原子力発電支援システムの開発

― インストラクションシステム―

Development of Instruction System for BWR Computerized Operator Support System—

INSは通商産業省補助事業原子力発電支援システム開発の一環として、昭和55年から5箇年にわたって、原子力発電所の運転信頼性のなおいっそうの向上を目指して開発したものである。開発技術は、原子力発電所に発生する異常、事故に対し、その原因の推定、波及の予測及び対応処置ガイドを、プラントの情報と合わせて運転員に提供することにより運転を支援する機能から成る。

本システムで開発された各種機能は、本システムと同時に開発したプラントシミュレータによりその有効性を確認した。更に、実機運転員の参画も得て、検証試験を実施した結果、本システムは有効に運転員を支援できる見通しを得た。

村田扶美男* Fumio Murata 橋本茂男** Shigeo Hashimoto 木口高志*** Takashi Kiguchi 佐々木良一**** Ryôichi Sasaki

11 緒 言

日立製作所では、我が国に原子力発電所が本格的に導入された1970年代から、中央監視制御システムを中心として、各種計装制御システムの信頼性向上のための開発努力をしてきた。この成果は東京電力株式会社納め新型中央監視制御システム(NUCAMM-80: Nuclear Power Plant Control Complex with Advanced Man-Machine Communication-80)、高信頼化制御システム(NURECS: Nuclear Power Plant High Reliability Control System)に代表されるシステムとして実現いしている。

一方、昭和54年3月米国スリーマイルズ島の原子力発電所で発生した原子炉事故は、なおいっそうの運転信頼性の向上の必要性を示唆した。INS(インストラクションシステム)はこのような背景の下で、NUCAMM-80の機能を拡充する方針とした。すなわち、NUCAMM-80は、起動・停止通常運転の自動化・監視機能強化に重点をおいて開発したのに対し、INSでは、万一発生した場合の異常、事故に対し、運転員を支援する機能を開発することに重点をおいた20~40。

これらの開発した機能に対しては、INSの検証用として、同時に開発したBWR(沸騰水型)原子力プラントシミュレータにより、その有効性を確認した。

2 INS

2.1 開発の背景と目標

INSの開発の背景と目標を図1に示す。

原子力プラントでは、プラントの情報は制御盤を介して運転員に提供される。運転員はそれに基づいて、監視・判断操作を実施する。INSは、運転員の監視・判断及び操作を各種機能によって支援するものである。監視では、CRT (Cathode Ray Tube)画面、音声告知などによるプラント情報の提供、判断では、異常・事故の原因診断、波及予測情報の提供、また操作に対しては、運転操作ガイドの提供によって、運転員を総合的に支援する。

日立製作所では、人間工学的見地から十分な検討を行ない、かつ発電所起動・停止の自動化をも組み込んだNUCAMM-

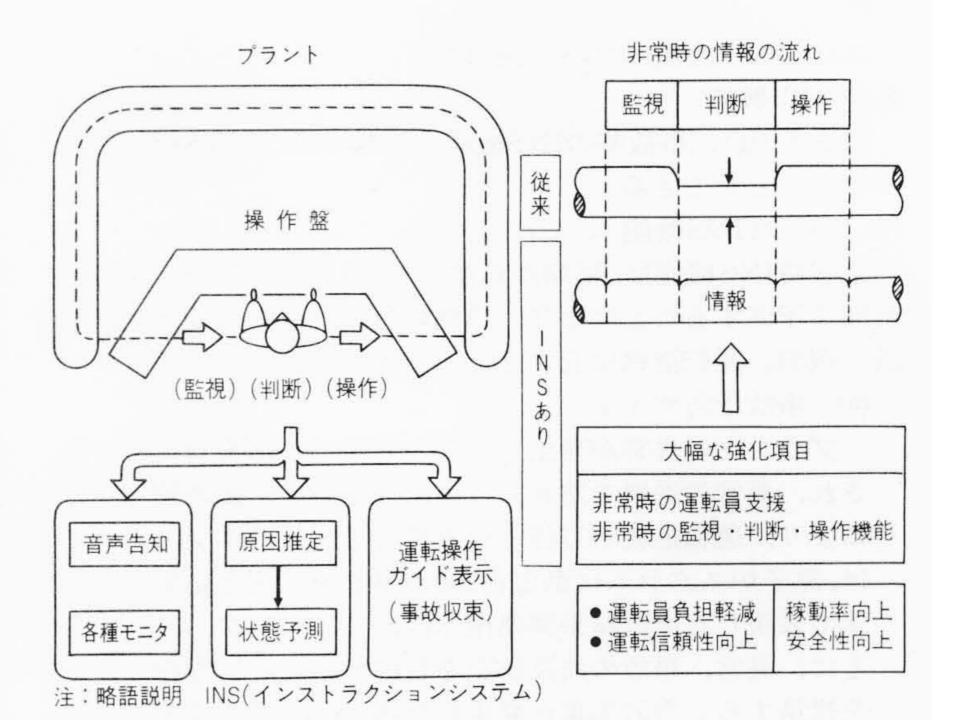


図 | 開発の背景と目標 非常時の原子力プラントでの運転員の判断を支援することに重点をおいた開発目標を設定している。

80を完成している。このシステムを詳細に検討し、非常時の運転支援を強化することにより、プラントの全運転状態にわたって、運転員をきめ細かく支援することが可能になると判断した。この結果、プラント運転員のなおいっそうの負担の軽減及び運転信頼性の向上を図ることが期待できる。

このような全体的な目標設定をプラントの運転状態に対応させ、図2に示すように機能を展開することができる。すなわち、起動・停止、通常運転状態では、プラントの安全系の待機状態を含めて健全に運転されていることを確認することが肝要であり、異常・事故時では、早期に対応策を構ずるための、異常・事故の原因診断、波及予測及びそれに基づくプラントの復旧操作あるいは安定停止へ導くための運転操作がイドによる運転支援を行なうことが必要となる。

INSは,新型中央監視制御システム(NUCAMM-80)とINSコンソールを調和させ、図3に示す制御盤体系として具体化

^{*} 日立製作所日立工場 ** 日立製作所大みか工場 *** 日立製作所エネルギー研究所 工学博士

^{****} 日立製作所システム開発研究所 工学博士

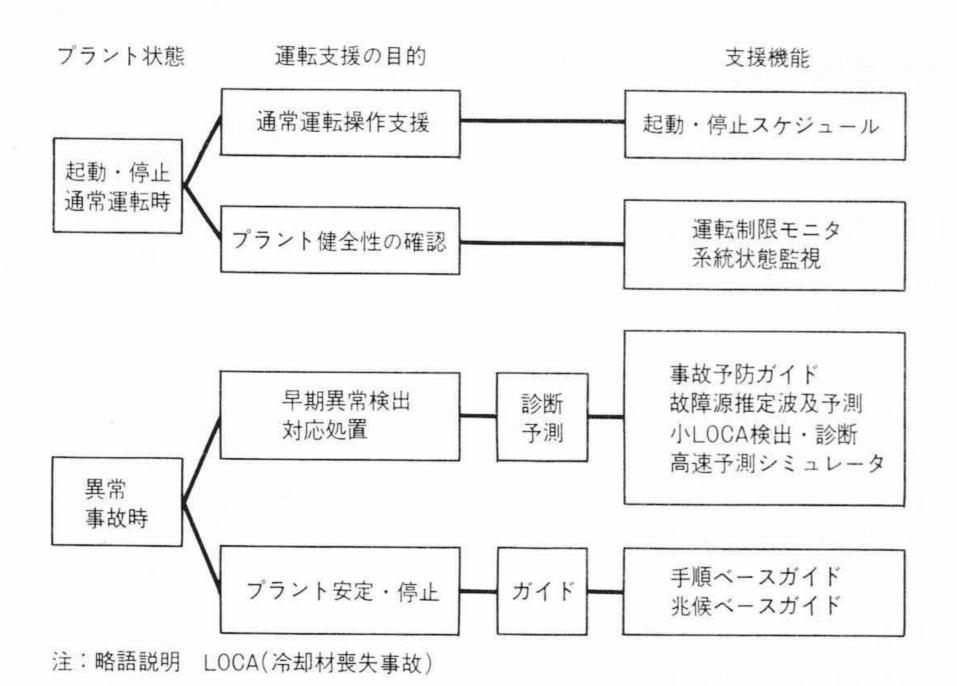


図 2 INSの機能展開 プラント状態に応じた運転員の支援が可能な機能展開としている。

した。

次にINSの機能について説明する。

2.2 INS機能

INS機能は、事故時のINS機能と起動・停止時INS機能とに 分けることができる。

(1) 事故時INS機能

事故時INS機能は、早期に異常を検出し、原因及びその波及 範囲を予測することにより、早期の対応処置を可能とし、事 故の復旧、運転継続に資するための機能である。

(a) 事故予防ガイド

プラントに異常が発生し、その異常に適切な対応策が施され、異常の進展を防止あるいは代替システムの使用などにより、運転継続が可能となる場合もある。本システムでは、原子炉スクラムに至る約200の事象を原因と結果を論理式で表現した原因結果関連樹木図によるデータベースをもとに、異常、事故の波及防止を目的とした運転操作ガイドを提供する。当該事象が発生した場合は、その原因、波及予測、波及防止のための運転操作ガイドをCRT上にメッセージの形で表示し運転員を支援する。

本システムでは、上述したように原子炉トリップに至る 重要事象を中心に取り扱うが、更に、詳細な故障診断を扱 うため次に述べる故障源推定、波及予測システムを導入し た。

(b) 故障源推定・波及予測システム5)

冷却水流量調節弁故障閉が発生すると、一定の故障遷移 確率及び一定の伝搬時間で主ポンプに故障が伝搬するとい う、故障伝搬構造を有向グラフによって表現した故障波及 線図に基づいて、故障源推定波及予測を行なう。検出器信 号が異常になると当該検出器に異常を及ぼす可能性のある 故障を抽出し、故障の原因候補とする。時間の経過ととも に、異常を示す検出器が多くなるとその共通要素として故 障要素を絞り込む。また推定された故障要素から、将来波 及すると考えられる故障要素を故障波及線図から推定す る。故障を検出すると上記手順で推定された故障源と、一 定時間後に故障が及ぶ範囲をプラントの系統図状に示した CRT画面により運転員に故障情報を提供する。

(c) 小LOCA検出診断システム

原子炉水位・圧力などのパラメータの雑音特性が、事故前後で変化することを利用して異常を検出する。あらかじめ設定した小LOCA(Loss of Coolant Accident:冷却材喪失)発生時の原子炉圧力,水位など複数個のパラメータの変化パターンに、実際に発生した異常時のパターンがどれだけ近いかを評価して、小LOCAの大きさなどを推定する。

(d) 高速予測シミュレータ

事故発生後の原子炉水位・圧力の変化率をもとに破断口の大きさを推定し、それを基に、原子炉水位、圧力、格納容器圧力の将来値を予測する。本シミュレータの予測ではプラントインタロックの条件設定が必要となるが、インタロックがプラントの本来の設計どおり動作するものと仮定し、最初の予測を行なう。その後は運転員の選択により条件設定を変更して、再予測可能な設計としている。図4に、事故発生約7分後に約28分先の原子炉水位・格納容器圧力の予測をした結果例を示す。

(e) 事故時ガイド

事故時ガイドは、前述のような診断予測機能があっても、プラントがトリップした後の、運転操作に対する指針を与える機能と位置づける。INSでは、通常のプラントトリップと冷却材喪失時とを区別して、運転操作ガイドを与える方式としている。前者の場合は、プラント諸システムの機能を保持しながら安全停止することが大前提である。そこで各プラントで規定されている事故時運転操作手順に基づいて、プラント状況を詳細に判断して、当該事象を収束させるのに必要十分な系統の運転操作手順をCRT表示し運転員を支援する。これを手順ベースガイドのという。一方後者の場合には、プラント諸システムの機能保持から、プラン



図 3 INSを組み込んだNUCAMM-80 新型中央監視制御システムNUCAMM-80の主盤を後方に、INSコンソールを手前に配し、INSの情報を的確に運転員に伝達できるよう設計している。

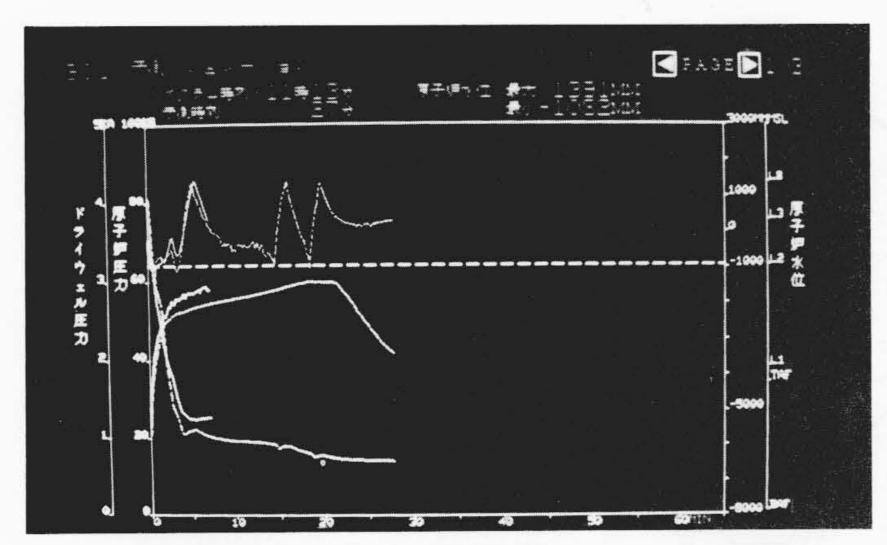


図 4 高速予測シミュレータのCRT表示例 実線が実機の変化を表わし、点線が将来の予測値を表わしている。事故発生後 7 分で、同28 分後の原子 炉水位・圧力の変化の予測値が得られている。

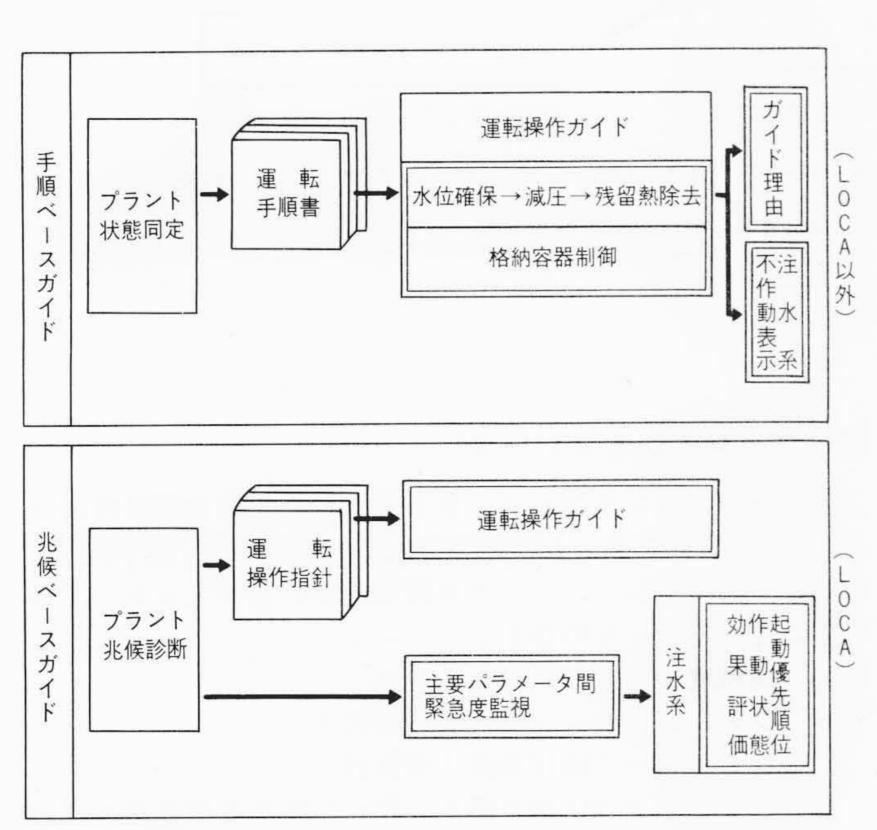


図 5 事故時ガイドシステム 手順ベースガイドと兆候ベースガイド を組み合わせた設計としている。

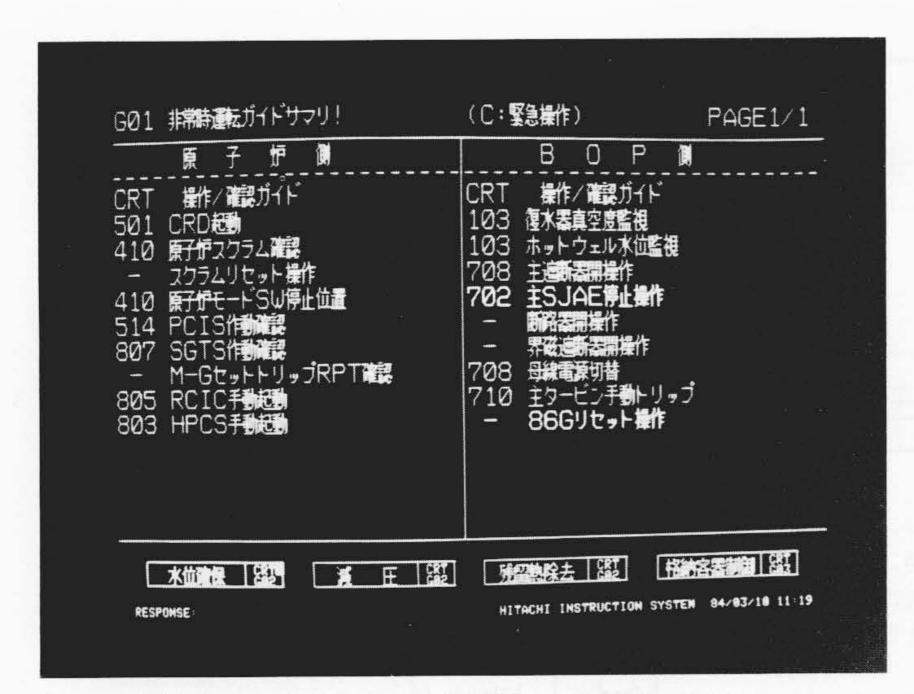


図 6 手順ベースガイドのCRT表示例 運転操作手順をメッセージの 形でCRTに表示する。当該操作が完了したと計算機で判断すると、メッセージは 黄色から緑色に変わり、操作未完の項目だけが黄色で残る方式とし、誤判断がな いように工夫している。

トの安全保持が必要となる。原子力発電所では、事故が発生した場合は、十分な安全系が自動的に作動し発電所の安全が確保される設計となっている。更に原子炉の水位・圧力や格納容器圧力などの安全上重要なパラメータが変化して、安全限界に近づいていることを示す指標(これを兆候と呼ぶ。)に基づいた運転操作指針の検討が進められている。この操作指針に基づいた運転操作ガイドをCRT表示することにより運転を支援する機能を兆候ベースガイドと呼ぶ。

INSでは、上記手順ベースガイドと兆候ベースガイドを次に説明する系統状態評価モニタと組み合わせて、信頼性の高い運転操作ガイドを提供する方式とした。図5に事故時ガイドシステムの原理的な説明を、図6に事故時ガイドシステムのCRT表示例を示す。

(2) 起動·停止時INS機能

起動・停止時のINS機能は、前述したとおり通常運転の支援 及び異常・事故発生時使用する系統の健全性の確認が必要機 能である。

(a) 運転制限モニタ

原子力発電所は,安全運転のため各種遵守事項が運転技術使用書によって規定されている。本モニタは,この遵守 事項が確実に守られているか否かを判断確認する機能をもっている。

(b) 系統状態評価モニタ

原子力発電所には各種安全系が設置され安全性を確保している。通常運転時それらは待機状態にあり、定期的に試験をして、いつでも起動可能な状態としている。

本モニタは,発電所の状態に応じて要求される安全系の 状態になっていることを確認するものである。確認する範 囲は安全系の待機,運転など各種運転状態での機器動作状 態及び系統流量,圧力などのプロセス量としている。

起動・停止時の支援機能は上述のほか、発電所の起動時有 効な起動・停止時スケジュール作成支援システムがある。

2.3 ハードウェア構成とマンマシン機器

ハードウェア構成とマンマシン機器構成を図7に示す。INSでは、NUCAMM-80の情報提供形態を踏襲・強化することとし、運転操作ガイドのように直ちに運転に反映する情報は、主盤ガイド用CRT、診断・予測結果など運転員との対話が必要な情報はINSコンソールのCRTに表示することとした。両者のCRT共、INSが異常、事故を検知すると直ちにそれを知らせるCRTを自動的に表示する方式とし、更に詳細な情報は下記のマンマシンシステムの使用により対話的に出力する方法を採用した。

(1) タッチスクリーン

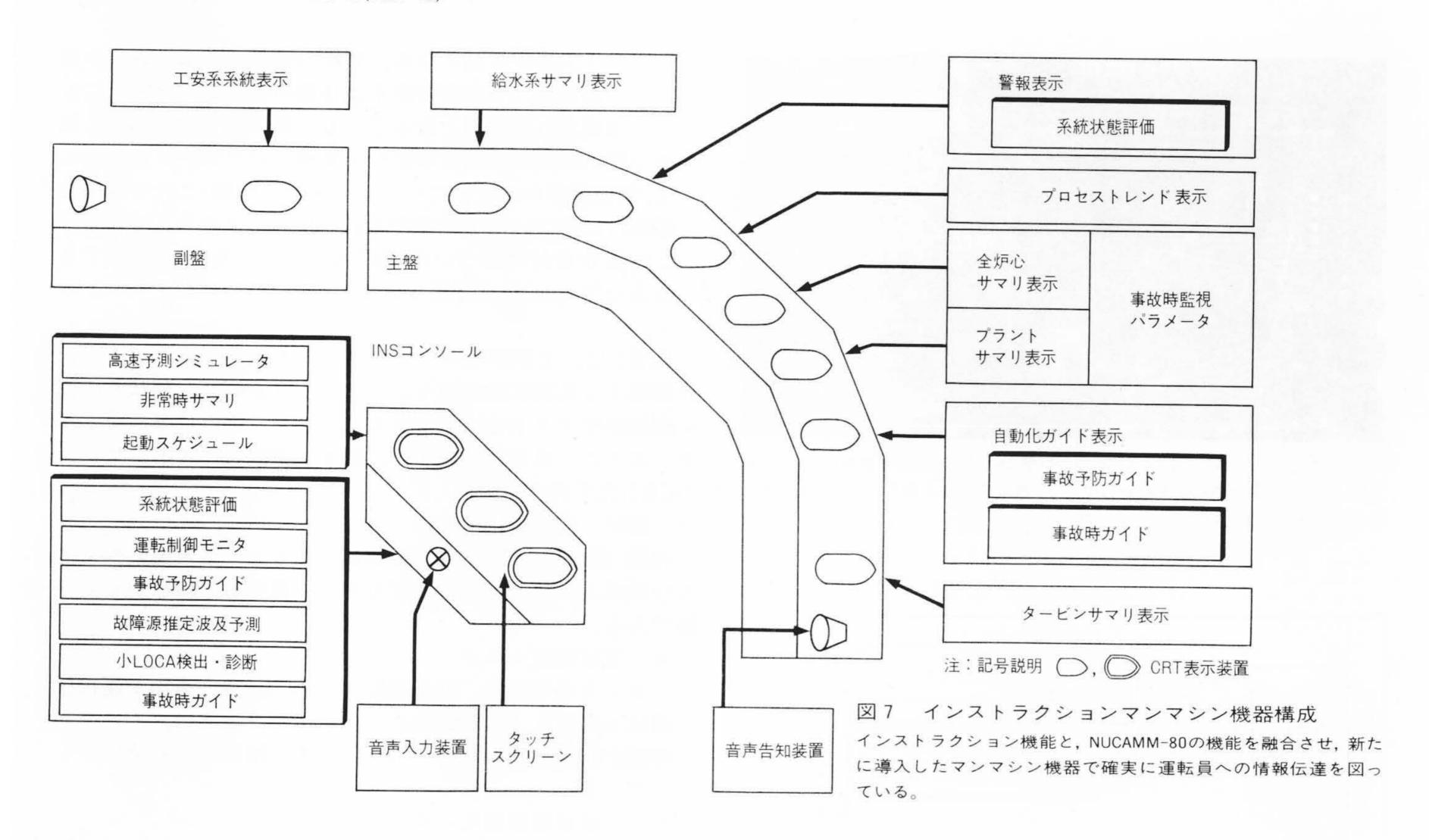
CRT表示装置の前部に取り付けられ、CRT画面のタッチされた座標を計算機に入力する装置である。検出部が画面上になく画面品質を低下させない発光・受光ダイオードの対による遮光位置検出方式を採用した。本スクリーンにより、キーボードや押しボタンスイッチのようにCRT画面から視線を離すことなく、マンマシンの対話を可能とした。

(2) 音声入力装置

特定話者の音声を認識する装置である。手を介さないで、 プラント状態の問合せ、CRT画面の切換えを可能とした。

(3) 音声告知装置

CRTは運転員がCRT画面を監視している状態で、かつ必要な情報を含む画面が表示されているときだけ当該情報を運転員に伝達できる。中央制御室運転員全体、同時に報告すべき



必要のプラント状態を伝達するため、音声告知装置を導入した。約80個の主要イベントの発生、音声入力装置によるプラント状態の応答に使用している。プラントのスクラム直後、運転員のプラント監視・操作が錯そうする時期・音声告知を抑える、告知メッセージの限定などのきめ細かい設計を導入している。

(4) フルグラフィックCRT

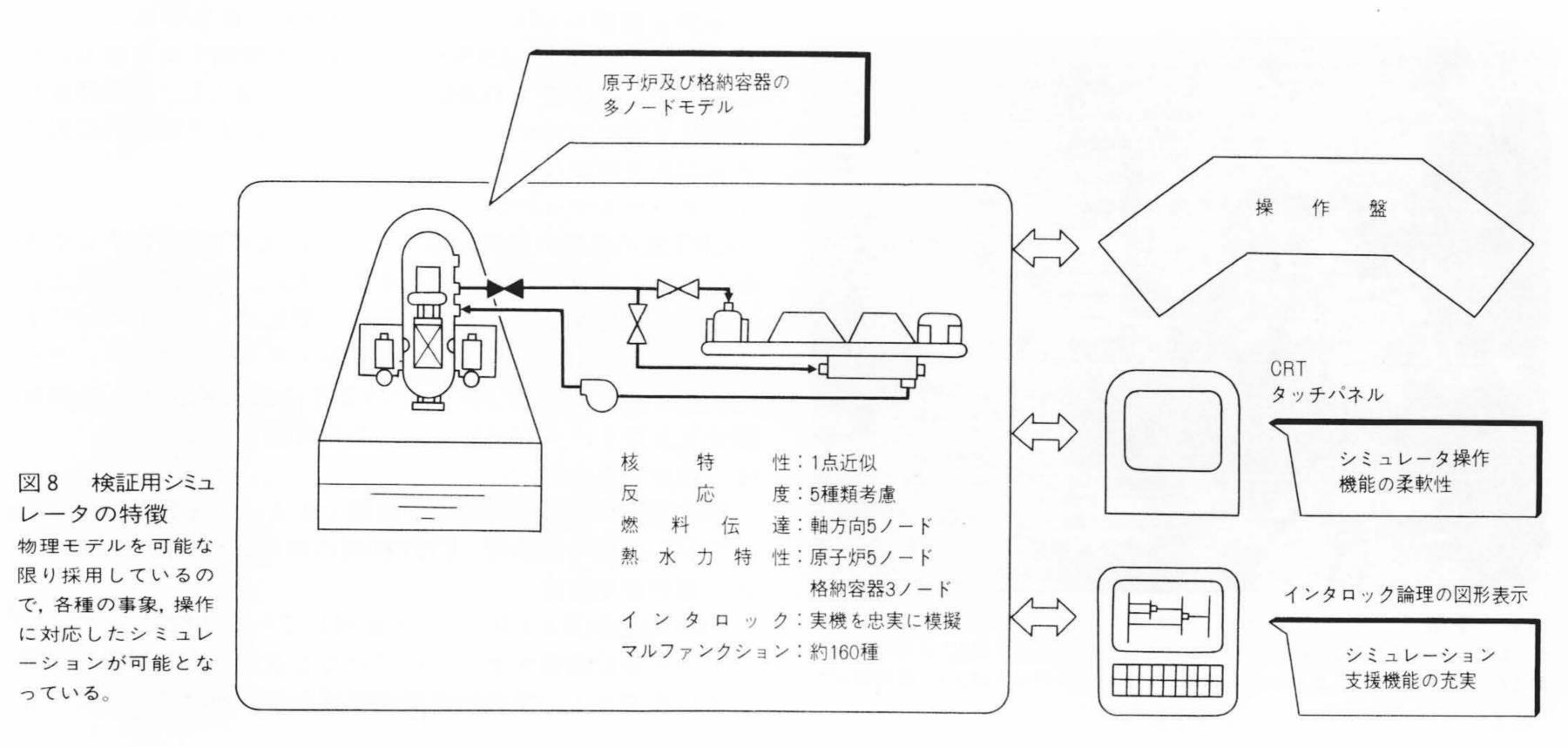
現在発電所のプロセス状態表示用に使用されているCRTは、キャラクタ単位で表示される。より詳細な情報表示のため、ドット単位の表示制御が可能なフルグラフィックCRTを導入し、従来不可能であったパラメータの実測値と予測値の同時表示などを可能とした。

3 プラントシミュレータ7)

マンマシンインタフェースを含めたINSを総合的に検証するためにBWRプラントの応答を実時間で模擬し、INS検証に有効なプラントシミュレータを開発した。本シミュレータは以下に述べるような特徴をもっている。

- (a) 高精度なシミュレーション
- (b) シミュレーション支援機能の充実
- (c) シミュレータ操作機能の柔軟性

本シミュレータの仕様を**図8**に示した特長と対比させ説明する。



(1) 高精度なシミュレーション

多様な事故事象の模擬のため、各種配管の破断・主要ポンプのトリップ・制御系故障を物理的モデルによりシミュレーションしている。また、事故時の原子炉・格納容器の特性を多ノードの伝熱及び流体の基礎式に基づいたモデリングをしている。これにより、運転訓練用のシミュレータの規準である米国標準規格ANSI/ANS3・5-1981を十分満足している。

(2) シミュレーション支援機能

インタロック論理の図形表示,マルファンクション発生,シミュレータ制御などのシミュレータとしての機能に加えて,INS検証に必要な運転操作,プラント状態の記録機能などを充実させている。

(3) シミュレータ操作機能の柔軟性

CRTタッチスクリーンによりシミュレータを操作可能とし、操作盤に設置されていない操作をも可能とし、シミュレータ操作機能範囲の充実を図った。

4 検証評価

検証試験としては、総合組合せ試験及び実用性評価試験の 二つを実施した。総合組合せ試験では、プラントシミュレー 夕を使って各種のINS機能が所定の仕様どおり動作するか否 かに着目して試験を実施し、その性能を確認した。

実用性評価試験は、INSの仕様自体の有効性を評価することを目的としたものであり、電力会社の実機運転員の協力を得て約3箇月、延べ20日間にわたって実施した。

検証評価は運転信頼性の向上の度合い,運転負担の軽減の 度合いと運転に対する一般的有効性を評価するため,図9に 示す方法でINSを使用した場合と,しない場合の運転操作上 発生する相違を評価することで進めた。

4.1 シミュレーション結果

INSを使用したときのシミュレーション結果の例を図10に示す。このシミュレーションでは、タービン補機冷却水系 (TCW)の熱交換器の故障により原子炉トリップに至る場合である。このようなトランジェントが発生すると、次のようにINSは運転員を支援する。最初TCW熱交換器出口温度高で故障源推定・波及予測システムが動作し、時間の経過とともに、故障源を推定し、TCWの熱交換器が故障していることを

INSを使用時の運転操作データ

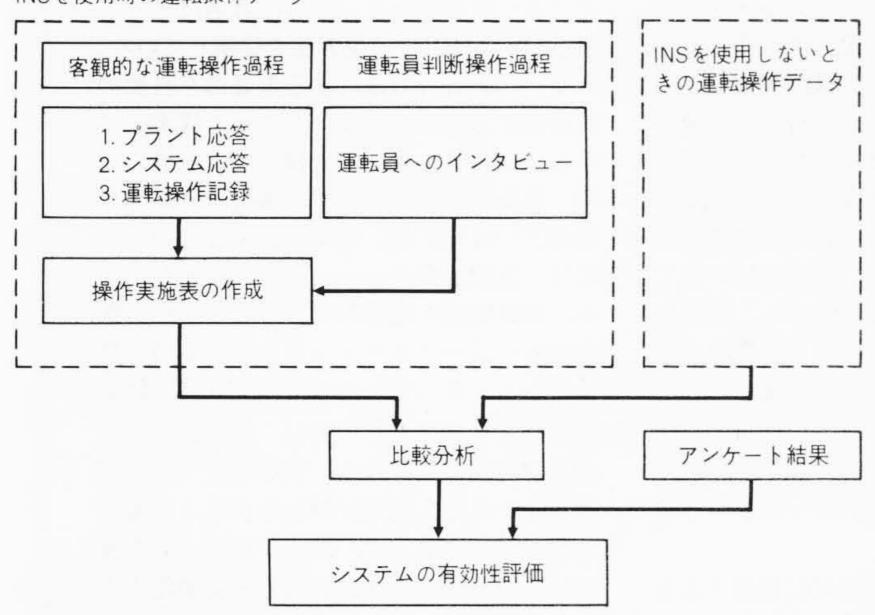
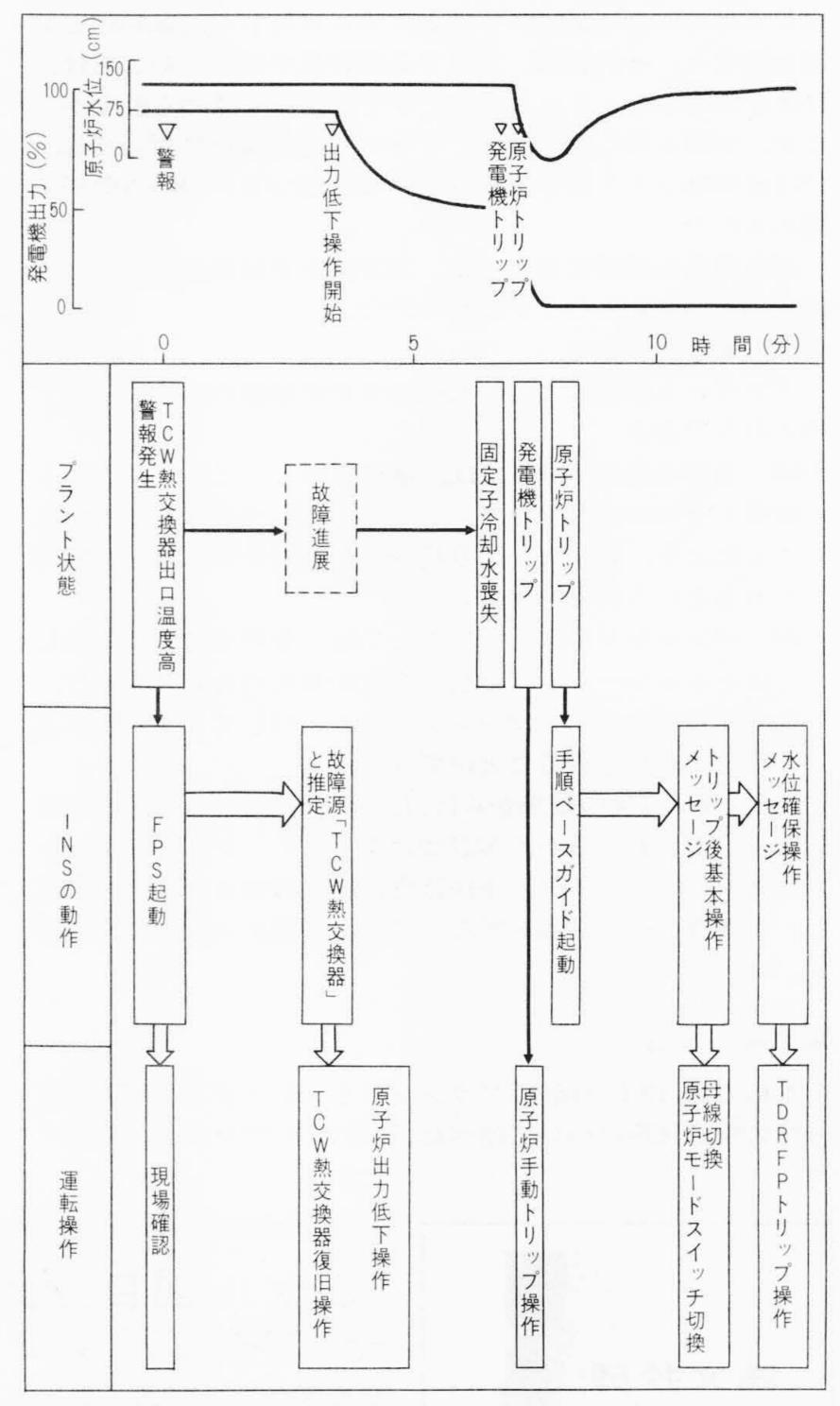


図 9 検証の方法 客観的な運転操作記録に、INSの情報がいかに使用されたかをインタビューにより補完し、運転員の判断過程でどうINSが生かされているかを評価する。



注:略語説明など
 →プラントの動きを示す。
 → INS機能の動きを示す。
 TCW(タービン補機冷却水系)
 TDRFP(タービン駆動給水ポンプ)
 FPS(故障源推定波及予測システム)

図10 INS動作例 INSが常時動作し、プラントの状態に応じ診断・運転操作ガイドを出力し運転員を支援している。

推定する。その結果、手動により原子炉出力を低下させ運転継続を図る。しかし、故障が進展して、固定子冷却水喪失により故障発生後数分で発電機トリップに至る。これと同時に手順ベースガイドにより、原子炉手動スクラム及びスクラム後の基本操作がガイドされ、それに基づいて運転員は操作・確認を行なうことになる。このように、INSは、プラントの全運転状態を通じて運転員を支援している。

4.2 試験結果

評価は大きく分けて,運転信頼性の向上などの客観的データと,アンケートによる一般的有効性に対する意見の二つがある。

(1) 運転信頼性の向上

運転信頼性の向上は、図10に示すようなあらかじめ定めた シミュレーションに対し、プラント運転要領書に基づいて作 成した標準的な運転操作手順と実際に実施した運転操作とを 対比させた。その結果、スクラム後の基本操作に対しては、 INSを使用したときとしないときでは差異は認められなかっ たが、判断を伴う運転操作、予防的な運転操作に対しては、 INS使用時はより標準運転操作手順に近づき、INSの効果が 認められた。

運転員負担軽減に対しては,異常検出原因調査に対する時間短縮が図られることが認められた。

(2) 一般的な有効性

アンケート調査による一般的な有効性評価の結果は,以下 のとおりである。

- (a) 各INS機能に対しては、運転員のもっているプラント情報とその判断に対して、システムのもつ情報を活用することにより、運転員がより総合的な判断をするために有効であるという評価を得ている。
- (b) マンマシンシステムに対しては、音声出力装置に対してはシミュレーション参加者全員が肯定的な意見であり、他の新規導入のマンマシンシステムに対しても、70%以上の肯定的意見を得ることができた。

以上,検証試験の結果からは,INSの実機適用に対する期待 感は強いと思われるが、本評価はあくまで、シミュレーショ ン試験での結果であり、今後は更に実機の種々の条件を勘案 し、実機導入への評価を行なってゆく必要があると考えてい る。

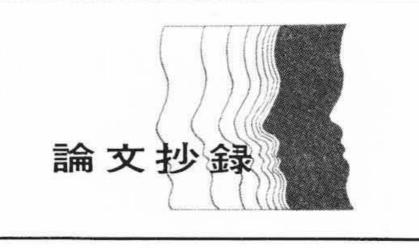
5 結 言

本稿では、INSの機能、プラントシミュレータ及び両者を使っての検証試験について述べた。INSでは、プラントに発生す

る異常・事故を早期に検出・診断する技術,及びプラントトリップ後は、プラントを安定状態へ至らせるための運転操作ガイド技術を開発した。それらを、プラント大のシミュレータにより検証し、それらが所期の性能をもっていることを確認した。更に実機運転員の参画を得た検証試験では、運転員の運転・操作・判断にも有効であると確認された。今後は、各電力会社の指導を得て実機導入を検討してゆきたいと考えている。

参考文献

- 1) 矢内,外:最近の沸騰水型原子力発電所計測制御システム,日 立評論,64,8,585~590(昭57-8)
- 2) 能,外:原子力発電支援システムの開発,日立評論,**64**,8,591~594(昭57-8)
- 3) F. Murata, et al.: Development of BWR Computerized Operator Support System for Emergency Conditions, IAEA-SM-268/20, Marseilles, France (1983.5)
- 4) Y. Higashikawa, et al.: A Computerized Operator Support System for BWR Abnormal Conditions, International Topical Meeting on Computer Applications for Nuclear Power Plant Operation and Control, USA (1985-9)
- 5) 古河,外:故障波及予測·診断システムの開発,計測と制御, Vol. 25, No. 8(昭59-8)
- 6) Y. Ohga, et al.: An Event Oriented Method for Determining Operating Guides Under Emergency Conditions in Boiling Water Reactors. Nucl. Technol., 64, 229 (1984)
- 7) 大森,外:沸騰水型原子力発電プラントシミュレータ,第4回 シミュレーション テクノロジ コンファレンス(昭59-6)



LSIセル図自動認識のための重畳線表現方法とその解釈アルゴリズム

日立製作所 嶋田 茂・角本 繁・他 I 名 電子通信学会論文誌 J68-D, 8, 1521~1528 (昭60-8)

電子回路などの設計の分野では, 計算機 支援による設計の自動化(CAD: Computer Aided Design)が進展しつつあるが、設計者 の描く図面をいかに能率よく計算機へ入力 させるかが最大の課題となっている。この課 題を解決するためには, 図面を計算機によ り自動的に認識させ,紙上の図面情報を直 接計算機へ入力する, いわゆる図面認識の 技術が必要となる。ところが, この図面認 識には、処理上の各段階に対応して、(1)紙 面上の図面情報を質の良い画像情報へと変 換する問題, (2) 得られた画像情報から線図 形・文字・記号を認識する問題, (3) 認識さ れた線図形・文字・記号から図面の意味を 求める問題がある。これらに関しては、現 在多方面からの研究が行なわれているが, まだ実用的な手法が確立されるには至って いなかった。ここでは、半導体設計で重要 なLSIセル図の自動認識の問題を取り上げ る。この図面は、アルミ層・酸化シリコン 層など複数層の線図形を, 設計者が色鉛

筆などによって層別に異なった線種(線色 と実線・破線・長破線の組合せ)で同一図 面上に描くものである。直線部分がほとん どであること、複雑な記号や文字が含まれ ないことから,一定の表現方法を守って描 けば比較的認識しやすい部類に属する。し かし, 同一経路上に異なった層での線図形 を重ねて表現しなければならないことが生 じるため、このような重畳部の表現方法と その解釈処理が問題となる。本論文ではこ のようなLSIセル図に対し、線の追跡が完了 して座標データになった段階から、図面の 性質と表現方法の規則を用いて重畳線を自 動的に解釈することを試みた結果について 述べている。これは先に説明した図面認識 上の三つの問題のうちの第三の問題に属し, LSIセル図面の意味情報を扱ったものと言 える。

さて、LSIセル図面を自動的に認識する上で重要な項目に、線色・実線・破線など線種の異なる複数の線が重畳する部分(重畳

部)の表現と解釈がある。本論文では、まず この重畳部を表現する方法について比較検 討した後, 重畳部を自動的に解釈する上で あいまい性が少なく,かつ設計者にとって 書きやすい新しい表現方法を提案している。 また, この表現方法による重畳部を自動的 に解釈するためのアルゴリズムも提案して いる。このアルゴリズムは, 重畳記号の認 識・重畳区間境界の探索・重畳線経路の推 定の三つに分かれ, 特に重畳線経路の推定 では、主要部分をルール形式で記述したほ か,探索範囲を適応的に拡大させながら推 定するヒューリスティックな手法を織り込 んでいる。そして、このアルゴリズムに基 づいたプログラムを作成し、セル図面の自 動入力装置に組み込み, 実際のセル図を認 識させ, 良好な結果が得られることを確認 した。これによって、従来タブレットを使 用した図面のマンマシン入力を自動化する ことが可能となった。