

原子力プラント事故時手順書表示機械化に関する研究 (ステップ-1 基本概念と仕様の考察)

Study on Computerized Presentation of Emergency Procedures of a Nuclear Plant
(Step-1 Thoughts on Basic Concept and Specification)

丹羽 雄二 (Yuji Niwa)* エリック ホルナゲル (Erik Hollnagel)†

要約 一般に文書化された手順書をそのまま表示することは、原子力発電プラントの事故時の運転員の有効な支援に資するとは考えられない。CRT上にフォーマットし直した表示を行うことが必要である。本論文では、CRT表示の基礎として、グラフィック画面上(GUI)に手順書を再フォーマットする方法論についての基礎概念と基本仕様の考察を扱う。

まず最初に、原子力発電プラントの手順書の世界の動向について述べ、手順書機械化による原子力発電プラント運転支援の考え得る種類について考察する。さらに手順書の表示という作業に関して、実施すべき問題点

- (1) 適切な手順書と実施すべきステップの探索 (ナビゲーションと呼ぶ)
- (2) 表示機械化のためのフォーマット
- (3) 操作進行のモニタ
- (4) 手順書表示機械化におけるヘルプ機能
- (5) 状態プロセスと計算機とのリンク

について詳細に議論し、安全注入自動作動時を仮定した手順表示の機械化について、これらを反映した簡単なモックアップについて述べる。本結果は、実際のプラントの手順書表示の機械化の基礎概念として拡張が可能である。

キーワード EOP機械化, ナビゲーション, フォーマット, 操作モニタ, プロセスとのリンク

Abstract Only presentation of raw documented emergency procedure is not considered to be effective for nuclear plants' operators during an accident. It is necessary to present the re-formatted one. In this paper, the basic methodology and specification for presenting emergency procedures on Graphic User Interface (GUI) as a basis for the presentation on plant CRT is treated.

In the first chapter, the trend of emergency procedures in nuclear plants in the world is mentioned. The possible support for nuclear plants' operators by the computerized emergency procedure is also referred in this chapter. In the next chapter, the problems to be considered in the work for the emergency computerization are discussed in detail. They are as follows:

- (1) The access to the adequate emergency procedure and the step to be done (What is called Navigation)
- (2) Re-formatting technology for presentation
- (3) How to monitor progress of operation
- (4) What kind of HELP function should be installed
- (5) How to link plant process

The simplified mock-up of the presentation of the emergency procedure assuming automatic activation of safety injection is mentioned in the subsequent chapters. These results can be applied to the presentation of emergency procedures in real plants.

Keywords computerized EOP, navigation, formatting, progress monitoring, process linking

*技術システム研究所 技術支援部門

†Human Reliability Associates Ltd., The U.K.

1. 緒言—原子力プラント事故時手順書の動向について

1979年3月に起こったスリーマイル島2号機の事故は、機器故障、保守時の過誤、運転員の認識及び操作ミスが複雑に重なり、炉心の損傷に至った事例である。この事故以降、人間と機械の関わりについての重要性が指摘された。これらの反映（アクションプラン）として、事故時の運転員の支援に対しても多くの研究が実施され、幾つかは実際のプラントにも適用されている。

一方は、緊急時のガイダンスシステムに関する研究であり、他方は事故時の手順書（Emergency Operating Procedure; EOP）に関するものであろう。特にEOPに関しては、事象を同定し、その事象に対して修復操作を実施する方法に基づく従来のEOP（事象ベースEOP）だけではスリーマイル島2号機の事故のような複雑な事象については、不十分なことが指摘された。この結果、事象の同定を必要としないEOPが追加されることとなった。

アメリカのコンバッションエンジニアリング社（CE社）のCorcoranらは、原子力プラントの安全機能という概念を定義し、この機能が満たされていれば、炉心の損傷や放射性物質の環境への制御されない放出を防ぐことができるとした。⁽¹⁾ 満たされるべき安全機能が阻害された場合に適用されるEOPを準備しておけば、基本的に運転員は事象の同定をすることなく、プラントを整定させることが可能である。アメリカのウェスチングハウス社（W社）は、このCE社の安全機能をさらに運転員が把握し易い形で再定義し、安全機能ベース（修復）EOPを作成し、従来の事象ベースEOPとの共存を図った。これらの手順書体系はERG（Emergency Response Guideline）と呼ばれるものである。⁽²⁾ CE社他でも、安全機能ベースEOPとの共存を図ったものが確立されているが、W社のERGが、体系全体として最も整備されたものといえる。

ERGは事象ベースのEOP（Optimal Recovery Guidelines; ORG）、安全機能ベースのEOP（Function Restoration Guidelines; FRG）、ORGからFRGへの移行（Navigation）をガイドするプ

ラント状態指向のフローチャート（Critical Safety Function Tree）の3種類の手順書から成り立っている。日本国内の電力会社もこの動きを受けて、手順書体系の改訂、整備が鋭意実施されている。国内PWR電力でも安全機能ベースの概念に基づくEOPを追加しているが、国内の場合、設計ベースを上回る事象が生起した場合、このEOPを使用するといった考えが強い。

事故時の運転員の支援に関する研究も、スリーマイル島2号機の事故以降実施され、多くは実際のプラントで稼働している。安全機能を常時モニターし、安全機能が損なわれた場合、該当のパラメータを表示する方法（Safety Parameter Display System; SPDS, Critical Function Monitoring System; CFMS）、マルチレベルフローモデリング（MFMM）を応用した方法、或いはCFMSの概念にエキスパートシステムを組み込んだ方法が既に適用されているか研究中である。⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾ これらの多くは、事故時の運転員の意志決定に支援を与えるもので、その意味で間接的な支援と言えよう。

直接手順書をCRT上に表示するものは意外に少なく、W社が、事象ベースEOPであるORGの表示システムを既に開発したと伝えられている。本来、W社のORGは、その作成段階からCRTによる表示を意識して、工夫されたフォーマットで記載されているので、これを再フォーマットすることなく機械化表示を実現したものと考えられる。⁽⁷⁾

一般に国内では、原子力産業のみにかかわらず化学産業の分野においてもプラントの運転手順書は手順そのもの、操作にあたっての注意事項、或いは現在まで得られたノウハウが一般の文章で記載されている場合が多い。これは日本の文化、日本語の構造から生ずるものと思われるが、手順を運転員にEOP表示という直接的な方法で認識させることは、原子力プラントの運転員支援として、世界の趨勢を考慮しても十分価値のあることである。航空産業で見られるようによく使用される手順書を小冊子形式で供給することや運転員が使用するべきEOPを計算機に記憶させて置き、必要な部分をハードコピーで取り出すという方策も考え得る。⁽⁸⁾ しかし、将来の拡張性、参照の効率を考えた場合、計算機を用いたEOP表示の機械化を検討しておくことは、必要

である。EOPの内容自身については、電力内で内容の改善が実施されているし、また、電力が自身の努力で鋭意改善すべきものである。それ故、内容自身の検討については、本研究では扱わない。

2. EOP機械化による支援の種類について

EOPの参照にあたっては、最小の努力によって、遅滞なく探索、参照が可能になることが必要であるが、昨今の計算機技術の発達によって、下記のEOP使用の支援の種類が考えられる。

1. 手順の自動生成—自然言語発生の処理を計算機が行い、手順が自動的に計算機により自動生成されるものである。実際の状況と生成された手順に矛盾が生じることは、避けられないので、オンラインによる学習機能を付与する必要がある。
2. 手順の表示—計算機の情報処理の形態により、支援方法が様々考え得る。計算機表示のために再フォーマットを要する。
3. 手順実行追跡—実施中の運転員の操作手順を追跡し、自動的に次のステップを表示したり、不要や余計なステップを表示ファイルから消去するものである。
4. 手順監視—手順実行追跡とよく似たものであるが、計算機自己の機能により、運転員の目的を推論し、目的と異なった操作をした場合、警報等で注意を促すものである。

項目3、4については、極めて高度な情報処理技術を必要とする。当面、本研究では、項目2を取り扱い、さらに進んだ研究、即ち人工知能導入による手順の自動生成の基礎を築くことを目標とする。

3. EOP機械化の定義について

本章では、側面を変えて、EOP機械化研究の発展ステップについて考察する。これら各々のステップがEOP機械化の定義を与える。

Level-0 文書としてのEOP

- この段階では、EOPは現在の使用されている手順書か、チェックリストである。

Level-1 計算機化された文書のEOP

- この段階では、文書は電子フォーマット化され、ディスプレイ（VDU）に表示される。スクロールは手動で実施される。但し、VDU表示のための再フォーマット作業は実施されていない。適当なファンクションキーを使用して、当該のステップを前後にスクロールさせることは可能である。手順書の電子ファイル化は原子力産業分野でも実施されているものである。

Level-2 計算機表示のEOP

- 計算機の表示用に再フォーマットが実施される。この時点でEOPが計算機化されていると定義してよい。情報処理が可能となるからである。

Level-3 操作進行のモニタ付きの計算機化EOP

- プロセス量とのリンクにより、自動スクロールが行われる。また、これによる運転員の作業軽減が期待できる。

Level-4 自動EOP：局所委任

- 計算機から出力を出すことにより、一部の操作を計算機に代行させるものである。但し、当該の部分は十分に吟味され、定義されていなければならない。実行時には運転員が開始命令を入力する。

Level-5 自動EOP：同意実行

- プロセスを監視し、同定し、適当な手順を選択し、操作を実施するという事故時の一連の行動の大部分を計算機に代行させる。それ故、運転員の同意を得て実行される必要がある。

Level-6 自動EOP：自動問題解決

- 上記の機能に加えて、計算機システムは、プロセスにおける問題を同定し、これを

運転員の同意や操作を要求することなく、自動的に解決するものである。

Level-7 自律実行

- これは完全な計算機自動化を意味し、計算機が必要と判断した場合に必要な操作を計算機が実施するものである。運転員に実行結果を報告するものと、全くしないものの2つの種類が考え得る。

これらの各段階での人間-機械の係わり（役割や責任分担の変化）については Billing がその概念を述べている。⁽⁹⁾ 本研究の範囲は、Level-3 の一部の実現を目標とすることである。

4. 基本仕様の考察について

研究の範囲が明確にされたところで、EOP表示の機械化にあたって、考慮しなければならない5つについて検討する。前章と同様に各観点毎に、各段階での目標を明確にする。これにより、当面の画面設計についての基礎的な仕様を明確にしていく。5つの観点とは、下記の5項目である。尚、以下でLevel-Xとあるのは、実際には現状の技術では実現不可能に近いものであるが、当然次の段階として考え得るものを記述したものである。

1. 適切な手順書と実施すべきステップの探索（ナビゲーションと呼ぶ。）
2. 表示機械化のための再フォーマット
3. 操作進行のモニタ
4. 表示機械化におけるヘルプ機能
5. 状態プロセスと計算機とのリンク

4.1 ナビゲーション

Level-0 単純シーケンシャル構造

- 手順書とステップの探索は、データベース検索と基本的に類似している。最も簡単な形態は、図1に示すような、シーケンシャル構造であろう。適当なファンクションキーを用いて、実施すべき箇所を探す

ものである。構造は極めて簡単であるが、探索には時間を要する。運転員は目標とする操作手順、例えば「蒸気発生器伝熱管破損事象」(SGTR)という項目を手動スクロールにより探索した後は、単純にステップを前向きに実施していけば良い。海外のプラントでは、このような単純な行動によっても、自身の操作すべきステップを見失うという事態を経験している。これは、ステップの進行と操作が結びついているためである。操作実施に注意が集中することにより、自分の操作したステップを忘れ、その結果、ステップのスキップ（操作し忘れ、オMISSIONエラー）を起こすことは十分考え得ることである。これを防止するのが、原始的ではあるが、操作チェック欄を使用することである。



図1 単純シーケンシャル構造のテキスト

Level-1 階層構造

- 次に考え得る探索方法は、階層構造による組織化である。先程のSGTRを例に採ろう。SGTRに関する階層構造は下記のように書き表されるであろう。

1. バウンダリの破損
 - (a) 1次系バウンダリの破損
 - i. LOCA（1次冷却材喪失）
 - ii. SGTR
 - (b) 2次系バウンダリの破損
 - i. MSLB（主蒸気管破損）
 - ii. MFLB（主給水管破損）

それ故、SGTRには、2回の検索で到達が可能である。以上のような階層構造を想定された事象全てについて組織化出来れば、「事象」そのものの検索の効率は良くなる。さらに適切なアイコンを定義出来れば、運転員は容易に自分の操作している位置を把握することができるであろう。図2に階層構造の概念図を示す。

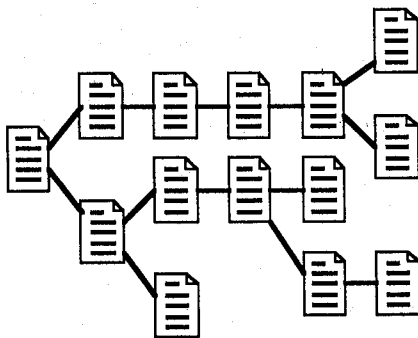


図2 階層構造のテキスト

Level-2 ハイパーテキスト

- 階層構造の手順書をさらに強化するには、ハイパーテキストを使用することである。これにより、最早、各々のステップ間のリンク付けのみならず、機器、サブシステム、パラメータ間のリンク付けが可能となる。例として次のような記述を考えて見る。

[主蒸気圧力「低」または1次冷却材平均温度「異常低」と主蒸気流量「高」の一致条件で自動的に安全注入が動作した場合、または格納容器圧力がX Paに上昇した場合は、主蒸気隔離が動作したことを確認せよ。付録-0を確認せよ。警報A1,A2の発信を確認せよ。]
以上、3つのセンテンスから成立する1ステップの命令にも、例えば、

1. 「主蒸気圧力」

2. 「1次冷却材平均温度」

3. 「付録-0」

他にハイパーテキストを生成させることが可能であろう。これらのリンクにより、運転員は、任意の手順書の様々な場所を参照することが可能になる。このようなハイパーリンク構造を付加しておけば、ヘルプ機能、操作の説明表示に応用することができるものと考えられる。ハイパーリンクでは、多重構造アクセスが容易になるため、色々なアクセスの方法が可能になる。ハイパーテキストにもブランチ型、ネットワーク型の2種類がある。図3にこれらの採用した手順書の組織構造の概念を示す。明らかに完全にランダムなナビゲーションを許すものではなく、あくまでパスに沿ったナビゲーションが許されるだけである。また、ハイパーテキストによる本来の有効性を十分に発揮するには、手順書を完全改訂しなければならないことに注意しなければならない。しかしながら、運転員は完全なハイパーテキストを要求しているとは考えられないので、完全なハイパーテキストを構成させる必要はないものと考えられる。EOP表示の機械化システムのプロトタイプ作成時には、実際の運転員の要求に基づいて、一部にハイパーテキストの概念が導入されるであろう。

Level-X インテリジェントアクセス

- 本研究では、ここまでは考慮していないが、運転員の操作の意味、例えば、炉心を冷却しているとか、破損個所を隔離し得るとかを計算機が理解し、該当の手順を「操作の意味」という観点から索引付けされたライブラリにアクセスし、その手順を表示するものが考えられる。リンク構造自身もプロセスのダイナミクスにより変動するものが必要とされるであろう。現状の技術の適用だけでは、実現が難しいと言わざるを得ない。

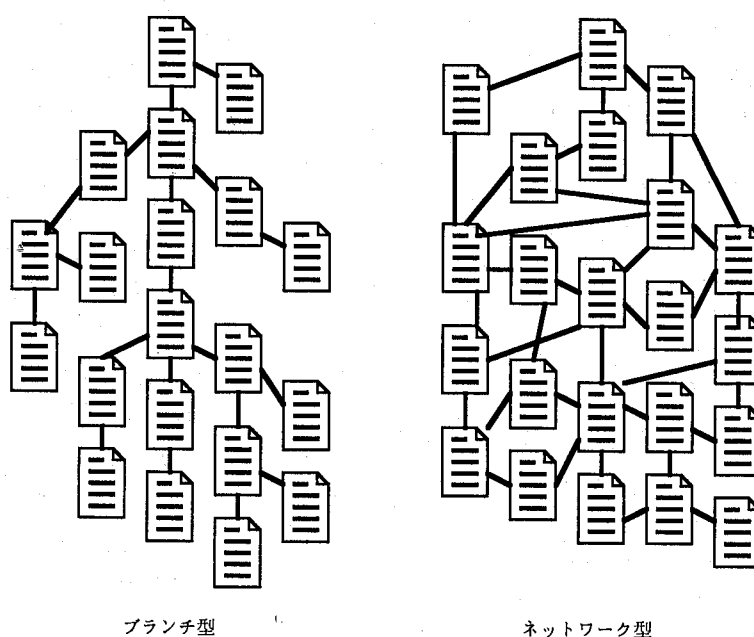


図3 ハイパーテキスト構造

以上のように、基本的に参照すべきEOPの探索については、階層構造が適しているものと考えられる。この為には、EOP体系の階層構造への再組織化が必要である。手順書の探索に成功したならば、シーケンシャルに表示を行えばよい。これは、EOPの記載構造が、本質的に操作時刻順に逐次に行われているからである。

4.2 表示機械化のためのフォーマット

Level-0 文書そのものの画面表示

- 現在のEOPをそのまま計算機に記憶させ、画面表示するか、運転員が該当する手順が記載された箇所を選んで、ハードコピー出力を行うものが、最初の段階であろう。これは、ページ毎の表示となるので、ナビゲーションの最初の段階に一致する。

Level-1 分解表示-1

- EOP表示を機械化する上での再フォーマット作業の最初の作業は、様々な要素(行動、条件、コメント、ノウハウに基づくアドバイス他)にEOPの操作ステップを分解することである。これらにそれぞれ

異なるフォント、色、空間的配置(インデント)、グラフィック上の強調(ボールド、背景パターン)を与え表示するのが効果的であろう。さらに、アイコン、記号、ウィンドウ等を導入するとさらに表示効果としては上がる。但し、オーバーラップウィンドウは重要な情報を隠すことがあるので、使用にあたっては特別の注意が必要である。アニメーション、3D表示、マルチメディア情報の活用もこれらの進んだ形として考え得る。これは、文書EOPの限界を越えるものであり、EOPの計算機表示によるEOPの表示の限界の拡大を示している。

Level-2 分解表示-2

- 前項の分解作業に加えて様々な運転員の役割、機能に異なるフォーマットを与えることも考慮されてもよい。一般にEOPには、異なる運転員(班長、制御員、主機員)毎に指示がかかっているものである。これらの各職種の運転員に異なる色を与えるのも一方法である。また、操作ステップには関係のない運転員は目立ちにくいグレーで表示するとさらに担当

が分かり易くなるであろう。これらは、表示システムをどのように使用するかにより異なる。例えば、各人専用のディスプレイを用意するのか、或いは複数人で共用するのかを先ず決定する必要がある。再フォーマットはこのように操作ステップ実施における過誤の可能性を低減するものである。

Level-3 条件表示

- 再フォーマットによる有効な点はさらに、条件節の理解を助けるという点である。EOPには、例文でも示したように、ある条件が成立したならば、ある操作をせよという記述が多く、さらにその条件節は複雑なものが少なくない。これについては、空間的な配置により、理解を助けることができる。(10)

本節の事項は、再フォーマットのために必要な作業の基礎を記述している。EOP表示にあたって、Level-1 から Level-3 の事項を実施することが必要である。

4.3 操作進行のモニタ

EOP機械化を表示のみに限るとしても、操作進行のモニタは極めて重要な役割を果たす。操作進行モニタの本質は、運転員が手順を参照しだしてからどれくらい経過したか、即ちどのステップを実施し、どのステップが残っているかを把握させることである。操作進行モニタはEOPとおりの操作を過誤なく実施していることを保証する上でも重要な役割を果たす。

Level-0 操作進行モニタなし

- 進行モニタ機能を搭載しない場合であり、操作し忘れ等の過誤の危険性がある。

Level-1 手動チェックによる進行モニタ

- チェック欄を使用した手法はしばしば従来の文書EOPにも見られる。これらを統合したものがいわゆるチェックリストであ

る。運転員は当該の操作が完了すれば、枠やボックスの中にチェックマークを記入する。チェック欄使用の有利な点は、

1. 運転員に単純であるが、有効なフィードバック情報を与える。
2. 手動（運転員自身）、自動（計算機）に関わらず、EOPの見落としエラー（オMISSIONエラー）を低減させる。
3. チェック欄の情報は、自動スクロール機能を考察する場合、必要不可欠な基礎である。
4. チェック欄の情報は、それまでステップを実施したことによる発生する不要な条件の消去に使うことができる。

である。機械化に関して言えば、実現は簡単である。適当なファンクションキーを押すことにより、または、マウスと記号キーの組み合わせにより、画面上、チェック欄を満たすことは簡単である。これらは、当面、運転員の操作により、手動で実施される。また、自動のタイムスタンプとの組み合わせにより、事故/事象の解析にも適用することができるのも大きな有利点である。

Level-2 半自動チェックによる進行モニタ

- しかしながら、事故状態においては、チェック操作は運転員のワークロードの増加を招く可能性がある。特に操作が輻輳する場合には、チェックは言うに及ばず、表示システム自身、無視される危険性をはらんでいる。それ故、このチェック作業も自動化を考慮すべき対象となる。プラント状態やフィードバック、さらには機器の接点信号を用い、これを自動チェック機能の処理系への入力信号とすることで、自動化が実現できるであろう。しかし、全てのステップについてこれが実現可能な訳ではない。自動と手動を組み合わせた半自動進行モニタが、現状考え得る最も良い形態であろう。

Level-X 完全自動進行モニタ

- 機械の操作認識や動的認識モデルの導入により可能となる。もし計算機が運転員の採ろうとしている行動を理解できるならば、その時に必要な画面の呼び出しに適用され得る情報となる。現在の技術応用では実現性は極めて低い。

本研究では、当面、手動チェックによる進行モニタを主眼に置き、設計を進めることとする。

4.4 EOP表示機械化におけるヘルプ機能

付加的な情報の表示を、どこまで詳細に行うかは重要な問題である。EOPが運転員の必要とする知識を全て網羅しているとは言えないから、表示の程度をよく検討しておく必要がある。使用者は、この知識は有しているはずであるという仮定でEOPは書かれている。しかしこの仮定も常に正しいとは限らない。これは運転員の仕事の仕方やレベルといった個人差によるだろうし、運転員のその時置かれている立場にもよるであろう。このような理由により、付加的な情報の表示機能を考えることは必要である。ただ、EOP参照が要求されるような状況下で付加的情報の参照が本当に要求されるのかどうかは、さらなる検討が必要である。この付加的情報表示をヘルプ機能として実現させる。

Level-0 ヘルプ機能なし

- これは、文書EOPそのままの状態である。EOPが完成した時点で、内容、構造等を容易に変えることは出来ないからである。電子化されたEOPも同様となる。

Level-1 受動的ヘルプ機能-1

- EOPの構造は変えずに予め定義された情報のみを表示するものである。EOPの文脈とは独立なものとなる。これは、1980年代半ばまでの計算機において典型的なものである。この種のヘルプ機能をEOP表示システムに適用すれば、運転員は情報を必要とする時、必要な情報

を検索する必要がある。検索は辞書を引く要領で実施すれば良い。

Level-2 受動的ヘルプ機能-2

- 文脈に関連するヘルプ機能を有するものである。この情報はその操作ステップが実施される場合の関連する情報、プラントのプロセスに関する情報でなければならない。これは最近の計算機のヘルプ機能に見られるものである。再帰的なヘルプ機能も考慮しなければならない可能性がある。

Level-3 能動的ヘルプ機能-モデルベースヘルプ機能

- さらに進んだ形は、文脈、ユーザー両方を考慮したヘルプ機能である。これに運転員のモデルを組み込み、状況に応じて、どのような付加情報を必要とするかを計算機自身に判断させるものである。現状の研究成果を踏まえれば実現出来ないことはないが、実際の現場の運転員の要求とは全く異なったものになる恐れがある。また、操作進行のモニタを必要とする。予め現場の要求を調査するという作業により付加的情報を用意しておくのは、有効と思われる。

上記のように受動的であれ、能動的であれ、ヘルプ機能は必要なものである。具体的なヘルプを必要とするものには、EOP全体、各々のステップ、制限値、判断基準、機器・サブシステム等が考えられ、その内容は設計思想、関連インタロック他が考え得る。最初の段階としては、ヘルプ機能の付与は考察しないが、実際にEOPを使用する運転員の要求に応じて、有効なヘルプ機能を付与できるように、ソフトウェア設計段階において、十分な柔軟性を持たせておくことが必要である。

4.5 状態プロセスと計算機とのリンク

EOP中の操作ステップの中では、制限値、設定値、目標値がしばしば現れる。これらの値が、その

状況におけるプロセス量により自動的に改訂される機能を持たせるためには、プラントのプロセス量とリンクをとることが必要である。

Level-0 リンクなし

- プロセスとのリンクがない場合である。この場合、必要であれば、運転員は直接計器からこれらの値を読み取らなければならない。電子化されたEOPでは当然、これらのリンクは考えられない。

Level-1 制限値の変更

- 制限値がプロセス状態（蒸気表）、システムのアベイラビリティや他の条件（燃料サイクル他）で変わる場合、プロセス量とのリンクにより、これらの制限値を計算機が自動的に改訂するものである。これで、運転員は計器を見たり、記憶しておいたりする必要はなくなる。

Level-2 主要パラメータの自動読み込み

- 前述の例文には、格納容器圧力がX Paに上昇しているかどうかをチェックする指示を掲げたが、その時の格納容器圧力が画面上のどこかに出力されれば、運転員が異なった計器を読む過誤や読みとりエラーを無くすることができる。但しこの場合、EOP表示システムの信頼性は安全系に比べても、同等かそれ以上に高くなければならない。このように単にプロセス量の読みとりと表示を行うことを受動的リンクと呼ぶ。計算機がプロセス量を認識し、比較し、規定された値（例文ではX）に達した場合、表示するものを能動的リンクと呼ぶ。しかし、これは前述の「自動EOP」からかけ離れたものであることに注意しよう。それ故、EOP表示システムにおいては、受動リンクが行われるだけで十分である。

Level-3 Level-1 と level-2 の複合

- 制限値の変更と主要パラメータ読み込みの両方を行うものである。あくまでEOP

P表示を改善するものであり、運転員の役割と責任の本質を損なうものであってはならないことに注意する必要がある。

当面の設計目標としては、オフライン使用を仮定し、Level-1 に止める。

4.6 適応段階について

5つの重要な項目について検討したが、さらに、付加的に実際のEOP表示機械化までに考慮されるべき事項について明らかにしておく。

Level-0 適応なし

- 他の項目と同様に、EOP表示機械化に対する適応が全く考慮されていない状況である。それ故、この段階では、文書そのものか、何か改編を実施したレプリカである。

Level-1 ある事象を想定した適応

- ある事象を想定して、適応問題を考える段階である。この段階では、ある程度のプロセス量とのリンクを始めとして、上述の他の事項についても考慮する必要がある。EOPの当該事象の全ての表示機械化を考えるより、当面必要がないと思われるところを除外して、考察するほうが見通しが良くなるのは当然である。

Level-2 限定された数個のEOPの適用

- この段階では他の関連するEOPも考慮に入れ、これらとのリンクが間違いなくかつ自動的に採られることを確認する。この場合、参照される別のEOPは全てである必要はなく、一部分であっても良い。

Level-3 フルスコープEOPに対する適応

- フルスコープEOPの適応を考察する段階である。この段階では、様々な参照条件を考慮に入れなければならない。多くの解決しなければならない事項が現れ、これの解決を図っていく段階である。

本研究は、研究の性質から Level-1 の範囲で行うのが適当であるが、ある EOP 内で他の EOP の参照を指示している現状を考慮し、Level-2 までの作業が必要となる。

5. EOP 表示機械化に対する基本作業

前章で考察した仕様に基ついた EOP 表示機械化について、再フォーマット作業のガイドラインの作成が必要となる。この作業ガイドラインの目的について明確にしておく。

1. EOP 毎に異ならず、分かり易いレイアウトを定義すること。
2. 全ての運転員が、自分が何を操作しようとしているのか、どう操作しようとしているのか、他の運転員の操作とどう関連があるのかを明確に知っていることを保証すること。
3. どこまで EOP を分解できるのかを明確にして置くこと。
4. 条件節と操作間の関連が明確に把握できること。特に条件節の論理結合については把握しにくいので、これについて分かり易く再フォーマットした形で、運転員に表示する必要がある。
5. 運転員の操作ステップ間のリンク、従属性に対する理解を向上させること。
6. オンライン支援のための仕様を明確にすること
当面、オフラインを前提とするが、その後のオンライン支援に当たっては、速やかにシステムの改善が可能なように、ソフトウェアに柔軟性を持たせておくことが必要である。オンライン化にあたっては、特に事故時において、運転員のワークロードを著しく増やすものであってはならない。このため、できるだけ、運転員の負担を無くし、本来の支援に供するような形で機械化に取り組むべきである。
7. ナビゲーションの方法が EOP で統一されており、理解し易いこと
運転員が EOP 表示システムの使用を決定した時点で、遅滞なく要求される画面が呼び出されなければならない。
8. 運転員のチーム行動を向上させること

5.1 EOP 表示画面に表示すべき事項の検討

EOP 内には様々なタイプの情報が記載されている。これは、通常時の手順書と類似したものである。全ての情報は EOP 表示機械化にあたっては保存されなければならない。EOP 表示機械化にあたっては、さらに情報を加えることが必要になる。EOP の情報は下記のとおりになる。

1. 手順と操作ステップのナンバー付け
運転員は事象に応じた EOP を検索出来なければならない。それ故、明確なナンバー付けが実施されていなければならない。EOP での位置を把握できることも重要である。
2. 各ステップで担当の運転員の明確化。
3. 明確に記述された行動（操作）
EOP における最も重要な情報である。これらは、さらに 2 つに明確に分類しておいた方が良い。実際の操作行為と観察行為である。前者はある効果を実現するためにシステムを制御するために行う動作を言い、後者はそれ以外を言う。例えば、計器の指示を読むのは観察に属する。計器の指示を読むのに何かの機器を起動しなければならないとしても、これは状態の変化を目的としたものではないので、観察である。
4. 操作ステップに関連する条件節、試験項目
本項目も重要なものである。多くの操作は条件節とともに記述されているからである。
5. コメント、注意事項
行動の項目には載らない重要事項を記載する。運転員が記憶しているかも知れないが、これを忘れると操作、結果に重要な影響を及ぼす。
6. チェック欄
厳密に言えば、情報には相当しないが、運転員がどこまで操作したかを知るためには重要である。
7. プラントの特殊状態における注意事項
例えば安全系のサブシステムの一部が修理中である時の運転上の注意事項（運転条件の変化、例外的な措置）は上記の項目同様に重要な情報である。

8. **設計に関する情報** 何故そのような操作をするのかを運転員に情報として与えることは、時として重要である。
9. **表示番号** 操作しているステップの同定他、1ステップが1面の画面以上の情報を越える場合、同定は操作し忘れを防ぐ観点からも重要である。また、ナビゲーションの形態にも依るが、操作ステップの開始時点と呼ぶためにも使用される。
10. **ステップ、表示ディスプレイをナビゲートする記号、またはアイコン** これらを用いれば、予め定義されたパスに沿っての参照すべきステップの検索が容易になる。
- これら全てを限られたスペース内に表示することは難しいが、VDU表示によって表示に柔軟性を持たせればこの問題を解決することが可能である。さらに動的な画面を導入することにより、これらの情報の表示効率をあげることは可能である。図4に考え得るEOPの計算機表示の例を示す。表示画面中の領域に対応する説明を下記に示す。
- ① EOPとステップの番号は常に表示されなければならない。このフィールドには、アイコン(矢印)もナビゲーションのため表示される。
 - ② このフィールドには事象の総操作ステップ数と、その内のどれを現在実施しているかを表示する。アイコンも同様に表示し、ステップ間のナビゲーションのために使用する。
 - ③ 表示ステップの担当者を表示する。
 - ④ EOPにおける全てのステップには、チェック欄が必要である。もし条件節がある場合には、独立したチェック欄が必要である。
 - ⑤ この領域には、「行動(操作)」が表示される。「観察行為」と「実際の操作行為」は異なる色で表示するのが効果的である。条件節と操作行為を同一の画面に表示することが必要である。
 - ⑥ 条件節、操作行為のために行う試験を表示する。条件節は文章とレイアウトの工夫により、認識性を上げる必要がある。

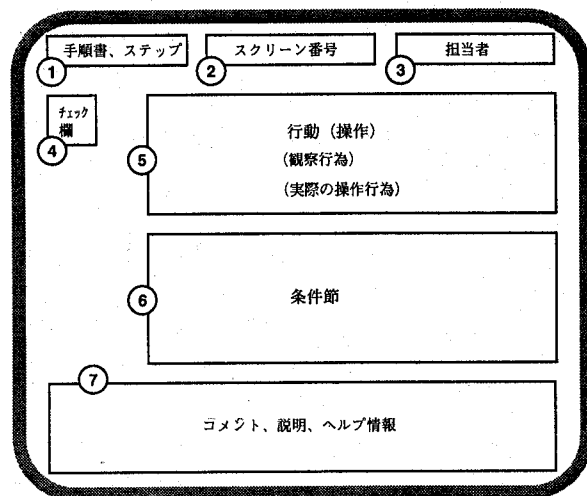


図4 画面レイアウトの例

- ⑦ この領域には、コメント、説明、ヘルプ情報を表示する。該当情報がない場合には、行動や条件節のフィールドを拡げて表示する。逆にこのフィールドの情報が多い場合には、行動、条件節のフィールドを犯さないように注意しなければならない。

5.2 条件節の表示について

前述のとおり、条件節の把握は、ストレスのかかった状況では、さらに難しくなる。特に接続条件（AND）と非接続条件（OR）が複雑に絡みあった場合、平常時でもその把握は難しくなる。これを表示空間の利用（レイアウト）により、把握を容易にし、過誤の減少を図る。

図5のとおり、OR条件に対しては、各々のチェック欄は共通のチェック欄の稜線に接続させると良い。全部の条件がチェックされれば、この共通のチェック欄に自動または手動でチェック可能となる。AND条件に対しては、他の方法、例えば色の使用、グループ化等でも可能であるが、OR条件との整合を考え、線で各条件を結合する。

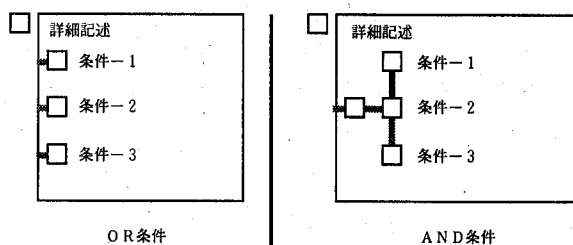


図5 条件の表示方法

チェック欄記入により、不要となる条件節があれば、自動的に消去する。例えばOR条件に対しては、もし1つの条件にチェックが入れば、自動的に他の条件が消去されるようにしておけば、運転員の負担が少なくなるであろう。同様にAND条件については、全体のチェック欄への記入は全ての条件のチェック欄への記入が完了するまで、「ロック」される。

前述の例文の一部について、再度考察しよう。

[主蒸気圧力「低」または1次冷却材平均温度「異常低」と主蒸気流量「高」の一致条件で自動的に安全注入が動作した場合、または格納容器圧力がX Paに上昇した場合は、主蒸気隔離が動作したことを確認せよ。]¹

この例文を構成要素分解すると、
次の条件で安全注入が動作した場合、

{ ([主蒸気圧力「低」] AND [主蒸気流量「高」]) OR ([1次冷却材平均温度「異常低」] AND [主蒸気流量「高」]) } OR [格納容器圧力がX Paに上昇]

その時、主蒸気隔離が動作したことを確認せよ。

以上のように接続（AND）条件が2つ、非接続（OR）条件が2つから構成されているのが明らかとなり、図6のような表示画面のモックアップを得る。

6. 問題点と今後の予定

極めて概念的なモックアップの作成を報告した。EOP表示に向けての具体的な作業は、4.2節にも記述したように、EOPの記述事項を分解し、これを5.1節に述べたような概念で再フォーマット作業を進めていくことである。さらに、この画面を「認識性」の観点から、評価、改善していく必要がある。

本報告では、事故の同定に成功し、適切なEOPを探索することについても同一画面のシーケンシャル表示をモックアップでは導入したが、適用すべきEOPの探索問題もEOP表示機械化にあっては、極めて重要な問題と考えられる。また、表示システムと人間のインターフェースの問題も重要である。EOP表示システムの操作が煩雑な場合、事故時の運転員のワークロードを増やす結果となり、慎重な検討が必要である。以上の問題点の解決が、EOP表示機械化のための検討課題となる。これらの問題点の解決を図った後、デモンストレーションシステムの構築に着手する予定である。

最後に、本研究でHuman Reliability Associates Ltd.との共同研究において、両者の調整に尽力頂いたコンピュータソフト開発株式会社の岩城利夫主席研究員に謝意を表します。

¹モックアップ作成のための例文であり、実際のEOPの記述の引用ではない。

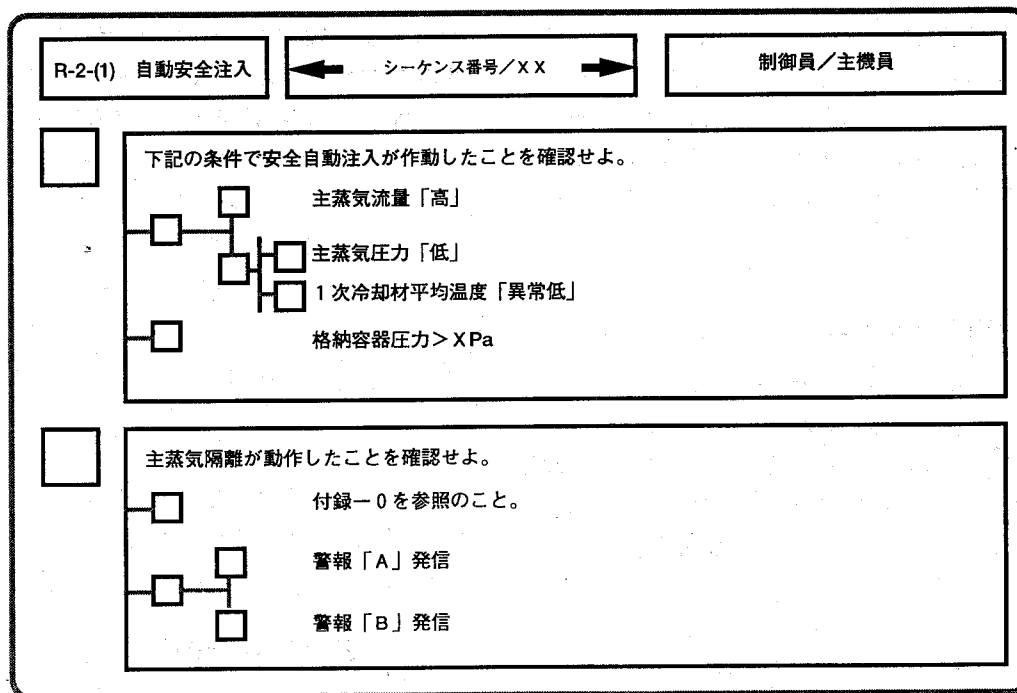


図 6 表示画面の設計例

参考文献

- (1) W. R. Corcoran, Nancy J. Porter et al, The critical safety functions and plant operation, Nuclear Technology, Vol.55, Dec. 1981, 690-712
- (2) A. Pierard, R.J. Contratto et al, A methodology to respond to emergency situations-Emergency Respose Guidelines, IAEA-SM-268/67, 313-331
- (3) D.D. Woods et al, Evaluation of safety parameter display concepts, EPRI-final report NP-2239, Feb. 1982
- (4) N.K. Simon et al, A comprehensive plant safety monitoring system for San Onofre Nuclear generating station, Units 2 and 3, ANS annual meeting, Los Angeles, California, June 1982
- (5) K.Monta, J.Itoh, An ecological Interface design for BWR nuclear power plants, Proceedings of post ANP'92 Conf. seminar on human cognitive and cooperative activities in advanced technological systems, Kyoto, Nov. 4-5, 1992
- (6) I.S. Kim, M.Modarres, Application of goal tree success tree model as the knowledge base of operator advisory systems, Nucl. Eng. Des., 1987
- (7) R.G. Orendi, D.S.Petras et al, Human-factors considerations in emergency procedure implementation, Conf. Rec. IEEE 4th Conf. Hum. factors power plants, 1988, 214-221
- (8) A. Degani, E.L. Wiener, Human factors of flight-deck checklists: The normal checklist, NASA CR-177549
- (9) C.E. Billings, Human-centered aircraft automation: A concept and guidelines, NASA Technical Memorandum 103885, Augst, 1991
- (10) P.C. Wason, Laird Johnson, Psychology of reasoning:Structure and content, London, Batsford Ltd., 1972