

# ABWR(新型沸騰水型原子炉)用 高信頼性インターナルポンプ

## High Reliable Internal Pump for ABWR (Advanced Boiling Water Reactor)

ABWRには再循環ポンプとして、水中電動機型のインターナルポンプが採用される。このポンプは原子炉圧力容器の底部に直接取り付けられ、炉心の冷却水を循環させる機能を持ち、プラント運転維持上最も重要な回転機器である。

日立製作所は、原子力用として我が国の国情に合った高品質、高信頼性をもつインターナルポンプを供給し、かつこのポンプの予防保全及び保守技術を確実なものとするため、電気出力1,300MW級ABWR用のインターナルポンプを自主技術により国産化した。

インペラ、ディフューザ、水中軸受、電動機巻線などの各構成要素ごとに構造あるいは材質などについて性能や使用範囲の限界特性、更に耐久性などを把握するための各種試験を実施し、最も優れた性能及び最も高い信頼性をもつものを選定して、インターナルポンプの実機を設計製作した。

インターナルポンプの試験は、システム的な性能確認を含めるため、実プラントに使用されるものと同じの電源装置及び制御装置を製作し、高温高压の実使用条件下でこれらを組み合わせて実施した。その結果、このインターナルポンプは要求仕様に対して優れた性能を示し、また電源、制御装置などの各機器も優れた性能が得られた。

仲平四郎\* Shirô Nakadaira  
 矢沢節雄\* Setsuo Yazawa  
 袴田武司\*\* Takeshi Hakamada  
 志田 茂\*\*\* Shigeru Shida

### 1 緒 言

ABWR(新型沸騰水型原子炉)は従来のBWR-5型原子炉を経済性、安全性及び信頼性などについていっそう向上させることを目標として、**図1**に示すように原子炉冷却材再循環系にインターナルポンプを採用し、外部大型再循環ポンプ及び外部大径再循環配管をなくしている。そのため、下記のような特長をもっている<sup>1)</sup>。

(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

とともに、定期検査の対象となる溶接線が減少し、保守時の被ばく低減が図れる。

(2) 再循環配管破断(仮想事故)を想定する必要がない。

(3) ポンプ駆動動力の減少により所内消費電力が低減し、経済性が向上する。

インターナルポンプは炉心に冷却水を直接循環供給し、ABWRにとって出力制御及び運転維持上最も重要な回転機器となっている。このインターナルポンプ方式の原子炉は、既に西欧で実績をもっているが、原子力用として我が国の国情に合った高品質、高信頼性ポンプを使用し、かつ予防保全及び保守技術を確実なものとするためには、このポンプを国産化することが肝要である。そこで日立製作所は、4年前から既に製作実績のある産業用水中ポンプ技術と立型ポンプ技術をベースに、**図2**に示すような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、これらの自主技術による成果を適用して実機として適用可能なインターナルポンプを製作した。

昭和58年度初めからは電源、制御装置を含めインターナルポンプシステムとしての試験を実施し、性能及び信頼性の評価を行ってきた。以下、その概要について述べる。

### 2 インターナルポンプ要素技術開発の概要

インターナルポンプは原子炉圧力容器の底部の外周に取り付けられ、インペラと電動機を1本のシャフトで構成した水中電動機型で、炉水の外部への漏れに対して高い信頼性を確保するため、軸封装置のない密閉型の構造となっている。し

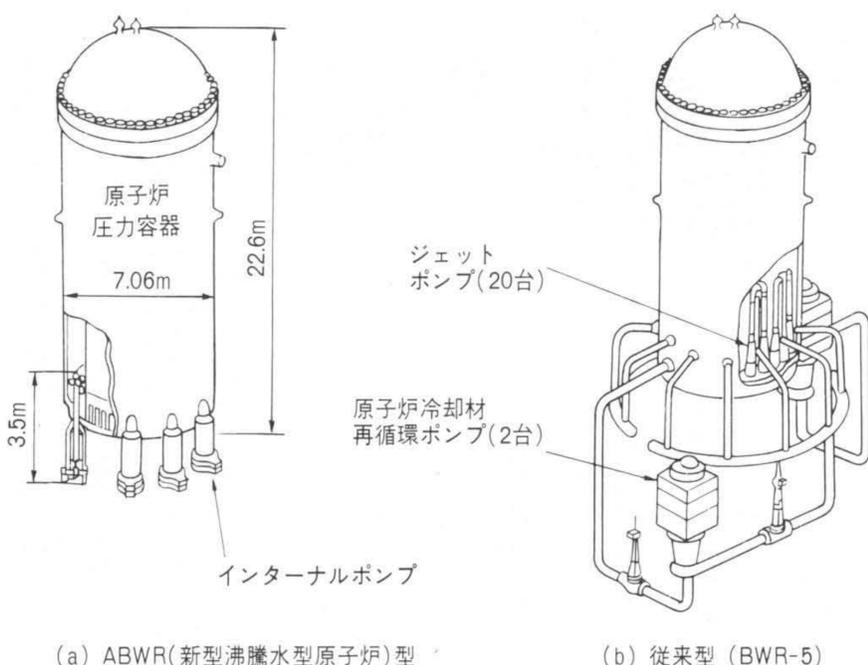


図1 ABWRの原子炉再循環系 ABWRは従来型のBWR-5に比べてジェットポンプと再循環ポンプをなくし、インターナルポンプを採用してプラントとして経済性、安全性及び信頼性をよりいっそう向上させている。

\* 日立製作所土浦工場 \*\* 日立製作所日立工場 \*\*\* 日立製作所機械研究所 工学博士

たがって、このようなインターナルポンプを国産化するために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、耐高水圧巻線の開発が最も重要な課題として挙げられる。

高性能化のために水力性能としては、効率が高いこと、 $Q-H$ (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、更に、炉停止時に炉心が自然循環で冷却されるために、順流に対するポンプ部の圧力損失が小さい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、ディフューザを開発した。また、水力モデルとしてのインペラ、ディフューザは、ポンプ台数が12台及び10台時の

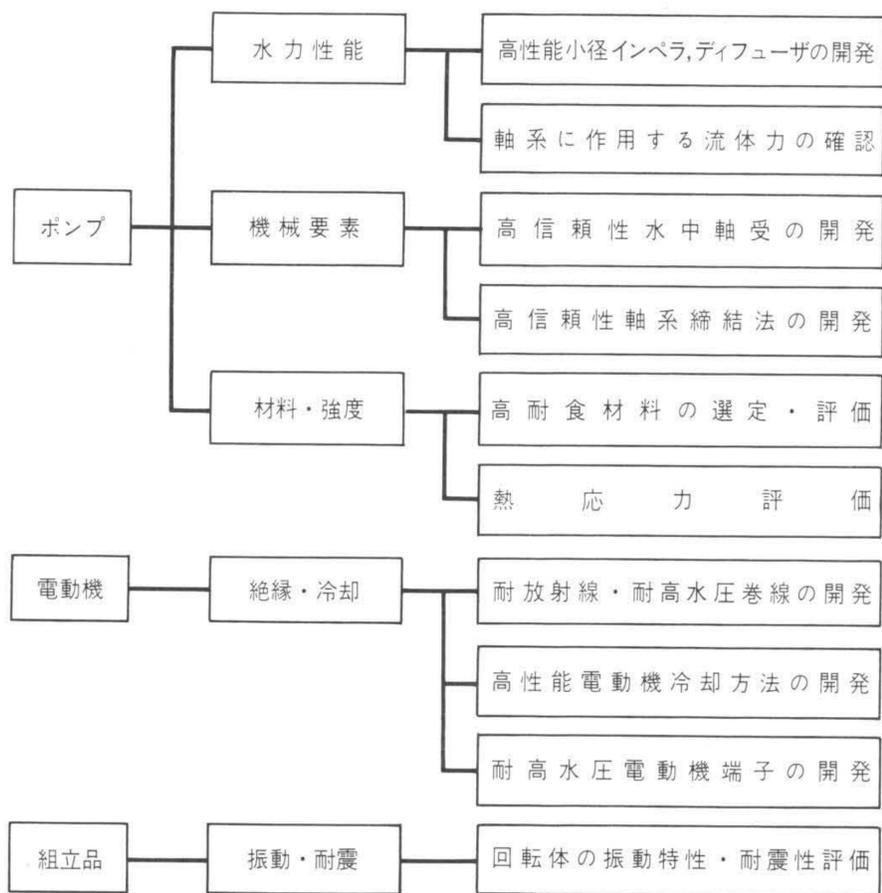


図2 インターナルポンプの高性能、高信頼化のための要素技術項目 インターナルポンプの高性能、高信頼性を確保するために、本図に示すような要素ごとに評価又は開発を行なった。

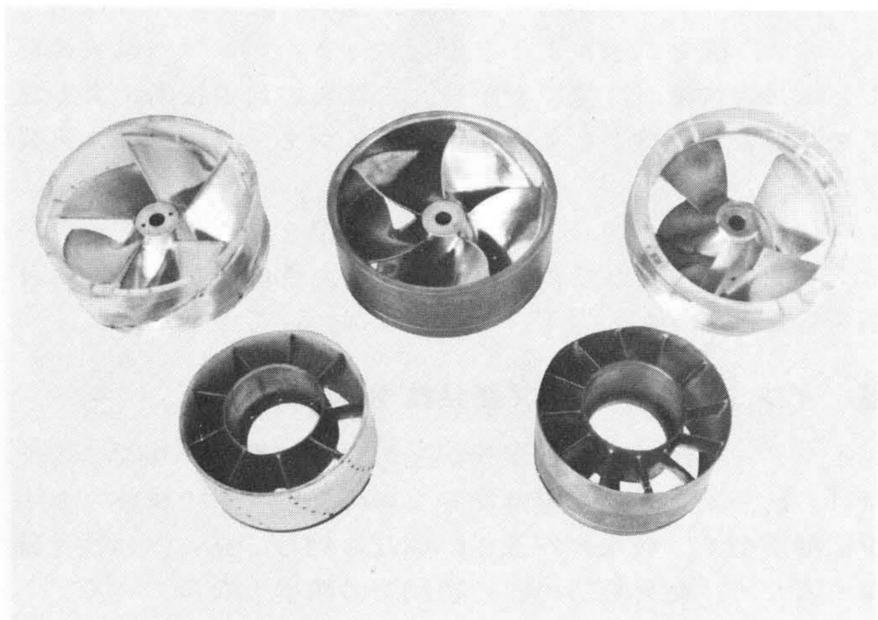


図3 水力モデル(インペラ、ディフューザ)の一例 ポンプ台数が12台及び10台時の要求仕様や流量・揚程曲線のこう配に対応させて、数種のモデルを開発した。

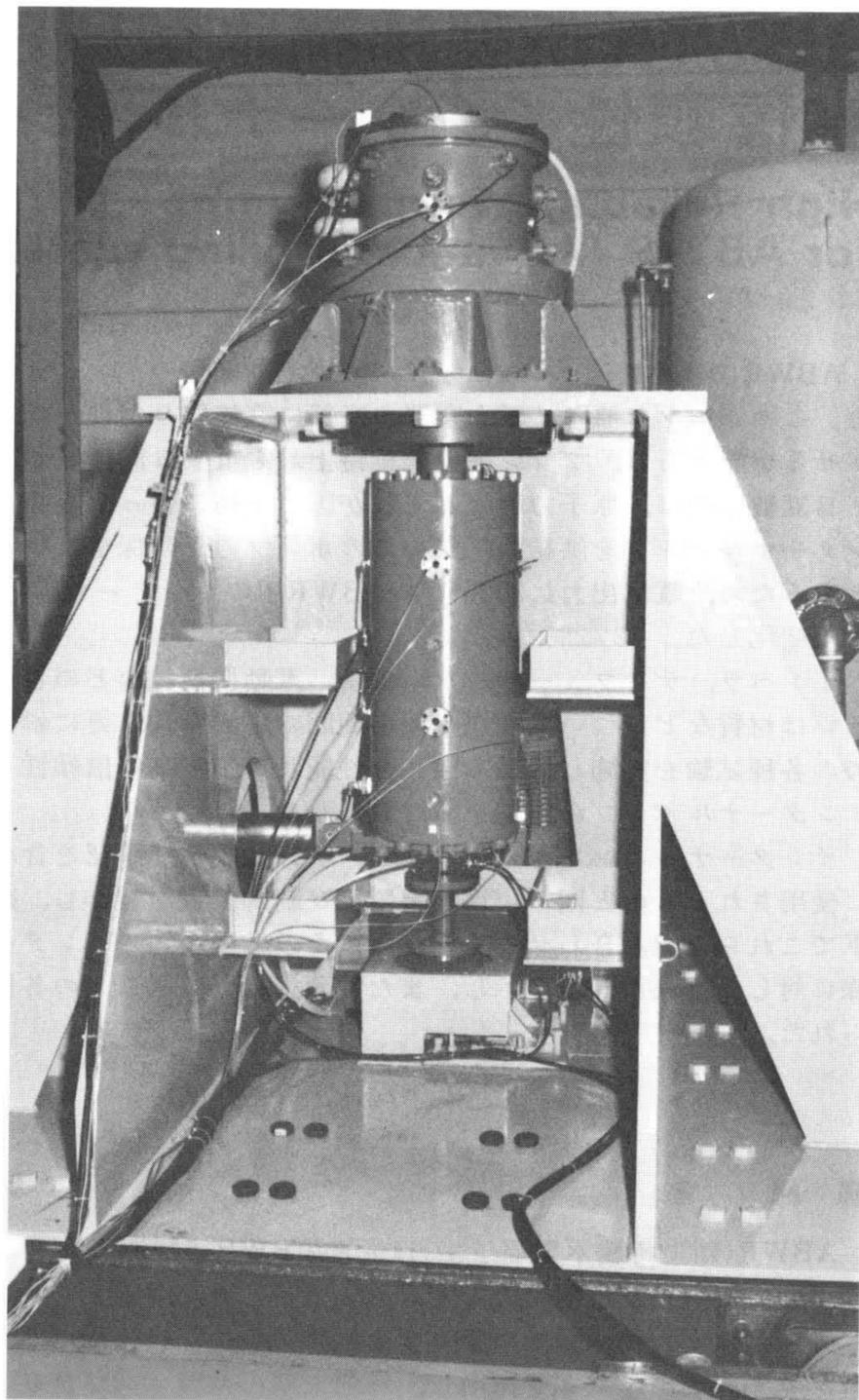


図4 インターナルポンプ回転体の耐震性評価試験状況 インターナルポンプの回転体を模擬し、振動の安定化開発と設計地震に対する耐震性を確認した。

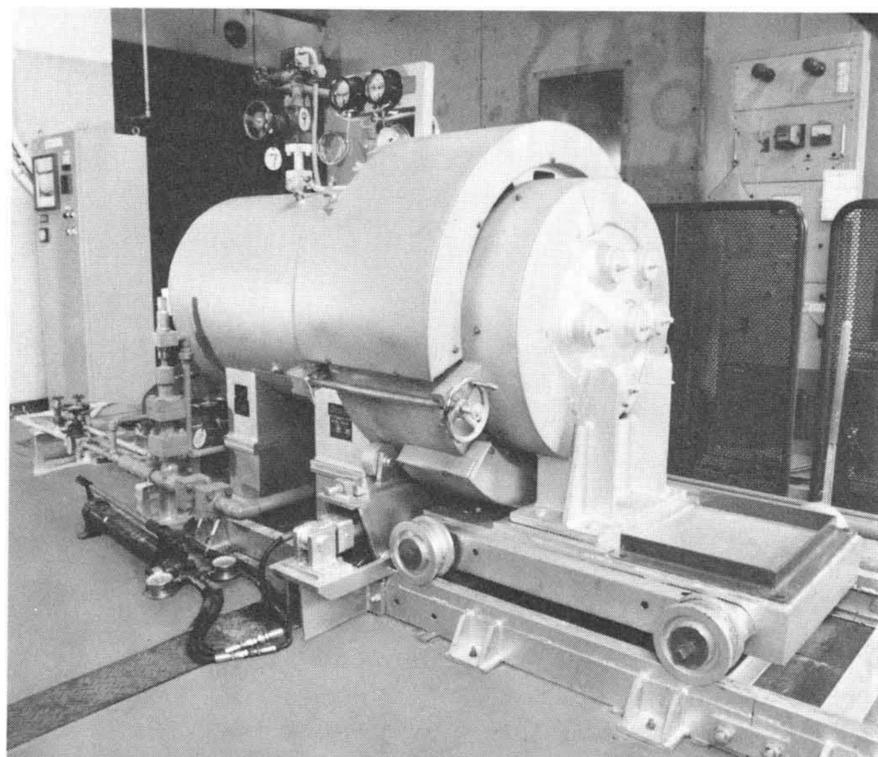


図5 電動機巻線の信頼性試験状況 電動機巻線と電動機端子を組み合わせ、設計温度、高水圧条件下で課電試験を実施し、電気特性が十分満足することを確認した。

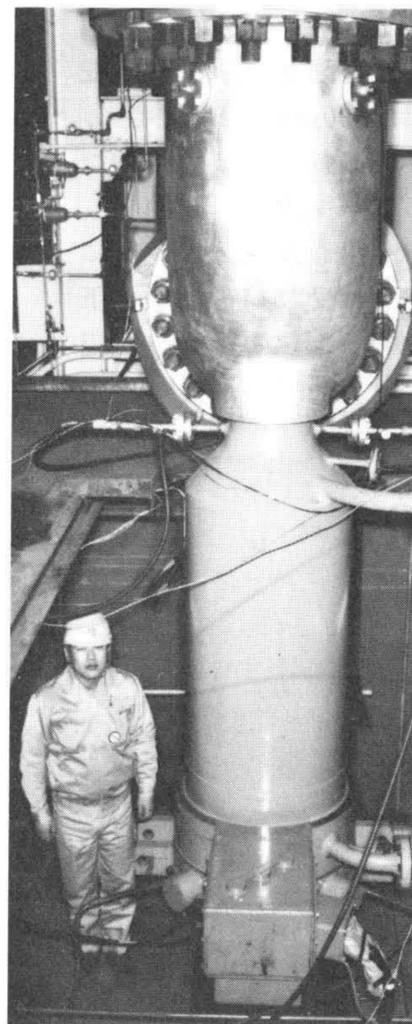
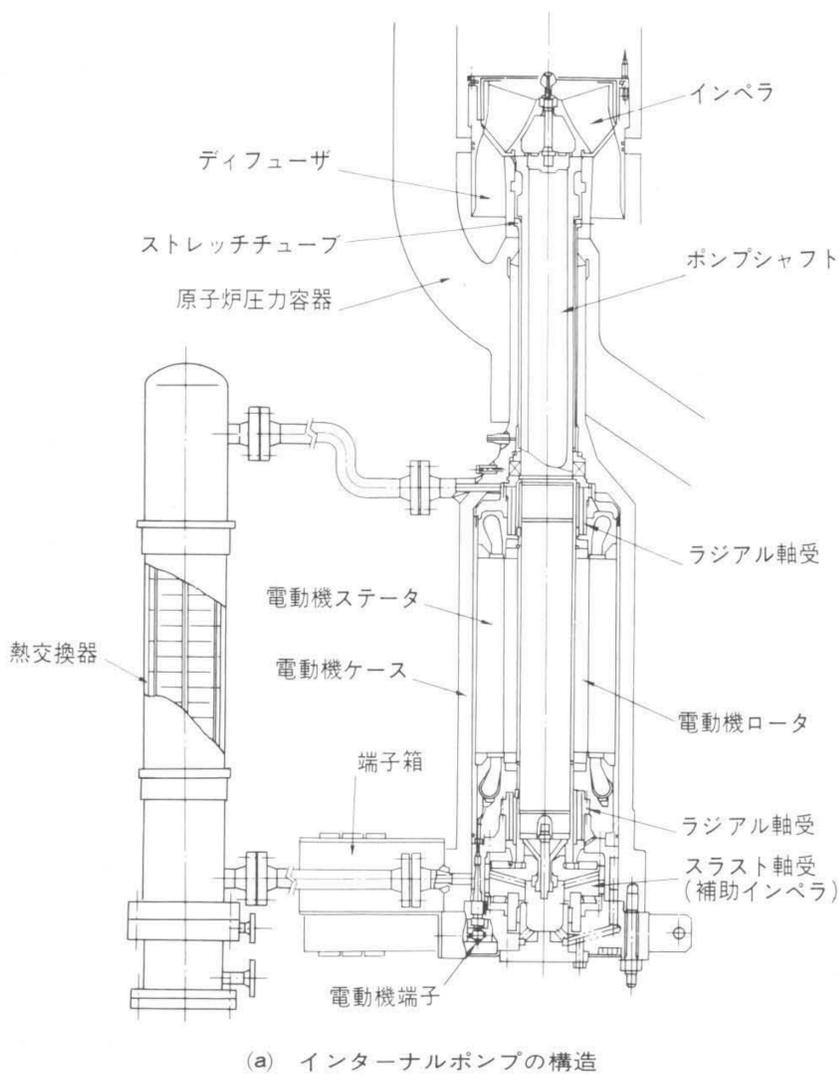


図6 インターナルポンプの構造  
ポンプ・電動機の回転部は密閉され、軸振動の外部検知ができないため、負荷容量が大きく制振性の高い特殊軸受を採用し、長期運転に対して高信頼化を図っている。

要求仕様やQ-H曲線のこう配に対応させて数種のモデルを開発した。図3にその一例を示す。

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実験を行ない、負荷容量の大きい軸受を開発し、実使用条件に対して十分余裕のあることを確認した。

また図4に示すようなポンプ回転体のモデル試験機により、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確認し、インターナルポンプ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。また、更にこの回転体モデル試験機を積載容量3tの振動台に載せて加振し、設計地震に対して十分裕度があることも確認した。

電動機巻線については、絶縁電線について設計限界の放射線や熱水に対する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認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。図5にその試験状況を示す。

### 3 インターナルポンプシステム機器の特長

インターナルポンプは通常、インペラ、ディフューザ部は278℃の高温で、電動機部は冷却水で冷却され約50℃の低温で連続運転される。また電気出力1,300MW級原子炉用としてのポンプ要求仕様は、表1に示すとおりである。製作したインターナルポンプの構造及び外観を図6に示す。インターナルポンプの保守点検周期は5年以上要求され、長期運転に対して高い信頼性をもたせることが必要である。したがって、軸振動や軸受荷重をできるだけ小さくするような構造とし、また軸受の損耗や電動機巻線の絶縁劣化に対する信頼性を高くすることが重要である。そのため、ラジアル軸受は要素試験で確認した振動安定性の良い特殊溝付円弧軸受を選定し、スラスト軸受の回転部の周りに圧力差をもたせて、極力定格運

表1 電気出力1,300MW級ABWR用インターナルポンプの要求仕様  
ポンプ台数によって要求仕様が異なるため、電源装置の容量を1,350kVAと大きくし、可変周波数範囲も10~58Hzと広くして、ポンプ回転数を変化させ性能を確認した。

項 目	要 求 仕 様	
ポンプ台数	12	10
流量	1.79m <sup>3</sup> /s	2.14m <sup>3</sup> /s
全揚程	43.6m	47.5m
電動機電圧	3.3kV	
最高使用圧力	ゲージ圧87.9kg/cm <sup>2</sup>	
最高使用温度	302℃	

転時のアキシヤル方向スラスト荷重が小さくなるような構造とした。また、電動機巻線は水中部の接続部をなくし、定期点検時に課電方向の切替を可能とするなど構造的に多くの特長をもたせ、高い信頼性が確保できるようにした。一方、ポンプ材料についてもプラントメーカーとしての応力腐食割れ防止技術を取り入れ、インペラ、ディフューザには特殊熱処理を施したマルテンサイト系ステンレス鋼を、ストレッチチューブのように間隙をもつ部材には特殊な耐食ニッケル基合金鋼を選定するなど、従来の産業用に比べ大幅な耐食性及び信頼性の向上を図っている。

電源装置は大容量GTO(ゲートターンオフ)サイリスタを使用し、出力変圧器も組み入れたものとし、据付面積を極力小さくするよう工夫した。また、制御装置は構成修復型分散システムを採用し故障確率を大幅に減少させた。

### 4 試験結果

高温高圧条件でのポンプ水力特性を図7に示す。ポンプ電動機を含む総合効率、ポンプ台数12台の要求仕様に対して68%、10台の要求仕様に対しては71%が得られ、インターナ

ルポンプとして非常に高いものとなっている。

常温及び高温状態でのポンプ振動特性を図8に示す。運転回転数の全域に対して軸受部の両振幅は $100\mu\text{m}$ 以下と小さく、回転体挙動は非常に良好である。特に軸振動の周波数特性は回転数( $N$ )成分だけが主成分で、立形ポンプ固有の問題として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に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の耐久性及び保守性が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になっていると評価できる。

一方、電源装置は加減速応答や瞬時停電に対する再始動性能などいずれも良好であった。また、制御装置も中性子束フィードバック方式が有効であることを確認し、制御特性も十分良好であった。

### 5 結 言

ABWRの最重要機器として高い信頼性及び保守性を確保するためには、インターナルポンプを自主技術で製作することが重要であり、そのため構成要素ごとにあらゆる角度から性能、信頼性を確認して、インターナルポンプの国産化開発を行なった。その成果をまとめると次のようになる。

- (1) インターナルポンプはABWRの要求仕様に対して高性能、高効率をもち、更に長期運転に対する信頼性が高いことを確認した。
- (2) 性能、信頼性共に西欧で使用されているものより優れたものである。
- (3) 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各機器の組合せ性能も十分良好なものであった。

今後は保守技術及び予防保全に関するデータの蓄積に積極的に取り組み、更に信頼性向上を図っていく予定である。

### 参考文献

- 1) 大木, 外: 軽水炉開発の動向, 日立評論, 64, 8, 547~552 (昭57-8)

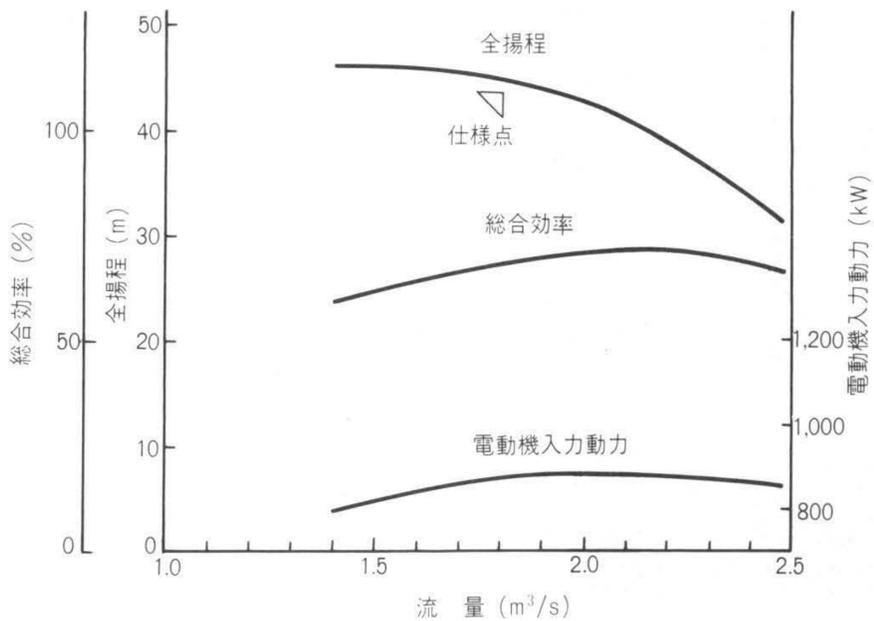


図7 ポンプ水力特性(ポンプ台数12台時) 流量・全揚程曲線は変曲点のない右下がり下降特性で、ポンプ12台仕様に対しては68%(10台仕様に対しては71%)の高い総合効率が得られた。

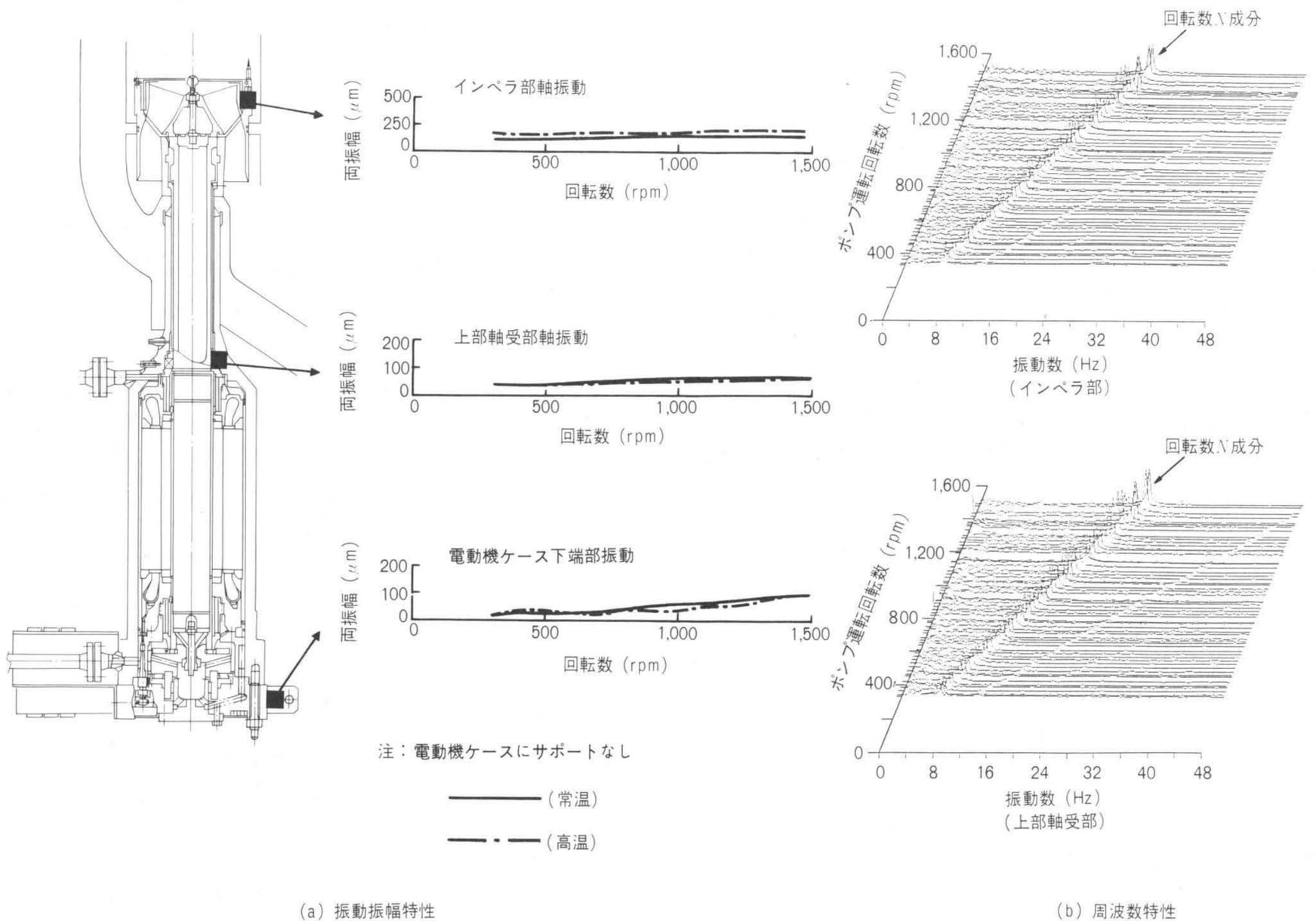


図8 ポンプ振動特性 振動振幅値は常温、高温状態でほとんど変わらず、上部軸受部の軸振動は $100\mu\text{m}$ 以下と良好である。また周波数特性は、運転回転数の全域に対して回転数 $N$ 成分が主成分で、ふれまわり現象がなく安定している。