

## 福井地域を基盤とした近畿圏連携による高経年化対策強化基盤整備事業の実施報告 (平成 21 年度)

### The Research Project on Technical Information Basis for Aging Management in Fukui and Kinki Area (3<sup>rd</sup> Report)

藤村 公也 (Kimiya Fujimura)\*<sup>1</sup> 渡海 親衛 (Chikae Watarumi)\*<sup>2</sup> 藤堂 二彦 (Tsugihiko Toudou)\*<sup>1</sup>

**要約** 高経年化対策強化基盤整備事業は、経済産業省原子力安全・保安院により、我が国の原子力発電所における高経年化対策に資するため、国内実用原子力発電プラントの高経年化に関する技術情報基盤整備を行うことを目的として、平成 18 年度に開始され現在に至っている。

具体的研究課題は、高経年化対応の安全研究ロードマップの一部を担うことを念頭に、加圧水型軽水炉を中心として 15 基の原子力発電設備が立地し、地域内及び近隣の近畿圏に多くの原子力関係の研究機関や大学を有する福井地域の特徴、および各組織の研究・事業実績をもとにその専門性を十分生かせるものとして、下記の 4 つの分野から選定されている。

- 1) 原子力発電プラントの配管減肉管理の高度化に関する研究
- 2) 劣化発生・進展状況把握のための検査技術評価に関する研究
- 3) 溶接補修技術に関する研究
- 4) 主要構築物の劣化に関する研究

研究の推進にあたって、原子力安全システム研究所（以下「INSS」という）技術システム研究所は、福井地域を基盤とした近畿圏連携（以下「福井クラスタ」）による研究の実施母体として、域内の大学、研究機関、電気事業及びメーカーと協力して福井地域高経年化事業コンソーシアムを立ち上げ、その中心として研究の受注、円滑な実施、および報告書の取り纏め業務といった総合的立場での役割を担ってきた。

平成 21 年度の福井クラスタの事業で実施した研究は、上記の 4 分野別に示せば、配管減肉関連で 4 件、検査技術関連で 3 件、補修溶接および主要構築物について各 1 件、計 9 件である。いずれの研究も円滑に実施され、所期の成果を達成することができた。

**キーワード** 原子力発電プラント、高経年化、配管減肉、検査技術、溶接金属、コンクリート

**Abstract** The Research Project on Technical Information Basis for Aging Management was initiated in FY2006 by the Nuclear and Industrial Safety Agency (NISA) of the Ministry of Economy, Trade and Industry (METI), to promote aging management of domestic nuclear power plants. Its main objective was to improve the technical basis on which aging nuclear power plants are regulated.

Upon taking part in the R&D Roadmaps for Aging Management and Safe Long Term Operation, the experiences and achievements of the participating organizations were taken into account and the following four topics were chosen. The regional characteristics of the Fukui and Kinki area where 15 nuclear power plants, mainly PWRs, and many nuclear related research institutes and universities are located, were also considered.

- 1) The improvement of pipe thinning management in nuclear power plants
- 2) The development of inspection techniques to monitor the initiation and propagation of defects
- 3) The development of a guideline for evaluating weld repair methods
- 4) The development of a guideline for evaluating the degradation of main structures

To promote this research project, INSS has established a regional consortium (called the “Fukui Regional Cluster” in coordination with universities, research institutes, electric utilities and vendors in the Fukui and Kinki area. INSS is acting as a coordinator to make contracts, facilitate execution, and compile annual reports.

In FY2009, 11 research subjects were proposed for this project and all were accepted. Of these, 4 subjects were related to the first topic (pipe thinning), 3 subjects to the second topic (inspection

\* 1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

\* 2 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所 客員研究員

technique) and 1 subject to each of the other two topics (weld repair & main structures). All the subjects have been completed, fulfilling the requirements and expectations.

Keywords nuclear power plant, plant aging, pipe thinning, inspection technique, weld metal, concrete

### 1. 序言

高経年化対策強化基盤整備事業は、経済産業省原子力安全・保安院（以下「NISA」という）により、我が国の原子力発電所における高経年化対策に資するため、国内実用原子力発電プラントの高経年化に関する技術情報基盤整備を行うことを目的として、平成18年度より開始された。事業の企画・推進に当っては、より広くかつ深い知識経験に基づくことが重要との考え方から、原子力関連の産・学・官の研究組織の地域連携が基本となっている。そのため、INSSが福井県と近畿圏の連携の中核として福井地域高経年化事業コンソーシアム（略称：福井クラスタ）を立ち上げ、研究の受注、円滑な実施、および報告書の取り纏め業務といった総合的立場での役割を担ってきている。これらのことは、本誌過年度報で紹介したとおりである<sup>(1)(2)</sup>。本報告では、これに引き続き、平成21年度事業の成果とともに研究の企画・推進に当ってのINSSの活動の概要を紹介する。

### 2. 事業の全体概要

原子力安全・保安院より示された平成21年度テーマ4件を、その目的とともに示す。

- ①技術情報の基盤整備等：高経年化対策強化基盤整備事業全体を総合的・俯瞰的に捉え、本事業で実施してきた成果を踏まえつつ、本事業の中で産学官が有する知見、施設等を効果的に活用して実施する研究成果に基づき、新検査制度における高経年化対策のための技術情報の整備を図る。
- ②健全性評価の妥当性確認手法の確立等：原子力発電設備の経年劣化対策を科学的・合理的に行うため、原子炉圧力容器鋼に係る脆化予測、ケーブルの劣化挙動予測のより定量的な評価や監視・診断法の適用性および、炉内構造物および配管における応力腐食割れに関する健全性評価手法の妥当性を判断するための技術的基盤の整備を図る。
- ③経年劣化事象の解明等：高経年化が進行しつつあるプラントの寿命予測精度を向上させ、その

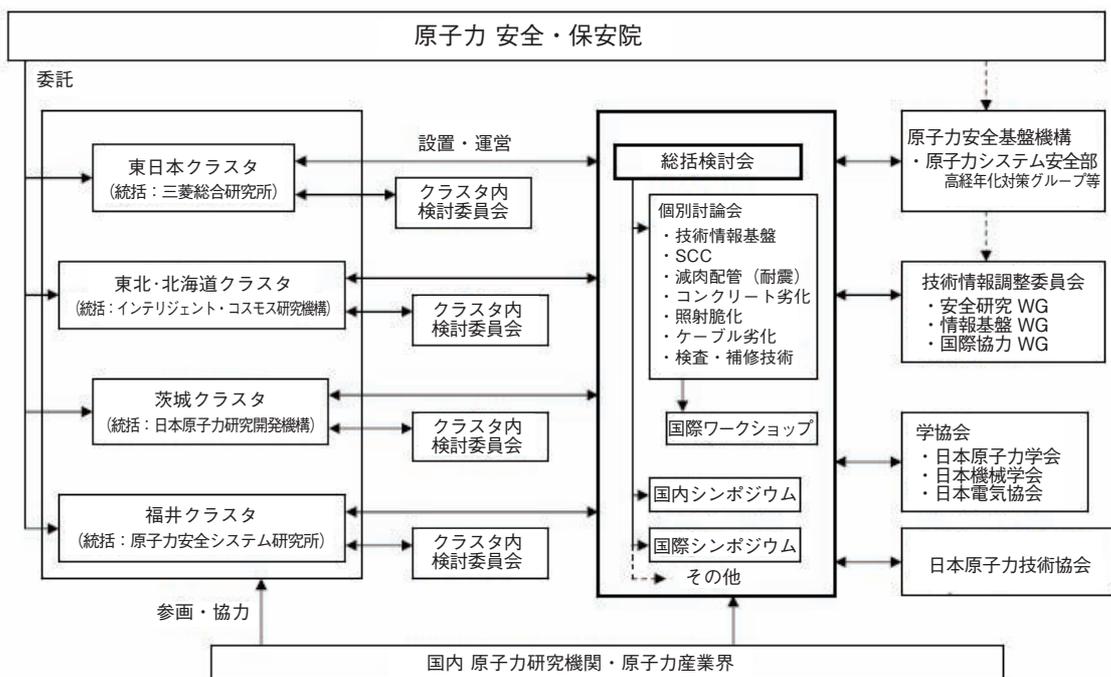


図1 高経年化対策強化基盤整備事業の実施体制

科学的合理性を担保するため、劣化メカニズムに着目し、実験的手法および解析的手法により劣化現象の解明等を行う。

- ④経年劣化事象の進展予測・評価手法の確立等：原子力発電設備の経年劣化対策を科学的・合理的に行うため、最新の知見を加味し、経年劣化事象の進展予測並びに評価手法の高精度化や検査技術、補修技術の妥当性評価手法の確立等を図る。

これらのうち、INSSが福井クラスタ代表として受注したテーマが④である。その具体的研究内容については次節で紹介する。他のテーマはそれぞれ、①三菱総合研究所（東日本クラスタ）、②（特）日本原子力研究開発機構（茨城クラスタ）、③（株）インテリジェント・コスモス研究機構（東北・北海道クラスタ）の取り纏めとなった。また、これらのクラスタ相互間の情報の共有や研究内容の調整等につい

ては、①の東日本クラスタが所管する総括検討会および個別検討会を中心に行われる。これらを含めた、本事業全体の実施体制概要は図1に示すとおりである。

### 3. 研究課題と実施体制

福井クラスタの平成21年度受託研究テーマは「経年劣化事象の進展予測・評価手法の確立等」である。具体的研究内容の提案に当たっては、高経年化対応の安全研究ロードマップの一部を担うことを念頭に、福井クラスタ構成メンバーの研究・事業実績をもとに、その専門性を十分生かすことを考慮し、表1に示す形で、下記の4分野について、合計11件の研究を各機関への再委託の形で実施することとした。いずれも、平成19年度から引き続けているものである。

- 1) 原子力発電プラントの配管減肉管理の高度化に

表1 平成21年度研究課題と実施担当

研究課題			担当*	
分野	課題	個別課題	機関	取纏め者
1) 原子力発電プラントの配管減肉管理の高度化に関する研究	(1)配管減肉予測・評価法の精度向上		名古屋大 大学院	辻 義之 准教授
	(2)液滴衝撃エロージョンに対応した配管減肉評価法の構築		福井大 大学院	服部修次 教授
	(3)減肉配管の破壊モード評価法の高度化		福井大 大学院	飯井俊行 教授
	(4)配管減肉の定量評価法の有効性検証	a. ガイド波による広域モニタリング手法の検証		徳島大 大学院
b. ガイド波検査シミュレータの構築および配管減肉サイジングの高度化			神戸大 大学院	小島史男 教授
2) 劣化発生・進展状況把握のための検査技術評価に関する研究	(1)高調波によるニッケル基合金溶接部 SCC の評価と画像化に関する研究		超音波 材料診断 研究所 (名古屋工 大大学院)	川嶋紘一郎 所長 (伊藤智啓 准教授)
	(2)3次元超音波探傷法によるニッケル基合金溶接部 SCC の高精度サイジング		発電設備 技術検査 協会	古村一郎 研究グル ープ長
	(3)マイクロ波検出技術を用いた高分子材料への放射線照射による経年劣化測定技術に関する研究	a. 放射線照射による経年劣化過程の解明		大阪大 大学院
b. 経年劣化測定技術の評価精度向上			福井工大	砂川武義 准教授
3) 溶接補修技術に関する研究	(1)補修溶接施工条件に応じた健全性評価技術の確立、補修後溶接部の長期使用後における健全性評価技術の確立、および補修溶接方法の実機適用における施工健全性の検証		大阪大 大学院	西本和俊 教授
4) 主要構築物の劣化に関する研究	(1)コンクリート構造物のひび割れによる鉄筋腐食評価法の高度化に関する研究		大阪大 大学院	岸本一蔵 准教授

\* ( )は他機関研究協力者(同一機関内研究協力者は記載省略)

関する研究

- 2) 劣化発生・進展状況把握のための検査技術評価に関する研究
- 3) 溶接補修技術に関する研究
- 4) 主要構築物の劣化に関する研究

研究実施者の専門性の活用と連携および事業関係者間の情報の共有化を図るためのクラスタ内検討委員会の設置、運営を含む、福井クラスタ内の事業活動の全体像を図2に示す。なお、図1に示す総括検討会および個別検討会や他クラスタの検討委員会へも積極的に参加協力した。

また、福井クラスタ事業を締め括る事業成果報告書の作成に当たっては、その前提となる各研究担当者からの報告書について、研究内容の確認とともに当初事業計画との整合性を吟味・確認し、研究成果に対する事業統括者としての見方を反映するよう努力した。

#### 4. 研究内容および成果の概要

ここでは、各研究課題の内容および得られた成果の概要、ならびに今後の課題を紹介する。

- 1) 原子力発電プラントの配管減肉管理の高度化に関する研究

本研究は、炭素鋼配管の減肉管理<sup>(3)(4)</sup>の充実に向けての既存技術の応用や新技術の適用の進展に備え、減肉予測・評価法の精度向上、減肉配管の破壊モード評価法の高度化および減肉配管の検査技術の高度化等について、測定等により基礎情報を収集し、得られた成果を踏まえ、減肉による配管破断リスクを考慮した保全を可能にするための技術を整備することを目的とするものである。このために以下の4つ研究が実施された。

- ① 配管減肉予測・評価法の精度向上  
流動加速腐食（Flow Accelerated Corrosion：FAC）に着目し、剥離、再付着、旋回等を伴う流

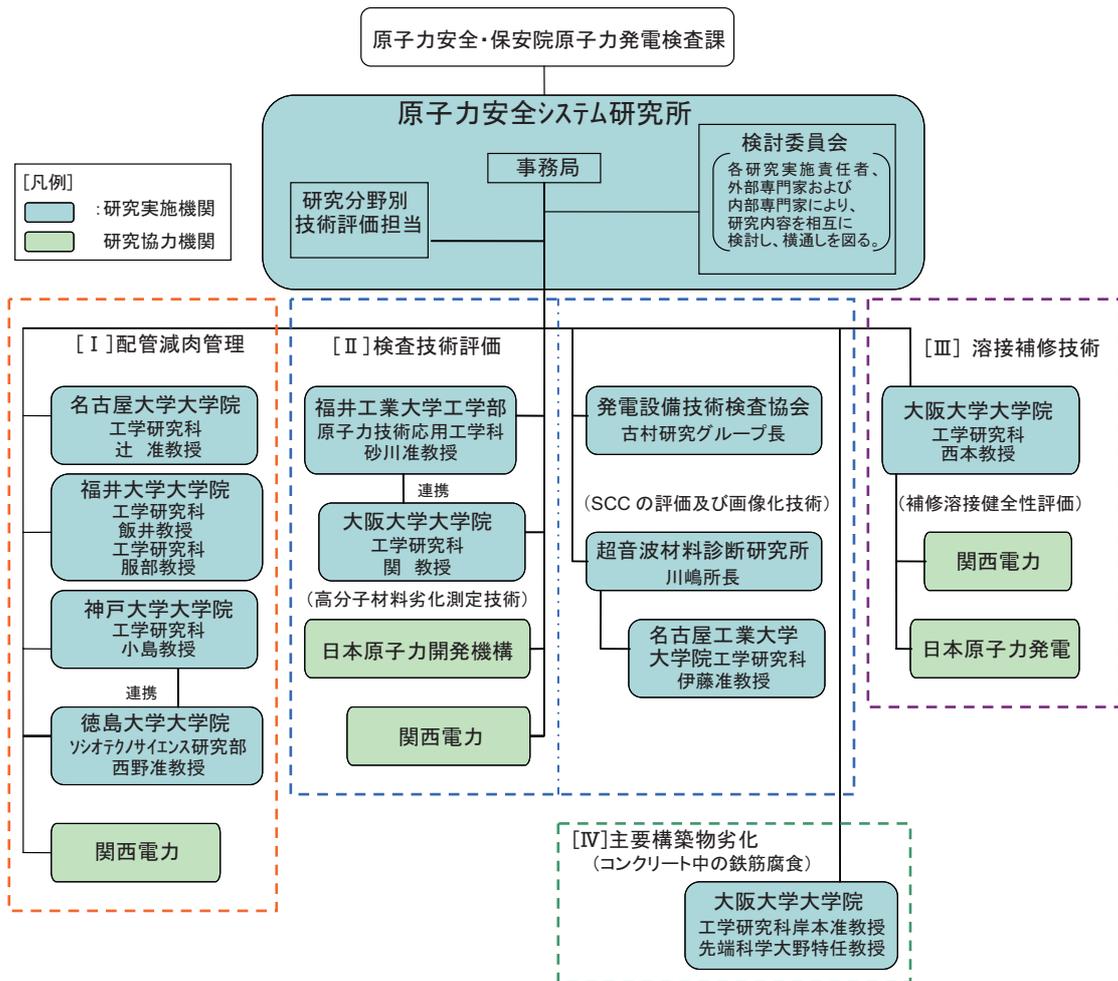


図2 福井クラスタでの高経年化対策強化基盤整備事業活動の全体像

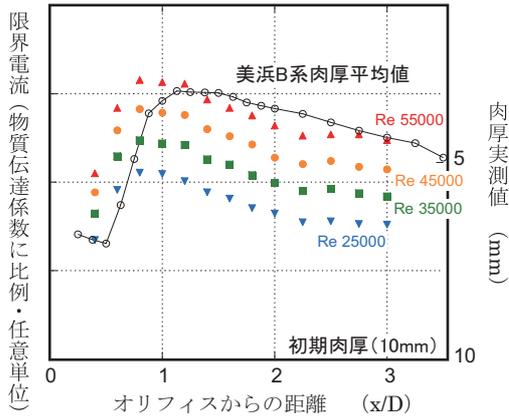


図3 限界電流の流れ方向分布に対するレイノルズ数の影響

れ場を対象として、 $10^4$  オーダーのレイノルズ数における常温流動実験によりオリフィス下流の流速分布と乱流エネルギー分布を測定するとともに、物質伝達係数（限界電流に比例）の流れ方向分布を測定した。その結果、物質伝達係数の流れ方向分布はレイノルズ数によらず相似であること（図3）、流れ方向の乱流エネルギー分布と流れ方向の物質伝達係数の分布とが相似であること（図4）が明らかになった。また、オリフィス開口比によって、下流での物質伝達係数の大きさならびにそれが最大となる位置に大きな違いがあり、Kastner 式の幾何形状係数のような一定値では扱えないことも確認した。さらに、オリフィスを対象として LES (Large Eddy Simulation)<sup>(5)</sup> を用いた数値計算を行い、偏心流れや表面粗さが乱流エネルギー分布に大きく影響し、ひいては物質伝達係数に影響することを確認した。今後は、これらの成果をもとに、実機特有の現象である壁面の粗さおよび旋回流を考慮した実験・解析による局所の流動パラメータと局所の物質伝達との関係の解明、多次元流動解析コードによる減肉評価に不可欠なデータベースの構築、さらには半経験ベースではあるが配管減肉の評価に必要な保守的物質伝達係数評価式の導出を行うこととしている。

## ② 液滴衝撃エロージョン (LDI) に対応した配管減肉評価法の構築

LDI の損傷過程について、メカニズムを考慮して減肉量の定量的な基礎データを取得することを目的として、軟質材料である Al および炭素鋼配管材料 STPG370 相当である S15C、配管用合金鋼である STPA24 について、腐食性を考慮した液体

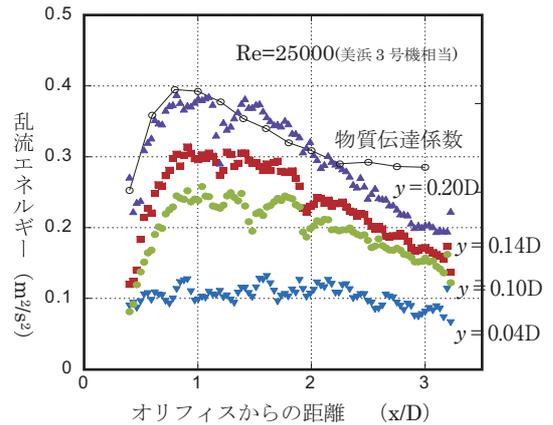


図4 限界電流の流れ方向分布に対するオリフィス開口比(y)の影響

(水流) 衝撃試験、回転円盤試験、および液滴衝撃試験を実施し、次のようなことが明らかになった。すなわち、S15C 酸化皮膜材および STPA24 酸化皮膜材の液体（水流）衝撃試験による剥離強度の流速依存性調査では、酸化皮膜は流速 100m/s でも容易に剥離することを見出し（図5）、酸化皮膜が母材の LDI エロージョンの防止や抑制には寄与しないとの見通しを得た。また、回転円盤試験装置を用いたエロージョン試験のデータをもとに、液滴径の影響を考慮した液滴 1 個あたりの体積減少量予測評価式を導出した。これによれば、液滴 1 個あたりの液滴エロージョンによる体積減少量は図6に示すように液滴径の約 5 乗に比例して増加する。なお、最終目標である、配管素材、液滴の流速、衝突粒子径や衝突角度を考慮した、液滴衝撃エロージョンに対応した配管減肉評価法を構築するためには、各種の酸化皮膜を用いた剥離強度の流速依存性の検討、試験片に衝突する液滴の大きさと流速の測定に基づく実験データの高精度化、さらにはエロージョンに及ぼす衝突角度の影響に関する検討結果が必要である。

## ③ 減肉配管の破壊モード評価法の高度化

破壊モードと強度を念頭に置いて、平面状欠陥（溝状欠陥）と非平面状欠陥（減肉）との境界条件を明確にし、破壊モードによらず適用可能な限界曲げ荷重評価式を確立することを目的として、これまでの研究を踏まえ、考えられるすべての欠陥タイプ（軸方向き裂、軸方向減肉、正方形減肉、周方向き裂、周方向減肉）を包絡するような減肉寸法を与えた直管の試験体について、内圧破壊実験および数値解析による検証を行い、その結果を

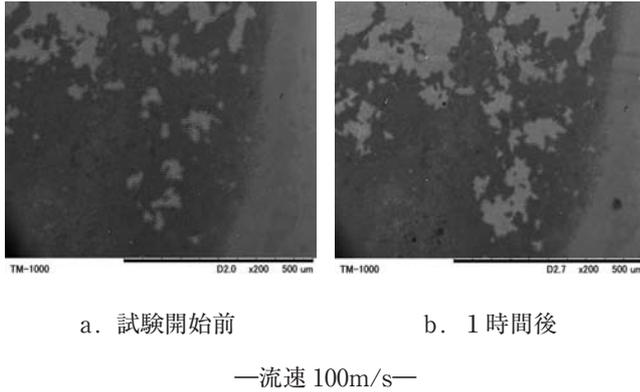


図5 酸化被膜水流衝撃剥離試験 SEM 観察写真例 (STPA24, 水中被膜 [脱気水, 150℃, 100時間])

もとに破裂内圧評価式および限界曲げ荷重評価式の検討を行った。これにより、破裂内圧評価式について、既存の軸方向に長いき裂の破裂内圧評価式（たとえば Kiefner の式<sup>(6)</sup>）の適用限界を明らかにすることができ、減肉欠陥の形状的な分類基準を明確にして（図7）、すべての減肉欠陥に精度よく適用できる（図8）新しい破裂内圧評価式を提案することができた。また、減肉直管の内圧+曲げ荷重下での限界曲げ荷重評価についても、同様に、周方向に長いき裂の限界曲げ荷重に対する既存の評価式（たとえば Kanninen の式<sup>(7)</sup>）の適用限界と減肉欠陥の形状による分類基準を明確にし、全ての減肉欠陥に適用できる新限界曲げ荷重評価式の提案の前段として、周方向き裂と周方向に長い減肉に対する限界曲げ荷重評価式を提案した。いずれの評価式も、日本では必要最小肉厚管理を行っていることを念頭に置き、最も薄い部分の肉厚に対する基準強度に形状関数を乗じる形と

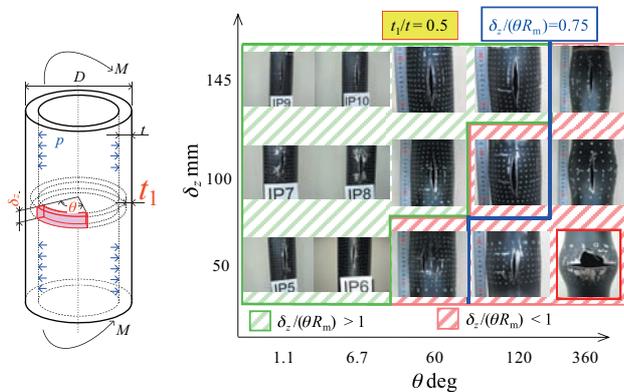


図7 内圧下破壊モードマップと欠陥分類基準例 (配管サイズ 100A の場合)

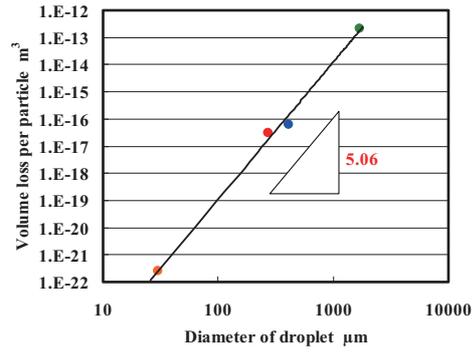


図6 液滴1個当たりの体積減少量の液滴径依存性

している。これらの成果をもとに、直管に対して提案した減肉形状評価基準の数値解析による補強、エルボ管に対する実験および数値解析による検証、さらにはエルボに対する減肉形状分類基準および破壊モードを考慮した局部減肉破壊評価式の検討も行い、これまでの成果と合わせて、合理的な減肉評価指針の実現に向けての情報として取りまとめることとしている。

④ 配管減肉の定量評価法の有効性検証

本研究のサブテーマは、超音波ガイド波<sup>(8)</sup>による広域モニタリング手法の検証ならびにガイド波検査シミュレータの構築および減肉配管サイジングの高度化の2つである。まず、ガイド波による広域モニタリング手法の検証では、溶接線やエルボ近傍に減肉が発生した場合を想定し、日本機械学会技術規格<sup>(4)</sup>記載の通常検査部位 10 箇所を漸増減肉欠陥を導入した試験体を用いた探傷試験により、エルボ部や溶接線近傍においても良好に検

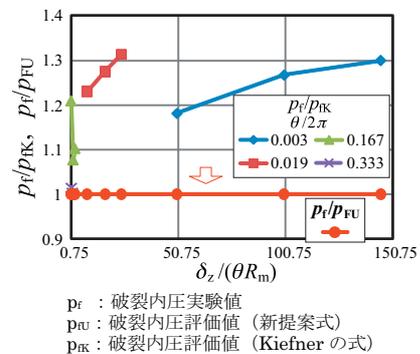


図8 破裂内圧評価式の精度比較

査可能であること、特にエルボ背側では、図9に示すようにガイド波エネルギーの集中により直管部よりも高い検出感度を有していることを確認した。また、FACを視野に、薄く広く成長した減肉について、模擬減肉を付与した配管での検出性確認試験とモデル計算との比較を実施し、両者の良好な一致を確認できた。これにより、任意の形状の薄肉減肉に対する検出感度が、解析により推定できる見通しを得た。また、内部に存在する減肉を非常に高感度で検出できる方法として、本事業で提案し、直管に対する有効性が確認されている、多重反射エネルギー閉じ込め(MGET)法について、エルボ下流に設置した減肉の検出感度が従来のガイド波法に比べ1.7倍程度向上すること、また複数の減肉が存在する場合、各減肉の管軸方向位置の特定は困難になるものの、減肉の存在を検知することは可能であり、合計した断面欠損率に該当する信号の変化をとらえることができることを確認した。さらに、関西電力火力センターの協力の下で実施した実機プラントでの検証実験や、東京電力から提供されたFAC減肉配管の計測を通して、今後の改良検討のための有益なデータを得た。今後は、これらの成果を踏まえ、本手法の実機適用をより確実なものとするため、エルボ管の減肉部位全体での検出感度の詳細評価、電磁超音波探触子(Electro Magnetic Acoustic Transducer: EMAT)狭域計測法と連携した傾向監視手法の提案等の改善検討を行うこととしている。ガイド波検査シミュレータの構築および減肉配管サイジングの高度化に関しては、超音波ガイド波による広域監視とEMATによる定点常時監視を組み合わせた検査法について、シミュレータを用いた超音波ガイド波による配管減肉検出精度の向

上のための検査法改良検討(図10)、常時定点監視を想定したEMATによる周方向減肉寸法計測に関するシミュレーションのモデリングと精度検証実験、およびEMATによる寸法計測の精度確認を行い、さらに関西電力火力センターの協力の下、実機プラントでの実地検査実験により、既存の超音波探傷法による配管検査と同等の精度で測定できることを確認した。また、解析コードを用いた減肉進展予測に基づき、FACやLDIに対応した減肉監視のための最適なセンサの個数と配置を選定する際の考え方について検討し、EMATによる運転中モニタリングへの適用を前提とした配管減肉進展予測コード整備の必要性等新たな技術課題を確認した。なお、ガイド波とEMATの統合化については、全周減肉および部分減肉を施した炭素鋼配管の直管および溶接部を含むエルボ管での計測実験により、その有効性を検証する必要があることも明らかになった。今後は、これらの技術課題について研究を進め、ガイド波による中・広域監視とEMATの運転中複数定点観測による高度な配管減肉管理の確立を目指すこととしている。

## 2) 劣化発生・進展状況把握のための検査技術評価に関する研究

原子力発電所の容器や配管に用いられているニッケル基合金やステンレス鋼溶接部に発生し得る応力腐食割れ(Stress Corrosion Cracking: SCC)を極めて高感度、高精度で検出、サイジングできるよう意図した非破壊検査技術の妥当性評価に関する2件と、原子炉格納容器内で用いられている安全系ケーブル絶縁材のプラントの高経年化により進展する絶縁性の劣化を高感度、高精度で測定するよう意図した診断技術の妥当性検証に関する1件の、計3つの

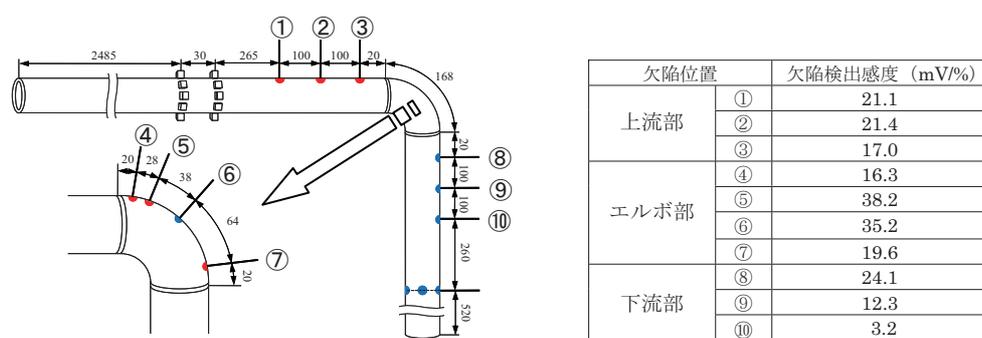
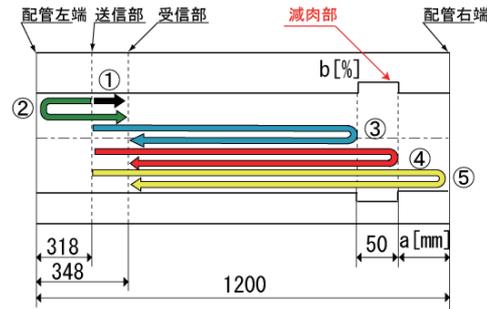


図9 エルボ部周辺における探傷試験結果(例)



SS400	減肉位置	実測	シミュレーション
減肉率50%	1.1[m]	1.096[m]	1.098[m]
減肉率10%	1.1[m]	1.104[m]	1.098[m]

※ 減肉位置とは上図の減肉左端位置である。

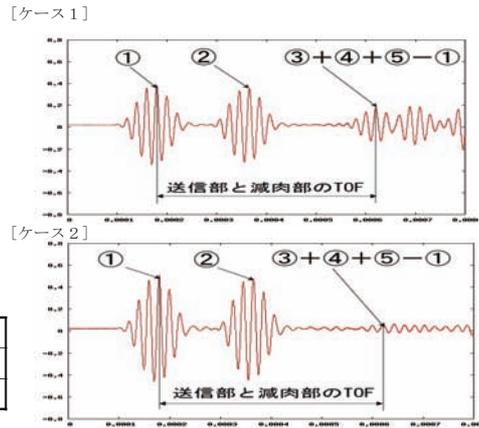


図 10 FAC 減肉位置推定法のシミュレーションによる開発と実測検証例

研究を行った。

① 高調波を用いた高散乱ニッケル基合金溶接部粒界型応力腐食割れ (IGSCC) の非破壊評価法に関する研究

本研究では、実機異種材料継手部模擬試験体のバタリング部と突合せ溶接部に導入した SCC を対象とした高調波を用いた IGSCC の画像化およびサイジング性能の検証と、波動伝播数値シミュレーションを用いた粗大結晶材料中の SCC から的高調波散乱伝播特性の解明と、これに基づくフェーズドアレイに代わる簡易複数探触子を用いたき裂検出法の検討を行った。その結果、画像化とサイジング性能の検証では、焦点探触子波縦波垂直入射・フェーズドアレイ探触子受信法においてバンドパスフィルターを適用すれば、接触法ですべて

の SCC の画像化およびサイジングが可能であることを確認した (図 11)。水浸法についても、焦点探触子縦波垂直入射・焦点探触子斜角受信法で一部の SCC の画像化が可能であること、また単独の焦点探触子を用いる場合でも、SCC 反対面からの適切な角度での縦波斜角入射・背面散乱高調波受信を行うことにより深い SCC の画像化が可能であること、SCC 面からの適切な角度での縦波斜角入射・背面散乱高調波受信によりほとんどの SCC の画像化が可能であり、これによるサイジング精度もさらなる検討が必要ではあるが概ね良好との見通しを得た (表 1)。数値シミュレーションによる高調波散乱特性の解明と複数探触子を用いたき裂検出法の検討に関しては、密着き裂部先端における散乱波高調波の伝播特性を解析し、前方散乱波

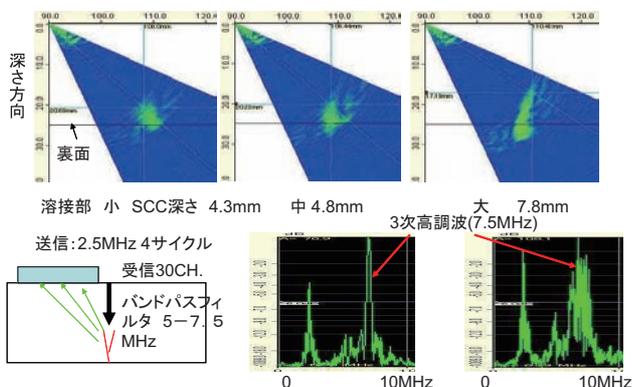


図 11 焦点探触子波縦波垂直入射・フェーズドアレイ探触子受信法での画像化 (突合せ溶接部の例)

表 1 SCC 深さ測定結果の比較

(単位 mm)

方法	突合溶接部			バタリング部			
	小	中	大	小	中	大	
フェイズドアレイ	4	5	8	6	9	9	
水浸高調波	外面入力	-	5	9	3	6	7.5
	SCC 側入力	-	7	9	3	6	7.5
パルス波	3	4	7	-	4	-	
切断面実測	未	未	6.4	未	4.6	未	
加工時計画	3	5	10	3	5	10	

と後方散乱波が強度、方向性ともほぼ同様な伝播特性を示すことが分かり、両者はともにき裂検出に利用できることが明らかになった。また、高調波受信波形の包絡線をもとに開口合成法により求めた再構成波形を用いて欠陥部位を画像化する手法の成立性を数値解析により確認し、実験により検証した。以上のことから、大振幅バースト波を用いた、フェーズドアレイによる高周波画像化および水浸高調波画像化により、ニッケル基合金を用いた異種材料溶接部の高散乱粗大結晶粒領域に発生した SCC を検出・確認できることが判明した。しかし、実機適用に向けては、バタリング部からのノイズによる長さおよび深さの過大評価傾向、縦波に対するバタリング部と突合せ溶接部との減衰の差に対する補正、さらにはバタリング部と突合せ溶接部の双方にまたがる SCC のサイジング精度の検討等が必要であること等、今後の課題も明らかになった。

## ② 3次元超音波探傷法によるニッケル基合金溶接部 SCC の高精度サイジング

本研究では、3次元超音波探傷法の特徴を生かし、探傷不可能範囲を減少させる技術としての有効性検証のため、ノズルセーフエンド異材継手のように、現行の超音波探傷試験では探触子走査の障害となる場合の SCC 探傷を想定し、放電加工 (EMD) により模擬欠陥 (欠陥開口部長さ 25mm と 15mm, 欠陥深さ 22.5mm, 15mm, 7.5mm) を付与した試験体に対する探傷試験を実施し、欠

陥の検出性および深さサイジング精度の超音波入射方向依存性に着目した探傷試験データの収集・評価を行った。その結果、長さサイジングに関しては、少なく見積もっても真正面から 25° 程度まで異なった方向からでも、 $\pm 1\text{mm}$  程度の正しい長さサイジングが可能であり (図 12), 深さサイジングに関しては、真正面から 60° 程度まで外れた方向からでも  $\pm 1\text{mm}$  程度の正しい深さサイジングが可能であることが分かった。また、高温継続 (定点) モニタリングや比較的短時間での高温探傷への本方法の適用性・実現性検証のため探触子シューなどの部品レベルでの基礎試験を行い、冷却機能付高温用シューを用いた探傷は比較的短時間に限られるとの見通しを、高温用マトリックスアレイ探触子については試作探触子の前面の遅延材を十分に厚い材料とすることで良好な探傷画像が得られる見通しを得た。以上の成果を踏まえた本方法の実機適用に向けた今後の課題としては、実際の SCC を持つ試験体での検証と改良型の高温用マトリックスアレイ探触子の作製・検証である。

## ③ マイクロ波検出技術<sup>(9)</sup>を用いた高分子材料への放射線照射による経年劣化測定技術に関する研究

本研究では、改良型マイクロ波誘電吸収測定装置 (空洞共振器) を用いたケーブル絶縁材の経年劣化測定技術の精度向上と、その基本である測定に係るケーブルの経年劣化過程の解明を行っている。経年劣化測定技術の精度向上に関しては、ポリエチレンを主体とした平成 20 年度の研究に引き

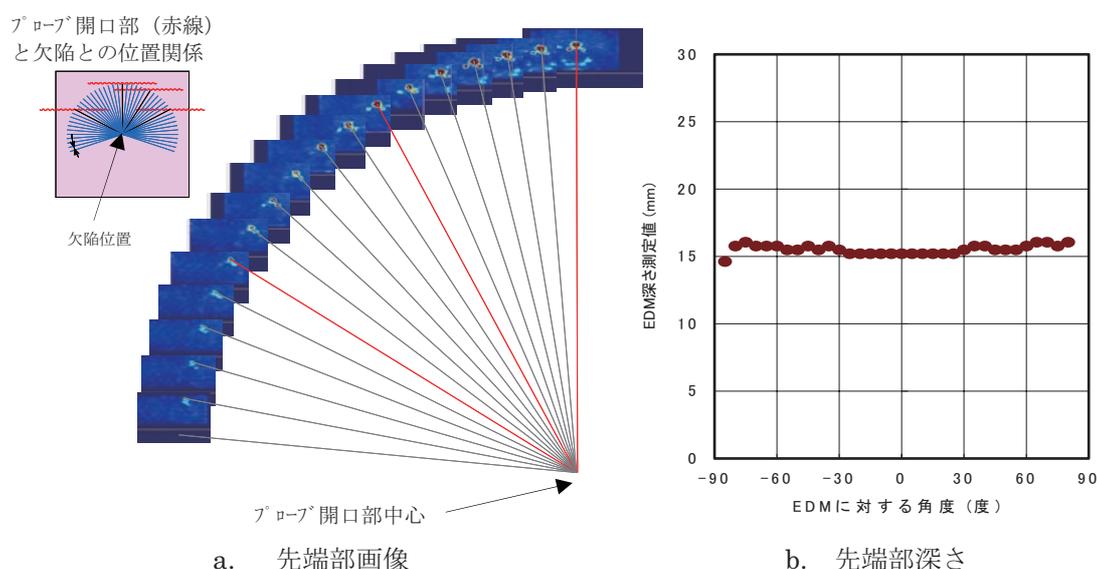


図 12 画像および深さ測定値の角度依存性 (開口部長さ 15mm, 深さ 15mm の人工欠陥先端部の例)

続き、EP ゴムを主体として種々の劣化供試体（導体を含まない）に対する測定実験を実施し、Xバンド（9GHz）およびKバンド（23GHz）のピンホール型空洞共振器による容易かつ高精度の測定手法を確立した。また、より高感度での測定を可能とするQバンド（43GHz）ピンホール型空洞共振器についても所期の性能を持つことを確認した（図13、図14）。また未劣化の実機ケーブルに対する試用、JAEA 原子炉廃止措置研究センター（ふげん）および関西電力火力センターの協力の下でそれぞれの実機プラントでのケーブル敷設・使用状況や測定環境の調査を行った。その結果、実機適用に向けては、測定法の適正化と狭隘な場所での使用を想定した、装置の小型軽量化が重要な課題であることを確認した。今後はこれらの成果を踏まえ、実機適用可能な装置を製作し、実機データの収集実績を積むとともに、種々の劣化試料に対する測定を通して本装置の劣化測定検証データの更なる充実を図ることとしている。また、経年劣化過程の解明に関わる検討では、高分子材料劣化と化学構造変化の定量的相関や劣化予測診断の信頼性に影響を与える実材料での可塑剤等添加物の影響の定量化について検討した。その結果、脱水素反応促進添加物系においてシリコンゴムの母材となるポリシロキサンのみでは、時間相関測定・化学反応速度論的評価のいずれから、有効な相関関係は見い出されず、実際のポリシロキサン系ゴム材料で観測された共振周波数シフトの要因が、ポリシロキサン骨格そのもの“以外”に起因する可能性がきわめて高いと考えられること、シリコンゴム高分子内添加物の分析を行い、9種の実際のシリコンゴム被覆材において、重量比

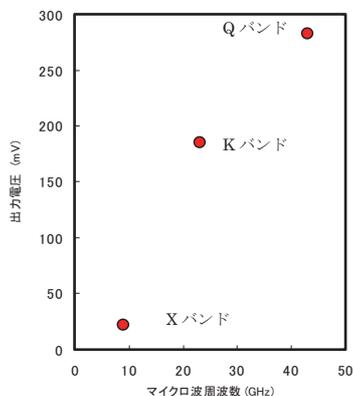


図13 ピンホール型空洞共振器の性能比較

(0.05wt%)以上の成分を12種見出し、このうち同定に至った着色色素4種を含む7種について、酸化反応に伴うマイクロ波共振周波数シフトの挙動を確認したところ、いずれも劣化進行メカニズムに深く関与する化学種ではないことが判明した。以上のことから、シリコンゴムの場合の共振周波数シフトと高分子劣化の相関性は、平成20年度に確認したポリエチレン（PE）の場合と同様、高分子材料内添加物の漏出・化学変化に強く関連していると判断でき、マイクロ波による高分子材料劣化の診断が、酸化防止剤漏出に伴う高分子劣化の早期診断（予防診断）技術となる可能性が一層高まったと考えられる。なお、シリコンゴム中の劣化促進化学種（マイクロ波による検出ターゲット）については、メーカ機密の壁と作業の技術的困難さもあり、未だ同定には至っていない。この点は、マイクロ波誘電吸収に影響を与える劣化機構を確定し、マイクロ波誘電吸収とケーブル劣化との相関の定量化、さらには保全のベースとなる劣化予測法等の検討を進める上で、今後の重要な課題であり、その解決に向けて研究を継続し、本測定技術の測定精度および信頼性の向上を図り、実用化の基礎を固める方針である。

### 3) 溶接補修技術に関する研究

本研究は、690合金とSUS316L鋼の異材補修溶接に関するもので、その課題は、大きく分けて、補修溶接施工条件に応じた健全性評価、補修溶接部の再供用における信頼性評価、および補修溶接の実機適用における施工健全性および再供用信頼性の検証の3つである。

#### ① 補修溶接施工条件に応じた健全性評価

本項の実施項目は、(イ) 材料学的観点からの補修溶

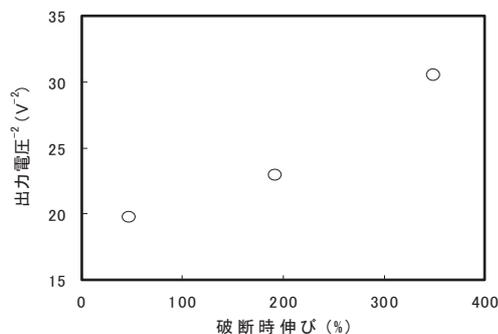


図14 Qバンドピンホール型空洞共振器での測定結果（難燃EPゴムケーブル・導体あり）

接健全性技術指針の検討，および(ロ) 力学的観点からの補修溶接健全性技術指針の検討の2つである。

(イ) 材料学的観点からの補修溶接健全性技術指針の検討

高速度カメラを用いた溶接割れのその場観察を実施し，割れ発生に至る局所ひずみおよび温度条件などの影響を定量的に明らかにした。また，これまでの成果を踏まえ，材料組成や希釈（施工条件）による多層盛溶接金属の組成変化や不純物のコンタミを考慮した溶接割れ感受性について，系統的な試験・評価を実施し，溶接健全性を確保するための不純物元素（P，S）や微量元素（Ce）の含有量，溶接施工条件（希釈率）範囲の規制基準を明確にした。具体的には，Ce 添加材を用いた多層盛溶接試験により，割れ発生防止のための溶接金属中の P および S 量に対する適正 Ce 量は，これらの原子比が  $0.22 < \text{Ce}/(\text{P} + \text{S}) < 1.1$  の範囲であることを明確にした（図 15）。さらに，これに基づき算出した適性 Ce 添加量の溶加材を用いて多層盛溶接試験を行い，溶接金属中での割れが全く認められないことを確認した。さらに，延性低下温度域（DTR）と粒界濃度の関係および多層盛溶接における熱弾塑性解析によって，レーザー多層肉盛溶接における延性低下割れ発生を予測する手法で基礎的検討を行い，P および S 量の多い溶加材はアーク溶接のみならずレーザー溶接においても延性低下割れが発生するが，高純度溶加材では極端に速い溶接速度を除き，レーザー溶接においても延性低下割れが発生しないと予測される結果を得た。また，スポットバレストレイン試験をその場観察することにより，DTR の割れ発生限界を求めることが可能であり，マイクロ割れ感受性に対する詳細な材料学的評価が可能であるとの見通しを得た。

(ロ) 力学的観点からの補修溶接健全性技術指針の検討

反復サブストラクチャ法を用いた 3 次元熱弾塑性解析による，690 合金の多層溶接時のマクロ的な応力・ひずみの評価と実継手において観察される延性低下割れの形態とを対比させることにより，割れの駆動力の大きさを表す指標として DTR 塑性ひずみを定義した。この DTR 塑性ひずみについて，入熱や溶接速度などの溶接施工条件や材料の耐割れ性を表す DTR 温度幅による影響について検討を行い，さらに DTR 塑性ひずみと限界ひずみとの差を指標として，溶接施工裕度の評価を行った。その結果，TIG 溶接では，多重熱サイクルの間に溶接金属は複

数回 DTR 温度域を通過し，DTR 中の加熱過程では圧縮の塑性ひずみが付与され，冷却過程では引張の塑性ひずみが付与されることや施工条件の点からは入熱量が小さく溶接速度が速い場合に DTR 塑性ひずみが低減されること，また DTR 温度域の点からは，100℃ の場合は 400℃ の場合に比べ大幅に低減されることが明らかになった。なお，比較のためレーザー溶接についても同様な手法で予備的検討を行い，冷却時の塑性ひずみの方向が，入熱量が大きい TIG 溶接では引張であるのに対し，入熱が小さいレーザー溶接では圧縮となり，かつ値も非常に小さくなるとの結果が得られた。このことは，レーザー溶接では施工裕度が TIG 溶接に比べて大きくなる可能性を示唆しており，今後より詳細な検討により確認する必要があると考えている。

② 補修溶接部の再供用における信頼性評価

補修溶接後再使用時の信頼性担保ならびに信頼性評価の基礎検討として，600 合金，690 合金および超高純度 690 合金，またこれらの溶接材について，PWR 環境を模擬した最高 360℃ の水素雰囲気の高圧水中での低ひずみ速度試験（SSRT）法により，応力腐食割れの発生の金属組織学的特徴ならびに表面状況を解析した。その結果，600 合金に対して IGSCC 発生の感受性が著しく高まることが確認されている特殊表面研磨を施した 690 合金および超高純度 690EHP 合金では，いずれも IGSCC の発生は観察されなかった。一方，溶接材については，600 合金では溶接金属，熱影響部ともに母材と同様に IGSCC が発生したが，690 合金および超高純度 690EHP 合金では IGSCC の発生はなかった。さらに，溶接割れ対策として導入された Ce 入り 690 合金溶接材についても IGSCC の発生は見られなかった。また，X 線回折残留応力測定システムを主に用いて得られたマイクロ残留応力分布の周期的な特異性と電子後方散乱回折法（EBSD）で観察された溶接金属部の平均結晶粒界間隔観察結果との対応が確認された。なお，結晶方位分布を考慮した数値解析手法として基本的な部分を構築済みのマルチスケール解析法に改良検討を加え，実際の SCC 試験片でのマクロ・マイクロ応力場評価に適用可能な手法として完成させ，これを用いて結晶粒界近傍におけるマイクロ残留応力分布と隣接結晶粒間の方位差などの結晶異方性の関係や，高い応力値を示す部位が割れ発生位置に対応すること等を確認した（図 16）。今後はこれらの成果をもとに，最終目標である SCC 発生に及

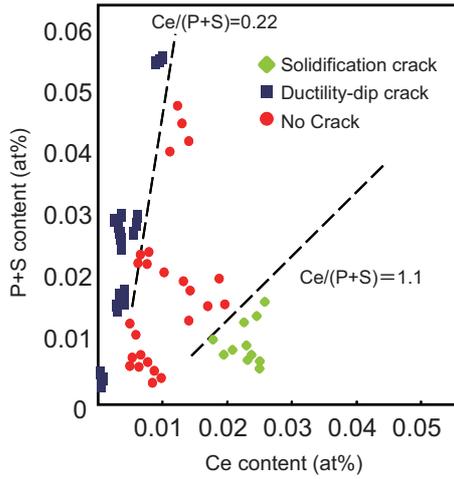


図 15 SUS316L 鋼多層盛溶接金属中のマイクロ割れ防止条件 (Ce 含有率と P + S 含有率)

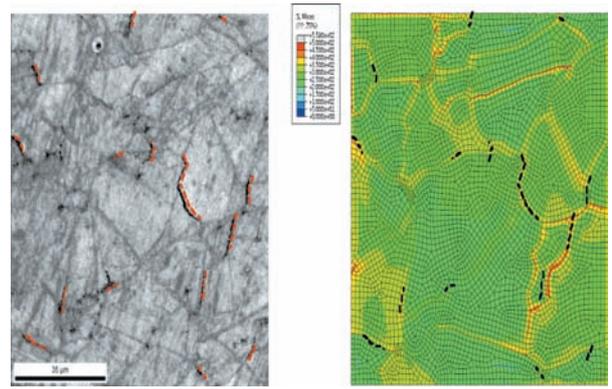
ばすマイクロ残留応力特性の影響の解明を進める。

③ 補修溶接の実機適用における施工健全性および再供用信頼性の検証

実際の高経年化プラントを補修する際に生じる可能性がある問題点を、国内外の損傷事例や予防保全事例を参考にして抽出した。これをもとに、本研究で検証された補修プロセスを実施工に適用した際の、施工健全性とその後の供用中の信頼性が担保されることを検証し、さらに今後の高経年化プラントの予防保全・補修技術の技術情報基盤整備のための実補修溶接部の施工健全性確認モックアップ試験の実施に向けて、試験条件を明確にした上で試験計画を立案した。なお、試験では、加圧器の管台異材継手部を模擬したモックアップ試験片に、本研究の対象としている Ce 添加材と現状の 52 溶材による溶接を施し、PT, UT, 断面金相試験などを行うこととしている。

4) 主要構築物の劣化に関する研究

本研究では、原子力発電所の鉄筋コンクリート構造物の耐久性評価確認のための技術基盤の整備の一環として、ひび割れの発生したコンクリートでの鉄筋腐食に着目し、その進展挙動データの収集、およびこれをもとにした腐食進展評価式の導出等、耐久性評価法に関する調査・検討を行っている。平成 21 年度は、ひび割れが鉄筋位置まで達している鉄筋コンクリート供試体に対して、中性化の有無も考慮した腐食促進試験および解析を行い、中性化および塩分浸透に係る高経年化特性を把握するとともに、鉄筋腐食発生の経時的な影響も考慮した基本特性を調査した。その結果、塩水浸漬試験では、3 週間から 9



(a) SSRT 試験片表面 EBSD IQ マップ (赤点は割れ発生点)

(b) ミクロ残留応力数値解析応力分布 (黒点は左図赤点重書き)

図 16 SSRT 試験結果と残留応力数値解析結果の比較

週間の促進試験期間 (コンクリート試験基準は無いため、メッキ耐食試験に係る JIS-H-8502 を参照した。これによると汀線環境下で 1.5 年から 4.5 年に相当) での鉄筋周りの塩化物濃度はひび割れ幅に関係なく供試体外部 (ひび割れ外部) の濃度と同程度ないし 10~20% 程度高い値を示すこと (図 17)、また鉄筋腐食はひび割れ幅の大小によらずひび割れ近傍にある部位で最も進むことが分かった。一方、塩水噴霧試験からは、鉄筋周りの塩化物濃度はひび割れ幅とほぼ比例するが、ひび割れ幅が約 0.5mm 以上になれば供試体外部 (ひび割れ外部) の濃度と同程度となること、また鉄筋腐食はひび割れ近傍にある部位で最大で塩化物濃度が大きいほど大きいこと等を確認した。この結果を踏まえ、耐久性評価手法の基礎となるコンクリート供試体に用いたものと同じ鉄筋 (公称直径 22mm) を用い、鉄筋のみを腐食促進させた場合の降伏強度低下率を計測し、このデータをもとにひび割れのある鉄筋コンクリートを自然曝露した場合の降伏強度 (すなわち引張強度) 低下率の暫定算定式を導出した。また、平成 20 年度に導出した「ひび割れ内部への中性化進展予測式」の実際の建物への適用に向けての精緻化のため、ひび割れ内部での換気状態の数値流体力学 (CFD) 解析を行った。その結果は、0.1mm 程度のひび割れ幅であっても、風による換気効果により、中性化は予測式より早めに進行するというものであり、平成 20 年度から継続して行っている原子力発電所立地地域での自然曝露試験の結果とも整合する。このことから、建屋外壁等屋外に発生するひび割れの予測評価には風による影響の補正が必要であることが確認できた。

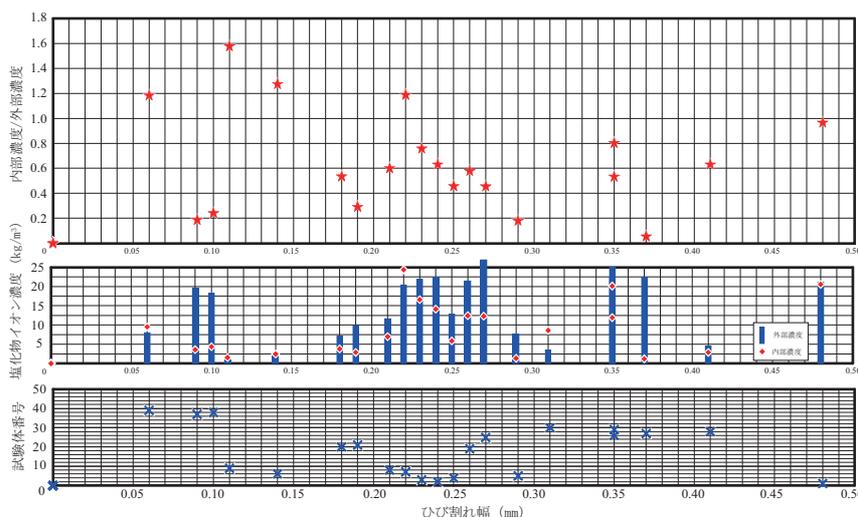


図 17 ひび割れ幅と内部濃度／外部濃度との関係（塩水噴霧試験結果）

今後は、この点も含め、評価精度を高めるために必要な実験データの収集・充実を図り、自然環境下で継続中の自然曝露試験結果も反映し、より信頼性の高い経年化鉄筋コンクリートの降伏強度低下率算定式の導出等、耐久性評価に関する基盤整備を進めることとしている。

## 5. 結言

平成 21 年度は当事業の当初目論見の 5 年計画の 4 年目であり、来期最終年度に向けて「評価指針や技術基準の素案策定を念頭に、より実用性の高い研究成果の達成を目指す」という本事業の最終目的を見据えた、成果見通しの具体化が全クラスタ共通の大きな課題であった。福井クラスタにおいては、ここに報告したように、これまでも増しての研究実施機関・研究者各位の精力的な努力、検討委員会委員各位のご指導・ご協力により、この課題に円滑かつ適切に対処できたと評価している。INSS としては、各研究実施機関の社会的役割である、人材育成、研究意欲の増進、技術シーズ開発等にも適切に配慮しながら、最終年度である平成 22 年度での本事業最終目標の達成に向けた研究の企画・推進、さらには本事業の次の段階に向けてのシーズの発掘・事業化計画の具体化に努力することとしている。

## 謝辞

平成 21 年度の福井クラスタの事業の遂行にあたっ

ての研究実施機関・研究者各位のご努力・ご協力に感謝いたします。また、福井工業大学柴田俊夫教授からは検討委員会主査としての確なご指導・ご助言を頂戴しました。この場をお借りして感謝の意を表します。

## 文献

- (1) 藤村公也，渡海親衛，藤堂二彦，“福井地域を基盤とした近畿圏連携による高経年化対策強化基盤整備事業の実施報告”，INSS JOURNAL, Vol. 15, p. 345 (2008)．
- (2) 藤村公也，渡海親衛，藤堂二彦，“福井地域を基盤とした近畿圏連携による高経年化対策強化基盤整備事業の実施報告”（平成 20 年度），INSS JOURNAL, Vol. 16, p. 293 (2009)．
- (3) “発電用設備規格 配管減肉管理に関する規格”，JSME S CAI-2005，日本機械学会発行，丸善，2005 年 3 月
- (4) “発電用原子力設備規格 加圧水型原子力発電所配管減肉管理に関する技術規格”，JSME S NG1-2006，日本機械学会発行，丸善，2006 年 11 月
- (5) 梶山岳夫，“乱流数値シミュレーション”，養賢堂，2003 年 7 月
- (6) Kiefner JF et. al., “Failure stress levels of flaws in pressurized cylinders, Progress in flaw growth and fracture toughness testing. Philadelphia, America Society for Tesiting and

Materials, 1979, pp. 461-481

- (7) Kanninen MF et. al., Instability predictions for circumferentially cracked Type-304 stainless steel pipes under dynamic loading. Palo Alto, EPRI, 1982
- (8) “発電用火力設備規格 火力設備配管減肉管理技術規格”, JSME S TB1-2009, 日本機械学会発行, 丸善, 2009年7月
- (9) A. Saeki, S. Seki, S. Sunagawa et. al., Philosophical Magazine 86, pp. 1261-1276, 2006