

# 高速増殖炉もんじゅ発電所 計測制御設備

## Instrumentation and Control System for the Prototype Fast Breeder Reactor "MONJU" Power Station

高速増殖炉もんじゅ発電所(以下、「もんじゅ」と略す。)は、次世代の原子力発電所として福井県敦賀市に建設が進められている。「もんじゅ」(電気出力:280 MW)の計測制御設備は、最新の原子力発電所としての高い安全性、運転信頼性を実現するために、わが国初の高速増殖炉である高速実験炉「常陽」の建設・運転経験やナトリウム計装などの各種研究開発の成果を反映するとともに、最新のデジタル制御技術、多重化システム技術などを駆使し設計、製作されている。

本論文では、高速増殖炉として特徴的な計測制御技術についての開発結果と「もんじゅ」向けに設計、製作された計測制御設備への適用状況を述べる。

|           |                   |
|-----------|-------------------|
| 原 広*      | Hiroshi Hara      |
| 前 良典**    | Yoshinori Mae     |
| 石田隆之***   | Takayuki Ishida   |
| 橋浦和彦****  | Kazuhiko Hashiura |
| 葛西省三***** | Shôzô Kasai       |
| 山本 元***** | Hajime Yamamoto   |

### 1 緒 言

現在、国家プロジェクトとして建設が進められている高速増殖炉もんじゅ発電所(以下、「もんじゅ」と略す。)は、日立製作所ほか国内原子力メーカーが、動力炉・核燃料開発事業団の指導の下に協力して推進中である。

高速増殖炉の計測制御技術は、昭和40年代の初めから本格的な開発に着手し、当初から動力炉・核燃料開発事業団と原子力メーカーが一体となって、研究開発および実用化を推進してきた。その成果は高速実験炉「常陽」へ反映され、さらに「常陽」での建設、運転経験を生かした制御棒駆動制御装置、予熱制御装置などの各種製品開発・改良が行われ、「もんじゅ」の計測制御設備に適用されている。

高速増殖炉では、原子炉の冷却材としてNa(ナトリウム)を用いるため、一般的な計測制御技術に加えてNaを対象とした計測制御技術を必要とする。また、「もんじゅ」では原子炉からタービン側へ熱輸送を行う1次冷却系、2次冷却系の熱容量、熱慣性が大きいこと、系統も3ループから構成されることによるプラント全体からみた熱バランスの維持を考慮した制御系とする必要がある。計測制御設備の構成概念を図1に示す。

計測制御設備については、この高速増殖炉の特性を考慮した技術開発を行うとともに、動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センターや日立製作所の各種工学試験施設での実証試験などを通じて、性能や信頼性などの評価・検証を行ってきた。

### 2 中央監視盤

「もんじゅ」の中央監視制御システムは、計算機技術を積極的に活用して、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、運転員の負担軽減と運転信頼性の向上を図っている。マンマシンインタフェースの中核となる中央監視盤には、以下の機能を持たせている。

#### (1) プラント運転状態の集約監視

6台のカラーCRT(カラーディスプレイ)を集中配置し、運転状態に対応した適切な情報を集約化して表示することにより、プラント全般の運転状態を把握できるようにする。

#### (2) プラント運転進行管理

プラントの起動準備から定格運転までと、定格運転からプラント停止に至るまでのプラント起動・停止過程の運転進行管理および低温停止時の系統メンテナンス運転過程での予熱制御、Na充てん・ドレン操作の運転進行管理を、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、操作ガイダンスをCRTに表示することによって行う。

#### (3) 人間工学的見地に基づく盤形態

中央制御盤との対応を考慮して、盤の高さ、幅を縮小して視認性、アクセス性を向上させている。またCRT、操作部の配置についても、監視操作の重要度、頻度などを考慮して配置している。

中央監視盤の外観を図2に示す。

\* 動力炉・核燃料開発事業団 動力炉建設運転本部 \*\* 日立製作所 大みか工場 \*\*\* 日立製作所 日立工場  
\*\*\*\* 日立エンジニアリング株式会社 \*\*\*\*\* 日立製作所 那珂工場 \*\*\*\*\* 日立製作所 エネルギー研究所

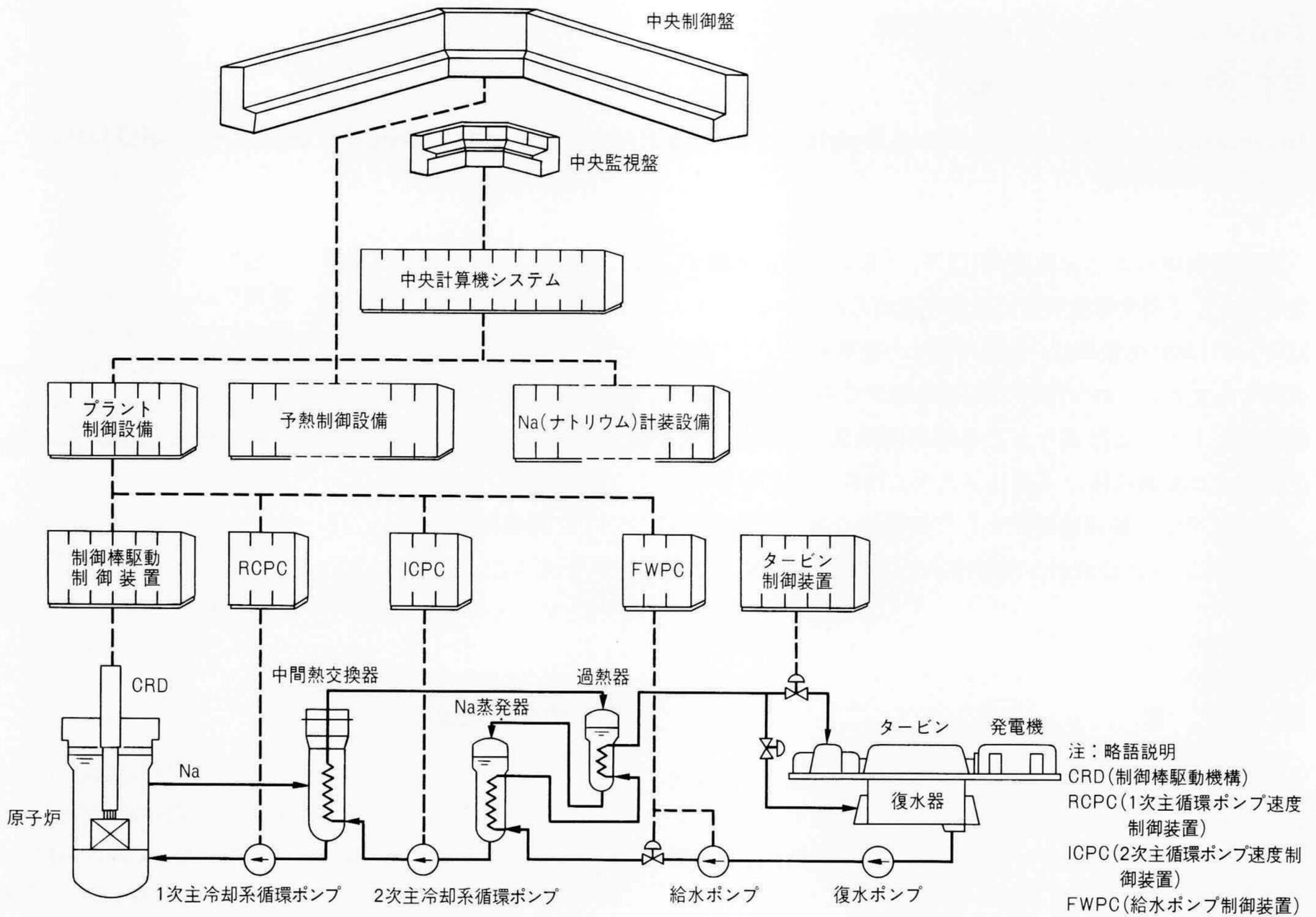


図1 計測制御設備の構成概念図 研究開発の成果を反映するとともに、最新のデジタル制御技術、多重化システム技術などを駆使した計測制御設備とし、運転信頼性と安全性の向上を図っている。

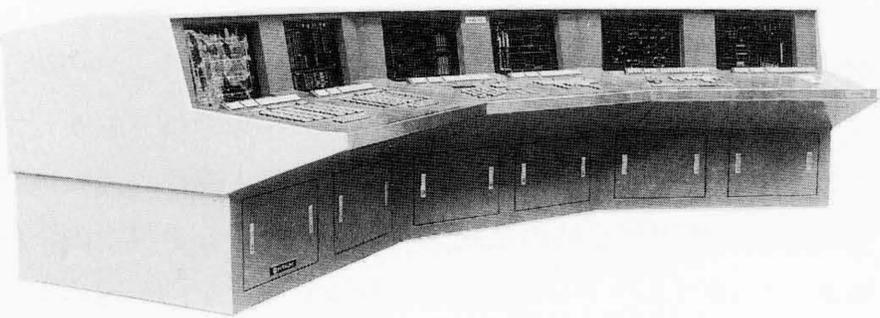


図2 中央監視盤の外観 中央監視盤は、運転員が座位で十分な監視操作性が得られるように、コンパクトな寸法にするとともに、CRTによる集約監視、操作ガイダンス機能などを採用し、運転員の負担軽減を図っている。

### 3 プラント制御設備

「もんじゅ」のプラント制御は、原子炉出力を制御してタービンが原子炉出力に追従する制御方式である。また、冷却システムの熱慣性を利用して、系統の温度変化が小さくなるように原子炉出力と1次主冷却系流量、2次主冷却系流量を一定の比率に制御する。さらに、負荷要求に応じて原子炉出口Na温度を制御することにより、タービン入口の主蒸気温度を一定に保つ制御方式を採用している。

制御装置は軽水炉で培われた多重化などのシステム高信頼化技術<sup>1)</sup>を基盤に、デジタル制御技術の適用を積極的に推進し、高い信頼度を達成している。

#### 3.1 制御棒駆動制御装置

原子炉出力は、原子炉出力要求指令に基づきFCR(微調整用制御棒)3本の位置を自動調整することによって制御される。制御棒駆動制御装置は、自己診断機能を持つマイクロコントローラによるデジタル二重系構成とし、信頼性や制御性の向上を図っている。また、制御装置は原子炉出力変更要求に対し迅速かつ安定に追従できるように、駆動電動機にはステップモータを使用し、約30~300 mm/minの可変駆動速度で位置制御を行う。この結果、速応性が優れ、高精度位置決め制御を実現している<sup>2)</sup>。一方、FCR3本は原子炉出力変動幅を規定値以内に制限するため、FCR自動選択回路を設け同時に1本だけしか駆動できないようインタロックをかけている。また、原子炉出力の空間分布平坦化のため、FCR相互位置偏差が所定値内に入るよう駆動ストローク計算を行い、駆動許可指令を出力している。ストロークが制限値に達すると他のFCRを自動選択し駆動する。

表1 FCR駆動制御装置の主要仕様 FCR(微調整用制御棒)駆動制御装置には、高精度の制御性と速応性が要求される。

| 項目      | 仕様                  |
|---------|---------------------|
| 駆動電動機   | 三相ステップモータ           |
| 駆動速度    | 30~300 mm/min       |
| 制御ストローク | 0~1,000 mm          |
| 応答時間    | 1 s以内(0→300 mm/min) |
| 位置決め精度  | ±1 mm以内             |

さらに、本制御装置はFCR駆動速度の全域でステップモータ電流がほぼ一定になるように、電動機回転数と電動機電圧の比を一定に制御し、駆動トルクを安定に保つ。FCR駆動制御装置の主要仕様を表1に、また同装置の制御ブロック図を図3に示す。

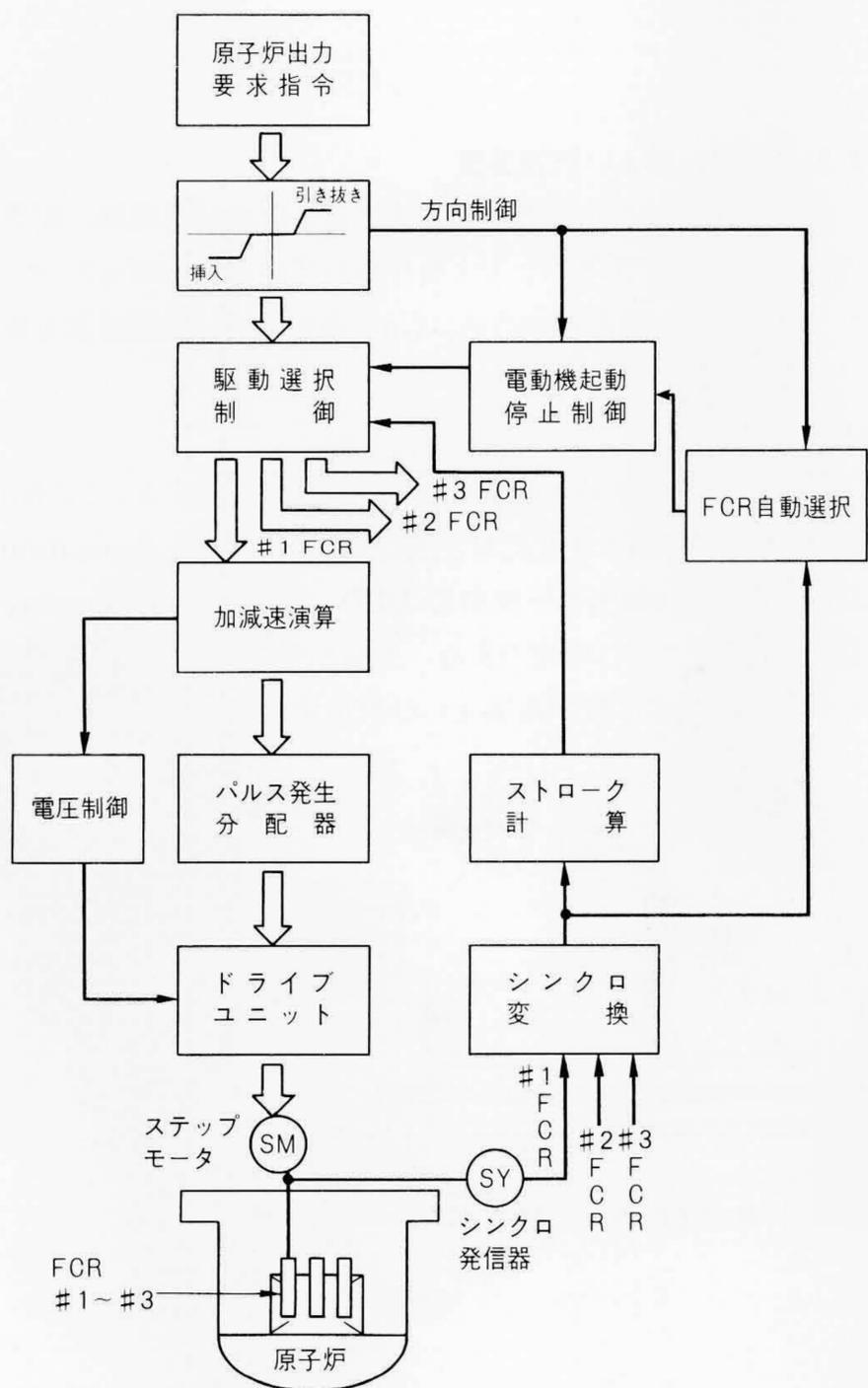


図3 FCR駆動制御装置制御ブロック図 FCR 3本は自動選択およびストローク計算を行い、1本ずつ駆動制御される。また、ステップモータを使用し制御性の向上を図っている。

### 3.2 1次主冷却系循環ポンプ速度制御装置

1次冷却系流量は原子炉出力に応じた流量に維持するため、流体継手付きM-G(電動機-発電機)セットによって周波数を変え、1次主冷却系循環ポンプの回転数を制御する。制御装置は、制御棒駆動制御装置と同様マイクロコントローラによる二重系構成である。

流体継手付きM-Gセットでは、入力信号と回転数出力の関係が非線形であり、かつ運転領域によって応答時間特性も非線形であるため、回転数制御領域20~100%の範囲で安定した制御性を確保するために制御パラメータを回転数の関数として最適化し、制御性の改善を図っている。本制御手法を図4に示す。また、本制御方式によるM-Gセットと1次主冷却系循環ポンプの工場での組合せ試験の結果を図5に示す。

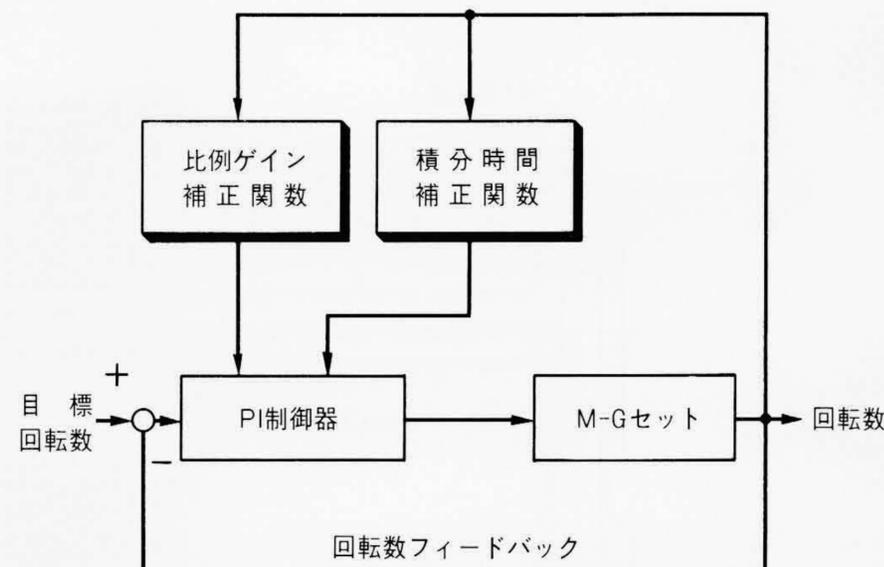
1次主冷却系3ループ間の流量は熱バランス上一致させる必要があるため、3台のポンプ回転数を監視し、常にバランスをとって運転する自動制御機能も持っている。

## 4 Na計装

「もんじゅ」では、冷却材であるNa計装の設置が軽水炉と比べての特徴の一つになっている。Na計装技術は開発に着手してすでに20年以上の歴史があり、この間改善・改良が加えられ「もんじゅ」に適用されている。

### 4.1 NaK封入圧力計

1次冷却系に用いられる圧力計は、センサ部がNaと直接接触するため耐放射線性、耐高温性の材料で構成した検出器とするとともに、液体金属合金のNaK(ナトリウム・カリウム合金：融点-11℃)を封入した置換器を使用している。測定点の圧力はこのNaK置換器を通してブルドン管に伝達され、その変位量が差動トランスによって電気信号に変換される。NaK封入圧力計の構造概念を図6に示す。



注：略語説明 PI(比例・積分)制御器 M-G(電動機-発電機)セット

図4 最適制御の手法 非線形プロセスで、制御パラメータを回転数の関数として最適化し、制御性を向上させる。

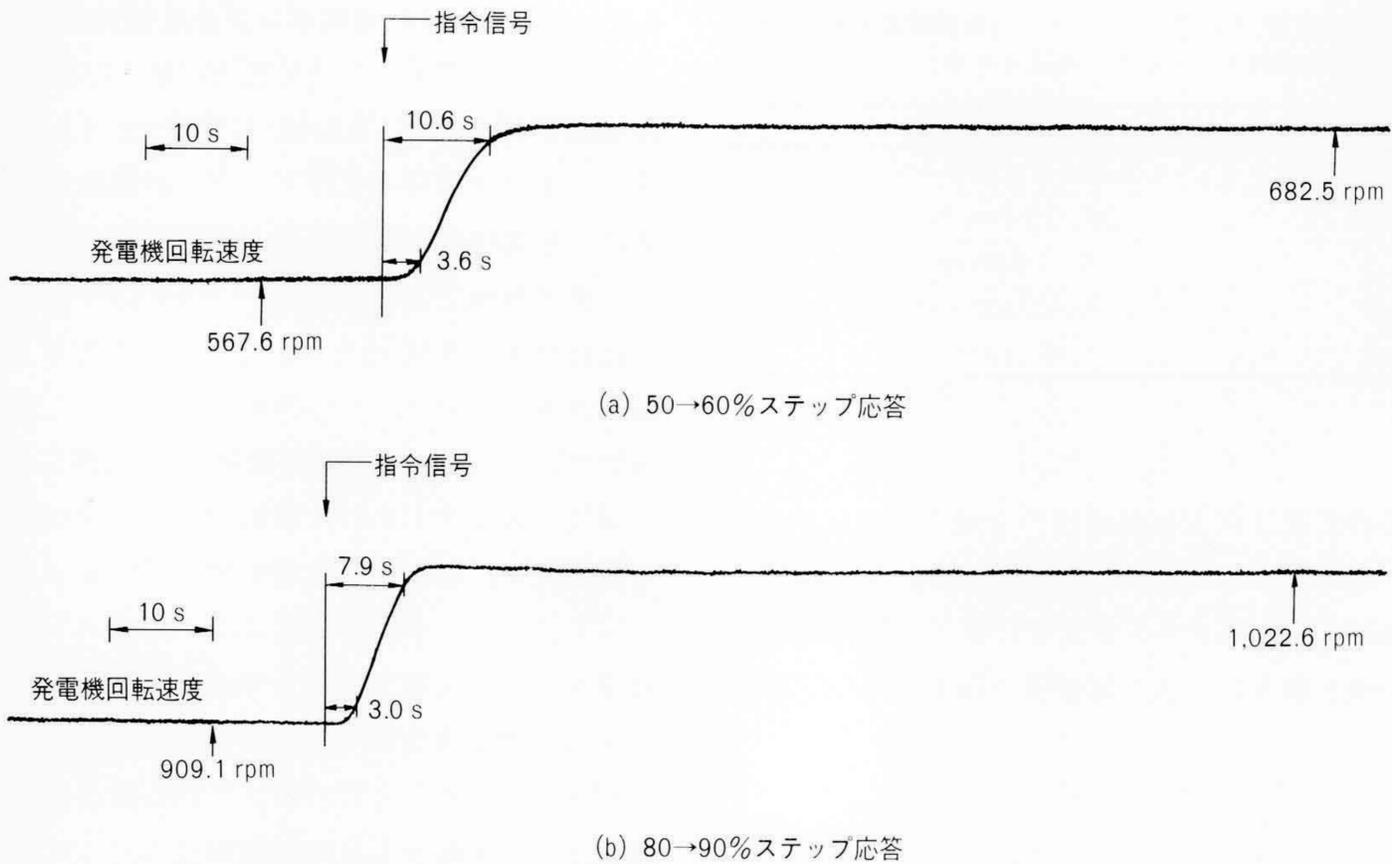


図5 1次主冷却系循環ポンプ速度制御装置のステップ応答試験結果 低回転数領域および高回転数領域ともに、さわめて良好な制御特性を示す。

#### 4.2 誘導式Na液位計

誘導式Na液位計は、ステンレス鋼のボビンに1次コイルと二組みの2次コイルが三条巻きにされた検出器を、ステンレス鋼製のウェルを介してNa中に挿入し、Na中に電磁誘導で発生する渦電流の効果を利用し液位を計測する。

本液位計は測定対象であるNaの温度が約200~550℃と広範囲に及ぶため、温度影響を最小とする温度補償機能を備えている。Na液位検出器および液位変換器の外観を図7に、Na液位計の温度補償特性を図8に示す。また、本液位計は基準レベル検出機能を備え、プラントメンテナンス時のNaのドレン、充てんを行う際に液位校正を行うことができる。

#### 4.3 微量Na漏えい監視装置

原子炉冷却材バウンダリを構成する1次冷却系機器、配管は特に高い品質管理のもとに製作されている。これらのバウンダリには健全性監視のため、Naの微量漏えい監視装置を設けている。

##### (1) 検出器

万一、Naが漏えいするとNaエアロゾルが発生する。このNaエアロゾルをNaイオン化検出器(SID: Sodium Ionization Detector)、Na捕集差圧検出器(DPD: Differential Pressure Detector)の二つの原理の異なった検出器で検出する<sup>3)</sup>。これらの検出器はごく微量な漏えいを検出する高い検出感度特性

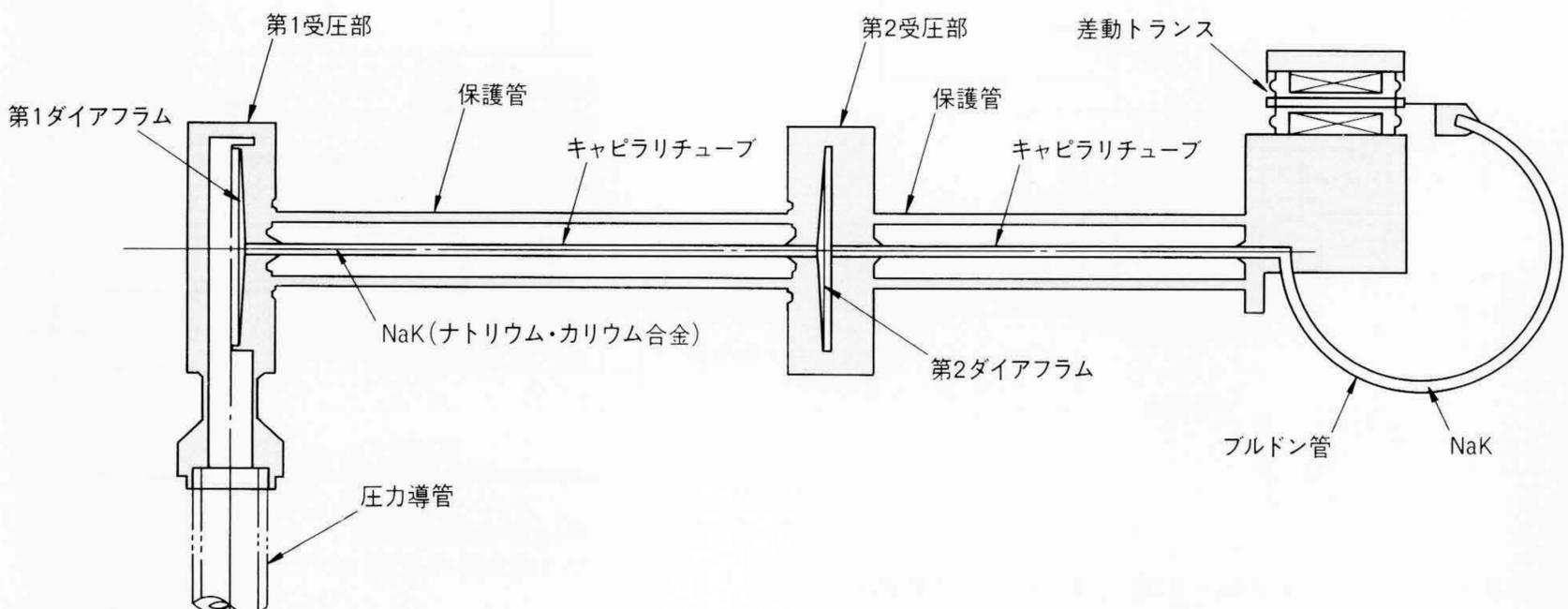


図6 NaK封入圧力計の構造概念 Naの融点は98℃のため、常温で液体のNaKに置換し圧力を伝達する。

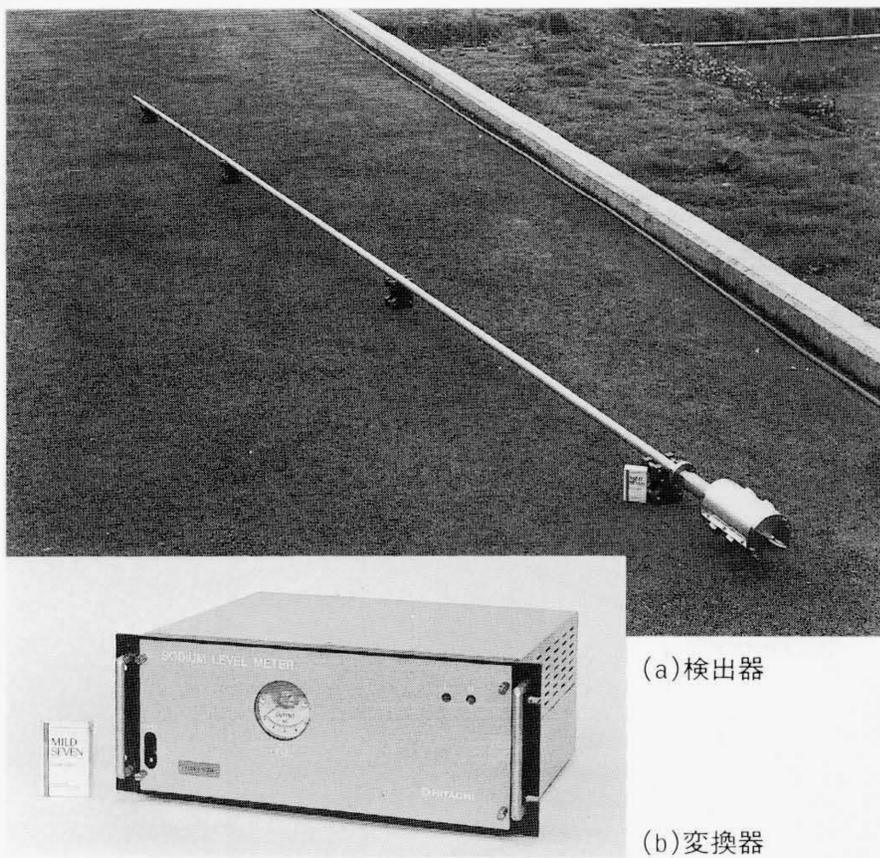


図7 Na液位検出器および変換器の外観 Na液位は最大5mの計測レンジを製作しており、かつ基準レベル検出機能を備え現地での校正を容易にしている。

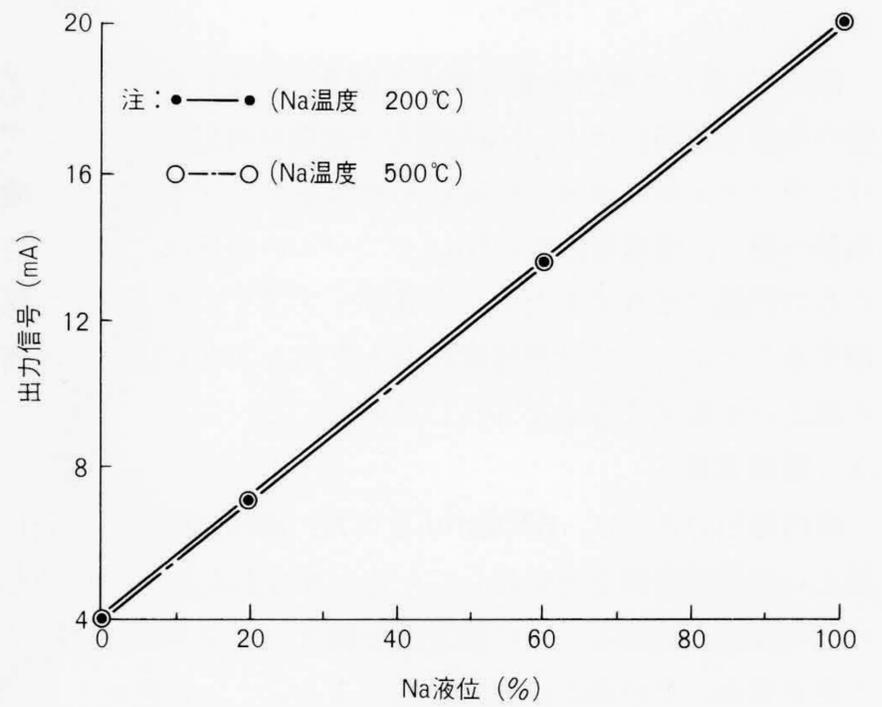
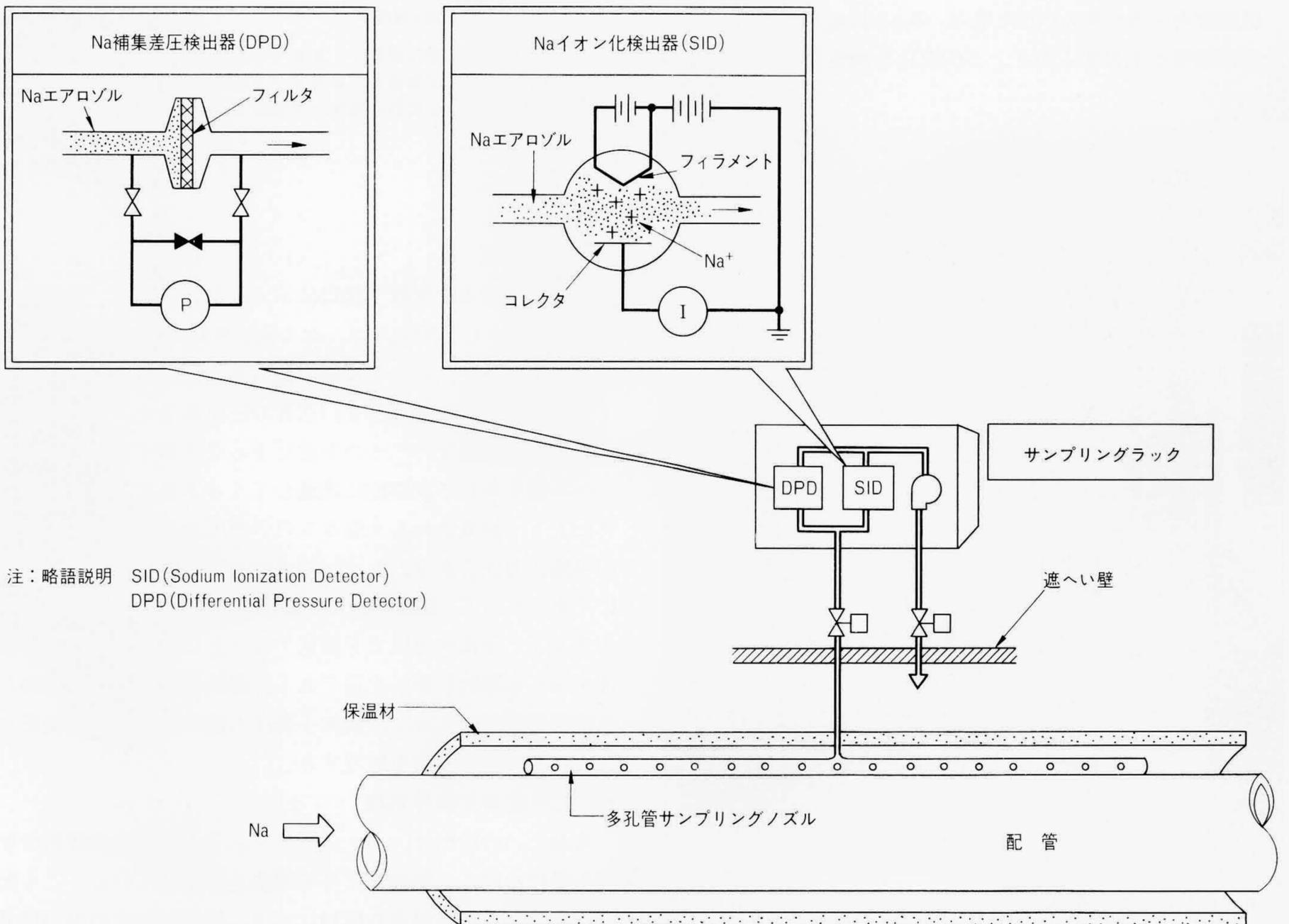


図8 誘導型Na液位計温度補償特性 Na温度が200℃から500℃の広い範囲でも、良好な計測精度が得られている。



注：略語説明 SID(Sodium Ionization Detector)  
DPD(Differential Pressure Detector)

図9 微量Na漏えい検出装置の構成 SIDとDPDの原理の異なる検出器を用い、信頼性向上を図っている。

を持っている。

微量Na漏えい検出装置の構成を図9に、またサンプリング盤の外観を図10に示す。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周辺のガスをサンプリングし、検出器へ導く。保温層内でのNaエアロゾルの濃度は、漏えい点からの距離に依存するため、多孔管サンプリングノズルを採用することによって計測感度の向上を図るとともに、広範囲の漏えいを監視できるようにしている。

(2) 監視装置

検出器出力信号は、SN比が小さいため面積比較法を開発し漏えいの早期検知を可能にしている。すなわち、出力信号を一定時間積分処理し、この積分した値とバックグラウンド値の差を求め、その差が設定値を超えると漏えいと判定する。

微量Na漏えい検出装置は、実物大配管、保温構造を模擬し、微量漏えいを発生させた検証実験を行い、十分な検出性能が得られることを確認している。

4.4 水漏えい監視装置

水漏えい監視装置は、蒸気発生器伝熱管に万一ピンホールなどが発生して、高圧の水がNa中へ漏えいしてもこれを初期の段階で検出し、プラントを安全に停止するために設置するものである。

伝熱管から水が漏えいした場合、Naと反応して水素が発生し水素濃度が上昇するので、この変化を測定して水漏えいを

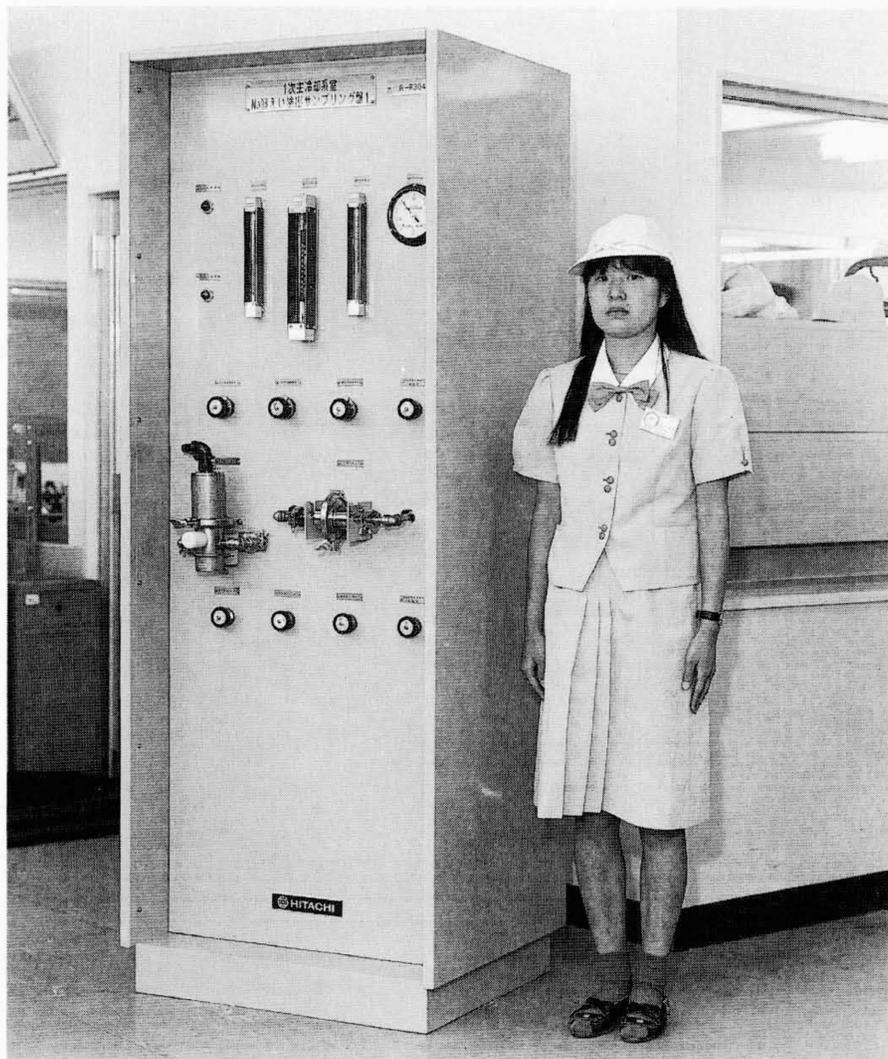
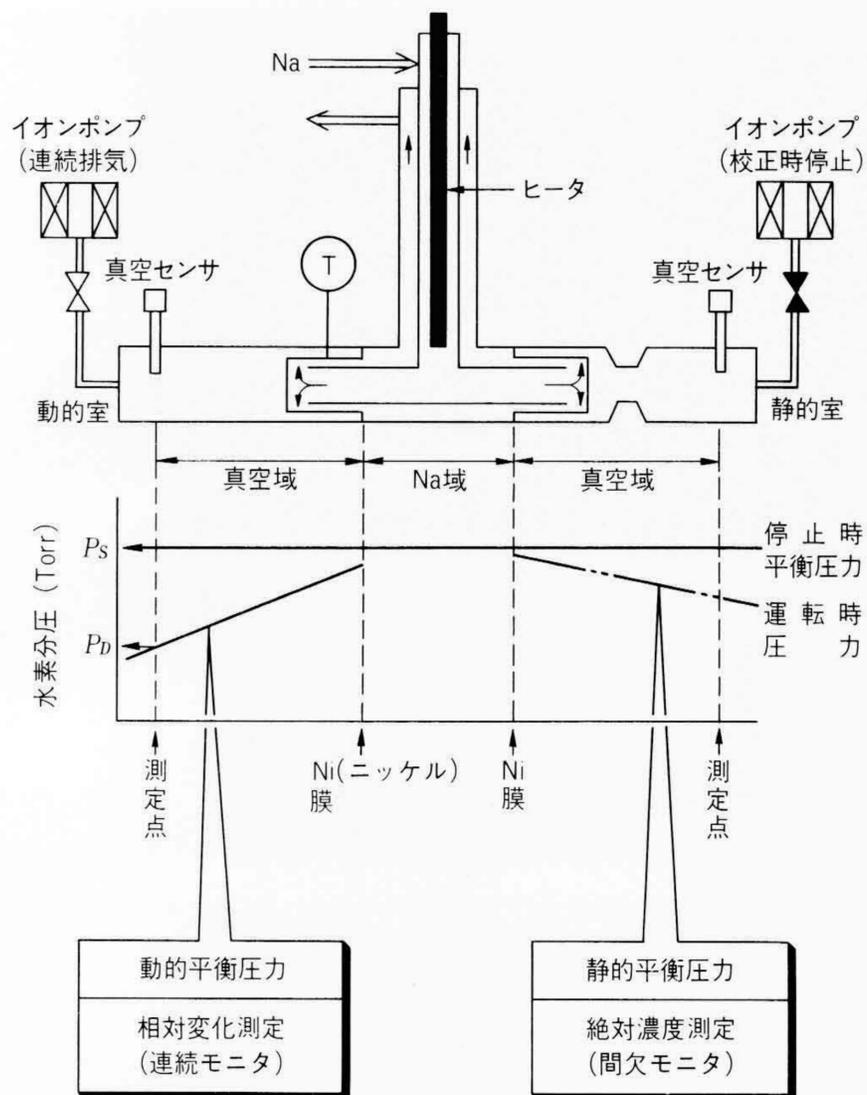


図10 微量Na漏えい検出サンプリング盤の外観 サンプリング盤は保守性を考慮し、前面アクセスとするとともにSID, DPDはクランプ継手を採用している。



注：略語説明  $P_s$  (静的平衡圧力)  
 $P_d$  (動的平衡圧力)

図11 水漏えい検出の原理 動的平衡圧力はNa中からNi膜を透過した水素濃度を連続して測定し、水漏えいを監視する。静的平衡圧力は、絶対水素濃度を測定し動的平衡圧力で測定される水素濃度を校正する。

検出する。

(1) 検出装置

水漏えい検出の原理を図11に示す。本装置では、水素分離用プローブとして円筒状ニッケル膜がNaまたはカバーガスに接するようにし、ニッケル膜の他方を真空に引くことによって水素を真空側に透過させ、水素分圧を真空センサで測定する。水素濃度は次の二つの方法によって計測する。一つはニッケル膜を介して真空側に透過してくる水素と、イオンポンプによって排気される水素ガスの平衡圧力を連続測定する動的平衡圧力法であり、もう一つはニッケル膜を介して間欠的にイオンポンプを運転停止し、真空側に透過する水素がNa中水素分圧と平衡する圧力を測定することによって絶対水素濃度を求める静的平衡圧力法である。静的平衡圧力法で求めた水素濃度信号によって、動的平衡圧力法の出力信号を校正して連続的に水素濃度を監視する。

(2) こう配検知信号処理

水漏えいの検出は、バックグラウンド水素濃度の変動の影響を受けないこう配検知信号処理法を採用している。こう配検知信号処理法を概念を図12に示す。真空センサの出力信号は、水素濃度に換算された後  $\Delta t$  時間の平均値を求め、現在の

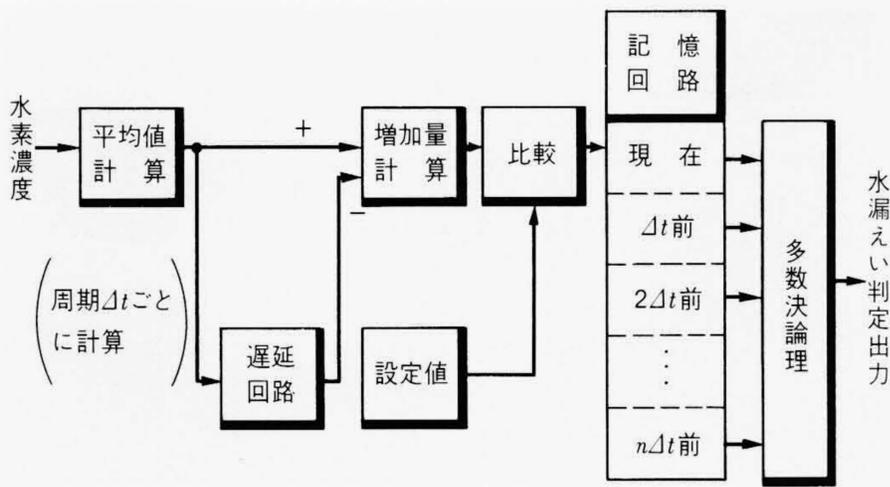


図12 こう配検知信号処理法の概念 水素濃度の変化は、現在値と一定時間前の値の差から増加量を計算し、水漏えいを判定する。

値と過去一定時間前の値の差から水素濃度の増加量を算出する。この水素濃度の増加量を  $\Delta t$  時間ごとに算出し、増加量が規定値を超えた場合に信号を出力し記憶させ、この記憶回路の  $n$  個のデータからの多数決論理判断により水漏えいを判定する。本システムは微少漏えいを対象としているため、ノイズなどによる誤動作を防止するとともに識別性能を格段に向上

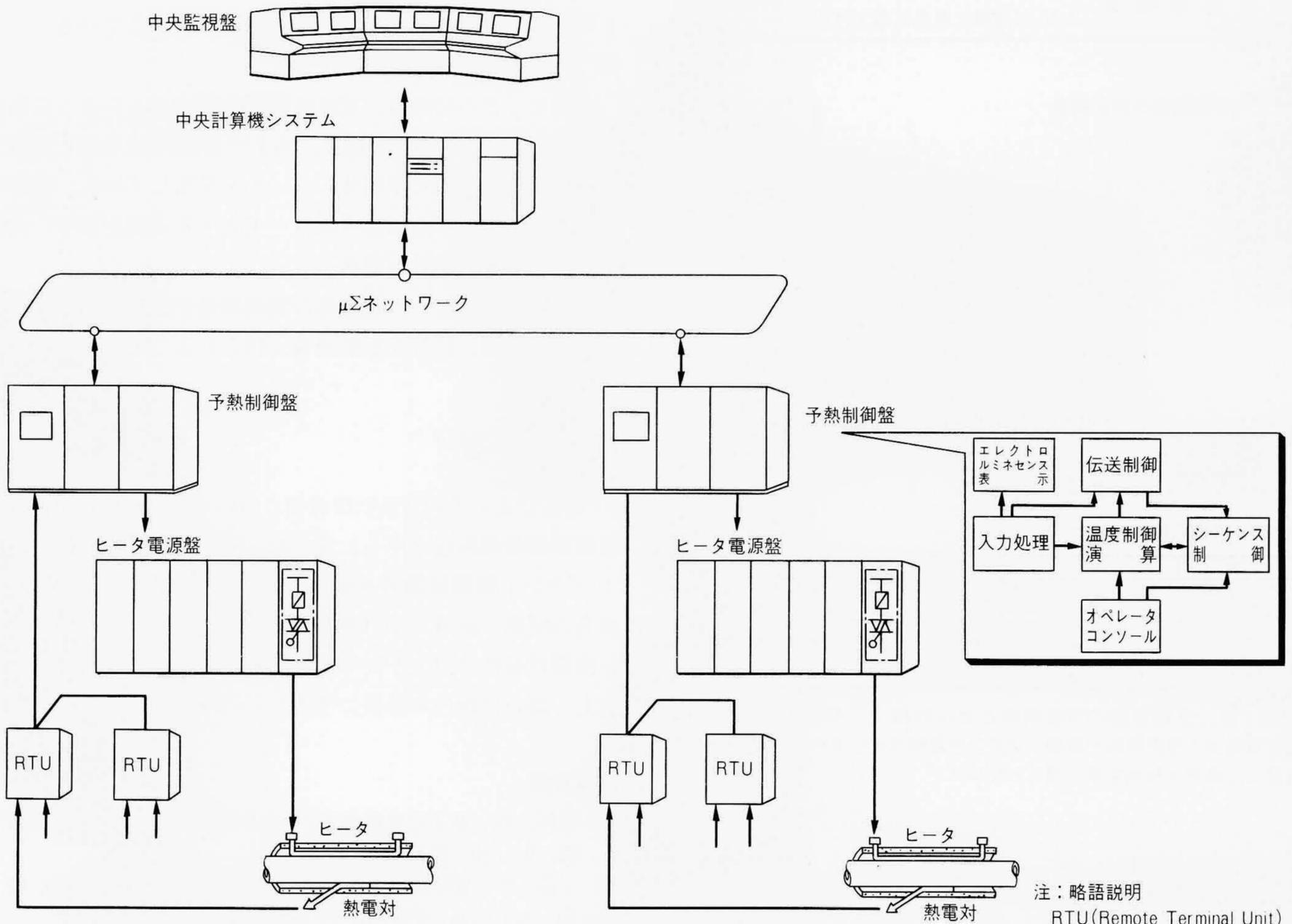
させている。

### 5 予熱制御設備

Naに接する機器、配管を表面から電気ヒータで約200℃の温度に加熱・保持制御し、冷却材であるNaの凝固を防ぐための冷却系統予熱設備が設けられている。1次冷却系の予熱制御設備のシステム構成を図13に示す。1次冷却系の予熱制御点数は約1,500点の規模になるため、マイクロコントローラと多重信号伝送を用いたデジタル予熱制御装置を開発し適用している。

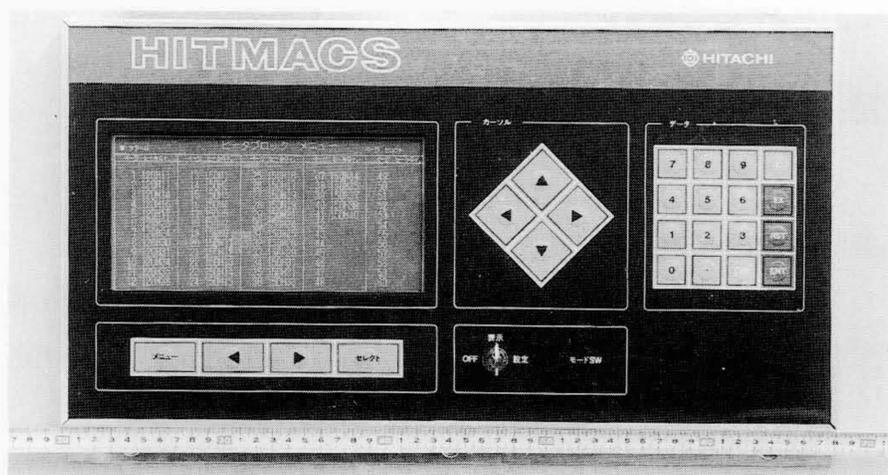
#### (1) 予熱運転自動化

「もんじゅ」での予熱制御点数は、上記のように約1,500点に及ぶため、予熱運転操作の自動化を行い運転員の負担軽減を図っている。予熱運転の自動化は、プラントの運転モードに対応した予熱モードスイッチを操作することによって、該当する対象機器、配管の予熱温度制御指令が選択され、予熱ヒータの通電制御が開始される。なお通電状態、予熱温度情報など運転監視に必要な情報をエレクトロルミネセンス表示器に集約表示する。エレクトロルミネセンス表示器および表

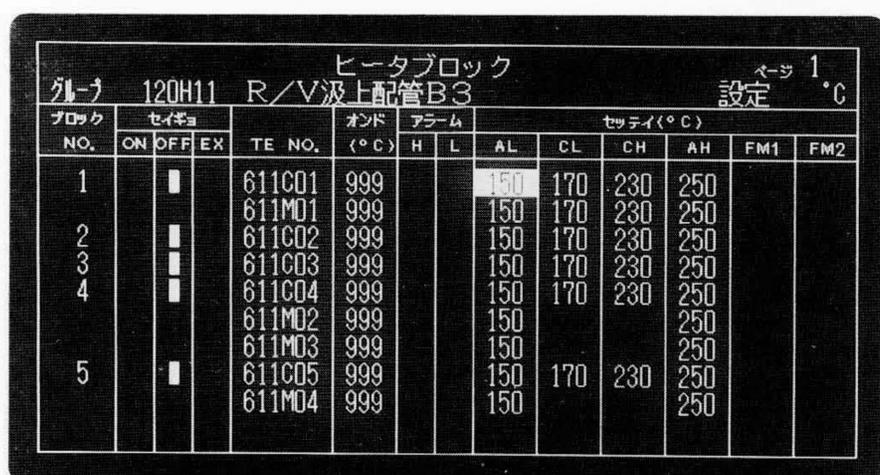


注：略語説明  
RTU(Remote Terminal Unit)

図13 1次冷却系の予熱制御設備のシステム構成 予熱制御点数は約1,500点に及ぶため、マイクロコントローラと多重信号伝送を採用し、運転自動化や集約監視を行って運転員の負担軽減を図っている。



(a) エレクトロルミネセンス



(b) 表示画面

図14 エレクトロルミネセンス表示器および表示画面 必要な予熱温度情報を、エレクトロルミネセンス表示器に画面を選択することによって表示できる。また、個別に予熱温度を設定することができる。

表2 予熱制御パターン 被予熱対象機器、配管に適した制御パターンを選択し制御する。

| 予熱制御パターン   | 説明                                   |
|------------|--------------------------------------|
| オンオフ制御     | Na機器・配管一般を対象としたオンオフ制御                |
| 多段設定値切換制御  | 大型機器の温度分布平坦化のため、温度設定を段階的に変更し制御する。    |
| フリーズ・メルト制御 | Na凝固をさせる配管のNa順序凍結、溶解制御を行う。           |
| 再生加熱制御     | ベーパートラップ、コールドトラップに付着したNaの溶解、再生制御を行う。 |

(a) ヒータ電源盤の実装構造



(b) ヒータ電源盤の主要仕様

| 項目       | 仕様                        |
|----------|---------------------------|
| 盤外形寸法    | 幅800×高さ2,300×奥行き1,000(mm) |
| ヒータ電圧    | AC100V, 200V              |
| 半導体定格    | 三相, 20A                   |
| スイッチ実装台数 | 最大40台                     |
| 冷却方式     | ファン強制冷却                   |

図15 ヒータ電源盤の実装構造と主な仕様 半導体スイッチの実装密度向上と放熱設計が課題であり、半導体スイッチへの空気の流れを改善し、良好な放熱効果が得られている。

示画面の例を図14に示す。

(2) 予熱制御パターン

被制御対象機器、配管の予熱操作に当たっては、表2に示す予熱制御パターンのうちから、それぞれの機器、配管に該

当するパターンが自動選択され、予熱温度制御が行われる。

(3) バックアップ制御

予熱制御装置は2台のマイクロコントローラで構成し、通常それぞれが受け持っている予熱ヒータ群を制御する負荷分担形構成をとっている。1台のコントローラが故障で停止した場合は、正常なコントローラが故障した側のコントローラの受け持っている予熱ヒータ群を、予熱状態に保持するのに必要なヒータ通電時間制御指令を出力するバックアップ制御を行い、システムダウンにならない対策を講じている。

(4) ヒータ制御

予熱ヒータの制御は、電路の開閉を行うことによって制御する。この電路の開閉頻度は、約1~2回/時となるため耐久性、保守性に優れた半導体スイッチを採用している。半導体スイッチは盤に予熱制御点数分を実装する必要があるため、実装密度向上と放熱設計が課題となる。

今回開発したヒータ電源盤の実装構造を図15に示す。実負荷試験の結果、良好な放熱効果が得られることを確認している。

6 結 言

「もんじゅ」での計測制御設備について、高速増殖炉特有の計測制御技術内容を中心に述べた。計測制御設備の特徴は、(1)プラント制御設備の高信頼化と制御性の向上、(2)Na計装技術の開発と採用、(3)予熱制御設備の運転操作性の向上、など設備信頼性の向上を図っていることである。今後も技術の向上、高い信頼性の確保に努力していく考えである。

参考文献

- 1) 若林, 外: 原子力発電所デジタル制御システム, 日立評論, 65, 9, 620~624(昭58-9)
- 2) 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)
- 3) 大内, 外: 高速増殖炉原型炉「もんじゅ」中央監視制御システム, 日立評論, 67, 11, 854~858(昭60-11)