

高速増殖炉もんじゅ発電所

1次主冷却系中間熱交換器の設計・製作

Design and Fabrication of the Intermediate Heat Exchanger in the Primary Heat Transport System for the Prototype Fast Breeder Reactor "MONJU"

高速増殖炉もんじゅ発電所1次主冷却系中間熱交換器は、1次主冷却系機器の重要な機器の一つであり、原子炉で発生した熱を1次ナトリウムを通じ、2次ナトリウムに伝達するたて型無液面平行向流型、交換熱量約238 MWの大型熱交換器である。中間熱交換器は3ループある原子炉冷却系の各ループに1基ずつ計3基が製作され、据付けられた。中間熱交換器は、材料のクリープ挙動が顕著な温度で運転され、高温ナトリウムによる厳しい熱衝撃条件のもとで使用されるため、熱応力の緩和対策が、また性能確保の面から機器内での均一な流動分布を得るために、各部に構造上の配慮が必要である。このため綿密な計画のもとに、伝熱・流動、材料、構造強度、製作技術などの開発を進めてきた。

井上達也*	Tatsuya Inoue
中川幸雄**	Yukio Nakagawa
岩間次男**	Tsuguo Iwama
樋口真一**	Shin'ichi Higuchi
山川正剛***	Masanori Yamakawa
福田嘉男****	Yoshio Fukuda

1 緒 言

1次主冷却系中間熱交換器(以下、中間熱交換器と略す。)は、原子炉で発生した熱を1次冷却材ナトリウム(以下、1次ナトリウムと略す。)を通じ、2次冷却材ナトリウム(以下、2次ナトリウムと略す。)に伝達する大型の熱交換器であり、1ループ当たり1基、合計3基設置される。中間熱交換器は、高速増殖炉もんじゅ発電所(以下、「もんじゅ」と略す。)1次主冷却系機器の中で重要な機器であり、高温構造強度、伝熱・流動設計、あるいは製作方法などについてより新しい技術の開発を目ざし研究開発が進められてきた。

動力炉・核燃料開発事業団と日立製作所は、従来から本機器の開発に積極的に取り組んでおり、動力炉・核燃料開発事業団向けの約13 MW再生熱交換器、高速実験炉常陽(以下、「常陽」と略す。)中間熱交換器¹⁾の開発のほか、大型化に対する伝熱・流動評価技術の確立、高温用材料の開発、高温構造強度技術および伝熱管管束製作技術の開発などを進めてきた。以下に、「もんじゅ」中間熱交換器の研究開発、設計および製作について、その概要を述べる。

2 中間熱交換器の設計概要

2.1 構 造

中間熱交換器の構造を図1に、設計主要目を表1に示す。中間熱交換器は、発電用原子力設備の中でもっとも重要な

機器に分類されるたて型無液面平行向流型のナトリウム-ナトリウム熱交換器であり、外胴の直径は約3 m、高さは約12 mであって、サポート胴によって上部から支持される。

1次ナトリウムは、外胴側面の1次ナトリウム入口ノズルから流入し、外側シュラウド上部に設けられている入口窓から伝熱管管束部に流入する。その後、伝熱管の外側を下降しながら2次ナトリウムと熱交換を行い、外側シュラウド下部の出口窓を経て1次ナトリウム出口ノズルから流出する。

一方、2次ナトリウムは、2次ナトリウム入口ノズルから流入し、下降管を通して2次側下部プレナムで反転して、伝熱管内を上昇しながら1次ナトリウムと熱交換を行い、2次ナトリウム出口ノズルから流出する。

2.2 伝熱・流動設計

本中間熱交換器の伝熱・流動設計の主な目標は次のとおりである。

- (1) 大容量熱交換器を極力小型化したうえで、所定の伝熱性能を得るための高性能化
- (2) 小さな許容圧力損失のもとでの均一な流動分布、温度分布の実現

機器の小型化のためには、伝熱管の配列ピッチを縮め、伝熱管の厚さを薄くすることが有効である。これらを考慮しながら、従来の研究成果を踏まえ、Lubarsky-Kaufman²⁾の式を

* 動力炉・核燃料開発事業団 ** 日立製作所 日立工場 *** 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

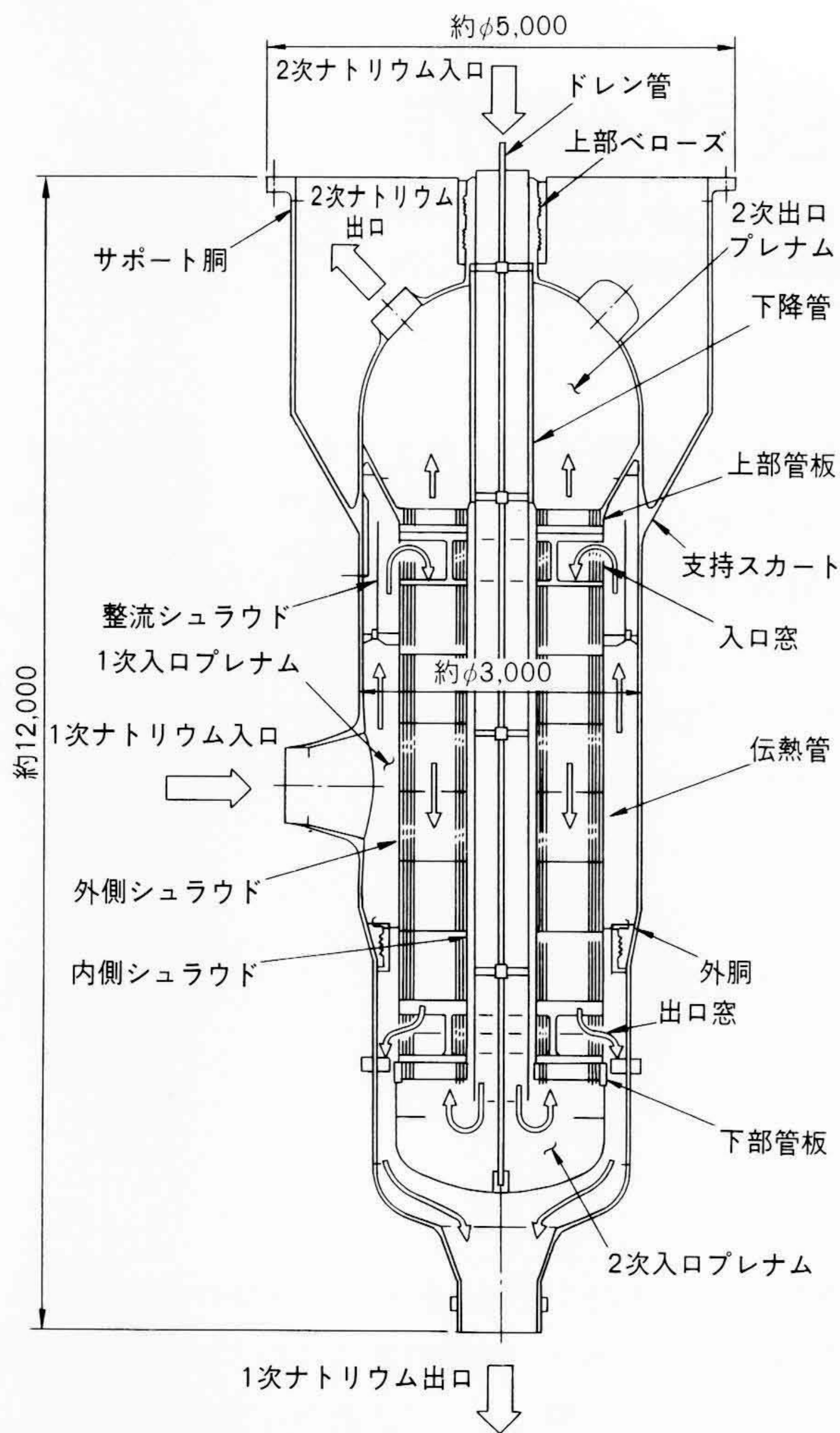


図1 中間熱交換器の構造 中間熱交換器は、直管の伝熱管を持ったて型であり、1次ナトリウムが胴側を、2次ナトリウムが伝熱管内を流れる。

用い1基当たり約238 MWの熱交換容量を持つよう伝熱設計を行った。

一方、均一な流動分布を得るために、1次入口プレナム部、伝熱管管束部および2次入口プレナム部に整流機構を設け、伝熱・流動解析および流動試験によってその妥当性を検証した。

2.3 材料、構造強度設計

中間熱交換器は、通常運転時に1次ナトリウム入口部で約530℃という高温で運転され、また過渡運転時にはナトリウムの温度変化が負荷されるため、クリープ疲労強度について十分な配慮が必要である。主要材料としては、高温強度特性に優れたオーステナイト系ステンレス鋼(SUS304)を用いた。

設計条件としての過渡運転時の温度変化については、プラント全体の運転条件に基づき、機器内各部での分布を詳細に求めた。この温度条件により、有限要素法を用いた温度分布解析および応力解析を行い、「もんじゅ」用に策定された「高速原型炉第1種機器の高温構造設計指針」(以下、「高温構造設計指針」と略す。)に基づく強度評価により、構造の健全性

表1 中間熱交換器の設計主要目 中間熱交換器は、原子炉容器で発生した熱を1次ナトリウムを通じ、2次ナトリウムに伝達する熱交換器である。

項 目		仕 様
型 式	たて型無液面平行向流型	
容 量		約238 MW
有 効 伝 熱 面 積		約1,100 m ²
運 転 温 度	1次入口・出口ナトリウム	約530℃・400℃
	2次入口・出口ナトリウム	約325℃・505℃
主 要 寸 法	胴 外 径	約3 m
	伝 熱 管 外 径 ・ 肉 厚	約21.7 mm・1.2 mm
	全 高	約12 m
主 要 材 料	外 胴	オーステナイト系ステンレス鋼 (SUS304)
	伝 熱 管	SUS304TB
伝 熱 管 本 数 ・ 配 列		約3,300本・円周
基		3基

を確認した。なかでも上部管板および支持スカートに対しては、弾塑性、クリープ挙動をより詳細に把握するため、非弾性解析を十分に活用した。

また、耐震設計に関しては、もっとも上位の区分である耐震クラスAsとし、6軸のバネ-質点モデルを用いた動的解析により、耐震構造健全性を確認した。

3 中間熱交換器の研究開発

3.1 技術課題と研究開発経緯

ナトリウム-ナトリウムの熱交換器は、高速増殖炉特有の機器であり、動力炉・核燃料開発事業団と日立製作所は当初からその開発を積極的に推進し、ナトリウム流動伝熱試験装置用の約13 MW再生熱交換器および「常陽」中間熱交換器などを開発してきた。「もんじゅ」の中間熱交換器は「常陽」のそれに比べると容量の大型化、運転温度の高温化といった特徴がある。「もんじゅ」の中間熱交換器の開発に当たっては、「常陽」の設計・製作・運転経験を踏まえて伝熱・流動、材料、構造強度、製作などに関する開発目標を整理した。主なものとしては、次のような項目を挙げることができる。

- (1) 入口プレナム部および伝熱管管束部での伝熱・流動特性評価技術の向上
- (2) 高温強度特性により優れた材料の開発
- (3) 管板部など高応力部の高温強度健全性の確認
- (4) 伝熱管の耐圧縮座屈健全性の確認
- (5) ベローズの構造健全性の確認
- (6) 大型伝熱管管束部の製作技術の確立

これらの課題に対し、図2に示すように中・長期的な計画をもとに技術の確立を進めてきた。

また、海外の研究開発機関とも協調しながら「もんじゅ」での研究開発成果を積極的に発表し、高い評価を得ている^{3)~7)}。

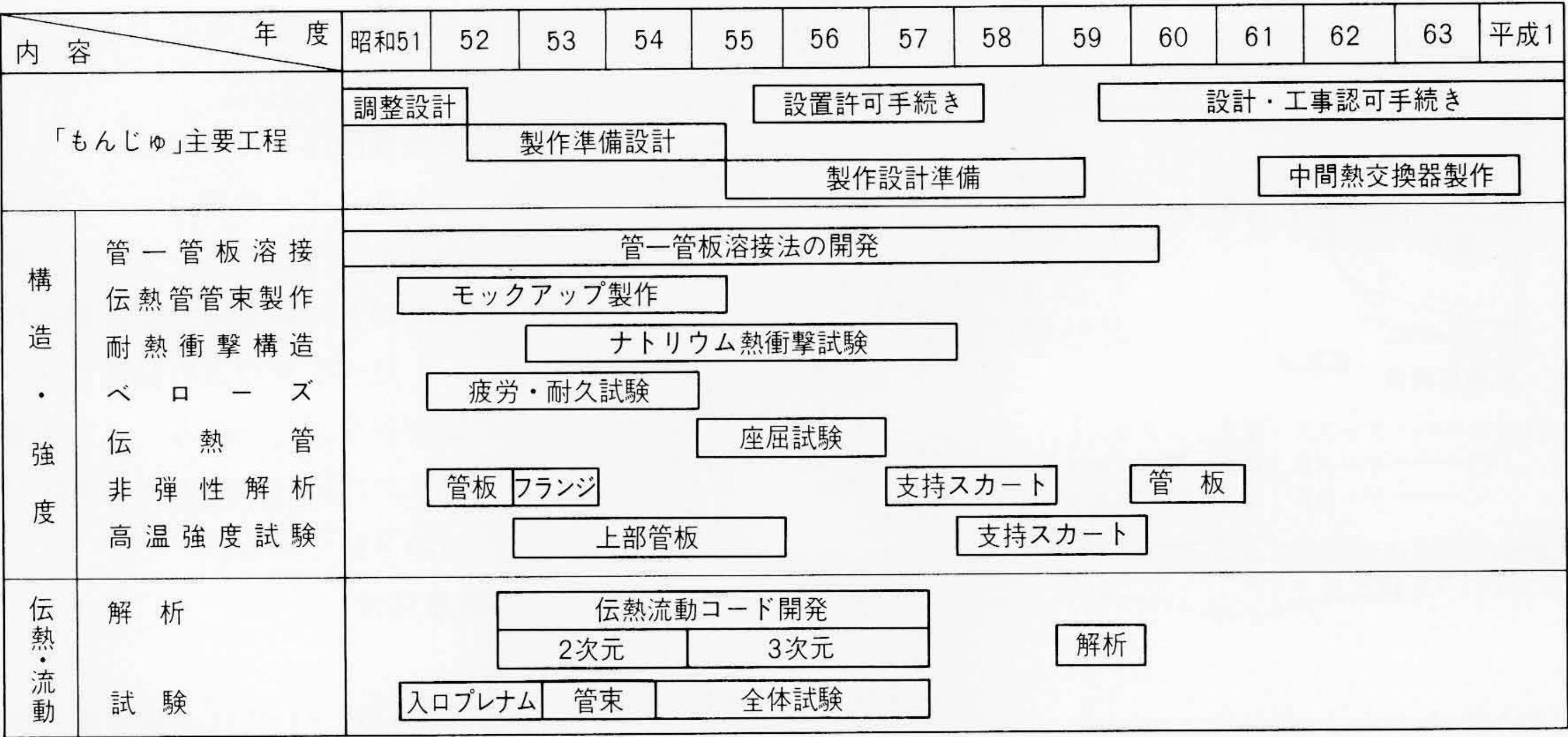


図2 中間熱交換器の主要研究開発 関連事業所が一体となり、体系的に研究開発を進めてきた。

3.2 伝熱・流動特性

中間熱交換器の小型化およびナトリウム流動の均一化を図るため、1次入口プレナム部、伝熱管管束部および2次入口プレナム部を対象とした水流動試験を実施するとともに、伝熱・流動解析コードを開発し、その妥当性を検証した。

3.2.1 水流動試験

水流動試験は、図3に示すように次の3段階にわたって実施し各部の整流機構を開発した。

(1) 1次入口プレナム部の整流

1次ナトリウムは、外胴の側部に設けられた単一の入口ノズルから1次入口プレナム部へ流入するため、この領域で周方向の流量が不均一となる(偏流)ことが考えられ、この偏流を最小限に抑えることが重要である。このため、 $\frac{1}{2}$ 縮尺部分モデルを用いた試験および流動解析により、1次ナトリウム入口ノズル上部に整流板を設け、開口比をノズル側から順次周方向に減少させることにより周方向偏流を低減することとした。

(2) 伝熱管管束部胴側の均一流量配分

1次ナトリウムは、外側シュラウド上部の入口窓から伝熱管管束部に流入し、伝熱管の外側を下降し下部の出口窓から流出する。このため、半径方向に偏流が発生することが考えられる。さらに、伝熱管管束部の内周および外周域では、中央域と流路形状が異なり、均一な流量配分を得るためには、適切な流速調整構造を必要とする。このため、外側シュラウドの伝熱管管束部入口窓直後および出口窓直前に多孔板式整流板を設けるとともに、伝熱管と内側・外側シュラウドとの距離を精度よく調整した。これらの詳細構造の決定に当たっては、伝熱・流動解析によって最適設計化を図るとともに、実規模(60度セクタ)の伝熱管管束部モデルを用いて流動性能を確認した。

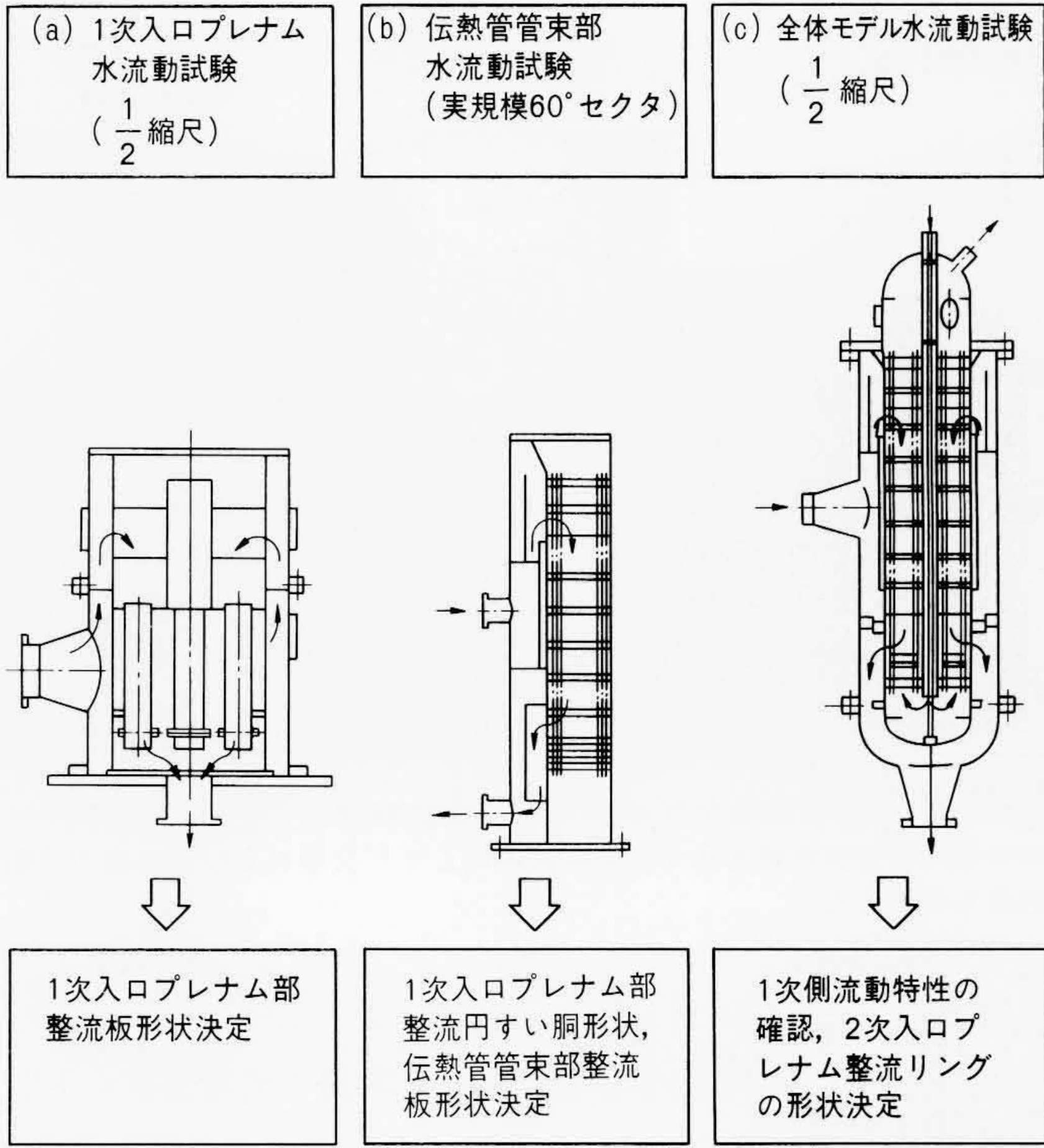


図3 中間熱交換器の伝熱・流動特性評価試験 ナトリウムの入口プレナムおよび伝熱管管束部での流量均一化のために、各種試験を実施した。

(3) 伝熱管内への均一流量配分

2次入口プレナム部では、下降管内を下降したナトリウムが反転し、伝熱管内に流入する。このとき、プレナム鏡板への衝突および反転により最外周部の流速が大きくなり、伝熱管管束部での半径方向の流量が不均一となることが考えられる。このため、図4に示すようにプレナム部外周に整流リングを設けることとし、図5に示す $\frac{1}{2}$ 縮尺の全体モデルを用いた流動試験および解析によって整流リング形状の最適化を図

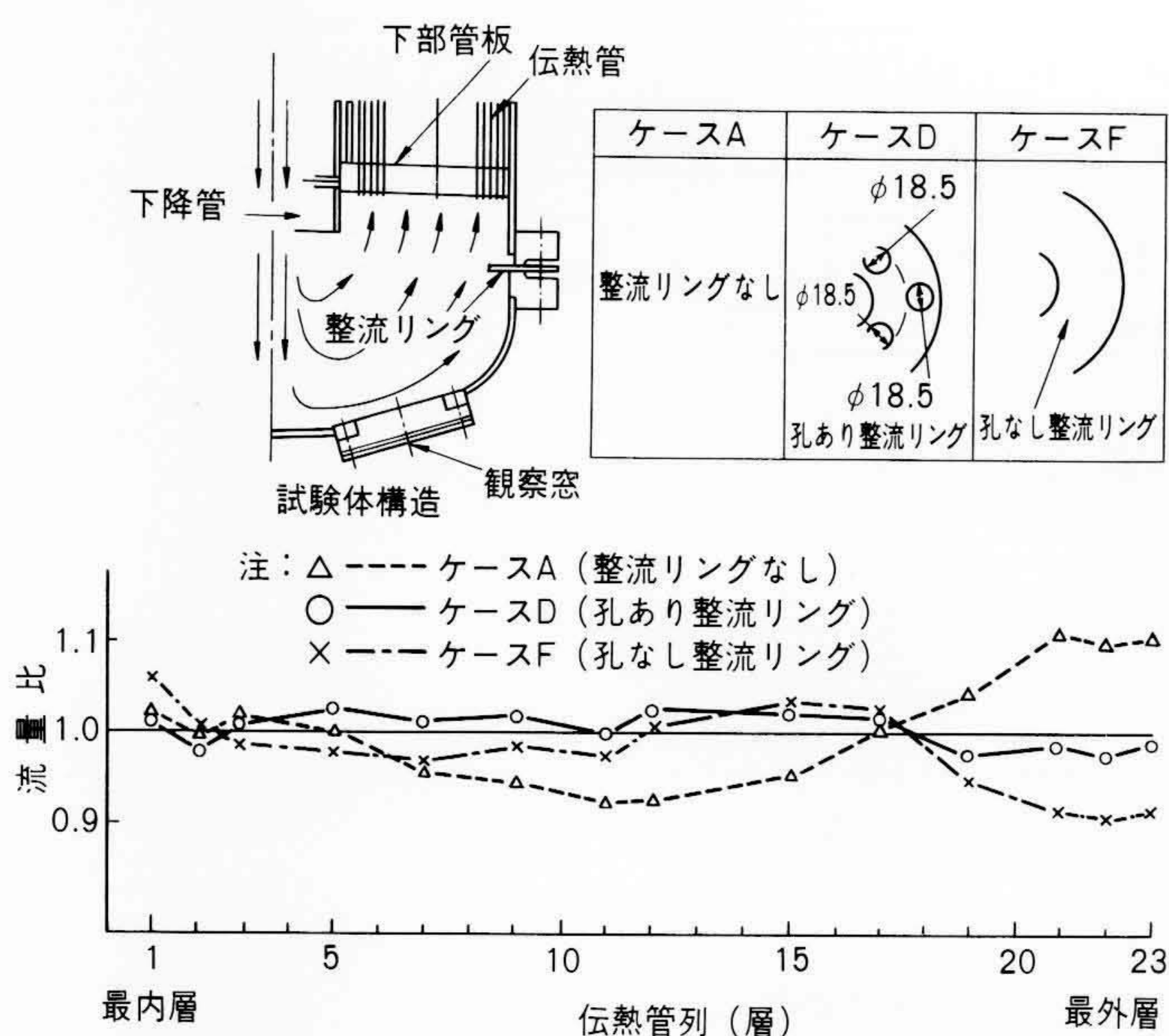


図4 2次入口プレナムの整流試験 2次入口プレナムに種々の整流リングを設け、伝熱管管束部への均一流量配分を得ることを目標とした。

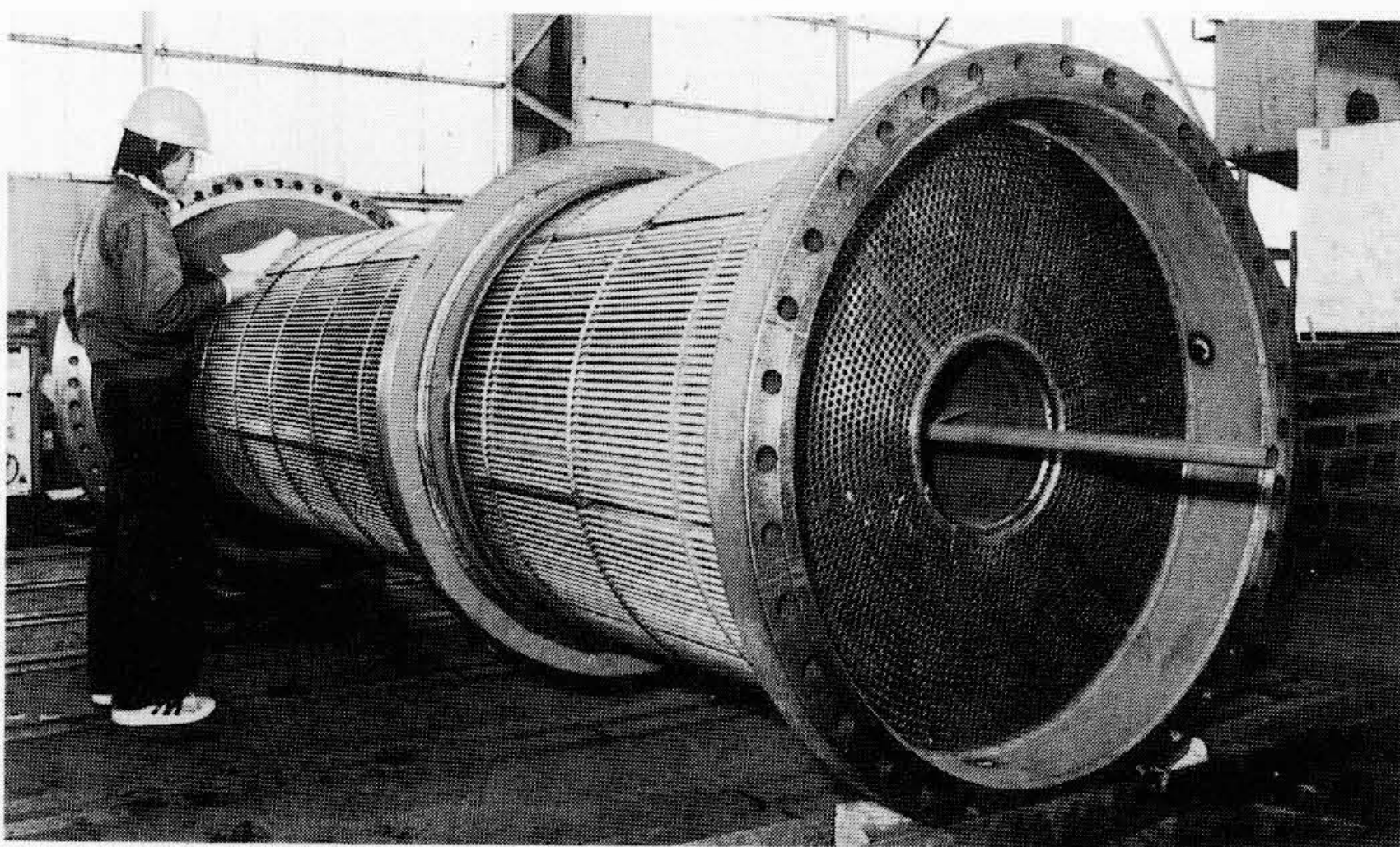


図5 中間熱交換器全体モデル水流動試験体 1/2縮尺の全体モデルの伝熱管管束外観を示す。本試験体により1次側および2次側の流動性能を確認した。

った。この結果、伝熱管管束部での2次側の流速分布を平均化することが可能となった。

なお、本全体モデルを用いた水流動試験により、1次側、2次側の流動特性の総合的な評価も行った。

3.2.2 解析コードの開発

中間熱交換器の伝熱・流動特性を詳細に評価するために、各種の解析コードを開発した。

静特性解析コード(MONSTER)は、伝熱管管束部の伝熱・流動特性を円周配列の伝熱管の各層ごとに評価し、定常時のナトリウムおよび各伝熱管の温度分布を計算するものである。また、内部動特性解析コード(TRIAC)は、中間熱交換器の入口ノズル部の温度変化を入力とし、各プレナム部での混合および伝熱管管束部での熱交換を考慮して各部の温度分布を計算するものである。得られた温度変化を入力条件として、各

構造部材の温度分布を解析することによって、より信頼性の高い構造強度評価が可能となった。

さらに、中間熱交換器内部での詳細なナトリウムの伝熱・流動解析が可能な差分法による解析コード(THERVIS)を開発し、各部での流動状況を確認した。また、伝熱管管束部に対して、1次側と2次側との熱交換による相互作用を計算できる機能をも加え、1次ナトリウムの詳細な流れを明らかにし、伝熱管相互の温度差などを求めることを可能とした。これらの伝熱・流動解析の技術は、高速増殖実証炉の設計検討ですでに効果的に活用されている。

3.3 材料・構造強度特性

3.3.1 材料開発

中間熱交換器の主要材料としては、耐食性・高温強度に優れたオーステナイト系ステンレス鋼(SUS304)を用いるが、高温のナトリウム中で使用されるため、より優れた高温強度および延性を持つSUS304鋼とするよう材料仕様の検討を行い、炭素と窒素の適切な配分により優れた性質を持つSUS304鋼を製造した。また、高応力部には大型鍛造材を使用して構造強度の信頼性向上に努めた。

さらに、ナトリウム環境試験の結果、ナトリウムの純度管理を行うことにより耐食性に問題ないこと、および浸炭もしくは脱炭による強度特性の変化もほとんどないことを確認した。

溶接材料の開発にはさらに注意を払い、母材と同様な主要元素の制限のほかに、微量元素〔(Nb(ニオブ)やV(バナジウム)など〕による高温特性への影響も十分試験、研究を重ねたうえで最適な仕様を決定した。

なお、上部ベローズおよびバイパス シール ベローズには、従来の実績により、SUS316鋼を用いた。

3.3.2 構造強度確認試験

中間熱交換器の構造健全性確認のため、上部管板、支持スカート、伝熱管、上部ベローズなどに対して構造強度確認試験を実施した。

(1) 上部管板の熱衝撃試験

伝熱管の内部を流れる2次ナトリウムの温度変化により、管板と接続円すい胴との接合部に熱応力が発生し、これが繰り返されるため、この部分の構造健全性を評価した。試験は、図6(a)に示す1/2縮尺の熱衝撃試験体を製作し、電気ヒータ加熱と空気冷却による熱衝撃を繰り返し負荷し、その挙動を調べることで実施した。同図中(b)に管板と円すい胴の温度差およびそのときのひずみの変化を示すが、進行性変形は発生しない。

(2) 上部ベローズの疲労試験

薄肉で大口径の上部ベローズは、伝熱管管束と下降管との熱膨張変位差の吸収のため用いられる。このため繰り返し変位負荷性能の確認を目的として図7に示す実規模の試験体を用いて、空気およびナトリウム雰囲気中の疲労試験を実施し

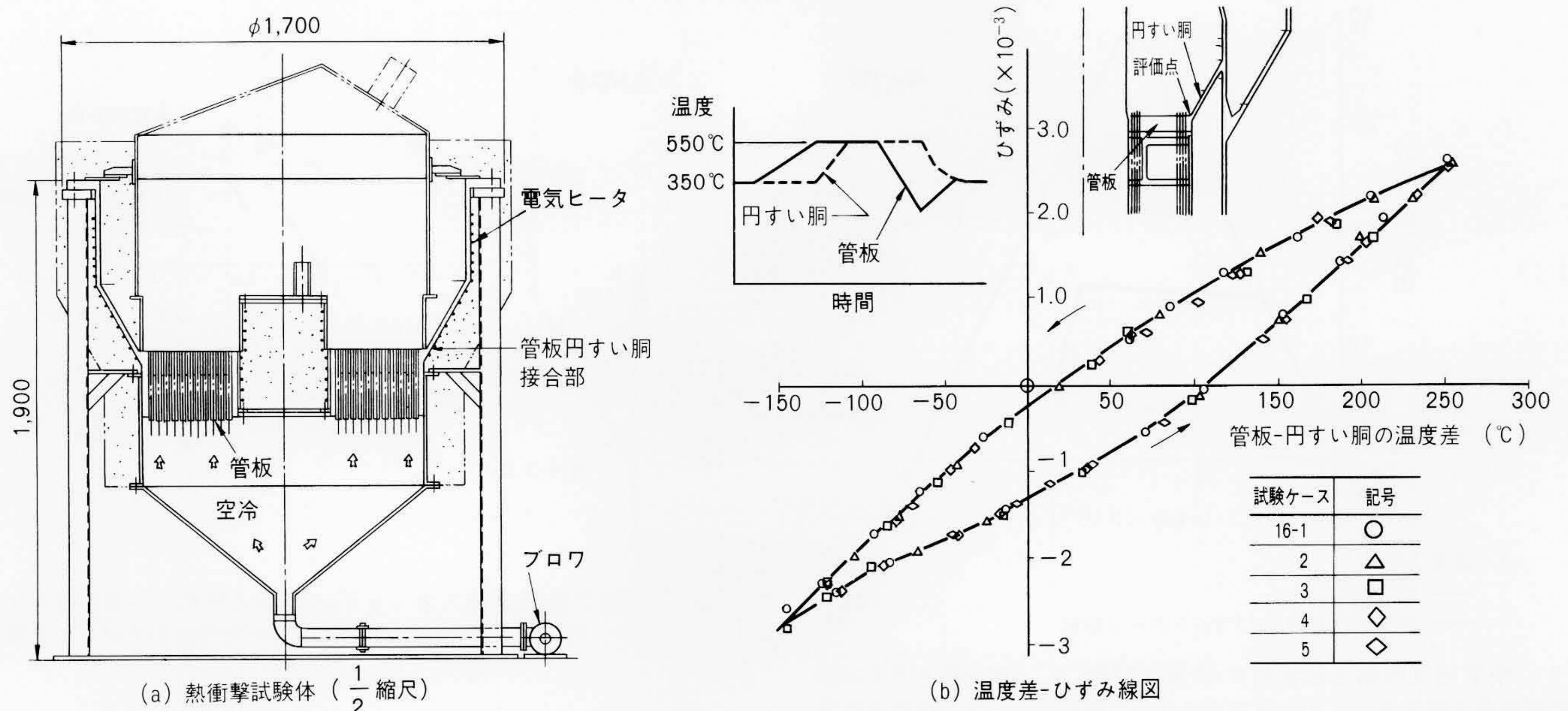


図6 中間熱交換器上部管板の熱衝撃試験 $\frac{1}{2}$ 縮尺モデルに対し、電気ヒータによる加熱および空気冷却による熱衝撃を繰り返し負荷し、進行性変形が発生しないことを確認した。

た。約 4×10^4 回の繰り返し負荷試験によっても、異常はまったく見られなかった。

(3) 伝熱管の軸圧縮座屈試験

約3,300本の直管の伝熱管は、上部管板と下部管板の間に固定されるため、伝熱管群内で相対的に温度差が生じると温度の高い伝熱管には軸圧縮力が負荷され、座屈することが考えられる。このため、実機と同一仕様の伝熱管を用いた座屈試

験および弾塑性大変形クリープ解析により座屈限界を把握するとともに、伝熱・流動解析により求めた伝熱管相互の温度差と比較し、座屈が発生しないことを確認した。伝熱・流動解析の妥当性は過渡時も含むナトリウム流動試験で確認した。

3.3.3 非弾性解析技術

中間熱交換器は、材料のクリープ温度領域で運転され、ナトリウムの温度変化による応力は一部材料の弾性挙動領域を超え、非弾性領域(弾塑性クリープ領域)まで使用されることもある。しかし、この挙動を詳細に把握するための非弾性解析は計算時間、作業量などの点から通常の設計ではあまり用いられず、容易な弾性解析結果に十分な安全係数を見こんで非弾性挙動を推定する手法を用いる。しかし、強度的に重要な部分については、より正確な評価が期待できる非弾性解析を活用することは効果的であり、上部管板と支持スカートには非弾性解析を積極的に採用した。

上部管板の非弾性解析結果の一部を図8に示す。これは、先の図6に示した上部管板と円すい胴との接合部で実機最大荷重および最大保持時間を条件として、弾塑性クリープ解析を行ったものである。評価点での非弾性ひずみの集中は小さく、弾性追従の程度が小さいことを示している。

一方、支持スカートでは、図9に示すように、高温での保持開始時の初期応力(熱荷重により生じた残留応力)が 4 kg/mm^2 以下と降伏応力に比べ十分に小さいことから、クリープ損傷も十分に小さいことを明らかにし、構造の健全性を確認した。

4 中間熱交換器の製作

4.1 製作上の特徴

中間熱交換器は、最内層のナトリウムのドレン管を含め5

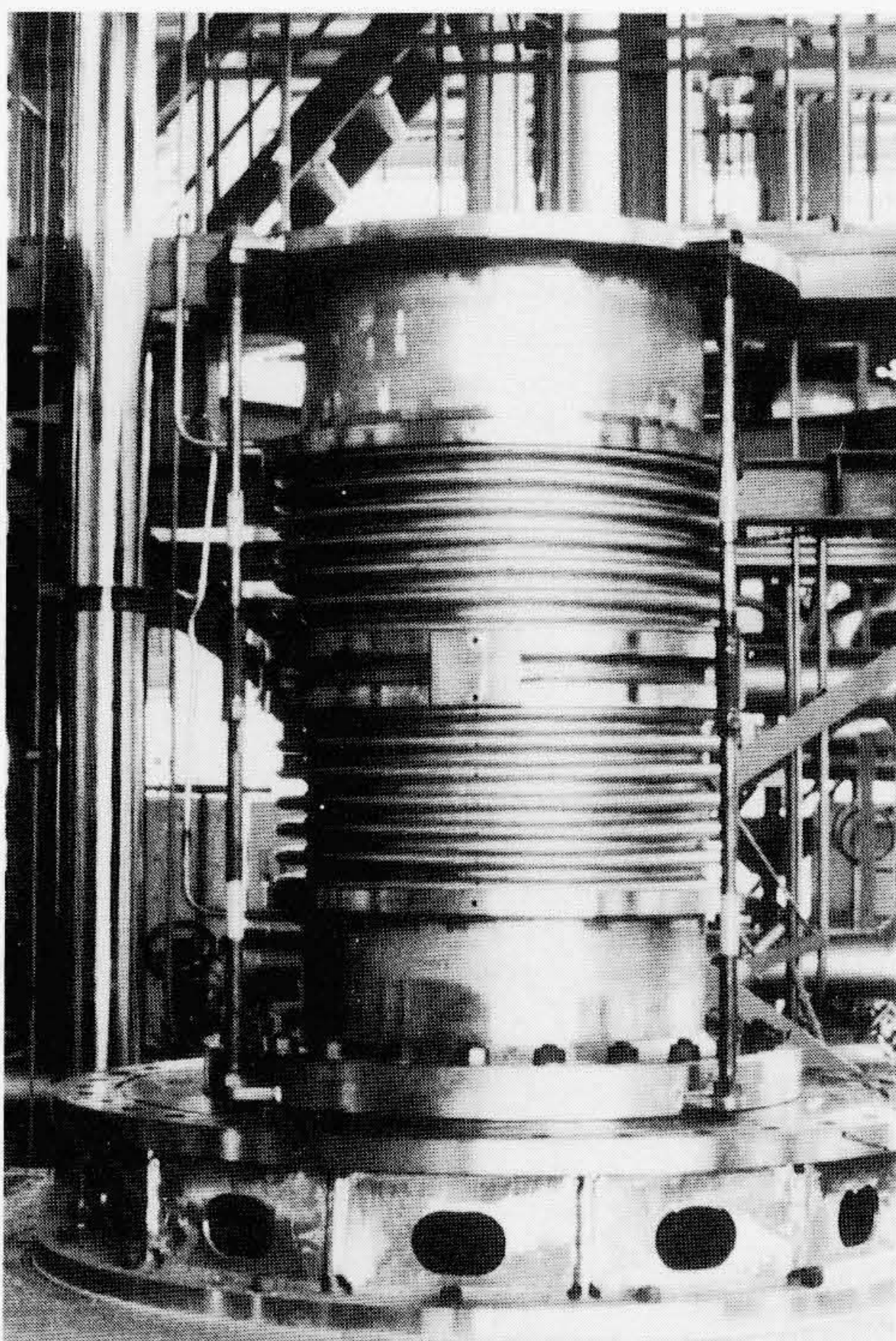
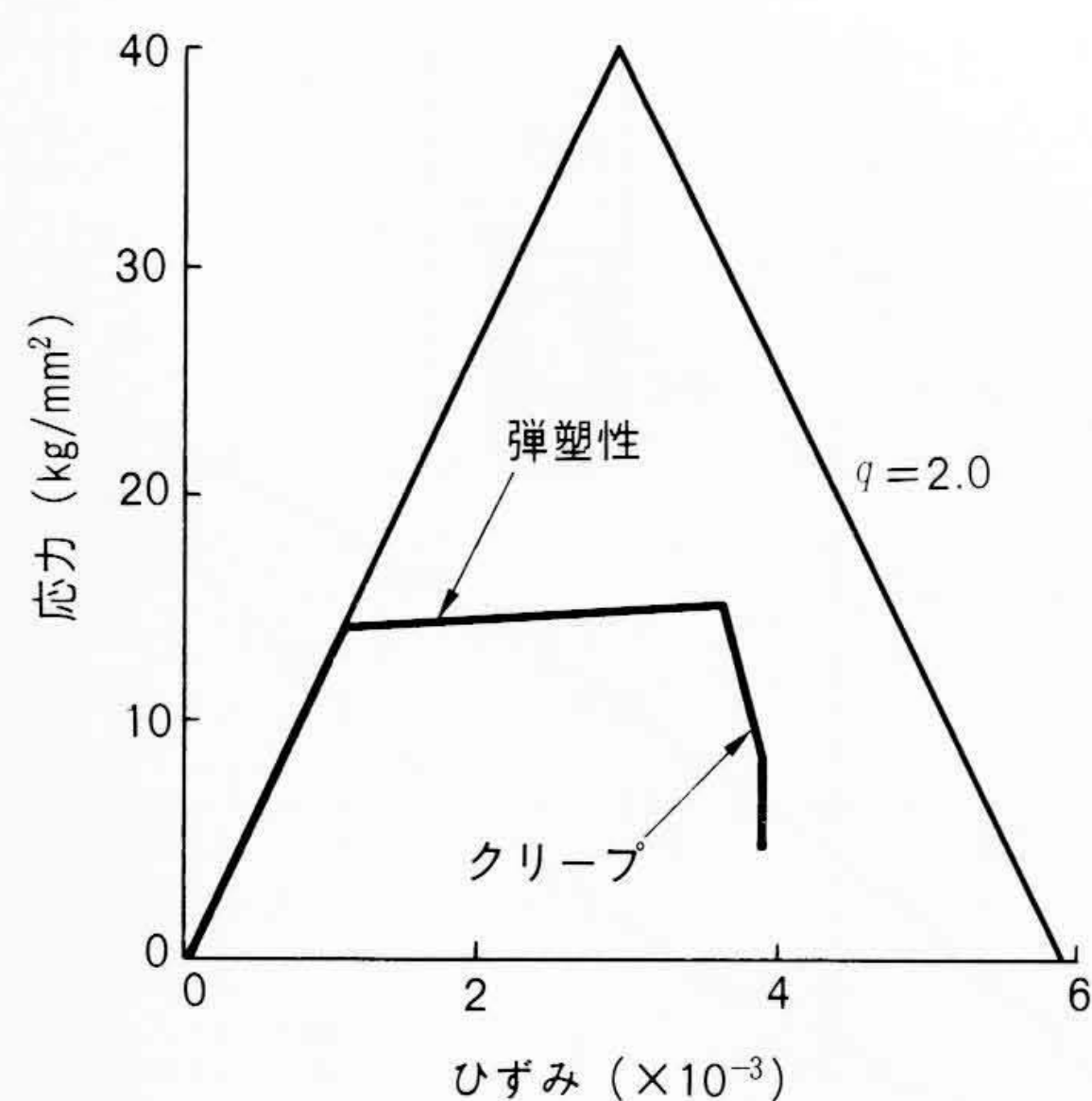


図7 中間熱交換器上部ペローズの疲労試験 上部ペローズは、厚さ1.5 mmのステンレス鋼板を2枚重ねて直径約700 mmに成形したもので、上下2ブロックに分かれて熱変位を吸収する。



注：温度 529℃

— 解析結果
— 弾性追従係数 q が2.0以下のとき挙動

図8 中間熱交換器上部管板の非弾性解析 上部管板と円すい胴接合部の最大熱荷重に対する弾塑性クリープ解析によって、弾性追従係数 q が2.0より小さいことを確認した。

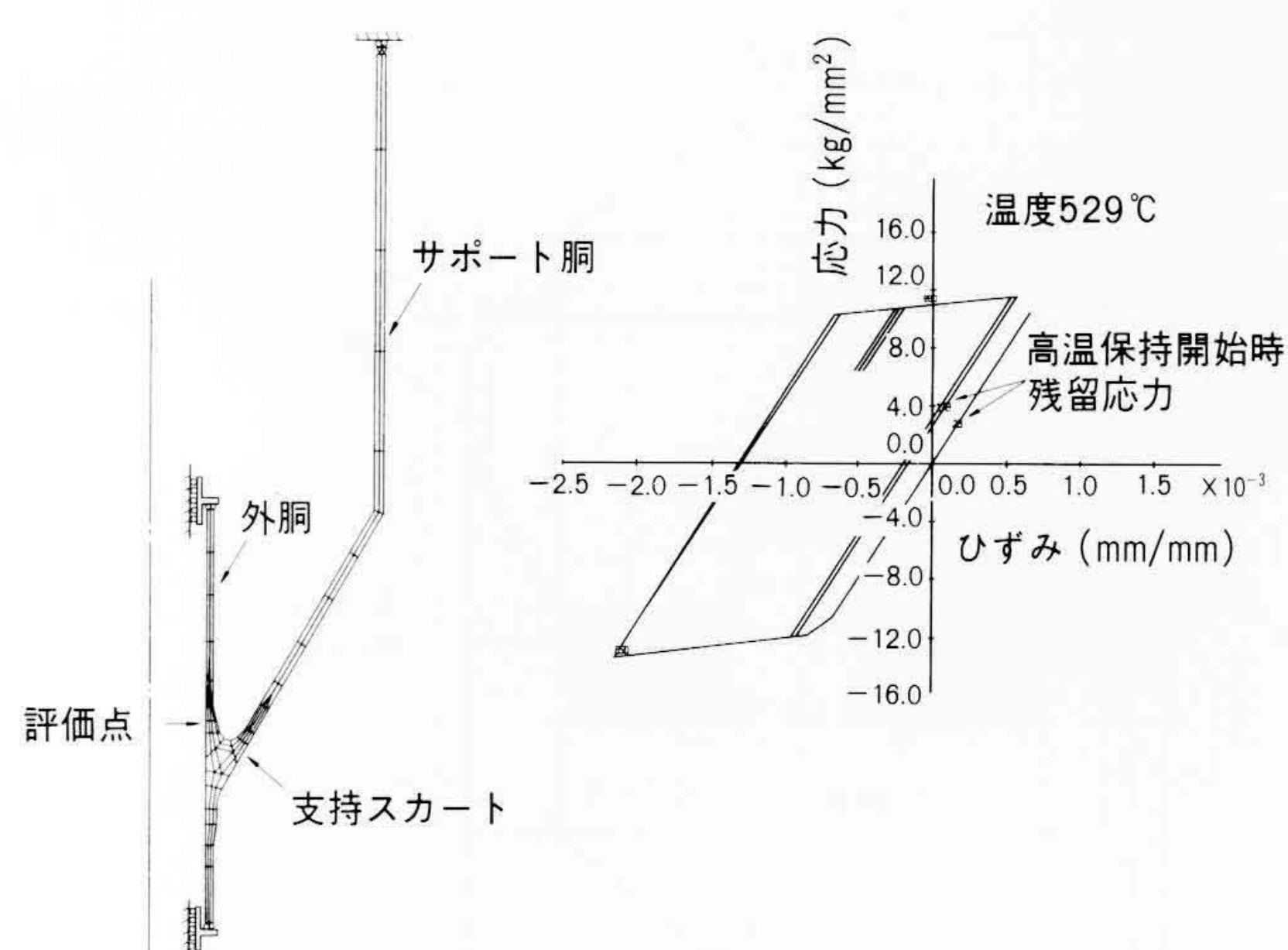


図9 中間熱交換器支持スカート部の非弾性解析 弾塑性クリープ解析により、残留応力によるクリープ損傷が十分に小さいことを確認した。

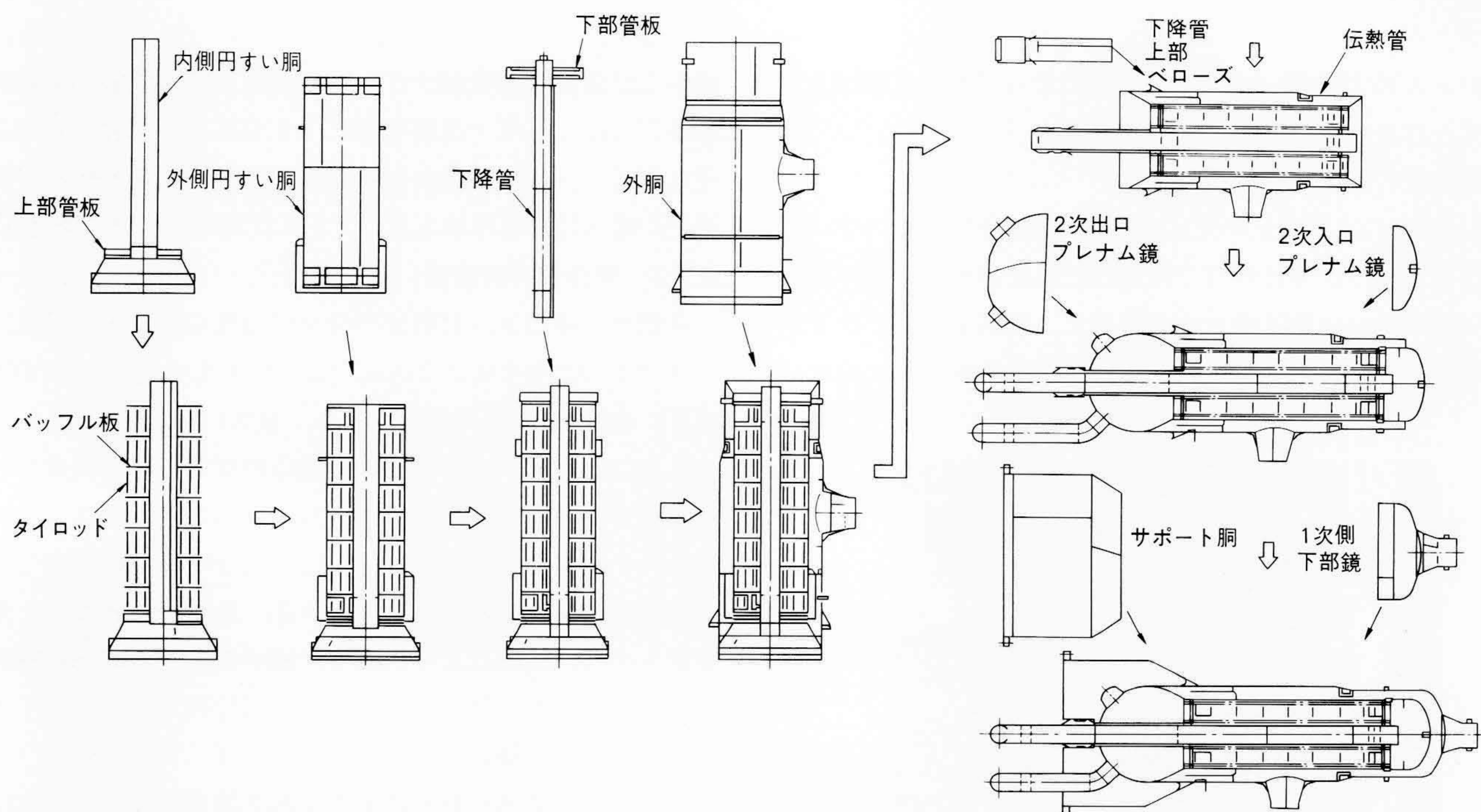


図10 中間熱交換器製作手順 中間熱交換器の製作手順を示す。中間熱交換器製作上、適切な製作手順の選定は重要なポイントである。

層のシェルから構成される。製作手順を図10に示す。内側シュラウド、外側シュラウドなどの伝熱管管束部品を単品で製作し、順次組み込み、上部管板、下部管板を溶接した後、伝熱管を挿入し管-管板溶接を行う。次に、2次出口プレナム鏡、2次入口プレナム鏡の溶接取り付けを行い、最後に1次側の下部鏡、サポート胴を取り付ける。

中間熱交換器の製作上の特徴として、次のことが挙げられる。

(1) 従来の軽水炉プラント用熱交換器に比べ、強度および流動均一化の観点から非常に高い組立精度を実現する伝熱管管

束の製作・組立技術の採用

(2) 低入熱、低ひずみおよび良好な高温クリープ特性の高品質溶接法の採用

(3) 温度、湿度が管理されたステンレス製品の専用製作工場での製作・組立実施

(4) 軽水炉プラントで実績のある品質管理体制をもとに、「もんじゅ」の特徴を取り込んだ品質管理の実施

これらのうち、伝熱管管束の製作と高品質溶接技術について以下に紹介する。

4.2 伝熱管管束の製作

伝熱管管束は、1次ナトリウム流量分布の均一化のため、組立部品の相互間の寸法公差を厳しく抑え、高精度の組立技術をもって製作した。この製作精度を確保するため、内側シュラウドの外側、外側シュラウドの内面およびバッフル板の内径・外径は精度の高い機械加工を行い、薄肉大口径のこれらの円筒の機械加工に当たっては、変形を防止するために万全の対策をとった。また、内側シュラウドと上部管板および2次側の下降管と下部管板の溶接は、積層手順をくふうした溶接法を採用するとともに、真直度の確保、自重による変形防止および開先合わせ作業などを容易にするため、伝熱管管束はたて置き組立法を採用した。主要部材が組み立てられた後の伝熱管の挿入は、横置きで実施し、これらのくふうにより、要求されるすべての寸法を公差内に収めることができた。

伝熱管管束の組立および完成後の状況を図11に示す。

4.3 高品質溶接技術

胴体、シュラウドなどの周および長手継手の溶接には、狭開先ホットワイヤティグ溶接を適用した。本溶接法は狭開先化により1層1パス溶接とし、低ひずみで、かつ高効率溶接を可能にするとともに、ホットワイヤ化によって単位時間当たりの溶着量の増加を図ったものである。狭開先ホットワイヤティグ溶接法と開先形状を図12に示す。狭開先自動ティグ溶接装置は、その目的に応じて図13に示すものを用いた。

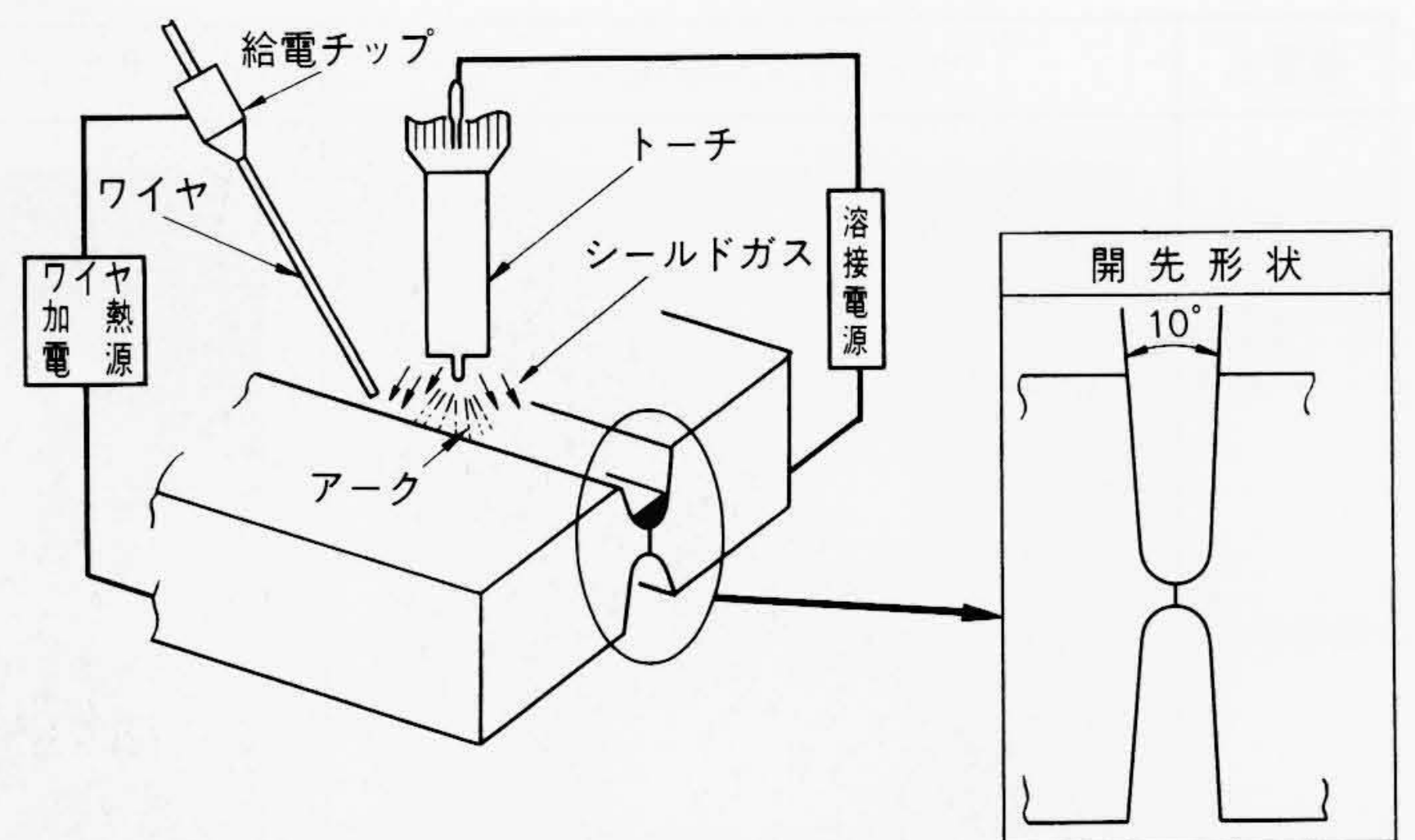
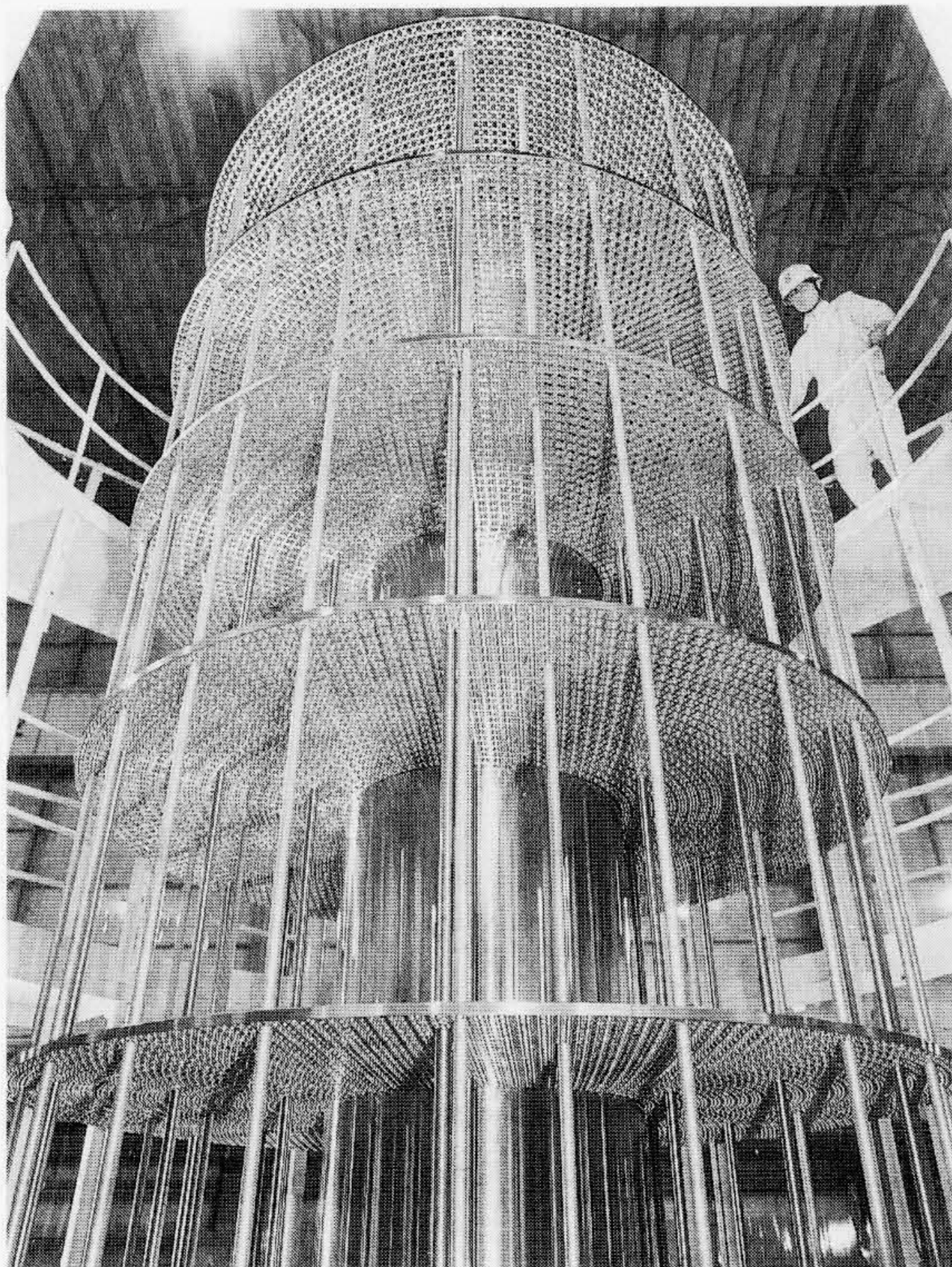


図12 狭開先ホットワイヤティグ溶接 中間熱交換器の溶接に使用された狭開先ホットワイヤティグ溶接の溶接方法と開先形状を示す。低ひずみで高効率の溶接が可能となる。

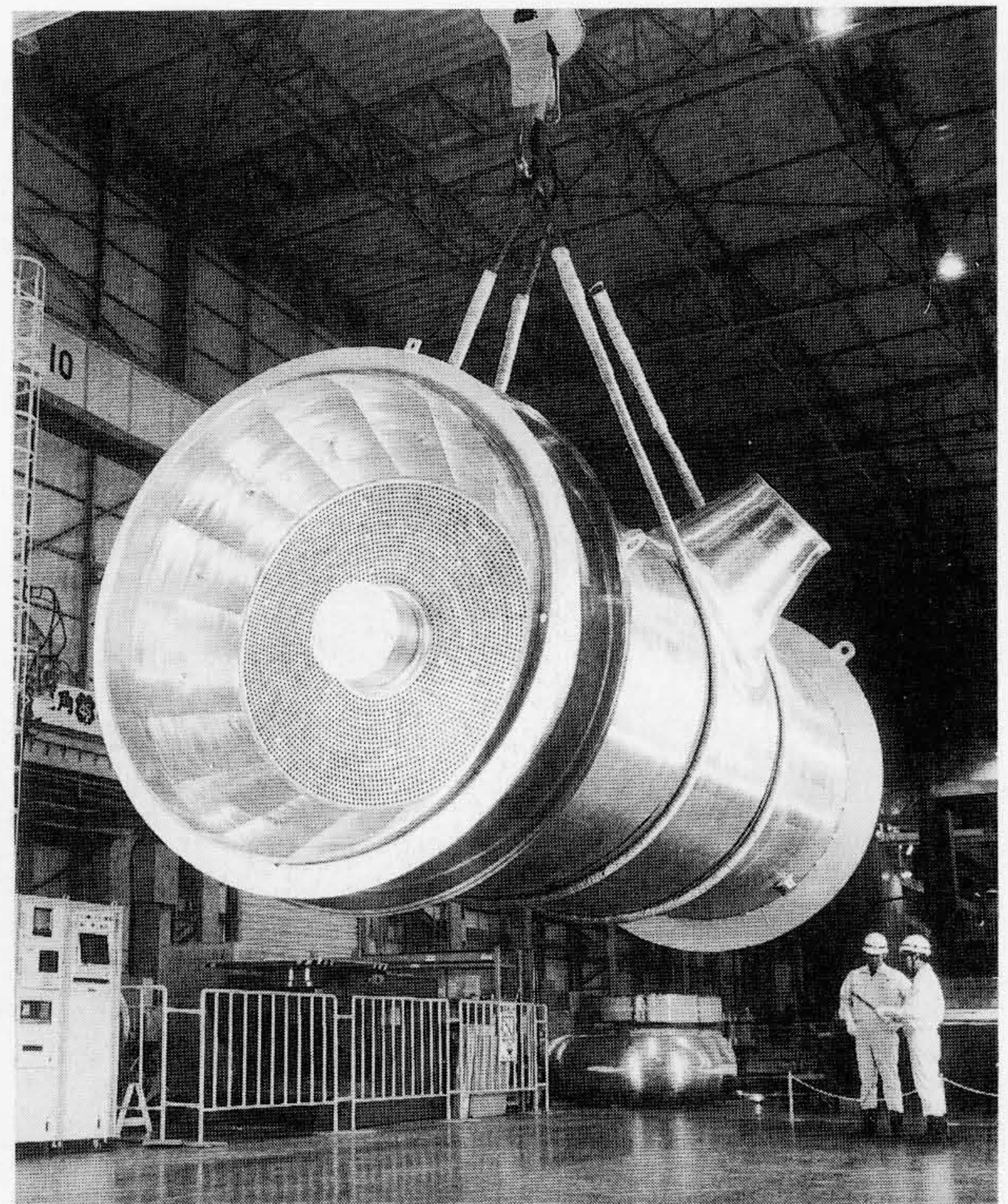
ウェルディングセンタは、ターニングテーブルと狭開先自動ティグ溶接装置を搭載したマニプレータを組み合わせたものであり、胴体をたて置きした状態で周および長手継手の連続自動溶接が可能である。

レールタイプ自走式狭開先溶接装置は、2次入口プレナム鏡の溶接など、伝熱管管束組立後の横置き状態で使用した。

画像処理溶接制御装置は、溶融池の温度分布を詳細に把握し、これを画像処理することによって溶接トーチ位置と溶接入熱を、リアルタイムで制御する溶接制御システムである。赤外線カメラで検出した溶融池熱画像をコンピュータで処理



(a) 伝熱管管束組立(バッフル板組立)



(b) 伝熱管管束完成

図11 中間熱交換器製作状況 伝熱管管束の組立で、バッフル板組立と伝熱管管束完成後の外観を示す。

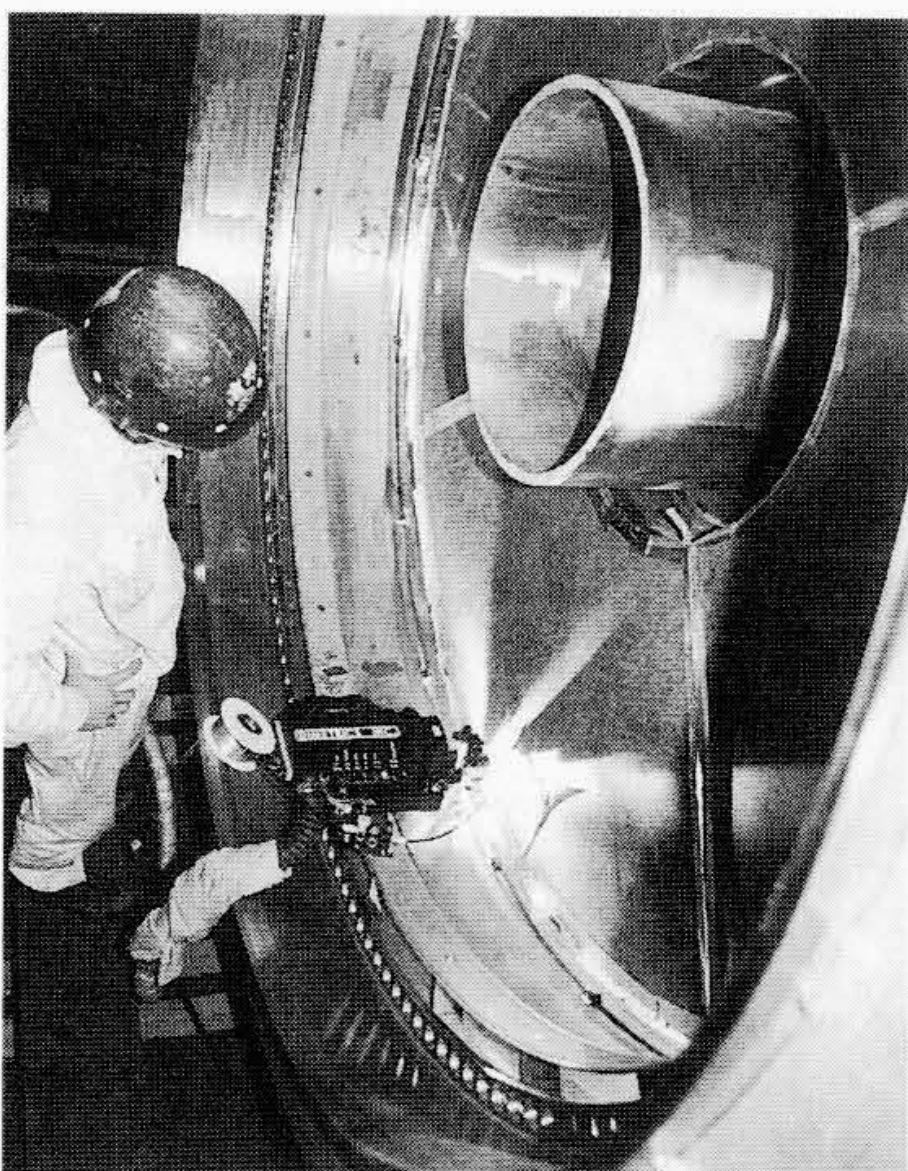
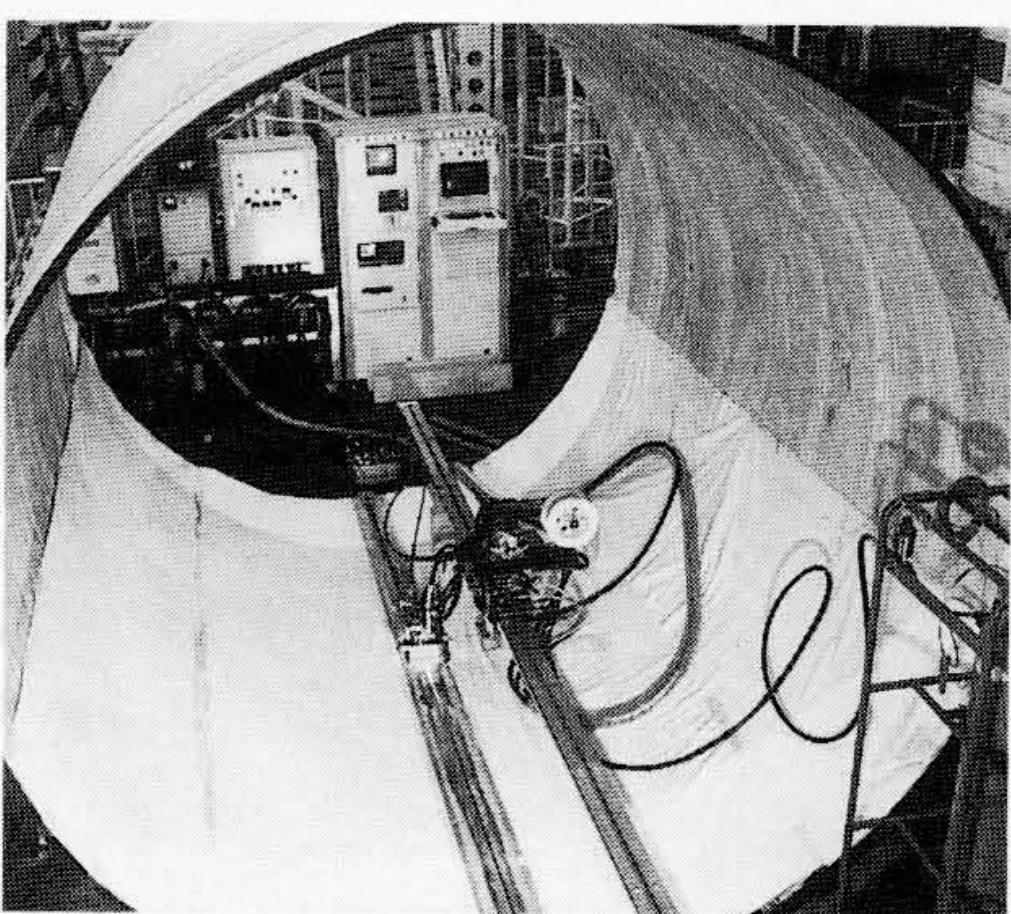
装置名	ウェルディングセンタ	レールタイプ自走式狭開先溶接装置	画像処理溶接制御装置
溶接状況			
特 徴	●大物製品の回転による周および長手 継手溶接可能 ●連続自動溶接	全姿勢溶接が可能	●溶接トーチ位置および溶接入熱をリアル タイムで自動制御

図13 狭開先自動ティグ溶接装置 溶接継手の種類および姿勢により、新技術の狭開先自動ティグ溶接法が適用されている。

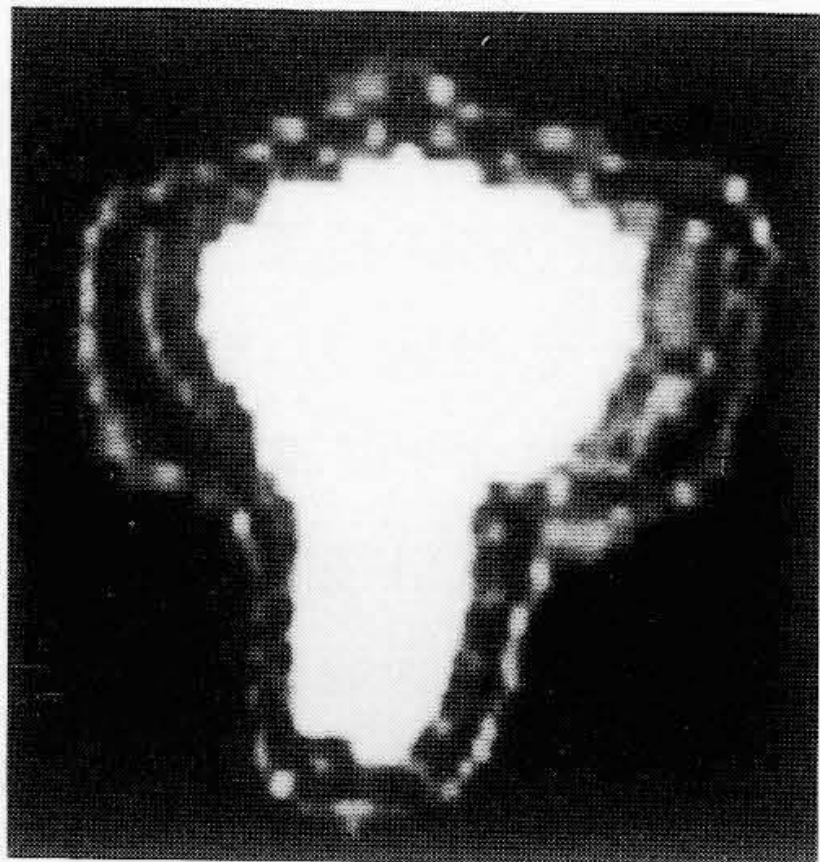


図14 赤外線カメラによる溶融池熱画像(等温度画像表示) 画像処理溶接制御システムは、画像の形状や大きさから溶接トーチ位置および溶接入熱を制御する。

し、画像の形状、大きさから溶接トーチ位置および溶接入熱を制御するものである。本溶接システムによる処理画像を図14に示す。

これらの溶接技術は、日立製作所で製作した他の「もんじゅ」用大型ステンレス鋼製設備(1次主冷却系中間熱交換器ガードベッセルおよび循環ポンプガードベッセル、オーバフロータンクなど)にも採用された。

伝熱管挿入後の管-管板溶接は、同一溶接条件で安定した品質が得られる自動ティグ溶接を採用した。溶接順序は、溶接による収縮変形を均一化するため、管板を数領域に分割し、対角および内外領域を交互に溶接する方法で行った。

5 結 言

「もんじゅ」1次主冷却系中間熱交換器の研究開発、設計および製作の概要について述べた。

中間熱交換器は、平成元年6月にC号機およびB号機が、続

いて7月にA号機が日立製作所日立工場で完成し、「もんじゅ」サイトに据え付けられた。今後は、配管との接続、予熱・保温設備の設置、さらには機能試験、性能試験へと進められ、信頼性の高いプラントを目ざしていっそうの努力を続けている。

また、「もんじゅ」中間熱交換器のために開発された多くの技術は、高速増殖実証炉の開発に有効に活用されている。

参考文献

- 1) 野本, 外: 高速実験炉「常陽」原子炉容器および1次冷却系の建設, 日立評論, 59, 12, 1001~1006(昭52-12)
- 2) B. Lubarsky, et al.: Review of Experimental Investigation of Liquid-Metal Heat Transfer, NACA TN3336
- 3) Y. Nakagawa, et al.: Research and Development of Intermediate Heat Exchanger for “Monju”, 5th International Conference on Pressure Vessel Technology, San Francisco, 1984, 9.
- 4) 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”, Genova, Nov.-Dec. (1981)
- 5) 上野, 外: 直管の伝熱管に対する弾塑性クリープ座屈の検討, 日本機械学会日立地方講演会(昭58-10)
- 6) Y. Nakagawa, et al.: Buckling Evaluation of Components for Fast Breeder Reactor “Monju”, International Atomic Energy Agency, Specialist’s Meeting on Advances in Structural Analysis for LMFBR Applications, Paris, Oct. 1982.
- 7) Y. Nakagawa: Tube Sheet Structural Analysis of Intermediate Heat Exchanger for Fast Breeder Reactor “Monju”, ditto.