

中国電力株式会社島根原子力発電所 1号機納め プロセス計算機システム

Nuclear Power Plant Process Computer System for Shimane P.S. No.1 of the Chugoku Electric Power Co.

A Process computer system for Shimane Nuclear Power Station No. 1 has been developed. As a system using domestic-made computer, this is the first of its kind in this country. Also, provided with a color CRT (Cathode Ray Tube), this system has made it possible to visually supervise the reactor core.

正岡勲彦* *Norihiko Masaoka*
 中田 昭** *Akira Nakata*
 飯田 宏** *Hiroshi Iida*
 稲葉剛三*** *Gozô Inaba*

1 緒 言

昭和45年、日本原子力発電株式会社敦賀発電所の運転開始により、わが国における本格的な原子力発電時代が始まり、原子力発電所は現在運転中のもの5基、建設中のもの十数基を数え、今後その建設は増加する計画となっている。

原子力発電所へのプロセス計算機の適用は世界的に広く行なわれており、その代表例は表1に示すとおりである。同表に示されるように、プロセス計算機の機能はデータ・ロガー、プラント運転監視、さらには自動化にも及んでいる。このうち、わが国における原子力発電プラントの主流の一つを占める沸騰水形(以下BWRと略す)原子力発電プラントでは、プロセス計算機が、プラント高効率運転の達成、安全性の向上、省力化のための必要不可欠の機器の一つとして設

置されている。

このほど中国電力株式会社島根原子力発電所1号機(電気出力460MW)納めプロセス計算機システムを完成した。このシステムには通常の機能の他にカラーCRT(プロセスディスプレイ装置)を導入し、原子炉熱出力分布などの原子炉運転状態の直観的把(は)握を可能とした。本計算機システムは、昭和47年8月現地搬入し、順調に系統別機能試験を終え、昭和48年秋の運転開始を目ざして起動試験の段階にある。さらにこの起動試験では、プラント実運転での計算機処理機能を実証するとともに、計算機を試験データ収集などプラント起動試験に活用していく予定である。

表1 プロセス計算機適用プラント一覧表 プロセス計算機を設置しているわが国および諸外国の主要原子力発電所を示す。

Table 1 Nuclear Power Plant Equiped with Process Computer

国名	原子力発電所	電気出力(MW)	炉形式	運 転 開 始	計 算 機 シ ス テ ム		計 算 機 シ ス テ ム 機 能						備 考	
							データロガー	運 転 監 視		自 動 化		その他		
								性能計算	監視	原子炉	タービン			
					計 算 機	構 成	原子炉	タービン他		原子炉	タービン			
日 本	日本原子力発電(株)敦賀	357	BWR	昭45.3	GEPAC-4020	32kW	IC/IU	○	○	○	○			
	関西電力(株)美浜1号	340	PWR	昭45.11	PRODAC-250	20kW	"	○	○	○	○			
	東京電力(株)福島1号	460	BWR	昭46.3	GEPAC-4020	32kW	"	○	○	○	○			
	関西電力(株)美浜2号	500	PWR	昭47.7	PRODAC-250	20kW	"	○	○	○	○			
	東京電力(株)福島2号	784	BWR	(昭48.8)	GEPAC-4020	32kW	"	○	○	○	○			
	中国電力(株)島根1号	460	"	(昭48.11)	HITAC 7250	32kW	"	○	○	○	○		原子炉状態表示	カラーCRT 1台
ア メ リ カ	Shipping Port	60	PWR	西暦年 1957	Daystorm	2kW	IC/IU	○						
	Big Rock Point	70	BWR	1963	GE-312	(44kW)	"	○	○					GE-312: ドラム マシン
	Dresden 2号, 3号	2×809	"	1971	GEPAC-4020	32kW	IC/2U	○	○	○	○			
イ ギ リ ス	Old bury	2×312	GCR	1967	AEI.1040	4kW	IC/2U	○					アラーム解析	CRT 4台
	Wylfa	4×335	"	1969	EELM T.A.C.	4kW	2C/2U	○		○			"	" 20台
	Dungeness B	2×660	AGR	(1973)	ARGUS500	24kW	3C/2U	○	○	○	○	○	"	" 24台
	Hinkley B	"	"	(1973)	E.E.Co. M-21-40	48kW	"	○	○	○	○	○	"	" 16台
Hartlepool & Heyeham	"	"	(1974)	ARGUS500	24kW	"	○	○	○	○	○	"	" 14台	
カ ナ ダ	Duglas Point	200	PHWR	1967	CDC636	8kW	IC/IU	○				○	○	
	Pickering	4×500	"	(1973)	IBMI800	16kW	2C/IU	○				○	○	
	Gentily	250	ATR	1971	SEL810A	16kW	"	○				○	○	

注:()内は、建設中、または建設予定の発電所を示す。

*中国電力株式会社原子力部 **日立製作所大みか工場 ***日立製作所日立工場

表2 計算機システム機能一覧表 計算機システムの目的、機能およびその主要対象項目を示す。

Table 2 Function of Process Computer System

目的	機能	対象項目	BWR標準
高効率運転	炉心性能計算		
	(1) 周期的炉心性能計算	熱的運転限界値, 燃料燃焼度など	○
安全性向上	(2) オン デマンド炉心性能計算	燃料同位元素組成, 目標燃焼度など	○
	制御棒価値ミニマイザ	制御棒引抜き, そう入操作監視	○
運転補佐	原子炉状態表示システム		
	(1) 全炉心分布表示	燃料集合体熱出力, 熱的運転限界値など	
省力化	(2) 炉心軸方向分布表示		
	プラント性能計算		
	(1) ユニット効率	発電端効率	○
	(2) タービン効率	タービン効率, 修正タービン効率	○
運転手順解析	(3) デミネ残余能力	復水デミネ, 廃液デミネ	
	(4) 原子炉圧力容器ボルト寿命		
プラント事故究明	日誌作表		
	(1) プラント運転日誌	定時記録, 日報	○
	(2) 炉心性能記録	定時記録, 日報, 月報	○
	テープ出力		
	(1) 総合機械化データ	発電電力量, 熱的運転限界値など	
	(2) 燃料管理データ	ヒート バランス データ, 燃焼度など	
	記録		
	(1) 制御棒操作記録	制御棒引抜き, そう入操作時の記録	
	(2) プラント起動, 停止記録	原子炉圧力, 炉水温度上昇率, タービン速度など	
	事故解析		
	(1) トリップ シーケンス	中性子束高, 復水器真空度低など	○
	(2) 経過値記録	原子炉圧力, 原子炉水位など	○

2 プロセス計算機の機能

BWRプラントへのプロセス計算機の適用は、アメリカ・G.E.社にて昭和38年にBig Rock Point原子力発電所で初めて試みられ、その後改善、改良され昭和46年Dresden 2号機および3号機でBWRの標準計算機システムが完成された。

島根1号炉の計算機の機能の決定にあたっては、上記BWR用計算機の標準機能のほかに在来火力で備えた機能および原子力として付加すべき機能を調査、検討した。その結果、表2に示すように原子力用として種々のユニークな機能を持つものが完成できた。同表の中で「BWR標準」の欄中の○印が従来のBWR標準機能であり、○印のないのは新しく付加した機能である。以下同表に従い、プロセス計算機の機能につき述べる。

2.1 炉心性能計算

原子炉の運転では、安全上燃料自体の内部溶解および燃料被覆の焼損という2種の運転限界値をきびしく監視する必要があるが、原子炉内部のこれら運転限界値を指示計などの従来計装で精度よく把(は)握するのは困難である。そこで、炉心性能計算で、これら運転限界値をそれぞれ線出力密度比および限界熱流束比としてとらえ、これらが全燃料集合体について許容値内にあるか否かを監視して、安全性を保証された高効率運転を可能ならしめている。また、原子力では火力と異なり、燃料が外部から逐次供給されるのではなく、次の燃料交換までの期間(約1個年)に必要な燃料はすべて最初から原子炉に燃料集合体として装荷されており、制御棒操作および再循環流量制御により徐々に燃焼させる。このため、装荷されている燃料集合体の燃焼度管理が必要となるのである

が、燃焼度の計算は炉心性能計算により自動的に実行し、運転員の負担を軽減する効果を上げている。さらに、炉心性能計算は官庁報告用に必要な燃料集合体のPuなどの同位元素の組成や、燃料の最適燃焼を達成するための目標燃焼度分布と現在の出力分布とのずれなどのデータを計算したり、運転員の要求によって熱的運転限界値などの原子炉運転に必要な炉内各種データを編集印字する機能を持っている。これらの機能は、表3に示すあらかじめ定めた周期で作動する4種の周期プログラムおよび運転員の要求により起動される20種のオンデマンドプログラムにより実行される⁽⁹⁾

なお、周期的炉心性能計算の結果は、炉心性能専用のタイプライタに1時間ごとに定時記録され、24時に日報、月末に月報として作表される。図1は上記定時記録の印字例を示すものである。一方、オンデマンド・炉心性能計算の結果は、大量データの場合は、印字時間の短縮化を図って紙テープパンチャへ、その他の場合はデマンドタイプライタに印字される。さらに、重要な燃焼度関係データは、セキュリティログとして紙テープにパンチされ、データの保存が行なわれている。

2.2 制御棒価値ミニマイザ

制御棒操作は、原子炉の安全性に密接に関連するため、次のような2種の安全対策がとられている。すなわち、高出力時においてはロッドブロックモニタで制御棒操作時に規定値以上の中性子束の増加を検知すると、論理回路で直ちに制御棒の操作を阻止する。

一方、低出力時には制御棒価値ミニマイザで監視を行なっている。これは、安全上および効率的な炉心運用上好ましくない制御棒パターンとなることを未然に防止するために制御

の運転状態などを19インチ、7色のカラーCRTに色別表示や図形表示で表わしている。

CRTの動力炉への適用は、運転情報の集約化という観点から特にイギリスのガス炉において顕著であるが、これに使用されているCRTは白黒であり、また図形表示機能に欠けている。今回のカラーCRTの適用は、世界的にも画期的なものであり、プラント運転状態をわかりやすく、かつ総合的に把握できるように図形表示を大幅に採用してある(2) 図3は今回開発した原子炉状態表示システムの機能を示すもので、以下に各機能につき述べる。

(1) 炉心状態の把握

島根1号炉の炉心は、直径約3m、高さ約3.7mの円筒形をしており、ここに400本の燃料集合体および97本の制御棒が

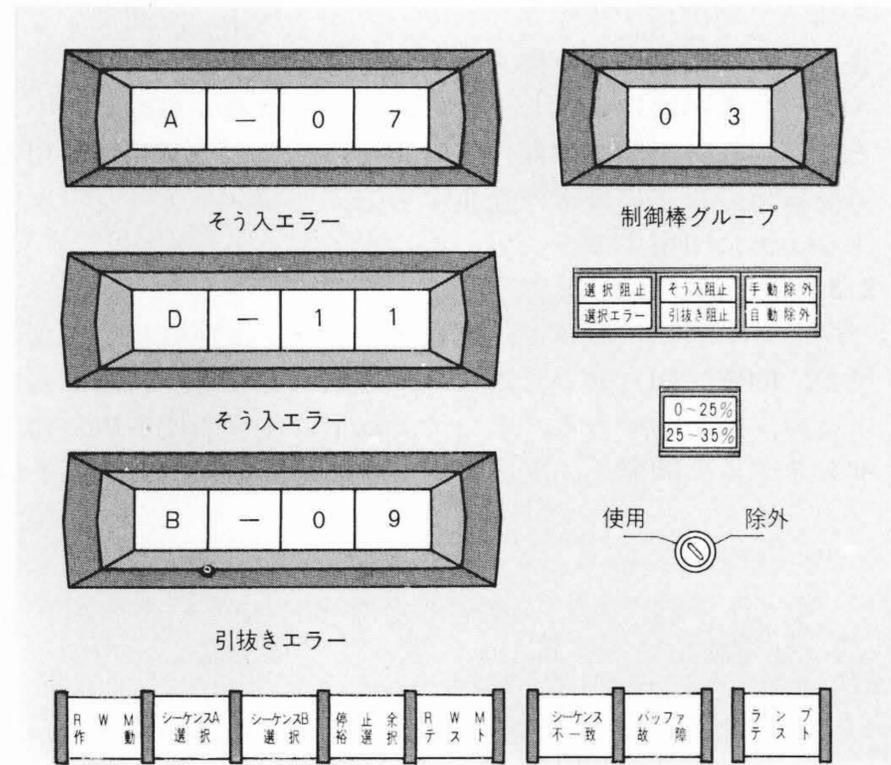


図2 制御棒値ミニマイザ パネル 制御棒A-07、D-11がそう入エラー またB-09が引抜きエラーの場合の表示例である。

Fig. 2 Rod Worth Minimizer Panel

装荷されている。原子炉の運転においてはこれら各燃料集合体をすべて運転限界値内におき、かつその燃焼の最適化を図る必要がある。このため、運転限界値および燃焼度などの全炉心での分布を把握し、分布に異常なひずみがないか、アンバランスがないかなどを確認することが重要となる。また、制御棒操作に先だち、制御棒に隣接した燃料集合体の炉心軸方向の運転限界値分布などを知ることにより、制御棒操作による運転限界値の変化などを推測することができる。そこで前述の炉心性能計算で求められた出力分布、運転限界値などの主要炉心パラメータの炉心全体の分布を把握するため、これをその値に応じて数種の段階に色分けし原子炉パターン状に表示している。また、1個の燃料集合体に着目し、これに関する熱出力、ボイドおよび運転限界値などの炉心パラメータの原子炉軸方向の分布を曲線表示している。図4および図5は、それぞれ最大線出力密度比分布および最小限界熱流束比発生燃料集合体に関する炉心軸方向データ分布の表示例を示すものである。

(2) 制御棒位置の把握

制御棒のそう入状態は、出力、運転限界値などと密接な関係があるため、この全体的把握は特に重要であるが、一般計装では選択した制御棒とこれに隣接する3本の制御棒のわずか4本の制御棒位置を表示するのみである。そこで、全制御棒の位置をそのそう入状態に応じて全そう入、浅そう入、深そう入および全引抜きの4段階に色分け表示した。また、この表示には、操作のため制御棒を選択すると選択された制御棒を赤色のわくで囲み、これを操作すると連動してその制御棒の軸方向位置を更新する機能を持たせ、プラントの起動過程、停止過程で常に全制御棒の状態を把握して制御棒操作が可能ないようにしてある。

(3) 警報発生の予知予防

ロッド・ブロック・モニタのように運転状態に応じて警報値が変化する場合、現在の警報値がいくらであるかを知ることがきわめて困難である。そこで、警報曲線と現在のプラント状態量を同時に表示し、警報値の把握および警報発生の予知、予防の容易化を図った。なお、本表示は10秒ごとに更新される。

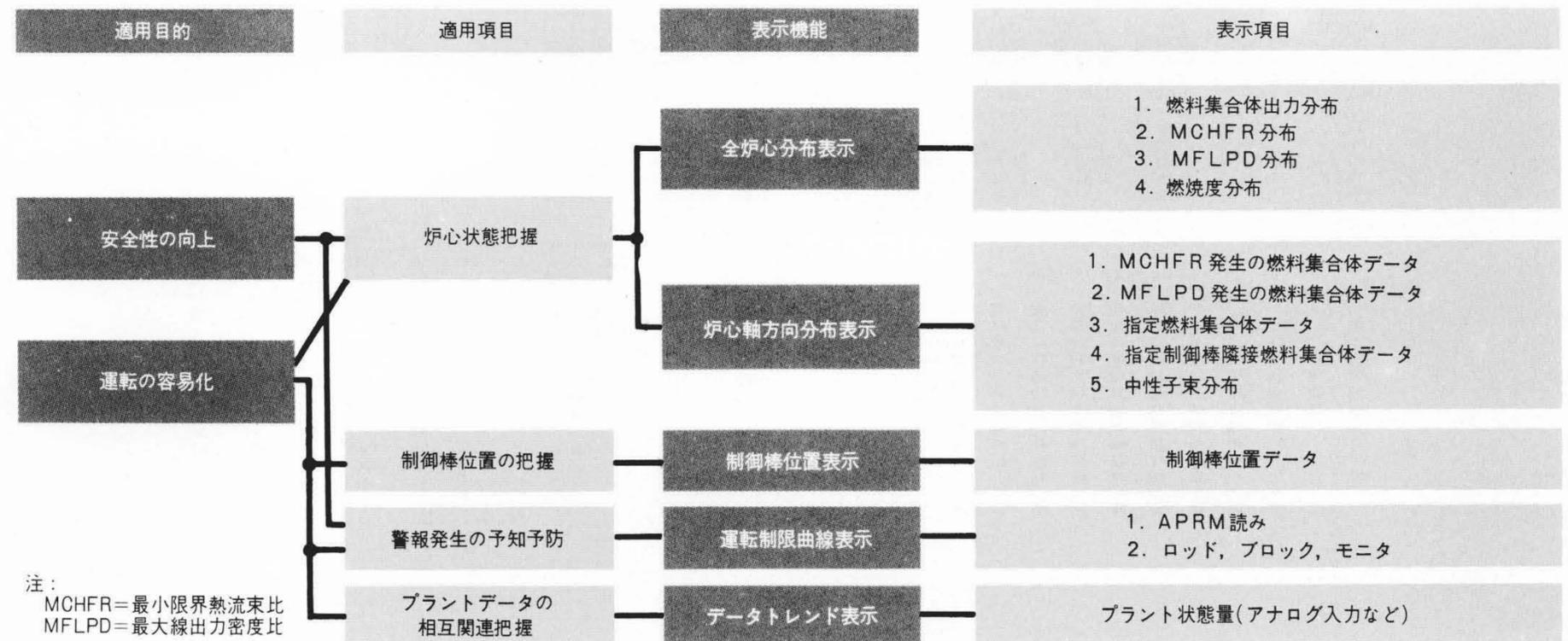


図3 原子炉状態表示システムの機能 原子炉状態表示システムの目的、機能、表示項目を示す。

Fig. 3 Function of Reactor Core Status Display System

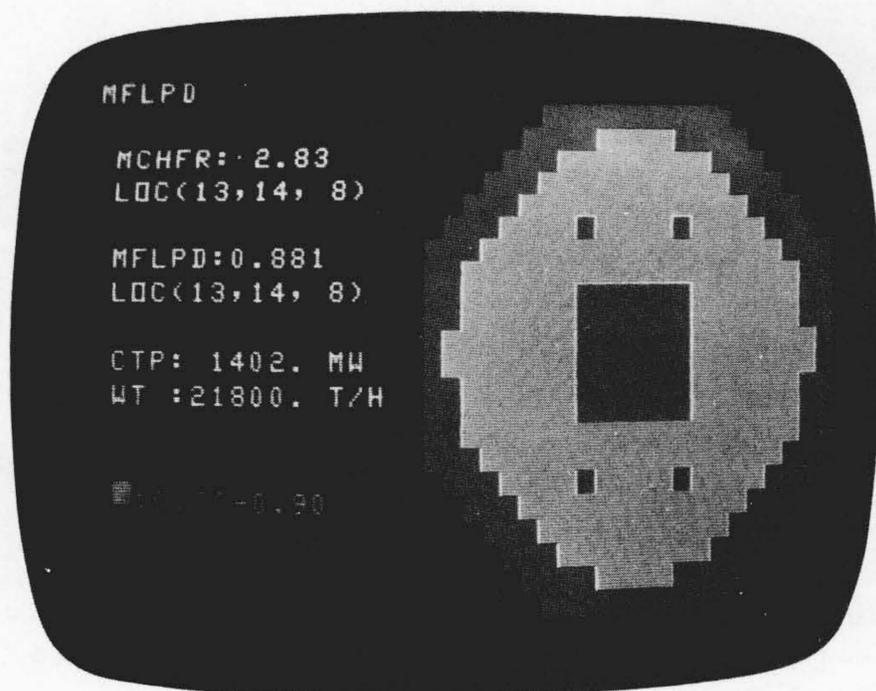


図4 全炉心線出力密度比分布 各燃料集合体の最大線出力密度をきびしい順に赤黄および青に色分け表示した。

Fig. 4 Maximum Fraction of Limited Power Density

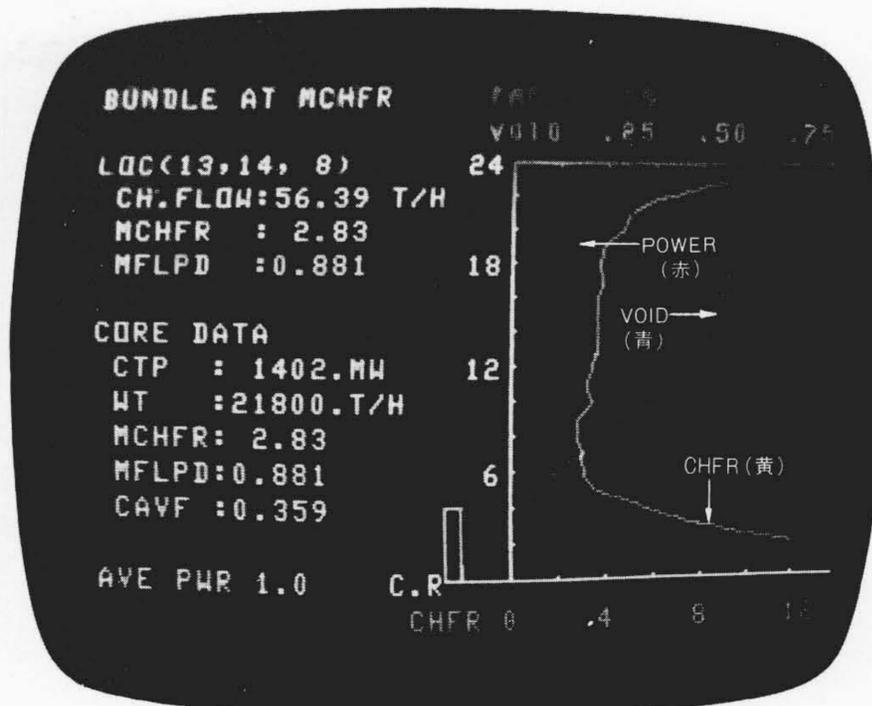


図5 最小限界熱流束比発生燃料集合体軸方向データ分布

最小限界熱流束比の発生した燃料集合体の熱出力(赤), 限界熱流束比(黄), ボイド(青)の軸方向分布を示す。

Fig. 5 Axial Distribution of Fuel Assembly Operational Data

(4) プラント データの相互関連把握

CRTに一種のレコーダ的機能を持たせたものであり、プラント状態量のうち関連する任意の3点までの30分間のデータを曲線表示で1分周期で連続記録する。これにより、データ間の相互関連を容易に把握できる。

2.4 その他の機能

(1) プラント性能計算

ユニット効率、タービン効率などのプラント性能計算の内容は、一般の原子力プラントにおけるものと大差はないが、島根1号炉用としては特に復水デミネおよび廃液デミネの残余能力を計算し、樹脂再生時期の目安としたり、原子炉で熱的疲労を強く受ける原子炉圧力容器のボルトの寿命消費量を積算し、ボルトの破損を予知できるようにした。

(2) 紙テープ出力

プロセス計算機は、中国電力株式会社本店における原子力発電所総合運転管理のため、毎日1回、発電電力量、限界熱流束比などの主要運転データを総合機械化データとして紙テープに出力したり、燃料総合管理のための中性子束の読み、燃料燃焼度などの多量のデータを運転員の要求により紙テープに出力する。この紙テープはそのまま、同本店事務用計算機の入力データとして使用される。

(3) プラント起動停止記録および制御棒操作記録

原子力発電所は、起動および停止の機会が非常に少ないため、プラント起動、停止過程でのプラント状態量の推移データおよびプラント機器類の動作データなどは貴重であり、これらデータの解析により運転手順の改良が期待される。プラント起動停止記録は、上述のデータを自動的に収集するものであり、プラント起動過程および停止過程での給水ポンプ、主しゃ断器などの主要機器の動作、臨界到達、タービン定格速度到達などの重要イベントおよび炉水温度上昇率、タービン速度などのプラント状態量の変化を所定の記録用紙に印字する。また、制御棒はプラント起動、停止過程および通常負荷運転の広い範囲にわたって操作され、かつ操作は原子炉運転上特に重要であるため、制御棒操作履歴を記録している。

(4) プラント事故解析機能

原子力発電所には、特に安全性の観点からプラントトリップ要因が多く、かつまた原子炉からタービン側へ、タービン側から原子炉側というようにトリップ要因が互いに入り組んでいる。したがって、トリップ発生時その一次原因を究明することが非常に重要となってくる。トリップシーケンス記録は、総数80点程度のトリップ接点動作を数ミリ秒程度の順序判別能力で順序記録し、トリップの一次原因究明のためのデータを提供する。また、トリップ発生時は原子炉制御盤上のデジタル表示器にトリップ経過時間を表示し、また一方トリップ発生前後の原子炉圧力、主蒸気圧力などのプラント状態量の変化の経緯を経過値記録として印字する。これによりトリップ発生後の経過時間の把握を可能とするとともにトリップ主原因究明のためのデータを提供する。

3 計算機システムの構成

以上の機能を果たす計算機システムの機器構成は図6に、またその機器仕様は表4に示すとおりである。これら構成機器は、中央操作室および計算機室に分散配置されている。すなわち、計算機本体、紙テープパンチャのようにプラント運転に直接関係ないものは計算機室に配置され、一方、オペレータコンソール、CRTおよびタイプライタのようにプラント運転中に使用する機器は中央操作室に配置されている。以下、プラント運転に密接に関連した中央操作室配置の機器につき述べる。

中央制御盤の中心に位置する原子炉制御盤の左端の直立部にはRWMパネルを組み込み、さらにその上には3組のデジタル表示器を取り付け、運転員の制御棒操作の監視および原子炉水位、炉心流量などのプラント状態量の連続表示を可能としている。また、原子炉制御盤の前方に盤と向かい合わせにCRT、オペレータコンソール、デマンドタイプライタおよび警報タイプライタの4台を1列に配置し、CRTの制御棒位置表示による全制御棒位置を把握しての制御棒操作を可能とするなどこれら機器をプラント運転操作に利用しやすいよ

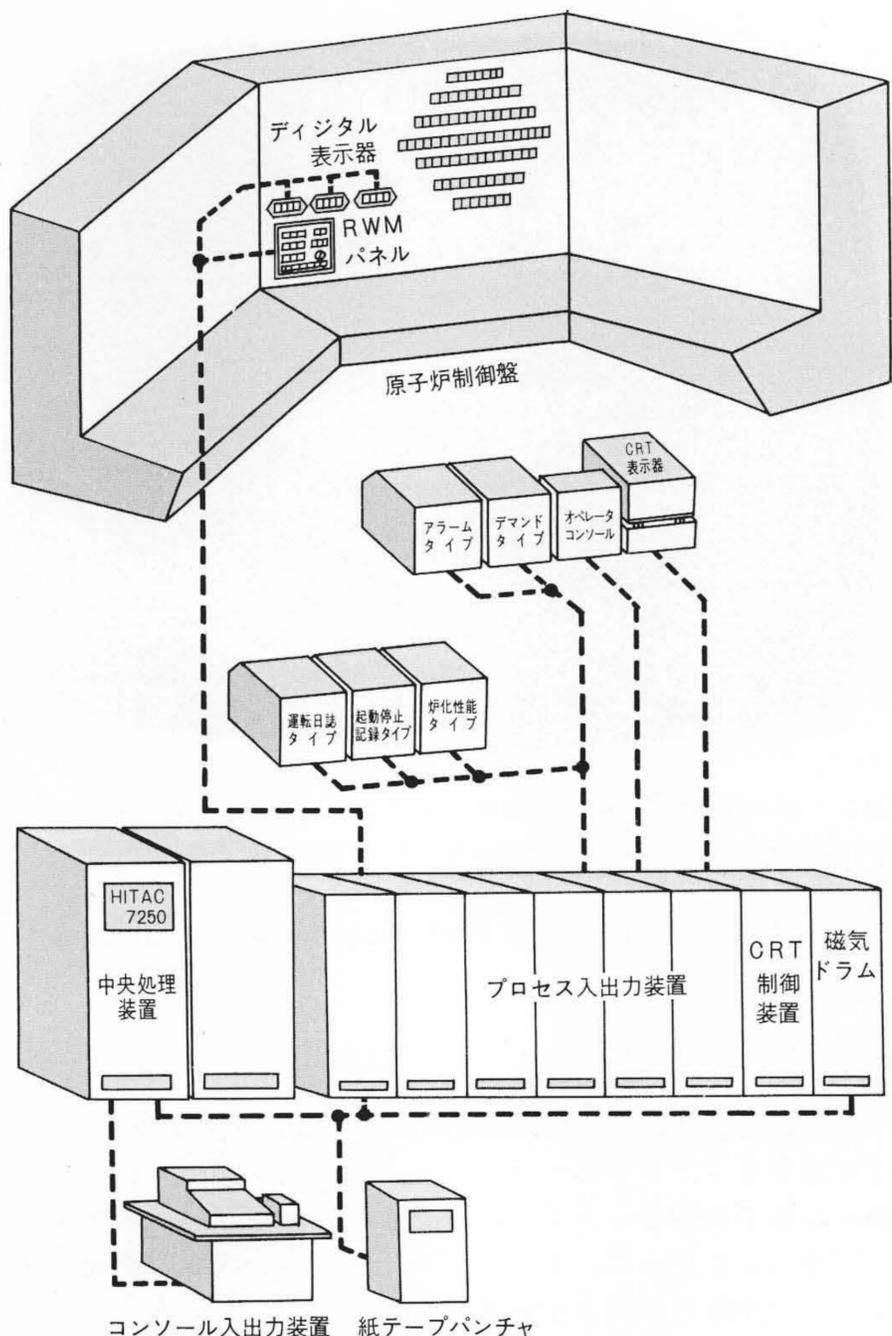


図6 計算機システム構成 中央操作室の原子炉制御盤に向かい合わせにオペレータコンソール類を、また中央制御盤の一隅(ぐう)に運転日誌タイプライタ類を配置した。また計算機本体関係機器は専用の計算機室に置いた。

Fig. 6 Configuration of Process Computer System

うにしている。また、プラント運転操作とは直接関係しない運転日誌タイプライタ、起動停止記録タイプライタおよび炉心性能タイプライタを中央操作室の端部に1列に並べている。

図7は運転員と計算機のマンマシンコミュニケーションの中心であるオペレータコンソール類を示すものである。

4 結 言

中国電力株式会社島根原子力発電所1号機用の計算機システムの機能および構成を中心にその概要を述べた。開発した本システムの特徴は、下記のとおりである。

- (1) 国産計算機による初の原子力発電所計算機システムである。
- (2) 世界に先がけ原子力発電所へのカラーCRTの導入を図り、画期的マンマシンコミュニケーション方式を開発した。

今後、原子力計算機制御は負荷追従運転、プラントの起動、停止の自動化およびCRTの大幅な採用による中央制御盤の合理化の方向を指向するものと考えられる。⁽³⁾ われわれは、本システムの開発によって得られた経験および火力発電所での自動化の実績を基盤とし、この要請にこたえるよういっそうの努力を払う所存である。



図7 オペレータコンソール類 CRTビューア、オペレータコンソールおよびタイプライタの列盤正面図を示す。後方には日誌タイプライタが見える。

Fig. 7 Operatore Console CRT Viewer and Typewriters

表4 計算機システム機器仕様 計算機システム構成機器およびその仕様を示す。

Table 4 Specification of Process Computer System

No.	機 器	仕 様
1	中央処理装置	HITAC 7250 コアメモリ：32k語
2	外部記憶装置	磁気ドラム 5!2k語
3	コンソール入出力装置	入出力タイプライタ 光電式紙テープ読取機
4	プロセス入出力装置	アナログ入力 263点 デジタル入力 223 " パルス入力 13 " 割込入力 87 " デジタル出力 約50 " (点数はプラント使用のみ)
5	タイプライタ	デマンド用 1台 警報用 " 運転日誌用 " 炉心性能用 " 起動停止記録用 "
6	紙テープパンチ	一式
7	オペレータコンソール	一式
8	RWMパネル	一式
9	デジタル表示器	5けた、4組(うち1組はオペレータコンソールは組込み)
10	CRT装置	19インチカラー7色一式

参考文献

- (1) 中村ほか、「BWR炉心性能計算シミュレーション」、日立評論、53、1103(昭46-11)
- (2) 中田、「カラーディスプレイの原子力運転監視への適用」、火力発電、24、115(昭48-2)
- (3) B.R.Welch, "Technical Survey No. 10 Computer Applications in Power Plant Control", Nuclear Engineering International, 25 (Jan, 1973)