

# 高速増殖炉用熱交換器における管-管板溶接構造の開発

## Development of a New Tube-to-Tubesheet Welding Type for FBR's Heat Exchangers

液体金属冷却高速増殖炉のうちで、中間熱交換器は、原子炉で発生した熱を伝達する放射化された一次ナトリウムと、蒸気発生器に熱を伝達する二次ナトリウムとの熱交換を行なう重要な機器であり、世界各国ともその開発に重点をおいている。この熱交換器を主な対象とした管-管板溶接法として、日立製作所では、低コスト・短納期で信頼性も高く、かつ保守・補修性の良い溶接施工法を確立することを目的とし、伝熱管をその肉厚と同じ程度管板に差し込み、これを内面より自動TIG溶接機により完全溶け込み溶接を行なう一部差込み型溶接継手を開発した。またこの溶接施工法の開発と同時に、溶接継手の健全性を確認するための非破壊検査技術の開発を行なうとともに、溶接継手の信頼性を確認するために各種短時間強度試験及び長時間強度試験を実施し、満足すべき結果を得、実機への適用が可能であることを確認した。本稿は、この一部差込み型管-管板溶接法の開発の概要について述べるものである。

間瀬矩章\* Mase Noriaki  
河原 愈\* Kawara Masaru  
柴藤英造\* Shibato Eizô  
柏倉功次\* Kashiwakura Kôji

### 1 緒 言

将来の原子炉として、最近国内外で高速増殖炉の開発が精力的に進められており、イギリス、フランス及びソ連では既に原型炉が運転されている。我が国では、昭和52年5月に高速実験炉「常陽」が臨界に達し、続いて現在高速増殖原型炉の

開発が進められている。

高速増殖炉の冷却系は、図1<sup>1)</sup>に示すように原子炉容器、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及び二次ナトリウムと水-蒸気との熱交換を行なう蒸気発

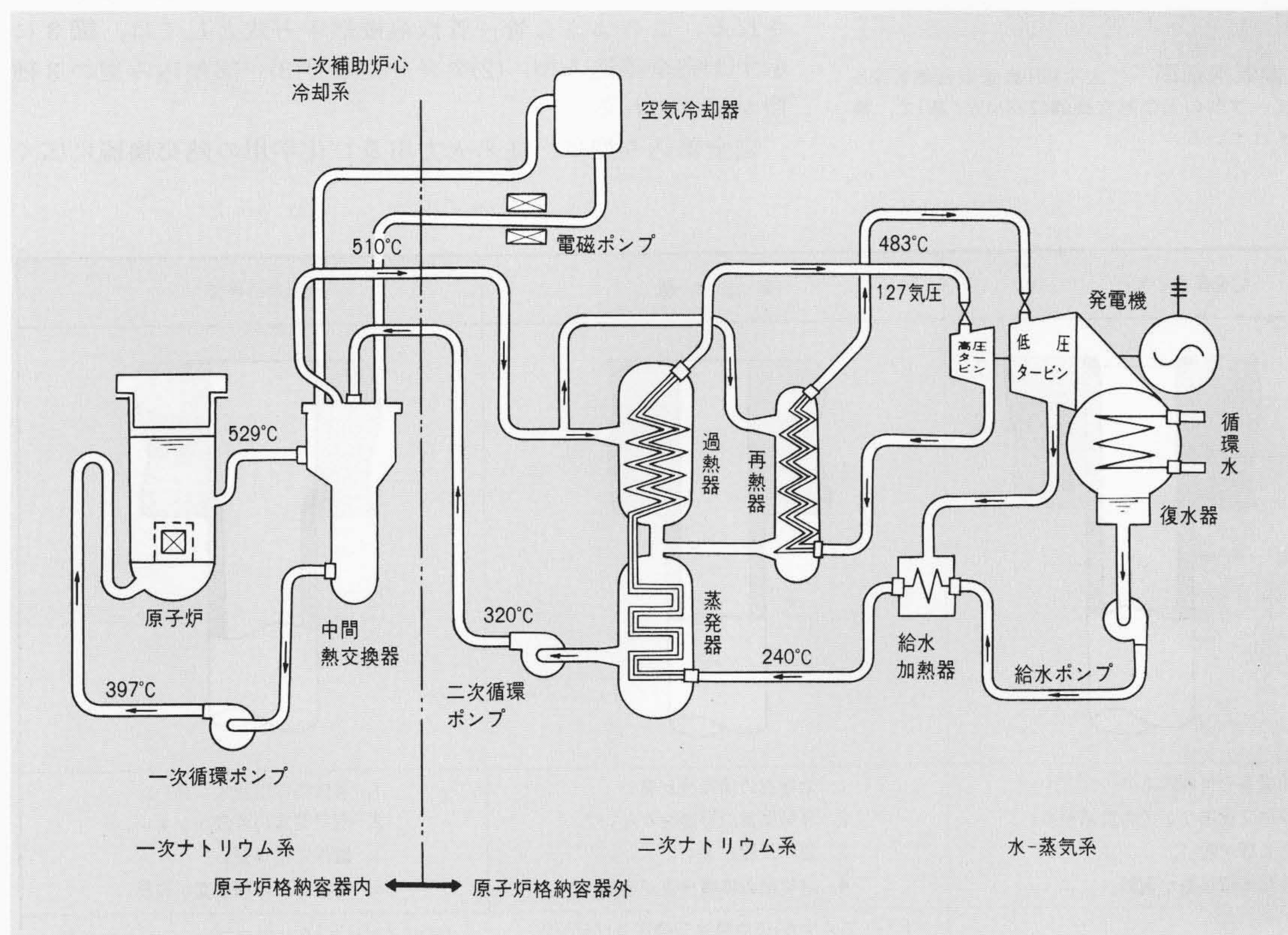


図1 高速増殖炉主系統概略図 この図は我が国の高速増殖原型炉主系統図を示すもので、中間熱交換器は、原子炉で発生した熱を一次冷却材から蒸気発生器を循環している二次冷却材に伝える機器であり、高温ナトリウム環境下で長期にわたり、その性能及び構造の信頼性を保証することが要求される。

\* 日立製作所日立工場

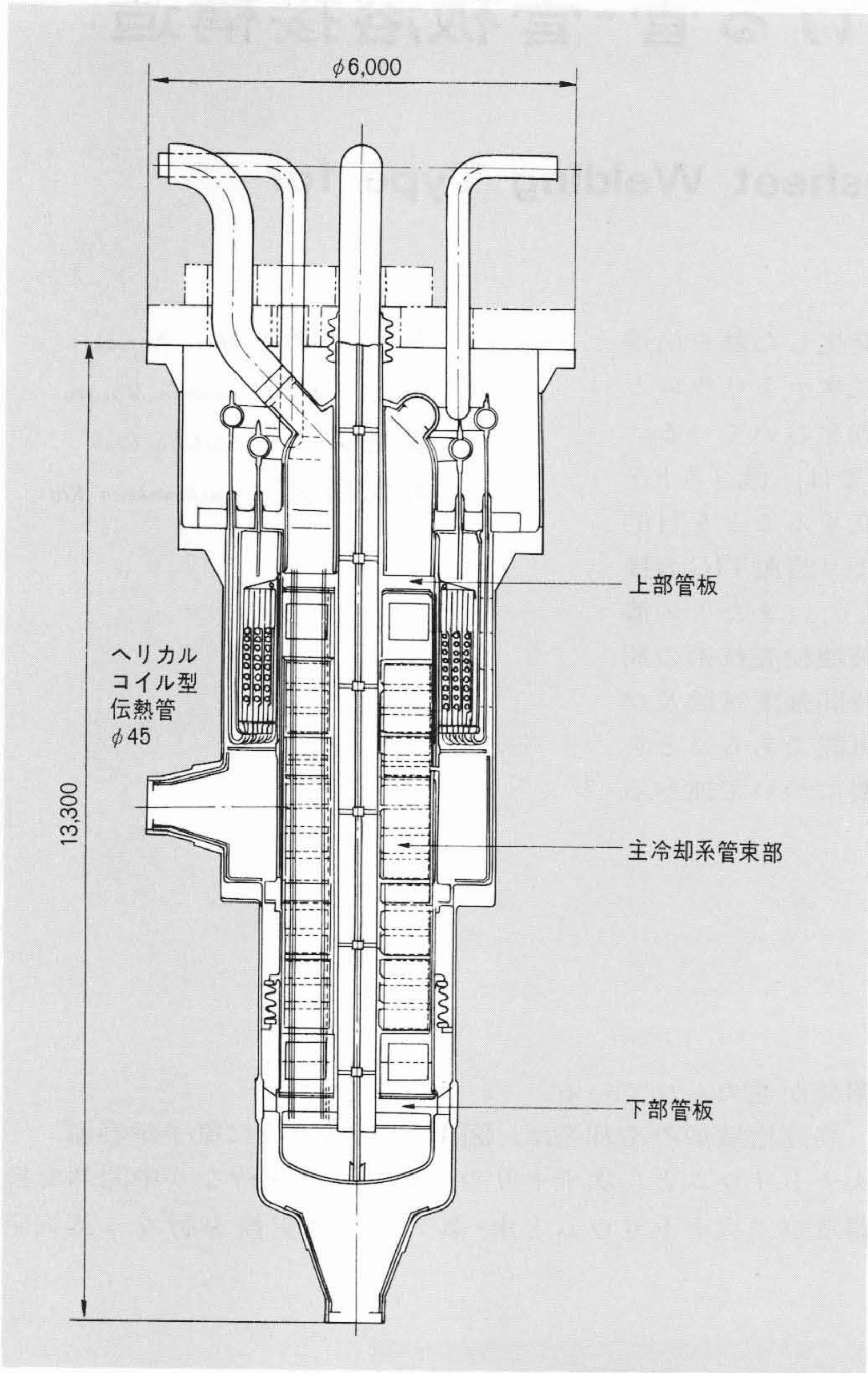


図2 高速増殖炉用中間熱交換器構造図 主冷却用直管型伝熱管束を内蔵した縦置シェル・アンド・チューブ型の大型熱交換器(238MW/基)で、高速増殖原型炉「もんじゅ」用に計画されている。

生器などの主要機器から構成されている。これらの機器は、高速増殖炉特有の高温ナトリウム環境下で長期にわたり、その性能及び構造の信頼性を保証することが要求される。このうち中間熱交換器は、シェル・アンド・チューブ型熱交換器であり、実証炉、商用炉級へとプラント出力が増大するに伴い本熱交換器も大型となり、伝熱管員数、管板サイズも大幅に増加する。このため、管－管板溶接部は構造の信頼性及び製造工程に大きく影響を与える。これを改善するために、溶接部の信頼性が高く、しかも低コスト、短納期が可能な管－管板溶接として、伝熱管をその肉厚と同じ程度管板に差し込み、これを内面より自動TIG溶接機により完全溶け込み溶接を行なう方法を開発した。また同時に、本溶接施工法による溶接継手の信頼性を確認するため、短時間強度及び長時間強度評価試験を実施した。各種試験の結果、短時間強度及び長時間強度については溶接継手として満足すべき性能が得られていることを確認し、実機への適用が十分可能であることを確認した。また、この溶接施工法の開発で必要な非破壊検査技術についても開発を行ない、実機に適用できる新しい技術確立した。これらの技術開発に引き続き、実機へ適用するための溶接トーチ位置決め、溶接作業の短縮など製造上の能率向上を考慮した設備の開発など、総合的な開発を実施中である。次にこの一部差込み型管－管板溶接法の開発の概要について述べる。

2 管－管板溶接法

高速増殖炉用熱交換器は、一般にシェル・アンド・チューブ型構造が採用される例が多い。一例として、中間熱交換器の構造例を図2<sup>1)</sup>に示す。本構造では直管型の伝熱管が上部管板及び下部管板に溶接されており、本溶接部は一次ナトリウムと二次ナトリウムの境界を構成するため高い信頼性が要求される。このような管－管板溶接継手方式としては、図3に示す(1)完全差込み型、(2)突合せ型及び(3)一部差込み型の3種類が挙げられる。

完全差込み型は、従来火力用及び化学用の熱交換器に広く

| 形状・他<br>タイプ   | 完全差込み型                                                                 | 突合せ型                                                                | 一部差込み型                                                              |
|---------------|------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| 管－管板溶接部<br>形状 |                                                                        |                                                                     |                                                                     |
| 特 徴           | 1. 隙間腐食の可能性あり。<br>2. 一般熱交換器などでの実績が多い。<br>3. 製作工程が短い。<br>4. 溶接部体積検査が困難。 | 1. 溶接部の信頼性が高い。<br>2. 隙間腐食の可能性がない。<br>3. 製作工程が長い。<br>4. 溶接部の体積検査が容易。 | 1. 溶接部の信頼性が高い。<br>2. 隙間腐食の可能性がない。<br>3. 製作工程が短い。<br>4. 溶接部の体積検査が容易。 |
| 採 用 例         | 一般の熱交換器                                                                | FFTF(アメリカ)の中間熱交換器及び50MW<br>蒸気発生器(日本)                                | PFR(イギリス)及びSNR(西ドイツ)の中間熱<br>交換器並びに蒸気発生器                             |

図3 管－管板溶接継手形状 熱交換器の管板と伝熱管の代表的溶接継手形状を示す。このうち一部差込み型は、隙間腐食の可能性がないことなど、溶接部の信頼性及び製造工程上優れている。

採用されてきた方式で、製作、組立が容易であるが、構造上溶接部の放射線透過試験、超音波探傷試験などによる内部欠陥の検出が非常に困難なため、溶接部健全性の確認が難しい。また、場合によっては管と管板との隙間部での腐食が原因で、溶接部に問題が生ずる可能性が皆無とはいえない。

突合せ型は、高速増殖炉用蒸気発生器で広く採用されており<sup>2),3)</sup>溶接部内部欠陥検出のための非破壊検査が可能であり、かつ腐食の原因となる管と管板との隙間をなくした方式で、溶接部の健全性を確認することができる反面、構造上管板に伝熱管突合せ用の突起部を設ける必要があり、中間熱交換器のように伝熱管本数が多い場合、製作工程が大幅に増加する。

一部差込み型は、突合せ型に必要な管板の突起部をなくし、かつ溶接部に対して放射線透過試験、超音波探傷試験などによる体積検査が実施できる方式で、完全差込み型のように隙間がないため信頼性が高くなる。この溶接法の実施例としては、イギリスの高速増殖原型炉“PFR”用中間熱交換器及び蒸気発生器<sup>4)</sup>に採用され現在運転中であり、また西ドイツの高速増殖原型炉“SNR-300”用中間熱交換器及び蒸気発生器<sup>5)</sup>に採用され現在製作中である。

### 3 一部差込み型溶接施工法の確立

前章で記述したように、一部差込み型は隙間腐食の可能性がなく、かつ溶接部の健全性の確認が可能であるため信頼性が高く、しかも製造工程が短期間となる利点を持っているため、長期間にわたって高い信頼性が要求される原子力用熱交換器への適用を目標としてこの溶接法の確立に着手した。

一部差込み型は、構造上溶接部での伝熱管側と管板側の熱容量差が大きいため、管板の十分な溶け込みを得るため入熱量を大きくした場合、管側が広範囲にわたり溶融し、伝熱管の溶け落ちにより穴を生じやすいという問題があり、これを防止するためには管と管板の熱伝導を良好にする必要がある。またトーチの回転精度、トーチ位置、管の差込み深さ、溶接電流などの設定は、良好な裏波ビードを得る上で非常に重要である。これらの溶接条件が溶接ビード形状に与える影響を調べ、適正条件を確立するために、図4に示す手順により試験、検討を行なった。

溶接試験用材料として使用した伝熱管、及び管板の仕様を表1に示す。

溶接は、管内面自動TIG溶接機により行なった。管内面溶接用トーチの外観を図5に示す。この溶接用トーチを図8(a)に示すような形状の溶接試験用ピースの管板側から挿入し、管-管板接合部の外面にバックパージ治具を取り付けた状態で自動TIG溶接を行なった。

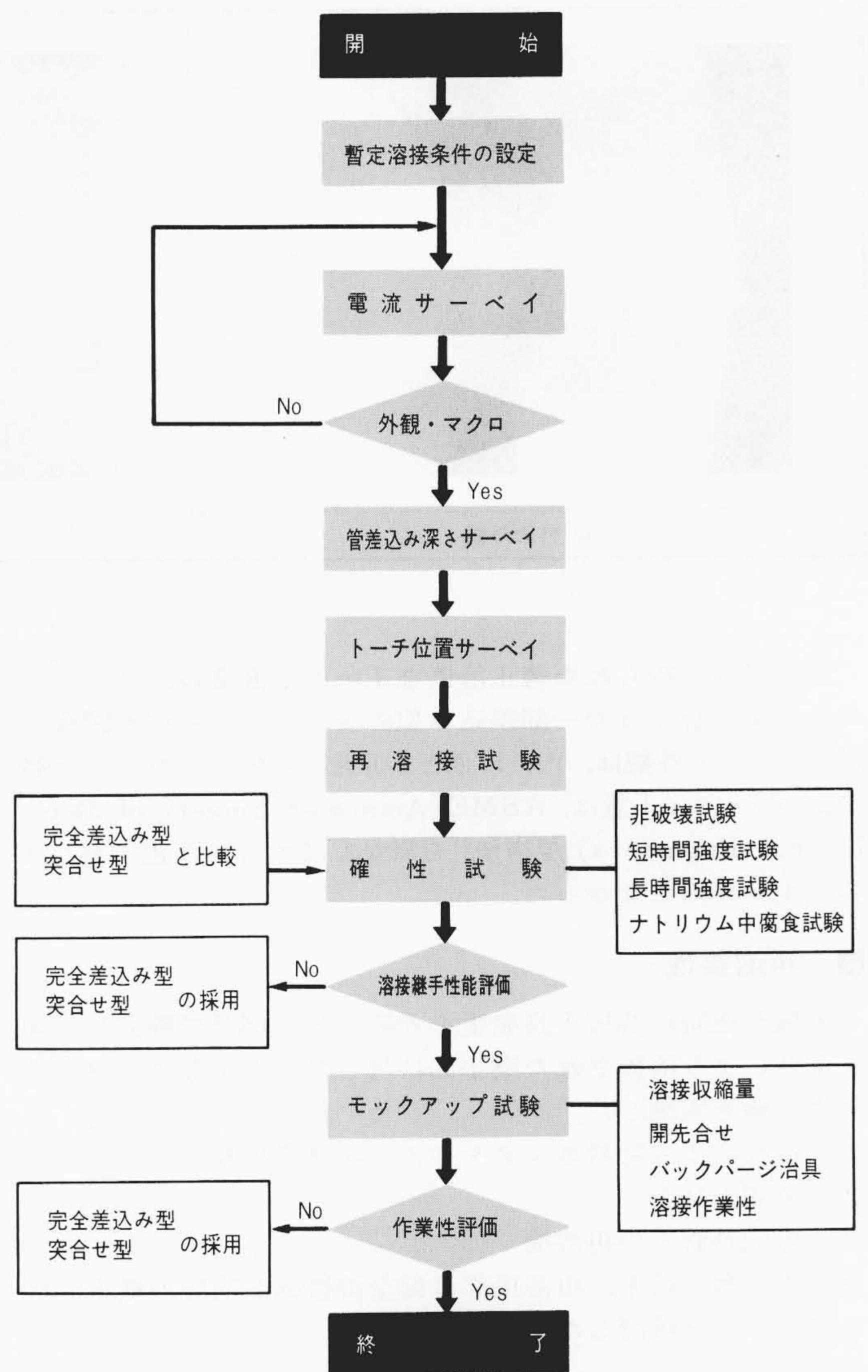


図4 一部差込み型溶接施工法の試験手順 新しい管-管板溶接継手である一部差込み型溶接施工法を開発するに当たり、実施した試験手順を示す。

表1 供試材の仕様 一部差込み型管-管板溶接施工法の開発に当たり使用した伝熱管及び管板の仕様を示す。

| 項 目   | 材 料 の 仕 様                                    |
|-------|----------------------------------------------|
| 伝 熱 管 | JIS G 3463 SUS304HTB<br>( $\phi 21.7/t1.2$ ) |
| 管 板   | JIS G 3214 SUS304                            |

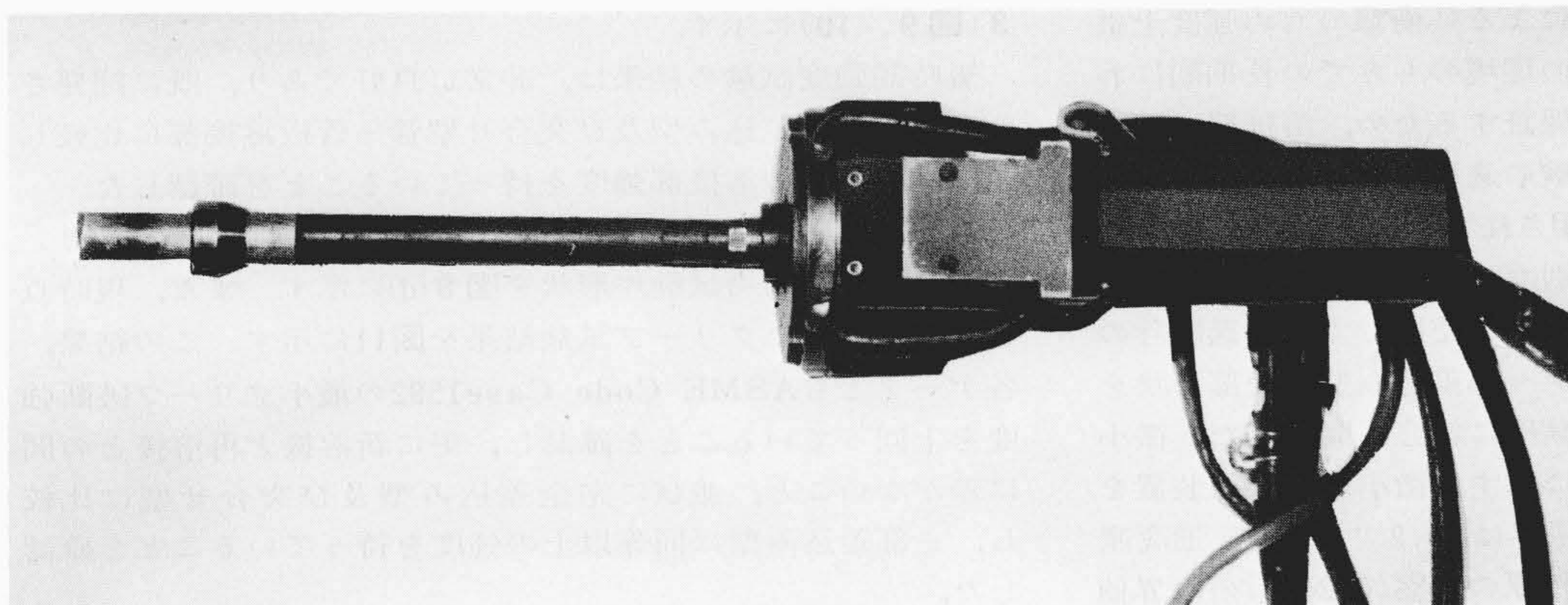


図5 管内面溶接用トーチの形状 この図に示す溶接用トーチを、図8(a)のような試験用ピースの管板側から挿入し、管内面から自動TIG溶接する。

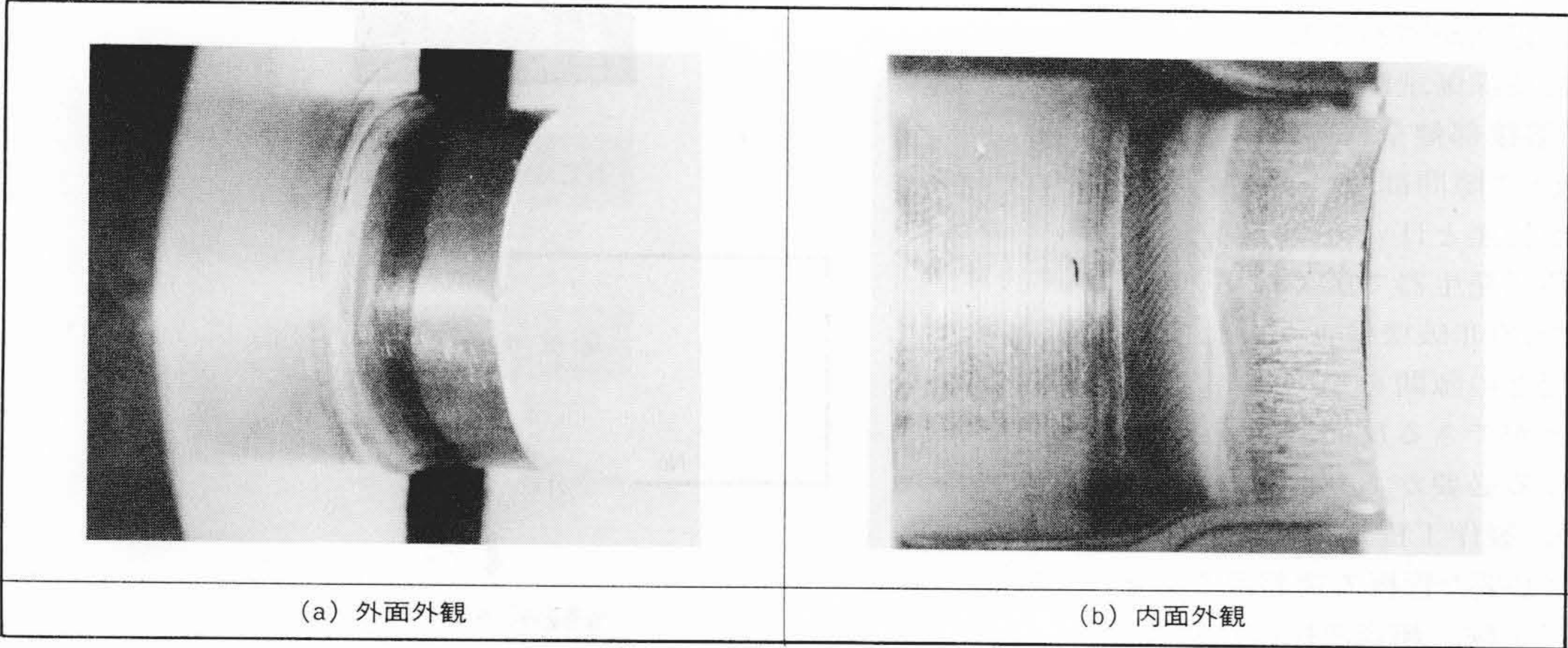


図6 適正溶接施工条件におけるビード外観 表2に示す適正溶接施工条件で得られた溶接ビード内、外面の外観を示す。内、外面とも非常に良好なビード形状が得られている。

この試験で得られた適正溶接施工条件を表2に、また、この条件下で行なった一部差込み型溶接のビード外観を図6に示す。ビード外観は、内、外面とも非常に良好であり、また溶接部のフェライト量は、ASME (American Society of Mechanical Engineers) 規格値<sup>6)</sup>を満足しており、高温割れなどの発生はみられなかった。

4 再溶接性

実機製造時の溶接不良発生を考慮して、前章で確立した適正条件により溶接された継手部に対して次の手順により再溶接性試験を実施した。

- (1) 管板穴より特殊カッタを挿入し伝熱管切断
- (2) 再開先加工
- (3) 新伝熱管との再溶接

以上の試験の結果、再溶接部は健全溶接部と同等の継手形状を得ることを確認した。

5 小形モックアップ試験

実機での管—管板溶接の作業性を検討するため、伝熱管本数10本、管板面間5mの小形モックアップを製作した。試験の結果、伝熱管の開先合せ、バックパージ治具の取付け、溶接部欠陥の発生を想定した場合の溶接部切断及び再開先加工、並びに再溶接が問題なく実施できることが確認された。また、片側溶接後、対面管板穴より開先加工用内面カッタを使用し、管差込み深さが適正值となるように開先加工を行ない、その後、前記と同じ方法により内面溶接を実施し、健全な溶接部が得られることを確認した。

6 管—管板溶接部非破壊検査技術の開発

高速増殖炉用熱交換器の管—管板溶接部は、高温ナトリウムに接しており、これら冷却材による熱衝撃のため強度上厳しい環境下におかれる。これらの環境のもとでの長期間にわたる溶接部の強度上の信頼性を保証するため、溶接部の健全性評価法として、放射線透過試験の適用を検討した。

放射線源として従来から広く使用されているγ線源(<sup>170</sup>Tm)<sup>2~4)</sup>を使用した場合には、十分な識別度は得られなかった。したがって、識別度の高い微小焦点X線を使用して、透過度計の識別度を試験した。フィルムは、一部差込み型溶接部形状を考慮して馬蹄形状のものを本試験用に新しく開発した。微小焦点X線装置による状態を図7に示す。微小焦点X線装置を使用した試験の結果、欠陥検出限界はφ0.2穴であり、通商産業省技術基準<sup>7)</sup>に定められている板厚の20%(0.24mm)の限界値

表2 適正溶接施工の条件 最適ビード外観及び断面形状が得られる溶接施工の条件を示す。溶接方法は、ノンフィラワイヤで内面自動TIG溶接である。

| 項 目        | 仕 様      |
|------------|----------|
| 溶 接 方 法    | TIG溶接    |
| フィラワイヤ     | フィラワイヤなし |
| 溶接電流 (A)   | 70～90    |
| 溶接電圧 (V)   | 15～20    |
| 溶接速度 (rpm) | 3.0      |
| トーチシールドガス  | アルゴン     |
| バックパージガス   | アルゴン     |

を満足しており、実機に適用が可能であることを確認した。また、供用期間中検査を考慮して、超音波探傷試験及び渦電流探傷試験技術を目下開発中である。

7 管—管板溶接継手性能の検討

管—管板溶接継手性能を確認するため、各種の強度評価用新溶接及び再溶接の試験片を製作し、評価試験を実施した。強度試験は、短時間強度試験と長時間強度試験に分類され、短時間強度試験は、(1)金属組織観察試験、(2)硬さ試験、(3)曲げ試験、(4)引張試験(常温及び高温試験)から成り、また長時間強度試験は、高速増殖炉特有の高温長時間運転環境での健全性確認を目的として、(5)クリープ試験などから成る。

7.1 短時間強度試験

金属組織観察試験用、硬さ試験用、曲げ試験用及び引張り試験用試験片の形状を図8[(a) (b) (c)]に、また試験結果を表3(図9、10)に示す。

短時間強度試験の結果は、非常に良好であり、既に開発されている完全差込み型及び突合せ型管—管板溶接部に比較して、同等以上の溶接部強度を持っていることを確認した。

7.2 長時間強度試験

クリープ試験用試験片形状を図8(d)に示す。また、現時点までに得られたクリープ試験結果を図11に示す。この結果、各データともASME Code Case1592の最小クリープ破断強度を上回っていることを確認し、更に新溶接と再溶接との間に差がないこと、並びに完全差込み型及び突合せ型に比較し、一部差込み型は同等以上の強度を持っていることを確認した。

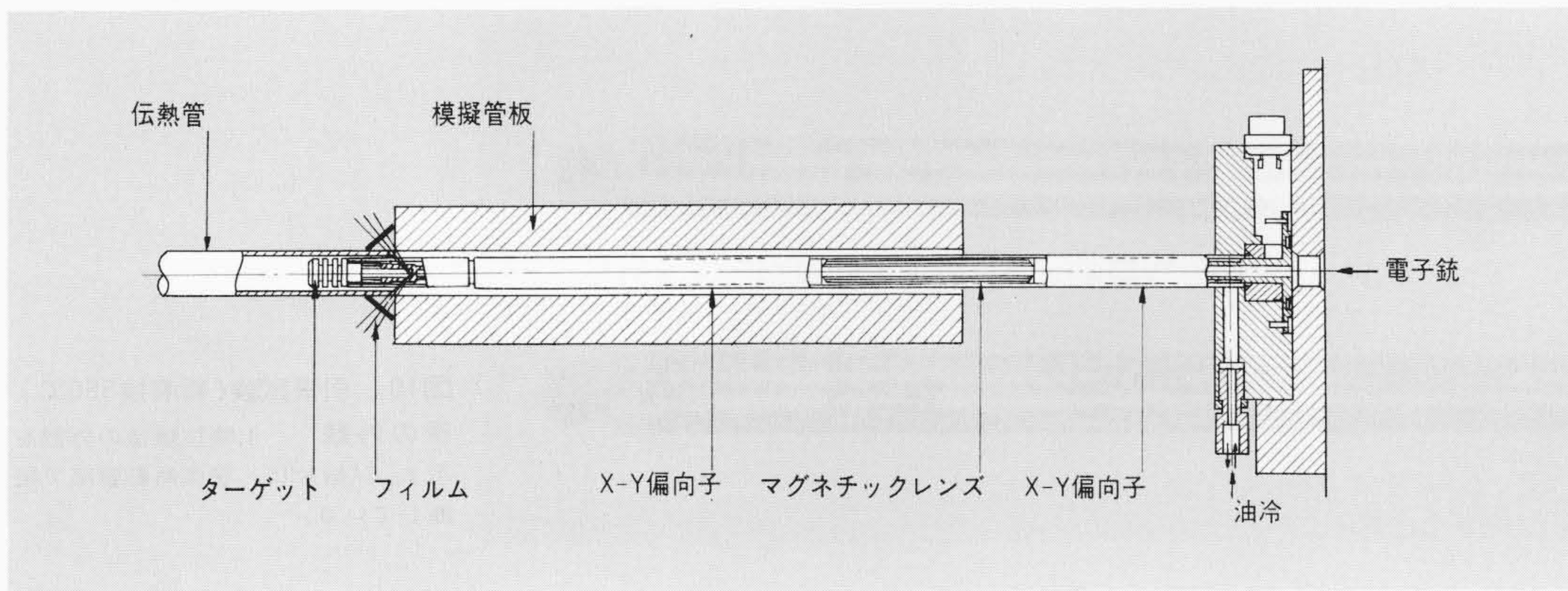


図7 微小焦点X線装置概略図  
一部差込み型溶接部に対する微小焦点X線装置による検査状態図を示す。ターゲットが管-管板溶接部内面にセットされ、溶接部の外面に馬蹄形のフィルムが周方向全体に巻き付けられ撮影される。

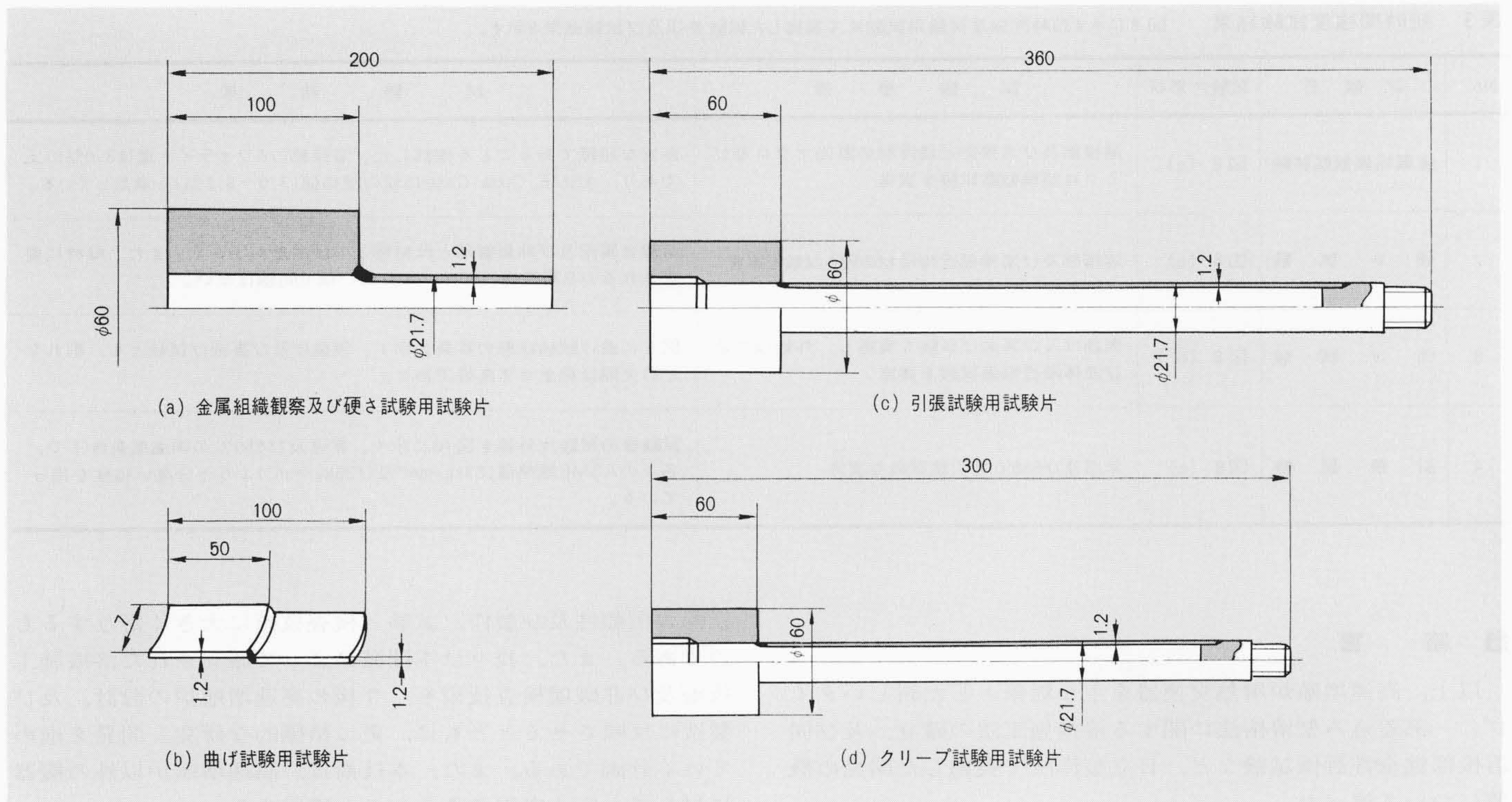


図8 短時間及び長時間強度試験用試験片 一部差込み型管-管板溶接部に対する短時間及び長時間強度試験用試験片形状を示す。

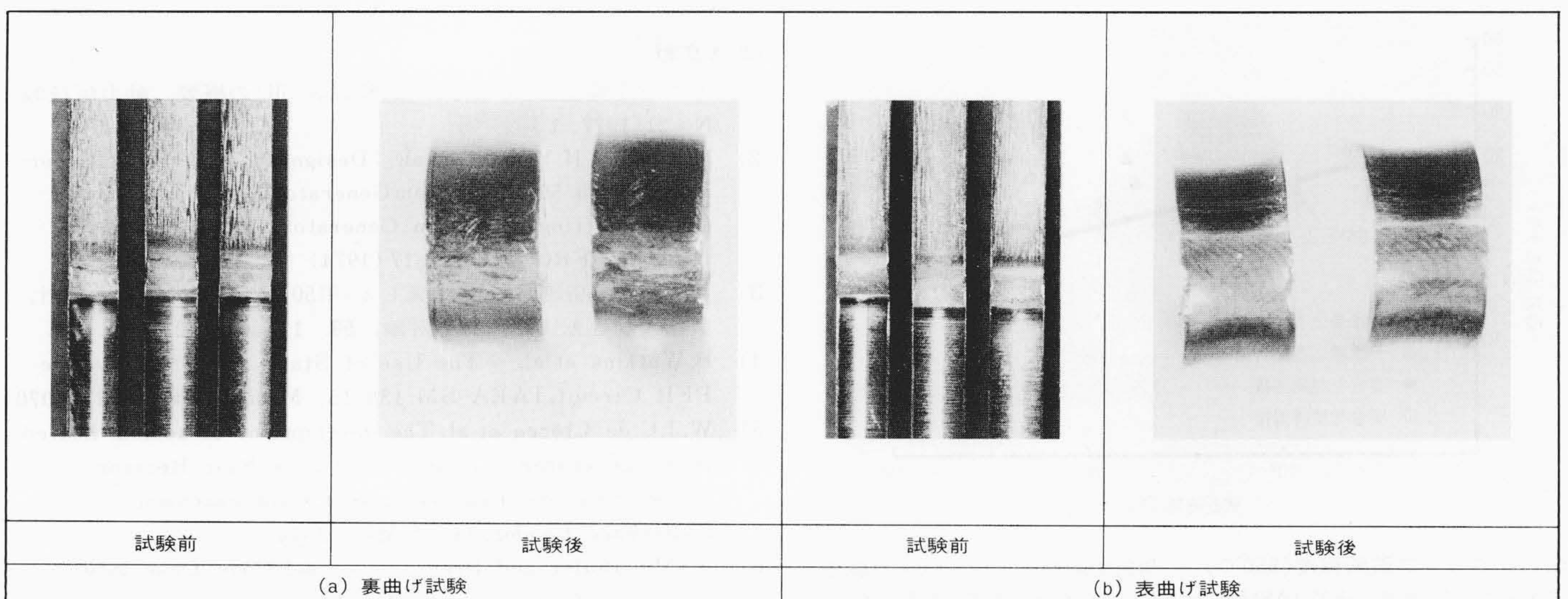


図9 曲げ試験結果外観 図8(b)の試験片で表曲げ及び裏曲げ試験を行ない、試験後、液体浸透探傷試験を実施し割れなどが発生していないことを確認した。

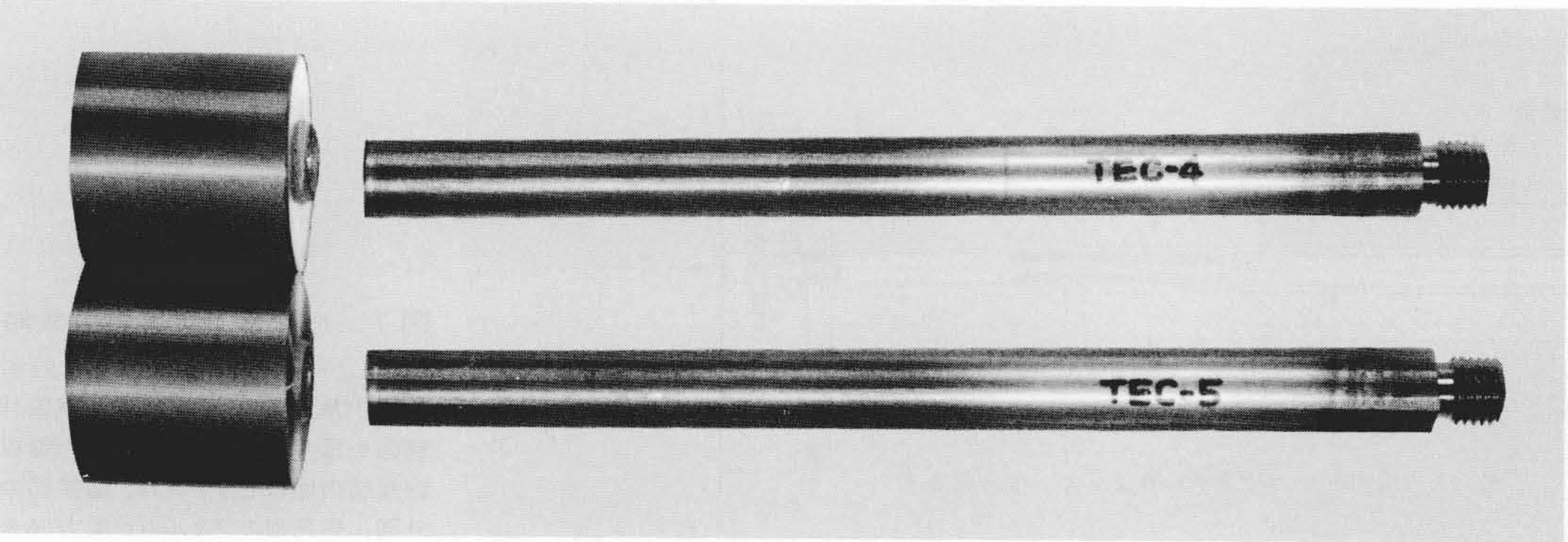


図10 引張試験(新溶接550℃)後の外観 引張試験後の外観を示す。試験片は、管側熱影響部で破断している。

表3 短時間強度試験結果 図8に示す短時間強度試験用試験片で実施した試験要領及び試験結果を示す。

| No. | 試験名      | 試験片形状 | 試験要領                             | 試験結果                                                                                                      |
|-----|----------|-------|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1   | 金属組織観察試験 | 図8(a) | 溶接部及び溶接部近傍母材の断面マクロ及びミクロ組織観察試験を実施 | 良好な組織であることを確認した。溶接部のδフェライト量は3.0%以上であり、ASME Code Case 1592の規格値(3.0~9.2%)を満足している。                           |
| 2   | 硬さ試験     | 図8(a) | 溶接部及び溶接部近傍母材の硬さ試験を実施             | 溶着金属部及び熱影響部と母材部との硬度差が小さく、また、母材に要求されるJIS規格値(190Hv)より低い値で問題はない。                                             |
| 3   | 曲げ試験     | 図8(b) | 表曲げ及び裏曲げ試験を実施し、外観検査及び液体浸透探傷試験を実施 | 図9に曲げ試験状態の写真を示す。表曲げ及び裏曲げ試験とも、割れなどの欠陥は発生せず良好である。                                                           |
| 4   | 引張試験     | 図8(c) | 常温及び550℃で引張試験を実施                 | 試験後の試験片外観を図10に示す。常温及び550℃の両温度条件下で、各々のASME規格値(53kg/mm <sup>2</sup> 及び36kg/mm <sup>2</sup> )より十分高い強度を持っている。 |

8 結 言

以上、高速増殖炉用熱交換器を主な対象とした新しいタイプの一部差込み型溶接法に関する溶接施工法の確立、及び同溶接部健全性評価試験など、日立製作所で実施した開発の概要について述べた。

この新しい一部差込み型溶接法の確立と同時に、実機への適用の可能性が確認されたことにより、本溶接法は今後開発される高速増殖原型炉、実証炉及び商用炉で使用される熱交

換器の信頼性及び製作、試験・検査技術に大きく寄与するものである。また、我々は本開発によって確立された溶接施工技術及び非破壊検査技術を、今後の高速増殖炉の設計、及び製造に反映させるとともに、更に積極的な研究、開発を進めていく計画である。また、本技術は、高速増殖炉以外の機器に対しても広く応用できるものと確信する。

最後に、この管-管板溶接法の開発に当たり御協力をいただいた日立製作所日立工場、同日立研究所の関係各位に対し深謝の意を表わす次第である。

参考文献

- 1) 原型炉準備室：「もんじゅ」調整設計(Ⅲ)の概要，動力炉技報 No.21(1977.1)
- 2) M.Kawara, H.Yamaki et al. : Design and Operating Experiences with 50 MW Steam Generator, I.A.E.A. Study Group Meeting on Steam Generators for LMFR's, Bensberg, FRG, Oct. 14~17 (1974)
- 3) 河原ほか：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，58，111(昭51-2)
- 4) B.Watkins et al. : The Use of Stabilized Steels in the PFR Circuit, IAEA-SM-130/15, Monaco, Mar.23-27 (1970)
- 5) W.J.C.de Clercq et al. The development of sodium-heated steam generators in the Netherlands, Fast Reactor Power Stations, Proceeding of the International Conference, London, 11-14 Mar. (1974)
- 6) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Case Interpretations, Code Case 1592
- 7) 電気工作物の溶接の技術基準，火力発電技術協会発行 (昭和45年)

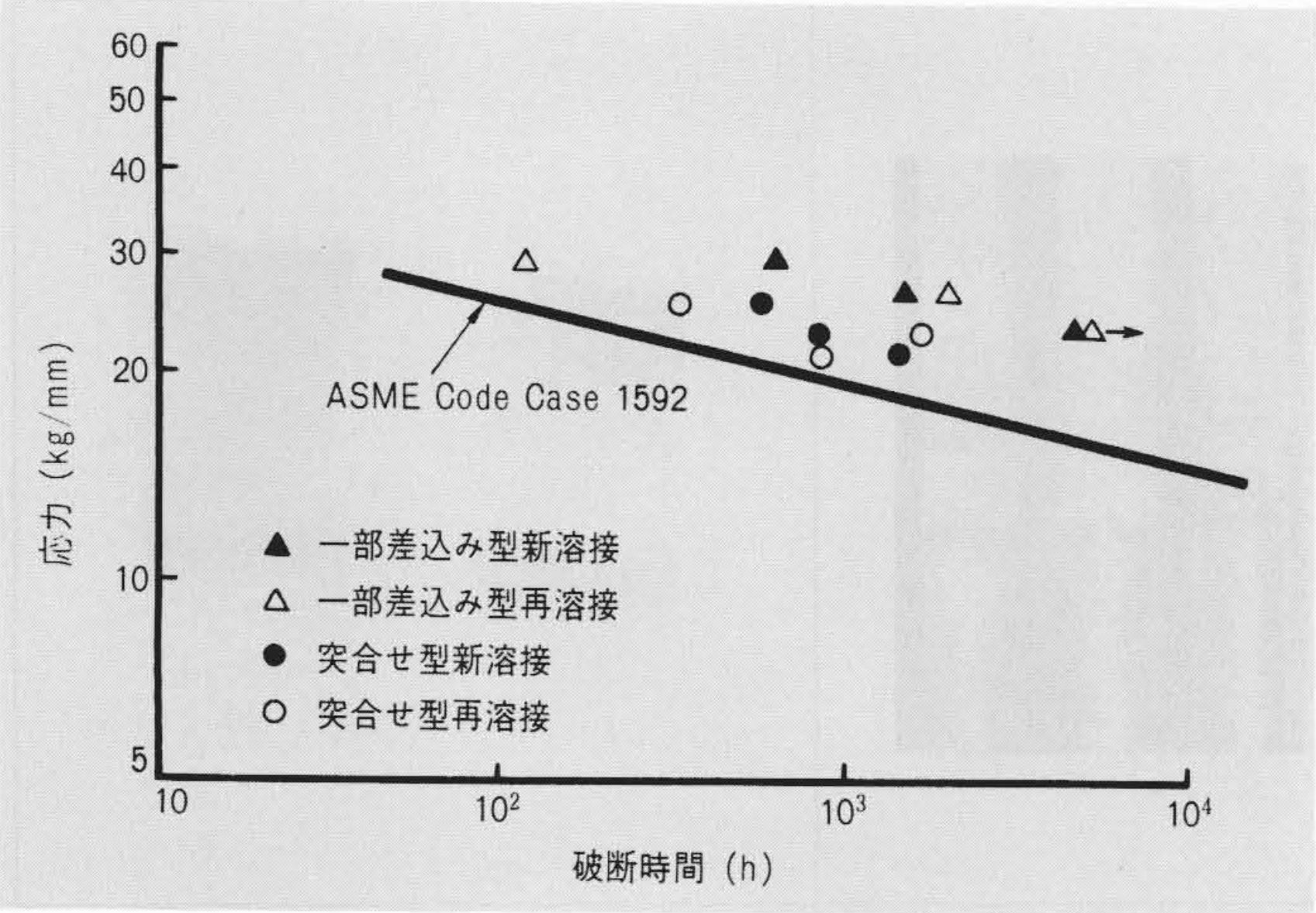


図11 クリープ破断強度(550℃) 雰囲気温度550℃でのクリープ破断強度を示す。一部差込み型はASME Code Case 1592に示されている最小クリープ強さより十分高く、また、突合せ型と同等以上の強度を持っていることを確認した。