

原子力プラントの手順書機械化表示システムの現場適用性の検証

Feasibility Study of Computerized Presentation of Procedures of a Nuclear Plant

高川 健一 (Kenichi Takagawa)*¹ 丹羽 雄二 (Yuji Niwa)*² 浦上 正公 (Masahiro Urakami)*³

要約 最近の原子力プラントでは計装システムのデジタル化が進んでおり、「コンピュータベース手順」(CBP)の導入が検討されている。これに該当するシステムとして、原子力安全システム研究所は、2002年度までにモデルプラントの事故時運転手順書の全項目を表示可能にした手順書機械化表示システム(CPP)を開発した。2003年度に、実際のシミュレータ訓練において紙ベースの手順書のかわりにこのCPPを使用した運転員訓練を行い、現場適用性を検証した。その結果に基づいて、今後のCBP導入にあたっての課題を考察した。複数手順の並行操作に対応できるようにすること、およびそのためのナビゲーションの充実等がCPPの実用化に向けた課題として指摘されたが、この点は、CBP導入においても新たな課題になると考えられる。

キーワード 原子力発電所、手順書機械化表示システム、コンピュータベース手順、運転員、シミュレータ

Abstract Introduction of a digital instrumentation control system is in progress in recent nuclear power plants, and an application of Computer Based Procedures (CBP) is being considered. The Institute of Nuclear Safety System, Incorporated has developed a system for a Computerized Presentation of Procedures (CPP) which corresponds to CBP. By fiscal year 2002, all items in the emergency operation procedures of a model plant were made displayable on the CPP. In 2003, the CPP instead of the paper based procedures was used for trial by the operators of a nuclear power plant in an actual training simulator, and feasibility of its practical application was evaluated. Based on the result, we considered subjects which should be taken into account in the future. As a result, improvements of CPP and its navigation system, etc. to enable operations with multi-procedures in parallel were extracted as primary subjects for introduction of CBP in the future as well as practical application of CPP.

Keywords nuclear power plant, Computerized Presentation of Procedures system, Computer Based Procedure operator, simulator

1. はじめに

コンピュータの処理能力や信頼性の向上とともに、最近の原子力プラントでは計装システムのデジタル化が進んでいる。コンピュータが介在するデジタル計装システムにおいては、コンピュータによる大量のデータ処理・蓄積の能力を活かして、自動操作範囲を拡大するとともに、「コンピュータベース手順(CBP: Computer Based Procedure)」の導入が図られている。この動きに対応して、IEC (International Electrotechnical Commission: 国際電気標準会議)の技術委員会のワーキンググループでは、CBPに関

する規格の制定に向けて検討を進めており⁽¹⁾、今後、海外のプラントを中心としてCBPの導入が進んでいくものと予想されている⁽²⁾。

国内の加圧水型原子炉では、デジタル計装システムを全面的に採用した新型中央制御盤が北海道電力泊3号機で導入され⁽³⁾、既設プラントにおいても新型中央制御盤への更新が計画されており、すでに一部のプラントでは実施されている⁽⁴⁾。この新型中央制御盤にはCBPが実装できるように準備されている。現時点のCBPの例としては、警報発信時に電子化した対応手順書を連動させて画面に表示するシステムがある。

* 1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

* 2 名古屋工業大学

* 3 MHI 原子力エンジニアリング

国際的な動向を踏まえると、今後、既設プラントにおいて新型中央制御盤への更新の機会にはCBPの本格導入に向けた検討が望まれる。

一方、原子力安全システム研究所（INSS）では、事故時のストレスがかかった状態での運転員の確実な操作と負担軽減を目的に、使用すべき事故時対応手順の探索と抜け落ちをなくすための事故時運転手順書機械化表示システム（CPP: Computerized Presentation of Procedures System）を開発し^{(5),(6),(7),(8)}、その後、運転員の意見を聞きつつ改良を加え、モデルプラントの事故時運転手順書（EOP: Emergency Operation Procedure）の全項目が表示可能なシステムを2002年度までに開発した。

2003年度に発電所への適用を目標として、事故を模擬した環境でシステムを検証し、実用化に向けた課題を抽出した。CPPは当初からスタンドアロンシステムとして研究開発されてきたが、抽出した課題の解決には新たにシステム連携を考慮する必要があったため、その後のハード面の性能向上に期待し、一旦研究を中断していた。現在では、新型中央制御盤の導入が本格化しており、ハード面での実現性が高まってきているため、ここで実用化に向けた課題を抽出した2003年度の研究成果を報告しておくことは意義があると考えられる。

この研究では、多くの運転員が実際のシミュレータ訓練においてCPPを使用し、その現場適用性をアンケートへの回答から検証した。この検証は、2002年までに開発されたCPPと、その後、運転員からの指摘を踏まえ改良したCPPに対し行い、両者を比較した。その結果から実用化に向けた具体的な課題を評価した。これらの課題には今後のCBP導入にも参考となる知見が含まれると考察された。

そこで、本稿では、まずCPPの設計概要について説明した上で、①現場適用性の検証とその評価の方法、②システムの変更前の検証結果、③これに基づくシステムの変更内容、④システムの変更後の検証結果と、これに基づく現場適用性の評価および実用化に向け残された課題を順に報告し、最後に⑤今後のCBPの導入に向けた課題について考察する。

2. CPPの設計概要

2.1 開発の目的

1990年代には、多くの事故において、予め定めら

れた手順書に対する逸脱行為から重大な事態に至ったことが報告されていた。そのため、手順書に記述された操作の遵守が安全確保につながると考えられるようになり、事故時には手順書を遵守した確実な操作が以前にも増して要求されてきた。原子力発電所では紙ベースのEOP（以下、「紙の手順書」という）が使用されており、事故時のストレスのかかった状態で当該手順書を開いて、抜け落ちなく参照し操作することは運転員に対する負担になると予想される。そこで本研究では使用すべき手順を探索し操作の抜け落ちをなくして運転員の負担軽減を図るために、EOPを機械化したシステムを開発することとした。

2.2 CPPの特徴

CPPの設計の詳細については、すでに報告しているので⁽⁵⁾、本稿では、その概要のみを説明する。CPPは図1のとおり基本的には紙の手順書のかわりに、コンピュータ画面上に手順を表示し、マウスをクリックすることによりチェックを入力するものである。実際の画面を図2に示すが、文章による手順の記述を条件・操作・コメントに分解して明確化し、複雑な条件をグラフィック化している点に大きな特徴があるほか、ナビゲーション（位置案内）、チェック対象の手順だけを自動選択した表示、チェック時刻の自動記録等により使いやすく工夫されている。

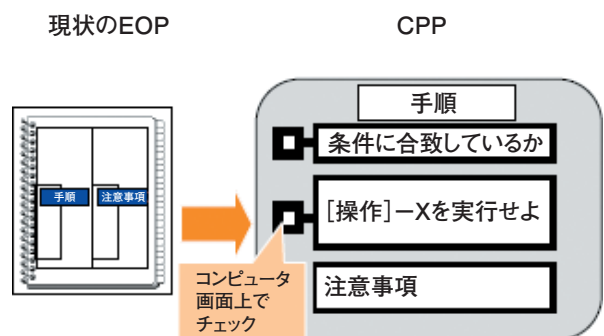
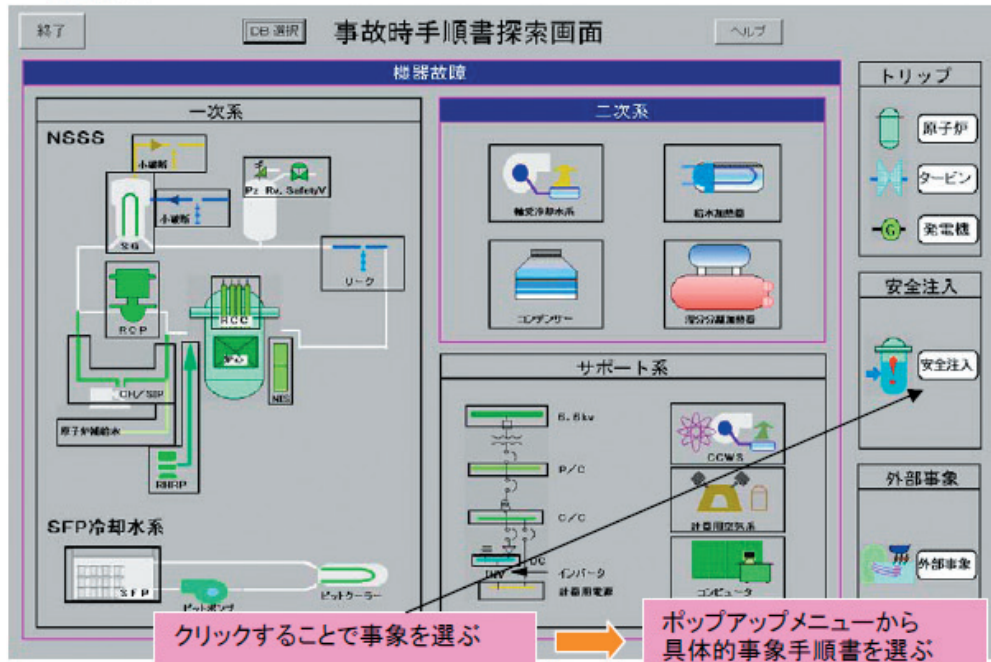


図1 CPPの概要

初期画面



手順書のチェック画面

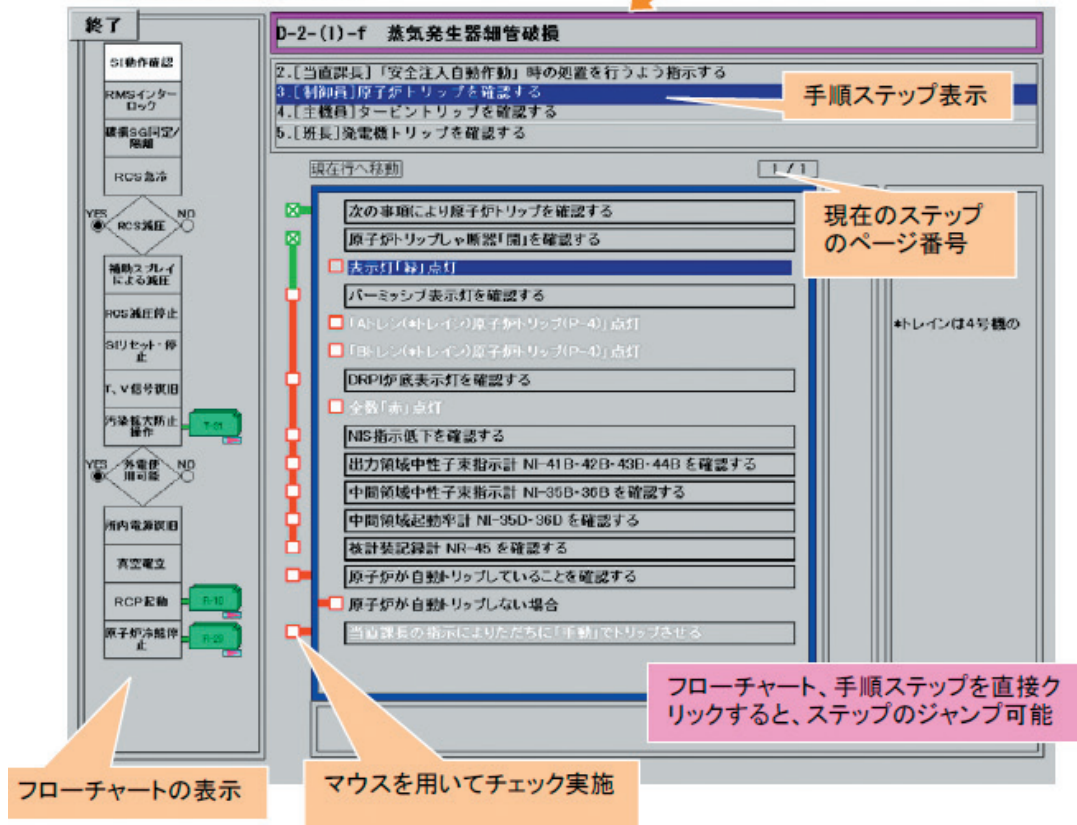


図2 CPPの画面と特徴

3. 現場適用性の検証とその評価の方法

3.1 検証の方法

実際の原子力発電所の運転員が、当直班単位で行うフルスコープシミュレータ訓練（以下「直員連携訓練」という）において、紙の手順書のかわりに CPP を使用した訓練を実施し、CPP が実際の事故を模擬した環境で使用できるかを検証する。CPP は当直長コンソールの横のドキュメント参照用コンピュータにインストールした。

検証は以下の手順で実施する。

- ① 直員連携訓練において、数事象行われる訓練のうちから任意に選択された2事象に対し、当直長または当直長を補佐するポジションについての運転員が CPP を使用し、指示・確認を行い、紙の手順書のかわりに適用できるかどうかを検証する。

② 上記訓練で検証した事象以外については、直員連携訓練中に待機中の運転員が適宜、任意の事象の CPP を参照し、紙の手順書のかわりに適用できるかどうかを検証する。

③ 検証後、上記のどちらの方法で検証したかを区別の上、アンケートに回答する。

3.2 アンケートの内容

検証した結果を回答するアンケート項目（システム変更前後とも同じ項目）を表1に示す。アンケート項目は、過去のシステム開発段階の評価に使用した項目に加え、システムの現場適用性の観点から、実用性の評価として「実際のトラブル時に使おうと思うか」「教育訓練用に使おうと思うか」の2問を追加し、満足度に応じて、非常に不満0点、不満1点、やや不満2点、どちらでもない3点、やや満足4点、満足5点の5段階評価を選択する設問が18問、自由

表1 CPPの現場適用性の評価のアンケート内容

<p>1. 既存の事故時運転手順書（EOP）との類似性</p> <p>(1) CPPの表示は、既存のEOPを参照される場合と比べ、違和感はないですか。</p> <p>2. 手順の同定</p> <p>(1) CPPで手順書の検索が容易になったと思いますか。</p> <p>(2) メニュー画面のアイコンは理解しやすいですか。</p> <p>(3) メニュー画面は使いやすいですか。</p> <p>(4) ホップアップメニューまたはダイアログボックスによる手順書の選択は理解しやすいですか。</p> <p>3. ナビゲーション、フォーマット</p> <p>(1) CPPで、適切な手順に問題なく行き着けますか。</p> <p>(2) 手順書表示画面でCPPに表示される「操作の条件」は、理解できますか。</p> <p>(3) CPPに表示される「操作」は明確に理解できますか。</p> <p>(4) CPPの「コメント」は明確に書かれていますか。</p> <p>4. CPPの動き</p> <p>(1) CPPで自分の実施しているステップは、フロー全体のどこを実施しているか明確になっていますか。</p> <p>(2) チェック欄にチェックする時は、自分のしようとしている内容（条件確認、操作指示等）が明確になっていますか。</p> <p>(3) CPPで、すでに実施した操作が明確になっていますか。</p> <p>5. システム応答</p> <p>CPPの応答速度は十分に速いですか。</p> <p>6. 満足度</p> <p>(1) CPPは必要な情報をすべて満足していますか。</p> <p>(2) マウスでの入力（選択・チェック）は問題なくできますか。</p> <p>(3) CPPを使用することは簡単ですか。</p> <p>(4) 実際のトラブル時にCPPを使おうと思いますか。</p> <p>(5) 教育訓練用にCPPを使おうと思いますか。</p> <p>7. もしCPPを中央制御室で使おうとすると何が問題になるか書いてください。</p> <p>8. CPPにさらにつけるべき機能があれば書いてください。</p> <p>9. その他、日頃の運転業務や将来のことを考え、困っていることや不安に思うことで、研究機関等で支援できそうな研究内容があれば書いてください。</p> <p>10. その他、自由に意見を書いてください。（不具合内容も含めて）</p> <p>（回答方法：質問1から6は5段階評価（非常に不満～満足）、質問7から10は自由記述）</p>
--

表2 アンケート結果に基づくシステムの変更要件と対応

システム変更要件	対 応
・チェックを入れないと先に進めない	・手順を意図して保留する機能の付加 ・重要手順だけに絞り込んだ表示・チェック対応化
・複合事象に対応できない ・並行操作に対応できない	・画面の Window 化等による複数手順の並行実施対応化
・自動チェックを望む	(実施不可)
・CPP の位置に人が固定される ・専任のチェック者が必要になる	・画面の Window 化によるノートパソコン対応化 (根本対策は実施不能)
・システムへのチェック入力、事象の進展について行けない	・重要手順だけに絞り込んだ表示・チェック対応化
・手順書改正と同時に CPP システムの改正が必要になる	(ユーザーマニュアルの作成)

記述する設問が4問の計22問である。

3.3 検証結果の評価方法

アンケートの点数と自由記述から検証の結果を次の2段階で評価する。

(1) システム変更前の評価

2002年度までに開発したCPPの検証結果を回答したアンケートで、満足度が低い項目について関連する自由記述の回答からその理由を評価し、システムの変更要件を抽出する。

(2) システム変更後の評価

システム変更要件に基づき変更したCPPの検証結果を回答したアンケートで、満足度の変化を確認し、満足度が低下した項目や、依然低い項目について、関連する自由記述の回答から、CPPの現場適用性を評価し、適用に向けて残された課題を抽出する。

4. 検証1 (システム変更前)

4.1 検証の実績

2003年8月から2004年1月の間に実施された直員連携訓練において2002年度までに開発したCPPを使用した訓練を行い、40人からアンケートの回答を得た。

4.2 アンケートの結果

アンケート結果から、満足度が低かった項目と理由は以下のとおりである。メニュー画面、操作内容の表示およびシステム応答は、比較的満足度が高い

結果を得た。

(1) 満足度が低い項目

- a. 紙の手順書に対し、CPPの画面表示は、違和感がある。
- b. 実際のトラブルにはあまり使おうとは思わない。

(2) 理由

- a. 各手順に必ずチェックを入れないと先に進めないので使いにくい。
- b. 並行操作、複合操作に対応できない、等。

4.3 システム変更要件と対応の検討

アンケートの結果を評価しシステムの変更要件を抽出し、表2のとおり対応することとした。CPPは当初からスタンドアロンシステムとして研究開発されてきたため、自動チェックと複数台設置の要件には対応できなかった。

5. システムの変更

スタンドアロンシステムとして対応可能な以下の変更を実施した。

(1) 手順を意図して保留する機能の追加

マウス操作により手順または画面単位に手順を意図して保留し、後でチェックできるようにする。保留した手順やそれが含まれるステップは明確に表示されるようにする。(図3)

(2) 重要手順だけに絞り込んだ表示・チェック機能の追加 (上級者モードの充実)

重要手順の絞込みを行い、上級者モード用のデータベース設定を可能とする機能を追加する。重要ス

トップを強調することにより大局的判断を支援できるようにする。(図4)

(3) 画面の Window 化等による複数手順の並行実施機能の追加

- a. 複数手順を1台のコンピュータ画面に表示できるようにし、Window 化した画面で任意に選択できるようにする。複合事象または事象の進展に伴う手順の移行に対し、画面切り替えの容

易化を図る。並行操作については並行操作を要求するステップの関連ステップ情報を追加する。(図5)

- b. 手順の実行中に別条件が成立し、別ステップへの移行が要求される場合に対応するため、画面に専用エリアを用意し、関連ステップを表示するとともに相互に移動できるようにする。(図6)

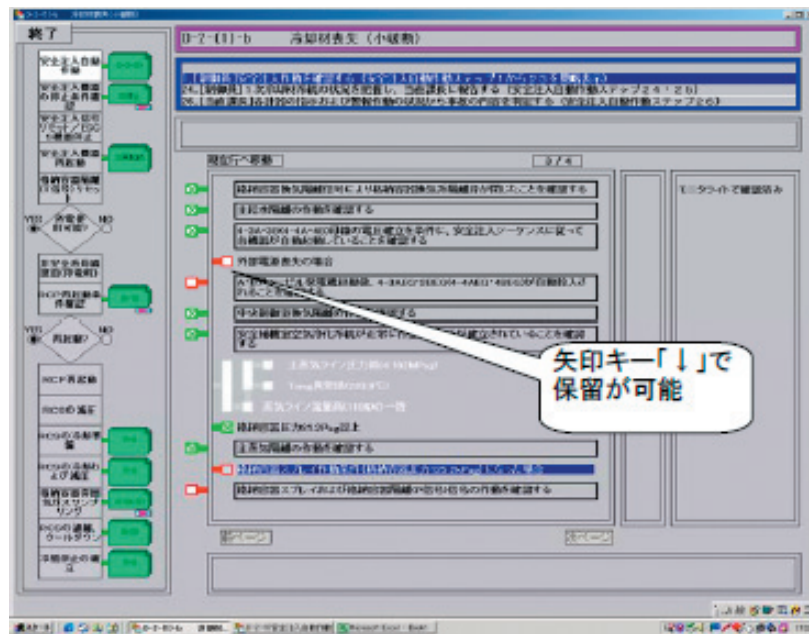


図3 手順を意図して保留する機能の追加

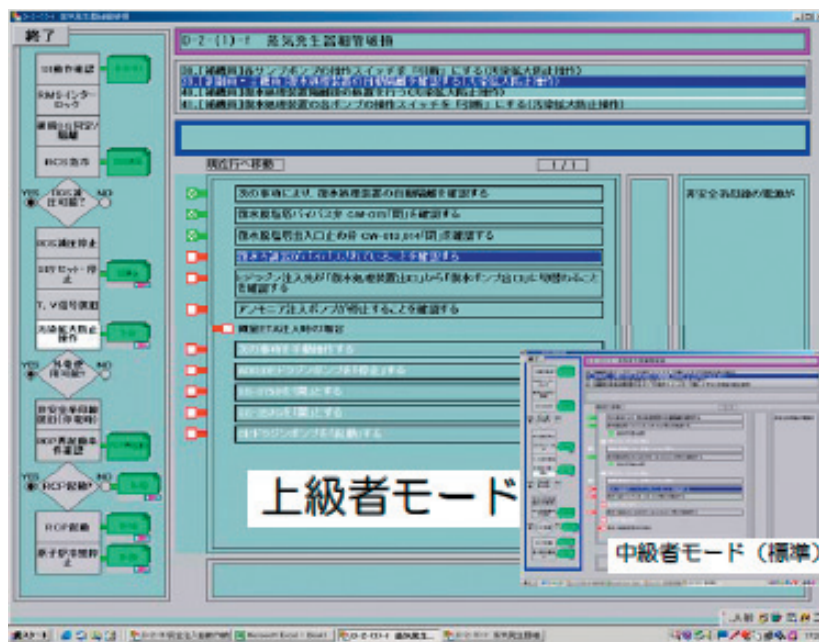


図4 重要手順だけに絞り込んだ表示・チェック機能の追加

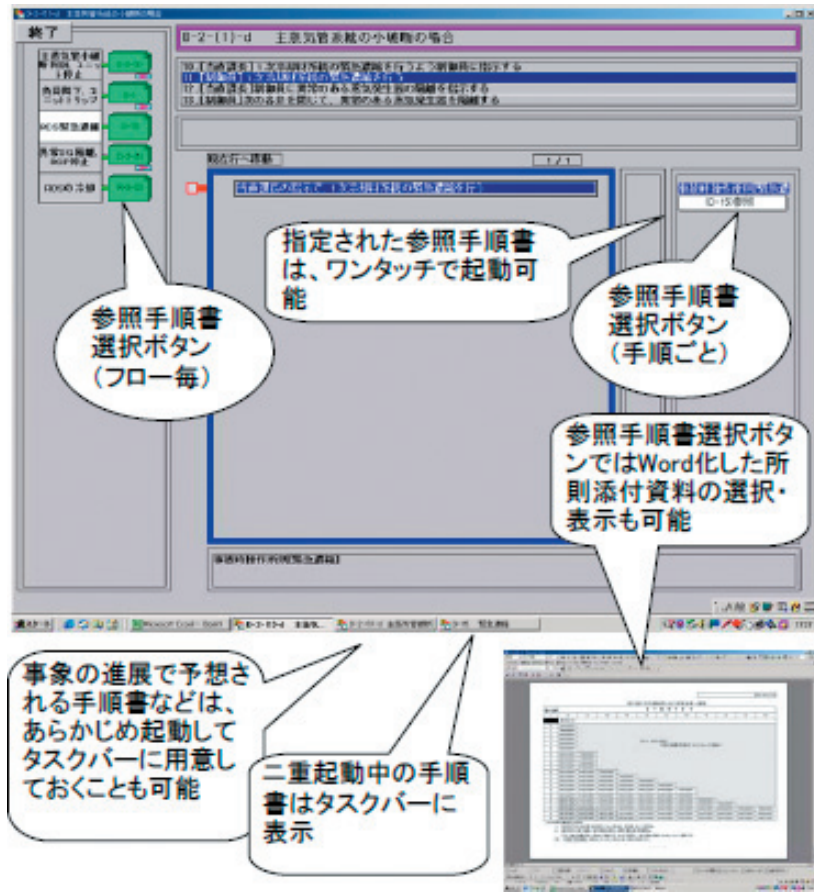


図5 複数手順の並行実施機能の追加 (複数手順の多重起動)

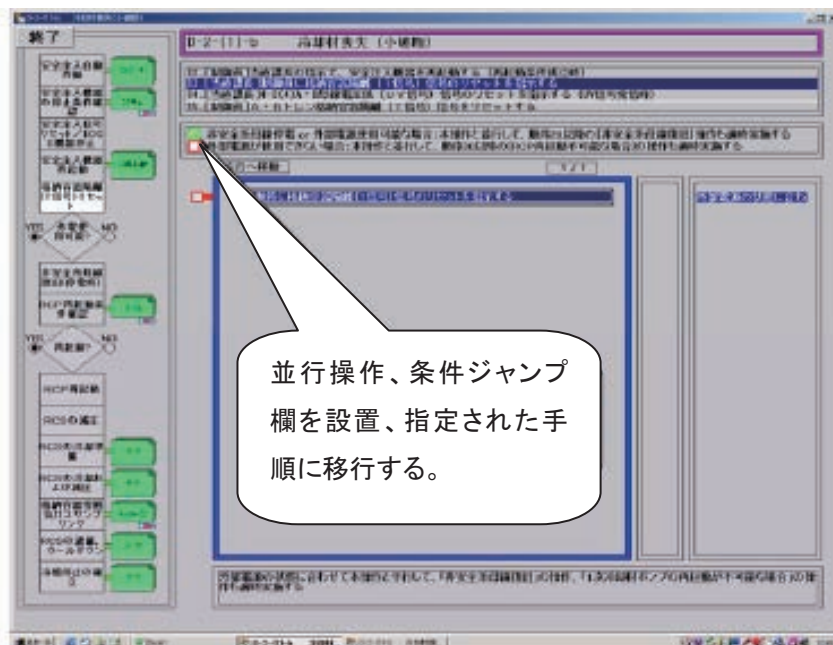


図6 複数手順の並行実施機能の追加 (並行操作、条件ジャンプ欄設置)

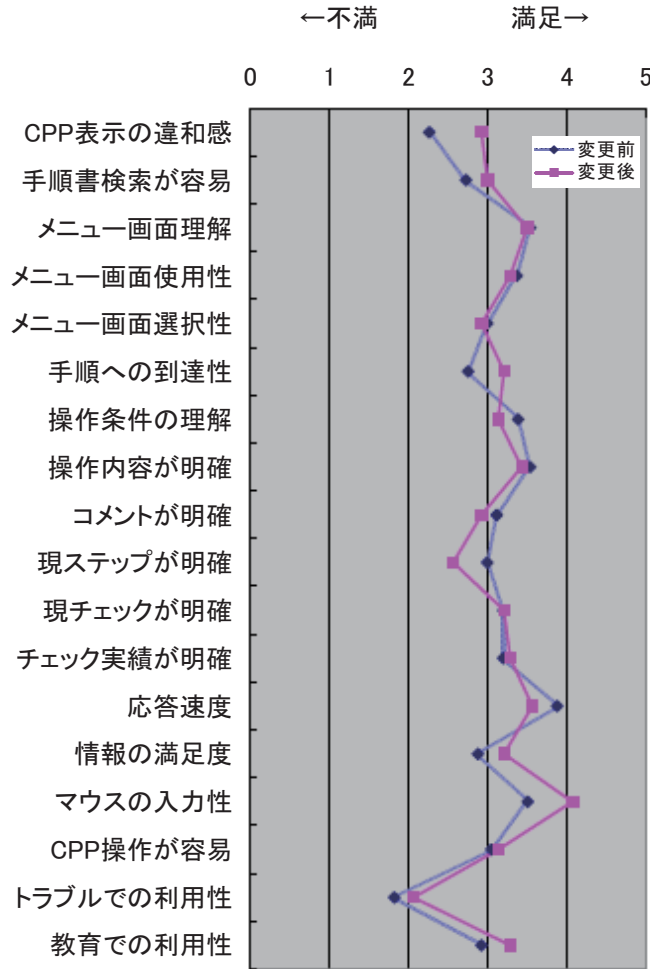


図7 システムの変更前後のアンケート結果

6. 検証2 (システム変更後)

6.1 検証の実績

2004年2月に実施されたシミュレータでの直員連携訓練において変更したCPPを使用した訓練を行い、14人からアンケートの回答を得た。なお、この検証2の回答者は検証1の回答者の40人とは重複していない。

6.2 アンケートの結果

システムの変更前後のアンケート結果の比較を図7に示す。システム変更により満足度が変化した、または低いままであった項目とその理由は以下のとおりである。

(1) 満足度が改善した点

- ・CPP表示の違和感 (紙の手順書に対し、CPPの画

面表示は違和感がないか)

指摘されていた違和感はほぼ解消したものと考えられる。関連する自由記述では、チェックを意図して保留する機能の付加や画面のWindow化で確認入力等の自由度が増したことが寄与したものと考えられる。ただし、「紙のように自由に扱えるようになったことで、機械化するメリットが感じられなくなった」という意見もあった。

(2) 満足度が低いままの点

- ・トラブルでの利用性 (実際のトラブルで使おうと思うか)

関連する自由記述では、「実際の事故状況では、確認者がCPPに固定され、ひとりで複数の手順を並行して確認入力するのは困難であり、紙の手順書のように手軽に全体を把握できないため、積極的に使いたいとは評価できない」という意見であった。

(3) 満足度が低下

- ・現ステップが明確 (フロー全体のどこを実施して

いるか明確か)

関連する自由記述では、「画面の Window 化で複数手順の並行実施機能を追加しても、CPP が 1 台だけである以上、1 人の確認者が並行操作中に同時進行している操作のステップを常に意識しておく必要があるが、画面上ではそれぞれ実行中のステップがわかりにくく、確認者の負担は増大する」という意見であった。

6.3 CPP の現場適用性の評価と課題

実際の事故状況での CPP の利用性の満足度が低いことから、自動チェックと複数台設置の要件に未対応である以上は CPP の現場適用性はまだ低いと評価する。

CPP の実用化に向けて残された課題として次の 3 点が指摘される。このうち、①と②は CPP をスタンドアロンシステムとして開発することとした段階である程度予測されたが、③は、今回の検証により明らかになった課題である。

- ① 機械化のメリットを活かすため、プラントコンピュータとの連携による自動チェック機能の追加が望まれる。
- ② 並行操作に対応させる対策として、複数の端末を設置し、ネットワーク化することにより各担当箇所による確認入力機能の追加が望まれる。
- ③ 実際の操作は複数手順を運転員が分担して同時に進行する並行操作になるため、それに対応して、一人の確認者が、並行操作はそれぞれどのステップを実施しているのかを抜けなく把握しやすくするように、ナビゲーションの充実が望まれる。

7. CBP の導入に向けた課題の考察

本研究は CPP の現場適用性を検証したが、ここで得られた知見は今後の CBP の導入に向けた課題として参考になる。特に、複数手順の並行操作対応化とそれに対応して一人の確認者がそれぞれの操作のステップを把握しやすくするナビゲーションの充実が、本研究の検証の結果から新たに明らかになった課題である。

事故時操作に対応した CBP の導入を検討する場合には、実際の運転員の事故対応訓練を調査し、並行操作、複合操作、または場合によっては操作の準備

であらかじめ用意された紙の手順書をどのように全体的に抜けなく把握し確認しているかを分析し、それをシステム上のナビゲーションとして実現する方法を検討しておくことが課題になると考えられる。

8. まとめ

- (1) 2002 年度までに開発したモデルプラントの EOP の全項目を表示可能にした CPP を、実際のシミュレータ訓練において運転員が紙の手順書のかわりに CPP を使用して訓練を行い、現場適用性を検証した。
- (2) 初期の検証後、運転員からのアンケート結果に基づき、手順を意図して保留する機能の付加やシステムを複数手順の並行実施に対応するなどの変更を行い、再度検証した。
- (3) 変更後の CPP に対して、複数手順の並行実施機能の追加化により、実行中のステップの位置がややわかりにくくなったとの指摘があった。
- (4) CPP の変更にかかわらず、プラントコンピュータとリンクした自動チェック機能の追加および複数端末の設置とネットワーク化により各端末からの入力機能の追加が望まれていた。
- (5) CPP の現場適用性の検証結果から、複数手順の並行操作に対応できる機能とそれに対応して一人の確認者がそれぞれの操作のステップを把握しやすくするナビゲーションの充実が課題として指摘された。これは今後の CBP の導入に向けた新たな課題として参考になる。

文献

- (1) 五福明夫, コンピュータ化手順の国際規格制定の動向, 日本原子力学会 2010 年春の年会予稿集, TN14, pp. 778-779 (2010).
- (2) 北村雅司, 原子力発電所の制御室の設計にかかわる IEC 規格の WG の活動, 日本原子力学会 2009 年春の年会予稿集, TN02, pp. 733-734 (2009).
- (3) 成田誠一, 他, 新型中央制御盤への異常時・事故時運転支援システムの適用, 日本原子力学会 2006 年秋の大会予稿集, L46, L47, pp. 662-663 (2006).
- (4) 森川宏, 渡辺浩, 伊方発電所 1, 2 号機中央制御盤等の更新工事について, 日本保全学会, 保

全学 Vol. 8 No. 4, pp. 19-25 (2010).

- (5) 丹羽雄二 事故時手順書表示の機械化：「安全の探究」北村正晴，木村逸郎編，第2編第4章，ERC出版，pp. 253-311 (2002).
- (6) 丹羽雄二，エリック ホルナゲル，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），INSS JOURNAL No. 1, p. 214 (1994).
- (7) 丹羽雄二，エリック ホルナゲル，岩城利夫，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-2 プロトタイプのガイドライン），INSS JOURNAL No. 2, p. 202 (1995).
- (8) 丹羽雄二，エリック ホルナゲル，岩城利夫，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-3 プロトタイプの製作とユーザー評価），INSS JOURNAL No. 3, p. 216 (1996).