

原子力発電所のマン・マシン・システム

Man Machine System for Nuclear Power Plant

北村 哲男* ・ 早川 博康** ・ 渡辺 孝雄***
Tetsuo Kitamura Hiroyasu Hayakawa Takao Watanabe

1. はじめに

現在、世界の原子力発電プラントは410基が運転中で、133基が建設中であり、我国でも36基が運転中で13基が建設中である（1988年6月末現在）。このように原子力発電所が増えてくるにつれ、その安全性と信頼性が増々重要になってくる。

1979年3月に米国スリーマイルアイランド発電所2号機（TMI）で発生した事故は、給水システムの保守管理が適切でなかったことが直接の原因ではあるが、その後運転員が対応を誤ったことが事故の拡大につながり、その背景には原子炉冷却系の正しい状態についての情報が適切に運転員に伝達されていなかったことが指摘されており、原子炉施設の安全確保には人的因子（ヒューマン・ファクター）と人と機械の相互関係（マン・マシン・インターフェイス）の問題の重要性が改めて認識されるようになった。

このように原子力発電所の運転操作においては、人的因子がその安全性に係る重要因子になり、運転員の教育訓練が安全確保の上からもきわめて大切なことは言うまでもないが、人間に過剰な責任を期待するのではなく、機械装置の自動化やコンピュータ化によって人間の役割を支援することを考えるのも重要である。これらを含め人間と機械の役割分担をいかに適切にするかが原子力発電プラントの設計に携わる者にとっての課題である。TMI事故以来、マン・マシン・インターフェイスの改善が世界中で段階的に行われて来ているが、我国でも各メーカーでの研究開発の他に通産省の補助事業として原子力発電支援システムの開発が続けられている。

本稿では、これらの状況を説明すると共に、現在通産省の補助事業で筆者等が開発を進めている最新の計

算機利用技術を駆使したマン・マシン・システムの概要を紹介することとしたい。

2. マン・マシン・インターフェイスの改善

マン・マシン・インターフェイスの改善のためには人間の振る舞いとか機械の能力限界や新技術の動向等を十分認識した上で人間と機械の適正なバランスを図るべきである。一般的に機械は高い信頼性を有し、正確でかつ高速にシナリオ通りの画一的な動きをする特質をもっているが、人間は不定形な分野において柔軟な思考、推論、判断をすることを得意としている。これを原子力発電プラントに当てはめてみると、通常運転とか運転時に想定される過度変化や異常事象は自動的な判断と操作、即ち機械に依存する領域であるが、予想されないような異常事象や事故に対しては、人間の柔軟な判断・操作が必要となる場合がある。このような場合でも、正しい状況を認知し診断するため、また記憶力や判断力の低下を補完するため運転員を支援するようなマン・マシン・システムがあれば有効であろう。

このような観点からマン・マシン・インターフェイスを改善する具体的方策としては

- (1) プラント自動化の拡充
- (2) 中央制御盤の改良
- (3) 運転支援システムの開発

が考えられる。ここで先ず、これらの方策について現在までの開発状況を概説することとする。

- (1) プラント自動化の拡充

原子力発電プラントの運転においては、先にも述べたように通常運転時とか、運転時に想定される過度変化や異常事象対応は潜在的誤判断・誤操作を防止する観点から自動化が望まれるが、我国の原子力発電プラ

* 三菱重工業(株)原子力事業本部軽水炉技術部次長
〒105 東京都港区芝公園2-4-1 秀和芝パークビル
** (株)東芝電子エンジニアリングセンター原子力事業部

原子力電気計装技術部長
*** (株)日立製作所日立工場原子力計画部計装制御グループ主任技師

トにおいては、当初より通常出力運転及び異常時・事故時対応としての安全機能確保面で自動化が導入されている。その後、廃棄物処理系等においてシステムレベルの自動化が実用化されて来ているが、最近では、プラントの起動・停止時の操作についても自動化が推進されている。現行の原子力発電プラントの起動・停止操作は比較的ゆっくりしたものであるが、通常出力運転時に比較して運転員の監視・操作の頻度は格段に多いので、自動化は運転員の負担軽減に大きく役立つこととなる。また運転員の高度な判断や操作が要求される予想されないような異常事象や事故時対応についても、将来人間の高度な認知・判断機能に相当する技術が開発されれば、自動化の選択が更に拡がると予想される。

(2) 中央制御盤の改良

中央制御盤には監視・操作機能として数多くの指示計、表示灯、警報、操作器具があり、ここに運転員と機械の接点、即ちマン・マシン・インターフェイスが存在する。TMI事故においては、多くの警報が点滅し、どれが問題の警報か識別できなかったこと、必要な計器や操作器具の設置位置が悪ったことが指摘された。そこでTMI事故を契機として各国で中央制御盤の設計が見直されるようになり、特に人間工学を重視した設計を採入れるようになった。その一つの手段として、CRTを監視装置として積極的に採入れ、運転員への情報提供形態を改善した。従来多量の情報を集約・整理し、プラント運転状態を判断する機能は運転員自身に依存していたが、CRT技術を用いることにより集約化された情報が運転員の理解し易い形態で随時提供することが可能になり、プラント監視機能の向上に大きく寄与している。

次に、CRTの導入によりプラント情報の集中化、集約化が可能になったことから制御盤の機能分割が図られ、最近の中央制御盤の構成は通常運転の監視操作を主体とした主盤と起動・停止時及び事故時の監視操作を行う補助盤とに分割している。このように制御盤の機能を分割することにより、運転員の監視操作に伴う移動量が減少し、CRTの採用と合せて運転員の記憶負担が軽減でき潜在的にエラーが低減されると期待されている。

また、警報システムについても改善が図られており、従来異常・事故事象が発生した時などに雪崩のように発生する警報を物理法則に基づいた因果関係のロジックを用いて重要なものと付随的なものに区別し、運転

員が重要なものだけに注目できるようにするシステムが開発されている。このようにすることにより運転員の警報確認時の過誤率並びに事象検知時間が大巾に低減できる。

(3) 運転支援システムの開発

近年、計算機利用技術の急速な進歩によりAI（人工知能）の研究が盛んであるが、原子力発電の分野でも計算機を利用した運転支援システムの開発が進められている。我国では、TMI事故を契機に通産省の補助事業として原子力発電支援システムの開発が始まり、三菱・東芝・日立の6社（三菱重工業(株)、三菱電機(株)、三菱原子力工業(株)、(株)東芝、日本原子力事業(株)、(株)日立製作所）が、昭和55年より原子力発電支援システム開発組合に参加してその開発に取り組んでいる。先ず昭和55年から61年にかけて開発したものが、インストラクション・システムと呼ばれ、次の項目を満す目標を挙げている。

- a. 原子力発電所において種々の運転モードで異常状態が発生した場合に、運転員が早期かつ容易に当該状況を認識でき、適切な対応処置がとれるように運転員を支援する。
- b. 種々のプラント運転状態における運転員の負荷を軽減し、誤操作・誤判断を防止する。

従来、プラントに異常が発生すると警報が発信し、運転員に必要な行動を促す。運転員はこの警報を確認後、関連パラメータの監視及び関連機器の状態の確認を行い、経験と知識に照らして状況評価・予測を行った上で判断・意志決定をする。この結果が操作行動となってあらわれる。インストラクション・システムはこの状況評価・予測までの一連の行為を計算機に実施させ、運転員が異常発生時に判断・意志決定を行う際の支援をしようとするものである。

インストラクション・システムにおいては、異常原因の同定や事象の推定等における推論ロジックの構成がシナリオベース、即ち因果ツリー法（CCT: Cause Consequence Tree）と呼ばれる方式に基づいている。

これは概略以下の手順で実現される。

- a. まず故障対象とその程度を定める。（Cause）
- b. その故障が起きた場合に発生するプロセスの擾乱を想定しておく。（Consequence）
- c. 想定されていたプロセスの擾乱（兆候）が実際に観測されたならば、初めに考えた故障対象をその原因とする診断ロジックを活性化させて、原因とその対応策並に今後の予想を出力する（Tree

Logic)

このような方法では、考えた通りの故障が発生し、さらに計算した通りの擾乱が発生した場合には、非常に効率的に診断を下せるが、他方何らかの理由によって仮定が成立しない場合には診断ができなくなる欠点を持っている。したがって、このような方法は比較的容易に故障時の振る舞いを特定できる機器や設備の典型的な故障に向いている。

尚、インストラクション・システムの開発においては、上記のインストラクションの技術の他に、原子炉内の異物検出、異常振動の検出診断及び弁リークの検出診断と言った機器異常診断技術についても開発した。

3. 原子力発電プラント・マン・マシン・システムの開発

インストラクション・システムの開発に引続き昭和59年度から通産省の補助事業として原子力発電支援システムの開発組合に参加の6社は、「原子力発電プラント・マン・マシン・システム」の開発に取り組んでいる。インストラクション・システムでは、異常原因の同定や事象と推定等の推論ロジックに因果ツリー法を採用したため、シナリオベースの事象には有効であるが、シナリオをはずれた事象には対応が難しい面がある。そこでマン・マシン・システムの開発においては、最新の計算機利用技術の進歩と知識工学を採入れ、プラントの状態把握、運転操作判断等において運転員の思考過程に適合した推論・判断・情報提供を行えるような次の機能を有するシステムの開発を目指している。

(1) 通常時運転支援

起動・停止過程や負荷追従運転時における柔軟な運転支援

(2) 異常時・事故時運転支援

プラント異常・事故の早期検知、原因同定及びプラント安全停止のための適切な操作ガイドの提供

(3) 保守支援

プラント構成機器の保守を効率的かつ確実に施されるようにする支援

(4) 最適運転監視

上記の各種処理結果を運転員が的確に把握し、また知りたい内容を適切に質問・応答できるマン・マシン・インターフェイス

本システムは、日常の運転管理・保守業務の効率向上を図り、更にプラント異常事態への的確・迅速な対

応を可能とするためのより高度な支援情報をユーザ（運転員を含む技術スタッフ）に提供するものであり、ユーザはシステムからの情報を評価・判断の参考とすることにより適切な対応操作を実施する。

尚、情報提供はシステムからの一方的なものではなく、ユーザからの要求に応じ必要な情報が自由に得られるように柔軟な対話ができる構成を考えている。

3.1 概念設計

上記の目標を満すシステムを開発するに当たり、先ず技術的な可能性を探るため、昭和59年度より61年度までの3年間で、本システムの基本技術となる以下の技術について概念設計を実施した。マン・マシン・システムは、これらの技術を組合せて図-1のような構成になる。

(1) プラントデータ編集管理技術

本システムは、プラント運転の種々の局面においてプラントの状態や運転操作に関する適切な情報を運転員に提示することにより、運転員の認知、判断、操作活動を支援するシステムである。これらの業務は従来、プラントの構造・機能に関するデータとベテラン運転員の長年の経験を基に遂行されてきた。したがって本システムでは、これらのデータや経験をプラント・データベースとして構築し、編集管理できることが必要になる。

本システムに要求されるプラントデータは多岐に亘り、現実には様々な存在形態を有しているもので、それに適したデータ表現及び獲得が必要である。例えば、構造・機能に関するプラントデータは大部分が設計図書などに明確に記載されており、これらを格納した設計用データベースとの適切なインターフェイスを整えることによりその主要な部分を獲得できるが、運転に

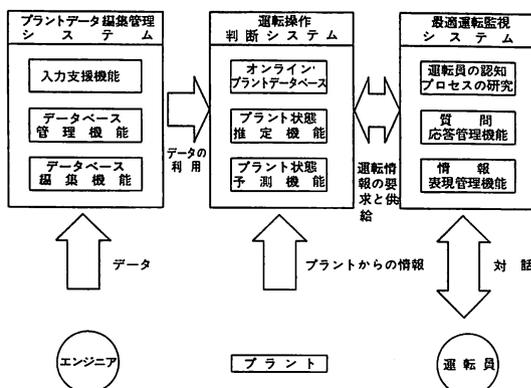


図-1 マン・マシン・システムの構想

関する経験的情報を獲得する場合には、運転員に対するインタビューが主になり、必要な情報が網羅的に獲得できるような獲得支援機能が必要になる。

また大規模なデータベースを効率的に管理し、高速アクセスに対応すると共に、データ間の整合性は、一貫性を保持するために検証・格納・検索の各機能が必要である。更にオンライン推論実行時の効率低下を防ぐためには、データの形態を変換する編集機能も必要である。そこで概念設計では、これらの機能を実現する方法について検討し、技術的見通しを得た。

(2) 運転操作判断技術

通常時運転支援や異常時・事故時運転支援並びに保守支援を実現するためには、プラントデータ編集管理システムで編集したプラントデータを参照して、最適な運転操作を決定する機能が必要である。概念設計においては、異常時・事故時運転支援を取上げ、ケーススタディを実施したが、このため異常検出、診断及びガイダンスの3つより成るテストプログラムを作成した。

異常検出は、先ず事象発生監視プログラムによってプラント情報の値と変化率をしきい値と比較し、事象発生の有無を判定し、それが実際にプラントで発生した事象か、計器故障による見かけ上の事象かを検定するため計器故障検定プログラムにかける。その結果、異常事象と判定されると、事故候補探索プログラムと事故発生検定プログラムから成る診断プログラムを使い、仮設検定法により事故と事故原因を同定する。事故発生と診断されると運転方法データの中から採用すべき運転方法の候補を探索し、その候補の中から採用すべき運転方法を決定する。但し解が複数個存在する場合には、CRTに並列表示して運転員の判断を求めることとする。

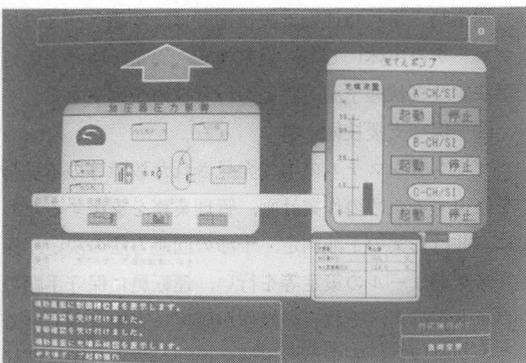


図-2 マルチスクリーンCRT画面例

(3) 最適運転監視技術

最適運転監視システムは、高度な情報処理能力を持つ計算機システムと運転員とのインターフェイスを司る部分であり、運転員の要求を柔軟に受け入れるとともに運転員の意志決定に最適な情報を理解し易い形で提供しなければならない。

概念設計では、プラントの通常時、異常時・事故時における最適運転監視技術の目的、機能構成などを検討して要求機能を策定し、それを実現するために必要な技術課題を抽出して実現方式を検討するとともに一部プロトタイプングを実施した。

本システムに対する基本要機能は、先ず入力された情報から運転員の質問内容を正しく理解する機能であり、従来機器やタッチパネル等からの入力に加えて柔軟性に富む音声入力も考慮した多様なリクエスト方式を検討した。また、運転員が意志決定する上で必要とする情報を運転員の理解し易い形に編集し、運転員と親和性に富む情報提供を実現するため、運転員がプラント運転に関して抱えているプラント機能イメージ及び運転経験や訓練を通じて得た経験的知識を用いて運転員の思考プロセスを構成し、音声、画像を効果的に利用して運転員に理解し易い情報の表現法を検討した。これらの検討は、プラント主要系統を対象としたミニモデルを試作し、プラント・シミュレータと結合することにより、音声認識装置や高速グラフィック表示装置等の最新のマン・マシン・デバイスも利用して行った。運転員に提供されるマルチスクリーンCRT画面の例を図-2に示す。

3.2 開発内容

3年間の概念設計の結果、技術的成立性の目途を得たので、昭和62年度より5年間に亘り、マン・マシン・システムの本格的開発に取り組んでいる。その概念は図

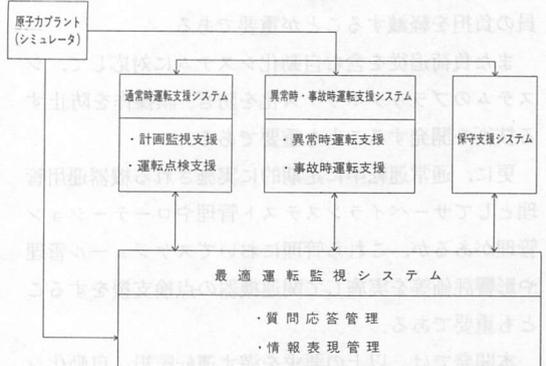


図-3 マン・マシン・システムの概念図

-3に示す通りで、個々の技術の開発内容は以下の通りである。

(1) 通常時運転支援技術

a. 計画監視支援技術

原子力発電が総発電量に占める割合が高くなるにつれて、信頼性向上はもとより電源の安定供給への対応、電力系統からの要求への柔軟な対応が原子力発電所に対しても要求される。電源の安定供給の観点からは、落雷等の外部要因によりプラントがトリップした際は、原因除去後直ちにプラントを再起動させることが望ましい。このためには、炉内に発生するキセノンの濃度変化を考慮して、プラントの再起動計画を迅速に立案する計画技術と計画通りの再起動運転が実施されることの監視技術が重要となる。

また、電力系統からの要求への柔軟な対応の観点からは、特に負荷追従運転への対応が必要になると予想され、その際固定パターンの負荷追従運転のみでなく、種々のパターンの負荷追従運転に対応することが望ましい。このためには、現状の炉心状況などを考慮して要求の負荷追従運転が可能であるかを迅速に判定する技術が重要となる。

本開発では、以上の要求を満す運転計画作成・監視等の運転支援技術を確立する。

b. 運転点検支援技術

起動・停止時には、予測を含む複雑な運転操作及び運転操作以外の管理業務等もあり、運転員の作業負担は大きい。このためプラントの運転状況、運転操作タスクの進捗状況や予測情報を提供することによって、運転員の負担を軽減することが重要である。

負荷追従運転時には、運転上主要なプロセスパラメータが恒常的に変動するため、運転員に連続的に変動するプラントの正常・異常の判断が求められる。このため適切な運転監視機能を持たせることによって、運転員の負担を軽減することが重要である。

また負荷追従を含む自動化システムに対応して、システムのブラックボックス化を防ぎ、誤操作を防止する技術を開発することも重要である。

更に、通常運転中に定期的に実施される機器運用管理としてサーベイランステスト管理やローテーション管理があるが、これら管理においてスケジュール管理や影響評価等を実施して関連機器の点検支援をすることも重要である。

本開発では、以上の要求を満す運転監視、自動化システム監視、点検管理等の運転支援技術を確立する。

(2) 異常時・事故時運転支援技術

機器の故障、誤動作、誤操作等によりプラントに何らかの異常が発生した場合に、異常の早期検知及びその原因の同定を行い、更に運転員に適切な対応操作をガイドすることは重要である。異常の原因同定・ガイド技術については、インストラクション・システムとして開発したが、本マン・マシン・システムでは、これらの事象を含み、より広範囲の事象を対象として、設計ベース事象を基点に開発を進めている。このためプラントの構造、運転特性等に関する大規模プラントデータベースを構築し、オンラインで入力される刻々と変化するプラント情報を基にプラント状態を評価する。この結果に基づいて異常の原因を同定するとともに、簡易シミュレータあるいは定性的シミュレータを用いて主要なプラント状態の変化の予測を行い、事故の発生を回避するために必要なガイドを提供する。更に万一の事故時においても運転員が迅速、確実にプラントの異常を同定し、適切な対応措置がとれるよう、人間としての能力や特性をわきまえた人間工学的配慮に基づく運転支援をすることが重要である。

プラントの異常の判断を行う方法は大別すると

- (a) その異常が過去に経験したもの、または訓練等によって学習したものであって異常の徴候と異常原因との関係につき知識があり、これによって診断するもの（ルールベース）
- (b) このような直接的な関係の知識がなく、プラントの機能・構造などの謂ゆる深い知識に基づいて診断するもの（知識ベース）

とに分けられ、対応処置の決定においても、ルールベースの場合は、予め異常徴候と対応処置の関係知識を用意できるのでそれを用いるが、知識ベースの場合は、機能・構造などの異常の同定結果に基づいて推論することとなる。

異常時・事故時運転支援技術では、知識ベースのアプローチを主体にして、異常検知、異常診断、対応処置決定及び状態予測、評価を行う技術を確立する。

(3) 保守支援技術

プラントシステムの中で発見された故障等の不具合を修復するための作業計画、管理業務を支援するために、並行作業の干渉判定、干渉の回避方法の決定、保守スケジュールの策定等を行い、運転員に保守手順のガイドを与え、それらの操作が確実に実施されていることを確認し、安全かつ迅速に保守ができるよう運転員・保守員を支援する技術を確立する。

尚、本保守支援技術は、プラント運転中の保守を対象としている。

(4) 最適運転監視技術

最適運転監視技術は、各支援技術により提供される各運転状態における種々の情報及び操作ガイドを運転員の思考課程と調和のとれた形で提供するものである。運転員の意志決定プロセスは、運転目標の決定、注意の焦点の絞り込み、結論の導出という大枠のステップからなっており、運転監視技術としては、これらのステップに対応した構成にすることが重要である。また、システムに入力された情報から運転員の質問内容を理解するために、プラントの運転状況、対話の背景や履歴を考慮し、最適な対話手段の実現を図る必要がある。

以上の要求から本技術は、次の基本機能から構成するものとする。

a. 応答管理機能

(a) 運転目標の設定

プラント・プロセス・パラメータ、構成機器のステータスから運転モードを決定する。

(b) 注意の焦点の絞り込み

運転モード及び音声認識、リクエスト、操作等による運転員との対話並びに履歴に基づき運転員の注意の焦点を推定する。

(c) 運転員への提供情報の決定

上記の推定過程及び得られた結論に基づき運転員に提供する情報を決定する。

b. 情報表現管理機能

(a) 運転員の思考モデルに合致した情報表現

プラント情報を運転員が持っているプラント機能イメージに対応した理解しやすい表現形式で提供する。

(b) 運転員の知覚特性に合致したメディアによる情報提供

高精細CRT、大型スクリーン、音声出力等で情報提供を行い、タッチスクリーン、音声入力等を用いて柔軟な対話を行う。

(5) シミュレーション技術とシステム検証・評価

本マン・マシン・システムの有効性は、種々のプラント状態における運転員の行動によって評価される。したがって、本システムの機能評価を行う上で十分なプラントシステムを含み、プラントの通常時、起動・停止時、異常時・事故時などの各種の重要な運転モードにおけるプラント挙動を模擬できるシミュレータが必要である。このため、在来シミュレータで蓄積された技術及び原子力プラントの設計・製作で培われたプラントシステム技術を総合的に活用し、検証用シミュレータの設計・製作を行い、そのシミュレータを使用して本システムの開発成果である運転管理支援機能及び最適運転監視機能の有効性を検証・評価する。

(6) 全体システム構成

以上の各支援技術を採入れたマン・マシン・システムの全体構成は、図-4の如くなる。これらの各サブシステムの基本技術は、概念設計の段階で検証したものであり、全体システムとして組合せることにより、運転員に適切な支援をすることができる。

4. まとめ

最新の計算機利用技術と知識工学を駆使したマン・マシン・システムは、原子力発電所の信頼性を更に高め、引いては安全性向上にもつながるものと考えられる。現在開発中のものは、平成3年度末に開発完了する予定であり、その全面適用は新設プラントになるが、部分適用は現在建計中あるいは既設のプラントにおいても可能であると考えられる。

現在、通産省の御指導のもと大学、研究所、電力会社等の識者の御意見を伺いながら開発を進めており、十分実用に耐えるものにして考えている。

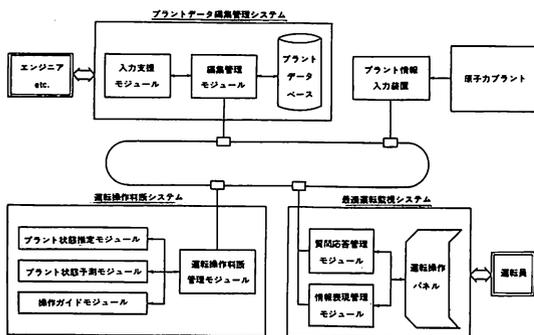


図-4 マン・マシン・システムの全体構成