

高速増殖原型炉「もんじゅ」用冷却系機器の研究開発

Research and Development of Main Components for the Prototype Fast Breeder Reactor “MONJU”

高速増殖原型炉「もんじゅ」の冷却系設備は、原子炉容器、一次ナトリウムと二次ナトリウムの熱交換を行なう中間熱交換器、二次ナトリウムと水・蒸気との熱交換を行なう蒸気発生器、ナトリウムを循環させるための主循環ポンプなどの主要機器から構成される。これらの機器には、高速増殖炉用機器の設計の特徴とも言える高温ナトリウム環境の下で、大きな熱衝撃及び熱膨脹を吸収するための構造上の配慮が必要であり、これらの機器の信頼性を高めるために、伝熱・流動、材料、構造・強度、製作・検査などの全般にわたり、種々の研究開発が実施され、検討されている。

本稿は、日立製作所で研究開発を行なっている高速増殖炉用機器のうち、中間熱交換器、一次主循環ポンプ及び蒸気発生器の主要開発項目の状況について述べる。

河原 愈*
矢沢節雄**
山川正剛***
福田嘉男****
佐々木武*****

Masaru Kawara
Setsuo Yazawa
Masanori Yamakawa
Yoshio Fukuda
Takeshi Sasaki

1 緒 言

高速増殖原型炉「もんじゅ」(以下、「もんじゅ」と略す。)は、昭和52年4月に臨界に達した高速実験炉「常陽」^{1),2)}(以下、「常陽」と略す。)に続いて、建設が予定されている電気出力約280 MWの発電プラントであり、建設着工に向けて鋭意設計の詳細化が行なわれている。

日立製作所は、「もんじゅ」の設計研究で、主として炉心設計、安全設計と合わせて、一次冷却系とその補助系統設備、蒸気発生器設備、制御棒駆動機構などを担当している。更に設計に必要な各種の研究開発を進めるに当たり、動力炉・核燃料開発事業団の委託を受け、あるいは日立製作所独自の開発計画により、それぞれ試験を実施してきた。以下に、「もんじゅ」冷却系の代表的な機器である中間熱交換器、一次主循環ポンプ及び蒸気発生器に関する研究開発の概要について述べる。

2 機器の主要目

表1に中間熱交換器、一次主循環ポンプ及び蒸気発生器の主要目を示す。これらの機器は、一基当たりの容量が非常に

大きく、かつ軽水炉用機器に比較して低圧、高温の設計条件であるとともに、高温ナトリウム環境の下で長期にわたり、その性能及び構造の信頼性を保証することが要求されている。

3 中間熱交換器

図1に中間熱交換器の構造例を示す。本熱交換器は、縦形無液面シェルアンドチューブ式の直管形熱交換器であり、一次ナトリウムは胴側を、二次ナトリウムは管側を流れ、伝熱管は一次系と二次系の境界をなす構造となっている。

開発の重要項目として、静的及び動的伝熱・流動特性の検討、伝熱管など構造材料の母材及び溶接部の高温ナトリウム環境中強度の検討、管板・伝熱管・熱膨脹吸収装置(ベローズ)などの重要構造の強度評価及び非弾性解析手法など設計手法の開発、伝熱管支持構造の検討、並びに管-管板溶接を中心とする高品質・高信頼度の製作及び検査技術の確立、更に保守・補修方法及びこれらのための機器の検討が挙げられる^{3)~5)}。

上記開発研究のうち、伝熱管管束部の流動特性試験、管板部熱衝撃試験及び伝熱管変形試験について、以下に述べる。

表1 主要機器の主要目 冷却材に高沸点、高熱伝導率のナトリウムを使用するため、軽水炉に比較して低圧、高温の設計条件となっている。

項 目	機 器 名	中 間 熱 交 換 器	一次主循環ポンプ	蒸 気 発 生 器	
				蒸 発 器	過 熱 器
形 式		縦形無液面平行向流式	機械式縦形自由液面遠心式	ヘリカルコイル貫流分離形	
基 数		3	3	3	3
容 量		238MW	5.1×10 ⁶ kg/h	238MW	
揚 程		—	94mNa	—	
流 体 (一次側/二次側)		ナトリウム/ナトリウム	ナトリウム	ナトリウム/水・蒸気	ナトリウム/蒸気
最高使用圧力 (一次側/二次側)		2/10atg	2/10atg	5/165atg	5/154atg
最高使用温度 (一次側/二次側)		550/540℃	420℃	490/465℃	525/520℃
主 要 材 料		オーステナイト系ステンレス鋼	オーステナイト系ステンレス鋼	クロムモリブデン鋼	オーステナイト系ステンレス鋼

注：括弧内の一次側、二次側は、各々胴側、管側のことを示す。

* 日立製作所日立工場 ** 日立製作所土浦工場 *** 日立製作所エネルギー研究所 **** 日立製作所機械研究所 工学博士
***** パプコック日立株式会社呉工場

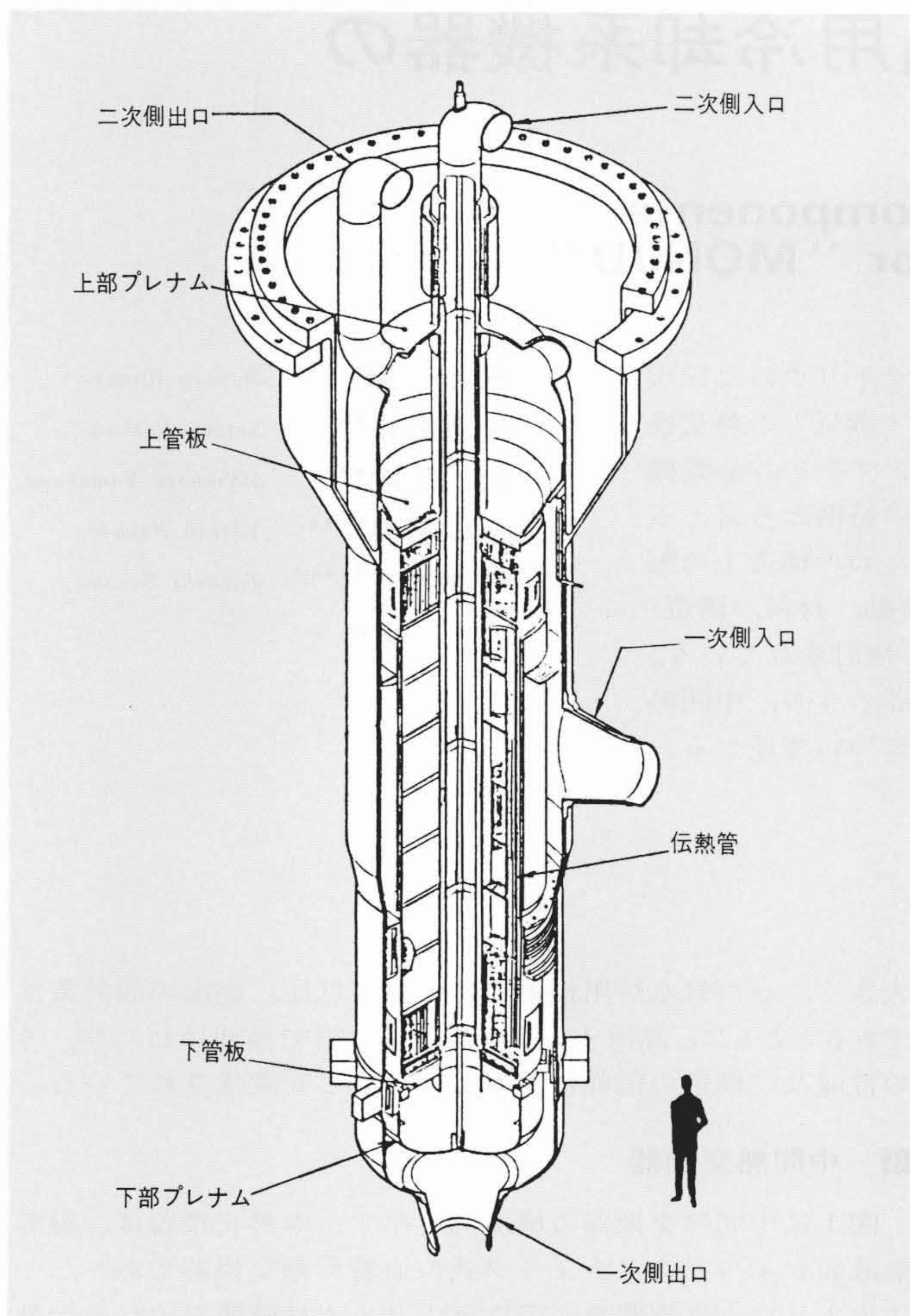


図1 中間熱交換器の構造 原子炉で発生した熱を、一次冷却系から二次冷却系に伝えるナトリウム-ナトリウムの熱交換器であり、他の機器に比較して熱衝撃条件が厳しい。

3.1 流動特性試験

熱交換器内での流動の不均一は、冷却材に高い熱伝導率のナトリウムが使用されるため、熱交換器の性能及び構造強度に影響を与える。このため、実機を模擬したモデルによって水流動試験を実施し、この結果を実機の整流構造に反映している。

図2に胴側管束部の水流動試験結果の一例を示す。本試験結果は、実機の定格運転時を模擬した場合の管束部の流速分布を示したものであるが、上部に設置された整流板によって、ほぼ均一な流速分布が得られている。なお、本試験で得られた管束部の流速分布は、実機の伝熱性能及び構造強度の評価に反映されている。

一方、解析面でも熱流動解析コードを開発し、プラントの通常及び過渡運転時での熱交換器内部の流動並びに温度分布を解析し、整流構造の選定及び構造解析に反映している。図3に二次側下部プレナムの流動解析例を示す。

3.2 管板熱衝撃試験

本熱交換器内へ流入する一次ナトリウムの温度は、約530℃であり、用いられているオーステナイト系ステンレス鋼にとってはクリープ領域であり、構造設計上クリープ挙動、塑性挙動などを的確に把握する必要がある。例えば、管板は、高速増殖炉用機器に特徴的な熱応力という観点から種々の解析的及び実験的アプローチによる研究開発がなされている。

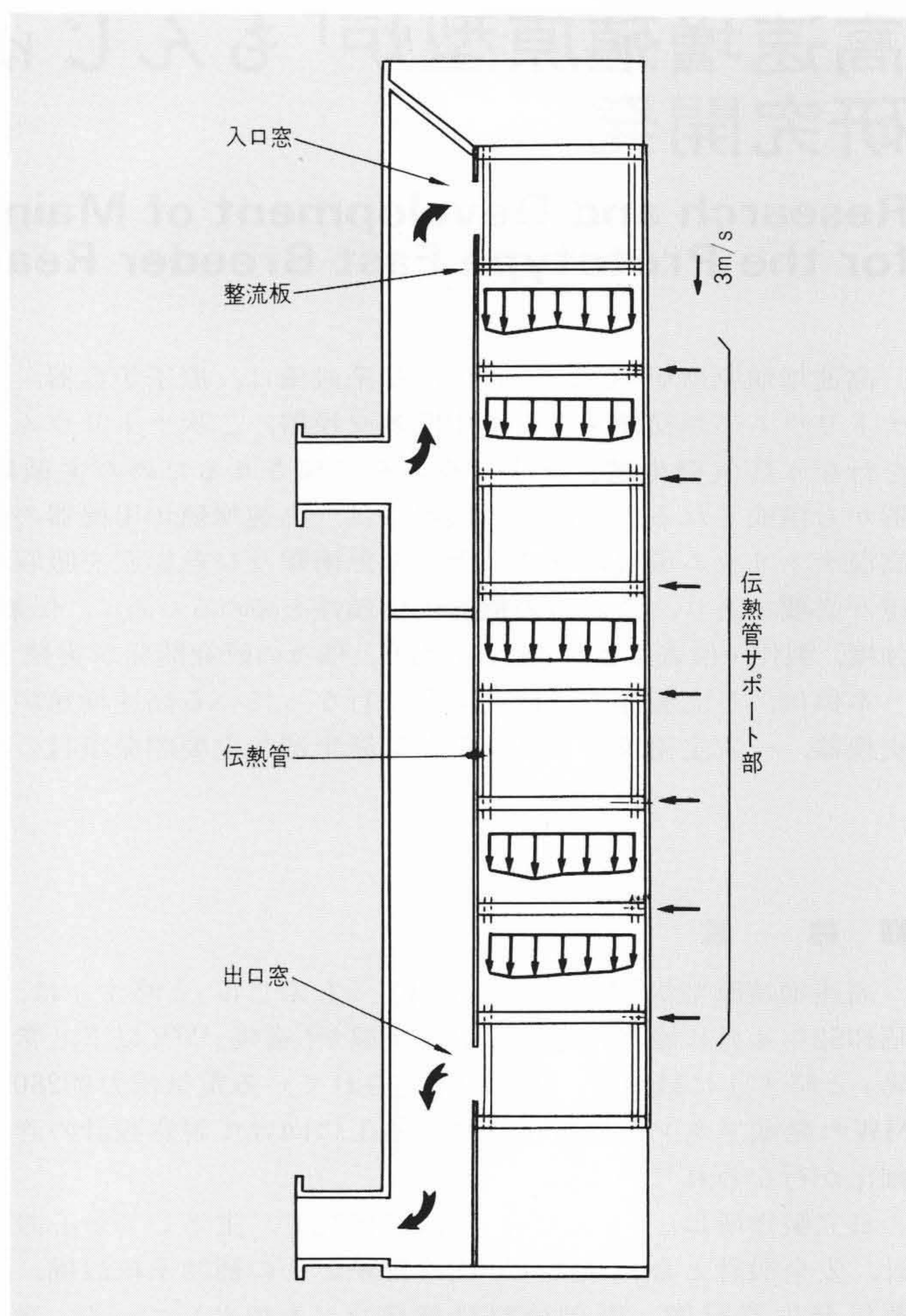


図2 中間熱交換器管束部の流速分布(管軸方向) システム上管束部での圧力損失の許容値は小さく、平行交流方式が採用されており、流動の均一化のため数多くの試験が行なわれた。

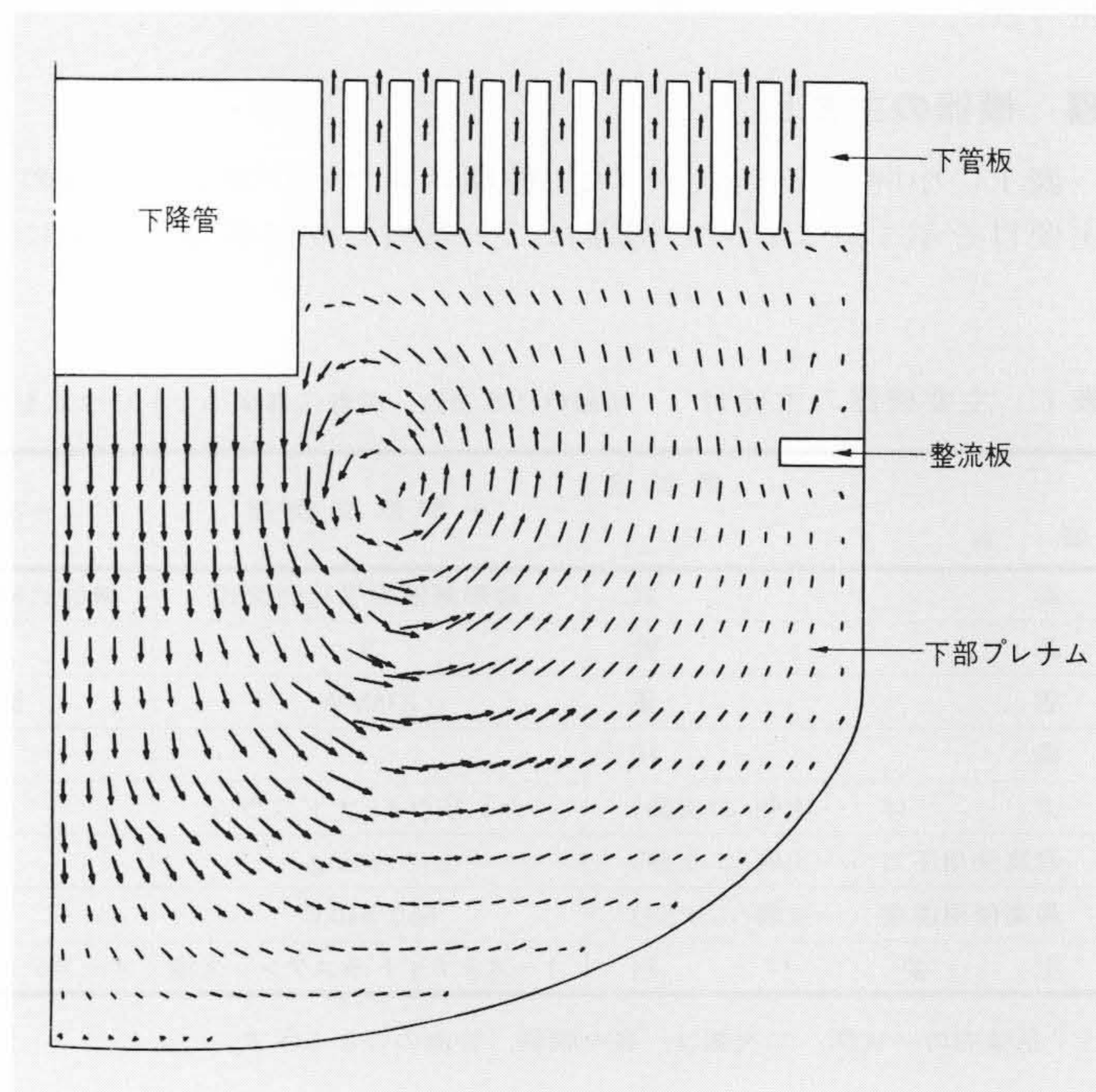


図3 中間熱交換器の流動解析例 管束部の胴側と同じく、管側についても流速分布の均一化を図る必要があり、実験と並行して数値解析によっても二次側下部プレナムの構造を検討している。

本熱交換器の中でも設計が難しいとされている管板部の耐熱荷重特性の詳細を把握するために、実機に使用を予定されている材料と同一仕様の材料を用いて、実機の $\frac{1}{2}$ 縮尺の管板モデルを製作し、実機条件を越える苛酷な繰返し熱的過渡変化を与え、各部の温度、ひずみなどを計測した。図4に代表点のひずみと（管板－シュラウド）の温度差の関係を示す。この場合、弾性的に計算された発生応力の大きさは、シェークダウン領域の約3倍であったが、5回の繰返しを与えてもひずみが増加する傾向は見られず、安定したヒステリシスを描いている。

3.3 伝熱管変形試験

本熱交換器の管束は、上、下2枚の剛な管板の間に、長さ約7m、直径21.7mmの直管式伝熱管が約3,000本溶接される構造となっている。このため、何らかの原因により管束部のナトリウムの流れが不均一となり、相互の伝熱管に温度差が発生した場合、相対的に高温になった伝熱管には軸圧縮荷重が加わり、この値がある限界を越えると横たわみが急速に増し、いわゆる座屈挙動を呈する。伝熱管では、両端の支持条件が剛であること及び軸力の原因が自己平衡的な熱荷重であることから、たとえこの限界を越えた場合にも、いわゆる崩壊に至ることはない。しかし、伝熱管は本熱交換器での最も重要な部材であるため、このような軸圧縮荷重に対するひずみ及び変形の挙動を把握しておくことが重要であり、実機を模擬した試験体により検証試験を行なった。

図5に最大横たわみと軸荷重の関係を示す。実機で考えら

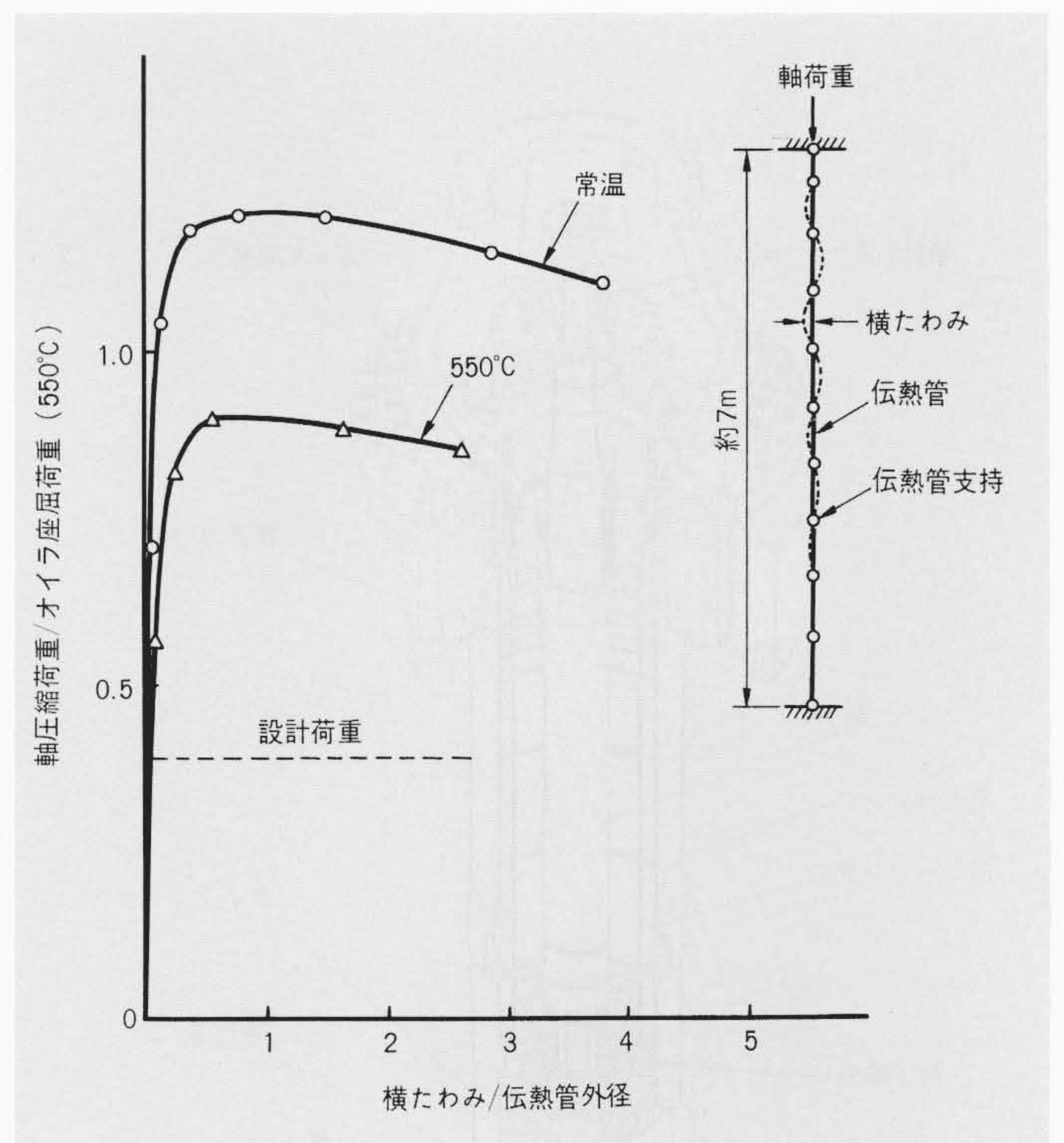


図5 中間熱交換器伝熱管の変形試験結果 550°Cでも横たわみが急激に増加する荷重に比較して、実機の設計荷重は十分に余裕があることを確認した。

れる荷重条件下では、ひずみ、横たわみとも十分小さいことが確認された。

4 一次主循環ポンプ

図6に主循環ポンプの構造例を示す。本循環ポンプは、一次主冷却系の高温ナトリウムを循環させる縦形の遠心式ポンプであり、高速増殖炉プラントの中でも最も重要な動的機器の一つである。

開発の重要項目として、流体性能の検討、構造材料の高温ナトリウム環境中強度の検討、熱変形防止構造の検討、上部軸受メカニカルシール構造及びナトリウム軸受構造など重要構造・部品の開発、振動特性の検討、耐震性の検討、並びに実規模大モックアップ試験機による製作及び検査技術の確立と総合的な機能及び信頼性の確認のための評価試験が挙げられる。更に、保守・補修方法の検討及びこれらのための機器の検討、並びにナトリウムの洗浄・処理技術の確立についても検討が行なわれている^{4),6)}。

上記開発研究のうち、軸受耐震試験、低液位時熱変形防止試験及び熱衝撃時熱変形防止試験について、以下に述べる。

4.1 軸受耐震試験

本循環ポンプは、設計用限界地震(S_2)が発生した場合にも、ポンプ機能の維持を確保することが要求されている。このため非線形時刻歴応答解析コードにより、地震時のポンプの振動挙動及び静圧軸受に発生する軸受荷重を求めた。静圧軸受の耐震性については、実物大の軸受部分モデルを用いて S_2 地震を想定した各種条件下の荷重による繰返し衝撃試験及び連続変動荷重試験を行なった。これらの解析及び試験により、軸受機能の維持が確保できることを確認した。

4.2 低液位時熱変形防止試験

本循環ポンプには、ポンプ内部のナトリウム液位の変動にかかわらず、炉心冷却のためにナトリウムを原子炉に供給す

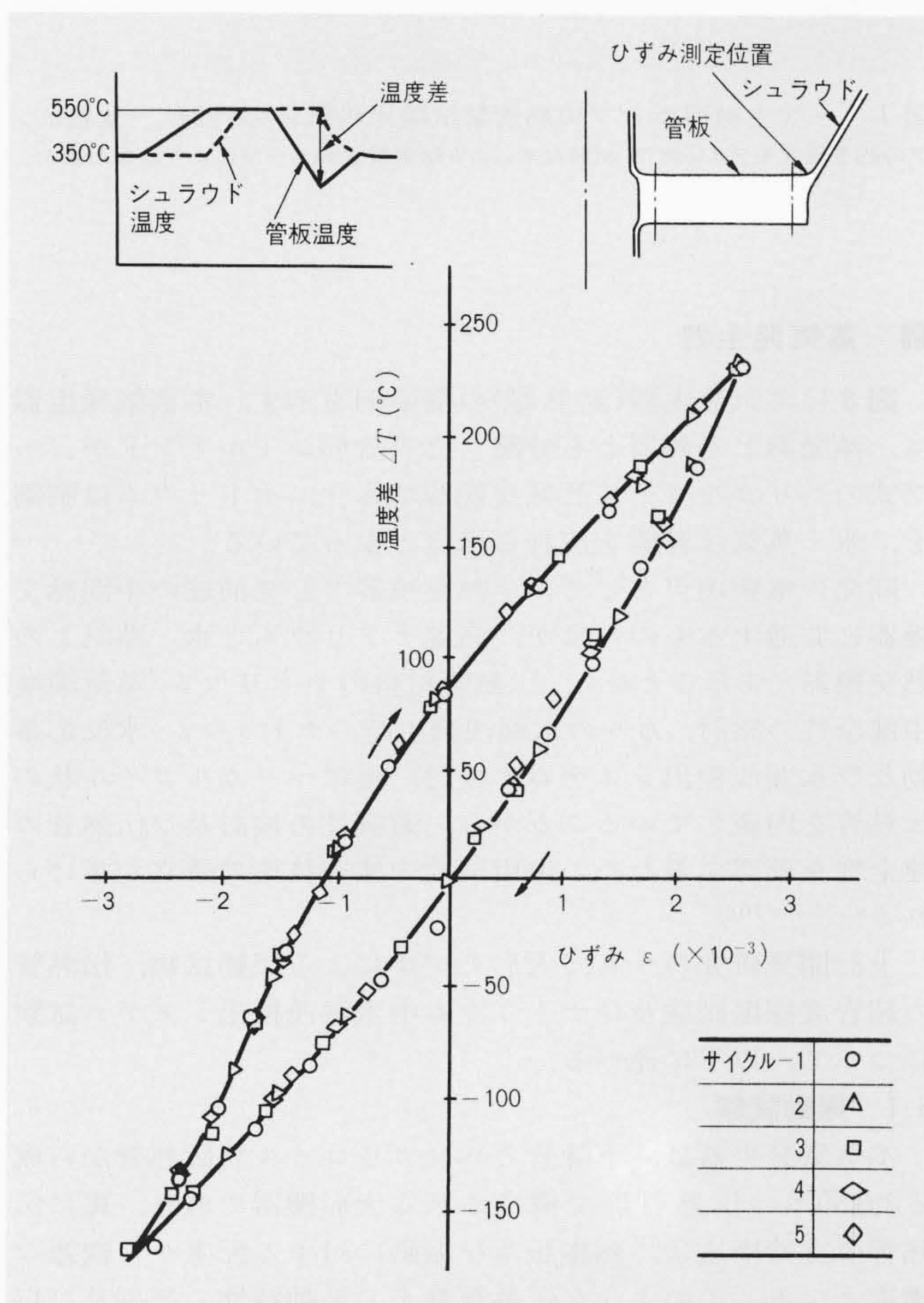


図4 中間熱交換器管板部の熱疲労試験結果 電気ヒータによる加熱及び空気による冷却を繰り返して、熱応力を負荷してひずみの挙動を計測した。

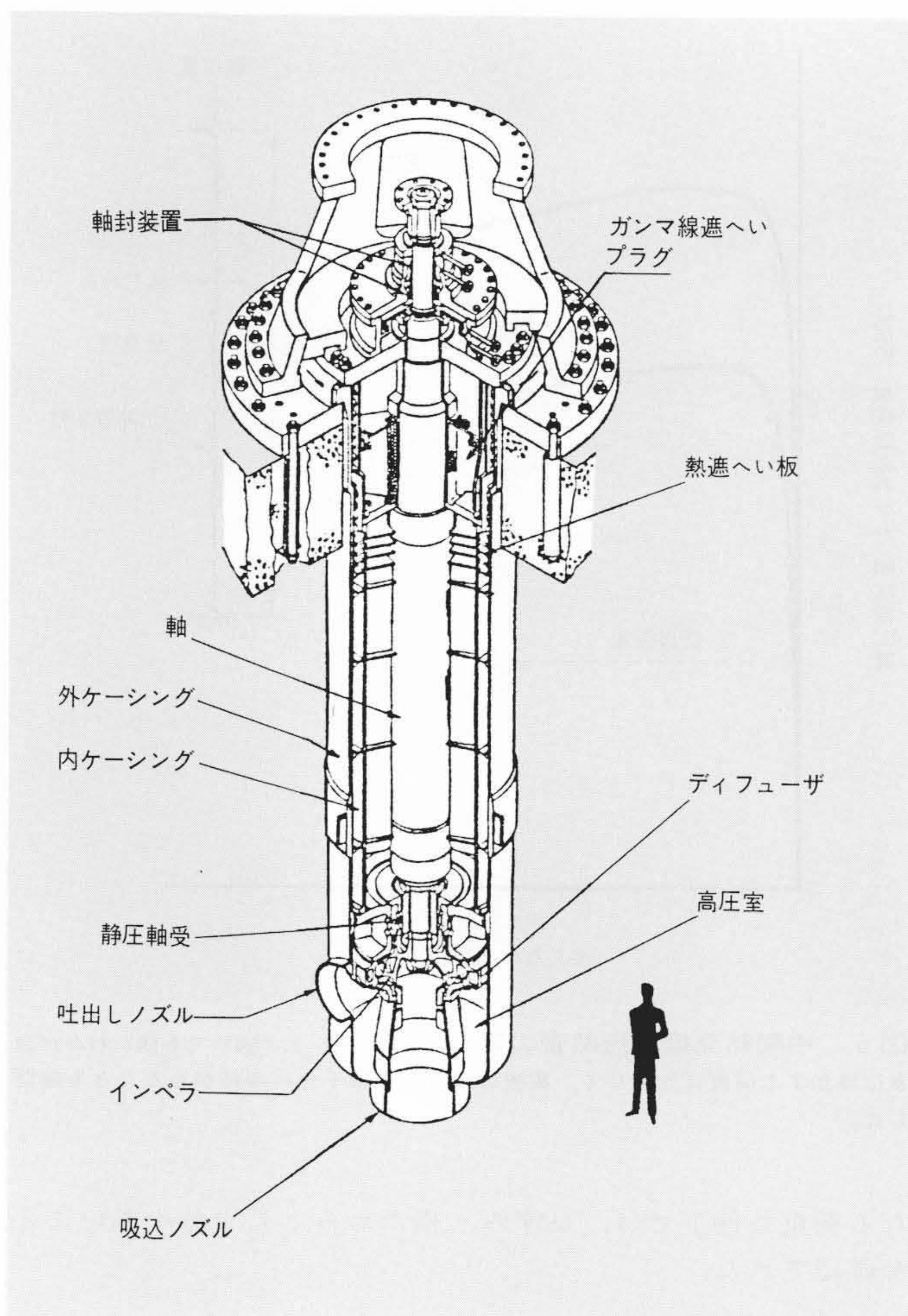


図6 一次主循環ポンプの構造 原子炉容器の入口側に設置され、予想運転範囲8～113%の広い流量範囲でナトリウムを循環し、炉心を冷却する。

ることが要求されている。このため、ポンプ機能維持の確認を目的として試験を行なった結果、ナトリウム液位が低下した場合には、ポンプ内の外ケーシングと内ケーシングとの間のアルゴンガス環状空間に、ケーシングの熱変形の原因となるアルゴンガスの自然対流が発生することが実験的に確認された。この自然対流の発生を防止するために、種々の対流防止板を取り付けたモデル実験を行ない、対流防止構造を確立することにより、低液位時にもポンプ機能の維持が可能であることを確認した。

4.3 熱衝撃時熱変形防止試験

原子炉緊急停止時には、循環ナトリウムの温度が急変し、ポンプに熱衝撃が加わり、この場合、静圧軸受と軸スリーブとの間の温度差によって熱変形が生じ、軸受部の隙間が変動することとなる。このため、熱衝撃時の温度分布及び変形解析コードを開発するとともに、縮小ポンプモデルによる水中熱衝撃試験を行ない解析コードの妥当性を確認している。なお、軸スリーブの内側をナトリウムが循環する構造を採用することによって、熱変形差を許容値以下にすることが可能となり、熱衝撃時にもポンプの機能を維持することを確認した。図7に試験ポンプの外観を示す。

なお、実規模のポンプについては、「常陽」の実機ポンプ¹⁾及び「もんじゅ」のモックアップポンプ⁶⁾が、それぞれ昭和52年及び昭和53年から順調に運転され、数多くの貴重なデータ及び運転実績が得られている。

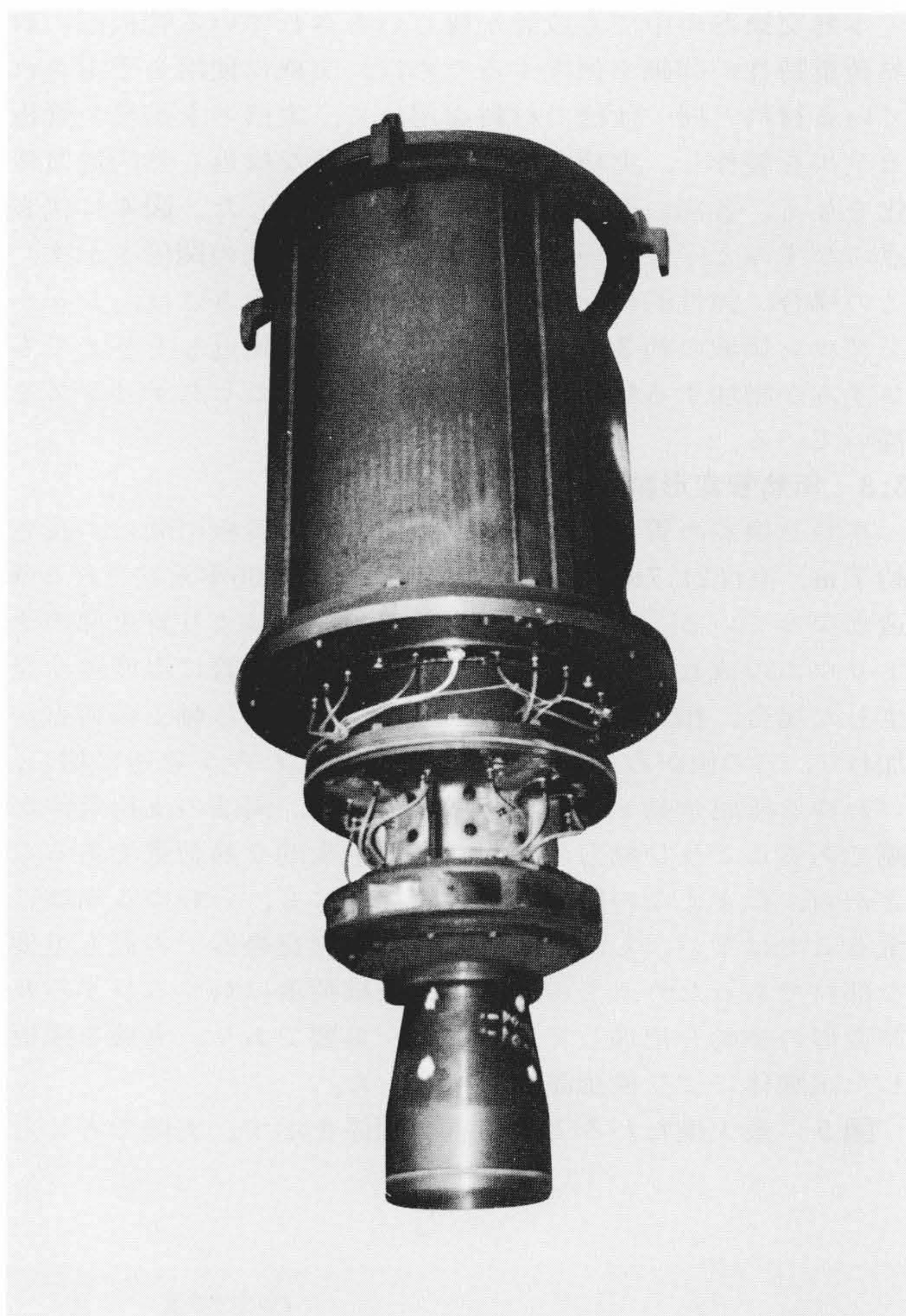


図7 一次主循環ポンプの熱衝撃試験用供試体の外観 実機ポンプの約1/3縮尺モデルであり、試験は水による熱衝撃試験ループにより行なわれた。

5 蒸気発生器

図8に蒸気発生器(過熱器)の構造例を示す。本蒸気発生器は、蒸発器と過熱器とを分離した貫流形シェルアンドチューブ式のヘリカルコイル形熱交換器であり、ナトリウムは胴側を、水・蒸気は管側を流れる構造となっている。

開発の重要項目としては、熱交換器として前述の中間熱交換器に共通するもののほか、高温ナトリウムと水・蒸気との熱交換器であることから、伝熱管材料のナトリウム/蒸気環境中健全性の検討、万一の水漏洩発生時のナトリウム-水反応挙動及び水漏洩検出システムの検討、更にヘリカルコイル状の伝熱管を内蔵していることから、耐震性の検討及び伝熱管の健全性を確認するための供用期間中検査技術の確立が挙げられる^{4), 5), 7)~10)}。

上記開発研究のうち、大形モデルによる振動試験、伝熱管の超音波探傷試験及びナトリウム中水漏洩検出システム試験について、以下に述べる。

5.1 振動試験

本蒸気発生器は、下降管とヘリカルコイル状伝熱管から成る約150本の伝熱管群で構成される大形機器であり、更に伝熱管の支持構造は、熱膨脹及び振動に対する配慮から複雑な構造となる。このような伝熱管群系の振動特性の把握及び振動解析モデル化の妥当性を確認するため、実機を模擬した大形モデルにより振動試験を行ない、実機の耐震構造設計に反

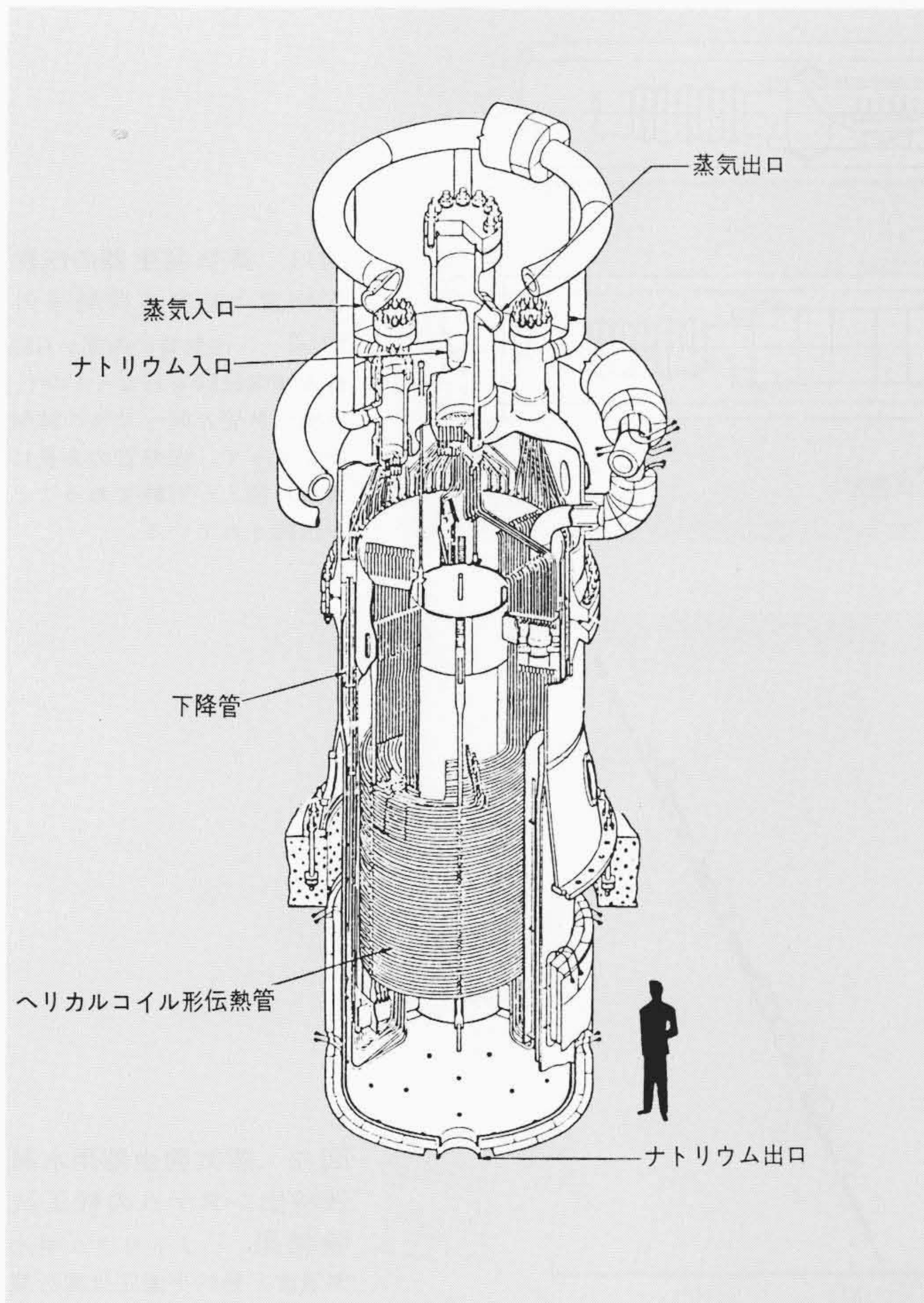


図8 蒸気発生器の構造 中間熱交換器で得られた熱を、二次冷却系から水・蒸気系に伝えるナトリウム-水・蒸気の熱交換器であり、特にナトリウム-水反応事故防止に対する配慮が必要である。

映している。

試験は、上昇管部及び下降管部の実規模大部分モデル並びに実機の $\frac{1}{2}$ 縮尺全体モデルによって行なわれた。図9に振動試験中の全体モデルの外観を、図10に固有振動数の計算値と実験値との比較結果を示す。計算値と実験値は良く一致しており、解析モデルの妥当性を確認した。

5.2 伝熱管の超音波探傷試験

本蒸気発生器の伝熱管は、下降管部、ヘリカルコイル部及び上昇管部から構成され、長尺・小口径(蒸発器:長さ約80m, 外径31.8mm/肉厚3.8mm, 過熱器:長さ約60m, 外径31.8mm/肉厚3.5mm)であるため、供用期間中に伝熱管の健全性を確認する方法として、伝熱管内部からの超音波探傷試験法を開発研究中である。

図11にマルチアレー形探触子の外観を示す。本探触子は、超小形の探触子を円周方向に多数個配列したものを複数個連結し、各探触子を電子的に切り換えることにより、探触子を回転することなく伝熱管の探傷検査を行なうものであり、従来の電動機駆動による回転式探触子に比較して、高能率の検査が可能である。

5.3 水漏洩検出システム

蒸気発生器には、安全対策として伝熱管の破損を早期に検出し、破損の拡大を最小限に抑制するため、漏洩した水・蒸気とナトリウムとの反応により生ずる水素を測定する水漏洩検出システムが設けられる。本システムは、ニッケル膜(厚さ

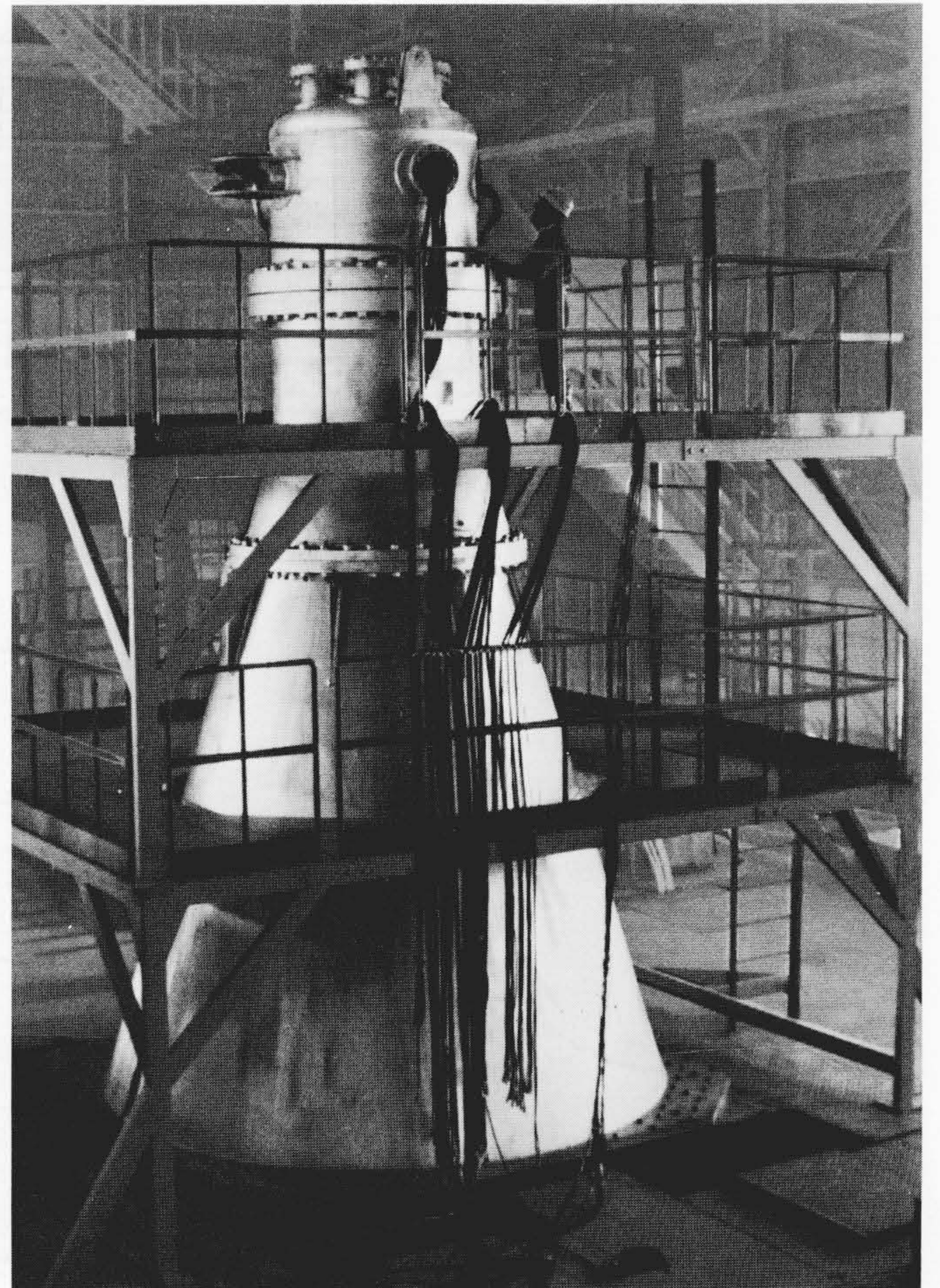


図9 蒸気発生器の振動試験体モデル 実機の $\frac{1}{2}$ 縮尺モデルを示すもので、日立製作所の振動台を用いて各種地震波による試験が行なわれ、その結果は実機の設計に反映されている。

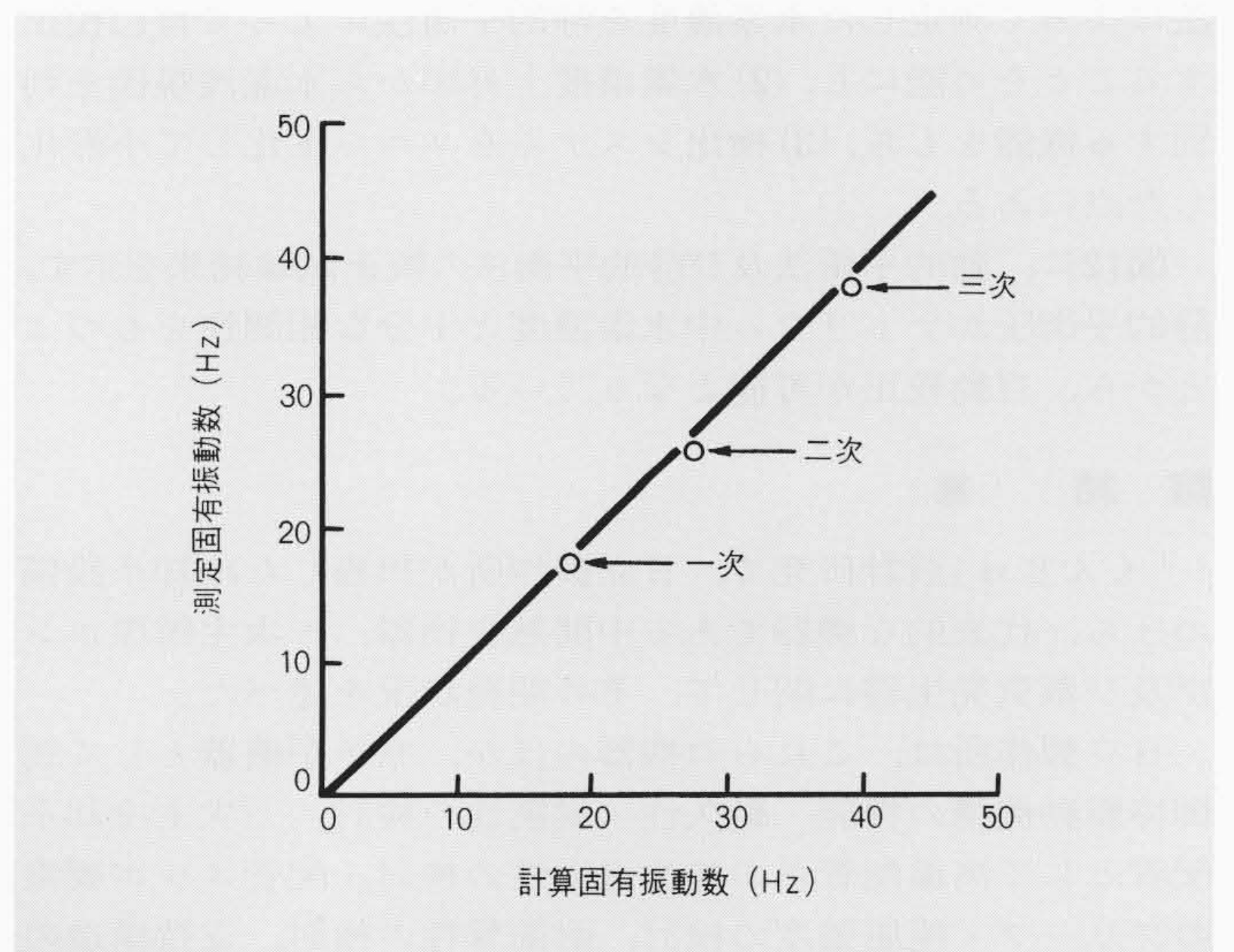


図10 振動試験体モデルの固有振動数 一次、二次、三次の固有振動数とも計算値と実験値は良く一致しており、また実機の一次固有振動数も建屋のそれに比較し十分高いことが確認された。

0.5mm, 外径25mm)の片側をナトリウム、もう一方を真空とし、ニッケル膜を真空側に透過する水素の圧力を測定する水素計と、水素計にナトリウムを導入する流路から成る。この水素計の特徴は、(1)二つのニッケル膜プローブをもち、動的平衡

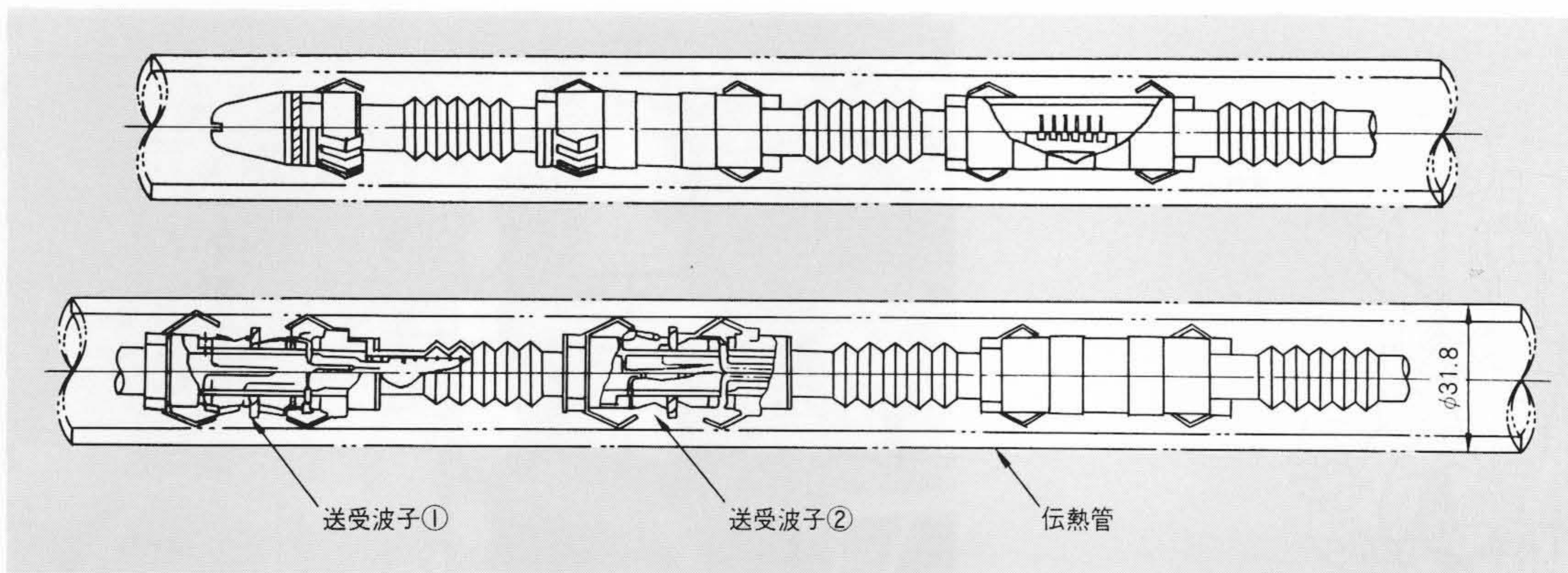


図11 蒸気発生器の伝熱管検査用超音波探触子外形図 伝熱管の内部から超音波探傷試験を行なうもので、実機伝熱管と同一寸法の試験体によって、伝熱管の全長にわたり挿入が可能であることも確認されている。

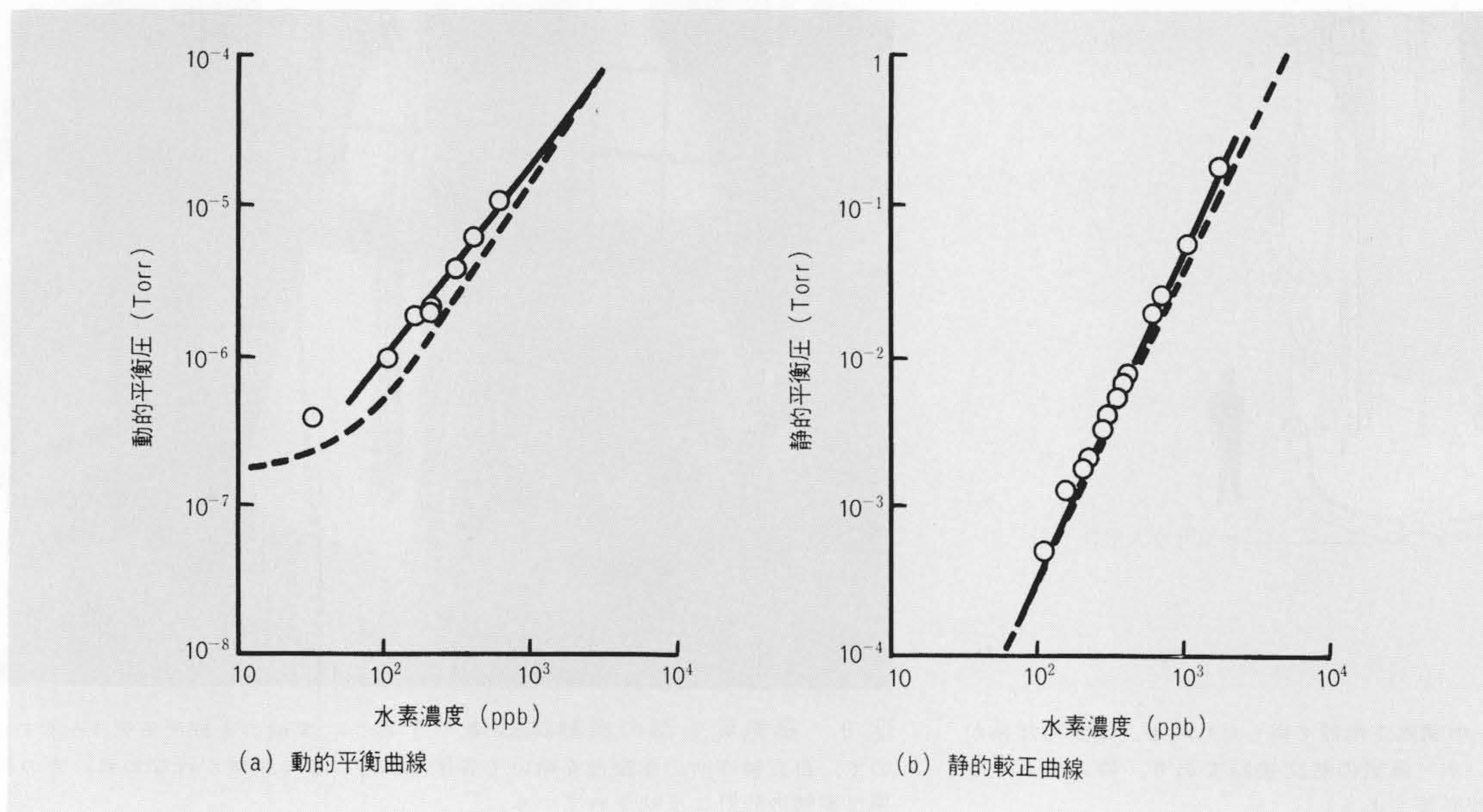


図12 蒸気発生器用水漏洩検出システムの較正試験結果 ナトリウム中水素濃度と静的平衡圧は線形関係にあるため、動的平衡法によって水素濃度を正確に、かつ容易に測定することが可能となる。

法によって測定した水素濃度を静的平衡法によって自己校正することを可能にし、(2) 水素濃度上昇率から水漏洩規模を判別する機能をもち、(3) 検出システムをユニット化して小形化した点にある。

図12に、動的平衡法及び静的平衡法の較正試験結果を示す。静的平衡圧がナトリウム中水素濃度と十分な相関性をもつことから、自動較正が可能となっている。

6 結 言

「もんじゅ」設計研究で、日立製作所が担当した冷却系設備のうち、代表的な機器である中間熱交換器、一次主循環ポンプ及び蒸気発生器に関して、その開発状況を述べた。

日立製作所は、これらの機器のほか、原子炉機器として制御棒駆動機構の機能・耐久性・耐震性の検討、一次主冷却系配管として高温配管系の弾性追従性の検討、配管エルボ要素のクリープ・座屈強度の検討、耐衝撃性の検討、支持構造の耐震性の検討、ガスサンプリング型ナトリウム微量漏洩検出システムの検討、一次補助ナトリウム系機器としてナトリウム純化システムの検討など数多くの研究開発を行っており、今後も高品質で信頼性の高い高速増殖炉用機器の開発に向けて、よりいっそうの努力を傾注する考えである。

終わりに、「もんじゅ」の設計研究及びこれに関連する研究・開発試験を実施するに当たり、終始、御指導をいただいた動力炉・核燃料開発事業団の各位に対し、深謝の意を表わす次第である。

参考文献

- 1) 野本, 外: 高速実験炉「常陽」原子炉容器及び一次冷却系の建設, 日立評論, **59**, 12, 1001~1006(昭52-12)
- 2) 野本, 外: 高速実験炉「常陽」一次冷却系の総合機能試験, 日立評論, **59**, 12, 1007~1012(昭52-12)
- 3) 間瀬, 外: 高速増殖炉用熱交換器における管-管板溶接構造の開発, 日立評論, **59**, 9, 747~752(昭52-9)
- 4) 館, 外: 高速原型炉「もんじゅ」用ナトリウム機器の開発, 日立評論, **60**, 2, 153~158(昭53-2)
- 5) 柴藤, 外: 高速増殖炉用中間熱交換器及び蒸気発生器の構造に関する研究開発, 日立評論, **62**, 10, 705~708(昭55-10)
- 6) 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)
- 7) 金森, 外: 高速原型炉「もんじゅ」用50MW蒸気発生器の設計, 製作及び運転実績, 日立評論, **58**, 2, 111~116(昭51-2)
- 8) H. Tsuda, et al.: Post-Performance Examination of the 50 MW Steam Generator for the Prototype Fast Breeder Reactor "Monju," BNES International Conference on Ferritic Steels for Fast Breeder Reactor Steam Generators, London, May-June(1977)
- 9) 鈴置: 流動不安定現象の研究(第3報), 機械学会論文集, **44**, 979~987(昭53-3)
- 10) M. Yamakawa, et al.: An Analytical Model for Dynamic Performance of a Sodium Heated Steam Generator by the Method of Characteristics, Topical Meeting on "R & D, Fabrication and Operating Experience on Steam Generators for LMFBRs," Genoa, Nov.-Dec., (1981)