

# 沸騰水型原子力発電所における計算機応用

## Computer Applications in Boiling Water Reactor Power Plants

沸騰水型原子力プラント用に最近開発された計算機応用技術のうち、今後、プラントの稼働率向上に大きく寄与すると期待される「炉心性能予測計算システム」と「プラント診断システム」の2システムについて紹介する。

炉心性能予測システムは、制御棒の引抜きや炉心流量の変更に伴う炉心熱特性の変化を事前に予測計算し、炉心の運転制限条件に違反しないよう運転員に警告し、適正な運転操作のガイドとするシステムである。その概略構成、及び精度評価結果について紹介する。

プラント診断システムは、プラントの動特性モデルを備え、標準的な状態と観測値との偏差を監視することにより、プラントの異常診断を自動的に行なうものである。その診断の原理、範囲、構成及び使用実績について紹介する。

中村日出雄\* Nakamura Hideo  
 上下利男\* Jôge Toshio  
 元田 浩\*\* Motoda Hiroshi  
 横見迪郎\* Yokomi Michirô  
 飯田 宏\*\*\* Iida Hiroshi

### 1 緒 言

沸騰水型原子力プラント(以下、BWRプラントと略す)でのプロセス計算機の役割は、従来は炉心の安全かつ高効率運転を図るための性能の把握が中心であったが、最近では、計算機技術の進歩とあいまって、プラントのいっそうの安全性向上や運転操作性向上を目的として、計算機の適用範囲が大幅に拡大される方向にある。

本稿では、BWRプラントで最近開発された計算機応用技術のうち、炉心や重要な機器、制御装置の信頼性向上により、プラントの稼働率向上に大きく寄与すると期待される、「炉心性能予測計算システム」と「プラント診断システム」の2システムについて紹介する。

### 2 炉心性能予測計算システム

現在、BWRプラントでは、燃料の健全性を維持するために炉心の運転条件に制限を課している。具体的には、特殊な場合を除き、高出力状態での制御棒操作は行なわず、再循環流量制御による出力上昇率も低い値に制限している。このような厳しい運転制限条件下で能率よく原子炉を運転するためには、燃料棒の最大線出力密度を精度よく見積るとともに、炉心流量の変更や制御棒の引抜きに伴う炉心熱特性の変化を、事前に精度よく予測する機能が必要になる。炉心性能予測計算システムは、このような非定常時の炉心熱特性の監視、及び予測を目的としたもので、現行のオンライン炉心性能計算による定常時の監視機能と併せて、(1)運転員の作業量の削減、(2)運転操作の円滑化、(3)安全運転の確認などに威力を発揮する。

#### 2.1 炉心性能予測計算システムの機能

上記の目的を果たすためには、次に述べる機能を具備することが必要である。

- (1) 現在の出力分布と熱的余裕の監視
- (2) 運転操作に起因する出力分布の変化と熱的余裕の予測
- (3) 出力上昇経路の予測

機能(1)は、短時間で最新の炉心情報を与え、かつ予測計算の初期値を提供するためのものである。機能(2)は、制御棒操作や流量変更に先立って、その安全性を事前に確認するため

のもので、このシステムの本質的な機能である。機能(3)は、あらかじめ定めた運転計画のとおり運転しても、所定の時期に所定の出力が達成されるかなど、かなり長期的な運転計画をチェックするためのものである。これと機能(1)、(2)とを併せて、起動過程の主要な炉心状態は予測可能となり、予定変更に伴う運転計画の修正、立案にも適用できる。

これらの計算をオンラインで実施するために、物理モデルとプラント・データ(炉内検出器の読み、ヒートバランス・データなど)を有機的に結合させ、データの蓄積によりモデルを漸次同定しなおすという新しい方式を採用している。図1はこのシステムのプログラム構成を示したものである。

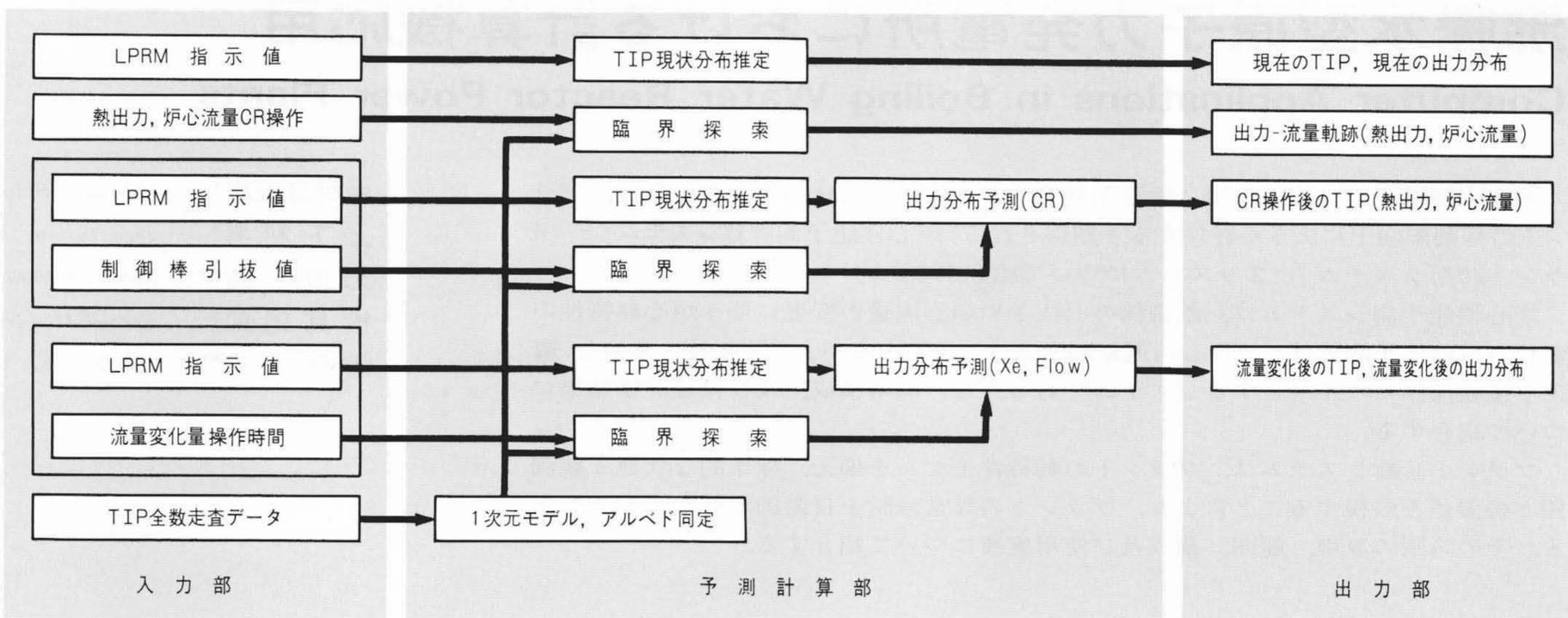
#### 2.2 計算精度及び応答性

このシステムの最も重要な評価基準は、精度及び応答性である。このため、オフライン・プログラムを作成し、先行して運転に入った炉の実測データを用いて、事前に十分な評価を実施した。図2は、東京電力株式会社福島第一原子力発電所2号機(電気出力784MWe)の起動過程でA点の状態にあるとき、3日後のE点の特定のTIP指示値を予測した結果を示したものである。この間、制御棒は65ノッチ引き抜かれ、21ノッチ挿入されている。他の多数の計算例でも同様な結果が得られ、プラントの運転上、十分な精度であると考えられる。制御棒引抜き後の予測計算時間は、汎用計算機で数秒であり、実用上問題はない。

#### 2.3 オンライン化

このシステムをオンライン化する場合、(1)従来のプロセス計算機に、その機能拡充として追加する方式、(2)このシステムのための専用のプロセス計算機を設置する方式、のいずれでも実現可能である。方式(2)の場合は、プラント・データ及び現行の炉心性能計算プログラムの計算結果の一部を、従来のプロセス計算機から取り込むためのデータ・リンケージ装置が必要となる。具体的なハードウェアの規模を表1に示す。今回、実証試験用に方式(2)を採用し、日立制御用計算機HIDIC 80に組み込み、オンライン化した。また、専用のコンソール一式を新たに設け、炉心性能予測システムとして独立した機能をもたせた。結果はすべてブラウン管ディスプレイ

\* 日立製作所電力事業本部 \*\* 日立製作所原子力研究所 工学博士 \*\*\* 日立製作所大みか工場



注：LPRM：Local Power Range Monitor (局所出力領域モニタ)  
 CR：Control Rod (制御棒)  
 TIP：Traversing Incore Probe (走行型炉内中性子束検出器)

図1 炉心性予測プログラムの構成 炉心性予測プログラムは、入力部、予測計算部及び出力部から成り、運転員の要求により随時起動される。計算結果は、CRT上にカラー表示される。

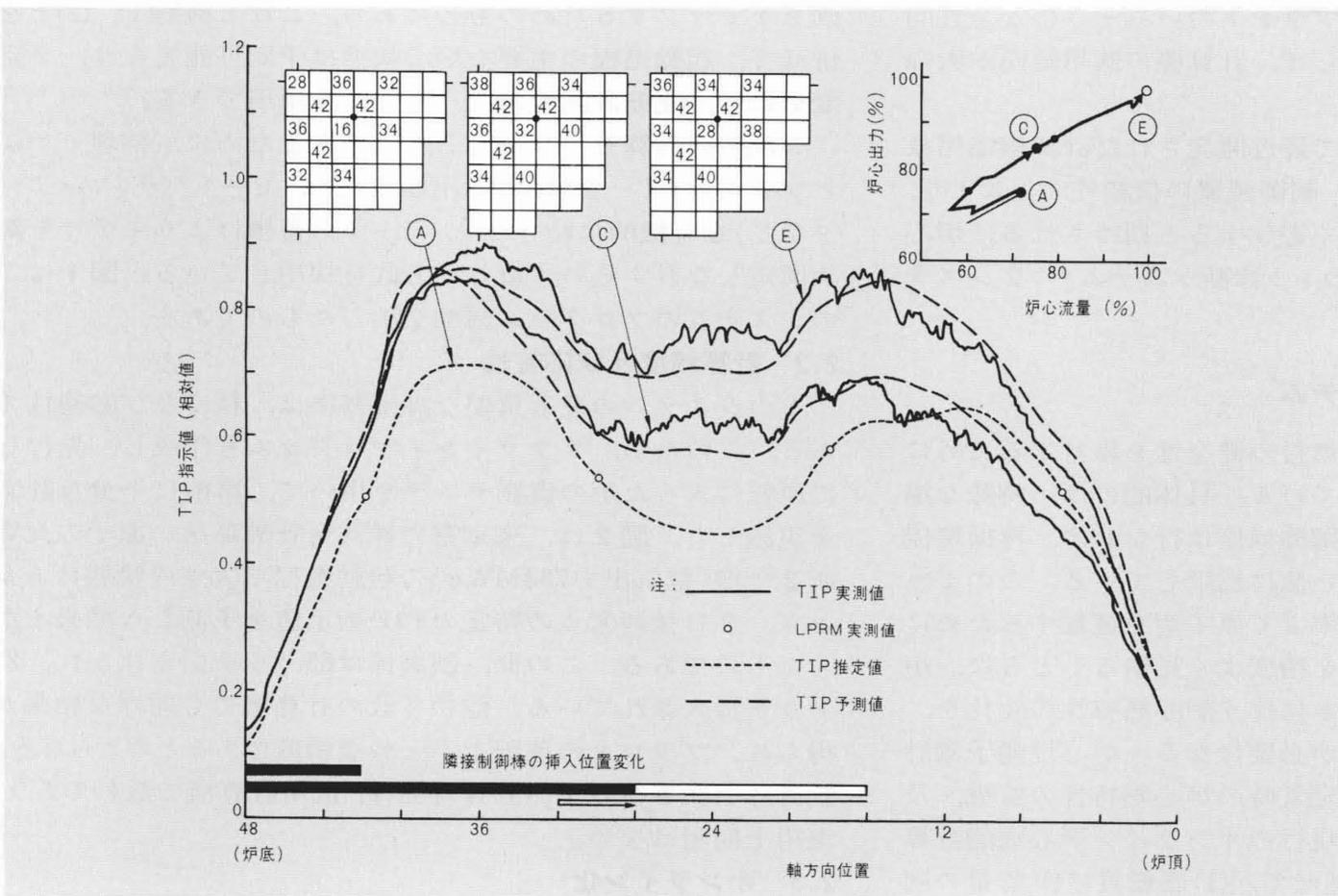


図2 TIP指示値予測結果 BWRの起動過程で(A点からC点, E点)の特定のTIP指示値を予測した結果を示す。TIP実測値と良い一致を示している。

装置(以下、CRTと略す)上に表示され、必要に応じてハードコピーすることができる。図3に表示例を示す。

このシステムの完成により、起動時の炉心監視、予測が可能になり、運転制限条件下での運転操作性の向上と、燃料の健全性の確保に大幅に寄与することが期待される。

### 3 プラント診断システム

原子力発電所の運転状態は、運転員が中央操作盤上の多数の指示計、記録計などを監視することによって把握されている。原子力プラントは安全第一で設計されており、たとえ軽微な故障でも、原子炉を含む主要機器の安全に影響を与える可能性があるれば、各状態量が限界値に達する前にプラントを

自動トリップするようになっている。しかし、プラントを高い稼働率で運転するためには、不必要な炉の停止を避けることが必要であり、これら多数の計器を常時監視して、微小な信号変化からプラントに発生する異常、又はその前兆を早期に的確に検知し、予定外の停止を極力回避する処置をとらねばならない。プラント診断システムはこの要求に対応するもので、プロセス計算機を導入することにより、プラント状態監視機能を拡大かつ機械化し、プラントの安全性及び運転の信頼性を向上させる役割を果たす。

#### 3.1 異常検出法の原理

このシステムの異常検出法は、実プラントの正常時動特性モデルによってその出力を推定し、これと観測した実プラン

表1 炉心性能予測計算システムの計算機ハードウェア規模 炉心性能予測計算システムをオンライン化する場合、(1)従来のプロセス計算機にその機能拡充として追加する方式と、(2)専用のプロセス計算機を設置する方式とがある。

No.	装置名	機能拡充方式	専用計算機方式
1	中央演算処理装置	メモリ拡張 (専用メモリ: 17k語) (共用メモリ: 24k語)	HIDIC 80 (メモリ64k語)
2	外部記憶装置	メモリ拡張 (約450k語)	外部記憶装置1台 (768k語)
3	計算機結合装置	不要	要
4	CRT表示装置	1台	1台
5	CRTハードコピー	オプション	オプション

トの出力との差を常時監視するモデル比較法を採用している。この差が大きくなったとき、プラントの特性が正常時の特性からずれたことが分かる。図4に、この方法による異常検出法の原理を示す。原子炉圧力 $X(t)$ が減少すると、圧力制御系が正常な動作をしていれば主蒸気流量も減少する。モデル比較法では、圧力制御系の正常時の動特性モデルを使って、正常時の主蒸気流量を推定する。もし、観測された主蒸気流量

$Y(t)$ が、原子炉圧力の減少にもかかわらずほとんど変化しないときには、主蒸気流量の観測値 $Y(t)$ と推定値 $\hat{Y}(t)$ の差 $E(t)$ が大きく変化し、圧力制御系が異常であることが分かる。

### 3.2 プラント診断システムの構成

このシステムの診断対象範囲を図5に、また、機能構成を図6に示す。

#### (1) 状態量計算部

状態量計算部は、各系統の正常時動特性モデルを備え、プラント計測データからの推定値を常時計算する。各系統のモデルは複数のサブモデルに分割され、それぞれプラント入力信号よりモデル出力を計算する。

#### (2) 監視量計算部

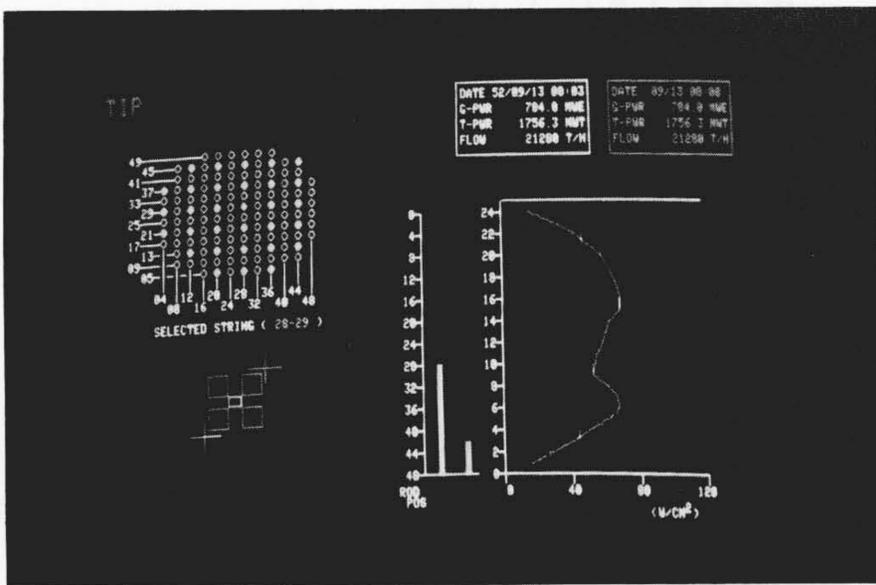
監視量計算部は、上述の動特性モデル出力と、これに対応する観測値との偏差(サブシステム監視偏差)を計算する。これらの偏差から、最終的に異常発生箇所に1対1に対応する監視量(ブロック監視指標)を計算する。

#### (3) 異常判定部

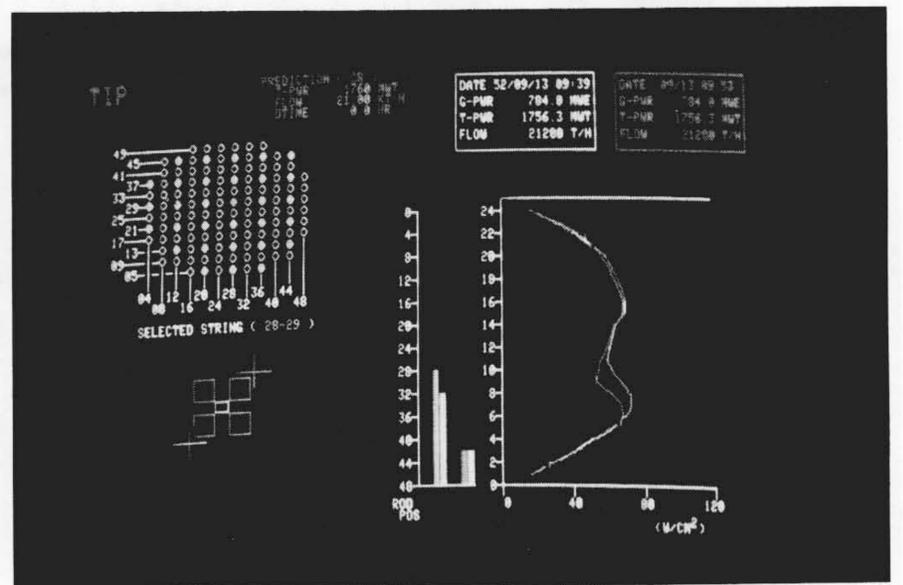
異常判定部は、各ブロック監視指標を2種の設定値(注意レベル、異常レベル)と比較し、そのブロックが正常領域にあるか、あるいは異常領域にあるかを判定する。

#### (4) 表示部

表示部は、以上の診断結果をタイプライタ及びCRT表示

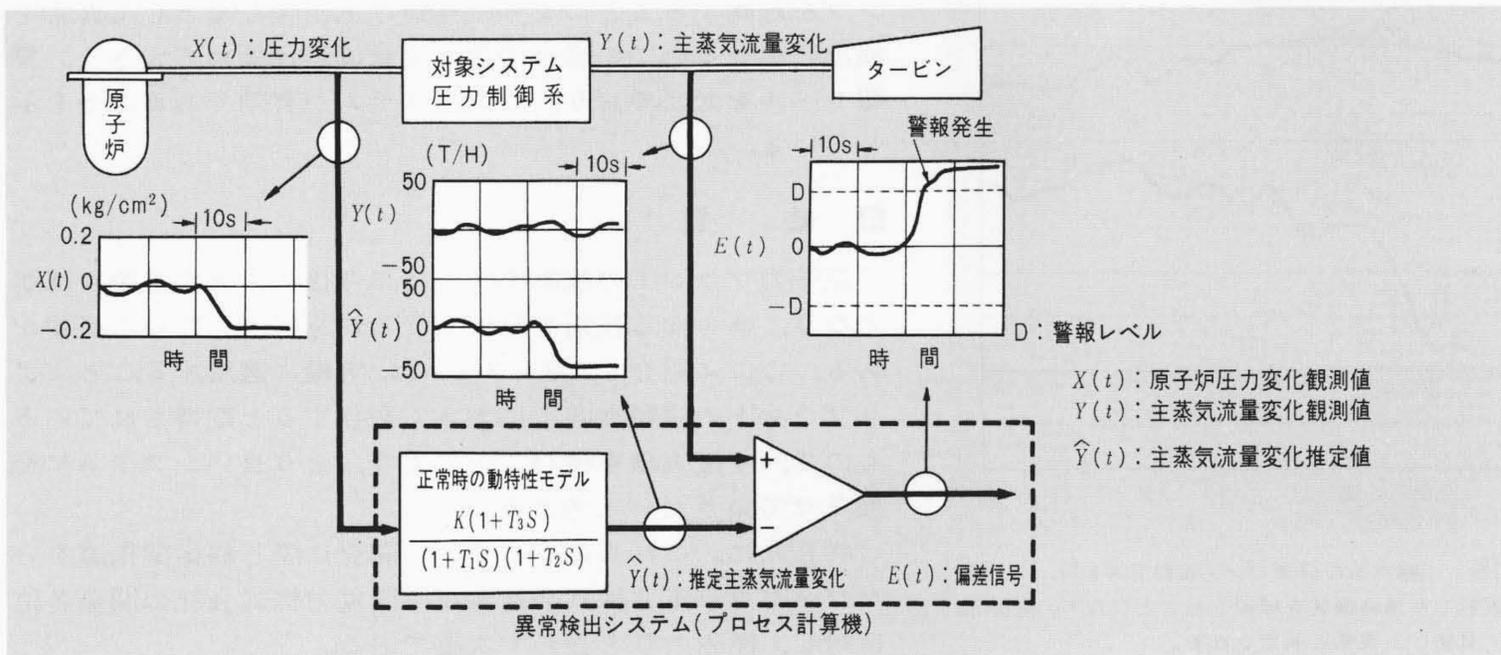


(a) 現状TIP指示値推定結果



(b) TIP指示予測結果

図3 炉心性能予測システムCRT表示例 運転員はCRT画面に表われた現在値と予測値を参考にしながら、安全かつ迅速な運転操作を行なうことが可能である。



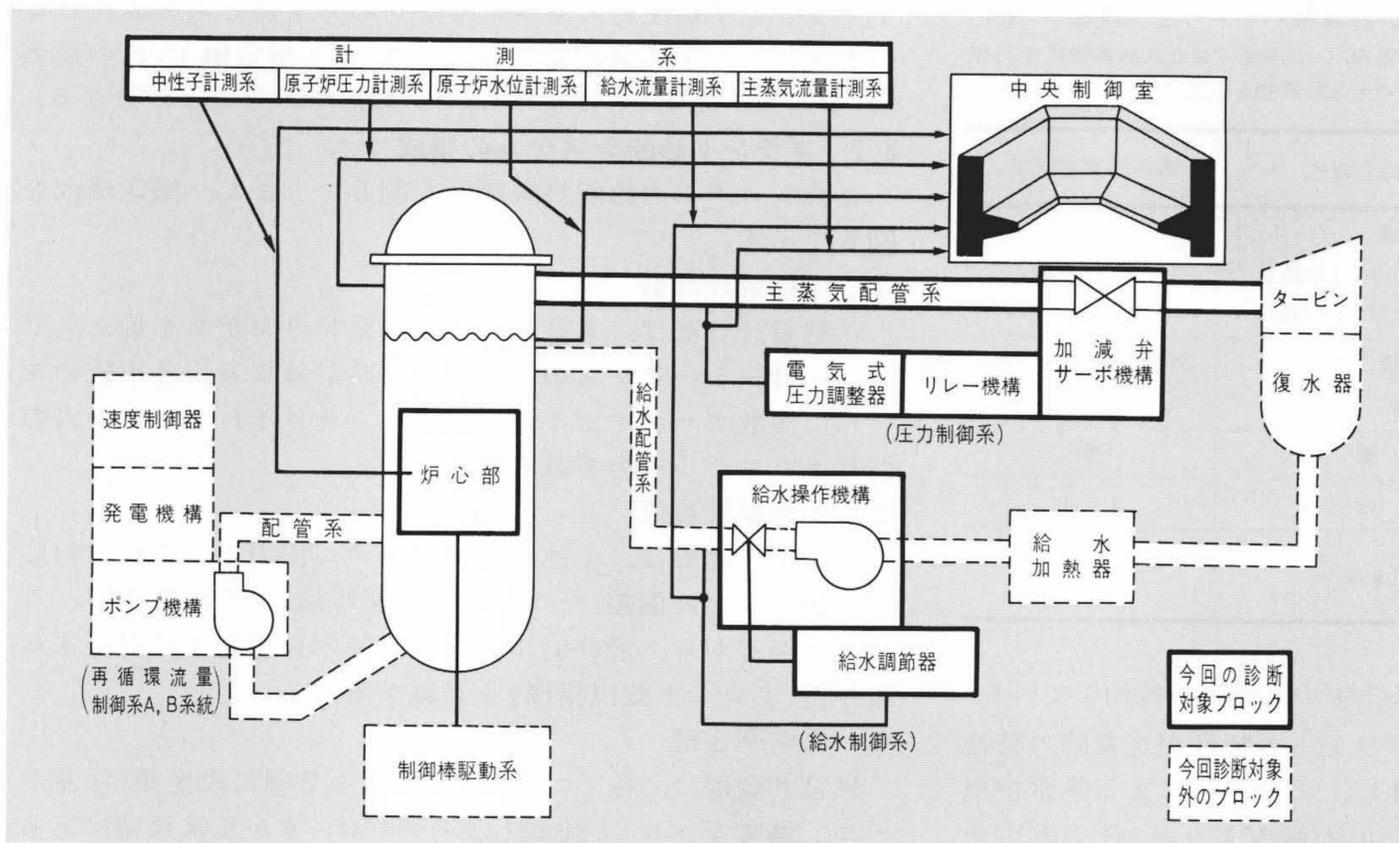


図5 プラント診断システムの診断対象範囲 各系統を計測系、制御回路、操作機構、配管系などにブロック分けしている。合計12のブロックが診断の対象となる。

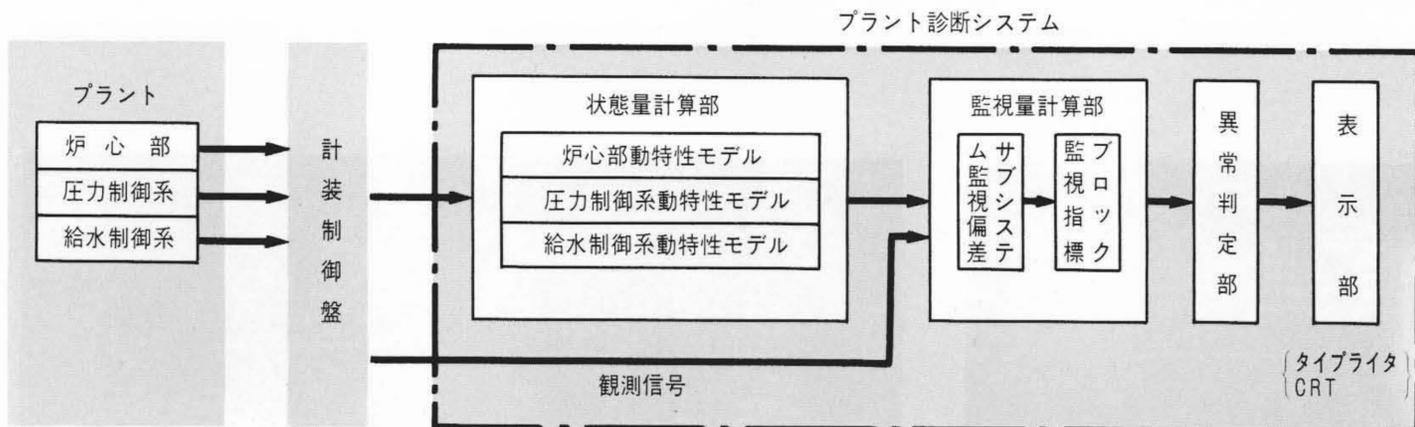


図6 プラント診断システム機能構成 プラント診断システムは、状態量計算部、監視量計算部、異常判定部及び表示部から成る。診断はブロック単位に行なう。

器に出力する。ブロック監視指標は、プラント全体の系統図とともに、棒グラフとしてCRTに連続表示され、これによりプラントの状態が直感的に把握できる。

### 3.3 運転実績

中国電力株式会社島根原子力発電所に適用されたプラント

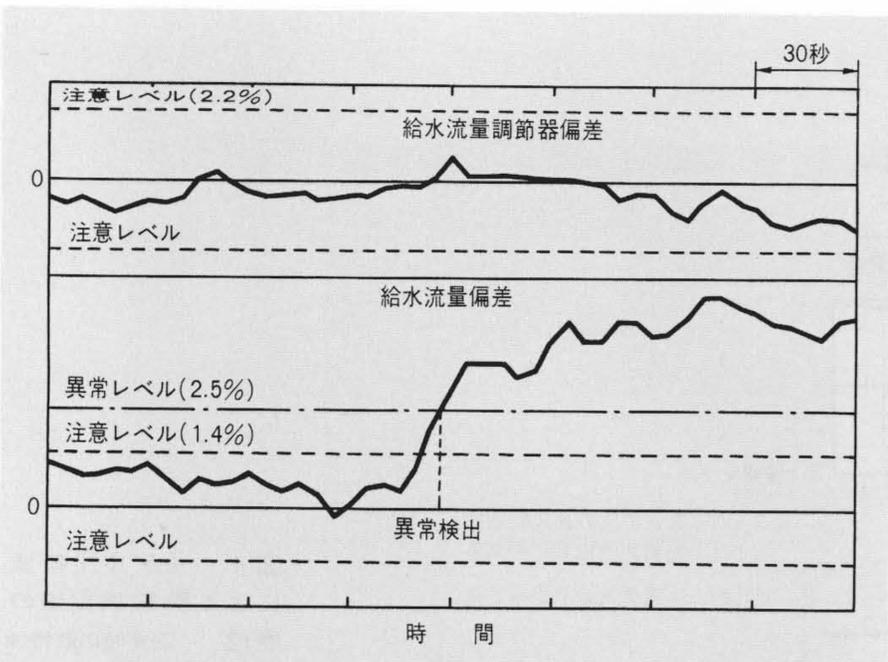


図7 模擬異常診断検出例 給水系の待機ポンプ起動テスト時、この診断システムをバイパスせずに運転した場合異常を模擬したことになり、給水流量偏差が異常レベルを超えて、見掛け上異常と判定される。

診断システムは、昭和51年6月から稼動に入り、その後の長期間の運転状況を反映した二、三の改良を加えて、現在順調に運転中である。

このシステムの異常検出性能は、おおむねプロセス変数定格値の3%以下であるが、図7に実機での模擬異常を検出した例を示す。これは、給水系の待機ポンプ起動テスト時に、本来なら見掛け上の異常を避けるために、診断システムを意識的にバイパスすべきところをバイパスせずに運転した場合の、給水調節器偏差及び給水流量偏差を示すものである。診断システムは、ポンプを含む給水操作機構の特性が、待機ポンプを起動することによって見掛け上変化したとして異常を検出している。この場合の給水流量偏差は極めて大きく、警報レベルを超えており、このシステムが有効であることを示している。

### 4 結 言

原子力プラントの稼働率向上は、今後ますます重要な課題となり、あらゆる技術を駆使してこれを解決していく必要がある。ここに紹介した2システムは、実機に適用することによりプラントの信頼性向上に大きく寄与すると期待されているもので、今後実績を積むことにより、より良いシステムに発展させていきたいと考える。

終わりに、これらのシステムの開発に際し終始御指導をいただいた東京電力株式会社及び中国電力株式会社の関係各位に対し、深謝の意を表わす次第である。