

中国電力株式会社島根原子力発電所向け

制 御 計 装 設 備

Controls and Instrumentation for Shimane Nuclear Power Station, Chugoku Electric Power Co., Inc.

Keeping pace with ever-increasing power demands from industries, construction of nuclear power plants is progressing with rapid strides. The safety criterion imposed on nuclear power plants is much more stringent than for conventional power plants. In fact, no failure whatsoever is considered permissible for reactors or for protective devices for reactors.

矢内勝也* Katsuya Yanai

This article describes the controls and instrumentation for a BWR-type nuclear power plant introducing part of the control equipment for the Shimane Nuclear Power Station, Chugoku Electric Power Co. The important points in the quality control for the above is also discussed.

1 緒 言

近年、電力需要の伸びはめざましく、エネルギー確保の長期的展望から、わが国においても原子力発電所の建設が、急速に進展してきた。このすう勢に対応して、日立製作所も積極的に種々の形で参画してきたが、このたび、中国電力株式会社島根原子力発電所460MW, No.1ユニット用制御計装設備一式を、国産第1号として製作完了し、現在、現地にて順調に試運転中である。

沸騰水形原子力発電所(以下、BWR原子力発電所と略す)の制御計装設備は、火力発電所または一般プラントと比較し、特異な点が多い。本稿では、制御計装について、計画上の特徴ならびに代表的な制御装置を紹介し、あわせて原子力発電所に対する制御計装からみた品質管理上のおもな点について説明する。

2 制御計装上の特殊性

原子力発電所の制御計装を一般プラントのそれと比較した場合、種々の特徴的なことがあげられる。それは単に制御対象が異なるということ以外に、次のような基本条件を背景としてシステムおよびハードウェアが構成されなければならない点にある。その第一は、原子炉運転に対する安全性の確保であり、第二は、放射線被ばく災害からの保護および環境の保全である。これらはいずれも、きわめて重要な問題であるため、国家的な行政規定(電気事業法など)または指導(電気技術指針など)がなされており、機器製造メーカーもその方針に準拠して、さらに具体的に規準化して製作に反映させている。

おもな特徴を列記すると、次の点があげられる。

- (1) 機器の設計、製作、試験、据付に至るまで、細部にわたり法的な規定、あるいは勧告ないし推奨があり⁽¹⁾⁽²⁾、システムおよびハードウェア両面に対し、高度の安全性と信頼性が要求される。
- (2) 通常運転時には使用しないか、あるいは起こりうる確率

のきわめて小さい事故を前提とした安全保護設備に対する制御計装が、全体の約3割を占める。

- (3) 一般プロセス計装に加えて、原子力発電所特有の中性子計装、放射線計装が最重要な計装として大きな部分を占める。
- (4) 廃棄物処理設備に対する制御計測設備が必要である。
- (5) 建屋内には高放射能ふんい気のため、随時立入りできない管理区域があり、常時、非常時の運転操作場所は中央となり、高度の中央制御方式がとられる。
- (6) 大形プロセス計算機が、核的特性を中心とした性能計算および運転補佐の点から、原子炉運転上重要な要素となっている。

3 制御計装の計画

BWR原子力発電所の制御計装として次のものがある。なお、プロセス計算機については省略する⁽³⁾。

3.1 制 御

BWR原子力発電所の主要な制御システムは、原子炉出力制御、タービン出力制御および給水制御の三つに分けられる。

(1) 原子炉出力制御

原子炉出力は、制御棒位置の調整および再循環流量の調整により制御できる。前者はプラントの起動・停止、大幅な出力変更、燃焼に伴う反応度変化の補正、炉出力分布の調整の場合に使用され、後者は通常出力制御または自動負荷追従制御の場合に使用される。

制御棒位置の調整は、炉心内の制御棒そう入位置を変え、燃料に対する付加反応度を変えて原子炉出力を制御するもので、中央制御室制御盤から手動にて操作される。この場合の重要な監視システムとして、中性子計装システム、制御棒位置信号伝送システムおよび制御棒価値ミニマイザ(RWM)の3システムがある。制御棒による出力制御速度は、約2%/minである。

再循環流量の調整は、BWR原子力発電所特有の出力制御

* 日立製作所大みか工場

方式で、炉心内ボイドの負の反応度を利用したものであり、原子炉出力は炉心流量にほぼ比例して連続的に変化する。炉心流量変化には原子炉再循環ポンプを設け、その駆動電動機の電源周波数を変えて変化させる。このため可変周波MGセットが必要であり、電圧対周波数比を一定とした周波数制御を行なう。本方式による出力制御速度は最大30%/minで、その自動制御範囲は定格炉出力の75~100%である⁽⁴⁾。

(2) タービン出力制御

BWR原子力発電所の出力制御方式は、付加的な自動負荷追従制御を考えなければ、基本的にはTurbine-following Controlであり、原子炉の発生出力に応じタービン発電機出力が制御される。このために設けられているのが初圧調整装置で、タービン入口圧力を一定にするようタービン加減弁およびタービンバイパス弁開度を変え、同時にタービン出力を制御する。本装置には電気式と機械式とがあり、通常は電気式を主制御とし、機械式をバックアップまたはスタンドバイとして使用する。圧力調定率は通常3%程度に設定される⁽⁵⁾。

(3) 給水制御

給水制御の目的は、原子炉水位を一定に保持することにより、炉心を冷却して安全を確保し、かつ圧力容器内気水分離器の作動を最適作動状態に維持することである。特に後者の目的のために、炉水位のプログラム制御が可能であり、タービンへのキャリーオーバー、再循環系へのキャリアンダを最小にできる。通常運転は、主蒸気流量、主給水流量および炉水位信号による、三要素制御方式をとるが、炉水位だけの一要素制も可能である。また、水位、流量の測定には、精度を上げるため密度、温度、膨張に対する補正が行なわれる。図1は、給水制御システムを示すものである。

以上は通常運転時のアナログ制御であるが、原子炉の緊急停止（スクラム）、または重大事故時のプラント保護に対しては次のような制御系がある。

これらは主として電磁リレーによる制御である。

(4) 原子炉保護系

(5) 原子炉隔離系

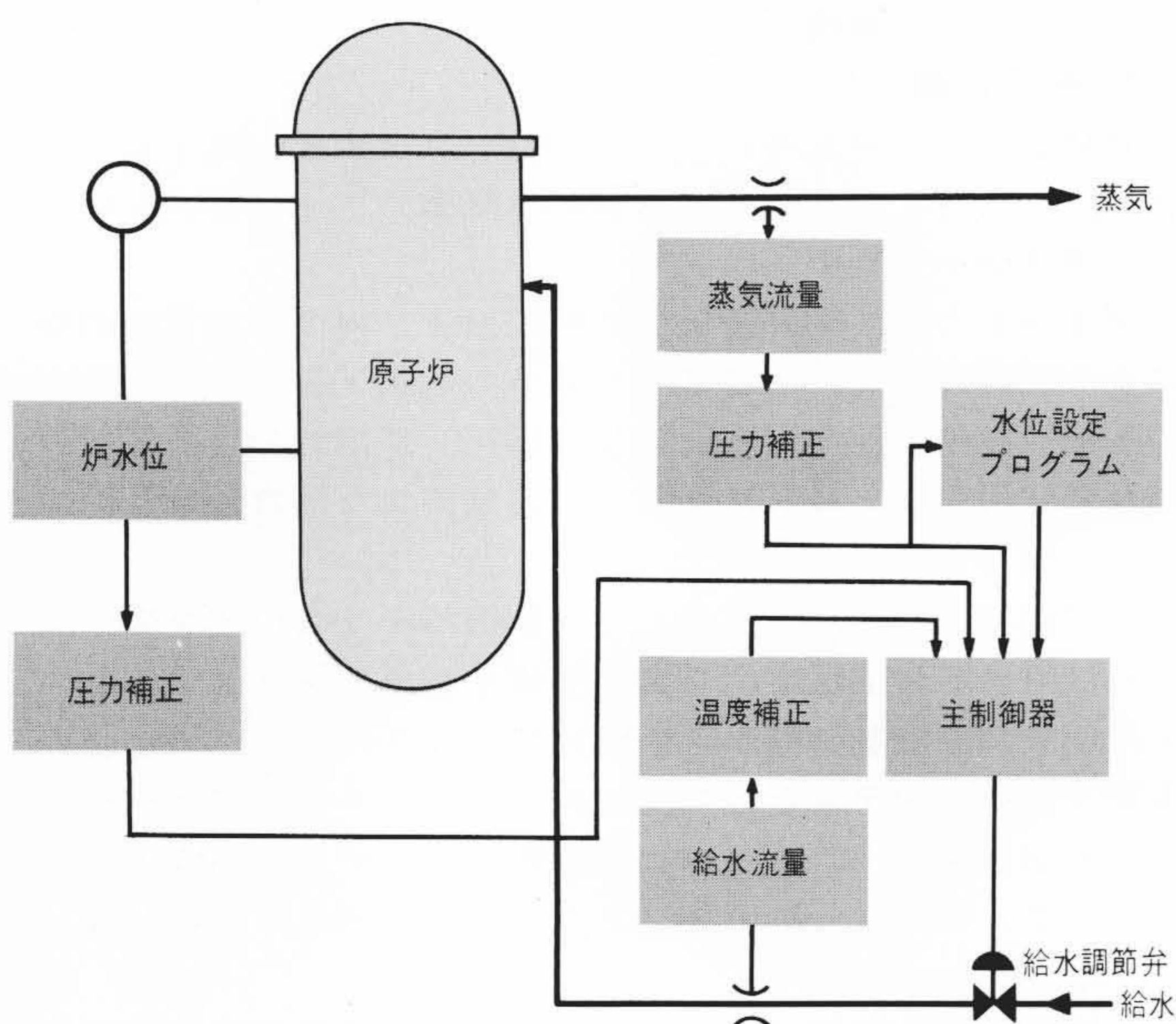


図1 給水制御システム 原子炉水位の制御として主蒸気流量、給水流量、原子炉水位による3要素制御を行ない、給水量の調整を行なう。

Fig. 1 Reactor Feed Water Flow Control System

(6) 工学的安全系

なお、これらの制御系においてプラントの異常を検出するために、水位、圧力、差圧、周囲温度などの検出スイッチを使用するが、自力動作形のスイッチとし、電源や空気源への依存性をなくしている。

3.2 計装

発電プラントの計装は大別して中性子計装、放射線計装、一般プロセス計装およびサンプリングシステムに分類される。

(1) 中性子計装

中性子計装は、起動から全出力までの炉心の出力レベルを監視するシステムで、中性子源領域モニタ(SRM)、中間領域モニタ(IRM)、出力領域モニタ(PRM)および走行形校正モニタ(TIP)から構成されている。図2は中性子計装の構成を示すものである。

中性子源領域モニタは、起動時、中性子源領域での炉心の監視に必要な情報をうるもので、4チャンネルで構成され中性子束 $10^3 \sim 5 \times 10^8 nv$ の範囲を監視する。検出器は核分裂計数管が使用され、信号はパルス前置増幅器で増幅されて中央制御室の電子装置へ伝送され、対数計数率計、周期率計などの指示を出すと同時に、信号の異常時にはトリップ信号を発生する。

中間領域モニタは8チャンネルで構成され、中性子束 $10^8 \sim 1.5 \times 10^{13} nv$ の範囲を監視する。検出器には核分裂電離箱が使用され、信号は電圧前置増幅器で増幅され中央制御室の電子装置へ伝送される。平均2乗回路で信号処理後必要なトリップ回路を形成するほか、レンジ切換スイッチを介して指示計にレベルを指示する。

出力領域モニタは、中性子束 $10^{12} \sim 10^{14} nv$ の範囲を監視する。検出器には核分裂電離箱が使用され、直接中央制御室の電子装置へ伝送される。電子装置は、局部出力分布の情報を与える局部出力領域モニタ(LPRM)22×4チャンネル、平均出力を監視し、異常な出力状態になったときには原子炉保護系へトリップ信号を与える平均出力領域モニタ(APRM)6チャンネルおよび制御棒引抜きによる局所的な過大出力変化時に制

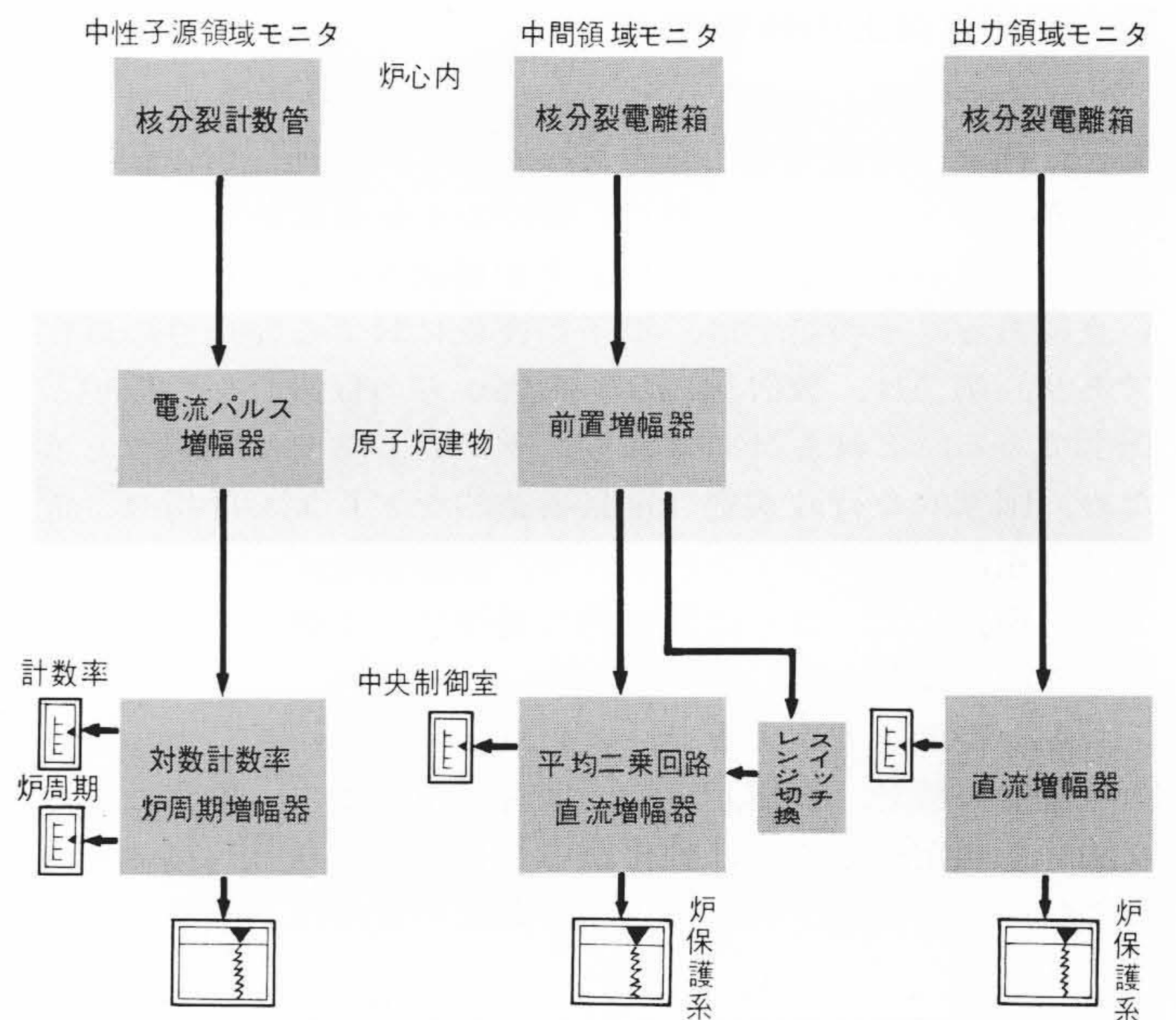


図2 中性子計装構成 炉内中性子束の検出、信号伝送、監視方式を中性子束レベルの3領域に分け、その構成を示している。

Fig. 2 Neutron Monitoring System

御棒引抜き阻止信号を発する制御棒引抜き阻止モニタ(RBM)は2チャンネルから構成され、制御棒引抜き阻止モニタ以外は中央操作盤に指示を出す。

走行形校正モニタは、 $10^{12} \sim 10^{14} \text{ nv}$ の範囲を監視できる移動形の中性子束分布測定システムで、X-Y記録計を具備し、3チャンネルで構成されている。

(2) 放射線計装

発電所内外の気体、液体の放射線レベルを連続計測しその値が規定値以上になった場合、警報を発し安全を図るもので、大別してプロセス放射線モニタ、エリア放射線モニタ、敷地外放射線モニタの三つに分けられる。

プロセス放射線モニタは18チャンネルあり、検出器には γ 線電離箱、シンチレーションカウンタ、GM管などが使用されプロセスラインの放射線レベルを監視する。

エリア放射線モニタは33チャンネルあり、建屋内の特定区域の γ 線または放射線レベルを連続監視する。検出器には電離箱を使用する。

敷地外放射線モニタは、プラント周辺の放射線管理に使用される。

(3) 一般プロセス計装

一般のプラントと同称、プロセスラインの圧力、温度、流量、差圧、レベル、その他水質管理計器などで、計測上原子力発電所としての特殊性は特にない。

(4) サンプルングシステム

一般プロセスの試料採取は火力発電所の場合と同様であるが、バイアルサンプル装置を必要とする放射性気体のサンプルリング、測定者および周囲の汚染防止のためフードを必要とする放射能汚染試料のサンプルリング、排ガス系統の酸素および水素ガス分析などには原子力発電所特有の設備を必要とする。

4 制 御 盤

4.1 中央制御室制御盤配置

原子力発電所は一般に一直数名の運転員によって、通常の運転操作から起動停止操作に至るまで、すべて中央制御室で集中的に行なえるよう計画されている。したがって、中央制御盤は集中監視制御方式がとられるが、盤形状からは運転監視を主体とするベンチ形制御盤および監視ひん度の少ない計器、プロセス計装、または制御リレーなどを収納する直立盤とに分けられる。図3は、中央制御室内制御盤の配置を示し、01～06がベンチ形制御盤で、他はすべて直立盤である。本配置は運転監視機能、作業性、システム分離、ノイズ防止、ケーブル処理法など総合的に十分検討のうえ決定された。

また、全体の2割強を占める非常用炉心冷却を主体とする安全保護系関係制御盤は多重化され、相互にシステム分離を完全に行なっているのが特徴である。

4.2 中央制御盤

中央制御盤は安全系制御盤、原子炉補機制御盤、原子炉制御盤、タービン補機制御盤、タービン発電機制御盤および所内電気盤の計6面で構成されている。各盤は運転操作を考慮して、操作スイッチ、計装および警報ユニットを一群として、システムごとに細分割してある。特に、運転監視の中心となる原子炉制御盤については、原子炉の運転状態を制御棒および中性子束の状態マトリックス状に表示させ、かつ、選択した制御棒周辺の中性子束レベル(アナログ量)と、制御棒位置(デジタル量)を拡大表示する4ロッド・ディスプレイ方式としてある。また、安全系制御盤に対しては、安全設備の動作状態が一見してわかるように、グラフィック表示および模擬母線方式を採用している。そのほか、トレンド式のディ

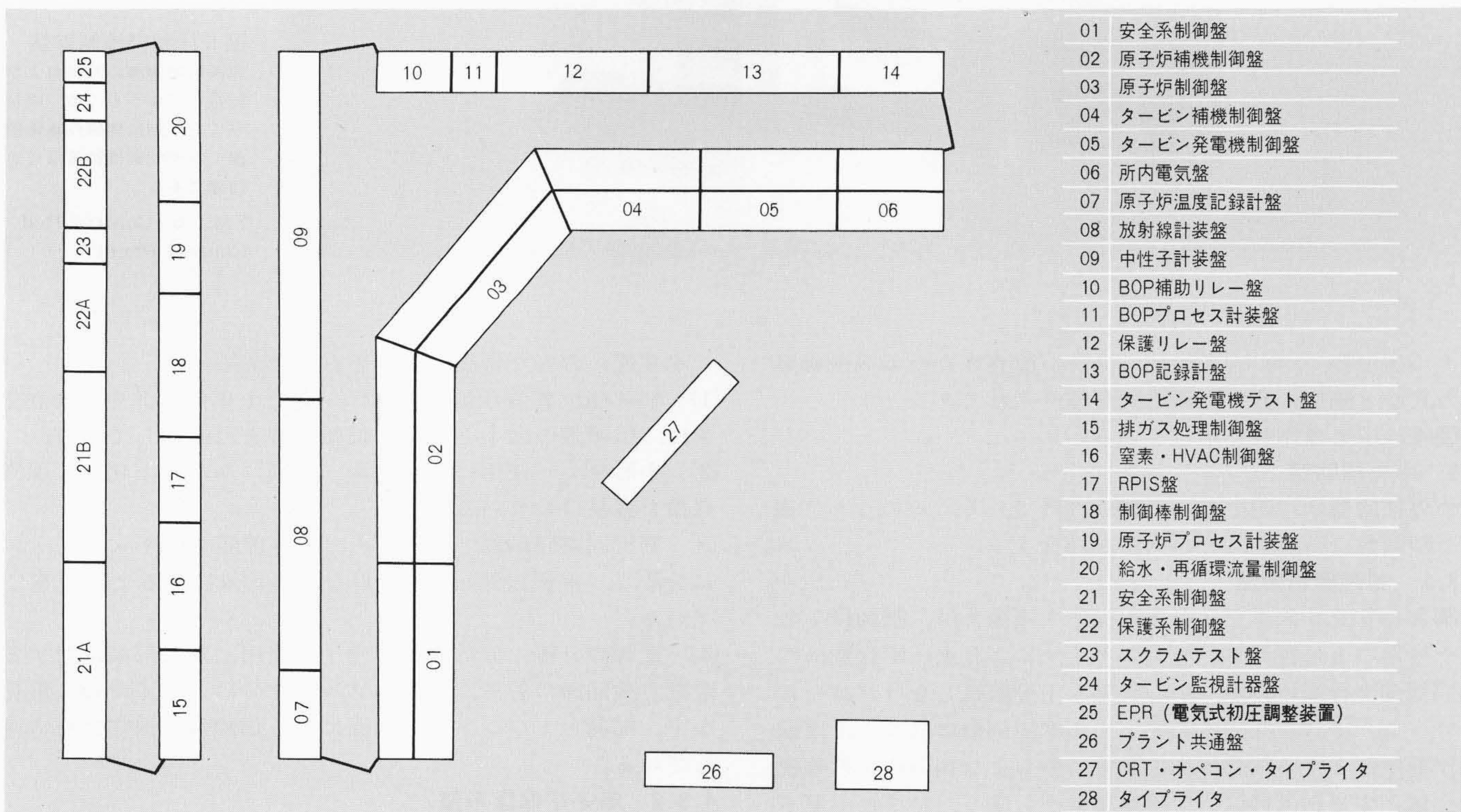


図3 中央制御室制御盤配置 中央制御室に設置される制御盤の名称とその配置を示したものである。

Fig. 3 Main Control Room Panel Arrangement

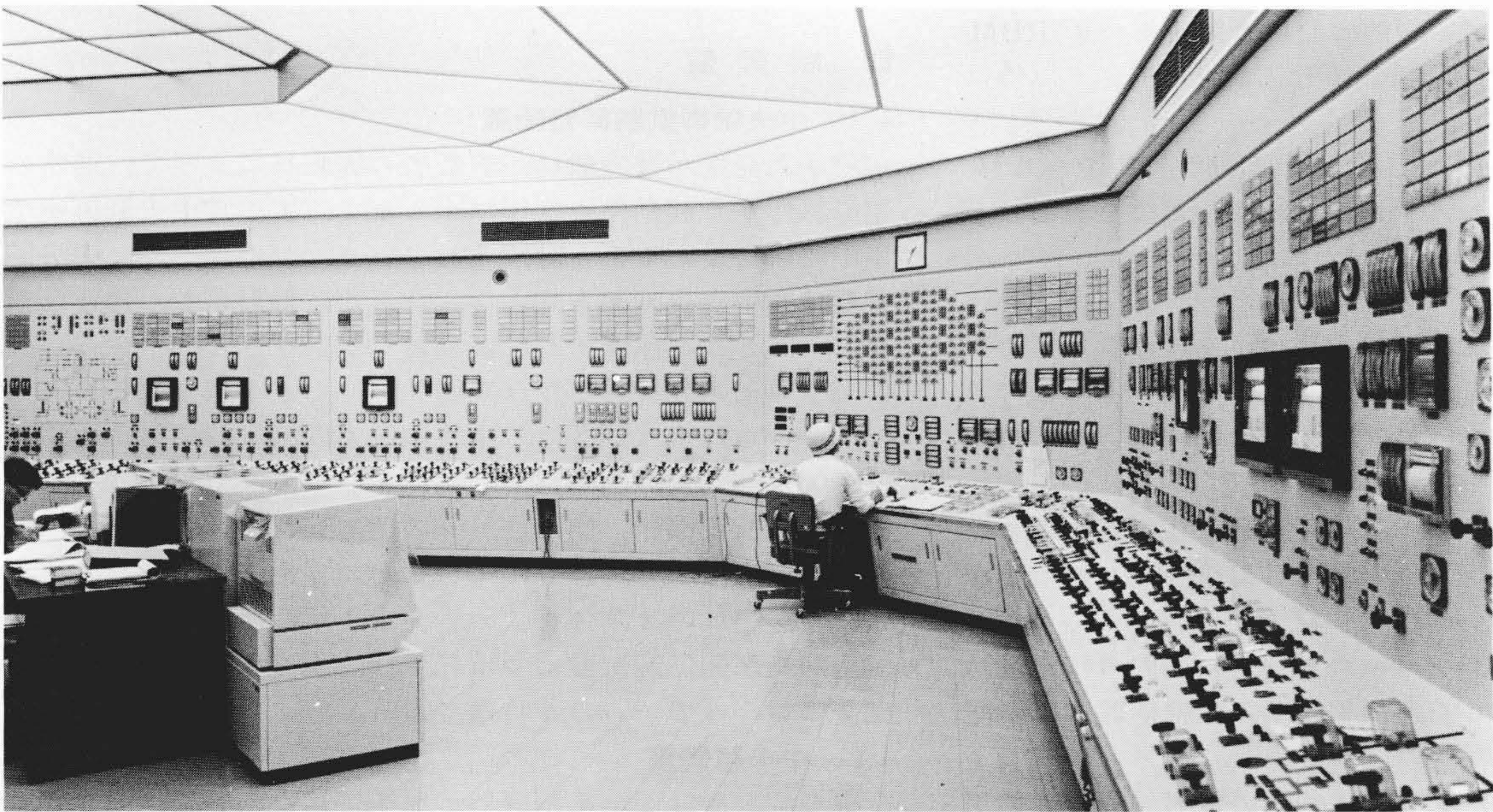


図4 中央操作盤
中央制御盤中の操作盤を示し、左3面が原子炉関係、他はBOP (Balance of Plant) 関係の操作盤である。

Fig. 4 Main Control Room Vertical Board

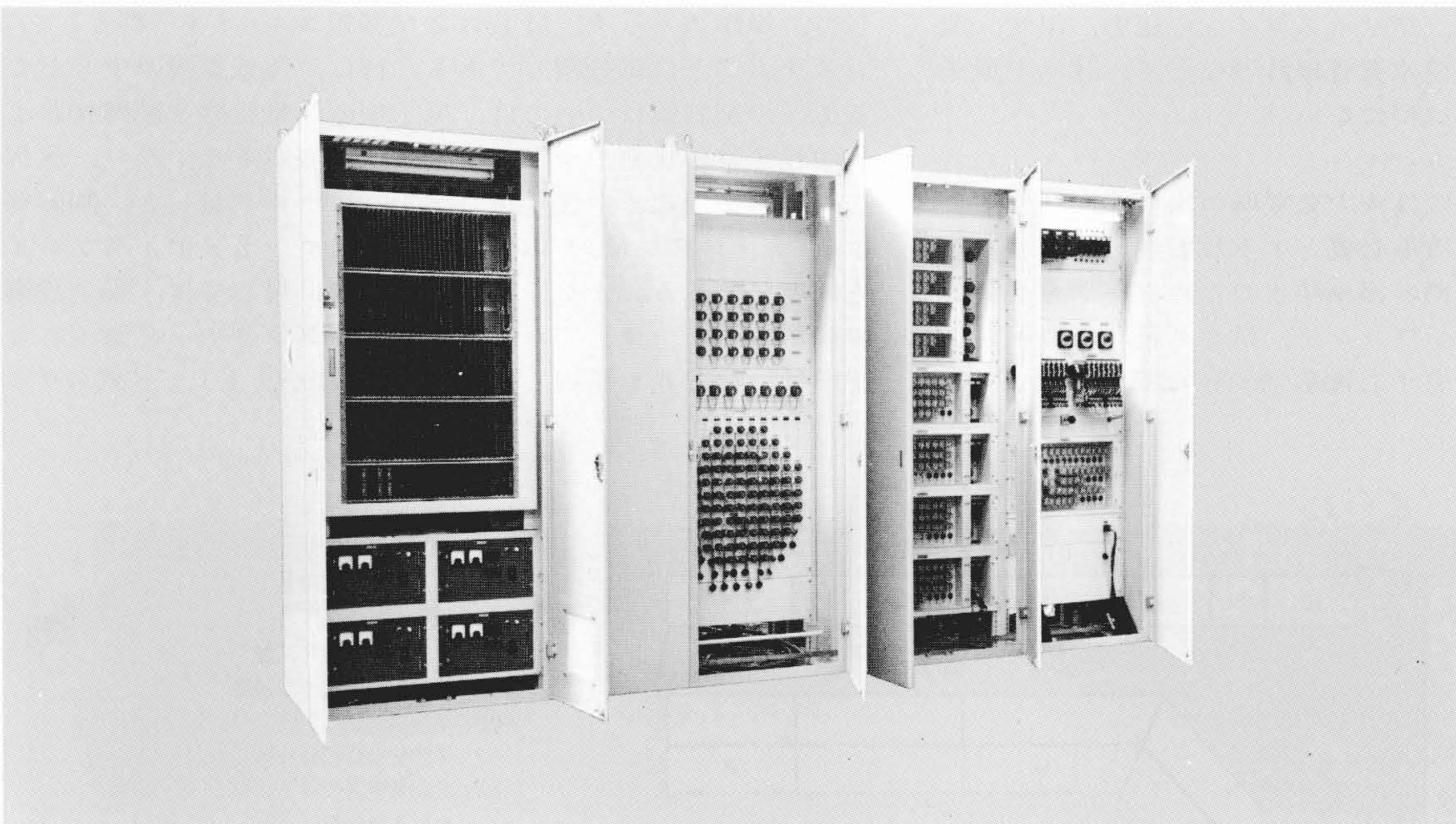


図5 制御棒制御盤
原子炉制御棒の制御および監視を行なうもので、向かって右が制御棒操作継電器盤、左が制御棒位置信号処理盤である。

Fig. 5 Control Rod Control Panel

デジタル表示器、ベル音色の使い分け、改良された盤内配線処理方式など細部にわたり新方式を採用している。

図4は中央操作盤を示している。

4.3 中央補助盤

中央補助盤は、四十数面で構成されている。そのうち代表的な制御盤について、その内容を紹介する。

4.3.1 制御棒制御盤

制御棒をそう入または引抜き操作する場合は、制御棒1ノッチ操作ごとに特殊シーケンスタイマにより水压駆動機構の時間制御を行ない、かつ炉心状態を十分監視しなければならない。このような機能を必要とする本制御盤は構成上、運転操作を主体とする制御棒操作継電器盤および制御棒状態監視を主体とする制御棒位置信号処理盤から成り、いずれも原子力発電所運転監視上、中枢となる制御装置である。

図5は制御棒制御盤で、5面より構成され、このうち制御棒位置信号処理盤の仕様は表1に示すとおりである。

本装置のおもな特長は次のとおりである。

- (1) 制御棒位置信号処理回路は、完全IC化により無接点化され、信頼性の向上と多量の情報処理を可能にしている。
- (2) 小形リレー使用によりグループ別にユニット化し、保守点検を容易にしている。
- (3) 制御回路収納部と外部ケーブル処理部を別キャビネットに分離し、重要制御回路を良好な環境に維持するよう考慮している。
- (4) 電源の分離、分散、圧着端子の使用、重要部品に対する定期点検回路の設置、回路のグループ分け、タイマの二重化など、部品およびシステム両面に対し信頼性、保守性を考慮している。

4.3.2 原子炉保護系盤

原子炉保護系は原子炉またはプラントの異常を検知し、アキムレータの蓄圧力により制御棒を急速に炉内へそう入し原子炉を緊急停止させる制御系である。このための制御装置

表1 制御棒位置信号処理盤仕様 制御棒位置信号処理盤の主要な仕様および構成内容を示したものである。

Table 1 Specification of Rod Position Information System Control Panel

項 目	仕 様
論 理 演 算 方 式	他システムとの非同期方式 時分割信号伝送方式（変形BCD方式）
演算および表示機能	制御棒位置および座標信号伝送（00～48デジタル） 計算機とのインターフェース処理 各種状態判断 諸インターロック
装 置 容 量	対象制御棒本数 97本 信号演算速度 $1\mu\text{s}/1$ パルス, $64\mu\text{s}/1$ クロックサイクル 入 力 信 号 5×10 マトリックス入力 出 力 信 号 2進および10進信号
主 要 回 路 構 成	論 理 素 子 DT μL 形IC 論 理 回 路 シフトレジスタ, カウンタ, メモリ, ドライバ, バッファなど 電 源 5Vおよび6V 60A 安定化電源
装 置 異 常 検 出	電源, ロジック, システムおのおのに対する異常検出回路付

が原子炉保護系盤で、原子炉を直接かつ安全に保護する重要な装置である。図6は二重化されたシステムの方のチャンネルに対する制御盤を示したものである。

本装置のおもな特長は次のとおりである。

- (1) 他の安全系制御盤と同様に、制御盤、制御器具すべてにわたって耐震設計を適用している。
- (2) 全体はA1, A2, B1, B2の四つのサブチャンネルの盤に分割されており、1 out of 2 twice のロジック演算を採用し、システムの誤動作、誤不動作に対する信頼性を向上させている。
- (3) 各チャンネルごとに分離がなされ、互いにバリヤで隔離されている。
- (4) 作動テストあるいは動作時の原因究明に便利なよう、各制御リレーの動作をランプ表示させ、一見して制御盤の状態がわかるよう考慮してある。
- (5) スクラム動作記録計を備えている。

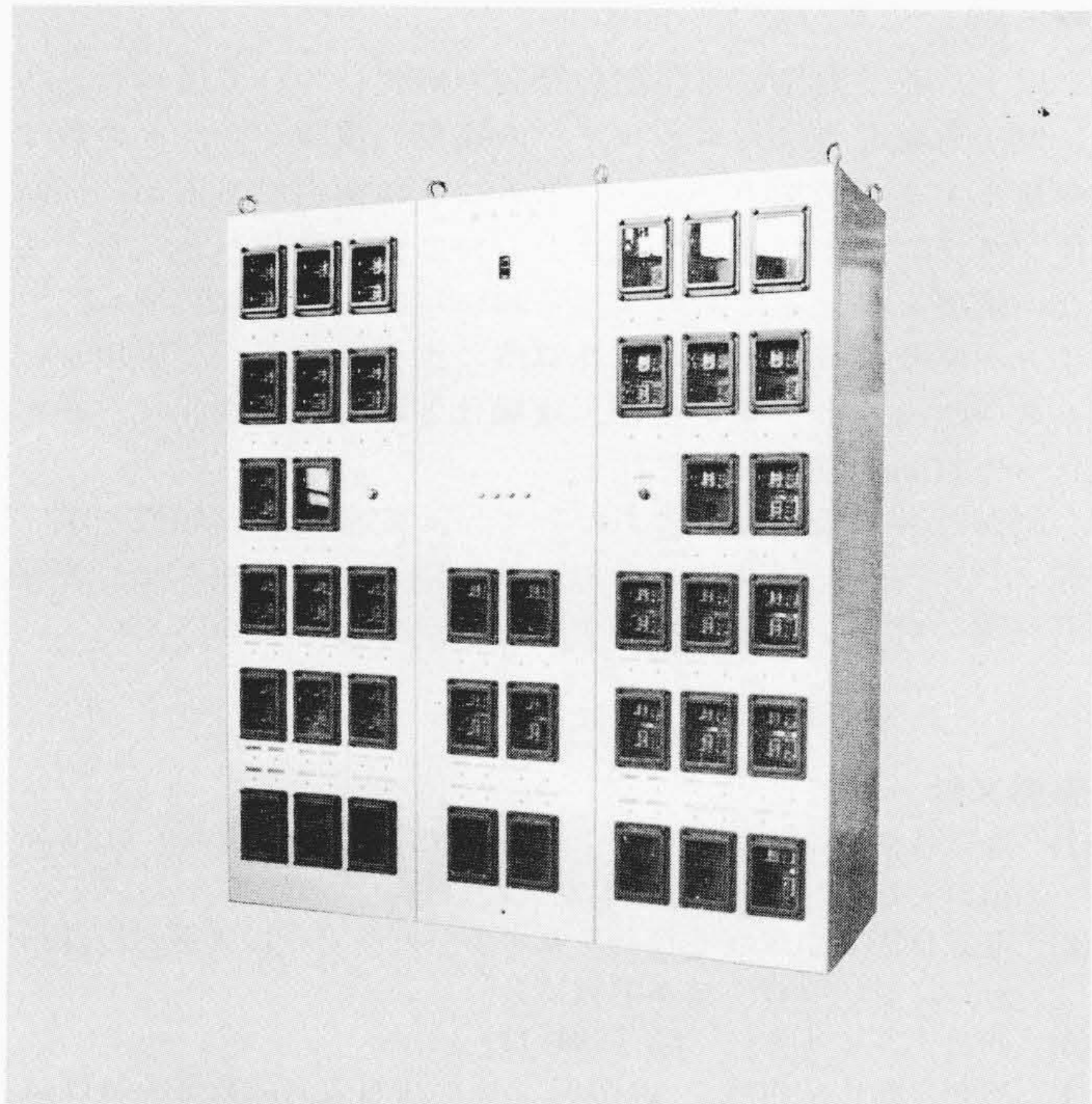


図6 原子炉保護系制御盤 原子炉保護系には2組の分離独立した制御盤があるが、本図はその一方の制御盤を示すものである。

Fig. 6 Reactor Protection System Control Panel

4.4 廃棄物処理制御盤

原子力発電所においては種々の形で放射性物質が発生するが、これらを安全かつ効果的に処理しなければならない。

図7は、廃棄物処理制御盤であり、廃棄物処理プロセスの運転管理が容易となるよう模擬母線方式としてある。また、運転記録計を設置してあるので、運転、保守に便利である。

5 品質管理

BWR原子力発電所における制御計装設備の品質管理について考えてみる。

原子力発電所において、特に高度の安全性と信頼性が要求され、品質管理を叫ばれるのは主として次の理由による。

- (1) 事故発生時には、確実にかつ安全に原子炉を緊急停止させ、その影響を最小限に食い止めなければならない。
- (2) 通常時または異常時において、発電所内外の居住者に、許容値以上の放射線被ばくを絶対に与えてはならない。
- (3) いったん稼(か)動後、一部機器の不具合があると、補修または点検作業に困難があるためプラント停止の時間が長くなり、電力供給障害をひき起こすことになるのでこれを避けなければならない。

このような要求に対して、メーカーとしての具体的方策は計画、設計段階から据付試運転に至るまで広範囲にわたりきめ細かい技術的、組織的な管理が必要であるが、特に計画、設計段階の技術的な内容に限定し、具体的実施例を述べる。

5.1 信頼性設計

安全保護系およびそれに準ずる制御装置の設計に対しては、その系の範囲内に起こりうるいかなる単一故障によっても、その安全保護機能を喪失しないように多重性、独立性、分離性、試験可能性を有するものとする。このため、原則としてロジック回路は1/2×2方式(1 out of 2 twice)とし、かつ他システムとの共用を避け、ロジックはテスト可能なように考慮する。また、分離については、電源はもちろん、検出器から最終操作端に至るまで、電氣的、物理的に分離を行なうようにする。検出器、検出配管、計器ラック、電線管、ケーブルトレイ、制御盤などは分離基準によって規定値以上の距離を確保するようにする。

なお、相互に分離すべきシステムは、表2に示すとおりである。

また、原子炉保護系を常時励磁方式とし、本質的にフェイルセーフ設計とする。

以上は、システム上で信頼性を向上している実際の方法で

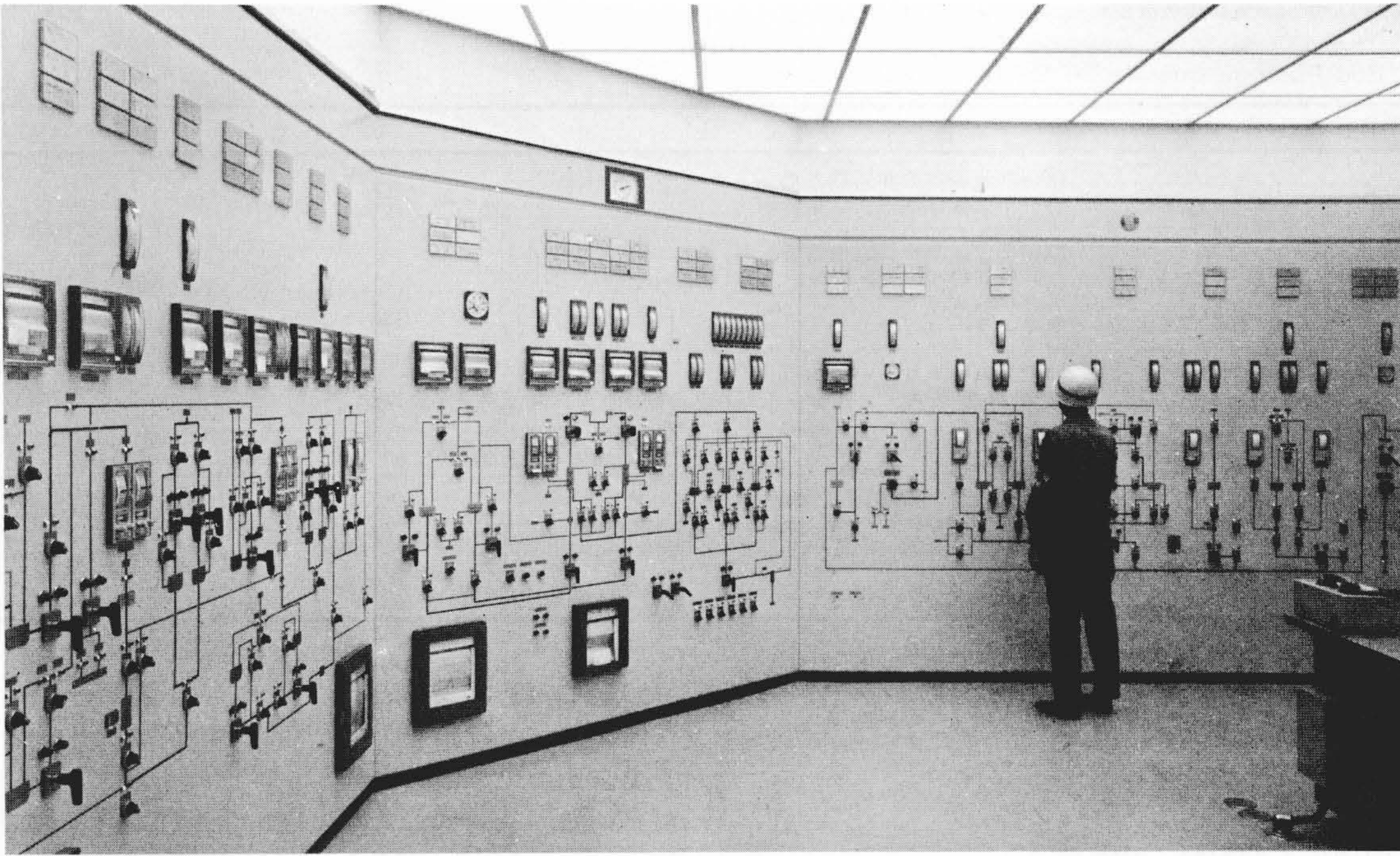


図7 廃棄物処理制御盤 廃棄物処理設備中、液体および固体廃棄物に対する制御盤を示している。

Fig. 7 Radwaste Disposal Control Panel

ある。

5.2 耐震設計

原子炉の安全保護機能は予想される自然災害に対しても、その保護機能を喪失してはならない。最も現実的で発生ひん度の高いものとして地震がある。原子炉の安全保護に関する制御器具は、予想される最大地震に対して、機械的強度が十分であることはもちろん、特性の変化あるいは機能喪失が起こってはならない。

耐震設計については、制御装置に対し震動解析コードを開発すると同時に、各種のモデル実験、実装実験を行ない、耐震設計法を実証して製品に適用している。

5.3 耐放射性設計

制御計装設備中、圧力容器周辺、ドライウエル内、排ガスシステムなど、ある程度以上の放射能レベル領域に設置される計装品、または直接汚染プロセスに接する計装品については、長期間の照射に耐えうる材質を選定しなければならない。特に有機質材料については、個々に検討する必要がある。

5.4 耐リーク設計

放射性のふんい気の内外を貫通する制御機器、または排ガ

スシステムのサンプル装置などは、大気中に排出される放射性物質の量を最小とするよう継手部分を溶接とし、弁類にはベローシール弁などを使用する。このときの部品、または接続点一点あたりのリーク量は、 10^{-6} cc/s以下を目標とする。

5.5 その他

その他一般の制御部品選定にあたっては、原理的にできる限り簡単であること、品質が安定していること、特殊工具を必要としないこと、使用条件に十分な余裕と耐量があること、また制御用検出スイッチなどに対しては、自力作動形を基本とすることなど周到な事前検討が必要である。

6 結 言

以上、原子力発電所の制御計装の概要について述べた。

原子力発電所は、エネルギーの長期的展望から、その数は今後ますます増加の一途をたどることは明白であるが、同時にシステムおよび機器の改良ならびに大容量化へと、たえない進展を続けるであろう。それに対応して制御装置も、プラント運転の自動化、電子計算機の拡大的使用、制御用デバイスの改良および開発など、複雑化と同時に高性能化、小形化へと質的变化が予想される。

制御計装設備の製作にあたっては、安全性と信頼性を第一義とし、内外先行プラントの運転実績を十分反映させ、原子力発電の健全な発展に寄与するよう、努力してゆきたい。

表2 原子炉安全保護系のシステム分離 原子炉安全保護系中、多重化されたシステムの相互分離基準を示している。

Table 2 Separation for Reactor Safeguards Systems

分 離 系 I	分 離 系 II
炉心スプレイ系 A	炉心スプレイ系 B
残留熱除去系 A	残留熱除去系 B
自動ブローダウン系	高圧炉心注水系
安全系機器冷却水 A	安全系機器冷却水 B
内側隔離弁	外側隔離弁
原子炉保護系 A1, B1	原子炉保護系 A2, B2
非常用電源 A	非常用電源 B

参考文献

- (1) 電気技術基準調査委員会：米国AEC「原子力発電所一般設計指針」の解説(昭-44、日本電気協会)
- (2) 電気技術基準調査委員会：原子力発電所安全保護系の設計指針、ほか(昭-47、日本電気協会)
- (3) 西村：エネルギー 53(昭44-11)
- (4) 川村、秋山、川城：「再循環ポンプ用可変周波数電源MGセット」日立評論 53, 1107(昭46-11)
- (5) 柏原、滝：「原子力タービンの制御系統の特長」日立評論 53, 535(昭46-6)