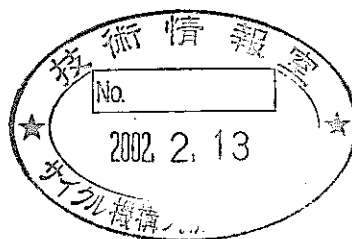


代替溶接法による
ODS鋼被覆管／端栓接合部の強度評価
(研究報告)



2001年12月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4-49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184

Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2001

代替溶接法による ODS 鋼被覆管／端栓接合部の強度評価 (研究報告)

畠山 耕一* 水田 俊治**
藤原 優行*** 鶴飼 重治*

要旨

ODS 鋼被覆管の高燃焼度燃料への適用性を早急に見極めることを目的として、ロシアの高速炉 (BOR-60) を用いた照射試験を計画している。この場合の ODS 鋼被覆管と端栓の溶接は、ロシアにおいて適用可能な TIG 溶接あるいはレーザー溶接が行われる計画である。本報告では、ODS 鋼被覆管の端栓接合方法として、TIG 溶接法、レーザー溶接法に加え、電子ビーム溶接法、ろう付拡散接合法 3 種 (金ろう、パラジウムろう、ニッケルろう) の適用性を評価した。さらに、レーザー溶接法と TIG 溶接法については、曲げ、内圧クリープ破断試験を行った。

本研究で得られた主な結果は以下の通りである。

- (1) 溶接法の中では、エネルギー密度の最も高いレーザー溶接試験片が優れた引張強度 (母材強度の 90% 以上) を示した。
- (2) ろう材では、ニッケルろう付が最も優れた強度 (母材強度の 84% 以上) を示し、次いで金ろう付、パラジウムろう付の順であった。
- (3) 曲げ試験では、レーザー、TIG 溶接試験片とも曲げ角度 50° で溶接部周方向にき裂が発生した。
- (4) 700°C における内圧クリープ破断試験では、レーザー、TIG 溶接試験片とも高応力側では母材部破断であったが、低応力側では溶接部破断となった。

溶接法の中ではレーザー溶接、ろう付法の中ではニッケルろうの適用性が最も高い。

*)大洗工学センター システム技術開発部 核燃料工学グループ

**)大洗工学センター システム技術開発部 核燃料工学グループ (現. 地域交流課)

***)大洗工学センター システム技術開発部 核燃料工学グループ (客員研究員)

Strength evaluation of jointed parts between ODS cladding and end plug
by means of alternative welding method
(Research Report)

Koichi HATAKEYAMA* Syunji MIZUTA**
Masayuki FUJIWARA*** Shigeharu UKAI*

Abstract

For the purpose of urgently discerning the applicability of ODS cladding tube to the long life core of the fast reactors, the irradiation test using Russian fast reactor BOR-60 is planned. In this irradiation test, TIG welding or laser welding will be applied as welding method of ODS cladding with end plug.

In this report, applicability of alternative welding method, i.e., TIG welding, laser welding, and also electron beam welding and 3 kinds of brazing diffusion bonding technique was evaluated. In addition, bending test and internal creep rupture test of the samples which were welded by laser and TIG welding were carried out.

Following results were obtained in this study.

- (1) Tensile strength of laser welding test specimens with the highest energy density is most excellent in the welding process (over 90% of the base metal strength).
- (2) In the brazing filler metal, the tensile strength of the nickel brazing was most excellent (over 84% of the base metal strength).
- (3) In the bending test of laser and TIG welded test specimens, the crack was generated in circumferential direction of weld zone, which relatively corresponds to small bending angle.
- (4) As result of internal creep rupture test at 700°C, cladding itself was ruptured in the high stress region, whereas, weld zone was ruptured in the low stress level.

*)Nuclear Fuel Research Group, System Engineering Technology Division, O-arai Engineering Center

**)Nuclear Fuel Research Group, System Engineering Technology Division, O-arai Engineering Center (Present : Community relations section)

***)Guest Researcher, Nuclear Fuel Research Group, System Engineering Technology Division, O-arai Engineering Center

目次

1. はじめに	1
2. 各種溶接接合材の強度評価	
2.1 接合材料	2
2.2 試験片の製作	2
2.3 検査及び評価試験	2
2.4 検査・試験結果	3
2.5 各種溶接接合法の評価	6
3. 曲げ・内圧クリープ破断試験	
3.1 試験片の製作	7
3.2 曲げ試験	7
3.3 内圧クリープ破断試験	8
4. まとめ	9
5. 参考文献	10

表目次

表 2.1-1 マルテンサイト系 ODS 鋼被覆管の化学成分	11
表 2.1-2 PNC-FMS 鋼端栓の化学成分	11
表 2.2 TIG 溶接条件	12
表 2.3 レーザー溶接による試験片製作条件	12
表 2.4 電子ビーム溶接による試験片製作条件	13
表 2.5 ろう付接合による試験片製作条件	13
表 2.6 TIG 溶接試験片の外径測定結果	14
表 2.7 レーザー、電子ビーム溶接試験片の外径測定結果	14
表 2.8 ろう付接合試験片の外径測定結果	15
表 2.9 TIG 溶接部断面の硬さ測定結果	16
表 2.10 レーザー溶接部、電子ビーム溶接部断面の硬さ測定結果	17
表 2.11-1 ろう付部縦断面の硬さ分布測定結果	18
表 2.11-2 ろう付部横断面の硬さ分布測定結果	18
表 2.12 引張試験結果	19
表 2.13 評価結果	20
表 3.1 内圧クリープ破断試験条件	21
表 3.2 内圧クリープ破断試験結果	21

図目次

図 2.1	引張試験片 (TIG 溶接)	22
図 2.2	引張試験片 (レーザー、電子ビーム溶接)	22
図 2.3	組織調査試験片 (TIG 溶接、レーザー、電子ビーム溶接)	22
図 2.4	ろう付接合部の構造	23
図 2.5	TIG 溶接部断面の硬さ分布	24
図 2.6	溶接部断面の硬さ分布	25
図 2.7	ろう付部縦断面の硬さ分布	26
図 2.8-1	TIG 溶接部の EPMA 線分析結果 (Fe, Ni, Mo, Cr, W)	27
図 2.8-2	TIG 溶接部の EPMA 線分析結果 (O, Nb, Y, Ti)	28
図 2.9-1	レーザー溶接部 (条件 1) の EPMA 線分析結果	29
図 2.9-2	レーザー溶接部 (条件 1) の EPMA 線分析結果 : 拡大	30
図 2.10-1	レーザー溶接部 (条件 2) の EPMA 線分析結果	31
図 2.10-2	レーザー溶接部 (条件 2) の EPMA 線分析結果 : 拡大	32
図 2.11	電子ビーム溶接部 (条件 1) の EPMA 線分析結果	33
図 2.12	電子ビーム溶接部 (条件 2) の EPMA 線分析結果	34
図 2.13	金ろう付接合部の EPMA 線分析結果	35
図 2.14-1	パラジウムろう付接合部 (ODS 側) の EPMA 線分析結果	36
図 2.14-2	パラジウムろう付接合部 (端栓側) の EPMA 線分析結果	37
図 2.14-3	パラジウムろう付接合部の EPMA 定量分析結果	38
図 2.15	ニッケルろう付接合部の EPMA 線分析結果	39
図 3.1	曲げ試験片	40
図 3.2	内圧クリープ破断試験片	40
図 3.3	内圧クリープ破断強度	41

写真目次

写真 2.1-1	TIG 溶接試験片の外観	42
写真 2.1-2	引張試験片 TIG 溶接部の外観	43
写真 2.2-1	レーザー溶接（条件 1）試験片の外観	44
写真 2.2.2	レーザー溶接（条件 2）試験片の外観	45
写真 2.2.3	レーザー溶接接合部の外観	46
写真 2.3-1	電子ビーム溶接（条件 1）試験片の外観	47
写真 2.3-2	電子ビーム溶接（条件 2）試験片の外観	48
写真 2.3-3	電子ビーム溶接接合部の外観	49
写真 2.4	金ろう（Au-4）接合試験片の外観	50
写真 2.5	パラジウムろう（BPd-11）接合試験片の外観	51
写真 2.6	ニッケルろう（BNi-5）接合試験片の外観	52
写真 2.7	ろう付接合部の外観	53
写真 2.8	TIG 溶接接合試験片縦断面の組織	54
写真 2.9-1	レーザー溶接（条件 1）試験片縦断面の組織	55
写真 2.9-2	レーザー溶接（条件 2）試験片縦断面の組織	56
写真 2.10-1	電子ビーム溶接（条件 1）試験片縦断面の組織	57
写真 2.10-2	電子ビーム溶接（条件 2）試験片縦断面の組織	58
写真 2.11-1	ろう付（金ろう：BAu-4）試験片縦断面の組織	59
写真 2.11-2	ろう付（金ろう：BAu-4）試験片横断面の組織	60
写真 2.12	ろう付（パラジウムろう：BPd-11）試験片縦断面の組織	61
写真 2.13-1	ろう付（ニッケルろう：BNi-5）試験片縦断面の組織	62
写真 2.13-2	ろう付（ニッケルろう：BNi-5）試験片横断面の組織	63
写真 2.14	破断後試験片の外観（TIG 溶接試験片）	64
写真 2.15-1	破断後試験片の外観（レーザー溶接試験片：条件 1）	65
写真 2.15-2	破断後試験片の外観（レーザー溶接試験片：条件 2）	66
写真 2.16-1	破断後試験片の外観（電子ビーム溶接試験片：条件 1）	67
写真 2.16-2	破断後試験片の外観（電子ビーム溶接試験片：条件 2）	68
写真 2.17	破断後試験片の外観（金ろう接合試験片）	69
写真 2.18	破断後試験片の外観（パラジウムろう接合試験片）	70
写真 2.19	破断後試験片の外観（ニッケルろう接合試験片）	71

写真 3.1	試験片の外観（溶接前）	72
写真 3.2	試験片の外観（TIG 溶接後）	73
写真 3.3	試験片の外観（レーザー溶接後）	74
写真 3.4-1	TIG 溶接試験片曲げ試験後の外観	75
写真 3.4-2	TIG 溶接試験片曲げ試験後の外観（溶接部拡大）	76
写真 3.5-1	レーザー溶接試験片曲げ試験後の外観	77
写真 3.5-2	レーザー溶接試験片曲げ試験後の外観（溶接部拡大）	78
写真 3.6	内圧クリープ破断後試験片の外観	79
写真 3.7	内圧クリープ破断後試験片の外観（レーザー溶接試験片の溶接破断部）	80

1. はじめに

酸化物分散強化型(Oxide Dispersion Strengthened ; ODS)フェライト鋼は、耐中性子照射性に優れたフェライト鋼中に酸化物(Y_2O_3)粒子を微細に分散させ高温強度を高めた材料であり、サイクル機構が開発した実用化用被覆管材料である。しかし、ウラン-プルトニウム混合酸化物燃料を燃料要素内に密封するための溶接作業において、融接法を用いると溶接金属部に微細な空孔を多数形成し、その空孔内部及び溶接ビード部に酸化物が凝集し、機械的強度が低下するため¹⁾、TIG 溶接法等の融接法に代わる溶接技術の開発が必要となり、固相接合に近い状態で溶接が行える抵抗溶接法の開発を行っている^{2)~4)}。

一方、サイクル機構では、ODS 鋼被覆管の高燃焼度燃料への適用性を早急に見極めることを目的として、早期の照射開始と燃料ピン照射の可能なロシアの高速炉 (BOR-60) を用いた照射試験を計画している。この場合の ODS 鋼被覆管と端栓の溶接方法としては TIG 溶接あるいはレーザー溶接が行われると考えられる。

本研究では、被覆管と端栓の溶接方法としてロシアにて行われると考えられる TIG 溶接及びレーザー溶接に加え、電子ビーム溶接、内圧クリープ破断試験で実績のあるろう付拡散接合を行い、溶接接合部の組織調査及び引張試験を実施して、溶接部の強度レベルを評価した。また、現状の燃料製造設備において適用可能なレーザー溶接法と TIG 溶接法について、曲げ、内圧クリープ破断強度を調査した。

2. 各種溶接接合材の強度評価

2.1 接合材料

供試材には、外径 $\phi 8.5 \times$ 肉厚 0.5^1 のマルテンサイト系 ODS 鋼被覆管(M11;0.13C-9Cr-2W-0.2Ti-0.35Y₂O₃)と PNC-FMS 鋼端栓(0.12C-11Cr-0.5Mo-2W-0.2V-0.05Nb)を用いた。ODS 鋼被覆管及び PNC-FMS 鋼端栓の化学成分を表 2.1 に示す。

2.2 試験片の製作

2.2.1 溶接接合方法

(1)TIG 溶接

ODS 鋼被覆管と PNC-FMS 鋼端栓を用いて、図 2.1 に示す長さ 75mm の被覆管両端にネジ継手を TIG 溶接した引張試験片を製作した。また、組織調査用に図 2.3 に示す端尺試料を製作した。TIG 溶接条件は、事前検討を行い溶接欠陥の発生しない条件を選定した。表 2.2 に選定した溶接条件を示す。

(2)レーザー溶接

図 2.2 に示す引張試験片と図 2.3 に示す組織調査用試験片を製作した。パルス型 YAG レーザーにより、表 2.3 に示すように事前に溶接条件を検討した。溶け込み不足とポロシティ発生の中間のエネルギー条件を最適エネルギーとし、2 条件にて試験片を製作した。

(3)電子ビーム溶接

図 2.2 に示す引張試験片と図 2.3 に示す組織調査用試験片を製作した。溶接条件を表 2.4 に示す。被覆管の肉厚 0.5mm に相当する溶け込み深さを達成する条件（エネルギー密度を最小にして入熱を極力抑えた条件）とそれよりやや深い溶け込み深さを得る 2 条件とした。

(4)ろう付接合

図 2.4 に示す形状にて ODS 鋼被覆管と PNC-FMS 鋼端栓部のろう付接合を行った。接合用ろう材として、金ろう (Au-4)、パラジウムろう (BPd-4)及びニッケルろう (BNi-5) の 3 種類を検討した。ろう付条件を表 2.5 に示す。

2.2.2 溶接後熱処理

接合試験片は、真空炉にて $780^{\circ}\text{C} \times 60\text{min} \cdot \text{FC}$ (真空度; $7 \times 10^{-5}\text{torr}$)の後熱処理を実施した。

2.3 検査及び評価試験

(1)外観検査

接合部に異常がないことを目視により調べた。

(2)外径測定

引張試験片全数について、接合部の外径をマイクロメータにより測定した。

(3)組織調査

組織調査用試料を縦方向半分に切断し、接合部断面の組織を光学顕微鏡により観察した（倍率 100 及び 400 倍）。なお、ろう付試験片についてはろう付部横断面についても観察を行った。

(4)硬さ測定

接合部の縦断面、被覆管肉厚の中心部における硬さ分布をマイクロビッカース硬度計（HV300gf）により測定した。

(5)EPMA 線分析

接合部断面における元素（Fe, Cr, Ni, W 及びろう材成分）の濃度分布を EPMA 線分析により調べた。

(6)引張試験

試験方法は JIS に準拠し、室温、400, 700, 800℃にて引張速度 0.5%/min 目標（試験片長さ 100mm とし、クロスヘッド速度を 0.5mm/min に調整した。但し TIG 溶接試験片のみ GL=75mm）で最大荷重、破断位置、試験温度、破断伸び（参考値）、破断後の試験片外観を測定した。試験機は 250kN オートグラフを用いた。

2.4 検査・試験結果

(1) 外観検査

TIG 溶接試験片の外観を写真 2.1-1 に示す。また、代表的な TIG 溶接引張試験片の溶接部の外観を写真 2.1-2 に示す。溶接部に欠陥は認められなかった。

レーザー溶接及び電子ビーム溶接試験片の外観を写真 2.2-1, 2.2-2, 2.3-1, 2.3-2 に示す。また、溶接部外面をビデオマクロスコープにより拡大観察した結果を写真 2.2-3, 2.3-3 に示す。電子ビーム溶接部のビードは滑らかであるが、レーザー溶接はパルス型であるため波目状のビードとなっている。

金ろう付接合試験片の外観を写真 2.4 に示す。ろう付部は片端のみとした。ろう付は真空中で行われているが、接合部は表面酸化の痕跡が認められる。パラジウムろう付接合試験片の外観及びニッケルろう付接合試験片の外観をそれぞれ写真 2.5 及び 2.6 に示す。各ろう付接合部（図 2.4 に示した被覆管と端栓の間隔 1mm の隙間部でろう材粉末を充填した部分）をビデオマクロスコープにより上から拡大観察した結果を写真 2.7 に示す。何れのろう材でも、この隙間部にはろう材が充填されていることが確認された。

(2)外径測定

被覆管溶接部の寸法測定結果を表 2.6～2.8 に示す。TIG 溶接試験片の外径は 8.50～8.53mm 程度であり、溶接部の外径はこれよりやや大きめとなっていた。

レーザー溶接、電子ビーム溶接試験片の場合は、すべてビード部の径は被覆管径より大きくなったが、+0.2mm を超えるものはなかった。

ろう付の場合は端栓材が被覆管に被さる形状であるため、接合部の寸法は測定できない。

接合根元部で被覆管の変形有無を確認するため、根元部と接合部から離れた被覆管の径を測定した。根元部で径がやや大きくなる試験片もあったが、大きな変形は認められなかった。

(3)組織調査

溶接部縦横断面の組織を光学顕微鏡にて観察した。TIG 溶接部縦断面の組織を写真 2.8 に示す。溶け込み深さは約 0.9mm 程度であり、溶融部の幅は約 4mm と大きい。溶融部にはやや大きいポロシティが観察された。

レーザー溶接部縦断面の組織を写真 2.9 に示す。条件 1 の溶け込み深さは約 0.56mm、条件 2 では約 0.64mm 程度である。

電子ビーム溶接部の縦断面の組織を写真 2.10 に示す。条件 1（溶け込み深さを被覆管厚さ程度とした条件）の溶融部にはポロシティの形成がみられる。条件 2（溶け込み深さを条件 1 より大きくした条件）の溶け込み深さは 0.8mm 程度で、溶け込み深さの増加に伴って溶融部の幅も大きくなっている。電子ビーム溶接材の溶融部の幅はレーザー溶接の場合に比べるとかなり大きい。

金ろう付接合部縦断面の組織を写真 2.11-1、横断面の組織を写真 2.11-2 に示す。ろう材は被覆管と端栓のはめ合い部分 10mm に対し、約 1/4 程度しか充填されていない。ろう粉末充填部では、ろう材と端栓材、被覆管材との反応部が認められる。被覆管に若干の変形が見られる。ろう材が充填された隙間部ではごく小さいポロシティが少量認められるが、剥離等の大きな欠陥はない。

パラジウムろう付接合部縦断面の組織を写真 2.12 に示す。ろう材は粉末充填部にて溶融しただけで、隙間部には全く回り込んでいない。溶融ろう材と端栓、被覆管材との反応は認められない。

ニッケルろう付接合部縦断面の組織を写真 2.13-1、横断面の組織を写真 2.13-2 に示す。金ろうの場合と同じく、ろう材は被覆管と端栓のはめ合い部分 10mm に対し約 1/4 程度しか充填されていない。ろう粉末充填部では金ろうの場合より程度は小さいが、ろう材と端栓材、被覆管材との反応部が認められ被覆管に若干の変形が見られる。ろう材が充填された隙間部では、やや大きいポロシティが認められる。剥離等の大きな欠陥はない。

(4)硬さ測定

TIG 溶接部縦断面の硬さ測定結果を表 2.9、図 2.5 に示す。ODS 鋼被覆管母材の硬さは HV370 程度であり、FMS 鋼端栓母材の硬さは HV230 程度である。溶融部の硬さは HV220 ~HV320 の範囲で、ODS 鋼側の硬さが低く端栓側の硬さがやや高くなっている。

レーザー溶接部及び電子ビーム溶接部縦断面の硬さ測定結果を表 2.10 及び図 2.6 に示す。後熱処理によって、溶接方法、溶接条件による大きな差はみられないが、電子ビーム溶接の場合は溶融部の硬さがやや高く、熱影響部の硬さがやや低くなる傾向が認められる。

ろう付部縦断面における硬さ測定結果を表 2.11-1 及び図 2.7 に、横断面における硬さ測定

結果を表 2.11-2 に示す。端栓材の硬さは HV260 程度、被覆管は HV400 程度の硬さを示した。縦断面では被覆管肉厚中央部の硬さを測定したが、ろう付による影響はみられなかった。これは、接合後に $780^{\circ}\text{C} \times 60\text{min}$ の後熱処理を施したためと考えられる。

(5) EPMA 線分析

TIG 溶接部縦断面の厚さ中央部にて軸方向に元素 (Fe, Cr, Ni, Mo, Nb, W, Ti, Y, O) の濃度分布を EPMA 線分析によって求めた。測定結果を図 2.8 に示す。Cr, Mo, Ni 濃度は PNC-FMS 鋼端栓が高く、溶融部では希釈により ODS 鋼と中間的な濃度になっている。Ti, Y, O 濃度は ODS 鋼被覆管側で高く、被覆管側溶接境界部で Y, Ti, O のピークが認められる。この部分では ODS 鋼の溶融によって酸化物の凝集が生じた可能性が窺える。ポロシティも ODS 鋼被覆管側の溶融部に生成している。

レーザ溶接部断面における Fe, Cr, Ni, W の濃度分布を図 2.9, 2.10 に示す。また、電子ビーム溶接部断面における濃度分布を図 2.11, 2.12 に示す。溶融部では、各元素は ODS 鋼被覆管と PNC-FMS 鋼端栓材の平均的な濃度を示す。

金ろう付接合部断面における Fe, Cr, Ni, W, Au の EPMA 線分析による濃度分布測定結果を図 2.13 に示す。被覆管と端栓の隙間充填部について調査した。ろう材 Au-4 には Au, Ni が含まれている。ろう材中心部では Au 濃度が高く、その両側で Ni 濃度が高くなっている。被覆管、端栓との境界部では Fe, Cr 濃度に勾配がみられ、ろう材との反応が推定される。

パラジウムろう付接合部断面における各種元素の濃度分布を図 2.14 に示す。このろう付では、被覆管と端栓の隙間部へのろう材の充填がなかったため、ろう材粉末充填部における境界を調べた。図 2.14-3 にパラジウムろう付接合部の EPMA 定量分析結果を示す。パラジウムろう材には、Pd, Ag, Cu が含まれる。被覆管、端栓とろう材の境界における Fe, Cr の濃度勾配は小さく、ろう材との反応はほとんどないと思われる。

ニッケルろう付接合部断面における各種元素の濃度分布を図 2.15 に示す。ろう材 BNi-5 には、Ni, Cr, Si が含まれる。被覆管、端栓との境界部では、金ろうの場合ほどではないが、Fe, Cr 濃度に若干の勾配がみられ、ろう材との反応が推定される。

(6) 引張試験

各溶接接合試験片の引張試験結果を表 2.12 に示す。また、破断後の試験片の外観を写真 2.14~2.19 に示す。

TIG 溶接試験片は、全試験片が耐力測定までに破断した。引張り強さは、ODS 鋼被覆管母材の強度の 53~63% の範囲であった。破断箇所は、写真 2.14 に示すようにすべて被覆管側溶接境界部付近であった。破断箇所はポロシティの生成する領域と推定される。

レーザ溶接試験片の場合は、溶け込み深さのやや大きい条件(条件 2)の方が高い破断強度、すなわち母材強度の 90% 以上の強度を示した。

電子ビーム溶接試験片の場合は、すべて溶接部破断となった。溶融部の幅が大きくなる条

件(条件 2)の方がやや低い強度となり、母材強度の 67%以上の強度を示した。電子ビーム溶接の場合は、レーザー溶接と比べるとエネルギー密度が低く、溶融部の幅もかなり広くなり、ポロシティ形成が多いためと考えられる。

金ろう付接合試験片では、試験した全温度で接合部の付け根近傍、即ち断面組織でみられたろう材と被覆管の反応部で破断した。しかし、室温の破断強度は母材の引張強さと同等であり、高温でも母材の引張強さの 82%以上の強度を示した。ろう付条件の改善によってはさらに高強度が期待できる。

パラジウムろう付接合試験片では、被覆管と端栓の隙間部へのろう材の充填が全くみられなかったため、高温では接合部が抜ける破断形態となり母材強度の半分程度の強度となった。しかし、室温ではろう付部が極めて狭い範囲であったにもかかわらず、母材強度の 94%に相当する強度を示した。

ニッケルろう付接合試験片では、室温、700℃では接合部の付け根近傍での破断、400,800℃では母材部での破断となり、母材強度の 84%以上の強度を示した。800℃では、接合部の付け根から数 mm 離れた母材部にて破断したが、その強度は低く原因については不明である。試験数を増やした検討が必要である。ニッケルろうは内圧クリープ破断試験片の接合にも用いており、ろう付の中では最も適用性は高いと考えられる。

2.5 各種溶接接合法の評価

表 2.13 に各種溶接接合法の評価結果を示す。溶接法の中では、エネルギー密度の最も高いレーザー溶接試験片が優れた強度（母材強度の 90%以上）を示した。電子ビーム溶接の場合は、溶融部の幅がレーザー溶接の場合より大きくなり、溶融部中にはポロシティが形成され、引張試験ではすべて溶接部破断となった。電子ビーム溶接、レーザー溶接法の場合に比べて、TIG 溶接の溶融部は最も大きく、形成されるポロシティのサイズも最も大きかった。このため溶接部に直角方向の引張試験では、常高温ともすべて溶接部破断となり、最も低い強度を示した。また、伸びが悪いという問題点が明らかとなった。

ろう材では、ニッケルろう付が最も優れた強度（母材強度の 84%以上）を示し、次いで金ろう付、パラジウムろう付の順であった。今回の試験のろう付は最適条件ではなく、充填部長さが目標より短くなる試験片であった。以下の改善により、さらにろう付による接合性能の向上が期待できる。

- ・ ろう付装置の真空雰囲気の改善
- ・ 接合部均一加熱のための高周波コイルの改善
- ・ 接合部均一加熱のための接合形状の改善

以上の試験結果から、溶接法の中ではレーザー溶接の適用性が、また、ろう材の中ではニッケルろうの適用性が最も高いと判断される。

3. 曲げ・内圧クリープ破断試験

各種溶接接合材の強度評価結果より、最も適用性が高いと考えられるのはレーザー溶接であった。また、最も劣っていたのは汎用の溶接法である TIG 溶接であったが、それでも引張強さは母材強度の 50%以上であった。この 2 種について、実用時に必要となる曲げ、内圧クリープ破断特性を調査した。なお、最も優れた接合性能を示したニッケルろう付法は、すでに内圧クリープ破断試験にて耐久性が実証されている。

3.1 試験片の製作

レーザー溶接条件は、表 2.3 に示す条件 2 を用いた。TIG 溶接条件は表 2.2 の条件とした。曲げ試験片は、図 3.1 に示す全長 120mm の形状とし、ODS 鋼被覆管長さは 60mm とした。曲げ試験時に被覆管の扁平を防止するため被覆管部には PNC-FMS 鋼の中子を挿入した。

内圧クリープ破断試験片は、図 3.2 に示すように ODS 鋼被覆管長さを 90mm とし、片端に PNC-FMS 鋼端栓、他端に ONC-FMS 鋼圧力導入管接合継手を溶接した。溶接後、真空中にて $780^{\circ}\text{C} \times 1\text{h} \cdot \text{FC}$ の後熱処理を行った。溶接組立前の PNC-FMS 鋼部品及び ODS 鋼被覆管の外観を写真 3.1 に、TIG 溶接後試験片の外観を写真 3.2、レーザー溶接後試験片の外観を写真 3.3 に示す。

3.2 曲げ試験

3.2.1 試験方法

押曲げ法（JIS Z 2248 に準拠）にて試験を行った。試験条件は、試験片の厚さ t を被覆管の外径 8.5mm とし、押し金具の半径 $R=2t \div 18\text{mm}$ 、支え間距離 $L=2R+2t+3=56\text{mm}$ 、支えの半径 $r=10\text{mm}$ とした。また、押し金具の位置は、接合部から 10mm 端栓側とした。試験は室温にて実施し、接合部において亀裂の発生する角度を測定した。

3.2.2 結果

TIG 溶接試験片は、押し金具の押し込み量約 11mm にて溶接部に亀裂が発生した。レーザー溶接試験片は、押し金具の押し込み量約 12mm にて溶接部に亀裂が発生した。押し込み量 11~12mm 程度は曲げ角度で約 50° に相当する。試験後の試験片外観を写真 3.4, 3.5 に示す。スプリングバック後の試験片の曲げ角度は TIG 溶接試験片で約 48.44° であり、レーザー溶接法で亀裂発生角度にほとんど差はないと考えられる。亀裂発生位置は、TIG 溶接の場合は被覆管の溶接境界部、レーザー溶接の場合は溶融部のほぼ中央部であった。

3.3 内圧クリープ破断試験

3.2.1 試験方法

試験は、700℃で目標破断時間 100,1000h とした。試験条件を表 3.1 に示す。設定応力は、フープ応力 180,150MPa を設定した。破断後に、破断位置、破断伸び（外径ふくれ率）を測定した。

3.2.2 結果

表 3.2 に試験結果を示す。また、内圧クリープ破断試験後試験片の外観を写真 3.6 に示す。高応力側（フープ応力 180MPa）の試験片は母材よりやや短い時間で破断した。TIG、レーザー溶接試験片とも破断位置は端栓側の母材部（被覆管部）であった。TIG 溶接試験片の場合は、溶接境界部から数 mm 離れた位置であり、溶接熱影響部である可能性がある。レーザー溶接試験片の場合は、溶接境界部から約 20mm 離れた位置であった。

低応力側（フープ応力 150MPa）の試験片は母材より大幅に短い時間で破断した。破断位置は、TIG 溶接試験片の場合は圧力管側の溶接部、レーザー溶接試験片の場合は端栓側の溶接部であった。破断位置は常温にて試験片を加圧し、石鹼水塗布・バブルテストで確認したが、写真 3.7 に示すように外観の目視観察では溶接部の破断位置は識別できなかった。

内圧から平均径の式により算出したフープ応力と破断時間の関係を図 3.3 に示す。図には M11 被覆管のクリープ破断強度（母材部にて破断）も併せて示した。内圧クリープ破断強度は、M11 被覆管母材、レーザー溶接材、TIG 溶接材の順に小さくなっている。

4. まとめ

ODS 鋼被覆管の端栓接合方法として、TIG 溶接法、レーザー溶接法、電子ビーム溶接法、ろう付拡散接合法 3 種（金ろう、パラジウムろう、ニッケルろう）の適用性を評価した。また、現状の燃料製造設備において適用可能なレーザー溶接法と TIG 溶接法を選定し、曲げ、内圧クリープ破断試験を行い、以下の結論を得た。

- (1) 溶接法の中では、エネルギー密度の最も高いレーザー溶接試験片が優れた強度（母材強度の 90%以上）を示した。
- (2) 電子ビーム溶接の場合は、溶融部の幅がレーザー溶接の場合より大きくなり、溶融部中にはポロシティが形成され、引張試験ではすべて溶接部破断となった。
- (3) TIG 溶接の場合、レーザー、電子ビーム溶接に比べてエネルギー密度が低く、入熱量が大きくなり同程度の溶け込み量に対して溶融部の幅が最も大きくなった（約 4mm）。漏洩に至る割れ、欠陥はないが ODS 鋼被覆管近傍の溶融部には比較的大きいポロシティ（粒径 0.2mm 程度）が認められ、EPMA 分析では、この領域に Y,Ti,O のピークが認められたことから酸化物が凝集した可能性が示唆された。軸方向引張試験の結果、耐力測定までに溶接部破断を生じたが、母材強度の 53%以上の強度を示した。伸びは認められなかった。
- (4) ろう材では、ニッケルろう付が最も優れた強度（母材強度の 84%以上）を示し、次いで金ろう付、パラジウムろう付の順であった。
- (5) 曲げ試験では、レーザー、TIG 溶接試験片とも曲げ角度約 50° で溶接部周方向にき裂が発生した。
- (6) 700°Cにおける内圧クリープ破断試験では、レーザー、TIG 溶接試験片とも高応力側では母材部破断であったが、低応力側では溶接部破断となった。

代替溶接法としては、溶接法の中ではレーザー溶接、ろう付法の中ではニッケルろうの適用性が最も高いと考えられる。

5. 参考文献

- 1) 長井修一郎,上村勝一郎,他:"酸化物分散強化型フェライト鋼材の溶接試験(2)(MA957 被覆管形状の模擬による溶接試験)",TN8410 91-174(1991)
- 2) 遠藤秀男,関正之,他:"抵抗溶接試験結果報告(基本特性把握試験結果 その2)",TN8430 2000-002(1999)
- 3) 遠藤秀男,関正之,他:"抵抗溶接法の開発(3)(ODS 鋼強度評価用試験片の製作)",TN8410 2000-007(2000)
- 4) 遠藤秀男,関正之,他:"抵抗溶接法の開発(4)(7A 材内圧封入型クリープ試験片の製作)",TN8410 2001-004(2001)

表 2.1-1 マルテンサイト系 ODS 鋼被覆管の化学成分 (wt%)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	W	Ti	Y	Y ₂ O ₃ ^{*1)}	O	Ex.O ^{*2)}	N	Ar
M11	0.12	0.05	0.044	0.002	0.002	0.023	9.02	1.94	0.21	0.27	0.34	0.17	0.10	0.011	0.0026

*1)Y₂O₃=1.27Y

*2)Ex.O=Total O-0.27Y

表 2.1-2 PNC-FMS 鋼端栓の化学成分 (wt%)

	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	W	V	Nb	N
PNC-FMS 鋼	0.15	0.039	0.80	0.50	10.52	0.40	1.81	0.20	0.049	0.072

表 2.2 TIG 溶接条件

項目	溶接条件
電極	φ 1.6mm
シールドガス	アルゴンガス
ガス流量	6.0 ℓ/min
電流値	40Amp
電圧	20V
溶接速度	120mm/min
加工時間	13.5sec

表 2.3 レーザー溶接による試験片製作条件

溶接条件	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
パルス幅(ms)	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5
周波数(Hz)	10	10	10	10	10	10	10	10
エネルギー(J/P)	5	5.5	6.4	7	8	10	12	14
焦点位置	± 0.0mm	± 0.0mm	± 0.0mm	± 0.0mm	± 0.0mm	± 0.0mm	± 0.0mm	± 0.0mm
ガス種類	Ar	Ar	Ar	Ar	Ar	Ar	Ar	Ar
ガス圧(kg/mm ²)	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
ガス流量(l/min)	30	30	30	30	30	30	30	30
加工速度	F92	F100	F125	F125	F125	F125	F140	F140
溶け込み深さ(mm)	0.4	0.55	0.6	0.7	0.75	0.86	0.9	1.04
溶融部の状態	溶け込 み不足	良好	良好	良好	ホロシテ 発生	ホロシテ イ、スパッ タ発生	ホロシテ イ、スパッ タ発生	ホロシテ イ、スパッ タ発生
溶け込み深さ測定値 (mm)		0.6	0.7					
ビード幅測定値(mm)		0.7	1.0					
選定条件		条件 1	条件 2					

使用加工機：住友重機械工業株式会社製 JK701 (YAG レーザ)

定格出力：400W

表 2.4 電子ビーム溶接による試験片製作条件

溶接条件	条件 1 (目標溶接深さ 0.6mm)	条件 2 (目標溶接深さ 1.0mm)
加速電圧(kV)	70	70
ビーム電流(mA)	3	5
レンズ電流(mA)	580	580
溶接速度(mm/min)	1000	1000
メータ速度(mm/min)	400	400
加工時間(sec)	1.6	1.6
真空度(Torr)	3×10^{-4}	3×10^{-4}
溶け込み深さ測定値(mm)	0.5	0.8
ビード幅測定値(mm)	1.2	1.8

表 2.5 ろう付接合による試験片製作条件

ろう付の種類	金ろう Au-4 82Au-18Ni	パラジウムろう BPb-4 15Pd-65Ag-20Cu	ニッケルろう BNi-5 71Ni-19Cr-10Si
ろう付温度 (°C)	950/1005	950/1050	1150/1205

表 2.6 TIG 溶接試験片の外径測定結果 (mm)

溶接法	試験片 番号	溶接部①		溶接部②	
		1	2	3	4
TIG 溶接	T-1	8.551	8.564	8.549	8.549
	T-2	8.541	8.559	8.554	8.564
	T-3	8.544	8.560	8.543	8.599
	T-4	8.522	8.539	8.554	8.600
	T-5	8.516	8.569	8.536	8.577
	T-6	8.566	8.586	8.539	8.567
	T-7	8.529	8.557	8.549	8.577

表 2.7 レーザー、電子ビーム溶接試験片の外径測定結果 (mm)

溶接法	試験片 番号	溶接部①		溶接部②	
		1	2	3	4
レーザー溶接 条件 1	L1-1	8.513	8.514	8.524	8.533
	L1-2	8.515	8.516	8.507	8.508
	L1-3	8.521	8.518	8.514	8.519
	L1-4	8.520	8.521	8.526	8.512
	L1-5	8.520	8.518	8.520	8.520
レーザー溶接 条件 2	L2-1	8.541	8.547	8.552	8.542
	L2-2	8.560	8.546	8.527	8.536
	L2-3	8.540	8.533	8.536	8.549
	L2-4	8.528	8.523	8.579	8.524
	L2-5	8.517	8.544	8.519	8.536
EB 溶接 条件 1	E1-1	8.531	8.545	8.532	8.528
	E1-2	8.642	8.579	8.529	8.563
	E1-3	8.564	8.543	8.534	8.529
	E1-4	8.535	8.577	8.622	8.613
	E1-5	8.603	8.580	8.620	8.623
EB 溶接 条件 2	E2-1	8.533	8.534	8.543	8.545
	E2-2	8.558	8.522	8.516	8.527
	E2-3	8.547	8.520	8.541	8.551
	E2-4	8.520	8.527	8.542	8.536
	E2-5	8.521	8.554	8.520	8.513

表 2.8 ろう付接合試験片の外径測定結果 (mm)

ろう種類	試験片 番号	ろう付根元部		被覆管側	
		1	2	3	4
金ろう Au-4	A1	8.504	8.505	8.500	8.501
	A2	8.500	8.501	8.501	8.496
	A3	8.500	8.504	8.500	8.498
	A4	8.506	8.506	8.502	8.504
	A5	8.505	8.502	8.493	8.494
パラジウムろう BPd-11	P1	8.505	8.507	8.502	8.501
	P2	8.508	8.505	8.502	8.508
	P3	接合不良			
	P4	8.509	8.505	8.505	8.504
	P5	8.507	8.514	8.505	8.506
ニッケルろう BNi-5	N1	8.549	8.547	8.501	8.500
	N2	8.673	8.641	8.506	8.502
	N3	8.526	8.516	8.505	8.504
	N4	8.503	8.517	8.507	8.501
	N5	8.514	8.502	8.500	8.496

表 2.9 TIG 溶接部断面の硬さ測定結果

(HV)

	測定位置	TIG 溶接部	備考
被覆管側 0.5mm ↑ ピッチ	7	373	
	6.5	378	
	6	378	
	5.5	380	
	5	376	
	4.5	376	
	4	385	
	3.5	378	
	3	378	
	2.5	376	
	2	378	
	1.5	361	
	1	369	
	0.5	366	
境界	0	308	
0.5mm ↓ 溶融部	0.5	226	ポロシティ生成部
	1	244	ポロシティ生成部
	1.5	296	
	2	306	
	2.5	302	
	3	322	
	3.5	304	
↓ 端栓側	4	243	
	4.5	229	
	5	231	

荷重 : 300gf

表 2.10 レーザー溶接部、電子ビーム溶接部断面の硬さ測定結果 (HV)

	測定位置	レーザ 条件 1	レーザ 条件 2	電子ビーム 条件 1	電子ビーム 条件 2
被覆管側 ↑ 0.5mm ピッチ	7	412	407	407	400
	6.5	422	416	421	404
	6	414	422	414	406
	5.5	415	413	416	392
	5	421	419	407	406
	4.5	416	416	410	407
	4	421	426	410	414
	3.5	411	411	420	421
	3	421	407	416	416
	2.5	422	409	405	413
	2	418	410	419	418
	1.5	426	413	420	395
	1	418	425	423	404
	0.5	425	426	419	412
境界	0	312	283	251	279
↓ 0.5mm ピッチ 端栓側	0.5	256	267	277	303
	1	275	266	283	295
	1.5	265	268	260	248
	2	266	261	265	251
	2.5	256	262	262	274
	3	261	266	269	277
	3.5	269	268	270	264
	4	257	271	266	268
	4.5	262	263	267	263
	5	264	258	272	263

荷重 : 300gf

表 2.11-1 ろう付部縦断面の硬さ分布測定結果 (HV)

	測定位置 (mm)	Au	Ni	Pd
端栓 ↑ 1mm ピッチ	4	268	275	
	3	263	268	265
	2	260	268	257
	1	260	250	258
被覆管 ↓ 1mm ピッチ	1	420	412	420
	2	407	398	405
	3	413	412	404
	4	418	412	401
	5	416	411	419
	6	410	420	425
	7	404	414	415
	8	420	402	420
	9	395	413	403
	10	387	407	412
	11	397	399	422
	12	418	409	414
	13	415	411	423
	14	401	420	426
	15	416	404	429
	16	412	433	406

荷重 : 300gf

表 2.11-2 ろう付部横断面の硬さ測定結果 (HV)

測定位置(mm)	Au	Ni	Pd
ODS 管内面近傍	422	415	425
ODS 管中心	433	421	427
ODS 管接合部近傍	406	423	410
端栓接合部近傍	265	272	256
端栓中心	264	271	266

荷重 : 300gf

表2.12 引張試験結果

試験片種別	試験片番号	試験温度 (°C)	試験片寸法			0.2%耐力 ^{*1)}		引張強さ		伸び (%)	破断位置	母材強度に 対する比
			径(mm)	厚さ(mm)	断面積(mm ²)	(N)	(N/mm ²)	(N)	(N/mm ²)			
TIG溶接	T-1	RT	8.5	0.5	12.56	—	—	8775	699	0	溶接部 ^{*2)}	0.57
	T-2	RT				—	—	8200	653	0	溶接部 ^{*2)}	0.53
	T-3	400				—	—	6550	521	0	溶接部 ^{*2)}	0.54
	T-4	400				—	—	6400	510	0	溶接部 ^{*2)}	0.53
	T-5	700				—	—	3050	243	0	溶接部 ^{*2)}	0.63
	T-6	700				—	—	3025	241	0	溶接部 ^{*2)}	0.62
レーザー溶接 (条件1)	L1-1	RT	8.5	0.5	12.56	14750	1174	14950	1190	0.6	溶接部	0.96
	L1-2	400				—	—	9175	730	0	溶接部	0.75
	L1-3	700				3775	301	4800	382	15.4	母材A	0.98
	L1-4	800				2650	211	3295	262	2.7	溶接部	
レーザー溶接 (条件2)	L2-1	RT	8.5	0.5	12.56	14750	1174	15525	1236	6.9	母材A	1.00
	L2-2	400				—	—	10900	868	0.7	溶接部	0.90
	L2-3	700				3775	301	4875	388	16.6	母材A	1.00
	L2-4	800				—	—	2560	204	0.6	溶接部	
電子ビーム溶接 (条件1)	E1-1	RT	8.5	0.5	12.56	—	—	11200	892	0	溶接部	0.72
	E1-2	400				—	—	8900	709	0	溶接部	0.73
	E1-3	700				—	—	3750	299	0	溶接部	0.77
	E1-4	800				2570	205	2700	215	0.9	溶接部	
電子ビーム溶接 (条件2)	E2-1	RT	8.5	0.5	12.56	—	—	11050	880	0	溶接部	0.71
	E2-2	400				—	—	8150	649	0	溶接部	0.67
	E2-3	700				3650	291	4450	354	1.3	溶接部	0.91
	E2-4	800				—	—	2360	188	0.5	溶接部	
金ろう付	A-1	RT	8.5	0.5	12.56			15575	1240	—	接合部	1.00
	A-2	400						12075	961	1.6	接合部	0.99
	A-3	700						4000	318	2.4	接合部	0.82
	A-4	800						2775	221	2.5	接合部	
パラジウムろう付	P-1	RT	8.5	0.5	12.56			14650	1166	0	チャック部	0.94
	P-2	400						5475	436	0	接合部抜け	0.45
	P-4	700						2862	228	1.9	接合部抜け	0.59
	P-5	800						1930	154	2.2	接合部抜け	
ニッケルろう付	N-1	RT	8.5	0.5	12.56			15300	1218	0.6	接合部	0.99
	N-2	400						12175	969	5.3	母材A	1.00
	N-3	700						4100	326	3.6	接合部	0.84
	N-4	800						1662	132	2.4	母材C	

*1) 0.2%耐力は参考値；—は耐力測定前に破断。ろう付接合試験片は形状から測定不可。

*2) 溶融金属部近傍のODS管側から破断

表 2.13 評価結果

接合方法	接合部の状態	引張試験結果	評価
TIG 溶接	ポロシティは大きい 融合部の幅は極めて大きい	すべて溶接部破断 強度は母材の 53%以上	ポロシティの発生 溶融部の幅が極めて大きい
レーザー溶接	ポロシティは小さい 溶融部の表面に凹み発生 溶融部の幅は狭い	溶接部または母材から破断 強度は母材の 75%以上 条件によっては 90%以上	溶け込みは深いほうが良好
電子ビーム溶接	ポロシティ発生 溶融部形状は良好	すべて溶接部破断 強度は母材の 67%以上	ポロシティの発生 溶融部の幅がやや大きい
金ろう付	拡散層大（反応部大） ろう融合部：目標の 1/4 程度 欠陥は少ない	接合部（拡散層）にて破断 強度は母材に近い(82%以上)	ろう付条件 隙間へのまわり不良 (クリープ破断)
パラジウムろう付	拡散層極めて小 隙間部への融合なし	接合部から抜ける	ろう材選定ミス 条件不良
ニッケルろう付	拡散層小 ろう融合部：目標の 1/4 程度 欠陥多い	接合部と母材から破断 強度は母材の 84%以上	ろう付条件 隙間へのまわり不良 ろう付法では最も良好

表 3.1 内圧クリープ破断試験条件

試験片 No.	外径 (mm)	肉厚 (mm)	試験温度 (°C)	目標破断 時間(h)	応力 (MPa)	試験圧力 (kgf/cm ²)
TIG 試験片 1	8.50	0.5	700	100	180	229
TIG 試験片 2	8.50	0.5	700	1000	150	191
レーザ 試験片 1	8.50	0.5	700	100	180	229
レーザ 試験片 2	8.50	0.5	700	1000	150	191

表 3.2 内圧クリープ破断試験結果

試験片 No.	目標破断 時間(h)	応力 (MPa)	破断時間 (h)	破断位置	破断 形態	最大外径 ふくれ(%)
TIG 試験片 1	100	180	24.5	先端寄り母材	F	0.235
TIG 試験片 2	1000	150	42.0	圧力管側溶接部	-	0.274
レーザ 試験片 1	100	180	39.8	先端寄り母材	F	0.411
レーザ 試験片 2	1000	150	137.6	先端溶接部	-	0.270

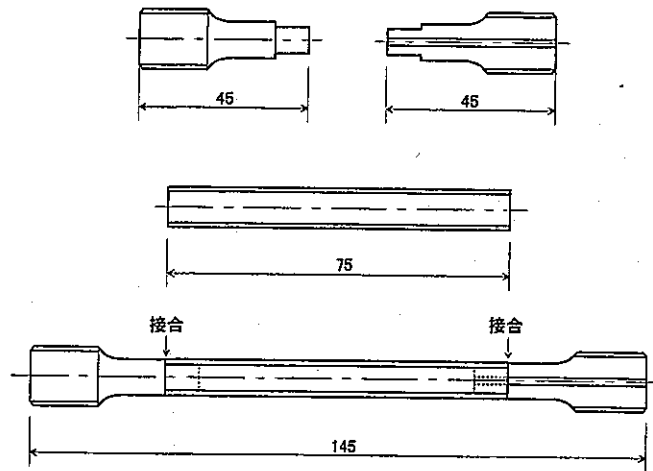


図 2.1 引張試験片 (TIG 溶接)

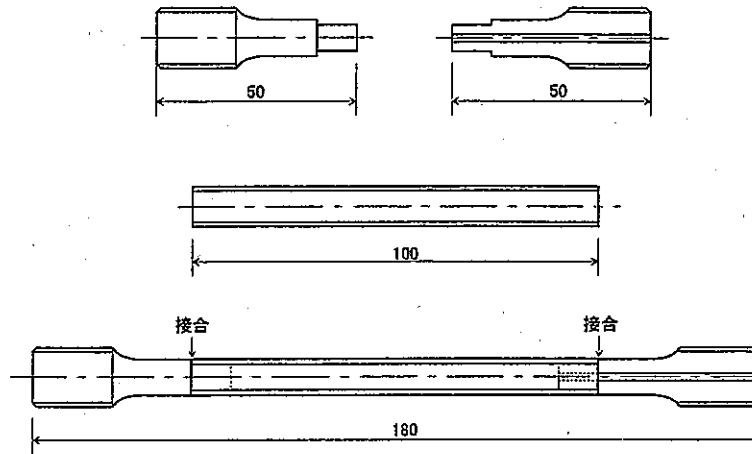


図 2.2 引張試験片 (レーザー、電子ビーム溶接)

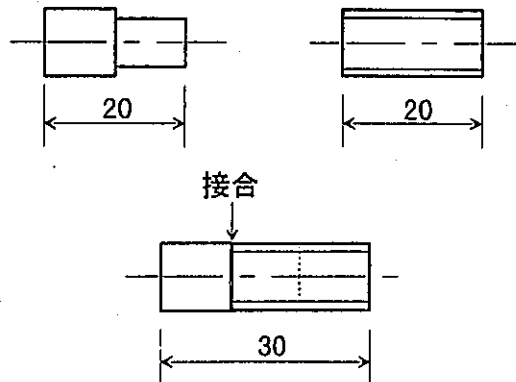


図 2.3 組織調査試験片 (TIG 溶接、レーザー、電子ビーム溶接)

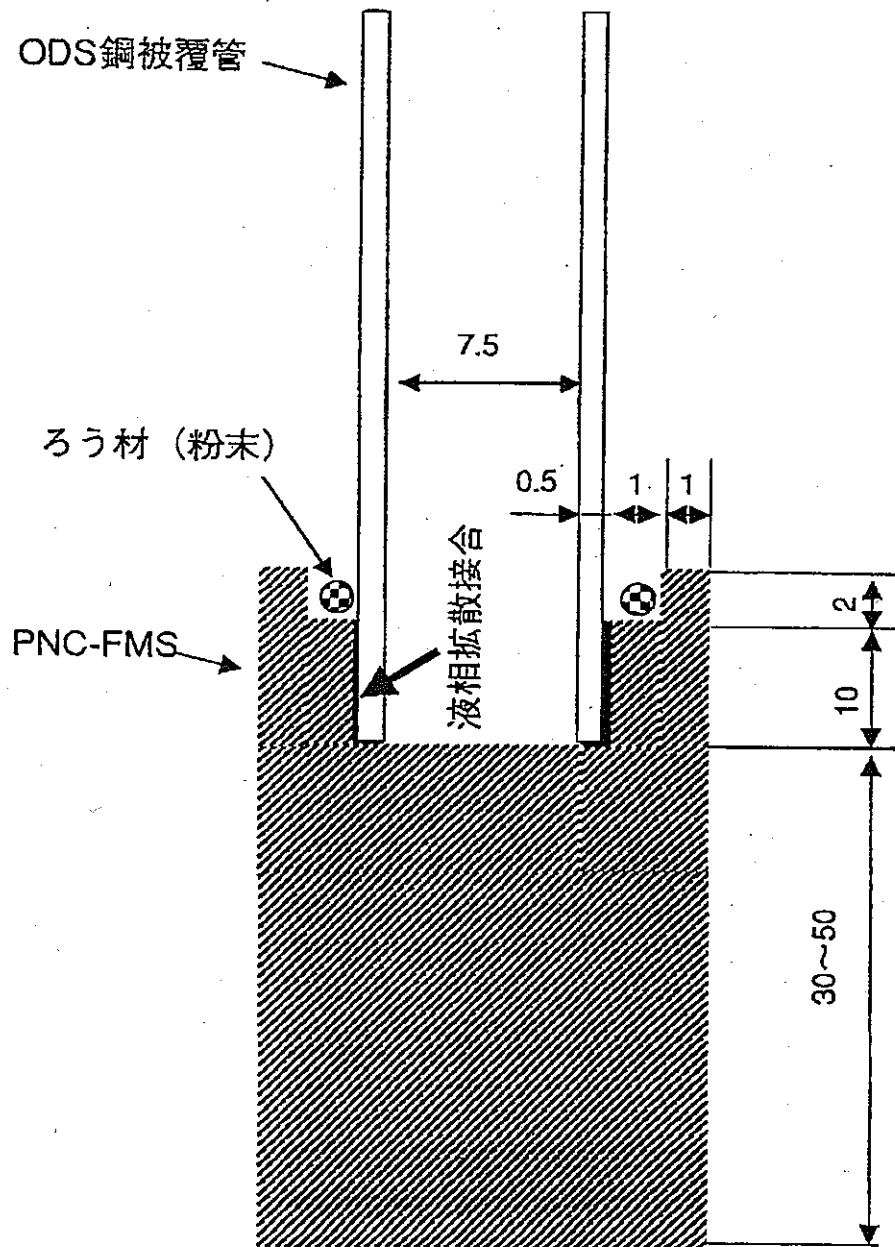


図 2.4 ろう付接合部の構造

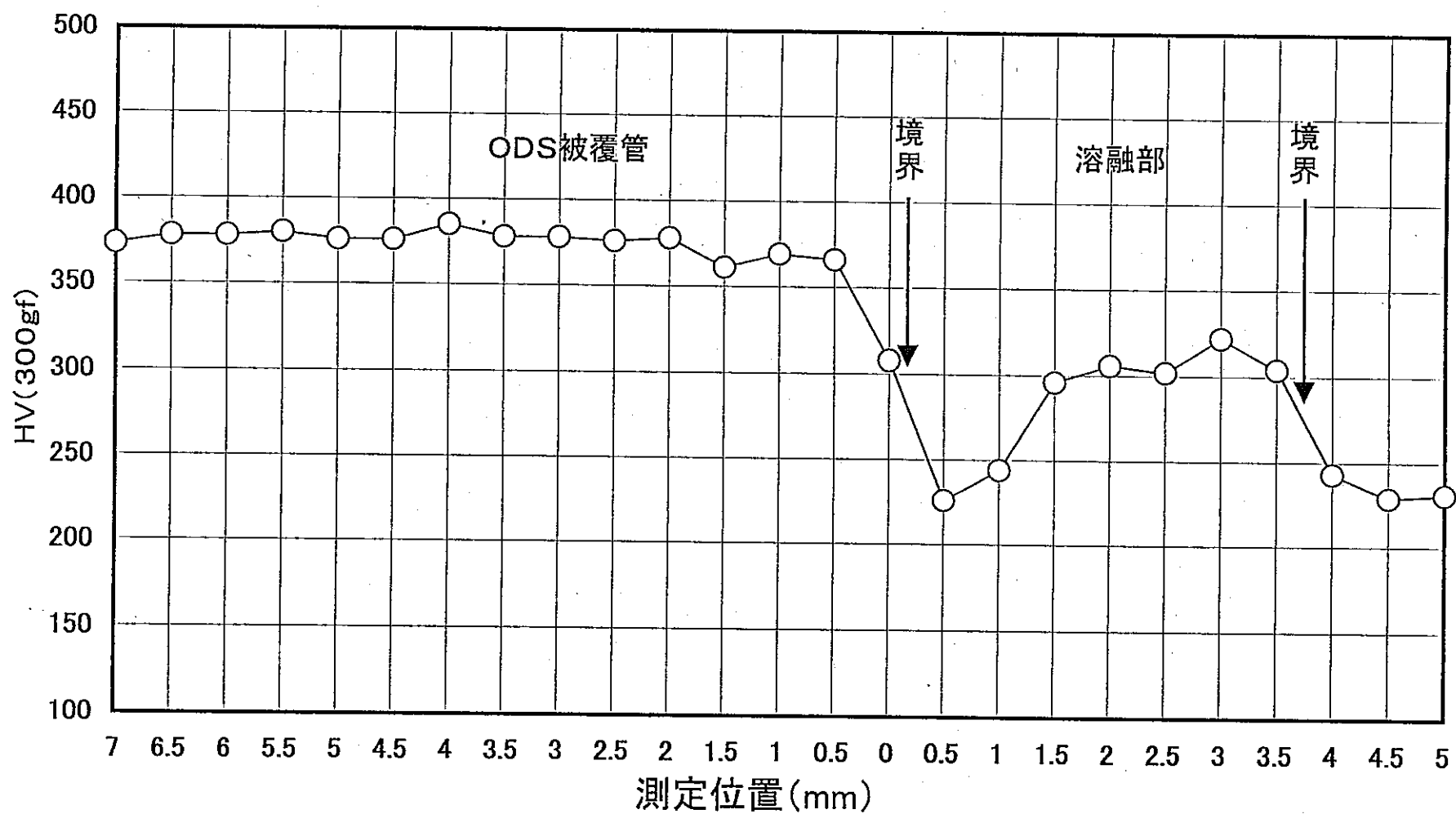


図 2.5 TIG 溶接部断面の硬さ分布

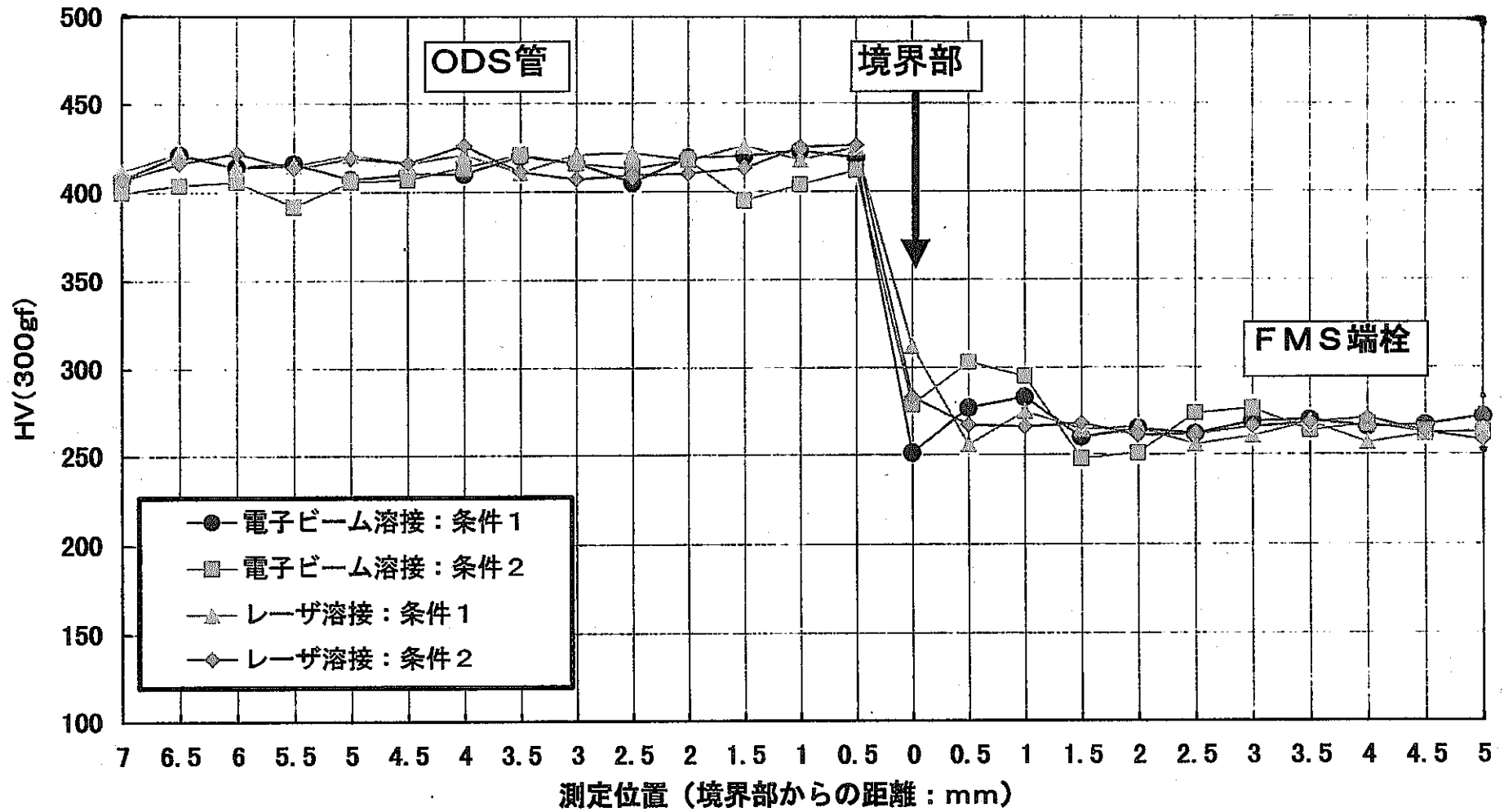


図 2.6 溶接部断面の硬さ分布

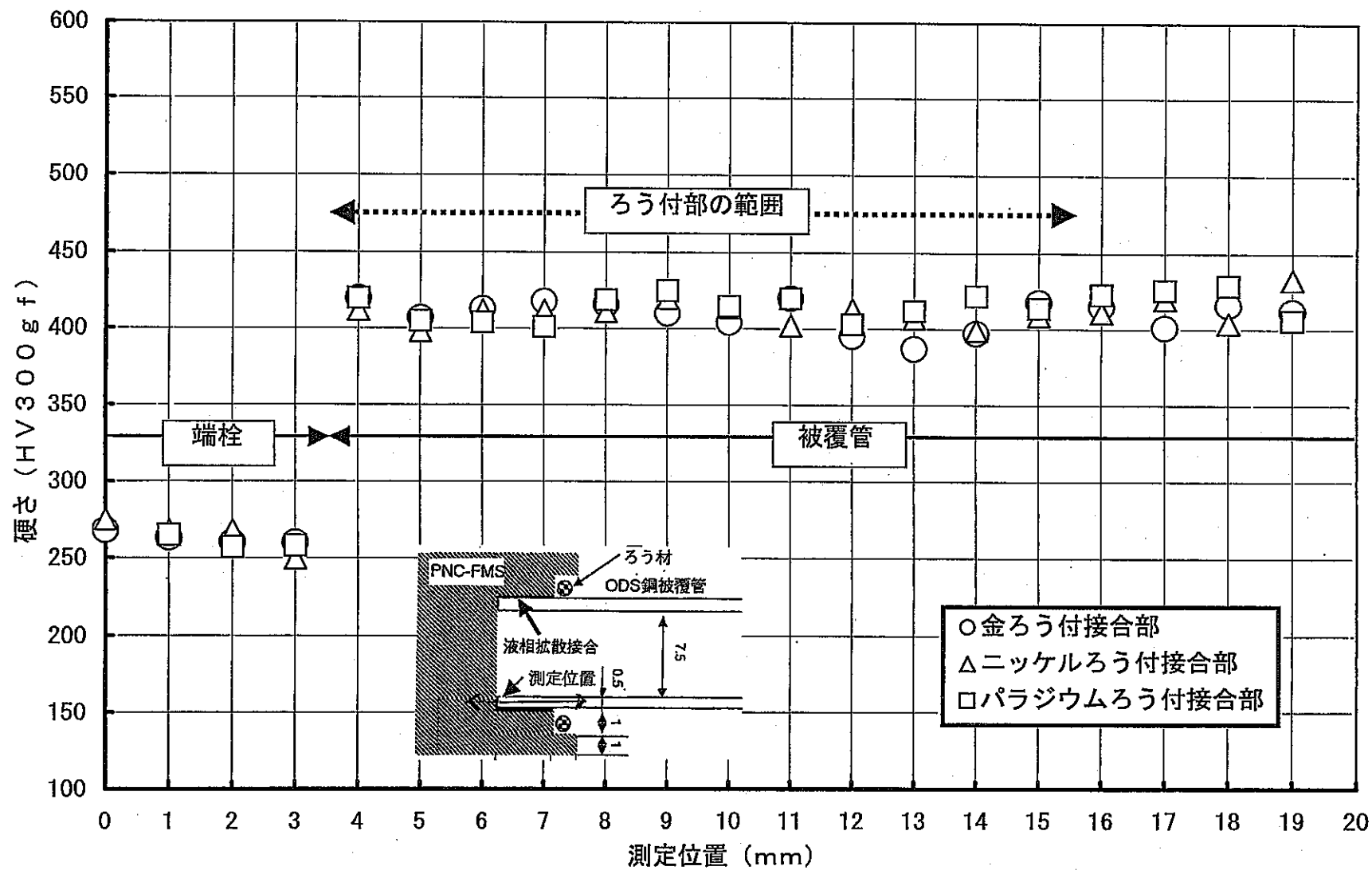


図 2.7 ろう付部縦断面の硬さ分布

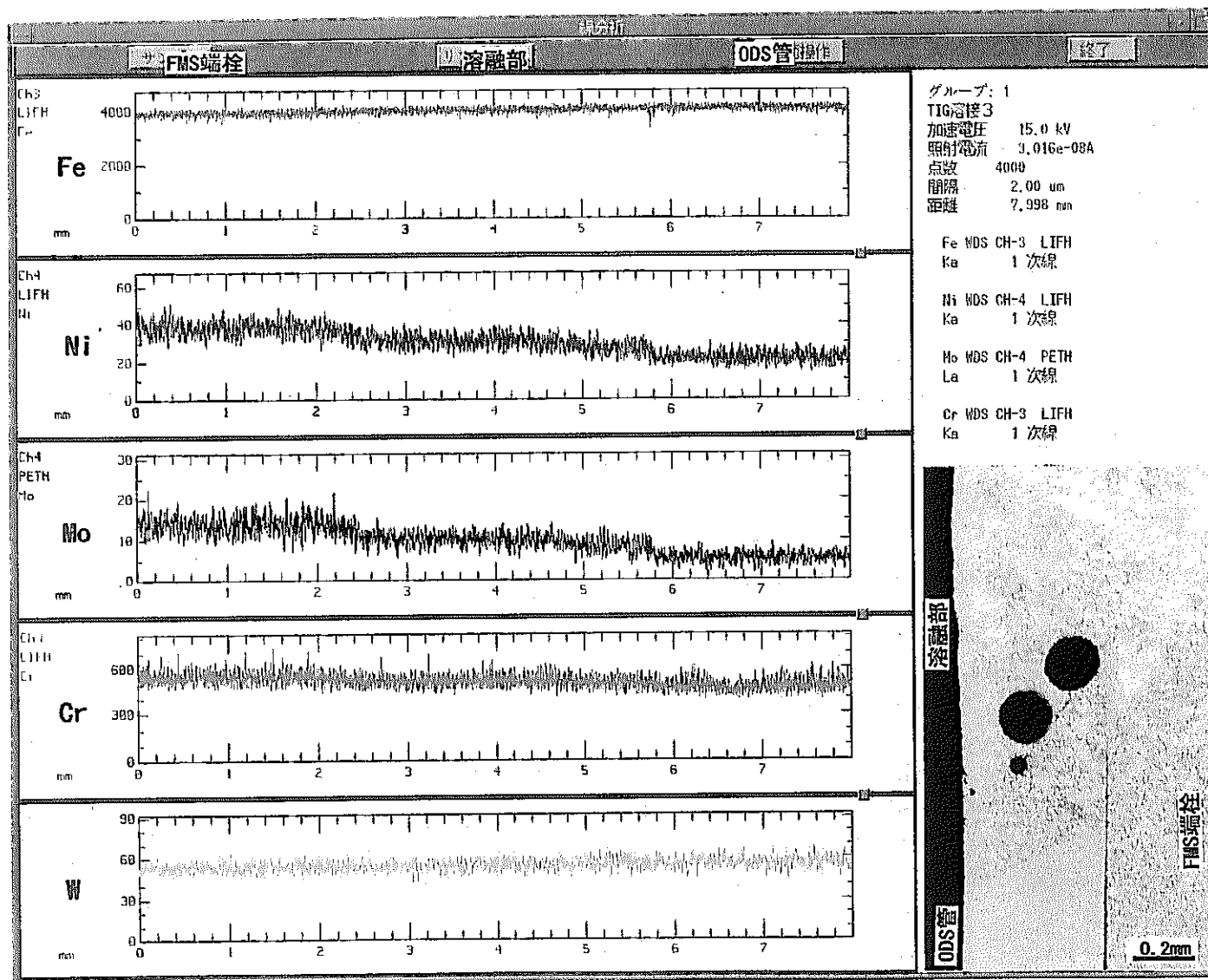


図 2.8-1 TIG 溶接部の EPMA 線分析結果(Fe,Ni,Mo,Cr,W)

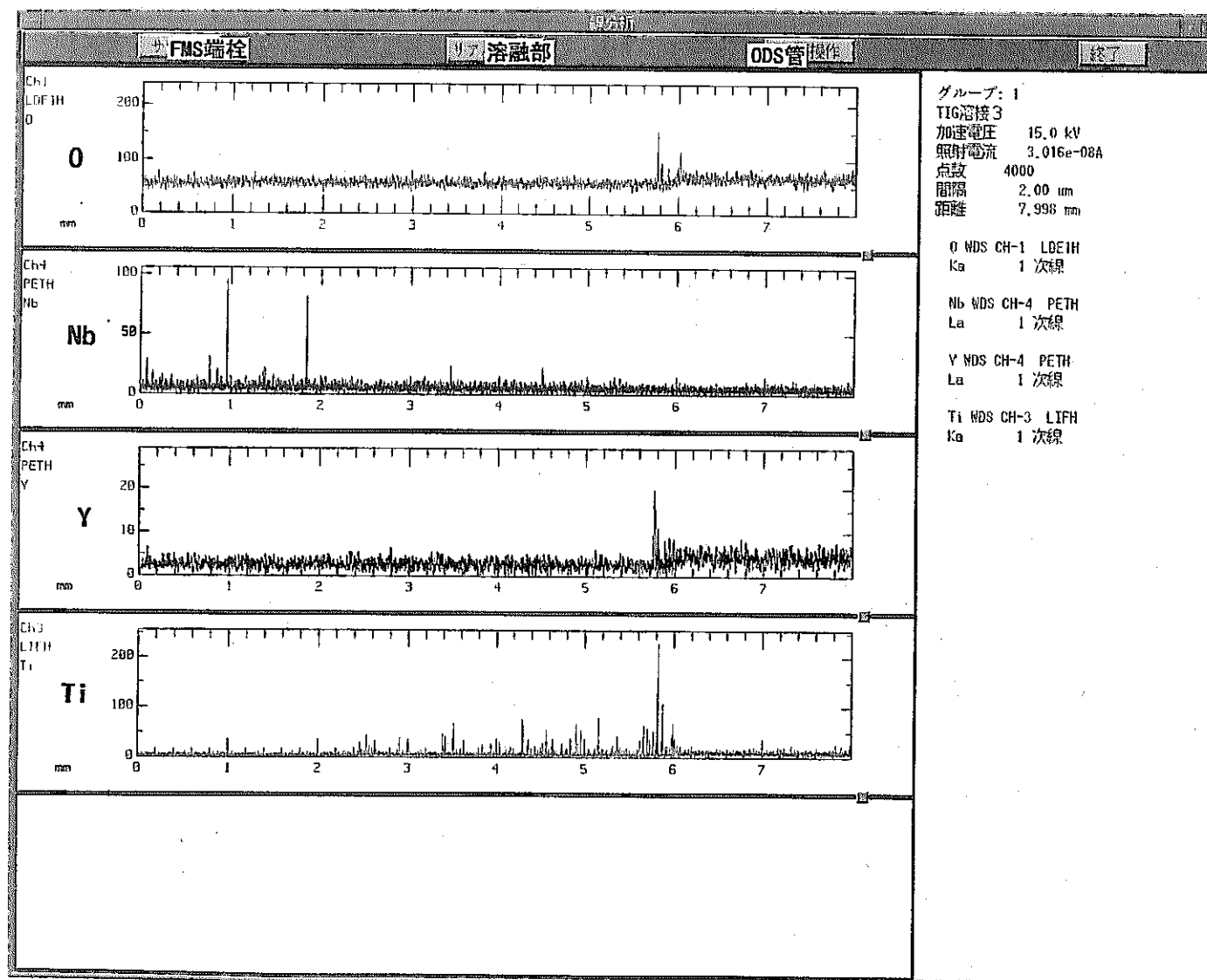


図 2.8-2 TIG 溶接部の EPMA 線分析結果(O,Nb,Y,Ti)

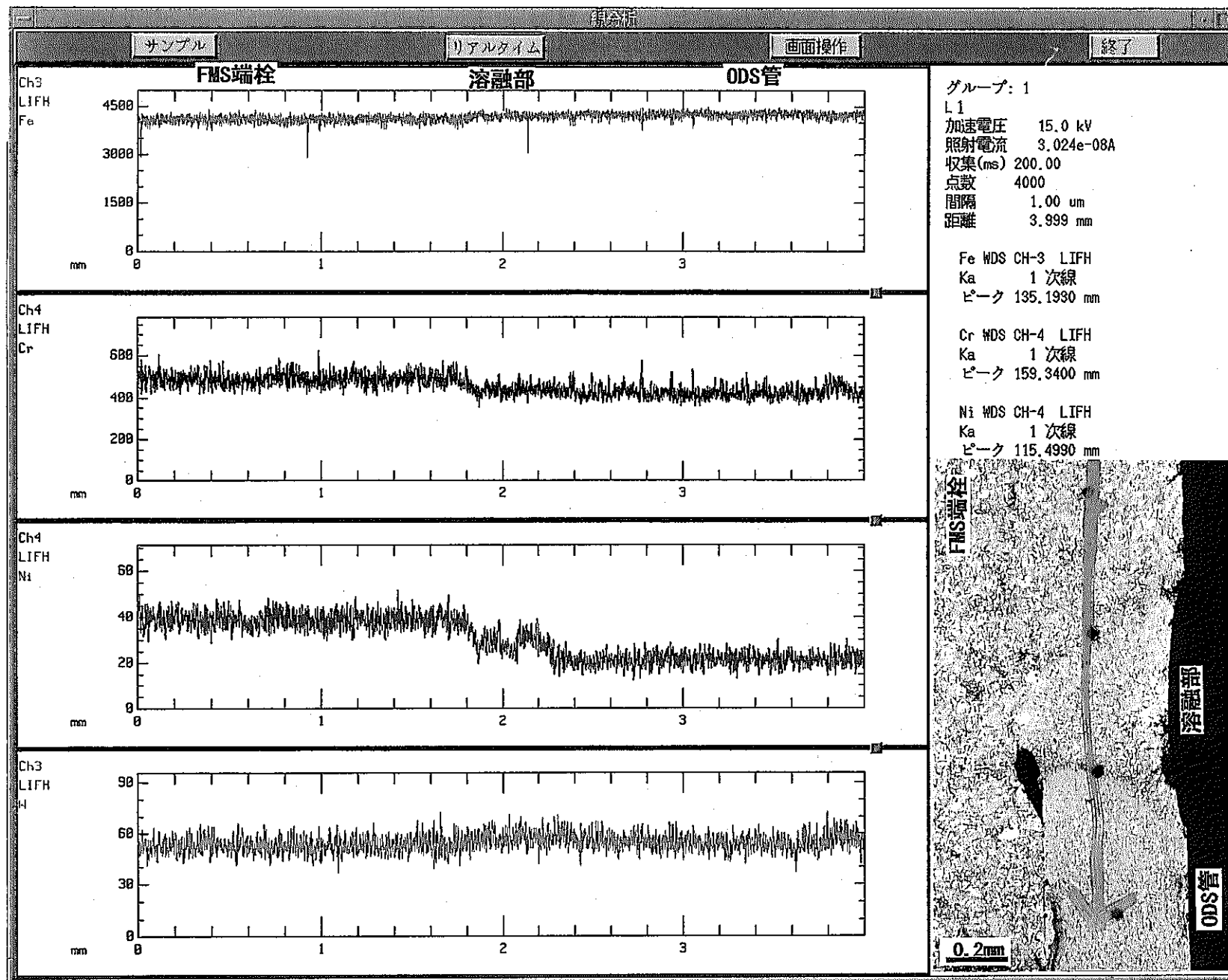


図 2.9-1 レーザー溶接部（条件 1）の EPMA 線分析結果

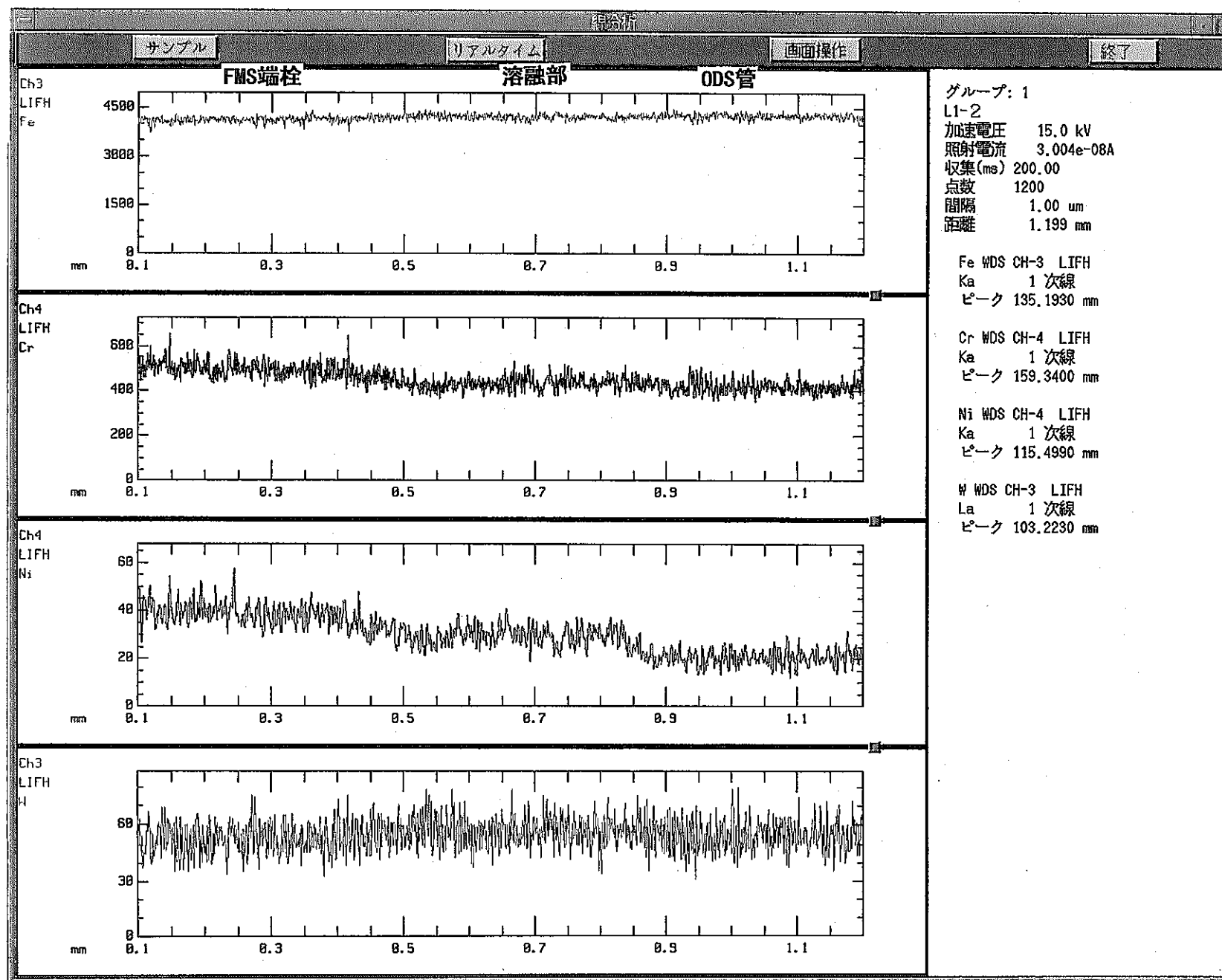
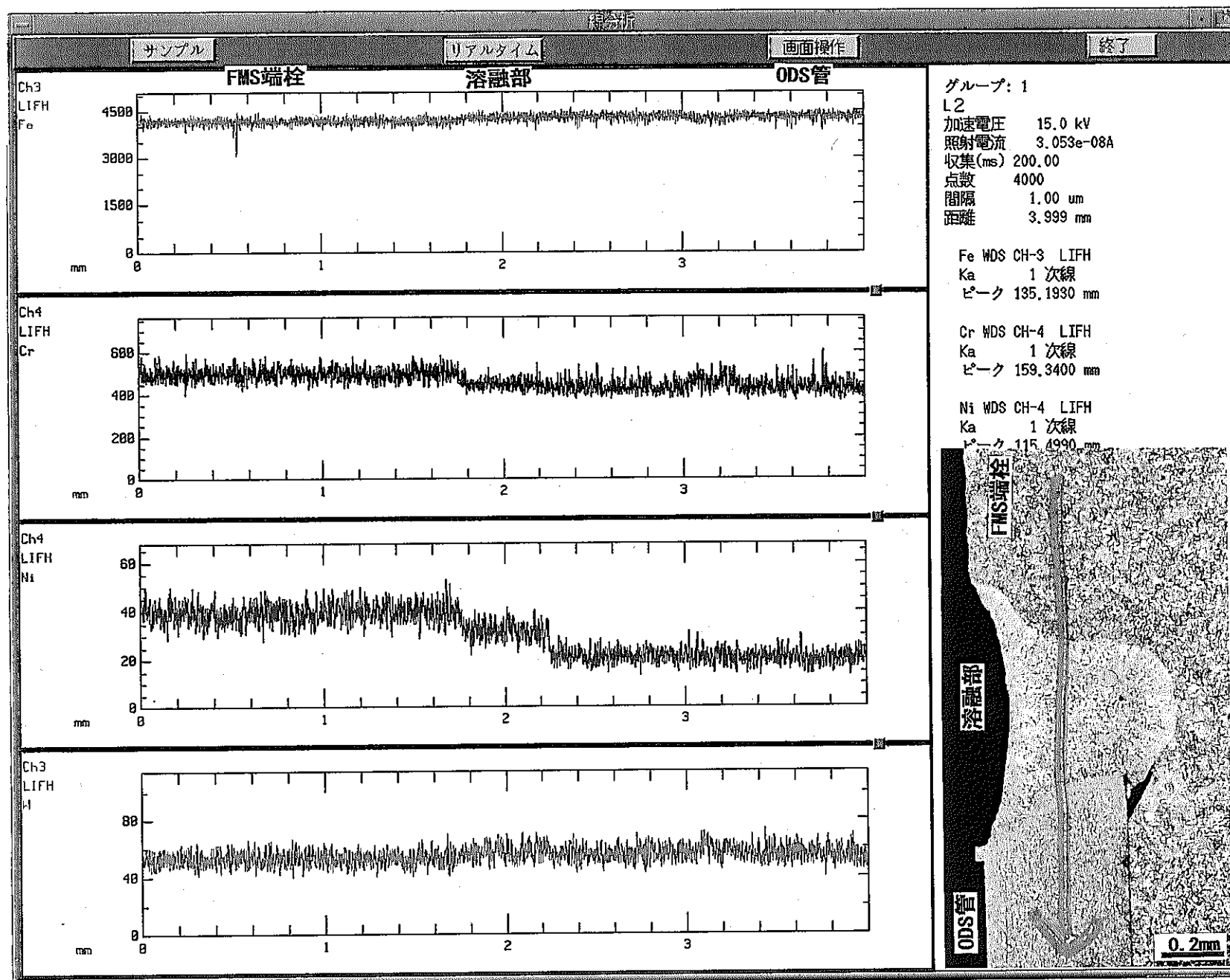


図 2.9-2 レーザー溶接部 (条件 1) の EPMA 線分析結果 : 拡大



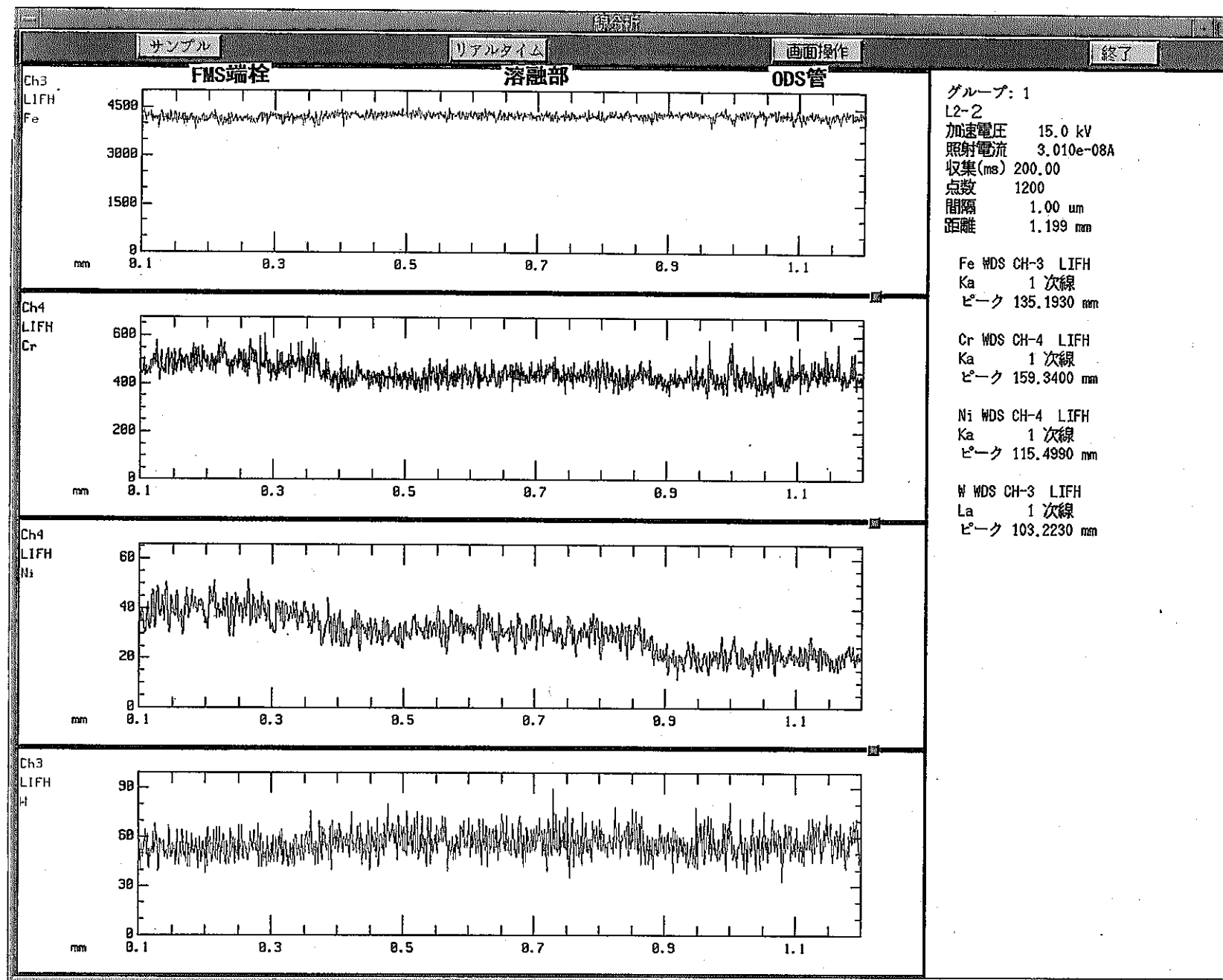


図 2.10-2 レーザー溶接部 (条件 2) の EPMA 線分析結果 : 拡大

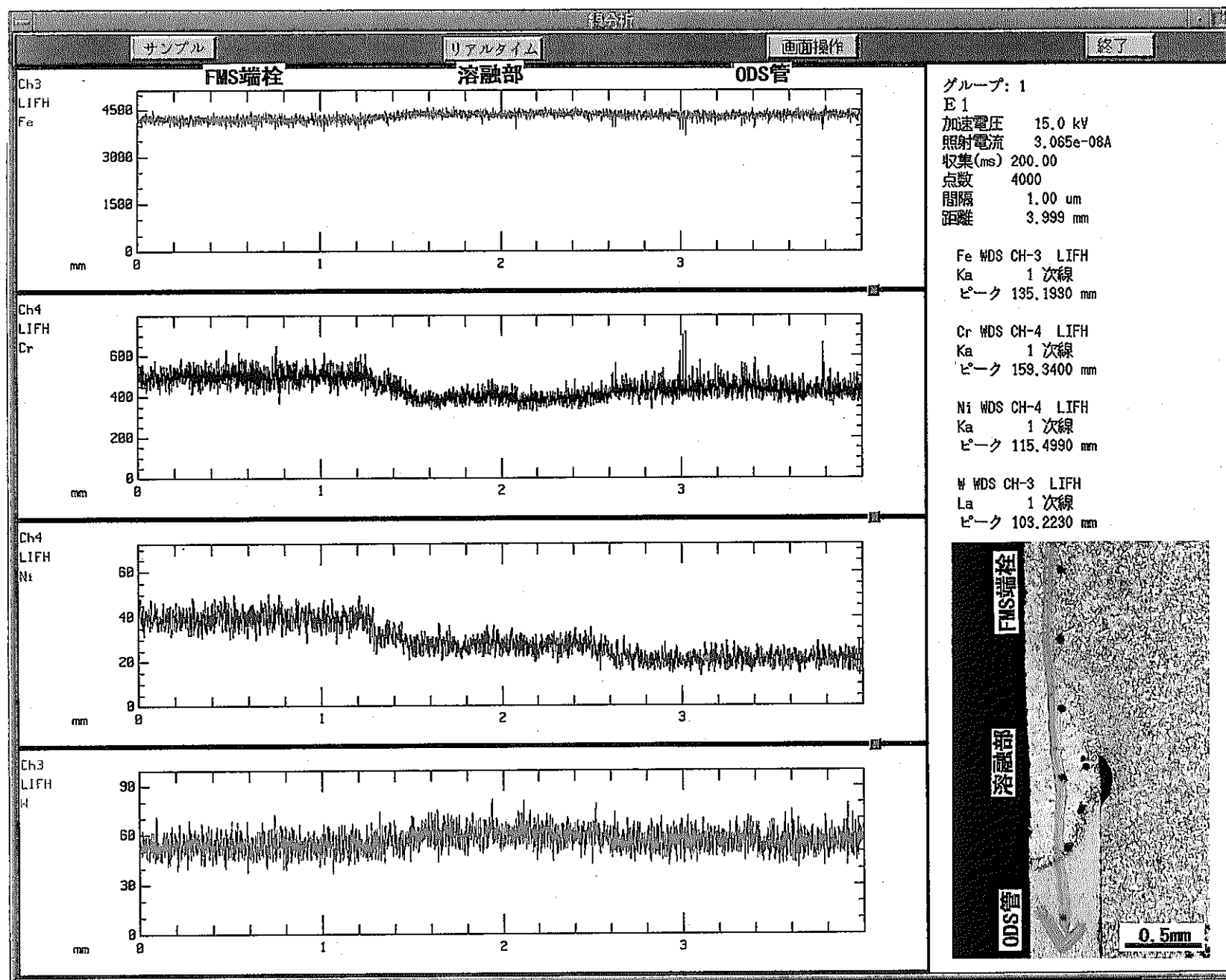


図 2.11 電子ビーム溶接部（条件 1）の EPMA 線分析結果

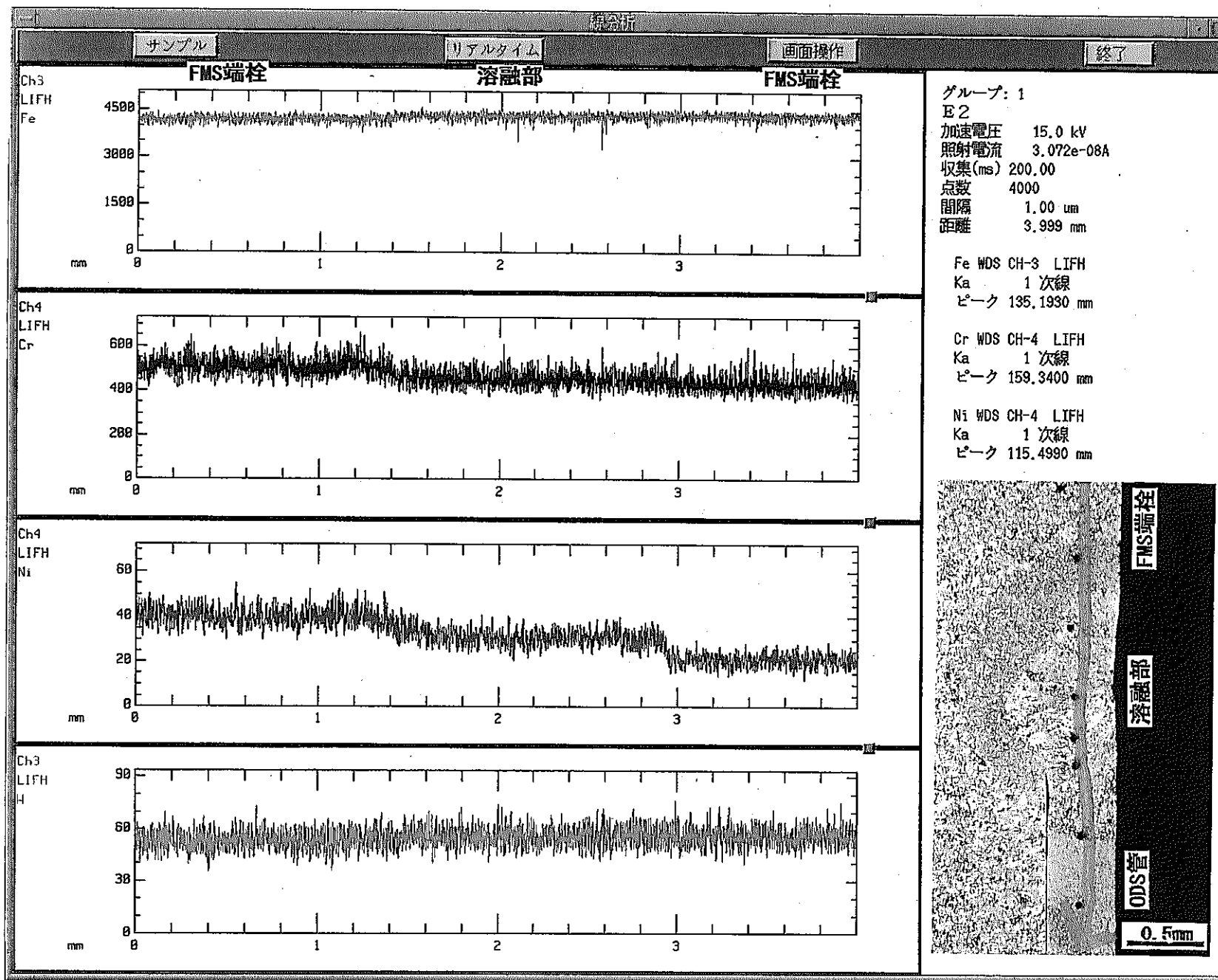


図 2.12 電子ビーム溶接部（条件 2）の EPMA 線分析結果

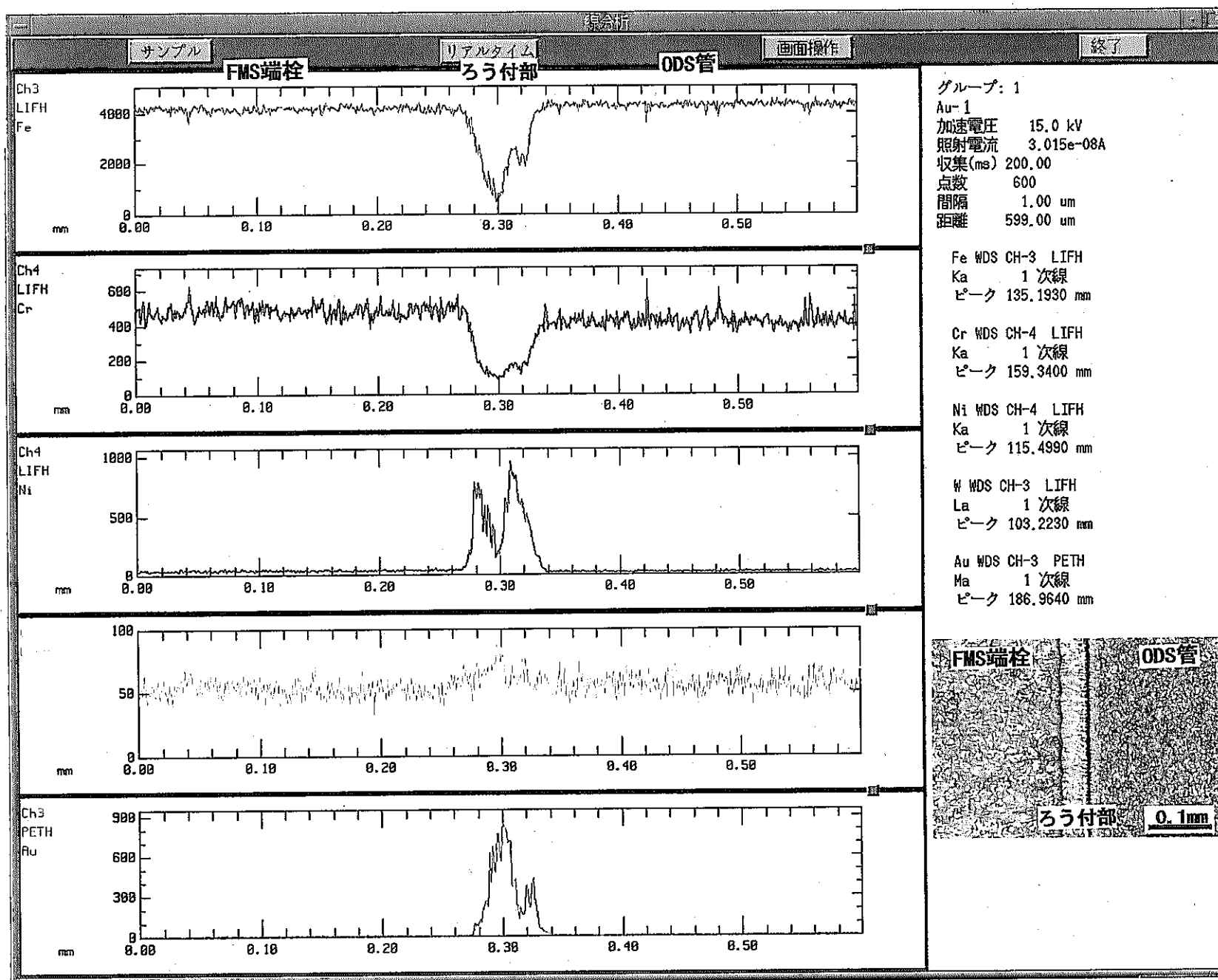


図 2.13 金ろう付接合部の EPMA 線分析結果

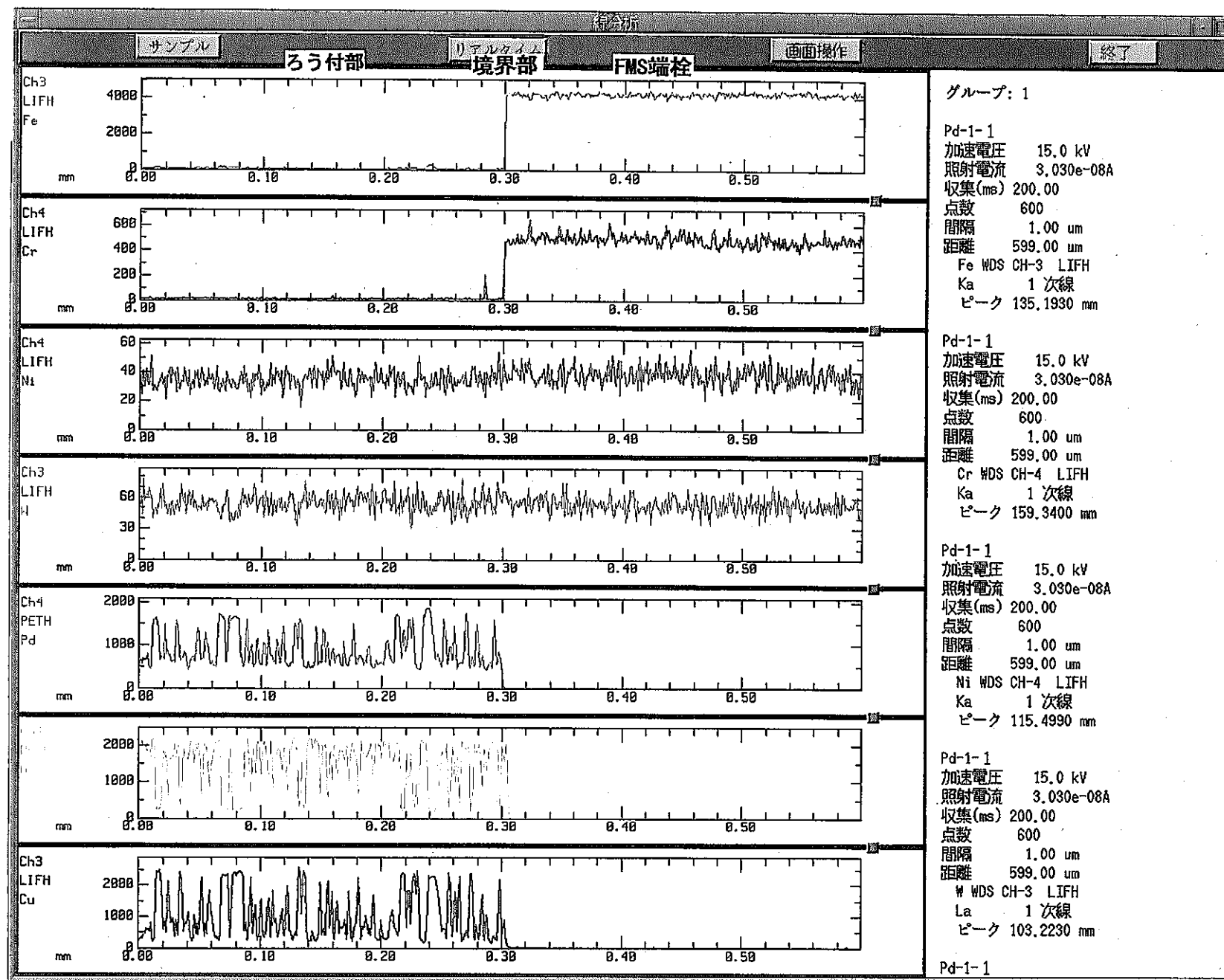


図 2.14-1 パラジウムろう付接合部 (ODS 側) の EPMA 線分析結果

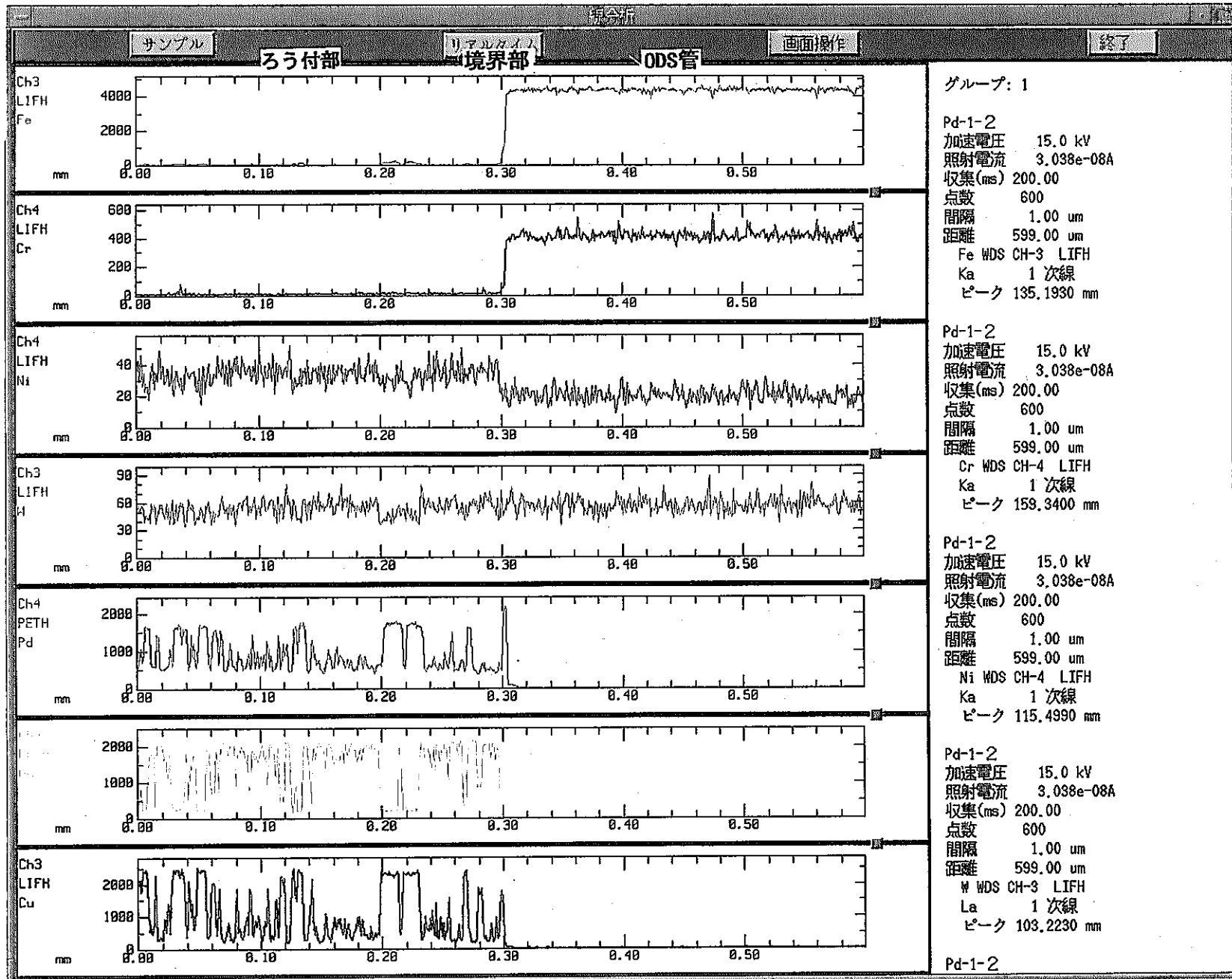


図 2.14-2 パラジウムろう付接合部（端栓側）の EPMA 線分析結果

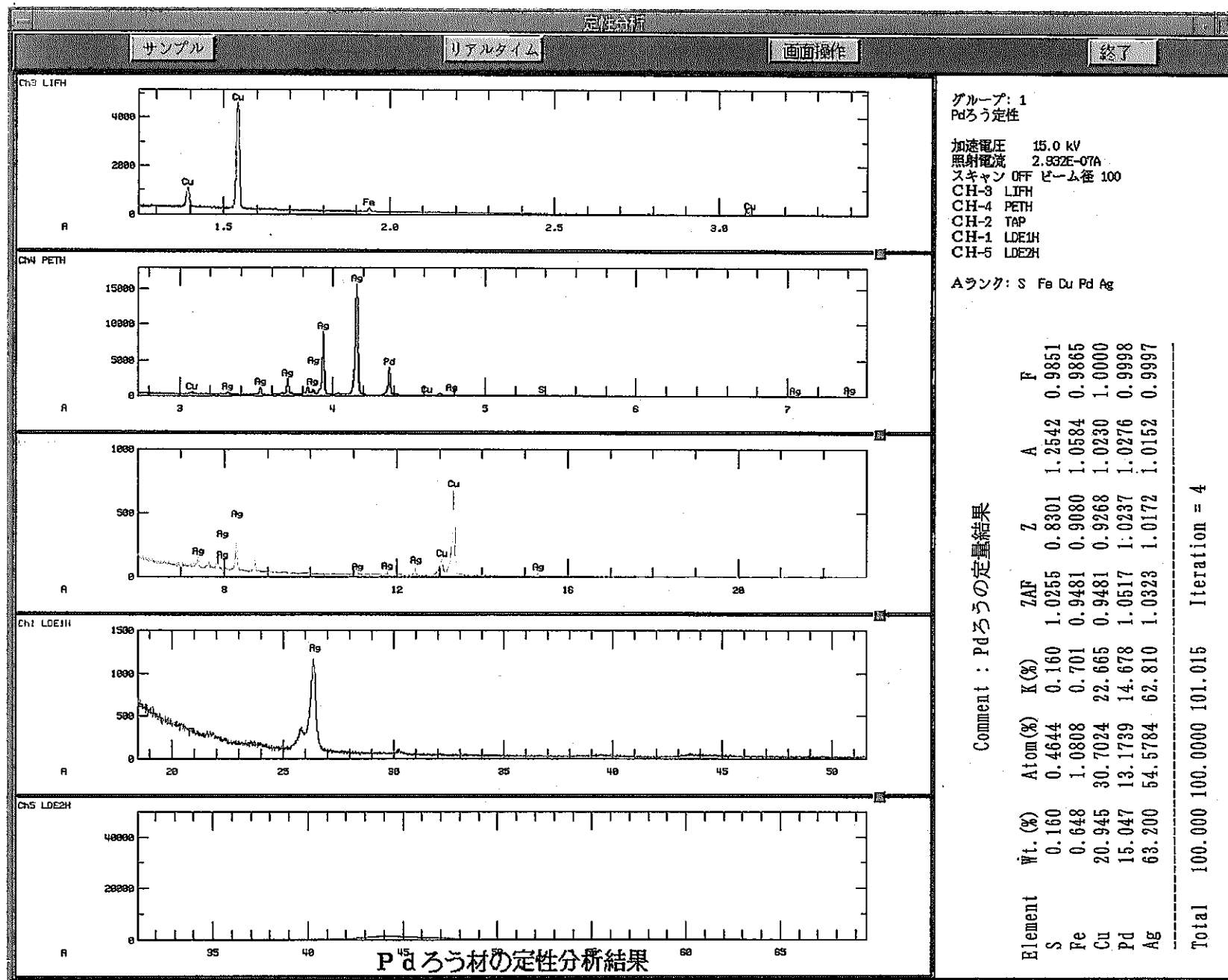


図 2.14-3 パラジウムろう付接合部の EPMA 定量分析結果

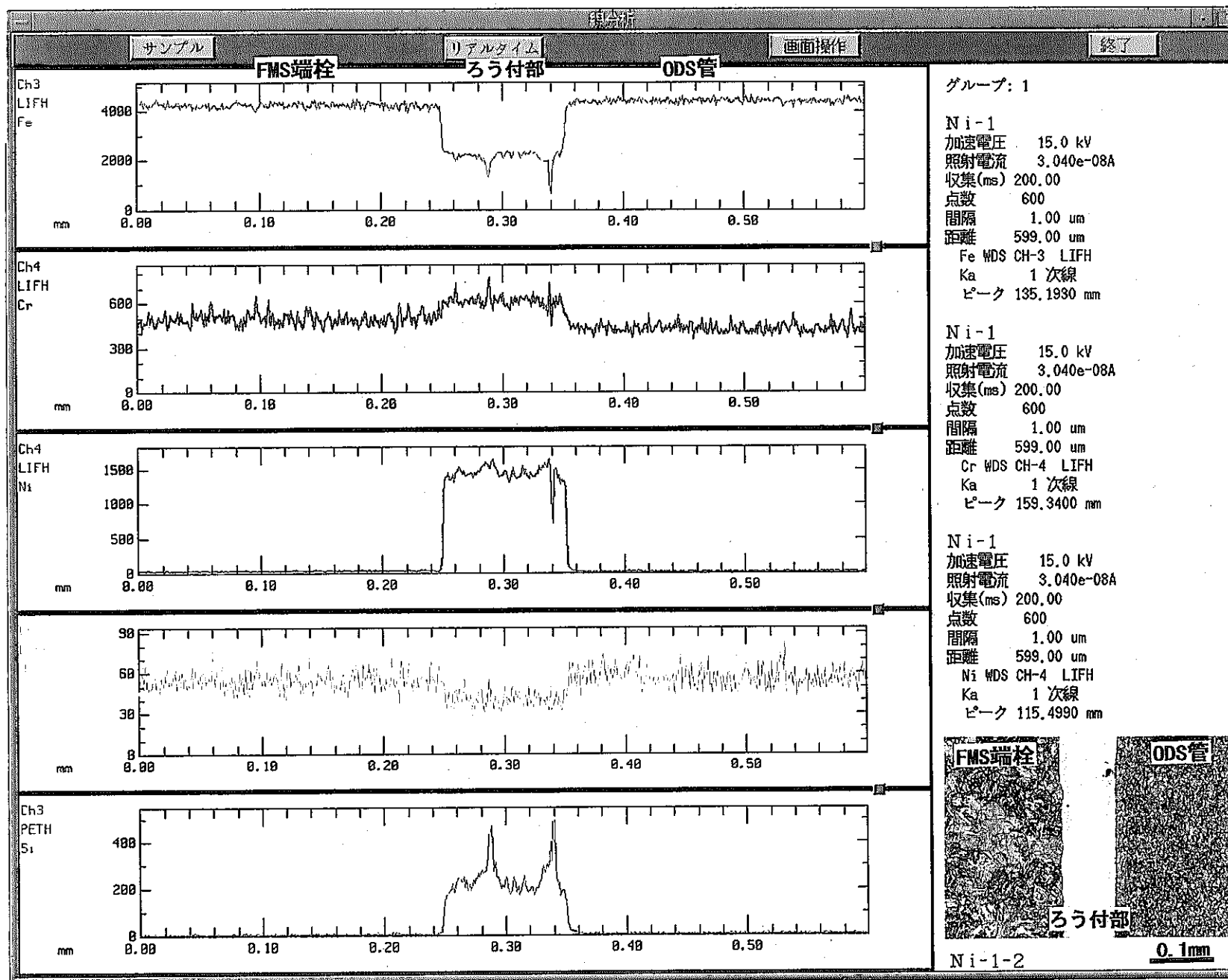


図 2.15 ニッケルろう付接合部の EPMA 線分析結果

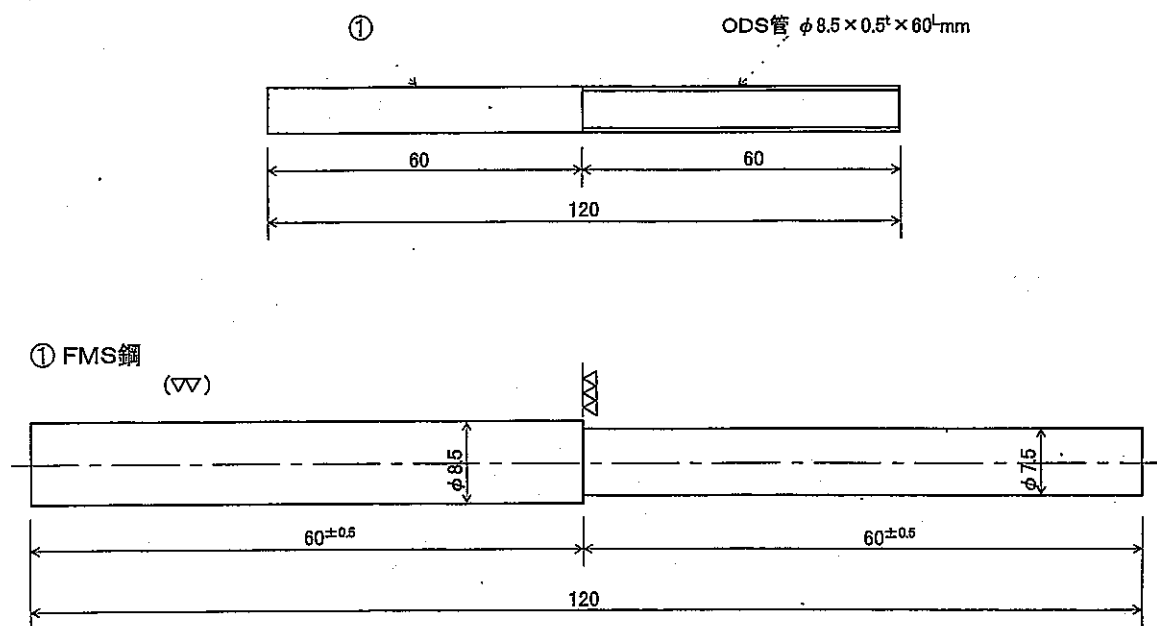


図 3.1 曲げ試験片

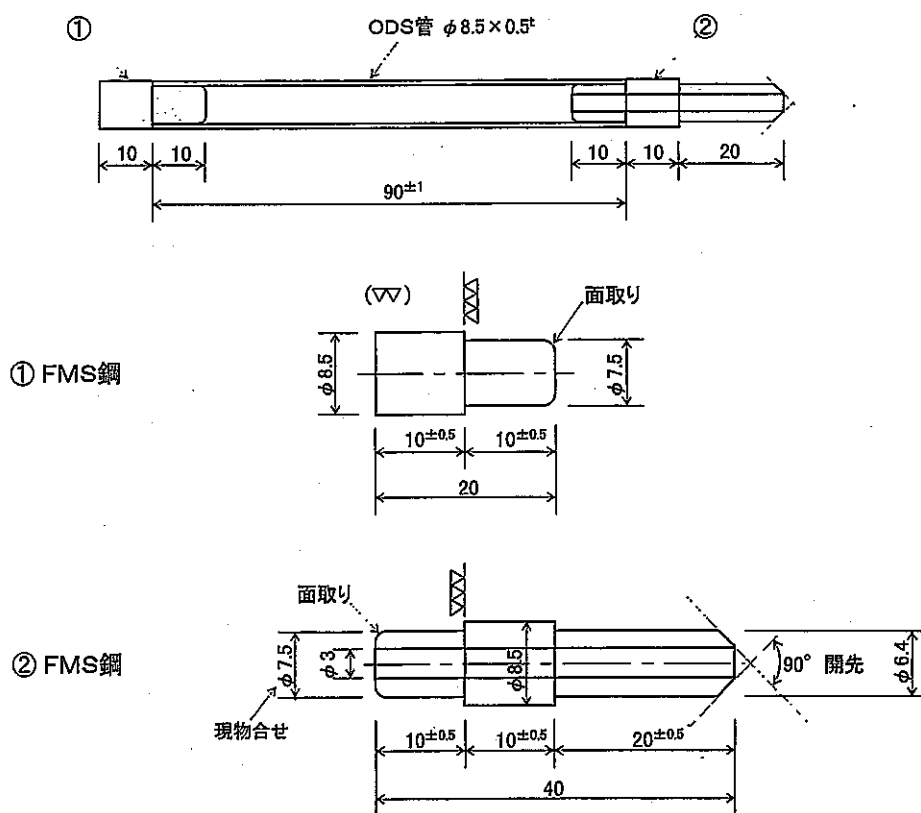


図 3.2 内圧クリープ破断試験片

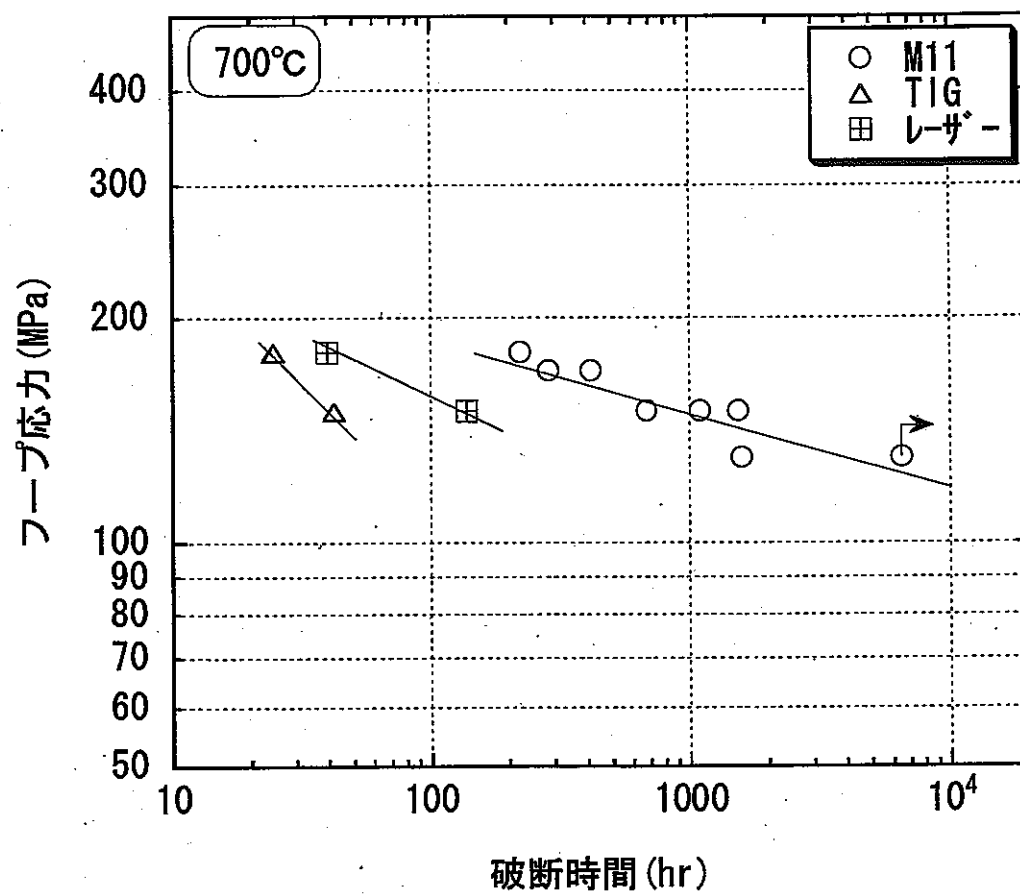


図 3.3 内圧クリープ破断強度

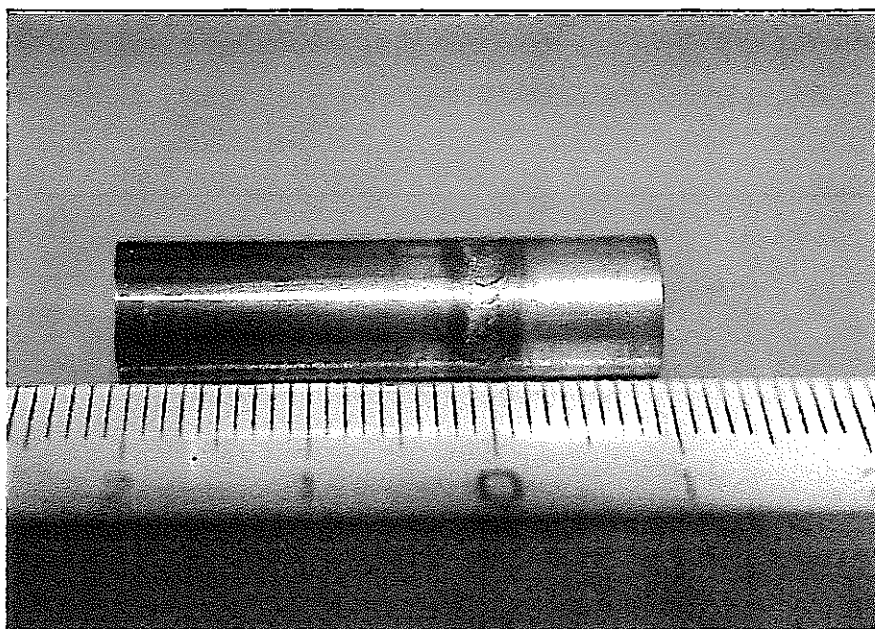
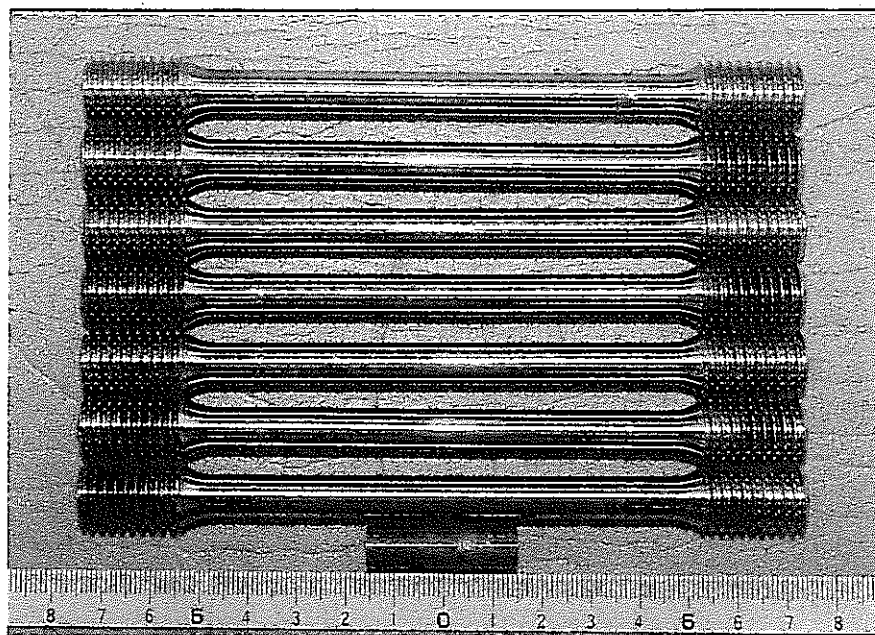


写真 2.1-1 T I G溶接試験片の外観

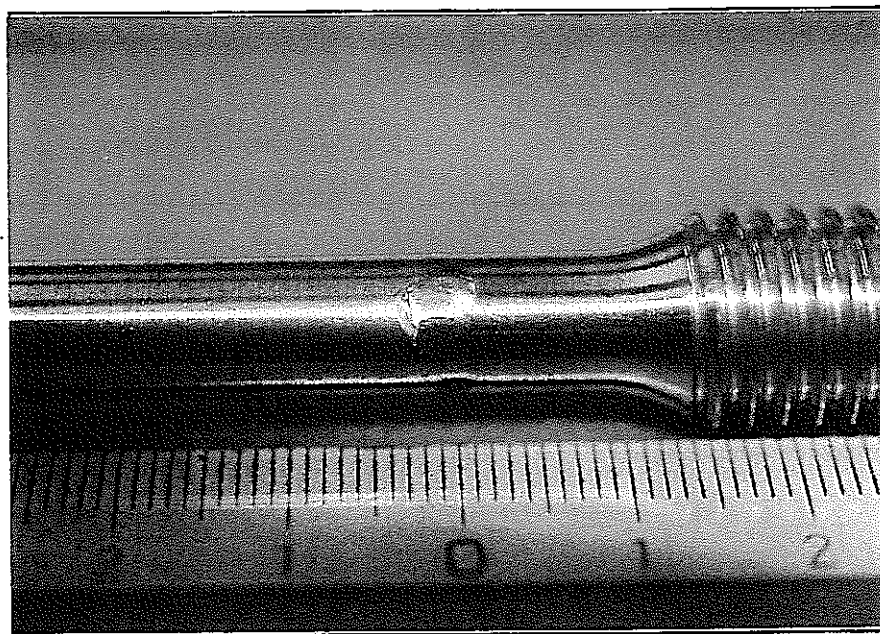
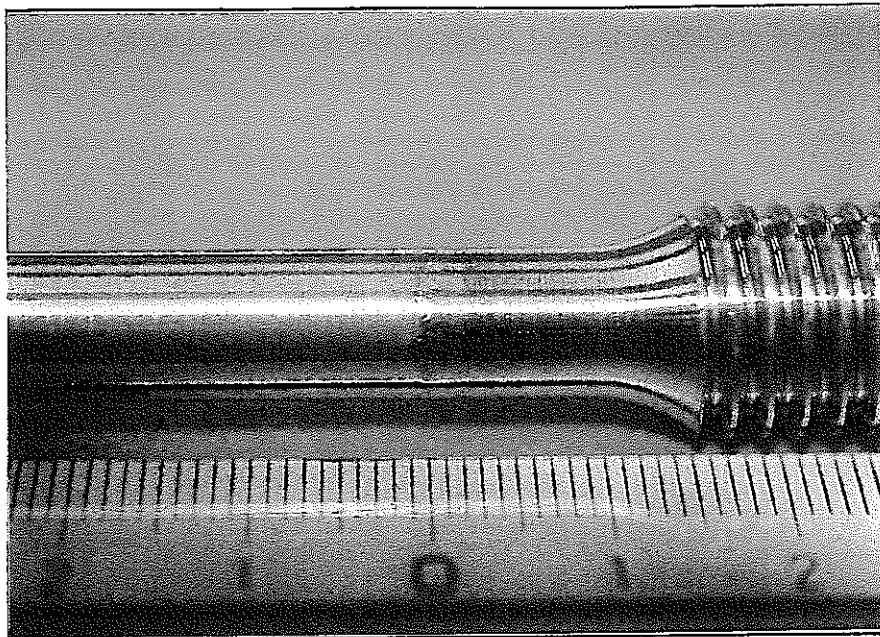


写真 2.1-2 引張試験片 T I G 溶接部の外観

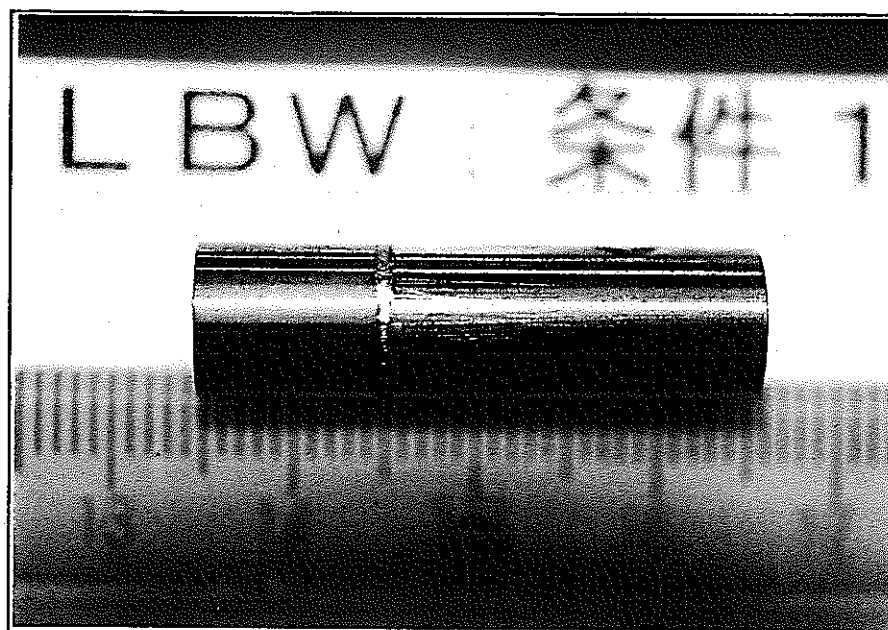
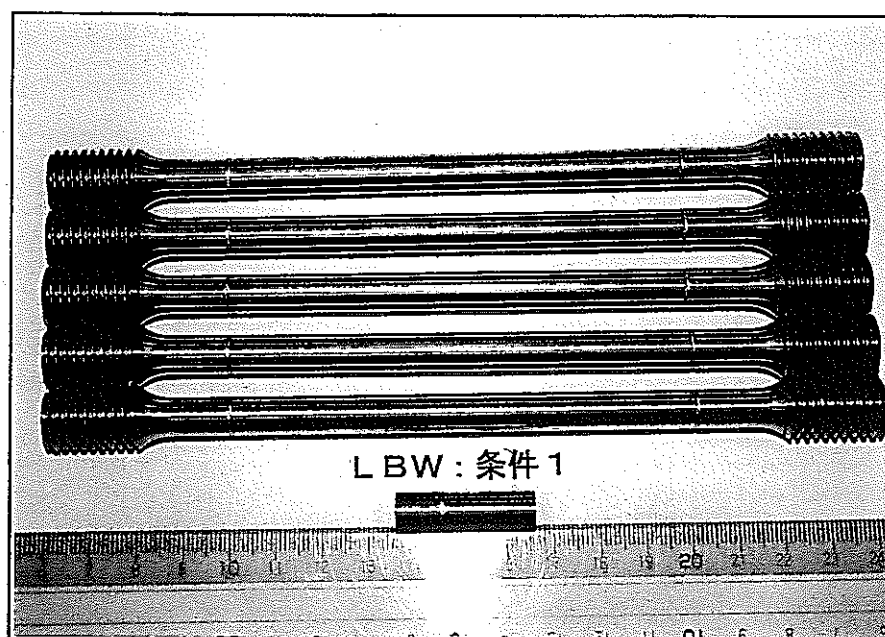


写真 2.2-1 レーザー溶接（条件 1）試験片の外観

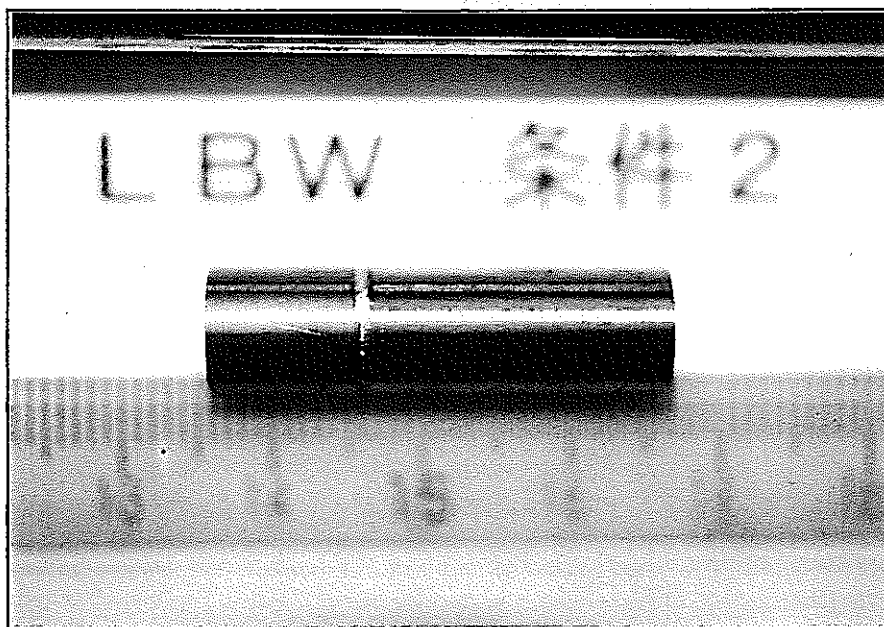
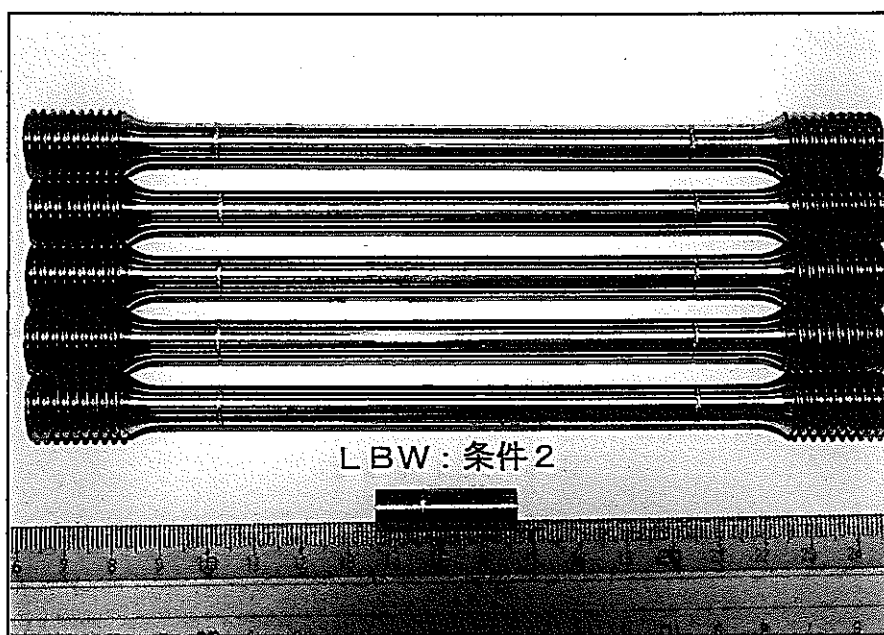
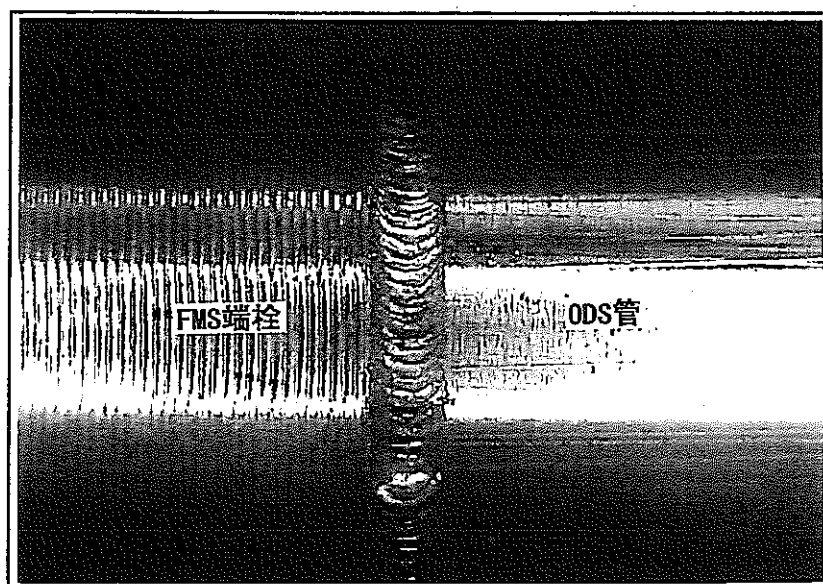
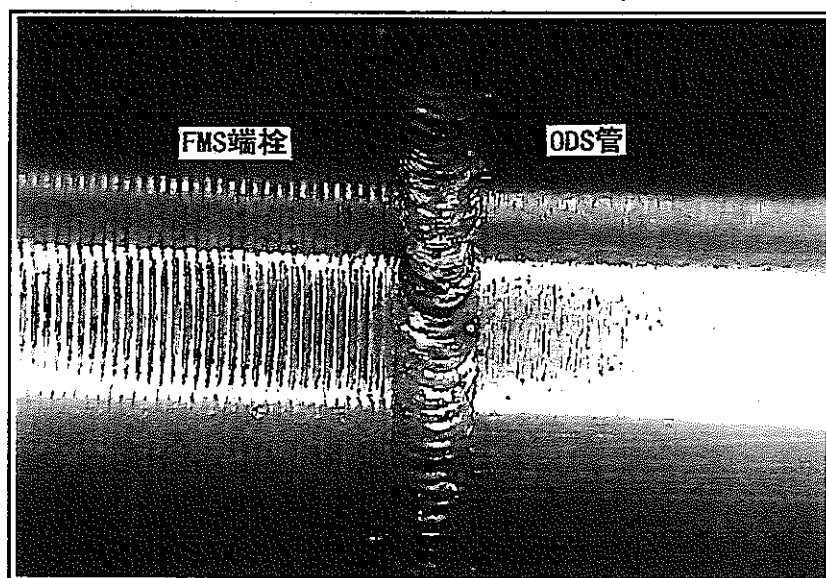


写真 2.2-2 レーザー溶接（条件2）試験片の外観



条件 1



条件 2



写真 2.2-3 レーザ溶接接合部の外観

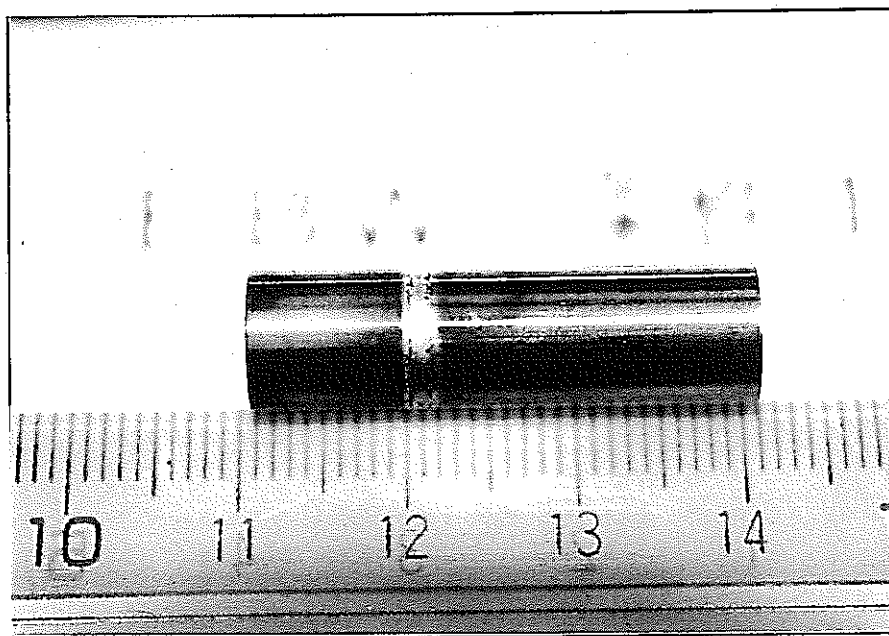
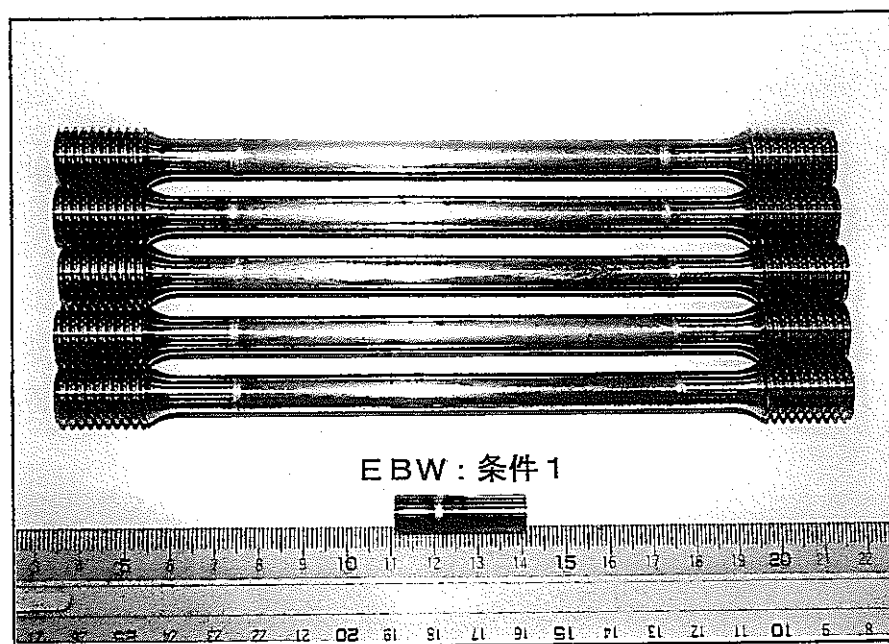


写真 2.3-1 電子ビーム溶接（条件 1）試験片の外観

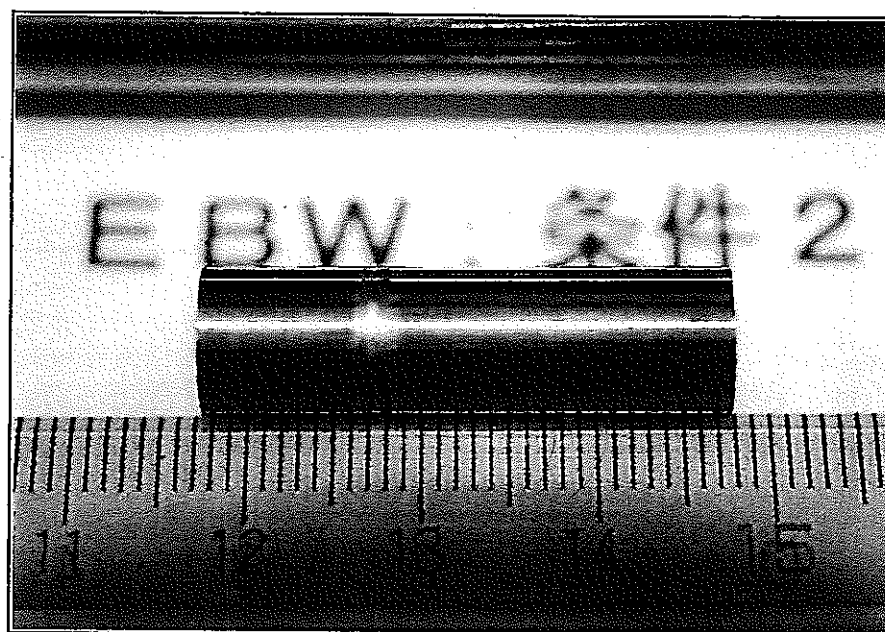
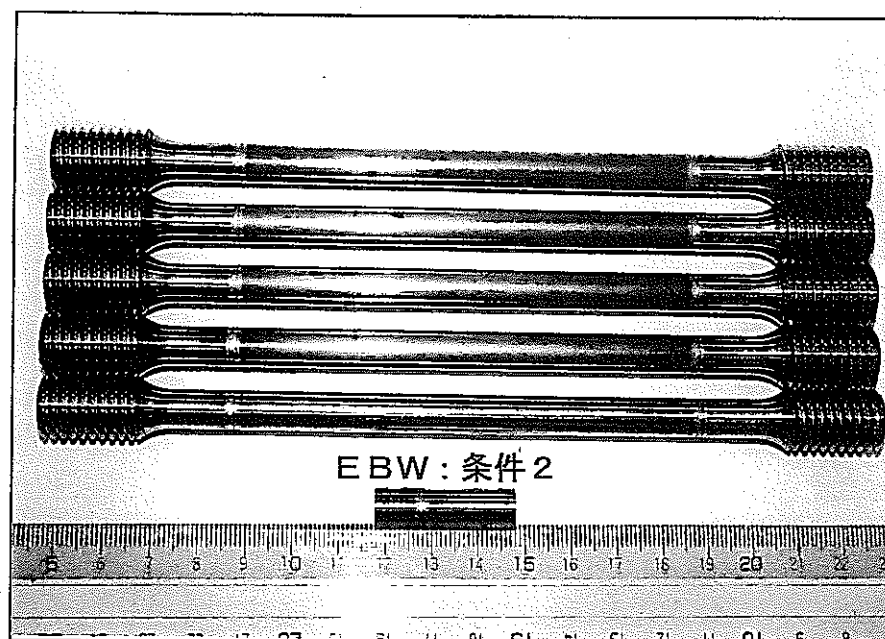
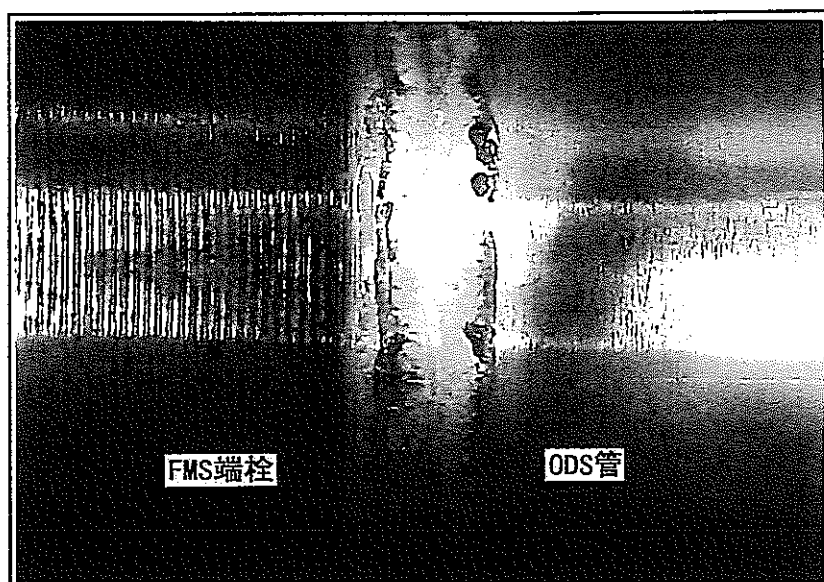
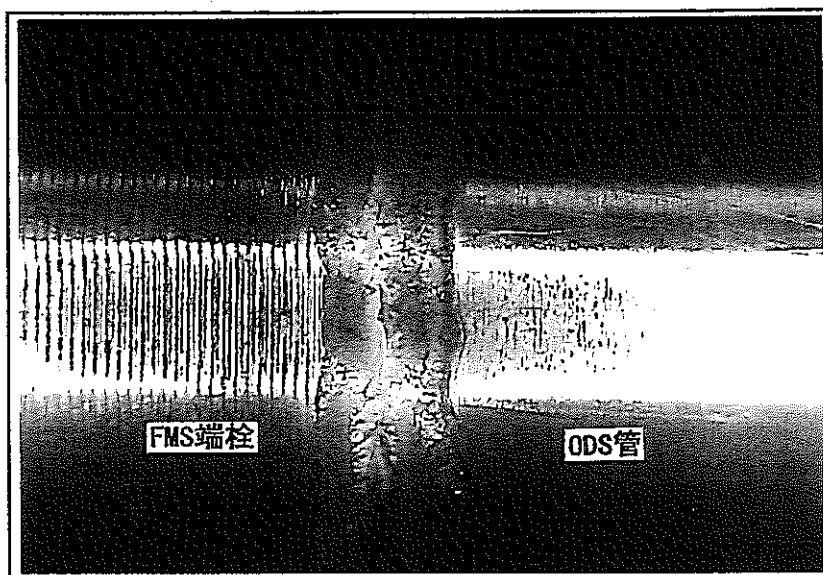


写真 2.3-2 電子ビーム溶接（条件2）試験片の外観



条件 1



条件 2

写真 2.3-3 電子ビーム溶接接合部の外観

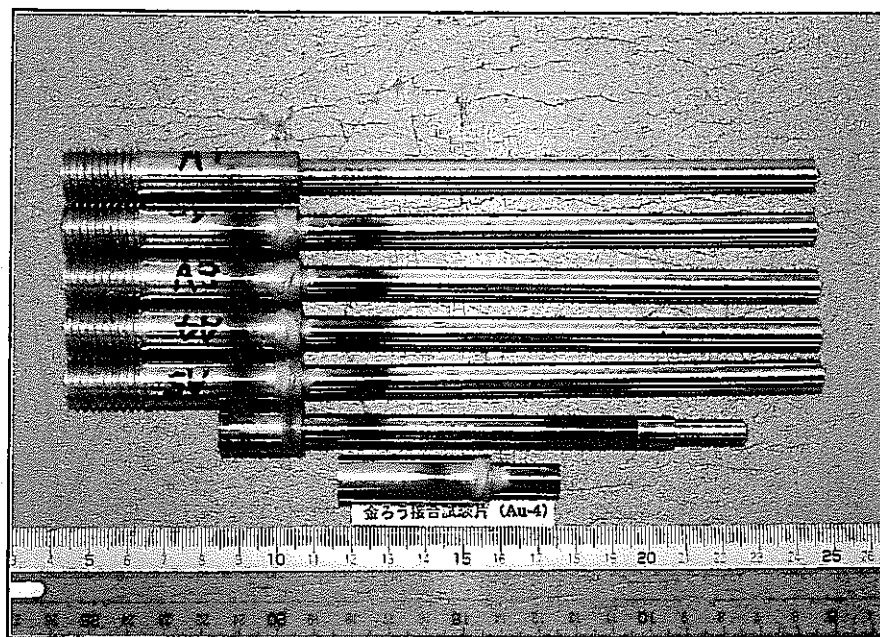


写真 2.4 金ろう (Au-4) 接合試験片の外観

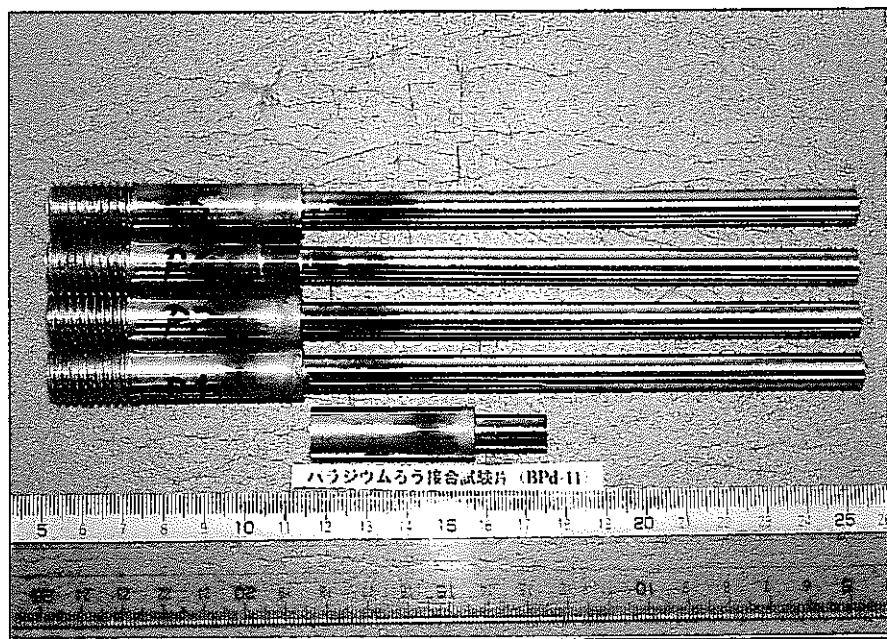


写真 2.5 パラジウムろう (BPd-11) 接合試験片の外観

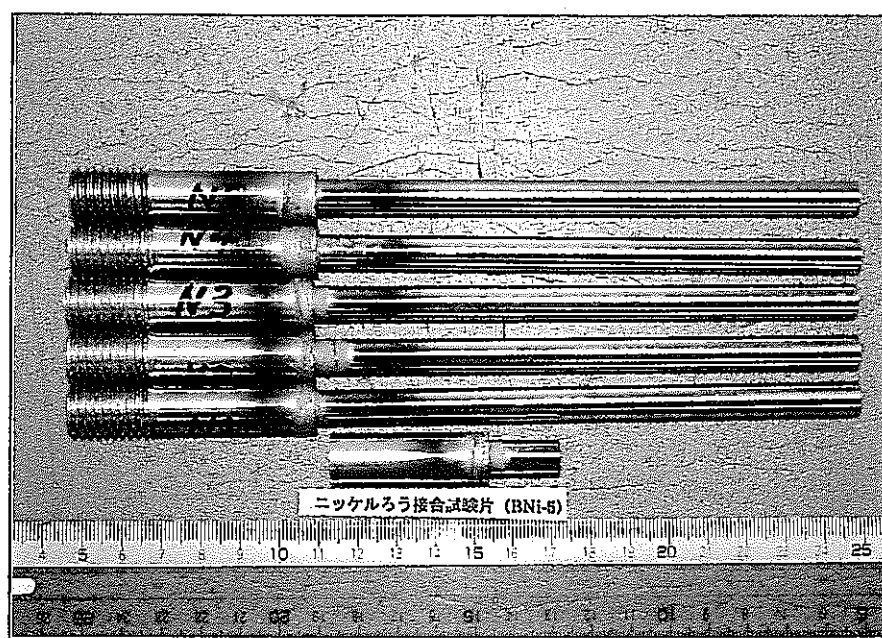
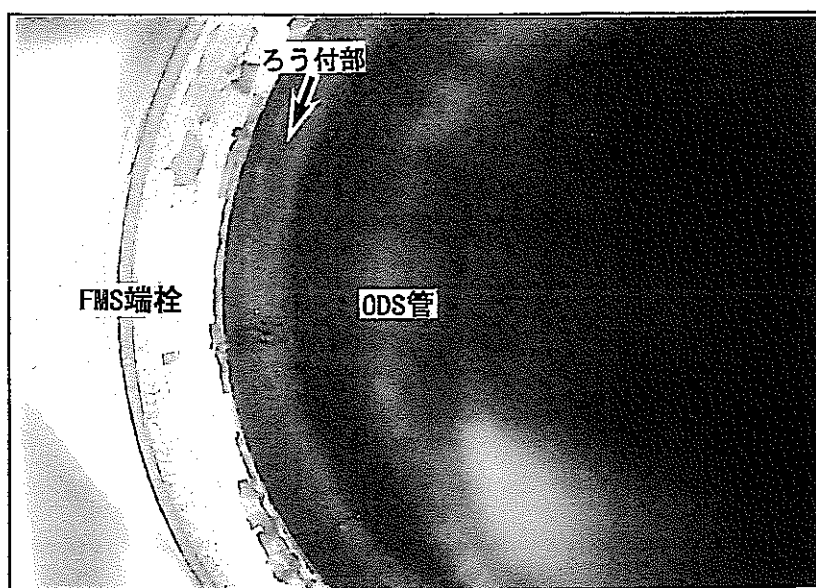
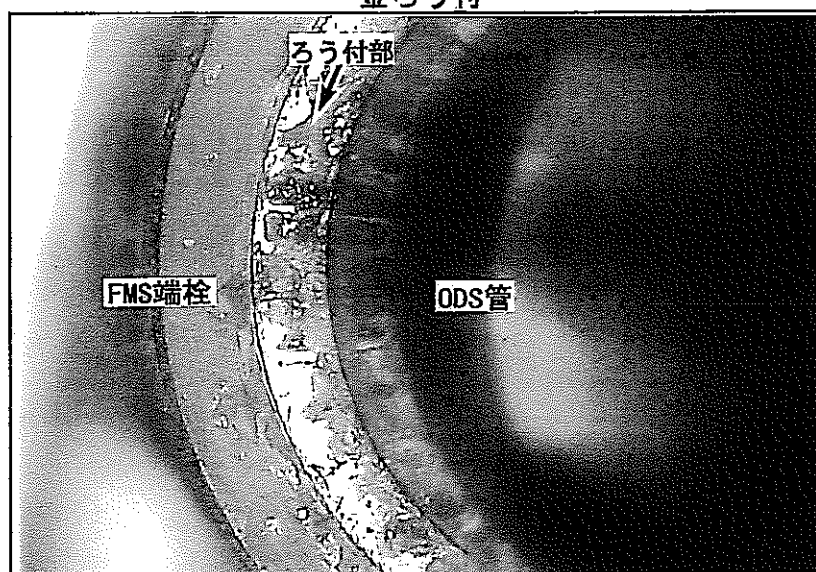


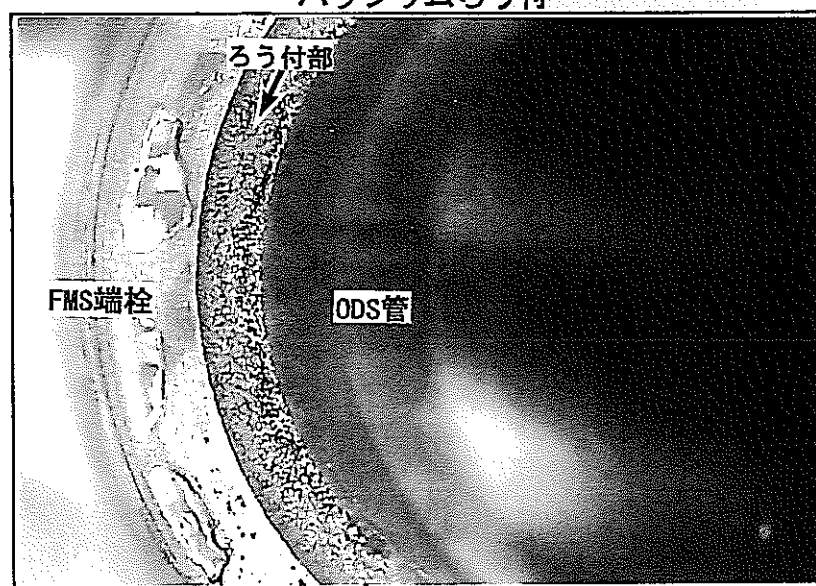
写真 2.6 ニッケルろう (BNi-5) 接合試験片の外観



金ろう付



パラジウムろう付



ニッケルろう付

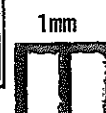


写真 2.7 ろう付接合部の外観

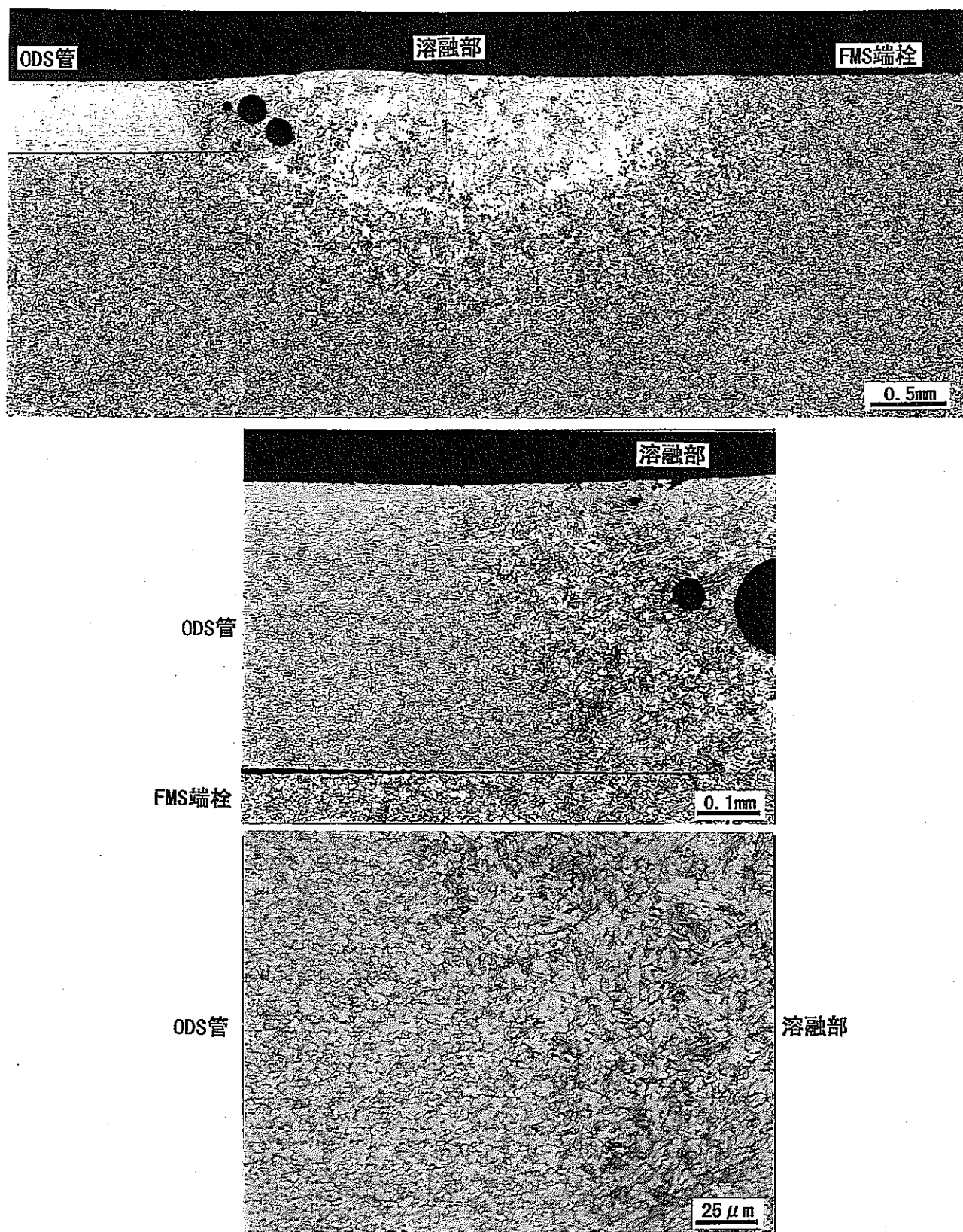


写真 2.8 T I G溶接接合試験片縦断面の組織

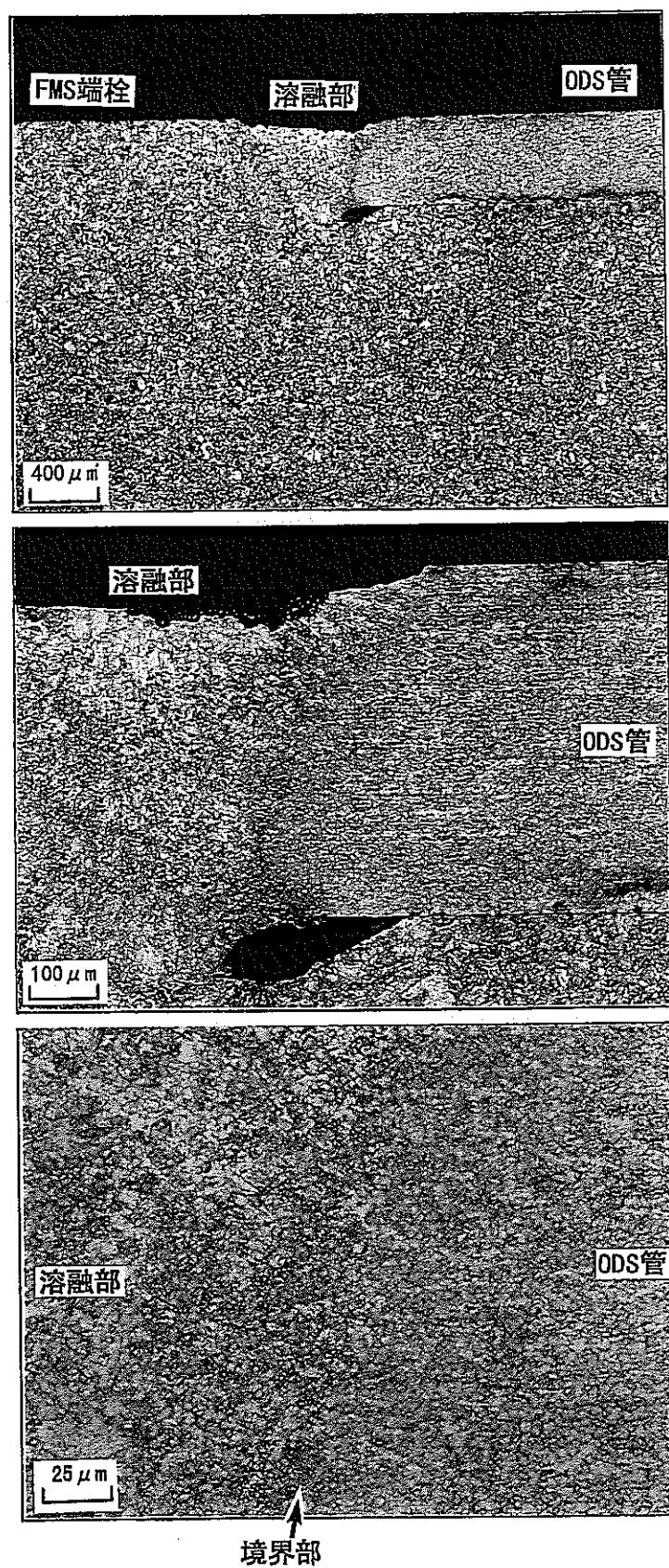


写真 2.9-1 レーザ溶接（条件 1）試験片縦断面の組織

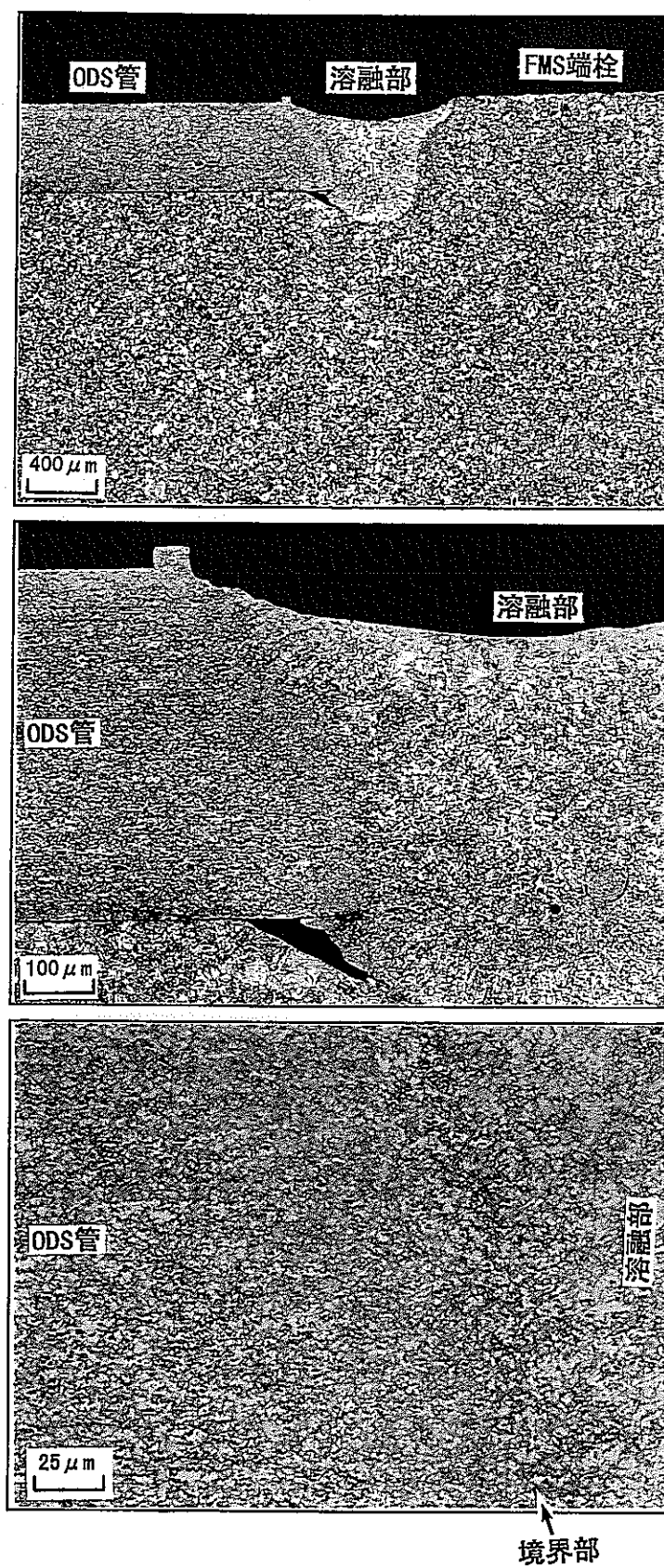


写真 2.9-2 レーザ溶接（条件 2）試験片縦断面の組織

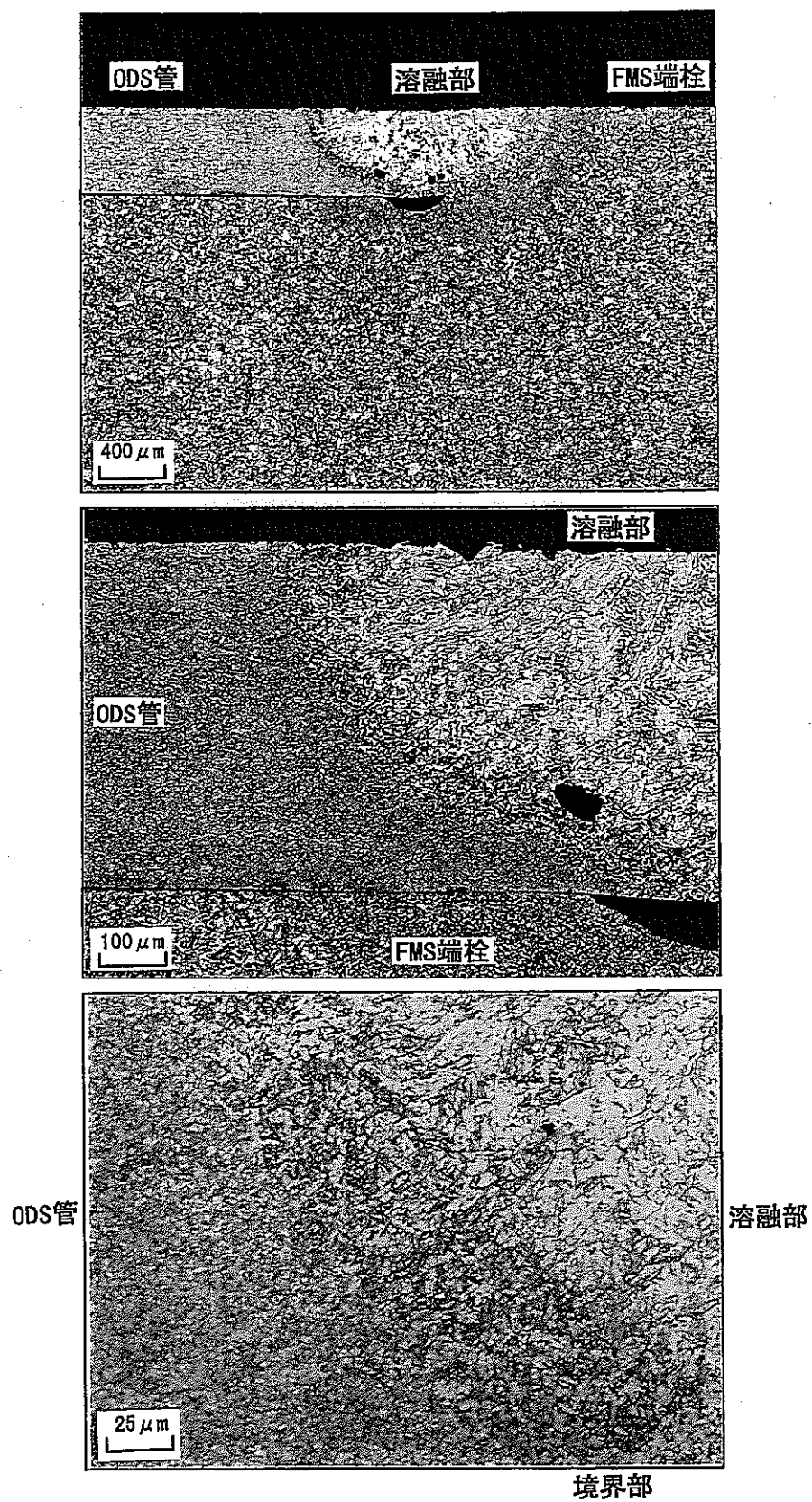


写真 2.10-1 電子ビーム溶接（条件 1）試験片縦断面の組織

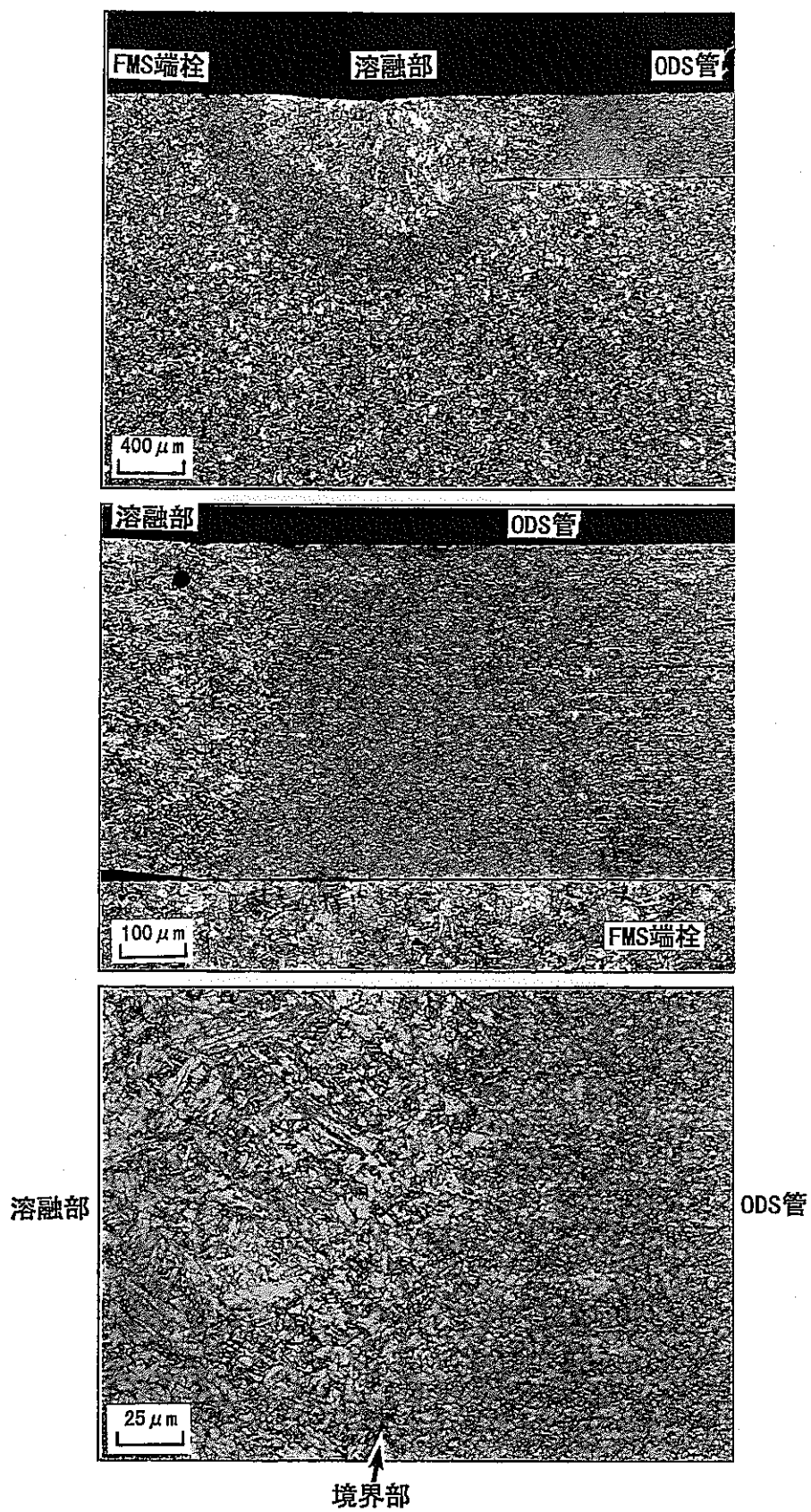


写真 2.10-2 電子ビーム溶接（条件 2）試験片縦断面の組織

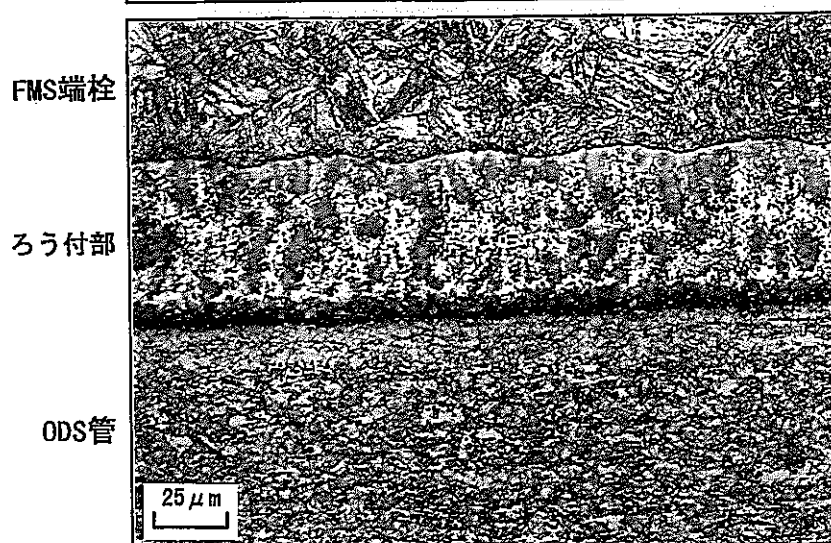
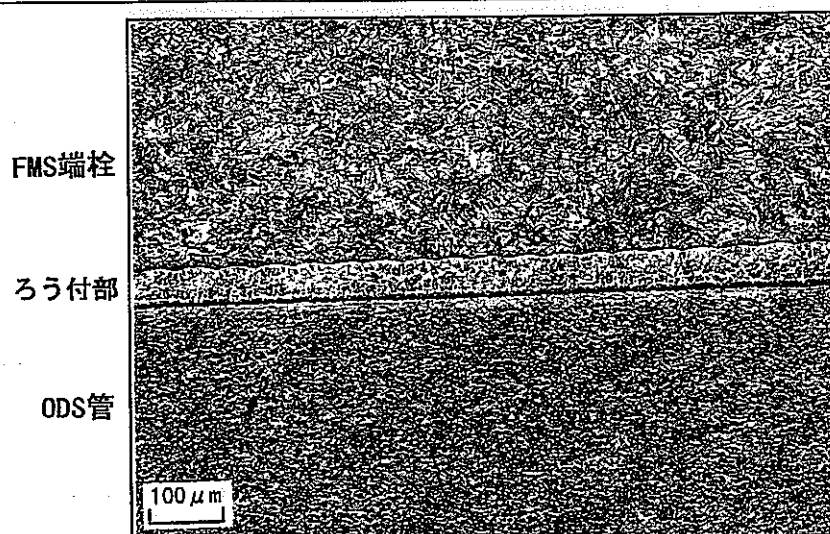
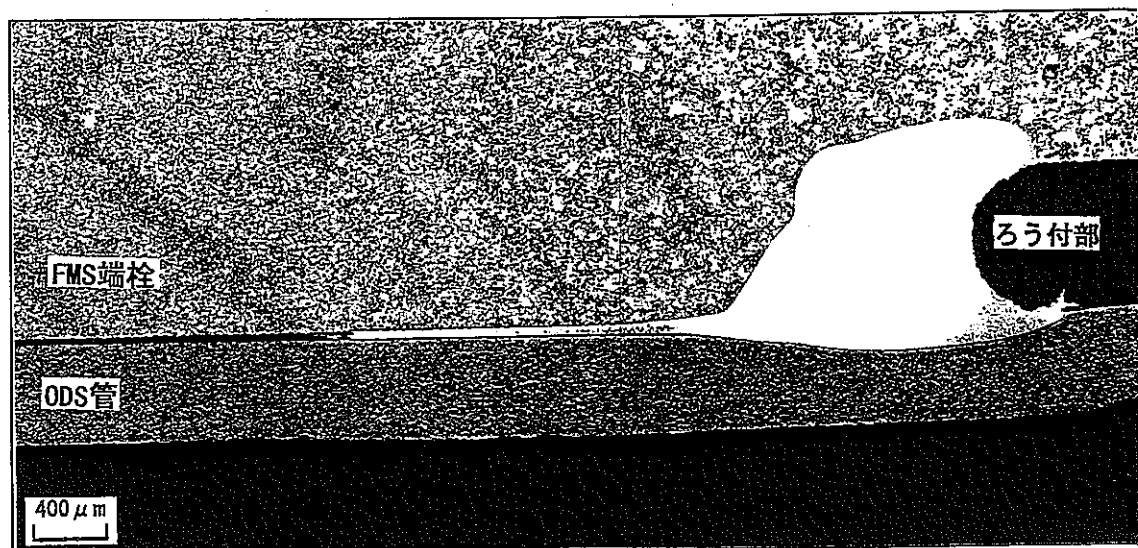


写真 2.11-1 ろう付（金ろう：BAu-4）試験片縦断面の組織

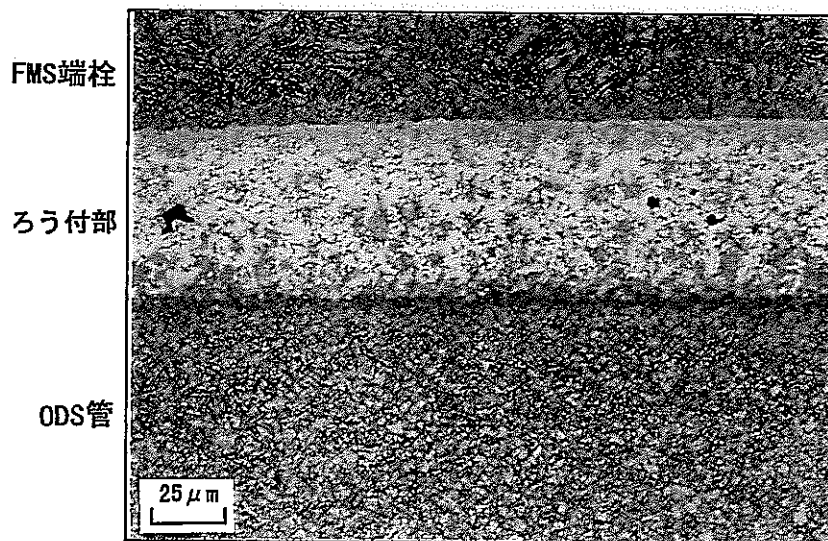
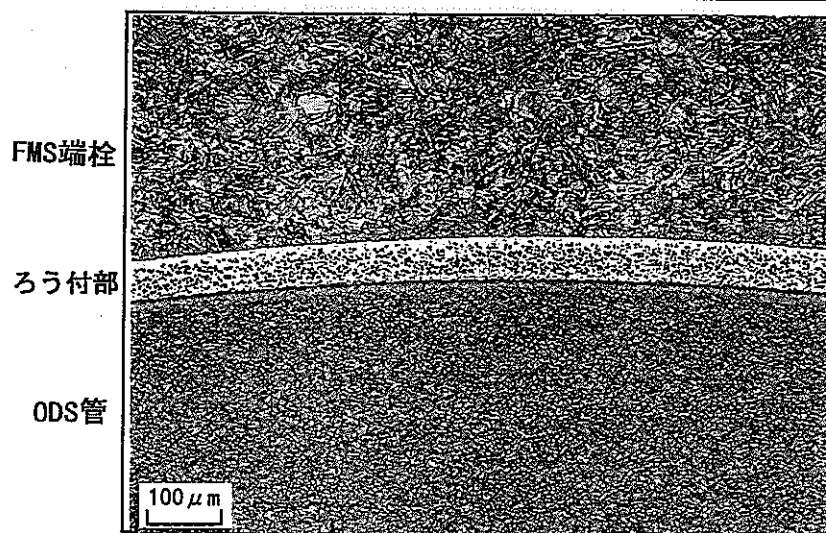
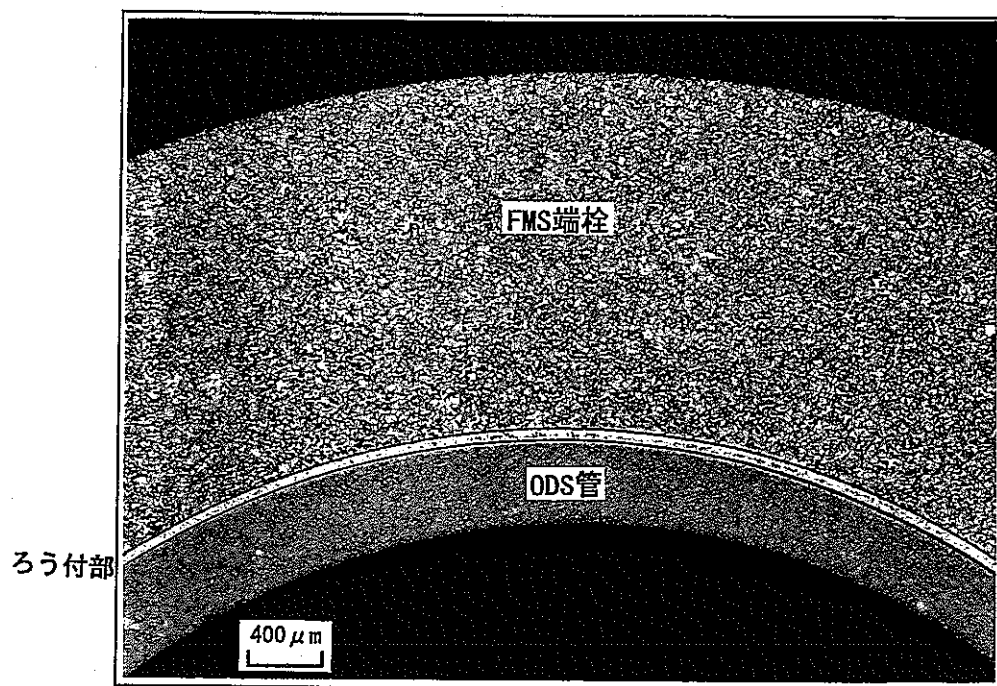


写真 2.11-2 ろう付（金ろう：BAu-4）試験片横断面の組織

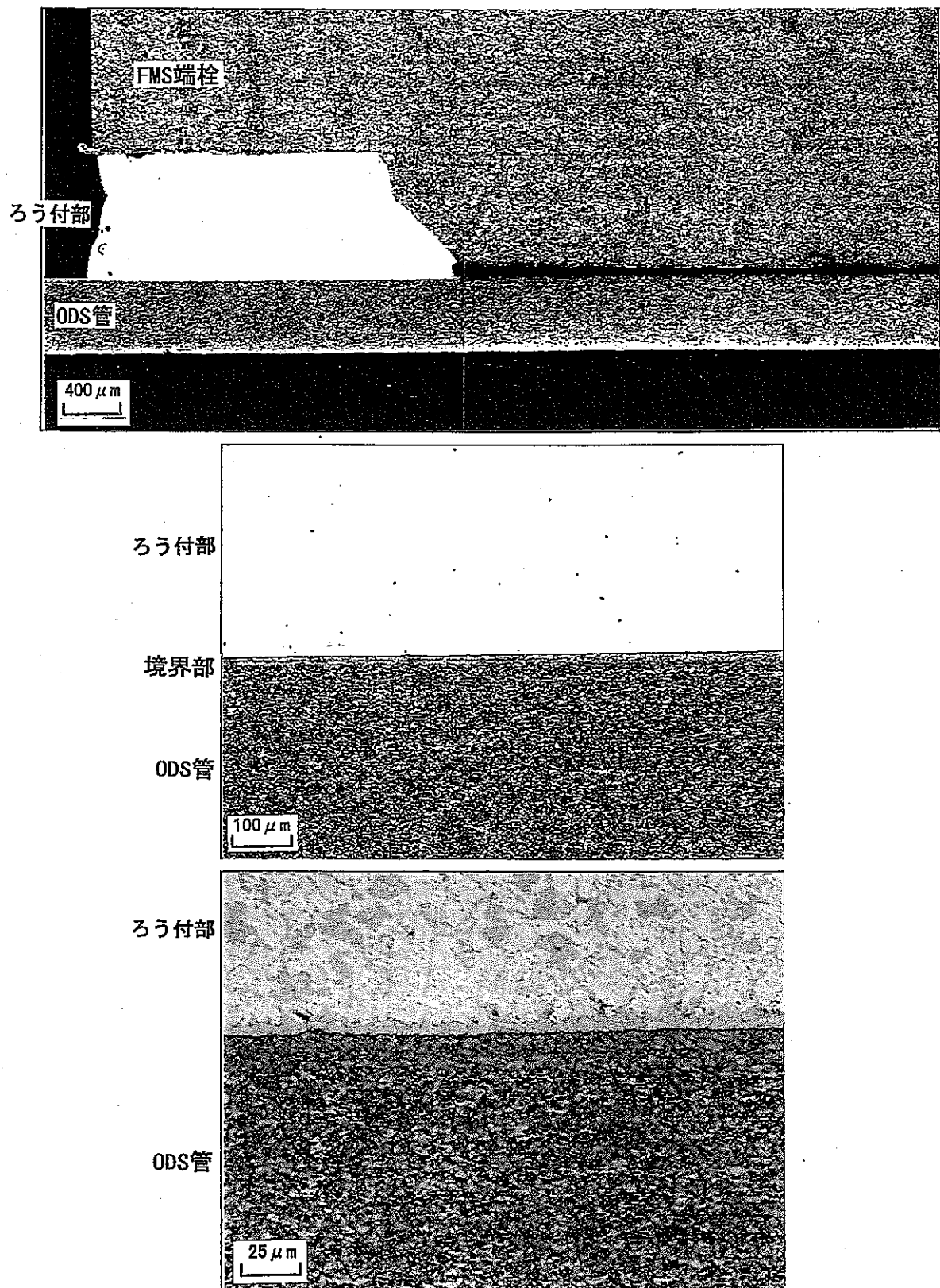


写真 2.12 ろう付（パラジウムろう：BPd-11）試験片縦断面の組織

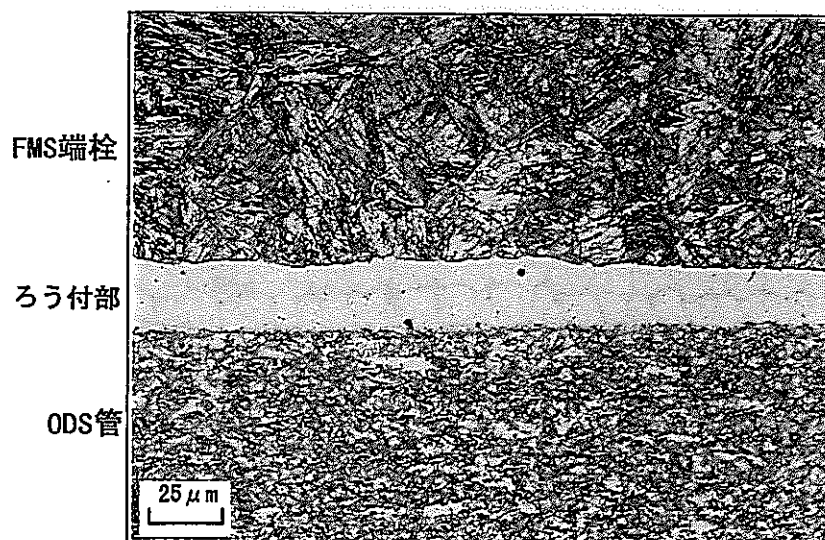
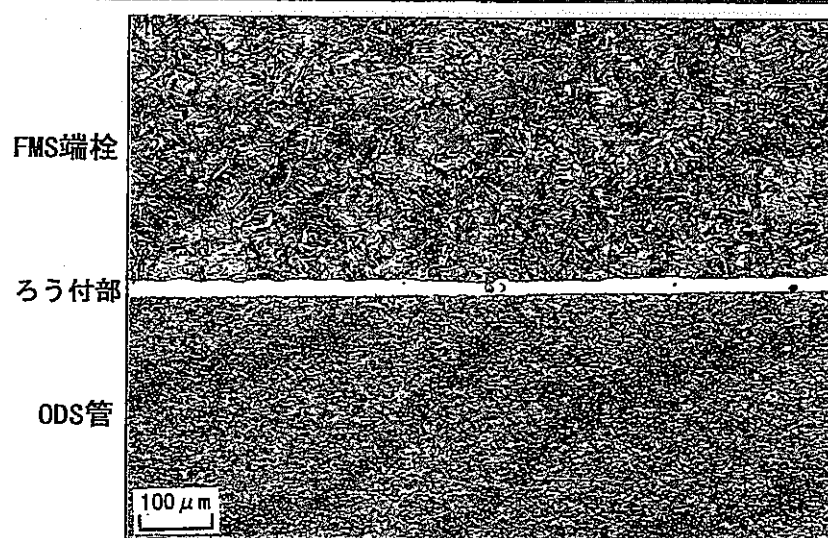
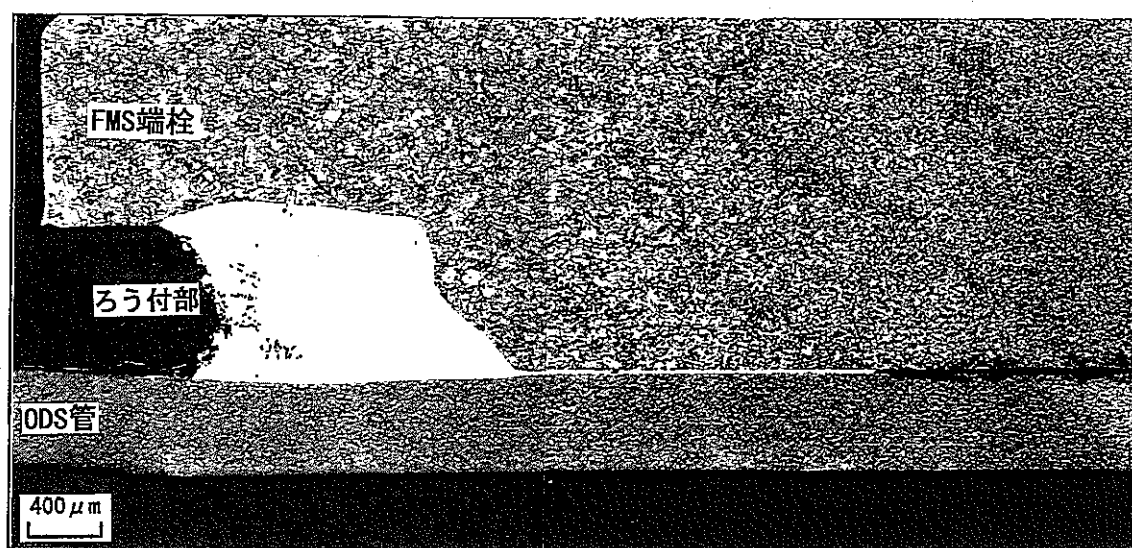


写真 2.13-1 ろう付（ニッケルろう：BNi-5）試験片縦断面の組織

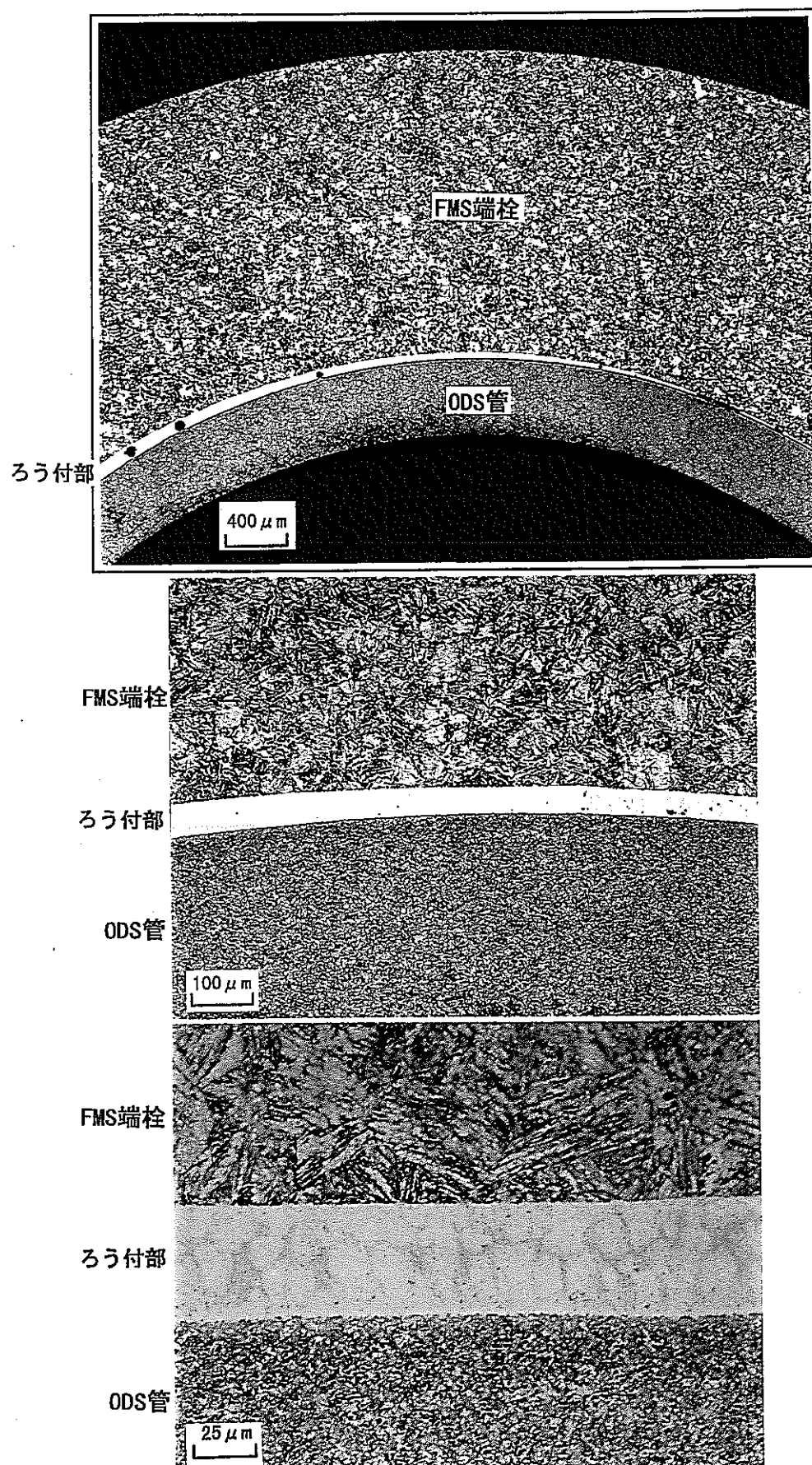


写真 2.13-2 ろう付（ニッケルろう：BNi-5）試験片横断面の組織

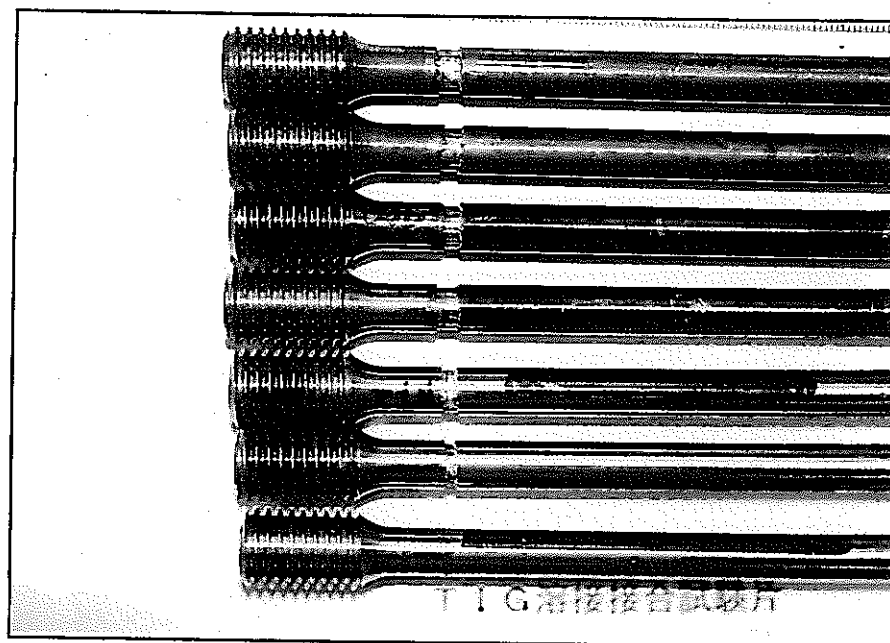
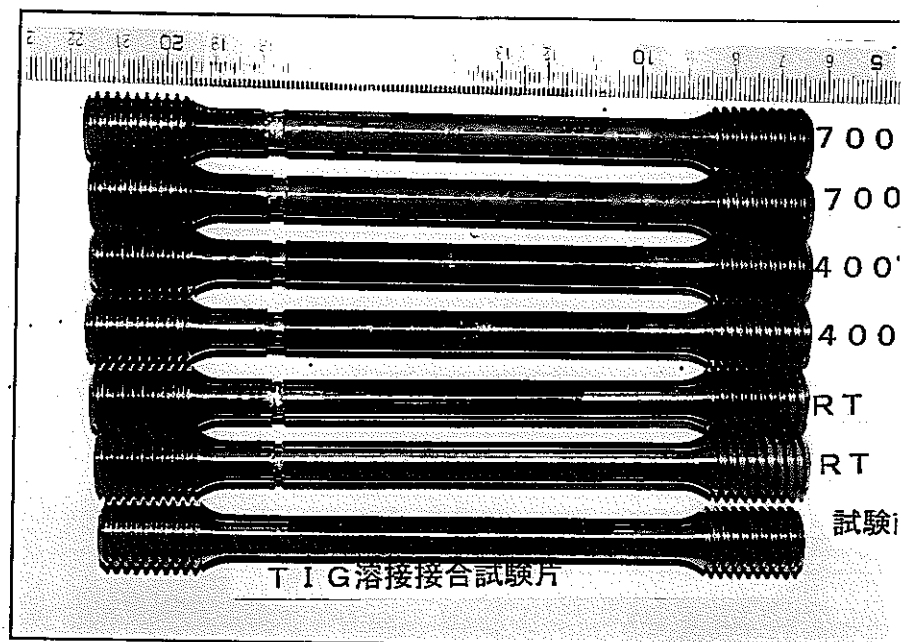


写真 2.14 破断後試験片の外観（T I G溶接試験片）

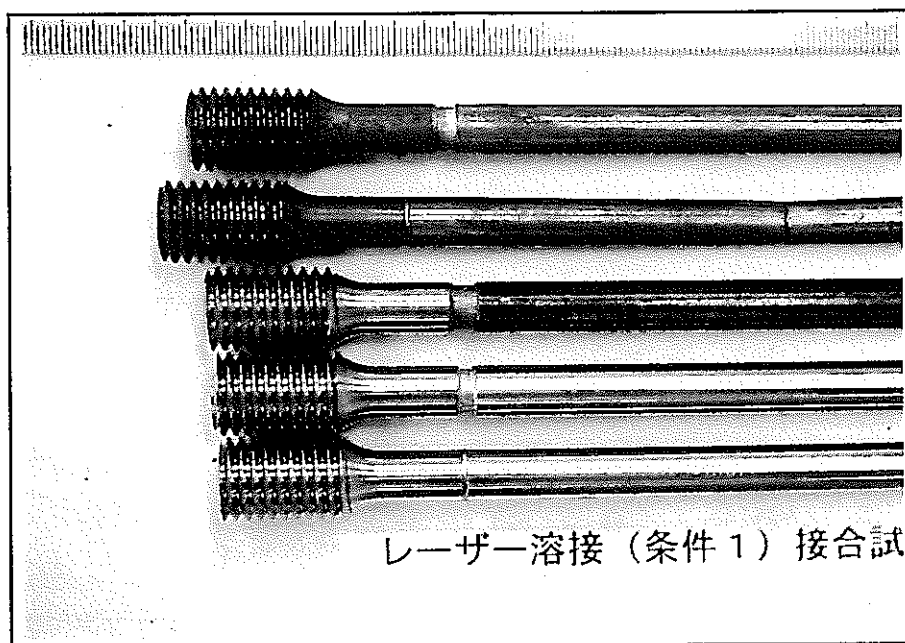
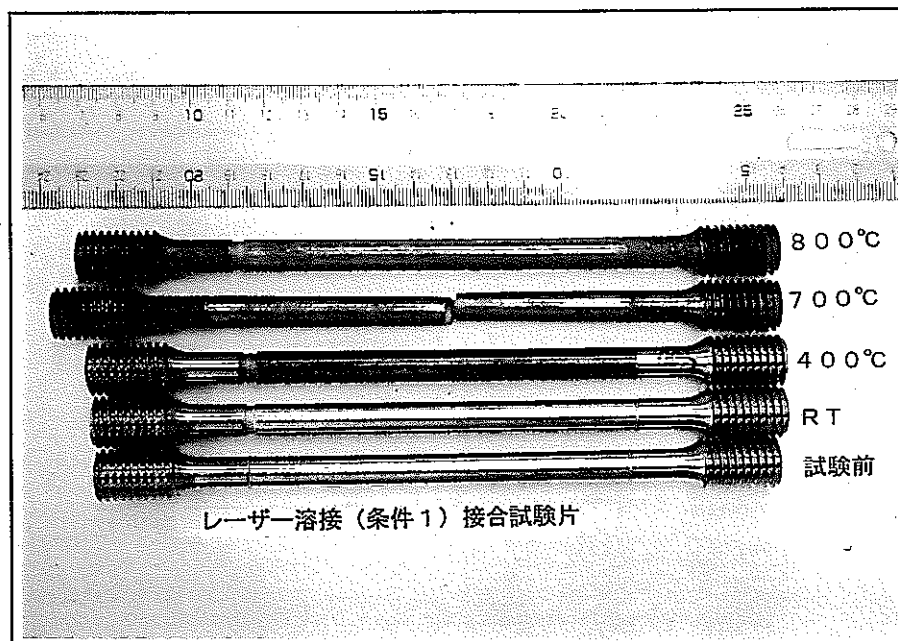


写真 2.15-1 破断後試験片の外観（レーザ溶接試験片：条件1）

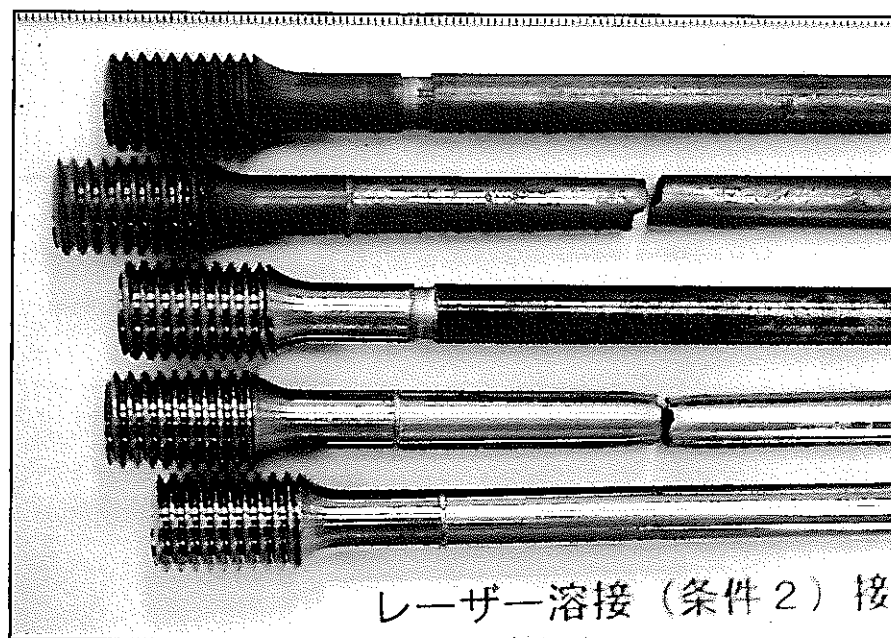
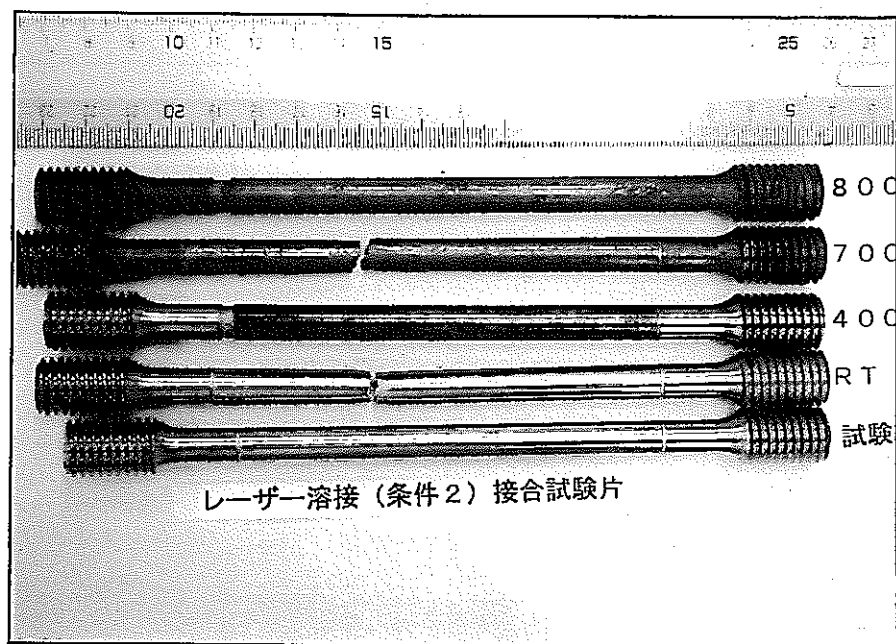


写真 2.15-2 破断後試験片の外観（レーザー溶接試験片：条件2）

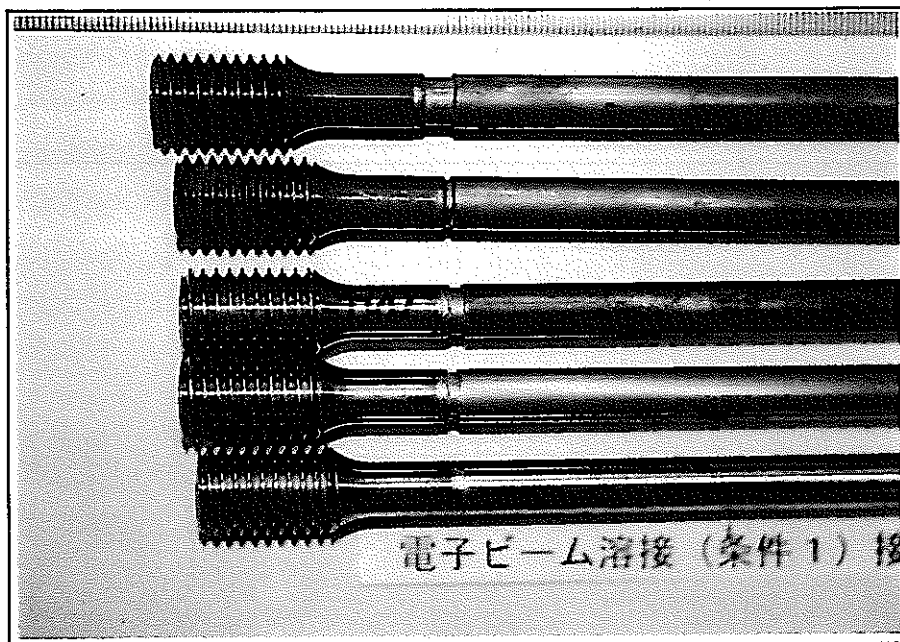
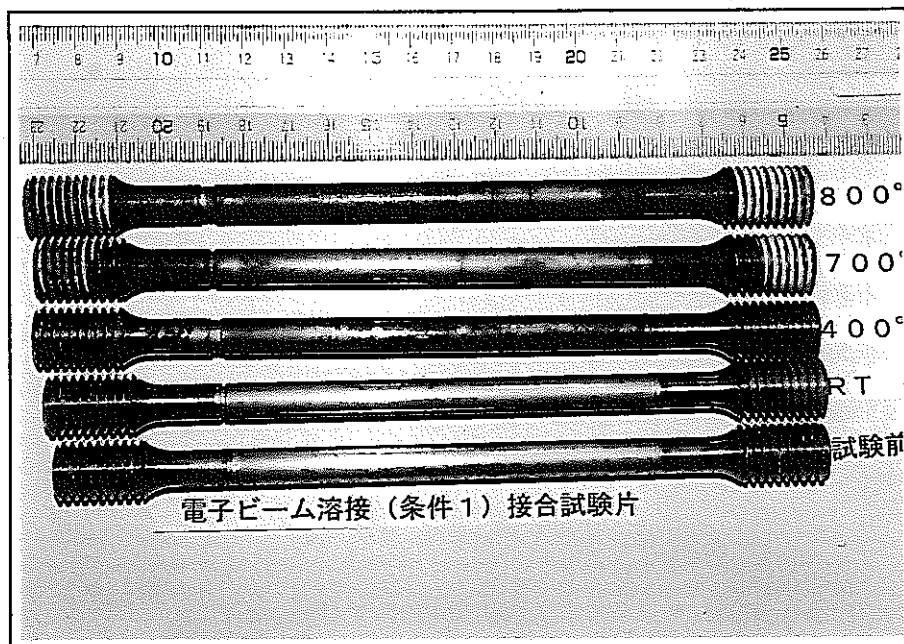


写真 2.16-1 破断後試験片の外観 (電子ビーム溶接試験片 : 条件 1)

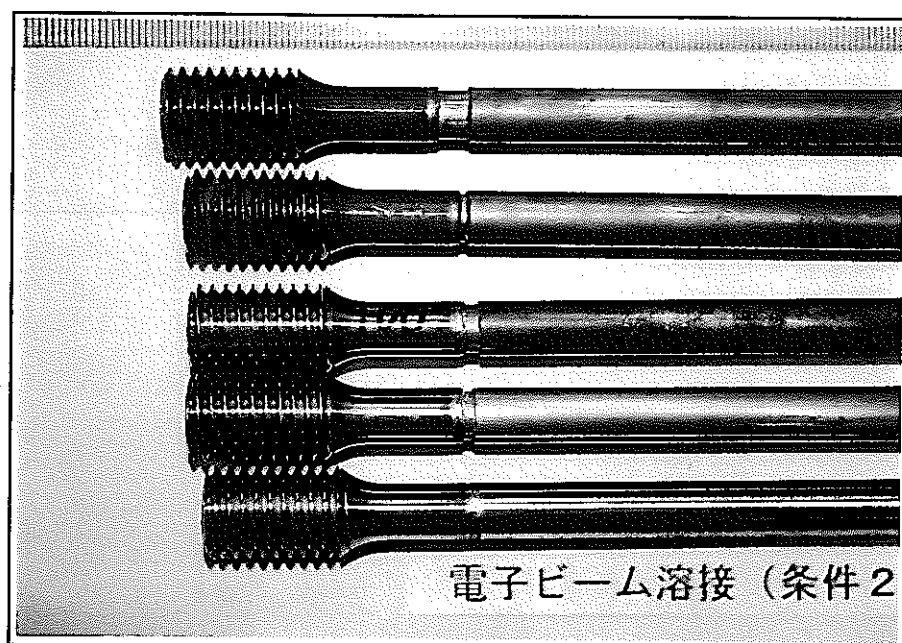
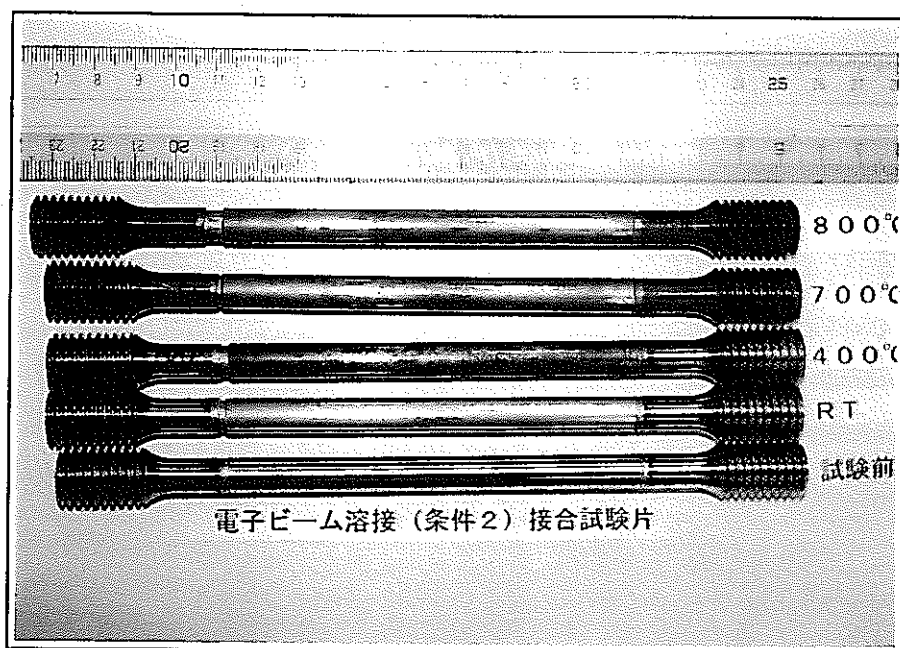


写真 2.16-2 破断後試験片の外観 (電子ビーム溶接試験片 : 条件2)

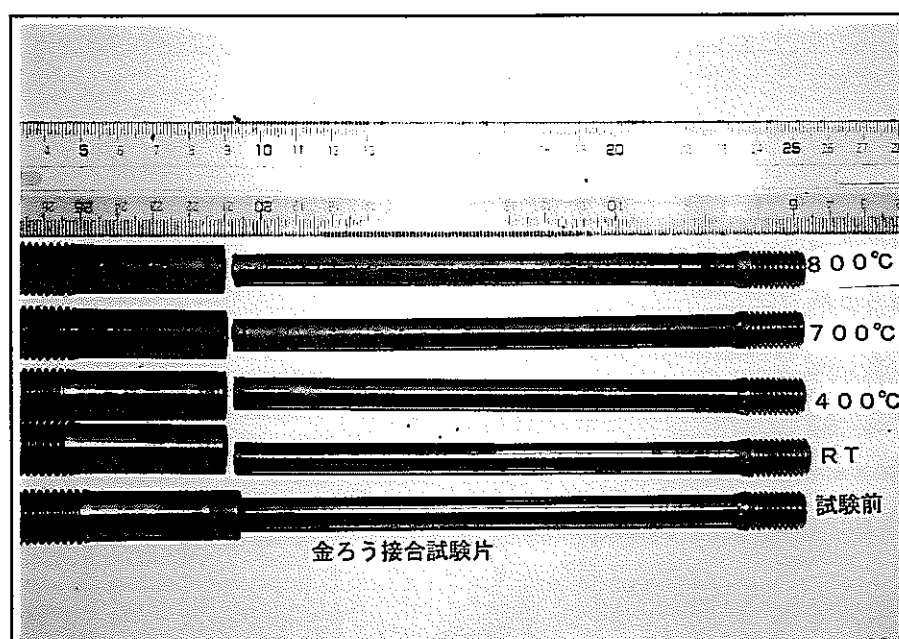
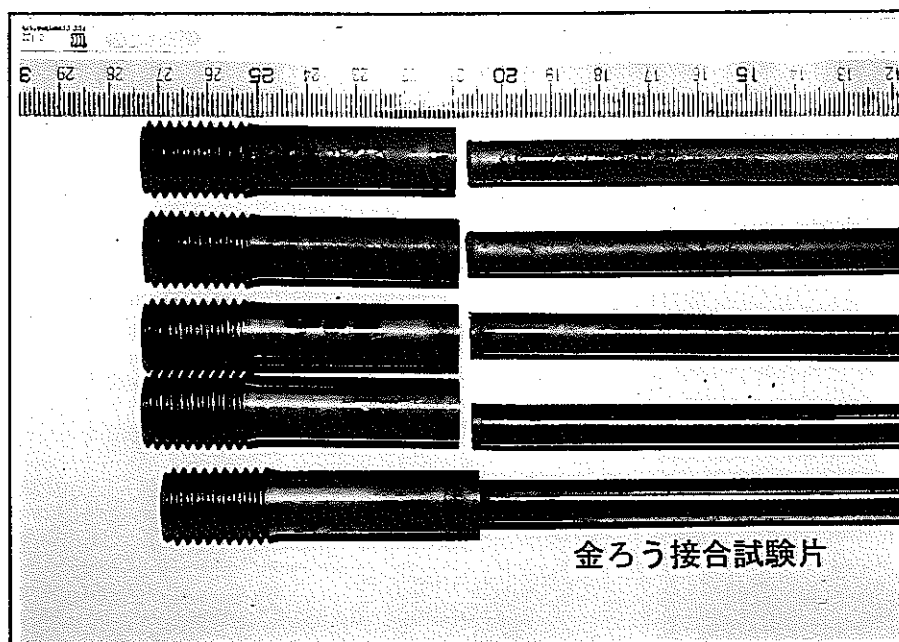


写真 2.17 破断後試験片の外観（金ろう接合試験片）

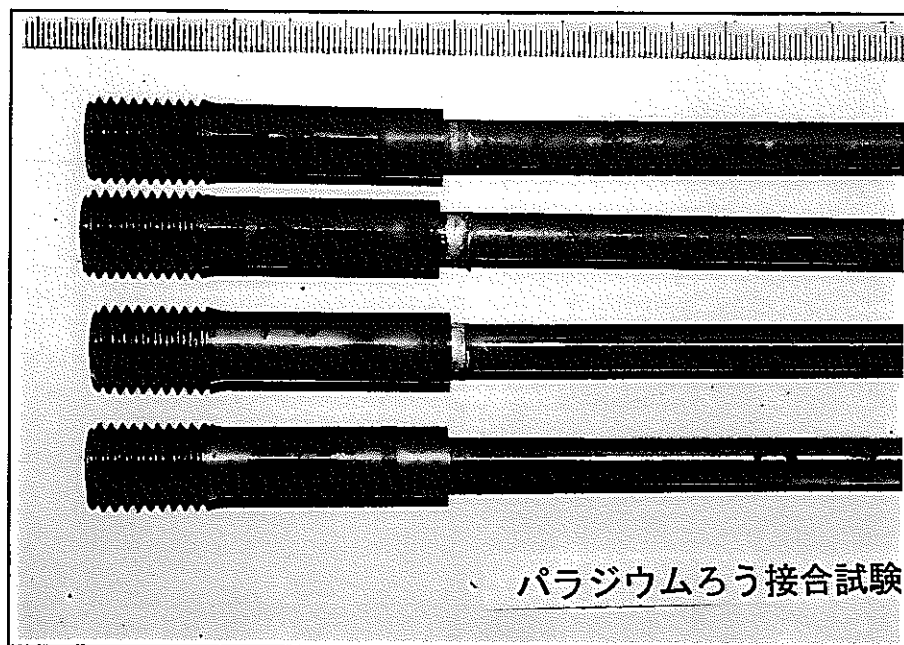
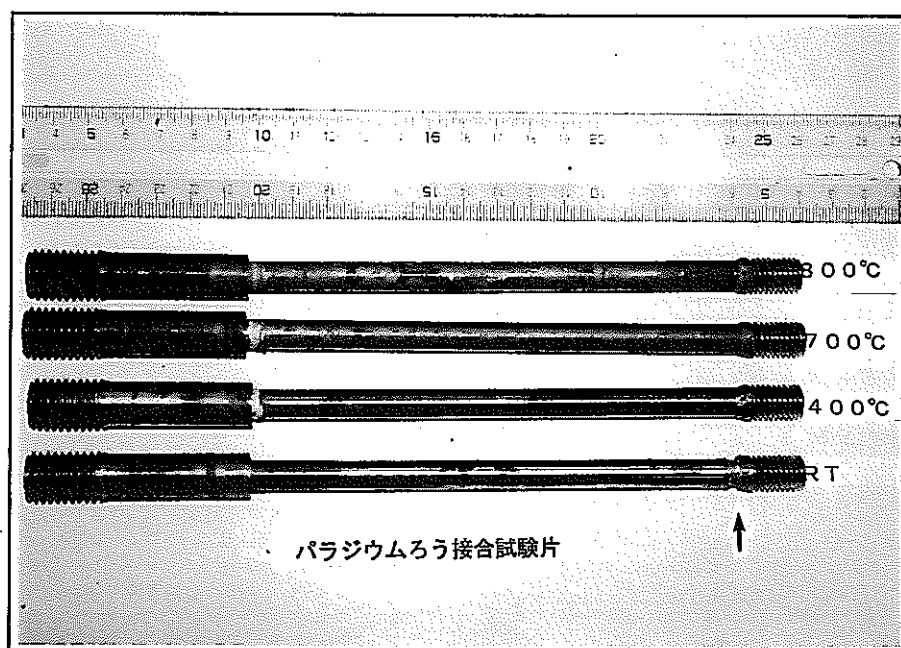


写真 2.18 破断後試験片の外観（パラジウムろう接合試験片）

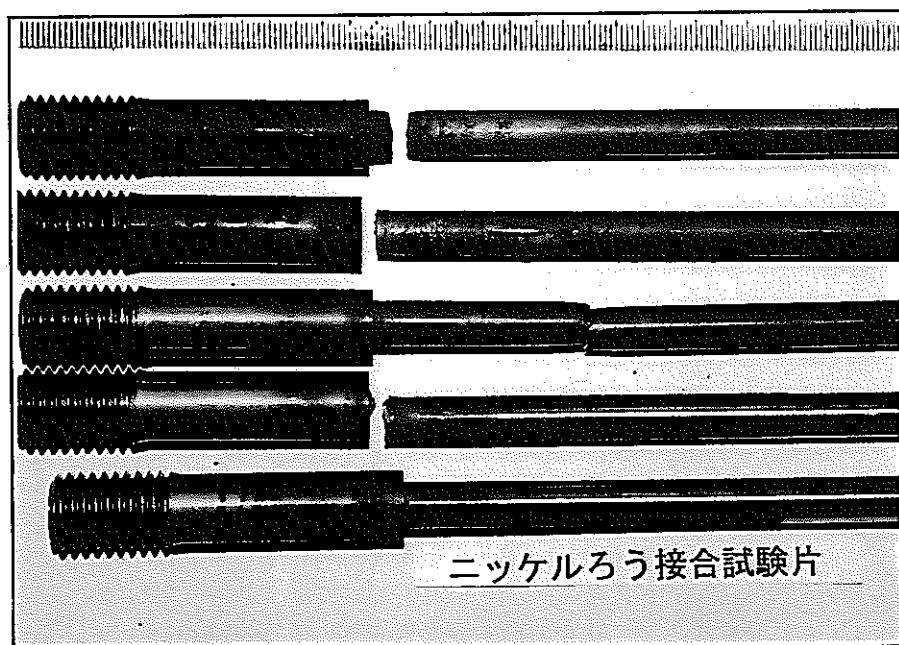
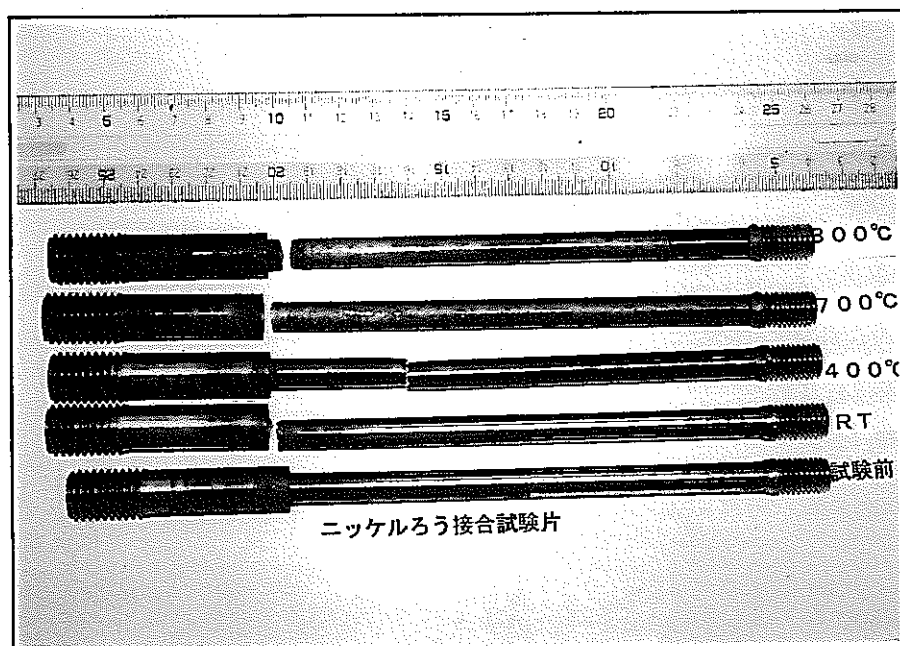
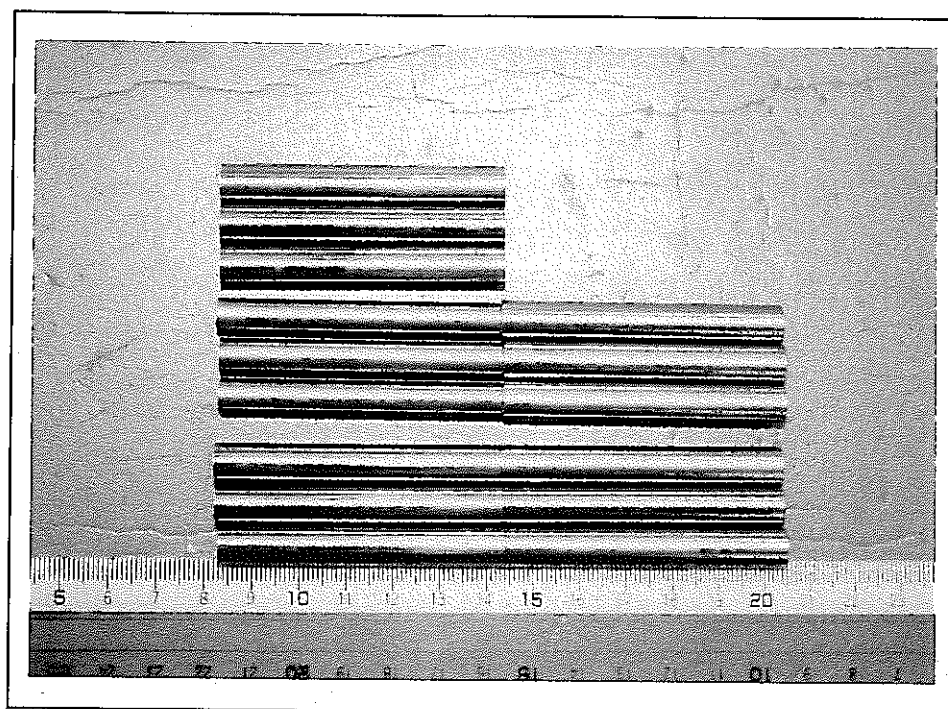
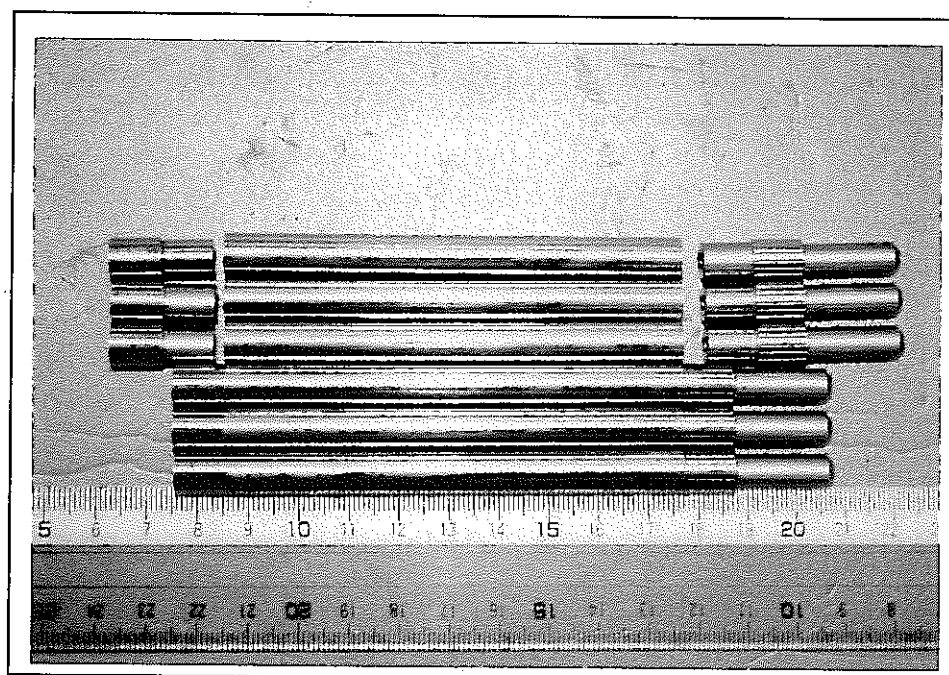


写真 2.19 破断後試験片の外観（ニッケルろう接合試験片）

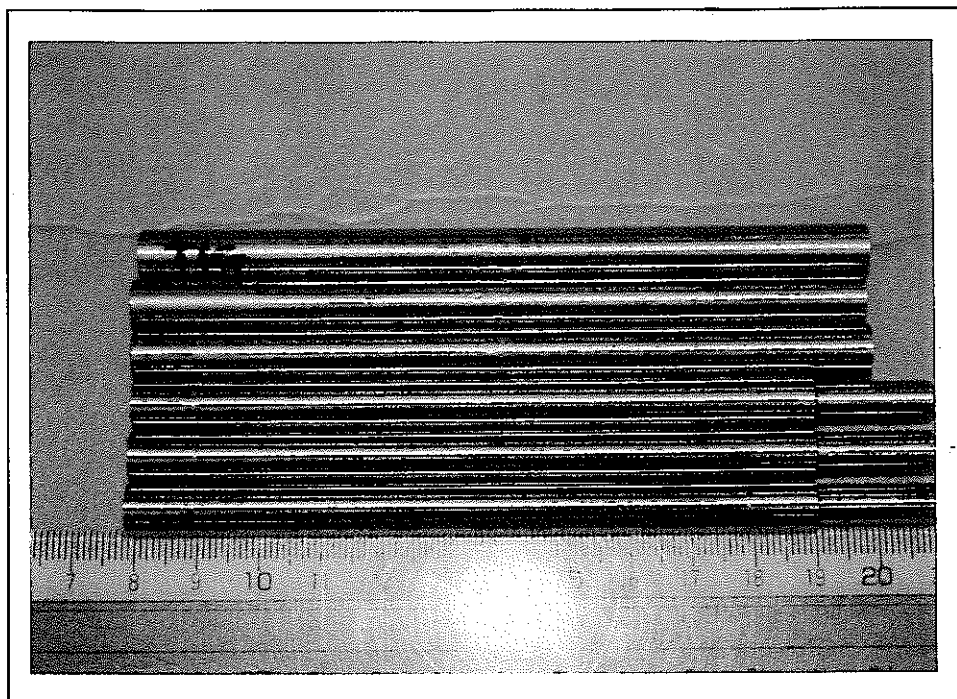


曲げ試験片

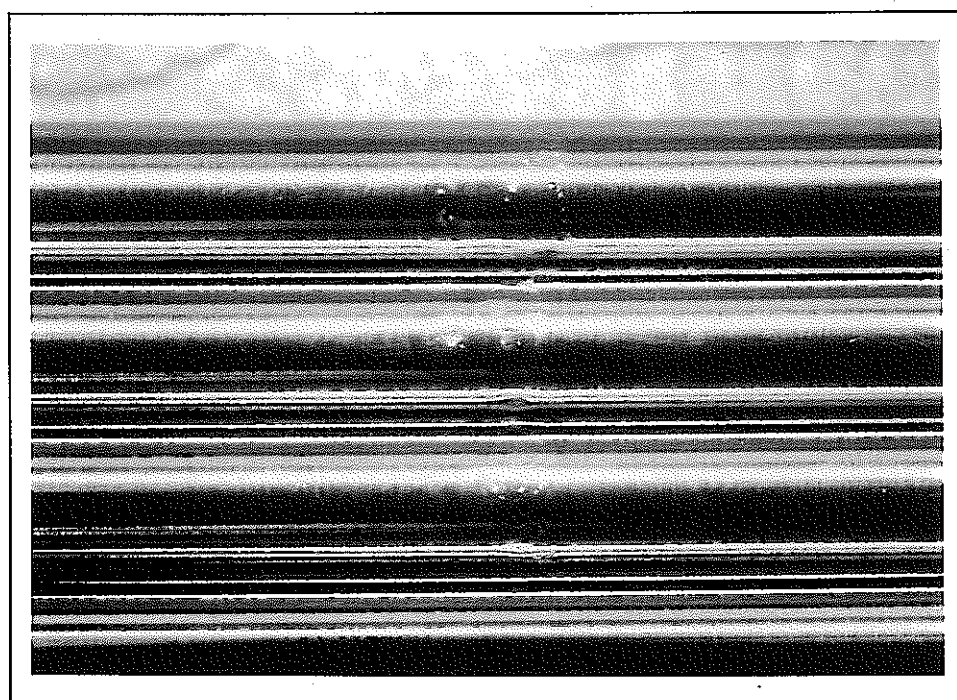


内圧クリープ破断試験片

写真 3.1 試験片の外観（溶接前）

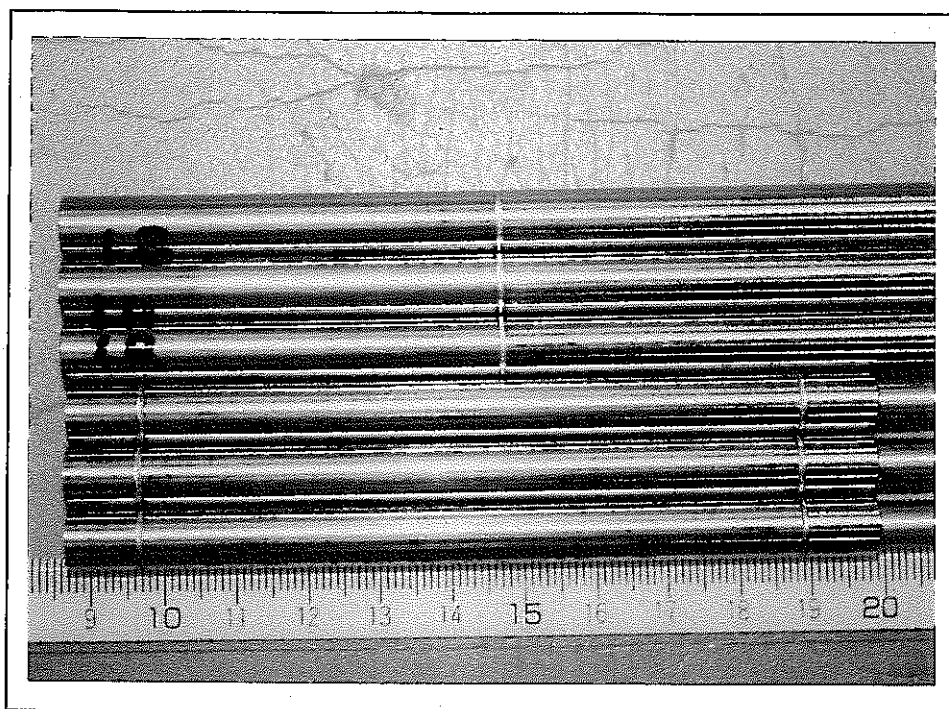


曲げ試験及び内圧クリープ破断試験片

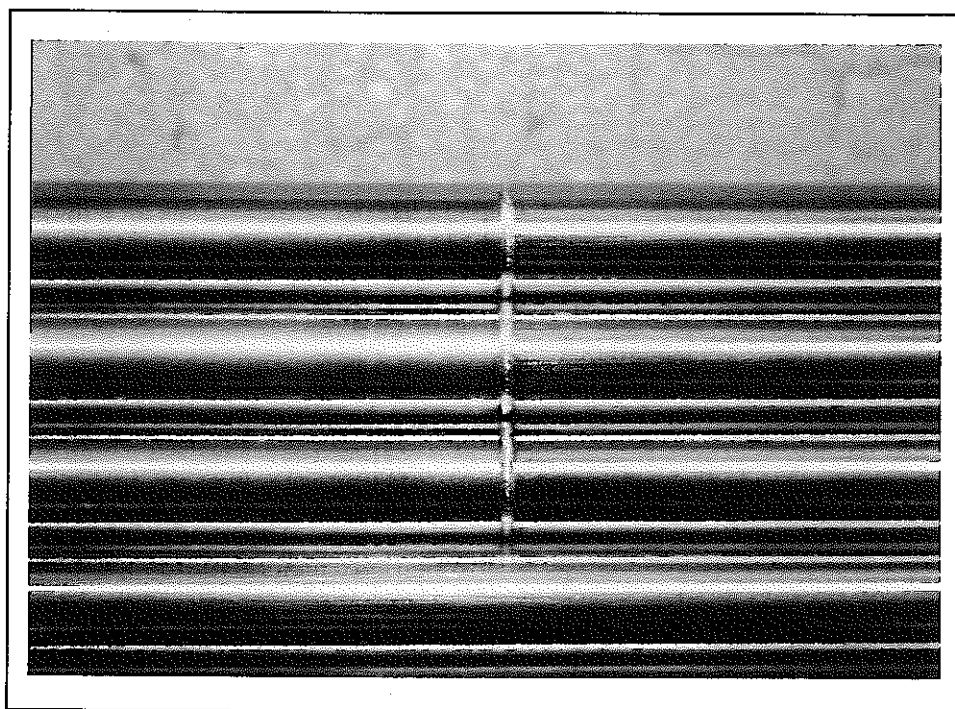


、 TIG 溶接部

写真 3.2 試験片の外観（TIG 溶接後）



曲げ試験及び内圧クリープ破断試験片



レーザー溶接部

写真 3.3 試験片の外観（レーザー溶接後）

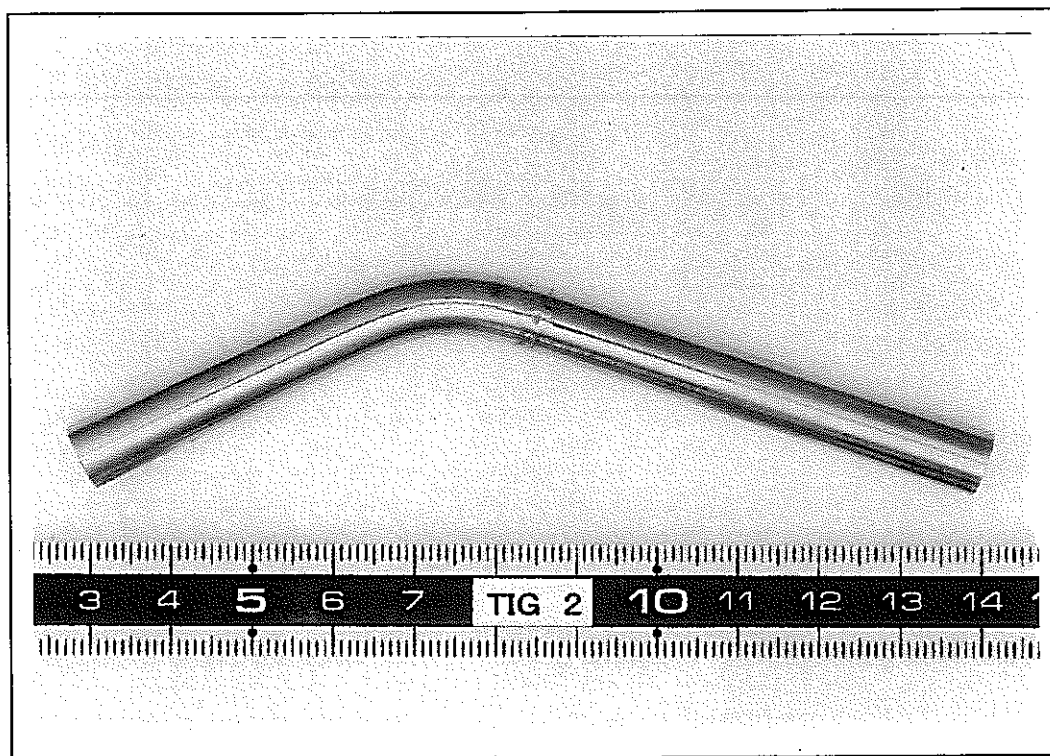
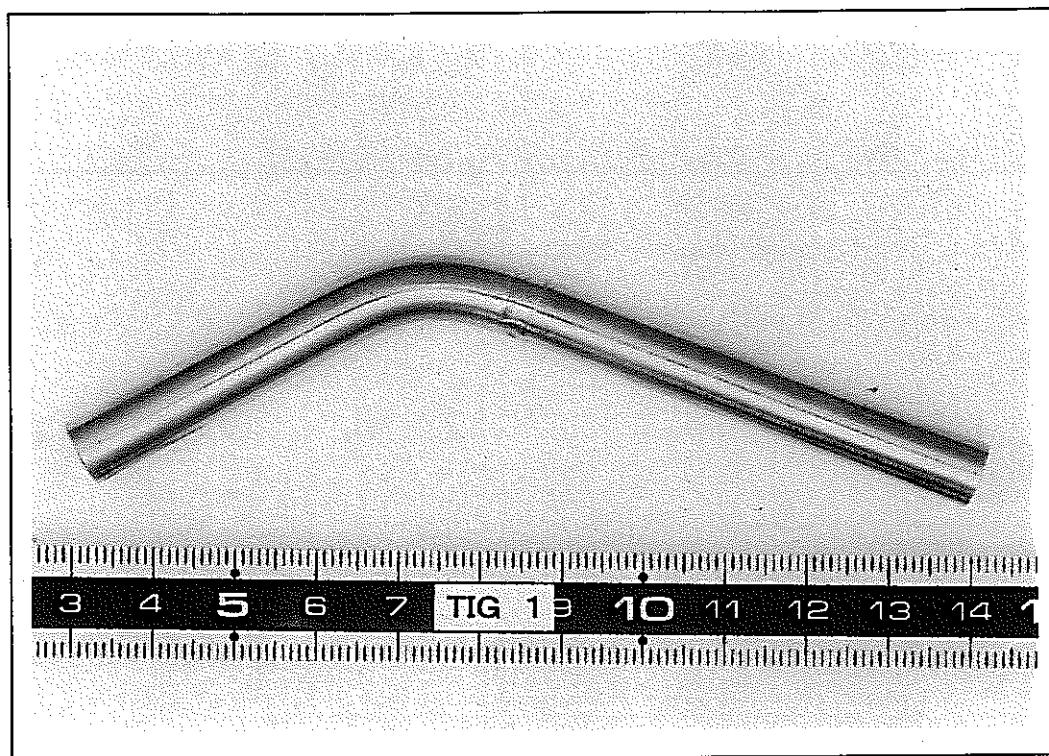


写真 3.4-1 TIG 溶接試験片曲げ試験後の外観

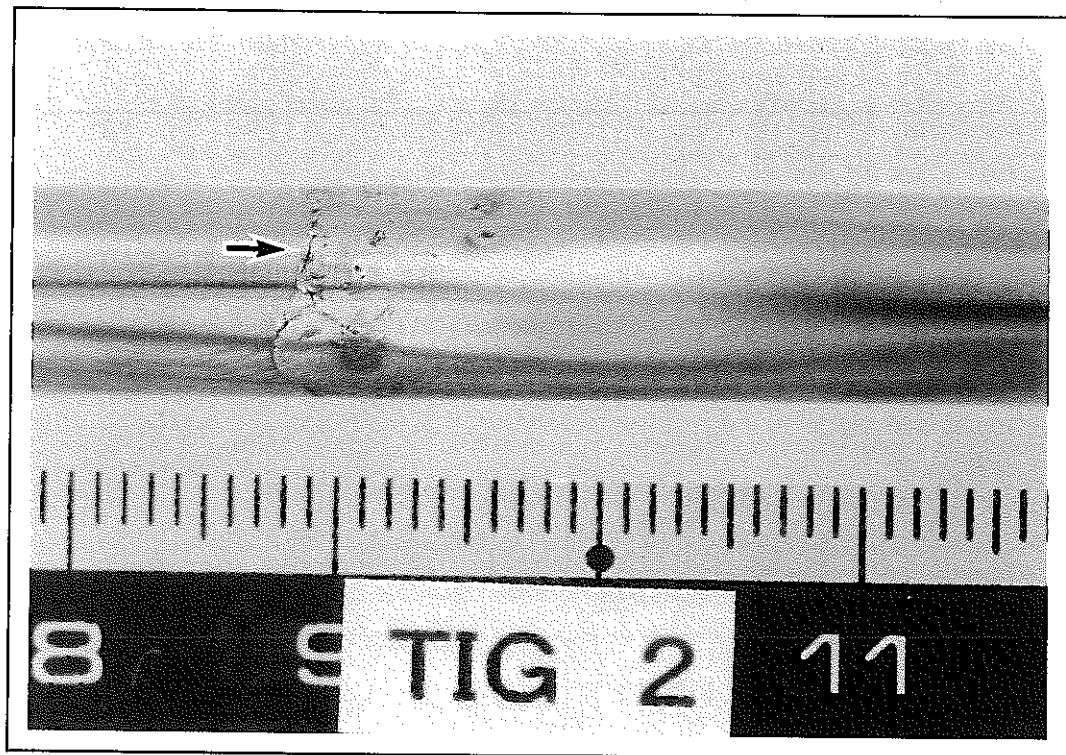
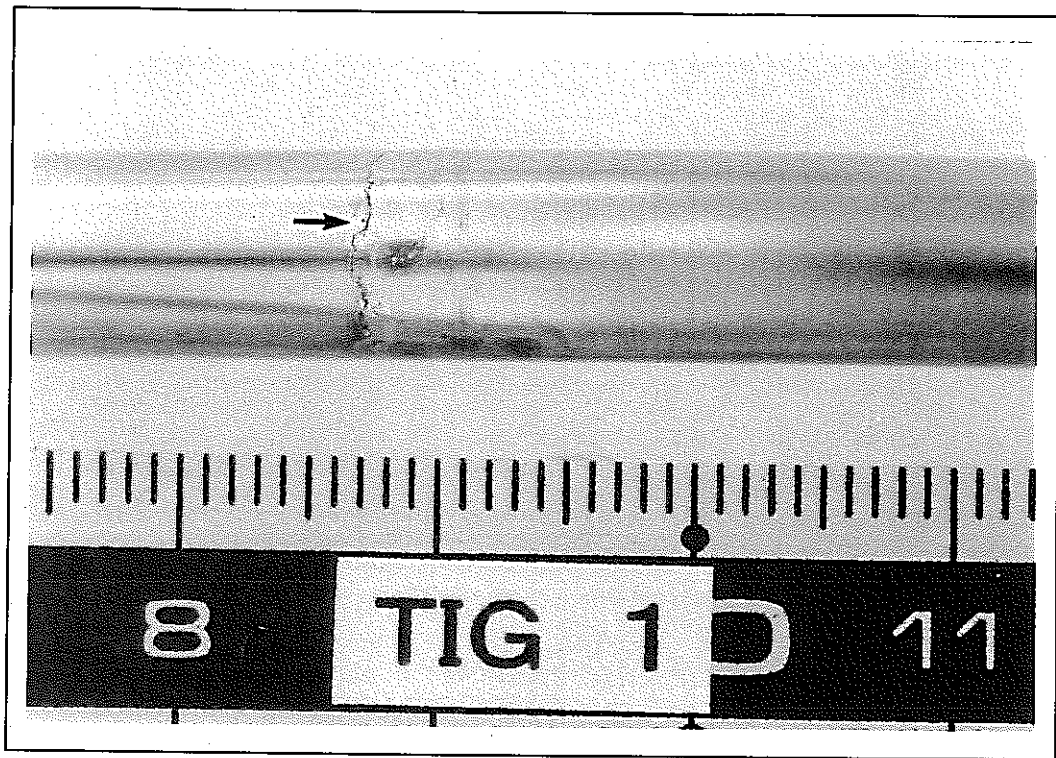


写真 3.4-2 TIG 溶接試験片曲げ試験後の外観（溶接部拡大）

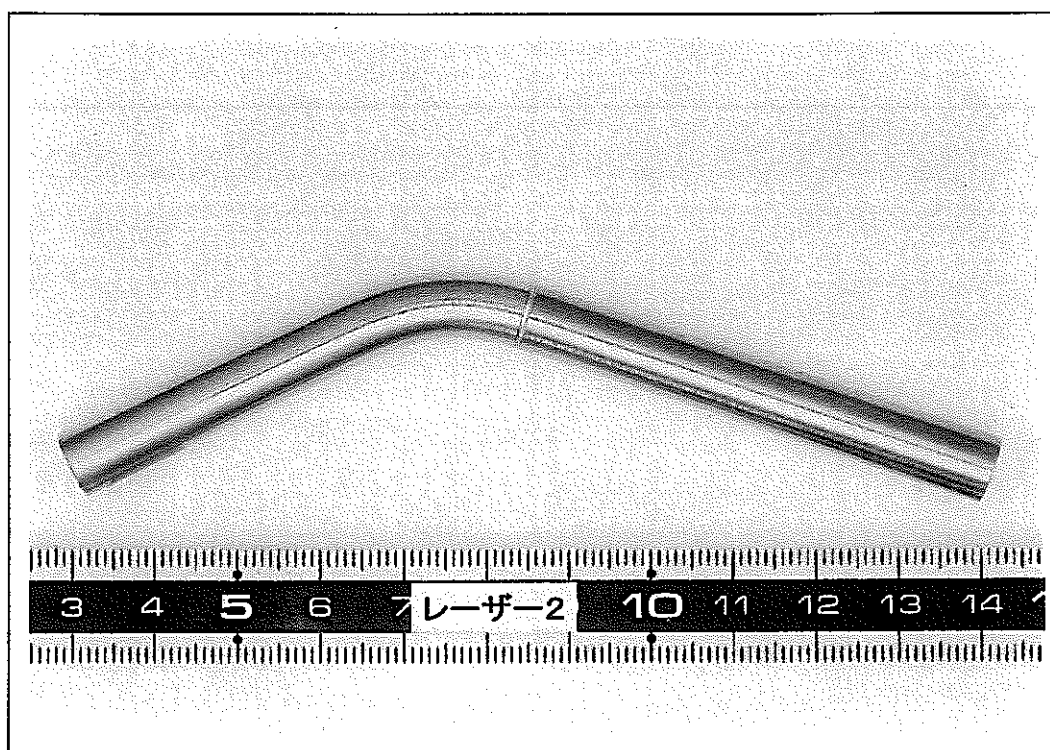
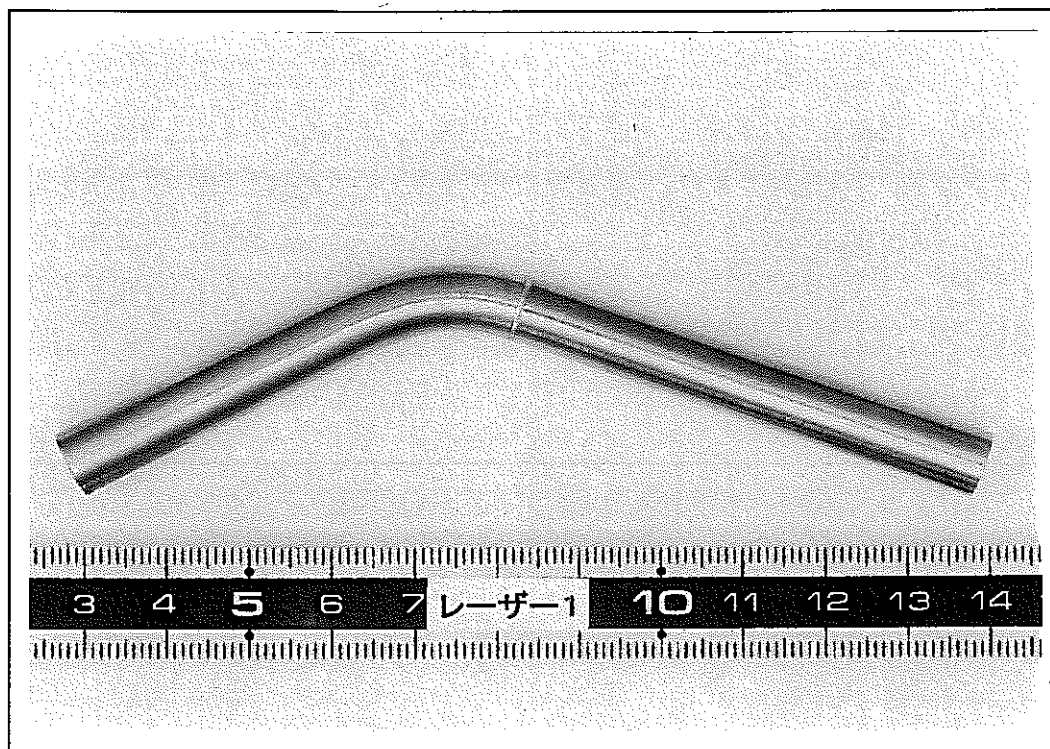


写真 3.5-1 レーザー溶接試験片曲げ試験後の外観

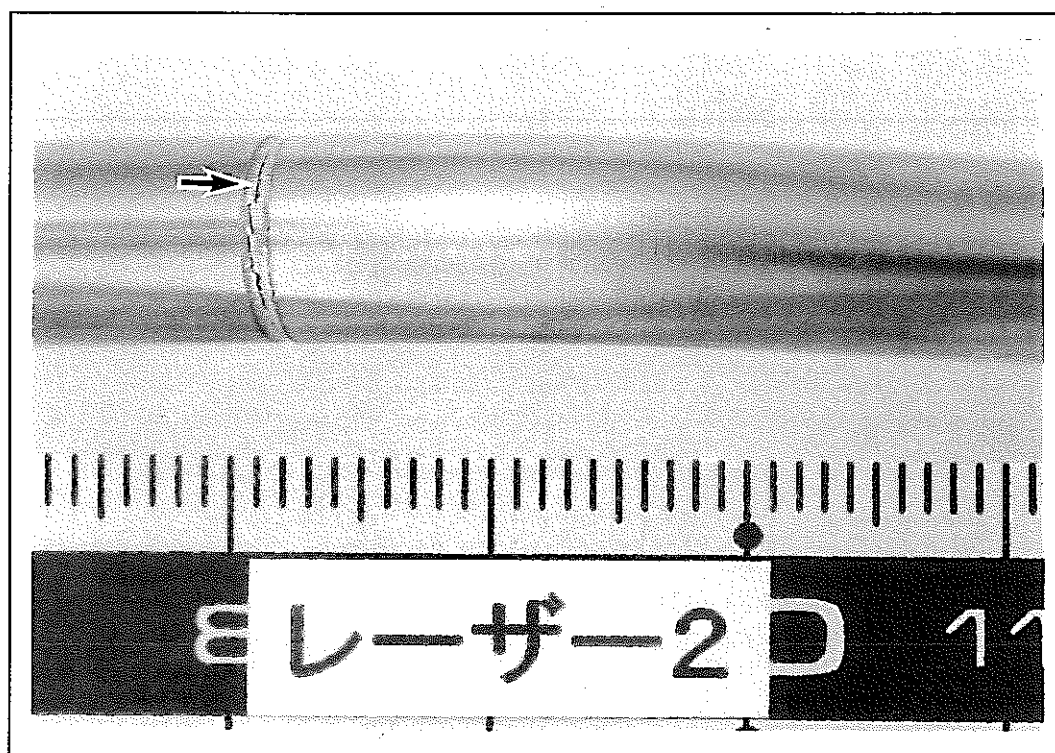
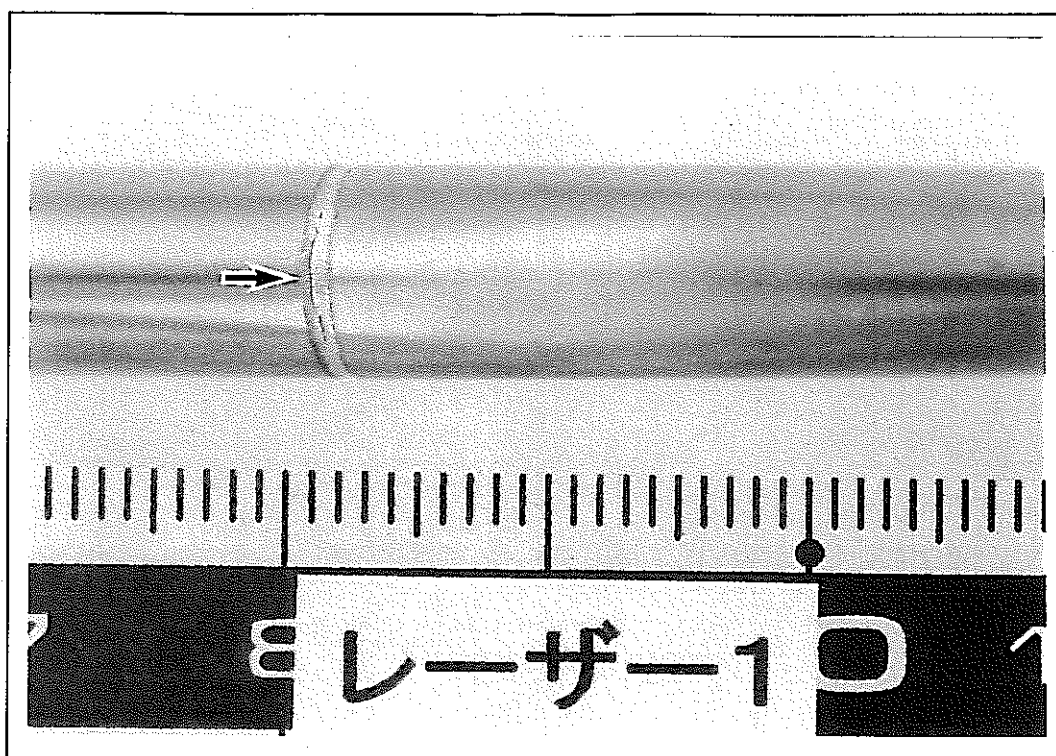
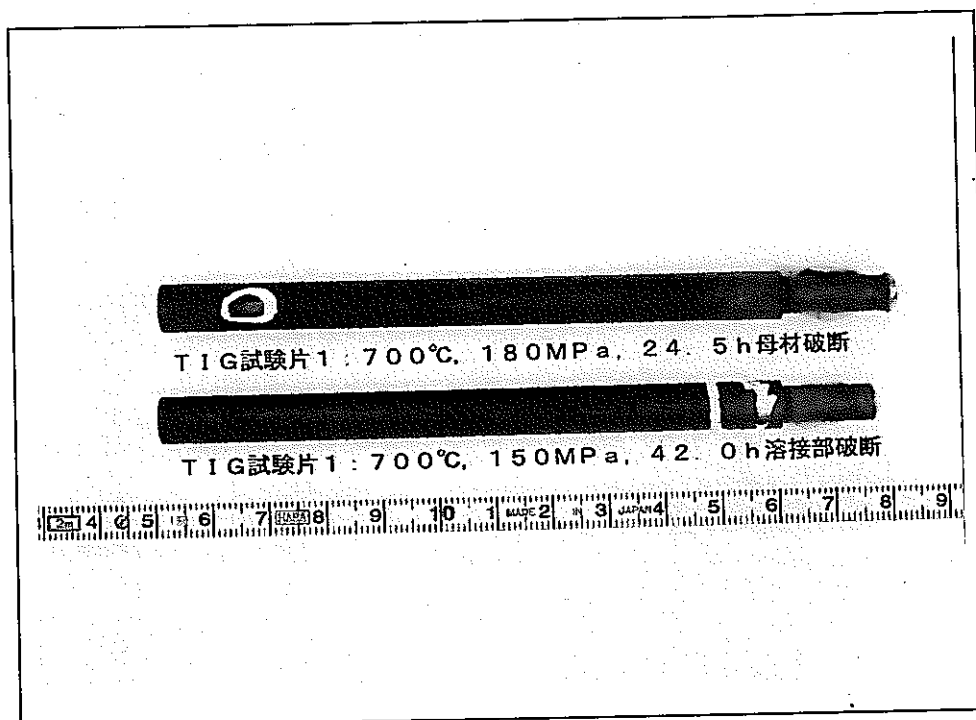
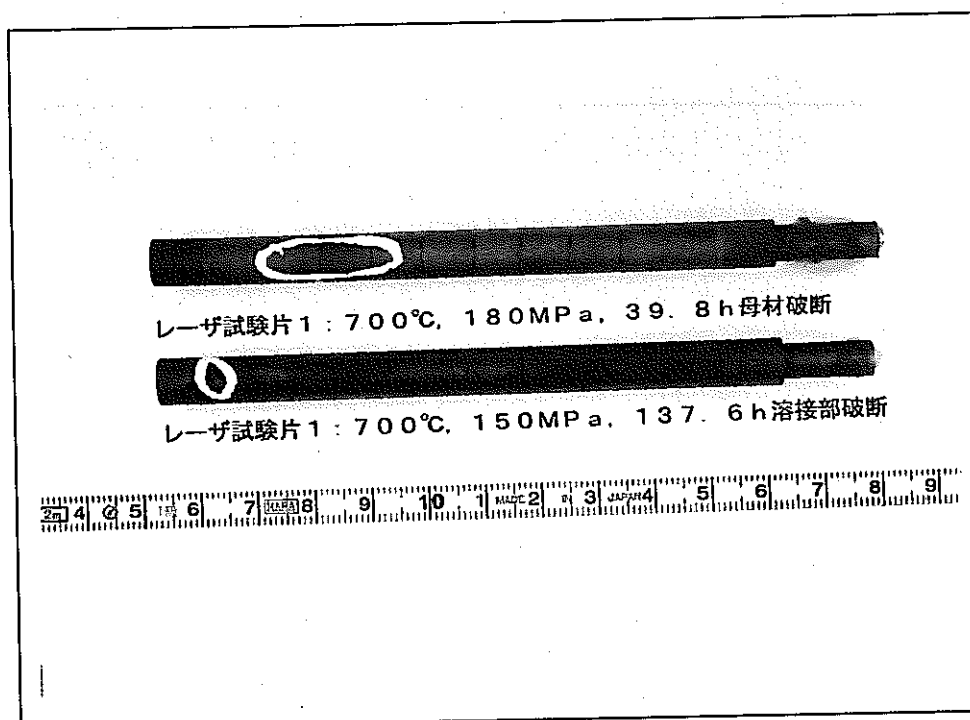


写真 3.5-2 レーザー溶接試験片曲げ試験後の外観（溶接部拡大）



TIG 溶接試験片



レーザー溶接試験片

写真 3.6 内圧クリープ破断後試験片の外観

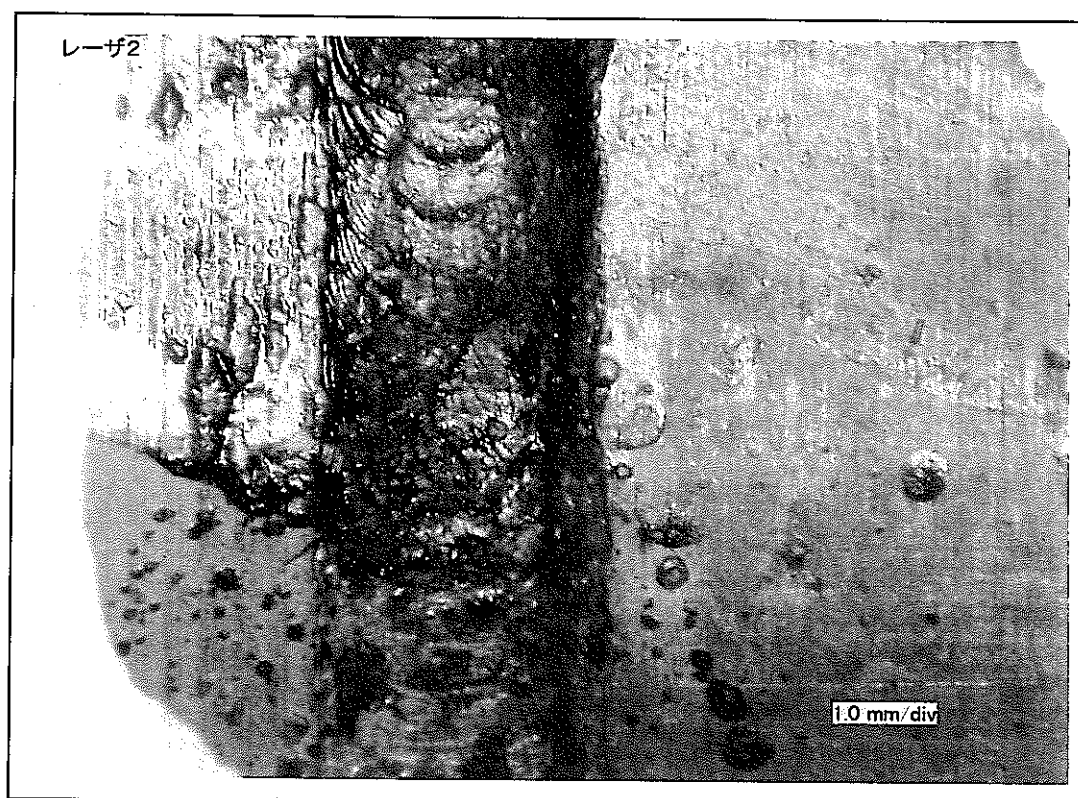


写真 3.7 内圧クリープ破断後試験片の外観
(レーザー溶接試験片の溶接破断部)