

東京電力株式会社福島第二原子力発電所4号機納め最新計測制御システム

Advanced Control and Instrumentation Systems for Fukushima Dai-Ni Nuclear Power Station Unit No. 4

BWR原子力発電所が我が国に導入されて20年を経た今日、数々の研究開発や技術革新により我が国の原子力発電所は世界でも有数の高い稼働率で安定に運転されている。

最新の計測制御システムでは、原子力発電プラントに求められるより高い運転信頼性と制御性を実現するために、デジタル技術・光多重伝送技術を駆使した新製品を実用化し、実際のプラントに適用して極めて良好な結果を得ている。本稿では、日立製作所が主契約者となって建設を担当した東京電力株式会社福島第二原子力発電所4号機向けに実用化した最新鋭の計測制御システムを中心に統括的に紹介する。

木村 成敏* Masatoshi Kimura
浅見 一夫* Kazuo Asami
三宅 雅夫* Masao Miyake
村田扶美男** Fumio Murata
秋田 彰** Akira Akita

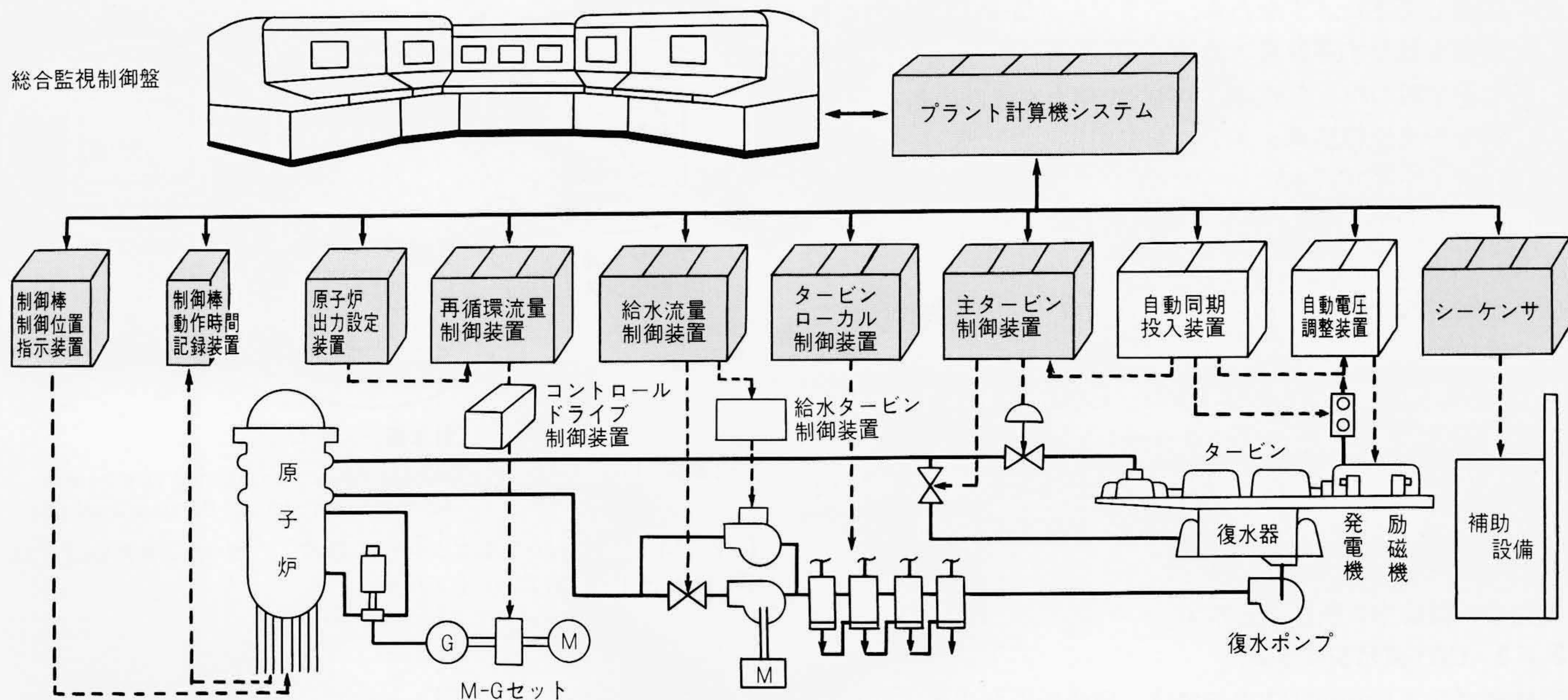
1 緒 言

BWR(沸騰水型原子炉)プラントの計装制御技術は、昭和40年代の米国GE(General Electric)社との技術提携による導入に始まり、その後の電力会社、国内メーカーが一体となったたゆまぬ研究開発、技術革新、更には数多くの運転経験を生かした製品開発により大きな成果が上がっている。

原子力発電所の計測制御技術では、新しいマンマシン技術をベースにいっそうの運転信頼性、稼働率・保守性の向上が

求められている。日立製作所ではこのニーズにこたえるべく総合的な技術革新により、(1)運転操作、(2)制御、(3)監視、(4)伝送のすべての面での積極的な展開を図ってきた。

以下、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。)に実用化した代表的な計測制御システムについて、現地試運転での結果をも包含してその内容を概説する。



注：略語説明 G(発電機), M(電動機), □(デジタル装置)

図1 BWR原子力発電所の主要制御系のシステム構成

主要制御装置に対して、広範囲のデジタル化が実用化されていることが分かる。

* 日立製作所大みか工場 ** 日立製作所日立工場

2 BWR計装制御技術の推移

BWR計装制御の歩みは社会の一般産業界での各種基盤技術の発展と密接に結びついている。日立製作所は、それらの技術動向を見極めながら最新のシステム開発を行ってきた。すなわち、国産化→改良標準化→高度化をターゲットとして、半導体技術、高集積化(LSI)技術、デジタル技術、光応用技術などの基本技術を積極的に適用することにより、原子力発電プラントのいっそうの信頼性の向上を図っている。

日立製作所は、原子力プラントに対するデジタル技術の適用に当たり一般の鉄鋼プラント、火力発電プラントで実証されたマイクロコントローラ応用製品の高い制御性、信頼性の特長を生かし、積極的な展開を図ってきた。本プラントは出力1,100 MWクラスの改良標準化プラントでの経験を十二分に生かし、計測制御分野での技術革新を飛躍的に図ったBWRプラントである。図1にBWR原子力発電所の主要制御系のシステム構成を、また表1に、主要な実用化新技術応用製品について示す。計算機応用技術及びマイクロコントローラによるデジタル技術が、計測制御の広範囲にわたって適用されていることが分かる。これらの制御装置は装置独自の優れた制御性により、現地での総合試運転で極めて良好な運転が実証され、現在順調に稼動中である。

以下に具体的な計測制御システムについて説明する。

3 新形中央監視制御システム(NUCAMM-80)

3.1 概要

原子力発電プラントのよりいっそうの安全・安定運転を図る上で運転操作監視性の向上は極めて重要な課題である。日立製作所ではこの点について、昭和40年代半ばから従来計装技術の見直しを図るとともに、計算機応用技術の適用を積極的に推進してきた。すなわち、プラントの安定運転に最も重要な役割を果たす運転員の操作監視性の向上を図るために、図2に示す四つのシステムの有機的な結合を設計の基本にし、革新的な中央監視制御システムを実用化した^{1)~3)}。

3.1.1 運転監視制御盤

通常の起動・停止、負荷運転、迅速な緊急操作などを考慮して、以下の設計方針を採用した。すなわち、

- (1) 制御盤機能の適正化(運転員の通常操作・緊急操作に対応した系統配列や作業時の動線の軽減)
- (2) 表示機能の集約・適正化(CRT：Cathode Ray Tube表示器の適切な配置と機能の最適な分散化)
- (3) 人間工学設計の適用(制御盤形状、寸法の最適化、操作機器のタッチ感の向上、カラーコーディングの適切な区分け)の3点をベースとしている。

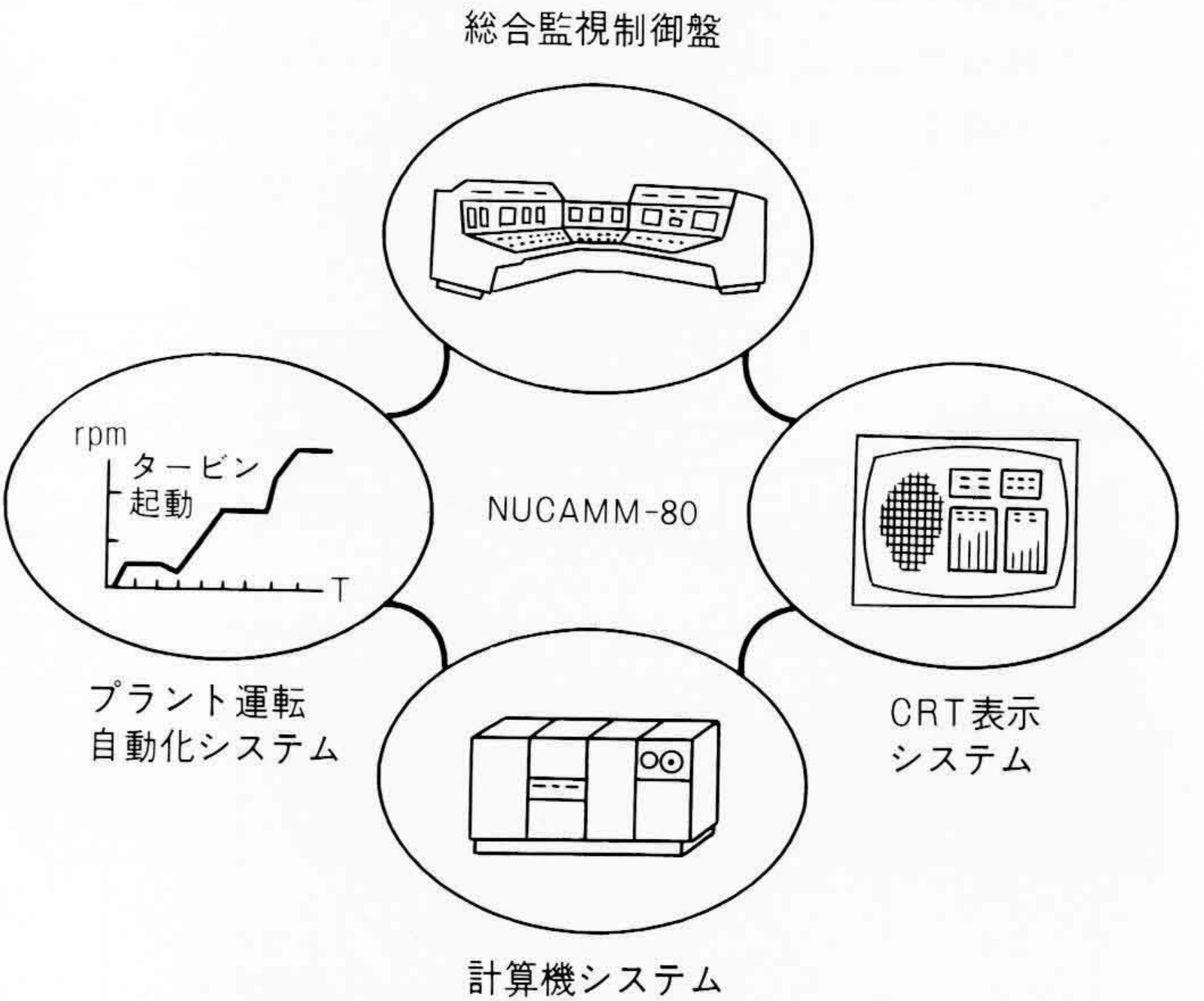
図3に稼動中の制御盤を示す。

3.1.2 CRT表示システム

従来プラントでのCRT表示器は、補助的な監視手段として位置づけられていた。本システムでは、CRT表示器の持つ直感的把握の容易性に着目し、プラントの運転過程に応じて運転員にプラント運転状態を集約表示するようにした。図4にCRT表示システムの機能・特徴と、CRT表示画面の一例を示す。

表1 実プラント適用の主な計測制御装置 デジタル化、多重伝送化などを主な技術ポイントとして、幅広い範囲にわたって適用が図られている。

No.	項目	システム・装置名	信頼性向上	機能性向上	合理化	適用技術	
						デジタル	多重伝送
1	統括運転監視装置	新型中央監視制御システム	○	○	○	○	—
2	制御装置	FWC(給水流量制御装置)	○	○	○	○	—
		RFC(再循環流量制御装置)	○	○	○	○	—
		EHC(主タービン制御装置)	○	○	○	○	—
		AVR(自動電圧調整装置)	○	○	—	—	—
		RMCS, RPIS(制御棒制御監視装置)	○	○	—	○	○
3	補助制御装置	自動出力設定装置	○	○	—	○	—
		起動時炉水制御装置	○	○	—	○	—
		原子炉給水ポンプタービン制御装置	○	○	—	○	—
		ブラシレスコントロールドライブ	○	○	○	○	—
4	監視装置	TIP(走行型中性子校正装置)	○	○	○	○	—
		サンプリング式格納容器雰囲気モニタ	○	○	—	○	—
		制御棒動作時間記録装置	○	○	○	○	—
5	伝送装置	原子力用光多重伝送システム(放射性廃棄物処理)	○	—	○	○	○



注：略語説明 NUCAMM-80 (Nuclear Power Plant Control Complex with Advanced Man-Machine Communication-80)
図2 NUCAMM-80の基本システム構成 四つのシステムを融合して、トータルなシステムとしている。

3.1.3 プラント運転自動化システム

従来原子力プラントでは、計算機システムはデータロガーや炉心性能計算をその主な機能としていた。NUCAMM-80では、火力発電所の計算機によるプラント運転自動化の実績を

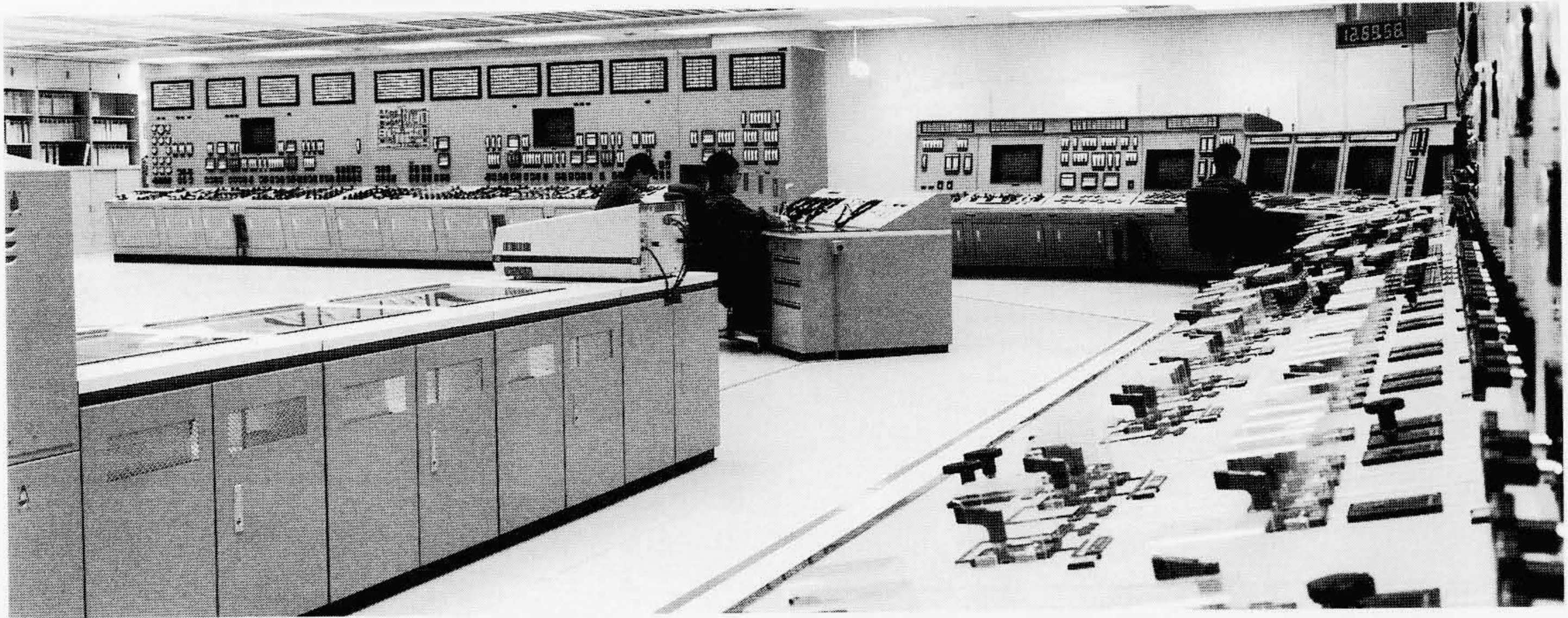
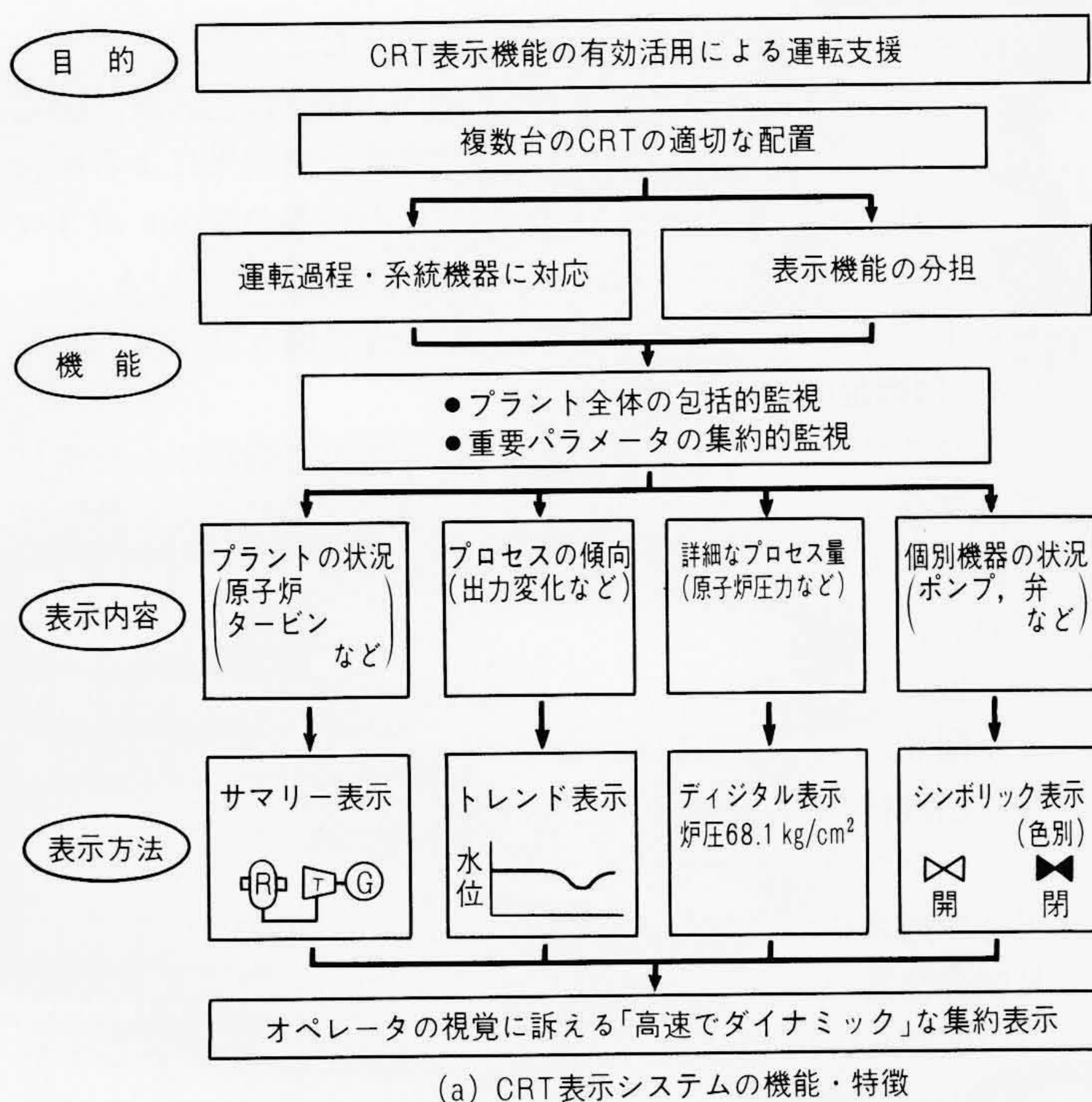
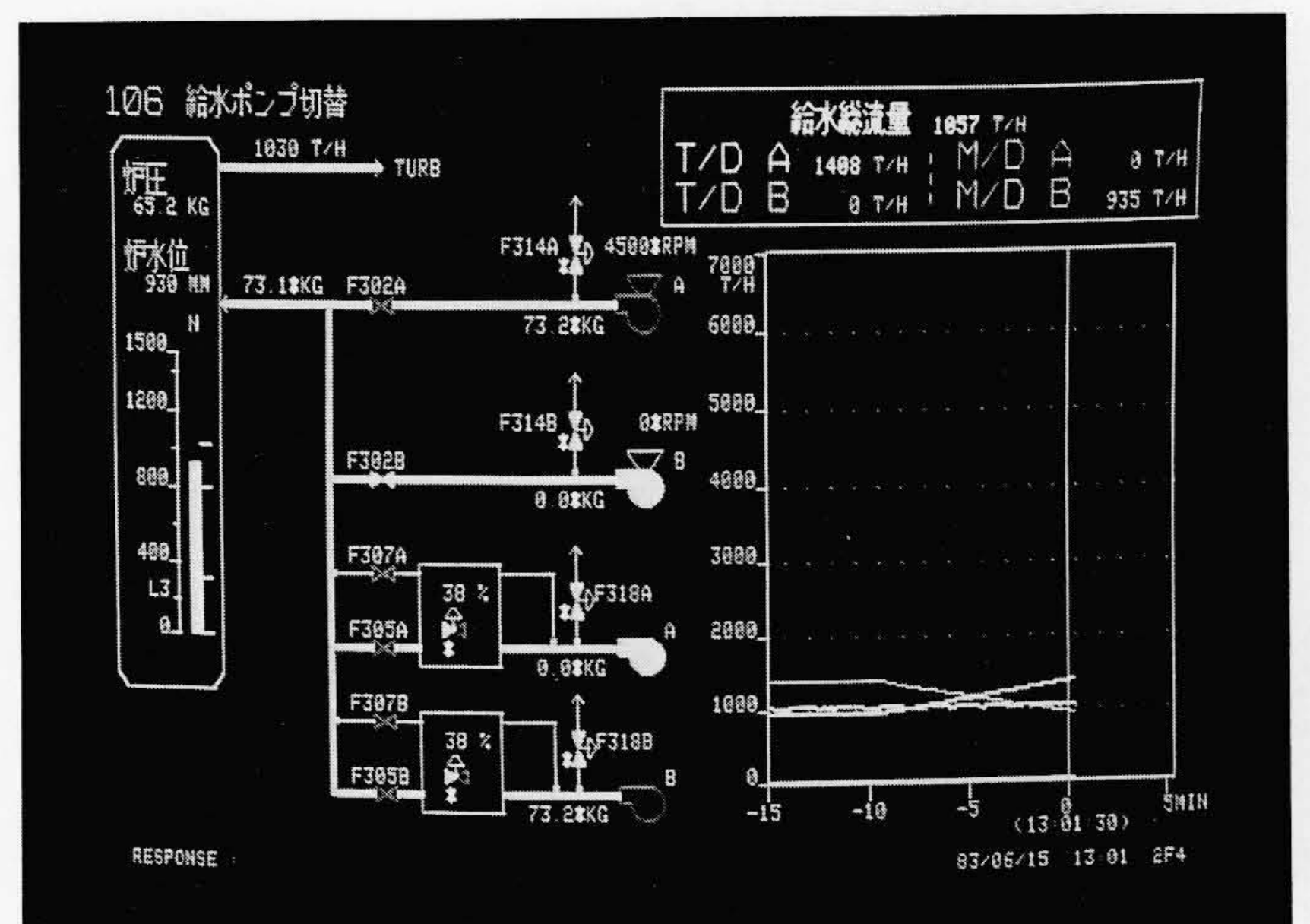


図3 中央制御室の中央監視制御システム 右中央部のデスク型の小型制御盤が、プラントの通常時総括監視をつかさどる総合監視制御盤である。



(a) CRT表示システムの機能・特徴



(b) CRT表示例

注: 略語説明 CRT(Cathode Ray Tube)

図4 CRT表示システムの機能・特徴とCRT表示例 運転員が容易にプラントの状態を把握できるように集約表示を行っている。

踏まえて、プラント自動化システムの統括装置として計算機システムを明確に位置づけ、以下の制御監視機能を実現している^{4),5)}。

- (1) DDC(Direct Digital Control: 計算機直接制御)
計算機内で操作量を計算し、直接操作端を駆動する。
- (2) SSC(Supervisory Computer Control: 計算機監視制御)
- (3) KIC(Kick Action Work: シーケンス起動制御)
計算機は設定値の操作や各プラント制御装置の使用、除外を指令し、専用の制御装置が制御を実行する。
- (4) OG(Operation Guide: 操作ガイド)
運転操作の指示をCRTに表示する。
実際のプラントで計算機と制御装置が協調制御を実行した

例を図5に示す。本図は計算機による電動機駆動給水ポンプからタービン駆動給水ポンプへの切替制御を示す。原子炉水位の変動は小さく、安定に計算機制御が行われていることが分かる。

3.1.4 計算機システム

計算機システムが以上述べた三つの構成要素と密接に結びついていることから、本システムでは負荷分散化のマルチコンピュータ構成とし、計算機システムの負荷分担自動構成制御機能により、万一、計算機が1台停止しても即時自動的に再構成できるようにしている。

以上により、プラント安定運転に必要な高信頼性を確保し、本システムの頭脳としての役割を十分に果たせるように設計している。

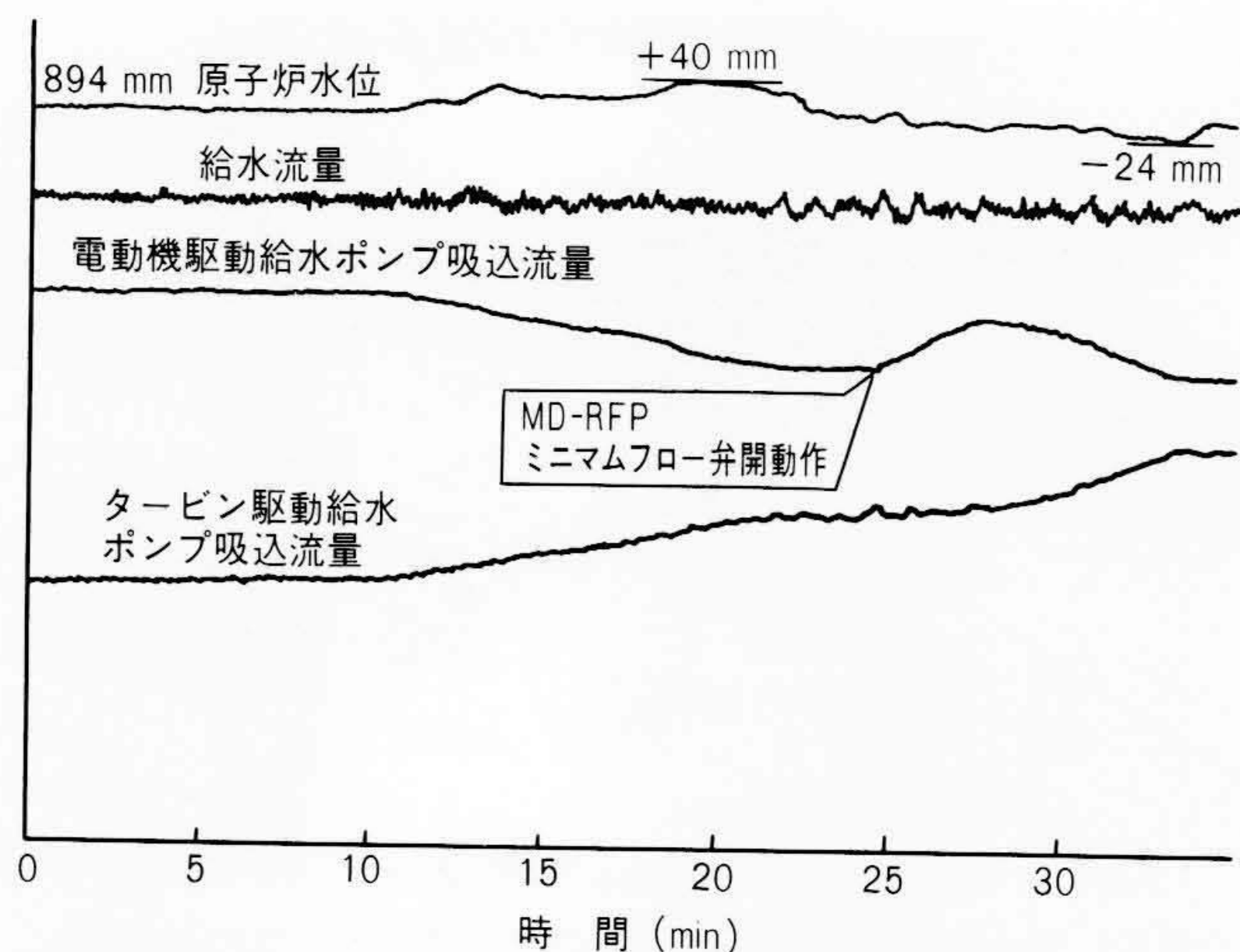


図5 計算機による給水ポンプ切替制御特性 タービン駆動給水ポンプの流量増加(計算機制御による)に従い、電動機駆動給水ポンプの流量が漸減し(制御装置による)原子炉水位が安定に制御されていることが分かる。

また、計算機システムでの重要機能の一つである炉心性能計算でも3次元シミュレータ方式炉心モデルを用いて、オンラインで炉心性能の監視、予測を行うことによって効率的なプラントの運転に寄与できるように配慮している。

4 高信頼化制御システム(NURECS)

4.1 概要

原子力プラントの安定運転上極めて重要な制御装置として、原子炉の出力、水位、圧力を制御する。

- (1) 原子炉再循環流量制御装置(NURECS-3000R)
- (2) 給水流量制御装置(NURECS-3000F)
- (3) 主タービン制御装置(NURECS-3000T)

は、従来のアナログ制御によるシステムに比べ、その信頼性、制御性を飛躍的に向上させた制御装置である^{6),7)}。

本システムでは共通の基本思想として、徹底した多重化の考え方を導入し、マイクロコントローラによる三重化構成を基本とすることによって、各種診断機能の大幅強化と最適制御の採用による制御性の向上、ひいてはプラント運転信頼性の向上を実現している⁸⁾。

4.2 高信頼化手法

本システムの具体的な設計では、全体システム構成はもとより構成要素の隅々まで徹底した検討を加えて、統一した高信頼化の手法を採用した。すなわち、

- (1) 電源供給システムの多重化

共通モード故障を発生させる原因を占めていた電源系をAC電源とDC電源の二重化方式として、上流は分電盤のフィーダから分離独立させ、総合的に強化された電源構成としている。

- (2) 入出力信号の分離と切離し

万一サブシステムに異常が発生した場合には、入出力信号、出力信号の切換部により完全に分離し、その異常が他の正常なサブシステムに波及しないことが必要である。そこで入力信号、出力信号のオンライン-オフラインの切換部に2 out of 3論理を持つ高信頼性の切換回路を採用し、確実な分離と切

離しができるようにしている。

- (3) マイクロコントローラとデータコントロール装置

・独立した三重化システム構成を実現するために、3台のマイクロコントローラは共通の同期装置による影響を排除した非同期方式の動作としている。各サブシステムでの制御演算信号を比較照合するために、各サブシステム間を1:1のデータ回線で行うとともに、更に二重伝送方式のデータコントロール装置を採用することにより高信頼化を図っている。これにより、各サブシステムの自己診断機能を有効に利用した極めて独立性の高い伝送を実現している。

- (4) 多重システム選択方式

三つのサブシステムから出力される信号の選択は極めて重要な機能であり、この機能が万全でなければ多重化構成の意味が実質的になくなるため、本システムでは選択判別回路の多重化を図り、RVS(Redundant Voting System)方式、すなわち多数決判定方式を新たに開発採用した。

本方式は、各サブシステムでの正常性評価(自己診断、相互診断)→最適サブシステムの決定(正常性評価結果による総合判定)→出力信号の切替え(総合判定出力結果の2 out of 3ロジックによる判定)の3段階により機能を達成している。

以上の考え方を実現したシステム構成を図6に示す。

4.3 制御性の向上

本システムではマイクロコントローラの高機能性を利用して、プラントの運転状態に応じて制御装置のゲインを最適値に調整する最適制御方式を採用し、制御の応答性を向上させている。

一例として、本システムの現地試運転での試験結果を図7及び図8に示す。図7は再循環ポンプ1台がトリップした場合の過渡特性を示す。また、図8は給水ポンプ1台がトリップし、かつ予備機が不起動で再循環ポンプがランバックした場合の過渡特性を示す。原子炉再循環流量制御装置と給水流量制御装置の協調制御、及びゲイン調整機能により原子炉水位の変動が抑制され、安定に水位制御が行われていることが分かる。

5 原子力用光多重伝送システム(HIPLEX)

光多重伝送システムは一般の電気伝送に比べて耐ノイズ性、伝送容量の大きさなど、優れた特徴を持つシステムである。

特に原子力プラントでは、数万点に及ぶプラント情報が中央制御室に集中的に伝送されるため、大幅な電気工事合理化のニーズが高く、従来のメタルケーブル伝送に変わってその適用が待たれていた。

そこで本プラントでは、約60台の廃棄物処理用ポンプの操作監視信号の伝送に適用を図った。従来は数十本のケーブルが必要であったが、本システムによってわずか4本(二重系)の光ファイバケーブルで約400点の信号伝送が可能となり、実際の信号伝送距離約900mに対し、電磁誘導障害を受けることなく良好に稼動している。

更に、システムの高信頼化を図るために二重化並列運転方式とし、電源構成も高信頼化システムで適用したAC電源とDC電源の二重化方式を採用している⁹⁾。

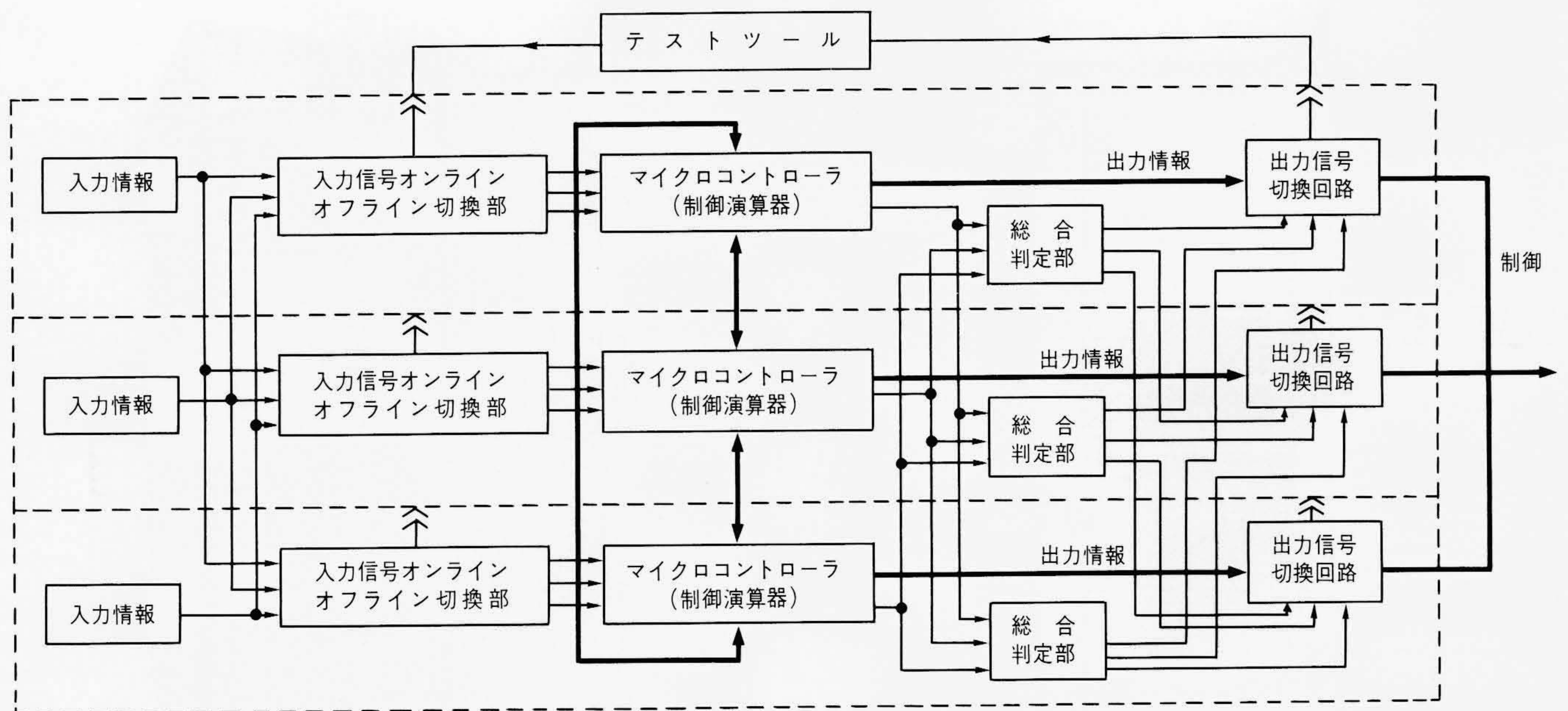


図6 NURECS-3000システム構成 制御系の各構成要素を、それぞれ三重化した高信頼性のシステム構成により、制御機能の耐故障性を大幅に強化している。NURECSは、Nuclear Power Plant High Reliability Control Systemの略語である。

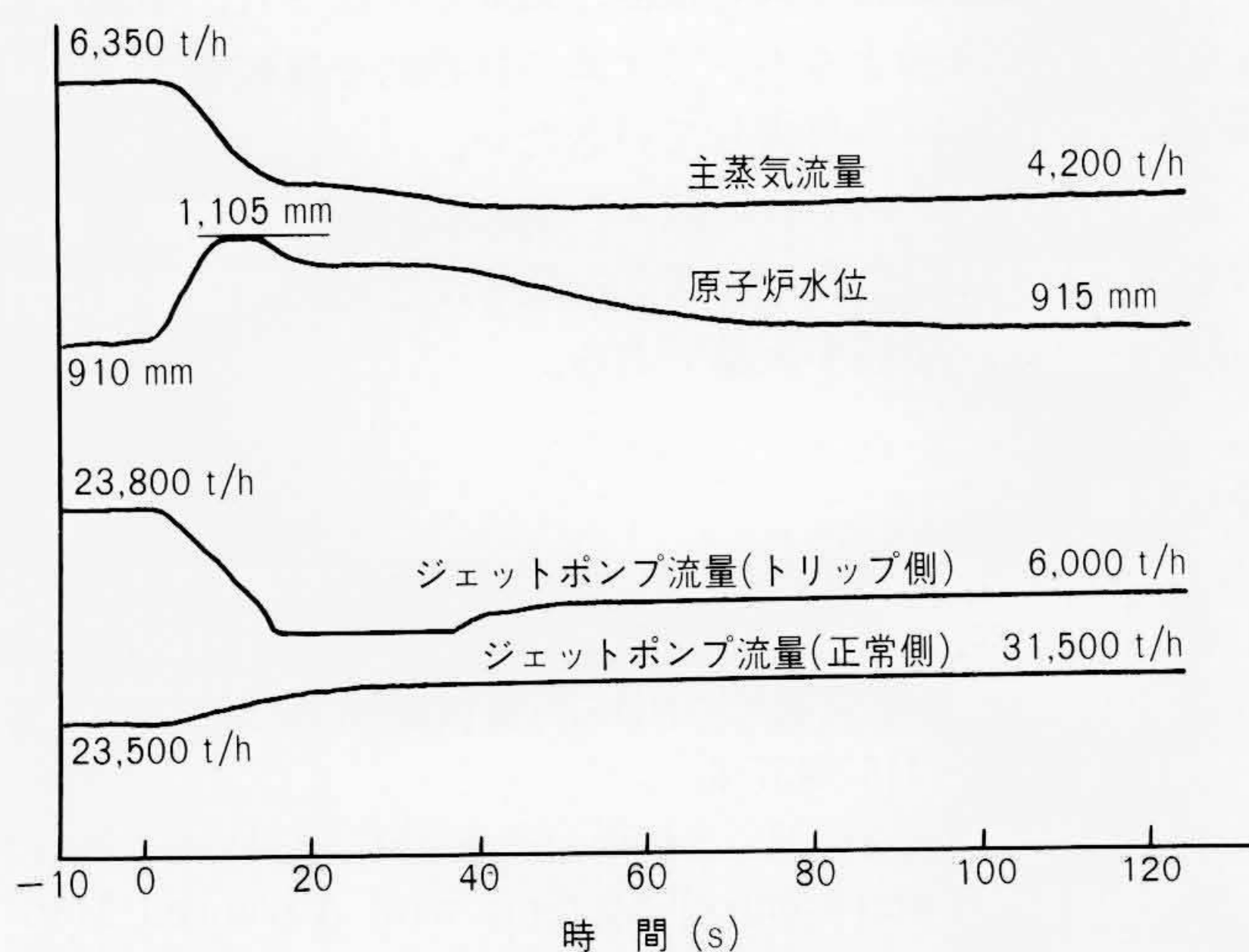


図7 再循環ポンプ1台トリップ時の過渡特性 原子炉再循環流量制御系(NURECS-3000R)と給水流量制御系(NURECS-3000F)の協調制御により、原子炉水位が約100秒で安定に制御されている。

光ファイバーケーブルとしては、原子力プラントの使用環境にも適合するように、石英ファイバーケーブルを採用し長期間使用に耐えられるように設計している。

図9に本システムの中核をなすCCU (Central Control Unit) 盤の外観を示す。

6 制御棒動作時間記録装置

出力1,100 MWクラスのBWRでは、185本の制御棒の動作の健全性確認と制御棒位置の迅速な把握、記録が必要である。

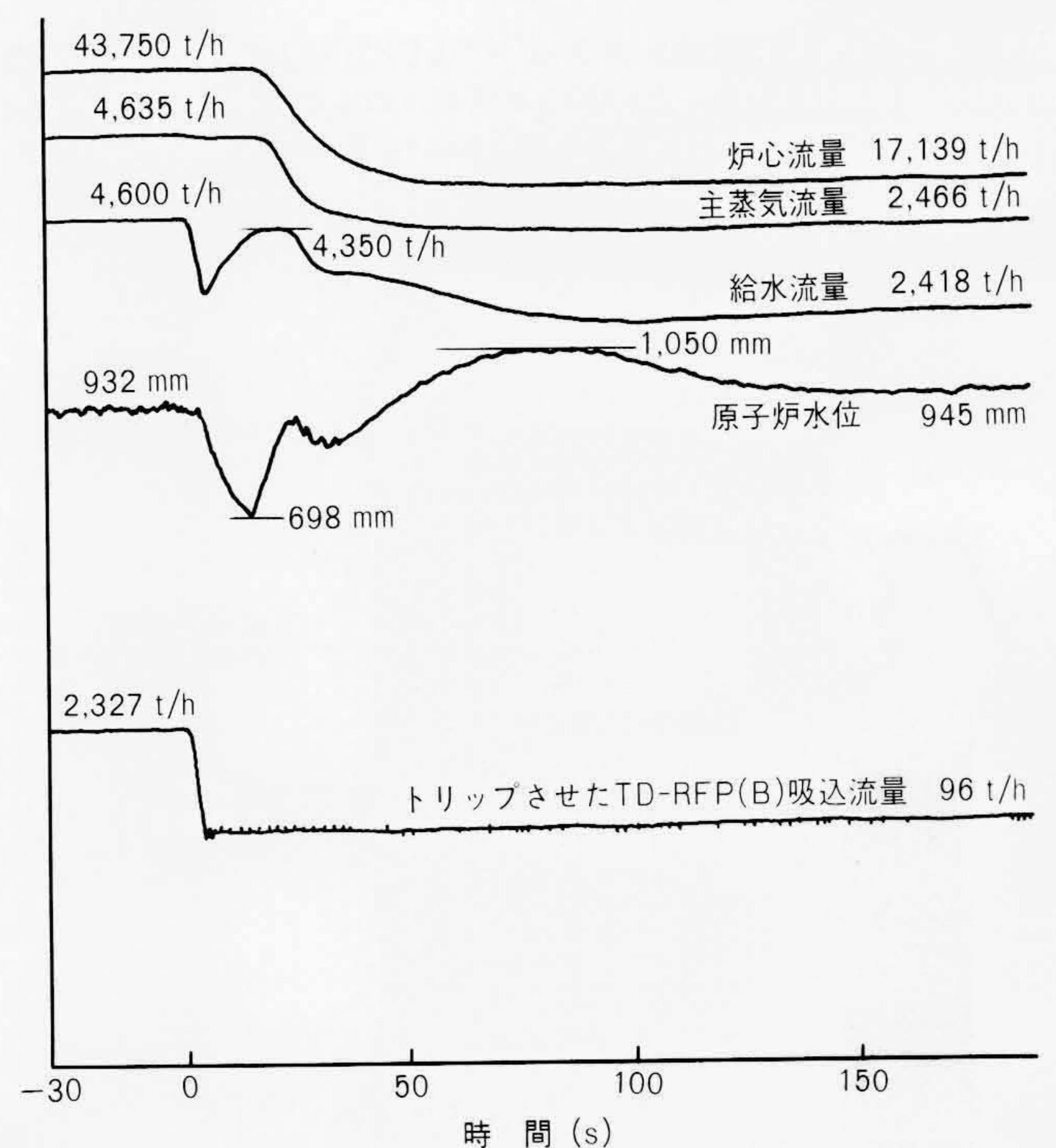


図8 タービン駆動給水ポンプ1台トリップ(予備機不起動)時の過渡特性 原子炉再循環流量制御系と給水流量制御系の協調制御、ゲイン最適調整機能により、原子炉水位の変動幅が抑制され約130秒で安定に復帰している。

従来プラントでは感熱式の記録計を使用して、人間が読み取っていたため、大幅な効率向上が望まれていた。

本装置では各制御棒1本ごとの定期的な作動テスト記録、全制御棒作動時の動作記録、動作評価を高速のマイクロプロセッサが自動的に行い、操作監視パネルに表示するとともにプリンタにより高速印字できるようにし、大幅な計測自動化を実現している。

図10に本装置の概観を示す。

その他のシステムとして、プラント出力設定装置の概観を

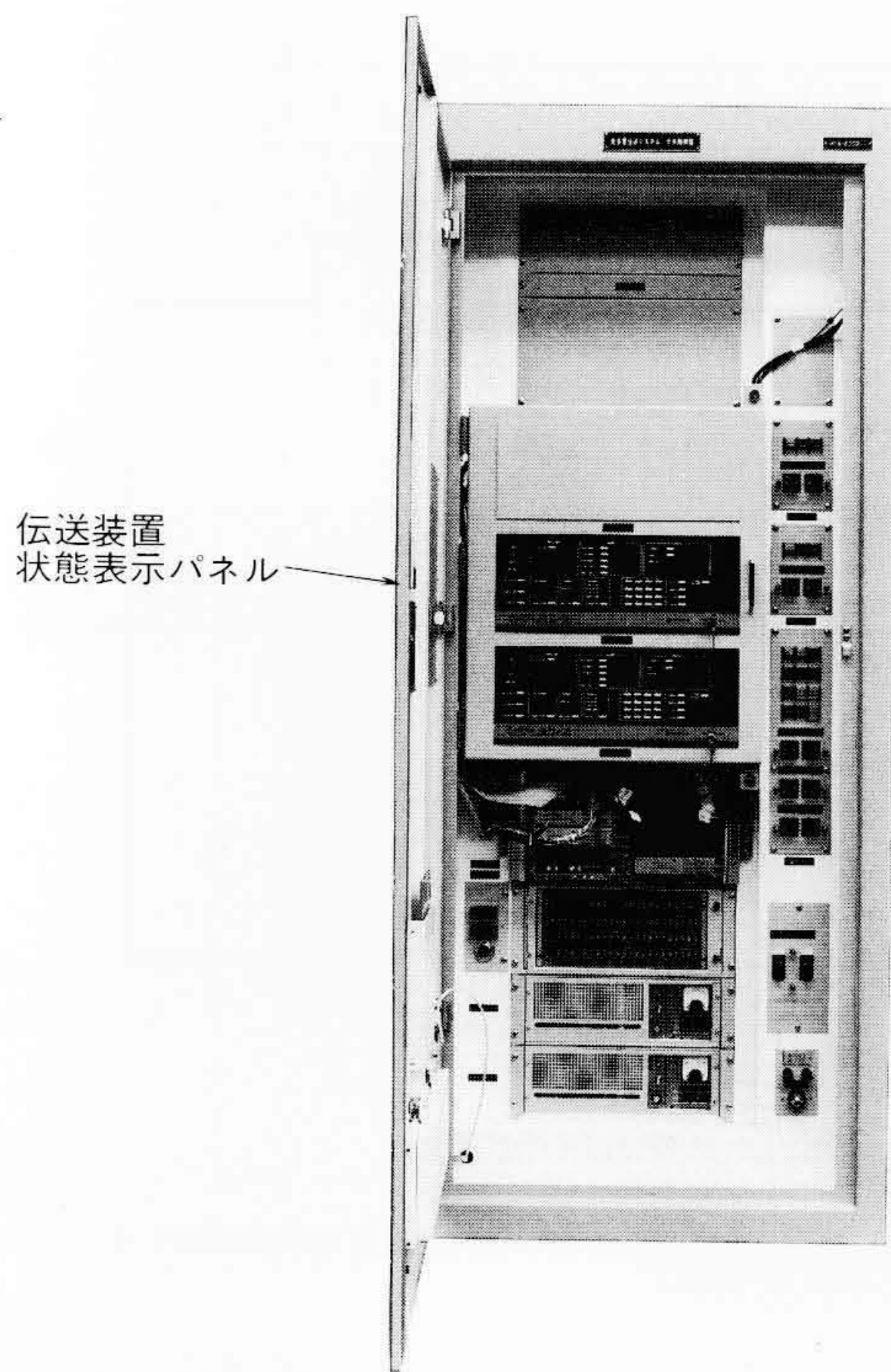


図9 原子力用多重伝送システム(HIPLEX)CCUの概観 伝送装置全体の監視機能を持ち、集中的な状態表示部により操作・保守の支援を図っている。HIPLEXはHitachi Multiplexing Systemの略、CCUはCentral Control Unitの略語である。



図11 自動出力設定装置 原子炉の出力設定を本装置から行うことにより、運転の簡素化が達成できた。保守性を上げるために、出力設定部と演算部を分割している。



図10 制御棒動作時間記録装置 集中監視用の操作表示パネルと印字装置を前面に設置して、操作・監視の改善を図っている。

図11に示す。

7 結 言

本論文では、福島第二・4号機に納入された数多くの新技術応用システム、装置について述べた。

いずれのシステムも慎重かつ周到な現地試運転を経て、そ

の優れた運転監視性と高い性能、機能が実証され、順調に運転中である。今後とも本システムの長期的な運転信頼性の確保に向けていっそう努力していきたい。

最後に、上記システムの開発と現地試運転で御指導、御協力をいただいた東京電力株式会社殿をはじめ、関係各位に対し深く感謝の意を表す次第である。

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) 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) K. Yanai, et al.: Development of New Plant Monitoring and Control Systems with Advanced Man-Machine Interface, IAEA-CN-39/66(1980-10)
- 4) 火力原子力発電技術協会: 計装・制御と自動化 IX. 原子力プラントの制御と自動化, 火力原子力発電, 34, 2, 199~210(昭58-2)
- 5) T. Johge, et al.: Development of Automatic Plant Start-up And Shutdown System for BWR Power Plant, IAEA-SM-265/36(1982-10)
- 6) 浅見, 外: 原子力プラント用高信頼化制御装置の開発, 日立評論, 62, 9, 629~632(昭55-9)
- 7) K. Asami, et al.: Development of Nuclear Power Plant High Reliable Control System, IAEA-SM-265/39(1982-10)
- 8) 若林, 外: 原子力発電所デジタル制御システム, 日立評論, 65, 9, 619~624(昭58-9)
- 9) 野口, 外: 最近のBWR用計測制御システム, 日立評論, 64, 4, 323~326(昭59-4)