

異材管継手の長期信頼性評価 (I)

—フィールド試験体の中間検査結果—

1998年8月

動力炉・核燃料開発事業団
東 海 事 業 所

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒319-11 茨城県那珂郡東海村大字村松 4-33

動力炉・核燃料開発事業団

東海事業所 技術開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section, Tokai Works, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation, 4-33 O-aza-Muramatsu, Tokai-mura, Naka, Ibaraki-ken, 319-11, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

異材管継手の長期信頼性評価（I）
—フィールド試験体の中間検査結果—

根本 健志^{*2}, 竹内 正行^{*1},
永井 崇之^{*1}, 藤咲 和彦^{*2},
石橋 祐三^{*1}, 大橋 和夫^{*1},
武田 誠一郎^{*1},

要 旨

(1) 目的

熱間圧延法, HIP法, 爆接法により製作した管継手を酸回収蒸発缶小型モックアップ試験設備へ装着し, 長期信頼性の評価を行う。

(2) 方法

酸回収蒸発缶小型モックアップ試験設備のプロセス系（硝酸凝縮液, 濃縮液, 供給液ライン）とユーティリティ系（計装用圧空, 加熱用蒸気, 冷却水ライン）に, 管継手試験体を装着し耐久性試験を行い, 中間検査として, 耐圧試験, 染色浸透探傷試験, 外観観察, 破壊検査を行った。

(3) 結果

- ① 热間圧延管継手については, プロセス系の濃縮液および供給液ライン, ユーティリティ系の計装用空気, 加熱用蒸気, 冷却水ラインに装着した試験体は, 約21,000時間の耐久性試験を行っても健全な状態を維持していた。しかし, プロセス系の硝酸凝縮液ラインに装着した試験体は, 耐圧試験において漏れが認められた。
- ② HIP管継手については, プロセス系の濃縮液および供給液ライン, ユーティリティ系の計装用空気, 加熱用蒸気, 冷却水ラインに装着した試験体は, 約18,000時間の耐久性試験を行っても健全な状態を維持していた。しかし, プロセス系の硝酸凝縮液ラインに装着した試験体は, 耐圧試験中に破断が認められた。
- ③ 爆接管継手については, すべての装着位置において漏れおよび破断等は認められなかつた。しかし, プロセス系の硝酸凝縮液ラインに装着した試験体は, ステンレス鋼側に肌荒れが認められた。

以上, 中間検査の結果から, 再処理プロセスへ適用する場合, ユーティリティ系（計装用空気, 加熱用蒸気, 冷却水ライン）は, 十分適用が可能と考えられる。プロセス系では, 硝酸凝縮液のようにステンレス鋼にとって厳しい試験環境では, 適用が困難と考えられる。しかし, 濃縮液および供給液の温度の低い環境であれば, 適用可能と考えられる。

*1 再処理技術開発部 機器材料開発室

*2 常陽産業（株）

目 次

1.はじめに -----	1
2.試験体 -----	2
2.1 熱間圧延管継手 -----	2
2.1 HIP管継手 -----	3
2.1 爆接管継手 -----	5
3.試験方法 -----	7
3.1 試験設備 -----	7
3.2 耐久性試験装着位置 -----	7
3.3 耐久性試験時間 -----	7
3.4 評価項目 -----	7
4.長期耐久性評価 -----	9
4.1 熱間圧延管継手 -----	9
4.2 HIP管継手 -----	11
4.3 爆接管継手 -----	13
5.まとめ -----	14
6.参考文献 -----	15

1. はじめに

再処理プロセスの中で、ステンレス鋼にとって厳しい腐食環境となるプロセスの装置材料に、チタン（以下「Ti」という）、チタン5%タンタル合金（以下「Ti-5Ta」という）、ジルコニウム（以下「Zr」という）などの非鉄系バルブメタルが適用されている。これらのバルブメタル製装置を設置する場合、当該装置前後の配管がステンレス鋼であるため、バルブメタルとステンレス鋼の接続が必要となる。しかし、これらのバルブメタルとステンレス鋼の接続に、通常の同材質同士を接続する溶融溶接法を適用した場合、機械的強度および耐食性において健全な継手部を得ることができない。このため、バルブメタルとステンレス鋼の接合に、新たな異材接合法の開発が必要となる。

機器材料開発室では、バルブメタルとステンレス鋼の新たな異材接合方法として、各種固相接合技術の適用性を、接合面の密着性、接合材の機械的強度（引張強度、せん断強度、曲げ強度等）および再処理プロセス液等の硝酸環境下での接合界面の耐食性などの観点から検討している。これまでの検討の結果⁽¹⁾、熱間圧延法^{(2), (3)}、熱間等方圧加圧法（熱間静水圧加圧（Hot Isostatic Pressing），以下「HIP法」という）^{(4), (5), (6)}、爆発接合法（以下「爆接法」という）⁽⁷⁾が有望であることがわかった。また、バルブメタルとステンレス鋼の間に、インサート材としてタンタル（以下「Ta」という）を挟んだ3層構造にすることによって、接合界面の耐食性が改善されることもわかった。

この異材接合継手を再処理プロセスへ適用する場合、長期的な耐久性の確認が必要となる。そこで、酸回収蒸発缶小型モックアップ試験設備（以下「試験設備」という）⁽⁸⁾のプロセス系の硝酸凝縮液、濃縮液、供給液ライン、ユーティリティ系の計装用圧空、加熱用蒸気、冷却水ラインに熱間圧延法、HIP法、爆接法により製作した管継手をそれぞれ装着し、長期耐久性試験を行っている。

本報は、これまでに進めてきたフィールド試験の中間検査結果（耐圧試験、染色浸透探傷試験、外観観察等）について報告する。

2. 試験体

2.1 熱間圧延管継手

2.1.1 形状

管継手の形状は、図1に示すように中央部にバルブメタルとステンレス鋼の接合部があり、管継手の一端がバルブメタル、他端がステンレス鋼となっている。この管継手の接合部は、小径のバルブメタル管と大径のステンレス鋼钢管が熱間圧延処理によってインサート材（タンタル箔）を介して接合されており、小径のバルブメタル管と大径のオーステナイト系ステンレス鋼钢管が重なった同軸二重管構造となっている。なお、インサート材は、バルブメタルとステンレス鋼とを直接接合した場合、接合界面に局部的な侵食が発生し、インサート材としてタンタル箔を介して接合した場合、接合界面の耐食性が改善されるとの知見により使用している。

2.1.2 構成材料

管継手の構成材料は、バルブメタルとしてTi-5TaおよびZrを、ステンレス鋼としてSUS304Lステンレス鋼（以下「SUS304L」という）を、インサート材にタンタルを用いている。なお、各素材の化学組成を表1に、外観寸法を図2-1～7に示す。

ここで、Ti-5Taは「加工施設、再処理施設および使用施設等の溶接の技術基準」に定める再処理施設用チタン合金R-Ti-5Ta規格材を、Zrは工場規模で溶製鍛造されたB5 50（ジルコニウム棒（ASTM R60702））規格材を用いている。一方、SUS304LはSUS304L（ステンレス鋼棒（JIS G4303））、SUS304LTP（配管用ステンレス鋼钢管（JIS G3459））、SUS304LTB（ボイラ・熱交換器用ステンレス鋼钢管（JIS G3463））の各規格材または「加工施設、再処理施設および使用施設等の溶接の技術基準」に定める再処理施設用ステンレス鋼R-SUS304ULC規格材を用いており、耐食性の観点からSUS304L中の硫黄（S）の含有量を0.01wt%以下に抑えている。また、インサート材であるTaはTa箔（タンタル展伸材（JISH4701））規格材を用いている。

2.1.3 製造方法

(1) 製造フロー

管継手の製造フローには、図3に示すように入手した材料の表面加工から管継手を配管へ組み込むまでの工程がある。以下に、製造方法の概略を各製造毎に述べる。

(2) 材料の表面加工

材料の表面加工は、熱間圧延処理により接合面となるバルブメタル丸棒の表面およびSUS304L钢管の内表面の凹凸を滑らかにするため、研磨等により仕上げ加工を行っている。ただし、インサート材に用いるTa箔については、厚さが0.05mmまたは0.1mmと薄く、研磨等が困難であることから、表面加工を行っていない。ここで、パッケージ内のバルブメタル丸棒の外径とSUS304L钢管の内径の差（以下「クリアランス」という）は、(a)式に示すクリアランス比が適当である。

$$\text{[クリアランス比]} = \frac{[\text{SUS304L钢管の内径}] - [\text{バルブメタル丸棒の外径}]}{2 \times [\text{SUS304L钢管の内径}]} \\ \leq (1.2 \times [\text{圧下比}]) - 0.16 \quad (\text{a})$$

なお、(a)式の圧下比とは、④項で示す熱間圧延処理における圧延前後のパッケージ断面積の比を示す。

(3) 接合用パッケージの製作

接合用パッケージは、材料の表面加工後SUS304L鋼管中へTa箔を巻いたバルブメタル丸棒を挿入し、図4に示す形状に製作を行っている。このパッケージの製作において、接合界面に異物が介入することを防ぐため、パッケージ内を脱気（真空度を0.01Pa程度とする）し、電子ビーム溶接（以下「EBW」という）によりSUS304L鋼管両端に端栓（SUS304L鋼板）を接合している。

(4) パッケージの熱間圧延処理

接合用パッケージの熱間圧延処理は、パッケージの製作後、図5に示すように3軸傾斜型特殊圧延機を用いて、高温（1,173K程度）に加熱したパッケージを熱間圧延処理し、バルブメタル丸棒表面とSUS304L鋼管内表面とをTaを介して接合した同軸円柱形状の熱間圧延棒（図6(a)を参照）の製造を行っている。この3軸傾斜型特殊圧延機は、パスラインの回りに3個の圧延ロールが等間隔に配した構造をしており、丸棒状のパッケージの周方向に均一な圧力を加えることができる。ここで、熱間圧延処理における圧下比は、1.2～1.4である。

(5) 热間圧延棒の中ぐり加工

热間圧延棒の中ぐり加工は、热間圧延処理後、同軸円柱形状の热間圧延棒の中心軸を中ぐり加工し、図6(b)に示すように内側がバルブメタル管、外側がSUS304L鋼管からなる同軸二重管形状の圧延接合材を加工している。

(6) 圧延接合材の仕上げ加工

圧延接合材の仕上げ加工は、中ぐり加工後、バルブメタル管とSUS304L鋼管からなる同軸二重鋼管形状の圧延接合材から、圧延接合材の一端のバルブメタル管の一部を切削し、他端のSUS304L鋼管の一部を機械加工により切削することで、図6(c)に示す熱間圧延接合管継手に仕上げる。

2.1.4 大径サイズ

大径サイズ（7T7, 7Z7）は、外径55mm以上の製造が困難であったため、以下のように製造を改良して行った。

三層構造の中空圧延パッケージを組立、ロータリ圧延ミルを用いて熱間圧延することにより圧延接合材を作製し、図7に示すように三層クラッド管から従来と同様、機械加工により異材管継手を作製した。外層管としてSUS304ULC、中間層管としてTi-5TaまたはZr、内層管としてSUS304ULCをそれぞれ用い、外層管／中間層の界面にTa箔を配した。パッケージ組立寸法の詳細を図8に、組立方法を図9に示す。

2.2 HIP管継手

2.2.1 形状

HIP管継手の形状は、図10に示すように円筒の一端から中央までがバルブメタル、他端から中央までがステンレス鋼、バルブメタルとステンレス鋼との間にインサート材としてタンタル箔を用いている。

2.2.2 構成材料

管継手の構成材料は、バルブメタルとしてTi-5TaおよびZrを、ステンレス鋼としてSUS304Lを、インサート材としてTaを用いている。なお、素材の規格は熱間圧延管継手の構成材料と同じ規格材を用いている。また、各素材の化学組成を表2に、外観寸

法を図11-1～7に示す。

2.2.3 製造方法

HIP管継手は図12に示すように、まず接合対象の素材をHIP処理することによって得られるHIP接合材を製作し、その後、管継手形状に仕上げ加工を行うことにより製造できる。以下に、HIP管継手の各製造手順の概要を述べる。

(1) 素材表面加工

接合対象の各素材を同径の円柱に機械加工した後、これら素材の接合面（円柱の上面または下面）の表面を、平滑かつ表面粗さ△△△△△（0.8S）程度に仕上げる。また、Ta箔は0.1mm厚さのものを使用することとし、Ta箔のように研磨が困難な素材は、表面が平滑な部分を使用する。

(2) カプセル製作

接合対象の各素材を挿入し、HIP処理を行うためカプセルを加工する。カプセルは、素材を入れるシリング形状のカプセル本体と、カプセル組立時にカプセル内を真空状態にする脱気管を付けたカプセル蓋から構成される。

(3) 素材等の洗浄

接合対象の各素材の表面およびカプセル内面に付着している溶剤等の不純物を除去するため、アセトンにより超音波洗浄を繰り返し行う。

(4) カプセル組立

素材等の洗浄後、カプセル本体にHIP接合材の素材を挿入し、カプセル本体にカプセル蓋を溶接する。溶接後、カプセル内を真空状態（真空度1.33Pa（10⁻²Torr）以下）にするため、真空ポンプを用いて室温状態で脱気し、脱気管先端部を圧着、溶接することによりカプセル組立が完了する。

(5) HIP処理

カプセル組立後、カプセルを図13に示すようなHIP装置内に入れ、HIP処理を行う。処理条件を以下に示す。

- ① HIP処理温度：1,198K
- ② HIP処理圧力：98MPa以上
- ③ 加圧時間：0.5時間

(6) カプセル除去

HIP処理後、カプセルおよび各素材からなる一体の接合材より、カプセル部のみを切削加工により除去し、HIP接合材の各素材のみ（HIP接合材）を取り出す。

(7) 仕上げ加工

カプセル除去後、円柱形状のHIP接合材の中心軸を中ぐり加工し、HIP管継手を適用する配管径の寸法に切削加工を行い、管継手形状に仕上げる。

2.2.4 改良法

表面性状をさらに向上したHIP接合体（T8）と従来の表面性状を有するTa箔を用いたHIP接合体（T7）の製作条件を以下に示す。

(1) HIP前処理条件

- ① 母材接合界面の加工方法：ダイヤモンドラッピング研磨
- ② Taの厚さおよび加工方法：従来法（T7）0.1mm, 圧延（受け入れ）まま
：改良法（T8）ダイヤモンドラッピング

(2) HIP条件

- ① HIP温度 : 1198K
- ② 加熱保持時間 : 2.5時間
- ③ HIP処理圧力 : 98MPa以上
- ④ 加圧時間 : 0.5時間

以上のように製造した接合体の外周を、所定の形状まで機械加工後、その内部をウォータージェットでくり貫き加工し、さらに仕上げの機械加工（旋削加工）によって管外径および両端を仕上げた。管内径は、旋削加工後にホーニング加工して、内表面粗さが3.2S以下となるように仕上げた（図14）。

2.3 爆接管継手

2.3.1 形状

爆接管継手の形状は、図15に示すように円筒の一端から中央までがバルブメタル、他端から中央までがステンレス鋼、バルブメタルとステンレス鋼との間にインサート材としてタンタル箔を用いている。

2.3.2 構成材料

管継手の構成材料は、バルブメタルとしてTi-5TaおよびZrを、ステンレス鋼としてSUS304Lを、インサート材としてTaを用いている。なお、各素材の化学組成を表3に、外観寸法を図16-1～6に示す。

ここで、Ti-5TaはKS50Taを、Zrは工業用純Zr (ASTM R60702) を、SUS304LはJIS規格材を、Taは工業用純Taを用いている。

2.3.3 製造方法

以下に示す手順に従って製造した。なお、これら接合材の製造は、日本化薬（株）が把握している最適な爆接条件（機微技術）としたため、詳細な爆接条件等は把握できなかった。

① 素材検査

素材の寸法、平坦度、内部欠陥および表面キズの有無を検査

② 平坦度矯正

素材の接合面の平坦度をレベル、プレス等により、0.5mm／全長に矯正

③ 表面研磨

接合面となる素材表面をサンドペーパー等で#600まで研磨した。なお、Zrは接合面の酸化防止のため、不活性ガス (Ar) 中で脱脂洗浄し、表面を大気に暴露しないこととした。

④ 素材脱脂

接合面となる素材表面をトルエン等の溶剤で入念に洗浄した。なお、Zrは③の研磨時と同様に、不活性ガス (Ar) 中で脱脂洗浄し、表面を大気に暴露しないこととした。

⑤ 爆薬選定

素材に適した爆薬として、特殊な含水エマルジョン爆薬（水+マクロバロニガラス（1mmφガラス+NH₄NO₃）を使用した。

⑥ 爆発接合

SUS304LとTaを爆発接合することにより、Ta/SUS304Lの2層接合材を施工した。

⑦ 接合状態検査

⑥により施工した2層接合材について、「クラッド鋼の試験方法（JIS G 0601）」および「金属材料のパルス反射法による超音波探傷試験方法（JIS Z 2344）」により、接合状態の良否を検査した。ここで、接合状態の良否の判定基準は、第1回底面エコーが完全になくなり、合わせ材と母材の界面からの反射波のみとなる部分を接合不良、すなわち非接合部とした。

⑧ 平坦度矯正・研磨

②および③と同様な処置を行った。

⑨ 爆発接合

Ta/SUS304Lの2層接合材のTa面に、Ti-5TaまたはZrを施工し、3層接合材を製造した。

⑩ 歪矯正

上記より製造した接合材表面の平坦度をレベル、プレス等により1.0mm／全長に矯正

⑪ 切断・研磨

接合材の周囲は機械切断、母材はプレサー加工、合材はバフ仕上げを行った。

⑫ 接合材検査

接合材の品質評価として、「クラッド鋼の試験方法（JIS G 0601）」等により、超音波探傷試験、外観検査および寸法検査を行った。

3. 試験方法

3.1 試験設備

試験設備の概略を図17に示す。試験設備はTi-5Ta製蒸発缶とZr製蒸発缶の2系列で構成されている。各系は蒸発缶の材質を除いて機器の構造および材質は同一であり、両系ともそれぞれ蒸発缶、供給タンク、供給ポンプ、凝縮器、凝縮液冷却器、濃縮液冷却器等から構成されており、両系のプロセスフローも同様である。

プロセスフローは、供給タンクから供給ポンプにより硝酸溶液が蒸発缶の加熱部下部へ供給される。蒸発缶の加熱部は多管式熱交換器であり、供給された硝酸はそこで蒸気により加熱される。そして、加熱された硝酸は上部連通管を通り、蒸発部で気体と液体に分離され、以下の3つのフローに分かれる。

- ① 硝酸蒸気は蒸発部塔頂部から気相配管を通り、凝縮器および冷却器で液化・冷却された後、供給タンクに戻る。
- ② 蒸発缶内で濃縮された硝酸溶液の一部は濃縮液ポンプにより一定量で抜液され、濃縮液冷却器で冷却された後、供給タンクに戻る。
- ③ 蒸発缶内のほとんどの濃縮液は蒸発部下部より下部連通管を通り、加熱部下部に戻り蒸発缶内を循環する。

試験設備の標準的な運転条件を表4に、濃縮液組成を表5に示す。これらの条件は、実機の酸回収蒸発缶の運転条件および濃縮液組成を参考に設定したものである。濃縮液は、定常運転時に蒸発缶内の濃縮液中に溶解している金属イオンが、表5に示す濃度となるように、予め供給液中に金属イオンを溶解することにより調整を行った。

3.2 管継手の装着位置

管継手の装着位置は図18に示すように、プロセス系の硝酸凝縮液、濃縮液、供給液ライン、ユーティリティ系の計装用圧空、加熱用蒸気、冷却水ラインの計6箇所とした。各装着部の試験環境を表6に示す。なお、熱間圧延、HIP、爆接管継手の順に溶液が流れるように装着した。また、試験体装着数を表7に示す。

3.3 試験時間

試験時間は、試験設備の運転に合わせて実施している。熱間圧延管継手の試験時間を表8-1、2に、HIP管継手の試験時間を表9に、爆接管継手の試験時間を表10に示す。なお、表に示すように、試験開始がずれているため、試験時間もそれぞれ異なっている。

3.4 評価項目

試験設備が本体の中間検査のため運転を停止したときに管継手を取り外して、以下の評価を行った。

3.4.1 耐圧試験

管継手に漏洩がないことを耐圧試験により評価した。耐圧試験方法は、管継手の両端にメクラフランジを取り付け、窒素ガスにより約 $3.0\text{kg}/\text{cm}^2\text{G}$ の圧力に加圧し、測定開始時と約30分後の圧力を比較した。

3.4.2 浸透探傷試験

管継手の外表面と内表面の接合部に欠陥がないことを染色探傷試験により評価した。

染色探傷試験方法は、管継手の接合界面部を拭き取り洗浄を行った後、浸透液を塗布し約20分間放置した後、過剰の浸透液を除去して現像液を塗布し約10分間放置後、接合部の指示模様を目視により観察した。

3.4.3 外観観察

管継手の内表面をファイバースコープを用いて観察した。

3.4.4 欠陥の発生した試験体の調査

漏れおよび破断が発生した管継手は、それぞれ製造メーカーで以下の調査を行った。

(1) 熱間圧延管継手

- ① 浸透探傷試験
- ② 欠陥の表面観察
- ③ 超音波探傷
- ④ 耐圧試験
- ⑤ 管軸方向への欠陥の追い込み観察
- ⑥ 腐食状況調査
- ⑦ リーク原因の推定

(2) HIP管継手

- ① 蛍光浸透探傷
- ② 超音波探傷
- ③ 破面および断面観察
- ④ 管内き裂の応力解析
- ⑤ 破断原因の推定

4. 長期耐久性評価

4.1 熱間圧延管継手

4.1.1 耐圧試験

耐圧試験結果を表11-1, 2に示す。プロセス系の硝酸凝縮液ラインに8試験体装着し2試験体(11,000時間(6T1), 16,000時間後(6T2))が圧力の低下および水中での気泡の発生が認められた。濃縮液および供給液ラインに装着したすべての試験体は、圧力の低下もなく、局部的なふくらみ、伸びまたは漏洩等の異常は認められなかった。また、ユーティリティ系の計装用圧空、加熱用蒸気、冷却水ラインに装着したすべての試験体も圧力の低下もなく、局部的なふくらみ、伸びまたは漏洩等の異常は認められなかった。

4.1.2 浸透探傷試験

外表面および内表面ともに、異常と認められる赤色指示模様は確認されなかった。なお、耐圧試験で継手部から漏れが確認された6T1, 6T2は、4.1.4項の破壊検査として、浸透探傷試験を行った。

4.1.3 外観観察

耐久性試験前後の管継手内表面を写真1-1~4に示す。観察した結果、硝酸凝縮液ラインに装着した管継手のうち、ステンレス鋼側は金属光沢がなくなり、肌荒れが認められた。その他の部位に装着した管継手の観察の結果、著しい腐食および傷等は認められなかった。

4.1.4 破壊検査

漏れが発生した管継手については、破壊検査を行った。

(1) 浸透探傷試験

図19にきず指示模様発生位置の概要および寸法を、写真2-1, 2に代表的なきず指示模様を示す。

(2) 欠陥の表面観察

浸透探傷試験による欠陥指示部(図19)の観察結果を写真3-1~4に示す。表面欠陥の発生位置は、外内面ともSUS/Ta界面の可能性が高い。特に内面側では、Taとの境界近傍のSUS表面に長手方向に凹状の欠陥が認められた。

(3) 超音波探傷検査

① 管内面側からの探傷

表12に管継手の製造時と今回実施した超音波探傷試験の条件を示す。探傷試験条件は基本的には同じであり、走査条件のみ精密走査(試験後)を実施した。

図20に製造時に実施した超音波探傷試験結果を示す。図21-1~3に試験後実施した超音波探傷試験結果を示す。

管継手内表面は長期耐久性試験により粗面となっているため、基準部のエコー高さが図21-3(右側)に示すように異なっている。したがって、どこの部位で探傷感度を設定するかによって結果が異なってくる。図21-1は中間レベル、図21-2は高レベル、図21-3は低レベルの部位で探傷感度を設定したものである。また、内表面の荒れにより探触子ホルダーの追従性が悪くなっているためエコー高さの変動(ばらつき)が従来の探傷に比べ若干大きくなっていると推定される。

② 管外面からの探傷結果

管内面からでは未探傷となっていた内面側テーパー部の接合界面について探傷を行った結果を図22-1, 2に示す。

6T1は、内面浸透探傷指示模様発生部位である0および80度付近に欠陥らしきものを検出した。その他210および340度付近についても欠陥らしき指示が認められた。

6T2は、管外面からの探傷結果では浸透探傷試験で指示模様が現れた位置付近のエコー高さが低下していることが判明した。この現象は、接合面近傍のSUS側の腐食により超音波が散乱して逆にエコー高さが低下したと考えられる。

③ 欠陥の分布の推定

図23に浸透探傷試験および超音波探傷試験結果を併せた分布図を示す。

6T1は、浸透探傷試験による結果は内外表面のみの結果であるが、きず指示模様の広がりから内部に深く進展していると推定される。超音波探傷試験で検出した位置はTa箔二層部と一層部の境界ではなく、二層部に若干入ったところである。外面側に連続していないのは外面側に近づくに従って境界部に沿って進展したものと推定される。

(4) 耐圧試験検査

窒素ガスを封入し、徐々に圧力を増加し水中にて気泡の発生を観察し、リーク発生限界圧力を求めた。その結果を表13に示す。6T1では0.11kg/cm²以上の圧力で(写真4)，また、6T2は0.06kg/cm²以上の圧力で気泡が観察された。

(5) 管軸方向への欠陥の追い込み観察

追い込み観察結果を写真5-1～4, 6-1, 2に示す。管外面側の欠陥から管軸方向に研削して追い込んでいくと、欠陥はTaとSUSの界面に接したSUS側に、6T1では約50μm×500μmの空洞(写真7-1～3)が、6T2では約260μm×740μmの空洞(写真8-1～7)が認められた。この空洞は長手方向で接合界面の中央部を切断した場合にも認められた。また、管内面側(写真9-1～9, 10-1～6)の欠陥から管軸方向に研削して追い込んだ断面にも認められ、空洞は、管内面から管外面に連続して存在しているものと考えられる。

管軸方向に境界面(6T1は1mm, 3mm, 5mm, 10.2mm(中央部), 6T2は0.5mm研削毎に断面)に認められる欠陥(空洞)の位置と寸法を測定した。その結果を図24-1, 2に示す。欠陥は管内面、外面側に近い側では周方向の長さ6T1は0.7mm, 6T2は0.5～1.8mm程度であったが中央部では、6T1については3.5mm, 6T2については7.5mm程度まで広がっていた。

(6) 腐食状況調査

これまでの耐久性試験により、リークが発生していない6Z2材についても、SUS側の腐食状況を調べるために、管軸方向の断面ミクロ観察を実施した(写真11)。なお、気密試験の結果、4.86kgf/cm²までリークは認められなかった。

(7) リーク原因の推定

調査結果より、以下のことがわかった。

- ① 欠陥はTaに接するSUS部に生じており、管内面側から外面近傍まで連続して存在していた。

② 管内面側ではTaとの境界近傍にSUS表面に長手方向に凹状の欠陥が認められた。

以上のことから、リークの原因としてはSUS側の腐食によるものと推定される。また、6T1および6T2は試験設備の硝酸凝縮液出口に一番近いところに設置していたことから、腐食環境としては厳しく、Ta/SUS境界近傍のSUS表面に腐食が生じ、Taとの境界に空洞が生じるとその部位に硝酸が滞留し局部腐食が進行する。その結果、TaとSUSとの境界の空洞はさらに拡大され管外面近傍にまで達し、リークに到ったものと推定される。

4.2 HIP管継手

4.2.1 耐圧試験

耐圧試験結果を表14に示す。プロセス系の硝酸凝縮液ラインに2試験体装着し、1体(3,000時間後(Z1))が耐圧試験中に継手部から破断した。濃縮液および供給液ラインに装着したすべての試験体は、圧力の低下もなく、局部的なふくらみ、伸びまたは漏洩等の異常は認められなかった。また、ユーティリティ系の計装用圧空、加熱用蒸気、冷却水ラインに装着したすべての試験体も圧力の低下もなく、局部的なふくらみ、伸びまたは漏洩等の異常は認められなかった。

4.2.2 浸透探傷試験

外表面および内表面の接合部とも異常と認められる赤色指示模様は確認されなかった。なお、Z1は耐圧試験で破断したため浸透探傷試験は行わなかった。

4.2.3 外観観察

耐久性試験前後の管継手内表面を写真12-1、2に示す。観察した結果、著しい腐食および傷等は観察されなかった。なお、破断したZ1およびそれに伴い取り外したT1は、破壊検査において詳細な断面観察を行った。

4.2.4 破壊検査

(1) 蛍光浸透探傷

破断したZ1(片方をA片(フランジ&SUS/Ta/Zr/Ta/SUS)、もう片方をB片(フランジ&SUS/Ta/Zr))およびT1を蛍光浸透探傷で検査した。

蛍光浸透探傷検査の結果、T1および破断したZ1の管内面の接合界面全周に欠陥が観察された。また、Z1のB片には管外面の接合界面にも欠陥が一部観察された。

(2) 超音波探傷

蛍光浸透探傷でき裂が観察されたZ1およびT1の管内面き裂を超音波探傷法により観察した。探傷法として、1探触子で接合界面端部からの反射波を測定する方法と、2探触子で接合界面の透過波を計測する方法について検討した。

① 斜角1探触子法

・探傷条件 探傷器：KB6000(クラウトクラーマ社)

探触子：10MHz, φ5, 焦点距離25mm(クラウトクラーマ社, ポリマー探触子)

水距離：10mm

入射角：19度(SUS304L内部への横波の屈折角が45度)

同じ感度(45dB)でのZ1およびT1の界面直射エコーを写真13に示す。界面エコーの高さを比較するとZ1の界面エコー高さがT1の界面エコー高さの倍以上あることから、Z1の方がT1よりも界面き裂が進展しているものと推測できる。

② 斜角 2 探触子法

・探傷条件 探傷器 : KB6000 (クラウトクラーマ社)

探触子 : 10MHz, $\phi 5$, 焦点距離25mm (クラウトクラーマ社, ポリマー探触子)

水距離 : 10mm

入射角 : SUS304L側19度 (SUS304L内部への横波の屈折角が45度)

Zr側 32度 (Zr内部への横波の屈折角が45度)

Ti-5Ta側 22度 (Ti-5Ta内部への横波の屈折角が45度)

Z1のZr側反射強度, SUS304L側反射強度, SUS304LからZrへの透過強度分布を図25-1に, T1のTi-5Ta側反射強度, SUS304L側反射強度, SUS304LからTi-5Taへの透過強度分布図を図25-2に示す。

Z1の透過強度は, 2個の探触子ともSUS304L側あるいはZr側にある場合は, 透過音軸と受信側探触子の角度・軸とがずれるため音圧が零になっている。透過波が接合界面を通過する位置では, 透過音軸と受信側の探触子位置・角度と一致し, 透過エコーが観察されている。この界面透過は, 反射強度分布が最大になる界面端部への直射位置で透過しない。これらは界面き裂により透過波が遮断されたためと推測される。

一方でT1の界面透過強度は, 界面直射位置に凹部が認められるもの小さな変化であり, Z1の透過強度と比較しても小さな変化であった。この事からもT1のき裂深さは破断したZ1よりも浅いと推測される。

(3) 破面および断面観察

① 破面観察

Z1試験片B片の残存接合界面のき裂進展状況を把握するために, 試験片を450°C, 30分間加熱してステンレス鋼およびジルコニウム表面に酸化膜を形成した後に, 蛍光浸透探傷により管継手表面までき裂が貫通していると推定される部位をプラスチックハンマーで打撃して強制破断させた。

強制破断は, 内周から1~2mmに管継手内面と同系色の酸化膜が形成された環状領域, 萤光浸透探触で管継手表面まで貫通したき裂が観察された部位に対応した茶色の酸化膜が形成された領域, 金属光沢のある酸化膜が形成されていない領域にわけられる。

内周側の環状領域は, 管内面の酸化面と同じ色をしていることから, 試験中に局部腐食もしくは応力腐食割れで進展した領域と思われる。

貫通き裂に対応する加熱着色による変色域には, 両端部とともに破面進展方向と垂直に形成された縞状の模様があらわれた。この変色域は加熱着色されていることから, 強制破断前に既に進展していた破面と思われる。

加熱による酸化膜が形成されていない領域はプラスチックハンマーによる強制破断時の破面と考えられ, この強制破断域には加熱着色された変色域の両端部と同様の縞状模様があった。

これらの目視観察から, 管内面から成長した環状のき裂(腐食域)が深くまで成長した部位で耐圧試験時もしくは輸送中に表面まで半径方向に成長して一部外表面まで貫通し, プラスチックハンマーの打撃によりさらに進展して破断したと考えられる。

耐圧試験において破断した破面も, 管内面の酸化面と同じ色をした内周側の領域と, 金属光沢のある外周側で形成されている。金属光沢のある外周側領域の一部には破面進展時に形成されたと思われる縞状模様が観察される。強制破断面も同様に腐食された内周側の環状領

域と縞状の模様がある外周側の領域に分かれることから、耐圧試験時に耐久性試験時の局部腐食もしくは応力腐食割れで進展した内周側の環状き裂を起点として最終破断したと推測される。

② 断面観察

Z1の未破断部からA, B, Cの3個の試験片を切り出し、接合部断面を走査型電子顕微鏡(SEM)で観察した。

A, B, C部の断面写真を写真14-1~3に示す。き裂長さは、A部で約2mm, B, C部で約1mmと異なる。しかし、何れもSUS304L/Ta接合界面を選択的き裂が進展し、進展したき裂に面したSUS304Lが粒界腐食している。また、A部外面近傍の断面写真の様に、き裂が無い外周側の接合界面にも微小な未接合部がある。

(4) 管内き裂の応力解析

今回の解析では、HIP冷却時は中実の接合体として残留応力を計算し、冷却後の管継手形状への加工で再配分された残留応力分布を計算した。さらに、この残留応力を初期応力として、管内面から1.5mm進展したき裂先端での残留応力分布を計算した。

計算条件は以下とし、

・形状

初期 : $\phi 80 \times H140.1$ (Ti-5Ta : H70, Ta : H0.1, SUS304L : H70)

加工終了 : 外径 $\phi 76.3 \times$ 内径 $\phi 65.9 \times H140.1$

使用要素 : ABAQUS CAX 4 (軸対象4節点要素)

材料物性 : ①ヤング率 (図26-1)

②ボアソン比 (図26-2)

③線膨張係数 (図26-3)

④応力-塑性歪関係 (SUS304L) : (図26-4)

⑤応力-塑性歪関係 (Ta) : (図26-5)

⑥応力-塑性歪関係 (Ti-5Ta) : (図26-6)

⑦応力-塑性歪関係 (Zr) : (図26-7)

・解析過程

初期形状で925°Cから25°C(室温)に冷却

管継手形状まで加工(外周部および中心部の要素を削除)

管内面側のTa/SUS304L接合界面に1.5mmのき裂を導入

管継手に加工後の軸方向残留応力分布を図27に、き裂進展後の軸方向応力分布を図28に示す。

管継手形状加工後の管内表面では、Ta/SUS304L接合部に約15kgf/mm²の引張残留応力がある。また、管内き裂先端には軸方向に約10kgf/mm²の残留応力がある。このき裂先端部の引張残留応力が見かけの破壊靱性を低下させている原因の一つと考えられる。

(5) 破断原因の推定

調査結果により、以下のことがわかった。

- ① 蛍光浸透探傷試験でZ1, T1試験片の管内面の接合界面全周に欠陥が検出された。
- ② 破面および断面観察から、耐圧試験時の破断は管内面から環状に進展した腐食によるき裂を起点に進展したと考えられる。
- ③ 硝酸凝縮液ラインを除くすべての部位における管継手は、漏れおよび破断等もなく、健全な状態を維持していた。

4.3 爆接法

4.3.1 耐圧試験

耐圧試験結果を表15に示す。管継手は圧力の低下もなく、局部的なふくらみ、伸びまたは漏洩等の異常は認められなかった。

4.3.2 浸透探傷試験

管継手の外表面および内表面の接合部において、異常と認められる赤色指示模様は確認されなかった。

4.3.3 外観観察

耐久性試験前後の管継手内表面を写真15-1, 2に示す。硝酸凝縮液ラインに装着した管継手のうち、ステンレス鋼側に金属の光沢がなくなり、肌荒れが確認された。その他の部位に装着した管継手には、著しい腐食および傷等は観察されなかった。

5. まとめ

異材管継手を試験設備のプロセス系の硝酸凝縮液、濃縮液、供給液ライン、ユーティリティ系の計装用圧空、加熱用蒸気、冷却水ラインに装着し長期耐久性試験を行い、中間検査として耐圧試験、染色浸透探傷試験、外観観察、破壊検査（一部）を行った結果、以下の事項が確認できた。

熱間圧延管継手、HIP管継手、爆接管継手を装着位置ごとにまとめたものを表16に示す。

熱間圧延管継手は、プロセス系の濃縮液および供給液ライン、ユーティリティ系の計装用空気、加熱用蒸気、冷却水ラインに装着した試験体は、約21,000時間の耐久性試験を行っても健全な状態を維持していた。しかし、プロセス系の硝酸凝縮液ラインに装着した試験体は、耐圧試験において漏れが認められた。

HIP管継手は、プロセス系の濃縮液および供給液ライン、ユーティリティ系の計装用空気、加熱用蒸気、冷却水ラインに装着した試験体は、約18,000時間の耐久性試験を行っても健全な状態を維持していた。しかし、プロセス系の硝酸凝縮液ラインに装着した試験体は、耐圧試験中に破断が認められた。

爆接管継手は、すべての装着位置において漏れおよび破断等は認められなかった。しかし、プロセス系の硝酸凝縮液ラインに装着した試験体は、ステンレス鋼側に肌荒れが認められた。

以上、中間検査の結果から、再処理プロセスへ適用する場合、ユーティリティ系（計装用空気、加熱用蒸気、冷却水ライン）は、十分適用が可能と考えられる。プロセス系では、硝酸凝縮液のようにステンレス鋼にとって厳しい試験環境では、適用が困難と考えられる。しかし、濃縮液および供給液の温度の低い環境であれば、適用が可能と考えられる。

6. 参考文献

- (1) 武田誠一郎, 板橋靖, 林正太郎
日本原子力学会「1989年会」要旨集, L48
- (2) 永井崇之, 根本健志, 藤咲和彦, 竹内正行, 武田誠一郎, 田中康正
「異材継手の開発 -熱間圧延接合管継手-」
PNC ZN8410 94-046 1994年1月
- (3) 住友金属工業株式会社 (委託研究成果報告者)
「大径・熱間圧延接合材の性能評価」
1996年3月
- (4) 永井崇之, 藤咲和彦, 武田誠一郎, 田中康正
「HIP接合管継手の製造条件の検討」
PNC ZN8410 94-206 1994年5月
- (5) 大谷修, 横幕俊典, 井上隆夫, 堤一之
「HIP接合管継手の検査技術に関する研究」
PNC ZJ1058 95-005 1995年5月
- (6) 永井崇之, 川野邊一則, 藤咲和彦, 武田誠一郎, 田中康正
「HIP接合管継手の応力解析」
PNC ZN8410 93-001 1992年12月
- (7) 永井崇之, 藤咲和彦, 武田誠一郎, 田中康正
「爆接法による異材接合材の接合強度評価」
PNC ZN8410 94-205 1994年4月
- (8) 根本健志, 竹内正行, 藤咲和彦, 永井崇之, 武田誠一郎, 鹿倉栄
「小型酸回収蒸発缶による耐久試験 (VII) -35,000時間までの運転試験結果-」
PNC ZN8410 95-322 1995年10月

表1 熱間圧延管の供試材の化学組成

(wt%)

ステンレス鋼

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
SUS304L	0.0130	0.48	1.51	0.020	0.0010	10.40	18.40
SUS304ULC (大径)	0.016	0.52	1.53	0.026	0.0014	10.25	18.50

バルブメタル

	O	N	H	Fe+Cr	C	Ti	Ta
Ti-5Ta	0.093	0.003	0.0021	0.031	—	bal	5.0
Ti-5Ta (大径)	0.092	0.003	<0.0010	0.030	—	bal	4.85
Ta	0.008	0.0015	0.0015	0.0010	0.0010	—	bal
Ta (大径)	0.005	0.001	0.0005	0.001	0.001	—	bal

	O	N	Hf	Fe+Cr	C	Zr
Zr	0.126	0.0021	0.0058	0.097	0.0030	bal
Zr (大径)	0.120	0.002	0.005	0.097	0.0030	bal

表2 HIP管の供試材の化学組成

(wt%)

ステンレス鋼

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
SUS304L	0.022	0.33	1.68	0.031	0.017	9.59	19.19
SUS304L（大径）	0.014	0.43	1.30	0.027	0.006	9.86	18.45

バルブメタル

	O	N	H	Fe	C	Ti	Ta
Ti-5Ta	0.088	0.002	0.0030	0.023	—	bal	4.84
Ti-5Ta（改良法）	0.095	0.002	<0.001	0.014	—	bal	4.78
Ta	0.004	0.001	≤0.0005	≤0.001	0.001	≤0.01	bal
Ta	従来法T7	0.005	0.001	<0.0005	<0.001	<0.001	bal
	改良法T8	0.002	0.001	<0.0005	<0.001	0.001	bal

	O	N	H	Hf	Fe+Cr	C	Zr+Hf
Zr	0.14	0.004	<0.0005	0.9	0.13	0.01	bal

表3 爆接管の供試材の化学組成

(wt%)

ステンレス鋼

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
SUS304L	0.017	0.45	0.83	0.031	0.0008	9.48	18.38

バルブメタル

	O	N	H	Fe	C	Ti	Ta
Ti-5Ta	0.080	0.0031	0.0017	0.03	—	bal	5.06
Ta	0.006	0.001	≤0.0005	≤0.001	0.001	≤0.001	bal

	O	N	H	Hf	Fe+Cr	C	Zr+Hf
Zr	0.12	<0.010	<0.002	<2.2	0.1	0.01	bal

表4 標準的な運転条件

液の種類	設定値および管理範囲
供給液	108 ± 5 (ℓ/h) 20 ~ 40 (°C)
硝酸凝縮液	105 ± 5 (ℓ/h) 110 ± 2 (°C)
濃縮液	2.16 ± 0.2 (ℓ/h) 110 ± 2 (°C)

表5 添加金属イオンの設定値および管理値

金属イオン	使用試薬	設定値	管理範囲
Fe ³⁺	Fe(NO ₃) ₃ · 9H ₂ O	200mg/ℓ	50~250mg/ℓ
Cr ³⁺	Cr(NO ₃) ₃ · 9H ₂ O	50mg/ℓ	12.5~62.5mg/ℓ
Ni ²⁺	Ni(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	50mg/ℓ	12.5~62.5mg/ℓ
Ce ³⁺	Ce(NO ₃) ₃ · 6H ₂ O	0.5mg/ℓ	0.475~0.625mg/ℓ
Ru ³⁺	RuCl ₃ · nH ₂ O	1.0mg/ℓ	0.75~1.25mg/ℓ

※Ru³⁺は、 RuCl₃ · nH₂OにAgNO₃を添加し、 Cl⁻を除去して用いた。

表6 管継手の試験環境

	装着位置	試験環境
プロセス系	供給液ライン	$108 \pm 5 \text{ l/h}$ $20 \sim 40^\circ\text{C}$
	硝酸凝縮液ライン	$105 \pm 5 \text{ l/h}$ $110 \pm 2^\circ\text{C}$
	濃縮液ライン	$2.16 \pm 0.2 \text{ l/h}$ 60°C以下
ユーティリティ系	計装用圧空ライン	2.0 kgf/cm^2
	加熱用蒸気ライン	14.0 kgf/cm^2 135°C
	冷却水ライン	840 l/h 30°C以下

表7 管継手の試験体数

装着位置	熱間圧延管継手	HIP管継手	爆接管継手
プロセス系	供給液ライン	4本	2本
	硝酸凝縮液ライン	8本	2本
	濃縮液ライン	4本	2本
ユーティリティ系	計装用圧空ライン	2本	2本
	加熱用蒸気ライン	2本	2本
	冷却水ライン	2本	2本

表 8-1 热間圧延管継手の試験時間 (Ti-5Ta/Ta/SUS304L)

試験体No.	装着位置	装着時間 (h)						Total時間 (h)
		酸回収蒸発缶小型モックアップ試験設備運転時間 (h)						
		18,000	20,000	25,000	30,000	35,000	40,000	
6T1	硝酸凝縮液ライン	○	▽	▽	▽	▽	▽	11,000
6T2	硝酸凝縮液ライン	○	▽	▽	▽	▽	▽	16,000
6T3	硝酸凝縮液ライン	○	▽	▽	▽	▽	▽	21,000
7T7	硝酸凝縮液ライン	○	○	○	○	○	▽	5,000
2T2	濃縮液ライン	○	▽	▽	▽	▽	▽	21,000
30T22	濃縮液ライン	○	▽	▽	▽	▽	▽	21,000
2T1	供給液ライン	○	▽	▽	▽	▽	▽	21,957
1T1	供給液ライン	○	▽	▽	▽	▽	▽	21,957
5T2	冷却水ライン	○	▽	▽	▽	▽	▽	21,000
30T21	計装用圧空ライン	○	▽	▽	▽	▽	▽	21,000
6T5	加熱用蒸気ライン	○	▽	▽	▽	▽	▽	21,000

○ : 試験開始, ▽ : 評価

表 8-2 热間圧延管継手の試験時間 (Zr/Ta/SUS304L)

試験体No.	装着位置	装着時間 (h)						Total時間 (h)
		酸回収蒸発缶小型モックアップ試験設備運転時間 (h)						
		18,000	20,000	25,000	30,000	35,000	40,000	
6Z1	硝酸凝縮液ライン	○	▽	▽	▽	▽	▽	21,000
6Z2	硝酸凝縮液ライン	○	▽	▽	▽	▽	▽	16,000
6Z4	硝酸凝縮液ライン	○	▽	▽	▽	▽	▽	21,000
7Z7	硝酸凝縮液ライン					○	▽	5,000
1Z1	濃縮液ライン	○	▽	▽	▽	▽	▽	21,000
40Z12	濃縮液ライン	○	▽	▽	▽	▽	▽	21,000
2Z3	供給液ライン	○	▽	▽	▽	▽	▽	21,957
1Z2	供給液ライン	○	▽	▽	▽	▽	▽	21,957
5Z1	冷却水ライン	○	▽	▽	▽	▽	▽	21,000
30Z22	計装用圧空ライン	○	▽	▽	▽	▽	▽	21,000
6Z6	加熱用蒸気ライン	○	▽	▽	▽	▽	▽	21,000

○ : 試験開始, ▽ : 評価

表9 HIP管継手の試験時間

試験体No.	装着位置	装着時間 (h)						Total時間 (h)
		酸回収蒸発缶小型モックアップ試験設備運転時間 (h)						
		18,000	20,000	25,000	30,000	35,000	40,000	
T1	硝酸凝縮液ライン			○	▽			3,000
T7	硝酸凝縮液ライン					○	▽	5,000
T8	硝酸凝縮液ライン					○	▽	5,000
Z1	硝酸凝縮液ライン			○	▽			3,000
T3	濃縮液ライン	○	▽	▽	▽	▽	▽	19,274.5
Z3	濃縮液ライン	○	▽	▽	▽	▽	▽	19,274.5
T2	供給液ライン	○	▽	▽	▽	▽	▽	18,000
Z2	供給液ライン	○	▽	▽	▽	▽	▽	18,000
T6	冷却水ライン	○	▽	▽	▽	▽	▽	18,000
Z6	冷却水ライン	○	▽	▽	▽	▽	▽	18,000
T4	計装用圧空ライン	○	▽	▽	▽	▽	▽	18,000
Z4	計装用圧空ライン	○	▽	▽	▽	▽	▽	18,000
T5	加熱用蒸気ライン	○	▽	▽	▽	▽	▽	18,000
Z5	加熱用蒸気ライン	○	▽	▽	▽	▽	▽	18,000

○：試験開始、▽：評価

表10 爆接管継手の試験時間

試験体No.	装着位置	装着時間 (h)						Total時間 (h)
		酸回収蒸発缶小型モックアップ試験設備運転時間 (h)						
		18,000	20,000	25,000	30,000	35,000	40,000	
1-T	硝酸凝縮液ライン	○	▽					20,000
1-Z	硝酸凝縮液ライン	○	▽					20,000
2-1T	濃縮液ライン	○	▽					20,000
2-1Z	濃縮液ライン	○	▽	▽	▽	▽	▽	20,000
2-2T	供給液ライン	○	▽	▽	▽	▽	▽	20,000
2-2Z	供給液ライン	○	▽	▽	▽	▽	▽	20,000
5-T	冷却水ライン	○	▽	▽	▽	▽	▽	20,000
5-Z	冷却水ライン	○	▽	▽	▽	▽	▽	20,000
3-T	計装用圧空ライン	○	▽	▽	▽	▽	▽	20,000
3-Z	計装用圧空ライン	○	▽	▽	▽	▽	▽	20,000
4-T	加熱用蒸気ライン	○	▽	▽	▽	▽	▽	20,000
4-Z	加熱用蒸気ライン	○	▽	▽	▽	▽	▽	20,000

○：試験開始、▽：評価

表11-1 热間圧延管継手の耐圧試験結果 (Ti-5Ta/Ta/SUS304L)

試験体No.		酸回収蒸発缶小型モックアップ試験設備運転時間 (h)									
		22,000後		25,000後		30,000後		35,000後		40,000後	
		開始時	30分後	開始時	30分後	開始時	30分後	開始時	30分後	開始時	30分後
6T1	圧力 (kg/cm ²)	3.425	3.416	3.473	3.462						
	温度 (°C)	23.2	23.2	6.6	6.6						
6T2	圧力 (kg/cm ²)	3.372	3.357	3.268	3.258	2.866	2.861				
	温度 (°C)	21.3	21.6	7.7	7.5	29.4	29.7				
6T3	圧力 (kg/cm ²)	3.210	3.208	3.638	3.633	2.866	2.861	3.327	3.323	3.511	3.511
	温度 (°C)	26.6	226.4	5.1	5.2	29.4	29.7	17.7	17.4	20.5	20.6
7T7	圧力 (kg/cm ²)									3.511	3.511
	温度 (°C)									20.5	20.6
2T2	圧力 (kg/cm ²)	3.218	3.213	3.230	3.225	3.094	3.094	3.431	3.431	3.389	3.390
	温度 (°C)	27.0	26.6	8.2	8.0	29.2	29.4	19.4	19.4	22.7	22.7
30T22	圧力 (kg/cm ²)	3.218	3.213	3.172	3.167	3.094	3.094	3.431	3.431	3.389	3.390
	温度 (°C)	27.0	26.6	8.3	8.1	29.2	29.4	19.4	19.4	22.7	22.7
2T1	圧力 (kg/cm ²)	3.058	3.063	3.580	3.570	2.968	2.954	3.321	3.321	3.539	3.534
	温度 (°C)	27.0	27.2	7.3	7.6	28.7	29.0	17.3	17.4	20.5	20.6
1T1	圧力 (kg/cm ²)	3.058	3.058	3.496	3.491	2.968	2.954	3.321	3.321	3.539	3.534
	温度 (°C)	26.3	26.5	7.7	7.6	28.7	29.0	17.3	17.4	20.5	20.6
5T2	圧力 (kg/cm ²)	3.731	3.721	3.563	3.552	3.100	3.095	3.319	3.319	3.427	3.422
	温度 (°C)	22.5	22.6	7.1	7.2	29.1	29.3	17.3	17.4	22.6	22.6
30T21	圧力 (kg/cm ²)	3.429	3.419	3.490	3.480	3.863	2.868	3.437	3.432	3.431	3.431
	温度 (°C)	23.2	23.1	7.7	7.2	29.5	29.8	19.4	19.5	22.7	22.7
6T5	圧力 (kg/cm ²)	3.350	3.326	3.571	3.565	2.982	2.983	3.322	3.302	3.364	3.354
	温度 (°C)	21.3	21.6	7.3	6.5	28.7	28.9	17.3	17.4	20.7	20.4

■ 継手部から漏れ

表11-2 熱間圧延管継手の耐圧試験結果 (Zr/Ta/SUS304L)

試験体No.		酸回収蒸発缶小型モックアップ試験設備運転時間 (h)									
		22,000後		25,000後		30,000後		35,000後		40,000後	
		開始時	30分後	開始時	30分後	開始時	30分後	開始時	30分後	開始時	30分後
6Z1	圧力 (kg/cm ²)	3.144	3.145	3.568	3.562	3.097	3.092	3.321	3.316	3.434	3.430
	温度 (°C)	20.4	20.7	7.1	6.6	29.1	29.2	17.3	17.4	22.1	22.4
6Z2	圧力 (kg/cm ²)	3.061	3.056	3.403	3.397	3.097	3.092	3.321	3.316		
	温度 (°C)	26.3	26.6	5.5	5.7	29.1	29.2	17.3	17.4		
6Z4	圧力 (kg/cm ²)	3.210	3.208	3.453	3.452	3.097	3.092	3.321	3.316	3.321	3.316
	温度 (°C)	26.6	226.4	6.0	6.0	29.1	29.2	17.3	17.4	17.3	17.4
7Z7	圧力 (kg/cm ²)									3.434	3.430
	温度 (°C)									22.1	22.4
1Z1	圧力 (kg/cm ²)	3.213	3.208	3.453	3.448	3.097	3.097	3.324	3.320	3.286	3.286
	温度 (°C)	26.5	26.3	8.1	7.9	29.1	29.3	17.3	17.3	20.5	20.6
40Z12	圧力 (kg/cm ²)	3.213	3.208	3.495	3.485	3.097	3.097	3.324	3.320	3.286	3.286
	温度 (°C)	26.5	26.3	7.7	7.7	29.1	29.3	17.3	17.3	20.5	20.5
2Z3	圧力 (kg/cm ²)	3.112	3.093	3.196	3.191	2.986	2.987	3.439	3.440	3.534	3.534
	温度 (°C)	20.4	20.6	8.1	7.9	28.7	28.9	19.4	19.4	20.5	20.6
1Z2	圧力 (kg/cm ²)	3.355	3.351	3.581	3.571	2.986	2.987	3.439	3.440	3.534	3.534
	温度 (°C)	21.4	21.8	7.4	7.4	28.7	28.9	19.4	19.4	20.5	20.6
5Z1	圧力 (kg/cm ²)	3.437	3.427	3.578	3.573	3.100	3.095	3.319	3.319	3.427	3.422
	温度 (°C)	23.2	23.1	7.9	7.8	29.1	29.3	17.3	17.4	22.6	22.6
30Z22	圧力 (kg/cm ²)	4.744	4.743	3.506	3.501	3.863	2.868	3.437	3.432	3.431	3.431
	温度 (°C)	21.9	21.9	7.6	7.3	29.5	29.8	19.4	19.5	22.7	22.7
6Z6	圧力 (kg/cm ²)	3.323	3.329	3.287	3.277	2.982	2.983	3.322	3.302	3.364	3.354
	温度 (°C)	21.9	22.1	8.1	7.9	28.7	28.9	17.3	17.4	20.7	20.4

表12 熱間圧延管継手の超音波探傷試験条件

	製作時	試験後
公称周波数	30MHz	30MHz
集束位置	接合面	接合面
探傷感度	基準部100%	基準部100%
走査	周方向	1度毎
	軸方向	0.5mm／回転
		0.3mm／回転

表13 耐圧（気密）試験結果

	圧力 (kgf/cm ²)	結 果
6T1	0.10以下	気泡発生認められず
	0.11	一箇所から、断続的に気泡発生
	0.13	一箇所から、連続した気泡発生
6T2	0.05以下	気泡発生認められず
	0.06	一箇所から、断続的に気泡発生
	0.08	一箇所から、連続した気泡発生

表14-1 HIP管継手の耐圧試験結果 (Ti-5Ta/Ta/SUS304L)

試験体No.		酸回収蒸発缶小型モックアップ試験設備運転時間 (h)									
		22,000後		25,000後		30,000後		35,000後		40,000後	
		開始時	30分後	開始時	30分後	開始時	30分後	開始時	30分後	開始時	30分後
T1	圧力 (kg/cm ²)			3.613	3.603	■■■■■■■■■■■■					
	温度 (°C)			7.5	7.4	■■■■■■■■■■■■					
T7	圧力 (kg/cm ²)									3.511	3.511
	温度 (°C)									20.5	20.6
T8	圧力 (kg/cm ²)									3.511	3.511
	温度 (°C)									20.5	20.6
T3	圧力 (kg/cm ²)	3.218	3.213	3.644	3.638	3.094	3.094	3.431	3.431	3.389	3.390
	温度 (°C)	27.0	26.6	5.4	5.7	29.2	29.4	19.4	19.4	22.7	22.7
T2	圧力 (kg/cm ²)			3.637	3.636	2.968	2.954	3.321	3.321	3.539	3.534
	温度 (°C)			6.0	6.3	28.7	29.0	17.3	17.4	20.5	20.6
T6	圧力 (kg/cm ²)			3.610	3.605	2.968	2.954	3.319	3.319	3.427	3.422
	温度 (°C)			7.7	7.5	28.7	28.9	17.3	17.4	22.6	22.6
T4	圧力 (kg/cm ²)			3.575	3.570	2.870	2.870	3.437	3.432	3.431	3.431
	温度 (°C)			6.7	6.9	29.5	29.8	19.4	19.5	22.7	22.7
T5	圧力 (kg/cm ²)			3.478	3.473	3.098	3.098	3.322	3.302	3.364	3.354
	温度 (°C)			7.8	7.7	29.1	29.2	17.3	17.4	20.7	20.4

■ 継手部から破断

表14-2 HIP管継手の耐圧試験結果 (Zr/Ta/SUS304L)

試験体No.		酸回収蒸発缶小型モックアップ試験設備運転時間 (h)									
		22,000後		25,000後		30,000後		35,000後		40,000後	
		開始時	30分後	開始時	30分後	開始時	30分後	開始時	30分後	開始時	30分後
Z1	圧力 (kg/cm ²)			3.613	3.603						
	温度 (°C)			7.5	7.4						
Z3	圧力 (kg/cm ²)	3.213	3.208	3.578	3.562	3.097	3.097	3.324	3.320	3.286	3.286
	温度 (°C)	26.5	26.3	7.4	7.4	29.1	29.3	17.3	17.3	20.5	20.6
Z2	圧力 (kg/cm ²)			3.493	3.493	2.986	2.987	3.439	3.440	3.534	3.534
	温度 (°C)			7.9	7.8	28.7	28.9	19.4	19.4	20.5	20.6
Z6	圧力 (kg/cm ²)			3.286	3.276	2.984	2.980	3.322	3.302	3.427	3.422
	温度 (°C)			7.9	7.7	28.7	28.9	17.3	17.4	20.7	20.4
Z4	圧力 (kg/cm ²)			3.617	3.616	2.870	2.870	3.437	3.432	3.431	3.431
	温度 (°C)			5.7	5.8	29.5	29.8	19.4	19.5	22.7	22.7
Z5	圧力 (kg/cm ²)			3.481	3.471	3.098	3.098	3.319	3.319	3.364	3.354
	温度 (°C)			7.5	7.5	29.1	29.2	17.3	17.4	22.6	22.6

表15 爆接管継手の試験時間

試験体No.		酸回収蒸発缶小型モックアップ試験設備運転時間 (h)									
		22,000後		25,000後		30,000後		35,000後		40,000後	
		開始時	30分後	開始時	30分後	開始時	30分後	開始時	30分後	開始時	30分後
1-T	圧力 (kg/cm ²)			3.438	3.427	3.256	3.257	3.327	3.323	3.511	3.511
	温度 (°C)			6.9	6.7	28.4	28.4	17.7	17.4	20.5	20.6
1-Z	圧力 (kg/cm ²)			3.483	3.468	3.256	3.257	3.321	3.316	3.511	3.511
	温度 (°C)			7.3	7.3	28.4	28.4	17.3	17.4	20.5	20.6
2-1T	圧力 (kg/cm ²)			3.436	3.436	3.094	3.094	3.431	3.431	3.389	3.390
	温度 (°C)			6.1	6.2	29.2	29.4	19.4	19.4	22.7	22.7
2-1Z	圧力 (kg/cm ²)			3.395	3.390	3.097	3.097	3.324	3.320	3.286	3.286
	温度 (°C)			7.9	7.8	29.1	29.3	17.3	17.3	20.5	20.6
2-2T	圧力 (kg/cm ²)			3.498	3.492	2.968	2.954	3.321	3.321	3.539	3.534
	温度 (°C)			5.8	6.0	28.7	29.0	17.3	17.4	20.5	20.6
2-2Z	圧力 (kg/cm ²)			3.461	3.461	2.986	2.987	3.439	3.440	3.534	3.534
	温度 (°C)			7.9	7.8	28.7	28.9	19.4	19.4	20.5	20.6
5-T	圧力 (kg/cm ²)			3.628	3.628	3.100	3.095	3.319	3.319	3.427	3.422
	温度 (°C)			5.2	5.5	29.1	29.3	17.3	17.4	22.6	22.6
5-Z	圧力 (kg/cm ²)			3.471	3.465	2.984	2.980	3.319	3.319	3.427	3.422
	温度 (°C)			5.6	5.9	28.7	28.9	17.3	17.4	22.6	22.6
3-T	圧力 (kg/cm ²)			3.523	3.522	3.863	2.868	3.437	3.432	3.431	3.431
	温度 (°C)			7.5	7.3	29.5	29.8	19.4	19.5	22.7	22.7
3-Z	圧力 (kg/cm ²)			3.636	3.635	2.870	2.870	3.437	3.432	3.431	3.431
	温度 (°C)			6.1	6.4	29.5	29.8	19.4	19.5	22.7	22.7
4-T	圧力 (kg/cm ²)			3.571	3.560	2.982	2.983	3.322	3.302	3.364	3.354
	温度 (°C)			6.7	6.8	28.7	28.9	17.3	17.4	20.7	20.4
4-Z	圧力 (kg/cm ²)			3.631	3.633	3.098	3.098	3.322	3.302	3.364	3.354
	温度 (°C)			5.2	5.4	29.1	29.2	17.3	17.4	20.7	20.4

表16 各異材管継手の耐久性試験結果

○：異常無し

装着位置		熱間圧延管継手	HIP管継手	爆接管継手
プロセス系	供給液ライン	○	○	○
	硝酸凝縮液ライン	2試験体に耐圧試験で漏れ発生、残6試験体に腐食有	1試験体に耐圧試験中で破断残3試験体に腐食有	2試験体に腐食有
	濃縮液ライン	○	○	○
ユーティリティ系	計装用圧空ライン	○	○	○
	加熱用蒸気ライン	○	○	○
	冷却水ライン	○	○	○

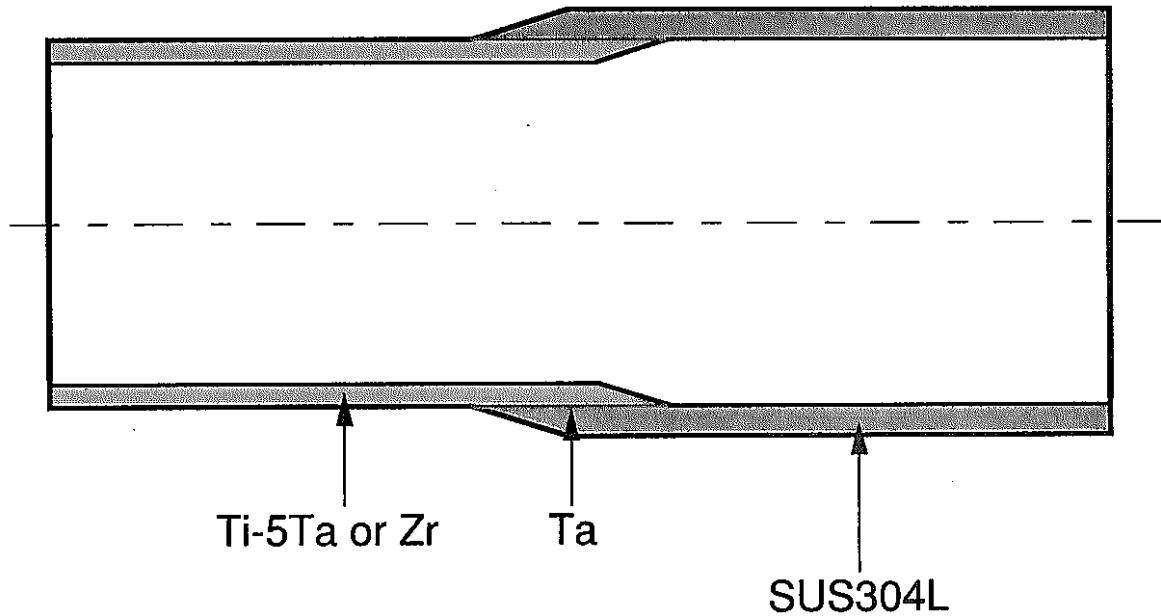
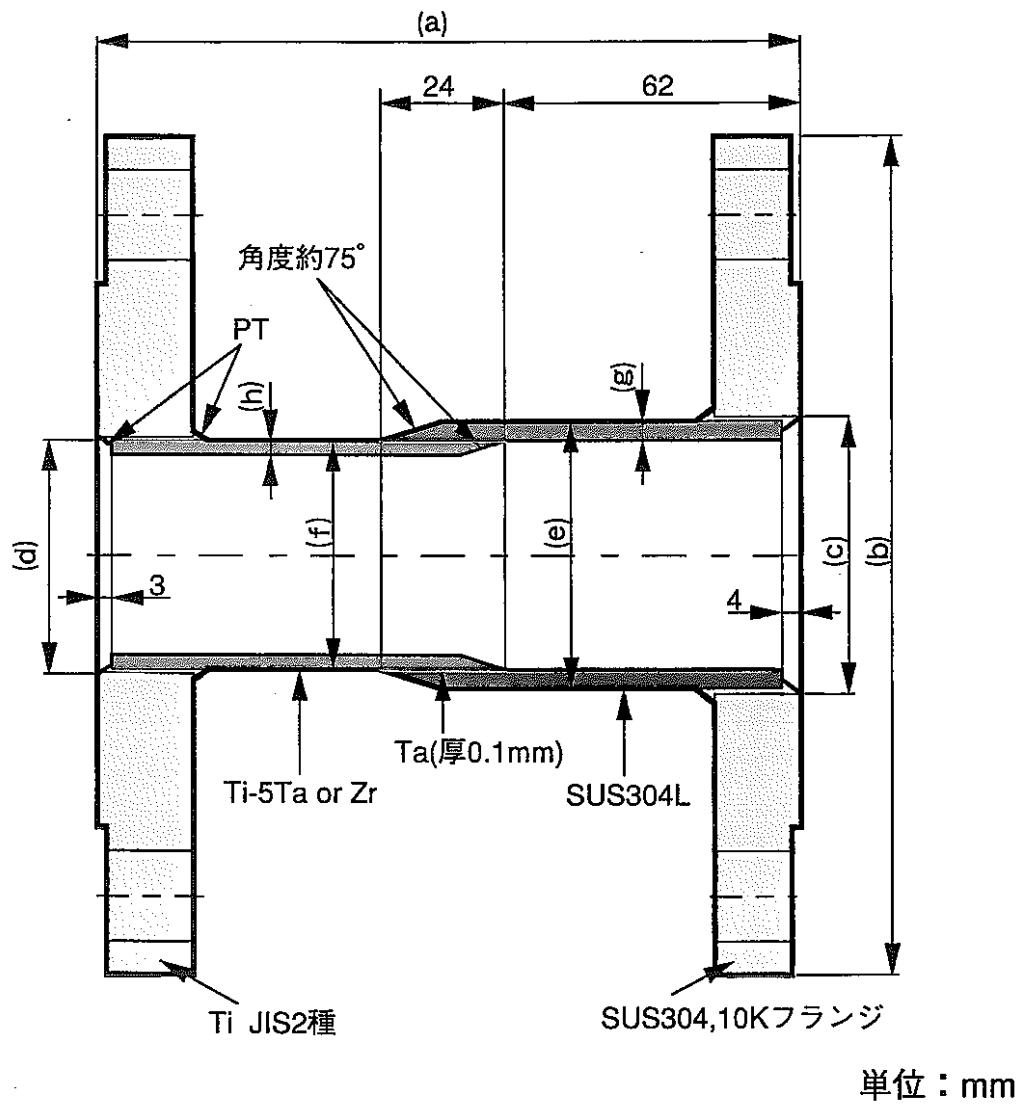
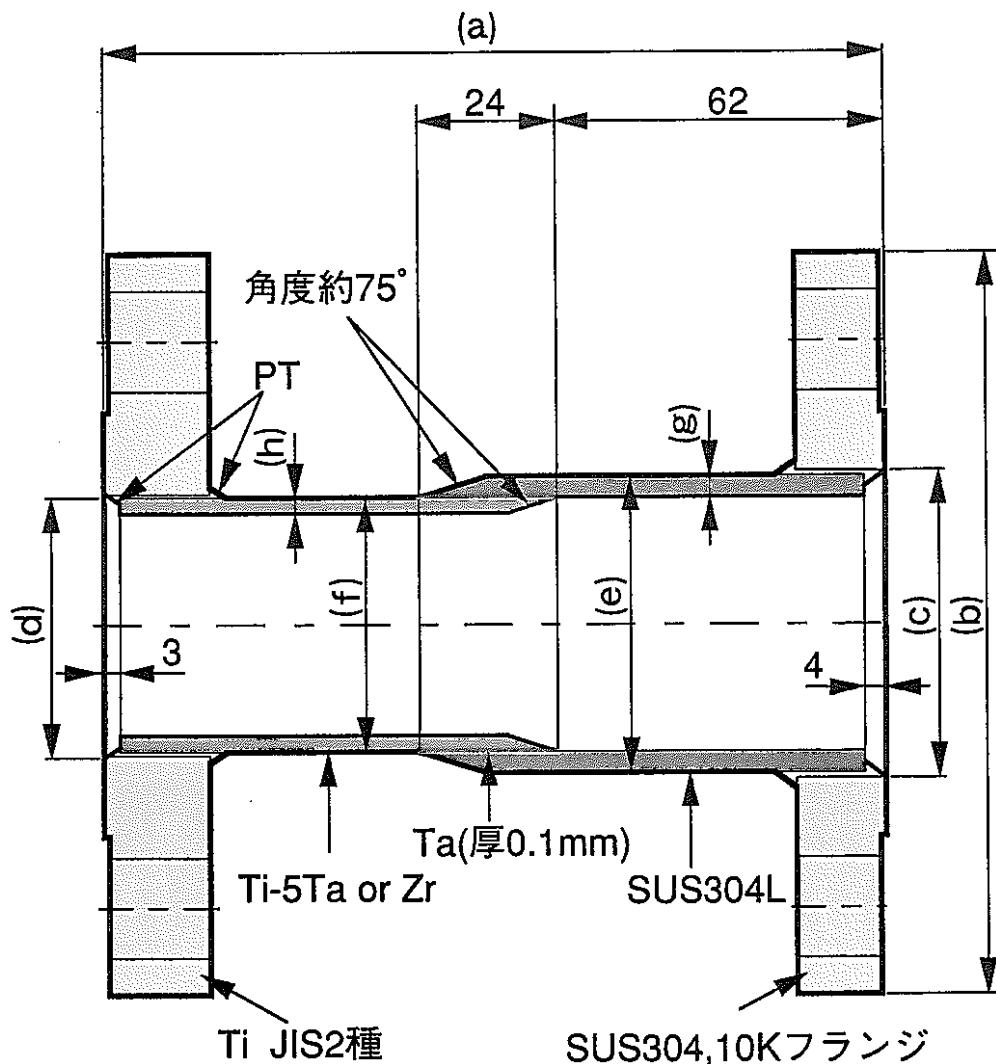


図 1 热間圧延接合管継手の形状



	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)
6T1	147.6	175.0	56.6	43.0	55.9	45.5	4.1	3.0
6T2	148.0	175.0	56.7	41.8	55.7	45.5	4.0	3.0
6T3	147.6	175.0	57.7	42.8	55.2	45.5	3.8	3.0
6Z1	147.6	175.0	57.0	44.4	55.4	46.1	3.8	3.0
6Z2	147.4	175.0	57.5	43.5	55.5	45.4	3.8	3.0
6Z4	147.7	175.0	56.0	43.0	55.4	45.1	3.8	3.0

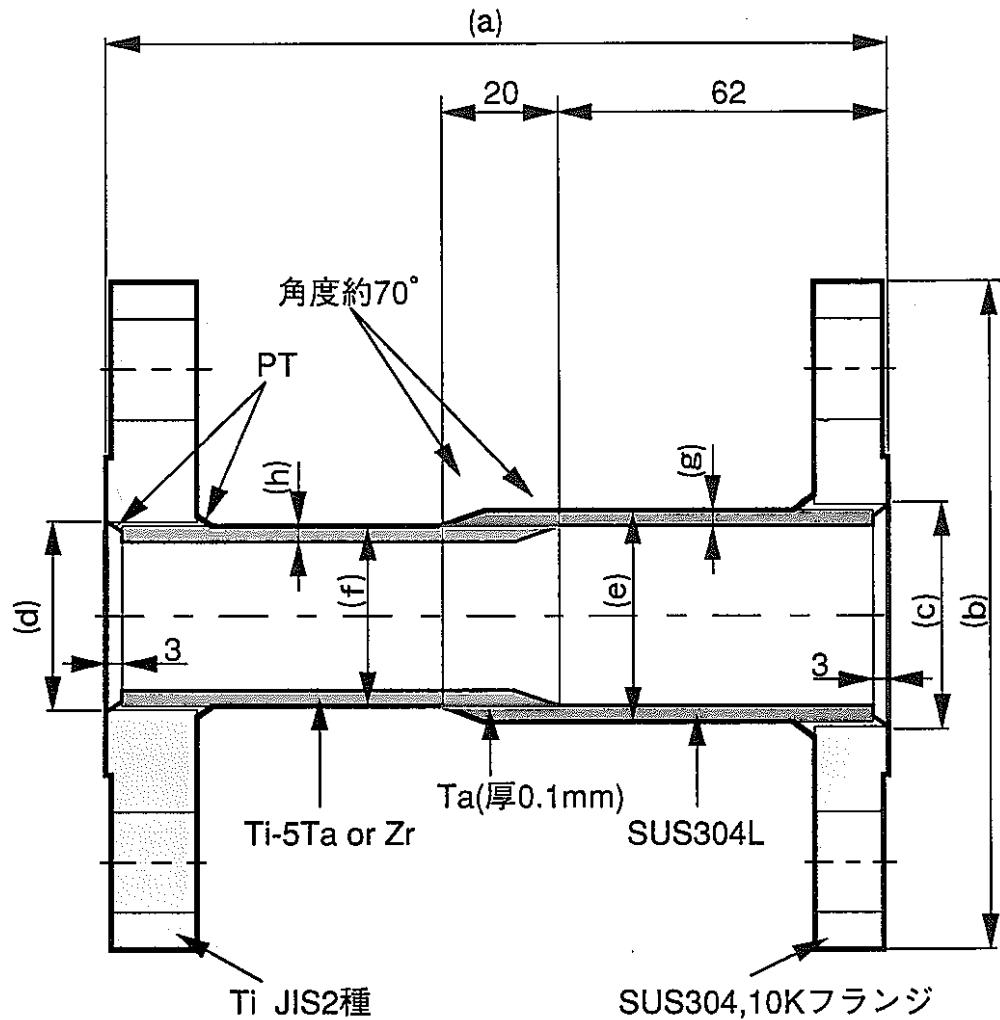
図 2-1 热間圧延管の形状および寸法
(硝酸凝縮液ライン)



単位 : mm

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)
6T5	147.6	139.9	56.4	43.5	55.4	45.3	3.9	2.9
6Z6	147.6	140.0	57.9	43.3	55.6	45.4	3.8	3.0

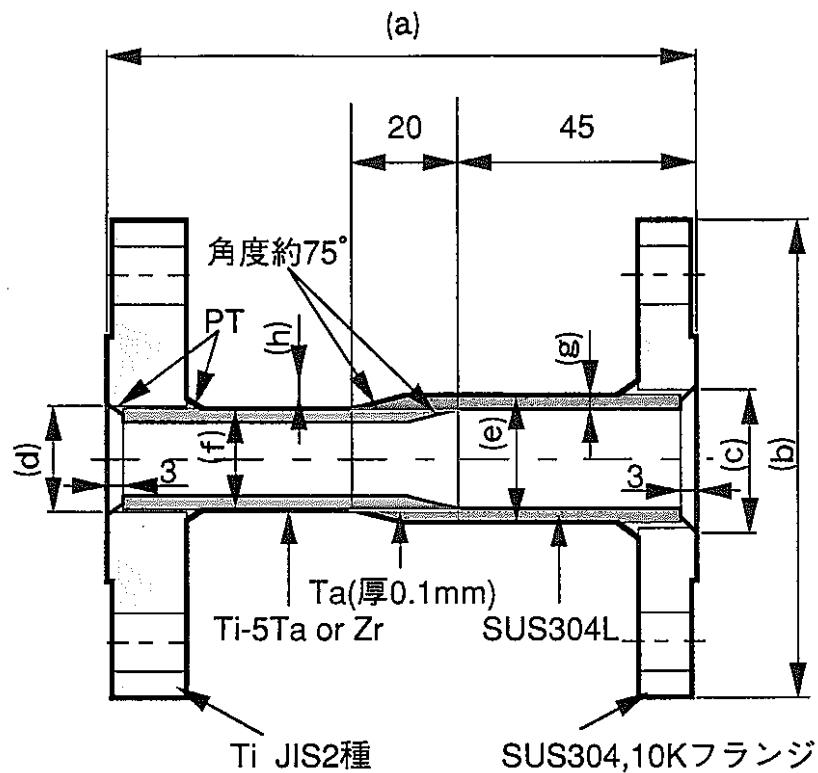
図 2-2 热間圧延管の形状および寸法
(加熱用蒸気ライン)



単位: mm

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)
5T2	147.5	125.0	38.3	32.9	40.4	33.4	3.2	3.2
5Z1	147.6	125.0	38.0	33.0	40.5	33.3	3.2	3.2

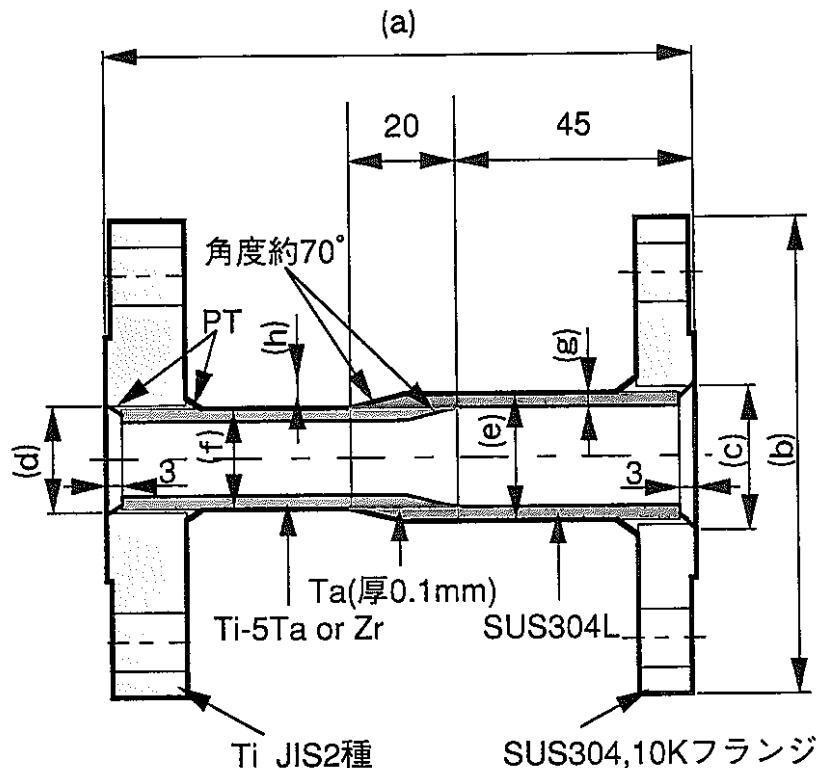
図 2-3 熱間圧延管の形状および寸法
(冷却水ライン)



単位 : mm

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)
2T2	110.0	89.7	23.8	18.4	24.3	18.6	2.5	2.5
30T22	109.7	89.4	22.9	16.7	22.9	16.7	2.3	2.3
1Z1	109.9	89.8	22.3	16.1	22.8	16.5	2.3	2.3
40Z12	109.8	89.8	24.0	17.1	24.0	17.1	2.3	2.5

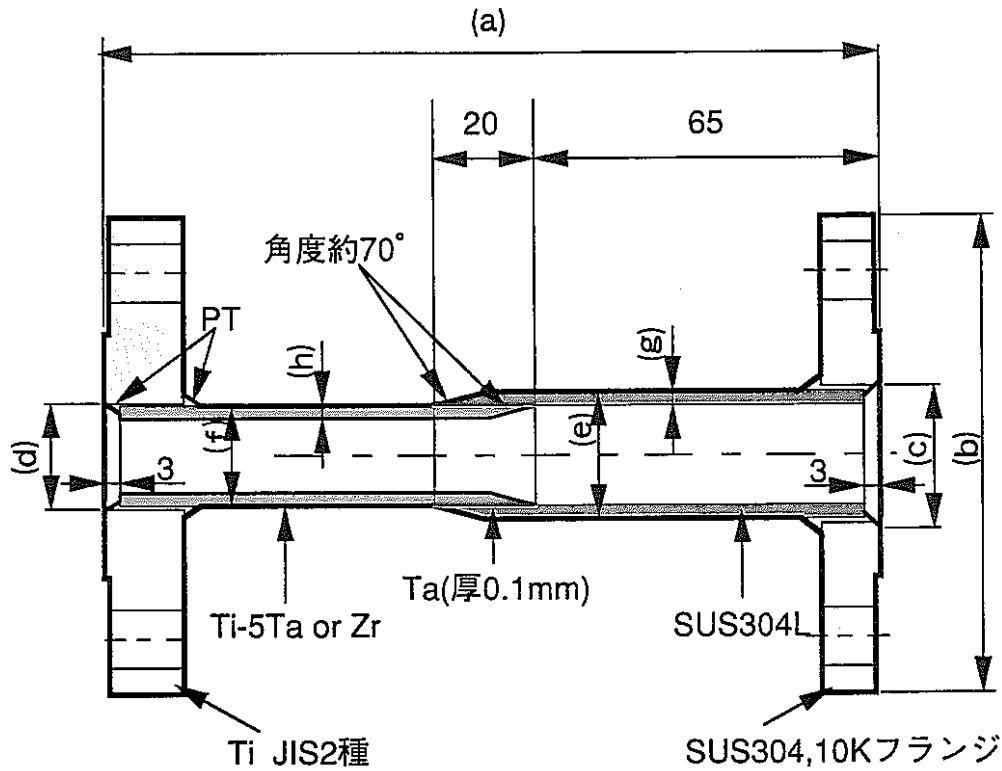
図 2-4 熱間圧延管の形状および寸法
(濃縮液ライン)



単位: mm

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)
1T1	110.0	89.8	22.0	16.7	22.2	16.5	2.3	2.3
2T1	110.0	89.8	24.6	18.5	24.3	18.7	2.5	2.6
2Z3	110.0	89.4	25.6	17.4	24.4	18.6	2.6	2.5
1Z2	110.0	89.8	25.6	17.4	22.6	16.6	2.3	2.3

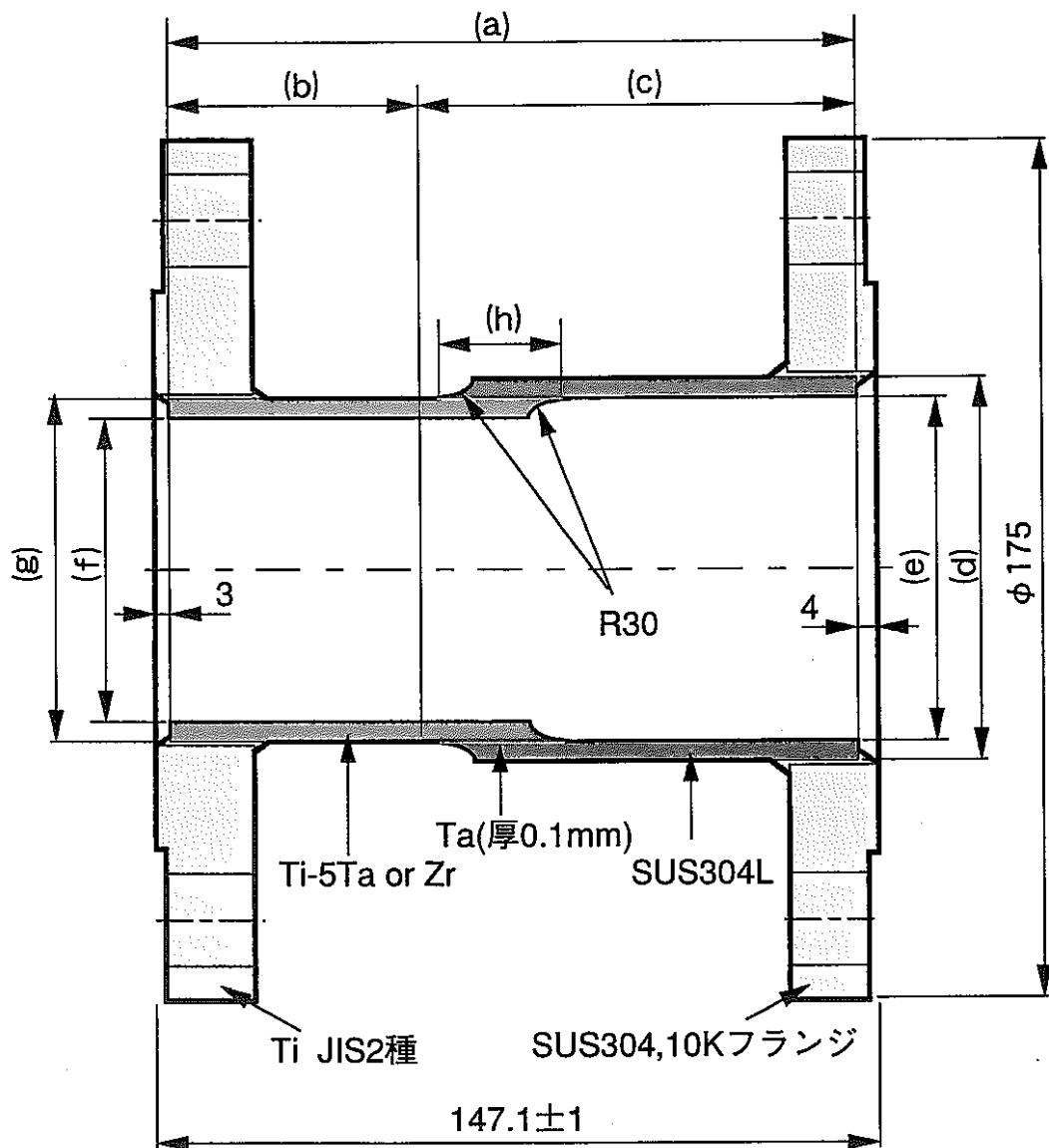
図 2-5 热間圧延管の形状および寸法
(供給液ライン)



単位 : mm

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)
30T21	109.7	89.4	22.9	16.7	22.9	16.7	2.3	2.3
30Z22	109.8	89.8	24.0	17.1	24.0	16.6	2.3	2.3

図 2-6 熱間圧延管の形状および寸法
(計装用圧空ライン)



単位 : mm

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)
7T7	140.17	52.50	87.67	77.17	70.11	61.34	68.71	35.67
7Z7	140.25	54.00	86.25	76.68	69.61	61.05	68.16	35.25

図 2-7 熱間圧延管の形状および寸法
(大径サイズ, 硝酸凝縮液ライン)

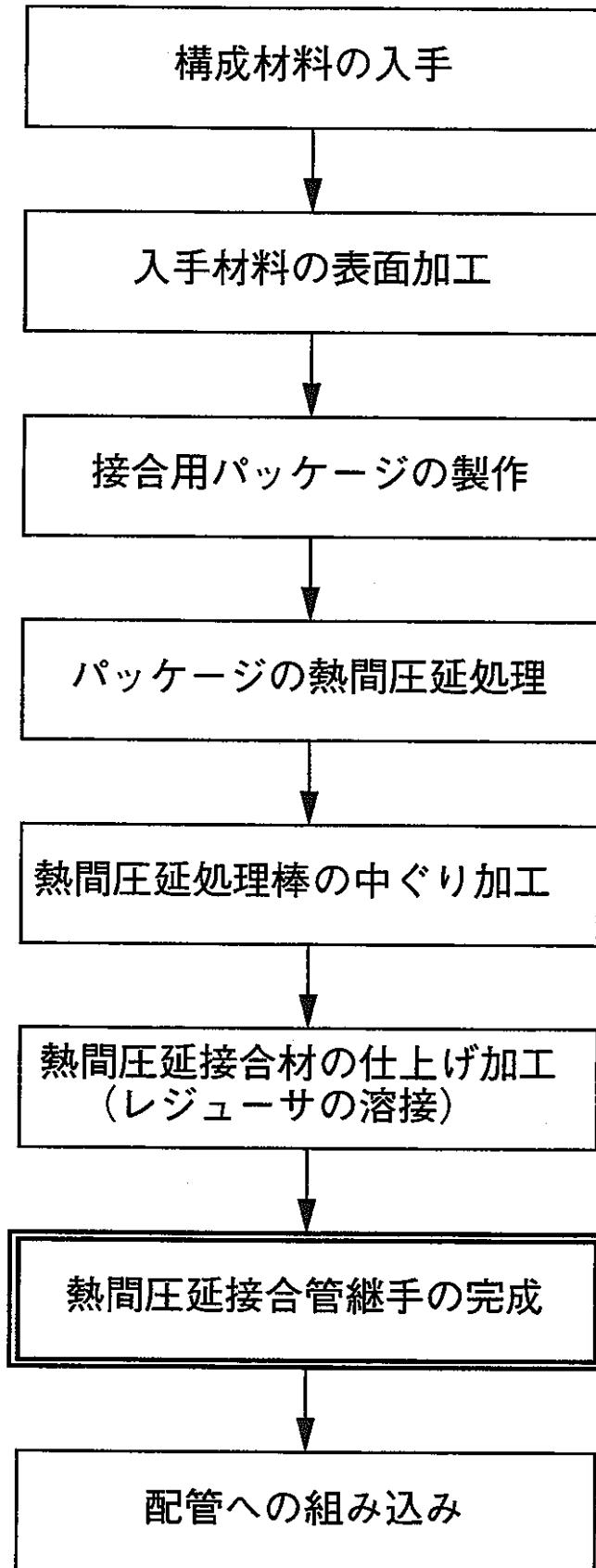


図 3 热間圧延接合管継手の製造フロー

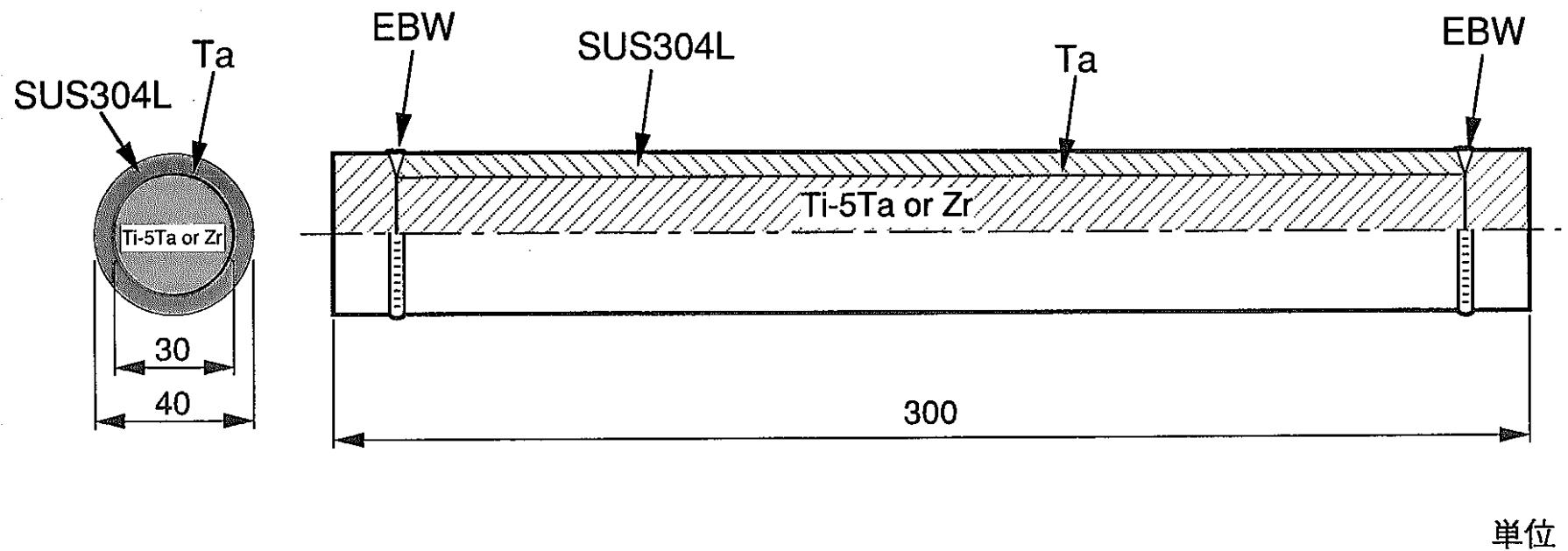


図4 接合用パッケージの形状（外径：40mmΦ）

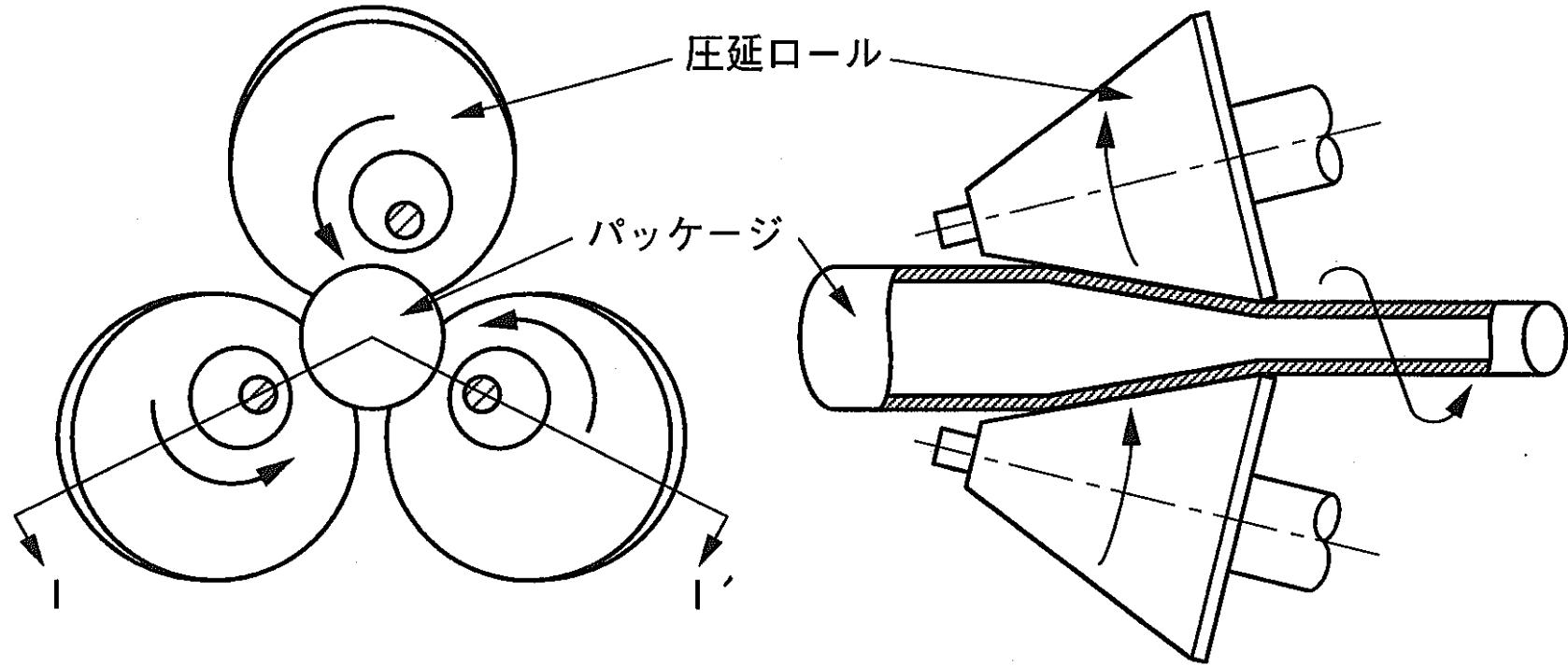
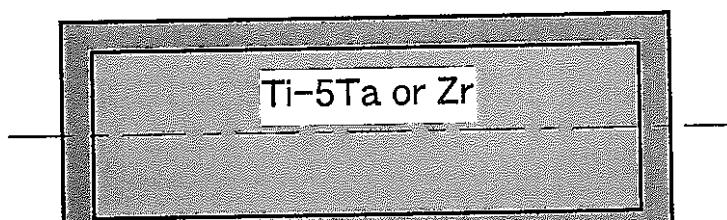
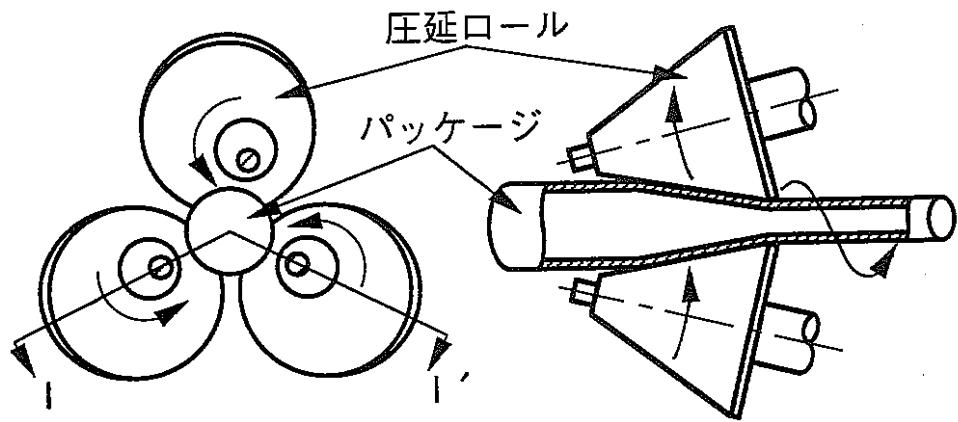


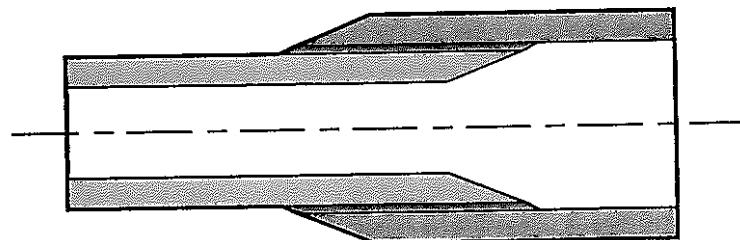
図5 3軸傾斜型特殊圧延機によるパッケージの熱間圧延処理



(a) 热間圧延処理

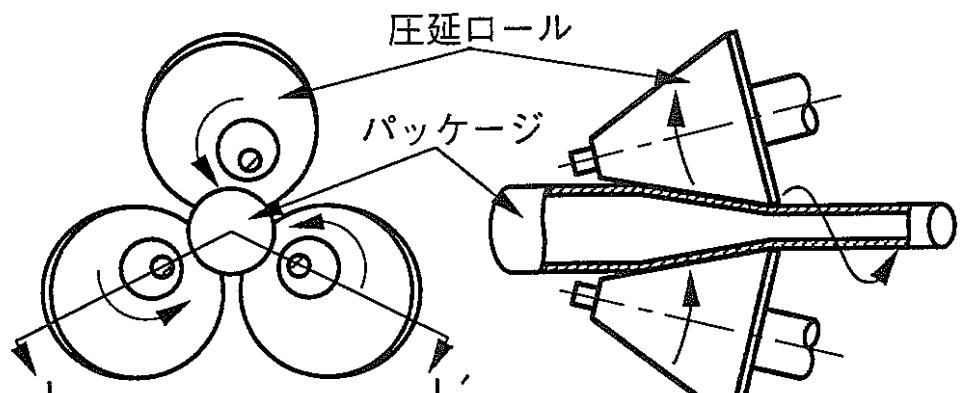


(b) 中ぐり加工



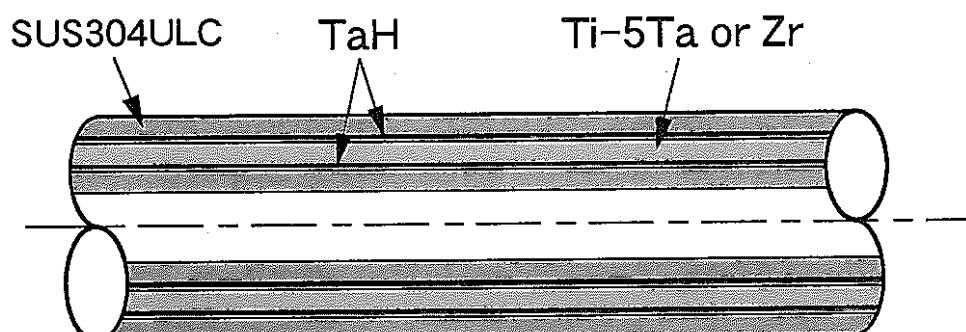
(c) 仕上げ加工

図 6 異材管継手の製作工程



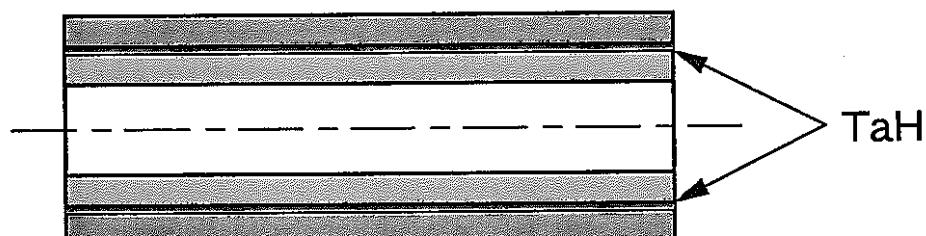
a) 正面図

b) 展開図 (I - I)

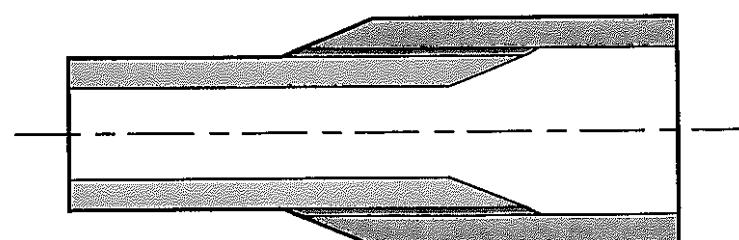


C) 壓延処理材

(a) 熱間圧延処理



(b) 中ぐり加工



(c) 仕上げ加工

図7 大径サイズ異材管継手の製作工程

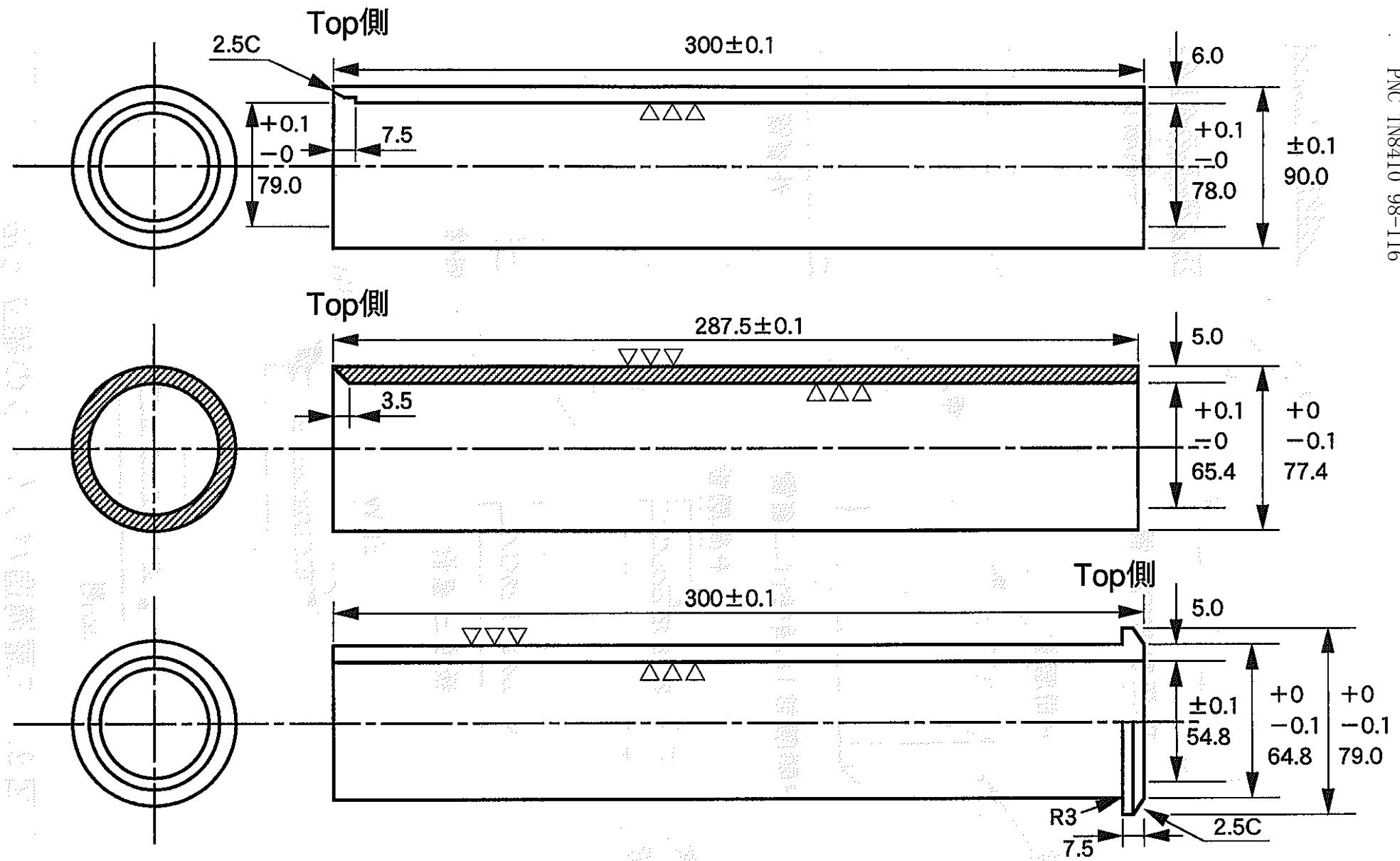


図 8 三層構造パッケージの各部詳細寸法

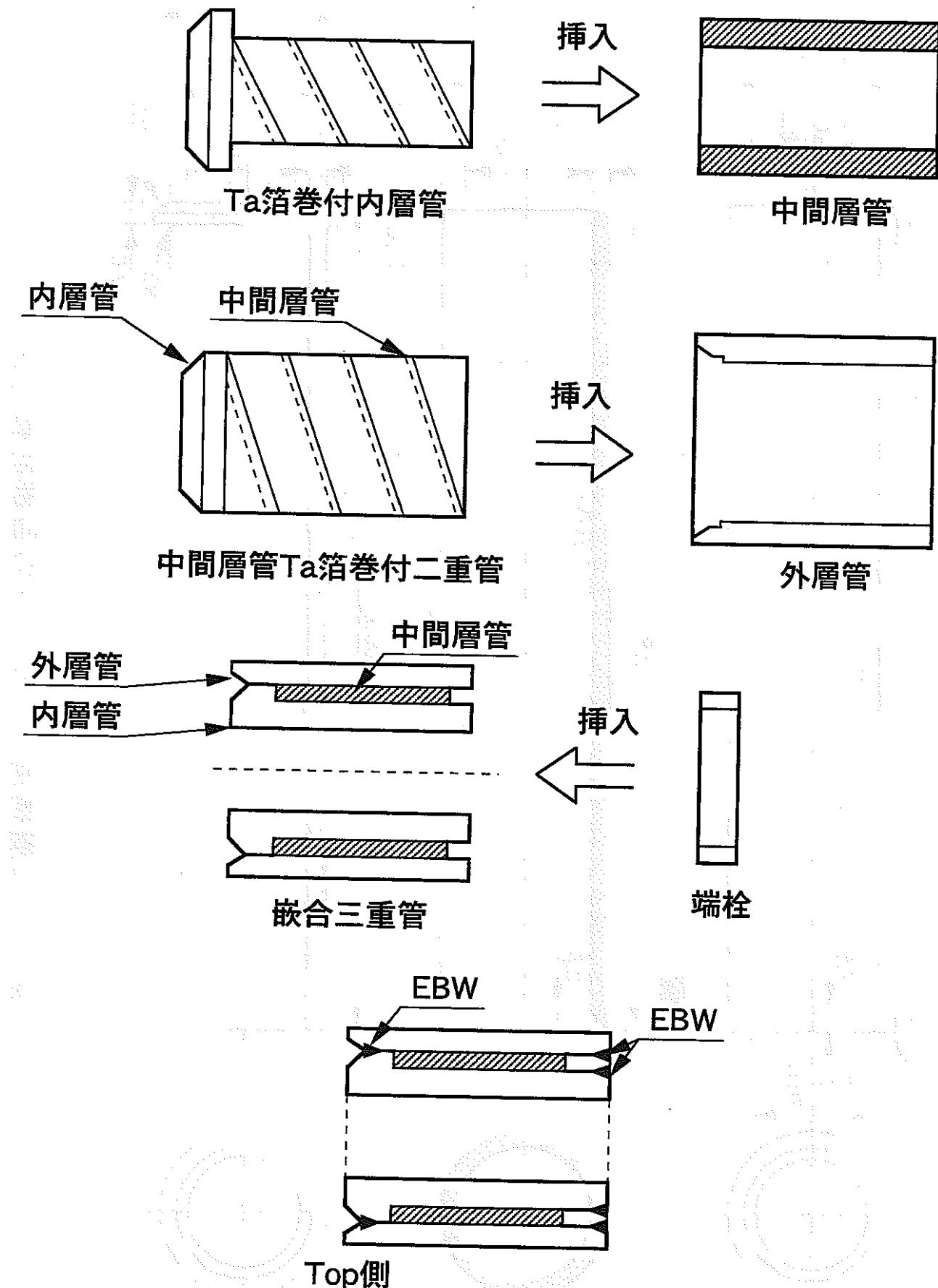


図9 三層構造パッケージの組立方法

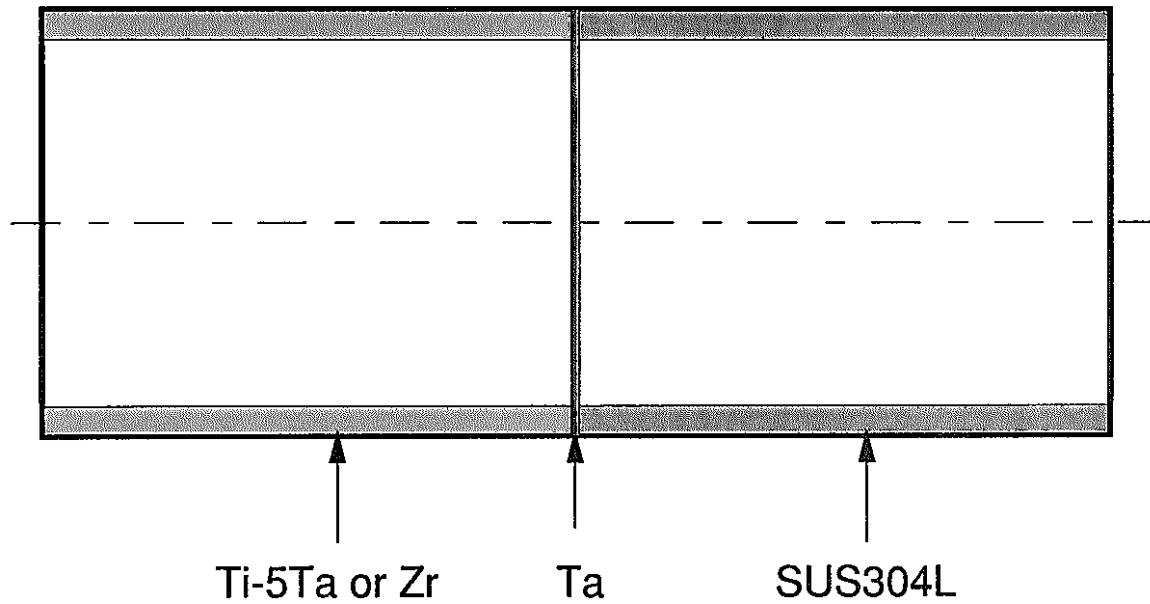
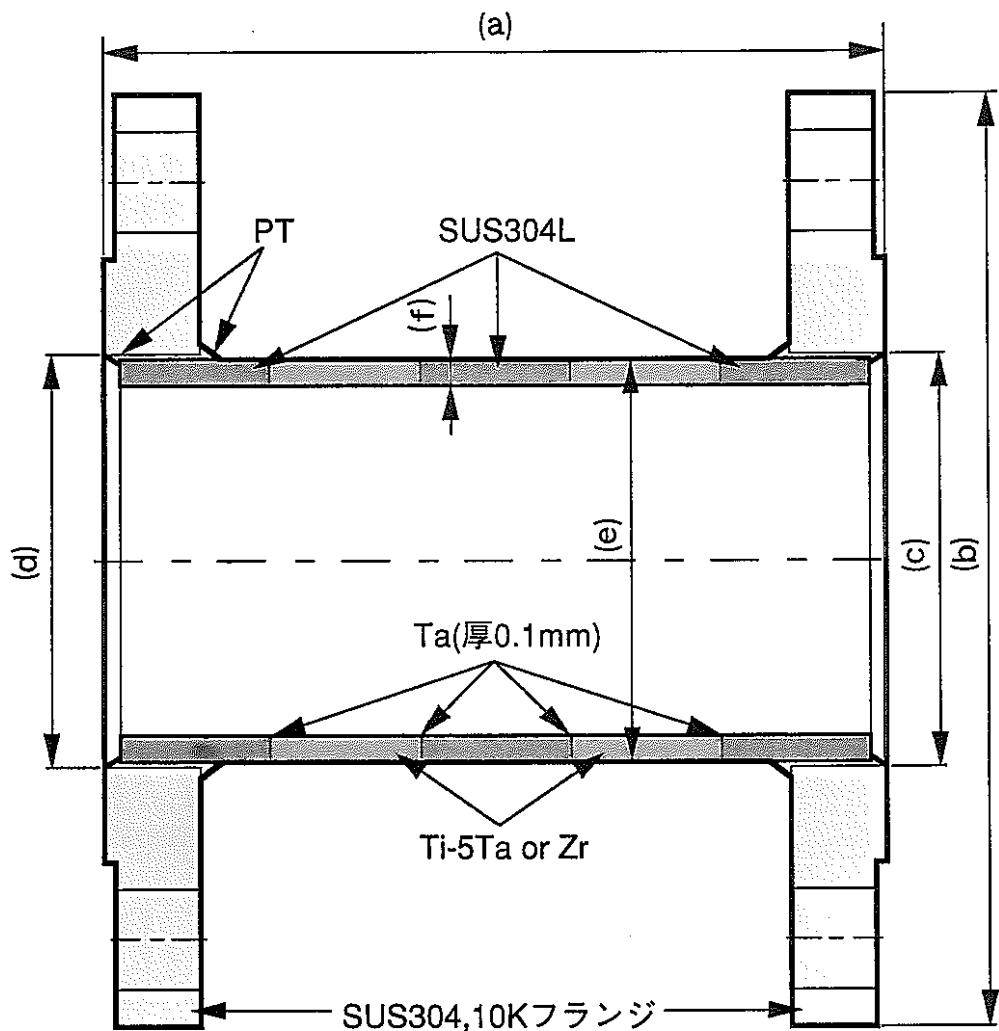


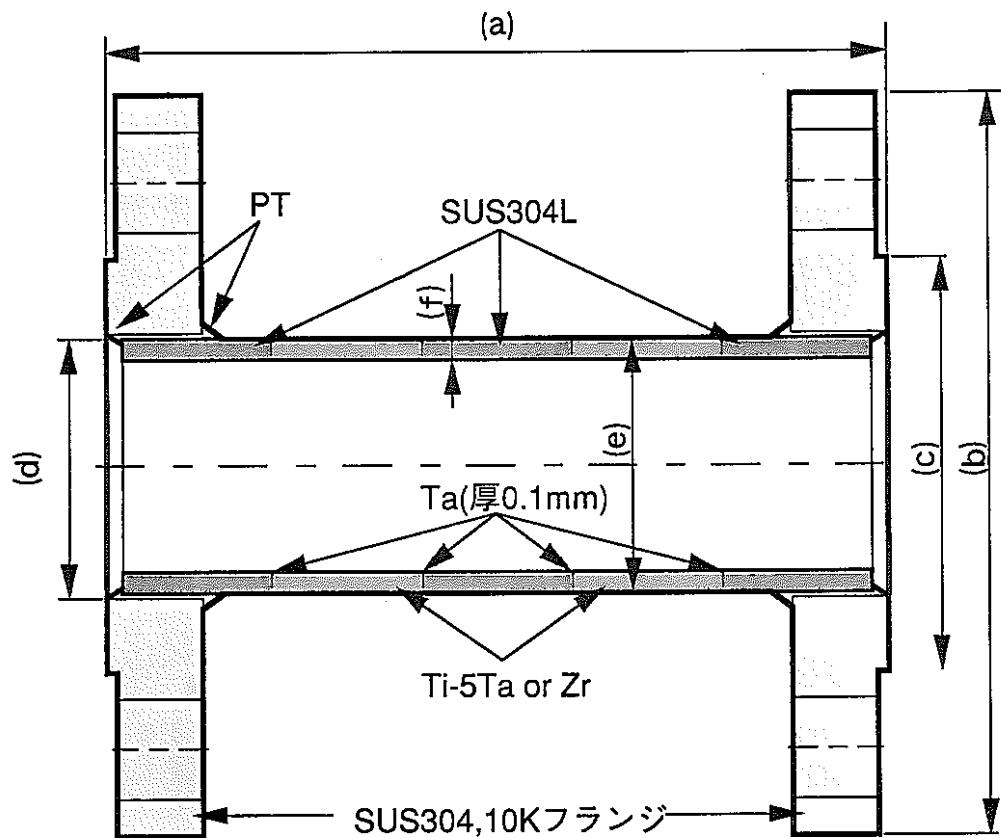
図10 HIP接合管継手の形状



単位：mm

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
T1	147.36 ~147.38	174.75 ~174.85	76.35	76.35	76.25	5.19 ~5.22
Z1	147.45	174.70	76.45	76.45	76.0	5.28

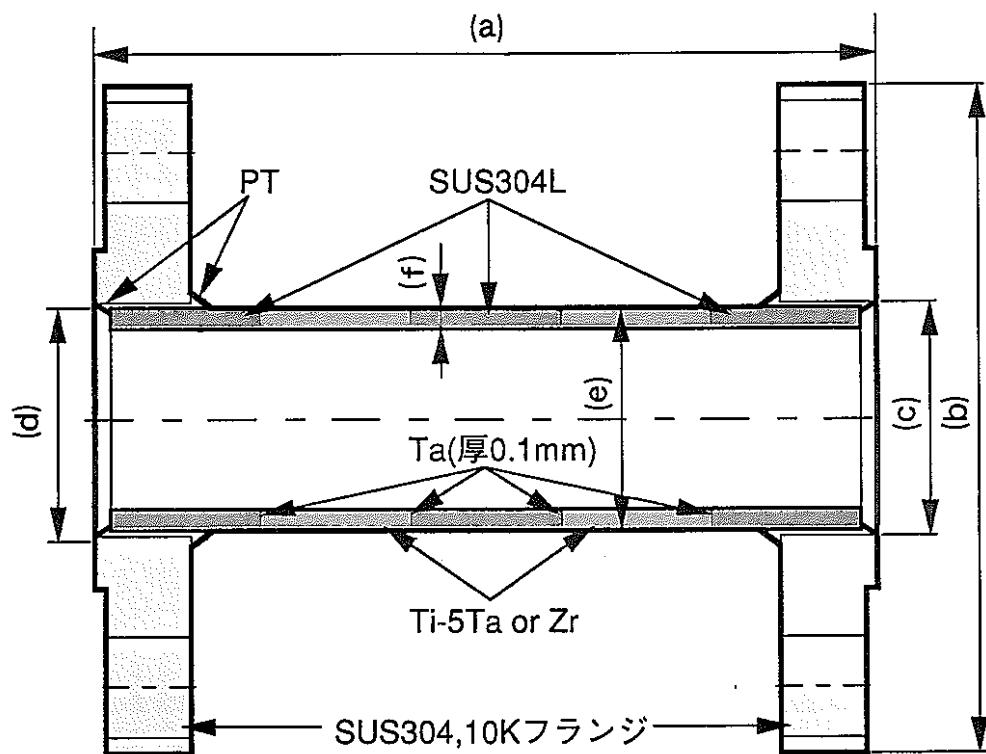
図11-1 HIP管の形状および寸法
(硝酸凝縮液ライン)



単位：mm

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
T5	147.55	139.75	48.70	48.70	48.65	3.55
Z6	147.60	139.90	48.70	48.70	48.60	3.68~3.72

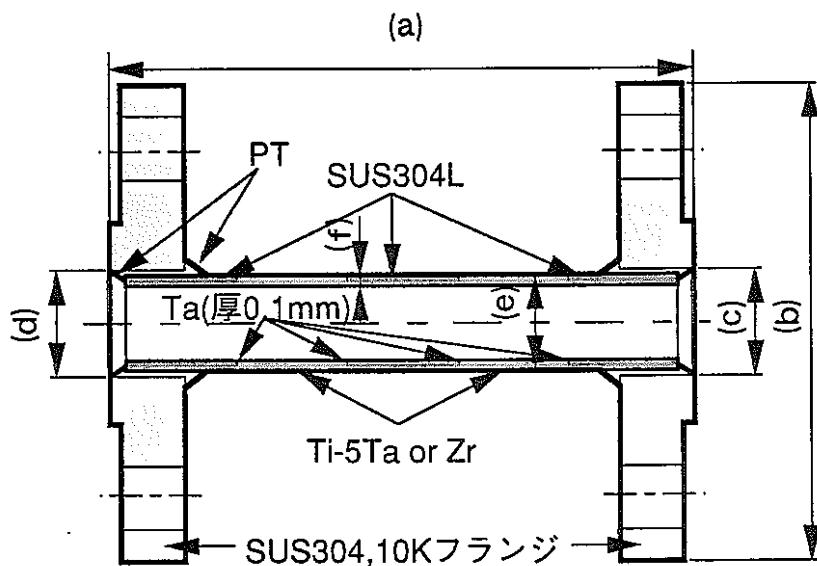
図11-2 HIP管の形状および寸法
(加熱用蒸気ライン)



単位: mm

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
T6	147.50	124.85	34.10	34.10	34.00	3.43~3.47
Z5	147.50	124.90	34.20	34.20	34.05	3.50

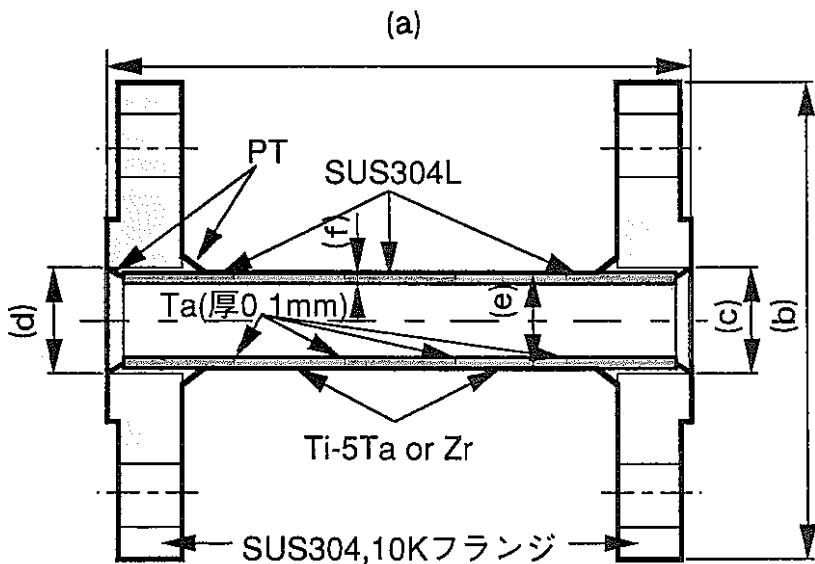
図11-3 HIP管の形状および寸法
(冷却水ライン)



単位：mm

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
T3	110.00	89.90	17.35	17.35	17.30	2.31~2.38
Z3	110.20	90.00	17.40	17.40	17.35	2.337~2.377

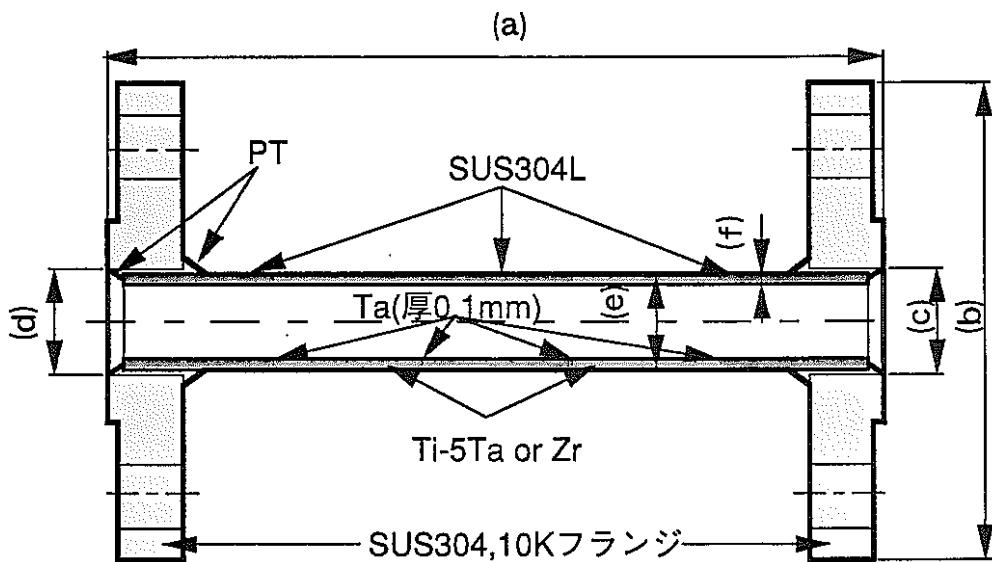
図11-4 HIP管の形状および寸法
(濃縮液ライン)



単位: mm

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
T2	110.25	89.95	17.40	17.40	17.35	2.30~2.39
Z2	110.10 ~110.20	89.95	17.35	17.35	17.30	2.297~2.372

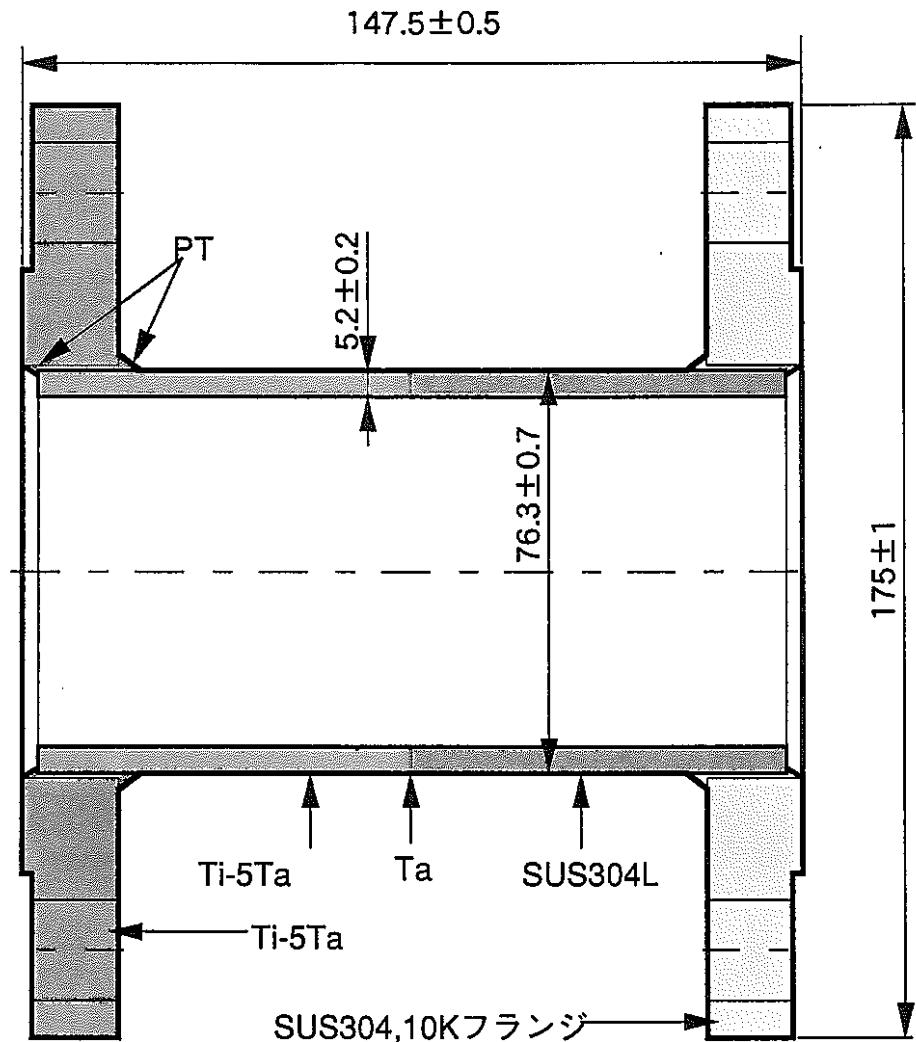
図11-5 HIP管の形状および寸法
(供給液ライン)



単位 : mm

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
T4	147.60	90.00	17.35	17.35	17.30	2.33~2.37
Z4	147.50	89.95	17.40	17.40	17.35	2.342~2.398

図11-6 HIP管の形状および寸法
(計装用圧空ライン)



単位 : mm

	Ta厚
従来法 (T7)	0.1
改良法 (T8)	0.2

図11-7 HIP管の形状および寸法
(硝酸凝縮液ライン)

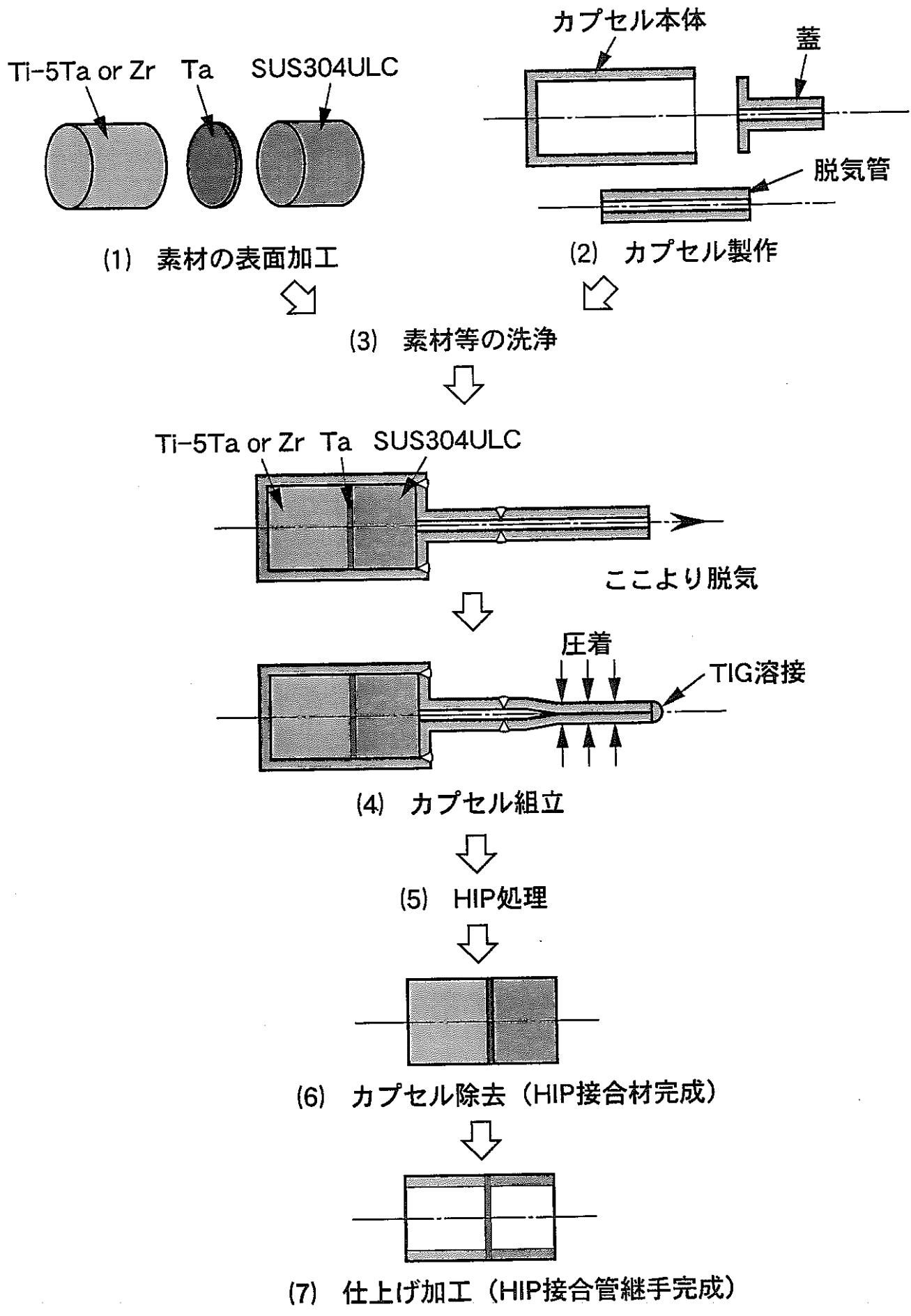


図12 HIP接合管継手の製造手順

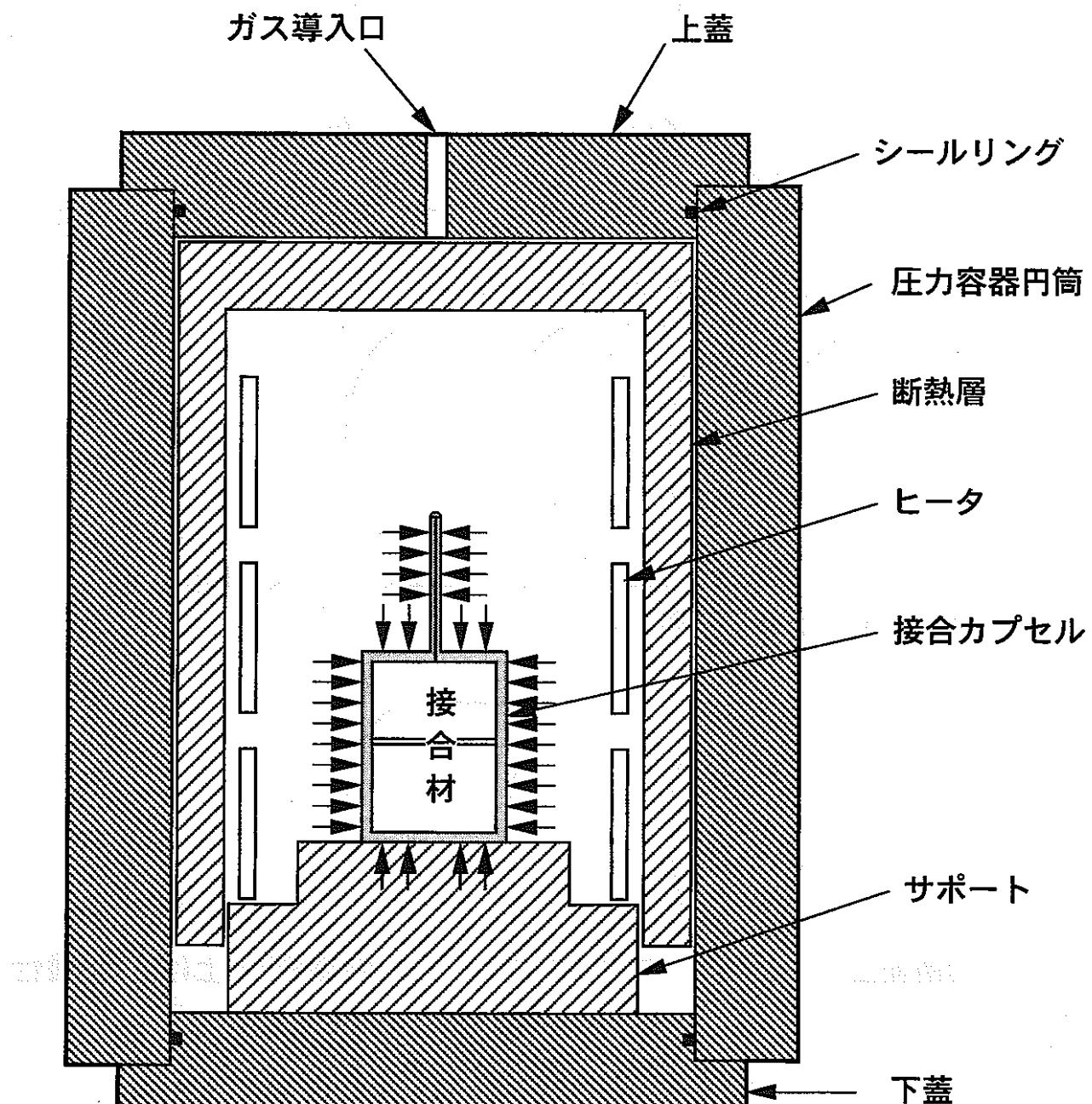


図13 HIP装置の概略

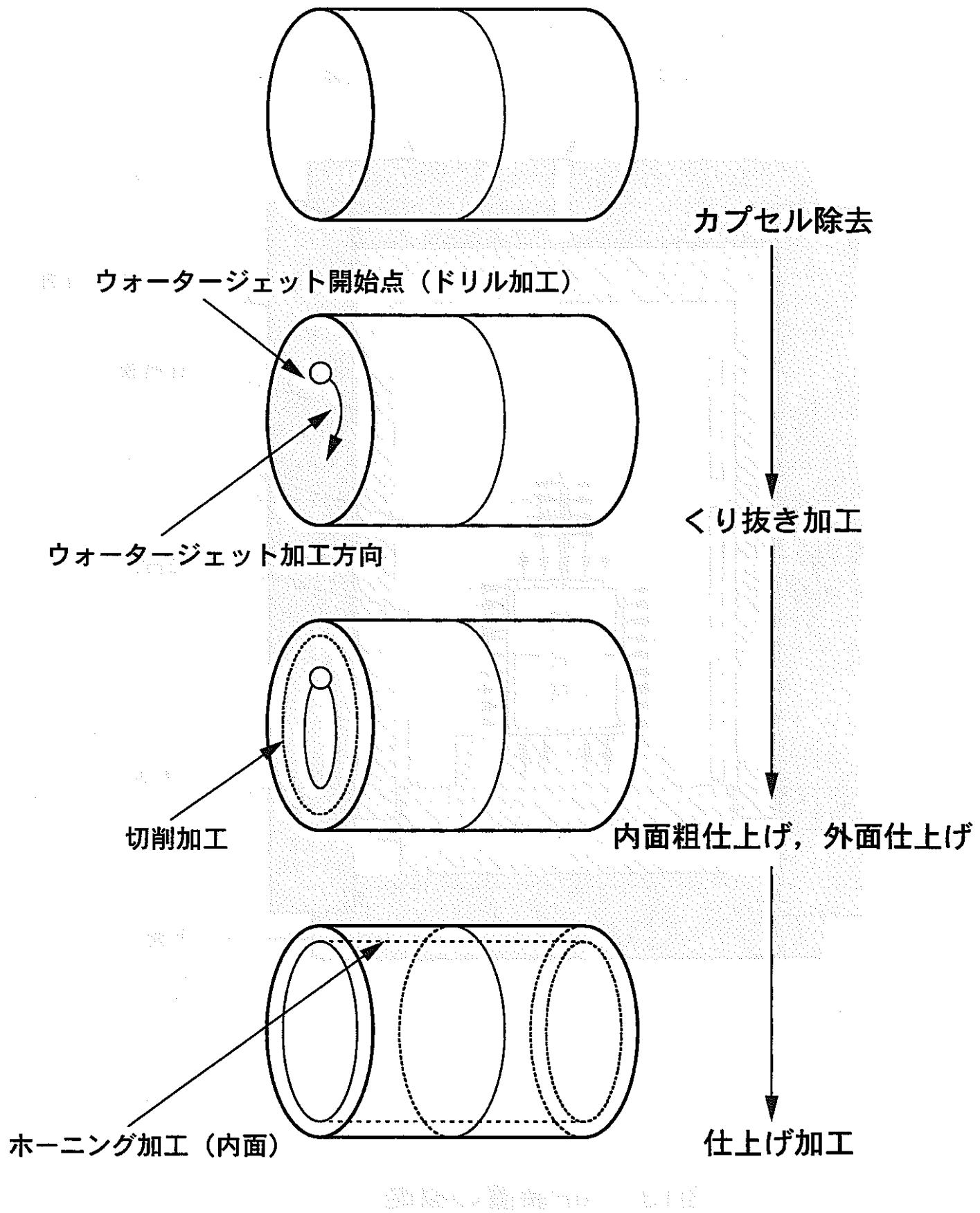


図14 大径サイズ管内外径の加工手順

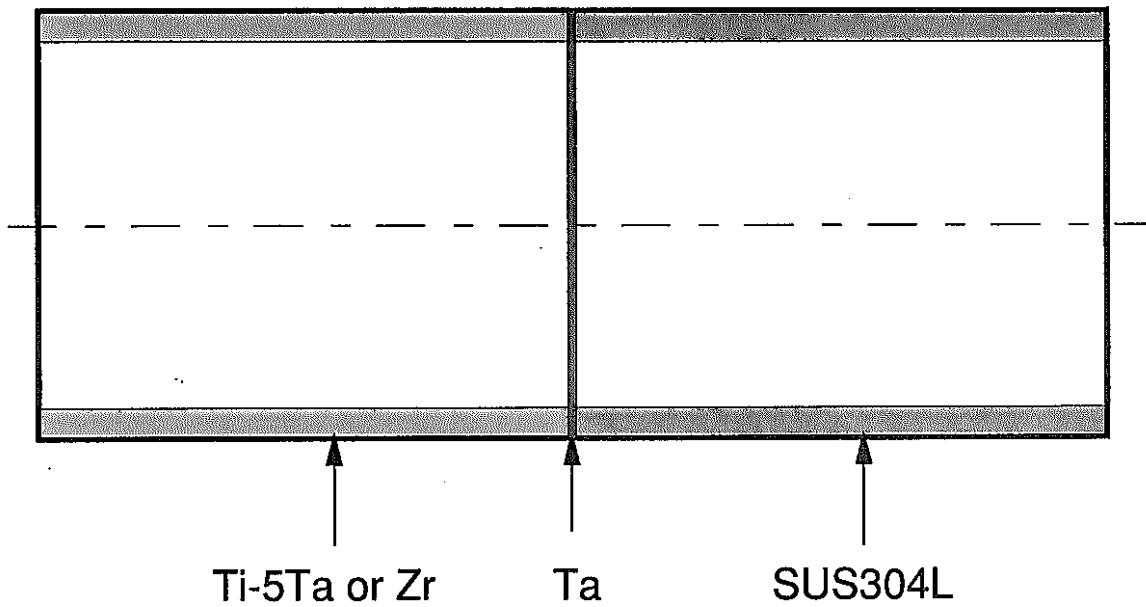
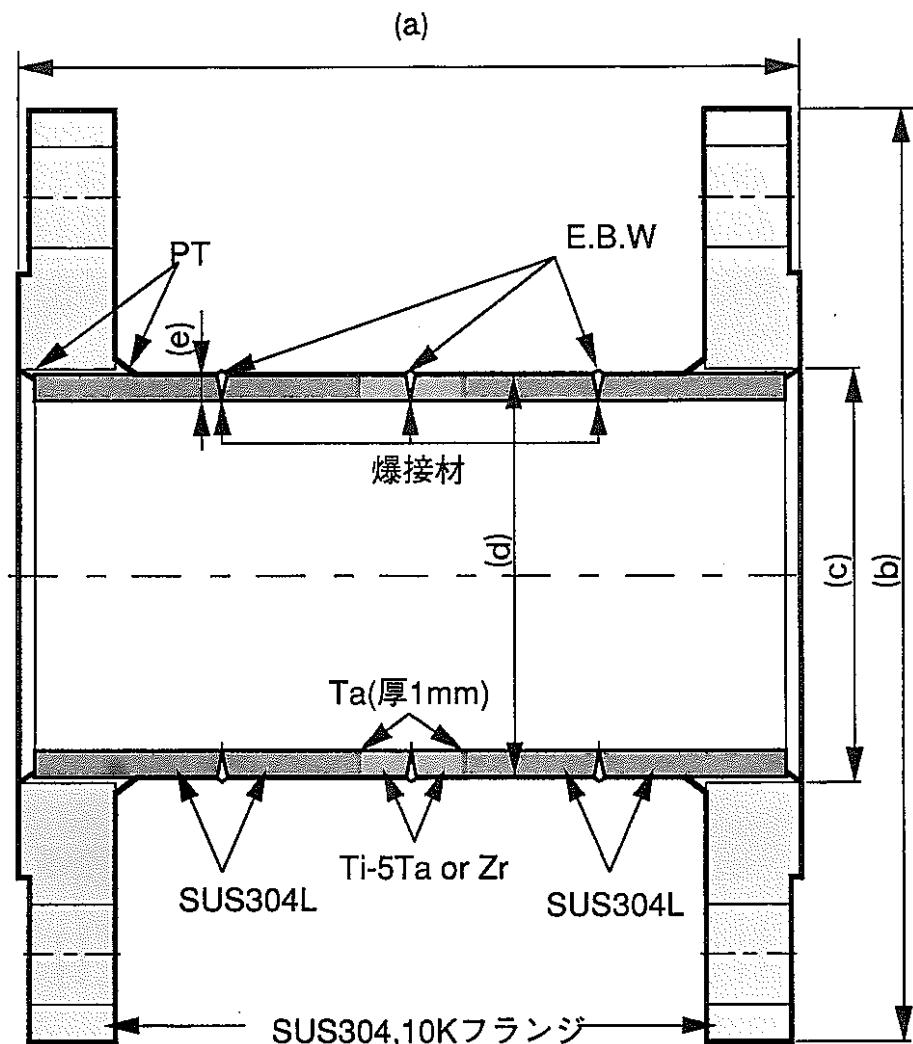


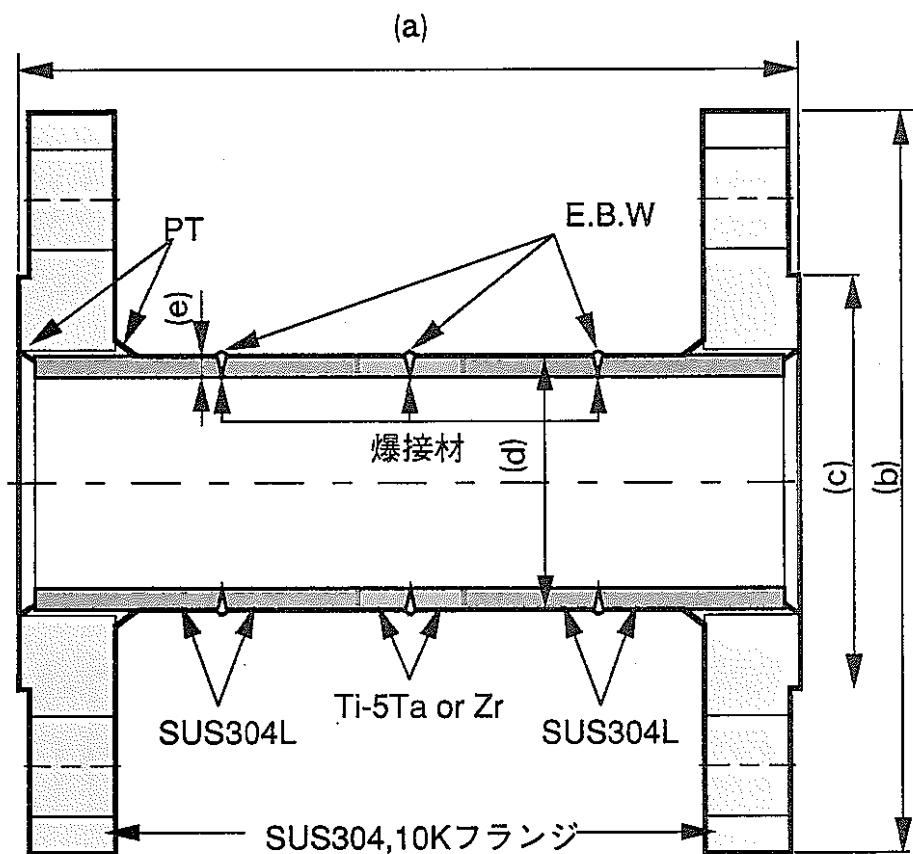
図15 爆接管継手の形状



単位：mm

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
1-T	146.5	175.2	77.3	76.3	5.1
1-Z	146.4	175.2	77.1	76.3	5.1

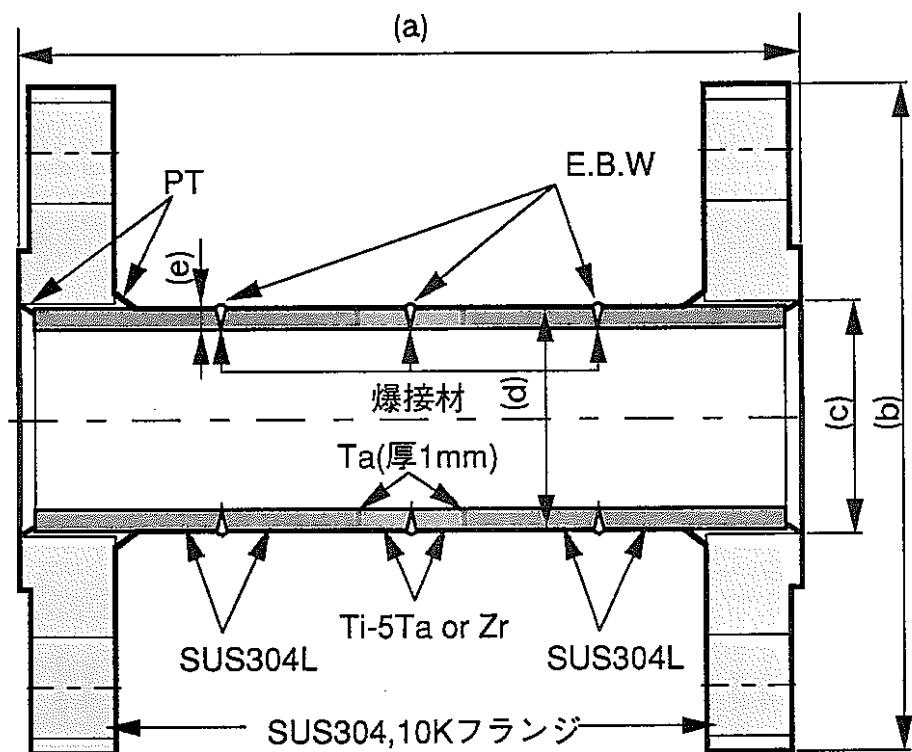
図16-1 爆接管の形状および寸法
(硝酸凝縮液ライン)



単位: mm

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
4-T	146.5	140.1	49.5	48.6	3.7
4-Z	146.7	140.8	49.5	48.7	3.7

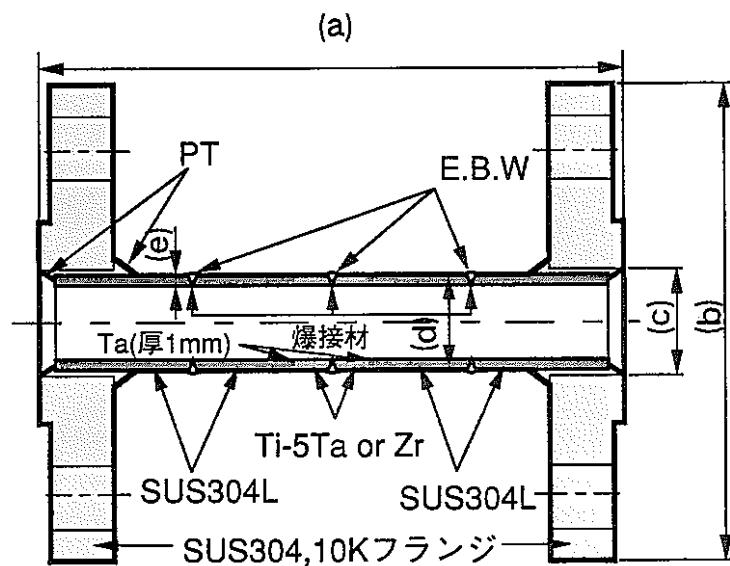
図16-2 爆接管の形状および寸法
(加熱用蒸気ライン)



単位：mm

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
5-T	146.8	125.4	34.5	33.8	3.2
5-Z	147.0	125.5	34.5	34.2	3.3

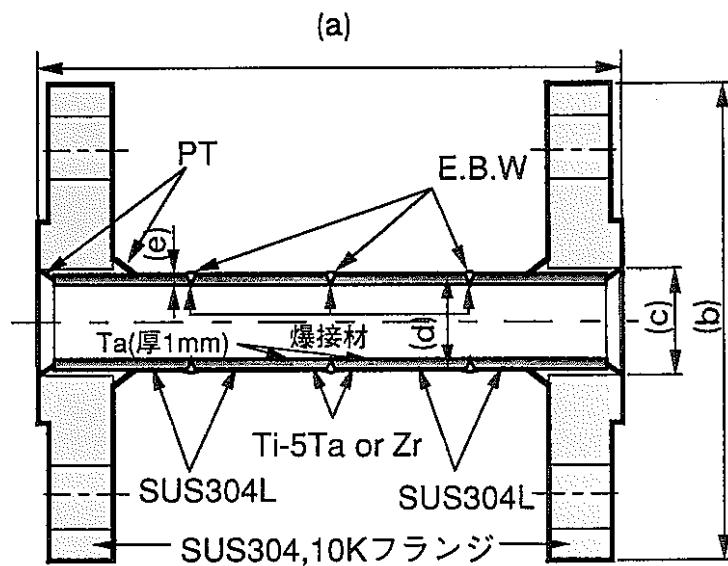
図16-3 爆接管の形状および寸法
(冷却水ライン)



単位: mm

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
2-1T	109.5	90.4	18.0	17.3	2.3
2-1Z	109.0	90.5	18.0	17.2	2.3

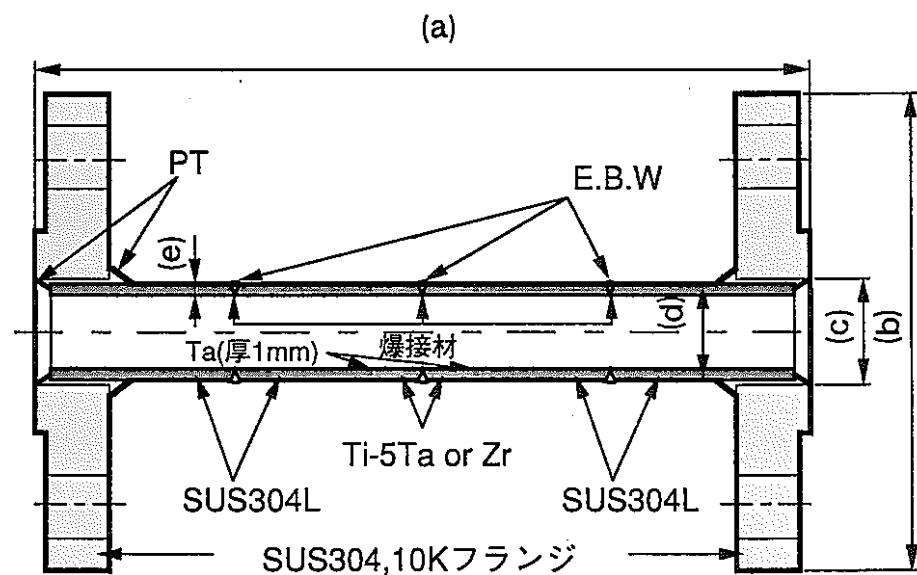
図16-4 爆接管の形状および寸法
(濃縮液ライン)



単位 : mm

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
2-1T	109.3	90.5	18.0	17.2	2.2
2-1Z	109.5	90.4	18.0	17.3	2.3

図16-5 爆接管の形状および寸法
(供給液ライン)



単位 : mm

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
2-1T	146.9	90.0	18.0	17.4	2.3
2-1Z	146.2	90.5	18.0	17.4	2.3

図16-6 爆接管の形状および寸法
(計装用圧空ライン)

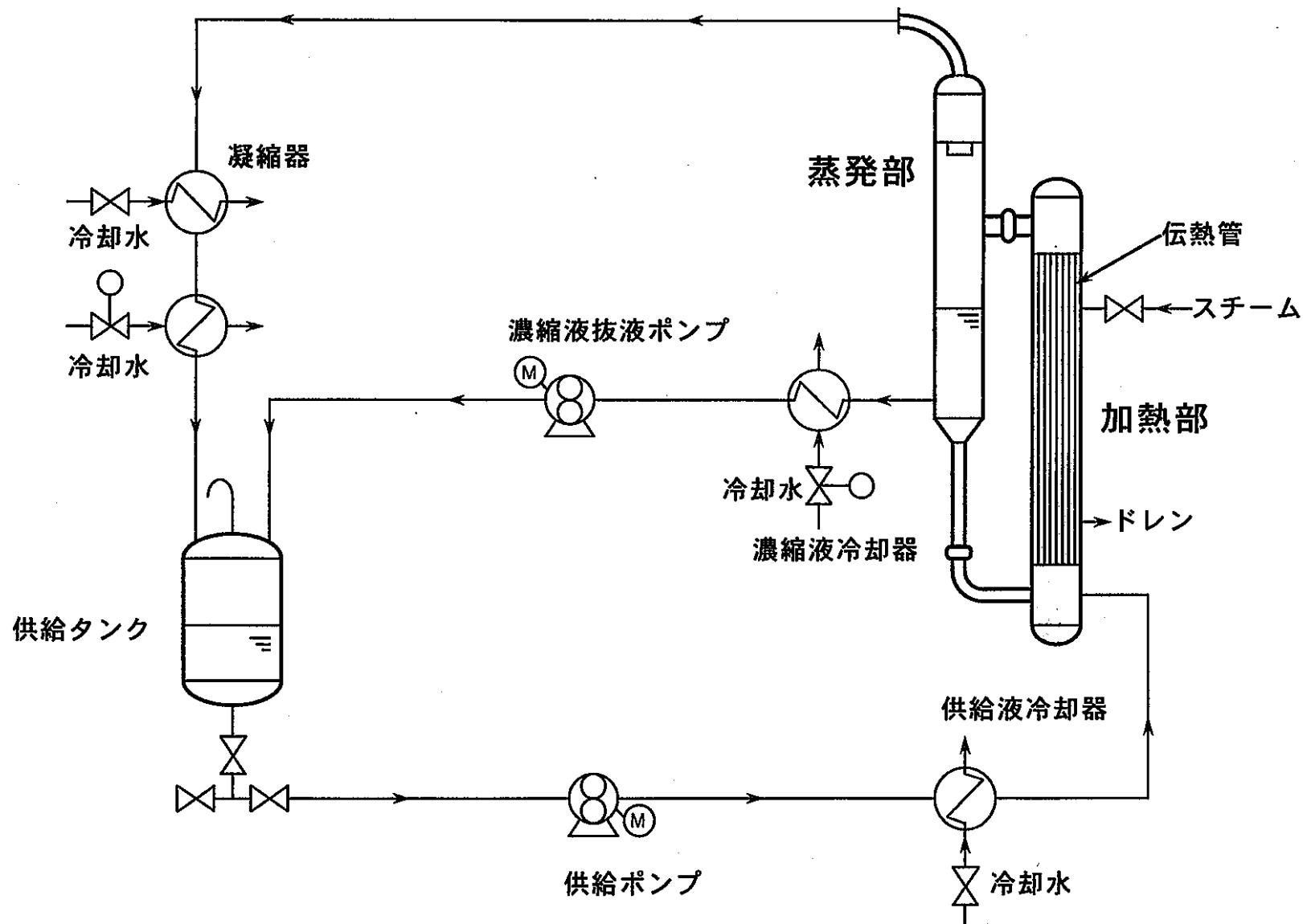
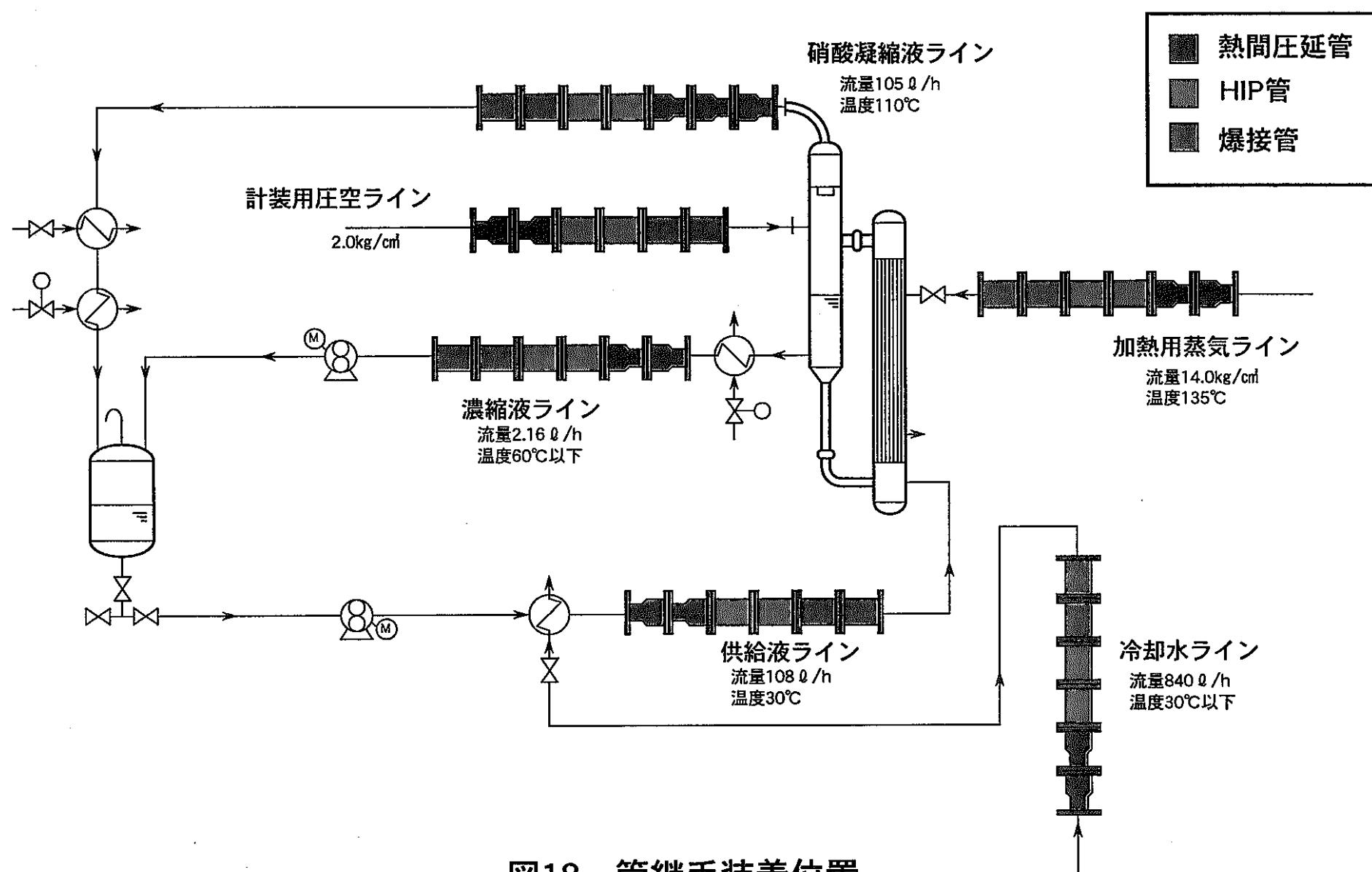
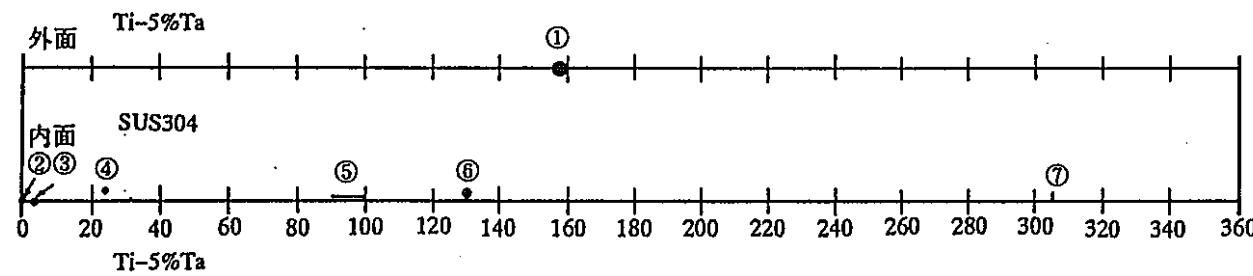
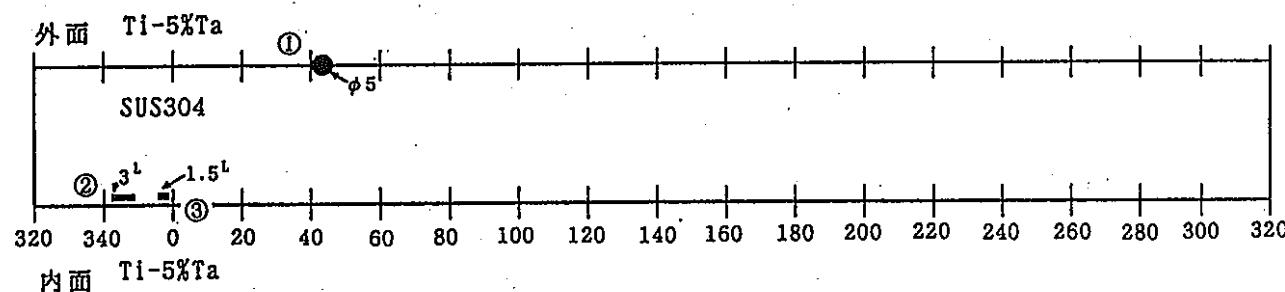


図17 酸回収蒸発缶小型モックアップ試験設備の概略





6T1のきず指示発生位置



6T2のきず指示発生位置

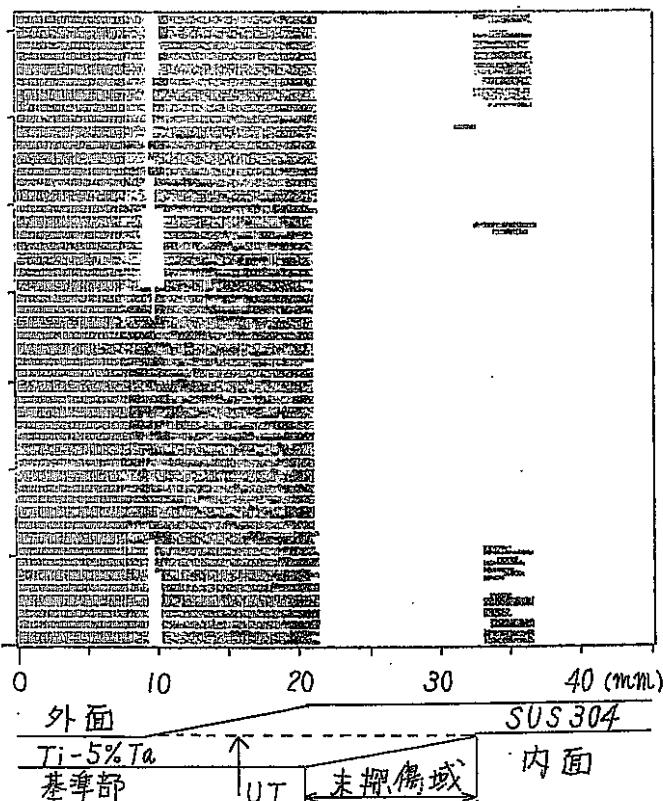
図19 熱間圧延管継手きず指示発生位置の概要および寸法

Echo Color Level

□	0 - 10 %
■	11 - 30 %
■■	31 - 50 %
■■■	51 - 80 %
■■■■	81 - 127 %

R1 = 000.00 deg Y1 = 0000.0 mm
 R2 = 360.00 deg Y2 = 0045.0 mm
 R3 = deg Y3 = 0010.8 mm
 R4 = deg Y4 = 0018.4 mm
 ファイル名 GT1S30
 30MHz2F,P1,D1,60Msec

C スコープ



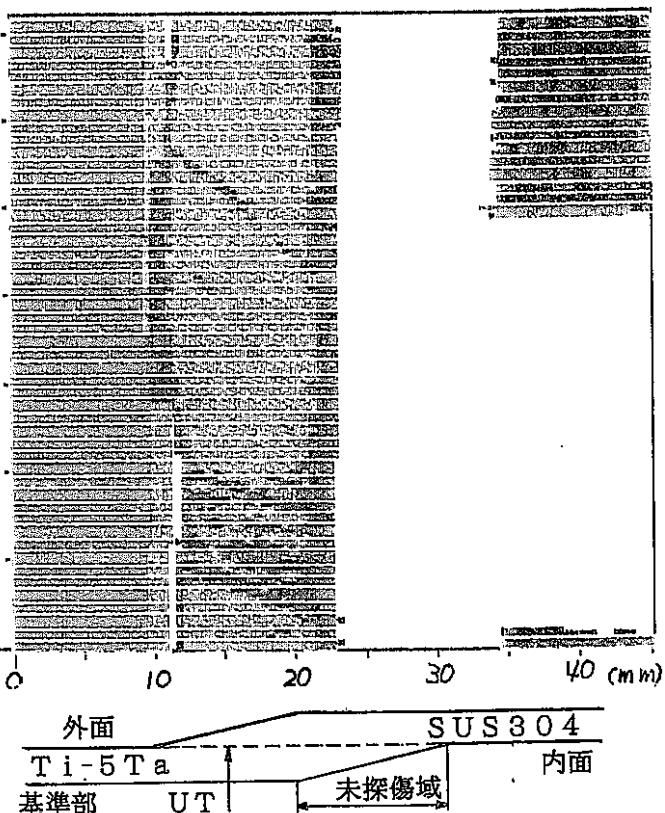
6T1

Echo Color Level

□	0 - 10 %
■	11 - 30 %
■■	31 - 50 %
■■■	51 - 80 %
■■■■	81 - 127 %

R1 = 000.00 deg Y1 = 0000.0 mm
 R2 = 360.00 deg Y2 = 0045.0 mm
 R3 = deg Y3 = 0012.4 mm
 R4 = deg Y4 = 0020.4 mm
 ファイル名 GT2S30
 30MHz2F,P1,D1,60Msec

C スコープ



6T2

図20 試験前の超音波探傷試験結果（管内面側から探傷）

Echo Color Level

- 0 ~ 10 %
- 11 ~ 30 %
- 31 ~ 50 %
- 51 ~ 80 %
- 81 ~ 127 %

R1 = 000.00 deg Y1 = 0000.0 mm

R2 = 360.00 deg Y2 = 0030.0 mm

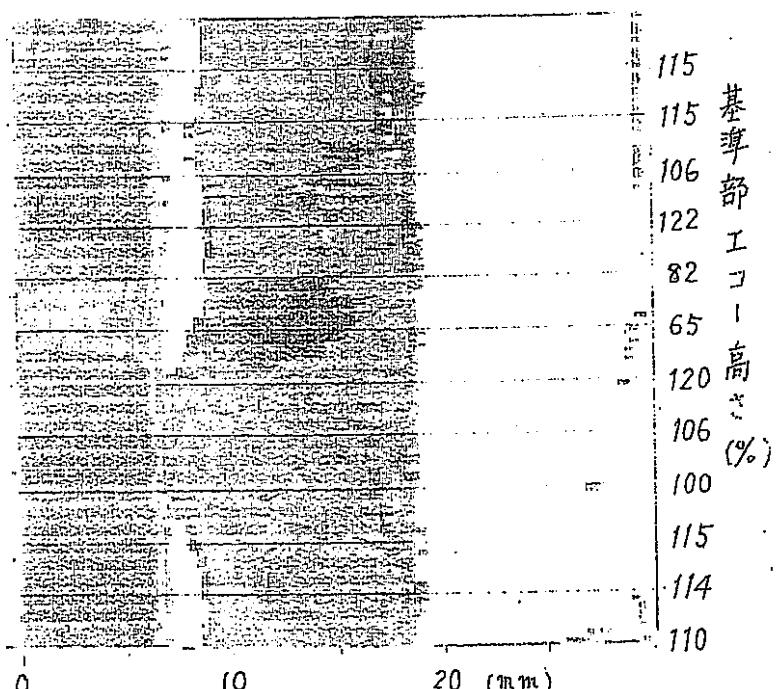
R3 = deg Y3 = mm

R4 = deg Y4 = mm

ファイル名 6T1-MG

30MHz, P1, D5, WL=43 μ s

C スコープ



6T1

Echo Color Level

- 0 ~ 10 %
- 11 ~ 30 %
- 31 ~ 50 %
- 51 ~ 80 %
- 81 ~ 127 %

R1 = 000.00 deg Y1 = 0000.0 mm

R2 = 360.00 deg Y2 = 0045.0 mm

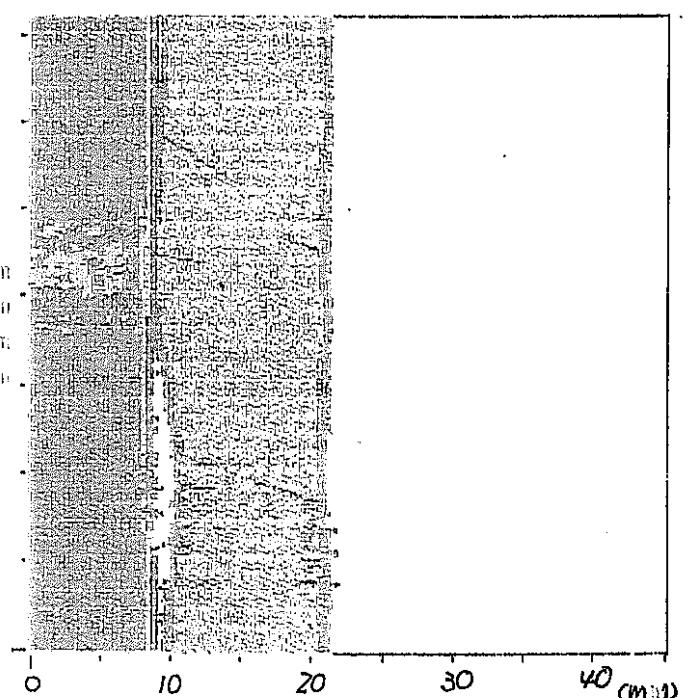
R3 = deg Y3 = mm

R4 = deg Y4 = mm

ファイル名 6T2-MG

30MHz P1 D5 43 μ m

C スコープ



6T2

図21-1 リーク後の超音波探傷試験結果（管内面側から探傷）
(基準部平均レベル)

Echo Color Level

<input type="checkbox"/>	0 - 10 %
<input checked="" type="checkbox"/>	11 - 30 %
<input type="checkbox"/>	31 - 50 %
<input type="checkbox"/>	51 - 80 %
<input type="checkbox"/>	81 - 127 %

R1 = 000.00 deg Y1 = 0000.0 mm

R2 = 360.00 deg Y2 = 0080.0 mm

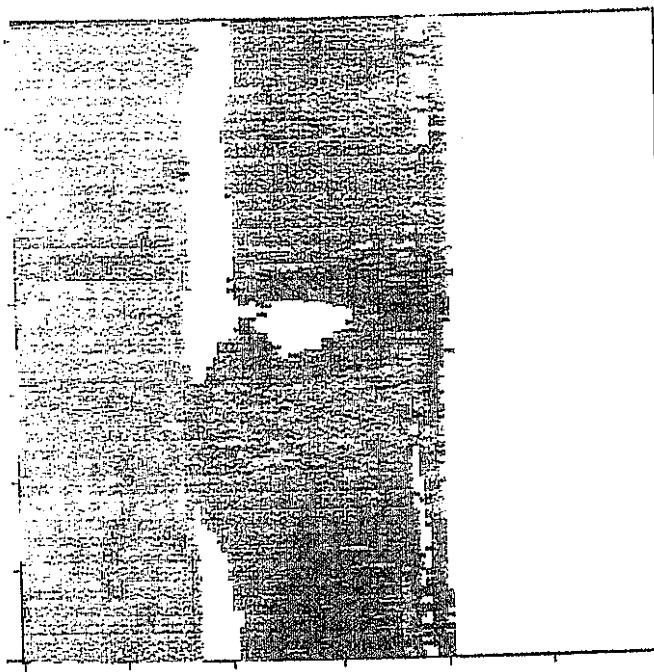
R3 = deg Y3 = mm

R4 = deg Y4 = mm

ファイル名 6T1-HG

30MHz, P1, D5, WL=43 μ s

C スコープ



6T1

Echo Color Level

<input type="checkbox"/>	0 - 10 %
<input checked="" type="checkbox"/>	11 - 30 %
<input type="checkbox"/>	31 - 50 %
<input type="checkbox"/>	51 - 80 %
<input type="checkbox"/>	81 - 127 %

R1 = 000.00 deg Y1 = 0000.0 mm

R2 = 360.00 deg Y2 = 0045.0 mm

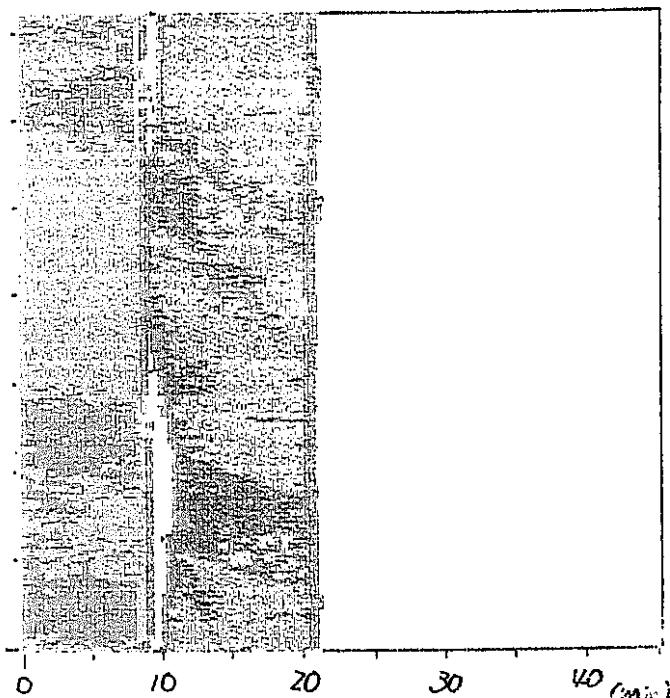
R3 = deg Y3 = mm

R4 = deg Y4 = mm

ファイル名 6T2-HG

30MHz P1 D5 43 μ m

C スコープ



6T2

図21-2 リーク後の超音波探傷試験結果（管内面側から探傷）
(基準部高レベル)

Echo Color Level

<input type="checkbox"/>	0 - 10 %
<input checked="" type="checkbox"/>	11 - 30 %
<input checked="" type="checkbox"/>	31 - 50 %
<input checked="" type="checkbox"/>	51 - 80 %
<input checked="" type="checkbox"/>	81 - 127 %

R1 = 000.00 deg Y1 = 0000.0 mm

R2 = 360.00 deg Y2 = 0030.0 mm

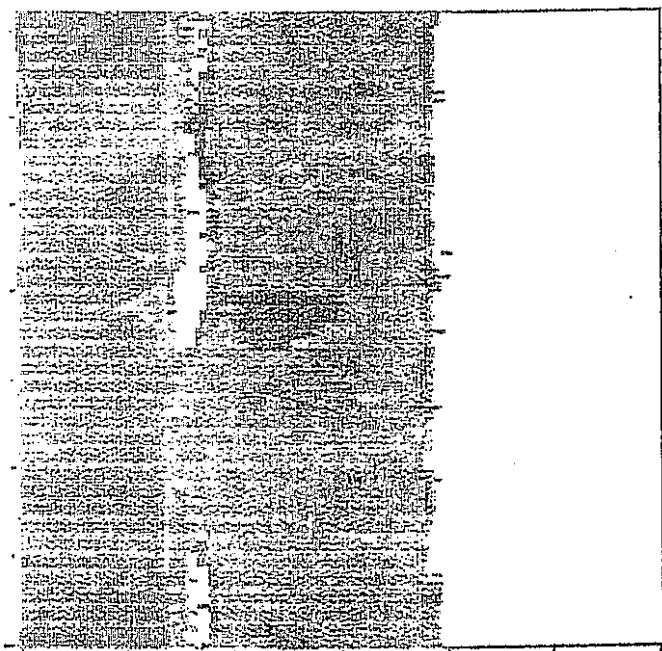
R3 = deg Y3 = mm

R4 = deg Y4 = mm

ファイル名 6T1-LG

30MHz, P1, D5, WL=43 μ s

C スコープ



6T1

Echo Color Level

<input type="checkbox"/>	0 - 10 %
<input checked="" type="checkbox"/>	11 - 30 %
<input checked="" type="checkbox"/>	31 - 50 %
<input checked="" type="checkbox"/>	51 - 80 %
<input checked="" type="checkbox"/>	81 - 127 %

R1 = 000.00 deg Y1 = 0000.0 mm

R2 = 360.00 deg Y2 = 0045.0 mm

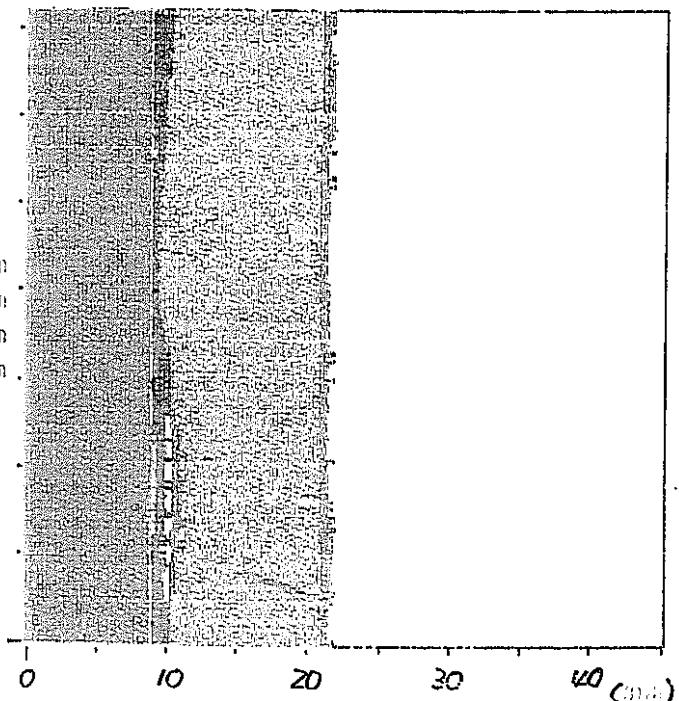
R3 = deg Y3 = mm

R4 = deg Y4 = mm

ファイル名 6T2-LG

30MHz P1 D5 43 μ m

C スコープ



6T2

図21-3 リーク後の超音波探傷試験結果（管内面側から探傷）
(基準部低レベル)

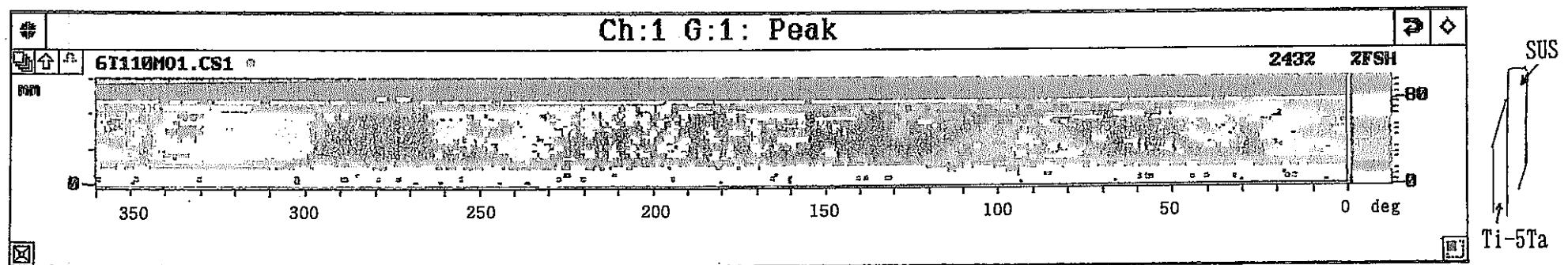


図22-1 外面からの超音波探傷試験結果 (6T1)

Echo Color Level

□	0 ~ 10 %
■	11 ~ 30 %
△	31 ~ 50 %
▲	51 ~ 80 %
●	81 ~ 100 %

R1 = 000.00 deg Y1 = 0000.0 mm

R2 = 360.00 deg Y2 = 0045.0 mm

R3 = 120.00 deg Y3 = 0011.1 mm

R4 = 240.00 deg Y4 = -0018.3 mm

ファイル名 6T2-10MO

30MHz P1 D5 43 μm

C スコープ

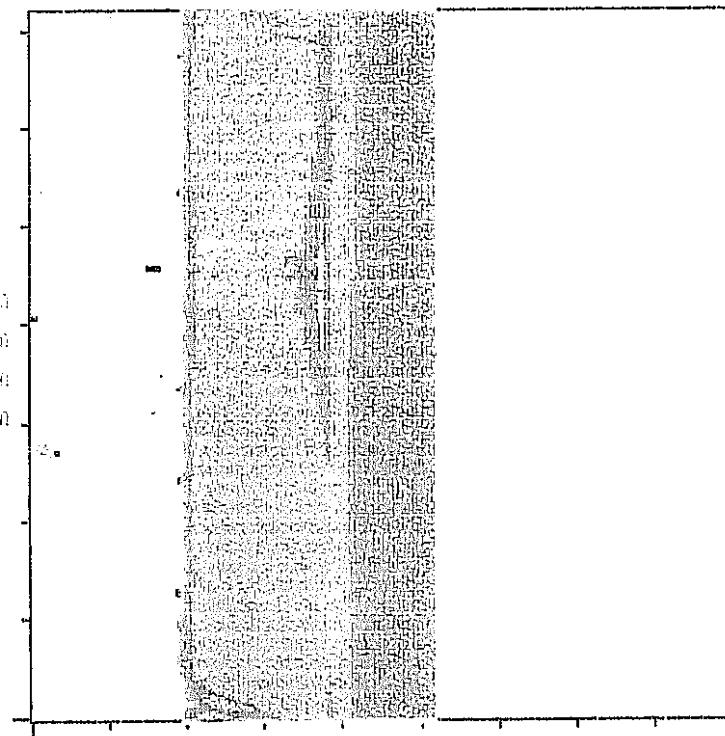
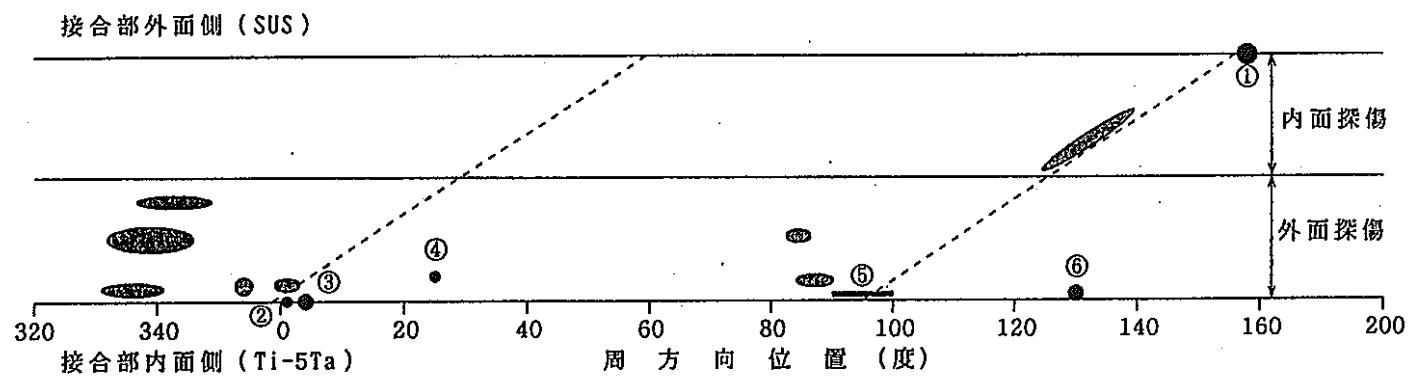
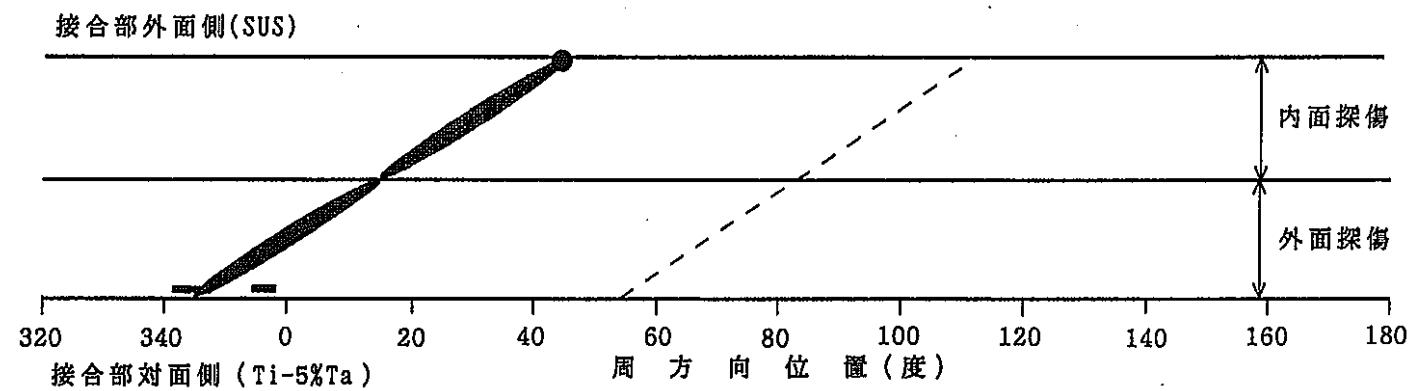


図22-2 外面からの超音波探傷試験結果 (6T2)



6T1



6T2

図23 欠陥の分布図

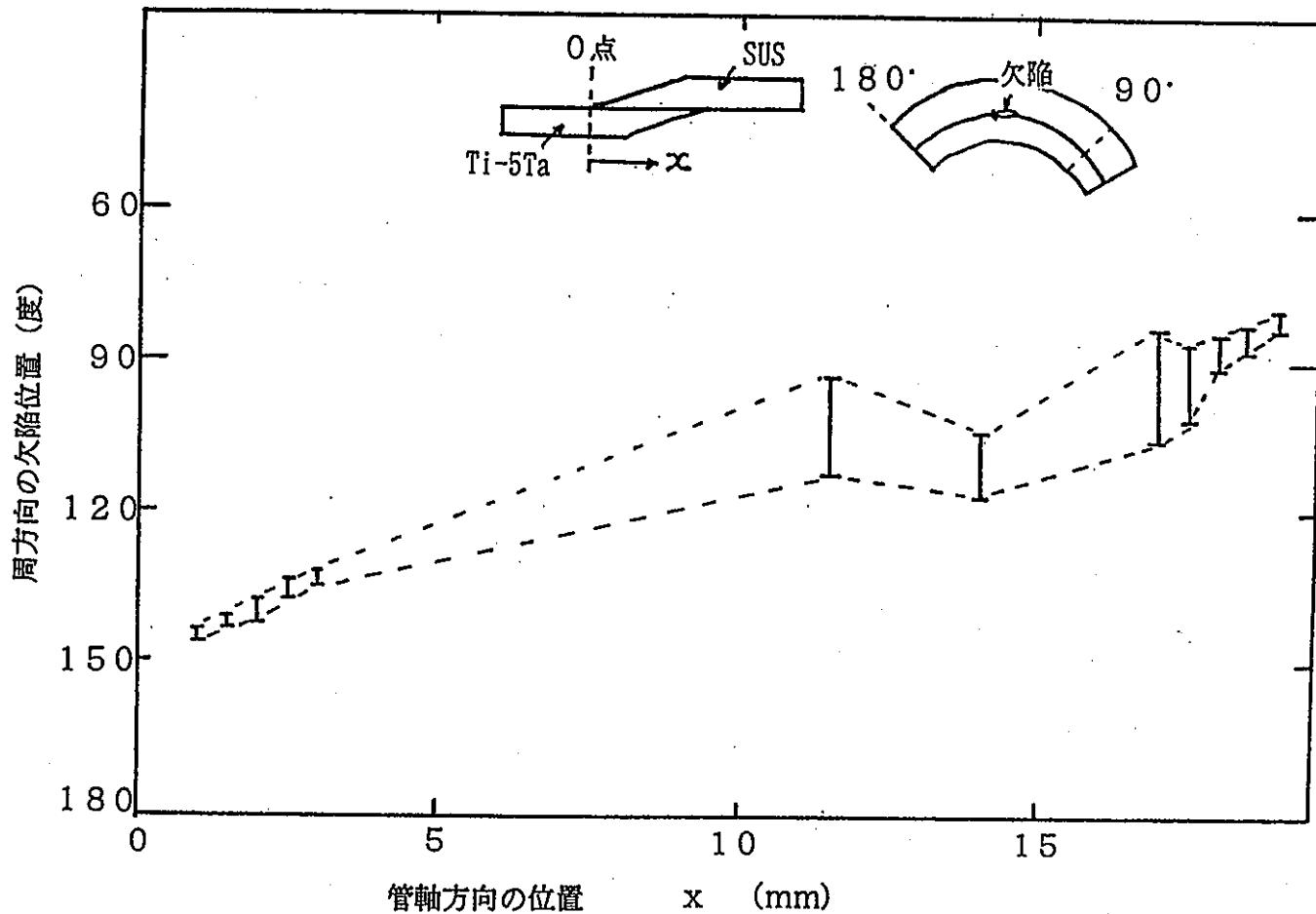


図24-1 追い込み断面観察による欠陥分布の測定結果 (6T1)

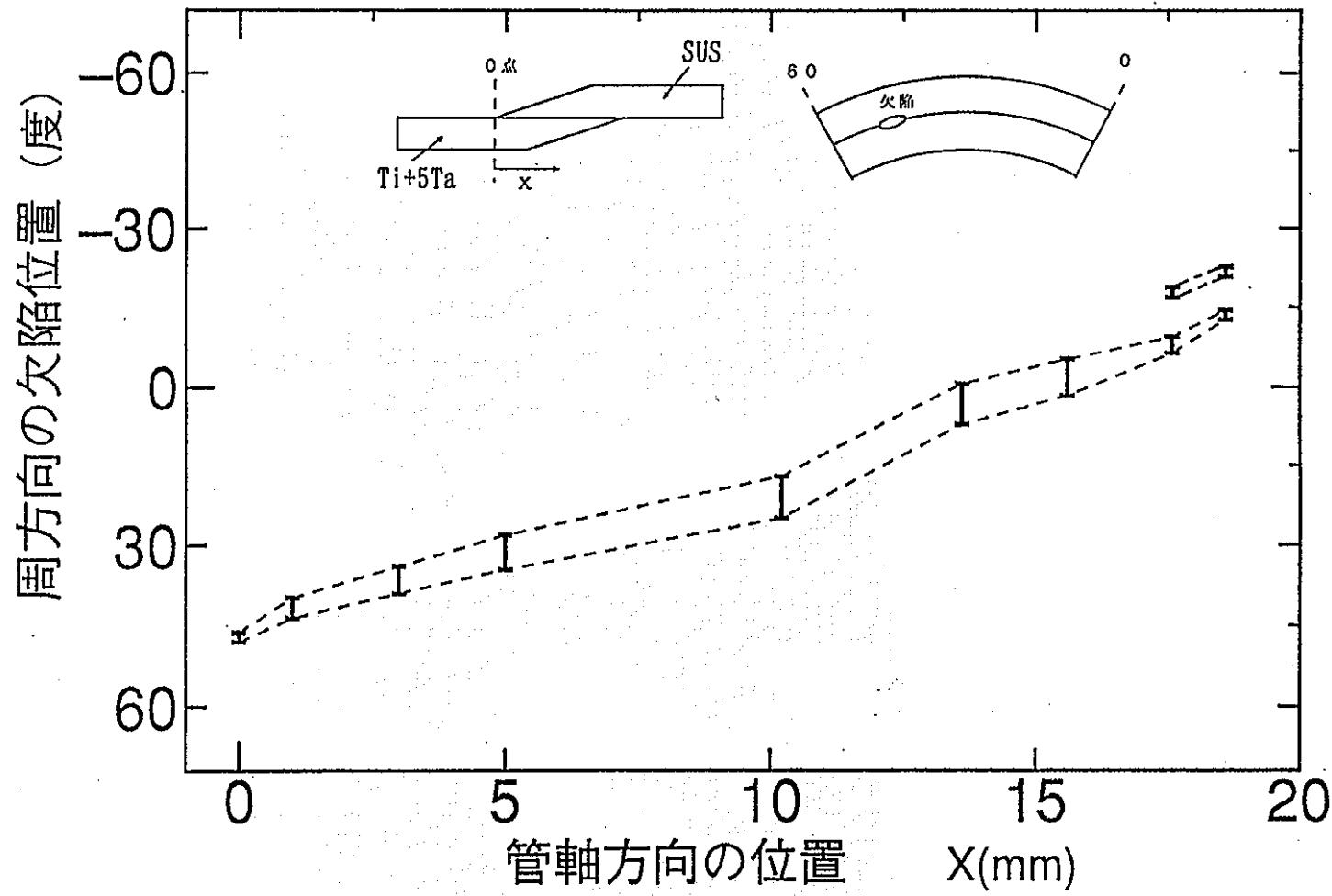


図24-2 追い込み断面観察による欠陥分布の測定結果 (6T2)

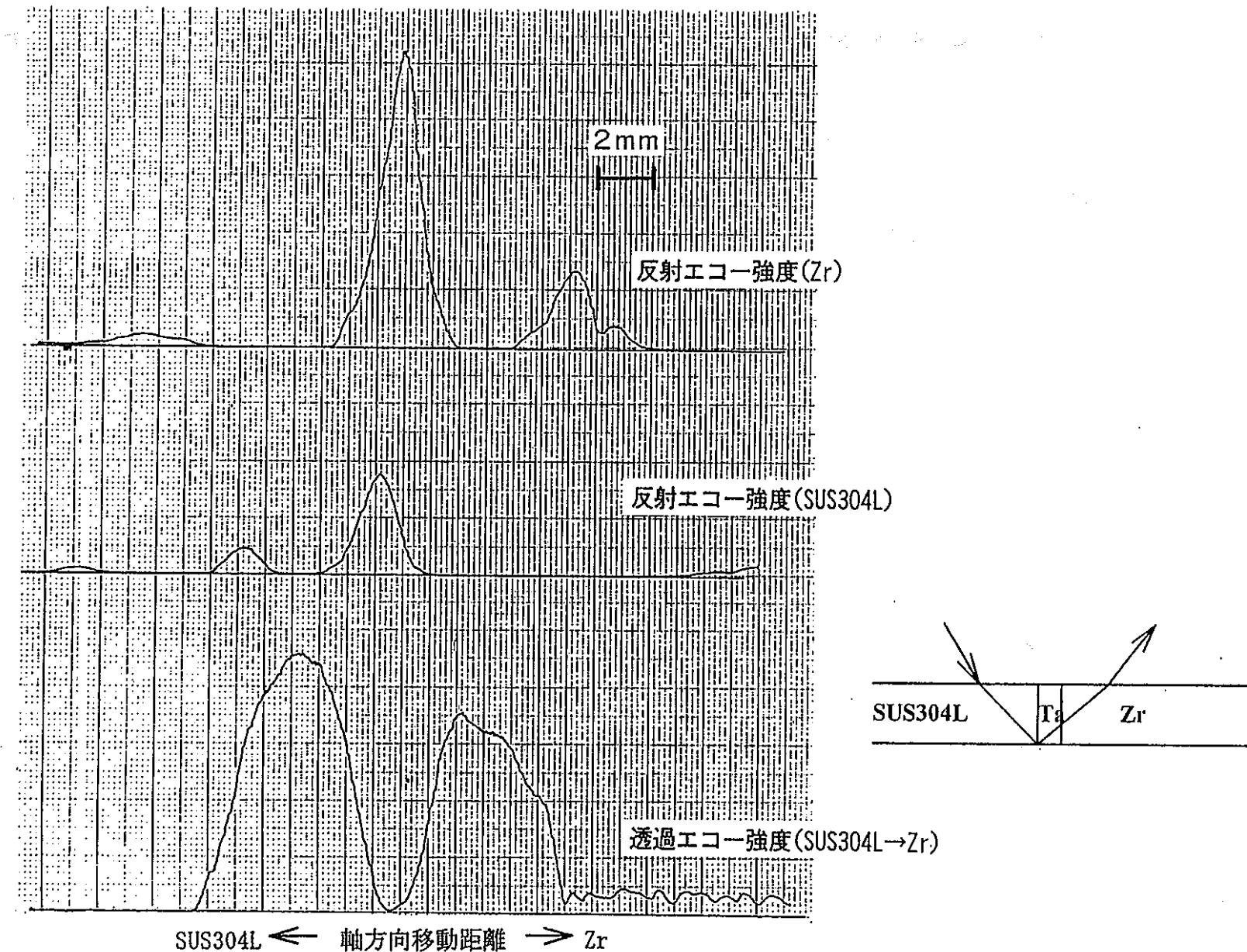


図25-1 2探触子斜角法探傷結果 (Z1試験片)

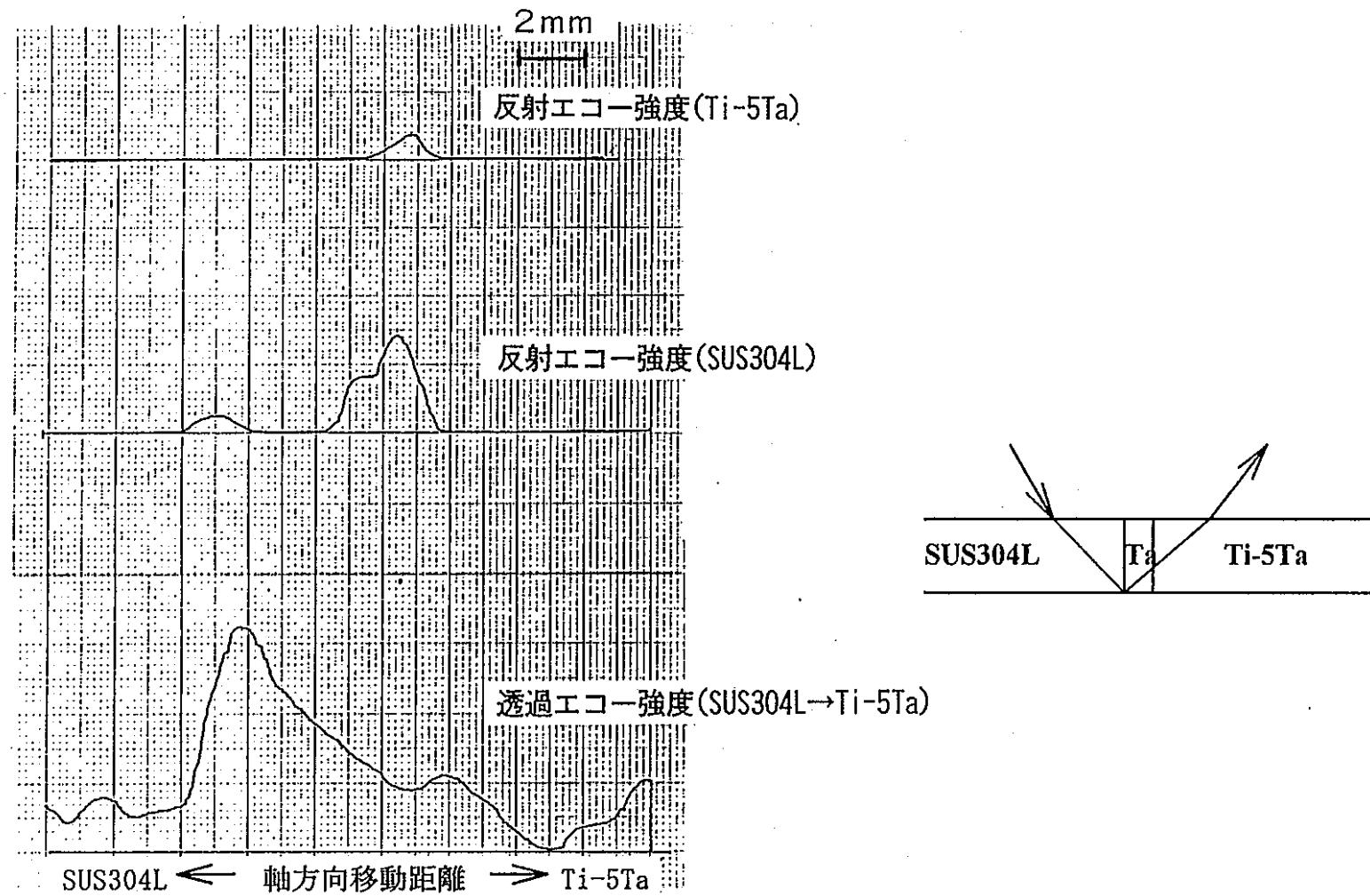


図25-2 2探触子斜角法探傷結果 (T1試験片)

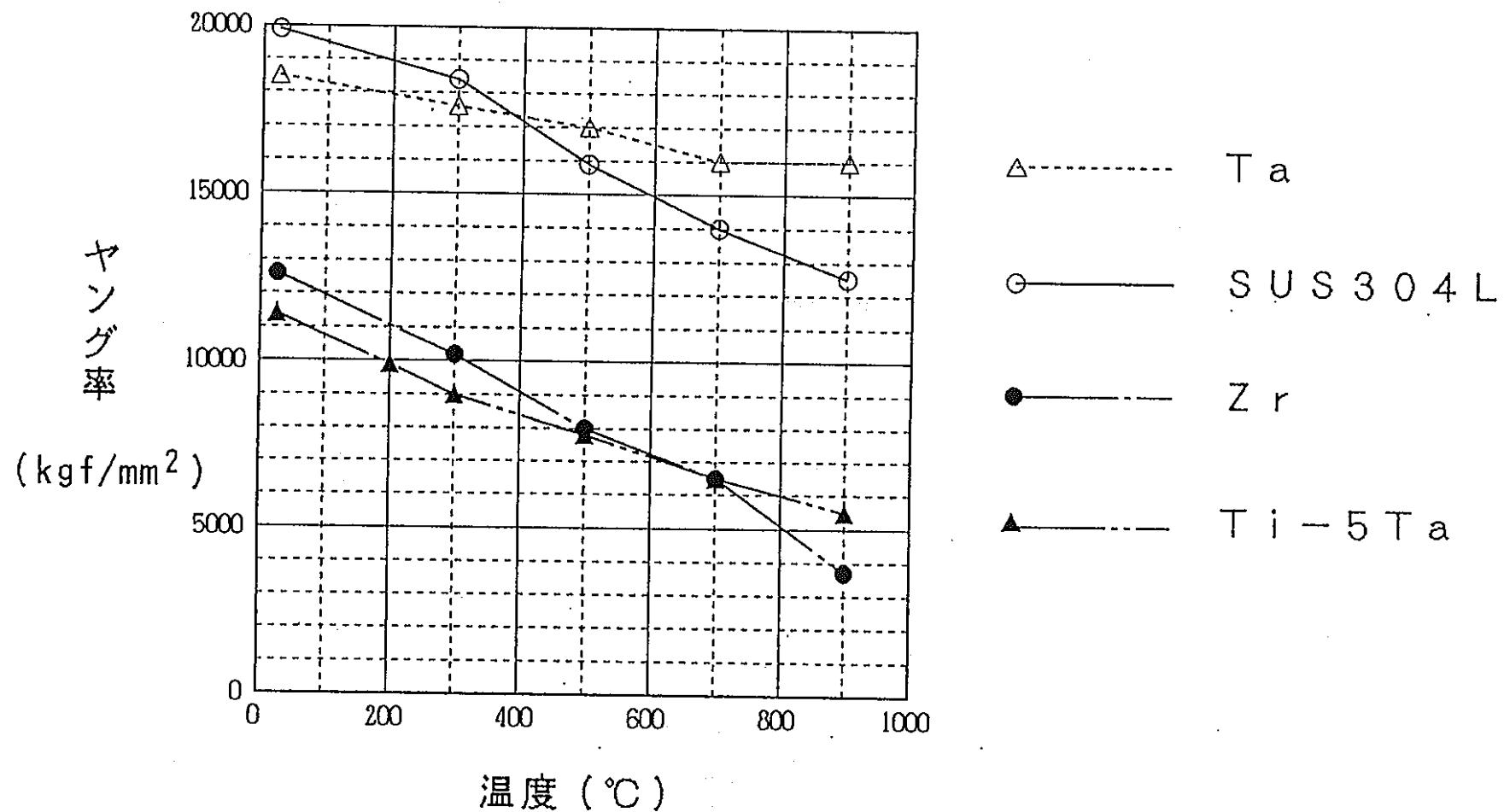


図26-1 弾性係数に及ぼす温度の影響

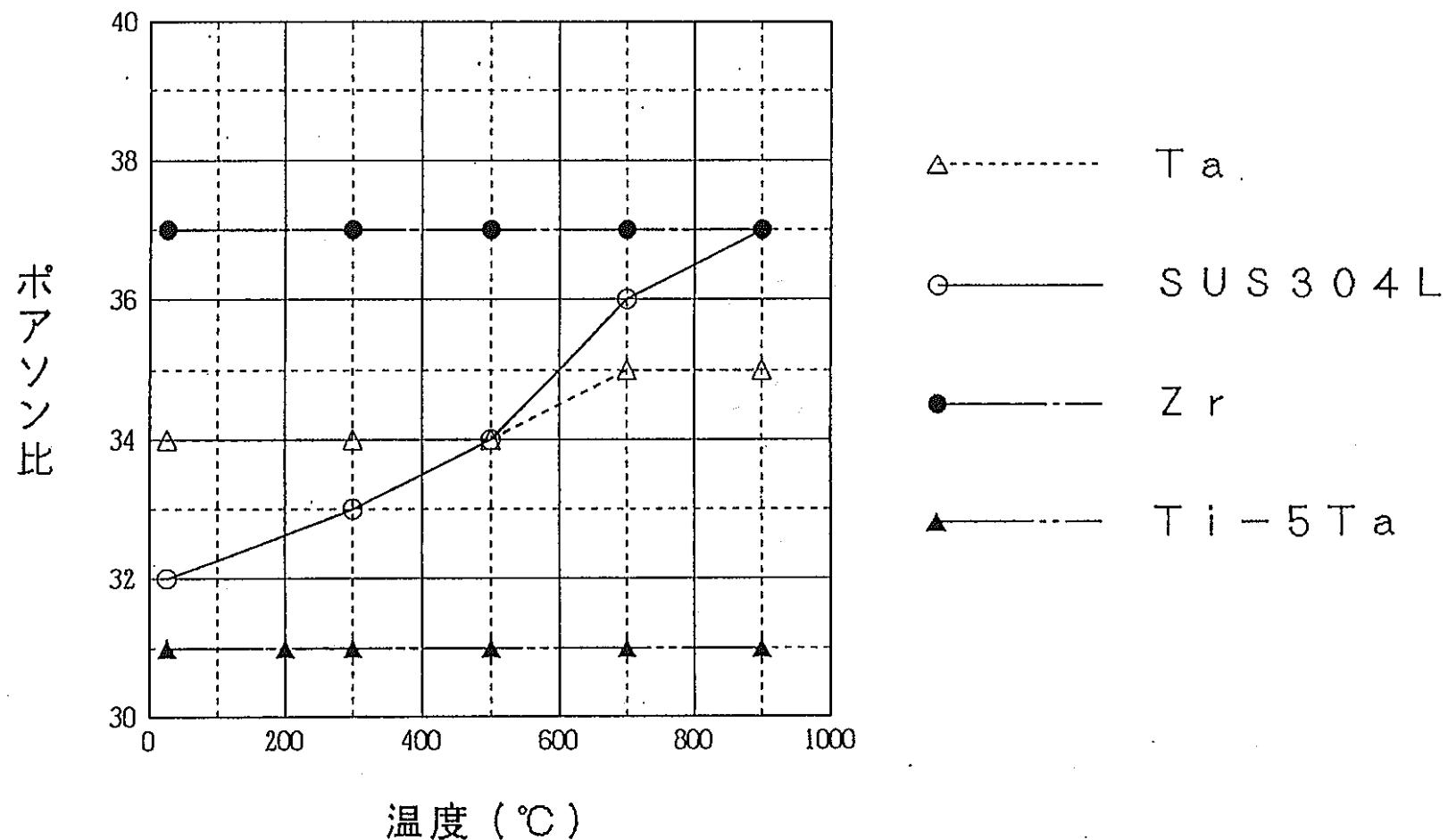


図26-2 ポアソン比に及ぼす温度の影響

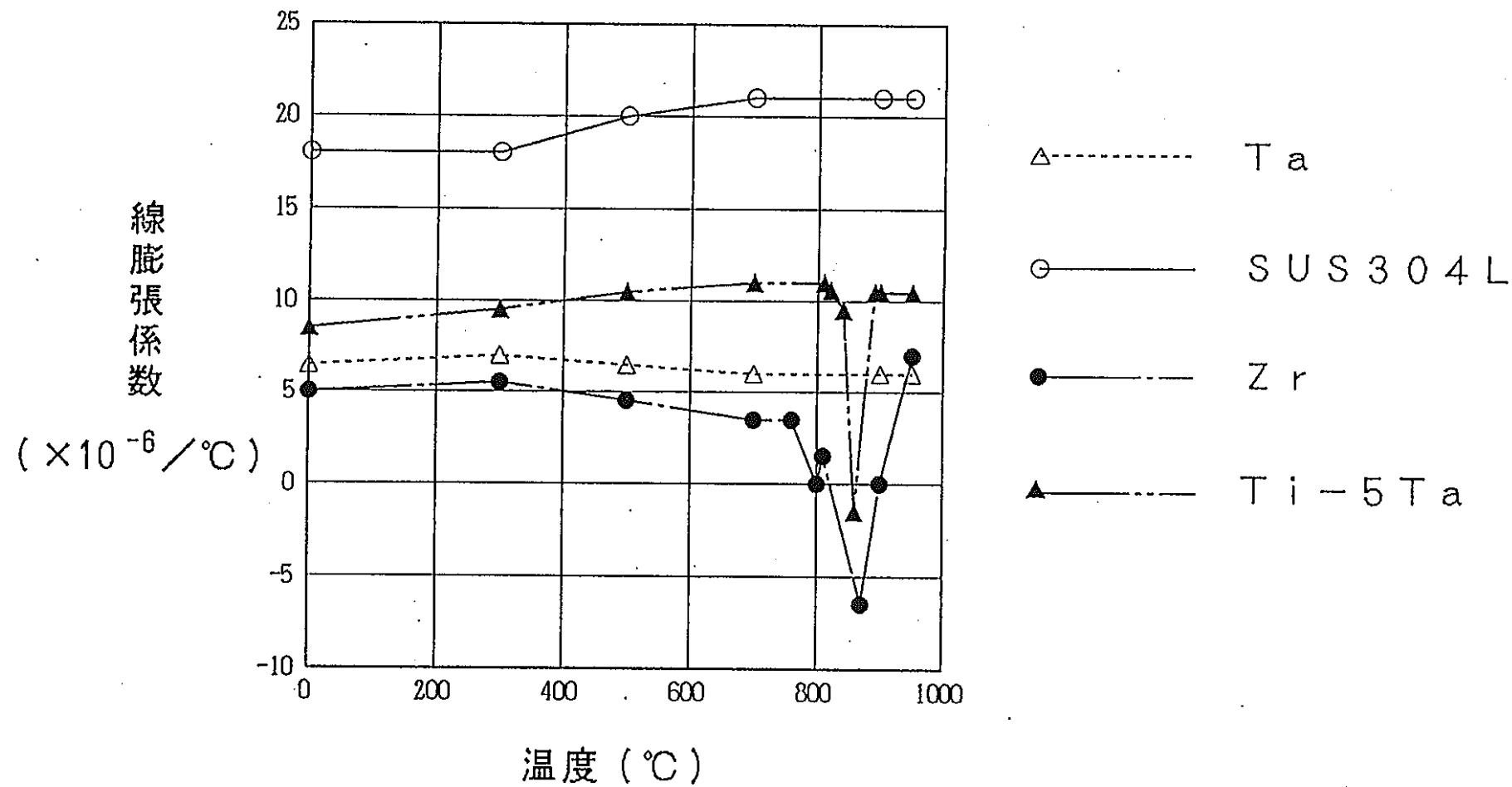


図26-3 線膨張係数に及ぼす温度の影響

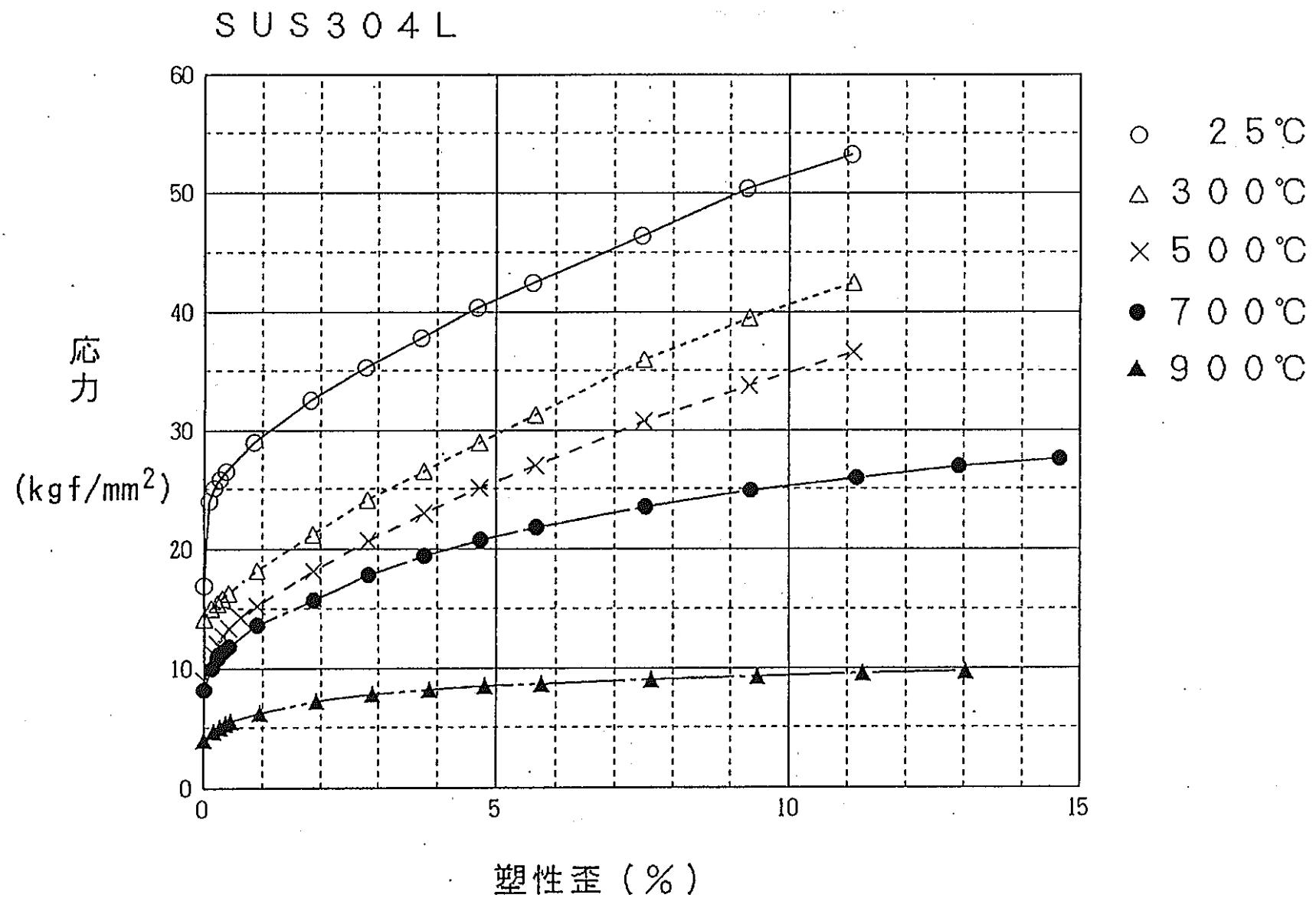


図26-4 応力－塑性歪係数に及ぼす温度の影響 (SUS304L)

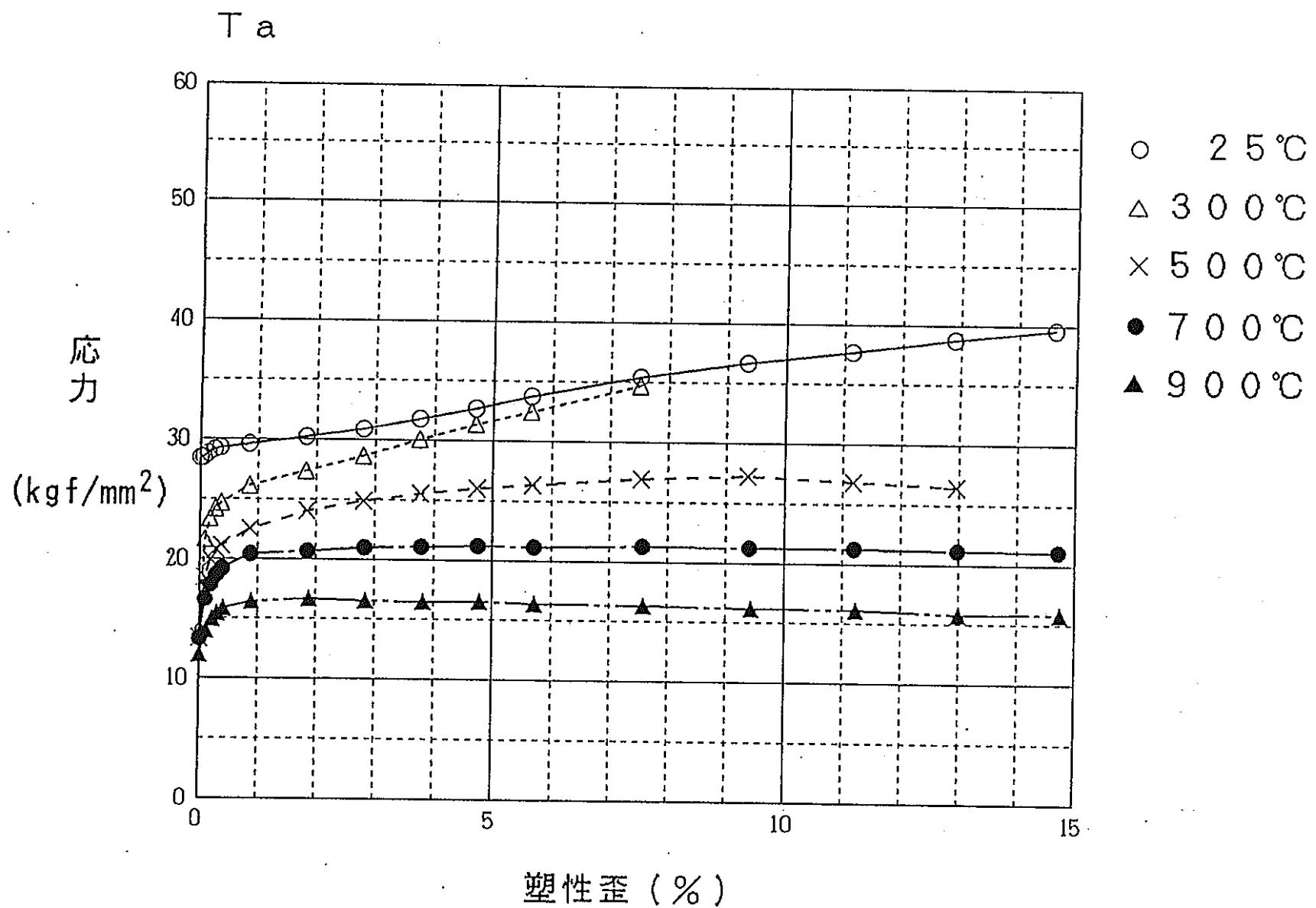


図26-5 応力-塑性歪係数に及ぼす温度の影響 (Ta)

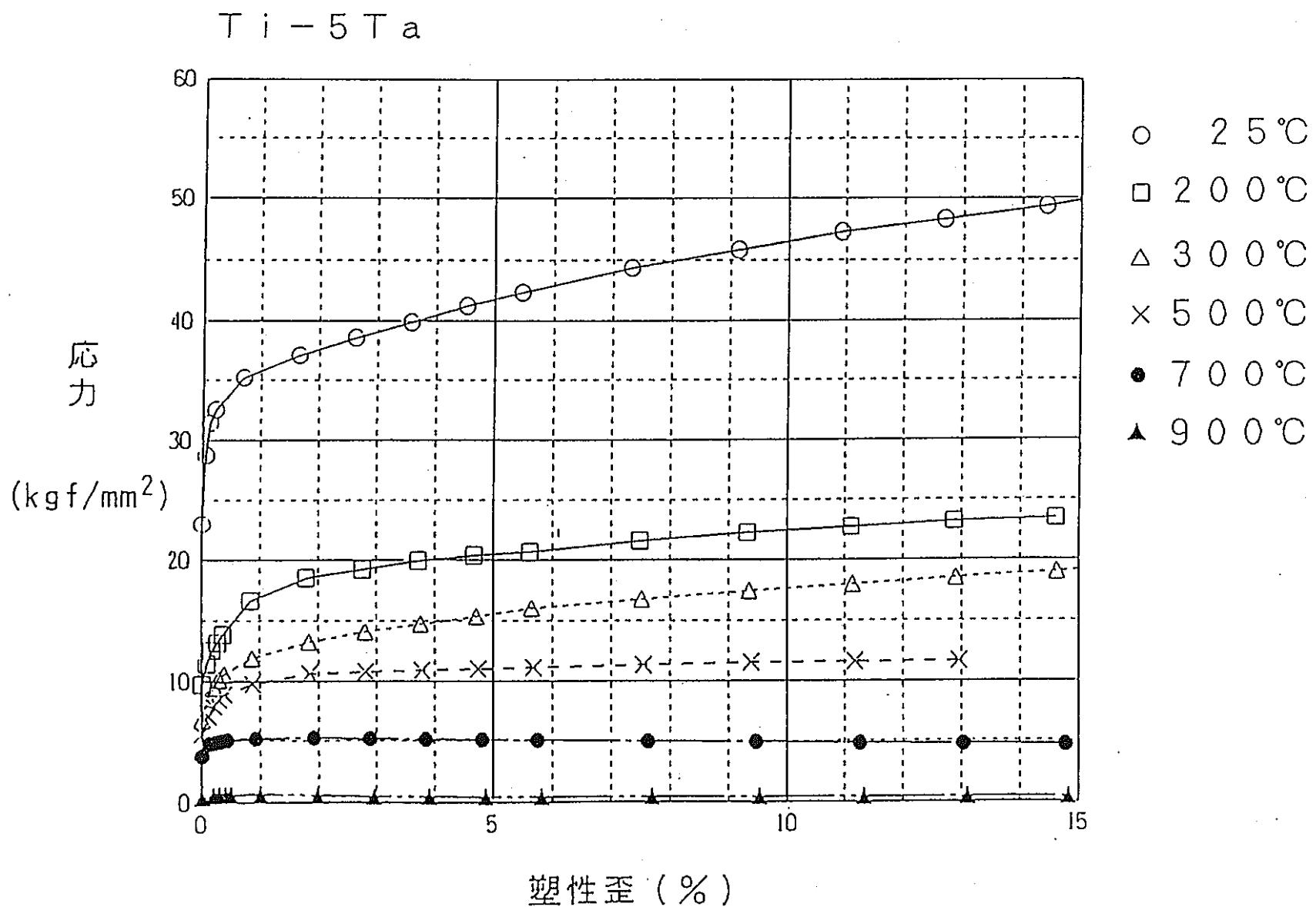


図26-6 応力 - 塑性歪係数に及ぼす温度の影響 (Ti-5Ta)

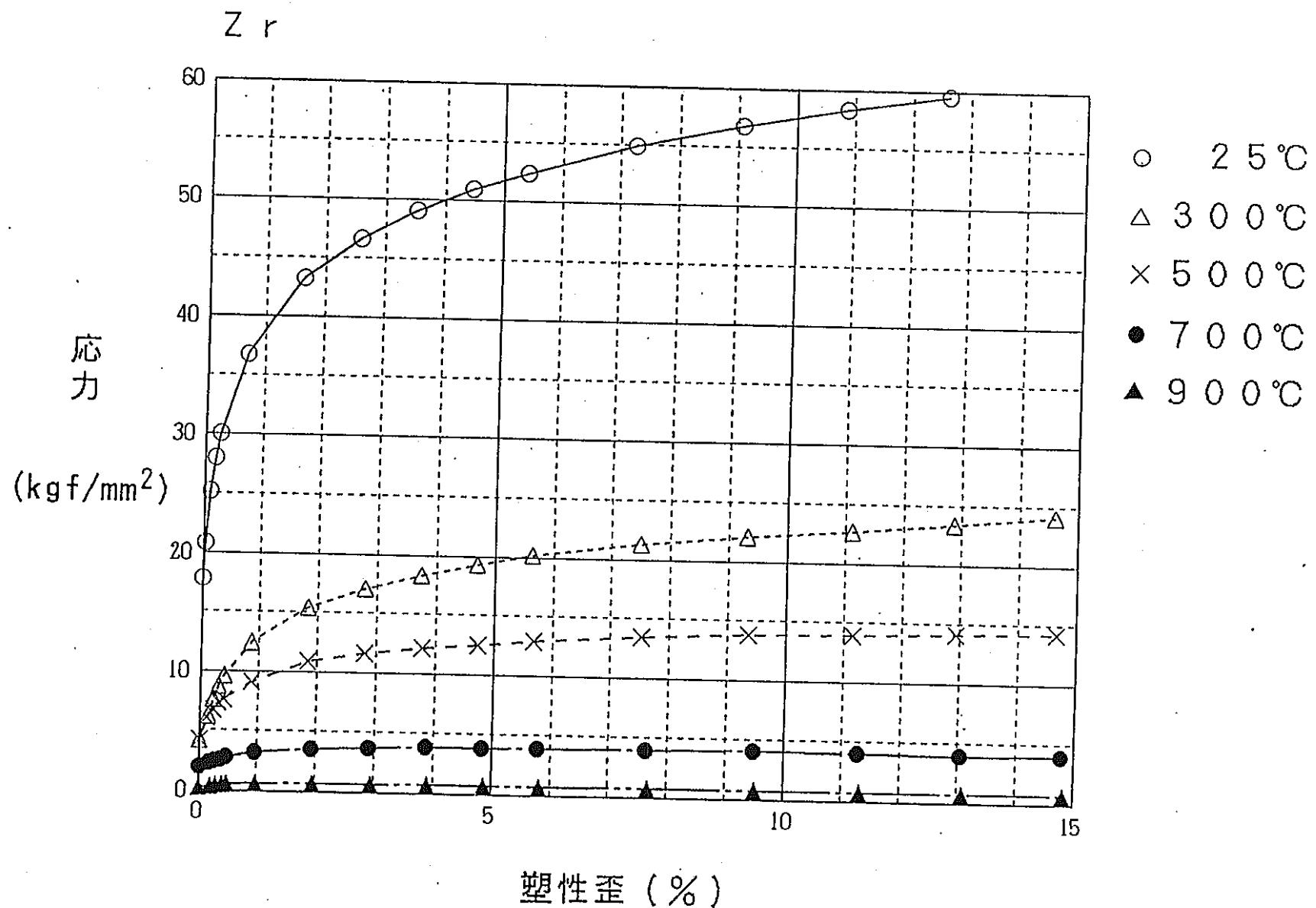


図26-7 応力-塑性歪係数に及ぼす温度の影響 (Zr)

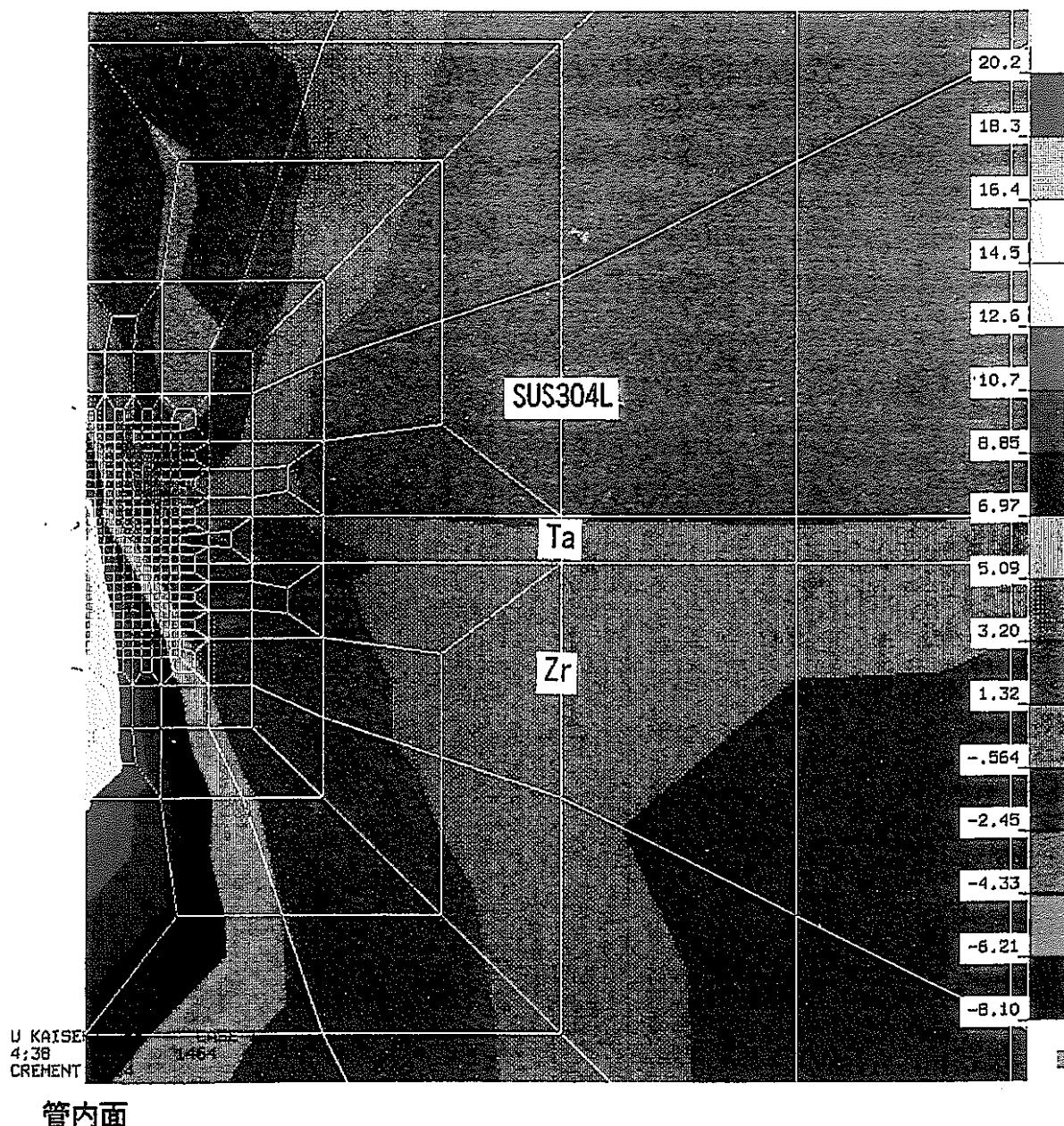
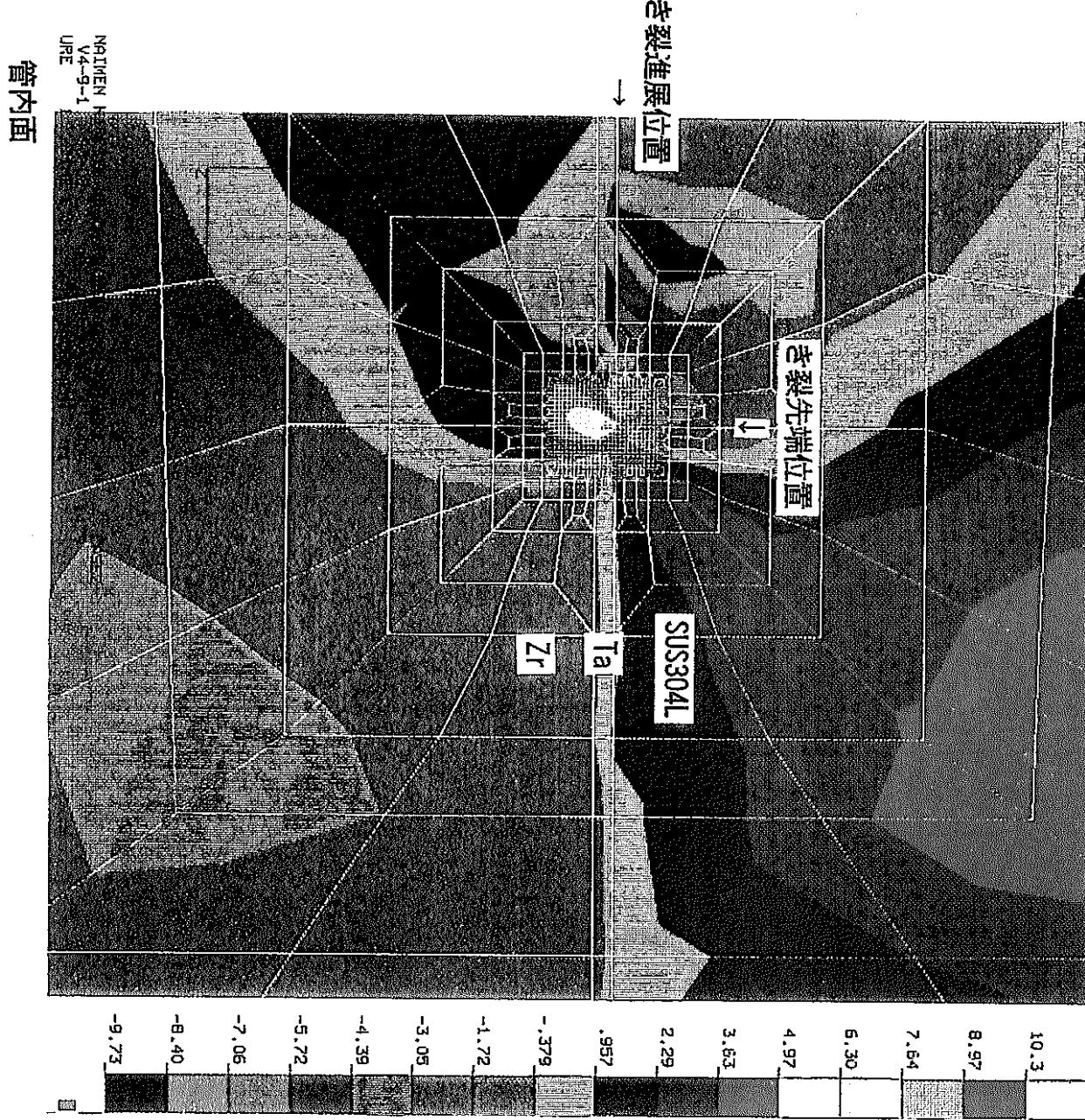


図27 管内面の軸方向残留応力分布 (kgf/mm²)

図28 き裂先端の軸方向残留応力分布 (kgf/mm²)



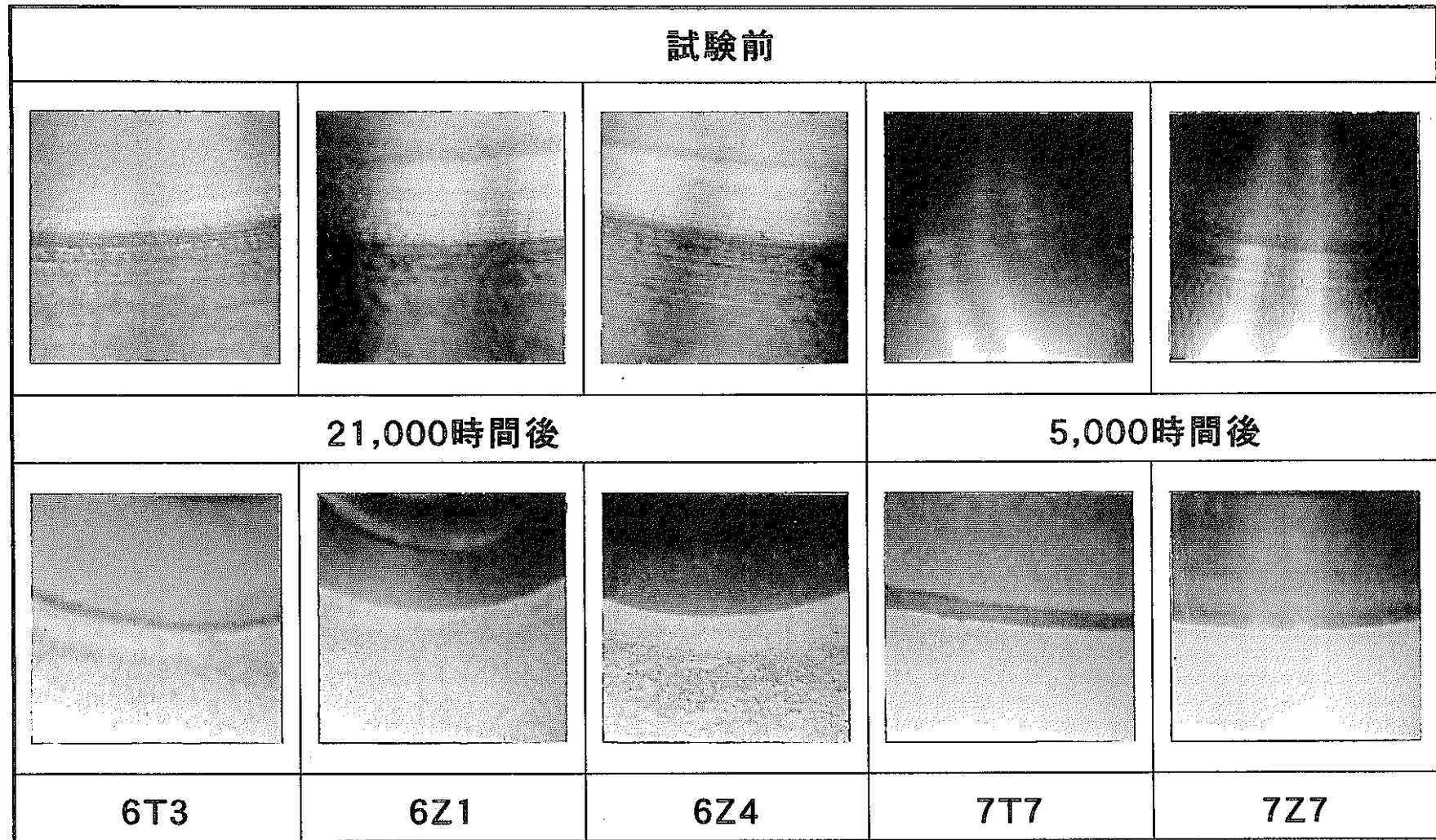


写真 1-1 热間圧延管継手の内表面観察（硝酸凝縮液ライン）

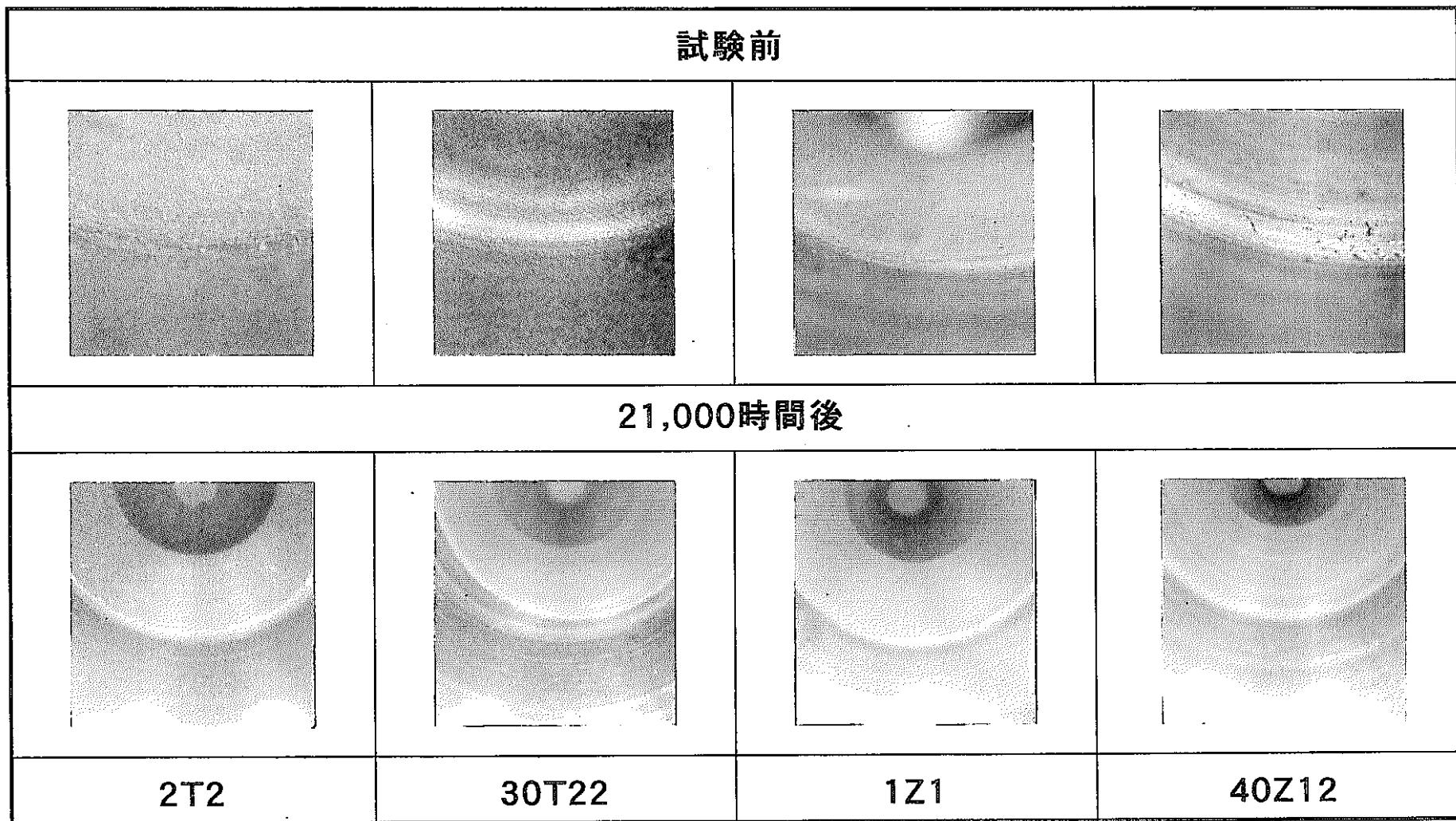


写真 1-2 熱間圧延管継手の内表面観察（濃縮液ライン）

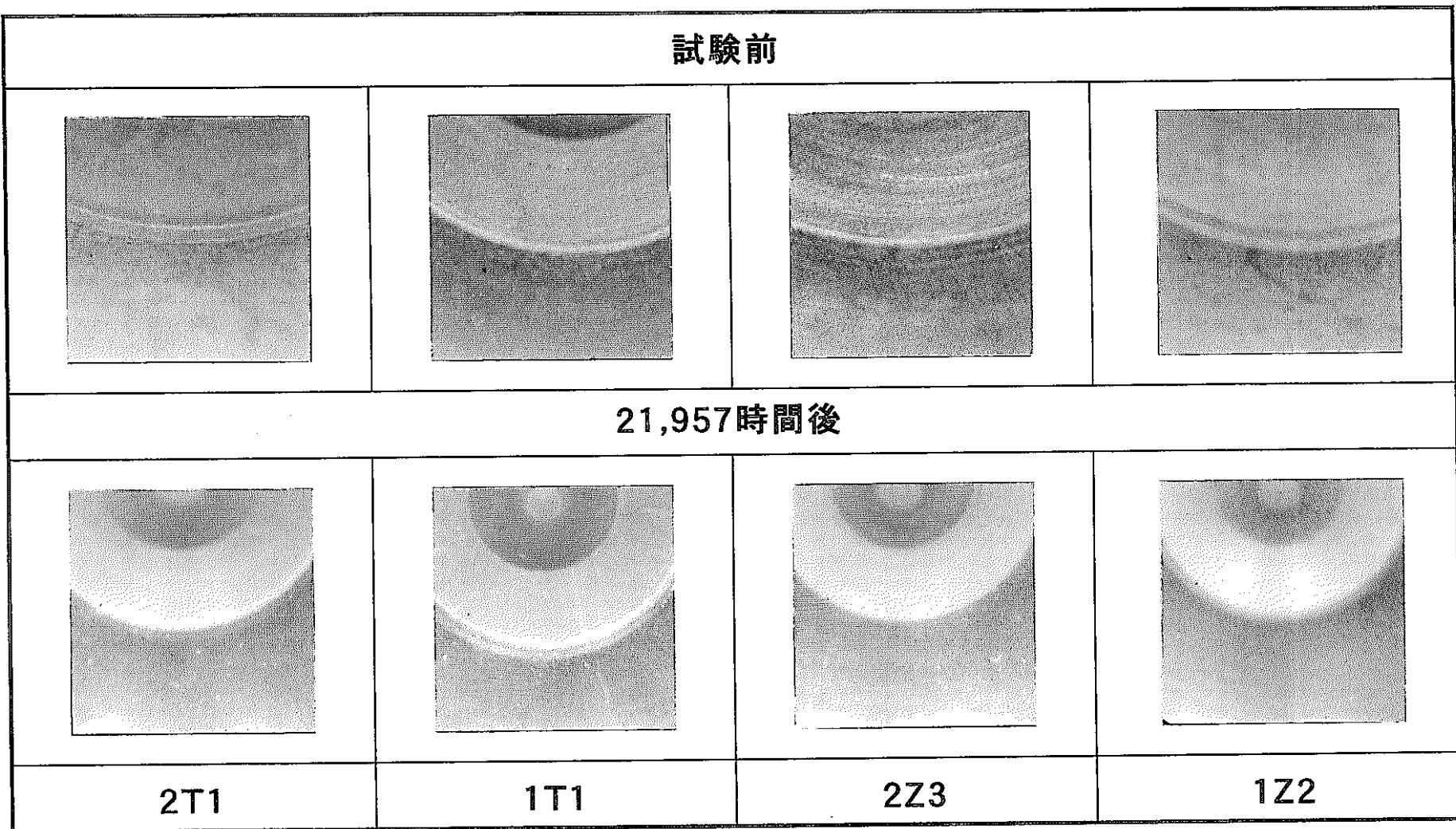


写真 1-3 熱間圧延管継手の内表面観察（供給液ライン）

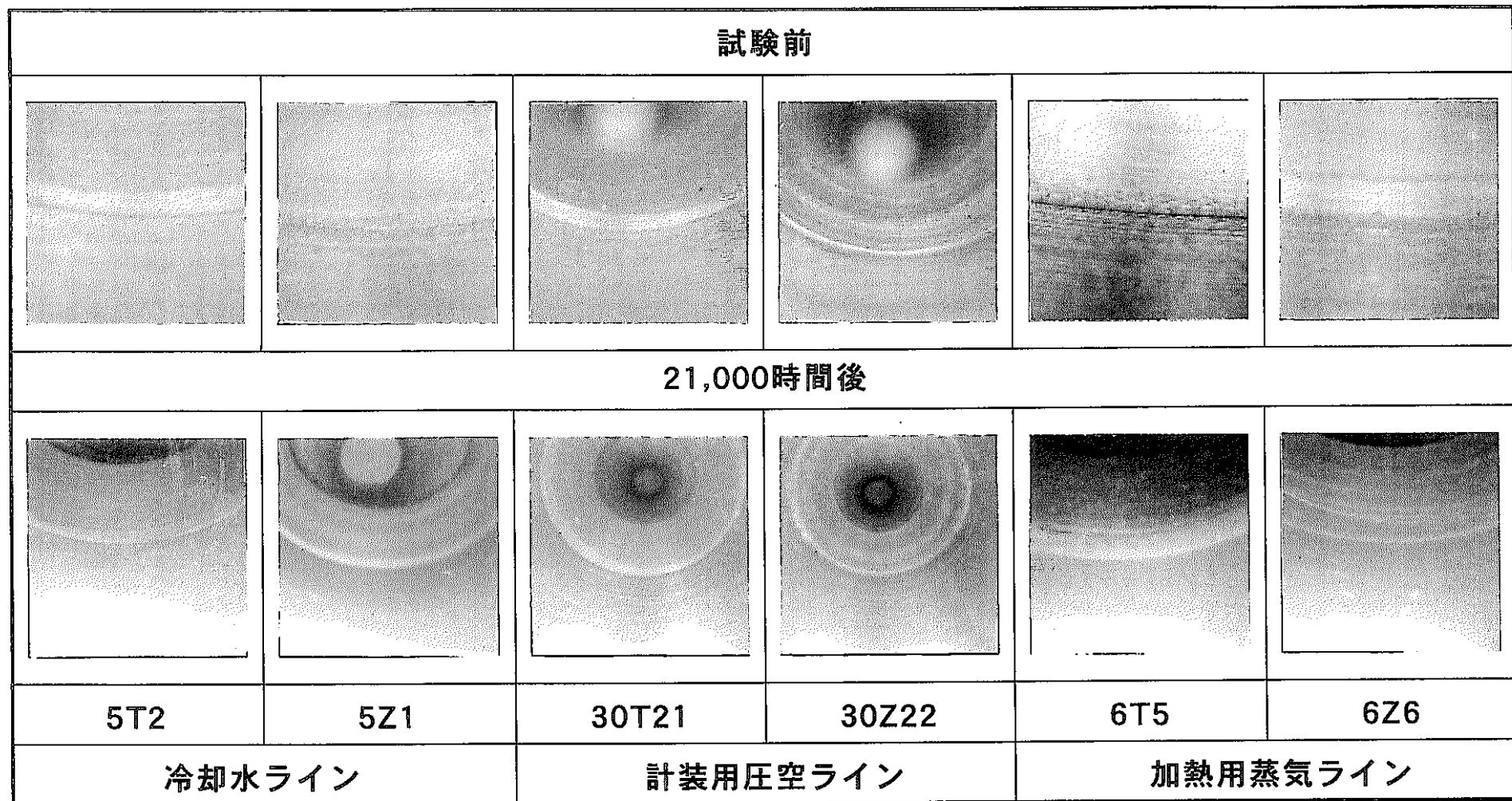


写真 1-4 热間圧延管継手の内表面観察（冷却水、計装用圧空、加熱用蒸気ライン）

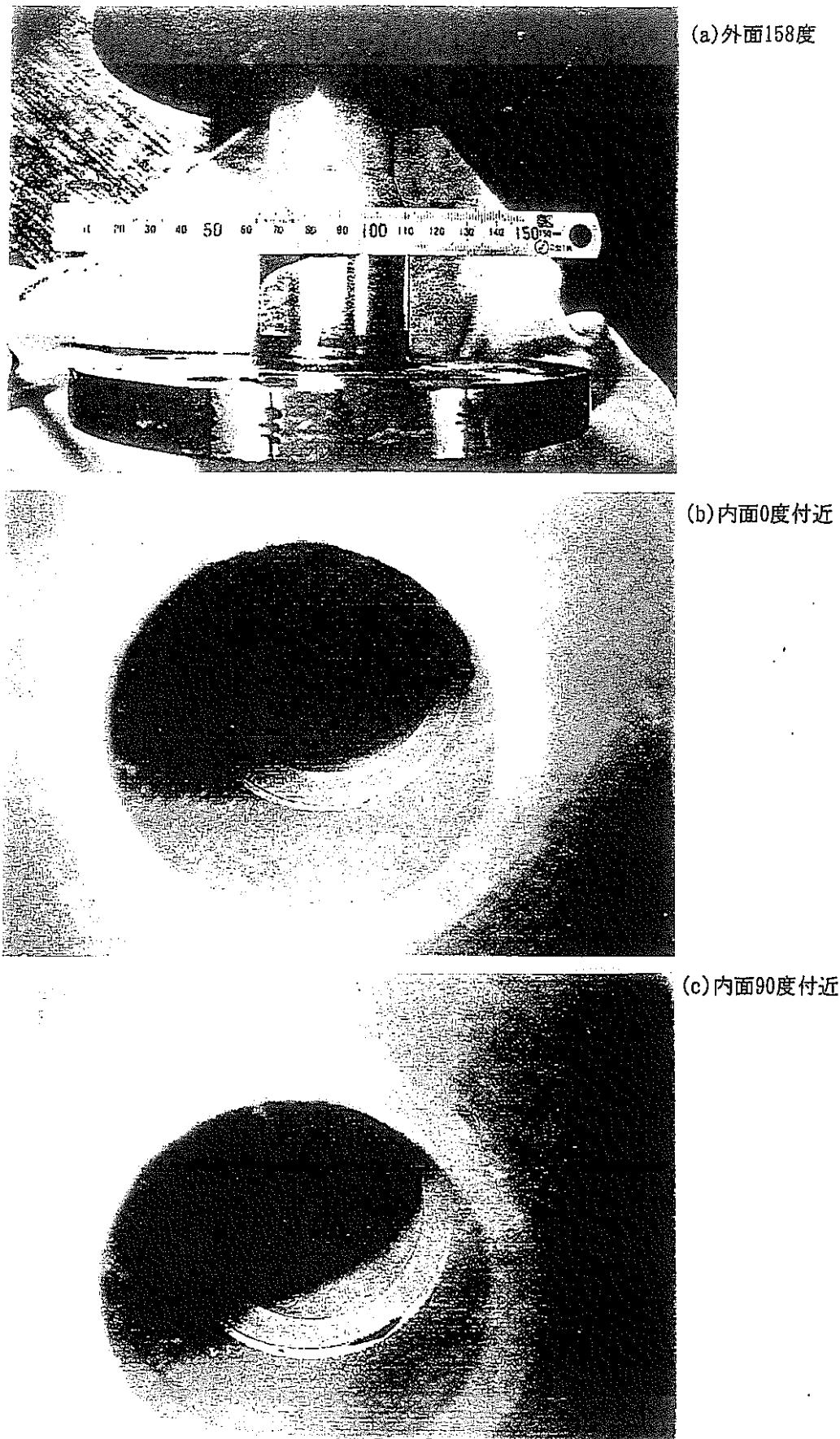
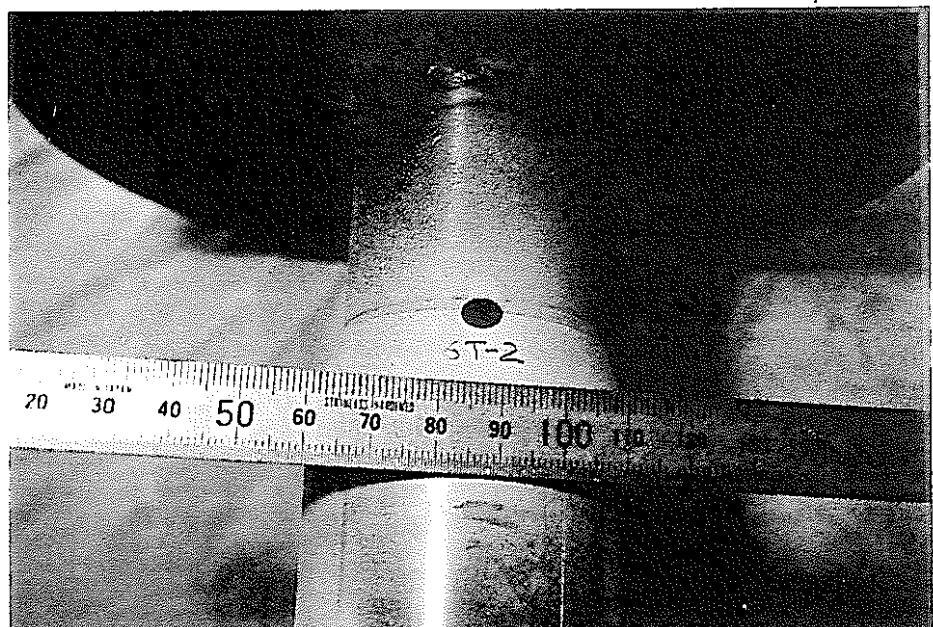
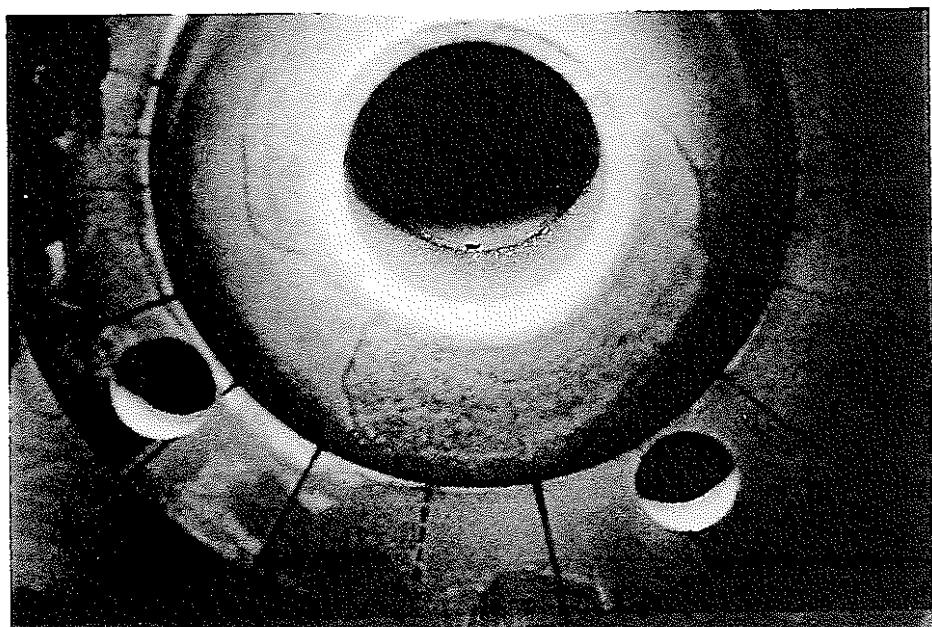


写真 2-1 6T1浸透探傷試験きず指示模様



(a) 外面40度付近



(b) 内面340度付近

写真 2-2 6T2浸透探傷試験きず指示模様

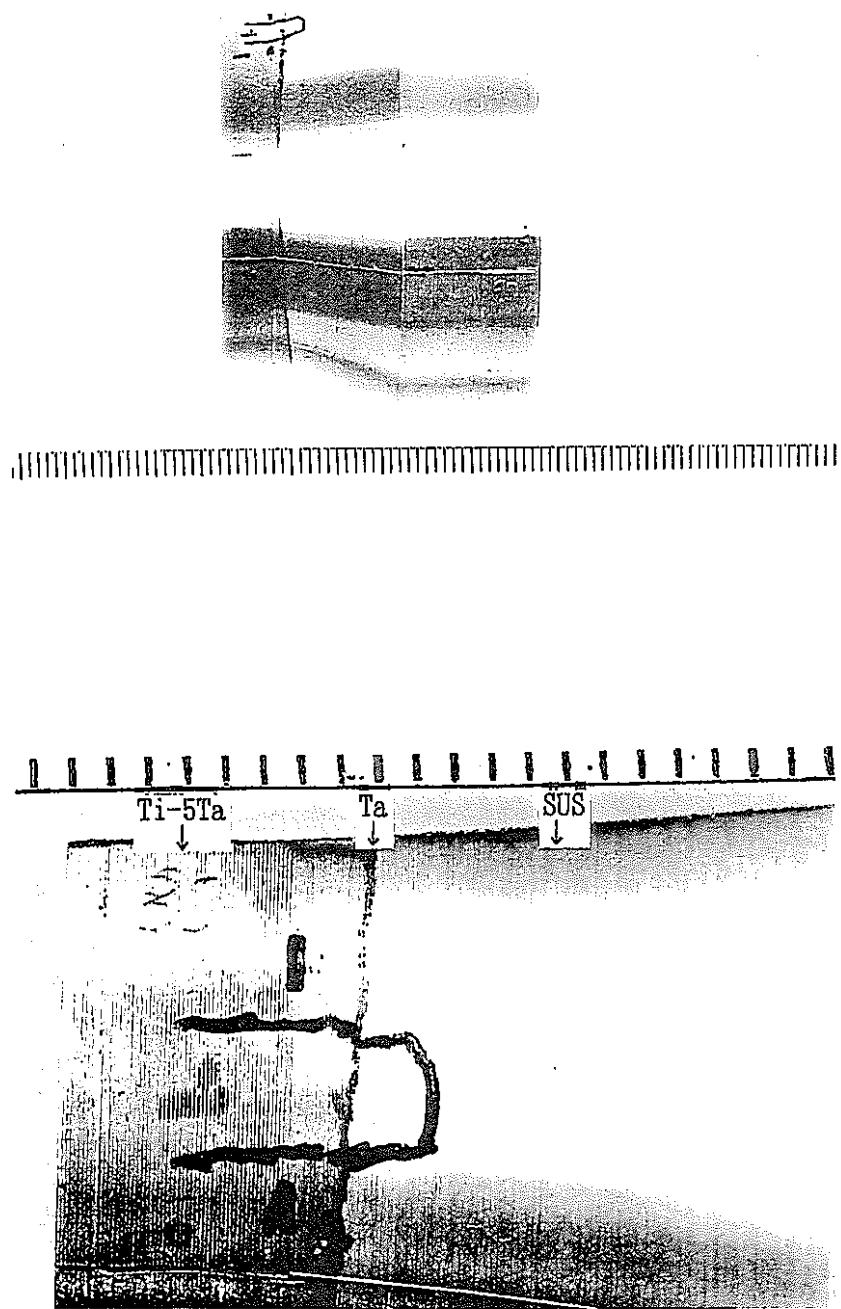


写真 3-1 外面側PT欠陥部の外観 (6T1)

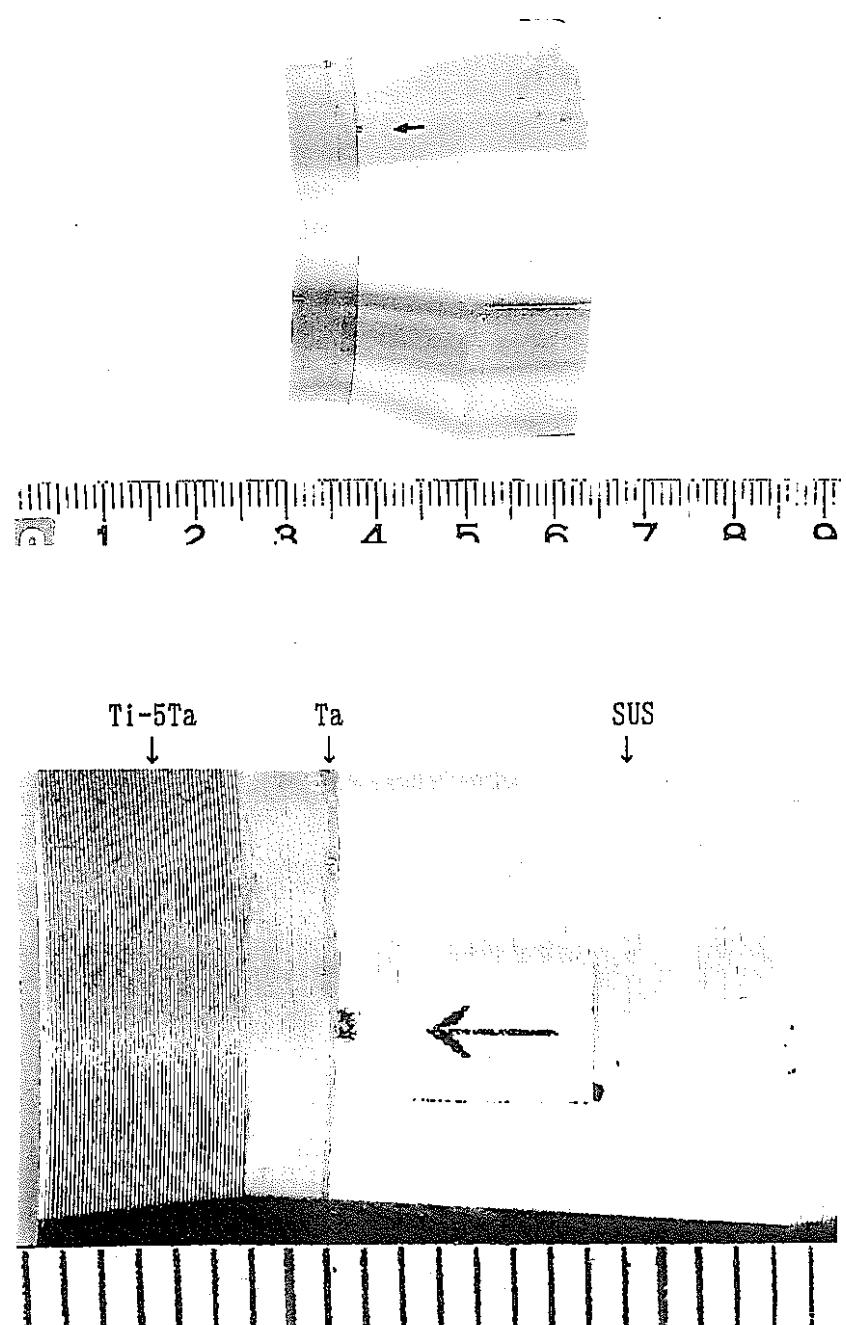
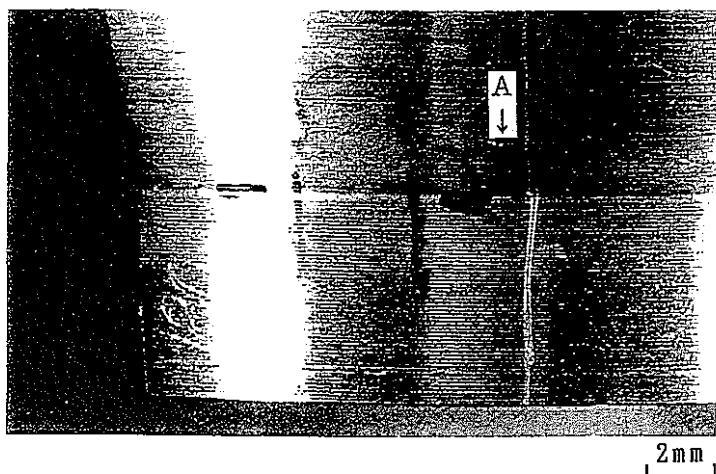
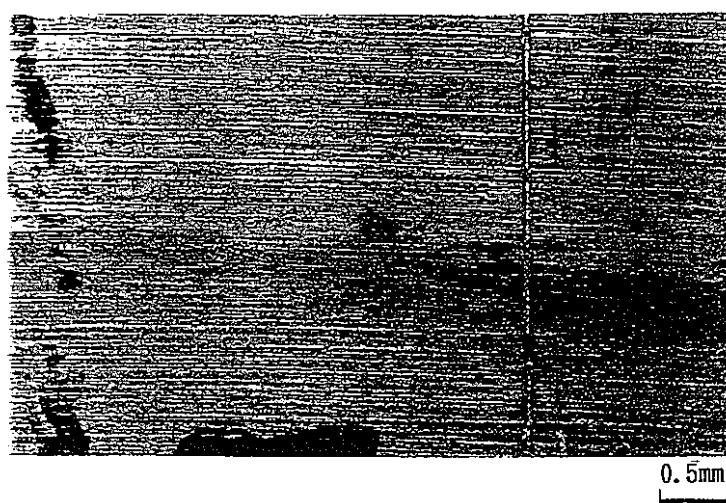


写真 3-2 外面側PT欠陥部の外観 (6T2)



A部



欠陥
↓

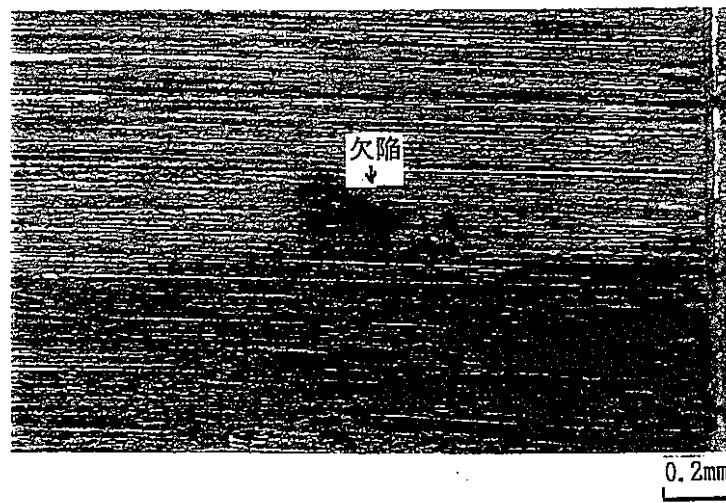


写真 3-3 外面側PT欠陥部の外観 (6T1)

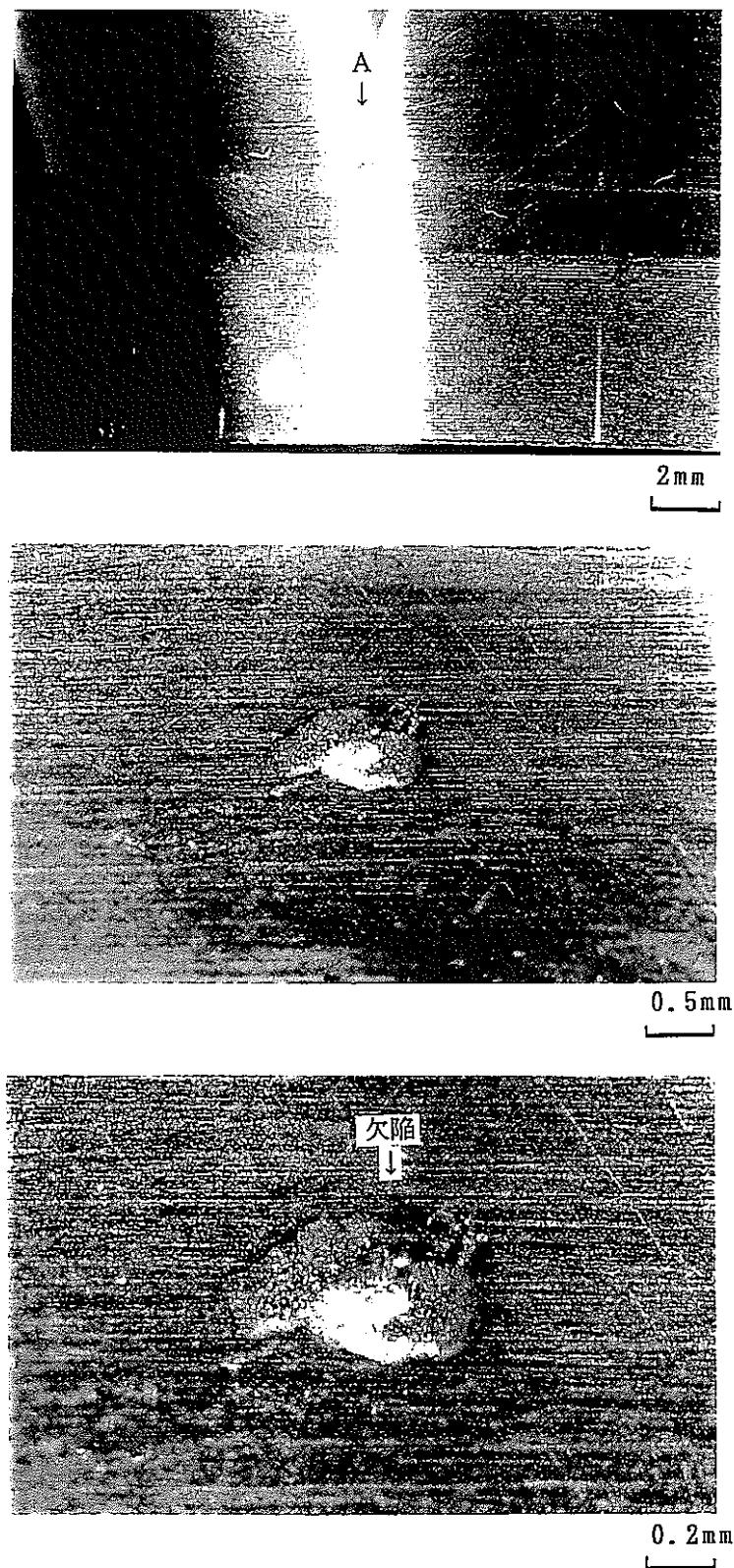


写真 3-4 外面側PT欠陥部の外観 (6T2)

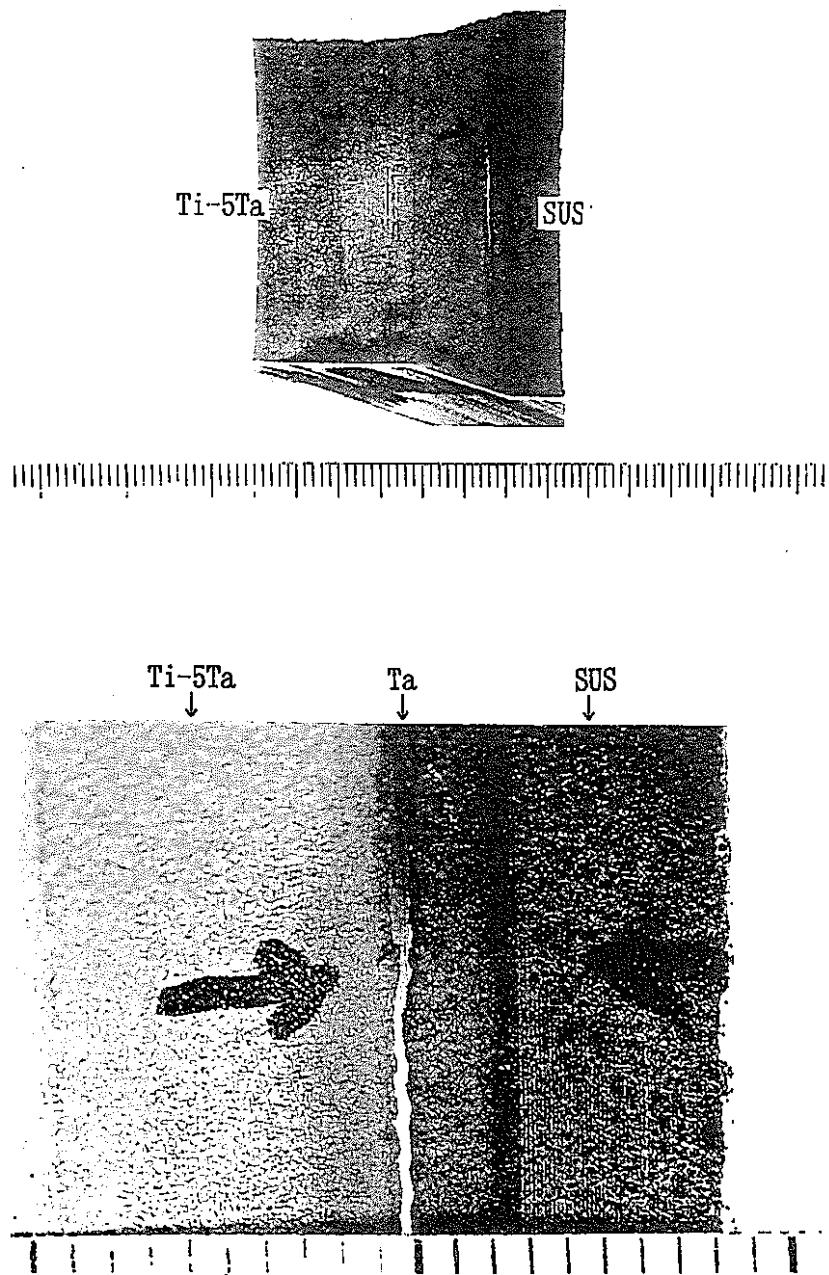


写真 3-5 内面側PT欠陥部の外観 (6T1)

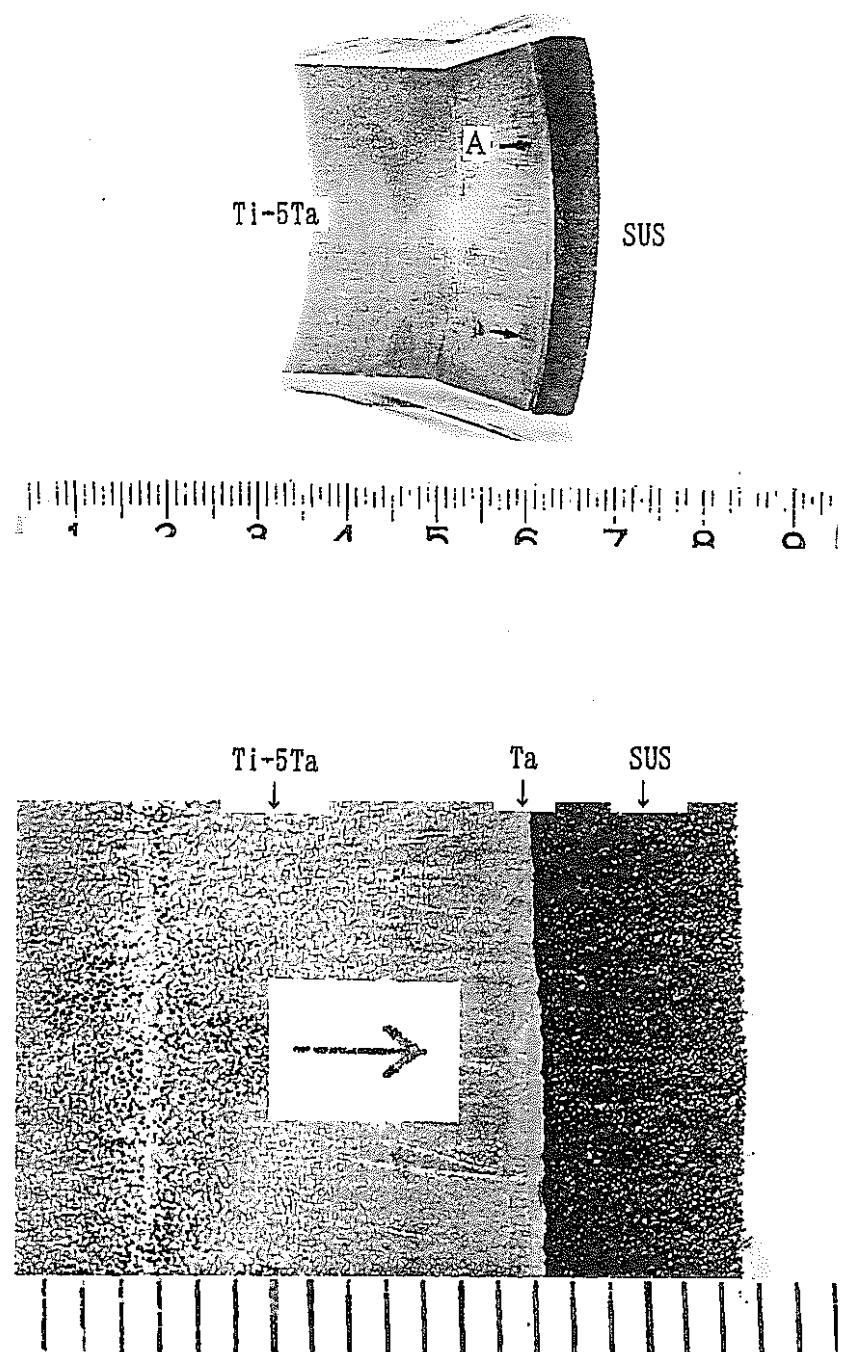


写真 3-6 内面側PT欠陥部の外観 (6T2)

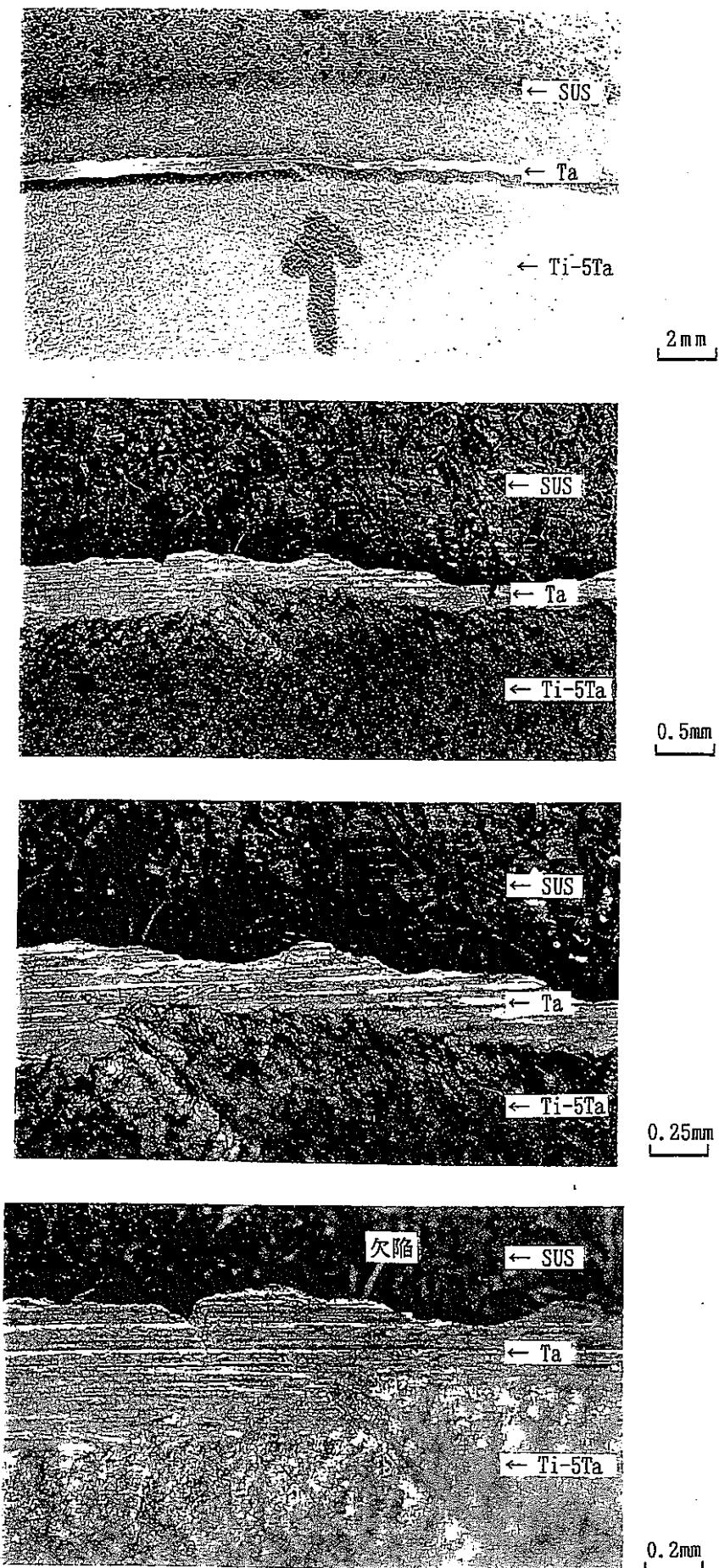
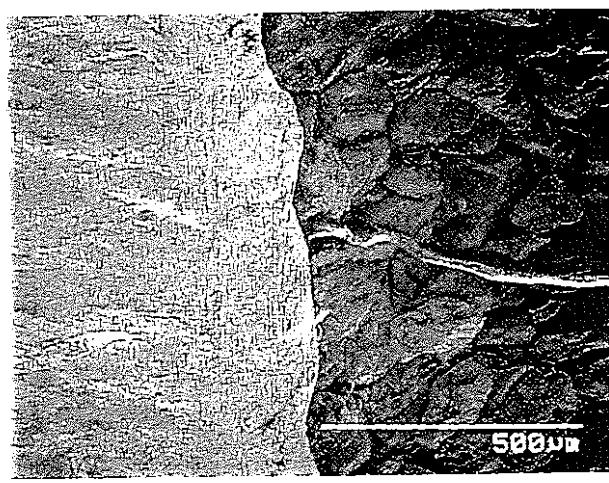
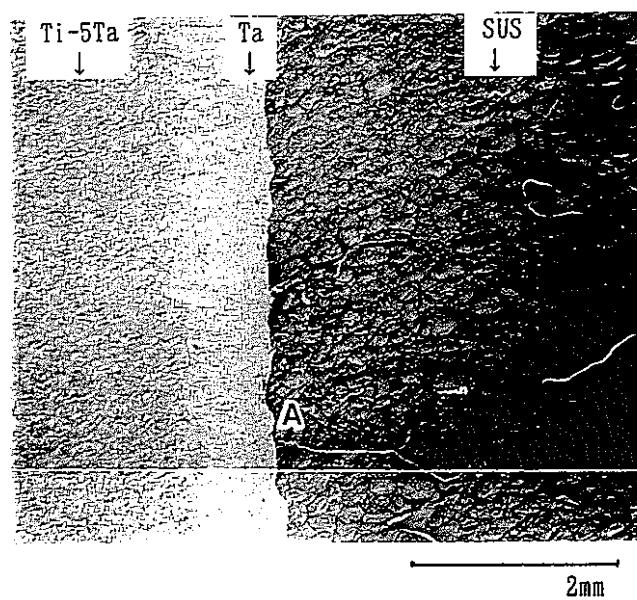
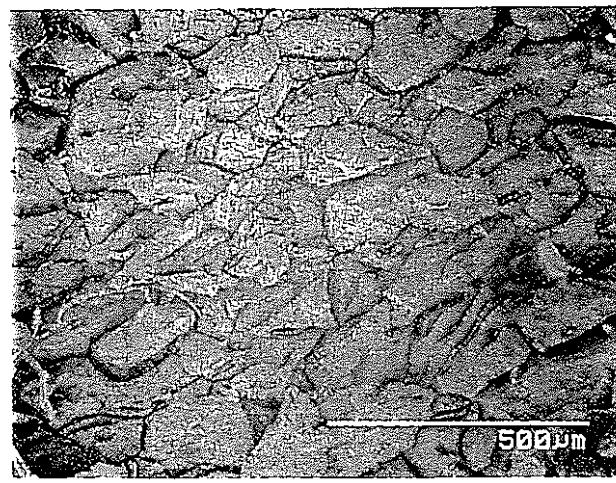


写真 3-7 内面側PT欠陥部の外観 (6T1)



A部



SUS部

写真 3-8 管内面側PT欠陥部のSEM観察 (6T2)

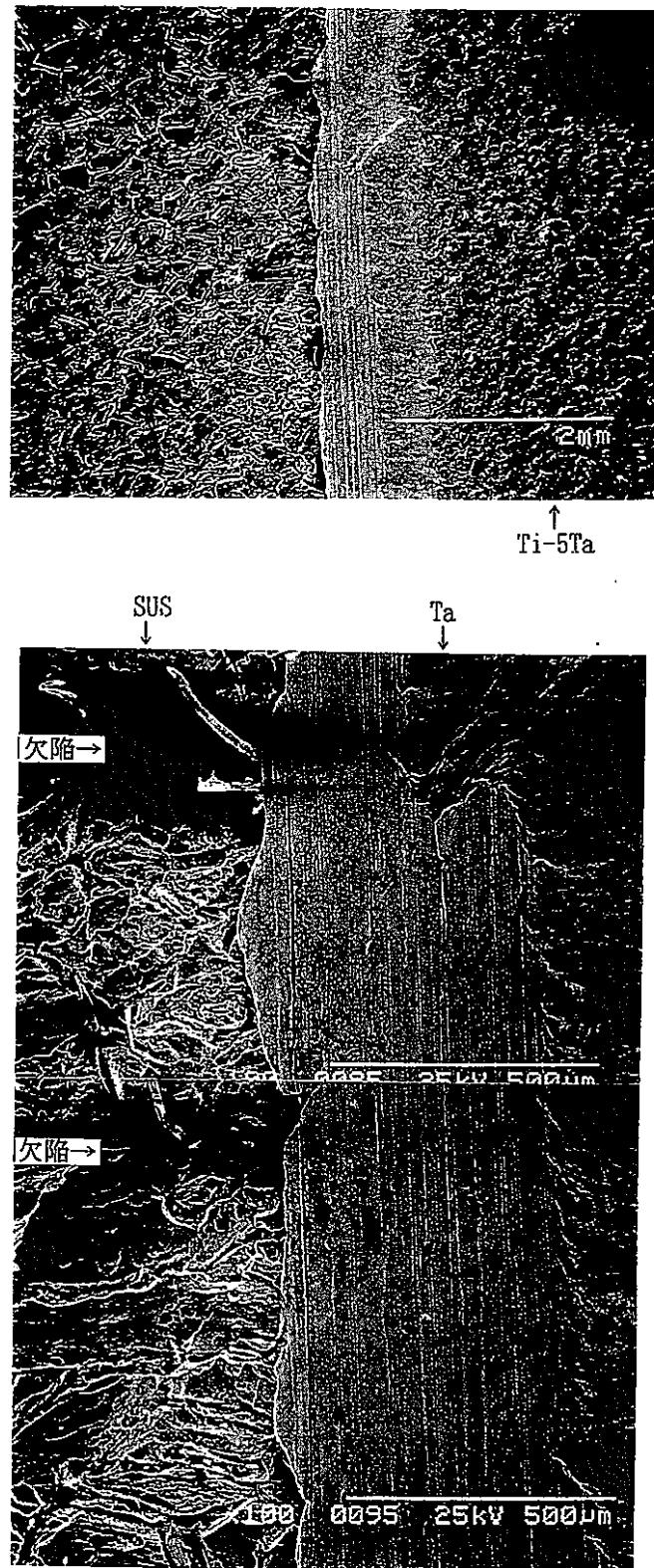


写真 3-9 管内面側PT欠陥部のSEM観察（6T1）

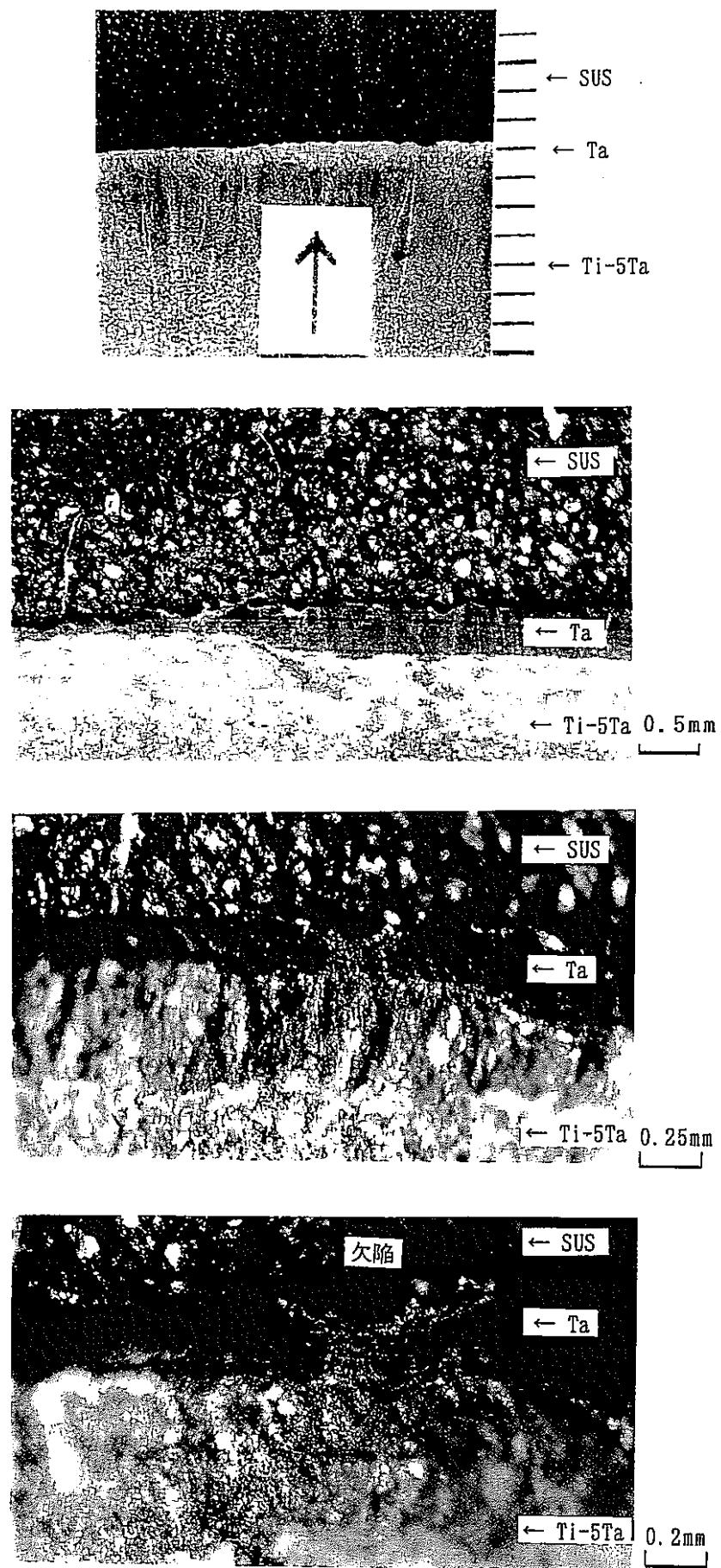


写真 3-10 内面側PT欠陥部の外観 (6T2)

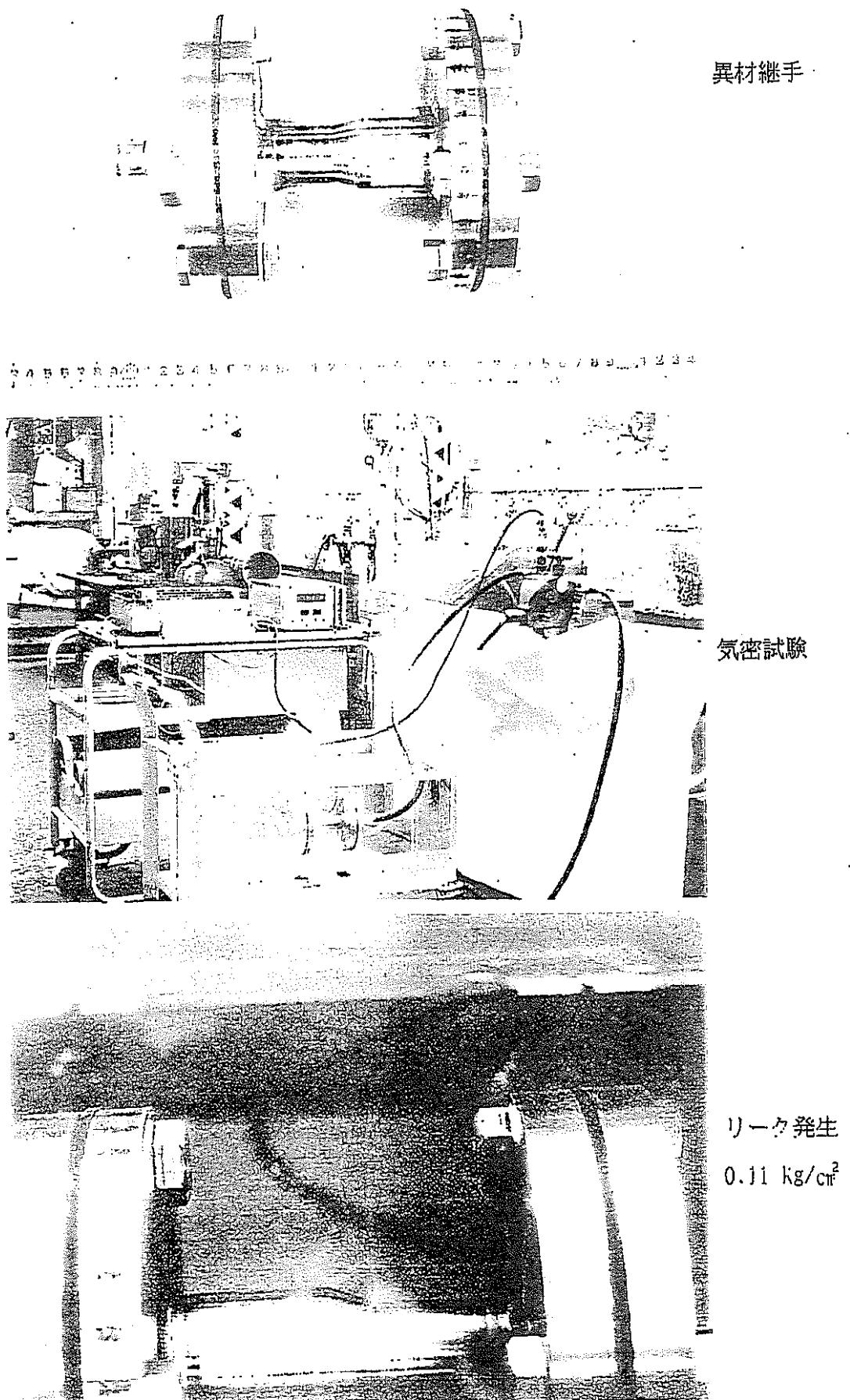


写真 4 気密試験状況

調査断面位置

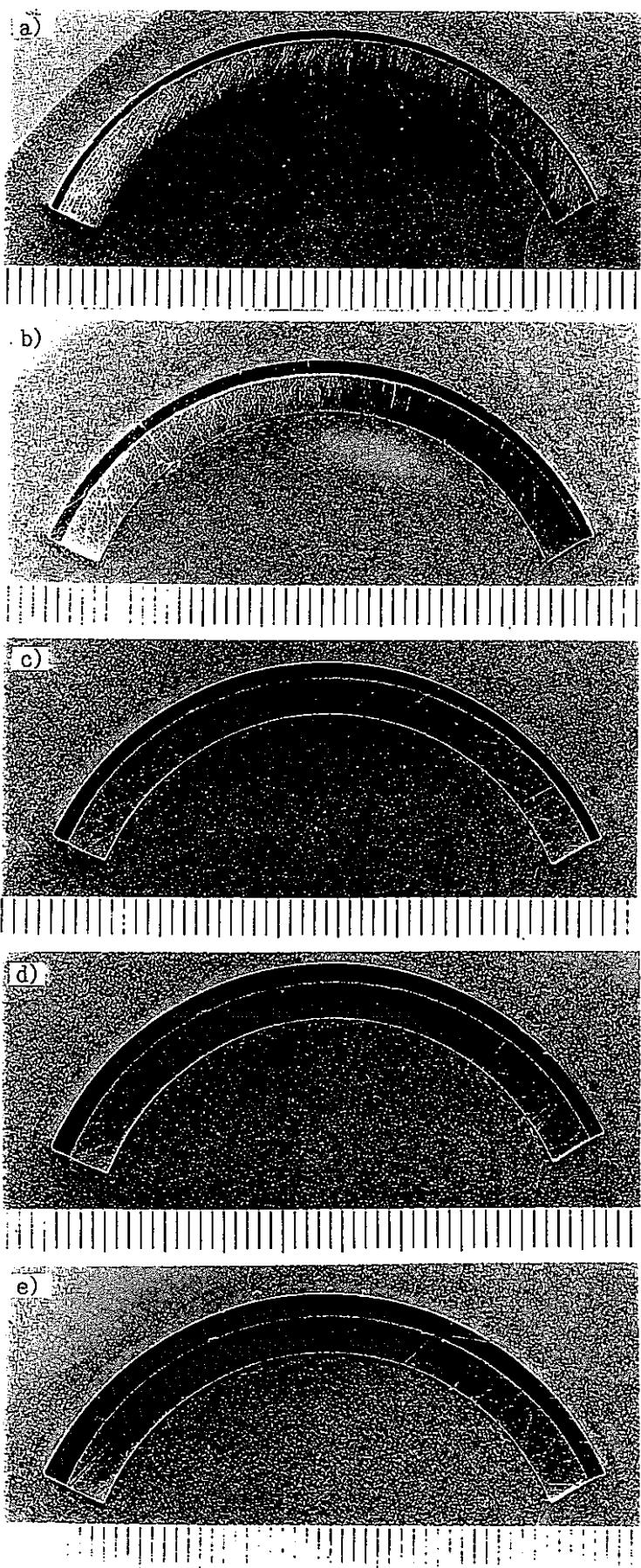
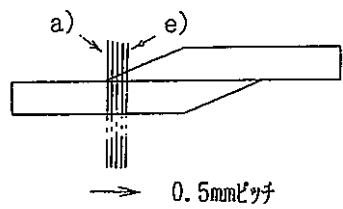


写真 5-1 管外面側欠陥からの断面研削後のマクロ断面 (6T1)

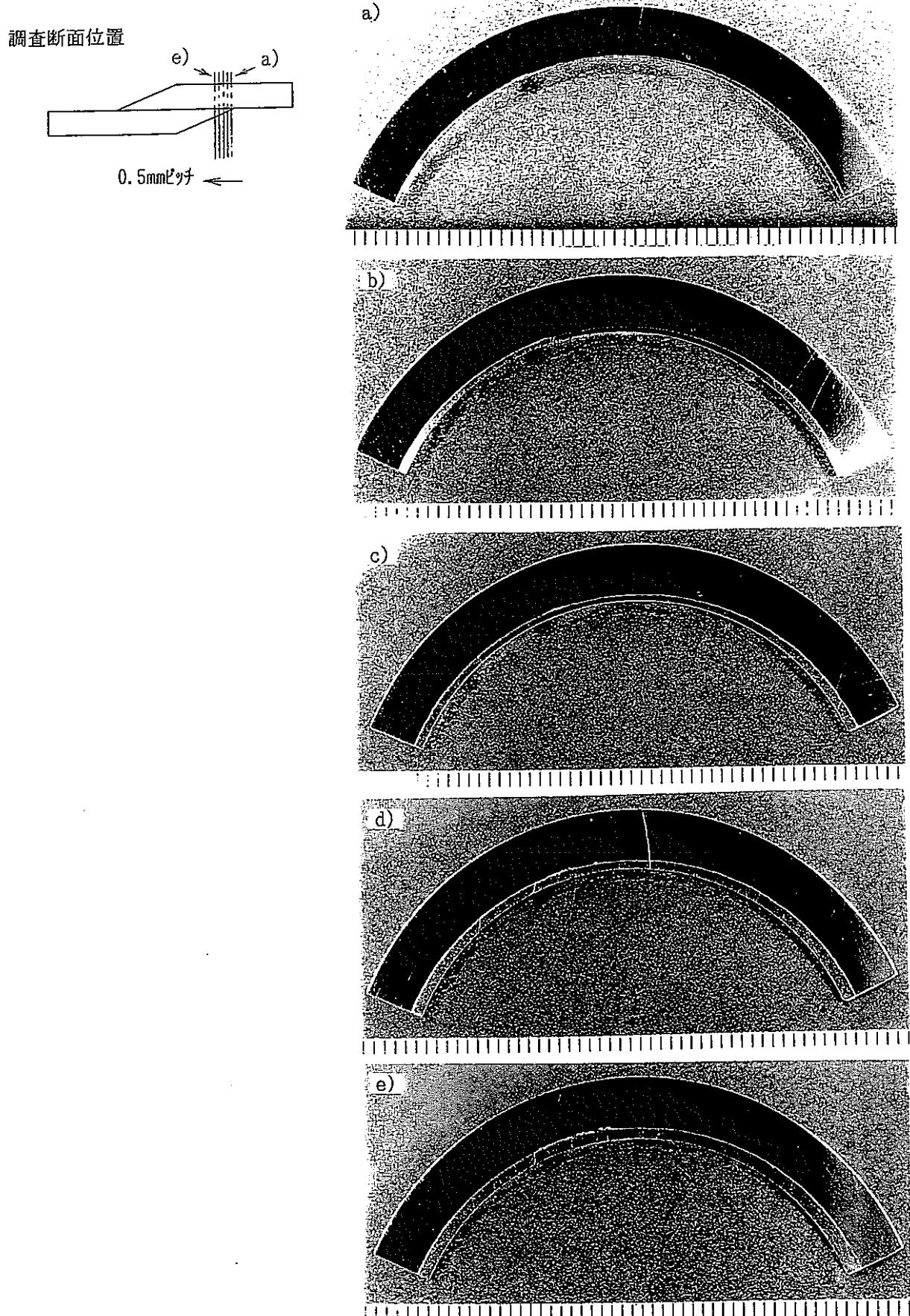


写真 5-2 管外面側欠陥からの断面研削後のマクロ断面 (6T1)

調査断面位置

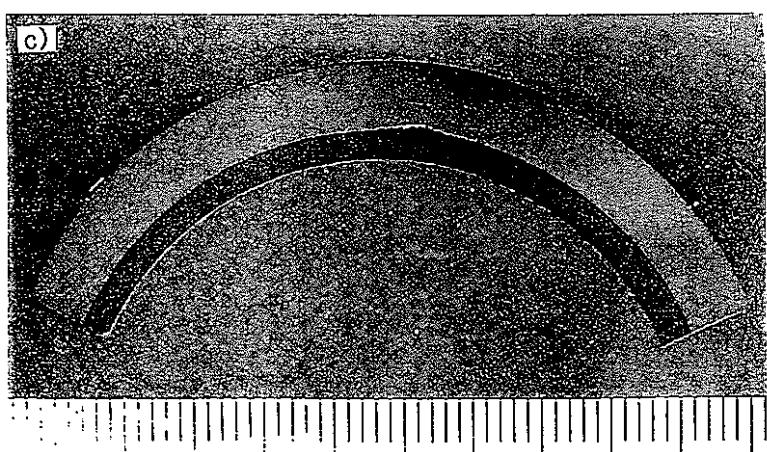
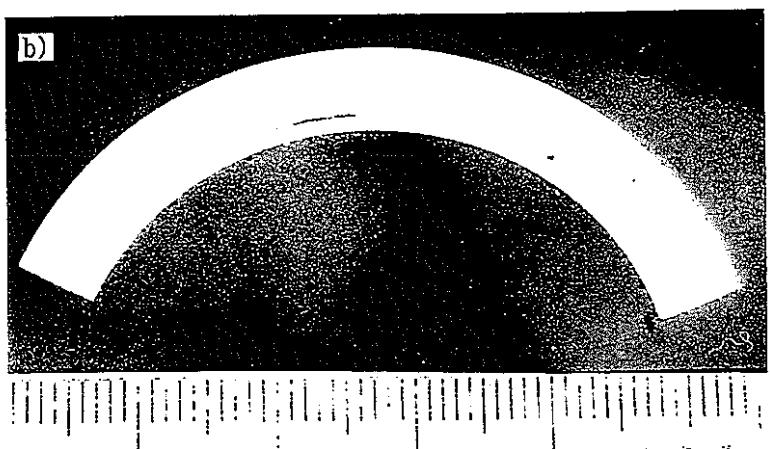
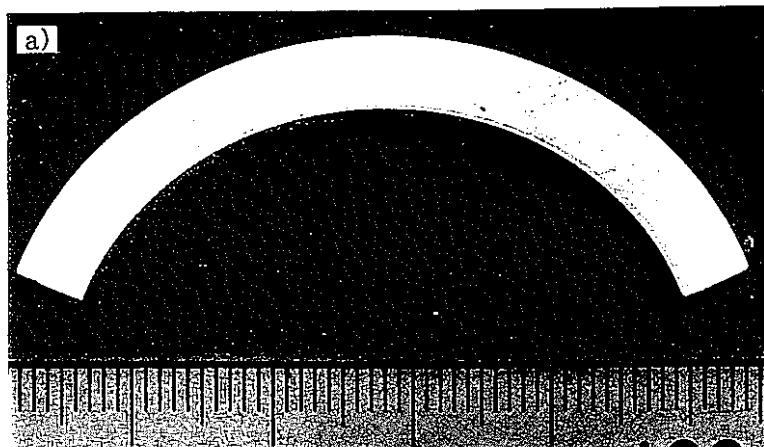
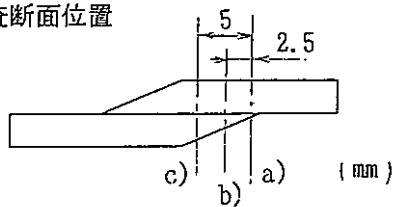


写真 5-3 管外面側欠陥からの断面研削後のマクロ断面 (6T1)

調査断面位置

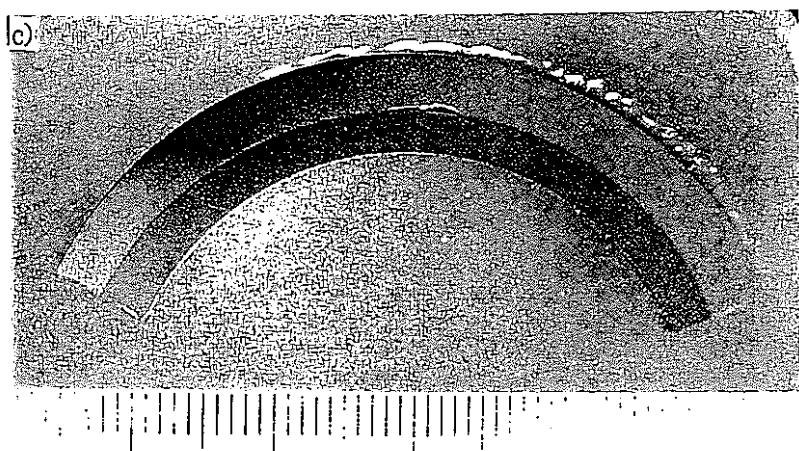
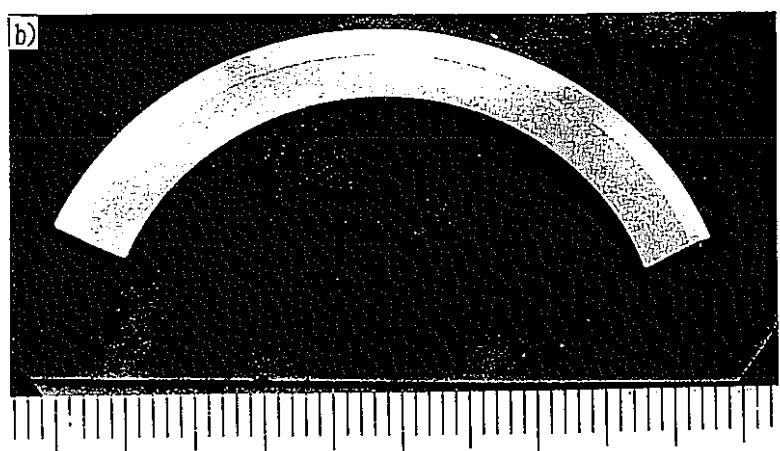
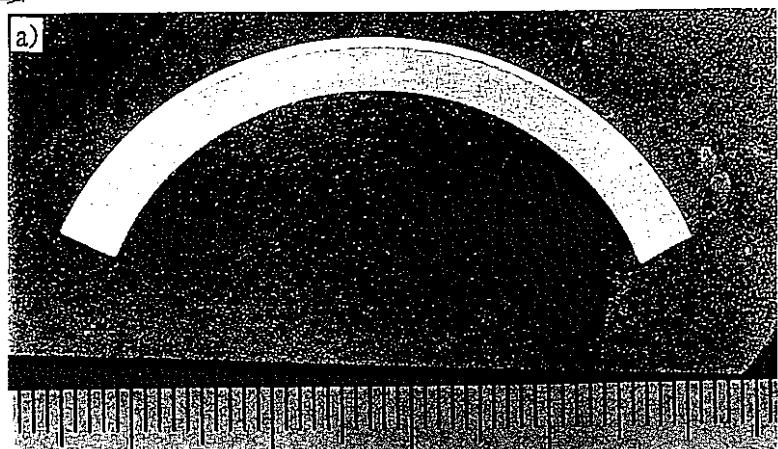
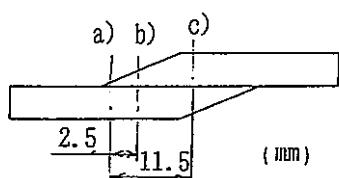


写真 5-4 管外面側欠陥からの断面研削後のマクロ断面 (6T1)

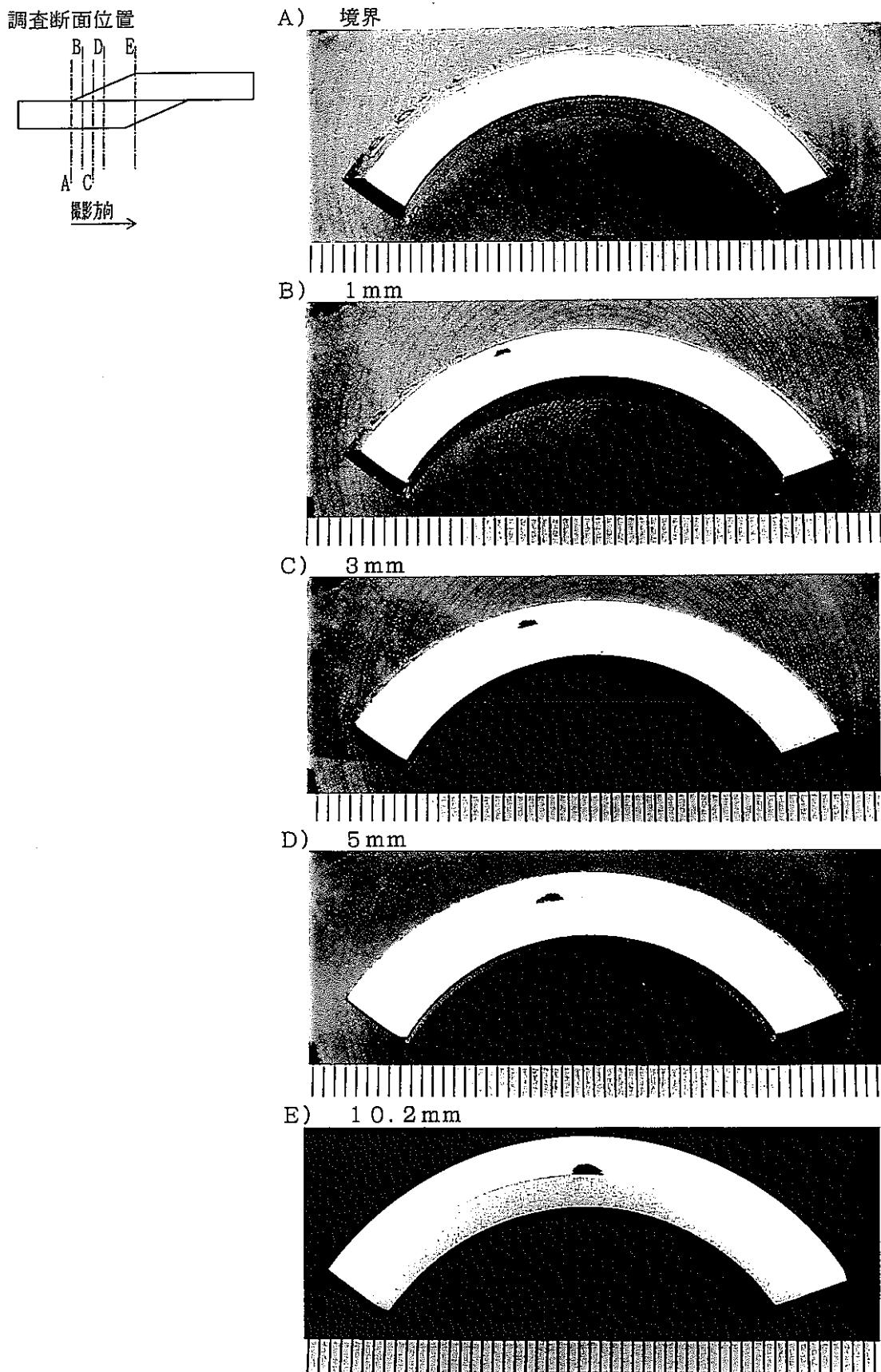
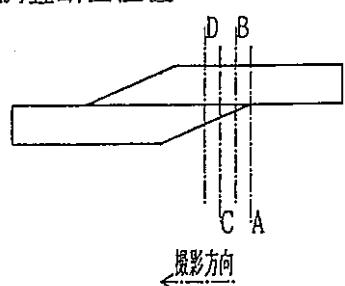
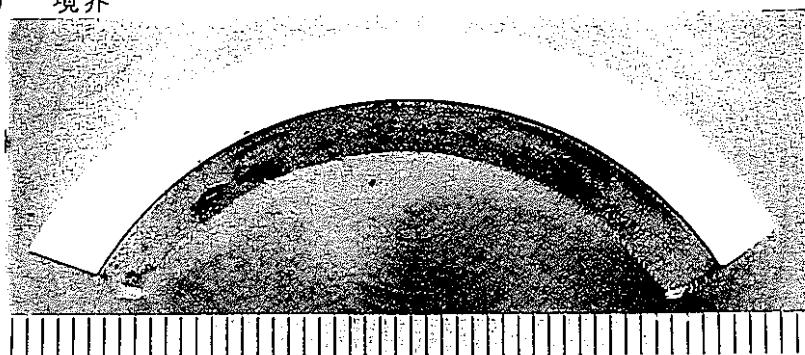


写真 6-1 管外面側欠陥からの断面研削後のマクロ断面 (6T1)

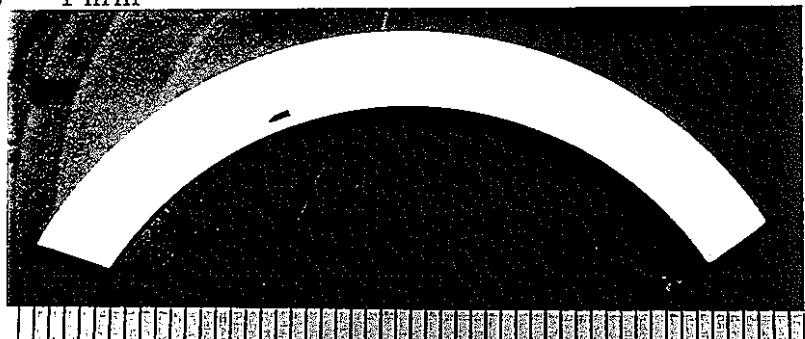
調査断面位置



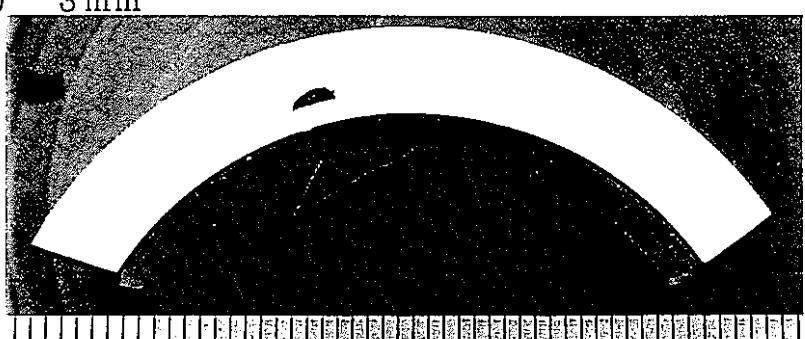
A) 境界



B) 1 mm



C) 3 mm



D) 5 mm

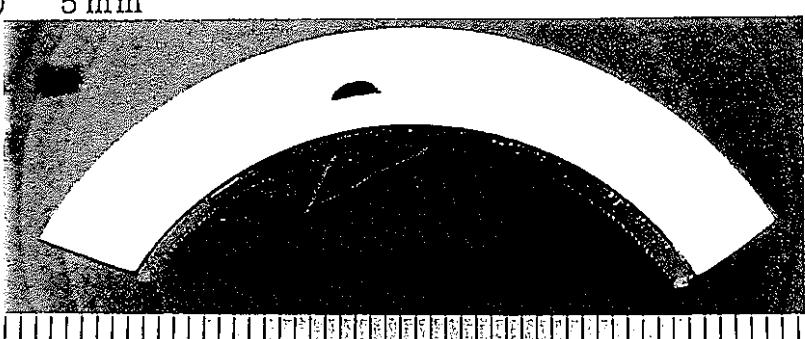
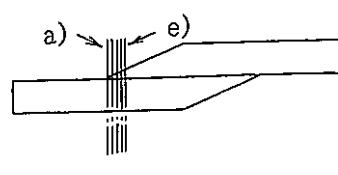
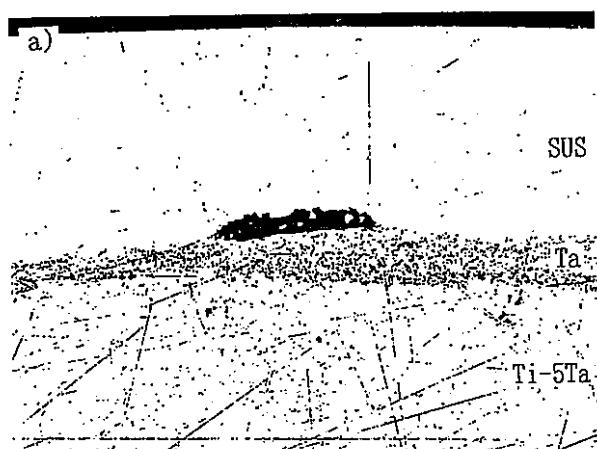


写真 6-2 管外面側欠陥からの断面研削後のマクロ断面 (6T1)

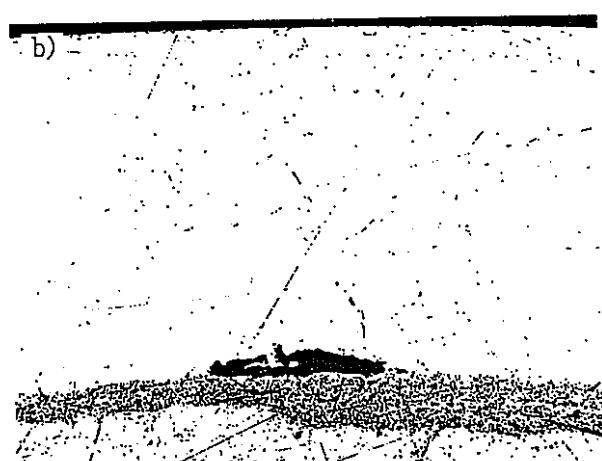
調査断面位置



c)



d)



e)

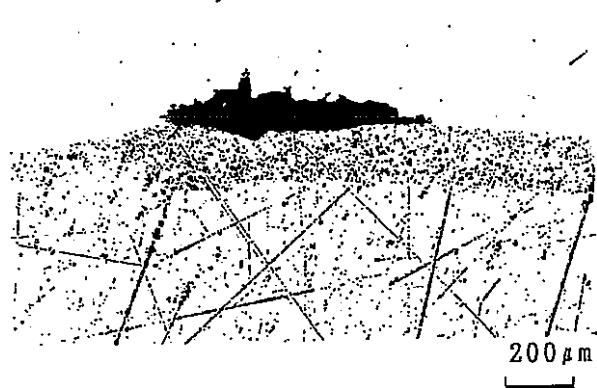
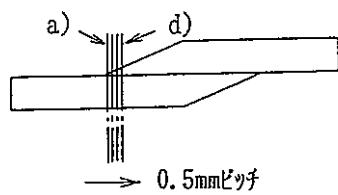


写真 7-1 管外面側欠陥からの断面研削後の界面 (6T1)

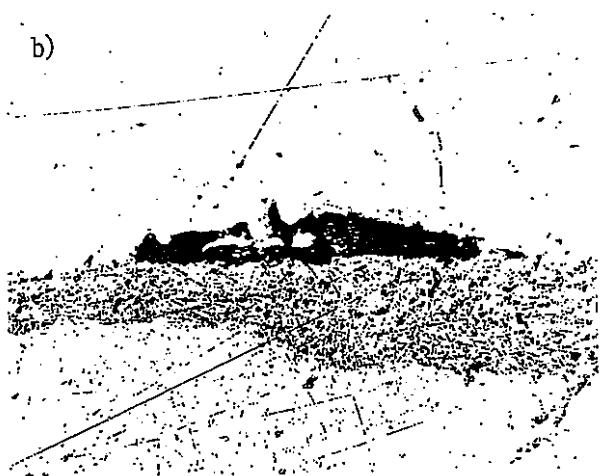
調査断面位置



a)



b)



c)



d)



100 μm

写真 7-2 管外面側欠陥からの断面研削後の界面 (6T1)

調査断面位置

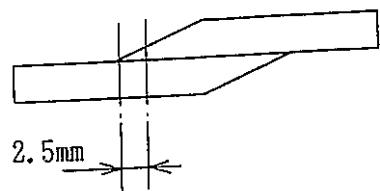
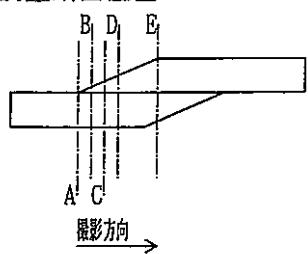


写真 7-3 管外面側欠陥からの断面研削後の界面 (6T1)

調査断面位置



A) 境界



B) 1 mm



C) 3 mm

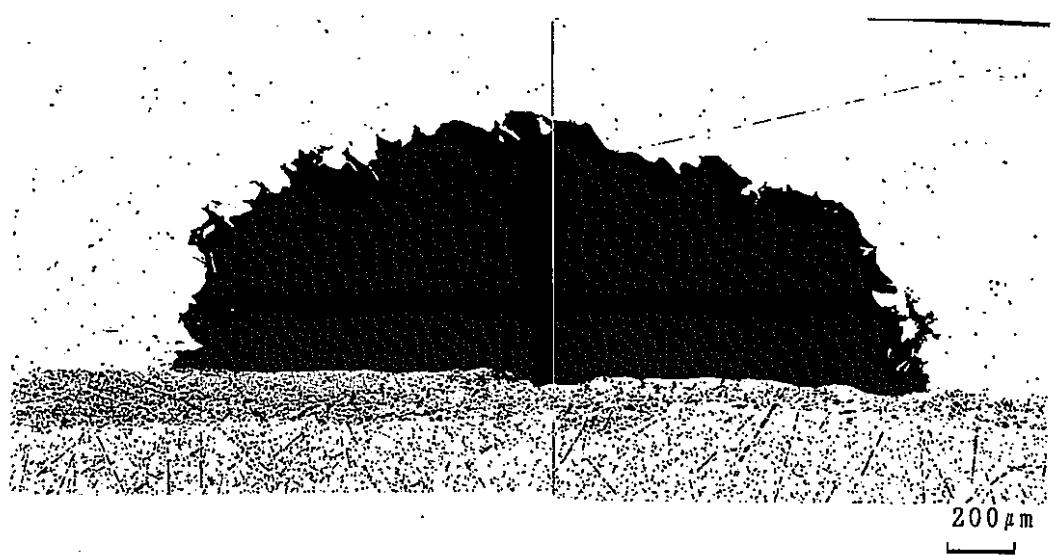
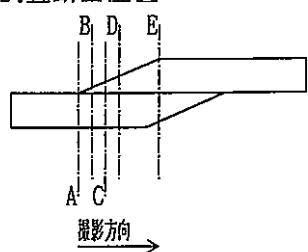
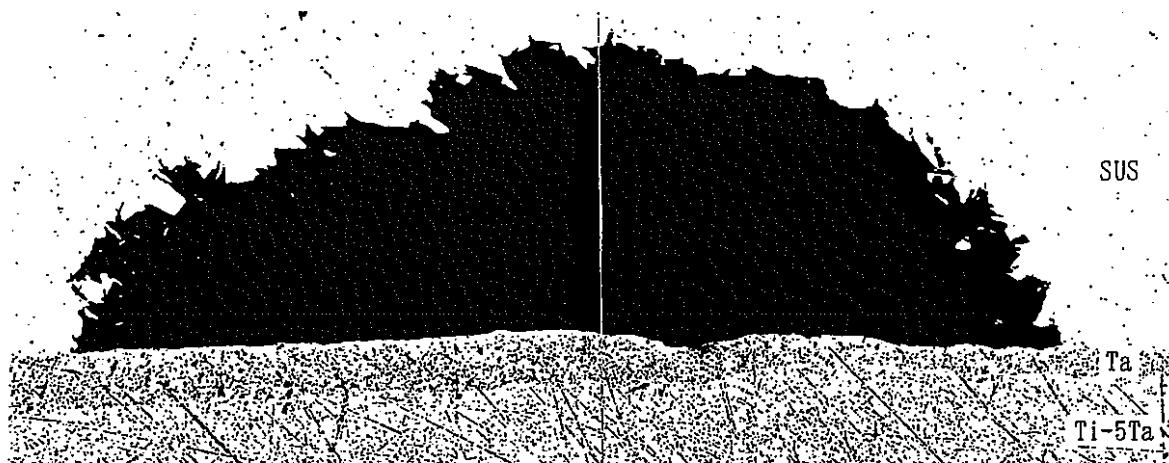


写真 8-1 管外面側欠陥からの断面研削後の界面 (6T2)

調査断面位置



D) 5 mm



E) 10.2 mm

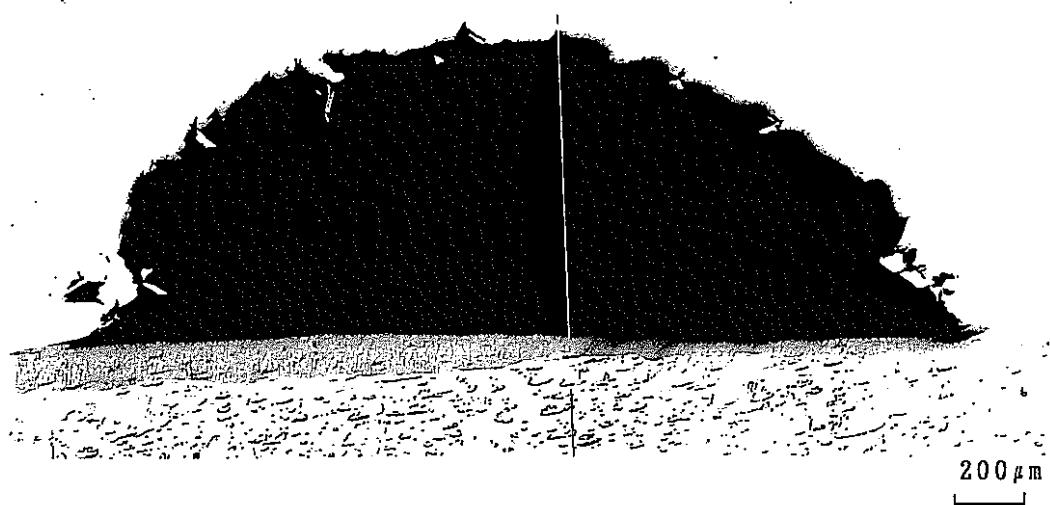


写真 8-2 管外面側欠陥からの断面研削後の界面 (6T2)

調査断面位置

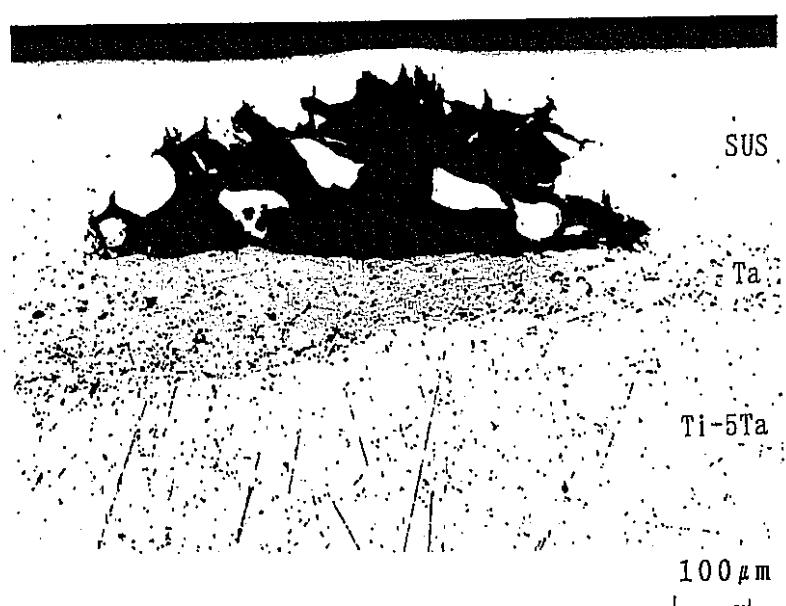
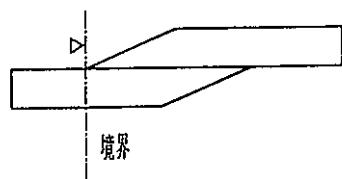


写真 8-3 管外面側欠陥からの断面研削後の界面 (6T2)

調査断面位置

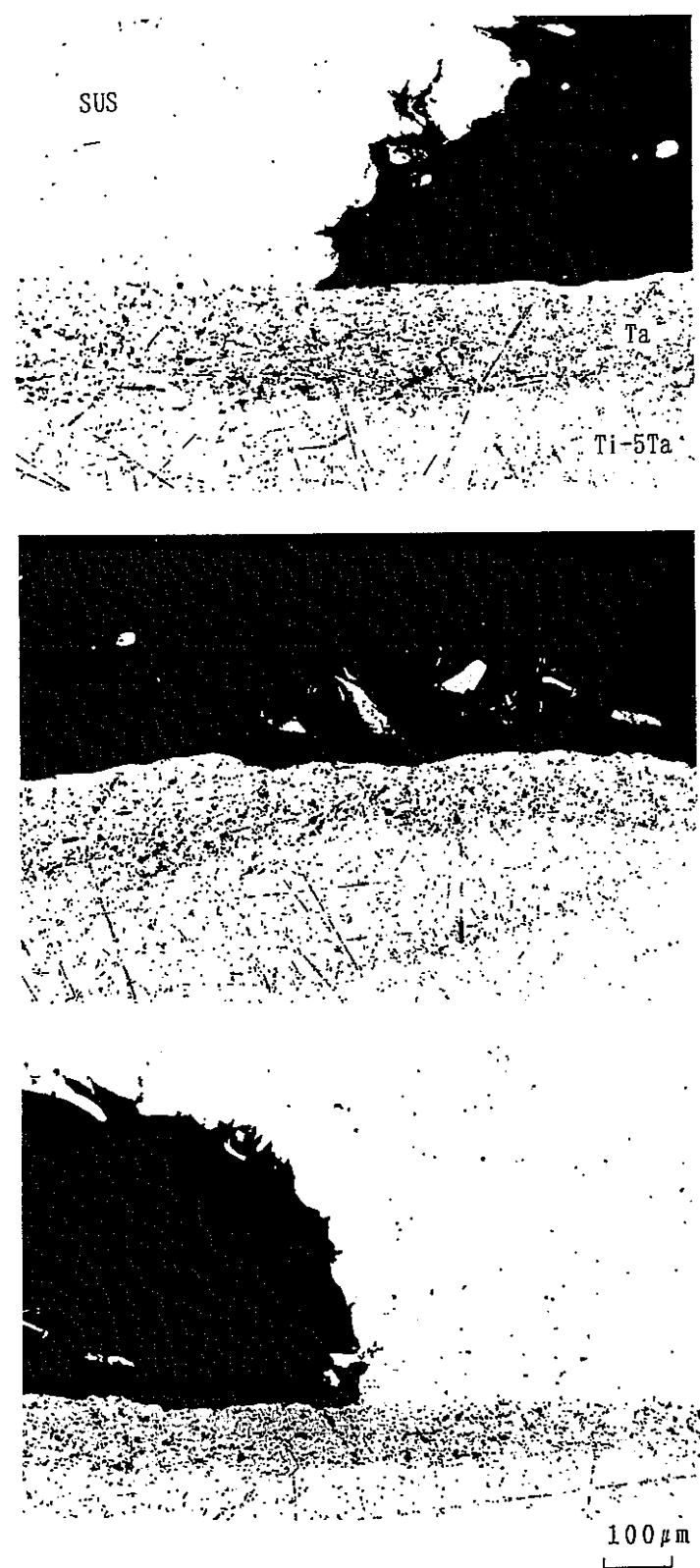
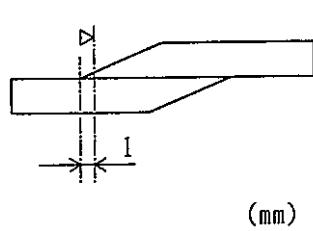
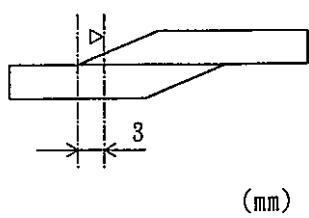


写真 8-4 管外面側欠陥からの断面研削後の界面 (6T2)

調査断面位置



SUS



Ta

Ti-5Ta

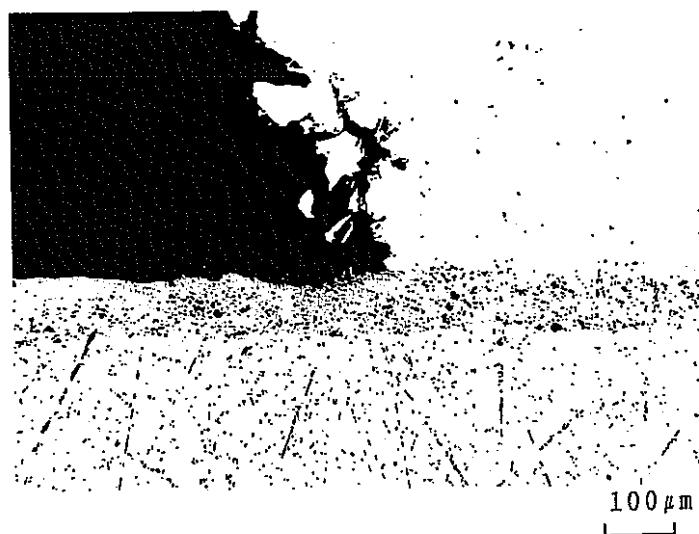
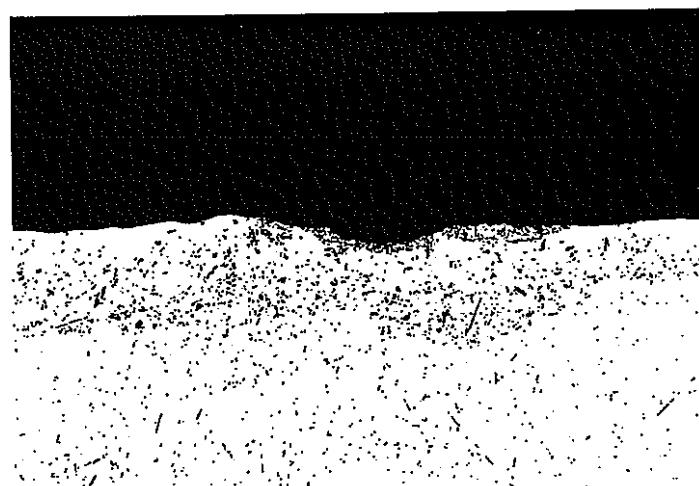


写真 8-5 管外面側欠陥からの断面研削後の界面 (6T2)

調査断面位置

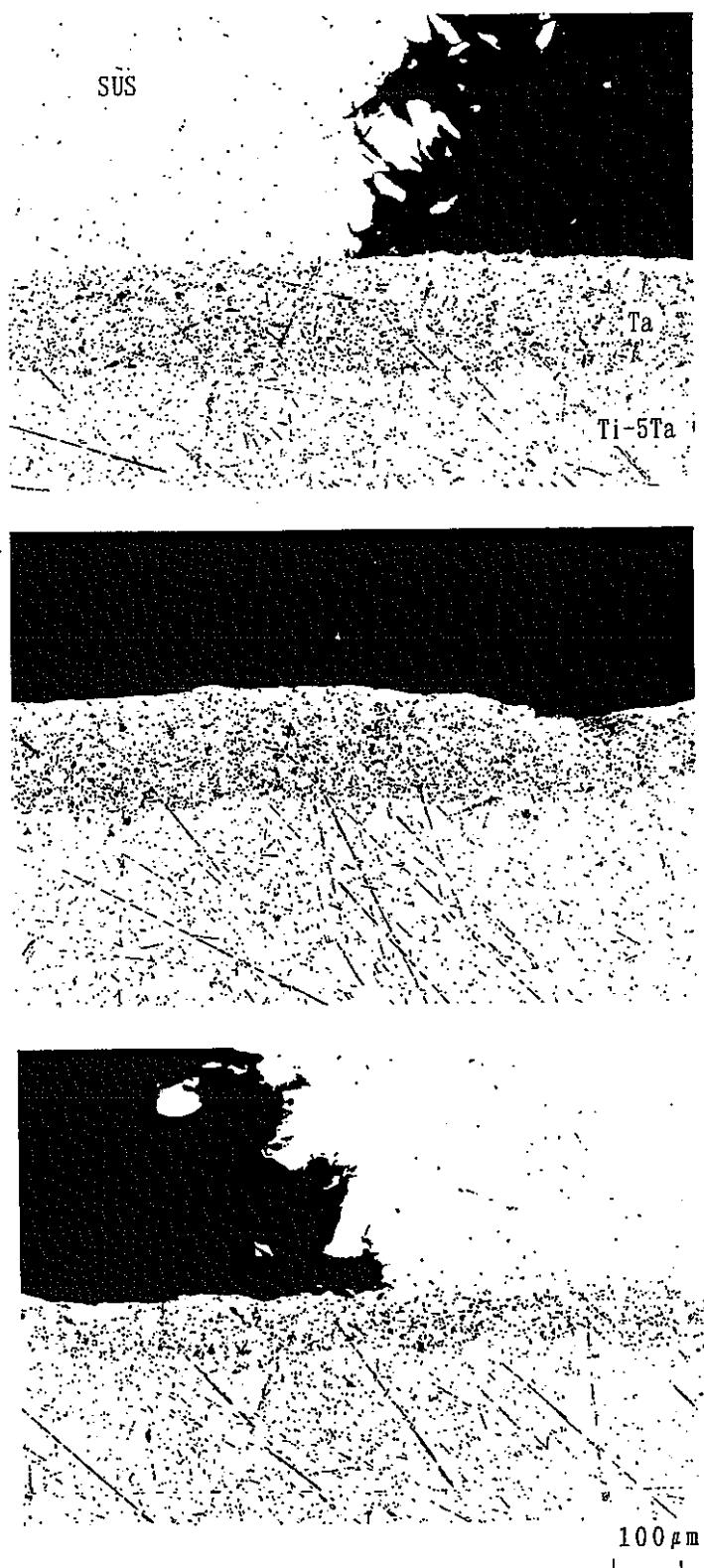
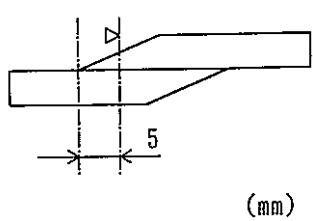
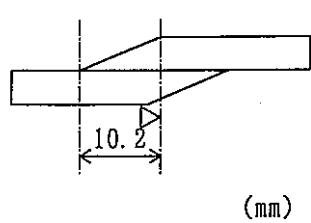


写真 8-6 管外面側欠陥からの断面研削後の界面 (6T2)

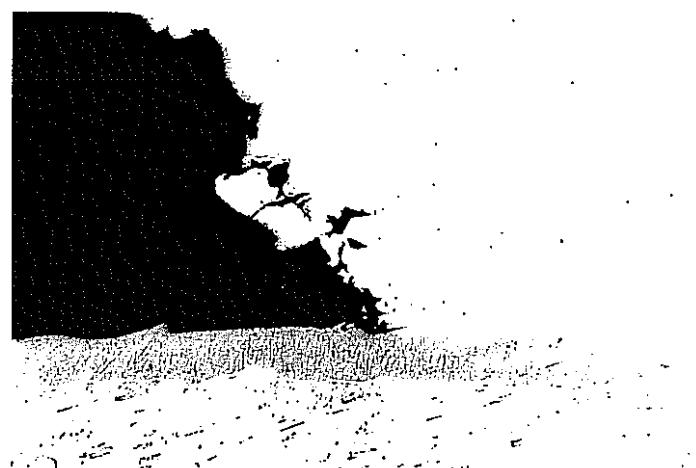
調査断面位置



SUS

Ta

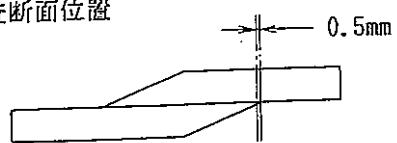
Ti-5Ta



100 μm

写真 8-7 管外面側欠陥からの断面研削後の界面 (6T2)

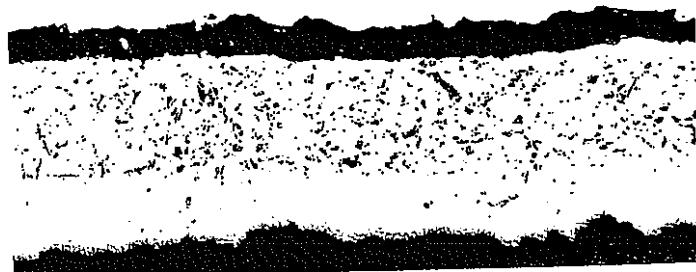
調査断面位置



← SUS

← Ta

← Ti-5Ta

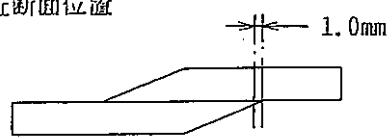


100 μm



写真 9-1 管内面側欠陥からの断面研削後の界面 (6T1)

調査断面位置



← SUS

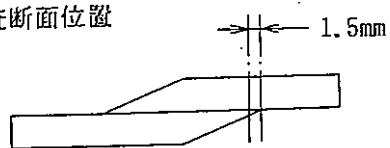
← Ta

← Ti-5Ta

100 μm

写真 9-2 管内面側欠陥からの断面研削後の界面 (6T1)

調査断面位置



← SUS

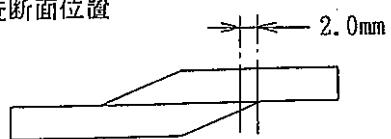
← Ta

← Ti-5Ta

100 μ m

写真 9-3 管内面側欠陥からの断面研削後の界面 (6T1)

調査断面位置



← SUS

← Ta

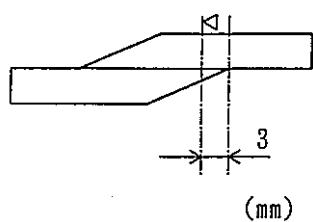
← Ti-5Ta

100 μm



写真 9-4 管内面側欠陥からの断面研削後の界面 (6T1)

調査断面位置



SUS

Ta

Ti-5Ta

100 μm

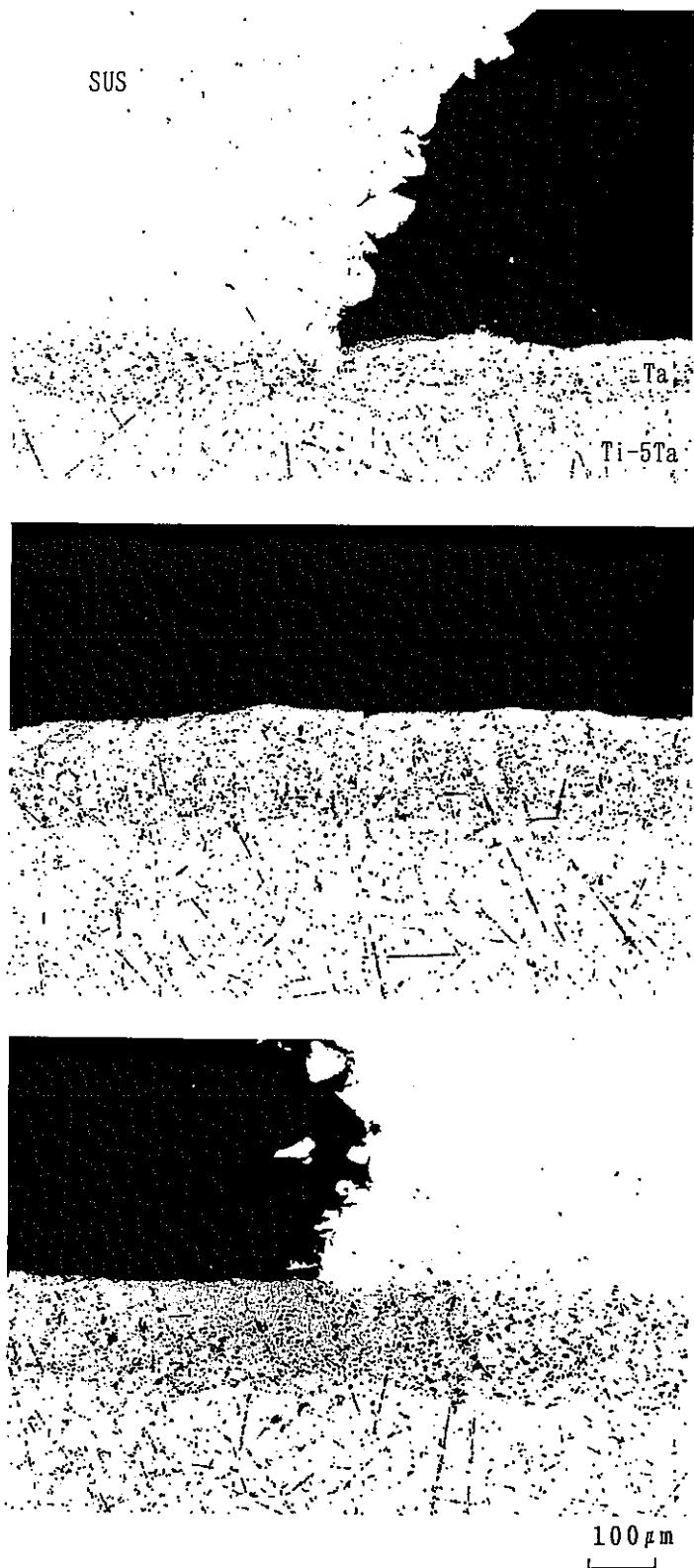


写真10-5 管内面側欠陥からの断面研削後の界面 (6T2)

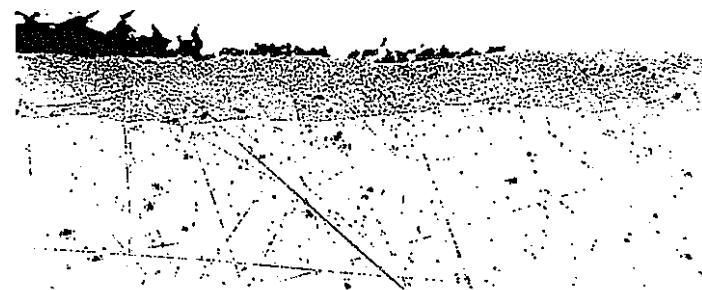
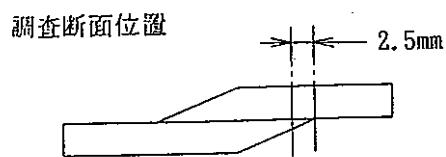
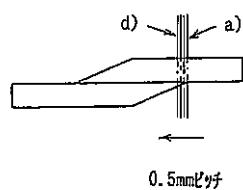


写真 9-5 管内面側欠陥からの断面研削後の界面 (6T1)

調査断面位置



a)



b)



c)



d)

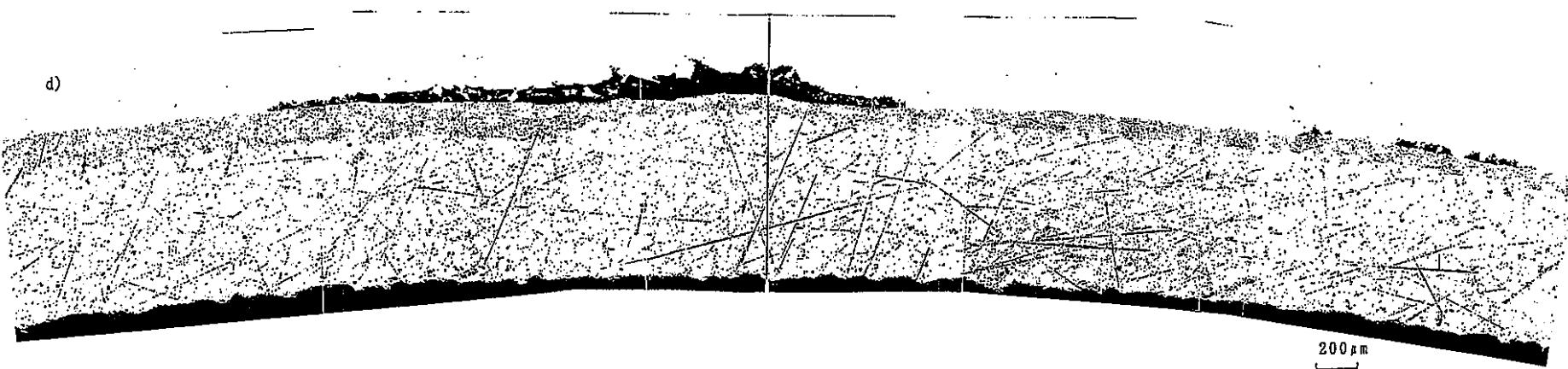


写真 9-6 管内面側欠陥からの断面研削後の界面 (6T1)

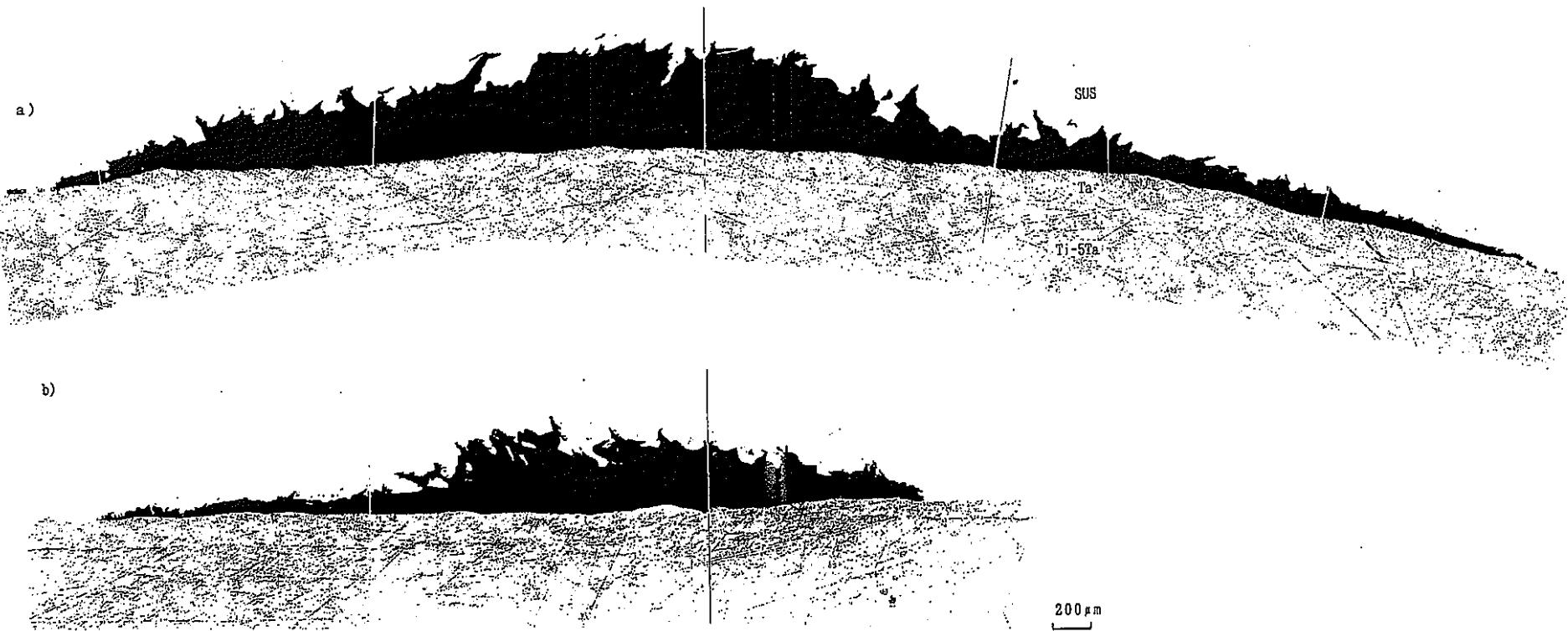
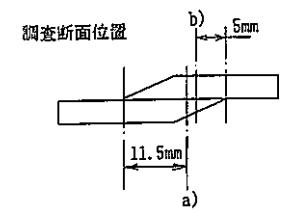
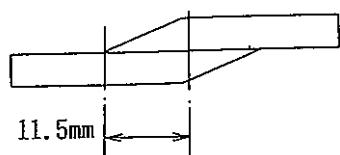


写真 9-7 管内面側欠陥からの断面研削後の界面 (6T1)

調査断面位置



← SUS

← Ta

← Ti-5Ta

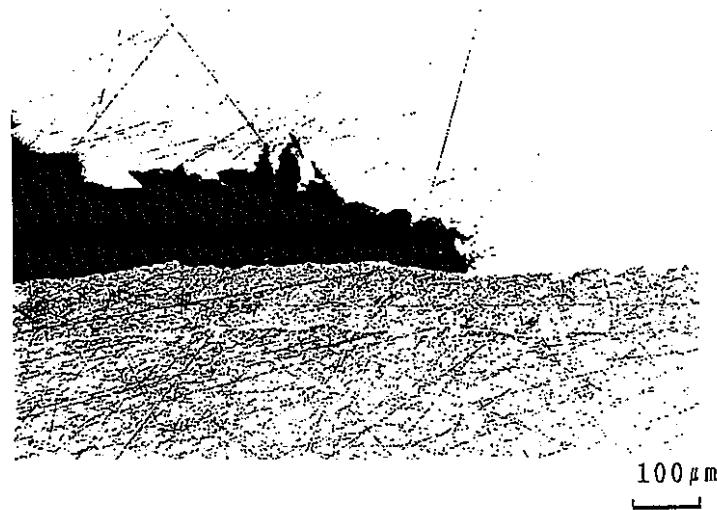


写真 9-8 管内面側欠陥からの断面研削後の界面 (6T1)

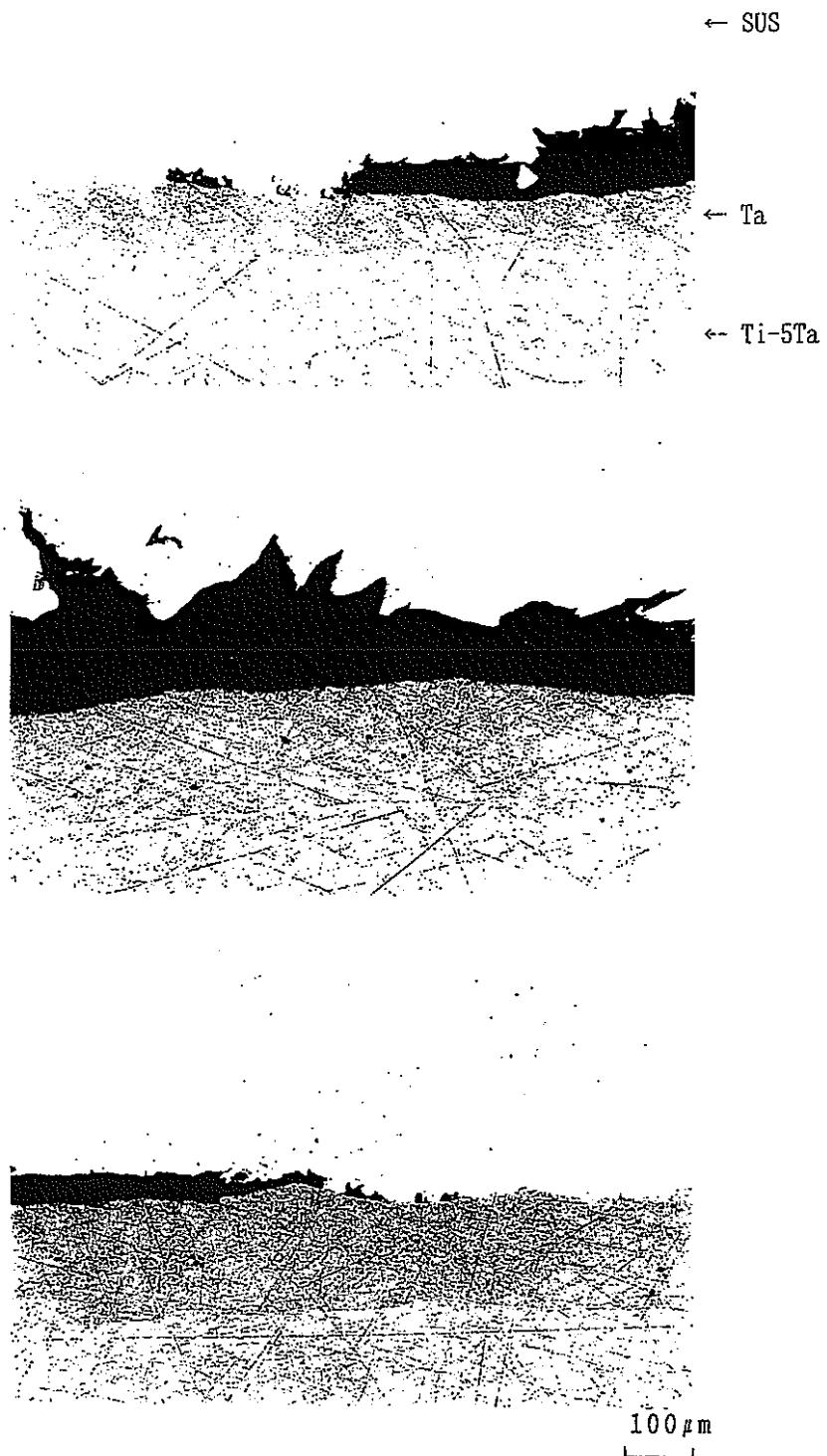
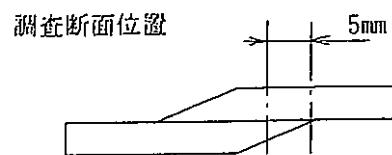
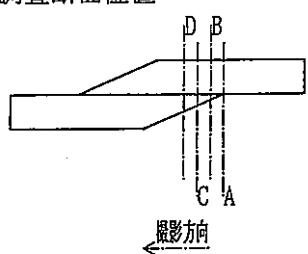


写真 9-9 管内面側欠陥からの断面研削後の界面 (6T1)

調査断面位置



A) 境界



B) 1 mm



C) 8 mm

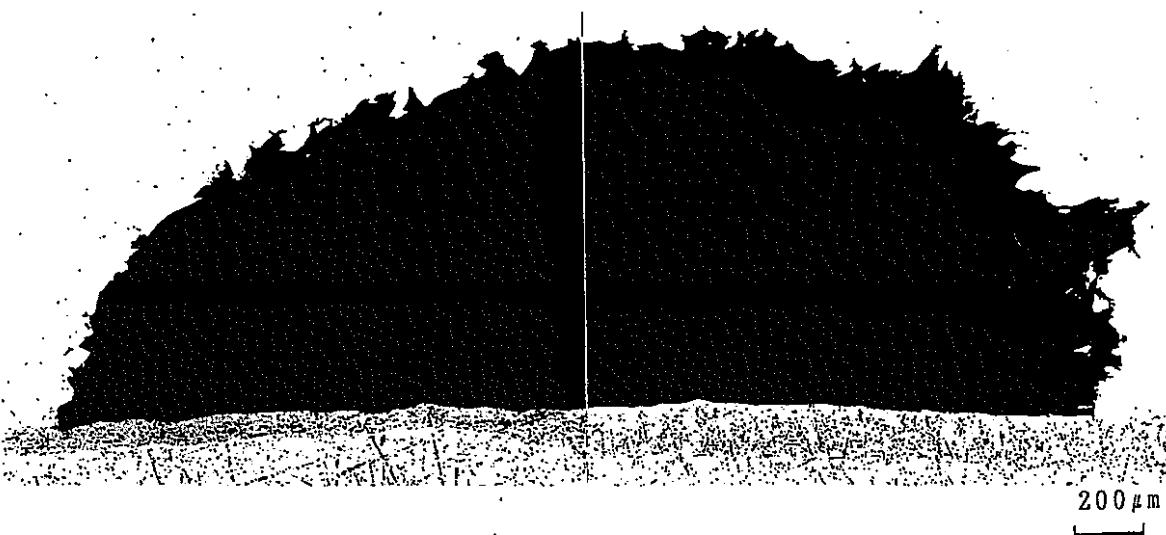
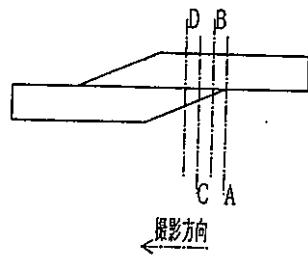


写真10-1 管内面側欠陥からの断面研削後の界面 (6T2)

調査断面位置



D) 5 mm

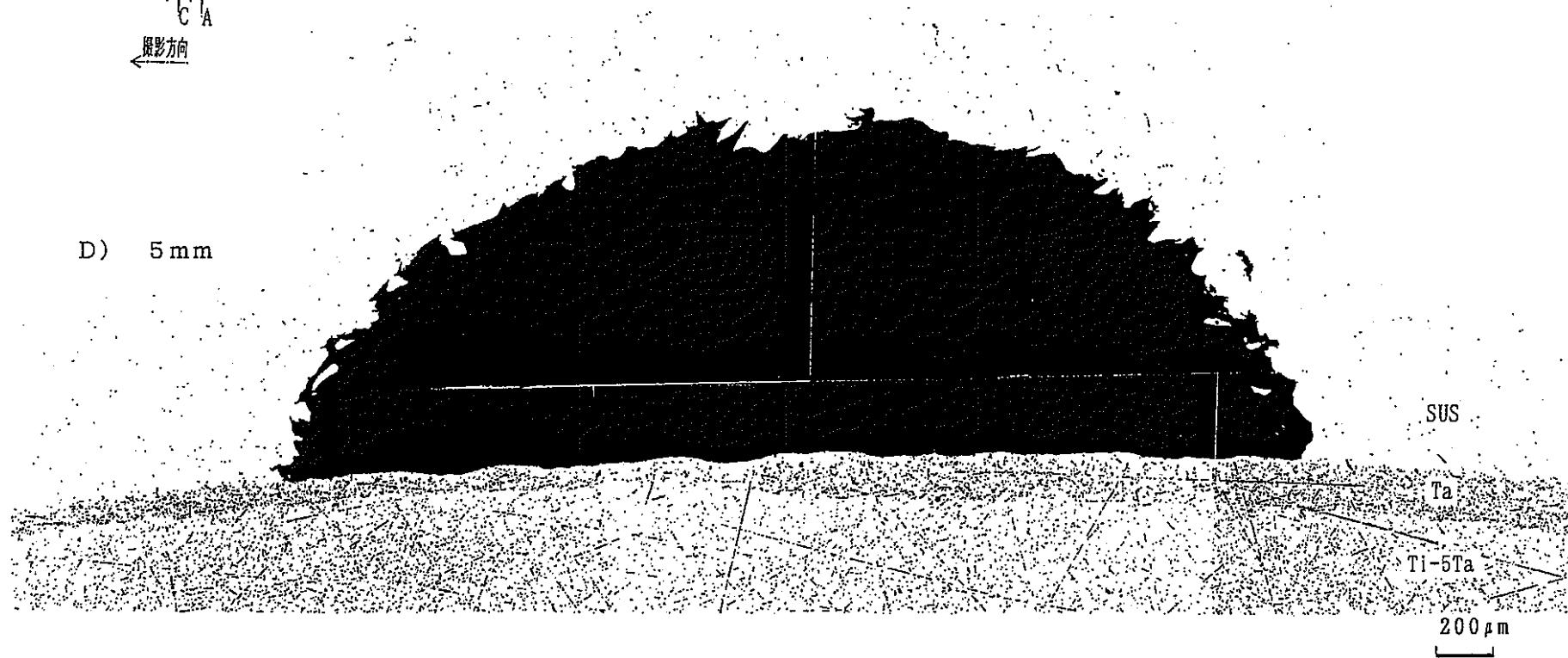
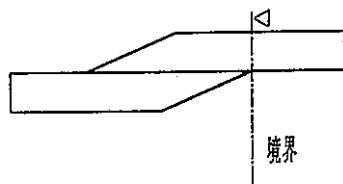


写真10-2 管内面側欠陥からの断面研削後の界面 (6T2)

調査断面位置



SUS



写真10-3 管内面側欠陥からの断面研削後の界面 (6T2)

調査断面位置

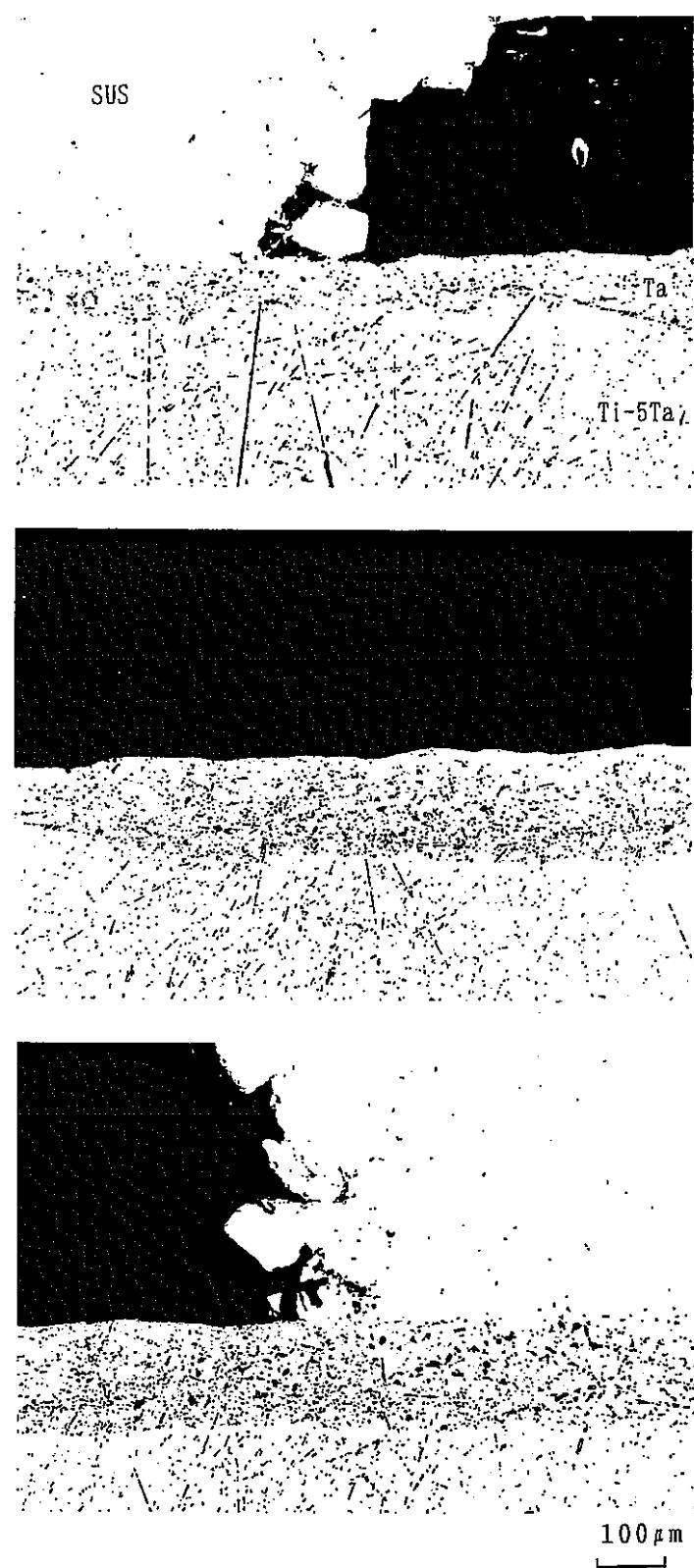
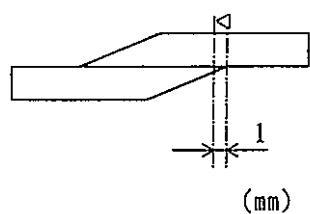
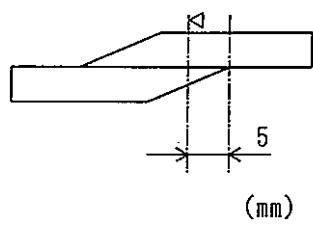


写真10-4 管内面側欠陥からの断面研削後の界面 (6T2)

調査断面位置



SUS

Ta

Ti-5Ta

100 μm

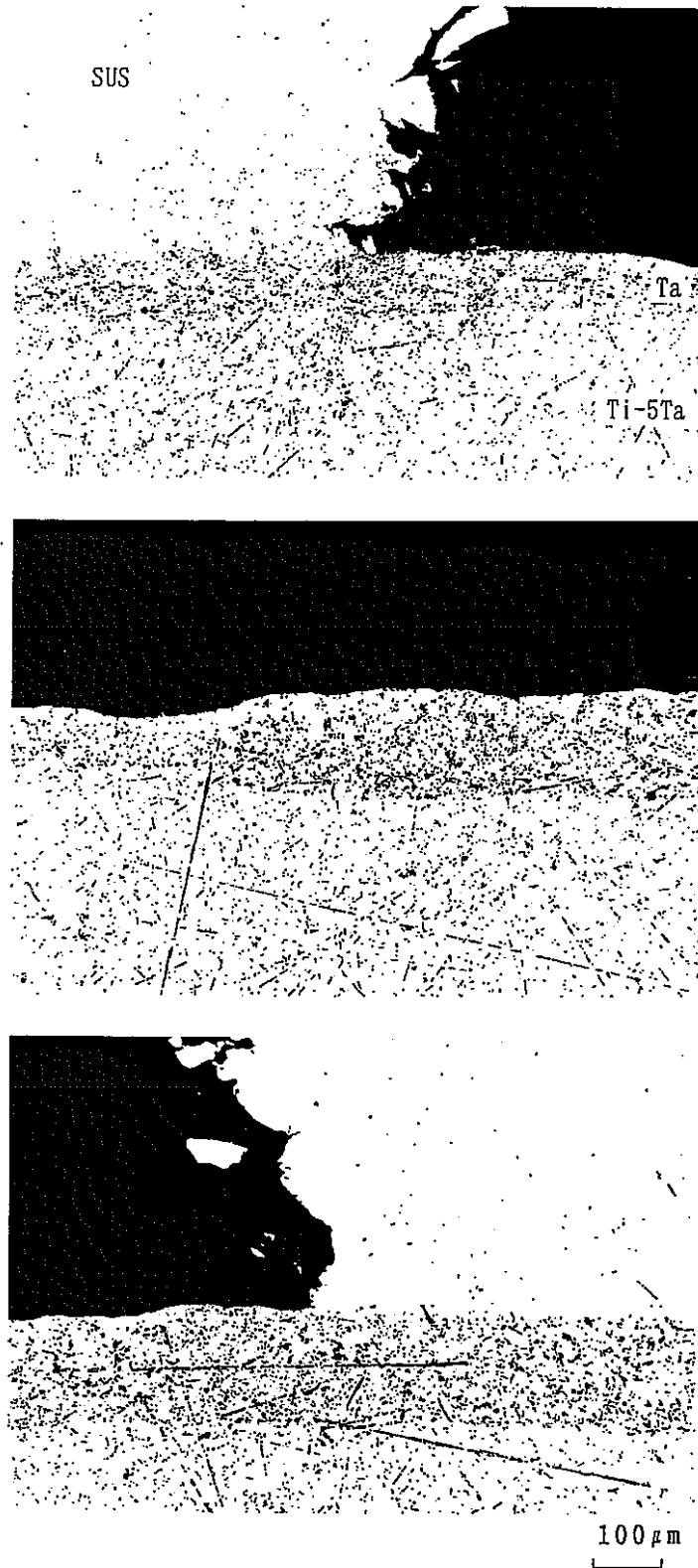


写真10-6 管内面側欠陥からの断面研削後の界面 (6T2)

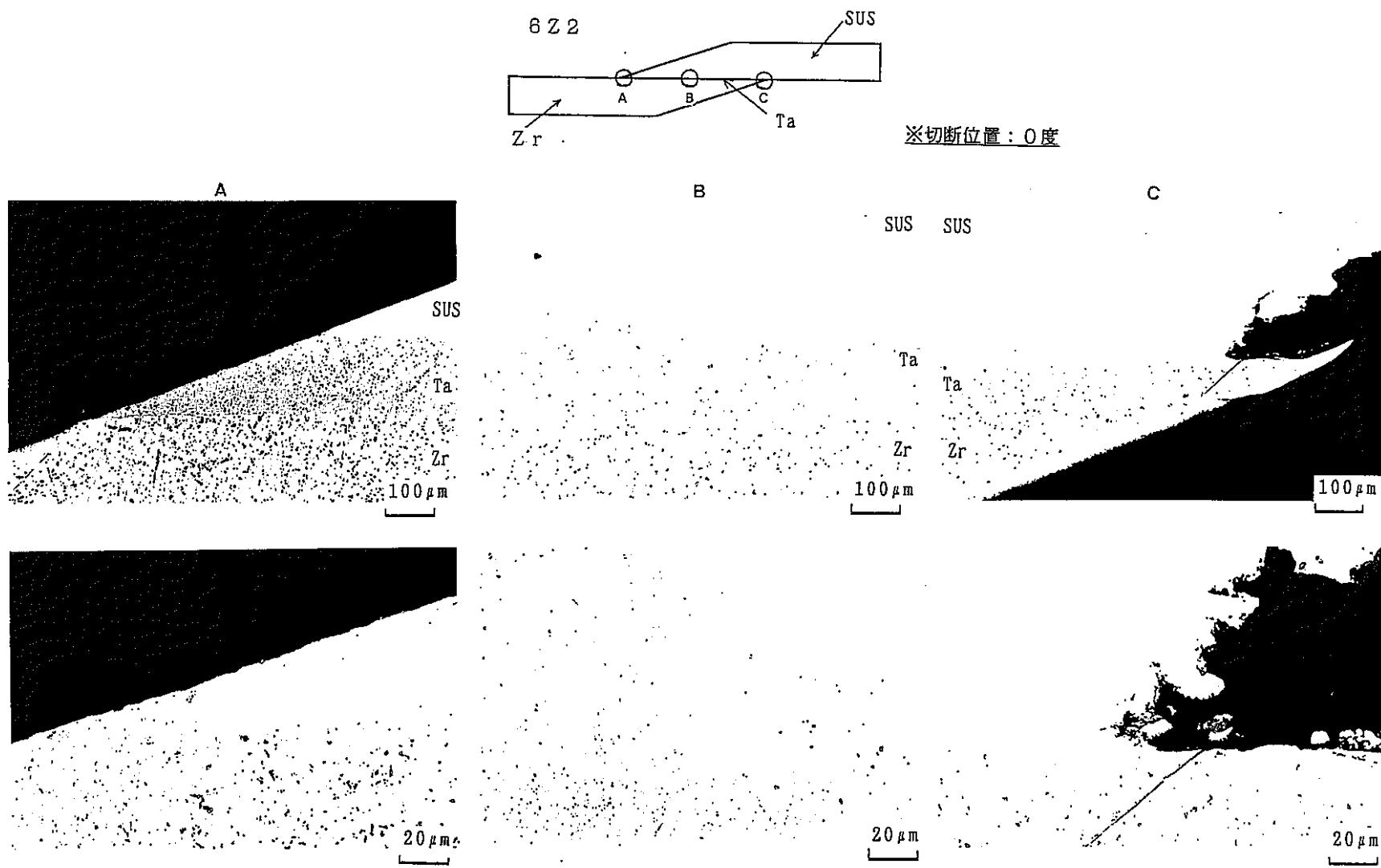


写真11 管軸方向の断面ミクロ観察 (6Z2)

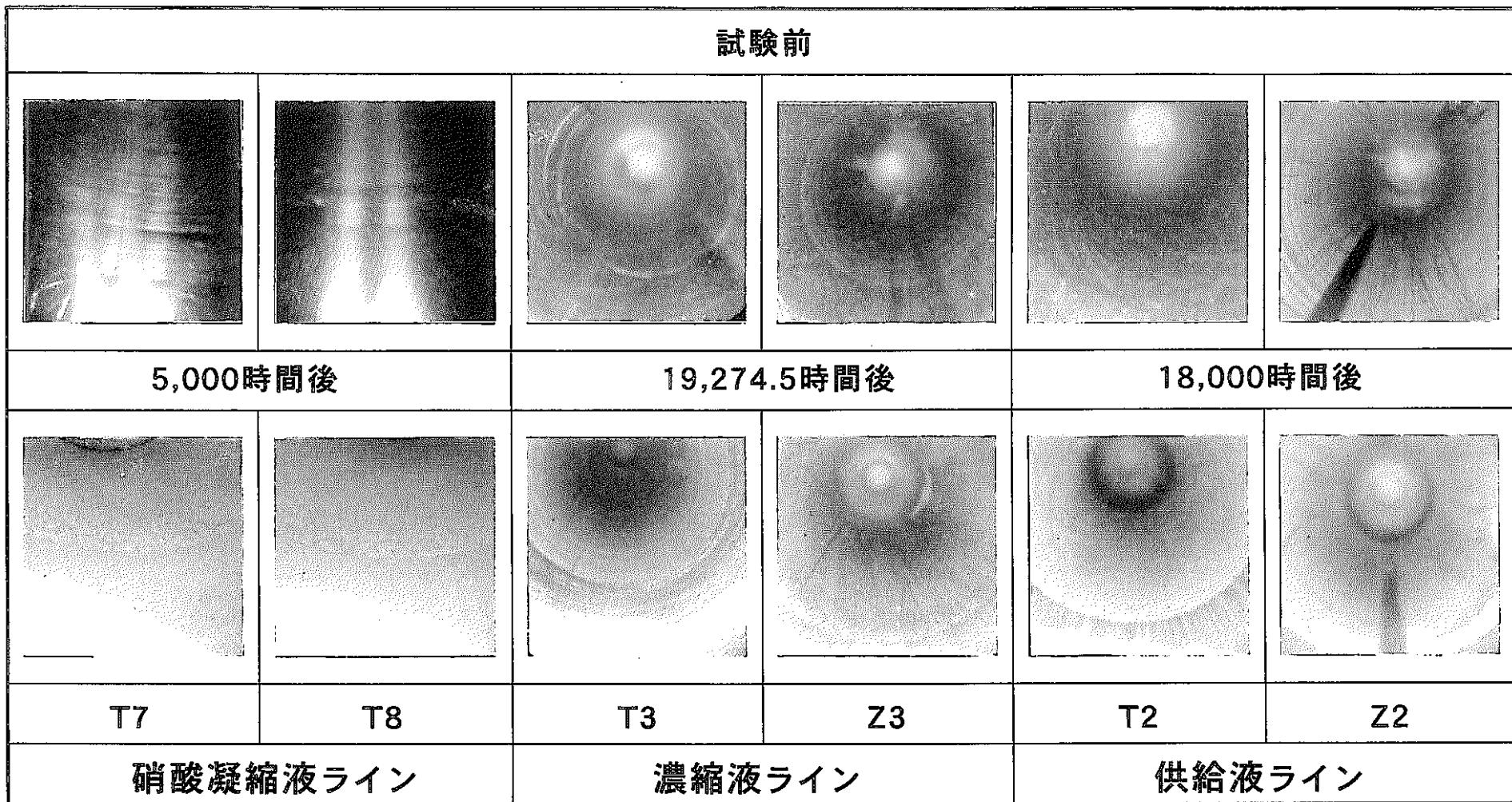


写真12-1 HIP管継手の内表面観察（硝酸凝縮液、濃縮液、供給液ライン）

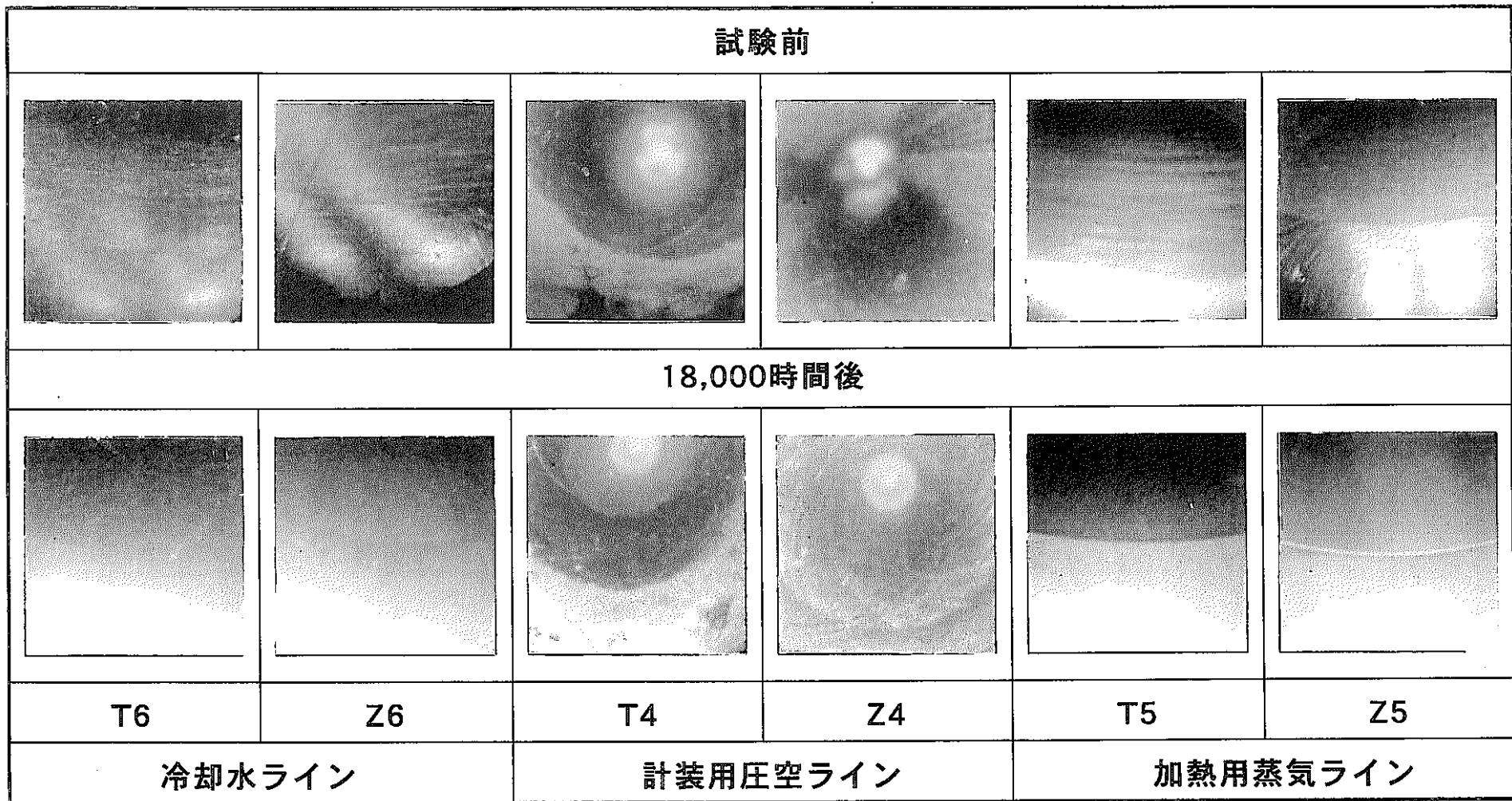
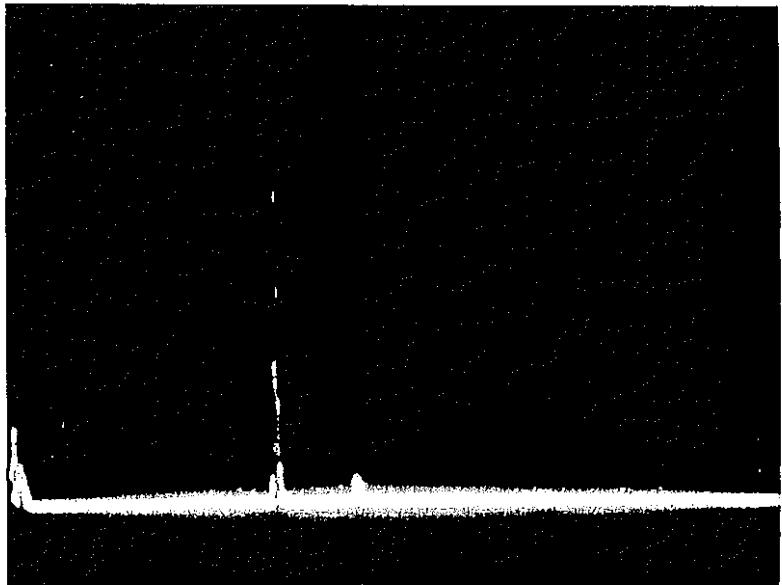
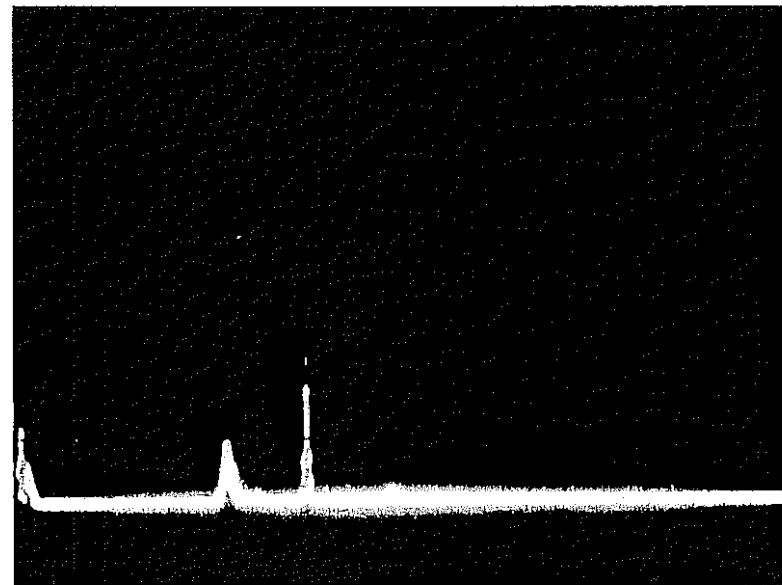


写真12-2 HIP管継手の内表面観察（冷却水、計装用圧空、加熱用蒸気ライン）



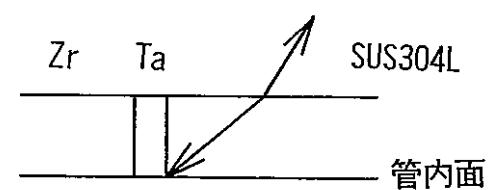
表面・界面

Z1試験片



表面・界面

T1試験片



界面端部直射時の反射エコー (SUS304Lから探傷)

写真13 1探触子斜角探傷結果

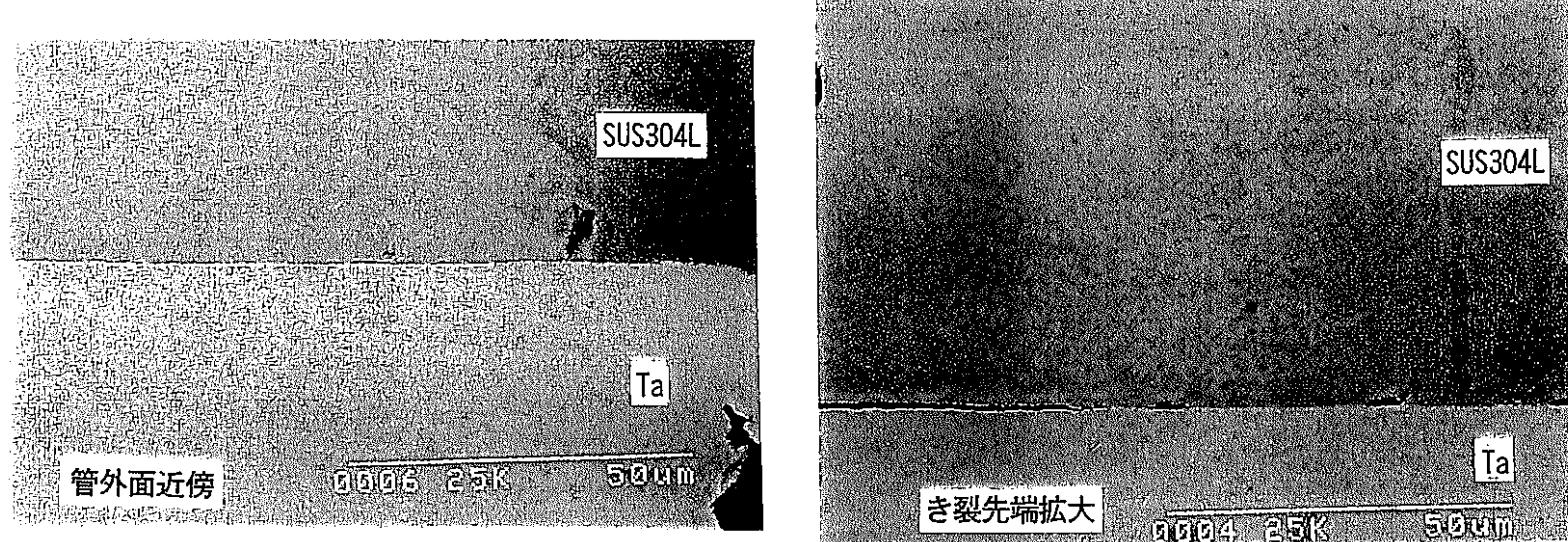
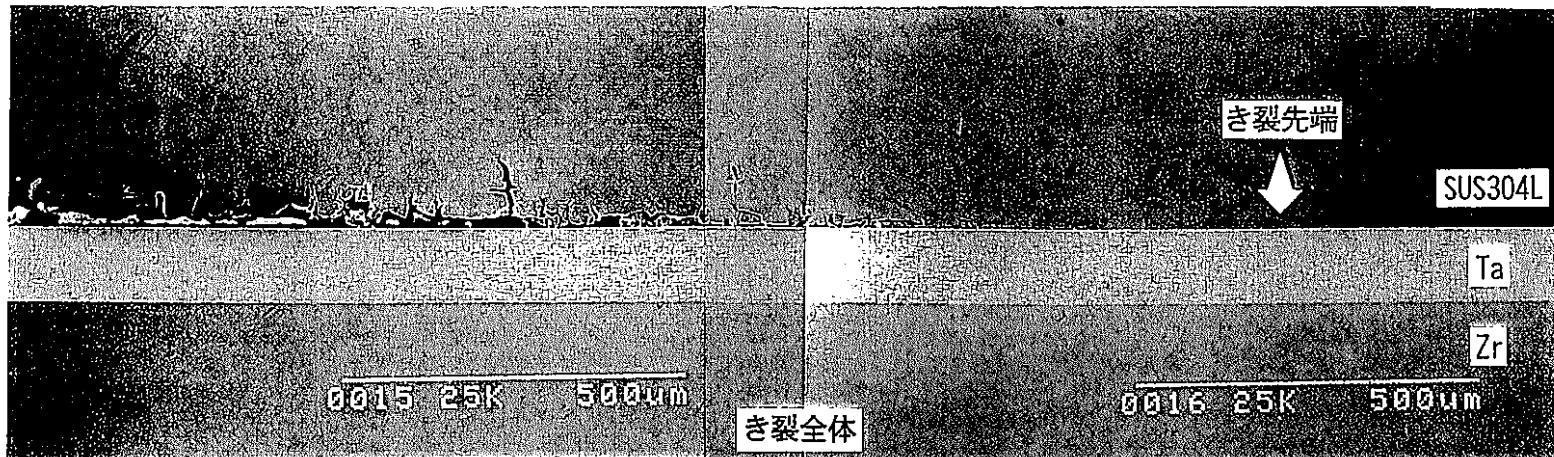


写真14-1 Z1試験片断面（A部）

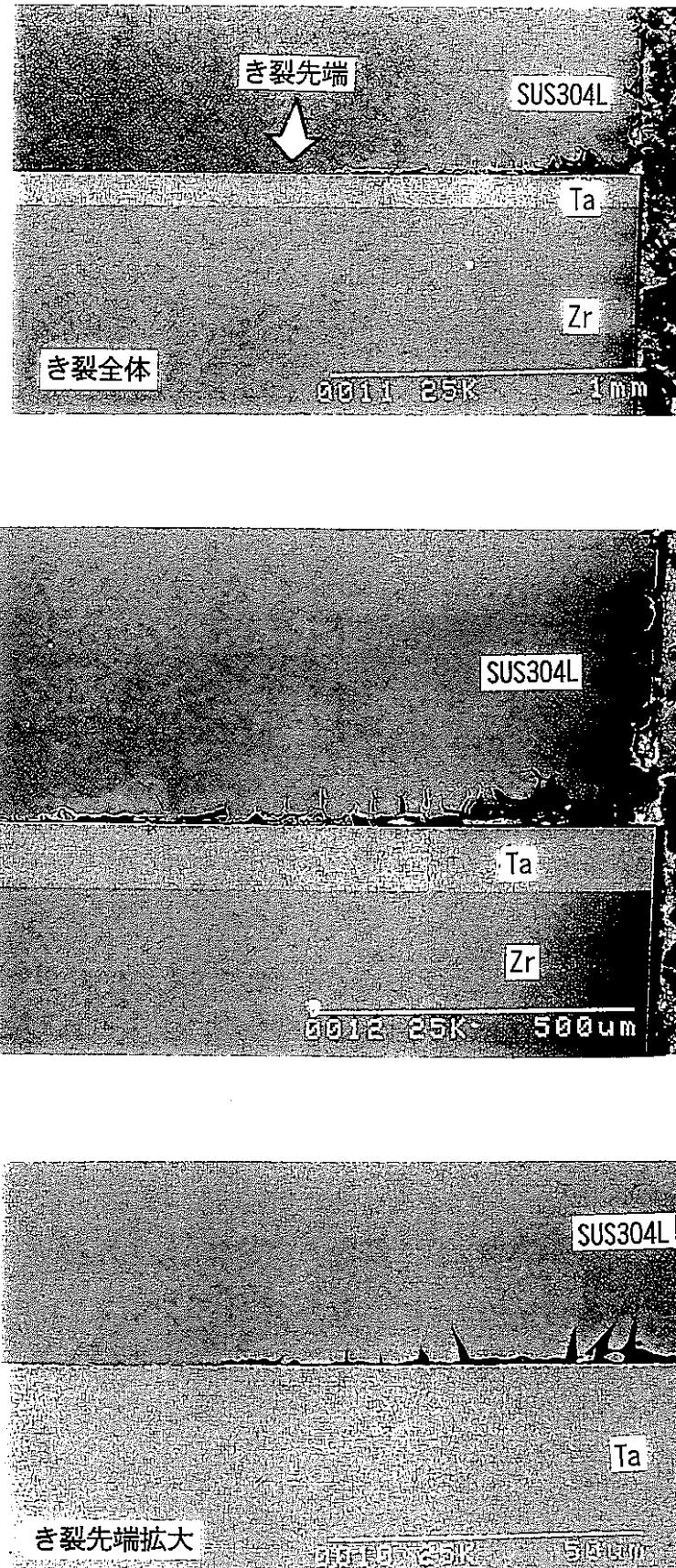


写真14-2 Z1試験片断面（B部）



写真14-3 Z1試験片断面（C部）

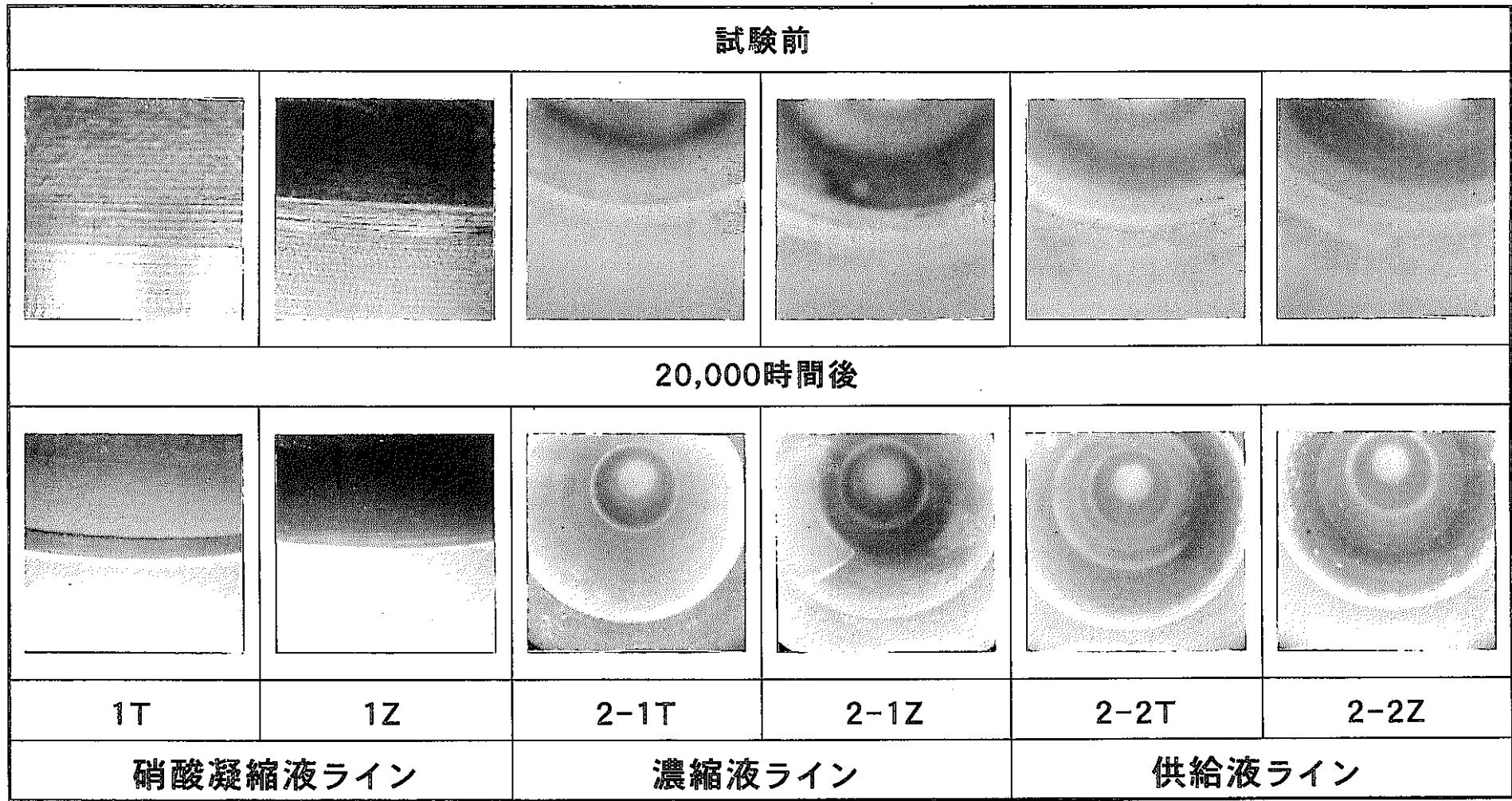


写真15-1 爆着管継手の内表面観察（硝酸凝縮液，濃縮液，供給液ライン）

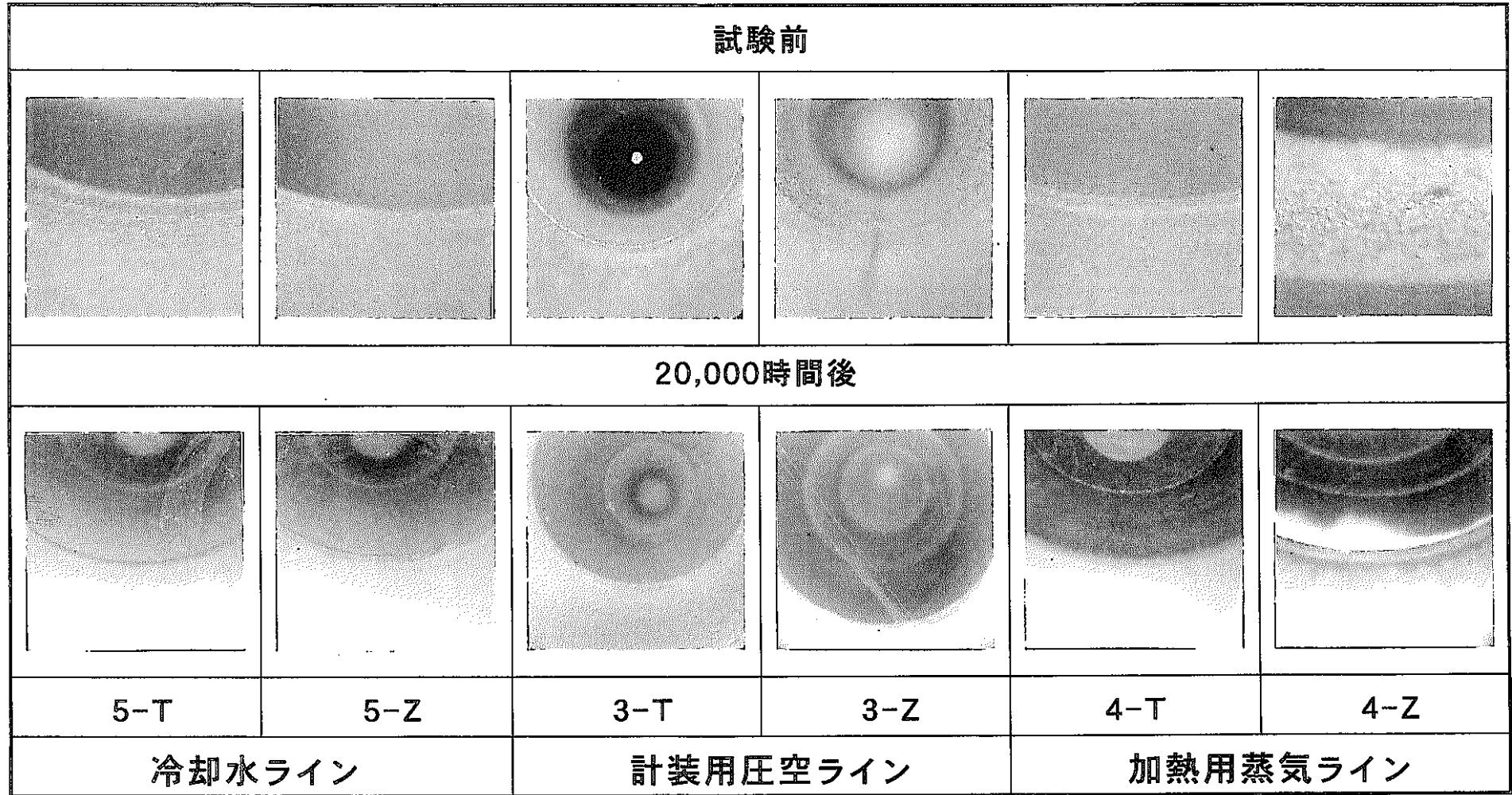


写真15-2 爆着管継手の内表面観察（冷却水，計装用圧空，加熱用蒸気ライン）