

# 沸騰水型原子力発電プラントにおける最近の電子計算機応用

## Recent Computer Applications in Boiling Water Reactor Power Plants

沸騰水型原子力発電プラントにおけるプロセス計算機は、炉心及びプラントの性能計算、データロギング用として運転上重要な設備となっている。この分野におけるプロセス計算機応用技術は年々拡大されつつあるが、本稿ではこれらの例として、最近開発されたプラント診断システム及び計算機化制御盤の2システムを紹介し、原子力発電プラントにおけるプロセス計算機の位置付けと動向把握の参考に供するものである。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、観測値との偏差を監視することにより、プラントの診断を自動的に行なうものである。また、計算機化制御盤はプロセス計算機とCRT表示器を導入して、運転情報の合理化と盤の縮小を図ったものである。

平賀 昭二\*      Shôji Hiraga  
上下 利男\*      Toshio Jôge  
清川 和宏\*\*     Kazuhiro Kiyokawa  
加藤 監治\*\*     Kanji Katô  
二川原 誠逸\*\*\*   Seitsu Nigawara

### 1 緒言

沸騰水型原子力発電プラント(以下、BWRプラントと略す)におけるプロセス計算機の役割は、現状では炉心性能計算、プラント性能計算、データロギングなどを主体としているが、プラントの運転性能及び信頼性の向上、運転員の放射線被ばく低減などのためにプロセス計算機を大幅に採り入れていく傾向にある。

本稿は、BWRプラントの最近の電子計算機応用技術開発の動向として、プラント診断システム及び計算機化制御盤の2システムを紹介する。プラント診断システムは、BWRプラントの主要システムの正常時動特性モデルを備え、各モデル出力と観測値との偏差を監視することにより、プラントの健全性を常時監視し、異常又はその前兆が発生した場合にこれを

早期に検出し、異常発生個所に関する情報を運転員に提供するものである。また、計算機化制御盤はプロセス計算機とCathode Ray Tube(以下、CRTと略す)表示器を導入して、盤の縮小と運転情報の合理化とを図り、必要最小限の運転員でプラントを迅速、且つ適切に対処できるようにした近代化された制御盤である。

### 2 プラント診断システム

現在、原子力発電プラントの運転状態は、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、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

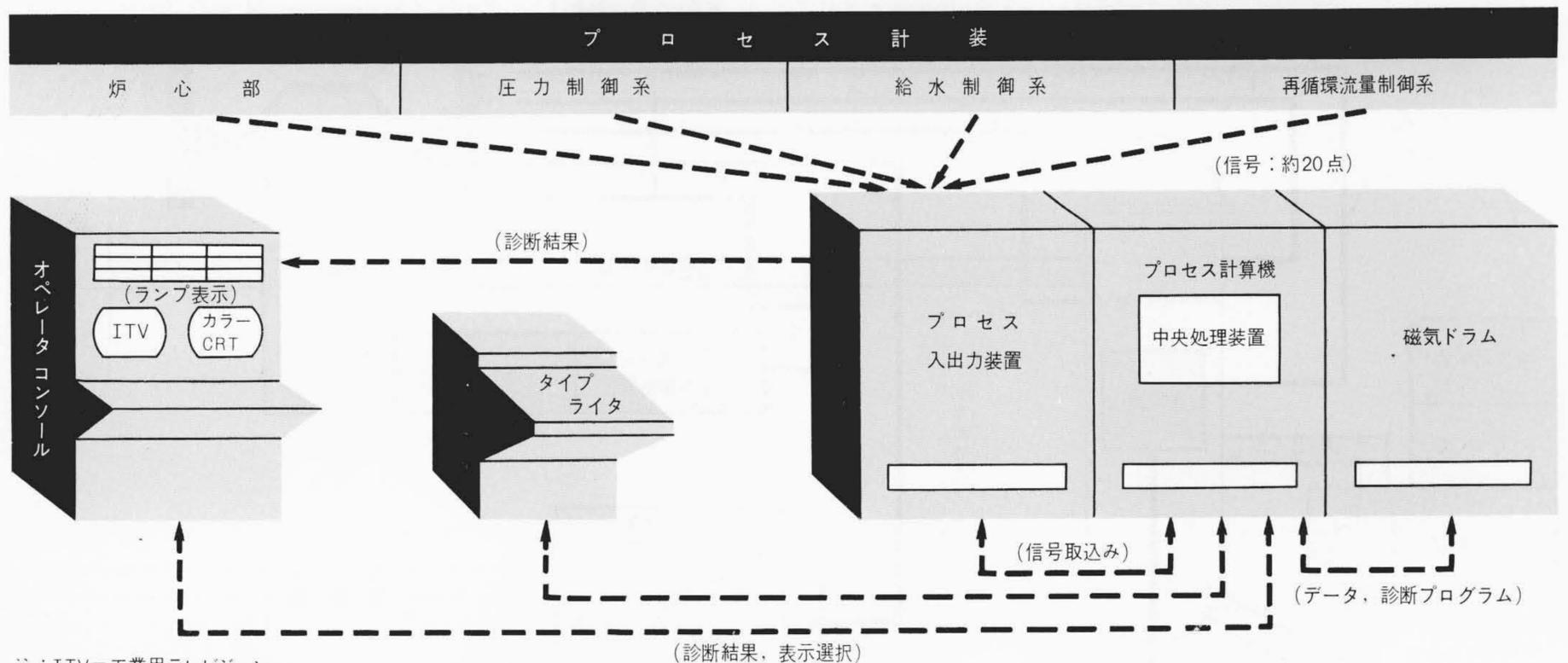


図1 プラント診断装置の構成 プラント診断装置はプラントからの信号を処理する部分、各系統の運転状態を診断する演算処理部、及び結果を表示する部分から成る。

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

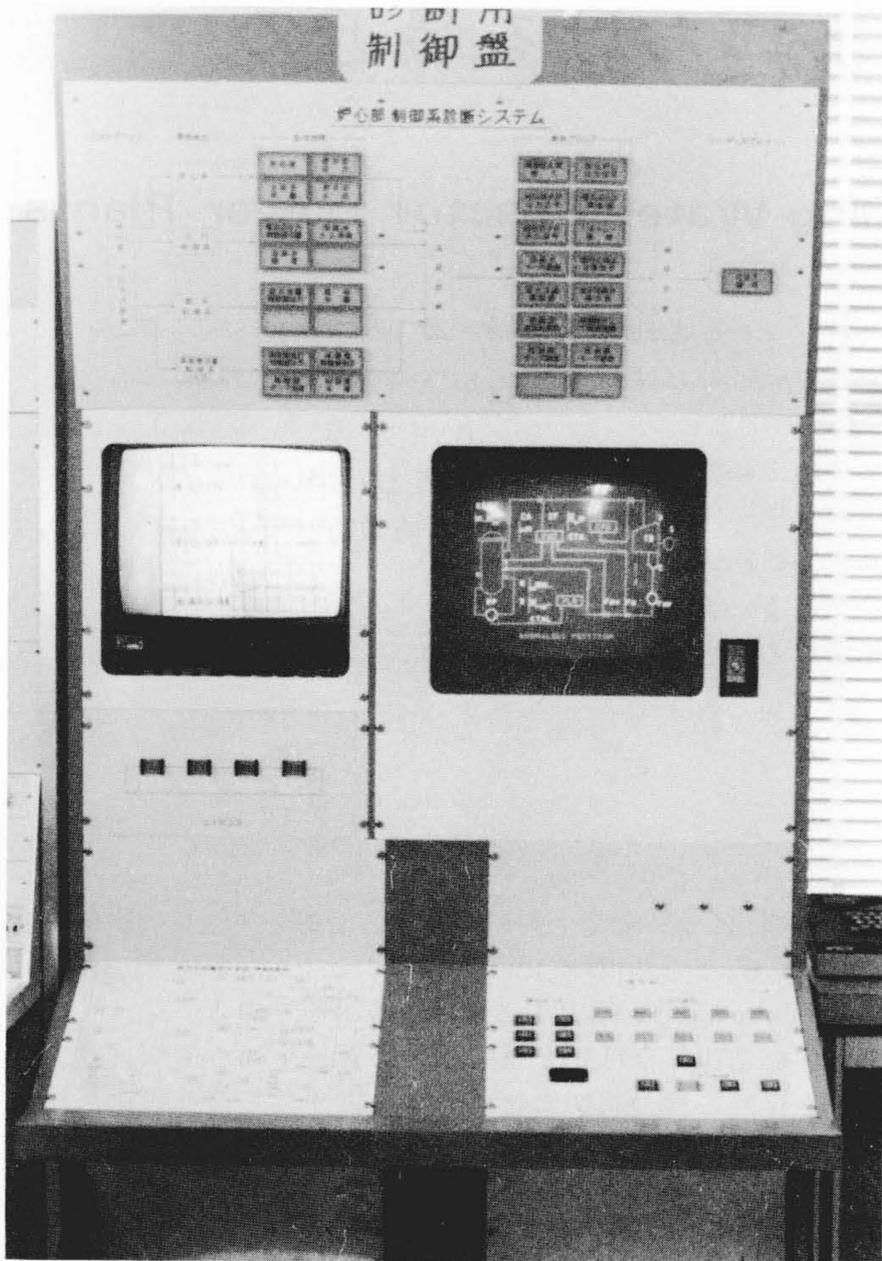


図2 プラント診断システム試作機のオペレータ コンソール  
カラーCRTに診断結果が表示され、異常発生位置が直観的に把握できる。

える可能性があれば、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。プラントを高い稼働率で運転するためには、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、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、且つ機械化し、プラントの安全性及び運転の信頼性を向上させるものである。本システムは、プラントの健全性をブロックごとに常時監視し、万一故障が発生した場合にその異常を早期に検出し、異常発生個所に関する情報を運転員に提供し、運転の一助とするものである。以下、BWRプラントの主要システムを対象に開発したプラント診断システムの概要とその性能試験結果について述べる。

### 2.1 システム構成

プラント診断システムのハードウェア構成は、図1に示すように、プラントからの信号を処理する部分（プロセス入出力装置）、入力信号を使って各システムのコンポーネントの運転状態を診断する電子計算機を主体とした演算処理部及び診断結果をCRT表示器、あるいはタイプライタなどで表示する部分から成る。図2に試作機のオペレータ コンソールを示す。

### 2.2 診断対象範囲

プラント診断システムは図3に示すように、プラント定常運転時の炉心部、圧力制御系、給水制御系及び再循環流量制御系（2系統）の5系統を診断対象としている。各系統は幾つかのブロックに分割され（制御系では計測系、制御演算回路部、操作部）、これら20個のブロックごとに診断される。診断システムでは、プログラムをブロック単位にモジュール化し、診断対象範囲を容易に拡張、削減することができる。

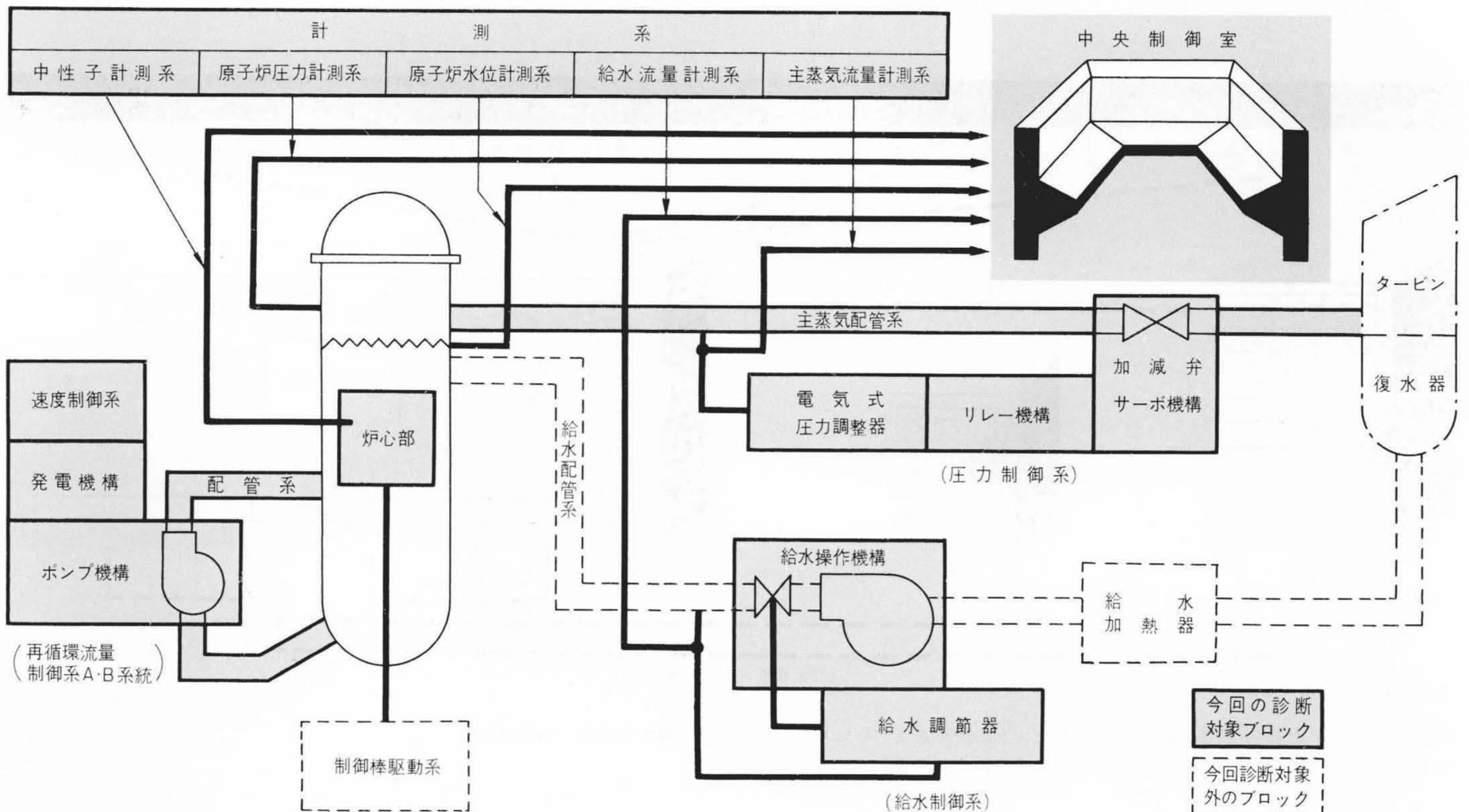


図3 プラント診断システムの診断対象範囲 各系統を計測系、制御回路、操作機構、配管系などにブロック分けしている。合計20のブロックが対象となっている。

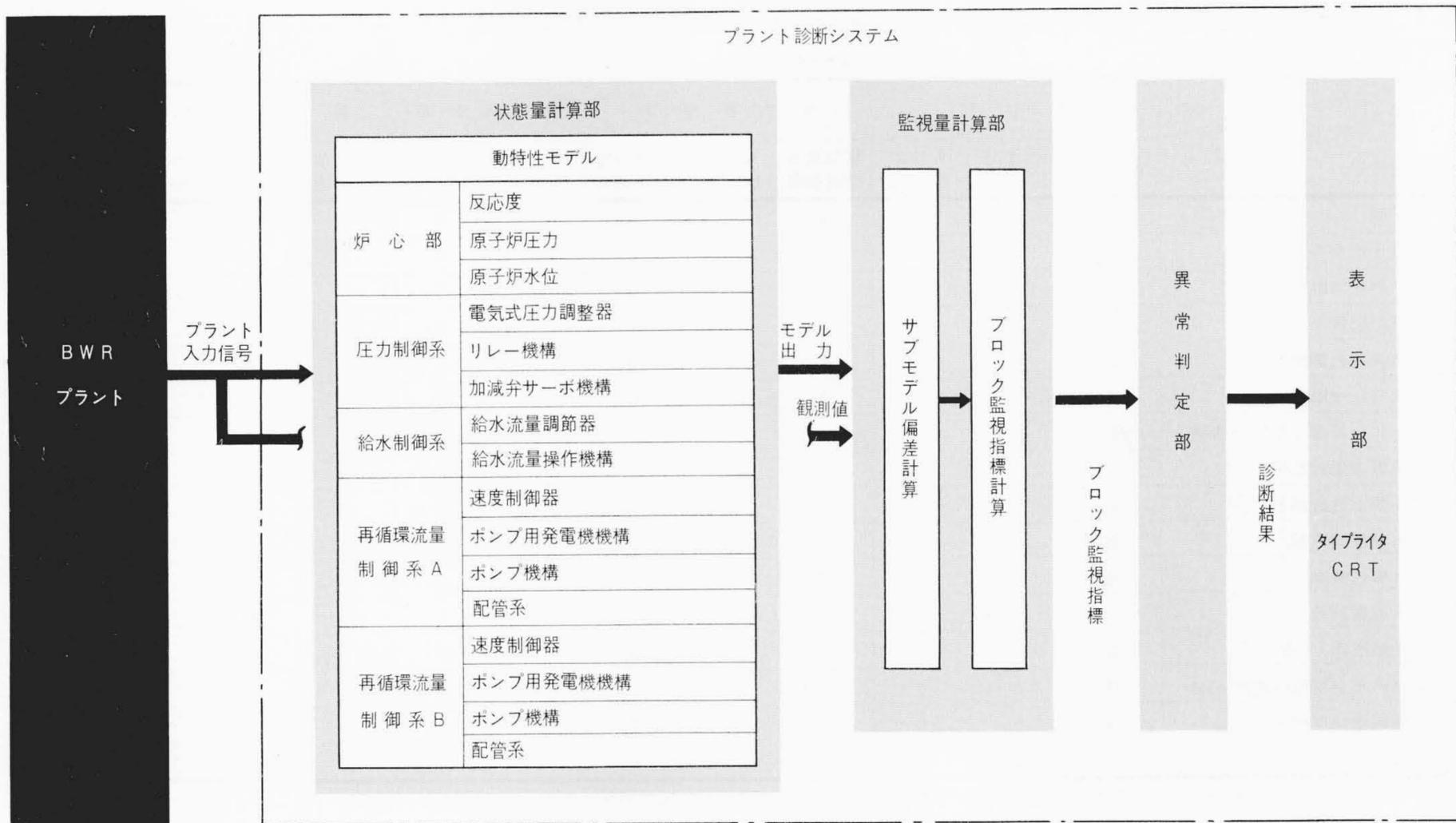


図4 プラント診断システム機能構成 プラント診断システムは、状態量計算部、監視量計算部、異常判定部及び表示部より成る。状態量計算部は、プラント動特性モデルを備え、モデル比較法により診断を行なう。

### 2.3 機能

プラント診断システムは図4に示すように、状態量計算部、監視量計算部、異常判定部及び表示部の機能をもつ。

#### (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、プラント状態量を常時計算する。各系統の動特性モデルは幾つかのサブモデル（合計16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。これらの動特性モデルは、定常状態からの微小変化分だけに着目し、線形化及び簡単化したもので、図5に圧力制御系の一例を示す。

#### (2) 監視量計算部

監視量計算部は、動特性モデル出力とこれに対応する観測値との偏差を計算する。この偏差は、プラント定常運転時は一般に正規分布している。

もし、図3に示したあるブロックに異常が発生すると、このブロックに関する1個、あるいは複数個のサブモデル偏

差が異常値を示すはずである。従って、異常を示すサブモデル偏差の組合せにより異常ブロックが判定できる。この関係を表1に示す。監視量計算部は各ブロックごとに、そのブロックが異常となったら異常値を示すはずの各サブモデル偏差の絶対値の相乗平均又は最小値（サブモデル偏差が1個のものはその絶対値）をブロック監視指標として計算する。

#### (3) 異常判定部

異常判定部は、監視量計算部で計算された20個のブロック監視指標を誤警報率から定められた2種の警報レベルと比較し、正常、注意及び異常の判定を行なう。

#### (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表示器に出力する。ブロック監視指標は棒グラフとしてCRTに連続表示され、これによりプラント状態が直感的に把握できる。また異常発生時は、自動的に診断結果がタイプライタに出力され、異常ブロックを示す全体の系統図がCRTに表示される。

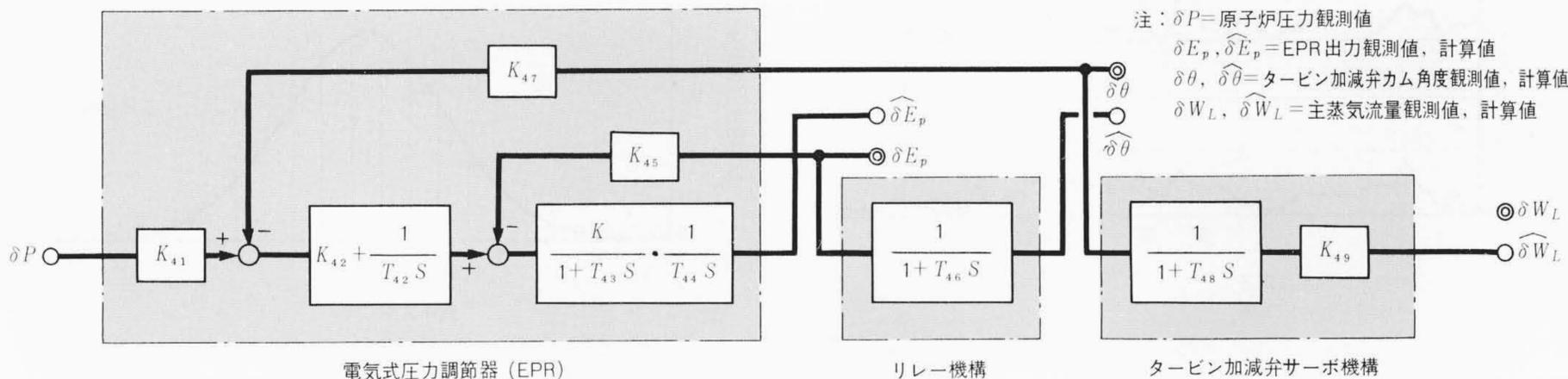


図5 圧力制御系動特性モデル 系統動特性モデルは3個のサブモデルに分割され、それぞれプラント入力信号を使って状態量を計算し、対応する観測値と比較される。

表1 異常発生ブロックとサブモデル偏差の関係  
 ブロックに異常が発生すると、1個又は複数個のサブモデル偏差が異常値を示す。

ブロック	系 統											
	炉 心 部			圧 力 制 御 系			給 水 制 御 系		再 循 環 流 量 制 御 系 (A/B)			
サブモデル	反 応 度	原 子 炉 圧 力	原 子 炉 水 位	電 気 式 圧 力 調 整 器	リ レ ー 機 構	加 減 弁 サ ー ボ 機 構	給 水 調 節 器	給 水 流 量 操 作 機 構	速 度 制 御 器	発 電 機 機 構	ポ ン プ 機 構	配 管 系
反応度	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
中性子計測系	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
原子炉圧力計測系	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
主蒸気配管系	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
電気式圧力調整器	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
一次リレー機構	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
タービン加減弁サーボ機構	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
主蒸気流量計測系	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
原子炉水位計測系	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
給水流量調節器	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
給水操作機構	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
給水流量計測系	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
速度制限器 A/B	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
再循環ポンプ用発電機A/B	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
再循環ポンプ機構 A/B	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
再循環配管系 A/B	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

注：「1」はブロックが異常のとき、そのサブモデル偏差が異常値となるものを示し、「0」は無関係であるものを示す。

2.4 性能試験

今回試作したプラント診断システムの性能を確認するため、BWRプラントの起動試験時データを磁気テープに採取し、

これを使って試験を実施した。制御系の設定値変更など、通常の運転では実施しない操作をしたときのプラント応答を異常模擬データとして使った結果、異常発生位置を正しく判定することができた。

この一例として、原子炉水位設定値を15cm下げたときの関連するブロック監視指標の応答を図6に示す。また定常運転時のデータを使用し、サブモデル偏差の分布を求め(図7)、これにより、誤判定率(誤って警報を発する割合)を注意レベル、異常レベルに対して、それぞれ $3 \times 10^{-3}$ 、 $3 \times 10^{-7}$ と設定したとき、圧力制御系では圧力変化に換算して、それぞれ約0.1、0.2kg/cm<sup>2</sup>、炉心では反応度変化に換算して、それぞれ約4、8セントとなった。

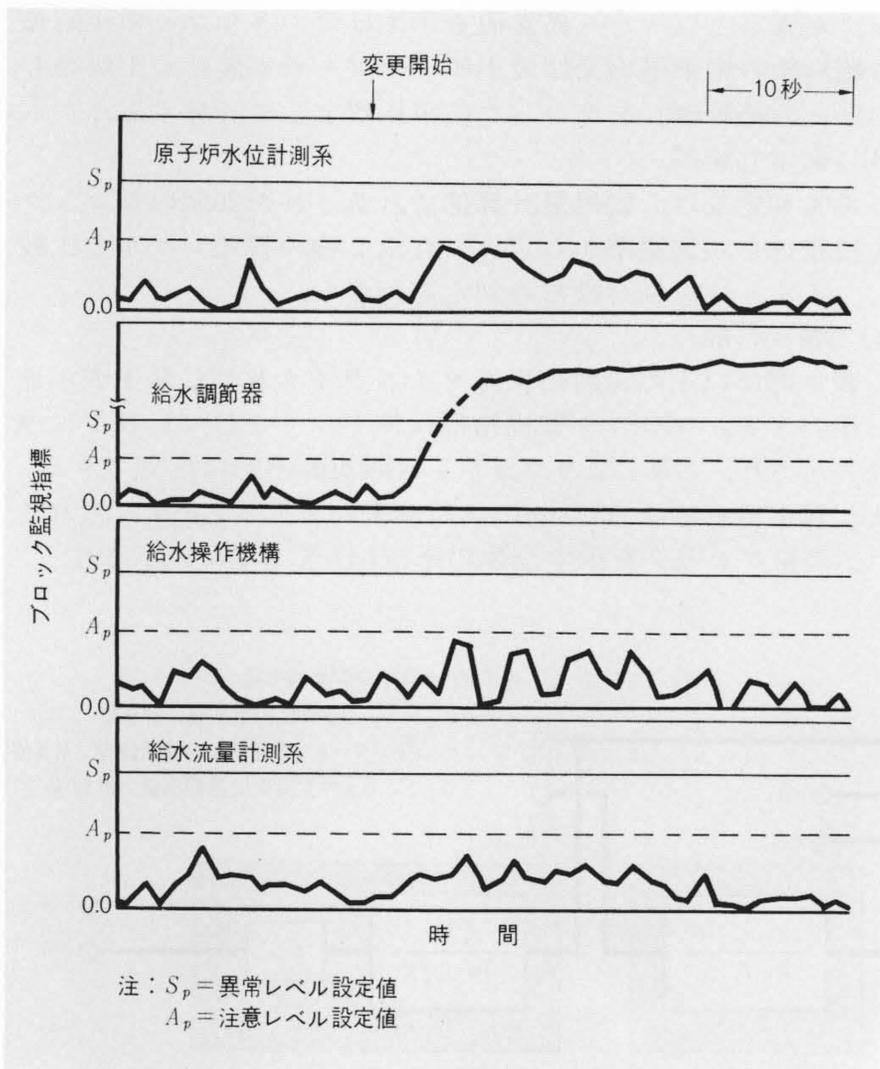


図6 給水制御系のブロック監視指標の応答  
 異常模擬信号として原子炉水位設定値を15cm下げたとき、給水調節器ブロック監視指標だけが異常値を示し、異常発生ブロックが適切に検知されていることが分かる。

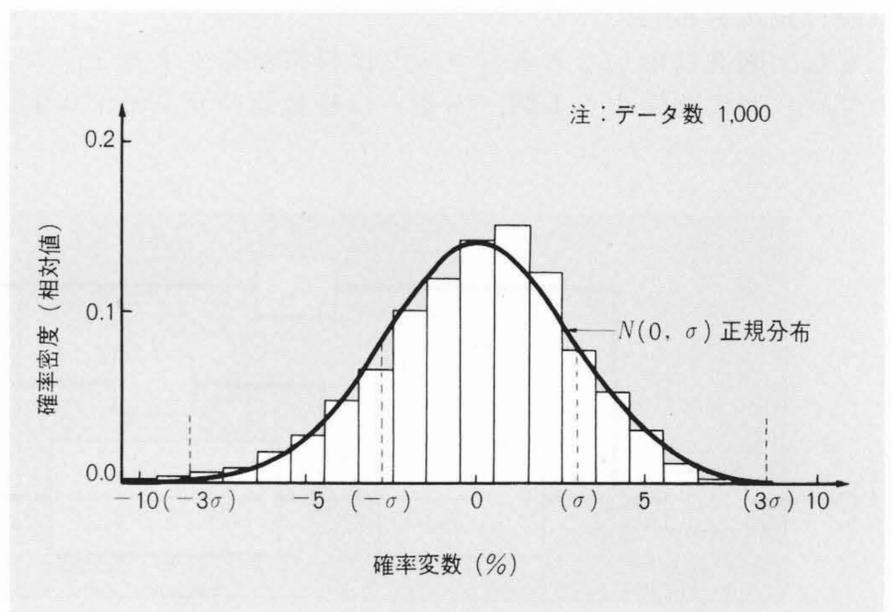


図7 電気式圧力調整器サブモデル偏差の度数分布  
 動特性モデル出力と観測値との誤差信号は、一般に正規分布する。この分布より注意レベル及び異常レベルの設定値の異常検出感度が計算される。

2.5 まとめ

今回開発したプラント診断システムの特徴と効果を表2に示す。

3 計算機化制御盤

原子力プラントの制御盤は、現在「プラントパラメータは盤計器にできる限り表示する」という思想で設計されている。しかし、プラント規模が大きくなるにつれて、「運転に必要なデータだけを表示する」という思想に変わりつつあり<sup>(1)</sup>、このような、制御盤を近代化する手段として、運転情報の処理にプロセス計算機とCRT表示器を導入した計算機化制御盤が注目されている<sup>(2)(3)</sup>。

ここでは、計算機化制御盤開発の1ステップとして試作したBWRプラント用の計算機化制御盤の概要とカラーCRTによる運転情報の監視機能について述べる。

3.1 計算機化制御盤の概要

中央操作室での運転作業の問題点と対策を図8に示す。計算機化制御盤は、プロセス計算機を導入することによって盤面積を縮小するとともに、カラーCRTを活用して、現在運転に要求されているチームワークと熟練した運転技術を代替するものである。これにより必要最小限の運転員でプラントに迅速、且つ適切に対処することが可能になると考えられる。

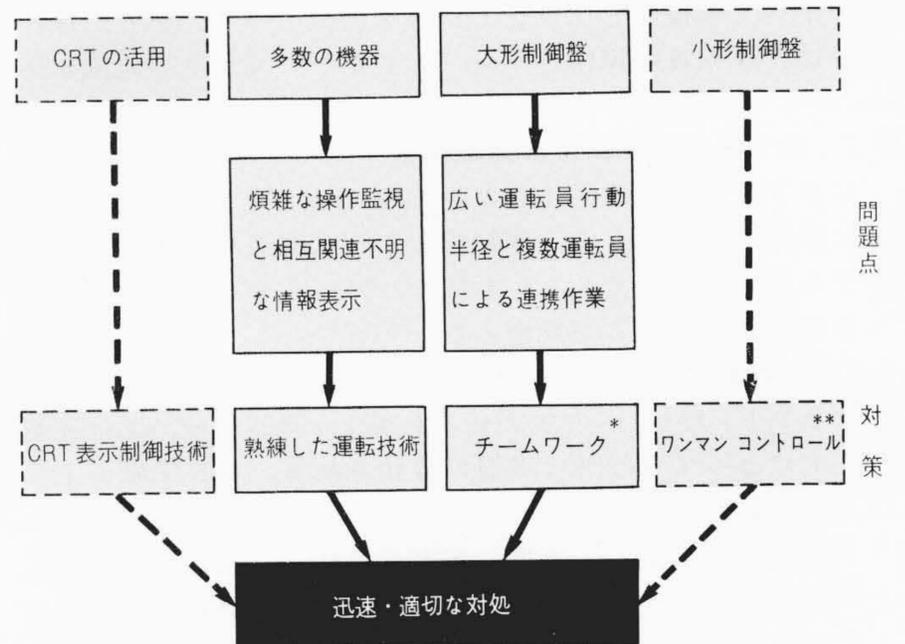
計算機化制御盤の実験機は運転員コンソールと当直長コンソールとで構成されている<sup>(4)</sup>。

3.1.1 運転員コンソール

運転員コンソール(図9)は現在の中央操作盤に相当するもので、長さ3m、高さ1.6mと現在の盤(1,100MW級で長さ20m、高さ2m)に比べて盤面積が約1/10となっている。

(1) 表示パネル

表示パネルは3台のカラーCRT(3,200文字、20")と常時監視ディスプレイ及び144個の警報表示窓から成っている。運転操作に必要な運転情報は3台のCRTに表示される。運転員は、CRTの表示内容を見ながら運転情報の表示を要求する対話形データアクセス法と、プラント状態に応じて優先情報を自動的にCRTに表示する自動選択表示法とにより、プラント状態を直観的に把握し、プラント異常時にも簡単、



注： \* = 運転員2~3名、主任1名、当直長1名  
 \*\* = 運転員1名、当直長1名  
 実線わく = 現状の運転  
 点線わく = 計算機化制御盤

図8 中央操作室運転作業の問題点と対策 現在の中央制御盤では、熟練した運転技術、運転員のチームワークが要求されている。



図9 運転員コンソール カラーCRT、多重警報表示窓、ページ式操作スイッチなどの採用により、従来の制御盤の約1/10に小形化し、ワンマンコントロールを可能にした。

表2 プラント診断システムの特徴と効果 プラント診断システムは、プラント状態の常時監視、異常発生個所の早期検出及びスクラム時の原因情報出力という特長をもっている。

プラント	現 状	診 断 シ ス テ ム	
		特 徴	改 良 点
正 常 時	運転員が、計器及び記録計を随時監視して状態を把握。	電子計算機による系統/機器ごとの常時監視	1. 系統/機器ごとの動作状態の把握が容易 2. 監視周期の短縮と迅速化を監視範囲拡大
異 常 発 生 時	異常が発生した系統/機器以外からもアラーム系ではアラーム発生。原因判定は、運転員が判断。	系統/機器の動作特性変化検出と原因判定の自動化	1. 検出限界の向上による異常の早期発見(0.1kg/cm <sup>2</sup> ・圧力制御系) 2. 原因判定迅速化 3. 誤判断の減少
ス ク ラ ム 発 生 時	アラームタイプ記録により、運転員がスクラム原因調査。	スクラム前の系統/機器の動作特性の自動記録	診断結果の記録により、スクラム原因究明が容易。

且つ迅速な監視操作ができる。

常時監視ディスプレイは、運転に重要なデータをオシロスコープ上に連続的に表示する。プラントが正常であれば、オシロスコープ上の輝点が所定の円周上に表示される。運転員は輝点のパターンからプラント状態を直観的に把握できる。

警報表示窓は、現在の単一警報表示窓のほかに、警報発生後の処置に緊急を要さないものを表示する多重警報表示窓を設けている。多重警報表示窓には投影形表示器を使用しており、1個の窓に最大10種類の警報を表示することができる。

(2) 操作 卓

プラント操作器は重要度、頻度によって3段階に分類されている。重要度、頻度の比較的低いものについては、一つの実操作スイッチで複数台の機器を操作できるようにした多重操作器(ページ式操作器)を使用して、操作器の数を少なくしている。

3.1.2 当直長コンソール

当直長コンソールでは、CRT1台で、運転員コンソール

でのすべての操作とプラント状態を監視できる。また、操作卓には、運転員の操作をブロックするキーロック設定部がある。

### 3.2 カラーCRTによる運転監視

CRTを使って近代化した制御盤では、プラント状態を適切に把握できるように、運転情報の相互関連を明確にして表示することが重要である。また、プラントデータへのアクセス手順も簡略化する必要がある。

#### 3.2.1 対話式データアクセス法<sup>(5)</sup>

プラントデータへのアクセス手順は、機器系統、又は運転モードによって3段階の階層に分類される。CRT画面上には、運転員が選択した階層に含まれる運転情報とともに、より下位の階層を示す一連番号が表示される。運転員はCRT上の一連番号をデータアクセスキーボードから選択することによって、希望するプラントデータにアクセスできる。

CRT情報表示例とデータアクセスキーボードを図10に示す。CRT画面の左半分に機器の運転状態を示す系統図、右半分に棒グラフで表わしたアナログデータ及びリファレンスデータがそれぞれ表示される。

対話式データアクセス法には次のような特徴がある。

- (1) プラントデータと入力点番号の対応表が不要
- (2) プラントデータと系統図が同時に表示されるので、プラント状態を直観的に把握できる。

#### 3.2.2 優先情報の自動選択法<sup>(6)</sup>

プラント異常時には、プラントの状態に応じて必要な情報を自動的に選択してCRTに表示する。優先情報の選択では熟練した運転員の思考過程を模擬し、異常発生の原因となっ

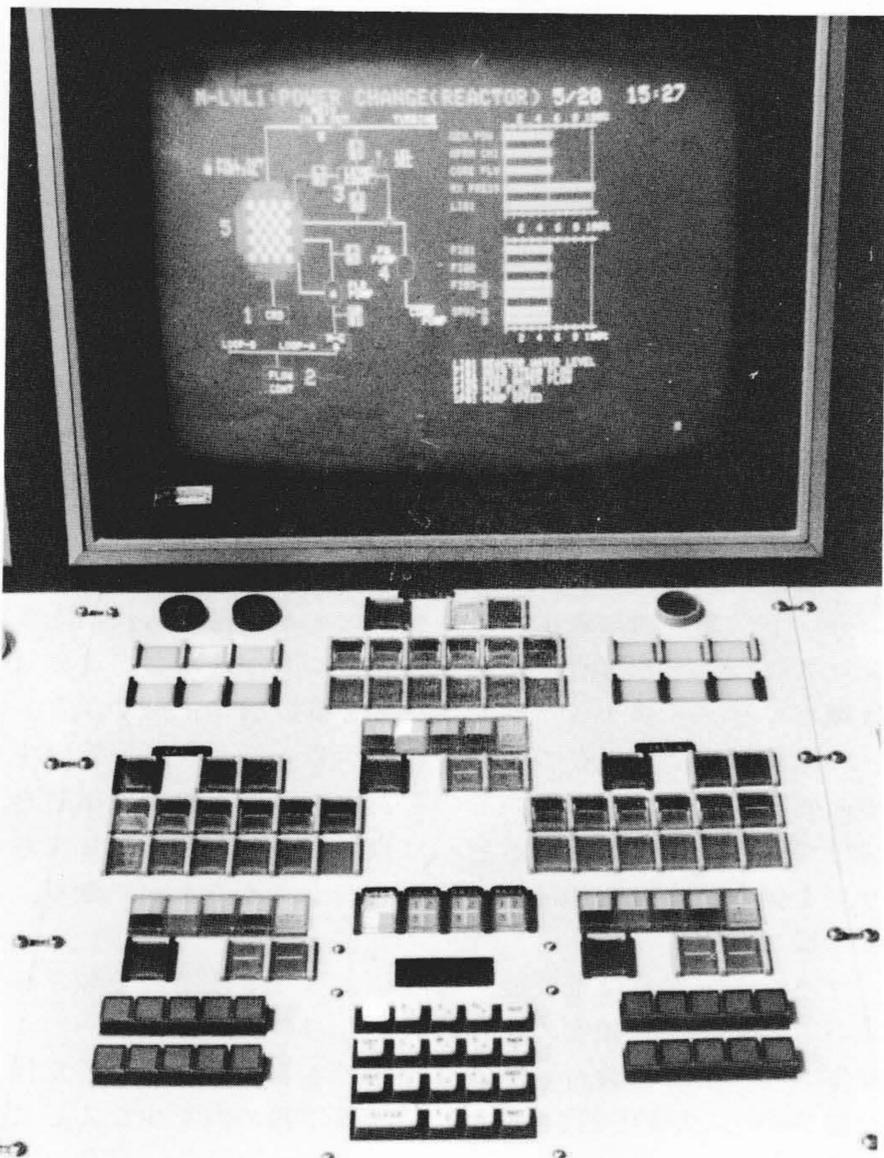


図10 CRT情報表示例とデータアクセスキーボード 対話式データアクセス法と優先情報自動選択法を採用した情報表示システムとした。

表3 計算機化制御盤の特徴と効果 本装置の効果として、プラント状態の集中監視、プラント状態の直観的把握、プラント異常時の簡単迅速な監視操作及びワンマンコントロール可能なことが挙げられる。

	特 徴	効 果
制 御 盤	1. CRTによる運転情報の表示	ワンマン コントロール可能 制御盤寸法：3m×1.6m 盤面積：1/10 警報表示窓：1/5
	2. 多重警報表示窓の導入	
	3. 常時監視ディスプレイの導入	
	4. 当直長用コンソールの新設	
運 転 情 報 の 監 視	1. プラント系統図の活用	プラント状態の集中監視
	2. 運転情報の階層化と対話形式	プラント状態の直観的把握
	3. プラント状態に応じて優先情報を判定・表示	プラント異常時の簡単、且つ迅速な監視操作
	4. 熟練した運転員の思考過程を電子計算機で代替	

た系統の系統図及びその系統の運転を継続できるか否かを判断するのに必要なプラントデータを選択する。これらの情報だけで不足のときは、前述の対話式データアクセス法により詳細な情報を得ることもできる。

この優先情報の自動選択法には、次のような特徴がある。

- (1) 人間の思考過程に本質的にあるあいまいさ(Fuzziness)を取り入れている。
- (2) 運転員の運転経験とプラントの個性を反映できるようになっている。

### 3.3 ま と め

今回開発した計算機化制御盤の特徴と効果をまとめて表3に示す。

## 4 結 言

BWR原子力発電プラントにおける最近のプロセス計算機の応用として、プラント診断システムと計算機化制御盤の2例を紹介した。これらの応用例にみるように、プロセス計算機は当面、プラントの運転性能及び信頼性の向上、更に運転員の放射能被ばくの低減などのために活用されていき、これらの経験と技術を蓄積しながら、現在火力発電プラントにみるようなプラントの自動化や自動負荷追従の方向に向かうものと考えられる。

### 参考文献

- (1) M. H. Raudenbush: "Human Engineering Factor in Control Board Design for Nuclear Power Plants" Nuclear Safety, 14, 21~26, 1973
- (2) S. E. Rippon: "Taking the Complexity out of the Control Complex" Nuclear Engineering International, 18, 200, 36~39, Feb., 1973
- (3) 和嶋, 芹沢: 「原子力発電プラントの計算機化制御盤の動向」火力発電大会, 10/8~9, 1974
- (4) 岸, 米田: 「運転操作コンソール」, 原子力学会昭49.秋の分科会, 炉物理・炉工学C26
- (5) 岸, 長岡: 「CRTコンソールのデータアクセス法」, 電気学会, 関西支部連合大会G6-24(昭49)
- (6) 芹沢, 須田: 「プラントモニタリングにおけるfuzzy情報量」第17回自動制御連合講演会1079