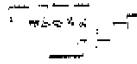


## 「もんじゅ」特集



## 「もんじゅ」の設計

## 7. 計測制御系統施設

高速増殖炉開発本部・原型炉建設部・電気課

資料番号：51-8

7. Instrumentation and Control System

Electrical Engineering Section, Monju Construction  
Division, FBR Development Project

「もんじゅ」の計測制御設備は、基本的には軽水炉と同様の設計思想に基づいているが、ナトリウム冷却の高速増殖炉としての特徴も持っている。ここでは、「もんじゅ」計測制御設備の代表例として、プラント制御の方式、原子炉保護設備、原子炉計装、ナトリウム用のプロセス計装、放射線管理・監視設備及び中央制御室について、それぞれの概要を述べる。

**Key Words:** Plant Control System, Reactor Protection System, Neutron Flux Monitoring System, Failed Fuel Detection and Location System, In-Core Instrumentation, Level Meter, Pressure Transmitter, Flow Meter, Radiation Control and Monitoring System, Central Control Room, Central Control Panel, Central Monitoring Panel.

## 7.1 まえがき

計測制御設備の目的は、原子炉の運転状態を制御・監視して安全な状態に保ち、万一異常状態が発生したとしても、原子炉を安全に停止させると共に周辺環境への影響を未然に防ぐことにある。

「もんじゅ」の計測制御設備の概念は、軽水炉と同様であり、「もんじゅ」独自というものではないが、「もんじゅ」はナトリウムを冷却材として使用する原子炉であることから、特に検出器類には、いろいろな特徴がみられ、これらには長年の研究開発の成果が反映されている。

「もんじゅ」計測制御設備のうち、主要な設備及び特徴のある設備について、以下に紹介する。

## 7.2 制御方式

「もんじゅ」は、液体ナトリウム冷却の高速増殖炉であるため、

- ① 原子炉出入口温度差が大きい。
- ② 主冷却系が大きな熱容量と無駄時間を持つ熱輸送系となっている。

と共に、

- ③ 過熱蒸気タービンを採用し、水・蒸気系の主蒸気温度と圧力を一定に保つよう制御する方式としている。

等の特徴を有している。

このため、「もんじゅ」のプラント制御は、プラント出力の統括出力指令に主冷却系流量がほぼ比例するように制御し、同時に原子炉出力を調整し、タービン発電機出力を追従させる方式を採用している。

原子炉の反応度制御は、制御棒により行う。制御棒は粗調整棒と微調整棒から構成され、粗調整棒は主として低温度状態から原子炉出力の約30%までの反応度変化、燃料の燃焼に伴う反応度変化の調整に用いられ、微調整棒は、主として、出力運転時の反応度変化の調整に使用される。

制御棒による原子炉の出力制御は、定格出力の約40%以下の範囲では手動で行い、定格出力の約40%～100%の範囲では目標値設定による自動制御となる。この自動制御の範囲においては、 $\pm 5\%/min$ のランプ状出力変更と $\pm 10\%$ のステップ状出力変更に応じられることを目標としており、またタービンバイパス弁の動作により、50%以下の負荷減少にも対処できるように考慮している。

以上述べたような制御を行うため、「もんじゅ」では原子炉制御設備を設けており、その概略を図7-1に示す。

原子炉制御設備は、6つの制御系から構成される、各々の概要を以下に述べる。

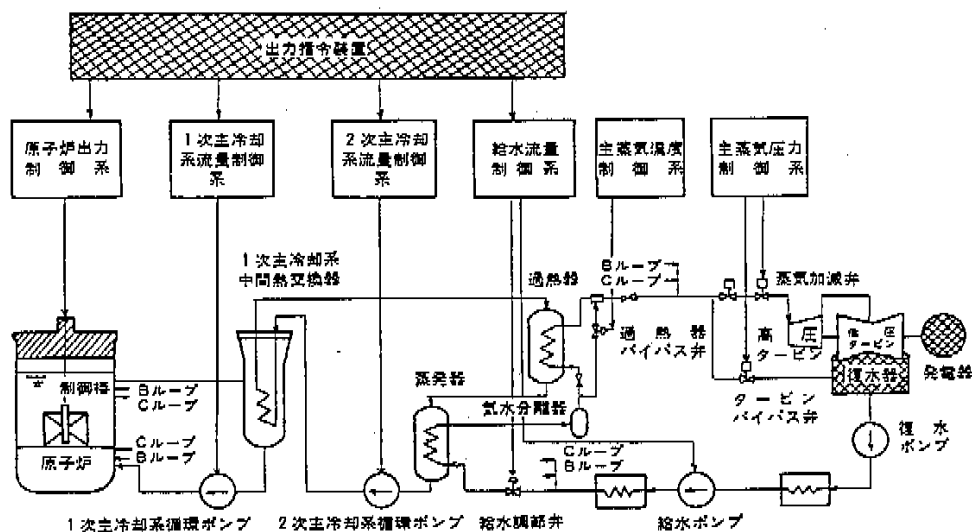


図 7-1 原子炉制御設備

(1) 原子炉出力制御系

通常運転状態で原子炉出力を自動制御している場合には、プラントの出力変更は、1次主冷却系流量、及び2次主冷却系流量をプラント出力指令にほぼ比例させて制御する。これと同時に、原子炉容器出口ナトリウム温度が所定の温度になるよう微調整棒を自動駆動して原子炉出力を調整する。一方、タービン側ではプラント出力指令の変更によって生ずる主蒸気圧力の変動を検出し、主蒸気圧力が一定となるよう蒸気加減弁を自動操作して、タービン出力を制御する。

原子炉出力制御系は図 7-2 に示すように、主蒸気温度が一定となるよう、出力指令装置からの設定値（出力指令値）と原子炉容器出口ナトリウム温度を比較して、その偏差を主制御信号とし、出力指令装置からの原子炉出力設定値と中性予束信号との偏差を補助信号として、微調整棒を制御し、原子炉容器出口ナトリウム温度を所定の値に維持する。

(2) 1次、2次主冷却系流量制御系

主冷却系（1次主冷却系及び2次主冷却系）の流量制御は、主冷却系流量を負荷特性に一致させるよう、即ちプラント出力にほぼ比例させるように制御する方式としている。

なお、1次主冷却系及び2次主冷却系の主ポンプ駆動装置には、電圧・周波数可変電源装置を用いて、主冷却流量を可変としている。

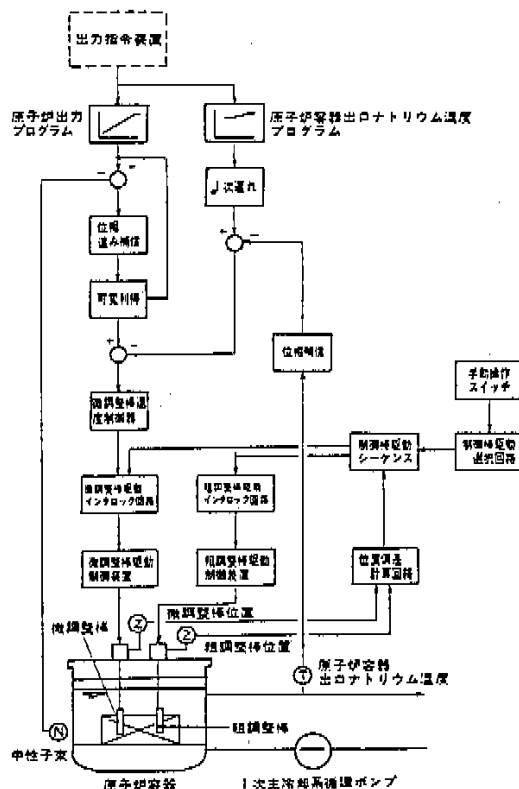


図 7-2 原子炉出力制御系

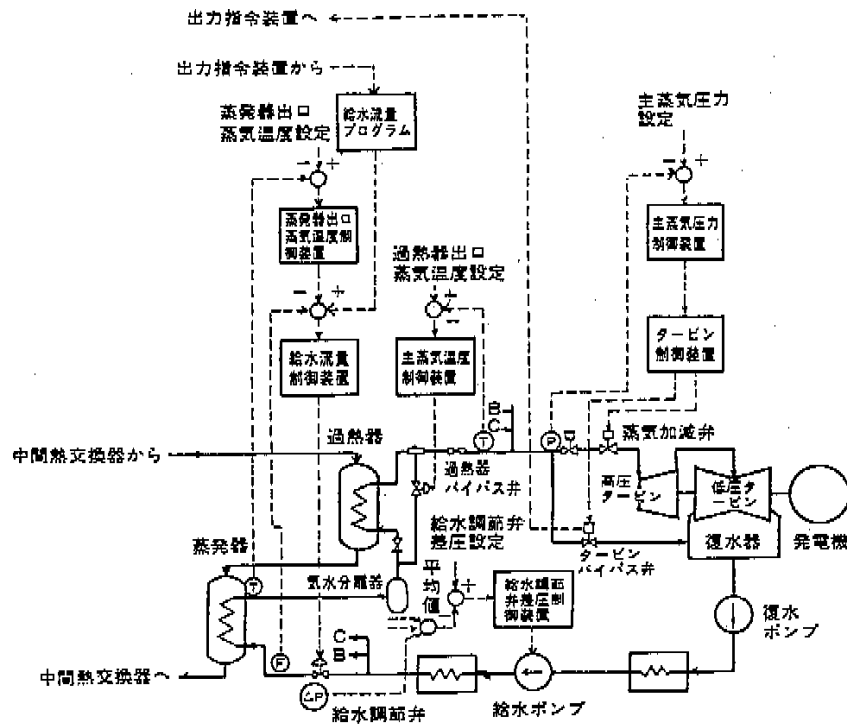


図 7-3 水・蒸気系関連制御系

(3) 給水流量制御系

給水流量制御系は、蒸発器出口温度制御装置、給水流量制御装置、及び給水調節弁差圧制御装置から構成される。この制御系は蒸発器出口蒸気温度の過熱度がほぼ一定となるよう、各ループの給水調節弁を調整すると同時に、給水調節弁の差圧を検出し、その信号により、給水流量を制御する。図 7-3 に水・蒸気系関連制御系の構成を示す。

(4) 主蒸気温度制御系

本制御系は、大きなステップ状の負荷減少等が発生し、主蒸気温度が過渡的に上昇した場合に、タービンを保護するため、過熱器出口蒸気温度を検出して、この温度が設定値以上になった場合、過熱器入口蒸気を過熱器出口側にバイパスする系統の減温制御弁の開度を調整する。この操作により、主蒸気温度を所定の値に維持する。

(5) 主蒸気圧力制御系

本制御系は、通常運転状態において、原子炉側の出力を変更した場合、その結果生じる主蒸気圧力の変動を検出して、主蒸気圧力が一定となるよう蒸気加減弁を自動操作する。

なお、水・蒸気系及びタービン系は、自動化制御

装置及び EHC システムにより、系統昇温開始より定格運転の範囲では、自動制御される。

7.3 原子炉保護設備

原子炉保護設備は、原子炉計装（後述）あるいは、プロセス計装の中で安全保護系に属する検出器からの信号により、運転時の異常な過渡変化、あるいは故障に際し、炉心や原子炉冷却材バウンダリを完全に保護するため、原子炉停止系を動作させ原子炉を自動停止させるための設備である。

原子炉保護設備は、安全保護系からの信号を受信し、原子炉トリップ信号を発生する 2 重トレイン構成の論理回路と原子炉トリップ信号により自動的に開く原子炉トリップしゃ断器から構成される。

なお、原子炉停止系には、粗調整格と微調整格から成る主炉停止系とバックアップ用の後備炉停止系の 2 系統がある。

原子炉トリップしゃ断器は、図 7-4 に示すように、主炉停止系と後備炉停止系のそれぞれに対して、直列に 2 台設けられる。これを介して、M-G セット電源を各炉停止系の制御棒保持用マグネットに接続する。従って、各炉停止系の 2 台のトリップしゃ

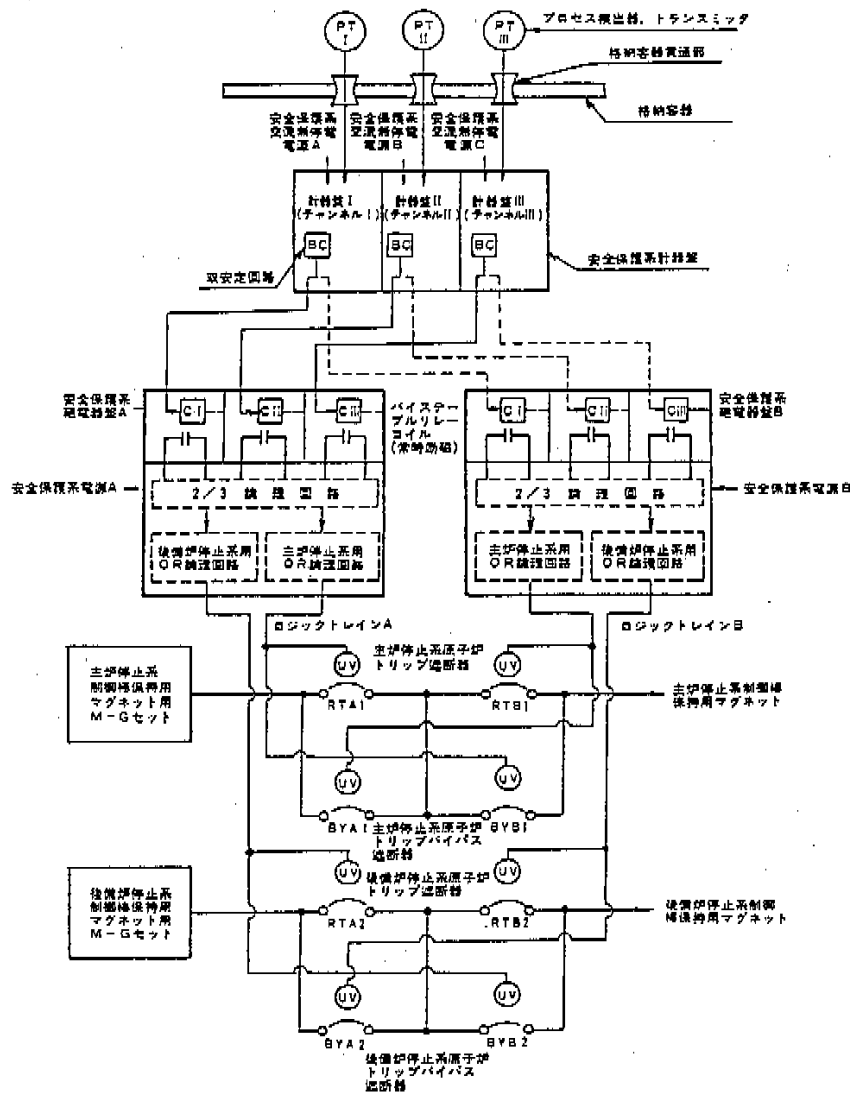


図 7-4 原子炉保護設備 (2 out of 3 ロジックの場合)

断器は、2重構成のロジックトレインの各々により、それぞれ独立に操作される。

また、2重のロジックトレインは、「2 out of 3」あるいは「1 out of 2」のロジック出力以降、主炉停止系及び後備炉停止系それぞれ専用に設けられる。

プラント出力運転中、各トリップしゃ断器の不足電圧コイル(UV)は、常時励磁されており、トリップ遮断器は閉状態で、各炉停止系の制御棒保持用マグネットは、M-Gセットより電源供給される。

トリップ項目に該当する各種変数が設定値に達し、所要の双安定回路が無効になると、トリップしゃ

断器の不足電圧コイルへの電源が断たれ、しゃ断器が開となる。従って、各炉停止系の制御棒保持用マグネットの電磁力が喪失し、各制御棒は炉心に落下挿入される。

原子炉をトリップさせるには、主炉停止系又は、後備炉停止系のいずれか一方が作動すればよく、従って、合計4台中1台の原子炉トリップしゃ断器を開けばよい。各制御棒の炉心への挿入は重力の他、主炉停止系については、封入ガス圧により、後備炉停止系は、スプリング力により加速され、挿入時間を短縮する。

表 7-1 原子炉トリップ信号

原子炉トリップ信号	検出器	作動ロジック
線源領域中性子束高	線源領域中性子束検出器	1 / 2
広域中性子束高 a 低設定 b 高設定	広域中性子束検出器 広域中性子束検出器	2 / 3 2 / 3
出力領域中性子束高 a 低設定 b 高設定	出力領域中性子束検出器 出力領域中性子束検出器	2 / 3 2 / 3
出力領域中性子束変化率高	出力領域中性子束検出器	2 / 3
原子炉容器ナトリウム液位低	原子炉容器ナトリウム液面計	2 / 3
原子炉容器出口ナトリウム温度高	原子炉容器出口ナトリウム温度検出器	各グループ 2 / 3
中間熱交換器1次側出口ナトリウム温度高	中間熱交換器1次側出口ナトリウム温度検出器	各グループ 2 / 3
1次主冷却系循環ポンプ回転数低	(1次主冷却系循環ポンプ回転数検出器 出力領域中性子束検出器)	各グループ 2 / 3
1次主冷却系循環ポンプ回転数高	(1次主冷却系循環ポンプ回転数検出器 出力領域中性子束検出器)	各グループ 2 / 3
1次主冷却系流量低	(1次主冷却系流量検出器 広域中性子束検出器)	各グループ 2 / 3
2次主冷却系循環ポンプ回転数低	(2次主冷却系循環ポンプ回転数検出器 出力領域中性子束検出器)	各グループ 2 / 3
2次主冷却系流量低	(2次主冷却系流量検出器 広域中性子束検出器)	各グループ 2 / 3
蒸発器出口ナトリウム温度高	蒸発器出口ナトリウム温度検出器	各グループ 2 / 3
タービントリップ	主蒸気止め弁位置検出器	2台閉
常用母線電圧低	常用母線電圧低電圧リレー	各母線 2 / 3
燃料破損検出	逸発中性子束検出器	各グループ 2 / 3
原子炉格納容器隔離		
地震加速度大 a 水平方向加速度 b 垂直方向加速度	水平方向加速度検出器 垂直方向加速度検出器	2 / 3 2 / 3
手動		1 / 2

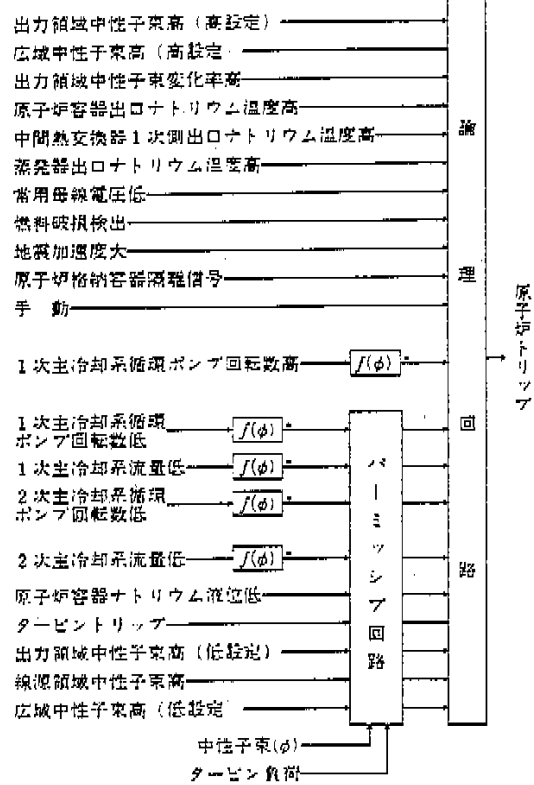


図 7-5 原子炉保護設備

原子炉トリップ信号を表 7-1 及び図 7-5 に示す。図中のパーミッション回路は、不要なトリップを防止するため、原子炉の出力条件によって原子炉トリップ信号のブロック等を行い、運転の継続を可能にするための回路であり、原子炉の保護機能を損うことはない。

プラントの安全に関わる計測制御設備としては、原子炉保護設備の他に、工学的安全施設作動設備があるが、安全保護系と同様、設備の信頼性を高めるため、2トレイン又は3トレインの論理回路構成としている。表 7-2 に工学的安全施設の作動信号を示す。

#### 7.4 原子炉計装

原子炉計装は、原子炉の運転制御及び保護動作に必要な情報のうち、特に、原子炉に関する情報を得るための設備であり、中性子計装、原子炉容器内計装、燃料破損検出装置、制御格位位置指示計装から構成される。

表 7-2 工学的安全施設作動信号

工学的安全施設作動信号	検出器	作動信号	
① 原子炉格納容器隔離信号 ① アニミクス循環排気装置異常用フィリタニニット切替信号	a 原子炉容器ナトリウム液位低	原子炉容器ナトリウム液面計	2/3
	b 原子炉格納容器床上部空気圧力高	原子炉格納容器床上部空気圧力検出器	2/3
	c 原子炉格納容器床上部空気放射能高	原子炉格納容器床上部空気放射線検出器	2/3
	d 原子炉格納容器床下部空気温度高	原子炉格納容器床下部空気温度検出器	各部屋 2/3
	e ガードベッセル内漏えいナトリウム液面高	ガードベッセル内漏えいナトリウム液面計	各ガードベッセル 2/3
	f 手動		1/2
② 補助冷却設備作動信号	a 主炉停止系原子炉トリップしゃ断器開	原子炉トリップしゃ断器開検出器	1/2
	b 後炉停止系原子炉トリップしゃ断器開	原子炉トリップしゃ断器開検出器	
	c 手動		2/2
③ 1次アルゴン系 ① 解信号	a 1次アルゴンガス系流量高	1次アルゴンガス系流量検出器	2/3
	b 手動		1/2

(1) 中性子計装

中性子計装は、図7-6に示すように原子炉容器室内の原子炉容器の外側に中性子束検出器を設置して、原子炉出力に比例した中性子束レベルを連続的に測定するための設備である。

検出器からの信号は、プリアンプを経由し、中央制御室の計装盤で処理され、原子炉の保護と制御に用いられる。原子炉の運転に必要なレンジを十分にカバーするための、線源領域、広域、出力領域のそれぞれ、オーバーラップした測定レンジを持つ回路が設けられる。

(2) 原子炉容器内計装

原子炉容器内や炉心の状態を監視するため、原子炉容器ナトリウム液面計、炉心出口計装などを設置する。

ナトリウム液面計は、被測定体のナトリウムが電気の良導体であることを利用した計測器であり、原子炉容器ナトリウム液位の測定には電磁誘導作用を応用した誘導型が用いられる。図7-7に誘導型ナトリウム液面計の原理図を示す。

炉心出口計装は、しゃへいプラグを貫通して、炉心の上部までセンサーを挿入し、各燃料集合体ごとに集合体出口ナトリウム温度等を連続測定する。

(3) 燃料破損検出装置

燃料破損検出装置は、燃料集合体の健全性を連続

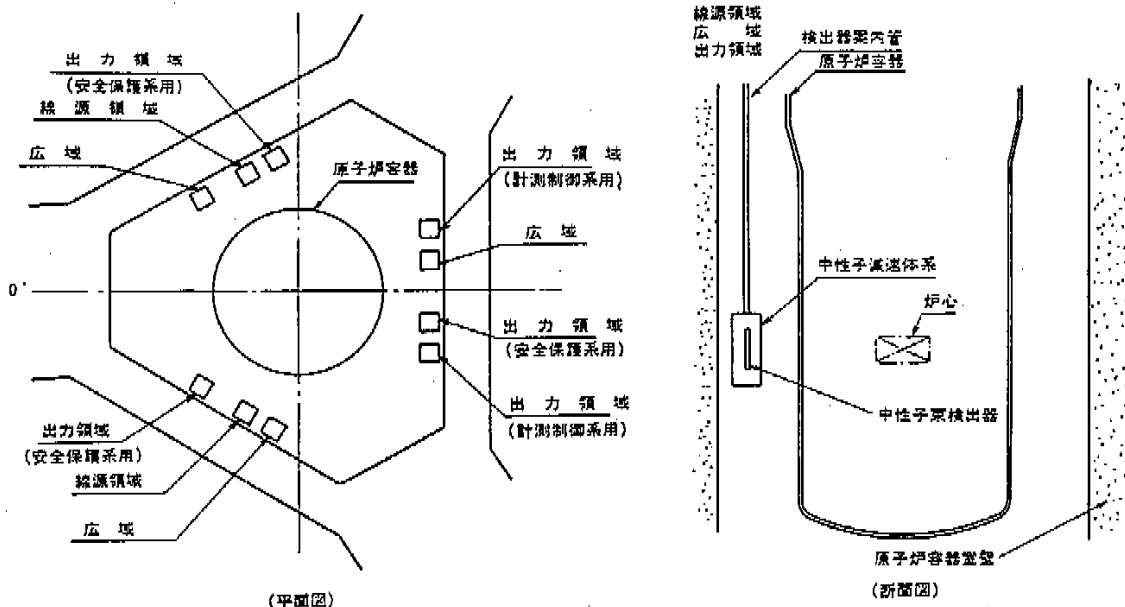


図 7-6 中性子束検出器配置概念図

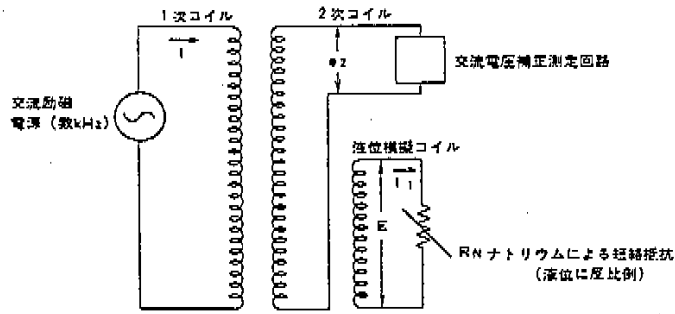


図7-7 誘導型運搬式ナトリウム液面計原理図

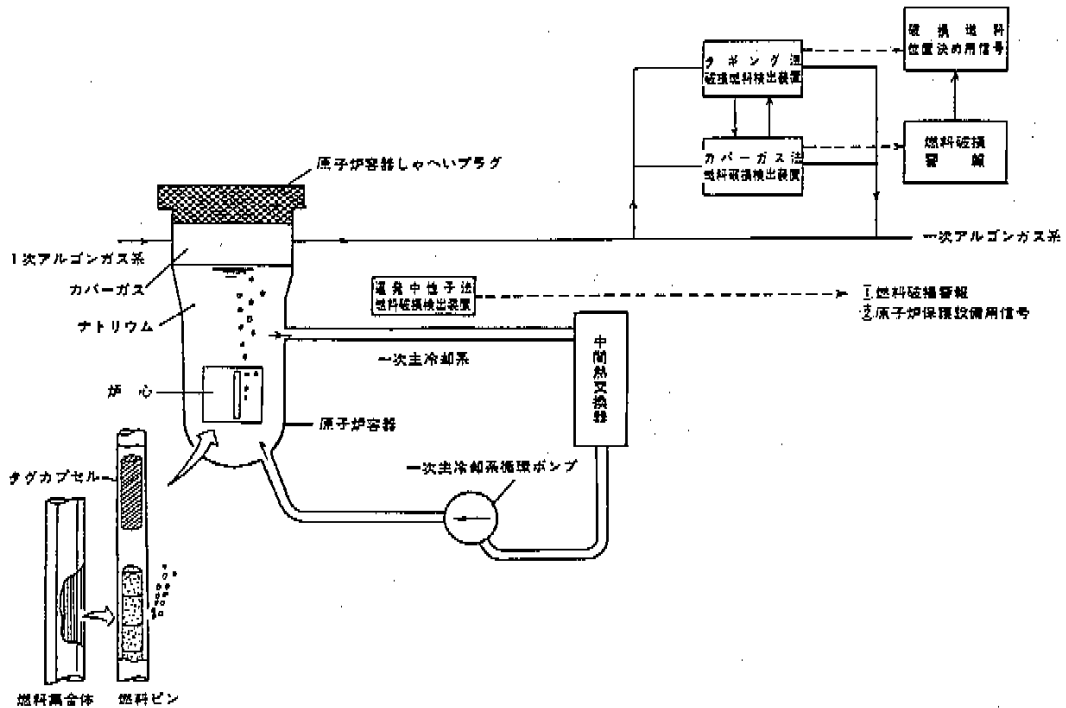


図7-8 燃料破損検出装置

監視するための設備である。万一燃料ピンが破損した場合、破損が発生したことを確実に検知し、更に破損した燃料集合体の位置を同定するため、図7-8に示すように、3種類のシステムを設置する。

破損検出のためには、燃料破損時に、冷却材中に放出される遅発中性子先行核からの遅発中性子を計測する遅発中性子法（DN法）と、原子炉カバーガスに放出される核分裂生成物（FP）を検出するカバーガス法（CG法）がある。又、破損燃料の位置を同定するためには、位置決めのガス（タグングガス）を用いたタグング法がある。

(4) 制御棒位置指示計装

原子炉出力の制御に直接使用される制御棒の位置を常時監視するため、各制御棒駆動機構に位置検出器を設け、中央制御室に位置を表示する。

7.5 プロセス計装

プラントを安全且つ適切に運転するため、1次主冷却系や2次主冷却系、更には、他の補助系の必要なプロセス量（温度・圧力・流量・液位など）の測定用として、プロセス計装が設けられる。プロセス計装の検出器としては、温度計・圧力計・流量計・

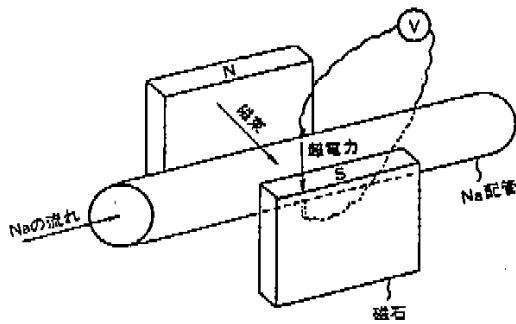


図7-9 ナトリウム流量計の原理図

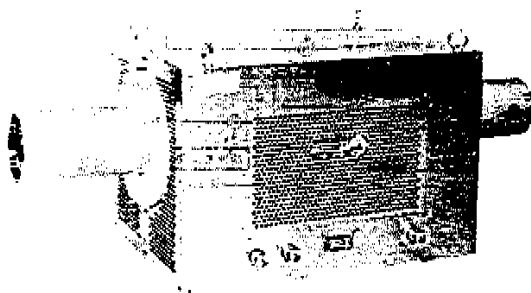


写真7-1 永久磁石式大型電磁流量計

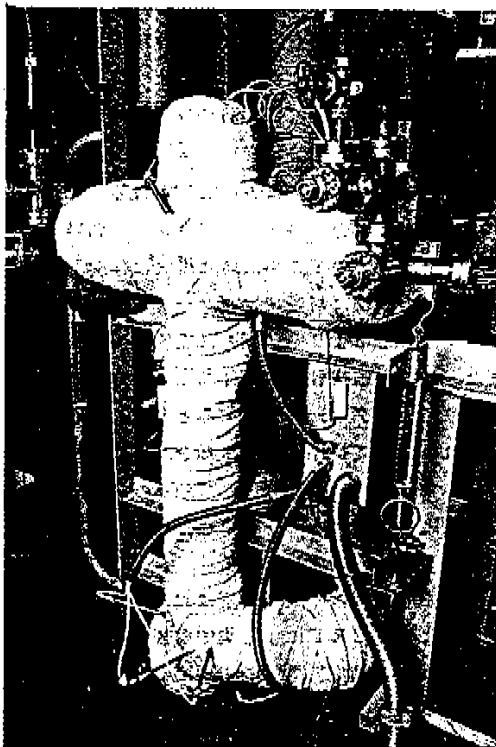


写真7-2 水漏えい検出器

液面計などがあるが、これらの検出器には、ナトリウム冷却炉独自の工夫がなされている。

ナトリウム液面計には、前述のとおり、誘導型が多く用いられるが、ナトリウム流量計も液面計と同様、ナトリウムが電気の良い導体であることを応用している。ナトリウム流量計による流量測定は、図7-9に示すように、磁場中で導電物質(ナトリウム)が移動する際、誘起される起電力を測定することによって行われる。写真7-1に「もんじゅ」用と同じ方式の永久磁石式大型電磁流量計を示す。

また、ナトリウム用圧力計としては、ナトリウムが高温、且つ化学的に活性であるため、圧力計のキャピラリーに特殊な液体(NaK)を封入したNaK封入圧力計を用いる。

その他、ナトリウム冷却炉に特有な計装として、蒸気発生器の伝熱管破損を早期に検出するための水漏えい検出器(写真7-2)や容器、配管などからのナトリウム漏えいを効率よく検出するためのナトリウム漏えい検出器などがある。

#### 7.6 放射線管理・監視設備

放射線管理・監視設備は、発電所周辺の一般公衆の放射線被曝が十分低く保たれていることを監視すると共に、発電所従業員を発電所に起因する放射線被曝から防護するための設備であり、放射線管理設備と放射線監視設備に分けられる。

放射線管理設備としては、出入管理、汚染管理、試料分析及び個人管理のための、

- ① 出入管理設備
- ② 汚染管理設備
- ③ 試料分析関係設備(コールド分析室、ホット分析室、校正室)
- ④ 個人管理関係設備

の各設備を設置する。

また、放射線監視設備は、発電所内及び周辺の放射線レベルを厳重に監視するための設備であり、

- ① プロセスモニタリング設備
- ② エリアモニタリング設備
- ③ 野外管理用モニタリング設備
- ④ 放射線サーベイ設備

に分類される。図7-10にプロセスモニタリング設備の概要を示す。

#### 7.7 中央制御室と制御システム

「もんじゅ」では計測制御系統施設のうち、プラ

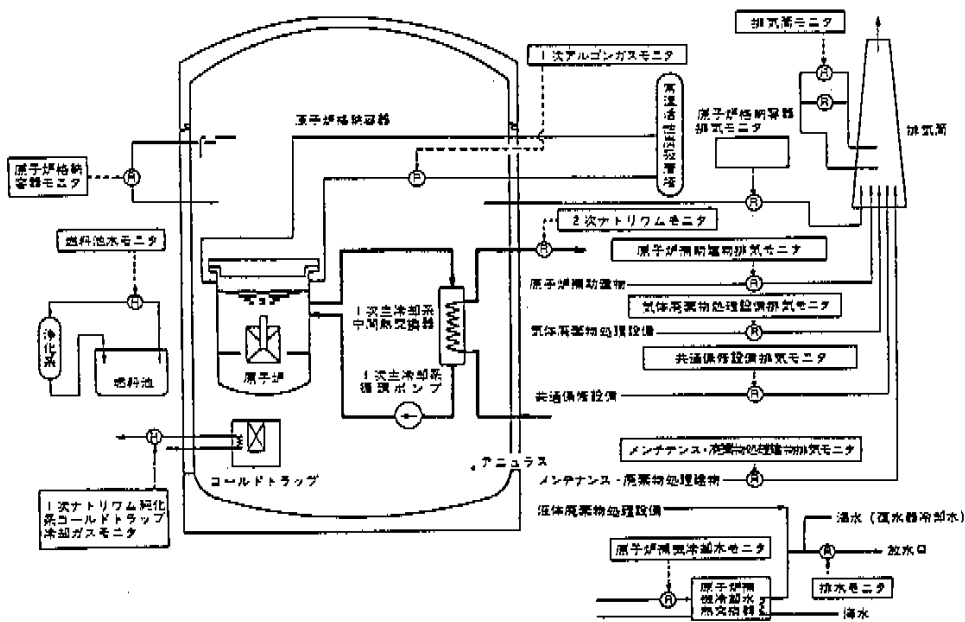


図7-10 プロセスモニタ配置

ントの主システムの運転に必要な監視・操作装置を集中化し、これらを中央制御室に設置する設計としている。

軽水炉以上に多くの情報が集中する「もんじゅ」の中央制御室の設計に当っては、運転員の負担を軽減し、誤判断、誤操作を防止することを基本方針としている。このため計算機及びCRT (Cathode Ray Tube) を積極的に活用し、運転員と機器設備間のインターフェイスの効率向上を図る設計としている。

この目的に沿って設けられるのが中央監視盤であり、中央制御室の中央に設置され、壁位で監視・操作が可能である。盤垂直部に埋め込まれた7枚のCRTには、発電所の運転状態に応じて必要な情報が表示される。

従来は、熟練運転員が長年の経験から最適な監視情報を選択していたが、この操作を計算機に行わせ、CRT上に必要な情報を系統図等の形でわかりやすく表示する。中央監視盤では、発電所全体をCRTで集中的に監視すると共に、各種自動化技術の導入により、起動・停止時及び通常出力運転時のほとんどの運転操作を行うことができる。発電所の起動・停止の各操作は、主要操作ごとにサブシステムとして分割され、中央監視盤で照光式押ボタンスイッチを操作することにより、サブシステム内の一連の

操作が自動的に実行される。自動化システムの構成を図7-11に示す。

また、自動化されていないサブシステムの運転や自動化されていても手動操作を行う可能性のある場合の運転に備えて、CRT上に操作前確認項目、操作すべき内容、操作の結果などがオペレーションガイドとして表示され、運転員の操作を援助するようにシステム構成している。

一方、中央監視盤の後方に設置されるベンチ型の中央制御盤は、万一の事故やプラント異常時の運転操作を行う盤である。事故時に確実に作動しなければならない設備に対しては、ケーブルや操作器具を分離することにより系統間の独立性を確保している。また、盤上の監視計器や操作スイッチは系統ごとによりわかりやすくグルーピングすると共に、実際の系統の流れに従って操作スイッチ類を配列し、模擬母線と結ぶミミック表示を採用している。更に、警報窓は重要度により赤、黄、白に色分けし、更に第一原因がわかるよう配慮している。

「もんじゅ」の中央制御室における監視・制御は、前述のようにCRTによる集中監視、オペレーションガイド、自動化、警報の重要度分類、操作スイッチのミミック構成などにより運転員の負担軽減及び誤判断、誤操作の防止を図っている。

動燃事業団では、「もんじゅ」のため、大洗工学

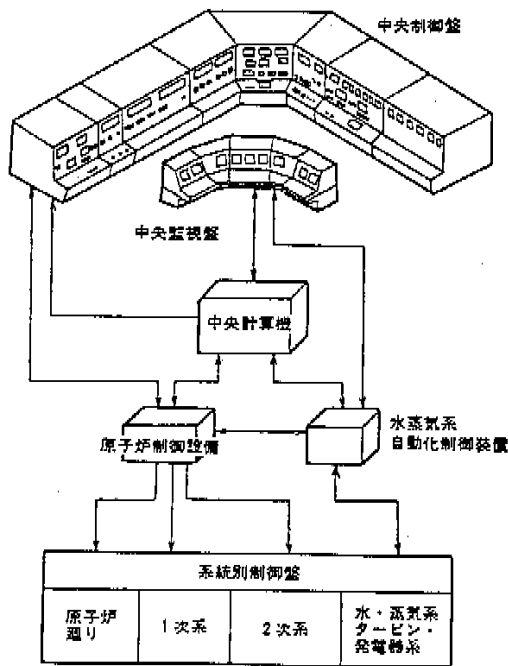


図 7-11 プラント自動化運転システム構成

センター内に中央制御盤、中央監視盤の実寸大モデルを製作して、制御盤の運転操作性を確認している。このモデルは、

- ① 計器が運転員の視線上適切な位置にあるか。
- ② 操作スイッチ類が操作しやすく、且つ誤操作しにくい配列となっているか。
- ③ CRTの画面には、必要な情報が見やすく表示されているか。

等、人間工学的な検討を加えるために使用され、発電所の起動・停止や事故時の操作を模擬しながらハード構成、人間工学、操作などの総合的な検討を喫



写真 7-3 中央制御盤及び中央監視盤の実寸大モデルによる検討作業状況  
中央制御盤(奥側)と中央監視盤(手前側)

施している。検討作業中の状況を写真 7-3 に示す。

また、冷却材としてナトリウムを使用する炉に特有の制御システムとして、予熱制御システムがある。このシステムは、溶解したナトリウムが凝固しないよう機器や配管を予め昇温しておくための設備であり、計算機を用いて運転員の負担を軽減すると同時に、信号多重伝送システムを適用して効率的なシステム構成としている。

## 7.8 まとめ

以上、「もんじゅ」計測制御系統設備の中で代表的な設備の設計概要を紹介したが、最近、計測制御分野での技術進歩はすばらしく、特に半導体分野では、目を見張るものがある。これらの開発結果を「もんじゅ」へ適用するには、十分な検討が必要ではあるが、今後とも、「もんじゅ」計測制御設備の高信頼性、高操作性、高保守性を目指して努力してゆく所存である。