

原子力発電プラントにおける計算機制御システム

Computer Control Systems for Nuclear Power Stations

プラント運転の信頼性、稼働率の向上、運転員の負担軽減の要求を背景に、原子力発電プラントでの計算機システムの適用範囲は拡大の傾向にあり、その役割はますます重要になってきている。特に、運転監視操作性向上の観点から近年適用されてきた特徴的機能としては、多数のCRTを活用したプラント通常時・異常時の状態監視、プラント運転の自動化とオペレーションガイド、3次元シミュレータ式炉心モデルによる炉心監視・予測システム、安全パラメータ表示システムなどがあげられる。

本稿では、これら適用例とプロセス計算機の動向について述べる。

三宅雅夫* Masao Miyake
 村田扶美男** Fumio Murata
 下重孝則** Takanori Shimoshige
 宮嶋一夫*** Kazuo Miyajima
 藤田義昭**** Yoshiaki Fujita

1 緒言

原子力発電所は、中央集中監視方式の典型的なプラントである。近年のユニット容量の増大、発電設備の高度化などに伴い、プラント運転の信頼性、稼働率向上、運転員の負担軽減が要求されている。これに対応し、プラント運転監視操作性のよりいっそうの向上のため、プロセス計算機を積極的に有効活用し、機能の向上、適用範囲が拡大していく傾向にあり、プロセス計算機システムの役割は非常に重要なものとなってきている。すなわち、BWR(沸騰水型原子炉)プラント用プロセス計算機は、適用の初期のころの炉心性能把握中心のものから、カラーCRT(Cathode Ray Tube)を積極採用したもの(新型中央監視制御システム、NUCAMP-80, Nuclear Power Plant Control Complex with Advanced Man-Machine Interfaces)¹⁾へと発展してきた²⁾。

本稿では、最近のBWRプロセス計算機機能について、東京電力株式会社福島第二原子力発電所4号機(以下、福島第二・

4号機と言う。)でのプロセス計算機システムの特徴的機能を中心に記すほか、安全パラメータ表示システムなど既設プラントでの計算機機能強化についても述べる。

2 運転監視機能強化

原子力発電所の中央監視制御については、プラント運転信頼性確保、運転員負担軽減などの観点から、運転監視操作に対するマンマシン性の向上が強く要望されてきた。このため従来型制御盤を、各種運転操作を考慮して、形状、器具配置、CRTの活用などを含めた人間工学的設計により、特に運転監視操作性の観点から見直し、新型中央監視制御システムとして福島第二・4号機で実用化した。その総括監視制御盤の外観を図1に示す。プロセス計算機システムは、新型中央監視制御システムの重要な構成要素であり、負荷分散型マルチ計算機システムとし、万一の計算機故障検出時には、システム

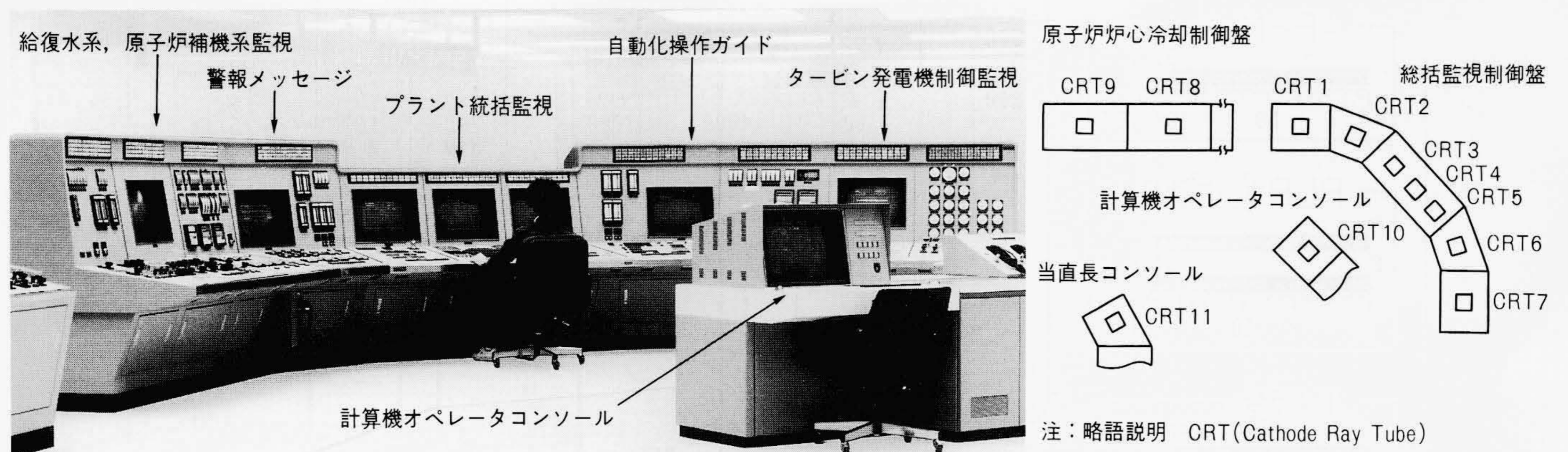


図1 新型中央監視制御盤の外観 人間工学的配慮がなされた総括監視制御盤上のCRTは、役割分担し、全体として運転監視性を向上させている。

* 日立製作所大みか工場 ** 日立製作所日立工場 *** 株式会社日立コントロールシステムズ **** 日立エンジニアリング株式会社

表1 プロセス計算機システムの機能例 プロセス計算機システムの機能は拡大傾向にあり、ますます重要な役割を果たすようになってきている。

分類	機能
1. プラント状態監視	(1) プロセス警報 (2) トリップシーケンス・経過値記録 (3) 通常時状態モニタ (4) 異常時状態モニタ
2. 炉心性能監視・予測	(1) 周期的炉心性能計算 (2) オンデマンド炉心性能計算 (3) 炉心性能予測
3. 自動化・操作ガイド	(1) プラント自動化 (2) サーベイランステストガイド (3) 音声告知

表2 CRTの設置場所と用途 中央制御室の各CRTは主な用途を持つが、他CRTへの割当て画面も表示する配慮をしている。

CRT No.	主な用途	設置場所
1	給復水系, 原子炉補機系表示	総括監視制御盤
2	警報表示	
3	プロセストレンド表示	
4	全炉心, 核計装表示	
5	プラントサマリ表示	
6	自動化操作ガイド表示	
7	タービン発電機系表示	原子炉炉心冷却系制御盤
8	工学的安全系表示	
9	サーベイランステストガイド表示	
10	データ表示, 炉心性能表示	計算機オペレータコンソール
11	当直長用総括監視	当直長コンソール

の自動再構成が可能な構成としている。福島第二・4号機プロセス計算機の代表的機能を表1に示す。

プラント運転の通常時での安定的、効率的運転の達成、異常時での安全の確保、迅速な復旧の目的から、運転操作に必要な適切な情報を運転員が得るための強力な運転員補佐手段として、CRTを用いてプラントの状態を集約表示する状態監視機能は有効である。

CRTは中央制御室設置分として表2に示すような運転監視上の役割を持たせ、それに対応した表示画面を割り当てている。なお、各CRTには専用の画面選択スイッチを設け、制御

盤上のCRTに割り当てられた画面を任意のCRTに表示可能なよう配慮している。

(1) 通常時状態モニタ

(a) プラント運転状態表示

プラント通常運転時にプラント状態を効率よく集約監視可能なように、主要系統、主要運転状態でのプラント状態を系統表示としてグラフィック表示、トレンド表示する。CRT表示のハードコピー例を図2に示す。

(b) サマリステータスモニタ

運転員のプラント監視作業を軽減するために、プラント

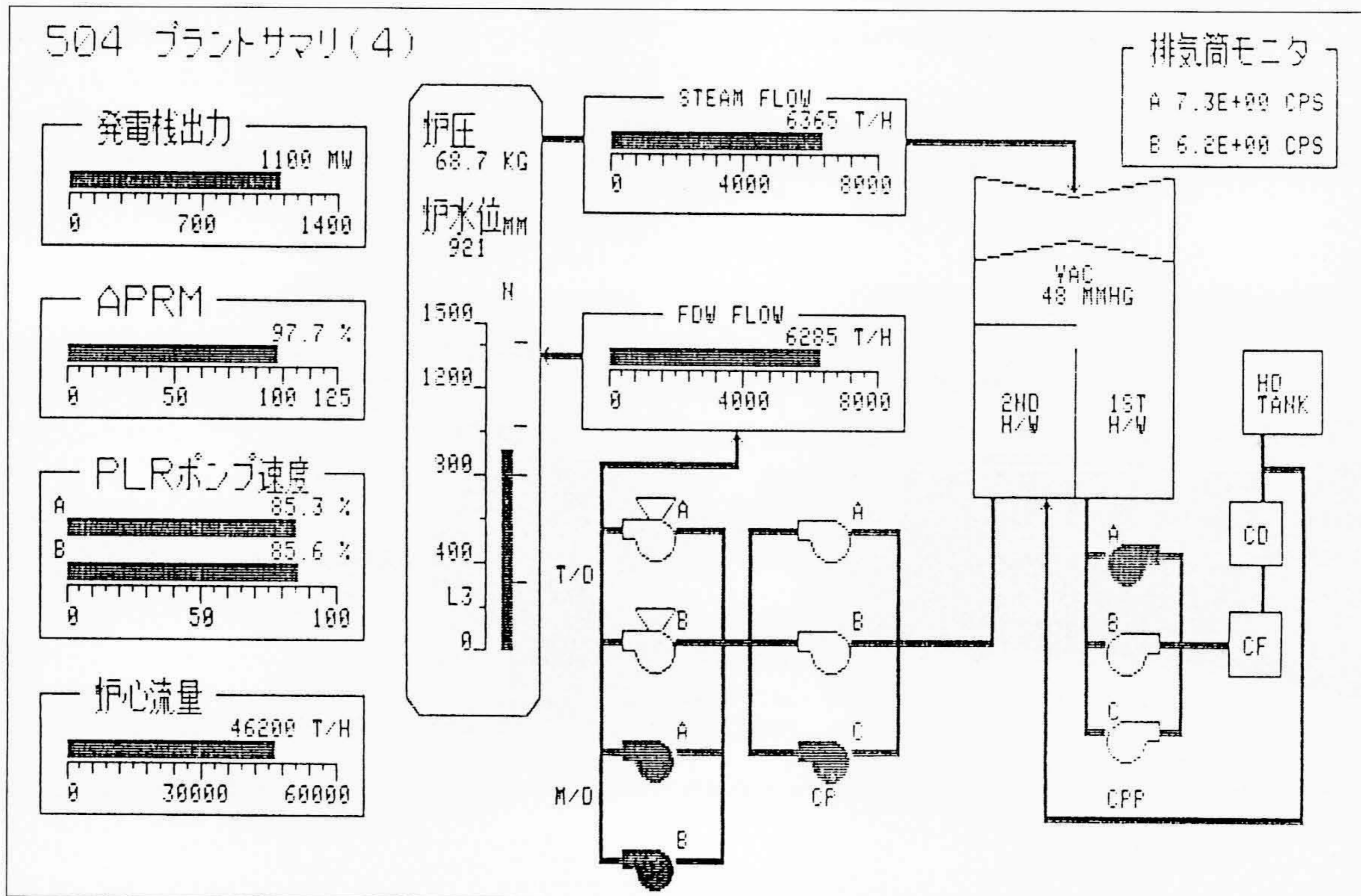


図2 CRT系統図表示ハードコピー例 プラント全体の状況を集約して、運転員の適切な状況把握のための情報を提供する。

出力運転中、プラント主要パラメータを、主として原子炉出力に関連して計算される基準値をもとに監視し、結果をCRTに集約表示する。

(c) 待機状態モニタ

プラントの非常時に起動することが期待されている工学的安全施設などの待機状態を、計算機により常時監視し、待機不全が発生したときに、中央制御盤のアナシエータに警報を出力するとともに、CRT及びタイプライタにアラームメッセージを出力する。

(2) 異常時状態モニタ

(a) トリップ時モニタ

プラントトリップが発生した場合に、原因の早期究明及び状況把握を容易にするため、トリップの状態及び引き続き重要な機器の作動状態並びにプラント状態を自動的に表示する。

表示画面としては、4種のプラントトリップを対象に最初のイベントとその要因を解析し表示する非常時アラーム表示、主要パラメータのトリップ前後の状態をトレンド表示するアナログトレンド表示、プラントの全体把握に必要な系統、機器の運転状態及び主要パラメータを系統図で集約表示する各種サマリ表示がある。

(b) 異常時モニタ

プラント異常時に監視すべき情報をCRTに集約表示することによって、運転員の監視や操作機能を補佐することを目的とし、原子炉水位集約表示、逃し安全弁排気管温度集約表示及びアナログトレンド表示などを行う。

(c) 工学的安全系状態表示

プラントの異常時のプラント状況把握の一助として、高圧炉心スプレイ系など工学的安全系を対象に、系統の作動を確認するための情報と、系統を運転するのに際して必要な関連系統の情報を系統図として表示する。

3 炉心性能監視・予測システム

BWRプラントでは炉心内の燃料の燃焼を、制御棒、炉心冷却材流量などにより制御している。燃料の燃焼管理や燃料の健全性を維持するための運転制限値の監視などは、炉心性能監視システムによって自動的に行うことができる。

炉心性能監視システムは、原子力発電所に設置されているプロセス計算機に組み込まれている。その主要部である炉心性能計算では、炉内中性子モニタの実測データをオンライン

で取り込み、これをベースとし、原子炉内の各位置に対応した3次元出力分布を、時々刻々求めることができる。

最近では、計算機の大幅な性能向上によって、大量のデータを取り扱い、詳細な物理モデルに基づく炉心性能計算が可能となってきており、これによる運転余裕度の評価精度向上は、燃料経済性あるいは運転融通性を向上した運転に寄与することが期待されている。

日立製作所では、以上のような考え方にに基づき高精度の炉心性能監視システム“COMS”(Core Operating and Management System)を開発した。

COMSの特徴は、中性子拡散理論及び熱水力学の諸法則に基づく核熱水力結合解析モデル(3次元シミュレータ)により全炉心内の3次元出力分布を計算することである。

また、COMSは、適応機能、すなわち計算値が炉内核計装の実測値と一致するよう自動的に較正する機能を持っており、高精度の炉心性能監視が可能である。

更に、COMSは、将来の炉心状態(炉心熱出力、炉心流量)及び炉心性能を予測できる機能を持っている。すなわち、制御棒の操作後、炉心流量の調整後、及び燃料の燃焼後について炉心状態と炉心性能を予測する機能である。これにより、起動運転中では、次の運転操作に関する指針、あるいは目標運転に対する制御棒パターン設定についての支援が可能である。また、通常運転中では、制御棒パターンの調整時期及び制御棒パターン選定に関する計画支援が可能である。

COMSのシステム構成を図3に示す。

本システムの有効性は、その運用実績から以下のように示されている。COMSの炉心性能計算で得られた軸方向出力分布を、炉内中性子モニタの実測値と比較して図4に示す。これより両者はよく一致しており、適応機能及び出力分布計算方式が適切であることが示された。また、出力上昇中での炉心流量の予測値と実績値を比較して図5に示す。

なお、COMSは、福島第二・4号機などに既に適用されており^{3),4)}、今後の新規プラントにも適用が計画されている。

4 プラント運転自動化操作ガイドシステム

4.1 自動化システム概要

新型中央監視制御システムの採用に伴い、プラント運転監視機能が強化されるとともに、加えてプラント運転操作の自動化が図られた。自動化の目的は、運転操作における運転員負担の軽減にあり、自動化システムはこの目的の下に設計し

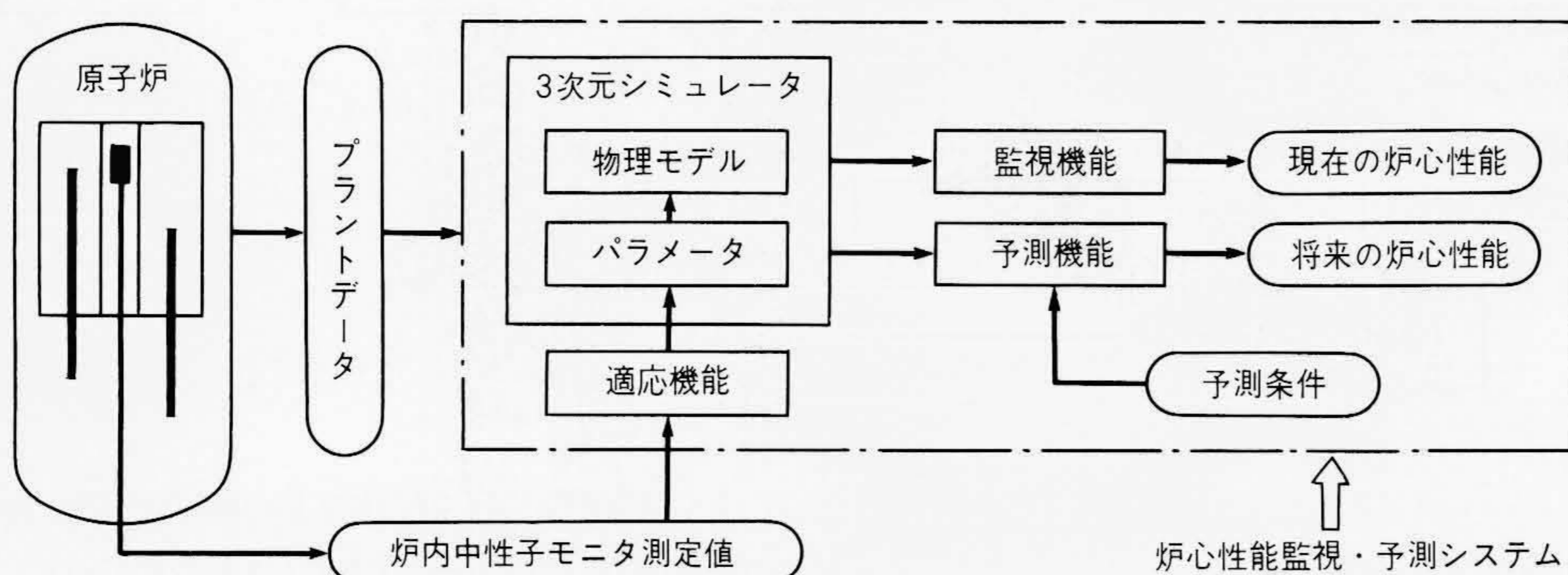
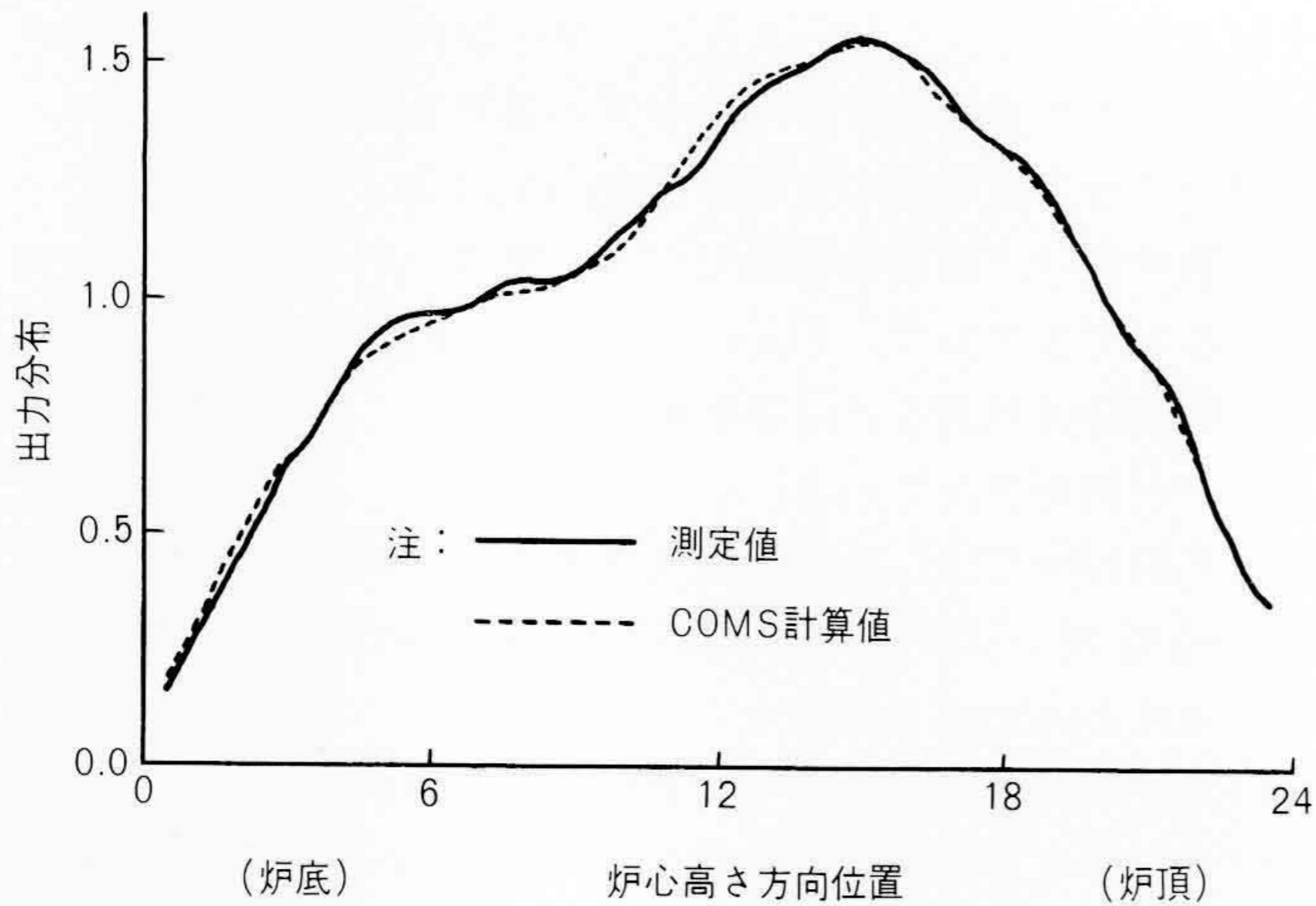


図3 炉心性能監視・予測システムの構成 3次元シミュレータモデルを中心に、実測への適応機能も備えている。



注：略語説明 COMS(Core Operating and Management System)

図4 軸方向出力分布の比較 炉心性能計算による出力分布は、炉内中性子モニタ実測値とよく一致している。

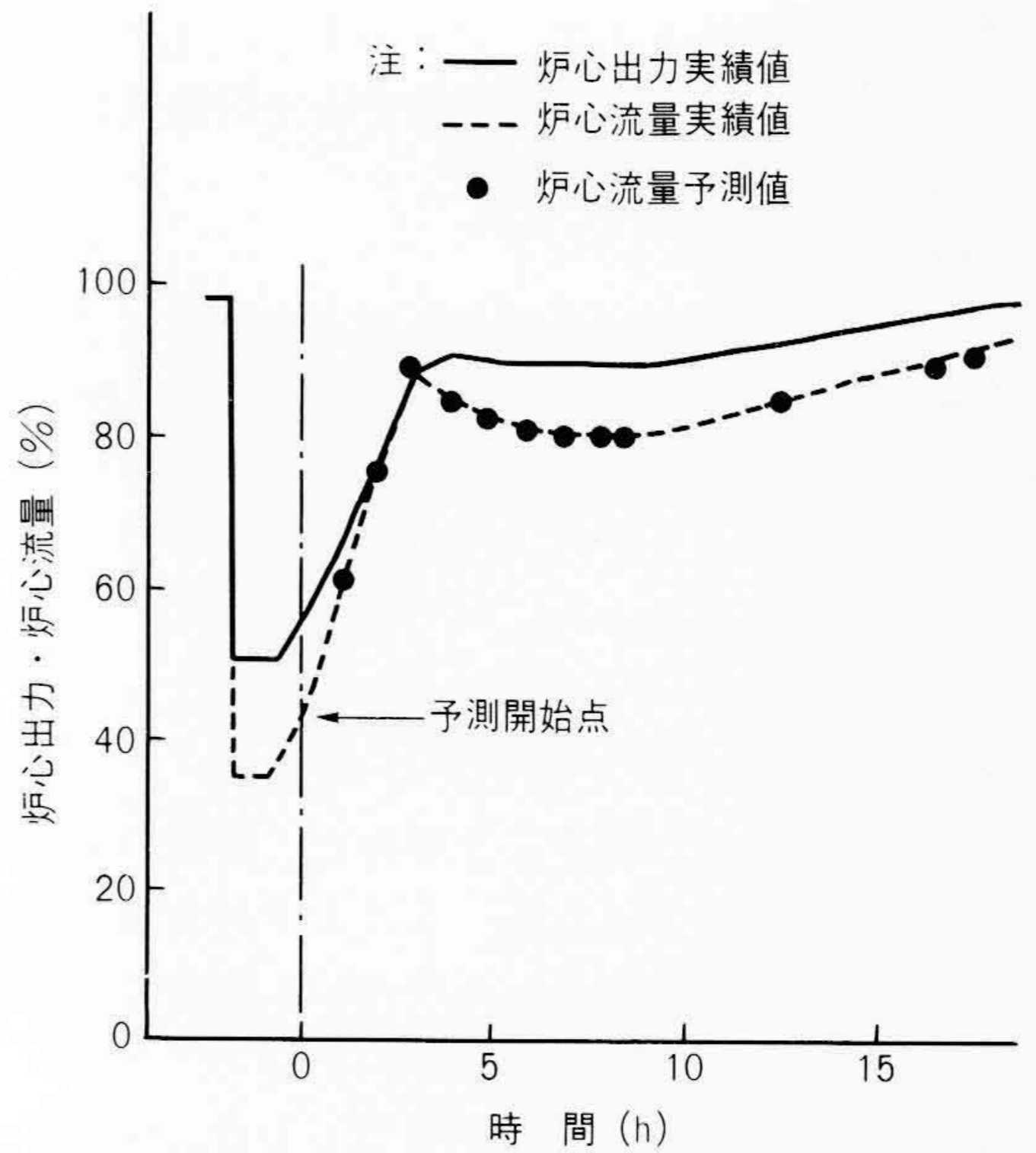
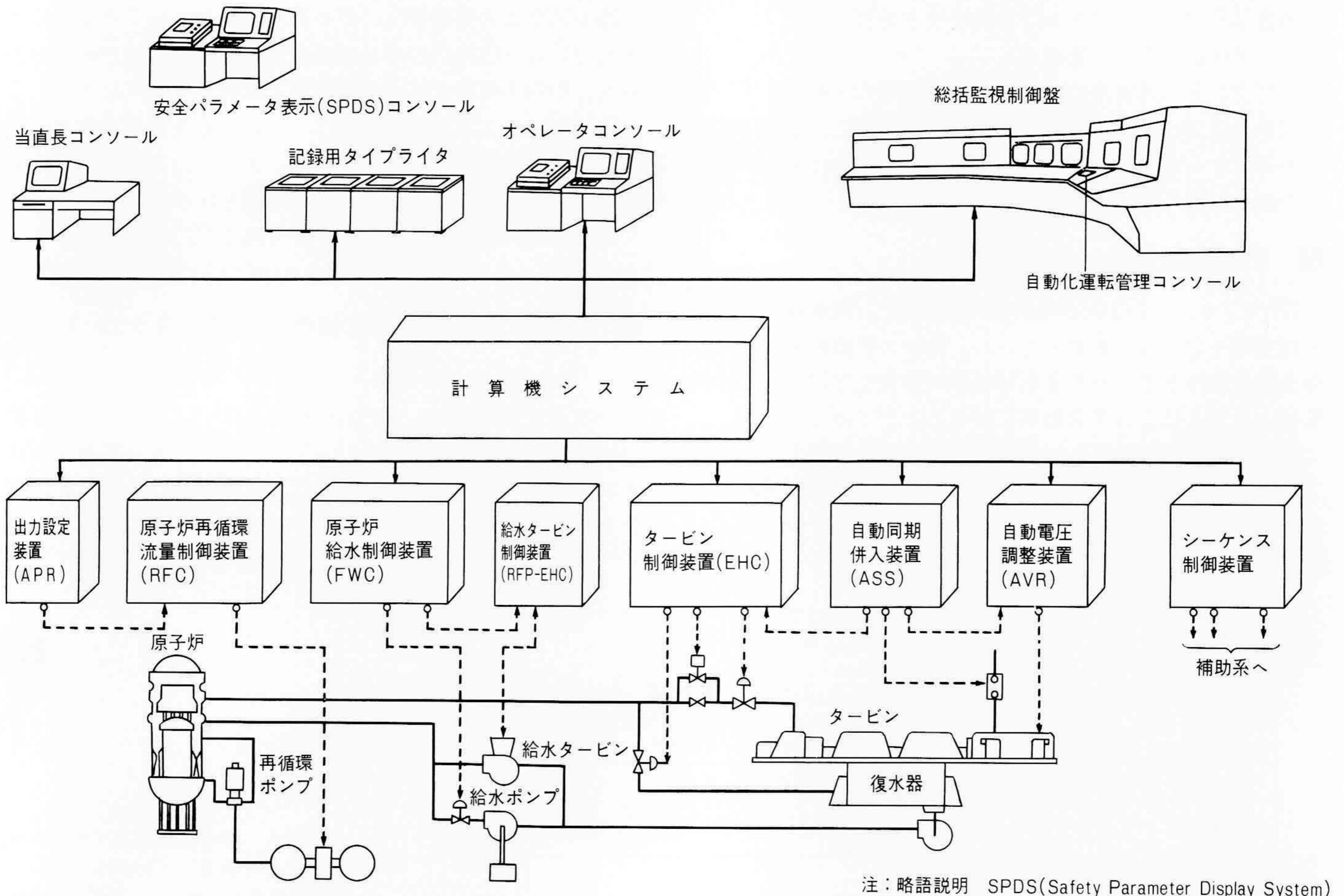


図5 予測計算結果(例) 炉心性能予測計算による出力上昇中の流量予測と実績の評価を示す。

ている。福島第二・4号機での自動化システムは、プロセス計算機の総括監視・管理の下に、直接、計算機が操作端を駆動するDDC(計算機直接制御)、デジタル化したタービン制御装置、給水・再循環流量制御装置、出力設定装置などのサブグループ制御装置へのKAW(駆動指令)、SCC(設定値変更指令を与える計算機監視制御)などの方式により構成している。

本自動化システムは、図6に示すような全体構成をとって

いる。プラントの運転状態は、下記(1)~(3)に示すように、プラントの起動から、出力運転、停止操作に至るまでの広範囲にわたっているが、この中で自動化対象となる操作は、主として主機周りにかかわる部分である。起動過程の自動化対象



注：略語説明 SPDS(Safety Parameter Display System)

図6 自動化システムの全体構成 計算機システムと各種制御装置はそれぞれの役割を持ち、全体として自動化システムを構成している。

の例を図7に示す。

- (1) 真空上昇, 原子炉昇温昇圧, タービン起動・発電機併入, 出力上昇などの起動過程
- (2) 再循環流量制御による出力上昇及びプラント出力変更過程
- (3) プラント定格出力からの原子炉, タービン停止過程

関連する計算機システムの機能として, マンマシン性向上の一つの試みである音声告知装置を導入した。これにより運転操作の自動化, 操作ガイドの拡張機能として, 運転フェーズ変更及びプラント主機の起動・停止のメッセージを音声により自動告知するようにした。更に, 原子力プラントで特有の工学的安全施設の定例試験(サーベイランステスト)を支援するサーベイランステストガイドなどの各種支援機能も合わせて実施することとした。

4.2 自動化システムの実証

前述のような大規模な自動化システムを導入するに当たって, 先行機までの運転実績の反映はもとより, 工場内での強力な設計レビュー, シミュレーション評価を実施し, かつプラント起動試験での調整, 検証を行い, 本システムの有効性を確認した。

起動時の主要操作である給水ポンプ切替操作を, 自動化システムで実行したときのプラントの主要パラメータの変化を図8に示す。

全給水流量を一定に保ちながら, MD-RFP(電動駆動給水ポンプ)からTD-RFP(タービン駆動給水ポンプ)への切替を行うものであるが, 同図を見ても分かるように原子炉水位の変

動も少なく, 安定に制御されていることが確認された。

このほかに, 下記のような主要な運転操作の自動化, 運転支援機能の性能を確認した。

- (1) 起動・停止時の自動制御性能の確認

原子炉の昇温・昇圧制御, 原子炉圧力制御からタービン出力制御への切替制御, タービン起動など, 自動制御性能が良好なことを確認した。

- (2) 起動・停止時の運転操作ガイド及び音声告知の確認

プラントの運転操作をガイドメッセージとして, CRTに表示するとともに, 運転フェーズ切替え, 主機などの起動・停止をメッセージで音声告知することは, 運転操作タイミングの遵守はもとより, 運転クルーのプラント状況把握に大きな役割を果たすことを確認した。

- (3) サーベイランステストガイドの確認

工学的安全施設の全サーベイランステスト項目にわたって手順を検証し, 有効な支援機能であることを確認した。

本システムのCRT表示例を図9に示す。

5 安全パラメータ表示システム

米国では安全パラメータを表示するシステム(SPDS: Safety Parameter Display System)を設置することが望ましいと勧告されている⁵⁾。国内でも民間基準としてSPDSの設置が勧められている。本基準に合致するシステムとして, プロセス計算機によりSPDSを具体化した。本SPDSでは, 炉心冷却(水位確保)制御, 格納容器制御, 反応度制御など安全確保の目的に応じ必要なパラメータを表示することによって, プ

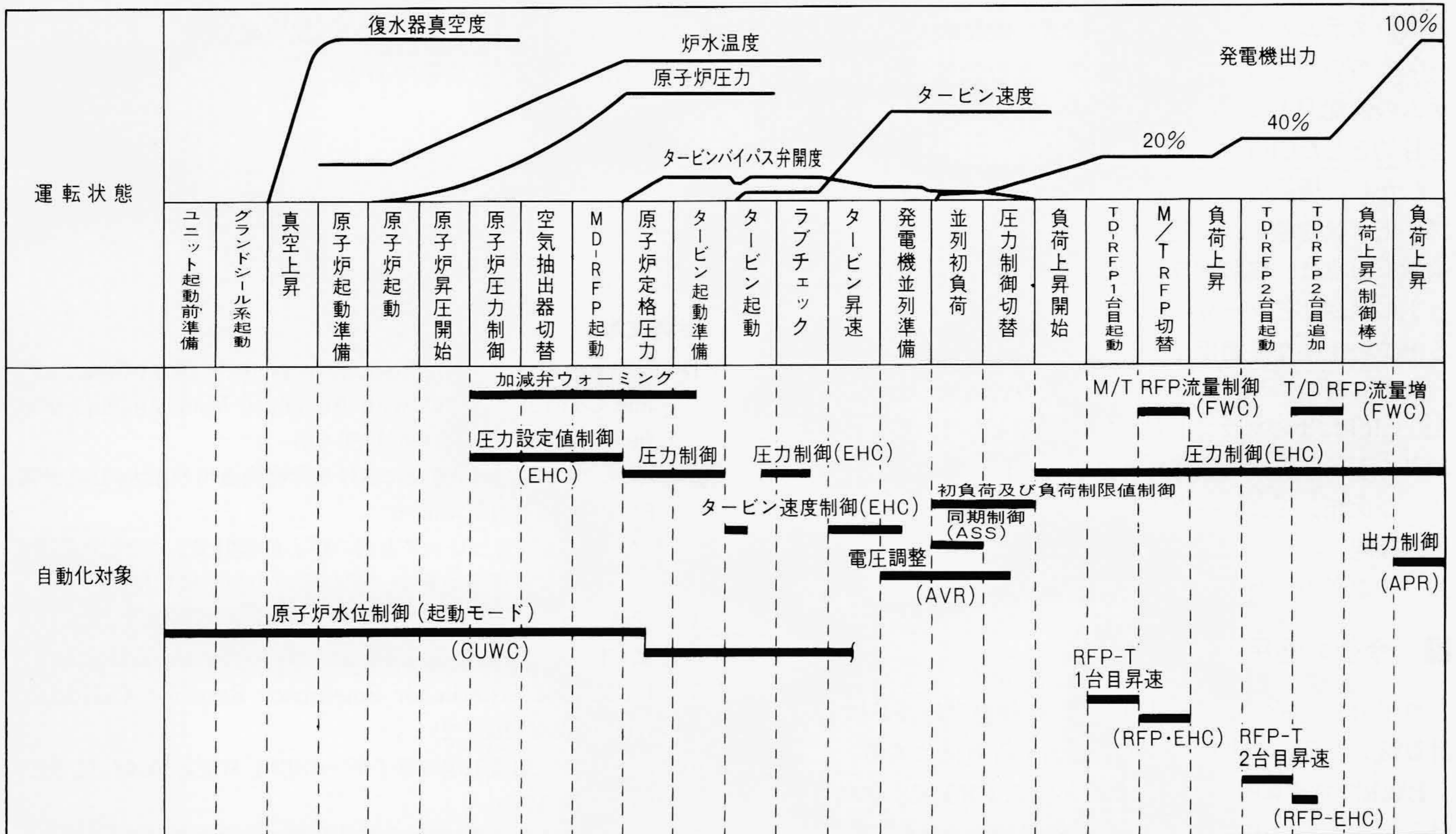


図7 運転状態と自動化対象(プラント起動時の例) 広範囲な運転状態のなか, 要所要所を自動化の対象としている。

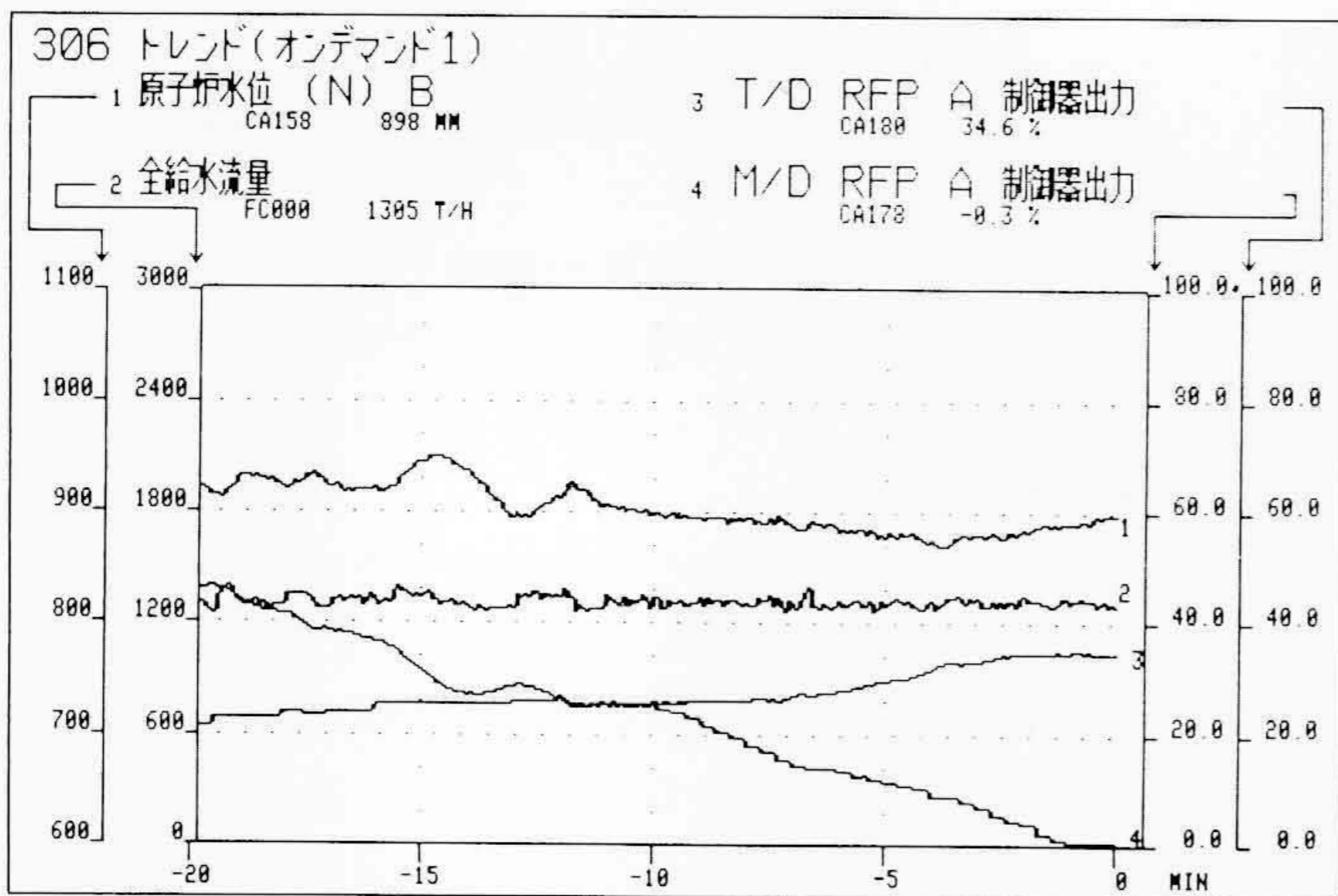


図8 自動化システム検証例 給水ポンプ切替え時のプラント応答として、変動も少なく安定に制御されている。

プラントの安全確保状況が十分であることを直ちに確認できるようにしている。

情報表示の形態としてはカラーCRTを用い、キーボード操作により定められたCRT画面を表示するものとし、SPDSコンソールとして構成した。また、プロセス計算機とSPDS CRT表示装置との間は光ファイバケーブルを介した伝送を用い、離れた場所にある端末への情報表示を可能とした。

6 既設プラントへの適用

原子力発電所に運転監視用としてプロセス計算機が導入されて約20年が経過しており、この間、プロセス計算機のハードウェアはもとより、機能面でも前述のように発展してきた。

既に商用運転に入っているBWRプラントでは、プロセス計算機システムのリプレースに合わせて機能強化が図られるケースも多い。このような既設プラントのプロセス計算機システムの機能向上に共通した傾向は、プラント運転監視性向上を目的としたCRTの利用拡大である。

しかし、機能向上のためには、プロセス計算機に入力するプロセス状態量を、一般的には追加する必要がある。この追加入力点は、既設プラントであるための計測若しくは取出し上の制約などを十分考慮して選定され、機能追加を検討する上での重要な評価事項の一つとなる。

次は、既設プラントでの機能強化の代表例である。

- (1) CRTによるプラント状態監視機能として、通常時状態モニタあるいは異常時状態モニタの一部機能
- (2) 3次元シミュレータ式炉心モデルによる炉心性能監視・予測機能
- (3) 発電所の安全パラメータ情報表示に関する機能

7 今後の適用拡大

原子力発電所での計算機適用は、今後更に範囲が拡大され、計算機システムの占める比重は増大する方向にある。

BWRでの計算機適用の拡大例として、CRT表示器前面に設けるタッチスクリーンを介して機器操作などを行う操作指示システム、プラントのサブグループ制御装置のデジタル化と

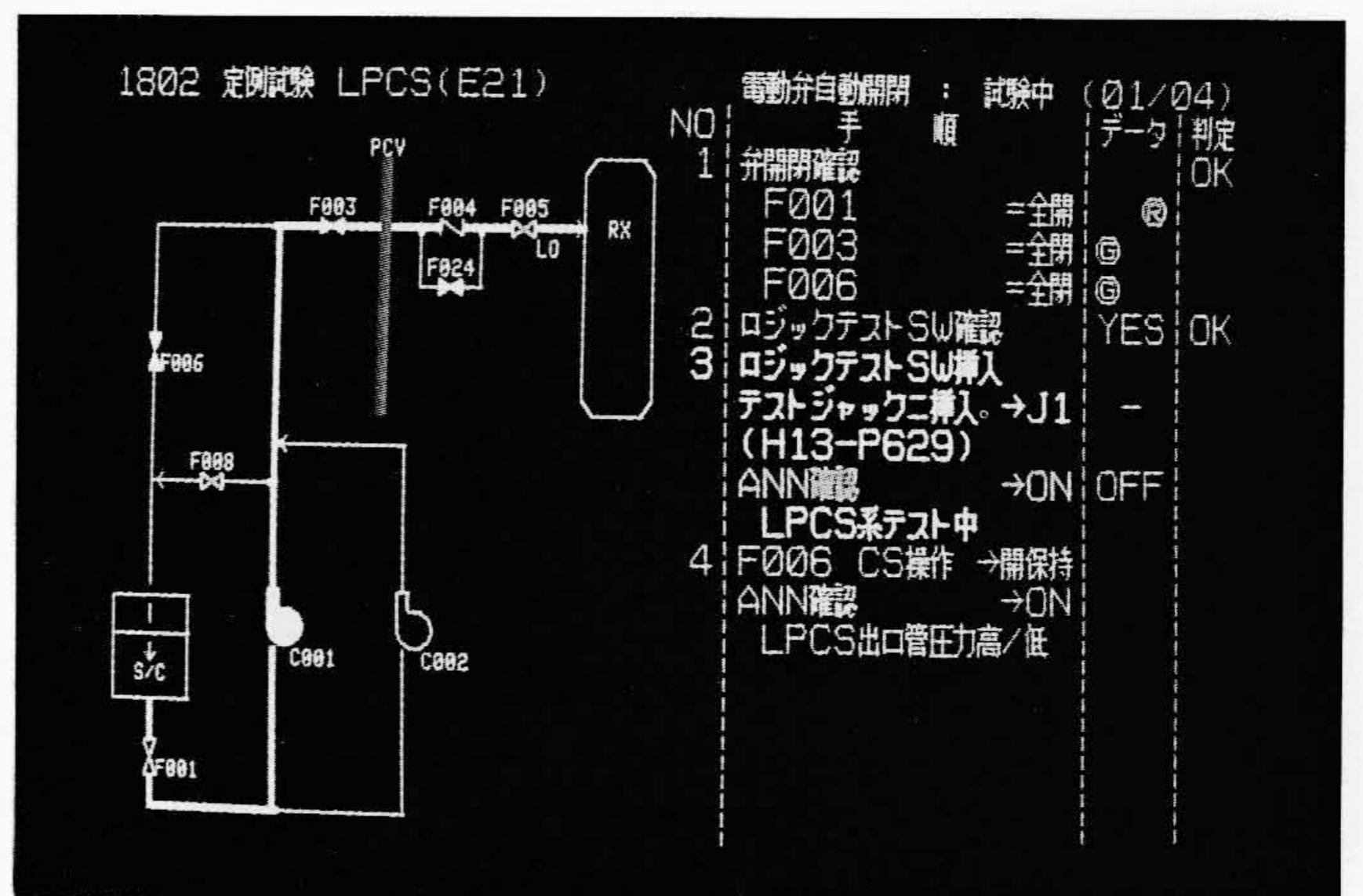


図9 サーベイランステストガイドのCRT表示例 定期試験の手順を表示し、試験を支援する。

協調した階層化デジタルシステム、プラント自動化範囲拡大などが予想される。

また、知識工学を適用した各種診断、支援システムなどについても将来への動きとして研究開発が進められている^{6),7)}。

8 結 言

以上、BWRプラントでの最新鋭の計装制御における計算機システムの適用例とその動向について述べた。プラント運転の信頼性、稼働率向上、運転員の負担軽減の要求に対応し、福島第二・4号機での新型中央監視制御システムに代表されるような、運転監視操作性の向上を目的とした種々の計算機システム機能を実機に適用し、その有用性を確認した。

最後に、原子力計算機システムの開発、実用化に当たり、御指導、御協力をいただいている電力会社の関係各位に対し厚く御礼申し上げる次第である。

参考文献

- 1) K. Yanai, et al. : Development of New Plant Monitoring and Control Systems with Advanced Man-Machine Interfaces. IAEA-CN-39/66(1980-10)
- 2) 中村, 外 : 原子力発電所における計算機適用の拡大, 日立評論, **64**, 6, 411~415(昭57-6)
- 3) 福崎, 外 : シミュレータ方式の炉心性能計算システムの運用実績(I), 日本原子力学会, 昭62秋の大会予稿集B48(昭62-10)
- 4) 武藤, 外 : シミュレータ方式の炉心性能計算システムの運用実績(II), 日本原子力学会, 昭62秋の大会予稿集B49(昭62-10)
- 5) Functional Criteria for Emergency Response Facilities, Nureg-0696(1981-2)
- 6) 木口, 外 : 知識工学の原子炉への応用, 日立評論, **67**, 12, 951~956(昭60-12)
- 7) 笠原, 外 : 原子力プラント保守作業の干渉判定・回避手法の開発, 日本原子力学会, 昭61分科会予稿集E13(昭61-10)