

インターナルポンプシステムの開発

Development of Internal Pump Systems

ABWRの原子炉再循環系には、インターナルポンプシステムを採用している。このポンプは水中モータ式であり、圧力容器底部に直接設置されており、炉心冷却材を強制循環させる重要な機器である。このポンプを駆動するための電源設備及び制御設備も、ポンプ回転数を変化させて原子炉熱出力を調整するための重要な機器である。

日立製作所では、ABWRの設計検討を米国GE社(ゼネラルエレクトリック社)及び株式会社東芝とともに共同実施する一方、インターナルポンプシステムの構成要素であるポンプ、電動機、電源及び制御設備並びにポンプ・電動機取扱い装置を自主技術により開発し国産化した。

個々の機器にあつては、各構成要素ごとに構造、材質などについて性能、使用範囲の限界特性、耐久性などを把握するための各種試験を実施して、最も優れた性能及び高い信頼性をもったものを選定して設計に取り入れた。

また、システムとして総合機能を達成することの重要性にかんがみ、各機器を組み合わせた総合試験を実施して、機器相互の機能・性能がバランスよく調整されていることを確認した。

自主技術による総合的開発・国産化により、インターナルポンプシステムをABWRプラントに適用するための技術的基盤が確立された。

桜井三紀夫* *Mikio Sakurai*
辻 昭夫* *Akio Tsuji*
仲平四郎** *Shirō Nakadaira*
下田一郎* *Ichirō Shimoda*
小泉 章* *Akira Koizumi*

1 緒 言

ABWR(新型沸騰水型原子力発電設備)には従来のBWR-5型原子炉に比較して、種々の新しい技術を採用している。特に原子炉再循環系については、図1に示すように、従来の外部再循環方式からインターナルポンプ方式の採用へと大きな変更を行なっている。インターナルポンプ方式では、外部再循環ポンプや再循環配管がないことから、次のような効果が得られる。

- (1) 原子炉格納容器がコンパクトになり、経済性が向上する。
- (2) 定期検査の対象となる溶接線が減少し、保守点検作業の被ばく低減が図れる。
- (3) 圧力容器の炉心部以下に大口径配管ノズルが存在せず、大口径配管破断事故(仮想事故)を想定する必要がない。
- (4) ポンプ駆動動力の減少により所内消費動力が低減され、経済性が向上する。

このような利点をもつインターナルポンプシステムも、国内では運転実績のないシステムであり、実機適用に向けて設計検討及び機器の開発を行なう必要があった。

日立製作所では全社の総合技術の結集により、原子炉システムとしての設計検討を基にして、インターナルポンプシステムを構成する各機器を自主技術により開発し、国産化を図った。

2 インターナルポンプシステムの概要

インターナルポンプシステムは、図2に示すように圧力容器底部に直接設置するポンプ及び電動機と、これを駆動する電源設備、制御するための制御設備、電動機を冷却する熱交換器などの補助設備で構成している。

原子炉再循環系は原子炉冷却材を炉心に強制再循環させ、

燃料を冷却する重要な機能をもつものである。炉心からの要求仕様を適切に設定する必要がある。また、通常運転時の仕様以外にも、ポンプ停止時などの原子炉への影響も検討した上で、十分に安全な系統設備としておく必要がある。

ポンプ及び電動機は、上記のように機能的に重要な役割を担うとともに、構造的には圧力容器に直接設置されていることから、故障が許されないこと及び補修にはプラントの停止を必要とすることから信頼性の高い機器とする必要がある。

BWR(沸騰水型原子炉)では、原子炉熱出力の制御を行なう方法として、制御棒挿入位置の調整のほかに、炉心流量を調整する方法がある。このため、再循環ポンプの回転数を変化する運転を行なうが、電源設備はこの運転を行なうために可変周波数電源設備とする。制御設備は原子炉出力変化の要求量を電源設備に的確に伝えるものであり、原子炉出力調整機能を果たすためには、電源設備及び制御設備の両方が正確に作動しなければならない。

また、インターナルポンプ補助設備は、ポンプ及び電動機の機能確保に必要な運転条件の保持のため、所要の性能をもっていることを十分に確認しておくことが肝要である。

このように、インターナルポンプシステムを構成する各機器は、それぞれ信頼性の高い設計とする必要があるとともに、組み合わせた状態で高性能が発揮されるように開発をしていくことが重要である。

また、インターナルポンプ及び電動機は、圧力容器に直接設置されていることから、保守点検時には遠隔装置による取扱いが必要であり、インターナルポンプを実プラントに採用するに際しては、自動取扱い機器もポンプ及び電動機と並行して開発しておく必要がある。

* 日立製作所日立工場 ** 日立製作所土浦工場

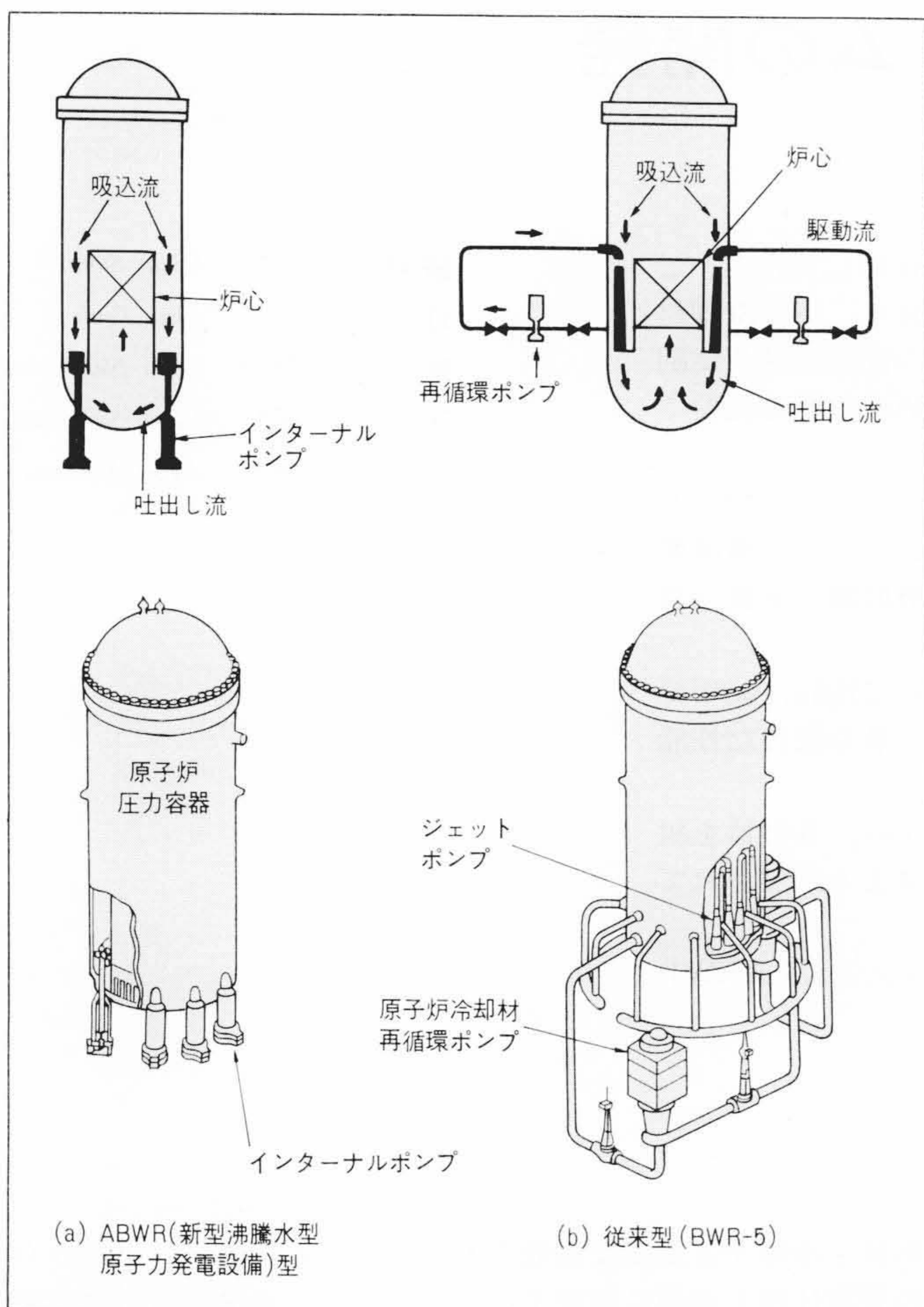


図1 原子炉再循環系の比較 ABWR再循環系は、原子炉压力容器下部に直接内部ポンプを取り付けた構成であり、大型ポンプ、大口徑配管が削除されているため、仮想的配管破損を考える必要がなく、また放射線源も低減される。

このように内部ポンプシステムを構成する機器は、単体ごとの機能のほかに、組み合わせた総合機能の達成を必要とするものであり、このような開発はプラントメーカーであり、かつ機器メーカーである日立製作所の総合技術を生かす必要のあるところである。

ABWRプラント仕様から内部ポンプシステムに課せられる仕様は、東京電力株式会社の指導の下に、日立製作所、米国GE社、株式会社東芝の3社が推進してきた共同設計に基づいたものであるが、システムを構成するポンプ、電動機、電源及び制御設備、並びに取扱い装置までの各機器については、日立製作所の自主技術に基づいて開発を行なったものである。

その開発内容について以下に述べる。

3 インターナルポンプシステムの開発

3.1 炉心・熱水力設計との関係

内部ポンプシステムがもつべき機能、性能はABWRプラント性能からの要求仕様として定められるものである。本節では、要求仕様の内容と内部ポンプシステムが達成した性能について記述する。

内部ポンプシステムの仕様を定めるに際しては、まず炉心設計及び熱水力設計の基本事項を明確に定める必要がある。

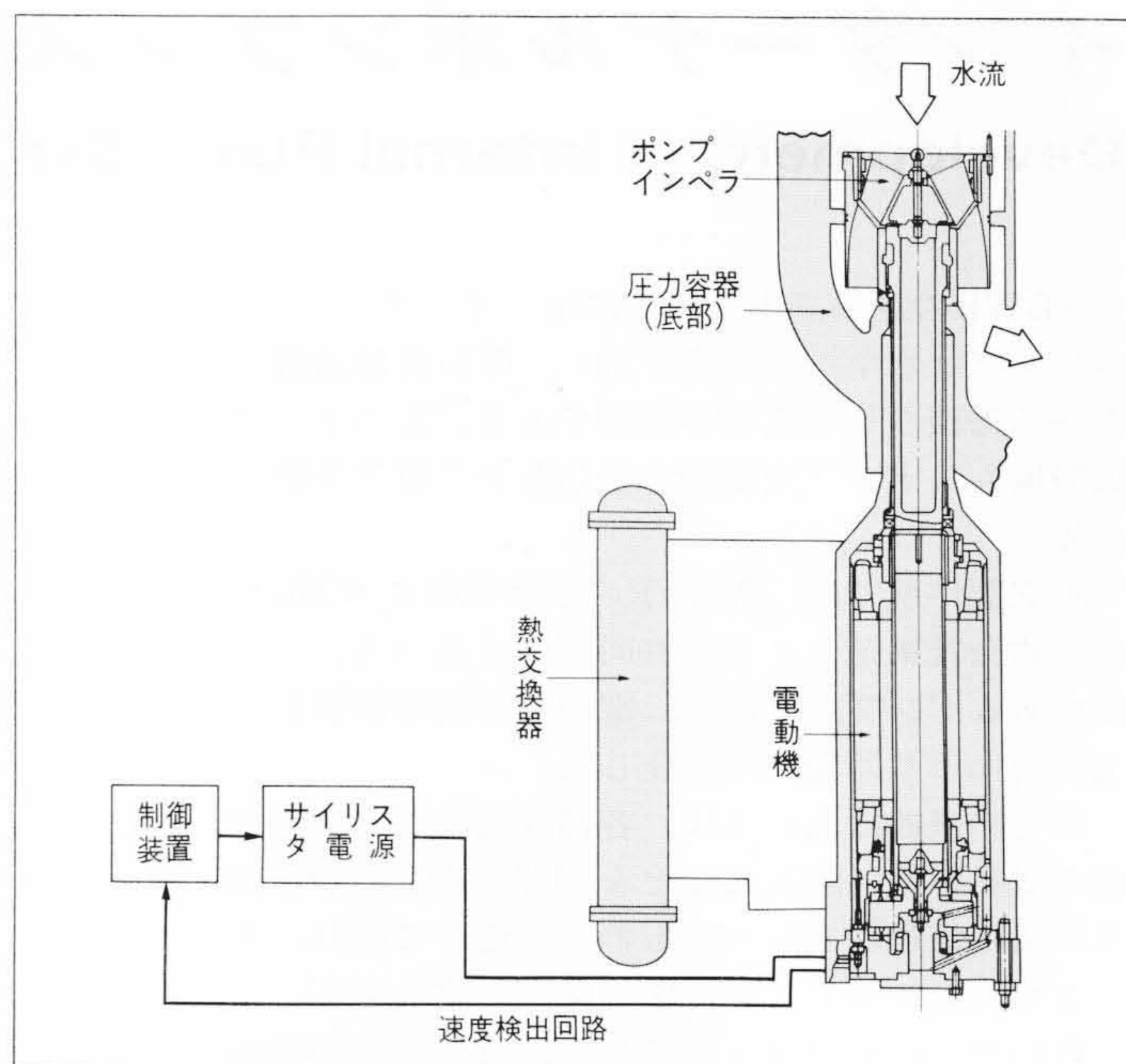


図2 インターナルポンプシステムの構成 本システムはポンプ、電動機、電源、制御設備、冷却設備などから構成されている。

ABWRの炉心熱出力は、電気出力1,300MW級を達成するものとして、熱出力3,926MWとしている。この熱出力を得るための燃料体数は、国内先行プラントで運転実績のある出力密度50kW/l程度を目標として872体としている。この燃料を適切に冷却するとともに、流動振動などの問題を生じない炉心冷却材流量を定める必要があり、従来の設計流量17.5kg/s・燃料体と流量拡大運転の実績から18.5kg/s・燃料体を最大流量として設定し、最大炉心流量を $58.0 \times 10^6 \text{ kg/h}$ としている。また、日間負荷追従運転を実施する場合に、ゼノン補償に用いる定格出力時の流量調整幅は10%程度が妥当であり、これを考慮して定格炉心流量を $52.2 \times 10^6 \text{ kg/h}$ とした。

これらの炉心流量仕様に基づいて、燃料被覆管のバーンアウトに至る熱出力に対する余裕度として安全限界MCPR(最小限界熱出力比)を評価した結果、十分に余裕のあることが示された。

3.2 プラント過渡特性との関係

内部ポンプの慣性定数が小さいことと、その電源装置である静止型可変周波数制御電源の応答性が速いことから、原子炉出力の変更速度を60%/minとすることが可能である。

一方、ポンプ慣性定数が小さいことは、ポンプトリップ時の流量減少速度が速いことにもつながるため、この場合の炉心の熱的余裕も評価しておく必要がある。ポンプは多数台設置するため、全ポンプが同時に停止する事象はほとんど発生しないが、最も厳しい事象として全ポンプが同時に停止するという事故事象を想定して評価した結果でも、熱的余裕が確保されることを確認した。

3.3 原子炉再循環系系統設計

原子炉冷却材を炉心に強制循環させる内部ポンプは、原子炉压力容器底部に環状に複数設置する。内部ポンプの形式は水中モータ形とメカニカルシール形とがあるが、構造が単純で取扱いが容易であり、また、軸封部がないため炉水漏えいのおそれのない水中モータ形を選定した。ポンプの台数は炉心熱水力設計からの要求流量と水中モータ

形ポンプの実績を考慮して10台とした。ポンプの仕様は流量 $2.14\text{m}^3/\text{s}$ 、揚程40mである。電動機の電圧は水中モータの実績を考慮した上で、動力ケーブルサイズを小さくすることをねらって3,300Vとした。これらのインターナルポンプ及び電動機の要求仕様を表1に示す。炉心流量と原子炉出力の関連を示した運転特性曲線を図3に示す。定格熱出力時の最大炉心流量はポンプ10台運転で達成するが、ポンプ1台停止時にも定格炉心流量が得られることを確認しており、このことは、ポンプ1台停止時にも定格出力運転が可能であることを示したものである。

水中モータの冷却はポンプ・電動機軸と同時に回転する補助インペラにより強制的に冷却水を循環し、電動機ケーシング外部に設けた熱交換器で冷却する方式である。この方式では、ポンプが停止した場合に、冷却水の強制循環力がなくなるので、そのような状態でも压力容器からの熱伝導などによる電動機側への入熱を除去するために、熱交換器を電動機ケーシングよりも高い位置に設置して自然循環による冷却機能を維持できる配置としている。また、電動機部分は取り外して保守点検を行なうため、そのときの被ばく線量の低減のために、電動機部分への炉水の浸入防止を図って、清浄水を電動機ケーシング上部から原子炉側へ注水している。

3.4 原子炉压力容器との関係

インターナルポンプは压力容器に直接取り付けるので、取

表1 電気出力1,300MW級インターナルポンプシステムの要求仕様
ABWRプラント仕様との関係から、インターナルポンプシステムに対する要求仕様が決定された。

項 目	要 求 仕 様
炉 心 流 量	最高58,000T/h
ポ ン プ 台 数	10台
ポ ン プ 流 量	$2.14\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{台}$
全 揚 程	40m
回 転 数	約1,500rpm
回転数変化範囲	30～100%
電 動 機 形 式	水中モータ形(水浸形誘導電動機)
総 合 効 率	65%以上
慣性モーメント	$19.5\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 以上
電 動 機 電 圧	3,300V

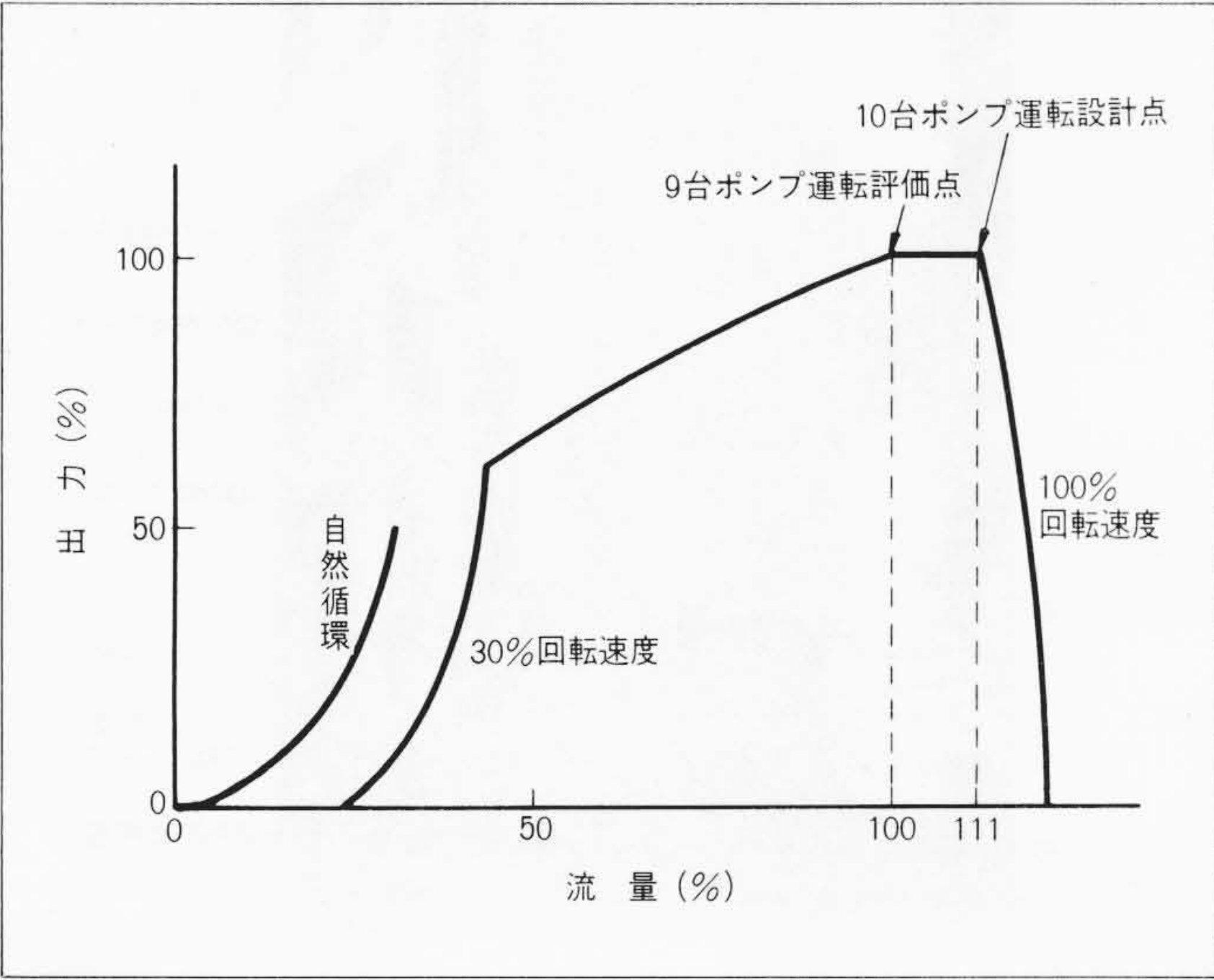


図3 運転特性曲線 ポンプ10台運転で最大炉心流量となり、ポンプ9台運転で定格炉心流量を達成できるシステム構成としている。

- 特 徴

 - 単純構造
 - 耐震剛性大
ただし、今後の研究開発を要する(実績なし)。
- 特 徴

 - ポンプ機能性に優れている(ディフューザとインペラの相対変位小)。
 - 熱的構造強度に優れている(柔軟構造による熱応力緩和)。
 - 開発的要素なし
 - 実績あり(ASEA-ATOM社)
 - ABWR共同研究で健全性実証済み

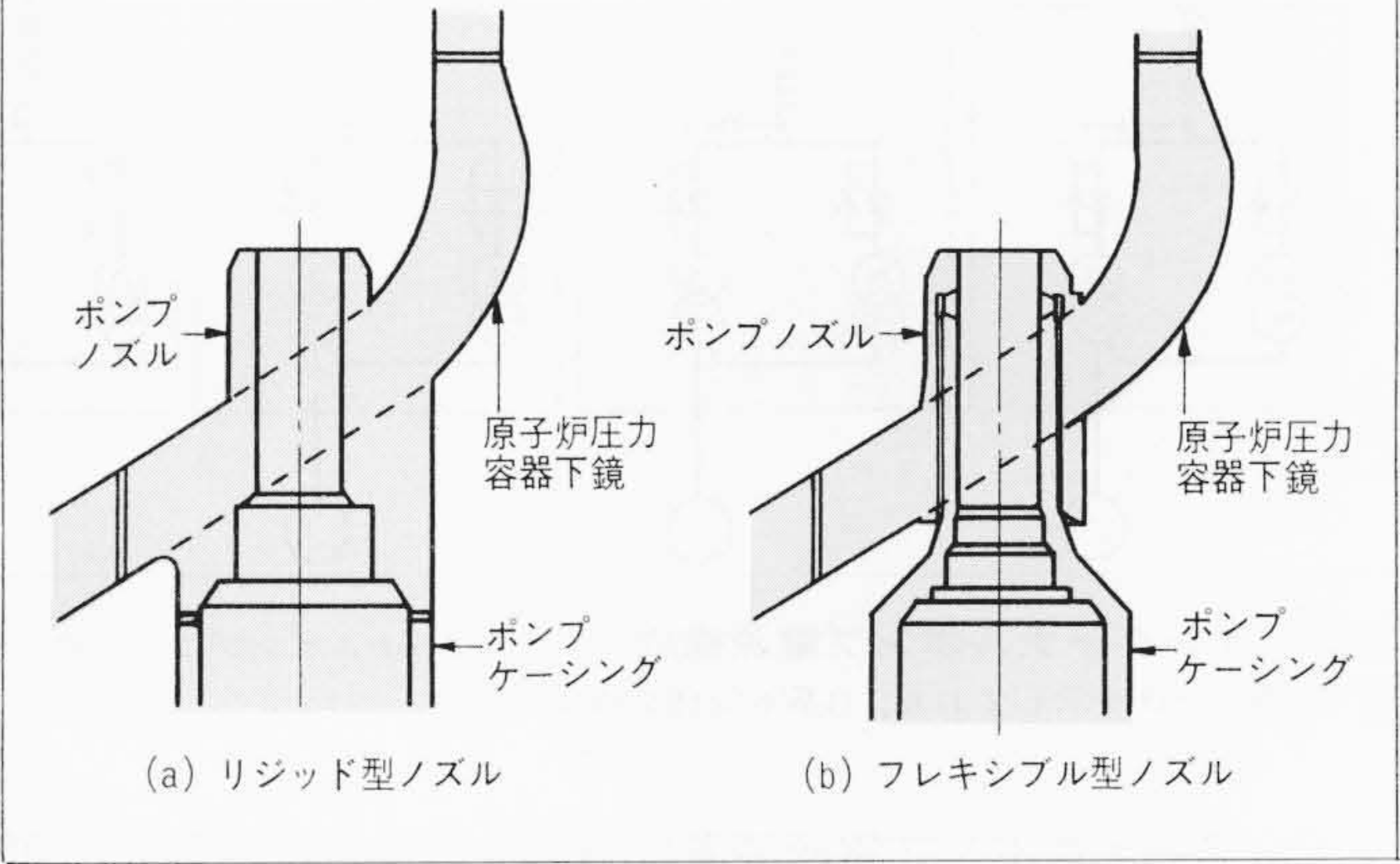


図4 ポンプノズル型式の比較 フレキシブル型ノズルの採用により、
(1) 高温高压による压力容器変形量を考慮しても、インペラとディフューザの間隙を維持できる。(2) 熱応力が緩和される。

付けノズルの設計に注意を払った。取付けノズルの構造としては図4に示すように、リジッド型ノズルとフレキシブル型ノズルが考えられるが、高温高压による压力容器変形量を考慮しても、インペラとディフューザの間隙を維持できること、熱応力が緩和されるなどの利点をもったフレキシブル型ノズルを選定した。また、電動機ケーシング外部に電動機冷却用熱交換器を設置するため、压力容器の支持部は胴部へ移動させてミニスカート型としている。

3.5 電源設備

原子力発電所の所内電源設備は、そのユニットの通常運転に必要な負荷に給電する常用母線、複数ユニットで共用する共通母線(この母線を設けないプラントもある。)、及び安全停止に必要な負荷に給電する非常用母線で構成されている。インターナルポンプは、プラントの通常運転に直接かわるものであるため常用母線から給電する。

インターナルポンプが10台、常用母線が4母線あることから、インターナルポンプ電源装置の設置台数として10台、4台、2台の各案が挙げられる。安全性、制御性の点ではどの構成にしても問題はないが、電源装置1台故障時の影響について考えると、10台構成ではポンプ1台停止となるだけであり100%出力運転継続できるのに対し、4台構成時は炉出力低下が必要で選択制御棒挿入となり、2台構成のときは水位高タービントリップに至る可能性が高い。一方、4台構成、2台構成としても電源装置設備費低減量が小さいので、結論として電源装置もポンプの台数と同じ10台を設けることとしている。しかし、変圧器については十分な実績があるので、入力変圧器は4台とし合理化を図っている。電源構成を図5に示す。

上記の電源構成の場合、入力変圧器容量は5,100kVA程度となるので高压(6.9kV)母線から受電するものとした。一方、ポンプ電動機の定格は、絶縁浸水課電劣化防止のための低電圧の要求、ケーブルサイズからの高電圧の要求、原子炉格納容器電線貫通部の台数など総合的に考え3,300Vとした。

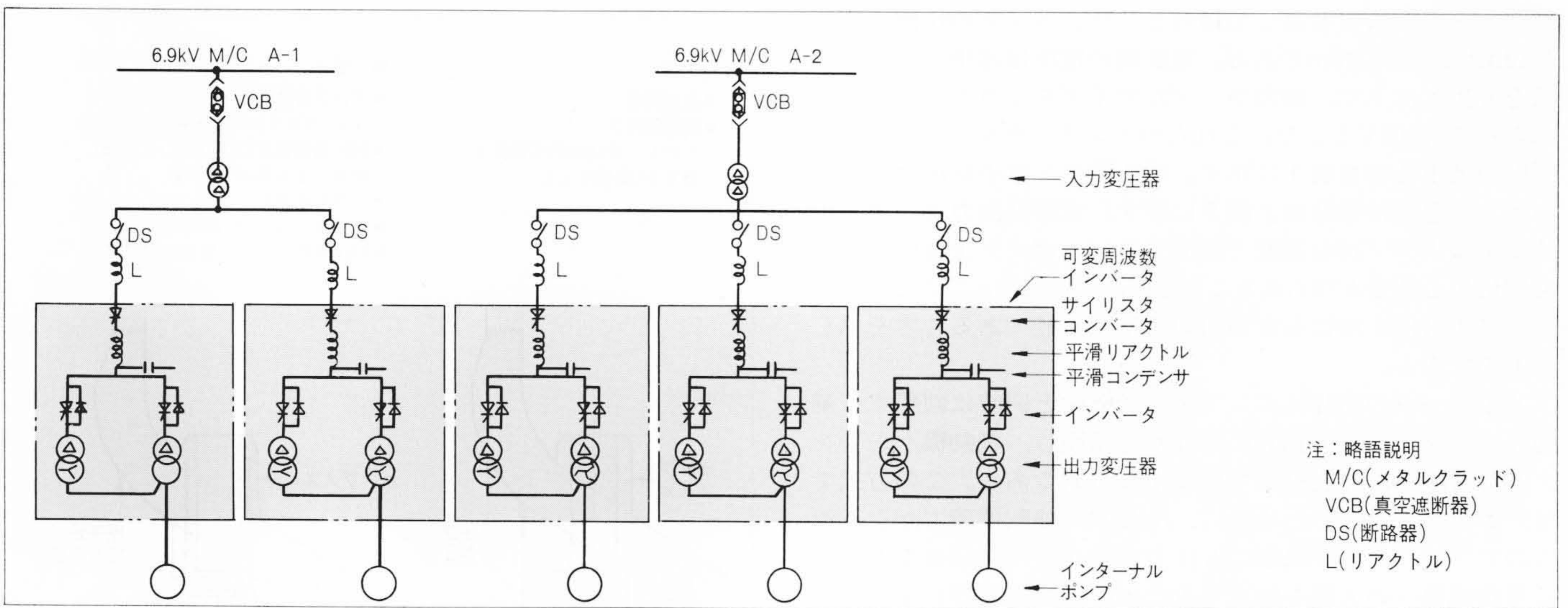


図5 インターナルポンプ電源構成 インターナルポンプごとに電源装置を設け、この電源装置には、常用母線ごとに設けた入力変圧器を通して給電する。図ではA系だけを示しており、B系も同様の構成である。

インターナルポンプ電源装置は制御性能に優れた静止形可変周波電源装置とし、ABWRの運転性能向上に寄与している。電源設備は電動機容量を考慮して1,250kVAとし、周波数可変幅はポンプ回転数変化範囲から10～55Hzとしている。

3.6 原子炉再循環流量制御装置

ABWRでは、再循環系に回転慣性の小さいインターナルポンプ及び可変周波数インバータ電源を採用しているため、インターナルポンプの速度指令に対し遅れなくポンプ回転数が追従する。この特性を生かして炉心出力の変更を再循環流量制御方式で行なうと、出力変更速度60%/minの達成が可能となり、運転性・負荷追従性の向上が図れる。

再循環流量制御装置は10台のインターナルポンプ各々に設置した可変周波数インバータに速度指令を与える構成とする。また制御装置のデジタル三重化を図り、信頼性をいっそう向上させている。

4 機器開発

インターナルポンプシステムの設計検討により、基本的な仕様を定めることができた。一方、実プラントへの適用に際しては、各機器が所定の機能を発揮することを確認することが肝要である。日立製作所では、インターナルポンプシステムを構成する各機器を自主技術により開発試作し、性能の確認を行なった。得られた性能は十分にABWRの要求仕様を満足するものであり、ABWR実用化へ大きく前進する礎となるものである。

以下に各機器の開発内容を示す。

4.1 インターナルポンプ及び電動機の開発

日立製作所では既に製作実績のある産業用水中ポンプの技術と縦型ポンプの技術を基に、昭和55年からインターナルポンプの構成要素ごとに基礎技術の開発に着手した。これらの自主技術による成果を結集して、実規模インターナルポンプの国産機を完成させた¹⁾。

インターナルポンプのもつ機能の重要性を考慮して、ポンプの国産化に当たっては、高性能小径インペラ、ディフューザの開発、高信頼性水中軸受の開発及び耐放射線性、耐高水圧巻線の開発が重要な課題であった。

水力性能としては、効率が低いこと、 $Q-H$ (流量-揚程) 曲線が変曲点のない下降特性であること、有効NPSH (Net

Positive Suction Head) 下でキャビテーションに対して十分余裕があることなどが必要である。これらを同時に満足し、更に原子炉圧力容器の胴径を大きくしないために小径のインペラとディフューザを開発した。

水中軸受はスラスト軸受及びラジアル軸受とも実寸法の要素で開発試験を行ない、実使用条件に対して十分余裕のあることを確認した。また、数種のラジアル軸受に対してふれまわり振動現象が発生する限界回転数をモデル試験機により確

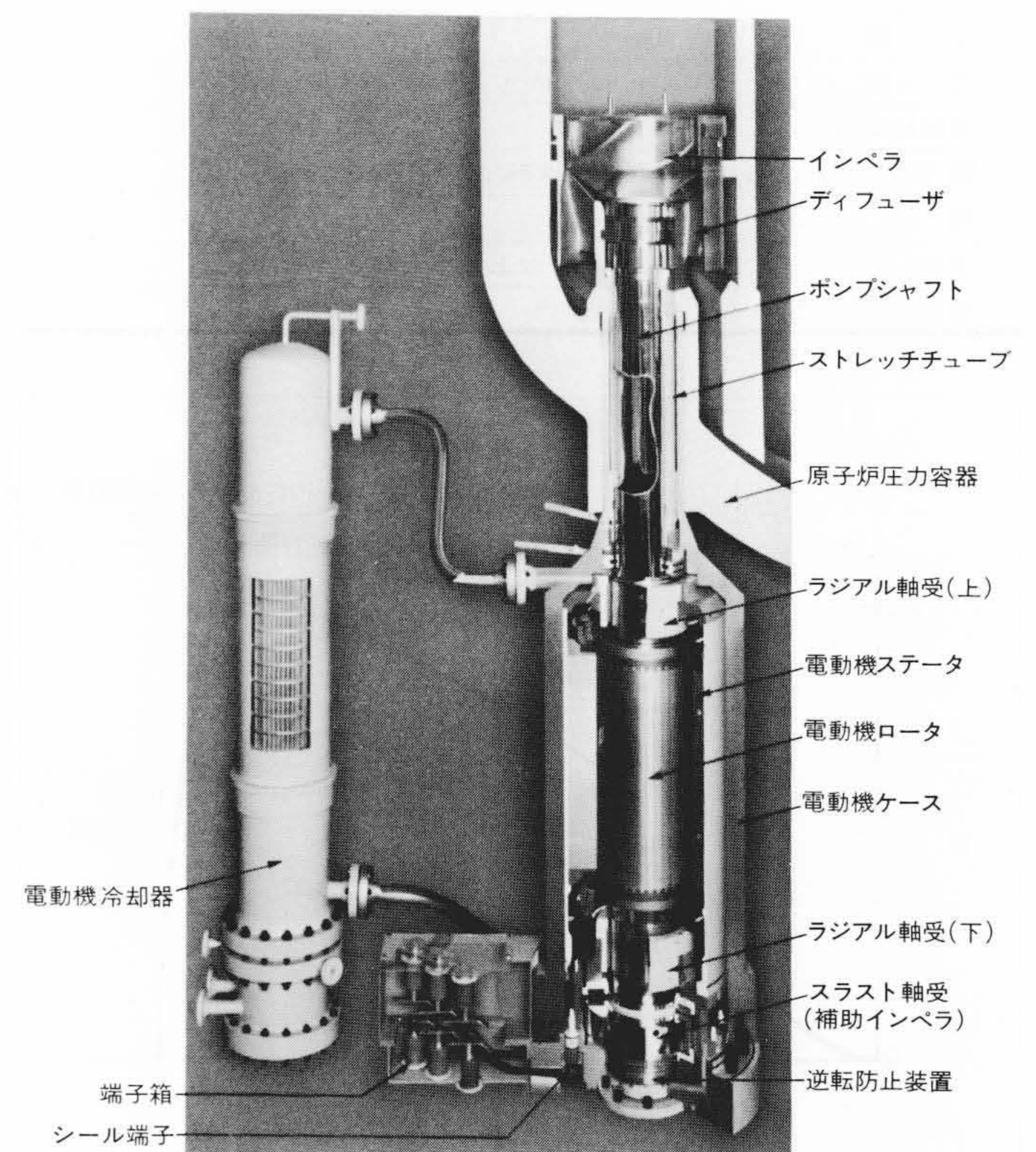


図6 インターナルポンプの構造 ポンプ・電動機の回転部は密閉され、軸振動の外部検知ができないため負荷容量が大きく、制振性の高い特殊軸受を採用し、長期運転に対して高信頼性を図っている。

認し、実機の運転仕様に対して十分安定な性能が得られるラジアル軸受を開発した。

電動機巻線については、設計限界放射線や熱水に対する絶縁電線の劣化特性を確認して、十分に耐久性があるものを開発した。更に、巻線の加工技術を確立して実機大の巻線要素を製作し、高水圧下での課電試験を行ない電気特性が十分満足できるものであることを確認した。

以上のような個々の要素開発をもとにして、自主技術によるインターナルポンプ試作機を製作し、性能試験を実施した。日立インターナルポンプの構造を図6に示す。

実機運転条件と同一の高温高圧条件でのポンプ水力特性を図7に示す。ポンプ及び電動機の総合効率は、要求仕様(65%)を上回る効率が得られ良好な性能となっている。

ポンプの振動特性を図8に示す。1,650rpmまで実施した性

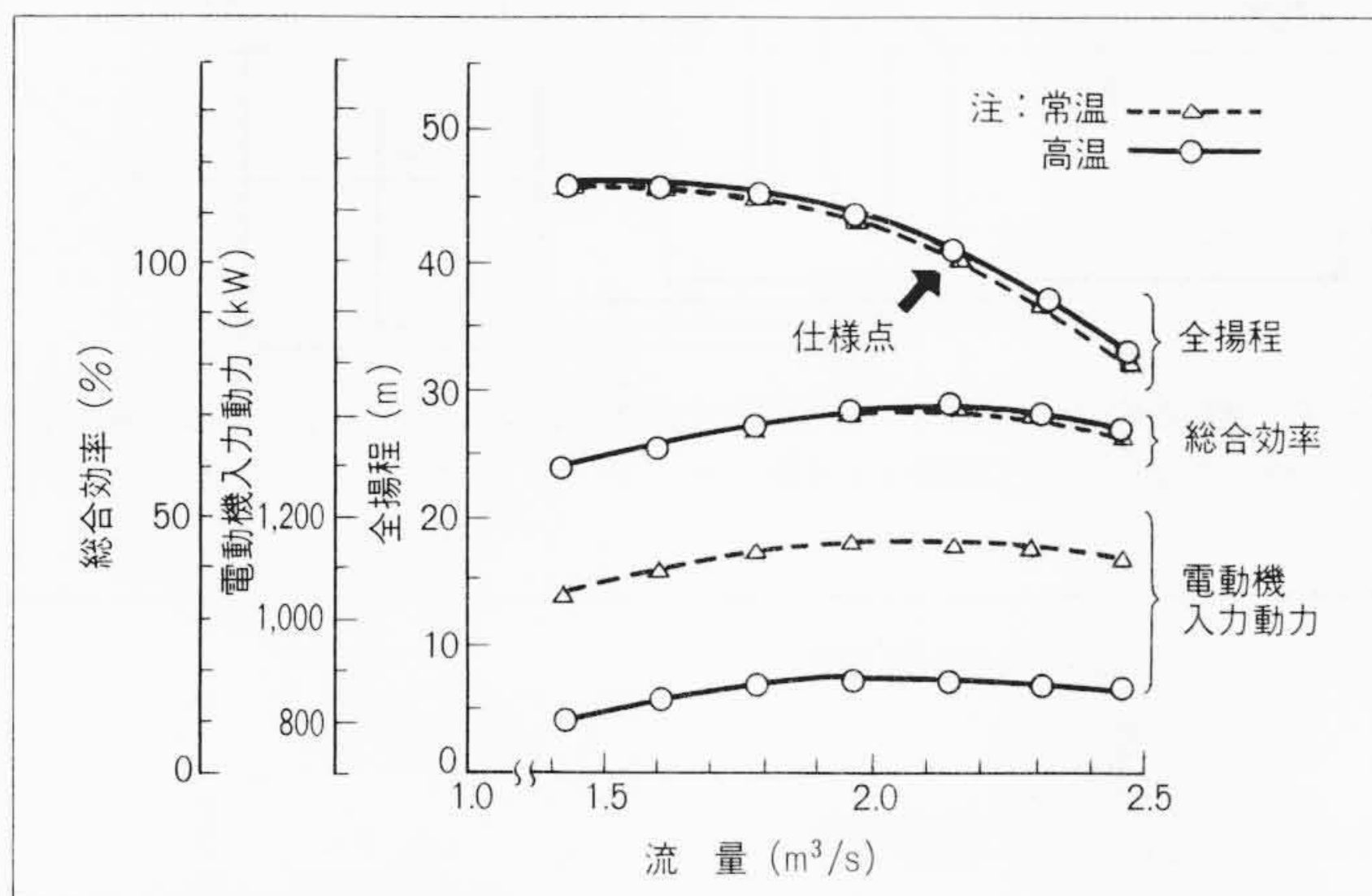


図7 ポンプ水力特性 流量・全揚程曲線は、変曲点のない右下がり下降特性で、要求仕様点で71%の高い総合効率が得られた。

能試験の全領域に対して軸受部の軸振幅は安定して小さく、回転体挙動は非常に良好であった。軸振動の周波数特性は回転数 N 成分だけが主成分であり、縦型ポンプに現われやすい軸のふれまわり現象を示す $\frac{1}{2}N$ 成分は完全に抑制されている。したがって、回転体、軸受及び電動機上下端の巻線曲部など振動の影響を受けやすい部位の挙動が安定し、インターナルポンプとして耐久性を向上することにつながり、長期間連続運転に対して信頼性が高いものとなっていると評価できる。また、将来の回転数増大化についても機械振動の点では健全性が維持できることが確認できた。

4.2 インターナルポンプ電源設備の開発

インターナルポンプ電源装置はインターナルポンプが10台、常用母線が4母線あるため、図5に示すように母線ごとに入力変圧器を設置し、インターナルポンプごとに可変周波数インバータを設置する構成としている。可変周波数インバータは、容量1,250kVA、出力電圧約3,300V、周波数約55Hz(周波数制御範囲約10~55Hz)の12相電圧形インバータで、インバータには2,500V、2,000AのGTO(ゲートターンオフ)サイリスタを12個使用している。

この装置は、交流入力を出力電圧に見合った直流電圧に変換する6相サイリスタコンバータ、直流電圧を平滑にするリアクトル、出力側の無効電力を処理する平滑コンデンサ、直流を指定の周波数に逆変換する12相GTOサイリスタインバータ、更に12相とするため30度の位相差を付けた出力変圧器から構成している。12相とすることにより、出力電圧リップルが低減され円滑な運転ができる。

本電源装置の試作機を製作し、インターナルポンプとの組合せ試験を実施した。試作機の外観を図9に示す。電源装置の加速特性及び減速特性について実測した結果、迅速な応答結果が得られ、プラント運転性能向上に寄与することが確認できた。

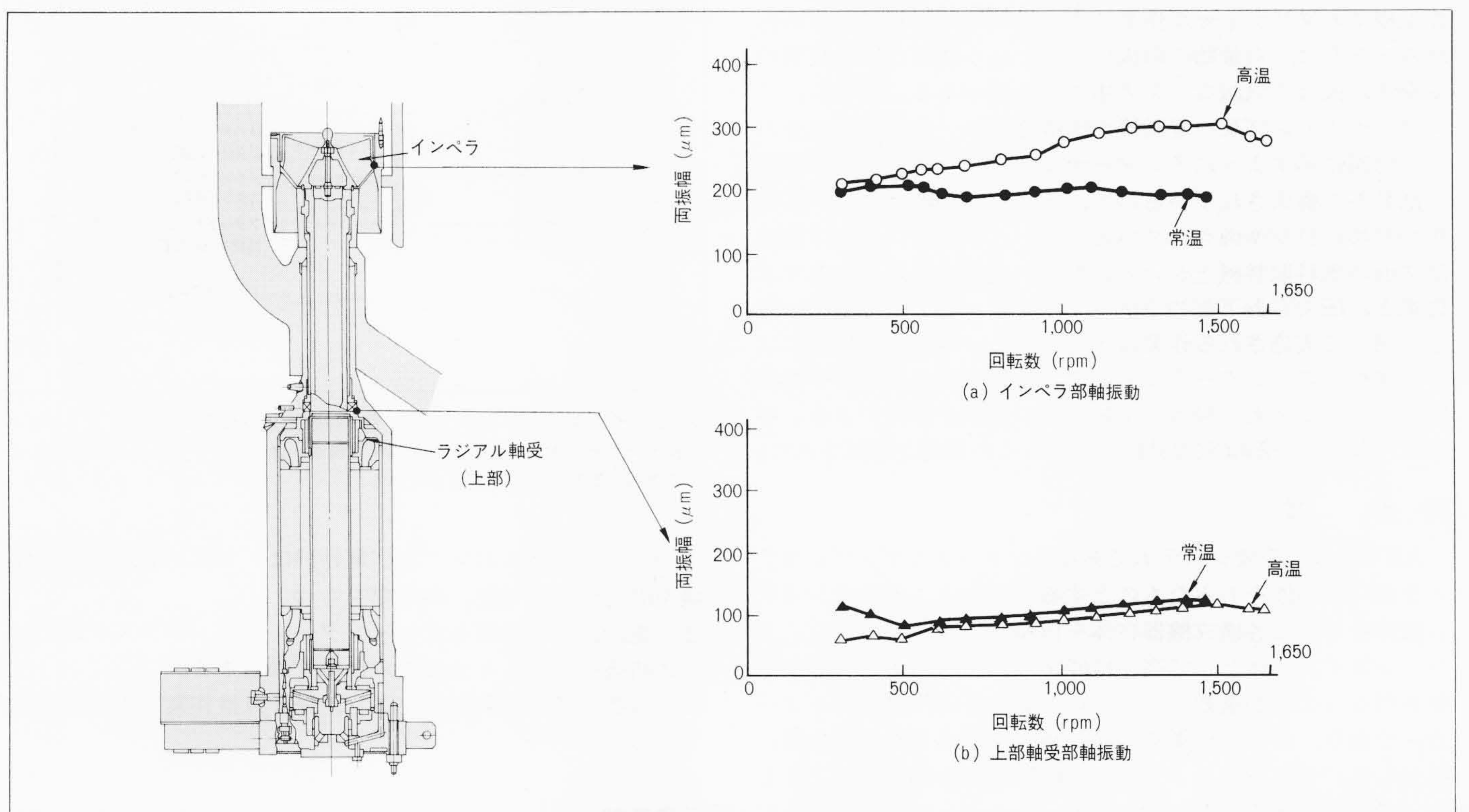


図8 インターナルポンプの振動特性 振動振幅値は常温状態、高温状態ではほとんど変わらず、上部軸受部の軸振動は100 μ m程度と良好である。また、その特性は1,650rpm以上まで保持されている。

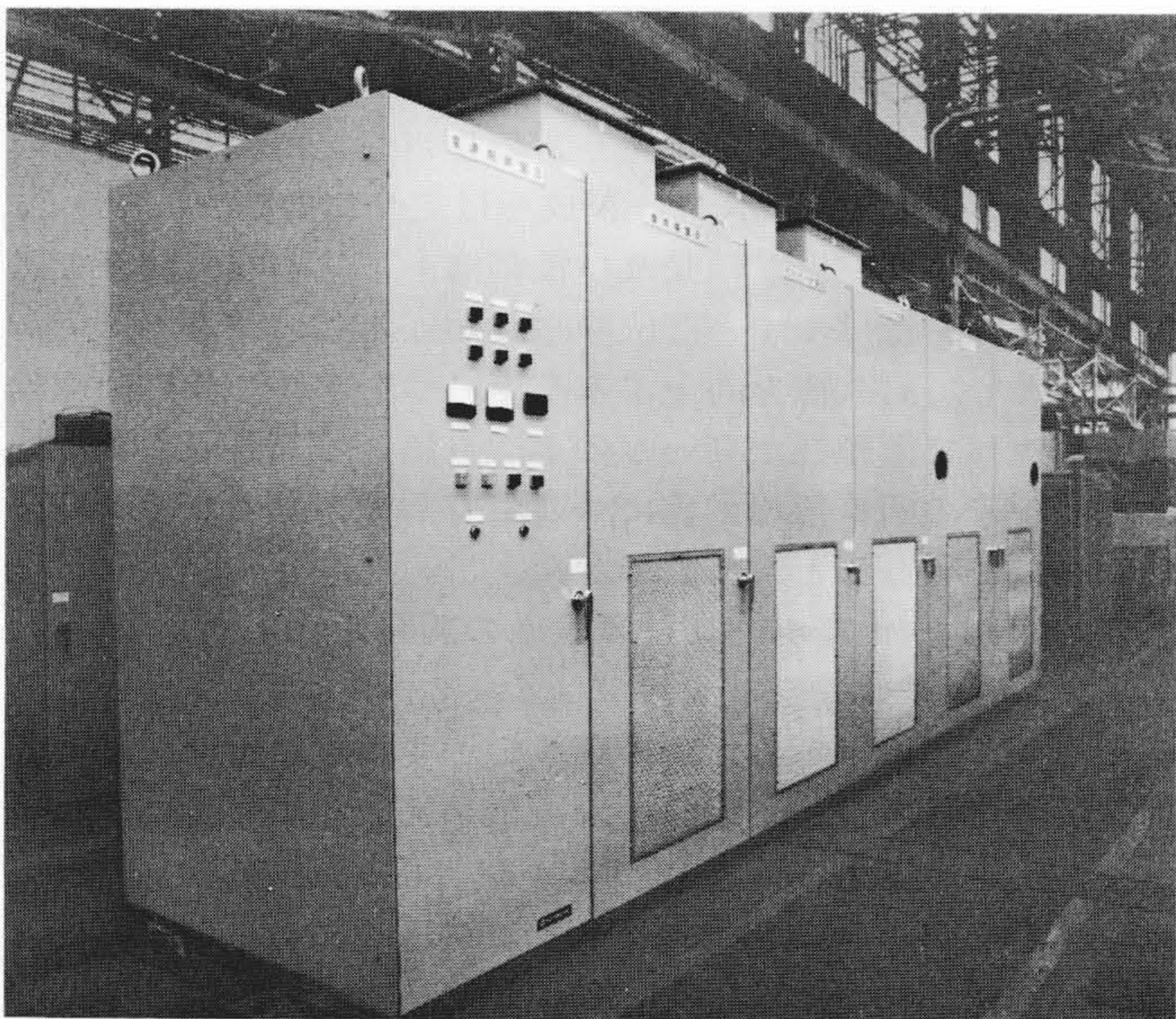


図9 インターナルポンプ電源装置の外観 正面左から制御盤、整流器盤、インバータ盤(2面)、出力変圧器盤で構成される〔幅6,200×奥行1,300×高さ2,300(mm)〕。

4.3 再循環流量制御装置の開発

ABWR再循環流量制御方式の妥当性を確認するために、日立製作所で開発、国産化したインターナルポンプ及びインバータ電源とデジタル再循環流量制御装置とを組み合わせ、総合試験を行なった。図10に制御装置の構成を示す。プラント応答を模擬するためにABWRの過渡特性を模擬したデジタルシミュレータを用い、種々の応答試験、外乱試験を実施し良好な応答特性が得られることを確認した。

4.4 インターナルポンプ及び電動機取扱い装置の開発

インターナルポンプ及び電動機の保守・点検は、通常発電所の定期検査時に2台程度ずつ実施される。本作業は定期検査工程でのクリティカル作業であり作業時間の短縮を求められるとともに、重量物の取扱い作業という観点から作業者の安全性、被ばく低減などを考慮する必要がある。図11に、インターナルポンプ及び電動機の構造と取扱い装置の構成を示す。同図に示すようにインターナルポンプ及び電動機は複数の部品から構成されているので、それぞれの部品について専用の取扱い具が準備されている。また、本取扱い作業は運転階床面の燃料取替機上から上部取扱い装置を用いて実施する作業と、圧力容器下部の下部ドライウェル内で下部取扱い装置を用いて実施される作業に大別される。本装置の開発により、実機でのインターナルポンプ及び電動機の取扱い作業時間の短縮、作業者の被ばく低減などの効果が期待できる。本取扱い装置の一部は電力共同研究でもその機能が確認された。

5 結 言

ABWRの最重要システムであるインターナルポンプシステムを高い信頼性をもったものとするためには、十分なシステム設計をもとに各構成機器自体を信頼性の高いものとし、また、システム全体として高い機能を果たすための総合的な開発を行なうことが重要である。日立製作所は、プラントメーカーであり、かつ各構成機器メーカーでもある点を最大限に生かして、自主技術により各々の機器要素を開発するとともに、総合的に組み合わせてインターナルポンプシステムとしての開発を行ない国産化した。その成果を次に示し、本稿をまとめる。

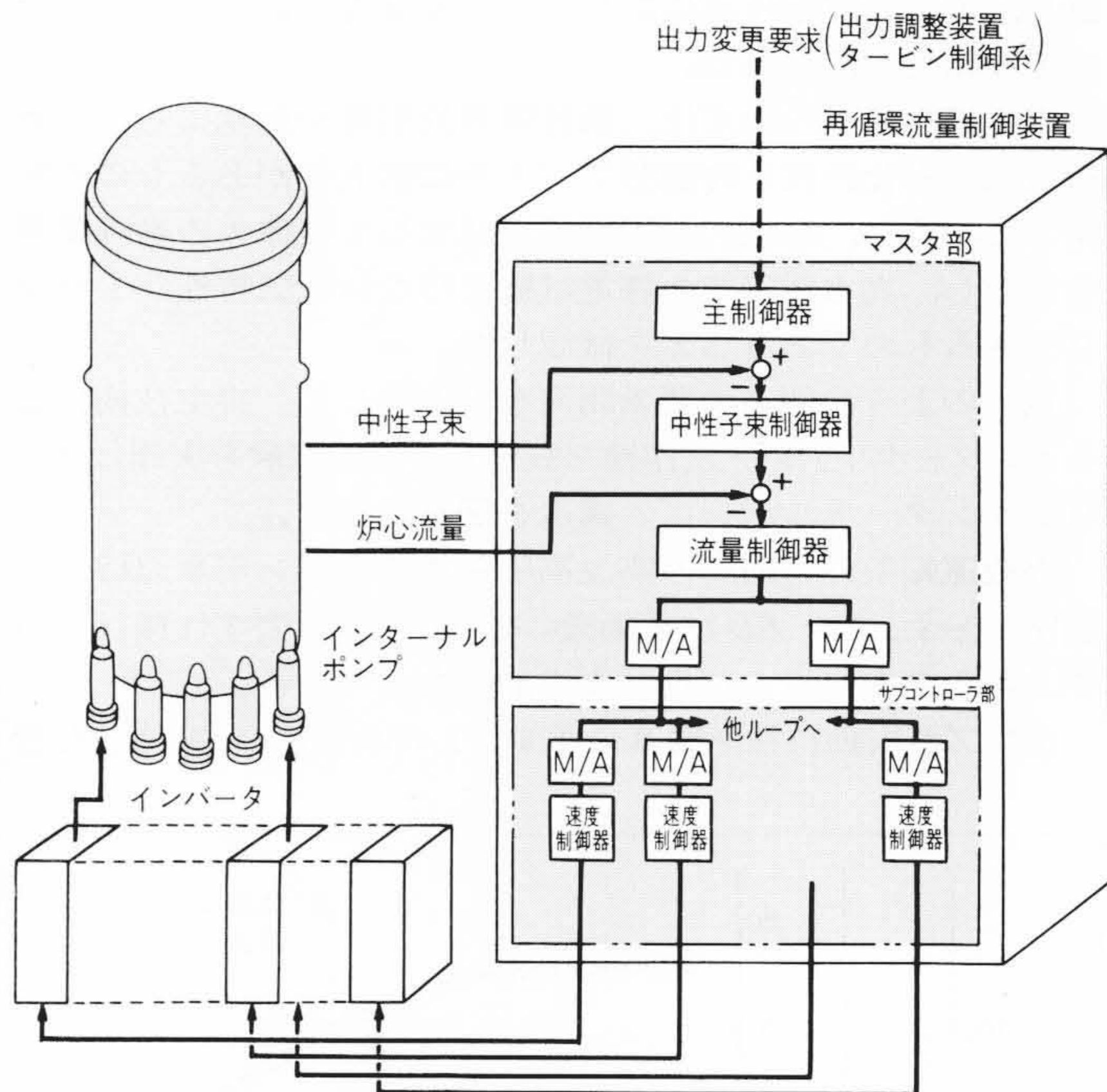


図10 構成修復型ABWR再循環流量制御装置 デジタル制御装置は、構成修復型とし信頼性向上を図った。

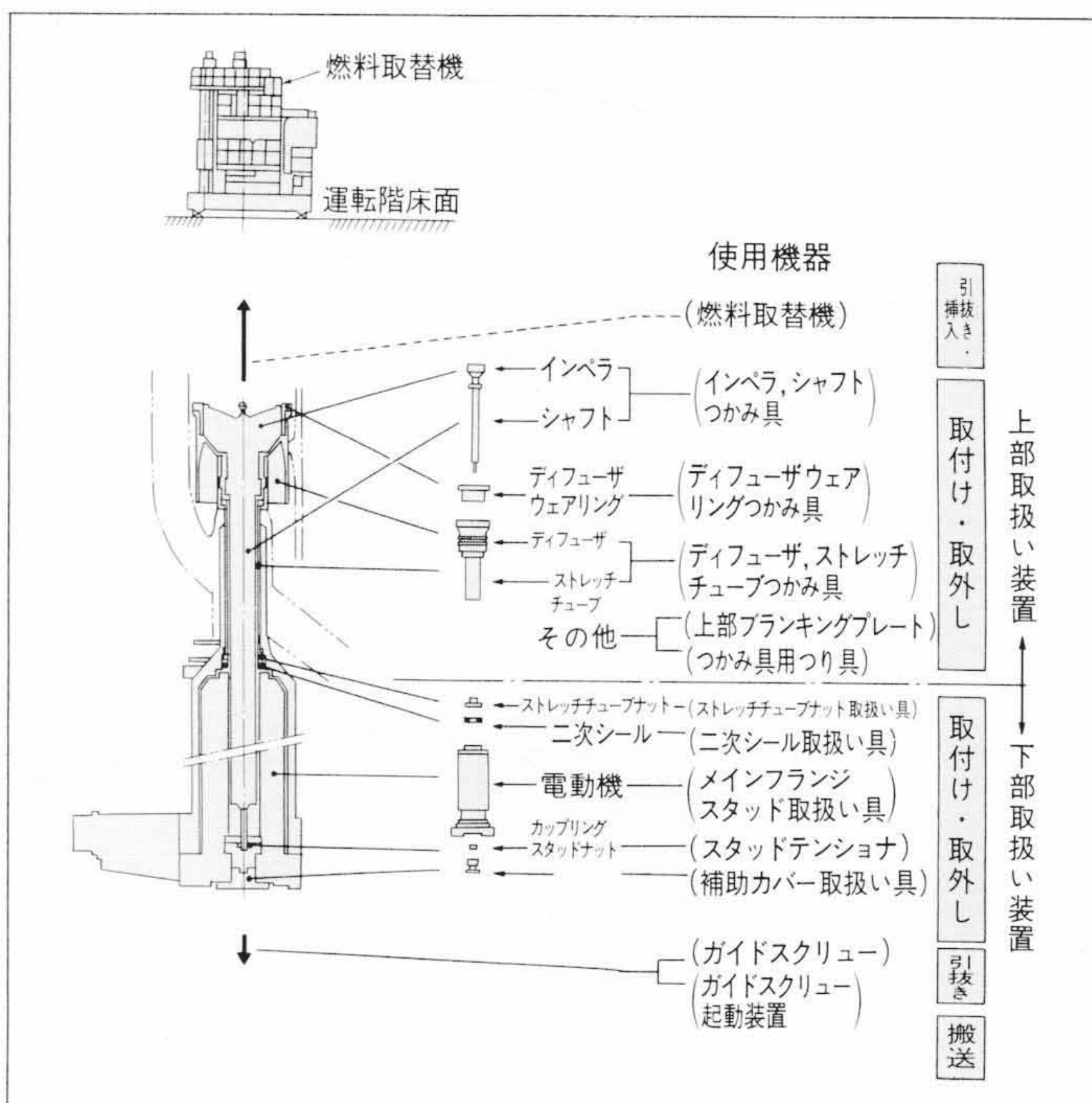


図11 インターナルポンプ及び電動機取扱い装置の構成 インターナルポンプ及び電動機は複数の部品から構成されており、それぞれの部品について専用の取扱い具が準備されている。

- (1) インターナルポンプ及び電動機は、プラント側の要求仕様を満足する高性能、高効率をもつ。
- (2) 電源、制御装置を含むインターナルポンプシステムとしての組合せ性能も十分に要求仕様を満足する。
- (3) 取扱い装置の開発も完了し、保守点検作業も円滑に実施できる。

参考文献

- 1) 仲平, 外: ABWR(新型沸騰水型原子炉)用高信頼性インターナルポンプ, 日立評論, 66, 4, 311~314(昭59-4)