

沸騰水型原子力発電所用中性子計測演算装置

Neutron Monitoring Instrumentation for BWR Nuclear Power Plant

本稿は、沸騰水型原子力発電所用として製品化を図った中性子計測演算装置について論述したものである。

この装置の特長は、信頼性及び保守性の向上と、耐震設計を図り、我が国特有の地質と環境条件に適合した製品としたことである。また、いかなる容量の沸騰水型原子力発電プラントに対しても適用できるように、ビルディングブロック方式による標準化を図っている。

甲斐孝明* Kai Takaaki
 坪本 徹* Tsubomoto Tôru
 猪狩邦之* Igari Kuniyuki
 高野一夫* Takano Kazuo

1 緒 言

近年、目覚ましい発展をとげた原子力発電プラントは、単機容量でも電気出力が1,000MWを超える大容量プラントが主流を占めようとしており、安全性と信頼性の確保がますます重要な課題となってきている。中性子計装は、核分裂に直接関係する量の計装で、原子炉の安全を確保するために欠くことのできない重要な原子炉計装装置である。中性子計装は、検出器を原子炉炉心外に設置して、平均的な出力を測定する炉外計装と、検出器を炉心内に挿入して局所的な出力分布までを測定する炉内計装とに大別され、沸騰水型原子力発電所(以下、BWRと略す)では、すべて炉内計装を採用しており、このたび我が国の高温・多湿条件に適合できる高い信頼性をもった中性子計測演算装置を製品化した。

2 中性子計装の役割

中性子計装は炉心内の中性子束を直接検出して、原子炉の出力レベルと出力変動の割合を測定の対象としている。図1はBWR用中性子計装の系統構成を示すもので、次のような

目的をもっている。

- (1) 対数、あるいは線形で表わした原子炉出力レベルと出力変動の割合の監視。
- (2) 制御棒引抜操作時に局所的出力の過大を検出し、制御棒引抜阻止信号を与える。
- (3) 原子炉出力レベル及び出力変動率を検出し、原子炉緊急停止(スクラム)信号を原子炉保護系に与える。
- (4) 中性子束分布の監視、炉心性能計算、原子炉状態表示及びプラント診断などに必要なプロセス計算機への情報の提供。
- (5) 再循環流量制御による、原子炉出力制御系への信号提供。

3 装置構成

BWR用中性子計装は、炉の起動から全出力運転までを中性子源領域監視系(以下、SRMと略す)、中間領域監視系(以下、IRMと略す)及び出力領域監視系(以下、PRMと略す)の三つの測定系で分担し、図2に示す範囲を監視する。表1にその主要構成仕様を示す。

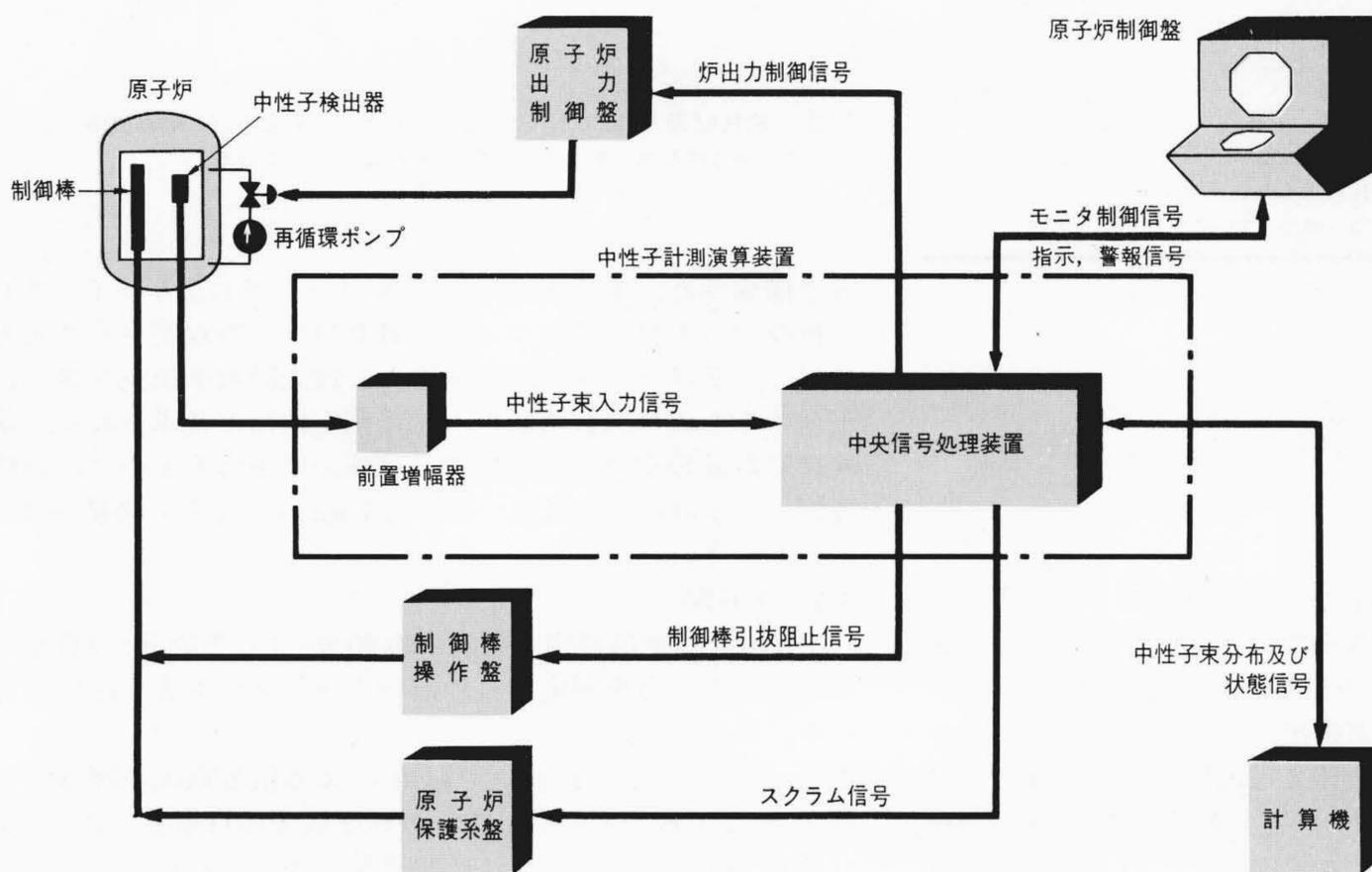


図1 中性子計装の系統構成 中性子計装は、原子炉の出力監視、保護、炉心性能計算などに必要な信号を提供する。

* 日立製作所大みか工場

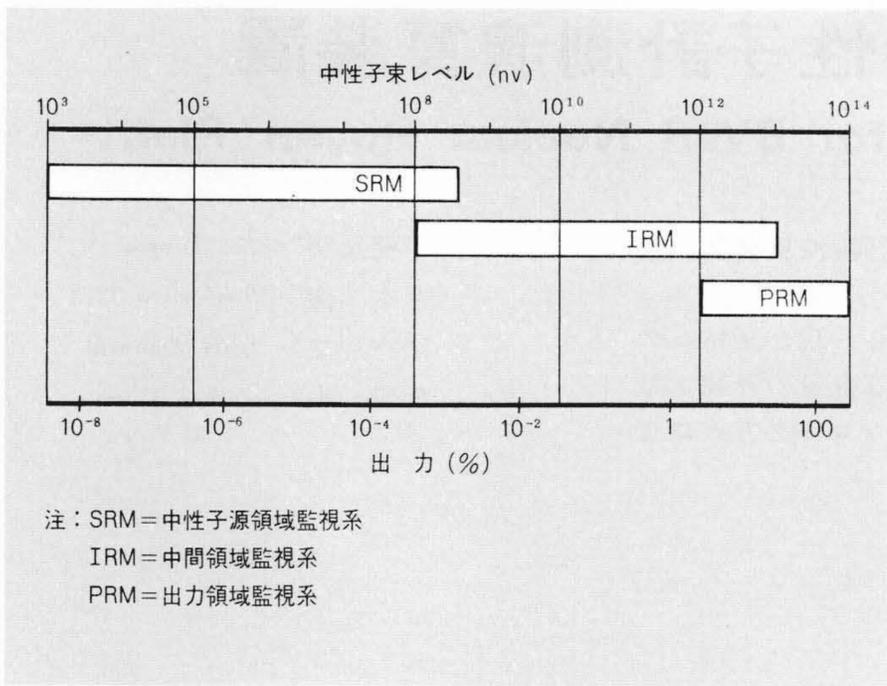


図2 測定範囲 起動から全出力までの約11けたの中性子束範囲を3領域に分けて測定する。

表1 主要仕様 各系統ごとにプラント容量に応じて標準化を図っている。

No.	項目	SRM	IRM	PRM
1.	系統(チャンネル)数	540MW	4	8
		780MW	"	"
		1,100MW	"	"
2.	計測方式	電流パルス法	自乗平均法(キャンベル法)	直流増幅法
3.	精度(実用範囲)	±2% フルスケール	±1.5% フルスケール	±0.8% フルスケール
4.	出力信号	対数計数率(cps) 炉周期(s)	リニア出力(ユニット)	熱出力(%)
5.	供給電源	DC ±24V	DC ±24V	AC 115V, 50/60Hz DC 125V,
6.	環境条件(中央制御室)	温度: 0~50°C (15~32°C)* 湿度: 10~85% (25~75%)		

注: *()内は上記精度保証範囲とする。

LPRM=局部出力監視系
APRM=平均出力監視系
RBM=制御棒引抜阻止系
TIP=走行形校正系

3.1 SRM

SRMは、原子炉の未臨界状態より熱出力数キロワットまでの中性子束レベルを測定する系である。この領域では、図3に示すように検出器として高感度の核分裂計数管を使用し、その出力をパルス数として検出する。検出器の出力パルスは、原子炉建屋内の前増幅器で電流増幅された後、中央制御室の信号処理装置へ伝送される。SRMでは $10^{-1} \sim 10^6$ cpsの範囲の対数計数率と、これを微分して得られる出力変動率(炉周期-100~∞~+10s)を測定する。警報は対数計数率高・低、炉周期短及び計器故障で与えられ、燃料装荷時には炉周期短でスクラム信号を出す。標準プラントでは4系

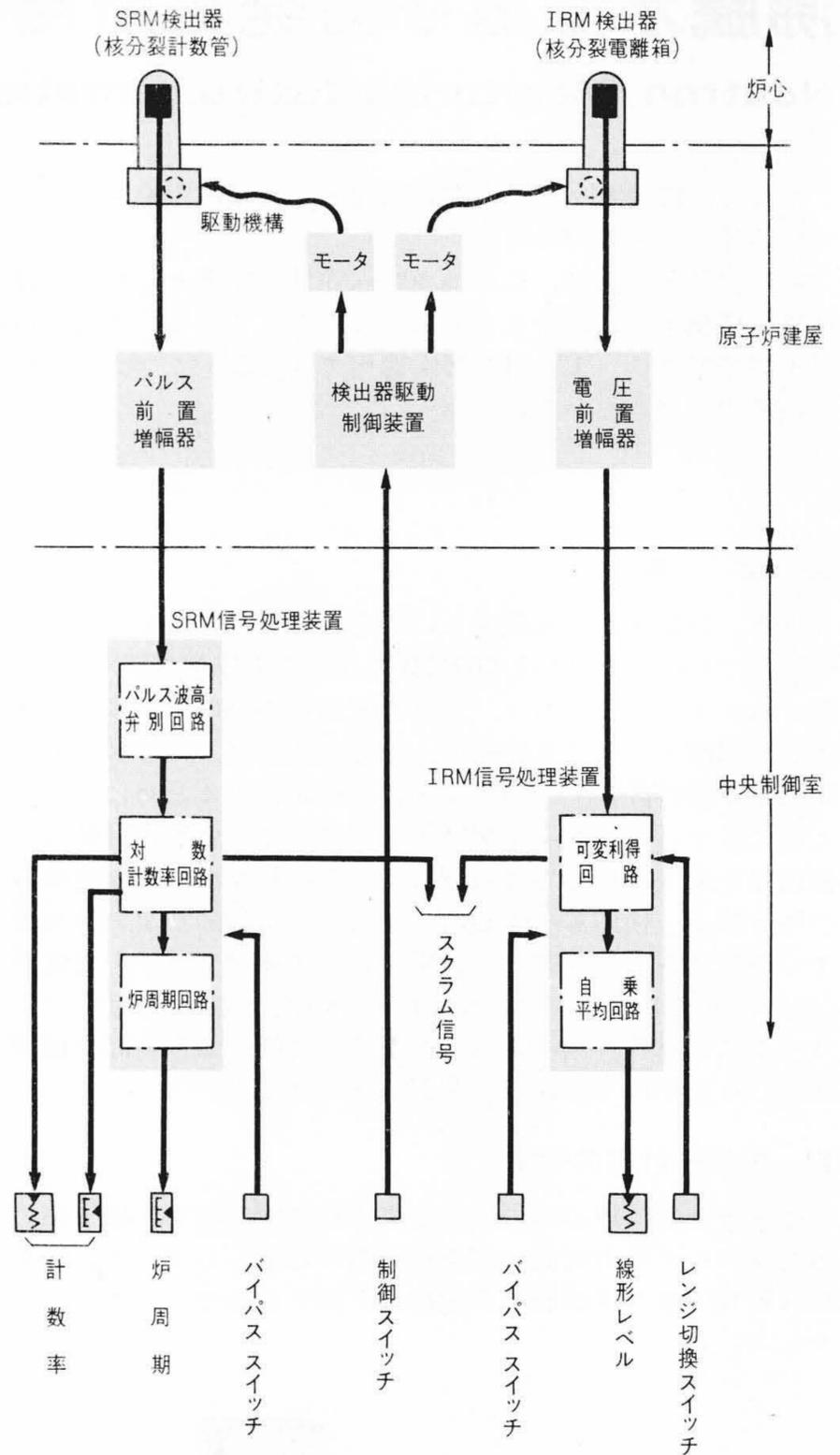


図3 SRM及びIRM 検出器は出力が上昇すると、駆動機構により炉心下部へ引き抜かれ、感度低下を防止するようにしている。

統で構成され、1系統はバイパススイッチによりバイパスして運転中にも校正可能である。SRMは、不規則パルス入力に対して7けたの測定範囲を持ち、最大計数率損失を3%以下にするために高分解能をもった測定技術が要求される。図4は対数計数率計の入出力特性試験結果を示すもので、目標仕様である直線性±2%、分解能1μs以下を十分満足させることができた。

3.2 IRM

IRMには検出器出力電流の変動分(ゆらぎ成分)の自乗平均値により出力を測定するいわゆるキャンベル法を採用している。本方式には次のような特長がある。

(1) n (中性子束), γ (ガンマ線束)による信号電流の期待値を各々 $\langle i_n \rangle$, $\langle i_\gamma \rangle$ とし、信号電流の標準偏差の自乗を $\langle (\Delta i_n)^2 \rangle$, $\langle (\Delta i_\gamma)^2 \rangle$ とすると、直流法と自乗平均法による n/γ 比は次のように与えられる。

$$\text{直流法} \frac{\langle i_n \rangle}{\langle i_\gamma \rangle} = K_1 K_2 \frac{Q_n}{Q_\gamma} \dots \dots \dots (1)$$

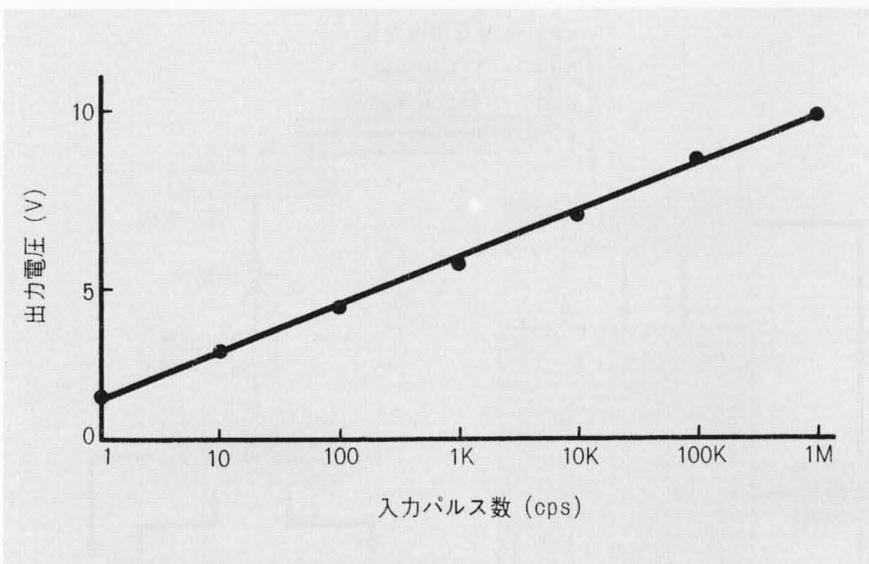


図4 SRM対数計数率計の入出力特性試験結果 目標の直線性を満足している。

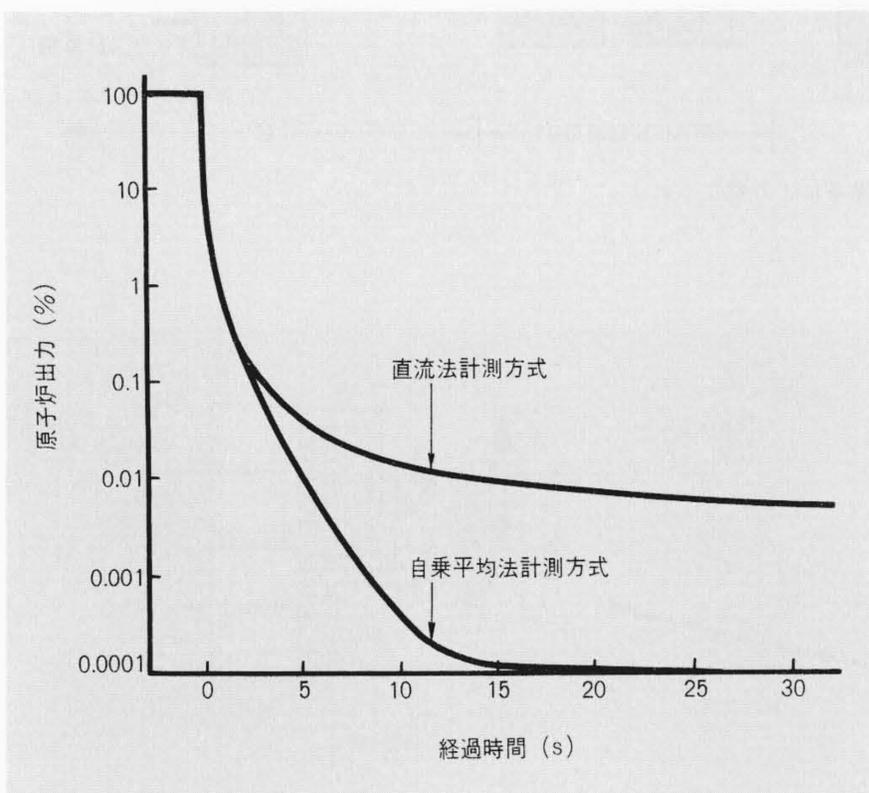


図5 IRMの原子炉試験結果 原子炉低出力領域において、自乗平均法のn/γ比が著しく向上していることが分かる。

$$\text{自乗平均法} \quad \frac{\langle (\Delta i_n)^2 \rangle}{\langle (i_\gamma)^2 \rangle} = K_1 K_2 \frac{Q_n^2}{Q_\gamma^2} \dots\dots(2)$$

ここで、 K_1 ：検出器の検出効率で決まる定数

K_2 ：中性子と γ 線の束密度比

Q_n, Q_γ ：中性子、 γ 線1パルス相当の電荷量
 一般に $Q_n \gg Q_\gamma$ であるから平均自乗法では直流法より Q_n/Q_γ だけ n/γ 比を改善できることが分かる。図5に原子炉出力降下時のIRM出力応答特性試験結果を示す。低出力レベルでは自乗平均法が直流法に比べて約2けたの n/γ 比が改善されており、図2に示したIRMの目標測定範囲を十分満足させることができることを確認した。

(2) 計測回路の大部分が交流信号系で構成されており、系全体の安定度が高く、漏れ電流による誤差を小さくできる。

(3) 信号系インピーダンスが低く選べるので、トランジスタ回路に適している。

IRMは検出器として核分裂電離箱を使用し、その出力は図3のように、原子炉建屋内の電圧前置増幅器を介して中央制御室の信号処理装置へ伝送される。出力測定はレンジ切換スイッチで利得を切り換えて線形に行なう。指示高・低及び

計器故障で警報し、指示過大でスクラム信号を与える。標準プラントでは8系統で構成され、これを2論理回路に分離して各論理回路内で1系統をバイパスして運転中にも校正できるようにしている。

3.3 PRM

PRMは約 $10^{12} \sim 10^{14}$ nv の中性子束レベルを直流電離箱方式により監視する系である。PRMは炉定格出力付近での炉心内の出力分布を常時監視し、出力過大でスクラム信号を与える。PRMは図6に示すように、局部出力監視系(以下、LPRMと略す)、平均出力監視系(以下、APRMと略す)、制御棒引抜阻止系(以下、RBMと略す)及び走行形校正系(以下、TIPと略す)で構成される。

(1) LPRM

図7に示すように炉心内に固定して配置した多数のLPRM検出器の信号は、各々独立して設けた直流増幅器で処理される。LPRM増幅器には検出器の感度低下を補正するための可変抵抗器を設けており、最大感度を $3 \text{ mA} \sim 50 \mu\text{A}$ まで調整できるようにしている。

(2) APRM

APRMは、選ばれたLPRMの信号を入力として平均出力を測定する系である。出力信号は、平均化回路の利得を可変抵抗器で調整して、熱出力で校正され、 $0 \sim 125\%$ の指示を与える。標準プラントでは6系統で構成し、これらを2論理回路に分離して、各論理回路内で1系統はバイパスして運転中にも校正できるようにしている。出力が過大になると(1 OUT OF 4) \times 2の論理でスクラム信号を与える。

(3) RBM

RBMは、原子炉出力10~30%以上の領域での制御棒引抜き時の局部的な過大出力を監視し、燃料破損を防止するために設けられる。図7に示すように選択された制御棒周囲の最大16個のLPRMを $\frac{1}{2}$ に分けて各々平均し、2系統のRBMを構成する。この出力は1 OUT OF 2の論理で制御棒引抜阻止信号を与える。

(4) TIP

TIPは、出力領域での炉内中性子束分布を連続的に測定すること、及びLPRM検出器感度を定期的に校正するために用いられる。常時、炉心外に引き抜かれた標準検出器を校正時には、LPRM検出器集合体の校正用案内管を通して炉心内へ挿入する。この出力を、炉心軸方向をX軸、中性子束をY軸とするX-Y記録計及びプロセス計算機へ与える。

4 信頼性設計

中性子計装は原子炉計装の中樞をなし、高度の信頼性が要求される。したがって、装置設計に当たっては日立製作所が制御用計算機をはじめとして電力、産業用機器及び圧延機など、各種機器の制御装置の分野で永年つちかかってきた厳しい品質水準を適用した。更に原子力特有の品質管理手法を加えて、特に信頼性のうえで特長のある製品を完成させた。

4.1 故障率の低減

本装置の使用部品は、プラグインカード約1,000枚、部品点数約50,000点にも及ぶため、使用部品の信頼度が非常に重要となる。そこで、適用部品は実績上信頼性が保証され、品質的に安定しており、かつ補充が容易な部品を選定した。更に大幅な集積回路(IC)化による部品点数の低減と、部品のばらつき及び使用条件を考慮して、部品の使用定格低減率を十分とった。こうした信頼性設計に加えて、広く計測制御装置の分野で得た経験をもとに確立させた厳しい品質試験

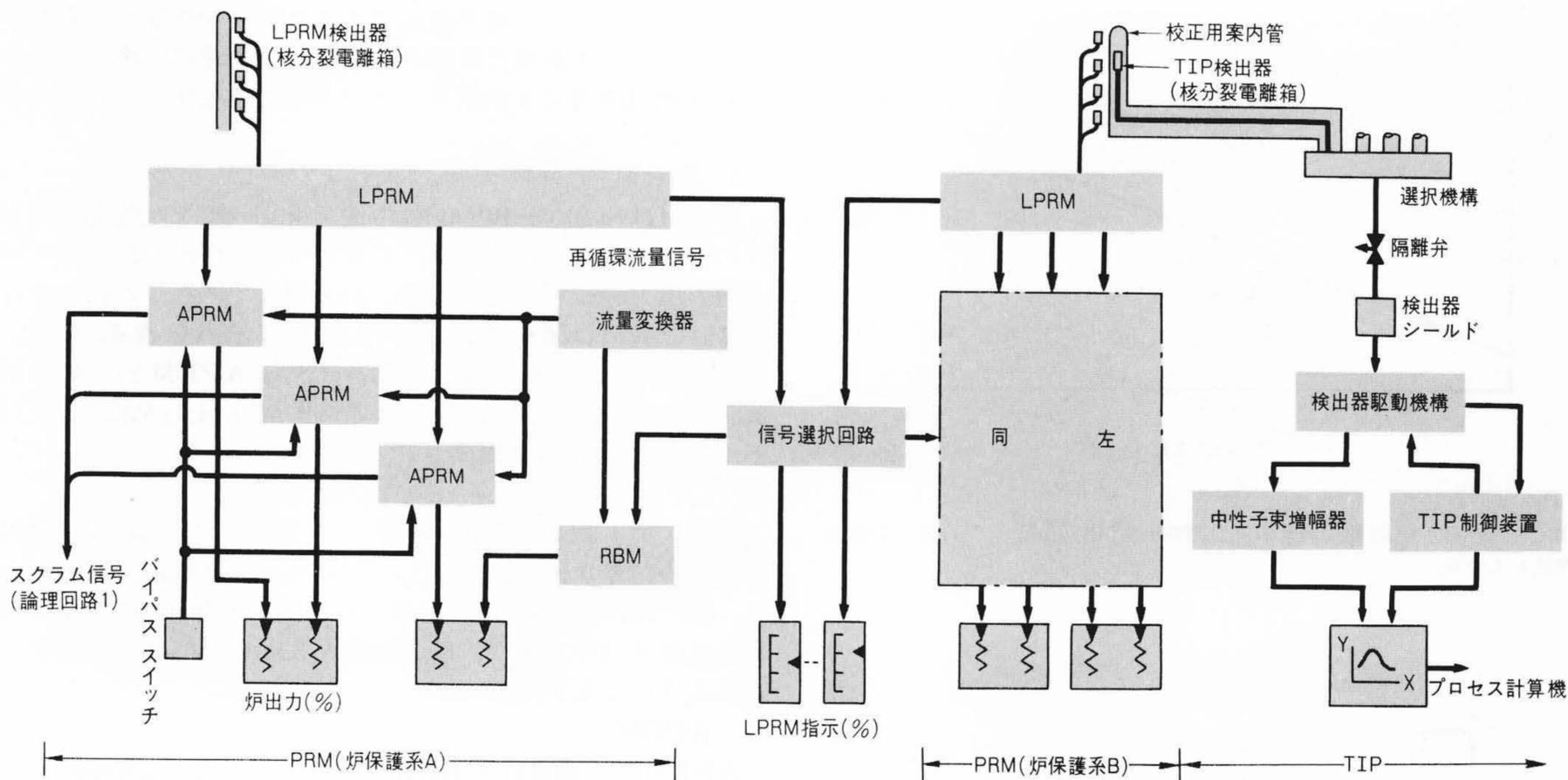


図6 PRMの構成 APRM, RBMのインターロック信号は、原子炉再循環流量信号により補正される。

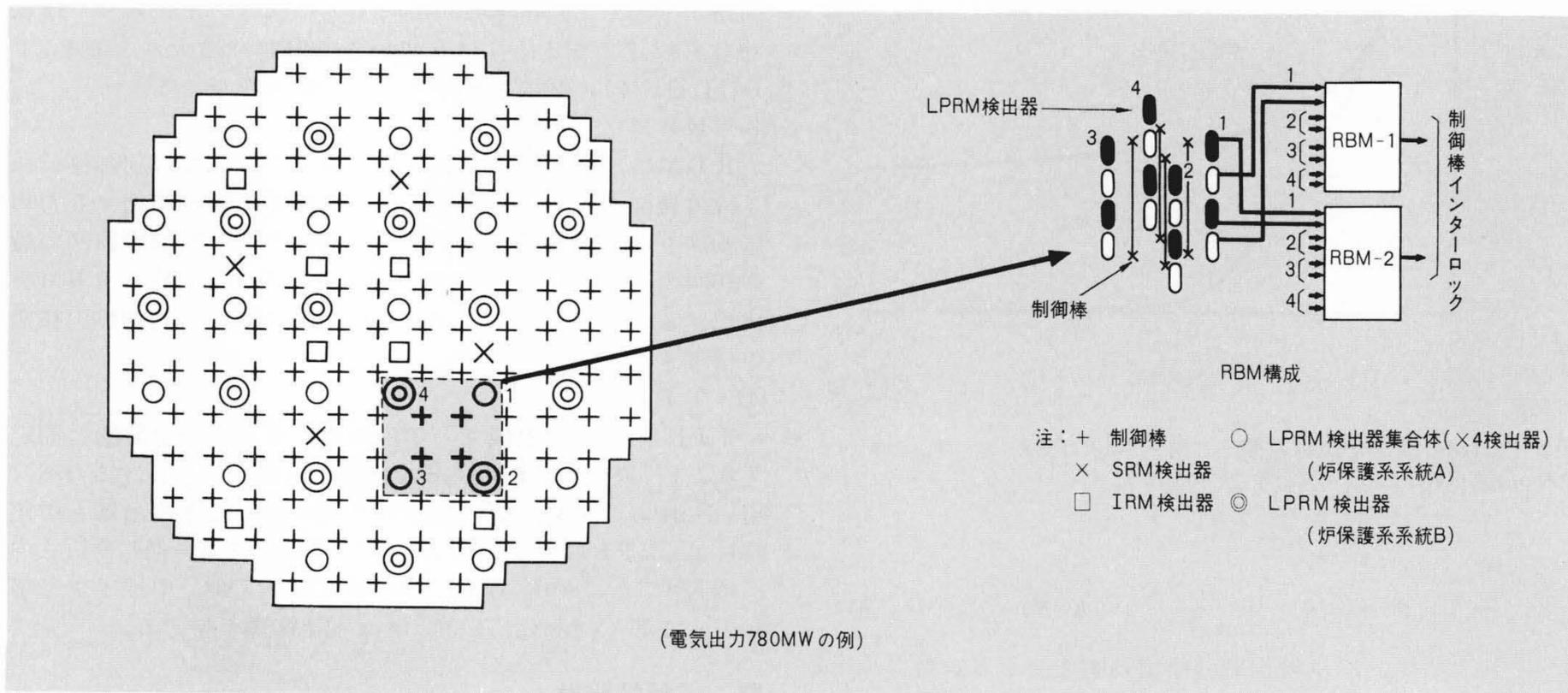


図7 検出器の炉心内配置とRBM構成 4本の制御棒のどれを操作しても、これを囲む最大4 LPRM 集合体(図示例: 1~4)の信号がRBMへ与えられる。

を実施することによって、系統上要求されるMTBF(Mean Time Between Failure; 平均故障間隔)を満足するようにしている。

4.2 耐環境性の強化

中央制御室設置機器は、通常は換気空調され比較的保護された環境条件下におかれている。しかし、据付時や停止中には中央制御室といえども吸湿しやすい条件にさらされること、及び前置増幅器が現場設置であることを考慮した場合、我が国特有の高温・多湿な環境条件に合致できる装置にしなければならない。耐湿性の強化に関しては、すべてのプラグインカードに対して防湿剤の塗布、使用部品の選定などにより対処した。例えば、SRMの炉周期計回路には一般には数百メ

グオームの高抵抗が使用されているが、高抵抗回路は周囲湿度の影響を受けやすいので好ましくない。本装置では回路方式を改良し、数メガオーム以下の低抵抗を使用した。温度の影響に対しては、消費電力の小さい回路構成を第一とし、更に放熱構造設計を行なって自然冷却方式とした。

4.3 耐ノイズ設計

中性子計装は、一般の計測制御装置で問題となる電氣的ノイズのほかにガンマ線などによる誤信号の影響を考えなければならない。後者に対しては、SRM系のパルス波高弁別回路やIRM系のキャンベル回路によりS/N比の改善を図っている。一方、本装置は 10^{-6} A電流パルスや 10^{-3} V交流電圧信号の処理技術を必要とするので、特に電氣的ノイズに対して

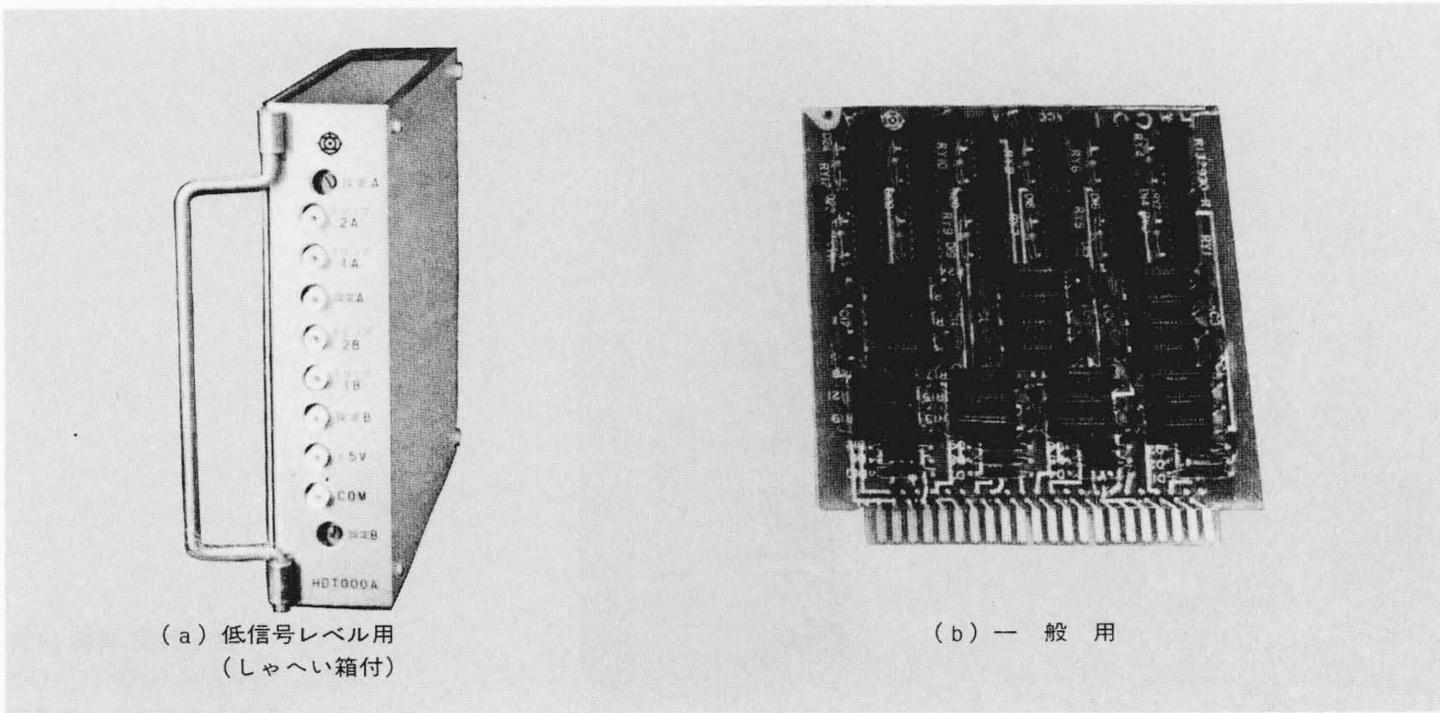


図8 プラグインカードの外観 低信号レベル演算回路用のプラグインカードには、金属製ケースにより耐ノイズしゃへいを図っている。

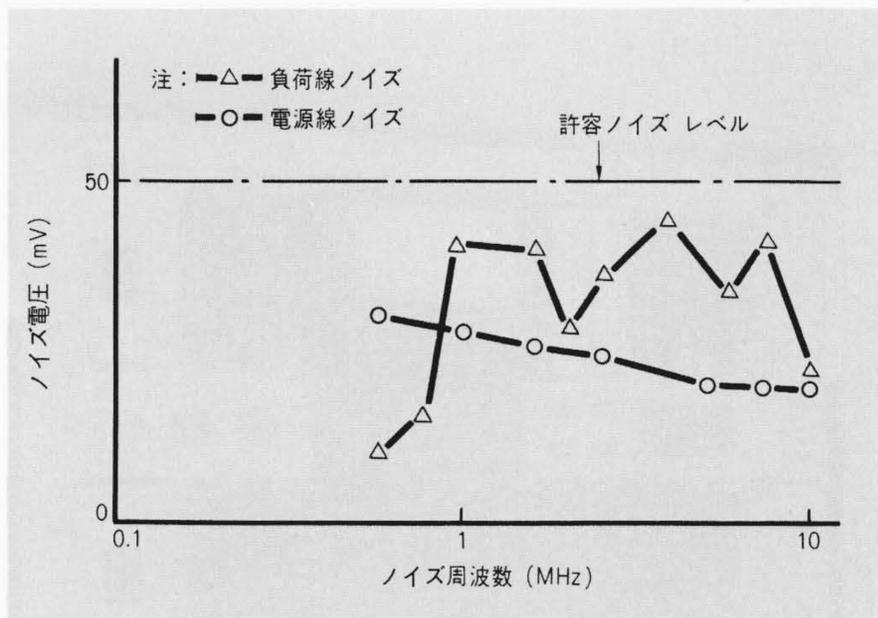


図9 SRM前置増幅器ノイズ試験結果 入力信号線を金属性導管内に布設することにより、ノイズレベルを許容値以下に低減できる。

は注意を要する。したがって、ノイズ余裕度の高い回路方式、配線の選定、接地線の確立、ノイズ発生防止回路の採用、制御線と計測線間の配線分離などにより、耐ノイズ対策を図った。更に、特に微小信号を扱うノイズの影響を受けやすいプラグインカードは、金属性しゃへい箱に内蔵させている。図8に本装置で使用している一般用としゃへい箱付のプラグインカードを示す。また、図9に最もノイズに弱いSRM系前置増幅器のノイズ試験結果の一例を示す。入力信号線を金属性導管内に入れて布設することによって、次段のパルス波高弁別回路より決まる許容ノイズレベル以下に低減できることを種々のノイズ試験結果により確認した。

4.4 信頼性試験

信頼性試験は、初期不良の低減と耐環境性の向上を目的として実施しており、主な試験は高温寿命試験、耐衝撃試験及び耐ノイズ試験である。これらの信頼性試験に加えて、原子力プラントは据付から運転開始までの試運転期間が比較的長期間に及ぶので、プラント運転開始後の初期不良はほとんど除去できるものと考えられる。更に原子炉建屋内に設置される前置増幅器、信号伝送線及びコネクタに対しては原子炉冷却材喪失事故(Loss of Coolant Accident)時を想定した高温、多湿試験を実施して、このような過酷条件にも耐えられ

ることを確認している。

5 耐震設計と系統分離

IRM系とPRM系は原子炉に対する安全保護機能が要求されており、予想される自然災害に対しても、その保護機能を喪失することのないように設計しなければならない³⁾。最も現実的で発生ひん度の高いものとして地震があり、予想できるいかなる地震に対しても機械的強度はもちろん、特性の変化あるいは機能の喪失が起こらないようにしなければならない^{1),2)}。耐震設計に関しては、耐震性に優れた部品の選定とユニット及び盤を耐震構造とすることにより要求される耐震機能を満足できるようにした。図10は耐震試験の一例としてAPRMユニットの試験結果を示すものである。試験は、

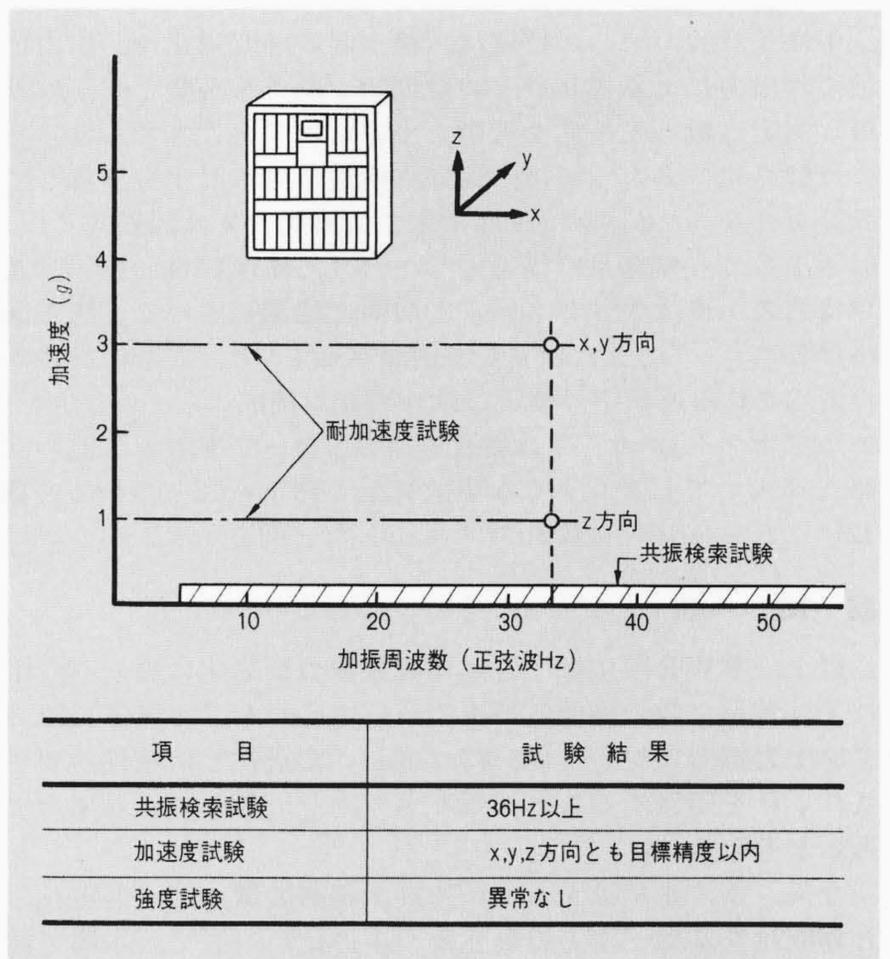


図10 APRMユニット耐震試験結果 全装置に対して耐震試験を行ない、強度、特性ともに目標値以内であることを確認している。

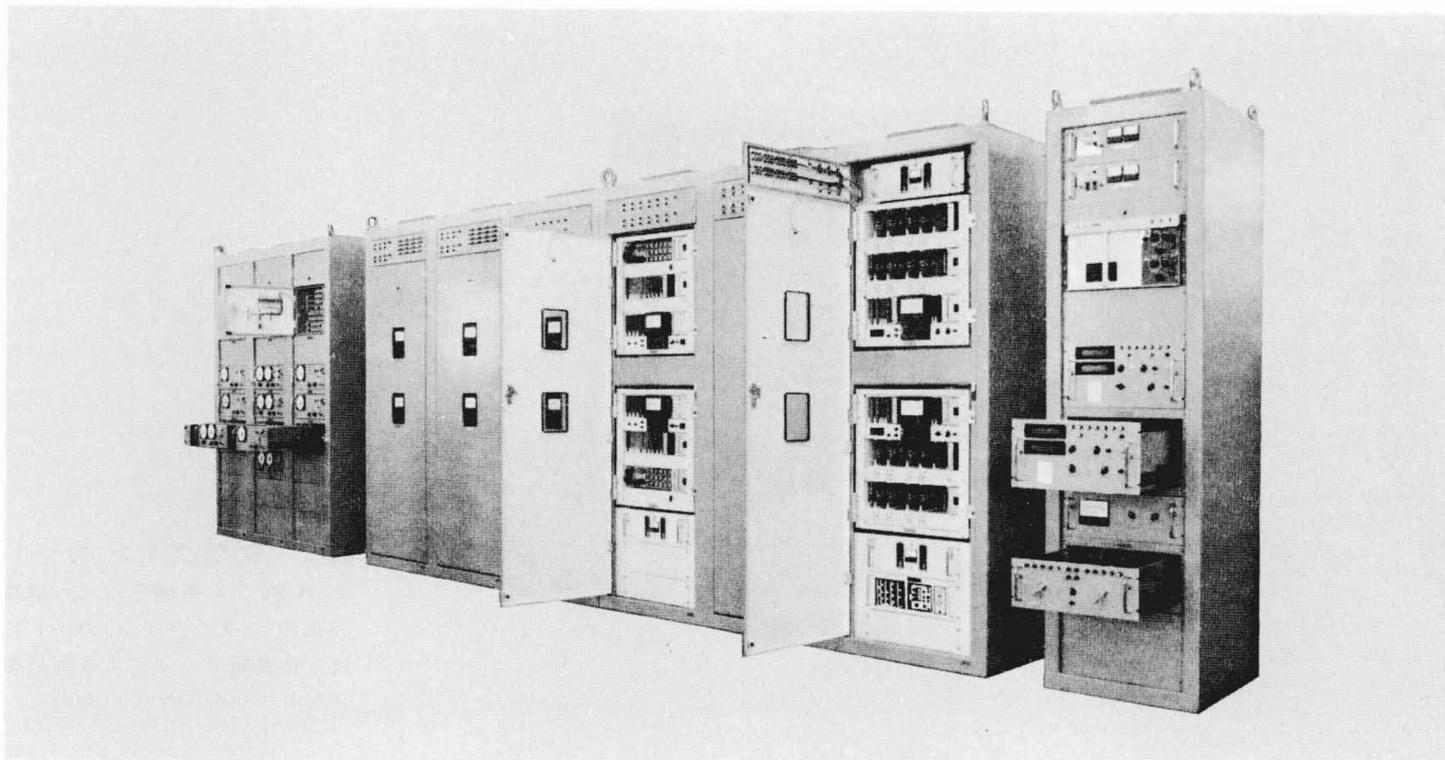


図11 中性子計測演算装置
盤 SRM, IRM盤, PRM盤
及びTIP盤で構成され、剛構造
としている。

共振検索試験、加速度試験及び強度試験を行なった。共振検索試験は5~1,000Hzについて行ない、共振点は36Hz以上であることを確認した。加速度試験は、x, y方向3g, z方向1gで行ない、いずれも特性の大きな変化はみられず、目標精度以内であった。また、機械的にも異常はなかった。図11は耐震構造を図った中性子計測演算装置盤を示している。

一方、安全保護系に関連する回路は、(1 OUT OF 4)×2の冗長系で構成され、各回路は電気的かつ物理的に分離独立させることにより、一つの回路の故障が他の回路に影響しないようにしなければならない^{1),2)}。これに対しては、金属性しゃへい板や導管による配線及び電源系統の分離、並びに信号変換器、リレーなどの絶縁装置による信号系統の分離及びユニット間のしゃへい板、又は距離の確保による分離を図っている。

6 保守性

中性子計装の一つの特質は、検出器の感度補正や、出力信号の熱出力による校正などの定期的な校正を必要とし、取り扱う測定点数も冗長性を考慮して非常に多いことである。そこで製品化に当たっては、保守点検性に対して十分留意して設計を行なった。ユニットはすべて引出式、又は回転式とし、引き出して点検容易な構造としており、操作器具、指示計及び状態表示灯はすべてユニット前面に配置している。校正回路は各ユニットごとに独立して内蔵させており、安全保護系から要求される運転中の校正試験が可能な構成にしている^{1),2)}。またプラグインカードは鍵化を図り、カードを誤って他の回路へ挿入してしまうような事故発生の防止を図っている。図12にこれら保守性に優れたユニットの一例を示す。

7 結 言

以上、BWR用中性子計測演算装置の製品化に当たり、中性子計装系全体の概要と特長について述べた。本装置に限らず原子力機器に対しては、特に厳しい安全性と信頼性が要求されこれを確保することが我々メーカーに与えられた使命であると考える。

今後、ますます拡大していく計測制御装置の電子装置化と計算機化を基盤とする自動化及び小形化に対して、本稿で述べた技術を活用し、増大する原子力発電設備の安全性の確保に努力していきたい。

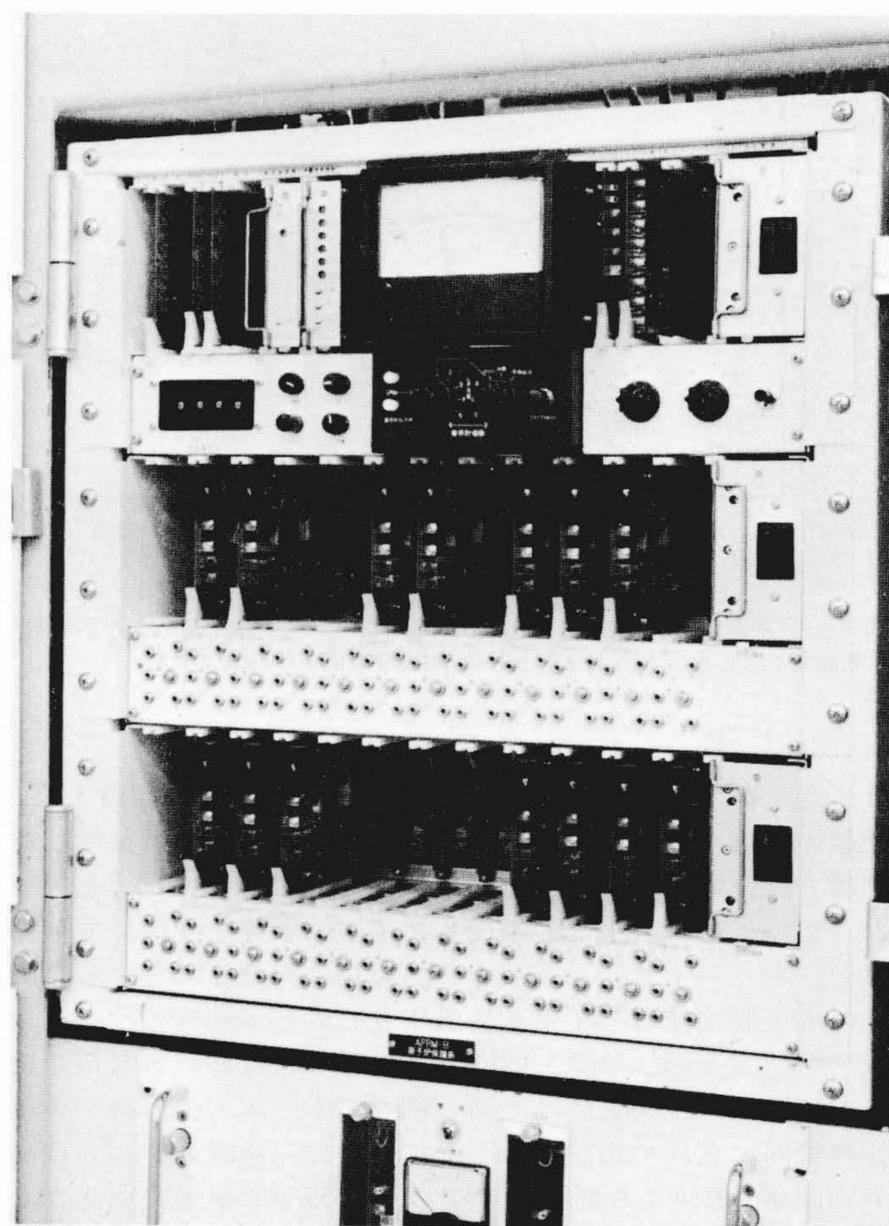


図12 ユニットの外観 ユニットは、系統別に独立して構成され、各々校正回路と校正用メータを内蔵している。

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) 矢内：「中国電力株式会社島根原子力発電所向け制御計装設備」、日立評論、55、619（昭48-8）