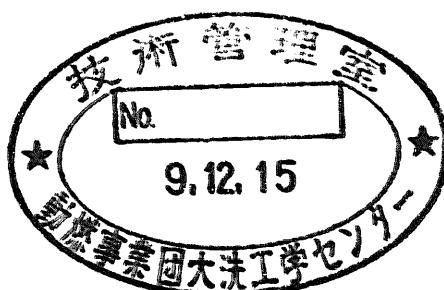


もんじゅナトリウム漏えい事故の原因究明

IHX入口温度計ウェル調査報告書

1996年6月



動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

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。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

システム開発推進部・技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-machi, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken 311-13, Japan.

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1996

もんじゅナトリウム漏えい事故の原因究明 IHX入口温度計ウェル調査報告書

青砥 紀身*、堀切 守人*、天藤 雅之**
小峰 龍司*、木村 英隆*、平川 康*

要 旨

高速増殖原型炉「もんじゅ」2次主冷却系Cループ中間熱交換器（IHX）出口温度計からのナトリウム漏えい事故に関連して、当該温度計破損部の原因調査に資するため、同2次系CループIHX入口部の温度計ウェルを調査した報告である。

調査は、主に熱電対ウェル段付部の損傷調査およびウェル管台溶接部の健全性に関する情報を得る目的で種々の試験検査を実施した。

試験検査は、温度計、ウェル段付部、太径および細径ウェル部ならびにウェル管台溶接部等で、以下に示す通りである。

- (1) 精密寸法計測
- (2) ウェルの打振試験
- (3) 各部非破壊検査
- (4) 成分分析
- (5) 金属組織観察
- (6) ウェル段付部の詳細観察
- (7) 硬さ試験
- (8) 隙間腐食に関する調査
- (9) ウェルの強度特性試験
- (10) シース高温曲げ試験

* 動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター 安全工学部 機器・構造安全工学室

** 同上 機器・構造安全工学室（現在 新日本製鐵㈱ 技術研究本部 鉄鋼研究所）

Investigation on the Sodium Leak Accident of Monju

Research Report on the Thermocouple well at the Inlet of the IHX

Kazumi AOTO*, Morito HORIKIRI*, Masayuki TENDO**,
Ryuji KOMINE*, Hidetaka KIMURA*, Yasushi HIRAKAWA*

Abstract

This report describes the check of the thermocouple well at the inlet of the intermediate heat exchanger(IHX) of C-loop of the secondary heat transfer system of the prototype fast breeder reactor Monju, regarding the sodium leak accident of the thermocouple well at the outlet of the IHX of the same loop of the secondary heat transfer system of the same plant Monju.

Various tests and inspections were performed to check damages at the part with rapid diameter change of the thermocouple well where stress concentration may occur, and to get the information about the integrity of the welded part between the thermocouple well and the attachment.

The thermocouple well, the rapid diameter change part, larger and smaller part, respectively, of the thermocouple well, and welded part between the thermocouple well and the attachments were examined as written below.

- (1) Accurate measurement of the dimension.
- (2) Vibration test by tapping the thermocouple well.
- (3) Non destructive testing at some points.
- (4) Chemical composition analysis.
- (5) Microscopic observation of metallogical structure.
- (6) Detailed observation around the rapid diameter change part.
- (7) Hardness test.
- (8) Research on corrosion at the clearance.
- (9) Structure strength test of the thermocouple well.
- (10) Bending test of the thermocouple's sheath at high temperature.

* Structure Safety Engineering Section, Safety Engineering Division, Oarai Engineering Center,
Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation

** Structure Safety Engineering Section, Safety Engineering Division, Oarai Engineering Center, PNC
(Presently Steel Research Laboratories, Technical Development Bureau, Nippon Steel Corporation)

もんじゅナトリウム漏えい事故の原因究明
－IHX入口温度計ウェル調査報告－

目 次

1. 目 的	1
2. 試験検査結果のまとめ	1

※添付資料

(IHX入口温度計ウェル超音波探傷試験で得た有為な指示エコーの原因についての検査結果)

図表リスト

- 写真 1-1 シース外観状況 (下部側)
- 写真 1-2 シースの圧痕部外観状況
- 写真 2(a) 段付部断面SEM写真 (0° 位置-1)
- 写真 2(b) 段付部断面SEM写真 (90° 位置-1)
- 写真 2(c) 段付部断面SEM写真 (180° 位置-1)
- 写真 2(d) 段付部断面SEM写真 (270° 位置-1)
- 写真 3 ウェル付け根部 光学顕微鏡マクロ観察結果 (IA1X)
- 写真 4(a) ウェル付け根隙間部のSEM観察結果 (試験片: IA3管台内表面側、観察部位A)
- 写真 4(b) ウェル付け根隙間部のSEM観察結果 (試験片: IA3ウェル外表面側、観察部位A)
- 写真 4(c) ウェル付け根隙間部のSEM観察結果 (試験片: IA3管台内表面側、観察部位B)
- 写真 4(d) ウェル付け根隙間部のSEM観察結果 (試験片: IA1管台内表面側、観察部位A)
- 写真 4(e) SEMによる管台内表面の断面組織観察結果 (×1000&4300, etching, 試験片: IA3)

表 1 成分分析結果

- 図 1 ウェル付け根部 金属組織観察試料の採取位置
- 図 2 ウェル段付き部の硬さ分布
- 図 3 ウェル-管台溶接部の硬さ分布
- 図 4 ウェル-管台溶接部の溶接最終層から初層にかけての硬さ分布
- 図 5(a) 隙間腐食観察用試料の採取位置
- 図 5(b) 隙間腐食観察部位詳細
- 図 6 実機ウェル材の疲労寿命特性

※添付資料

- 図 1 超音波指示エコー状況
- 図 2 ウェル段付部超音波探傷時の超音波ビームプロファイル
- 写真 1 段付部90°断面に観察された δ フェライト相 (E)
- 写真 2 段付部90°断面に観察された δ フェライト相 (F)

1. 目的

高速増殖原型炉「もんじゅ」2次主冷却系Cループ中間熱交換器（IHX）出口温度計からのナトリウム漏えい事故に関連して、損傷部の原因調査に資するため、同2次系CループIHX入口部の熱電対ウェル段付部の損傷調査およびウェル管台溶接部の健全性に関する情報を得る目的で種々の試験検査を実施した。とくに科技庁の5/23の報告書⁽¹⁾に書かれているように、温度計の切り離しに際し、温度計さや内部から超音波探傷試験を行ったところ、さや段付部に異常な波形が認められ、切り離した温度計を動燃大洗で調査したところ、超音波探傷試験方法では上述と同様な波形がでるものの、蛍光浸透探傷試験結果からは、はっきりとした異常が認められなかった。このため段付部を切断して金属疲労に関する調査を進めることとした。

2. 試験検査結果のまとめ

試験検査により得られた主な結果および知見を以下に列記した。

(1) ウェル段付部周辺に関する主な精密寸法計測結果を以下に示す。

- ① 段付テーパ部の表面粗さは $R_{\max}=13.9$ 程度であり、仕上げ粗さとしては三角2つの範囲にある。
- ② 段付部曲率（R寸法）は、設計では指定されていないが、4カ所（90° 毎）2手法（投影法と輪郭測定法）による計測結果の平均で0.14mmであった。破損ウェルのR寸法は約0.1mm。

(2) シースの外観では段付部細径側入口部に当たる箇所（ボス出口から先端側に124mm位置）にほぼ全周にわたる接触痕が認められた（写真1-1、1-2参照）。

(3) ウェル段付部における浸透探傷試験（PT）と超音波探傷試験（UT）の結果は以下の通りである。

- ① 動燃大洗に受入れた状態、表面研磨後および引張負荷中に実施した10 μ m級深さのき裂検出レベルを有する蛍光PT結果では、いずれも有意なき裂であると判定できる指示模様は得られなかった。
- ② もんじゅサイトで採用した直接接触法による検査では、もんじゅサイトで観察された有意な指示エコーが同様に認められた。
- ③ 直接接触法以外の水浸式法UTでは、動燃大洗に受入れた状態および表面研磨後とも有意な指示エコーは得られなかった。

(4) ウェル段付部については、SEMおよび必要に応じてエネルギー分散型X線分析器（EDX）により詳細観察を実施した。結果は以下の通りである。

- ① ウェル段付部外周表面の200倍による全周観察並びにナトリウム上流側（90°）については約 $\pm 10^\circ$ 範囲、0°、180°（上下部）および270°（下流側）については約 $\pm 5^\circ$ 範囲を1,000倍、注視すべき箇所については10,000倍までのSEM観察を実

施したがき裂等の欠陥は認められなかった。

- ② 0～270° の各90° 毎断面の100～500倍のSEM観察では、いずれの断面にもき裂等の欠陥は認められなかった（写真2(a), (b), (c), (d)参照）。
- ③ 90° 断面（ナトリウム流れ上流側）詳細観察結果と直接接触法UTのビーム路程の分析に基づき、もんじゅサイトおよび大洗で同方位に認められた有意な指示エコーの発生原因が鎖状に連なる δ フェライト相であったものと推定される（添付資料参照）。

【結 論】

これらの結果、当該温度計ウェル段付部周辺にはき裂の発生等の欠陥はないと総合的に判断した。

この他、念のため、各部の調査を行った結果は次の通りである。

- (1) ウェル段付部、ウェル管台溶接部、ウェル太径部およびウェル細径部の縦分割後実施した内表面に関する染色PTによりウェル段付部その他の各部が健全であることを確認した。
- (2) 湿式成分分析の結果、ウェル母材およびウェル管台溶接金属のいずれにも異常がなく、かつ破損ウェルおよびウェル管台溶接金属の成分分析結果と有意差のないことを確認した（表1参照）。
- (3) ウェル母材の金相観察により、素材の清浄度は0.055%、粒度は2.8程度であり、破損ウェルの観察結果（清浄度：0.054%、粒度：2.5）と大差がないことを確認した。
- (4) 光学顕微鏡および走査型電子顕微鏡（SEM）によるウェル管台各溶接部の金属組織観察結果は以下の通りである。
 - ① ウェル管台溶接部は90° 毎に4切断しその各面（図1(a)参照）の組織観察を行った。観察4断面中3面合計8個のミクロ溶接欠陥を認めた。そのうち7個は $100\mu\text{m}$ に満たない「第1種の欠陥」であったが、ナトリウム上流側断面（IA1X）には長さ1.15mm程度の「第2種の欠陥」を認めた。同断面には他に $10\mu\text{m}$ 程度の「第1種の欠陥」が存在したが、JIS Z3106に定められるRTの欠陥等級分類に準拠した判定では当該溶接部は1級であり問題はなかった。写真3に1例を示した。写真中a部、b部およびc部にそれぞれ「第2種の欠陥」および「第1種の欠陥」が存在する。
 - ② ウェル管台溶接部のルート部では、破損ウェルの観察結果同様、細長いきずが認められたが、いずれも非常に小さく（約 $20\sim 160\mu\text{m}$ ）RTの等級分類に照らしても問題がないことを確認した。

(5) 各部のマイクロビッカース測定器による硬さ試験結果は以下の通り（負荷荷重：200g 溶接金属の層間硬さ計測のみ300g）。

- ① ウェル段付部 ： 内表面近傍（230Hv）、その他の領域（150Hv）。内表面近傍は加工の影響であり、この傾向および値は太径部および細径部とほぼ同じであり、他と比較して特に疲労等による硬化は認められなかった（図2参照）。
- ② ウェル—管台溶接部 ： 管台の端で切断による硬化が認められた以外は、破損ウェルの当該部の硬さと同等であった（図3参照）。溶接金属部（160～180Hv）、ウェルおよび管台（140～160Hv）。
- ③ 溶接金属層間 ： いずれも硬さに有意な変化はなく（約130～160Hv）、傾向や値は破損ウェルの場合と同じであった（図4参照）。
- ④ ウェル太径部縦断面 ： 150～170Hv。内表面から300 μ m部では260Hv程度の硬化が観察された。これは傾向として破断部ウェルの硬さ試験結果と同様である。

(6) ウェル—管台溶接部近傍隙間部の隙間腐食観察用試料を図5(a)に示すように上部下流側にあたる部位（45°、試料1A1）及び下部下流側にあたる部位（270°、試料1A3）の2箇所から採取し、図5(b)に示すように製作図面上の0.5mmの環状隙間がある溶接近傍（3mm長さ程度、観察部位：図5(b)のA部）、およびその隙間より下部側の1.5mmの環状隙間部（70mmの長さの部分、観察部位：図5(b)のB部）の2箇所について実施した。その結果、破損したIHX出口側のウェルでは見られなかったクロムの析出が、溶接近傍部の隙間が試料1A1に比べ小さい方の試料1A3については、管台内表面（写真4(a)）およびウェル外表面（写真4(b)）のA部並びに管台内表面のB部（写真4(c)）に、また、反対側の試料1A1についても管台内表面のA部（写真4(d)）において確認された。これは、IHX出口側が高温であるため、高温域で溶出したクロムが低温域で過飽和となり析出する温度差質量移行現象により、クロム過剰層の沈着物が厚く被ったものと考えられるが、母相には粒界腐食や孔食等の局所的な腐食の進行は認められなかった（写真4(e)）。

(7) ウェル太径部から採取した微小試験片による室温疲労試験の結果は、破損ウェルおよび同程度の粒度を有するSUS304鍛鋼品の微小試験片の疲労強度とほぼ同じ（図6参照）であった。

（参考文献）

- (1) 科学技術庁、動力炉・核燃料開発事業団 高速増殖原型炉もんじゅ ナトリウム漏えい事故の報告について：平成8年5月

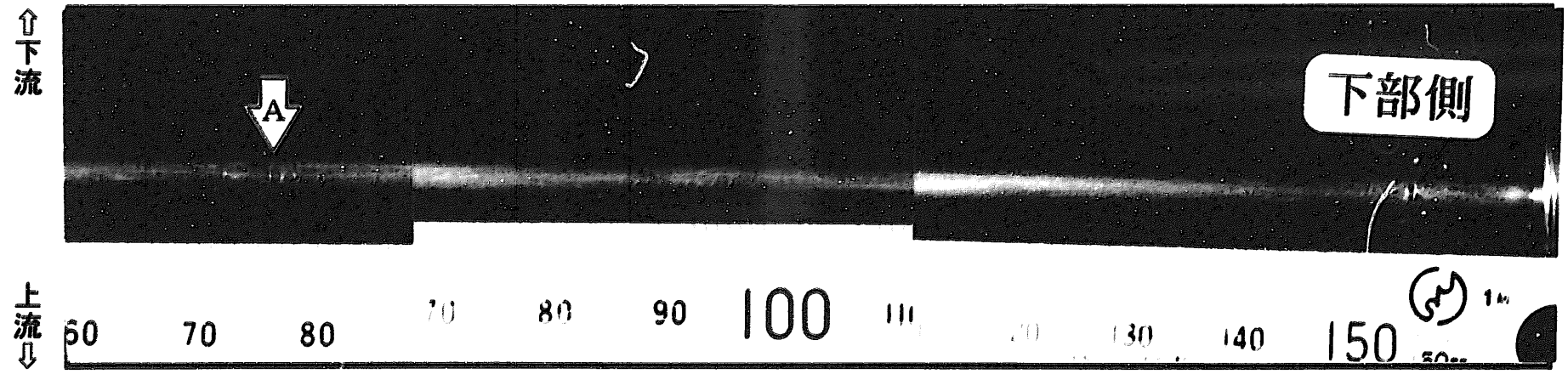
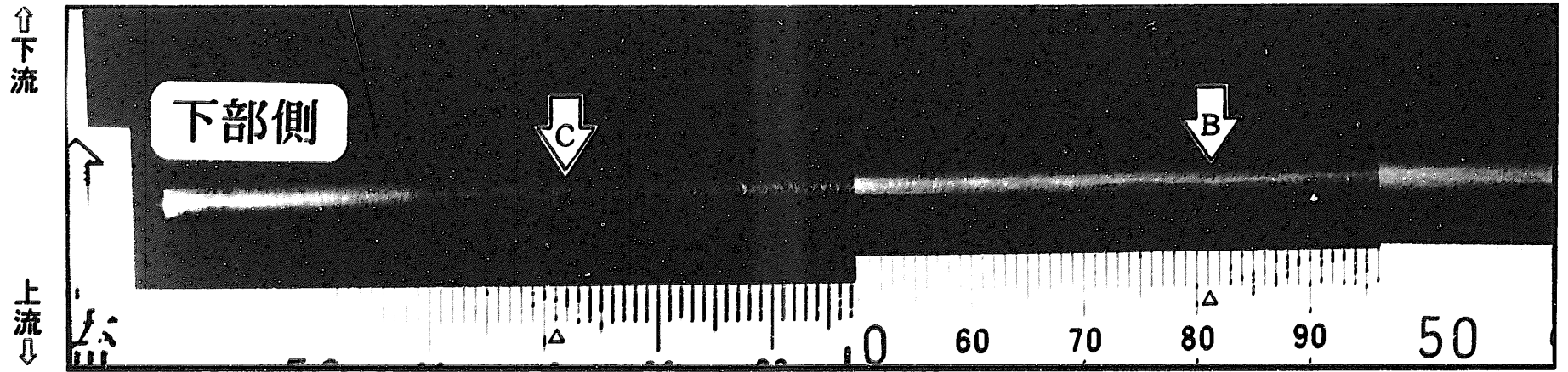
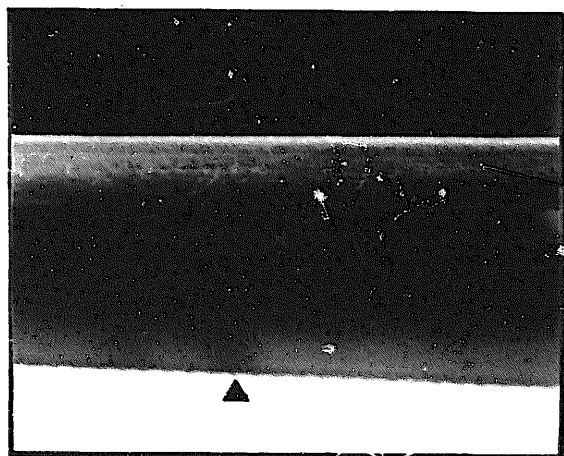
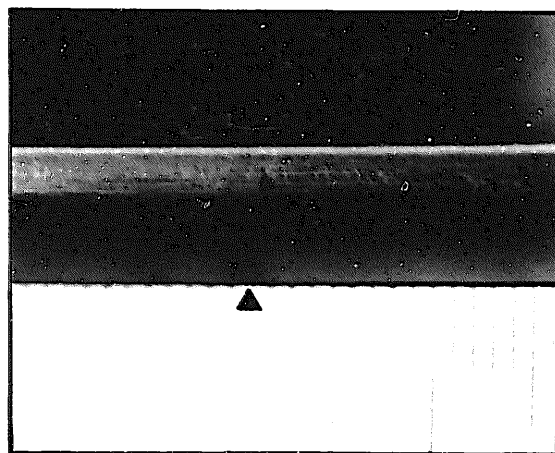


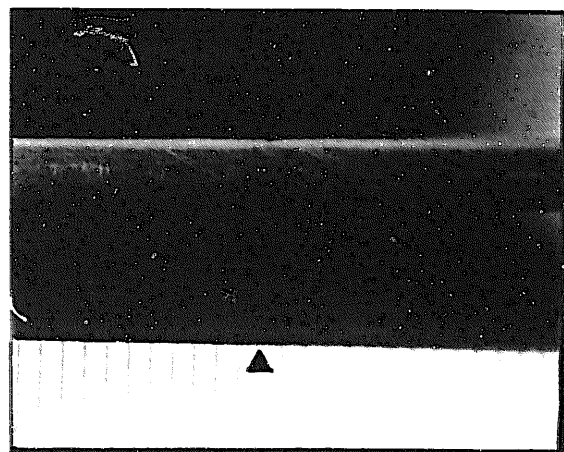
写真1-1 シース外観状況(下部)



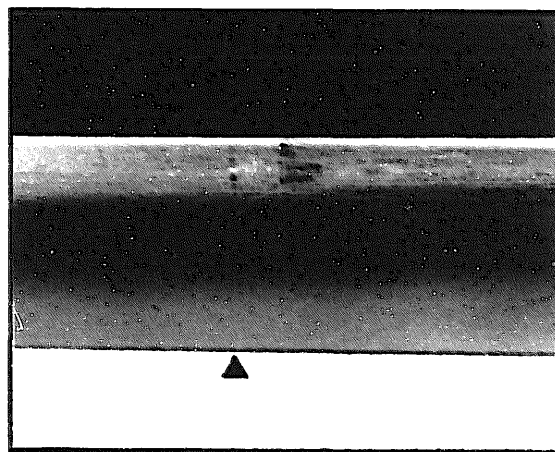
ボス部先端面から 124mm ; 上部側
A部



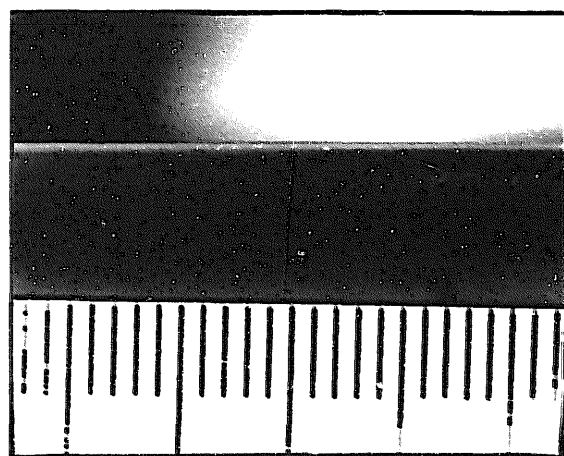
ボス部先端面から 124mm ; 上流側
A部



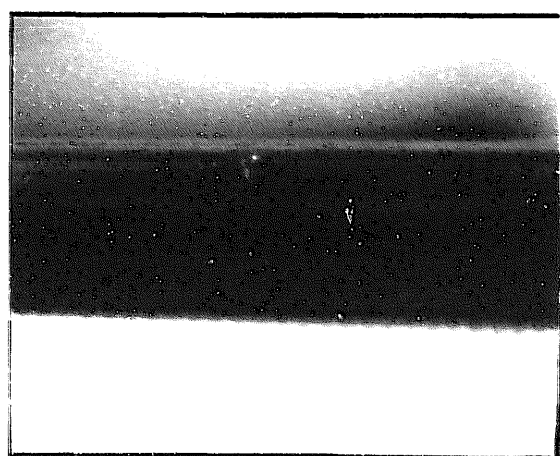
ボス部先端面から 124mm ; 下部側
A部



ボス部先端面から 124mm ; 下流側
A部



ボス部先端面から 180mm ; 下部側
B部



ボス部先端面から 240mm ; 上部側
C部 (上流方向へ 40° の位置)

写真 1-2 シースの圧痕部外観状況

細径部

太径部 →

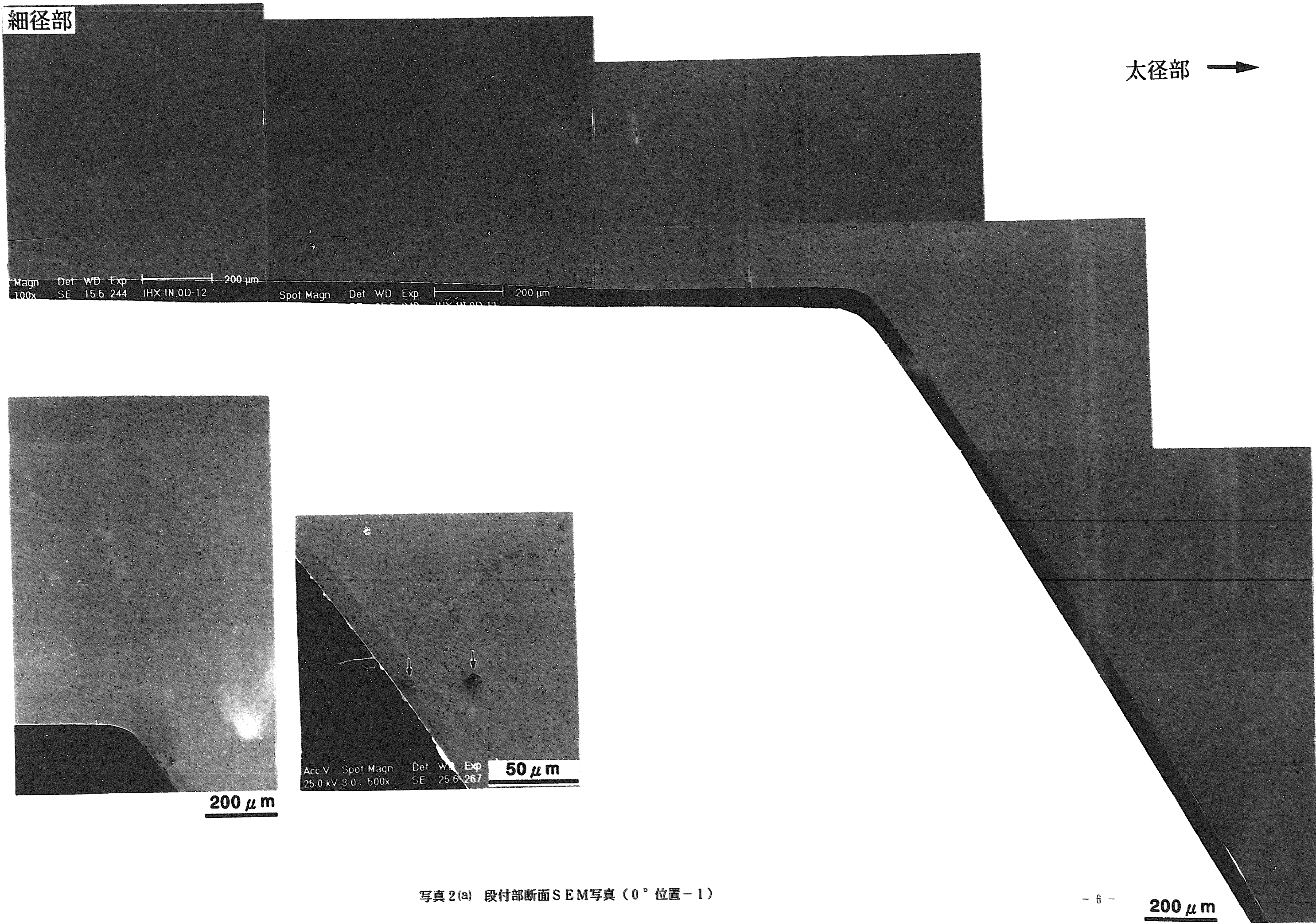


写真 2(a) 段付部断面SEM写真 (0° 位置-1)

200 μm

← 太径部

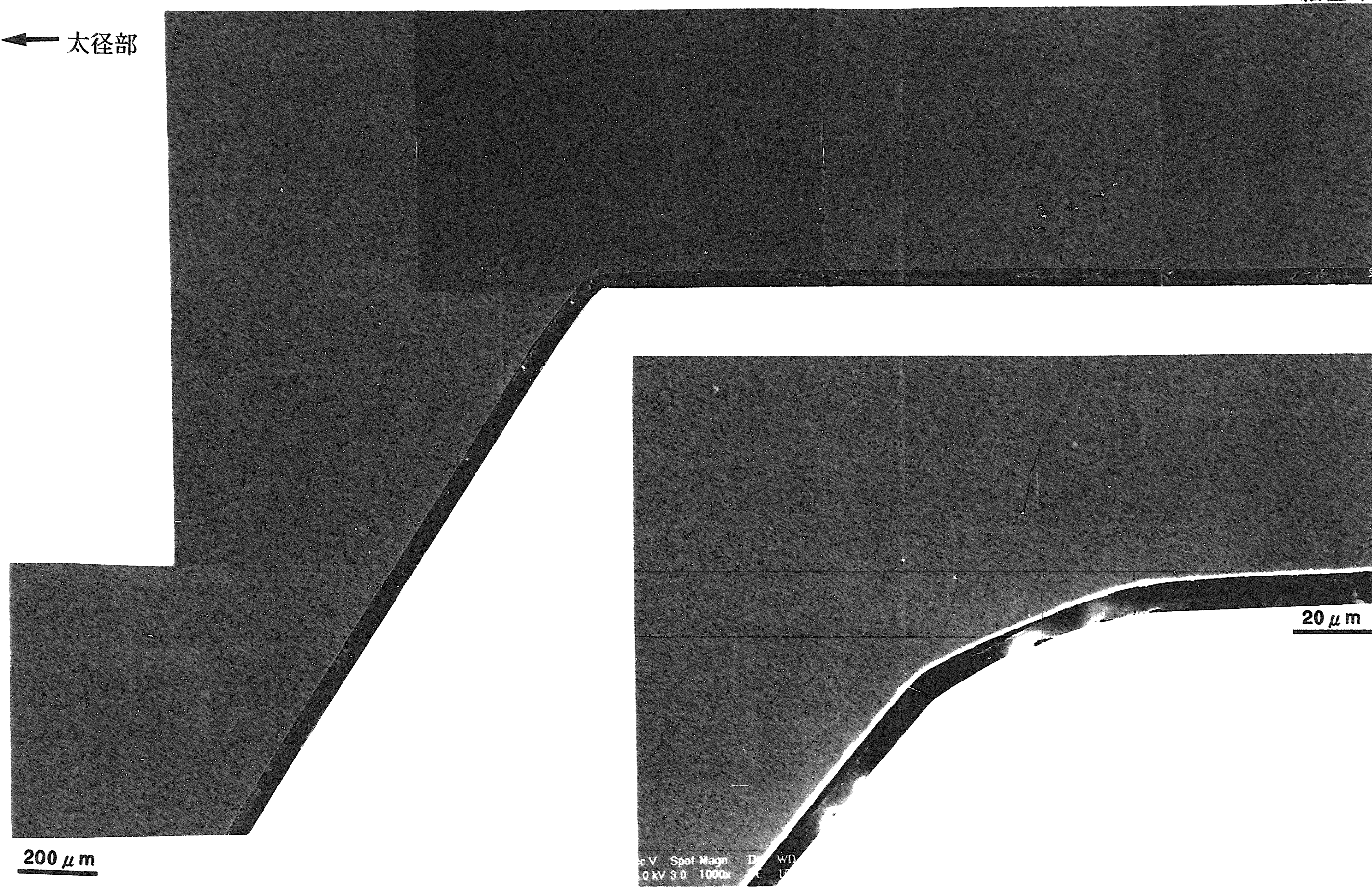


写真 2 (b) 段付部断面SEM写真 (90° 位置 - 1)

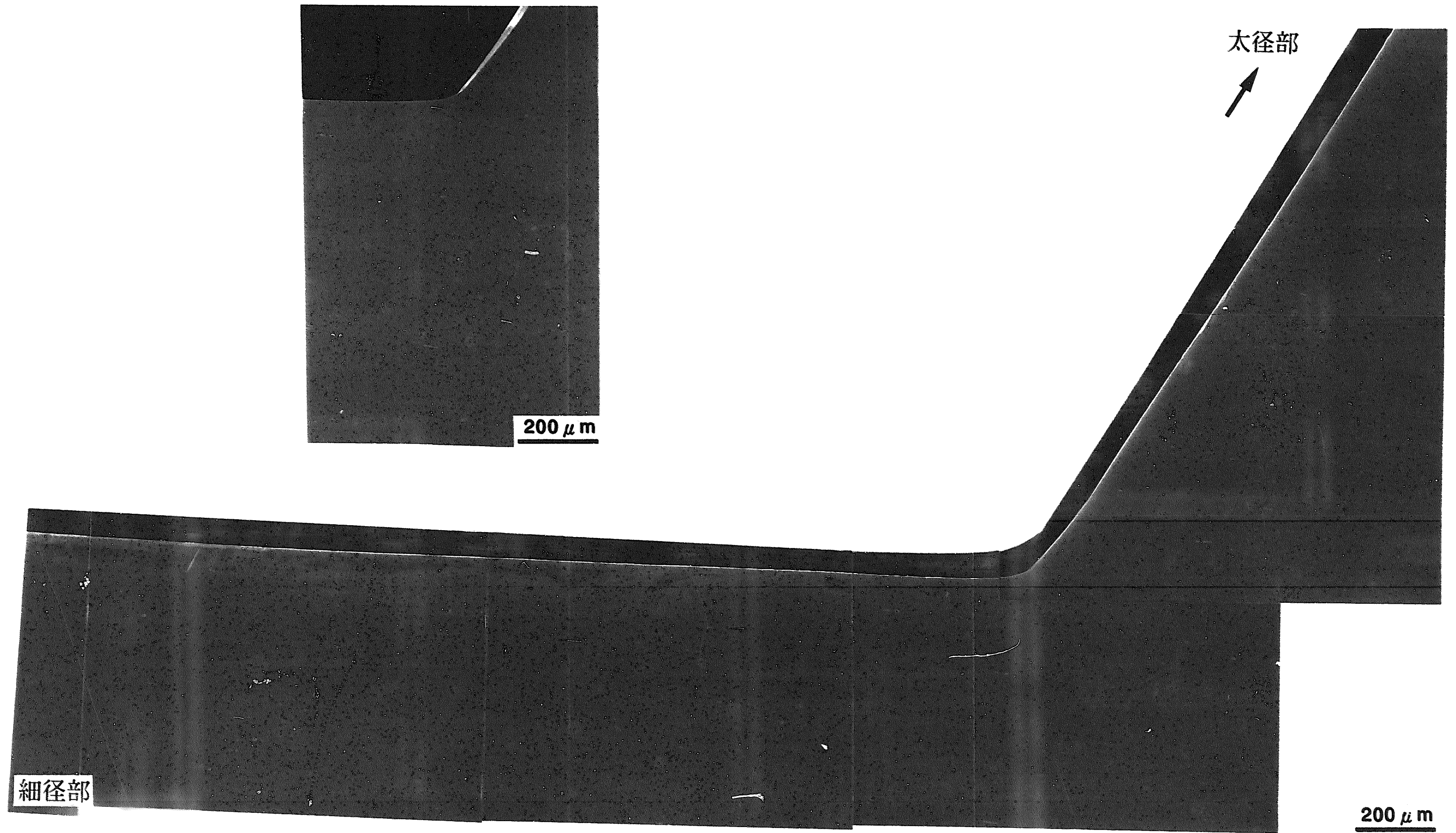


写真2(c) 段付部断面SEM写真(180°位置-1)

細径部

太径部 →

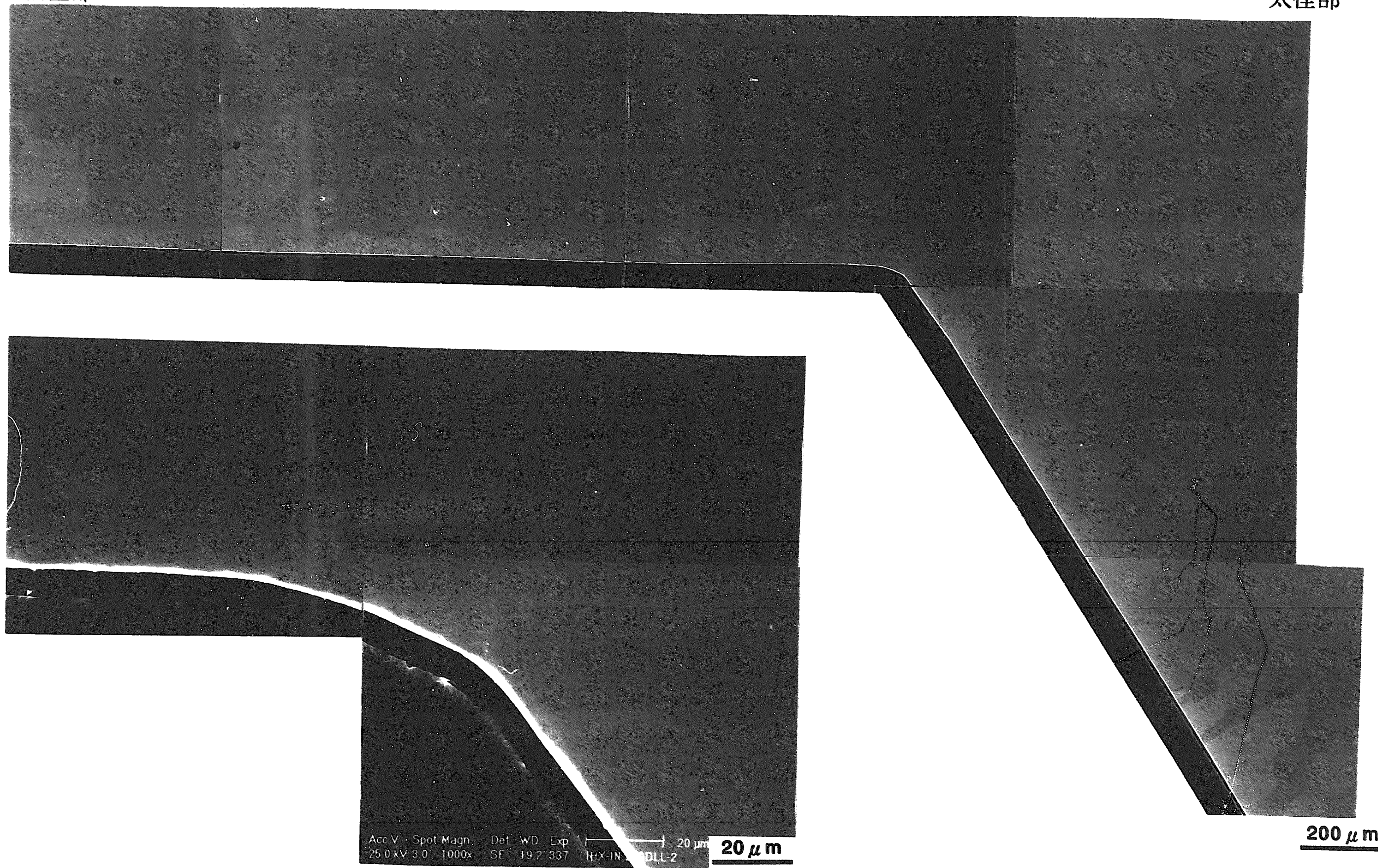


写真 2(d) 段付部断面SEM写真 (270° 位置 - 1)

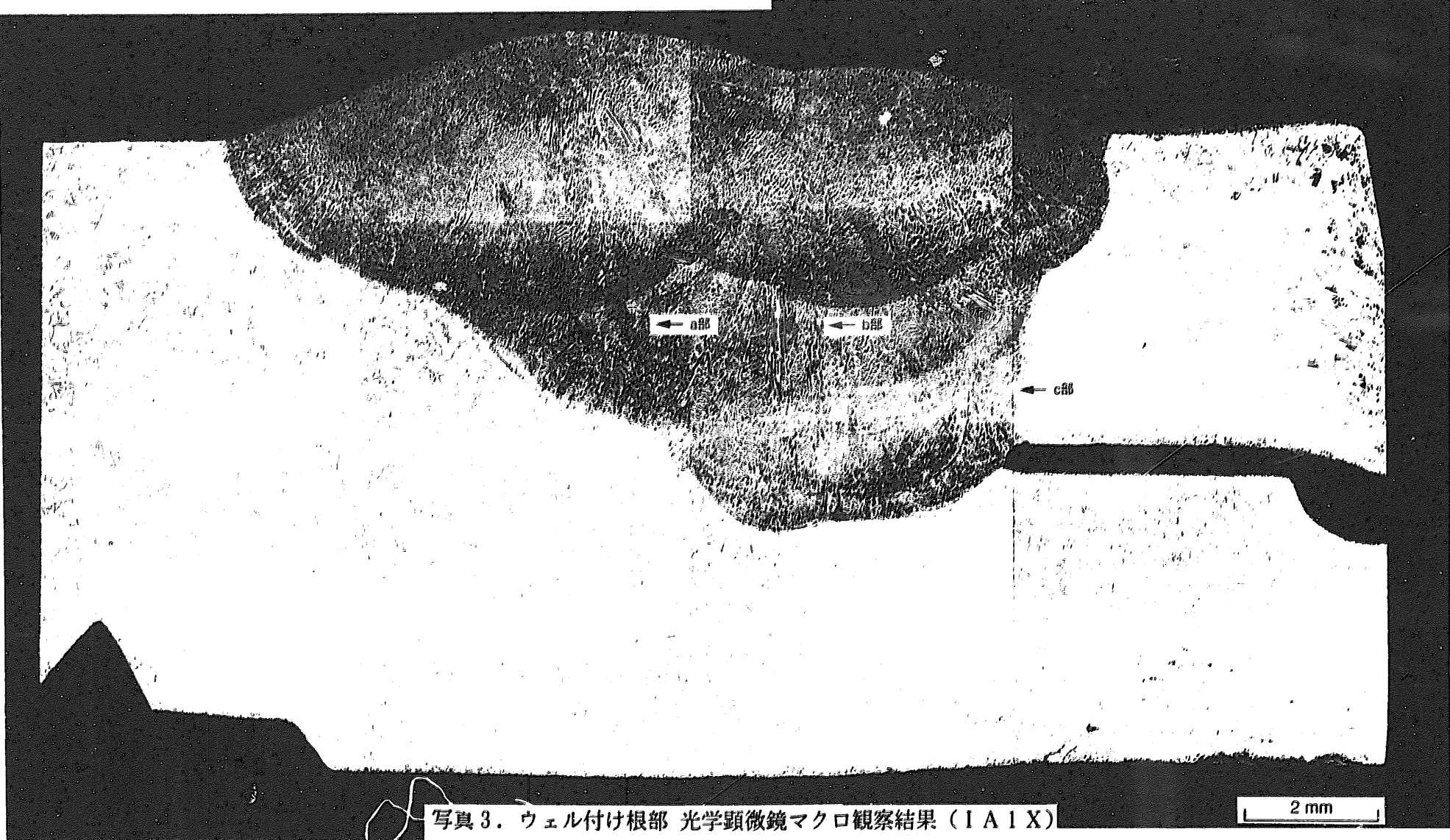


写真3. ウェル付け根部 光学顕微鏡マクロ観察結果 (1A1X)

2 mm

観察部位

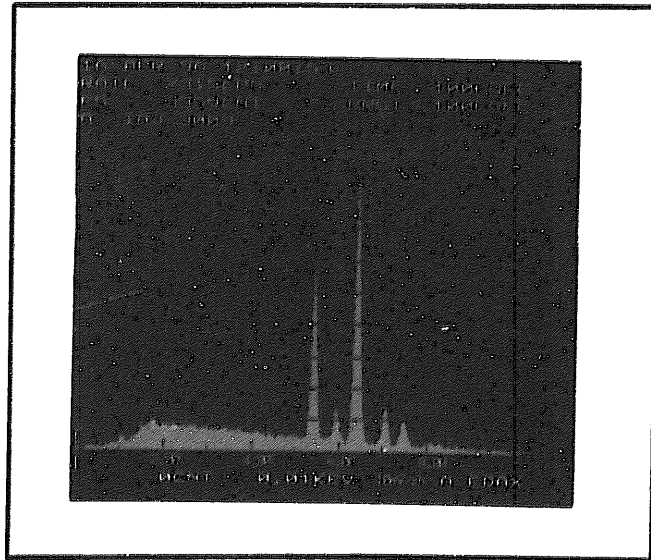
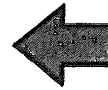
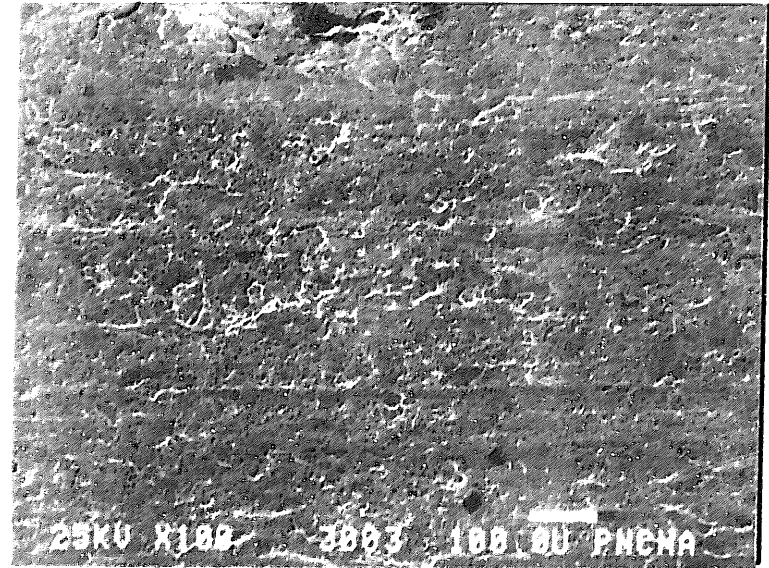
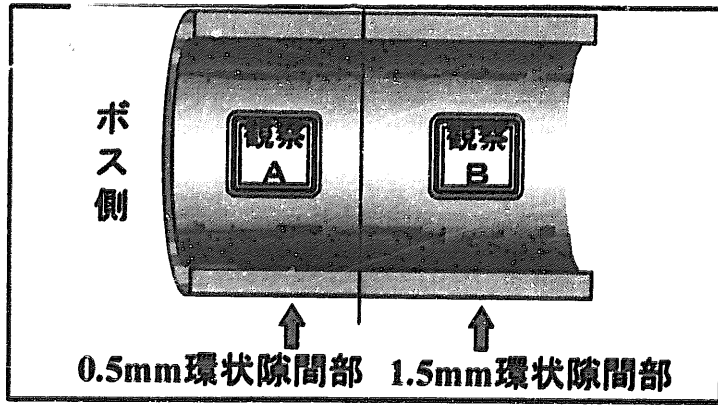


写真4(a) ウエル付け根隙間部のSEM観察結果
(試験片：IA3管台内表面側，観察部位A)

観察部位

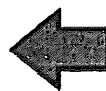
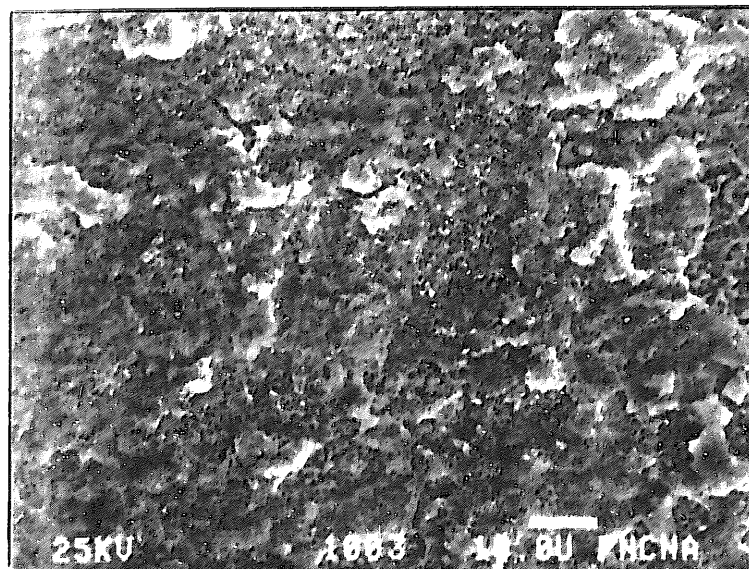
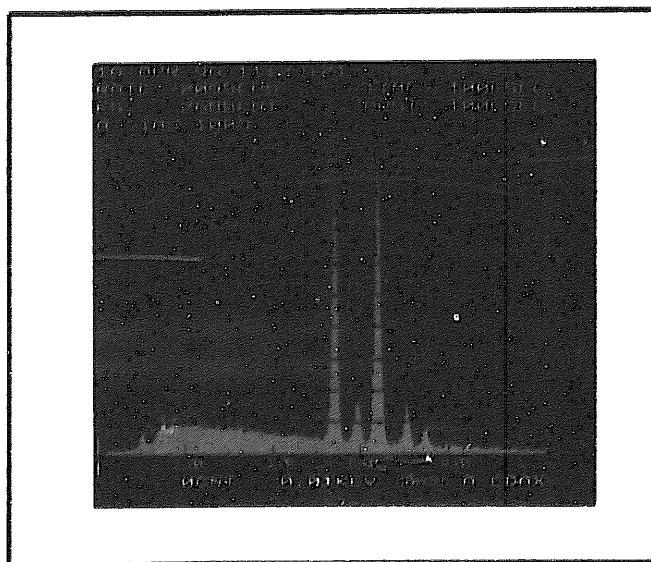
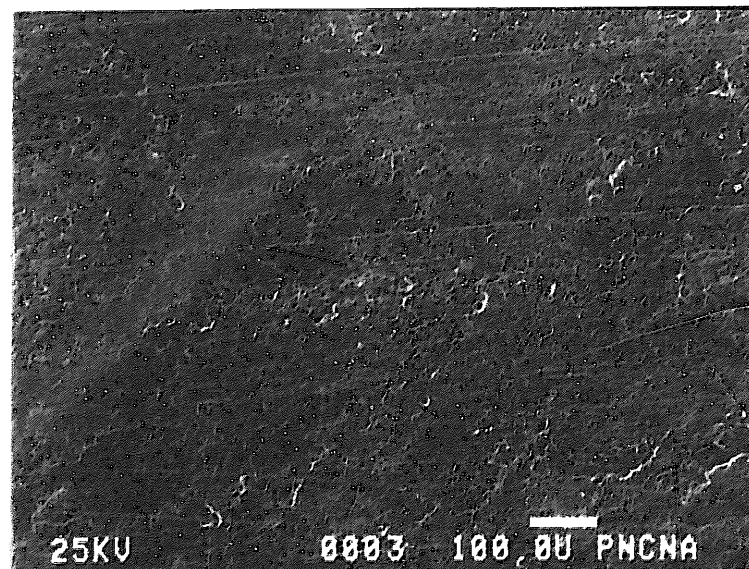
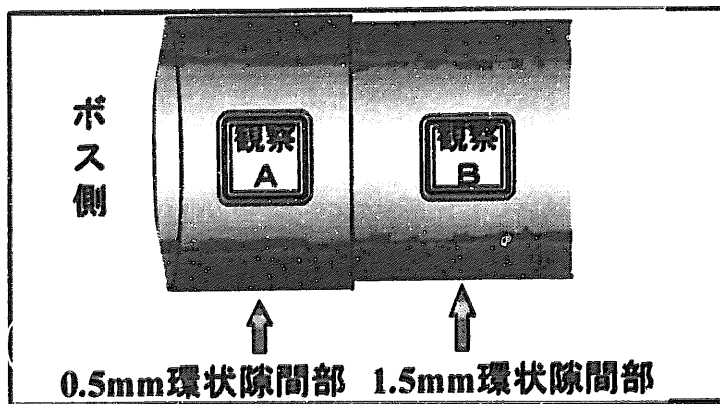


写真4(b) ウエル付け根隙間部のSEM観察結果
(試験片: I A 3 ウエル外表面側, 観察部位A)

観察部位

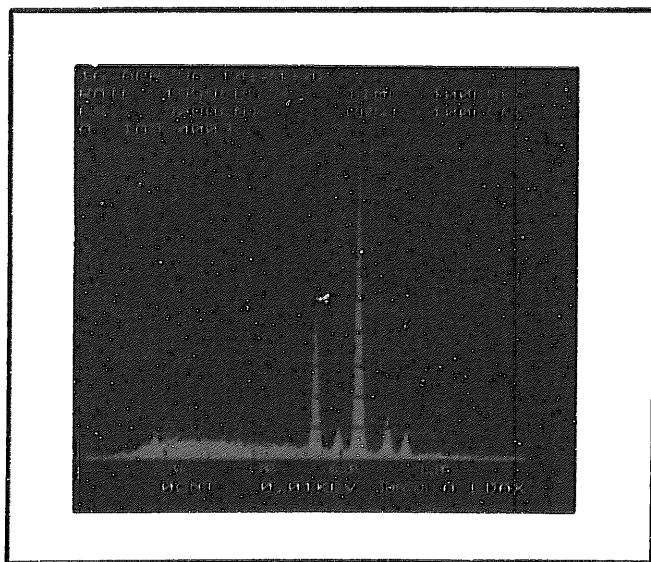
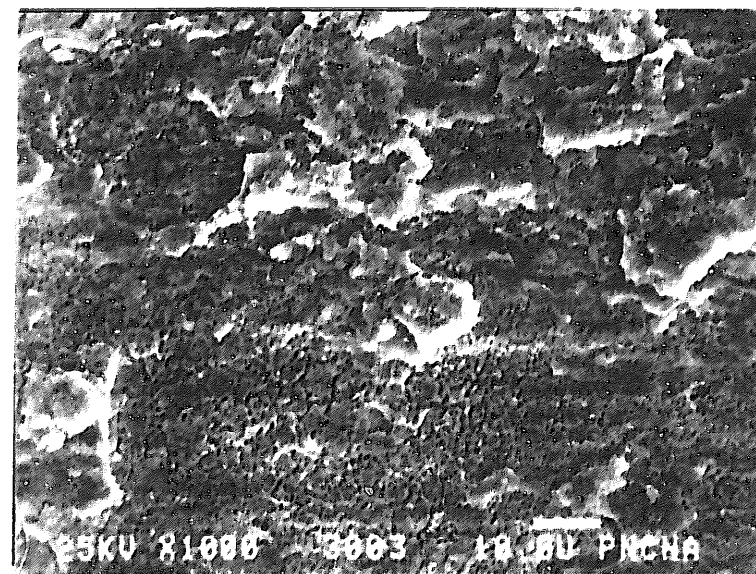
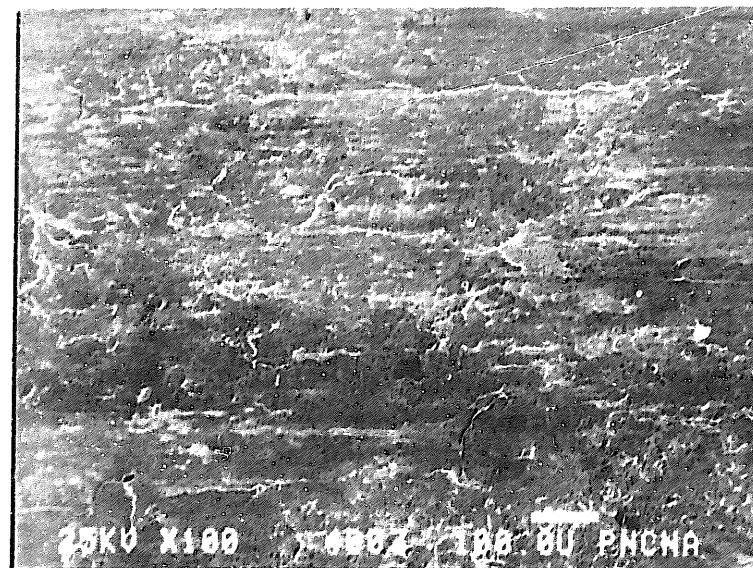
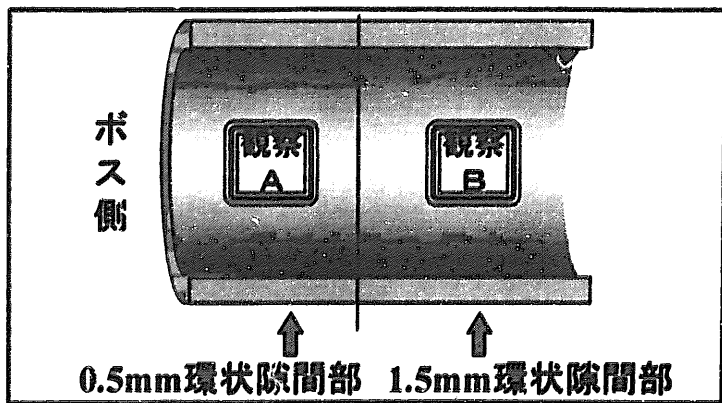


写真4(c) ウエル付け根隙間部のSEM観察結果
(試験片：I A 3 管台内表面側，観察部位B)

観察部位

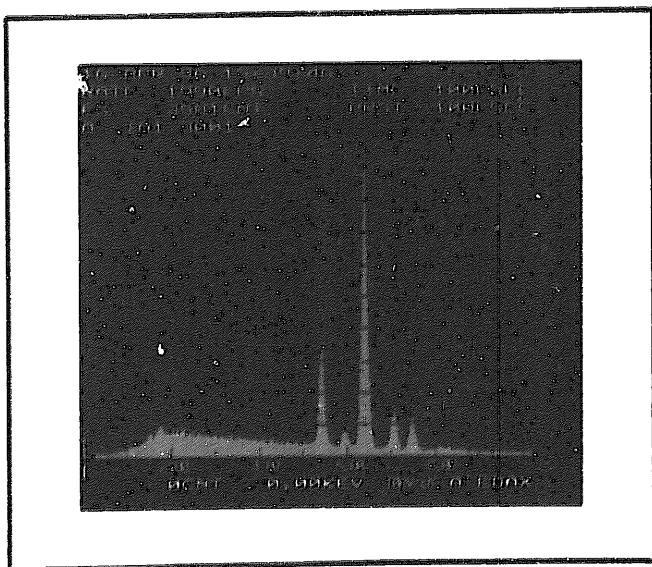
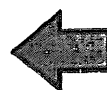
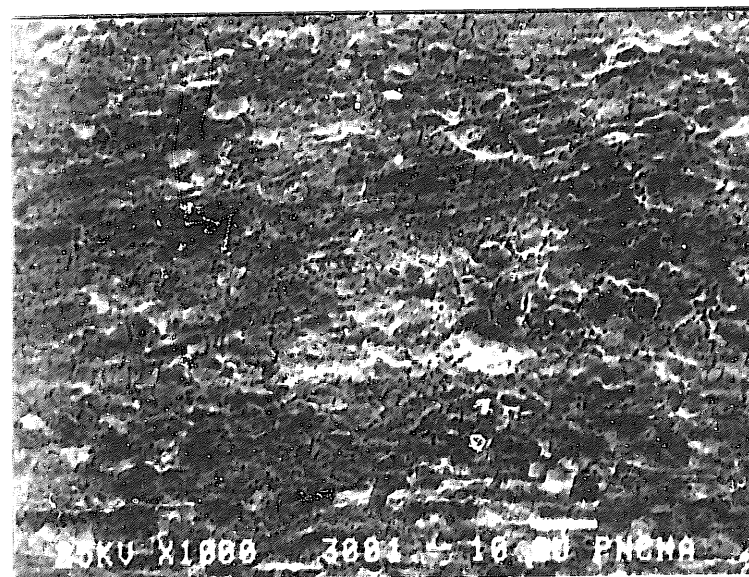
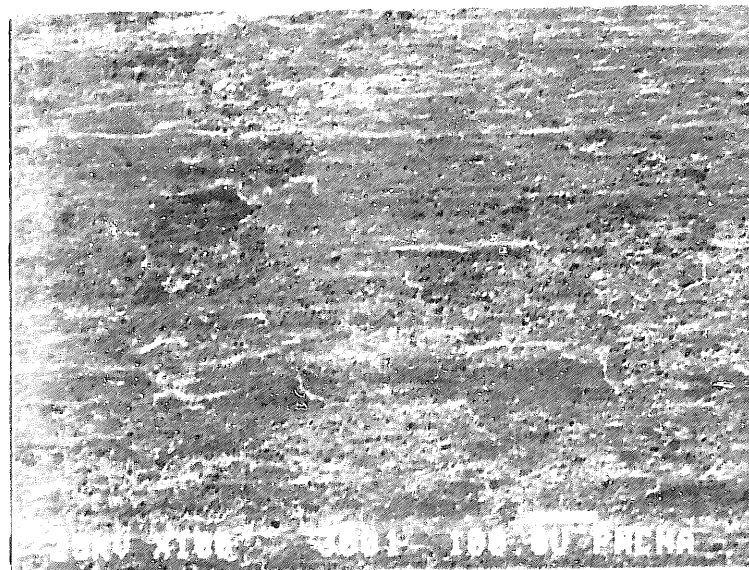
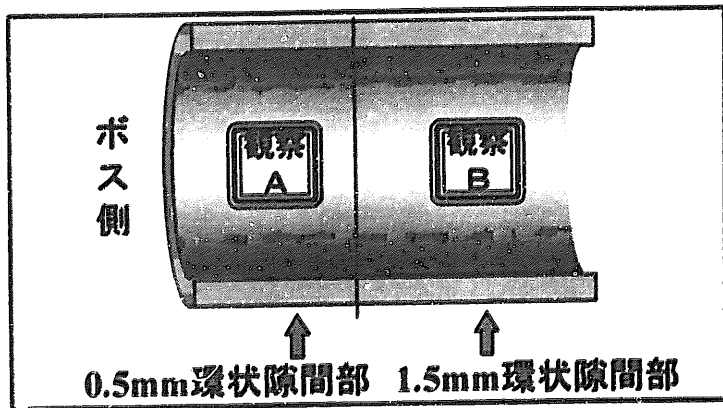
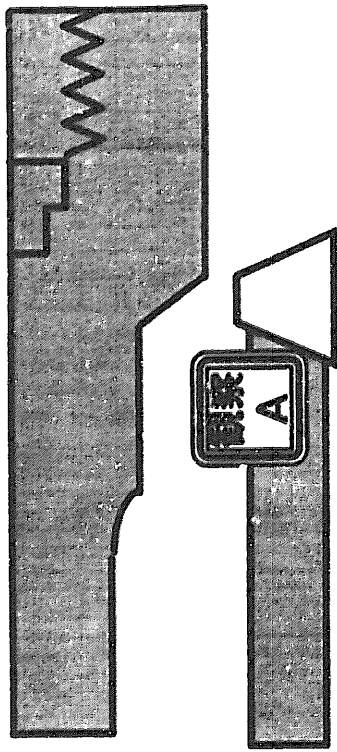
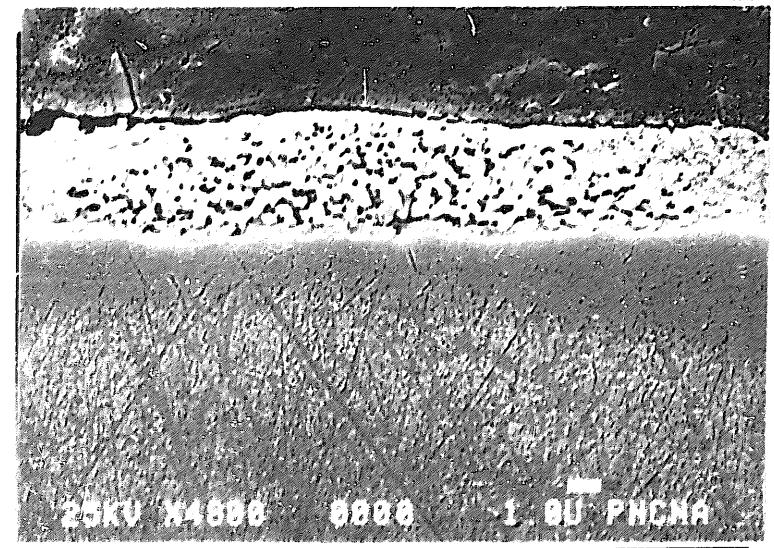
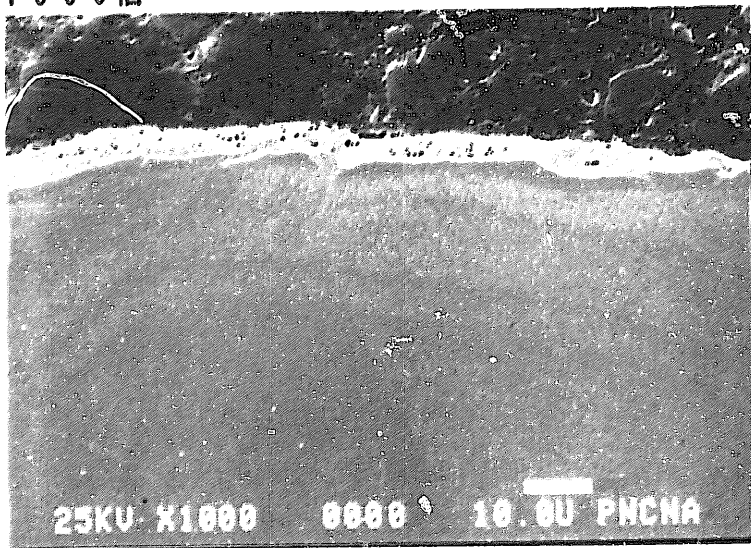


写真 4 (d) ウエル付け根隙間部の SEM 観察結果
(試験片： I A 1 管台内表面側， 観察部位 A)

管台内表面近傍の断面SEM像

1000倍

4800倍



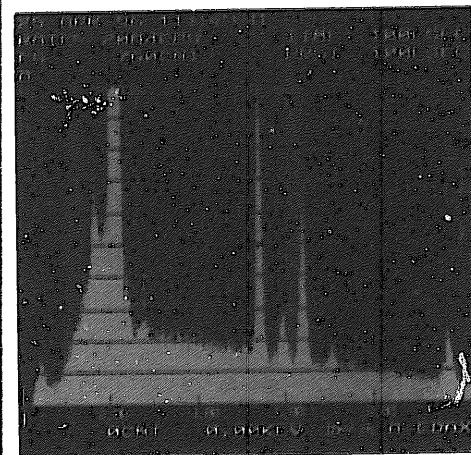
ウェル

管台

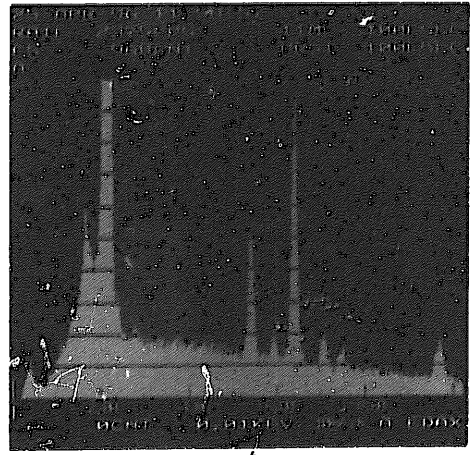
沈着物

母材表面近傍

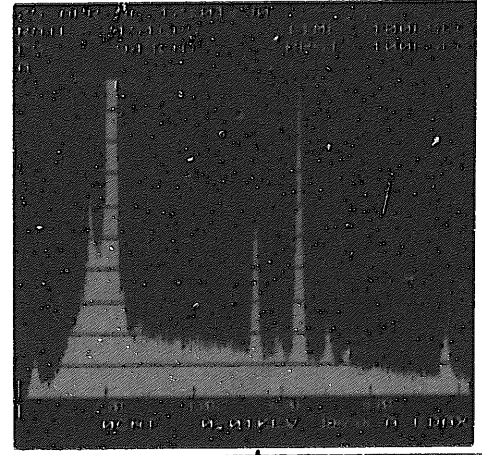
母材中心



(Cr)



(Cr)



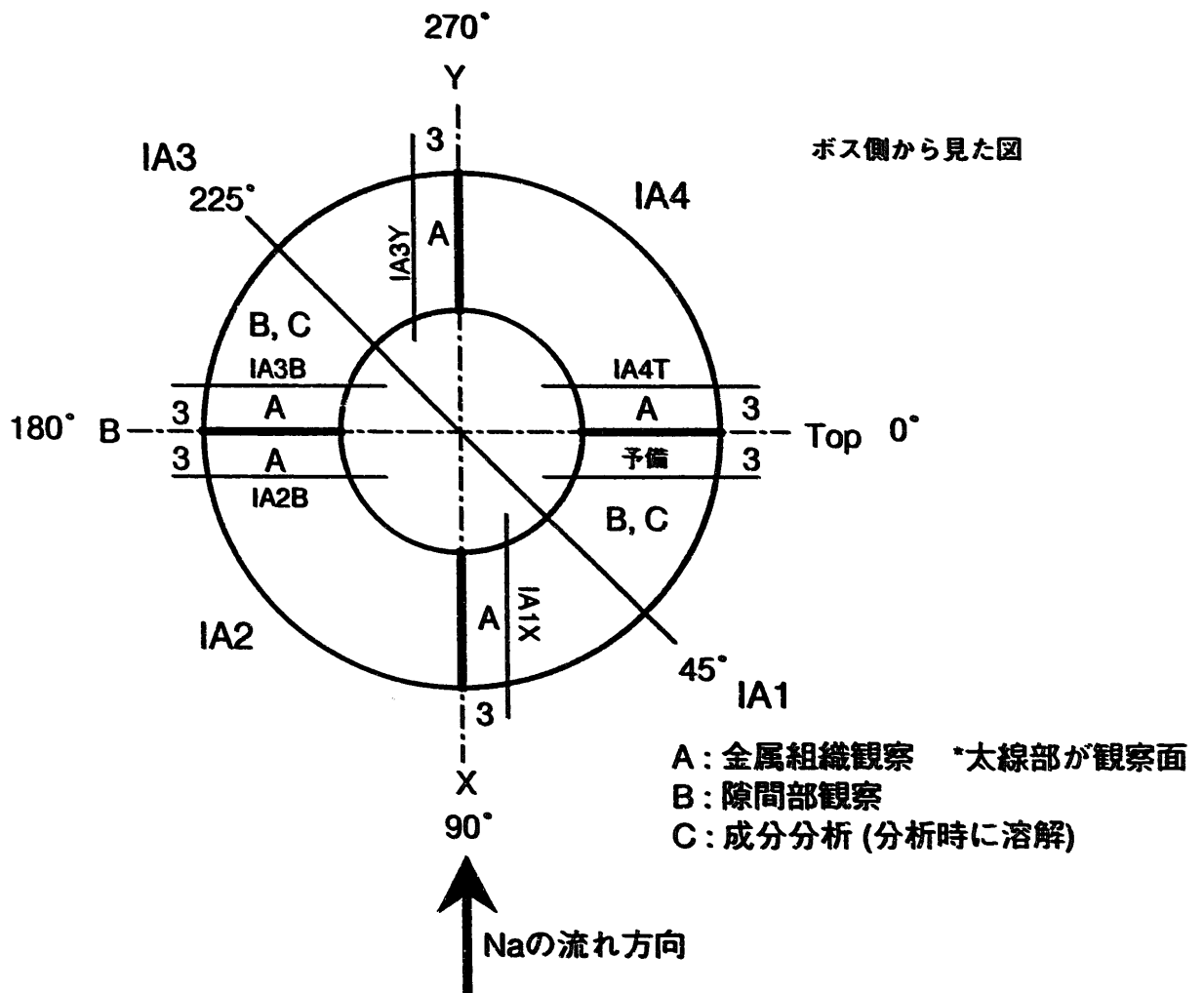
(Cr)

写真4(e) SEMによる管台内表面の断面組織観察結果
(×1000&4300, etching, 試験片: I A 3)

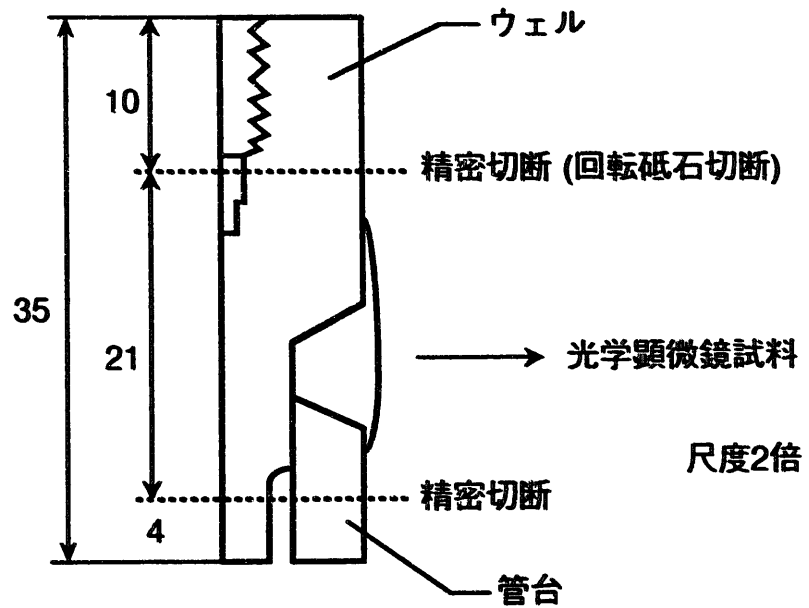
表1 成分分析結果 (単位: 質量%)

	分析位置 (分析精度 σ *1)	C (0.001)	Si (0.005)	Mn (0.006)	P (0.0006)	S (0.0006)	Ni (0.05)	Cr (0.04)	V (0.0008)	Al (0.0007)	W (0.001)	N (0.0003)	O (0.0002)
1	ウエル母材 (前回分析値*2)	0.060 (0.061)	0.51 (0.49)	1.60 (1.61)	0.030 (0.028)	0.003 (0.003)	9.80 (9.70)	18.11 (18.38)	0.042 (0.041)	0.009 (0.010)	<0.005 (<0.005)	0.042 (0.042)	0.003 (0.004)
2	ウエル付け根部 溶接金属 (前回分析値*2)	0.024 (0.037)	0.30 (0.30)	1.63 (1.68)	0.031 (0.029)	0.004 (0.004)	9.82 (9.83)	19.46 (19.54)	0.092 (0.092)	0.005 (0.005)	<0.005 (<0.005)	0.040 (0.041)	0.011 (0.011)
参 考	SUS304規格	≤ 0.08	≤ 1.00	≤ 2.00	≤ 0.040	≤ 0.030	8.00 ~10.50	18.00 ~20.00	-	-	-	-	-
参 考	SUSY308規格	≤ 0.08	≤ 0.65	1.00 ~2.50	≤ 0.030	≤ 0.030	9.00 ~11.00	19.50 ~22.00	-	-	-	-	-

*1 分析精度 (σ) は本分析最大値での室内精度を示す
 *2 前回分析値は破損した I H X 出口熱電対の値を示す



(a) 放電切断による試料素材採取位置



(b) 放電切断後の光学顕微鏡試料採取位置

図1 ウェル付け根部 金属組織観察試料の採取位置

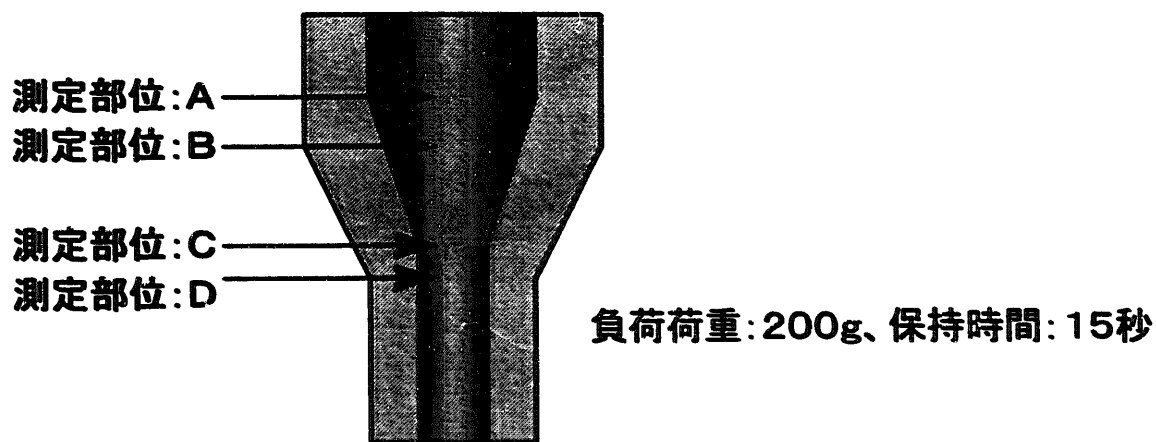
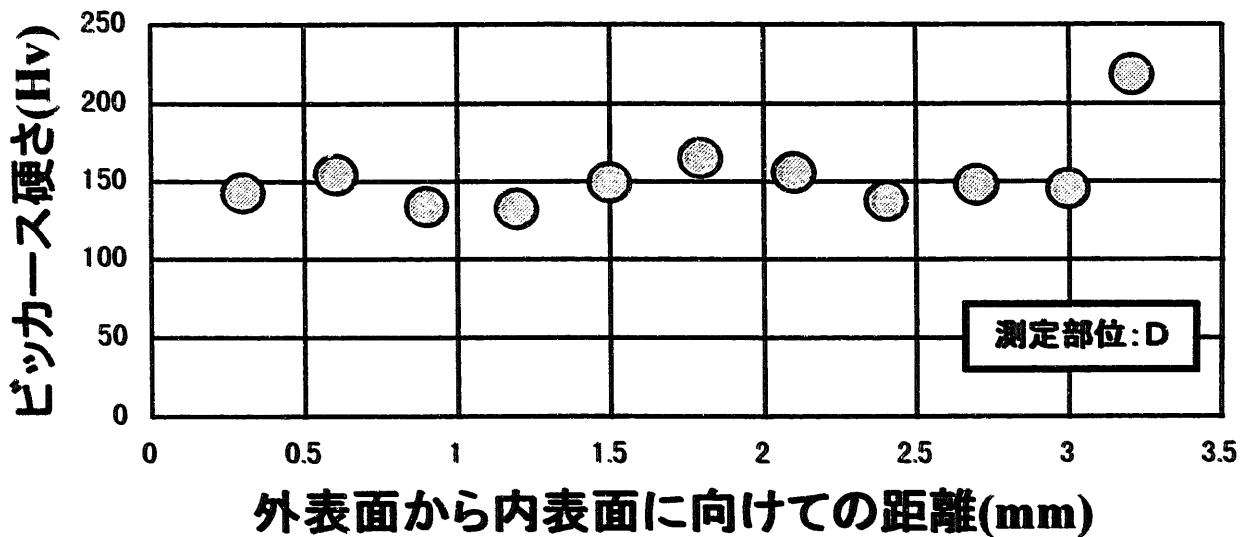
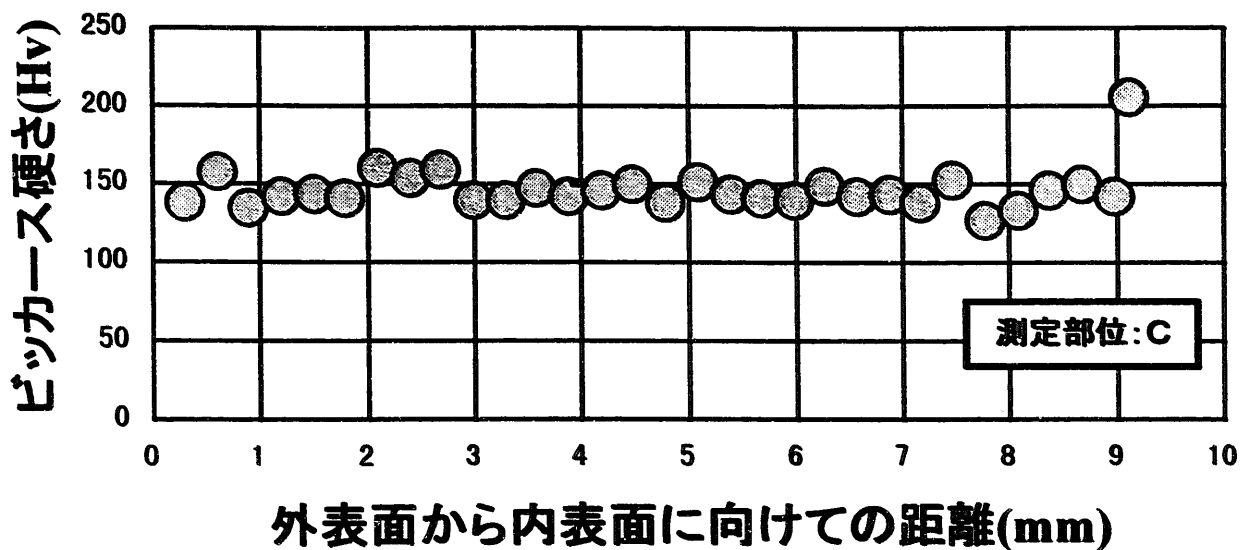


図2. ウェル段付き部の硬度分布

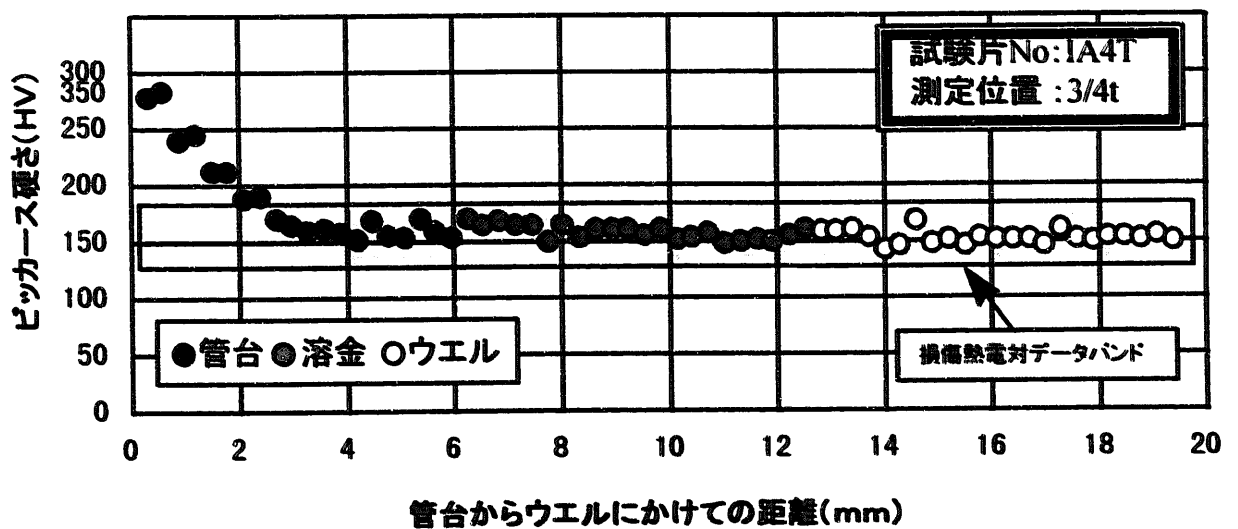
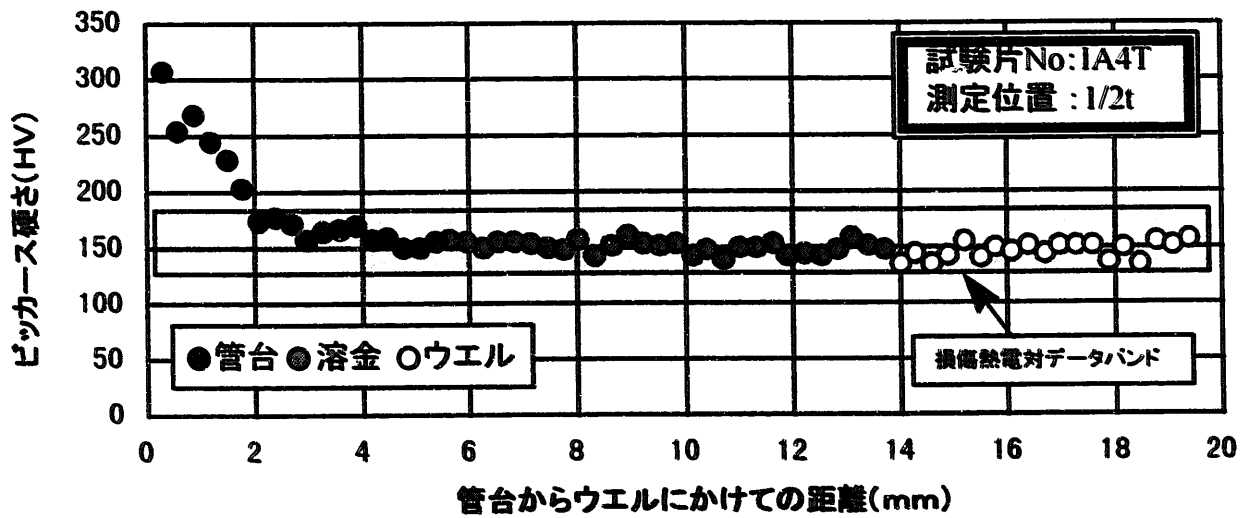
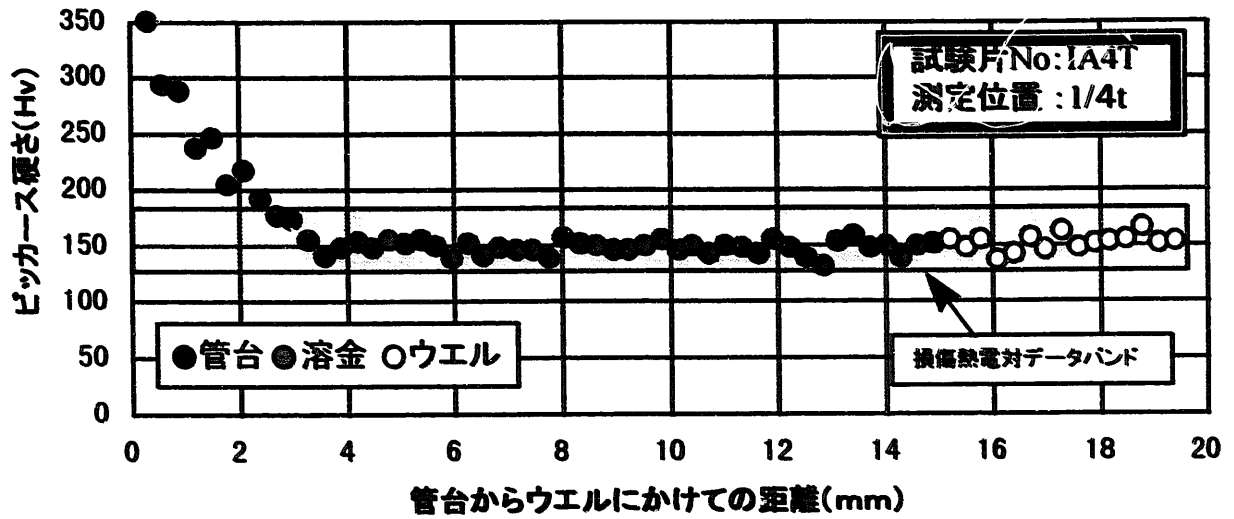
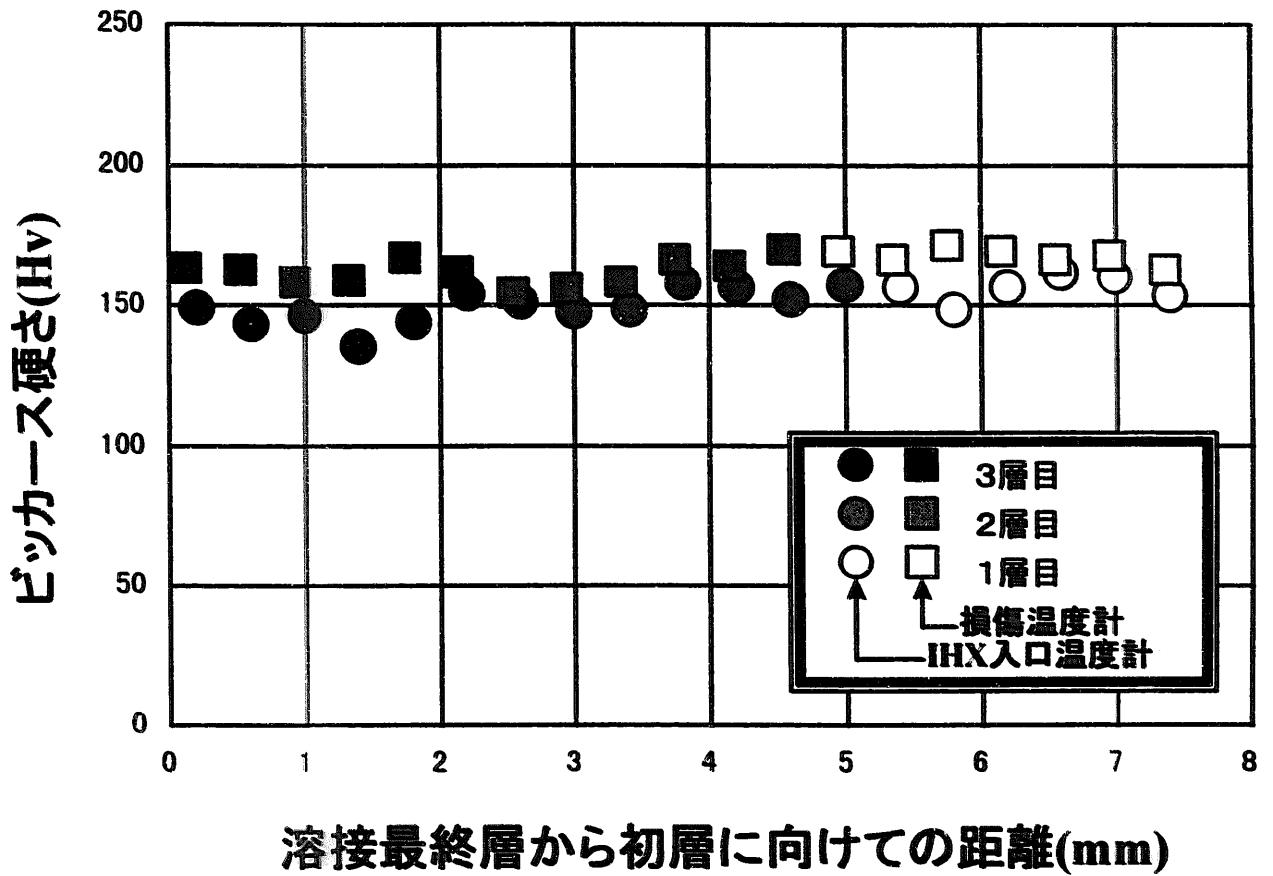


図3. ウェル-管台溶接部の硬さ分布
 負荷荷重:200g, 保持時間:15秒



負荷荷重: 300g、保持時間: 15秒

図4. ウェル-管台溶接部の溶接最終層から初層にかけての硬さ分布

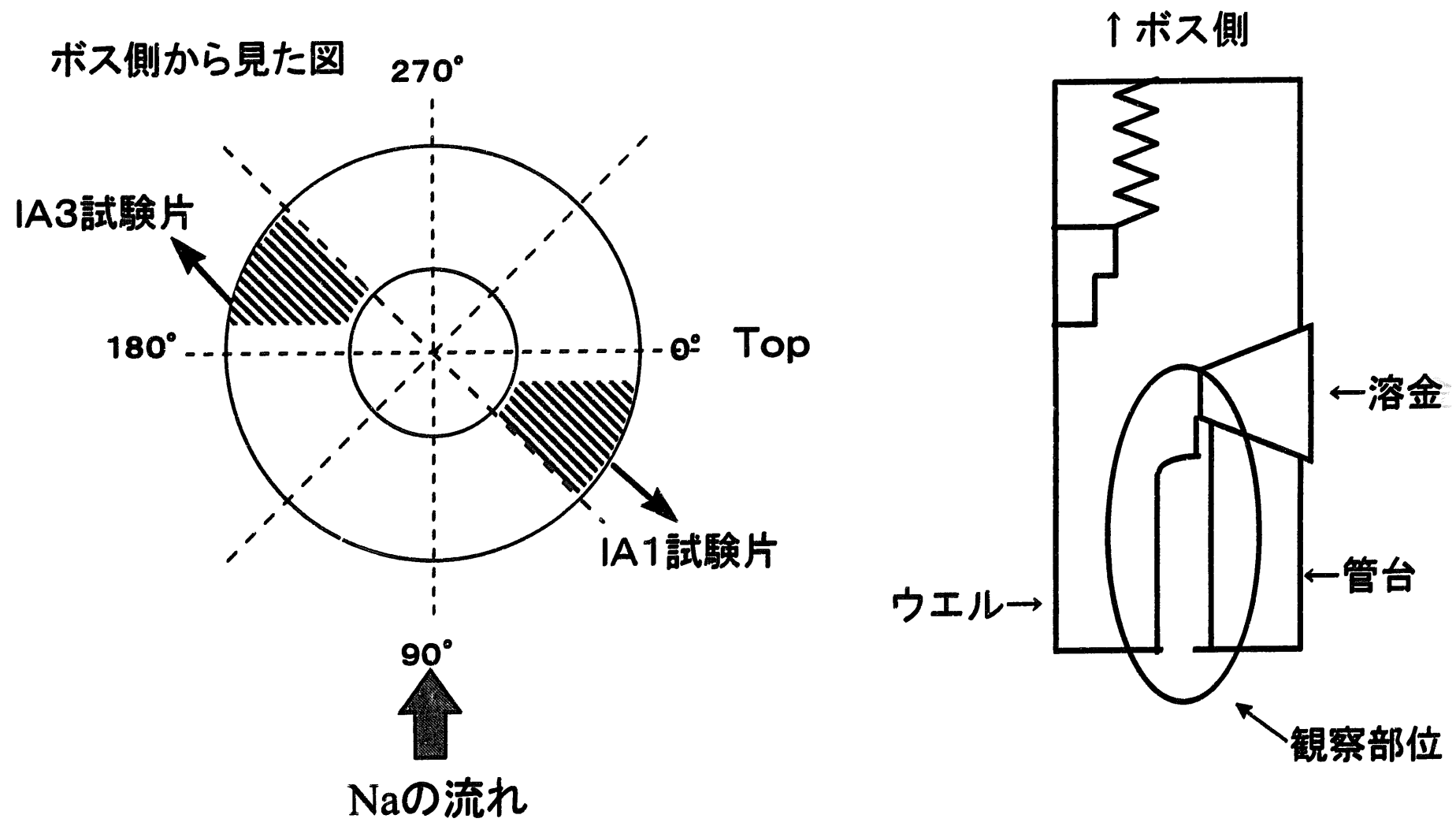


図 5 (a) 隙間腐食観察用試料の採取位置

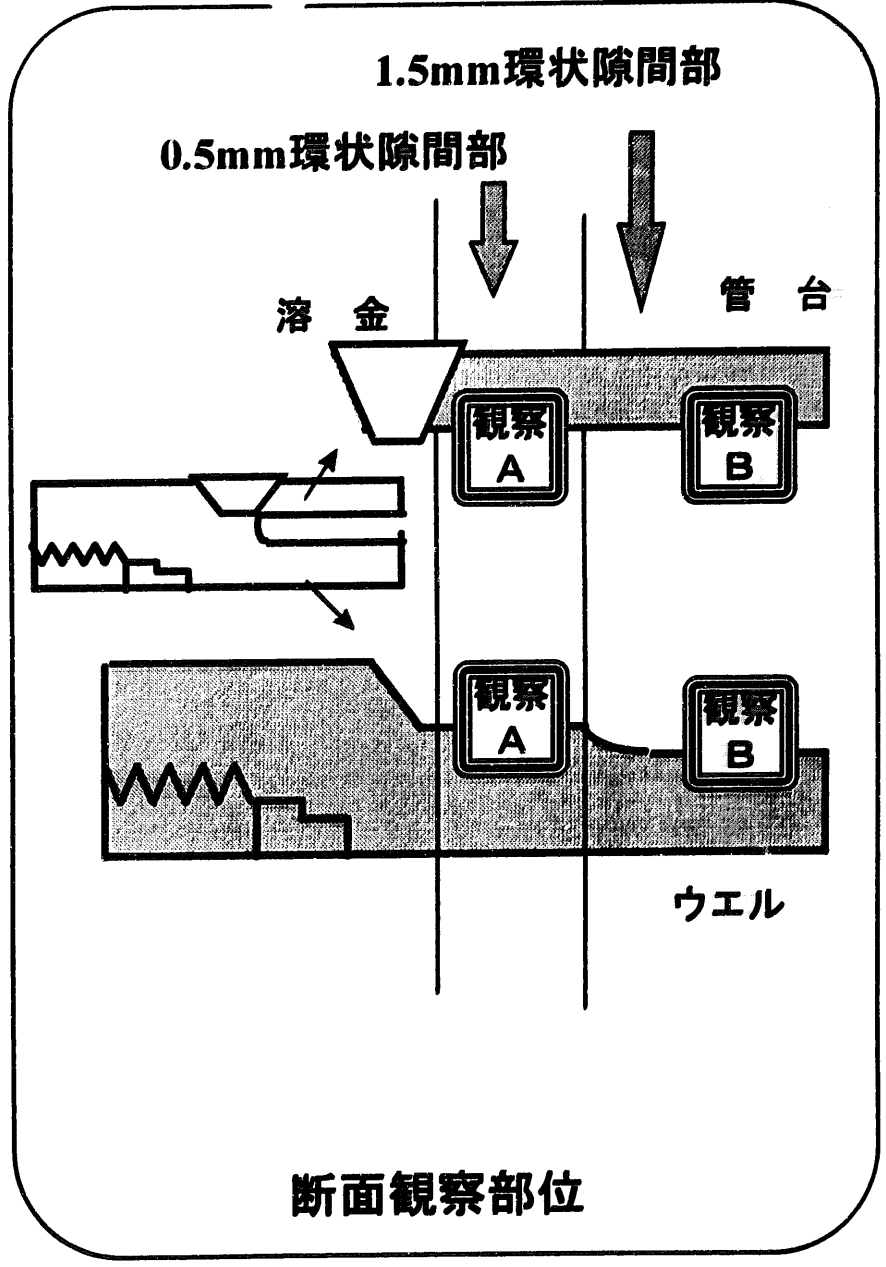
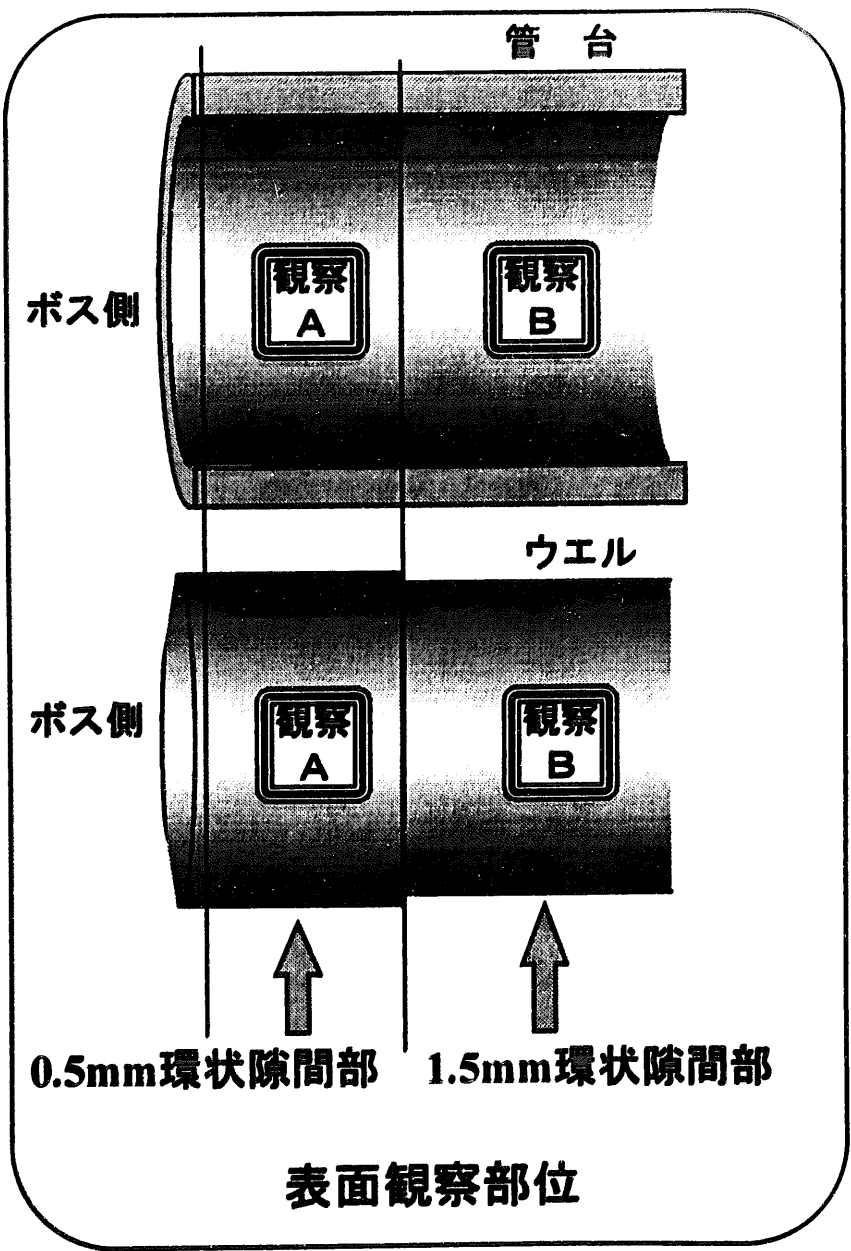


図 5 (b) 隙間腐食観察部位詳細

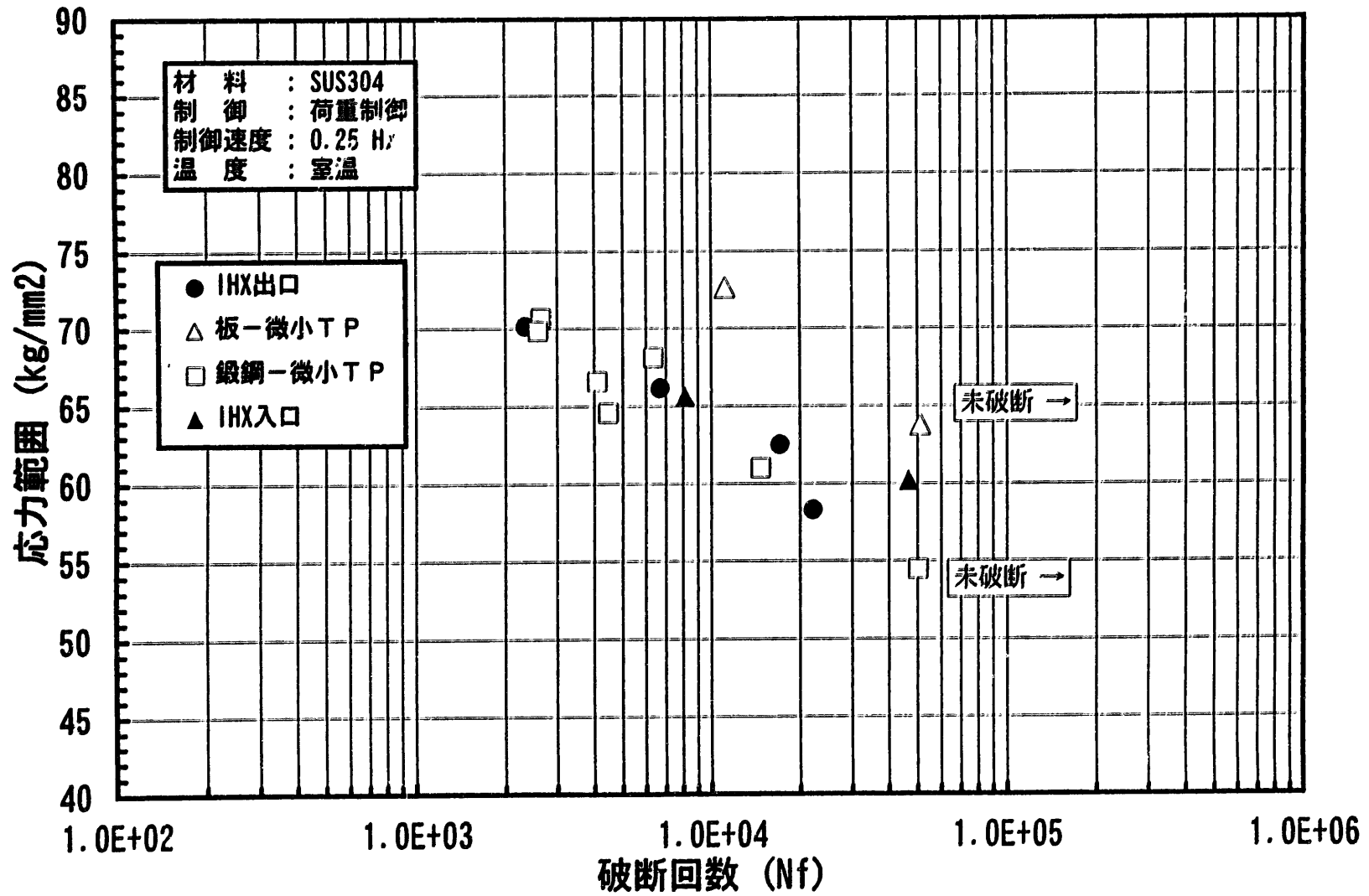


図6. 実機ウエル材の疲労寿命特性

添付資料

IHX入口温度計ウェル超音波探傷試験で得た有意な指示エコーの原因についての検討結果

1. 経緯と検討概要

もんじゅサイトで実施した中間熱交換機（IHX）入口温度計ウェル段付部周辺の超音波探傷試験（UT:10MHzおよび5MHz射角70°横波）では、Y距離（ウェル内側テーパ面とUTの支持具面との距離：入射位置はY距離とウェルの寸法から割り出す相対長さで求められる）5mmからの探傷でビーム路程9.5mm位置に有意な指示エコーを認めた（図1参照）。その後の水浸式UTや浸透探傷試験（PT）結果および段付部の周囲外表面や90°毎切断面の各詳細組織観察では、いずれにも有意な指示やき裂等の欠陥は観察されず、当該部周辺にはき裂の発生がなかったことを確かめている。

ナトリウム流れ上流位置（方位90°）で認められた指示エコーは、もんじゅサイトで適用した形式のUTでは再現性があることを確認しており、ここでは90°断面の組織観察から指示エコー発生の原因特定を試みた。

2. 分析の前提

- (1) UT実施時のY距離－ビーム路程に基づく有意エコー発生位置（段付部表層）の同定は設計寸法に依っているが、Y距離の起点となるテーパ部の板厚は切断後の精密寸法計測により設計寸法3mmではなく約5mmあることが分かった。
- (2) 有意な指示エコーは10MHzの場合だけでなく5MHzでも示されており、原因となる対象物はある程度の大きさを有していなければならない。
- (3) 適用したUTは手動型のものであり、屈折角は計測時に改めて求めてはいないため最大±10°程度の測定誤差は発生する。
- (4) Y距離は手動とウェル端部からの物差しで測定するため、ビーム路程には少なくとも±1mm程度の誤差は生じる。
- (5) 測定時に90°位置段付部をフィンガーダンピングし、指示エコーが影響されることを確認しておりビーム中心は少なくとも当該段付部近傍を通過している。

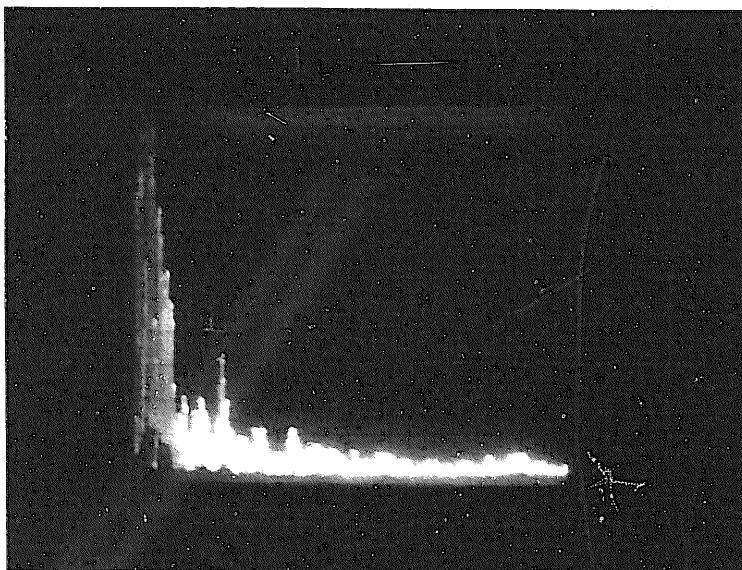
3. 検討結果

検討結果を図2に示した。対象とした方位90°断面には複数の鎖状の析出物が観察できたが、テーパ厚さを補正した入射位置からの斜角70°ビームではそれらの因子とは交錯しない。また、斜角60°以下ではウェル外表面で反射してしまい、斜角70°以上では幾つかの析出物を補足できるがフィンガーダンピングによる影響を受けにくい。ビーム60°～70°の範囲で上記に「2.」の前提に矛盾しない路程を想定すると、図2における実線が考えられ、かつ有意エコーの原因となったのは路程よりEのδフェライトであると推察できる。ビーム路程途中に他の析出物Fが存在するが、誤差を考慮しても路程に整合しない。写真1および写真2に鎖状に析出しているEおよびFのδフェライト相を示した。なお、超音波的には、10MHzの波長が0.3mmで波長の1/4から1/2程度は検出が可能とされていることから単独では検出が困難であるが連続体としてみると十分に検出が可

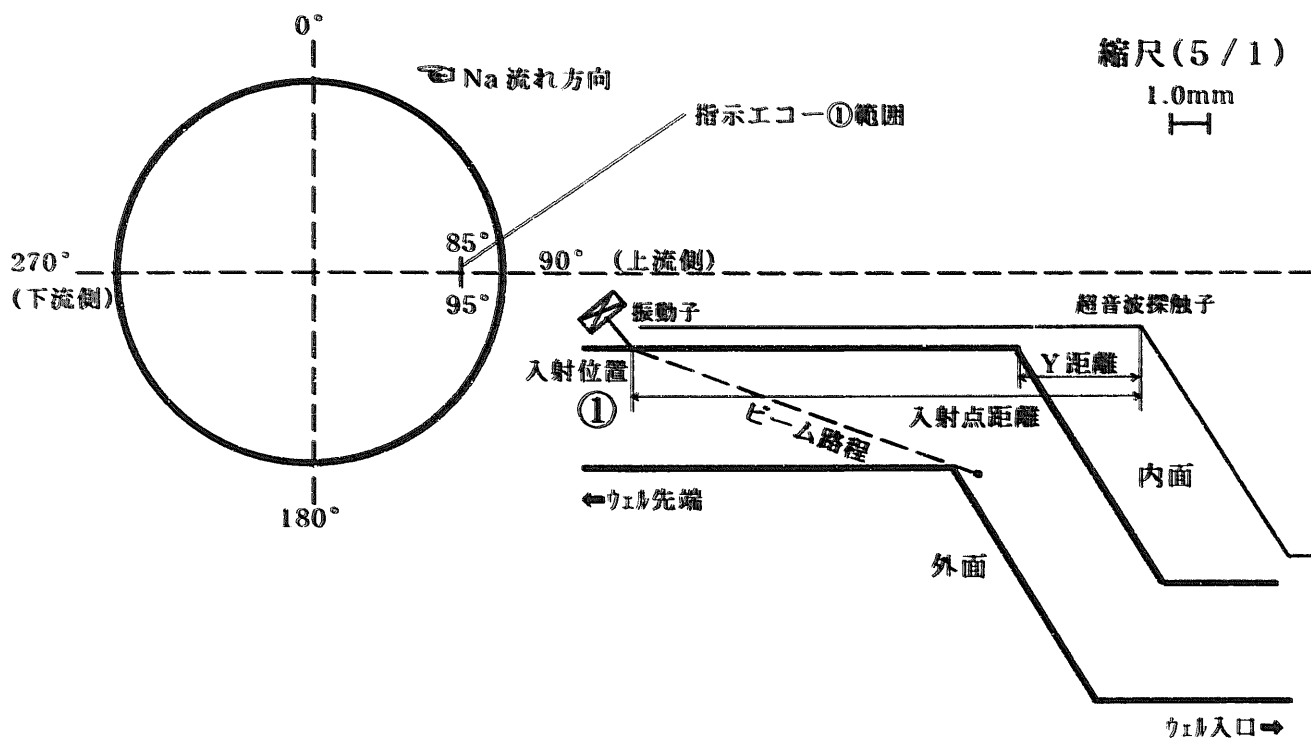
能であると推定される。

また、SUS304系の鋼種においては完全オーステナイトと言うよりは少量（5%）程度のフェライトを含有していると言われている（ステンレス鋼便覧、実用材料編より抜粋）。従って、他の箇所においてもウェル段付部で実施した水浸式超音波探傷結果で、エコーレベル20パーセント程度のスポット指示が多数得られているが、これらについては、 δ フェライト相からの反射エコーレベルが低いため有為な指示として認識されていないと推定される。

図1 超音波指示エコー状況



指示①
 方位 ; 90°
 Y距離 ; 5.0mm
 ビーム路程 ; 9.5mm
 CRT ; 32% (max.)
 感度 ; 基準感度



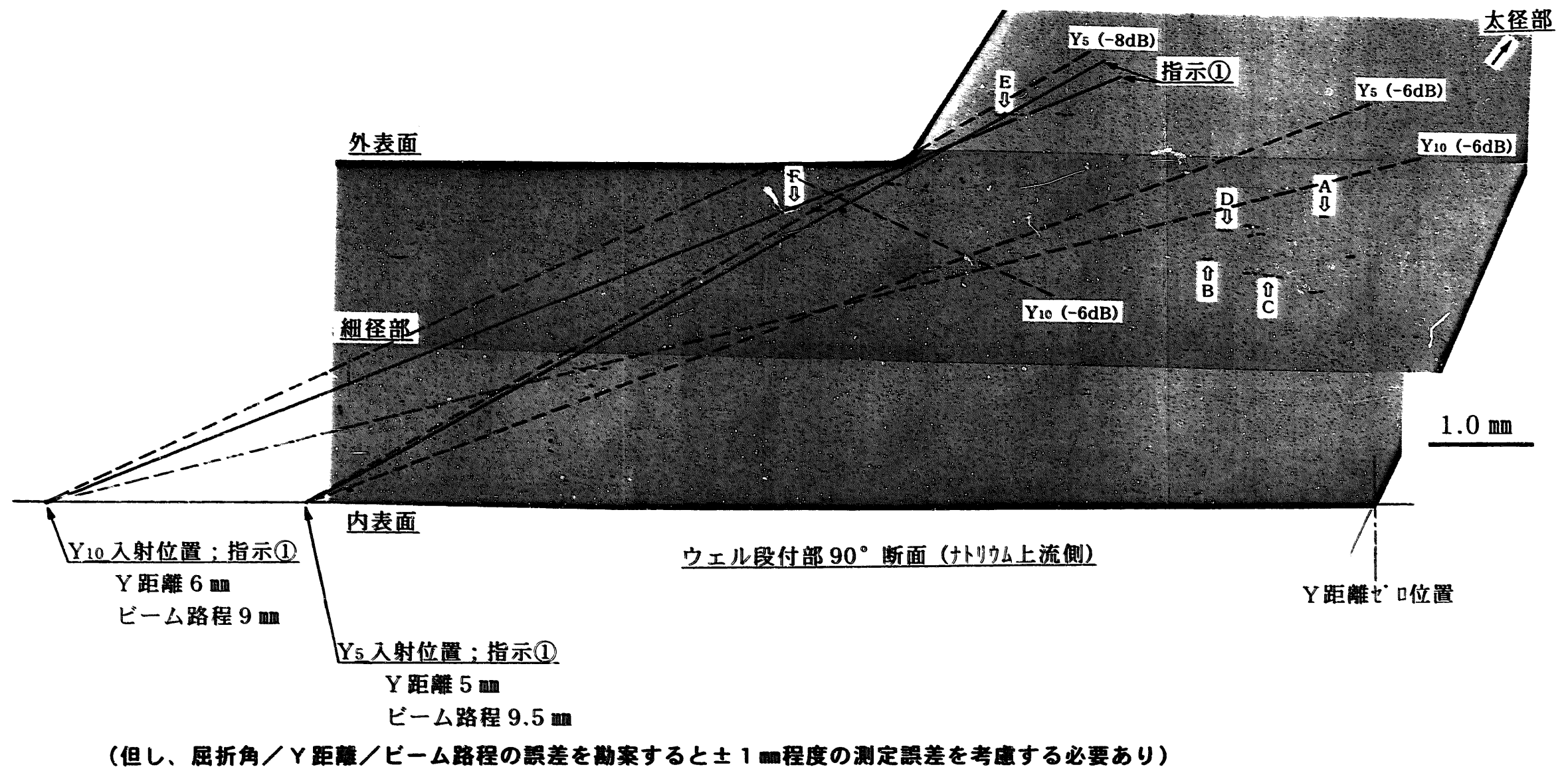


図2 ウェル段付部超音波探傷時の超音波ビームプロファイル

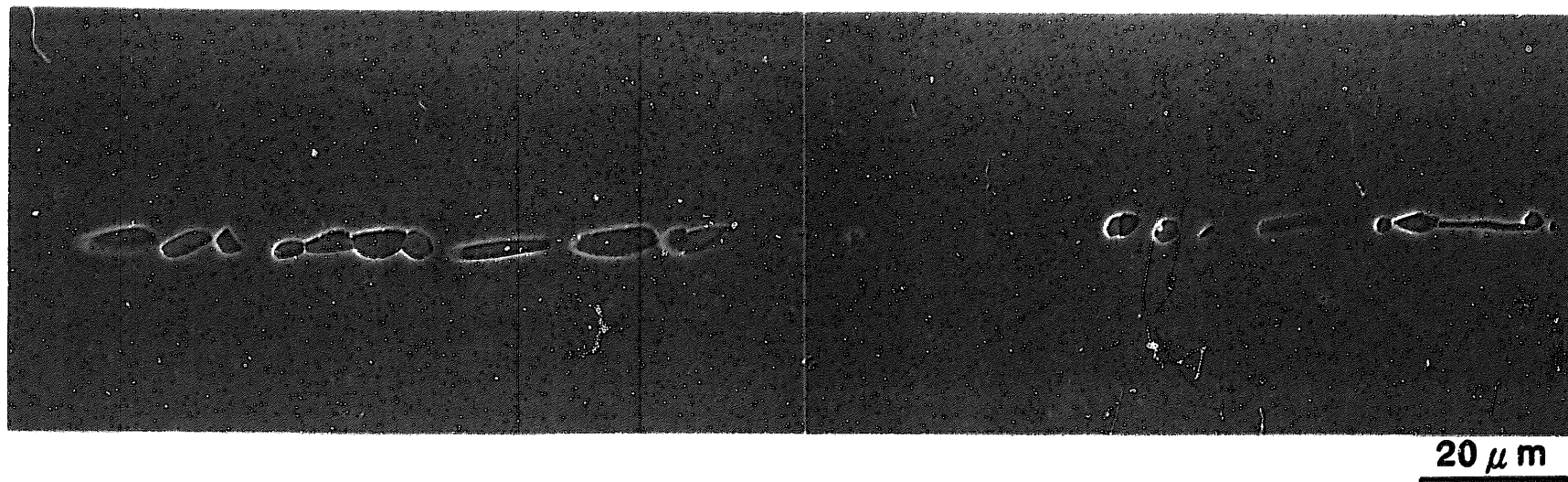


写真1 段付部90°断面に観察された δ フェライト相 (E)



写真2 段付部90°断面に観察された δ フェライト相 (F)