

高速増殖炉原型炉「もんじゅ」中央監視制御システム

Central Control and Instrumentation System for Prototype Fast Breeder Reactor "MONJU"

高速増殖炉原型炉「もんじゅ」の中央監視制御システムは、高速増殖炉に特有の計装制御技術とともに、計算機技術を積極的に活用したプラント情報の集約化、運転操作ガイダンス機能などを採用し、運転信頼性の向上を図っている。

ここでは、マンマシンインタフェースの中核となる中央監視盤とプラント情報の処理・監視、性能計算などを実行する中央計算機システムを中心に、高信頼化技術、人間工学的検討、高速増殖炉特有技術などについて設計の概要を紹介する。

- 大内一利* Kazutoshi Oouchi
- 山岡耕一** Kōichi Yamaoka
- 渡辺孝雄*** Takao Watanabe
- 金戸邦和*** Kunikazu Kaneto
- 前良典**** Yoshinori Mae
- 宮崎洋一**** Yōichi Miyazaki

1 緒言

高速増殖炉原型炉「もんじゅ」(以下、「もんじゅ」と略す。)は、電気出力約280MWのループ型高速増殖炉プラントであり、日立製作所を含む原子力4グループが協力して設計を進めている。

「もんじゅ」は、冷却材にNa(ナトリウム)を使用するため、軽水炉などに比較し特有の計装制御技術を必要とするほか、原子炉からタービン側へ熱輸送する一次冷却系、二次冷却系とも3ループから構成されるため、運転操作項目及び監視すべき情報量が多く、また全体としてバランスのとれた運転が必要である。

そこで、「もんじゅ」中央監視制御システムは、計算機技術

を積極的に活用し情報の集約化と運転進行管理を集中して行なえる中央監視盤を設けるとともに、中央制御盤及び各種制御装置とも有機的に運用できるようにして、運転員の負担軽減と運転信頼性の向上を図っている。

本稿では、中央監視盤と中央計算機を中心に「もんじゅ」中央監視制御システムの構成、機能とともに、その中で特徴的な技術について概要を述べる。

2 中央監視制御システムの構成と機能

「もんじゅ」中央監視制御システムは、中央監視盤、中央制御盤、中央補助盤、中央計算機及び関連計装制御装置から構

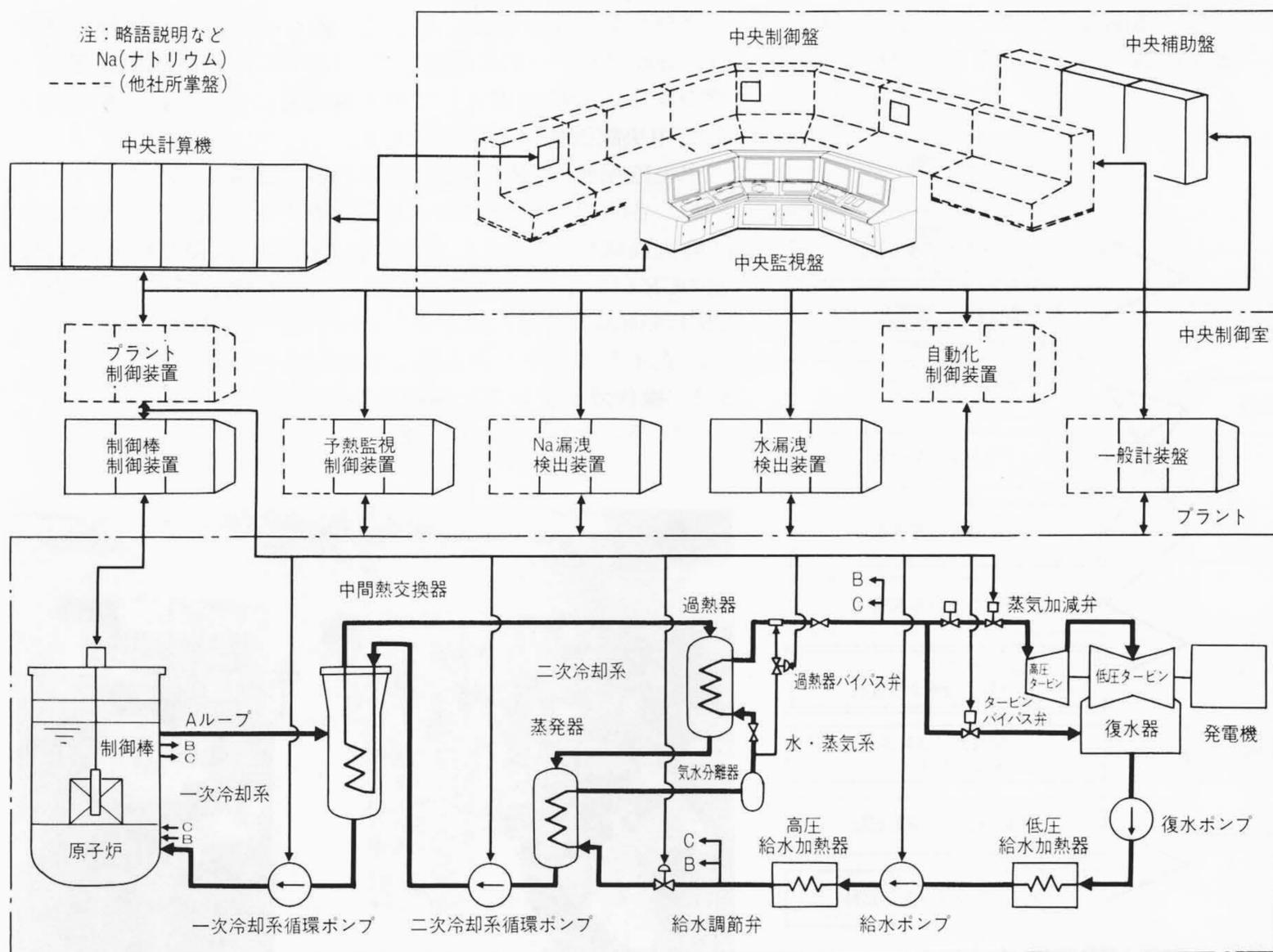


図1 「もんじゅ」中央監視制御システムの構成概念図
計算機技術を積極的に活用し、プラント統括監視と運転進行管理を集中して行なえる中央監視盤を設けるとともに、高速増殖炉特有の計装制御技術を開発、採用して運転信頼性、安全性の向上を図っている。

* 動力炉・核燃料開発事業団動力炉建設運転本部電気課 ** 日本原子力発電株式会社高速炉建設部高速炉電気課 *** 日立製作所日立工場 **** 日立製作所大みか工場

成される。本システムの構成を図1に示す。「もんじゅ」中央監視制御システムは、軽水炉での最新技術¹⁾及び高速増殖炉実験炉「常陽」の運転経験などを反映させるとともに、以下の基本方針のもとに設計している。

(1) 監視操作機能の適正化

監視操作の重要度、緊急度、頻度などを考慮し、中央制御室の監視盤、制御盤及び補助盤の機能を適切な分担とするとともに、人間工学的な検討を加えた盤形態や機能的な配置とすることによって、運転信頼性の向上を図る。中央監視盤と中央制御盤については、モックアップ盤により模擬操作を行ない、監視操作性を総合的に検証する。

(2) プラント運転状態監視の集中化

中央監視盤にCRT(Cathode Ray Tube: カラーディスプレイ)を集中設置し、異常状態も含めプラント運転状態の統括監視を行なえるようにする。各CRTには、運転状態に対応した適切な情報を集約化して提供する。

(3) プラント運転の容易化

通常運転時でのプラント運転自動化及びCRTへの操作ガイダンス表示を導入し、運転員の負担軽減と誤操作防止を図る。

(4) 異常時の対応

プラントの異常時又は計算機システムの故障時には、中央制御盤、中央補助盤によって異常事態への対処又は運転継続を可能とする。重要な監視項目については、CRTと従来計器の二重計装とするとともに、CRTの故障に際しては、他のCRTに表示画面を切り替えて監視可能とする。

図2に中央監視制御システムの主要機能を示す。プラント運転監視、操作ガイダンスなどの最新の計算機利用技術とともに、次のような高速増殖炉に特有な機能を取り入れている。すなわち、高速増殖炉では、過酷な条件のため炉心内に中性子検出器を設置することが困難であり、出力分布の推定ある

いは予測を精度良く計算する炉心性能評価機能を設けている。また、破損燃料検出・位置決め計算は、燃料集合体の燃料ピンの中に希ガス同位体で構成するタグガスを封入しておき、燃料破損時に放出されるタグガスの同位体比率分析データを用いて、破損した燃料集合体の位置を同定し、破損燃料検出データとともにCRTに表示する機能である。更に、高速増殖炉では冷却材にNaを使用するため、Na漏洩監視、蒸気発生器水漏洩監視、冷却系統予熱監視制御など特有のシステムを開発し、採用している。

3 中央監視盤

3.1 中央監視盤の形態

中央監視盤は、中央監視制御システムのマンマシンインタフェースの中核となるもので、長時間にわたるプラント統括監視、運転進行管理を運転員が座位で行なえるようにし、運転員の負担を軽減する。このため、中央監視盤はデスク型とし、形態についてはモックアップ盤を用いた模擬操作による検討を含め、次のような人間工学的配慮をしている。

(1) 中央監視盤は、中央制御盤の前方に配置されるため、運転員が座位で中央制御盤の垂直部を監視できる盤高とする。

(2) 中央監視盤は、一人又は二人の運転員で全CRTの監視を行なえるように、極力見やすい位置にCRTを配置するとともに、中央制御盤との機能上の対応を考慮した配置とする。

図3にモックアップ盤を用いた模擬操作検討状況を示す。これらの検討結果を反映し、中央監視盤のコンパクト化を図り、中央制御盤へのアクセス性、可視範囲などを改善した。

図4に中央監視盤の外観を示す。

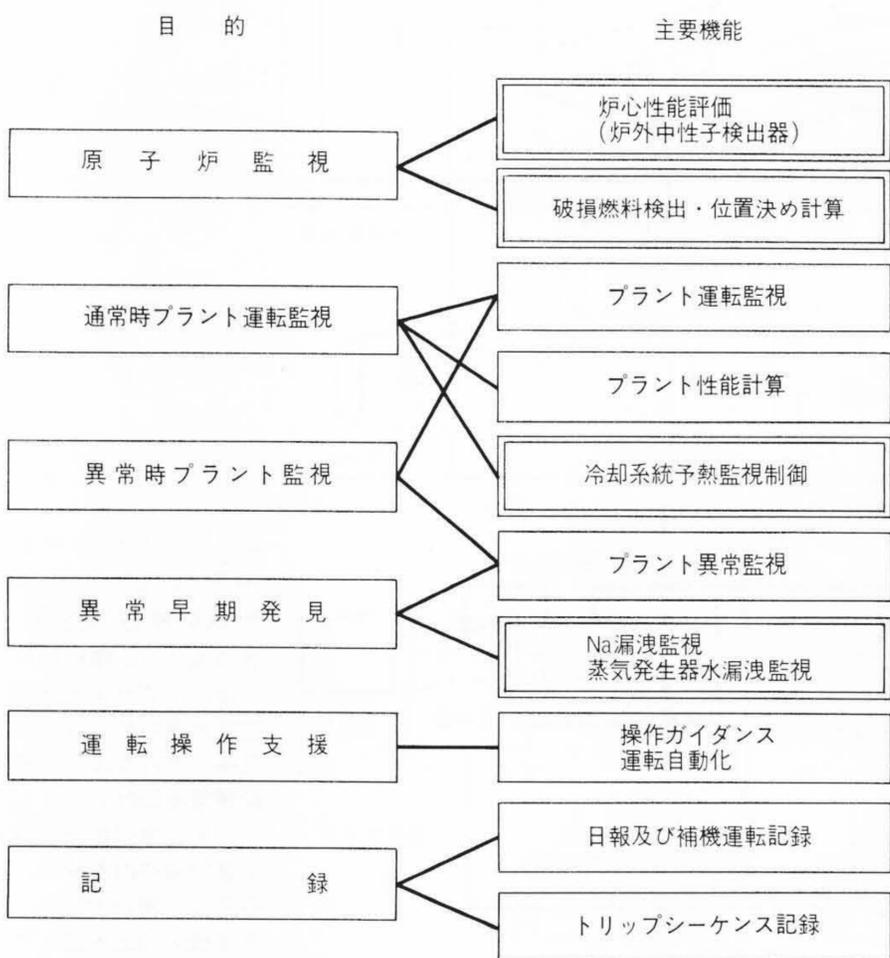
3.2 プラント運転監視

プラントの運転状態に応じて、最も必要とする情報を運転員に分かりやすい形に集約して、CRTに表示する。CRTは、プラント統括監視用として中央監視盤に6台、操作監視用として中央制御盤に3台設置する。

中央監視盤のCRTの主要表示内容は図4に示すとおりであるが、各CRTはCRTの前に設置された画面選択パネルにより随時画面切替可能とし、また1台のCRTが故障した場合には、他のCRTに切り替えて表示できるよう構成している。また、CRT画面設計では、表示シンボルの統一、識別しやすい表示色、表示密度基準など人間工学的配慮をしている。

3.3 操作ガイダンスと運転自動化

(1) プラント通常運転時機能



注: 高速増殖炉に特有又は特徴的な機能を示す。

図2 中央監視制御システムの主要機能 プラント運転監視、操作ガイダンスなど最新の計算機利用技術とともに、高速増殖炉特有の炉心性能評価、Na漏洩・水漏洩監視システムなどを開発し採用している。



図3 モックアップ盤を用いた模擬操作検討状況 中央監視盤、中央制御盤を模擬したモックアップ盤を用い、運転員の監視操作性などについて人間工学的検討を加え、盤の形態、配置、盤面設計などへ反映している。

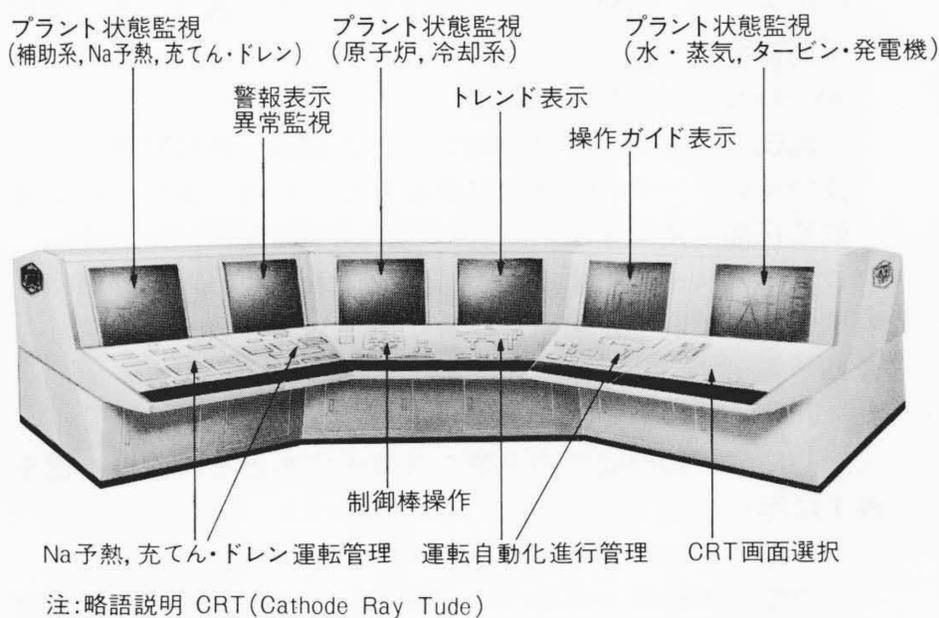


図4 中央監視盤の外観 中央監視盤の形態は、運転員が座位で十分な監視操作性が得られるようにコンパクト化するとともに、中央制御盤との機能上の対応を考慮した盤面配置としている。

プラント起動・停止過程を、一連の操作単位に分割したサブブレイクポイントごとに、操作ガイダンス及び運転自動化進行管理を行なう。

すなわち、運転員の負担軽減と誤操作防止を目的として、中央計算機は、プラント起動準備から定格運転に至るまでの広範囲にわたる起動過程及び停止過程で、操作ガイダンスをCRTに表示する。

(2) プラント異常時機能

原子炉トリップ、タービントリップなどプラント停止に至る異常が発生した場合には、監視・確認すべき重要なプラント情報をCRTに表示し、運転員の判断を支援する。

3.4 制御棒監視制御

「もんじゅ」の制御棒は、FCR(微調整棒)3本、CCR(粗調整棒)10本、及びBCR(後備炉停止棒)6本から構成される。

図5にFCR監視制御システムの構成を示す。FCRD(微調整棒駆動機構)は、連続可変速駆動を可能とするため、ステップモータを使用する。プラント出力約40%以上で自動モードとすることにより、原子炉出力制御系からの信号に比例した駆動速度で制御棒位置を調整し、原子炉出力を自動制御する。制御棒は一度に1本しか駆動できないようにするとともに、炉出力の空間分布をひずませないよう制御棒の相互位置偏差を所定値内に収めるための制御を行なう。制御棒の手動操作は、中央監視盤、中央制御盤の双方から可能であるが、双方から同時に選択できないよう操作場所を選択するキー付きスイッチを設ける。また、制御棒手動操作は2アクションとするとともに、制御棒引抜阻止インタロックを設けて誤操作防止を図っている。

原子炉緊急停止時には、監視制御システムとは完全に独立した原子炉保護系からの信号により、すべての制御棒をCRD(制御棒駆動機構)から切り離し、炉心内に急速に挿入する。

3.5 冷却系統予熱監視制御

冷却系統予熱設備は、冷却材であるNaが凝固しないようNaに接する配管、機器を表面からヒータで約200℃の温度に保持制御する設備で、高速増殖炉特有のものである。プラントの予熱制御点数は、数千点の規模となるため、マイクロプロセッサと多重伝送を用いたデジタル予熱制御装置を開発、採用し、大幅なケーブル及び格納容器ケーブルペネトレーションを削減するとともに中央監視盤で集中監視制御可能として

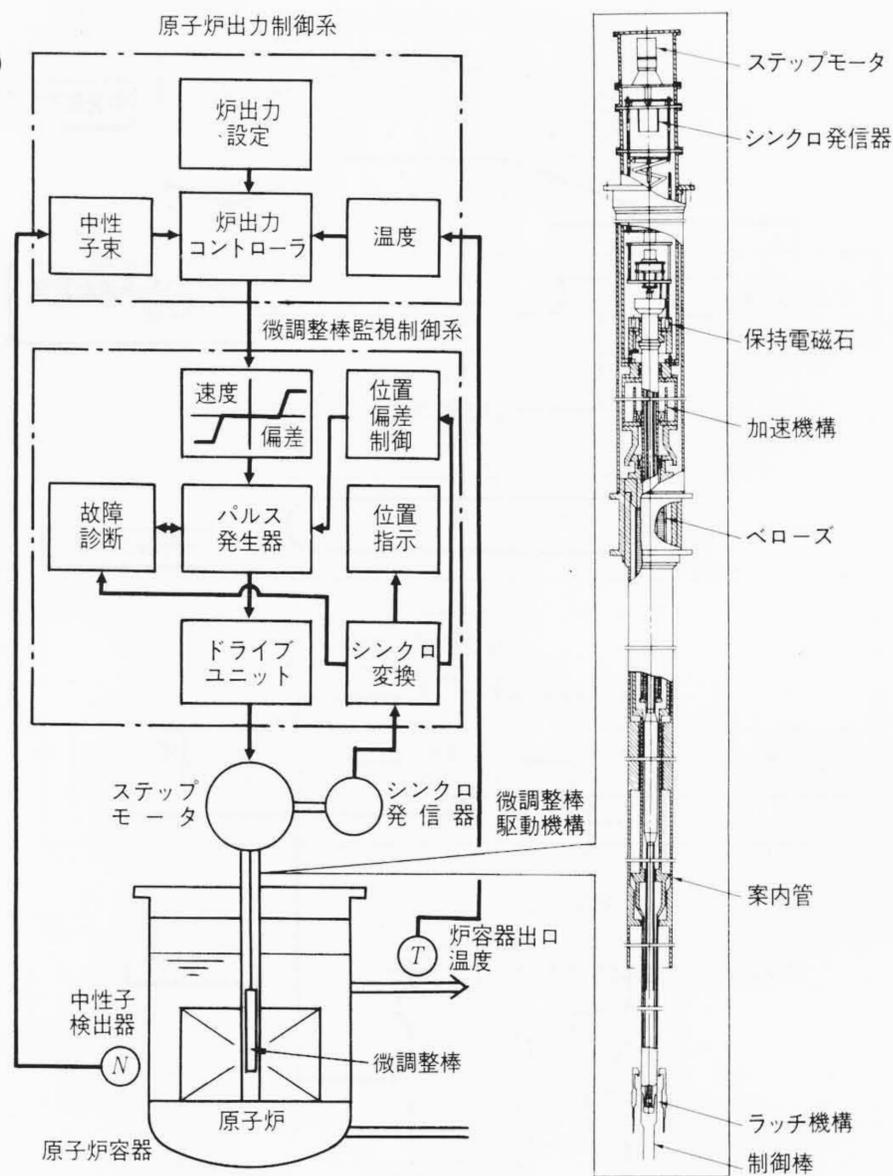


図5 微調整棒監視制御システム 3本の微調整棒は、相互位置偏差が所定値内に入るよう制御される。位置偏差監視、故障診断など高信頼化技術が適用されている。

いる。

図6に一次冷却系予熱監視制御システムの構成を示す。運転員が予熱運転モードを選択することにより、対応したヒータグループが選択され配管、機器が所定の値に温度制御される。

4 中央計算機システム

中央計算機システムの機能のうち中央監視盤と密接に関連するプラント運転監視、操作ガイダンスと運転自動化については前章で述べたので、次に、炉心性能評価、プラント性能計算及び異常監視機能と中央計算機システムの構成について以下に述べる。

4.1 炉心性能評価

(1) 主要処理項目

「もんじゅ」での炉心性能評価機能は、下記の4項目に分類することができる。

(a) 炉心熱的裕度の確認

燃料被覆管最高温度などの熱的裕度を監視し、燃料の健全性を確保するためのものであり、炉心性能計算部で処理する。

(b) 炉心異常監視

炉心反応度などでの異常の有無を早期に検出し、安全性確認のためのデータを提供することによって、炉心安全性の向上を図る。

(c) 炉心運転状態予測

制御棒操作などに伴う炉心状態の変化を予測し、各種操

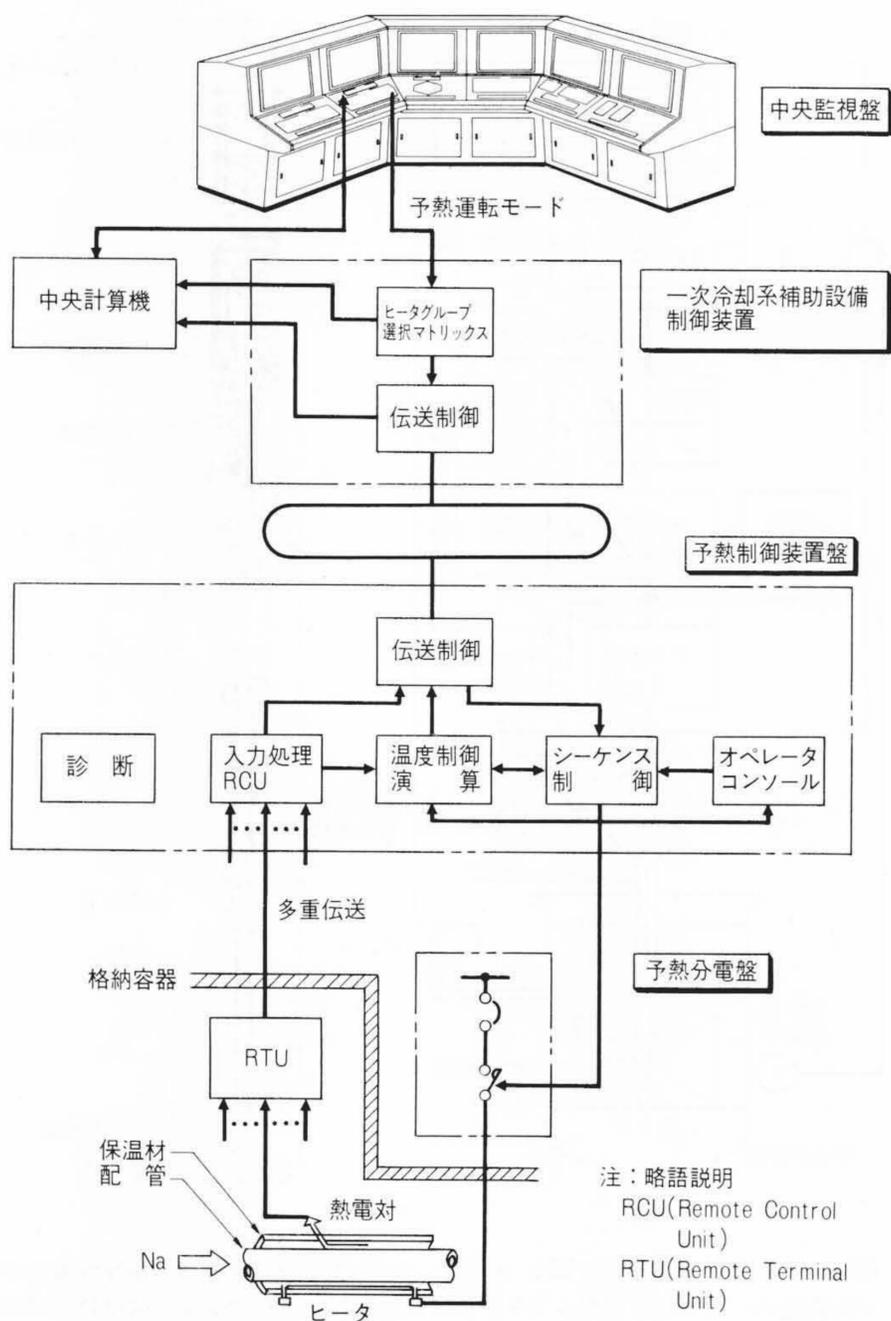


図6 一次冷却系予熱監視制御システム 予熱制御点はプラント全体で数千点に及ぶため、マイクロプロセッサと多重伝送方式を採用し、集中監視制御可能とするとともに、ケーブル及び格納容器ケーブルペネトレーションの大幅な削減を図っている。

作の妥当性、炉停止余裕を確認するものであり、炉心運転予測部で処理する。

(d) 炉心運転管理

温度分布などの詳細熱的データの表示、燃料管理データ及び運転データの自動的収集を行なうものであり、炉心運転監視部で処理する。

これら項目を達成するため、図7に示す炉心性能評価機能の構成としている。本図には各処理項目間のデータの流れも合わせて示す。

(2) 計算モデル

炉心性能評価機能での主要な計算モデルとその性能指標を表1に示し、以下その特徴について述べる。

(a) 出力分布計算モデル(炉心性能計算用)

中性子検出器が炉心内に設置されないことから、高精度かつ高速の3次元出力分布計算モデルが要求される。炉心設計では通常、多群(6群程度)詳細メッシュ拡散計算モデルを基準としているが、計算時間、記憶容量の観点からオ

表1 炉心性能評価用計算モデル 高速増殖炉の特徴を念頭において設計を進めている主要計算モデルと、その精度及び処理時間の性能指標を示す。

| 処理項目 | 計算・予測モデル | 性能指標 | |
|---------|-------------------------|-------|---------|
| | | 精度 | 処理時間(s) |
| 出力分布計算 | 修正1群粗メッシュ補正拡散計算法 | 約6% | 200 |
| 温度分布計算 | 計測データ、計算値の統計処理による最確値計算法 | 約12% | 150 |
| 出力分布予測 | インフルエンス関数法 | 約8% | 20 |
| 反応度予測 | 中性子束、随伴中性子束の重みつき固有値計算法 | 約4%* | 100 |
| 異常反応度監視 | 反応度平衡法 | 約3φ** | 0.3 |

注：* 制御棒反応度値の詳細モデル計算との差
** 残留反応度

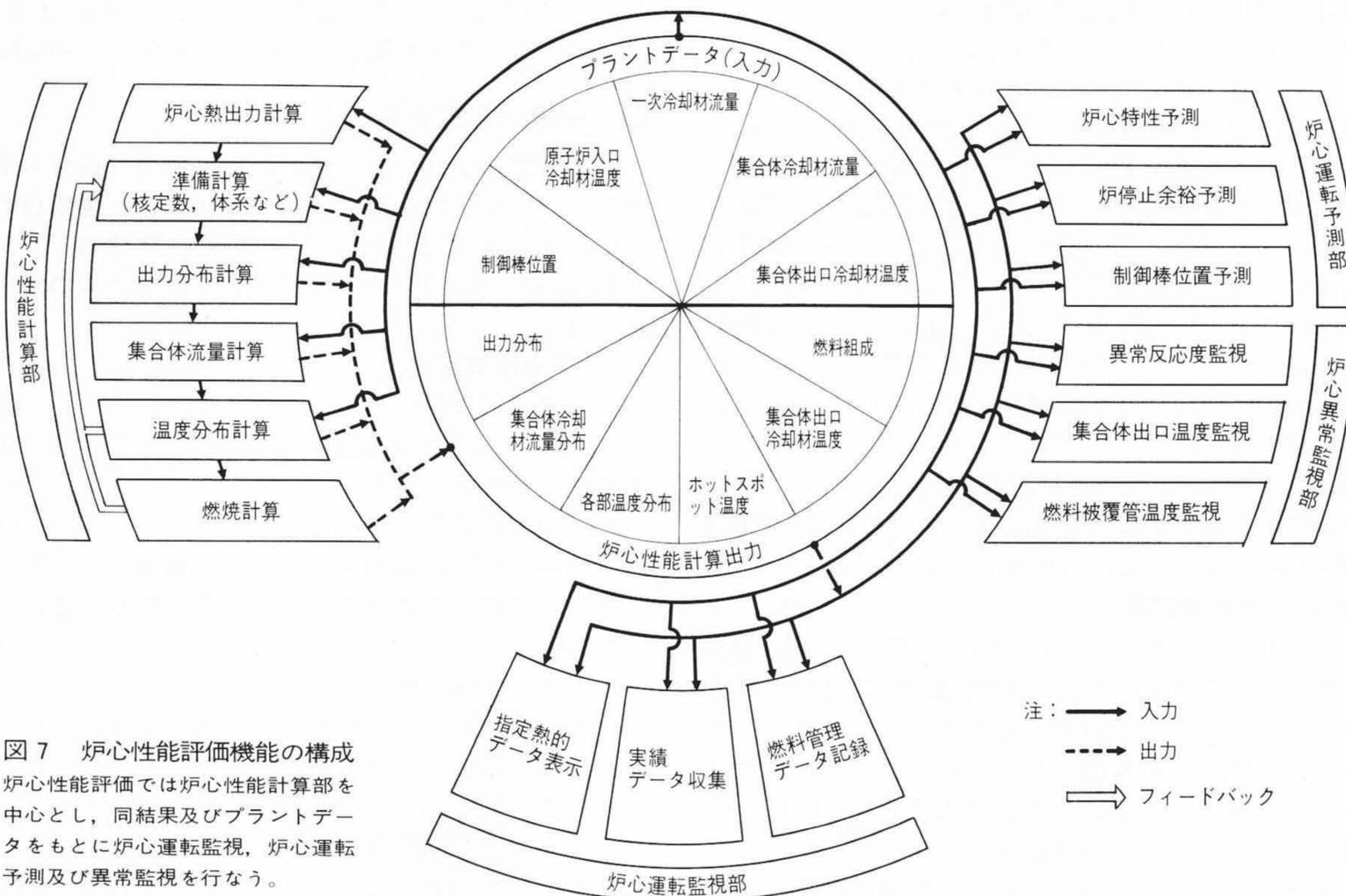


図7 炉心性能評価機能の構成 炉心性能評価では炉心性能計算部を中心とし、同結果及びプラントデータをもとに炉心運転監視、炉心運転予測及び異常監視を行なう。

ンライン計算への適用は不適當である。そこで、この詳細モデルを基準として、計算時間及び記憶容量を約 $\frac{1}{50}$ に削減できる、修正1群粗メッシュ補正拡散計算モデルを開発し^{2),3)}、採用した。本モデルにより、表1に示す計算精度を達成できる見通しである。

(b) 温度分布計算モデル(炉心性能計算用)

燃料集合体出口部の冷却材温度、流量のデータと出力分布の計算値を用いて、集合体出力、出口温度及び流量の最確値を計算するモデルを開発した²⁾。燃料各部の推定誤差を考慮したホットスポット温度は、この最確値の誤差を用いて評価する。「常陽」の実測データを用いた検証結果によれば、本計算モデルの採用により被覆管最高温度と入口冷却材温度との差の推定誤差を約12%にできる見通しである。

(c) 出力分布予測モデル(炉心運転予測用)

機能上速応性が要求されることから、制御棒挿入位置変化による出力分布のひずみ係数を基に予測する簡易モデル(インフルエンス関数法)を開発した^{2),3)}。本モデルにより、表1に示す性能を達成できる見通しである。

(d) 反応度予測モデル(炉心運転予測用)

通常の運転操作に対しては、別途詳細モデルで求めた制御棒反応度曲線を基に予測するが、制御棒の固着を想定しその挿入状態がアンバランスな体系で計算をする炉停止余裕予測に対しては、インフルエンス関数法により求めた中性子束分布、及び随伴中性子束分布を重みとする固有値計算から予測するモデルを開発した³⁾。本モデルによる予測値の詳細モデルとの差は約4%である。

4.2 プラント性能計算と異常監視

(1) プラント性能計算

プラント主要機器及び安全上重要な機器の性能を周期的あるいは運転員の要求時に計算し、機器の性能、効率、制限条件との関連、運転履歴などをCRTあるいはタイプライタに出力する。

(2) プラント異常監視

直接測定される個々のプロセスデータからは検出困難な、主冷却系循環ポンプ流力特性変化などの異常状態を、複数のプロセスデータをもとに総合判断して異常を早期に検出する。また、安全保護系のアナログ信号相互比較、制御設定値などの異常監視を行なう。

(3) 燃料破損検出・位置決め計算

燃料破損が検出されると中央制御室の運転員に警報及びCRT表示で知らせる。更に、破損燃料ピンから放出されるタグガスの同位体比率分析データを用いて、破損した燃料集合体の位置を同定し、その結果をCRTに表示する。

(4) Na漏洩監視

一次冷却系Naバウンダリの健全性を損なうような漏洩に至る前の微少漏洩の段階で、早期かつ確実にNa漏洩を検出することを目的に、次の二つの原理の異なる検出器を用いる。

(a) SID(Naイオン化検出器)

Na漏洩により発生したNaエアロゾルをフィラメントでイオン化させ、電圧を印加したコレクタ電極に集めイオン電流を測定するもので、極めて高い検出感度をもつ。

(b) DPD(Na補集差圧検出器)

Naエアロゾルをフィルタに補集し、上流側と下流側の圧力差を測定する。

図8にNa漏洩検出系の構成を示す。Na配管などに取り付けられたサンプリングノズルから連続的にガスをサンプリングし、SIDとDPDの両方によってNaエアロゾルを常時モニタする。

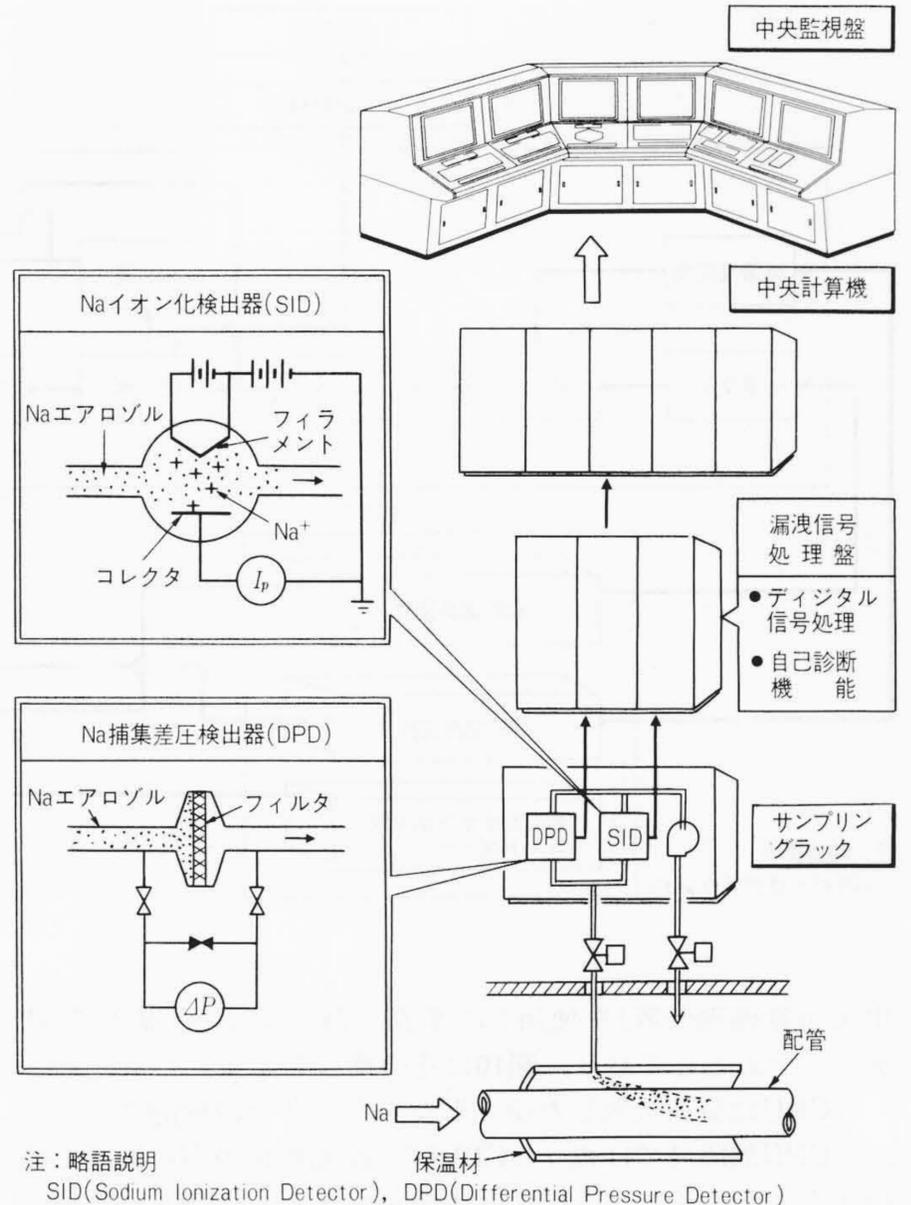


図8 一次冷却系ナトリウム漏洩検出系 SIDとDPDの原理の異なる検出器を用い、更にデジタル信号処理して微少漏洩検出の信頼性向上を図っている。

上記のほか、電極式検出器、放射化Naイオン検出器などを用いて、冷却材Naバウンダリの漏洩監視を行なう。漏洩が検出された場合には、中央制御室の運転員に警報で知らせるとともに、中央監視盤のCRTに詳細を表示する。

(5) 蒸気発生器水漏洩監視

蒸気発生器の伝熱管に万一ピンホールなどが発生し、給水がナトリウム中に漏洩すると、これを微少漏洩段階で検出し、蒸気発生器を隔離して大規模な漏洩に至るのを防止する必要がある。伝熱管から水が漏洩した場合、ナトリウムと反応して水素が発生し水素濃度が上昇するので、この変化を測定し水漏洩を検出する。

図9に水漏洩検出系の構成を示す。水素分離用プローブとしてNi拡散膜をNa中⁹⁾又はカバーガス中⁹⁾に設け、拡散膜の他方を真空に引くことにより、水素を真空側に拡散、透過させ、その水素量を電離真空計で測定する。水素濃度の計測は、水素の平衡圧を連続測定する動的平衡圧力法と間欠的に水素の絶対濃度を測定する静的平衡圧力法を用い、静的平衡圧力法で求めた水素濃度信号により、動的平衡圧力法の信号を校正して、連続的に水素濃度をモニタする。水素濃度信号を処理して、水漏洩発生の有無を判定し、その結果を中央制御室の警報及びCRTに表示する。

4.3 中央計算機システムの構成

「もんじゅ」中央計算機システムは、高信頼性、高処理性をもつ構成とすべく、複数台のCPU(Central Processing Unit :

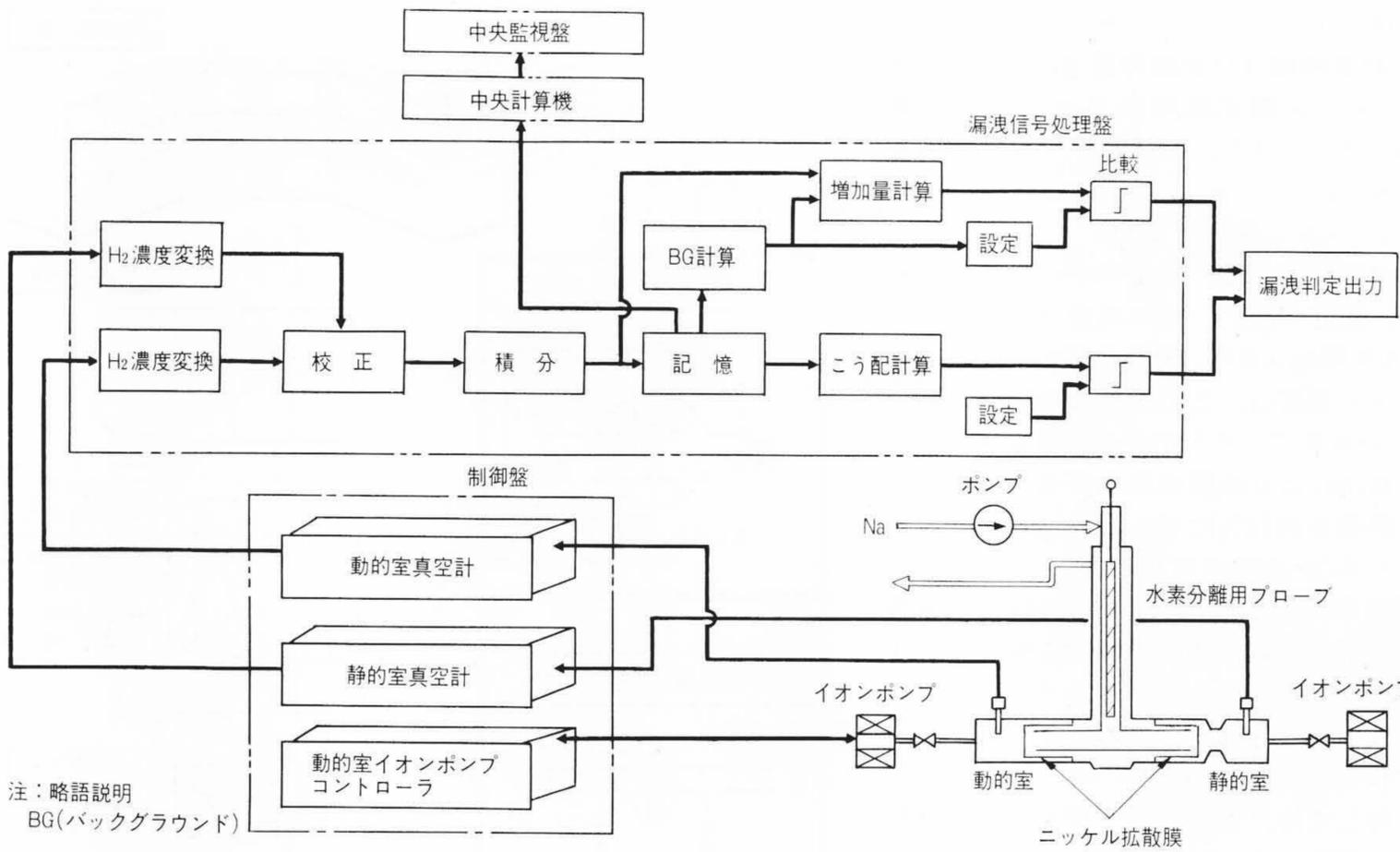


図9 蒸気発生器水漏洩検出系 Na中からNi拡散膜を透過した水素濃度を測定し水漏洩を監視する。デジタル信号処理により、バックグラウンド信号との識別性能を向上している。

中央演算処理装置)を使用した負荷分散型マルチ(複合)計算機システムとしており、図10にその構成を示す。

各CPUに負荷分散した優先順位をもつ各々の機能グループは、CPU故障時では残りのCPU間で優先順位の高い機能を維持するようにシステム自動再構成を行ない、強靱なシステムとしている。更に重要データファイルである磁気ディスクなどの二重化、CRTなど重要な周辺機器は入出力制御装置を分散させた危険分散方式をとるなど、よりいっそうの信頼性向上を図っている。

また、処理性の面では、各種処理機能を複数台のCPUに負荷分散させ、並列処理性を最大限に生かした機能分散構成と

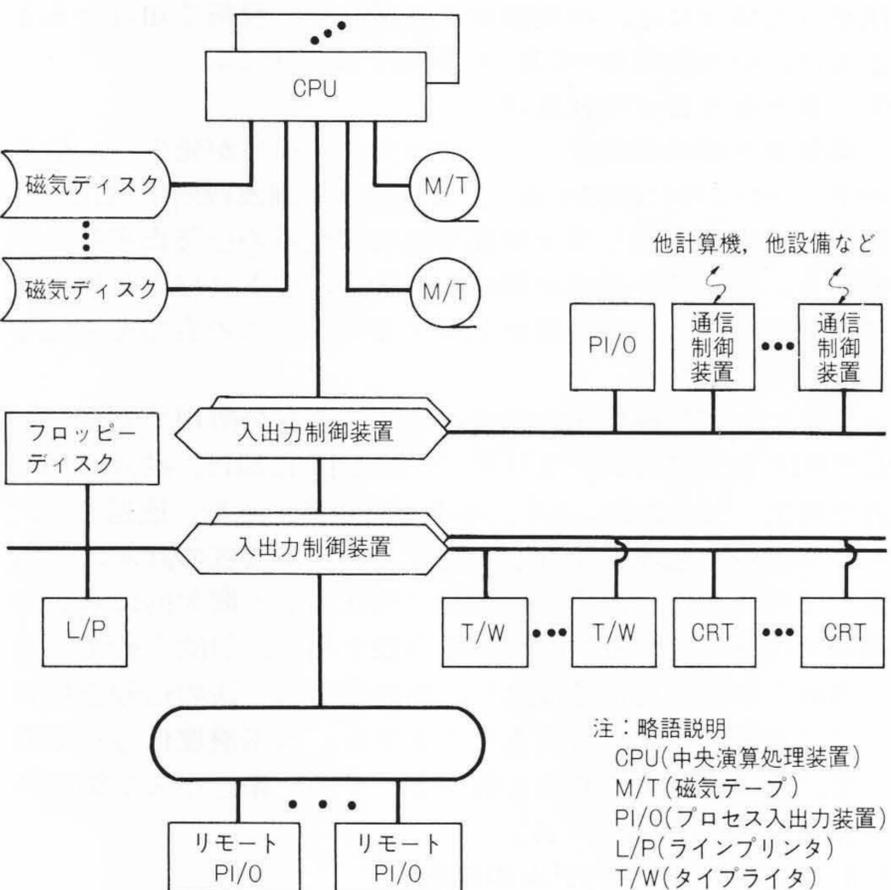


図10 中央計算機システムの構成 広範かつ多彩な入出力データを経済的にサポートするとともに、負荷分散により高処理性を実現している。

することにより高応答性を図っている。特に、一部プロセス入出力装置を、現場設置のリモート型とし、また、オフサイト計算機などの他計算機や冷却系予熱設備などの他設備とは、比較的低速かつ多岐にわたるデータを通信回線を介してCPUと通信させるようにしている。これら方式により、プロセス入出力装置と通信装置とのデータの入出力を効率良く分担させるとともに、ケーブル量の削減など経済性についても十分に考慮した構成としている。

5 結 言

高速増殖炉原型炉「もんじゅ」の中央監視制御システムについて、中央監視盤と中央計算機システムを中心に設計の概要を述べた。本システムの主な特徴は、(1)中央監視盤によるプラント統括監視と運転進行管理の集中化、(2)モックアップ盤による人間工学的検討を加えた盤形態と機能的配置、(3)高速増殖炉特有の計装制御技術の開発と採用、などにより運転信頼性の向上を図っていることである。今後、更に設計を進め製作に入ることになるが、信頼性の高い中央監視制御システムの完成に努力していく考えである。

参考文献

- 野口, 外: 最近のBWR用計測制御システム, 日立評論, 66, 4, 323~326(昭59-4)
- 工藤, 外: 高速増殖炉用計装制御装置の開発, 日立評論, 62, 10, 714~718(昭55-10)
- 漆原, 外: 高速炉における炉心管理システムの開発, 昭和57年日本原子力学会年会 D27, D28
- H.Yamamoto, et al.: Development of a Fluctuation Monitor-Type Sodium Ionization Detector, Liquid Metal Engineering and Technology. BNES, London, 1984
- 酒井, 外: ナトリウム中水漏洩検出計の性能実験, 昭和57年日本原子力学会年会 E56
- 山本, 外: カバーガス中水漏洩検出装置の性能実験, 昭和58年日本原子力学会秋の分科会 E58