

中央監視制御システムの性能向上

Improvement of Central Control and Instrumentation Systems

BWR原子力発電所の計測制御分野に対し多くの技術開発を進め、より信頼性の高い技術の確立に努めてきた。

この結果、改良標準型ベースプラントである東京電力株式会社福島第二原子力発電所2号機の中央監視制御システムに対し、従来プラント(福島第一原子力発電所4号機など)に比べプロセス計算機の大幅な活用による運転監視性の強化、デジタル技術、負荷分散形マルチ計算機システムによる信頼性向上、更にプラント制御方式の改善などの技術的改良・開発の成果が採用されるに至った。

本稿では上記信頼性向上策の内容、及び試運転で得られた有効性の確認結果について述べる。

片柳 弘* *Hiroshi Katayanagi*

村田扶美男** *Fumio Murata*

手嶋俊明*** *Toshiaki Teshima*

1 緒言

多年にわたるBWR(沸騰水型原子炉)プラントの運転経験を基に、計測制御設備の性能向上を目指し技術的改良・開発を進めてきた。

一方、米国スリーマイル島原子力発電所の事故の教訓から、よりいっそうの運転監視操作性の向上策が望まれている。

その結果、東京電力株式会社福島第二原子力発電所2号機(以下、福島第二・2号機と略称する。)では、プラント監視・操作性の点では、計算機機能の拡充を中心とする監視機能の強化、計測制御設備のハードウェアとしては、負荷分散形マルチ計算機システムの採用、アナログ単一系としての給水・再循環制御装置の高信頼化、デジタル技術の適用による高信頼化、更に、制御機能というソフトウェア面では、原子炉水位の過渡安定性のなおいっそうの改善を目指した制御方式などの新機能の採用を図った。

試運転を通じて監視性の向上が確認され、また制御方式の性能は起動試験で有効性が確認された。

本稿では、福島第二・2号機で採用した計測制御装置の性能向上の方策、及び試運転を通じての有効性確認の結果について報告する。

2 中央監視機能の強化

プラントの運転状況を運転員が正確かつ迅速に把握することは、プラントを信頼性高く運転するための必要不可欠の条件である。原子力発電所は、起動停止、通常運転、過渡変化時などのすべての運転操作は、原則として中央制御室から行なえるように設計され、典型的な中央集中監視制御形のシステムである。

従来の原子力発電所〔東京電力株式会社福島第一原子力発電所4号機(以下、福島第一・4号機と略称する。)]に比べて福島第二・2号機の計装制御の分野の最も重要な改良項目として、プロセス計算機システムの機能拡充、制御盤上へ配置したカラーCRT(Cathode Ray Tube)への適切な情報の集約表示の有効活用による、監視操作性の向上がある。図1に、上述の内容を反映した福島第二・2号機の中央監視制御盤の外観を示す。

2.1 計算機システムの活用

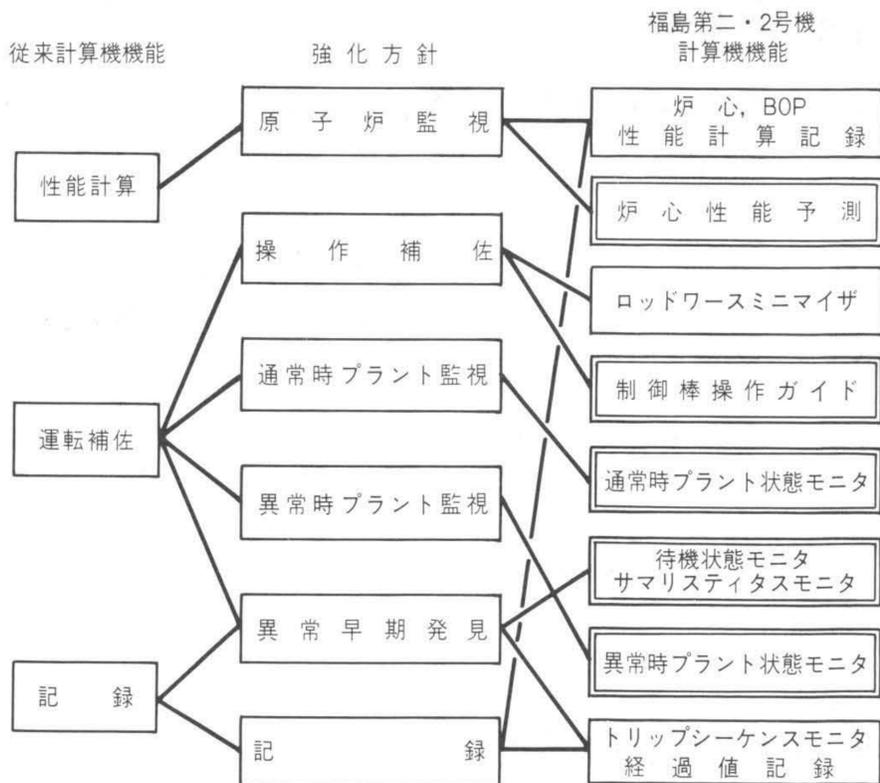
従来のプロセス計算機システムの機能は、炉心性能計算、運転データの記録、日誌作表などが主体であった。

これに対し福島第二・2号機では、従来の機能の向上に加え、図2に示す方針にのっとり、プラント監視、運転操作補助と



図1 福島第二・2号機中央監視制御装置 中央制御室の中央監視制御装置に、原子力発電所の膨大な情報を集約し、中央制御室からすべての運転操作が行なえるように設計している。

* 東京電力株式会社 ** 日立製作所日立工場 *** 日立製作所大みか工場



注：略語説明など
BOP (Balance of Plant)

は、福島第一・4号機に比べて特に強化した機能を示す。

図2 プロセス計算機機能の強化 監視機能中心に強化されていることが分かる。

して、カラーCRTを効果的に活用し、機能の拡張を図った。表1にプロセス計算機システムの全体機能の概要を示すが、特に強化を図った項目の代表例を以下に述べる。この強化により、計算機システムはプラントの通常運転状態から異常時までの広範囲な運転状態にわたり運転員を補佐できるようになった。

(1) 通常時・異常時プラント状態モニタ

運転の目的ごと、運転状態ごとに適切なパラメータを選び、各運転状態で有効利用できるようにしている。また、プラントトリップの発生時には原子炉スクラムなどのトリップ種別を識別し、そのトリップ種別に対応したCRT表示画面の組み

表1 プロセス計算機機能 CRTを活用した機能中心に、運転補佐機能が拡充されている。

機能	機能概要
通常時プラント状態モニタ	プラントの運転状態・機器状態の系統図による表示及び各種パラメータの経時変化のグラフ表示
待機モニタ	工学的安全設備などでの制御回路、ポンプ、弁、水張り状態などの待機状態監視
サマリステータスモニタ	主要なパラメータ間の相関による状態監視
炉心性能計算	炉心内の出力分布及び諸特性の計算、制限値の計算
BOP性能計算	電力量、プラント利用率、熱効率などのプラント運転管理に必要なデータの計算
制御棒操作ガイド	制御棒操作手順のCRT表示
トリップ時状態モニタ	プラントトリップ発生時に、トリップに応じたパラメータのアナログトレンド、プラント状態、機器の運転状態表示
異常時アラーム表示	重要度の高い警報、トリップの最初の要因(ファーストヒット)、重要機器の作動状態の表示
異常時プラント状態モニタ	工学的安全設備状態表示 事故時に監視すべきパラメータをCRTに集約表示
事故時状態モニタ	事故時に監視すべきパラメータをCRTに集約表示
トリップシーケンス	主要プラントトリップを対象に、発生時刻及びその要因を記録
経過値記録	プラントトリップ前後の主要プロセス量の経過値を記録
炉心性能予測	制御棒引抜き炉心流量変更運転時の炉心状態の予測

注：略語説明 CRT (Cathode Ray Tube)

合わせを制御盤上の5台のCRTへ自動表示する。表示内容は、プラントの全体把握に必要な系統・機器の運転状態を示す系統図表示、トリップ種別に応じたパラメータの組み合わせによるトリップ前後のアナログトレンド曲線表示、異常時アラーム表示である。

図3、4にこれら表示画面のCRTハードコピーの一例を示す。CRT表示は、運転員とのインタフェースとして重要な役割を果たしており、その画面設計では下記のような人間工学

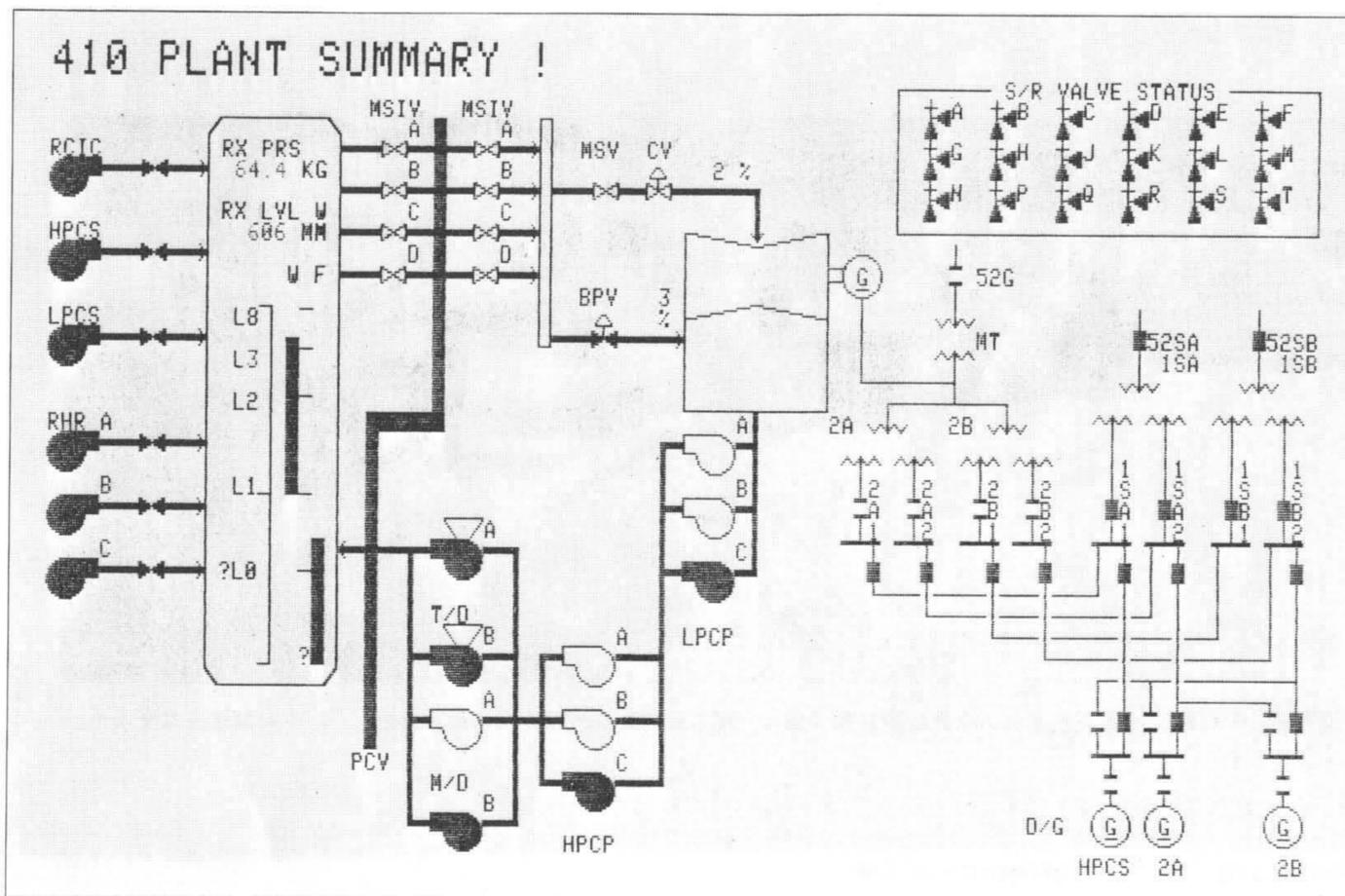


図3 プラントサマリCRT表示例 プラント主要機器の運転状態が、一目で把握できる。

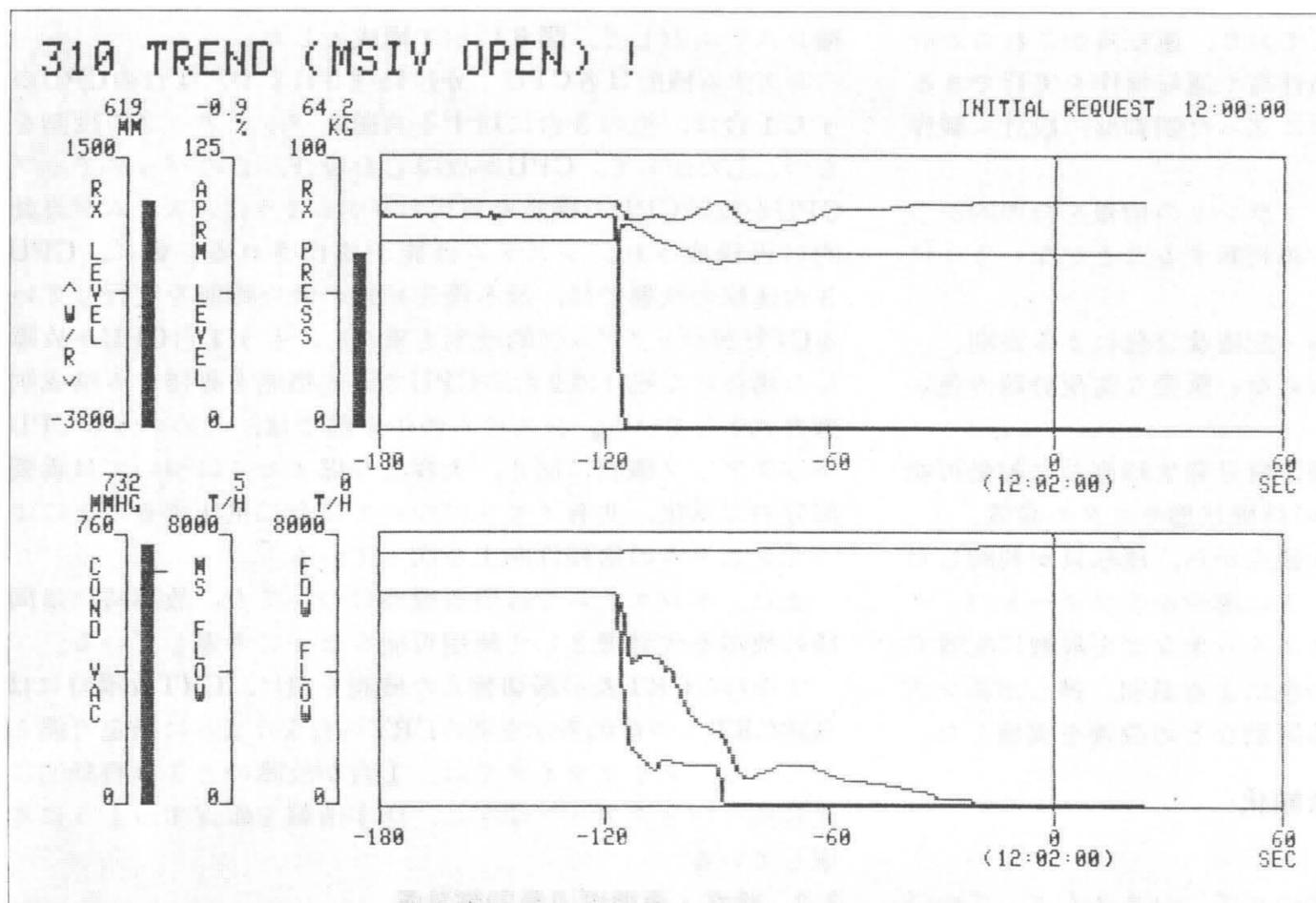


図4 パラメータトレンドのCRT表示例 運転状況に応じたプラントパラメータを任意に選択表示して、運転に活用できる。

的配慮をしている。

- (a) 機器などの表示シンボルは、できる限り系統図に使用されているものに統一した。
- (b) 運転員の疲労を少なくする色調を基本とし、機器あるいは警報状態の識別がしやすいように表示色基準を定めた。
- (c) 画面上の表示情報は、必要項目を厳選し集約表示の効果を高めるように配慮した。
- (d) 棒グラフ、トレンドグラフにデジタル数値表示を併用し、見やすさとともに精度よい数値の読み取りができるようにした。

(2) 炉心性能予測

原子炉を安全かつ効率よく運転するためには、炉心流量の

変更や制御棒操作に伴う炉心状態の変化を事前に精度よく予測し、運転上の制約を守りながら運転操作を行なうことが重要である。この要求に対し、下記のような機能をもつ炉心性能予測システムを導入した。

- (a) 制御棒操作後の出力分布予測
- (b) 流量変更後の出力分布予測
- (c) 出力上昇経路予測

本機能は制御棒操作、流量制御時に利用でき、運転監視操作性の向上に寄与している。図5にCRTハードコピーの一例を示す。

2.2 制御盤の改善

中央監視制御盤には、約2,000個を超える監視計器・警報表

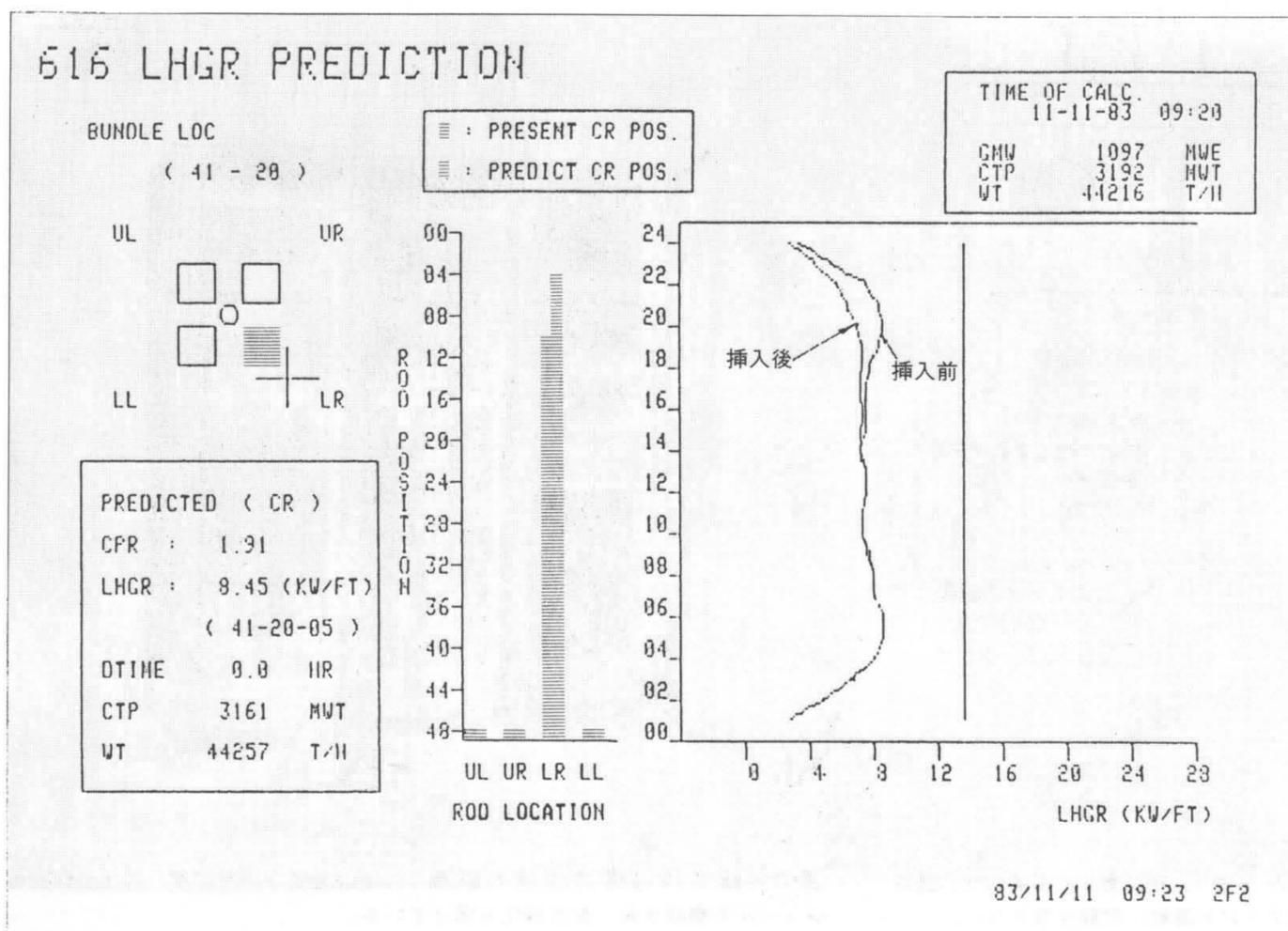


図5 制御棒1本操作後の出力分布予測のCRT表示例 制御棒の操作前に操作後の出力分布を予測し、制限条件を守っていることを確認することができる。

示器・操作スイッチが設置されており、運転員がこれらの計器・警報から情報を受け、信頼性高く運転操作を実行できるようにするためには、人間工学に立った制御盤の設計・製作を行なうことが重要である。

安全性向上という観点から、プラントの情報を合理的かつ正確に運転員に伝え、運転員が誤判断することがないように以下の改善を実施した。

- (1) 警報の重要度に従った分類・配置及び色による識別。
- (2) 事故時に監視しなければならない重要な監視計器の色による識別。
- (3) 工学的安全設備が、起動要求信号発生時直ちに起動可能であることを常時監視するための待機状態モニタの設置。

また、運転操作性向上という観点から、運転員が判断した結果が運転操作を通じてプラントに速やかにフィードバックできるように、監視計器・操作スイッチなどを最適に配置するとともに、重要なスイッチの色による識別、押しボタンスイッチと表示灯との視覚による区別などの改善を実施した。

3 監視制御システムの高信頼化

3.1 プロセス計算機システム

計算機システムの機能拡大につれて、システムとしての信頼性向上、処理性向上が必要となってきた。

福島第二・2号機のプロセス計算機システムは、この要求に対応して、CPU(Central Processing Unit: 中央演算処理装置)としてHIDIC 80Eを4台用いた負荷分散形マルチ計算

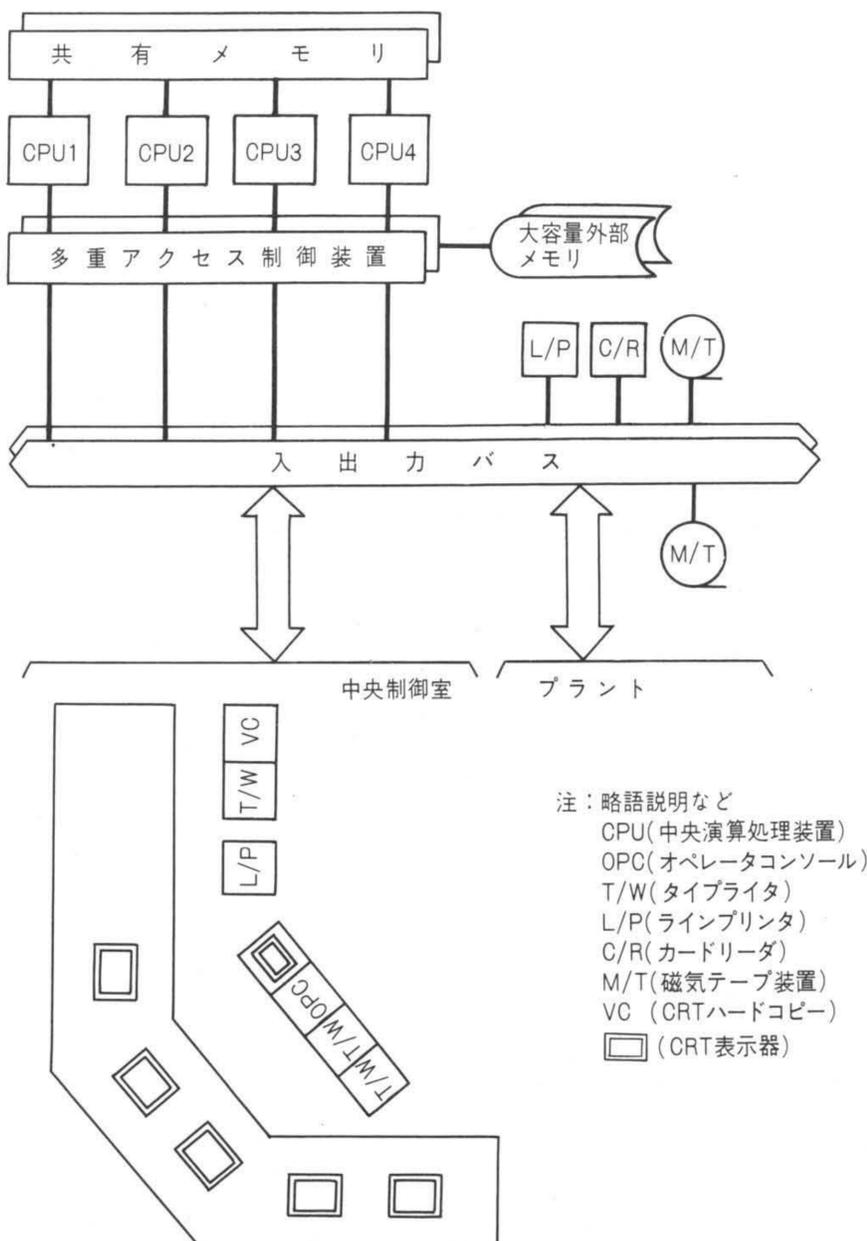


図6 計算機システム構成 CPU, メモリ, 周辺機器の多重化で、機器が故障してもシステム機能が維持され、プラント運転に影響を与えない。

機システムとして、図6に示す構成とした。

システム機能は各CPUで分担処理されるが、4台のCPUのうち1台は、他の3台に対する共通のバックアップの役割をもつ。したがって、CPUが故障した場合、このバックアップCPUが故障CPUの機能を肩代わりするようにシステムが自動的に再構成され、システム機能が維持される。更に、CPU3台運転の状態では、最も優先順位の低い機能を実行しているCPUがバックアップ的役割を果たし、もう1台CPUが故障した場合にも残りの2台のCPUで優先機能を維持する構成制御方式としている。システムの中核部では、このようなCPUバックアップ機能に加え、大容量外部メモリについては重要部分の二重化、共有メモリについては全二重化することによってシステムの信頼性向上を図っている。

また、本システムでは周辺機器についても、故障時には同種の機器を代替機として使用可能なように考慮している。

すなわちCRT表示器切替えの機能を設け、CRT故障時には当該CRTへの自動表示を別のCRTへ行なうように指定可能としている。タイプライタでは、1台が故障のときは自動的に代替機へバックアップ印字し、印字情報を確保するように考慮している。

3.2 給水・再循環流量制御装置

給水流量制御系、再循環流量制御系は、プラントの中核制御系であり、高い信頼性が要求されるため、全部品のスクリーニングを含む厳しい原子力QC(Quality Control)の下で製作された専用の高信頼化アナログ演算モジュールを採用した。これとともに主制御ループの部品点数の削減、信号切換回路の最少化などにより、給水・再循環流量制御装置をアナログ単一系として信頼性の高いものとすることができた。また使用電源については、各負荷を多重化電源の各々に適切に分散配置した。これにより万一の電源母線喪失、電源装置異常発生に対しても、耐力の強いシステムを実現している。図7に、給水・再循環流量制御装置の外観を示す。

3.3 デジタル制御装置

計装制御系の高信頼化のほか、運転員の負担軽減と省力化を図るため、デジタル制御技術を導入した。

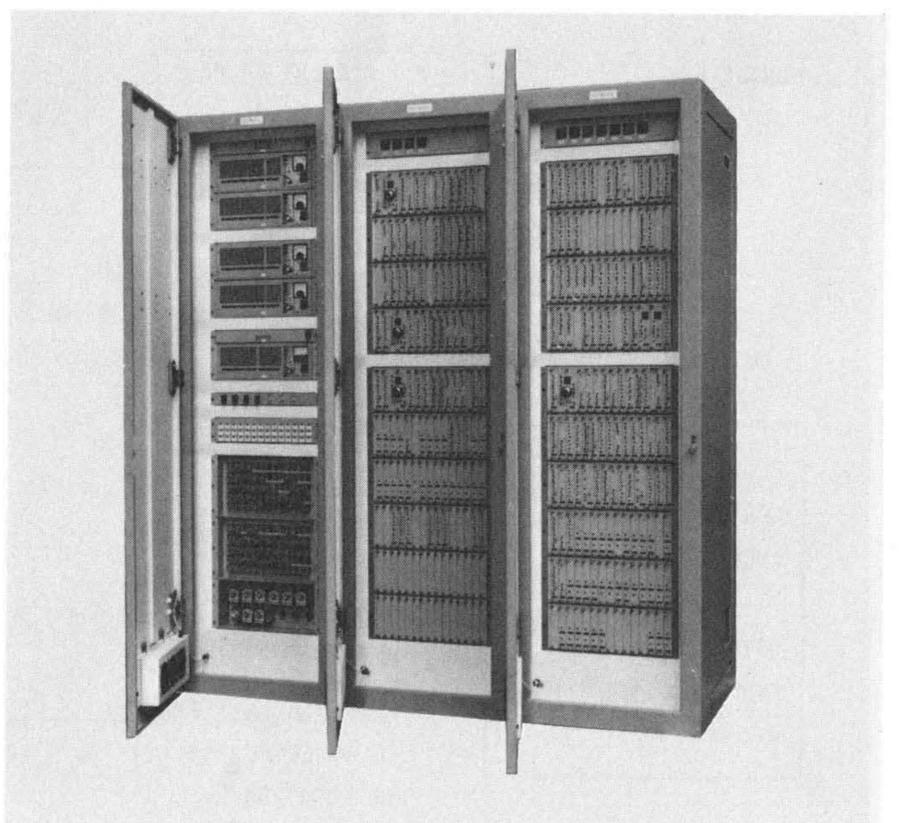


図7 給水再循環流量制御装置 全点スクリーニングしたアナログモジュールで構成され、高信頼化を図っている。

(1) RMCS(原子炉手動操作装置)・RPIS(制御棒位置指示装置)

BWRでのRMCS・RPISは、従来、並列信号伝送方式を採用しており、中央制御室と現場間に膨大なケーブル本数を要し、また電磁リレーを使用したシステムであるため、より信頼性の高い装置が要求されるようになってきた。

新型RMCSは、電磁リレーを半導体化し、各制御棒の水圧ユニットに対応させて設けた現場端末器へ、4本の同軸ケーブルで信号を直列多重伝送する方式のデジタル装置であり、オンライン故障診断機能などにより、高い制御信頼性を実現している。

一方、新型RPISは、位置信号を制御棒ごとに時分割処理し、直列多重伝送と装置の小型化を行ない、位置信号の合理性チェック機能を備えた。

(2) TIP(移動式炉心内計装)制御装置

TIP制御装置は、複雑な操作を必要とし、また位置検出器に機械式接点を使用しているため、信頼性、保守性の面からその改善が強く望まれていた。

TIP制御装置として、マイクロコントローラを採用し、そのインテリジェント機能により、操作の簡素化・時間短縮を実現した。また、従来の位置検出方式を非接触方式に改善するとともに、故障診断機能を付加し、信頼性・保守性を向上させた。

(3) タービンローカル制御装置

タービンローカル制御系は、湿分分離器・復水器ホットウェル・給水加熱器などの水位制御を含むタービン周りの約60の制御ループを総称して言うが、これらは、従来、空気式計器を主体とした現場制御方式であった。

これらをマイクロコントローラを使用したデジタル制御方式とし、中央制御室からの操作を可能にするとともに、制御性・操作性を向上させ、更に重要な制御ループについては二重化して高信頼化を図った。

4 プラント制御システムの性能向上

計測制御システム全体で、より高度の信頼性を達成するために、ハードウェアの信頼性向上を図るだけでなく、過去の

プラント運転実績を十分に評価検討したうえで、ソフトウェア機能の点で改良を加えている。図8に、BWRの主要制御系の概要を示すとともに、通常時並びに過渡時の操作性及び信頼性を向上させるため、次に述べるような技術的改良を行なった。

(1) 流体継手制御特性

再循環流量制御系の重要な制御機器である流体継手の国産化を図った。流体継手内のすくい管位置に対する流体継手伝達トルク特性が変化する領域を除去し、通常時の運転性向上を図った。

(2) 高速ランバック機能

再循環ポンプ速度を急速に最低ポンプ速度にする(ランバック)機能は、従来再循環流量主制御器出力を最低出力にする方式であった。応答速度を高めるため、すくい管位置要求信号を直接変更する(高速ランバック)方式を採用し、機器異常時に急速に炉出力を低下できるようにした。これにより、給水ポンプトリップ時に、万一予備機(電動駆動給水ポンプ)が起動しない場合にも炉水位低下を抑制し、運転継続が可能となった。更にスクラム時に本機能の採用で、炉水位の低下を抑制することができるようになった。

(3) 原子炉水位設定値自動変更機能

制御系の定数は、通常時の制御性を重視し設定される。このため、再循環流量高速ランバック発生時などの急激な外乱に対して制御系の速応性が得られない場合がある。給水制御系では、再循環流量ランバック発生時に、その信号を検出し一時的に水位設定点を約20cm降下させる。その結果、大きな過渡変化時にも炉水位上昇を抑制し、制御性を向上させた。このように連続的な制御とオン・オフ的な制御の組み合わせた給水制御系と再循環流量制御系の協調制御を導入することにより、プラント全体の制御性が向上した。

(4) 給水ポンプ再循環弁固定連続制御方式

給水ポンプの大容量化に伴い、給水ポンプのミニマムフロー流量が定格値の約25%に増大しているため、従来行なってきた給水ポンプ再循環弁の全開・全閉制御では、給水流量の変動が大きくなる可能性がある。そこで、給水ポンプ再循環弁を一定開度までステップ状に開し、その後全開位置まで連

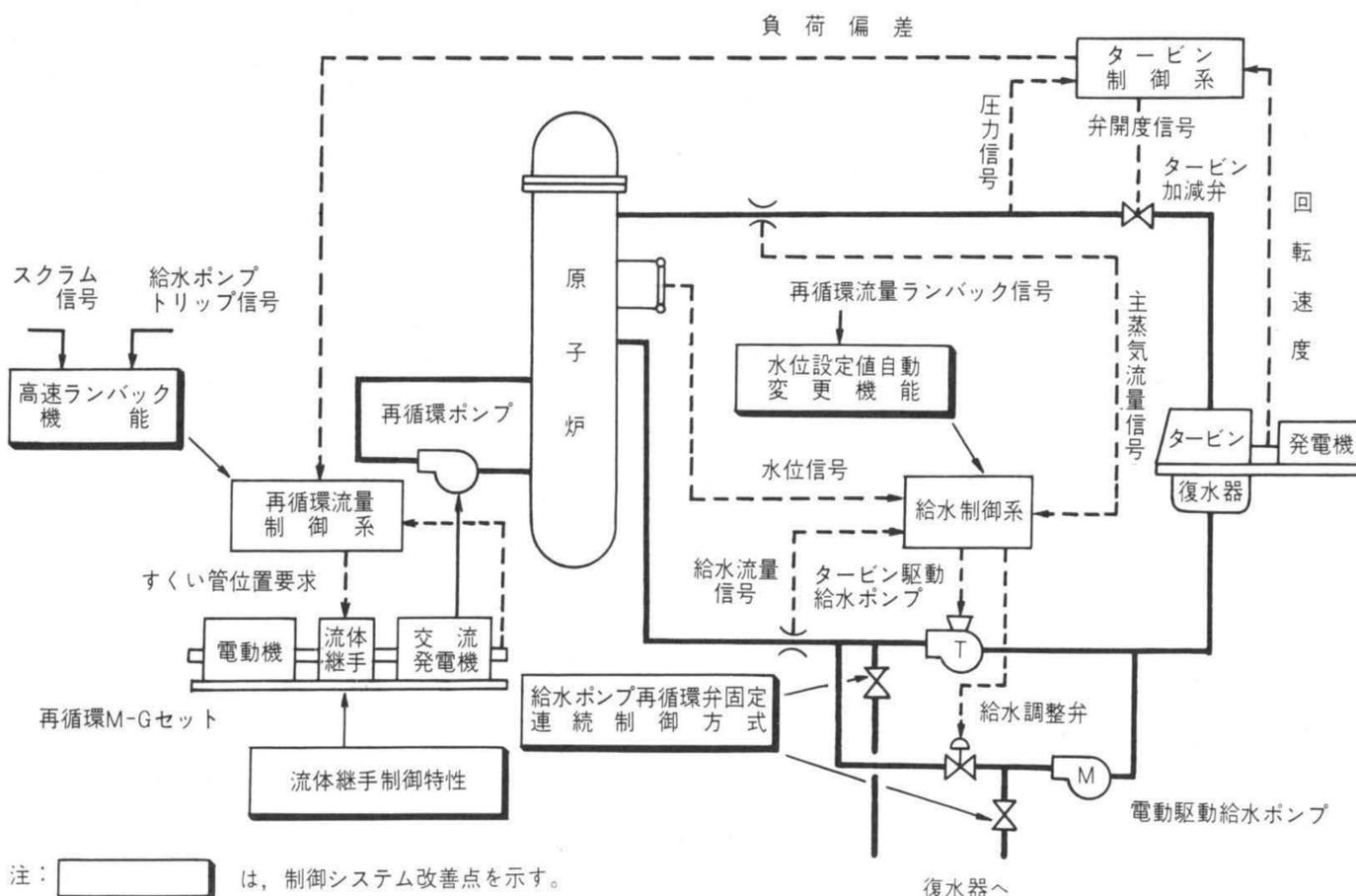


図8 BWR主要制御システムと改善点 運転操作性・信頼性を高めるため、主要制御間の協調が強化されている。

注: [] は、制御システム改善点を示す。

続的に徐開する方式を採用した。その結果、給水流量の変動を抑え原子炉水位へは小さな外乱にとどめることができた。

5 試運転結果及び評価

前述した改善点を含め、福島第二・2号機の計装制御システムは、試運転での各種試験を経てきたが、特に、制御系の速応性、安定性などで良好な結果を得ている。また、CRT表示に代表されるプロセス計算機システムは有効に活用され、運転監視操作性が向上した。

5.1 監視機能強化

監視機能強化項目に対する試運転結果の中から、プロセス計算機を中心に以下に述べる。

- (1) 中央制御盤上の警報窓、計器、操作スイッチの重要度分類は有効である。
- (2) 表示パラメータの時系列的傾向の分かるトレンド表示を筆頭に、系統表示などのCRT表示は、運転状態に応じた情報が集約表示されるため監視性が良く、試運転初期からプラント運転全般を通して広く活用され、非常に有効であることが確認された。
- (3) CRTハードコピー装置は種々の試験で多用され、運転履歴の有効な記録手段として活用された。
- (4) 炉心性能予測機能は、制御棒操作、流量変更などの時点で精度評価され、良好な結果が得られた。図9に制御棒操作時の例を示す。

5.2 制御機能の改善

制御システムの性能向上策は、起動試験でその効果を確認した。表2にその結果を示す。プラント過渡変化時、原子炉水位の過渡安定性強化のための水位設定点自動変更、及び高速ランバックの両者の機能を確認した結果を以下に述べる。

定格出力運転中には、2台の50%容量のタービン駆動給水ポンプが稼動しており、このうちの1台が停止した場合は、通常予備機(25%容量の電動駆動給水ポンプ2台)が起動し、プラント運転継続を可能にしている。起動試験では、予備機を強制的に起動阻止するという過酷な条件下での水位の過渡応答性を評価した。

図10に示すように、タービン駆動給水ポンプトリップにより炉水位は急速に降下した。同時に再循環ポンプ高速ランバックが動作して炉出力が急速に低下し、その結果、炉水位の低下は抑制された。その後、水位低下に伴う過度な給水流量

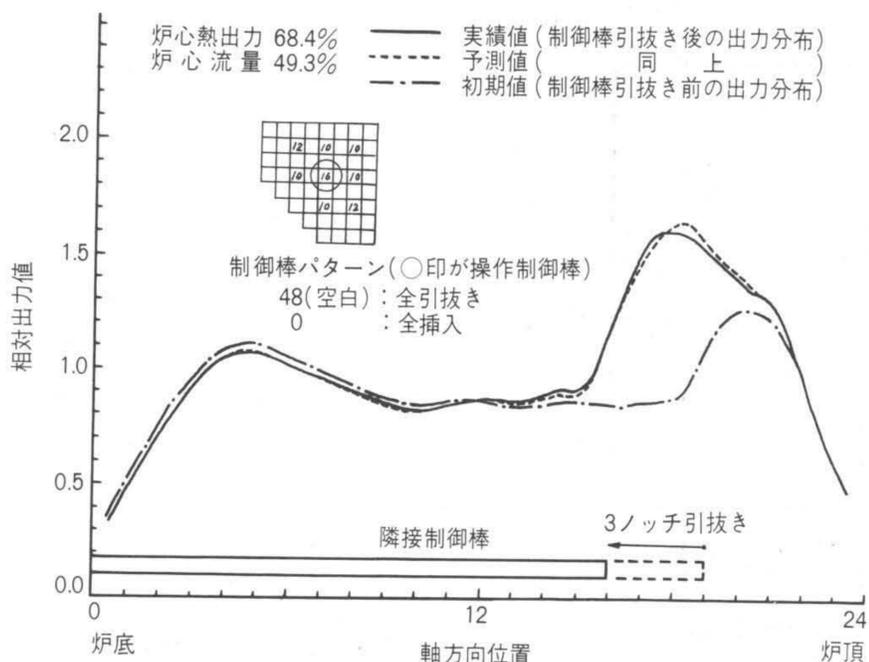


図9 制御棒引抜き後の出力分布予測 制御棒引抜きによる出力分布予測曲線と、引抜き操作後の出力分布がよく一致している。

表2 制御特性改善の確認 水位設定点自動変更機能など、協調的な制御機能は大規模外乱試験で確認された。

系統名	改良点	確認
再循環流量制御系	流体継手制御特性	通常運転時の操作性改善
	高速ランバック	給水ポンプトリップ、MSIV閉試験で良好な結果
給水制御系	水位設定点自動変更機能	給水ポンプトリップ試験で良好な結果
	給水ポンプ再循環弁固定連続制御方式	通常運転時の操作性改善

注：略語説明 MSIV (主蒸気隔離弁)

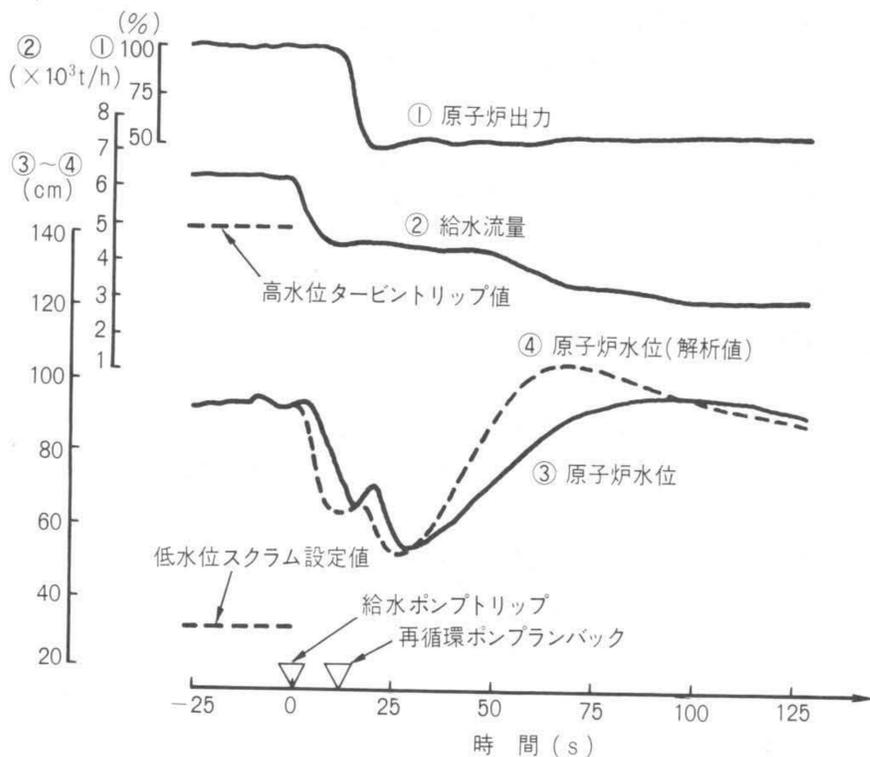


図10 給水ポンプトリップ試験時のプラント応答 再循環高速ランバックは、ポンプトリップ信号と原子炉水位低信号の一致により起動され、出力急減を図る。

による水位上昇を水位設定点自動変更機能により回避している。この間の水位の変動は、40cm以下と小さく、炉水位高・低の保護機能動作設定値に十分な余裕があった。このような過渡状態でもプラント運転継続が可能であり、制御機能の改善効果が確認された。また同図に示すように、パラメータ変化は解析値と良い一致をみせており、解析コードの妥当性も同時に確認できた。

6 結 言

福島第二・2号機の中央監視制御システムに対し、監視操作性、機器信頼性及び制御機能の性能向上内容及びその成果について述べた。

これらの技術的改良は、プラントの性能向上に十分役立っていることが試運転を通じて確認された。

今後、原子力の全発電電力量に占める割合が増大するに従って、ますます計測制御装置の性能向上が求められる。

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) 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)
- 4) 小林, 外: 原子炉冷却材再循環系機器の国産化と信頼性向上, 日立評論, 64, 8, 567~572(昭57-8)