用することにより，中間層の受止めが掴みやすくなる．

エネルギー問題おけるコミュニケーションの研究は以前からあるが，いずれも生活者全体を分析したものが多い．実際の対話の場面を想定して，どのような層にとって，どのような表現，伝え方や提示の仕方が印象に残ったかを報告するものは少ない．

本稿では，クリエイティブとして対話の中で実際に交換されている情報の中から，パンフレットやリーフレットなどの冊子をとりあげる．冊子に着目した理由は２つある．第一にエネルギー問題に関する情報を概ね網羅したものが数多くあること．第二に，実際の現場で交換されている情報をもとに，中間層の反応を知ることが極めて重要であると考えたからである．

リスク・コミュニケーションにおいては，受け手の思いや考えに共感し理解するとともに，求められるものは何か，求められる情報の量がどの程度なのか，どのように情報を伝えるかを考えることが大切である．

北田（2006）では，質問紙法により，冊子の構成要素が，原子力発電の態度変容に及ぼす効果を測定し，有効なものを明らかにしている．その他，科学技術に関するメッセージ作成の留意点をまとめた，土屋・小杉（2001）の研究がある．この研究では，科学技術の理解促進を図る主体がより良い情報提供のために活用できる，科学技術情報の作成チェックリストを提案している．

2. 中間層４分類

本稿では，中間層４分類別に分析をおこなっていく．４層分類の詳細は夛田（2020）を参照してほしい．中間層は多様な異なりをもった層であるが，具

＊2　中間層は，社会課題に関して，将来の社会の選択や個人の行動の選択，考え方の意見の表明等の際に，はっきりとした答えが出しにくい層である．

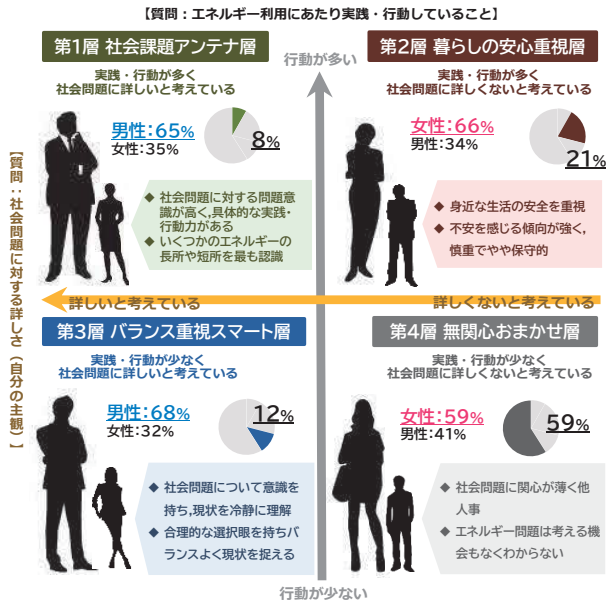


図１　中間層４分類の代表的人物像

体的には，「社会課題に関する詳しさ」と「エネルギー利用にあたり実践・行動していること*3」という２つの質問への回答によって，４つの層に分類することができる．

第１層は，社会課題の解決に積極的に行動する「社会課題アンテナ層」（以下，第１層）である．第２層はリスク回避志向が強い「暮らしの安心重視層」（以下，第２層），第３層は現実的な選択眼で物事を判断する「バランス重視スマート層」（以下，第３層）．第４層は，中間層の過半数を占め，エネルギーに関する関心の低い「無関心おまかせ層」（以下，第４層）である．

第１層は，社会課題に対する関心があり，問題意識を強く持つ傾向がある．各種エネルギーの利点と課題を認識しており，解決策は自分なりに考えて判断する．国際問題から身近な省エネまで幅広い関心があり，課題解決のために行動する層である．夛田（2020）が行った調査によると，中間層全体の８％を占める．

第２層は，自身の身の回りの問題に対しては敏感であり，基本的には物事の判断を慎重に行う．安全・安心への意識が強くエネルギー問題についてはそれほど詳しくない．安定供給については現状の生活を守りたいと考える傾向のため重視する．中間層の21％を占める．

第３層は，社会課題やエネルギー問題への認識があり，現実的・合理的な選択眼で物事を判断する．バランスよく現在のエネルギー事情をとらえ，科学技術の恩恵を受けるためにはリスクを受容しようとする傾向がある．中間層の12％を占める．

第４層は（以下，第４層），社会課題にそもそも関心がなく，自分が関わることではないと他人事になる．中間層の59％を占める．

3.　調査の概要

3.1　目的

本稿の目的は３つある．第一に可能な限り多くの広報冊子に対する印象の把握を行い，印象に残るものとそうでないものを把握する．第二にこの分析の結果を踏まえ，参加者にとって印象に残ったものを中間層４分類別に整理し，冊子を作成する際の方向性や対話の方針をまとめる．第三に，主体的にリスク・コミュニケーションに取組んでいる送り手の組織が，冊子を作成する際に心掛けることをまとめ，冊子作成の際に活用できるチェックリストの提案を行う．

3.2　調査方法

調査方法の選定にあたっては，クリエイティブに対する細かな反応を集めるために質的調査を行うこととした．また，他の人の意見に影響を受けない素直な意見を可能な限り自然な形で収集しやすくするために，デプスインタビュー方式を採用した．このため，調査結果は，母集団に対する統計的な代表性を担保するものではない．

3.3　対象となる調査参加者

対象となる調査参加者は，調査会社の登録モニターからスクリーニングを行い，３段階の抽出を行っている．中間層４分類別に一定の人数を集めた（表１）．

＊3　複数選択の14の選択肢（省エネ，省エネ，節電，高めの冷房・低めの暖房温度の設定，エコドライブ，環境に優しい製品の選択，太陽光等の設置，環境イベントへの参加等）から３個以上に取り組まれている方を行動が多いとし，ほとんど何もしていないや上記記載の項目のうち２個未満の方を行動が少ないとした．全体の選択肢の選択数の中央値は２個であった．

表１　実査概要と回答者の属性

時期	2019年９月	2020年９月
方法	デプスインタビュー調査	
対象	近畿２府４県在住，18歳～60歳代の男女であり，中間層を対象とするため３段階抽出*4を実施した.	
	調査会社モニター登録者	
人数	22	12
内訳	第１層４　第２層７ 第３層５　第４層６	第１層３　第２層３ 第３層３　第４層３

3.4　調査対象となる冊子の選定

調査対象の冊子としては，エネルギー問題に関して広く情報発信を行っている電力会社の諸冊子を採用した．実査時期にインターネット上に公開されていた５種を選定*5している．選定にあたっては，構成の特徴，情報量，イラストの使い方に着目した（表２）.

選定理由は以下のとおりである．最も情報量が多い「A誌」，二番目にクイズ形式の構成が特徴的な「B誌」，３番目に旅をしながらエネルギーのことを考える「C誌」，４番目に女性目線で作られた「D誌」，最後に，一緒にエネルギーのことをお話しませんかという対話を意識した雰囲気の「E誌」である．C誌，D誌，E誌は，イラストを多く使った漫画的な冊子である．A誌，B誌は教科書的な冊子といえる.

2019年は，A誌，B誌（2018年版），D誌を調査した．調査では，相対比較を行って分析することを踏まえ，2020年はC誌，E誌を対象とするとともに，2019年の分析結果と整合が取れるようB誌（2019年版），A誌も選定した.

B誌については，2019年の調査結果において印象に残る冊子との評価であったため，ベンチマークとなる冊子として位置づけて分析を進めた．B誌は2019年に改訂が行われており，違いは表紙のデザインが変更され，本文の文字サイズが大きくなったことである．本稿では，断りがない限りB誌は改訂された2019版の内容を指す.

3.5　調査手順

調査手順（図２）は，まず，アイスブレイクで中間層４分類の特徴を確認しながら徐々に本題に入り，「初見で見た冊子の印象」「各構成要素のクリエイティブをじっくり見た印象」に関する意見を集めていく．対象となる同一コンテンツの表現や伝え方を，別の冊子のものと比較しながら見てもらう.

また，「わかりやい」「わかりにくい」という受け止めは曖昧な表現である．内容について聞いたことがないから「わからない」のか，説明内容が理解できないという意味で「わからない」のか，説明内容が本当かどうかわからないという情報の信頼性の意味での「わからない」のかを分類して分析している.

「わかりやすい」についても，「身近に感じる」，「面白い」，「興味関心がわく」，「その事実を知ったこと

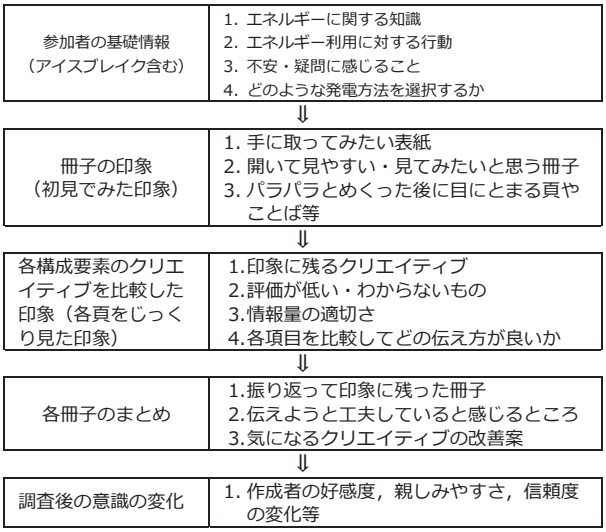
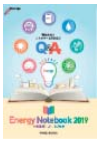


図２　調査手順

＊4　１段階目の抽出では，近畿２府４県在住者，20歳～60歳代の男女を抽出した．２段階目では，原子力発電所の再稼働賛否において，５件法の選択肢のうち，中間の選択肢，「2」どちらかといえば再稼働してもよい，「3」どちらでもない，「4」どちらかといえば再稼働すべきでない，を選択した回答者を抽出した．３段階目の抽出では，中間層４分類の抽出を行うため，社会課題に対して詳しいと考えているかどうかの質問により，詳しいと考える層とそうでない層に分類するとともに，エネルギー利用にあたり実践･行動していることの14の選択肢に対する複数選択での回答を得た．14のうち３つ以上を選択したグループを「行動が多い」と定義した．このように社会課題と実践･行動に対する２つの質問に対する回答を組み合わせて４つの層に分類した上でそれぞれの層に対するリクルーティングを実施した.

＊5　選定した５種の冊子は，A誌は関西電力株式会社「関西電力がお届けする電気の話EL MESSAGE かんでんエル･メッセージ」以下関西電力（2019），B誌は中国電力株式会社「エネルギーノートブック，2018版」以下中国電力（2019），D誌は北海道電力株式会社「エネリーフ」以下北海道電力（2019），いずれも2019年９月１日確認．C誌は，関西電力株式会社「エネたび」以下関西電力（2020），（2020），E誌は中部電力株式会社「エネルギーを語ろう ene go to」以下中部電力（2020），2020年調査のB誌は，中国電力株式会社「エネルギーノートブック，2019版」以下中国電力（2020），いずれも2020年９月１日確認.

表２　調査対象冊子の概要*6

	A 誌	B 誌	C 誌	D 誌	E 誌
表紙		 2018版  2019版			
冊子を開いたイメージ					
特徴	情報量が多くエネルギーに関する情報や原子力発電に関する情報が,この１冊にまとめられている.写真や図表,マップ図を多く採用し,電気を安定して届けるためのさまざまな課題や,企業の取組みが紹介されている	クイズ形式で,エネルギーのこと,原子力のこと,放射性廃棄物のことを一緒に考えるための冊子.各章の冒頭になるクイズはとりあげられるテーマそのもので,とても明快である.数値やグラフが多く使われている	地域を旅をしながら,エネルギー問題の情報に触れていく冊子.各地域の特徴的なイラストと,吹き出しを活用して,その地域の方言で課題を共有し,対策を知ってもらう形で展開している	女性目線から,電気やエネルギーについて知っていただくきっかけにとの思いで作られている.可愛らしいフォントとイラスト,平易なことばで簡潔にかかれ,掲載写真が大きい	可愛らしく大きなイラストで投げかけを行い,絞り込まれた情報を返していく.一緒に話しをしながら考えるコンセンプトで作られている.手書きのようなフォントと図が特徴的
タイプ	教科書的	教科書的	漫画的	漫画的	漫画的
仕様	カラー印刷 A4 版 38 頁	カラー印刷 A4 版 30 頁	カラー印刷 B5 版 30 頁	カラー印刷 A4 版 17 頁	カラー印刷 A4 版 20 頁
文字量	約 2,300 文字（P5-6）	約 1,700 文字（P3-4）	約 900 文字（P5-6）	約 1,400 文字(P2-3)	約 800 文字（P2-3）
写真	76 点	11 点	39 点	28 点	4 点
目次	【全 12 テーマ】 第１章 エネルギー資源と各発電方法 電気をつくるうえで大切なこと 火力発電の取組み 再生可能エネルギーの取組み 太陽光発電や風力発電のメリット・デメリット 第２章 原子力発電について 原子力発電のしくみ 原子力発電所の安全対策 原子力発電所の使用済燃料対策 原子力発電所の廃止措置	【全７テーマ】 日本を取り巻くエネルギー事情 バランスの取れた電源構成 原子力発電の必要性 原子力発電のしくみと原子燃料サイクル 放射性廃棄物の処理・処分 放射線と人体への影響 島根原子力発電所の現状	【全 13 テーマ】 地球温暖化問題 エネルギー安全保障 再生可能エネルギー エネルギーミックス 発電のしくみ/放射線 原子力発電所の安全対策 新規制基準と深層防護 原子力発電所の主な安全対策 運用面での安全対策 40 年以降運転に向けた取組み 原子燃料サイクル/中間貯蔵 高レベル放射性廃棄物の最終処分/原子力発電所の廃止措置	【全７テーマ】 エネルギーミックス 泊発電所再稼働の必要性 泊発電所の安全対策 暮しと放射線 高レベル放射性廃棄物 再生可能エネルギー 電源開発と設備計画	【全９テーマ】 エネルギー資源のはなし お金のはなし 環境のはなし 太陽光と風力のはなし 放射線のはなし ゴミのはなし 発電所のはなし 発電のはなし 子どもたちの未来のためにどんな選択肢があるの？
表紙に関する意見	自分の生活のことを書いていそうなイラスト.身近に感じる(第 1,2 層) カラフル(第 2,4 層)	タイトルにQ&Aは書いているので何かなと思って目に留まる.何か学べそう(第 2 層)	「たび」と入っていて何だろうと期待が沸く(第 2 層)親しみやい(第 2,4 層)漫画チックでわかりやすそう(第 4 層)	何について書いているのかわからない（全層）	何について書いているのかわからない(全層)
冊子を開いたときの印象に関する主な意見	情報量が多い(第 4 層) 専門的な内容なので,しっかりと読まないといけない(第 2,4 層)	最初に Q があると,答えはどこかなって見る気持ちになる.勉強するときには良い(第 2 層) 字の大きさ・配色が見やすい(第 2,4 層)	イラストがあるので見やすそう(第 2,4 層) 県ごとの最初の頁に目がいく(第 4 層)	堅苦しくなくて読みやすい(第 2 層) カラフル.絵が多く見やすい.見る側がわかりやすいように説明している(第 2,4 層)	かわいい・柔らかい 伝えたいことが３つの要素だと伝わる(第 2 層) 大きく見出しがあってわかりやすい(第 4 層)

に気づきや発見がある」,「再確認ができた」等について「わかりやすい」と表現されるケースが多いため，根拠が何かを可能な限り聴きだした.

インタビュアーは４人が交代して対応した．参加者の年代に近い人が担当し，自然な形で意見を言いやすい雰囲気づくりを心掛けた.

3.6　調査結果の分析

分析にあたっては，対象となった冊子の各頁において，以下の３つのクリエイティブを分類した（図３）.

○：印象の良いクリエイティブ（見てみたい，興味関心が持てるといった,「わかりやすい」に繋がるもの）

＊6　表に掲載している図はＡ誌, 関西電力(2019)の表紙, P5-6, なお, P5-6には, 今村・井内・坂東(2016), 資源エネルギー庁(2015a), 閣議決定(2018), 資源エネルギー庁(2014), 資源エネルギー庁(2018a)の情報が掲載されている．Ｂ誌, 中国電力(2019)および中国電力(2020)の表紙, 中国電力(2020), P02-03, なお, P02-03には, IEA (2019), 資源エネルギー庁(2019), 資源エネルギー庁(2018b), 日本原子力文化財団(2019), 国立社会保障・人口問題研究所(2019), 日本エネルギー経済研究所(2018), 財務省(2020)の情報が掲載されている．Ｃ誌, 関西電力(2020)の表紙, P03-04, なお, P03-04には, 日本原子力文化財団(2018), 地球温暖化対策推進本部(2015), 資源エネルギー庁(2015b)の情報が掲載されている．Ｄ誌, 北海道電力(2019)の表紙, P3-4, なお, P3-4には, IEA (2018a), BP (2018), NEA・IAEA (2016), IEA (2018b), 閣議決定(2018), 資源エネルギー庁(2015b)の情報が掲載されている．Ｅ誌, 中部電力(2020)の表紙, P16-17.

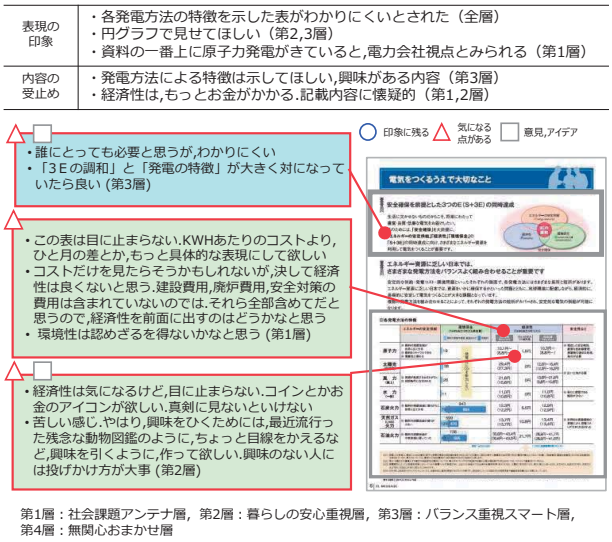


図３　分析シート*7

△：（受け手にとって否定的な意味，表現内容の評価が低いという意味での）気になる，もしくはわからないとされるもの

□：改善意見やアイデア

また，分類に際しては，中間層４分類のうちどの層がそういった印象を受けたのかを記録している．

分析の客観性を極力確保するため，上記の「○△□」の整理にあたっては，調査者が発言内容やインタビュー参加者を観察した結果をとりまとめ，インタビュアーの４名にも協力を仰ぎ，合議のうえで「○△□」の受止めの整理を行い，そのシートをもとに調査目的に対する分析を行っている．

4.　調査結果

4.1　冊子を開いてみたくなる表紙

冊子は，受け手が読みたいと思うタイミングで読まれることから，手に取ってみたいと思うデザインであることが重要である．表２の「表紙に関する意見」をまとめた．以降で紹介する参加者の声について，「　」は，参加者の言葉を直接引用している．［　］については，調査者が適宜編集を行っている言葉である．

2019年の調査で，最も手に取ってみたい冊子はA誌であった（図４）．第１層や２層からは「自分の生活のことを書いていそうなイラスト」「身近に感じる」とされている．次にあげられた冊子は，B誌（2018年版）で，第２層からは「Q＆Aと書いているので何かなと思って目に留まる」とされた．D誌については，全層から「何が書いてあるのかわからない」とされ３番手となった．

2020年の調査では，C誌の評価が高い（図５）．第２層や第４層からは「たびと入っていてなんだろうと期待がわく」「絵や漫画が親しみやすい」とされている．次にB誌が選ばれた．B誌（2019年版）は，



図４　手に取ってみたい冊子（2019年調査）*8



図５　手に取ってみたい冊子（2020年調査）*9

＊7　図３内の図は，関西電力（2019），P5.
＊8　A誌，関西電力（2019）．B誌，中国電力（2019）．D誌，北海道電力（2019）．
＊9　A誌，関西電力（2019）．B誌，中国電力（2020）．C誌，関西電力（2020）．E誌，中部電力（2020）．

各エネルギーのアイコンをQ＆Aの文字の周りに配置して表現したことにより，第２層からは「何のことについて書いてあるか想像できる」という点で手に取りたくなるとされた．３番目はA誌，４番目はE誌となる．E誌は，D誌と同様に，冊子タイトルがシンプルなデザインであったため，全層から「何について書いているか想像できない」と指摘を受けた．

エネルギー問題に関する冊子は頁数が多く，受け手の関心は低い．だからこそ受け手にとっては冊子を開く動機が必要である．どのようなことが書いてあるのかが想像できることは手に取りやすい冊子の理由となる．

その他，表紙のデザインから受ける印象として，‘身近さ’や‘親しみ’を感じるという印象を表明した参加者には特徴があり，比較的リラックスしながら冊子を見ようとする傾向があった，その結果として，冊子の内容を積極的に見ていこうとする意欲が感じられた．

4.2　開いてみたあと読み進めたいと思う冊子

「冊子を開いたときの印象」（表２最下段）についてまとめた．読み進めたいとする冊子はどれかという質問に対して，2019年調査ではB誌，D誌，2020年調査ではC誌，B誌，E誌が上位となる（図６，図７）．これらの冊子は，クイズ形式の質問（Q）や投げかけのために大きなスペースを取り，それによって取り上げたテーマを明快に見せているという構成上の共通点がある．

C誌，D誌，E誌は，親しみやすい大きなイラストを活用していることが読みやすいという評価につながっている．E誌，D誌はイラストの印象に加え，手書きのような文字の柔らかい雰囲気が好印象のようである．カラフルで身近に感じるイラストを多く使ったものは，「身近さ」「楽しさ」があるため，生活とは遠い存在に感じられるエネルギー問題であっても情報共有が進みやすく，読みやすいという印象につながるように思われる．

B誌は，「選択肢が明示されたクイズ形式」が特徴的である．頁を大胆に使って，クイズ形式の問題

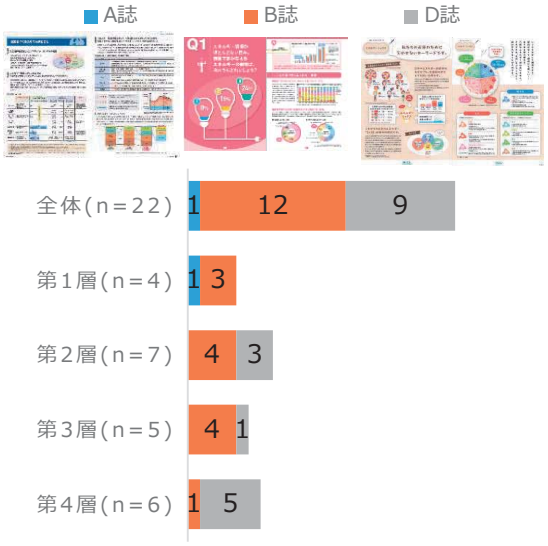


図６　冊子を開いて見たくなる冊子（2019年調査）＊10



図７　冊子を開いて見たくなる冊子（2020年調査）＊11

提起と答えの選択肢をセットで提示することで，興味関心を高めながら読み進めることができるため，中間層全体から好印象を受けている．第２層からは「問題の裏にすぐ答えがあるので見やすかった」のほか，「冊子の中の説明に変化が見られる」とあり［興味関心が喚起される］とされた．第４層からは他の冊子と比較した感想として「課題ばかりを提示されると思考が進まない」というものがあり［社会問題ばかりを並べ立てているという印象があると，そのクリエイティブは単調で一方的なものに感じられ，真剣に読まないと読めなくなる］ということに

＊10　A誌，関西電力（2019），P5-6．B誌，中国電力（2019），P02-03．D誌，北海道電力（2019），P5-6.
＊11　A誌，関西電力（2019），P5-6．B誌，中国電力（2020），P02-03，C誌，関西電力（2020），P03-04，E誌，中部電力（2020），P16-17.

なる．その他B誌の印象に残った特徴として，答えを提供する頁では，根拠としての数字を図やグラフを用いて紹介していることについて，第１層からは「教科書みたいで読みやすい」，第３層からは［全体的に数値の提示，グラフに力が入っている］との意見があった．

E誌が読み進めたいとされる理由は，左頁の投げかけを受ける形で，右頁で答えや伝えたい内容を紹介し，この答えや伝えたい内容の伝え方がコンパクトにまとめられている点にある．中間層全体から［この頁で伝えたいことは３つ（ないし２つ）であるとパッとみてわかるので印象に残る］とされた．

次に，否定的に受け取られたものとしてA誌がある．A誌の情報量は他の冊子よりも多く，最も充実した内容であり，第１層の一部からは「これだけの情報をまとめられた冊子はないので是非欲しい」という強い意見がある一方，他の中間層からは「情報量が多すぎる」とされている．受け手にとって情報量が多すぎるとされると，それだけの理由で冊子を見なくなる．

4.3　両面的情報提示の重要性

エネルギー問題では，情報の送り手と受け手の間で，リスクを踏まえてどういった電源選択を行うか等のやりとりが想定される．第５次エネルギー基本計画によると，電力供給を行ううえでは，今のところ全てにおいて完璧な発電方法はないという現状の中で，それぞれの発電方法の強みと弱みを踏まえて組み合わせを行い，弱みを補い合っていくとある．エネルギー問題の議論では，将来の日本のエネルギーミックスについて考えるケースが多く想定される．その際に，リスクが大きいと認識されている原子力の取り扱いには注意が必要である．

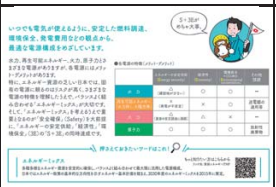
電源選択における長所と短所について，両面的な情報提示をしているクリエイティブを表３にまとめた．印象がよかったのは，B誌とE誌であった．これらは，各電源の長所･短所（強み･弱み）の両面を，中間層全員から「バランスよく表現している」図であることがわかった．

特にE誌は，各層から「強みと弱みを具体的な短いことばで表現している」と認められたほか，「イラストがあることで目にとまる」「適度な余白で視認性がよい」とされた．先ほどのバランスが良いという印象の結果を受けて，第３層からは「表現の仕方が平等なので自分で読んで理解して良いと考える」との興味深い声があり，適切な両面的情報提示により，考えることに対する主体性が増すことがわかる．

B誌は，第１層から「一つ一つのエネルギーの見え方は一番分かりやすくかつ網羅できている．なるほどと思うものがある」と好印象であったが，第２層や第４層の一部からは「文字量が多い，教科書みたい」とされている．

評価が高まらなかった両面的情報提示は，A誌とC誌であった．A誌は，経済性について，1kWh

表３　両面的情報提示のクリエイティブ*12

A誌	B誌	C誌	D誌	E誌
				
コストを気にするならA誌の表(第１層) 一番上に原子力がきている．発電方法で並べると多分最後になるのが普通．この図表は電力会社側の視点(第１層) kWh はわからない（第４層）	長所・短所がそれぞれ書かれているのでバランスが取れている（第１層），一番項目が多いので，一つ一つのエネルギーの見え方は一番分かりやすくかつ網羅できている．なるほどと思う（第１層） フォントも詰まっているので検索しづらい．教科書みたいで詰まっている感じ（第２層）	○×で書かれているのは良い（第４層） メリットが少なくてデメリットが多いとある方が公平さを感じるがそうなってない（省略）どちらかに偏っている情報の方が警戒する(第１層) 正直全然入ってこない○×の意味がわからない．情報が少なすぎる（第２層）	割合はこんな感じなのかとわかる(第２層) 書き方はわかりやすい，苦労して作っている感じ（第３層）	強みと弱みを具体的に短いことばで表してある(第１層) わりと大きくスペースを取っているので勝手に文字が入ってきやすい（第２層） 一番バランスがいい．太陽光，原子力とか全部平等に書いていて，表現の仕方が平等なので，自分で読んで理解してここは良いと考える（第３層）

＊12　表に掲載している図は，A誌，関西電力(2019)，P5．B誌，中国電力(2020)，P07．C誌，関西電力(2020)，P12．D誌，北海道電力(2019)，P4．E誌，中部電力(2020)，P17．

あたりのコストで表現しているが，第４層からは「kWhはわからない」，第１層からは「kWhあたりのコストより，１カ月になるとこれだけの差が出るというような具体的な表現にして欲しい」という意見があった．「kWh」という単位は，電力会社にとっては日常語であるが，中間層の人達からすると難しいことばである．その他，中間層全体からＡ誌は「情報過多」「専門的すぎる」と指摘を受けた．その他，第２層からは［コインのようなお金のアイコンが欲しい］とされた．その他，気になる点として，第１層からは「原子力発電についてコストだけを見たらそうかもしれないけど，決して経済性は良くないと思う」という懐疑的な意見が多く見られる．

Ｃ誌のクリエイティブは，左側に説明文があり，表は「○×」と「短いことば」で表現されている．第２層や第４層の一部からは「○×と書いているのが一目瞭然で簡潔でわかりやすい」とする声があったが，第１層や第３層からは「○×だけではわからない」とされ，評価が分かれた．

評価が高まらなかったＡ誌とＣ誌には共通点がある．Ａ誌は，第１層からの指摘として「一番上に原子力がきている，発電方法で並べると多分最後になるのが普通．この図表は電力会社としての視点」という指摘があった．Ｃ誌は，原子力に関するデメリットの記載はあるものの「×」の表記がないことから，第１層や第３層から［原子力がいいですよって押し付けられている］との声があり，Ａ誌とＣ誌は情報の公正性に不透明感が生じている．

木下（2016）によると，リスク・コミュニケーションにおいて届けるべき情報の考え方として「送り届ける情報は賛成の内容だけでなく，反対の内容も合わせて提供することである．これが情報の両面提示であり，それによって情報の共有と公正が担保される」とあるように，両面的情報提示の伝え方については細心の配慮が必要であり，上記の例では情報の共有と公正に関する指摘を受けている．

4.4 エネルギー問題に関するクリエイティブ

エネルギー問題に関しては，それぞれの国の事情，温暖化対策に代表されるような社会問題の解決方策，エネルギー特有の地政学リスク等を考える必要があり，これらはエネルギー選択を考える上で大切な情報となる．

4.4.1 エネルギーの安定供給

各冊子とも，エネルギーの安定供給の問題は最初の頁に掲載されている．印象に残ったとされるものは（図８）のとおりである．

図８-(1)は「知ることで気づきがある事柄」である．左の頁に「Q1 エネルギー資源がほとんどない日本．自国で賄えるエネルギーの割合は次のうちどれでしょう？」という問題があり，それに対する答えは次頁に示された「11.8%」である．エネルギー自給率の現状についてのこの11.8%という数字にはインパクトがある．第２層からは「11.8%とわかって，まずいなと思う，危機感につながる」「こんなにエネルギーはないのか日本は」という声があり，課題としての気づきがあることがわかる．エネルギー安定供給に関する日本のエネルギーの現状紹介は，中間層にとって，どの冊子の情報も共有しやすい内容であった．

図８-(2)の「イラストを活用して視覚的にわかる比較表現」も印象に残るものであった．ここでは，世界の主要国のエネルギー自給率を，女性が持っている風船の大きさで表現している．エネルギー問題に関する内容は，諸外国の状況と日本の状況を比較しながら情報提供されるケースが多い．イラストを活用して視覚的に表現することで，第２層から「比べるものが少ない方が良い，目に入ってくる」とする見方がある．その他，印象に残ったものとして，図８-(3)の「アイコンと短いことばの表現」がある．第２層は「教科書っぽくなくわかりやすい」，第３層は「苦労して作っていることがわかる」と好印象である．図８-(4)の「アイコンと数字で視覚的に表現した図」や図８-(5)の「円グラフの活用」も目に止まる表現である．

図８-(6)の「将来の電源構成をグラフで提示」の図は，第４層の一部からは「グラフを見てもわからない」との意見があるが，第１層や第２層からは「(エネルギーミックスの）グラフをみてこのバランスが良いと思う」という声が聞かれた．このグラフは他の冊子でも使われており，2030年の日本に望ましい将来の電源構成，資源エネルギー庁（2015b）を示している．このグラフを見ることで中間層の人々は，将来我々がどの電源を選択していくかをイメージしやすくなるようである．このグラフは，今後のエネルギー選択を考えるうえで大切な情報であり，第４層の一部を除き，中間層全体にとって検討

(1) 知ることで気づきがある事柄



(2) イラストを活用し視覚的にわかる比較表現



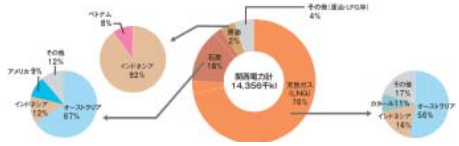
(3) アイコンと短いことばの表現



(4) アイコンと数字で視覚的に表現した図



(5) 円グラフの活用



(6) 将来の電源構成をグラフで提示



(7) 地図を使った表現



図８　安定供給における印象に残るクリエイティブ*13

の際の参考になる情報である．

さらに，図８-(7)「地図を使った表現」は，中間層全体から［特に目に止まる］とされ，実際に，パラパラとめくった際に参加者の多くが地図のところで目が止まる様子であった．地図による表現は，再生可能エネルギーの取組みや，世界各国の廃炉の状況など，他のコンテンツの説明にも多く使われているが，いずれのクリエイティブも目にとまり印象が残るとされた．地図にデータを載せて表現していくインフォグラフィックスには，受け手の注目を集める力がある．また，自分の地域が含まれているような地図は特にその効果が大きい．地図があることは，情報をより身近に感じさせる．

ただし，地図に掲載する情報量が多く圧迫感があるような表現には注意が必要である．

4.4.2　環境保全

地球温暖化対策という観点から大きく頁を割いている冊子は，A誌，C誌，E誌である．

印象が良いとされたものは，図９-(1)「日本のシンボルである富士山の活用」である．温暖化の地球環境への影響について，静岡大学増澤武弘教授の研究資料を基に作成したイラストが用いられている．富士山の永久凍土の状況は，温暖化の影響を実感させ，参加者の多くが大阪府在住者であっても「地球温暖化の影響を身近に感じられる」としている．その他，図９-(1)の，地球温暖化の影響の説明文は，短い文章で書かれており，締めくくりについて「発電方法の組み合わせを考える必要がありそうですね」「発電方法によってCO_2の排出量が変わるんですね」などの文末表現が使われており，中間層全体から，一方向的ではなく［対話をしているかのような印象を受ける］との反応があった．

その他，図９-(2)「共感できる投げかけ」が印象に残るとされた．「夏の京都が暑いのは知っていたけど暑い，暑すぎる！やっぱり地球温暖化の原因といわれてるCO_2が増えているの？」という投げかけは第２層や第４層から共感をよび，興味関心を持つきっかけとなっている．

評価が高まらなかったものとして，図９-(3)「本文と小見出しの文字色の強弱が弱い」がある．

＊13　図８-(1)，中国電力(2020)，P02とP03，図８-(2)，(3)，北海道電力(2019)，P3，P4．図８-(4)，関西電力(2020)，P06．図８-(5)，関西電力(2019)，P8．図８-(6)，中国電力(2020)，P08．図８-(7)，関西電力(2019)，P7．

（1）日本のシンボルである富士山の活用



（2）受け手の側が共感できる投げかけ



（3）本文と小見出しの文字色の強弱が弱い

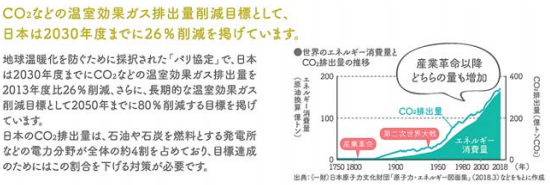


図９　地球温暖化対策＊14

地球温暖化の影響，温室効果ガス排出量削減目標の提示において，小見出しの文字のカラーが薄いことについて，第１層からは「見出し項目はきれいな紙. デザインもいいんだけど, 文字のところはちょっと弱い．解説は質問に対応しているんだろうが，細かすぎて読まない，要点がどこか分かりにくい」とされた．小見出し文字のカラーの薄さからくる視認性の悪さとともに,それによる内容の受け止めの悪さも指摘されており,視認性の大切さが確認される．

また，同じく図９-(3)のように，左側に解説文が来て右側に図表が来るようなクリエイティブは，情報量が多いという印象を受けやすいようである．参加者の多くは，図や表で視覚的に捉えて情報を得たいと考えているが，文字が左側にある事で細かさや情報量の多さを感じるようである．その他，第４層からは「地球温暖化の頁は他のコンテンツよりも難しいことばがいっぱい出てきている」「漢字が多い」と指摘された．地球温暖化に関する資料作成の際には，あらかじめ難しい用語や漢字が多くなることを踏まえておく必要がある．

4.4.3　原子力発電の安全性対策

全ての冊子で，原子力発電所の安全対策が紹介されている．松本・塩見（2004）の研究では，「送り手に対する信頼は『安全対策情報』を伝達しない場合よりも，伝達した場合の方が，信頼が高い」ということが確認されている．ただし，工学的な説明の多い安全対策に関して，「より効果的な『安全対策情報』の伝え方の検討が必要である」と指摘されている．以下, 安全対策に関する調査結果をみていく．

誌面構成を見ていくと，A誌，C誌，D誌は，「福島第一原子力発電所事故」「原子力発電所の安全対策」の順に情報を掲載している．B誌，E誌は，「原子力発電所の安全対策」のみを掲載している．印象に残ったものは，C誌，D誌であった．中間層全体から「見てみたい」「目にとまる」とされた．

図10-(1)「観音開きで大きく提示」は，安全対策の取組みを見やすくするために，観音折の見開きで大きなスペースを使って安全対策を掲載している．このため，対策の写真が大きくて見やすい特徴がある．2019年の調査で，安全対策に関する頁についての中間層の多くは,「興味関心がわきにくい」「やっていて当然」という反応であった．観音開きを活用することで，ひとつひとつの写真やイラストが大きくなることにより，じっくりと見る参加者が多く好印象になっている．見開きの効果は大きいと思われる．また，中央に発電所を配置した，全体がわかるようにしたイラストの印象も良好である，このイラストは他の冊子でも使われているが，どの冊子でも印象に残るとされている．

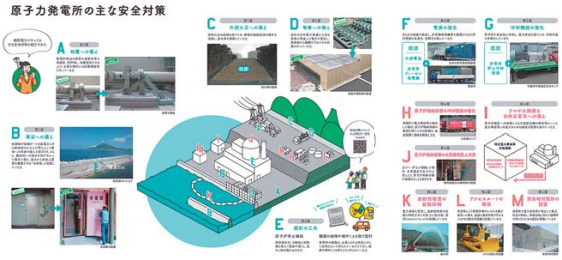
図10-(2)の「取組んでいる従業員が紹介され何をしているかがわかる」も印象が残るとされている．C誌とD誌のものが好印象であった．

図10-(3)「安全対策工事前後の写真」では，第１層や第２層から［対策工事のビフォアアフターが提示されているため，どのような対策を行なったかがわかりやすい］とされている．

図10-(4)のディジタル式中央制御盤は印象に残

＊14　図９-(1)，中部電力(2020)，P06-07，なおP6に日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット(2019)，気象庁(2020)，温室効果ガスインベントリオフィス(2020)の情報が掲載されている．図９-(2)，関西電力(2020)，P03．図９-(3)，関西電力(2020)，P04.

(1) 観音開きで大きく提示



(2) 取組む人が紹介され何をしているかわかる



(3) 安全対策工事前後の写真



(4) ディジタル式中央制御盤



(5) 地域と一緒に行った防災活動（新聞記事）



図10　安全対策で印象に残ったクリエイティブ*15

るとされている．長期運転に関連する安全対策工事の中で，ディジタル式中央制御盤の取替え工事が掲載されているが，第２層や第４層から［ヒューマンエラーを防げそう］との声が聞かれた．このため，参加者全員に対して，ディジタル式中央制御盤取替え工事に関する受け止めを整理したところ（図11），22人中13人が「安心感が高まる」とし，半数以上には好印象であった．原子力発電所の安全性の議論の中で，ヒューマエラー発生への懸念があることは知られているが，全ての不安が解消されるわけではないにしても軽減される可能性がある．

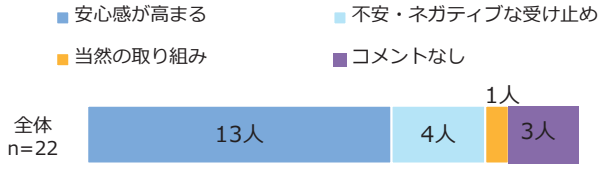


図11　ディジタル式制御盤の受止め

その他，図10-(5)の「地域の人と一緒に行った防災活動（新聞記事）」による原子力防災訓練の紹介は，第１層や第２層からは［対策を考えている］．第１層や第３層からは［これだけのことをやっているということを（電力会社は）伝えた方がよい］との意見があった．また，新聞に記事化された情報を紹介することについて，中間層からは［情報の信頼性が高まる］とされた．

図12は，安全対策の説明の中でストーリーが優れているものである．一般の生活者が，原子力発電所の話題で最も気になることは，福島第一原子力発電所事故である．図12の流れは，まず福島第一原子力発電所事故の経過と安全対策を解説し，発電所の安全性向上に取り組んでいる従業員の取組み風景を説明してから，発電所の安全対策を提示している．

この構成に対して，中間層からは［福島第一原子力発電所事故の説明によって，大規模災害の時に発生する可能性のある事故がわかり，その事故に対してどのような対策が必要なのかをイメージしやすい］とされている．

また，図12-(2)「安全を守るのは人」では，実際に働いている人が写真で紹介されているが，発電所の安全性を高める従業員の仕事ぶりに写真を見て触れることで，第２層からは「取組んでいる社員を見

＊15　図10-(1)，関西電力(2020)，P18-20．図10-(2)，北海道電力(2019)，P8．図10-(3)，関西電力(2020)，P18．図10-(4)，関西電力(2020)，P24．図10-(5)，福井新聞社(2019)．

○ストーリー（流れ）

(1) 福島第一の事故の経過と安全対策
⇓
(2) 安全を守るのは人
⇓
(3) 主な安全対策

(1) 福島第一の事故の経過と安全対策



(2) 安全を守るのは人



(3) 主な安全対策



図12　D誌の優れたストーリー*16

ることで安心感が増す」とされた．

そのうえで，図12-(3)「発電所の工学的な安全対策」を紹介しており，流れの中で安全対策に触れることが可能となっている．

過去の調査から，このような安全対策に関しては興味･関心が沸きにくいことが明らかになっている．D誌のストーリーと他の冊子のストーリーを比較すると，「工学的な安全のしくみ」が「発電所の人・体制・しくみ」よりも先に来ている．第２層や第４層の意見から推察すると，設備や安全対策工事を紹介するよりも先に「人・体制・しくみ」を紹介し，安全対策を担う人たちの仕事ぶりに触れる方が，情報を共有しやすい可能性がある．

図12にまとめた「D誌の優れたストーリー」は，特に，工学的な内容について苦手意識のある人や関心を示さない人の割合が多い第２層や第４層からは［安全対策の全体像が掴みやすく，わかりやすい］とされた．

図13「福島第一原子力発電所事故の経緯」は，印象に残るものであった．事象の進展の経緯を「ことば」と「→」で表現し，災害事象の発生は「アイコン」を挿入して，フローチャート的に表現している．この表現により，事象進展の時系列の中で何ができて何ができなかったかが一目でわかるようになっている．さらに，できなかったことに対する対応策のイラストとして，中間層の誰が見ても想像しやすい水密扉，送水車，放水砲が紹介されている．また，「柔らかいタッチのイラスト」が，難し

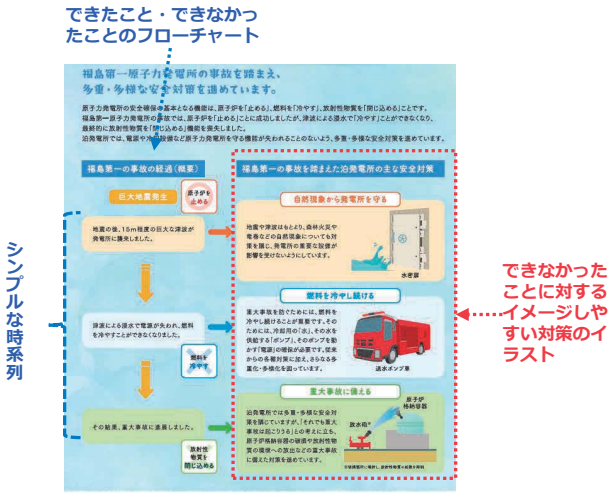


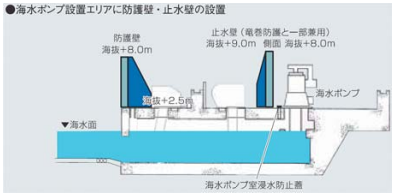
図13　福島第一原子力発電所事故の経緯*17

＊16　12-(1), 北海道電力(2019), P7.　図12-(2), 北海道電力(2019), P8.　図12-(3), 北海道電力(2019), P9.
＊17　図13, 北海道電力(2019), P7.

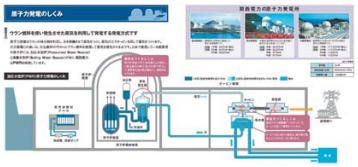
(1) 写真や文字が小さい



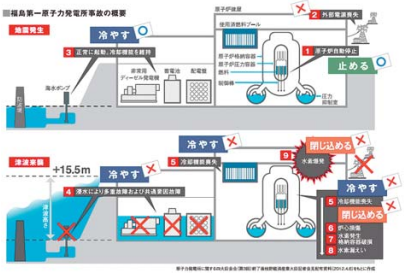
(2) 図面のようなイラストの使用



(3) 複雑と受止められるしくみ図



(4) 複雑と受止められるしくみ図を比較して見せる



(5) 海外事例の受止め



(6) 目線を行き来させないと分からない図

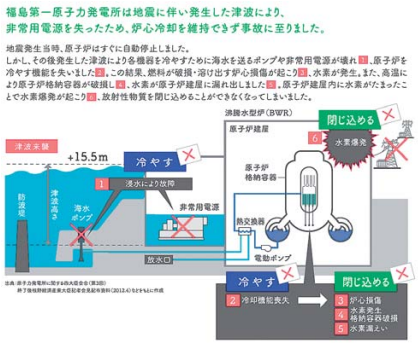


図14　安全対策で気になるクリエイティブ*18

いというイメージのある工学的なしくみの説明を入りやすくしている．福島第一原子力発電所事故の経緯の説明では，不安や恐怖を感じるといった指摘を受けることがあるが，図13については，そのような指摘は受けなかった．

次に安全対策において，否定的な評価を受けたものを紹介する．図14-(1)のように「写真や文字が小さい」という場合には，ただでさえ複雑な発電所のしくみについて，それだけの理由で冊子を見なくなってしまう．図14-(2)は「図面のようなイラストの使用」という場合である．工事の概要図でどこに対策を行ったのかを数値を交えて紹介しているが，第１層からは「専門家が使うもの」という意見があった．そのほか，図14-(3)の「複雑と受止められるしくみ図」は，燃料から得られた熱エネルギーをタービンに伝えて電気を作ることを表したイラスト図の例である．この図は他の冊子でも多く使われるが，中間層からは［難しい］という意見が聞かれた．さらに，図14-(4)の「複雑と受止められるしくみ図を比較して見せる」については，第２層からは「どこに違いがあるかを見つけることが難しい」という意見がある．しくみに詳しくない中間層からみれば，２つのしくみ図を比較しながら，どこが異なっているのか，その異なりの影響がどこに表れるのかを理解することは難しい．調査の中で明らかになった具体例としては，「PWR」と「BWR」の比較，「原子力発電所」と「火力発電所」の比較，「汽力発電方式」と「コンバインドサイクル発電方式」の比較は，難しいとされている．最も詳しい知識を持つ第１層であっても「補足資料的な感じならいいが専門的ではないか」と見ている．しくみ図については，過去からよく使われているものばかりであるが，情報が入ってきやすいしくみ図の作成に取組むことが求められる．

図14-(5)の「海外事例の受止め」では，「米国における運転期間延長の認可状況と運転年数」を説明しているが，［米国とは条件が違うので比較にならない］と答えた参加者は22人中14人で過半数を超えている．この種の受け止めについては留意しておく必要がある．

最後に，図14-(6)は「目線を行き来させないと分からない図」であるが，これは福島第一原子力発

＊18　図14-(1),(2), 関西電力(2019), P25-26.　図14-(3), 関西電力(2019), P17-18, 図14-(4), 関西電力(2019), P23, 図14-(6), 関西電力(2020) P16.　図14-(4),(6)は共に経済産業省(2012)の情報が掲載されている．図14-(5), 関西電力(2019), P21, U.S.NRC (2019)の情報が掲載されている．

電所の事故の進展を図と解説で表している．先ほどの図13と比較して，図14-(6)を見るときのインタビュー参加者の目の動きを比較観察した．すると，図14-(6)を見る参加者の視線は，上下左右に忙しく動いており，頁内で視線を頻繁に動かさないと分からないような図であることがわかった．一方，図13を見るときの参加者の視線は，何度も行き来させることなく内容が掴めるようになっている．視線が頻繁に行き来するようなものは「わかりにくさ」につながることが明らかである．

5. 考察

5.1 印象に残ったクリエイティブ

まず，どのようなクリエイティブを採用するか否かに関わらず，受け手にとっての視認性の良さが備わっていなければ評価が低くなる．そして，視認性は対象層によっても異なり，伝えたい情報の内容によっても変化する．

視認性とも関連するが，情報量が多いと感じられることは，送り手に対する信頼に影響を及ぼす可能性がある．このため，冊子作成の際には，受け手である対象層を想定したプリテストを行い，対象層毎の視認性の水準と適度な情報量をコンテンツ毎に把握しておくことが求められる．

表紙のデザインについては，何が書かれているのか想像できるようなデザインで，どのようなことが書かれているのかに対して，興味が惹かれるようなものが選ばれた．一方，シンプルであっさりしたデザインは，どのようなことが書かれているのかが想像できないため，手に取りにくくなる．

冊子の構成として「選択肢が明示されたクイズ形式」は特に優れている．また，受け手に対して投げかけを行いながら展開するクリエイティブも印象が良かった．当然ながら，そういったクイズ形式，投げかけを行った際には，見つけやすいところに答えを配置しておくことが必要である．

冊子の雰囲気として，対話をしているように感じられる「私たちと一緒にエネルギーのことを話しませんか？」という姿勢は印象に残るようである．その他，原子力のような賛否の分かれる問題が含まれる場合には，情報に対する信頼や提供情報の公正さが求められる．長所と短所の両面的情報提示を適切に行い，特定の立場からの意見と受止められないよう注意しなければならない．

地図を活用したクリエイティブは，多くの人の目を止める表現であることが分かる．その他，冊子に親しみや身近さを感じるイラストや事例の活用は大切である．キャラクターやアイコンの活用により情報は伝わりやすくなる．

エネルギーミックスのグラフは，印象に残るものであった，とくに将来の電源構成がグラフで示されていれば，受け手がどのような選択をしていくかを考える際にイメージしやすくなるとのことであり，どの冊子でも好印象であった．

発電所の安全対策の紹介では，観音開きで大きくスペースを確保して，大きな写真と短いことばで説明するクリエイティブは特に参加者の目を止めるものであった．図12で紹介した優れたストーリーによるクリエイティブでは，情報が流れるように共有されることが確認された．

5.2 中間層４分類別の対話の進め方に関する考察

中間層４分類別の受け手の印象と対話の方向性を考察する．第１層の「社会課題アンテナ層」は，詳しい資料に理解を示す傾向があり，比較的軽い感じのクリエイティブには拒否感を示すことがある．社会問題に対する解決策を自分で考えたいという傾向があるからこそ，両面的情報提示のバランスを欠くと感じられるものに対して否定的な反応を見せる．情報発信者の対話の仕方や姿勢など細部にも注意が払われ，比較項目を紹介する順番にも配慮が必要となる．以上を踏まえた第１層に提示する資料と対話の方向性として，相対的に教科書的なクリエイティブが好まれる傾向がある．対話においては，長所と課題であるリスクをバランス良く提示し，この層にとって気にかかる問題や，既に起きている問題，起きると考えられる問題に対する対話を積み重ねながら，意見交換を進めることが重要である．

第２層の「暮らしの安心重視層」は，生活に身近な内容のクリエイティブを契機として興味関心が高まる傾向が強い．「世界の問題」「日本経済全体」等の遠い情報よりも，身近な話題に親しみを感じ，疑問や不安に応える問いかけや共感の表現を交えながらの展開が好印象を与える．相対的に教科書的なクリエイティブよりも軽い感じのクリエイティブを好む傾向がある．ただし，情報の中でも，将来の自分

たちの生活に重大な影響があると感じた情報の場合，軽すぎると受け止められたクリエイティブには否定的となる．

第２層の対話では，様々なリスクに対する不安を感じやすい層であるからこそ，既に行っている対策を並べ立てて説明するのではなく，説明の流れに配慮し，手順を踏んで，納得性の高い対話を進めることが求められる．社会問題には詳しくないと考えているため，知らなくて不安が多い，わからないから不安であるという気持ちを尊重し共感を示しながら，「そうなんだ」とわかる対話の進め方や提供情報の準備が必要である．安全対策の説明であれば，図12の優れたストーリーのように流れを大切にすることが必要である．

第３層の「バランス重視スマート層」は，第１層と似た傾向があるが，情報量が多いものや，説得されていると感じるようなクリエイティブは評価しない．情報が絞られていて，コンパクトにまとめられているものには好印象を持つ．また，根拠としての数字を使った伝え方を好み，教科書的な表現も評価するが，柔らかいものにも寛容である．対話の方向性としては，根拠としての数字や直感的にわかるグラフを活用し，コンパクトに説明することが重要である．

第４層の「無関心おまかせ層」は，広く情報を網羅して深い理解を促すような教科書的な冊子は難しいという印象につながり，腰を据えて読まなければならないと受け止められる．漫画のように視覚的にわかるもの，軽い感じの印象をうける資料や冊子を好意的に受け止める．とくに，第４層で注意したいのは，受け止め切れる以上の情報を提供することがないようしなければならないということである．情報量が多いと感じられると，問題が他人事となり，場合によっては一方的であるとの印象を受けることもある．このため，受け止めきれる情報量を把握することが大切である．

第４層への対話の方向性としては，E誌のような，「一緒にエネルギーのことを話しませんか」「不安を出し合いませんか」という雰囲気を作ることが大切である．エネルギー問題は身近な話題ではないため，具体的なイメージを持ち合わせていない．この層が聞いてみたい，知りたいと考えることを捉え，選択肢を明示したクイズ形式やこの層が持つ疑問を投げかけとして活用し，それに対する答えや取組みの考え方，とるべき選択肢の候補などをわかりやすい形で提示することが大切である．

最後に，中間層全体の対話の進め方においては，「一緒に話をしながら」「不安を出し合う」というように，「共に考える対話」を展開することは，質の高い双方向の対話につながり，互いの関係性の中で一定の信頼を醸成し，自然な形で情報が共有されることにつながると考えられる．この点は，前述のように木下（2016）でも指摘されている．

5.3　冊子作成に関する考察と作成の際に活用できるチェックリストの提案

エネルギー問題については対象層による課題の認知や興味の違いが大きく，「誰に対しても」過不足のない情報の提供は，結果的に「多くの情報」を掲載することになり，冊子の魅力が低下する．本研究から，各層が求める万能の冊子を作ることは難しいこと，いかなる冊子によっても，それぞれの層からの否定的な受け止めをなくすことは難しいということがわかる．

このため，冊子を作成する際には，受け手にとって冊子の魅力をどう整理するかが大切になる．受け手の生活にとって有益な情報の提供や気づきのある情報の提供は魅力につながりやすい．受け手にとっての魅力がなければ一方的な情報提供となってしまうため冊子の魅力づくりは重要な視点である．

エネルギー問題に関する冊子において，受け手の興味や関心を高める方法や生活により身近に感じる表現を用いることは，わかりやすさだけでなく，情報の信頼性にも良い影響を与える可能性がある．

冊子を構成する際には，冊子の利用シーンを視野に入れ，どこで使うものなのか，いつ見てもらいたいのか，送り手が対話の中でどのように使うのか，といった冊子の役割や位置づけの問題を整理することも大切である．そのうえで，教科書的スタイルをとるのか，選択肢が明示されたクイズ形式，または共に考える対話の形式をとるのかといった，伝え方のスタイルを検討すると同時に，表紙のデザインやタイトルの設定，受け止めきれる情報量の把握，各頁の構成，見出し文，文字（書体，大きさ），色，使用する写真，図やイラストなど，細部に亘るクリエイティブについて検討することが重要である．

夛田（2020）において，中間層全体のコミュニケーションを考えるとき，比率の大きさから，「無関心おまかせ層」の第４層を意識する必要があることを

提言している．今回の調査結果による表４は，第４層をコミュニケーションターゲットとして冊子を作って印象に残るとされれば，広い層から評価される冊子となる可能性が高いことを示唆している．

以上の本稿の調査結果と考察を踏まえて，エネルギー問題に関するリスク・コミュニケーションを図る主体が，冊子を作成する際に留意すべき点をまとめたチェックリストを提案する（表５）．このチェックリストには，今回の２度にわたる調査で把握した内容の全てが記載されている．

最後に，冊子に対する否定的な意見は，視認性の悪さに起因するものが少なからずあることを指摘したい．可能な限りクリエイティブに関する調査を行い，受け手にとっての視認性を確認し，受け手の印象を体系的に取りまとめ，改善を継続するような取組みが求められる．なお表５のチェックリストは，冊子を作成する際だけでなく，冊子の印象を評価する際にも活用できる．

6. おわりに

本研究では，２回の調査に分けて５つの冊子の印象について把握することを試みた．１回目よりも２回目の調査対象冊子の方が，イラストを多く使った柔らかいものや親しみを感じやすいものの割合が増えている．

２回目の調査後に，参加者に対して電力会社への印象に関する質問を行った．「好感度」，「親しみやさ」，「信頼度」についての印象であるが，結果は全てポジティブな方向に変化している（図15）．

親しみやすいと感じられるイラストを多く使った表現が，送り手の提供情報や送り手自身の信頼に与える影響を明らかにすることは興味深い問題である．

調査後の雑談の中で，第１層からは「冊子を見て，それぞれの電力会社が色々な対策をしていると思った．現場でたくさんの方が働き，色々なバッシングの中でもやっていることを考えると，今までよりは力を入れているのではと思う」，第２層からは「賛成というわけでもないけど，色々冊子を読んだら，（電力会社が）頑張っているなというのを感じた」というコメントがあった．電力会社が伝えることを工夫し努力していることは，好感を持って捉えられていると考えられる．

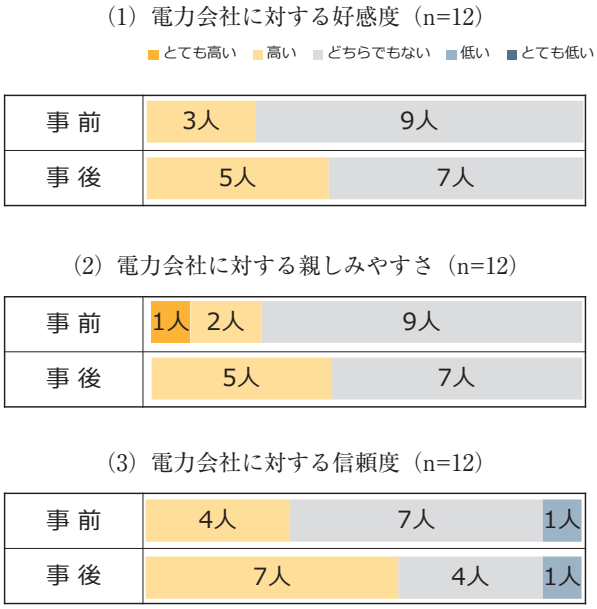


図15　調査前後の電力会社に対する印象の変化（2020年）

表４　印象に残るとされた冊子（中間層４分類別）

［凡例 ●：印象に残る］

	構成比	A誌	B誌	C誌	D誌	E誌
第1層：社会課題アンテナ層	8%	●（一部）	●			●
第2層：暮らしの安心重視層	21%		●	●	●（特に女性）	●
第3層：バランス重視スマート層	12%		●	※悪い評価ではない		●
第4層：無関心おまかせ層	59%		●	●	●（特に女性）	●

表5　エネルギー問題に関する冊子作成・評価の際に活用できるチェックリスト

企画		• 伝えたい対象層が明確になっており，エネルギー問題に関する認知の度合と受止めを把握しているか
		• 伝えたい対象層が，冊子をとおして得られるベネフィット，受け手にとっての魅力があるか
		• 伝えたい対象層がどのようなクリエイティブを好むかを理解しているか
		• 伝えたい対象層が受け止め切れる情報量を理解しているか
作成の際の留意点	表紙のデザイン	• 表紙のデザインは，手に取ってみたいと思うデザインか
		• 表紙のデザインと，冊子の中身のクリエイティブが受け手にとって違和感がないか
	視認性	• 冊子の目的が受け手にとって明確になっており，一目でその目的がわかるようになっているか
		• 受け手にとって，視認性が良いという確認をしているか （フォントの大きさ,行長が長すぎない，図・写真が一目で何を示しているかがわかるか）
		• 受け手にとって，受け止めきれる情報量であることを確認しているか
		• 冊子の表現スタイル（クリエイティブ）が冊子の目的（伝えたい内容）と一致し，受け手にとって違和感がないか
		• 冊子の表現スタイル（クリエイティブ）に合った書体が使われているか
		• 冊子の最初の方の頁が読み進めやすくなっているか（最初の部分は適度に助走ができるようになっているか）
	冊子を開いて，目に止まる構成になっているか	• 伝えたいことに対する導入が適切にできているか
		• 伝えたいことの導入後に受け手にとっての選択肢が明示されているか(答え等が見やすい位置に配置されている)
		• タイトルやリード文に難しいことばが使われていないか
		• タイトルやリード文の文字や書体，文字の色・大きさの強弱が適切に使われているか
	構成要素の説明が読みやすいものになっているか	• 提供する情報量が，取り上げるテーマの導入に対して細かすぎる情報量になっていないか
		• 提供する情報量が，冊子全体を通して統一された情報量になっているか
		• 提供する情報の見出しや小見出しの文字が目立つように配慮されているか（文字の種類，大きさ，色使い）
		• 受け手にとってそうなんだと，気づきのある情報が提供できているか
		• 事業者にとって日常的なことばでも一般の人からすると馴染みのないことばや単位，数字を使っていないか （例：LNG，kWh等）
		• グラフ内に様々なデータを掲載し，凡例と値を何度も確認しないとわからないグラフを使っている
	受け手が,情報を自然なかたちで受け取れるような作りになっているか	• 受け手の受け止めを拘束するような一方的な情報提供になっていないか
		• 長所や短所について，バランスの取れた適切な両面的情報提示がなされているか
		• 多くの課題や問題を提示し，将来の不安を強く感じさせるものになっていないか
		• 生活に身近な情報を交えて説明しているか
		• 受け手の受け止めや考えに共感するような表現があるか
		• 不確実性の高い情報について断定的な表現を使っていないか
		• 安易に諸外国の取組み事例を紹介していないか
	伝えたいメッセージがわかるようになっているか	• 伝えたいメッセージが，視認性の悪いところに配置されていないか
		• 目にとまる表現，アイコン，イラスト，吹き出しを上手く使っているか
		• 伝えたいメッセージの近くに，目を止めるようなクリエイティブが存在し，埋もれていないか
		• 将来の見通しがイメージできるようなクリエイティブを含めているか
	工学的なしくみの紹介の注意点	• 工学的なしくみや対策の紹介の前に，そのしくみの対策が必要となる流れに配慮した構成になっているか
		• 難しいしくみ図や構造図，産業組織図等を簡略化せずに使っていないか
		• 同一頁内で，解説を読まないと理解できない比較図を掲載していないか
		• 設備図や写真，文字が小さくなっていないか
		• 設備やしくみの説明をたくさんの文章で説明していないか
		• 実際に何をしてるかがわかる従業員の取組みを示す写真を掲載しているか
		• イメージしにくい設備固有の名称が，解説なしにたくさん使われていないか
		• 設備の安全を守る人の紹介を先に行う（設備・しくみの説明の後になっていないか）
		• 難しい規制や制度説明が冒頭に来ていないか
作成後の評価	作成後の活用・評価・充実・改善の取組み	• 冊子の活用方法を，送り手側の組織の中で情報共有されているか
		• 冊子を活用して対話を行う送り手側からの冊子に対する評価や意見を集めるしくみがあるか
		• 受け手の側から，冊子に対して直接評価，意見を集める取組みがあるか
		• 集められた評価や意見をとりまとめ，内容を検証して，冊子の改訂を行うしくみがあるか
		• 冊子の評価について，独立した第三者のクリエイティブ評価を受ける用意があるか
参考	目に留まるクリエイティブ例	• 選択肢が明示されたクイズ形式
		• 地図に情報をのせたクリエイティブ
		• 身近な話題や，シンボリックな対象を活用したクリエイティブ
		• 伝えたい内容について，吹き出しやイラストを活用してアイキャッチする
		• 観音開きで，大きなスペースを確保してみせる（観音開きの裏ページは見に止まりにくくなるため注意する）

引用文献

BP(2018). BP Statistical Review of World Energy 67th edition. June 2018.

Nuclear Energy Agency, International Atomic Agency(2016). Uranium 2016:Resources, Production and Demand.

International Energy Agency(2018a). World Energy Balances 2018 edition.

International Energy Agency(2018b). Key World Energy Statistics 2018.

International Energy Agency(2019). World Energy Balances 2019 edition.

U.S. Nuclear Regulatory Commission.(2019). Backgrounder on Reactor License Renewal. 〈https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/fs-reactor-license-renewal.html〉(2021年8月16日)

今村栄一・井内正直・坂東茂(2016). 日本における発電技術のライフサイクルCO_2排出量総合評価, 電力中央研究所報告, Y06.

温室効果ガスインベントリオフィス(2020). 日本の温室効果ガス排出量データ(1990～2019年度確報値). 〈http://www.nies.go.jp/gio/archive/ghgdata/index.html〉(2021年8月16日).

閣議決定(2018). エネルギー基本計画.

関西電力株式会社(2019). 関西電力がお届けする電気の話EL MESSAGE かんでんエル・メッセージ. 〈https://www.kepco.co.jp/corporate/report/index.html〉(2019年9月1日).

関西電力株式会社(2020). エネたび. 〈https://www.kepco.co.jp/corporate/report/index.html〉(2020年9月1日).

気象庁(2020). 各種データ・資料. 〈https://www.jma.go.jp/jma/menu/menureport.html〉(2021年8月16日).

北田淳子(2006). 広報パンフレットの効果測定に関する研究 -パンフレットの構成要素が態度に及ぼす効果- 広告科学, 第47集, 17-31.

木下冨雄(2016). リスク・コミュニケーションの思想と技術 共考と信頼の技法. ナカニシヤ出版.

経済産業省(2015). 長期エネルギー需給見通し. 〈https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/mitoshi/pdf/report_01.pdf〉(2021年8月16日).

経済産業省(2012). 原子力発電所に関する四大臣会合(第3回)終了後枝野経済産業大臣記者会見配布資料. 〈https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/3489016/www.meti.go.jp/policy/safety_security/120406_02.html〉(2021年8月16日).

国立社会保障・人口問題研究所(2019). 人口統計資料集2019. 〈http://www.ipss.go.jp/syoushika/tohkei/Popular/P_Detail2019.asp?fname=T02-09.htm〉(2021年8月16日).

財務省(2020). 貿易統計. 〈https://www.customs.go.jp/toukei/info/index.htm〉(2021年8月16日).

資源エネルギー庁(2014). 第4次エネルギー基本計画及び今後の原子力政策の検討. 〈https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/genshiryoku/pdf/001_05_00.pdf〉(2021年8月16日).

資源エネルギー庁(2015a). 長期エネルギー需給見通し小委員会に対する発電コスト等の検証に関する報告. 〈https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/mitoshi/cost_wg/pdf/cost_wg_01.pdf〉(2021年8月16日).

資源エネルギー庁(2015b). 長期エネルギー需給見通し関連資料. 〈https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/mitoshi/010/pdf/010_06.pdf〉(2021年8月16日).

資源エネルギー庁(2018a). エネルギー基本計画策定後の動向と今後の対応の方向性. 〈https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/pdf/016_s01_00.pdf〉(2021年8月16日).

資源エネルギー庁(2018b). 平成29年度(2017年度)エネルギー需給実績とりまとめ. 〈https://www.meti.go.jp/press/2019/04/20190412007/20190412007.html〉(2021

年8月16日).
資源エネルギー庁（2019）．エネルギー白書2019.
〈https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2019pdf/〉（2021年8月16日）.
夛田幹宏（2020）．エネルギー問題に関する中間層の受け止めとペルソナの案，INSS JOURNAL Vol.27，66-87.
夛田幹宏（2019）．原子力発電に関する情報提供における際の留意点，INSS JOURNAL Vol .26，32-49.
中国電力株式会社（2019）．エネルギーノートブック，2018版.
〈https://www.energia.co.jp/pr/pamph/〉（2019年9月1日）.
中国電力株式会社（2020）．エネルギーノートブック，2019版.
〈https://www.energia.co.jp/pr/pamph/〉（2020年9月1日）.
地球温暖化対策推進本部（2015）．日本の約束草案.
〈https://www.env.go.jp/press/101241.html〉（2021年8月16日）.
中部電力株式会社（2020）．エネルギーを語ろう ene go to.
〈https://www.chuden.co.jp/corporate/report/〉（2020年9月1日）.
土屋智子･小杉素子（2001）．科学技術に関するメッセージ作成の留意点，電力中央研究所報告，Y01002.
福井新聞社（2019）.「嶺北住民 初の避難　県原子力防災訓練　越前市など290人」,『福井新聞』.（2019年9月1日）.
日本エネルギー経済研究所(2018). IEEJアウトルック2019 - エネルギー変革と3E達成への茨の道，日本エネルギー経済研究所第430回定例研究報告会配付資料.
〈https://eneken.ieej.or.jp/whatsnew_op/181015teireiken.html〉（2021年8月16日）.
日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット（2019）．EDMCエネルギー・経済統計要覧2019，日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット編，省エネルギーセンター.
日本原子力文化財団（2018）．原子力・エネルギー図面集.
〈https://www.ene100.jp/zumen〉（2019年9月1日）.
日本原子力文化財団（2019）．原子力・エネルギー図面集.
〈https://www.ene100.jp/zumen〉（2020年9月1日）.
北海道電力株式会社（2019）．エネリーフ.
〈https://www.hepco.co.jp/corporate/public_info/pamphlet/pamphlet.html〉（2019年9月1日）.
松本隆信・塩見哲郎（2004）．原子力発電のリスク・コミュニケーションにおける安全対策情報の効果 - 受け手側の評価 - ，INSS JOURNAL Vol .11，34-49.

T字配管における衝突型逆流現象の数値シミュレーション

Numerical simulation of impinged penetration into T-junction branch lines

歌野原　陽一（Yoichi Utanohara）*1　　三好　弘二（Koji Miyoshi）*1　　釜谷　昌幸（Masayuki Kamaya）*1

要約　T字配管にて温度差のある流体が混合する場合，温度変動に伴う熱疲労が生じることがある．著者らはこれまでにT字配管における流れ場の可視化実験を実施し，主管と分岐管の運動量比に応じて主管流体が間欠的に分岐管内に逆流する現象を確認している．観察された流動様式は，逆流なし，巻き込み型逆流，衝突型逆流の3種類に分類される．本研究では可視化実験で観察された衝突型逆流現象を数値計算で再現し，高温・高圧条件下での侵入深さの推定を行った．乱流モデルにはラージエディシミュレーション（動的スマゴリンスキーモデル）を用いた．主管内径60 mm，分岐管内径20mmである．主管・分岐管の流入流体をともに室温20℃とした等温条件では，分岐管への侵入深さの計算結果は実験結果と定量的に一致した．主管・分岐管の流体温度を等温320℃まで上昇させると，等温20℃の場合より分岐管への侵入が深くなる計算結果となった．粘性係数の低下による壁面摩擦の低下が影響していると考えられる．実機条件を想定し，分岐管の流体温度を室温のまま主管流体の温度を上げ150℃の温度差を付けた場合，等温20℃の場合より約1.4倍侵入が深くなった．温度差の増加に伴い，壁面摩擦の低下に加えて浮力が増加したことが影響していると考えられる．

キーワード　熱疲労，T字配管，分岐管逆流，数値シミュレーション

Abstract　Thermal fatigue cracks may be initiated at T-junction pipes where high- and low-temperature fluids flow in and mix. The authors previously conducted visualization studies of flow fields in a T-junction pipe. As a result, flows from the main pipe penetrated into the branch line intermittently depending on the momentum ratio between main and branch lines. Observed flow patterns were classified into three patterns: no reverse flow, entrained penetration and impinged penetration. In the present study, numerical simulations were carried out to reproduce the impinged penetration and estimate the penetration depth for actual power plant conditions. The large eddy simulation (Dynamic Smagorinsky) was carried out. Inner diameters were D_m = 60 mm (main) and D_b = 20 mm (branch). The simulation results of the maximum penetration depth for room temperature condition (20°C) were agreed well with experimental data quantitatively. As inlet temperatures of main and branch lines isothermally rose to 320°C, the penetration depth became deeper, because wall friction decreased with the decrease of viscosity. When inlet temperature of main line was raised while maintaining the branch line at 20°C and the temperature difference was set to 150°C, which is similar to actual operating condition, the maximum penetration depth became about 1.4 times as deep as that of the isothermal room temperature condition because of the buoyancy effect as well as the decrease of the wall friction.

Keywords　Thermal fatigue, T-junction, Penetration flow, Numerical simulation

1.　はじめに

T字配管は原子力発電プラントや火力発電プラントにおいて一般的に用いられる配管要素である．T字配管にて高温水と低温水が混合する際，高サイクル熱疲労が生じる可能性があることが知られている．例えば，1998年フランスCivaux発電所でのき裂発生に伴う冷却水漏洩事象(1)や近年の米国の原子力発電所でのき裂発生事例(2)などはT字配管下流で発生している．

日本機械学会では発電プラントでの熱疲労による配管損傷を防止すべく，配管の高サイクル熱疲労に関する評価指針(3)を発行している．この指針は実験データベースに基づいて作成されており，高低温水合流による温度差の低減効果を考慮した温度ゆらぎ幅や熱

＊1　（株）原子力安全システム研究所　技術システム研究所

応力評価式を用いて熱疲労発生の可能性が判定される．

熱疲労のメカニズムの更なる理解と評価方法の高度化のため，これまで数多くの研究が行われてきた．例えば，OECD/NEAによるT字配管の流れ場および温度場に対する国際的なベンチマーク[4][5]や，実機プラントと同様の高温条件で流体温度と配管壁面温度を計測したFATHER実験[6]，日本原子力研究開発機構によるT字配管を対象とした一連のWATLON実験[7]などである．そして，これらのT字配管に関する実験に対し，数値流体計算による実験結果の再現方法を確立すべく，これまで様々な取り組みが実施されてきた．

従来のT字配管の熱疲労研究は，主に合流部下流の主管壁面の熱疲労を対象に行われてきた．しかし近年，図1に示すように，合流部から分岐管上流部にも熱疲労によると思われるき裂が米国発電所で発見された[2]．熱疲労き裂発生の原因として考えられるものに，分岐管への逆流現象が挙げられる．このような逆流は“Turbulent penetration”（乱流による侵入）と呼ばれ，これまでいくつかの研究が行われてきた[8]-[11]．既存のTurbulent penetrationに関する研究では，分岐管上流側が弁で閉止されているかもしくは，弁リークが発生し主管流量よりずっと低い分岐管流量が発生している場合が想定されている．

著者らは，T字配管の熱疲労を対象とした研究を実験[12][13]，数値計算[14][15]の両面から行ってきたが，これらは主に合流部下流を対象としたものだった．そこで，分岐管上流側での熱疲労の可能性を調べるために，分岐管への逆流現象を可視化実験で観察した[16]．その結果，主管と分岐管の運動量に応じて「巻き込み型逆流」と「衝突型逆流」の2つの逆流パターンがあることが明らかになった．しかし，実験は室温の水で行っており，高温による影響（浮力など）は検討されていない．実験により明らかになった分岐管への逆流に関する知見を補足・拡張するには，数値計算の適用が望ましい．数値計算に関しては，これまで巻き込み型逆流を対象に実施しており，流動場を定性的に再現できている[17]．本研究では，衝突型逆流を対象に数値計算を行い，可視化実験で観察された流動場の再現性について検討を行った．そして，実機を想定した高温条件での数値計算を行い，温度上昇による逆流現象への影響を検討した．

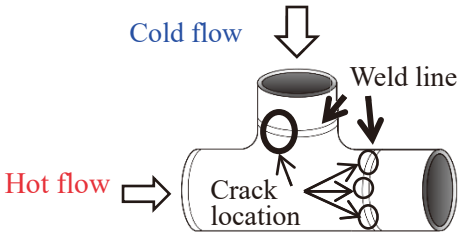


図1. 米国原子力発電所でみられた熱疲労亀裂箇所

2. 観察された流動様式の概要

T字配管における分岐管への逆流現象は可視化実験[16]により観察されており，図2のような流動様式に整理されている．

(1) 逆流無し
(2) 巻き込み型逆流（Entrained penetration）
(3) 衝突型逆流（Impinged penetration）

上記(3)の流動様式はキャビティフローの一種で，これまでの文献では“turbulent penetration”として報告されている[8]-[11]．上記(2)および(3)の流動様式の名称はそれぞれ「巻き込み型逆流」，「衝突型逆流」としている．

図3は流動様式線図を示したもので，次式によって定義される主管流れの運動量M_mおよび分岐管流れの運動量M_bの比M_Rを用いて分類した．

$$M_R = M_m / M_b \tag{1}$$

$$M_m = \rho D_m D_b U_m^2 \tag{2}$$

$$M_b = 1/4\pi\rho D_b^2 U_b^2 \tag{3}$$

ここで，ρ は密度，U_mとU_bは主管および分岐管内の流速である．図3に示すように，逆流に関する流動様式は次の3通りに分類できた．

$M_R < 1.0$:	逆流無し
$1.0 < M_R < 500$:	巻き込み型逆流
$500 < M_R$:	衝突型逆流

本研究では運動量比を$M_R > 500$とし衝突型逆流の再現を行った．

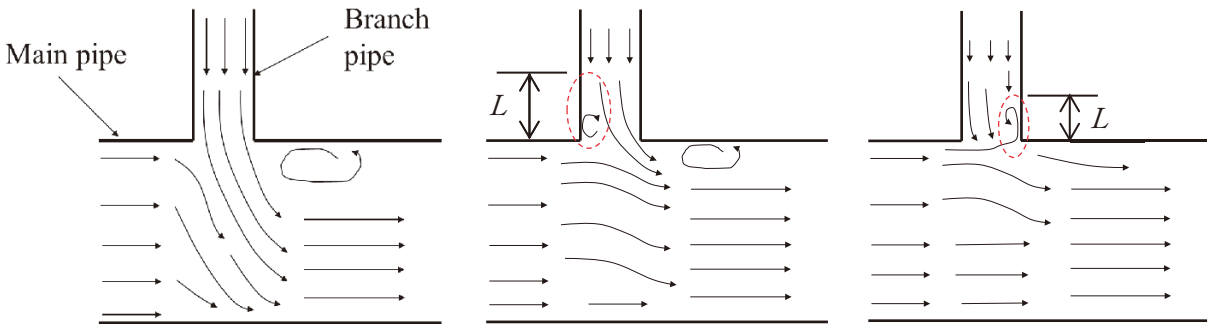


図2. 分岐管への逆流の流動様式[16]

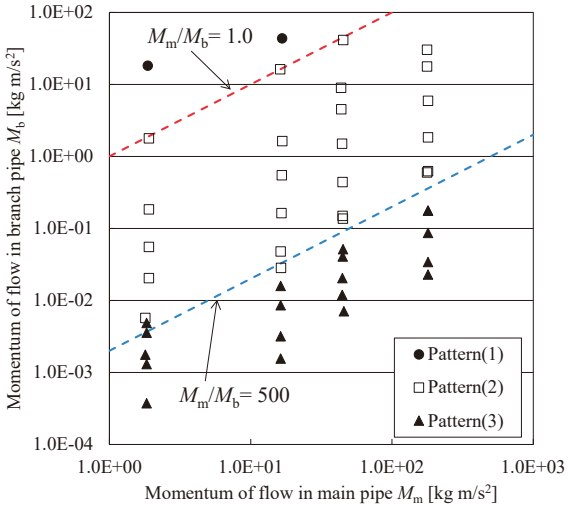


図3. 流動様式線図（主管運動量M_mおよび分岐管運動量M_bによる分類）[16]

3. 数値シミュレーション

図4(a)に数値計算領域を示す．主管内径D_m＝60 mm，分岐管内径D_b＝20mmである．合流部から主管方向の上流，下流に$5D_m$，分岐管方向に$15D_b$の長さを確保した．座標系は主管流れ方向にx，分岐管の流れ逆流方向にzとした．また，主管と分岐管の管中心の交点を座標原点とした．重力が働く方向はz方向負方向である．本研究では管内の流路だけを模擬し，配管金属は計算領域から除外した．本来，配管熱疲労は配管金属部で発生する現象なので，配管金属も計算対象とすることが望ましいが，本研究ではまずは可視化実験で観察された流れ場を再現することを目的とした．可視化実験ではアクリル試験体を用いていることから，管壁内面を断熱境界とした．

図4(b)に計算メッシュを示す．メッシュは6面体メッシュを用い，円管内面に沿うように作成した．また，合流部近傍や壁面近傍などにメッシュを寄せ，空間解像度を高くした．メッシュのセル数は約33万（329,616）セルである．また，壁面第１層のメッシュ厚さが壁面y^+でほぼ$y^+<5$となることを確認している．

表1に計算設定と境界条件を示す．計算にはANSYS FLUENT 2019 を用いた．水の物性値は温度依存とした．浮力はブシネスク近似で計算せず，密度に温度依存性を持たせることで考慮した．乱流はラージエディシミュレーション（LES）Dynamic Smagorinskyモデルで考慮している．水温と流入速度をパラメータとして，表2に示すような9ケースの計算を行った．いずれのケースも$M_R>500$であり，可視化実験[16]では衝突型逆流が観察された条件である．Case 1～5は主管および分岐管の流入速度を固定し，それぞれの温度をパラメータに等温条件，非等温条件でケース分けしている．流体温度の絶対値の影響の加え，合流する流体の温度差の影響も調べた．Case 6～9は分岐管流入速度を増加させ，実機プラントで一般的な運動量比M_R＝2500～6000程度に低下させた場合である．また，温度による侵入深さの違いを比較検討するため，等温条件と実機温度に近い条件（高温側170℃，低温側20℃）の2通りを設定した．時間刻みはΔt＝0.2 msとして，定常RANS収束解を初期条件として計算を開始し，準定常となった3秒～13秒で統計量（時間平均値，RMS値）を取得した．

主管流体の侵入の有無を判断するため，等温条件の

場合は主管流体と分岐管の流体を，同じ物性値を持つ成分の異なる流体として取り扱った．こうすることで，主管と分岐管で等温であっても，分岐管への主管流体の侵入深さを判断することができる．非等温の場合は，温度分布から分岐管への侵入深さを判断できるため，このような取り扱いは行っていない．

侵入深さを定量的に評価するために，図5に示すようにモニターポイントを設置し，1タイムステップ（0.2 ms）ごとのz方向速度，主管流体濃度もしくは温度を記録した．モニターポイントは壁面から1 mm離れた地点で，分岐管深さ方向9.75D_b（195 mm）までの範囲で0.25D_b（5 mm）ごとに40点，各断面内に±30°，±15°，0°の計200点設置した．侵入深さLは，主管流体と分岐管流体が接する境界を起点とし，分岐管を遡る方向を正とした．

表1　数値計算条件

ソフトウェア		ANSYS FLUENT 2019 R1
流体		水（物性値は温度依存）
乱流モデル		Large eddy simulation (Dynamic Smagorinsky)
流入境界条件	速度	表2参照
	速度変動	Vortex法
出口境界条件		圧力流出境界条件 (Pressure-outlet)
壁面境界条件		粘着条件，断熱
時間	時間刻み	0.2 ms
	初期条件	標準k-ε定常解
	統計量	3～13秒（10秒間）

表2　計算ケース

Case	温度		圧力	速度 (運動量)		M_R
	主管 T_m [℃]	分岐管 T_b [℃]	[MPa]	主管 U_m [m/s] (M_m)	分岐管 U_b [m/s] (M_b)	
1	20	20	0.1	10 (1.20E+02)	0.1 (3.14E-03)	38200
2	55	55	0.1	10 (1.18E+02)	0.1 (3.10E-03)	38200
3	320	320	15.4	10 (8.41E+01)	0.1 (2.20E-03)	38200
4	55	25	0.1	10 (1.18E+02)	0.1 (3.13E-03)	37800
5	320	20	15.4	10 (8.41E+01)	0.1 (3.15E-03)	26700
6	20	20	0.1	10 (1.20E+02)	0.256 (2.06E-02)	5830
7	20	20	0.1	10 (1.20E+02)	0.39 (4.77E-02)	2510
8	170	20	3	10 (1.08E+02)	0.256 (2.07E-02)	5220
9	170	20	3	10 (1.08E+02)	0.37 (4.29E-02)	2510

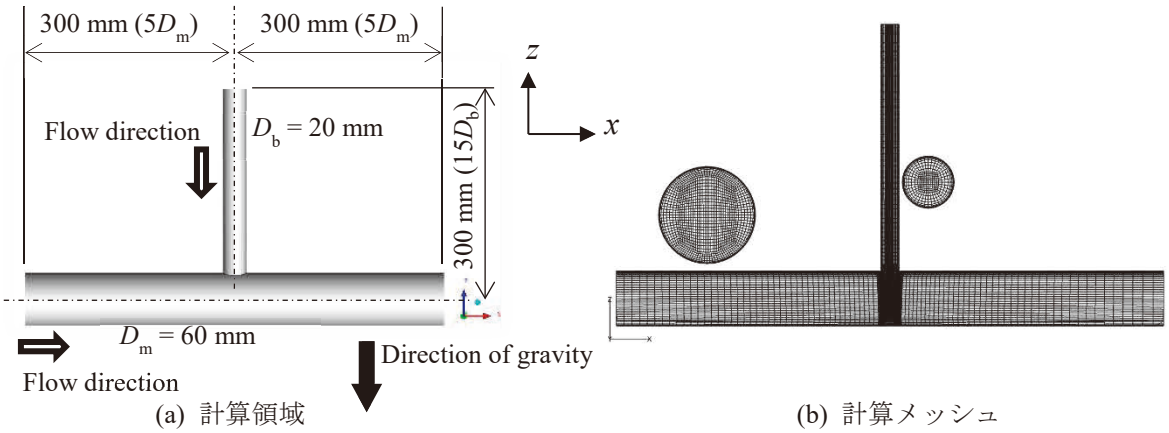


図4. 計算領域および計算メッシュ

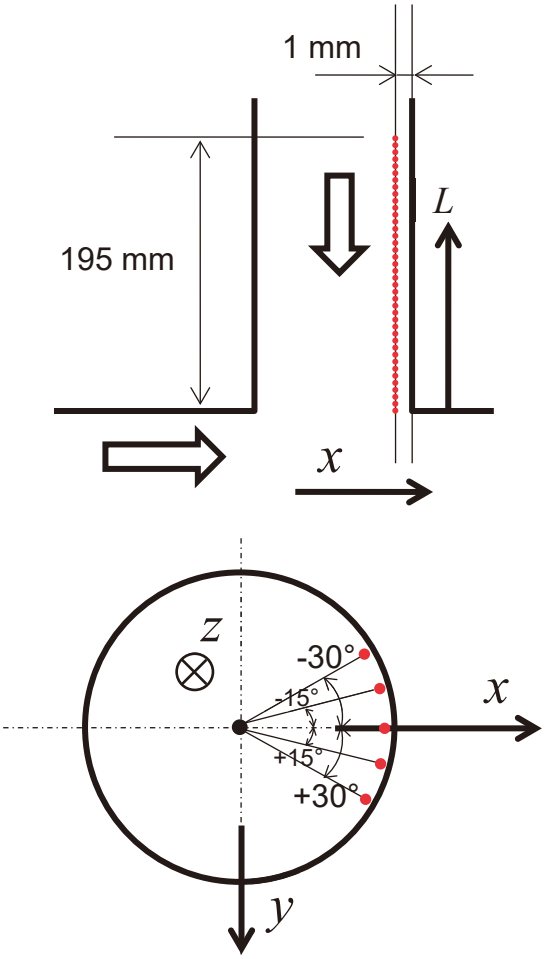


図5. 分岐管内のモニターポイント，壁面近傍200点

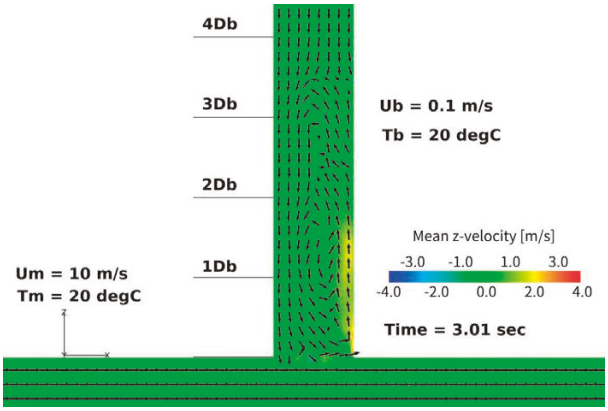
4. 計算結果

4.1 主管流体の濃度分布，もしくは温度分布

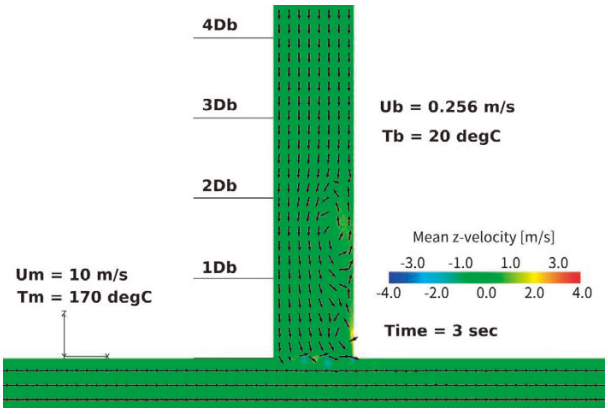
図6にCase 1および8における時刻3秒時における速度ベクトル分布を示す．どちらの場合でも衝突型逆流による分岐管への主管流体の侵入が発生している．侵入深さは時々刻々変動するが，運動量比M_Rの大きいCase 1の方がCase 8の場合よりも深くなる．侵入深さを速度ベクトルの反転位置と定義した場合，時刻3秒時ではそれぞれおよそ$L = 3.5D_b$および$L = 2.0D_b$である．

図7に時刻3秒時における主管流体の質量分率分布（Case1，6，7）もしくは温度分布（Case 8, 9）を示す．質量分率と温度は異なる物理量であるが，分岐管流体の温度は主管流体の侵入により上昇すると考えてほぼ差支えないので，ここではともに主管流体の分布を表す指標として区別せず取り扱っている．主管流体濃度はCase 1では$3.5D_b$程度の侵入となった．分岐管流速を増加させたCase 6，7では，侵入が浅くなった．分岐管内の混合はCase 1のような分岐管断面内で比較的一様に主管流体が分布する状態とは異なり，Case 6，7では分岐管の主管流れ方向に向かって奥側の壁面近傍にのみ分布した．分岐管流速の増加に伴い，侵入した主管流体が押し戻され混合が弱まったものと考えられる．

150℃の温度差を付けた場合，同じ運動量比のCase 6とCase 8を比較すると，Case 8の方が侵入は深い．Case 7とCase 9でもCase 9の方が若干深く潜り込んでいる．温度差増加により浮力の効果が加わり，より侵入が深くなったと考えられる．



(a) Case 1



(b) Case 8

図6. 瞬時の速度ベクトル分布

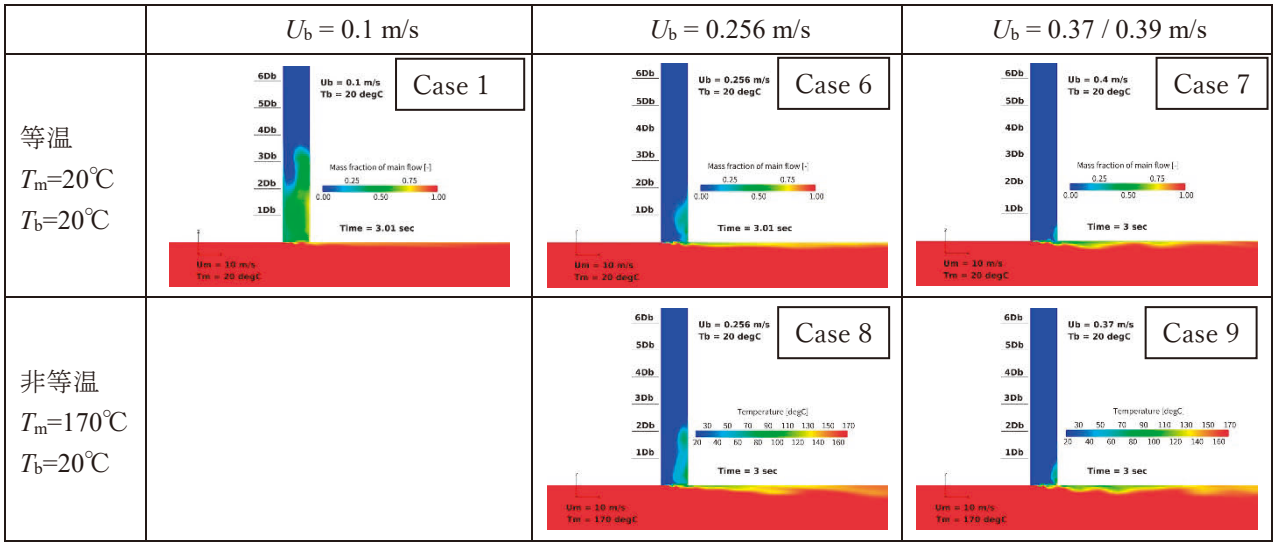


図7. 主流質量分率分布（Case1, 6, 7）および温度分布（Case8, 9）

4.2 主管流体の侵入深さ

モニターポイントにおけるz方向速度の履歴から，侵入深さを定量的に評価した．図8は3～13秒間での各点での記録結果から，逆流流速（z方向負方向に向かう速度）の発生の有無をもって主管流体が侵入したと判定し，最大侵入深さの周方向分布を示したものである．どのCaseも0～30° の範囲では周方向角度に依存せず，ほぼ同じ侵入深さとなっている．最も深く侵入したのはCase 5であり，6D_bの侵入深さとなった．続いてCase 3で，5.25D_bの侵入深さとなった．Case3とCase 5は主管流体が320℃の場合である．次にCase 2およびCase 4で4.5D_bの侵入深さとなり，どちらも主管流体が55℃の場合である．このことから，主管流体の温度は侵入深さに大きく影響を与えていることが示唆される．分岐管流速を増加させたCase 6～9は侵入が浅くなった．

以上のように，最大侵入深さは流体温度と運動量比に依存している．これらの関係をよりわかりやすく把握できるように，図9に最大侵入深さを運動量比で整理したものを示す．図中には実験データも併せて示した．まず，主管と分岐管温度が等温20℃の場合（Case 1, 6, 7）は運動量比の増加とともに最大侵入深さが増加した．侵入深さは実験結果とも定量的に一致した．等温55℃（Case 2）の場合は等温20℃の場合と差がないが，等温320℃（Case 3）では侵入がより深くなった．

この原因として，図10に示すように，温度の上昇とともに粘性係数が低下し，壁面摩擦が低下することが考えられる．粘性係数は20℃で1.0×10^{-3} Pa s，55℃で4.9×10^{-4} Pa s，320℃で7.8×10^{-5} Pa sであり，20℃から55℃では半減程度だが，55℃から320℃では1桁値が低下している．

温度差を付けた場合，ΔT = 30℃（Case 4）では等温20℃の場合とほとんど差がなかったが，ΔT = 300℃（Case 5）では侵入が深くなった．上述の粘性係数低下の影響に加え，浮力影響が顕著に表れたことが影響していると考えられる．実機プラント条件に近い運動量比とΔT = 150℃の温度差を付けたCase 8，9では，それぞれ同程度の運動量比の等温条件Case 6, 7に比べて約1.4倍侵入が深くなった．図9において，等温条件の場合の勾配（Case 6と7）とΔT = 150℃の場合の勾配（Case 8と9）はほぼ同程度である．このことから，等温条件で得られた侵入深さの関係（Case1, 6, 7の直線）を約1.4倍深くすれば，実機で想定される温度差（ΔT = 150℃）での侵入深さを推定できる可能性がある．

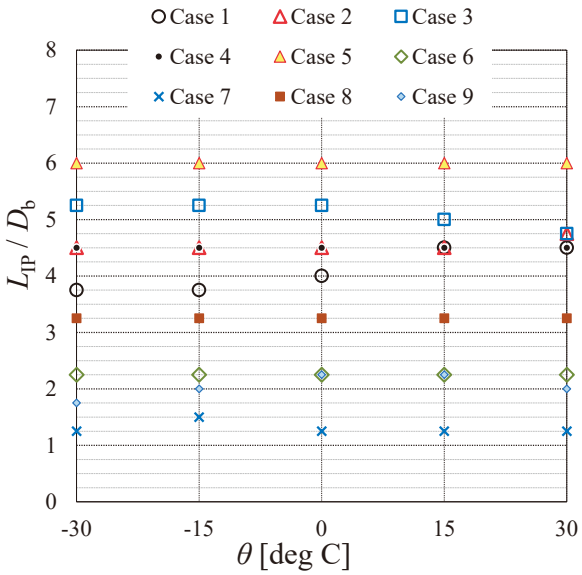


図8. 主管流体の最大侵入位置（3～13秒間）

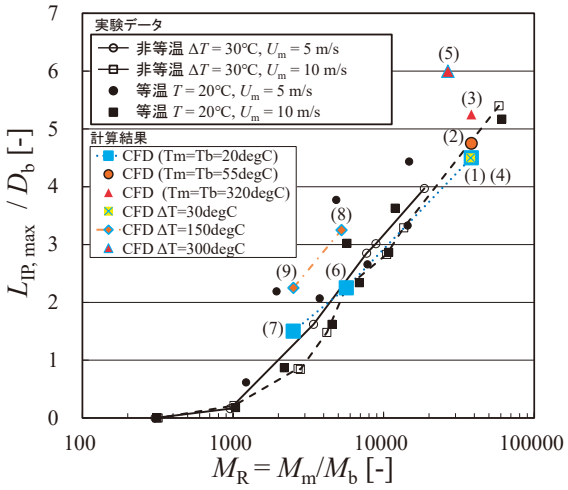


図9. 最大侵入深さの実験データと計算結果の比較
（括弧内の数字はCase番号）

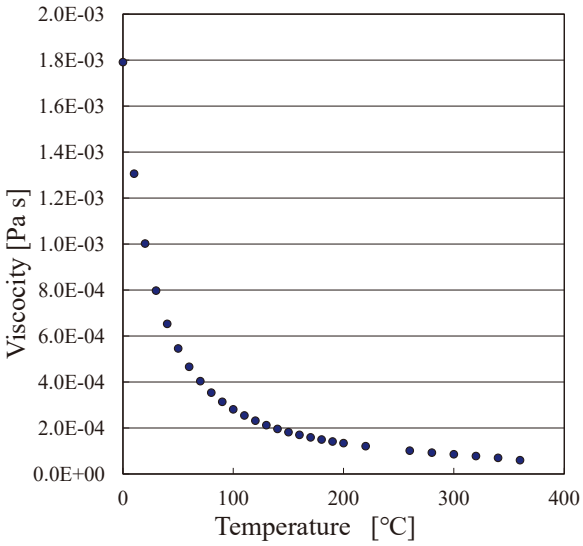


図10. 粘性係数の温度依存性（伝熱工学資料改訂第5版より）[18]

5. 結論

T字配管における分岐管内への主管流体の侵入について数値流体シミュレーションを行い，侵入深さの再現精度を確認し，温度差が侵入深さに及ぼす影響について検討した．これまでの可視化実験では，2つの逆流に関する流動様式（巻き込み型逆流，衝突型逆流）が観察された．ここでは，衝突型逆流を対象に数値シミュレーションを実施した．

(1) 主管・分岐管ともに室温20℃の等温条件では，分岐管への侵入深さの計算結果は実験結果と定量的に一致した．

(2) 主管・分岐管の温度を等温320℃とすると，等温20℃の場合より分岐管への侵入深さが深くなった．粘性係数の低下による壁面摩擦の低下が影響していると考えられる．

(3) 主管・分岐管で150℃程度の温度差を付けることで，等温の場合より約1.4倍侵入が深くなった．温度差の増加に伴い，浮力が増加したことが影響していると考えられる．

引用文献

(1) S. Chapuliot, C. Gourdin, T. Payen, J. P. Magnaud and A. Monavon, “Hydro-Thermal-Mechanical Analysis of

Thermal Fatigue in a Mixing Tee," Nuclear Engineering and Design, Vol. 235, Issue 5 , pp. 575-596, (2005).
(2) M. McDevitt, M. Hoehn, T. Childress and R. McGill, "Analysis and Impact of Recent U.S. Thermal Fatigue Operating Experience," Fourth International Conference on Fatigue of Nuclear Reactor Components, Sevilla, Spain, Sep. 28– Oct. 1, Paper No. 27 (2015).
(3) 日本機械学会, "配管の高サイクル熱疲労に関する評価指針", JSME S 017, (2003).
(4) OECD/NEA, "OECD/NEA-Vattenfall T-Junction Benchmark Specifications," Final version, (2009).
(5) OECD/NEA, "Report of the OECD/NEA-Vattenfall T-Junction Benchmark Exercise," Report No. NEA/CSNI/R(2011)5, (2011).
(6) O. Braillard, R. Howard, K. Angele, A. Shams and N. Edh, "Thermal Mixing in a T-Junction: Novel CFD-Grade Measurements of the Fluctuating Temperature in the Solid Wall," Nuclear Engineering and Design, Vol. 330, pp. 377-390, (2018).
(7) H. Kamide, M. Igarashi, S. Kawashima, N. Kimura and K. Hayashi, "Study on Mixing Behavior in a Tee Piping and Numerical Analyses for Evaluation of Thermal Striping," Nuclear Engineering and Design, Vol. 239, pp. 58-67, (2009).
(8) J.H. Kim, R.M. Roidt and A.F. Deardorff, "Thermal Stratification and Reactor Piping Integrity," Nuclear Engineering and Design, Vol. 139, pp. 83-95, (1993).
(9) E. Deutsch, P. Montanari and C. Mallez, "Isothermal Study of the Flow at the Junction between an Auxiliary Line and Primary Circuit of Pressurised Water Reactor," Journal of Hydraulic Research, Vol. 35, No. 6, pp. 799-812, (1997).
(10) R. Zboray and H.-M. Prasser, "On the Relevance of Low Side Flows for Thermal Loads in T-junctions," Nuclear Engineering and Design, Vol. 241, pp. 2881-2888, (2011).
(11) J. Kickhofel, V. Valori and H.-M. Prasser, "Turbulent Penetration in T-junction Branch Lines with Leakage Flow," Nuclear Engineering and Design, Vol. 276, pp. 43-53, (2014).
(12) K. Miyoshi, A. Nakamura and Y. Utanohara, "An Investigation of Wall Temperature Characteristics to Evaluate Thermal Fatigue at a T-Junction Pipe," Mechanical Engineering Journal, Vol. 1, No. 5, pp. tep0050, (2014).
(13) K. Miyoshi, M. Kamaya, A. Nakamura and Y. Utanohara, "An Investigation of Thermal Stress Characteristics by Wall Temperature Measurements at a Mixing Tee," Nuclear Engineering and Design, Vol. 298, pp. 109-120, (2016).
(14) Y. Utanohara, A. Nakamura, K. Miyoshi and N. Kasahara, "Numerical Simulation of Long-Period Fluid Temperature Fluctuation at a Mixing Tee for the Thermal Fatigue Problem," Nuclear Engineering and Design, Vol. 305, pp. 639-652, (2016).
(15) Y. Utanohara, K. Miyoshi and A. Nakamura, "Conjugate Numerical Simulation of Wall Temperature Fluctuation at a T-Junction Pipe," Mechanical Engineering Journal, Vol. 5, No. 3, pp. 18-00044, (2018).
(16) Miyoshi, K., Utanohara, Y., and Kamaya, M., "Penetration Flow into a Branch Pipe Causing Thermal Fatigue at a Mixing Tee", Nuclear Engineering and Design, Vol. 360, 110496, (2020).
(17) Y. Utanohara, K. Miyoshi and M. Kamaya, "Numerical Simulation of Penetration Flow into T-Junction Branch Lines," The 18th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-18), Portland, OR, USA, August 18-22, Paper No. 27613 (2019).
(18) 日本機械学会, "伝熱工学資料", 改訂第 5 版, (2009).

T字管合流部 の熱疲労評価のための熱伝達率の解明*1

Heat transfer coefficient suitable for thermal fatigue assessment at a T-junction

三好　弘二（Koji Miyoshi）*2　　釜谷　昌幸（Masayuki Kamaya）*2
歌野原　陽一（Yoichi Utanohara）*2　　中村　晶（Akira Nakamura）*2

要約　高低温水が合流するT字管では，熱疲労による亀裂が発生することがある．本研究ではこのような熱疲労を評価するためにT字管の管内面温度変動に関する非定常熱伝達率を調べた．また，明らかにした非定常熱伝達率を用い，管内面の温度変動の予測精度について検証した．高低温水合流部における流体温度および管内面の温度は熱流動実験にて調べた．分岐管からの高温の噴流と低温の主流の境界部にて発生した流体温度変動が，管内面における温度変動を引き起こしていた．非定常熱伝達率は温度変動が比較的高い範囲にてパワースペクトル法により求めた．求めた非定常熱伝達率はDittus-Boelter式により求まる値の最大で3.3倍であった．壁近傍の流体温度と求めた非定常熱伝達率を用いて管内面の温度変動を見積もった結果，その誤差は温度変動範囲基準で±20%以下であった．

キーワード　T字管，熱伝達率，熱疲労，温度変動

Abstract　Thermal fatigue cracks have been found at T-junctions where high and low temperature fluids flow in. In this study, the heat transfer coefficient at a T-junction was investigated. The obtained heat transfer coefficient was then validated by estimating the temperatures on a pipe inner surface. The temperatures of the fluid and the pipe inner surface were measured by mock-up tests in which high and low temperature water was mixed. The fluid temperature fluctuation near the boundary between the hot jet flow and the cold main flow caused the temperature on the pipe inner surface to fluctuate. The heat transfer coefficient was obtained by the power spectrum method for the pipe inner surface where the temperature fluctuation was relatively large. The estimated heat transfer coefficient was 3.3 times larger than that calculated by the Dittus-Boelter equation. The temperature on the pipe inner surface was successfully estimated using the obtained heat transfer coefficient and the measured fluid temperature in the vicinity of the inner surface. The prediction error was less than ±20% for the temperature fluctuation range.

Keywords　T-junction, Heat transfer coefficient, Thermal fatigue, Temperature fluctuation

1.　はじめに

原子力発電所のT字管合流部で熱疲労が発生した事例がある[(1),(2)]．温度差のある流体が混合し，配管内面の温度変動を引き起こし，疲労亀裂を発生させる現象はサーマルストライピングと呼ばれ，その現象は図1に示す通り複数のプロセスから構成される[(3)]．まず，混合により流体温度変動が管内で発生し，次に流体から配管への熱伝達により管内面の温度変動が発生する．そして，温度変動は管厚方向に伝わり熱応力変動を誘起し疲労損傷が蓄積する．

T字管の高低温水合流部では、温度や流速が複雑に変化するため管内面の温度を予測することは困難といえる．しかしながら，熱応力を評価するためには．その温度変動を予測することが必要である．疲労損傷は応力の変動範囲が配管材料の疲労限度を超えると蓄積するため，疲労評価には管壁の温度変動範囲の最大値を予測することが望まれる．

これまでT字管での混合現象に対する数値シミュレーションが数多く行われている[(4)-(13)]．流体温度の計算結果は実験結果との比較検証が行われ，管壁近傍の流体温度変動を予測できることが報告されている[(5)-(9),(11),(13)]．一方，管壁の温度変動を正確に予測することは，流体から構造への熱伝達過程の複雑さから未だ難しい状況である．

T字管における熱疲労評価のため，高低温水の混合

＊1　Nuclear Engineering and Design (2020), Vol. 370, 110916を和訳し転載
＊2　(株)原子力安全システム研究所　技術システム研究所

現象に対するいくつかの実験もこれまで行われている[14)-24)]．また，熱電対を使用した配管温度の調査も行われている[14),16),18)-23)]．T字合流部の配管内面の温度変動を測定するためには，熱伝導による温度変動の減衰の影響を低減するため熱電対の測定点が管内表面近くとなるように調整する必要がある．また，温度変動範囲の最大値を捉えるには，複数の位置において測定しなければならない．それゆえ，高低温水が合流するT字管の内表面の温度を予測する手法の開発が望まれる．

Moriyaら[25)]は，構造材表面近傍の流体温度と求めた非定常熱伝達率から構造材表面の温度を予測する手法を開発しており，その手法では，熱伝達率を得るために流体と壁温度の時刻歴データのパワースペクトル密度（PSD）を用いている（以下，パワースペクトル法）．また，その手法の妥当性については，並行に配置した2つのノズルから噴出させた高温と低温の水を試験平板に衝突させた実験で検証されているが，T字合流部での妥当性確認については報告されていない．Kimuraら[16)]は，パワースペクトル法にてT字合流部の複数の箇所にて非定常熱伝達率を求め，Dittus-Boelter式[26)]で得られる熱伝達率より大きくなることを示している．また，Fontesら[14)]も同様な方法でT字合流部の非定常熱伝達率を調べ，測定した管壁温度と推定した管壁温度を比較することで流体から構造への位相遅れの影響を議論している．

本研究では，T字合流部の管内面における最大温度変動範囲を予測するために非定常熱伝達率を調べた．合流前の断面平均流速の比は，比較的壁近傍の流体温度変動が高いことが知られている壁面噴流条件[15)]を模擬する条件とした．初めに，管内面の温度変動が比較的大きい範囲を明らかにし，その範囲において測定した温度を用いて非定常熱伝達率を算出した．次に，求めた非定常熱伝達率を用いて推定した管内面温度変動とその測定値を比較することでその妥当性について検証した．最後に，最大温度変動範囲の評価方法について考察した．

2. 試験方法

2.1 実験ループ

図2に高低温水合流実験に使用したT-Cubic実験ループの概略図を示す[27)]．本ループは，高温水タンク，低温水タンク，混合水タンクおよび2つのポンプから構成される．高低温水は試験部で混合され，各々の流量は弁操作により調整される．試験部の上流には，エルボや弁にて生じる乱れを低減するため整流器を設置した．試験部入口の流速分布は，レーザードップラー流速計にて測定し，十分発達した乱流分布になって

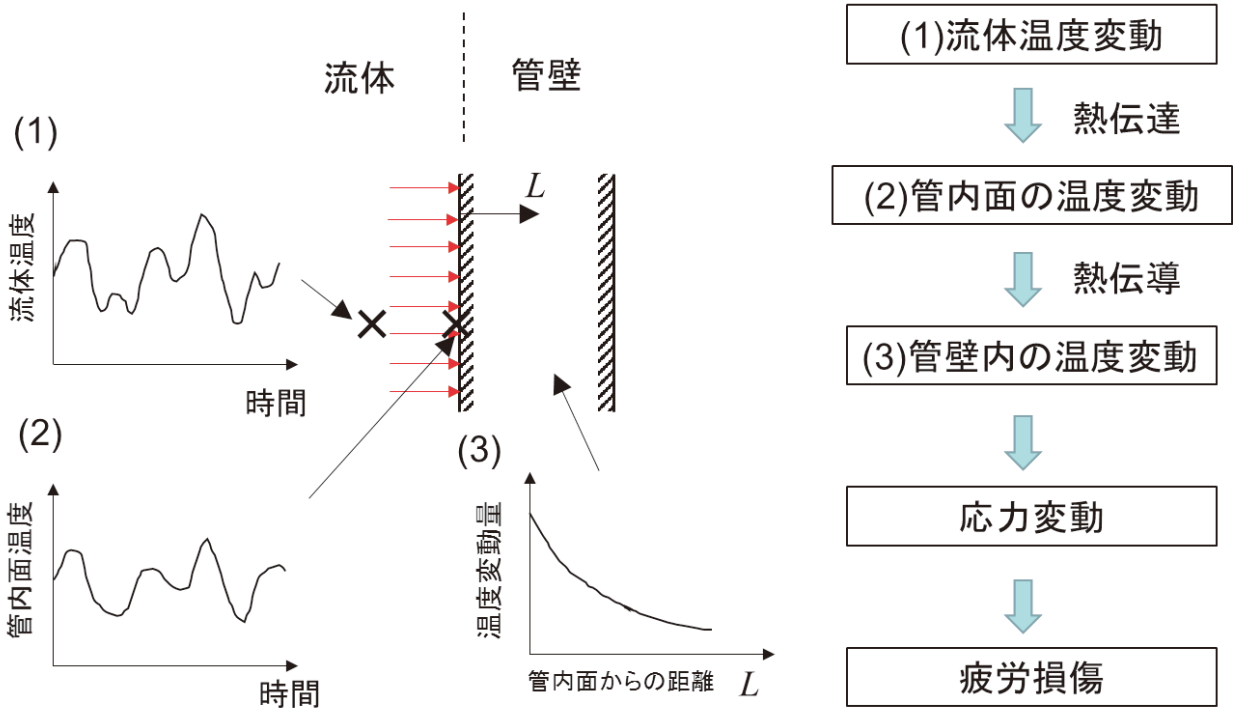


図1 サーマルストライピング現象の概要

いることを確認している[28]．試験部入口の流体温度は整流器の上流に設置したシース熱電対にて測定した．図3に温度測定用試験体の概略図を示す．試験体は，管内径150 mmの主管と管内径50 mmの分岐管から成るT字管であり，ステンレス製とした．主管と分岐管の管外径はJISの6Bおよび2B相当とし，管厚は，各々7.6 mm, 5.3 mmである．試験部の形状は，WATLON試験装置[15]-[16]とほぼ同じである．配管の外面には保温材を取り付けた．

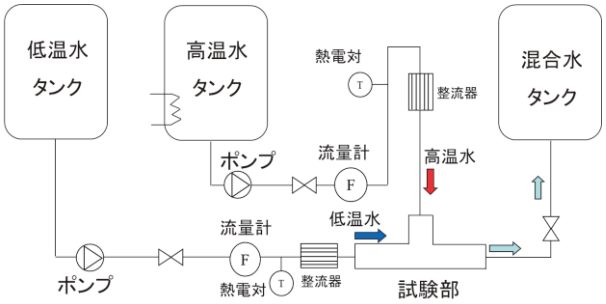


図2 実験ループ(T-Cubic)の概略図

2.2 管内面温度測定

配管内面の温度はシース熱電対（外径0.5 mm）を管内面近傍に挿入することで測定した．熱電対周囲の断面写真を図4に示す．幅0.6 mm, 深さ0.7 mmの溝に非接地型のシース熱電対を埋め込んだ．図5に主管内面の148点の温度測定点を示す．測定箇所は，図中の赤丸で示した．z = −50 mm ～ 225 mmの範囲に25 mm間隔，θ = 0° ～ 60°の範囲に5°間隔，z = −150 mm，600 mmではθ = 0°の位置とした．ここでzは主管軸で，θは分岐管の方向を0°とする主管上流側からみて反時計周りの周方向角度とする（図3参照）．原点は，主管軸と分岐管軸の交点とした．温度測定の時間間隔は0.02秒とした．白金測温抵抗体タイプの基準温度計を挿入し，静水状態で校正式を作成し，測定データを校正処理した．その誤差は，0.42 K以下であり，入口温度差の1.4%相当である．

図4の熱電対取り付け断面写真に示したとおり熱電対の測定点は管内表面より0.45 mm離れており厳密には管内表面位置での温度ではない．よって，本研究では，逆解析により測定値から管内表面温度を算出した．その解析手法の詳細は既報[28]を参照されたい．

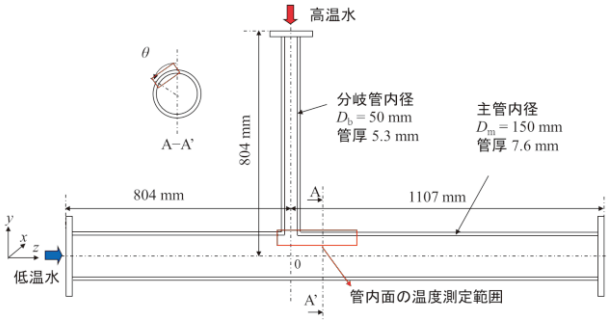


図3 温度測定用試験体の概略図

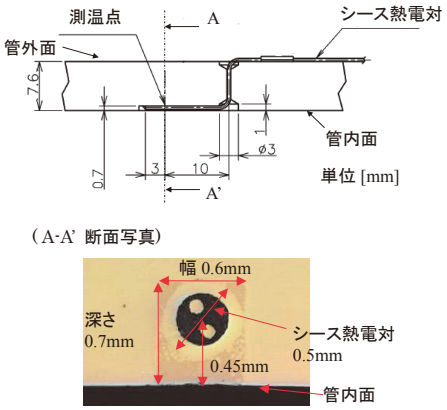


図4 熱電対埋設方法

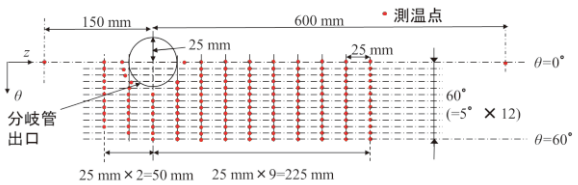


図5 主管の管内面温度の測定箇所

2.3 流体温度測定

図6に主管内の流体温度を測定した装置の概略図を示す[29]．16のシース熱電対をくし状に配置しており，その間隔はr = 0 ～ 70 mmで5 mm，最も外側の1つはr = 74 mmの位置（主管内面から1 mm）とした．外径0.25 mmのシース熱電対を直径1 mm，長さ50 mmの筒にシースを差し込み，シース先端を長さ5 mmだけ筒から出して根元はロウ付けで固定した．装置は，試験部下流から挿入し，z方向への並進，θ方向への回転により流体温度分布を計測した．温度の測定間隔は0.02秒とした．Kamideら[15]は，T字管合流部の流体温度を，くし状に配置した熱電対により測定できることを示している．本研究においても，同様な形状の測定装置を使用した．

測定した温度は，前節と同様な手法で校正した．その誤差は，0.42 K以下であり，入口温度差の0.4%相当である．

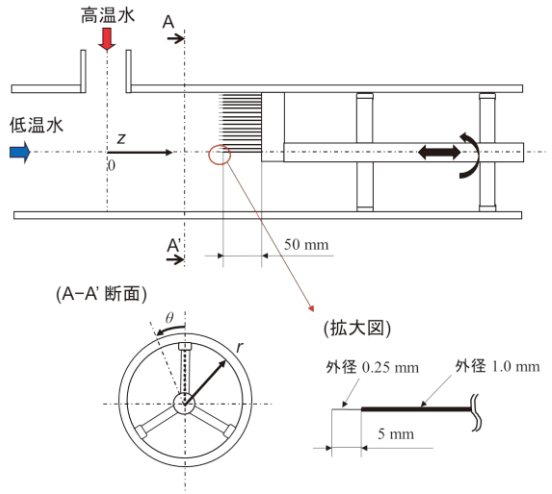


図6　流体温度測定装置

2.4　実験条件と方法

主管側と分岐管側の入口流体温度は，20 ℃，50 ℃，入口断面平均流速は，1.0 m/s，0.7 m/sとした．レイノルズ数は，各々1.5×10^5，6.3×10^4である．断面平均流速は，流量を流路面積で除することで求めた．Kamideら[15]は，T字管合流部の流動様式を主管側と分岐管側の入口部での流れの運動量比により分類しており，分岐管からの流入運動量が比較的小さい条件では，分岐管からの噴流が主管の壁に沿って流れることで壁近傍にて比較的高い温度変動が発生することを示している．本研究の条件は，その流動様式を再現する条件とした．

初めに，主管内面の温度分布を160秒間測定した．その際，図6に示した流体温度測定装置は主管内に挿入しなかった．次に，管内面と流体温度を同時に測定するため，その測定装置を挿入した．くし状の熱電対は，z = 0.33D_m，0.5D_m，0.67D_m，0.83D_m，1.0D_m (= 50 mm，75 mm，100 mm，125 mm，150 mm)の位置に移動し，分布を測定するため回転させた．θ方向の測定間隔は5°とした．z方向とθ方向の最小目盛りは1 mmおよび1°で，その測定誤差はz = ±0.2 mmおよびθ = ±0.2°である．管内面および流体温度は，各位置で160秒間測定した．

3.　実験結果

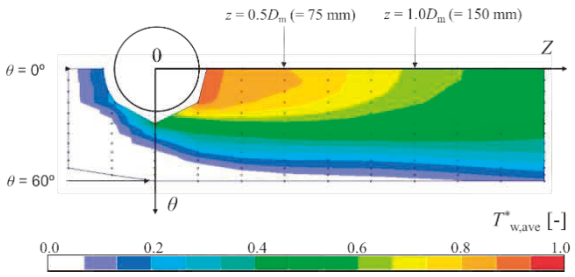
3.1　管内面温度

図7に主管内表面位置における時間平均温度および温度変動範囲の分布を示す．変動範囲は時刻歴データの最大値と最小値の差として定義した．これらの温度は以下の式に示す通り無次元化した．

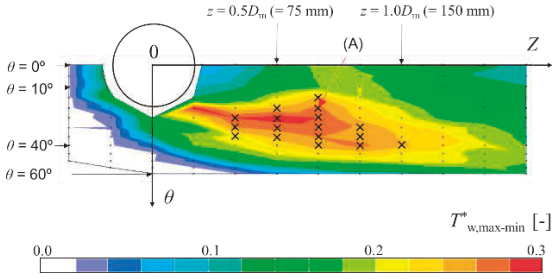
$$T^*_{\mathrm{w,ave}} = \frac{T_{\mathrm{w,ave}} - T_{\mathrm{m}}}{T_{\mathrm{b}} - T_{\mathrm{m}}} \tag{1}$$

$$T^*_{\mathrm{w,max-min}} = \frac{T_{\mathrm{w,max}} - T_{\mathrm{w,min}}}{T_{\mathrm{b}} - T_{\mathrm{m}}} \tag{2}$$

ここで$T_{\mathrm{w,ave}}$は160秒間における管内面の時間平均温度，T_{m}およびT_{b}は，主管側，分岐管側の試験部入口の流体温度である．そして，$T_{\mathrm{w,max}}$および$T_{\mathrm{w,min}}$は160秒間における管内面の最大温度，最小温度とした．コンター図は測定値の線形補間により描画した．時間平均温度は，分岐管出口部で比較的高くなっており，下流に行くに従い減少していた．一方，温度変動範囲は，時間平均値が高い位置でとくに大きいわけではなく，分岐管出口部からz = 1.0D_m (= 150 mm)の範囲でかつ θ = 10°から40°の範囲で比較的大きくなっていた．



(a) 時間平均温度



(b) 温度変動範囲

図7 主管の内表面位置での温度分布

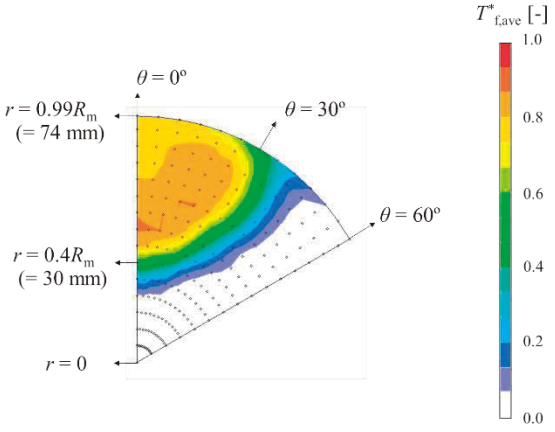
3.2 流体温度

図8に主管内の流体の時間平均温度と温度変動範囲の分布を示す．測定範囲はz = 0.5D_m (= 75 mm)のθ = 0°から60°の範囲である．これらの温度は以下の式にて無次元化した．

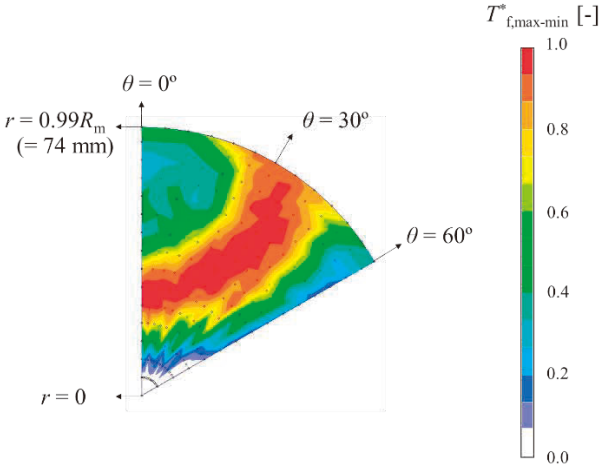
$$T^*_{f,ave} = \frac{T_{f,ave} - T_m}{T_b - T_m} \quad (3)$$

$$T^*_{f,max-min} = \frac{T_{f,max} - T_{f,min}}{T_b - T_m} \quad (4)$$

ここで，$T_{f,ave}$は時間平均流体温度，$T_{f,max}$および$T_{f,min}$は160秒間における流体温度の最大値，最小値である．コンター図は，測定値を線形補間して作成した．時間平均温度は，r = 0.4R_m (= 30 mm)から0.99R_m (= 74 mm)かつθ = 0°から35°の範囲で比較的高かった．R_mは主管の内半径である．一方，温度変動範囲は，θ = 15°から50°の範囲で比較的高く，その範囲は高温の噴流と低温の主流との境界部であった．境界部では，馬蹄形状の大規模な渦構造が発生することが知られている[7]．高温の噴流がその渦により揺動することで温度変動が発生したと推定される．温度変動範囲が大きくなっていたθ = 30°から40°の範囲は図7(b)に示した管内面の温度変動が大きかった位置と近くなっていた．



(a) 時間平均温度



(b) 温度変動範囲

図8 主管内の流体温度分布（z = 0.5D_m）

4. 非定常熱伝達率

4.1 算出方法

Moriyaら[25]は，サーマルストライピングに対する非定常熱伝達率を見積もる方法として，パワースペクトル法を提案している．本研究でも，この手法を適用した．パワースペクトル法の流れを図9に示す．初めに，測定した管内面温度と壁近傍の流体温度データの各々に対しPSDを算出する．そして，それらの比であるΦ_w/Φ_fを計算する．ここでΦ_wは管内面温度に対する，Φ_fは壁近傍の流体温度に対するPSDである．一方，Φ_w/Φ_fは理論的に以下の式で表される．

$$\frac{\Phi_w}{\Phi_f} = \frac{1}{2e^2 + 2e + 1} \quad (5)$$

$$e = \frac{\sqrt{\pi \rho_w c_{pw} \lambda_w f}}{h} \quad (6)$$

ここでρ_w, c_{pw}およびλ_wは，配管の密度，定圧比熱，熱伝導率であり，fおよびhは周波数および非定常熱伝達率である．これらの関係式は1次元の熱伝達モデルから得られる[25]．非定常熱伝達率hは，管内面温度と壁から1 mmの位置での流体温度の測定値から算出したΦ_w/Φ_fを式(5)で回帰することで求めた．

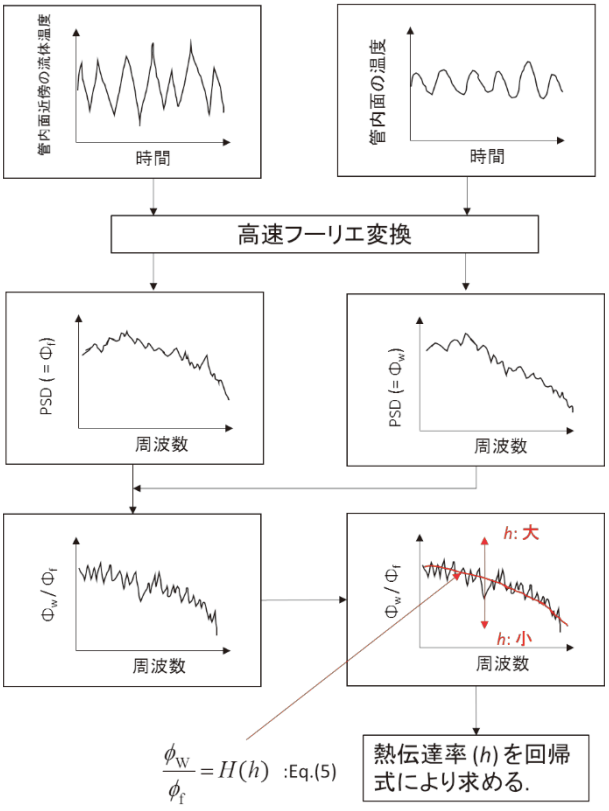


図9 パワースペクトル法による非定常熱伝達率の評価フロー

4.2 算出結果

非定常熱伝達率hは，管内面の温度変動範囲が比較的大きかった17箇所（図7(b)の×）で見積もった．図10はz = 0.67D_m，θ = 20°（図7(b)のA点）におけるパワースペクトル密度（PSD）を示す．Φ_fは管内面から1 mm位置における流体温度から算出した．PSDは，卓越周波数を明瞭にするため，以下の平滑化処理を行った．まず，160秒間の測定温度から81.92秒のデータを1.0秒毎ずつずらして70個抽出した．次に、各データに対してPSDを計算し，70個のPSDの平均を求めた．

図11は，測定温度から得たΦ_w/Φ_fと式(5)により回帰した曲線を示す．周波数0.1Hzから10Hzまでの範囲で回帰した結果得られた非定常熱伝達率は8795 W/(m^{2}K)であった．0.1Hz以下の値は，測定時間の限界から信頼性が低く，10Hz以上の値は熱応力変動にあまり寄与しないことから[27]，回帰計算には含めなかった．算出した非定常熱伝達率の一覧を表1に示す．無次元化した非定常熱伝達率h^*は，以下の式[26]で求めたDittus-Boelterの管主流部の定常熱伝達率h_{DB}で除した値である．

$$Nu = \frac{h_{DB} D_m}{\lambda_f} = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (7)$$

ここで，Nuはヌセルト数，D_mは主管内径，λ_fは流体の熱伝導率，Reはレイノルズ数，Prはプラントル数である．ReおよびPrは，断面平均流速および混合平均温度を用いて算出した．図12に管軸方向のh^*の分布を示す．それらの最小値は1.2，最大値は3.3であった．図には本研究と近い実験条件（主管内径150 mm，分岐管内径50 mm，主管側入口流速1.46 m/s 分岐管側入口流速1.00 m/s）で得られたKimuraら[16]のデータも参考のため示した．得られた値はKimuraらの値に近いことがわかる．

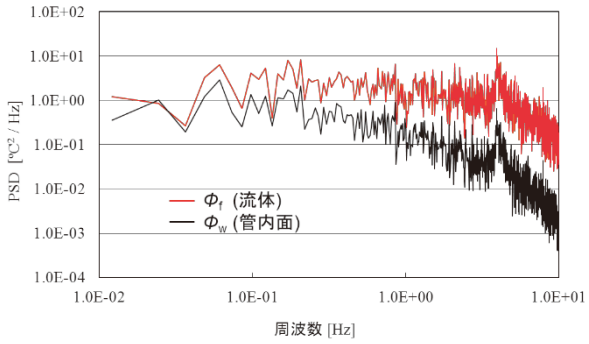


図10 温度のPSD分布（z = 0.67D_m，θ = 20°）

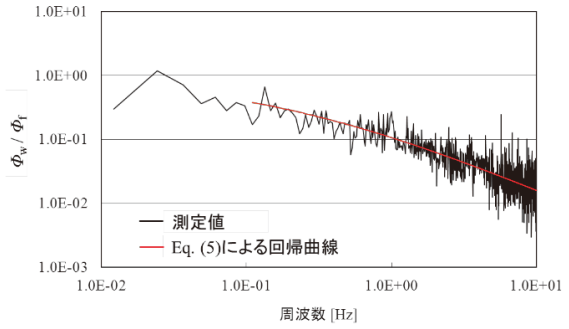


図11 温度のPSDの比と回帰曲線

表1 求めた非定常熱伝達率

z/D_m [-]	θ [°]	h_{DB} [W/(m²K)]	h [W/(m²K)]	$h^*= h/h_{DB}$ [-]
0.33	25	3210	10240	3.2
0.33	30	3195	4032	1.3
0.33	35	3165	3927	1.2
0.50	20	2798	9120	3.3
0.50	25	2859	8366	2.9
0.50	30	2856	5085	1.8
0.50	35	2847	4226	1.5
0.67	15	2890	8246	2.9
0.67	20	2931	8795	3.0
0.67	25	2909	7533	2.6
0.67	30	2929	6530	2.2
0.67	35	2942	5813	2.0
0.67	40	2945	6564	2.2
0.83	30	3041	6899	2.3
0.83	35	3038	6388	2.1
0.83	40	3036	6953	2.3
1.0	40	3114	6912	2.2

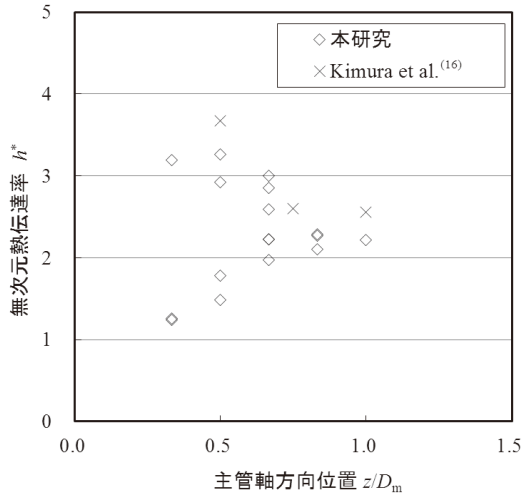


図12 非定常熱伝達率の主管軸方向分布

5. 非定常熱伝達率の検証

5.1 管内面温度の推定方法

非定常熱伝達率の妥当性を検証するために流体温度の測定値と得られた非定常熱伝達率から管内面温度を再計算した．そして，その予測精度について熱電対で測定した管内面温度と比較することで検証した．管内面温度は，1次元熱伝導解析により計算した．解析には汎用解析コードであるAbaqus（version 6.14）を使用した．図13に解析条件を示す．表1に示した非定常熱伝達率hと管内面から1 ㎜位置の流体温度T_fから管内面の熱流束q_{inner}を計算した．管壁の外面は断熱条件とした．管壁の初期温度には流体温度の時間平均値を与えた．節点の間隔は0.1 ㎜で一様である．解析に使用した物性値を表2に示す．

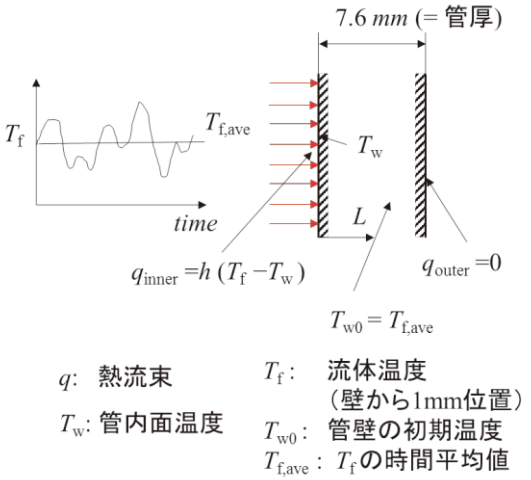


図13 管内面温度の解析条件

表2 熱伝導解析に使用した物性値

密度 [kg/m³]	7920 (at 20° C) 7910 (at 50° C)
熱伝導率 [w/(mK)]	16.0 (at 20° C) 16.1 (at 50° C)
比熱 [J/(kgK)]	498 (at 20° C) 502 (at 50° C)

5.2 管内面温度の推定結果

図14にz = 0.67D_m，θ = 20°における管内面温度の推定値と測定値を示す．当該位置は，温度変動範囲$T^*_{w,max-min}$が最大となった位置である．図は，比較を容易にするため160秒間の温度のうち10秒間の範囲を示す．これらの温度は以下の式により無次元化した．

$$T^*_w = \frac{T_w - T_m}{T_b - T_m} \tag{8}$$

ここで，T_wは管内面の温度である．非定常熱伝達率と流体温度を使用して求めた温度は測定値とよく一致

している．式(2)で求めた温度変動範囲$T^*_{w,max-min}$は，測定値0.27に対し推定値は0.26であった．図14に示すような温度変動が発生する位置に対しては，非定常熱伝達率も変化すると考えられるが，時間的に一定の非定常熱伝達率を適用しても温度変動範囲を精度よく予測できた．図11に示したように非定常熱伝達率は式(5)の回帰式により求めた．Φ_w/Φ_fの回帰式からの偏差は周波数が減少するにつれて少なくなっており，低周波成分の予測精度が高周波成分と比較して良好であり，その結果，管内面温度が比較的よく予測できたと考えられる．

一般に，疲労損傷は応力変動範囲の最大値が材料の疲労限度を超えると発生することが知られている．それゆえ，疲労評価には温度変動範囲$T^*_{w,max-min}$を予測することが重要である．図15は，表1に示した17箇所に対する$T^*_{w,max-min}$の推定値と測定値の関係を表す．推定には各々の位置で見積もったhを使用した．図に示すとおり管内面の温度変動範囲の最大値の予測誤差は±20%以内であった．

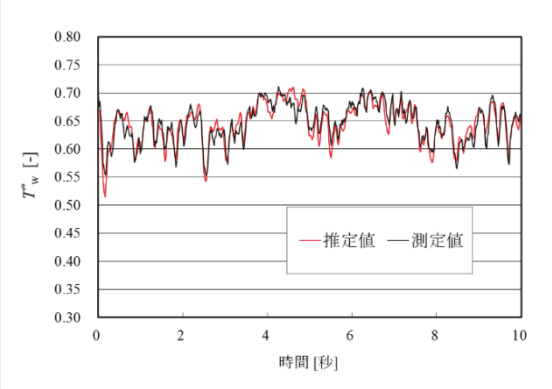


図14 管内面温度の推定結果
(z = 0.67D_m, θ = 20°)

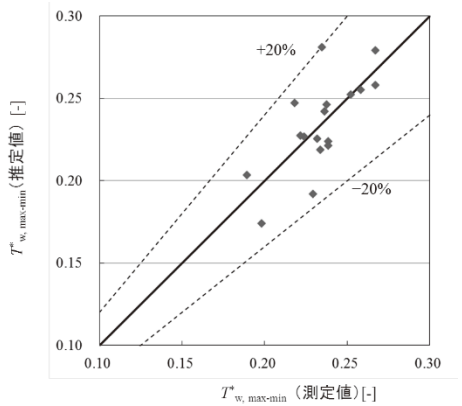


図15 管内面温度の推定値と測定値の関係

6 考察

1章で述べたようにT字合流部の壁近傍の流体温度変動は数値シミュレーションにより比較的よく予測できることが報告されている．しかしながら，管壁の温度変動については，精度よく予測可能な状況ではない．その理由として，温度変動が流体から構造に熱伝達する過程での減衰を予測することの難しさがある．また，2.2節で示したとおり管内面の温度を測定することは容易ではない．それゆえ，数値シミュレーションや実験で求めた流体温度を用いて管内面の温度変動を予測することが望まれる．

図14および図15の結果が示した通り，非定常熱伝達率hと壁近傍の流体温度が与えられれば図13に示した解析手法により管内面の温度変動範囲$T^*_{w,max-min}$を推定することができる．ここで使用した非定常熱伝達率hは，時間変化しない一定値であることは注目すべきことである．これは，管内面の温度変化が1/hの熱抵抗を考慮することで予測できたことを意味する．

図16は，z = 0.67D_m, θ = 20°における壁から1 mmの位置の流体温度を用いて推定した$T^*_{w,max-min}$を示している．表1に示したように最大のh^*は3.3であったので，保守的な評価をするためにh = 3.3h_{DB}として$T^*_{w,max-min}$を計算した．その結果，見積もった値は測定値にほぼ近くなっていた．一方，h = h_{DB}を使用して推定した$T^*_{w,max-min}$は，測定値より小さくなっていた．Dittus-Boelter式は直管内の十分発達した乱流に対して適用される式である．Kimura[16]らはT字合流部において，壁近傍の高い流速が流体から構造への熱伝達を増加させていたことを示している．局所的な乱れが熱伝達を増加させ，h = h_{DB}に対する$T^*_{w,max-min}$が過小評価されたと考えられる．$T^*_{w,max-min}$の過小評価は疲労評価のうえで非保守的となることに注意を要する．$T^*_{w,max-min}$を壁近傍の流体温度変動範囲である$T^*_{f,max-min}$と等しいと仮定することは保守的で簡易な評価方法である．しかしながら，$T^*_{f,max-min}$の最大値は0.92であり図16に示す通り測定値と比較して大きすぎる．この仮定は疲労評価上過度に保守的といえる．以上のことから$T^*_{w,max-min}$には，保守性を考慮して3.3倍した非定常熱伝達率を採用すべきと考える．その値は流速比や口径比のような試験条件に依存する可能性があり，境界条件の影響は今後の課題である．

図17に表1に示した17箇所で測定した$T^*_{f,max-min}$と

$T^*_{w,max\text{-}min}$の関係を示す．壁近傍の流体温度変動と管内面温度変動との間に相関関係は認められなかった．これは，$T^*_{f,max\text{-}min}$が最大となる位置で$T^*_{w,max\text{-}min}$が最大とはならなかったことを意味する．図18(a)に$T^*_{f,max\text{-}min}$が最大となった位置（$z = 0.33D_m$，$\theta = 35^o$）と$T^*_{w,max\text{-}min}$が最大となった位置（$z = 0.67D_m$，$\theta = 20^o$）におけるPSDを示す．図に示す通り，流体温度の周波数の特徴は類似していることがわかる．一方，図18(b)に示す通り$z = 0.67D_m$，$\theta = 20^o$における管内面温度のPSDは$z = 0.33D_m$，$\theta = 35^o$におけるPSDより大きくなっていた．これは，流体から構造への熱伝達が$z = 0.67D_m$，$\theta = 20^o$の位置の方が大きいことを意味する．実際，非定常熱伝達率の推定値は，表1に示す通り$z = 0.33D_m$，$\theta = 35^o$ではh = 3927 W/(m^{2}K)，$z = 0.67D_m$，$\theta = 20^o$ではh = 8795 W/(m^{2}K)であった．この差は，流体温度の周波数特性の違いではなく他の要因により引き起こされた可能性がある．図19(a)に$z = 0.33D_m$，$\theta = 35^o$位置での，図19(b)に$z = 0.67D_m$，$\theta = 20^o$位置での測定温度を示す．$z = 0.33D_m$，$\theta = 35^o$における流体温度は間欠的に増加しているが，$z = 0.67D_m$，$\theta = 20^o$では間欠的に減少している．このことから，前者の位置は，高温噴流の外側に位置するが、後者の位置はその内側に位置しているといえる．噴流内の速度変動強度はwake領域に発生した渦により増加することが知られており[15]，この速度変動の増加が非定常熱伝達率を増加させたと推察される．それゆえ，$T^*_{f,max\text{-}min}$は$z = 0.33D_m$，$\theta = 35^o$にて最大となったが，$T^*_{w,max\text{-}min}$は，$z = 0.33D_m$，$\theta = 35^o$よりむしろ$z = 0.67D_m$，$\theta = 20^o$で最大となったと考えられる．

$T^*_{w,max\text{-}min}$は，$T^*_{f,max\text{-}min}$が最大となった位置において最も大きくはならなかった．このことから，流体から構造への熱伝達により$T^*_{w,max\text{-}min}$の最大値が緩和されたとも解釈できる．それゆえ，非定常熱伝達率の最大値と$T^*_{f,max\text{-}min}$の最大値を用いることで管内面の温度変動範囲の最大値を保守的に予測することが可能である．$h = 3.3h_{DB}$と$z = 0.33D_m$，$\theta = 35^o$における流体温度を用いて$T^*_{w,max\text{-}min}$を見積もると，その値は0.38となり測定値である0.27より大きく，流体温度変動範囲の最大値0.92より小さくなっていた．これらの結果から，管内面の最大温度変動範囲が合理的に予測可能であるといえる．

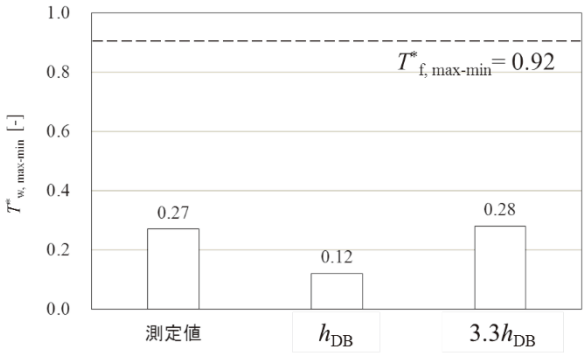


図16 管内面の温度変動範囲
($z = 0.67D_m$，$\theta = 20^o$)

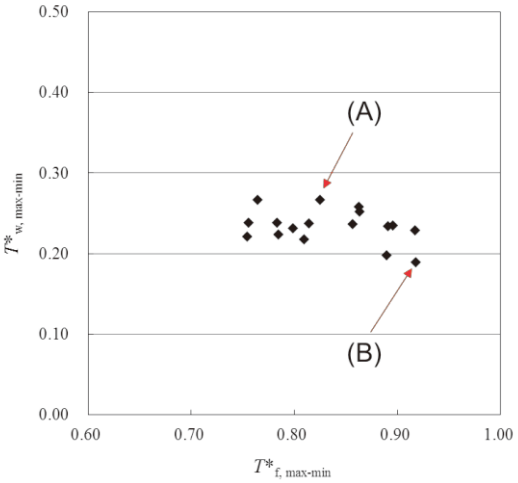
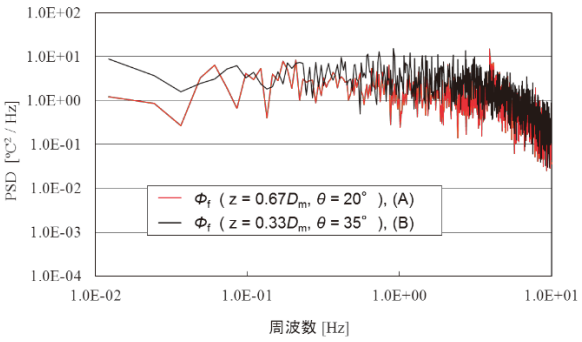
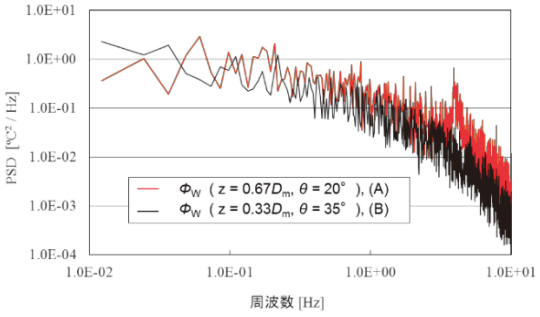


図17 流体温度と管内面温度の温度変動範囲の測定値の関係；(A) $z = 0.67D_m$，$\theta = 20^o$；(B)$z = 0.33D_m$，$\theta = 35^o$

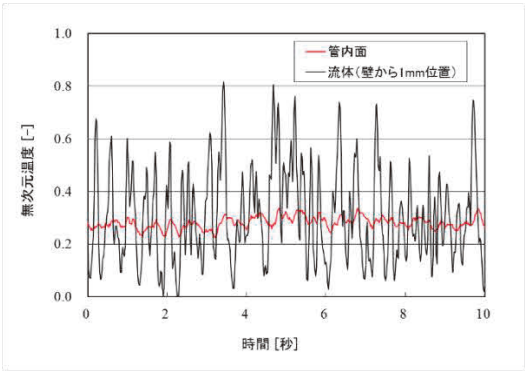


(a) 流体温度

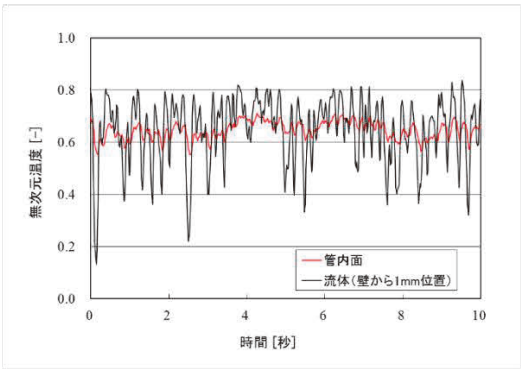


(b) 管内面温度

図18 温度のパワースペクトル密度分布



(a) z = 0.33D_m, θ = 35°



(b) z = 0.67D_m, θ = 20°

図19 温度測定値の時間変化

7. まとめ

本研究では，T字管の高低温水合流部にて流体と管内面の温度を測定し，非定常熱伝達率をパワースペクトル法にて得た．次に，求めた非定常熱伝達率と管内面近傍の流体温度の測定値から管内面温度を推定した．その結果，以下の結論が得られた．

(1) 高温噴流と低温の主流の境界部で発生した流体温度変動が管内面の温度変動を引き起こしていた．

(2) 見積もった非定常熱伝達率はDittus-Boelter式で求めた値より大きく，その最大値は3.3倍であった．

(3) 求めた非定常熱伝達率と壁近傍の流体温度を用いて管内面の温度変動範囲を見積もった．その結果，予測誤差は20%以下であった．

(4) 管内面の温度変動範囲は流体温度変動範囲が最大となった位置において最大とはならなかった．これは，非定常熱伝達率が高温噴流内に発生する渦のような流れの構造に依存していたためと考えられる．そのため，管内面の最大温度変動範囲は，非定常熱伝達率の最大値と壁近傍の流体温度の変動範囲が最大となった位置における流体温度を用いて合理的に予測することができた．

引用文献

(1) Chapuliot, S., Gourdin, C., Payen, T., Magnaud, J.P., Monavon, A. (2005). Hydro-thermal-mechanical analysis of thermal fatigue in a mixing tee, Nuclear Engineering and Design 235, 575-596.

(2) McDevitt, M., Hoehn, M., Childress, T., McGill, R. (2015). Analysis and impact of recent U.S. thermal fatigue operating experience, Fourth International Conference on Fatigue of Nuclear Reactor Components, Paper No. 27.

(3) Kasahara, N., Itoh, T., Okazaki, M., Okuda, Y., Kamaya, M., Nakamura, A., Nakamura, H., Machida, H., Matsumoto, M. (2014). Development of thermal fatigue evaluation methods of piping systems, E-Journal of Advanced Maintenance, Vol.6, 14-23.

(4) Howard, R. and Pasutto, T. (2009). The effect of adiabatic and conducting wall boundary conditions on LES of a thermal mixing tee, Proceedings of 13th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-13),

Paper No.N13P1110.

(5) Nakamura, A., Oumaya, T., Takenaka, N. (2009). Numerical investigation of thermal striping at a mixing tee using detached eddy simulation, Proceedings of 13th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-13), Paper No.N13P1074.

(6) Nakamura, A., Utanohara, Y., Miyoshi, K.,Kasahara, N. (2015). A Review of Evaluation Methods Developed for Numerical Simulation of the Temperature Fluctuation Contributing to Thermal Fatigue of a T-junction Pipe, E-Journal of Advanced Maintenance, Vol.6-4, 118-130.

(7) Tanaka, M., Ohshima, H. Monji, H. (2010). Thermal mixing in T-junction piping system related to high-cycle thermal fatigue in structure, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 47, No. 9, 790-801.

(8) Qian, S., Kanamaru, S., Kasahara, N. (2012). High-accuracy analysis methods of fluid temperature fluctuations at T-junctions for thermal fatigue evaluation, Proceedings of the ASME 2012 Pressure Vessels & Piping Division Conference (ASME-PVP), Paper No. PVP2012-78159.

(9) Qian, S., Kanamaru, S., Kasahara, N. (2015). High-accuracy CFD prediction methods for fluid and structure temperature fluctuations at T-Junction for thermal fatigue evaluation, Nuclear Engineering and Design, Vol. 288, 98-109.

(10) Höhne, T. (2014). Scale resolved simulation of the OECD/NEA-Vattenfall T-junction benchmark, Nuclear Engineering and Design, Vol.269, 149-154.

(11) Tanaka, M. and Miyake, Y. (2015). Numerical simulation of thermal striping phenomena in a T-junction piping system for fundamental validation and uncertainty quantification by GCI estimation, Mechanical Engineering Journal, Vol. 2, No. 5, https://doi.org/10.1299/mej.15-00134.

(12) Utanohara, Y., Nakamura, A., Miyoshi, K., Kasahara, N. (2016). Numerical simulation of long-period fluid temperature fluctuation at a mixing tee for the thermal fatigue problem, Nuclear Engineering and Design, Vol.305, 639-652.

(13) Utanohara, Y., Miyoshi, K., Nakamura, A. (2018). Conjugate numerical simulation of wall temperature fluctuation at a T-junction pipe, Mechanical Engineering Journal, Vol.5, No.3, https://doi.org/10.1299/mej. 18-00044.

(14) Fontes, J., Braillard, O., Cartier, O., Dupraz, S. (2009). Evaluation of an unsteady heat transfer coefficient in a mixing Area: the FATHER experiment associated to the specific “Coefh” sensor, Proceedings of 13th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-13), Paper No. N13P1136.

(15) Kamide, H., Igarashi, M., Kawashima, S., Kimura, N., Hayashi, K. (2009). Study on mixing behavior in a tee piping and numerical analyses for evaluation of thermal striping, Nuclear Engineering and Design 239, 58-67.

(16) Kimura, N., Ono, A., Miyakoshi, H., Kamide, H. (2009). Experimental study on high cycle thermal fatigue in T-junction, Proc. of 13th Int. Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-13), Paper No. N13P1169.

(17) Courtin, S. (2013). High cycle thermal fatigue damage prediction in mixing zones of nuclear power plants: engineering issues illustrated on the FATHER case, Procedia Engineering 66, 240-249.

(18) Smith, B.L., Mahaffy, J.H., Angele, K. (2013). A CFD benchmarking exercise based on flow mixing in a T-junction, Nuclear Engineering and Design, Vol. 264, 80-88.

(19) Kickhofel, J., Prasser, H.-M., Selvam, P.K., Laurien, E., Kulenovic, R. (2016). T-junction cross-flow mixing with

thermally driven density stratification, Nuclear Engineering and Design 309, 23-39.

(20) Selvam, P.K. (2017). Thermal mixing characteristics of flows in horizontal T-junctions, Dissertation, University of Stuttgart, http://dx.doi.org/10.18419/opus-9160

(21) Zhou, M., Kulenovic, R., Laurien, E., Kammerer, M., Schuler, X. (2017). Thermocouple measurements to investigate the thermal fatigue of a cyclical thermal mixing process on a dissimilar weld seam, Nuclear Engineering and Design 320, 77-87.

(22) Zhou, M., Kulenovic, R., Laurien, E. (2018). Experimental investigation on the thermal mixing characteristics at a 90° T-junction with varied temperature differences, Applied Thermal Engineering 128, 1359-1371.

(23) Zhou, M., Kulenovic, R., Laurien, E. (2019). T-junction experiments to investigate thermal-mixing pipe flow with combined measurement techniques, Applied Thermal Engineering 150, 237-249.

(24) Orea, D., Vaghetto, R., Nguyen, T., Hassan, Y. (2020). Experimental measurements of flow mixing in cold leg of a pressurized water reactor, Annals of Nuclear Energy 140, 107137.

(25) Moriya, S., Ogura, K., Shiina, K., Tanimoto, K., Fukuda, T., Minami, Y. (2003). Prediction method of surface temperature fluctuation for thermal striping evaluation, Proceedings of 11th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-11), Paper No. 36207.

(26) Dittus, F.W. and Boelter, L.M.K. (1930). Heat transfer in automobile radiators of tubular tube, University of California Publications in Engineering, Vol.2, No.13, 443-461.

(27) Miyoshi, K., Kamaya, M., Utanohara, Y., Nakamura, A. (2016). An investigation of thermal stress characteristics by wall temperature measurements at a mixing tee, Nuclear Engineering and Design 298, 109-120.

(28) Miyoshi, K., Nakamura, A., Utanohara, Y., Takenaka, N. (2014). An investigation of wall temperature characteristics to evaluate thermal fatigue at a T-junction pipe, Mechanical Engineering Journal, Vol.1, No.5, https://doi.org/10.1299/mej.2014tep0050

(29) 三好 弘二, 中村 晶, 歌野原 陽一 (2014) . T字配管部の流体温度ゆらぎによる熱応力特性の解明 INSS JOURNAL, 21, 86-98.

ステンレス鋼溶接金属のPWR1次冷却水模擬環境中の腐食特性への熱時効と照射の影響

Effects of Thermal Aging and Irradiation on Corrosion Behavior of Austenitic Stainless Steel Weld Metals in Simulated PWR Primary Water

藤井　克彦（Katsuhiko Fujii）*1　　山田　卓陽（Takuyo Yamada）*1
國谷　耕平（Kohei Kokutani）*1　　福谷　耕司（Koji Fukuya）*1

要約　熱時効したオーステナイト系ステンレス鋼溶接金属にFeイオン照射してフェライト／オーステナイトの相境界の組成変化を調べるとともに，PWR1次冷却水模擬環境中の腐食特性を調べた．熱時効後に照射した試料で相境界に顕著な偏析が生じ，耐食性の低下に関係するCr濃度の低下とSi濃度の増加が確認された．さらに，相境界で偏析が生じた試料で相境界に沿った選択的な酸化の進行が確認され，照射に伴い相境界の耐食性が低下することがわかった．

キーワード　ステンレス鋼溶接金属，熱時効，照射，相境界の照射誘起偏析，相境界の選択酸化

Abstract　The thermal-aged austenitic stainless steel weld metals were irradiated with Fe ions to investigate the composition change of the phase boundary of ferrite / austenite, and the corrosion behavior of the weld metals in a simulated PWR primary water were investigated. Significant segregation occurred at the phase boundary in the specimens irradiated after thermal aging, and it was confirmed that the Cr concentration decreased and the Si concentration increased, which were related to the decrease in corrosion resistance. Furthermore, it was confirmed that selective oxidation progressed along the phase boundary in the specimens in which segregation occurred at the phase boundary, and it was found that the corrosion resistance of the phase boundary decreased with irradiation.

Keywords　stainless steel weld metal, thermal aging, irradiation, radiation induced segregation at phase boundary, selective oxidation along phase boundary.

1.　はじめに

応力腐食割れ（stress corrosion cracking，SCC）に対して高い耐性を有するオーステナイト系ステンレス鋼においては，加圧水型原子炉（pressurized water reactor，PWR）の1次冷却水環境でのSCC発生の報告は，酸素滞留域での事象と照射誘起応力腐食割れ（irradiation assisted stress corrosion cracking，IASCC）を除き非常に少ない[(1)～(5)]．

SCC進展については，非鋭敏化ステンレス鋼において，PWR1次冷却水模擬環境の高温B-LiOH溶液環境で冷間加工度依存性とその電位の影響，温度依存性とその冷間加工度の影響，応力依存性とその冷間加工度の影響が調べられている[(6)～(9)]．その結果，SCC形態は粒界型SCC（intergranular SCC，IGSCC）であり，電位の低い高温水中でもIGSCCの進展が認められている．一方で，鋭敏化ステンレス鋼においては，PWR1次冷却水模擬環境ではIGSCC進展は認められない[(6)]．

また，ステンレス鋼溶接金属においても，PWR1次冷却水模擬環境ではSCC進展は認められない[(10)]．しかし，沸騰水型軽水炉（boiling water reactor，BWR）の標準水環境や酸素添加高温B-LiOH溶液環境ではデンドライト境界に沿ったSCC進展が生じ，非鋭敏化ステンレス鋼のSCC進展速度に近い値も報告されている[(10)(11)]．さらに，熱時効によりSCC進展速度は増加する傾向が認められている．ステンレス鋼溶接金属はオーステナイト相とフェライト相からなる2相組織であり，それぞれの腐食特性の変化とSCC進展挙動の相関が調べられているが[(10)(12)]，熱時効によるSCC進展の促進機構のみならず，電位依存性についてもその機構はよくわかっていない．

＊1　（株）原子力安全システム研究所　技術システム研究所

軽水炉条件を想定した熱時効では,スピノーダル分解とG相の析出によりフェライト相が硬化し,延性脆性遷移温度の上昇や破壊靭性値の低下を生じる.PWR炉内構造物のステンレス鋼溶接部では,中性子照射の寄与を考慮する必要がある.中性子照射によっても熱時効と同様にフェライト相が硬化するが,その微視的な変化は熱時効とは同じではない.さらに,中性子照射によりオーステナイト相も硬化するとともに,相境界の構造や組成も変化すると考えられる.このようなミクロ組織やミクロ組成の変化はステンレス鋼のIASCC研究から明らかなようにSCCの発生や進展に影響する.また,その変化は時間,中性子照射量の増加とともに大きくなるため,長期間のプラントの供用を想定した場合には,熱時効効果を加味した照射ステンレス鋼溶接金属のSCC評価が必要となる可能性がある.しかし,ステンレス鋼溶接金属のPWR1次冷却水模擬環境での腐食特性への熱時効と照射の影響,それらの重畳影響はほとんど調べられていない.そこで,長期間の中性子照射によるステンレス鋼溶接金属のミクロ組織変化を把握するとともに,腐食およびSCC特性を調べて照射ステンレス鋼溶接金属のIASCC挙動を検討することが必要である.

本研究では,熱時効およびFeイオンで模擬照射したステンレス鋼溶接金属をPWR1次冷却水模擬環境で腐食試験して,照射ステンレス鋼溶接金属の腐食特性を調べた.

2. 実験方法

2.1 供試材

400℃で100時間,1,000時間,10,000時間それぞれ時効した308Lおよび316L溶接金属とその未時効材を供試材として用いた.以下,それぞれ100h時効材,1kh時効材,10kh時効材,未時効材と呼ぶ.表1に化学組成を示すとともに,図1に308L溶接金属を例として未時効材の代表的な金相組織を示した.フェライト相の含有量は12〜15%である.フェライト相はオーステナイト下地に幅数μmの樹枝状に分散しており,連続的に存在していた.また,316L溶接金属も同様な組織であり,フェライト相の含有量は約15%である.なお,400℃の時効による金相組織の変化はともに認められていない.

未時効材および時効材に対して,京都大学イオン照射設備DuETでイオン照射試験を実施した.照射には,6.4 MeVのFe^{3+}イオンを用いた.照射温度は300℃であり,深さ600 nmでの照射量0.2 dpa(損傷速度3.3×10^{-5} dpa/s),照射量1 dpa(損傷速度1.0×10^{-4} dpa/s),照射量5 dpa(損傷速度3.3×10^{-4} dpa/s)の照射を行った.なお,損傷量の計算にはSRIM2006を用い,はじき出しエネルギーをE_d = 40 eVとして行った[13].注入されたFeイオンの600 nm深さ位置での量は最大0.005 at%である.時効材と未時効材に対してイオン照射した試料をそれぞれ時効0.2dpa照射材,時効1dpa照射材,時効5dpa照射材,未時効0.2dpa照射材,未時効1dpa照射材,未時効5dpa照射材と呼ぶ.

フェライト相およびオーステナイト相の硬さの変化ならびにアトムプローブ(atom probe tomography, APT)測定によるスピノーダル分解および溶質原子クラスタの形成に関するデータは既に報告済みである[14].以下にその概要を示す.

- 熱時効により増加したフェライト相の硬さは照射により減少する.その原因は熱時効によるスピノーダル分解が低減するためである.

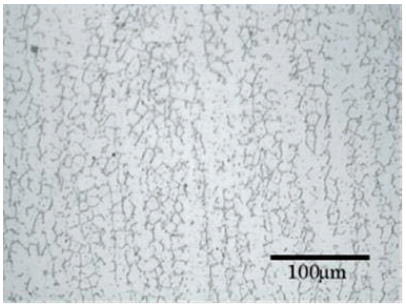


図1 308L溶接金属の組織

表1 308Lおよび316L溶接金属の化学組成(wt%)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Fe
308L	0.032	0.35	1.45	0.024	0.002	9.79	19.53	-	Bal.
316L	0.024	0.42	1.56	0.025	0.002	12.11	19.26	2.20	Bal.

・ イオン照射のように速い損傷速度条件下では照射がスピノーダル分解への熱時効影響を加速しない.
・ 照射により形成するクラスタは熱時効の有無によらず類似しており，クラスタ形成に対する熱時効と照射の重畳影響は小さい.
・ Mo はスピノーダル分解を抑制するのに対して，クラスタ形成を促進する効果がある.

2.2 フェライト/オーステナイトの相境界のAPT分析

集束イオンビーム（focus ion beam, FIB）加工装置を用いてフェライト相とオーステナイト相の境界を含む試験片を採取し，APT 測定用の針状の試料を作製した.針状の試料は軸がイオン照射面に平行で，深さ 600 nm になるように作製した．これにより，APT 測定された領域はほぼ一定の照射量と見なすことができる.

APT 測定には,CAMECA 社製の LEAP3000XHR を用いた.測定には電圧パルスモードを用い,試料温度 50 K，パルス比 0.15 とした．APT 測定で収集したデータは,質量／電荷比ごとに元素の種類を決定し,Fe, Cu, Ni, Fe/Ni-58, Mn, Si などの３次元像形成処理（測定したデータからアトムマップを再構成するコンピュータ処理）を行った．なお，３次元像形成処理においては,アトムマップの z 方向長さを最適化するために，電界蒸発場（Evaporation Field）33.0 V/nm とアトムマップの伸長係数（Image Compression Factor）1.1 を用いた．また，Fe と Ni の化学組成の割合から質量 58 の原子の多くが Ni と考えられることから，以下の評価では質量 58 の原子は Ni として取り扱った.

2.3 腐食試験

腐食試験は，温度 320˚C の PWR1 次冷却水模擬環境（500 ppmB + 2 ppmLi + 30 cc/kg·$H_2$0）中で 1,000 時間浸漬して実施した．なお，すべての試料は１つのオートクレーブで一度に浸漬した．これは，表面酸化層のうち腐食生成物は試験に使用するオートクレーブや腐食試験のバッチにより影響を受けることがあるため，その影響を極力排除するためである.

2.4 表面酸化層の観察

腐食試験後，表面をデジタルマイクロスコープ（キーエンス製 VHX）と走査型電子顕微鏡（scanning electron microscope, SEM：Zeiss 製 ULTRA55）で観察して腐食生成物の形成を調べた．また，クロスセクションポリッシャー（日本電子製 IB-19530CP）を用いて試験片の断面を加工して，SEM で断面組織観察を行い，内層酸化を調べた.

3. 結果

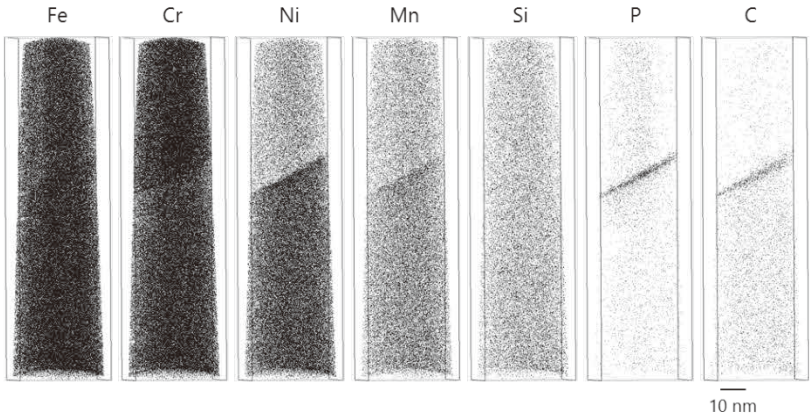
3.1 フェライト/オーステナイトの相境界

図 2(1)と(2)に 308L 溶接金属のフェライト/オーステナイトの相境界のアトムマップを示した．上側がフェライト相であり，下側がオーステナイト相である．図 2(1)は時効前の試料であり，相境界でわずかな Ni と Mn の偏析と顕著な P と C の偏析が認められる．Cr についてはフェライト相で濃度が高いが，相境界での変化は認められない．図 2(2)は 400℃で 10,000 h の熱時効後の試料であり，フェライト相にスピノーダル分解による Cr 濃度分布が認められる．これに対して，オーステナイト相では均一な元素分布である．相境界では Ni と Mn, Si, P, C の偏析が認められるが，Cr に偏析は認められない．熱時効に伴う相境界での偏析の変化は小さいことがわかった.

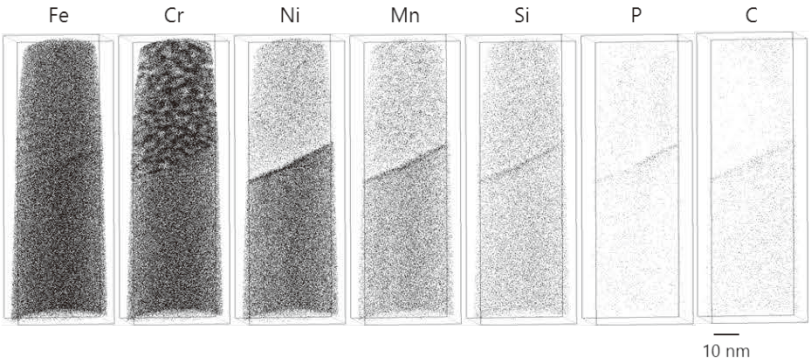
図 2(3)と(4)に 316L 溶接金属のフェライト/オーステナイトの相境界のアトムマップを示した．上側がフェライト相であり，下側がオーステナイト相である．図 2(3)は 400℃で 1,000 h の熱時効後の試料であり，フェライト相にスピノーダル分解による Cr 濃度分布と Ni, Mn, Si が集積した溶質原子クラスタが認められる．これに対して，オーステナイト相では均一な元素分布である．相境界では Ni と Mo, Mn, Si, P の偏析が認められるが,Cr に偏析は認められない.図 2(4)は 400℃で 1,000 h の熱時効後に 300℃で 5 dpa 照射した試料である.照射によりフェライト相においては,スピノーダル分解が緩和されているが，Ni と Si が集積した溶質原子クラスタは照射前と同様なものが認められる．これに対して，オーステナイト相では照射により形成したと考えられる Si クラスタが認められる．相境界では Ni と Si, P の偏析が認められるが，照射前にあった Mo と Mn の濃化は認められず，逆に相

境界にて欠乏する傾向が認められる．さらに，相境界では Cr の著しい欠乏が認められ，照射に伴い相境界で濃度変化が生じることがわかった．

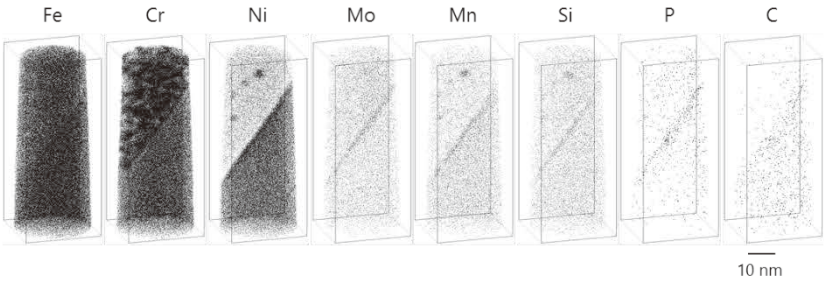
図 3 に相境界での濃度変化をまとめて示した．相境界からマイナス側がフェライト相であり，プラス側がオーステナイト相である．図 4 に相境界での組成の比較を示した．熱時効による相境界での組成の変化は大きくないが，照射により Cr 濃度は 20 %より低下する



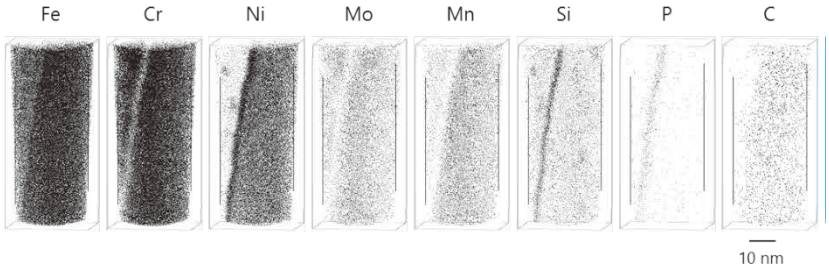
(1) 未時効 308L 溶接金属



(2) 10kh 時効 308L 溶接金属

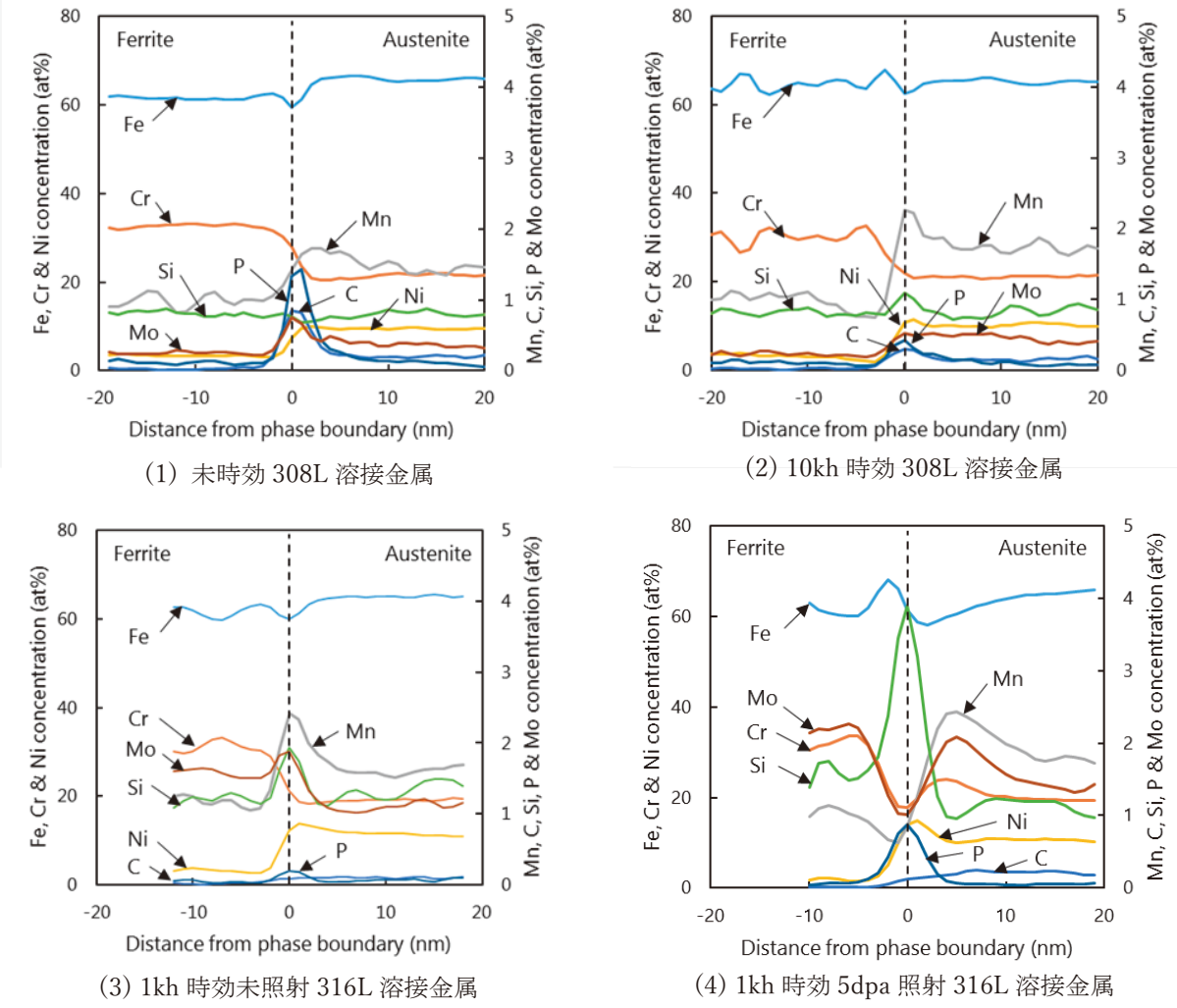


(3) 1kh 時効未照射 316L 溶接金属



(4) 1kh 時効 5dpa 照射 316L 溶接金属

図 2　フェライト/オーステナイト相境界のアトムマップ



(1) 未時効 308L 溶接金属

(2) 10kh 時効 308L 溶接金属

(3) 1kh 時効未照射 316L 溶接金属

(4) 1kh 時効 5dpa 照射 316L 溶接金属

図 3　フェライト/オーステナイト相境界での濃度変化

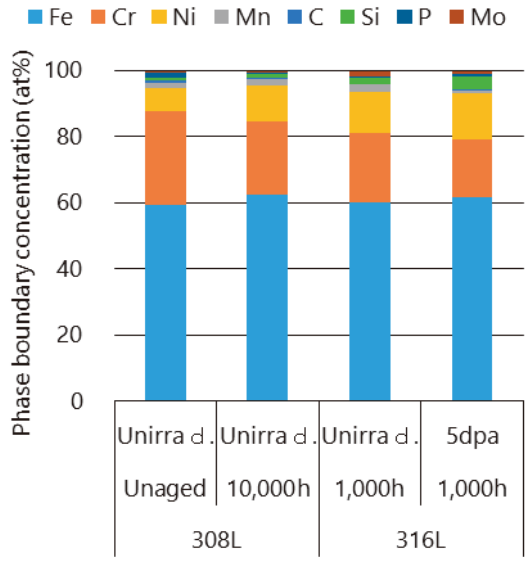


図 4　熱時効および照射によるフェライト/オーステナイト相境界の組成の変化

とともに，Si 濃度は母相の 4 倍程度まで濃化することがわかった．

3.2　表面酸化層

腐食試験後に表面をデジタルマイクロスコープで観察した結果を図 5 に示した．比較的厚く腐食生成物が存在することを示唆する茶色と青色の部分と比較的薄いことを示唆する金色の部分が表面に観察されるが，熱時効時間や照射量に依存した傾向は認められない．

図 6 と 7 に腐食試験後の表面を SEM 観察した結果を示した．熱時効のみの試料および照射量の少ない試料では島状に腐食生成物が形成していることがわかる．これに対して，照射量が増加すると熱時効の有無にかかわらず腐食生成物が分散して均一に形成する傾向

が認められる．高倍での観察の結果，腐食生成物は大きさによらずファセットを有しており，粗大な腐食生成物はフェライト相とオーステナイト相の界面に形成していることがわかった．また，フェライト相は微細な腐食生成物で緻密に覆われていることがわかった．

図 8 に 316L 溶接金属試料に対して SEM で断面組織観察を行った結果を示す．未時効材，10kh 時効材，未時効 5dpa 照射材，10kh 時効 5dpa 照射材を代表例として観察を行った．暗く細い組織がフェライト相である．すべての試料で内層酸化はオーステナイト相で生じており，フェライト相はほとんど酸化されていないことが確認された．このような相による酸化挙動の違いは，オーステナイトとフェライトの 2 相からなるステンレス鋳鋼の CF8M 鋼でも報告されており，低電位の高温水中ではオーステナイト相が優先的に酸化され，フェライト相はほとんど酸化されない[15]．

フェライト/オーステナイトの相境界に着目すると，未時効材ではオーステナイト相からフェライト相に向かって内層酸化膜が薄くなる傾向がある．熱時効材でも同様な傾向であり，熱時効による相境界の腐食挙動への影響は認められない．これに対して，照射材では相境界でのオーステナイト相の腐食が促進される傾向が確認され，熱時効後に照射した試料では顕著な酸化が認められた．

4. 考察

フェライト/オーステナイトの相境界に着目したミクロ組成分析の結果，熱時効のみでは相境界で組成に顕著な変化は生じないが，照射を受けると著しい偏析が相境界で生じることが明らかになった．同様な相境界での偏析が 3 dpa プロトン照射された 308L 溶接金属で報告されている[16]．

顕著な組成変化は，Cr 濃度の低下と Si 濃度の増加であり，ともに耐食性が低下する方向に作用する変化である．腐食試験後の表面の断面 SEM 組織観察により，相境界に偏析が生じた試料で相境界に沿った酸化の進行が観察された．この結果は照射によりオーステナイトステンレス鋼溶接金属の耐食性は低下し，IASCC 感受性が発現する可能性を示唆する．

これまでの長時間熱時効した溶接金属による SCC

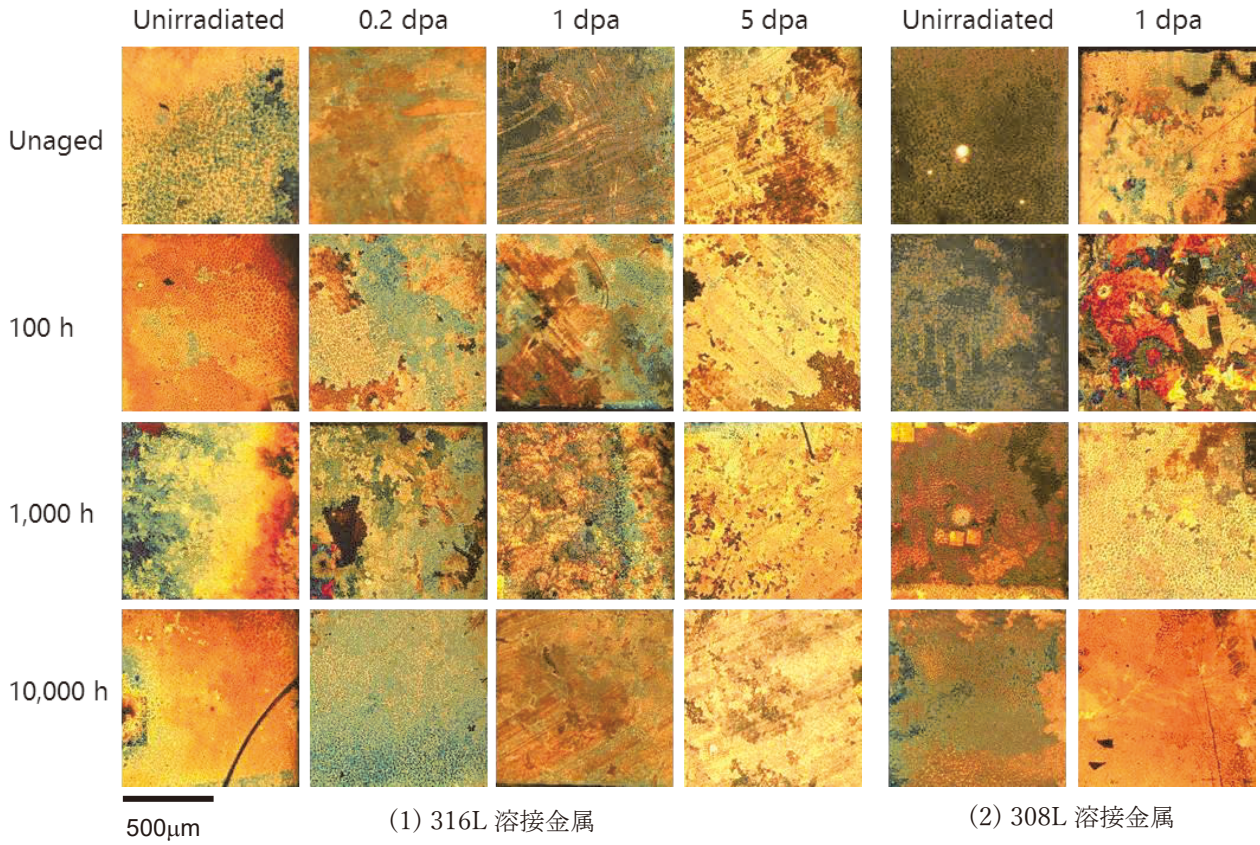


図 5　腐食試験後の試料表面のデジタルマイクロスコープ観察結果

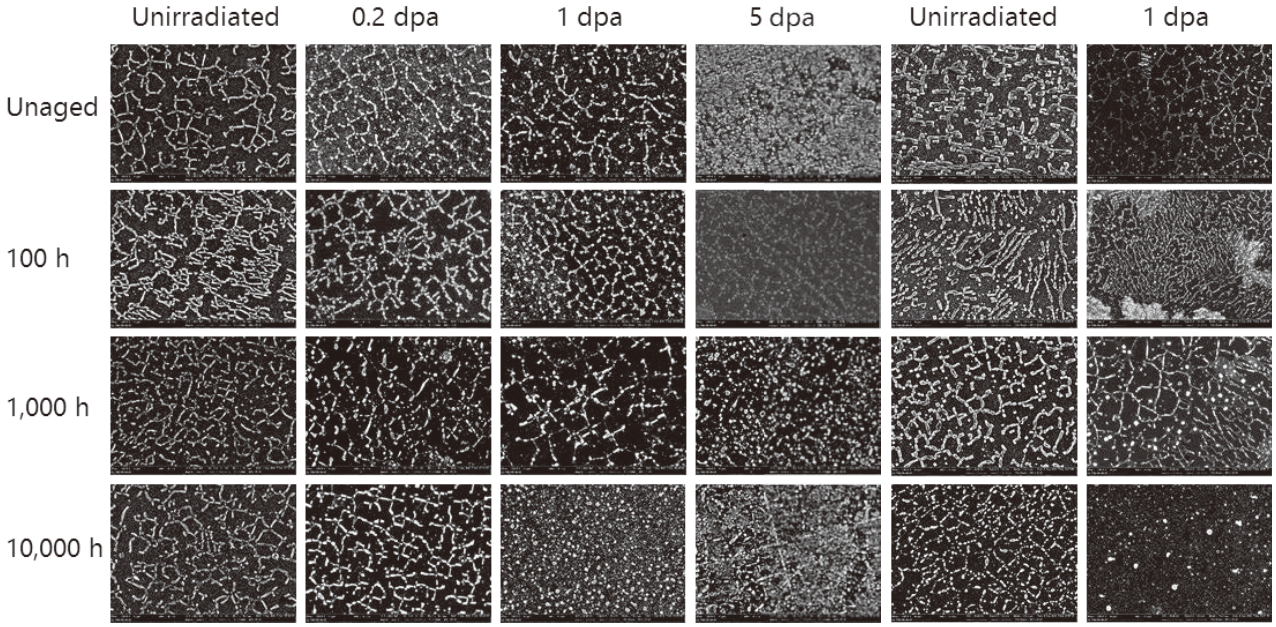


図 6　腐食試験後の試料表面の SEM 観察結果（×1,000）

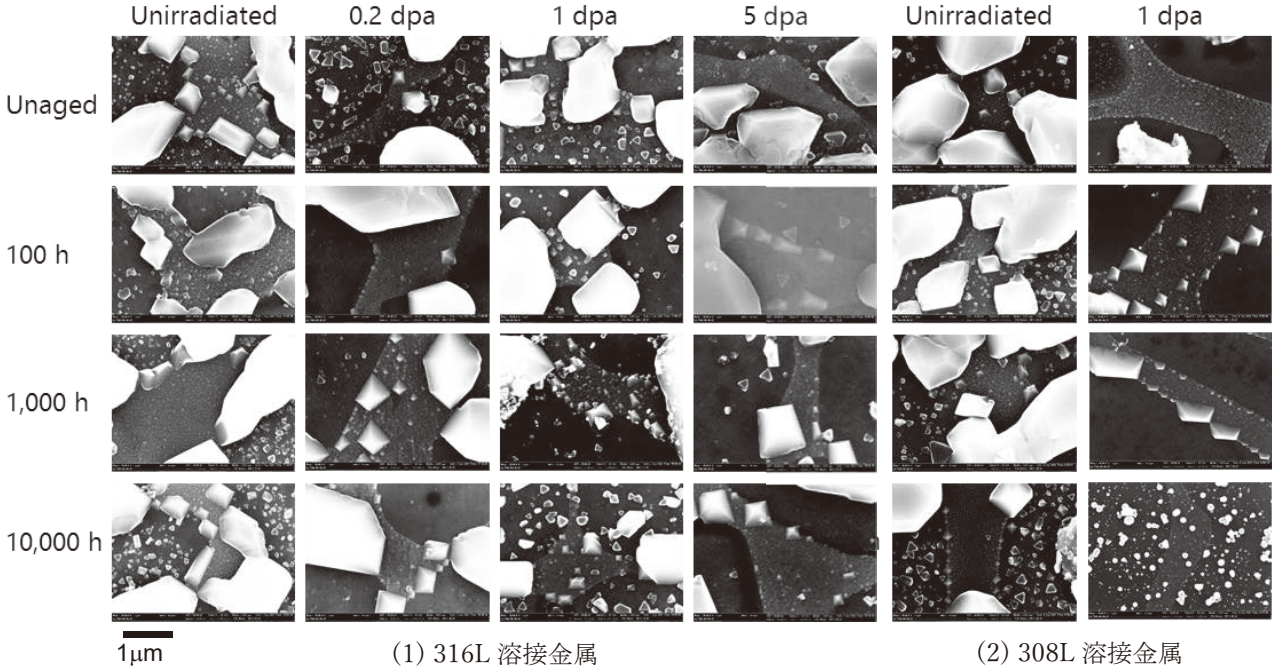
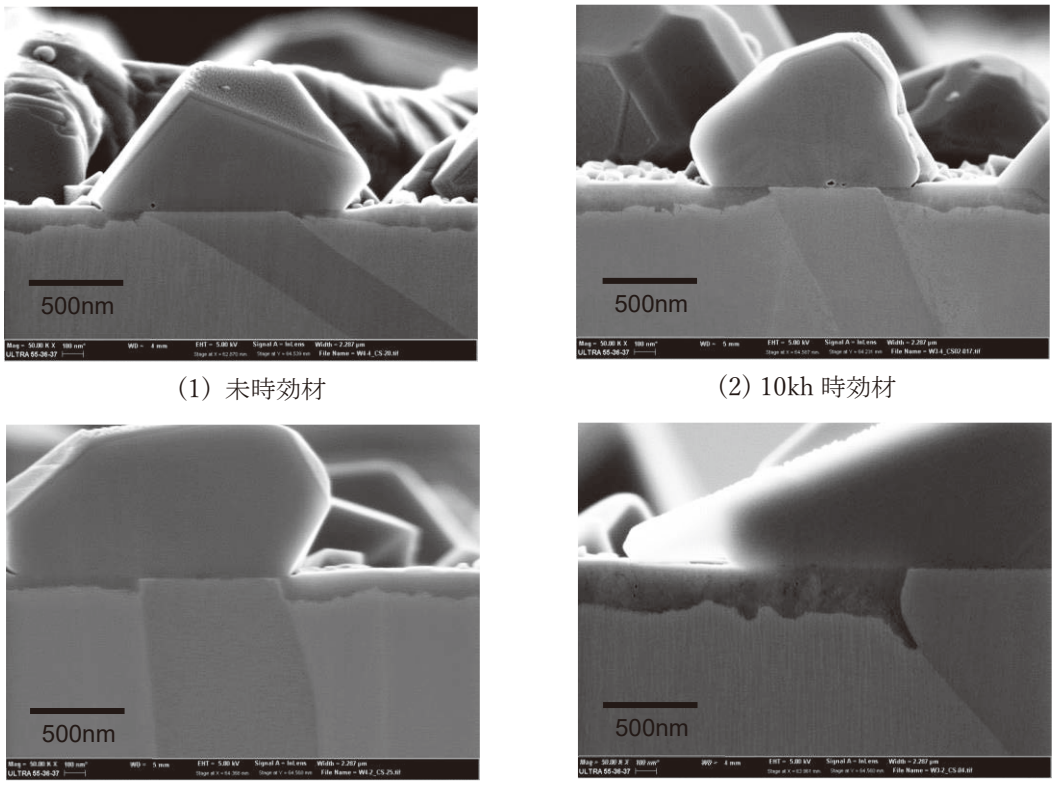


図 7　腐食試験後の試料表面の SEM 観察結果（×30,000）

研究では，溶存水素を含む還元性低電位の高温水環境では，熱時効は SCC の感受性を促進しないことが確認されている[10]．これは SCC の進展経路であるフェライト/オーステナイトの相境界の組成，特に耐食性に影響する Cr 濃度や Si 濃度が熱時効だけでは変化しないことが原因と考えられる．

イオン照射したステンレス鋼溶接金属のフェライト/オーステナイトの相境界の組成変化に起因すると考えられる相境界に沿った選択的な酸化の促進が認められたことから，同様な相境界での組成変化が中性子照射された溶接金属でも生じているかを実機材等で調べるとともに，腐食試験および IASCC 試験による検討が必要と考えられる．



(1) 未時効材　(2) 10kh 時効材

(3) 未時効 5dpa 照射材　(4) 10kh 時効 5dpa 照射材

図 8　316L 溶接金属の相境界部の断面の SEM 観察結果

5. まとめ

熱時効したステンレス鋼溶接金属にイオン照射してフェライト/オーステナイトの相境界の組成変化を調べるとともに，PWR1 次冷却水模擬環境中の腐食特性を調べた．熱時効後に照射した試料で相境界に顕著な偏析が生じ，耐食性の低下に関係する Cr 濃度の低下と Si 濃度の増加が確認された．腐食試験の結果，相境界で偏析が生じた試料で相境界に沿った選択的な酸化の進行が確認された．

同様な相境界での組成変化が生じる中性子照射された溶接金属でも相境界に沿った選択的な酸化の発生が考えられる．今後，中性子照射されたステンレス鋼溶接金属による腐食試験および IASCC 試験による検討が必要である．

文献

(1) T. Couvant, P. Moulart, L. Legras, P. Bordes, J. Capelle, Y. Rouillon, T. Balon, “PWSCC of Austenitic Stainless Steels of Heaters of Pressurizers,” *Proc. Int. Symp. on Fontevraud 6*, SFEN, A100 (2006).

(2) N. Matsubara, T. Kobayashi, K. Fujimoto, Y. Nomura, N. Chigusa, S. Hirano, “Research Programs on SCC of Cold-worked Stainless Steel in Japanese PWR N.P.P.,” *Proc. Int. Symp. on Fontevraud 7*, FNES, A099 (2010).

(3) G.O. Ilevbare, F. Cattant, N.K. Peat, “SCC of Stainless Steels under PWR Service Conditions,” *Proc. Int. Symp. on Fontevraud 7*, FNES, A115 (2010).

(4) IRSN’s Position on Safety and Radiation Protection at Nuclear Power Plants in France, 2012, IRSN report DG/2013-00005-EN.

(5) 原子力規制庁「大飯 3 号機加圧器スプレイライン配管溶接部における有意な指示に係る公開会合」資料.

(6) K. Arioka, T. Yamada, T. Terachi, R.W. Staehle, “Intergranular Stress Corrosion Cracking Behavior of Austenitic Stainless Steels in Hydrogenated High-Temperature

Water,” Corrosion 62 (2006) 74-83.
(7) K. Arioka, T. Yamada, T. Terachi, G. Chiba, “Influence of Carbide precipitation and Rolling Direction on Intergranular Stress Corrosion Cracking of Austenitic Stainless Steels in Hydrogenated High-Temperature Water,” Corrosion 62 (2006) 568-575.
(8) K. Arioka, T. Yamada, T. Terachi, G. Chiba, “Cold Work and Temperature Dependence of Stress Corrosion Crack Growth of Austenitic Stainless Steels in Hydrogenated and Oxygenated High-Temperature Water,” Corrosion 63 (2007) 1114-1123.
(9) K. Arioka, T. Yamada, T. Terachi, T. Miyamoto, “Dependence of Stress Corrosion Cracking for Cold-Worked Stainless Steel on Temperature and Potential, and Role of Diffusion of Vacancies at Crack Tips,” Corrosion 64 (2008) 691-706.
(10) 山田卓陽, 寺地巧, 宮本友樹, 有岡孝司, “ステンレス鋼溶接金属部の高温水中 SCC 進展挙動－腐食電位, 鋼種, 熱時効, 冷間加工および温度の影響－,” INSS JOURNAL 16 (2009) 127-135.
(11) T. Lucas, R. Ballinger, H. Hanninen, T. Saukkonen, “Effect of Thermal Aging on SCC, Material Properties and Fracture Toughness of Stainless Steel Weld Metals,” *Proc. 15th Int. Conf. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors*, TMS, 883 (2011).
(12) 山田卓陽, 寺地巧, 岡本マキエ, 有岡孝司, “ステンレス鋼溶接金属／鋳鋼の酸素添加高温水中の SCC 進展挙動－水質と温度の影響－,” INSS JOURNAL 26 (2019) 136-144.
(13) J.F. Ziegler, J.P. Biersak, SRIM2006 (Stopping and Range of Ion in Materials). Available from: http://www.srim.org.
(14) 藤井克彦, 福谷耕司, “オーステナイト系ステンレス鋼溶接金属のミクロ組織への熱時効と照射の影響,” INSS JOURNAL 25 (2018) 75-90.
(15) 山田卓陽, 寺地巧, 宮本友樹, 有岡孝司, “ステンレス鋳鋼の高温水中 SCC 進展挙動－腐食電位, 鋼種, 熱時効, 冷間加工および冷間加工の影響－,” INSS JOURNAL 18 (2011) 158-169.
(16) X. Lin, Q. Peng, En-H. Han, W. Ke, C. Sun, Z. Jiao, “Irradiation-Induced Segregation at Phase Boundaries in Austenitic Stainless Steel Weld Metal,” Scripta Mat. 149 (2018) 11-15.

INSS JOURNAL Vol. 28 2021 NT-4

エルボ管テーパ部の軸方向欠陥に対する超音波探傷試験条件の検討（第３報）－フェーズドアレイ探触子の最適化検討－

Study on Ultrasonic Testing Conditions for an Axial Flaw in a Taper of Pipe Elbow on Weld Piping（III）－ The phased array probe specifications －

石田　仁志（Hitoshi Ishida）*1　　市来　隆一（Ryuichi Ichiki）*2　　堤田　正一（Shoichi Tsutsumida）*3

要約　加圧水型原子炉（PWR）の１次冷却材管等に使用されている鋳造ステンレス鋼は，その柱状晶組織による超音波の散乱減衰，偏向が大きいため，配管外面からの超音波探傷試験は困難であるとされていた．INSSは大型２振動子探触子および自動超音波探傷システムを開発し，実機適用に至っている．しかし，この探触子では，配置が制限されるエルボ管テーパ部の内面にある軸方向欠陥を探傷することが難しい．そこで，この軸方向欠陥に対して，探触子の配置可能な位置から超音波を斜めに入射するスキュー探傷に対応するフェーズドアレイ探触子の振動子の寸法と配列を超音波探傷シミュレーションにより検討した．その結果，前後方向32列×左右方向8列の探触子による疲労き裂反射波の強度は，既存探触子（前後16列×左右4列）の約３倍となり，探触子の超音波波長に相当する深さ14mmの疲労き裂検出の可能性を見出した．

キーワード　超音波探傷試験，鋳造ステンレス鋼，フェーズドアレイ技術，走査不可範囲，超音波探傷シミュレーション，スキュー探傷

Abstract　Casting stainless steel used for the primary coolant pipe of a pressurized water reactor（PWR）has large ultrasonic scattering attenuation and deflection due to material columnar structure, so it is difficult to perform an ultrasonic testing from the outer surface of the pipe. INSS has developed a large twin crystal probe and an automatic ultrasonic testing system, which has been applied to actual plants. However, it is difficult this probe to detect axial defects on the inner surface of the tapers of the elbow pipes that the placement of the probes is restricted. Therefore, the dimensions and arrangement of the elements of the phased array probe corresponding to the skew scanning for this axial defect with angle incident from the accessible position are determined by the ultrasonic testing simulation. As a result, it was found that the probes with 32 rows in the front-rear direction and 8 rows in the left-right direction can detect fatigue cracks with reflected waves that are about three times higher than the existing probes（16 rows x 4 rows）. We evaluated the possibility of detecting a fatigue crack of 14 mm that corresponds to a wave length of ultrasonic waves used for the probe.

Keywords　ultrasonic testing, cast stainless steel, phased array, inaccessible zone, ultrasonic testing simulation, skewed beam method

1. はじめに

加圧水型軽水炉（Pressurized Water Reactor, PWR）の１次冷却材管の溶接部は，供用期間中検査において体積試験として超音波探傷試験が要求される[(1)]．この１次冷却材管には，鋳造ステンレス鋼が使用されている．鋳造ステンレス鋼は，鍛造ステンレス鋼と比較して非常に大きな結晶組織を持ち，これによる超音波の散乱減衰，異方性と結晶粒界を超音波が通過する際の偏向によって，超音波探傷試験において，信号強度低下による欠陥識別性の低下や欠陥位置の誤認等を発生させる．結晶異方性と結晶粒における超音波の散乱と減衰への対処として，INSSは縦波，低周波数，送受信振動子の分割，集束型振動子を採用した大型２振動子探触子を開発した．この探触子と自動探傷装置からなる，鋳造ス

＊1　（株）原子力安全システム研究所　技術システム研究所
＊2　元（株）原子力安全システム研究所　技術システム研究所　現 関西電力（株）
＊3　非破壊検査（株）

テンレス鋼の１次冷却材管の超音波探傷試験システムを開発し[(2)-(8)]，実機の検査に適用させるに至っている[(9)]．

配管系統を構成するために，直管とエルボ管が溶接され，その中にはエルボ管のテーパが溶接部に隣接しているものがある．図１にテーパのある配管溶接部の断面の例を示す．体積試験範囲は，断面において軸方向に溶接止端から両側にそれぞれ 10 mm，板厚方向に配管外面から内面までのA-B-C-D（赤線）で囲まれ，周方向に全周の範囲である．エルボ管のテーパ部などがあると，探触子を走査できない範囲（以下，走査不可範囲）が生じる．このような走査不可範囲があっても，欠陥面が周方向にある欠陥（以下，周方向欠陥）は，直管部に配置した探触子により斜角探傷が可能である．開発した超音波探傷システムは，このような周方向欠陥の検出が可能である[(2)(4)(5)]．

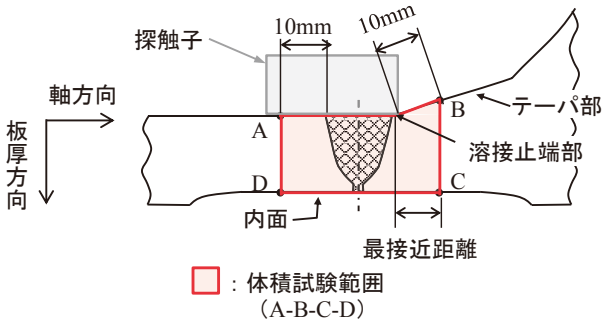


図１　配管溶接部の断面の例

一方，欠陥面が軸方向にある欠陥（以下，軸方向欠陥）は，周方向において斜角探傷を行う必要があるが，探触子を欠陥面に正対して配置することができれば，探傷が可能であり，開発した超音波探傷システムにより軸方向欠陥の検出も可能である[(6)(7)]．しかし，軸方向欠陥が走査不可範囲にあるような場合，欠陥面に正対して探触子を配置することができず，開発した超音波探傷システムのような従来の斜角探傷法では探傷することができない．このような構造上接近または検査が困難な箇所の検査は免除[(1)]されているが，記録を残し[(10)]，類似箇所の試験結果による評価等の代替措置を講じることが要求[(11)]されている．原子力発電所のさらなる安全性向上の観点から検査が困難な箇所を低減し，残余のリスクを小さくすることが望ましい．

そこで，著者らは，欠陥面の凹凸により生じる散乱波と欠陥端部に生じる回折波（端部エコー）に着目し，軸方向欠陥の欠陥面に対して探触子の走査可能な位置から超音波を斜めに入射して探傷（以下，スキュー探傷という）する技術の開発を行ってきた[(12)(13)]．これまでに，超音波伝搬シミュレーションにより，スキュー探傷の方法として，探触子の向きはそのままに超音波のみを欠陥方向に入射するBeam-skew探傷に比べ，探触子を欠陥方向に向けて入射させるProbe-skew探傷が適していること，その際の探触子の最適な位置を明らかにした．しかし，既存のフェーズドアレイ探触子を用いた実験による検証では，欠陥の識別には至っていない．検出性を向上させるための方策の一つとして，探触子仕様の最適化がある．具体的には，欠陥に正対した位置から探傷する場合よりも，欠陥に対して超音波を斜めに入射させて探傷する場合に長くなる路程に必要な振動子の大きさを明らかにすることである．

そこで本研究では，斜め入射の路程に対して必要なフェーズドアレイ探触子の振動子の寸法と配列について，超音波シミュレーションにより検討した．

2.　検討対象

図２に，フェーズドアレイ探触子の仕様を検討したテーパのある配管溶接部を示す．軸方向欠陥の中心があると想定した体積試験範囲の境界を，超音波探傷のねらいとする位置とした．探触子は，想定する欠陥に最も近づき探触子ホルダがテーパに接触する位置で，探触子の向きを欠陥に向けるProbe-skew探傷とした．Probe-skew探傷のこれま

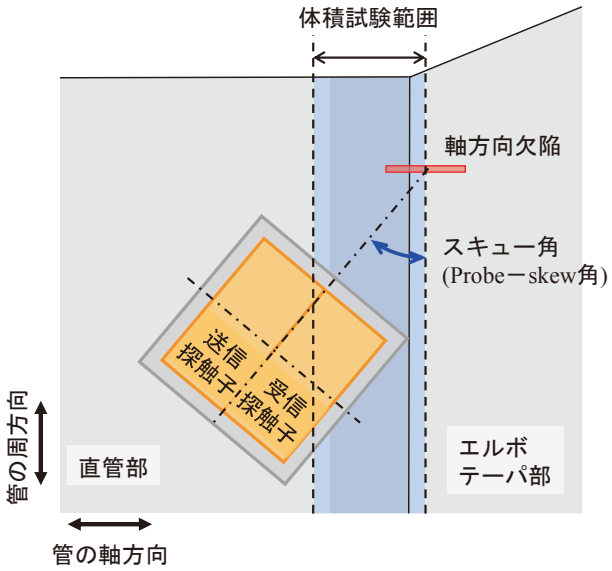


図２　検討対象とした探触子と欠陥の配置

でに明らかにした最適な探触子位置範囲に相当するProbe-skew角40°，50°，60°の位置に探触子を配置し，想定欠陥までのそれぞれの路程から，探触子仕様である振動子の寸法と配列を検討した．図中の探触子の中心と欠陥の中心を結ぶ線分を配管表面に投影した線と配管の周方向とが成す角をProbe-skew角と定義した．

3. 必要な探触子寸法の検討

3.1 近距離音場限界距離

フェーズドアレイ技術は，複数の振動子を配列したアレイ探触子の各振動子の励振のタイミングを電子的に制御し，各振動子から発生する超音波を合成して，任意の方向と距離に焦点を設定し，超音波を集束させることが可能な技術である．フェーズドアレイ探触子の振動子で構成される全体寸法と使用する周波数から算出される近距離音場限界距離内に，焦点を設定することが望ましい[14][15]．

前述の1次冷却材管の超音波探傷試験システムの大型2振動子探触子の配列した振動子の長さ71.5mm，幅24.7mmを基準に，これまではフェーズドアレイ探触子の寸法を設定し，スキュー探傷の最適化の検討を行ってきた．この基準とした寸法のフェーズドアレイ探触子を，テーパのある溶接部に対する異なるProbe-skew角条件で使用する場合の，実際の材料中で有効な近距離音場限界距離Ne（以下，有効近距離音場限界距離という）を次式[16]により求めた．

$$N_{\mathrm{e}} = \frac{k(L_{\mathrm{c}}\cos\beta/\cos\alpha)^2 f}{4v_{\mathrm{t}}} - \frac{L_{\mathrm{w}}v_{\mathrm{w}}}{v_{\mathrm{t}}} \qquad (1)$$

ここで，

k ：近距離音場限界距離補正係数
（矩形探触子の縦横比による補正）

L_{c}：配列した振動子の前後方向の長さ（mm）
= 71.5

L_{w}：ウェッジ内の路程（mm）

f ：周波数（MHz）=0.5

v_{t} ：試験体の音速（m/s）=5770

v_{w}：ウェッジの音速（m/s）=2350

α ：入射角

β ：屈折角

である．

(1)式の第1項は斜角探傷および振動子が矩形の場合の近距離音場限界距離であり，有効近距離音場限界距離は，第2項により斜角探傷の際に用いるウェッジ中の路程を差し引く．

表1に，超音波探傷システムとして開発した大型2振動子探触子（以下，既存探触子という）のProbe-skew探傷のProbe-skew角40°，50°，60°，周方向探傷，軸方向探傷，垂直探傷の屈折角，有効近距離音場限界距離，各条件での路程Wを示す．

probe-skew角40°，50°，60°での有効近距離音場限界距離は，それぞれ26mm，30mm，35mmと路程の1/3以下であった．欠陥位置で超音波が十分に集束していない可能性がある．しかし，軸方向探傷の場合の有効近距離音場限界距離45mmは路程の半分程度であるが，開発した超音波探傷システムにより周方向欠陥の検出が可能である[2]~[5]．このことから，有効近距離音場限界距離が欠陥までの距離より短くても，欠陥を検出できる可能性があることが分かった．

3.2 必要な探触子寸法

欠陥位置に超音波を集束させるために，その路程が有効近距離音場限界距離以下となうような探触子の配列する振動子の前後方向の長さは，(1)式から求められる．

振動子の寸法は，既存探触子より大きくなり，テーパに接触しないように配置するため，探触子と欠陥の幾何学的な位置関係が変化する．その結果，路程はさらに長くなり，必要な振動子の大きさも大きく

表1　既存探触子の有効近距離音場限界距離

探傷方法 / 項目	スキュー探傷（probe-skew角）			周方向探傷	軸方向探傷	垂直探傷
	40°	50°	60°			
β［°］	57.5	55.5	52.7	36.4	47.6	0
N_{e}［mm］	26	30	35	66	45	110
W［mm］	166	141	124	91	102	69

なる．最も路程が短いprobe-skew角60°で，ウェッジを含むこの送受信探触子の寸法を長さ253mm×幅206mmまで大きくしても，有効近距離音場限界距離は欠陥までの路程に至らなかった．この寸法は，既存探触子（100mm×100mm）の2倍以上大きく，これを使用する自動超音波探傷装置の大きさは，実機への搬入・据付，配管での駆動という点で，実用に支障をきたす可能性が考えられる．

4. 振動子寸法と配列の検討

4.1 振動子の寸法

検討の前提とした装置に係る条件は，①振動子数はフェーズドアレイ装置の最大の接続，駆動数である256個，②周波数は既存探触子と同じ0.5MHzとした．

フェーズドアレイ技術は，探触子に配列させた振動子からの超音波の位相を制御することによって，超音波ビームを構成する．図3に示すように，ねらいとする超音波ビームとは異なる方向に，グレーティングローブと呼ばれる疑似的な超音波ビームが構成されることがある．これは，振動子から発せられる超音波の複数の波面のうち，隣り合う振動子からの異なる波面によって主ビームとは別の波面が構成されることによる．

次式に示す条件で，グレーティングローブの波面が構成される

$$\sin\beta_g = \left(\frac{m\lambda}{p}\right),\quad m=\pm1,\ \pm2, \qquad (4)$$

ここで，β_gはグレーティングローブの主ビームからの角度，mは振動子間の波面の位相のずれ，λは波長，pは振動子の配列ピッチを示す．

図3に示すように，$\beta_g<90°$で，グレーティングローブは現れる．位相が一つずれたm=1の場合，$p\geqq\lambda$の時，β_gは90°以下となり，グレーティングローブが発生する．$p<\lambda$では，式(4)を満足するようなβ_gはなく，グレーティングローブは発生しないが，超音波ビームの走査角度によって発生することがあることから，一般的に$p<0.67\lambda=7.7$mmが推奨されている[17]．

既存探触子の振動子ピッチは走査角度が大きい長手（前後）方向で$p=4.5\text{mm}\leqq\lambda/2=5.7$mmを，走査角度が小さい短手（左右）方向で$p=6.3\text{mm}\leqq0.67\lambda=7.7$mmを満足していることから，振動子ピッチおよびギャップは，既存探触子と同じとした．

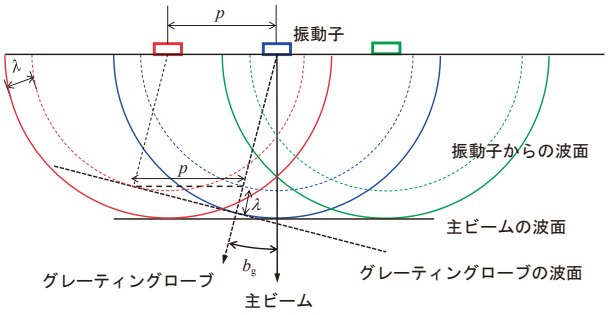


図3　グレーティングローブの発生

4.2 振動子の配列

既存探触子の振動子と同じピッチ（前後方向4.5mm，左右方向6.3mm）およびギャップ（0.5mm）で，個数は既存探触子の64個以上，フェーズドアレイ装置の最大チャンネル数256個以下とし，異なる振動子配列を検討した．

表2に，検討した振動子配列を示す．前後方向と左右方向の振動子数すなわち開口幅／長さ比の異なる組み合わせ8種類を検討した．既存探触子No.0の振動子の開口幅／長さ比0.35と同じで，振動子数が異なる探触子No.1～4を選定した．さらに，振動子配列の前後方向と左右方向における振動子数の影響を調べるために，開口幅／長さ比の異なる場合として探触子No.5～7を選定した．

探触子に使用する探触子ウェッジは，既存探触子の開口寸法（71.5mm×24.7mm）とウェッジ外形

表2　振動子配列の検討

振動子数（振動子開口寸法[mm]）		左右方向（開口幅） 4（24.7）	5（31.0）	6（37.3）	7（43.6）	8（49.9）
前後方向（開口長さ）	16（71.5）	No.0 0.35				
	20（89.5）		No.4 0.35			No.7 0.56
	24（107.5）	No.6 0.23		No.3 0.35		
	28（125.5）				No.2 0.35	
	32（143.5）	No.5 0.17				No.1 0.35

上段：振動子配列番号，下段：開口幅／長さ比

寸法（100mm × 100mm）の関係と同じとした．最も大きい振動子配列番号No.1のウェッジ外形寸法，長さ172mm × 幅151mmは，既存探触子の1.5倍程度である．この探触子の大きさであれば，必要な自動探傷装置は実機で使用可能な大きさになると考えられる．

5. 超音波探傷シミュレーションによる検討

5.1 探傷条件

外径836mm，厚さ69mmの直管の外表面に，前章で選定した８種類の探触子を，既存探触子と同じ幅の探触子ホルダを保持し，テーパ部に最も近接できる位置に配置した．探触子は，探傷方向に向かって左側を送信用，右側を受信用とする左右分割型である．周波数は0.5MHz，波のモードは縦波とした．ウェッジのウェッジ角および屋根角は，探傷条件毎に探触子と欠陥の位置から幾何学的に算出した．また，ウェッジの底面は配管表面に合わせた曲率を有する．

検出対象に疲労き裂を想定し，使用する周波数の波長に相当し板厚の20%となる深さ14mmのき裂とした．疲労き裂は超音波の路程が最も長くなるように，探触子位置から最も遠い体積試験範囲のエルボ側境界が中心となる位置に，割れ面を軸方向として配置した．

Probe-skew角は，既存探触子で最適と評価された範囲 [13] の中間の50°とし，配管内面の欠陥開口部中心に焦点を設定した．

5.2 モデル化と解析方法

超音波伝搬解析を行い，スキュー探傷による欠陥までの超音波の伝搬状況と欠陥反射波の最大振幅値を調べた．解析には，超音波伝搬解析ソフトComWAVE [18] を使用した．

ComWAVEに認定する材料物性値として，振動子およびウェッジの縦波音速，横波音速および密度を，2.35×10^3 m/s，1.15×10^3 m/s，1.05×10^3 kg/m^{3}に，同じく配管について，5.77×10^3 m/s，3.15×10^3 m/s，7.85×10^3 kg/m^{3}とした．振動子配列の有効性を調べることを目的としたため，材料は減衰のない等方均質材とした．

疲労き裂は，切断開放した鋳造ステンレス鋼の疲労き裂面を３次元形状計測器により計測した凹凸を数値化してモデル化した．図４に疲労き裂のモデルを示す．形状は半楕円形で，長さ50mm，深さ14mm，間隙0.5mmとした．

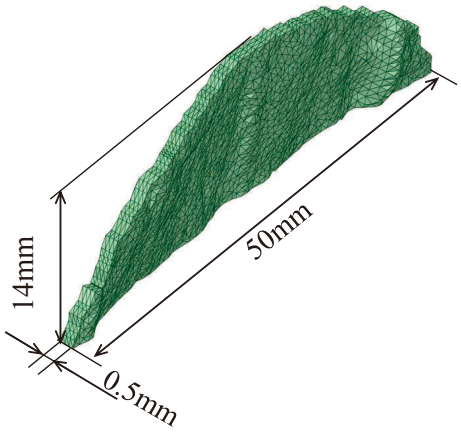


図４　疲労き裂のモデル

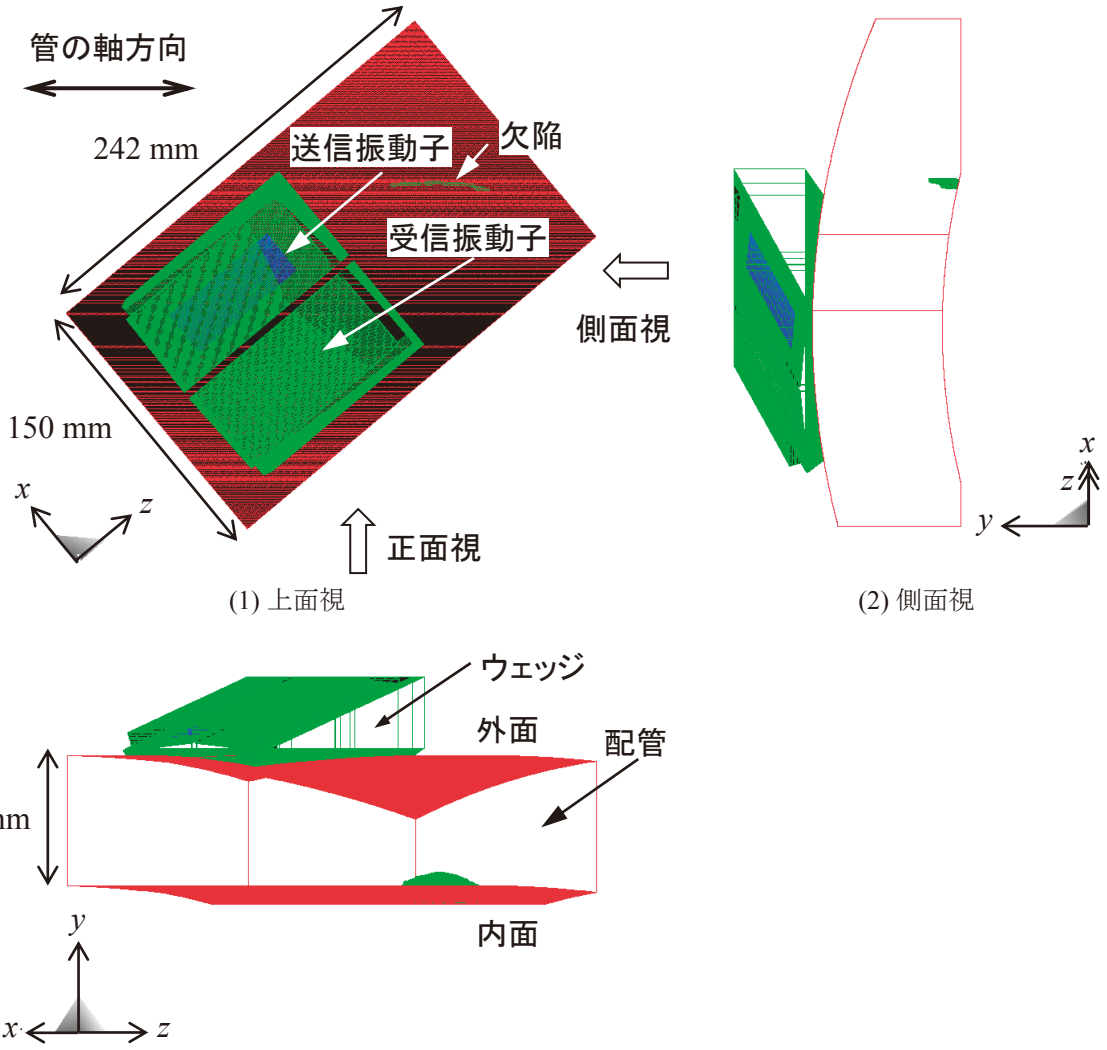
解析領域を１辺0.2mmの８節点立方体要素で分割した．図５に，解析モデルの例を示す．配置した探触子と欠陥の間を伝搬する超音波に影響のないことを確認して，解析領域を設定した．要素数は，最も解析領域の小さいNo.0で5.4億個，最も大きいNo.1で14.2億個であった．

初期条件として，図６に示す送信波形に相当する変位を送信振動子位置に，欠陥開口部中心位置に焦点化するように，振動子ごとの遅延時間に応じて入力した．超音波が送信振動子から欠陥で反射して受信振動子まで伝搬するのに十分な時間の解析を行なった．

5.3 解析結果と考察

5.3.1 超音波の伝搬状況

図７に伝搬する超音波の分布を示す．送信探触子の中心と欠陥開口部中心と欠陥頂部の３点を結ぶ平面内の縦波を表す体積ひずみの最大振幅の分布を色で示しており，送信振動子からの超音波ビームの形状に相当する．既存探触子を含め，欠陥開口部中心まで超音波ビームが形成されている．



(1) 上面視　　(2) 側面視

(2) 正面視

図５　解析モデル例（No.0（振動子配列16 × 4））

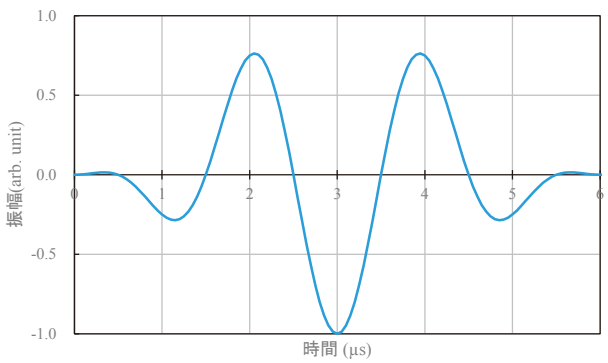


図６　送信波形

5.3.2　受信信号

図８に，探触子No.1（振動子配列：前後方向32 × 左右方向8，以下32 × 8と記す.）および探触子No.0（16 × 4）の受信信号波形の例を示す．縦軸は縦波に相当する体積ひずみの振幅，横軸は送信波発信後の経過時間である．受信信号波形において，入射点から欠陥開口部の中心までの伝搬距離に相当する時刻（以下，欠陥中心の路程相当時刻という.）付近の信号を欠陥反射波と判断した．全ての探触子の解析結果において．この欠陥反射波と判断される信号が得られた．

表３に，８種類の探触子の受信信号の最大振幅値，路程および有効近距離音場限界距離を示す．路程に対する有効近距離音場限界距離は１以下であり，必要な路程以下であるが，欠陥開口部中心まで超音波が伝搬していることは，図７に示した通りである．

図９には，総振動子数と最大振幅値の関係を示す．既存探触子No.0と同じ幅／長さ比で，No.4，3，2，1の順に総振動子数が増加すると最大振幅値は増加する．最も振動子数の大きい探触子No.1での

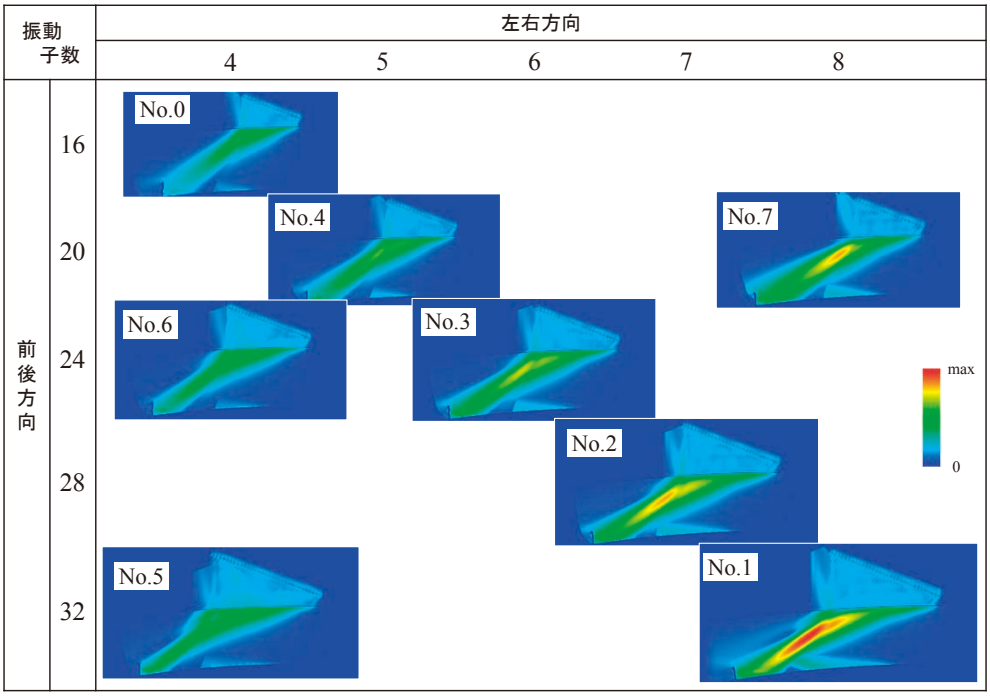
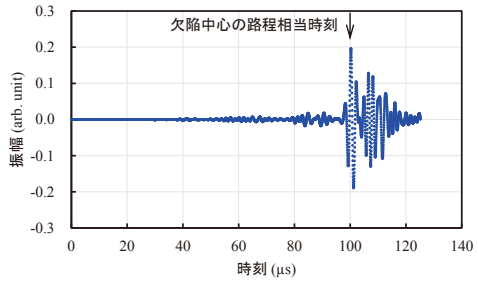
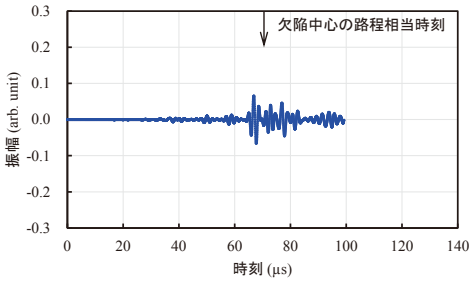


図７　超音波ビーム形状



(1) No.1（振動子配列32×8）



(2) No.0（振動子配列16×4）

図８　受信信号波形

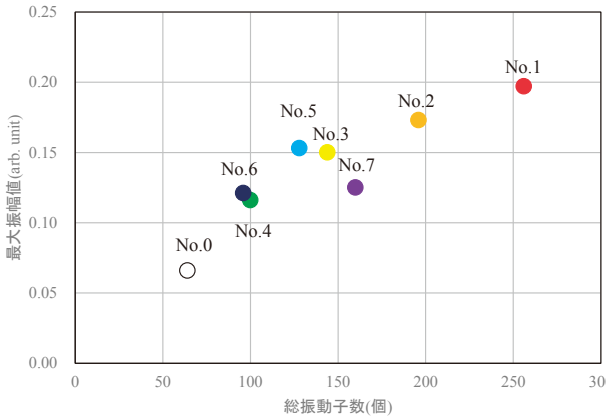


図９　受信信号振幅

最大振幅値0.197が最も大きく，既存探触子No.0より振動子数の多いいずれの探触子も，既存探触子No.0よりも大きな最大振幅値を得た．これらの値は，実際の試験体に導入した深さ14mmの放電加工（electric discharge machining,：以下 EDMとする）スリットを既存探触子No.0で検出できた探傷結果

表３　欠陥エコーの最大振幅値

探触子番号	No. 0	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7
最大振幅値［arb. unit］	0.066	0.197	0.173	0.150	0.116	0.153	0.121	0.125
路程［mm］	141.0	196.4	179.5	167.8	155.9	166.4	155.2	176.2
有効近距離音場限界距離［mm］	30.3	101.7	82.0	62.2	46.4	119.2	69.4	42.4
有効近距離音場限界距離／路程	0.215	0.518	0.457	0.370	0.298	0.717	0.447	0.241

を，解析した場合の最大振幅値0.108より大きい．このことから，既存探触子No.0より振動子数の多い探触子は，実際の鋳造ステンレス鋼試験体の深さ14mmの疲労き裂を，欠陥コーナーエコーによって検出できる可能性が推定される．

探触子No.4（20×5）から左右方向に振動子数を増加させたNo.7（20×8）の最大振幅値は，総振動子数がNo.7より小さいNo.3（24×6），No.5（32×4）よりも小さい．また，探触子No.0（16×4）から前後方向のみに振動子数を増加させたNo.6（24×4），No.5（32×4）において，既存探触子No.0と同じ幅／長さ比で振動子数を増加させた場合と同等以上に増加している．このことは，探触子の開口寸法において前後方向の効果の方が大きいことを示している．自動探傷装置の制限がある場合などに，探触子開口の前後・左右方向の寸法を検討する際に，有効な知見となる．

6. おわりに

スキュー探傷の長い路程に適した振動子の寸法と配列の影響を，超音波探傷シミュレーションにより検討した．その結果，以下のことが分かった．

①有効近距離音場限界距離が路程以上となる探触子の大きさは，既存探触子の２倍以上大きく，これを保持する自動超音波探傷システムは，実用に支障をきたす可能性のある大きさにする必要があることがわかった．

②Probe-skew角50°条件の超音波探傷シミュレーションにより，フェーズドアレイ超音波探傷装置で駆動可能な最大の振動子数である前後方向32列×左右方向８列の探触子を用いた場合，疲労き裂反射波の強度は既存探触子（16×4）の約３倍であることがわかった．

③鋳造ステンレス鋼試験体の深さ14mmのEDMスリットを用いた測定試験とその超音波探傷シミュレーションの結果から，既存探触子より振動子数を大きくすると，深さ14mmの疲労き裂を検出できることが推定された．

今後は，他のProbe-skew角条件の検討により，実用上も最適な探触子の大きさを選定し，疲労き裂を段階的に進展させることによって，深さ14mmまでおよびそれ以上の深さの疲労き裂に対する検証を行う予定である．

参考文献

(1) 発電用原子力設備規格 維持規格（2012年版）（JSME S NA1 – 2012），日本機械学会，(2013)．

(2) 黒住保夫，“鋳造ステンレス鋼の超音波探傷検査技術の開発，” INSS JOURNAL，Vol.7, p.159–171，(2000)．

(3) 黒住保夫，“鋳造ステンレス鋼の超音波探傷における結晶組織が超音波の入射角と欠陥検出感度に与える影響，” INSS JOURNAL, Vol.10, p.198–209，(2003)．

(4) 黒住保夫，石田仁志，“新開発自動超音波探傷システムを用いた鋳造ステンレス鋼中の欠陥検出感度およびサイジング特性，” INSSJOURNAL, Vol.11, p.182–197，(2004)．

(5) 黒住保夫，“鋳造ステンレス鋼の超音波探傷技術：鋳造ステンレス鋼試験片中疲労欠陥の深さ・長さ測定 –端部エコー法による深さサイジング（寸法測定）– ，” INSS JOURNALVol.12, p.251–270，(2005)．

(6) 西川嘉人，石田仁志，黒住保夫，“鋳造ステンレス鋼配管溶接部における軸方向き裂の大型探触子による検出性評価，” INSS JOURNAL, Vol.20,p.182–190，(2013)．

(7) 西川嘉人，“鋳造ステンレス鋼配管溶接部における軸方向き裂の大型探触子による深さサイジング性評価，” INSS JOURNAL, Vol. 21, p.163–169，(2014)．

(8) 西川嘉人，“鋳造ステンレス鋼の超音波探傷技術の開発状況，” INSS JOURNAL, Vol.22, p.208–212，(2015)．

(9) 石田仁志，“ステンレス鋳鋼超音波探傷試験システムの開発と実機適用，” INSS JOURNAL, Vol.25, p.209–213，(2018)．

(10) 軽水型原子力発電所用機器の供用期間中検査における超音波探傷試験規程（JEAC4207-2008），日本電気協会，(2008)．

(11) 実用発電原子炉及びその付属施設における破壊を引き起こす亀裂その他の欠陥の解釈，令和２年１月15日改正，原規技発第2001159号，原子力規制委員会，(2020)．

(12) 市来隆一，遠藤賢，堤田正一他，“エルボテーパ部の軸方向欠陥に対する超音波探傷条件の検討，” INSS JOURNAL, Vol.26, p.164–172,

(2019).
(13) 市来隆一，堤田正一他，“エルボテーパ部の軸方向欠陥に対する超音波探傷条件の検討（第２報）,” INSS JOURNAL, Vol.27, p.197-205, (2020).
(14) 超音波による欠陥寸法測定編集委員会，超音波による欠陥寸法測定，共立出版，p.167, (2009).
(15) 日本非破壊検査協会，超音波探傷試験Ⅲ，p.71, (2017).
(16) OLYMPUS NDT, Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications Olympus NDT Guideline, p.50, (2006).
(17) OLYMPUS NDT, Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications Olympus NDT Guideline, p.112, (2006).
(18) 伊藤忠テクノソリューションズ，超音波伝播解析ソフトウェアComWAVE, http://www.engineering-eye.com/ComWAVE/index.html

SUS630 の高温水中 SCC 挙動に及ぼす微細組織の影響

The Effect of Microstructure on SCC behavior of SUS630 in High-temperature Water

山田　卓陽（Takuyo Yamada）*1　　國谷　耕平（Kohei Kokutani）*1
大厩　徹（Toru Oumaya）*1　　有岡　孝司（Koji Arioka）*1

要約　SUS630 の PWR 1 次冷却材模擬水中の SCC 挙動については，熱時効の影響がない場合，比較的高靭性の H1100 と H1150 は，試験温度 290℃以下であれば高応力拡大係数（K=30 MPa√m）条件であっても SCC 進展は生じないが，400℃, 350℃, 320℃で 20,000 h までの熱時効により硬化し，SCC 進展を生じるようになり，熱時効時間とともに SCC 進展速度が増加することをこれまでの研究で明らかにした．また，その硬化因子は，微細な Cu-rich 相の析出，G 相の生成，スピノーダル分解であることを報告したが，各々微細組織変化と SCC 挙動の関係が未だ不明確である．本研究では，同一熱時効条件で硬さもほぼ同じ HV1=400 程度の SUS630（H1150 と H1100）の 320℃で 20,000 h 熱時効材の SCC 進展速度に一桁程度差異があったことに着目し，これらの熱時効材の微細組織を詳細に調べ，各々微細組織変化と SCC 挙動の関係について検討した．また，吸収水素量についても調べ微細組織との関係を検討した．

その結果，熱時効により生成した数 nm サイズの Cu-rich 相と隣接して生成する G 相が，硬さと SCC 挙動へ影響する可能性が示唆された．一方で未時効材と熱時効材で水素吸収に差が見られなかったことから，それらの熱時効生成物は水素のトラップサイトとは関係しないことが示唆された．

キーワード　SUS630，17-4PH ステンレス鋼，熱時効，高温水中応力腐食割れ（SCC），SCC 進展速度，軽水炉

Abstract　According to our previous report, in unaged H1100 and H1150 SUS630 (better toughness and lower hardness than H900 and H1025), no SCC growth was observed in simulated PWR primary water at temperatures below 290°C, which contained 500 ppm B, 2 ppm Li, and dissolved hydrogen (30cc STP H_2/kg-H_2O), even for the high applied stress intensity factor condition (K=30 MPa $m^{1/2}$). On the other hand, after thermal aging at 320, 350 and 400°C for up to 20,000 h of H1100 and H1150, the hardness and the SCC growth rate increased with aging time. In addition, it was suggested that age hardening was caused by microstructural changes with aging, such as precipitation of the fine Cu-rich phase, formation of the G phase and Spinodal decomposition. But the individual percent contributions for the age hardening and SCC behavior are still unclear. In this study, we evaluated correlations among the microstructural changes, hardness and SCC behavior using SUS630 (H1100, H1150) materials aged at 320°C for 20,000 h. Because of those aged H1100 and H1150 have one order difference of the SCC growth rate, despite being almost the same hardness. To consider a role for hydrogen in SCC, we carried out temperature desorption hydrogen analysis (TDA) using the materials.

From the obtained findings, we considered that the fine Cu-rich phase and G phase affected the age hardening and SCC behavior. On the other hand, no major difference was observed in the amount of hydrogen desorption between unaged and aged H1100 and H1150. This suggested that these aged precipitations did not act as hydrogen trap sites in these materials.

Keywords　SUS630，17-4 PH stainless steel，thermal aging，
stress corrosion cracking (SCC) in high-temperature water，SCC growth rate，light water reactor

1. はじめに

SUS630（17-4 PH ステンレス鋼）は，基本成分が 17%Cr-4%Ni-4%Cu のマルテンサイト系析出硬化型ステンレス鋼であり，1020～1060℃の固溶化熱処理後に析出硬化熱処理を施し，Cu-rich 相などの微細な第 2 相粒子を析出させることで，高強度と高硬度を得る材料である(1)．日本産業規格（Japanese Industrial Standards，JIS）では硬度を重視する H900 から高靭性を重視する H1150 まで 4 段階の析出硬化熱処理，即ち H900（470～490℃/空冷），H1025（540～560℃/空冷），H1075（570～590℃/空冷），H1150（610～630℃/空冷）が規定されている(2)．海外の鉄鋼メーカ（AK-steel）では，これに加え H925，H1100 などさらに細かく規定されている(3)．この H900～H1150 は析出硬化熱処理記号であり，例えば 1150 は熱処理温度の摂氏 621℃を華氏に換算した温度に相当する．この鋼種は耐食性と高強度を兼ね備えていることから，軽水炉においても高強度が求

＊1（株）原子力安全システム研究所 技術システム研究所

められる弁棒等に用いられている．

SUS630 の軽水炉での実機損傷事例については，Olender らがとりまとめた報告によると，析出硬化熱処理条件によって応力腐食割れ（stress corrosion cracking, SCC）の発生時期が異なること，推奨される析出硬化熱処理条件は，より靭性に有利な H1050 以上であることを報告している[4]．加えて，熱時効により SCC 感受性が増加すること，どのような熱処理条件においても，推奨される使用温度は 316℃以下であることなどを報告している．一般に，硬化は SCC に関係するが，SUS630 は 300～450℃の温度で長期間時効すると硬化が生じる場合がある[5]．また，国内での SUS630 の弁棒折損事例では水素の関与した擬へき開状の割れとの報告があり[6]，水素の関与が指摘されている．

実験室における SCC 挙動評価については，Tsubota らが BWR（boiling water reactor）の酸素を含む環境（normal water chemistry， NWC）条件で，SUS630 を含む様々な高強度ステンレス鋼の SCC 感受性をすきま付定ひずみ曲げ（creviced bent beam， CBB）試験法により調査し，ビッカース硬さ 340 以上で SCC 感受性が増加することを報告している[7]．一方で，PWR（pressurized water reactor）の 1 次冷却材環境下でこの鋼種の SCC 挙動を報告した例はほとんどなく，また熱時効の SCC に対する影響についてはよくわかっていない．

そこで著者らは PWR 1 次冷却材模擬水中の SUS630 の SCC 挙動について，長期間の熱時効による影響評価に 2016 年頃から取り組んできた．これまでの結果から，熱時効の影響がない場合，より高硬度の H900 と H1025 は，試験温度 290℃と 320℃で，高応力（K=30 MPa√m）条件下であれば，SCC 進展が確認された．一方で，比較的高靭性の H1100 と H1150 は，試験温度 290℃以下であれば，高応力拡大係数（K=30 MPa√m）条件であっても SCC 進展が観察されず，良好な耐 SCC 性を示した[8]．しかし，同材料は 400℃，350℃と 320℃で 20,000 h までの熱時効により硬化し，SCC 進展を生じるようになり，熱時効時間とともに SCC 進展速度が増加すること，またその硬化は数 nm サイズの微細な Cu-rich 相の析出，G 相の生成，スピノーダル分解など複数の硬化因子によることについて報告した[9][10]が，各々の析出物の硬化および SCC への寄与については未だ不明確である．

スピノーダル分解と G 相の析出は，熱時効したステンレス鋳鋼やステンレス鋼溶接金属のフェライト相においても報告されているが，それらの材料は 400℃で 10,000 h を超える長時間熱時効後も，PWR 1 次冷却材模擬環境下で優れた耐 SCC 性を示すことが報告されており[11]，スピノーダル分解と G 相の析出およびそれによる硬化が，単純に SCC 進展速度の増加因子とはならない場合があり，さらなる微細組織変化の観点での評価が必要と考えられる．

そこで本報告では，同じ熱時効条件であるが SCC 進展速度に一桁以上の差異が観察された高靭性の 2 材料 SUS630（H1100, H1150）の 320℃×20,000 h（以降 320℃×20kh と呼ぶ）熱時効材に着目し，そのミクロ組織データを拡充し，SCC 挙動に及ぼすミクロ組織と熱時効硬化の影響を検討した．SCC 進展データについては再現性確認のためのデータ拡充も実施した．また，前述のように SUS630 の弁棒折損事例では水素の関与が指摘されている．そこで，熱時効による微細析出物の生成が水素吸収量に影響することを想定し，未時効材および熱時効材を水素チャージし，材料中の固溶水素量の熱時効による変化を調べ，微細析出物と水素の関係を検討した．

2. 実験方法

2.1 供試材

供試材は，市販の SUS630 で図 1(b)に示すような直径 100 mm の棒鋼に 1038℃の固溶化熱処理後急冷の後，2 種類の析出硬化熱処理 H1100（600℃×6.5h／空冷），H1150（620℃×6h／空冷）を施した．H1150 については，JIS 規格に規定されている析出硬化熱処理条件を満足した．H1100 は JIS 規格にはないが，海外での使用実績[3][4]を考慮し選定した．供試材の化学組成

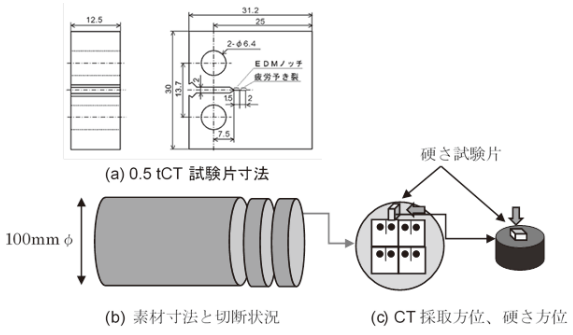


図 1 試験片寸法と採取方位

表 1　供試材の化学組成(wt%)

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Nb	Fe
Spec.	≤0.07	≤1.00	≤1.00	Max 0.040	Max 0.030	3.00-5.00	3.00-5.00	15.00-17.50	0.15-0.45	Bal.
分析値	0.05	0.26	0.84	0.034	0.003	3.32	4.26	15.60	0.24	

表 2　供試材[*1] の機械的性質

	析出硬化熱処理条件	試験温度	耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	絞り (%)	硬さ HBW	硬さ HV1
H1100	600℃×6.5 時間, 空冷	RT	(793)	(965)	(14)	-	-	-
		RT	976	1041	21	60	331	349
		320℃	807	854	13	57	-	-
H1150	620℃×6 時間, 空冷	RT	(725)	(930)	(16)	(50)	(277)	-
		RT	1000	1049	20	59	341	348
		320℃	838	880	13	56	-	-

[*1]：溶体化熱処理条件は，全て 1038℃/ 急冷

(　)内，規格値（全て下限値）

を表 1 に，析出硬化熱処理条件と機械試験結果を表 2 に示した．全ての析出硬化熱処理条件で，強度は JIS あるいは海外規格を満足した．これらの 2 種類の析出硬化熱処理材に熱時効処理を施し，硬化と SCC 挙動に及ぼす熱時効の影響を評価した. 熱時効温度は, 400～320℃で最長 20,000 h とした. これらの供試材から，図 1(a)に示した 0.5 インチ厚さの（compact tension, CT）試験片を，同図(c)に示した方位で採取し，SCC 進展試験に供した．また，硬さ試験片は，同図(c)に示したように軸方向断面で採取した．

2.2　SCC 進展試験と試験後の評価

SCC 進展試験は標準的な PWR 1 次冷却材環境を模擬し 500 ppm B+2 ppm Li+30cc/kg-DH の水中で実施した．試験温度は 320℃とした．全ての荷重条件は一定荷重とし, 応力拡大係数の目標値は K=30MPa√m とした．試験時間は 1,000 h を目安として実施した．

SCC 進展試験終了後, 大気中疲労試験機にて破面開放し, デジタルマイクロスコープおよび走査型電子顕微鏡（scanning electron microscopy，SEM）により破面観察し，破面形態と SCC 進展深さを評価した．

SCC 進展深さは, 板厚方向に 5～10 点計測しその平均値とした．

SCC 進展速度 *CGR*（mm/sec）は，SCC 進展深さ *a*（mm）を試験時間 *t*（sec）で除して求めた．なお，1,000 h 未満で破断した試験片の SCC 深さは一律 6 mm として SCC 進展速度を算出した．

2.3　硬さ

析出硬化熱処理および熱時効による硬さ変化は，ビッカース硬さ（試験荷重1kg）で5点計測し平均値で評価した．個別の測定値は，前報で報告済み[10]であるが再掲する．

2.4　微細組織観察

熱時効による微細組織の評価は，アトムプローブ（Atom probe tomography，APT）分析を行った．APT 測定には，米国Imago社（現CAMECA社）製の局所電極型３次元アトムプローブ（LEAP 3000X HR）を用いた．測定は，レーザーパルスモードで行った．測定条件は，試料温度35 K，レーザー出力0.2 nJ，パルス周波数200 kHzである．収集したデータは, 専用ソフトウェア上で元素の種類を決定し，Fe，Cr，Cu，Ni，Mn，Si，Mo，P，Nb，Cの３次元像形成処理（測定したデータからアトムマップを再構築するコンピュータ処理）を行った．なお，３次元像形成処理においては，アトムマップの z 方向長さを最適化するために，電解蒸発

場（Evaporation Field）＝28.0 V/nmとアトムマップの伸縮係数（Image Compression Factor）＝1.65を用いた．スピノーダル分解の程度を定量的に調べるために，第一近接分布解析法[13]を用いてCr濃度の分布解析を実施した．また，解析においてCuあるいはNi，Mn，Siのクラスタは除外した領域で実施した．第一近接分布解析法では，Crについて第一近接間距離を計算して頻度分布を求め，ランダム配置を仮定した分布との差をとった．第一近接分布解析法ではこの差の積分値で1NN（1st nearest neighbor）パラメータの値が定義される．スピノーダル分解が進行すると，頻度分布とランダム分布の差が大きくなり，1NNパラメータも大きくなるので，これをスピノーダル分解の指標とした．

2.5 固溶水素量の分析

SUS630（H1100とH1150）の未時効時と熱時効（320℃×20kh）材を対象として，水素チャージ前後の水素吸収量を評価した．水素チャージ用の試験片は，寸法：5 mm × 5 mm × L10 mm 以下に加工したものを準備した．これに水素チャージ時間 0, 2, 4, 6 hで水素チャージ後，昇温脱離ガス分析（Temperature desorption gas analysis, TDA）を実施した．昇温条件は5K/min，測定温度範囲は室温～約1100Kまでとした．

水素チャージ条件は，池田らの報告[14]を参考に，溶液は293Kに調整した0.5 vol.%の硫酸＋0.5 g/lの亜ひ酸を用いた．試験片表面の浸漬部位での電流密度が0.1 mA/cm^{2}になるように設定し，水素チャージ後，速やかに水素量測定に供した．

3. 実験結果

3.1 SCC進展速度の熱時効依存性

図2に，SUS630（H1100とH1150）熱時効（320℃×20kh）材のSCC進展試験（320℃PWR 1 次冷却材環境）後のSCC破面を示す．H1100熱時効（320℃×20kh）材は955h試験後，板厚方向に均一なSCC進展が観察された．H1100の未時効ではほとんどSCC進展が観察されない[8]ため，熱時効の影響によりSCC進展感受性が増加したと考えられる．次にH1150熱時効材では，図2(b)のように955hで破断に至り，より熱時効の影響を受けたことが示唆される．なお，再現性確認のため実施したH1150熱時効材の結果（図2(c)）でも，362 hと1,000 h未満で破断に至り，同じ熱時効条件（320℃×20kh）でもH1100とH1150でSCC進展挙動に差異があることが示唆された．

このSCC挙動の差異を定量的に比較するため，SCC進展速度を熱時効時間に対してプロットしたものを図3に示す．400℃と350℃の熱時効条件では，H1100とH1150両者のSCC進展に及ぼす熱時効の影響は類似の傾向であり，その差は大きくなかった．一方で，320℃×20kh熱時効材のデータを比較すると，図3中矢印で示したように一桁程度の差異が観察された．このことは，熱時効による微細組織変化など，SCC進展挙動に及ぼす何らかの差異がある可能性が示唆される．

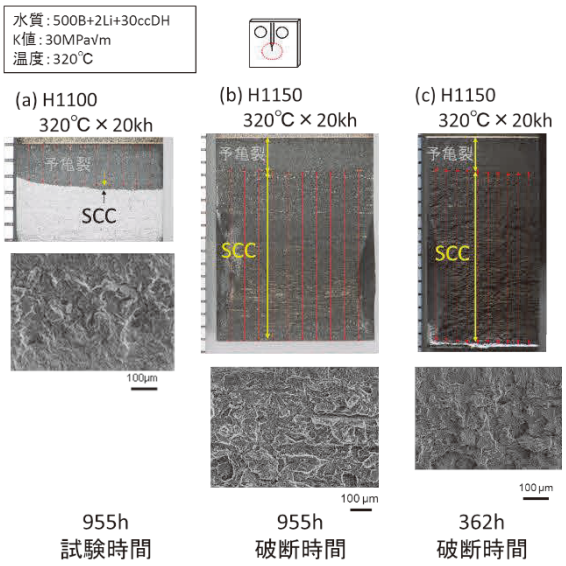


図 2 SCC 進展試験後の破面

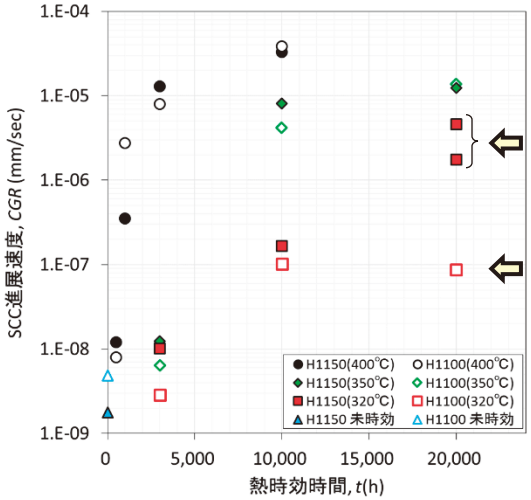


図 3 SCC 進展速度の熱時効依存性

3.2　硬さの熱時効依存性

図4にSUS630（H1100とH1150）の硬さの熱時効依存性を示す．H1100とH1150両者の硬さに及ぼす熱時効の影響は類似の傾向であり，その差は大きくなかった．SCC進展速度に差異の確認された320℃×20kh熱時効材でH1100とH1150を比較すると，両者ともHV1=400程度（図中矢印で示した）と硬さの観点での差異は観察されなかった．

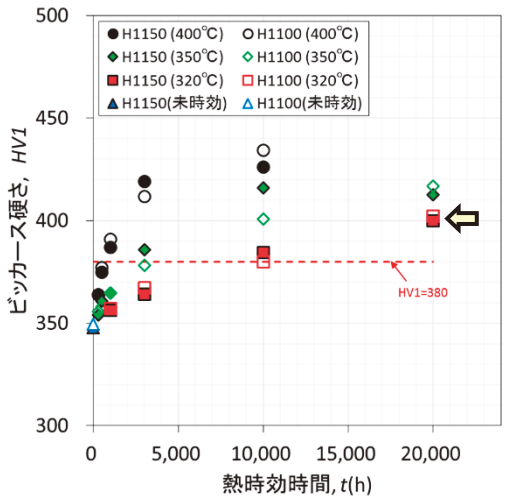


図 4　硬さの熱時効依存性

3.3　熱時効材（320℃×20kh）の微細組織

図5にH1100（320℃×20kh）熱時効材，図6にH1150（320℃×20kh）熱時効材のアトムマップを示す．分析結果は全てマルテンサイト母相中の分析結果である．図中Cuのアトムマップに矢印で示した30 nmサイズのCu-rich相は未時効材のH1150でも観察される[9]ので，熱時効前（析出硬化熱処理後）に生成した析出物と考えられる．一方で，数 nmサイズのCu-rich相は，未時効材のH1150では観察されない[9]ので，320℃×20khの熱時効により生成したと考えられる．このCu-rich相とほぼ同じ位置にSiとNiとMnを含むG相の生成も確認された．これらの熱時効生成物は，前報で報告したH1150の320℃×10kh熱時効材でも観察されている[10]．これらの微細な熱時効生成物のクラスタ解析を実施した．クラスタ解析にあたっては，30 nmサイズの析出物を除外し図5，6で示したような赤枠内に限定し評価した．この微細なCu-rich相とG相は隣接して存在す

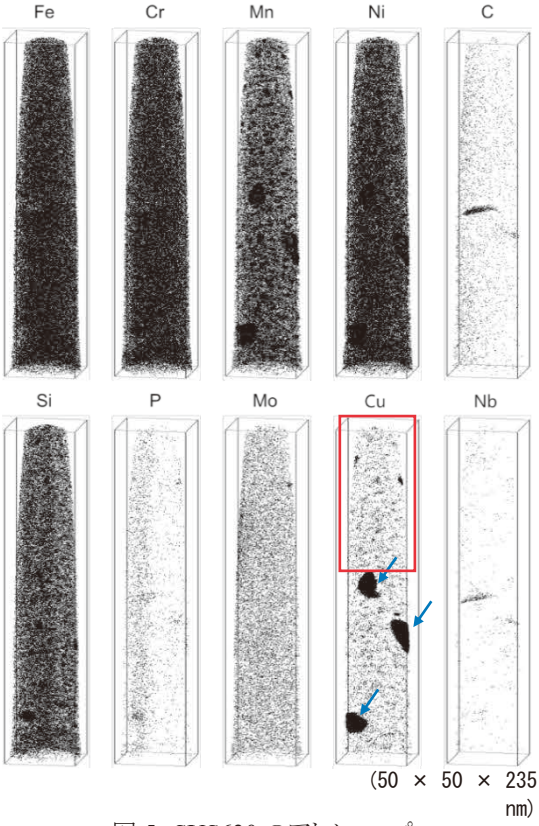


図 5　SUS630 のアトムマップ
H1100（320℃×20kh）

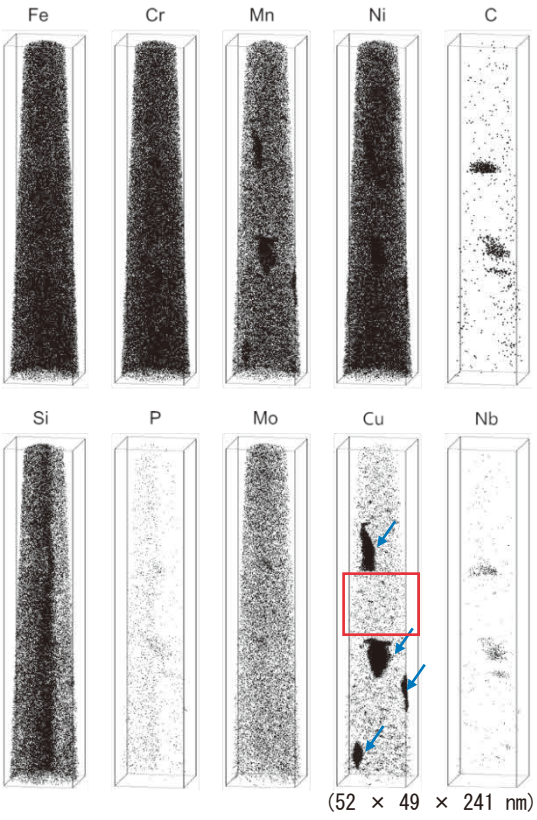


図 6　SUS630 のアトムマップ
H1150（320℃×20kh）

ることを前報で報告した[10]が，本報告ではコア原子をCu, Ni, Mn, Siとしてクラスタ解析を実施し，一つのクラスタとして取り扱った．その結果を表3に取りまとめた．また，クラスタの平均組成を表4に示した．H1100とH1150の熱時効材ともに数 nmサイズのクラスタが確認され，H1150熱時効材ではそのサイズがやや大きく，数密度もわずかに多い傾向であるものの，両者に大きな差異はなかった．クラスタ平均組成もわずかな差は見られるが大きな差ではなかった．スピノーダル分解の進行度は1NNパラメータで0.055および0.057と両者ともに差が明瞭ではなく，スピノーダル分解の硬化への影響は少ないものと考えられた．以上から，320℃×20kh熱時効材の主たる熱時効硬化因子は，前者の熱時効生成物が寄与したことが示唆され，H1100とH1150の320℃×20kh熱時効材の硬さがHV=400とあまり変わらないこととも整合する．

表 3　解析結果一覧

材料条件	H1150 320℃C20kh	H1100 320℃C20kh
クラスタ直径（nm）	3.34(0.53)	3.26(0.52)
クラスタ数密度（m^3）	1.04E+24	9.02E+23
スピノーダル1NN	0.055	0.057

（ ）内は標準偏差

表 4　クラスタ平均組成(at.%)

	Fe	Cr	Ni	Mn	Mo	Si	C	P	Cu	Nb
H1150 Cuあり	59.65	10.99	19.04	5.27	0.09	3.03	0.01	0.03	1.88	0.01
H1100 Cuあり	59.56	11.52	19.03	5.12	0.10	3.21	0.02	0.04	1.40	0.00

3.4　固溶水素量分析結果

図7にH1150熱時効材（320℃×20kh）の水素放出曲線を示す．TDA測定は，水素チャージ時間を0, 2, 4, 6 hとし，それぞれ測定した．図のように，水素チャージ時間が長くなるにつれて，400 K近傍のピークが増大することが分かる．一般に，弱い結合のトラップサイトからの水素の放出は比較的低温の100～200℃に対応し，いわゆる「拡散性水素」として議論されることが多いが，ここでは水素チャージによって明確に増加が確認された700K以下の吸収量を積算し，水素チャージ時間毎に図8に示した．H1100，H1150ともに，未時効材と熱時効材の水素吸収量を比べると，熱時効前後の水素吸収量に大きな差はなかった．またH1100とH1150との比較においても，水素吸収量に明確な差はなく，むしろSCC進展速度の遅いH1100の方が若干多い傾向であった．これらの結果から，それらの熱時効生成物が水素のトラップサイトとは関係しないことが示唆された．

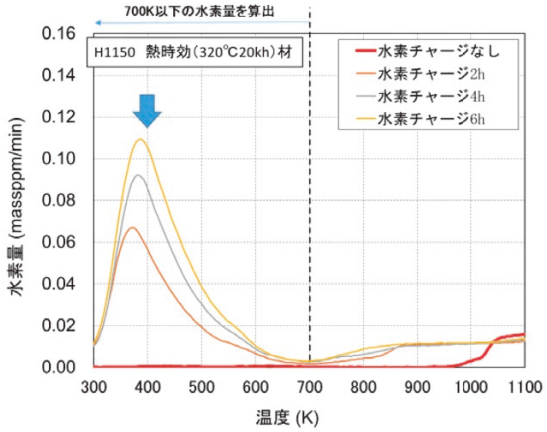


図 7　水素吸収量の分析結果例

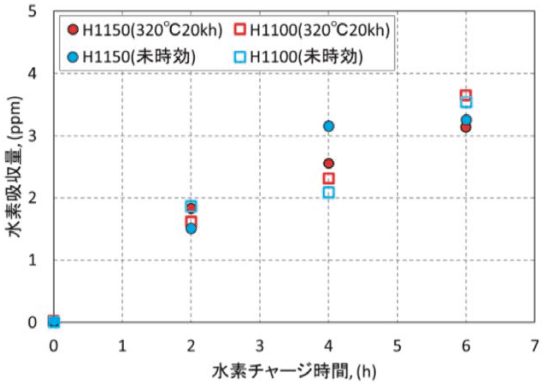


図 8　700K 以下の水素吸収量の比較

4.　考察

SUS630（H1100とH1150）熱時効材（320℃×20kh）に着目してその微細組織を調べた結果，数 nmサイズのCu-rich相が生成すること，また隣接してG相が生成することが確認された．図9に各種熱時効条件のスピノーダル分解の1NNパラメータを熱時効時間に対してプロットして示した．第一近接分布解析法では，Crについて第一近接間距離を計算して頻度分布を求め，ランダム配置を仮定した分布と差をとった．第一近接分布解析法ではこの差の積分値で1NN（1st nearest neighbor）パラメータの値が定義される．スピノーダ

ル分解が進行すると，頻度分布とランダム分布の差が大きくなり，1NNパラメータも大きくなる．320℃×20kh熱時効材のスピノーダル分解は，図5と6のCrのアトムマップからも濃度変調を示す特徴は明瞭でないが，図9の1NNパラメータにおいても，この熱時効条件のスピノーダル分解の進行は明瞭ではなかった．以上からこの熱時効条件の主たる熱時効硬化因子は数 nmサイズのCu-rich相とG相の生成によるものと考えられる．

400℃の熱時効硬化因子としては，マルテンサイト相中においても400℃で5,000 hの熱時効でスピノーダル分解とG相の析出が生じることが，Murayamaらから報告されており[15]，本研究でも前報にてH1150の400℃で3,000 h以上の熱時効条件では，APT分析によりこのスピノーダル分解とG相の生成を確認するとともに，微細なCu-rich相の生成を確認し報告している[9][10]．図9のH1150の400℃の熱時効条件の1NNパラメータは， 320℃の値よりも明確に大きかった．400℃の値は，比較のため示したステンレス鋳鋼SCS14Aのフェライト相中の1NNパラメータに比べると小さいもののCrのアトムマップにおいても明瞭なCrの濃度変調が確認されている[9]ことから，スピノーダル分解は進行している．したがって，400℃の熱時効条件においては，スピノーダル分解も熱時効硬化に寄与するものと考えられる．これらの結果から，熱時効条件（熱時効温度，時間）によって各々熱時効析出物の生成量は異なる傾向が見られ，今後SCC挙動および熱時効硬化と微細組織の関係を明瞭にするためには，より詳細な整理が必要と考えられる．

本報告では，熱時効生成物の増加により，水素吸収挙動に何らかの変化を見出すことを意図し，熱時効前後の水素吸収量についても調査したが，熱時効前後で水素チャージ後の水素吸収量に大きな違いは観察されなかった．このことは，前述の微細な熱時効生成物が，水素トラップサイトとは関係しないことを示唆する．一方で，前述のように一部のSUS630の弁棒折損事例において，水素の関与が指摘されている[6]．本研究結果が直ちにSCC挙動に及ぼす水素の関与を否定するものではないが，水素脆化機構との関連性を含めてさらなる検討が必要である．

破面形態や既報のSCC進展経路から，SCCは主として旧オーステナイト粒界ではなく，マルテンサイト相粒内を進展し，またラス状組織に対しては，直交方向のものが多い傾向であった[10]．したがって，この熱時効SUS630のSCC進展の増加には，マルテンサイト母相内の微細析出物および硬化が寄与したものと考えられる．しかし，本報告で確認したH1100とH1150の微細析出物の差異は，両者のSCC進展速度の差異を説明するには，十分な差とは言い難い．今後このSCCメカニズム検討のためには，高温水中の酸化挙動や亀裂進展経路などSCC挙動に影響する微細析出物以外の影響因子の検討も必要と考えられる．

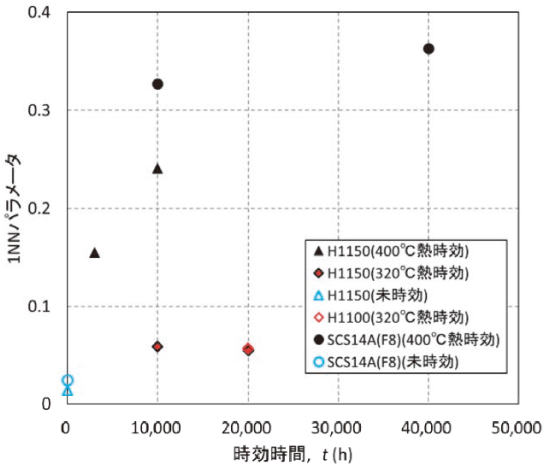


図 9　1NN パラメータと時効時間の関係

5.　結論

同一熱時効条件で硬さもほぼ同じHV1=400程度のSUS630（H1100とH1150）の320℃×20kh熱時効材のSCC進展速度に一桁程度差異があったことに着目し，これらの熱時効材の微細組織を詳細に調べ，各々微細組織変化とSCC挙動の関係について検討した．また,吸収水素量についても調べ，微細組織との関係を検討した結果以下の知見を得た．

熱時効により生成した数 nmサイズのCu-rich相と隣接して生成するG相が，硬さとSCC挙動へ影響する可能性が示唆された．スピノーダル分解は，この熱時効条件では顕著ではなく，硬さおよびSCC進展への寄与は少ないものと考えられた．

水素吸収の観点では，それらの熱時効生成物は水素のトラップサイトとは関係しないことが示唆された．

今後，熱時効したSUS630のSCCメカニズム検討のため，高温水中の酸化挙動や亀裂進展経路など，微細析出物以外のSCC影響因子の検討も予定している．

謝辞

本研究を遂行するにあたり，各種実験準備や腐食試験等の実施，データ整理や解析のサポートにあたっては，㈱原子力安全システム研究所　材料グループ　村上公治氏，黒崎登氏，小島敦子氏，宮下明子氏による多大な協力があった．この場を借りて謝意を表します．

引用文献

(1) ステンレス鋼便覧,日刊工業新聞社,p.642, (1976).
(2) JIS G 4303 (2005), “ステンレス鋼棒”, JIS ハンドブック，鉄鋼I, p.1099, (2007).
(3) 17-4PH Stainless steel, Products Data Sheet, AK Steel, (2007).
(4) A. Olender, J Gorman, C. Marks, G. Ilevbare, “Recent Operating Experience Issues with 17-4PH in LWRs”, Fontevraud 8, (2014).
(5) B. Yrieix, M. Guttmann, “Aging between 300 and 450°C of wrought martensitic 13-17 wt% Cr stainless steels”, Materials Science and Technology, 9, pp.125-134, (1993).
(6) ニューシア，報告書番号1988-九州-T007，登録日2004年3月26日，更新日2005年7月7日，http://www.nucia.jp/nucia/kn/KnTroubleView.do?troubleId=1517
(7) M. Tsubota, K. Hattori, T. Kaneko, T. Okada, “Effect of Tempering Temperature on SCC Susceptibility of Martensitic Stainless Steels in High Temperature Water”, 4th Int. Conf. of Degradation of Materials in Nuclear Power Systems Water Reactor, pp.9-66-75, (1990).
(8) 山田卓陽，寺地巧，岡本マキエ，有岡孝司，“SUS630の高温水中のSCC進展挙動”, INSS JOURNAL Vol.24, pp.101-108, (2017).
(9) 山田卓陽，寺地巧，岡本マキエ，有岡孝司，“SUS630の高温水中のSCC進展挙動（第2報）-熱時効，温度，応力の影響”, INSS JOURNAL Vol.25, pp.91-101, (2018).
(10) 山田卓陽，寺地巧，岡本マキエ，有岡孝司，“SUS630 の高温水中SCC挙動に及ぼす長時間熱時効の影響”, INSS JOURNAL Vol.27, pp.187-196, (2020).
(11) T. Yamada, T. Terachi, T. Miyamoto and K. Arioka, International Congress on Advances in Nuclear Power Plants, ICAPP 2017, 17432, (2017).
(12) 牧正志, “鉄鋼の相変態―マルテンサイト変態編I―鉄合金のマルテンサイト変態の特徴―”, まてりあ, p.557, 第54巻, 第11号, (2015).
(13) M. Kato, Acta Met., 29 (1981) 79.
(14) 池田裕樹, ” 高強度マルテンサイト系ステンレス鋼の水素脆化” , Sanyo Technical Report Vol.9 (2002) No.1
(15) M.Murayama, Y. Katayama and K. Hono, “Microstructural evolution in a 17-4 PH stainless steel after Aging at 400°C”, Metall. Mater. Trans. A. Vol. 30A, pp. 345-353, (1999).

TT690 合金冷間加工材の粒界キャビティ生成型による亀裂発生時間の評価

Evaluation of crack initiation time due to grain boundary cavity formation for cold worked Alloy 690TT

大厩　徹（Toru Oumaya）*1　　寺地　巧（Takumi Terachi）*2　　山田　卓陽（Takuyo Yamada）*1
國谷 耕平（Kohei Kokutani）*1　　有岡　孝司（Koji Arioka）*1

要約　TT690 合金では，粒界にキャビティが生成する現象が PWR1 次系環境水によって促進され，SCC 発生に至る可能性が指摘されている．本研究では，TT690 合金における粒界キャビティ生成型の SCC 発生の可能性を検討するため，ブラントノッチ CT 試験片を用いて高温大気中のクリープ試験により粒界キャビティ生成に対する冷間加工度依存性や温度依存性を系統的に把握し，それらの関係式を検討した．その上で，PWR プラントの運転温度における粒界キャビティ生成型による SCC 発生の可能性について評価した．10%，20%及び 30%の冷間加工(CW)材を用いて，360℃～475℃の温度範囲で高温大気中のクリープ試験で亀裂発生時間(加速クリープ到達時間)を取得した結果，冷間加工度の増大とともに亀裂発生時間が短くなる傾向が得られると共に，20%CW 材及び 30%CW 材でアレニウス型の温度依存性が認められ，活性化エネルギーはそれぞれ 212kJ/mol 及び 231kJ/mol と評価された．さらに冷間加工度，温度，活性化エネルギーをパラメータとして粒界キャビティ生成型機構による亀裂発生時間を算出する関係式を検討した結果，20%CW 材及び 30%CW 材の試験データを良好に再現する関係式が得られた．得られた関係式により，30%CW 材の 320℃における亀裂発生時間を試算した結果，粒界のキャビティ生成のみを因子として考慮すると亀裂発生に至るまで約 129 年との結果が得られ，冷間加工度や応力が小さくなるとさらに長期間を要することが示唆された．

キーワード　TT690 合金，冷間加工，亀裂発生，ブラントノッチ CT，キャビティ生成，クリープ試験

Abstract　Cavities formed on grain boundaries of Alloy 690TT may lead to SCC initiation when exposed to PWR primary water. This research focuses on influence of cold work and temperature on grain boundary cavity formation. Creep test with blunt notch CT specimen were conducted under high temperature air to obtain crack initiation time (time to reach tertiary creep). Cold work and temperature dependence were evaluated based on the test result. Correlation formula calculating crack initiation time based on the test result was determined. Then, possibilities of SCC initiation under operating temperature of PWR plant due to grain boundary cavity formation were evaluated based on the formula. The test with 10%, 20% and 30% cold worked Alloy 690TT under 360ºC to 475ºC revealed cold work reduces crack initiation time. Also, Arrhenius type temperature dependence was observed for crack initiation time. Activation energy of 20% and 30% cold worked Alloy 690TT were evaluated as 212kJ/mol and 231kJ/mol, respectively. The correlation formula that calculates crack initiation time based on cold work ratio, temperature and activation energy were determined and good correlation were observed with the tested data for 20% and 30% cold worked Alloy 690TT. According to the formula, crack initiation time of 30% cold worked Alloy 690TT was calculated as approximately 129 years only considering grain boundary cavity formation. It was also indicated that lower cold work ratio and lower stress condition would extend the crack initiation time.

Keywords　Alloy 690TT, cold work, crack initiation, blunt notch CT, cavity formation, creep testing

1. 緒言

ニッケル基合金の一種である 600 系合金は加圧水型軽水炉（pressurized water reactor，PWR）プラントの 1 次冷却材環境下で応力腐食割れ（stress corrosion cracking，SCC）感受性を有することが知られており，国内外の実機プラントで多くの SCC 発生・進展事例が報告されている[(1)]．そのため，PWR プラントの 600 系合金を使用している機器では，耐 SCC 性に優れる 690 系合金を用いた部材への交換や補修が進められた．対策材として採用された 690 系合金については，現在までのところ，SCC 発生の報告例はない．

一方，実験室では強い冷間加工(cold work，CW)を

＊1　(株)原子力安全システム研究所　技術システム研究所
＊2　元(株)原子力安全システム研究所　技術システム研究所　現 関西電力(株)

付与することにより亀裂進展の感受性を示すことが報告[2]～[10]されており，米国では 690 系合金を対象とした亀裂進展速度線図も策定されつつある[11].

また，SCC 発生についても SCC 進展試験と同様に冷間加工などの促進因子を加味して検討が行われ，Zhai らが 31%CW 材で 360℃の PWR1 次冷却材模擬水環境中において丸棒の引張試験片に 0.2%耐力相当の荷重を付与して 9,220h 程度の定荷重試験を実施した際に，試験片表面に深さ 15μm を超えるキャビティ生成を伴った粒界割れが生じたことを報告している[12]. 寺地らも 20%CW 材でブラントノッチ型 CT (blunt notch compact tension, BNCT) 試験片によりノッチ先端に 0.2%耐力相当の荷重を付与して 40,635h の定荷重試験を行ない，ノッチ先端に微細な亀裂状の開口が生じたことを報告している[13]. さらに，寺地らは変形を許容した高応力条件(0.2%耐力の 1.1 倍程度の荷重を付与)下では 20%CW 材及び 30%CW 材の 360℃の PWR1 次系模擬水環境中における 10,000h 程度の定荷重試験で，ノッチ先端に亀裂状の開口が生じ，その開口の断面観察により前駆挙動として粒界上にキャビティが生成している状況が観察されたことを報告している[14]. これらの知見から，特に SCC 感受性の低い 690 系合金の SCC 発生に際しては粒界キャビティの生成が影響因子となる可能性がある.

粒界キャビティ生成型の SCC 発生機構は，高温クリープで知られる粒界にキャビティが生成する現象が環境水の影響によって促進され，プラントの長期供用時に PWR1 次冷却材環境中で顕在化することを想定した機構である[15]. 具体的には，粒界に集積する空孔が集合体を形成し，粒界にキャビティを生じることで粒界結合力を低下させるとした仮説である. 冷間加工は材料中に空孔を導入するため，空孔の集積により生じる粒界キャビティ生成を促進する因子となり得る. Arioka らは冷間加工を加えたステンレス鋼中のニッケルの体拡散について 360～500℃で評価を行ない，冷間加工を付与することにより拡散が数桁速くなることを報告している[16].

これまでに主として 360℃以上の温度条件下で粒界上にキャビティ生成が確認されているが，より低温の場合でも寺地らが 40%CW 材の 320℃で試験した SCC 進展試験片の亀裂先端近傍の断面観察で粒界にキャビティが認められたことを報告しており[17]，PWR プラントの運転温度域での粒界キャビティ生成も否定できない状況である.

本研究では，TT690 合金(thermal treatment，特殊熱処理)における粒界キャビティ生成型の SCC 発生の可能性を検討するため，高温大気中のクリープ試験により粒界キャビティ生成に対する冷間加工度依存性や温度依存性を系統的に把握し，それらの関係式を検討した. その上で，PWR プラントの運転温度におけるキャビティ生成型による SCC 発生の可能性について評価した.

2. 実験方法

2.1 供試材及び試験片

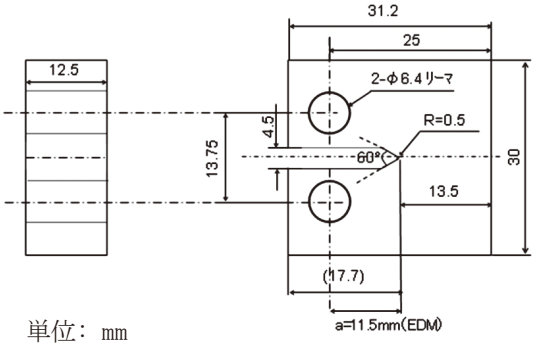
供試材には，表1に示す化学組成のTT690合金を用いた. 供試材の熱処理は，溶体化処理の後，700℃で15hの特殊熱処理(TT処理)を施した. 供試材に10%，20%，30%の3条件の冷間圧延を行なった. 表2にそれぞれの冷間加工度における機械特性を示す. 試験片形状を図1に示す. 試験片は，外形寸法が0.5T-CT試験片と同一で予亀裂を導入せずノッチ先端をR=0.5㎜のU字型の形状とし，亀裂発生試験片として用いた. 試験片は冷間加工した供試材からT-L方向で採取し，ノッチ先端はダイヤモンドペースト1μm仕上げとした.

表1 供試材の化学組成(wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Fe
0.019	0.3	0.32	0.009	0.0006	0.04	59.25	30.18	9.42

表2 供試材の機械特性

冷間加工度(%)	温度(° C)	0.2%耐力(MPa)	引張強さ(MPa)
10	室温	480	687
	360	407	572
	450	390	539
20	室温	716	790
	360	546	613
	450	551	608
30	室温	781	849
	360	701	733
	450	647	684



単位：mm

図1 BNCT試験片の形状

2.2 高温大気中の亀裂発生試験

試験条件の一覧を表3に示す．亀裂発生時間の温度依存性を取得するため，試験温度は実機の運転条件よりも若干高温となる360℃から高温クリープ域となる475℃まで最大5条件設定した．

試験片に付与した荷重は全て9.2 kNに設定した．この荷重はノッチ先端を亀裂先端とみなして応力拡大係数(K値)の概念を適用するとK=40 MPa$\sqrt{m}$相当の荷重となる．試験中は変位計により開口変位の推移をモニタリングし，加速クリープに到達したと判断された場合は試験を終了し，加速クリープに遷移した時点を亀裂発生時点と評価した．試験が長時間に及ぶ場合は，途中で試験を中断し，ノッチ先端の状態変化を観察した後で試験を再開した．実績の試験時間を併せて表3に示す．

表3　高温大気中亀裂発生試験条件

冷間加工度(%)	試験温度(℃)	試験時間(h)
10	360	1,459
	400	1,674
	425	1,937
	450	3,876
	475	5,723
20	400	13,012
	450	1,200
	475	173 / 998
30	360	9,346
	400	4,719
	425	1,937
	450	349
	475	111

2.3 試験片の応力解析

表3の試験条件のうち最も0.2%耐力が高く，最も高応力が生じると考えられる30%CW材の360℃における試験片のノッチ先端近傍の詳細な応力分布を有限要素法解析により求めた．解析に際しては，汎用有限要素法解析コードABAQUS 2017[18]を用いて弾塑性解析を行い，応力-ひずみ関係として30%CW材の360℃の引張試験で得られた結果を用いた．

3. 実験結果

3.1 10%CW材の亀裂発生試験結果（温度依存性）

10%CW材の変位の時間変化を図2に示す．475℃の試験では3,600hで，450℃の試験では2,950hで加速クリープへの遷移が認められ，亀裂が発生したと判断した．425℃よりも低温の試験では定常クリープ速度の推移から加速クリープ到達まで極めて長時間を要すると想定されたことから，加速クリープへの遷移を待たずに定常クリープ域の2,000h程度で試験を終了した．

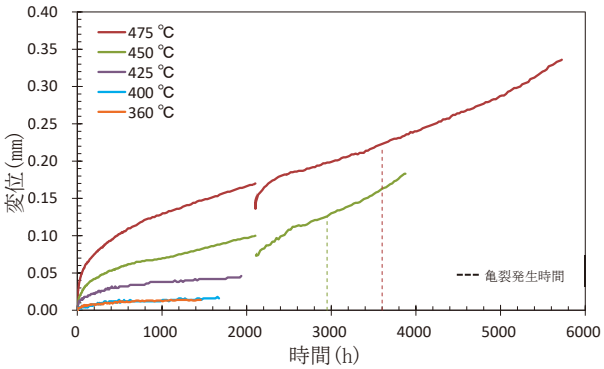


図2　10%CW材のBNCT試験片の変位の時間変化

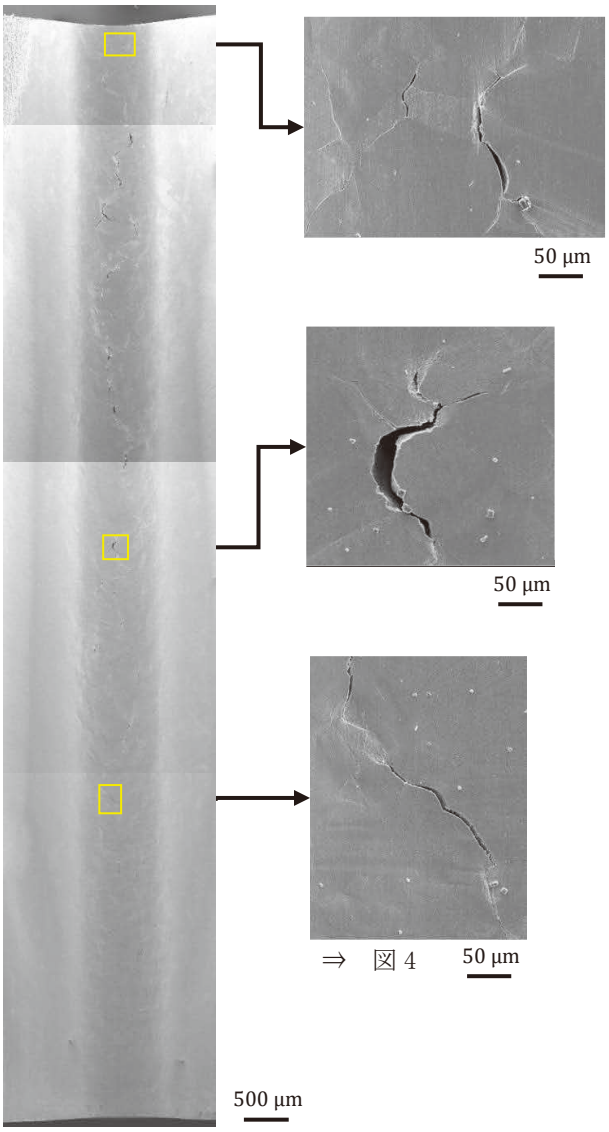


図3　10%CW材の475℃におけるBNCT試験片のノッチ先端の観察結果(5,723h時点)

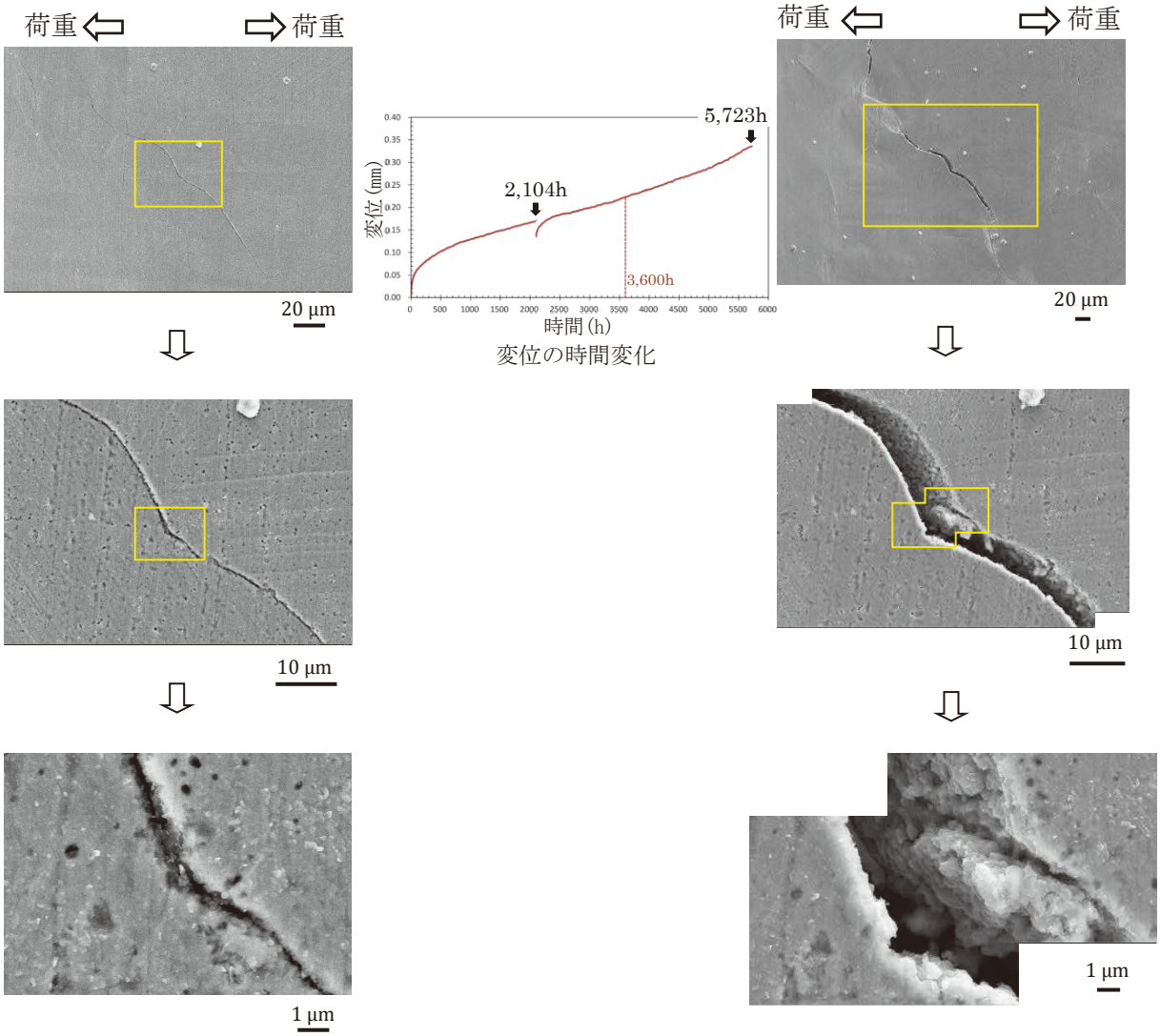


図4　10%CW材の475℃におけるBNCT試験片のノッチ先端の観察結果(同一領域を2,104h時点と5,723h時点で比較)

これらの結果から10%CW材については，試験温度が高いほど変形量及び定常クリープ速度が速く加速クリープ域への到達時間も短い傾向であった．亀裂発生時間については，450℃のほうが475℃よりも若干短く温度依存性が逆転する傾向であった．

475℃の試験片について，試験終了後にノッチ先端全域を走査型電子顕微鏡（scanning electron microscope，SEM）で観察した結果を図3に示す．複数の開口が連結して板厚方向全域に表面亀裂を生じている様子が観察された．また，図3の一部の領域について，加速クリープ遷移前(2,104h時点)のSEM観察結果と対比して図4に示す．加速クリープへの遷移前からノッチ先端の表面には粒界に微小な開口が認められ，加速クリープ遷移後はその開口の幅が拡大すると共に他の開口と合体・成長することで変位が増加したと考えられる．

3.2　20%CW材の亀裂発生試験結果(温度依存性)

20%CW材の変位の時間変化を図5に示す．亀裂発生時間は，450℃の試験で980hであり，475℃では2回試験を実施して125hと728hで差がある結果となった．400℃では，13,012hまで定荷重試験を継続したが，加速クリープへの遷移は認められなかった．

これらの結果から20%CW材については，試験温度が高いほど変形量及び定常クリープ速度が速く，加速クリープ域への到達時間も短い傾向であった．

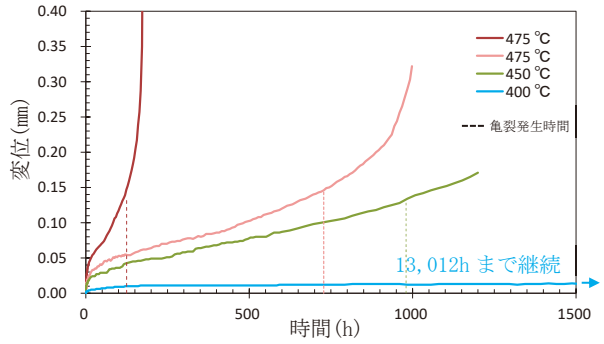


図 5　20%CW 材の BNCT 試験片の変位の時間変化

3.3　30%CW 材の亀裂発生試験結果（温度依存性）

30%CW材の変位の時間変化を図6に示す．400℃以上の試験において加速クリープへの遷移が認められ，亀裂が発生したと判断した．亀裂発生時間は，475℃の試験で68h，450℃の試験で235h，425℃の試験で1，150h，400℃の試験で4，000hであった．360℃では，9，346hまで定荷重試験を継続したが，加速クリープへの遷移は認められなかった．

これらの結果から30%CW材については，試験温度が高いほど変形量及び定常クリープ速度が速く，加速クリープ域への到達時間も短い傾向であった．

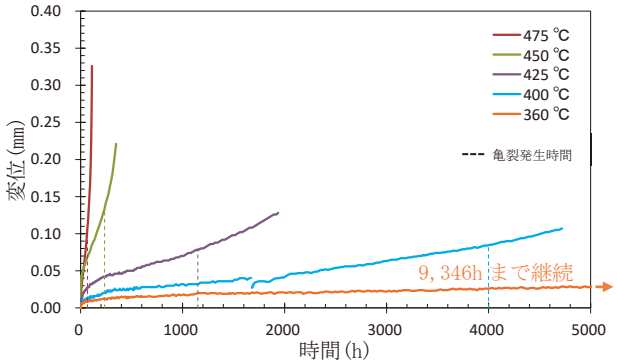
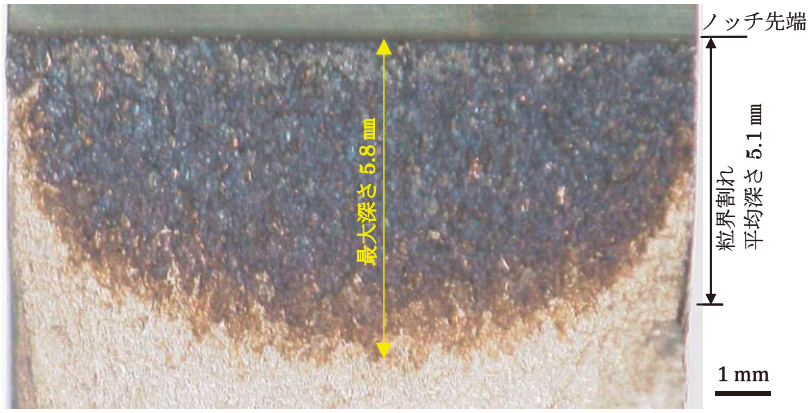
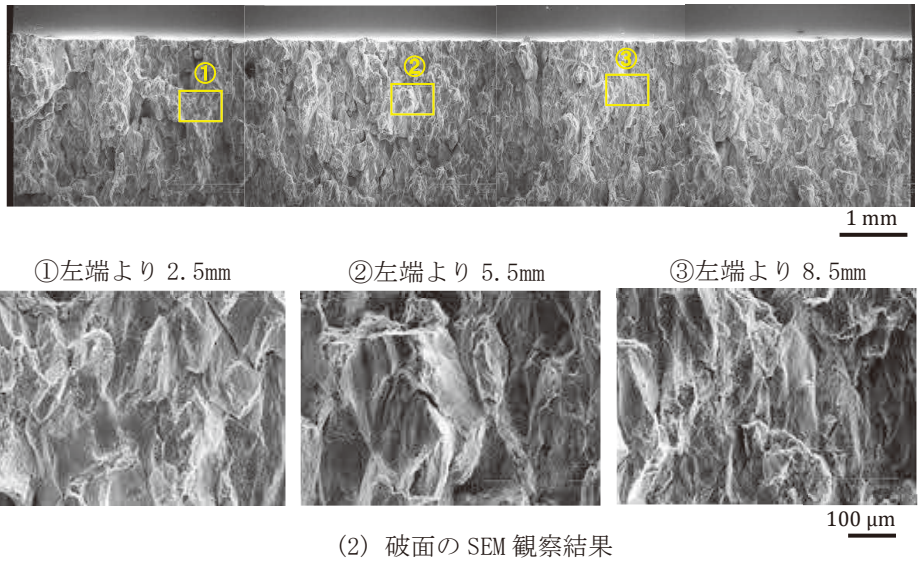


図6　30%CW材のBNCT試験片の変位の時間変化

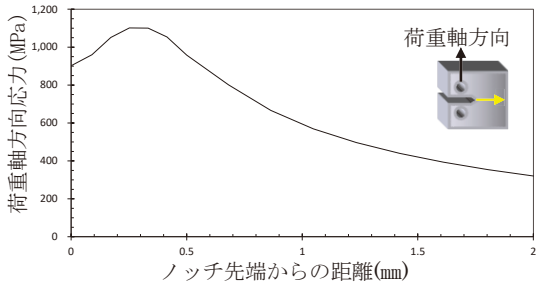


(1) 破面の光学顕微鏡観察結果

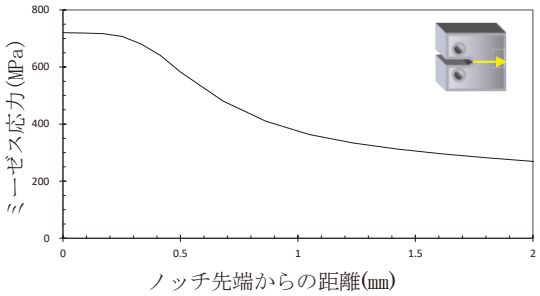


(2) 破面の SEM 観察結果

図 7　30%CW 材の 475℃における BNCT 試験片の試験後の破面観察結果



(a) 荷重軸方向応力



(b) ミーゼス応力

図 8　30%CW 材の 360℃における
BNCT 試験片の応力分布

475℃の試験片について，試験後に破面を開放して光学顕微鏡及び SEM で観察した結果を図 7 に示す．亀裂の平均深さは 5.1 mmであり，破面は粒界割れであった．この試験片は，68h で加速クリープに到達しており，比較的短時間で亀裂発生に至ったが，破面観察の結果ほぼ全面が粒界で割れていることが確認できた．

30%CW 材の 360℃における板厚中央部における荷重軸方向の応力分布を図 8(a)に，ミーゼス応力分布を図 8(b)にそれぞれ示す．荷重軸方向の応力分布についてはノッチ先端から 0.3 mm内側で最大値 1,100MPa を示し，ミーゼス応力についてはノッチ先端の表面で最大値 720MPa を示した．この値は 0.2%耐力を若干上回り，その 1.03 倍であった．

4. 考察

4.1 冷間加工度依存性

冷間加工度10%～30%の範囲で亀裂発生時間が取得されている400℃，450℃及び475℃の試験結果について，亀裂発生時間の冷間加工度依存性を整理して図9に示す．

450℃及び475℃共に冷間加工度の増大と共に亀裂発生時間が短くなる傾向となっており，その要因は冷間加工を付与することにより粒界におけるキャビティ生成量が増加したことが考えられる．このことは，冷間加工を付与することによりニッケルの体拡散が数桁速くなるとのAriokaらの知見[16]と整合する．

400℃では，30%CW材のみ亀裂発生時間が取得できており，冷間加工度依存性は確認できなかったが，20%CW材で30%CW材の亀裂発生時間を上回る13,012hの試験で加速クリープ域に到達しなかったことから，450℃及び475℃と同様の冷間加工度依存性を示すことが示唆される．

また，475℃の試験結果のうち，20%CW材については同一条件で2回試験を行なったが，亀裂発生時間に大きな差が認められた．同一試験条件でこのような違いが生じた要因については特定できなかったが，475℃についても平均的な傾向としては450℃と同様に冷間加工度に対して指数関数的な影響が認められた．

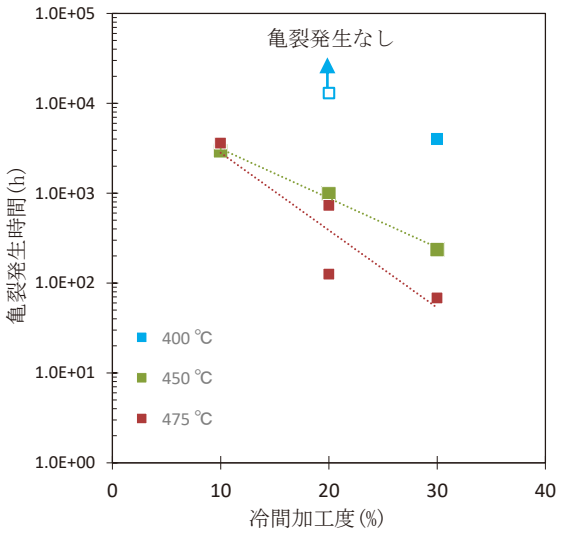


図9　亀裂発生時間の冷間加工度依存性

4.2 試験温度依存性

高温大気中亀裂発生時間の試験温度依存性について，10%～30%CW材について温度の逆数に対して亀裂発生時間の試験温度依存性を整理して図10に示す．20%CW材及び30%CW材については，亀裂発生時間を取得できた温度範囲でアレニウス型の温度依存性が認められ，亀裂発生時間の平均的な傾きから算出された活性化エネルギーは20%CW材が212kJ/mol，30%CW材が231kJ/molであった．また，より低温となる400℃や360℃では亀裂発生時間を取得できなかったが，定常

クリープ域の持続時間からその傾向が継続している可能性が示唆された．

一方，10%CW材については，データ数が少なく高温となるほど亀裂発生時間が短くなる傾向は確認できなかった．図2より変位量及び定常クリープ速度は温度に応じて増加する傾向となっており，亀裂発生時間についても同様にアレニウス型の温度依存性が認められる可能性はあるが，今回のデータでは確認できなかった．

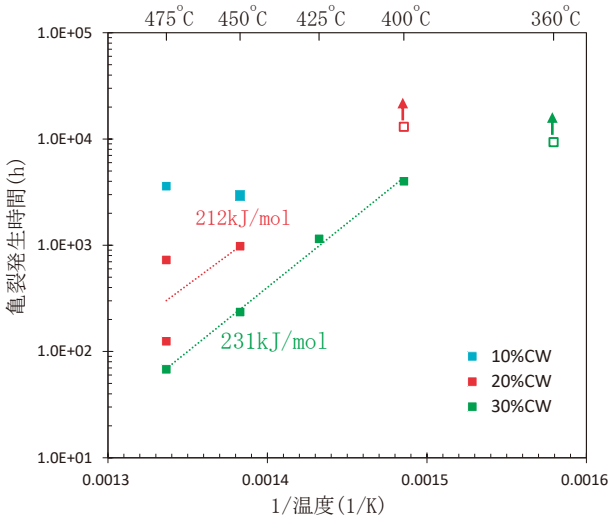


図10　高温大気中亀裂発生時間の試験温度依存性

4.3　粒界キャビティ生成型機構に基づく亀裂発生時間の評価

4.3.1　亀裂発生時間の関係式の検討

冷間加工度及び温度をパラメータとした粒界キャビティ生成型機構による亀裂発生時間を評価する関係式を検討した．寺地らは，高温大気中の亀裂進展速度について，PWR1次系模擬水環境中と同様にアレニウス型の温度依存性が認められ，冷間加工度依存性についても図9と同様に指数関数的な影響が見られることを報告している[19]．このような知見を踏まえて，亀裂進展速度と亀裂発生時間の逆数が，温度及び冷間加工度に対して同様の依存性を示すと想定し，亀裂進展速度式として提案されている式(1)[20]をもとに亀裂発生時間の逆数で整理した式(2)を用いて関係式を策定した．式(2)の係数を得られたデータに対して最適化することでキャビティ生成型による亀裂発生時間を算出する式とした．

$$CGR = C_{CGR} \times e^{\alpha \cdot CW} \times K^{\beta} \times e^{-\frac{E_a}{R \cdot T}} \quad \cdots(1)$$

$$\frac{1}{t_{init}} = C_{init} \times e^{\alpha \cdot CW} \times K^{\beta} \times e^{-\frac{E_a}{R \cdot T}} \quad \cdots(2)$$

ここで，CGR:亀裂進展速度(mm/s)，t_{init}:亀裂発生時間(h)，C_{CGR},C_{init}:定数，CW:冷間加工度(%)，α:冷間加工度の係数，K:応力拡大係数(MPa$\sqrt{\mathrm{m}}$)，β:応力拡大係数の影響係数，E_a:活性化エネルギー(J/mol)，R:気体定数(8.314J/mol・K)，T:絶対温度(K)　である．

応力拡大係数については，今回の試験はいずれも見かけのK=40(MPa$\sqrt{\mathrm{m}}$)の条件で実施されているため，K=40の一定値とし，βについても1とした．

また，活性化エネルギーについては，図10に示すように20%CW材と30%CW材については200kJ/mol程度の値が得られているが，10%CW材については活性化エネルギーが求められなかったことから，今回の検討では10%CW材のデータは最適化対象に含めなかった．

4.3.2　関係式の検討結果

活性化エネルギーが求められた20%CW材及び30%CW材について，係数の最適化を行ない，C_{init}及びαを決定した．最適化に際しては式(2)の対数をとって式(3)に変形したうえで，マイクロソフト社の表計算ソフトウェアExcelのソルバー機能(GRG法[21]による非線形最適化を行なう)を用いて係数の最適化を行なった．

$$\ln\left(\frac{1}{t_{init}}\right) = \ln(C_{init}) + \alpha \cdot CW + \beta \cdot \ln(K) - \frac{E_a}{R \cdot T} \quad \cdots(3)$$

最適化により得られたC_{init}及びαを表4に示す．また，この値を用いて式(2)により亀裂発生時間を計算した結果を図11に示す．20%CW材，30%CW材共に実測値と計算値の間に良好な1対1の相関が認められた．また，データ点数が7点と少なく統計的な評価は困難だが，残差(実測値－計算値)の標準偏差は222hで，残差の平均値は10.1hであった．

表4　最適化結果

最適化対象	最適化結果
定数 C_{init}	6.12×10^{6}
冷間加工度の係数 α	0.453

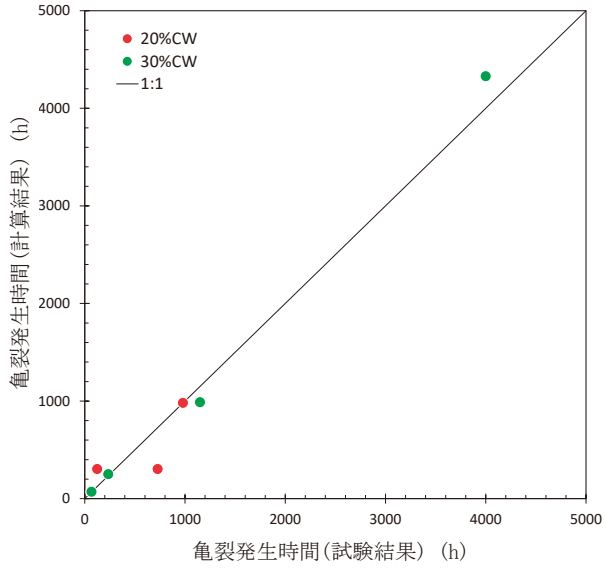


図11　最適化後の式(2)による亀裂発生時間の計算結果と試験結果の比較

4.3.3　得られた関係式による亀裂発生時間の評価

得られた関係式により，20%CW材及び30%CW材について亀裂発生時間と温度の逆数との相関を求めた結果を試験データと共に図12に示す．

PWRプラントの運転温度である320℃では亀裂発生時間は取得されておらず式(2)を外挿した評価とはなるが，試算すると30%CW材で約129年となり，20%CW材ではその2倍程度の約254年となる．このことから，固体中のキャビティ生成のみを因子として考慮すると亀裂発生に至るまで，30%CW材で0.2%耐力を若干上回る720MPaの応力が生じる荷重条件下で100年程度のオーダーとなり，冷間加工度や応力が小さくなるとさらに長期間を要することが示唆された．

また，図12に360℃のPWR1次系模擬水環境中で得られた丸棒引張試験片による定荷重試験結果[12]及びBNCT試験片による定荷重試験結果[13]を併せて示すが，式(2)を低温側へ外挿して得られた線よりも短時間でノッチ先端に亀裂状の開口が認められている．これらはPWR1次系模擬水環境が亀裂の発生を促進したことを示唆する．その原因として腐食作用がSCC発生に対して何らかの促進効果を及ぼしたことが考えられる．ただし，荷重条件や亀裂の発生評価方法が高温大気中の亀裂発生試験の結果とは異なるため，直接比較には注意を要する．現段階ではSCC発生に関する知見は十分ではなく腐食作用がSCC発生に及ぼす促進効果については必ずしも明らかになっていないため，引き続き定荷重試験を継続し，発生段階の知見を拡充することが重要と考えられる．

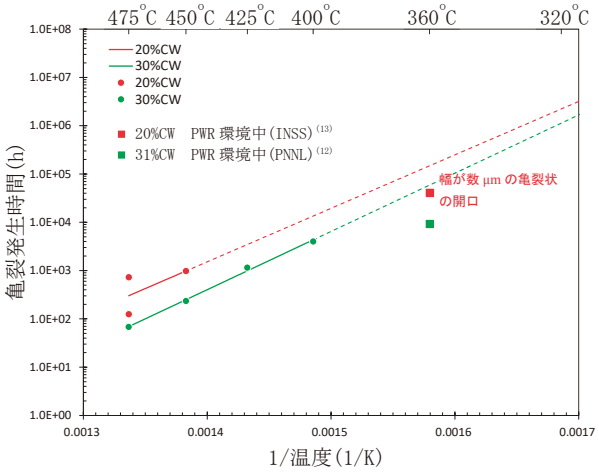


図12　最適化後の式(2)により得られた亀裂発生時間と温度の逆数との相関

5.　結言

TT690合金において，粒界キャビティ生成型のSCCの発生を検討するため，10%，20%及び30%の冷間加工材を用いて，360℃～475℃の温度範囲で高温大気中のクリープ試験で亀裂発生時間を取得し，粒界キャビティ生成に対する冷間加工度依存性や温度依存性を系統的に把握した．得られた結果は以下の通りである．

- 亀裂発生時間の冷間加工度依存性については，冷間加工度の増大とともに亀裂発生時間が短くなる傾向であり，その要因として冷間加工を付与することにより粒界におけるキャビティ生成量が増加することが考えられた．
- 亀裂発生時間の温度依存性については，20%CW材及び30%CW材でアレニウス型の温度依存性が認められ，亀裂発生時間の平均的な傾きから算出された活性化エネルギーは20%CW材が212kJ/mol，30%CW材が231kJ/molであった．10%CW材については，今回のデータでは高温となるほど亀裂発生時間が短くなる傾向は確認できなかった．
- 冷間加工度，温度，活性化エネルギーをパラメータとしてキャビティ生成型機構による亀裂発生時間を算出する関係式を検討し，その係数を20%CW材及

び30%CW材の亀裂発生時間のデータに対して最適化した結果，これらの試験データを良好に再現する関係式が得られた．

・得られた関係式により，30%CW材について320℃における亀裂発生時間を試算した結果，粒界のキャビティ生成のみを因子として考慮すると亀裂発生に至るまで約129年との結果が得られた．冷間加工度や応力が小さくなるとさらに長期間を要することが示唆された．

・360℃のPWR1次系模擬水環境中で得られた定荷重試験結果と比較すると，高温大気中の結果よりも短い時間でノッチ先端に亀裂状の開口が認められており，PWR1次系環境における腐食作用が亀裂発生を促進し，その原因として粒界のキャビティ生成に対して促進効果を及ぼしたと推定された．

参考文献

(1) 実用発電用原子炉の法令報告事象について，原子力安全委員会 原子力事故・故障分析評価専門部会,事専第10-6号，平成22年12月17日，(2010).

(2) B. Alexandreanu, Y. Yang, Y. Chen and W.J. Shack, “The Stress Corrosion Cracking Behavior of Alloys 690 and 152 Weld in a PWR Environment,” Proc. of 14th International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors, Virginia Beach, VA, August 23-27, (2009).

(3) M.B. Toloczko, S.M. Bruemmer, “Crack Growth Response of Alloy 690 in Simulated PWR Primary Water,” Pacific Northwest National Lab (No. PNNL-SA-72539), Richland, WA, (2009).

(4) S.M Bruemmer, M.J. Olszta and M.B. Toloczko. “Cold Rolling Effects on Grain Boundary Damage and Stress Corrosion Crack Growth in Alloy 690,” Proc. Fontevraud 7, 236, (2010).

(5) K. Arioka, T. Yamada, T. Miyamoto and T. Terachi, “Dependence of stress corrosion cracking of alloy 690 on temperature, cold work, and carbide precipitation-role of diffusion of vacancies at crack tips,” Corrosion, 67(3), (2011).

(6) D.R. Tice, S.L. Medway, N. Platts and J.W. Stairmand, “Crack Growth Testing on Cold Worked Alloy 690 in Primary Water Environment,” Proc. of the 15th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors, pp. 71-89, Colorado US, (2011).

(7) M.B. Toloczko, M.J. Olszta and S.M. Bruemmer, “One Dimensional Cold Rolling Effects on Stress Corrosion Crack Growth in Alloy 690 Tubing and Plate Materials,” Proc. of the 15th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors pp. 91-107, Colorado US, (2011).

(8) P. L. Andresen, M.M. Morra, and K. Ahluwalia, “SCC of Alloy 690 and Its Weld Metals,” Proc. of the 15th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors, pp. 161-178, Colorado US, (2011).

(9) T. Moss, D. Morton and Heather Mohr, “Evaluation of the Temperature Dependence of Alloy 690 and Alloy 690 Weld Metal SCC Growth in Hydrogenated Water,” Proc. of the 17th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors, Toronto Canada, (2015).

(10) S.M. Bruemmer, M.J. Olszta, N.R. Overman, and M.B. Toloczko, “Cold Work Effects on Stress Corrosion Crack Growth in Alloy 690 Tubing and Plate Materials,” Proc. of the 17th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors, Toronto Canada, (2015).

(11) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Code Case N-909, Aug.10 2020, (2020).

(12) Z. Zhai, M. Toloczko, K. Kruska & S. Bruemmer, “Precursor Evolution and Stress

Corrosion Cracking Initiation of Cold-Worked Alloy 690 in Simulated Pressurized Water Reactor Primary Water," Corrosion, 73(10), 1224-1236, (2017).
(13) 寺地巧, 山田卓陽, 岡本マキエ, 有岡孝司, "PWR1次系模擬水中におけるTT690合金冷間加工材のSCC発生評価," INSS JOURNAL, Vol.26, pp. 118-135, (2019).
(14) 寺地巧, 山田卓陽, 岡本マキエ, 有岡孝司, "PWR1次系模擬水中におけるTT690合金冷間加工材のSCC発生評価(第2報)," INSS JOURNAL, Vol.27, pp. 159-174, (2020).
(15) K. Arioka, "Role of Cavity Formation on Long-Term Stress Corrosion Cracking Initiation: A Review," Corrosion, 76(2), pp. 142-175, (2020).
(16) K. Arioka, Y. Iijima, T. Miyamoto, "Rapid Nickel Diffusion in Cold-Worked Type 316 Austenitic Steel at 360-500° C," International Journal of Materials Research, 108(10), pp.791-797, (2017).
(17) 寺地巧, 宮本友樹, 福村卓也, 戸塚信夫, 山田卓陽, 有岡孝司, "690 合金の SCC 進展に及ぼす粒界キャビティの影響," INSS JOURNAL, Vol.22, pp.129-139, (2015).
(18) Dessault Systèmes Simulia Corp., Abaqus User's Manual Version 2017, Providence, RI, (2017).
(19) 寺地巧, 山田卓陽, 岡本マキエ, 有岡孝司, "TT690合金のSCCに関する知見と今後の課題," INSS JOURNAL, Vol.25, pp.187-208, (2018).
(20) T. Terachi, T. Yamada, T. Miyamoto and K. Arioka, "SCC Growth Behaviors of Austenitic Stainless Steels in Simulated PWR Primary Water," Journal of Nuclear Materials, 426(1), pp. 59-70, (2012).
(21) Lasdon, L. et al., "Design and testing of a generalized reduced gradient code for nonlinear programming," ACM Transactions on Mathematical Software, Vol. 4, Issue 1, pp.34-50, (1978).

TT690合金のPWR1次系模擬水中の腐食挙動への溶存水素濃度と温度の影響

Influences of dissolved hydrogen and temperature on corrosion behavior of Alloy 690 TT in simulated PWR primary water condition

笹岡　孝裕（Takahiro Sasaoka）*1　　山田　卓陽（Takuyo Yamada）*1　　有岡　孝司（Koji Arioka）*1

要約　TT690合金のPWR1次系模擬水中の腐食挙動への溶存水素（DH）濃度と温度による影響について調べた．表面皮膜の形態はDH濃度と温度により変化している様子が観察され，低DH濃度条件では針状酸化物が，高DH濃度条件ではスピネル酸化物が形成することがわかった．また，高温条件ほど針状酸化物の形成が支配的であった．内層酸化皮膜の厚さと試験時間から放物線速度定数k_p［m^2/s］を求めた結果，腐食速度は高温側で大きくなる単純なアレニウス型の温度依存性ではなく，低温側で大きくなった．これはTT690合金の腐食挙動に酸素等の拡散律速反応以外の腐食機構が関係することを示唆する．

キーワード　PWR1次系，TT690合金，溶存水素濃度，皮膜厚さ

Abstract　The effects of dissolved hydrogen(DH)concentration and temperature on the corrosion behavior of Alloy 690 TT in the simulated PWR primary water system were investigated. It was observed that the morphology of the outer layer oxide film changed depending on the DH concentration and temperature, and it was found that needle-like precipitates were formed under low DH concentration conditions and spinel oxides were formed under high DH concentration conditions. In addition, the formation of needle-like oxide was dominant at the higher temperatures. As a result of determining the parabolic rate constants k_p[m^2/s]from the oxide film thickness and the test time, it was found that the corrosion rate did not show the simple Arrhenius-type temperature dependence that increased on the high temperature side, but that increased on the low temperature side. This suggests that the corrosion behavior of Alloy 690 TT is related to a corrosion mechanism other than a diffusion-controlled reaction such as for oxygen.

Keywords　PWR primary water system, alloy 690, dissolved hydrogen, film thickness

1. はじめに

軽水炉原子力発電所における1次系水質管理は，燃料の反応度制御，構造材の劣化抑制，腐食抑制による系統線量低減等を目的としており，より良い水質管理を達成するための検討がされてきた[(1)]．しかし，構造材の種類によっても水質の影響は異なり，蒸気発生器（SG）伝熱管として用いられているNi基合金の一つである600系合金では，1次冷却材応力腐食割れ（PWSCC）感受性をもつことが知られており，国内外で多くの発生・進展事例が報告されている[(2)(3)]．そのため，600合金を使用している加圧水型軽水炉（PWR）プラントでは耐PWSCC対策として開発されたTT690合金への交換が進められ，現在までのところTT690合金で実機におけるPWSCC発生の報告例はない．1次冷却材の水質管理においては，溶存水素（DH）濃度が燃料被覆管や構造材の腐食挙動に影響を与えることは従来から知られており，腐食生成物の発生および炉心への移行抑制に関係している[(4)]．TT600合金やTT690合金等のNi基合金から^{58}Niが溶出すると，1次冷却材により原子炉内へ持ち込まれ，燃料表面で析出して放射化されることにより主要放射性核種である^{58}Coとなる．またNiはNi/NiO（金属NiとNiO）で熱力

＊1　（株）原子力安全システム研究所　技術システム研究所

学的な安定状態が変化し，その形態変化点はDH濃度と温度に依存することが分かっている[(5)]．米国電力研究所（EPRI）の報告においては，DH濃度を高くすることによりNiを溶解度の低い金属Niとすることで溶出を抑制し，原子炉内への移行を防ぐことが^{58}Coの発生を抑制する観点からは有効であるとしている[(5)]．一方，国内の一部事業者においては，DH濃度を低く管理することでNiを溶解度の高いNiO安定領域とし，燃料表面の付着クラッド量を低下させることで^{58}Coの発生を抑制する管理を検討している[(6)]．しかし，NiのNi/NiO境界での熱力学的な安定状態の変化が，Ni基合金の腐食挙動に影響しているとした場合，DH濃度だけではなく温度環境も含めた腐食影響評価が，被ばく低減における最適なDH濃度条件の選定には必要である．

本研究では被ばく低減と材料劣化抑制を目的としたより良い水質条件策定のため，PWR1次系模擬環境下でDH濃度が0～45 cm^3/kg，試験温度が290～360℃の幅広い環境条件下で腐食試験した試験材の酸化皮膜分析を行い，DH濃度と温度によるTT690合金の腐食挙動の変化を調べた．

2. 実験方法

2.1 供試材

使用した供試材は690合金のラボ溶製材（A材）および実機相当材（B材）であり，材料の化学組成を表1に示す．なお熱処理条件は，ともに1,075℃の溶体化（水冷）処理後，700℃×15 hの特殊熱処理（TT処理）を施した材料である．材料表面は3 μmのダイヤモンドペーストまで研磨を行った．

2.2 腐食試験

PWR1次系模擬水環境下（B:500 ppm，Li:2 ppm）で，試験温度が290～360℃，DH濃度が0～45 cm^3/kgの条件で703～4090 h腐食試験した．なお290℃条件のみB材を用いた．試験条件一覧について表2に示す．以降，試験条件は「温度/DH条件」で示す．

2.3 皮膜観察

表面皮膜観察には電界放射型走査電子顕微鏡（FE-SEM，以下SEMと略す）（Carl Zeiss 製ULTRA55）を用いて試験片全体を観察した．

また，クロスセクションポリッシャー（CP）により断面試料を作製し，皮膜断面方向からのSEM観察を行った．

3. 実験結果

3.1 表面皮膜観察

腐食試験後の試験片表面皮膜をSEM観察した結果，試験条件により異なる特徴を持つ皮膜が形成されている様子が確認できた．表面皮膜観察結果一覧について図1に示す．観察結果から，各試験条件下でのTT690合金の表面皮膜の形態として次の4種類に分類した．

① NiOが形成されている
② 針状酸化物で表面全体が覆われている
③ 針状酸化物とスピネル酸化物が点在している
④ スピネル酸化物のみ形成されている

表1　690合金供試材の化学組成（wt%）

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Fe	Cu	Ni
A材	0.022	0.32	0.31	0.010	0.0016	28.86	8.86	0.06	61.05
B材	0.019	0.30	0.32	0.009	0.0006	30.18	9.42	0.04	59.25

表2　腐食試験条件

		温度［℃］					
		290	320	330	340	350	360
DH濃度［cm^3/kg］	0	-	-	-	1037 h	-	1037 h
	15	815 h	4090 h	4090 h	888 h	888 h	888 h
	30	815 h	715 h	703 h	703 h	703 h	811 h
	45	817 h	3778 h	3778 h	874 h	874 h	874 h

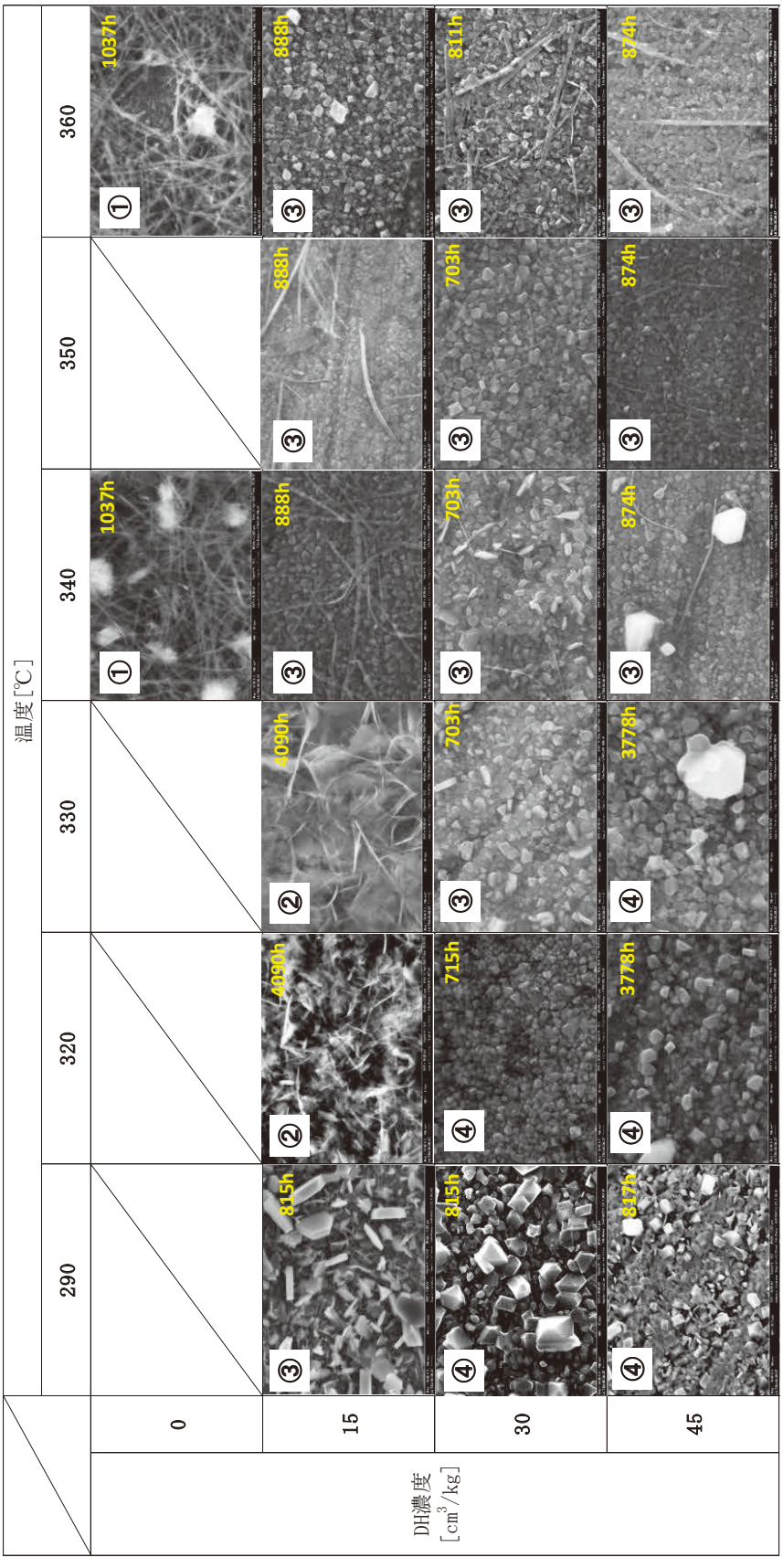


図１　SEMによる表面皮膜観察結果（一覧）

なお，図１にはこの分類分けの結果を示した．

分類①では，表面全体が針状の酸化物と丸みを帯びた酸化物で覆われていた．また，10 μm程度の大きさの多角形の酸化物が点在した．類似の報告より丸みを帯びた酸化物は岩塩型の特徴を持つNiO，多角形の酸化物はNi，Cr，Feを主体とする正八面体のスピネル構造の酸化物と考えられる[7]．NiOについてはDH濃度0 cm^3/kg条件でのみ観察された．

分類②では，全体が針状の酸化物で覆われており，NiOやスピネル酸化物はほとんど確認できなかった．

分類③では，表面は小さなスピネル酸化物で覆われており，針状の酸化物が表面を覆う様子は見られず，僅かに析出しているのみであった．比較的大きな酸化物についてもほとんど見られなかった．

分類④では，表面は直径が0.1 μm程度の小さなスピネル酸化物で覆われており，針状の酸化物は観察されなかった．

針状の酸化物については，NiOとする報告[8]やBonaccordite（Ni_2FeBO_5）とする報告[9]があるが，寺地ら[10]による600 合金での電子線回折とEDS分析結果ではNiOではなくスピネル酸化物に近い組成が示されておりBonaccordite（Ni_2FeBO_5）と考えられる．

3.2　皮膜断面観察

図２に各環境条件における皮膜断面をSEM観察した結果をまとめて示す．母材中へ酸素が侵入し内層酸化皮膜（以降，内層皮膜とする）が形成されており，皮膜断面は表面皮膜同様に，DH濃度と温度の環境条件により腐食形態が異なる様子が確認された．それぞれの試験条件下でのTT690合金の皮膜断面の形態として次の３種類に分類した．

A 内層皮膜がまだら状に深い領域まで形成している
B 内層皮膜が全体に渡って形成している
C 内層皮膜が部分的に形成している

なお，図２にはこの分類分けの結果を示した．

分類Aでは，特徴的な酸化の様子が認められ，まだら状に母材中の深い領域まで酸化されている様子が見られた．これについて，DH濃度 0 cm^3/kg条件では母材中への酸素の内方拡散が生じ易い環境であったと考えられる．600合金について，Pengら[11]により類似の報告があり，低DH濃度条件では$NiCr_2O_4$の水素化によりアモルファスなCrOOH層が形成され，CrOOH層は保護性酸化皮膜（以降，保護皮膜とする）として機能する典型的なCr_2O_3と比べ保護性が低く，環境水が母材に浸透しやすいため，より酸化が進行した厚い内層皮膜を形成する機構が提案されている[11]．

分類Bでは，全体に渡って内層皮膜が形成されている様子が見られた．例えば「320/15条件」では表面全体に針状の酸化物が形成されていたが，断面観察からも表面皮膜の形態がよく確認でき，厚く隙間の多いポーラスな様子が見られた．

分類Cでは，ほとんど酸化が見られない部分と酸化されている部分に分かれている様子が見られた．断面方向から見た表面皮膜の形態として，分類A，Bよりも表面皮膜は薄く密な層になっている様子であった．それぞれの分類について観察結果の中から代表例を図３に示す．

内層皮膜の腐食形態には表面皮膜との界面に近い合金内部に形成される保護皮膜が影響していると考えられる．一般にCrやAl等により保護性のよい酸化皮膜（Cr_2O_3やAl_2O_3）が形成され，以降の腐食反応を抑制することが知られている[12]．金属を空気中で高温に加熱すると保護皮膜が形成されるが，この皮膜が緻密で均一に表面を覆っているとした場合，内層皮膜の成長反応はこの保護皮膜を通しての物質輸送（金属イオンの外方拡散，または酸素イオンの内方拡散）により律速される．このような保護皮膜中のイオンの拡散に律速される内層皮膜の成長は，放物線則に従うことが知られている[13]．皮膜厚さと時間との関係を表す放物線則を次式に示す．

$$X^2 = 2k_p t \qquad (1)$$

ここで，Xは皮膜厚さ［m］，k_pは放物線速度定数［m^2/s］，tは時間［s］である．

内層皮膜の成長が保護皮膜を通したイオンの拡散に律速であると仮定し，皮膜厚さのデータから(1)式によりk_pを求めることで試験時間の異なる試験片の腐食影響を相対的に評価した．内層皮膜厚さと試験時間から求めたk_pの計算結果をまとめて表３に示す．内層皮膜厚さについては，図３に示した表面皮膜を除く母材表面から内層皮膜先端までを皮膜厚さとして測定した．なお，分類Cでは内層皮膜の形成が部分的なため，全体観察から代表的とみなせ

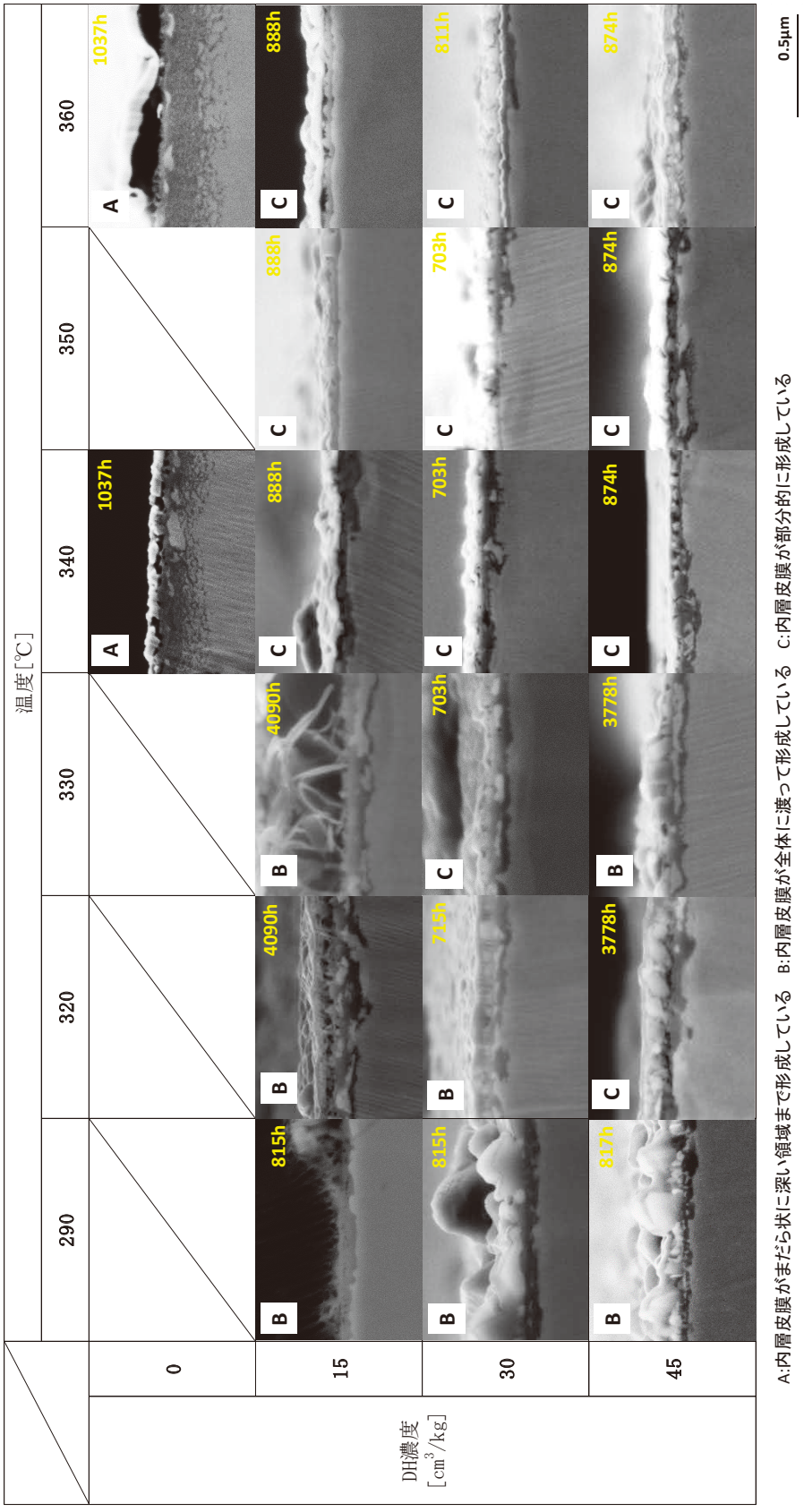
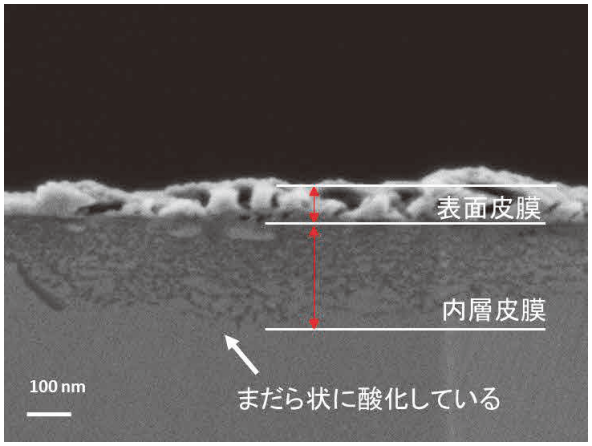
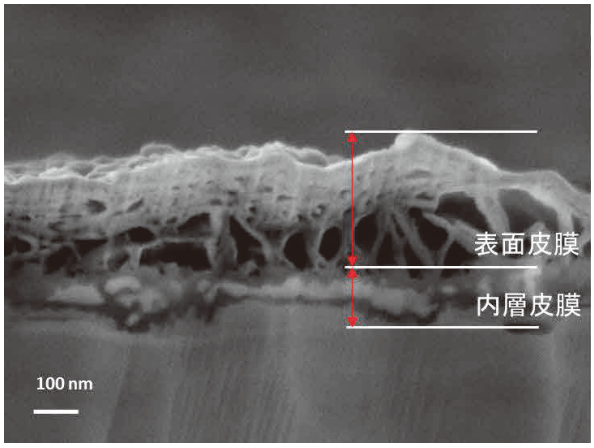


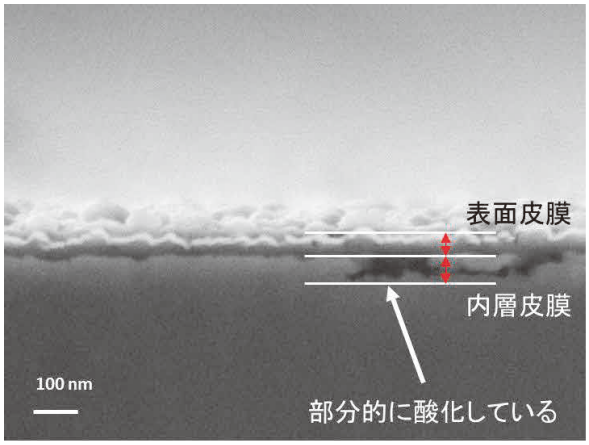
図２　SEMによる皮膜断面観察結果（一覧）



（a）分類A（340/0条件）



（b）分類B（320/15条件）



（c）分類C（360/30条件）

図３　SEMによる皮膜断面観察結果（代表例）

る箇所を選定し，測定した．

得られたk_pをDH濃度に対してプロットした結果を図４に示す．DH濃度 0 cm^3/kg条件では，他の条件と比べk_pは大きくなった．k_pが大きい程試験時間に対してより内層皮膜厚さが厚い，すなわち酸化が進行している．この結果について，k_pが保護皮膜の形成と関係しているとした場合，DH濃度 0 cm^3/kgは保護性の低い皮膜が形成されている条件と考えられる．15，30，45 cm^3/kgのDH濃度条件では，k_pは 0 cm^3/kgと比べ１～２桁程度小さな値であった．また，温度条件によってもDH濃度による傾向が異なり，DH濃度の増加に伴い290℃から330℃条件ではk_pは小さくなり，340℃から360℃条件では0 cm^3/kgを除きk_pは大きくなる傾向が見られた．

k_pを温度に対してプロットした結果を図５に示す．DH濃度 15 cm^3/kg条件では，320℃から360℃の範囲でより高温条件になるに従いk_pが小さくなる傾向が見られ，1.6×10^{-21}～9.4×10^{-23}［m^2/s］で変化した．DH濃度30 cm^3/kg条件でも高温側でk_pは低下傾向となり，これに反してDH濃度 45 cm^3/kg条件では330℃から340℃でkpが大きく上昇した．

4.　考察

4.1　表面皮膜形態とDH濃度，温度の関係

表面皮膜の形態がDH濃度と温度により変化することについてはNiがNi/NiOで熱力学的な安定状態が変化することが知られており[5]，Ni/NiO境界データがAttanasioら[14]により報告されている．また，寺地ら[10]は600合金について，DH濃度と皮膜構造の関係性を検証するためNiOおよび$NiFe_2O_4$が水素により還元される平衡DH濃度を自由エネルギー変化（ΔG）と平衡定数を用いた理論式により求めている．表面皮膜観察結果をAttanasioらの境界データおよび寺地らの試験結果と合わせてプロットした結果を図６に示す．

表面皮膜の腐食形態の違いについて，先述した４種類の分類（①NiOが形成されている ②針状酸化物で表面全体が覆われている ③針状酸化物とスピネル酸化物が点在している ④スピネル酸化物のみ形成されている）に分けてプロットした．NiOについては，DH濃度 0 cm^3/kg条件でのみ観察された．Attanasioらの境界データにおいては「360/15条件」と「350/15条件」はNiO安定領域と考えられるが，NiOは確認できなかった．NiOは高温環境下ではかなり低いDH濃度でもNiに還元されること[15]が報告されており，NiOとして析出することができなかったためと考えられる．

針状酸化物については，AttanasioらのNi/NiO境界で見た場合にNi安定領域となる環境条件下

表３　k_p計算結果

［m^2/s］

DH濃度［cm^3/kg］	温度［℃］					
	290	320	330	340	350	360
0	–	–	–	8.1×10^{-21}	–	1.2×10^{-20}
15	7.7×10^{-22}	1.6×10^{-21}	7.9×10^{-22}	9.6×10^{-22}	2.0×10^{-22}	9.4×10^{-23}
30	1.0×10^{-21}	1.3×10^{-21}	2.3×10^{-21}	1.2×10^{-21}	1.2×10^{-21}	3.4×10^{-22}
45	3.4×10^{-22}	4.6×10^{-22}	2.4×10^{-22}	1.8×10^{-21}	1.3×10^{-21}	5.8×10^{-22}

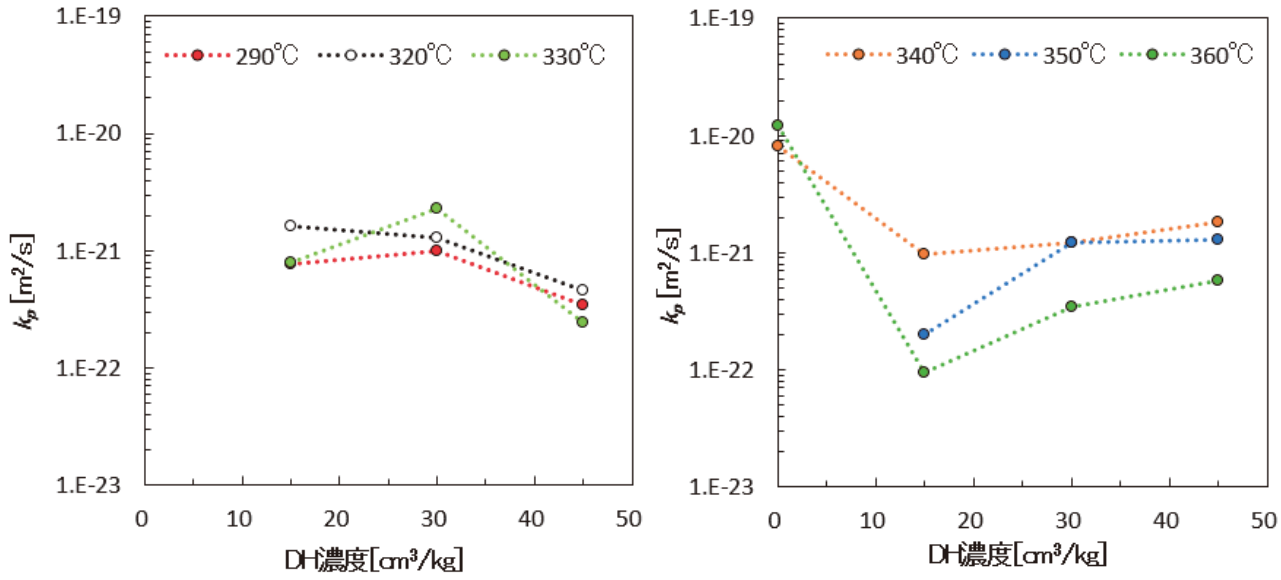


図４　DH濃度とk_pの関係（左：290～330℃　右：340～360℃）

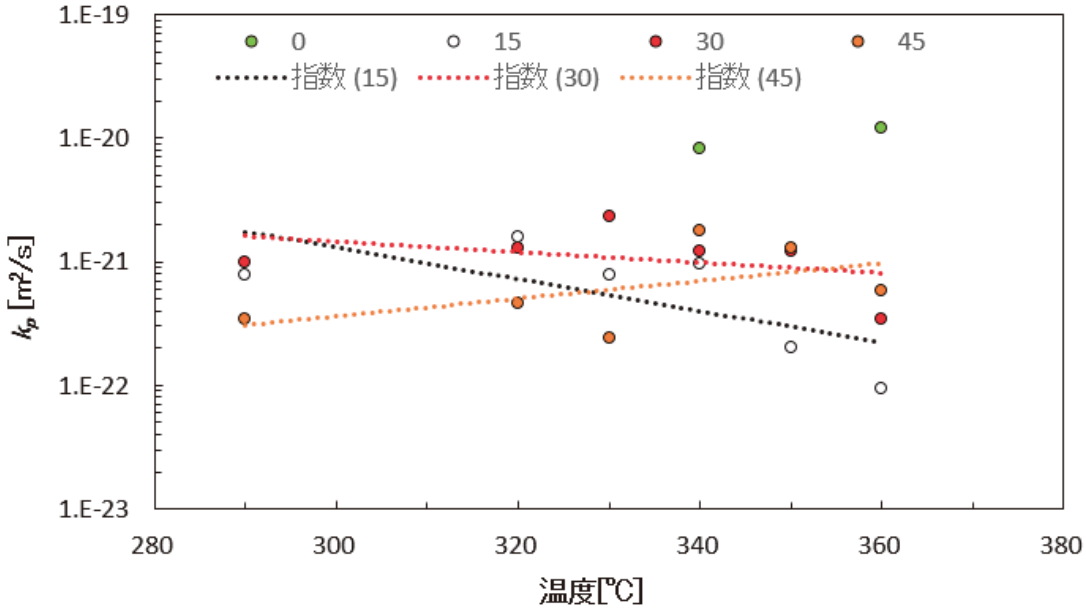


図５　温度とk_pの関係

の一部と，NiOが形成されていた環境条件で確認できた．針状酸化物が部分的に形成されている様子は他の環境条件下でも確認できたが，表面全体を覆うように析出している様子ではなかった．針状酸化物については米国のPWRプラントで燃料表面の析出物として報告[16]があり組成分析の結果からBonaccordite（Ni_2FeBO_5）とされている．Bonaccorditeが形成された理由としてクラッドの

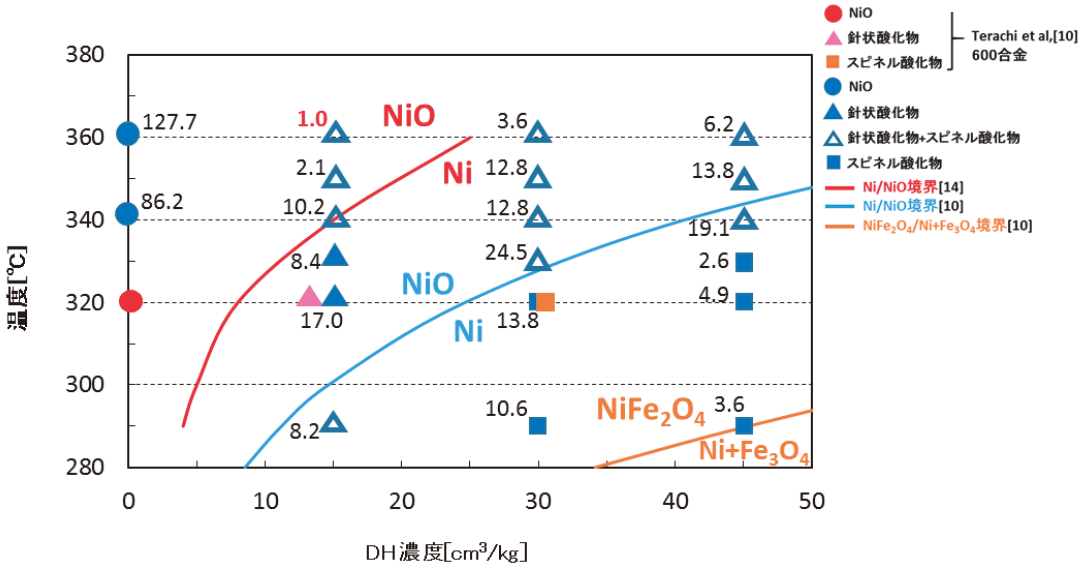


図６　表面皮膜形態とDH濃度,温度の関係

Ni/Fe比が高いことを挙げ，系統水中のNi濃度が高いことを原因としている．系統水中のNi濃度が高いことがBonaccorditeである針状酸化物が形成される原因と仮定した場合，図６から針状酸化物の形成が無くスピネル酸化物が主として形成されている領域がNiの溶出が抑制された環境条件であると考えられ，PWRプラントの通常運転温度範囲である290℃～320℃で考えるとDH濃度は約 30 cm^3/kg以上になると考えられる．

図中のNi/NiO境界データについて，寺地らの熱力学データより計算した境界条件と比べAttansioらの境界は低DH濃度側にシフトしている．これについては，熱力学データにより求められたNi/NiO境界と違いAttanasioらは実験的にNi/NiO境界を求め，より低DH濃度側に真の境界があることを指摘している [14]．

4.2　k_pとDH濃度，温度の関係

保護性の高い酸化皮膜により，以降の腐食反応は抑制されるため，k_pが大きい結果は酸化皮膜の保護性が低く，酸化が進行しやすい環境条件であったと考えられる．

酸素と親和力の大きいCrが酸化皮膜との界面に近い合金内部で酸化され，緻密で連続したCr_2O_3層が形成されると以後の内部酸化は阻止され，Cr_2O_3層を通した拡散が律速となる [12]．この連続したCr_2O_3層が形成されるかどうかは酸素の内方拡散と，Crの外方拡散の大小により決まり，酸素の合金表面濃度，合金中のCrのバルク濃度が関係している．母材中のCr濃度は同一材料で同じと仮定した場合，合金表面の酸素濃度が高く，酸素の内方拡散がCrの外方拡散と比べ優先的に進んだ結果，酸素が内部に侵入してCrをその場で酸化し，不連続な内層皮膜が形成されると考えられる．図５よりDH濃度 0 cm^3/kg条件下では340℃と360℃でk_pは他のDH濃度より大きな値となった．また，図３(a)に示したように，母材中の深い領域まで酸化が進行しており酸素の内方拡散が優先的に起こった結果と考えられる．このことからDH濃度 0 cm^3/kg条件等の極低DH濃度条件では，保護性が低く拡散障壁としての機能を持たない皮膜が形成されている可能性が示唆される．

次に，温度による影響として図５に示したように，DH濃度15，30 cm^3/kgでは290℃から360℃の間で360℃が最もk_pが小さくなった．金属イオンの拡散が腐食速度に影響している場合，高温条件下ほど拡散速度が増加するアレニウス型の温度依存性を示すと考えられ，得られた皮膜厚さの傾向とは一致しなかった．これについて明確な理由は分からないが，寺地ら [17] によるステンレス鋼の腐食においても同様の温度傾向が報告されている．寺地らの報告では一般的なPWR1次系模擬水環境下（B:500 ppm，Li:2 ppm）DH濃度30 cm^3/kg条件でSUS316ステンレス鋼を用いた腐食試験において，皮膜厚さが250℃から300℃の領域では温度上昇に伴い増加し，300℃をピークに高温側で減少する傾向が確認されている．寺地らはこの結果について溶

液と表面皮膜での電気化学反応の影響について考察しており，高温側で電気化学反応が抑制されるためとしている．高温側で抑制される理由については，水を酸化剤として金属の腐食反応が進行していることが影響しており，水の乖離（$H_2O \rightarrow OH^- + H^+$）が高温側で抑制されるためとしている．今回観察された結果におけるDH濃度15と30 cm^3/kg条件でも350と360℃の高温条件で，290と320℃の低温条件よりもk_pは小さな値となっており，金属の拡散現象が関係する保護皮膜の形成だけではなく電気化学反応が腐食に影響している可能性が考えられる．一方でDH濃度 45 cm^3/kgでは高温側でk_pが大きくなっており異なる傾向となった．

4.3 表面皮膜形態とk_pの関係

TT690合金の表面皮膜形態と腐食影響を評価するため，最もk_pが小さい値となった「360/15条件」での値を1とした場合の相対値を算出し図6に示した．NiOが析出していた環境条件では他の表面皮膜形態と比べて数十倍程度腐食影響が大きいことが分かる．表面皮膜形態と腐食影響を評価した結果としてはHurら[8]による報告があり，TT690合金のPWR1次系模擬水環境下（B:1200 ppm，Li:2.2 ppm，330℃）での腐食試験結果として，DH濃度5 cm^3/kgから35 cm^3/kgへと増加させることで腐食速度［mg/(m^2・h)］が72%減少したことが確認されている．腐食速度はNi/NiO境界を境にNi安定領域側で大きく減少しており，この理由としてNiOが安定となるような低DH濃度条件では隙間の多いポーラスで保護性の低い酸化皮膜が形成され，緻密な酸化皮膜を形成している高DH濃度条件と比較して母材表面が系統高温水と接触する機会が増え，系統中のBやLiは簡単に皮膜に吸着し濃縮されることでLiBO2が形成されpHの低下を引き起こし，腐食を加速させるとしている．Hur[8]らの報告においては，「330/5条件」で隙間の多いポーラスな酸化物として針状の酸化物を観察している．本報告でも「320/15条件」と「330/15条件」で針状酸化物を観察したが，他の皮膜形態と比べk_pに大きな違いは見られなかった．この結果について，Hur[8]らは重量変化から腐食速度を算出しており，本報告の結果とは評価方法が異なるため直接比較が難しいが，NiOが形成されていた環境条件とでは内層皮膜の形態も異なるため，SEM観察では判別できない表面皮膜形態の違いが腐食に影響している可能性が考えられる．

一方で寺地ら[10]の自由エネルギー変化による理論式から求めたNi/NiO境界付近で相対値が大きく，Ni/NiO境界から離れた条件では小さくなる傾向が見られた．600合金において亀裂進展速度がNi/NiO境界付近でピークを持つことが報告[18]されており，Ni/NiO境界では形成される保護皮膜の形態が不安定になることが原因と考えられており腐食にも関係している可能性が示唆された．

5. まとめ

PWR1次系模擬環境下でTT690合金の腐食に対するDH濃度と温度の影響を調べ，以下の知見を得た．

(1) 表面皮膜形態はDH濃度と温度により大きく変化し，低DH濃度では針状の酸化物が，高DH濃度では粒状のスピネル酸化物が析出する．また，温度により同じDH濃度でも形態が変化する．

(2) 内層皮膜厚さについてもDH濃度と温度により変化し，低DH濃度では内層深くまで酸化が進行する．340～360℃の高温側では高DH濃度において酸化が進行し，290と320℃の低温側では抑制される傾向がある．この温度依存性には単純なアレニウス型の拡散律速の腐食挙動のみではなく，電気化学反応による腐食影響が関係していることが考えられた．

(3) k_pはNiO形成条件で大きな値となった．また，Ni/NiO境界では他の環境条件と比べk_pは大きく，形成される保護皮膜が不安定な形態となり腐食に影響している可能性が示唆された．

謝辞

本研究の実施にあたり多大な協力を頂いた関西電力(株)寺地　巧氏，関電プラント(株)の村上　公治氏，黒崎　登氏に深く感謝いたします．

文献

(1) 乙葉啓一，石榑顕吉，内田俊介，原口和之，塚本雅昭，平野秀郎，塚田隆，山崎健治，布施元正，西村孝夫，磯部毅，瀧口英樹，“原子力の安全と信頼を支える水化学の役割と課題　軽水炉時代の技術課題への取組み，”日本原子力学会誌Vol. 49, No. 5, pp365-370, (2007).

(2) 渡辺　憲夫，“米国の加圧水型原子力発電所におけるAlloy600製圧力バウンダリ構成機器の一次冷却材応力腐食割れ事例の分析，”(2006).

(3) 原子力安全・保安院，“蒸気発生器一次冷却材出入口管台溶接部内表面における亀裂への対応について（解説），”(2008).

(4) EPRI, “Pressurized Water Reactor Primary Water Chemistry Guidelines,” (2014).

(5) EPRI, “Material Reliability Program Mitigation of PWSCC in Nickel-Base Alloys by Optimizing Hydrogen in the Primary Water (MRP-213) ,” (2007).

(6) K. Hisamune, M. Sekiguchi , H. Takiguchi, “New Aspect of DH Control in PWR Primary Water Chemistry,” JAIF, (1998).

(7) 山田　卓陽，青木　政徳，宮本　友樹，有岡　孝司，“冷間加工690合金の高温水中き裂進展挙動 -試験温度，溶存水素，粒界炭化物，粒界組成の影響-,”INSS JOURNAL, (2014).

(8) S. Jeon, E. Lee , D. Hur, “Effects of dissolved hydrogen on general corrosion behavior and oxide films of alloy TT690 in PWR primary water,” Journal of Nuclear Materials, (2017).

(9) J. Chen, F. Lindberg, D. Wells , B. Bengtsson, “EELS and Electron Diffraction Studies on Possible Bonaccordite Crystals in PWR Fuel CRUD and in Oxide Films of Alloy 600 Material,” Studsvik Nuclear AB, Sweden, (2014).

(10) 寺地　巧，戸塚　信夫，山田　卓陽，中川　朋和，出口　博史，堀内　正樹，押谷　正人，“PWR 1次冷却材環境下で生成した600合金の皮膜構造解析，” INSS JOURNAL, (2002).

(11) Q. Peng, J. Hou, K. Sakaguchi, Y. Takeda ,T. Shoji, “Effect of dissolved hydrogen on corrosion of Inconel Alloy 600 in high temperature hydrogenated water,” Electrochimica Acta, (2011).

(12) 新居　知嘉，“金属・合金の高温腐食，” National Research Institute for Metals, (1980).

(13) 河村　憲一，B. A. Mohd Hanafi，上田　光敏，丸山　俊夫，“合金の高温酸化皮膜表面における酸素ポテンシャル，” Netsu Sokutei, (2010).

(14) S. A. Attanasio , D. S. Morton, “Measurement of the Ni/NiO Transition in Ni-Cr-Fe Alloys and Updated Data and Ni-Cr-Fe Alloys and Updated Data and Correlations to Quantify the Effect of Aqueous Hydrogen and Primary Water SCC,” Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water Reactors, (2003).

(15) S. E. Ziemniak , M. Hanson, “Corrosion behavior of NiCrFe Alloy 600 in high temperature, hydrogenated water,” CORROSION SCIENCE, (2006).

(16) J. A. Sawicki, “Evidence of Ni2FeBO5 and m-ZrO_2 precipitates in fuel rod deposits in AOA-affected high boiling duty PWR core,” Journal of nuclear materials, (2007).

(17) 寺地　巧，宮本　友樹，山田　卓陽，有岡　孝司，“ステンレス鋼の高温水中応力腐食割れに関する基礎研究 -腐食の温度依存性-,” INSS JOURNAL, (2009).

(18) P. Andresen, “Effects of PWR Primary Water Chemistry and Deareated Water on SCC,” 12th International Conference on the Degradation of Materials in Nuclear Power Systems, (2005).

(19) IAEA, Stress Corrosion Cracking in Light Water Reactors: Good Practices and Lessons Learned, (2011).

サポートベクターマシンを用いた加圧水型原子炉の冷却材喪失事故時の漏洩口径推定手法の開発

Estimation development using support vector machine to evaluate the break diameter during PWR loss-of-coolant accident

中村　晶（Akira Nakamura）*1　　楠木　貴世志（Takayoshi Kusunoki）*1

要約　本論文では，安全パラメータ表示システム SPDS から得られるデータを利用し，機械学習を用いて加圧水型原子炉の冷却材喪失事故 LOCA 時に原子炉冷却系統の漏洩口径を判断する手法を検討した．原子炉冷却材圧力の変化から，LOCA 発生後に圧力が 4MPa 未満になる点までの間で時間差分が最小になった時刻と，平均圧力変化率を特徴量として抽出した．技術計算言語 MATLAB を用いて，これら 2 つの特徴量の抽出および 2 次の多項式カーネルを用いたサポートベクターマシンで学習を行った．結果にばらつきを与える因子としては，原子炉冷却材系統の漏洩箇所，および 1 分毎のサンプリング値となる SPDS のサンプリング時刻がある．これらのばらつきを与えてシビアアクシデント解析コードで計算し，計算の入力値の漏洩口径に対して学習したところ，推定値は相対誤差が±13%以内（標準偏差 5.6%）であった．原子炉が停止してから LOCA 発生までの時間が 0 分から 30 分，60 分と変化しても，学習結果が有効であること確認した．事故対応によっては，蒸気発生器の 2 次側を用いた原子炉冷却材の冷却を行う場合もある．この場合には圧力変化が冷却に大きく影響されるため，推定が困難であった．余震等を考えると漏洩口径が事故進展途中で拡大する場合が考えられる．拡大するタイミングによって拡大前後の設定口径に近い推定値が得られ，実用に供することができると判断した．

キーワード　機械学習，原子炉冷却材喪失事故，漏洩口径，安全パラメータ表示システム，サポートベクターマシン

Abstract　This paper describes development of a break diameter estimation method with machine learning for a PWR loss-of-coolant accident (LOCA) that uses the data obtained by a safety parameter display system (SPDS). The time between the point when the time difference of reactor coolant pressure became the minimum to the point when the pressure became less than 4 MPa after the occurrence of the LOCA, and the average pressure decreasing rate are extracted as features. The programming language MATLAB is used to extract data of these features and to learn them using a support vector machine (SVM) with the 2nd order polynomial kernel function. There are some factors that cause deviations in the results such as break location in the reactor coolant piping and the one-minute sampling timing of SPDS. After data are simulated by a severe accident code and the input break diameter is learned by the SVM with simulated data, the learning result shows a relative error of plus or minus 13% and standard deviation of 5.6%. It is confirmed that these learning results are valid even if the time from the reactor shutdown to the occurrence of LOCA changes from 0 to 30 or 60 minutes. Depending on the accident response, the reactor coolant may be cooled using the secondary side of the steam generator. Because the pressure change is greatly affected by the cooling in this case, the estimation by the learning result is not applicable. Considering aftershocks when a big earthquake occurs, the leak diameter may expand during the progress of the accident. Depending on the timing of the expansion, an estimated diameter is close to the input diameter before and after the expansion, and it is judged applicable to practical use.

Keywords　machine learning, loss-of-coolant accident, break diameter, safety parameter display system, support vector machine

1.　はじめに

東京電力（株）福島第一原子力発電所事故後，原子炉等規制法の改正により原子力安全規制が強化され，過酷事故対策の強化が実施されてきている．原子力事業者は，過酷事故の発生を防止するための対策に努め可搬型電源・ポンプ等の機器の設置だけでなく，防災訓練による緊急時対応能力の向上等の人的な対策にも努めている．原子力規制庁は発電所の緊急時対策所や中央制御室の指揮者の判断能力向上のための訓練，

＊1（株）原子力安全システム研究所 技術システム研究所

および現場の対応力向上のための訓練が行われるように指導している[1].

中央防災会議の防災基本計画では原子力施設の事故状態等の予測について，“原子力事業者は，原子力施設の状態予測等を行うための機能を平常時から適切に整備するものとする”とされている[2]．また原子力災害発生時において，住民避難を行わせる必要があるか否かの判断には，原子力施設の事故の現状のみならず，事故の進展予測，収束対応戦略，その進捗状況といった以下の情報を迅速かつ正確に把握する必要がある[3]．この事故の進展予測とは，例えば過酷事故において注水等のプラント情報を用いて数値シミュレーションを行い，プラント状態に即した予測計算により炉心損傷時刻を求めること等を指す．このような計算が行えれば，事故対応時に予測結果を踏まえた対策立案にも活用できる．

これまで原子力安全システム研究所（INSS）では加圧水型原子力炉（pressurized water reactor, PWR）の原子力災害時の事象進展予測技術の開発を進めてきた[4]．プラントの事象進展予測にはシビアアクシデント解析コードMAAP4[5]を用い，MAAP4の入力補助や発電所内被ばく線量評価等を組み合わせた事象進展予測システム（Incident Progress Prediction System, IPPS）として統合した．このシステムを用いて防災訓練で事象進展予測をINSSが実施しているが，プラント状態に即した予測のためには情報の把握，例えば冷却材喪失事故（loss of coolant accident, LOCA）においては原子炉冷却系統からの漏洩流量または漏洩口径を把握することが重要である．プラントで計測される圧力・温度・水位等のパラメータは，漏洩流量を直接与える情報ではないため，漏洩流量を仮定した事象進展予測計算を行って計測パラメータと一致するかどうかを繰り返す必要がある[4]．

Naら[6]はLOCAの漏洩箇所の推定に確率的ニューラルネットワーク（Probabilistic Neural Network, PNN），漏洩口径推定にファジーニューラルネットワーク（Fuzzy Neural Network, FNN）を用いて，2%以内の誤差で漏洩口径を推定できたと述べている．MAAP4を用いたシミュレーション結果から，原子炉容器圧力や温度等の13のパラメータからPNNに学習させて，ホットレグ破断・コールドレグ破断・蒸気発生器細管破断の漏洩箇所を推定した．また13のパラメータから漏洩箇所に応じて2つを自動的に選定してFNNで学習させて，漏洩口径を推定した．Leeら[7]は，機械学習のサポートベクター分類（Support Vector Classification, SVC）を用いて原子炉冷却材系統と蒸気発生器に関連するプラントパラメータを学習させ，LOCA時の漏洩口径推定に用いた．Choiら[8]は，Naら[6]と同様にFNNを用いて，Leeら[7]と同様に原子炉冷却材系統と蒸気発生器に関連するプラントパラメータを学習させ，LOCA時の漏洩口径推定に用いた．これらの研究では推定誤差が数%と小さいものの，事故発生後の時間経過と推定との関連については述べられていない．すなわち，非定常な変化を学習させる場合に，事故発生から収束までの事故経過結果を与えて学習させたとする．しかし事故途中の過程では，事故収

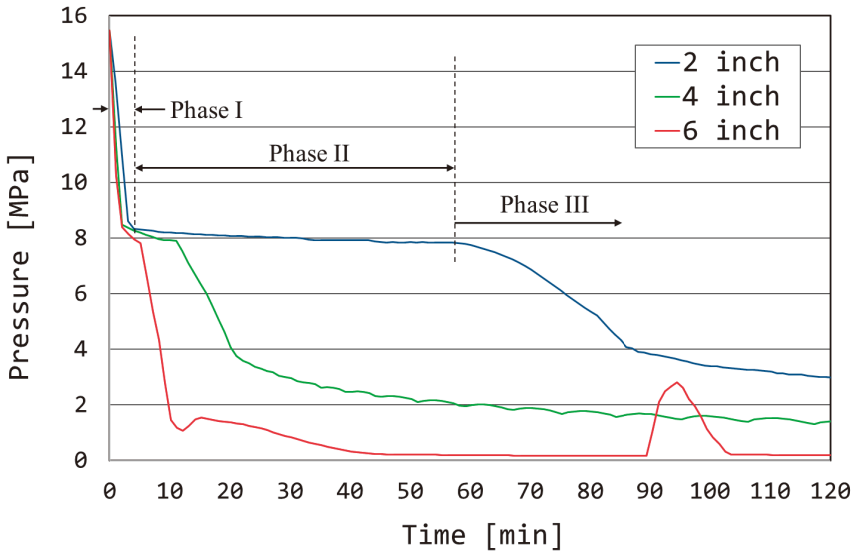


図 1　加圧水型原子炉(PWR)の LOCA 時の一次冷却材圧力の変化例

束までのデータが揃っていない．シミュレーション結果を与えた学習から事故進展の途中で人の判断を補助できるデータが得られるかは，機械学習の重要な課題である．

建部ら[9]は，LOCA時の原子炉冷却材圧力の変化に着目し，配管からの漏洩口径を推定する相関式を作成した．PWRの一次冷却材系統（reactor coolant system, RCS）の圧力がLOCAにより図1のように時間変化する時，建部らは圧力変化を飽和圧力まで急減（フェーズⅠ），飽和圧力付近で圧力低下が抑制（フェーズⅡ），破断流が高クオリティ二相流となり減圧が促進（フェーズⅢ）と3つの状態に分けた．フェーズⅠから初期圧力P_sを，フェーズⅢから低下後圧力P_fを抽出し，それらの差を時間差で割ることで圧力低下率R_pを求め，P_f毎に設定した相関式から漏洩口径を推定した．MAAP4コードもしくはRELAP5[10]コードによる計算結果から推定した漏洩口径の誤差は95%確率で8～12%であった．この手法は，事前に計算された結果から求めた相関式により精度良く推定できる方法であるが，RCS圧力の挙動が複雑になるとP_s・P_fを抽出する精度が悪くなる

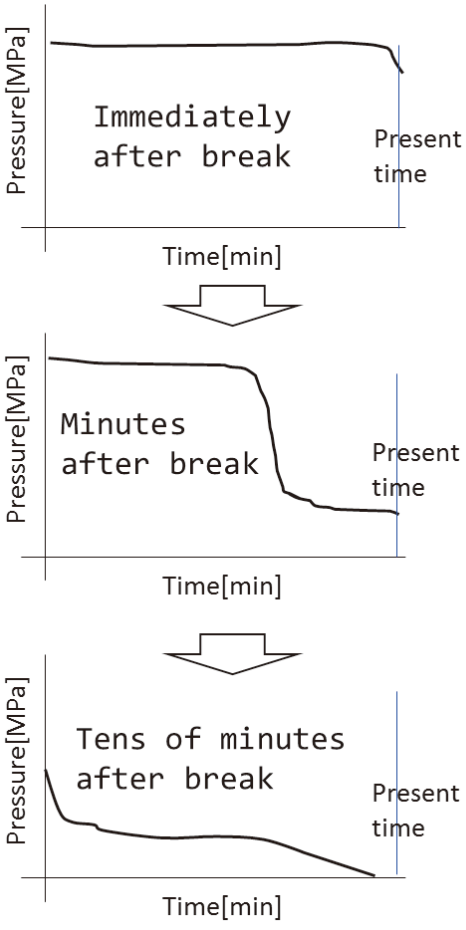


図２　LOCA 発災後の原子炉冷却材圧力の時間経過

可能性を有している．

本研究では，建部ら[9]の手法を改良し，データの前処理による圧力低下率の抽出と，機械学習による予測精度の向上と，事故時にモニタリングにより漏洩口径を判断できるような仕組みの構築を試みた．特に，図1のような事故後に得られる圧力変化の時刻歴から直接学習するのでは無く，事故状態が進展する中で得られる情報から抽出される特徴量を学習に用いた．

2.　時刻歴データからの特徴量抽出

2.1　安全パラメータ表示システムSPDS

安全パラメータ表示システム（safety parameter display system, SPDS）は原子炉圧力や温度等の原子力発電所のプラント状態を，原子力災害発生時に原子力規制委員会緊急時対応センター（Emergency Response Center, ERC）を始め外部からも把握できるシステムである．プラントパラメータや放射線レベル等の各種運転監視パラメータが1 分間隔のデータとして関係各所に伝送される．前述の事象進展予測システムIPPSではSPDS により伝送されるプラントデータを活用し，事故の初期状態（漏洩の有無，機器の動作状況等）を把握し，事象進展予測に必要なシミュレーションの入力を作成している．LOCAにおいては原子炉冷却系統からの漏洩流量または漏洩口径を把握することが重要であることは前章で述べた．これまでIPPSでは建部ら[9]の方法によりSPDSから漏洩口径を推定している．本研究ではSPDSを用いる仕組みはそのままで，建部ら[9]の方法を改良することを目指した．

2.2　前処理による特徴量抽出

前述のとおりSPDSは1分毎に運転監視パラメータを伝送する．伝送されたデータを数時間保存すると図2のように時々刻々とデータが更新される．この更新される時系列データを処理して漏洩口径を推定しなければならない．単純に図1のような圧力の時刻歴をニューラルネットワークで学習すれば，学習されたデータに対して推定精度が良くても，図2のように時刻が異なる，事故中のデータに対しては推定精度が悪くなると予想される．

本研究では，建部ら[9]が着目したLOCA時の原子炉冷却材圧力の変化を用い，特徴量を抽出した後に機械学

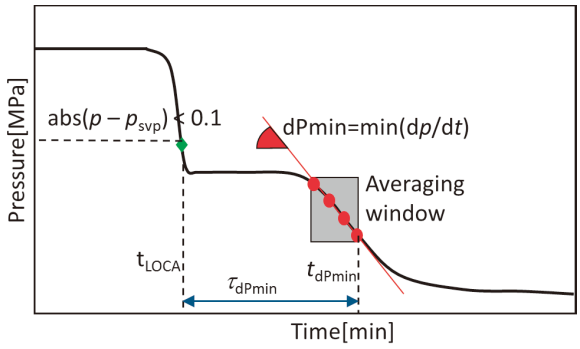


図 3　LOCA 発災後の原子炉冷却材圧力の変化

習で漏洩口径との関係を学習させることとした．建部らは，飽和圧力付近で圧力低下が抑制（フェーズⅡ）された時間と，その前後の圧力差とを用いて，漏洩口径の相関式を求めた．この方法では1つの特徴量，すなわちフェーズⅡの持続時間（時間差）から算出された圧力変化率R_pに着目している．本研究では特徴量を増やすことで予測精度を向上させることと，できるかぎり早いタイミングで推定できることを目指し，時間差（フェーズⅡの持続時間）と圧力変化率を分けて定義することを試みた．具体的には図3のように，

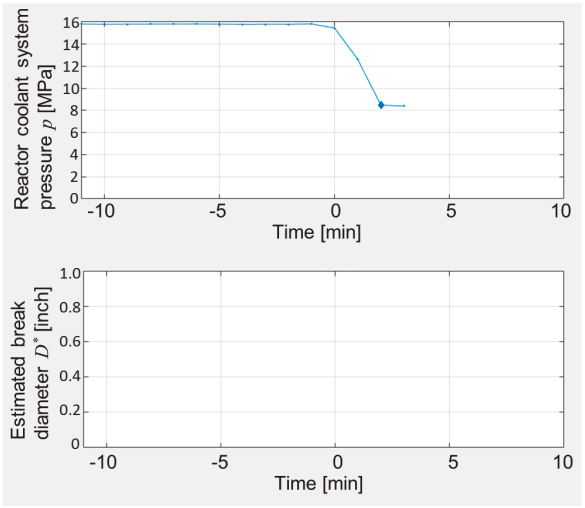
1) 原子炉冷却材温度から計算される飽和蒸気圧 p_{svp} と原子炉冷却材圧力 p との差 p-p_{svp} が初めて 1 MPa 未満になった点で LOCA フラグをセット．LOCA フラグがたった状態で，p-p_{svp} が 0．1 MPa 未満になった点で，LOCA 発生と算定（時刻=t_{LOCA}）

2) 時刻 t_{LOCA} 以降，圧力が 4MPa 未満になる点までの間で，圧力の時間差分が最小（傾きが最大）になった時刻 t_{dPmin} を求める．圧力変化が緩やかな場合は，最小点より前のウィンドウ内データから平均値で圧力変化率 $dPmin$ を算出

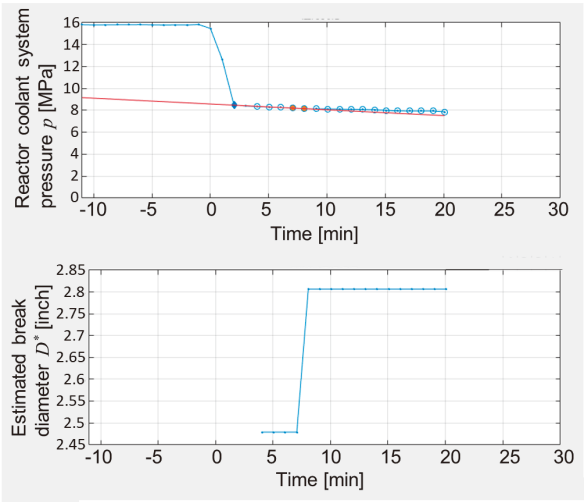
3) 飽和蒸気圧から圧力変化が最小になるまでの時間 $\tau_{dPmin} = t_{dPmin} - t_{LOCA}$ を算出

本研究では3)が建部らのフェーズⅡの時間差とは異なり，LOCA開始後に飽和蒸気圧近くまで下がった時点から，4MPaにまで圧力が変化する時間でτ_{dPmin}を定義した．4MPa以下では蓄圧注入系からの原子炉冷却材系統への注水が行われるため，圧力変化率の評価対象範囲外とした．

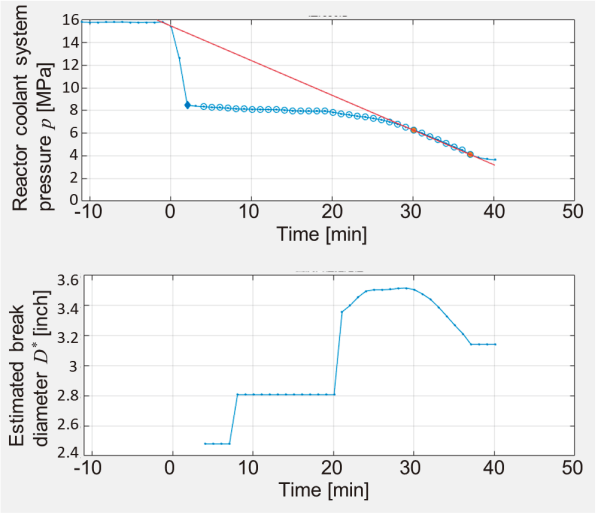
この定義に従ってプログラミングを行い，MATLAB R2019b[11]で特徴量抽出と次章で述べる学習結果を適用した例を図4に示す．時間経過に従って，(a)～(c)



（a）LOCA 直後



（b）圧力変化率の順次算出



（c）圧力変化率の最小時刻の決定

図 4　事象進展に伴う特徴量抽出の例（3 インチ）

のように順に圧力pの変化が得られる．(a) LOCA直後，(b) 圧力変化率の順次算出，(c) 圧力変化率の最小時刻の決定，といった上記1)～3)の手順から，時間経過とともに変化するpから特徴量を抽出した．(a)ではt_{LOCA}を決定したが圧力変化dPの算出は未実施，(b)ではdPを算出しつつ最小値を検索，(c)では最小値$dPmin$とそれが得られた時刻t_{dPmin}を決定している．さらに各図の下半分には，この手順の結果として得られた$dPmin$およびτ_{dPmin}から，次章で説明する機械学習結果で推定された漏洩口径（Estimated break diameter）D^*を示した．この例ではMAAP4に設定した漏洩口径（Break diameter）D = 3インチに対し，LOCA発生後5分では2.5インチと推定し，7分では2.8インチと推定，37分では3.1インチと推定して終了している（これ以降は最終推定値を保持）．このように，本研究では時々刻々のデータから予測することを目指した．

2.3 事故シナリオ

本研究では，建部ら[9]の検討を踏まえ，全交流電源喪失により高・低圧注入系の起動に失敗した場合のLOCA時の原子炉冷却材圧力の変化を用いることとした．また，漏洩口径が1インチ以下では前述3)の飽和蒸気圧からの低下が非常に緩慢となり，漏洩口径推定を行うよりも早期にプラントの事故対応が進むため，本研究の対象外とした．一方，漏洩口径が大きくなると後述するSPDSの1分毎のデータ転送では圧力変化を捉えることが難しくなるため，10インチ以上の場合も本研究の対象外とした．

これらの事故条件を入力し，MAAP4コードで計算された結果を次節以降の検討に用いた．

2.4 漏洩位置の影響

PWR 4ループプラントを対象に，漏洩（MAAP4コードで設定した漏洩口径D）を原子炉冷却材系統の配管の各位置（クロスオーバーレグ，コールドレグ，ホットレグ）に仮定し，計算した結果から先の前処理2)で得られた$dPmin$に対してプロットした結果を図5に示す．漏洩位置により同じ漏洩口径に対しても$dPmin$にばらつきが生じていることがわかる．SPDSの情報から直接には漏洩位置についての情報が得られないため，このばらつきの回避は難しく，次章で述べる機械学習による推定誤差に影響する．もし$dPmin$だけから判断すれば，例えば図5で$dPmin$ = 0.03を縦に見ると青丸の7インチから赤丸の8インチ以上までばらついており，誤差は（8−7）/（(7+8) / 2）= 13% 程度生じることが予想される．

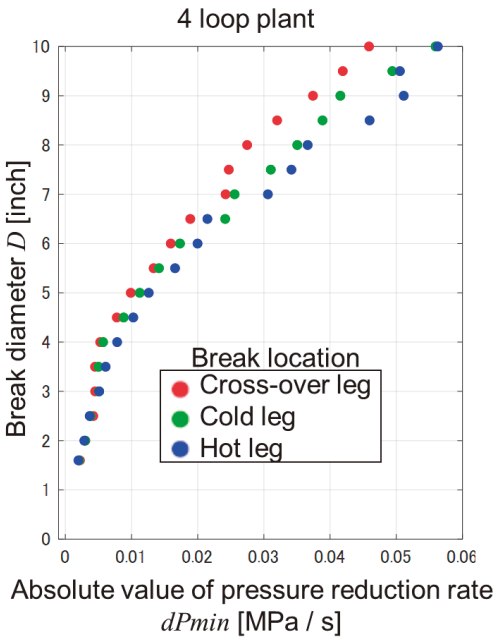


図 5　漏洩口径 D に対する圧力変化率 $dPmin$

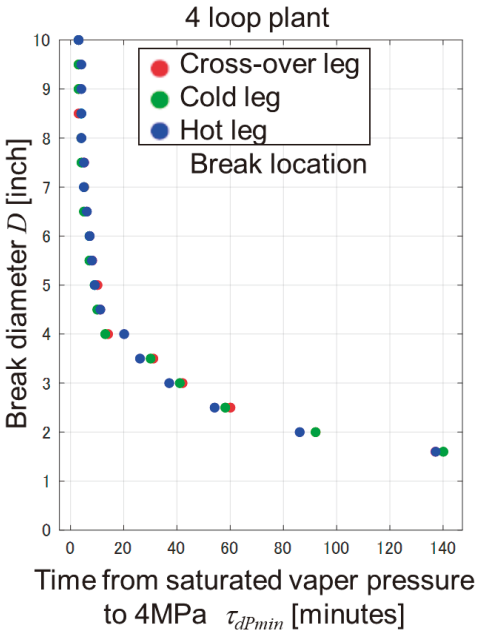


図 6　漏洩口径 D に対する時間差 τ_{dPmin}

同様に4ループプラントを対象に，漏洩口径Dに対する圧力変化の時間τ_{dPmin}を図6に示す．一見すると漏洩口径の大きな所で誤差が少ないように見えるが，図5に近い表示にするために横軸を$1/\tau_{dPmin}$として図7に示すと，図5よりも誤差が大きくなることが予想される．SPDSは1分毎に伝送されるため，漏洩口径が大き

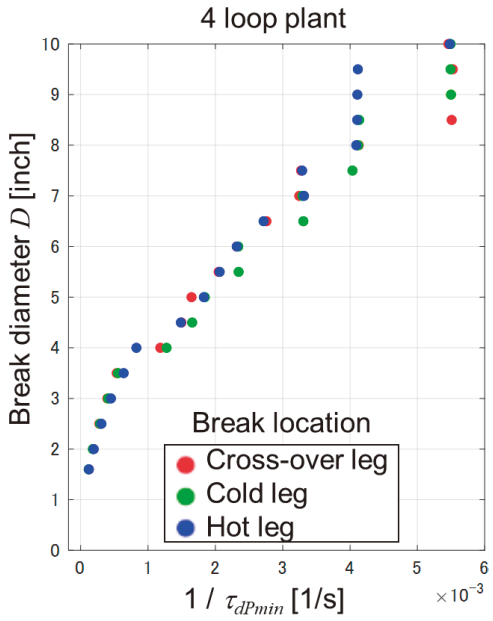


図 7　漏洩口径 D に対する $1/\tau_{dPmin}$

くなり圧力変化が急になると，時間分解能による誤差が大きくなる．これが横軸$1/\tau_{dPmin}$が4×10^{-3}と5.5×10^{-3}にプロットされる点が多い理由である．同じ$1/\tau_{dPmin}$ = 4×10^{-3}で見ると，漏洩口径は7.5インチから9.5インチまでばらついており，(9.5 - 7.5) / ((9.5+7.5) / 2) = 24%程度の誤差が予想される．

2.5　サンプリング時刻の影響

SPDSが1分毎に伝送されるデータであるため，計測値にはサンプリングされるタイミングの影響があると考えられる．この点を確かめるため，MAAP4の計算開始から30秒後，60秒後の2条件で時間をおいてからLOCAを発生させた計算を，すべての漏洩口径に対して行った．漏洩口径に対して$dPmin$，$1/\tau_{dPmin}$をプロットした結果を図8, 9にそれぞれ示す．30秒後，60秒後という時間はサンプリングに対する誤差として影響すると考え，プロットは0秒後を示した図5と同じ色を用いて凡例で分けていない．図8を見ると赤，緑，青のプロットがそれぞれの分布傾向を維持しつつばらつきを示しており，誤差を生じていることがわかる．

3.　特徴量を用いた機械学習と推定精度の確認

3.1　SVMによる漏洩口径量の推定

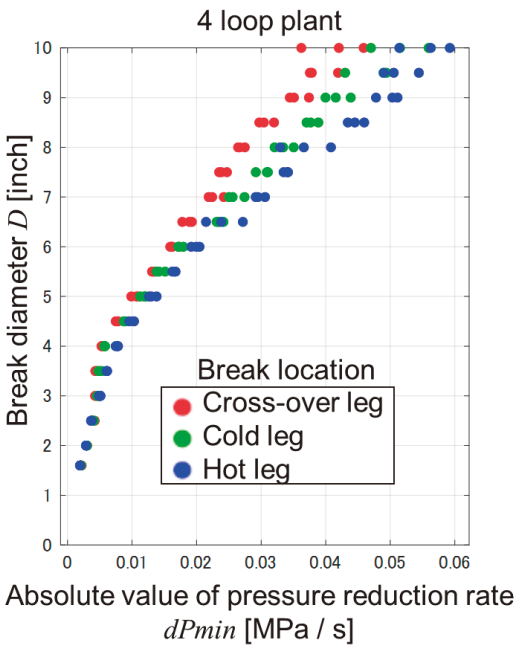


図 8　サンプリング時間を変えた時の
漏洩口径 D に対する圧力変化率 $dPmin$

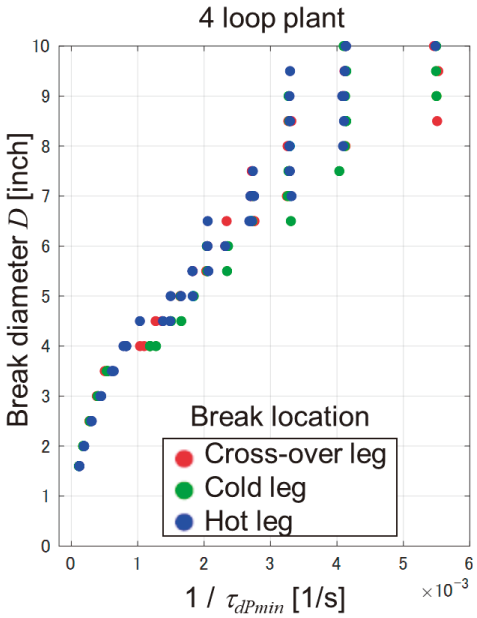


図 9　サンプリング時間を変えた時の
漏洩口径 D に対する $1/\tau_{dPmin}$

前章で検討した$dPmin$，τ_{dPmin}の2つの特徴量から漏洩口径Dを機械学習で推定することとした．機械学習にはMATLAB R2019bを用いて，推定手法としては，二次多項式カーネルを用いたサポートベクターマシン（Support Vector Machine，SVM）回帰を採用した．学習データ量が少ないため，Leave-one-out検証を行い，その結果をもって推定の精度としている．また，

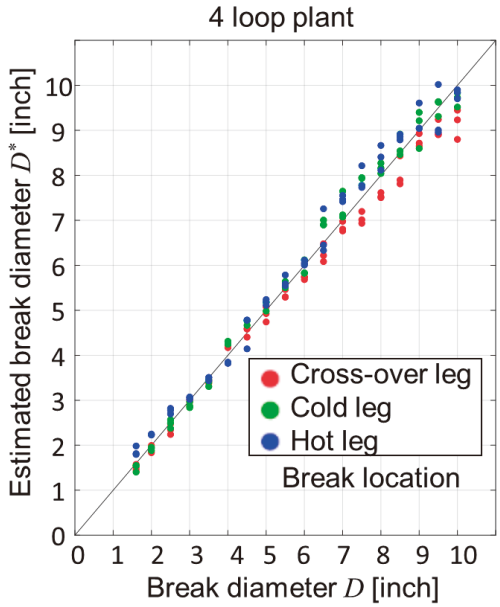


図 10　漏洩口径 D に対する推定値 D^*

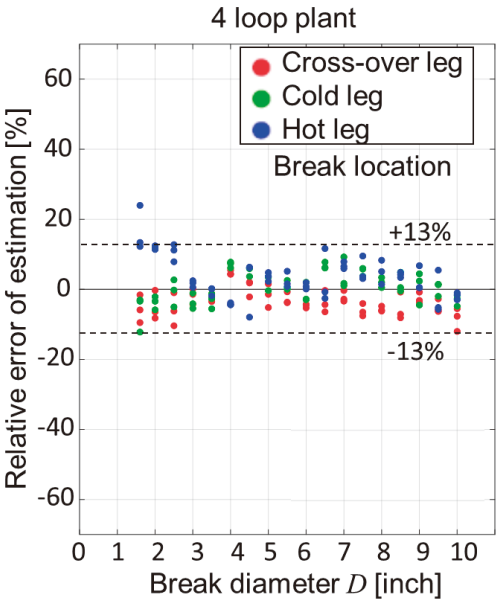


図 11　漏洩口径 D に対する推定値 D^*の相対誤差

SVMのハイパーパラメータはMATLABの回帰学習器を用いて最適化した.

学習結果を用いた漏洩口径Dに対して推定値D*をプロットした結果を図10に，また推定値D^*の相対誤差を図11に示す．図11からは2インチ以上10インチ以下の範囲では概ね相対誤差が±13%以内（標準偏差5.6%）で推定できていることが分かる.

3.2　原子炉停止からLOCA発生までの時間の影響

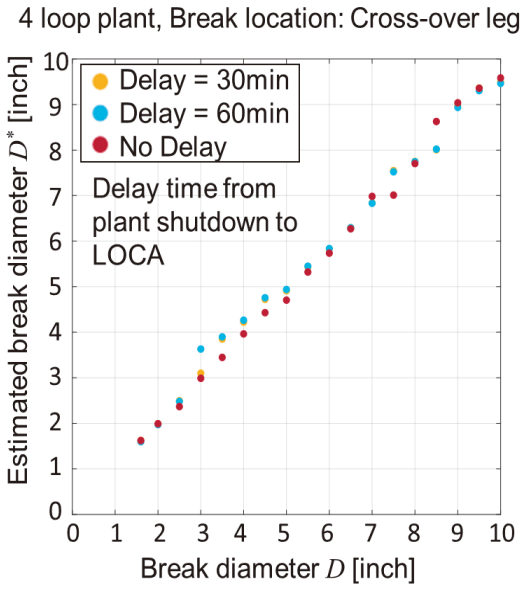


図 12　原子炉停止からLOCAまでの時間間隔があった場合の漏洩口径 D に対する推定値 D^*（漏洩位置：クロスオーバーレグ）

例えば地震で原子炉が自動停止した後に，数回の本震・余震でLOCAが発生するような状況を考えると，原子炉停止からLOCA発生までの時間間隔に対して前章の前処理および学習結果からの推定が有効かどうかを確認しておく必要がある．時間間隔なしのデータから前節で学習させた結果を用いて，原子炉停止から30分後，60分後の2条件でLOCA発生までの時間間隔を入れたMAAP4の計算結果から推定した結果を図12に示す．図12では3～4インチで時間間隔無しに対して時間間隔がある場合の推定結果が過大評価となっているが，0.5インチ程度の差異であり，実用上は問題ないと判断した.

3.3　蒸気発生器を用いた強制冷却の影響

地震等で送電系統に損傷が生じて外部電源を喪失し，かつ非常用発電機の起動に失敗する全交流電源喪失時には，原子炉冷却材を冷却するためPWRでは蒸気発生器を用いた2次系強制冷却（intentional depressurization of the steam generator secondary side, IDSG）が行われる．全交流電源喪失時のLOCA発生を考えると，原子炉冷却材が冷却されれば圧力が低下し，LOCAによる圧力低下と重なる場合が考えられる．このような状況では，3.1節で前述した圧力低下

率による学習をもとにした漏洩口径推定には，影響を受けることが予想される．冷却を行うための蒸気放出に必要な主蒸気逃し弁の開操作を原子炉停止から30分後に実施すると同時にLOCA発生，もしくは主蒸気逃し弁開放からさらに30分後にLOCA発生と2ケースの仮定を置いてMAAP4の計算を行った．その結果を用いて漏洩口径を推定した結果を図13に示す．

IDSGから30分後にLOCA発生した水色のプロットを見ると，漏洩口径Dに対して推定値D^*はすべて約3.5インチとなっているが，漏洩口径が3.5インチということではない．これはIDSGによる原子炉冷却材圧力が3.5インチ漏洩に相当する低下率で下がっていることを示している．そのため，IDSGを行うと今回開発した推定手法では漏洩口径を推定できない．

図14にはIDSGから30分後にLOCA発生の条件で，設定した漏洩口径が2インチの場合の，原子炉冷却材圧力の変化を赤線で示す．図中には図1の青線，すなわちIDSG無しの2インチ漏洩のデータも示している．IDSG無しでLOCA発生のみの場合には図1に示したとおり，漏洩口径が2インチの場合に原子炉冷却材圧力がほぼ一定で推移するフェーズⅡが60分近く継続した．一方，IDSGから30分後にLOCA発生する図14の赤線では，IDSG開始（時刻：30分）直後に圧力は降下開始し，IDSGのみで圧力が3MPaまで低下し，その後LOCA（時刻：60分）が生じる．結果としてLOCAによる圧力低下はほとんど見られない．そもそも，このような条件では原子炉冷却材圧力から漏洩口径を推定することはできない．

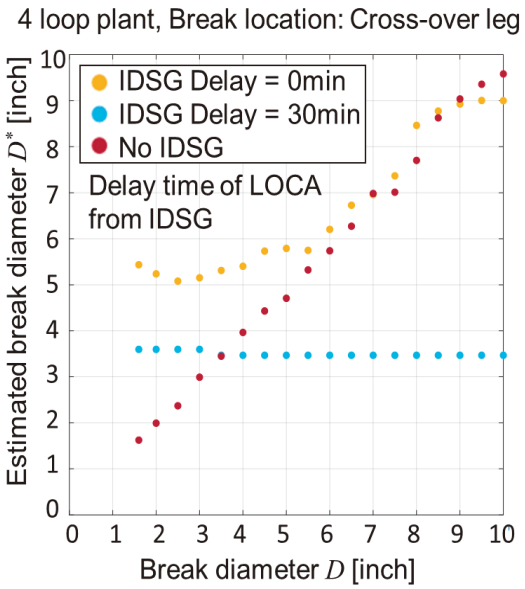


図 13　蒸気発生器を用いた原子炉冷却材系統の冷却（IDSG）を行った場合に，冷却と LOCA 発生が同時（LOCA+IDSG），または 30 分後に LOCA 発生（LOCA 30min after IDSG）の 2 条件での漏洩口径 D に対する推定値 D^*（漏洩位置：クロスオーバーレグ）

い．

一方，IDSGと同時にLOCA発生する図14の緑線では，平均的な圧力低下率ではIDSGのみの赤線よりも大きくなり，図13では約5インチの漏洩口径と推定された．しかし図1に見られたフェーズⅡの挙動が見られないなど，青線と同じ2インチの漏洩口径と推定することはできない．

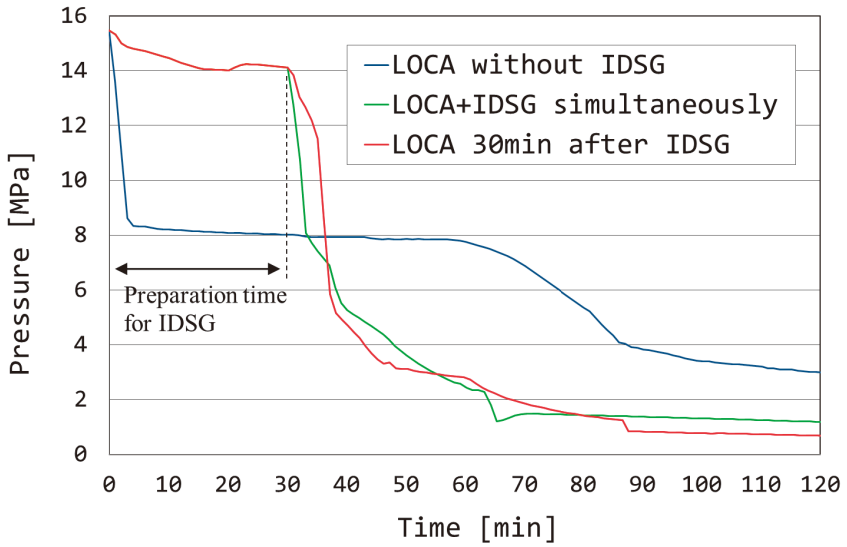


図 14　蒸気発生器を用いた原子炉冷却材系統の冷却（IDSG）を行った場合に，冷却と LOCA 発生が同時（LOCA+IDSG），または 30 分後に LOCA 発生（LOCA 30min after IDSG）の 2 条件での一次冷却材圧力 p の変化（漏洩位置：クロスオーバーレグ）

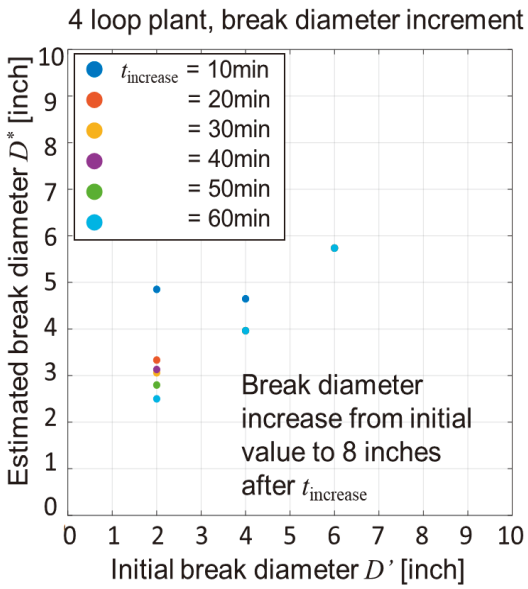


図 15　LOCA が発生した初期の漏洩口径 D'と漏洩が拡大するまでの時間 $t_{increase}$ を変えた場合の圧力 p の変化（漏洩位置：クロスオーバーレグ）

3.4　漏洩口径の拡大の影響

LOCAが生じて以降，数回の余震により漏洩口径が拡大する可能性もある．初期の漏洩口径D'と口径が拡大するまでの時間$t_{increase}$の組み合わせは様々なパターンが考えられるが，ここでは拡大後の漏洩口径を8インチと固定して，D'は主に2インチ，$t_{increase}$を10～60分と組み合わせた計算から漏洩口径を推定した結果を図15に示す．

図15で初期漏洩口径D'が2インチの場合，比較的短い時間間隔である10分で8インチに拡大した場合には，5インチと推定されている．しかし20分以上間隔が開いた場合には初期口径に近くなり，2.5～3.5インチと推定されている．間隔が開けば初期口径での漏洩と途中で拡大した影響が分離されやすいため，D'に近い推定結果が得られることは実用的である．運用上は，初期口径から事象進展予測を開始し，圧力変化から口径が拡大した後にはその変化を感度解析にて求めることで対応できる．

一方，初期漏洩口径D'が6インチの場合，時間間隔が10～60分と変わっても同じ値になり，約6インチと推定された（図中では水色のプロットに他のデータが隠れている）．計算結果の圧力変化を別途確認すると6インチから8インチへと拡大しても挙動にほとんど変化が見られないことから，漏洩拡大までの時間間隔が変化しても同じ値に推定されていることは妥当であり，かつ初期漏洩口径を推定値できている．

4.　結論

本研究では，安全パラメータ表示システムSPDSから得られる原子炉圧力や温度等の原子力発電所のデータを利用し，機械学習を用いて冷却材喪失事故LOCA時に原子炉冷却系統の漏洩口径を自動的に判断する手法を検討した．原子炉冷却材圧力の変化から2つの特徴量を抽出し，機械学習の入力とすることを考えた．2つの特徴量とは，LOCA発生後に原子炉冷却材圧力が4MPa未満になる点までで圧力の時間差分が最小（傾きが最大）になった時刻t_{dPmin}と，その時点より前の平均圧力変化率$dPmin$である．

シビアアクシデント解析コードMAAP4により計算した結果からSPDSのデータに相当する原子炉冷却材圧力を計算した．この2つの特徴量の抽出を機械学習もできる技術計算言語MATLABで行い，さらにMAAP4の入力で設定した漏洩口径を用いて2次多項式カーネルを用いたサポートベクターマシンSVMで学習を行った．ここで，原子炉冷却材圧力の前処理結果にばらつきを与える因子としては，原子炉冷却材系統の漏洩箇所，および1分毎のサンプリング値となるSPDSのサンプリング時刻である．

学習の結果，入力値の漏洩口径Dに対して推定値D^*の相対誤差は概ね相対誤差が±13%以内（標準偏差5.6%）で推定できた．現実のLOCA事象では，原子炉が停止してからLOCA発生までの時間は変化する．30，60分後にLOCA発生した場合は，同時に発生したと仮定した上記の相対誤差の範囲で推定できることを確認した．一方事故対応によっては，蒸気発生器を用いた原子炉冷却材の冷却を行う場合もあるが，この場合には原子炉冷却材圧力の変化が蒸気発生器を用いた冷却に大きく影響されるため，推定が困難であった．また，余震等を考えると漏洩口径が事故進展途中で拡大する場合が考えられるが，拡大するタイミングによっては拡大前後の設定口径に近い推定値が得られ，実用には供することができると判断した．

以上のように本研究では，LOCA発生時の漏洩口径を，プラントパラメータを用いた機械学習により推定が可能になることが示された．今後，学習する対象を広

げ，事故進展の途中で人の判断を補助できるシステムの構築が期待される．

謝辞

MATLABを用いた前処理および機械学習については，マスワークス合同会社の池上徹氏にご協力をいただいた．ここに記して謝意を表する．

引用文献

(1) 原子力委員会，平成30年度版原子力白書，(2019)．
(2) 中央防災会議，防災基本計画（2020）．http://www.bousai.go.jp/taisaku/keikaku/pdf/kihon_basicplan.pdf
(3) 原子力規制庁，第11回原子力事業者防災訓練報告会説明資料，(2019)．https://www.nsr.go.jp/data/000275094.pdf
(4) 吉田他，原子力災害時事象進展予測技術の開発－これまでの開発状況と今後の課題－，INSS JOURNAL Vol. 21 RV-1 (2014)．
(5) 北海道電力他，重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（第３部ＭＡＡＰ），原子力規制委員会第102回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合資料 1-2-5 (2014)．https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11068782/www.nsr.go.jp/disclosure/committee/yuushikisya/tekigousei/power_plants/h26fy/index_h26fy.html
(6) Man Gyun Na, et al., Estimation of break location and size for loss of coolant accidents using neural networks, Nuclear Engineering and Design, 232, pp.289-300 (2004)．
(7) Sung Han Lee, et al., Diagnostics of Loss of Coolant Accidents Using SVC and GMDH Models, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol.58, No.1, pp.267-276 (2011)．
(8) Geon Pil Choi, et al., Estimation of LOCA Break Size Using Cascaded Fuzzy Neural Networks, Nuclear Engineering and Technology, Vol.49, pp.495-503 (2017)．
(9) 建部恭成，吉田至孝，原子力災害事象進展予測に用いる冷却材漏洩口径推定手法の開発，日本原子力学会和文論文誌，Vol.11，No.4，pp.304-315 (2012)．
(10) U.S. NRC, RELAP5/MOD3 Code Manual, NUREG/CR-5535, INEL-95/0174, Vol. 7, Rev. 1 (1996)．
(11) MathWorks, MATLAB help. https://jp.mathworks.com/help/matlab/index.html

統計的安全評価における代替統計モデルの適用（実機条件の不確かさ解析に対する適用性の検討）

Application of Surrogate Models for Statistical Safety Evaluation (Investigation of Applicability to Uncertainty Analysis for PWRs)

木下　郁男（Ikuo Kinoshita）*1

要約　加圧水型原子炉の冷却材喪失事故を対象に，最適評価コードRELAP5による不確かさ解析に対して代替統計モデルを構築し，統計的安全評価における代替統計モデルの適用性を検討した．代替統計モデルによる95%累積確率値の計算精度を確認する方法として，交差検証法の適用性を検討した．RELAP5不確かさ解析との比較により，代替統計モデルが95%累積確率値を予測する汎化性能があることの判定は，学習データを用いた交差検証によって推定可能であることを確認した．したがって，交差検証を行い95%累積確率値の予測精度を確認した代替統計モデルを用いることにより，統計的安全評価が可能であると言える．少ないデータ数で効率的に95%累積確率値の予測精度のよいモデルを構築するために，適応的サンプリング法の有用性を検討した．RELAP5不確かさ解析との比較により，適応的サンプリングを繰り返すことにより，95%累積確率値の計算誤差が収束すること，および95%累積確率値の計算誤差は学習データに対する交差検証によって推定可能であることを確認した．以上より，95%累積確率値を目標値とした適応的サンプリングにより代替統計モデルを更新し，交差検証により計算精度を推定することによって，95%累積確率値の計算精度が高い代替統計モデルを効率的に構築することができると言える．

キーワード　統計的安全評価，代替統計モデル，不確かさ解析，交差検証，適応的サンプリング

Abstract　Application of a surrogate model for statistical safety evaluation was discussed in the present paper on uncertainty analysis by the RELAP5 code for loss of coolant accidents in PWRs. Cross validation techniques were applied to verify the prediction capability of the surrogate model for the 95th percentile values of the safety evaluation parameters. Comparison with the RELAP5 uncertainty analysis results confirmed that the generalized performance of the surrogate model for the 95th percentile value prediction could be estimated using the cross validation on the training data set. From the results it was concluded that the surrogate model whose prediction accuracy for the 95th percentile values was confirmed by the cross validation could be used for the statistical safety evaluation. The effectiveness of the adaptive sampling technique was verified to improve the prediction accuracy for the 95th percentile values using a small number of training data. Comparison with the RELAP5 uncertainty analysis results confirmed that the prediction error of the 95th percentile values converged by repeating the adaptive sampling and the prediction errors were able to be estimated by the cross validation on the training data set. Therefore, the surrogate model with high accuracy for the 95th percentile value prediction was able to be effectively constructed by improving the surrogate model using the adaptive sampling procedure with the target of the 95th percentile values and confirming the model prediction accuracy using the cross validation on the training data set.

Keywords　Best Estimate Plus Uncertainty (BEPU), surrogate model, uncertainty analysis, cross validation, adaptive sampling

1. 緒言

原子力プラントの安全性について十分な精度での議論を行うためには，事故時の諸現象を忠実に模擬する最適評価コードの使用とその解析結果の不確かさを評価する統計手法を組み合わせた統計的安全評価手法（Best Estimate Plus Uncertainty, BEPU）[(1)]が必要となる．統計的安全評価手法は，最適評価

＊1　（株）原子力安全システム研究所　技術システム研究所

コードのV&V（検証と妥当性確認），関連パラメータの不確かさの定量化，および解析結果に対する不確かさの評価を実施し，合理的な裕度の評価を行う．統計的安全評価手法は，米国，韓国，スペインなどの国で規制に採用されており，日本でも採用が検討されている．日本では2008年に日本原子力学会標準「統計的安全評価の実施基準」[(2)]が策定され，現在，本手法の最新知見を反映した改訂作業が行われている．

統計的安全評価では，安全解析コードを用いた多数回のモンテカルロ計算により統計的安全評価値を求める．安全解析コードは計算コストが大きいため，多数回のモンテカルロ計算を実施可能な計算時間で行うためには，安全解析コードよりも計算コストの小さな代替統計モデルの適用が有効である．代替統計モデルは，解析コードの入力と計算結果との間の関係を近似するように学習されたモデルである．NUREG/CR-5249 [(1)] において米国原子力規制委員会（NRC）が提唱した応答曲面法も代替統計モデルの一種である．また，近年の機械学習手法の進展により，高度な機械学習モデルを用いた代替統計モデルの研究も行われている [(3)(4)]．しかしながら，統計的安全評価において重要となる95%累積確率値に対する代替統計モデルの計算精度についての検討は，これまで十分に行われていない．

統計的安全評価に代替統計モデルを適用するにあたっては，適切な学習モデルおよびモデルパラメータを選択することにより，95%累積確率値の予測に対する過学習を回避し，学習データ以外のデータに対する汎化性能を有することの確認が必要となる．

前論文 [(5)] では，ROSA/LSTFにおける小破断LOCA（冷却材喪失事故）模擬実験の不確かさ解析に対して，２次線形回帰（交互作用あり）による代替統計モデルを適用した．本ケースに対して，汎化性能の確認に交差検証法が有用であることを示した．また，順序統計法と比較して，同じ数の学習データで95%累積確率値の評価精度のよい代替統計モデルを構築できることを示した．

本論文では，実機プラントにおける小破断LOCA事象の不確かさ解析に対して，代替統計モデルの適用性を検討する．代替統計モデルとして，前論文のモデルを拡張し，２次線形回帰（交互作用あり）とガウス過程回帰を組み合わせた代替統計モデルを適用する．前論文と同様に，汎化性能の確認に対する交差検証法の有用性を検討する．また，少ないデータ数で効率的に95%累積確率値の評価精度のよいモデルを構築する適応的サンプリング法を提案し，その有用性を検討する．

2. 統計的安全評価と代替統計モデル

図１は，統計的安全評価における不確かさ評価の概要を示す．統計的安全評価は以下の手順で実施する．①最適評価コードの入力パラメータの不確かさを特定し，確率分布として定量化する．②入力パラメータの不確かさ分布からサンプリングを行って最適評価コードによる解析を行い（図中の赤字で示す），これらの解析結果を集計して出力パラメータの不確かさ分布を求める．③出力パラメータの不確かさ分布から統計的安全評価値を求める．通常，統計的安全評価値は95%累積確率値で与えられる．

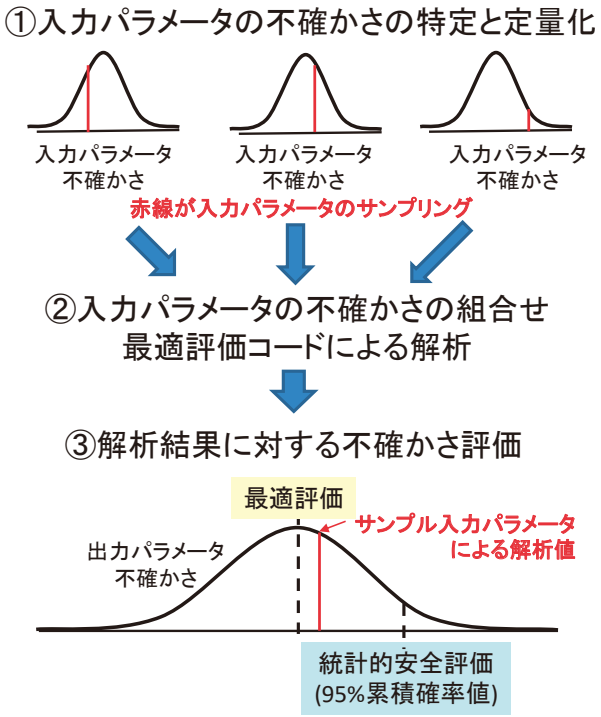


図１　統計的安全評価における不確かさ評価

統計的安全評価においては，95%累積確率値は最適評価コードの直接計算で得られた確率分布から直接評価するのが厳密であるが，これでは計算コストが大きくなることが課題となる．計算コストを削減するために，順序統計法や代替統計モデルを適用して95%累積確率値の評価が行われている．

順序統計法は [(6)(7)]，統計理論から所定の確信度を有する評価値を得るために必要なサンプル数（解析ケース数）を定めて不確かさを評価する方法である．

解析ケース数を抑えることにより，計算コストを削減することを意図している．不確かさパラメータの数に依存せずに適用でき頑健性があるが，95％累積確率値を統計的に高めに評価するため，統計的安全評価値にこのバイアスが含まれることになる．

代替統計モデルは，最適評価コードの入力と出力との関係を近似するように少数のサンプル（学習データ）から学習されたモデルである．図２に，代替統計モデルの概念図を示す．代替統計モデルは最適評価コードよりも計算コストが小さいため，多数回の計算が可能であり，これから得られる確率分布から直接的に95％累積確率値を評価することができる．したがって，適切な代替統計モデルを構築すれば，代替統計モデルは順序統計法よりも高い精度で95％累積確率値を評価することが可能となる．また，入力パラメータと出力パラメータの関係の分析も，代替統計モデルを用いた感度解析により可能となる．

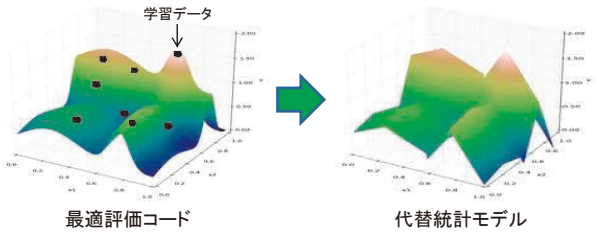


図２　代替統計モデル

一方，代替統計モデルを統計的安全評価に適用するにあたっては，学習データ以外のデータに対するモデルの汎化性能の確認が必要である．すなわち，代替統計モデルを用いた95％累積確率値が，最適評価コードを用いた95％累積確率値と一致することを保証するためには，学習データ以外のデータに対するモデルの計算精度の確認が必要である．

統計学や機械学習では，代替統計モデルが，学習データに対しては適合しているが，未知のデータに対しては適合できていないことを，そのモデルが過学習（または過剰適合）していると言う．一般に，過学習の要因としては，モデルの自由度が大きすぎることと，学習データが少なすぎることが考えられる．統計的安全評価に代替統計モデルを適用するにあたっても，これらの観点からの検討が重要である．代替統計モデルを単純で自由度を小さいものとすれば過学習を抑制できるが，あまり単純なモデルでは，代替統計モデル自体の精度が悪いものになる可能性がある．また，学習データを多くすれば過学習を抑制できるが，代替統計モデルの構築のために多くの最適評価コードによる計算が必要となり，統計的安全評価の計算コスト削減のために代替統計モデルを適用する意義が失われる．統計的安全評価に代替統計モデルを適用するにあたっては，解析対象の複雑度に応じて適切な代替統計モデルを構築することが重要であると言える．

本論文では，実機プラントにおける小破断LOCA事象の統計的安全評価を対象に，代替統計モデルの適用性を検討する．燃料被覆管最高温度（PCT）の不確かさ解析に対して，２次線形回帰（交互作用あり）とガウス過程回帰を組み合わせた代替統計モデルを適用する．このモデルによる95％累積確率値の評価に汎化性能があることを確認するために，交差検証法の有用性を検討する．また，少ないデータ数で95％累積確率値の評価精度のよいモデルを構築するために，適応的サンプリング法の有用性を検討する．

3. RELAP5コードによる実機プラントを対象とした不確かさ解析

3.1 対象事象

対象事象は４ループ加圧水型軽水炉（PWR）における小破断LOCA時高圧注入系不作動事象とした．PWRプラントの小破断LOCA時には１次系が高圧状態で冷却材が喪失していくため，高圧注入系の作動に失敗すると蓄圧注入系による注水が遅れ，炉心損傷に至る可能性がある．このためアクシデントマネジメント策として蒸気発生器を利用した２次側強制減圧操作が行われる．

表１に，不確かさ解析のベースケースとして設定した主要な解析条件を示す．破断口位置は，加圧器接続ループの低温側配管とし，破断差サイズは１，３，５インチとした．また，２次側強制減圧の条件は，炉心出口温度が350℃に達してから２分後（運転員操作遅れを考慮）に主蒸気逃がし弁を全開にするものとした．

前論文[5]で対象としたROSA/LSTFにおける小破断LOCA実験では，２次側強制減圧の操作は破断後600秒と決まっていた．しかし，本論文の解析条件では，破断口径の違いによって２次側強制減圧の開始時刻が変化し，事故の事象進展も変わってくる．

表１　主要解析条件

項　目	解析条件
破断場所	加圧器接続低温側配管
破断サイズ	１，３，５インチ
初期炉出力	定格
原子炉トリップ	加圧器圧力低
タービントリップ	原子炉トリップと同時
安全注入信号	加圧器圧力低
主給水	原子炉トリップと同時に停止
補助給水	破断60秒後，全ループ給水
主蒸気逃がし弁	自動作動
高圧注入	不作動
蓄圧注入	全ループ作動
低圧注入	全ループ作動
２次系強制冷却	炉心出口温度≧350℃到達後， 遅れ時間2分で主蒸気逃し弁を全開

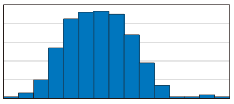
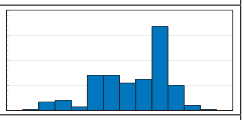
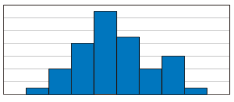
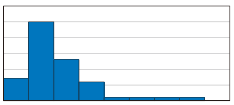
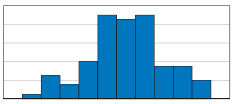
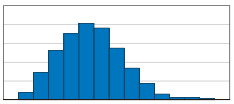
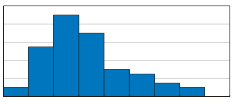
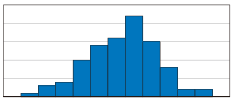
3.2　燃料被覆管最高温度の不確かさ解析

最適評価コードRELAP5/MOD3 [8] を使用して，3.1節の解析条件をベースケースとし，RELAP5/MOD3コードの計算モデルの不確かさを変化させた統計解析を実施した [9]．概要を以下に示す．

不確かさ解析は，日本原子力学会標準 [2] に則って実施した．安全評価パラメータはPCTである．表２に，不確かさを考慮する重要現象とそれに対応するRELAP5コードの計算モデル，および定量化した入力パラメータの不確かさを示す．

入力パラメータの不確かさ分布から，ランダム・サンプリング法により1024ケースのパラメータの組み合わせをサンプリングし，各破断口径に対して解析を実施した．1024ケースの解析結果を集計し，

表２　重要現象と入力パラメータの不確かさ

重要現象	RELAP5モデル	不確かさパラメータ	最小	最大	ヒストグラム
崩壊熱 [10]	1979年度版ANS標準データ	崩壊熱乗数	0.98	1.02	一様分布
被覆管酸化 [10]	Cathcart相関式	酸化膜厚さ乗数	0.91	1.16	
被覆管変形 [10]	FRAP-T6モデル	バースト温度乗数	0.86	1.07	
露出炉心熱伝達 [11]	Dittus-Boelter相関式	熱伝達係数乗数	0.58	1.88	
炉心内相間摩擦 [12][13]	EPRI相関式	相間摩擦係数乗数	0.13	3.00	
伝熱管凝縮熱伝達（層流）[10]	Nusselt相関式	熱伝達係数乗数	0.56	1.44	
伝熱管凝縮熱伝達（乱流）[10]	Shah相関式	熱伝達係数乗数	0.64	1.66	
伝熱管入口CCFL [14]	CCFL相関式	CCFL定数	0.70	0.80	一様分布
低温側配管水平層状化 [15]	Taitel-Dukler式	水平層状化判定乗数	0.20	4.63	
ダウンカマ相間摩擦 [16]	Kataoka-Ishii相関式	相間摩擦係数乗数	0.58	1.60	

PCTの95%累積確率値は一定値に収束することを確認した.

表３に，PCTの不確かさの統計値を示す．5%累積確率値および95%累積確率値は，以後，単に５％値あるいは95%値とも言う，

表３　PCTの不確かさの統計値

項目	破断口径		
	１インチ	３インチ	５インチ
5%値	1024.7	1161.9	752.8
平均値	1067.1	1237.0	869.0
95%値	1116.4	1342.4	957.2
歪度	−0.90	0.85	−0.67
尖度	2.69	1.20	0.14

図３に，全1024ケースに対するPCT不確かさのヒストグラムを示す．前論文[5]で対象としたROSA/LSTFにおける小破断LOCA実験の不確かさ解析では，PCTの分布は正規分布に近い分布となった．しかし，本論文で対象とする実機における不確かさ解析では，PCTの分布は正規分布とは異なる.

１インチ破断では，1,000K以下の低温領域でPCTの分布が分離している．しかし，これは95%値の評価に大きな影響を及ぼさないと考えられる．３インチ破断では，PCTの不確かさ分布は高温度側で裾野の広い分布となっている．代替統計モデルを不確かさ解析に適用するにあたり，PCTの95%値の計算精度に留意が必要である．５インチ破断では，PCTの不確かさ分布に双峰性が確認できる．このピークの単純な分離は困難と考えられ，精度の良い代替統計モデルの構築において留意が必要である.

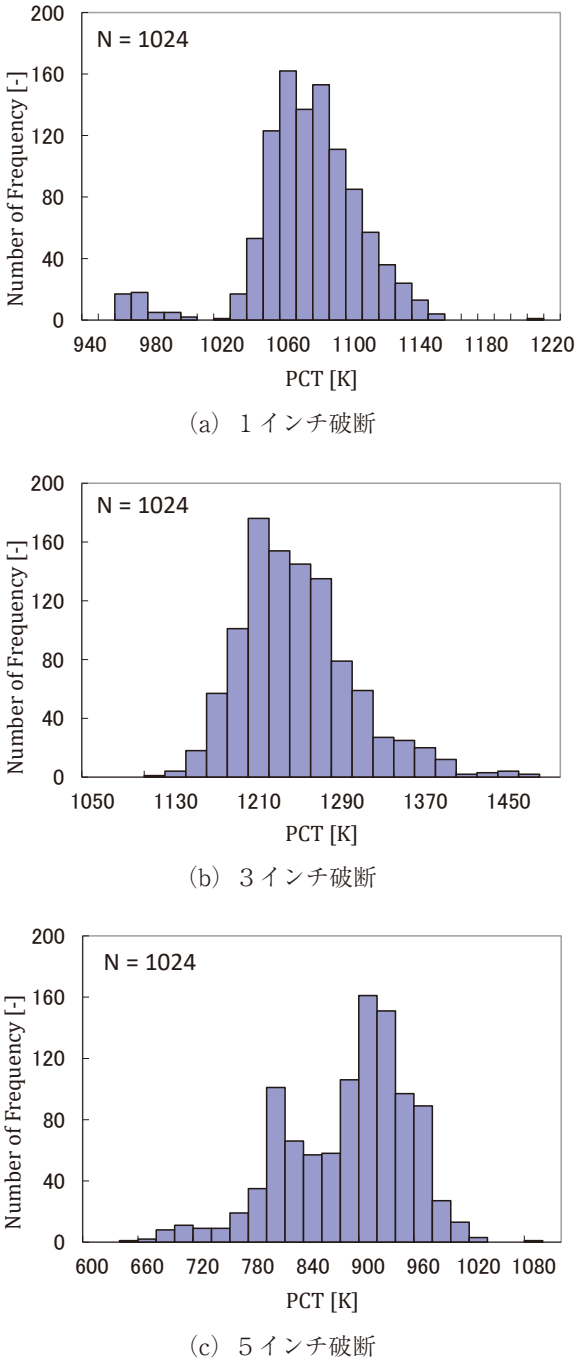


図３　PCTの不確かさのヒストグラム[9]

4. 代替統計モデルによる不確かさ解析

4.1 代替統計モデルの適用

本節では，3.2節で説明したRELAP5コードによる不確かさ解析を参照解析として，代替統計モデルの不確かさ解析への適用性を検討する.

本論文では，RELAP5コードによる不確かさ解析結果を対象に，RELAP5計算を近似する２次の線形回帰モデル（交互作用あり）を構築し，さらにそれとRELAP5計算との誤差を評価するガウス過程回帰モデル[17]を構築し，これらの和によって不確かさ解析の代替統計モデルとした．ガウス過程回帰モデルのハイパーパラメータの最適化にはMATLAB R2020b（The MathWorks, Natick, USA）を使用した[18]．目的関数評価の最大数を30として，ベイズ最適化によりハイパーパラメータを推定した.

3.2節のRELAP5による不確かさ解析を対象とし

て，少数のサンプルを学習データとして構築した代替統計モデルにより，RELAP5解析と同じ乱数を用いて統計解析を行い，PCTの不確かさ分布をRELAP5解析結果と比較した．学習データ数は，順序統計法と比較する目的で，93サンプル，124サンプル，153 サンプル，181サンプルとした．

図４に，代替統計モデルによる不確かさ解析により得られたPCTの累積確率分布をRELAP5による参照計算と比較して示す．黒破線は，RELAP5参照計算（黒線）による5%値, 平均値, 95%値を示す．

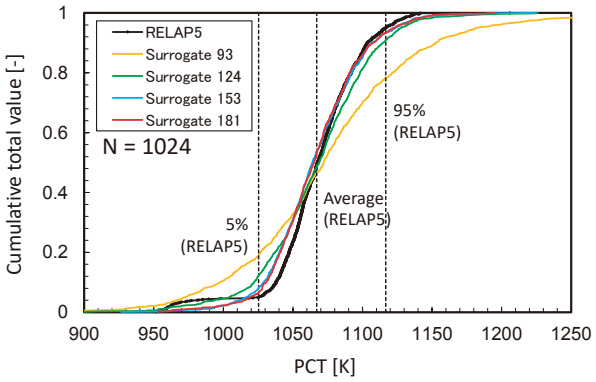
93サンプル（橙線）では，各破断口径に対して，代替統計モデルによる不確かさ解析結果は，RELAP5計算と比較して95%累積確率値を過大評価した．これは，学習データ数が十分でなく，モデルが学習データに対して過剰適合しているためと考えられる．

学習サンプル数が増加するにしたがって，代替統計モデルによる累積確率分布はRELAP5計算に近づき，１インチ破断と３インチ破断では，153サンプル（青線）でRELAP5計算とほぼ一致する結果となった．５インチ破断では，181サンプル（赤線）でRELAP5計算とほぼ一致する結果となった．なお，５インチ破断では，181サンプルでも，累積確率分布は中温度領域でRELAP5計算と一致していない．これは，本研究で用いた代替統計モデルは，５インチ破断の不確かさ解析で現れる分布の双峰性を表現する十分な性能がないためと考えられる．

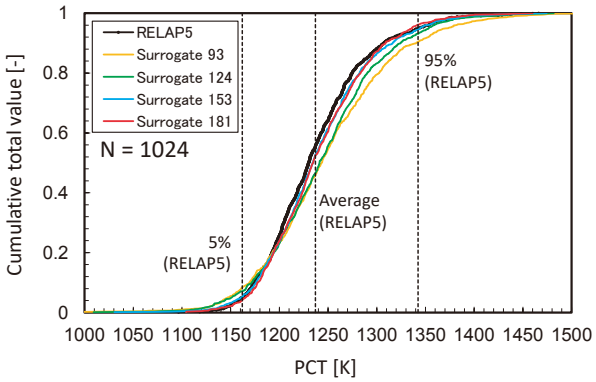
このように，代替統計モデルによる不確かさ解析では, モデルの表現力に対して学習データが少なく，モデルが過剰適合している場合は，95％値の評価の精度が悪い．したがって，代替統計モデルを不確かさ解析に適用するにあっては，代替統計モデルが学習データに過剰適合していないことの判定が重要であると言える．

図５に，PCTの95%値についての代替統計モデルと順序統計法による評価の比較を示す．

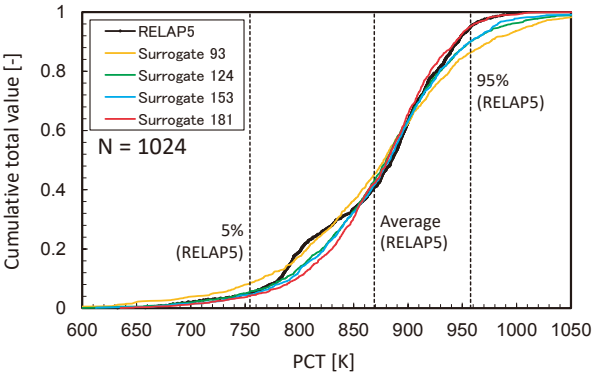
順序統計法は，統計理論から所定の確信度を有する評価値を得るために必要なサンプル数（解析ケース数）を定めて不確かさを評価する方法である．必要なサンプル数を決定するWilksの式 [7] によると，安全評価パラメータのサンプルを大きい順から並べた場合, 95%信頼水準で95%累積確率値が上位２位，３位，４位，５位に位置するために必要なサンプル数は，それぞれ93サンプル，124サンプル，153サンプル，181サンプルである．



（a） １インチ破断



（b） ３インチ破断

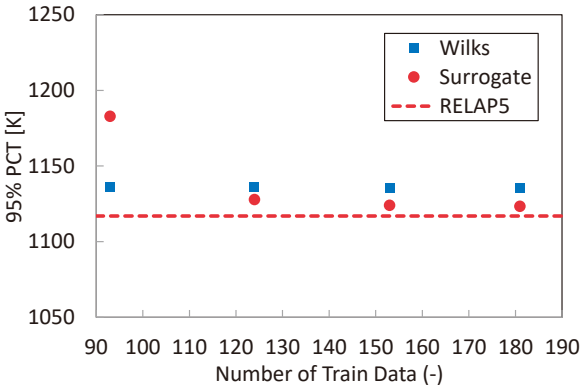


（c） ５インチ破断

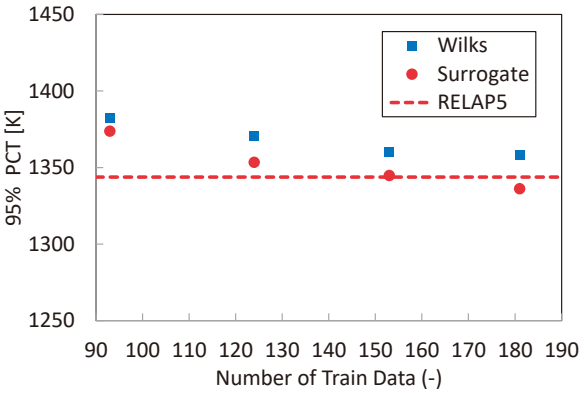
図４　PCTの累積確率分布

代替統計モデルによる95%値の評価は，学習データ数が，93サンプル，124サンプル，153サンプル，181サンプルと多くなるにしたがって精度が向上することが分かる．１インチ破断と３インチ破断では153サンプルでRELAP5計算とほぼ一致し，５インチ破断では181サンプルでRELAP5計算とほぼ一致している．

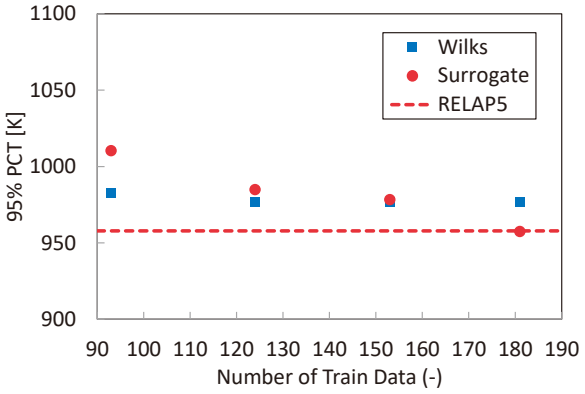
代替統計モデルによる評価を順序統計法と比較すると，３インチ破断では，何れの学習サンプル数



（a） 1インチ破断



（b） 3インチ破断



（c） 5インチ破断

図5　PCT95%値の順序統計法との比較

についても代替統計モデルの方が評価精度が良い．一方，1インチ破断では，学習サンプル数が93のケースで順序統計法の方が評価精度が良い．5インチ破断では，学習サンプル数181以外のケースで順序統計法の方が評価精度が良いか同程度である．

以上のように，代替統計モデルを不確かさ解析に適用するにあたっては，対象とする不確かさ解析の複雑度に応じて適切なモデルを構築し，適切な数の学習データを用いなければ，その95%値の評価結果は順序統計法よりも悪化する場合が有る．

4.2　交差検証法の適用

本節では，代替統計モデルの学習以外のデータに対する95%値の予測精度をその学習データから評価するために，交差検証法の適用性を検討する．

図6に，k分割交差検証の概念図（k=5の場合）を示す．まず，学習データをk分割する．このうち1つのデータセットを検証用にして，残りのデータセットで学習したモデルを検証する．以下，これをk回繰り返して実施する．このように，交差検証では各データが検証データと学習データとして利用されるため，評価が特定のデータに偏らない．このため，交差検証による評価は学習データ以外のデータに対して汎化性能があると考えられる．特に分割数が学習データ数と同じ場合は，一個抜き交差検証という．本論文では，交差検証として一個抜き交差検証を用いた．

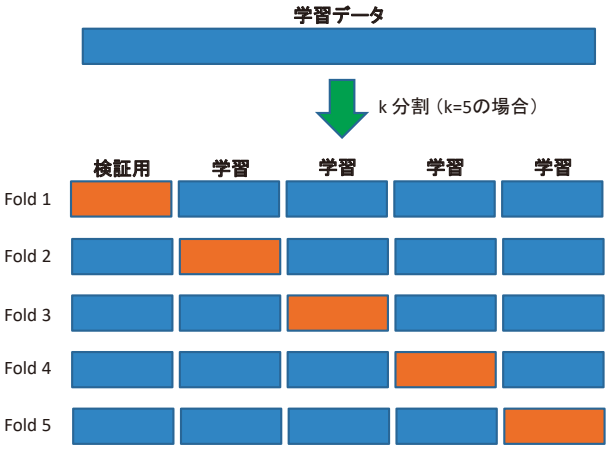
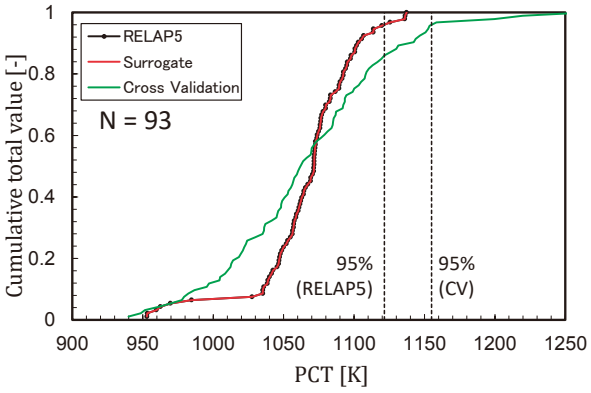


図6　交差検証法

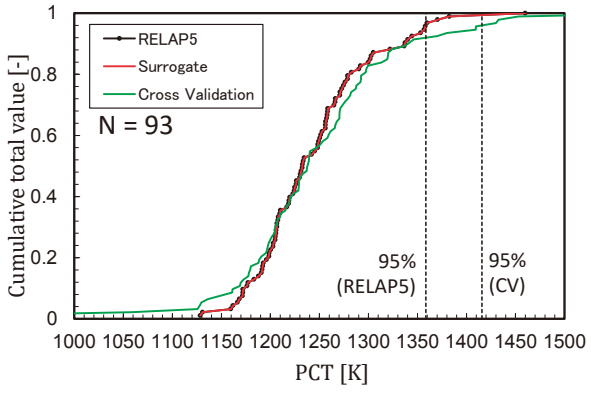
4.1節で示した代替統計モデルによる不確かさ解析を対象に，学習データに対する交差検証による95%値の計算精度から，全データに対する95%値の計算精度が推定可能か検討した．

図7に，学習データ数93の場合に対する交差検証の適用結果を示す．黒線がRELAP5計算によるPCTの累積確率分布，赤線が代替統計モデルによるPCTの累積確率分布，緑線が交差検証によるPCTの累積確率分布である．

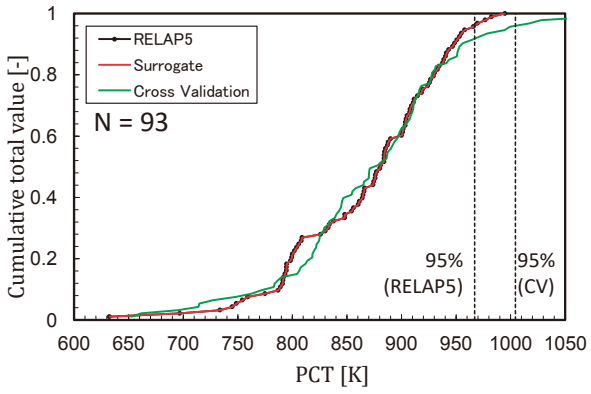
図7に示すように，各破断サイズについて，代替統計モデルによる累積確率分布はRELAP5計算の累積確率分布とほぼ完全に一致している．しか



（a） 1インチ破断

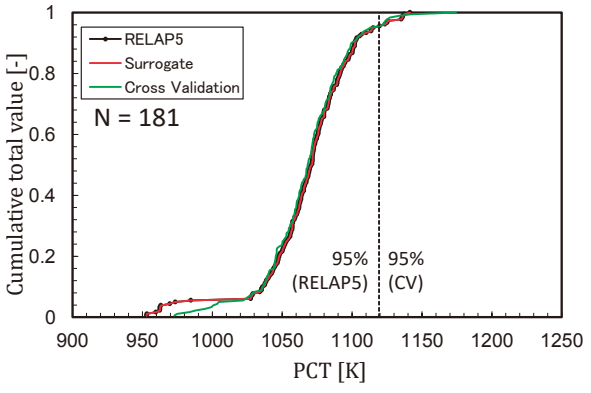


（b） 3インチ破断

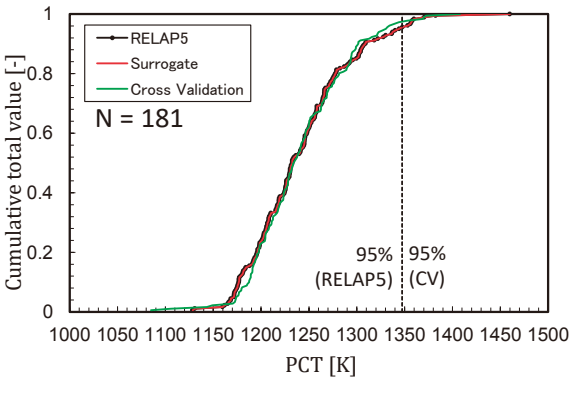


（c） 5インチ破断

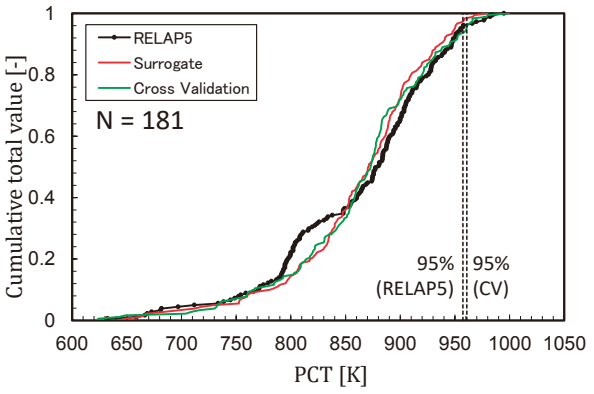
図7　交差検証法の適用（学習データ数93）



（a） 1インチ破断



（b） 3インチ破断



（c） 5インチ破断

図8　交差検証法の適用（学習データ数181）

し，これは過学習であり，図4で見たように，全1024のデータに対する累積確率分布はRELAP5と代替統計モデルで大きく異なる．一方，交差検証法による累積確率分布は，過学習の影響を反映してRELAP5計算の累積確率分布と異なるものとなり，図4の全1024データに対するRELAP5計算の累積確率分布と類似した分布となっている．

図8に，学習データ数181の場合に対する交差検証の適用結果を示す．この場合は，代替統計モデルによる累積確率分布と交差検証による累積確率分布はほぼ一致している．これは，モデルが汎化性能を獲得するために十分な学習データ数が得られていることを示していると考えられる．実際，図4で見たように，学習データ数181の場合の代替統計モデルでは，全1024データに対して代替統計モデルの累積確率分布とRELAP5計算の累積確率分布はほぼ一致している．なお，5インチ破断では，代替統計モデルによる累積確率分布は中温度領域で

RELAP5計算と一致していない．これは前述したように，本研究で用いた代替統計モデルは，５インチ破断の不確かさ解析で現れる分布の双峰性を表現する十分な性能がないためと考えられる．しかし，代替統計モデルと交差検証による累積確率分布はほぼ一致しており，95％値評価のための汎化性能の確認には問題が無いものと考えられる，

以上のように，代替統計モデルを不確かさ解析に適用するにあっては，学習データを用いた交差検証を行うことにより，95％値評価の汎化性能を確認することができると判断される．

4.3　適応的サンプリングの適用

本節では，なるべく少ない学習データによって95％累積確率値の評価精度の良い代替統計モデルを構築する方法として，適応的サンプリングの有用性を検討する．

適応的サンプリングは，目標値に向けて，効率的に学習データを選択する手法である．これまでに本手法は，PCTの制限値に対応する限界曲面を効率的に計算するために適用されてきている[19][20]．本論文では，本手法を統計的安全評価における95％値を効率的に計算するために修正して適用する．

図９に，95％値を目標値とした適応的サンプリングの手続きを示す．適用的サンプリングは以下の手順で行う．初めに，学習点を選択する．本論文では，93個の学習点から開始した．そして，これらを入力としたRELAP5計算を行い，これらの結果を学習データとして代替統計モデルを構築する．次に，代替統計モデルを用いて不確かさ解析を行い，PCTの累積確率分布を求める．さらに，この95％値に対応する入力点から最も近いサンプリング点（本論文では５点）を新たな学習点として選択する．そして，これらの学習点に対してRELAP5計算を行い，これらの結果を学習データに追加して代替統計モデルを更新する．

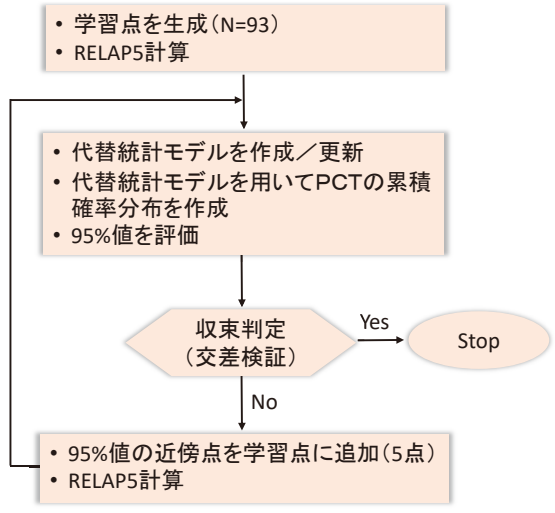


図９　95％値を目標値とした適応的サンプリングの手続き

適応的サンプリングの手続きにより，全データに対するRELAP5コードによる95％値に近いデータが学習データに追加されることになり，代替統計モデルの95％値の計算精度が向上することが期待できる．

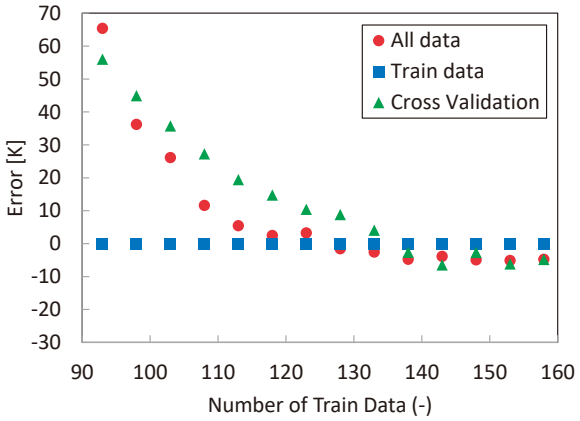
図10に，適応的サンプリングを適用して構築した代替統計モデルによる95％値の計算誤差を，学習データ数と対応して示す．横軸が学習データ数，縦軸が代替統計モデルによる95％値の計算誤差である．

赤丸が，全1024データに対する代替統計モデルによる95％値の計算誤差である．各破断サイズについて，適応的サンプリングを繰り返すことにより，計算誤差は小さくなっていることが確認できる．ただし，実際に代替統計モデルを用いて統計的安全評価を行うためには，全1024データに対する計算誤差を，学習データのみから推定する必要がある．

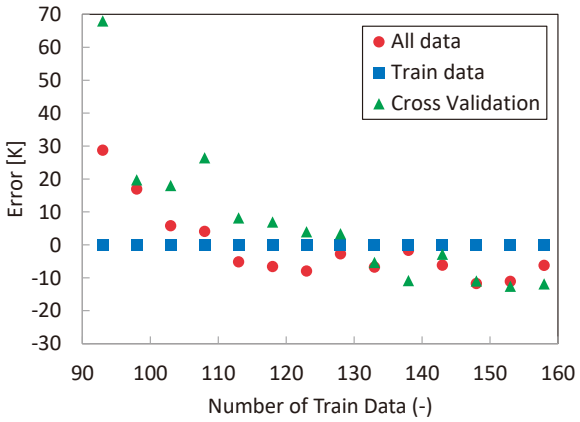
青四角は，学習データに対する代替統計モデルによる95％値の計算誤差である．4.2節で確認したことと同様に，各破断サイズについて，学習データに対する代替統計モデルによる95％値の計算誤差はほぼゼロである．

緑三角は，学習データに対する代替統計モデルの交差検証による95％値の計算誤差である．4.2節で確認したことと同様に，各破断サイズについて，全1024データに対する95％値の計算誤差は，学習データに対する代替統計モデルの交差検証による95％値の計算誤差で凡そ推定できていることが確認できる．

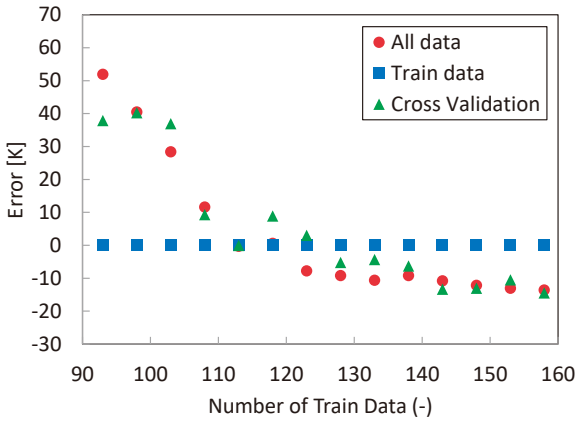
図11に，適応的サンプリングを適用した代替統計モデルによる95％値の計算結果を，学習データ数と対応して示す．ここでは，適応的サンプリングの手続きの収束判定として，代替統計モデルの交差検証による95％値の計算誤差がほぼゼロになることとした．図11には，RELAP5による不確かさ解析の結果を比較して示している．３インチ破断ではやや過小評価の傾向があるものの，適応的サンプリングを適用した代替統計モデルの更新によって，



（a） 1インチ破断

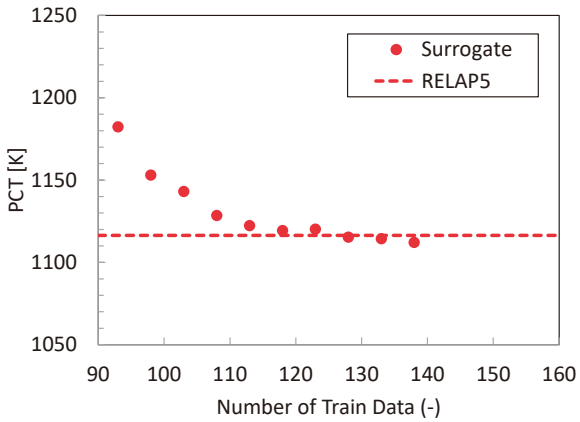


（b） 3インチ破断

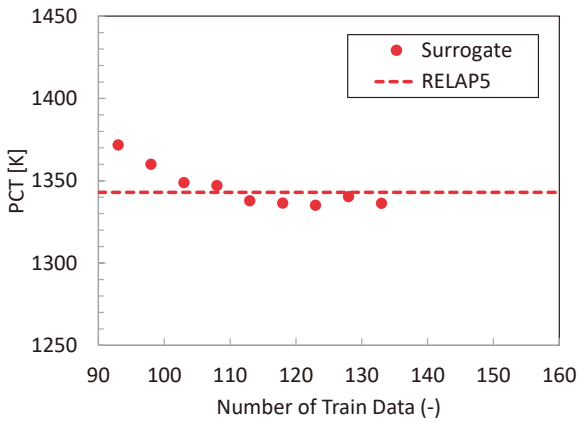


（c） 5インチ破断

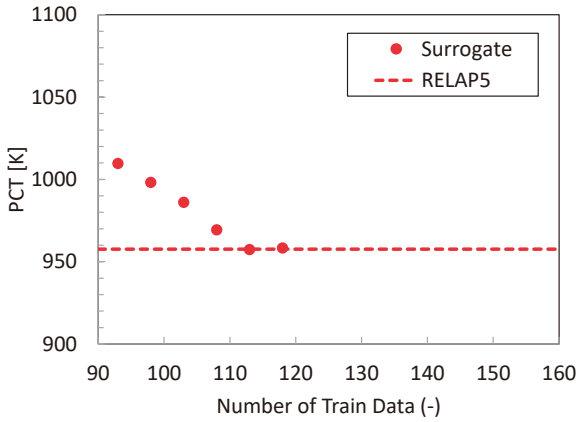
図10　適応的サンプリングを適用した代替統計モデルによる95%値計算の誤差の変化



（a） 1インチ破断



（b） 3インチ破断



（c） 5インチ破断

図11　適応的サンプリングを適用した代替統計モデルによる95%値計算の変化

95%値の計算結果はRELAP5計算値とほぼ一致していることが分かる．

以上のように，95%値を目標値とした適応的サンプリングにより学習データを生成して代替統計モデルを更新し，交差検証により95%値の計算精度を推定することによって，全データに対する95%値の計算精度が高い代替統計モデルを効率的に構築することができると言える．

5. 結言

統計的安全評価では，最適評価コードを用いた多数回のモンテカルロ計算により統計的安全評価値を求める．これを実施可能な計算時間で行うためには，最適評価コードよりも計算コストの小さな代替統計モデルの適用が有効である．

本論文では，実機プラントの小破断LOCA事象を対象に，RELAP5コードによる不確かさ解析に対して代替統計モデルを構築し，統計的安全評価における代替統計モデルの適用性を検討した．

代替統計モデルによる95%累積確率値の計算精度を確認する方法として，交差検証法の適用性を検討した．RELAP5不確かさ解析との比較により，代替統計モデルが学習データに過剰適合せずに汎化性能を有することの判定は，学習データを用いた交差検証によって推定可能であることを確認できた．したがって，交差検証を行い95％累積確率値の予測精度を確認した代替統計モデルを用いることにより，統計的安全評価が可能であると言える．

少ないデータ数で効率的に95%累積確率値の評価精度のよいモデルを構築するために，適応的サンプリング法の有用性を検討した．RELAP5不確かさ解析との比較により，適応的サンプリングを繰り返すことによって，95%累積確率値の計算誤差が収束することを確認できた．また，95％累積確率値の計算誤差は，学習データに対する交差検証による計算誤差で推定可能であることを確認できた．

以上より，95%累積確率値を目標値とした適応的サンプリングにより代替統計モデルを更新し，交差検証により95％累積確率値の計算精度を推定することによって，95%累積確率値の計算精度が高い代替統計モデルを効率的に構築することができると言える．

引用文献

(1) B. Boyack, R. Duffey, G. Wilson, P. Griffith, G. Lellouche, S. Levy, U. Rohatgi, W. Wulff, N. Zuber, “Quantifying reactor safety margins: Application of code scaling, applicability, and uncertainty（CSAU）evaluation methodology to a large break, loss-of-coolant accident,” NUREG/CR-5249（1989）.

(2) 日本原子力学会, “統計的安全評価の実施基準：2008”, AESJ-SC-S001: 2008（2009）.

(3) D. Mandelli, C. Smith, A. Alfonsi, C. Rabiti, J. Cogliati, H. Zhao, I. Rinaldi, D. Maljovec, P. Talbot, B. Wang, V. Pascucci, “Reduced order model implementation in the risk-informed safety margin characterization toolkit,” INL/EXT-15-36649, Idaho National Laboratory（2015）.

(4) A. Alfonsi, C. Wang, J. Cogliati, D. Mandelli, C. Rabiti, “Status of adaptive surrogates within the RAVEN framework,” INL/EXT-17-43438, Idaho National Laboratory（2017）.

(5) 木下郁男, “統計的安全評価における代替統計モデルの適用（不確かさ解析への適用性に関する検討）”, INSS JOURNAL, Vol.27, pp.219-230（2020）.

(6) S.S. Wilks, “Statistical prediction with special reference to the problem of tolerance limit,” Annals of Mathematical Statistics, 13, pp.400-409（1942）.

(7) A. Guba, M, Makai, P. Lenard, “Statistical aspects of best estimate method-I,” Reliability Engineering and System Safety, 80, 217-232（2003）.

(8) The RELAP5 code development team, “RELAP5/MOD3 code manual”, NUREG/CR-5535（1995）.

(9) I. Kinoshita, M. Murase, “Uncertainty analysis of small break LOCA with HPI failure in PWRs: A comparison of uncertainty of quantification between Monte Carlo and Wilks’ formula approach,” Proceedings of the ANS Best Estimate Plus Uncertainty International Conference（BEPU2018）, BEPU2018-149, Lucca, Italy, May 13-19（2018）.

(10) 鳥毛俊秀, 木下郁男, 山田実, “小破断LOCA時高圧注入系不作動事象への統計的手法適用～被覆管酸化，崩壊熱，被覆管変形および伝熱管凝縮に係るRELAP5モデルの不確かさの定量化”, INSS JOURNAL, Vol.21, pp.213-222（2014）.

(11) T. Torige, I. Kinoshita, “Application of the statistical safety evaluation method to the small break LOCA with high pressure

injection failure (Quantification of the uncertainty of uncovered core heat transfer model), " Proceedings of the ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress & Exposition (IMECE2013), IMECE2013-64305, San Diego, CA, November 13-21 (2013).

(12) 木下郁男, 鳥毛俊秀, 山田実, "炉心内相間摩擦にかかるRELAP5モデルの不確かさの定量化", INSS JOURNAL, Vol.24, pp.201-210 (2017).

(13) I. Kinoshita, T. Torige, M. Yamada, "Uncertainty quantification of the RELAP5 interfacial friction model in the rod bundle geometry," Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science, Vol.2, No.2, 021003 (2016).

(14) 楠木貴世志, 村瀬道雄, 冨山明男, "蒸気発生器に伝熱管下端における気液対向流制限に関する研究のレビュー", INSS JOURNAL, Vol.24, pp.211-220 (2017).

(15) 鳥毛俊秀, 木下郁男, 山田実, "小破断LOCA時高圧注入系不作動事象への統計的手法の適用；(9) 重要現象に係るモデル不確かさの定量化 (伝熱管凝縮熱伝達, 低温側配管水平層状化)", 日本原子力学会2014春の大会, L24 (2014).

(16) C. Clark, J.P. Schlegel, T. Hibiki, M. Ishii, I. Kinoshita, "Uncertainty in RELAP5/MOD3.2 calculations for interfacial drag in downward two-phase flow," Annals of Nuclear Energy, Vol. 94, pp230-240 (2016).

(17) C.E. Rasmussen, C.K.I. Williams, "Gaussian Processes for Machine Learning," the MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London (2006).

(18) MathWorks, MATLAB ドキュメンテーション, https://jp.mathworks.com/help/matlab/help-and-support.htmel

(19) C. Parisi, et al., "Automatic limit Surface Search for PWR Transients by RELAP5-3D/RAVEN Codes," Proceedings of the ANS Best Estimate Plus Uncertainty International Conference (BEPU2018), BEPU2018-264, Lucca, Italy, May 13-19 (2018).

(20) I. Kinoshita, "A Limit Surface Prediction for PWR LOCA Transient Using Adaptive Machine Learning Techniques," Proceedings of the 29th European Safety and Reliability Conference (ESREL2019), ESREL2019-378, Hannover, Germany, September 22-26 (2019).

MAAPにおけるISLOCAのモデル化

Modeling an interface system LOCA in the severe accident analysis code “MAAP”

楠木　貴世志（Takayoshi Kusunoki）*1　　高木　俊弥（Toshiya Takaki）*1

要約　東京電力福島第一原子力発電所事故を踏まえ，これまで原子力発電所緊急安全対策，シビアアクシデント対策他として導入された設備をMAAPプラントモデルに組み込み，動作を確認してきた．本稿では当研究所で開発した事象進展予測システムを用いて多様な事故シナリオに迅速に対応するため，高浜発電所3/4号機の安全性向上評価に記載されている起因事象をもとに，事前にMAAPにおいてモデル化しておくことが望ましい起因事象の検討を行った．その結果，インターフェイスシステムLOCA（ISLOCA）を抽出し，MAAPにおいてそのモデル化を行った．「高浜３号炉及び４号炉 重大事故等対策の有効性評価」に基づき，モデルの動作確認を行った結果，事象発生後約１時間以降は１次冷却材圧力及び１次冷却材温度は有効性評価より高くなる傾向となったが，プラント挙動はおおむね再現することができた．

キーワード　MAAP，シビアアクシデント，モデル化，インターフェイスシステムLOCA

Abstract　From a consideration of progression of the 2011 Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, apparatuses introduced as power station emergency safety measures and severe accident measures in power stations were incorporated into the MAAP plant model. In this paper, in order to respond quickly to various accident sequences using the Incident Progress Prediction System, we examined the initiating events that should be modeled in advance based on the initiating events described in the safety improvement analysis reports. As a result, the ISLOCA (interface system LOCA) was extracted and modeled. We verified the operation of the model based on “Effectiveness evaluation of measures against serious accidents of Takahama No. 3 and No. 4 reactors” and found that after the event occurred the primary coolant pressure and the primary coolant temperature tended to be higher than the effectiveness evaluation after about 1 hour. The plant behavior showed a similar trend to that of the data.

Keywords　MAAP, severe accident, modeling, interface system LOCA

1. はじめに

MAAP（Modular Accident Analysis Program）コードは，1980年代の初めに米国FAI社（Fauske & Associates, LLC.）によって開発され，米国EPRI（Electric Power Research Institute）が所有権を有するコードである．現在もEPRIを中心としたMAAPユーザーズグループのもとで保守及び改良が進められている．

MAAPは，シビアアクシデントの事象進展の各段階を網羅し，炉心，原子炉容器，原子炉格納容器内等で起こると考えられる重要な事故時の物理現象をモデル化するとともに，工学的安全施設や炉心損傷防止あるいは格納容器機能喪失防止で想定する各種の緩和設備についてのモデルを備えている．また，核分裂生成物（Fission Product, FP）に関する物理現象をモデル化しており，事故時に炉心溶融に伴って原子炉容器や原子炉格納容器内等に放出されるFPの挙動についても取り扱うことが可能である．このように，広範囲の物理現象を取り扱うことが可能な総合解析コードであり，想定される様々な事故シナリオについて，起因事象から安定した状態，あるいは過圧・過温により原子炉格納容器が機能喪失するシビアアクシデントまで計算が可能であることが特徴である[(1)]．

上述したように，MAAPでは原子力プラントにおける様々な緩和設備を設定することが可能である．これまで当研究所は関西電力の原子力プラ

＊1　（株）原子力安全システム研究所　技術システム研究所

ントに導入されている各種の緩和設備について，MAAPでモデル化を実施し，原子力防災訓練等で使用してきた[(2)]．特に近年は，東京電力福島第一原子力発電所事故を踏まえて日本の原子力発電所において発電所緊急安全対策，シビアアクシデント対策他として導入された設備について重点的にモデル化を実施してきた[(3)(4)(5)]．

一方，電力事業者は原子力災害時には限られた時間の中で事態の進展を予測して適切な影響緩和操作を行うとともに，必要に応じて一般公衆の防護措置を行わなければならない．当研究所は関西電力の支援を行うため，原子力災害時には当研究所員が関西電力の原子力事業本部（以下，事業本部）に駆け付け事象進展予測を行うこととなっており，これまで「事象進展予測システム」の開発を行ってきた[(6)]．事業本部内に設置している事象進展予測システムを図１に，事象進展予測システムの概要を図２にそれぞれ示す．事象進展予測システムはプラントから逐次，送られてくる情報に基づき，MAAPを用いて事態の推移予測を行い，今後の進展を予測するとともに，将来の影響緩和操作の有効性や放射性物質放出量の推定を行い，事故収束操作及び公衆防護措置に有益な情報を提供することを目的とするものである．



図１　事象進展予測システム（原子力事業本部内）

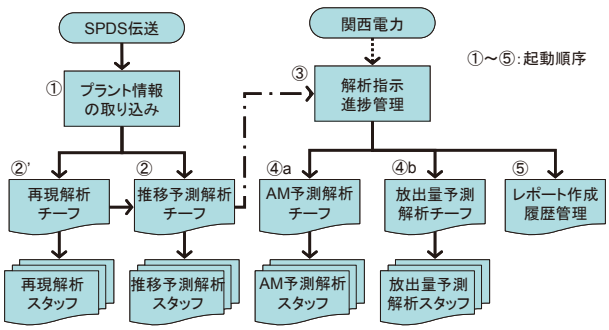


図２　事象進展予測システムの概要

原子力災害発生時には，当研究所員が関西電力から原子力災害発生の連絡を受け，事業本部に駆け付け，システムの準備，起動等を実施した後に，事象進展予測として再現解析（起因事象の同定を含む），推移予測解析，アクシデントマネジメント（Accident Management, AM）予測解析，放射性物質放出量予測解析，レポート作成の順序で行うこととなるため，限られた時間を効率よく解析に活用することが重要となる．事象進展予測システムに搭載されているMAAPは他のシステム解析コードに比べて解析時間が短いことがその特徴の１つとして挙げられるが，実際の原子力災害時に事象進展予測解析を実施することを想定した場合，当日のプラント状況を反映した入力データの作成に要する時間は可能な限り短縮することが望ましい．このため，当研究所では関西電力の各原子力プラントに対応したMAAPの入力データを整備してきた．

さらに，上述したように，近年では東京電力福島第一原子力発電所事故を踏まえた緩和設備の設置に伴うモデル化を実施し，かつ代表的な事故シナリオの解析に必要となる設備等をMAAPでモデル化している．これらのデータをあらかじめ整備しておくことにより，原子力災害発生時にもこれらの緩和設備を用いたより多くの事故シナリオの解析が可能となる．

本研究では，各電力事業者が作成している発電用原子炉施設の安全性の向上のための評価（安全性向上評価）に記載されている起因事象（重大な事故に至る事故進展の発生要因になりえる事象）をもとに，事前にMAAPにおいてモデル化しておくことで原子力災害発生時にも効率よく解析が行える起因事象の検討を行った．関西電力の高浜発電所3/4号機の安全性向上評価[(7)(8)]に記載されている起因事象を表１に示す．

表１に示した起因事象のうち，MAAP解析基盤（パラメータファイル，インクルードファイル等）に整備されていなければ解析に多くの労力と時間を要し，原子力災害発生時に迅速に対応することが難しい起因事象として，「インターフェイスシステムLOCA（Interface System Loss-Of-Coolant Accident, ISLOCA）」及び「運転時の異常な過渡変化時において原子炉緊急停止（原子炉スクラム）ができない事象（Anticipated Transient Without Scram, ATWS）」が考えられる．これらの事象について次に述べる．

表１　安全性向上評価の確率論的安全評価（PRA）で対象としている起因事象

No.	起因事象
1	大破断冷却材喪失事故（LOCA）
2	中破断LOCA
3	小破断LOCA
4	極小LOCA
5	インターフェイスシステムLOCA
6	主給水流量喪失
7	外部電源喪失
8	ATWS
9	２次冷却系の破断
10	蒸気発生器伝熱管破損
11	過渡事象
12	原子炉補機冷却機能喪失
13	手動停止

ISLOCAとは，原子炉容器に接続する高圧設計部分と低圧設計部分（余熱除去系が含まれる）のインターフェイスにおいて，隔離機能が喪失することによって，低圧設計部分に設計圧を超える圧力が発生し，それにより機器破損を引き起こし，原子炉冷却材が原子炉格納容器外に流出する事象である（図３の赤色のマーク）．一方，ATWSとは，起因事象発生後の原子炉トリップに失敗することで発生するシナリオであり，厳密には起因事象ではないが，安全性向上評価の分類に従って，本稿でも起因事象とした．安全性向上評価では，ATWSは２次冷却系からの除熱機能が喪失する事象が厳しく，蒸気発生器２次側保有水が減少することにより補助給水が必要となる主給水流量喪失，負荷の喪失及び外部電源喪失を対象としている[(7)(8)]．これらのうち，本研究ではまずISLOCAについてモデル化を検討したので，次章に述べる．

近年の有効性評価[(9)]におけるプラント過渡解析

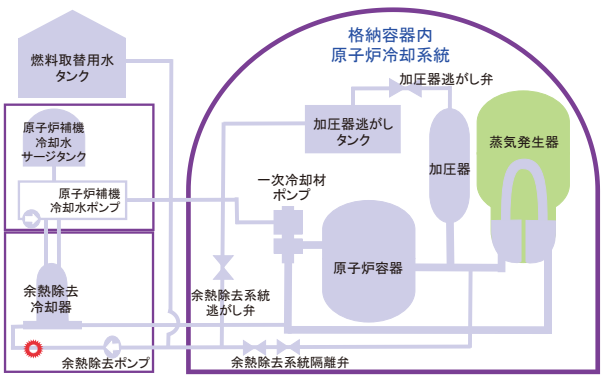


図３　余熱除去系統概要図

コードM-RELAP5を用いたISLOCAの解析では，余熱除去系統（Residual Heat Removal System, RHRS）から各種逃がし弁及び機器からの漏えいによる格納容器内及び格納容器外への流出を考慮しており，本研究でも同様の解析を実施できるようなモデル化を目的とした．これまでの当研究所のMAAP解析基盤では，ISLOCAに特化したRHRS及びこれに付随する各種の流出経路はモデル化されておらず，実際の原子力災害発生時にISLOCAを解析する場合に，これらに関する多くの情報（各種幾何データ，温度や圧力といった物理量，弁の開閉条件等）を入力データに追加することは時間の制約からできない．従って，こうした情報をあらかじめモデル化しておくこととした．

2.　MAAPのモデル化の概要

2.1　ノード及びジャンクション

本稿では，MAAP Version 4（MAAP4）におけるISLOCAのモデル化について説明する．MAAP4では，炉心部を多数のノードに分割し，炉心損傷等の状態変化とそれに伴うノード間の質量及びエネルギーを計算している（図４の黒色で示される部分）．

ISLOCAのモデル化として，原子炉容器から高温側主冷却材配管（ホットレグ配管）からの冷却材の流出先となるノード及びそれらにつながるノードを新たに作成した．余熱除去系統の配管（RHRS配管）（ノード14）をホットレグ配管からの冷却材の流出先となるノードとして作成した．加圧器逃がしタンク，及び冷却材貯蔵タンク（ノード15及び16）をRHRS配管（ノード14）につながるノードとして作成した．さらに，それらのノードをつなげる以下のジャンクション（ジャンクション29～31）を作成した．

- ノード14：RHRS配管
- ノード15：加圧器逃がしタンク
- ノード16：冷却材貯蔵タンク
- ジャンクション29：RHRS配管～安全補機室
- ジャンクション30：RHRS配管～加圧器逃がしタンク
- ジャンクション31：RHRS配管～冷却材貯蔵タンク
- ジャンクション32：加圧器逃がしタンク～格納容器（CV）

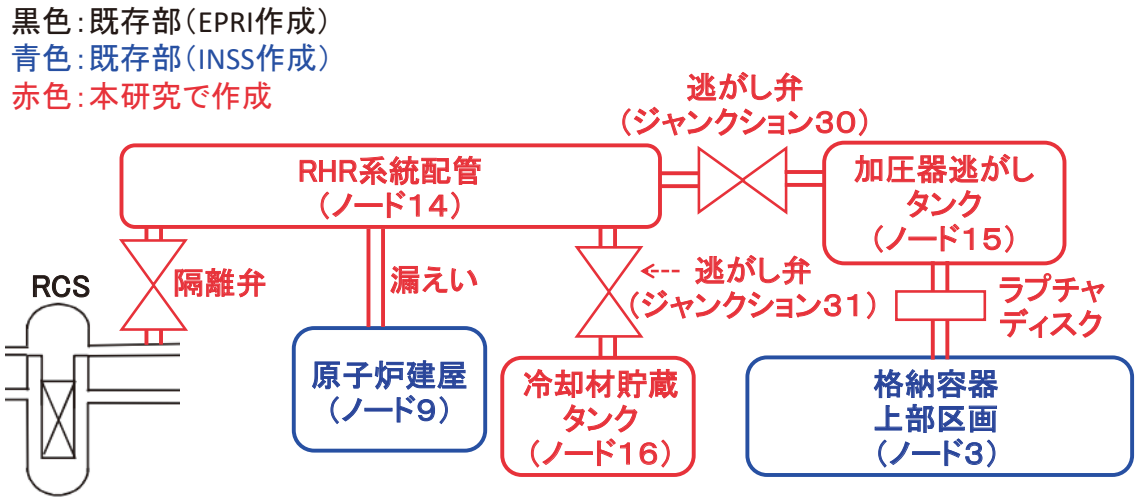


図４　MAAP4におけるモデルの概要 [1]

作成した上述のノード及びジャンクションの概要を図４に示す．赤色で記載されている設備が本研究で作成した設備となる．それ以外の黒色で記載されている設備は米国EPRIにより作成されている既存のモデル [1] であり，青色で記載されている設備はこれまでに原子力安全システム研究所（INSS）で作成していたモデルである．

2.2　インプットファイルにおけるノード設定

本研究では，MAAPのインプットファイルを作成し，上述したノード14～16及びジャンクション29～31のパラメータを設定した．設定したノードの主なパラメータ及びジャンクションの主なパラメータを以下に示す．

【ノードの主なパラメータ】
- ➢ 気体と液体の総体積［m^3］
- ➢ フロアの高さ［m］
- ➢ 最大の特性総断面積［m^2］
- ➢ エアロゾル沈着面積［m^2］
- ➢ 総流路面積［m^2］
- ➢ イグナイターの数［-］
- ➢ イグナイターの平均高さ［m］
- ➢ PAR（静的触媒式水素再結合装置）の数［-］

【ジャンクションの主なパラメータ】
- ➢ ジャンクションのタイプ
- ➢ 上流のジャンクション
- ➢ 下流のジャンクション
- ➢ 垂直or水平のジャンクション
- ➢ 幅［m］
- ➢ 高さ［m］
- ➢ 長さ［m］
- ➢ 面積［m^2］
- ➢ ガスの流れを遮断する水位［m］

3.　解析条件

3.1　解析シナリオ

今回作成したMAAPにおけるISLOCAモデルの動作確認を実施した．解析シナリオは「高浜３号炉及び４号炉重大事故等対策の有効性評価 [9]」に基づき，設定した．解析シナリオは公表されている有効性評価から読み取ることができる情報から設定した．

表２に示す通り，起因事象として，余熱除去系統入口隔離弁の誤開又は破損による余熱除去系統の圧力上昇により，余熱除去系統からの漏えいが発生するものとする．１次冷却材の漏えい個所として，余熱除去系逃がし弁の作動，余熱除去系機器等からの漏えいが発生するものとする．

事象発生後，余熱除去系逃がし弁，余熱除去系機器等からの漏えいにより１次冷却材圧力が低下することで，トリップ限界値に到達し，原子炉は自動停止する．その後，非常用炉心冷却設備作動限界値に到達した後，非常用炉心冷却設備が作動することにより炉心に注水される．

事象発生の約25分後に主蒸気逃がし弁の開放による２次系強制冷却を開始するとともに，１次系か

表２　解析シナリオ

経過時間	主要な事象
－	定格熱出力一定運転中
０分（0:00）	事象発生 原子炉トリップ LOCA 発生 余熱除去ポンプ使用不可
SI信号発信	高圧注入ポンプ２台起動
RHRS配管の圧力が設定圧力到達	余熱除去ポンプ入口逃がし弁「開」（但し，設定値以下になる場合は「閉」）
	余熱除去冷却器出口逃がし弁「開」（但し，設定値以下になる場合は「閉」）
SI信号※発信25分後	２次系強制冷却開始（主蒸気逃がし弁の開度10%）
62分（1:02）	高圧注入ポンプから充てんポンプへ切り替え
420分（7:00）	充てんポンプ停止 余熱除去ポンプ入口弁の閉止（隔離）

※SI信号：安全注入信号

らの漏えい量抑制のため，事象発生の約62分後に充てん／高圧注入ポンプによる炉心注水について，高圧注入から充てん注入へ切替えを実施する．その後，余熱除去ポンプ入口弁（ツインパワー弁）を閉止することで漏えいは停止する [(9)]．

4.　解析結果

作成したMAAPにおけるISLOCAのモデルを用いて，事象進展解析を実施した．プラント挙動を示す代表的なパラメータとして，１次冷却材圧力，１次冷却材温度及び１次系注入流量の時刻歴をそれぞれ図５～図７に示す．青線が本解析結果であり，赤線が有効性評価の結果を示している．

作成したモデルの動作確認の結果，事象発生後約１時間以降は１次冷却材圧力及び１次冷却材温度は有効性評価より高くなる傾向となったが，プラント挙動はおおむね再現することができた．余熱除去冷却器出口逃がし弁及び余熱除去ポンプ入口逃がし弁が吹き止まり圧力に到達する時間を比較すると，有効性評価では約７分と約15分であり，本解析ではいずれも約15分であった．但し，図５及び図６に示されるような余熱除去ポンプ入口逃がし弁の開閉に伴う圧力・温度の変動等，本解析では再現することができない事象もあった．ちなみに，１次系注入

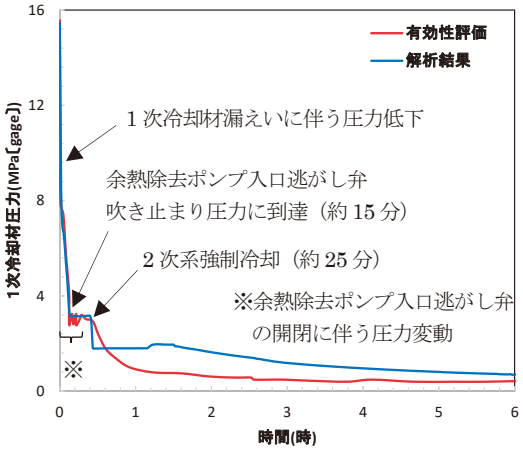


図５　１次冷却材圧力の時刻歴

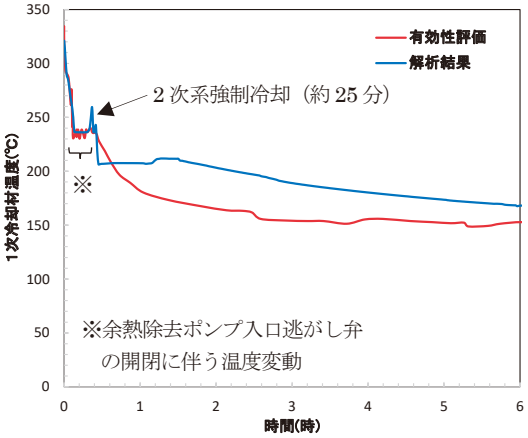


図６　１次冷却材温度の時刻歴

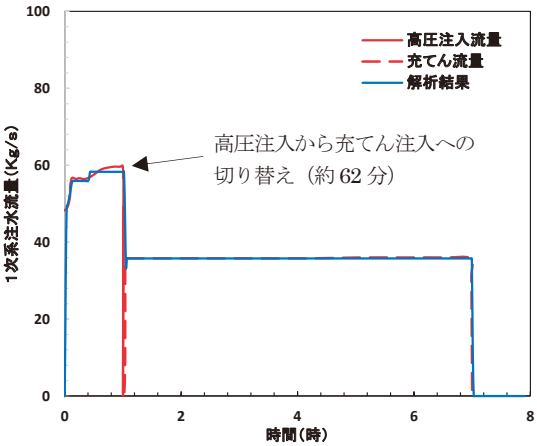


図７　１次系注入流量の時刻歴

流量は図７に示すように，高圧注入から充てん注入への切り替えも再現されている．

5. まとめ

当研究所ではこれまで発電所緊急安全対策，シビアアクシデント対策他として導入された設備のモデル化を行ってきた．本研究では多様な事故シナリオに迅速に対応するため，安全性向上評価に記載されている起因事象をもとに，事前にモデル化しておくことが望ましい起因事象の検討を行った．その結果，ATWS（運転時の異常な過渡変化時において原子炉緊急停止（原子炉スクラム）ができない事象）とISLOCA（インターフェイスシステムLOCA）を抽出し，本研究では先ずISLOCAのモデル化を行った．

作成したモデルの動作確認の結果，事象発生後約１時間以降は１次冷却材圧力及び１次冷却材温度は有効性評価より高くなる傾向となったが，プラント挙動はおおむね再現することができた．但し，余熱除去ポンプ入口逃がし弁の開閉に伴う圧力・温度の変動等，本解析では再現することができない事象もあった．

今回抽出した２つの起因事象のうち，ISLOCAについてはモデル化することにより対応したが，残りのATWSについても万一の緊急時のための解析上の事前準備ができないか検討する予定である．

当研究所のMAAP解析基盤については，関西電力原子力防災訓練時のプラント事象進展シナリオ解析に活用するとともに，原子力災害時においては事象の推移を予測する事象進展解析に用いることとなる．本研究で組み込まれたモデルについては，今後も解析結果を踏まえて様々な知見を蓄積するとともに，新たな設備が導入された場合には反映を行い，更なるMAAP解析基盤の充実を図る予定である．

謝辞

本研究にあたり，関西電力（株）河瀬宇宙氏には資料収集及び開示にご協力いただいた．ここに厚く感謝します．

文献

(1) Electric Power Research Institute, MAAP4 Users Manual.
(2) 川崎郁夫，高木俊弥，尾上彰，池田浩之，平成30年度 関西電力美浜発電所原子力防災訓練のプラント事象進展シナリオ解析，日本原子力学会2019年秋の大会，(2019)．
(3) 楠木貴世志，高木俊弥，中村晶，佐野直樹，MAAPにおける福島第一原子力発電所事故を踏まえた発電所安全対策設備のモデル化，INSS JOURNAL Vol. 27（2020）．
(4) 楠木貴世志，高木俊弥，中村晶，佐野直樹，MAAPにおける1F事故を踏まえた発電所安全対策設備のモデル化（その１），原子力学会2020年春の年会（2020）．
(5) 楠木貴世志，高木俊弥，中村晶，佐野直樹，MAAPにおける1F事故を踏まえた発電所安全対策設備のモデル化（その２），原子力学会2020年秋の年会（2020）．
(6) 吉田至孝，山本泰功，楠木貴世志，川崎郁夫，柳千裕，木下郁男，岩崎良人，原子力災害時事象進展予測技術の開発 －これまでの開発状況と今後の課題－，INSS JOURNAL Vol. 21（2014）．
(7) 関西電力株式会社，高浜発電所３号機　第１回安全性向上評価届出，https://www.kepco.co.jp/energy_supply/energy/nuclear_power/info/review/takahama3_01.html
(8) 関西電力株式会社，高浜発電所４号機　第１回安全性向上評価届出，https://www.kepco.co.jp/energy_supply/energy/nuclear_power/info/review/takahama4_01.html
(9) 関西電力株式会社，高浜３号炉及び４号炉 重大事故等対策の有効性評価，https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11517338/www2.nsr.go.jp/data/000148110.pdf

シビアアクシデント演習ツールの改良

Improvement of the severe accident practice tool

川崎　郁夫（Ikuo Kawasaki）*1　　高木　俊弥（Toshiya Takaki）*1
山本　治宗（Yoshinori Yamamoto）*2　　池田　浩之（Hiroyuki Ikeda）*2

要約　東京電力福島第一原子力発電所事故の教訓を踏まえて開発した，シビアアクシデント（SA）時の発電所の原子力緊急対策本部対応を疑似体験できるSA演習ツールにおいて，緊急時活動レベル（EAL）判断基準の見直し等を反映して改良を行った．主な改良点は，EAL判断基準の見直し等を踏まえた演習シナリオの新規作成，SA演習ツールのスキップ機能追加等である．改良したSA演習ツールをSA研修に用いた結果，EAL判断基準の変更点について研修受講者の理解を深めることができたことを確認した．

キーワード　シビアアクシデント，演習ツール，緊急時活動レベル，警戒事態，施設敷地緊急事態，全面緊急事態，原子力災害対策特別措置法

Abstract　We developed the severe accident (SA) practice tool based on lessons learned in the accident at the Tokyo Electric Power Company Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. Reflecting the review of EAL criteria, we utilized the developed SA practice tool. Major improvements were the creation of new exercise scenarios based on the review of EAL judgment criteria and the addition of the skip function of the SA practice tool. As a result of using the improved SA practice tool for SA training, we confirmed that trainees were able to deepen their understanding about the changes in the EAL criteria.

Keywords　severe accident, practice tool, Emergency action level, Alert, Site Area Emergency, General Emergency, Act on Special Measures Concerning Nuclear Emergency Preparedness

1.　はじめに

東京電力福島第一原子力発電所の事故の安全対策のうち，「事故時の判断能力の向上(対策 12)」[(1)]において，シビアアクシデント(以下，SA という)教育の更なる充実が求められている．

また，2013 年度から原子力災害対策特別措置法（以下，原災法という）[(2)]第 6 条の 2 第 1 項の「原子力災害対策指針」[(3)]において，原子力災害事前対策として緊急事態区分及び緊急時活動レベル(Emergency action level:以下，EAL という)が定められた．緊急事態区分の設定は，レベル 1「警戒事態(Alert:以下，AL という)」，レベル 2「施設敷地緊急事態(Site Area Emergency:以下，SE という)」，レベル 3「全面緊急事態(General Emergency:以下，GE という)」の 3 段階とされている．AL は 2013 年度に新規追加され，SE は従来の原災法第 10 条，GE は従来の原災法第 15 条，25 条に該当する．原子力発電所において事故が発生した場合は，発電所の原子力緊急対策本部の構成員（以下，本部構成員という）がそれぞれの事象判断（EAL 判断）を迅速かつ的確に実施して，関係各所に通報連絡を実施しなければならない．

これらを踏まえて，本部構成員が SA 発生時に適切な対応ができるようになることを目的として，SA 理解のための効果的教育・訓練ツールの検討を行い，本部構成員自らがプラント構成および応答，EAL 判断基準等を知識として習得し，SA 時の原子力緊急対策本部対応を模擬体験できるSA演習ツールを開発した[(4)]．

SA 演習ツールの訓練シナリオ用データは 2 種類あり，過去の防災訓練シナリオ解析[(5)(6)(7)]で実施した訓練データを加工して作成したものと，研修用として EAL の見直し内容を理解させるために作成したものがある．

関西電力㈱の原子力防災研修（シビアアクシデント EAL 判断対応演習）において，この SA 演習ツールを活用し有効性を確認するとともに，研修実施後，演習ツールに関する問題点，講師・受講者からの要望に対する改善策を検討し，それらを踏まえて SA 演習ツー

＊1（株）原子力安全システム研究所 技術システム研究所
＊2　関西電力（株）

ルの改良を実施してきた．これまでの主な改良点は，EAL 説明資料表示等の演習ツールの機能追加，EAL 判断基準の変更点を含む演習シナリオの作成，演習シナリオ時間の延長，事象進展の早送り機能の強化等である[8][9]．本報告は，前回報告[9]以降の SA 演習ツールの改良について報告する．

2. SA演習ツールの改良点

2.1 演習シナリオの新規作成

関西電力の原子力防災研修（シビアアクシデント EAL 判断対応演習）は毎年実施されており，本研修の受講対象者は 3 年に 1 回受講することとなっている．2017 年度に作成した研修用演習シナリオを用いた研修は 2019 年度で一巡したので，2020 年度は新規の研修用演習シナリオを作成する必要があった．

また，2019 年度に EAL の判断基準が一部見直しされた[10]．主なものとして，「原子炉停止機能の異常」，「原子炉冷却機能の異常」，「電源供給機能の異常」，「停止中の原子炉に関する異常」，「使用済燃料貯蔵槽に関する異常」，「原子炉制御室等に関する異常」等の判断基準の見直しがされた．

2020 年度の演習シナリオの新規作成にあたり，判断基準の見直しがされた EAL のシナリオを選択することとし，「原子炉停止機能の異常」，「使用済燃料貯蔵槽に関する異常」の 2 ケースの演習シナリオを新たに作成した．

「原子炉停止機能の異常」では，従来は原子炉トリップ信号の片系だけの動作が一定時間経過した場合に AL を判断することになっており，原子炉停止が発生した場合に原子炉停止機能喪失（ATWS）となれば，制御棒の挿入により原子炉を停止することができないため AL よりも先に GE を判断する必要がある．そのため，中央制御室から制御棒挿入操作が失敗した場合を AL 判断に加えるとともに，全ての停止操作失敗（AL の原子炉停止操作に加え，現場での制御棒挿入操作失敗を含む）を GE の判断とするよう EAL 判断基準が見直された．

また，原子炉緊急停止失敗時に，従来は原子炉の臨界を抑制する SA 設備（ATWS 緩和設備やほう酸注入設備）が考慮されていなかったため，SA 設備による原子炉停止を GE 判断に加えるよう EAL 判断基準が見直された．

表 1　作成した原子炉停止機能喪失(ATWS)事象の演習シナリオ

主要なイベント
・地震発生 ・外部電源喪失 ・原子炉トリップ失敗（原子炉停止機能喪失） AL11（原子炉停止機能の異常または異常のおそれ） ・A 非常用ディーゼル発電機自動起動 ・B 非常用ディーゼル発電機自動起動失敗 →15 分後 AL25（非常用交流高圧母線喪失または喪失のおそれ） ・A 充てん／高圧注入ポンプ起動 ・A 電動補助給水ポンプ起動 ・タービン動補助給水ポンプ起動
・格納容器内主蒸気管破断＆非常用炉心冷却装置作動（安全注入信号） ・A 余熱除去ポンプ起動 ・A 電動補助給水ポンプ停止 ・タービン動補助給水ポンプ停止 AL24（蒸気発生器給水機能喪失のおそれ） SE24（蒸気発生器給水機能の喪失）
・A 充てん／高圧注入ポンプ停止
・蒸気発生器ドライアウト（蒸気発生器広域水位 10%未満） GE24（蒸気発生器給水機能喪失後の非常用炉心冷却装置注水不能）
・炉心出口温度 350℃超過 AL42（単一障壁の喪失または喪失のおそれ）
・炉心出口温度 650℃超過
・被覆管破損
・炉心損傷検知 GE28（炉心損傷の検出）
・格納容器スプレイ作動設定値到達
・格納容器スプレイ作動設定値到達（2 回目） →10 分後 SE41（格納容器健全性喪失のおそれ）
・格納容器最高使用圧力到達 GE41（格納容器圧力の異常上昇） GE42（2 つの障壁の喪失および 1 つの障壁の喪失または喪失のおそれ）

表 2　作成した使用済燃料貯蔵槽に関する異常事象の演習シナリオ

主要なイベント
・地震発生 ・原子炉トリップ ・外部電源喪失 ・原子炉冷却材漏えい発生（大口径） ・非常用炉心冷却装置作動（安全注入信号） AL21（原子炉冷却材の漏えい） AL42（単一障壁の喪失または喪失のおそれ） ・A,B 非常用ディーゼル発電機自動起動 ・A,B 充てん／高圧注入ポンプ起動
・格納容器スプレイ作動設定値到達 ・A,B 格納容器スプレイポンプ起動失敗
・使用済燃料ピット水位低下確認
・使用済燃料ピット水位出口配管下端確認 AL30（使用済燃料貯蔵槽の冷却機能喪失のおそれ） ・A 非常用ディーゼル発電機停止 →15 分後 AL25（非常用交流高圧母線喪失または喪失のおそれ） ・B 余熱除去ポンプ停止 SE21（原子炉冷却材漏えい時における非常用炉心冷却装置による一部注水不能）
・格納容器スプレイ作動設定値到達 →10 分後 SE41（格納容器健全性喪失のおそれ）
・再循環切替失敗 GE21（原子炉冷却材漏えい時における非常用炉心冷却装置による注水不能）
・炉心出口温度 350℃超過 SE42（2 つの障壁の喪失または喪失のおそれ）
・炉心出口温度 650℃超過
・被覆管破損
・炉心損傷検知 GE28（炉心損傷の検出）
・格納容器最高使用圧力到達 GE41（格納容器圧力の異常上昇）

「使用済燃料貯蔵槽に関する異常」では，従来は使用済燃料ピット水位低下時，注水準備にかかる時間（AL, SE は 1 時間）は EAL を判断しないこととしているため，AL よりも先に SE，GE を宣言しなければならない場合がある．そのため，原子力事業者にて「一定の水位」（AL：使用済燃料ピット出口配管下端等）が定義され，「一定の水位」となれば EAL を判断（準備時間の概念を削除）し，水位低下時に段階的な判断となるよう設定するよう見直された．

今回の EAL 見直し内容（判断基準）を演習に反映できるよう，シナリオ上機器が故障することになるタイミング等を検討し，原子炉停止機能喪失(ATWS)事象のシナリオ（表 1）および使用済燃料貯蔵槽に関する異常事象のシナリオ（表 2）を作成した．なお，シナリオ中の赤字は今回採用した EAL 判断基準の見直し事象，青字は判断すべき EAL である．

演習シナリオは美浜，高浜，大飯発電所での研修で共通とし，1 つの演習シナリオで複数の EAL 判断が要求されるように、様々な故障が重なるように工夫している．この演習シナリオを基にして発電所ごとに SA 解析コード MAAP による解析を実施した．解析時間は事象発生から格納容器最高使用圧力到達までとした．SA 演習ツールでは発電所ごとにパラメータを表示させるため，3 発電所×2 ケース，合計 6 ケースの安全重要パラメータ表示システム(SPDS)の演習用データを作成した．

演習実施後の講師による解説資料については，今回の EAL 見直し内容を踏まえて，演習の事象の概要，必要とされた EAL の判断，その解説等を作成した．解説資料の一例として，美浜 3 号機原子炉停止機能喪失(ATWS)事象のものを図 1～4 に示す．



図 1　演習内容の解説（1/4）

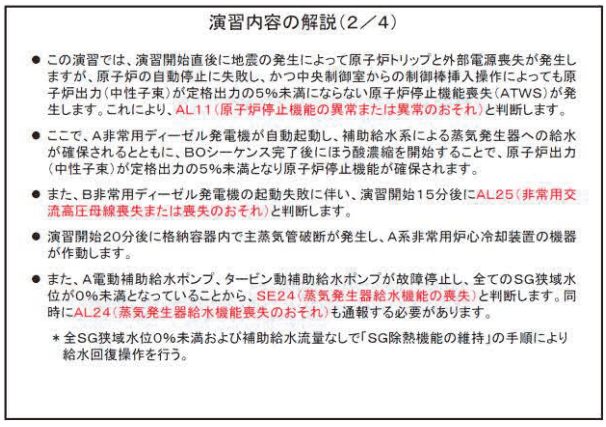


図 2　演習内容の解説（2/4）

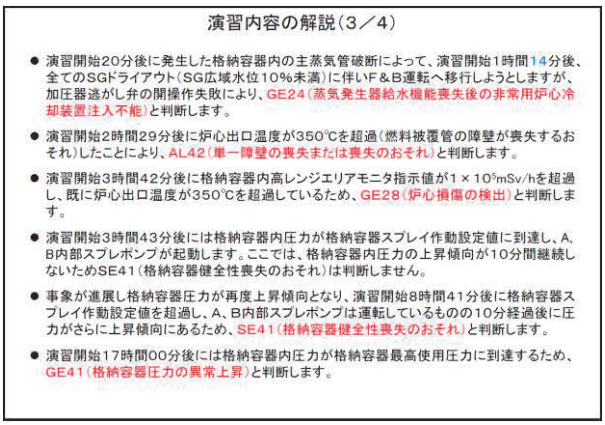


図 3　演習内容の解説（3/4）

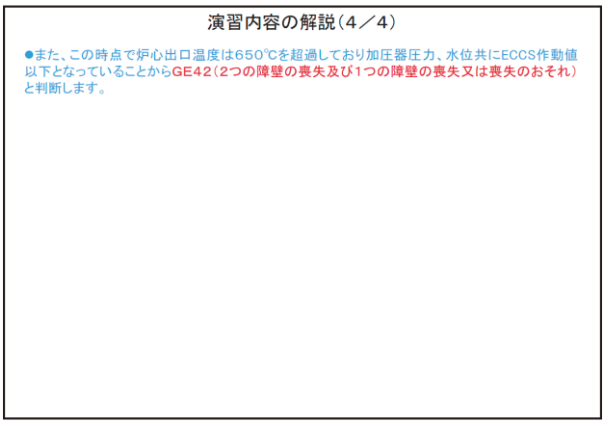


図 4　演習内容の解説（4/4）

2.2　SA演習ツールの機能追加

研修実施後，SA 演習ツールに関する問題点，講師・受講者からの要望に対する改善策を検討し，それらを踏まえて以下の SA 演習ツールの改良を実施した．

2.2.1　スキップ機能追加

長時間のシナリオを研修時間内で効率よく学習するため，事象進展の早送り機能の強化として，事象速度を最大 64 倍速まで変更可能としていた[9]．しかしながら，演習中に事象速度を早くし過ぎると，事象速度の切り替え操作が間に合わず，確認すべき時間を過ぎてしまうことがあった．SA 演習ツールには事象の後戻り機能を設けていなかったため，この場合最初から事象進展をやり直す必要があった．そのため，指定した時間まで早送り，早戻しできるようスキップ機能を追加した．

スキップ機能は，事象進展を確認する「訓練プラントステータスサマリ画面」,「訓練 AM サマリ画面」,「訓練プラントステータス画面」，「訓練環境監視データ（狭域）画面」に追加し，指定可能な時間は演習用 SPDS データの時間範囲内としており，過去の時間へのスキップも可能とすることで，効率的に演習を進められるようになった．

2.2.2　原子炉下部キャビティ注水ポンプの運転表示追加

美浜 3 号機，高浜 1，2 号機では事故時のアクシデントマネジメント策として，本来は SA 時に原子炉下部キャビティへの水張りのために設置された原子炉下部キャビティ注水ポンプを使用した炉心注入，または格納容器スプレイを実施することがある．そのため，美浜 3 号機，高浜 1，2 号機の「訓練 AM サマリ画面」に，原子炉下部キャビティ注水ポンプの運転表示を追加した．

2.2.3　補助給水系ミニマムフロー運転中表示追加

美浜 3 号機，高浜 1～4 号機，大飯 3,4 号機の訓練 AM サマリ画面において，補助給水系がミニマムフロー運転中の場合，流量は $0m^3/h$ と表示される．電動およびタービン動補助給水ポンプが運転中であるのに流量が $0m^3/h$ のため，演習中に計器の誤りと誤解される恐れがあった．そのため，美浜 3 号機，高浜 1～4 号機，大飯 3,4 号機の「訓練 AM サマリ画面」に，電動およびタービン動補助給水ポンプのミニマムフロー運転中が分かる表示を追加した．なお，本表示はミニマムフロー運転をしている時のみ表示させることとした．

2.2.4　トレンドグラフの値表示機能追加

トレンドグラフで表示した時，デジタル値が読み取れなかったため，格納容器圧力のような縦軸のスパンが大きいパラメータについては EAL 判断基準に達したかどうかの判断がしづらかった．そのため，図 5 のようにトレンドグラフで表示されている線にカーソルを合わせた時に，縦軸のパラメータの値と横軸の時間を表示できるようにした．

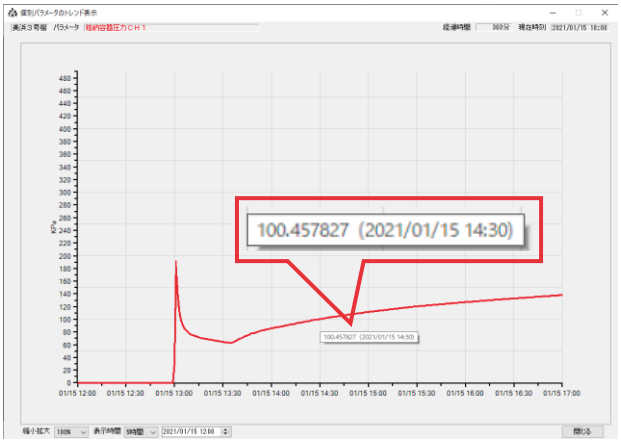


図 5　トレンドグラフの値表示機能追加

3.　SA 演習ツールを活用した研修の実施結果と今後の課題

今回改良した SA 演習ツールを活用し，美浜，高浜，大飯の各発電所において，2020 年 9 月に SA 研修を実施した．その結果，EAL 判断基準の変更点について研修受講者の理解を深めることができたことを確認した．

今後の課題として，種々の EAL を網羅するよう演習シナリオの充実を図っていく必要がある．また，SA 研修の実施結果および受講者からの改善要望を踏まえた演習ツールの改善を継続して実施することにより，研修の効率化を図っていく必要がある．



図 6　研修風景

4.　結論

東京電力福島第一原子力発電所事故の教訓を踏まえて開発した，SA 時の事象進展を疑似体験できる SA 演習ツールについて，EAL 判断基準の見直し等を反映して改良を行った．

主な改良点は，EAL 判断基準の見直し等を踏まえた演習シナリオの新規作成，SA 演習ツールのスキップ機能追加等である．本演習ツールを SA 研修に用いた結果，EAL 判断基準の変更点について研修受講者の理解を深めることができたことを確認した．

今後も研修後の改善要望を踏まえた SA 演習ツール改善を継続し，SA 演習ツールが更に効果的なものになるように努める．

引用文献

(1) 経済産業省ホームページ，“東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故の技術的知見について”，https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/3491725/www.nisa.meti.go.jp/shingikai/800/28/008/8-2-1.pdf

(2) 内閣府ホームページ，“原子力災害対策特別措置法”，http://www.bousai.go.jp/shiryou/houritsu/002-1.html

(3) 原子力規制委員会，“原子力災害対策指針（令和2年10月28日一部改正）”，(2020)．

(4) 川崎郁夫，吉田至孝，岩崎良人“シビアアクシデント演習ツールの開発と適用”，INSS Journal，Vol.21，PP.196 -204 (2014)．

(5) 川崎郁夫，吉田至孝，山本泰功，岩城隆則，“平成26年度福井県原子力防災訓練のプラント事象進展シナリオ解析”，INSS Journal，Vol.22，PP.169-176 (2015)．

(6) 川崎郁夫，中村晶，山本泰功，高橋俊佑，“平成28年度福井県原子力防災訓練のプラント事象進展シナリオ解析”，INSS Journal，Vol.24，PP.167-174 (2017)．

(7) 川崎郁夫，高木俊哉，尾上彰，池田浩之，“平成30年度 関西電力美浜発電所原子力防災訓練のプラント事象進展シナリオ解析”，INSS Journal，Vol.26，PP.179-186 (2019)．

(8) 川崎郁夫，高橋俊佑“シビアアクシデント演習ツールの改良”，INSS Journal，Vol.23，PP.135 -144 (2016)．

(9) 川崎郁夫，中村晶，高橋俊佑“シビアアクシデント演習ツールの改良”，INSS Journal，Vol.25，PP.137 -142 (2018)．

(10) 原子力規制委員会，“原子力災害対策指針の緊急事態区分を判断する基準等の解説”，(2020)．

ルール逸脱防止のための職場討議用事例集の作成

Preparation of Case Studies for Discussion to Prevent Rule Deviations

彦野　賢（Masaru Hikono）*1　　作田　博（Hiroshi Sakuda）*1

要約　2000年代初頭に技術者倫理に対する議論が活発化して以降，その扱う範囲は，法令遵守問題，企業の社会的責任（CSR）などへの関心の高まりとともにその扱う範囲は広がってきている．本報では，その後電力業界で注目されることとなったルール逸脱防止のための対策の一つとして実施された職場討議用の事例集作成について述べる．2007年度から2020年度までに47事例を作成した．さらに，討議のための視点を整理し事例との対応を示した．職場のリスクマネジメントの一助となれば幸いである．

キーワード　法令遵守，技術者倫理，事例討議

Abstract　Since the beginning of the 2000's, discussions on the ethics of engineers have become active, and the scope of the issues has expanded to include legal compliance issues and corporate social responsibility（CSR）. In this paper, we report on the preparation of case studies for workplace discussion as one of the measures to prevent deviation from the rules, which has attracted attention in the electric power industry. 47 case studies were prepared from FY2007 to FY2020. In addition, the perspectives for discussion were organized and the correspondence with the cases was shown. We hope that this report will be of help to risk management in the workplace.

Keywords　Compliance, Engineer Ethics, Case Study

1. はじめに

2000年代初頭に日本でも技術者倫理に関心が高まってきた（藤本・杉原，2010）．原子力学会でも2001年に倫理規程を制定していたが，原子力職場に活用できる体系的な教育テキスト（事例集）はみられなかった．そこで原子力安全システム研究所（2003）は，技術者倫理をテーマとし原子力職場に従事する技術者が実際に直面する倫理上の問題に対する解決策を職場で討議するための解説書（事例集）を出版した．技術者倫理に関する体系的な教育を受けていない職場では，構成員がばらばらな立場，価値観，基準によって意思決定がなされるが，合理性と安全性とのジレンマを伴う判断課題を課すことにより組織としての一定の判断基準が構成員間で共有されるものと考えた．

その一方，2006年に，国内電力会社の発電設備において法令や業務マニュアルの遵守が徹底されていない，いわゆる，ルール逸脱とみられる事例が相次いで報告された（例えば関西電力，2006）．この事例の再発防止策として各社は，組織風土の改革，QMS（品質マネジメントシステム）の浸透，そして教育訓練の充実を重点項目として取り組み，また，原子力学会倫理委員会はこれらの組織的再発防止策とともに，現場の技術者一人一人の知識（法令，手続き）と意識（技術者倫理，コンプライアンスなど）の向上と浸透が強く望まれると提言した（鳥飼，2010）．これらの問題提起から徐々に技術者倫理問題は企業の社会的責任（CSR）など，リスクマネジメントも含んだ広範囲の組織の問題として，特に科学技術産業を中心に注目されるようになった．

組織ぐるみの不正（バイオレーション）は論外としても，たったひとりの社員が不祥事を起こしたことを発端として社会的に大きなニュースとして扱われるなど，企業のサステナビリティ（事業持続可能性）にも影響する経営的な課題として捉える企業も

＊1　（株）原子力安全システム研究所　社会システム研究所

今日では少なくない．技術はますます高度化・細分化され，専門技術の判断はその現場の専門家でないとできなくなり，現場はそれぞれの専門家が的確な判断をすることを前提に成り立っているといえる（中村，2012）．技術者倫理に代表されるこのような感性分析力，判断力を養う方法としては倫理に関する理解を深めることと並行し，実際にジレンマを疑似体験しながら少しでも良い対応策を普段から接する職場の仲間たちと議論しながら探求することが望ましい教育方法であるとされる（原子力安全システム研究所，2003）．

近年では，レジリエンスエンジニアリングの観点からの議論もなされている（大場，2021）．また，重森（2021）は従来の安全活動を管理的安全（完璧な手順をつくりそれを管理，遵守することで作り上げる安全）と呼び，ジレンマ状況の中でのさらなる安全活動としてSafety-Ⅱの概念とは異なる創造的安全（想定外の事象や効率的な要求に対し都度創造的な対応を採ることで作り上げる安全）という新たな安全概念を主張している．この創造的な対応力を高めるためには，人間関係スキルや認知的スキルなどのノンテクニカルスキル（リーダーシップ，コミュニケーション，意思決定，チームワーク，ストレスマネジメント）を発揮しないと実現しないとし，ジレンマ問題発生とその対処に必要なスキルを高める手法としても，職場（課，グループ単位）による事例討議が有効であろうと考えた．本報では2007年度以降に取り組んできた，ルール逸脱防止のための討議用事例集作成について報告する．

2. 討議の前提条件の検討

2.1 討議の方法

技術者の倫理問題を扱う教育方法のひとつとして行われている職場討議を，法令遵守（コンプライアンス）も含めた広範なジレンマ問題を解決するスキル向上方法として用いることが望ましい．ジレンマ問題を解決するためには，知識だけでなく自分がどのような手順で考えるかをサポートする知識が必要である．定期的にケーススタディを行うことにより，法令遵守に関する感性を磨き，職場の上司や同僚と素直に議論し互いの考え方を理解し，倫理上の問題が発生し，ジレンマに直面した際に，少しでもより優れた対応策を粘り強く探求していくことができる職場風土を作り出すことができる．職員を対象とした職場討議の手法としては，それぞれの職場で企画・実施できる方法（各職場が段取り，短時間に，繰り返し継続的に，自らの職場に密着したテーマについて事例討議を行う）を採用した．

2.2 討議の視点（チェックポイント）

職場で事例を討議するにあたり，個々の職員がどのように受け止め，判断し，行動すべきかについてある程度の指針を示すことが望ましい．実際に倫理上の問題が発生した際に，その当事者は初めての経験に当惑し不安にかられ，後から考えてみると信じられない稚拙な選択をしてしまうことが見受けられるものである．よりよい選択をするためには，討議の視点（チェックポイント）を整備しておくことが望ましい．検討を開始した当初は，技術者倫理としての知見しか有していなかったことから，法令遵守を含めた新たなチェックポイントを作成することとした．技術者倫理としての従来の視点を基礎とし，代表的な企業がホームページで公表している法令遵守マニュアルを参考に，2008年度におおよその共通項を整理した．その後，細部修正を経て，現在は以下の５分類（10項目）に至っている．

①基本をおろそかにしていませんか
- 業務に慣れると，つい初心を忘れがちになります．
- わかりきったことでも相互確認する努力を怠らないようにしましょう．

②思い込みで動いていませんか
- 勘や経験のみに頼って動いていると，本来見えるはずのものが見えなくなります．

③責任感を持って仕事をしていますか
- 「だれかがやってくれるはず」は禁物です．
- 任された以上は自分の仕事と心得ましょう．
- 常に緊張感を持ちましょう．

④情報の伝達や公表を正しく行っていますか
- 自分の仕事は社会につながっていると認識しましょう．
- 隠蔽は禁物です．

⑤法令を遵守していますか
- 自分の仕事に関係する法律や規則は正しく知っておきましょう．
- 他者や組織の法令違反に気づいたときは，指摘

する勇気を持ちましょう.

3. 職場討議用の事例作成

討議により参加者が自ら気付いたと実感してもらうためには，様々なテーマが選択でき，繰り返し討議が行えるように多くの事例の提供が必要である．本検討では，当該の原子力職場で発生した実事例に加え，それ以外の職場（他社の事例，原子力以外の職場の事例）で発生した事例であっても広く参考にした．対象事例については公開されている情報の範囲内で，その事例の教訓となるポイントを整理したうえで，実際の事例とは異なる場面に置き換えて作成しており，原子力職場だけでなく幅広い職場で応用可能な事例とした.

具体的には，原子力職場での事例を中心に，公開されている情報（原子力安全推進協会運営のニューシア）の範囲内で調査し，前述の討議の視点（チェックポイント）と照合し，より適切な事例の選択を行った．事例の作成に当たっては，事象の背景や心理要因等を深堀し，不適切な行為が行われた背後要因を考えさせることができるような内容を含むように考慮した.

2007年度から2020年度までに作成した事例数は，合計で47事例となった．事例の一覧と討議の視点との対応を表1に示す．これにより，職場で討議したいポイントに沿った事例を選択しやすくした.

4. まとめ

本報は，2007年度から2020年度までに実施してきた，現場技術者向けの倫理およびルール逸脱防止のための意識の向上と浸透に向けた職場討議の考え方と討議用事例の作成について述べた.

東京電力福島第一原子力発電所事故以降，様々な対策によって，原子力発電所の安全性は一層高まったとはいえるだろう．しかし，そこに日々直接携わる技術者（個人と集団）が，まずは法令を守ったうえで業務に誠実に取り組みながら，リスクを敏感に感じとり，思い込みで判断せず，躊躇せずに職場，ひいては社会に伝達できるか否かに安全が帰着することには変わりない．職場をとりまく環境は日々揺らいでいるからこそ事例による疑似体験は重要であり，私であったらどのように行動するか，どのように判断するかを定期的に皆で真摯に議論することが肝要である．技術者はそのような社会からの期待に最大限応えることで初めて技術を扱うことが許されていることを改めて肝に銘じたい. 技術である以上，リスクは必ず存在することから，一つ一つの類似事故の教訓を事例としそれを未然防止につなげるリスクマネジメントのひとつとして一助となれば幸いである.

引用文献

藤本 篤・杉原 桂太（2010）．工学倫理の教科書の変遷　技術倫理研究，7, 23-71.

原子力安全システム研究所（2003）．技術者のモラル ――モラルに対する感性を磨くために――　丸善プラネット.

関西電力株式会社（2006）．当社発電設備にかかる点検報告書の提出について.
Retrieved from https://www.kepco.co.jp/corporate/pr/2007/0330-1j.html
（2021年7月19日）.

中村 昌允（2012）．技術者倫理とリスクマネジメント　オーム社.

日本原子力安全推進協会ニューシア.
Retrieved from http://www.nucia.jp/index.html（2021年7月19日）.

大場 恭子・吉澤 厚文・北村 正晴（2021）．レジリエンスエンジニアリングの考え方を活用した技術者倫理教育の改善　工学教育，69(3)，3-10.

重森 雅嘉（2021）．ヒューマンエラー防止の心理学　日科技連出版社.

鳥飼 誠之・小澤 通裕・鐘ヶ江 直道・谷 雅明・班目 春樹・宮越 直樹（2010）．原子力発電事業者の不正・不適切事例およびその再発防止策に関する分析評価　日本原子力学会和文論文誌，9(4)，347-359.

表１　事例一覧および視点との対応

No.	タイトル	討議の視点（チェックポイント）									
		①-1	①-2	②	③-1	③-2	③-3	④-1	④-2	⑤-1	⑤-2
1	点検の死角							○		○	○
2	ひび割れたボックスカルバート					○			○		○
3	ふぞろいな品質検査結果			○			○	○			
4	排水管の亀裂		○	○				○			
5	信頼できる仕入れ先							○	○	○	
6	３つのデータ	○							○		○
7	多すぎる従業員数	○			○				○		
8	気難し屋の工作機械			○		○			○		
9	点滴液の取り違え			○	○	○		○			
10	耐水パネルの厚み						○	○	○		
11	矜持（きょうじ）の問題	○		○				○	○		
12	だれの責任？		○		○	○	○				
13	重要操作への立ち会い	○	○		○	○	○				
14	防災設備の点検	○		○			○				
15	意欲的な新所長							○	○	○	○
16	使える人材					○		○		○	
17	疑わしい言い訳								○	○	○
18	新工場の立ち上げ				○		○			○	
19	暗黙の了解	○	○	○			○	○		○	
20	取り違えられたデータ	○	○	○			○				
21	信頼の置ける構造計算ソフト	○	○	○	○		○			○	○
22	続行すべきか停止すべきか		○		○	○	○	○	○	○	○
23	危険な安全帯	○	○	○			○			○	
24	新支社長の孤軍奮闘									○	
25	失敗を糧に				○					○	
26	頼りになるベテラン社員	○	○	○			○				
27	たとえほんのわずかでも						○	○	○	○	○
28	改善への遠い道のり			○				○	○	○	○
29	主語を言わない日本人	○	○				○				
30	やるべきか、やらないべきか					○		○	○	○	○
31	いつもの作業で		○				○			○	
32	節穴	○		○	○						
33	ちょっとのつもりが	○					○	○		○	
34	マニュアル神話					○		○	○		○
35	外壁崩落		○	○			○				
36	清掃員のプライド	○	○		○						
37	たぶん・・・だろう		○	○	○			○		○	○
38	モニターではわからないこと		○	○		○				○	
39	そんなことがおこるとは・・思わなかった		○	○			○	○		○	
40	教えるだけだから、危なくない？	○		○			○				
41	気をとられて痛い目に	○	○	○			○			○	
42	チームリーダーが代わった後に		○	○	○	○		○		○	
43	おかしな検査データを見つけた新工場長				○		○	○	○	○	○
44	光ケーブル切断で大損失！		○	○	○		○			○	
45	架空の検査データの本当の問題		○				○	○	○	○	○
46	環境条件の確認不足で建てた実験小屋		○	○							○
47	勝手な計画変更で起こった一酸化炭素中毒	○			○		○			○	
合計		17	21	22	15	11	24	21	16	26	15

潜在リスク気付き支援研修における発想の転換を促すための工夫の検討

An Examination of Measures to Promote a Change in Mindset for Training to Support Potential Risk Awareness

作田　博（Hiroshi Sakuda）*1　　北村　正晴（Masaharu Kitamura）*2

要約　潜在リスク気付き支援研修を試行したときに，研修の主催者から研修対象者に対して発想の転換を促すための工夫があった方が良いとの意見があった．この背景には，研修の最初の質問として，「あなたが担当している業務において，起こってほしくない事象例を挙げてください.」と研修対象者に単に投げかけ，回答することを求めていることにある．このときに，研修対象者は新たな潜在リスクに気付くことよりも，既知のリスクにおいて十分な対策がとられていない，いわゆる残留リスクに意識を向けやすくなることを懸念した意見と考えられる．この意見への対応として，研修対象者が潜在リスクをより広くとらえることができるように，発想の転換を促すための研修プログラムにおける工夫・方策について検討したので報告する．

キーワード　潜在リスク，気付き，研修，発想の転換

Abstract　We considered the training organizer's opinion that it is better to devise ways to encourage trainees to change their mindset when trying training to support potential risk awareness. Behind this thinking were the replies training participants gave to a questionnaire request: "Please give an example of an event that you do not want to happen in the work you are in charge of." From the answers given, we considered that the trainees were more concerned that they would be more likely to focus on the so-called residual risk, in which sufficient measures are not taken for the known risk, rather than in being aware of the new potential risk. In this paper, we examined ideas and measures to promote a change of mindset in training programs so that the potential risk can be understood more broadly for trainees.

Keywords　potential risk, awareness, training, change in mindset

1. はじめに

レジリエンス・エンジニアリングで提唱されている質問群RAG（Resilience Assessment Grid）（E.Hollnagelら，2014; E.Hollnagel, 2019）をもとに，原子力発電所の職員へのインタビューなどを行い，潜在リスクへの気付きを支援するための質問群を開発した（作田ら，2019）．その後，電力会社原子力部門の上位機関の職員を対象にした潜在リスク気付き支援研修を2019年度に試行し，その有用性と研修に対する自由意見を確認した（作田ら，2020）．自由意見の一つに「発想の視点の転換が必要．転換につながるような工夫があった方がよい.」との声が研修の主催者からあがっていた．この背景には，研修の最初の質問として，「あなたが担当している業務において，起こってほしくない事象例を挙げてください.」と研修対象者に単に投げかけ，回答することを求めていることにあると推測される．発想の支援をしないと，新たな潜在リスクに気付くことより，既知のリスクにおいて十分な対策がとられていない，いわゆる残留リスクに意識を向けやすくなること，その結果として，本研修が目的としている参加者の視野拡大や気づき能力向上が十分には進まないことを懸念しているものと考えられる．そこで本稿では，研修対象者が潜在リスクをより広くとらえることができるように，潜在リスクの発想の転換を促すための工夫・方策について検討したので報告する．

＊1　(株)原子力安全システム研究所　社会システム研究所
＊2　(株)テムス研究所

2. 発想の転換を促すための工夫の検討

2.1 背景となる認識

本研修では，「潜在リスクの気付き」に向けた活動が従来も，これからも，原子力安全上重要な意味を有するという考え方をとっている．その考え方の背景を以下のように整理した．

東京電力福島第一原子力発電所（1F）事故（2011.3.11）は，日本の「原子力と社会」の関係に最も影響を及ぼした事故であった．これらの事故からの教訓を考えると，そもそも原因事象について事前に想定していたのか否か，という課題がまず浮かび上がる．以下，2つの場合に分けて課題を考察する．

【ケース１】：想定がなされなかった場合

想定がなされなかったのはどうしてか，本当に予見不能であったのか，という問いについての答えが求められる．

【ケース２】：想定がなされていた場合

想定はなされていたのに，どうして効果的な対処策が実装されなかったのか，という問いについての回答の探究が必要になる．

このような探究を徹底することなしに，企業が「安全を最優先にします」，「安全に終わりはない」などと表明しても，実質的な成果は期待できない．

2.2 課題の考察

【ケース１】：想定がなされなかった場合

この状況設定に関しては，なぜ想定できなかったのか，その想定力不足の背景要因は何か，という観点からの分析が考察の要点になる．以下では，1F事故の事例について，想定が全くされていなかったという状況を前提として考察を進める．現実には，一部の人間は想定していたと考えられるが，組織としての想定はなかったという設定である．この場合には，以下のような推論ができると思われる．

国の地震調査研究推進本部から津波襲来自体は警告されていたので，津波事象に関しては想定はなされていた（これについては，次のケース２で論じる）．しかし警告はあったとしても，その警告が組織としてどこまで真剣に受け止められていたのであろうか．大津波襲来時には，標高の低い地盤に設置されている海水ポンプ系が，機能を喪失することまでは確実に想定できたはずである．その事態の延長線上にある全電源が喪失する事態の想定は全くなされなかったのであろうか．全電源喪失については，政府事故調は「東京電力は，複数号機が同時に損壊故障する事態を想定しておらず，非常用電源についても，非常用DGや電源盤の設置場所を多重化・多様化してその独立性を確保するなどの措置は講じられておらず，直流電源を喪失する事態への備えもなされていなかったこと．また，このような場合を想定した手順書の整備や社員教育もなされておらず，このような事態に対処するために必要な資機材の備蓄もなされていなかった」と言及している（政府事故調，2012）．全電源喪失が起きても30分以内に何らかの電源は復帰する，という安全解析の通例としてなされていた想定について，真剣に疑うことなく，結果として「全電源喪失の想定はなかった」のではないかという推測が有力視される．

波高10mを超える津波は想定しなくても，海水ポンプ系が低い場所に設置されている実態を踏まえて，高潮＋台風による高波の複合作用で，海水ポンプ系が障害を起こす懸念を感じた人はいなかったであろうか．国会事故調は「2006年には，福島第一原発の敷地高さを超える津波が来た場合に全電源喪失に至ること，土木学会評価を上回る津波が到来した場合，海水ポンプが機能喪失し，炉心損傷に至る危険があることは，保安院と東電の間で認識が共有されていた」と指摘しており（国会事故調，2012），2011年３月11日以前でも，1Fの設計について危惧を感じていた人はいたはずである．

2004年のインド洋津波によるインド・マドラス原子力発電所の被害についても情報は入っていた．2005年に同国で開催されたワークショップには，JNES，産業技術総合研究所，電力会社数社が参加したと報告されている（政府事故調，2012）．危惧を想定した人はいたと思われるが，その後の津波対策の検討状況を見るとその想定を我が事として実感した人は少なかったと推測される．

そこまで神経過敏になる必要はない，という認識が東京電力内部でも，規制の側でも支配的であったように推測される．その背景として，「これまでなんともなかったのだから，これからもまあ大丈夫だろう」という正常性バイアスが影響した可能性もある．

またそのような危険性を表に出して対策を論じることに対しては，「これまで地元に対して『安全です』と言い続けてきたのに，その実績と矛盾を起こしてしまう」とか，「これまで想定していなかった津波を想定するということは，反原子力運動家らによる各地の法廷闘争に悪影響を与える」などの反対もあった可能性がある．国会事故調は，「東電は，新たな知見に基づく規制が導入されると，既設炉の稼働率に深刻な影響が生ずるほか，安全性に関する過去の主張を維持できず，訴訟などで不利になるといった恐れを抱いており，それを回避したいという動機から，安全対策の規制化に強く反対し，電気事業連合会を介して規制当局に働きかけていた」と指摘している（国会事故調，2012）．また，民間事故調は，「原発反対運動に対抗するため，原災リスクを封じ込めようとしてきた．リスクを露わにするとそれを除去するまで原発の運転停止を求められることを彼らは恐れた.」と述べている（民間事故調，2012）．

これら「想定を表に出して論じること」への消極的姿勢が支配的であった結果として，一度は想定されかけた問題事象は想定外状態のままで推移したのではないかと推測される．

【ケース２】：想定がなされていた場合

この状況では，なぜ想定がなされたのに事前に対策はなされなかったのか，ということが主要な論点になる．以下のような推論ができると思われる．

21世紀初頭までは，福島県沿岸に巨大津波が襲来する可能性は明確には予見されておらず，その意味では想定外だったかも知れない．しかし，2002年に地震調査研究推進本部が公表した「長期評価」によれば，不確実性は大きいにしても巨大津波襲来の警告はなされたと言える．

このような事情から，想定自体は一部の社員には間違いなく知られていたはずである．このことはいわゆる東電刑事裁判の中でも明らかにされている．例えば，NHK記事“詳報　東電刑事裁判「原発事故の真相は」”（NHK記事，2019）によれば，検察審査会の起訴対象となった経営幹部は2008年２月の通称「御前会議」において，波高15.7メートルの大津波についての警告を受けていたことは確実と思われる．それゆえ，状況としては「想定はされていた」とすることが実態に沿っているであろう．

しかし，東京電力は慎重を期して土木学会へチェックを依頼した．そしてその結果を待っているうちに津波が来てしまった．むろん，不確実性が大きい津波現象の長期評価である以上，また対策をとるとすれば防潮堤などの建設費用は莫大となると想定されることから，慎重な態度に傾いたことは理解できる．

ここで「完璧な，徹底した」対応が重要なのではない．警告があった場合，災害は待ってはくれないことは自明である以上，何らかの対策はなされるべきであったと考える．そのような「小規模だがそれなりに実効性のある対策」さえも考えることをしないという姿勢は，原子力技術を担当する組織として疑問を持たざるを得ない．

一番簡単だが実効性のある対策の例は，中央制御室の近傍に，計装系を生かし続ける容量を持つ直流電源を配備することであろう．あるいは1Fの5,6号機においてなされていたように，地下室ではなく高い位置に非常用の電源を配備することも，防潮堤の建設などに比べればはるかに低いコストでの効果的対策であったと思量される．しかし周知のように，そのような事前措置はいずれも実施されることはなかった．

以上の考察からは，「想定外だったか否か」「想定可能か否か」という問いかけは裁判官の判断材料としては重要であろうが，安全工学的にはさほど重要性はないことがわかる．巨大津波に関する事前警告は間違いなく存在した．ただし，そのような事態の生起可能性（生起確率）は，電力会社側としての認識ではごく小さいものであった．そのため，小規模でもそれなりに実効性が期待される事前措置さえ考えようとしない，または考えても実施しないという組織のバイアスにつながったと考えることが合理的であろう．

だとすれば，原子力発電所を運用する側で留意すべきことは，技術に詳しい現場実務者らを対象として，以下のような訓練を実施するとともに，その成果を組織としての意思決定行動に反映させていく方策も具体化することであろう．

① 生起する可能性は小さいと思われても，起きたら困ることについては，あえて思考実験的に想定する．

② その想定された事象について，組織は「今は何もしない」または「その可能性を慎重に見極めてから対策する」という選択をするバイアス傾向を有することを自覚する．

③その上で，「何もしない」ではなく，「完璧でなくても，事象シナリオの苛酷度を低減できる」事象緩和方策を策定する訓練を行う．
④組織は事象緩和方策にさえも消極的になるバイアスを有することを認識し，組織としての行動を変容させる方策についても検討する．

3. 課題の整理

以上述べたように，「懸念は感じても対応行為には踏み出さない」，「結果的に懸念はなかったことにしてしまう」という行動様式が，これらの事故の背後要因として存在すると思われる．組織が陥りやすいこれらの過誤を前提とすれば，「原子力安全の終わりなき向上」のために取り組むべき課題は，上記の①～④をより具体的に書き換えて次のように整理できると思われる．

3.1 想定する能力

プラントになんらかの危険をもたらし得るが，これまでは想定されていないリスク事象を，まずは想定する能力の向上が必要である．「そんなことは起きる可能性が極めて低い」と自分で主観的に判断して，想定から除外してはならない．ただ何もない条件下で，この発電所で何が起きたら重大事故が懸念されるか，と聞いても回答は困難かも知れない．その際に効果的な考察を進めるための補助指針として，以下のような問いかけについて考えたい．

(1) 懸念される事象の想起

「自分の職場で何が起きたら，自分としては深刻に困りそうか」．この問いかけについて考察してもらう．その際，抽象的に考えるのではなく，「我が事として」考えることで，地に足がついた発想が促進されよう．

(2) 他業種で経験された困難事象からの類推

「他業種で経験されたものと類似の事象が自社で起きるとしたら，どのようなシナリオか」．この問いかけについて考察してもらう．国内外で，また原子力産業だけでなく航空や鉄道，石油化学などの産業分野の事例を調べて，印象的な事象を対象として取り上げる．

その際に，「他業種のことなので，そんな事例は原子力とは関係ない（起こり得ない）」という反応では，安全に責任を持つ人間として望ましくない．あえて共通要因を考えれば，この問題（例えば，特定リスクの軽視，とか，集団同調圧力とか）は，我が社（我が職場）でも起こり得る，という基本姿勢が強く望まれる．そのような姿勢に立てば，他業種の事例を題材にしても，それと通底する原因による事象が自社に起きることは想定できるはずである．

＜例＞

山陽新幹線博多駅発のぞみ34号の台車枠亀裂発生事故（2017年12月11日）（JR西日本，2017）：

本件では博多駅発車直後から，客室乗務員らによって異音，異臭が感知されていた．岡山駅から車両保守担当社員が乗車したが，諸般の事情から意思決定に時間がかかり，結局停止したのは名古屋駅においてであった．その結果，JR西日本とJR東海（特に前者）は安全を軽視したとの批判がなされた．

この事象に関して言えば，車両の移動は原子力発電所ではむろん起きない．しかしながら早めに対応することが望ましい事象についての判断の先送りは十分に起こり得る．

3.2 想定された事象について考える能力

本能力は，なぜ（我が社，我が職場では）未対策なのかを考える能力のことであり，次項との関連において，「問題の迅速な解決を妨げる要因」を考えるという意味を持つ．3-1項で，それなりに厄介な事象シナリオが想定されたとした場合，自然な展開として「そのような事象シナリオに対して我が社で対応策が実装されていないのはなぜか」を明らかにすることが重要である．理由の例として，例えば以下のようなことが考えられる．

- 社内に言い出しにくい雰囲気（例：同僚が業務量の増大を嫌う，上司が現状維持指向型で問題提起は一般に歓迎されない，言えばかえって自分がネガティブな評価を受ける，他）がある．
- 具体的な困難要因（例：この上カネのかかる提案など困る，業務量が日常的に多いため提示された課題に対応する人の手配が到底できない，他）がある．

「原子力安全の終わりなき向上」を目指すには，

上記のような要因解消への継続的な努力が必要であることは言うまでもない.

3.3 リスクを低減する行動力

想定された事象に対して,「何もしない」すなわち「当該リスクは,そのまま保有する」という選択肢は,もし当該事象が起きた場合の結果が深刻な影響をもたらし得るなら避けたい.起きても我が社として受け入れられる,という場合のみリスク保有は選択できる.この段階でリスク低減のための対策の発想法が重要な意味を持つ.

<例>

「巨大津波が来る懸念がある」というリスク指摘に対して:

「防潮堤を建造する」「建物を水密構造にする」「高い場所に非常用大型電源装置を増設する」「配電盤を少なくとも1系統は地下階でなく上層階に設置する」という完璧な(実際には完璧はあり得ないが)対処策発想法は,莫大な経費負担が見込まれるので,現実に採用されにくい.結果として,想定された事象シナリオは未対策のまま放置される恐れがある.この「何もしない」という事態が起きることは回避しなければならない.

ここでは,完璧な対策に比べれば小規模・部分的ではあっても,相当な実効性が期待できる対策を考案する能力が望まれる.前述したように,「中央制御室の近傍に,計装系を生かし続ける容量を持つ直流電源を配備する」,「海抜の高い場所に非常用発電機を原子炉2基あたり1台設置する」,あるいは「関連する配電盤類も高い位置に設置する」は,その例である.

4. 研修内容の構成

ここまでの考察に基づいて,「潜在リスクの発想の支援」を通じての潜在リスク気付き支援研修内容の構成について提案する.

方向性1:対策指向支援方式

「起こると困る事象例」について,比較的容易に考えられる事象でもよいので,それに続けて,3.2,3.3項のような設問について考察を深めていただきたい.その理由は,「2. 発想の転換を促すための工夫の検討」で述べたように,「かなり起きにくい事象であったとしても,それについて誰も全く考えたことがない」という事態よりは,「そこまで神経過敏になる必要はない」という認識が支配的であるという事態が,日本の原子力組織では多いと推測されるからである.

「起きにくいことを徹底して考える」よりも,まずは「想定はされたが,実質的に対処されていないままの事象について,何とか対策が実施される方向性を目指す」ということがここでの骨子である.

組織としてのこのようなプロアクティブな対処能力向上は,レジリエンス向上に直結する.

上記とは異なった方向性の研修もあり得る.「想起しにくいことを考えることが,安全上はまず重要だ」という立場に立つならば,もっと別の補助指針を提示して,それに沿って考えを深める研修方式もあり得よう.具体的には,以下のような方向性がある.

方向性2:発想指向支援方式

「自分として困ることを考えてください」とか,「他の事例から考えてください」という課題設定では,発想支援という観点から見ると支援不足である.より効果的な発想支援法としては,事前に適切な知見を付与し,考え方を習得してもらうことが考えられる.ここでは,「どのような条件が満たされると,想定困難な事象が起きるか」という問いかけに対するいくつかのヒントを提供する.

<例>

A:極低頻度だが起きると影響が大きい事象シナリオ

原子力の場合,1F事故の反省もあって,自然災害に関してはこのカテゴリーは相当稀な事象まで考慮されているように思う人が多いかもしれない.人によっては,「ここまで考えればもう十分であろう」と考える恐れもないわけではない.しかし,自然シナリオについても想定規模が不測な事象は多々存在するし,それ以外の事象もあり得る.

<参考例>

- 巨大な太陽フレアの発生による広域停電は,すでに諸外国(カナダやスウェーデン)で経験されているが,同時に深刻な通信障害も生起し得る.
- 異常高温や異常な降雨は各地ですでに経験され

ているが，経験をはるかに超えた大寒波や大量降雪の襲来も当然想定すべきである．

- 悪質なサイバー攻撃やバイオテロなどは，近未来にどのような形で生じるか予見さえ困難な例である．それでもなお，これらの可能性や仮定的シナリオを想定しておくことは，ある程度の予備知識があれば可能である．

B：組み合わせ的に考えられてこなかったが，生起し得る事象シナリオ

実際のトラブル事例などを見ると，「そのような不幸な組み合わせが起きるのか」という事態が起きてしまった例は少なくない．そのように，考えにくい事象の組み合わせが大きなトラブルにつながることを認識しておくことが，安全性向上のポイントである．この観点からは，どのような事象の組み合わせが安全の脅威になり得るかを検討しておくことが必要と考える．

＜参考例＞

- 大量降雪後の異常低温による発電所構内の広範囲な凍結と，それによる重機や電源車の移動困難（一部配管の凍結を含む）

C：異種世界の干渉で起きる事象シナリオ

人間が考える因果関係は，機械の世界，電気の世界，熱の世界，化学の世界，材料物性の世界，土木の世界，微生物の世界のように，特定の世界個々の中では相当に詳細に検討されている．その場合は，対策も講じやすい．しかし異種の世界間の干渉が起きる場合には，考えが追いつかないことが少なくない．電気ケーブル劣化を例とすると，誘導現象による規格外高電圧の印加による劣化は同じ電気的世界での事象なので想定しやすいが，調理場からの油脂雰囲気による化学的劣化などには注意が及びにくい．このタイプの事例を示して考察を深めてもらうことも，研修として意義が大きい．

5. まとめ

2019年度に試行した潜在リスク気付き支援研修において得られた課題について検討し，研修プログラムの改良について提案した．研修の方向性の要点をまとめると，以下の二点である．

方向性１：対策指向支援方式

想定された懸念事象がなぜ対策困難であったのか，の要因を明らかにして，その要因解消を目指すことを骨子とする．この方式の方が，組織の中で，想定の自己限定やグループ浅慮を解消することにつながるので，レジリエンス・エンジニアリングの本質に整合したアプローチである．

方向性２：発想指向支援方式

視点を変えて，これまで発想の盲点になっていたような種類の事象を想定する能力向上を目指す．そのためには，ただ「自由に発想してください」という従来のやり方ではなく，「どのような条件が満たされると，想定困難な事象が生じるか」という問いに関するいくつかのヒントを事前に提示する．この方式であっても，従来は検討の範囲外であった事象が想定されたとするならば，結果的には組織のレジリエンス向上につながることが期待できる．

2019年度の研修の試行では方向性１を指向したが，今後は方向性２についても指向することとしたい．どちらの方向性の研修においても，気付きや発想を支援するための適切な事例（不適切な事例だけでなく，良好事例も含めて）の提供が重要と認識している．今後，継続して事例の抽出，提供を行っていきたい．

引用文献

C.P.Nemeth, E.Hollnagel（編）, 北村正晴監訳（2017）．レジリエンスエンジニアリング応用への指針，E.Hollnagel，第12章，レジリエントな組織になるために，日科技連.

E.Hollnagel他（編），北村正晴・小松原明哲監訳（2014）．実践レジリエンスエンジニアリング−社会・技術システムおよび重安全システムへの実装の手引き，E.Hollnagel，エピローグ，日科技連.

E.Hollnagel（著）, 北村正晴・小松原明哲監訳（2019）．Safety-Ⅱの実践 −レジリエンスポテンシャルを強化する，海文堂.

ＪＲ西日本（2017）．新幹線車両の台車に亀裂などが発見された重大インシデントについて，https://www.westjr.co.jp/press/article/2017/12/page_11639.html

NHK記事（2019）．詳報　東電刑事裁判「原発事故の真相は」，
https://www3.nhk.or.jp/news/special/toudensaiban/
作田博・北村正晴（2019）．RAGを活用した潜在リスクの気付き支援に関する試行，INSS JOURNAL, 26, 194–201.
作田博・北村正晴（2020）．潜在リスク気付き支援研修の試行と展望，INSS JOURNAL, 27, 237–241.
東京電力福島原子力発電所事故調査委員会（国会事故調）（2012）．国会事故調報告書.
東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会（政府事故調）（2012）．政府事故調最終報告書.
福島原発事故独立検証委員会（民間事故調）（2012）．調査・検証報告書.

原子力発電所における安全文化の自己評価方策の検討(2)
情報収集のための質問紙調査の試行

Examination of self-assessment of safety culture in nuclear power plants (2)
Trial of the questionnaire survey for information collecting

高城　美穂（Miho Takagi）*1　　余村　朋樹（Tomoki Yomura）*2
前田　典幸（Noriyuki Maeda）*2　　井上　枝一郎（Shiichiro Inoue）*2

要約　日本の原子力事業者においては，安全文化の重要性が指摘され，安全文化醸成のための取り組みが行われている．安全文化醸成のためには，組織の安全文化を自ら評価し，健全な安全文化となるよう取り組んでいくという安全文化のセルフアセスメントが重要である．特に，原子力発電所の職員が自ら自分たちの安全文化を見つめ，継続的な改善につなげる機会を増やすことは大切である．これを支援するため，本検討は，安全文化の自己評価をより効果的かつ平易に行う方法として，評価に用いる情報を収集する質問紙の試行をおこなった．質問項目は，「健全な原子力安全文化の特性（INPO, 2012）」（10 traits）を参考とする「健全な職場の姿」と自職場とのギャップの有無，更にその理由について，自由記述形式で回答を求めるものであった．試行の結果，目に見える現象や行動の背景にある状況や考え方についての情報が得られる可能性などが示された．これらの情報は，評価の担当者が組織の安全文化について考察を行うために有用である．

キーワード　安全文化，自己評価，健全な安全文化の特性（10 traits）

Abstract　The importance of a safety culture has been pointed out by experts in the Japanese nuclear industry, and efforts are being made to enhance a safety culture. In order to enhance the safety culture, its self-assessment is required, in which the organization's safety culture is evaluated by itself and efforts are made to create a healthy safety culture. It is important for nuclear power plant staff to look at their safety culture by themselves and to increase the opportunities for continuous improvement. To support this, the present study tested a questionnaire to collect information used for evaluation as an effective and easy method for self-evaluation of the safety culture. The question items are free-form descriptions about the existence of a gap between the “healthy workplace” and the responding worker’s own workplace, and the reason for the gap, with reference to “Traits of a Healthy Nuclear Safety Culture（INPO（2012））” （10 traits）. As a result, it was shown to be possible to obtain information on the situations and ideas behind the observed behavior of workers and their actions. This information is useful for assessors in considering the safety culture of an organization.

Keywords　safety culture, self-assessment, Traits of a Healthy Nuclear Safety Culture（10traits）

1. 背景

1.1 安全文化の自己評価

日本の原子力発電所においては，原子力規制委員会と原子力規制庁が実施する新検査制度の本格的な運用が2020年４月より開始された．新検査制度は，リスク情報を活用することによって検査対象を選定し，原子力施設の設備や保安活動が，安全確保の上で本来果たすべき機能を発揮している状態であるかどうかを主眼に確認するパフォーマンスベースド検査を実施することを志向している（原子力規制委員会，2018）．原子力事業者は自ら課題を抽出し，自主的に安全を向上させていくことが求められている．

米国の原子力産業においても，安全の保証と継

＊1　（株）原子力安全システム研究所　社会システム研究所
＊2　（公財）大原記念労働科学研究所

続的な改善のために，事業者による自己評価が重要であることが認識されている（Carroll，1998）．例えば米国原子力規制委員会（the US Nuclear Regulatory Commission，以下「NRC」）は，過去10年間の改善の要因の一つとして，NRCおよび事業者が「問題の根本原因を特定し，効果的な是正措置を確実にするためのイベントの自己評価」に重点を置いたことを挙げている．そして，よりパフォーマンスベースの規制アプローチに移行するにつれ，自己評価はますます重要になるであろうと述べている（Jackson，1996; Carroll，1998）．

安全文化の概念は，旧ソ連のチェルノブイリ原子力発電所事故を契機として，原子力施設の安全運転に不可欠な要素の一つとして提唱され（IAEA，1991），以降，組織文化やその評価に対する知見が蓄積されてきた．安全文化や組織文化については様々な捉え方があるが，IAEA（2002）は安全文化向上の方策として，安全文化の自己評価を提起し，その中で，E.H. シャインによる組織文化のモデル（例えばE.H. シャイン，2004）を，組織文化を検討する際に有用なものとして紹介している．シャインによるモデルは，安全の向上のためには組織文化を考慮する必要があることを示しており，安全文化の自己評価は，組織や組織構成員の活動を見つめ，改善することに他ならないことを示唆していると考えられる．また，IAEA（2006）は安全文化の自己評価を「安全文化を強化するための包括的なアプローチの一部」と位置付けており，更にIAEA（2016）は，自己評価を行うという行為自体が，組織の構成員の安全や安全文化に対する意識を高めることを指摘している．

組織の自己評価の方法の一つには，監査を担う部署が，組織内の第三者的な立場から評価を行う方法がある．一方，発電所の現場の職員が自ら安全文化を見つめることも重要である．現場の職員が主体的に自己評価を行うことによって，評価結果に対して積極的に取り組む意欲が高まり，継続的な改善が促進されると期待できる．

1.2　安全文化評価の方法

安全文化を評価する方法については，これまで多くの知見が蓄積されてきた．質問紙は安全文化の測定・評価のための一般的な方法であり，妥当で信頼できる質問紙の開発に多くの努力が払われてきた．その一方で，質問紙による安全文化の評価は，提唱されたアプローチの一部に過ぎないのではないかという指摘もある（竹内，2012; Guldenmund，2000）．

竹内（2012）は一般的な質問紙（主にリッカート尺度による点数の高低に基づいて，安全文化の良さ／悪さを評価するもの）以外の手法や着眼点を採用しているものに注目して，評価・測定手法の整理を行っている．その中で，評価・測定手法の一つとして，質問紙とその他の方法の組み合わせによる方法が示されている．これは「質問紙の回答を，環境，歴史，特定の課題という個別の文脈につなげる」ために，インタビューや行動観察といった様々な方法と組み合わせて行う試みである．IAEA（2016）においても，安全文化の自己評価の方法として，質問紙や文書のレビュー，観察，インタビュー等から得られた様々な量的および質的なデータを基に，分析・評価を行う方法が提起されている．安全文化の評価では，質問紙調査により得られる量的なデータはもちろんのこと，様々な質的および量的なデータ，指標等を用いることによって，安全文化の特徴や組織の課題をより適切かつ具体的に把握することにつながると考えられる．

しかし，インタビューや観察などの方法は，分析・評価のための豊富なデータが集められる反面，実施には大きな資源を要する．特に，現場の職員による自己評価を支援するためには，比較的平易かつ効果的に安全文化を評価する方法の開発が求められる．

1.3　研究協力者（Ａ社）の評価の仕組み

本研究はＡ社の協力を得て行った．Ａ社では安全文化の自己評価を毎年実施している．Ａ社の安全文化評価は，まず事業所の各部署の役職者が自部署の安全文化を評価し（Ａ社独自の安全文化指標に基づく，自由記述形式による評価），次に，同事業所に所属する評価担当者が，役職者による評価結果を含む様々な情報を基に，事業所全体の安全文化の評価を行う．

安全文化評価の手順は，一般に 1）情報収集，2）収集した情報に基づく安全文化の分析・評価，に整理できる．Ａ社の安全文化評価において，各部署の役職者による評価は，事業所全体の評価のための情報収集に相当する．この過程で豊富な情報が得られれば，安全文化評価がより適切に行われることが

期待できる.

2. 目的

高城・余村・前田・井上（2020）は，情報収集のための平易かつ効果的な方法として，役職者が自部署を評価するための質問紙を作成した．本稿の目的は、この質問紙を試行し，得られる情報の特徴を確かめることとする.

3. 方法

高城他（2020）で作成された質問紙は，自由記述形式であり，次のような情報を得ることを目指すものであった.

・目に見える組織の状況や組織構成員の行動の背景にある，状況や考え方についての情報
・組織を幅広く多様な視点から評価した情報

このような情報は，事業所全体の評価担当者が安全文化についての考察を行うきっかけや，あるいは，評価のための根拠となるものとして有用と考えられる．そこで下記（1）～（3）の方針で質問項目を作成した.（詳細は高城他（2020）を参照.）

(1)「健全な職場」の姿（18項目）を提示し，それぞれについて，自職場とのギャップの有無とその理由を尋ねる．それにより，現象や行動の記述のみでなく，その現象や行動の背景にある状況や考え方についての情報を得る.
(2)「健全な職場」の姿は，米国の原子力発電運転協会（Institute of Nuclear Power Operations）の「Traits of a Healthy Nuclear Safety Culture（2012）（以下，『10traits』）」に示される健全な安全文化の特性と，A社独自の安全文化指標を包含するものを作成（18項目）する．それにより，幅広い観点から組織を評価した情報を得る.
(3)「健全な職場」の姿は，10traitsの「個人の役割」「マネジメントの役割」「マネジメントの仕組み」の要素ごとに提示し，それぞれ「『個人の役割』についてたずねます」等，何について尋ねるかを強調して質問する．これにより「個人の役割」「マネジメントの役割」「マネジメントの仕組み」という多様な視点から組織を評価した情報を得る.

質問紙では，まず「健全な職場」（18項目）の姿が提示された上で，それぞれについて下記の設問への回答が求められた.

質問①「健全な職場」と比べた際のギャップを列挙して下さい
質問② ギャップがある理由（ギャップが無い場合は，そう判断した理由や，良好な状況，取り組み，その他気がかりな点）
質問③ ギャップを埋めるための取り組みや，こうした方が良いと思っていること
質問④ その他言いたいことを何でも書いてください

また，質問紙の冒頭で，「健全な職場」の姿は理想であり，現状をより向上させるためにギャップを挙げてほしいという趣旨を伝えた.

A社の役職者５名に質問紙を配付し，自部署の評価を求めた．その結果，４名から回答を得た．実施時期は2019年11月～12月であった.

4. 結果

質問紙の回答は，比較対象として，A社の役職者による前年度の評価結果（自由記述）を参考に，特徴の検討を行った．以下に，前年度の評価結果には見られなかった点について記載がある回答の例を示す．回答者（４名）はそれぞれA氏～D氏と記す．なお回答は，内容を変えない範囲で著者が表現を一部修正している.

4.1 現象や行動の背景にある状況や考え方

【例１　B氏の回答】

〔提示された「健全な職場」の姿〕

（あなたを含めて）あなたの組織・部署・チームの長は，安全を確保するために，責任・権限・役割を明確に割り振り，それが上手く機能している.

〔質問①（「健全な職場」と比べた際のギャップを列挙して下さい）の回答〕

業務が輻輳しているときも，分担についての責任，権限，役割を振り分けて対応しており，ギャップはないと思う．ただし，個業のライン的要素で業務遂

行を補完しているところもあると感じる.
〔質問②（ギャップがある理由）の回答〕
業務の輻輳を避け，個に頼る部分は組織による対応に移行していく.

B氏は業務の責任・権限・役割の分担には大きな問題はないとしつつ，「個業のライン的要素で業務遂行を補完しているところもあると感じる」と述べている.「個業のライン的要素」とは，組織体制として整備された体制を補完するような個人的なネットワークを意味すると思われる．そのようなネットワークが業務遂行を補完している部分もあると感じられているようである.

【例２　C氏の回答】
〔提示された「健全な職場」の姿〕
あなたの組織（または部署）は，個人としてではなく，組織として以下のような幅広い方法で学び，有効に活用している.
- 自分たちの運転経験に加え，社内外の運転経験を主体的に収集し，組織として改善のチャンスを作っている
- 自分たちの知識，技能を継続的に向上させるために，他の組織をベンチマーキングし組織として学んでいる
- 自分たちの組織の状況や仕事の仕方を批判的な視点で組織としてチェックしている

〔質問①の回答〕
（ギャップは）なし
〔質問②の回答〕
運転経験を含む社内外の知見を収集する仕組みがあり，必要に応じて安全性向上活動として計画しており，また，適宜ベンチマークしている．また，社風として，何故必要なのかを考える視点が根付いていると考える.

C氏は「健全な職場」の姿と自職場にギャップはないとした上で，「社風として，何故必要なのかを考える視点が根付いている」と，組織内で共有されていると思われる考え方を補足的に述べている.

以上のように，複数の項目で，回答者である役職者が，目に見える現象や行動の背景にある状況や考え方を考察した回答が得られた.

4.2　10traitsを参考とした幅広い観点からの評価

【例３　A氏の回答】
〔提示された「健全な職場」の姿〕
一人ひとりは，安全に焦点を当てて（focusして）必要な情報の伝達・交換を行っている.
（例）
- 相手，内容，方法を考慮してリスクが小さくなるようにしている
- どのような相手にも正直に残存リスクを伝えている
- 立ち話などの非公式なコミュニケーションの場でも安全を重視した言動を行っている
- 意思決定の理由を伝えている　など

〔質問①の回答〕
（ギャップは）なし
〔質問②の回答〕
プライベートも含め，積極的なコミュニケーションに努めるようにしているところ，必要十分なリスクにフォーカスできているかは不明．ただ，業務においてリスクを最小限にしようという意識は働いていると思われる．一方で，考慮するリスク低減として，原子力安全上のリスクかコストや時間を要することのリスクかについては，ケースバイケースと思われる.

A氏は「積極的なコミュニケーションに努めるようにしている」と全般的に評価しつつ，安全に焦点を当てた情報の伝達・交換については，「必要十分なリスクにフォーカスできているかは不明」であると述べている．そして，リスクに関する考え方について，「考慮するリスク低減として，原子力安全上のリスクかコストや時間を要することのリスクかについては，ケースバイケースと思われる」と述べている．このような「安全に焦点を当てた情報の伝達・交換」に対する評価や，リスクに関する考え方についての回答は，比較対象として用いた前年度の評価結果では得られていない.

【例４　A氏，C氏の回答】
〔提示された「健全な職場」の姿〕
（あなたを含めて）あなたの組織・部署・チームの長は，安全に関わる意思決定について，十分に納

得できるまでは先に進まない判断が行われている．
（例）
・ルールに沿った厳密な判断が行われている
・許容範囲だから良いというのではなく，より安全側に倒した判断が行われている
・行った判断について，後の判断のために，意思決定の根拠を記録に残している

〔質問①の回答〕
（A氏）*特に安全に関わる判断は慎重になされていると思われるが，許容範囲なら問題ないという意識も感じられることがある．*
（C氏）*ギャップなし．業務の意思決定プロセスは，安全に関わる根拠を含めて判断しながら進めることになるよう規定されており，これに従って業務を遂行している．*

A氏は安全に関わる意思決定について，「安全に関わる判断は慎重になされている」と全体に評価した上で，時には，許容範囲なら受容するという傾向が感じられることもあると指摘している．またC氏は，業務の意思決定プロセスが安全について考慮されたものであることに基づき，「健全な職場」の姿とのギャップはないと評価している．いずれも，比較対象である前年度の評価結果に比べ，安全に関わる意思決定により注目した内容の回答が得られた．

例３，例４とも，A社の従来の方法には含まれていなかった「安全に焦点を当てて（focusして）必要な情報の伝達・交換を行う」，「安全に関わる意思決定」という視点が加わったことにより，新たな情報が得られたと考えられる．

4.3 「個人」「マネジメント」「マネジメントの仕組み」という多様な視点からの評価

質問紙では，組織の状況を多様な視点から評価することを目的として，10traitsを参考に「個人の役割」「マネジメントの役割」「マネジメントの仕組み」の要素ごとに「健全な職場」の姿（18項目）を提示した．回答の文言が提示された要素の視点から記述されていることから，役職者は三つの要素それぞれを念頭に、組織の状況を評価していると思われた．

5. 考察

今回，高城他（2020）で作成した質問紙を用いて「健全な職場」の姿と自職場とのギャップの理由などを尋ねたところ，複数の項目で，目に見える現象や行動の背景にある状況や考え方についての情報が得られた．各部署の役職者は，ギャップの理由を尋ねられることによって，表面に現れた現象や行動だけでなく，その背景にどのような状況や考え方があるかということまで考察が促進されたと考えられる．（4.1）

また，幅広く，多様な視点から組織（各部署）を評価した情報を得るため，10traitsとA社独自の安全文化指標を包含する形で質問項目を作成した．その結果，質問項目に「安全に焦点を当てて（focusして）必要な情報の伝達・交換を行う」や「安全に関わる意思決定」といった，従来の方法には含まれていなかった視点に対応する，新しい情報が得られることが示唆された．適切な視点を質問項目に加えることによって，安全文化評価のためのより幅広い情報が得られることが期待できる．（4.2）

更に「個人の役割」「マネジメントの役割」「マネジメントの仕組み」の要素ごとに「健全な職場」の姿（18項目）を提示して評価を求めたところ，三つの要素のそれぞれを念頭に組織を評価したと思われる回答が行われ，多様な視点から組織を評価した情報が得られる可能性が示唆された．（4.3）

これらの情報は，事業所全体の評価担当者が安全文化についての考察を行うきっかけや，あるいは，評価のための根拠となるものとして有用と考えられる．

ただし，4.3で言及した「個人の役割」「マネジメントの役割」「マネジメントの仕組み」の要素は，それぞれが独立に存在しているのではなく，互いに関わり合って組織の活動が形成されていると考えられる．けれども，そのような要素間の相互関係を，回答者である役職者が想定しているかどうかは判別できなかった．この点については，各部署の役職者に，要素間の相互関係まで考慮することを求めるか否かには議論の余地がある．事業所全体の評価のための情報として，各部署の役職者が要素間の相互関係までを考慮した回答が必要か，あるいは，彼らにそれを求めることが現実的かを検討する必要がある．

更に言えば，本稿では，各部署の役職者による評

価を，事業所全体の評価のための情報収集と位置づけているが，役職者による自部署の評価には，役職者自身による自己評価（自部署に対する評価）という側面もある．IAEA（2006）は，原子力事業者の全ての階層の管理者が，業務の実績と安全文化の自己評価を行うことを推奨している．会社，事業所，部門や部署といった各階層の管理者による自己評価は，それぞれの目的を明確にし，評価のために求められる知識や技能を確認する必要がある．

6. おわりに

本稿では，平易かつ効果的な安全文化評価方法として，情報収集のための質問紙調査の試行を行った．その結果，今回用いた質問紙によって，安全文化に対する考察のきっかけとなる情報や，評価のための根拠となる情報など，安全文化評価のための情報が得られることが示された．

今後は，収集した情報を基に組織の安全文化を分析，評価する手順を検討する必要がある．特に，複数の現象の背後にあると推察される共通の要素をどのようにして考察するか，また例えば10traitsで表現される様々な要素が影響し合っている組織文化をどのように理解し，抽出するかなど，分析，評価の具体的な方法を検討することが求められる．

また，組織文化の評価は，組織全体の文化的特徴が共通していることを前提としている．しかし，一つの組織でも，そこに含まれるグループ毎に文化的な特徴が異なるという指摘がある．すなわち，一つの事業所であっても，部門や部署によって文化的な特徴に違いがあるということである．この指摘は，組織の文化を正確に把握することや対策立案に関わるため，組織内のグループ毎の文化的特徴についても考慮する必要がある．

最後に，本稿で試行した質問紙では「リーダーシップ」や「意思決定」や「コミュニケーション」といった安全文化の指標を基に「健全な職場」の姿を想定した．しかし，「リーダーシップ」，「意思決定」，「コミュニケーション」は，日常業務を通して発揮され，普段の仕事の行われ方の中に現れるものである．ということは，安全文化の評価は，「普段の仕事の行われ方」を，安全という観点から文化的に評価することと言える．そのため，安全文化評価にあたっては，一連の評価方法の検討を進めると共に，「評価の対象は『普段の仕事の行われ方』である」との理解を促進するよう，評価の関係者にはたらきかけることが必要である．

引用文献

原子力規制委員会（2018）．原子力規制検査の概要について 資料１　平成30年11月19日．〈https://www.nsr.go.jp/data/000254917.pdp〉（2021年７月30日）．

Carroll, J. S.（1998）. Safety culture as an ongoing process: Culture surveys as opportunities for enquiry and change. Work and Stress, 12 (3), 272–284.

Jackson, S.(1996). Challenges for the nuclear power industry and its regulators: the NRC perspective. Speech presented at the Regulatory Information Conference, Washington, DC, 9 April.

International Atomic Energy Agency(1991). Safety Series No.75 - INSAG-4 Safety Culture.

International Atomic Energy Agency(2002). Safety culture in nuclear installations Guidance for use in the enhancement of safety culture, IAEA-TECDOC-1329.

E.H.シャイン．金井壽宏（監訳）・尾川丈一・片山佳代子（訳）(2004)．企業文化－生き残りの指針　白桃書房.

International Atomic Energy Agency(2006). The Management System for Facilities and Activities, IAEA Safety Standard Series No.GS-R-3.

International Atomic Energy Agency(2016). Performing Safety Culture Self-assessment, Safety Report Series No.83.

竹内みちる（2012）．組織の安全文化（安全風土）評価・測定の手法に関する試論．INSS Journal, 19, 10–19.

Guldenmund, F. W.(2000). The nature of safety culture: A review of theory and research. Safety Science, 34, 215–257.

高城美穂・余村朋樹・前田典幸・井上枝一郎（2020）．原子力発電所における安全文化の自己評価方策の検討　情報収集のための質問紙の試作．INSS Journal, 27, 2–10.

Institute of Nuclear Power Operations(2012).
Traits of a Healthy Nuclear Safety Culture,
INPO-12-012.

コロナ禍においてテレワークはどれだけ浸透したのか？

How Much Has Teleworking Penetrated During the COVID-19 Pandemic?

後藤　学（Manabu Goto）*1　　濵野　和佳（Waka Hamano）*1

要約　コロナ禍においてテレワークがどれだけ浸透したのかを明らかにするため，テレワークの実施状況等を調べた継続調査を収集し，13の調査結果を整理した．(1)テレワークの実施率は，１回目の緊急事態宣言時に最も高く，その後はそこまで高まらなかった．(2)労働者の主観的な報告によると，テレワークの生産性は，出社時と比べるとやや下回る傾向にあった．ただし，コロナ禍の長期化に伴って生産性に対する評価は回復しつつあった．(3)テレワーク経験者のテレワーク継続意向は当初から強く，その傾向は継続している．以上の結果をふまえ，日本でのアフターコロナにおけるテレワークの発展可能性と課題について考察した．

キーワード　コロナ禍，テレワーク（在宅勤務），継続調査，仕事の生産性

Abstract　In order to clarify how much teleworking has penetrated into the workplace, we collected the continuous surveys that investigated the implementation status of teleworking during the COVID-19 pandemic and organized about the results of 13 surveys. (1) Teleworking implementation rates were highest during the first state of emergency declared in Japan and not so high thereafter. (2) Teleworkers' subjective reports showed that teleworking productivity tended to be slightly lower than when they came to office. However, with the prolongation of the COVID-19 pandemic, the evaluation of productivity was recovering. (3) Those who have experienced teleworking wanted to continue teleworking from the beginning, and that tendency was continuing. Based on the above results, we considered the development potential and issues of teleworking in Japan for the post-corona workplace.

Keywords　COVID-19 pandemic, teleworking (home teleworking), continuation survey, work productivity

1. 問題

日本に新型コロナウイルス感染症の影響が出始めて１年半が経過した．2020年１月～2021年７月までの間に，新型コロナウイルス感染者は，第１波から第５波と呼ばれる増加と減少を繰り返し，それに伴い４回の緊急事態宣言が発出された．政府は，緊急事態宣言期間中，出社率７割削減を掲げ，職場への出勤にかかる人流の抑制を図るため，テレワークを推奨した．

テレワークとは，在宅勤務，サテライトオフィス勤務，モバイル勤務の総称（総務省，2018）であるが，コロナ禍においては，在宅勤務とほぼ同義で用いられていることから，本稿でも同様に用いる．コロナ禍において，テレワークが企業に導入され，実際に従業員に利用されるかは，緊急事態宣言下にあるか，宣言下でどのような政府方針が出されたか，また社会がどれだけの危機感を持って事態を受け止めたか等により影響される．したがって，ある一時点でのテレワークの浸透状況を把握するのでは十分とはいえず，継続的に把握することが重要である．

後藤・濵野（2020）は，2020年７月までのコロナ禍でのテレワークの実施状況，仕事の生産性，メリット・デメリット，継続意向について調査動向を整理した．そこでは，テレワークの実施率が，第１回目の緊急事態宣言（以下，１回目宣言）の発出時には３割程度であったが，宣言が全国拡大すると実施率が60%にのぼると言及した．ただ，その後もコロナ禍が長期化し，複数回の緊急事態宣言が発出されていることや，調査によって導入率・実施率に相当のばらつきが見られたこと，などを考慮し，テレワークの導入率・実施率がその後どのように変

＊1　(株)原子力安全システム研究所　社会システム研究所

化したのかを再度整理することを試みたい.

また，後藤・濵野（2020）は，１回目宣言下では，各企業の体制が整っていないこと，個々人でも在宅勤務の準備が整っていないことなどを理由に，テレワークの生産性が十分に高まっていないことを報告した．これについてもコロナ禍が長期化する中で，企業・個々人のテレワーク環境が整備され，働き方に慣れてきたことなど，生産性を高めるような要素が充実してきていると思われる．加えて，強制的なテレワークから選択的なテレワークへと，勤務形態を個人の意思で決められるようになっている職場が増えてきたと推測され，その点でもテレワークの生産性は高まってきている可能性がある. そこで，導入率・実施率と同様に，テレワークの生産性についても継続的なデータが得られている調査を整理したい.

最後に，テレワーク勤務に対する満足度と，テレワーク継続意向についても継続的な調査結果を整理する. テレワークは, 日本の会社組織の一体感やチーム単位での成果を重視する組織では馴染みにくいという指摘がある（池田，2020）．テレワークが浸透したことにより，対面や電話でのコミュニケーション量が減り，オンラインでのコミュニケーション量が増えた．そのため，テレワークでも，出社時と同様に仕事相手とコミュニケーションがとれ，意思疎通ができないと満足度は高まりにくいものと予想される．満足度と継続意向の二点の変化を確認することで，テレワークがどれだけ本当の意味で浸透し，アフターコロナの時代にも受け入れられるのか見通したい.

2. 目的

(1) コロナ禍を通じて，テレワークの実施率・導入率がどのように推移しているのかを明らかにする.
(2) テレワーク実施者は，コロナ禍を通じて，テレワークにおける仕事の生産性をどのように感じているのかを明らかにする.
(3) テレワーク実施者は，コロナ禍を通じて，テレワークに対する満足度や今後の継続意向についてどのように感じているのかを明らかにする.

3. 方法

テレワークの実施状況に関する継続調査として，本稿では13の調査を取り上げた．これらの調査概要を表１に示す．うち２つの調査では企業調査と個人調査の両方を実施していた．また，１つの調査では個人調査により，企業のテレワーク導入率と個人の実施率を両方問うていた（表１）.

表１　本稿で取り上げた13の調査

	調査主体	調査名	企業／個人	導入率／実施率
1	東京商工リサーチ	新型コロナウイルスに関するアンケート	企業	実施率
2	東京商工会議所	テレワークの実施状況に関する緊急アンケート	企業	実施率
3	東京都	テレワーク実施率調査	企業	導入率
4	東京都	多様な働き方に関する実態調査	企業／個人	導入率／実施率
5	総務省	通信利用動向調査	企業／個人	導入率／実施率
6	日本生産性本部	働く人の意識に関する調査	個人	実施率
7	パーソル総合研究所	新型コロナウイルス対策によるテレワークへの影響に関する緊急調査	個人	実施率
8	内閣府	新型コロナウイルス感染症の影響下における生活意識・行動の変化に関する調査	個人	実施率
9	リクルートワークス研究所	全国就業実態パネル調査（JPSED）	個人	実施率
10	国土交通省	テレワーク人口実態調査	個人	導入率／実施率
11	LINEリサーチ	新型コロナウイルスに関する調査	個人	導入率
12	LINE・厚生労働省	新型コロナ対策のための全国調査	個人	実施率
13	大久保・NIRA	テレワークに関する就業者実態調査	個人	実施率

4. 結果

4.1 テレワーク導入率・実施率の推移

各種調査におけるテレワーク導入率・実施率を図１に示した．導入率と実施率は厳密には問うていることが異なるが，テレワークの浸透状況を把握する類似した指標であるため，両方をまとめて図示した．

4.1.1 テレワーク導入率の推移

テレワーク導入率を問うた調査を整理した．取り上げた調査には，企業調査と個人調査が含まれる．企業調査では，各社においてテレワーク制度が整備されているかどうか，個人調査では，あなたの勤務先ではテレワーク制度が導入されているかどうか，を問うものであった．

(1) 企業調査

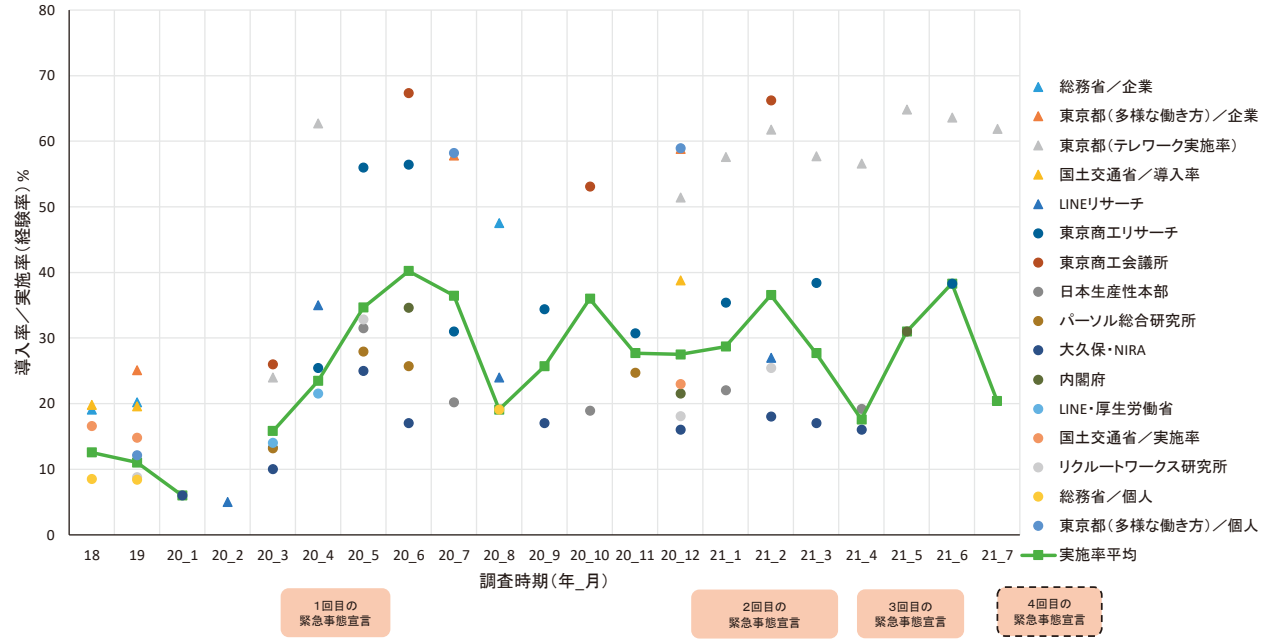
総務省（2019, 2020, 2021）の「通信利用動向調査」では，常用雇用者規模100人以上の企業，約２千社において，2018年９月の導入率は19.1%，2019年９月は20.2% であったが，2020年８月には47.5%に増加した．

東京都（2020, 2021k）の「多様な働き方に関する実態調査」では，都内の従業員30人以上の企業，約２千社において，コロナ前（2019年７月）には導入率が25.1%であったが，2020年７月は57.8%，12月は58.8%に増加した．

また，東京都（2021a, 2021b, 2021c, 2021d, 2021e, 2021f, 2021g, 2021h, 2021i, 2021j）の「テレワーク実施率調査」でも，都内の従業員30人以上の企業，約400社において，2020年３月（１回目宣言前）は導入率24.0%であったが，2020年４月に62.7%，12月51.4% に増加した．さらに２回目の緊急事態宣言下では，2021年１月前半57.1%，１月後半63.5%，２月前半64.8%，２月後半58.7%，３月前半59.0%と高く推移した．２回目宣言が明けると，３月後半56.4%，４月56.6%と若干の低下が認められたものの，３回目宣言以降は５月64.8%，６月63.6%，７月61.9%と再び上昇した．

(2) 個人調査

国土交通省（2019, 2020, 2021）の「テレワーク人口実態調査」では，就業者４万サンプルを回収し，勤務先にテレワーク制度が導入されている割合を調べた．H30年度（2018）19.8%，R1年度（2019）19.6%，R2年度（2020年12月）38.8%であった．



注 プロットについては、▲で導入率、●で実施率を示した。
同じ月に2回調査が行われている場合は、2回の導入率・実施率の平均をプロットした。
調査期間が2か月にまたがる場合は、調査期間最終日の月にプロットした。

図１ テレワーク導入率・実施率の変化

LINEリサーチ（2020a, 2020b, 2020c, 2021）の「新型コロナウイルスに関する調査」では，LINEユーザー約５千人の回答を収集し，職場における「テレワークの許可/推奨」の有無を尋ねた．2020年２月にテレワークの許可/推奨があったと回答者した人は5%，３月14%，４月35%，８月24%，2021年２月27%であった．

全国を対象とした総務省，国土交通省，LINEリサーチでのテレワーク導入率は，コロナ前と比べると倍増した．ただし，いずれの調査でも導入率は５割に満たなかった．その一方で，東京都内の企業を対象とした調査（東京都，2021a～2021j）では導入率が50%を超えている．また，緊急事態宣言時には（１回目，2回目，3回目とも）導入率が60%を超えて一時的により高まる傾向にあった．

4.1.2　テレワーク実施率の推移

続いて，テレワーク実施率を問うた調査を整理した．導入率と同様に，企業調査と個人調査が含まれた．企業調査では，各企業でその時点においてテレワークを実施している社員がいるかどうか，個人調査では，個々の従業員がテレワークを実施しているかどうか，を問うものであった．

各調査では，テレワークの実施率（その時点で実施しているか），利用率（テレワーク制度を利用しているか），経験率（これまでに経験したことがあるか）などと，異なる語が用いられ，問うている意味合いも多少異なるものが含まれる．本稿では，各調査で用いられている表記を尊重しつつ，テレワークを行っている割合として，ここにまとめた．

(1) 企業調査

東京商工リサーチ（2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2021a, 2021b, 2021c）の「新型コロナウイルスに関するアンケート調査」では，全国の企業約１～２万社において，１回目宣言発出直前（2020年３～４月）のテレワーク実施率は25.4%であったが，宣言中（４～５月）56.0%，解除直後（５～６月）56.4%と大きく増加した．その後は実施率30%台で推移し，２回目宣言中でも実施率は40%に届かなかった．１回目宣言解除後の調査では「実施している」「実施していない」の選択肢に加え，「新型コロナ以降にテレワーク（在宅勤務・リモートワーク）を実施したが，現在は取りやめた」という選択肢を追加したが，そういった回答が企業全体の18～27%にのぼった．したがって，１回目宣言中にテレワークを実施した企業の1/3程度は，２回目以降の宣言中にテレワークを実施しなかったと思われる．

東京商工会議所（2020a, 2020b, 2020c, 2021）の「テレワークの実施状況に関する緊急アンケート」によれば，会員企業約１千社についての実施率は，2020年３月26.0%であったが，解除直後５～６月67.3%，下半期９～10月53.1%，２回目宣言中2021年１～２月66.2%と推移している．

(2) 個人調査

日本生産性本部（2020a, 2020b, 2020c, 2021a, 2021b, 2021c）の「働く人の意識に関する調査」では，20歳以上の雇用者1,100名を対象に，テレワーク（在宅勤務，サテライトオフィス，モバイルワークの複数回答）を「現在行っている」人の割合を調べた．2020年５月31.5%，７月20.2%，10月18.9%，2021年１月22.0%，４月19.2%，７月20.4%であった．

パーソル総合研究所（2020a, 2020b, 2020c, 2021）の「新型コロナウイルス対策によるテレワークへの影響に関する緊急調査」では，全国の就業者約２万人を対象にテレワーク実施率を調べ，2020年３月13.2%，５月27.9%，６月25.7%，11月24.7%であった．

大久保・NIRA（2020a, 2020b, 2020c, 2021）の「テレワークに関する就業者実態調査」では，約１万人を対象に通常業務でのテレワーク利用を問い，2020年１月6%，３月10%，４～５月25%，６月以降（６月，９月，12月，2021年１～２月，３月，４月）は16～18%と安定して推移していることを示した．

内閣府（2020a, 2020b, 2021）の「新型コロナウイルス感染症の影響下における生活意識・行動の変化に関する調査」では，全国約１万人を対象に，2020年６月時点でのテレワーク経験率が34.6%，12月21.5%，2021年５月31.0%であることを報告した．

LINE・厚生労働省（2020a, 2020b, 2020c）がLINEユーザーを対象に行った「新型コロナ対策のための全国調査」では，そのうちの約600万人のオフィスワーク中心（事務・企画・開発など）の人のテレワーク実施率が2020年３月14.0%，４月上旬16.2%，４月中旬26.8%であることを示した．

国土交通省（2019, 2020, 2021）の「テレワーク人口実態調査」では，就業者４万サンプルを回収し，平成30年度（2018年），令和元年度（2019年10月）は，

雇用型テレワーカーは全就業者の16.6%, 14.8%に過ぎなかったが, 令和２年12月には23.0% に上昇した.

リクルートワークス研究所（2020a, 2020b, 2021a, 2021b）は「全国就業実態パネル調査2020，同臨時追跡調査」「同2021，同臨時追跡調査」の４回の調査を通じ，8,587名に１週間のテレワーク時間を聴取した．テレワーク時間が０時間の場合をテレワーク未実施とみなし，１時間以上の回答を実施とみなすと，実施率は2019年12月8.8%，１回目宣言中32.8%, 2020年12月18.1%，２回目宣言中25.4%であった.

総務省（2019, 2020, 2021）の「通信利用動向調査」では，約４万人の回答から，過去１年間のテレワーク経験率を調査した．2018年９月末時点，2019年９月末時点では，テレワーク経験率は8.5%, 8.4%であったが，2020年８月時点では19.1%に上昇した.

東京都（2020, 2021k）の「多様な働き方に関する実態調査」では，約3,800名の回答を回収し，「在宅でテレワークをしたことがある」の経験率を問うたところ，2019年７月12.1%, 2020年７月58.2%, 12月58.9%と急増した.

各調査を通じて，１回目宣言中～解除後をピークにしていること，実施率のピークは20%～40%の間にあることが多く，全体の1/3程度であったものと推測される．また，いくつかの調査で確認されるように（東京商工リサーチ，東京商工会議所，日本生産性本部，パーソル総合研究所）宣言解除後，夏にはテレワーク実施率がいったん低下したが，２回目宣言中の実施率は再度上がっている．ただし，１回目宣言中の実施率を２回目宣言中以降に上回ることはなかった.

4.2 テレワーク時の仕事の生産性の推移

日本生産性本部（2020a, 2020b, 2020c, 2021a, 2021b, 2021c）の「働く人の意識に関する調査」では，自宅での勤務で効率が上がったかを全６回を通じて調査した．１回目宣言中の2020年５月時点では「効率が上がった」（効率が上がった，やや効率が上がった）の合計33.8% であったが，７月50.0%, 10月50.5%, 2021年１月54.5%，４月59.1%，７月50.2%と，テレワークを始めた当初と比較して「効率が上がった」との回答が増加した.

大久保・NIRA（2020a, 2020b, 2020c, 2021）の「テレワークに関する就業者実態調査」では，通常通り勤務していた場合の仕事の成果を100とした場合，テレワークでの時間あたりの仕事のパフォーマンス（仕事の効率）がどのように変化したか回答を求めた．2020年３月時点で78，６月時点83, 12月時点88, 2021年４月時点88（100と回答した人の割合40%）であった．至近の変化は小さいが，2020年の間は生産性の評価が徐々に回復傾向にあった.

内閣府（2020a, 2020b, 2021）の「新型コロナウイルス感染症の影響下における生活意識・行動の変化に関する調査」では，感染症拡大前（2019年12月）からの生産性の変化を問うている．2020年５月時点では「減少」（やや減少，減少，大幅に減少）が40.2%であったが，12月には34.1%, 2021年４～５月には33.4%とやや低下し，「増加」が，4.4%, 10.5%, 11.5%とやや上昇した.

パーソル総合研究所（2021）では「第四回 新型コロナウイルス対策によるテレワークへの影響に関する緊急調査」において, 出社時の生産性を100（%）とすると，テレワーク時の生産性はいくつになるかについて回答を求めた結果を分析している．2020年11月の時点では，100未満の回答が正社員のテレワーカーの64.7%, 100以上の回答が35.2%（うち100%の回答が18.6%）を占め，全体平均84.1で，生産性は出社時より低いとする回答が多いことを明らかにした.

リクルートワークス研究所（2020b）の「全国就業実態パネル調査2020 臨時追跡調査」では，2019年12月と比較した緊急事態宣言下での仕事の生産性について，終日テレワーク勤務の頻度との関連性を検討している．週１日以上のテレワーク実施者では，仕事の生産性が上昇した人の割合は２割に届かないが，低下した人の割合は32.0%～42.5%であった．また，テレワークをまったくしなかった人と比べると，テレワーク経験者は仕事の生産性が上昇した割合，低下した割合とも高くなっていた.

東京商工会議所（2020b, 2021）では，テレワークの実施効果として「定型的業務の生産性向上」が2020年５～６月調査で17.0%, 2021年１～２月調査で12.0%と一部で確認できることを報告した.

以上の結果を総合すると，テレワークが多くの職場で導入・実施されるようになったばかりの時点では，テレワーク時の仕事の生産性は，平常時（出社時）と比較して低かったことがわかる．ただ，その後は，テレワーク時の仕事の生産性がやや高まる傾向にある.

4.3 満足度と継続意向の推移

日本生産性本部（2020a, 2020b, 2020c, 2021a, 2021b, 2021c）の「働く人の意識に関する調査」では，「自宅での勤務に満足しているか」を継続的に問うている．2020年５月では「満足」（「満足している」「どちらかと言えば満足している」）の合計）の割合は57.0%で，７月70.3%, 10月68.9%, 2021年１月69.8%, ４月75.7%，７月70.2%と満足している人の割合が高く，増加傾向にあることを報告した．また，同調査では「コロナ禍収束後もテレワークを行いたいか」についてもあわせて問うており，2020年５月では「そう思う」（「そう思う」「どちらかと言えばそう思う」の合計）の割合は62.7%，７月75.6%, 10月68.8%, 2021年１月76.4%，４月76.8%，７月74.1%と継続意向も上昇傾向にあることを示した．

東京都（2020, 2021k）の「多様な働き方に関する実態調査」では，企業調査において「テレワークの継続・拡大意向」を調査している．2020年７月時点での継続意向（「継続したい」「継続したいが拡大は考えていない」）は80.4%, 12月時点で92.7%であった．また，同調査の従業員調査でもテレワークの継続意向について問うており，2020年７月時点で「継続したい」（「ぜひ継続したい」「まあ継続したい」）の割合が75.8%で，12月時点でも75.8%であった．

国土交通省（2021）の「テレワーク人口実態調査」では，雇用型テレワーカー（雇用型就業者の23.0%）のテレワークに対する総合的な満足度について「大変満足，やや満足」が64.3%を占めることを示した．また今後のテレワーク実施意向についても「実施したい」が81.5%にのぼり，テレワーカーのテレワークについての受け止めが肯定的であることを示した．

リクルートワークス研究所（2020b）の「全国就業実態パネル調査2020 臨時追跡調査」では，「仕事そのものに満足していたか」を問うた．質問に「あてはまる」「どちらかというとあてはまる」を合算した仕事満足度について，2019年12月時点では38.6%であったが，１回目宣言下では30.9%と低下した．この調査では，テレワーク勤務（在宅勤務）に関する満足度を問うているのではないため，解釈には慎重を期す必要があるが，宣言下では仕事満足度は低下傾向にあった．

以上の結果を総合すると，テレワーク経験者のテレワークに対する満足度や継続意向は高く，テレワーク経験者の６～８割は，肯定的な受け止めをしていると考えられる．

5. 考察

5.1 テレワークはどれだけ浸透したのか

本稿は，後藤・濵野（2020）で十分に解明できなかった，コロナ禍におけるテレワークの浸透状況について検討するため，多くのテレワークに関する調査のうち，継続調査のみを取り上げたものである．テレワークの浸透状況を整理する上では，導入率と実施率（経験率）という二種類の指標をどのように処理するかが難しいが，筆者は両者の違いを以下のように考える．

導入率とは，総じてどのくらいの「職場」にテレワークが普及しているのかを示す指標だと言い換えることができる．したがって，この指標については，主に企業調査の結果を参考にすべきである．4.1.1で示したように，導入率は30～50%程度であり，最も導入率の高い東京都であれば50%超になっている調査も含まれる．ただし，テレワークは，すべての業種・業態に適用できる働き方ではなく，テレワーク導入に向けたそれ相応の準備・整備も必要となるため，残りの半数以上の企業（職場）は，テレワークが適用しにくい仕事・環境にあると位置づけることができるであろう．加えて，多くの調査では，一定の従業員数以上の企業を対象に調査を行っており，調査結果には中小企業におけるテレワークの浸透状況はそれほど反映されていない．後藤・濵野（2020）で指摘したように，テレワーク導入率・実施率は，会社の所在地（首都圏・大都市圏ほど高くなる），企業規模（従業員数の大きい企業ほど高くなる），業種や地域性（例：関東よりは関西のほうが製造業などの中小企業の割合が多いため，低くなる），勤務形態（例：正規社員では非正規社員よりも高い）などの影響を受けることも十分考慮する必要がある．

その一方で，実施率（経験率）とは，総じてどのくらいの「個人」がテレワークを行っている（行った）のかを示す指標だと言い換えることができる．したがって，この指標については，主に個人調査の結果を参考にすべきである．4.1.2で示したように，実施率（経験率）は，最もテレワーク人口が多くなった

１回目の緊急事態宣言下（特に，宣言が全国拡大した時期）であっても30%台の数字が並んでいる．働き手の３人に１人程度がテレワークを実施していたといえるであろう．後藤・濵野（2020）では，実施率が緊急事態宣言の全国拡大下で60%程度まで高まることを指摘したが，継続調査に限ればそこまで高い実施率を示す調査結果は認められなかった．

ところで，テレワークの導入・実施状況は，緊急事態宣言の発出と大きな関連性を持っていた．特に2020年４月から５月にかけての１回目の緊急事態宣言下では，最初の宣言であるというインパクトの強烈さとともに，一斉休業や休校措置が出されるなど，最も生活への制限が強く，それに伴って事態の深刻さや不安感・危機感が国民の中で共有されていた時期であったと推測される．そのため，この時点でのテレワーク導入率・実施率はそれ以前から急激に高まったと思われる．その後も，３回の緊急事態宣言が出されているが，全国拡大には至っていないこと，コロナ禍での生活への慣れ，事態が長期化したことによる間延びした感覚なども影響して，テレワーク導入率･実施率は,それ以上には高まらなかった．ただし，４回の緊急事態宣言がすべて適用されている東京都では，テレワークの導入率・実施率はあまり落ち込むことなく，高い状態が維持されているといえそうである．

緊急事態宣言期間中であるかによって，テレワークの導入率・実施率が変動するというアンケート調査の結果は，人流に関する客観データからも裏付けられている．個々のスマートフォンから取得できるデータを利用して，コロナ禍での人出状況を可視化したAgoop（2021）の解析によれば，2020年１月１日～現在（2021年７月25日）までの主要エリアの人出状況を見ると，この約１年半の間に，2020年５月１日（その前後１週間程度）と2021年１月１日に人出が普段より極端に少なくなっている．それだけ最初の緊急事態宣言時の人出は抑制されていたと考えられる．この傾向は，４回の緊急事態宣言が適用されている東京の主要駅周辺でも，その他の大都市駅，地方駅などでも同様であった．テレワークの導入率・実施率は，人出状況同様，社会の受け止めが反映されたものともいえる．

その一方で，１回目宣言中にテレワークを実施した企業の1/3程度は，２回目以降の宣言中はテレワークを実施しなかったことを示唆する知見も得られている．東京商工リサーチ（2020c, 2020d）では，２回目以降の宣言時にテレワークを実施しなかった理由を企業に問い（複数回答），85%以上の企業が「業務がリモートワークに適しない」を選び，その他の理由は20%程度の選択率に留まったことを報告した．業務内容とテレワークの相性は根深い問題であるが，１回目宣言中はたとえ相性が悪くともテレワークを実施せざるを得ない状況にあったが，それが解除されて以降は，テレワークを実施するか否かの自由度が高まり，相当数の企業がテレワークを実施しない選択をしたと考えられる．

5.2 テレワークでは生産性は高まらないのか

日本全体でテレワークが導入・実施されるようになってから１年半ほどになるが，主観的な報告によるテレワークの生産性は十分に高まっているとまではいえない．コロナ禍の当初は，テレワーク時の生産性が，コロナ前（もしくは出社時）と比べると低いとする回答者が多かった．コロナ禍が長引いてからは，テレワーク時の生産性についての回答は上がる傾向にあった．これについては，企業側・従業員側がそれぞれにテレワークのための制度や準備を整え，快適で働きやすい環境が出来上がってきたことがあるのであろう．また，テレワーク経験が蓄積されていったことによって，自宅やリモートでの勤務の仕方に慣れ，それぞれがテレワークを快適に行うための工夫をしてきたことも考えられる．

その一方で，リクルートワークス研究所（2021）の調査結果によれば，テレワークの頻度が多くなるにつれ，効率が上がる人と，下がる人がともに増える，すなわち二極化する傾向を指摘している．この傾向は，テレワークで行いやすい業務内容とそうでない業務内容があるという相性の問題や，テレワークを自分の生活の中に馴染ませることができたのかといった問題が関わるものと思われる．また，業務が単純で少量の場合にはテレワークで問題なく対応できていたが，業務が複雑もしくは多量になることによってテレワークでは対応しにくくなるといったことも考えられる．いずれの問題も働き手本人だけでは解消できないことであると予想され，職場やチーム，家族等と最適解を探していく必要があるであろう．そのためには，テレワークでは対応しにくい部分を組織の経営層が積極的に把握し，解決策を探ったり，テレワークに伴う課題を職場内や家庭内

で確認・共有し，対応策を話し合っていくことが必要と思われる．

テレワークの生産性について報告した調査のほとんどは，現状，主観的な報告による測定だけに留まっている．今後は，客観的な指標をあわせて測定し，主観的な指標（生産性や満足度）との関連性を検討することが求められる．

5.3　今後もテレワークは続くのか

各種調査において，テレワーク経験者のテレワークに対する満足度は概して高く，テレワーク継続意向も強い点は一貫している．テレワークの持つメリットは，時間（勤務時間帯，通勤時間）と空間（会社で働かなければならない）の制約から解放され，働きやすい時間や働きやすい空間を自分で選べるようになったことにある．それは，テレワークという新たな働き方の登場によって，自分の働きやすい・快適な環境を選択・創造することができるようになったことを意味する．テレワークに対する満足度の高さや継続意向の強さは，それに起因するものと推測される．

コロナ禍という特殊な状況のもとでテレワークが導入されたためか，緊急事態宣言やコロナ禍が終わったら，出社することを前提とした「本来」の働き方に戻そうという考え方になりがちである．ただ，それこそがコロナ禍の終焉であるように錯覚してはいないだろうか．これまでの働き方（毎朝会社に通勤する，会議室に集まる，出張に出かける，・・・など），１年半前では当然のこととして信じて疑わなかったことが，コロナ禍で急速に変わりつつある．アフターコロナの働き方改革では，出社をデフォルトと考えるのではなく，テレワークをデフォルトと考えるべきという声もある．テレワークを行うことを大前提にというのは言い過ぎなのかもしれないが，元の働き方に戻すのではなく，まずはテレワークを行いやすい環境づくり，という観点に立った経営層の決断と働き手の意識改革が重要となるであろう．

引用文献

Agoop（2021）．新型コロナウイルス特設サイト「新型コロナウイルス拡散における人流変化の解析」レポート　Agoop　2021年7月25日．<https://www.agoop.co.jp/coronavirus/>（2021年7月25日）．

後藤学・濵野和佳（2020）新型コロナウイルス感染症流行下でのテレワークの実態に関する調査動向　INSS JOURNAL, 27, 252-274.

池田朋弘（2020）テレワーク導入の４つの抵抗　チームコミュニケーションの教科書　マイナビ出版，p.16.

国土交通省（2019）．平成30年度テレワーク人口実態調査 -調査結果の概要-　国土交通省　2019年3月28日．<https://www.mlit.go.jp/common/001282117.pdf>（2021年7月24日）．

国土交通省（2020）．平成31年度（令和元年度）テレワーク人口実態調査 -調査結果の概要-　国土交通省　2020年3月31日．<https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001338554.pdf>（2021年7月24日）．

国土交通省（2021）．令和２年度テレワーク人口実態調査 -調査結果の抜粋-　国土交通省　2021年3月19日．<https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001391381.pdf>（2021年7月24日）．

LINE・厚生労働省（2020a）．第１回「新型コロナ対策のための全国調査」厚生労働省　2020年4月30日．<https://www.mhlw.go.jp/stf/newpage_11109.html>（2021年7月24日）．

LINE・厚生労働省（2020b）．第２回「新型コロナ対策のための全国調査」厚生労働省　2020年4月30日．<https://www.mhlw.go.jp/stf/newpage_11109.html>（2021年7月24日）．

LINE・厚生労働省（2020c）．第３回「新型コロナ対策のための全国調査」厚生労働省　2020年4月30日．<https://www.mhlw.go.jp/stf/newpage_11109.html>（2021年7月24日）．

LINEリサーチ（2020a）．新型コロナウィルスに関する調査結果（2020年２月19日実施）LINEリサーチ　2020年2月25日．<https://research-platform.line.me/archives/34813234.html>（2021年7月24日）．

LINEリサーチ（2020b）．新型コロナウィルス

に関する調査結果（2020年３月２日実施）LINEリサーチ　2020年3月5日．<https://research-platform.line.me/archives/34862186.html>（2021年7月24日）．

LINEリサーチ（2020c）．【速報詳細】第５回新型コロナ対策のための全国調査　LINEリサーチ　2020年8月17日．<https://research-platform.line.me/archives/35785304.html>（2021年7月24日）．

LINEリサーチ（2021）．【最新】新型コロナ感染症拡大に伴う職場・テレワークの現状について（2021年２月実施）LINEリサーチ　2021年3月2日．<https://research-platform.line.me/archives/37296541.html>（2021年7月24日）．

内閣府（2020a）．新型コロナウイルス感染症の影響下における生活意識・行動の変化に関する調査　内閣府　2020年6月21日．<https://www5.cao.go.jp/keizai2/manzoku/pdf/shiryo2.pdf>（2021年7月24日）．

内閣府（2020b）．第２回　新型コロナウイルス感染症の影響下における生活意識・行動の変化に関する調査　内閣府　2020年12月24日．<https://www5.cao.go.jp/keizai2/manzoku/pdf/result2_covid.pdf>（2021年7月24日）．

内閣府（2021）．第３回　新型コロナウイルス感染症の影響下における生活意識・行動の変化に関する調査　内閣府　2021年6月4日．<https://www5.cao.go.jp/keizai2/manzoku/pdf/result3_covid.pdf>（2021年7月24日）．

日本経済団体連合会（2021）．緊急事態宣言下におけるテレワーク等の実施状況調査　日本経済団体連合会　2021年1月29日．<https://www.keidanren.or.jp/policy/2021/011.pdf>（2021年7月24日）．

日本生産性本部（2020a）．新型コロナウイルスの感染拡大が働く人の意識に及ぼす調査　日本生産性本部　2020年5月22日．<https://www.jpc-net.jp/research/assets/pdf/5f4748ac202c5f1d5086b0a8c85dec2b.pdf>（2021年7月24日）．

日本生産性本部（2020b）．第２回働く人の意識に関する調査　日本生産性本部　2020年7月21日．<https://www.jpc-net.jp/research/assets/pdf/attachment1_20200721.pdf>（2021年7月24日）．

日本生産性本部（2020c）．第３回働く人の意識に関する調査　日本生産性本部　2020年10月16日．<https://www.jpc-net.jp/research/assets/pdf/3rd_workers_report.pdf>（2021年7月24日）．

日本生産性本部（2021a）．第４回働く人の意識に関する調査　日本生産性本部　2021年1月22日．<https://www.jpc-net.jp/research/assets/pdf/4th_workers_report.pdf>（2021年7月24日）．

日本生産性本部（2021b）．第５回働く人の意識に関する調査　日本生産性本部　2021年4月22日．<https://www.jpc-net.jp/research/assets/pdf/5th_workers_report_0617.pdf>（2021年7月24日）．

日本生産性本部（2021c）．第６回働く人の意識に関する調査　日本生産性本部　2021年4月16日．<https://www.jpc-net.jp/research/assets/pdf/6th_workers_report.pdf>（2021年8月16日）．

大久保敏弘・NIRA総合研究開発機構（2020a）．新型コロナウイルスの感染拡大がテレワークを活用した働き方，生活・意識などに及ぼす影響に関するアンケート調査　大久保敏弘・NIRA総合研究開発機構　2020年４月30日．<https://www.nira.or.jp/pdf/NIRA20200430-telemigration1.pdf>（2021年７月24日）．

大久保敏弘・NIRA総合研究開発機構（2020b）．第２回テレワークに関する就業者実態調査報告書　大久保敏弘・NIRA総合研究開発機構　2020年8月5日．<https://www.nira.or.jp/pdf/report202008_1.pdf>（2021年7月24日）．

大久保敏弘・NIRA総合研究開発機構（2020c）．第３回テレワークに関する就業者実態調査（速報）大久保敏弘・NIRA総合研究開発機構　2020年12月29日．<https://www.nira.or.jp/pdf/report202012_2.pdf>（2021年7月24日）．

大久保敏弘・NIRA総合研究開発機構（2021）．第４回テレワークに関する就業者実態調査（速報）大久保敏弘・NIRA総合研究開発機構　2021年5月6日．<https://www.nira.or.jp/pdf/report202105_1.pdf>（2021年7月24日）．

パーソル総合研究所（2020a）．新型コロナウイルス対策によるテレワークへの影響に関する緊急調

査　パーソル総合研究所　2020年4月24日. <https://rc.persol-group.co.jp/thinktank/research/assets/telework.pdf>（2021年7月24日）.

パーソル総合研究所（2020b）. 第三回・新型コロナウイルス対策によるテレワークへの影響に関する緊急調査　パーソル総合研究所　2020年6月19日. <https://rc.persol-group.co.jp/thinktank/research/assets/telework-survey3.pdf>（2021年7月24日）.

パーソル総合研究所（2020c）. 第四回・新型コロナウイルス対策によるテレワークへの影響に関する緊急調査（速報版）パーソル総合研究所　2020年12月16日. <https://rc.persol-group.co.jp/thinktank/research/assets/telework-survey4.pdf>（2021年7月24日）.

パーソル総合研究所（2021）. 第四回・新型コロナウイルス対策によるテレワークへの影響に関する緊急調査（総合分析編）パーソル総合研究　所　2021年1月21日. <https://rc.persol-group.co.jp/thinktank/research/activity/data/telework-survey4.html>（2021年7月24日）.

リクルートワークス研究所（2019）. 全国就業実態パネル調査（JPSED）2019 データ集　リクルートワークス研究所　2019年6月5日. <https://www.works-i.com/research/works-report/item/190605_jpsed2019data.pdf>（2021年7月24日）.

リクルートワークス研究所（2020a）. 緊急事態宣言下で人々の働き方はどう変化していたのか　全国就業実態パネル調査（JPSED）2020 データ集　リクルートワークス研究所　2020年6月11日. <https://www.works-i.com/research/works-report/item/200611_jpsed2020data.pdf>（2021年7月24日）.

リクルートワークス研究所（2020b）. 緊急事態宣言下で人々の働き方はどう変化していたのか　全国就業実態パネル調査2020 臨時追跡調査　リクルートワークス研究　所　2020年8月27日. <https://www.works-i.com/research/works-report/item/jpsed2020_rinji.pdf>（2021年7月24日）.

リクルートワークス研究所（2021a）. 全国就業実態パネル調査（JPSED）2021 データ集　リクルートワークス研究所　2021年6月15日. <https://www.works-i.com/research/works-report/item/jpsed2021data.pdf>（2021年7月24日）.

リクルートワークス研究所（2021b）. コロナショックは日本の働き方を変えるのか　全国就業実態パネル調査2021 臨時追跡調査　リクルートワークス研究所　2021年5月12日. <https://www.works-i.com/research/works-report/item/jpsed2021rinji.pdf>（2021年7月24日）.

総務省（2018）. テレワークの最新動向と今後の政策展開　総務省　2018年4月17日. <https://teleworkdays.go.jp/2018/topics/pdf/topics_180417_01_01.pdf>（2021年7月24日）.

総務省（2019）. 平成30年通信利用動向調査の結果　総務省　2019年5月31日. <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/statistics/data/190531_1.pdf>（2021年7月24日）.

総務省（2020）. 令和元年通信利用動向調査の結果　総務省　2020年5月29日. <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/statistics/data/200529_1.pdf>（2021年7月24日）.

総務省（2021）. 令和二年通信利用動向調査の結果　総務省　2021年6月18日. <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/statistics/data/210618_1.pdf>（2021年7月24日）.

東京商工会議所（2020a）. 新型コロナウイルス感染症への対応について　東京商工会議所　2020年4月8日. <http://www.tokyo-cci.or.jp/file.jsp?id=1021763>（2021年7月24日）.

東京商工会議所（2020b）. テレワークの実施状況に関する緊急アンケート　東京商工会議所　2020年7月17日. <https://www.tokyo-cci.or.jp/file.jsp?id=1022367>（2021年7月24日）.

東京商工会議所（2020c）. テレワークの実施状況に関するアンケート　東京商工会議所　2020年11月4日. <https://www.tokyo-cci.or.jp/file.jsp?id=1023299>（2021年7月24日）.

東京商工会議所（2021）. 緊急事態宣言下における中小企業のテレワーク実施状況に関する緊急調査　東京商工会議所　2021年2月25日. <http://www.tokyo-cci.or.jp/file.jsp?id=1023987>（2021年7月24日）.

東京商工リサーチ（2020a）. 第５回「新型コロナウイルスに関するアンケート」調査　東京

商工リサーチ　2020年6月16日．<https://img03.en25.com/Web/TSR/%7B42379c82-bb66-466f-bbda-81aaa3487062%7D_20200616_TSRsurvey_CoronaVirus.pdf>（2021年6月24日）．

東京商工リサーチ（2020b）．第6回「新型コロナウイルスに関するアンケート」調査　東京商工リサーチ　2020年7月14日．<https://img03.en25.com/Web/TSR/%7B87991d73-6466-4cbd-8071-07b5a5428ce4%7D_20200714_TSRsurvey_CoronaVirus.pdf>（2021年7月24日）．

東京商工リサーチ（2020c）．第8回「新型コロナウイルスに関するアンケート」調査　東京商工リサーチ　2020年9月15日．<https://img03.en25.com/Web/TSR/%7Bd07e9c91-6739-49c7-95df-6ffe7bb82fef%7D_20200915_TSRsurvey_CoronaVirus.pdf>（2021年7月24日）．

東京商工リサーチ（2020d）．第10回「新型コロナウイルスに関するアンケート」調査　東京商工リサーチ　2020年11月25日．<https://img03.en25.com/Web/TSR/%7Bb43f62cf-72d5-456e-ade3-923ad4125ead%7D_20201125_TSRsurvey_CoronaVirus.pdf>（2021年7月24日）．

東京商工リサーチ（2021a）．第12回「新型コロナウイルスに関するアンケート」調査　東京商工リサーチ　2021年1月22日．<https://img03.en25.com/Web/TSR/%7B911f6754-1b35-4fee-9b17-8c062843a06b%7D_20210122_TSRsurvey_CoronaVirus.pdf>（2021年7月24日）．

東京商工リサーチ（2021b）．第14回「新型コロナウイルスに関するアンケート」調査　東京商工リサーチ　2021年3月18日．<https://img03.en25.com/Web/TSR/%7B39ca8863-bf33-44ce-8ec6-1c4817983b53%7D_20210318_TSRsurvey_CoronaVirus.pdf>（2021年7月24日）．

東京商工リサーチ（2021c）．第16回「新型コロナウイルスに関するアンケート」調査　東京商工リサーチ　2021年6月21日<https://img03.en25.com/Web/TSR/%7B0cb79cdc-1c68-462b-a7f4-3ac2980c756e%7D_20210621_TSRsurvey_CoronaVirus.pdf>（2021年8月16日）．

東京都（2020）．多様な働き方に関する実態調査（テレワーク）．<https://www.hataraku.metro.tokyo.lg.jp/hatarakikata/telework/01_telework_tyousa.pdf>（2021年7月24日）．

東京都（2021a）．テレワーク実施率調査結果（1501報）東京都　2021年1月22日．<https://www.metro.tokyo.lg.jp/tosei/hodohappyo/press/2021/01/22/17.html>（2021年7月24日）．

東京都（2021b）．テレワーク実施率調査結果（1594報）東京都　2021年2月5日．<https://www.metro.tokyo.lg.jp/tosei/hodohappyo/press/2021/02/05/27.html>（2021年7月24日）．

東京都（2021c）．テレワーク実施率調査結果（1665報）東京都　2021年2月19日．<https://www.metro.tokyo.lg.jp/tosei/hodohappyo/press/2021/02/19/29.html>（2021年7月24日）．

東京都（2021d）．テレワーク実施率調査結果（1737報）東京都　2021年3月5日．<https://www.metro.tokyo.lg.jp/tosei/hodohappyo/press/2021/03/06/14.html>（2021年7月24日）．

東京都（2021e）．テレワーク実施率調査結果（1801報）東京都　2021年3月19日．<https://www.metro.tokyo.lg.jp/tosei/hodohappyo/press/2021/03/19/29.html>（2021年7月24日）．

東京都（2021f）．テレワーク実施率調査結果（3月後半）東京都　2021年3月2日．<https://www.metro.tokyo.lg.jp/tosei/hodohappyo/press/2021/04/02/11.html>（2021年7月24日）．

東京都（2021g）．テレワーク実施率調査結果　東京都　2021年5月7日．<https://www.metro.tokyo.lg.jp/tosei/hodohappyo/press/2021/05/07/10.html>（2021年7月24日）．

東京都（2021h）．テレワーク実施率調査結果　東京都　2021年6月2日．<https://www.metro.tokyo.lg.jp/tosei/hodohappyo/press/2021/06/03/03.html>（2021年8月16日）．

東京都（2021i）．テレワーク実施率調査結果　東京

都　2021年7月2日．<https://www.metro.tokyo.lg.jp/tosei/hodohappyo/press/2021/07/02/09.html>（2021年8月16日）．
東京都（2021j）．テレワーク実施率調査結果　東京都　2021年8月6日．<https://www.metro.tokyo.lg.jp/tosei/hodohappyo/press/2021/08/06/08.html>（2021年7月24日）．
東京都（2021k）．多様な働き方に関する実態調査（テレワーク）．<https://www.hataraku.metro.tokyo.lg.jp/hatarakikata/telework/02report.pdf>（2021年7月24日）．

コロナ禍におけるオンラインコミュニケーションツールの利用状況と利用者の受け止め

Status for Usage of Online Communication Tools in the COVID-19 Pandemic and How Users Feel Towards Them

濵野　和佳（Waka Hamano）*1　　後藤　学（Manabu Goto）*1

要約　コロナ禍がきっかけとなり，テレワークが一気に普及した．テレワークの最大のデメリットは「上司・同僚や顧客とのコミュニケーションの取りにくさ」であった．テレワークでコミュニケーションを取るにはオンラインコミュニケーションツールの使用が欠かせない．そこで本研究では，オンラインコミュニケーションツールの利用状況，メリット・デメリット，満足度などに関する調査を収集・整理した．主な結果は以下３点であった．(1) コロナ流行後，Web会議を導入する企業，利用する人が急激に増加した．(2) オンラインコミュニケーションツール利用の最大のメリットは「時間と距離の削減」，最大のデメリットは「コミュニケーションの取りづらさ」であった．(3) オンラインコミュニケーションツールの利用頻度が多くなっても，非対面のコミュニケーションに十分に慣れることはなく，その満足度は「ある程度まで満足している」人が最も多かった．オンラインコミュニケーションの満足度が上がるためにはどのような工夫をすればよいか検討した．

キーワード　オンラインコミュニケーションツール，Web会議，ビジネスチャット，対面コミュニケーション，非対面コミュニケーション

Abstract　Teleworking has spread quickly, triggered by the COVID-19 pandemic with its accompanying restrictions on meeting and traveling. The biggest demerit of teleworking has been the difficulty of communication with co-workers. Use of online communication tools is indispensable dealing with this problem. We collected and organized surveys on usage status, merits, demerits, and satisfaction with online communication tools. The following three points were identified.(1)The COVID-19 pandemic has led to an increase in, the number of companies introducing web conferencing and the number of people who use.(2)The greatest merit of using online communication tools was savings in time and commuting distance, while the biggest demerit was the difficulty of communication.(3)Even if online communication tools were used frequently, workers were not sufficiently accustomed to non-face-to-face communication, and most of them were only “satisfied to some extent” with their usage. We examined what kinds of measures should be taken to increase the satisfaction level of online communication tools.

Keywords　online communication tool, web conferencing, business chat, face-to-face communication, non-face-to-face communication

1. 問題

新型コロナウイルスは2019年12月に中国・武漢市で報告されて以降，世界中に拡散し，現在も感染収束は見えない．日本では2020年１月16日に国内で初の感染者が確認され，2020年２月～３月にかけては連日確認されるようになった．コロナ流行の始まりである．2020年４月７日に７都道府県を対象に緊急事態宣言が発出され，４月16日には全国に拡大された．感染者数は増減を繰り返し，現在（2021年７月）までに緊急事態宣言が４回発出されている．感染拡大防止のため，外出制限や人との接触制限がされるようになり，コロナ禍以前と比べて日常が一変した．

コロナ禍では，職場への出勤，仕事を通じた人との接触を制限するためにテレワークが奨励された．

＊1　(株)原子力安全システム研究所　社会システム研究所

政府は，2020年４月７日，７都道府県に発出された緊急事態宣言に伴い変更された「新型コロナウイルス感染症対策の基本的対処方針」において，出勤者７割削減などの目標を掲げ，テレワークの推進を図った（総務省，2020）.

後藤･濵野（2020）によると，コロナ流行前（2019年末まで）の企業のテレワーク導入率は２割程度であったが，１回目の緊急事態宣言が発出された2020年５月頃には６～７割程度まで上昇し，国内の多くの企業や団体が従業員にテレワークを推奨した.

テレワークが一気に普及した中，職場でも対面でコミュニケーションをとる機会が少なくなった．また，感染拡大防止のため，出社をしても対面でのコミュニケーションは控えられるようになった．そこで，非対面でもコミュニケーションを取る手段として，Web会議やビジネスチャットなどのツールが多くの職場内で導入，利用されるようになった．しかしながら，テレワークの最大のデメリットは「上司・同僚や顧客とのコミュニケーションの取りにくさ」であることがテレワーク経験者への調査から指摘されているように（後藤・濵野，2020），オンラインコミュニケーションでは，対面でのやりとりのようなスムーズなコミュニケーションが実現できていない可能性がある．そこで本稿では，職場におけるオンラインコミュニケーションの導入状況や導入形態とともに，オンラインコミュニケーションに対する満足度など，実際の働き手がオンラインコミュニケーションに対してどのような認識を持っているのかにも注目する.

2. 目的

本稿では，新型コロナウイルス流行前，流行後のオンラインコミュニケーションツールの導入，利用の実態など，以下６点について着目し，各種調査結果を根拠に整理・概観した.

(1) 新型コロナウイルス流行前，流行後では，企業のオンラインコミュニケーションの利用率，導入率，利用頻度にどのような変化があったか.
(2) 通信環境を整備することや，テレワークで使用するパソコンの準備など，オンラインツールの導入には経費がかかるため，事業規模の大きい会社ほど導入されやすいと想像できるが，実態としてどのような傾向にあるのか．また，業種別ではどのような傾向にあるのか.
(3) オンラインツールは，学生のころからソーシャルメディアの使用に慣れている若い世代に受け入れられやすいことが想像できる．果たして年代別ではどのような傾向にあるのか.
(4) オンラインコミュニケーションツールのメリット・デメリットにはどういったものがあるか．また，オンラインコミュニケーションに満足しているか.
(5) オンラインコミュニケーションツールが会議場面にとどまらず，活用されている事例として，オンライン商談とオンライン就活の状況はどのようなものか.
(6) オンラインコミュニケーションと対面でのコミュニケーションの特性の違いにはどのようなものがあるか.

3. 方法

インターネット上でコロナ流行前（2017年～2019年）とコロナ流行後（2020年～）のオンラインコミュニケーションツールについての調査に関する記事，報告書等を収集，整理した．収集にあたっては「コロナ禍」「Web会議」「対面」「オンライン商談」「オンライン就活」「オンラインコミュニケーション」「ビジネスチャット」などのキーワードを複数組み合わせて検索し，ヒットしたもののなかから，調査時期や調査対象，調査対象数が概ね明確なものを採用した．各調査の調査時期，調査対象，調査対象者数については，本文もしくは表１～８に記載した.

4. 結果

矢野経済研究所（2020）では，テレワーク勤務中のITツール利用状況について尋ねており，その種類はWeb会議システム，ビジネスチャットツール，オンラインストレージ，タスク・プロジェクト管理ツールであった．そのなかでも，とりわけ「利用した」という割合が多かったものは，Web会議システム79.2%，ビジネスチャットツール46.2%であった．テレワーク勤務中に使われる代表的なITツールはWeb会議システムとビジネスチャットツールであることがうかがえる．そこで，本稿では「オン

ラインコミュニケーションツール」という用語を，Web会議システムとビジネスチャットツールに対して使う．

4.1 Web会議の利用率，導入率

コロナ流行前，コロナ流行後のWeb会議の利用率，導入率を検討するにあたり，Web会議の使用率，利用率を問うたもの８件の結果を表１に整理した．

コロナ流行前後のWeb会議の利用率について，全国の会社・団体の役員・社員，2,119名に調査したMM総研（2020）によると，2019年12月末の利用率は44％であったが，2020年４月末では63％にまで上昇した．あしたのチーム（2020, 2021）では，コロナ流行途中の2020年３月と，流行後の2021年４月に，テレワーク時の上司／部下のコミュニケーション手段を尋ねており，「オンライン会議」と回答した人の割合は，67.3％から82.7％に上昇した．一方で，「メール」と回答した人の割合は87.3％から75.7％に，「電話」は70.0％から63.7％と，どちらも減少した．オンライン会議はメール，電話に代わるコミュニケーション手段になりつつあることがわかる．

2021年４月に調査を行ったクオリティア（2021）によると，テレワークを行うことがある人に「仕事でどのようなコミュニケーションツールを使っているか」と尋ねたところ，「Web会議」と回答した人の割合は76.2％であった．現在ではテレワークを行う人々にWeb会議が広く浸透していることがわかる．

なお，表１でまとめたWeb会議の使用率，利用率は，以下３つの要因の影響によって変動するものと推測される．第一に，回答の仕方が複数回答か単一回答であったかがある．当然ながら，複数回答では単一回答よりも値が高くなりやすい．第二に，大都市に限定した調査か，全国を対象とした調査であるかがある．大都市では，地方都市よりもテレワークの利用率が高い（後藤・濵野，2020）ため，Web会議の使用・利用率も高くなる．第三に，テレワーク経験者への調査か，そうでないかがある．テレワーク経験者に限れば，80%程度がWeb会議ツールを利用しており，経験者に限定した調査のほうが値は高くなるであろう．加えて，日頃からWeb会議をよく行うかどうかは，日頃からどのような目的の会議に多く出席しているか，どのような関係性の相手と会議をすることが多いかなどにも大きく影響される．これらの調査結果だけから過度に一般化することのないように留意する必要がある．

続いて，コロナ流行後のWeb会議の導入率について問うたもの３件の結果を表２に整理した．ダイヤモンド経営者倶楽部（2020）では，「今回の新型コロナウイルスにより「Web会議システム」を導入したか」と問うたところ，91.7％の企業が「導入している」と回答した．また，パーソルプロセス＆テクノロジー（2020）では，３ヶ月以上テレワークを継続している会社員に「Web会議の導入・整備状況」を尋ねており，「コロナ禍の前から導入，実施されている」と回答した人の割合は33.6％，「コロナ禍発生後に導入，実施されている」が53.6％であった．コロナ禍がきっかけとなり，多くの企業がWeb会議を導入したことがわかる．

freee（2020）では，国内の従業員300名以下規模の経営者，従業員に，従業員規模別にWEB会議・オンライン会議システムの導入率を尋ねている．従業員が10人未満の企業の導入率は21.2％であったが，従業員数が増えるにつれ導入率も増加し，従業員数が100人～300人未満の企業では63.4％であった．テレワーク実施率が企業規模の大小に影響される（後藤・濵野，2020）ことと同様に，Web会議の導入率も企業規模の影響があることがわかる．

以上のことから，その他の要因についても考慮する必要はあるものの，コロナ禍をきっかけにテレワークが普及したことと，対面でのやり取りを控えるようになったことにより，Web会議を利用，導入する企業とその従業員が急激に増加したことがわかる．

4.2 Web会議の利用状況

コロナ流行後のWeb会議の利用頻度と，年代別のWeb会議の利用状況について検討した．

4.2.1 Web会議の利用頻度

コロナ流行後のWeb会議の利用頻度について調査した３件の調査を表３に整理した．

UCHIDA（2020）では，コロナ感染拡大の前と比べて，WEB会議の頻度が「増えた」と回答した人の割合は86.8％であった．ブイキューブ（2021）では，「増えた」と回答した人の割合が55.6％，

表1　Web会議の使用率，利用率

調査主体	調査期間	調査対象者	人数	質問	率	回答	メール	電話	備考
マツリカ	2020年4月20日 ～4月24日	企業の経営者層，営業部門の管理職・マネージャー，営業担当者等	233	（営業活動の）リモートワークではどのようなツールを使用していますか（MA）※1	87.7%	Web会議ツール	—	—	
MM総研	2020年4月28日 ～5月1日	全国の会社・団体の役員・社員	2,119	Web会議システムの利用率（SA）※2	63%		—	—	2019年12月末のWeb会議システムの利用率44%
矢野経済研究所	2020年5月	東京都，神奈川県，埼玉県，千葉県，大阪府，兵庫県，福岡県の7都道府県のオフィスに勤務する20～70歳代の男女	500	テレワーク勤務中のITツール利用状況（MA）	79.2%	Web会議システム	—	—	
リトルソフト㈱	2020年6月1日 ～6月3日	現在テレワーク中の中小企業・ベンチャー企業・スモールビジネス従事者	1,042	どのようなツールでコミュニケーションを取っていますか（SA）	43.1%	WEB会議システム	18.1%	—	LINE/SNS12.3%
H1T	2020年6月9日 ～6月23日	H1Tユーザー	181	在宅勤務中，社内・社外との打ち合わせをどのように行っているか教えてください（MA）	94.3%	ZoomやTeamsなど外部のWeb会議システム	—	63.8%	会社貸与のスマートフォン，携帯電話での通話
アスマーク	2020年11月27日 ～11月30日	月に数回以上「在宅勤務」をしている全国20代～50代会社員	860	各コミュニケーション手段の使用率（MA）	64.4%	ビデオ会議	90.8%	80.0%	対面式会議33.5%
クオリティア	2021年4月6日 ～4月7日	全国の20歳～50歳の会社員・公務員・団体職員	1,000	仕事でどのようなコミュニケーションツールを使っているか（MA）	36.5%	WEB会議	76.4%	81.9%	
		テレワークを行うことがある人	362	仕事でどのようなコミュニケーションツールを使っているか（MA）	76.2%	WEB会議	93.4%	82.9%	
あしたのチーム	2021年4月23日 ～4月26日	全国の従業員数5名以上の企業に勤める正社員で，2020年3月～2021年3月に平均週2回以上テレワークをした一般社員，および同期間にご自身または平均週2日以上テレワークをした部下を持つ管理職，20歳～59歳の男女	300 管理職：150名 一般社員：150名	あなたがテレワーク中に上司/部下とのコミュニケーション手段として使ったものをお答えください（MA）	82.7%	オンライン会議	75.7%	63.7%	2020年3月：オンライン議67.3%（メール87.3%，電話70.0%）

※1　MA:複数回答
※2　SA:単一回答

表2　Web会議の導入率

調査主体	調査期間	調査対象者	人数	質問	率	回答
ダイヤモンド経営者倶楽部	2020年6月20日～6月23日	ダイヤモンド経営者倶楽部会員	621社	今回の新型コロナウイルスにより「Web会議システム」を導入しましたか	91.7%	導入している
freee	2020年9月25日～9月29日	国内の従業員300名以下規模のスモールビジネスの経営者または，スモールビジネスマンに従事する従業員	4,463	WEB会議・オンライン会議システムの導入率	21.2%	10人未満 N=909
					32.9%	10～50人未満 N=1072
					48.8%	50～100人未満 N=687
					63.4%	100～300人未満 N=949
パーソルプロセス＆テクノロジー	2020年11月20日～11月24日	3ヶ月以上テレワークを継続している会社員	500	各項目について，お勤め先における業務のデジタル化に関する取組状況を教えてください（Web会議の導入・整備）	87.2%	コロナ禍の前から導入，実施されている33.6% コロナ禍発生後に導入，実施されている53.6%

表3　Web会議の利用頻度

調査主体	調査期間	調査対象者	人数	質問	回答
UCHIDA	2020年7月10日 ～7月12日	関東地方でテレワークを導入している従業員500名以上の企業に勤めている20～59歳の経営者，役員クラス，本部長（事業部長）クラス，部長クラスで，経営責任を（一部でも）負う立場にある方	333	コロナ感染拡大の前と比べて，WEB会議の頻度はどうなりましたか？	増えた86.8% 変わらない8.7% 減った2.1% WEB会議はしていない1.8% わからない・答えたくない0.6%
筑波大学	2020年8月19日 ～9月7日	コロナ禍に伴いテレワークが導入された企業（17社）に勤務する方	有効回答数 4,343	新型コロナウイルスの流行前（2019年10-12月頃）と流行後（2020年4-5月頃）のオンライン会議の利用頻度	流行前 月に1回以下60.0%　（月に1回程度，それ以下，全くないの合計） 月に2～3回程度10.0% 週に1回以上23.1% （週に4～5回程度，週に2～3回程度，週に1回程度の合計） 1日1回以上7.0%（1日に数回，1日1回程度の合計） 流行後 月に1回以下8.3%　（月に1回程度，それ以下，全くないの合計） 月に2～3回程度5.3% 週に1回以上41.0% （週に4～5回程度，週に2～3回程度，週に1回程度の合計） 1日1回以上45.4%（1日に数回，1日1回程度の合計）
ブイキューブ	2021年4月	東京都，神奈川県，千葉県，埼玉県のいずれかに居住する，第1回・第2回の緊急事態宣言期間中の両方で月1回以上のWeb会議を行っていた会社員	498	新型コロナウイルス流行前(2019年以前)と比べ，流行後にWeb会議の頻度はどうなったか？	増えた55.6% どちらかといえば増えた24.7% どちらかといえば減った0.6% 減った1.2%

「どちらかといえば増えた」24.7％であり，合わせて80.3％の人が「増えた」と回答した.

筑波大学（2020）では，コロナ禍に伴いテレワークが導入された企業に勤務する人を対象に，新型コロナウイルスの流行前（2019年10月~12月頃）と流行後（2020年４月～５月）のオンライン会議の利用頻度を尋ねており，コロナ流行前では，オンライン会議を「月に１回以下」利用していると回答した人の割合は60.0％であったが，流行後では8.3％に減少した. また,「週に１回以上」23.1％が41.0％に，「１日１回以上」7.0％が45.4％となり，大きく上昇した．流行後の「週に１回以上」41.0％と「１日１回以上」45.4％を合わせると86.4％の人がオンライン会議を頻繁に利用している結果となった.

以上のことから，コロナ流行前と比べ，コロナ流行後は約８割の人がWeb会議の利用頻度の増加を感じていることがわかる．また，コロナ流行後の利用頻度も大きく増えていることから，コロナ禍においてのコミュニケーション手段としてWeb会議が主流となっていることがうかがえる.

4.2.2　年代別のWeb会議利用状況

年代別のWeb会議の利用状況，使いやすさについてどう感じているかを検討した.[*2]

クオリティア（2021）では，男女・年代別にWeb会議の利用状況を尋ねており，男性の利用率の高い順では，20代47.2％，40代44.8％，50代42.4％，30代38.4％，女性では20代35.2％，30代29.6％，40代28.0％，50代26.4％であった．男女ともに20代でWeb会議を利用することが多いことがわかる.

Web会議の「使いやすさ・仕事のしやすさ」について年代別に尋ねたアスマーク（2021）では,「とても使いやすい」「使いやすい」と答えた割合は，20代55.9％，30代56.5％，40代46.5％，50代41.8％であった．20代，30代の若い世代ではWeb会議を「使いやすい」と感じており，一番割合の低かった50代と比べて約15ポイントもの差があった.

若い世代では利用率が高いことから，使い方に慣れているため使いやすいと感じている人が多く，年代が上がると利用率が低いため使い方に慣れていないことがうかがえる.

4.3　Web会議のメリット，デメリット

Web会議で便利なこと，Web会議がいい理由，メリット，そしてWeb会議で困ること，気になること，デメリットなどを整理した.

4.3.1　Web会議のメリット

Web会議のメリットについて問うた４件の調査のうち，回答割合が高かったものから上位５件までを表４に整理した.

メリットであると考える理由として「移動しなくていい」「移動時間や交通費が減る」の回答が上位を占めた．他に「移動」に関連して，「場所を選ばずにどこからでも参加ができる」「会議室の確保が不要」などもあった．この結果から，遠方の相手との会議でも移動時間や交通費がかからず，すぐに会議ができることを多くの人がメリットであると感じていることがわかる.

続いて，どの調査にも「画面共有ができて便利」が挙げられている．資料を印刷する手間が省け，会議の直前まで資料の手入れをすることができるなど，オンライン会議ならではの便利な機能である．このほかに「緊張やストレスがない」「会議が長引かない」という理由が挙げられた.

Web会議は地方や海外などの遠方の相手でも，移動に伴う交通手段や宿泊先，会議室の予約，移動時間などを気にせず開催できる．また，感染予防対策はもちろんのこと，天候や災害にも影響を受ける心配がない．そして，画面共有によるペーパーレス化や会議を録画できるため，議事録の作成が不要となることも考えられる．時間や費用の削減ができ，効率化が図れることが大きなメリットであると考えられる.

4.3.2　Web会議のデメリット

Web会議のデメリットについて問うた７件の調査のうち，回答割合が高かったものから上位５件までを表５に整理した.

＊2　なお，ここで取り上げる調査では，使いやすさのソフトによる違いは考慮されておらず，Web会議の一般的な使いやすさについて尋ねている.

表4　Web会議のメリット

	調査主体	調査期間	調査対象者	人数	質問項目	1	2	3	4	5
1	インフィニ	（不明）	インフィニ社員	（不明）	WEB会議で便利なことは何ですか（SA）	44% 移動しなくていい	36% 画面共有ができて便利	10% 緊張やストレスが少ない	9% 会議が長引かない	—
2	H1T	2020年6月9日～6月23日	H1Tユーザー	181	WEB会議のメリットを教えてください（MA）	87.8% 場所を選ばずにどこからでも参加ができる	86.6% 会議に出席するための移動時間が減り，交通費も削減できる	83.1% 設定が簡単で，手軽にすぐ始められる	70.3% メールでの事前送付や画面上での資料共有などにより，資料印刷費が削減される	—
3	SB C&S	2020年7月11日～7月13日	20～69歳の仕事でビデオ会議システムを利用する機会がある男女	400	ビデオ会議にはどのような利点があると感じますか（MA）	80.0% 移動時間や交通費が減る	42.8% 無駄な会話が減る	40.3% 会議室の確保が不要	39.5% 会議時間が短縮される	37.8% 会議資料の共有が簡単
4	ビズヒッツ	2020年9月1日～9月15日	WEB会議をしたことがある全国の男女	527（n＝251）	WEB会議がいい理由（MA）	53.3% 移動しなくていい	13.5% 緊張やストレスが少ない	9.1% 会議が長引かない	5.1% 画面共有ができて便利	—

表5　Web会議のデメリット

	調査主体	調査期間	調査対象者	人数	質問項目	1	2	3	4	5
1	インフィニ	（不明）	インフィニ社員	（不明）	WEB会議で困ること，ストレスに感じていることは何ですか（SA）	31% 反応がわかりづらい	27% 音声や映像の不具合	25% 発言のタイミングがつかみづらい	8% 背景や顔映りが気になる	4% 相手の話している内容が分かりづらい
2	EEC	（不明）	企業経営者，会社員，フリーランス・自営業	117（n＝285）	Web会議・テレビ会議で気になることはありますか（MA）	16.8% 接続トラブルが起きる（画像，音声の途切れなど）	12.2% 雑音が気になる	11.5% 相手の感情や気持ちがわかりづらい	10.1% 発言しづらい	9.4% 環境を用意することが難しい（静かな場所，背景など）
3	H1T	2020年6月9日～6月23日	H1Tユーザー	181	WEB会議のデメリットを教えてください（MA）	72.1% 会議の空気や細かいニュアンス，相手の表情が読み取りにくい	62.2% 音質/画質がネット環境などに影響を受けるため，会議の進行が妨げられることがある	45.9% 会議の内容が外に漏れないよう，対面時以上にセキュリティ対策が必要	—	—
4	イード	2020年6月30日～7月6日	20～59歳男女，有職者，月に1回以上仕事でWeb会議をする人	1,010	WEB会議で困ること（MA）	58.1% 発言のタイミングがつかみづらい	42.0% 相手の表情を読みとりづらい	38.7% 相手の音声が聞きづらい	33.5% 話を聞くのに集中力がいる	18.9% 発言者が誰なのか分かりづらい
5	J.DPOWERジャパン	2020年7月中旬～8月中旬	WEB会議システムを導入している全国の従業員数50名以上の企業	1501社から1965件 ※1回答企業から最大2つのWEB会議システムの評価を聴取	WEB会議システム利用中の問題・不具合（MA）	35% 音声が聞き取りにくい	26% 途中，接続が切れる（つながらなくなる）	17% 画面共有が遅延する（タイムラグがある）	14% ビデオと音声のタイミングがズレる	13% 音声が聞こえない/声が届かない
6	筑波大学	2020年8月19日～9月7日	コロナ禍に伴いテレワークが導入された企業に勤務する方	有効回答数　4,343	オンライン会議の問題（MA）	86.7% 相手の表情やしぐさなどが分かりにくい	85.8% 参加者がどう反応しているのかが分かりにくい	76.4% 場の雰囲気がつかみづらい	72.9% 積極的に発言する人とそうでない人がはっきりわかれる	72.8% 相手がどのくらい内容を理解できているかが分かりくい
7	ビズヒッツ	2020年9月1日～9月15日	WEB会議をしたことがる全国の男女	527（n＝448）	WEB会議で困っていること（MA）	52.2% 音声や映像の不具合	16.9% 話すタイミングが難しい	15.1% 反応がわかりづらい／伝わりにくい	9.1% 背景や顔映りが気になる	5.5% WEB会議ツールを使いこなせない

デメリットであると考える理由として「音声や映像の不具合」の回答が，ほぼどの調査でも上位を占めた．テレワークで通信環境が整っていないなどの要因で不具合が発生することが考えられる．しかし，継続調査を行っているパーソル総合研究所（2020a，2020b，2020c）では，全国の就業者約２万人を対象に調査を実施しており，2020年４月の調査では，テレワークにおける課題として，「遠隔会議のシステムが使いにくい」と答えた人の割合は35.2％であったが，５月では29.4％，11月では24.4％にまで低下した．また，「自宅のインターネット環境が不安定」と回答した人の割合は，４月31.5％，５月28.8％，11月26.2％であった．同様に，日本生産性本部（2020, 2021）では、20歳以上の雇用者1,100名を対象に継続調査を行っており「Web会議などのテレワーク用ツールの使い勝手」が課題であると答えた人の割合は，2020年５月では32.1％，2021年４月では25.1％であった．Web会議を使用する頻度が増え，利用者が使い方に慣れてきたことに加え，インターネット環境やWeb会議ツールの改良が技術的に進んできたことが背景にあると推測される．

デメリットに関するそれに続く理由としては「反応がわかりづらい」「発言のタイミングがつかみづらい」「背景や顔映りが気になる」などコミュニケーションに関わる回答が多く挙げられた．パーソル総合研究所（2020a，2020b，2020c）によると，「非対面のやりとりは相手の気持ちがわかりにくく不安」と答えた人の割合は，2020年４月の調査では39.2％，５月では32.2％，11月では34.2％であった．非対面のやり取りの感じ方に関しては，オンライン会議に慣れてもあまり大きな変化がないことがわかる．

4.4 対面の状況

コロナ禍で対面会議の頻度はどう変化したか，また対面会議のメリットを検討した．

4.4.1 対面会議の頻度

キーマンズネット（2021）では，コロナ流行初期である2020年１月とコロナ流行後の2020年12月に行った調査において，テレワーク制度導入済みの企業に対し，出社を中心に勤務している人とテレワークを中心に勤務している人が会議を実施する際の会議形態について尋ねたところ，「対面会議はなく常にWeb会議／ビデオ会議」と答えた人の割合は6.3％から38.1％に増加，「出社日に対面会議」は21.3％から3.2％に減少した．コロナ流行後では人との接触を減らすために，対面会議の機会は減っていることがわかる．

アスマーク（2021）では2020年11月に，月に数回以上在宅勤務をしている人を対象に行った調査において，「週に１回以上対面会議している」と答えた人の割合は33.5％であった．同調査では，「週に１回以上ビデオ会議をしている」人が64.4％いることが示されており，３密を防ぐため対面での会議は控えられてきていることがわかる．

企業の人事責任者，担当者を対象に調査を行ったHR総研（2021）では，2021年１月に社内コミュニケーションで利用頻度の多い手段を従業員規模別に調査しており，対面会議では従業員数が1,001名以上の企業で44％，301～1,000名で73％，300名以下で64％であった．大企業の対面会議の利用頻度が低い理由として考えられることは，大企業では会議への参加者が多くなりがちなため，密を避けて対面会議を開かないようにしていること，大企業ではWeb会議を行うための機器・体制が整っているので，Web会議を積極的に活用しているなどの理由が推測される．

4.4.2 対面会議のメリット

ビズヒッツ（2020）では，対面会議とWeb会議ではどちらがいいかと尋ねた質問で「対面会議がいい」と回答した人の割合は52％，「WEB会議がいい」48％であった．同様の質問で，インフィニ（2021）では，対面会議46％，WEB会議54％であった．対面会議とWeb会議の好みは拮抗していることがわかる．更にビズヒッツ（2020）では，対面会議のほうがよいと思う理由を尋ねており，「意思疎通しやすい」と回答した人の割合が63.0％，「WEB会議は不具合が生じる」24.2％，「発言や議論をしやすい」17.0％，「資料や現物の共有ができる」3.9％であった．対面会議では多くの人が意思疎通しやすいと感じていることがわかる．

20代を対象とした調査を行った学情（2020c）では，同僚とのコミュニケーションにおいて「対面」と「オンライン」どちらが好ましいかを尋ねており，「対面」「どちらかといえば対面」と回答した人の割

合は合わせて66.4%,「どちらかといえばオンライン」「オンライン」では15.4%であった．同僚とのコミュニケーションは「対面」が好ましいと回答した人が多いことがわかる．また，上司とのコミュニケーションにおいても尋ねており，「対面」「どちらかといえば対面」は合わせて50.9%,「どちらかといえばオンライン」「オンライン」では23.5%であった．上司とのコミュニケーションでも約半数の人が「対面」が好ましいと回答した．

同調査では，同僚と対面でのコミュニケーションが好ましい理由として,「直接のほうがコミュニケーションを取りやすい」,「顔を合わせて話したほうが，仕事を進めやすいと思う」,「画面越しよりも，直接話したほうが良い関係を築くことができる」などが挙げられた．上司と対面でのコミュニケーションが好ましい理由では，「顔をみて話したほうが，上司がどう思っているか感じ取りやすい」「直接話したほうが，真剣さや熱意も伝わると思う」などが挙げられた．上司よりも同僚との間で対面でのコミュニケーションが選ばれていることを考えると，緊張を強いられない相手との間のコミュニケーションで，より対面が好まれやすいものと推測される．

この結果を受けて学情（2020c）は,「相談」などの双方向のコミュニケーションは対面で行いたいものの，スピードが求められる「報告」などはWeb会議システムや社内チャットも有効活用したいという意向も伺えるとしている．

4.5 オンラインコミュニケーションの満足度

Web会議について満足しているかどうかを問うた調査について検討した．ダイヤモンド経営者倶楽部（2020）では,「Web会議システム」について満足していますか」と問うたところ,「満足している」と回答した企業の割合が30.6%,「どちらかと言えば満足している」60.2%であり，合わせて90.8%の企業が「満足している」と回答した．同じく筑波大学（2020）でも,「非常に満足している」8.9%,「満足している」29.9%,「どちらかといえば満足している」38.3%であり，合わせて77.1%の人が「満足している」と回答した．Web会議でのコミュニケーションを多くの人が満足していることがわかる．しかし，筑波大学（2020）の調査結果でも指摘しているとおり，どちらの調査も「どちらかといえば満足している」と答えた人の割合が多い．これは，オンラインコミュニケーションに不満もあるが，Web会議を行うことのメリットが大きいことを認めているため，ある程度まで満足しているという結果であることがうかがえる．

4.6 オンライン商談

新型コロナウイルス感染症対策として，人と対面で接するのが控えられる中，社外の人とのオンラインコミュニケーションに特化した営業活動について検討した．エン・ジャパン（2021a）が2020年10月～11月の間に「人事のミカタ」を利用している企業374社に対して行った調査によると，オンライン商談を導入している企業の割合は65%であった．業種別では,「IT・インターネット関連」92%,「広告・出版・マスコミ関連」85%,「コンサル関連」83%などで導入率が高かった．一方で,「不動産・建設関連」45%,「流通・小売関連」42%,「金融関連」25%などでは導入率が低かった．オンライン商談の導入もテレワークの導入と同じように（後藤・濵野，2020），業種によって向き，不向きがあることがわかる．

ファストマーケティング（2020）が2020年５月に事前調査で現在の職種が営業と回答した20代～50代の男女240名に対して行った調査では，年代別にオンライン商談の実施状況を尋ねており,「オンライン商談を行っている」「ときどき行っている」と回答した人の割合は，20~29歳では41.7%，30～39歳36.7％，40～49歳36.6％，50～59歳25.0％であった．調査結果から，若い世代ほど実施率が高く，年代が上がるにつれ実施率が下がっていることがわかる．

学情（2020a）が2020年６月に20代専門転職サイト「Re就活」へのサイト来訪者のうち「営業職経験者」120名に行った調査では，希望する営業スタイルを尋ねており,「対面商談」「どちらかと言えば対面商談」と回答した人の割合は合わせて69.4%,「オンライン商談」「どちらかと言えばオンライン商談」では合わせて30.6%であった．20代の営業職経験者ではオンライン商談より対面商談を希望する人が多いことがわかる．

同調査で対面での営業を希望する理由を尋ねており,「オンライン商談では表情がわかりにくいから」と回答した人の割合は43.2%,「オンラ

イン商談ではコミュニケーションが難しいから」42.1%，「オンライン商談を実施したことがないから」30.5%，「お客様から対面の方が好評だから」25.3%などであった．オンラインでの営業を希望する理由では，「移動時間を削減できるから」52.4%，「アポイントの時間を調整しやすいから」47.6%，「感染症や熱中症などのリスクを抑えられるから」42.9%，「オンラインでできることが分かったから」40.5%，「対面と変わらず商談できるツールがあるから」23.8%，「アポイントの件数を増やせるから」21.4%などであった．

ベルフェイス（2020）が2020年４月～５月の間に行った調査では，７都道府県（東京，神奈川，埼玉，千葉，大阪，兵庫，福岡）在住の企業の経営者層，営業職1,000名に「営業のどのフェーズでオンライン商談を行っていますか」と尋ねており，「既存顧客へのフォロー」と回答した人の割合は44.6%，「新規顧客との２回目以降の商談」31.2%，「新規顧客との初回商談」16.2%，「既存顧客へのアップセル・クロスセル提案」13.3%，「新規顧客との契約」9.4%などであった．「既存顧客へのフォロー」が一番多いことから，すでに信頼関係が構築されている顧客との間ではオンライン商談は効率的に進むと思われる．一方で「新規顧客との契約」「新規顧客との初回商談」では，信頼関係が構築されていないためか，オンライン商談ではあまり利用されていなかった．

4.7　オンライン就活

4.7.1　就活生を対象にした調査

新型コロナウイルス感染防止の影響で就職活動においてもオンライン化が進んでいる．学情（2020b）では，2021年卒学生に「Webセミナー・Web面接に参加したことはありますか」と尋ねたところ，「はい」と回答した人の割合は74.0%であった．ZENKIGEN（2020）では，2021年３月末卒業予定の就活生に「（2020年３月以降）あなたが受けた面接の開催方法についてお聞かせください」と尋ねたところ，「オンライン面接のみ」19.5%，「対面面接とオンライン面接の両方」52.0%であり，オンライン面接を経験した人は約７割であったことがわかる．

エン・ジャパン（2021b）では2021年５月に行った調査で，同社が運営する就活サービスサイトを利用する，2022年に卒業予定の大学生，大学院生，650名のうち，既に内定を取得している学生に「内定先企業はどのような選考方法の企業でしたか」と尋ねたところ，「内定までの全プロセスがオンライン完結する企業のみだった」52%，「内定までの全プロセスがオンライン完結だった企業と，対面選考が含まれる企業の両方があった」29%，「内定までのプロセスで対面選考が含まれる企業のみだった」19%であった．コロナ禍ということはあるが，一次選考から最終選考までオンラインで完結している内定者が半数であったことがわかる．

次に，オンライン就活のメリットについて問うた３件の調査のうち，回答割合が高かったもの上位５件を表６に整理した．

「交通費を節約できる」「移動時間を節約できる」という理由が，いずれの調査でも上位を占めた．また，学情（2020b）の調査では欄外の結果であったが，「地方・地元の企業など遠方の企業にも参加できる」27.4%や，「遠方の企業にも応募しやすい」（ZENKIGEN, 2020）「遠方でも受けやすい」（MMD研究所, 2021）という回答が挙がっていた．他にも，「複数の企業の説明会や面接を受けることができる」という回答がいずれの調査でも挙げられていた．オンライン就活のメリットにおいても，他のオンラインコミュニケーションのメリットと同じく，時間や距離などの効率化を感じていることがわかる．

続いて，オンライン就活のデメリットについて問うた３件の調査のうち，回答割合が高かったもの上位５件を表７に整理した．いずれの調査でも「会社の雰囲気が分かりにくい」が上位を占めた．その他に，「相手の声や表情を確認しづらい」「言いたいことや熱意を伝えにくい」「会話のテンポが合わない」など，コミュニケーションに係るものが多かった．就職するにあたって，会社の雰囲気が分からないことは不安であり，直接自分の目で見て確かめたいと考える人が多いと思われる．その他に，「部屋の中が映り込んでしまう」「通信環境が整っていない」なども，どの調査にも挙げられていた．

就活生は就職活動においてオンライン，対面のどちらを好むのかを調べた．オンライン就活経験者の学生の男女329人に対して調査を行ったMMD研究所（2021）では，「オンラインでの就活が普及してほしい」と回答した281人に，「オンラインで行ってほしい就活イベント」を尋ねたところ，「説明会」78.3%，「１次面接」54.4%，「筆記試験」52.0%，

表6　オンライン就活のメリット

	調査主体	調査期間	調査対象者	人数	質問項目	1	2	3	4	5
1	学情	2020年6月17日 ～6月29日	就職情報サイト「あさがくナビ2021」へのサイト来訪者	991	Webセミナー・Web面接のメリット	79.3% 交通費を節約できる	75.9% 移動時間を節約できる	62.5% 好きな時間に視聴することができる	56.3% 感染症のリスクなく参加できる	31.2% 直接訪問よりも多くの企業のセミナーに参加できる
2	ZENKIGEN	2020年9月11日 ～9月17日	2021年3月末卒業予定の就活生	1,030	企業説明会や面接をオンラインで参加するメリットをお聞かせください	74.2% 移動時間や交通費・宿泊費を節約できる	63.4% 感染症のリスクがない	58.4% 遠方の企業にも応募しやすい	49.9% 1日のうちに複数の企業の説明会や面接を受けることができる	37.8% 学業と就職活動を両立しやすい
3	MMD研究所	2021年2月15日 ～2月25日	予備調査：全国の15歳～25歳の学生の男女 本調査：オンライン就活経験者	予備調査 4,875 本調査 329	オンライン就活のメリット	64.4% 移動がない	53.5% 遠方でも受けやすい	47.7% 時間の都合がつけやすい	46.8% 新型コロナウイルスに感染するリスクが減る	34.7% 受ける会社の数が増える

表7　オンライン就活のデメリット

	調査主体	調査期間	調査対象者	人数	質問項目	1	2	3	4	5
1	学情	2020年6月17日 ～6月29日	就職情報サイト「あさがくナビ2021」へのサイト来訪者	991	Webセミナー・Web面接のデメリット	67.0% 画面越しだと、企業や社員の雰囲気が分かりにくい	42.2% 画面越しだと、言いたいことや熱意を伝えにくい	36.7% Web面接時に、部屋が映り込んでしまう	27.1% 質問するタイミングがつかみにくい	19.0% Wi-Fiなどの通信環境が整っていない
2	ZENKIGEN	2020年9月11日 ～9月17日	2021年3月末卒業予定の就活生	1,030	企業説明会や面接をオンラインで参加するデメリットをお聞かせください	57.8% 企業や社員の雰囲気が分かりにくい	44.5% 相手の声や表情を確認しづらい	43.9% 背景に部屋が映り込んでしまう	43.6% 通信環境や端末を揃える必要がある	39.3% 言いたいことや熱意を伝えづらい
3	MMD研究所	2021年2月15日 ～2月25日	予備調査：全国の15歳～25歳の学生の男女 本調査：オンライン就活経験者	予備調査 4,875 本調査 329	オンライン就活のデメリット	52.6% 会社の雰囲気がわかりにくい	37.7% 会話のテンポが合わないことがある	35.9% 部屋の中が映ってしまう	35.6% 電波が途切れてしまう	33.4% 自宅の物音が入ってしまう

「自己PRなどのエントリー選考」46.6％，「２～３次面接」35.9％，「グループディスカッション」21.0％，「最終面接」17.4％であった．

説明会や面接はオンラインと対面のどちらを希望するかを就活生に対し尋ねたZENKIGEN（2020）の調査では，最終選考は「対面が良い」「どちらかと言えば対面が良い」と回答した人の割合は合わせて73.4％，「どちらかと言えばオンラインが良い」「オンラインが良い」では合わせて10.6％あった．

上記２つの調査結果より，説明会，１次面接，筆記試験，自己PRなどのエントリー選考については約半数の就活生がオンラインで行われることを好んでいるが，最終選考については約７割の人が対面を希望していることがわかる．

また，ZENKIGEN（2020）では企業説明会や面接を対面で参加するメリットを尋ねており，「会社の雰囲気を確認できる」69.0％，「直接会って話したほうが話しやすい」57.1％，「会社の場所や環境を確認できる」55.3％，「人柄や熱意を伝えやすい」51.5％であった．対面であると雰囲気をつかむことや気持ちを伝えることが可能だと考えている人が多いことがわかる．

4.7.2　企業を対象にした調査

エン・ジャパン（2020a）では，2020年５月～６月の間に行った調査で，求人支援サービス「engage」を利用している企業935社に「オンライン面接をしたことがあるか」と問うたところ，「ある」と回答した企業は26％であった．業種別では「IT・インターネット関連」が一番多く58％，「広告・出版・マスコミ関連」43％，「コンサル関連」33％であった．一方で，一番割合の低かった企業は「不動産・建設関連」「サービス関連」21％であった．

HR総研（2020）では，2020年６月～７月の間に上場企業・未上場企業の採用担当者を対象に行った調査で，面接を実施している企業における「現在の面接選考の実施状況」について問うており，「オンライン面接のみを実施している」19％，「オンライン面接の他，対面での面接も実施している」34％，「対面での面接のみを実施している」27％，「面接選考は終了した（オンライン利用あり）」10％，「面接選考は終了した（オンライン利用無）」10％であった．さらに「オンライン面接を実施している／実施した」と回答した企業に「最終面接までオンラインで実施する可能性」について問うたところ，「すでにオンライン面接のみで実施した」57％，「オンライン面接のみで実施予定」６％，「対面型の面接も実施する予定」28％，「検討中」９％であった．オンライン面接を実施している企業では，最終面接までオンラインで実施した企業が６割近くあることがわかる．

エン・ジャパン（2020a）が2020年５月～６月の間に同社が運営する求人支援サービスを利用している企業935社に対して行った調査で，「オンライン面接をしたことがあると」回答した企業に，今後，積極的にオンライン面接を実施していきたいかと問うたところ，「したい」「どちらかといえばしたい」と回答した企業の割合は合わせて71％であった．多くの企業が今後もオンライン面接を実施していきたいと考えていることがわかる．また，今後，積極的にオンライン面接を実施していきたい理由では，「来社による日程調整の手間が省けるので，採用までの時間短縮に繋がる」「地方など，遠方の求職者との面接機会ができる上，交通費の負担がないのはメリット」などの意見が挙げられた．

他方，エン・ジャパン（2020b）が2020年７月～８月の間に454社に対して行った調査では，オンライン面接を導入している企業に，オンライン面接の感想で「不満足」「どちらかといえば不満足」と回答した理由を問うたところ，「画面越しで評価がしづらい」92％，「直接会ってみたら応募者の印象が違った」47％，「回線トラブルがあった」39％，「求職者・企業側の一方がネットに不慣れだと難しい」33％，「面接を録画されたり，データ流出リスクがある」19％などであった．

以上のことより，メリットについては「交通費・時間の節約」「遠方の企業（求職者）との面接の機会がもてる」など，就活生と企業で同じ内容を挙げていることがわかる．また，デメリットについても多くの就活生が「画面越しでは会社の雰囲気が分かりにくい」「言いたいことや熱意を伝えにくい」と感じており，企業側も「画面越しで評価がしづらい」と感じていることから，双方同じ内容をデメリットであると感じていた．

4.8　Web会議での顔出しの有無

Web会議の際に画面に自分の顔を映しているかどうかについて検討した．

インフィニ（2021）では，WEB会議の際「ほとんどの場合出している」と回答した人の割合は40%，「出すことが多い」14%，「出さないことが多い」14%，「ほとんどの場合出さない」15%であった．イード（2020）では，「ほとんどの場合出している」32.2%，「出すことが多い」15.1%，「出さないことが多い」15.7%，「ほとんどの場合出さない」22.1%であった．約半数の人がWeb会議の際に画面に自分の顔を映していることがわかる．同調査では，テレワーク実施状況別の「Web会議の際の顔出しの状況」についても尋ねている．「毎日テレワークをしている人」でほとんどの場合出している人は19.4%，「半々くらいテレワークを実施している人」29.2%，「毎日出勤している人」40.4%であった．Web会議で顔を映す，映さないは，自宅から参加（毎日テレワーク）の人は顔を映している人の割合が少なく，職場から参加（毎日出勤）の人は顔を写す割合が高いことがわかる．

産労総合研究所（2020）が2020年８月に20～60代の男女200人を対象とした調査の中で，オンライン会議に参加したことがあると回答した53人に，「モニターに自分の顔が映ることを，どう感じていますか」と尋ねたところ，モニターに自分の顔が映るのは「いやなことだと思う」「どちらかというといやなことだと思う」と答えた人の割合は合わせて66.0%，「いいことだと思う」「どちらかというといいことだと思う」では合わせて34.0%であった．なお，男女別の集計では，男性の「いやなことだと思う」「どちらかというといやなことだと思う」は55.1%，女性では79.2%であった．また，男性の「いいことだと思う」「どちらかというといいことだと思う」は44.8%，女性では20.9%であった．このことから，男性はモニターに顔が映ることには女性ほど抵抗感がないことがわかった．

ランクアップ（2020）が2020年10月に発表した，20～60代の働く男性323人を対象とした調査結果によると，「画面をオンにしてオンライン会議をする際，画面越しに自分の顔が見えることについてどう思うか」と尋ねたところ，「嫌だ」「どちらかというと嫌だ」と答えた人の割合は合わせて48.6%，「嬉しい」「どちらかというと嬉しい」では合わせて4.3%，「どちらでもない」47.1%であった．また，嫌だと思う理由を尋ねたところ，「表情が気になるから」44.6%，「自分の外見に自信がないから」43.3%，「大きさなど顔の輪郭が気になるから」30.6%などであった．一方で，嬉しいと回答した4.3%の人の理由は「表情の改善ができるから」78.6%，「美意識が上がるから」35.7%，「自分の外見に自信があるから」14.3%などであった．約半数の人が画面越しに自分の顔が見えることを嫌だと感じており，嬉しいと感じている人はごくわずかであることがわかる．

マーケティングアプリケーションズ（2020）が2020年10月に全国の20～59歳女性会社員400人を対象に行った調査で，「オンライン会議時，画面に映る自分の顔にネガティブな印象を感じたことがあるか」と尋ねたところ，「表情が暗く見える」42%，「シワやたるみが目立つ」38%，「不健康そうに見える」31%などの回答があった．一方で，「特にない」と答えた人の割合は11%であり，多くの人が容貌を気にしていることがわかる．

4.9 ビジネスチャットツール

オンラインコミュニケーションで利用されるツールとして，Web会議システムの他にビジネスチャットツールがあるが，その中で代表的なものにはSlack, Chatwork, LINE WORKS, Google Chat, Microsoft Teamsなどが挙げられる（池田，2020）．

ビジネスチャットの導入率，使用率，利用率について問うた調査11件を表８に整理した．

コロナ禍以前のビジネスチャットツールの導入率は，2017年２月に調査を行った伊藤忠テクノソリューションズ（2017）によると，28.1%であった．2018年12月に調査を行ったサイバーソリューションズ（2019）では導入率は33%であり，コロナ禍以前では約３割程度の企業がビジネスチャットを導入していたと考えられる．また，コロナ流行後に調査を行ったキーマンズネット（2020）では54.3%，マネジー（2021）では39.2%であった．更にマネジー（2021）では，導入していると回答した人に，導入時期はいつ頃かと尋ねており，「コロナウイルスの流行より前から導入していた」と回答した人の割合が78.1%，「コロナウイルスをきっかけに導入した」21.9%であった．ビジネスチャットを導入している企業ではビジネスチャットがコロナ流行前から導入されており，コロナ禍の影響はあまりなかったことがわかる．一方で，２割の企業はコロナ禍を機に導入していることから，コロナ禍がより利用者を増やすきっかけになった（マネジー，2021）ことがうか

表８　ビジネスチャットツールの導入率，使用率，利用率

調査主体	調査期間	調査対象者	人数	質問	率	回答	率	率	備考
伊藤忠テクノソリューションズ	2017年2月3日～2月4日	全国，売上規模100億円以上，従業員数200名以上の企業に勤務する経営者・役員，及び係長・リーダークラス以上の役職者	412	チャットツール，ビジネスチャットツールを導入しているか（SA）	28.1%	導入している	—	—	
サイバーソリューションズ	2018年12月	全国，従業員200名以上の企業に勤務する経営者･役員，及び係長･リーダークラス以上の役職者	500	ビジネスチャットツールの導入率（MA）	33%		96%	95%	
マネジー	（不明）	（不明）	（不明）	チャットツールを導入していますか（SA）	39.2%	導入している	—	—	
マツリカ	2020年4月20日～4月24日	企業の経営者層，営業部門の管理職・マネージャー，営業担当者等	233	（営業活動の）リモートワークではどのようなツールを使用していますか（MA）	66.8%	チャットツール	—	—	
矢野経済研究所	2020年5月	東京都，神奈川県，埼玉県，千葉県，大阪府，兵庫県，福岡県の7都道府県のオフィスに勤務する20～70歳代の男女	500	テレワーク勤務中のITツール利用状況（MA）	46.2%	ビジネスチャット	—	—	
リトルソフト㈱	2020年6月1日～6月3日	現在テレワーク中の中小企業・ベンチャー企業・スモールビジネス従事者	1,042	どのようなツールでコミュニケーションを取っていますか（SA）	25.3%	ビジネスチャット	18.1%	—	LINE/SNS12.3%
キーマンズネット	2020年7月27日～8月7日	（不明）	70	電話やメール以外のコミュニケーション手段として，業務でビジネスチャットやメッセージアプリなどを導入しているか（SA）	54.3%	導入している	—	—	
Chatwork	2020年10月19日～10月23日	ビジネスチャット利用者　1,669人 ビジネスチャット利用者　593人	2,262	週1回以上テレワークをしている人でビジネスチャットを利用しているユーザー（SA）	51.7%		—	—	週1回以上テレワークをしている人でビジネスチャットを利用していないユーザー30.7%
				勤務日すべてテレワークしている人でビジネスチャットを利用しているユーザー（SA）	22.8%		—	—	勤務日すべてテレワークしている人でビジネスチャットを利用していないユーザー13.3%
アスマーク	2020年11月27日～30日	月に数回以上「在宅勤務」をしている全国20代～50代会社員	680	各コミュニケーション手段の使用率（MA）	63.4%	チャット	90.8%	80.0%	対面式会議33.5%
クオリティア	2021年4月6日～4月7日	全国の20歳～50歳の会社員･公務員･団体職員	1,000	仕事でどのようなコミュニケーションツールを使っているか（MA）	20.2%	ビジネスチャット	76.4%	81.9%	
		テレワークを行うことがある人	362	仕事でどのようなコミュニケーションツールを使っているか（MA）	43.9%	ビジネスチャット	93.4%	82.9%	
あしたのチーム	2021年4月23日～4月26日	全国の従業員数5名以上の企業に勤める正社員で，2020年3月～2021年3月に平均週2回以上テレワークをした一般社員，および同期間にご自身または平均週2日以上テレワークをした部下を持つ管理職，20歳～59歳の男女	300 管理職：150名 一般社員：150名	あなたがテレワーク中に上司/部下とのコミュニケーション手段として使ったものをお答えください（MA）	52.0%	チャット/SNS	75.7%	63.7%	2020年3月：チャット43.3%（メール87.3%，電話70.0%）

がえる.

テレワーク中のコミュニケーション手段として,ビジネスチャットはどれくらい使われているかを尋ねた調査結果を総合すると,22.8%～63.4%の人が使用していると回答した.メールの使用率は(テレワーク中のスモールビジネス従事者を対象とした調査(18.1%)を除けば)75.7%～93.4%と依然として高いが,ビジネスチャットも,テレワークを行っている人の約4割が使用していることがわかる.コミュニケーションを気軽に取るための手段や,メールに代わるツールとして注目されていると考えられる.

ビジネスチャットツールを利用する目的(検討目的)を尋ねたサイバーソリューションズ(2019)によると,「スピーディーなコミュニケーション」と回答した人の割合は64%,「会議時間の短縮が期待できる」36%,「複数人での情報共有が容易になる」35%などであった.ビジネスチャットは対面でコミュニケーションを取っている時と同じように,声をかけたいときにすぐにコミュニケーションを取ることができるツールとして,多くの人がメリットを感じていることがわかる.

4.10 今後のオンラインコミュニケーションの継続意向

今後も社内会議,取引先との打ち合わせはWeb会議やビジネスチャットを利用するかについて検討した.J.D.パワージャパン(2020a)が2020年4月に1週間以内に仕事でWEB会議システムを利用した男女1,223名に対して行った調査では,「今後,社内会議はウェブ会議でも問題ない」と回答した人の割合は63%(そう思う32%,まあそう思う31%),「今後,取引先や顧客等の外部との会議はウェブ会議でも問題ない」50%(そう思う24%,まあそう思う26%)であった.ダイヤモンド経営者倶楽部(2020)では,「今後,社内会議はWEB会議でも問題ない」と回答した人の割合は75.0%(思う24.1%,どちらかと言えば思う50.9%)「今後取引先との打ち合わせはWEB会議でも問題ない」64.8%(思う13.9%,どちらかと言えば思う50.9%)であった.野村総合研究所(2020)が2020年3月に全国の従業員500人以上の企業に勤める男女計6,184人を対象に行った調査では,「WEB・テレビ会議(社内の打ち合わせ)」を「緊急時だけでなく平常時でも,取り入れた働き方をしたい」と答えた人の割合は,63.1%,「WEB・テレビ会議(他社との打ち合わせ)」(を平常時でも取り入れたい)58.0%,「ビジネスチャットを用いた業務コミュニケーション」(を平常時でも取り入れたい)60.1%であった.Web会議の効率の良さが受け入れられたため,社内会議,取引先との打ち合わせ共に半数以上の人が,緊急時だけでなく平常時でもWeb会議を利用したいと感じていることがわかる.

続いて,今後のオンライン商談の継続意向について検討した.ファストマーケティング(2020)では,「あなたは新型コロナウイルスの流行が収束してもオンライン商談を継続したいですか」と尋ねたところ,「したい」「ややしたい」と回答した人の割合は合わせて60.7%であった.半数以上の人がオンライン商談を継続したいと感じていることがわかる.さらに,年代別にも尋ねており,20代の「したい」「ややしたい」の割合は合わせて80.0%,30代72.7%,40代54.5%,50代では20.0%であった.若い世代ほどオンライン商談を継続したいと感じていることがわかる.

5. 考察

5.1 オンラインコミュニケーションの利用・導入状況

新型コロナウイルス流行禍では,感染拡大防止のため人との接触が制限されている.新型コロナウイルスの流行をきっかけにテレワークが普及し,感染の心配がなく,同日同時刻で,非対面でコミュニケーションをとることができるWeb会議の利用率は上昇し,対面会議の実施率は低下した.また,Web会議の利用頻度の割合も流行前と比べて大きく上昇した.一方で,ビジネスチャットツールの導入率は3割程度とまだそれほど高くなく,その導入時期は「コロナウイルスの流行より前から導入していた」と回答した人の割合が7割であり,コロナ禍の影響はあまりなかった.ビジネスチャットツールのメリットは「スピーディーなコミュニケーション」であるため,今後,メールや電話に代わるツールになり得ると考えられる.

年代別のWeb会議利用率は,20代で最も高いという調査結果(クオリティア,2021)があったが,そもそも回答者の年代によって会議や商談の内容・

重要度・複雑さなどが異なることを考慮する必要があると思われる．今回収集した各種調査からは定かでないが，若い世代に比べてベテラン世代の会議や商談は，規模が大きく内容も複雑になり重要性が高まっていくと予想される．そのため，年齢が上がるとオンラインで簡単に済ますわけにはいかないという意識が働く可能性がある．

5.2 オンラインコミュニケーションのメリット・デメリット，満足度

Web会議，オンライン商談，オンライン就活のメリットで共通することは「時間と距離の削減」であった．また，ビジネスチャットツールのメリットも「時間の削減」であった．

Web会議では，移動をせずとも遠隔地からでも参加ができ，インターネット環境さえあればいつでもどこからでも参加可能である．Web会議で顔を出さない場合は，電話と同じであると思われるが，資料共有ができるため，顔が見えなくても資料を見ながら，また資料に書き込みをしながら話をすることができる．そして録画機能があるため，あとから見直すことができ，会議に参加できなかった人とも共有することができる（池田，2020）．

オンライン商談では，今まで移動に使っていた時間が不要となり，空いた時間でアポイントの件数を増やすことができる．さらに，出張旅費が抑えられるため，国内の遠方の企業や海外の企業でも容易に商談を進めることが可能である．

就職活動においても，遠方の企業でも応募しやすいため，企業側にとっても全国から優秀な人材を集める可能性が大きくなることが推測される．

ビジネスチャットツールでは，メールのように挨拶や署名など，定型句や形式的なマナーは必要なく，短文でやりとりをするため，簡潔なメッセージのやりとりをスピーディーにおこなうことができる．また，メールで複数人に送信する場合，ToやCCに入れて送信することができるが，手間がかかる．そして後から参加したメンバーに経緯を知らせるためには，今までのメールを転送しなければならないなど，大変面倒である．一方で，ビジネスチャットツールでは複数人での情報共有が容易であり，後から参加したメンバーも経緯を追うことができる（池田，2020）などの点で便利で効率的である．

その他に，「音声や映像の不具合」がデメリットとしてあるが，Web会議で不具合があった場合，会議が滞る．オンライン商談やオンライン面接の場合では印象が悪くなる可能性があり，致命的である．しかし，不具合に関しては，継続調査からもわかるように徐々に改善されてきている．今後さらに操作の慣れや，通信環境の改善などで不具合が減っていくものと思われる．

Web会議の満足度は７割以上であり，多くの人が満足していることがわかった．しかし，その満足度合いの多くは「どちらかといえば満足している」であり，不満に感じていることもあるが，満足であると感じることのほうが上回っていることがうかがえる．前述したように，オンラインコミュニケーションツールではコミュニケーションが取りづらいが，「時間と距離の削減」により仕事の効率化を図ることができ，テレワークを容易に実現することができるため，得られるメリットは大きい．そのため，ある程度まで満足しているという結果が多かったと推測できる．

ビジネスインサイダー（2021）は，Microsoft（2021）が行った，2020年２月から１年間のMicrosoft Teamsなど同社製のワークプレイス・ツールで行われたやりとりの分析結果を取り上げ，会議に費やす時間は，2020年２月と比べ2.5倍にもなっており，同僚とのチャットは45%増加，メールは400億件以上増加したことを紹介している．オンラインコミュニケーションで削減した時間を利用してWeb会議の回数を増やしたり，気軽にコミュニケーションが取れるため，これまでより多くのメッセージを送っていることが考えられる．そのため，会議への参加やメッセージへの返答に時間を取られ，長時間労働となっていることがうかがえる．Web会議はお互いにバーチャルに顔を合わせてコミュニケーションを取ることができ便利であるが，職場で自席から会議ができない場合，会議室の予約や機器の準備，相手との会議時間の調整などの必要がある．また，ビジネスチャットでは同じ空間にいるかのように気軽に声掛けができるため，不必要な情報まで送っている可能性がある．労働時間の増加を抑えるため，本当にWeb会議が必要であるか，電話で済ませられないか，チャットやメールではチーム全員に周知し返信を要するような内容かどうか吟味し，必要性の薄いWeb会議やメッセージを省くことが長時間労働を助長しないことにつながると考える．

5.3 オンライン商談とオンライン就活

オンラインコミュニケーションツールの具体的な活用事例として，オンライン商談とオンライン就活を取り上げ，コロナ禍での活用状況を確認した．

オンライン商談については，調査数が少ないため推測の域を出ないが，約半数程度の企業で導入されていると思われる．コロナ禍で対面での商談は憚られ，他県への移動が自粛されてきたことなどから，様々な職種でオンライン商談が活用されているようである．また，オンライン商談が，営業のどのフェーズで向いているかを問うた調査（ベルフェイス，2020）からは，「新規顧客」との商談ではオンラインは不向きとされ，「既存顧客」との商談でオンラインが利用されていること，また顧客との「契約」よりも，契約後の「フォロー」においてオンラインが利用されていることが明らかとなった．商談においてオンラインを選択するか，対面を選択するかは，相手との関係性やその時の商談のフェーズが影響していると思われる．今後の顧客との関係を永続的なものにするために，初めて顔を合わせるような相手，ぜひとも関係を構築しておきたい相手，相手との信頼関係を構築したい場面では，オンラインよりも対面が好まれるものと推測される．

オンライン就活においては，７割の就活生がオンライン面接を経験していた．コロナ禍で対面での企業説明会や採用試験が控えられたため，企業説明会から最終面接までの全プロセスをオンラインで済ませた企業が相当数にのぼっていた．当の就活生たちは，学校の授業にもオンライン授業が導入されていたこと等もあり，スムーズに採用試験の変化に対応できたと思われる．しかしながら，採用試験の最も重要な局面である「最終面接」については，できれば対面で実施したいという声が多かった．オンライン就活は，遠方の志願者がその企業にアプローチしやすくなることから，学生側にも企業側にもメリットが大きく，これから定着していくものと思われる．今後は，企業側の「学生のことをより深く知り理解したい」というニーズ，そして学生側の「企業の雰囲気を感じ取りたい」「企業側に本当の自分をわかってほしい」という思いに応えるような採用方法が模索されていかなければならないであろう．

5.4 オンラインコミュニケーションの特性

職場におけるオンラインコミュニケーションツールの利用状況をふまえて，オンラインコミュニケーションと対面でのコミュニケーションの特性の整理を試みた．

まず，オンラインコミュニケーションツールの利用・導入率は，会議の目的や規模，取り扱う用件の重要性等によって影響される可能性を指摘してきた．例えば，重大な決断を求められる場面や，契約締結に向けた交渉を行う場面，初対面の相手との間で信頼関係を築き上げたいという場面では，オンラインよりも対面でのコミュニケーションが好まれていた．その一方で，オンラインコミュニケーションは，既に関係が出来上がった相手との打ち解けたやりとりや，報告を主体とした，どちらかといえば一方向的なコミュニケーションに向いていることが示唆された．

オンラインコミュニケーションツールのデメリットとして「非言語コミュニケーションの取りづらさ」が共通して挙げられた．オンラインでは言語情報以外の聴覚情報，視覚情報が制限されるため，対面の場合と比較すると，相手の反応や表情がわかりづらく，場の雰囲気や発言のタイミングがつかみづらい．これに対し，対面コミュニケーションでは「意思疎通のとりやすさ」が大きなメリットであった．オンラインコミュニケーションツールでは，資料の共有等の機能を有していることもあり，情報を共有することについては対面の場合と遜色ないが，非言語情報を手がかりに相手の感情を読み取ろうとする場合などには，あまり向かないものと考えられる．日常の他の場面と比べると，仕事場面では，情報を主体としたやりとりが多く，情報を迅速かつ正確に伝達したい機会は多い．その意味では，オンラインコミュニケーションツールの特性をよく理解して活用することが重要と考えられる．

杉谷（2008）は，インターネット（チャット）と対面コミュニケーションを比較し，どちらが優れているかについての実証研究を行っている．それによると，「話し手の発話内容が，その意図通り，正確に相手に受け取られたかどうか」という「伝達度」については，インターネット（チャット）の方が対面より優れており，話し手の発話内容が正確に聞き手に伝達されていた．これに対し，「話し手と聞き手が，互いに情報を正しく共有できていると感じて

いるかどうか」という「伝達感」については，インターネット（チャット）よりも対面の方が，相手に言いたいことが伝わった，あるいは，伝わってきたと実感されていた．この結果について，杉谷（2010）は，人は対面での会話中は，表情，ジェスチャー，声のトーン，周辺環境等，様々な情報が入ってくるため，話に集中できない．しかし，非言語的情報が乏しいオンラインでは，相手の発言だけに集中することが出来るため，より正確な理解と記憶が可能となる，と述べている．よって，情報を正確に伝えたい場合にはオンラインコミュニケーションの方が適しているという．また，対面では非言語的な情報の「伝達感」に優れているため，信頼関係を築くことや，感情を伝えたい，共有したい等の場合は，対面でのコミュニケーションの方が適していると述べている（杉谷，2020）．

対面会議とWeb会議の用途に応じた使い分けを想定して，これまでに言及した調査結果と，対面会議とWeb会議を比較した資料（会議室セレクト，2020，みんなの貸会議室，2021）をもとに両者の特性を表９に整理した．対面会議の特性として，意思疎通を図る，信頼関係を構築する（みんなの貸会議室，2021），繊細なコミュニケーションを図る（会議室セレクト，2020）などが向いているとされ，相談や1on1ミーティング，大型案件の提案や役員に対するプレゼンテーション，議論･ディスカッションを活発に行う会議，初めての顧客との会議には対面会議を選択することが好ましいと考えられる．Web会議の特性は，情報伝達のスピードを求める，発表者が話したいペースに合わせて会議を進めるなどが向いているとされ，報告会やセミナー，勉強会など大人数での報告・通知を行い共通認識を持つことにはWeb会議を選択することが好ましいと考えられる．

6. 全体考察

6.1. オンラインコミュニケーションの定着に向けて

既に述べたように，野村総合研究所（2020）の調査では，今後コロナ禍が収束した後も，社内会議，取引先との打ち合わせについて，約半数以上の人がWeb会議を継続したいと考えていた．また，オンライン商談についても半数以上の人が継続意向を持っていた．オンラインコミュニケーションツールを多くの人が利用し，時間やコスト削減など多くのメリットがあること，オンラインでもコミュニケーションが可能であることを認識したため，コロナ禍が鎮静化し対面会議が可能となっても，オンライン会議を一切利用しなくなることは考えにくい．オンラインコミュニケーションと対面，両方を利用したハイブリッド式の会議が定着すると予想される．

しかしながら，オンラインコミュニケーションツールを多用することによる特有の問題点も指摘されている．以下では２点について触れておきたい．

第一に，Web会議が広く実施されるようになってから「Zoom疲れ」（zoom fatigue）という言葉が使われることもあるように，オンラインコミュニケーションツールを用いたやりとりに特有の身体的疲労や精神的ストレスの存在が指摘されている．リクルートマネジメントソリューションズ（2020）によると，オンライン通話の疲労の要因として，「集中して画面を凝視すること」「画面に映る自身の

表9　対面会議とWeb会議の特性

	対面会議	Web会議
目　的	・意思疎通を図る ・信頼関係を構築する ・繊細なコミュニケーションを取る ・雰囲気をつかみ取る ・真剣さや熱意を伝える	・時間や距離の削減 ・情報伝達のスピードを求める ・発表者が話したいペースに合わせて会議を進める ・一方向的なコミュニケーション
具体例	・相談 ・1on1ミーティング ・大型案件の提案や役員に対するプレゼンテーション ・議論・ディスカッションを活発に行う ・初めての顧客との会議 ・重大な決断をする ・契約締結に向けた交渉	・報告会 ・セミナー ・勉強会 ・大人数での報告・通知を行い共通認識を持つ

顔を気にすること」「表情が見えないなかで相手の感情を読み取る必要があること」「少しの間が空くだけでも友好的でない雰囲気になること」「微妙な音の遅れが発話衝突（かぶり）を引き起こすこと」などが諸々の研究から明らかになったとしている．

特に，画面に映っている自分の顔を見ながらコミュニケーションをすることは，現在のWeb会議ツールに特有のストレッサーとなっている可能性がある．4.8でも述べたように，Web会議等で相手に向けて自分の顔を示すことは，非言語情報が制限されている中で，相手にとって貴重な情報源となっている．テレワークをしている中で，上司が部下の様子を知ることや，同僚同士の様子を知るためには，文字だけで本当のところをうかがい知ることは難しい．Web会議でカメラをオンにし，表情を確認することができれば，体調やメンタルヘルスの状態をうかがい知ることができる（武神，2021）．また，会議で話し合われている内容に対する理解度や発言意向の確認などの目的を考えても，双方が自分の顔を示したほうが，会議や会話はスムーズに進行するものと思われる．ただ，通常の対面でのコミュニケーションと対比させて考えると，相手には自分の顔を示しつつも，自分からは自分の顔が見えないように設定しておくことも選択肢の一つなのかもしれない．

第二に，筑波大学（2020）では，オンライン会議にどのような問題点があると感じているかを尋ねた調査の中で，「内容・意思決定上の問題」として，「雑談や些細な話題のやりとりが少ない」65.3％，「会議のテーマや議題から話がそれにくい」55.0％，「会議中に他の参加者との一体感が生まれにくい」54.8％などを指摘した．Web会議では，相手の反応が確認しにくく，沈黙が落ち着かなかったり，間の取り方が難しいためか，本来の議題以外の話題に展開しにくく，雑談を行うことが難しいとされる．また，そういったことが影響して，一体感も生まれにくいと考えられる．職場のチームが一体感を持つことができるように，対面でのやりとりや協力的な活動を通じて，一体感を培う必要があるであろうし，対面でのやりとり・活動が困難なコロナ禍のような状況においては，雑談のようなやりとりを生み出す仕掛けを工夫することもできるであろう．

さらに，オンラインでコミュニケーションを取りやすくするためには，職場内の誰もが自由な発言機会を保障され，それが皆に受容されるような，心理的安全性（石井，2020）の高い雰囲気づくりが重要だと思われる．コロナ禍が長期化している現在においては，本来であれば，対面で行う方がよいと考えられる会話や会議であっても，オンラインを選択せざるを得ない状況がある．対面でのコミュニケーション機会が限られている職場も多いと推測されることから，オンライン上でも発言しやすい雰囲気づくりに配慮し，コミュニケーションを活発にとることができれば，チームや組織のパフォーマンスを最大限に発揮することができるであろう．

6.2　今後に期待すること

今回収集した調査の多くは，どのテーマについても多くの調査によって裏打ちされた，客観性の高い知見であるとはいえない．また，サンプル数が少なかったり，特定の地域や職業に限られるなど，対象者の偏りも大きい．テレワークの実施状況だけでなく，オンラインコミュニケーションツールの利用状況等についても，広範で継続的な調査が多く行われることを期待したい．

また，今後もテレワークと出社のハイブリッド勤務が継続すると思われることから，通信環境の充実はもとより，オンラインコミュニケーションツールの技術的な発展（利便性の向上，機能の充実）と，オンラインコミュニケーションツールの利用上の工夫は，さらに高まっていくものと期待される．オンラインコミュニケーションツールが定着していく過程で，コミュニケーションの取りづらさがどのように軽減し，またオンライン特有の疲れや，雑談の発生しにくい状況などの新たな課題が，どのように改善・解消されていくのか，引き続き動向を注視していきたい．

引用文献

あしたのチーム（2020）．テレワークと人事の課題に関する調査　あしたのチーム　2020年4月20日<https://www.ashita-team.com/news/20200420-2/>（2021年7月27日）．

あしたのチーム（2021）．コロナ禍のテレワークと人事の課題に関する調査　あしたのチーム　2021年5月18日<https://www.ashita-team.com/news/20210518-3/>（2021年7月13日）．

アスマーク（2021）．「オンラインコミュニケーション」実態調査　アスマーク<https://www.asmarq.co.jp/white_paper/online_drinking_session/>（2021年7月14日）．

ビジネスインサイダー（2021）．在宅ワークに疲れた？マイクロソフトがそれを裏付ける調査結果を発表・・・パンデミックで会議時間は2倍，チャットは５割増しに　ビジネスインサイダー　2021年4月1日<https://www.businessinsider.jp/post-231938>（2021年7月18日）．

ビズヒッツ（2020）．WEB会議の悩みに関する意識調査　PRTIMES　2020年10月7日<https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000014.000041309.html>(2021年6月22日)．

ブイキューブ（2021）．ニューノーマルな働き方におけるWeb会議の実態調査　ブイキューブ　2021年5月26日<https://jp.vcube.com/news/release/20210526-1530.html>（2021年7月18日）．

ベルフェイス（2020）．「オンライン商談」に関する実態調査　ベルフェイス　2020年5月18日<https://corp.bell-face.com/news/2935/>（2021年8月16日）．

Chatwork（2020）．コロナ禍での働き方に関するストレス調査　Chatwork　2020年11月25日<https://ec-commonassets.s3.amazonaws.com/site/chatwork/documents/pdf_ja_stress-survey.pdf>（2021年7月19日）．

ダイヤモンド経営者倶楽部（2020）．Web会議システムについてのアンケート　ダイヤモンド経営者倶楽部　2020年7月20日<https://www.dfc.ne.jp/wp-content/uploads/2020/07/第2回アンケート.pdf>（2021年7月13日）．

EEC（2021）.「オンラインコミュニケーション」に関するアンケート　EEC　2021年2月18日<https://e-ec.co.jp/column-31/>（2021年7月18日）.

エン・ジャパン（2020a）.「オンライン面接」実態調査　エン・ジャパン　2020年7月29日<https://corp.en-japan.com/newsrelease/2020/23725.html>（2021年7月18日）.

エン・ジャパン（2020b）.「オンライン面接」実態調査　エン・ジャパン　2020年10月28日<https://corp.en-japan.com/newsrelease/2020/24445.html>（2021年8月14日）.

エン・ジャパン（2021a）.「オンライン商談」実態調査　エン・ジャパン　2021年2月3日<https://corp.en-japan.com/newsrelease/2021/25152.html>（2021年7月18日）.

エン・ジャパン（2021b）.「オンライン就活」意識調査2021　エン・ジャパン　2021年5月26日<https://corp.en-japan.com/newsrelease/2021/26140.html>（2021年8月17日）.

ファストマーケティング（2020）．営業のオンライン商談に関する実態調査　ファストマーケティング　2020年5月21日<https://fastmarketing-pro.com/btob-research-200521/>（2021年7月18日）.

freee（2020）．ITシステムの利用に関するアンケート　freee　2020年10月21日<https://corp.freee.co.jp/news/ITsystem_Investigation.html>（2021年7月13日）.

学情（2020a）.「希望する営業スタイル」に関するアンケート　学情　2020年6月26日<https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000524.000013485.html>（2021年7月18日）.

学情（2020b）．21卒・オンライン就活に関する調査　学情　2020年7月1日<https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000529.000013485.html>（2021年7月18日）.

学情（2020c）．職場でのコミュニケーション方法　学情　2020年9月29日<https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000583.000013485.html>（2021年7月18日）.

後藤学，濵野和佳（2020）．新型コロナウイルス感染症流行下でのテレワークの実態に関する調査動向　INSS JOURNAL，Vol.27，252-274.

H1T（2020）.コロナによって変化する働き方に関する実態把握アンケート　H1T　2020年11月17日

<https://www.h1t-web.com/columns/26.html>（2021年7月18日）.

HR総研(2020). 2021年卒及び2022年卒採用活動動向調査 HR総研 2020年8月13日<https://www.hrpro.co.jp/research_detail.php?r_no=273>（2021年8月14日）.

HR総研（2021）. 社内コミュニケーションに関するアンケート2021 HR総研 2021年3月17日<https://www.hrpro.co.jp/research_detail.php?r_no=294>（2021年7月18日）.

池田朋弘（2020）. チームコミュニケーションの教科書 マイナビ出版.

石井遼介（2020）. 心理的安全性のつくりかた 日本能率協会マネジメントセンター.

伊藤忠テクノソリューションズ（2017）. 大手企業のビジネスチャットツール導入実態調査 伊藤忠テクノソリューションズ 2017年4月13日<https://www.ctc-g.co.jp/company/release/doc/20170413a_detail.pdf>(2021年7月18日).

イード（2020）. Web会議に関する調査(1) イード 2020年10月15日<https://u-site.jp/survey/web-conference-1/>（2021年7月18日）.

インフィニ（2021）.「WEB会議」に関するアンケート調査 INFINI FOREST 2021年4月1日 <https://www.infini-forest.com/guest/infinilookup/detail/today115_webmtg#/>（2021年6月22日）.

J.D.パワージャパン（2020a）. テレワーク下におけるWEB会議利用に関する日米調査 J.D.パワージャパン 2020年4月27日<https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000049.000042677.html>（2021年8月23日）.

J.D.パワージャパン（2020b）. J.D.パワー2020年WEB会議システム顧客満足度調査 J.D.パワージャパン 2020年10月15日<https://japan.jdpower.com/sites/japan/files/file/2020-10/2020_JP_Webmeeting.pdf>（2021年8月23日）.

会議室セレクト（2020）. 対面会議とWeb会議どちらが適切？向き不向きの会議内容とは 会議室セレクト 2020年10月6日<https://www.kaigi-select.com/column/3475/#7>（2021年8月17日）.

キーマンズネット（2020）.「コミュニケーションツールの利用状況」に関する調査 キーマンズネット 2020年8月20日<https://www.keyman.or.jp/kn/articles/2008/20/news007.html>（2021年7月18日）.

キーマンズネット（2021）. 会議の実施状況 キーマンズネット 2021年1月7日<https://www.keyman.or.jp/kn/articles/2101/07/news030.html>（2021年7月18日）.

クオリティア（2021）. ビジネスコミュニケーションに関する調査2021 クオリティア 2021年4月27日<https://www.qualitia.co.jp/doc/newsrelease20210427.pdf>(2021年7月13日).

MM総研（2020）. SaaS・コラボレーションツール利用動向調査 MM総研 2020年5月22日<https://www.m2ri.jp/release/detail.html?id=420>（2021年7月13日）.

MMD研究所（2021）. オンラインでの就職活動に関する実態調査 MMD研究所 2021年3月16日<https://mmdlabo.jp/investigation/detail_1945.html>（2021年7月18日）.

Microsoft（2021）. The Next Great Disruption is Hybrid Work-Are We Ready? Microsoft 2021年3月22日<https://www.microsoft.com/en-us/worklab/work-trend-index/hybrid-work>（2021年7月20日）.

マーケティングアプリケーションズ（2020）. 在宅勤務時のメイクについての調査 マーケティングアプリケーションズ 2020年11月4日<https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000014.000041511.html>(2021年7月18日).

マツリカ(2020). 営業活動のリモートワーク調査 マツリカ 2020年4月30日<https://mazrica.com/press-release/p200430/>（2021年7月18日）.

マネジー（2021）. ビジネスチャットツールに関する調査 マネジー 2021年1月9日<https://www.manegy.com/news/detail/3670>（2021年7月18日）.

みんなの貸会議室（2021）. その移動本当に必要? 対面で行うべき会議とリモートで問題ない会議の特徴とは みんなの貸会議室 2021年5月12日<https://minnanospace.com/2021/05/12/remote-face-meeting-better/>（2021年8月17日）.

日本生産性本部（2020）. 新型コロナウイルスの感染拡大が働く人の意識に及ぼす調査 日本生

産性本部　2020年5月22日<https://www.jpc-net.jp/research/assets/pdf/5f4748ac202c5f1d5086b0a8c85dec2b.pdf>（2021年7月18日）.

日本生産性本部（2021）. 第5回働く人の意識に関する調査　日本生産性本部　2021年4月22日<https://www.jpc-net.jp/research/assets/pdf/5th_workers_report_0617.pdf>（2021年7月18日）.

野村総合研究所（2020）. 新型コロナウイルス感染症拡大に伴う人々の行動と意識の変化から見る「学び方改革」,「働き方・暮らし方改革」の可能性～進んだ在宅勤務やオンライン会議. 抵抗感の緩和や仕事と家庭の両立への効果実感につながる～　野村総合研究所　2020年4月20日<https://www.nri.com/-/media/Corporate/jp/Files/PDF/keyword/proposal/20200420.pdf?la=ja-JP&hash=A19B267F6BB3C75C1BC904B5ECF35A33A5E4CBD8>（2021年7月18日）.

パーソル総合研究所（2020a）. 新型コロナウイルス対策によるテレワークへの影響に関する緊急調査　パーソル総合研究所　2020年4月24日<https://rc.persol-group.co.jp/thinktank/research/assets/telework.pdf>（2021年7月19日）.

パーソル総合研究所（2020b）. 新型コロナウイルス対策によるテレワークへの影響に関する緊急調査　パーソル総合研究所　2020年6月11日<https://rc.persol-group.co.jp/news/202006110001.html>（2021年7月18日）.

パーソル総合研究所（2020c）. 第四回・新型コロナウイルス対策によるテレワークへの影響に関する緊急調査　パーソル総合研究所　2020年12月16日<https://rc.persol-group.co.jp/news/202012160001.html>（2021年7月18日）.

パーソルプロセス＆テクノロジー（2020）. 業務のデジタル化に関する意識・実態調査　パーソルプロセス＆テクノロジー　2020年12月17日<https://www.persol-pt.co.jp/news/2020/12/17/4841/>（2021年7月13日）.

ランクアップ（2020）.「コロナ禍のテレワークでの男性の意識変化」に関するアンケート調査　MONOist　2020年10月22日<https://monoist.atmarkit.co.jp/mn/articles/2010/22/news013.html >（2021年7月20日）.

リクルートマネジメントソリューションズ（2020）. 加速するテレワークの明暗を分ける, チームでのコミュニケーションとは　2020年7月6日<https://www.recruit-ms.co.jp/issue/column/0000000869/>（2021年7月18日）.

リトルソフト（2020）.「テレワーク中のコミュニケーション」に関する調査　リトルソフト　2020年7月1日<https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000001.000053703.html>（2021年7月18日）.

SB C&S（2020）. ビデオ会議に関する意識調査　SB C&S　2020年8月20日<https://cas.softbank.jp/press/200820_01/>（2021年7月18日）.

サイバーソリューションズ（2019）. メールとビジネスチャットツールの利用実態調査　サイバーソリューションズ　2019年2月26日<https://japan.cnet.com/release/30300204/>（2021年7月18日）.

産労総合研究所（2020）. オンライン会議は好きですか？　産労総合研究所　2020年10月7日<https://www.e-sanro.net/share/pdf/research/pr_2010-1.pdf>（2021年7月18日）.

杉谷陽子（2008）. 電子メディアによる情報伝達の研究　－コミュニケーションにおける非言語的手掛かりの役割－　一橋大学大学院社会学研究科・社会学部博士論文.

杉谷陽子（2010）. インターネット・コミュニケーションと対面コミュニケーションにおける情報の伝わり方の差異についての意見書.

杉谷陽子（2020）. 対面とオンラインの長所･短所を知り上手に組み合わせればいい　リクルートマネジメントソリューションズ　2020年12月21日<https://www.recruit-ms.co.jp/issue/interview/0000000928/?theme=skill,workplace>（2021年8月22日）.

総務省（2020）. 新型コロナウイルス感染症まん延防止のための出勤者の削減について　総務省　2020年4月13日<https://www.soumu.go.jp/main_content/000683222.pdf>（2021年7月27日）.

武神健之（2021）. 在宅勤務時代における部下のトリセツ　マイナビニュース　2021年3月8日<https://news.mynavi.jp/article/zaitaku_kinmu_mental-3/>（2021年8月18日）.

筑波大学（2020）．テレワークによる社内コミュニケーションの変化　筑波大学　2020年10月2日<http://www.human.tsukuba.ac.jp/counseling/w/wp-content/uploads/2020/10/surveyresult20201002.pdf>（2021年7月14日）．

UCHIDA（2020）．テレワーク時代のオフィスに関する実態調査　UCHIDA<https://office.uchida.co.jp/workstyle/telework/column_007.html>（2021年7月14日）．

矢野経済研究所（2020）．テレワーク関連ソリューションの動向調査　矢野経済研究所　2020年7月6日<https://www.yano.co.jp/press-release/show/press_id/2467>（2021年7月20日）．

ZENKIGEN（2020）．就職活動におけるWEB面接利用実態調査　ZENKIGEN<https://harutaka.jp/wp/wp-content/themes/HARUTAKA/img/contact/DLstudentsurvey.pdf>（2021年7月18日）．

エネルギー環境教育関西ワークショップ研究会活動へのオンラインミーティングシステムの導入

Introduction of the online meeting system to the meeting of Kansai Workshop for Energy and Environmental Education

西野　加奈江（Kanae Nishino）*1　　中川　幸二（Koji Nakagawa）*1

要約　2020年，全世界にまん延した新型コロナウイルス感染症の影響により，日本でも緊急事態宣言の発出や移動の自粛，人の多く集まるイベントなどの中止や規模を縮小した開催等が強く求められるようになった．このような流れの中，大阪・梅田の会場で月１回程度開催していたエネルギー環境教育関西ワークショップ研究会の活動も，2020年４月の開催分は中止せざるを得なくなったが，当時，世の中で主流となり始めていたオンラインミーティングシステムの導入を急遽検討し，５月から運用を開始した．2020年度は，オンライン開催６回，会場に集まる従来型の会合開催（実開催）とオンラインによる会合開催を併用したハイブリッド開催を３回，試行錯誤しながら行った．利用開始から１年後に行った参加者へのアンケートでは，オンラインのメリットを理解し「概ね好評」との結果になっている一方，オンラインでは相手の表情や反応が見えづらく，雰囲気が伝わりにくい，臨場感に欠けるなど，心を通わせる面での物足りなさから実開催を希望する意見が見られた．今後，オンラインの利用を維持・継続していく中で，会員同士の一体感を創出できるよう工夫を重ねていく．

キーワード　オンラインミーティング，Zoom，新型コロナウイルス感染症，エネルギー環境教育

Abstract　Due to the spread of COVID-19 worldwide in 2020, it has been also required in Japan to declare a state of emergency in which people refrain from moving around and events which would have many people in attendance are canceled or scaled down. The Kansai Workshop for Energy and Environmental Education had normally met about once a month in a venue at Umeda in Osaka, but the April 2020 meeting had to been canceled due to the state of emergency. Then, the introduction of an online meeting system was considered, and its operation started from May 2020. Online meeting systems began to spread worldwide at that time. In FY 2020, through trial and error, 6 online meetings and 3 hybrid meetings were held. The hybrid meetings were a conventional type meeting（actual face-to-face meeting）with participants gathered in the venue combined with the online system. Participants answered a questionnaire survey that was carried out 1 year after beginning to use the online meeting system. The answers showed that participants understood the merits of online meetings, and these were viewed as “generally popular”. But, on the other hand, some opinions were given that actual meetings was desired as online meetings were unsatisfactory in terms of hearty communications caused by the following conditions: online it is difficult to see the other person’s facial expression and reaction, it is difficult to convey the atmosphere present at the venue, etc. In the future, as we continue to use online meetings, new ways will be devised that maintain and develop a sense of unity among members.

Keywords　online communication tool,Covid-19 pandemic,energy and environmental education

1. はじめに

エネルギー環境教育関西ワークショップ研究会（以下，「関西WS」）は，エネルギー環境教育の実践研究推進および普及促進を目的に，関西地域の教職員を中心とした教育関係者が自主的に参加・活動する研究会である．この研究会では，ほぼ毎月１回，会合を開催し，エネルギー環境教育に資する知識の

＊1　（株）原子力安全システム研究所　社会システム研究所

向上や実践事例の研究，会員相互の情報交換などを行うとともに，エネルギー環境教育の普及に努めている．会合には，毎回，概ね20人程度の教職員及び関係者が集まり，活発な活動を進めている．原子力安全システム研究所（以下，「INSS」）社会システム研究所 社会意識・エネルギー問題研究プロジェクトは，この研究会の事務局として運営に携わっている．

2. 新型コロナウイルス感染症と関西WS活動

2020年１月から日本で広がり始めた新型コロナウイルス感染症（以下，「新型コロナ」）は，４月には「緊急事態宣言」が発出されるまでにまん延した．

そのような状況の中，４月20日に大阪・梅田の会議室で開催予定であった関西WS全体会（以下，「全体会」）は中止せざるを得なくなった．この状況がいつまで続くのか，先が見通せない中，事務局内で対応策を検討した結果，オンラインミーティングシステムを利用する方向で検討することとなった．この案によれば，和歌山や兵庫，福井など遠方の会員も参加し易くなるという副次的な効果も期待された．

利用するオンラインミーティングシステムとしていくつかの選択肢があったが，その中で，操作が容易であること，利用数を伸ばしていること，接続可能人数が多く接続安定性が高い（通信データ量が小さい）ことなどの利点から，Zoomを採用する方向となった．これまで試用経験がなく，使用環境についてもいくつか問題があったが，IT担当者の協力を得て環境を整えた．

その後，事務局員同士での接続テストを繰り返し，さらに関西WS代表の京都教育大学山下宏文教授の協力により，研究室との接続テストを行うとともに，一部の関西WS会員の協力も得て，オンライン全体会開催に向けて準備を進めた．

3. 第一回および第二回オンライン全体会の開催と振り返り

５月16日，2020年度第一回目となる全体会をオンラインで開催した．会員のほとんどが，オンラインミーティングシステムの利用は初めてであったことから，オンライン参加上の注意事項やZoomに関する解説を付け，不安解消に努めた上で，全体会を開催した．

第一回全体会終了後，参加者にZoom利用についての感想を求めたところ，一時的に音声の乱れなどはあったものの，全体評価としては概ね良好との感触であった．これにより，その後も継続してZoomを利用していく方針を固めた．

第二回全体会（６月）も，新型コロナの状況からオンラインのみで開催した．

５月および６月の２回のオンライン全体会を通じて，参加者が一人ずつ順番に発言するぎこちなさ，また相手の表情や反応の読み取りにくさから，オンラインには実開催のような自由闊達な意見交換からは遠いところがあるということが問題点として認められた．参加者も，新型コロナでやむを得ないとしながらも，教員という職業柄もあって，集まることの意義，対面で話をすることの良さということを口にしており，実開催の早期復活が望まれた．

4. オンライン全体会の試行錯誤

オンライン全体会は，INSSの会議室に機材を設置し，司会者およびZoom管理者（以下，ホスト）の２名体制で運営を始めた[*2]．

オンライン全体会では回を追う毎にハウリング問題やホスト脱落事象などへの対応で試行錯誤を繰り返し，機材や接続にも変化が出てきた．当初のパソコン１台によるZoom接続から，現在は在宅の１台のほかINSSに本ホストと共同ホストを接続し，計４台での事務局運営となっている．（図１）

5. 実開催とオンライン開催の併用

新型コロナの状況は，５月末に緊急事態宣言が解除され，６月には一時的に沈静化した．これを受け，会員の中には通常開催を望む声もあったことから，

＊2　新型コロナ対策のため，事務局４名のうち，半数がINSS会議室で運営にあたり，半数は在宅で接続した．

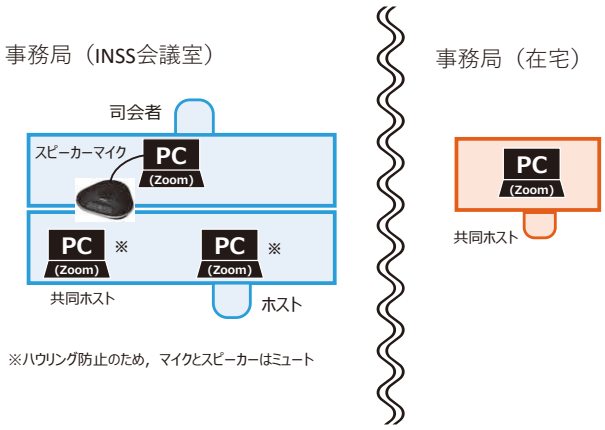


図１　オンライン全体会時の配置図

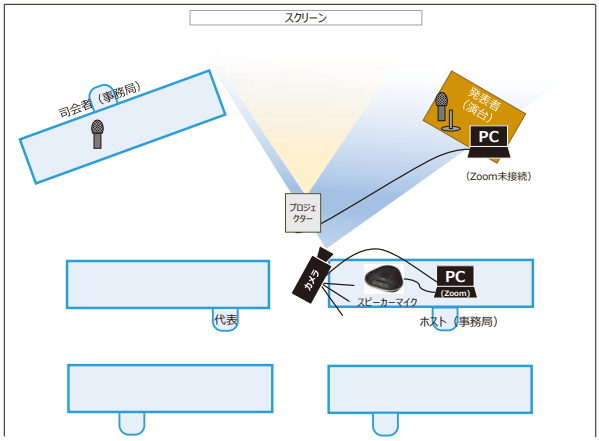


図２　ハイブリッド開催初回の配置図

第三回全体会（７月）は大阪・梅田の会議室で開催することとした．ただし，必要な感染対策（事前周知も含め，当日の検温，マスク，消毒，座席間隔，換気など）は十分に行い，会場に集まることが不安な人や，遠方に在住の会員にも参加のきっかけとなるよう，オンラインも併用して開催する，いわゆる「ハイブリッド開催」を初めて行うこととした．

5.1　ハイブリッド開催での試行錯誤

第三回全体会をハイブリッド開催とするにあたり考慮したことは，オンライン参加者に，会場の様子，特に発表者の様子をどう見せるか，という問題である．オンラインのみであれば，発表者はそれぞれのパソコンの前で話をすればよいが，会場で発表を行う場合は前方の演台で行うことになる．前述の会員の要望も踏まえ，発表者の様子と発表資料の両方をオンライン参加者にもうまく伝える工夫が事務局の課題となった．

ハイブリッド開催の初回では，オンライン参加者に発表の様子が分かるようビデオカメラを使い，発表者と資料投影のスクリーンを映すことにした．スクリーンに投影される資料は，事前に参加者に送付しており，Zoom画面で見づらい場合は事前送付の資料で確認できるようにした．これで，オンライン参加者に発表している様子を見せることはできた．初回の配置図を図２に示す．

ハイブリッド開催初回終了後の事務局の反省点として，この方法で大きな問題はなかったものの，発表中のZoom画面に資料が大きく表示されるようにした方がよいのではないか，というものがあった．しかし，発表者のパソコンにはZoom接続への制限があったことから，「画面共有」はホストが代わりに操作することで対応することにした．

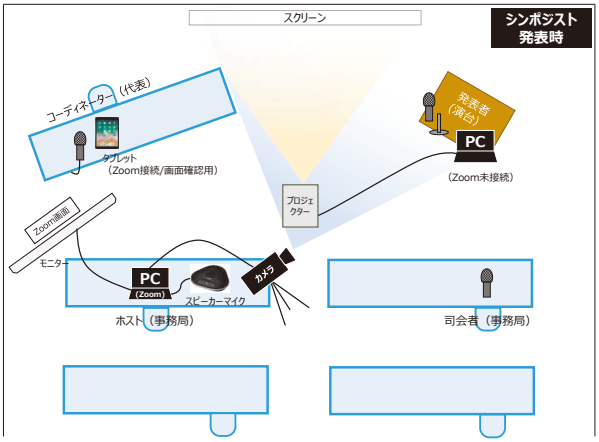
ハイブリッドの２回目（すなわち，10月の第五回全体会）でこれを行ったところ，ホストが行う参加者対応の作業などと重なり非常に輻輳する場面が生じた．当時，事務局のZoomに関する知識が十分ではなかったため気づくことができなかったが，その後は，「共同ホスト」機能を利用して解決することにした．

また，この２回目は通常の全体会ではなく，シンポジウムという開催方式であったため，コーディネーターがオンライン参加者の様子を手元で確認できるよう，タブレット端末を配置し対応した．このタブレットはカメラ補助としても利用している．さらに，ホストパソコンを47インチのモニターに接続し，会場参加者は，このモニターでZoomの様子を見ることができるようにした．２回目の配置図を図３に示す．

３回目（すなわち，11月の第六回全体会）では，発表者の使用するパソコンでの「画面共有」が可能となった．このパソコンを会場のプロジェクターにも接続して，「画面共有」とともにZoom参加者の様子を表示した．３回目の配置図を図４に示す．

6.　2020年度 オンラインを利用した関西WS開催実績

試行錯誤を重ねながらではあるが，2020年度は，４月度を除き，予定していたスケジュールどおり，合計９回の全体会を開催することができた．そのうち６回（５月，６月，９月，12月，１月，２月）はオンライン開催，３回（７月，10月，11月）は



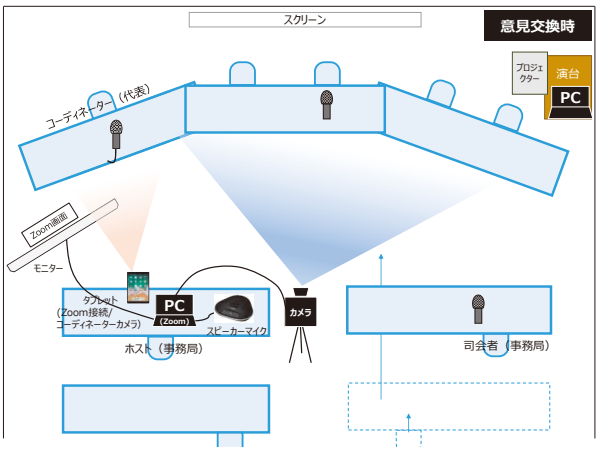


図３　ハイブリッド開催２回目の配置図

参加人数を絞ってのハイブリッド開催であった．時系列でまとめて表１に示す．

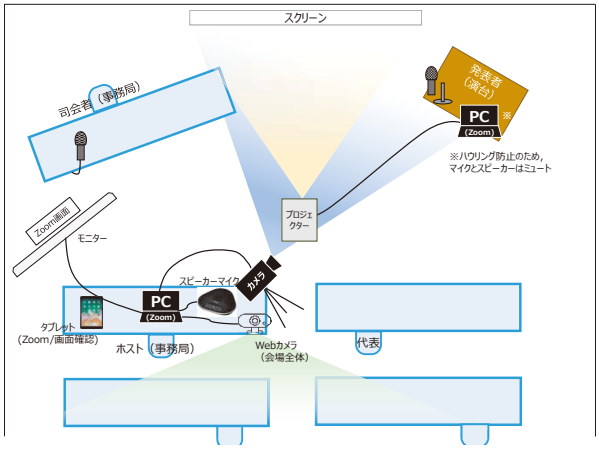


図４　ハイブリッド開催３回目の配置図

7. オンライン開催に関するアンケート調査と結果

前項の開催実績を踏まえ，2021年度 第二回関西WS全体会（５月オンライン開催）において，当日参加した参加者19名に対して，オンライン利用に関するアンケート（Web形式）を実施した．なお，この19名のうち１名を除き，18名は全体会にほぼ毎回出席している会員であるため，以下に示す結果は，概ね全ての開催を踏まえた回答であると考えられる．

まず，総論として「2020年度一年間を通し，関西WSでZoomを利用してどうであったか」の質問に対しては，「よかった」58%，「まあまあよかった」37%，「普通」５%，「あまりよくなかった」０%となっており（図５），全般に好評であったといえる．

表１　関西WS全体会オンライン利用での出来事

全体会の回（月）	開催方法および回数	主な出来事
第一回（５月）	（オンライン開催導入） オンライン開催１回目	ホスト脱落事象発生
第二回（６月）	オンライン開催２回目	参加者からの「画面共有開始」．大過なく運営
第三回（７月）	（ハイブリッド開催導入） ハイブリッド開催１回目	発表用パソコンZoom接続なし．ビデオカメラを使い，発表者とスクリーン（資料投影）の映像をオンライン配信
第四回（９月）	オンライン開催３回目	発表者，京都教育大学に集合し発表を実施．（事務局はINSS会議室）
第五回（10月）	ハイブリッド開催２回目	シンポジウム．発表者用パソコンZoom接続なし． ホストパソコンにて資料の「画面共有」を行う．ホストの負担増問題発生
—	———	事務局司会者のパソコンでZoom利用が可能になる
第六回（11月）	ハイブリッド開催３回目	発表用パソコンZoomに接続．「画面共有」が可能となる．会場全体の様子のオンライン配信を試みるが再検討の余地あり（機器の種類等）
第七回（12月）	オンライン開催４回目	セミナー．事務局パソコンの２台運用開始（ホストと司会者）
第八回（１月）	オンライン開催５回目	Zoom接続パソコンを１台増やし，「共同ホスト」導入． 現時点の完成形となる
第九回（２月）	オンライン開催６回目	大過なく運営

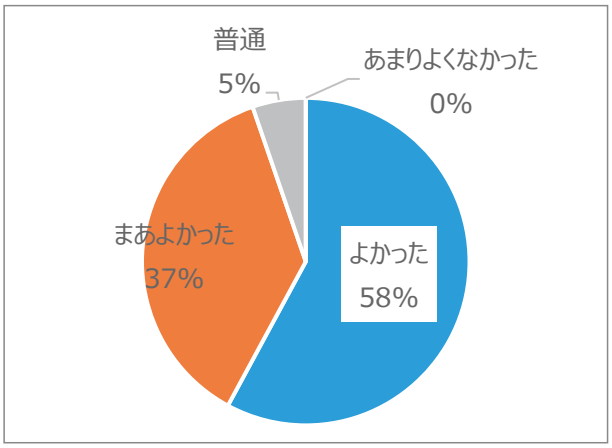


図５　2020年度一年間を通し，Zoomを利用してどうだったか

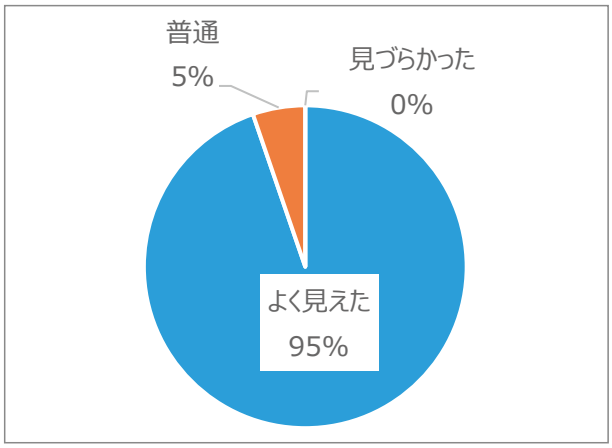


図７　「オンライン開催時の映像について」

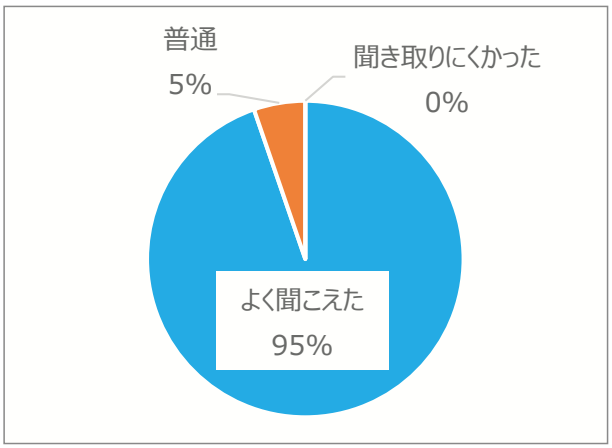


図６　オンライン開催時の音声について

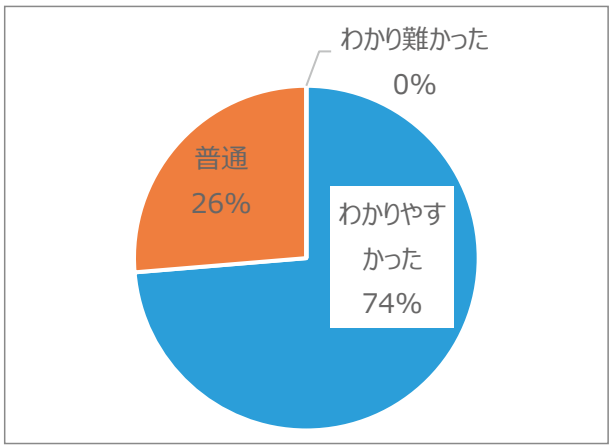


図８　オンライン開催，参加の際の操作方法について

次に，「音声」「映像」「参加者の操作方法」の観点からそれぞれ質問したところ，図６から図８の結果となり，設備等のハード面についてはほぼ問題がなかったことがわかる．

一方，「発表者の操作方法」（図９）については，特に説明会や練習をしたわけではなく，全体会の中で徐々に使い慣れたものであるが，「わかり難かった」との回答が５％であることから，操作にもほぼ問題がなかったことがわかる．ただし，発表者として利用した場合には，「わかりやすかった」が42％と下がっていることから，発表者としての経験も少ないため，画面共有等で手間取ることがあったようである．

さらに，「会議室に集まる会合（実開催）と比較しての意思疎通について」質問したところ，「しやすかった」５％，「変わらない」53％，「しづらかった」42％という結果（図10）であった．意思疎通が「しづらかった」理由を具体的に尋ねたところ，「世代の関係でどうしても馴染めない」「（資料共有をすると）相手の反応が見えない」「臨場感が実開催より薄く，他の参加者の表情も見えにくい」「Zoomの場合はどうしても１対１の感覚になってしまう」「会議室に集まれば，皆さんの反応もわかるので，自分の意見も出しやすい」などの指摘があった．

2020年度はハイブリッド開催が３回あり，その

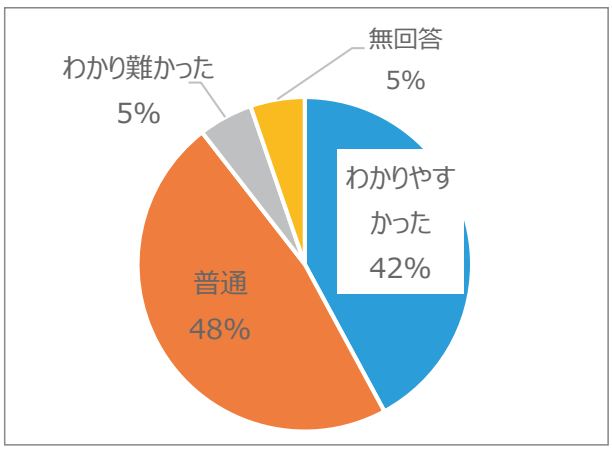


図９　オンライン開催，発表の際の操作方法について

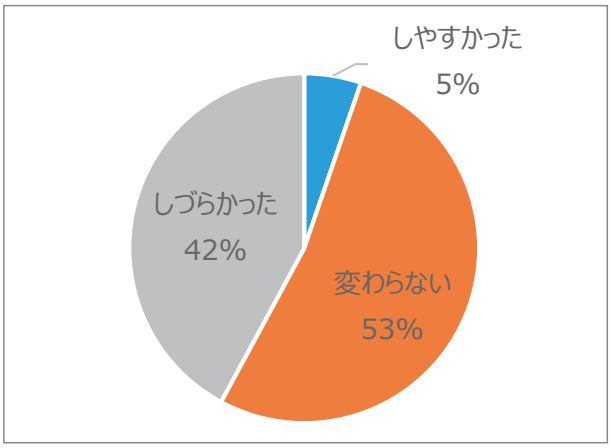


図10　会議室に集まる会合（実開催）と比較しての意思疎通について

時の意思疎通について質問したところ,「しやすかった」16％,「変わらない」53％,「しづらかった」31％（図11）となり，オンラインのみの場合と比べてもそれほど違いはなかったが，理由に若干の違いがあった.「対面とオンラインでは，どうしても話をする際の視点(視線)が違ってくる. その意味で，どちらかに絞った方がわかりやすい」「実開催とオンラインの併用時には，会場での参加者全員の顔が映らないので，会場参加者の反応がわかりにくいことがある」「実際に会場で参加していた時は，参加している感を強く感じた」などである.

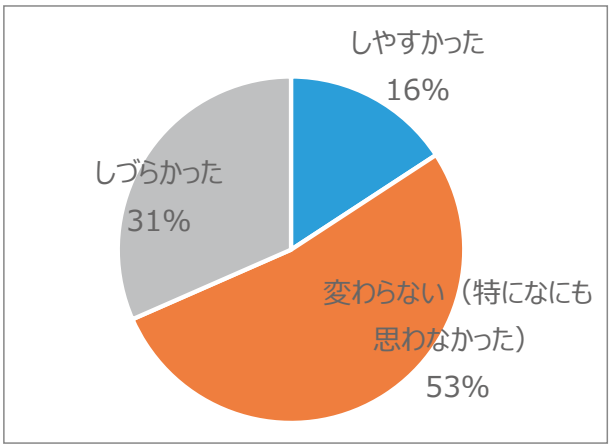


図11　ハイブリッド開催時の意思疎通について

ハイブリッド開催の場合は一方でリアルな会合が進行している中，オンライン参加者は外部から傍観しているといった感覚が生じることから，オンラインのみの開催と比べて，疎外感や視線の方向が合わないなどの違和感が生じているものと思われる.

オンライン開催，ハイブリッド開催の運営について，気が付いたことなどをそれぞれ自由に記載してもらったところ，共通して見られた意見が「併用開催が望ましい」「実開催を希望する」というものであった. 開催方法の多様性というところで一定の評価はあるが，やはり「実開催」の希望が根強いことが分かる.

また，オンライン開催のメリット，デメリットについても尋ねたところ，メリットとして「通信環境があれば，どこからでも参加できる」「移動時間，旅費の節約」など，参加のしやすさという点が多く見られた. デメリットとして「相手の反応が見えづらい（意思疎通の難しさ)」「交流が少なくなる」「臨場感に欠ける」といったことが見られた. オンラインのメリットも感じるものの，関西WS研究会が，会員同士の交流の場としても期待されており，実開催が望まれていることが分かる.

最後に，新型コロナが収束した後もZoomを利用（併用）した全体会を継続した方がよいか，を尋ねたところ,「継続した方がよい」84%,「継続しなくてよい」16％であった（図12). これまでの結果や自由記述から見て,「継続した方がよい」と回答した方は，Zoomのメリットとして挙がっている便利さが理由であり,「継続しなくてよい」と回答した方は，Zoomの機能や仕組みなどのハード面からではなく，意思疎通がしづらいといったソフト面からの回答と考えられる.

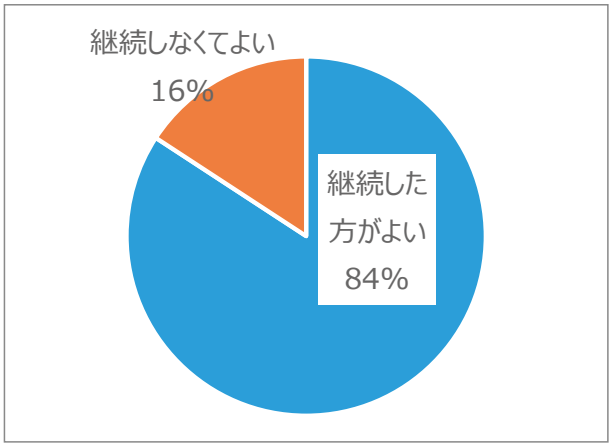


図12　新型コロナ収束後もZoomを利用（併用）した全体会を継続した方がよいか

7.1　考察

以上の結果から，関西WSのオンライン全体会は，全体として概ね満足のいく結果となっており，大きな支障は出ていないと捉えることができる. オンラ

イン開催のメリットとしては，主に会場までの移動が不要となる便利さや時間とコストの節約など参加のし易さなどが挙げられた．デメリットとしては，参加者の表情がわかりづらく意思疎通がしにくいことや，臨場感に欠け全体の雰囲気が捉えづらく発言がしにくいことなどが挙げられている．

オンラインでは，小さな画面を通じて伝達できる視覚情報に限界があり，聞いている人の表情を読み取れないことや，特に画面共有しているときには，話し手の表情や身振り手振りなどの非言語情報が伝えきれないことから，双方向の対話が完全には成り立たないことがデメリットの大きな原因であると考えられる．また，参加者が物理的に同じ「場」にいないことで，会合の雰囲気や一体感が形成されにくいこともデメリットの一因と考えられる．

さらに，実開催では可能であった立ち話や雑談を通じた情報交換や交流ができない点などが挙げられた．この原因としては，オンラインでは当日予定された公式議題が終了すれば通信が切断され，非公式な話題について会話できる余地をつくりにくいことが考えられる．雑談から教材開発につながったことがあるとの事例もあり，関西WSの場合，我々が日頃業務で行う意思決定や，単なる言語的な用件の伝達ができればそれで良いというものではなく，非公式な会話も含め，同じ目標に向かう者同士のコミュニティとしての「つながり」や「一体感」を感じることもコミュニケーションの重要な要素として存在していると思われる．

このような点から，数字上は概ね「支障がない」と答えながらも，一体感など心を通わせる面での物足りなさから，実開催への根強い支持があり，今後も併用を志向していくべしとの結果につながっていると思われる．

8. 今後の課題と改善方策

今後の関西WS全体会は，ハイブリッドを主軸に開催していくことになるであろうが，会員同士の一体感を維持発展させながら運営していくことが最も大きな課題だと考えられる．この課題に対しては，アンケートに挙がっていたが，Zoomの機能である「ブレイクアウトルーム」を利用した小グループでの会話や議題終了後の雑談の時間の確保なども重要な改善方策のひとつと考えられる．また，ハイブリッド開催を行う際に，現地とオンラインの参加者で臨場感に差があることは，ある程度仕方のないことではあるが，会場全体が見渡せるような画像を提供することや，会場のざわめきが伝わるような音声を届けることなど，使用機材やカメラワークの工夫によって，臨場感を向上させる余地もあるのではないかと考えており，今後も試行錯誤をしながら，より良いものにしていきたいと考えている．

当初，オンライン導入の副次的な効果として，遠方からの参加者が増えるのではないか，という期待があった．これについては，１年経過した現在でも数字に表れるほどの参加者増には至っていない．理由として，全体会の開催日が毎回土曜日の午後であることや，全体会の内容など根本的なところにもあるかも知れないが，教員の方々が日頃からパソコン等の扱いに慣れていないことやインターネット環境が整っていないことなども考えられる．後者については，現在学校現場でギガ・スクール構想に基づき，相当なスピードでデジタル化が進められていることから，近い将来改善されることは間違いないと思われるが，前者については，事務局として，真摯に検討し改善していきたい．

9. まとめ

新型コロナの感染拡大をきっかけとして，手探りで始まったオンラインシステムの導入であるが，１年をかけてなんとか軌道に乗せることができた．少人数での事務局運営でもあり，まだ課題は残っているものの，この機会をバネに，関西WS研究会をより発展させていくことができるのではないか．オンラインミーティングは，その利用の仕方，ミーティングの創り方次第では，大きな可能性を秘めているのではないだろうか．

謝辞

オンライン開催の導入にあたり，繰り返し接続テスト等にご協力いただいた関西WS代表 京都教育大学 教育学部 山下宏文 教授と，関西WS会員の皆さまに感謝申し上げます．

参考文献

ホームページ　Zoomアカデミージャパン．
https://zoomy.info/

INSS JOURNAL Vol. 28 2021 R-7

エネルギー環境教育を指向する自由研究のテーマとその内容

Themes and Contents of Student-generated Research Aimed at Energy and Environmental Education Topics

小鍛治　優（Masaru Kokaji）*1　　大磯　眞一（Shinichi Oiso）*2

要約　エネルギー環境教育は，理科や社会などの教科学習の中や，総合的な学習の時間などで取り扱われている．しかし，教科内容の充実や総合的な学習の時間の縮小により，エネルギー環境教育に十分な時間が確保できていないのが現状である．そこで，教員が，夏休みなどを使って課題として行っている児童・生徒を対象とした自由研究の中で，エネルギー環境教育に関する探究的な取り組みを行うのを可能にすることを考えた．ただ，教員が自由研究の指導を進める上で一番の課題となっているのがテーマ設定であり，見通しを持った課題解決の方法である．そこでエネルギー環境教育に関わるテーマや課題解決の方法を示し，指導する教員に，使いやすく改良することができる提案を行った．

キーワード　エネルギー環境教育，理科，教科学習，探究的，自由研究

Abstract　Energy and environmental education topics are covered in subjects such as science and social studies, as well as in integrated study periods. However, the current situation is that sufficient time for energy and environmental education has not been secured due to changes of the curriculum and the reduction of the time for comprehensive study. Therefore, we thought about offering ways for teachers to carry out an exploratory approach to energy and environmental education in student-generated research projects that are being carried out by students during their summer vacation. Guiding students in setting a theme is the most important issue for teachers whose students want to carry out a research project. In setting a theme, students need to use a problem-solving method with a clear perspective. Therefore, we presented themes related to energy and environmental education and methods for solving problems and proposed ways to use them and make it easier for teachers to guide students and improve the quality of their projects.

Keywords　energy and environmental education, science, subject study, exploratory, student-generated research

1. はじめに

新学習指導要領（2017年度３月告示）では，新しい時代に必要となる資質･能力が明示されており，理科（小学校理科）で育成する資質・能力（理科教育の目標）については以下のように示されている．「自然に親しみ，理科の見方・考え方を働かせ，見通しをもって観察，実験を行うことなどを通して，自然の事物・現象についての問題を科学的に解決するために必要な資質・能力を次のとおり育成することを目指す．

（1）自然の事物・現象についての理解を図り，観察，実験などに関する基本的な技能を身に付けるようにする．
（2）観察，実験などを行い，問題解決の力を養う．
（3）自然を愛する心情や主体的に問題解決しようとする態度を養う．」

ここでいう「自然の事物・現象についての問題を科学的に解決する」とは，従来より大切にしてきた課題を設定して仮説を立て，実験・観察を通して結論を導き出す探究的な過程を経た学習を指す（図１）．

＊1　美浜町エネルギー環境教育体験館きいぱす
＊2　(株)原子力安全システム研究所　社会システム研究所

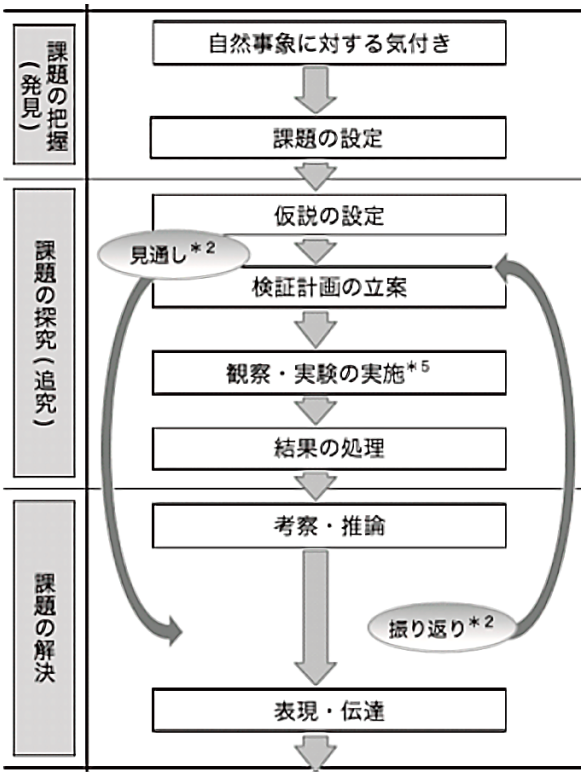


図１　探究の過程 (1)

また，「理科の見方・考え方を働かせ」とは，以下のように，領域に合わせた見方や科学的な探究の方法を用いた考え方を指す．

＜科学の見方＞

「エネルギー」領域…主として量的・関係的な視点で捉えること
「粒子」領域…主として質的・実体的な 視点で捉えること
「生命」領域…主として共通性・多様性の視点で捉えること
「地球」領域…主として時間的・空間的な視点で捉えること

＜考え方＞

探究の過程を 通した学習活動の中で，
・比較する
・関係付ける（条件制御）
・多面的な思考をする

さらに，「見通しをもって観察，実験を行う」とは，児童・生徒に観察，実験を何のために行うか，観察，実験ではどのような結果が予想されるかを考えさせること（課題に対しての解決・実験方法や結果の見通しを持たせること）を指す．

これらのアプローチにより，資質・能力の三つの柱を育成する．

＜育成する資質・能力の三つの柱＞
「知識及び技能」
「思考力，判断力，表現力等」
「学びに向かう力，人間性等」

そして，この資質・能力の育成のために，探究活動における，「主体的・対話的で深い学びの視点（アクティブラーニングの視点）」での授業改善が必要とされている．最終的に，主体的で対話的な深い学びによって，今日の知識基盤社会に必要な「知識の質や量の改善」を図っていくことが大切である．

2. 主体的・対話的で深い学びの視点での授業改善について

図２は，文部科学省 新しい学習指導要領の考え方にある「主体的・対話的で深い学びの実現」に向けてのイメージ図である．

https://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/new-cs/__icsFiles/afieldfile/2017/09/28/1396716_1.pdf　2021年６月14日アクセス

図２の指摘を踏まえれば，「主体的・対話的で深い学びの実現」と「自由研究」との関連は以下のように示される．ここでいう自由研究とは，教員によるテーマの設定や指導により，児童・生徒が夏休み等に行う探究学習・活動のことであり，これは理科教育システムに組み込まれている．

①「学ぶことに興味や関心を持ち」，「見通しを持って粘り強く取り組む」，「自らの学習をまとめ振り返り，次の探究につなげる」などを追求し，主体的な学習に近づけることが大切である．
②「連携・協働して社会に見られる課題を解決」，「個人で考えたことを意見交換したり，議論したりすることで新たな考え方に気が付いたり，自分の考えをより妥当なものとしたりすること」，「子供同士の対話に加え，子供と指導者，子供と親（地域の人），本を通して本の作者な



図２　主体的・対話的で深い学びの実現 (2)

どとの対話」を重視することで，対話的な学習につなげることが大切である．

③「事象の中から自ら問いを見いだし」，「課題の追究，課題の解決を行う探究の過程に取り組む」こと，「精査した情報を基に自分の考えを形成する」，「目的や場面，状況等に応じて伝え合う」，「考えを伝え合うことを通して集団としての考えを形成する」，「感性を働かせて思いや考えを基に，豊かに意味や価値を創造する」ことなどにより，深い学びにつなげることが大切である．

このように，自由研究での取り組みにより，学ぶこと・内容の虜になり，他者とともに営む社会的・文化的活動に参画し，少しでも新しい気づきや手続きを生み出す学びにつながれば，児童・生徒の知識の量や質の改善が果たされることになる．学びとは，話し合いや教え合いとは違い，参加するそれぞれが，未知の事柄を共に探る・解決する活動である．

3. 探究活動を取り入れたエネルギー環境教育

エネルギー環境教育の重要性についてはいうまでもないと思われるが，中教審答申などでも例示された今日的課題「地球温暖化やエネルギー資源等の地球規模の問題」，つまり持続可能な社会を構築するという課題は，理科教育の目標(1)～(3)そのものを必要とする課題である．言い換えれば，理科で育てようとしている資質・能力を育成するのに最適な課題といえる．もちろん，持続可能な社会を考えるような大きな課題は，理科のみでできることではなく，学校教育全般で取り組んでいくべき問題であり，他教科での学び，教科横断的な学びなどが必要不可欠である．

現在，エネルギー環境教育は，理科や社会などの教科学習の中や，総合的な学習の時間などで取り扱われている．しかし，教科内容の充実や総合的な学習の時間の縮小により，エネルギー環境教育に十分な時間が確保できていないのが現状である．そこで，夏休みなどを使って課題として行われている自由研

究の中で，エネルギー環境教育に関する探究的な取り組みを行うことを，ぜひ，強力に進めたいと考えた．ただ，教員が自由研究の指導を進めるうえで一番の課題となっているのが，テーマの設定であり，見通しを持った課題解決の方法である．そこで，エネルギー環境教育に関わるテーマや課題解決の方法を提案する．指導する教員は，この提案を使いやすく改良することが可能である．

4. 自由研究のテーマとその内容

教員の自由研究の指導に役立つようにつくったテーマについて，その一覧を挙げる．なお，2020年度より２年間の取り組みを想定しているために，まだ，予備実験が済んでいないものもある．

（＊は，ほぼ予備実験が終了したもの）

○ 自由研究 ＜Sample 1-1：エアコンの効率的な使用＞＊
…エアコン（暖房運転）を使ったときの部屋の上部，中部，底部の気温変化とエアコンの風向やサーキュレーターを併用した時の気温の変化

○ 自由研究 ＜Sample 1-2：エアコンの効率的な使用＞＊
…エアコン（冷房運転）を起動した時の部屋の上部，中部，底部の気温の変化とサーキュレーターを併用したときの気温の変化

○ 自由研究 ＜Sample 2：断熱効果＞＊
…ペットボトルにタオルやアルミニウム，気泡緩衝材などを巻いた時の断熱効果を調べる．また，色々な物質による熱の伝わりにくさを比べる．

○ 自由研究 ＜Sample 3：色と温度＞＊
…路面の材質と路面の温度変化，家の外壁の色や材質によって部屋の気温がどう変わるかを調べる．

○ 自由研究 ＜Sample 4：太陽光発電＞
…ソーラーパネルに当たる太陽光の角度や気温による発電効率など，ソーラーパネルの効率的な使い方を探る．

○ 自由研究 ＜Sample 5：紫外線＞＊
…時刻による紫外線の強さや，天気による紫外線の強さ，何を使うと紫外線をカットできるかなどを調べる．

○ 自由研究 ＜Sample 6：電池の効率＞
…普通の電池と充電池の効率や，充電するときの有線・無線の充電器での電力量などを調べる．

○ 自由研究 ＜Sample 7：エネルギー効率＞＊
…湯を沸かすときの鍋の蓋のあるなし，トイレの便座の開け閉め，電気ポットで使う時に湯を沸かすのと保温して利用する場合，センサーと手によるライトのon・offでの電気の使い方などの比較で，電気の無駄のない使い方を調べる．

○ 自由研究 ＜Sample 8：換気効率＞＊
…部屋の中の換気をする場合，家の中の窓のどこを開けると効率よく換気できるかを，実験をもとに検証する．

○ 自由研究 ＜Sample 9：光合成とCO_2＞
…植物の光合成が，一生の間（季節）でどう変わるか，時刻や気温などによってどんな影響を受けるかを調べる．

○ 自由研究 ＜Sample 10：気化熱＞
…部屋の中に水槽を置いて，部屋の気温と水温によって，どれぐらい水が蒸発するかを調べる．部屋の湿度や気温によって除湿機の除湿効率は変わる．どのような条件で　除湿機を使うとよいか調べる．

○ 自由研究 ＜Sample 11：屋根・壁の断熱＞
…粘土，火山灰，パーライト，バーミキュライト，発泡ポリスチレン，金属，ガラス，木材，ビニールなどの材料を工夫・加工して，家の模型の屋根板に木工ボンドで接着し，室内の気温の違いを比較する．

これらのテーマのうち，予備実験等が終わっており完成度が高い＜Sample 7：エネルギー効率＞について，その実験内容は図３に示す通りである．

図３ Sample7の実験の結果わかったこととしては，主に次のようなことがあげられる．

①電気ポットの蓋をしないと，いつまでたっても電源が切れずに，万が一，沸騰したことに気づかないと無駄に電気を使い続けることになる．そういう意味で蓋は必ずした方がよい．

②人感センサーは，赤外線を出すことで常時監視しているため，１日で24Whの電力を消費している．もし５分間だけライトをつけたいときは，

実験①…電気ポットで湯を沸かすとき，蓋をする・しないときの電気代の違い
実験②…電気ポットで１日保温する電力量と必要なときに電気ポットで湯を沸かすときの電力量の違い
実験③…人感センサーでのライトのON・OFFと，手によるスイッチのON・OFFの電池代の違い
実験④…トイレの便座の蓋をしているときとしていないときの電力量の違い
実験⑤…冷蔵庫のドアを開けている時間と庫内の温度変化
実験⑥…IH調理器，ガス調理器，電熱器，電子レンジでの省エネ比べ

図３　<Sample7：エネルギー効率＞実験内容

１回あたり0.83Whの消費電力なので，人感センサーより，手でスイッチをつける方が，消費電力が少ない.

③冷蔵庫のドアを開けている時間が長くなると消費電力量が増加するのではないかという仮説のもとに実験を行ったが，結論は変化がなかった．単に，ドアを開けたことで冷蔵庫内の温度が上がり，元の温度に戻るまでの時間が長くなっただけであった.

5. 自由研究のまとめ方

自由研究の対象としては，小学生，中学生，一部高校生を想定しているが，主に小中学生を想定している．まとめ方としては，以下の通り教員による指導を考えている.

１．研究テーマ（題名）
２．研究のきっかけ（選んだ理由）
３．研究の方法と内容
４．研究の結果・分かったこと
５．感想，今後どう活かすか
６．参考にした本
７．お世話になった人や場所

実際に実験をしてまとめるときには実験の様子の写真を載せることや，データをとった場合はグラフ化することなどを指導する.

6. おわりに：自由研究の実際

2020年度の美浜町エネルギー環境教育体験館「きいぱす」における夏休みの自由研究（高学年の部）は，コロナ対応もあり，実施回数が２回のところ１回に減ったうえ人数制限もあり，本格的に行うことができなかった.

2020年度に取り組んだのは，４組８名の親子であった（基本的に，実験・観察は，児童・生徒のみで実施）．人数も少なかったので，＜自由研究Sample 2：断熱効果＞を指定して，２人１組で実施した.

最初に，自由研究の概要について説明後，具体的な取り組み内容（テーマ）について説明し，実験方法について解説して実験・観察を行い，データ取りを行った．次に，各自パソコンにデータを入力してグラフ（グラフ作成エクセルシート使用）を作成した．実験は２種類あったが，２つ目の実験についても１つ目の実験と同様に行うことができた．その後，考察を支援するため，熱の伝わり方について解説した．残りの時間は，実際に自由研究をまとめていく時間とした．また，実験中の様子について指導者側で過去に撮りためた写真を参考資料として提供した.

この取り組みについては，美浜町エネルギー環境教育体験館「きいぱす」の定例行事であり，また取り組み時間が２時間程度と決まっているため，指導者サイドで進行することになった．しかし，「きいぱす」ではなく一般の学校で実施するときには，テーマについての予想とその理由，実験方法などについても，児童・生徒各自にできるだけ考えさせることが大切である．また，考察なども，児童・生徒自身にデータやグラフから考えさせることが必要である.

引用文献

(1) 文部科学省初等中等教育局（2020）中学校学習指導要領 理科の改訂のポイント．https://www.nits.go.jp/materials/youryou/files/025_001.pdf（2021年6月14日）.
(2) 文部科学省（2020）新しい学習指導要領の考え方 －中央教育審議会における議論から改訂そして実施へ－ p22「主体的・対話的で深い学びの実現」.

https://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/
new-cs/__icsFiles/afieldfile/2017/09/28/
1396716_1.pdf（2021年6月14日）.

INSS JOURNAL Vol. 28 2021 R-8

放射線および原子力防災学習モデルの作成と実践

Development and Implementation of Radiation and Nuclear Disaster Prevention Learning Models

大磯　眞一（Shinichi Oiso）*1

要約　福井理科教育研究会（Fukui Science Education Community，以下，研究会）は，エネルギー・環境領域を中心とする理科の授業プログラムの開発と実践を目的として2012年５月に立ち上げられた研究会で，福井県内の小中高等学校の教員や大学の研究者で構成されている．これまでの研究･実践を踏まえて，研究会で「放射線および原子力防災学習モデル（以下，学習モデル）」の作成・実践を行った．その結果，学習モデルを配布した学校からは，わかりやすいイラストで生徒が容易に理解できることや，放射線と防災の双方が一度で学べることにおいて一定の評価を得た．さらに，福井大学において，研究成果報告会として理科教育フォーラムを開催した際に，学習モデルを活用した活動状況報告を行い，参加教員のコメントからは，教材や指導法が学校の授業で直接使えるということが利点として明確になった．

キーワード　放射線，原子力防災，学習モデル，授業プログラム，エネルギー

Abstract　The Fukui Science Education Community was established in May 2012 as the workshop for developing and practicing science lessons, focused mainly on energy and environmental topics. Its members are teachers of elementary, junior high and high schools in Fukui Prefecture and university researchers. Based on research findings and practice until now, the preparation and practice of the radiation and nuclear disaster prevention learning model was prepared and tried out at the workshop. From fixed evaluation results obtained from the schools which participated in lessons using the learning model, it was determined that the information could be easily understood by the students by combining text with illustrations and that both disaster prevention and radiation could be learned at the same time. In addition, an activity situation report using the learning model was carried out when science education forum was held as a research report meeting at Fukui University, and it was clarified from the comments of the participating teachers that the teaching materials and teaching method could be directly and advantageously used in the school classes.

Keywords　radiation, nuclear disaster prevention, learning model, lesson program, energy

1. はじめに

原子力安全システム研究所の実施した放射線意識動向調査（2014-2015）の結果を反映させ，小中高等学校における学習用展開案として，放射線および原子力防災学習モデルを作成した．

特徴として，放射線ならびに原子力災害時の対応についての学習を，教科教育や学級活動，学校行事（避難訓練）の中にどのように盛り込めばよいかを検討している．作成にあたっては，福井県美浜町原子力対策室，島根大学附属中学校（原子力発電所から30km圏内）にもヒアリングを実施した．学習モデルは福井県内の全学校に配布し，希望する学校にはデータを無償提供している．学習モデルを実際に教員が使って，さらに学習モデルにフィードバックさせるという継続的な作業も実施している．

2. 目的

放射線および原子力防災学習モデルについて知っていただくために，本稿でその内容や特徴，実践事例などを紹介する．別途実施する学校訪問などと合

＊1　(株)原子力安全システム研究所　社会システム研究所

わせてその利用価値を周知することにより，学校教育の中での使用を慫慂し，もって次世代層への放射線および原子力防災の普及啓発に資することを目的とする.

3. 方法

3.1 先行事例調査

福井理科教育研究会（以下，研究会）において，2015年に茨城県および静岡県の小中学校の状況を調査した．その結果，東海村立舟石川小学校への調査で，原子力防災訓練（保護者引き渡しならびに屋内退避）時には，訓練後に放射線に関する説明も実施していることがわかった．また袋井市立周南中学校では，理科などの教科で，関連する単元において短時間，放射線学習を行っていた.

さらに，研究会において，2015年に福井県における防災教育手引き及びあわら市金津小学校の状況を調査した．その結果，福井県の防災教育手引きの内容は充実しているが，自然災害に関することが主で，原子力防災に関する記述はないことが明らかとなった．また，上記調査の結果，金津小学校では，防災教育手引きの内容を受けて，学年ごとに学級活動，防災訓練，教科学習に分けて防災教育指導計画を作成していることがわかった. これらのことから，防災教育手引きの内容をベースとして原子力防災をどのように組み込むかを研究会で検討した.

また，筆者は2015年に福井県美浜町の原子力対策室や，原子力発電所から30km圏内の島根大学附属中学校などでヒアリング調査を行った．その結果を研究会において検討して，即時避難を要する空間放射線量率の基準などを学習モデルに組み込んだ. さらに，原子力安全システム研究所が作成した原子力用語解説集の放射線・原子力防災関連個所の内容も，研究会において議論の上，組み込むこととした.

3.2 放射線意識動向調査の結果の織り込み

原子力安全システム研究所は，2014年と2015年に放射線意識動向調査を実施しており，その結果を上記学習モデルに反映させた．この調査は，近畿２府４県において訪問留置方式でデータ数1,000，調査対象20歳以上の男女に対し実施したものである．この調査の結果として，自然放射線については，若年層での知識が不足しており，今後，学校教育においても，さらなる知識普及が必要であることが明らかとなった.

また，放射線に関する基礎知識では，外部被ばくと内部被ばくについて知識がある人の比率が若年層であまり高くないことが判明している. このことは，原子力防災の面でも重要な内容であり，今後，学校教育においてさらに取り上げていく必要があると思われた．さらに測定器（放射線モニター）を使って学校内外での放射線測定を行うことが望ましいとする意見が多く，また，学校で原子力防災を教えるべきとする人が大半であった．このような結果を学習モデルの内容に織り込むこととした.

3.3 学習モデルの作成協力者

学習モデルについては，原子力安全システム研究所が中心となり，福井県内の教員らが参加する研究会で検討した.

4. 結果

4.1 学習モデルの内容

小学校版，中学校版に分けた教科用の展開案を，研究会会員の授業実践結果を踏まえて作成した．教科用の展開案については，放射線と放射性物質の違いをおさえる内容，原子の構造を復習する内容などを組み込んでおり，理科の授業として取り組みやすい内容となっている.

また，学級活動，学校行事（避難訓練）での展開案を新たに作成した. 学級活動での展開案としては，学習指導プランおよび配布資料を作成した.

(1) 小学校版

小学生に知ってほしいこと，行ってほしいこととしては，まず，原子力災害時，安全な場所で自分の命を守り，その後避難するということをあげた.

万一の原子力災害時は，まず安全な場所に屋内退避し，その後場合によって避難する．原子力災害といっても特別のことは一部で，他の災害への対応と共通する部分が多い．ただし原子力災害の場合は，対応が求められるまでに時間があることが特徴である．さらに，放射線教育の一環としての原子力防災教育という観点から，放射線とはどのようなものか，

また大量に浴びると危険であることも記載した.

小学校の学級活動の時間で，原子力防災教育のまとめを行うにあたっての確認事項は次のとおりである.

- 様々な災害の中の一つに原子力災害があることが理解できたか，原子力災害の特徴を知ることができたかどうかを確認する.
- 避難訓練を通して，学校や家庭・地域の一員としての自覚を持ち，万一の原子力災害の際，安全な行動の仕方を実践できる姿勢が身についたかどうかを確認する.
- 防災マップ作りなどを通して，避難場所や避難ルートなどを学ぶことができたかどうかを確認する（主に原子力施設から30km圏内の地域）.
- 放射線の性質についても，基本的なことが身についたかどうかを確認する.

(2) 中学校版

中学生に知ってほしいこと，行ってほしいこととして，小学校版の内容に加えて，放射線の性質や特徴について学んでおくべきこと，放射線から身を守る方法について日頃から学習しておくことを記載した.

学習したことを家庭・地域に広げることができるという観点から，学校で学習したことや体験したことを，家庭・地域での原子力防災に活かし，災害時に自分たちにできることを述べた．また，行動ができるという観点から，日頃から万一の原子力災害に対する備えについて学習し，集団や地域の人々の役に立つ行動ができるように準備しておくということも記載した.

中学校の学級活動の時間で，原子力防災教育のまとめを行うにあたっての確認事項（小学校版に追加する内容）は次のとおりである.

- 放射線の性質や放射線量の単位や基準についても，基本的なことが身についたかどうかを確認する.
- 災害時に地域の一員として行動することの大切さについて理解できたかを確認する.
- 万一の原子力災害時には防災無線を必ず聞く，指示があるまで屋内にとどまる，避難看板・設備について日頃から知っておくといった基本的なことについて身についたかどうかを確認する.

4.2 学習モデルの特徴

学習モデルの特徴としては，自然放射線の存在や放射線の性質，利用，防護のことなどについて，わかりやすいイラストとともに低年齢層でも十分理解できるよう平易に解説している.

さらに，原子力災害時の対応について，教科教育ならびに学級活動，学校行事（避難訓練）の中にどのように盛り込めばよいかを示している.

学習モデルでは，児童・生徒に知ってほしいこととして，原子力災害時には安全な場所で自らの命を守り，その後に避難することをあげた．また，原子力防災の観点から，放射線の性質や特徴について学んでおくことや，放射線から身を守る方法について日頃から学習することを勧めている．図１は教科教育（理科）での学習モデルを使用した授業風景である.



図１　学習モデルを使用した授業風景

さらに，学んだことを家庭や地域に広げるため，学習内容や体験したことを原子力防災に生かす必要性を記載している．そして，原子力災害に対する備えを日頃から学習し，災害時に地域住民らの役に立つ行動ができる準備の重要性などを盛り込んだ.

様式としては，教員が使用する「学習指導プラン（指導案）」（表１），児童・生徒が記入する「ワークシート」（図２），スクリーンにも映写できるようパワーポイントにした「配布資料」（図３）の３点セットで作成した.

表１　学習指導プラン（指導案）の一部

時間配分	学習の流れ	教員の指導
導入５分	生徒による放射線のイメージの発表	放射線と放射能の違いなど
展開40分	「放射線の種類と発生のしくみ」「身の周りの放射線の測定」「放射線の性質と利用」	放射線測定器（放射線モニター）の扱いについては，丁寧に説明する
まとめ５分	「役に立つ放射線も大量に浴びると危険」「放射線の人体への影響について考えるときには量が大切」	原子力発電・放射線防災につなげる


放射線と防災ワークシート（1時間目）

名前

【今日のねらい】

【2種類の塩】

塩	名前	メーターの値（簡易放射線測定器）	放射線が出ている？（○×）
A			
B			

放射線を出す物質を…（　　）、放射線を出す能力を…（　　）

【いろいろな物質中から出ている放射線　測定】

○理科室にも放射線は、飛んでいるか？…その場所の空気中の放射線量（　　）

物質（場所）	1回目	2回目	3回目	平　均	正味	気づいたこと
野菜（　）						
コンクリート						
温ノ花						
カリ肥料						
かこう岩						

【いろいろな場所で出ている放射線　測定】

物質（場所）	1回目	2回目	3回目	平　均	正味	気づいたこと
理科室						
理科室前廊下						
自分の教室						
体育館						
グラウンド中央						

【まとめ・分かったこと・感想】

図２　作成したワークシートの一部

5.　考察

放射線および原子力防災学習モデルについては，原子力安全システム研究所のホームページhttp://www.inss.co.jp/の該当箇所（研究成果/その他公開資料）で既に公開しているが，その作成過程ならびに学習モデルを用いた学校授業などでの実践については，本稿で初めて報告している．また学習モデルについては，福井県内の学校等への配布を行い，

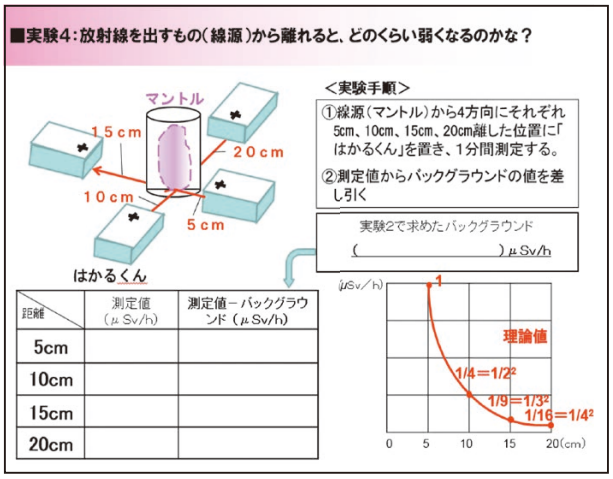


図３　作成した配布資料の一部

希望する学校には無料でデータを提供している．

学習モデルの普及に向けた活動として，福井県を中心に学校訪問も実施している．放射線および原子力防災学習モデルの実践事例も増加している．これまでに把握できているだけで，十数校で実践を行っていただいた．その結果，学習モデルは，理科，保健体育，総合学習，学校行事，学級活動など，学校教育の様々な場面で使用可能であることが明らかになった．美浜町エネルギー環境教育体験館「きいぱす」でも学習モデルを使った授業を実施し，放射線学習に役立てている．

福井大学で開催している研究会による研究成果報告会での参加者（教員）からは，「学校の授業で直接使える放射線教材や指導法がとても参考になった」「防災に関する自助・共助の重要性がよく分かった」といった意見をいただいた．

放射線教育については，2021年度より，中学校２年生および３年生のカリキュラムに組み込まれており，かけられる時間の長短はあれ，授業の中で取り上げられるものと思われる．しかし，原子力防災教育については，おもに原子力発電所の立地地域を中心として行われ，電気の消費地で取り上げられることは少ないと予想される．原子力防災教育については，表２に示す通り，教科，学級活動，学校行事からのアプローチを，「生徒への主な指導内容」と「重点ポイント」に分けて盛り込んだ．

学習モデルについては一応の案の完成後も，図４および図５に示すように，実際に教員が使う中で課題を明確にし，残された課題について，対策として学習モデルにフィードバックさせる作業を実施した．

表２　原子力防災教育の特徴

区 分	生 徒 へ の 主な指導内容	重点ポイント
教科（授業）	原子力防災体制の理解 • 緊急時に対処する体制や安全を守る関連機関	他の自然災害との違い • 屋内退避，発生から避難までに時間があることなど他の自然災害との違い
学級活動（ホームルーム等）	万一の原子力災害から身を守る • 自治体パンフや日本原子力文化財団のDVD等を教材として活用	避難場所やルートを学ぶ • 自治体パンフの教員による平易な説明 • 防災マップの作成
学校行事（避難訓練等）	避難訓練 • 屋内退避と保護者への引き渡し • 訓練後の放射線についての講話	屋内退避時 • 顔や手足をよく洗う

具体的なフィードバックとしては，永平寺町志比小学校での授業実践結果から，「保護者引き渡し訓練では，実際に保護者に学校へ来てもらって臨場感を高めること」を学習モデルの内容に追加した．さらに地震などの場合は想定外のことが起きるので，様々なケースを想定して日頃から訓練をしていく必要性についても記載した．

また，美浜町立美浜東小学校での授業実践結果から，「避難訓練時は声が通ったが，実際の事故時はもっと騒々しい可能性が高いので，拡声器を常備しておくこと」，「保護者引き渡しの際，保護者に連絡がつかない可能性があるので，日頃から，保護者の職業・連絡先等を把握しておくこと」の２つを学習モデルの内容に追加した．

6. おわりに

学習モデルについては，理科や総合学習の授業や学級活動，学校行事，クラブ活動などで利用可能である．今後，普及活動に力を入れていきたい．

また，学習モデルを研究会に所属する教員が実際に授業に使用して，その結果を再び学習モデルに織り込むことにより，さらに内容をブラッシュアップさせていきたい．

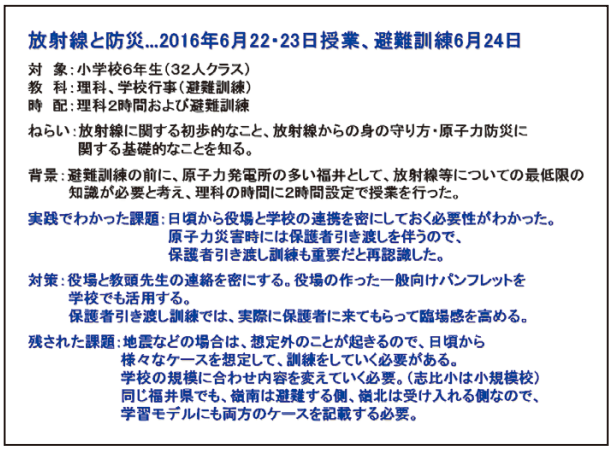


図４　永平寺町志比小学校での授業実践

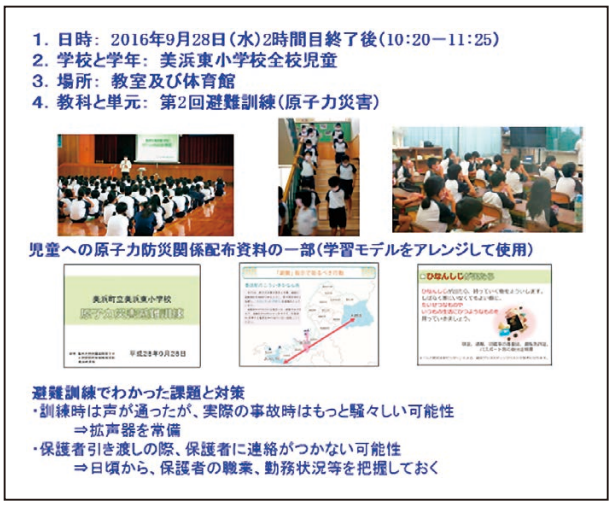


図５　美浜町立美浜東小学校での授業実践

引用文献

国立研究開発法人科学技術振興機構：理数系教員（コア・サイエンス・ティーチャー）養成拠点構築プログラム．
http://www.jst.go.jp/cpse/cst/
（2021年6月14日）．

原子力安全システム研究所（2013）放射線学習絵本『はじめましてほうしゃせん』．
http://www.inss.co.jp/book/1083.html
（2021年6月14日）．

放射線および原子力防災学習モデル．
http://www.inss.co.jp/wp-content/themes/inss/images/research/放射線および原子力防災学習モデル.pdf（2021年6月14日）．

亀裂構造物評価のための J 積分算出方法

Ways of Obtaining J-integrals for Assessment of Cracked Components

釜谷　昌幸（Masayuki Kamaya）*1

要約　亀裂を有する構造物の破壊評価において，破壊の駆動力指標として J 積分が用いられる．J 積分は，亀裂先端の弾塑性状態を代表する指標で，弾塑性有限要素解析により得ることができる．その値は，亀裂と構造物の形状や負荷の大きさの他，応力・ひずみ曲線などの材料の変形特性にも依存する．そのため，種々の構造物と亀裂形状に対応した解を表として準備することは難しく，維持規格にも J 積分の値は与えられていない．その代替として，J 積分の簡易推定法などが提案されている．本稿では，J 積分の算出方法の現状についてまとめた．J 積分の特徴を総括するとともに，簡易解析法（参照応力法と参照塑性勾配法）について解説した．そして，最後に，著者がこれまで発表してきた内表面に亀裂を有する配管の J 積分解を紹介した．

キーワード　J 積分，破壊評価，参照応力法，参照塑性勾配法，維持規格

Abstract　J-integral is used as a driving force parameter for component failure in fracture assessments of cracked components. The J-integral represents an elastic-plastic condition near the crack-tip and its value is obtained by elastic-plastic finite element analyses. The magnitude of the J-integral depends not only on crack and component geometries as well as the magnitude of the applied load, but also on material deformation properties such as the stress-strain curve. Therefore, it is not an easy task to prepare the J-integral solutions for a tabulated form and J-integral solutions have not been prescribed in the fitness-for-service codes. As an alternative, in some fitness-for-service codes, a simplified J-integral estimation procedure is provided. This paper summarizes the current situation of the J-integral estimation procedure. First, the characteristics of the J-integral are summarized. Then, two simplified methods, the reference stress method and reference plastic slope method, are outlined. Finally, some solutions the author has suggested for pipes with inside surface cracks are presented.

Keywords　J-integral, fracture assessment, reference stress method, reference plastic slope method, fitness-for-service code

1.　はじめに

国内の原子力発電プラント機器において亀裂が発見された場合，当該機器の構造健全性評価は日本機械学会の発電用原子力設備規格維持規格（以後，維持規格）[(1)]の規定にしたがって実施される．具体的には，亀裂の進展予測と，進展後の亀裂寸法を想定した破壊評価が実施される．そして，予測された強度が基準を満足すれば亀裂を補修することなく機器の使用を継続できる．破壊評価では，延性破壊や脆性破壊などの破壊モード（壊れ方）を想定した上で，破壊モードに対応する破壊の駆動力を算出する．そして，材料の強度が破壊駆動力よりも大きければ，破壊しないと判断される．破壊モードは，材料の他，亀裂や構造物の形状などに依存し，複数の破壊モードを想定する場合もある．

維持規格では，図 1 に示すように塑性崩壊，弾塑性破壊，および脆性破壊の 3 つの破壊モードが想定される[(2)]．そして，破壊モードによって，用いる駆動力指標と材料強度の強度特性が異なる．塑性崩壊は構造物断面で生じる延性破壊で，断面における平均的な応力（実断面応力）が破壊を引き起こす駆動力になる．機器設計など亀裂がない構造物を対象にする場合は，塑性崩壊を想定して強度評価が実施される．そして，ステンレス鋼のように延性が大きい材料に対しては，亀裂構造物であっても塑性崩壊が破壊モードとして想定される[(1)]．

断面全体が変形する塑性崩壊に対し，弾塑性破壊と脆性破壊は亀裂先端の局所から破壊する．したがって，弾塑性破壊と脆性破壊に対する破壊評価には局所的な応力やひずみの大きさを代表する J 積分や応力拡大係

＊1　（株）原子力安全システム研究所　技術システム研究所

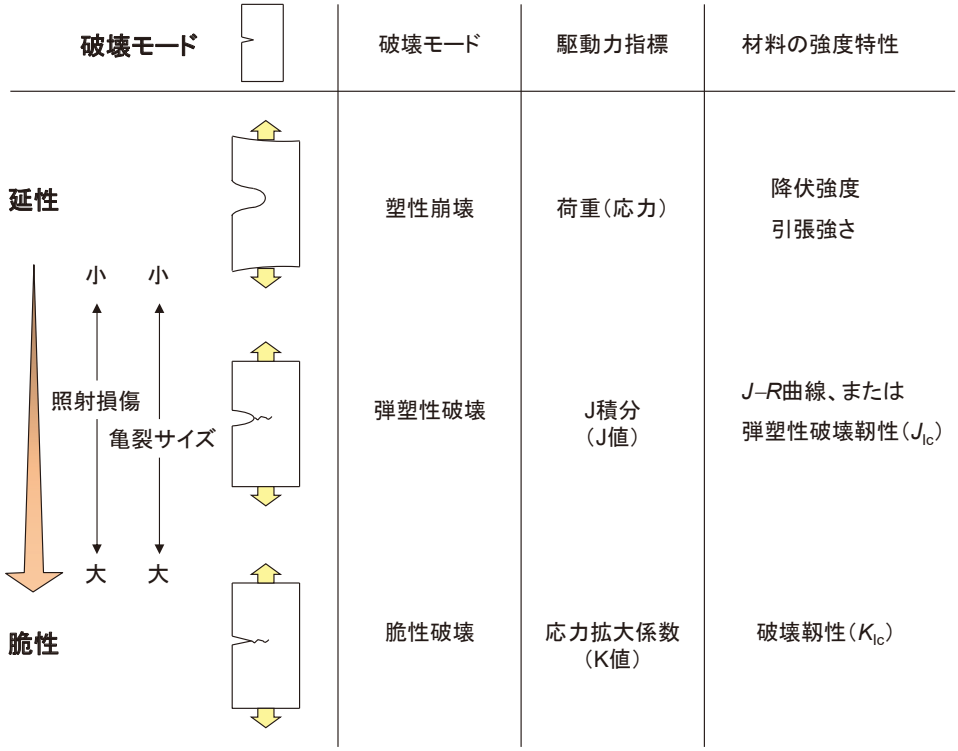


図 1　維持規格で想定される破壊モード

数が駆動力指標として用いられる．弾塑性破壊と脆性破壊のどちらの破壊モードが出現するかは，材料や使用温度などの条件による．とくに，原子力発電プラント機器を対象にした場合は，中性子照射や熱による脆化の影響を考慮する必要がある．維持規格では，脆化が想定される原子炉圧力容器や炉内構造物などに対しては脆性破壊を想定する規定となっている．その他の一般的な材料であれば，弾塑性破壊が想定される．

弾塑性破壊では，破壊の駆動力として J 積分が用いられる[3]．J 積分は，亀裂先端への応力とひずみの集中を考慮した力学パラメータであり，単位面積あたりのエネルギーの次元を有する．したがって、負荷される外力に加え，材料の変形特性の影響も受ける．実構造物に対する J 積分を算出するには，有限要素解析を実施する必要がある．しかし，維持規格のユーザーが有限要素解析を利用できるとは限らない．また，利便性のためにも有限要素解析を実施しなくても J 積分が得られることが望ましい．しかし，材料の変形特性にも依存する J 積分を解として整備することは容易ではない．そして，維持規格で対象となるような構造物に対する J 積分の解が十分整備されているとは言えない状況にある．それに代わる方法として，簡易評価法も提案されており，いくつかの規格で採用されている．

J 積分は，物理的意味の理解が容易とは言えない弾塑性破壊力学パラメータとなる．そして，実用の場では，解析によって得られた値や簡易評価法など複数の方法が運用されており，どの値を用いるべきか判断に困る場面も想定される．本稿では，亀裂構造物の破壊評価に用いる J 積分を得るために必要な知見をまとめる．2 章では，J 積分の基本的な事項を解説する．とくに，破壊評価を実施するために理解しておくべき知見を中心にまとめる．3 章では，J 積分の簡易評価法を示すとともに，その特徴と適用に際しての注意点をまとめる．そして，4 章には，簡易評価法に依らずに，正確な J 積分を得るために著者がこれまで公表してきた J 積分解を紹介する．

2.　J積分の特徴

亀裂先端では応力とひずみが集中し，その大きさは理論上，無限大になる．したがって，破壊駆動力が応力やひずみであったならば，亀裂は無条件に破壊すると判断されることになる．しかし，実際は小さい亀裂は破壊しにくい．つまり，亀裂先端における無限大の応力やひずみにも大きさが存在する．その大きさを代表するパラメータが応力拡大係数や J 積分となる．寸

法 a の亀裂に応力 σ が負荷されている場合の応力拡大係数は下式で表すことができる．

$$K = f_1\sigma\sqrt{\pi a} \tag{1}$$

ここで f_1 は亀裂と構造物の形状から決定される形状係数を示す．一部の場合を除き形状係数は，有限要素解析などの数値解析により求める必要がある．応力拡大係数は，弾性力学において定義されるパラメータとなる．等方均質体の弾性材料の変形特性はヤング率とポアソン比で代表できるが，応力拡大係数はポアソン比にのみ依存する．一般的な金属材料のポアソン比は 0.3 近傍で，多くの場合 0.3 が仮定される．したがって，応力拡大係数は実質的に材料に依存しない．そして，弾性（線形）パラメータであることから，負荷の大きさに対しては比例的に変化し，複雑な負荷分布に対しては，解の重ね合わせが適用できる．平板や配管など代表的な構造物や亀裂形状に対する形状係数はハンドブックにまとめられている[4]．維持規格の評価において，亀裂は半楕円状に置き換えられる．配管内表面に半楕円亀裂が存在した場合の形状係数は亀裂の深さ（厚さに対する比），亀裂の形状（深さと長さの比）そして配管形状（半径と厚さの比）に依存する．維持規格では，3 つのパラメータを系統的に変化させて得られた形状係数が表の形で与えられている．評価を実施する際は，表の値を内挿により求めることで，有限要素解析を実施しないでも，応力拡大係数を求めることができる．維持規格の添付 E-5 には，評価に必要になると思われる形状係数が網羅されている[5]．

緒言でも述べたように，応力拡大係数は例えば中性子照射を受けた材料のように硬い材料，つまり塑性変形が生じにくく，弾性的な変形が想定される材料の破壊評価に用いられる．一方，塑性変形の影響が無視できない材料の破壊評価には，J 積分を用いた弾塑性破壊力学評価が適用される．J 積分では，応力拡大係数に対する 3 つのパラメータに加え，降伏強度や応力・ひずみ曲線などの材料の変形特性も考慮する必要がある．さらに，材料は荷重に対して非線形に変形することから，荷重の大きさも考慮する必要がある．変形特性が 1 つの定数で代表できたとしても，3 つの形状因子と荷重の大きさを併せた 5 つのパラメータに対応した 5 次元の表を準備する必要があり現実的ではない．そこで，表の次元を下げるため，以下の方法により荷重の影響を正規化する．

まず，応力σとひずみεの関係（応力・ひずみ曲線）が次式の指数則にしたがう材料を想定する．

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_o} = \alpha\left(\frac{\sigma}{\sigma_o}\right)^n \tag{2}$$

ここで，σ_o と ε_o は基準応力と基準ひずみで，n と α は材料定数を示す．σ_o と ε_o にそれぞれ降伏強度σ_y とそれに対応する降伏ひずみσ_y/E（E はヤング率）を用いる．(2) 式の材料特性に対する J 積分の解析解は得られており[6]，その値 J_p は次式で表すことができる[7]．

$$J_p = h_1\frac{\alpha\sigma_y^2 t}{E}\left(\frac{P}{P_L}\right)^{n+1} \tag{3}$$

P と P_L は負荷する荷重と極限荷重を示す．極限荷重は，図 1 の塑性崩壊が発生する限界荷重に相当する．(3)式では，J_p が荷重 P の関数となっていることから，形状係数に相当する h_1 が与えられればσ_y，n およびα で定義される任意の材料と荷重に対する J 積分を得ることができる．しかし，h_1 は亀裂と構造物の形状のみでなく材料定数にも依存する．経験的には，α による h_1 の変化は小さいので，考慮すべき材料パラメータは n のみとなる．配管内表面の亀裂に対しては，3 つの形状因子に材料定数 n を加えた 4 次元の表が必要となるが，4 章でも示すように，準備することは不可能ではない．

応力・ひずみ曲線を(2)式で表わすことのできる材料は限られ，一般的な構造材料への適用は誤差を伴う．構造材料の応力・ひずみ曲線の近似式（以下，構成式）として，次式の Ramberg－Osgood 式（R-O 式）がよく用いられる．

$$\frac{E\varepsilon}{\sigma_y} = \frac{\sigma}{\sigma_y} + \alpha\left(\frac{\sigma}{\sigma_y}\right)^n \tag{4}$$

この材料に対する J 積分 J は次式で得られる[12]．

$$J = J_e + J_p = \frac{\left(K\left(a_e\right)\right)^2}{E'} + h_1\frac{\alpha\sigma_y^2 t}{E}\left(\frac{P}{P_L}\right)^{n+1} \tag{5}$$

ここで，$E' = E/(1-\nu^2)$（E と ν はそれぞれヤング率とポアソン比）で $K(a_e)$は亀裂寸法 a_e に対応した応力拡大係

数を示す．J_p は(3)式による．弾塑性状態の J 積分は弾性と塑性の単純な足し合わせで求まるわけではない．その補正のために a_e（$> a$）が用いられる．a_e は亀裂先端で塑性変形が生じることによる実質的な亀裂進展を考慮した寸法との解釈[9]もあるが，a ではなく a_e を用いる目的は(5)式の精度を高めることにある．4 章に記載した解では，正しい J 積分（有限要素解析の結果）に近い値が得られる a_e を経験的に決定している．応力拡大係数を変換した J_e と J_p の和を用いることで，実用的な(4)式の構成式の材料に対して任意の荷重の J 積分を得ることができる．

以上のように，構成式が(2)式または(4)式で近似できる場合は，J 積分の解を 4 次元の表として準備することができる．しかし，4 次元のパラメータを系統的に変化させて有限要素解析を実施するには多くの労力が必要となることから解の整備には限界がある．実際に，3 次元表面亀裂に対する系統的な J 積分の解が報告された例は限られる[10]-[15]．そして，維持規格の評価に対応する実用段階まで網羅されているとは言えない状況にある．また，R-O 式が全ての材料に適用できるとは限らないという問題もある[16]．

任意の応力・ひずみ曲線の材料に対する J 積分を得るため，次節で説明する参照応力法などの簡易評価法が適用されている規格もある[17][18]．維持規格では参照応力法の適用は炉内構造物を対象にした場合に限られる．任意の応力･ひずみ曲線に対応できる方法として，維持規格では J 積分を用いない Z 係数法と 2 パラメータ評価法が規定されている．Z 係数法は代表的な亀裂形状と材料に対して予め弾塑性破壊力学評価を実施して，保守的な破壊荷重を規定する簡易法で，得られる解は過度に保守側になる場合もある[19]．2 パラメータ評価法には，J 積分を用いなくても破壊評価が実施できるオプションが準備されている．しかし，これも保守側の評価になることが知られている[20]．合理的な評価のためには J 積分を算出する必要がある．

3. J積分の簡易評価法

3.1 参照応力法

参照応力法では，下式により J 積分が算出される[21]-[25]．

$$J = \frac{E\varepsilon_{\mathrm{ref}}}{\sigma_{\mathrm{ref}}} J_{\mathrm{e}} \tag{6}$$

ここで，σ_{ref} は下式で求まる参照応力を示す．

$$\sigma_{\mathrm{ref}} = \left(\frac{P}{P_{\mathrm{L}}} \right) \sigma_{\mathrm{y}} \tag{7}$$

参照ひずみ $\varepsilon_{\mathrm{ref}}$ は材料の応力・ひずみ関係における σ_{ref} に対応するひずみと定義される．J_e は(5)式でも用いられている弾性の J 積分で応力拡大係数 K を用いて，次式により変換される．

$$J_{\mathrm{e}} = \frac{K^2 \left(1-\nu^2\right)}{E} \tag{8}$$

参照応力法の物理的な意味の解釈のため，(6)式を以下のように展開する．

$$\begin{aligned} J = \frac{E\varepsilon_{\mathrm{ref}}}{\sigma_{\mathrm{ref}}} \frac{K^2 \left(1-\nu^2\right)}{E} &= \left(1-\nu^2\right) K \times f_1 \left(\frac{\varepsilon_{\mathrm{ref}}}{\sigma_{\mathrm{ref}}} \sigma \right) \sqrt{\pi a} \\ &= \left(1-\nu^2\right) K \times f_1 \varepsilon'_{\mathrm{ref}} \sqrt{\pi a} \\ &= \left(1-\nu^2\right) K K_{\varepsilon} \end{aligned} \tag{9}$$

ここで，K_ε はひずみ拡大係数に対応する[26]．つまり，J 積分は応力（K）とひずみ（K_ε）の積で表される．参照応力法では，ひずみ拡大係数に対する形状係数も応力拡大係数と同じ f_1 を用いている．h_1 が n に依存したように，厳密にはひずみ拡大係数の形状係数は材料の構成式に依存する．しかし，塑性ひずみが小さい場合は，$J \fallingdotseq J_e$ が成立するように，ひずみ拡大係数の形状係数は f_1 に近い．参照応力法により精度のよい J 積分が得られる場合もあるが，必ずしも保証されたものではない[27][28]．また，参照応力法の精度は，用いる極限荷重 P_L に依存する[29][30]．逆に，極限荷重の値を調整することで，J 積分の算出精度を上げる取り組みも報告されている[31]-[35]．

参照応力法は，精度に対する問題は指摘されているものの，(6)式の導出の考え方が根拠をもって解説されており[21]，受け入れられやすいものとなっている．応力拡大係数解（(8)式から得られる J_e）と応力・ひずみ曲線から J 積分を得られる簡便さも実用では重要とな

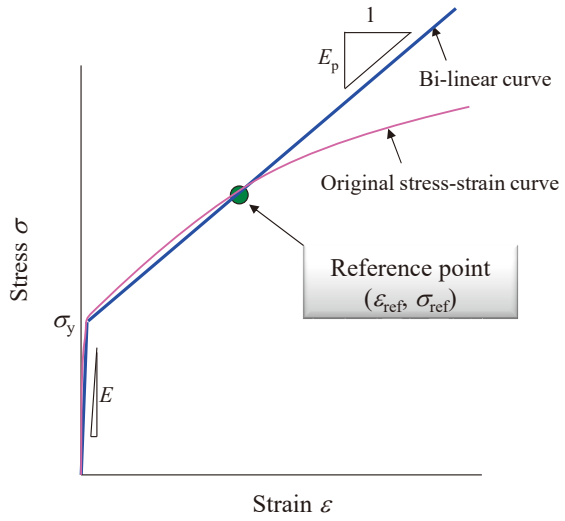


図 2　参照塑性勾配法（2 直線近似の方法）

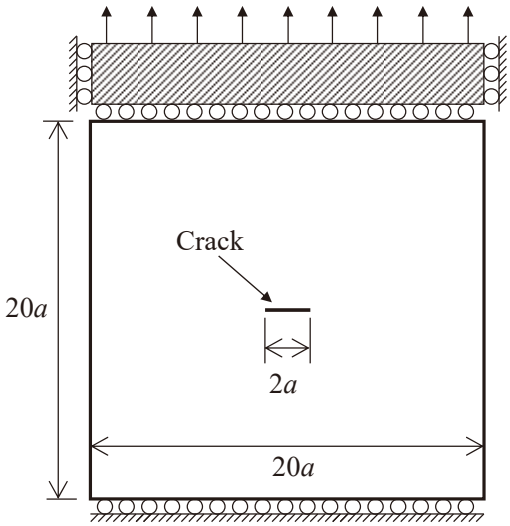


図 4　引張荷重を受ける 2 次元平板モデル

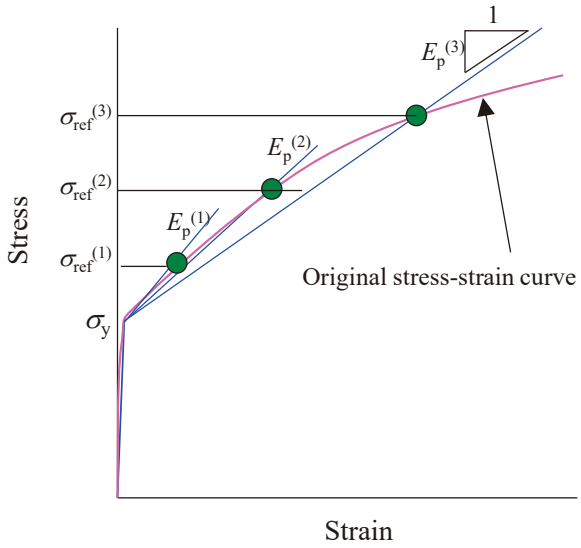


図 3　参照塑性勾配法（塑性勾配の同定方法）

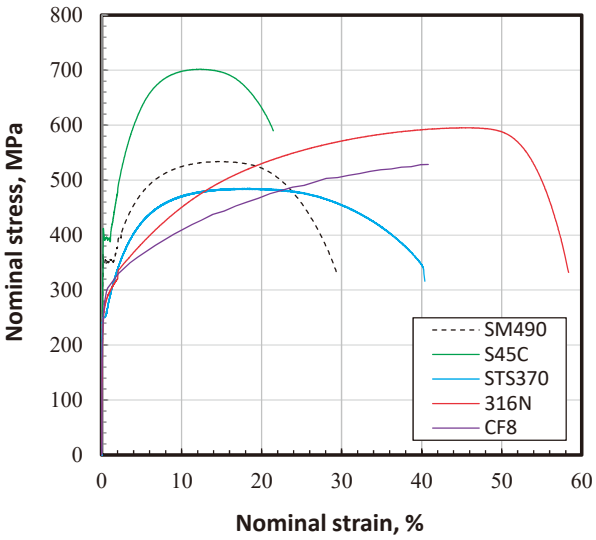


図 5　想定した材料の公称応力・ひずみ曲線

る．現実問題として，任意の応力・ひずみ曲線から有限要素解析なしに J 積分を推定することのできる唯一の方法となる．そして，一部の規格の破壊評価に適用されている．しかし，規格に規定されていることが，必ずしも妥当な評価が行えることを意味しない．実機評価を実施したい社会的な要求の中で，取り得る選択肢が少ないのが現状である．

3.2　RPS法（参照塑性勾配法）

任意の応力・ひずみ曲線を有する材料の J 積分を推定する方法として，著者は Reference Plastic Slope 法を提案している．この方法のオリジナルは，ステンレス鋼の構成式としてよく用いられる Swift 構成式の J 積分を算出するために提案された[36]．原理的には，任意の応力・ひずみ曲線に適用できることから，J 積分の簡易評価法として文献(37)において一般化した．本稿では，RPS 法を参照塑性勾配法と称し，以下で概要を説明する．

手順としては，応力・ひずみ曲線を 2 直線の応力・ひずみ曲線（以後，2 直線とよぶ）に置き換えて J 積分を算出する．置き換えの方法として，図 2 に示すように，参照応力法と同様に参照応力を用いる．このようにして置き換えた 2 直線に対する J 積分が，オリジナ

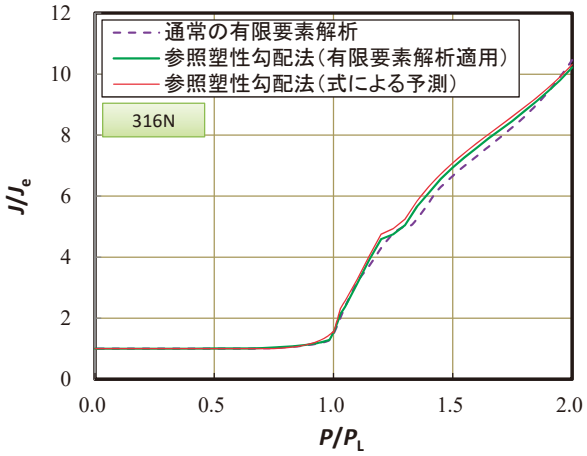


図 6　参照塑性勾配法と通常の有限要素解析により算出した J 積分の比較

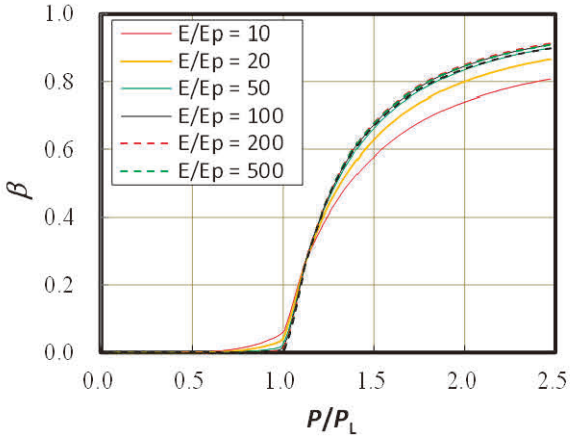


図 7　2 直線の J 積分の係数 β の変化（(11)式参照）

ルの応力・ひずみ曲線の J 積分とほぼ同じであることが確認されている. 2 直線を定義するのに必要なパラメータは，降伏点と降伏点以降の勾配（塑性勾配）のみであるから, 2 直線の J 積分は比較的簡便に準備できる. 図 3 に示すように，任意の応力・ひずみ曲線に対して 2 直線近似を行い，J 積分を推定する．参照応力法では参照点を決定するための P_L の選択が重要であった．参照塑性勾配法では，構造物の真の極限荷重を P_L に用いることを基本としている．極限荷重の予測式については，種々の解を参照できる[38]．一般に提案されている極限荷重式は安全側に設定されている．参照塑性勾配法において，安全側の極限荷重を用いると，推定される J 積分も大きくなり，安全側の破壊評価をもたらすことになる．

参照塑性勾配法の精度は，応力・ひずみ曲線を 2 直線近似することによる J 積分の変化と，2 直線の J 積分の精度に依存する．図 4 に示す引張荷重を受ける 2 次元平板の中央部に貫通亀裂が存在する場合の J 積分を基本的な例として検討した[37]．応力・ひずみ曲線としては, 図 5 に示す 3 つの炭素鋼（SM490, S45C, STS370）と溶体化ステンレス鋼（316N），および鋳造ステンレス鋼（CF8）を想定した．316N に対する J 積分を比較した結果を図 6 に示す．荷重 P は極限荷重 P_L で，J 積分は J_e で正規化している．P_L としては，平板の理論解を用いた．応力・ひずみ曲線を用いて有限要素解析にて算出した J 積分（図中の破線）は，参照塑性勾配法により得た 2 直線近似を用いた有限要素解析結果（緑実線）に近いことがわかる．つまり，2 直線近似しても，J 積分はほとんど変化しない．他の材料についても，同様の結果が得られた．赤実線は，2 直線の J 積分を有限要素解析ではなく，近似式で算出した結果を示している．近似式は以下の手順により求めた．

降伏強度が零の弾性域が存在しない場合の 2 直線（実際には 1 直線）の J 積分 J_{ps} は J_e と同様に，次式で算出できる．

$$J_{ps} = \frac{K^2\left(1-\nu_p^2\right)}{E_p} \tag{10}$$

ここで，E_p は塑性勾配を示す．ν_p は塑性域のポアソン比に相当し, 体積一定の塑性変形に対して 0.5 を適用する．2 直線の J 積分は荷重 σ_{ref}/σ_y が大きくなると J_{ps} に漸近する．一方，荷重が小さく完全に弾性の場合の J 積分は J_e に等しくなる．つまり，2 直線の J 積分は J_e と J_{ps} の中間の値となる．そこで，係数 β を用いて次式で J を表す．

$$J = J_e + \beta\left(J_{ps} - J_e\right) \tag{11}$$

図 7 に P/P_L に対する β の変化を示す．荷重が大きくなるにしたがって，β が 1 に収束している（J が J_{ps} に漸近している）．そして，β は正規化した塑性勾配 E/E_p による変化が小さかった．P/P_L と β の関係を定式化することで，任意の荷重に対する J 積分が得られる．文献(37)では，β を P/P_L と E_p，および亀裂長さ a の関数として式の形に表すことができた．その式を用いて得られた結果が，図 6 の赤実線となる．文献(37)では，さらに，曲げ荷重を受ける管内表面に半楕円亀裂がある場合の 2 直線の J 積分も式の形で得ている．

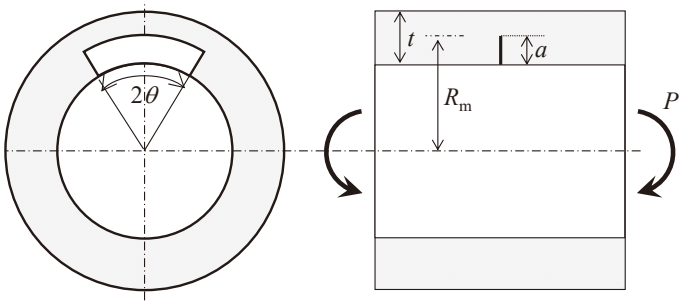


図 8　周方向亀裂を有する曲げ荷重を受ける配管

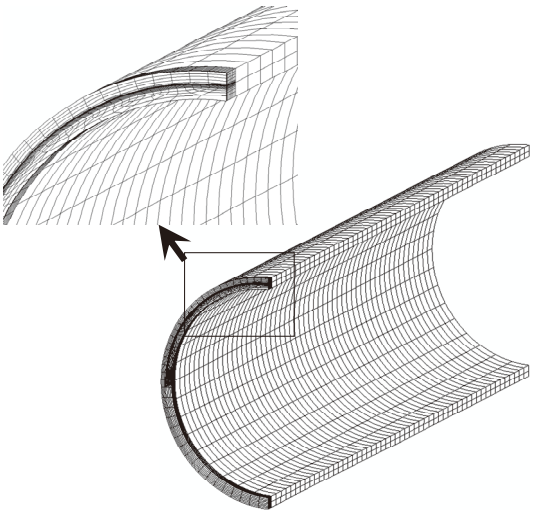


図 9　周方向亀裂の有限要素モデル
（$R_m/t = 10$, $a/t = 0.5$, $\theta/\pi = 0.5$）

以上のように，参照塑性勾配法では，2 直線の J 積分を準備すれば，任意の応力・ひずみ曲線の J 積分は高精度に推定することができる．また，2 直線の J 積分は表ではなく，式で表現できるなど，実用的な方法と考えられる．今後の発展が期待される．

4.　配管のJ積分解

これまで著者が発表してきた，一定深さ周方向亀裂を有する曲げ荷重下の直管と，軸方向半楕円き裂を有する内圧荷重下の直管の J 積分を紹介する．

4.1　周方向亀裂を有する曲げ配管

(1) 算出条件

図 8 に示す一定深さの周方向亀裂が内面に存在する直管が曲げ荷重を受ける場合の J 積分の解を算出した[39][40]．

対象は R-O 構成式に従う材料で，構成式の指数定数 n は $n = 3, 5, 7$ 10 および 13 とした．定数 α は 1.5 として算出したが，$\alpha = 4$ または 8 とした場合も，算出される J 積分に及ぼす影響は小さいことを確認した．つまり，$\alpha = 1.5$ 以外の場合も適用できる．降伏強度 σ_y とヤング率 E はそれぞれ 200 MPa と 180 GPa としたが，これらの値以外の場合にも適用できる．ポアソン比は 0.3 とした．管は厚さ t を 40 mm に固定し平均半径 R_m との比 R_m/t を変化させた．板厚の影響がないことは確認されている[30]．管形状，および亀裂形状は以下の数値の組み合わせとした．

$R_m/t = 5, 10, 20, 30$
$a/t = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$
$\theta/\pi = 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$

解析に用いた有限要素メッシュの例を図 9 に示す．配管には曲げモーメントのみが負荷され，軸力は考慮しなかった．

最新点（対称位置）の節点での J 積分を算出した．

(2) J積分の算出方法

得られた J 積分解を表 1 と表 2 にまとめる．これらの表の値を用いて，以下の手順で J 積分が算出できる．

① 配管形状（t および R_m/t），亀裂形状（a と θ）および曲げモーメント P を設定する．
② (4)式の構成式（R-O 式）の材料定数（α と n および σ_y）を決定する．
③ 極限荷重 P_L を下式で算出する．

$$P_L = 2\sigma_y R_m^2 t\left(2\sin\beta - \frac{a}{t}\sin\theta\right) \tag{12}$$

$$\beta = \frac{1}{2}\left(\pi - \frac{a\theta}{t}\right) \tag{13}$$

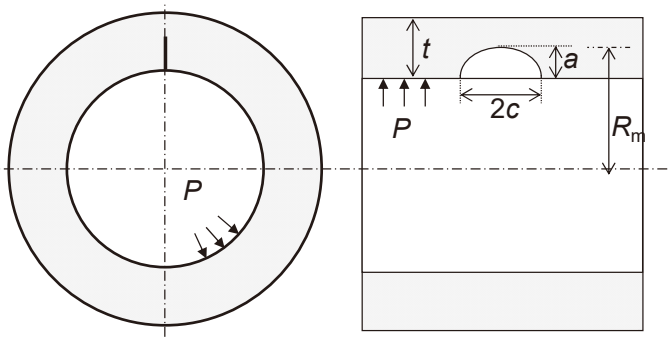


図 10　軸方向亀裂を有する内圧を受ける配管

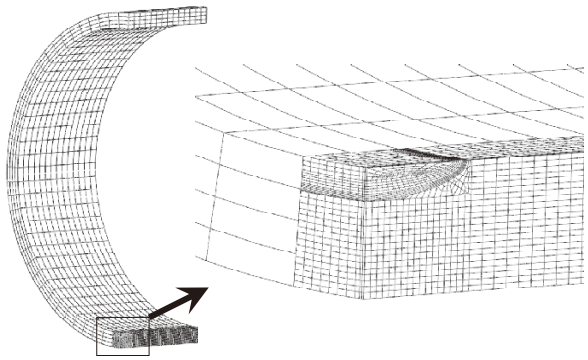


図 11　軸方向亀裂の有限要素モデル
（R_m/t = 10, a/t = 0.2, a/c = 0.2）

④ (1)式にしたがって応力拡大係数を求める．応力 σ は断面係数 Z を用いて $\sigma = P \times Z$ により算出する．定数 f_1 は表 1 による．

⑤ 下式により a_e を算出する

$$a_e = a\left\{1+\left(0.5n-1.5\right)f_1^2\left(\frac{P}{P_L}\right)^2\frac{1}{1+2\left(P/P_L\right)}\right\} \quad (14)$$

⑥ (3)式から J_p を算出する．h_1 は表 2 の値を用いる．

⑦ 以上求まった値を用いて(5)式により得られる J が，得られる J 積分となる．

4.2　軸方向亀裂を有する内圧配管

(1) 算出条件

図 10 に示す半楕円の軸方向亀裂が内面に存在する直管が内圧を受ける場合の J 積分の解を算出した[40][41]．

対象は R-O 構成式に従う材料で，構成式の指数定数 n は n = 3, 5, 7 10 および 13 とした．定数 α は 1.5 とした．降伏強度 σ_y とヤング率 E はそれぞれ 200 MPa と 180 GPa とした．ポアソン比は 0.3 とした．管は厚さ t を 40 mm に固定し平均半径 R_m との比 R_m/t を変化させた．管形状，および亀裂形状は以下の数値の組み合わせとした．

R_m/t = 5, 10, 20, 30

a/t = 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4, 0.45, 0.5, 0.55, 0.6, 0.65, 0.7, 0.75

c/a = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0

解析に用いた有限要素メッシュの例を図 11 に示す．亀裂面を含めた配管内面に内圧 P を負荷した．内圧が負荷された配管では軸方向荷重も作用する．しかし，実配管では軸方向の変位が拘束され，必ずしも軸力が作用するとは限らない．本解析では，安全側に，軸力を考慮しなかった．

表面点と最新点の 2 点の J 積分を算出した．

(2) J積分の算出方法

得られた J 積分解を表 3 と表 4 にまとめる．これらの表の値を用いて，以下の手順で J 積分が算出できる．

① 配管形状（t および R_m/t），亀裂形状（a と c）および内圧 P を設定する．

② (4)式の構成式（R-O 式）の材料定数（α と n および σ_y）を決定する．

③ 極限荷重 P_L を下式で算出する．

$$P_L = \frac{t}{R_m}\sigma_y\left(\frac{t/a-1}{t/a-1/M_t}\right) \quad (15)$$

$$M_t = \sqrt{1+\frac{1.61c^2}{R_m t}} \quad (16)$$

④ (1)式にしたがって応力拡大係数を求める．応力 σ は $\sigma = P \times R_m/t$ により算出する．定数 f_1 は表 3 による．

⑤ 下式により a_e を算出する

$$a_e = a + \frac{1}{6\pi}\frac{(n-1)}{(n+1)}\left(\frac{K(a)}{\sigma_y}\right)^2\left(\frac{1}{1+(P/P_L)^2}\right) \quad (17)$$

⑥ (3)式から J_p を算出する．h_1 は表 4 の値を用いる．

⑦ 以上求まった値を用いて(5)式により得られる J が，得られる J 積分となる．

5. おわりに

一般的な解説書では J 積分は亀裂進展に伴うエネルギー解放率として，難解な式により定義される．非線形の弾塑性力学において用いられる J 積分は，弾性力学パラメータである応力拡大係数よりもさらに敷居が高く思える. 本稿は, あえて詳細な定義式を用いずに, 表題にある「亀裂構造物評価のための」を前提に，必要となる部分のみを抜き出して解説としてまとめた．より厳密な定義などは文献(42)など, 優れた解説を参照されたい．本稿では，J 積分は亀裂先端の応力とひずみの集中を代表するパラメータであること，弾塑性状態に対応した破壊評価に用いられる駆動力指標であることの 2 つを定義に代わるものとした．そして，J 積分に対するもう一つのハードルであると思われる，値を得ることの困難さについてまとめた. J 積分の値を得る方法として以下のように要約できる．

(1) 正確な値は有限要素解析により算出する必要がある．

(2) 予め計算された解が整備されているが，想定される材料構成式は R-O 式に限られる．本稿 4 章においても紹介されている．

(3) 有限要素解析を用いないで，任意の構成式に対して J 積分を得るために参照応力法が用いられている．ただし，参照応力法は J 積分の推定式であり，必ずしも正しい値を算出するものではない．

(4) 任意の構成式に対応する方法として，参照塑性勾配法も紹介した．開発されて間もないが，精度と簡便さの両方を備えた方法として，今後の発展が望まれる．

弊社ホームページから要求いただければ，4 章で紹介した表 1～表 4 は電子データとしてお渡しすることもできる．解の精度は参照した文献(39)と(40)の中で検討されている．しかし，解の妥当性は客観的に示されるべきと考えている．検証にご協力いただければ幸甚である．

本稿ならびにお渡ししたデータを用いて得られる結果については，著者ならびに本稿の発行元である㈱原子力安全システム研究所はいかなる責任も負わないことをお断りしておく．

引用文献

(1) 日本機械学会，発電用原子力設備規格維持規格, JSME S NA1-2016 (2016)，日本機械学会.

(2) 釜谷昌幸，北條智博，望月正人，中性子照射を受けた原子炉容器炉内構造物の構造健全性（ステンレス鋼構造物の冷間加工による破壊強度変化），日本機械学会論文集, Vol. 80, (2014) SMM0252.

(3) 釜谷昌幸, “軸方向き裂を有する鋳造ステンレス鋼管の破壊評価法”，日本機械学会論文集A編, Vol. 78, No. 794 (2012), pp.1473-1484.

(4) Committee on Fracture Mechanics, The Society of Material Science, Japan, Stress Intensity Factors Handbook Volume 1-3, Pergamon Press (1987).

(5) N. Miura, Y. Takahashi, H. Shibamoto and K. Inoue, “Comparison of stress intensity factor solutions for cylinders with axial and circumferential cracks”, Nuclear Engineering and Design, Vol.238 (2008), pp.423-434.

(6) J. W. Hutchinson, “Plastic stress and strain fields at a crack tip”, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol.16 (1968), pp.337-347.

(7) N. L. Goldman and J. W. Hutchinson, “Fully plastic crack problems: the center-cracked strip under plane strain”, International Journal of Solids and Structures, Vol.11 (1975), pp.575-591.

(8) C. F. Shih, “J-integral estimates for strain hardening materials in antiplane shear using fully plastic solution”, ASTM STP 590 (1976), pp.3-26.

(9) V. Kumar and C. F. Shih, “Fully Plastic Crack Solutions, Estimation Scheme, and Stability Analyses for the Compact Specimen,” In: Fracture Mechanics: Twelfth Conference, ASTM STP 700 (1980), pp. 406-438.

(10) A. Zahoor, Ductile Fracture Handbook, EPRI NP-6301 (1989), Electric Power Research Institute.

(11) G. Yagawa, Y. Kitajima, H. Ueda,“Three-dimensional fully plastic solutions for semi-elliptical surface cracks”, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 53 (1993) 457-510.

(12) Y. J. Kim, J. S. Kim, Y. Z. Lee and Y. J. Kim, “Non-linear fracture mechanics analyses of part circumferential surface cracked pipes”, International Journal of Fracture, Vol. 116 (2002) 347-375.

(13) Y. Lei, “J-integral and limit load analysis of semi-elliptical surface cracks in plates under bending”, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 81 (2004) 31-41.

(14) Y. Lei, “J-integral and limit load analysis of semi-elliptical surface cracks in plates under combined tension and bending”, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 81 (2004) 43-56.
(15) Y. J. Kim, J. S. Kim, Y. J. Park and Y. J. Kim, “Elastic–plastic fracture mechanics method for finite internal axial surface cracks in cylinders”, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 71 (2004) 925-944.
(16) M. Kamaya, “Ramberg-Osgood type stress-strain curve estimation using yield and ultimate strengths for failure assessments”, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 137, (2016) pp.1-12.
(17) Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects, R6 revision 4: British Energy Generation Ltd, 2007.
(18) Fitness-For-Service API579-1/ASME FFS-1, ASME, 2007.
(19) 釜谷昌幸，町田秀夫，板谷雅雄，北条公伸, “維持規格における弾塑性破壊力学評価のためのZ係数式”，日本機械学会論文集, Vol. 82 (2016) DOI:10.1299/transjsme.16-00263.
(20) M. Kamaya, “Failure assessment curve for austenitic stainless steel pipes of nuclear power plants”, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 238, (2020) (DOI:10.1016/j.engfracmech.2020.107283).
(21) R. A. Ainsworth, “The assessment of defects in structures of strain hardening material”, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 19, No. 4 (1984), pp.633-642.
(22) R. L. Roche, “Models of failure - primary and secondary stresses”, Transaction of ASME Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 110, No. 3 (1988), pp.234-239.
(23) S. Takamatsu and T. Shimakawa, “Development of a simplified J-estimation scheme based on the reference stress method”, Journal of Society of Material Science, Japan, Vol. 43, No.493 (1994), pp.1284-1289.
(24) T. Shimakawa, N. Miura, Y. Nakayama and Y. Takahashi, “Verification of simplified J-integral evaluation method for flaw evaluation at high temperature”, Journal of Society of Material Science, Japan, Vol. 49, No. 8 (2000), pp.851-856.
(25) N. Miura, T. Shimakawa, Y. Nakayama and Y. Takahashi, “Systematization of simplified J-Integral evaluation method for flaw evaluation at high temperature”, Journal of Society of Material Science, Japan, Vol. 49, No. 8 (2000), pp.845-850.
(26) M. Kamaya, “Low-cycle fatigue crack growth prediction by strain intensity factor”, International Journal of Fatigue, Vol. 72, (2015) pp.80-89.
(27) A. G. Miller, R. A. Ainsworth, “Consistency of numerical results for power-law hardening materials and the accuracy of the reference stress approximation for J”, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 32 (1989), pp.233-247.
(28) 三浦直樹，小山田賢治, “円筒中の表面欠陥に対する参照応力解の比較”，圧力技術, Vol. 55, No.4 (2017), pp.158-166.
(29) I. W. Goodall and G. A. Webster, “Theoretical determination of reference stress for partially penetrating flaws in plates”, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 78 (2001), pp.687-695.
(30) 釜谷昌幸，町田秀夫, “参照応力 J 積分簡易解析法の破壊評価曲線評価への適用性の検討”，日本機械学会論文集Ａ編, Vol. 75 (2009), pp.333-342.
(31) Y. J. Kim, J. S. Kim, Y. Z. Lee and Y. J. Kim, “Non-linear fracture mechanics analyses of part circumferential surface cracked pipes”, International Journal of Fracture, Vol. 116 (2002), pp.347-375.
(32) Y. J. Kim, J. S. Kim, Y. J. Park and Y. J. Kim, “Elastic–plastic fracture mechanics method for finite internal axial surface cracks in cylinders”, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 71 (2004) pp.925-944.
(33) Y. J. Kim, N. Su. Huh, Y. J. Kim, “Reference stress based elastic–plastic fracture analysis for circumferential through-wall cracked pipes under combined tension and bending”, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 69 (2002), pp.367-388.
(34) Y. J. Kim and D. J. Shim, “Relevance of plastic limit loads to reference stress approach for surface cracked cylinder problems”, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 82 (2005), pp.687-699.
(35) U. Zerbst, Y. Kiyak, M. Madia, A. Burgold, G. Riedel, “Reference loads for plates with semi-elliptical surface cracks subjected to tension and bending for application within R6 type flaw assessment”, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 99 (2013) pp.132-140.
(36) M. Kamaya, “A J-integral estimation procedure for Swift-type stress-strain curves”, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 127, (2014) pp.31-45.
(37) M. Kamaya, “J-integral estimation by reference plastic slope method for poly-linear stress-strain curves”, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 191, (2021) (DOI:10.1016/j.ijpvp.2021.104366).
(38) A. G. Miller, “Review of limit loads of structures containing defect”, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 32 (1988), pp.197-327.
(39) M. Kamaya, “J-integral solutions for surface cracks inside pipes under bending load”, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, Vol. 10 (2009), pp.1115-1126.
(40) 釜谷昌幸, “クラス 2, 3 配管に対する弾性塑性破壊力学評価のための荷重割増し係数（Z 係数）”，日本機械学会論文集Ａ編, Vol. 79, (2013), pp.1669-1684.
(41) M. Kamaya, “J-integral solutions for surface cracks inside pipes under internal pressure”, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, Vol. 6 (2012), pp.871-885.
(42) 久保司郎, “弾塑性破壊力学と J 積分”，材料, Vol. 32, No.362 (1983), pp.1285-1290.

表 1　周方向亀裂の f_i

R_m/t	θ/π	a/t 0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
5	0.05	0.887	0.915	0.897	0.867	0.834	0.803	0.780	0.778
	0.1	0.882	0.963	1.01	1.03	1.05	1.05	1.05	1.07
	0.2	0.892	0.988	1.07	1.14	1.21	1.27	1.33	1.41
	0.3	0.893	0.993	1.08	1.17	1.26	1.36	1.47	1.61
	0.4	0.893	0.994	1.08	1.18	1.28	1.40	1.53	1.71
	0.5	0.893	0.995	1.08	1.18	1.29	1.41	1.55	1.75
10	0.05	0.953	1.08	1.15	1.18	1.19	1.18	1.16	1.15
	0.1	0.949	1.10	1.22	1.33	1.42	1.49	1.53	1.55
	0.2	0.960	1.12	1.26	1.41	1.57	1.72	1.86	2.00
	0.3	0.960	1.12	1.27	1.42	1.61	1.80	1.99	2.21
	0.4	0.960	1.12	1.27	1.43	1.62	1.82	2.05	2.30
	0.5	0.960	1.12	1.27	1.43	1.62	1.83	2.06	2.33
20	0.05	0.955	1.15	1.31	1.45	1.57	1.64	1.67	1.65
	0.1	0.957	1.16	1.35	1.56	1.77	1.96	2.11	2.19
	0.2	0.967	1.18	1.38	1.61	1.87	2.16	2.44	2.71
	0.3	0.968	1.18	1.38	1.62	1.89	2.21	2.55	2.89
	0.4	0.968	1.18	1.38	1.62	1.90	2.22	2.58	2.95
	0.5	0.968	1.18	1.38	1.62	1.90	2.22	2.58	2.95
30	0.05	0.952	1.16	1.37	1.57	1.76	1.90	1.99	2.00
	0.1	0.942	1.17	1.39	1.65	1.93	2.22	2.46	2.62
	0.2	0.966	1.18	1.42	1.69	2.01	2.37	2.77	3.14
	0.3	0.954	1.18	1.42	1.69	2.02	2.41	2.85	3.29
	0.4	0.954	1.18	1.42	1.69	2.02	2.41	2.86	3.32
	0.5	0.954	1.18	1.42	1.69	2.02	2.41	2.86	3.32

表 2(a)　周方向亀裂の $h_1\,(n=3)$

$h_1\,(n=3)$

R_m/t	θ/π	a/t 0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
5	0.05	0.427	1.07	1.59	2.02	2.30	2.45	2.56	2.86
	0.1	0.405	1.12	1.85	2.64	3.24	3.60	3.90	4.64
	0.2	0.398	1.08	1.79	2.57	3.18	3.59	4.03	5.21
	0.3	0.383	0.995	1.59	2.18	2.60	2.86	3.13	4.10
	0.4	0.371	0.930	1.44	1.87	2.14	2.20	2.24	2.52
	0.5	0.366	0.895	1.34	1.67	1.79	1.71	1.53	1.46
10	0.05	0.426	1.41	2.53	3.78	4.80	5.35	5.62	6.25
	0.1	0.402	1.37	2.64	4.30	5.87	6.97	7.83	9.54
	0.2	0.400	1.30	2.43	4.00	5.61	6.86	8.07	10.8
	0.3	0.383	1.16	2.13	3.39	4.60	5.52	6.31	8.15
	0.4	0.371	1.08	1.86	2.86	3.68	4.09	4.28	4.80
	0.5	0.366	1.03	1.72	2.52	2.96	2.97	2.69	2.50
20	0.05	0.390	1.42	3.26	5.93	8.66	10.5	11.4	12.8
	0.1	0.364	1.31	3.12	6.10	9.57	12.5	15.0	18.7
	0.2	0.374	1.27	2.83	5.45	8.86	12.2	15.5	21.1
	0.3	0.358	1.14	2.42	4.50	7.02	9.32	11.3	14.4
	0.4	0.346	1.04	2.12	3.73	5.40	6.57	7.09	7.69
	0.5	0.341	0.994	1.96	3.24	4.36	4.74	4.42	3.94
30	0.05	0.392	1.40	3.67	7.19	11.3	14.6	16.4	18.8
	0.1	0.334	1.24	3.32	7.18	12.3	17.2	21.4	27.5
	0.2	0.378	1.24	3.04	6.30	11.1	16.5	21.9	30.2
	0.3	0.337	1.10	2.56	5.09	8.52	12.0	15.2	19.2
	0.4	0.325	1.01	2.24	4.19	6.38	8.21	9.08	9.74
	0.5	0.320	0.957	2.07	3.62	5.13	5.84	5.59	4.82

表 2(b)　周方向亀裂の $h_1(n=5)$

$h_1\ (n=5)$

R_m/t	θ/π	a/t							
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
5	0.05	0.463	1.21	1.84	2.30	2.63	2.81	2.98	3.49
	0.1	0.430	1.28	2.16	2.92	3.61	3.93	4.10	5.20
	0.2	0.407	1.22	1.99	2.66	3.17	3.48	4.16	5.55
	0.3	0.384	1.09	1.70	2.16	2.46	2.64	2.93	3.90
	0.4	0.368	1.01	1.46	1.80	1.94	1.84	1.91	2.45
	0.5	0.362	0.961	1.32	1.56	1.52	1.33	1.26	1.24
10	0.05	0.465	1.63	3.04	4.45	5.52	6.28	6.39	7.68
	0.1	0.434	1.59	3.11	5.07	6.58	7.57	8.72	12.9
	0.2	0.412	1.43	2.81	4.62	5.92	7.02	8.83	15.0
	0.3	0.386	1.26	2.40	3.71	4.74	5.50	6.39	10.2
	0.4	0.370	1.15	2.03	2.97	3.64	3.66	3.92	5.45
	0.5	0.363	1.09	1.81	2.51	2.81	2.50	2.36	2.45
20	0.05	0.426	1.65	4.07	7.69	10.8	12.5	13.9	18.2
	0.1	0.387	1.49	3.92	8.13	12.0	15.1	18.8	29.7
	0.2	0.384	1.33	3.36	7.33	11.1	14.7	19.9	35.6
	0.3	0.373	1.17	2.82	5.46	8.10	10.8	13.0	20.9
	0.4	0.343	1.06	2.37	4.14	6.07	6.68	7.19	10.6
	0.5	0.336	1.00	2.08	3.42	4.51	4.21	3.84	4.14
30	0.05	0.426	1.64	4.93	9.86	14.7	18.0	20.7	28.7
	0.1	0.354	1.40	4.35	10.3	16.7	22.2	28.9	49.2
	0.2	0.388	1.29	3.67	9.15	15.4	21.6	30.2	56.5
	0.3	0.339	1.13	3.04	6.52	10.8	14.9	18.7	30.9
	0.4	0.322	1.01	2.56	4.80	7.25	8.68	9.25	14.4
	0.5	0.315	0.958	2.23	3.92	5.59	5.44	4.85	5.43

表 2(c)　周方向亀裂の $h_1(n=7)$

$h_1\ (n=7)$

R_m/t	θ/π	a/t							
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
5	0.05	0.448	1.27	1.87	2.42	2.82	3.06	3.32	4.01
	0.1	0.413	1.35	2.16	2.96	3.46	3.74	4.22	4.83
	0.2	0.394	1.25	1.89	2.48	2.76	2.98	3.55	4.90
	0.3	0.365	1.07	1.56	1.86	1.97	2.09	2.40	3.10
	0.4	0.343	0.958	1.29	1.46	1.43	1.40	1.45	1.60
	0.5	0.334	0.895	1.13	1.21	1.07	0.950	0.950	0.690
10	0.05	0.470	1.74	3.18	4.81	5.92	6.46	7.06	8.93
	0.1	0.426	1.67	3.35	5.30	6.71	7.74	9.53	13.9
	0.2	0.405	1.48	2.84	4.53	5.74	6.73	8.92	13.8
	0.3	0.370	1.25	2.29	3.47	4.20	4.69	5.89	8.64
	0.4	0.348	1.08	1.88	2.66	2.86	3.00	3.28	3.97
	0.5	0.337	1.00	1.61	2.15	2.07	1.85	1.55	1.57
20	0.05	0.436	1.77	4.55	8.24	11.4	13.1	15.1	20.8
	0.1	0.378	1.54	4.37	8.58	12.3	15.4	21.2	35.6
	0.2	0.368	1.33	3.57	7.41	11.4	14.6	21.3	36.7
	0.3	0.336	1.10	2.73	5.48	8.07	9.41	12.2	20.4
	0.4	0.313	0.936	2.18	3.99	5.09	5.56	6.00	7.83
	0.5	0.304	0.864	1.86	3.13	3.49	3.27	2.64	2.90
30	0.05	0.460	1.87	5.75	11.4	16.6	19.9	24.2	36.2
	0.1	0.353	1.52	5.30	12.2	18.6	24.4	35.2	65.7
	0.2	0.382	1.33	4.22	10.4	17.5	23.5	35.0	63.8
	0.3	0.322	1.09	3.11	7.34	11.7	14.4	19.1	34.1
	0.4	0.300	0.922	2.45	5.10	7.10	7.89	8.56	12.0
	0.5	0.290	0.847	2.09	3.97	4.69	4.52	3.68	4.11

表 2(d)　周方向亀裂の $h_1\,(n=10)$

$h_1\,(n=10)$

R_m/t	θ/π	a/t							
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
5	0.05	0.434	1.26	1.85	2.40	2.80	3.05	3.36	4.08
	0.1	0.394	1.33	2.08	2.81	3.17	3.38	3.83	4.83
	0.2	0.361	1.19	1.69	2.01	2.15	2.35	2.81	3.61
	0.3	0.323	0.979	1.26	1.40	1.45	1.52	1.62	1.87
	0.4	0.299	0.838	0.990	1.05	0.963	0.847	0.802	0.825
	0.5	0.288	0.761	0.835	0.828	0.639	0.523	0.395	0.336
10	0.05	0.465	1.79	3.30	4.97	6.00	6.55	7.37	9.52
	0.1	0.413	1.67	3.46	5.30	6.50	7.52	9.51	13.2
	0.2	0.373	1.42	2.76	4.05	4.95	5.99	7.99	11.1
	0.3	0.331	1.13	2.05	2.87	3.41	3.85	4.50	5.65
	0.4	0.305	0.944	1.58	2.11	2.08	2.00	2.10	2.30
	0.5	0.293	0.849	1.28	1.60	1.35	1.07	0.893	0.843
20	0.05	0.432	1.82	4.95	8.95	12.0	13.7	16.7	23.4
	0.1	0.363	1.53	4.74	9.19	12.9	16.9	24.6	37.6
	0.2	0.337	1.23	3.67	7.48	10.8	14.5	21.7	32.5
	0.3	0.298	0.942	2.54	5.10	7.20	8.11	10.2	14.1
	0.4	0.273	0.773	1.88	3.47	3.96	3.95	4.12	4.91
	0.5	0.261	0.689	1.49	2.53	2.54	1.95	1.62	1.65
30	0.05	0.465	1.97	6.44	12.8	18.0	21.8	28.4	41.9
	0.1	0.341	1.54	5.98	13.9	20.6	28.5	44.3	72.1
	0.2	0.351	1.23	4.44	11.6	18.2	24.2	37.8	56.2
	0.3	0.287	0.938	2.98	7.50	10.5	12.9	16.9	26.3
	0.4	0.261	0.758	2.16	4.83	5.88	5.97	6.32	7.89
	0.5	0.250	0.679	1.71	3.50	3.70	2.79	2.41	2.52

表 2(e)　周方向亀裂の $h_1\,(n=13)$

$h_1\,(n=13)$

R_m/t	θ/π	a/t							
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
5	0.05	0.425	1.26	1.84	2.40	2.78	3.00	3.29	3.92
	0.1	0.376	1.32	2.01	2.62	2.86	3.02	3.37	4.08
	0.2	0.336	1.11	1.48	1.63	1.67	1.76	1.97	2.37
	0.3	0.293	0.872	1.00	1.02	0.971	0.946	0.937	1.03
	0.4	0.264	0.714	0.743	0.685	0.579	0.490	0.413	0.408
	0.5	0.251	0.630	0.602	0.499	0.364	0.275	0.196	0.164
10	0.05	0.463	1.82	3.41	5.10	6.07	6.62	7.52	9.49
	0.1	0.401	1.68	3.52	5.14	6.16	7.20	9.14	12.0
	0.2	0.349	1.32	2.58	3.51	4.22	5.04	6.23	7.81
	0.3	0.302	1.00	1.77	2.27	2.46	2.66	2.84	3.37
	0.4	0.271	0.800	1.28	1.46	1.34	1.24	1.16	1.22
	0.5	0.257	0.696	1.00	1.03	0.789	0.593	0.481	0.431
20	0.05	0.432	1.85	5.21	9.49	12.5	14.6	18.2	24.8
	0.1	0.353	1.51	4.92	9.34	13.3	18.3	26.1	36.0
	0.2	0.314	1.13	3.51	7.00	10.0	13.4	18.1	23.8
	0.3	0.270	0.804	2.26	4.33	5.37	6.04	6.97	8.97
	0.4	0.241	0.628	1.54	2.63	2.74	2.46	2.37	2.82
	0.5	0.228	0.547	1.17	1.77	1.50	1.11	0.909	0.883
30	0.05	0.471	2.00	6.72	13.8	19.1	23.6	31.3	43.3
	0.1	0.334	1.53	6.26	14.4	21.8	31.6	47.9	67.4
	0.2	0.330	1.14	4.32	11.5	17.3	22.6	31.2	39.8
	0.3	0.261	0.799	2.66	6.88	8.82	9.78	12.0	15.0
	0.4	0.232	0.618	1.78	3.97	4.25	3.79	3.79	4.62
	0.5	0.219	0.536	1.33	2.67	2.34	1.66	1.35	1.37

表 3　軸方向亀裂の f_1

f_1

	R_m/t	a/c	a/t 0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75
Deepest point	5	0.1	1.29	1.30	1.32	1.36	1.42	1.50	1.59	1.69	1.81	1.94	2.09	2.25	2.42	2.60	2.79
		0.2	1.24	1.23	1.24	1.26	1.28	1.32	1.37	1.43	1.49	1.56	1.64	1.73	1.82	1.92	2.03
		0.3	1.17	1.17	1.16	1.17	1.19	1.21	1.23	1.26	1.30	1.34	1.39	1.44	1.49	1.55	1.61
		0.4	1.11	1.10	1.10	1.10	1.11	1.12	1.13	1.15	1.17	1.20	1.22	1.25	1.28	1.32	1.36
		0.5	1.05	1.04	1.03	1.03	1.03	1.04	1.05	1.06	1.07	1.08	1.10	1.12	1.14	1.16	1.19
		0.6	0.983	0.979	0.973	0.970	0.970	0.972	0.975	0.981	0.987	1.00	1.01	1.02	1.03	1.04	1.06
		0.7	0.926	0.922	0.916	0.912	0.910	0.910	0.911	0.914	0.917	0.921	0.927	0.933	0.941	0.950	0.962
		0.8	0.873	0.869	0.864	0.859	0.856	0.855	0.854	0.855	0.856	0.858	0.861	0.864	0.869	0.875	0.883
		0.9	0.824	0.821	0.816	0.811	0.808	0.805	0.803	0.803	0.802	0.803	0.804	0.805	0.808	0.811	0.817
		1.0	0.779	0.777	0.771	0.767	0.763	0.760	0.758	0.756	0.755	0.754	0.754	0.754	0.755	0.757	0.761
	10	0.1	1.18	1.20	1.23	1.28	1.34	1.41	1.50	1.61	1.73	1.86	2.01	2.17	2.34	2.52	2.70
		0.2	1.13	1.14	1.15	1.18	1.21	1.25	1.30	1.36	1.42	1.49	1.56	1.64	1.72	1.80	1.87
		0.3	1.07	1.08	1.09	1.10	1.12	1.14	1.17	1.21	1.25	1.29	1.33	1.37	1.41	1.45	1.49
		0.4	1.01	1.02	1.03	1.03	1.04	1.06	1.08	1.10	1.12	1.15	1.17	1.20	1.22	1.24	1.27
		0.5	0.956	0.960	0.963	0.967	0.975	0.984	1.00	1.01	1.03	1.04	1.06	1.07	1.09	1.10	1.11
		0.6	0.907	0.900	0.904	0.907	0.912	0.919	0.927	0.936	0.946	0.956	0.966	0.975	0.984	0.993	1.00
		0.7	0.854	0.848	0.850	0.853	0.856	0.860	0.865	0.871	0.877	0.884	0.890	0.896	0.902	0.907	0.914
		0.8	0.805	0.799	0.801	0.803	0.805	0.807	0.810	0.814	0.818	0.822	0.826	0.830	0.833	0.837	0.841
		0.9	0.760	0.754	0.756	0.757	0.758	0.760	0.762	0.764	0.766	0.769	0.771	0.773	0.775	0.777	0.780
		1.0	0.719	0.714	0.715	0.716	0.716	0.717	0.718	0.719	0.720	0.721	0.722	0.723	0.724	0.725	0.727
	20	0.1	1.13	1.14	1.18	1.23	1.29	1.37	1.46	1.56	1.68	1.81	1.95	2.10	2.26	2.43	2.59
		0.2	1.08	1.08	1.11	1.14	1.17	1.22	1.27	1.33	1.39	1.46	1.53	1.60	1.66	1.73	1.79
		0.3	1.02	1.03	1.04	1.06	1.08	1.11	1.14	1.18	1.22	1.26	1.30	1.34	1.37	1.40	1.43
		0.4	0.991	0.973	0.983	1.00	1.01	1.03	1.05	1.08	1.10	1.13	1.15	1.17	1.19	1.21	1.23
		0.5	0.933	0.915	0.923	0.932	0.943	0.956	0.971	0.987	1.00	1.02	1.04	1.05	1.06	1.07	1.08
		0.6	0.927	0.869	0.864	0.871	0.880	0.890	0.901	0.912	0.924	0.935	0.946	0.956	0.964	0.971	0.977
		0.7	0.872	0.818	0.813	0.818	0.825	0.832	0.840	0.848	0.856	0.864	0.871	0.878	0.883	0.888	0.891
		0.8	0.821	0.771	0.766	0.770	0.775	0.781	0.787	0.793	0.798	0.804	0.808	0.813	0.816	0.819	0.821
		0.9	0.774	0.728	0.723	0.726	0.730	0.735	0.739	0.743	0.747	0.751	0.754	0.757	0.759	0.760	0.762
		1.0	0.730	0.688	0.683	0.686	0.690	0.693	0.696	0.700	0.702	0.705	0.707	0.708	0.709	0.710	0.711
	30	0.1	1.14	1.12	1.16	1.21	1.28	1.35	1.44	1.55	1.66	1.79	1.93	2.08	2.23	2.38	2.54
		0.2	1.09	1.06	1.09	1.12	1.16	1.20	1.26	1.32	1.38	1.45	1.52	1.58	1.65	1.70	1.75
		0.3	1.04	1.01	1.02	1.04	1.07	1.10	1.13	1.17	1.21	1.25	1.29	1.33	1.36	1.39	1.41
		0.4	1.02	0.963	0.966	0.979	1.00	1.02	1.04	1.07	1.09	1.12	1.14	1.17	1.19	1.20	1.21
		0.5	0.959	0.907	0.907	0.917	0.930	0.945	0.961	0.978	1.00	1.01	1.03	1.04	1.06	1.07	1.07
		0.6	0.949	0.885	0.860	0.859	0.866	0.877	0.889	0.902	0.914	0.927	0.938	0.948	0.957	0.963	0.968
		0.7	0.892	0.833	0.809	0.807	0.812	0.820	0.829	0.838	0.848	0.856	0.864	0.871	0.876	0.880	0.883
		0.8	0.838	0.785	0.762	0.759	0.763	0.769	0.776	0.783	0.790	0.796	0.802	0.806	0.810	0.812	0.814
		0.9	0.789	0.740	0.719	0.716	0.719	0.724	0.729	0.735	0.740	0.744	0.748	0.751	0.753	0.754	0.755
		1.0	0.743	0.699	0.679	0.676	0.679	0.683	0.687	0.691	0.695	0.698	0.701	0.703	0.704	0.705	0.705
Surface point	5	0.1	0.542	0.537	0.550	0.566	0.585	0.607	0.632	0.660	0.692	0.727	0.767	0.812	0.861	0.916	0.976
		0.2	0.631	0.636	0.645	0.661	0.681	0.705	0.735	0.768	0.806	0.849	0.897	0.949	1.01	1.07	1.14
		0.3	0.714	0.720	0.726	0.738	0.755	0.777	0.803	0.834	0.870	0.909	0.954	1.00	1.05	1.11	1.17
		0.4	0.787	0.788	0.792	0.801	0.815	0.834	0.858	0.886	0.918	0.955	1.000	1.04	1.09	1.14	1.20
		0.5	0.832	0.833	0.834	0.840	0.851	0.866	0.885	0.908	0.935	0.965	1.000	1.04	1.08	1.12	1.16
		0.6	0.868	0.866	0.866	0.870	0.878	0.890	0.905	0.924	0.947	0.973	1.000	1.03	1.07	1.10	1.14
		0.7	0.883	0.882	0.881	0.883	0.889	0.898	0.910	0.926	0.944	0.965	0.989	1.01	1.04	1.07	1.10
		0.8	0.890	0.889	0.888	0.889	0.893	0.900	0.910	0.922	0.937	0.955	0.974	1.00	1.02	1.04	1.07
		0.9	0.891	0.890	0.889	0.889	0.892	0.897	0.905	0.915	0.927	0.942	0.958	0.975	0.994	1.01	1.03
		1.0	0.888	0.887	0.886	0.886	0.888	0.892	0.898	0.906	0.916	0.928	0.941	0.956	0.972	0.988	1.01
	10	0.1	0.506	0.507	0.507	0.516	0.532	0.553	0.577	0.605	0.637	0.673	0.715	0.764	0.819	0.882	0.954
		0.2	0.570	0.583	0.593	0.607	0.625	0.648	0.675	0.707	0.744	0.786	0.833	0.887	0.946	1.01	1.08
		0.3	0.644	0.656	0.667	0.681	0.698	0.720	0.745	0.775	0.809	0.848	0.890	0.937	0.989	1.04	1.10
		0.4	0.713	0.723	0.730	0.741	0.756	0.776	0.799	0.827	0.858	0.893	0.932	0.974	1.02	1.07	1.12
		0.5	0.756	0.764	0.770	0.778	0.791	0.807	0.827	0.851	0.878	0.908	0.941	0.976	1.01	1.05	1.09
		0.6	0.791	0.796	0.801	0.807	0.817	0.830	0.847	0.867	0.890	0.916	0.945	0.975	1.01	1.04	1.08
		0.7	0.809	0.810	0.814	0.819	0.827	0.838	0.852	0.869	0.889	0.911	0.935	0.960	0.987	1.02	1.04
		0.8	0.820	0.816	0.819	0.824	0.830	0.840	0.851	0.865	0.882	0.900	0.921	0.943	0.965	0.989	1.01
		0.9	0.827	0.816	0.819	0.823	0.829	0.837	0.847	0.859	0.872	0.888	0.905	0.924	0.943	0.963	0.984
		1.0	0.831	0.813	0.816	0.819	0.824	0.831	0.839	0.849	0.861	0.874	0.889	0.905	0.921	0.938	0.956
	20	0.1	0.470	0.491	0.500	0.508	0.518	0.531	0.550	0.574	0.603	0.638	0.680	0.728	0.784	0.849	0.924
		0.2	0.538	0.548	0.563	0.580	0.599	0.621	0.647	0.677	0.711	0.751	0.796	0.847	0.904	0.967	1.04
		0.3	0.631	0.619	0.631	0.647	0.666	0.689	0.715	0.745	0.779	0.816	0.858	0.904	0.953	1.01	1.06
		0.4	0.674	0.684	0.696	0.709	0.725	0.745	0.769	0.797	0.829	0.864	0.902	0.944	0.988	1.03	1.08
		0.5	0.729	0.724	0.734	0.745	0.759	0.776	0.797	0.821	0.849	0.879	0.913	0.948	0.986	1.02	1.06
		0.6	0.777	0.757	0.764	0.774	0.786	0.800	0.818	0.839	0.863	0.889	0.918	0.949	0.981	1.01	1.05
		0.7	0.807	0.775	0.777	0.785	0.795	0.808	0.823	0.840	0.861	0.883	0.908	0.934	0.962	0.990	1.02
		0.8	0.828	0.786	0.783	0.789	0.797	0.808	0.821	0.837	0.854	0.873	0.894	0.917	0.940	0.964	0.988
		0.9	0.842	0.793	0.784	0.788	0.795	0.805	0.816	0.829	0.844	0.861	0.879	0.898	0.918	0.938	0.959
		1.0	0.848	0.796	0.783	0.784	0.790	0.798	0.808	0.820	0.833	0.847	0.862	0.879	0.896	0.914	0.931
	30	0.1	0.452	0.477	0.493	0.506	0.519	0.533	0.550	0.571	0.597	0.629	0.667	0.713	0.766	0.830	0.904
		0.2	0.537	0.535	0.549	0.566	0.587	0.610	0.636	0.666	0.701	0.739	0.783	0.833	0.888	0.949	1.02
		0.3	0.641	0.614	0.617	0.632	0.652	0.675	0.702	0.733	0.767	0.805	0.846	0.892	0.940	0.992	1.05
		0.4	0.672	0.667	0.680	0.696	0.713	0.734	0.758	0.786	0.818	0.854	0.892	0.934	0.978	1.02	1.07
		0.5	0.737	0.713	0.719	0.731	0.746	0.765	0.786	0.811	0.839	0.869	0.903	0.939	0.976	1.02	1.06
		0.6	0.788	0.754	0.751	0.760	0.773	0.789	0.807	0.829	0.853	0.880	0.909	0.941	0.973	1.01	1.04
		0.7	0.819	0.778	0.767	0.772	0.782	0.795	0.812	0.830	0.851	0.874	0.899	0.926	0.954	0.982	1.01
		0.8	0.836	0.796	0.778	0.777	0.785	0.796	0.810	0.826	0.844	0.864	0.885	0.908	0.932	0.956	0.980
		0.9	0.842	0.808	0.784	0.779	0.784	0.793	0.804	0.818	0.834	0.851	0.870	0.889	0.909	0.930	0.951
		1.0	0.841	0.816	0.787	0.779	0.780	0.787	0.796	0.808	0.822	0.837	0.853	0.870	0.887	0.905	0.923

表 4(a)　軸方向亀裂の h_1 ($n = 3$)

h_1 ($n = 3$)

	R_m/t	a/c	a/t														
			0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75
Deepest point	5	0.1	0.230	0.455	0.676	0.878	1.05	1.19	1.29	1.30	1.29	1.21	1.06	0.906	0.710	0.516	0.356
		0.2	0.215	0.429	0.650	0.876	1.09	1.27	1.39	1.44	1.40	1.28	1.11	0.888	0.670	0.475	0.302
		0.3	0.197	0.394	0.596	0.807	1.02	1.22	1.38	1.47	1.49	1.43	1.26	1.04	0.795	0.553	0.359
		0.4	0.179	0.358	0.540	0.729	0.924	1.12	1.29	1.42	1.48	1.47	1.37	1.18	0.932	0.681	0.446
		0.5	0.160	0.321	0.484	0.654	0.827	1.00	1.17	1.31	1.40	1.43	1.38	1.26	1.05	0.799	0.555
		0.6	0.144	0.286	0.432	0.581	0.734	0.888	1.04	1.18	1.28	1.34	1.34	1.26	1.11	0.887	0.648
		0.7	0.128	0.256	0.386	0.519	0.656	0.793	0.929	1.06	1.17	1.24	1.27	1.23	1.12	0.951	0.722
		0.8	0.114	0.229	0.345	0.464	0.587	0.710	0.832	0.949	1.05	1.14	1.18	1.17	1.10	0.971	0.781
		0.9	0.102	0.205	0.310	0.417	0.526	0.637	0.747	0.853	0.952	1.04	1.09	1.10	1.06	0.962	0.813
		1.0	0.0920	0.185	0.279	0.375	0.474	0.573	0.672	0.769	0.860	0.940	1.00	1.03	1.01	0.938	0.818
	10	0.1	0.206	0.425	0.665	0.916	1.16	1.35	1.50	1.59	1.56	1.47	1.30	1.05	0.822	0.572	0.380
		0.2	0.192	0.395	0.617	0.868	1.14	1.42	1.67	1.82	1.87	1.82	1.60	1.31	0.999	0.682	0.434
		0.3	0.176	0.361	0.560	0.781	1.03	1.29	1.55	1.78	1.93	1.95	1.85	1.63	1.29	0.949	0.610
		0.4	0.163	0.330	0.508	0.703	0.915	1.14	1.38	1.61	1.80	1.91	1.89	1.75	1.52	1.18	0.832
		0.5	0.147	0.297	0.455	0.625	0.810	1.01	1.21	1.42	1.61	1.75	1.81	1.76	1.59	1.35	1.01
		0.6	0.132	0.268	0.408	0.557	0.717	0.886	1.06	1.24	1.41	1.56	1.65	1.67	1.57	1.39	1.13
		0.7	0.118	0.240	0.365	0.496	0.636	0.784	0.939	1.10	1.25	1.39	1.49	1.54	1.51	1.39	1.18
		0.8	0.106	0.215	0.326	0.443	0.567	0.697	0.832	0.971	1.11	1.23	1.34	1.40	1.41	1.34	1.19
		0.9	0.095	0.193	0.293	0.397	0.506	0.621	0.741	0.863	0.984	1.10	1.20	1.27	1.30	1.27	1.17
		1.0	0.0849	0.174	0.263	0.357	0.454	0.557	0.663	0.771	0.879	0.982	1.07	1.15	1.19	1.18	1.12
	20	0.1	0.189	0.406	0.658	0.951	1.27	1.59	1.84	2.02	2.11	2.00	1.79	1.49	1.11	0.783	0.472
		0.2	0.176	0.373	0.594	0.857	1.17	1.52	1.89	2.24	2.48	2.53	2.43	2.15	1.68	1.23	0.767
		0.3	0.162	0.340	0.534	0.758	1.02	1.32	1.65	1.99	2.30	2.53	2.59	2.43	2.15	1.72	1.20
		0.4	0.151	0.315	0.488	0.681	0.902	1.15	1.43	1.72	2.00	2.25	2.41	2.43	2.27	1.96	1.56
		0.5	0.137	0.283	0.436	0.604	0.792	1.00	1.23	1.47	1.72	1.95	2.12	2.22	2.20	2.02	1.70
		0.6	0.124	0.255	0.394	0.542	0.703	0.880	1.07	1.27	1.48	1.68	1.85	1.97	2.00	1.93	1.73
		0.7	0.111	0.228	0.352	0.482	0.622	0.774	0.937	1.11	1.29	1.46	1.62	1.74	1.80	1.79	1.68
		0.8	0.0995	0.204	0.315	0.430	0.552	0.684	0.826	0.974	1.13	1.28	1.42	1.53	1.61	1.63	1.58
		0.9	0.0889	0.183	0.283	0.385	0.493	0.609	0.731	0.860	0.992	1.12	1.25	1.36	1.44	1.48	1.46
		1.0	0.0797	0.165	0.254	0.346	0.442	0.544	0.652	0.764	0.879	0.995	1.11	1.21	1.28	1.33	1.34
	30	0.1	0.181	0.394	0.654	0.967	1.33	1.73	2.10	2.35	2.53	2.53	2.26	1.92	1.44	1.00	0.610
		0.2	0.169	0.361	0.584	0.851	1.18	1.56	1.99	2.44	2.82	3.06	3.01	2.79	2.36	1.74	1.19
		0.3	0.156	0.329	0.524	0.748	1.01	1.32	1.68	2.07	2.46	2.79	3.00	3.00	2.73	2.33	1.79
		0.4	0.148	0.306	0.481	0.674	0.895	1.15	1.44	1.76	2.08	2.39	2.63	2.76	2.73	2.49	2.09
		0.5	0.134	0.275	0.430	0.597	0.784	1.00	1.23	1.49	1.76	2.02	2.25	2.41	2.47	2.41	2.16
		0.6	0.122	0.248	0.385	0.535	0.698	0.876	1.07	1.28	1.51	1.73	1.93	2.09	2.19	2.19	2.08
		0.7	0.109	0.222	0.344	0.476	0.617	0.769	0.935	1.11	1.30	1.49	1.67	1.82	1.92	1.96	1.93
		0.8	0.0974	0.199	0.308	0.424	0.548	0.680	0.822	0.973	1.13	1.29	1.45	1.58	1.69	1.75	1.75
		0.9	0.0869	0.178	0.276	0.379	0.488	0.604	0.727	0.857	0.994	1.13	1.27	1.39	1.49	1.56	1.58
		1.0	0.0776	0.160	0.248	0.340	0.437	0.539	0.647	0.760	0.878	0.999	1.12	1.23	1.32	1.39	1.43
Surface point	5	0.1	0.041	0.084	0.123	0.155	0.180	0.194	0.197	0.194	0.185	0.167	0.143	0.119	0.0906	0.0646	0.0422
		0.2	0.054	0.109	0.167	0.225	0.278	0.322	0.353	0.366	0.361	0.338	0.304	0.253	0.199	0.144	0.0910
		0.3	0.0653	0.131	0.200	0.273	0.348	0.419	0.479	0.522	0.540	0.531	0.489	0.423	0.340	0.248	0.164
		0.4	0.0647	0.130	0.200	0.274	0.351	0.431	0.506	0.568	0.612	0.626	0.606	0.547	0.457	0.351	0.237
		0.5	0.0724	0.144	0.221	0.301	0.387	0.476	0.566	0.649	0.714	0.755	0.756	0.717	0.627	0.501	0.356
		0.6	0.0760	0.149	0.225	0.307	0.394	0.485	0.578	0.669	0.750	0.808	0.837	0.817	0.751	0.629	0.472
		0.7	0.0800	0.156	0.236	0.320	0.410	0.504	0.601	0.698	0.790	0.864	0.910	0.918	0.869	0.764	0.598
		0.8	0.0829	0.161	0.242	0.328	0.419	0.514	0.614	0.714	0.811	0.897	0.959	0.986	0.962	0.875	0.721
		0.9	0.0847	0.164	0.247	0.332	0.424	0.519	0.619	0.721	0.821	0.913	0.985	1.03	1.03	0.960	0.826
		1.0	0.0856	0.166	0.249	0.334	0.425	0.520	0.619	0.721	0.822	0.918	1.00	1.05	1.07	1.03	0.910
	10	0.1	0.034	0.0721	0.111	0.147	0.176	0.198	0.212	0.217	0.212	0.203	0.185	0.158	0.129	0.0922	0.0632
		0.2	0.044	0.0939	0.148	0.208	0.271	0.333	0.386	0.423	0.442	0.443	0.412	0.364	0.301	0.222	0.151
		0.3	0.054	0.113	0.178	0.251	0.331	0.419	0.508	0.591	0.655	0.686	0.684	0.645	0.549	0.438	0.299
		0.4	0.0565	0.113	0.176	0.247	0.328	0.418	0.514	0.612	0.704	0.777	0.811	0.798	0.743	0.619	0.468
		0.5	0.0643	0.127	0.196	0.272	0.359	0.457	0.563	0.677	0.790	0.894	0.971	0.998	0.963	0.872	0.695
		0.6	0.0702	0.135	0.204	0.280	0.367	0.463	0.569	0.685	0.805	0.921	1.02	1.09	1.09	1.02	0.885
		0.7	0.0748	0.143	0.215	0.293	0.381	0.479	0.587	0.704	0.828	0.952	1.07	1.16	1.20	1.17	1.05
		0.8	0.0782	0.149	0.222	0.302	0.391	0.489	0.596	0.713	0.837	0.964	1.09	1.19	1.26	1.27	1.17
		0.9	0.0803	0.153	0.227	0.308	0.397	0.494	0.599	0.714	0.837	0.964	1.09	1.20	1.29	1.32	1.27
		1.0	0.0815	0.155	0.230	0.311	0.399	0.495	0.598	0.710	0.830	0.955	1.08	1.20	1.29	1.35	1.33
	20	0.1	0.0267	0.0642	0.104	0.144	0.182	0.214	0.238	0.252	0.257	0.248	0.235	0.210	0.172	0.133	0.0879
		0.2	0.0368	0.0837	0.137	0.197	0.266	0.341	0.420	0.495	0.557	0.588	0.597	0.569	0.488	0.396	0.273
		0.3	0.0477	0.102	0.164	0.236	0.320	0.416	0.526	0.643	0.762	0.869	0.943	0.952	0.916	0.805	0.619
		0.4	0.0511	0.106	0.165	0.232	0.311	0.404	0.511	0.631	0.761	0.893	1.01	1.10	1.11	1.05	0.912
		0.5	0.0596	0.121	0.185	0.258	0.342	0.441	0.555	0.685	0.827	0.978	1.13	1.26	1.34	1.34	1.22
		0.6	0.0649	0.133	0.199	0.271	0.354	0.451	0.562	0.688	0.829	0.980	1.14	1.28	1.40	1.46	1.40
		0.7	0.0691	0.142	0.211	0.286	0.370	0.467	0.577	0.703	0.844	0.996	1.16	1.31	1.45	1.54	1.55
		0.8	0.0722	0.148	0.220	0.296	0.380	0.476	0.585	0.709	0.846	0.996	1.15	1.31	1.46	1.58	1.63
		0.9	0.0743	0.153	0.226	0.303	0.387	0.482	0.588	0.708	0.841	0.987	1.14	1.30	1.45	1.58	1.65
		1.0	0.0758	0.155	0.229	0.307	0.390	0.483	0.587	0.703	0.832	0.972	1.12	1.28	1.43	1.56	1.65
	30	0.1	0.0164	0.0592	0.0990	0.142	0.186	0.226	0.261	0.283	0.297	0.298	0.280	0.259	0.214	0.169	0.113
		0.2	0.0305	0.0777	0.130	0.191	0.262	0.344	0.434	0.529	0.620	0.695	0.727	0.731	0.683	0.563	0.427
		0.3	0.0441	0.0964	0.157	0.228	0.313	0.414	0.531	0.663	0.807	0.952	1.08	1.17	1.17	1.11	0.936
		0.4	0.0396	0.103	0.162	0.229	0.308	0.401	0.511	0.639	0.782	0.937	1.09	1.24	1.33	1.34	1.23
		0.5	0.0497	0.119	0.184	0.256	0.339	0.438	0.553	0.688	0.842	1.01	1.19	1.36	1.51	1.60	1.57
		0.6	0.0497	0.131	0.201	0.274	0.357	0.453	0.565	0.695	0.843	1.01	1.18	1.36	1.53	1.66	1.71
		0.7	0.0551	0.140	0.213	0.290	0.374	0.470	0.581	0.709	0.854	1.02	1.19	1.38	1.55	1.70	1.79
		0.8	0.0592	0.147	0.223	0.300	0.385	0.480	0.589	0.714	0.855	1.01	1.18	1.36	1.54	1.70	1.82
		0.9	0.0623	0.151	0.229	0.308	0.392	0.486	0.592	0.713	0.849	1.00	1.16	1.34	1.52	1.68	1.81
		1.0	0.0646	0.153	0.233	0.312	0.396	0.489	0.592	0.708	0.838	0.982	1.14	1.31	1.48	1.64	1.78

表 4(b)　軸方向亀裂の h_1 (n = 5)

h_1 (n = 5)

	R_m/t	a/c	a/t 0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75
Deepest point	5	0.1	0.232	0.461	0.671	0.841	0.976	1.07	1.08	0.921	0.837	0.756	0.628	0.453	0.286	0.203	0.150
		0.2	0.215	0.435	0.666	0.893	1.08	1.20	1.27	1.27	1.11	0.842	0.664	0.508	0.342	0.181	0.110
		0.3	0.196	0.399	0.614	0.837	1.06	1.23	1.32	1.37	1.34	1.19	0.886	0.631	0.452	0.289	0.136
		0.4	0.177	0.360	0.553	0.757	0.966	1.16	1.29	1.37	1.38	1.32	1.15	0.857	0.577	0.388	0.235
		0.5	0.158	0.322	0.495	0.679	0.868	1.06	1.22	1.32	1.37	1.35	1.25	1.06	0.770	0.494	0.320
		0.6	0.141	0.286	0.439	0.601	0.769	0.940	1.10	1.23	1.30	1.31	1.26	1.14	0.933	0.632	0.394
		0.7	0.126	0.256	0.392	0.537	0.688	0.843	1.01	1.13	1.22	1.27	1.24	1.15	1.01	0.785	0.489
		0.8	0.113	0.229	0.352	0.482	0.618	0.757	0.898	1.04	1.14	1.20	1.20	1.14	1.03	0.863	0.611
		0.9	0.101	0.206	0.317	0.433	0.556	0.682	0.810	0.937	1.05	1.12	1.14	1.11	1.03	0.896	0.706
		1.0	0.101	0.186	0.286	0.407	0.501	0.615	0.732	0.849	0.957	1.04	1.08	1.07	1.01	0.900	0.749
	10	0.1	0.219	0.457	0.720	0.982	1.14	1.30	1.41	1.37	1.09	0.912	0.767	0.581	0.345	0.204	0.143
		0.2	0.202	0.421	0.671	0.957	1.27	1.55	1.67	1.75	1.73	1.53	1.12	0.775	0.556	0.349	0.153
		0.3	0.185	0.383	0.606	0.860	1.15	1.46	1.74	1.89	1.89	1.85	1.63	1.29	0.820	0.539	0.333
		0.4	0.172	0.351	0.548	0.770	1.02	1.29	1.57	1.82	1.95	1.91	1.78	1.57	1.26	0.804	0.490
		0.5	0.154	0.316	0.490	0.685	0.900	1.14	1.39	1.64	1.83	1.92	1.84	1.67	1.45	1.14	0.706
		0.6	0.139	0.285	0.440	0.608	0.794	0.998	1.22	1.44	1.64	1.78	1.86	1.74	1.55	1.27	0.962
		0.7	0.125	0.256	0.394	0.543	0.705	0.883	1.08	1.27	1.46	1.62	1.71	1.69	1.53	1.37	1.12
		0.8	0.112	0.230	0.353	0.486	0.630	0.786	0.955	1.13	1.31	1.46	1.58	1.62	1.54	1.35	1.19
		0.9	0.100	0.207	0.318	0.436	0.564	0.703	0.852	1.01	1.17	1.32	1.44	1.51	1.49	1.36	1.17
		1.0	0.0906	0.187	0.287	0.394	0.508	0.632	0.763	0.902	1.04	1.23	1.30	1.39	1.41	1.34	1.22
	20	0.1	0.203	0.447	0.739	1.09	1.45	1.65	1.82	1.96	1.85	1.41	1.07	0.847	0.581	0.278	0.156
		0.2	0.188	0.405	0.657	0.972	1.36	1.79	2.21	2.48	2.46	2.39	2.14	1.66	1.02	0.676	0.403
		0.3	0.172	0.368	0.586	0.850	1.17	1.55	1.97	2.37	2.67	2.72	2.50	2.23	1.84	1.28	0.706
		0.4	0.162	0.342	0.535	0.761	1.03	1.34	1.69	2.06	2.39	2.63	2.69	2.44	2.13	1.84	1.26
		0.5	0.147	0.309	0.479	0.673	0.897	1.15	1.44	1.76	2.08	2.35	2.52	2.53	2.28	1.93	1.65
		0.6	0.135	0.280	0.436	0.605	0.795	1.01	1.32	1.52	1.79	2.04	2.24	2.34	2.42	2.02	1.67
		0.7	0.121	0.251	0.390	0.539	0.703	0.889	1.10	1.39	1.63	1.87	1.99	2.13	2.17	2.06	1.75
		0.8	0.108	0.225	0.350	0.482	0.627	0.788	0.965	1.16	1.43	1.65	1.84	1.91	1.99	1.98	1.80
		0.9	0.0971	0.203	0.316	0.433	0.561	0.702	0.856	1.09	1.27	1.46	1.64	1.79	1.89	1.93	1.77
		1.0	0.0874	0.183	0.285	0.390	0.504	0.629	0.819	0.909	1.13	1.30	1.46	1.60	1.72	1.78	1.78
	30	0.1	0.196	0.435	0.744	1.13	1.57	1.98	2.14	2.36	2.41	2.11	1.45	1.10	0.797	0.456	0.193
		0.2	0.182	0.393	0.651	0.972	1.38	1.88	2.42	2.90	3.16	3.01	2.81	2.41	1.78	1.03	0.649
		0.3	0.167	0.357	0.578	0.841	1.17	1.57	2.04	2.53	2.98	3.27	3.26	2.89	2.50	2.01	1.38
		0.4	0.160	0.334	0.532	0.754	1.02	1.35	1.72	2.13	2.55	2.90	3.13	3.13	2.79	2.35	1.89
		0.5	0.145	0.302	0.476	0.667	0.891	1.15	1.46	1.80	2.26	2.49	2.76	2.91	2.87	2.56	2.11
		0.6	0.134	0.273	0.429	0.603	0.795	1.01	1.26	1.54	1.94	2.25	2.52	2.75	2.66	2.59	2.25
		0.7	0.120	0.245	0.384	0.537	0.703	0.889	1.10	1.33	1.58	1.84	2.08	2.40	2.53	2.43	2.30
		0.8	0.108	0.220	0.344	0.480	0.625	0.786	0.964	1.16	1.38	1.60	1.92	2.12	2.26	2.34	2.35
		0.9	0.0966	0.198	0.310	0.430	0.559	0.699	0.854	1.02	1.21	1.40	1.69	1.90	2.05	2.13	2.19
		1.0	0.0864	0.178	0.279	0.387	0.502	0.625	0.761	0.909	1.07	1.24	1.50	1.67	1.81	1.96	1.87
Surface point	5	0.1	0.0429	0.088	0.128	0.157	0.173	0.178	0.170	0.151	0.135	0.117	0.0922	0.0639	0.0409	0.0273	0.0169
		0.2	0.0542	0.112	0.174	0.234	0.283	0.316	0.333	0.331	0.301	0.243	0.200	0.156	0.109	0.0587	0.0358
		0.3	0.0645	0.132	0.205	0.283	0.360	0.424	0.469	0.489	0.488	0.448	0.355	0.269	0.201	0.132	0.0624
		0.4	0.0600	0.125	0.196	0.274	0.355	0.433	0.497	0.539	0.552	0.543	0.494	0.387	0.275	0.194	0.118
		0.5	0.0665	0.137	0.213	0.297	0.387	0.478	0.562	0.628	0.666	0.669	0.644	0.573	0.431	0.289	0.190
		0.6	0.0690	0.139	0.215	0.299	0.389	0.484	0.577	0.657	0.715	0.738	0.725	0.679	0.586	0.406	0.257
		0.7	0.0724	0.144	0.222	0.308	0.401	0.499	0.621	0.693	0.766	0.813	0.811	0.780	0.706	0.568	0.353
		0.8	0.0750	0.149	0.228	0.314	0.407	0.506	0.610	0.732	0.797	0.860	0.886	0.861	0.801	0.687	0.489
		0.9	0.0766	0.151	0.231	0.316	0.409	0.507	0.611	0.716	0.813	0.887	0.929	0.928	0.875	0.780	0.616
		1.0	0.0880	0.152	0.232	0.337	0.407	0.504	0.608	0.714	0.816	0.901	0.959	0.976	0.935	0.852	0.710
	10	0.1	0.0347	0.0779	0.122	0.161	0.186	0.200	0.204	0.196	0.169	0.151	0.130	0.102	0.0628	0.0390	0.0258
		0.2	0.0447	0.0983	0.160	0.229	0.301	0.365	0.400	0.419	0.424	0.398	0.319	0.244	0.186	0.124	0.0567
		0.3	0.0540	0.117	0.188	0.271	0.365	0.466	0.563	0.628	0.649	0.680	0.626	0.540	0.368	0.262	0.168
		0.4	0.0526	0.109	0.175	0.253	0.345	0.448	0.557	0.661	0.736	0.757	0.746	0.707	0.610	0.414	0.267
		0.5	0.0604	0.122	0.194	0.276	0.373	0.484	0.607	0.735	0.853	0.932	0.942	0.907	0.839	0.706	0.451
		0.6	0.0665	0.129	0.200	0.282	0.376	0.485	0.609	0.741	0.874	0.990	1.09	1.08	1.01	0.871	0.690
		0.7	0.0715	0.137	0.209	0.293	0.389	0.498	0.622	0.757	0.898	1.03	1.14	1.18	1.13	1.06	0.896
		0.8	0.0750	0.143	0.217	0.301	0.397	0.505	0.626	0.760	0.902	1.05	1.17	1.26	1.26	1.15	1.04
		0.9	0.0773	0.148	0.222	0.306	0.401	0.507	0.625	0.755	0.895	1.04	1.18	1.29	1.33	1.26	1.11
		1.0	0.0789	0.150	0.225	0.309	0.402	0.506	0.620	0.747	0.883	1.09	1.17	1.29	1.37	1.35	1.26
	20	0.1	0.0260	0.0676	0.114	0.162	0.206	0.232	0.249	0.256	0.248	0.208	0.178	0.149	0.111	0.0590	0.0360
		0.2	0.0360	0.0862	0.147	0.219	0.304	0.400	0.493	0.562	0.576	0.592	0.575	0.498	0.339	0.250	0.159
		0.3	0.0466	0.104	0.173	0.257	0.359	0.481	0.620	0.766	0.896	0.963	0.947	0.920	0.835	0.641	0.380
		0.4	0.0470	0.102	0.162	0.236	0.327	0.437	0.569	0.717	0.872	1.01	1.11	1.09	1.03	0.986	0.728
		0.5	0.0557	0.117	0.182	0.260	0.355	0.472	0.610	0.768	0.943	1.12	1.28	1.38	1.34	1.22	1.13
		0.6	0.0612	0.130	0.196	0.272	0.364	0.474	0.661	0.761	0.935	1.12	1.30	1.45	1.62	1.43	1.26
		0.7	0.0658	0.140	0.209	0.287	0.377	0.487	0.618	0.830	1.01	1.20	1.32	1.50	1.63	1.65	1.48
		0.8	0.0693	0.147	0.219	0.297	0.388	0.494	0.622	0.769	1.00	1.19	1.39	1.50	1.66	1.75	1.68
		0.9	0.0722	0.152	0.226	0.305	0.394	0.498	0.620	0.822	0.989	1.17	1.37	1.57	1.74	1.86	1.79
		1.0	0.0746	0.155	0.231	0.309	0.397	0.498	0.671	0.750	0.971	1.15	1.34	1.54	1.72	1.86	1.95
	30	0.1	0.0140	0.0605	0.107	0.161	0.215	0.261	0.281	0.301	0.307	0.290	0.227	0.192	0.150	0.0973	0.0473
		0.2	0.0291	0.0786	0.137	0.212	0.302	0.408	0.526	0.642	0.725	0.733	0.746	0.713	0.595	0.380	0.263
		0.3	0.0429	0.0970	0.163	0.247	0.352	0.482	0.636	0.812	0.996	1.16	1.25	1.20	1.14	1.01	0.767
		0.4	0.0350	0.0976	0.158	0.230	0.320	0.432	0.569	0.732	0.915	1.10	1.28	1.39	1.35	1.24	1.08
		0.5	0.0455	0.115	0.180	0.256	0.349	0.464	0.605	0.775	1.05	1.18	1.40	1.59	1.71	1.64	1.44
		0.6	0.0456	0.128	0.199	0.276	0.366	0.475	0.606	0.766	1.03	1.25	1.48	1.73	1.78	1.86	1.71
		0.7	0.0521	0.138	0.214	0.293	0.383	0.490	0.619	0.772	0.954	1.16	1.38	1.71	1.92	1.96	1.97
		0.8	0.0575	0.145	0.224	0.306	0.395	0.500	0.624	0.770	0.943	1.14	1.45	1.68	1.91	2.09	2.23
		0.9	0.0621	0.149	0.232	0.314	0.403	0.505	0.624	0.764	0.927	1.11	1.42	1.68	1.91	2.07	2.25
		1.0	0.0659	0.152	0.236	0.319	0.407	0.507	0.622	0.755	0.908	1.09	1.38	1.60	1.82	2.09	2.05

表 4(c)　軸方向亀裂の h_1 ($n = 7$)

h_1 ($n = 7$)

	R_m/t	a/c	a/t 0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75
Deepest point	5	0.1	0.233	0.439	0.628	0.754	0.779	0.772	0.658	0.582	0.484	0.317	0.231	0.155	0.0884	0.0536	0.0353
		0.2	0.217	0.422	0.627	0.823	0.994	1.06	0.991	0.878	0.671	0.517	0.336	0.188	0.111	0.0505	0.0257
		0.3	0.196	0.388	0.584	0.782	0.977	1.14	1.21	1.13	0.991	0.754	0.539	0.351	0.180	0.0935	0.0367
		0.4	0.179	0.356	0.535	0.719	0.904	1.07	1.21	1.27	1.17	1.00	0.762	0.518	0.331	0.161	0.0758
		0.5	0.160	0.319	0.479	0.650	0.823	0.987	1.13	1.25	1.28	1.15	0.955	0.713	0.468	0.286	0.126
		0.6	0.144	0.289	0.439	0.595	0.756	0.910	1.05	1.17	1.24	1.22	1.06	0.860	0.614	0.395	0.227
		0.7	0.129	0.259	0.393	0.533	0.678	0.821	0.959	1.08	1.17	1.21	1.14	0.959	0.753	0.500	0.313
		0.8	0.116	0.233	0.355	0.481	0.612	0.745	0.874	0.994	1.09	1.16	1.15	1.04	0.837	0.626	0.387
		0.9	0.105	0.211	0.322	0.435	0.556	0.679	0.801	0.916	1.02	1.09	1.11	1.06	0.902	0.707	0.475
		1.0	0.0944	0.192	0.292	0.396	0.504	0.616	0.729	0.840	0.941	1.02	1.06	1.05	0.949	0.757	0.563
	10	0.1	0.237	0.494	0.731	0.963	1.14	1.13	1.08	0.865	0.698	0.527	0.292	0.190	0.104	0.0538	0.0320
		0.2	0.220	0.463	0.723	0.997	1.25	1.51	1.68	1.57	1.32	0.992	0.674	0.426	0.207	0.107	0.0398
		0.3	0.202	0.417	0.662	0.923	1.21	1.46	1.69	1.86	1.83	1.52	1.19	0.778	0.486	0.257	0.108
		0.4	0.187	0.391	0.604	0.842	1.10	1.37	1.60	1.79	1.92	1.88	1.59	1.22	0.832	0.503	0.260
		0.5	0.169	0.346	0.537	0.754	0.984	1.23	1.48	1.68	1.82	1.89	1.82	1.54	1.16	0.784	0.451
		0.6	0.152	0.317	0.487	0.677	0.886	1.11	1.35	1.57	1.73	1.83	1.84	1.73	1.43	1.05	0.663
		0.7	0.137	0.286	0.441	0.607	0.791	0.987	1.21	1.42	1.60	1.72	1.76	1.73	1.57	1.23	0.883
		0.8	0.124	0.257	0.396	0.548	0.711	0.891	1.07	1.27	1.45	1.60	1.67	1.67	1.59	1.39	1.03
		0.9	0.112	0.233	0.359	0.490	0.641	0.796	0.974	1.15	1.31	1.47	1.57	1.59	1.55	1.43	1.17
		1.0	0.103	0.213	0.326	0.445	0.579	0.720	0.878	1.03	1.20	1.34	1.45	1.51	1.49	1.41	1.25
	20	0.1	0.230	0.504	0.847	1.19	1.50	1.79	1.79	1.59	1.26	0.915	0.641	0.304	0.176	0.0747	0.0360
		0.2	0.213	0.459	0.768	1.13	1.56	1.99	2.31	2.59	2.57	2.07	1.58	0.997	0.642	0.285	0.122
		0.3	0.197	0.420	0.676	1.00	1.38	1.81	2.25	2.58	2.76	2.79	2.53	1.91	1.36	0.780	0.413
		0.4	0.185	0.390	0.629	0.899	1.21	1.58	1.97	2.38	2.70	2.80	2.78	2.56	2.02	1.42	0.824
		0.5	0.168	0.353	0.554	0.798	1.07	1.37	1.72	2.08	2.43	2.68	2.71	2.63	2.41	1.92	1.31
		0.6	0.153	0.318	0.508	0.707	0.938	1.20	1.51	1.83	2.15	2.44	2.61	2.61	2.48	2.22	1.72
		0.7	0.137	0.288	0.458	0.637	0.834	1.06	1.32	1.60	1.90	2.17	2.40	2.50	2.44	2.26	1.96
		0.8	0.124	0.261	0.406	0.571	0.749	0.948	1.17	1.42	1.67	1.94	2.16	2.32	2.34	2.22	2.02
		0.9	0.112	0.237	0.368	0.518	0.674	0.847	1.04	1.25	1.48	1.72	1.94	2.11	2.20	2.15	2.00
		1.0	0.101	0.215	0.341	0.469	0.609	0.763	0.935	1.12	1.32	1.54	1.74	1.91	2.03	2.05	1.95
	30	0.1	0.222	0.500	0.877	1.30	1.71	2.13	2.41	2.17	1.92	1.34	0.957	0.534	0.252	0.130	0.0450
		0.2	0.206	0.452	0.754	1.16	1.65	2.23	2.78	3.11	3.34	3.18	2.44	1.81	1.07	0.659	0.245
		0.3	0.192	0.414	0.674	1.01	1.42	1.90	2.47	3.01	3.38	3.48	3.41	3.01	2.21	1.54	0.839
		0.4	0.182	0.386	0.617	0.905	1.24	1.64	2.10	2.60	3.07	3.42	3.45	3.30	2.99	2.37	1.60
		0.5	0.165	0.352	0.556	0.788	1.08	1.41	1.79	2.21	2.66	3.04	3.29	3.28	3.09	2.79	2.22
		0.6	0.153	0.319	0.498	0.715	0.948	1.22	1.54	1.90	2.29	2.67	2.98	3.14	3.09	2.89	2.55
		0.7	0.138	0.287	0.450	0.641	0.847	1.08	1.35	1.65	1.98	2.33	2.63	2.86	2.95	2.86	2.60
		0.8	0.124	0.258	0.407	0.567	0.758	0.960	1.19	1.45	1.73	2.04	2.32	2.56	2.72	2.74	2.58
		0.9	0.111	0.233	0.368	0.513	0.682	0.860	1.05	1.28	1.53	1.79	2.05	2.28	2.46	2.57	2.50
		1.0	0.0990	0.211	0.334	0.465	0.615	0.767	0.945	1.14	1.36	1.59	1.83	2.04	2.22	2.36	2.39
Surface point	5	0.1	0.0486	0.0934	0.129	0.147	0.146	0.137	0.117	0.101	0.0804	0.0519	0.0375	0.0228	0.0122	0.00719	0.00345
		0.2	0.0588	0.118	0.175	0.228	0.273	0.288	0.273	0.244	0.191	0.152	0.100	0.0596	0.0355	0.0153	0.00779
		0.3	0.0670	0.135	0.206	0.279	0.349	0.407	0.437	0.414	0.370	0.292	0.217	0.145	0.0763	0.0408	0.0148
		0.4	0.0651	0.131	0.201	0.274	0.349	0.418	0.478	0.507	0.480	0.420	0.333	0.232	0.150	0.0723	0.0334
		0.5	0.0701	0.143	0.216	0.297	0.383	0.466	0.540	0.601	0.622	0.577	0.494	0.381	0.254	0.154	0.0656
		0.6	0.0738	0.150	0.228	0.313	0.404	0.494	0.578	0.648	0.699	0.703	0.630	0.521	0.379	0.241	0.132
		0.7	0.0760	0.155	0.234	0.321	0.414	0.511	0.606	0.689	0.754	0.788	0.760	0.656	0.522	0.346	0.206
		0.8	0.0773	0.158	0.239	0.326	0.420	0.520	0.620	0.712	0.788	0.841	0.853	0.788	0.641	0.480	0.287
		0.9	0.0782	0.160	0.243	0.328	0.425	0.526	0.628	0.729	0.814	0.877	0.903	0.883	0.761	0.594	0.387
		1.0	0.0789	0.160	0.244	0.330	0.423	0.524	0.629	0.731	0.825	0.898	0.943	0.944	0.866	0.690	0.500
	10	0.1	0.0412	0.094	0.137	0.172	0.189	0.180	0.168	0.138	0.118	0.0926	0.0550	0.0379	0.0203	0.0104	0.00564
		0.2	0.0488	0.114	0.184	0.256	0.320	0.378	0.416	0.396	0.350	0.281	0.205	0.137	0.0710	0.0390	0.0138
		0.3	0.0564	0.130	0.212	0.303	0.403	0.495	0.575	0.646	0.660	0.581	0.487	0.339	0.221	0.120	0.0529
		0.4	0.0573	0.129	0.206	0.294	0.392	0.499	0.598	0.679	0.749	0.772	0.697	0.568	0.411	0.255	0.133
		0.5	0.0643	0.138	0.222	0.318	0.426	0.544	0.670	0.781	0.870	0.937	0.952	0.859	0.679	0.478	0.276
		0.6	0.0719	0.149	0.234	0.332	0.443	0.564	0.702	0.839	0.961	1.05	1.10	1.09	0.947	0.717	0.455
		0.7	0.0774	0.155	0.245	0.344	0.456	0.578	0.721	0.869	1.01	1.13	1.20	1.23	1.17	0.954	0.686
		0.8	0.0813	0.158	0.248	0.352	0.464	0.591	0.725	0.876	1.03	1.17	1.27	1.32	1.31	1.19	0.881
		0.9	0.0841	0.162	0.252	0.352	0.469	0.590	0.731	0.879	1.03	1.19	1.31	1.38	1.40	1.33	1.10
		1.0	0.0872	0.166	0.253	0.353	0.468	0.589	0.726	0.868	1.03	1.19	1.33	1.42	1.45	1.41	1.26
	20	0.1	0.0294	0.083	0.143	0.193	0.234	0.260	0.253	0.229	0.189	0.152	0.115	0.0598	0.0382	0.0168	0.00883
		0.2	0.0332	0.0975	0.178	0.269	0.371	0.471	0.550	0.624	0.651	0.565	0.480	0.326	0.227	0.106	0.0504
		0.3	0.0430	0.112	0.198	0.307	0.431	0.577	0.733	0.868	0.970	1.05	1.03	0.848	0.661	0.402	0.224
		0.4	0.0510	0.115	0.196	0.293	0.408	0.546	0.699	0.869	1.02	1.12	1.19	1.18	1.02	0.768	0.468
		0.5	0.0614	0.130	0.209	0.315	0.437	0.580	0.748	0.930	1.13	1.31	1.42	1.47	1.44	1.24	0.887
		0.6	0.0729	0.147	0.230	0.326	0.446	0.589	0.760	0.956	1.16	1.38	1.56	1.65	1.67	1.59	1.30
		0.7	0.0797	0.158	0.242	0.339	0.455	0.598	0.767	0.963	1.18	1.40	1.62	1.79	1.85	1.81	1.64
		0.8	0.0845	0.167	0.246	0.346	0.461	0.599	0.766	0.958	1.17	1.40	1.63	1.85	1.97	1.97	1.85
		0.9	0.0876	0.173	0.253	0.354	0.464	0.600	0.759	0.940	1.15	1.38	1.62	1.85	2.02	2.08	1.99
		1.0	0.0897	0.178	0.266	0.358	0.465	0.597	0.750	0.921	1.13	1.35	1.58	1.82	2.02	2.13	2.09
	30	0.1	0.0136	0.0730	0.137	0.200	0.252	0.298	0.324	0.299	0.278	0.209	0.167	0.101	0.0551	0.0300	0.0111
		0.2	0.0191	0.0817	0.158	0.261	0.377	0.508	0.634	0.729	0.824	0.855	0.731	0.606	0.394	0.258	0.101
		0.3	0.0342	0.0982	0.180	0.290	0.426	0.588	0.780	0.985	1.16	1.28	1.37	1.34	1.09	0.821	0.467
		0.4	0.0389	0.110	0.182	0.279	0.401	0.549	0.727	0.929	1.14	1.35	1.47	1.53	1.52	1.30	0.931
		0.5	0.0537	0.129	0.203	0.296	0.424	0.575	0.757	0.972	1.22	1.47	1.70	1.83	1.87	1.80	1.53
		0.6	0.0642	0.151	0.229	0.325	0.437	0.580	0.755	0.967	1.21	1.48	1.76	1.99	2.11	2.09	1.95
		0.7	0.0714	0.164	0.246	0.342	0.453	0.589	0.757	0.965	1.20	1.47	1.76	2.04	2.25	2.31	2.21
		0.8	0.0759	0.174	0.259	0.349	0.465	0.594	0.755	0.953	1.18	1.44	1.73	2.02	2.28	2.43	2.40
		0.9	0.0792	0.180	0.268	0.358	0.473	0.600	0.748	0.938	1.15	1.41	1.68	1.97	2.25	2.47	2.52
		1.0	0.0813	0.183	0.275	0.366	0.479	0.593	0.742	0.914	1.13	1.37	1.64	1.92	2.20	2.45	2.57

表 4(d)　軸方向亀裂の h_1 (n = 10)

h_1 (n = 10)

	R_m/t	a/c	a/t														
			0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75
Deepest point	5	0.1	0.211	0.389	0.522	0.569	0.543	0.514	0.365	0.274	0.167	0.109	0.0592	0.0369	0.0239	0.0171	0.0129
		0.2	0.197	0.381	0.557	0.715	0.795	0.788	0.685	0.566	0.353	0.216	0.108	0.0517	0.0232	0.0126	0.00767
		0.3	0.180	0.352	0.526	0.702	0.857	0.942	0.926	0.803	0.667	0.438	0.253	0.118	0.0542	0.0198	0.00855
		0.4	0.163	0.321	0.485	0.653	0.814	0.948	1.01	0.984	0.853	0.681	0.465	0.255	0.120	0.0492	0.0151
		0.5	0.146	0.289	0.436	0.592	0.752	0.895	1.01	1.05	1.00	0.842	0.653	0.440	0.233	0.102	0.0371
		0.6	0.130	0.261	0.399	0.544	0.692	0.832	0.956	1.04	1.04	0.956	0.768	0.589	0.371	0.192	0.0726
		0.7	0.117	0.235	0.359	0.490	0.627	0.761	0.888	0.993	1.05	1.01	0.887	0.689	0.512	0.290	0.141
		0.8	0.106	0.213	0.325	0.443	0.568	0.693	0.816	0.927	1.01	1.02	0.943	0.794	0.598	0.417	0.206
		0.9	0.0948	0.193	0.295	0.401	0.514	0.631	0.749	0.860	0.953	1.00	0.965	0.857	0.675	0.496	0.294
		1.0	0.0857	0.175	0.268	0.364	0.467	0.574	0.686	0.794	0.890	0.957	0.962	0.887	0.746	0.552	0.384
	10	0.1	0.231	0.478	0.706	0.887	0.922	0.832	0.750	0.497	0.326	0.165	0.0950	0.0439	0.0247	0.0158	0.0109
		0.2	0.214	0.446	0.703	0.978	1.21	1.39	1.36	1.17	0.902	0.588	0.315	0.140	0.0616	0.0220	0.0098
		0.3	0.196	0.410	0.644	0.907	1.19	1.43	1.61	1.65	1.44	1.08	0.788	0.430	0.211	0.0791	0.0235
		0.4	0.182	0.379	0.588	0.829	1.09	1.36	1.59	1.74	1.76	1.53	1.19	0.841	0.509	0.240	0.0833
		0.5	0.165	0.341	0.528	0.739	0.972	1.23	1.48	1.68	1.78	1.76	1.51	1.18	0.818	0.495	0.217
		0.6	0.149	0.307	0.478	0.668	0.883	1.12	1.37	1.60	1.74	1.81	1.74	1.46	1.10	0.750	0.413
		0.7	0.134	0.278	0.431	0.601	0.790	1.00	1.23	1.45	1.63	1.74	1.75	1.62	1.33	0.955	0.631
		0.8	0.122	0.251	0.389	0.541	0.711	0.900	1.10	1.31	1.50	1.65	1.70	1.66	1.46	1.16	0.779
		0.9	0.110	0.229	0.354	0.490	0.642	0.811	0.993	1.18	1.37	1.53	1.62	1.62	1.53	1.28	0.942
		1.0	0.100	0.208	0.323	0.446	0.582	0.733	0.898	1.07	1.24	1.40	1.52	1.56	1.51	1.35	1.07
	20	0.1	0.228	0.508	0.852	1.20	1.48	1.55	1.40	1.14	0.744	0.425	0.189	0.0921	0.0373	0.0190	0.0111
		0.2	0.211	0.460	0.766	1.15	1.61	2.06	2.34	2.41	2.05	1.49	1.05	0.532	0.245	0.0872	0.0247
		0.3	0.196	0.421	0.685	1.01	1.42	1.88	2.35	2.66	2.74	2.53	1.99	1.37	0.904	0.408	0.146
		0.4	0.184	0.390	0.625	0.910	1.25	1.65	2.09	2.53	2.83	2.85	2.67	2.17	1.56	1.00	0.489
		0.5	0.168	0.354	0.563	0.806	1.09	1.43	1.82	2.23	2.61	2.83	2.82	2.61	2.14	1.52	0.948
		0.6	0.153	0.320	0.506	0.719	0.966	1.26	1.60	1.97	2.33	2.66	2.81	2.75	2.52	2.01	1.39
		0.7	0.138	0.291	0.456	0.645	0.861	1.11	1.41	1.73	2.06	2.39	2.63	2.71	2.59	2.30	1.77
		0.8	0.124	0.264	0.415	0.580	0.771	0.993	1.25	1.53	1.83	2.14	2.40	2.57	2.56	2.38	2.01
		0.9	0.111	0.240	0.377	0.525	0.696	0.892	1.11	1.36	1.63	1.91	2.17	2.37	2.46	2.38	2.13
		1.0	0.101	0.218	0.343	0.478	0.629	0.803	1.00	1.22	1.46	1.71	1.96	2.17	2.30	2.30	2.15
	30	0.1	0.221	0.507	0.886	1.35	1.77	2.10	2.03	1.66	1.31	0.712	0.410	0.157	0.0623	0.0268	0.0135
		0.2	0.203	0.455	0.773	1.19	1.73	2.37	2.94	3.19	3.13	2.55	1.78	1.19	0.569	0.237	0.0749
		0.3	0.190	0.417	0.688	1.03	1.47	2.02	2.64	3.22	3.56	3.53	3.17	2.42	1.63	1.05	0.440
		0.4	0.179	0.388	0.629	0.921	1.29	1.74	2.26	2.84	3.35	3.67	3.60	3.28	2.65	1.89	1.16
		0.5	0.164	0.356	0.567	0.817	1.12	1.49	1.93	2.42	2.93	3.36	3.59	3.49	3.19	2.63	1.83
		0.6	0.154	0.322	0.509	0.728	0.988	1.30	1.67	2.10	2.55	3.00	3.35	3.49	3.39	3.08	2.42
		0.7	0.139	0.291	0.461	0.654	0.879	1.14	1.46	1.83	2.23	2.64	3.00	3.24	3.33	3.19	2.77
		0.8	0.125	0.263	0.418	0.590	0.787	1.02	1.29	1.61	1.96	2.33	2.68	2.95	3.13	3.14	2.89
		0.9	0.111	0.238	0.379	0.535	0.711	0.912	1.15	1.42	1.74	2.07	2.39	2.67	2.88	3.00	2.88
		1.0	0.0991	0.216	0.344	0.485	0.644	0.819	1.03	1.27	1.54	1.84	2.14	2.41	2.63	2.79	2.79
Surface point	5	0.1	0.0452	0.0855	0.111	0.115	0.106	0.0931	0.0678	0.0512	0.0300	0.0198	0.0107	0.00636	0.00361	0.00209	0.00115
		0.2	0.0542	0.109	0.161	0.204	0.226	0.223	0.195	0.161	0.105	0.0661	0.0347	0.0170	0.00820	0.00419	0.00235
		0.3	0.0618	0.125	0.190	0.255	0.311	0.345	0.343	0.301	0.253	0.173	0.105	0.0501	0.0236	0.00877	0.00387
		0.4	0.0593	0.119	0.183	0.251	0.318	0.375	0.407	0.399	0.352	0.287	0.202	0.113	0.0519	0.0213	0.00669
		0.5	0.0637	0.129	0.198	0.273	0.351	0.423	0.483	0.509	0.487	0.421	0.332	0.228	0.121	0.0504	0.0176
		0.6	0.0663	0.137	0.209	0.289	0.375	0.460	0.534	0.586	0.593	0.550	0.455	0.351	0.221	0.109	0.0380
		0.7	0.0681	0.141	0.215	0.297	0.388	0.480	0.568	0.638	0.678	0.658	0.587	0.463	0.342	0.185	0.0828
		0.8	0.0691	0.144	0.220	0.302	0.394	0.490	0.586	0.669	0.730	0.747	0.696	0.593	0.442	0.300	0.137
		0.9	0.0693	0.146	0.222	0.304	0.394	0.493	0.593	0.688	0.763	0.806	0.785	0.700	0.552	0.393	0.217
		1.0	0.0694	0.146	0.223	0.304	0.393	0.490	0.593	0.693	0.779	0.839	0.853	0.790	0.664	0.479	0.314
	10	0.1	0.0408	0.0921	0.135	0.160	0.157	0.138	0.121	0.0842	0.0613	0.0332	0.0215	0.0100	0.00572	0.00319	0.00188
		0.2	0.0471	0.111	0.181	0.255	0.315	0.360	0.352	0.313	0.253	0.178	0.104	0.0486	0.0231	0.00853	0.00381
		0.3	0.0529	0.126	0.207	0.300	0.401	0.493	0.564	0.594	0.543	0.434	0.337	0.193	0.101	0.0383	0.0113
		0.4	0.0531	0.123	0.198	0.288	0.390	0.497	0.594	0.663	0.700	0.642	0.534	0.397	0.249	0.120	0.0402
		0.5	0.0589	0.133	0.215	0.309	0.419	0.543	0.669	0.779	0.853	0.883	0.804	0.661	0.474	0.291	0.126
		0.6	0.0675	0.140	0.227	0.327	0.441	0.572	0.715	0.859	0.975	1.05	1.06	0.936	0.734	0.500	0.269
		0.7	0.0729	0.146	0.236	0.338	0.454	0.586	0.733	0.890	1.04	1.15	1.20	1.17	0.992	0.724	0.465
		0.8	0.0772	0.149	0.240	0.344	0.461	0.594	0.740	0.901	1.07	1.21	1.30	1.32	1.21	0.972	0.639
		0.9	0.0808	0.152	0.243	0.347	0.464	0.595	0.742	0.901	1.07	1.23	1.36	1.41	1.37	1.17	0.854
		1.0	0.0840	0.154	0.243	0.347	0.463	0.592	0.736	0.892	1.06	1.23	1.38	1.47	1.46	1.34	1.05
	20	0.1	0.0280	0.0847	0.145	0.197	0.229	0.229	0.207	0.174	0.125	0.0803	0.0391	0.0218	0.00972	0.00500	0.00259
		0.2	0.0290	0.0962	0.178	0.274	0.387	0.499	0.574	0.618	0.562	0.445	0.345	0.188	0.0965	0.0364	0.0105
		0.3	0.0371	0.108	0.197	0.308	0.444	0.605	0.778	0.921	1.00	1.01	0.865	0.641	0.455	0.214	0.0799
		0.4	0.0474	0.108	0.189	0.291	0.415	0.566	0.739	0.926	1.09	1.16	1.18	1.04	0.796	0.540	0.267
		0.5	0.0576	0.121	0.202	0.307	0.440	0.597	0.781	0.990	1.21	1.39	1.48	1.47	1.29	0.976	0.623
		0.6	0.0690	0.140	0.219	0.321	0.451	0.610	0.799	1.02	1.25	1.49	1.68	1.75	1.70	1.45	1.03
		0.7	0.0768	0.154	0.229	0.331	0.458	0.616	0.805	1.03	1.27	1.53	1.77	1.93	1.96	1.82	1.45
		0.8	0.0816	0.164	0.240	0.336	0.460	0.615	0.802	1.02	1.26	1.53	1.79	2.02	2.13	2.06	1.80
		0.9	0.0834	0.172	0.248	0.341	0.462	0.613	0.796	1.01	1.25	1.51	1.78	2.03	2.21	2.23	2.05
		1.0	0.0879	0.177	0.255	0.346	0.461	0.607	0.784	0.989	1.22	1.48	1.75	2.01	2.23	2.32	2.22
	30	0.1	0.0121	0.0725	0.139	0.207	0.259	0.294	0.286	0.245	0.209	0.129	0.0845	0.0364	0.0158	0.00760	0.00359
		0.2	0.0125	0.0773	0.160	0.268	0.398	0.545	0.690	0.783	0.836	0.753	0.585	0.439	0.224	0.102	0.0341
		0.3	0.0254	0.0898	0.176	0.290	0.441	0.626	0.844	1.08	1.27	1.36	1.36	1.16	0.839	0.569	0.245
		0.4	0.0350	0.103	0.175	0.273	0.405	0.572	0.773	1.01	1.25	1.47	1.57	1.57	1.38	1.04	0.663
		0.5	0.0508	0.122	0.193	0.289	0.422	0.592	0.800	1.05	1.32	1.60	1.85	1.97	1.92	1.69	1.24
		0.6	0.0606	0.147	0.223	0.315	0.436	0.597	0.798	1.04	1.33	1.64	1.95	2.19	2.29	2.18	1.84
		0.7	0.0688	0.161	0.243	0.331	0.448	0.599	0.794	1.04	1.32	1.64	1.97	2.28	2.50	2.52	2.29
		0.8	0.0751	0.172	0.259	0.348	0.458	0.601	0.786	1.02	1.30	1.61	1.95	2.28	2.56	2.71	2.60
		0.9	0.0784	0.179	0.271	0.361	0.468	0.605	0.778	1.00	1.27	1.57	1.91	2.25	2.56	2.78	2.79
		1.0	0.0810	0.184	0.279	0.370	0.475	0.603	0.765	0.972	1.23	1.52	1.85	2.20	2.52	2.78	2.88

表 4(e)　軸方向亀裂の h_1 (n = 13)

h_1 (n = 13)

	R_m/t	a/c	a/t 0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75
Deepest point	5	0.1	0.190	0.341	0.441	0.445	0.377	0.276	0.176	0.105	0.0561	0.0296	0.0169	0.0115	0.00874	0.00693	0.00534
		0.2	0.178	0.340	0.491	0.623	0.650	0.608	0.461	0.296	0.164	0.0776	0.0299	0.0128	0.00677	0.00444	0.00311
		0.3	0.163	0.317	0.472	0.624	0.756	0.797	0.733	0.575	0.389	0.214	0.0990	0.0389	0.0133	0.00532	0.00292
		0.4	0.148	0.290	0.436	0.586	0.727	0.841	0.865	0.789	0.629	0.423	0.236	0.109	0.0407	0.0118	0.00397
		0.5	0.133	0.261	0.393	0.534	0.678	0.805	0.901	0.909	0.811	0.626	0.413	0.226	0.100	0.0342	0.00831
		0.6	0.119	0.238	0.364	0.496	0.630	0.754	0.864	0.934	0.888	0.770	0.565	0.363	0.191	0.0787	0.0216
		0.7	0.106	0.214	0.329	0.448	0.573	0.696	0.810	0.903	0.939	0.853	0.711	0.498	0.300	0.144	0.0506
		0.8	0.0957	0.194	0.297	0.405	0.520	0.638	0.752	0.854	0.923	0.912	0.790	0.625	0.417	0.228	0.0954
		0.9	0.0862	0.176	0.269	0.367	0.473	0.583	0.694	0.799	0.881	0.918	0.847	0.711	0.518	0.319	0.152
		1.0	0.0779	0.160	0.245	0.334	0.429	0.531	0.637	0.741	0.831	0.889	0.873	0.765	0.607	0.404	0.217
	10	0.1	0.227	0.467	0.662	0.805	0.756	0.617	0.426	0.241	0.123	0.0534	0.0241	0.0124	0.00836	0.00624	0.00466
		0.2	0.210	0.441	0.695	0.952	1.13	1.26	1.13	0.882	0.555	0.286	0.125	0.0456	0.0150	0.00612	0.00352
		0.3	0.193	0.406	0.640	0.902	1.17	1.37	1.50	1.47	1.16	0.776	0.441	0.206	0.0767	0.0208	0.00587
		0.4	0.179	0.377	0.588	0.829	1.09	1.36	1.54	1.63	1.60	1.27	0.903	0.538	0.258	0.0961	0.0229
		0.5	0.163	0.340	0.529	0.742	0.979	1.23	1.48	1.65	1.69	1.62	1.28	0.920	0.548	0.257	0.0880
		0.6	0.147	0.306	0.481	0.675	0.899	1.15	1.40	1.62	1.73	1.73	1.61	1.25	0.874	0.499	0.215
		0.7	0.133	0.276	0.433	0.607	0.806	1.03	1.27	1.49	1.66	1.73	1.68	1.50	1.14	0.750	0.390
		0.8	0.120	0.250	0.391	0.547	0.725	0.923	1.14	1.36	1.55	1.68	1.69	1.59	1.34	0.982	0.587
		0.9	0.109	0.228	0.356	0.496	0.654	0.833	1.03	1.23	1.42	1.58	1.65	1.61	1.46	1.15	0.777
		1.0	0.0993	0.208	0.324	0.450	0.593	0.753	0.928	1.11	1.30	1.46	1.57	1.58	1.49	1.27	0.937
	20	0.1	0.230	0.515	0.865	1.20	1.41	1.34	1.11	0.708	0.371	0.163	0.0609	0.0235	0.0107	0.00676	0.00478
		0.2	0.213	0.466	0.784	1.19	1.67	2.10	2.26	2.21	1.68	1.07	0.572	0.252	0.0857	0.0216	0.00679
		0.3	0.199	0.426	0.703	1.05	1.48	1.98	2.45	2.67	2.61	2.27	1.63	0.983	0.494	0.189	0.0490
		0.4	0.188	0.396	0.641	0.945	1.31	1.75	2.22	2.68	2.93	2.81	2.52	1.88	1.23	0.636	0.248
		0.5	0.172	0.361	0.579	0.838	1.15	1.52	1.94	2.39	2.79	2.98	2.83	2.50	1.92	1.24	0.634
		0.6	0.155	0.326	0.520	0.749	1.02	1.34	1.72	2.14	2.54	2.88	3.00	2.82	2.47	1.83	1.15
		0.7	0.140	0.297	0.471	0.670	0.909	1.19	1.52	1.88	2.26	2.63	2.88	2.89	2.68	2.25	1.60
		0.8	0.126	0.270	0.427	0.606	0.816	1.06	1.35	1.67	2.01	2.36	2.65	2.81	2.75	2.45	1.95
		0.9	0.114	0.246	0.388	0.548	0.736	0.955	1.20	1.49	1.79	2.12	2.42	2.63	2.70	2.53	2.17
		1.0	0.103	0.224	0.354	0.496	0.665	0.860	1.08	1.33	1.61	1.91	2.19	2.42	2.56	2.51	2.27
	30	0.1	0.225	0.518	0.915	1.40	1.75	2.00	1.73	1.24	0.725	0.349	0.133	0.0436	0.0162	0.00824	0.00530
		0.2	0.209	0.464	0.798	1.25	1.84	2.51	3.04	3.10	2.87	2.11	1.29	0.652	0.271	0.0813	0.0171
		0.3	0.197	0.427	0.708	1.08	1.56	2.17	2.84	3.43	3.66	3.43	2.92	2.02	1.21	0.591	0.203
		0.4	0.185	0.399	0.648	0.960	1.36	1.87	2.46	3.09	3.65	3.91	3.66	3.15	2.38	1.55	0.757
		0.5	0.168	0.368	0.585	0.854	1.19	1.61	2.11	2.67	3.24	3.70	3.88	3.63	3.16	2.46	1.53
		0.6	0.157	0.332	0.526	0.762	1.05	1.40	1.83	2.33	2.86	3.37	3.74	3.84	3.62	3.14	2.28
		0.7	0.142	0.300	0.476	0.685	0.934	1.24	1.61	2.04	2.51	3.00	3.40	3.65	3.69	3.44	2.80
		0.8	0.127	0.271	0.433	0.617	0.836	1.10	1.42	1.80	2.22	2.66	3.07	3.37	3.55	3.50	3.09
		0.9	0.114	0.245	0.394	0.560	0.754	0.983	1.26	1.59	1.97	2.37	2.76	3.08	3.32	3.42	3.19
		1.0	0.102	0.222	0.358	0.509	0.683	0.883	1.13	1.42	1.75	2.12	2.49	2.81	3.06	3.23	3.16
Surface point	5	0.1	0.0411	0.0764	0.0950	0.0908	0.0734	0.0530	0.0346	0.0209	0.0112	0.00611	0.00328	0.00204	0.00128	0.000784	0.000465
		0.2	0.0490	0.0989	0.144	0.180	0.188	0.175	0.135	0.0883	0.0503	0.0249	0.0103	0.00474	0.00245	0.00154	0.00095
		0.3	0.0560	0.113	0.172	0.229	0.278	0.295	0.275	0.218	0.151	0.0875	0.0413	0.0167	0.00603	0.00250	0.00142
		0.4	0.0534	0.108	0.165	0.226	0.286	0.335	0.351	0.321	0.260	0.182	0.104	0.0475	0.0172	0.00516	0.00187
		0.5	0.0573	0.116	0.179	0.247	0.319	0.384	0.434	0.440	0.392	0.312	0.212	0.116	0.0499	0.0161	0.00404
		0.6	0.0598	0.125	0.191	0.267	0.350	0.429	0.494	0.535	0.516	0.448	0.338	0.217	0.110	0.0416	0.0105
		0.7	0.0610	0.129	0.198	0.276	0.363	0.453	0.534	0.595	0.620	0.568	0.473	0.335	0.196	0.0880	0.0275
		0.8	0.0614	0.132	0.203	0.281	0.370	0.465	0.558	0.635	0.684	0.679	0.592	0.468	0.303	0.156	0.0584
		0.9	0.0619	0.134	0.205	0.283	0.372	0.469	0.569	0.660	0.727	0.754	0.700	0.583	0.418	0.244	0.105
		1.0	0.0620	0.134	0.206	0.283	0.370	0.467	0.571	0.668	0.750	0.798	0.789	0.689	0.535	0.340	0.166
	10	0.1	0.0396	0.0901	0.127	0.146	0.130	0.103	0.0725	0.0449	0.0255	0.0119	0.00621	0.00310	0.00196	0.00125	0.000766
		0.2	0.0452	0.109	0.180	0.251	0.298	0.333	0.299	0.247	0.167	0.0939	0.0439	0.0170	0.00607	0.00250	0.00145
		0.3	0.0501	0.124	0.204	0.301	0.401	0.479	0.532	0.539	0.451	0.323	0.197	0.0958	0.0370	0.0102	0.00300
		0.4	0.0483	0.119	0.195	0.287	0.389	0.493	0.577	0.627	0.642	0.544	0.417	0.261	0.128	0.0463	0.0109
		0.5	0.0534	0.128	0.211	0.307	0.420	0.543	0.668	0.766	0.815	0.819	0.694	0.523	0.319	0.148	0.0480
		0.6	0.0626	0.135	0.224	0.326	0.444	0.580	0.729	0.874	0.979	1.02	0.999	0.824	0.589	0.331	0.135
		0.7	0.0687	0.139	0.233	0.338	0.459	0.598	0.754	0.917	1.07	1.17	1.18	1.10	0.865	0.569	0.282
		0.8	0.0740	0.143	0.237	0.345	0.467	0.607	0.766	0.937	1.11	1.25	1.32	1.29	1.13	0.827	0.476
		0.9	0.0782	0.145	0.240	0.349	0.471	0.611	0.769	0.943	1.12	1.30	1.41	1.43	1.33	1.07	0.696
		1.0	0.0816	0.147	0.241	0.350	0.471	0.609	0.765	0.938	1.12	1.30	1.45	1.52	1.47	1.27	0.910
	20	0.1	0.0265	0.0847	0.146	0.195	0.217	0.201	0.169	0.118	0.0699	0.0347	0.0146	0.00650	0.00296	0.00181	0.00113
		0.2	0.0238	0.0951	0.181	0.283	0.403	0.516	0.569	0.591	0.489	0.345	0.204	0.0965	0.0353	0.00948	0.00296
		0.3	0.0290	0.105	0.199	0.318	0.464	0.639	0.824	0.952	0.991	0.943	0.735	0.480	0.254	0.101	0.0272
		0.4	0.0452	0.101	0.186	0.293	0.426	0.589	0.778	0.974	1.13	1.16	1.12	0.909	0.635	0.346	0.135
		0.5	0.0573	0.113	0.196	0.310	0.448	0.620	0.822	1.05	1.27	1.45	1.49	1.41	1.16	0.791	0.410
		0.6	0.0701	0.135	0.210	0.320	0.462	0.636	0.844	1.08	1.34	1.59	1.77	1.79	1.65	1.32	0.843
		0.7	0.0781	0.150	0.222	0.326	0.470	0.645	0.856	1.10	1.37	1.65	1.90	2.05	2.02	1.77	1.30
		0.8	0.0838	0.162	0.233	0.332	0.472	0.647	0.855	1.10	1.38	1.67	1.96	2.19	2.27	2.12	1.73
		0.9	0.0883	0.172	0.242	0.337	0.469	0.641	0.847	1.09	1.36	1.66	1.97	2.24	2.41	2.37	2.06
		1.0	0.0910	0.180	0.251	0.339	0.465	0.631	0.833	1.07	1.34	1.64	1.95	2.24	2.46	2.52	2.32
	30	0.1	0.00931	0.0716	0.141	0.210	0.254	0.281	0.251	0.196	0.130	0.0710	0.0309	0.0118	0.00481	0.00237	0.00147
		0.2	0.00278	0.0724	0.161	0.278	0.420	0.580	0.728	0.789	0.810	0.661	0.458	0.259	0.113	0.0363	0.00819
		0.3	0.0124	0.0805	0.174	0.297	0.462	0.670	0.914	1.17	1.35	1.37	1.30	1.00	0.642	0.322	0.114
		0.4	0.0367	0.0967	0.164	0.269	0.415	0.597	0.820	1.08	1.34	1.56	1.61	1.52	1.25	0.849	0.434
		0.5	0.0510	0.118	0.181	0.281	0.425	0.615	0.849	1.13	1.43	1.73	1.98	2.04	1.90	1.56	1.02
		0.6	0.0580	0.149	0.216	0.306	0.436	0.615	0.848	1.13	1.45	1.79	2.12	2.36	2.41	2.18	1.71
		0.7	0.0680	0.166	0.240	0.324	0.444	0.616	0.843	1.12	1.45	1.81	2.18	2.51	2.71	2.66	2.28
		0.8	0.0770	0.179	0.260	0.342	0.454	0.612	0.827	1.10	1.43	1.80	2.20	2.57	2.86	2.96	2.73
		0.9	0.0831	0.189	0.275	0.358	0.464	0.609	0.808	1.07	1.40	1.77	2.17	2.57	2.91	3.11	3.04
		1.0	0.0871	0.195	0.287	0.370	0.474	0.608	0.791	1.04	1.35	1.71	2.11	2.53	2.90	3.17	3.21

INSS JOURNAL Vol. 28 2021 C-2

超微小引張試験法を用いた 中性子照射ステンレス鋼の粒界劣化要因の検討

Micro-mechanical investigations about grain boundary degradation factors in neutron-irradiated stainless steels

三浦　照光（Terumitsu Miura）*1　　藤井　克彦（Katsuhiko Fujii）*1　　福谷　耕司（Koji Fukuya）*1

要約　本稿では，これまでに照射誘起応力腐食割れ（IASCC）の機構解明を目的として超微小引張試験法を用いて中性子照射ステンレスの粒界劣化要因について検討した結果を紹介する．まず，開発した超微小引張試験法の概要を示し，次に，同試験法を適用して得られた粒界劣化に関する知見を紹介する．最後に，現時点で考えられるIASCCの機構を示す．中性子照射ステンレス鋼に生じる粒界のミクロ組織と組成の変化のうち，キャビティの形成と粒界偏析に起因する高温水中での選択的な酸化が粒界の結合力を低下させることが，これまでに実施した検討により明らかとなった．これらの劣化要因により結合力が低下した粒界に照射材特有の局所変形により増加した局所応力が作用することで，まず酸化した粒界で割れが生じ，更なる粒界の酸化と破壊を繰り返して微小亀裂が成長し，粒界割れが進展するようになる過程がIASCC機構として考えられた．

キーワード　照射誘起応力腐食割れ，中性子照射，ステンレス鋼，粒界劣化，超微小引張試験

Abstract　In this paper, we explain research activities to date that have examined the grain boundary (GB) degradation factors in neutron-irradiated stainless steels by using micro-tensile testing to elucidate the mechanism of irradiation assisted stress corrosion cracking (IASCC). First, we outline the micro-tensile testing method that we have developed, and then we introduce our findings on GB degradation in neutron-irradiated stainless steels obtained by applying the developed method. Finally, we show the mechanism of IASCC that is based on the presented information. Among the changes in microstructure and microchemistry of GBs that occur in neutron-irradiated stainless steels, the research activities revealed that the formation of GB cavities and the selective oxidation of GBs in high temperature water due to radiation-induced segregation degraded the binding force of GBs. For the IASCC mechanism, three steps were considered. In the first, oxidized GBs cracked by the action of local stress that increased due to localized deformation peculiar to irradiated materials on GBs whose binding force decreased due to the formation of cavities and oxidation. In the second, the micro-cracks on GBs grew by repeated oxidation and fracture of the GBs. In the final step, the grown cracks continued to progress on the GBs.

Keywords　irradiation assisted stress corrosion cracking, neutron irradiation, stainless steel, grain boundary degradation, micro-tensile testing

1. はじめに

原子炉施設の高経年化対策を行う上で，個々の経年劣化事象の機構や発生条件を明らかにすることが重要である．原子炉の構造材料に生じる経年劣化には粒界を破壊の経路とする粒界型応力腐食割れ（intergranular stress corrosion cracking, IGSCC）等があり，腐食や熱あるいは照射により生じる粒界の変化が割れの機構や発生条件と密接に関係すると考えらえる．IGSCCの機構については，図１に示すように，すべり変形が関与して粒界で溶解や酸化が起こると考える説や，粒内よりも破壊強度が低下することで粒界破壊が生じると考える水素脆化等の説がある[(1)]．加圧水型軽水炉（pressurized

＊1　（株）原子力安全システム研究所　技術システム研究所

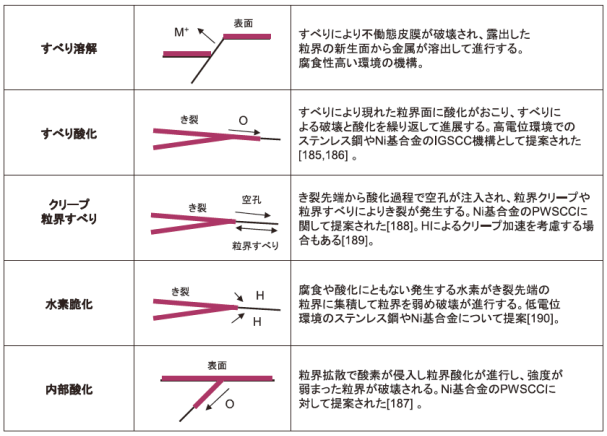


図１　主なIGSCC機構の仮説 [1]

water reactor, PWR）の600合金の割れを例にすると，図１に示したように「内部酸化」,「すべり酸化」,「クリープ，粒界すべり」や「水素脆化」が機構として考えられており，最近では，応力加速による粒界のキャビティ（空孔型欠陥）を主要因とする報告 [2] がある．照射誘起応力腐食割れ（irradiation assisted stress corrosion cracking, IASCC）は中性子照射の影響が加わることで生じるSCCであり，これも粒界を破壊の経路とするIGSCCである．IASCCの最初の発生事例は，1960年代に沸騰水型軽水炉（boiling water reactor, BWR）で認められたステンレス鋼製の燃料被覆管の割れとされており [3]，PWRでは1988年に仏国のBugey ２号機で認められたステンレス鋼製のバッフルフォーマボルト（baffle-former bolt, BFB）の割れである．国内のPWRではIASCCの発生報告はないが，海外では近年もBFBの割れが報告されている [4]．

IASCCは，中性子照射が材料や水環境に影響してこれらを変化させるため，他のSCCよりも複雑な事象となるが，照射した材料を非照射下で試験してもSCCの発生を確認できることから，照射によって生じた材料の変化が機構として最も重要と考えられている．照射による主な材料の変化には，転位ループ等の照射欠陥が材料中に形成することによる照射硬化や粒界でクロム（Cr）やモリブデン（Mo）の濃度が減少し，ニッケル（Ni）やシリコン（Si）の濃度が増加する粒界偏析がある [1]．IASCCの機構にまだ定説はないが，BWRではステンレス鋼のIGSCCのすべり酸化モデル [5][6] を照射硬化と粒界偏析で拡張した説 [7] や照射材特有の局所変形による粒界での応力集中を強調した説 [8]，PWRではクリープ／粒界すべりの促進による説 [9] 等が提案されている．INSSでは，Wasら [8] が提唱する局所変形による粒界での応力集中と，照射と腐食によって粒界に生じるミクロ組織と組成の変化による粒界の結合力の低下がIASCCの発生に関係していると考えている [1][10]．IASCCの対策として，定荷重試験によりIASCC発生しきい線（IASCCが発生するしきい応力と照射量の関係）が評価されており，これを使って発生予測が行われ，BFBの検査時期が設定されている．IASCCの機構が明らかになることで，発生予測を機構論の観点から補強することができ，より合理的なIASCC対策や安全裕度についての説明性の向上が期待できる．

ステンレス鋼の粒界では，中性子照射と腐食により様々な変化が生じる．照射によって粒内に照射欠陥が形成されるとともに，粒界には微細なキャビティが形成される場合がある [11][12]．また，粒界偏析によって粒界組成が変化する．中性子照射による核変換反応により水素（H）とヘリウム（He）が生成され，粒内を拡散したHとHeが粒界に捕捉されて蓄積する可能性がある．また，照射を受けた材料が高温水中で腐食されると，粒界に選択的な酸化が生じる [13]．腐食反応により生じるHについても，一部が材料中に固溶し，核変換反応で生成されたHと同様に粒界に蓄積する可能性がある．これらの粒界におけるミクロ組織と組成の変化は粒界の結合力を低下させ，IASCCの発生を誘起する可能性があるが，それぞれが粒界の結合力にどの程度寄与しているのかは分かっていない．IASCCの機構を明らかにする上で，照射や腐食により生じる粒界の変化と粒界の破壊挙動や結合力との関係を把握することが重要になる．

粒界は隣接する結晶粒の方位関係により，粒界での原子配列が規則的な対応粒界と不規則なランダム粒界（対応粒界ではない大傾角粒界）に大別される．ランダム粒界では粒界のエネルギーが高く [14]，腐食や照射によるミクロ組織や組成の変化が対応粒界よりも大きくなることが知られている．このため，粒界に生じる変化と粒界の破壊挙動や結合力との関係は，多結晶材料中の個々の粒界ごとか，少なくとも同じ性格（対応粒界かランダム粒界）の粒界について調べる必要がある．このための手段としては，単一の粒界のみを含む材料（双結晶材料）を作製して粒界部の機械試験と分析を行う方法と，多結晶材料中の個々の粒界について微視的な機械試験と分析を行う方法が考えられる．前者については，ブリッ

ジマン法と呼ばれる単結晶材料を作製するための加熱炉を使用して双結晶材料を作製する方法が知られているが，実機材料との組織の違いに注意する必要がある．後者については，分析は透過型電子顕微鏡（transmission electron microscope, TEM）等を用いて個々の粒界について行う方法が確立されているが，結晶粒のサイズが一般的に10～100 μmのオーダーであることから，一般の機械試験で取り扱う試験片サイズの1/1000以下のスケールで試験を行う必要がある．

そこでINSSでは，多結晶材料中の個々の粒界から単一の粒界を含むミクロンサイズの試験片を作製し，引張試験により粒界部（粒界とその周辺を含む微小領域）の破壊挙動を調べる手法[15]を開発して，IGSCC等の粒界割れの機構研究に活用してきた．本稿では，これまでにIASCCの機構解明を目的として超微小引張試験法を用いて中性子照射ステンレスの粒界劣化要因について検討した結果を紹介する．まず，開発した超微小引張試験法の概要を述べる．次に，同試験法を適用して得られた粒界劣化に関する知見を紹介する．最後に，現時点で考えられるIASCCの機構を示す．

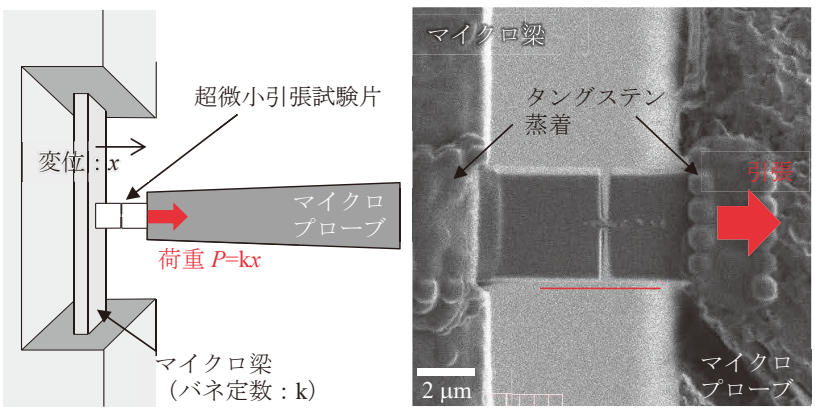
2. 超微小引張試験法の概要

2.1 試験の機構

超微小引張試験法は，多結晶材料中の個々の粒界について粒界部の破壊挙動を引張試験により調べるために開発した微小試験法であり，分析により把握した粒界のミクロ組織および組成との関係を別途検討し，粒界の劣化機構を明らかにすることを目的としている．試験の機構は，集束イオンビーム（focused ion beam, FIB）加工装置（日立ハイテクノロジーズ製NB5000，等）を用いて作製されるミクロンサイズの引張試験片と荷重評価に用いるマイクロ梁および試験片を引っ張る駆動機構としてのマイクロプローブから成る．試験はFIB装置内で，室温かつ真空中で行う．超微小引張試験の概略図と試験前の走査イオン顕微鏡（scanning ion microscopy, SIM）像の例を図２に示す．試験片はマイクロ梁とFIB装置内で３軸方向に移動可能なマイクロプローブに，FIB装置のタングステン蒸着機構を用いて固定される．図２(a)中の右方向にマイクロプローブを動かし，試験片が破断するまで引張試験を行う．試験片にかかる荷重はマイクロ梁の変位とバネ定数から線形弾性論により算出され，バネ定数は超微小硬さ試験機（エリオニクス社製ENT-2100）を用いてマイクロ梁の中央部に荷重を負荷して得た荷重－変位曲線から決定する[16]．試験中のSIM像を録画し，試験片の形状変化とマイクロ梁の変位を記録して試験片の伸びと応力の関係等を評価する．

2.2 超微小引張試験片の作製と応力評価

超微小引張試験片の作製の概略図と試験片の寸法を図３に示す．まず，試料の表面を機械研磨により鏡面研磨まで仕上げ，その後，電子後方散乱回折（electron backscatter diffraction, EBSD）測定を実施して試料表面における粒界の位置と性格を調べる．次に，試験対象とする粒界を粒界性格と粒界の長さや湾曲具合を考慮して選定する．なお，粒界は主にランダム粒界から選定される．FIB加工により，選定した粒界を含む20 × 20 × 10 μm程度のマ



（a）超微小引張試験の概略図　（b）試験前の SIM 像の例

図２　超微小引張試験の概略図と試験前のSIM像の例

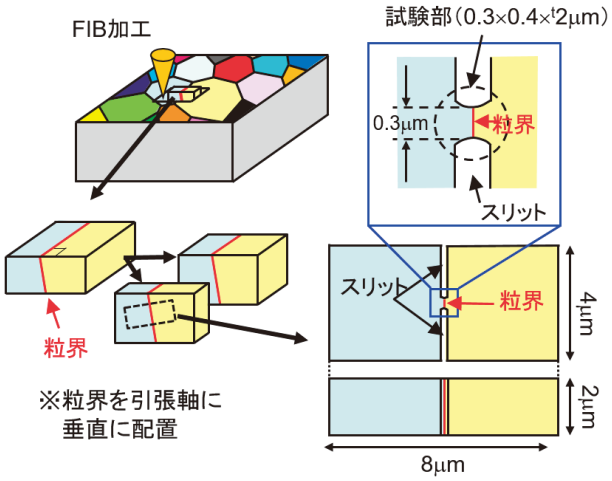


図３　超微小引張試験片の作製の概略図と試験片の寸法

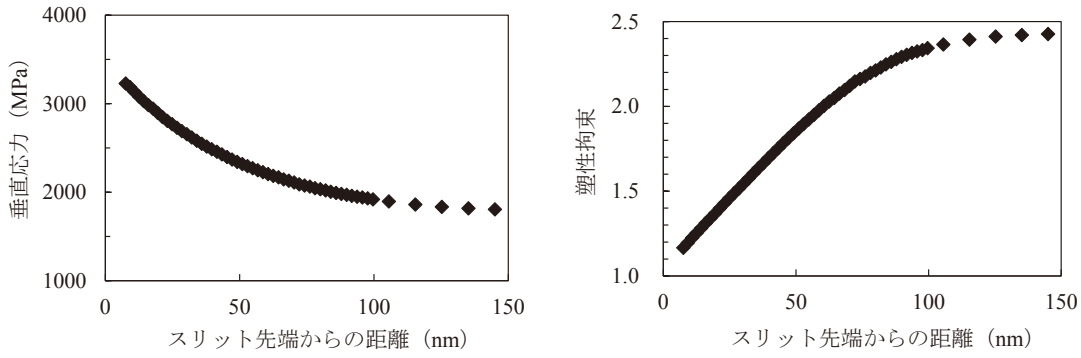
イクロ試料を採取し，マイクロ試料の一部を切断して引張試験片を作製する．粒界は試験片中央に引張軸に対して垂直に配置され，試験片側面からは粒界に沿ってスリットが加工される．スリットの導入は，粒界面に生じる応力を高めて粒界破壊を促進させるとともに，粒界周辺の塑性変形を抑制し，粒界破壊が起こる前に試験片が伸びて延性破壊することを抑える目的がある．

スリットの加工により粒界周辺は多軸応力場となるため，試験片の応力状態を詳細に評価するためには有限要素法（finite element method, FEM）解析等を実施する必要がある．FEM弾塑性解析で求めた粒界面の垂直応力および塑性拘束とスリット先端からの距離の関係の例[17]を図４に示す．この解析では，FeSn合金を対象として，試験片破断時の荷重に相当する引張応力を負荷した際の粒界面の垂直応力と塑性拘束の分布を計算している．なお，スリット先端から150 nmの位置が試験片中央に相当する．粒界面にはスリット先端で最大値となる応力分布が生じているが，粒界破壊はスリット先端からではなく，塑性拘束が強くなる試験部の内部側から生じることが本解析[17]と実際の破面観察において粒界破面が試験片の内部側に認められる傾向にあることから分かっている．なお，粒界破壊に要する応力については，粒界破壊の起点を厳密に特定することが難しいことから，試験片破断時の試験部の平均応力（破断応力と定義）を用いて評価することとしている．図４に示した解析結果における破断応力は2200 MPaであり，試験片内部側の応力値とおおむね一致しており，破断応力を粒界破壊に要する応力の評価に用いることは妥当な方法であると考えられる．

2.3　マイクロ梁による荷重評価

一般の引張試験では試験機のロードセル等を用いて荷重が評価されるが，本手法ではマイクロ梁を用いて荷重を評価する．マイクロ梁は，FIB加工によりSi単結晶の板に作製した長さ100～200 μm，断面10×10 μm程度の片持ちあるいは両端固定の梁である．マイクロ梁に固定した試験片を引っ張り，その際のマイクロ梁の変位を測定し，マイクロ梁のバネ定数から試験片にかかる荷重を算出する．試験中のSIM像と走査型電子顕微鏡（scanning electron microscope, SEM）像の例[18]を図５に示す．なお，SEM像については，マイクロ梁の変位が約500 nm進むごとに観察しており，破断直前の像は観察していない．

片持ち梁形状のマイクロ梁を使用する場合は，引張応力に加えて曲げモーメントも試験片に作用する



（a）垂直応力　　（b）塑性拘束

図４　FEM弾塑性解析で求めた粒界面の垂直応力および塑性拘束とスリット先端からの距離の関係の例
（文献[17]のデータを引用して示す）

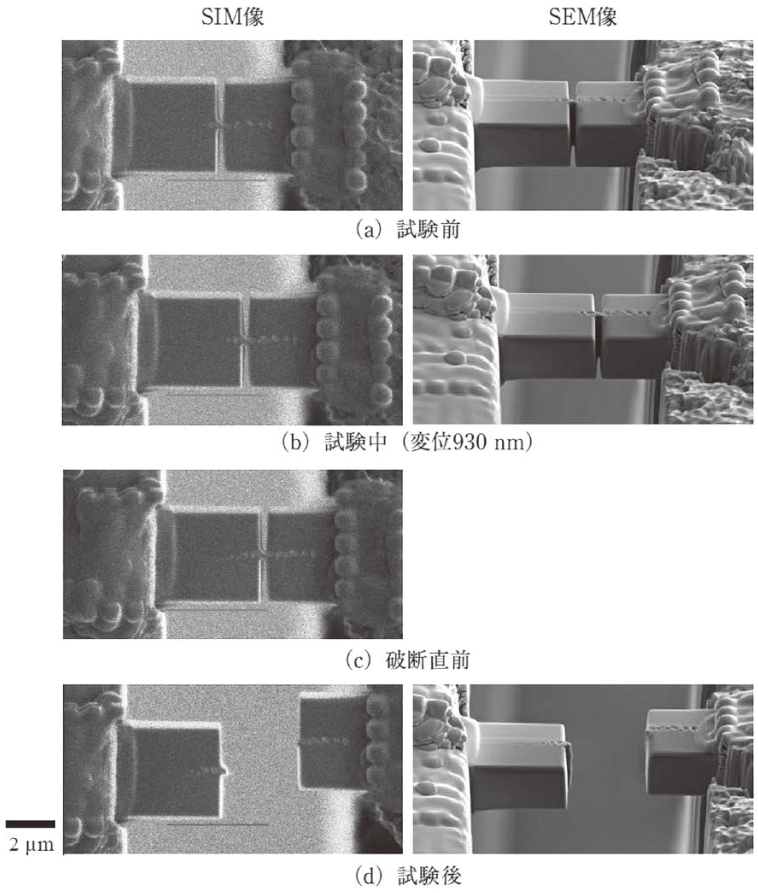


図５　超微小引張試験中のSIM像とSEM像の例 [18]

ため，正確な応力評価にはFEM解析が必要になる[15]．一方，両端固定型のマイクロ梁を用いる場合は，曲げモーメントが発生せず，一軸上の引張応力のみ負荷できる．負荷したい応力の状況によって，片持ち梁か両端固定梁かを選択する．

マイクロ梁のバネ定数は梁の寸法に依存しており，引張試験時に想定される最大応力とSIM像の視野の大きさを考慮して，最適なバネ定数になるようにマイクロ梁の寸法を調整する必要がある．バネ定数が大きすぎると，小さな変位で大きな荷重がかかるため，SIM像の空間分解能（１ピクセル分の変位）に相当する荷重が大きくなり，荷重や応力評価の分解能が悪くなる．また，逆の場合は，荷重分解能は良くなるが，視野を逸脱するような変位を与えても荷重が小さくて試験片が破断に至らない場合があり，破壊挙動の評価が難しくなる．試験には500～600 N/mのバネ定数のマイクロ梁を用いており，スリットで挟まれた試験部に対して，平均応力で約6000 MPaまでの応力を約20 MPaの分解能で負荷できる条件で試験している．

2.4　駆動機構としてのマイクロプローブの使用

試験片を引っ張るためには，試験片を保持して動かすことができる駆動機構が必要になる．本手法では，FIB装置に付属する日立ハイテクノロジーズ製のマイクロサンプリングプローブを駆動機構として用いており，試験片の加工とマイクロ梁への固定から引張試験までをFIB装置内で完結することができる．マイクロプローブはFIB装置内に装荷した試料等に対して45度の俯角で設置されており，その先端は数μmの断面径になっているため，プローブ自体は一軸上に動かすことができるが，試験片と固定して引っ張る際にプローブがしなり，試験片に若干の曲げモーメントが生じる．このため，断面径の細いマイクロプローブの先端部を切断し，断面径が約100 μmになるまで太くして使用することでしなりを抑制している．また，最近は，FIB装置に装荷可能な三軸方向にピエゾ駆動できる引張試験ホルダー（三友製作所製引張試験用試料ホルダー）を新たに開発し，引張速度のデジタル制御や完全な一軸上で

の引張試験の実施が可能となっている．

3. 中性子照射ステンレス鋼の粒界劣化要因

3.1 中性子照射ステンレス鋼の粒界部の破壊挙動

最初に，中性子照射ステンレス鋼の粒界部の破壊挙動を超微小引張試験で調べた結果[19]～[21]を紹介する．試験にはPWRで使用された316ステンレス鋼製のフラックスシンブルチューブ（flux thimble tube, FTT）材とBFB材が用いられ，照射量はFTT材が17 dpaと73 dpa，BFB材が19 dpaであった．これらの材料について，ランダム粒界を対象に超微小引張試験が実施された[19][20]．73dpaのFTT材の試験片破面[20]を図6に示す．73 dpaのFTT材では破面のほぼ全面に粒界破壊が確認された．一方，17 dpaのFTT材では破面の一部にのみ粒界破壊が認められ，19 dpaのBFB材では粒界破壊の様子は認められず，試験片は粒内で延性破壊した[19]．試験片の粒界破面率と照射量の関係[19][21]を図7に示す．なお，粒界破面率は粒界破面の断面積を試験前の試験部の断面積で除した値で定義している．73 dpaのFTT材では破面のほぼ全面で粒界破面が認められたが，試験片が破断するまでに試験部が絞られており，粒界破面率は50%であった[21]．照射量が高いほど，粒界破面率が高くなった．また，17 dpaのFTT材では粒界破壊が確認されたものの，19 dpaのBFB材では粒界破壊は確認されず，粒界の結合力はBFB材よりFTT材の方が低下している可能性が示唆された[19]．

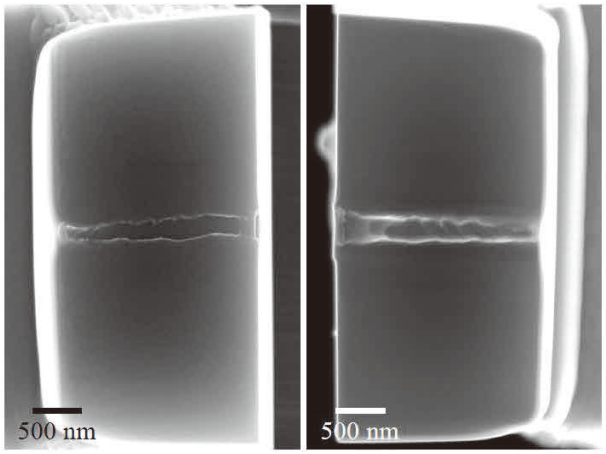


図6　超微小引張試験片の破面（FTT材-73dpa）[20]

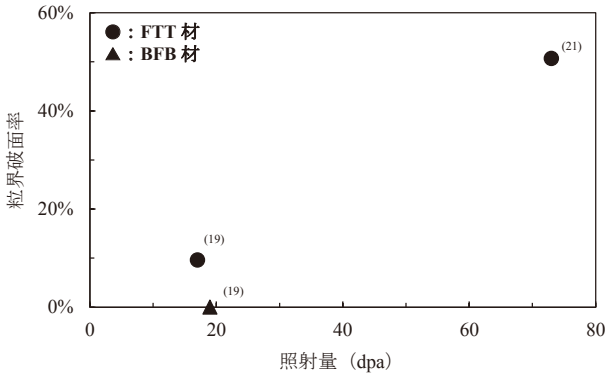


図7　試験片の粒界破面率と照射量の関係（中性子照射ステンレス鋼）

中性子照射ステンレス鋼の粒界のミクロ組織を図8に示す．図はアンダーフォーカス条件で撮影された明視野像であり，キャビティが形成されていれば，小さなものは暗いコントラストに縁取られた明るい輝点状の像として観察される．FTT材では粒内と粒界に直径約1 nmのキャビティの像が認められたが，BFB材では粒内にのみキャビティの像が認められた[21]．また，73 dpaのFTT材では，17 dpaのFTT材や19 dpaのBFB材と比べて，キャビティの像がより多く，明確に観察された．図8(d)に示した粒界を傾斜させて観察したミクロ組織では，キャビティの像が粒界のコントラストの両端に偏在している傾向が認められた．観察試料（厚さ

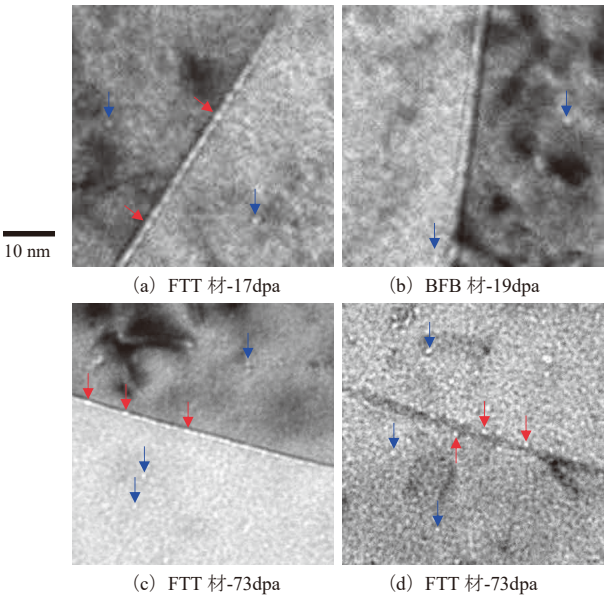


図8　中性子照射ステンレス鋼の粒界のミクロ組織
(a)(b)(c)は粒界を垂直に立てて，(d)は粒界を傾斜させて撮影したアンダーフォーカス像を示す．代表的な粒内のキャビティ像を青矢印で，粒界上のキャビティ像を赤矢印で示す．

100 nm以下の薄膜）は電解エッチングで作製されており[21]，電解エッチングの際に微細なエッチピット（くぼみ）が試料表面に形成すると，キャビティに似た像として観察される可能性がある[11]．また，粒界転位が存在すると，その転位芯が小さなキャビティに似た像を示すため，粒界キャビティと粒界転位を混同する可能性もある．試料表面のエッチピットや粒界転位による像は主に粒界のコントラストの端部に現れるため，図８に示した粒界キャビティの像はエッチピットや粒界転位を含む可能性がある．図９は，観察された粒界上のキャビティの像から算出した粒界キャビティの面密度（粒界の単位面積辺りのキャビティの像の数で定義）と照射量の関係[21]を示す．粒界キャビティ（エッチピットや粒界転位を含む）の面密度は，FTT材では照射量の増加に伴って増加している．エッチピットや粒界転位を一部混同している可能性があるが，FTT材では照射によって粒界キャビティが形成し，照射量が増すとともに粒界キャビティが増加していると考えられる[21]．

中性子照射ステンレス鋼の粒界偏析量と照射量の関係[1]を図10に示す．粒界偏析量は粒界組成とバルク組成の差分で定義している．粒界偏析により粒界のCrとMoの濃度が減少し，NiとSiの濃度が増加する．粒界組成は，照射量が10 dpa程度までに大きく変化し，それ以上の高照射量域ではゆるやかに変化する傾向を示す．なお，図10に示したデータはFTT材について測定されたものであるが，BFB材についてもFTT材と同等の粒界偏析が確認されている[22]．

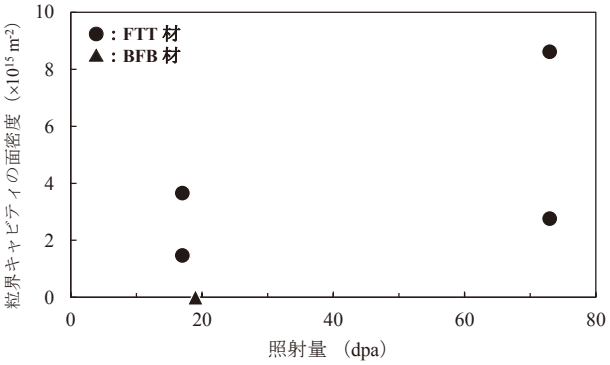


図９　中性子照射ステンレス鋼の粒界キャビティの面密度と照射量の関係　（文献[21]のデータを引用して示す）

粒界キャビティの数密度や粒界偏析量は照射量が増加するとともに増えており，試験片の粒界破面率の照射量に対する傾向と一致している．粒界キャビティの形成と粒界偏析は粒界の結合力を低下させ，粒界破壊を生じさせる要因であることがこれらの結果[19]～[21]から示唆された．しかし，粒界偏析については，19 dpaのBFB材を試験しても，十分に粒界偏析が進んでいたにもかかわらず粒界破壊が認められていないことから，単独で粒界の結合力を強く低下させる可能性は低いと考えられる．また，

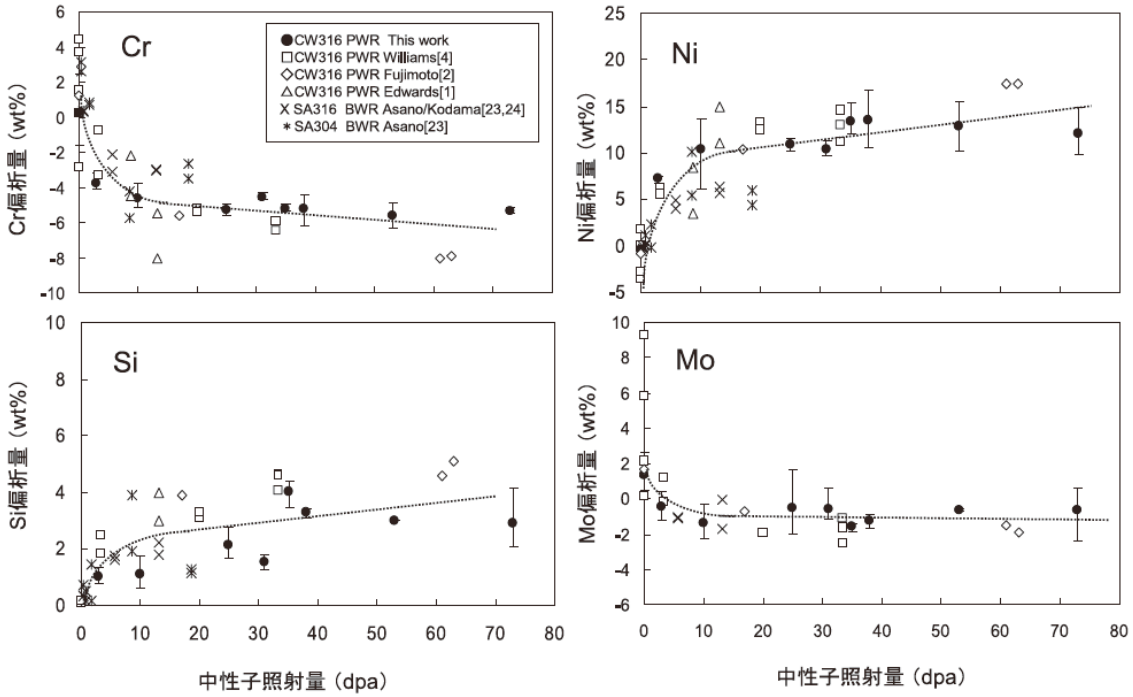


図10　中性子照射ステンレス鋼の粒界偏析量と照射量の関係[1]

FTT材の方がBFB材よりも粒界の結合力が低下している可能性が示唆された[19]が，その原因としてBFB材では粒界キャビティが形成していないことが関係する可能性がある．

3.2 Heイオン照射したステンレス鋼の粒界部の破壊挙動

3.1項では，粒界キャビティの形成と粒界偏析が中性子照射ステンレス鋼の粒界劣化要因として寄与していることを示唆する結果を紹介した．本項では粒界キャビティの形成に着目し，粒界キャビティの単独の影響を検討するために実施されたHeイオン照射したステンレス鋼の粒界部の超微小引張試験の結果[16][23]を紹介する．Heイオン照射では，はじき出し損傷（格子間原子と空孔ペア）の形成に加えて，キャビティを安定化させるHeを同時に注入できるため，キャビティが形成し難い高い照射速度や低い照射温度の照射条件でもキャビティが形成できる．一方で，高い照射速度や低い照射温度の条件では粒界偏析が起こり難く，粒界偏析の影響と区別して，粒界の結合力に対する粒界キャビティの影響を検討することができる．

試験には，若狭湾エネルギー研究センターの200 kVマイクロ波イオン源イオン注入装置を用いて，室温あるいは300℃でHeイオンを照射された316ステンレス鋼の15%冷間加工材が用いられた[16][23]．粒界キャビティの直径と数密度を幅広く変化させるため，照射した材料の一部が650℃等で熱処理され，粒界キャビティを成長させた材料も準備された．Heイオン照射したステンレス鋼の粒界のミクロ組織[23]を図11に示す．アンダーフォーカス条件で撮影された明視野像であり，図中ではHeバブルと記載されているものがキャビティである．Heイオンの注入量を0.05at%（500 appm）から6at%（60000 appm）まで変えており，図の見出しに温度が表記されているものはその温度で熱処理された材料である．照射のみの材料では直径約1 nmのキャビティが粒内と粒界に形成しており，熱処理をした材料では直径約10 nmの粗大なキャビティが形成している．なお，観察試料はイオンミリングで作製されており[23]，中性子照射ステンレス鋼の場合と異なり，エッチピットの様なくぼみは生じ難い．また，粒界を傾斜させて粒界キャビティの位置が確かめられており，中性子照射ステンレス鋼のような粒界のコントラストの両端に偏在する不均一な分布は認められ

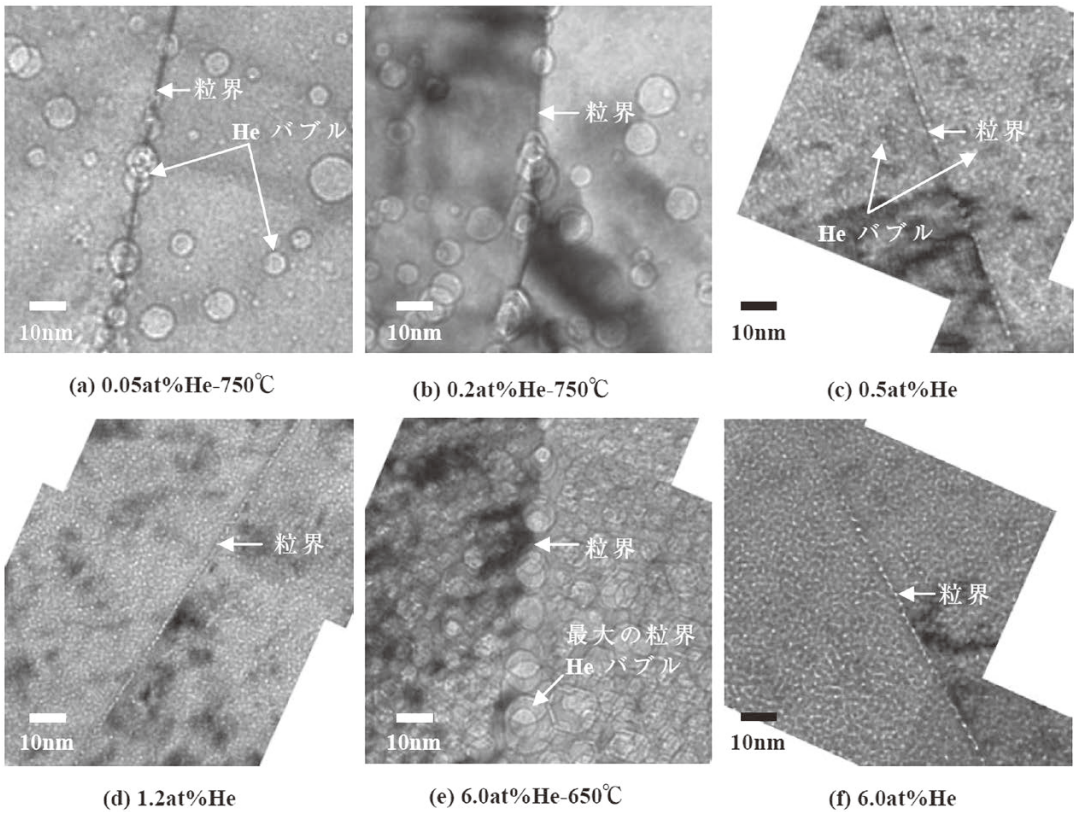


図11　Heイオン照射したステンレス鋼の粒界のミクロ組織[23]

ていない．このため，本試験では粒界キャビティの像は全てキャビティとして扱っている [16][23]．

これらの材料のランダム粒界について超微小引張試験が実施された結果 [16][23]，He注入量が1.2at%以上の材料では粒界破壊が認められた．試験片の破壊モードを粒界キャビティの平均間隔と粒界被覆率（粒界の面積に占める粒界キャビティの面積比）で整理した結果を図12に示す．粒界キャビティが数多く形成し，その平均間隔が狭くなると，粒界破壊が起こるようになる傾向が認められた [16][23]．熱処理でキャビティを成長させた材料では，粒界被覆率は大きくなったが，キャビティの平均間隔は広くなり，試験では粒界面のキャビティ間が伸びて延性破壊する粒界延性破壊が生じた．

粒界にキャビティが形成されると，引張応力が負荷された際に粒界キャビティ同士が合体して粒界面に微小亀裂を形成し，これが粒界破壊の起点になると考えられる．粒界キャビティの間隔が狭いと，粒界キャビティ同士の合体が容易になり，粒界面での微小亀裂の形成と成長が促進されるため，粒界破壊の発生は粒界キャビティの粒界被覆率ではなく平均間隔に影響されると考察された [16][23]．中性子照射ステンレス鋼の粒界劣化要因として考えられる粒界キャビティの形成と粒界偏析のうち，粒界キャビティの形成は単独で粒界の結合力を低下させる要因であることが本試験 [16][23] により明らかにされた．

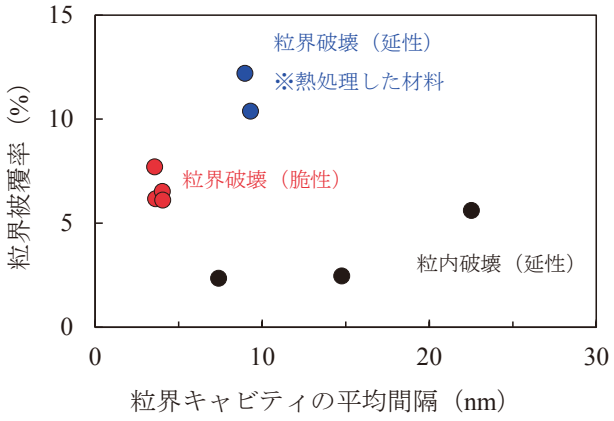


図12　試験片の破壊モードと粒界キャビティの平均間隔および粒界被覆率との関係
（Heイオン照射したステンレス鋼，文献 [16] のデータを引用して示す）

3.3　腐食試験した中性子照射ステンレス鋼の粒界部の破壊挙動

前述の3.1項と3.2項では，中性子照射によって直接的に生じる粒界のミクロ組織と組成の変化と粒界劣化の関係を検討した結果を紹介した．本項では，粒界偏析に起因して高温水中での腐食を介して生じる粒界の選択的酸化と粒界劣化の関係を検討した結果 [18][20] を紹介する．高温水中で中性子照射ステンレス鋼を腐食試験すると粒界に選択的な酸化が生じることが分かっており，照射量が高いほど深くまで粒界が酸化される傾向にある [13]．未照射のステンレス鋼であっても高温水中で一部の粒界が酸化される例 [24] が報告されているが，中性子照射ステンレス鋼の場合は，3 dpa程度の比較的低い照射量であってもランダム粒界のほぼ全てに選択的な酸化が確認される [13]．中性子照射ステンレス鋼の粒界の酸化は，粒界偏析によって耐食性に関係する元素であるCrが粒界から減少することが関係していると考えられる [13]．JIS規格で規定されているSUS316ステンレス鋼のCr濃度は16～18%であるが，高照射されたステンレス鋼では，粒界偏析により12%程度まで粒界のCr濃度が低下する [1]．

320℃のPWR一次系模擬環境で約1000時間の腐食試験に供された照射量73 dpaのFTT材の粒界部の断面 [13] を図13に示す．粒界に沿って数100 nmの選択的な酸化が確認される．本材料について，酸化した粒界とその周囲の内層酸化膜を対象に超微小引張試験が実施された結果 [18]，酸化した粒界を含む試験片では酸化した粒界に沿って割れが生じて試験片が破断し，内層酸化膜の試験片では酸化膜が割

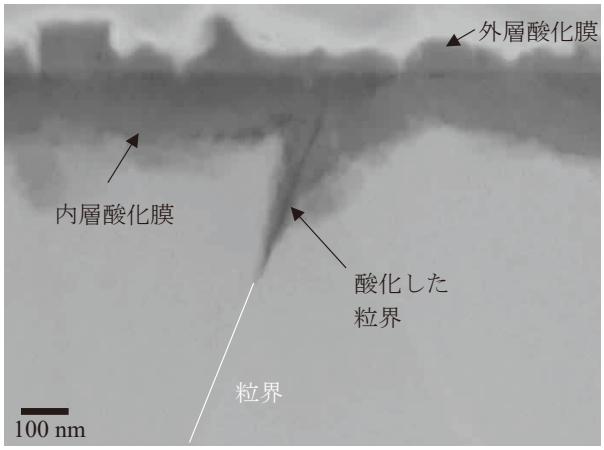


図13　腐食試験した中性子照射ステンレス鋼の粒界部の断面（FTT材-73dpa）[13]

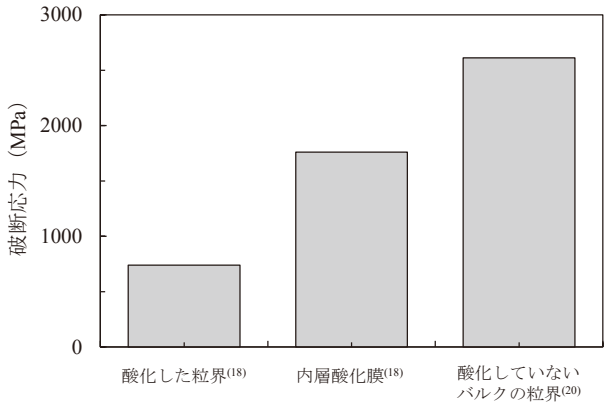


図14　酸化した粒界と内層酸化膜および酸化していないバルクの粒界部の破断応力の比較（FTT材-73dpa）

れて試験片が破断した．試験片の破断応力を，酸化した粒界と内層酸化膜および同材料の酸化していないバルクの粒界部[20]で比較した結果を図14に示す．酸化した粒界の破断応力は1100 MPaであり，内層酸化膜の破断応力1800 MPaの約1/2であり，また，酸化していないバルクの粒界部の破断応力2600 MPaの約1/3であった．高照射されたステンレス鋼の粒界が酸化されると，粒界の結合力が約1/3に低下することが示された．酸化した粒界の破壊強度は周囲の内層酸化膜より低く，高温水中で中性子照射ステンレス鋼に応力が負荷されると，破壊強度の低い酸化した粒界で割れが生じ，これが粒界割れの起点となり，更なる粒界の酸化と破壊を繰り返して粒界割れが進展する過程が考えられる[18]．

4. 中性子照射ステンレス鋼の粒界劣化とIASCC機構

中性子照射ステンレス鋼の粒界では，照射によってキャビティが形成される場合があるとともに，粒界偏析が生じて組成が変化する．粒界偏析によりCr濃度が低下した粒界では高温水中で選択的な酸化が生じる．また，中性子照射による核変換反応や腐食反応により生じるHとHeが粒界に蓄積する可能性がある．前章で紹介したこれまでに超微小引張試験法を用いて行った検討により，これらの粒界の変化のうち，キャビティの形成と酸化は粒界の結合力を低下させることが明らかとなった．粒界偏析については，19 dpaのBFB材の超微小引張試験の結果を踏まえると，単独で粒界の結合力を強く低下させる可能性は低いと考えられたが，粒界キャビティの形成等の他の粒界劣化要因と合わさった場合の影響については明らかではなく，詳細な検討が今後必要である．粒界キャビティの形成と粒界の酸化による粒界劣化の観点から，IASCC機構について以下に考察する．

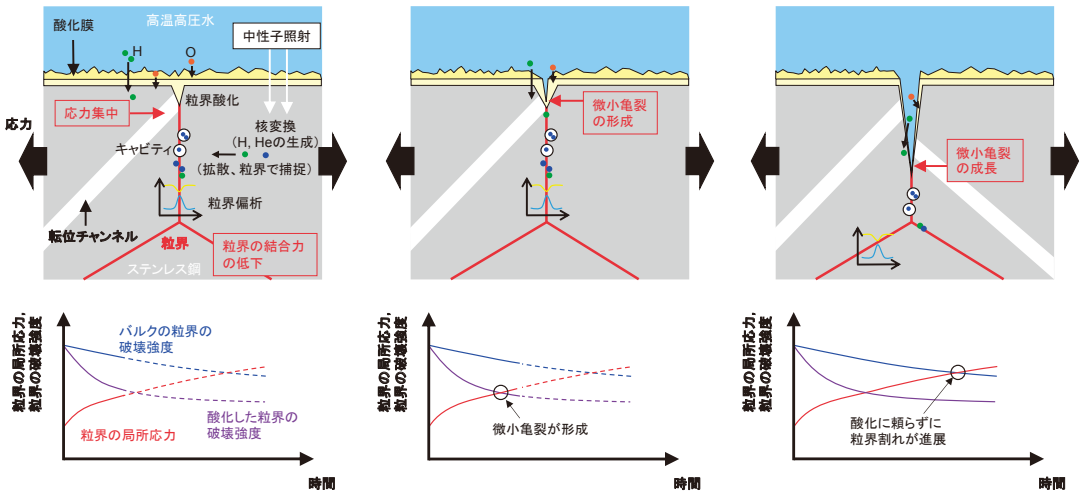
Fujimotoら[12]は，PWRと高速増殖炉（fast breeder reactor, FBR）でそれぞれ中性子照射されたステンレス鋼をPWR一次系模擬環境中で低ひずみ速度引張（slow strain rate tensile, SSRT）試験した結果，PWR照射材に比べてFBR照射材ではIASCC感受性が大きく低下する（粒界破面率が低い）ことを報告している．彼らの報告では，PWR照射材とFBR照射材で同等の照射硬化と粒界偏析が確認されたが，材料中のHとHeの量はFBR照射材ではPWR照射材よりも極めて少なく，また，PWR照射材では粒内と粒界でともにキャビティの形成が認められたが，FBR照射材では粒内にのみキャビティの形成が認められた．PWRとFBRでは中性子スペクトルが異なるため，核変換反応によって生成されるHとHeの量がFBR照射材では著しく少ない[1]ことが知られている．この報告[12]は，硬さと粒界偏析，そしておそらく粒界の酸化についてはPWR照射材とFBR照射材で同等であったものの，粒界キャビティが形成されていないとIASCCの発生に強く影響する可能性を示唆する．

3.3項では，高温水中で中性子照射ステンレス鋼に応力が負荷されると，破壊強度の低い酸化した粒界で割れが生じ，これが粒界割れの起点となり，更なる粒界の酸化と破壊を繰り返して粒界割れが進展する過程が考えられることを紹介した．粒界が酸化される深さは1000時間の腐食試験で数100 nmであり，粒界の酸化深さを腐食試験時間で除した見かけの酸化速度は10^{-11} mm/sのオーダーと小さい．IASCCの発生試験で認められる見かけの亀裂進展速度（粒界割れの平均深さをSSRT試験の時間で除したもの）はおおよそ10^{-6} mm/sのオーダー[1]であり，粒界の酸化と破壊を繰り返すだけではIASCCの進展速度を説明することは難しい．微小亀裂がある程度成長すると，亀裂先端の応力集中が増し，酸化に頼らずとも亀裂が進展するようになると考えられる．しかし，Fujimotoら[12]の報告ではFBR照射材は低いIASCC感受性を示しており，粒界にキャビティが形成してバルクの粒界の結合力が低下していないと，微小亀裂が成長しても粒界割れが進展しないと考えられる．

IASCC機構については，「はじめに」で述べたよ

うに複数の機構が提案されている．これらのうち，Wasら[8]が提唱している照射材特有の局所変形による粒界での応力集中は，キャビティと酸化による粒界劣化と合わさってIASCCの発生を加速する可能性がある．照射により転位ループ等の照射欠陥が高密度に形成された金属にすべり変形が起こると，移動する転位が照射欠陥と相互作用してこれらの一部を除去し，転位チャンネルと呼ばれる照射欠陥が減少したパスが転位の移動経路に沿って形成される．転位チャンネル内の変形抵抗は周囲よりも小さくなるため，後続のすべり変形は既存の転位チャンネルに集中して起こるようになり，未照射の金属と比較して粗大なすべり変形が照射された金属で起こるようになる．転位チャンネルが粒界に到達した際に，隣接粒にすべり変形が伝播せずに粒界で転位チャンネルが停止すると，粒界と転位チャンネルの交点で転位が止まり（転位のパイルアップと呼ぶ），局所応力が発生する．停止した転位チャンネルに後続のすべり変形が加わると，粒界でパイルアップする転位が増え，粒界の局所応力が増加する．粒界の局所応力が増加することで隣接粒にすべりが伝播すれば，転位のパイルアップが解消される場合があるが，解消されない場合は外力の３～４倍に相当する局所応力に達する場合があることがFEM解析を用いた計算で評価されている[25]．高照射されたステンレス鋼のIASCC発生しきい応力は400～500 MPaであり[1]，この程度の外力が加わった際に，粒界には最大で2000 MPaの局所応力が加わると考えられる．超微小引張試験で評価した酸化した粒界の破断応力は1100 MPa[18]であり，粒界に～2000 MPaの局所応力が加われば，酸化した粒界が開口してIASCCの起点になる可能性がある．

IASCC機構の仮説を図15にまとめる．照射により転位ループ等の照射欠陥が形成されることで，転位チャンネルを形成して粗大なすべり変形が生じるようになり，粒界に作用する局所応力が増加する．一方で，粒界にはキャビティが形成されるとともに，粒界偏析により高温水中で選択的に粒界が酸化されるようになり，粒界の結合力が低下する．粒界の局所応力が酸化した粒界の破壊強度を上回ると粒界に微小亀裂が形成され（図15(b)），更なる粒界の酸化と破壊を繰り返して微小亀裂が成長する．亀裂先端の応力がキャビティの形成によって弱化したバルクの粒界の破壊強度を上回るようになると，酸化に頼らずに亀裂が粒界を進展するようになる（図15(c)）．中性子照射ステンレスの粒界劣化の観点から考察すると，このような過程がIASCCの機構として考えられる．



（a）照射初期　（b）微小亀裂の形成　（c）微小亀裂の成長と粒界割れの進展

図15　IASCC機構の仮説

5. まとめ

本稿では，これまでに超微小引張試験法を用いて中性子照射ステンレスの粒界劣化要因について検討した結果を紹介し，現時点で考えられるIASCCの機構を示した.

- 中性子照射ステンレス鋼に生じる粒界のミクロ組織と組成の変化のうち，キャビティの形成と粒界偏析に起因する高温水中での選択的な酸化が粒界の結合力を低下させることが，これまでに実施した検討により明らかとなった.
- これらの劣化要因により結合力が低下した粒界に照射材特有の局所変形により増加した局所応力が作用することで，まず酸化した粒界で割れが生じ，更なる粒界の酸化と破壊を繰り返して微小亀裂が成長し，粒界割れが進展するようになる過程がIASCC機構として考えられた.

文献

(1) 福谷耕司，西岡弘雅，藤井克彦，ステンレス鋼の軽水炉照射挙動，INSS MONOGRAPHS No.4，株式会社原子力安全システム研究所，(2009).
(2) 寺地巧，山田卓陽，岡本マキエ，有岡孝司，TT690合金のSCCに関する知見と今後の課題，INSS JOURNAL, 25（2018）C-2.
(3) G.S. Was, Fundamentals of Radiation Materials Science: Metals and Alloys, Springer, New York（2017）.
(4) M.R. Ickes, J. McKinley, J.-K. Lee, J.M. Smith, A.M. Ruminski, M.A. Burke, Irradiation-assisted stress corrosion cracking of Type 347 and Type 316 steels irradiated in commercial pressurized water reactors, J. Nucl. Mater. 536（2020）152182.
(5) P.L. Andresen, F.P. Ford, Life prediction by mechanistic modeling and system monitoring of environmental cracking of iron and nickel alloys in aqueous systems, Mater. Sci. Engineering: A 103（1988）167-184.
(6) T. Shoji, Z. Lu, H. Murakami, Formulating stress corrosion cracking growth rates by combination of crack tip mechanics and crack tip oxidation kinetics, Corrosion Sci. 52（2010）769-779.
(7) M. Koshiishi, T. Hashimoto, R. Obata, Application of the FRI crack growth model for neutron-irradiated stainless steels in high-temperature water of a boiling water reactor environment, Corrosion Sci. 123（2017）278-288.
(8) G.S. Was, D. Farkas, I.M. Robertson, Micromechanics of dislocation channeling in intergranular stress corrosion crack nucleation, Current Opinion in Solid State and Materials Science 16（2012）134-142.
(9) B. Margolin, A. Sorokin, N. Pirogova, A. Toivonen, F. Sefta, C. Pokor, Analysis of mechanisms inducing corrosion cracking of irradiated austenitic steels and development of a model for prediction of crack initiation, Engineering Failure Analysis 107（2020）

104235.
(10) K. Fukuya, K. Fujii, H. Nishioka, Y. Kitsunai, Evaluation of Microstructures and Microchemistry in Cold-work 316 Stainless Steels under PWR Irradiation, J. Nucl. Sci. Technol. 43 (2006) 159-173.
(11) D.J. Edwards, F.A. Garner, S.M. Bruemmer, P. Efsing, Nano-cavities observed in a 316SS PWR flux thimble tube irradiated to 33 and 70 dpa, J. Nucl. Mater. 384 (2009) 249-255.
(12) K. Fujimoto, T. Yonezawa, E. Wachi, Y. Yamaguchi, M. Nakano, R.P. Shogan, J.P. Massoud, T.R. Mager, Effect of the accelerate irradiation and hydrogen/helium gas on IASCC characteristics for highly irradiated austenitic stainless steels, in: Proc.12th Int. Conf. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems - Water Reactors, Salt Lake City, UT, USA, 2005.
(13) 福村卓也，三浦照光，藤井克彦，福谷耕司，橘内裕寿，照射ステンレス鋼の粒界酸化挙動，INSS JOURNAL, 27 (2020) NT-8.
(14) R. Sumi, N. Toda, H. Fujii, S. Tsurekawa, Impact of a magnetic field on grain boundary energy in 99.9% iron and iron-tin alloy, Rev. Adv. Mater. Sci. 21 (2009) 35-43.
(15) 藤井克彦，福谷耕司，粒界強度測定のためのFIB 装置内引張試験法の開発，INSS JOURNAL, 17 (2010) 172-177.
(16) T. Miura, K. Fujii, H. Nishioka, K. Fukuya, Micro-mechanical investigation for effects of helium on grain boundary fracture of austenitic stainless steel, J. Nucl. Mater. 457 (2015) 279-290.
(17) 三浦照光，藤井克彦，西岡弘雅，福谷耕司，照射ステンレス鋼の粒界破壊に及ぼすHe影響の検討（その２）-照射誘起偏析との重畳効果-，INSS JOURNAL, 21 (2014) NT-6.
(18) 三浦照光，藤井克彦，福谷耕司，中性子照射ステンレス鋼の粒界酸化部の破壊特性の評価，INSS JOURNAL, 25 (2018) NT-5.
(19) T. Miura, K. Fujii, K. Fukuya, A micro-mechanical study of grain boundary fracture in neutron-irradiated stainless steels, in: Proc. 2017 Int. Cong. on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP 2017), Fukui and Kyoto, Japan, April 24-28, 2017.
(20) T. Miura, K. Fujii, K. Fukuya, Y. Kitsunai, Fracture behavior of oxidized grain boundary in neutron-irradiated stainless steel, in: Proc. 19th Int. Conf. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems - Water Reactors, Boston, MA, August 18-22, 2019.
(21) T. Miura, K. Fujii, K. Fukuya, in preparation.
(22) K. Takakura, K. Nakata, K. Fujimoto, K. Sakima, N. Kubo, IASCC Properties of Cold Worked 316 Stainless Steel in PWR Primary Water, in: Proc. 14th Int. Conf. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems, Virginia Beach, VA, August 23-27, 2009.
(23) 三浦照光，藤井克彦，福谷耕司，照射ステンレス鋼の粒界破壊に及ぼすHe影響の検討，INSS JOURNAL, 20 (2013) NT-9.
(24) T. Couvant, D. Haboussa, S. Meunier, G. Nicolas, E. Julan, K. Sato, F. Delabrouille, A simulation of IGSCC of austenitic stainless steels exposed to primary water, in: Proc. 17th Int. Conf. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems - Water Reactors, Ontario, Canada, August 9-12, 2015.
(25) P. Evrard, M. Sauzay, Modelling of the effect of dislocation channel on intergranular microcrack nucleation in pre-irradiated austenitic stainless steels during low strain rate tensile loading, J. Nucl. Mater., 405 (2010) 83-94.

鉛直管における蒸気と空気の混合気体からの凝縮伝熱

Condensation heat transfer from steam-air mixture in a vertical pipe

村瀬　道雄（Michio Murase）*1　　歌野原　陽一（Yoichi Utanohara）*1
細川　茂雄（Shigeo Hosokawa）*2　　冨山　明男（Akio Tomiyama）*3

要約　本報では，鉛直管における蒸気と空気の混合気体の流れ方向・半径方向の温度分布データおよび凝縮熱流束 q_c と凝縮熱伝達率 h_c に関する著者らの研究について述べた．非凝縮性気体を含む凝縮伝熱実験は多く実施され，多くの h_c の相関式が提案されており，多くの三次元計算が実施されているが，計算結果の検証データは流れ方向一次元分布であり凝縮面からの距離 y に対する分布データは極めて少ない．そこで本研究では，蒸気と非凝縮性気体の混合気体に対する三次元計算における凝縮伝熱モデル検証データの提供を主目的として，直径 49.5 mm，冷却長さ 610 mm の鉛直管および蒸気と空気の混合気体を用いた凝縮伝熱実験を行い，流れ方向と半径方向の温度分布データを取得した．取得した温度分布データから q_c と h_c を求め，熱輸送と物質輸送の相似則や拡散層モデルに基づく従来相関式で h_c を評価できることを確認した．また，飽和温度より約 100 ℃高い過熱蒸気と空気の混合気体での温度分布を測定し，q_c と h_c を求め，飽和温度からの凝縮伝熱として扱えば従来相関式で h_c を評価できることを明らかにした．

キーワード　鉛直管，凝縮，熱流束，熱伝達率，非凝縮性気体，温度分布

Abstract　In this review, we presented our studies on axial and radial temperature distributions of steam-air mixture in a vertical pipe, condensation heat flux q_c, and condensation heat transfer coefficient h_c. Many experiments on condensation in the presence of non-condensable gases have been carried out, many correlations for h_c have been proposed, and many three-dimensional computations have been done. Most of the validation data for three-dimensional computations are one-dimensional in the flow direction, and distributions as a function of the distance y from the condensation surface are few. Therefore, we carried out experiments on condensation heat transfer from the steam-air mixture in a vertical pipe with the diameter of 49.5 mm and the cooling length of 610 mm, and we measured axial and radial temperature distributions of the mixture, mainly to offer validation data for heat transfer models in three-dimensional computations. We obtained q_c and h_c from the temperature distributions, and confirmed that h_c was expressed by an existing correlation based on the analogy between heat and mass transfers or the diffusion layer model. We also measured temperature distributions of superheated steam-air mixture at about 100 °C higher than the saturated temperature, obtained q_c and h_c, and found that an existing correlation could predict h_c with the assumption of condensation from the saturated conditions.

Keywords　vertical pipe, condensation, heat flux, heat transfer coefficient, non-condensable gas, temperature distribution

1.　はじめに

軽水炉(加圧水型原子炉 PWR と沸騰水型原子炉 BWR)での冷却材喪失事故（LOCA）やシビアアクシデント（SA）時における格納容器（CV）内では，非凝縮性気体（空気や窒素ガスなど）が存在する条件で蒸気の移動と凝縮が生じる．CV を模擬する容器での熱流動実験[(1)-(3)]や実験解析[(3)-(5)]が行われ，容器内の圧力や温度については解析と実験でよい一致が得られている．また，Severe Accident Research Network of Excellence (SARNET)でのベンチマーク活動[(6)]では，高さ 2 m の鉛直平板での凝縮量分布に対する CV 解析用の計算流体力学（CFD）コードにおける最新モデルが整備され，凝縮量に対してよい予測が得られるようになった．一方，CV のように複雑な流れ場に対しては，従来の凝縮熱伝達率の相関式は Heiss-Dampf Reactor (HDR) の CV で測定された局所の熱伝達率を過大に計算したり過小に計算したりすることが示されている[(7)]．形状が単純な円管や平板に対しては，多くの凝縮伝熱実験が行われ，凝縮熱伝達率の相関式が提案されている[(8)-(9)]．

＊1　(株)原子力安全システム研究所　技術システム研究所
＊2　元 神戸大学　現 関西大学
＊3　神戸大学

従来実験は流れ方向の一次元データでありCFDの検証に用いる凝縮面からの距離に対する温度分布データが少ない（平板での温度分布データが数例[10]-[11]ある程度）．従来相関式ではバルク（主流）と凝縮面の間で熱伝達率が定義されているがCVに対するCFD解析ではバルクの定義が困難である．また，LOCA時には破損位置の近傍では過熱蒸気が生じる可能性があり（主蒸気管破断時の過熱度は約100 ℃[3]），SA時には過熱蒸気がCV内に流出する可能性がある．しかし，過熱蒸気と非凝縮性ガスの混合気体での凝縮伝熱に関する研究例は少ない．Minkowycz and Sparrow[12] は，蒸気の過熱度の影響を計算して非凝縮性気体の存在条件では過熱度が増加すると熱流束が増加するとしている．De la Rosa ら[8] のレビューでは，混合気体の過熱度の増加で熱流束は増加するが熱伝達率は減少すると結論付けている．

本研究の目的は，直径49.5 mmで冷却長さ610 mmの鉛直管を用いて蒸気と空気の混合気体からの凝縮伝熱実験を行い，CFDの凝縮伝熱モデルを検証するための温度分布データを提供すること，過熱蒸気と空気の混合気体からの凝縮伝熱を評価すること，およびCV解析に合理的に適用できる凝縮伝熱の相関式を探索することである．本報では，飽和蒸気と空気の混合気体からの凝縮伝熱実験における温度分布と熱流束[13]，凝縮熱伝達率[14]および過熱蒸気と空気の混合気体からの凝縮熱流束と熱伝達率[15]について述べる．なお，これらの実験は，神戸大学の冨山明男教授との共同研究の一環として実施した．

2. 実験装置と実験条件

2.1 実験装置

実験装置は，蒸気ボイラ，蒸気加熱器，蒸気流量計，減圧弁から成る蒸気供給系，空気圧縮機，空気乾燥器，空気加熱器，空気流量計から成る空気供給系，蒸気と空気の混合器，測定部と同じ直径の助走管，測定部，排気管，および冷却水系で構成されている[13]．空気加熱器より下流の空気配管系，蒸気配管系と蒸気・空気混合気体の配管系は低出力ヒーターで加熱保温した．測定部から流出する蒸気・空気混合気体は大気に放出した．空気流量計の測定誤差は±2.5 %，蒸気流量計の測定誤差は±2 %である．蒸気・空気混合気体の圧力と温度を測定部上流の助走管で測定した．

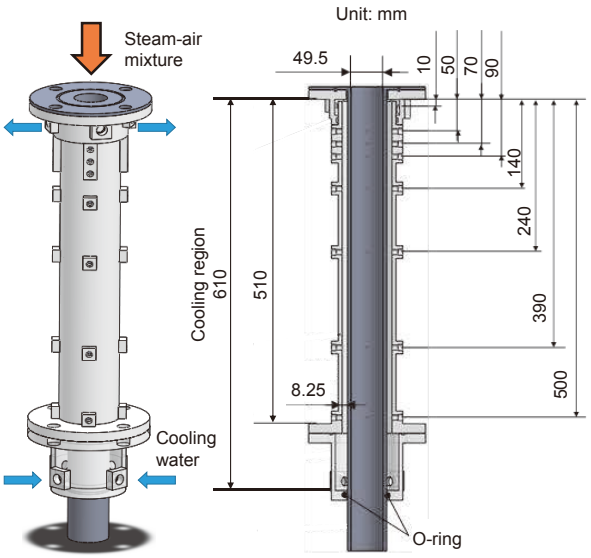


図1　凝縮伝熱実験装置の測定部[13]

圧力計の測定誤差は測定範囲0～0.3 MPaに対して±3 kPa，T型シース熱電対の測定誤差は±0.5 ℃である．

測定部を図1に示す．測定部は内径49.5 mmで肉厚5.5 mmのステンレス管，ギャップ8.5 mm の環状流路を形成するポリカーボネート樹脂製管，および冷却水の入口プレナムと出口プレナムで構成されている．冷却範囲は出入口プレナムを含めて610 mmである．

伝熱壁での温度を測定するために，ステンレス管の半径方向位置r = 26.25 mm（内面から1.5 mm）と28.25 mm（外面から2.0 mm），軸方向位置z = 10，50，70，90，140，240，390，500 mmにT型シース熱電対（ϕ 0.5、先端が平坦）を埋め込み設置した．冷却水の温度を測定するために、同種のT型シース熱電対（ϕ 0.5、先端が平坦）をz = 50，70，90，140，240，390，500 mmに外部から挿入し、熱電対をr = 30.25，30.35，31.25，32.25，34.25，38.25 mm（伝熱管外面からy = 0，0.1，1，2，4，8 mm）に移動して温度分布を測定した．

蒸気・空気混合気体の温度分布を測定するために，図2に示す熱電対アレイを使用した．熱電対アレイでは，11本と10本のT型シース熱電対（ϕ 1.0）を支持板の上流50 mm と20 mmに固定している．熱電対アレイを測定部の下方から挿入し，移動することによりz = 50，70，90，140，240，390，500 mmで温度を測定した．温度の測定位置を図3に示す．熱電対の半径方向位置は，図示した上流50 mmではr = 0，10，11.5，14，16，18，18.5，21.3，21.5，23，24 mmであり，図示していない上流20 mmではr = 10，12，14，16，18，19，21，

21，22.5，24 mmである．

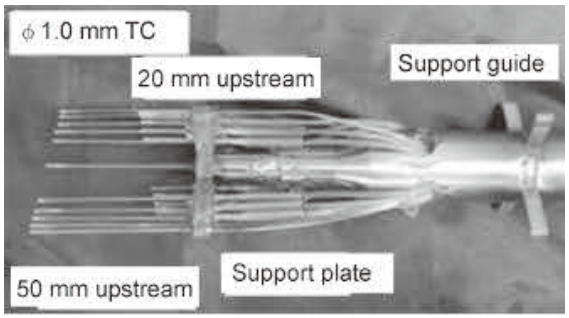


図2　混合気体の温度測定用熱電対アレイ[13]

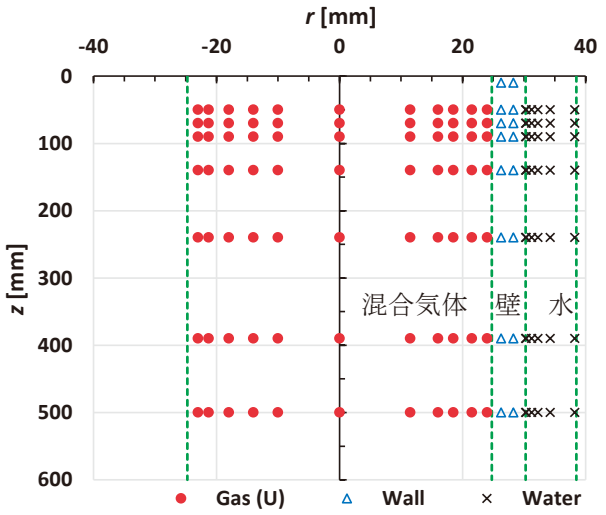


図3　温度の測定位置[13]（混合気体は上下に移動，伝熱壁は固定，冷却水は水平に移動）

2.2　実験条件

主な実験条件を表1に示す．実験パラメータは，蒸気流量W_sと空気流量W_aである．飽和蒸気実験[13]では，蒸気と空気の混合後に飽和状態になるように，室温の空気を蒸気と混合した．蒸気と空気の混合器での凝縮により，助走管での蒸気流量$W_{s,in}$は混合前の蒸気流量測定値$W_{s,s}$と異なる．そこで，Gibbs-Daltonの法則と理想気体の仮定を用い，W_aおよび助走管での圧力P_{in}と温度$T_{g,in}$の測定値から次式[16]により$W_{s,in}$を求めた．

$$\frac{W_{s,in}}{W_a}=\frac{M_s P_{s,in}}{M_a\left(P_{in}-P_{s,in}\right)} \tag{1}$$

ここで，Mは分子量である．助走管での蒸気分圧$P_{s,in}$は飽和状態を仮定して温度$T_{g,in}$から求めた．空気の質量流量比は$x_{a,in}$ = 0.36～0.92の範囲である．助走管での混合気体の温度は$x_{a,in}$により$T_{g,in}$ = 53.5～97.3 ℃であり，レイノルズ数は$Re_{g,in}$ = 3600～25000の範囲である．実験の時期により冷却水の入口温度$T_{cw,in}$は異なる．冷却水のレイノルズ数は約500である．

過熱蒸気実験（表1のNo. 2SH，7SH，9SH）では，11ケースの飽和蒸気実験から3ケースを選択した[15]．過熱蒸気実験では蒸気，空気ともに混合前に加熱器で加熱して混合した．したがって，過熱蒸気実験では蒸気凝縮がなく$W_{s,in}$ = $W_{s,s}$となり，飽和蒸気実験より$W_{s,in}$が多く，平均熱流束qが大きい．蒸気の過熱度は約100 ℃である．

表1　飽和蒸気[13]と過熱蒸気[15]での実験条件

No.	$W_{s,s}$ [g/s]	$W_{s,in}$ [g/s]	W_a [g/s]	$x_{a,in}$ [-]	$T_{g,in}$ [°C]	$T_{cw,in}$ [°C]	q [kW/m^2]
1	3.98	3.58	2.0	0.36	97.3	18.5	47.5
2	4.40	4.03	4.5	0.53	91.5	12.5	46.0
2SH	**4.47**	←	**4.5**	**0.50**	**191**	**14.3**	**56.2**
3	5.97	5.77	9.0	0.61	87.3	12.7	47.6
4	5.94	5.91	9.0	0.60	87.7	22.5	45.8
5	5.86	5.86	9.0	0.61	87.5	28.5	39.9
6	4.14	3.94	6.0	0.60	87.7	12.7	42.8
7	2.0	1.91	3.0	0.61	87.4	12.7	27.9
7SH	**1.98**	←	**3.0**	**0.60**	**186**	**15.2**	**32.8**
8	1.07	0.84	1.5	0.64	85.9	11.2	14.0
9	1.07	0.82	3.0	0.79	74.6	11.0	11.0
9SH	**0.98**	←	**3.0**	**0.75**	**177**	**11.3**	**16.4**
10	1.09	0.79	6.0	0.88	61.8	11.2	11.2
11	0.94	0.74	9.0	0.92	53.5	11.2	9.5

助走管圧力P_{in} = 0.123～0.127 MPa，冷却水流量W_{cw} = 56 g/s，No.のSH：過熱蒸気（その他は飽和蒸気），$W_{s,s}$：蒸気流量測定値，$W_{s,in}$：入口蒸気流量，W_a：空気流量，$x_{a,in}$：空気質量流量比(= W_a/($W_{s,in}$+W_a))，$T_{g,in}$：入口混合気体温度，$T_{cw,in}$：入口冷却水温度，q：平均熱流束

3.　実験結果

3.1 温度分布

測定例としてNo. 7と7SHの半径方向温度分布を図4(a)と(b)に示す. 図4(a)に示す飽和蒸気のNo. 7では, 温度低下により気相中で蒸気凝縮（ミスト）が生じて潜熱h_{fg}を放出[10]するため温度低下を緩和し, 半径方向および流れ方向の温度低下が小さい. 本実験では目視観察できずミストを確認していないが, Kang and Kim[10]は平板での温度分布測定でミストの発生を確認した. 温度分布の計算値と測定値との比較は, 凝縮面近傍での挙動だけでなく, 気相空間での相変化（ミストの発生）モデルの検証にも役立つ.

図4(b)に示す過熱蒸気のNo. 7SHでは, No. 7のz = 50 mmでの飽和温度より高く, 混合気体は全測定点で過熱状態になっている. 過熱蒸気ではミスト発生はなく, 顕熱は潜熱より大幅に小さく, 少しの熱移動で大きく温度変化するため, 半径方向および流れ方向の温度低下が大きい. これらの温度分布はCFD解析の検証に活用できる.

蒸気と空気の混合気体の温度分布から無次元温度差ΔT^*を式(2)で定義し, 温度境界層の厚さδ_TをΔT^*が0.99になる壁からの距離yで定義した.

$$\Delta T^* = \frac{T_g - T_i}{T_{g,c} - T_i} \tag{2}$$

$$\delta_T = y|_{\Delta T^* = 0.99} \tag{3}$$

ここで, $T_{g,c}$とT_iは管中心と凝縮面での温度である. T_iは後述する式(11)で求める.

温度境界層の厚さを図5に示す. 冷却水温度の相違で平均熱流束が異なるが, 同一設定条件であるNos. 3～5の平均値は$\delta_T/R = 0.20\,(z/d)^{0.40}$で表せる. 熱流束が大きいNo. 1では$\delta_T$が薄く, 熱流束が小さいNo. 9では$\delta_T$が厚い. 過熱蒸気のNo. 7SHでは, 過熱蒸気の顕熱が小さく温度変化しやすいためδ_Tが厚くなる. ΔT^*が0.99になる壁からの距離yでδ_Tを定義しているため, δ_Tの不確かさが大きく, 詳細な定量的議論はできない.

式(2)で定義した無次元温度差ΔT^*の例としてNo. 7と7SHの半径方向分布を図6に示す. 乱流境界層内のΔT^*はy/δ_Tの累乗関数で近似できる.

$$\Delta T^* = a\left(\frac{y}{\delta_T}\right)^n \tag{4}$$

Nos. 2, 3, 6に対して$\Delta T^* = 0.995\,(y/\delta_T)^{0.057} \pm 0.015$

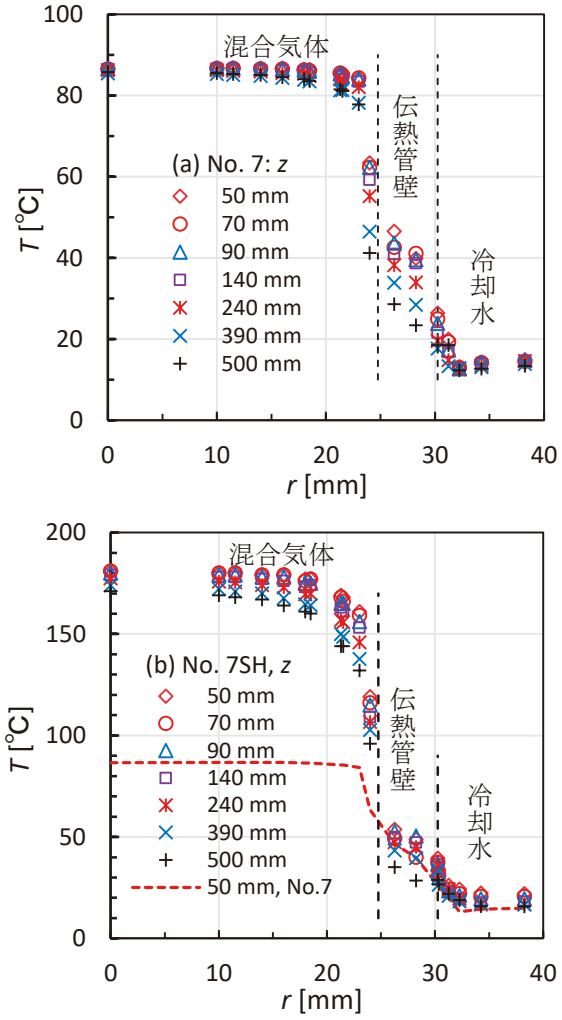


図4 温度分布の測定例

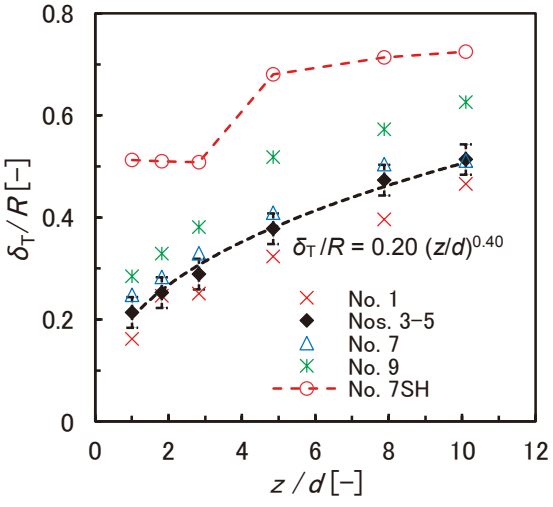


図5 温度境界層の厚さδ_T

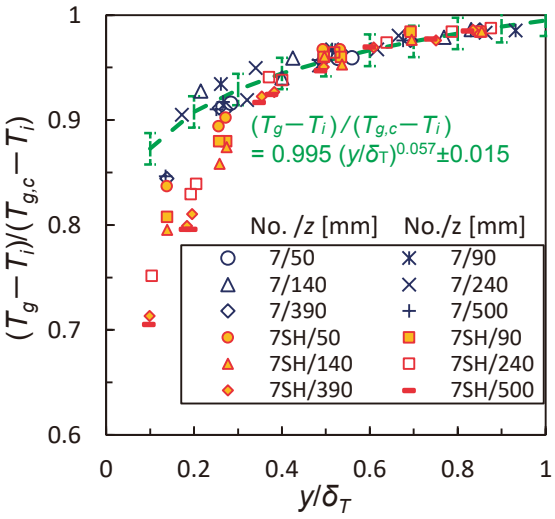


図6　無次元温度差 ΔT^* の分布例

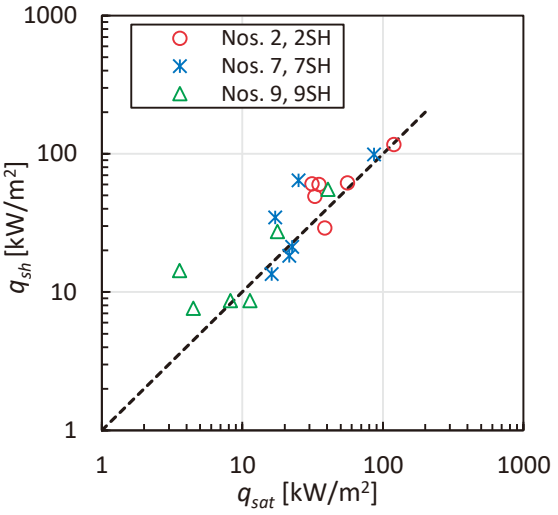


図7　飽和蒸気と過熱蒸気での熱流束の関係[15]

で表せる．q が小さいほど指数n が大きくなり，Nos. 9～11でn = 0.083になった[14]．過熱蒸気条件では，中央部では飽和蒸気条件と無次元温度分布の相違はないが，$y/\delta_T < 0.3$ で温度変化（温度勾配）が飽和蒸気条件より大きくなる．このため過熱蒸気での温度分布は式(4)との相違が大きくなる．飽和蒸気では温度低下によりミストが発生して潜熱を放出するため温度低下が小さく，過熱蒸気では顕熱が小さいため凝縮面に向かって急激に温度低下する．

3.2　熱流束

熱流束測定値の不確かさは測定方法により異なる．凝縮熱流束を測定する際には伝熱壁での温度勾配による熱流束q_w が広く用いられている（例えばArakiら[17]）．Nagae ら[16] は冷却水のエンタルピー増加による熱流束q_{cw} もしくは飽和状態を仮定して蒸気と空気の混合気体のエンタルピー減少による熱流束q_g を求めた．彼らは，冷却水や蒸気と空気の混合気体に対して流路断面の中央における温度を用いた．本研究では，冷却水や蒸気と空気の混合気体に対して半径方向の温度分布を用いた[13]．熱流束の測定方法によりq_w，q_{cw}，q_g の値が異なるため，工学的な判断により，これらの平均値を熱流束q_{ave} とした．

$$q_{ave,j} = \frac{q_{cw,j} + q_{g,j} + (q_{w,j-1} + q_{w,j})/2}{3} \qquad (5)$$

添字j は軸方向位置の番号を示す．式(5)で定義されるq_{ave} は図3に示した流れ方向（z方向）に隣接する熱電対位置の間での平均値であり，q_w は熱電対位置での局所値であるため平均値$(q_{w,j-1}+q_{w,j})/2$を用いた．

q_g の計算では飽和蒸気の仮定を用いており過熱蒸気には適用できない．したがって，過熱蒸気では熱流束にq_w とq_{cw} の平均値を用いた．

$$q_{ave,j} = \frac{q_{cw,j} + (q_{w,j-1} + q_{w,j})/2}{2} \qquad (6)$$

飽和蒸気での熱流束q_{sat}[13] と過熱蒸気での熱流束q_{sh}[15] との関係を図7に示す．蒸気流量が大きい（No. 2，7，9の順）ほど熱流束が大きく，上流ほど境界層が薄く（図5参照）熱流束が大きくなる．過熱蒸気では飽和蒸気より熱流束が大きく，約1.5倍である．

3.3　熱伝達率

蒸気と空気の混合気体から伝熱管の壁面への凝縮熱伝達では，気体の対流による熱伝達率h_{conv}，蒸気の凝縮による熱伝達率h_c および凝縮した液膜の熱伝達率h_f がある．式(5)もしくは式(6)で得られる熱流束q_{ave} およびバルク（主流）と壁面の温度差$(T_b - T_w)$から求まるのは，熱通過率h_t である．q_{ave} と熱伝達率hとの関係は次式で与えられる．

$$\begin{aligned} q_{ave} &= h_t (T_b - T_w) \\ &= (h_c + h_{conv}) (T_b - T_i) \\ &= h_f (T_i - T_w) \end{aligned} \qquad (7)$$

T_b とT_i およびT_w はバルクと凝縮液膜の表面（つまり

気体と液体の界面）および壁面での温度である．式(7)は，q_{ave} がバルクと壁面の間，バルクと液膜表面の間，および液膜表面と壁面の間で定義されることを示す．凝縮熱流束は$q_c = h_c\ (T_b - T_i)$である．本研究ではT_b に中心温度$T_{g,c}$ を使用した（$T_b = T_{g,c}$）．式(7)から温度を消去すると，次式が得られる．

$$\frac{1}{h_t} = \frac{1}{h_c + h_{conv}} + \frac{1}{h_f} \tag{8}$$

式(8)は飽和条件に対して広く使用されている（例えば，Araki ら[17]，Liao and Vierow[18]）．$1/h_t$ は全熱抵抗，$1/h_f$ は液膜の熱抵抗である．空気を含まない純粋な蒸気では，h_c が大きく$1/(h_c+h_{conv})$を無視でき，$1/h_t \fallingdotseq 1/h_f$になる．一方，空気のような非凝縮性ガスが存在すると凝縮面の近くにガスが停滞してh_c が小さくなり，$1/h_f$ を無視できる場合がある．測定値から求まるのはh_t であり，h_f とh_{conv} は従来相関式を用いて計算し，h_c を求める．

式(7)と式(8)は過熱蒸気には適用できないので，過熱蒸気には次式を用いた．

$$\begin{aligned} q_{ave} &= h_t\ (T_b - T_w) \\ &= h_c\ (T_s - T_i) + h_{conv}\ (T_b - T_i) \\ &= h_f\ (T_i - T_w) \end{aligned} \tag{9}$$

T_s は流路断面での蒸気の飽和温度であり，凝縮熱流束q_c は飽和温度T_s と凝縮面温度T_i の差に基づいて評価するため，$q_c = h_c\ (T_s - T_i)$と近似した．この近似の妥当性は過熱蒸気実験データで確認する．T_s は蒸気分圧P_s に対する飽和温度として求め，P_s は式(1)を変形して蒸気と空気の質量流量（W_s とW_a）から求める．

$$\frac{P_s}{P_t} = \frac{W_s / M_s}{(W_s / M_s) + (W_a / M_a)} \tag{10}$$

P_t は測定部圧力，M は分子量である．W_s は伝熱量と熱バランス式から求まる．

h_f とT_i は層流液膜に対するヌッセルトのモデル[19]を用いて計算した．

$$h_f = \frac{\lambda_f}{\delta_f},\quad \frac{\delta_f}{\left(\nu_f^2/g\right)^{1/3}} = \left(\frac{3\Gamma}{\mu_f}\right)^{1/3},\quad T_i = T_w + \frac{q_{ave}}{h_f} \tag{11}$$

Γ は単位濡れ縁長さ当たりの液膜流量，δ_f は液膜厚さ，λ_f は液相の熱伝導率，μ_f は液粘度，ν_f は液の動粘度である．液膜厚さは約0.1 mm以下，液膜レイノルズ数(= Γ/μ_f) は1.2～20の範囲であり，液膜は層流である．

h_{conv} にはColburnの式[20]を用い，温度境界層の発達領域の影響Nu_z/Nu_∞ を補正した．

$$\begin{aligned} Nu &= \frac{h_{conv} d}{\lambda_g} \\ &= 0.023\, Re_g^{0.8} Pr^{1/3} \left(\frac{Nu_z}{Nu_\infty}\right) \end{aligned} \quad \text{for } 2300 < Re_g < 10^7 \tag{12}$$

d は直径，Nu はヌッセルト数，Pr はプラントル数，λ_g は気相の熱伝導率である．Nu_z/Nu_∞ にはReynoldsら[21]による次式を使用した．

$$\frac{Nu_z}{Nu_\infty} = 1 + \frac{C}{z/d},$$

$$C = 0.8\left(1 + \frac{70000}{Re_g^{3/2}}\right) \quad \text{for } 3000 < Re_g < 500000 \tag{13}$$

対流熱流束q_{conv} を凝縮熱流束q_c と比較して図8に示す．式(12)と(13)で対流熱伝達率h_{conv} を計算し，式(11)で計算した凝縮面温度T_i を用いて式(7)でq_{conv} とq_c を求めた．飽和蒸気では流量が多いほどq_{conv} が大きいが，上流部ではT_i が高く温度差($T_b - T_i$)が小さいためq_{conv} が小さい場合がある．過熱蒸気では($T_b - T_i$)が大きいためq_{conv} が大きい．q_{conv} はq_c より1桁～2桁小さいが，q_c が小さい場合にはq_{conv} を無視できない．

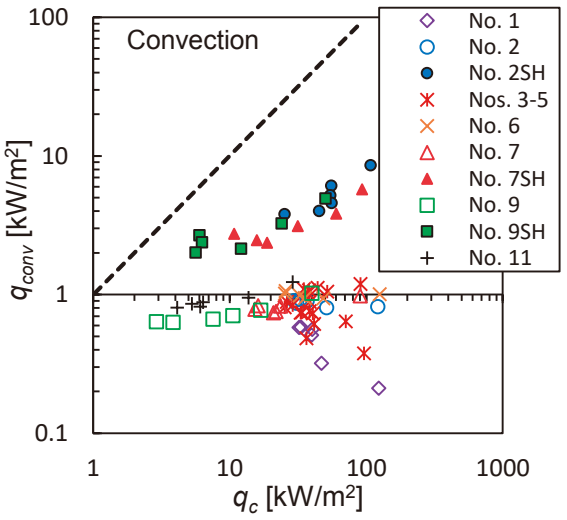


図8　対流熱流束q_{conv}

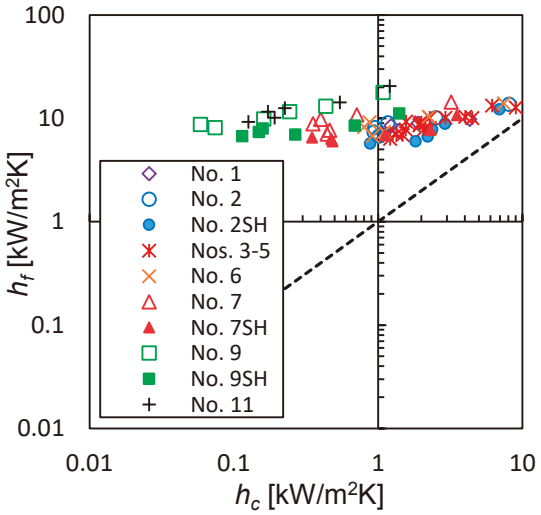


図9　液膜熱伝達率h_f

液膜熱伝達率h_fを凝縮熱伝達率h_cと比較して図9に示す．凝縮量が少ない上流部やq_c小では液膜厚さが薄くなり，h_fが大きくなる．測定範囲では液膜厚さが約0.1 mm以下であるためh_fは大きいが，h_cが大きい場合には$1/h_f$を無視できない．

4.　凝縮熱伝達率の相関式

蒸気と非凝縮性ガスの混合気体からの凝縮熱伝達率については，多くの実験が行われ多くの相関式が提案されている[7]-[9]．相関式には，蒸気と非凝縮性ガスの質量比もしくは分圧比の関数にした実験式，熱輸送と物質輸送の相似則に基づく相関式，拡散層モデルに基づく相関式などがある．実験式は，バルク（主流）での物理量の単純な関数形が多く，使用しやすいが適用範囲が狭い．相似則や拡散層モデルに基づく相関式は，バルクと凝縮面での物理量を用いており，計算が煩雑であるが適用範囲が広く，最近は拡散層モデルが広く使用されている．本研究では，Arakiら[17]による相似則に基づく相関式とLiao and Vierow[18]による拡散層モデルに基づく相関式を使用した．

4.1　従来の凝縮熱伝達率の相関式

Arakiら[17]は本実験と類似する測定部を用いて伝熱壁の温度勾配から局所の熱流束を求めた．本実験より測定部が長く，蒸気流量が多く，空気流量が少ない．彼らは実験式を提案しており，実験式は熱流束が大きいNo. 1～6に対して試験部の入口近傍でh_cを過小に評価する一方，熱流束が小さいNo. 8～11に対して下流域でh_cを過大に評価した．実験式は一般的に適用範囲が狭く，実験式の使用は推奨しない．

Arakiら[17]は，実験式の他に，熱輸送と物質輸送の相似則に基づく式(14)を提案している．

$$h_c = \frac{m_s h_{fg}}{T_b - T_i},$$

$$m_s = \frac{DP_t M_s}{RT_{ave} d}\left(\ln\frac{P_{a,i}}{P_{a,b}}\right)\left\{\frac{2}{\ln(1-2/Sh)}\right\},$$

$$T_{ave} = \frac{T_b + T_i}{2} \tag{14}$$

$$Sh = 0.023\, Re_g^{0.8} Sc^{1/3} \frac{Sh_z}{Sh_\infty} \quad (2300 < Re_g < 10^7) \tag{15}$$

$$\frac{Sh_z}{Sh_\infty} = \frac{Nu_z}{Nu_\infty} \tag{16}$$

D (m²/s) は拡散係数，d (m) は直径，h_{fg} (kJ/kg) は凝縮潜熱，M_s (kg/kmol) は蒸気の分子量，m_s (kg/m²s) は蒸気の質量流束，P (Pa)は圧力，R (kJ/kmol K) は一般ガス定数，Sc はシュミット数，Sh はシャウッド数である．添字b とi はバルクと気液界面（凝縮面）を示す．式(15)では，温度境界層が発達中の影響を評価するために(Sh_z/Sh_∞)を付加しており，Reynolds ら[21]による式(13)をSh に適用して式(16)を使用した．

拡散層モデルに基づく相関式にはLiao and Vierow[18]による次式を使用した．

$$h_c = Sh\frac{\lambda_c}{d}, \quad \lambda_c = \frac{\varphi_2 h'_{fg} h_{fg} PDM_s M_a}{\varphi_1 R^2 T_g^3}$$

$$\frac{1}{\varphi_1} = \frac{X_{s,m}}{X_{a,i}}\frac{\ln(1+B_m)}{B_m}, \quad \varphi_2 = \frac{M_g^2}{M_{g,b} M_{g,i}} \tag{17}$$

h_{fg} (kJ/kg) は凝縮潜熱，$h_{fg}' = h_{fg} + c_p(T_b - T_i)$，$\lambda_c$ (kW/m K) は凝縮熱伝導率，M (kg/kmol) は分子量，R (kJ/kmol K) は一般ガス定数，$X_{a,i}$ は凝縮界面での空気の質量分率，$X_{s,m}$ は蒸気の対数平均質量分率である．B_m は物質移動係数で$\ln(1+B_m)/B_m$ はサクション効果[22]である．サクション効果は，主流から凝縮面に向かう蒸気の流れにより速度境界層，温度境界層および濃度境界層が壁側に押し付けられることによる伝熱促進効果である．蒸気の凝縮を壁面への吸込みと見なしてサクションと呼ばれており，図5で熱流束が大きいほどδ_Tが薄いのはサクション効果による．M_gは混合気体の分子量の対数平均，$M_{g,b}$ と$M_{g,i}$ はバルクと気液界面での混合気体の分子量である．式(17)のλ_cの計

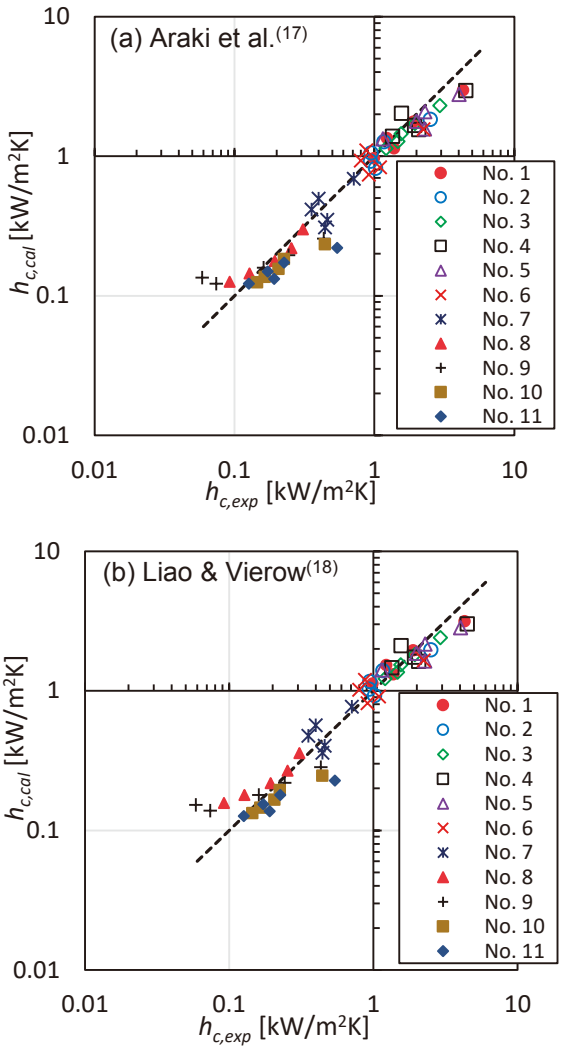


図10　凝縮熱伝達率の相関式と測定値の比較[14]
（飽和蒸気）

算では，単位が一致して適切な値を得るには，R^2 にR (kJ/kmol K) とR (m³atm/kmol K) を使用する必要がある．Sh には式(15)を使用した．

式(14)と(17)の主な相違は，式(14)は$q_c = m_s\ h_{fg}$ に基づいておりh_c の相関式に$(T_b - T_i)$ を含むこと，式(17)にはサクション効果の影響を含むことである．凝縮伝熱の流れ方向一次元計算を行う際に，式(17)でもT_i を求める必要があり，計算の煩雑さは式(14)と(17)で顕著な相違はない．

4.2　飽和蒸気での凝縮熱伝達率

Arakiら[17]による式(14)を式(13)で補正した計算値$h_{c,cal}$ と測定値$h_{c,exp}$ との比較[14]を図10 (a)に示す．式(13)で境界層厚さの影響を補正した式(14)は$h_{c,exp}$ と比較的よく一致した．式(14)は測定部の入口近傍でh_c を過小に評価し，総流量が小さいNo. 8 と 9の下流でh_c を過大に評価した．図10 (a)は，熱輸送と物質輸送の相似則はArakiら[17]によるデータと本実験データを含む広い範囲に適用できることを示す．

Liao and Vierow[18]による式(17)での計算値$h_{c,cal}$ と測定値$h_{c,exp}$ の比較[14]を図10 (b)に示す．式(17)では，式(15)で表されるSh を使用した．図10 (a)と図10 (b)は類似しており，グラフ上では式(14)と式(17)の相違を判断するのは難しい．式(17)による計算値$h_{c,cal}$ の平均は，式(14)による計算値の平均より9.5%大きく，測定値$h_{c,exp}$ の平均より1.2%小さい．この結果は，式(17)は測定部入口近傍での過小評価およびNo. 8 と9の下流での過大評価を除いてデータとよく一致することを示す．

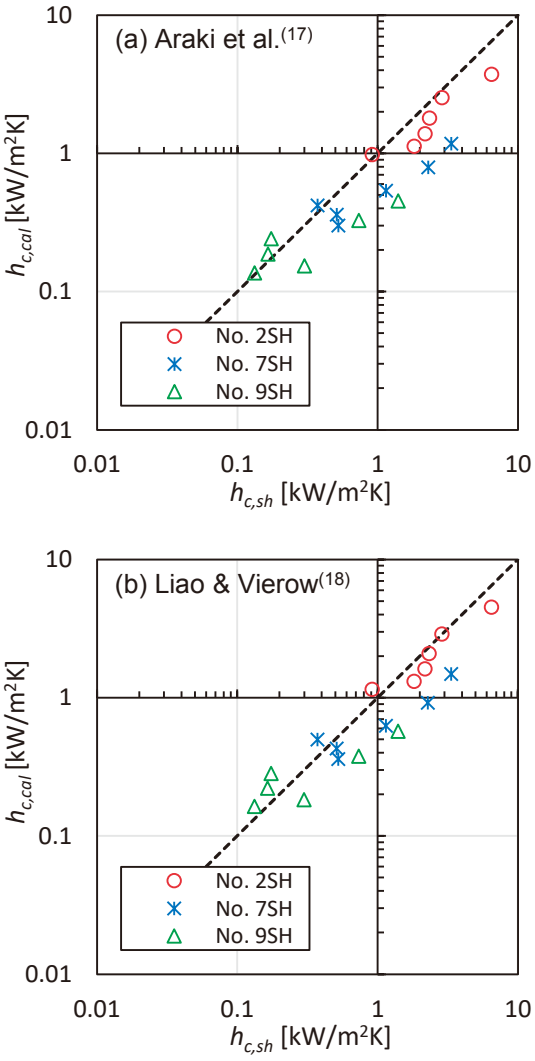


図11　凝縮熱伝達率の相関式と測定値の比較
（過熱蒸気）

4.3 加熱蒸気での凝縮熱伝達率

Arakiら[17]による式(14)を用いた過熱蒸気に対する計算値$h_{c,cal}$と測定値$h_{c,sh}$との比較を図11 (a)に，Liao and Vierow[18]による式(17)での計算値$h_{c,cal}$と測定値$h_{c,sh}$の比較[15]を図11 (b)に示す．過熱蒸気に対する式(9)では$q_c = h_c\ (T_s - T_i)$と近似しており，T_sには流路断面平均値を用いた．バルクもしくは流路中心でのT_sは流路断面平均値より大きいため，$h_{c,sh} = q_c/(T_s - T_i)$が過大に評価される．$h_{c,sh}$は，式(14)による$h_{c,cal}$より28 %大きく，式(17)による$h_{c,cal}$より15 %大きい．$h_{c,sh}$を適切に評価するには，CFD計算により蒸気分圧$P_s$と飽和温度$T_s$の半径方向分布を求め，バルクでの$T_s$と断面平均での$T_s$との関係を評価する必要がある．しかし，凝縮熱伝達率の測定では不確かさが大きいことを考慮すると，図11に示した$h_{c,cal}$は$h_{c,sh}$と比較的よく一致しており，過熱蒸気でも飽和蒸気に対する凝縮熱伝達率で近似計算できる．

5. 考察

図4に示したような混合気体温度の半径方向および流れ方向の二次元分布はCFDの凝縮伝熱モデルを検証するために活用できる．従来研究による平板での混合気体の温度分布データ[10]-[11]は流れ方向一断面であり，二次元分布データは本研究以外に見当たらない．図6に示したように無次元表示して比較すると温度分布の特徴を把握することができる．

凝縮熱伝達率の測定では，一般的に測定値の不確かさが大きい．本研究で取得した飽和蒸気での凝縮熱伝達率は従来研究による相関式[17]-[18]とよく一致し，測定とデータ処理が適切に行われていることを確認した．

過熱蒸気に対する凝縮伝熱実験データは見当たらない．したがって，本研究で取得した過熱蒸気での温度分布は貴重なCFD検証データを提供する．また，飽和蒸気からの凝縮を仮定すれば，従来の飽和蒸気に対する凝縮熱伝達率の相関式を近似的に使用できることを明らかにした．これは，SA時のCV温度解析に従来相関式を適用できる可能性を示し，本研究の大きな成果である．しかし，飽和蒸気の圧力P_sと温度T_sに断面平均値を用いており，熱伝達率の定義で用いられるバルクでの値と異なる．この断面平均値とバルクでの値の相違の影響については，CFD計算により確認することが望ましい．

本研究の最終目標は，CV解析に合理的に適用できる凝縮伝熱の相関式を探索することである．凝縮熱伝達率はバルクと凝縮面の間で定義されているが，CV解析ではバルクの定義が困難である．そこで，Dehbiら[5]はCFDへの適用を考慮して次式を提案した．

$$q = m_s h_{fg}, m_s = \frac{1}{1-X_s}\rho_g D\frac{\partial X_s}{\partial y} \tag{18}$$

m_s (kg/m^{2}s) は蒸気の質量流束，y (m) は凝縮面から直角方向の距離，X_s は蒸気の質量分率，ρ_g (kg/m^3) は蒸気と空気の混合気体の密度である．このモデルではX_sやρ_gに対して凝縮面に接するセルにおける値を用いるので，CFD応用に適している．一方，凝縮面に近い位置における蒸気の質量分率の勾配($\partial X_s/\partial y$)を用いる必要があるため，Dehbiら[5]は凝縮面に隣接する計算セルの無次元距離を$y^+ = 0.47$にした．しかし，$y^+ = 0.47$の小さい計算セルはCV解析では現実的でない．また，温度分布の測定値[11],[13]は$y^+ > 10$であり，$y^+ < 10$でのy^+と($\partial X_s/\partial y$)の関係は確認されておらず，式(18)の妥当性は確認されていない．$y^+ < 10$で信頼できる温度測定を行うのは困難であり，測定値とCFD計算値を合わせて凝縮面近傍でのy^+と($\partial X_s/\partial y$)の関係について検討する必要がある．また，CV解析に現実的に適用できる非凝縮性気体が存在する条件での凝縮伝熱に対する合理的なモデルは提案されておらず，重要な技術課題である．

CVの実規模解析の報告例は少ないが，液膜熱抵抗$1/h_f$は凝縮熱抵抗$1/h_c$に比べて小さいとして考慮されていない．本報で述べた高さ610 mmの伝熱管でも図9に示したように条件によっては$1/h_c$に対して$1/h_f$を無視できないため，CV解析では$1/h_f$の影響を考慮するのが望ましい．$1/h_c$と$1/h_f$は伝熱機構が異なるため別々に計算される．$1/h_f$は重力で流下する液膜厚さに比例するため，CV解析では，CV壁を高さ方向に複数のリング状に分割して蒸気の凝縮量を計算し，水平方向に平均化した液膜厚さと$1/h_f$を計算するのが現実的である．

6. まとめ

本研究の目的は，CFD解析によりLOCA時におけるCV内の温度を詳細に評価することである．蒸気と非凝縮性ガスとの混合気体からの凝縮熱伝達率に関する従

来相関式はバルク（主流）と凝縮面との間で定義されているがCV解析ではバルクの定義が困難，破断口の近傍では局所的に過熱蒸気の存在が想定されるが過熱蒸気での凝縮伝熱に関する知見が見当たらない，凝縮伝熱モデルを検証するための温度分布データが少ない，などの技術課題がある．そこで，CFDの凝縮伝熱モデルを検証するための温度分布データの提供，過熱蒸気と空気の混合気体からの凝縮伝熱の評価，およびCV解析に合理的に適用できる凝縮伝熱の相関式の探索を目標として，直径49.5 mmで冷却長さ610 mmの鉛直管を用いて蒸気と空気の混合気体からの凝縮伝熱実験を実施した．本報では，飽和蒸気と空気の混合気体からの凝縮伝熱実験における温度分布と熱流束[13]，凝縮熱伝達率[14]および過熱蒸気と空気の混合気体からの凝縮熱流束と熱伝達率[15]について述べた．

飽和蒸気では，温度低下で蒸気凝縮（ミストの発生）により潜熱を放出して温度低下を緩和するため半径方向および流れ方向の温度低下が小さい．温度分布の計算値と測定値との比較は，凝縮面近傍での挙動だけでなく，気相空間での相変化モデルの検証にも役立つ．過熱蒸気では，凝縮面の近傍を除いて過熱状態が維持されている．温度境界層厚さ δ_T は，流れ方向に厚くなるが，熱流束が小さいほど厚くなり，過熱蒸気では顕熱が小さく温度変化しやすいため δ_T が厚くなる．無次元温度分布は，$y/\delta_T > 0.3$ では飽和蒸気と過熱蒸気で顕著な相違はないが，過熱蒸気では $y/\delta_T < 0.3$ で無次元温度が急激に低下する．

飽和蒸気では，凝縮熱伝達率 h_c の測定値は熱輸送と物質輸送の相似則に基づく相関式および拡散層モデルに基づく相関式とよく一致し，測定とデータ処理の妥当性を確認した．過熱蒸気では，飽和温度からの凝縮を仮定すれば，飽和蒸気に対する従来相関式（相似則および拡散層モデル）を近似的に使用できることを明らかにした．

h_c の従来相関式はバルク（主流）と凝縮面との間で定義されているが，CV解析ではバルクの定義が困難である．今後の重要な技術課題は，CV解析に現実的に適用できる非凝縮性気体が存在する条件での凝縮伝熱に対する合理的なモデルもしくは相関式の探索である．

謝辞

本報における凝縮伝熱実験は，神戸大学の大学院生であった合田頼人氏および島村長幸氏を中心に行われた．ここに記して感謝の意を表する．

記号

B_m	物質移動係数（-）
c_p	比熱（kJ/kg K）
d	直径（m）
D	拡散係数（m^2/s）
g	重力加速度（m/s^2）
h_c	凝縮熱伝達率（kW/m^2 K）
h_{conv}	対流熱伝達率（kW/m^2 K）
h_f	液膜熱伝達率（kW/m^2 K）
h_{fg}	凝縮潜熱（kJ/kg）
h_{fg}'	$= h_{fg} + c_p (T_b - T_i)$（kJ/kg）
h_t	熱通過率（kW/m^2 K）
M	分子量（kg/kmol）
Nu	ヌッセルト数（-）
P	圧力（MPa）
Pr	プラントル数（-）
q	熱流束（kW/m^2）
R	ガス定数（kJ/kmol K）or（m^3 atm/kmol K）もしくは半径（m）
Re	レイノルズ数（-）
r	半径方向座標（m）
Sc	シュミット数（-）
Sh	シャウッド数（-）
T	温度（K）
W	質量流量（kg/s）
X	質量分率（-）
x	質量流量割合（-）
y	面からの距離（m）
y^+	無次元距離（-）
z	流れ方向座標（m）

ギリシャ文字

Γ	濡れ縁あたりの液膜流量（kg/s m）

ΔT^*	無次元温度差 (-)
δ_f	液膜厚さ (m)
δ_T	温度境界層厚さ (m)
λ	熱伝導率 (kW/m K)
λ_c	凝縮熱伝導率 (kW/m K)
μ	粘度 (Pa s)
ν	動粘度 (m^2/s)

添字

a	空気
ave	平均値
b	バルク
c	中心もしくは凝縮
cal	計算値
conv	対流
cw	冷却水
exp	測定値
f	液膜
g	気相
i	気液界面
in	入口
j	流れ方向位置
m	対数平均値
s	蒸気
sh	過熱状態
t	全体
w	壁面
z	z方向

文献

(1) Vendel, J., Malet, J., Bentaib, A., Conclusions of the ISP-47 Containment Thermal-Hydraulics, Proc. the 12th Int. Topical Meeting on Nuclear Thermal Hydraulics (NURETH-12), Paper No. 031 (2007).

(2) Sibamoto, Y., Ishigaki, M., Abe, S., Yonomoto, T., Experimental Study on Outer Surface Cooling of Containment Vessel by Using CIGMA. Proc. the 17th Int. Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-17), Paper No. 21591 (2017).

(3) Studer, E., Abdo, D., Benteboula, S., Bernard-Michel, G., Cariteau, B., Coulon, N., Dabbene, F., Debesse, Ph., Koudriakov, S., Ledier, C., Magnaud, J.-P., Norvez, O., Widloecher, J.-L., Beccantini, A., Gounand S., Brinster, J., Challenges in Containment Thermal Hydraulics, Nucl. Technol., Vol. 206(9), pp. 1361-1373 (2020).

(4) Mimouni, S., Foissac, A., Lavieville, J., CFD Modeling of Wall Steam Condensation by a Two-Phase Flow Approach, Nucl. Eng. Des., Vol. 241, pp. 4445-4455, (2011).

(5) Dehbi, A., Janasz, F., Bell, B., Prediction of Steam Condensation in the Presence of Noncondensable Gases Using a CFD-Based Approach, Nucl. Eng. Des., Vol. 258, pp. 199-210 (2013).

(6) Ambrosini, W., Forgione, N., Merli, F., Oriolo, F., Paci, S., Kljenak, I., Kostka, P., Vyskocil, L., Travis, J. R., Lehmkuhl, J., Kelm, S., Chin, Y.-S., Bucci, M., Lesson Learned from the SARNET Wall Condensation Benchmarks, Annals of Nucl. Energy, Vol. 74, pp. 153-164 (2014).

(7) Green, J., Almenas, K., An Overview of the Primary Parameters and Methods for Determining Condensation Heat Transfer to Containment Structures, Nucl. Safety, Vol. 37 (1), pp. 26-48 (1996).

(8) De la Rosa, J.C., Escriva, A., Herranz, L.E., Cicero, T., Munoz-Cobo, J.L., Review on Condensation on the Containment Structure, Progress Nucl. Energy, Vol. 51, pp. 32-66 (2009).

(9) Huang, J., Zhang, J., Wang, L., Review of Vapor Condensation Heat and Mass Transfer in the Presence of Non-condensable Gas, Applied Thermal Eng., Vol. 89, pp. 469-484 (2015).

(10) Legay-Desesquelles, F., Prunet-Foch, B., Heat and Mass Transfer with Condensation in Laminar and Turbulent Boundary Layers along a

Flat Plate, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 29, pp. 95-105 (1986).

(11) Kang, H.C., Kim, M.H., Characteristics of Film Condensation of Supersaturated Steam-Air Mixture on a Flat Plate, Int. J. Multiphase Flow, Vol. 22, pp. 1601-1618 (1999).

(12) Minkowycz, W., Sparrow, E., The Effect of Superheating on Condensation Heat Transfer in a Forced Convection Boundary Layer, Int. J. Heat Transfer, Vol. 12, pp. 147-154 (1968).

(13) Murase, M., Utanohara, Y., Goda, R., Shimamura, T., Hosokawa, S., Tomiyama, A., Measurements of Temperature Distributions and Condensation Heat Fluxes for Downward Flows of Steam-Air Mixture in a Circular Pipe, 混相流, Vol. 33(4), pp. 405-416 (2019).

(14) Murase, M., Utanohara, Y., Hosokawa, S., Tomiyama, A., Condensation Heat Transfer for Downward Flows of Steam-Air Mixture in a Circular Pipe, 混相流, Vol. 34(4), pp. 510-519 (2020).

(15) Murase, M., Utanohara, Y., Goda, R., Hosokawa, S., Tomiyama, A., Condensation Heat Transfer for Downward Flows of Superheated Steam-Air Mixture in a Circular Pipe, Nucl. Eng. Des., Vol. 371, 110948 (2021).

(16) Nagae, T., Murase, M., Wu, T., Vierow, K., Evaluation of Reflux Condensation Heat Transfer of Steam-Air Mixtures under Gas-Liquid Countercurrent Flow in a Vertical Tube, J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 42(1), pp. 50-57 (2005).

(17) Araki, H., Kataoka, Y., Murase, M., Measurement of Condensation Heat Transfer Coefficient inside a Vertical Tube in the Presence of Noncondensable Gas, J. Nucl. Sci. Technol., Vol. 32(6), pp. 517-526 (1995).

(18) Liao, Y., Vierow, K., A Generalized Diffusion Layer Model for Condensation of Vapor with Noncondensable Gases, J. Heat Transfer (ASME), Vol. 129, pp. 988-994 (2007).

(19) Nusselt, W., Die Oberflüchenkondensation des Wasserdampfes, Vereines Deutscher Ingenieure, Vol. 60(27), pp. 541-546 (1916). (in German)

(20) Colburn, A.P., A Method of Correlating Forced Convection Heat Transfer Data and a Comparison with Fluid Friction, Trans. AIChE, Vol. 29, pp. 174-210 (1933).

(21) Reynolds, H.C., Swearingen, T.B., McEligot, D.M., Thermal Energy for Low Reynolds Number Turbulent Flow, J. Basic Eng., Vol. 91(1), pp. 87-94 (1969).

(22) Kays, M. K., Crawford, M. E., Heat, Mass and Momentum Transfer, 3rd ed., McGraw-Hill, New York (1993).

以下の論文については、関西電力株式会社殿から受託し、当研究所において実施した調査・研究の成果を同社にご了解をいただき、本論文集に収録したものです。
研究の成果については、関西電力株式会社殿と当研究所が共有しております。

●安全志向的モチベーションと安全風土の関連についての考察

●脱炭素化に向けた原子力発電による石炭火力発電代替の受容性

●エネルギー問題関連冊子の印象に残るクリエイティブ－中間層４分類の視点－

●T字配管における衝突型逆流現象の数値シミュレーション

●ステンレス鋼溶接金属のPWR １次冷却水模擬環境中の腐食特性への熱時効と照射の影響

●エルボ管テーパ部の軸方向欠陥に対する超音波探傷試験条件の検討（第３報）
－フェーズドアレイ探触子の最適化検討－

●SUS630の高温水中SCC挙動に及ぼす微細組織の影響

●TT690合金冷間加工材の粒界キャビティ生成型による亀裂発生時間の評価

●TT690合金のPWR1次系模擬水中の腐食挙動への溶存水素濃度と温度の影響

●MAAPにおけるISLOCAのモデル化

●シビアアクシデント演習ツールの改良

●ルール逸脱防止のための職場討議用事例集の作成

●潜在リスク気付き支援研修における発想の転換を促すための工夫の検討

●原子力発電所における安全文化の自己評価方策の検討(2) 情報収集のための質問紙調査の試行

●エネルギー環境教育関西ワークショップ研究会活動へのオンラインミーティングシステムの導入

●エネルギー環境教育を指向する自由研究のテーマとその内容

●放射線および原子力防災学習モデルの作成と実践

●超微小引張試験法を用いた中性子照射ステンレス鋼の粒界劣化要因の検討

●鉛直管における蒸気と空気の混合気体からの凝縮伝熱

編　集　委　員　会

編集委員長　川邊　辰也（取締役社長・所長）

編 集 委 員　田中　克宜（取締役・副所長）
小泉　潤二（社会システム研究所長）
片岡　　勲（技術システム研究所長）
増井　和重（管理部長）
嶋田　　学（社会システム研究所　副所長）
中野　守人（技術システム研究所　副所長）

編集委員会は論文を審査し掲載の可否を決定する.
編集委員会は論文審査に際し必要に応じて編集委員以外の専門家の意見を求めることができる.

編集事務局　〒919-1205　福井県三方郡美浜町佐田64号

(株)原子力安全システム研究所　管理部
ＴＥＬ 0770-37-9100
ＦＡＸ 0770-37-2008
ＵＲＬ http://www.inss.co.jp

INSS JOURNAL VOL.28 2021

2021年10月発行

Ⓒ 2021 Institute of Nuclear Safety System ,Incorporated

— 禁無断転載 —

編　集　(株)原子力安全システム研究所
「INSS JOURNAL」編集委員会

発　行　(株)原子力安全システム研究所

印　刷　若越印刷株式会社



株式会社 原子力安全システム研究所
〒919-1205　福井県三方郡美浜町佐田64号
TEL 0770-37-9100　FAX 0770-37-2008
URL http://www.inss.co.jp

Institute of Nuclear Safety System, Incorporated
64 Sata, Mihama-cho, Mikata-gun
Fukui 919-1205, Japan
TEL 0770-37-9100　FAX 0770-37-2008
URL http://www.inss.co.jp

定価 1,000 円（税抜）