

高速増殖炉もんじゅ発電所

1次主冷却系循環ポンプの設計・製作

Design and Manufacturing of Primary Sodium Pump for the Prototype Fast Breeder Reactor "MONJU"

高速増殖炉もんじゅ発電所(以下、「もんじゅ」と略す。)1次主冷却系循環ポンプは、高温(約400℃)の液体金属ナトリウムを取り扱い、あらゆるプラント運転状態に対するポンプ機能維持のために、高い信頼性が要求される重要な機器の一つである。

日立製作所は、動力炉・核燃料開発事業団の指導の下で国産技術による自主開発を目的に、高速実験炉「常陽」での建設・運転経験、「もんじゅ」モックアップポンプの耐久試験をも含めて、20年以上にわたって機械式ナトリウムポンプにかかわる研究開発を進めてきた。「もんじゅ」1次主冷却系循環ポンプは、これらの研究成果を基に設計されるとともに、ポンプの重要度および法規制に合致する厳しい品質管理の下で製作・検査が行われ、このたび、設計予想どおりの製品として完成に至った。工場での水試験でも良好な結果を収め、現在、原子炉格納容器内で据付けが進められている。

山 崖 佳 昭*	Yoshiaki Yamagishi
矢 沢 節 雄**	Setsuo Yazawa
仲 平 四 郎**	Shirô Nakadaira
林 洋 二 郎**	Yôjirô Hayashi
下 屋 敷 重 広***	Shigehiro Shimoyashiki
天 田 達 雄****	Tatsuo Amada

1 緒 言

1次主冷却系循環ポンプ(以下、主循環ポンプと略す。)は、1次冷却材の循環用として使用され、プラント出力運転時の炉心熱除去および低温停止時や事故時の炉心崩壊熱除去に必要な流量を、炉心に供給するために設置されるものである。主循環ポンプには、放射化された1次冷却材である液体金属ナトリウムを取り扱ううえで、その温度が約200℃からプラント定格運転温度の約400℃まで変化すること、流量を約10%から100%と幅広い範囲で制御することなどの多くの要求条件が与えられている。このため、日立製作所は、動力炉・核燃料開発事業団を中心とする国家プロジェクトの高速増殖炉開発計画にそって国産技術による自主開発を目的に、放射性高温ナトリウムの取り扱いを対象とした基礎技術、ポンプ要素技術、モックアップポンプによる耐久試験など、主循環ポンプにかかわる研究開発を進めてきた^{1)~3)}。高速増殖炉もんじゅ発電所(以下、「もんじゅ」と略す。)主循環ポンプは、上述の各種研究成果に基づいて設計され、原子炉冷却系ポンプとしての高品質を確保するための特別な生産体制の下で、このほど工場完成に至った。

本稿では主循環ポンプにかかわる研究経過の概要と、「もんじゅ」主循環ポンプの設計・製作および工場試験の内容につ

いて述べる。

2 主循環ポンプの特徴

「もんじゅ」主循環ポンプの設計主要目を表1に、構造を図1に示す。主循環ポンプは、流力部(羽根車、ディフューザ)、シャフト、軸受および軸封装置をもって基本構成とするが、取り扱う冷却材が放射性高温ナトリウムという高速増殖炉プラント仕様から、さらに次のような部位を構成する^{1)~5)}。

- (1) 分解補修を可能とするため、主循環ポンプの内部構造が一体で引き抜けるよう二重ケーシング構造を採用している。
- (2) 1次冷却系での万一の冷却材漏えいを想定した最低位自由液面時でも、必要な炉心熱除去流量を確保できるよう主循環ポンプは羽根車や下部軸受がナトリウム液中に浸漬する長軸構造としている。
- (3) 高温ナトリウムを直接軸封することは困難であるため、ポンプ内にナトリウムの自由液面を形成させる。さらに、その上部を不活性なアルゴンガス(以下、カバーガスと略す。)で覆い、このカバーガスを軸封する。また、ケーシング中間部にオーバフローノズルを設け、ナトリウム液面の上昇を制限している。

* 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 土浦工場 *** 日立製作所 エネルギー研究所 **** 日立製作所 日立工場

表1 「もんじゅ」主循環ポンプの設計主要目 本ポンプ仕様は、これまで高速増殖炉用ナトリウムポンプとして開発を行ってきたものとしては最大規模の容量で、国内初の発電プラント用仕様である。

項 目		仕 様
型 式		機械式たて型自由液面遠心式
容 量		約100 m ³ /min
揚 程		約92 mNa
定 格 回 転 数		約840 rpm
運 転 温 度		約400 ℃
主要寸法	胴 外 径	約1.8 m
	全 高	約10.5 m
主 要 材 料		オーステナイト系ステンレス鋼(SUS304)
基 数		3

(4) 軸封装置には、上下2段にメカニカルシールを配置し、その間に油を封じ込めたダブルシール構造を採用し、カバーガスと大気とは完全に遮断している。特に下部メカニカルシールにはベローシール型を採用し、信頼性の向上を図っている。

(5) ポンプ上面への接近性のため、自由液面上部のカバーガス層には熱遮へい板を、またその上部にはγ線遮へいプラグを設けている。

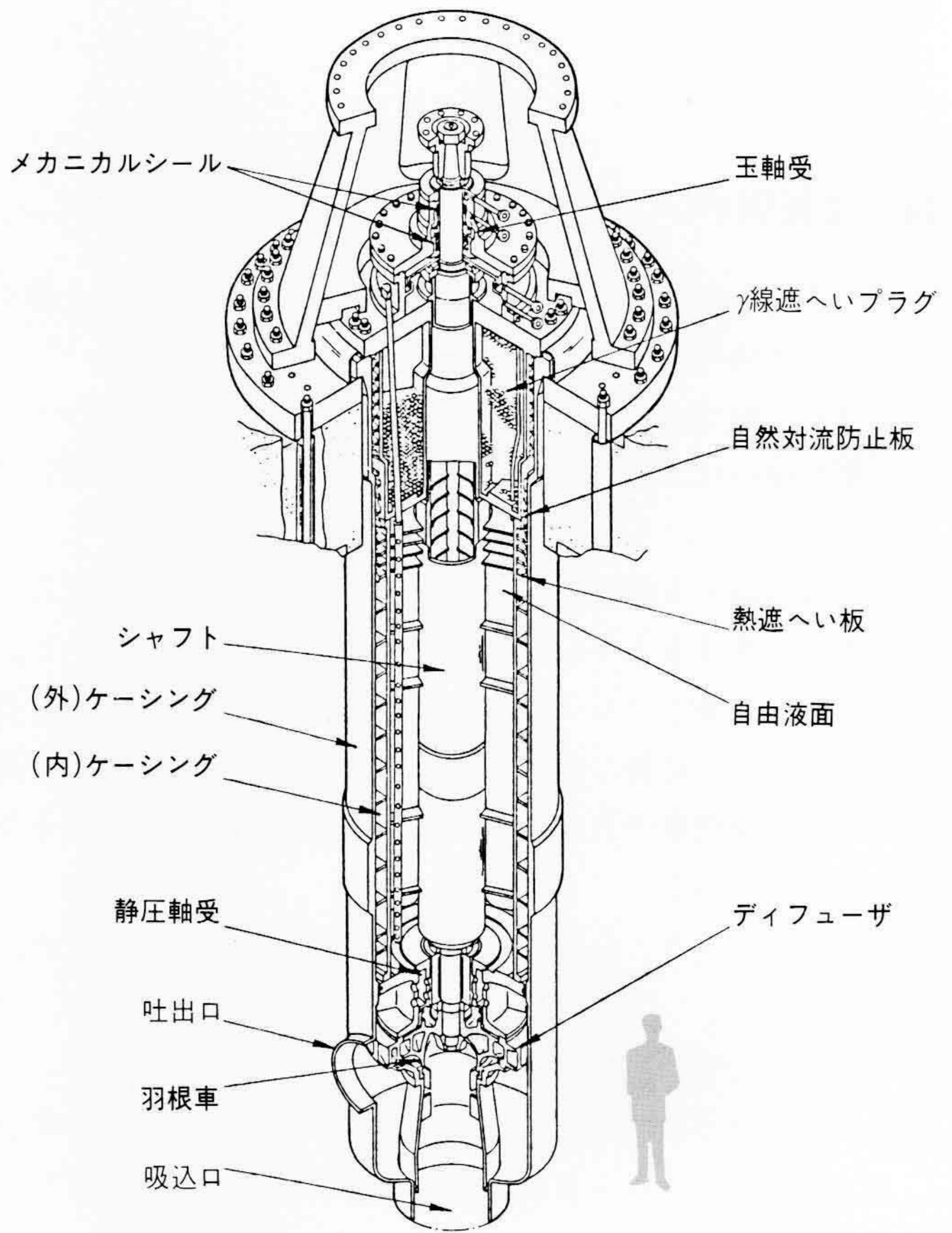


図1 「もんじゅ」1次主冷却系循環ポンプ 1次主冷却系循環ポンプは、プラント要求仕様からγ線遮へいおよび熱遮へい部を持つ長軸構造となっている。

(6) ポンプ材料は、ナトリウムと共存性のよいオーステナイト系ステンレス鋼(SUS304)を用いている。

(7) ケーシングの外側にはナトリウムの充填(てん)に先立ち昇温ができるよう、電気ヒータと保温材を取り付けている。

さらに、ポンプ機能維持上の信頼性向上を図るために、次のような設計上の考慮が払われている。

- (1) 円周方向の温度分布不均一によるケーシングの曲がり発生防止のために、二重ケーシングの環状ガス空間部には自然対流防止板を設けている。
- (2) 長軸の回転系が本ポンプに要求されるあらゆる運転状態に対し共振しないよう、また高い熱遮へいの効果が得られるよう中空の大口徑軸を採用している。
- (3) 下部軸受は高温で使用されるため、軸受すきまを大きくできる静圧軸受を採用し、本ポンプ自身が昇圧した液体金属ナトリウムにより潤滑する。

流力部および下部軸受の詳細を図2に示す。また、上部軸受は、上下のメカニカルシールの中間に設け、玉軸受とし封液の油を潤滑液としている。

なお、主循環ポンプによる流量制御は、M(電動機)-G(発電機)セットによって電源周波数を変え、主電動機の回転数を制御することにより行われる。主循環ポンプにはこの主モータ

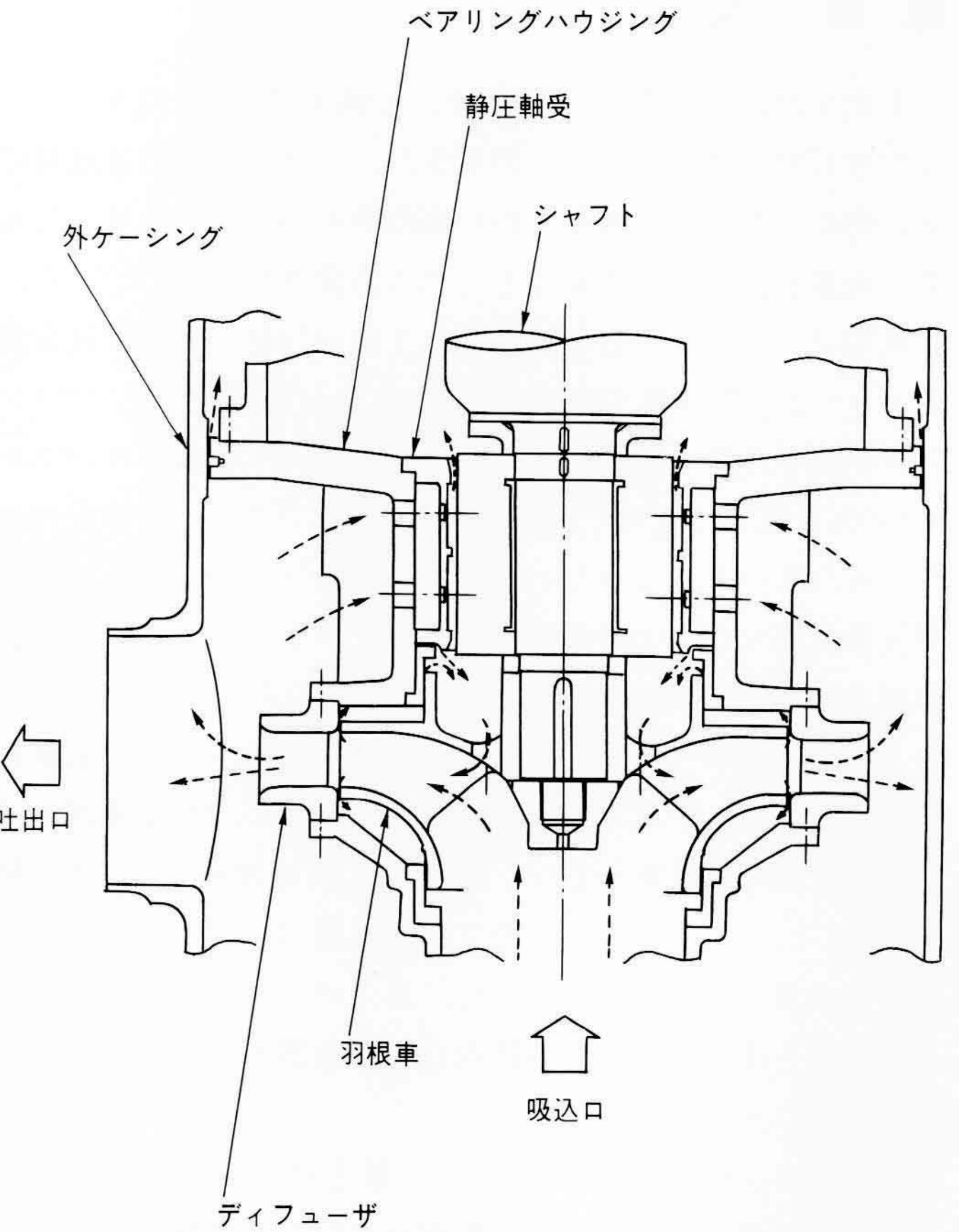


図2 下部軸受の構造 下部軸受は、ポンプの回転機能上もっとも重要な要素の一つであり、羽根車の吐出圧力を利用した静圧軸受が採用されている。

のほかに、炉心崩壊熱除去運転時に使用されるポニーモータ（出力22 kW）、および起動トルクの測定とポンプロータの熱変形の矯正を目的としたターニングモータ（出力1.5 kW）が具備されている。これらは主電動機上部のオーバランニングクラッチを介して配置されている。主循環ポンプの駆動装置の概略構成を図3に示す。

3 主循環ポンプの開発経緯

高速増殖炉の開発の主要課題の一つは、冷却材である高温液体金属ナトリウムの使用に関する技術確立であり、この研究は動力炉・核燃料開発事業団を中心に国家プロジェクトとして推進されてきた。

主循環ポンプも主要開発機器の一つであり、直接放射性高温ナトリウムを取り扱う唯一の回転機器として高信頼性、大容量ポンプの開発を目ざしてスケールアップの経緯をたどってきた。日立製作所は昭和40年、41年度原子力平和利用委託研究費の交付を受けて、国産初号機の試作ポンプを完成させたのをはじめ、図4に示すように流量比で約5倍の、スケールアップ比で4種のポンプを製作してきた^{1)~3),6)}。これらのナトリウムポンプの製作および運転研究と並行して、日立製作所は流体性能、材料、熱、振動、計測、軸受軸封、洗浄などの広範囲にわたって動力炉・核燃料開発事業団と共同で研究を行ってきた⁷⁾。これらの研究開発経過を図5に示す。ここで、

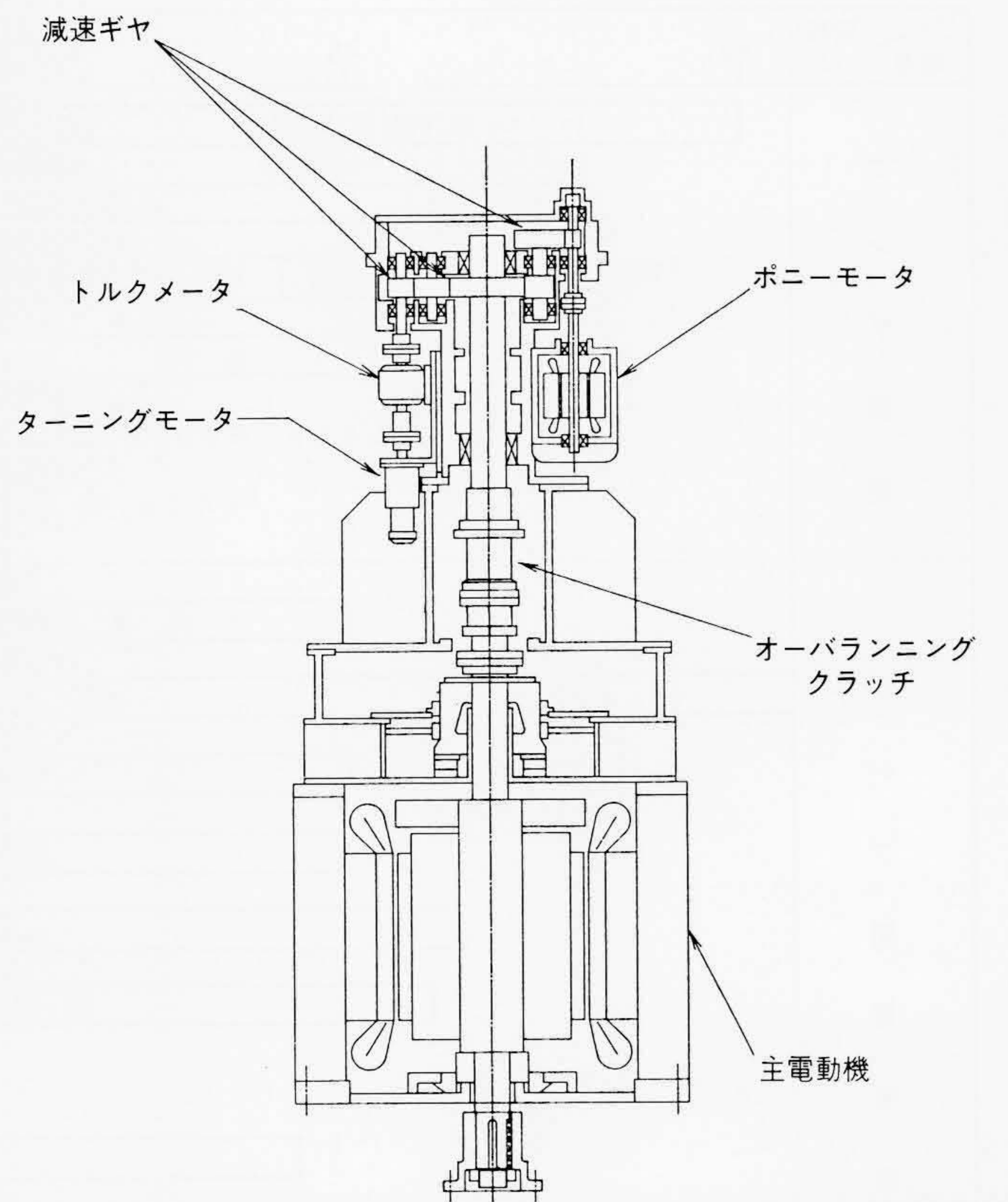


図3 「もんじゅ」1次主冷却系循環ポンプ駆動装置 1次主冷却系循環ポンプは、通常運転用の主モータのほかクラッチを介して炉心崩壊熱除去用のポニーモータおよび起動・停止時に使用するターニングモータと連結されている。

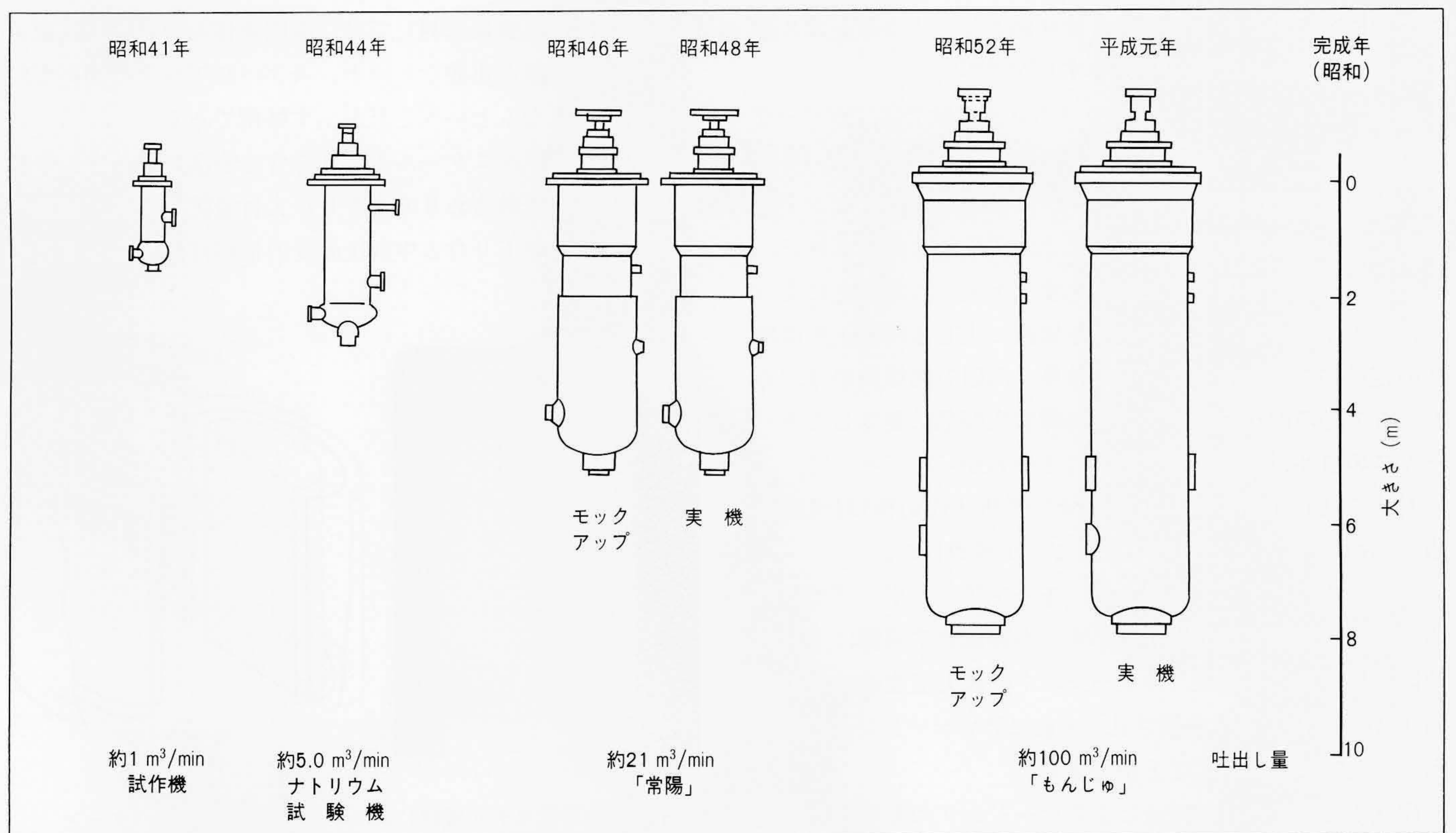


図4 高速増殖炉用ナトリウムポンプの大きさと容量の変遷 高速増殖炉用ナトリウムポンプは、国産初号機から20年余りにわたって流量比で約5倍ごとにスケールアップして開発されてきた。

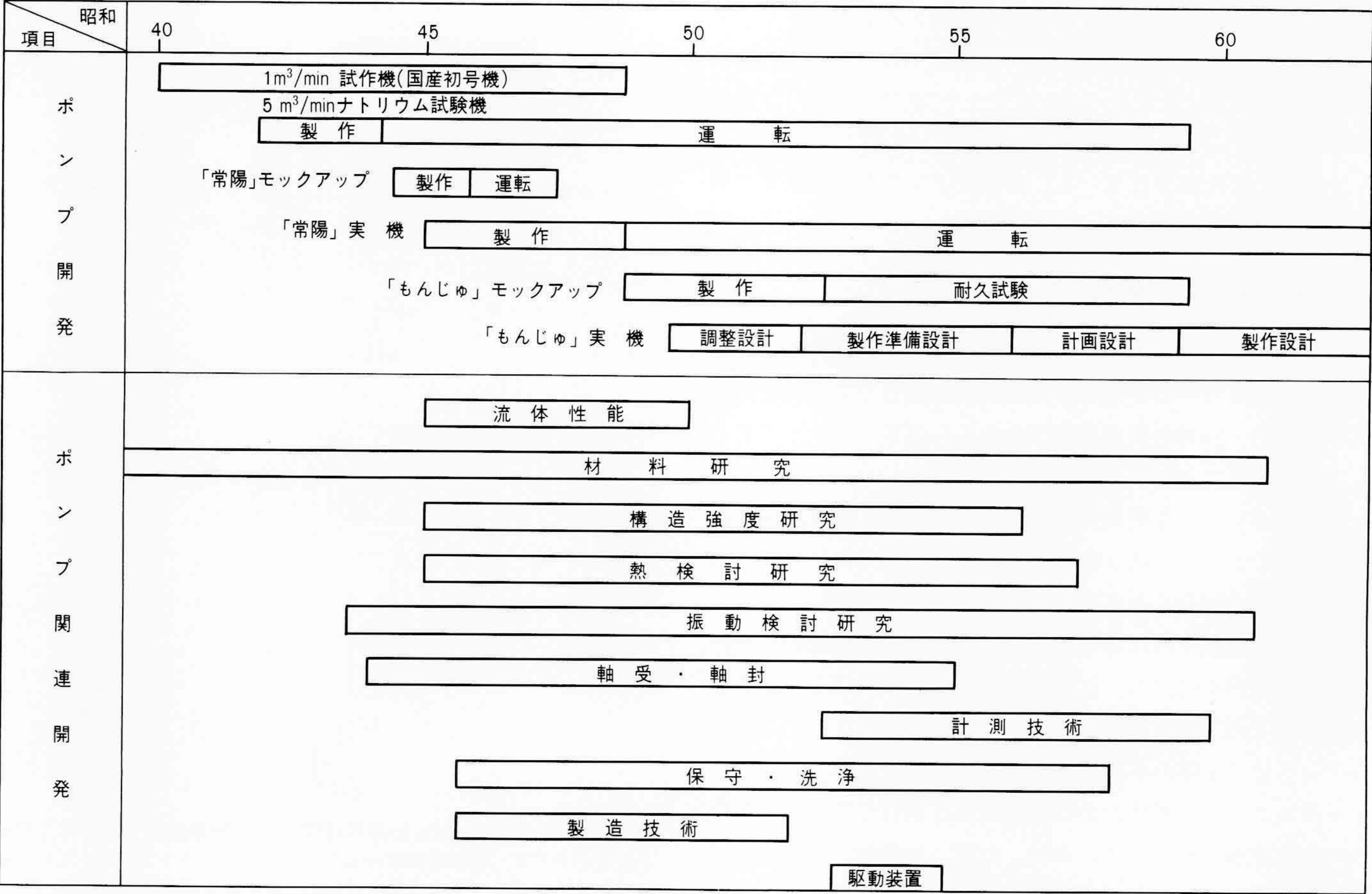


図5 高速増殖炉用ナトリウムポンプにかかわる研究開発の経緯 高速増殖炉用ナトリウムポンプは、スケールアップのたびにポンプ本体とポンプの各要素について、20年余りにわたって研究開発を行ってきた。

ポンプ機能にかかわる特徴ある研究例として、カバーガス部の自然対流防止技術開発を紹介する^{2),3),8)~10)}。

当初、「もんじゅ」モックアップポンプ試験では、カバーガス層部のケーシングの周方向に大きな温度差が生じた。さらに、このことに起因してケーシングに熱変形が生じポンプ駆動系に過大な負荷が発生しうることが実験的に確認された。このため、縮小可視モデル実験と実寸大モデル実験とによって、その発生メカニズムの究明と実際に生じる円周上の温度差の定量的把握を行った。その結果、円周方向温度差は、カバーガス部の内外ケーシング間の環状空間部に発生したカバーガスの自然対流が原因であることがわかった。そして、この対流を防止するには、当該部分に短冊状仕切板(対流防止板)を設置することが有効であることが判明した。

自然対流のパターンを図6に、モックアップポンプでの円周方向温度差の分布を図7に示す。当該環状空間部に上記対流防止板を設けた結果、外ケーシングの最大温度差は当初の74℃から約10℃まで低減され、それに伴いケーシングの熱変形量も大幅に低減することができた。

環状空間部での自然対流によるケーシングの変形は、高速実験炉「常陽」(以下、「常陽」と略す。)から「もんじゅ」へのスケールアップにより、その影響が顕著に現れたものである。

本現象は、高温機器に対しては、温度条件も模擬した実液モックアップ試験が重要なことと、スケールアップで初めて問題が明らかになるということを示す好例である。

このほか、フルスケールモデルを含む高温ナトリウム中試験により、回転軸まわりのナトリウム付着防止対策、熱遮へい板設計法、ナトリウム中静圧軸受の信頼性向上法などにつ

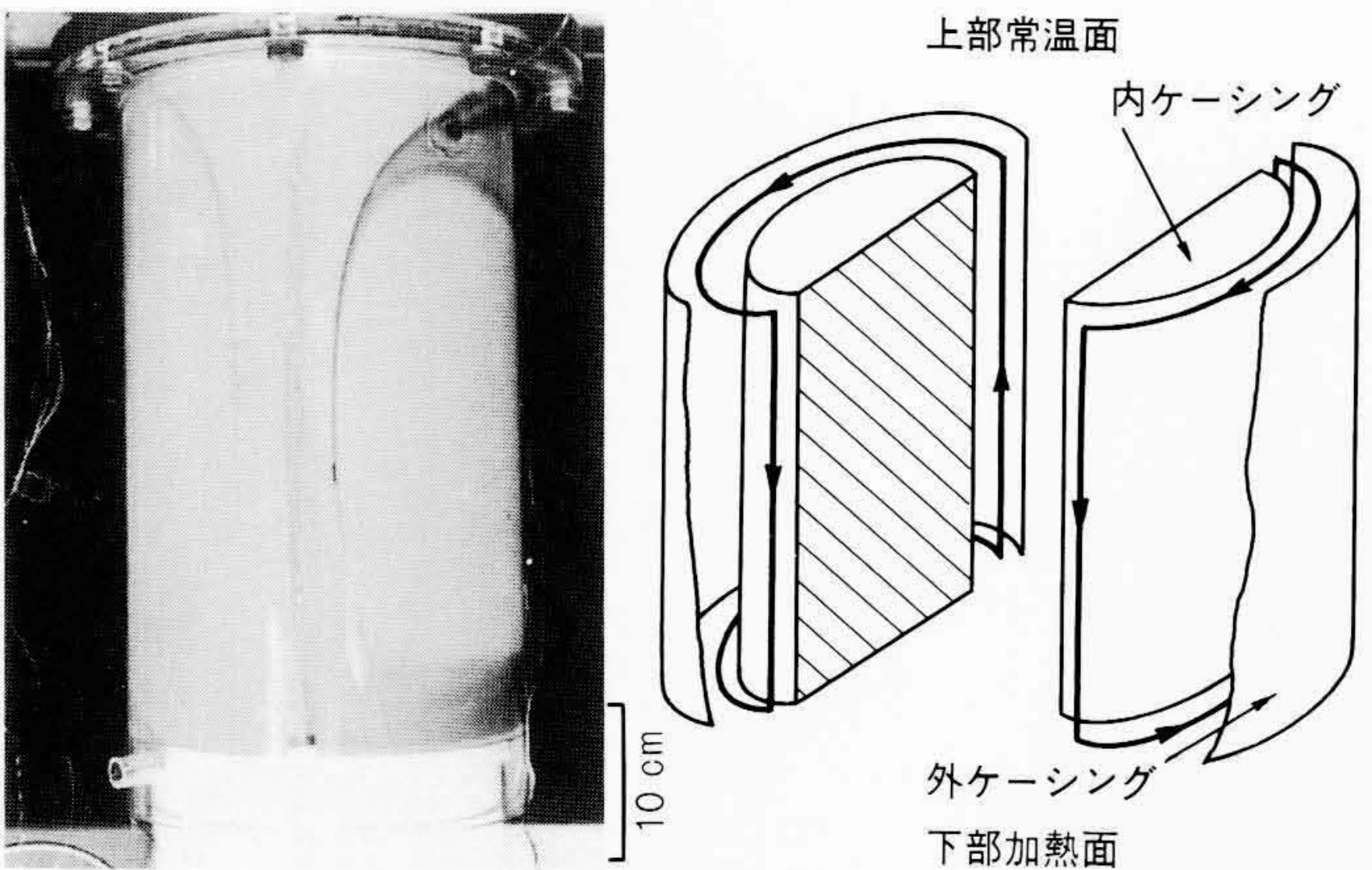
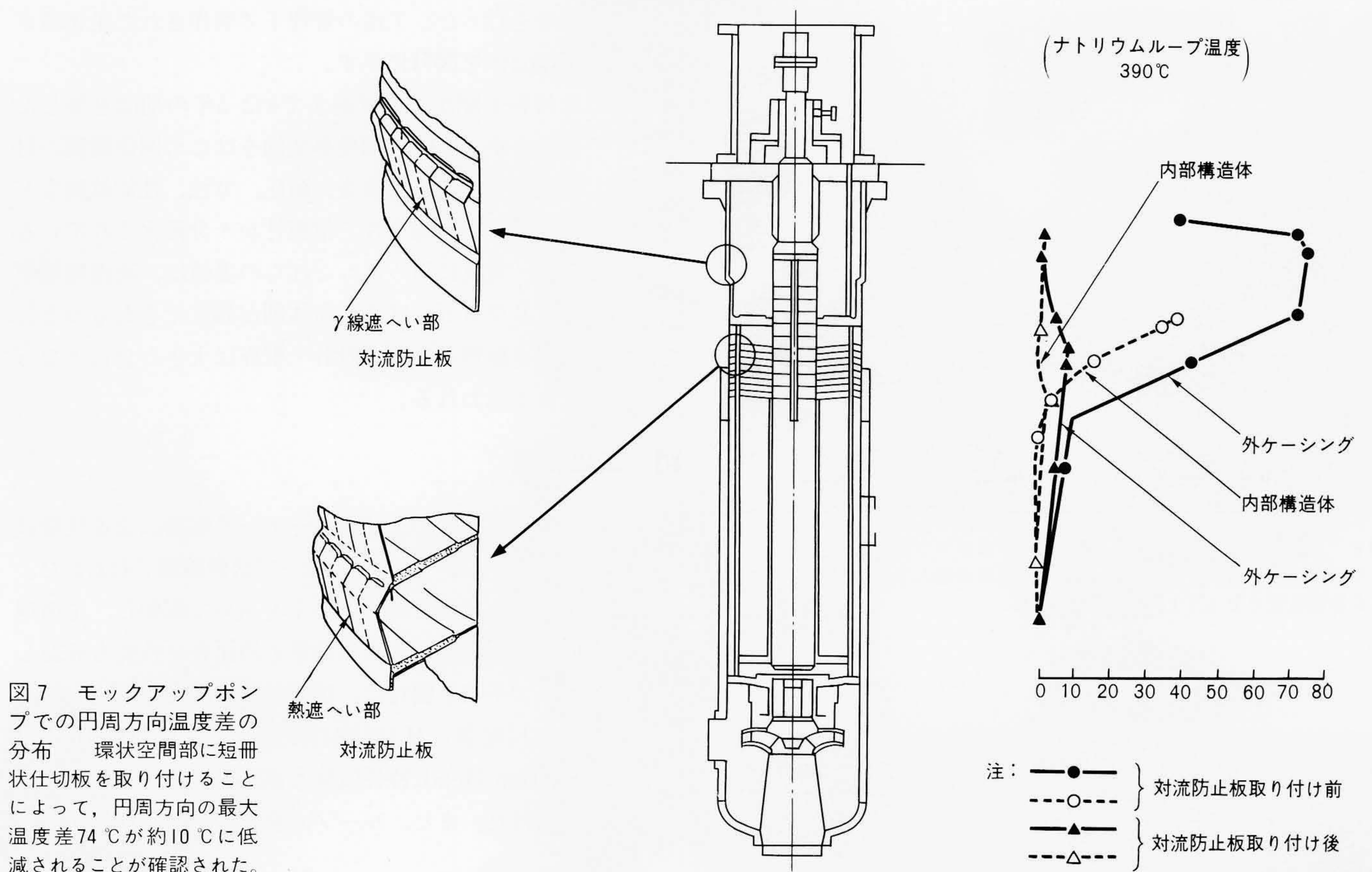


図6 縮小可視モデル実験による環状空間自然対流パターン 縮小可視モデル実験によって、環状空間部には下部が加熱されると一方向に上昇流が生じ、その180度対称位置が下降流となることが確認された。



いても多くの貴重な知見を得ている。

一方、ポンプの運転実績についてみると、「常陽」主循環ポンプでは7万時間以上の運転経験が得られるとともに、「もんじゅ」モックアップポンプでは2万3,700時間に及ぶ耐久試験が行われるなど、ナトリウム実流試験で高い信頼性があることが確認されてきている。これらの貴重な成果は「もんじゅ」主循環ポンプの設計・製作に生かされている。

4 主循環ポンプの製作

「もんじゅ」主循環ポンプは、原子炉冷却系ポンプとして、製作に関する厳しい品質管理規制が適用された。主循環ポンプの製作に当たっては、単に法規制上の要求品質を満足させるだけでなく、プラントシステム上の重要度を考え合わせ、下記のような特別な生産体制および製作ノウハウの駆使によって高品質が確保できるようにした。

- (1) 管理者をはじめ製作に携わる作業員全員を対象とした教育講座を開催して、ポンプの重要度の意識高揚を図った。
- (2) 工場内に専用エリアを設け、作業服、靴なども専用のものを着用するなど、他製品と区別することによって主循環ポンプ専用の作業環境を作った。
- (3) 部品を加工する際は、当該加工部以外の材料表面に保護シートを貼(は)り、運搬の際は専用色別箱に入れて運ぶなど、製作過程での部品材料の保護を図った。
- (4) ポンプ部品の履歴管理はコンピュータによって行い、品

質管理を強化した。

- (5) 主循環ポンプ3台の号機間の製作精度のばらつきを少なくすること、および回転機としての芯(しん)出し精度を確保するために、特殊治工具、段取具および合わせ加工を多用した。

- (6) シャフトについては、使用条件と同じ高温環境下での振れ試験を実施するなど、曲がりについて細心の注意が払われた。加工時には中空部の偏肉精度を厳しく抑え、高精度のバランスを確保できるようにするとともに、シャフトの軸方向に数か所の厚肉部を設けて不釣合いの修正を容易にした。シャフトの加工状況を図8に、高温振れ試験状況を図9に示す。

- (7) 羽根車、ディフューザなど、性能にかかわる部品はJIS規格で規定されているよりも厳しい寸法公差で管理を実施した。羽根車の仕上がり状況を図10に示す。

- (8) 軸受の表面硬化材としては、コバルト含有量の少ないコルモノイを採用し、補修時の放射線量の低減を図った。コルモノイの採用に当たっては、肉盛方法や欠陥検査方法などについて事前に技術を確立し、軸受摺(しゅう)動材としての信頼性を十分に確保できるようにした。

- (9) 工場内に本ポンプ専用の大型洗浄設備を設け、事前にテストピースで問題のないことを確認したうえで、現品の洗浄を行った。

その他素材段階から溶接、熱処理、機械加工、組立、試験、発送準備に至るまで製作プロセスごとに慎重かつ細心の注意

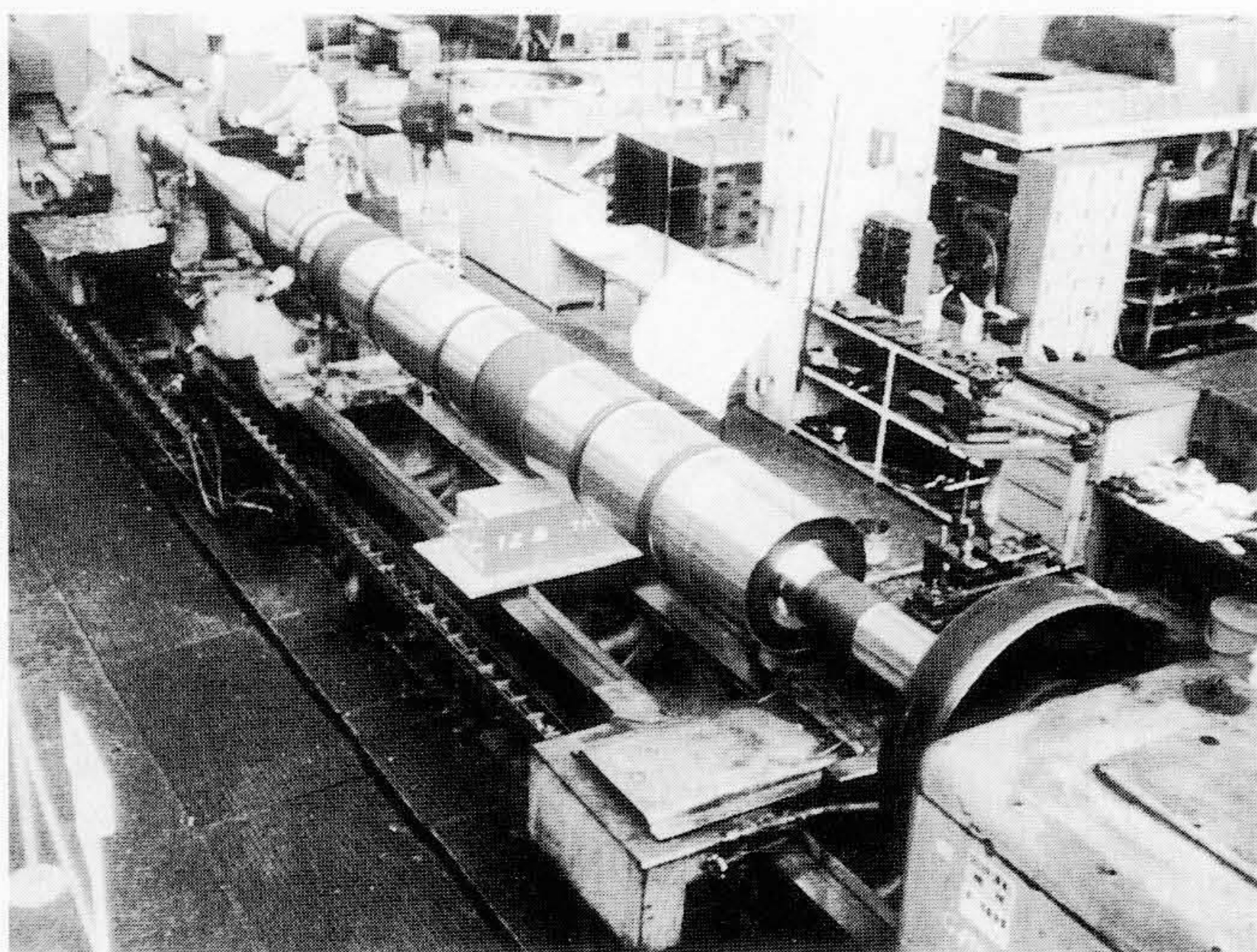


図8 シャフトの加工状況 シャフトはポンプ回転部の主要部品として高精度な釣合いが要求されるため、各部の振れを自動計測し、支持台を最適位置にセットして加工した。

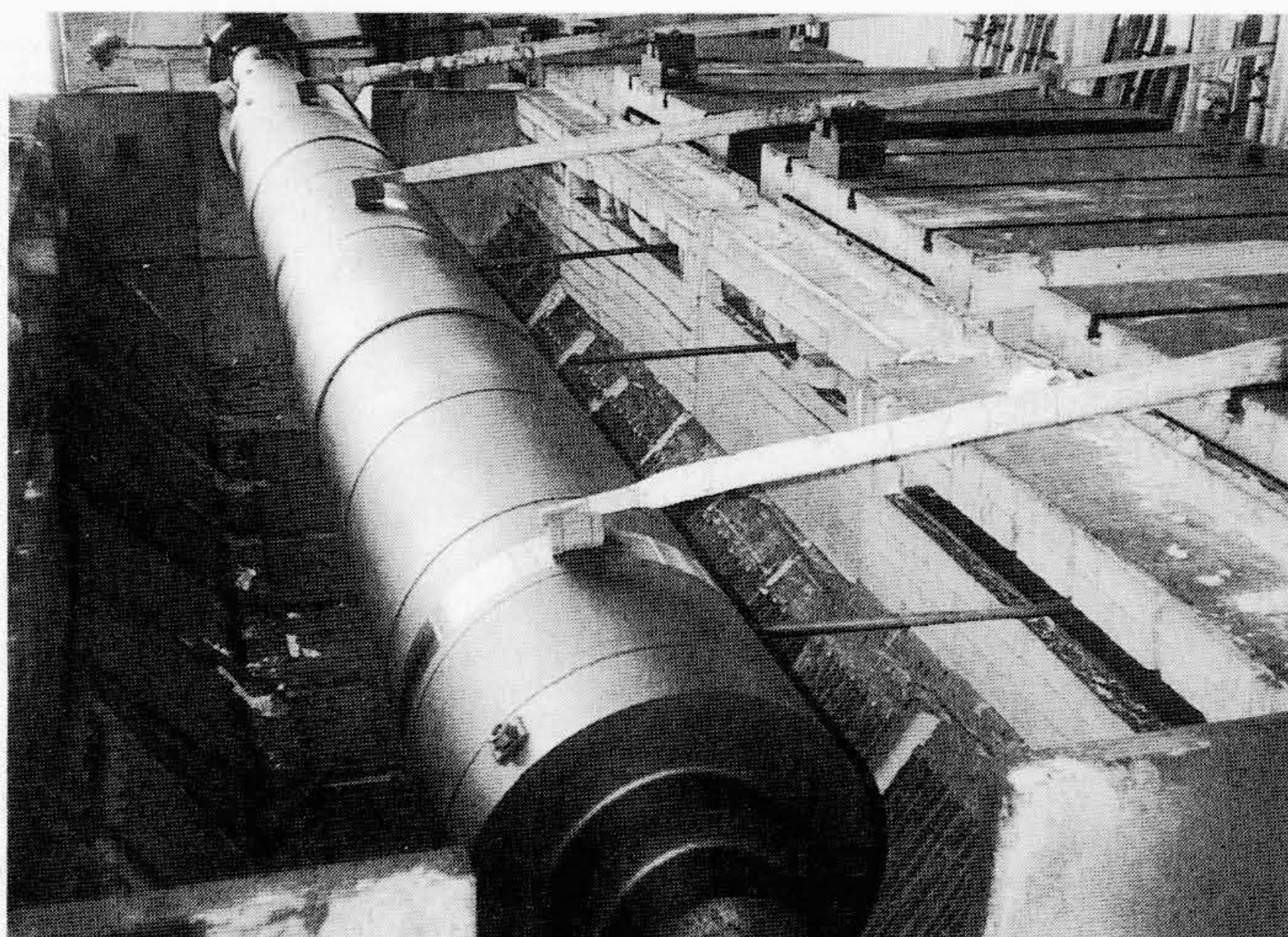


図9 高温振れ試験状況 実際の運転状態と同じ温度(約400℃)までシャフトを加熱し、シャフトの曲がりがないことを確認した。

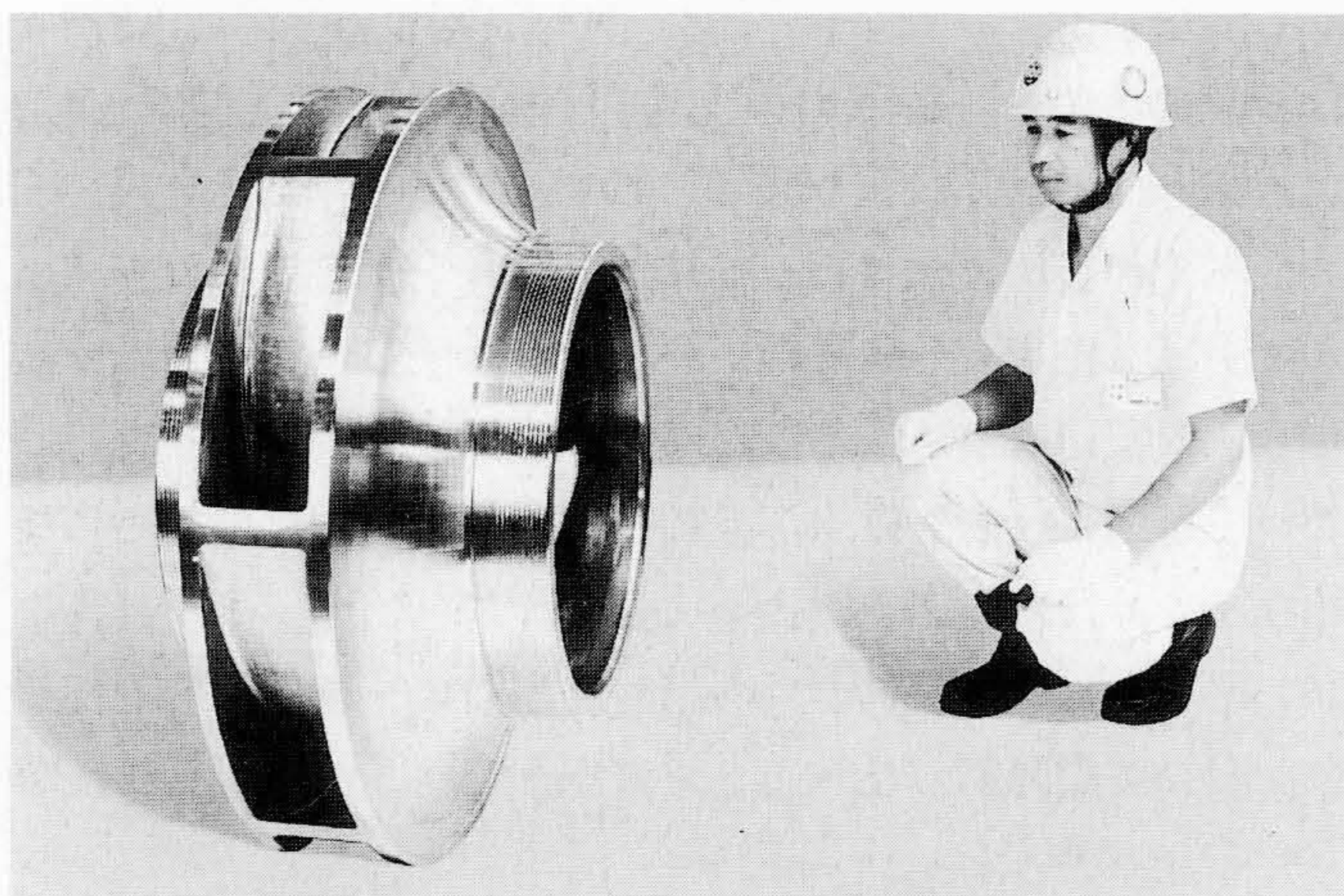


図10 羽根車の完成品 羽根車は流体性能への影響が大きいため、厳しい寸法精度で仕上げている。

を払った管理を行った。上述の管理下で製作された主循環ポンプの内部組立体を図11に示す。

製作には材料手配から水試験まで約2.5年の期間を要したが、その間動力炉・核燃料開発事業団をはじめ関係機関の材料確認、溶接検査、非破壊検査、耐圧、寸法、性能試験など工場立会検査を終え、健全性、信頼性が十分確保されていることを確認し、完成に至った。これらの実績は、高速増殖炉用機械式ナトリウムポンプの生産体制が確立できたものとして、実証炉用主循環ポンプの設計・製作に大きな自信となって生かされると思われる。

5 工場試験

工場では、主電動機およびポニーモータ駆動による性能試験が、常温の純水を用いた専用閉ループ試験設備で行われた。なお、主電動機は実機のM-Gセットを用いて駆動し、主循環ポンプを回転数制御運転し、駆動系との組合せ性能も確認した。試験ループ系統を図12に、試験状況を図13に示す。試験装置には、 Q (流量)- H (揚程)特性のほかにNPSH (Net Positive Suction Head)特性試験も測定できるように圧力調整タンクを設けた。また、ループ水を常温に一定保持するた

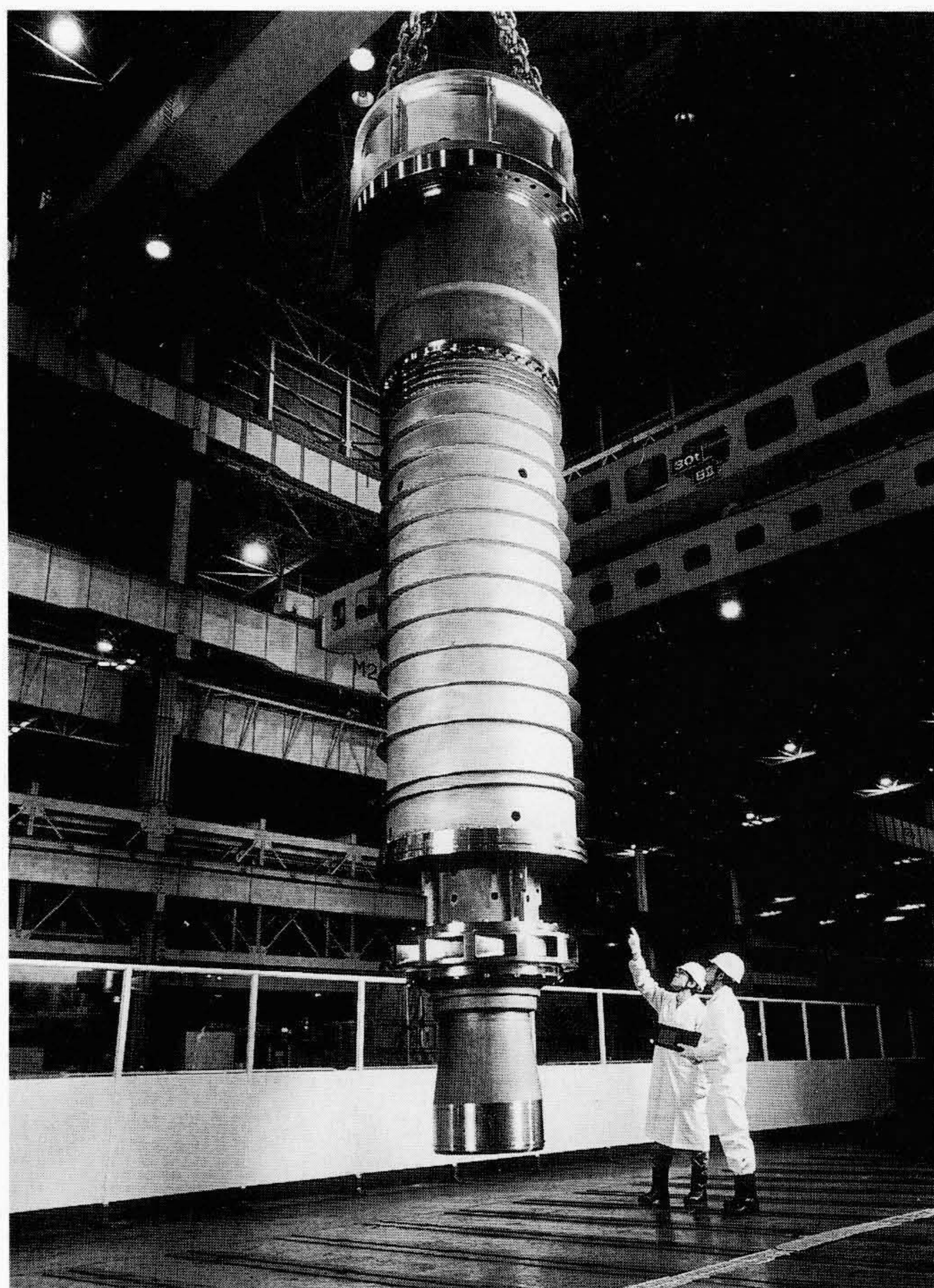
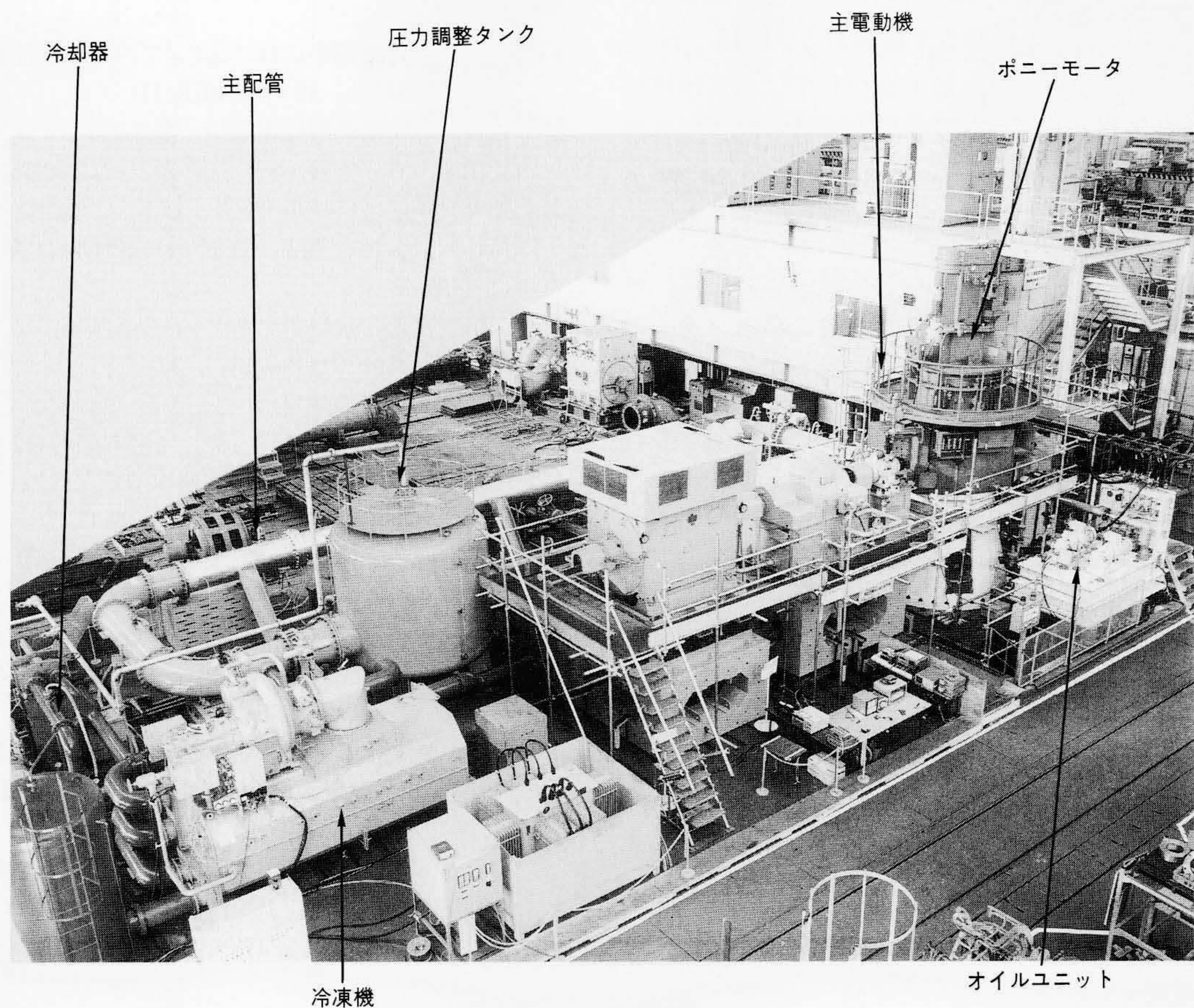
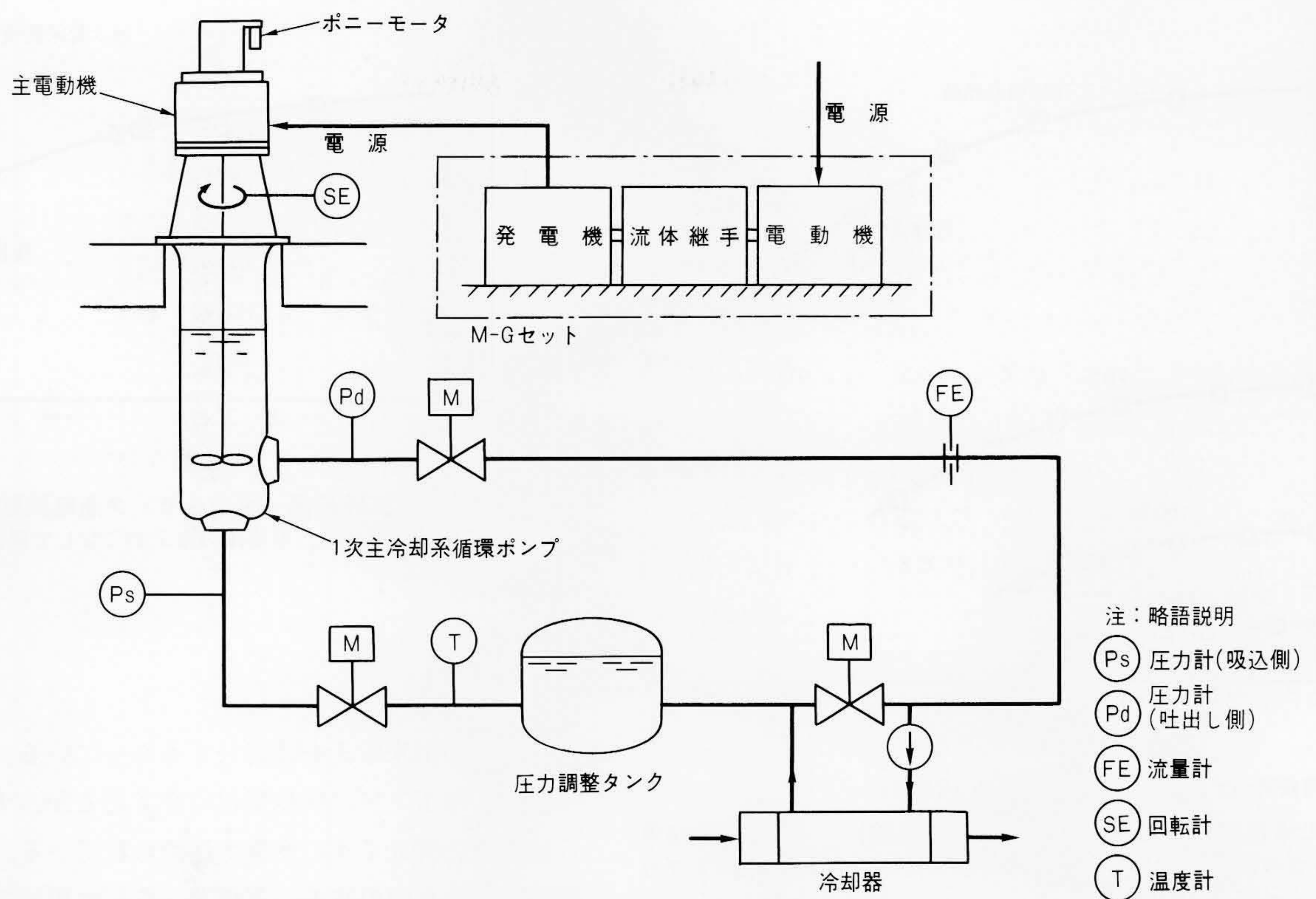
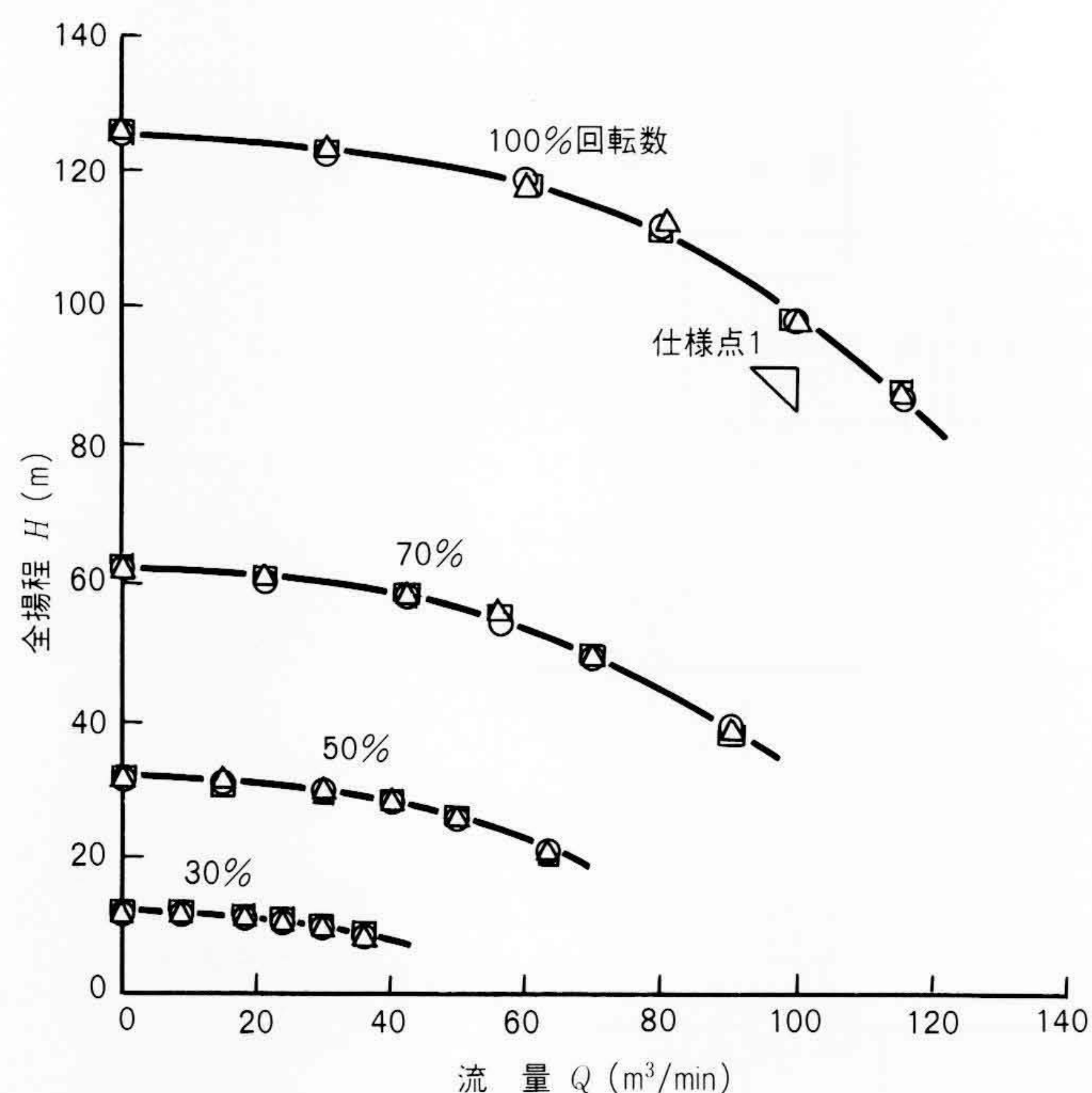


図11 高品質下で製作され組み立てられた内部組立体 ポンプの各部品は原子炉冷却系ポンプとして厳しい品質管理下で製作され、回転機として高い芯(しん)出し精度で組み立てられた。





注：記号説明 □ (A号機), ○ (B号機), △ (C号機)

図14 工場性能試験結果（主電動機運転試験） 工場での主循環ポンプ3台の性能試験結果は、プラント要求仕様を満足し、各ポンプの特性もよく一致している。

めに冷却器を設置した。

試験の結果得られた100%、70%、50%、30%定格回転数およびポニーモータ運転での Q - H 特性を図14および図15に示す。いずれのポンプでも羽根車の修正加工を行わずに多点仕様を十分満足する設計予想どおりの結果が得られた。また、各ポンプ間の特性も良い一致を示しており、製作時の品質管理の適切さが裏づけられた。

主循環ポンプでは設計から製作、工場試験に至るまで、詳細にわたって動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センターの「常陽」や各種ナトリウム機器試験室での長年にわたる経験が生かされている。また、発電所運開後を考えたメンテナンスについても、ナトリウム機器の遠隔洗浄技術などに上記施設での数多くの経験が設計段階から反映されている。

6 結 言

「もんじゅ」主循環ポンプのタイプは、製作機会がそう多くはないポンプの型式であり、20年余の数々の開発研究に立脚して、このほど製作完了した。本主循環ポンプは国内最大容量のものであり、高速増殖炉の重要機器の一つとして、完成品は高速増殖炉開発に携わる関係者の強い関心の的となっている。現に、工場試験が完成するまで、その製作状況について50回以上にわたって数百人にも及ぶ多数の人々の視察を得

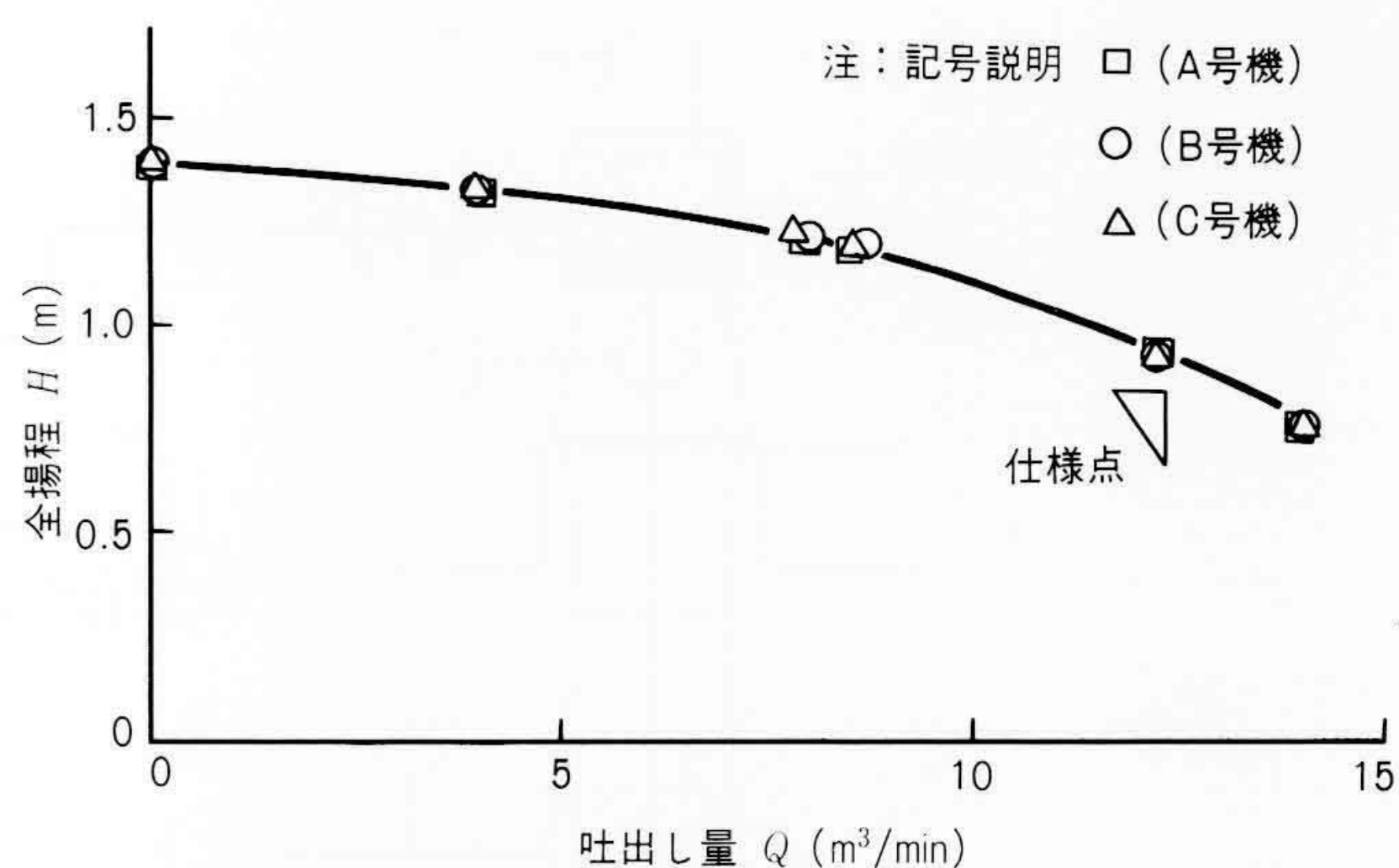


図15 工場性能試験結果（ポニーモータ運転試験） 定格回転数の約10%の低速運転でも、羽根車の修正加工なしで要求仕様を満足させることができた。

て、製品の出来栄を確認してもらっている。

現在、本ポンプは現地据付け中であるが、ナトリウムによる試運転に備えてその準備が進められている。今回の製作経験は、これまでの技術の蓄積と、さらに現地での運転経験とあいまって、次期計画の実証炉用ナトリウムポンプの設計・製作に生かしていく考えである。

参考文献

- 1) 深田：高速増殖炉におけるポンプの現状と将来，ターボ機械，第6巻，第11号，59～67(1978-11)
- 2) 亀井，外：高速増殖原型炉「もんじゅ」ナトリウムポンプの研究開発，日立評論，62，10，709～712(昭55-10)
- 3) 矢沢：高速増殖炉用ナトリウムポンプの開発，ターボ機械協会第15回講習会，「製品・技術の将来動向と開発の苦心談を語る」(平1-2)
- 4) 深田：高速増殖炉開発とナトリウム技術，ソーダと塩素，1981年，5号，19～31(1981-5)
- 5) 鈴木：高速増殖炉用機械式ナトリウムポンプ，日本機械学会誌，第75巻，第648号，1871～1877(昭47-12)
- 6) 佐川，外：液体金属冷却高速増殖炉用機械式ナトリウムポンプ，日立評論，52，5，419～424(昭45-5)
- 7) 河原，外：高速増殖原型炉「もんじゅ」用冷却系機器の研究開発，日立評論，64，8，619～624(昭57-8)
- 8) 鳥居，外：下部を加熱された狭い垂直環状空間内自然対流(第1報，対流発生限界の解析)，日本機械学論文集(B編)，47巻，417号，812～820(昭56-5)
- 9) 鳥居，外：下部を加熱された狭い垂直環状空間内自然対流(第2報，非線形数値解析)，日本機械学論文集(B編)，47巻，421号，1792～1800(昭56-9)
- 10) 鳥居，外：下部を加熱された狭い垂直環状空間内自然対流(第3報，各種要因が対流発生に及ぼす影響)，日本機械学論文集(B編)，49巻，447号，2418～2426(昭58-11)