

BWR プラントの炉心性能計算シミュレーション

Simulation of BWR Core Performance Calculation

中村 日出雄*
Hideo Nakamura

飯田 宏**
Hiroshi Iida

宮垣 久典***
Hisanori Miyagaki

稲葉 剛三*
Gohzoh Inaba

杉山 栄****
Sakae Sugiyama

要 旨

沸騰水形原子力発電所におけるプロセス計算機の機能は主としてオンラインで炉心性能を把握(はあく)することである。制御用計算機 HITAC 7250 による BWR プラント用プロセス計算機システムの早期確立を図るため、原子炉プラントシミュレータと組合せた実時間試験(オンライン・シミュレーション)と、HITAC 5020 による炉心性能計算プログラムの検討評価(オフライン・シミュレーション)とを行なった。本文ではこれらのシミュレーションの内容および検討結果について述べる。

1. 緒 言

沸騰水形原子力発電所におけるプロセス計算機の利用は、アメリカの Big Rock Point 発電所以来多数のプラントにおいて行なわれ、国内でも日本原子力発電株式会社の敦賀炉、東京電力株式会社の福島1号炉において、GE 社製プロセス計算機 GE/PAC 4020 によるオンライン性能計算システムがすでに稼働している。

日立製作所においても、デジタル計算機 HITAC 7250 による BWR プラント用プロセス計算機システムの早期確立を図るため、1968 年より各種のシミュレーション試験を行ない、成果をあげることができた。

シミュレーションとしては、オフライン計算機 HITAC 5020 による炉心性能計算プログラムの検討評価(オフライン・シミュレーション)とオンライン計算機 HITAC 7250 と原子炉プラントを模擬するアナログ計算機との組合せによる実時間試験(オンライン・シミュレーション)とを行ない、実プラントで採用できる計算機システムを確立することができた。

2. 炉心性能計算プログラム概要

沸騰水形原子力プラントの炉心性能計算プログラムは表1に示すように所定の周期で自動的に起動される周期プログラムと、運転員の要求に応じて随時起動されるオンデマンド・プログラムの2種類がある。以下、周期プログラムおよびオンデマンド・プログラムについて説明する。

2.1 周期プログラム

炉心性能計算プログラムは以下で述べるもので構成されている。
P1 プログラム：1時間に一度の割合で計算され、計算の順序と内容は次のとおりである。

<P1-1>

- (1) 制御棒位置、インコアモニタ(LPRM)信号、プラントデータを読み込み、あらかじめ採取されている炉内走行形モニタ(TIP)データをベースとし、出力分布の計算を始める。
- (2) プラントデータを用いて熱の収支より炉心熱出力を計算する。
- (3) 中性子照射による LPRM の感度低下の補正計算を行なう。
- (4) LPRM 信号から軸方向出力分布(実効的読み)を計算し、さ

* 日立製作所日立工場

** 日立製作所大みか工場

*** 日立製作所原子力研究所

**** 日立製作所日立研究所

表1 炉心性能計算プログラム

分類	名称	各 計 算 内 容
周 期 プ ロ グ ラ ム	P 1	周期的炉心性能評価
	P 2	日ごとの炉心性能総括
	P 3	月ごとの炉心性能総括
	P 4	10 分間のエネルギー積算
オ ン デ マ ン ド ・ プ ロ グ ラ ム	OD 1	全炉心 LPRM の較正および BASE 分布
	OD 2	指定 LPRM の代用値および BASE 分布
	OD 3	炉心熱出力計算および APRM 較正
	OD 4	指定制御棒付近熱の限界値概略計算
	OD 5	炉心熱的限界値概略計算
	OD 6	指定燃料集合体熱的データ
	OD 7	制御棒現在位置
	OD 8	LPRM 現在値
	OD 9	軸方向内挿(そう)データ
	OD10	指定データ印字
	OD11	炉心解析データ記録
	OD12	燃料同位元素組成
	OD13	LPRM 感 度
	OD14	制御棒位置代用値
	OD15	計算機停止および再起動時モニタ
	OD16	目標燃焼度分布および出力分布
	OD17	周期的炉心性能計算記録
	OD18	LPRM 警報トリップ設定値再計算
	OD19	LPRM 高速走査制御
	OD20	燃料交換時更新データの監視

- らに炉の対称性を利用して半径方向に内外挿(そう)する。
- (5) P1-2で行なわれる繰り返し計算のためのチャンネル流量、燃料セグメント出力など初期値の計算を行なう。
- <P1-2>
- (6) 全チャンネルを特長づける4個の特性、(i)クラッド係数、(ii)オリフィス、(iii)出力分布形、(iv)出力レベルの組合せで構成される代表チャンネルについて炉心圧力損失が一樣になるようにチャンネル内流量分布およびボイド分布を求める。
- (7) 燃料燃焼度制御棒位置およびボイド体積率を考慮し、実効的読みからセグメントごとの出力を計算する。
- (8) 上記(6)と(7)を収束するまで繰り返し計算をする。
- <P1-3>
- (9) 最小限界熱流束比(MCHFR)や最大線出力密度比(MFLPD)など運転限界値の計算を行なう。
- (10) 計算結果を理解しやすい形に整理編集する。
- P2 プログラム： P1で得られる結果を日誌にまとめる。
- P3 プログラム： P1やP2で計算されるものを月報にまとめる。
- P4 プログラム： 10分間隔で熱および電気出力の積算を行なう。

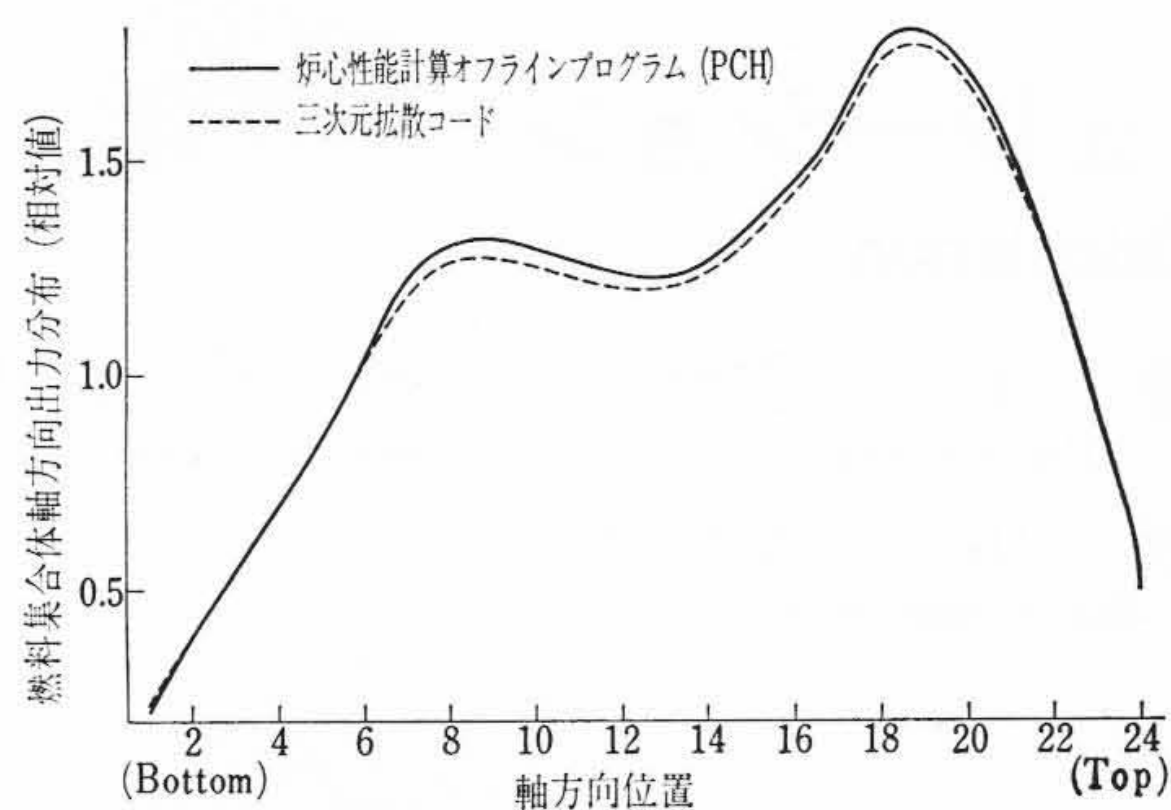


図1 MCHFRを生じた燃料集合体における軸方向出力分布の比較

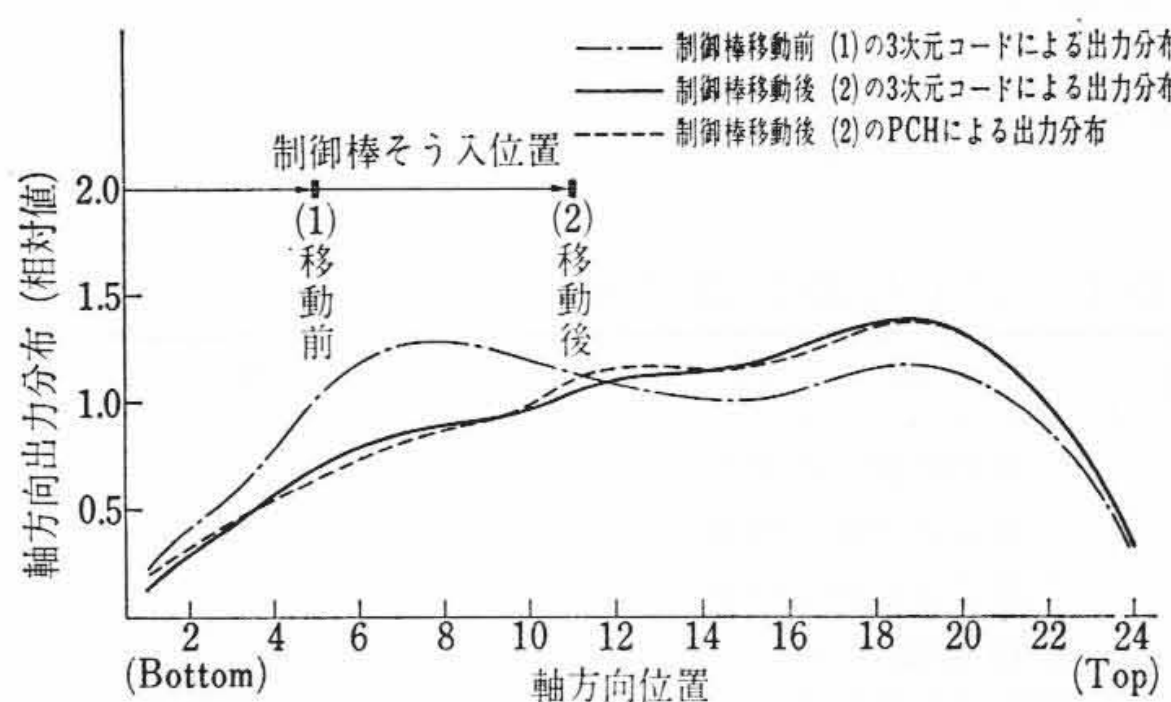


図2 制御棒を動かしたときの3次元拡散コードとPCHで計算した軸方向出力分布との比較

2.2 オンデマンド・プログラム

オンデマンド・プログラムは前述の周期プログラムの機能を補うものであり、原則としてオペレータ・コンソールからの運転員の要求(デマンド)によりその処理を開始する、これらの機能を表1にまとめた。

3. オフライン・シミュレーション

次章以下に述べるオンライン・シミュレーションに先だち、科学技術計算用計算機 HITAC 5020 用にオフラインの炉心性能計算プログラム(コード名 PCH)を作り、性能計算の諸特性を検討した。この場合炉心模擬信号として三次元拡散コードによる計算結果を使用した。三次元拡散コードによるTIPおよびLPRMの読みを制御棒位置データおよびヒートバランスデータとともにPCHの入力として総合的な特性評価を行なった。三次元拡散コードによる計算結果とPCHの計算結果を比較した例は次に示すとおりである。

図1はMCHFRの生じた燃料集合体について軸方向出力分布を比較したものである。

またBWRプロセス計算機では、TIPを用いてLPRMの校正を行なったのち、数週間は制御棒の位置が変わっても、そのときに採取したTIPデータと現時点でのLPRMの読みをもとに出力分布を計算しているが、TIP走査後に制御棒を動かした場合のPCHによる軸方向出力分布計算値と三次元コードによる出力分布計算値の比較は図2に示すとおりである。いずれも三次元コードとPCHによる計算値がたいへんよい一致を示し、性能計算プログラムの計算法がじゅうぶんよい精度であることがわかる。

このほか収束回数のチェックなど炉心性能計算プログラムの妥当性について種々の検証を行ない、正確なオフラインの性能計算プログラムを確立することができた。

このオフライン・プログラムの確立による意義をまとめると次のようになる。

(1) 炉心性能計算法の評価: PCHは先行炉のデータをオフ

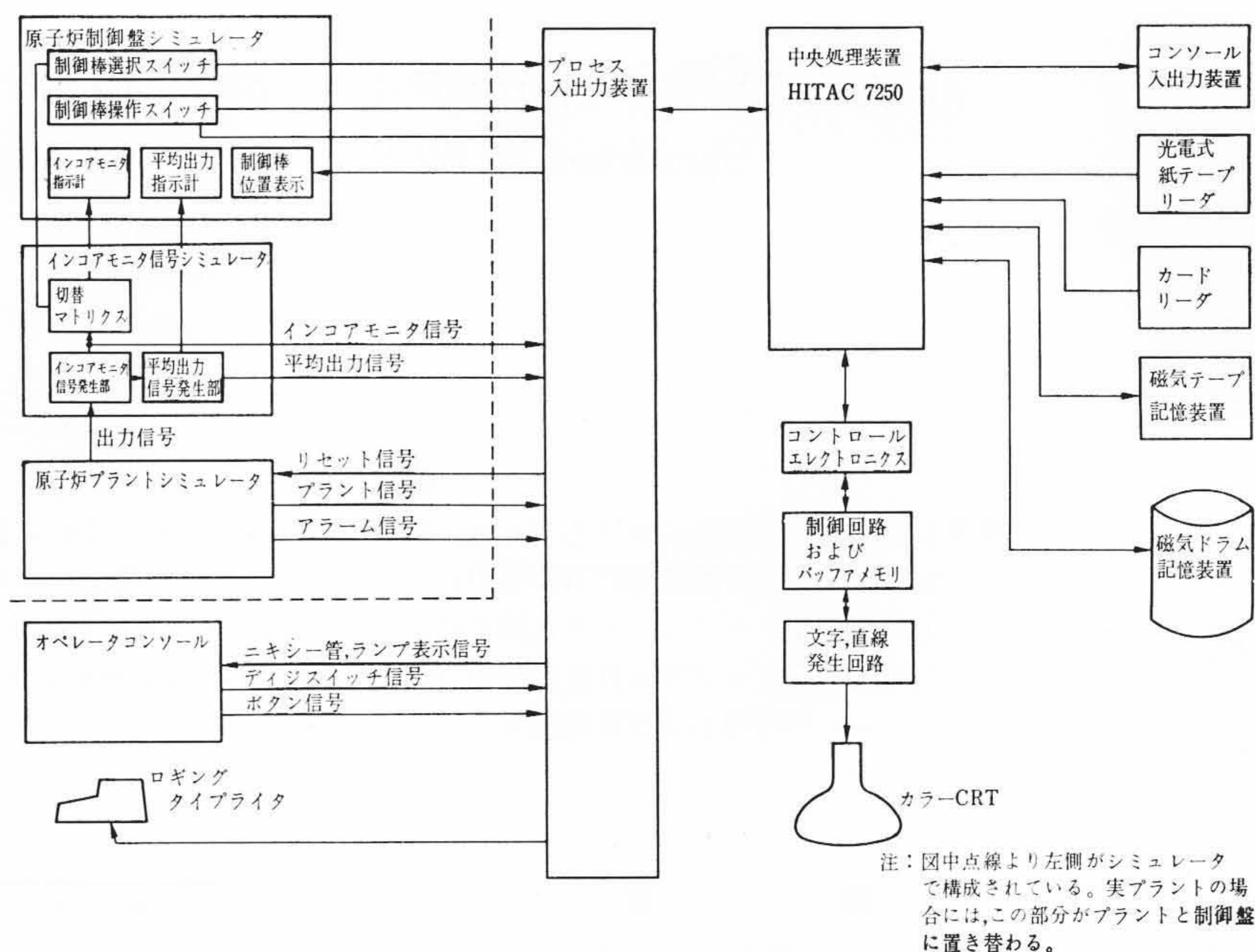


図3 シミュレーション装置構成図

ラインで入力することにより、計算法の評価ができるのみならず、三次元拡散プログラムを原子炉として模擬し、その計算結果をPCHの入力として原子炉の種々の特性解析を行なうことができる。

(2) 炉心性能計算入力定数の検討: HITAC 7250に記憶されるプログラムの入力定数に対してあらかじめPCHにより総合的にじゅうぶん検討することができる。

(3) HITAC 7250用オンライン・プログラムのチェック: 上述のようにPCHは完全なプログラムであることが確認されているので、これを基準としてHITAC 7250用プログラムのデバックを行なうことができる。

(4) HITAC 7250のバックアップ: 原子力発電所からのプラント運転データをPCHに入力することにより、HITAC 7250の故障時のバックアップを行なうことができる。

4. オンライン・シミュレータの構成

4.1 ハードウェア

オンライン・シミュレーション装置の構成は図3に示すとおりである。図において点線より左側の部分が発電プラントのシミュレータで、右側がプロセス計算機およびその周辺装置である。

これら二つの部分を構成する装置の機能を以下説明する。

4.1.1 プラントのシミュレータ

原子炉プラントシミュレータ、インコアモニタ(LPRM)信号シミュレータ、原子炉制御盤シミュレータの三つの装置で構成されており、性能計算に必要な入力信号を提供するものである。次にこれらの装置の構成と機能について説明する。

(1) 原子炉プラントシミュレータ

BWRプラントの動特性モデルはアナログ計算機によってシミュレートされているが、この規模は積分器30台、加算器77台程度のものである。核特性には一点近似を用い炉心内出力分布は一定でその大きさのみが変わるものとした。

(2) インコアモニタ(LPRM)信号シミュレータ

インコアモニタと同じ数88個のポテンショメータを使用して電圧値によりその点の出力値を模擬したものである。このシミュレータからは、このほかインコアモニタの信号を平均した6点の

平均出力モニタ (APRM) 信号が計算機に取り込まれている。それぞれの走査同期は, LPRM について通常は 60 秒で, 制御棒の引抜き操作時または出力上昇時には 5 秒であり, APRM については 60 秒である。

(3) 原子炉制御盤シミュレータ

本装置は制御棒の座標選択スイッチ, 駆動操作スイッチ, 制御棒位置デジタル表示器, LPRM 指示計および APRM 指示計より構成した。

4.1.2 プロセス計算機および周辺装置

プラントのシミュレータからの信号をもとにして性能計算などのデータ処理を実行するデジタル計算機 HITAC 7250, データの入出力制御をするプロセス入出力装置および計算機と人間とのコミュニケーションをはかる周辺装置などで構成されている。以下にこれらの機能と仕様について説明する。

(1) デジタル計算機

本性能計算では大容量多数個のプログラムによる計算をできるだけ短時間で精度よく実行することが要求されている。これを実現するためには, 計算機的能力として, 演算の高速性, 内部記憶装置の高速アクセス, 大容量補助記憶装置, 多重レベルの優先割込み機能, 所定の精度を得るに必要な語長などが備わっていることが必要である。このような観点から制御用デジタル計算機 HITAC 7250 を採用した。これはシリコン集積回路よりなる並列マイクロプログラム方式の計算機であり, 内部記憶装置としてサイクルタイム $2\mu\text{s}$ の磁気コア 32k 語, 外部補助記憶装置としてアクセスタイム 10 ms の磁気ドラム 384k 語を使用した。

(2) プロセス入出力装置

プロセス入出力装置は, 検出器信号やオペレータコンソールからの信号などの入力情報を計算機に送る装置と計算機からの情報をデータタイプライタやデジタル表示器に送る装置より成る。ここではアナログ入力 102 点, デジタル入力 104 点, デジタル出力 40 点の規模のものを使用している。

(3) 周辺装置

(a) オペレータコンソール

オペレータコンソールはオペレータが計算機に実行させるべき処理項目を指定し, 計算機に指令を発するための装置である。すなわち, 処理項目をディジススイッチで記号または数字によって設定し, 押しボタンを押せば指定された機能が実行される。そのおもな機能を次に掲げる。

- (i) オンデマンド・プログラムの起動
- (ii) 指定した入力値またはその上下限値のデジタル表示または印字指令の発生
- (iii) 計算機へのデータの手動設定
- (iv) 走査入力点の削除または復帰

(b) コンソール入出力装置

本装置はプログラムの起動, 停止などの制御を行なう装置である。なお, 磁気テープ装置, 紙テープリーダー, カードリーダーからプログラムまたはデータの読み込み制御, 磁気テープへのプログラムまたはデータの書き込み制御にも使用される。また, プログラムの動作異常時にはメッセージを印字する。

(c) ロギングタイプライタ

ロギングタイプライタは性能計算の結果, オペレータコンソールから指定した入力点データ, アラームメッセージなどを印字する。

(d) CRT カラーディスプレイ

ディスプレイは性能計算の結果を文字または図形で表示する装置である。原子力プラント炉心性能計算用としては標準的なものではないが, シミュレーション用に特に設けた。本装置は, 19 インチのカラーブラウン管, 文字直線発生回路, 制御回路, バッファメモリ (4k 語磁気コア), コントロールエレクトロニクスで構成されており, 計算機からバッファメモリに送られた情報を, 制御回路で翻訳し, 文字直線発生回路によって表示する。色は 7 色で分解能は 512×512 である。

4.2 ソフトウェア

本シミュレーションのプログラムは, 図 4 に示すようにプロセス・モニタ, サブ・モニタ, プログラムに大別される。プロセス・モニタは, 炉心性能計算プログラム統括, データ処理プログラム統括の二つのサブ・モニタを介して多数個のプログラムを優先順位に従って多重処理する。周期プログラムは, サブ・モニタの炉心性能計算プログラム統括によって, 所定の周期に従って起動をかけられる。一方, 性能計算プログラムに入力走査データを提供する入力取込み処理プログラムはサブ・モニタのデータ処理プログラム統括によって周期的に起動され, 入力点を走査し, データを工学単位へ変換している。オンデマンド・プログラムは, オペレータ・コンソールからの操作信号を処理するオペレータ・コンソール受け付け処理プログラムによって起動され, 周期プログラムの計算結果または入力取込み処理プログラムによって, 工学単位に変換された入力データを使用して, 計算を実行する。そして, 性能計算の結果および入力点の印字処理はすべてタイプアウト・プログラムで処理される。

5. オンライン・シミュレーション実験

中国電力株式会社島根 1 号炉をモデルとして, 前述したシミュレータの構成のもとでシミュレーション実験を実施した。計算方式および精度については, 実験に先だってオフラインで個々のプログラムについて検討を終え, オフライン・シミュレーション実験では実時間における (1) 各プログラムの応答動作 (2) プログラム間のデータの授受の方式 (3) プログラムの演算所要時間および (4) プラントからのデータ取込み処理について検討することを目的とした。

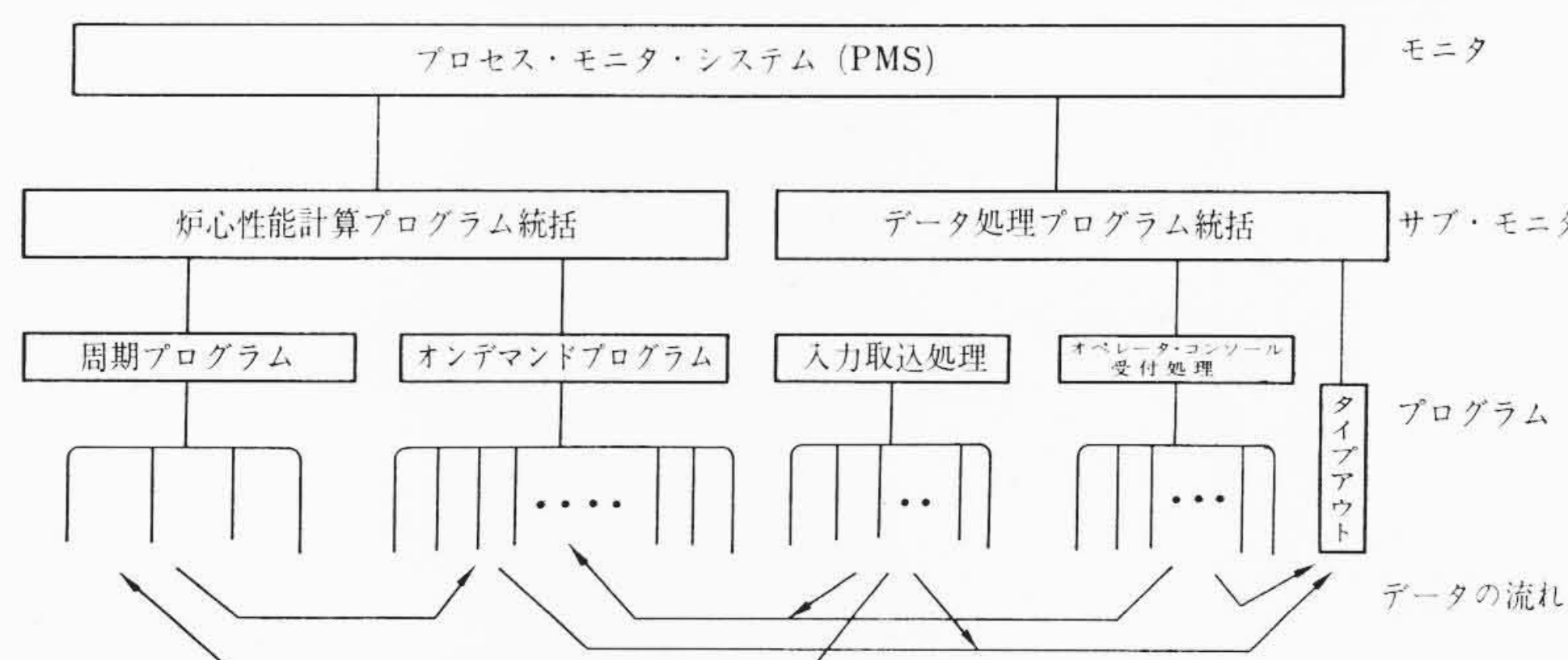


図4 シミュレータソフトウェアシステム構成

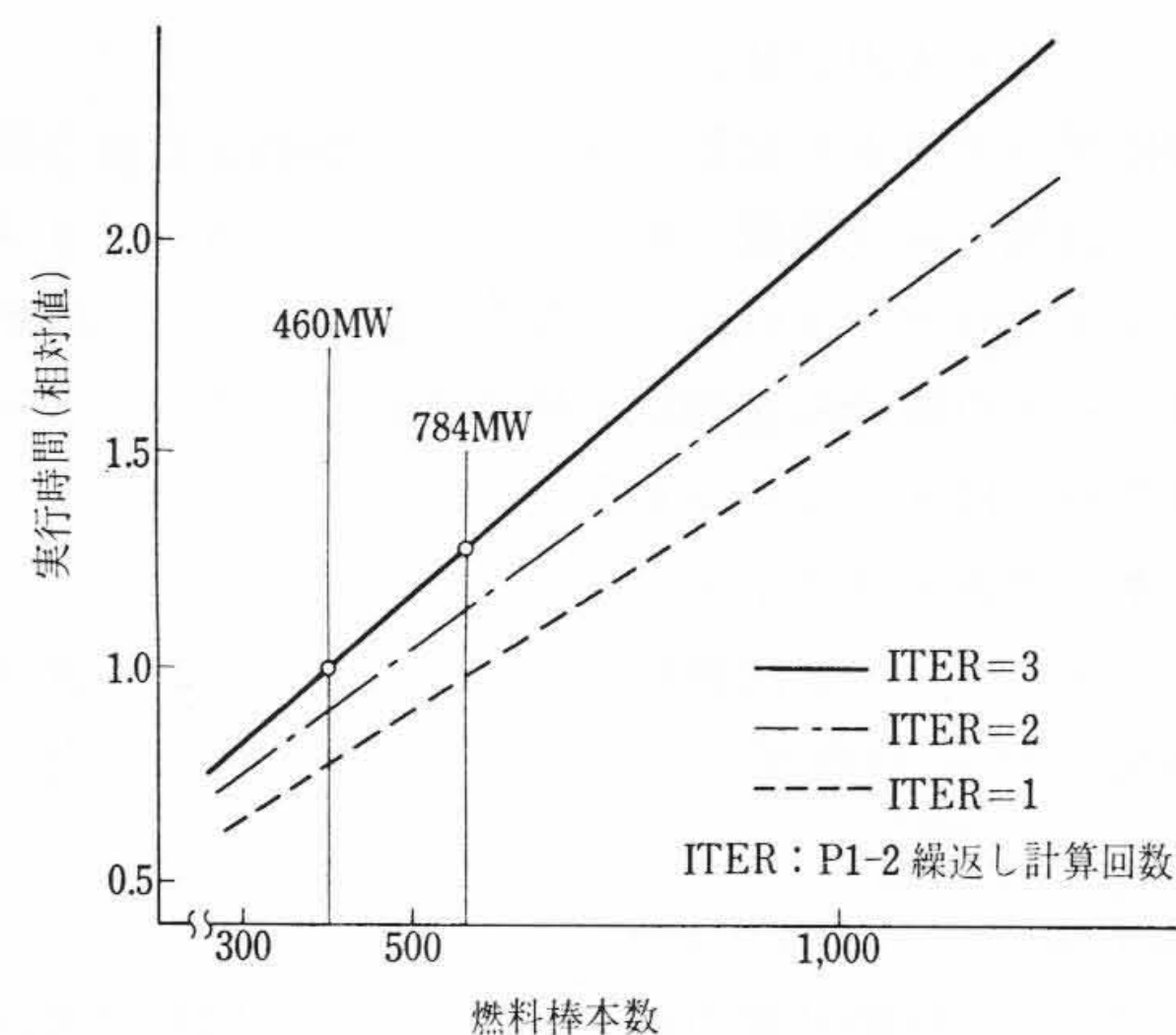


図5 周期的プログラム P1 の実行時間対燃料棒本数の関係

5.1 実験条件

原子炉プラント・シミュレータを、定格出力運転状態にしており、インコアモニタ信号シミュレータのポテンショメータをあらかじめ三次元拡散計算プログラムによって計算された出力分布を与えるように設定した。

次に、入力走査データとしては、プラントデータ信号、LPRM信号、APRM信号のほかに、実プラントの場合に予想される性能計算の入力データ以外のものもダミー信号として加え、中央処理装置の入力走査による負荷状況を実際の場合と等価にした。ダミー入力を含めた走査入力点は205点で平均走査点数は、13.6点/秒である。

5.2 実験および結果の検討

周期プログラムについては、P1～P4が、統括プログラムによって定期的に起動され、そのおのおのの結果が、ロギングタイプライタに自動的に印字されることを確認した。これと同時に、演算所要時間を測定し、実用上満足すべき値を得た。

さらに種々の規模の発電所に適用する場合の演算所要時間についても検討を行なった。結果は図5に示すとおりである。

次にオンデマンド・プログラムについては、種々のリクエストをオペレータ・コンソールより発し、リクエストされたプログラムが迅速に応答し、その結果がロギングタイプライタまたはCRTカラーディスプレイにアウトプットされることを確認した。また、プラントトリップ、制御棒引抜き操作などの外部の状況変化に対して、自動的に起動されるものについては、プラントシミュレータまたは原子炉制御盤シミュレータの模擬信号によって動作させ、その機能を確認した。図6、7は、CRT表示の例である。図6は、24個の燃料セグメントの出力、ボイド率、制御棒挿入度の分布を、図7は限界熱流束比、線出力密度比を燃料セグメントの度数分布として表示したものである。

以上の検討の結果、本性能計算システムはじゅうぶん実用炉に適用できるとの結論に達した。今後の改良点としては、CRTディス

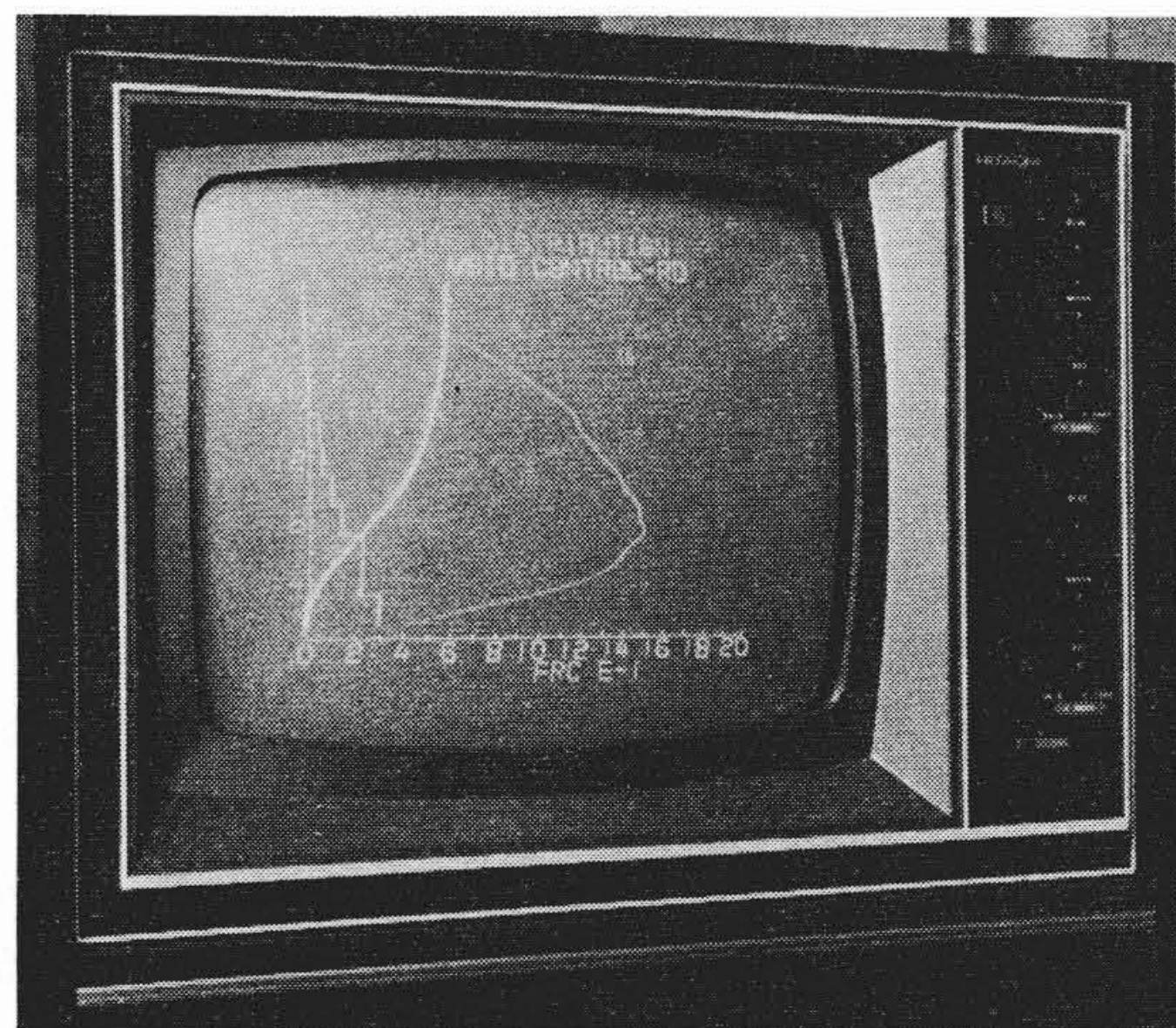


図6 CRT カラーディスプレイによる表示例(1)

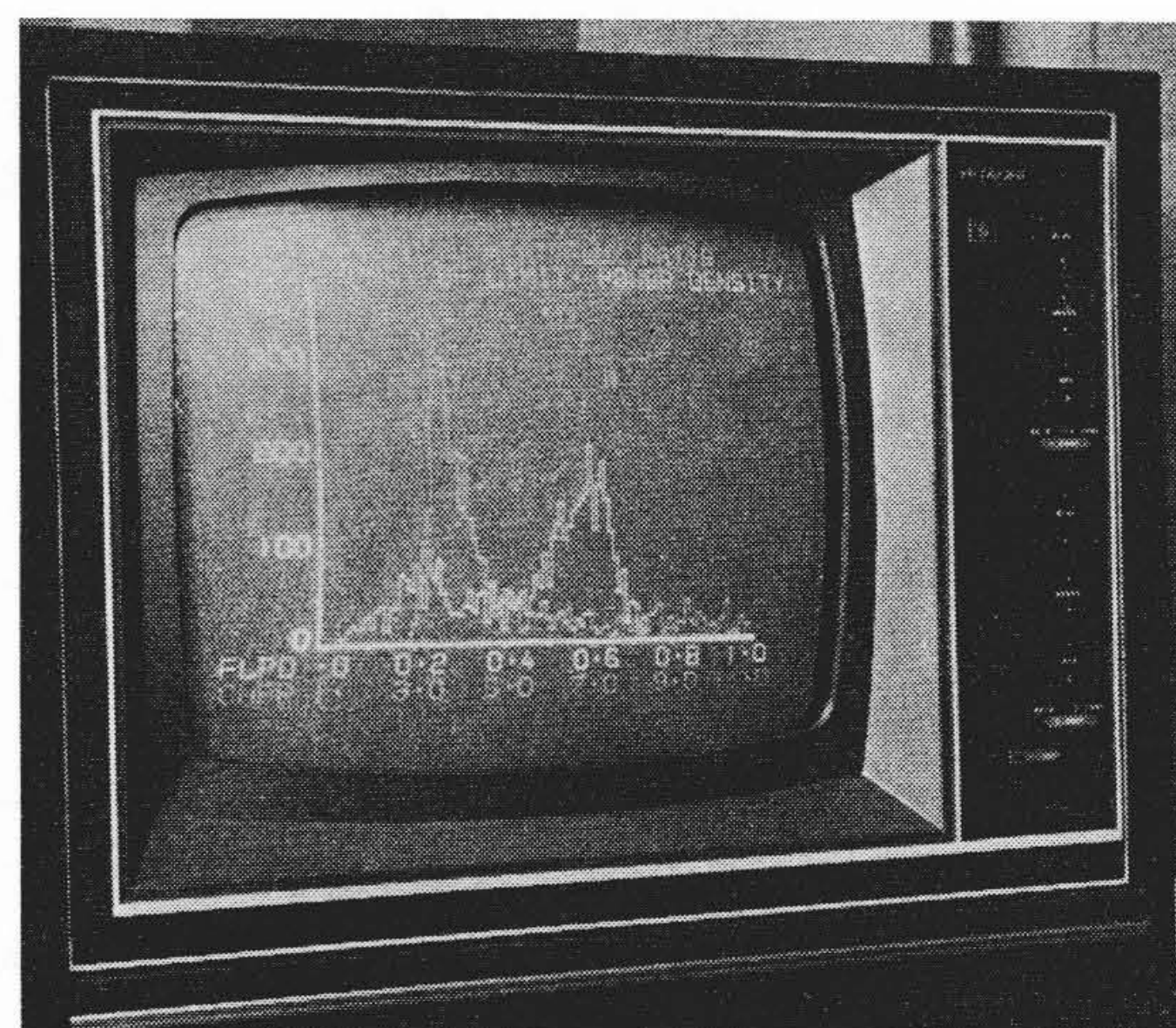


図7 CRT カラーディスプレイによる表示例(2)

プレイの積極的活用、オペレータガイダンス機能の拡充などが考えられる。

7. 結 言

以上述べたシミュレーション試験などにより、HITAC 7250による沸騰水形原子力発電所用プロセス計算機システムが完成し、中国電力株式会社の島根1号炉に国産初の計算機システムとして納入することとなった。同炉においては標準のシステムのほかにカラーCRTによるグラフィック・ディスプレイも採用され、運転員の有用な道具となることが期待されている。

終わりに終始ご指導をいただいた中国電力株式会社の関係者各位に厚く感謝の意を表する。