

PNC- FMS 鋼ラップ管／SUS316 鋼の 異材溶接技術開発（Ⅲ）

— 溶接部の強度特性評価 —

（研究報告）

2 0 0 4 年 1 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村松 4 番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課
電話：029-282-1122（代表）
ファックス：029-282-7980
電子メール：jserv@jnc.go.jp

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)
2004

PNC-FMS 鋼ラップ管／SUS316 鋼の異材溶接技術開発(Ⅲ)

－溶接部の強度特性評価－

(研究報告)

成田 健^{*)}、鵜飼 重治^{*)}、皆藤 威二^{*)}

大塚 智史^{*)}、藤原 優行^{**)}

要旨

オーステナイト鋼に比べて中性子照射によるスエリング量が格段に少ないフェライト/マルテンサイト鋼(PNC-FMS)ラップ管を高速実験炉「常陽」、高速増殖原型炉「もんじゅ」に適用する場合は、ラップ管上下部材を構成するオーステナイト系ステンレス鋼(SUS316)との異材溶接が必要となる。この場合、異材溶接部で生成する δ フェライトによる靱性低下が懸念されるため、これを回避する方法として丸管溶接後に加工熱処理を施して最終ラップ管に仕上げる複合ラップ管製造技術を確立した。

本研究では、複合ラップ管の異材溶接部の機械的特性を把握し、材料強度基準を整備するために必要な各種強度試験を実施した。また、高温長時間使用を想定した時効処理材についても試験を行った。得られた結果は次の通りである。

- (1) 異材溶接材の引張試験では、溶接境界部で破断したものはなかったことから、短時間強度に関しては、異材溶接部は母材部と同等に扱っても特に問題ないものと考えられる。
- (2) 衝撃特性は母材部よりも良好、破壊靱性、曲げ特性は同等、クリープ特性、疲労特性は母材部の方が良好であったが、これらの試験データは各設計基準を満足していたことから、これらの特性に関しても、異材溶接部は母材部と同等に扱って良いと考えられる。
- (3) 熱時効によって FMS 溶接境界部の引張特性、衝撃特性は低下するが、その程度は母材の低下と同等であった。

^{*)}大洗工学センター システム技術開発部 核燃料工学 Gr

^{**)}同上、客員研究員

Development of Welding Technique Between PNC-FMS

Wrapper Tube and SUS316 Steel (Ⅲ)

—Evaluation on strength properties of weld zone—

Takeshi NARITA*) Shigeharu UKAI*) Takeji KAITO*)
Satoshi OHTSUKA*) Masayuki FUJIWARA**)

Abstract

It is necessary to carry out welding of Ferritic/Martensitic steel (PNC-FMS) wrapper tube with the austenitic stainless steel(SUS316, entrance nozzle, handling head) in order to apply to the real wrapper tube of Experimental Fast Reactor "Joyo" and Proto type FBR "Monju". If the δ ferrite phase is formed at heat affected zone in welded PNC-FMS, toughness degradation would be suspected. For preventing the δ ferrite formation, PNC-FMS/SUS316 complex wrapper tube, which were welded by TIG at round tube condition before cold drawing, were developed. In this study, the mechanical properties of PNC-FMS/SUS316 complex wrapper tube were evaluated to make the material design base standard of PNC-FMS. The results obtained are summarized as follows.

- (1) In tensile test, fracture occurred at location of base metal, not PNC-FMS welded interface. Thus, tensile strength of welded PNC-FMS/SUS316 is equivalent to base metal or more.
- (2) Impact property of the welded part is superior to base metal. Its fracture toughness, bendability are equivalent to base metal. The creep rupture and fatigue properties of the welded part are slightly inferior to base metal, but both values are still beyond design base standard of base metal.
- (3) The tensile and impact properties of the welded part are degraded by thermal annealing, but the amount of their degradation is the same as that of base metal.

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

***) the same as above, Visiting Researcher

目 次

1. はじめに	1
2. 異材溶接部の製作	2
3. 異材溶接部の評価試験	5
3. 1 光頭組織観察	5
3. 2 溶接部断面の硬さ分布測定	6
3. 3 引張試験	8
3. 4 シャルピー衝撃試験	11
3. 5 コンパクトテンション(CT)試験(J_{IC} 取得試験)	14
3. 6 単軸クリープ破断試験	23
3. 7 高温低サイクル疲労試験	24
3. 8 PNC-FMS 鋼同材溶接部の曲げ試験	26
4. 溶接試験まとめ	27
5. 考察	29
5. 1 短時間強度	29
5. 2 衝撃特性	34
5. 3 破壊靱性	38
5. 4 クリープ特性	39
5. 5 疲労特性	40
5. 6 曲げ特性	42
6. おわりに	43
7. 参考文献	44

添付資料 1 SUS316 鋼およびインコネル溶接材料のミルシート

添付資料 2 異材溶接→熱処理まま材 A 追試および FMS 母材の引張試験チャート

添付資料 3 J_{IC} 試験結果

付表 1～3 $J-\Delta a$ データ

付図 1～18 荷重-開口変位曲線, $J-\Delta a$ 線図

添付資料 4 高温低サイクル疲労試験結果

付図 1 応力と繰返し数の関係

付図 2 応力とひずみの関係

付表 1～3 低サイクル疲労試験データシート

表

表 1	PNC-FMS ラップ管異材溶接試験材の化学成分 (wt%)	2
表 2	溶接部断面の硬さ分布測定結果	6
表 3	異材溶接部熱処理まま材 A の引張試験結果	9
表 4	異材溶接部時効処理材 B の引張試験結果	10
表 5	異材溶接部時効処理材 C の引張試験結果	10
表 6	異材溶接部熱処理まま材 A の引張追試および FMS 母材の引張試験結果	10
表 7	異材溶接部熱処理まま材 A のシャルピー衝撃試験結果	12
表 8	異材溶接部時効処理材 B のシャルピー衝撃試験結果	13
表 9	異材溶接部時効処理材 C のシャルピー衝撃試験結果	13
表 10	異材溶接部熱処理まま材 A のき裂長さ測定結果	17
表 11	異材溶接部時効処理材 B のき裂長さ測定結果	18
表 12	異材溶接部時効処理材 C のき裂長さ測定結果	19
表 13	異材溶接部熱処理まま材 A の J_{IC} 試験結果 (ASTM-E813-89)	20
表 14	異材溶接部時効処理材 B の J_{IC} 試験結果 (ASTM-E813-89)	21
表 15	異材溶接部時効処理材 C の J_{IC} 試験結果 (ASTM-E813-89)	22
表 16	異材溶接部熱処理まま材 (A6) の J_{IC} 試験結果	23
表 17	異材溶接部の単軸クリープ破断試験結果	24
表 18	異材溶接試験片の低サイクル疲労試験結果	26
表 19	PNC-FMS ラップ管母材部の引張試験結果 (H13 年度実施)	30
表 20	H13 年度実施した異材溶接試験片の引張試験結果	31
表 21	各種試験に用いた PNC-FMS の化学成分 (wt%)	31
表 22	各種試験に用いた PNC-FMS の熱処理条件	32
表 23	各衝撃試験片の仕様	36

図

図 1	PNC-FMS ラップ管異材溶接薄板材の製作工程	3
図 2	PNC-FMS ラップ管異材溶接厚板材の製作工程	4
図 3	同材突合せ溶接試験片の製作工程	5
図 4	A (薄板材-熱処理まま) PNC-FMS:SUS316 鋼異材溶接部断面の硬さ分布	6
図 5	B (薄板材-600℃×74hrs 時効) PNC-FMS:SUS316 鋼異材溶接部断面の硬さ分布	7
図 6	C (薄板材-700℃×145hrs 時効) PNC-FMS:SUS316 鋼異材溶接部断面の硬さ分布	7
図 7	A (厚板材-熱処理まま) PNC-FMS:SUS316 鋼異材溶接部断面の硬さ分布	7
図 8	B (厚板材-600℃×74hrs 時効) PNC-FMS:SUS316 鋼異材溶接部断面の硬さ分布	8
図 9	C (厚板材-700℃×145hrs 時効) PNC-FMS:SUS316 鋼異材溶接部断面の硬さ分布	8
図 10	異材溶接薄板材から採取した引張試験片形状	9
図 11	異材溶接部の引張試験結果 (FMS 母材結果含む)	11
図 12	異材溶接薄板材から採取した衝撃試験片形状	12

図 13	熱処理まま材 A のシャルピー衝撃遷移温度曲線	12
図 14	時効処理材 B のシャルピー衝撃遷移温度曲線	13
図 15	時効処理材 C のシャルピー衝撃遷移温度曲線	14
図 16	0.1CT (B=2.54) 試験片形状・寸法	15
図 17	試験片開口部変位と荷重線変位の関係	15
図 18	J- Δa 線図のパターン	16
図 19	異材溶接厚板材から採取したクリープ破断試験片形状	24
図 20	高温低サイクル疲労試験片形状	24
図 21	S-N diagram for 12Cr-2W steel plate tested in triangular strain wave shape at $10^{-3}/s$.	26
図 22	異材溶接材の引張強さ測定データと設計引張強さの比較	29
図 23	異材溶接材の 0.2%耐力測定データと設計降伏点の比較	30
図 24	異材溶接材および母材の熱時効による引張強さの低下	33
図 25	異材溶接材および母材の熱時効による 0.2%耐力の低下	34
図 26	シャルピー衝撃試験片の寸法表記	34
図 27	吸収エネルギーとシャルピー衝撃試験温度との関係の例	35
図 28	異材溶接熱時効材と製造まま材および熱時効材の USE 比較	35
図 29	異材溶接熱時効材と製造まま材および熱時効材の $USE/(Bb)^{1.4}$ 比較	36
図 30	異材溶接熱時効材と製造まま材および熱時効材の DBTT 比較	37
図 31	異材溶接熱時効材と製造まま材および熱時効材の $DBTT-115\log_{10}BK_t$ 比較	37
図 32	異材溶接材および母材の破壊靱性値	38
図 33	異材溶接材のクリープ破断-時間曲線(試験温度 600°C)	39
図 34	異材溶接材のクリープ破断強度の LMP 依存性	39
図 35	異材溶接材および FMS 母材の破損繰返し数と許容繰返し数(600°C)	40
図 36	各温度における PNC-FMS 母材と SUS316 の許容繰返し数	41

写真

写真 1-1	ラップ管板異材溶接継手の外観(溶接前)	45
写真 1-2	ラップ管板異材溶接継手の溶接後外観	46
写真 1-3	薄肉異材溶接部の外観	47
写真 2-1	厚板異材溶接継手の外観(溶接前)	48
写真 2-2	厚板異材溶接継手の溶接後外観	49
写真 2-3	厚板異材溶接継手の冷間圧延・熱処理後の外観	50
写真 2-4	厚板異材溶接部の外観	51
写真 3	時効処理後試験材(異材溶接)の外観	52
写真 4	FMS 同材突合せ TIG 溶接後の外観	53
写真 5	FMS 同材突合せ溶接材の冷延→熱処理後の外観	54
写真 6	PNC-FMS 鋼ラップ管:SUS316 鋼異材溶接部の断面マクロ組織(薄板材)	55
写真 7-1	No. A(熱処理まま)薄板材 PNC-FMS:SUS316 異材溶接部断面のミクロ組織	56

写真 7-2	No. A(熱処理まま)薄板材 PNC-FMS:SUS316 異材溶接部断面のミクロ組織	57
写真 8-1	No. B(600℃×74hrs)薄板材 PNC-FMS:SUS316 異材溶接部断面のミクロ組織	58
写真 8-2	No. B(600℃×74hrs)薄板材 PNC-FMS:SUS316 異材溶接部断面のミクロ組織	59
写真 9-1	No. C(700℃×145hrs)薄板材 PNC-FMS:SUS316 異材溶接部断面のミクロ組織	60
写真 9-2	No. C(700℃×145hrs)薄板材 PNC-FMS:SUS316 異材溶接部断面のミクロ組織	61
写真 10	PNC-FMS:SUS316 異材溶接部の断面マクロ組織(厚板材)	62
写真 11-1	No. A(熱処理まま)厚板材 PNC-FMS:SUS316 異材溶接部断面のミクロ組織	63
写真 11-2	No. A(熱処理まま)厚板材 PNC-FMS:SUS316 異材溶接部断面のミクロ組織	64
写真 12-1	No. B(600℃×74hrs)厚板材 PNC-FMS:SUS316 異材溶接部断面のミクロ組織	65
写真 12-2	No. B(600℃×74hrs)厚板材 PNC-FMS:SUS316 異材溶接部断面のミクロ組織	66
写真 13-1	No. C(700℃×145hrs)厚板材 PNC-FMS:SUS316 異材溶接部断面のミクロ組織	67
写真 13-2	No. C(700℃×145hrs)厚板材 PNC-FMS:SUS316 異材溶接部断面のミクロ組織	68
写真 14	熱処理まま材 A 引張試験片の外観	69
写真 15	時効処理材 B 引張試験片の外観	70
写真 16	時効処理材 C 引張試験片の外観	71
写真 17	追試した熱処理まま材 A 引張試験片の外観	72
写真 18	FMS 母材引張試験片の外観	73
写真 19	熱処理まま材 A 衝撃試験片の外観	74
写真 20	時効処理材 B 衝撃試験片の外観	75
写真 21	時効処理材 C 衝撃試験片の外観	76
写真 22	J _{IC} 試験後の破面写真 熱処理まま材 A	77
写真 23	J _{IC} 試験後の破面写真 時効処理材 B	78
写真 24	J _{IC} 試験後の破面写真 時効処理材 C	79
写真 25	J _{IC} 試験後の破断状況 熱処理まま材 A	80
写真 26	J _{IC} 試験後の破断状況 時効処理材 B	81
写真 27	J _{IC} 試験後の破断状況 時効処理材 C	82
写真 28	クリープ破断後試験片の外観	83
写真 29	疲労試験片の外観	83
写真 30	曲げ試験機の外観	84
写真 31	曲げ試験中の試験片状況	85
写真 32	曲げ試験片①試験後の外観	86
写真 33	曲げ試験片②試験後の外観	86
写真 34	曲げ試験片③試験後の外観	87
写真 35	曲げ試験片①試験後のカラーチェック	88
写真 36	曲げ試験片②試験後のカラーチェック	88
写真 37	曲げ試験片③試験後のカラーチェック	89

1. はじめに

高速中性子照射下での耐スエリング性がオーステナイト系ステンレス鋼に比べて格段に優れ、長期使用が期待できるフェライト/マルテンサイト鋼(以下 PNC-FMS 鋼: 公称組成 $0.12\text{C}-11\text{Cr}-0.5\text{Mo}-2\text{W}-0.2\text{V}-0.05\text{Nb}-0.05\text{N}$)はラップ管材質として実用化が期待されている。常陽、もんじゅでは炉心支持板がオーステナイト鋼であるため、熱膨張差による燃料集合体との隙間からのリーク流量を抑制する上でエントランスノズルおよびハンドリングヘッドはオーステナイト鋼にしておく必要がある。そのため PNC-FMS 鋼とオーステナイト系ステンレス鋼(SUS316)との異材接合が必要となる。その場合、PNC-FMS 鋼熱影響部は硬化するため溶接後熱処理が必要となり、また、PNC-FMS 鋼側の溶接境界部には δ フェライト相が生成し、靱性を著しく損なう恐れがある。この問題を解決するため、ラップ管製造過程において、予め PNC-FMS 鋼ラップ管の両端に短尺の SUS316 鋼を TIG 溶接した後、一体で加工熱処理を施して仕上げる複合ラップ管製造技術を開発した^{1), 2)}。

本試験では、複合ラップ管異材溶接部の機械的特性を把握するために、模擬溶接材を製作し、引張試験、衝撃試験、破壊靱性試験、クリープ破断試験、及び高温低サイクル疲労試験を行った。基本的には実機ラップ管と同じ薄肉材から試験片を製作して試験を行ったが、薄肉材では試験が困難な破壊靱性試験、クリープ破断試験、及び高温低サイクル疲労試験については薄肉材と同等の加工工程で製作した厚肉材から試験片を採取して試験を実施した。高温長時間使用を想定した時効処理材についても試験を行った。

また H13 年度「フェライト/マルテンサイト鋼ラップ管(実機)の溶接試験」において、PNC-FMS 鋼と SUS316 鋼の異材溶接試験片の曲げ試験を行ったところ SUS316 鋼母材部で曲がりが生じ、PNC-FMS 鋼の溶接熱影響部の曲げ評価とはならなかったため、PNC-FMS 鋼の同材突合せ溶接継手試験片を作製し、同鋼溶接部の曲げ評価を行った。

2. 異材溶接部の製作

複合ラップ管の製造工程を模擬して、PNC-FMS 鋼と SUS316 ステンレス鋼の異材溶接継手試験板を製作した。

(1) PNC-FMS 鋼ラップ管板材による継手

前年度試作 PNC-FMS 鋼ラップ管（常陽サイズ；外対面間距離 78.5mm，肉厚 1.9mm）残材から機械加工により板材（厚さ 1.9mm、幅約 40mm、長さ 50mm、36 枚）を切り出し、市販の SUS316 鋼板（厚さ 2mm 板購入、厚さ 1.9mm に切削加工）と TIG 溶接を行った（計 36 組）。突合せ形状は 60° V 開先とし（突合せ方向は板圧延方向）、溶接材には $\phi 2.0$ mm インコネル溶接棒を用い、以下の条件にて溶接した。

電流値	55 $\pm$ 5 A	パス数	1パス
電圧	17V	ルート間隔	1.0mm
シールドガス、流量	Ar, 8ℓ/min	溶接ワイヤ、線径	WEL TIG82, $\phi 2.0$ mm
溶接速度	90mm/min		

溶接後、800℃ $\times$ 30min の後熱処理を施した後、板厚 1.9mm から 1.5mm に冷間圧延加工を行った。加工後、真空熱処理炉を用いて、焼ならし(1,050℃ $\times$ 40min・Ar ガス冷却)、焼戻し(720℃ $\times$ 40min・Ar ガス冷却)処理を行った。これを熱処理まま材とし、36 枚の継手のうち、12 枚 1 組で 2 組の真空ガラス封入を行い、(3)の時効処理を施した。

用いた FMS 鋼ラップ管、SUS316 鋼板材の化学成分を表 1 に示し、製作工程の概要を図 1 に示す。また、購入した市販 SUS316 鋼板材と $\phi 2.0$ mm インコネル溶接ワイヤのミルシートは添付資料 1 に示した。溶接前後の異材溶接薄板材の外観を写真 1-1, 1-2 に、薄肉異材溶接部の外観を写真 1-3 に示す。

表 1 PNC-FMSラップ管異材溶接試験材の化学成分(wt%)

試験材種類	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	W
(成分範囲)	0.09~0.15	≤ 0.10	0.40~0.80	0.20~0.60	10.0~12.0	0.30~0.70	1.70~2.30
(目標値)	0.12	0.05	0.60	0.40	11.0	0.50	2.00
FMSラップ管*	0.14	0.05	0.49	0.50	11.25	0.45	2.07
FMS鋼厚板材	0.15	0.039	0.80	0.50	10.52	0.40	1.81
SUS316薄板材	0.05	0.69	0.96	10.15	17.1	2.13	—
SUS316厚板材	0.05	0.72	1.01	10.21	17.23	2.18	—
溶接棒薄板用	0.03	0.19	3.02	73.52	18.56	—	—

試験材種類	V	Nb	N	Cr-eq.	Ni-eq.
(成分範囲)	0.15~0.25	0.020~0.080	0.030~0.070	—	—
(目標値)	0.20	0.050	0.050	—	—
FMSラップ管*	0.23	0.06	0.060	12.96	6.75
FMS鋼厚板材	0.20	0.049	0.072	12.01	7.55
SUS316薄板材	—	—	—	厚さ2mm板材	
SUS316厚板材	—	—	—	厚さ19mm板材	
溶接棒薄板用	—	2.70	—	Fe:1.39	

*「常陽」炉心燃料用異材溶接ラップ管試作材：外対面間距離78.5mm、肉厚1.9mm

Cr-eq. =Cr+Mo+0.5W+1.5Si+0.5Nb+0.5V

Ni-eq. =Ni+30(C+N)+0.5Mn

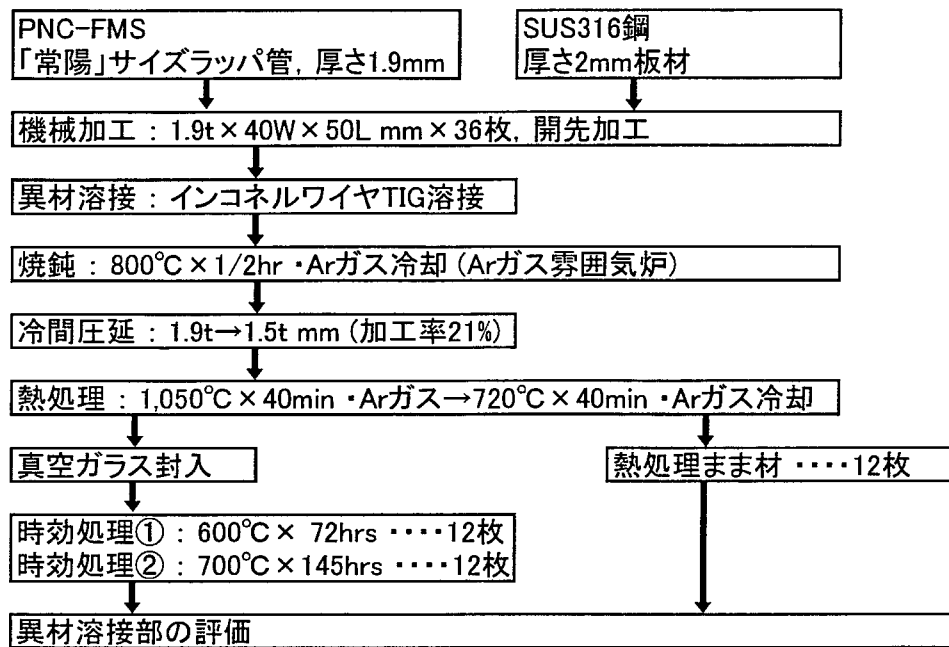


図1 PNC-FMS ラップ管異材溶接薄板材の製作工程

(2) 厚板材の製作

異材溶接厚板材の製作工程を図2に示す。FMS鋼の真空溶解インゴットから熱間鍛造、熱間圧延、冷間圧延、800℃焼鈍により厚板材(厚さ19mm、幅120mm、長さ100mm、6枚)を製作した。市販の厚さ19mmのSUS316鋼板材とφ3.2mmインコネル溶接棒を用いて突き合わせ溶接を行った。開先形状は、FMS鋼側は90°フラット、SUS316鋼側は50°K型とし、表裏両面側から以下の条件にて溶接施工した。

電流値 : 160 ± 10 A

電圧 : 20V

シールドガス、流量 : Ar, 9 ℓ/min

溶接速度 : 70mm/min

パス数 : 10 パス

ルート間隔 : 3.2mm

溶接ワイヤ、線径 : WEL TIG82, φ3.2mm

溶接後、800℃×30minの後熱処理を施し、余盛部を切削した後、厚さ19mmから15mmまで冷間圧延を行い、大気中で焼ならし(1,050℃×40min・AC)、焼戻し(720℃×40min・AC)処理を行った。これを熱処理まま材とし6枚の継手のうち2枚1組で2組について(3)の時効処理を施した。

製作したFMS鋼厚板材、および購入したSUS316鋼厚板材の化学成分を表1に示す。又購入した市販SUS316鋼厚板材とφ3.2mmインコネル溶接ワイヤのミルシートは添付資料1に示した。溶接前後の異材溶接厚板材の外観を写真2-1～2-3に示し、厚板異材溶接部(K型開先)の外観を写真2-4に示す。FMS鋼側には板厚方向にほぼフラットな溶接境界部が形成されている。

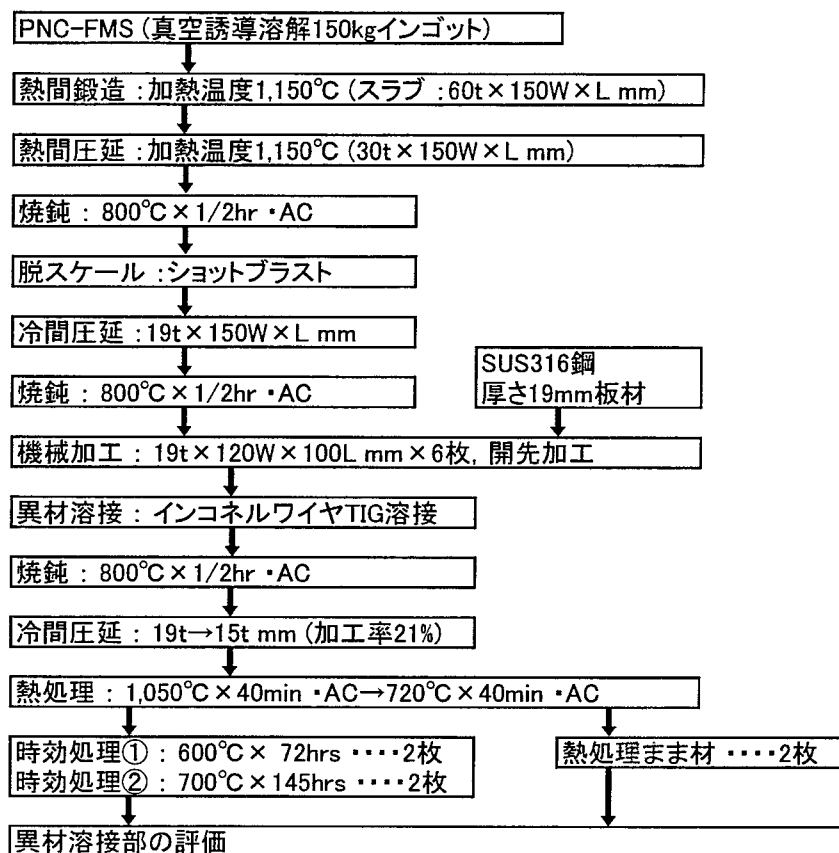


図2 PNC-FMS ラップ管異材溶接厚板材の製作工程

(3) 時効処理

経年劣化を評価するために、熱処理ままの異材溶接部に対して、下記条件の時効処理を施した試験材も製作した。定数 $C=20$ とし、 $LMP=(T+273.15)(20+\log_{10}t_a) \times 10^{-3}$ (T :温度[℃]、 t_a :時効時間[hr])に従って LMP を算出した。試験材記号は以下のようにした。

A－熱処理まま材 (1,050℃×40min・AC→720℃×40min・AC)

B－600℃×74hrs 時効処理材 ($LMP=19.09$; 500℃にて約 50,000hrs に相当)

C－700℃×145hrs 時効処理材 ($LMP=21.56$; 600℃にて約 50,000hrs に相当)

なおラップ管を用いた異材溶接薄板材は板厚が薄く、長時間時効処理中の酸化減肉を避けるため、溶接試験板を写真3に示すように、真空ガラス封入して時効処理を施した。異材溶接厚板材は、そのまま大気中で時効処理を行った。

(4) 同材溶接曲げ試験片の製作

表1に示す厚板材を用いてラップ管の製造工程を模擬し、以下の工程でFMS鋼同材突合せ溶接継手曲げ試験片を作製した。製作工程を図3に示し、②突合せTIG溶接後及び⑥熱処理後の溶接試験材外観を写真4, 5に示す。TIG溶接条件は下記の通りである。

- ・ 電流値・電圧・電極 : 100±5A, 20V, $\phi 2.4\text{mm}$
- ・ シールドガス・流量 : Arガス 表側 10 l /min, 裏側 5 l /min
- ・ 溶接速度、パス数およびルート間隔 : 90mm/min ×6パス、2mm
- ・ 溶接ワイヤ・線径 : WEL TIG82, $\phi 2.0\text{mm}$

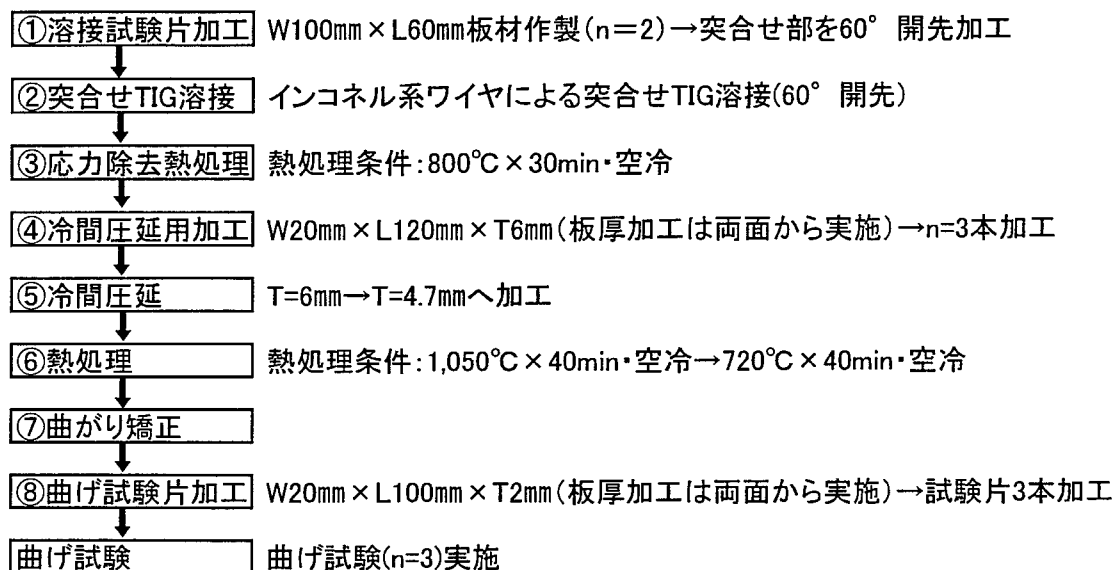


図3 同材突合せ溶接試験片の製作工程

3. 異材溶接部の評価試験結果

製作した異材溶接部の熱処理まま材A、時効処理材B、Cについて、評価試験を行った。

3. 1 光顕組織観察

溶接部断面の組織を光学顕微鏡にて観察し、母材、熱影響部、溶接境界部、溶接金属部についてそれぞれ100倍、400倍の写真撮影を行った。

異材溶接薄板材(ラップ管材)の溶接部断面マクロ組織観察結果を写真6に示す。熱処理まま材Aにおける異材溶接各部(FMS鋼側母材、熱影響部、溶接境界部、溶接金属部、SUS316鋼側溶接境界部、熱影響部、母材)のミクロ組織を写真7-1、7-2に示す。FMS鋼母材は少量のフェライト相を含む焼戻しマルテンサイト組織となっており、溶接境界部近傍では若干の増加はみられるが、顕著なδフェライト相の生成は認められない。SUS316鋼母材部では、焼ならし・焼戻し処理により炭化物の粒界析出が部分的に認められる。B材における異材溶接各部の組織を写真8-1、8-2に示す。FMS鋼側の組織は熱処理ままのA材の組織と差は認められない。SUS316鋼側では時効処理によって顕著な炭化物の粒界析出が認められる。C材における異材溶接各部の組織を写真9-1、9-2に示す。FMS鋼側の組織はA、B材の組織と大きな差は認められないが、SUS316鋼側では時効処理によってさらに顕著な炭化物の粒界、粒内析出が認められる。

異材溶接厚板材の溶接部断面マクロ組織を写真10-1、10-2に示す。熱処理まま材Aにおける異材溶接各部のミクロ組織を写真11-1、11-2に示す。FMS鋼母材は焼戻しマルテンサイト組織ほぼ単相であり、δフェライト相はほとんど認められない。溶接境界部近傍でもδフェライト相は認められない。薄板材で若干のδフェライト相がみられたのに対し、厚板材ではδフェライト相が認められないのは、表1の化学成分に示したごとく、薄板材に比べ、厚板材のCr当量は低く、かつNi当量が高いことによる。時効処理材B、Cのミクロ組織を写真12、13に示す。薄板材の場合と同様、FMS鋼側の組織では時効処理による変化はほとんど認められない

が、SUS316 鋼側の組織では時効処理によって粒界、粒内炭化物の析出が顕著となっている。

3. 2 溶接部断面の硬さ分布測定

溶接部縦断面について 0.5mm 間隔で硬さ測定を行った。測定結果を表 2 に、異材溶接薄板材 A, B, C の硬さ分布を図 4～6 に、異材溶接厚板材 A, B, C の硬さ分布を図 7～9 に示す。6 種類の溶接いずれの場合でも、FMS 鋼の硬さが最も高く次いでインコネル溶接金属部、SUS316 鋼の順となる。薄板材 A 材における FMS 鋼の硬さは HV320 程度であり、時効処理によって硬さの低下、すなわち軟化が認められる。特に C 材では HV240～250 程度まで軟化している。インコネル溶接金属部および SUS316 鋼の硬さには時効処理による大きな変化は認められない。異材溶接厚板材の硬さでも同じ傾向がみられる。時効処理材 C における SUS316 鋼の硬さが若干高くなっている。

表 2 溶接部断面の硬さ分布測定結果

Hv0.5 (荷重500gf)

試験材 No.	FMS鋼母材側からの距離 (mm)																					
	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0	
薄板	A	321	323	324	320	317	314	326	317	313	309	258	171	168	162	168	164	172	163	168	160	157
	B	303	314	309	308	309	309	313	301	301	309	263	169	179	171	177	171	173	174	169	175	184
	C	248	248	252	240	242	240	237	244	244	239	219	179	163	170	154	160	161	167	169	173	152
厚板	A	304	298	300	310	301	297	304	304	299	296	274	181	180	165	158	170	171	170	144	158	147
	B	306	312	306	307	309	301	302	302	298	297	261	172	171	174	162	166	157	162	173	169	167
	C	245	244	249	257	251	249	247	256	245	243	245	168	181	183	178	170	179	173	165	169	172

試験材 No.	FMS鋼母材側からの距離 (mm)										
	10.5	11.0	11.5	12.0	12.5	13.0	13.5	14.0	14.5	15.0	
薄板	A	161	158	163	154	151	160	157	151	153	160
	B	183	164	163	148	154	156	153	154	153	155
	C	158	153	161	156	157	155	158	161	163	156
厚板	A	148	152	152	154	154	160	160	155	156	150
	B	165	175	159	149	155	155	157	155	152	154
	C	178	164	159	174	164	170	172	160	168	168

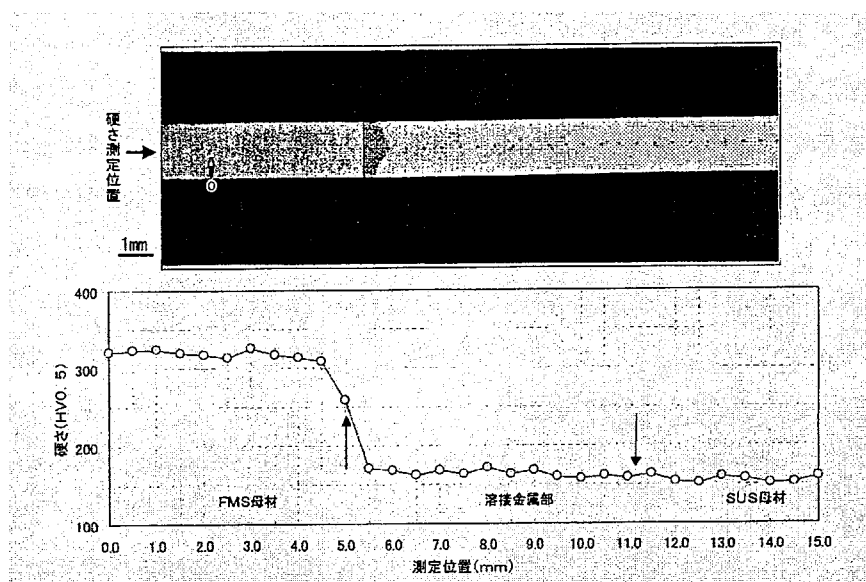


図 4 A (薄板材-熱処理まゝ) PNC-FMS:SUS316 鋼異材溶接部断面の硬さ分布

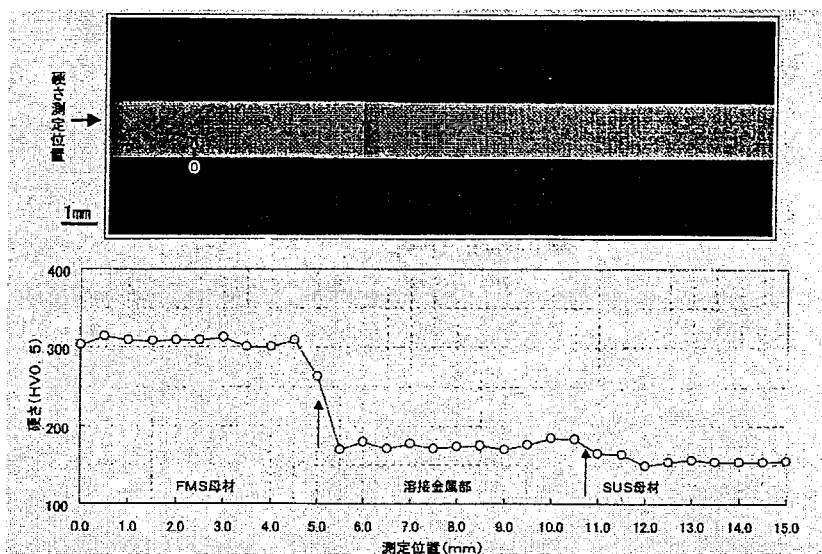


図5 B(薄板材-600°C×74h 時効)PNC-FMS:SUS316 鋼異材溶接部断面の硬さ分布

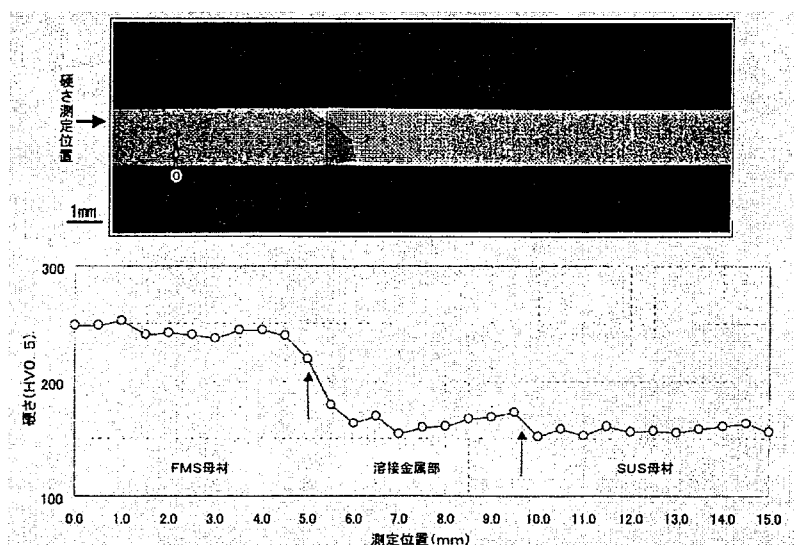


図6 C(薄板材-700°C×145h 時効)PNC-FMS:SUS316 鋼異材溶接部断面の硬さ分布

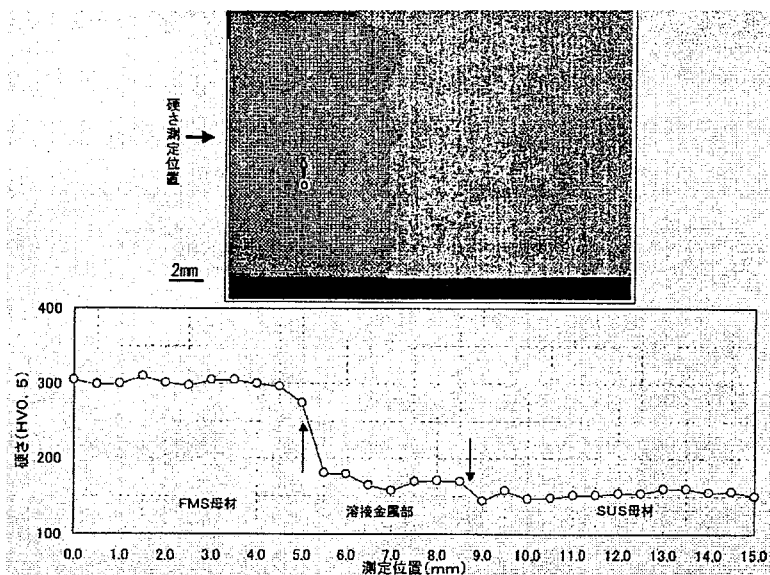


図7 A(厚板材-熱処理ま)PNC-FMS:SUS316 鋼異材溶接部断面の硬さ分布

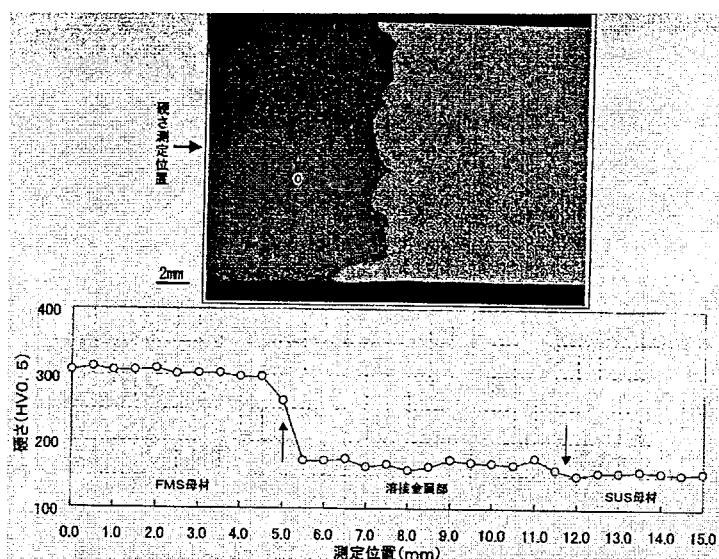


図8 B(厚板材-600°C×74h 時効)PNC-FMS:SUS316 鋼異材溶接部断面の硬さ分布

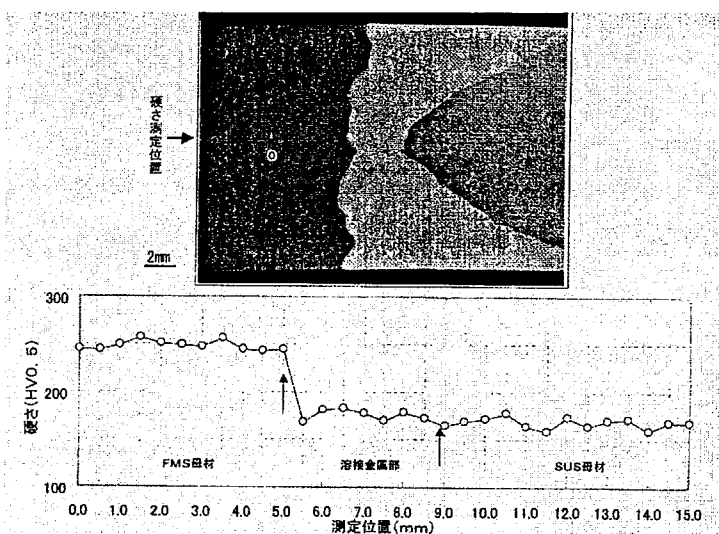


図9 C(厚板材-700°C×145h 時効)PNC-FMS:SUS316 鋼異材溶接部断面の硬さ分布

3. 3 引張試験

異材溶接薄板材を用い引張試験を行った。試験片形状を図10に示す。溶接線の直角方向を引張方向とし試験片平行部の中央に溶接部を配置した。試験条件、測定項目は以下のとおりである。また比較として本溶接試験に用いたのと同じ材料を用いてFMS母材の引張試験も実施した。試験片形状は溶接しない点を除いて図10に準拠とし、試験温度は650°C、700°C、750°Cとした。

①試験条件

- ・試験方法：JISに準拠
- ・引張速度：耐力まで0.5%/min, 耐力以降5%/min
- ・試験温度：RT, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 650, 700, 750, 800°C (11 試験温度)
- ・試験数量：27 (9 試験温度×3 種)

②測定項目：引張強さ, 0.2%耐力(クロスヘッドによる参考値), 破断伸び, 破断位置, 荷重-変位曲線, 試験温度

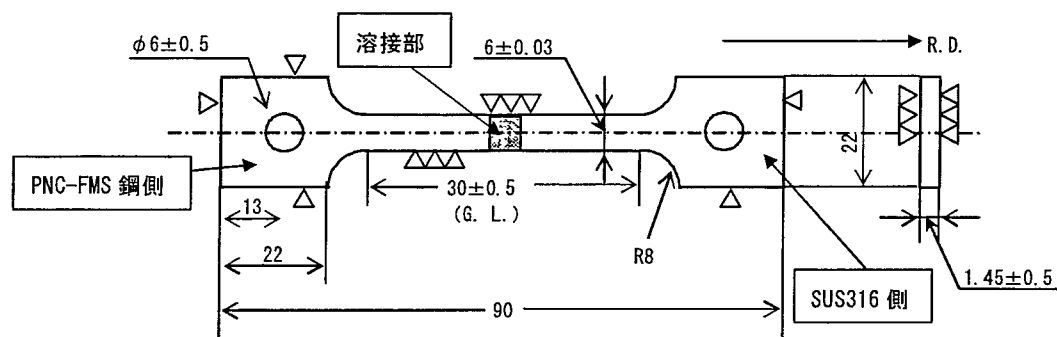


図 10 異材溶接薄板材から採取した引張試験片形状

熱処理まま材 A の引張試験結果を表 3，時効処理材 B、C の結果を表 4、5 に示し、熱処理まま材 A の 650、700、750℃における追試結果と FMS 母材の引張試験結果を表 6 に示す。各材の引張強さおよび破断伸びと試験温度の関係を図 11 に示す。ただし伸びに関しては、破断位置だけでなく他の部位も伸びているため破断位置にある材料の厳密な伸びの比較評価とはならないため、参考値報告とする。引張試験後の各試験片の外観を写真 14～18 に示す。また熱処理まま材 A の追試と FMS 母材の引張試験チャートを添付資料 2 に示す。

熱処理まま材 A は、追試結果によると、室温から 700℃までの破断位置は SUS316 母材部、750℃では FMS 母材部であり、溶接境界部での破断はなかった。750℃における A 材の引張強さは、FMS 母材と同等であった。伸びは、SUS 母材部で破断した室温～700℃では 20%程度でほぼ一定で、650℃～750℃の FMS 母材の伸びよりもやや大きかった。FMS 母材部で破断した 750℃では、SUS の伸びより小さく、FMS 母材とほぼ同等であった。

時効処理材 B は 600℃までの試験片破断位置は SUS316 鋼母材部となり、700℃以上では FMS 鋼側母材または溶接熱影響部となる。熱処理まま材 A と時効処理材 B の引張強さはほぼ同等である。すなわち B の時効条件 (500℃で約 50,000hrs に相当) では短時間強度に及ぼす影響は小さい。時効処理材 C の場合、試験温度 600℃以上で FMS 鋼側破断となり、約 300℃以上における高温引張強さは、熱処理まま A 材および時効処理 B 材の場合よりやや低くなる。C の時効条件 (600℃で約 50,000hrs に相当) では SUS316 鋼、FMS 鋼とも高温強度の低下が進行するようである。

表 3 異材溶接部熱処理まま材 A の引張試験結果

試験片 番号	試験片寸法			試験 温度 (℃)	耐力 (0.2%)		引張強さ		一様伸び (mm)	伸び (G.L.=30mm)		破断 位置
	幅 (mm)	厚さ (mm)	面積 (mm ²)		P 0.2 (N)	σ 0.2 (MPa)	Pmax (N)	σ max (MPa)		(mm)	(%)	
AO1	6.00	1.44	8.64	RT	2631	305	5762	667	9.1	9.5	31.7	SUS母材
AO2	6.00	1.43	8.58	100	2379	277	4700	548	5.4	6.2	20.7	SUS母材
AO3	6.01	1.43	8.59	200	1819	212	4227	492	5.3	6.0	20.0	SUS母材
AO4	6.01	1.43	8.59	300	1609	187	4254	495	5.6	5.8	19.3	SUS母材
AO5	6.00	1.43	8.58	400	1499	175	4210	491	5.9	6.0	20.0	SUS母材
AO6	6.01	1.43	8.59	500	1312	153	3985	464	6.2	5.9	19.7	SUS母材
AO7	6.01	1.43	8.59	600	1326	154	3227	376	4.5	6.1	20.3	SUS母材
AO8	6.00	1.43	8.58	700	1035	121	2106	245	2.6	2.8	9.3	FMS側境界
AO9	6.00	1.43	8.58	800	605	71	815	95	1.0	10.2	34.0	FMS母材

表4 異材溶接部時効処理材Bの引張試験結果

試験片 番号	試験片寸法			試験 温度 (°C)	耐力(0.2%)		引張強さ		一様伸び (mm)	伸び (G.L=30mm) (mm) (%)		破断 位置
	幅	厚さ	面積		P 0.2	σ 0.2	P _{ma x}	σ _{ma x}				
	(mm)	(mm)	(mm ²)		(N)	(MPa)	(N)	(MPa)				
B01	5.98	1.47	8.79	RT	2600	296	5825	663	10.8	10.1	33.7	SUS母材
B02	5.97	1.47	8.78	100	2026	231	4680	533	6.9	7.8	26.0	SUS母材
B03	5.99	1.45	8.69	200	1746	201	4269	491	5.8	6.5	21.7	SUS母材
B04	6.01	1.45	8.71	300	1634	187	4272	490	6.9	6.9	23.0	SUS母材
B05	6.00	1.45	8.70	400	1359	156	4192	482	6.8	6.3	21.0	SUS母材
B06	6.00	1.44	8.64	500	1315	152	4006	464	7.1	6.7	22.3	SUS母材
B07	6.02	1.45	8.73	600	1576	181	3456	396	5.3	6.4	21.3	SUS母材
B08	5.98	1.47	8.79	700	1117	127	2045	233	2.2	3.8	12.7	FMS側境界
B09	6.02	1.46	8.79	800	606	69	836	95	1.1	7.0	23.3	FMS側境界

表5 異材溶接部時効処理材Cの引張試験結果

試験片 番号	試験片寸法			試験 温度 (°C)	耐力(0.2%)		引張強さ		一様伸び (mm)	伸び (G.L=30mm) (mm) (%)		破断 位置
	幅	厚さ	面積		P 0.2	σ 0.2	P _{ma x}	σ _{ma x}				
	(mm)	(mm)	(mm ²)		(N)	(MPa)	(N)	(MPa)				
C01	5.97	1.45	8.66	RT	2439	282	5642	652	8.0	8.0	26.7	SUS母材
C02	5.95	1.45	8.63	100	2190	254	4775	553	6.6	7.6	25.3	SUS母材
C03	5.99	1.45	8.69	200	1959	226	4271	492	5.2	6.2	20.7	SUS母材
C04	6.02	1.47	8.85	300	1672	189	4081	461	4.9	4.9	16.3	SUS母材
C05	5.98	1.47	8.79	400	1499	170	3906	444	5.0	5.0	16.7	SUS母材
C06	5.98	1.46	8.73	500	1325	152	3773	432	5.2	5.7	19.0	SUS母材
C07	5.97	1.45	8.66	600	1616	187	2714	313	1.9	6.1	20.3	FMS母材
C08	5.99	1.45	8.69	700	1034	119	1327	153	1.0	4.7	15.7	FMS母材
C09	6.00	1.45	8.70	800	501	58	709	81	1.1	6.9	23.0	FMS側境界

表6 異材溶接部熱処理まま材Aの引張追試およびFMS母材の引張試験結果

試験片種別	試験片寸法			試験 温度 (°C)	0.2%耐力		引張強さ		伸び (%)	破断位置
	幅	厚さ	面積		P 0.2	σ 0.2	P _{ma x}	σ _{ma x}		
	(mm)	(mm)	(mm ²)		(N)	(MPa)	(N)	(MPa)		
FMS/SUS316 異材溶接	1.511	6.039	9.125	650	1005	110	3195	350	22.2	SUS316母材
	1.533	6.037	9.255	650	1105	119	3205	346	19.4	SUS316母材
	1.523	6.036	9.193	700	1005	109	2670	290	25.9	SUS316母材
	1.505	6.036	9.084	700	1050	116	2660	293	21.1	SUS316母材
	1.527	6.033	9.212	750	1070	116	1980	215	15.8	FMS母材
	1.521	6.044	9.193	750	975	106	1990	216	16.4	FMS母材
FMS母材	1.917	6.006	11.514	650	3775	328	4563	396	12.2	A
	1.912	6.000	11.472	650	3688	321	4463	389	15.9	A
	1.921	6.005	11.536	700	2625	228	3313	287	17.5	B
	1.914	5.997	11.478	700	2713	236	3313	289	16.7	B
	1.926	6.014	11.583	750	1895	164	2340	202	18.6	B
	1.924	6.020	11.582	750	1890	163	2410	208	23.3	B

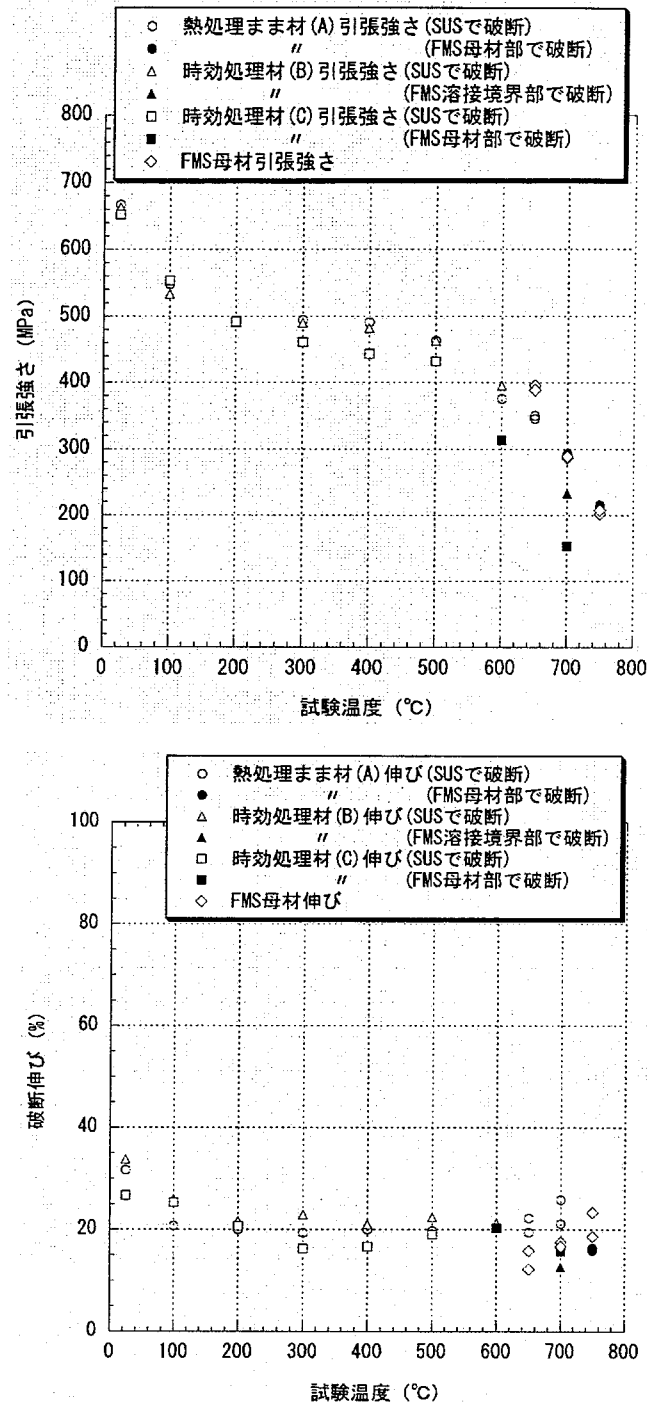


図 1.1 異材溶接部の引張試験結果 (FMS 母材結果含む)

3. 4 シャルピー衝撃試験

異材溶接薄板材から図 1.2 に示す幅約 1.45mm、厚さ 10mm、長さ 55mm の 2mmV ノッチシャルピー衝撃試験片を各 12 本 (計 36 本) 製作した。試験片長さ方向を溶接線の直角方向とし、切り欠き位置は PNC-FMS 鋼側の溶接境界部とした。各種温度で試験を行い、上部棚エネルギー、エネルギー遷移温度、破面遷移温度を求めた。熱処理まま材 A の試験結果を表 7、図 1.3、時効処理材 B の試験結果を表 8、図 1.4、時効処理材 C の試験結果を表 9、図 1.5 に示す。試験後試験片の外観を写真 1.9～2.1 に示す。

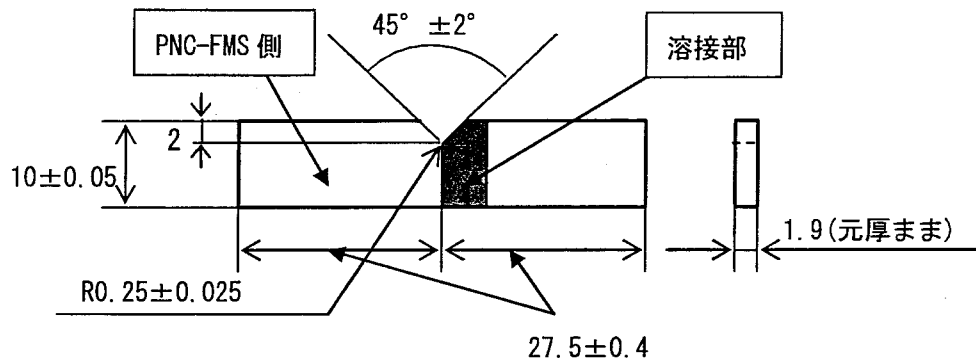


図 1 2 異材溶接薄板材から採取した衝撃試験片形状
(2 mm V ノッチシャルピー衝撃試験片)

表 7 異材溶接熱処理まま材 A のシャルピー衝撃試験結果

記号	試験温度 ℃	吸収エネルギー J	延性破面率 %
A 1	10	10.2	100
A 2	-25	9.1	100
A 3	-25	11.1	100
A 4	-50	12.5	100
A 5	-50	11.6	100
A 6	-75	12.5	100
A 7	-75	11.9	100
A 8	-100	6.7	100
A 9	-100	8.7	100
A 1 0	-196	6.3	62
A 1 1	-196	8.7	97
A 1 2	-100	11.8	100
A 1 3	10	8.7	100
A 1 4	-100	8.4	49

上部棚エネルギー (vEshelf)	12.5J
エネルギー遷移温度 (TrE)	-200℃
破面遷移温度 (Trs50)	-200℃以下

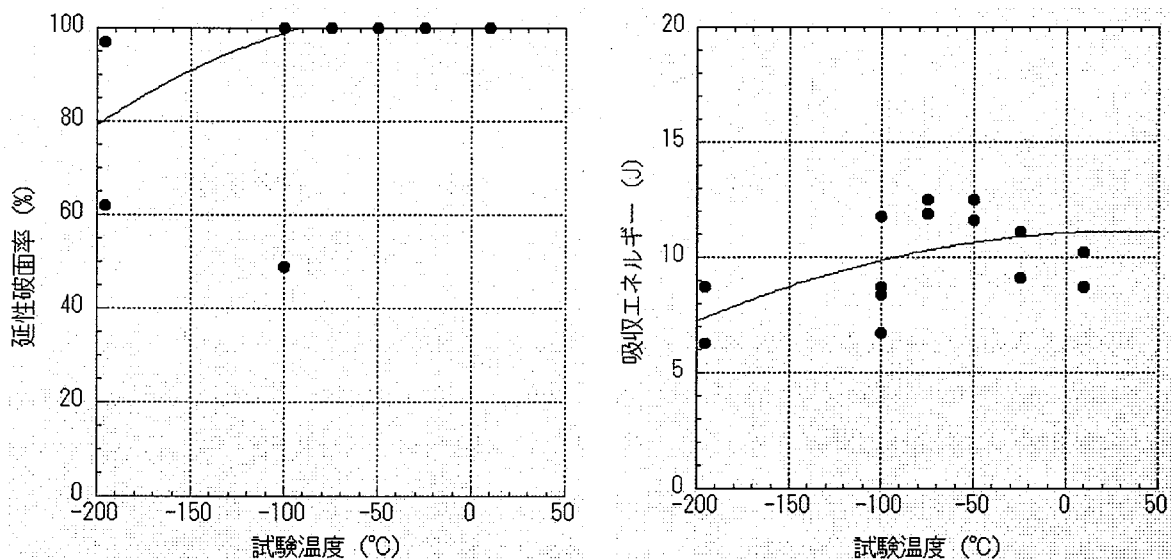


図 1 3 熱処理まま材 A のシャルピー衝撃遷移温度曲線

表 8 異材溶接部時効処理材 B のシャルピー衝撃試験結果

記号	試験温度 ℃	吸収エネルギー J	延性破面率 %
B 1	10	11.3	100
B 2	-25	11.3	100
B 3	-25	12.2	100
B 4	-50	8.9	100
B 5	-50	10.6	84
B 6	-75	7.6	32
B 7	-75	10.4	100
B 8	-100	6.1	15
B 9	-100	8.2	91
B 1 0	-196	1.1	0
B 1 1	-196	2.0	0
B 1 2	-100	11.8	100

上部棚エネルギー (vEshelf)	11.3J
エネルギー遷移温度 (TrE)	-145℃
破面遷移温度 (Trs50)	-123℃

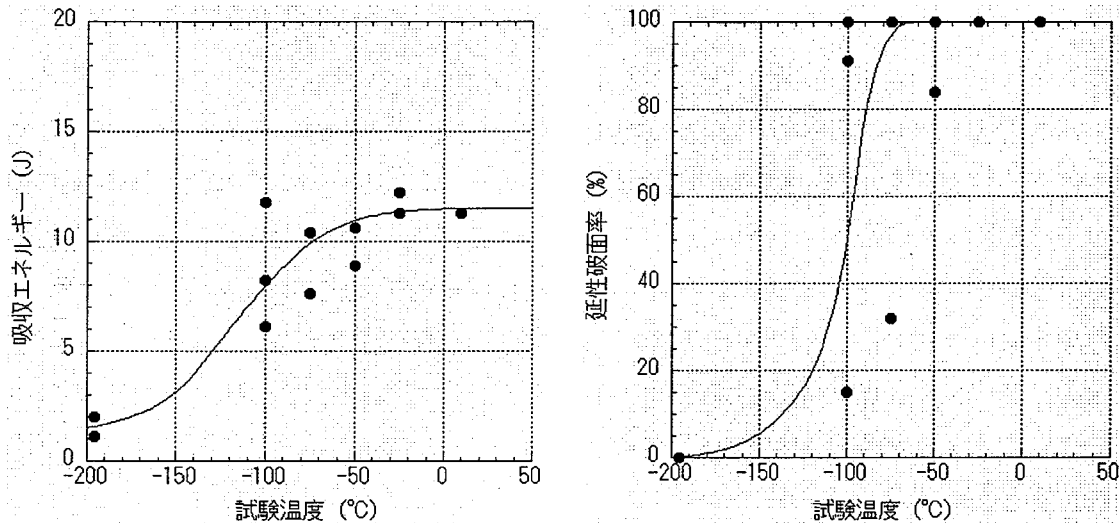


図 1 4 時効処理材 B のシャルピー衝撃遷移温度曲線

表 9 異材溶接部時効処理材 C のシャルピー衝撃試験結果

記号	試験温度 ℃	吸収エネルギー J	延性破面率 %
C 1	10	13.4	100
C 2	-25	12.2	100
C 3	-25	12.7	100
C 4	-50	12.2	100
C 5	-50	11.3	100
C 6	-75	8.0	92
C 7	-75	12.5	100
C 8	-100	7.4	26
C 9	-100	7.6	41
C 1 0	-196	0.8	0
C 1 1	-196	0.6	0
C 1 2	-100	9.1	45

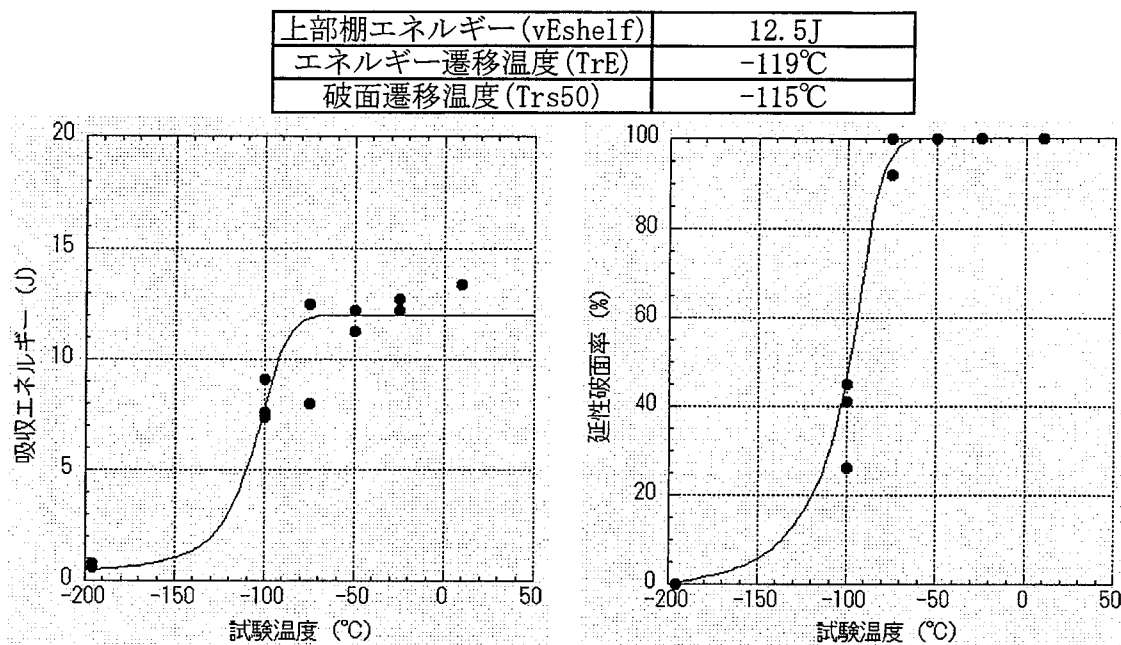


図 1 5 時効処理材 C のシャルピー衝撃遷移温度曲線

熱処理まま材 A の場合、写真 1 9 に示すように、き裂は FMS 鋼側溶接境界部の切り欠きからインコネル溶接金属部側に伝播する。このため、図 1 3 の延性破面率、吸収エネルギーと試験温度の関係において、延性－脆性遷移領域が認められない。時効処理材 B の場合、ほとんどの試験片において、き裂は FMS 鋼側を伝播しており、延性－脆性遷移領域が認められる。時効処理材 C の場合もほぼ FMS 鋼側のき裂伝播が認められ、遷移温度は時効処理材 B の場合より上昇している。

熱処理ままの状態では、溶接部近傍の FMS 鋼は比較的高い靱性を有し、ほとんどの試験片においてき裂はインコネル溶接金属部を伝播する。高温時効に伴い脆化が進行し、時効処理材 C の試験片においては FMS 鋼側をき裂が伝播するようになる。時効処理条件によって上部棚エネルギーにはほとんど変化がみられない。

δ フェライト相生成による脆化が懸念される領域は溶接境界部近傍である。実際の溶接境界部には凹凸があり、平坦にすることは不可能である。切り欠きを溶接境界部近傍にいれても、き裂が境界部のみを伝播するとは限らず、このため FMS 鋼溶接境界部の正確な衝撃データを取得するのは難しい。溶接熱サイクル再現による試験片の評価が有効と考えられる。

3. 5 コンパクトテンション(CT)試験 (J_{IC} 取得試験)

J_{IC} 取得試験は、異材溶接厚板材から図 1 6 に示す厚さ 2.54mm の CT 試験片を製作し、機械切り欠き先端に ASTM E813 に基づき約 2mm の疲労予き裂を付与した後、以下の条件で行った。機械切り欠き位置およびき裂導入位置は PNC-FMS 鋼側の溶接境界部とし、き裂伝播方向を溶接線平行方向とした。

試験規格：ASTM E813-89

試験機：島津製作所製電気油圧サーボ式疲労試験機（荷重容量 10kN）

計 測：除荷コンプライアンス法自動試験システム

試験雰囲気：大気中

試験温度：RT(23℃)，200℃，400℃

試験繰り返し数：n=2

* き裂長さ計算およびJ値算出に用いる荷重線変位は、図17に示すように、試験片開口部変位から換算した。

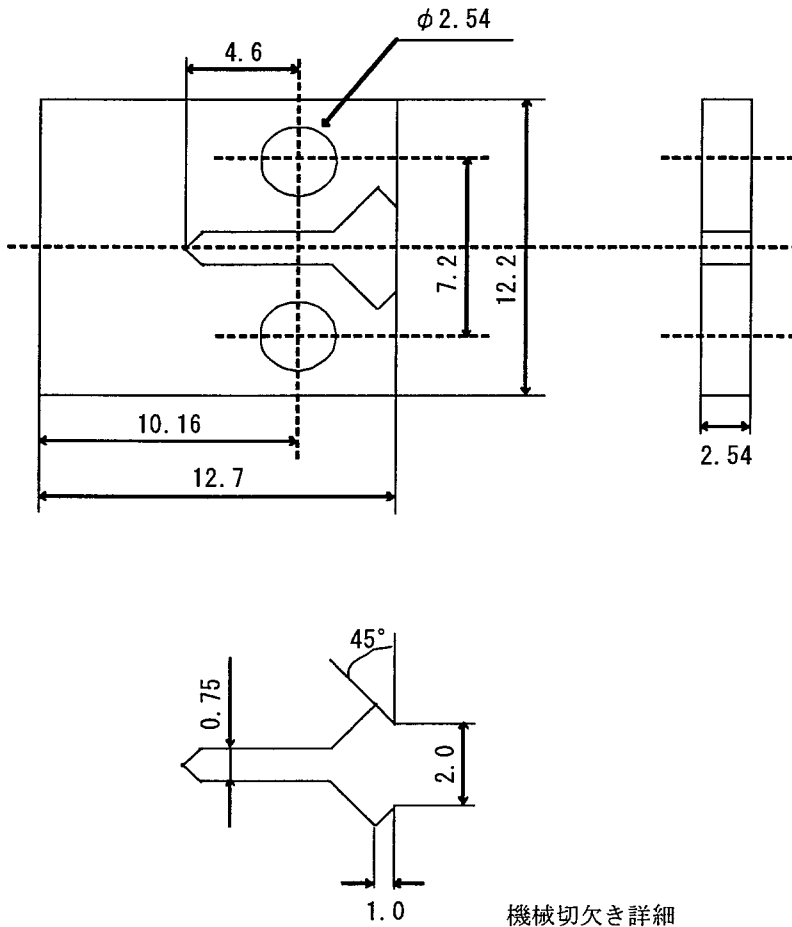
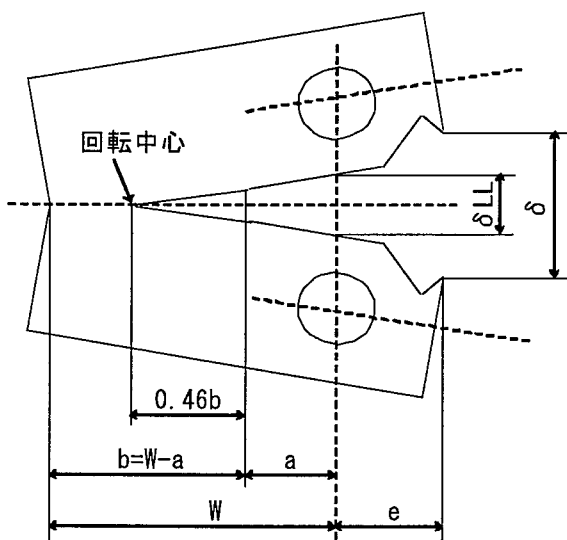


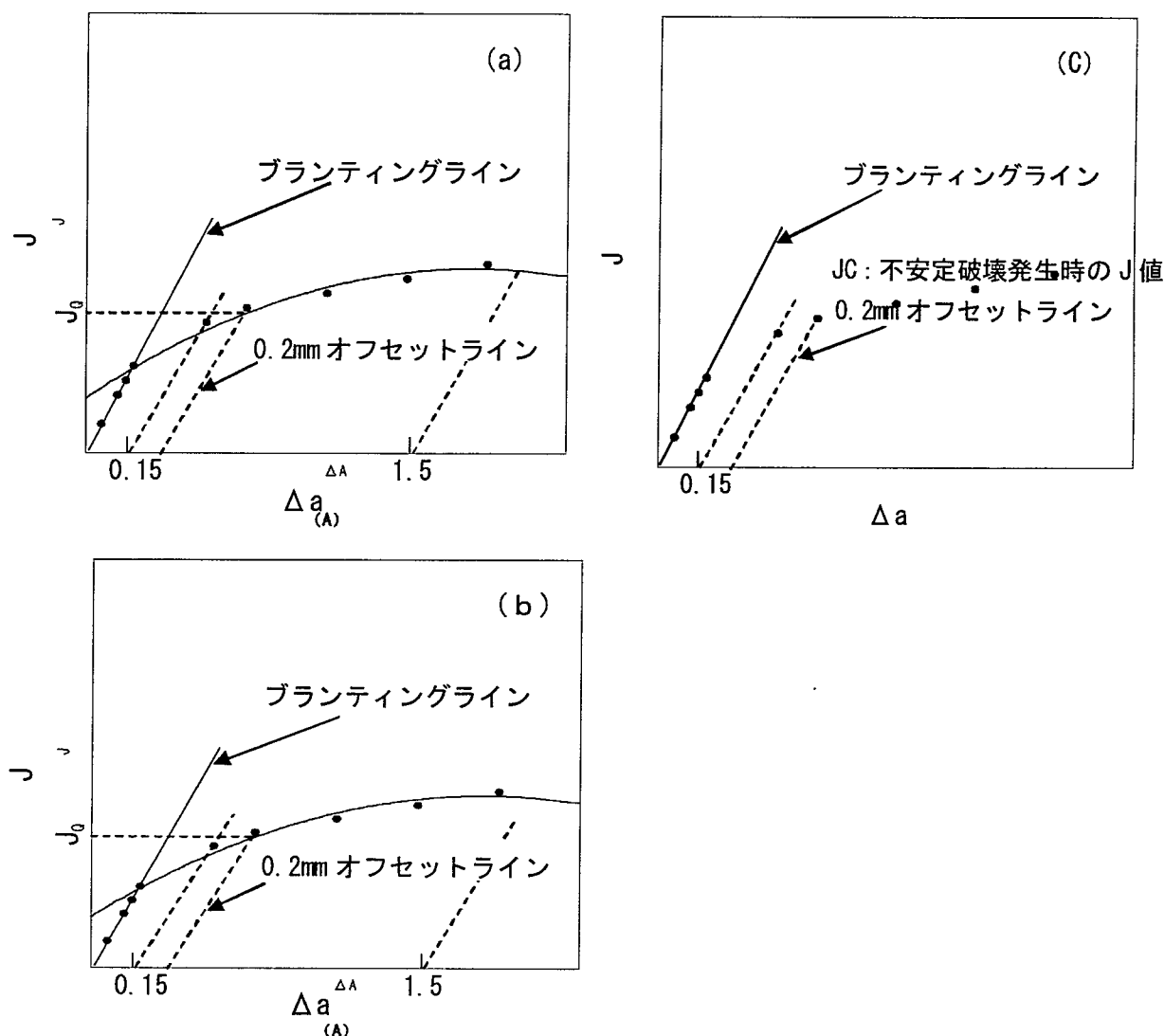
図16 0.1CT (B=2.54) 試験片形状・寸法



BS7448 では、CT 試験片の塑性状態の回転中心を下図のように、き裂先端から $0.46b$ (b : リガメント= $W-a$) の位置と考えている。これにより、試験片開口部の変位 (δ) と荷重線変位 (δ_{LL}) の関係は、幾何学的関係により次式で表される。

$$\delta_{LL} / \delta = (0.46W + 0.54a) / (0.46W + 0.54a + e)$$

図17 試験片開口部変位と荷重線変位の関係

図 18 J - Δa 線図のパターン

高温試験は電気炉を用いて行った。試験片の温度はき裂先端部に点溶接した熱電対により測定し、試験温度に 15min 保持後、試験を開始した。

試験後、安定延性き裂の進展した試験片については加熱着色させた後、繰り返し荷重を付加して疲労破壊させ、試験中に不安定破壊を起こした試験片とともに、すべての試験片破面における疲労き裂長さおよび延性き裂進展量を 1/1000mm 目盛り付き投影機で測定した。

熱処理まま材 A 試験片のき裂長さ測定結果を表 10、時効処理材 B 試験片のき裂長さ測定結果を表 11 に示し、時効処理材 C 試験片のき裂長さ測定結果を表 12 に示す。なお各表中の a は、 $M + (af_0/2 + af_1 + af_2 + af_3 + af_4 + af_5 + af_6 + af_7 + af_8/2)/8$ とした。各試験片の J_{IC} 取得試験結果を表 13～15 に示す。疲労予き裂挿入時における K 値の最大値を $K_{fmax.} = 10\text{MPa}$ とし、降伏点は、 $\sigma_{flow} = (\sigma_{0.2} + \sigma_B)/2$ とした。また、各試験片の $J - \Delta a$ データ、荷重 - 開口変位線図ならびに $J - \Delta a$ 線図は添付資料 3 に示した。各試験片の破面を写真 22～24、破断状況を写真 25～27 に示す。

熱処理まま材 A 試験片 No. A6 (試験温度 400℃) では、試験途中に不安定破壊が生じ、 $J - \Delta a$ 線図は図 18 の (c) に示す形となった。この試験片については、表 16 に示すように不安

定破壊時の J 値を破壊靱性値 (J_c 値) とした。

A 6 以外の試験片は、すべて図 18 の (a) のような $J - \Delta a$ 線図が得られたが、ASTME813 の試験片寸法に関する有効性判定基準 (板厚およびリガメント) を満足せず、有効な J_{Ic} 値は求められなかった。安定延性き裂発生時の J 値を破壊靱性値 (J_Q) とした。

上記の破壊靱性値、 J_Q 値および J_c 値は、いずれも平面ひずみ破壊靱性値としては扱えず、今回実施した板厚に限った破壊靱性値となる。

試験は繰り返し数=2で行ったが、例えば試験片 B 1 と B 2 の場合のように、同条件でも破壊靱性値が大きく異なる場合があった。これは、写真 21～23 の試験片破断状況に示すように、き裂が FMS 鋼側溶接境界部を必ずしも直線的には進展せず、FMS 鋼母材部やインコネル溶接金属部の異なる材質部を進展し、き裂進展抵抗が変化したことが原因と考えられる。このようなき裂進展挙動は、シャルピー衝撃試験の場合と同じであり、平坦ではない溶接部の安定データ取得ならびに評価は難しい。

表 10 異材溶接部熱処理まま材 A のき裂長さ測定結果

試験片温度		R. T		200°C		400°C	
試験片記号		A 1	A 2	A 3	A 4	A 5	A 6
機械切欠き長さ mm	M	4.60	4.59	4.61	4.57	4.57	4.48
疲労き裂長さ mm	0/8 t	1.79	1.43	1.33	1.32	1.48	1.49
	1/8 t	1.84	1.50	1.45	1.45	1.55	1.53
	2/8 t	1.81	1.53	1.55	1.51	1.56	1.56
	3/8 t	1.71	1.55	1.61	1.51	1.59	1.55
	4/8 t	1.76	1.55	1.63	1.55	1.58	1.54
	5/8 t	1.69	1.52	1.62	1.55	1.58	1.55
	6/8 t	1.52	1.51	1.60	1.55	1.52	1.51
	7/8 t	1.52	1.46	1.57	1.53	1.47	1.53
	8/8 t	1.48	1.39	1.49	1.45	1.38	1.53
	max	1.84	1.55	1.63	1.55	1.59	1.56
	min	1.48	1.39	1.33	1.32	1.38	1.49
平均 mm	af	1.69	1.50	1.56	1.50	1.54	1.54
初期き裂長さ M+af	ai	6.28	6.09	6.16	6.07	6.11	6.01
安定延性き裂進展量 mm	0/8 t	1.38	1.02	2.69	1.70	0.94	0.00
	1/8 t	1.32	0.95	2.74	1.48	1.16	0.13
	2/8 t	1.35	1.05	2.54	1.83	2.18	0.26
	3/8 t	1.80	1.34	2.43	1.70	2.70	0.53
	4/8 t	1.48	2.00	2.34	1.77	2.80	0.78
	5/8 t	1.15	2.21	2.19	1.68	2.92	1.45
	6/8 t	0.95	2.17	1.98	1.24	3.04	1.32
	7/8 t	0.49	2.21	1.78	0.88	2.91	0.50
	8/8 t	0.50	2.13	1.77	0.66	2.75	0.00
平均 mm	Δa	1.19	1.69	2.28	1.47	2.44	0.62

表 1 1 異材溶接部時効処理材 B のき裂長さ測定結果

試験温度		R. T		200°C		400°C	
試験片記号		B 1	B 2	B 3	B 4	B 5	B 6
機械切欠き長さ mm	M	4. 58	4. 55	4. 59	4. 60	4. 62	4. 65
疲労き裂長さ mm	0/8 t	1. 43	1. 45	1. 41	1. 49	1. 52	1. 46
	1/8 t	1. 47	1. 51	1. 49	1. 55	1. 55	1. 52
	2/8 t	1. 52	1. 54	1. 50	1. 60	1. 58	1. 57
	3/8 t	1. 51	1. 54	1. 51	1. 63	1. 57	1. 58
	4/8 t	1. 49	1. 54	1. 52	1. 61	1. 57	1. 57
	5/8 t	1. 43	1. 50	1. 53	1. 64	1. 56	1. 56
	6/8 t	1. 38	1. 46	1. 53	1. 59	1. 51	1. 54
	7/8 t	1. 25	1. 42	1. 53	1. 55	1. 45	1. 51
	8/8 t	1. 19	1. 35	1. 51	1. 48	1. 40	1. 44
	max	1. 52	1. 54	1. 53	1. 64	1. 58	1. 58
	min	1. 19	1. 35	1. 41	1. 48	1. 40	1. 44
平均 mm	af	1. 42	1. 49	1. 51	1. 58	1. 53	1. 54
初期き裂長さ M+af	ai	6. 00	6. 04	6. 09	6. 18	6. 15	6. 18
安定延性き裂進展量 mm	0/8 t	1. 38	1. 04	0. 28	2. 62	2. 63	2. 57
	1/8 t	1. 36	1. 02	0. 21	2. 54	2. 53	2. 54
	2/8 t	1. 65	1. 19	0. 91	2. 47	2. 51	2. 47
	3/8 t	1. 73	1. 55	1. 72	2. 35	2. 49	2. 39
	4/8 t	1. 80	1. 94	2. 11	2. 30	2. 45	2. 24
	5/8 t	1. 67	1. 49	2. 26	2. 08	2. 38	2. 13
	6/8 t	1. 46	1. 12	2. 07	2. 10	2. 22	2. 14
	7/8 t	1. 37	0. 84	1. 91	2. 22	1. 84	2. 20
	8/8 t	1. 24	0. 89	1. 94	2. 37	1. 44	2. 15
平均 mm	△a	1. 54	1. 26	1. 54	2. 32	2. 31	2. 31

表 1 2 異材溶接部時効処理材 C のき裂長さ測定結果

試験温度		R. T		200℃		400℃	
試験片記号		C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6
機械切欠き長さ mm	M	4.58	4.60	4.62	4.53	4.57	4.53
疲労き裂長さ mm	0/8 t	1.64	1.34	1.46	1.46	1.40	1.50
	1/8 t	1.72	1.47.00	1.51	1.66	1.51	1.55
	2/8 t	1.78	1.50	1.53	1.63	1.55	1.57
	3/8 t	1.80	1.53	1.54	1.60	1.56	1.60
	4/8 t	1.81	1.56	1.55	1.61	1.56	1.56
	5/8 t	1.80	1.56	1.55	1.59	1.54	1.54
	6/8 t	1.77	1.56	1.54	1.59	1.50	1.47
	7/8 t	1.70	1.54	1.50	1.53	1.43	1.39
	8/8 t	1.59	1.45	1.44	1.41	1.38	1.30
	max	1.81	1.56	1.55	1.66	1.56	1.60
	min	1.59	1.34	1.44	1.41	1.38	1.30
平均 mm	af	1.75	1.51	1.52	1.58	1.51	1.51
初期き裂長さ M+af	ai	6.33	6.11	6.14	6.11	6.07	6.04
安定延性き裂進展量 mm	0/8 t	2.18	1.90	1.48	2.42	2.07	2.65
	1/8 t	2.23	1.78	1.43	2.18	1.90	2.64
	2/8 t	2.27	2.11	1.46	2.27	2.00	2.70
	3/8 t	2.18	2.12	1.66	2.14	2.20	2.53
	4/8 t	1.99	2.32	1.87	2.25	2.53	2.50
	5/8 t	1.84	2.28	1.71	2.73	2.63	2.51
	6/8 t	1.80	2.36	1.48	2.25	2.68	2.54
	7/8 t	1.80	2.35	1.34	2.21	2.78	2.67
	8/8 t	1.83	2.43	1.32	2.35	2.36	2.80
平均 mm	Δa	2.01	2.19	1.54	2.30	2.37	2.60

表 1 3 異材溶接部熱処理まま材 A の J_{IC} 試験結果 (ASTM-E813-89)

試験温度 試験片記号			R. T		200°C		400°C	
			A1	A2	A3	A4	A5	A6
試験片厚さ	mm	B	2.55	2.56	2.54	2.55	2.54	2.54
試験片正味厚さ	mm	BN	2.55	2.56	2.54	2.55	2.54	2.54
試験片幅	mm	W	10.24	10.22	10.15	10.23	10.27	10.18
機械切欠長さ	mm	M	4.60	4.59	4.61	4.57	4.57	4.48
疲労き裂長さmm	最大値	a_{fmax}	1.84	1.55	1.63	1.55	1.59	1.56
	最小値	a_{fmin}	1.48	1.39	1.33	1.32	1.38	1.49
	平均値	a_f	1.69	1.50	1.56	1.50	1.54	1.54
初期き裂長さ	mm	a_0	6.28	6.09	6.16	6.07	6.11	6.01
初期リガメント長さ	mm	b_0	3.96	4.13	3.99	4.16	4.17	4.17
試験温度	°C		23	23	200	200	400	400
降伏応力	MPa	$\sigma_{0.2}$	305	305	212	212	175	175
引張強さ	MPa	σ_{flow}	667	667	492	492	491	491
有効降伏点	MPa	σ_{flow}	486	486	352	352	333	333
ヤング率	GPa	E	218	218	207	207	190	190
ポアソン比		ν	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
J_Q 値	N/mm	J_Q	371	379	238	346	221	
dJ/da	N/mm ²	dJ/da	319	253	311	367	215	
延性き裂進展量	mm	Δa	1.19	1.69	2.28	1.47	2.44	0.62
J_{IC} 値有効性判定条件	$B(B_N) > 25J_Q / \sigma_{flow}$		19.08 NO	19.50 NO	16.90 NO	24.57 NO	16.59 NO	- NO
	$b_0 > 25J_Q / \sigma_{flow}$		19.08 NO	19.50 NO	16.90 NO	24.57 NO	16.59 NO	- NO
	$dJ/da < \sigma_{flow}$		NO	NO	NO	OK	NO	NO
破壊じん性値	N/mm	J_Q	371	379	238	346	221	-
J- Δa 線図のパターン 参考図1参照			a	a	a	a	a	c

表 1 4 異材溶接部時効処理材 B の J_{IC} 試験結果 (ASTM-E813-89)

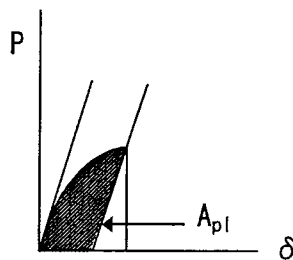
試験温度			R. T		200℃		400℃		
試験片記号			B 1	B 2	B 3	B 4	B 5	B 6	
試験片厚さ	mm	B	2.55	2.56	2.53	2.54	2.54	2.55	
試験片正味厚さ	mm	BN	2.55	2.56	2.53	2.54	2.54	2.55	
試験片幅	mm	W	10.22	10.22	10.19	10.24	10.25	10.31	
機械切欠長さ	mm	M	4.58	4.55	4.59	4.60	4.62	4.65	
疲労き裂長さ mm	最大値	a _{fmax}	1.52	1.54	1.53	1.64	1.58	1.58	
	最小値	a _{fmin}	1.19	1.35	1.41	1.48	1.40	1.44	
	平均値	a _f	1.42	1.49	1.51	1.58	1.53	1.54	
初期き裂長さ	mm	a ₀	6.00	6.04	6.09	6.18	6.15	6.18	
初期リガメント長さ	mm	b ₀	4.23	4.18	4.10	4.06	4.10	4.13	
試験温度	℃		23	23	200	200	400	400	
降伏応力	MPa	σ _{0.2}	296	296	201	201	156	156	
引張強さ	MPa	σ _{flow}	663	663	491	491	482	482	
有効降伏点 ¹⁾	MPa	σ _{flow}	480	480	346	346	319	319	
ヤング率	GPa	E	218	218	207	207	190	190	
ポアソン比		ν	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	
J _Q 値	N/mm	J _Q	270	819	390	334	355	235	
dJ/da	N/mm ²	dJ/da	353	381	305	280	268	261	
延性き裂進展量		mm	Δa	1.54	1.26	1.54	2.32	2.31	2.31
J _{IC} 値有効性判定条件	B(B _N) > 2.5 J _Q /σ _{flow}		14.08	42.70	28.18	24.13	27.82	18.42	
			NO	NO	NO	NO	NO	NO	
	b ₀ > 2.5 J _Q /σ _{flow}		14.08	42.70	28.18	24.13	27.82	18.42	
			NO	NO	NO	NO	NO	NO	
	dJ/da < σ _{flow}		NO	NO	NO	NO	NO	NO	
			NO	NO	NO	NO	NO	NO	
破壊じん性値	N/mm	J _Q	270	819	390	334	355	235	
J-Δa線図のパターン 参考図 1 参照			a	a	a	a	a	c	

表 1 5 異材溶接部時効処理材 C の J_{IC} 試験結果 (ASTM-E813-89)

試験温度			R. T		200℃		400℃	
			C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6
試験片厚さ	mm	B	2.55	2.55	2.54	2.55	2.55	2.54
試験片正味厚さ	mm	BN	2.55	2.55	2.54	2.55	2.55	2.54
試験片幅	mm	W	10.22	10.21	10.26	10.20	10.31	10.25
機械切欠長さ	mm	M	4.58	4.60	4.62	4.53	4.57	4.53
疲労き裂長さmm	最大値	a _{fmax}	1.81	1.56	1.55	1.66	1.56	1.60
	最小値	a _{fmin}	1.59	1.34	1.44	1.41	1.38	1.30
	平均値	a _f	1.75	1.51	1.52	1.58	1.51	1.51
初期き裂長さ	mm	a ₀	6.33	6.11	6.14	6.11	6.07	6.04
初期リガメント長さ	mm	b ₀	3.89	4.10	4.12	4.09	4.24	4.21
試験温度	℃		23	23	200	200	400	400
降伏応力	MPa	σ _{0.2}	282	282	226	226	170	170
引張強さ	MPa	σ _{flow}	652	652	492	492	444	444
有効降伏点 ¹⁾	MPa	σ _{flow}	467	467	359	359	307	307
ヤング率	GPa	E	218	218	207	207	190	190
ポアソン比		ν	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
J _Q 値	N/mm	J _Q	555	510	383	369	368	308
dJ/da	N/mm ²	dJ/da	285	326	353	295	225	234
延性き裂進展量	mm	Δa	2.01	2.19	1.54	2.3	2.37	2.6
J _{IC} 値有効性判定条件	B(B _N) > 2.5 J _Q /σ _{flow}		29.71	27.30	26.67	25.7	29.97	25.08
			NO	NO	NO	NO	NO	NO
	b ₀ > 2.5 J _Q /σ _{flow}		29.71	27.30	26.67	25.7	29.97	25.08
			NO	NO	NO	NO	NO	NO
		dJ/da < σ _{flow}	NO	NO	NO	NO	NO	NO
破壊じん性値	N/mm	J _Q	555	510	383	369	368	308
J-Δa線図のパターン 参考図 1 参照			a	a	a	a	a	a

表 1 6 異材溶接部熱処理まま材 (A6) の J_{IC} 試験結果

試験片記号			A6
試験片厚	B	mm	2.54
正味試験片厚	B_n	mm	2.54
試験片幅	W	mm	10.18
試験温度		°C	400
機械切欠	M	mm	4.48
	0/8 B_n	mm	1.49
	1/8 B_n	mm	1.53
	2/8 B_n	mm	1.56
	3/8 B_n	mm	1.55
	4/8 B_n	mm	1.54
	5/8 B_n	mm	1.55
	6/8 B_n	mm	1.51
	7/8 B_n	mm	1.53
	8/8 B_n	mm	1.53
平均	a_f	mm	1.54
初期き裂長さ	$a_0 = a_f + M$	mm	6.02
リガメント	b_0	mm	4.17
係数	$f(a/W)$		13.180
最大荷重	P_{max}	kN	0.840
ポアソン比	ν		0.3
ヤング率	E	Gpa	190
係数	η		2.214
塑性面積	A_{pl}	N・mm	740
J の塑性成分	J_{pl}	N/mm	154.8
最大荷重時のK	K_{max}	MPa・m ^{1/2}	43
破壊じん性値	J_C	N/mm	165
	$K_C(J)$	MPa・m ^{1/2}	177



$$\eta = 2 + 0.522 \cdot b_0/W$$

$$K_{max} = P_{max} \cdot f(a/W) / (B_n \cdot W)^{1/2}$$

$$J_{pl} = \eta \cdot A_{pl} / (B_n \cdot b_0)$$

$$J_C = K_{max}^2 / E + J_{pl}$$

$$K_C(J) = (J_C \cdot E)^{1/2}$$

3. 6 単軸クリープ破断試験

異材溶接厚板材の熱処理まま材について、図 1 9 に示す丸棒形状のクリープ破断試験片を製作し、単軸クリープ破断試験を実施した。試験片長さ方向を溶接線直角方向とし、試験片平行部の中央部に溶接部を配置した。

試験条件、測定項目は以下のとおりである。

- ① 試験条件：試験温度：600°C

目標破断時間：400hrs (FMS 母材データから応力 25kgf/mm² を設定)

- ② 測定項目：試験温度、応力、破断時間、破断伸び、破断位置

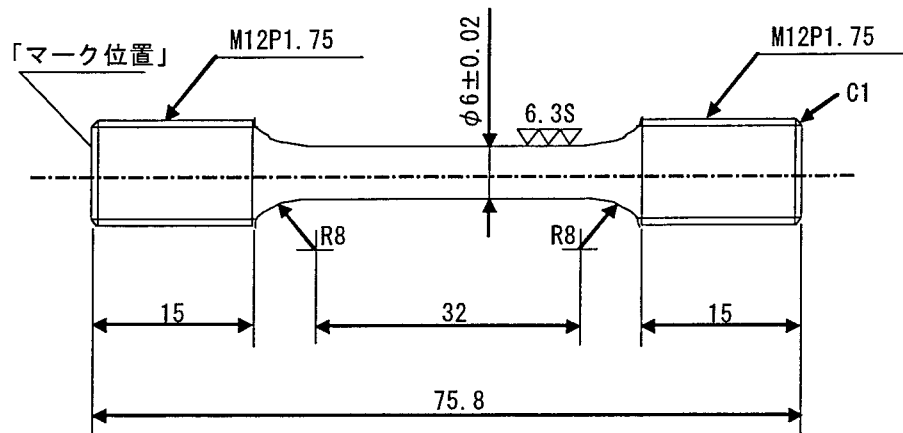


図 19 異材溶接厚板材から採取したクリープ破断試験片形状

試験結果を表 1 7 に示す。破断位置は FMS 鋼側の溶接境界部近傍であり、目標破断時間に対してやや短い破断時間であった。試験片の破断位置は、写真 2 8 に示すように、FMS 鋼側の溶接境界部近傍であった。しかし本試験は高応力 1 水準のデータであり、今後データを蓄積し、応力-破断時間曲線の傾きと破断位置の時間変化で異材溶接部のクリープ破断強度特性を評価する必要があると考えられる。

表 1 7 異材溶接部の単軸クリープ破断試験結果

試験温度 (°C)	応力 (kgf/mm ²)	破断時間 (hrs)	伸び (%)	絞り (%)	破断位置
600	25	197.7	8.1	7.2	FMS溶接境界部

3. 7 高温低サイクル疲労試験

異材溶接厚板材から図 2 0 に示す丸棒状試験片を熱処理まま材 A、時効処理材 B、時効処理材 C について各 1 本製作した。試験片長さ方向を溶接線直角方向とし、平行部の中央部に溶接部を配置した。試験温度 600℃、全ひずみ範囲一定の条件で 5×10^3 回を目標に大気中での高温低サイクル疲労試験を行った。用いた試験機および試験条件を次頁に示す。

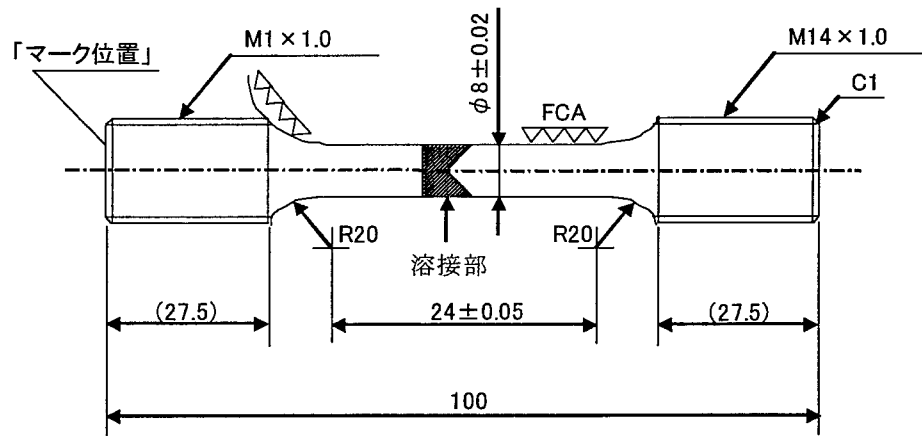


図 2 0 高温低サイクル疲労試験片形状

試験機

- ・ 名称：東京衡機ハイドロパルス
- ・ 容量：±49kN
- ・ 伸び計：東京衡機 DSA20/10H (GL=20mm)

試験条件

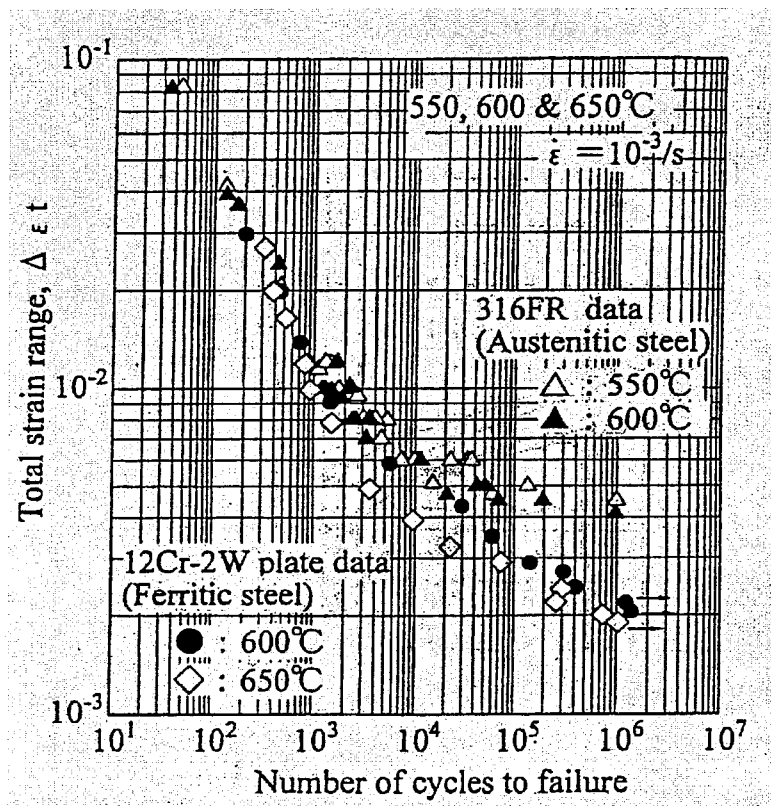
- ・ 試験温度：600℃
- ・ 環境：大気中
- ・ 制御方式：ひずみ制御
- ・ 全ひずみ範囲： $\Delta \epsilon_t = 0.7\%$
- ・ 制御比： $R_\epsilon = -1$
- ・ 波形：三角波
- ・ ひずみ速度：0.1%/sec
- ・ 破損繰り返し数 N_f は、引張応力が定常時の 3/4 に減少した時の繰り返し数とした。
- ・ 伸び計は、溶接部を挟む 20mm の範囲に取り付けた。

試験結果を表 1 8 に、破損後試験片の外観を写真 2 9 に示す。また、各試験片の応力と繰り返し数の関係、応力とひずみの関係、およびデータシートは添付資料 4 に示した。熱処理まま材 A の異材溶接継手試験片の破損繰り返し数は、母材データの約 19%、時効処理材 B では約 15%、時効処理材 C では約 12% と短くなった。破断位置は、写真 2 9 に示すように、熱処理まま材 A 試験片では SUS316 鋼側溶接境界部、時効処理材 B、C 試験片では FMS 鋼側の溶接境界部であった。参考として、12Cr-2W 鋼と 316FR 鋼の 600℃における低サイクル疲労試験結果を図 2 1 に示す。10⁴ サイクル程度までは両鋼の疲労寿命は同等である。本試験における異材溶接熱処理まま材 A 試験片では、同寿命のひずみ範囲に対して約 1/2 に低下している。

本試験では全ひずみ範囲一定の条件で試験行ったが、GL=20mm の範囲内にはインコネル溶着金属を中心として FMS 鋼と SUS316 鋼の母材および熱影響部が存在し、各部のひずみは異なる。試験温度 600℃において、最も軟化する領域にひずみが集中し、一様な材質の試験片に比べると破損繰り返し数は低下する。一般に、12Cr マルテンサイト鋼では繰り返し軟化、オーステナイト系ステンレス鋼では繰り返し硬化を示すが、本試験の異材溶接試験片では、添付資料 4 の付図 1 に示すごとく、繰り返し硬化を示した。応力範囲は時効が進行した時効処理 C 材の試験片で低下がみられた。熱処理まま材 A 試験片では SUS316 鋼側溶接境界部にて破断した。600℃の引張試験でも SUS316 鋼母材部で破断しており、熱処理ままの異材溶接部では 600℃の強度は SUS316 鋼が最も低く、この領域にひずみ集中が生じたと考えられる。700℃の時効処理材 C では FMS 鋼の 600℃強度が低くなり、引張試験、疲労試験とも FMS 鋼側で判断した。時効処理材 B の場合は、600℃引張試験では SUS316 鋼側、疲労試験では FMS 鋼側で破断が生じたが、B の時効処理では FMS 鋼と SUS316 鋼の 600℃強度がほぼ均衡するためと推定される。

表 18 異材溶接試験片の低サイクル疲労試験結果

試験片 符号	全歪範囲 $\Delta \varepsilon_t$ (%)	塑性歪範囲 $\Delta \varepsilon_p$ (%)	弾性歪範囲 $\Delta \varepsilon_e$ (%)	最大応力 σ_{max} (N/mm ²)	最小応力 σ_{min} (N/mm ²)	応力範囲 $\Delta \sigma$ (N/mm ²)	繰返し数 N_f (cycles)	破断 位置	記事
A	0.70	0.30	0.40	314	-326	640	985	B	SUS316 溶接境界部
B	0.69	0.30	0.39	315	-325	640	735	A	PNC-FMS 溶接境界部
C	0.70	0.38	0.32	264	-276	540	619	A	PNC-FMS 溶接境界部
備考	三角波		$\varepsilon_{min}/\varepsilon_{max} = -1$		G.L = 20mm				

図 2 1 S-N diagram for 12Cr-2W steel plate tested in triangular strain wave shape at $10^{-3}/s$.

参考文献) 木村恵他; フェライト系耐熱鋼の母材および溶接継手のクリープ疲労寿命特性: 鉄と鋼, 87(2001)7, 42

3. 8 PNC-FMS 鋼同材溶接部の曲げ試験

H13 年度「フェライト/マルテンサイト鋼ラップ管(実機)の溶接試験」において、フェライト/マルテンサイト鋼(PNC-FMS 鋼)と SUS316 鋼の異材溶接試験片の曲げ試験を行ったところ SUS316 鋼母材部で曲がりが生じ、PNC-FMS 鋼の溶接熱影響部の曲げ評価とはならなかった。本件につき PNC-FMS 鋼の同材突合せ溶接継手試験片を作製し、同鋼溶接部の曲げ評価を行うことを目的として試験を行った。板厚中央から採取した曲げ試験片①～③(W20mm×L100mm×T2mm)について、表側(溶接最終盛り側の面)が曲げの外側となるようにして、溶接部の曲げ試験を実施

した。試験条件は、押し金具半径 $R=2t=2\times 2=4\text{mm}$ 、支え間の距離 $L=2R+2t=2\times 4+2\times 2=12\text{mm}$ とし、 180° 曲げとした。

曲げ試験機及び試験中の試験片外観を写真 30、31、試験後の外観（曲げ部側面および上面）及びカラーチェック結果を写真 32～37 に示す。

各試験片とも外観観察及びカラーチェックにより、溶接金属部では溶接欠陥と思われる疵（ブローホール、ポロシティが曲げにより開口した状態）が認められたが、割れは確認されなかった。溶接金属はインコネルであり、曲げ性は溶接欠陥を除いては良好であると考えられる。溶接境界部及び FMS 鋼熱影響部に割れ等は確認されなかった。

4. 溶接試験まとめ

フェライト／マルテンサイト鋼（PNC-FMS）ラップ管実用化のため、フェライト／マルテンサイト鋼ラップ管の両端に SUS316 オーステナイト系ステンレス鋼を TIG 溶接接合した後、加工熱処理を施して仕上げる複合ラップ管を開発した。複合ラップ管異材溶接部の機械的特性を把握するために、高温使用を想定した時効処理を含む模擬溶接部を製作し、引張試験、衝撃試験、破壊靱性試験、クリープ破断試験、及び高温低サイクル疲労試験を実施した。また異材溶接部の曲げ試験では硬度の低い SUS316 母材部で曲がってしまったため、PNC-FMS 溶接熱影響部の曲げ特性を評価する目的で FMS 同材溶接材の曲げ試験を行った。得られた結果は以下のとおりである。

- ① 実機相当 FMS 鋼ラップ管を用い、複合ラップ管製造工程を適用した異材溶接薄板材とその 10 倍の厚さの異材溶接厚板材を製作した。
- ② 熱処理まま材（すなわち、複合ラップ管製造まま；符号 A）に対して、 $500^\circ\text{C}\times 50,000\text{h}$ 相当（ $600^\circ\text{C}\times 74\text{h}$ 加熱；符号 B）の時効処理材 B と $600^\circ\text{C}\times 50,000\text{h}$ 相当（ $700^\circ\text{C}\times 145\text{h}$ 加熱；符号 C）の時効処理材 C を製作した。
- ③ 異材溶接後に加工、熱処理が施される複合ラップ管の溶接境界部では、 δ フェライト相の生成が防止できることが確認された。FMS 母材部の硬さは SUS316 母材部の硬さより 2 倍程度高く、インコネル溶接金属部の硬さは SUS316 母材部の硬さよりやや高い。時効処理 C（ 700°C 加熱）の条件では、FMS 母材部の硬さは大幅に低下した。
- ④ 引張試験において、熱処理まま材 A は室温から 700°C までの破断位置は SUS316 母材部、 750°C では FMS 母材部であり、溶接境界部での破断はなかった。 750°C における A 材の引張強さは、FMS 母材と同等であった。
- ⑤ 時効処理材 B は 600°C までの試験片破断位置は SUS316 母材部となり、 700°C 以上では FMS 母材または溶接熱影響部となる。引張強さは、熱処理まま材 A とほぼ同等である。すなわち B の時効条件（ 500°C で約 50,000hrs に相当）では短時間強度に及ぼす影響は小さい。
- ⑥ 時効処理材 C は 600°C 以上で FMS 母材で破断し、熱処理まま材 A および時効処理 B 材と比較してやや低い強度を示した。
- ⑦ FMS 鋼溶接境界部の衝撃特性を調べるため、FMS 鋼溶接境界部に切欠を入れた試験片を用いたが、熱処理まま材 A および時効処理 B 材ではき裂が境界部に沿って伝播せず、FMS 鋼溶接境

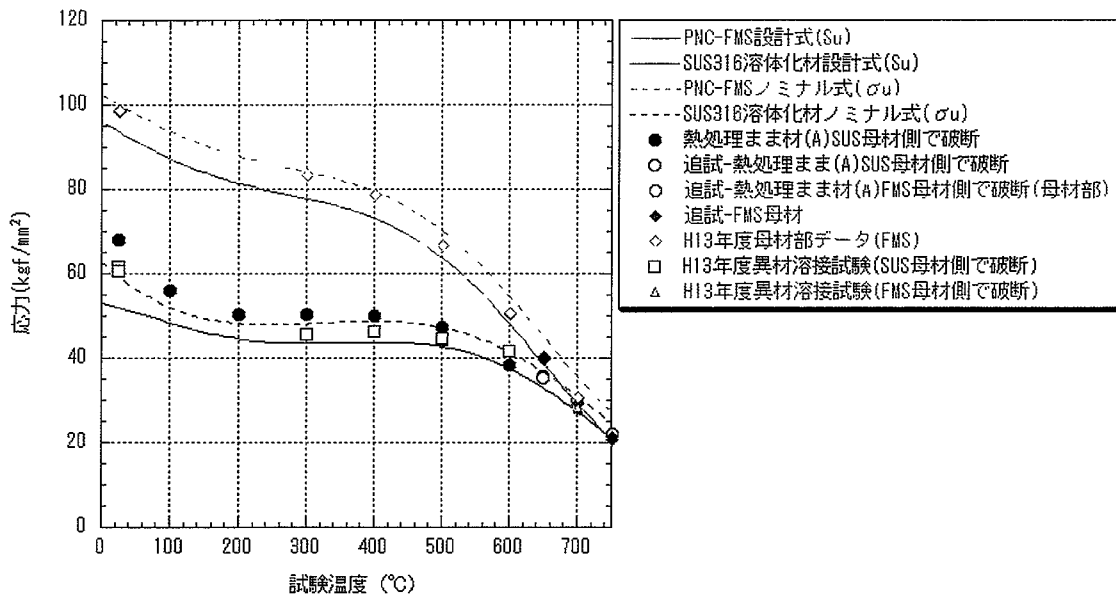
界部の有効な衝撃データは得られなかった。最も脆化が進行したと考えられる時効処理材 C では溶接境界部に沿ったき裂伝播がみられ有効なデータが得られた。時効処理材 C における FMS 溶接境界部の DBTT は約 -115°C 、上部棚エネルギーは約 12.5J であり、優れた靱性を示した。

- ⑧ CT 試験でも、衝撃試験と同様、き裂が FMS 溶接境界部に沿って直線的には伝播せず、ばらつきの大きな結果となった。
- ⑨ 熱処理まま材 A における異材溶接部の単軸クリープ破断時間は、目標時間よりやや短く、破断位置は FMS 溶接境界部であった。
- ⑩ 異材溶接部の疲労寿命は母材データに比べると、熱処理まま材 A の試験片でもかなり短く、同寿命のひずみ範囲にて約 1/2 となった。
- ⑪ FMS 同材溶接材について、曲げ支点部を中心に左右均等な曲げ試験を行ったところ、溶接金属は微小溶接欠陥を除いて割れは認められなかった。また FMS 溶接境界部、熱影響部にも割れ等の欠陥は認められず、良好な曲げ性能を示した。

5. 考察

5. 1 短時間強度

本試験により得られた異材溶接試験片熱処理まま材 A の引張強さ、0.2%耐力について、PNC-FMS と SUS316 ラップ管(溶体化処理(ST)材)用設計引張強さ(以下 S_u)⁴⁾、設計降伏点(以下 S_y)⁴⁾、各ノミナル曲線(以下 σ_u 、 σ_y)⁴⁾と測定データ、および本試験片と同一材料を用い、同一溶接条件で作製した異材溶接材と母材の H13 年度実施した引張試験データをまとめて図 2 2、2 3 に示す。参考として H13 年度実施した PNC-FMS 母材および異材溶接材の引張試験結果を表 1 9、2 0²⁾に示し、引張および後に示す衝撃、クリープ破断、疲労試験に用いた各試験片の化学成分、熱処理条件を表 2 1、2 2⁴⁾、⁵⁾に示す。本試験片と設計式策定に用いた各試験片の化学成分、熱処理条件に顕著な差異は認められない。

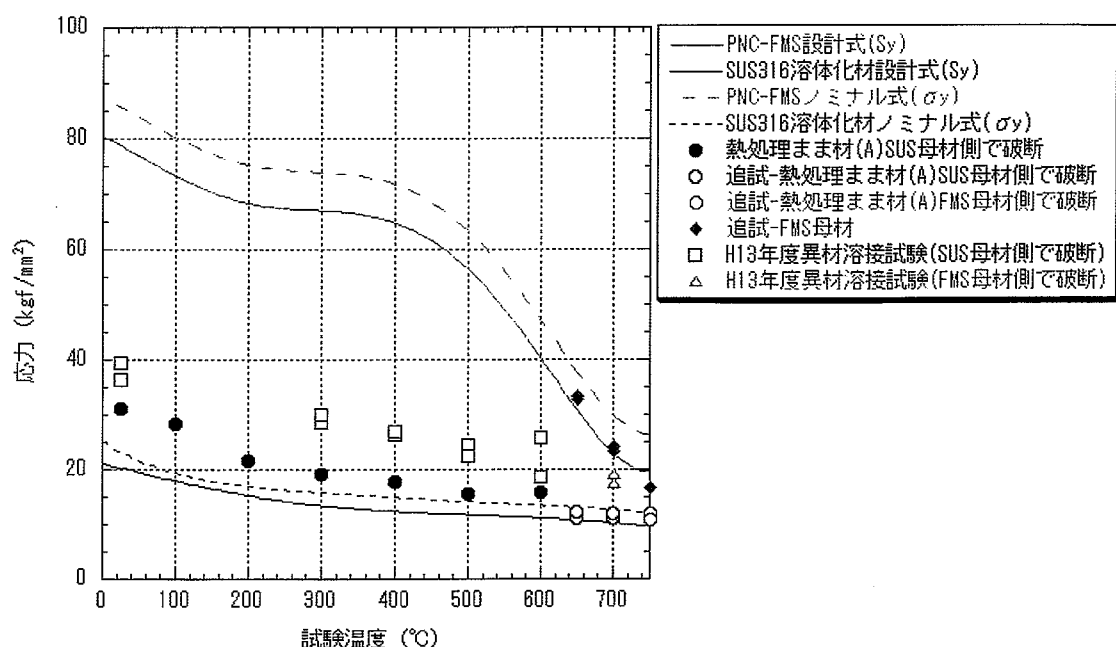


$$1) \text{ PNC-FMS 設計式 } (S_u)^{4)} : 95.8 - 9.09 \times 10^{-2}T - 4.94 \times 10^{-5}T^2 + 1.25 \times 10^{-6}T^3 - 3.07 \times 10^{-9}T^4 + 1.96 \times 10^{-12}T^5 \quad (T: \text{温度})$$

$$2) \text{ SUS316 溶体化材設計式 } (S_u) : \text{SUS316 ST 材の } S_u \text{ データ }^{10)} \text{ をプロットし、温度の 5 次式で回帰した。}$$

$$3) \text{ PNC-FMS ノミナル式 } (\sigma_u)^{4)} : 102.2 - 9.09 \times 10^{-2}T - 4.94 \times 10^{-5}T^2 + 1.25 \times 10^{-6}T^3 - 3.07 \times 10^{-9}T^4 + 1.96 \times 10^{-12}T^5 \quad (T: \text{温度})$$

図 2 2 異材溶接材の引張強さ測定データと設計引張強さの比較(溶接後熱処理まま材)



- 1) PNC-FMS 設計式(S_y)⁴⁾: $80.3 - 5.47 \times 10^{-2}T - 3.99 \times 10^{-5}T^2 + 2.96 \times 10^{-6}T^3 - 6.21 \times 10^{-9}T^4 + 3.88 \times 10^{-12}T^5$ (T: 温度)
- 2) SUS316 設計式(S_y): SUS316 ST 材の S_y データ¹⁰⁾をプロットし、温度の 5 次式で回帰した。
- 3) PNC-FMS ノミナル式(σ_y)⁴⁾: $87.2 - 5.47 \times 10^{-2}T - 3.99 \times 10^{-5}T^2 + 2.96 \times 10^{-6}T^3 - 6.21 \times 10^{-9}T^4 + 3.88 \times 10^{-12}T^5$ (T: 温度)

図 2 3 異材溶接材の 0.2%耐力測定データと設計降伏点の比較(溶接後熱処理まま材)

表 1 9 PNC-FMS ラッパ管母材部の引張試験結果(H13 年度実施)

試験温度 (°C)	0.2%耐力		引張強さ		伸び	破断位置
	(kgf/mm ²)	(MPa)	(kgf/mm ²)	(MPa)	(%)	
R.T (25)	74	728	98.4	965	8.7	B
	83	817	98.5	966	8.8	B
300	72	703	83.3	817	6.9	B
	72	710	83.4	818	7.2	B
400	56	550	78.7	772	9.8	B
	58	572	78.5	770	10	B
500	51	497	66.8	655	18.2	A
	52	511	66.8	655	15.9	A
600	34	335	50.3	493	17.0	B
	37	365	50.7	497	18.7	B
700	22	217	30.6	300	20.6	A
	25	247	30.7	301	23.2	A

注 1) 試験片寸法: 板厚 1.9 mm × 板幅 8mm × GL30 mm

注 2) 異材溶接試験片と母材試験片は同一材料

母材: H13 年度試作複合ラッパ管(丸管 TIG)の PNC-FMS 部分より採取

異材溶接：H13 年度試作 PNC-FMS ラップ管残材より板材を切り出し、複合
ラップ管の製造工程を模擬して製作

表 20 H13 年度実施した異材溶接試験片の引張試験結果

試験温度 (°C)	0.2%耐力		引張強さ		伸び (%)	破断位置
	(kgf/mm ²)	(MPa)	(kgf/mm ²)	(MPa)		
R.T (25)	39	387	61.6	604	33.4	B(SUS側)
	36	357	60.8	596	34.3	B(SUS側)
300	29	280	45.8	449	18.2	B(SUS側)
	30	293	45.6	447	15.7	B(SUS側)
400	26	258	46.3	454	18.0	B(SUS側)
	27	264	46.5	456	16.5	B(SUS側)
500	24	239	44.3	434	17.5	B(SUS側)
	23	221	44.6	437	20.6	B(SUS側)
600	19	183	41.7	409	18.7	B(SUS側)
	26	253	41.7	409	16.4	B(SUS側)
700	19	187	28.2	276	21.9	B(FMS側母材部)
	18	172	28.3	277	23.8	B(FMS側母材部)

注 1) 試験片寸法：板厚 1.9 mm×板幅 8mm×GL30 mm

注 2) 異材溶接試験片は、H13 年度試作複合ラップ管(丸管 TIG)の異材溶接部より採取して製作

表 21 各種試験に用いた PNC-FMS の化学成分 (wt%)

		C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	W	V
成分規格	範囲	0.09～ 0.15	≤0.10	0.40～ 0.80	0.20～ 0.60	10.0～ 12.00	0.30～ 0.70	1.70～ 2.30	0.15～ 0.25
	目標	0.12	0.05	0.60	0.40	11.00	0.40	2.00	0.20
本試験(引張&衝撃)		0.14	0.05	0.49	0.50	11.25	0.45	2.07	0.23
引張試験 クリープ試験	63WFS	0.13	0.03	0.64	0.45	10.95	0.44	1.82	0.18
	63WFK	0.14	0.05	0.49	0.50	11.30	0.45	2.07	0.22
	1WFS	0.12	0.02	0.65	0.39	10.90	0.39	1.81	0.19
	2WFK	0.14	0.05	0.49	0.50	11.20	0.45	2.07	0.23
衝撃試験		2WFK相当	0.12	0.05	0.60	11.09	0.49	2.08	0.21
疲労試験		61FS	0.10	0.07	0.54	11.05	0.45	1.89	0.21

		Nb	N	Cr-eq.	Ni-eq.	
成分規格	範囲	0.020～ 0.080	0.030～ 0.070	－	－	
	目標	0.050	0.050	－	－	
本試験(引張&衝撃)		0.06	0.060	12.96	6.75	
引張試験 クリープ試験	63WFS	0.070	0.050	12.47	6.17	
	63WFK	0.060	0.060	13.00	6.75	
	1WFS	0.060	0.050	12.35	5.82	
	2WFK	0.060	0.060	12.91	6.75	
衝撃試験		2WFK相当	0.047	0.049	12.82	5.76
疲労試験		61FS	0.055	0.044	12.68	5.51

注) Cr-eq. ; $Cr + Mo + 0.5W + 1.5Si + 0.5Nb + 0.5V$
Ni-eq. ; $Ni + 30(C + N) + 0.5Mn$

表 2 2 各種試験に用いた PNC-FMS の熱処理条件

	溶接後熱処理	最終熱処理		冷間加工度
		焼ならし処理	焼戻し処理	
異材溶接部 母材部	800°C × 30min・Arガス冷却	1,050°C × 40min・Arガス冷却	720°C × 40min・Arガス冷却	21%
63WFS	溶接実施せず (PNC-FMS母材部の試験)	1,045°C × 10min・Arガス冷却	700°C × 60min・Arガス冷却	10%
63WFK		1,050°C × 40min・Arガス冷却	710°C × 40min・Arガス冷却	-
1WFS		1,045°C × 10min・Arガス冷却	700°C × 30min・Arガス冷却	9.8%
2WFK		1,050°C × 40min・Arガス冷却	710°C × 40min・Arガス冷却	-
2WFK相当		1,050°C × 10min・Arガス冷却	700°C × 60min・Arガス冷却	-
61FS		1,100°C × 10min・Arガス冷却	780°C × 60min・Arガス冷却	-

①溶接境界部

①-1 引張強さ

本異材溶接材は、試験温度 700°C以下では SUS 母材部で破断しているが、それらの引張強さは全て SUS316 の S_u よりも上にある。これに対して試験温度 750°Cでは FMS 母材部で破断しており、その引張強さは FMS 母材の S_u の線に乗っているが、この S_u は SUS316 溶体化材の S_u と重なっているため、SUS316 溶体化材の S_u の線に乗っているとも言える。また H13 年度実施した異材溶接材の引張試験では 700°Cにおいて FMS 母材部で破断しており、かつ SUS316 溶体化材の S_u よりも上にあることがわかる。

以上の結果より、PNC-FMS/SUS316 異材溶接部の引張強さは、室温～700°Cでは SUS316 母材が支配的で、750°Cでは FMS 母材 と SUS316 母材が同程度に支配的であると考えられる。また全ての試験において母材部で破断していることから、溶接境界部では引張強さの劣化はなく、各母材と同等に扱って問題ないと考えられる。

したがって、室温～750°Cにおける複合ラップ管異材溶接部の設計引張強さ(S_u)としては、SUS316 溶体化材の S_u を用いるのが適切であると考ええる。

①-2 0.2%耐力

本異材溶接材は、試験温度 700°C以下では SUS 母材部で破断しているが、それらの 0.2%耐力は全て SUS316 溶体化材の S_y よりも上にある。これに対して試験温度 750°Cでは FMS 母材部で破断しているが、その 0.2%耐力は FMS 母材の S_y の線より下で、SUS316 溶体化材の S_y のほぼ線にある。また H13 年度実施した異材溶接材の引張試験では 700°Cにおいて FMS 母材部で破断しているが、その 0.2%耐力は FMS 母材の S_y と SUS316 溶体化材の S_y の間にある。このように FMS 母材部で破断したにもかかわらず 0.2%耐力が FMS 母材の S_y を下回ったのは、異材溶接材の引張試験片平行部には SUS316、PNC-FMS 各母材と溶接熱影響部および溶接金属部(インコネル)が含まれるため、破断位置は FMS 母材であるが、0.2%耐力は SUS316 溶体化材が最も低いためである。また全ての試験において母材部で破断していることから、引張強さと同様に 0.2%耐力についても、溶接境界部における劣化はなく、各母材と同等に扱って特に問題ないと考えられる。

したがって、室温～750°Cにおける複合ラップ管異材溶接部の設計降伏点(S_y)としては、SUS316 溶体化材の S_y を用いるのが適切であると考ええる。

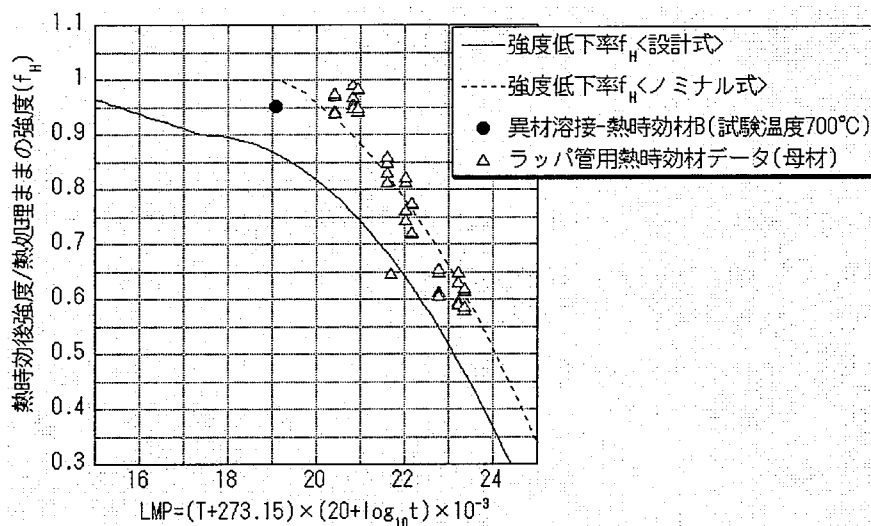
①-3 伸び

図 1 1 に示すように、SUS 母材部で破断した室温～700℃では、伸びは 20%程度でほぼ一定で、650℃～750℃の FMS 母材の伸びよりもやや大きかった。FMS 母材部で破断した 750℃では、700℃以下の SUS で破断した異材溶接材の伸びよりやや小さく、FMS 母材の伸びとほぼ同等であった。

異材溶接材は破断位置の材料だけでなく他の部位の材料も伸びるため、厳密な比較評価はできないが、以上の結果より、PNC-FMS/SUS316 異材溶接部の伸びは、概ね室温～700℃においては SUS316 母材が支配的であるが、750℃においては PNC-FMS 母材が支配的であるが SUS316 と顕著な差異はないと考えられる。また全ての試験温度において母材部で破断したことから溶接境界部で伸びに著しい劣化はないと考えられる。

②熱時効効果

試験温度 700℃において FMS 側溶接境界部で破断した時効処理材 B(600℃×74hrs 時効、LMP=19.09 : 500℃で約 50,000hrs 相当)および FMS 母材(ラップ管用)の熱時効による引張強さの低下率(f_H)を図 2 4 に示し、0.2%耐力について図 2 5 に示す⁷⁾。同一鋼、同一溶接条件での熱時効効果確認を目的とするので、熱処理まま材の強度は表 3 のデータ(試験片番号 A08)を用いた。 f_H の設計式を各図の下に示す。(ノミナル式作成にあたっては、ラップ管用としての母材の熱時効データ数が少ないため、LMP の変化に対する強度低下の挙動およびデータの不確かさ幅は被覆管とラップ管で大きな違いはないと仮定し、被覆管用の各式を LMP 軸と平行に移動して作成したものを適用した⁷⁾。)



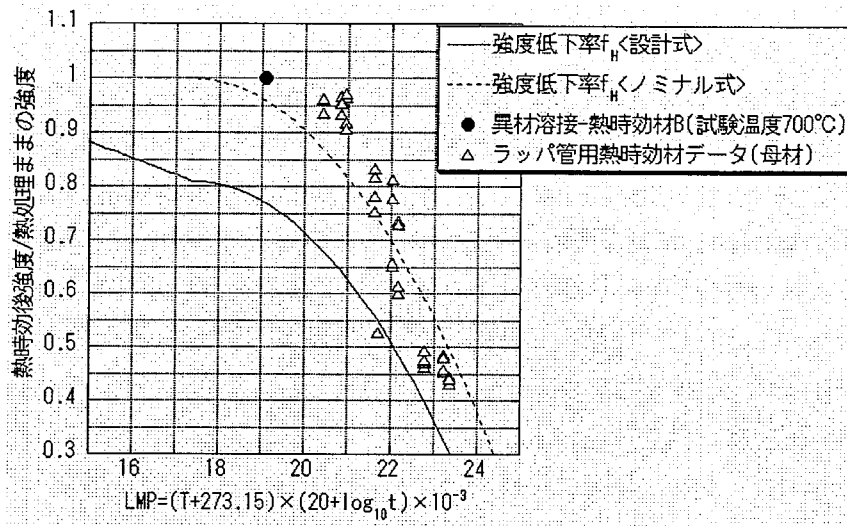
LMP < 17.415 のとき

$$f_H = -2.75353 \times 10^{-2}(LMP - 17.415) + 0.89900 \quad (\text{ただし } f_H \leq 1)$$

LMP $\geq$ 17.415 のとき

$$f_H = -1.2221 \times 10^{-2}(LMP - 17.415)^2 + 0.89900$$

図 2 4 異材溶接材および母材の熱時効による引張強さの低下



LMP < 17.411 のとき

$$f_H = -2.9922 \times 10^{-2} (LMP - 17.411) + 0.80959 \quad (\text{ただし } f_H \leq 1)$$

LMP $\geq$ 17.411 のとき

$$f_H = -1.4224 \times 10^{-2} (LMP - 17.411)^2 + 0.80959$$

図 2.5 異材溶接材および母材の熱時効による 0.2%耐力の低下

時効処理材 B の熱時効後強度/熱処理ままの強度 (強度低下率、以下 f_H) は、引張強さ、0.2%耐力ともに母材 f_H < 設計式 > の上であった。

以上の結果から、異材溶接材の FMS 側溶接境界部における引張強さおよび 0.2%耐力の熱時効効果については、FMS 母材と同等に扱って特に問題ないものとする。

5. 2 衝撃特性

FMS 溶接境界部の衝撃特性を調べるため、溶接境界部に切り欠きを入れた試験片を用いたところ、時効処理材 C (700℃ × 145hrs 時効、LMP=21.56 : 600℃ で約 50,000hrs 相当) のみ溶接境界部に沿ったき裂伝播がみられ、有効なデータが得られた。シャルピー衝撃特性には熱時効効果および試験片の寸法効果があるため、これらの効果を考慮して時効処理材 C のデータを換算し、母材のデータと比較することによって、FMS 溶接境界部の衝撃特性を評価した^{3)~5)}。図 2.6 にシャルピー衝撃試験片の寸法表記を示し、吸収エネルギーとシャルピー衝撃試験温度との関係の例を図 2.7 に示す。

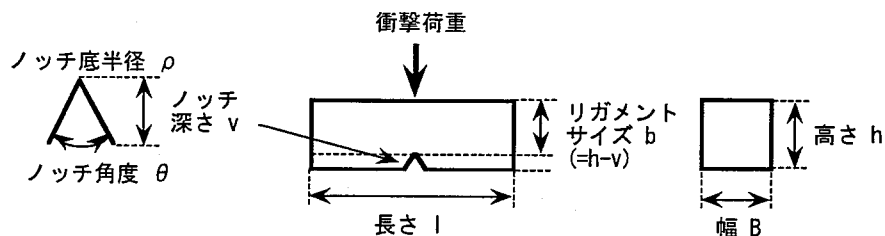


図 2.6 シャルピー衝撃試験片の寸法表記

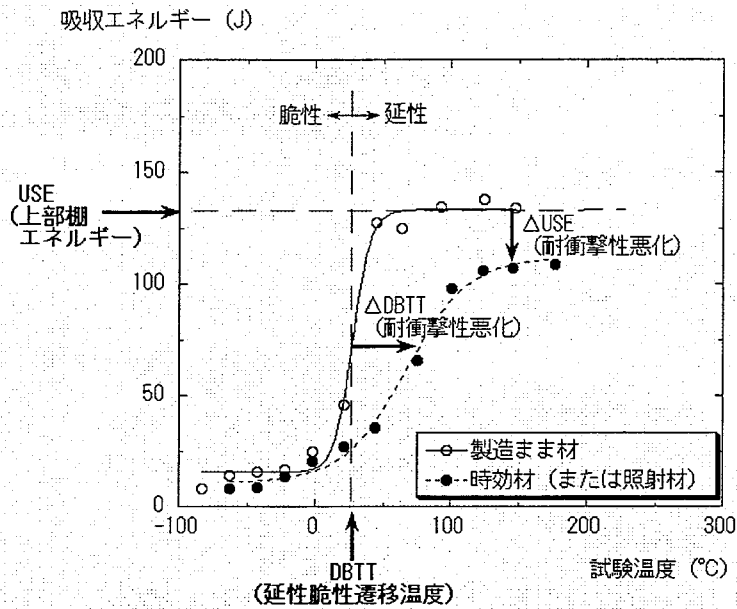


図 2 7 吸収エネルギーとシャルピー衝撃試験温度との関係の例

①上部棚エネルギー(以下 USE)

これまでの研究では、PNC-FMS 母材(製造まま材および熱時効材)の USE を、試験片の幅 B と、試験片の高さからノッチ深さを差し引いたリガメントサイズ b の積 Bb の 1.4 乗 ($= (Bb)^{1.4}$) を用いて試験片寸法依存性のないよう規格化している。⁵⁾ これを参考にして、USE におよぼす熱時効効果を評価した。図 2 8 に異材溶接-熱時効材 C と熱処理まま材(母材)および熱時効材(母材)の USE 比較を示し、図 2 9 に各材料の $USE/(Bb)^{1.4}$ の比較を示す。また各衝撃試験片の仕様を表 2 3 に示す。

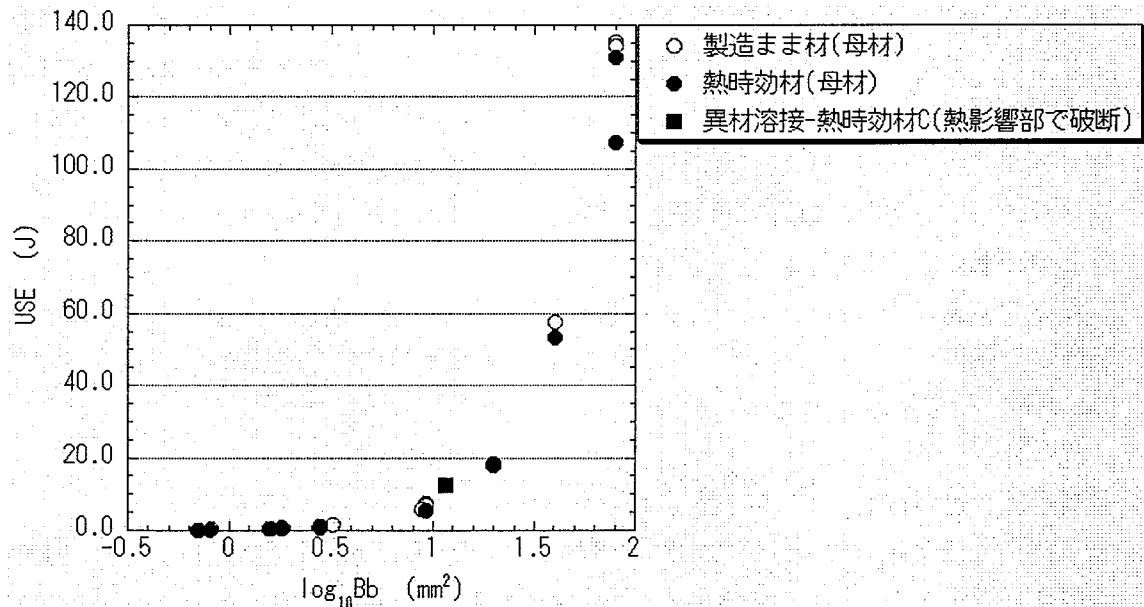


図 2 8 異材溶接熱時効材と製造まま材および熱時効材の USE 比較

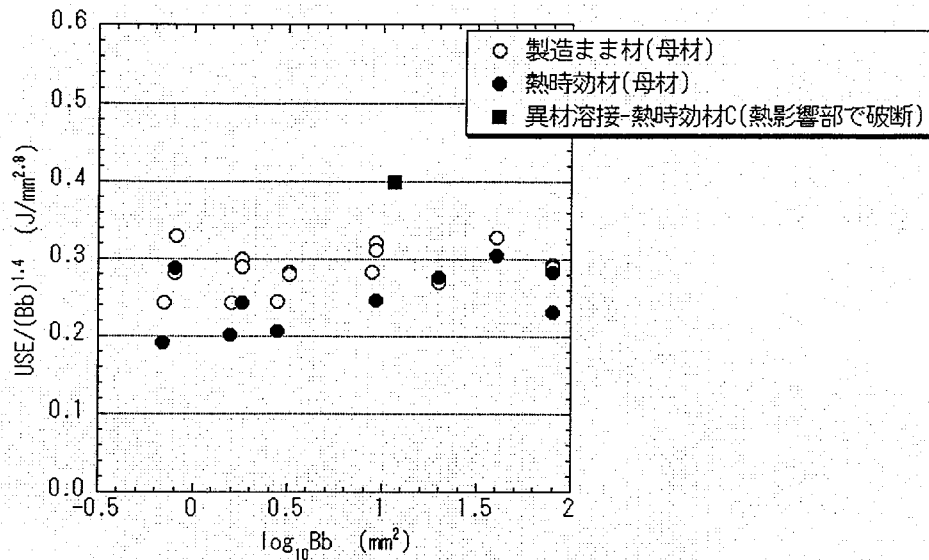
図 2 9 異材溶接熱時効材と製造まま材および熱時効材の $USE/(Bb)^{1.4}$ 比較

表 2 3 各衝撃試験片の仕様

	最終熱処理	試験片幅×高さ(mm)	時効条件	備考
製造まま材	1050℃×10min	10×10～1×1	—	2WFK相当板材
熱時効材	+700℃×1hr		700℃×2000hrs	
異材溶接熱時効材 (熱影響部で破断)	1050℃×40min +720℃×40min	1.45×10	700℃×145hrs (600℃×50000hrs相当)	常陽炉心燃料用試作材

時効処理材 C の USE は、FMS 母材 (2WFK 相当材) の USE のプロットを結んだ線上にほぼ乗っており、溶接熱影響部の USE は、母材の USE と顕著な差異はなかった。

寸法依存性のないように $(Bb)^{1.4}$ で割った時効処理材 C の USE は、母材の $USE/(Bb)^{1.4}$ よりも若干高めであった。また図 2 8、2 9 に示すように、一般的に (熱処理まの USE) > (熱時効後の USE) であることから、時効処理材 C と同一鋼、同一溶接条件で作製した熱処理まま材 A の溶接熱影響部の USE は、時効処理材 C の USE と同等以上であると推測される。即ち異材溶接材熱影響部の USE は、母材の USE と同等あるいはそれ以上であるとの結果が得られた。

以上の結果より、インコネル (溶接金属) 部分からの亀裂進展の影響も懸念されるが、実際に実機のラップ管において、異材溶接部を起点として衝撃荷重が加わったとしても、USE の低下は問題ないと考えられる。

②延性脆性遷移温度 (以下 DBTT)

これまでの研究では、PNC-FMS 母材 (製造まま材および熱時効材) の DBTT を、試験片の幅 B と、(ノッチ底にかかる応力)/(材料全体にかかる応力) で定義される弾性応力集中係数 K_t の積 BK_t を用いて試験片寸法依存性のないよう規格化している。⁵⁾ これを参考

にして、時効処理材 C の DBTT を評価した。図 30 に異材溶接-熱時効材 C と製造まま材(母材)および熱時効材(母材)の DBTT 比較を示し、図 31 に各材料について寸法効果を補正した DBTT-115log₁₀BK_t 比較を示す。

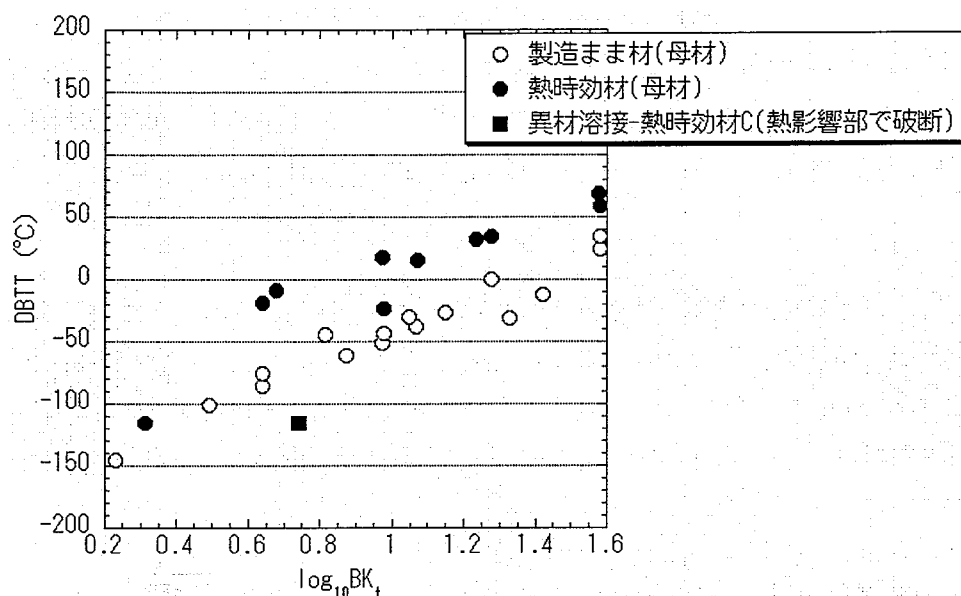


図 30 異材溶接熱時効材と製造まま材および熱時効材の DBTT 比較

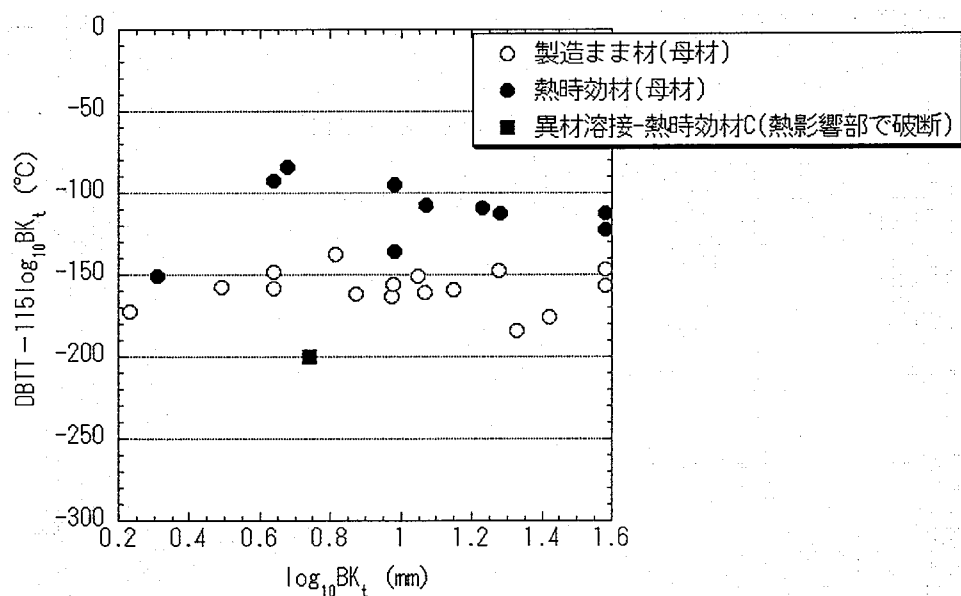


図 31 異材溶接熱時効材と製造まま材および熱時効材の DBTT-115log₁₀BK_t 比較

寸法依存性のないように 115log₁₀BK_t を引いた時効処理材 C の DBTT は、母材よりも低かった。また図 30 に示すように、一般的に(熱処理ままでの DBTT) < (熱時効後の DBTT) であることから、時効処理 C 材と同一鋼、同一溶接条件で作製した熱処理まま材 A の

溶接熱影響部の DBTT は、時効処理材 C の DBTT と同等以下になると推測される。即ち異材溶接材熱影響部の DBTT は、母材の DBTT と同等あるいはそれ以下であるとの結果が得られた。

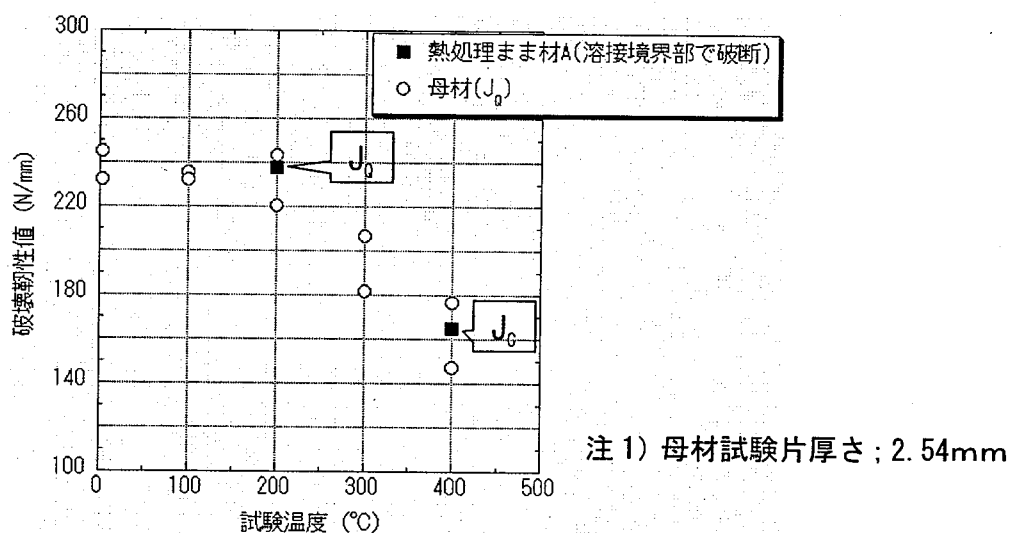
以上の結果より、USE と同様に、実機のラップ管において異材溶接部を起点として衝撃荷重が加わったとしても、DBTT の上昇は問題ないと考えられる。

本試験結果は、USE、DBTT とともに、亀裂がインコネル部分に進展している影響が表われているが、実機の異材溶接を模擬した形状での試験データであることから、実機においても異材溶接部で衝撃特性の低下が生じることはないと考えられる。

5. 3 破壊靱性

異材溶接材の破壊靱性試験は、破断状況の写真(写真 2 1～2 3)によると、衝撃試験と同様に溶接境界部を進展しないものがほとんどであったが、熱処理まま材 A で FMS 側溶接境界部で破断したと思われる試験片があったので、それらと FMS 母材の破壊靱性値を比較した(時効処理材 B および C は、FMS 側溶接境界部で破断したと思われる試験片なし)。比較結果を図 3 2 に示す。

FMS 側溶接境界部で破断したと思われる異材溶接-熱処理まま材 A の 200℃および 400℃における破壊靱性値は、FMS 母材の破壊靱性値と顕著な差異は認められなかった。このことから、異材溶接材の溶接境界部における破壊靱性値は、母材と同等に扱っても特に問題ないものと考えられる。



母材	ASTM E813の試験片寸法に関する有効性判定基準を満足せず
熱処理まま材A (試験温度200℃)	⇒安定延性亀裂発生時のJ値を破壊靱性値(J ₀)とした。
熱処理まま材A (試験温度400℃)	安定延性亀裂の進展前に不安定破壊発生 ⇒不安定破壊発生時のJ値を破壊靱性値(J ₀)とした。

図 3 2 異材溶接熱処理まま材および母材の破壊靱性値

5. 4 クリープ特性

図3-3に試験温度 600℃における異材溶接材、FMS 母材ラップ管(以下 FMS 母材)のクリープ破断強度および FMS 母材(被覆管・ラップ管)の設計クリープ破断強度、SUS316 溶体化材(ST(Solution Treated)材)のノミナル式、設計クリープ破断強度を示し、図3-4に試験温度 550～700℃におけるクリープ破断強度の LMP 依存性を示す^{3)、8)、10)、11)}。FMS 母材は、表2-1、2-2に示す2WFKのデータを用いた。異材溶接材および FMS 母材は単軸クリープ破断試験であるため、Mises 型の相当応力を用い、以下の式に従って単軸応力を周応力に換算してグラフ化した。

$$\sigma_0 = \sqrt{3} / 2 \cdot \sigma_H \quad (\sigma_0; \text{単軸応力}, \sigma_H; \text{周応力})$$

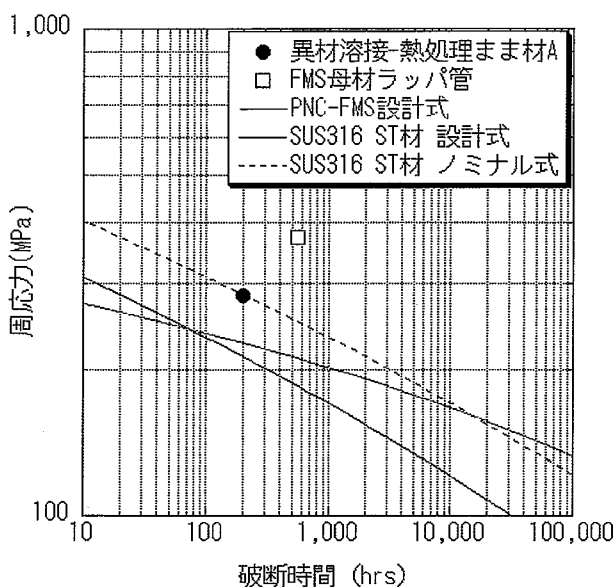


図3-3 異材溶接材のクリープ破断-時間曲線(試験温度 600℃)

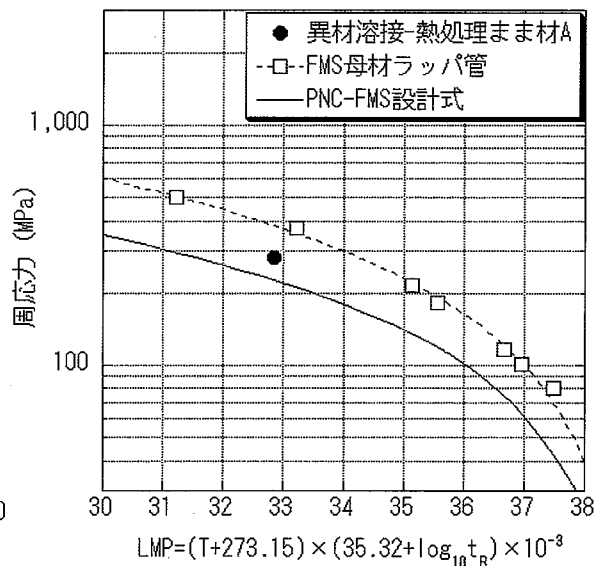


図3-4 異材溶接材のクリープ破断強度の LMP 依存性

$$\begin{aligned} \cdot \text{PNC-FMS}^{8)} : \text{LMP} &= (T + 273.15) \times (35.32 + \log_{10}(3 \cdot t_R)) \times 10^{-3} \\ &= 40.246 - 6.7351 \log_{10} S_R + 7.953 (\log_{10} S_R)^2 - 4.964 (\log_{10} S_R)^3 \\ \cdot \text{SUS316(溶体化材)}^{11)} : \text{LMP} &= (T + 273.15) \times (17.38 + \log_{10}(10 \cdot t_R)) \times 10^{-3} \\ &= 22.983 - 0.7985 \log_{10} S_R + 2.164 (\log_{10} S_R)^2 \end{aligned}$$

S_R : 設計クリープ破断強度(kgf/mm²)

T : 試験温度(℃)

t_R : 試験時間(hrs)

試験温度 600℃において異材溶接材は、母材よりもやや低めの強度で、より短時間で FMS 溶接境界部で破断した。これは溶接時の入熱による溶接金属(インコネル)から FMS 母材への Ni 等の拡散が影響している可能性が考えられるが、この異材溶接材のクリー

プ試験データは、FMS 母材の設計クリープ破断強度の上にある。このことから、FMS 溶接境界部のクリープ特性は、若干の劣化はあるものの母材と同等に扱って特に問題ないものと考えられる。(FMS 母材のクリープ破断強度は設計クリープ破断強度よりもかなり高くなっているが、これは PNC-FMS の設計クリープ破断強度がラップ管と被覆管の両方を対象に設定されたものであることおよびラップ管のクリープ破断強度は被覆管よりも高い値を示すことに起因する。) また 600℃における FMS 母材と SUS316 溶体化材のノミナル式は、破断時間約 2,000hrs 近傍で交叉しており、それ未満の時間では PNC-FMS の破断応力の方が小さく、それ以上の時間になると SUS316 溶体化材の方が小さくなっている。これは、異材溶接材は同一温度でも応力レベルによって破断部位(材質)が異なる場合があり得ることを示している。したがって異材溶接材としての設計クリープ破断強度は、FMS 母材と SUS316 溶体化材の設計クリープ破断強度を重ね合わせて小さい方を採用することにより、健全性を確保することができる。

5. 5 疲労特性

図 3 5 に試験温度 600℃における異材溶接材、FMS 母材被覆管(61FS(表 2 1、2 2 参照)、歪速度 0.1%/sec)の破損繰返し数(N_f)⁹⁾と FMS 母材(被覆管・ラップ管)³⁾、SUS316 溶体化材(歪速度 0.1%/sec)¹⁰⁾の許容繰返し数(N_d)との比較を示す。

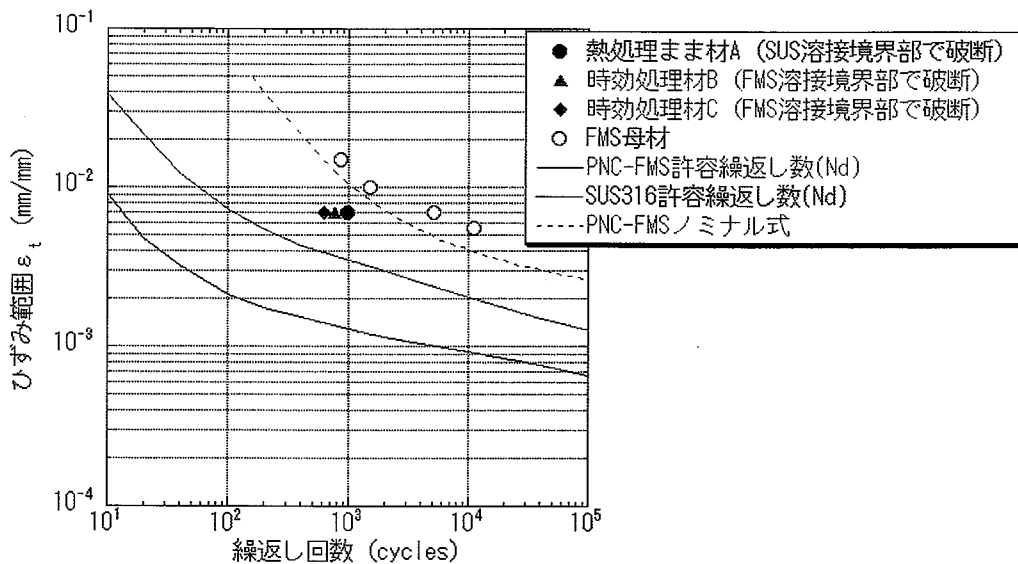


図 3 5 異材溶接材および FMS 母材の破損繰返し数と許容繰返し数(600℃)

熱処理まま材 A は SUS316 溶接境界部で破断したのに対して時効処理材 B および C は FMS 溶接境界部で破断した。また同一ひずみ範囲($\epsilon_t=0.007\text{mm/mm}$)において、熱時効材の破損繰返し数は、熱時効していない FMS 母材の繰返し数よりも少なくなっていた。これらのことより、異材溶接部の疲労特性は、熱時効されない状態では SUS316 が支配的であ

るが、熱時効によって疲労特性が低下し、PNC-FMS 溶接境界部が支配的になると考えられる。ただしそれぞれの破損繰返し数は、PNC-FMS、SUS316 いずれの許容繰返し数の線よりも上にあることがわかる。したがって 600℃における異材溶接部の許容繰返し数 (N_d) については、熱時効された場合も含め、SUS316 の許容繰返し数を適用するのがより安全側になると考えられる。

同様に他の各温度における FMS 母材と SUS316 溶体化材の許容繰返し数を図 3 6 に示す(歪速度=0.1%/sec)^{3), 10)}。異材溶接部の許容繰返し数としては、500℃～700℃では、同一許容ひずみ範囲において $N_d(\text{PNC-FMS}) > N_d(\text{SUS316})$ であることから、SUS316 の N_d を使用し、425℃以下では、 $N_d(\text{PNC-FMS}) < N_d(\text{SUS316})$ であることから、PNC-FMS 母材の N_d を使用するのが適切と考えられる。これらの温度域では、全許容ひずみ範囲における両鋼種の N_d の大小関係が一定であるのに対して、450℃および 475℃では、 $N_d(\text{PNC-FMS})$ と $N_d(\text{SUS316})$ の線が交叉しており、ある点を境に両鋼種の N_d の大小関係が逆転する。したがって 450～475℃での異材溶接部の許容繰返し数としては、両鋼種の N_d を重ね合わせ、小さい方を使用するのが適切である。

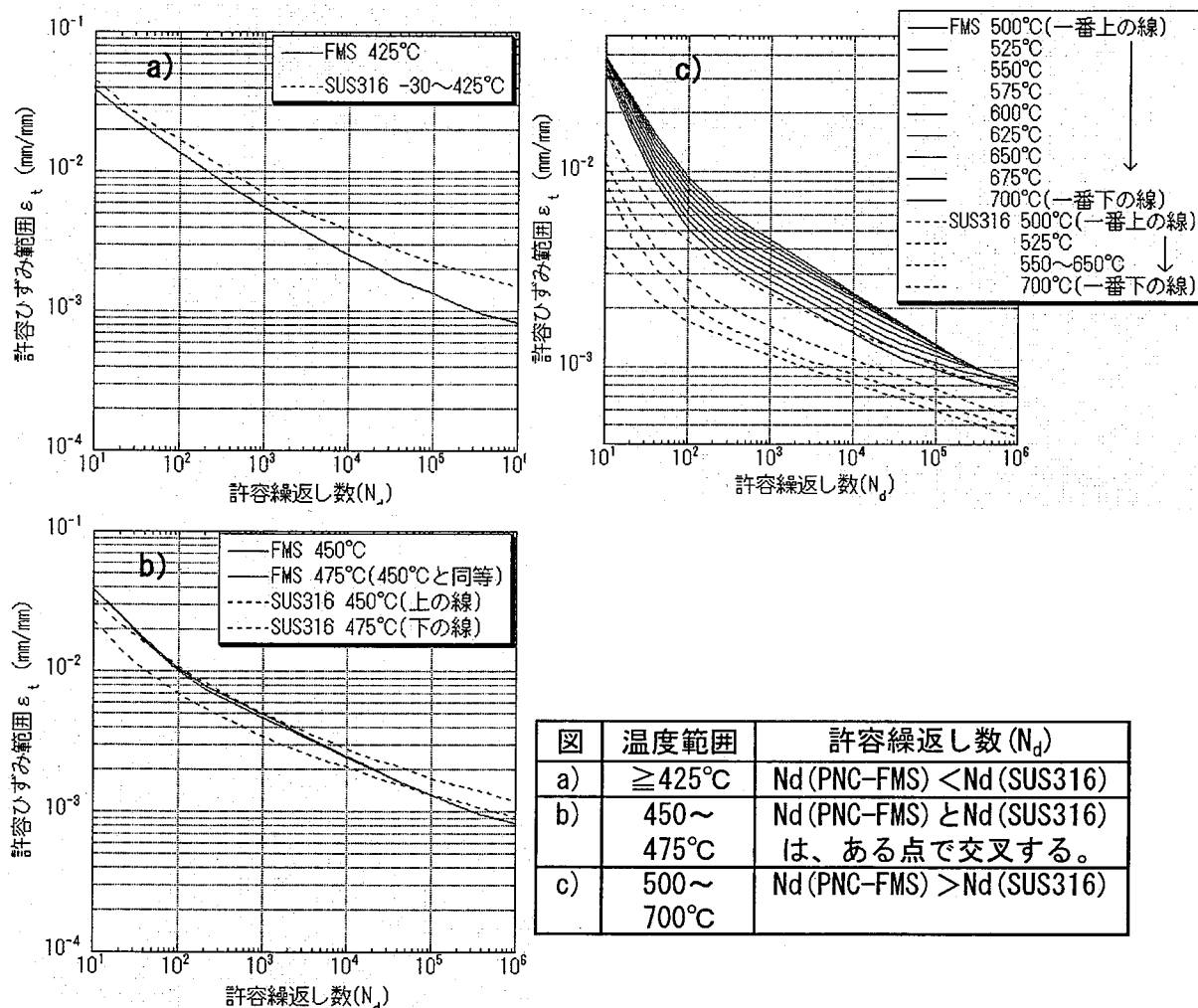


図 3 6 各温度における PNC-FMS 母材と PNC316 の許容繰返し数

5. 6 曲げ特性

PNC-FMS 溶接熱影響部の曲げ特性を評価する目的で、FMS 同材溶接継手を複合ラップ管製造工程を模擬して製作し、この継手から試験片を加工して曲げ試験を行った。その結果、FMS 側溶接境界部、熱影響部にも割れ等の欠陥は認められなかった。

このことから、FMS 溶接熱影響部は良好な曲げ性能を有しており、母材部と顕著な差異はない、即ち曲げ特性に関しては、異材溶接部は母材部と同等に扱っても特に問題ないものと考えられる。

6. おわりに

オーステナイト鋼に比べて耐スエリング性が格段に優れているフェライト/マルテンサイト鋼(PNC-FMS 鋼)ラップ管を「常陽」「もんじゅ」に適用する場合は、ラップ管上下部材(ハンドリングヘッド、エントランスノズル)を構成するオーステナイト系ステンレス鋼との異材溶接が必要となるが、異材溶接部では溶接時の入熱により δ フェライト相が生成し、これによる靱性の低下が懸念される。このような観点から PNC-FMS 鋼丸管の両端に SUS316 を TIG 溶接し、その後一体で加工熱処理を施して仕上げる複合ラップ管を開発した。

本研究では、複合ラップ管異材溶接部の機械的特性を把握し、材料強度基準を整備するために必要な各種強度試験を実施した。また、高温長時間使用を想定した時効処理材についても試験を行った。得られた結果は次の通りである。

- (1) 異材溶接材の引張試験では、溶接境界部で破断したものはなかったことから、溶接境界部の短時間強度は、母材部に比べ同等以上と判断される。
- (2) 異材溶接-熱時効材の USE、DBTT は、母材の製造ままおよび熱時効材に比べ良好であった。これは異材溶接材試験片の亀裂が、溶接金属(インコネル)に進展している影響が表れているためであるが、本試験は実機異材溶接部を模擬した形状での試験結果であることから、実機においても異材溶接部で衝撃特性の低下が生じることはないと考えられる。また異材溶接-熱処理まま材の破壊靱性は、母材と同等であった。
- (3) 試験温度 600℃において、異材溶接-熱処理まま材は母材よりもやや低めのクリープ破断強度で、より短時間で FMS 溶接境界部で破断した。これは溶接時の入熱による溶接金属(インコネル)から母材への Ni 等の拡散が影響している可能性が考えられる。しかし母材の設計クリープ破断強度よりは上であった。
- (4) 疲労特性に関し、異材溶接-熱処理まま材は試験温度 600℃において SUS316 溶接部で破断し、その値は SUS316 の許容繰返し数よりも大きかった。これに対して異材溶接-熱時効材は試験温度 600℃において FMS 溶接境界部で破断し、その値は母材よりも小さかった。これは熱時効により軟化して SUS316 と同等になった FMS 溶接境界部に歪が集中したためと考えられる。しかし母材の許容繰返し数よりは上であった。
- (5) 曲げ試験において溶接境界部、熱影響部とも割れ等の欠陥は認められなかった。
- (6) 上記(1)～(5)より、異材溶接材の短時間強度、衝撃特性、クリープ特性、疲労特性、曲げ特性に関しては異材溶接部は母材部と同等に扱って特に問題ないものとする。
- (7) 熱時効によって FMS 溶接境界部の引張特性、衝撃特性は低下するが、その程度は母材の低下と同等であった。従って異材溶接部の熱時効効果については、母材部の熱時効効果と同等に扱っても特に問題ないものとする。
- (8) 今後は異材溶接部の照射による強度特性変化を調査し、材料強度基準を整備する予定である。

7. 参考文献

- 1) 畠山 耕一, 鵜飼重治, 水田俊治, : “PNC-FMS 鋼ラップ管/SUS316 鋼の異材溶接技術開発 (Ⅰ) - δ フェライト生成量調査および衝撃特性評価 - ” , JNC TN9400 2000-104 (2000).
- 2) 畠山 耕一, 鵜飼重治, 藤原優行, : “PNC-FMS 鋼ラップ管/SUS316 鋼の異材溶接技術開発 (Ⅱ) - 実機サイズラップ管の溶接試験評価 - ” , JNC TN9400 2001-082 (2001).
- 3) 野村茂雄, : “高速炉炉心構成要素高強度フェライト/マルテンサイト鋼 (PNC-FMS) 材料強度基準(暫定案)” , JNC ZN9410 92-110 (1992).
- 4) 岡田浩一, 鵜飼重治, 原田誠, 鹿倉栄 : “高速炉炉心構成要素高強度フェライト/マルテンサイト鋼 (PNC-FMS) 材料強度基準(暫定案) 詳細解説(2)” , PNC ZN9410 93-039 (1993).
- 5) 上平明弘, 鵜飼重治, : “高強度フェライト/マルテンサイト鋼 (PNC-FMS) の衝撃特性の評価” , JNC TN9400 2000-035 (2000).
- 6) 上平明弘, 水野朋和, 鵜飼重治, 吉田英一 : “高強度フェライト/マルテンサイト鋼 (PNC-FMS 鋼) のクリープ強度特性の評価” , JNC TN9400 99-045 (1999).
- 7) 上平明弘, 水野朋保, 鵜飼重治, 浅賀健男, 吉田英一, : “高強度フェライト/マルテンサイト鋼 (PNC-FMS 鋼) の短時間強度特性の評価” , JNC TN9400 99-024 (1999).
- 8) 加納洋一, 水田俊治, 佐藤義則, 野村茂雄, 柴原格 : “高速炉炉心構成要素高強度フェライト/マルテンサイト鋼 (PNC-FMS) 材料強度基準(暫定案) 詳細解説(1)” , PNC ZN9410 92-313 (1992).
- 9) 野村茂雄 : “高速炉炉心構成要素用高強度フェライト/マルテンサイト鋼 (PNC-FMS) 材料強度基準(暫定案) 解説” , PNC ZN9410 92-111 (1992).
- 10) 設工認調整会議燃料分科会 : “高速原型炉燃料集合体の構造設計方針 材料強度基準(案)” , PNC ZN241 85-22(1) (1985).
- 11) 設工認調整会議燃料分科会 : “高速原型炉燃料集合体の構造設計方針 材料強度基準(案)” , PNC ZN241 85-22(2) (1985).

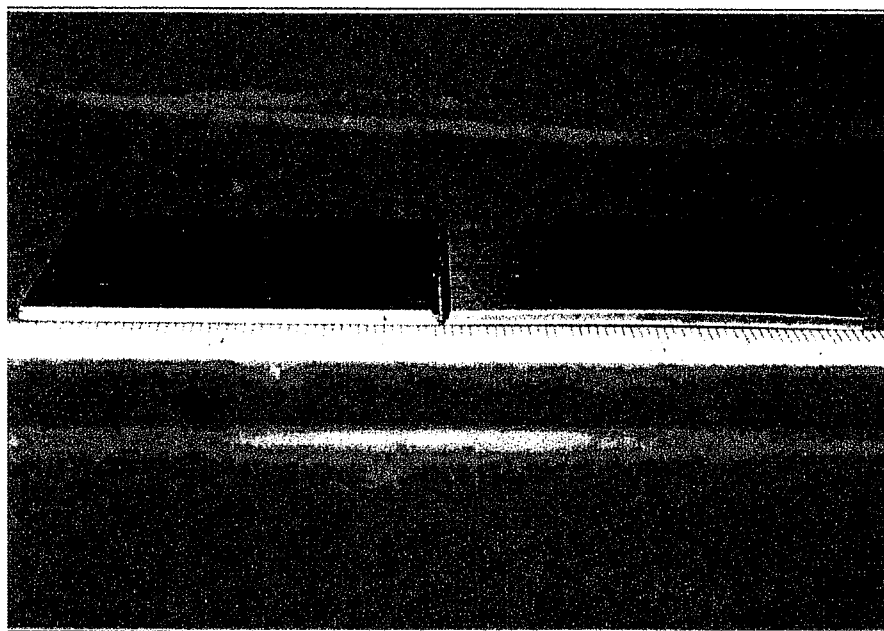
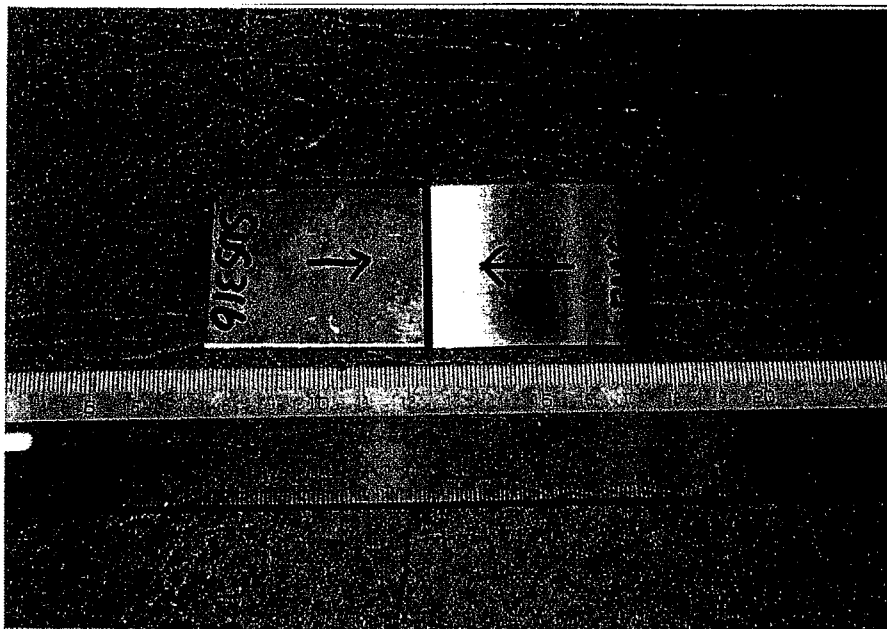


写真 1-1 ラッパ管板異材溶接継手の外観
(厚さ 1.9mm、開先加工、溶接前)

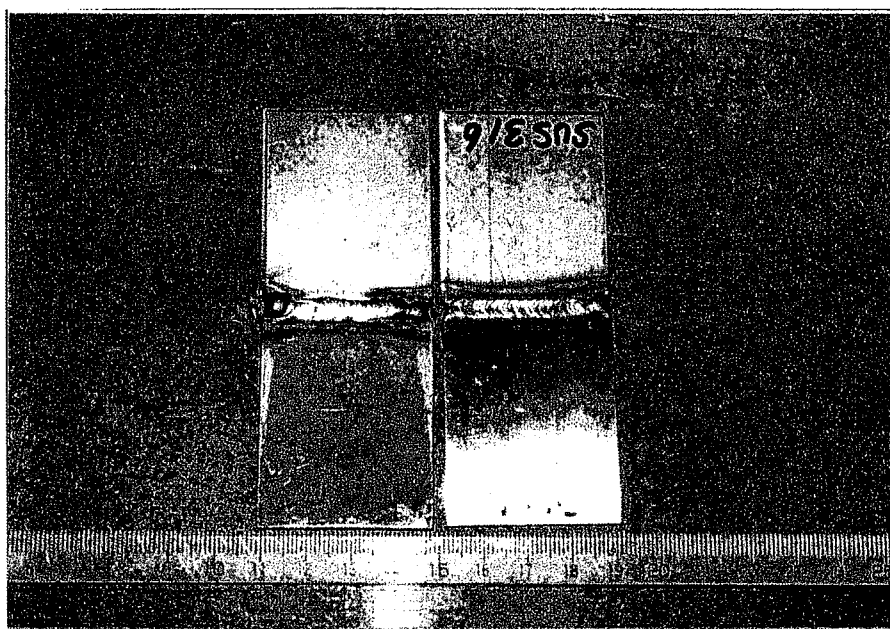
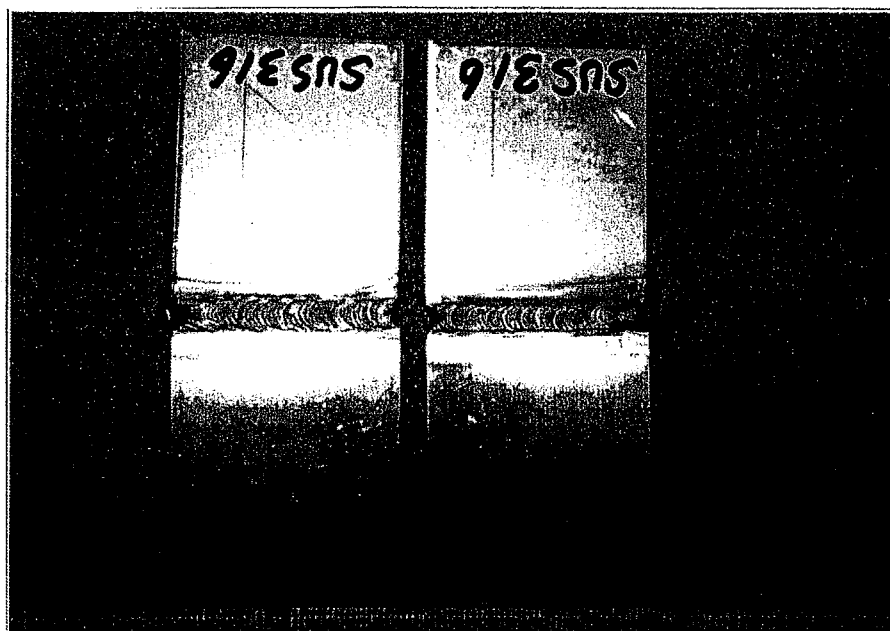


写真 1-2 ラップ管板異材溶接継手の溶接後外観

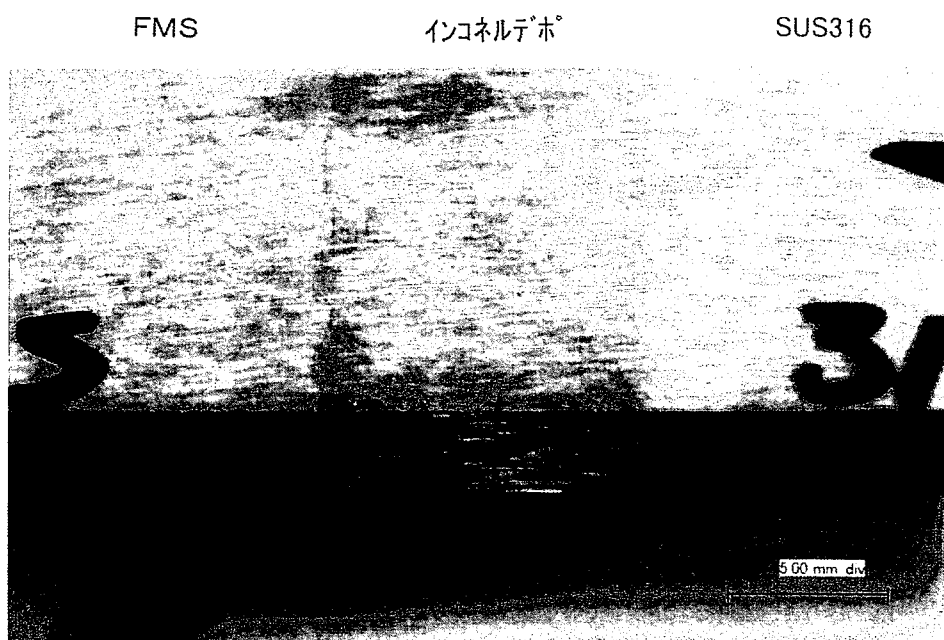
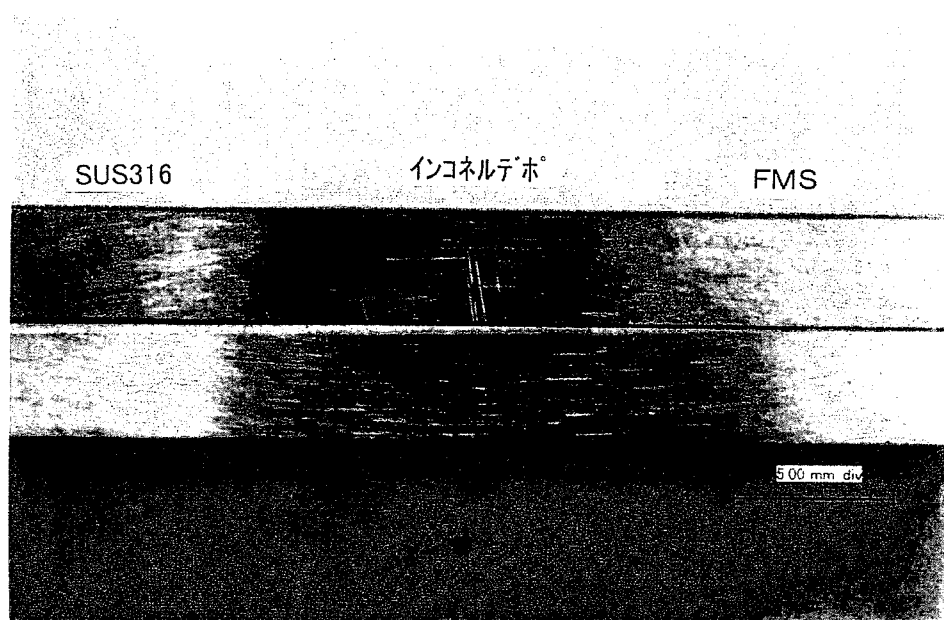


写真1-3 薄肉異材溶接部の外観

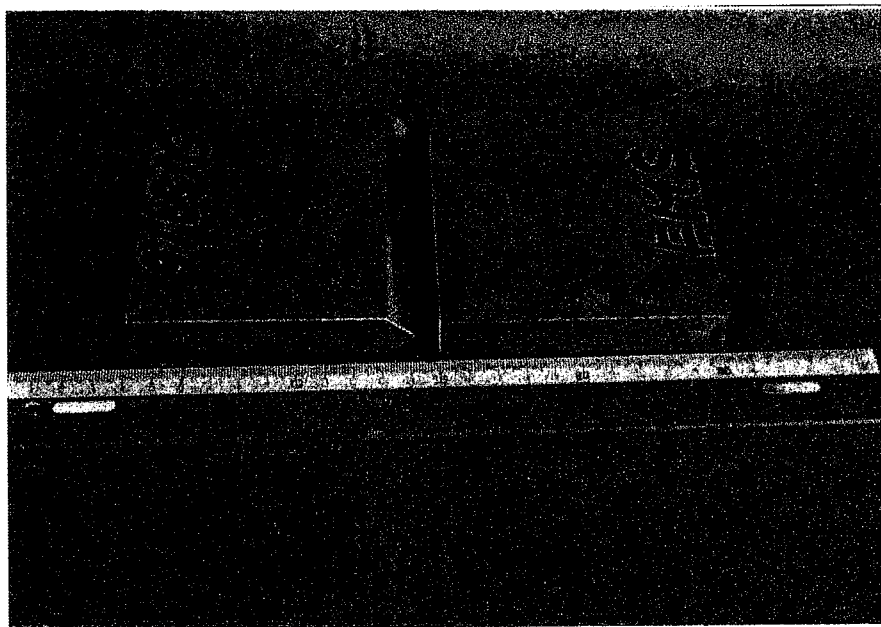
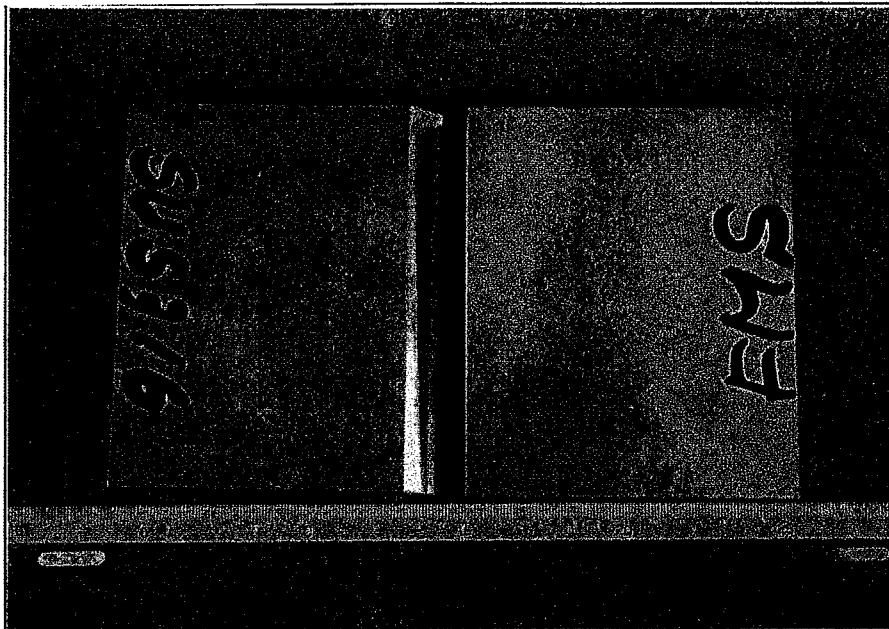


写真 2-1 厚板異材溶接継手の外観
(厚さ 19mm、開先加工、溶接前)

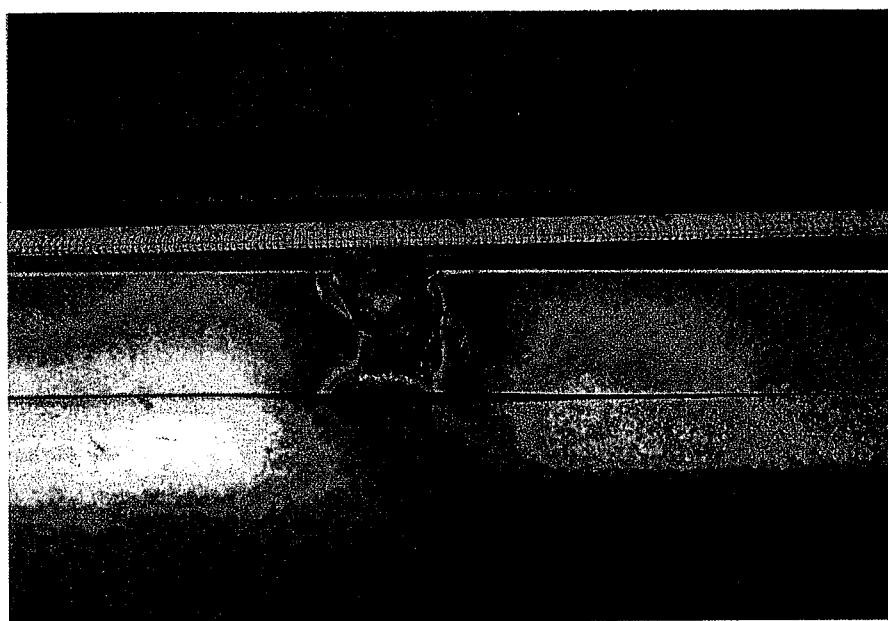
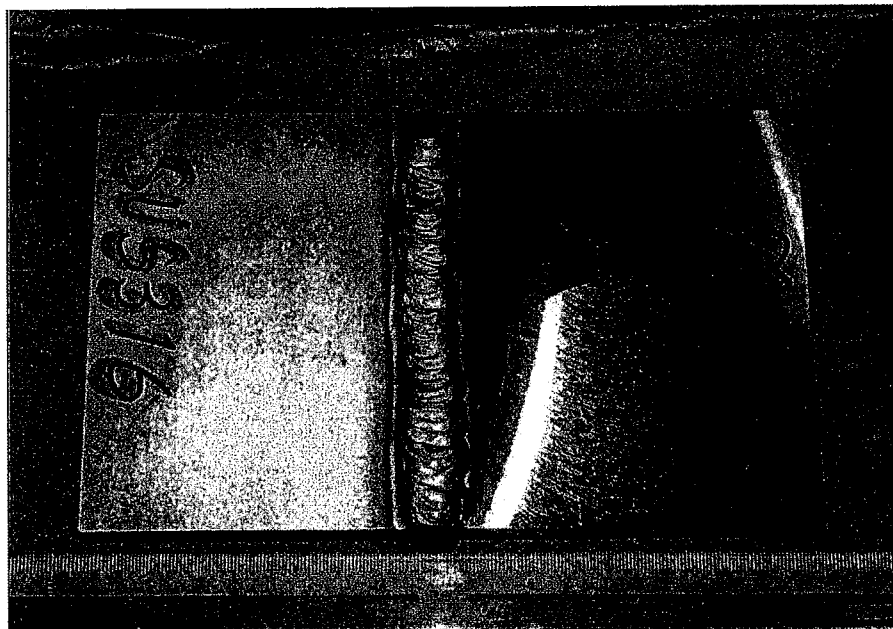


写真 2-2 厚板異材溶接継手の溶接後外観

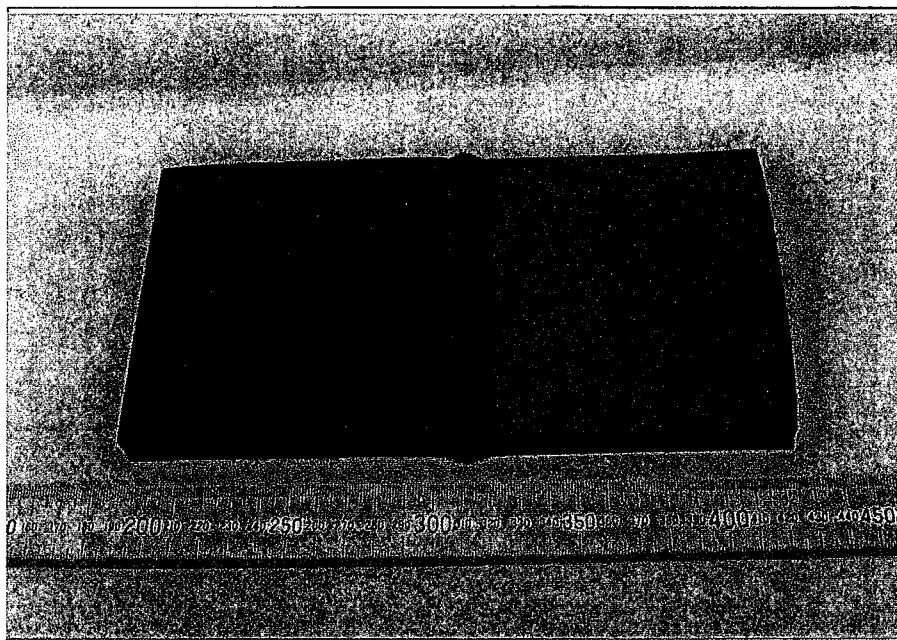


写真 2-3 厚板異材溶接継手の冷間圧延・熱処理後の外観

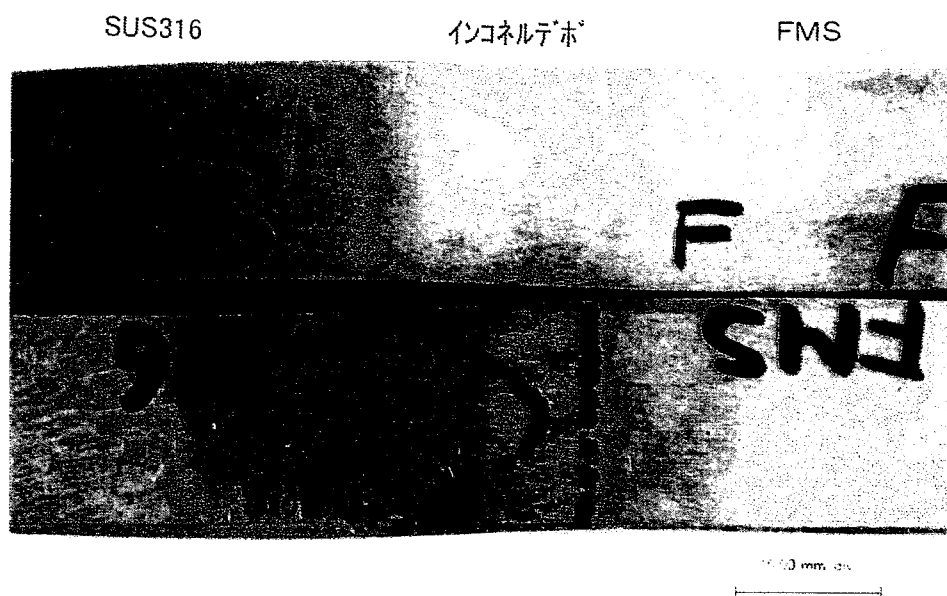
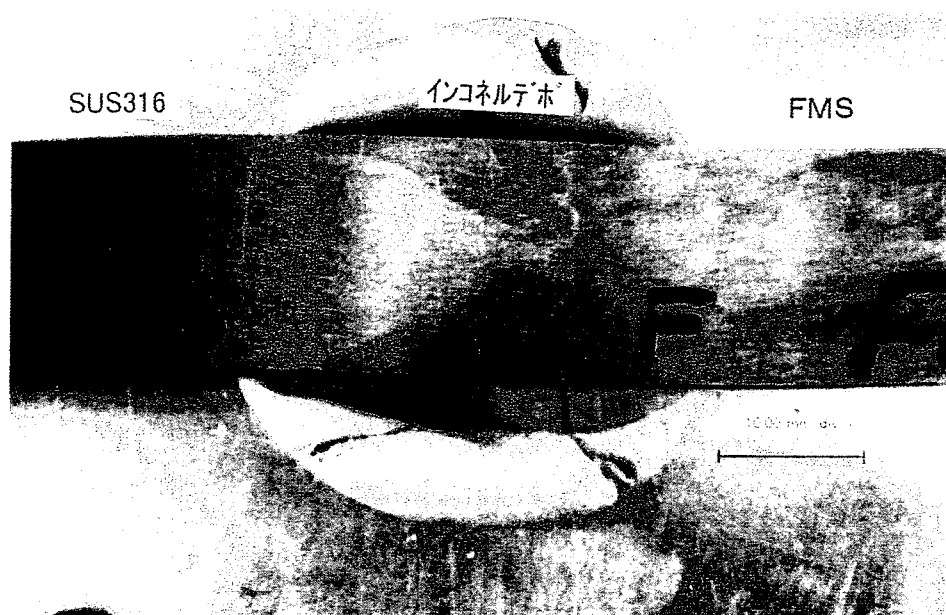


写真 2-4 厚板異材溶接部の外観

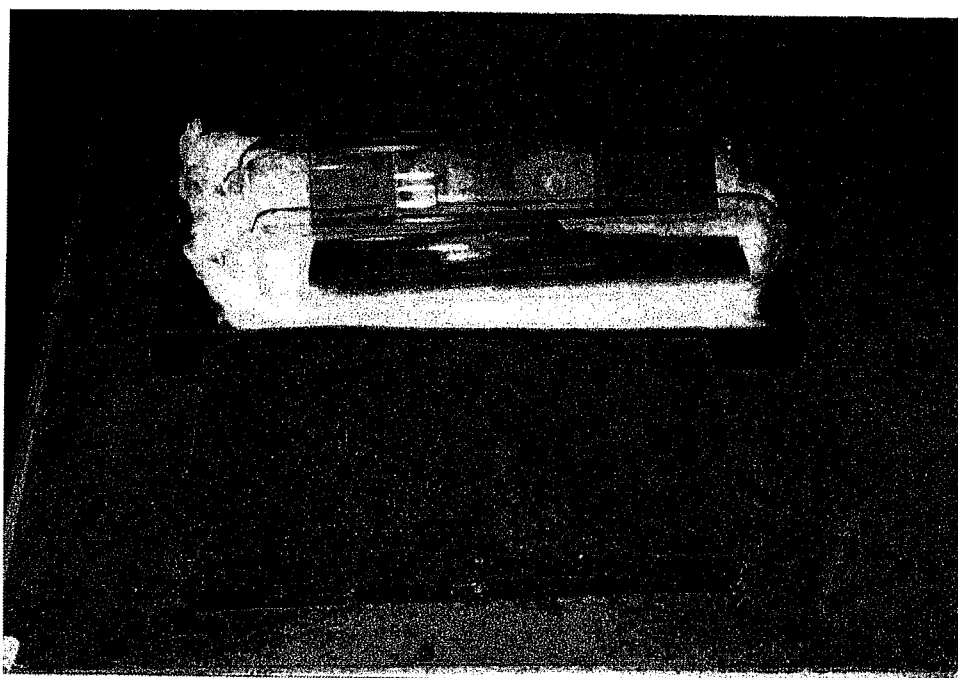
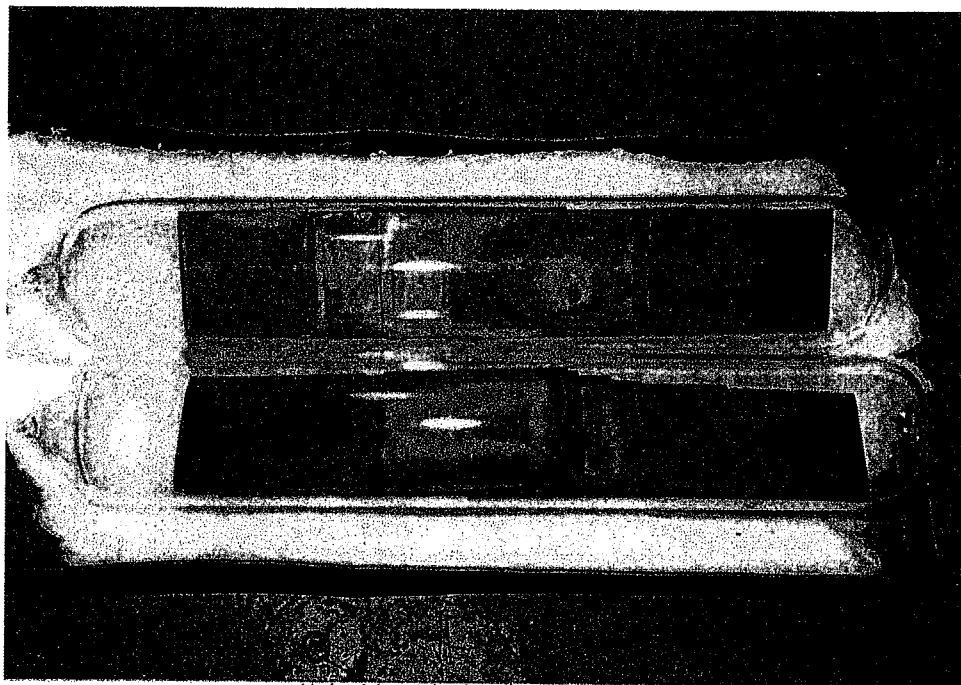


写真 3 時効処理後試験材(異材溶接)の外観

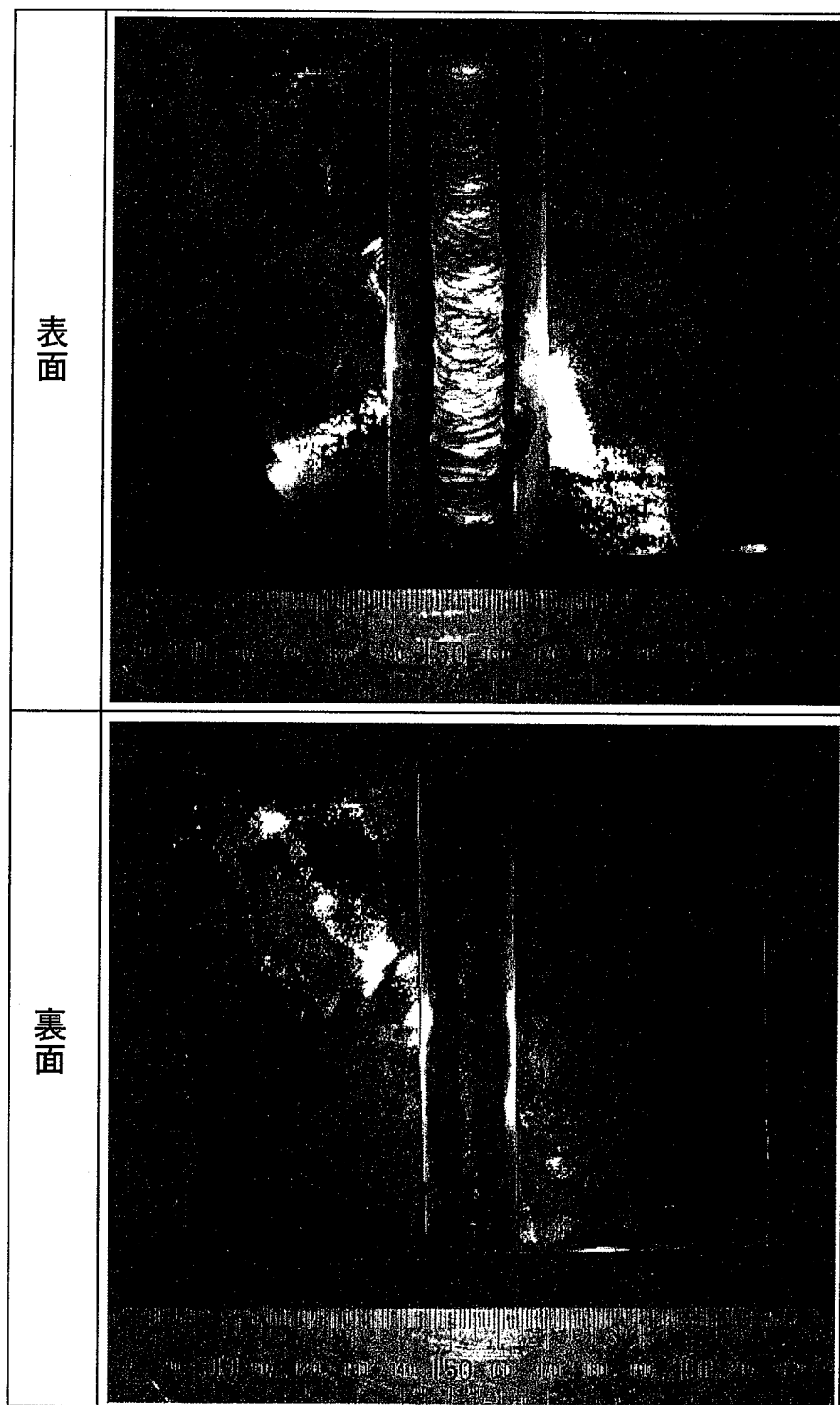


写真4 FMS 同材突合せT I G溶接後の外観

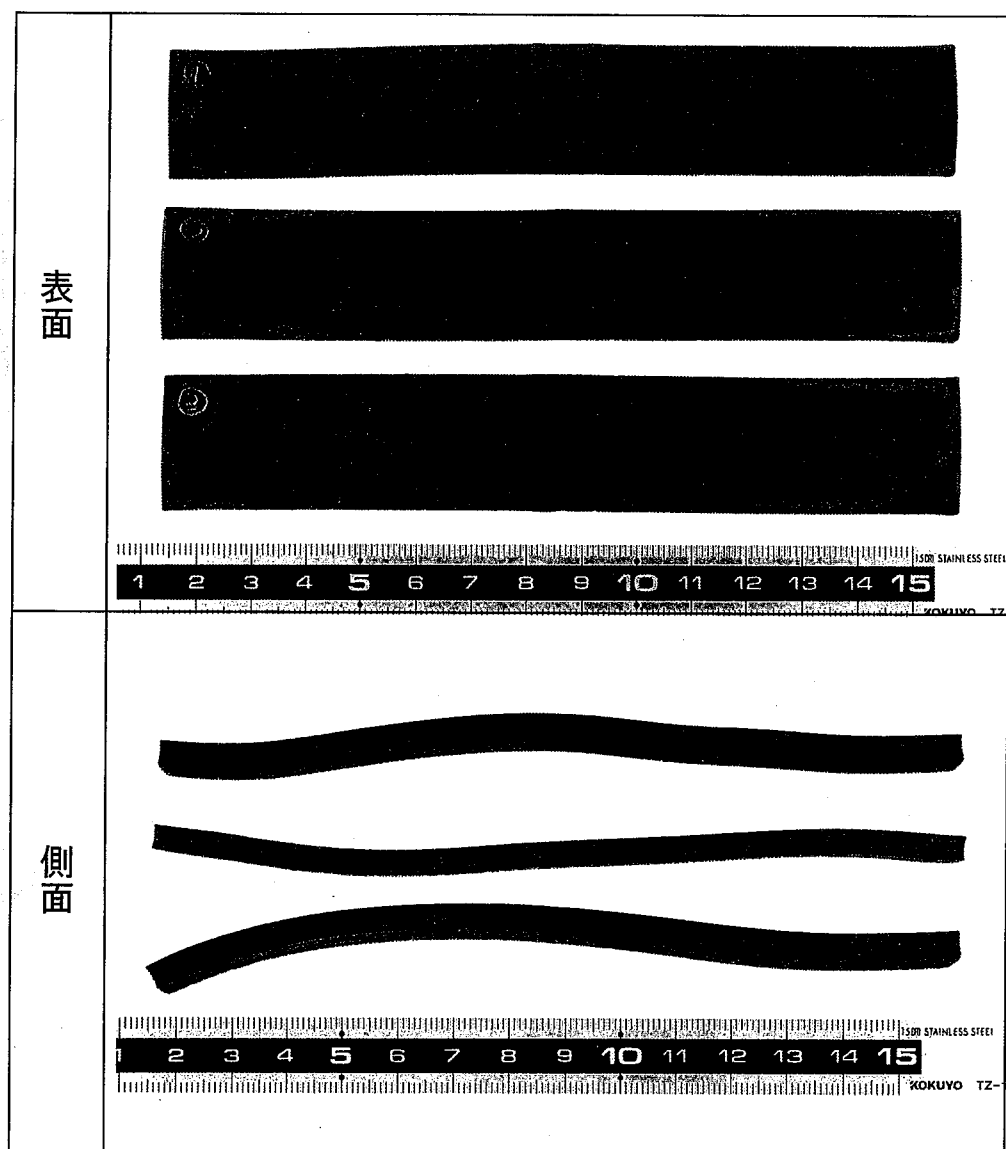


写真5 FMS 同材突合せ溶接材の冷延→熱処理後の外観

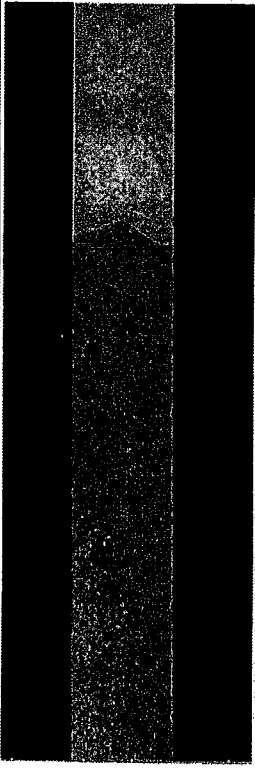
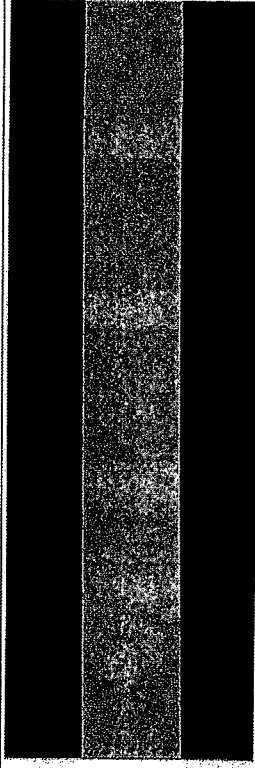
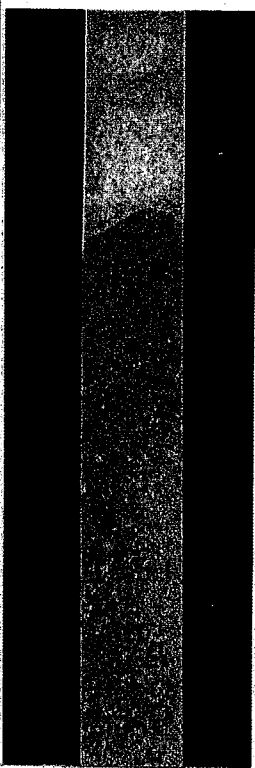
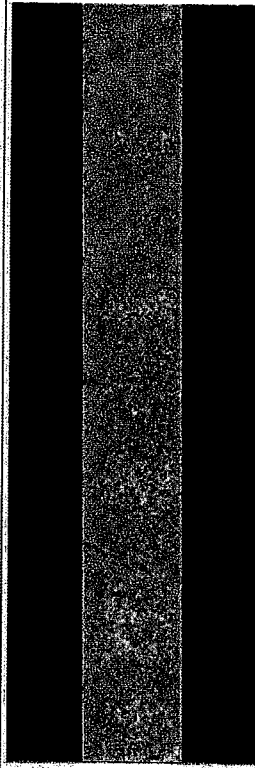
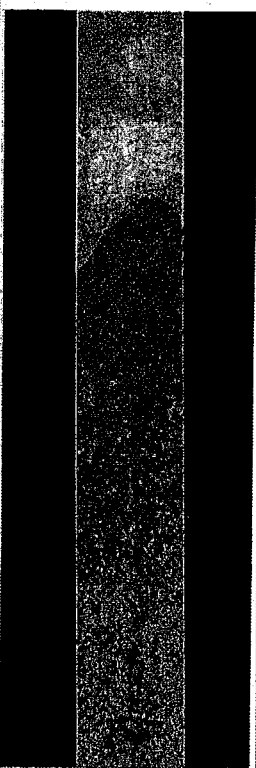
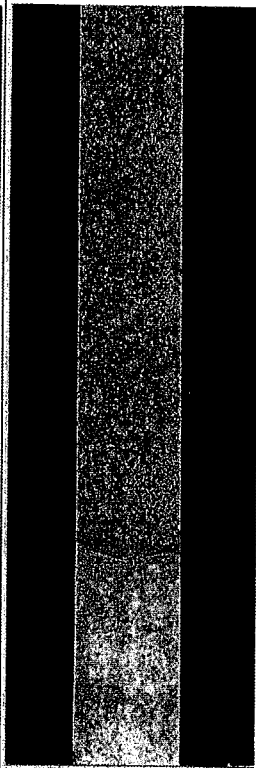
	PNC-FMS側	SUS316側
A—薄板材 熱処理まま		
B—薄板材 600℃×74h 時効材		
C—薄板材 700℃×145h 時効材		

写真 6 PNC-FMS ラップ管：SUS316 異材溶接部の断面マクロ組織（薄板材）

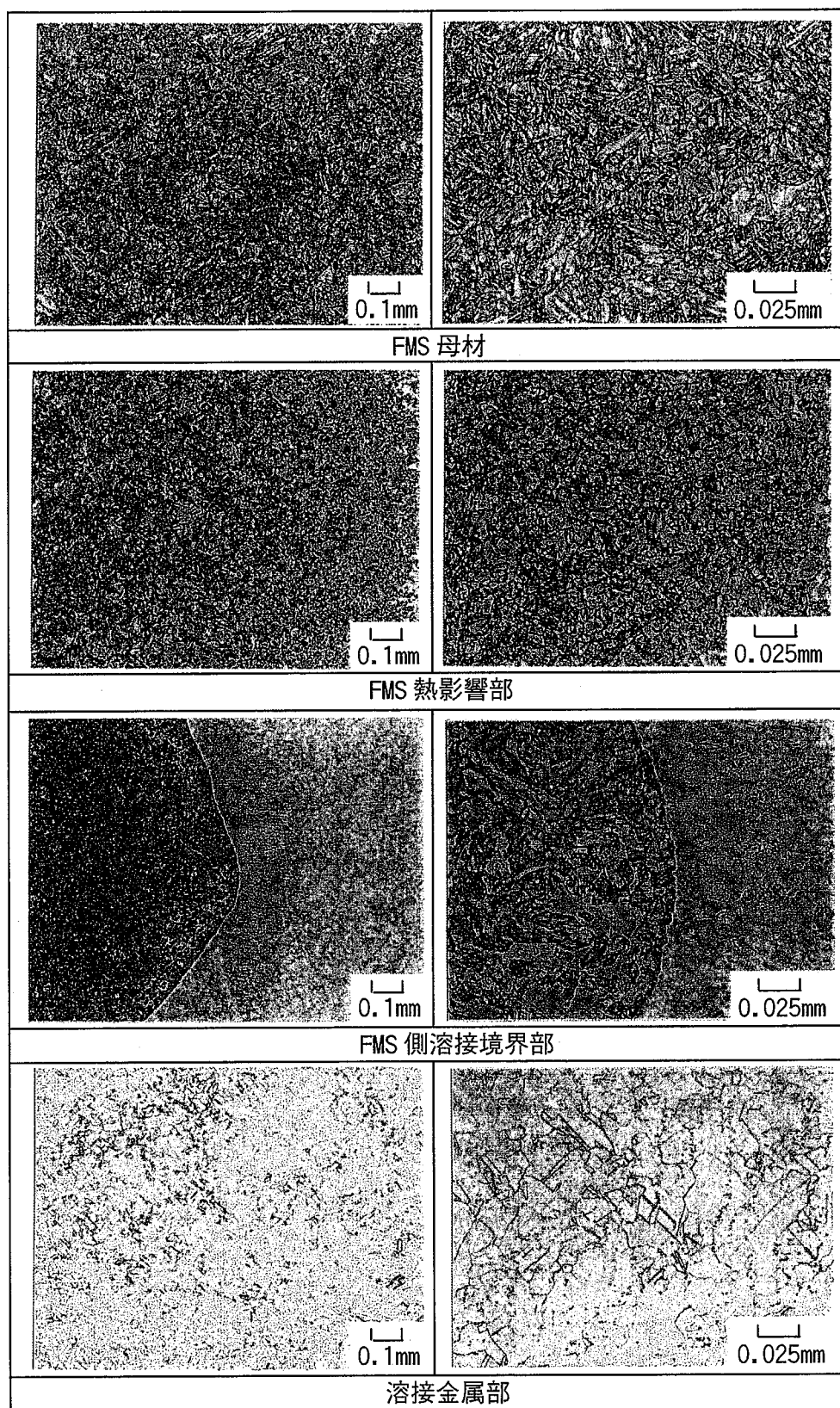


写真 7-1 No.A(熱処理まま)薄板材

PNC-FMS:SUS316 異材溶接部断面のミクロ組織

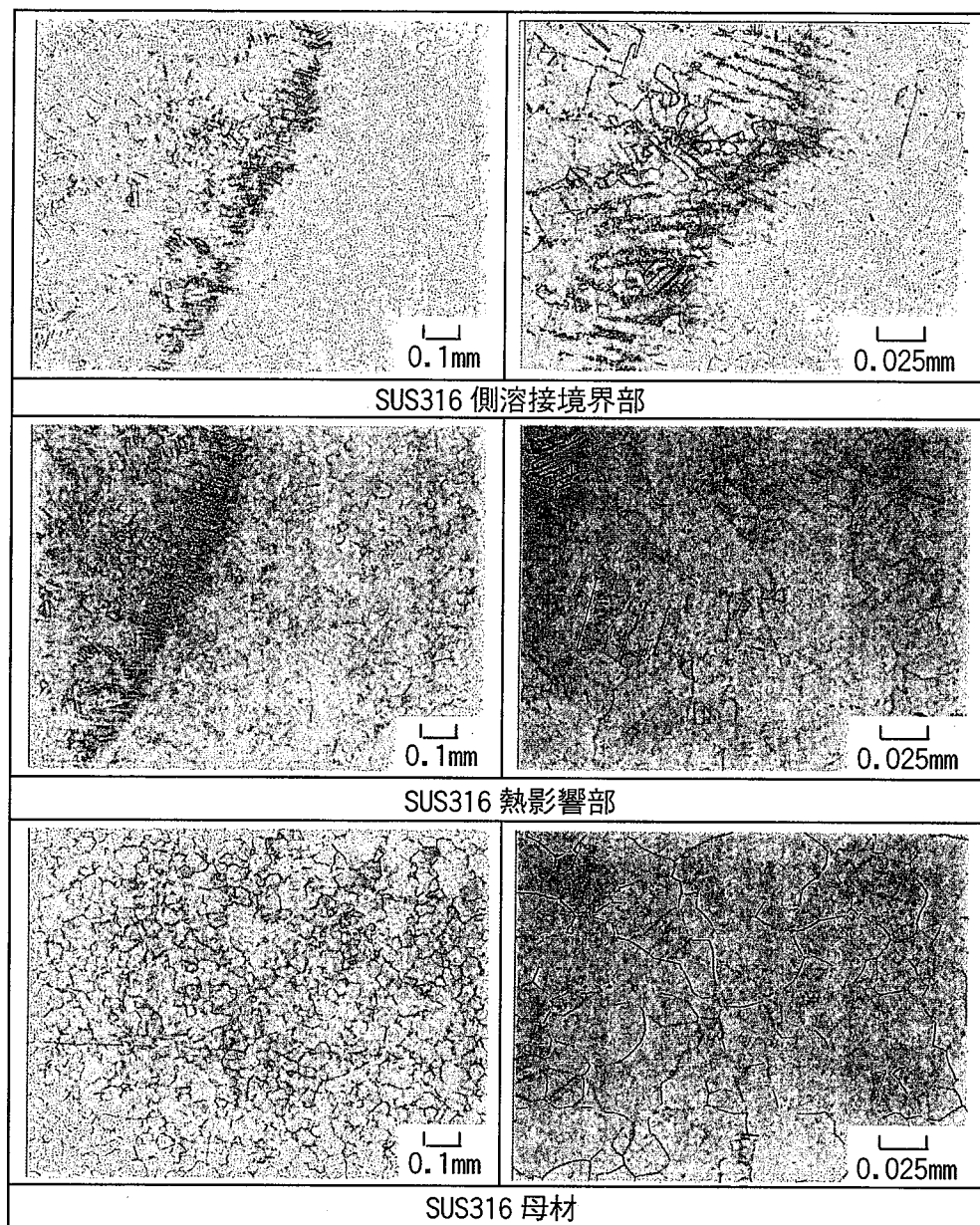


写真 7-2 No.A(熱処理まま)薄板材

PNC-FMS:SUS316 異材溶接部断面のミクロ組織

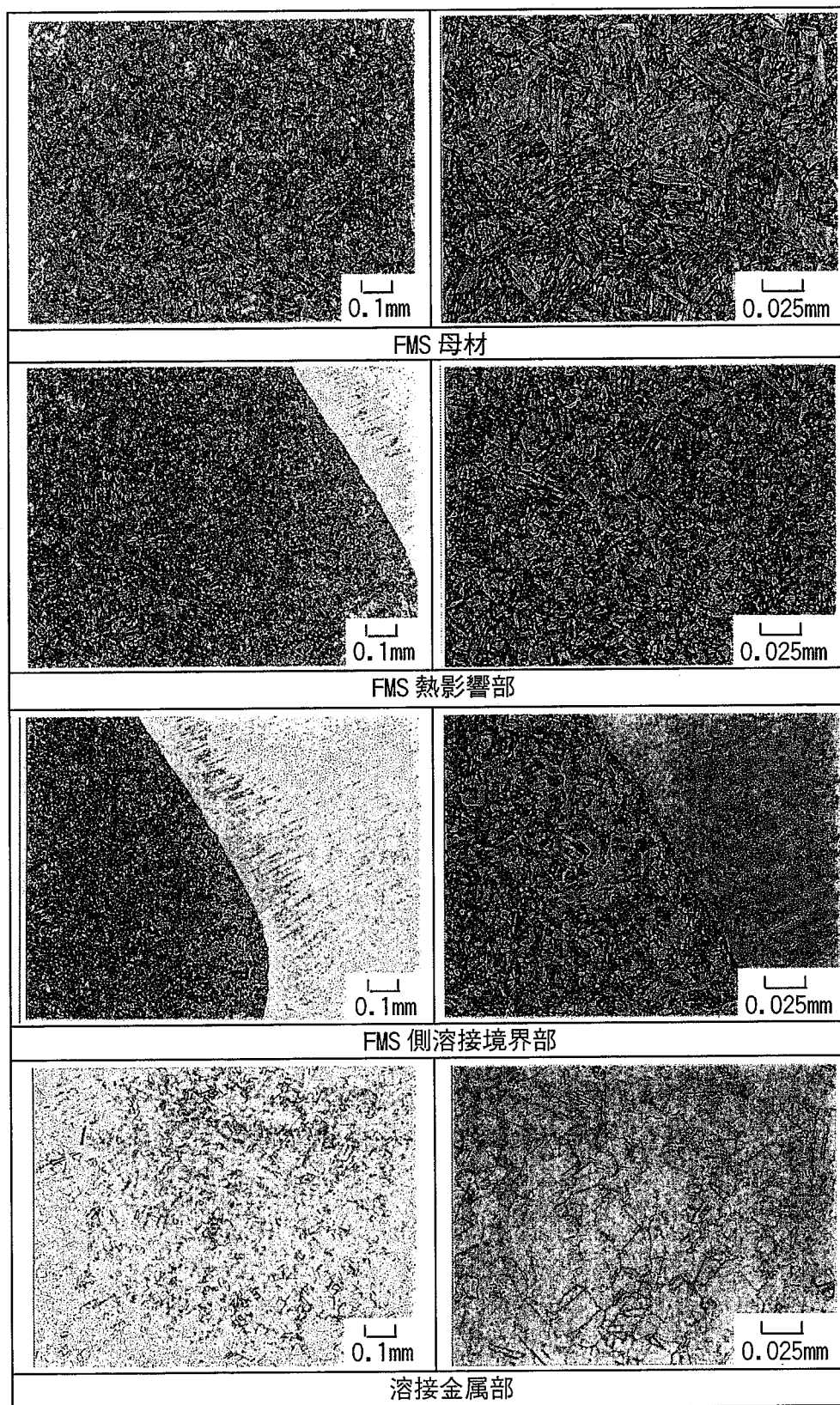


写真 8-1 No.B(600℃×74hrs)薄板材

PNC-FMS:SUS316 異材溶接部断面のミクロ組織

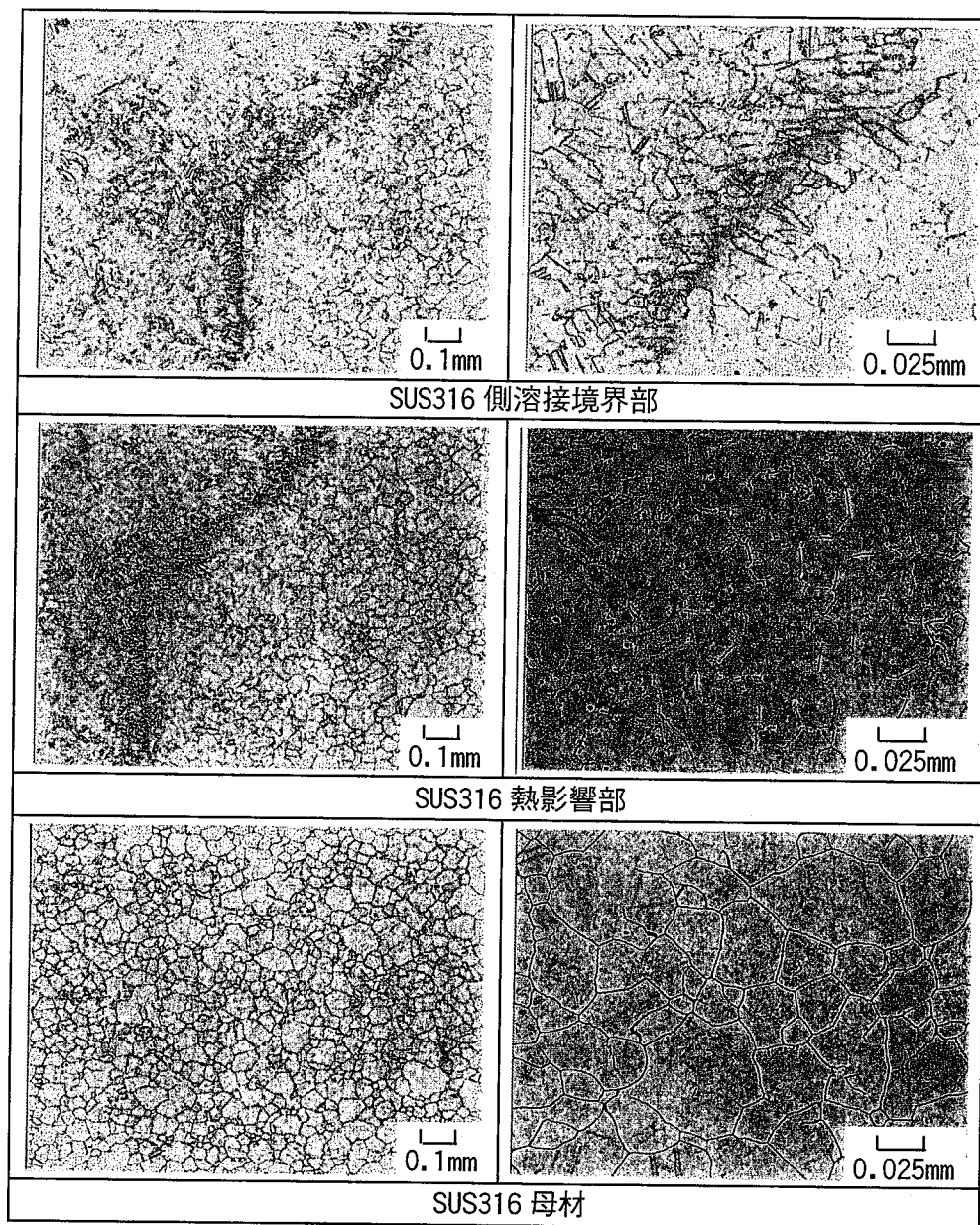


写真 8-2 No.B(600℃×74hrs)薄板材

PNC-FMS:SUS316 異材溶接部断面のミクロ組織

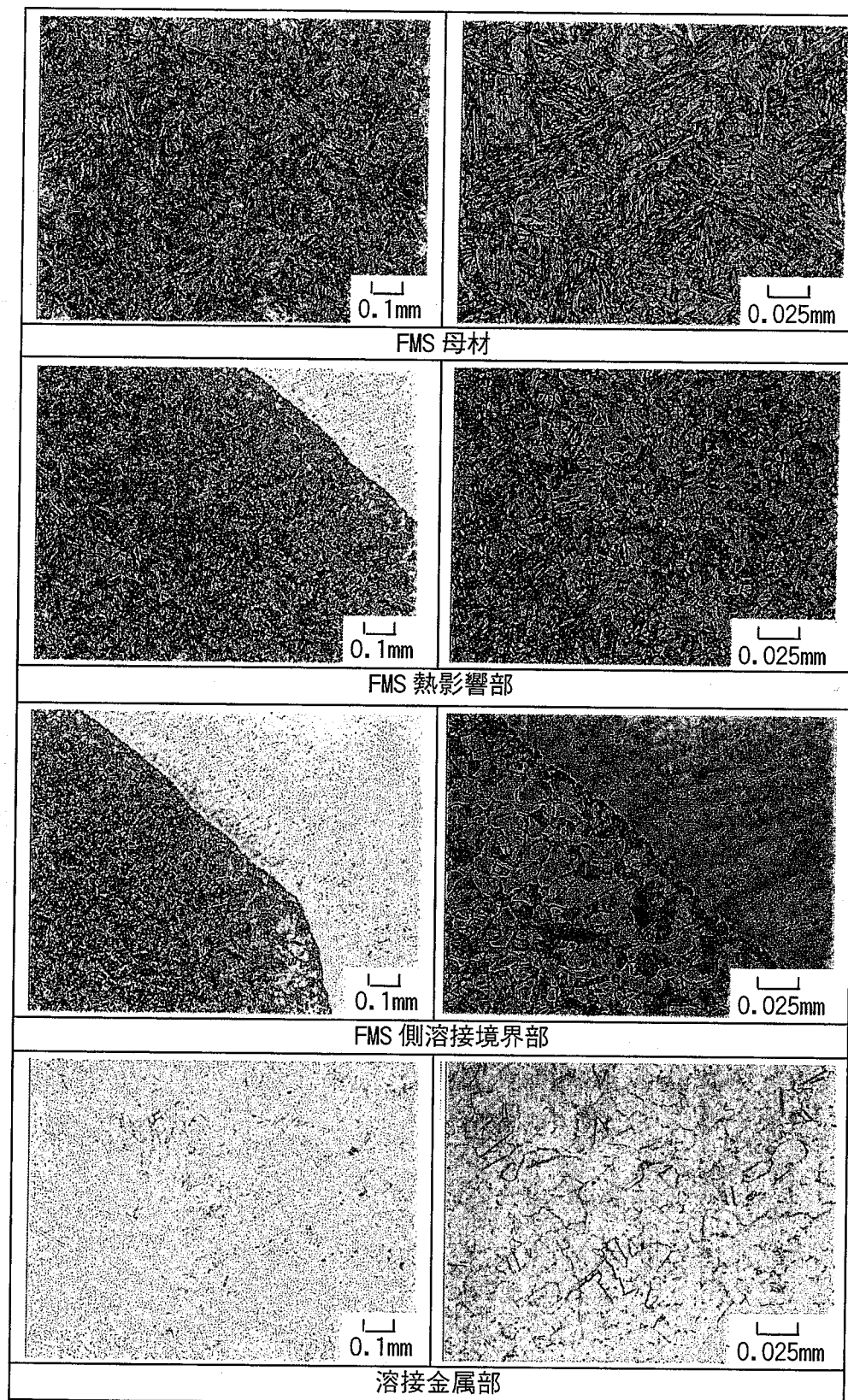


写真 9-1 No.C(700℃×145hrs)薄板材

PNC-FMS:SUS316 異材溶接部断面のミクロ組織

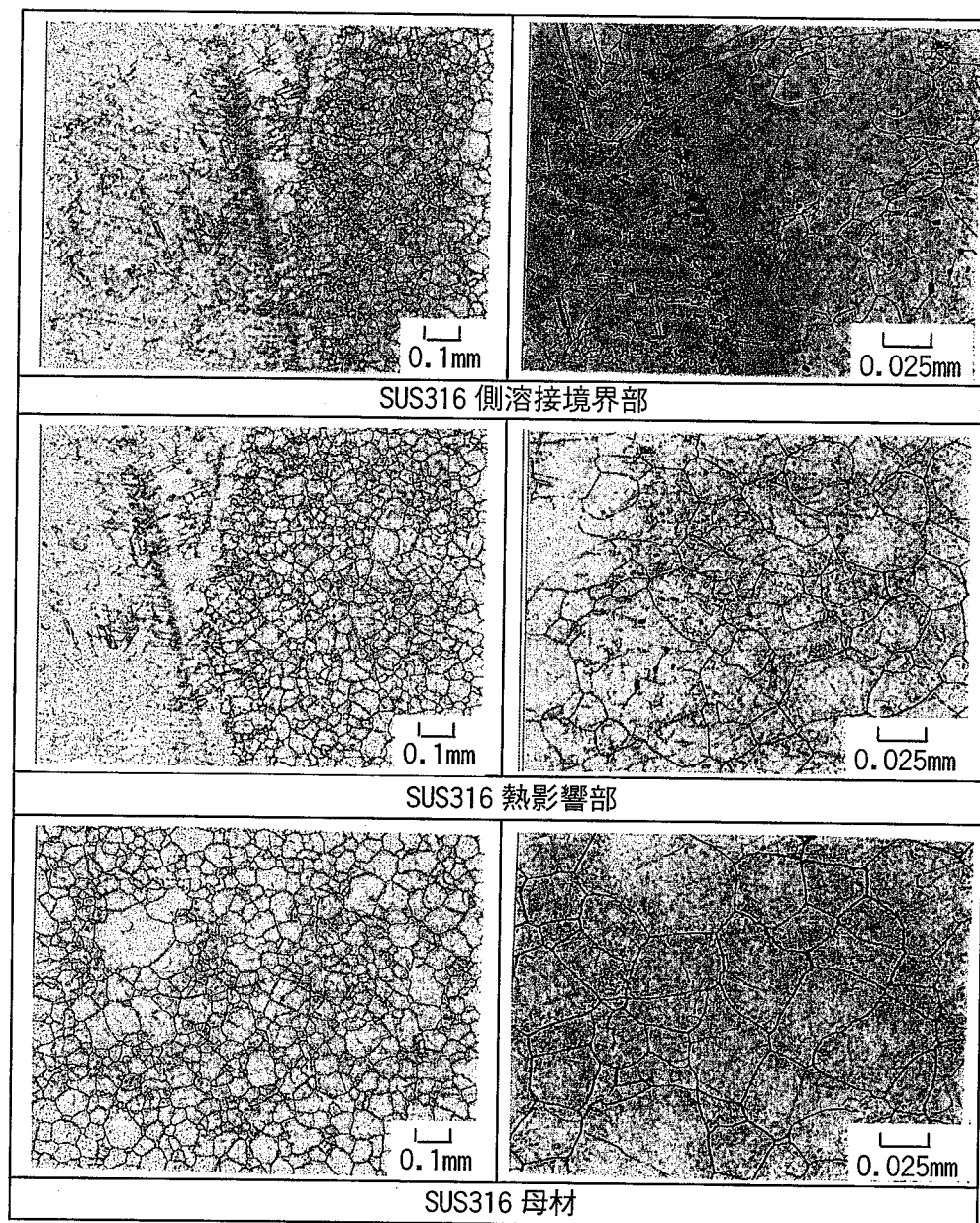


写真 9-2 No. C (700°C × 145hrs) 薄板材

PNC-FMS: SUS316 異材溶接部断面のミクロ組織

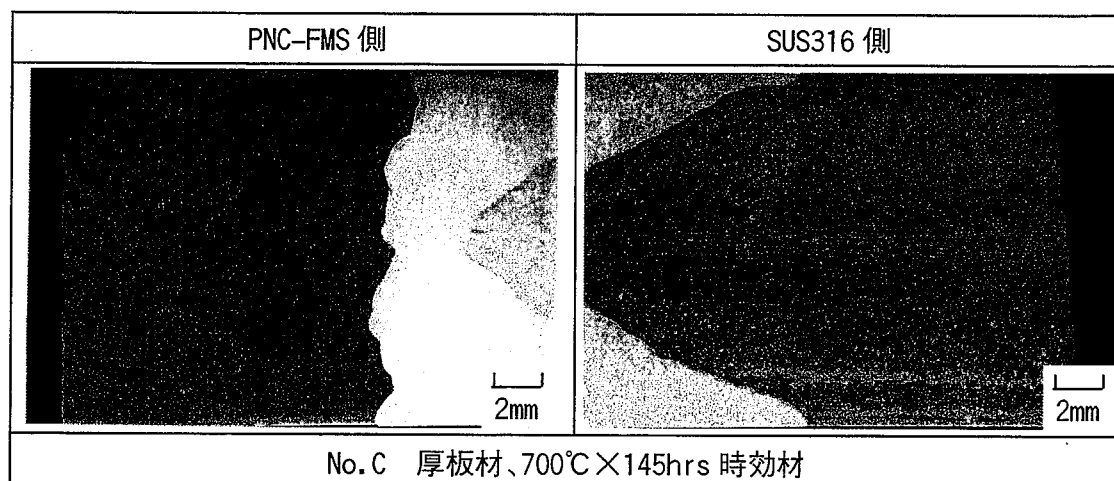
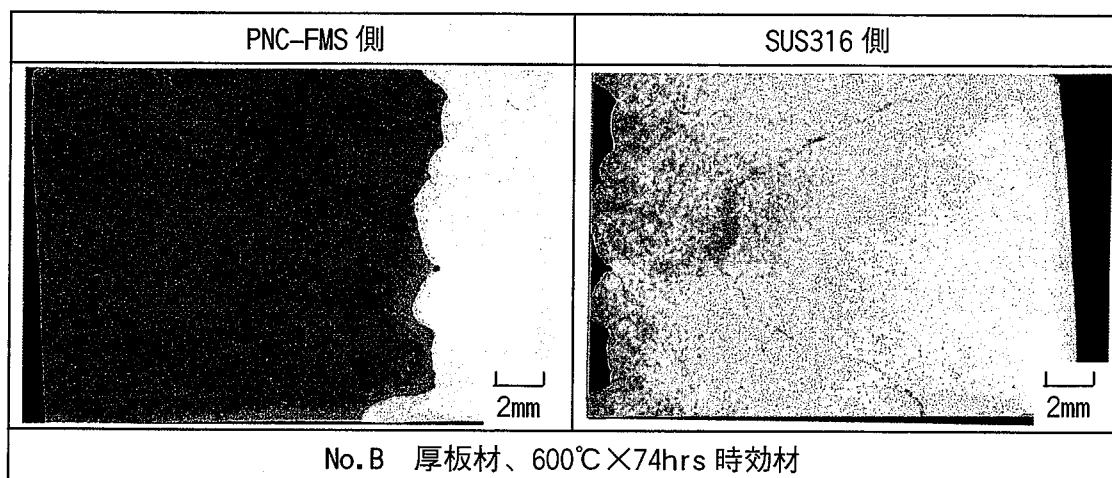
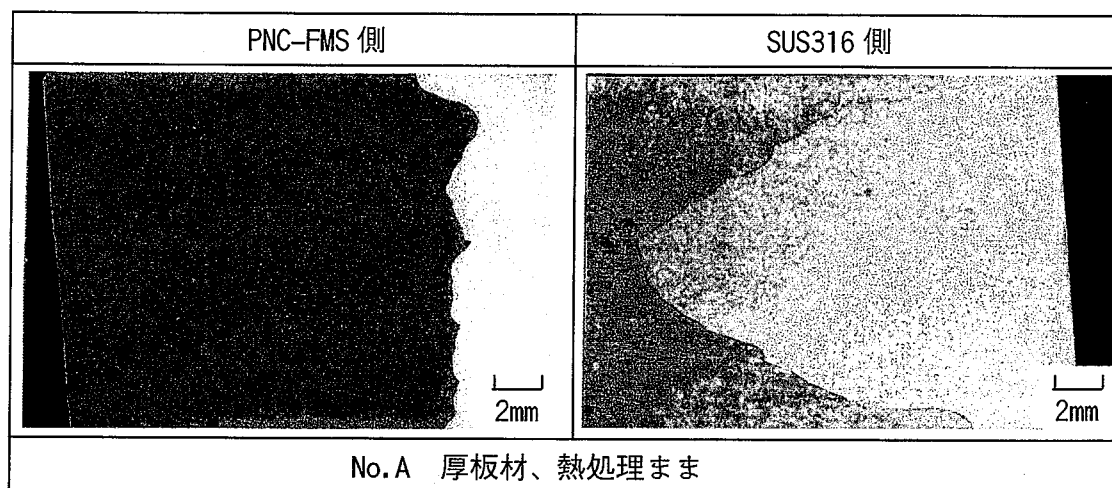


写真 1 0 PNC-FMS:SUS316 異材溶接部の断面マクロ組織

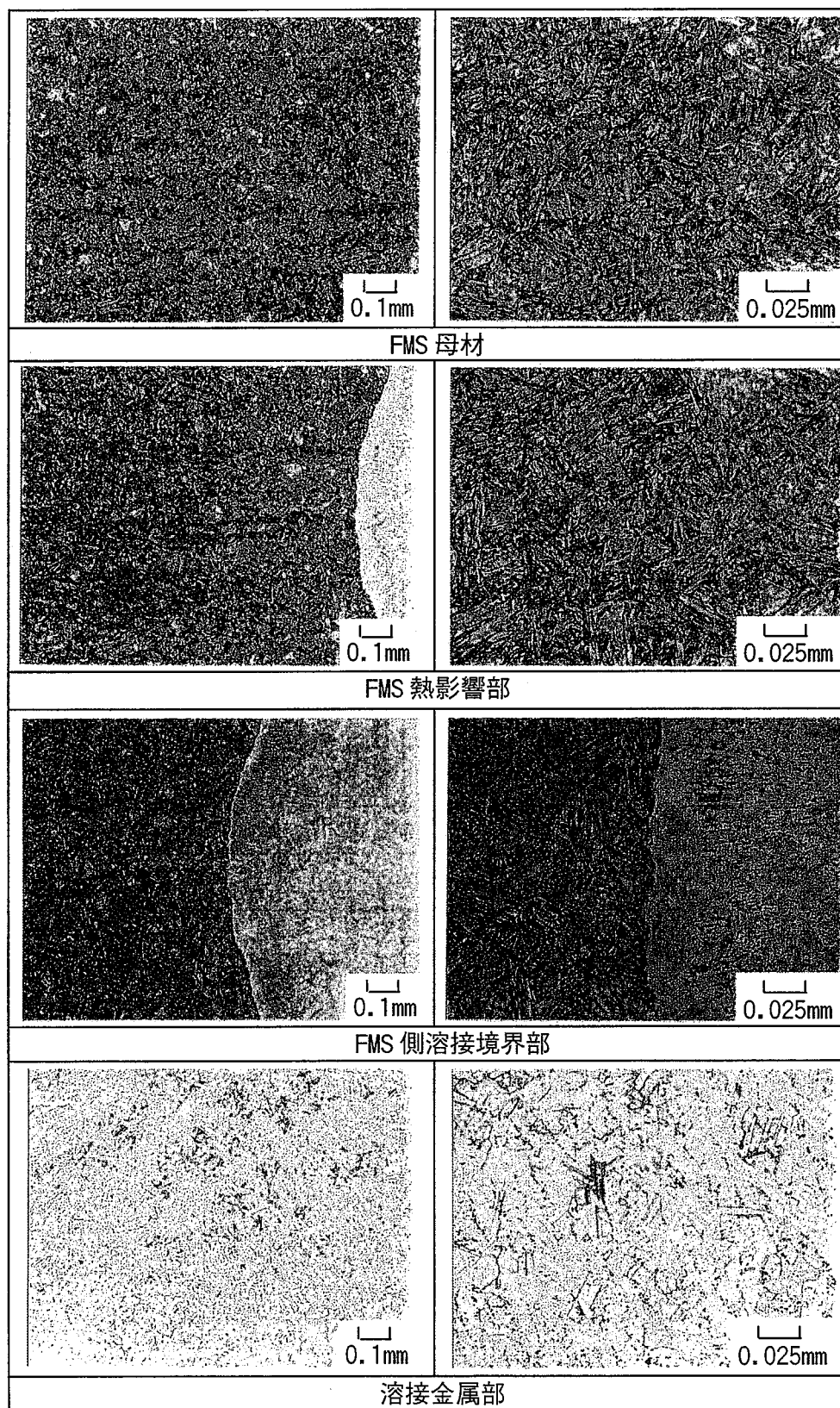


写真 1 1-1 No.A(熱処理まま)厚板材

PNC-FMS:SUS316 異材溶接部断面のミクロ組織

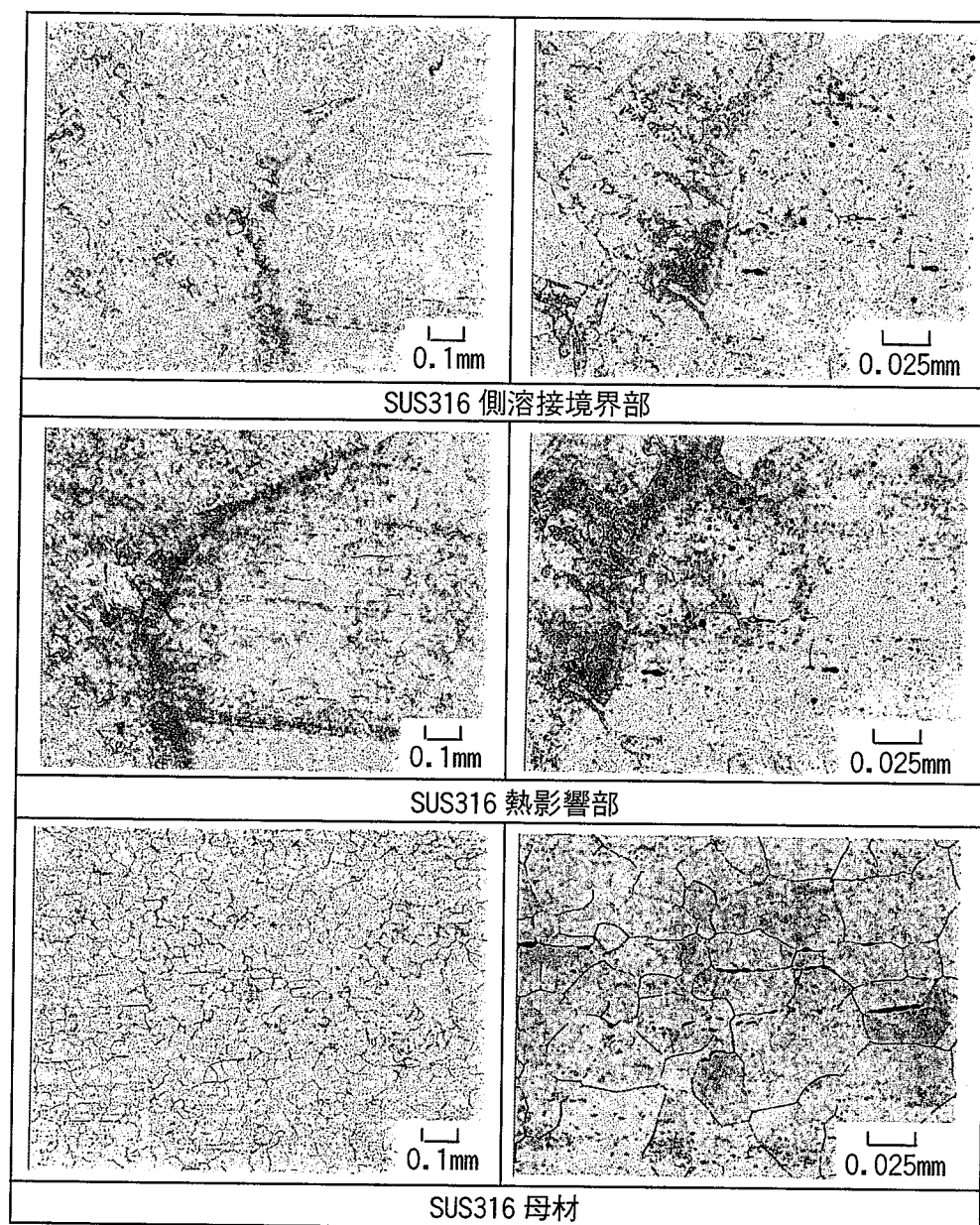


写真 1 1-2 No.A(熱処理まま)厚板材

PNC-FMS:SUS316 異材溶接部断面のミクロ組織

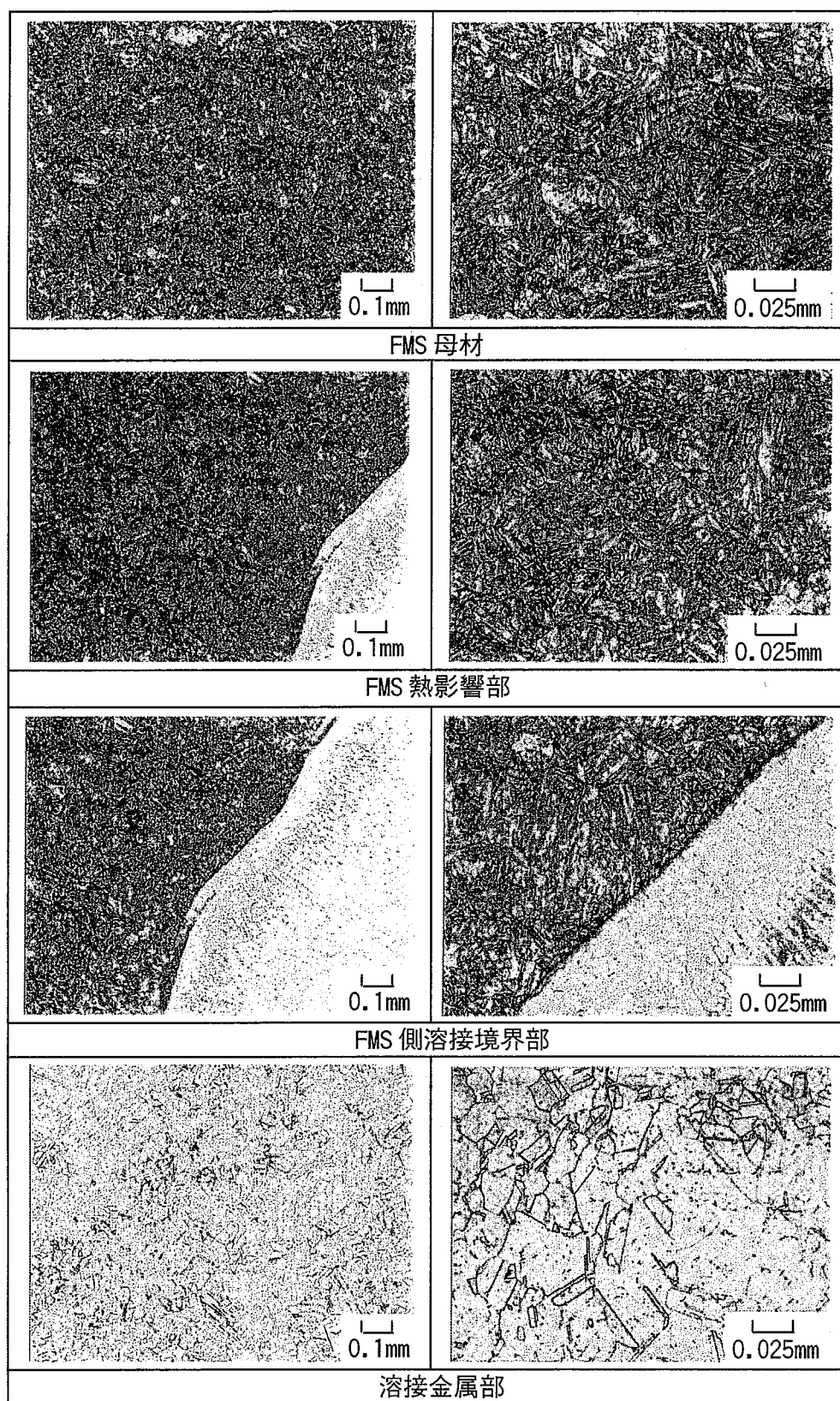


写真 1 2-1 No.B(600℃×74hrs)厚板材

PNC-FMS:SUS316 異材溶接部断面のミクロ組織

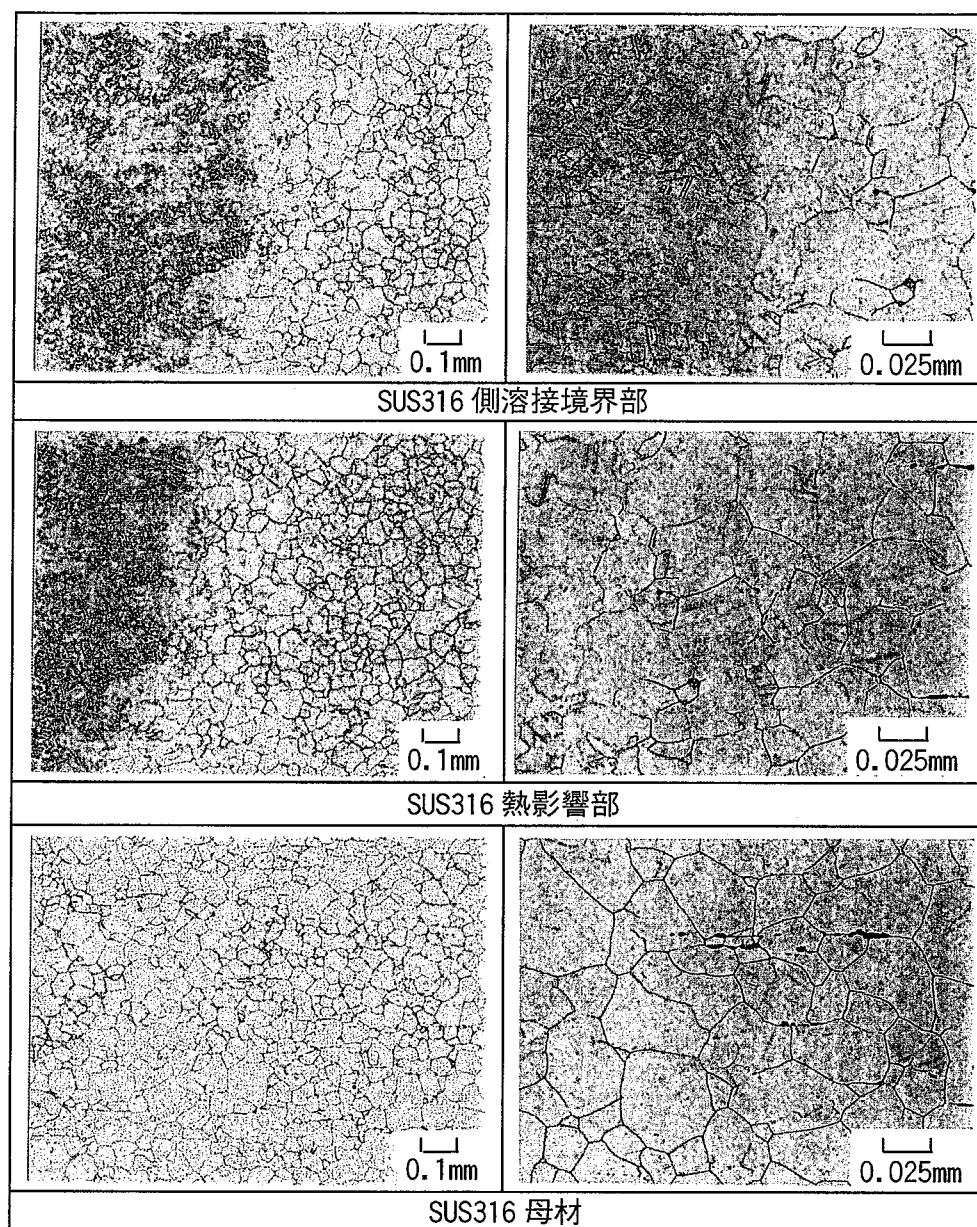


写真 1 2-2 No.B(600℃×74hrs)厚板材

PNC-FMS:SUS316 異材溶接部断面のミクロ組織

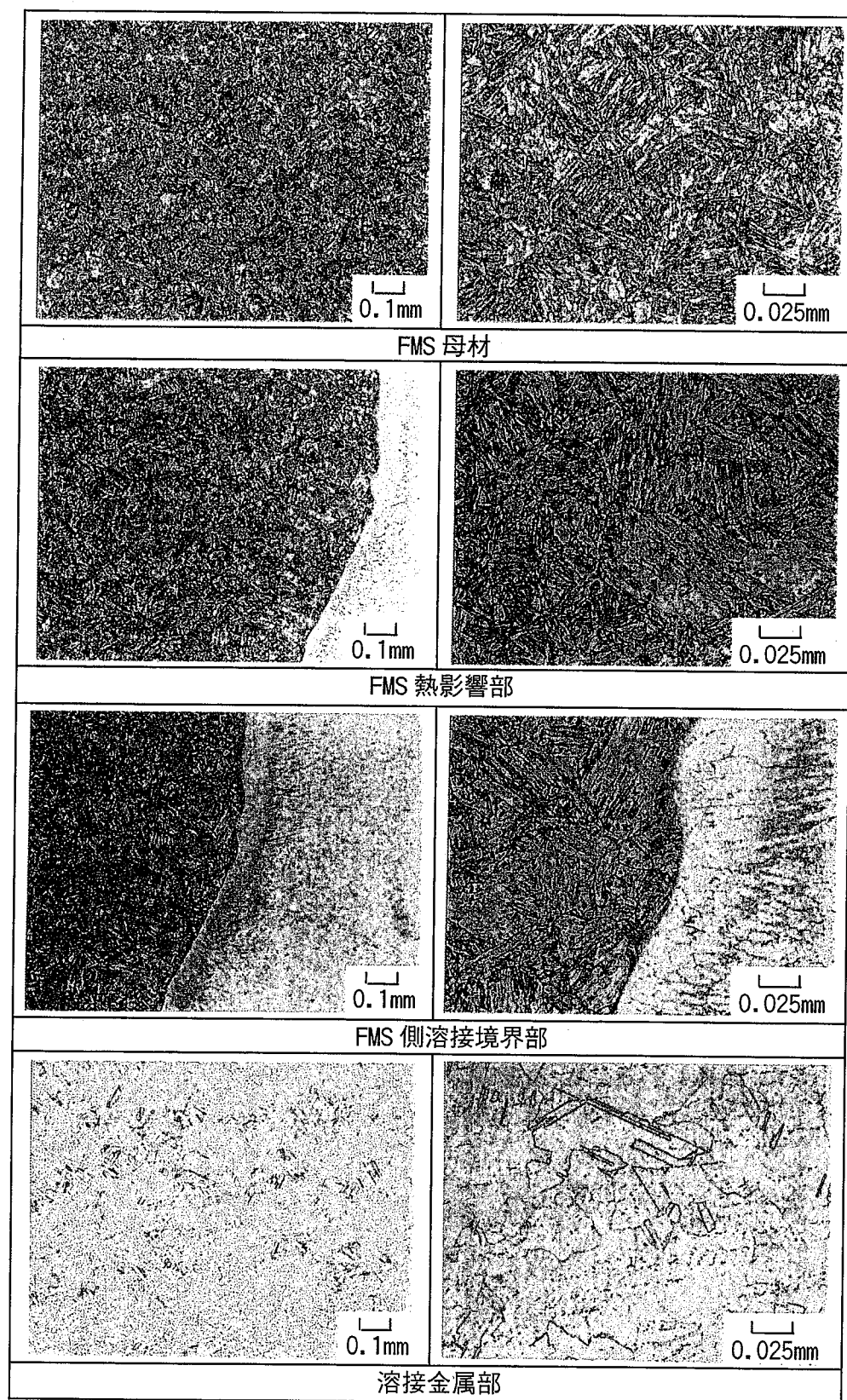


写真 1 3-1 No.C(700℃×145hrs)厚板材

PNC-FMS:SUS316 異材溶接部断面のミクロ組織

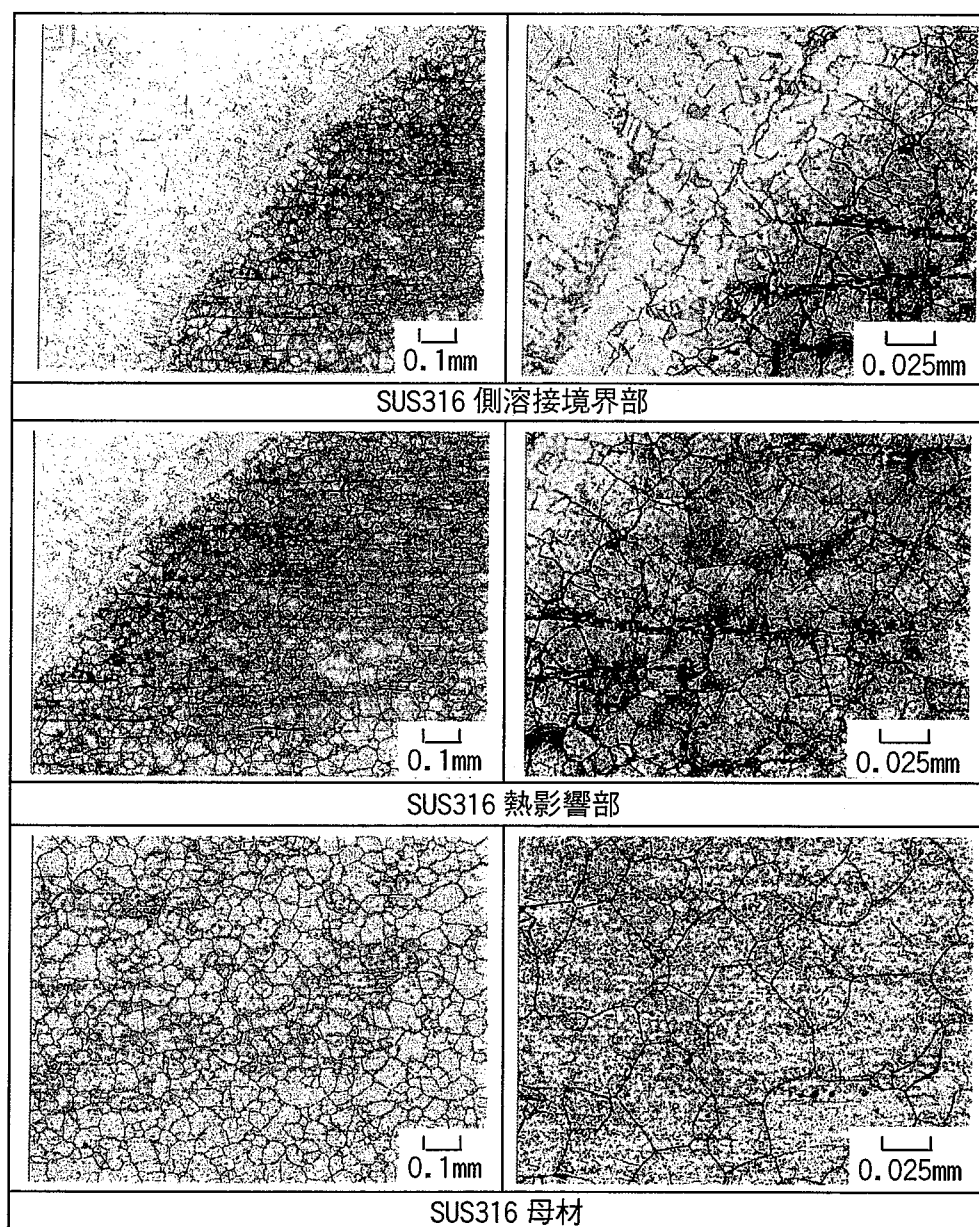


写真 1 3-2 No.C(700℃×145hrs)厚板材

PNC-FMS:SUS316 異材溶接部断面のミクロ組織

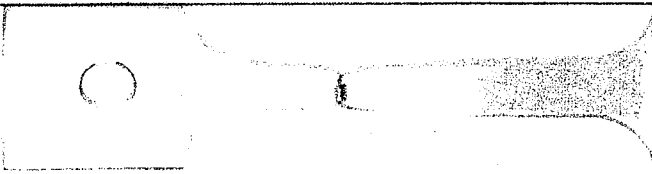
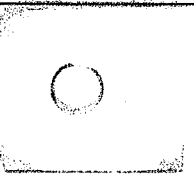
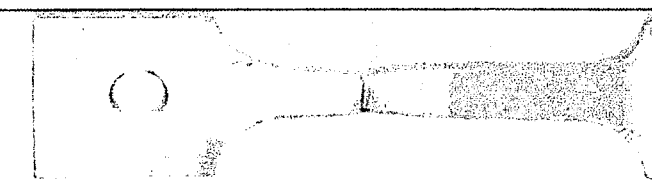
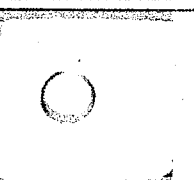
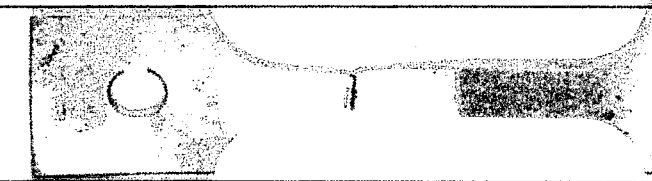
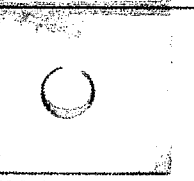
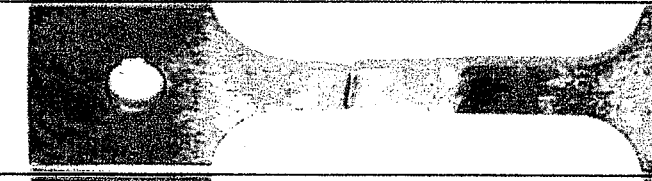
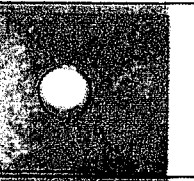
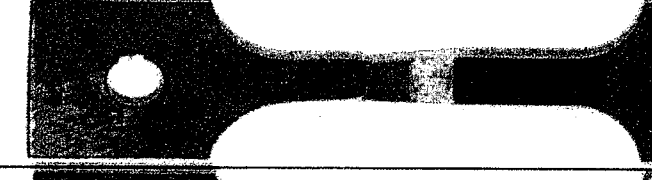
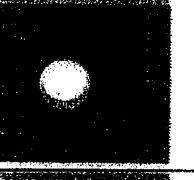
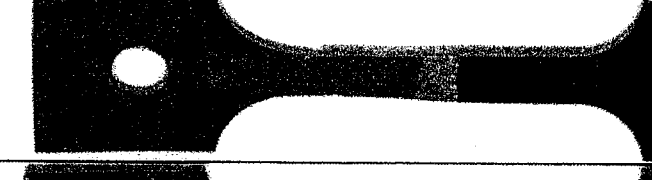
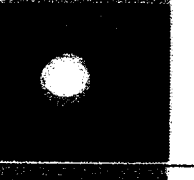
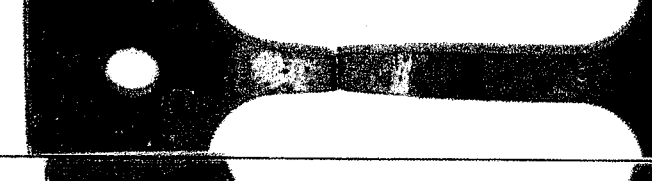
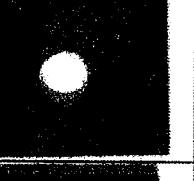
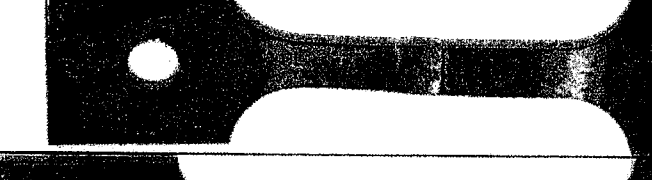
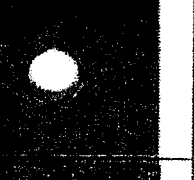
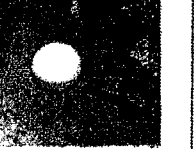
	SUS316	PNC-FMS
RT		
100℃		
200℃		
300℃		
400℃		
500℃		
600℃		
700℃		
800℃		

写真14 熱処理まま材A引張試験片の外観

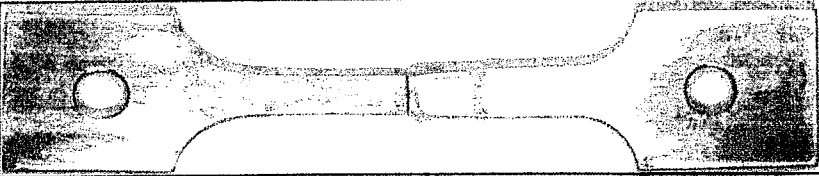
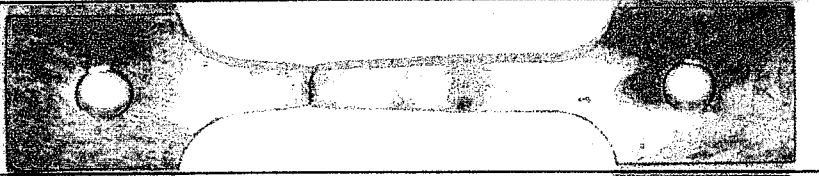
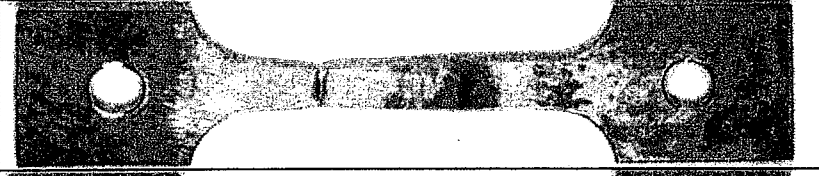
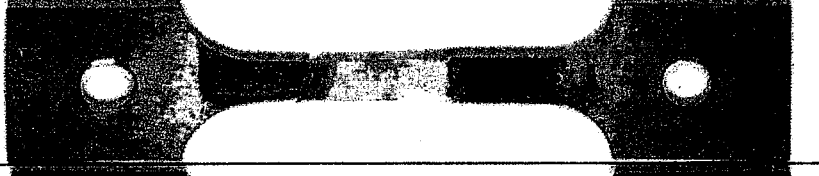
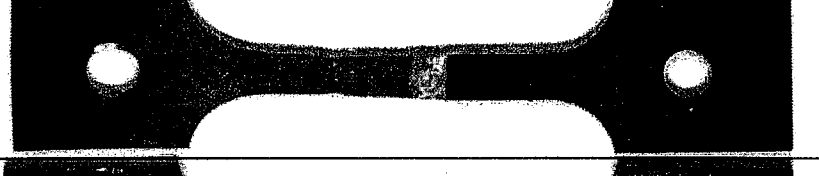
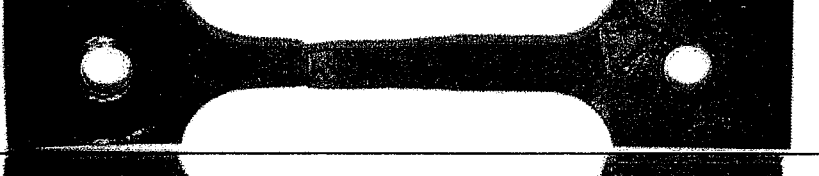
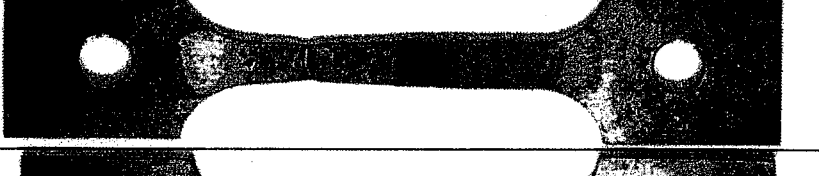
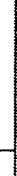
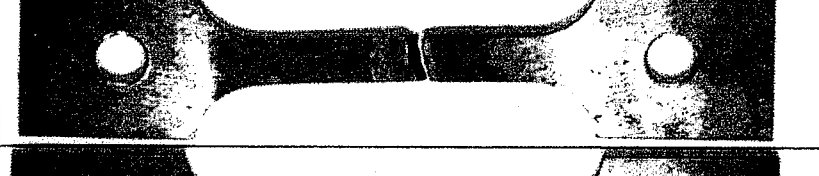
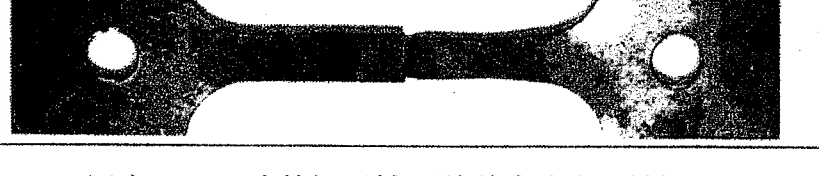
	SUS316	PNC-FMS
RT		
100℃		
200℃		
300℃		
400℃		
500℃		
600℃		
700℃		
800℃		

写真15 時効処理材B引張試験片の外観

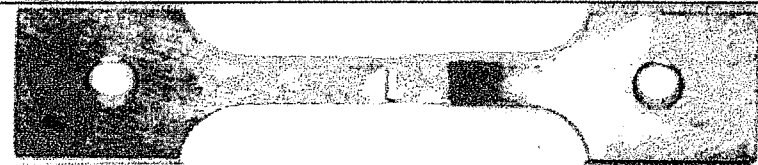
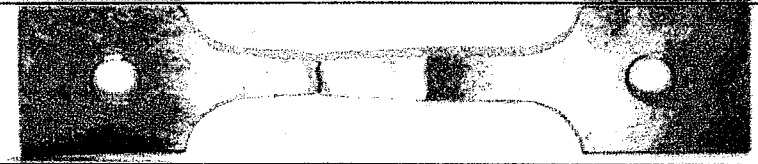
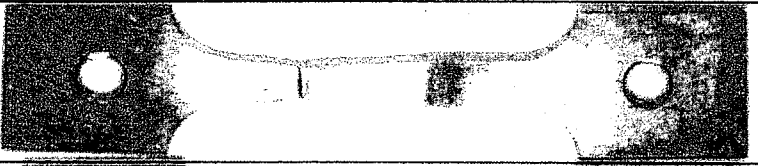
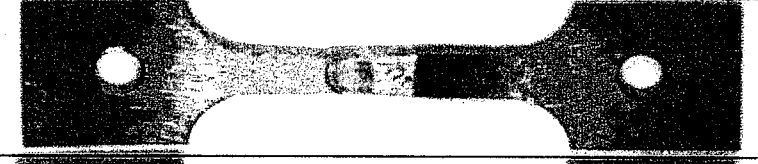
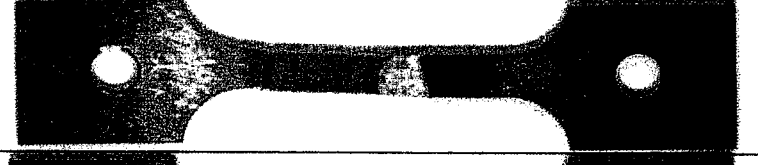
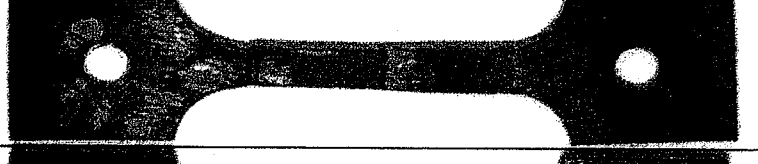
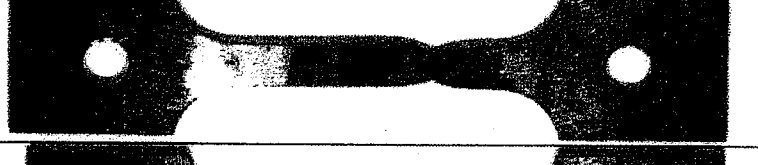
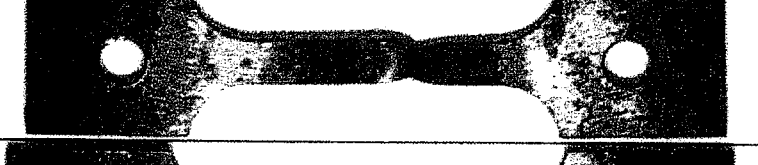
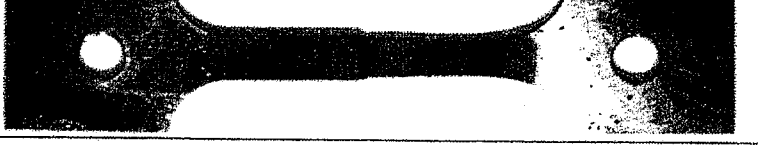
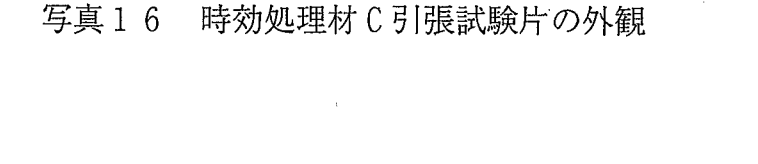
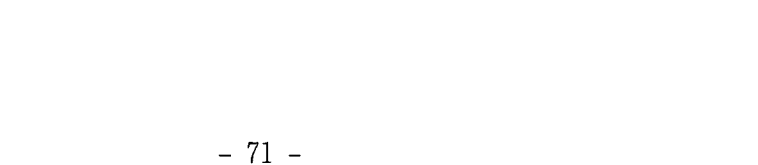
	SUS316	PNC-FMS
RT		
100℃		
200℃		
300℃		
400℃		
500℃		
600℃		
700℃		
800℃		

写真16 時効処理材C引張試験片の外観

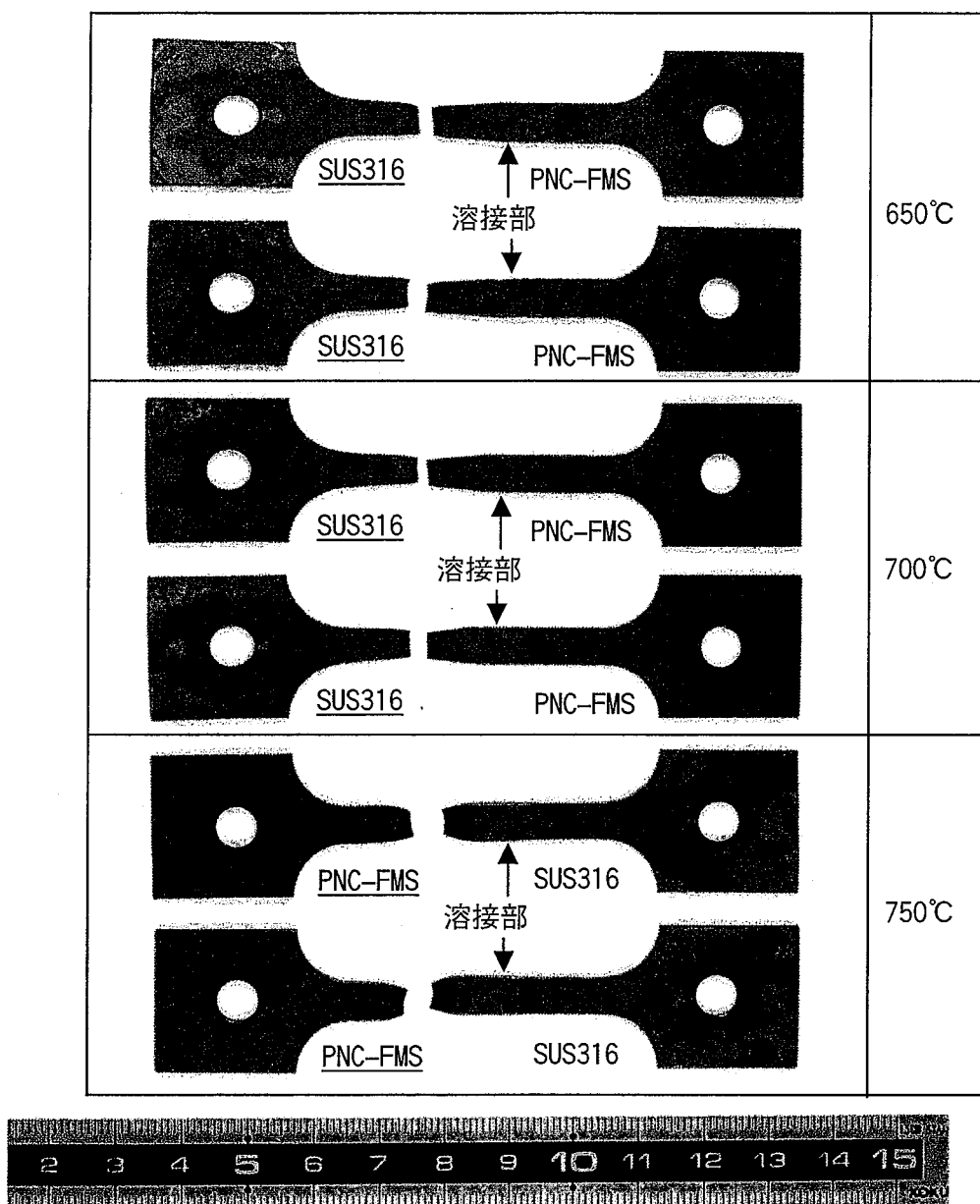


写真 1 7 追試した熱処理まま材 A 引張試験片の外観

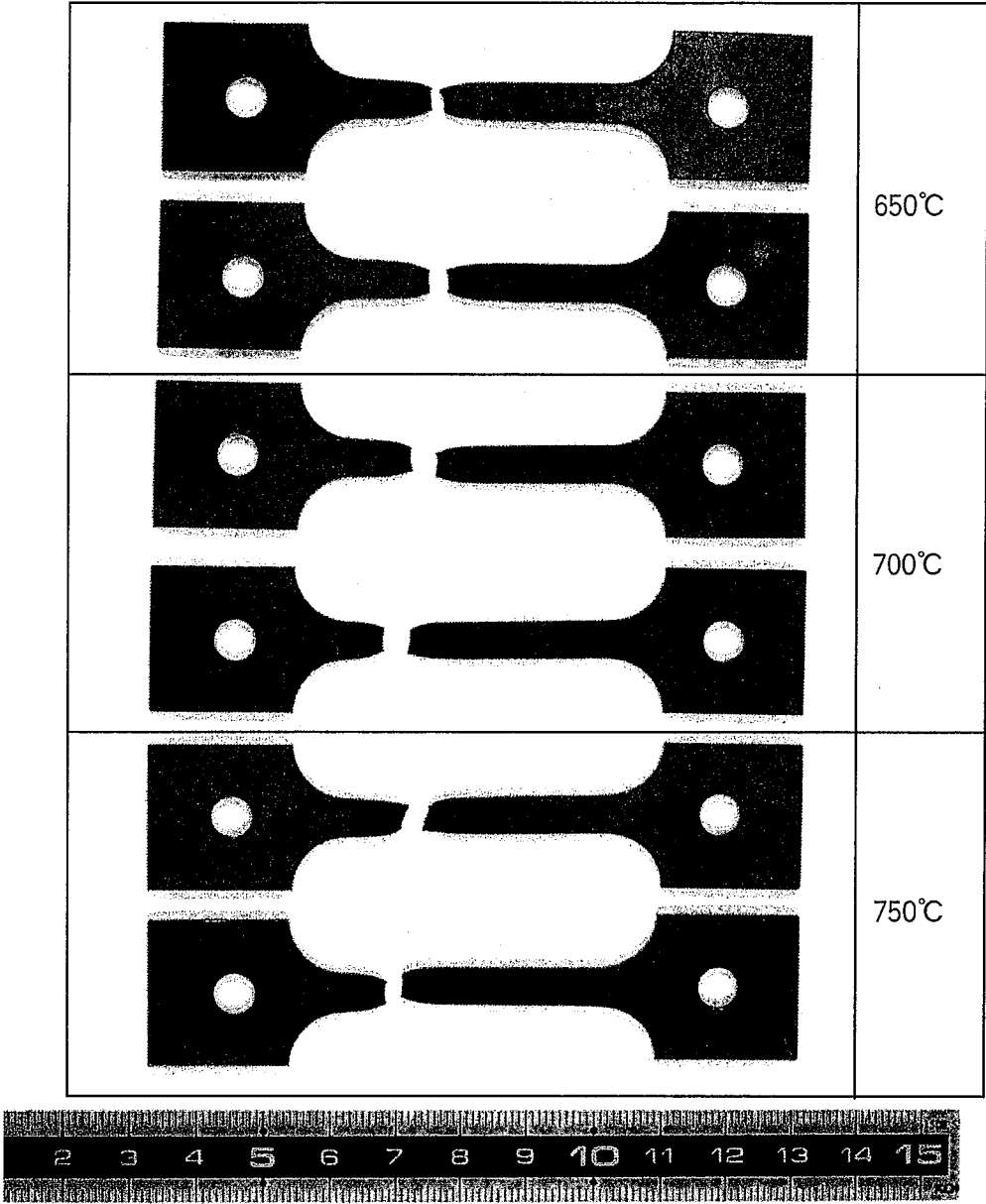


写真 1 8 FMS 母材引張試験片の外観

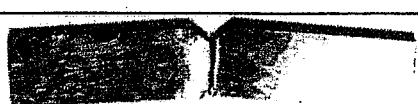
試験片 No.	SUS316	PNC-FMS
A 1		
A 2		
A 3		
A 4		
A 5		
A 6		
A 7		
A 8		
A 9		
A 1 0		
A 1 1		
A 1 2		
A 1 3		
A 1 4		

写真 1 9 熱処理まま材 A 衝撃試験片の外観

試験片 No.	SUS316	PNC-FMS
B 1		
B 2		
B 3		
B 4		
B 5		
B 6		
B 7		
B 8		
B 9		
B 1 0		
B 1 1		
B 1 2		

写真 2 0 時効処理材 B 衝撃試験片の外観

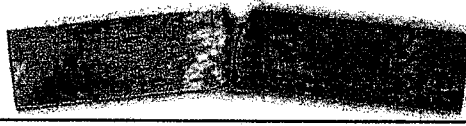
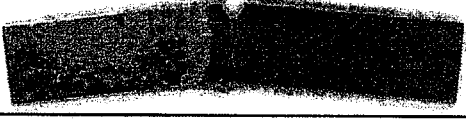
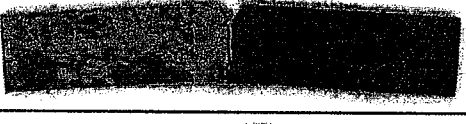
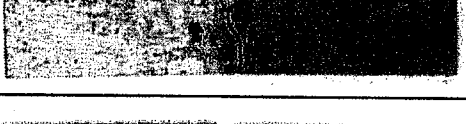
試験片 No.	SUS316	PNC-FMS
C 1		
C 2		
C 3		
C 4		
C 5		
C 6		
C 7		
C 8		
C 9		
C 1 0		
C 1 1		
C 1 2		

写真 2 1 時効処理材 C 引張試験片の外観

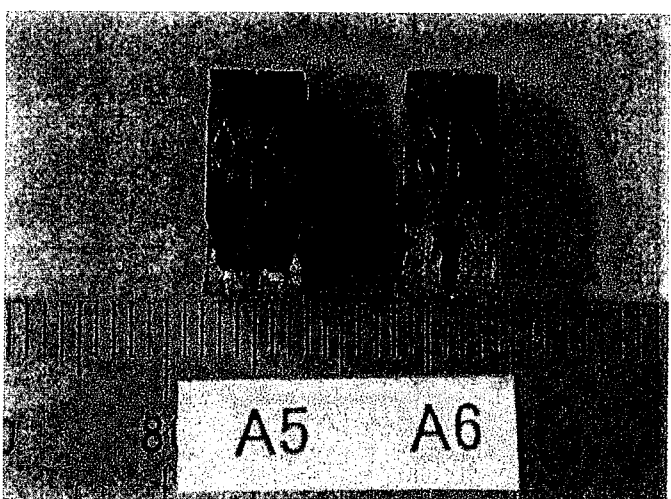
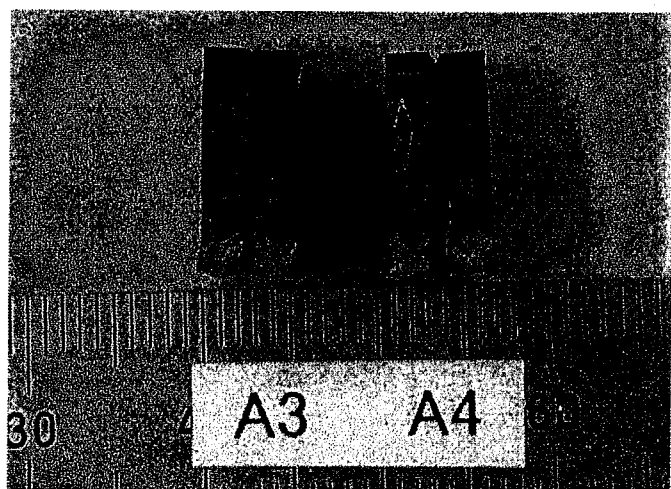
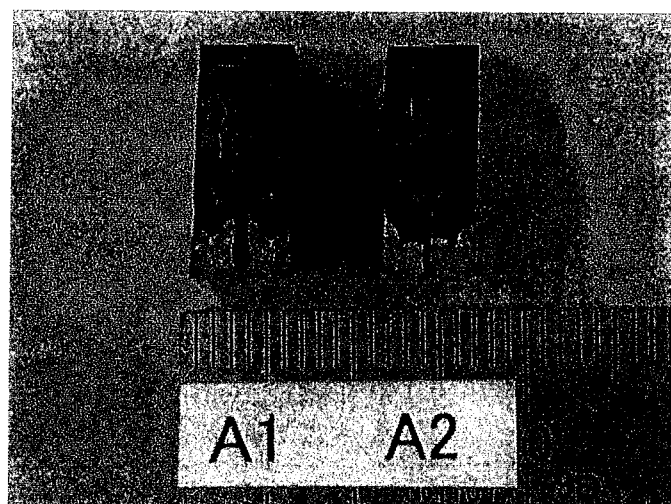


写真 2 2 J_{Ic} 試験後の破面写真 熱処理まま材 A

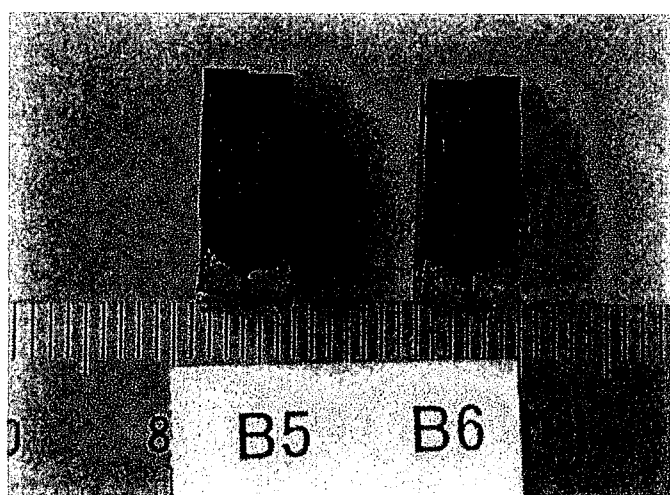
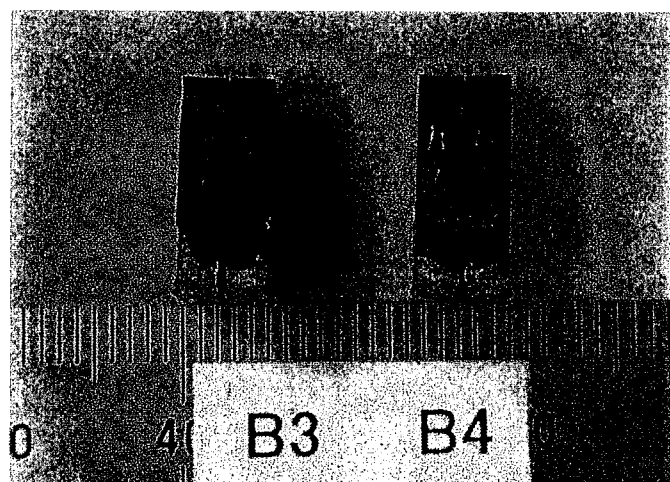
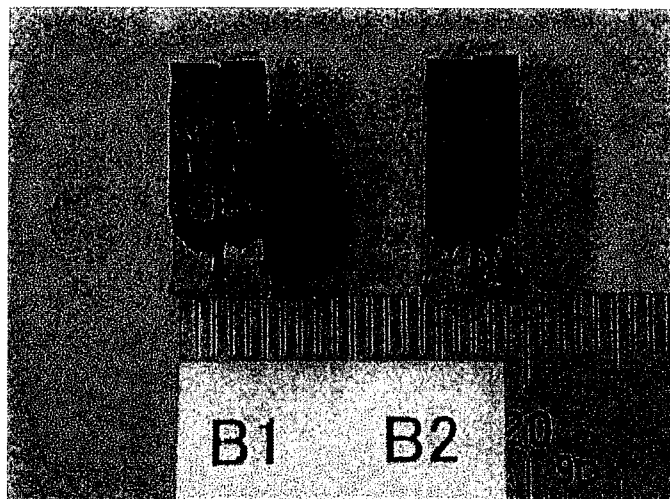


写真 2 3 J_{Ic} 試験後の破面写真 時効処理材 B

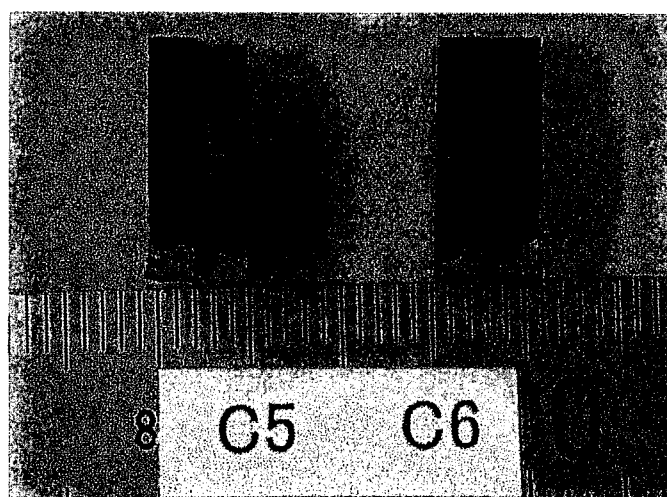
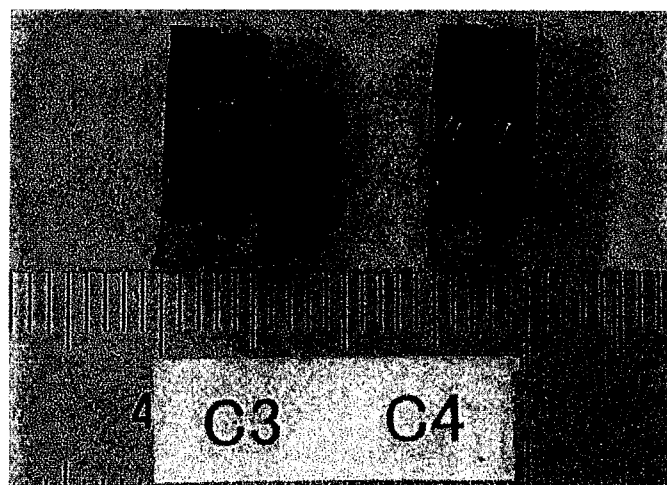
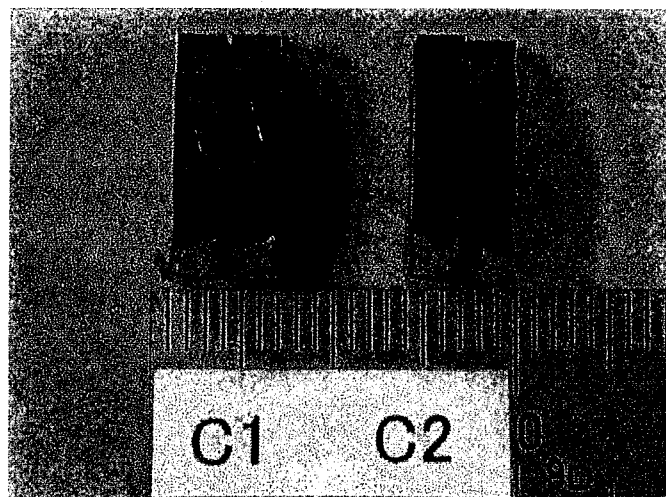


写真 2 4 J_{IC} 試験後の破面写真 時効処理材 C

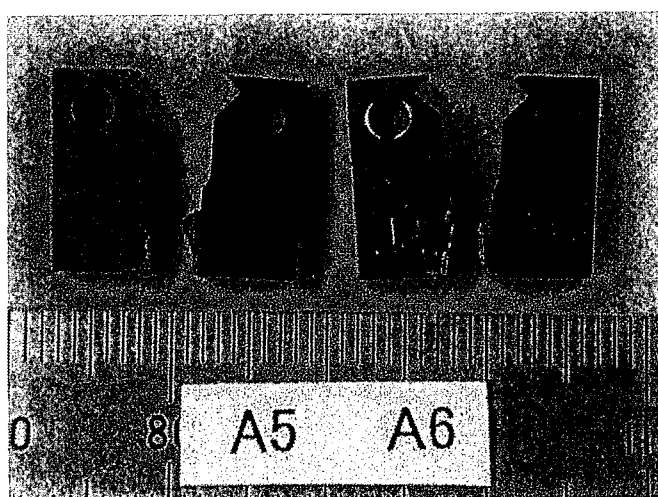
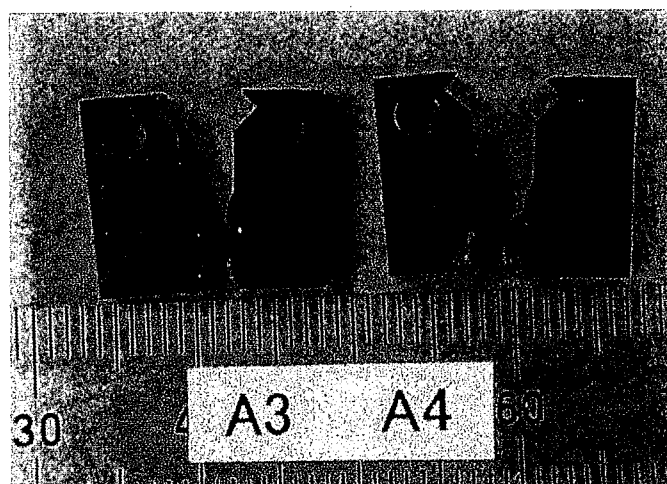
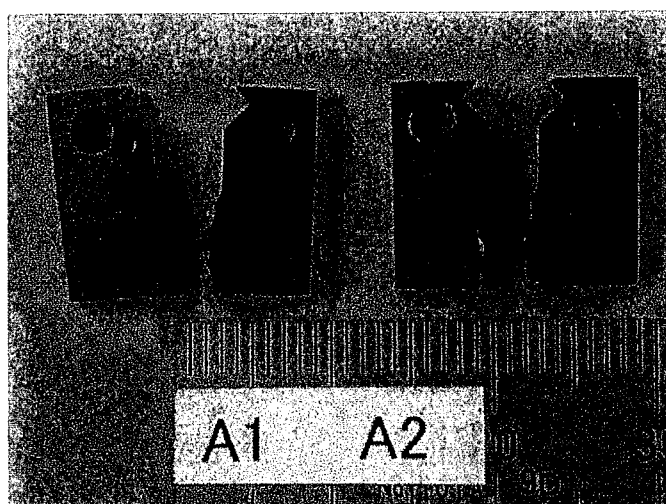


写真 2 5 J_{IC} 試験後の破断状況 熱処理まま材 A

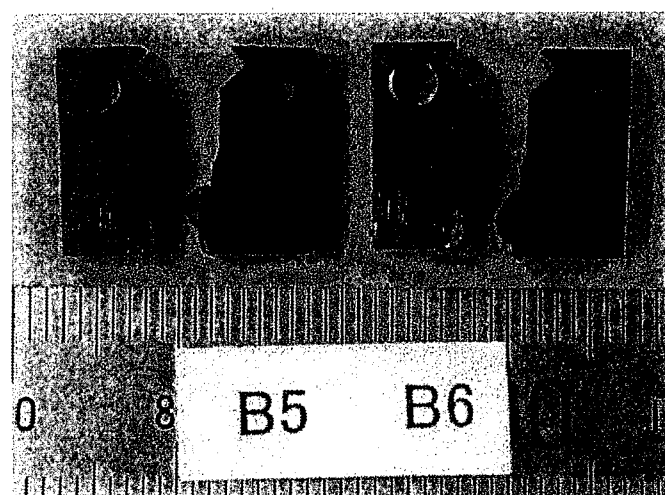
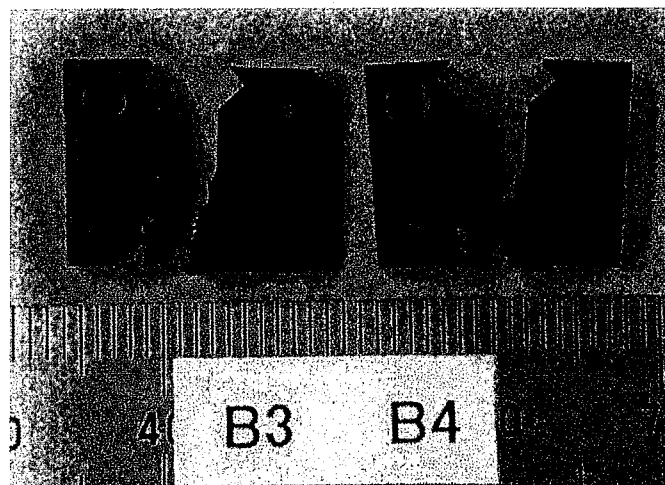
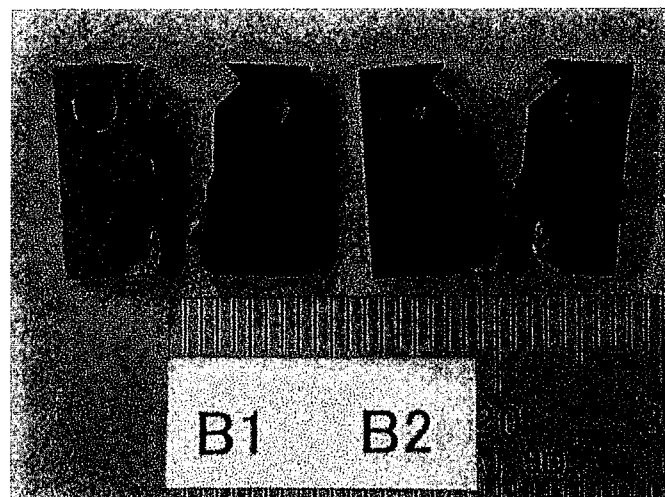


写真 2 6 J_c 試験後の破断状況 時効処理材 B

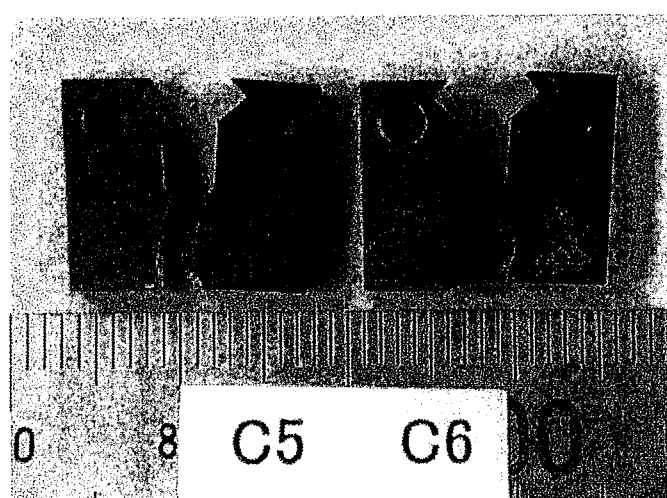
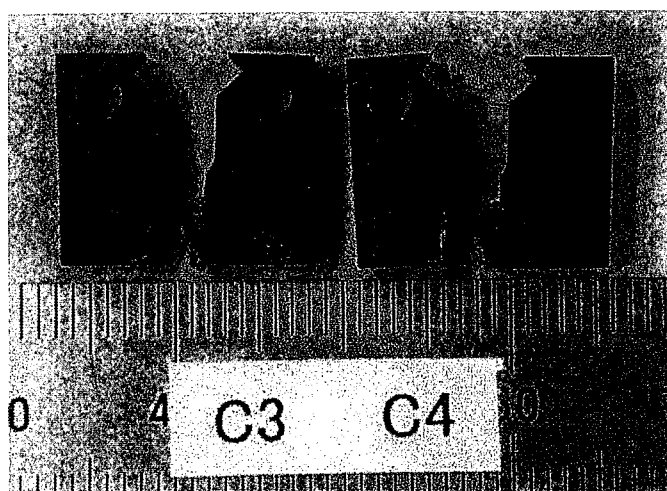
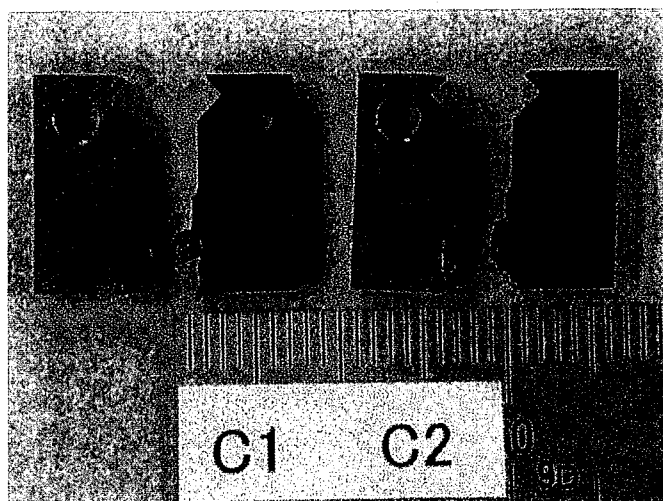


写真 2 7 J_{IC} 試験後の破断状況 時効処理材 C

PNC-FMS

インコネルデボ

SUS316



熱処理まま材 A

試験条件：600℃×25kgf/mm²

破断時間：197.7hrs

写真 2 8 クリープ破断試験後試験片の外観

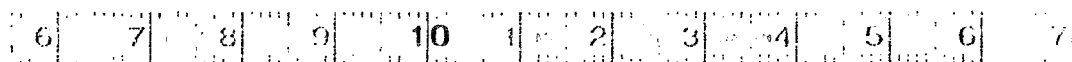
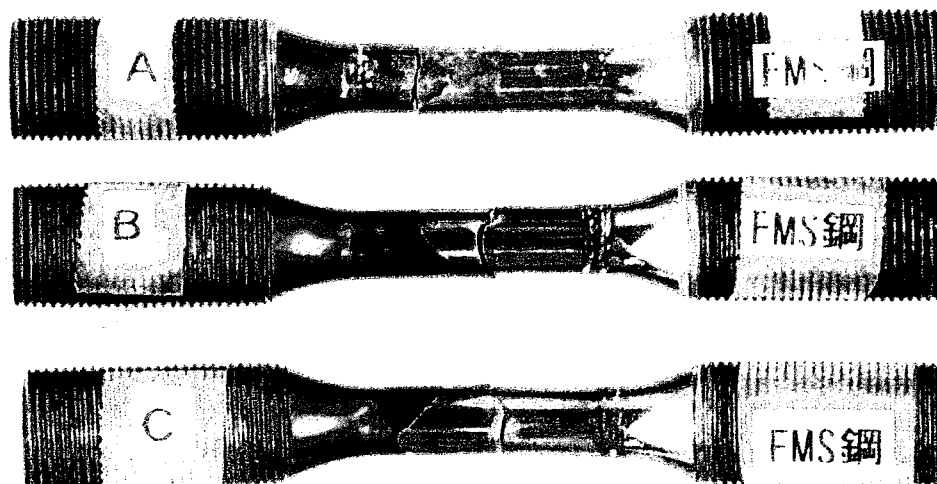


写真 2 9 疲労試験後試験片の外観

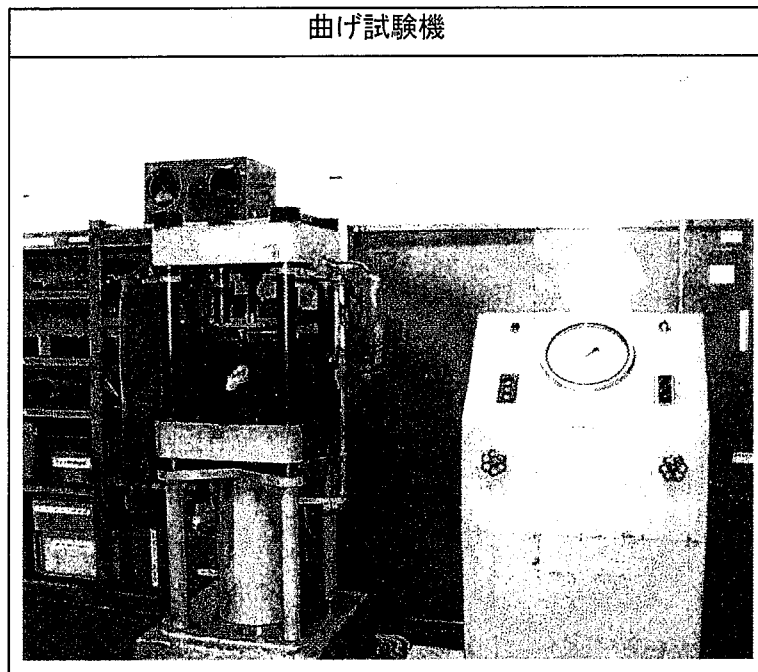


写真 3 0 曲げ試験機の外観

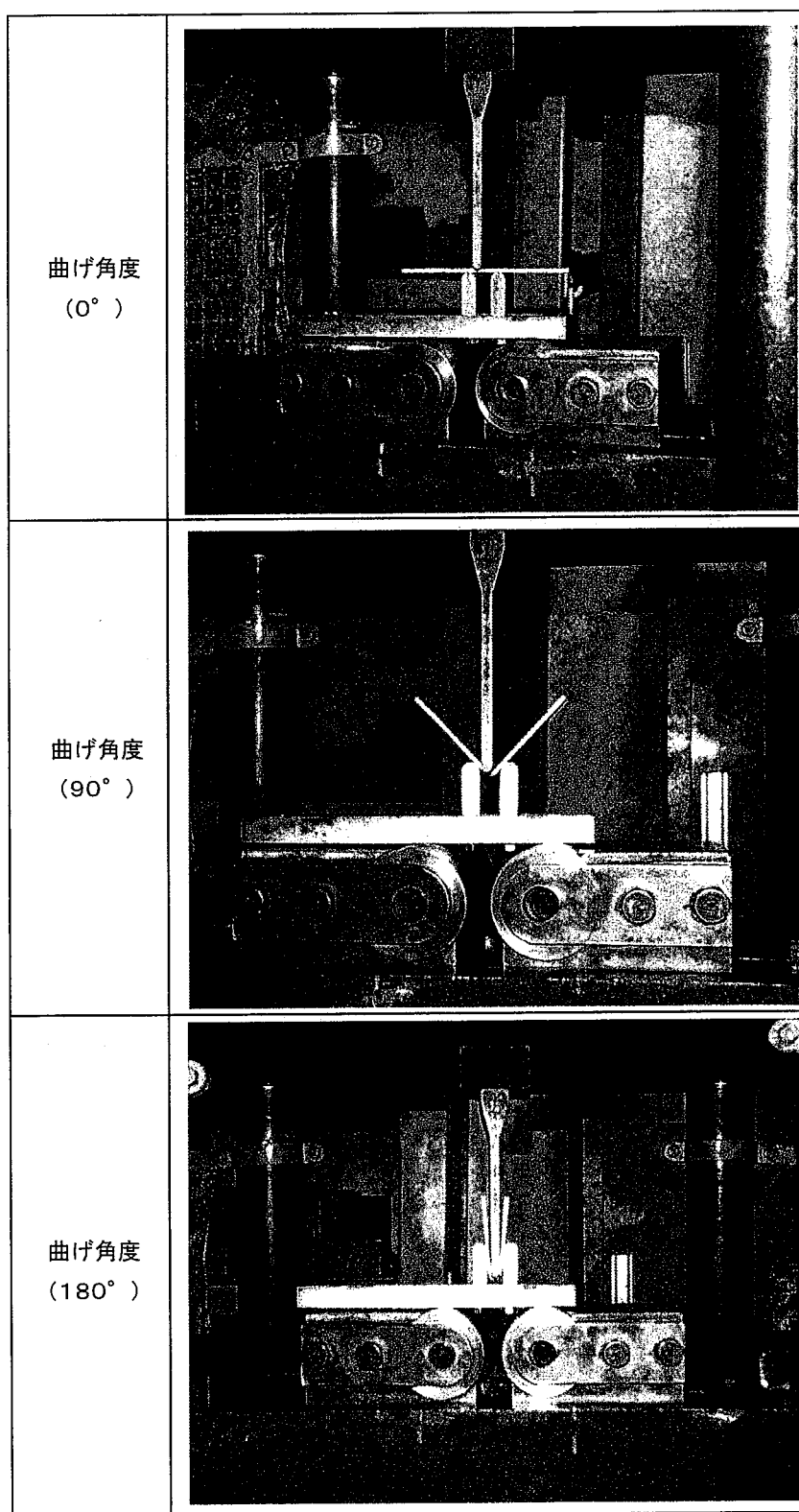


写真 31 曲げ試験中の試験片状況

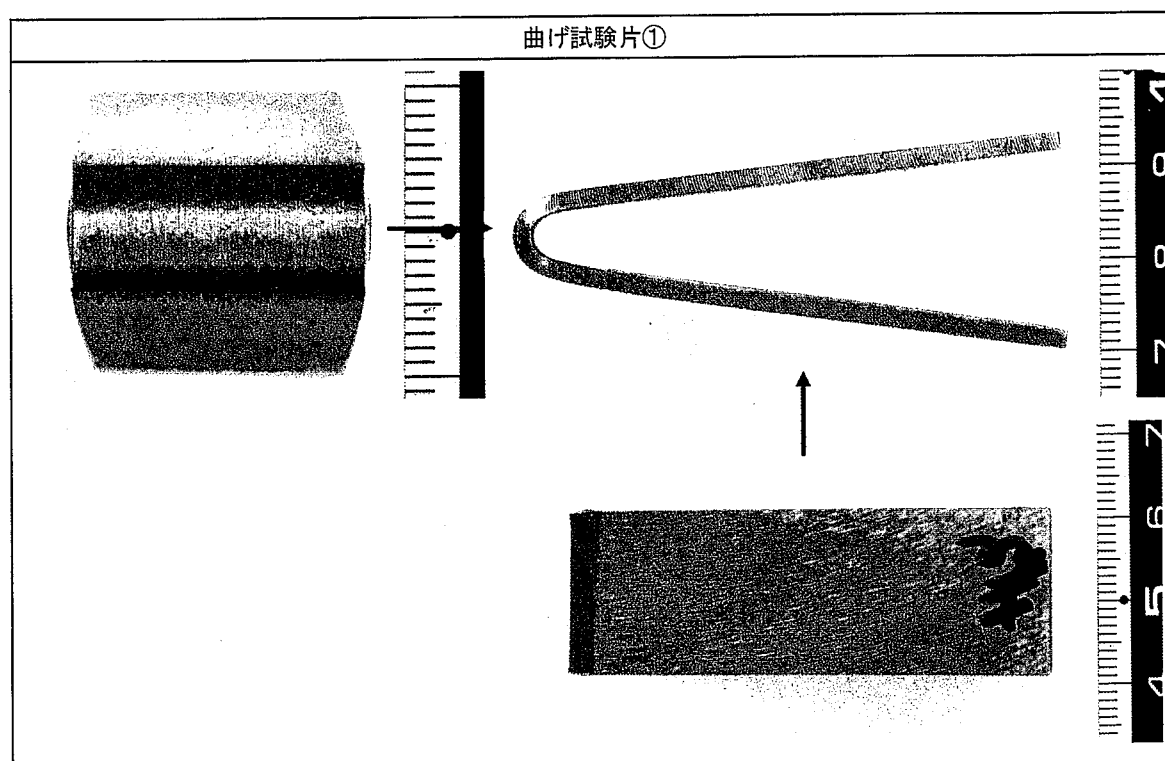


写真 3 2 曲げ試験片①試験後の外観

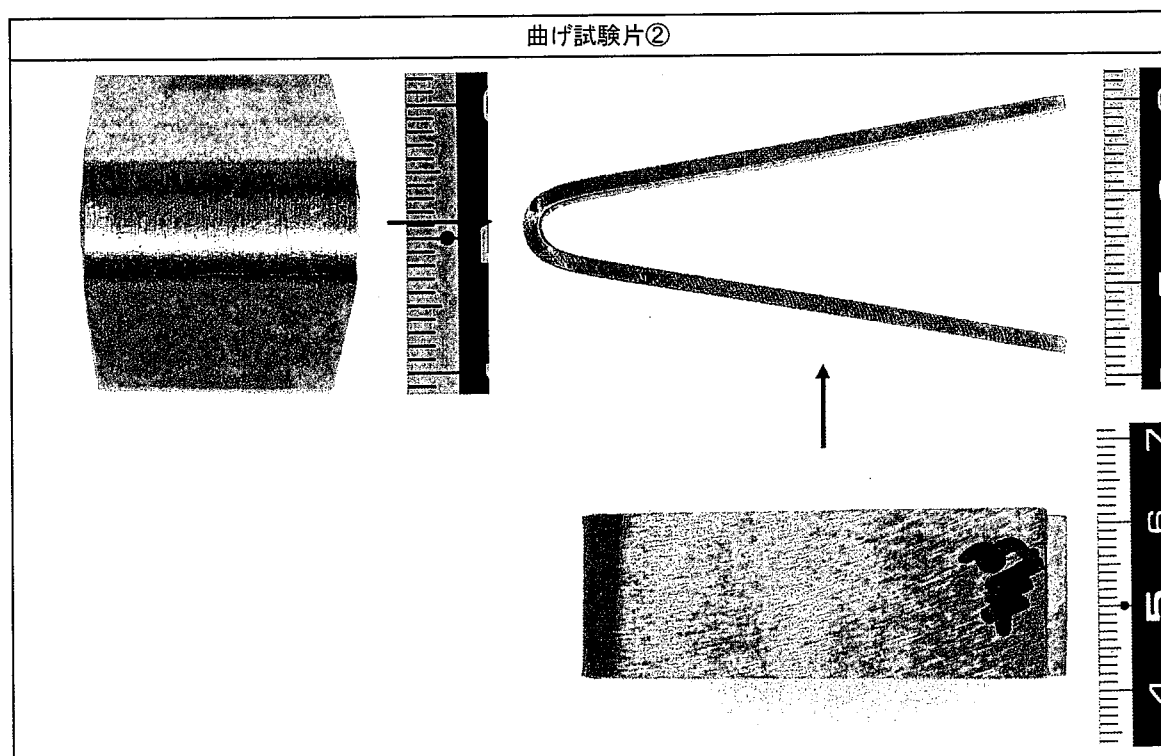


写真 3 3 曲げ試験片②試験後の外観

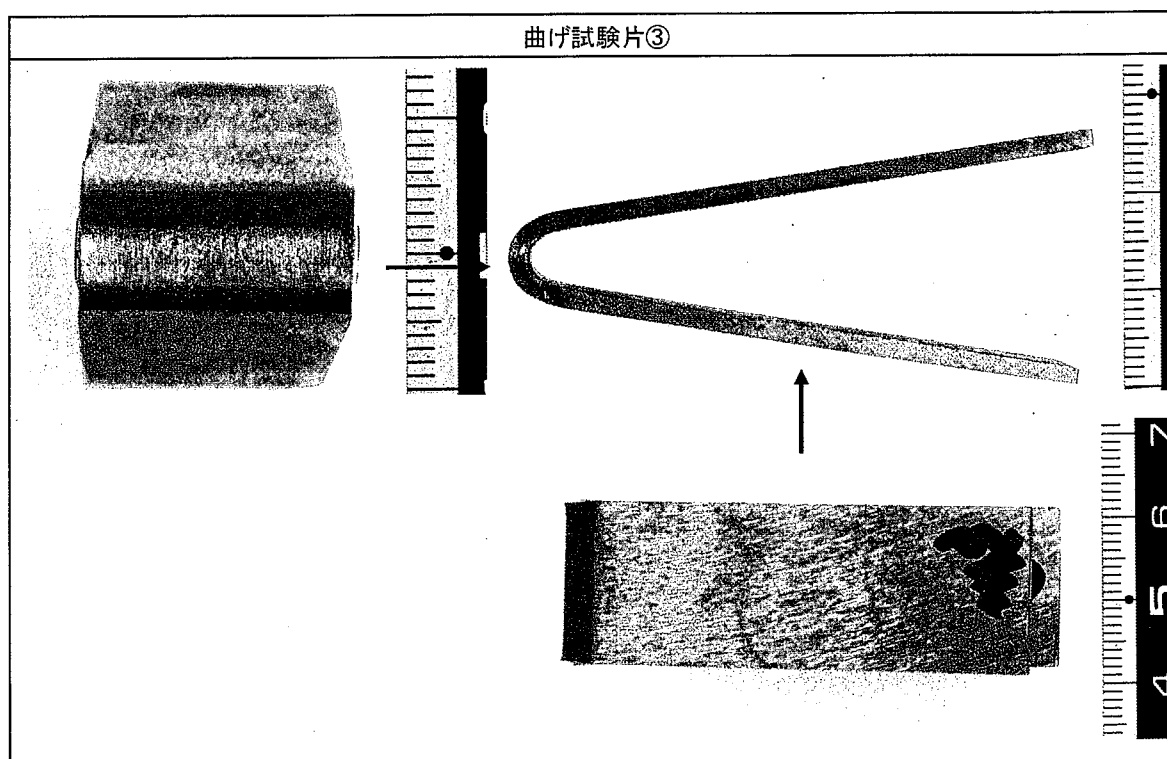


写真 3 4 曲げ試験片③試験後の外観

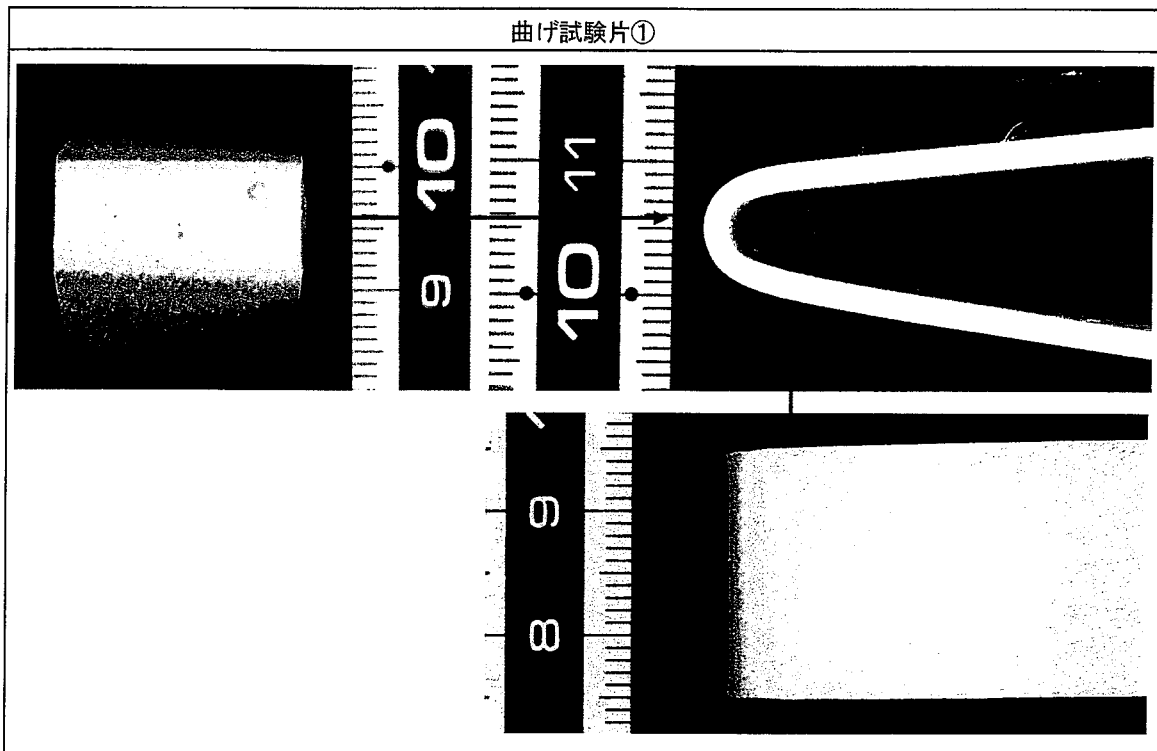


写真 3 5 曲げ試験片①試験後のカラーチェック

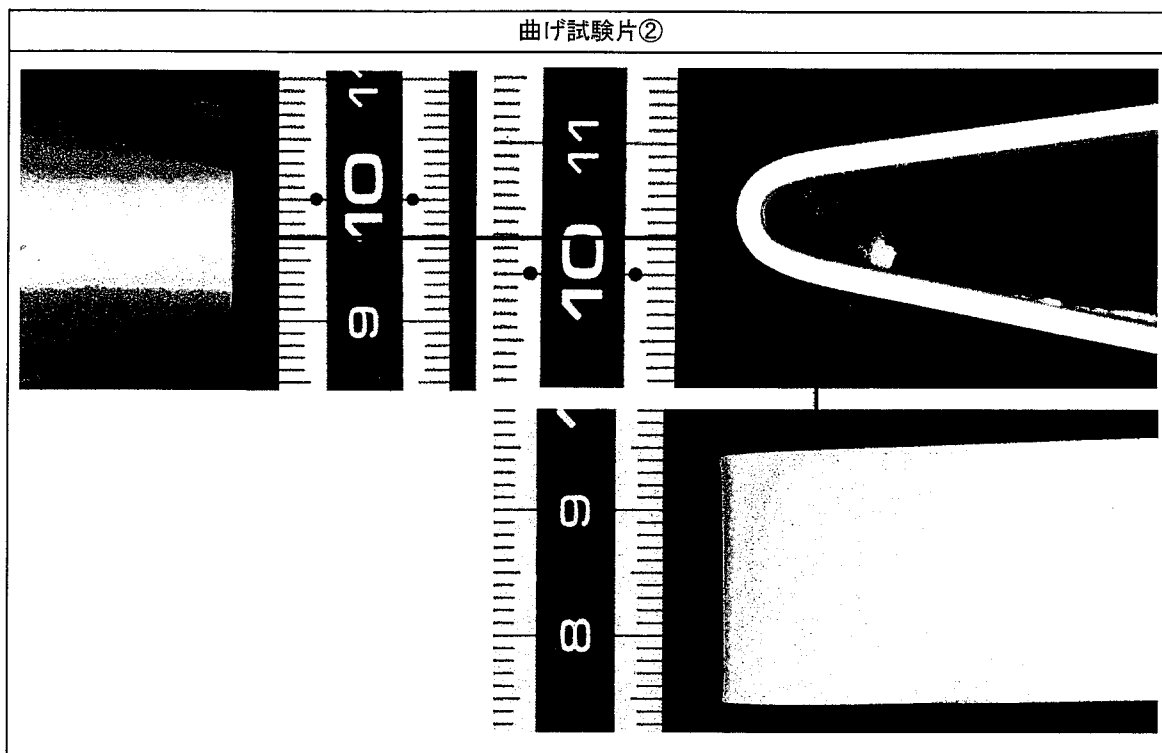


写真 3 6 曲げ試験片②試験後のカラーチェック

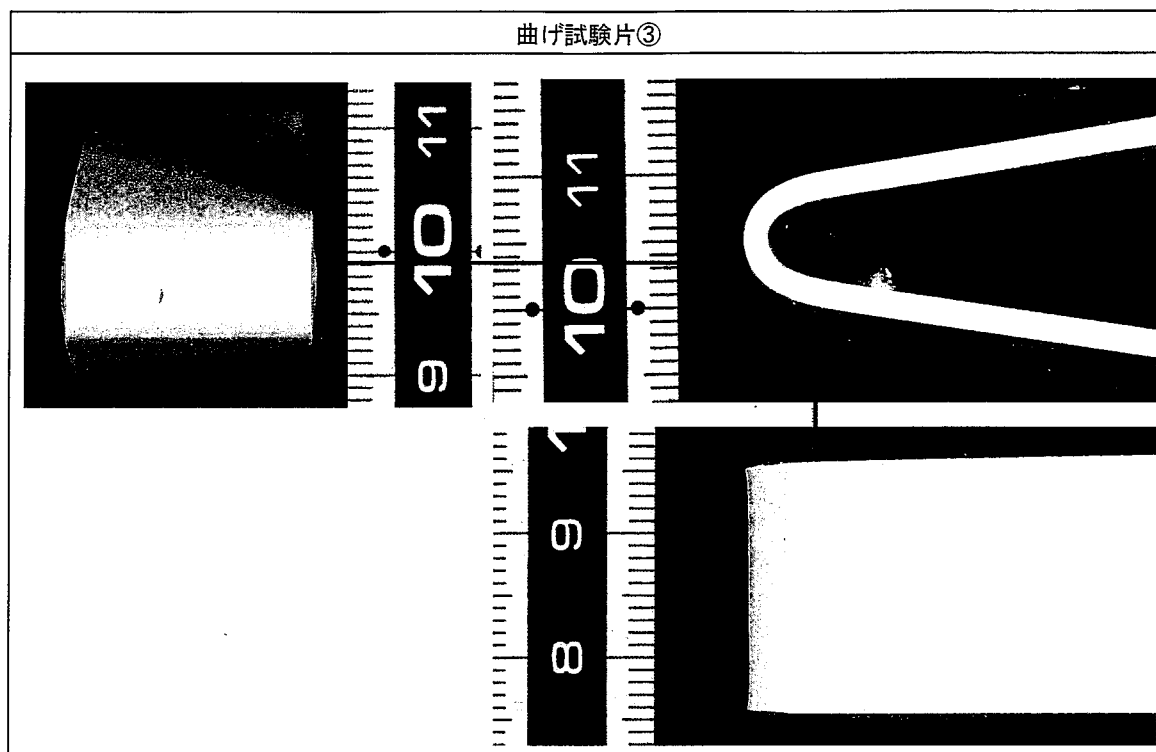


写真 3 7 曲げ試験片③試験後のカラーチェック

添付資料 1

SUS316 鋼およびインコネル溶接材料のミルシート

00/07/24 01/01

NIPPON METAL
日本金属工業株式会社INSPECTION CERTIFICATE
検査証明書ORDER No. HI-B-05-3902 INVOICE No. 05-8582
出納票内番番号

CUSTOMER ORDER No.

契約番号

CUSTOMER

注文先

DESTINATION

納入先

WORKS

製造所

次南製造所

DATE

発行日

2000. 5. 19

SPECIFICATION

規格

JIS G 4305 (1999)

T Y P E		SUS316		仕 様		FINISH 仕上		NO. 2B		SIZE		2.0 X1.000.0 X L		TEST DETAIL (試験項目)					
No.		HEAT NO.		QUANTITY		MASS		Kg											
1		0N5761C		1		9.137													
CHEMICAL COMPOSITION																			
No.		C		Si		Mn		P		S		Ni		Cr		Mo		(%)	
Max		0.08		1.00		2.00		0.045		0.030		14.00		18.00		3.00			
Min												10.00		16.00		2.00			
1		0.05		0.69		0.96		0.029		0.005		10.15		17.10		2.13			
Tensile Strength																			
Yield Strength		0.2%		N/mm ²		Tensile Strength		N/mm ²		Elongation		Hardness		Bend Test					
Max		205		520		40		53		83									
Min		329		626															
1		j37																	
NOTE (記事)																			
熱処理記録... 1080℃ 水冷 試験片 No. 13B号																			
We hereby certify that the material herein described has been manufactured and tested in accordance with the standards and specification specified by the customer and satisfies those requirements. 上記の証文は、御指定の規格又は仕様に基づいて製造され試験されたものであり、その要求事項を満足していることを証明します。																			
Certificate No. (シールシート No.) 00050287702 B																			
X. Nakagawa MANAGER OF Q. A. TEAM																			

ORDER No. OA-A-08-2350 INVOICE No. 10-3636
 契約番号 出納票内番番号

CUSTOMER ORDER No.

CUSTOMER

注文元

DESTINATION

納入先

INSPECTION CERTIFICATE

検査証明書

WORKS

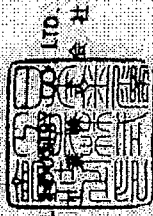
製造所

DATE

発行日

SPECIFICATION

規格



NIPPON METAL WORKS LTD.

日本金属工業株式会社

TEL. 0427(79)1813

SAGAMIHARA

19.0 X 2,000.0 X 4,000.0

19.0 X 2,000.0 X 4,000.0

19.0 X 2,000.0 X 4,000.0

19.0 X 2,000.0 X 4,000.0

19.0 X 2,000.0 X 4,000.0

19.0 X 2,000.0 X 4,000.0

19.0 X 2,000.0 X 4,000.0

19.0 X 2,000.0 X 4,000.0

19.0 X 2,000.0 X 4,000.0

19.0 X 2,000.0 X 4,000.0

19.0 X 2,000.0 X 4,000.0

19.0 X 2,000.0 X 4,000.0

19.0 X 2,000.0 X 4,000.0

19.0 X 2,000.0 X 4,000.0

19.0 X 2,000.0 X 4,000.0

19.0 X 2,000.0 X 4,000.0

19.0 X 2,000.0 X 4,000.0

19.0 X 2,000.0 X 4,000.0

19.0 X 2,000.0 X 4,000.0

19.0 X 2,000.0 X 4,000.0

19.0 X 2,000.0 X 4,000.0

19.0 X 2,000.0 X 4,000.0

19.0 X 2,000.0 X 4,000.0

19.0 X 2,000.0 X 4,000.0

19.0 X 2,000.0 X 4,000.0

19.0 X 2,000.0 X 4,000.0

19.0 X 2,000.0 X 4,000.0

19.0 X 2,000.0 X 4,000.0

19.0 X 2,000.0 X 4,000.0

19.0 X 2,000.0 X 4,000.0

19.0 X 2,000.0 X 4,000.0

19.0 X 2,000.0 X 4,000.0

19.0 X 2,000.0 X 4,000.0

19.0 X 2,000.0 X 4,000.0

19.0 X 2,000.0 X 4,000.0

19.0 X 2,000.0 X 4,000.0

19.0 X 2,000.0 X 4,000.0

19.0 X 2,000.0 X 4,000.0

19.0 X 2,000.0 X 4,000.0

19.0 X 2,000.0 X 4,000.0

19.0 X 2,000.0 X 4,000.0

19.0 X 2,000.0 X 4,000.0

19.0 X 2,000.0 X 4,000.0

19.0 X 2,000.0 X 4,000.0

19.0 X 2,000.0 X 4,000.0

19.0 X 2,000.0 X 4,000.0

19.0 X 2,000.0 X 4,000.0

19.0 X 2,000.0 X 4,000.0

19.0 X 2,000.0 X 4,000.0

NOTE(注)

HEAT TREATMENT...1100°C X 5.0 min W.Q.

T.P. JIS Z 2201 No.10

T.P. JIS Z 2201 No.10

T.P. JIS Z 2201 No.10

T.P. JIS Z 2201 No.10

T.P. JIS Z 2201 No.10

T.P. JIS Z 2201 No.10

T.P. JIS Z 2201 No.10

T.P. JIS Z 2201 No.10

T.P. JIS Z 2201 No.10

T.P. JIS Z 2201 No.10

T.P. JIS Z 2201 No.10

T.P. JIS Z 2201 No.10

T.P. JIS Z 2201 No.10

T.P. JIS Z 2201 No.10

T.P. JIS Z 2201 No.10

T.P. JIS Z 2201 No.10

T.P. JIS Z 2201 No.10

Certificate No. (シール付)

97100617901

A

A

A

A

A

A

A

A

A

A

A

A

A

A

A

A

A

K. Tanaka

MANAGER OF Q.A. TEAM

INSPECTION CERTIFICATE

検査証明書

WELDING MATERIAL 溶接材料

Certificate No. 241932
検査証明書番号

Customer's Name :
客先名

Trade Designation (銘柄) : WEL TIG 82

Lot Heat No. (焼却ヒート番号) : DU125

Size (寸法) : 2.0 X 1000 (mm)

JIS SPECIFICATION & CLASS.: JIS Z 3334-1999 YNCr-3

◎ NIPPON WELDING ROD CO., LTD.

HAMAKITA FACTORY Quality Assurance Division

日本ウエルディング・ロッド株式会社

浜北製造所 品質保証部

7800 NAKASE HAMAKITA CITY, SHIZUOKA PREF., JAPAN 〒434-0012

〒434-0012 静岡県浜北市中郷7800番地 Telephone: 053-588-7732

Elements 元素 (wt%)		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cu	Cr	Fe	Mo	B	
Spec. 規格	min.	-	-	2.5	-	-	67.0	-	18.0	-	2.0	-	
	max.	0.10	0.50	3.5	0.030	0.015	-	0.50	22.0	3.0	3.0	0.75	
FILLER METAL		0.03	0.19	3.02	0.003	0.002	73.52	0.03	18.56	1.39	2.70	0.46	
Mechanical Properties 機械的性質													
All-Weld-Metal Tension Test (Room Temp) 全溶接金属引張試験 (室温)													
Yield Strength at 0.2% offset 0.2% 耐力	min.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	max.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tensile Strength 引張強度	min.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	max.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Reduction of Area 断面収縮率													
min.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	max.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Remarks : VISUAL INSPECTION : SATISFACTORY
記 事 DIMENSIONAL INSPECTION : SATISFACTORY
CERTIFICATE ISSUED DATE : SEPT. 13, 2001

We hereby certify that the contents of above test results are correct and accurate.
上記の試験結果の内容は正しいことを証明致します。

Form No. 9-3 △

Signature
Quality Assurance Division
品質保証部

INSPECTION CERTIFICATE

検査証明書

WELDING MATERIAL 溶接材料

◎ NIPPON WELDING ROD CO., LTD.

HAMAKITA FACTORY, Quality Assurance Division.

日本ウエルディング・ロッド株式会社

浜北製造所 品質保証部

7900 NARASE HAMAKITA CITY, SHIZUOKA PREF. JAPAN 〒434-0012

〒434-0012 静岡県浜北市南郷7900番地 Telephone: 053-588-7232

Certificate No. 241933
検査証明書番号

Customer's Name:
客先名

Trade Designation (銘柄): WEL TIG 82

Lab. Heat No. (製造ヒート番号): DU125

Size (寸法): 3.2 X 1000 (mm)

JIS SPECIFICATION & CLASS.: JIS Z 3334-1999 YNiCr-3

Elements 元素 (Wt%)		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe	Mo	Ti	
Spec. 規格	Items 項目	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	
		0.10	0.50	2.5	0.030	0.015	67.0	0.50	18.0	—	2.0	—
FILLER		0.03	0.19	3.02	0.003	0.002	73.52	0.03	22.0	3.0	0.75	
METAL								18.56	1.39	2.70	0.46	

All-Weld-Metal Tension Test (Room Temp.) 全溶接金属引張試験 (室温)			
Mechanical Properties 機械的性質	Yield Strength at 0.2% offset 0.2% 耐力 N/mm^2	Tensile Strength 引張強度 N/mm^2	Elongation 伸び %
	min.	max.	min.
Spec. 規格	—	—	—
Items 項目	min.	max.	min.
—	—	—	—
—	—	—	—

Remarks: VISUAL INSPECTION ; SATISFACTORY
記 事 寸法検査 ; 満足

DIMENSIONAL INSPECTION ; SATISFACTORY
CERTIFICATE ISSUED DATE ; SEPT. 13, 2001

We hereby certify that the contents of above test results are correct and accurate.
上記の試験結果の内容は正しいことを証明致します。

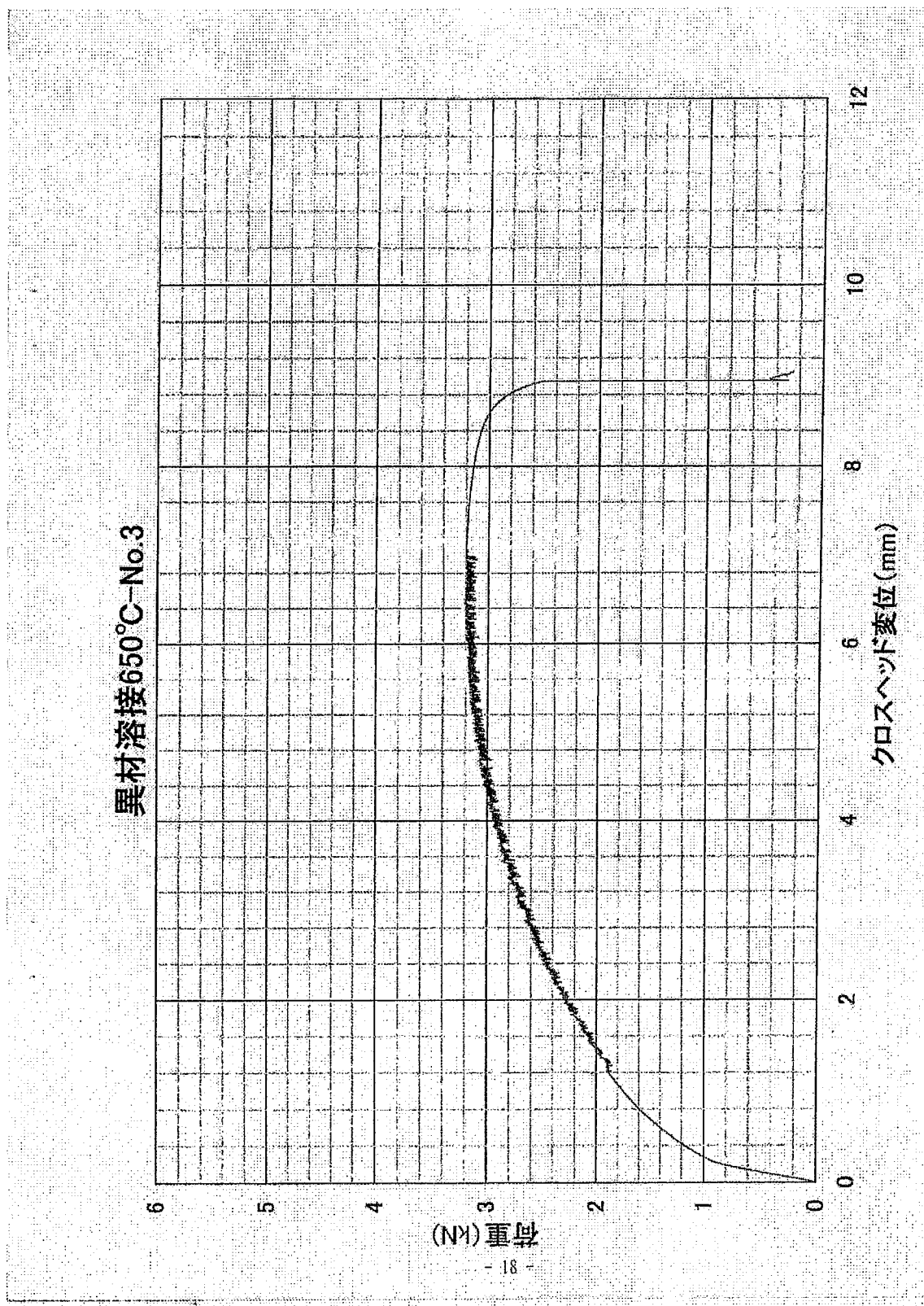
Form No. 9-3 4

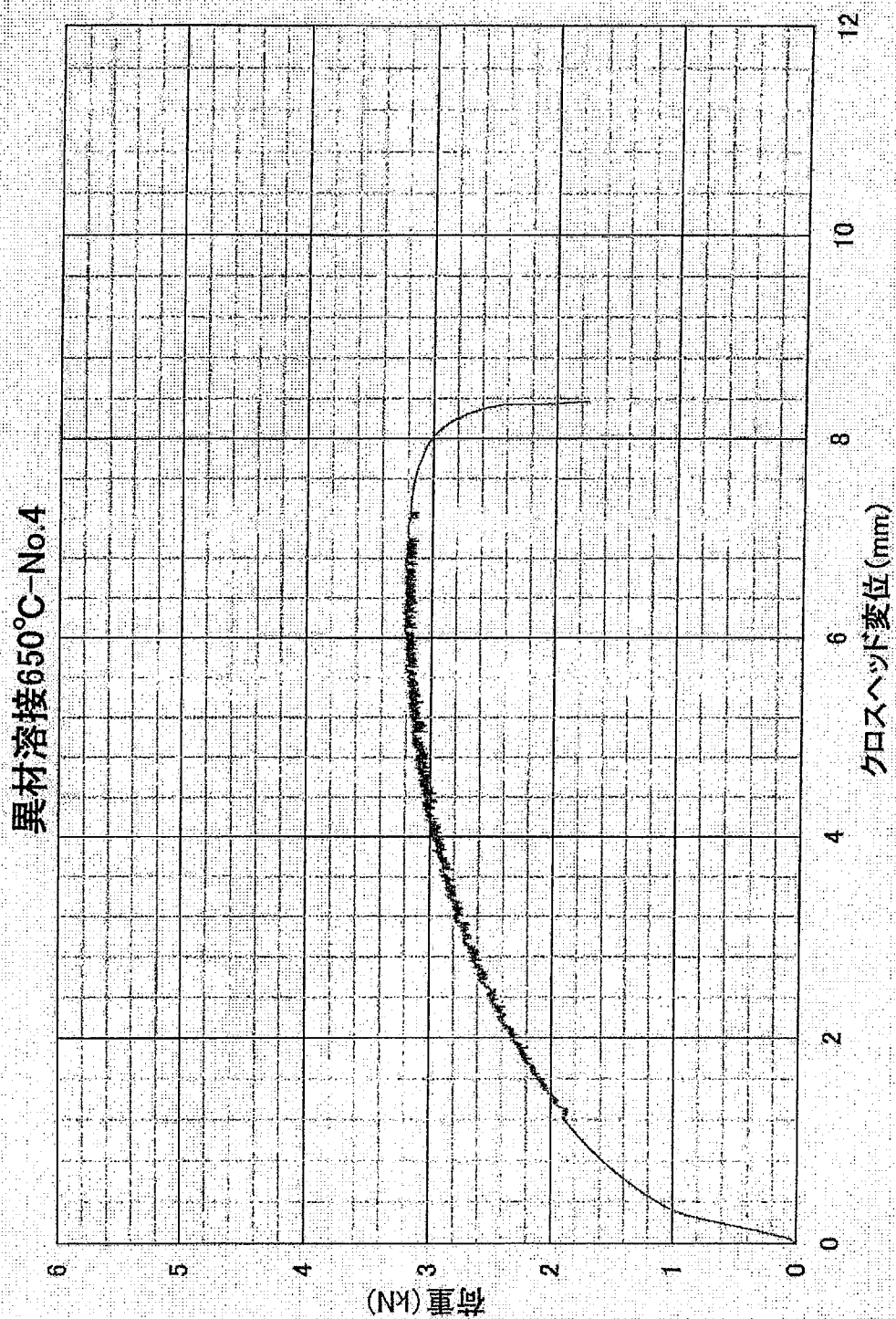
Quality Assurance Division
品質保証部

添付資料 2

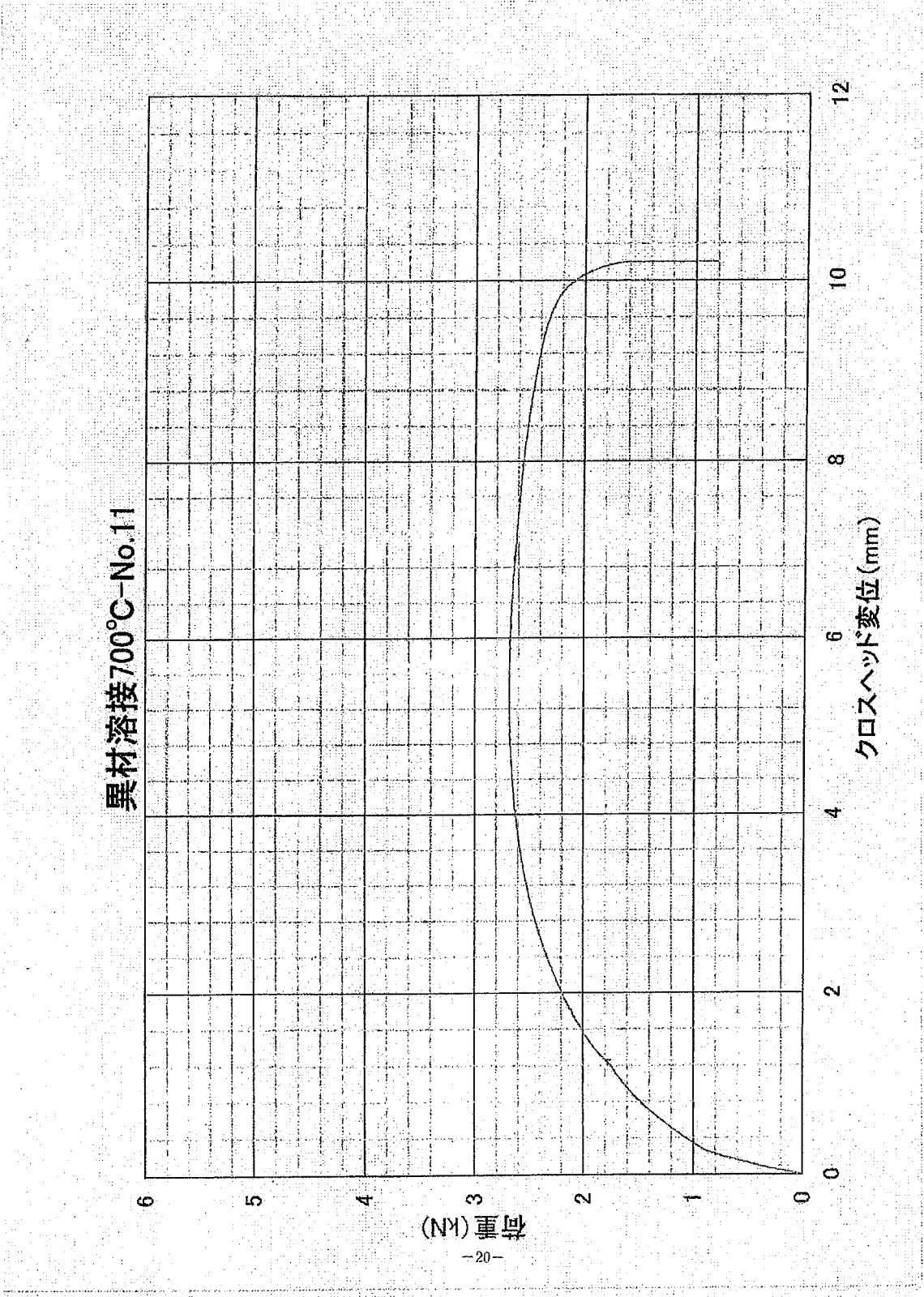
異材溶接→熱処理まま材 A 追試および FMS 母材の

引張試験チャート

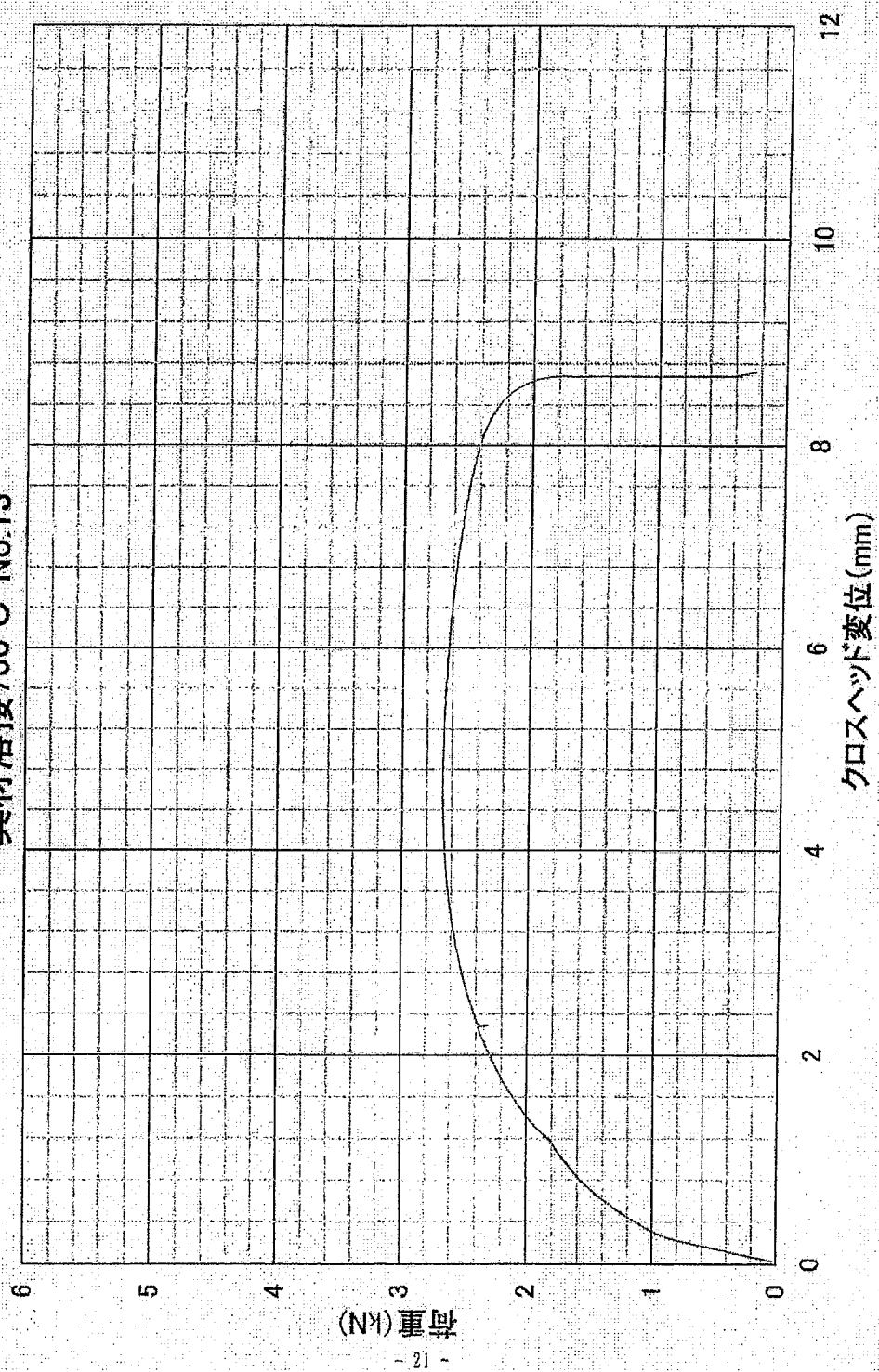


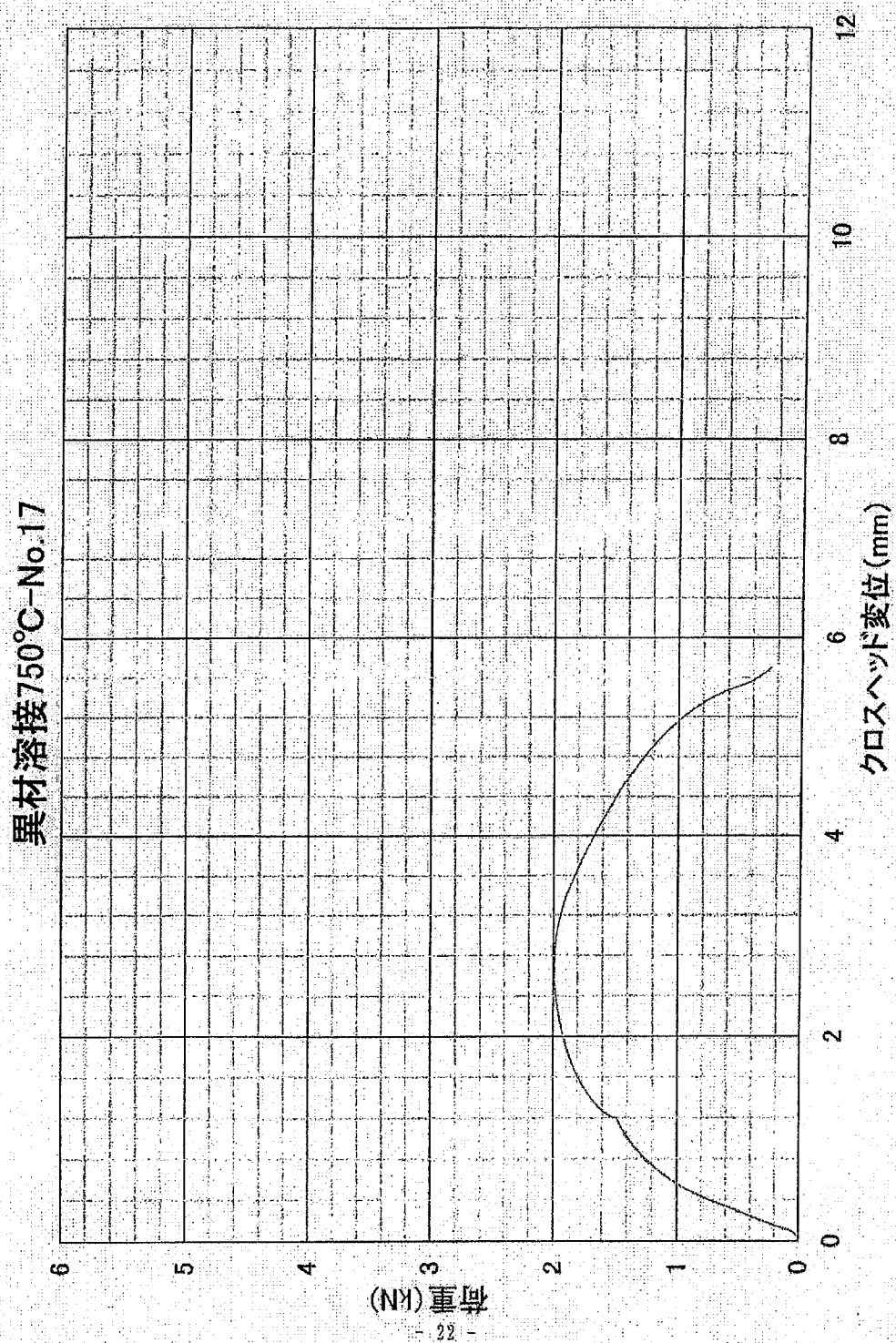


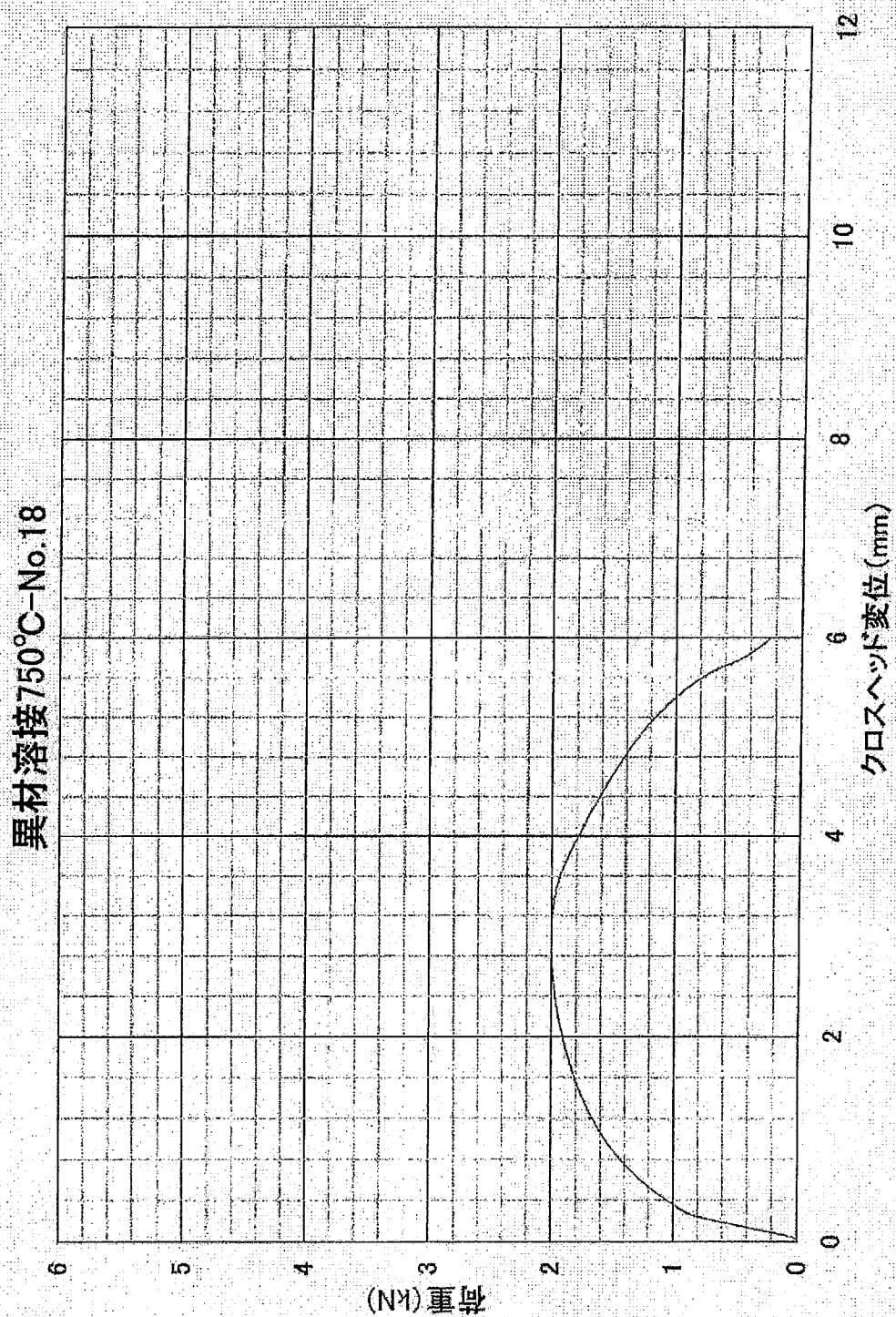
- 19 -



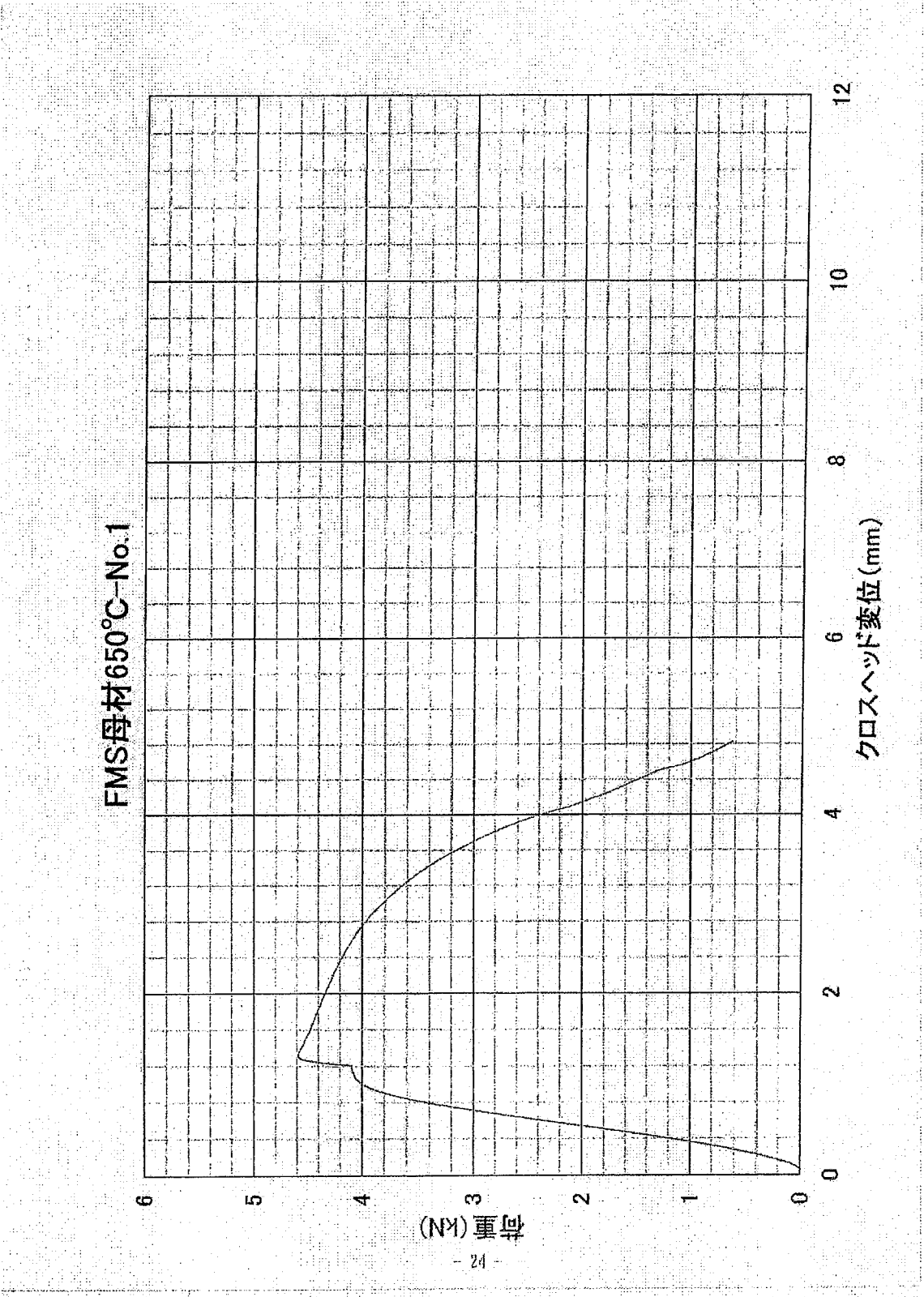
異材溶接700°C-No.13

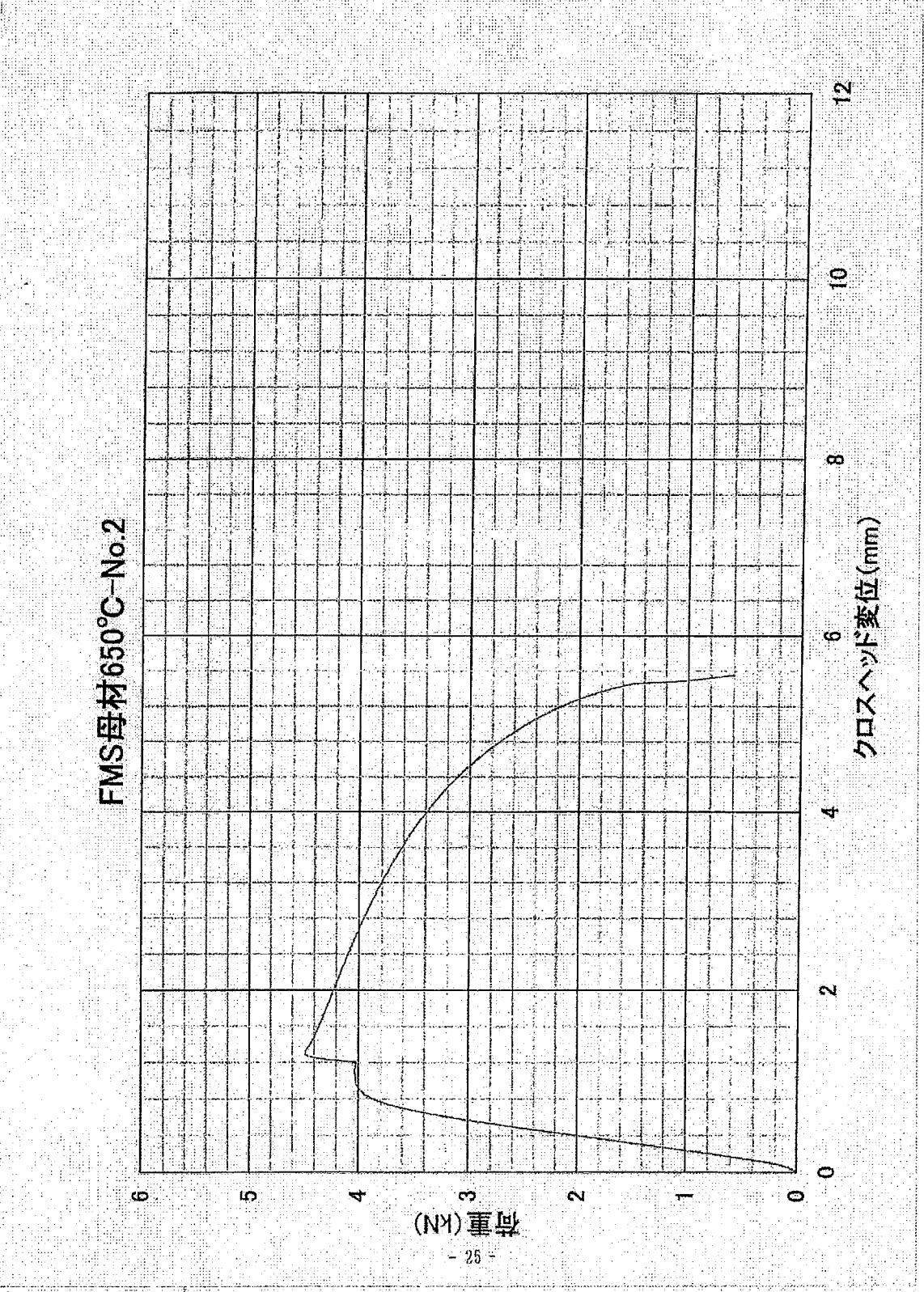


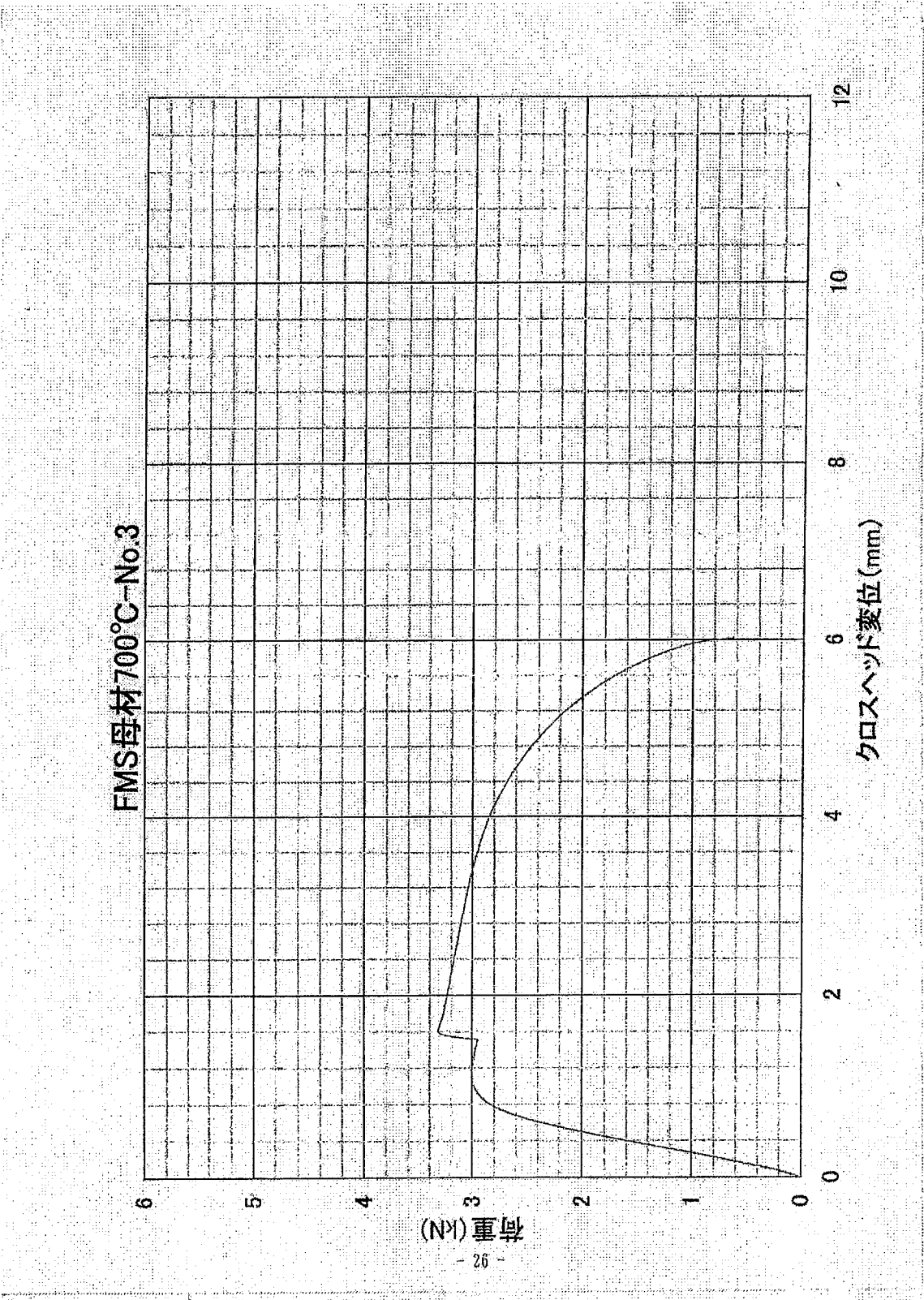


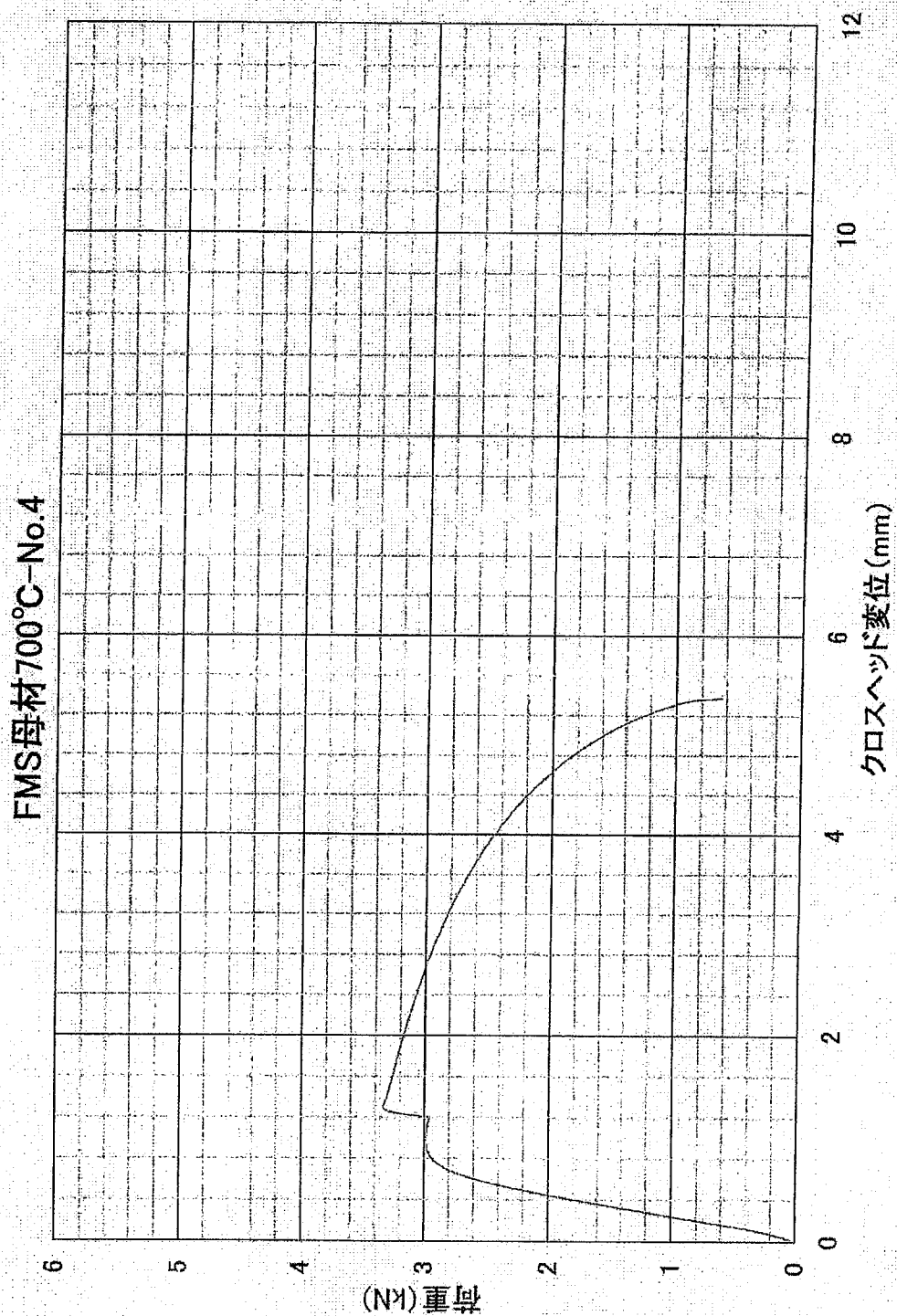


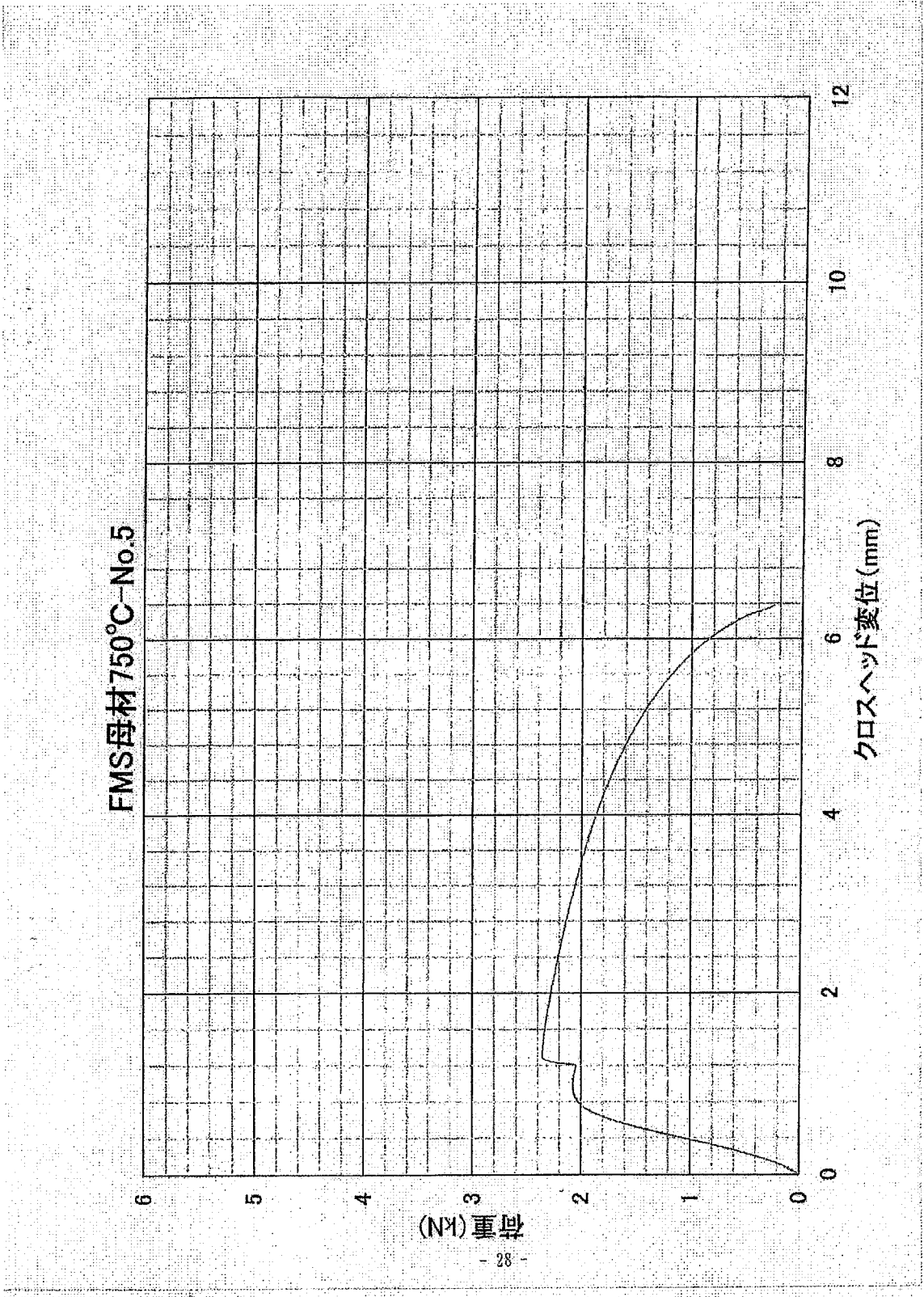
- 23 -

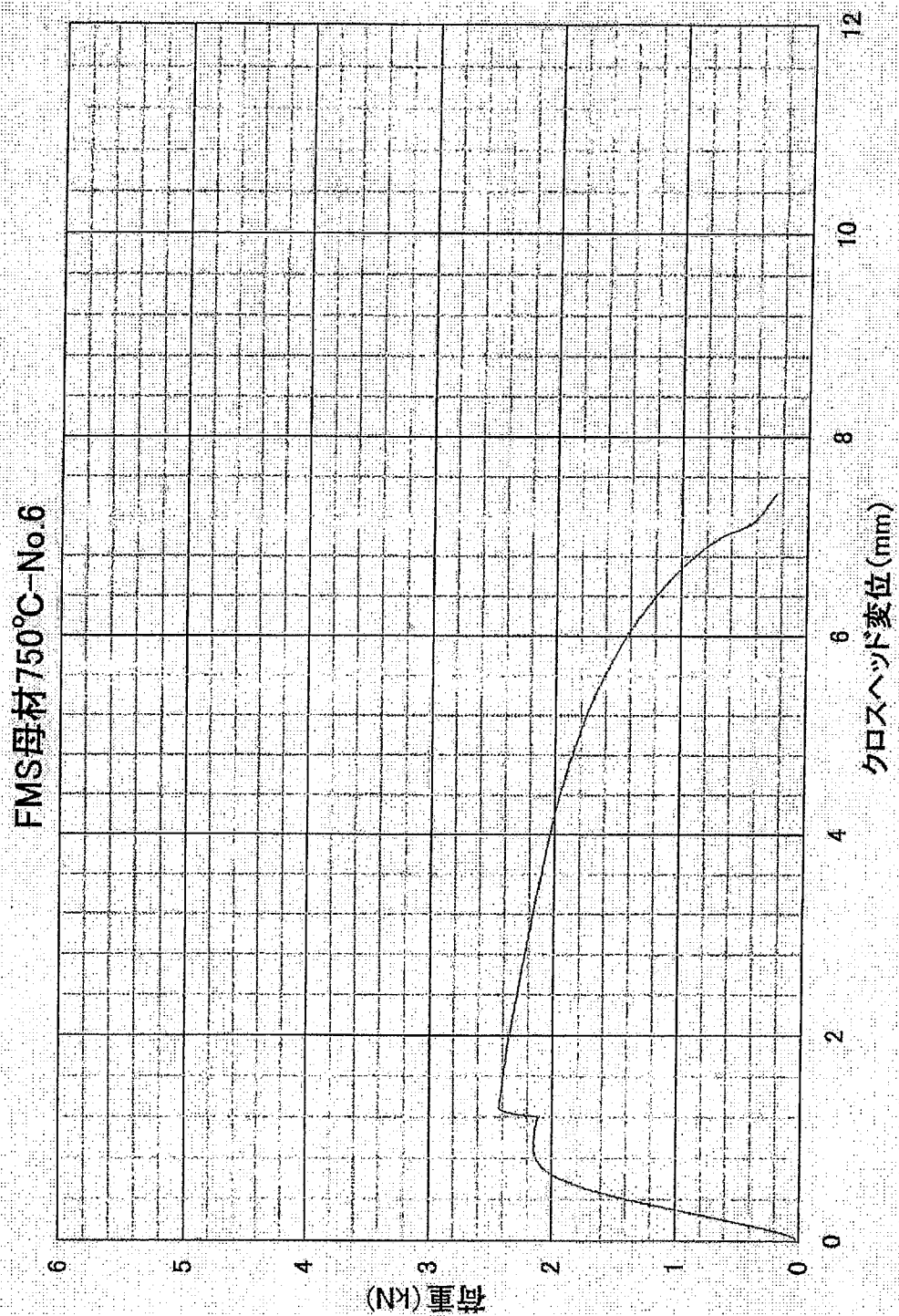












添付資料 3

J_{IC} 試験結果

付表 1～3 $J-\Delta a$ データ

付図 1～18 荷重-開口変位曲線, $J-\Delta a$ 線図

付表1 J, Δaデータ

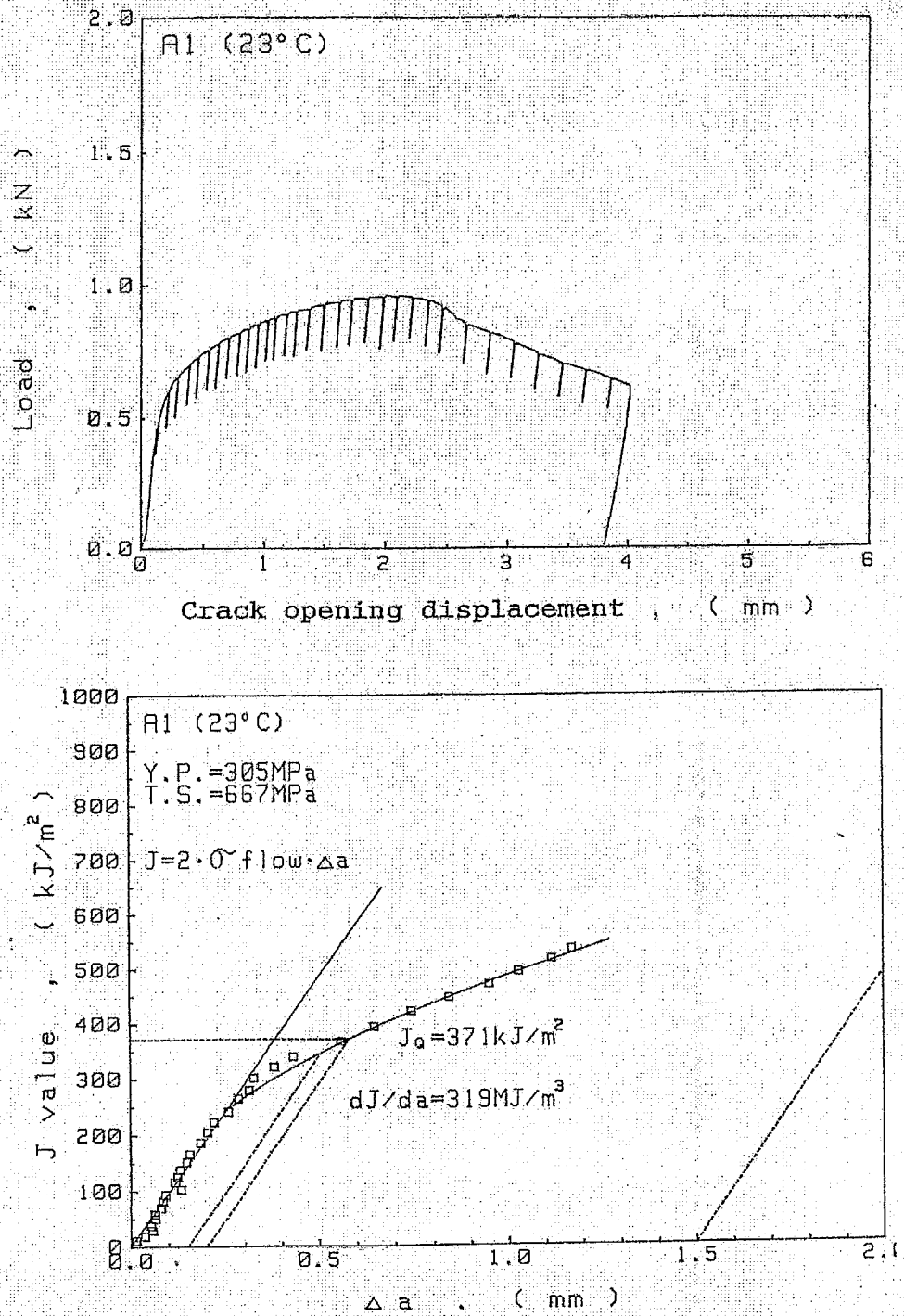
IP No. A1			IP No. A2			IP No. A3			IP No. A4			IP No. A5			IP No. A6		
J	Δa		J	Δa		J	Δa		J	Δa		J	Δa		J	Δa	
kN/m	mm		kN/m	mm		kN/m	mm		kN/m	mm		kN/m	mm		kN/m	mm	
4.02	0.01		20.82	0.02		30.71	0.05		31.58	0.10		29.89	0.09		30.55	0.12	
10.58	0.02		35.22	0.04		50.59	0.07		51.21	0.12		50.00	0.11		51.76	0.03	
18.60	0.04		53.17	0.05		72.78	0.12		75.19	0.13		73.14	0.09		75.32	0.17	
28.71	0.06		69.49	0.08		93.31	0.15		96.86	0.20		95.93	0.11		99.74	0.14	
37.09	0.05		87.51	0.09		117.79	0.17		122.16	0.12		121.43	0.18		124.62	0.17	
49.41	0.07		106.71	0.12		142.25	0.19		146.57	0.17		143.09	0.22		150.77	0.16	
57.77	0.06		123.39	0.12		167.05	0.26		170.65	0.21		168.02	0.30		177.73	0.20	
68.95	0.08		143.15	0.14		190.71	0.28		197.36	0.28		193.92	0.44				
80.84	0.09		162.55	0.15		217.09	0.41		224.88	0.30		214.05	0.48				
92.53	0.09		197.84	0.19		250.34	0.61		266.21	0.41		248.57	0.72				
102.26	0.13		232.12	0.23		287.17	0.89		307.27	0.53		281.54	0.84				
115.13	0.12		265.95	0.27		321.63	0.93		346.22	0.66		312.76	1.03				
124.87	0.12		301.18	0.34		355.78	0.99		384.17	0.79		338.36	1.20				
137.00	0.13		334.96	0.41		387.16	1.10		421.66	0.93		359.94	1.39				
150.81	0.15		364.31	0.53		416.79	1.22		454.01	1.05		382.24	1.50				
165.27	0.16		397.18	0.66		446.63	1.29		488.36	1.15		400.58	1.64				
185.33	0.19		423.72	0.77		472.40	1.44		517.76	1.20		417.78	1.84				
204.25	0.20		450.81	0.91		499.68	1.49		551.19	1.32		432.70	1.95				
221.52	0.22		474.52	1.06		521.57	1.66		582.07	1.37							
240.26	0.26		497.01	1.19		545.06	1.71		611.33	1.47							
263.23	0.28		517.72	1.29		564.97	1.87		638.65	1.60							
278.02	0.31		535.14	1.39		582.99	1.97		667.10	1.64							
300.45	0.33																
320.17	0.38																
338.71	0.43																
366.74	0.56																
393.10	0.66																
420.89	0.75																
445.72	0.84																
469.42	0.95																
492.76	1.03																
516.10	1.12																
534.32	1.17																

付表2 J, Δaデータ

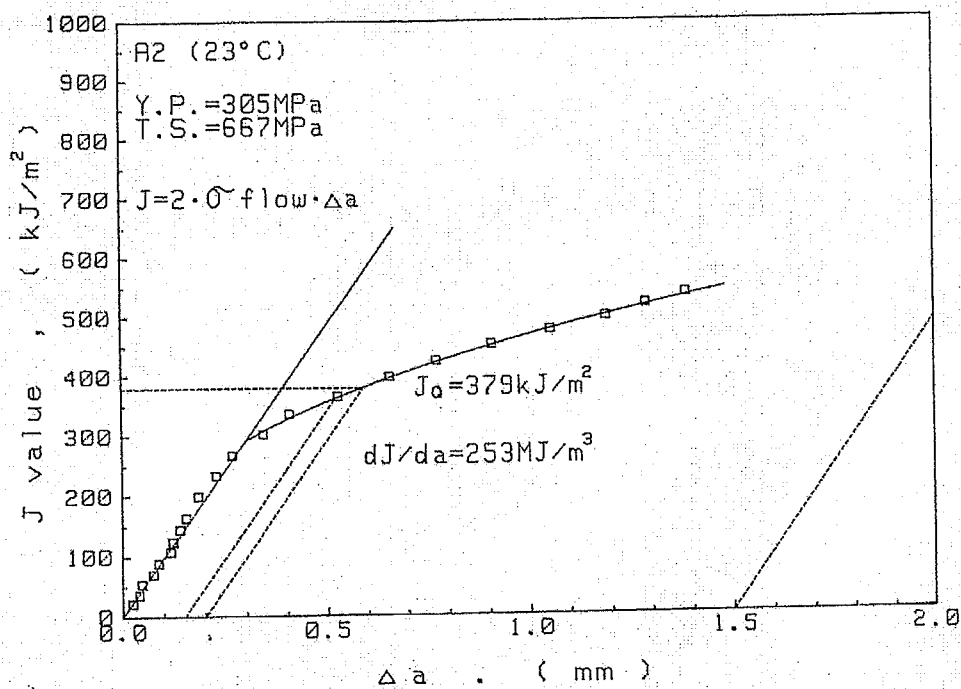
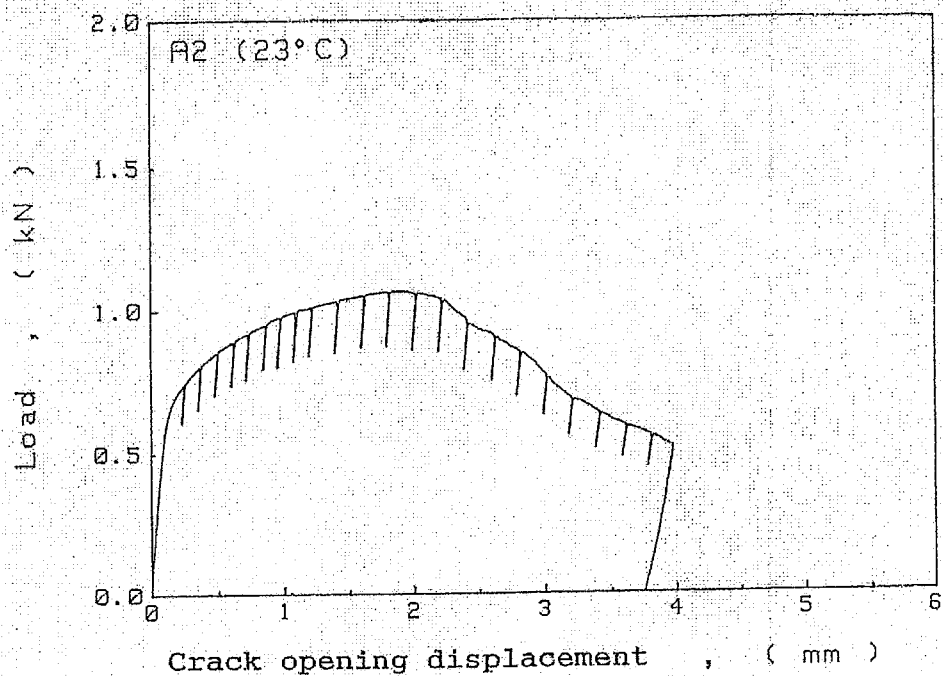
TP No. B1			TP No. B2			TP No. B3			TP No. B4			TP No. B5			TP No. B6		
J	Δa		J	Δa		J	Δa		J	Δa		J	Δa		J	Δa	
kN/m	mm		kN/m	mm		kN/m	mm		kN/m	mm		kN/m	mm		kN/m	mm	
20.80	-0.02		22.64	0.10		34.34	-0.10		31.06	0.12		39.68	0.17		32.71	0.08	
34.68	0.06		39.93	0.13		60.56	0.17		53.40	0.10		69.35	0.23		54.36	0.15	
50.39	0.04		55.93	0.13		83.75	0.19		74.81	0.00		97.31	0.21		79.84	0.16	
67.80	0.07		76.30	0.16		111.48	0.20		97.22	0.18		128.95	0.23		104.52	0.16	
84.04	0.09		94.46	0.16		140.05	0.23		120.17	0.21		160.72	0.22		128.60	0.23	
100.40	0.09		117.51	0.17		168.76	0.23		146.16	0.22		189.43	0.31		154.59	0.22	
118.11	0.14		139.54	0.18		198.56	0.29		171.11	0.24		219.82	0.36		181.39	0.30	
134.79	0.16		160.56	0.22		225.53	0.28		194.27	0.31		252.29	0.34		204.63	0.43	
155.96	0.19		180.51	0.22		258.29	0.32		220.85	0.34		282.06	0.47		226.29	0.53	
186.67	0.23		218.96	0.25		304.48	0.39		264.37	0.45		331.64	0.57		263.81	0.68	
220.73	0.32		254.59	0.28		354.10	0.48		303.73	0.60		375.84	0.83		296.41	0.83	
247.11	0.38		294.36	0.31		399.56	0.65		343.49	0.69		414.11	1.00		327.46	0.93	
277.56	0.49		331.42	0.34		443.85	0.73		378.58	0.83		449.56	1.13		356.53	1.13	
307.75	0.59		371.47	0.36		482.75	1.03		414.35	1.01		481.01	1.32		383.11	1.24	
336.85	0.70		415.22	0.40		514.68	1.25		447.16	1.16		511.37	1.43		407.77	1.40	
365.28	0.79		448.96	0.43		543.48	1.37		477.31	1.30		538.21	1.52		431.41	1.49	
391.86	0.89		492.05	0.47		572.33	1.49		505.43	1.44		561.37	1.72		451.53	1.60	
415.79	0.97		532.70	0.50		597.66	1.61		530.29	1.59		584.75	1.80		471.94	1.69	
442.41	1.05		572.51	0.52		624.59	1.69		554.75	1.64		601.54	1.89		490.49	1.78	
464.71	1.12		608.83	0.59		648.49	1.79		577.73	1.79							
489.92	1.22		644.07	0.64		672.58	1.86		598.46	1.86							
510.56	1.31		682.84	0.70		693.82	1.99		618.30	1.95							
			720.46	0.73		711.44	2.02										
			744.06	0.81													
			765.19	0.86													
			786.65	0.92													
			807.82	0.98													
			828.74	1.09													
			847.85	1.12													
			861.29	1.17													
			883.03	1.22													
			906.22	1.29													
			933.04	1.38													
			961.53	1.46													

付表3 J, Δaデータ

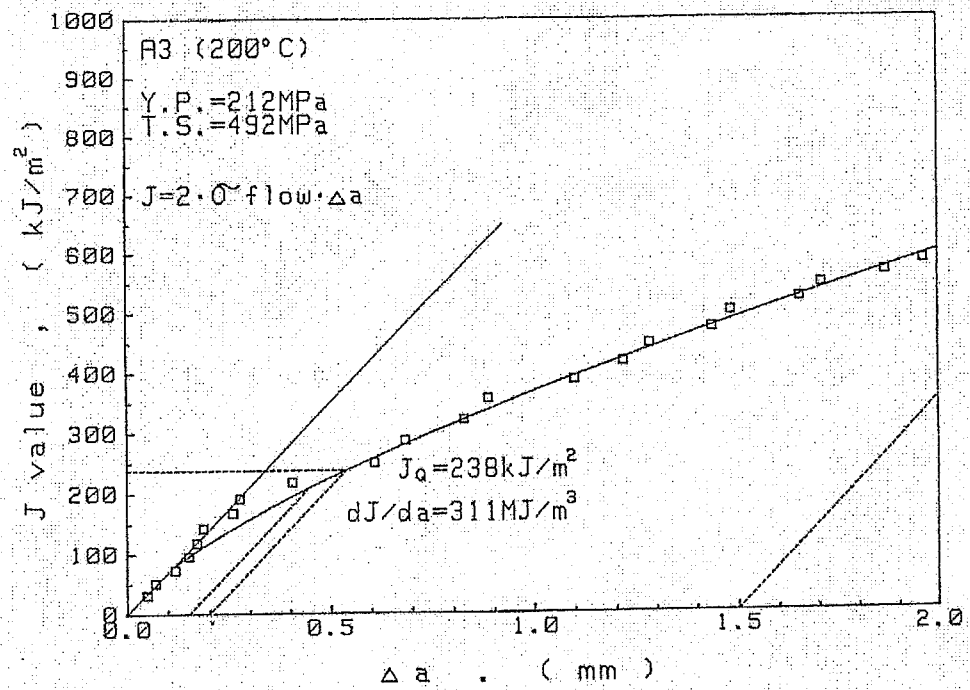
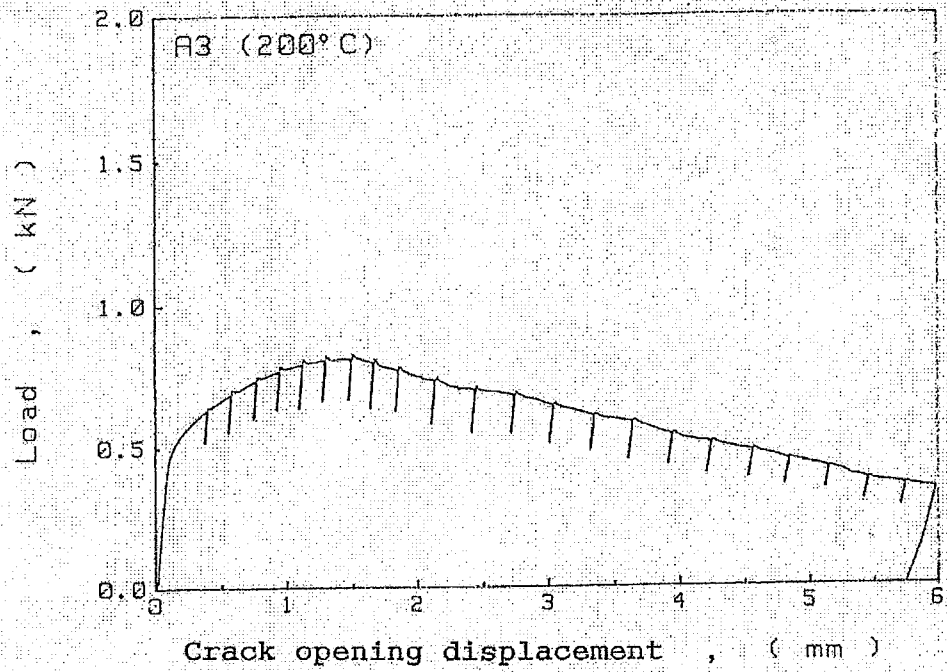
JP No. C1			JP No. C2			JP No. C3			JP No. C4			JP No. C5			JP No. C6		
J	Δa		J	Δa		J	Δa		J	Δa		J	Δa		J	Δa	
kN/m	mm		kN/m	mm		kN/m	mm		kN/m	mm		kN/m	mm		kN/m	mm	
20.53	0.00		39.28	0.05		31.88	0.13		33.17	0.05		30.71	0.23		34.32	-0.01	
34.70	0.03		67.21	0.10		53.67	0.15		55.14	0.12		49.34	0.39		59.16	0.16	
50.44	0.07		94.65	0.12		75.08	0.19		78.22	0.12		73.99	0.18		81.58	0.15	
67.68	0.08		124.62	0.14		98.83	0.17		102.62	0.13		98.33	0.16		104.99	0.15	
86.69	0.10		154.15	0.17		124.50	0.18		128.32	0.15		119.20	0.28		132.67	0.27	
103.67	0.12		185.90	0.19		148.94	0.21		154.97	0.24		143.68	0.28		156.39	0.20	
121.36	0.13		213.25	0.22		176.06	0.24		181.16	0.28		170.51	0.21		184.61	0.29	
139.85	0.15		247.02	0.24		203.66	0.26		208.00	0.27		194.13	0.30		208.87	0.40	
162.49	0.17		277.15	0.28		229.04	0.27		231.62	0.33		221.33	0.39		231.74	0.40	
190.74	0.20		329.17	0.35		269.79	0.37		274.51	0.44		261.75	0.47		270.97	0.55	
224.41	0.25		381.99	0.44		314.09	0.40		314.13	0.57		299.73	0.55		306.82	0.66	
255.38	0.27		431.51	0.51		353.65	0.60		352.92	0.65		339.22	0.73		340.90	0.90	
288.97	0.31		481.59	0.60		392.81	0.70		390.05	0.79		374.87	0.86		372.59	1.01	
322.69	0.35		529.72	0.78		428.16	0.87		426.44	0.93		408.68	0.94		401.61	1.13	
352.01	0.39		575.18	0.96		463.56	1.01		459.33	1.03		442.26	1.10		427.00	1.28	
385.73	0.44		612.33	1.12		494.65	1.13		491.50	1.17		467.58	1.43		451.07	1.41	
420.05	0.49		649.56	1.26		526.00	1.25		521.33	1.30		495.51	1.30		473.46	1.62	
450.13	0.55		684.38	1.38		556.07	1.31		548.54	1.43		518.81	1.57		492.03	1.73	
480.86	0.61		714.89	1.53		585.42	1.40		571.78	1.59		536.95	1.77		510.69	1.80	
508.62	0.68		742.43	1.64		614.59	1.46		596.00	1.66		556.48	1.81		527.78	1.90	
538.45	0.74		770.13	1.75		640.43	1.52		618.12	1.73		574.04	2.04		543.01	1.98	
567.32	0.83		794.06	1.83		668.48	1.58		639.53	1.83		590.28	2.16		557.42	2.11	
590.58	0.91					689.13	1.67								568.68	2.18	
591.40	0.92																
590.98	0.96																
608.77	1.00																
620.01	1.07																
633.77	1.13																
647.32	1.16																
662.01	1.22																
674.01	1.28																
685.35	1.35																
698.50	1.39																
716.61	1.48																
735.20	1.56																
748.48	1.66																



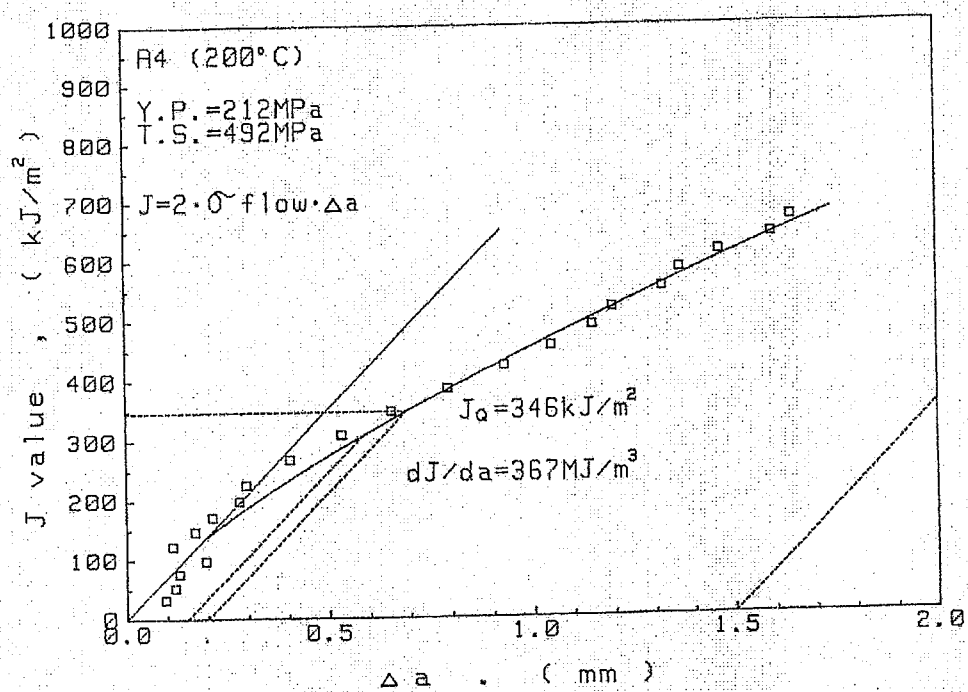
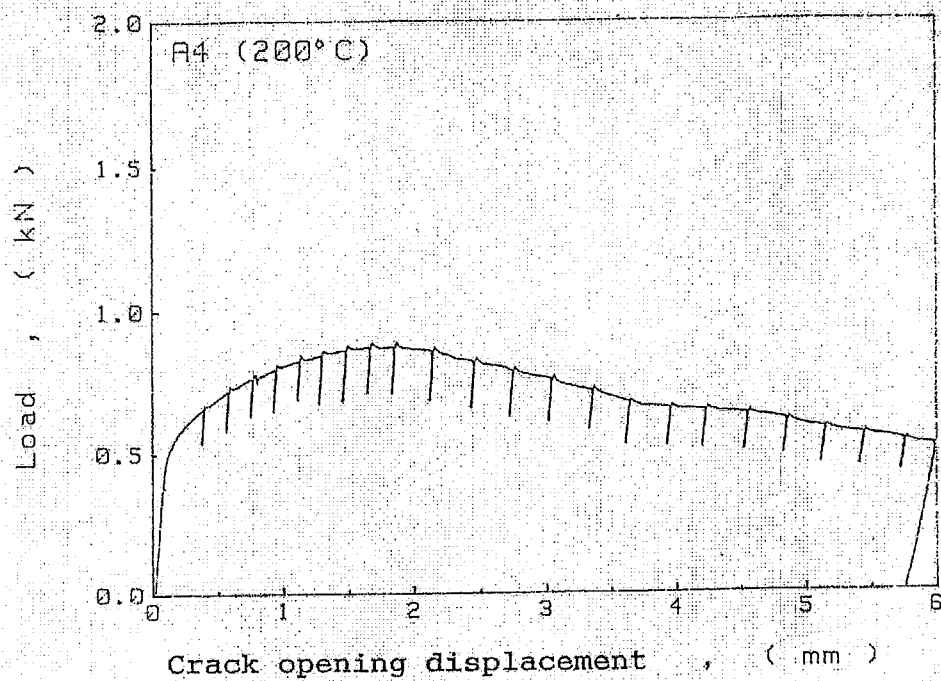
付図 1 J_{IC} 試験結果



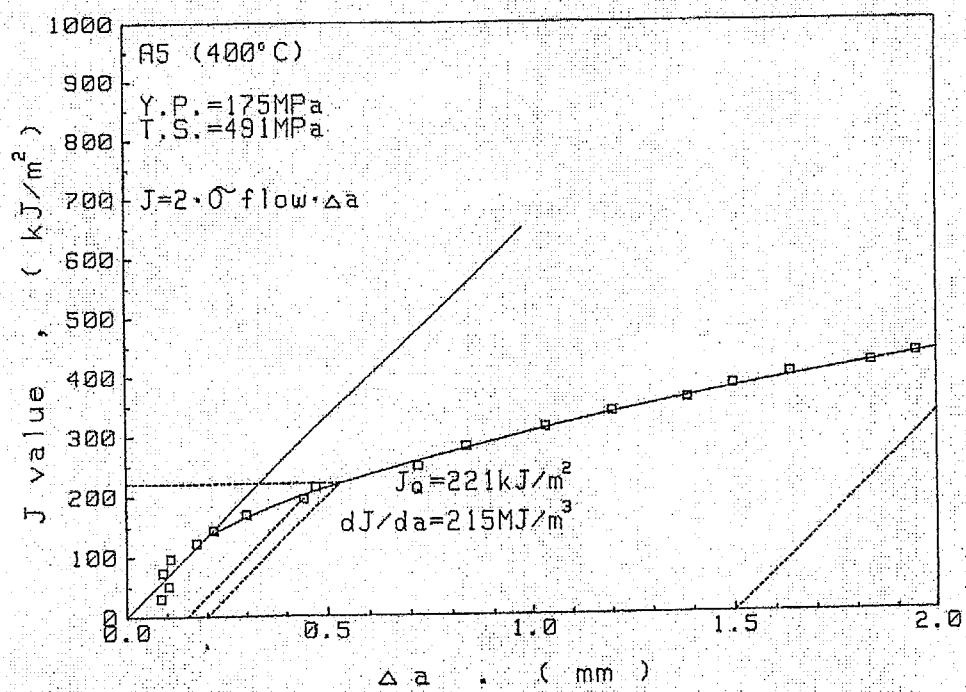
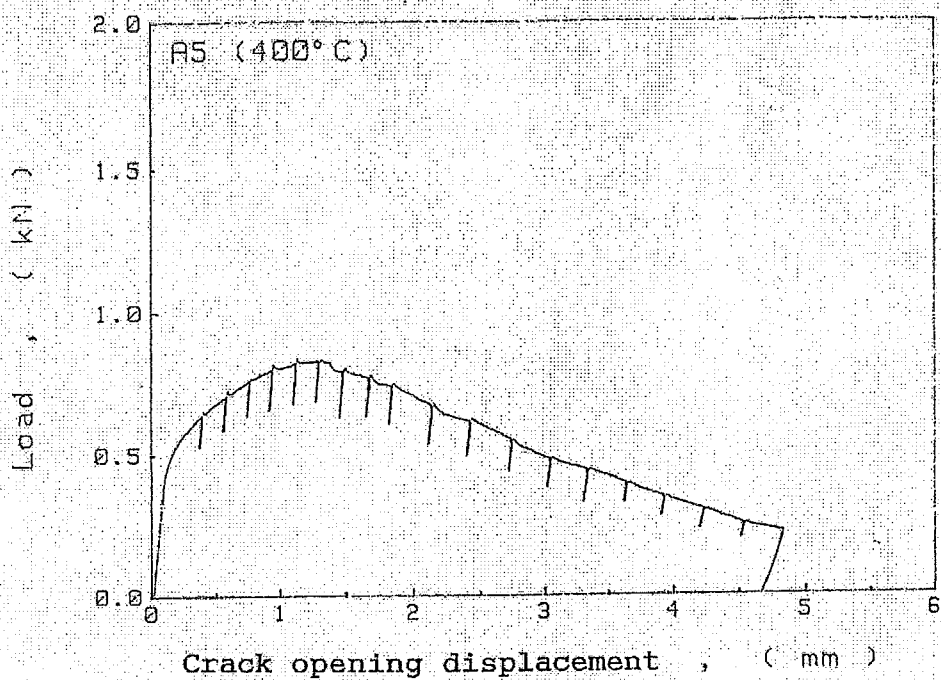
付図 2 J_{IC} 試験結果



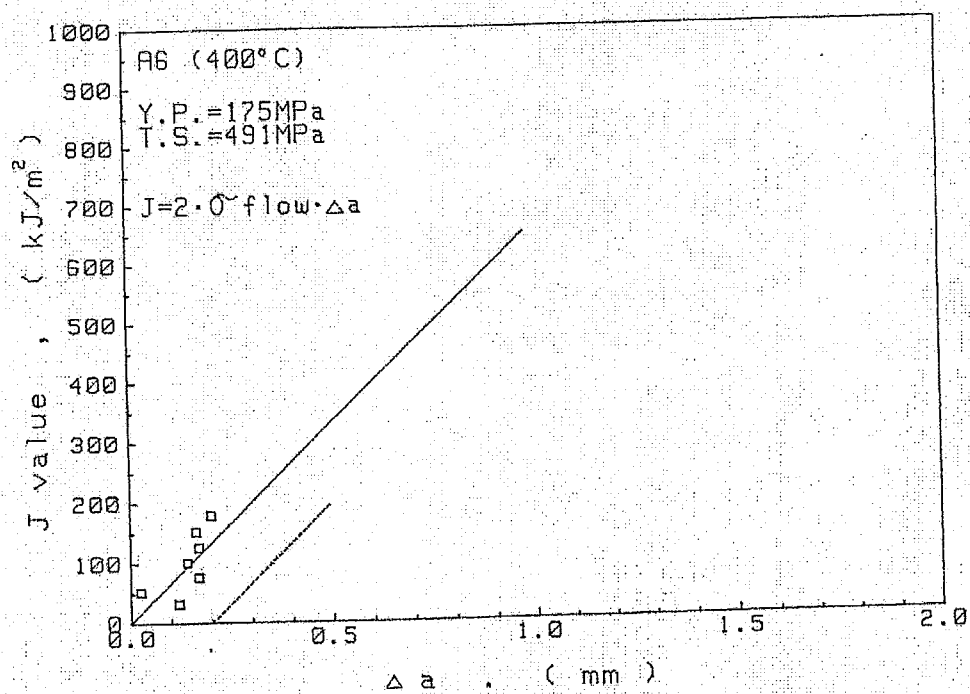
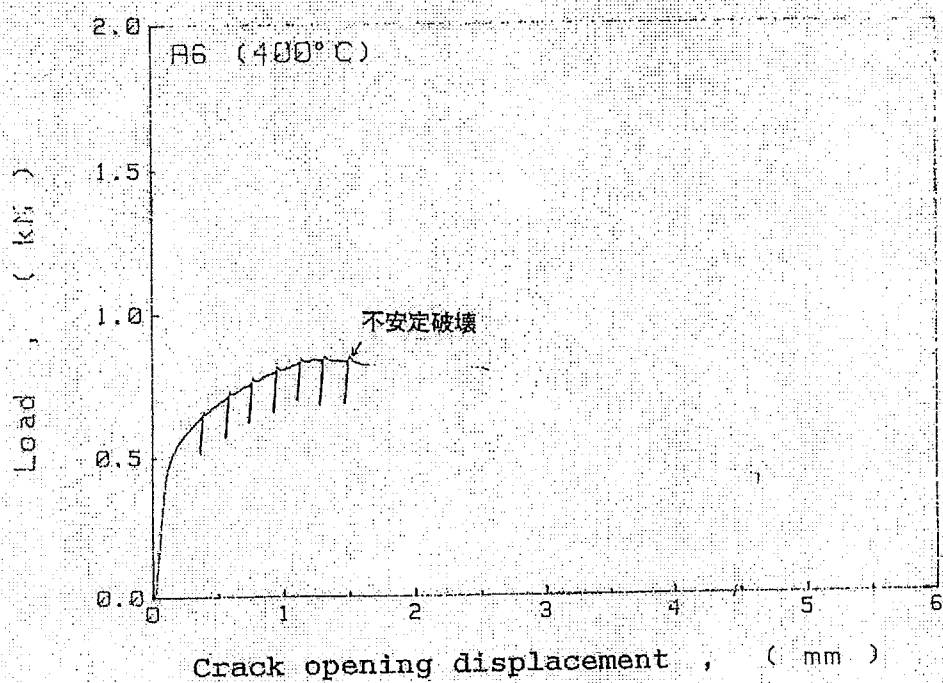
付図 3 J_{IC}試験結果



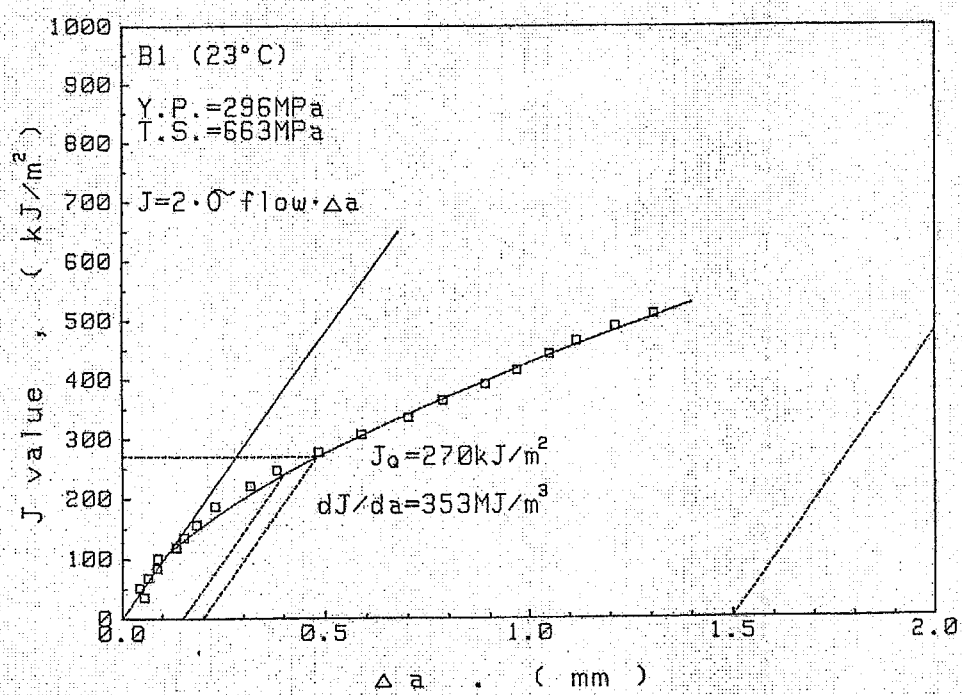
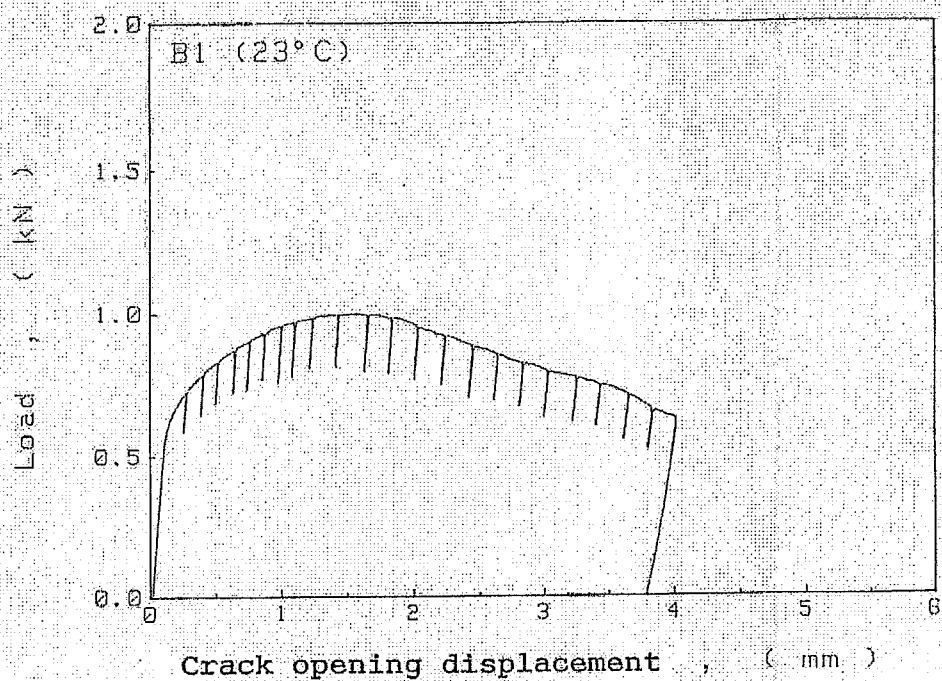
付図 4 J_{IC}試験結果



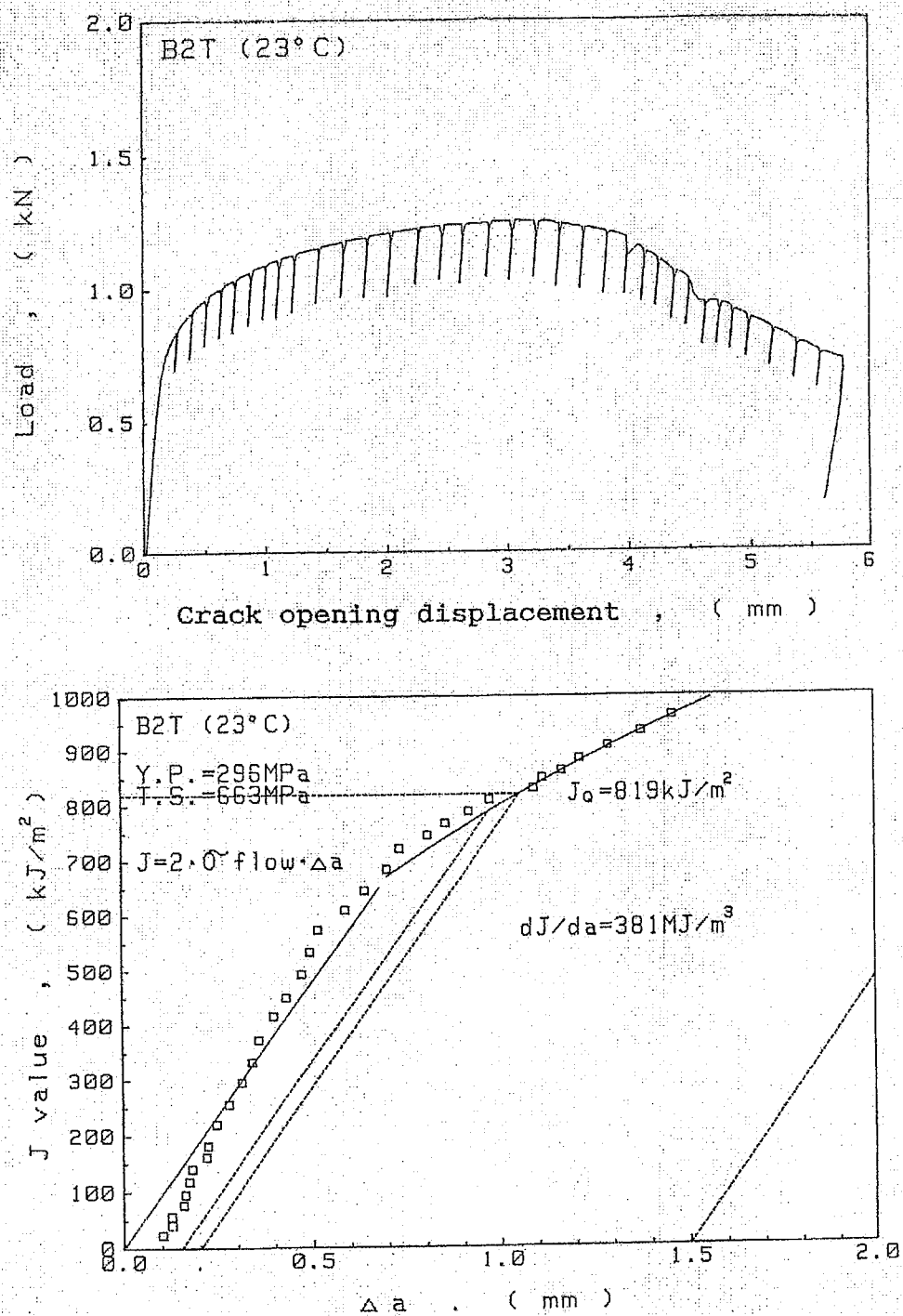
付図 5 J_{IC} 試験結果



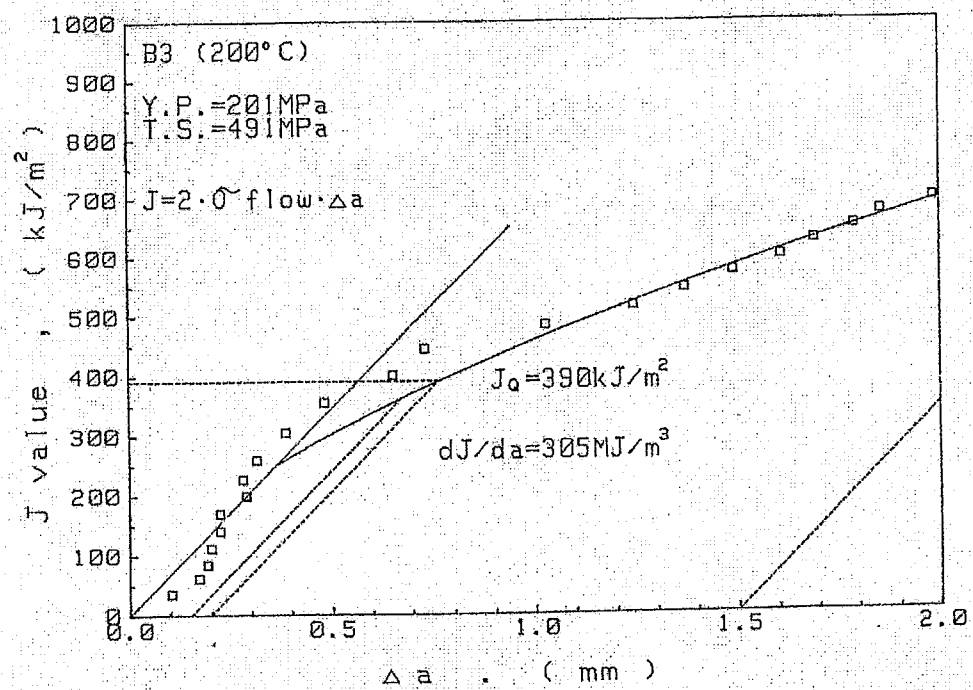
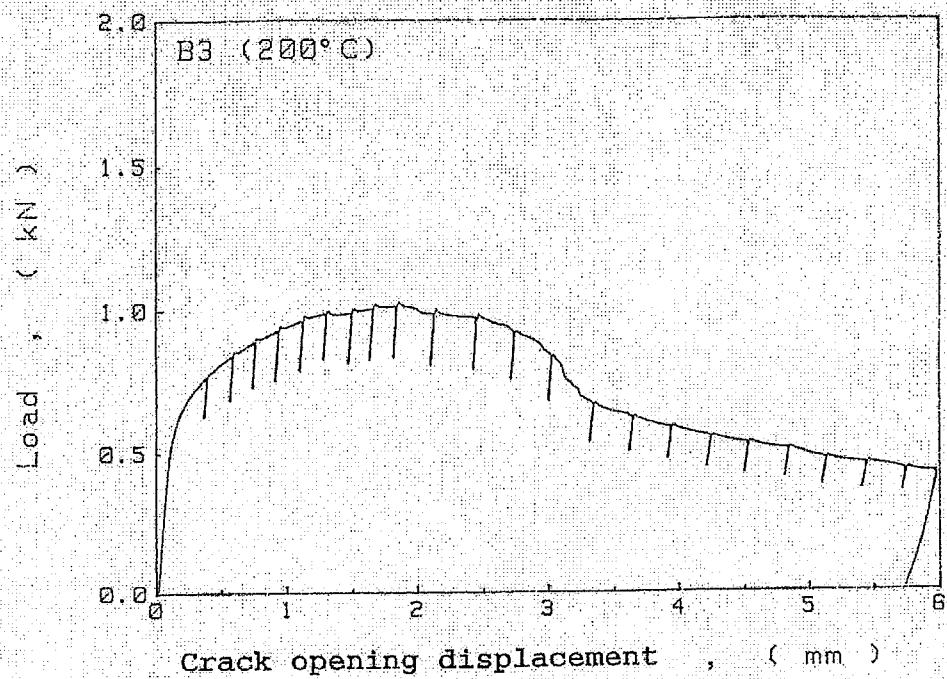
付図 6 J_{IC} 試験結果



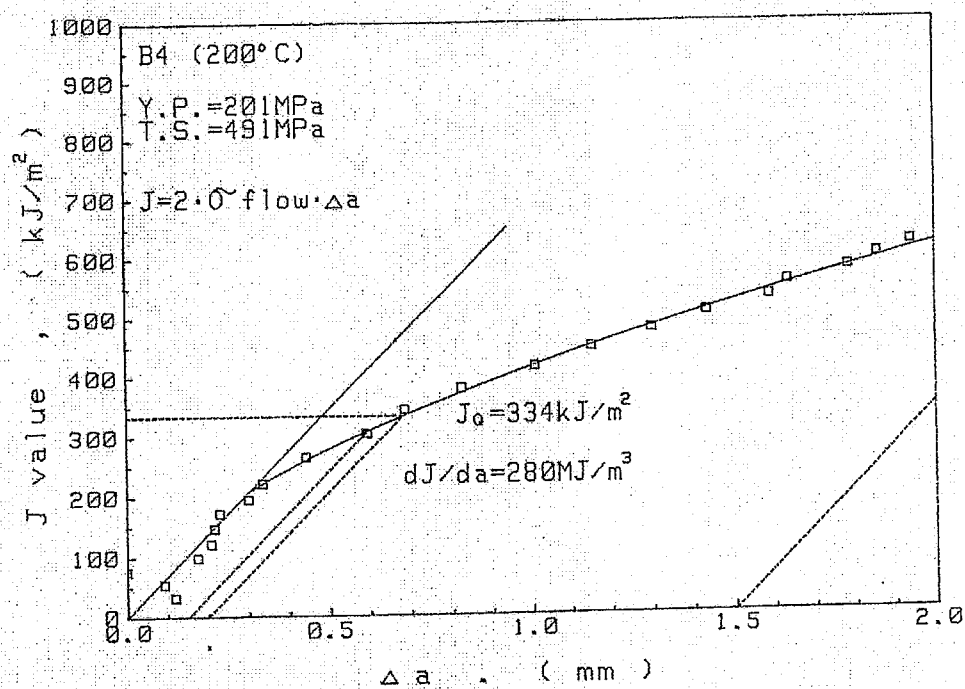
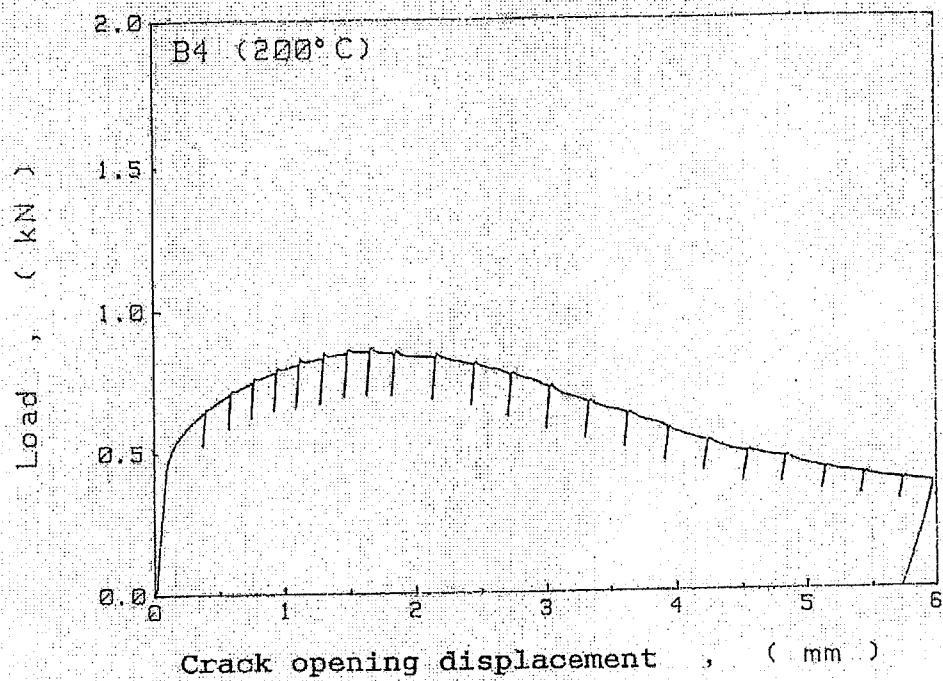
付図 7 J_{IC} 試験結果



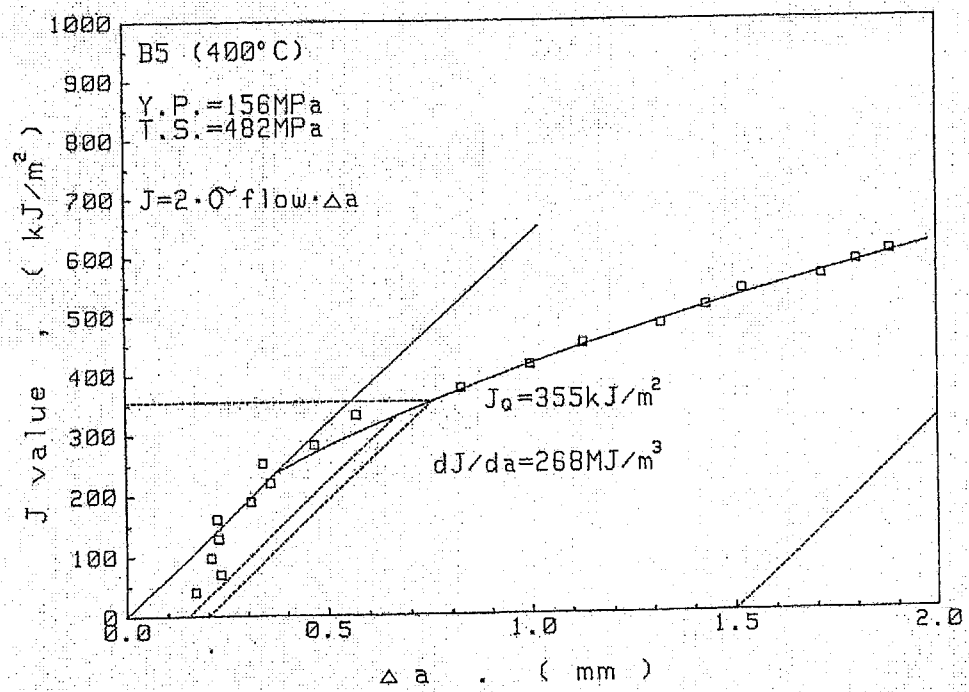
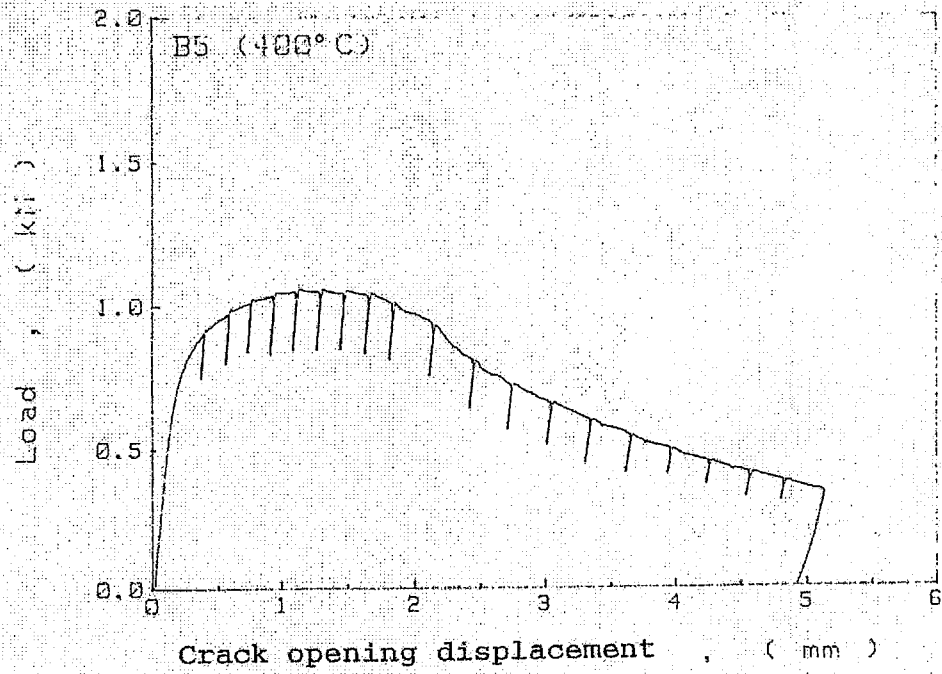
付図 8 J_{IC} 試験結果



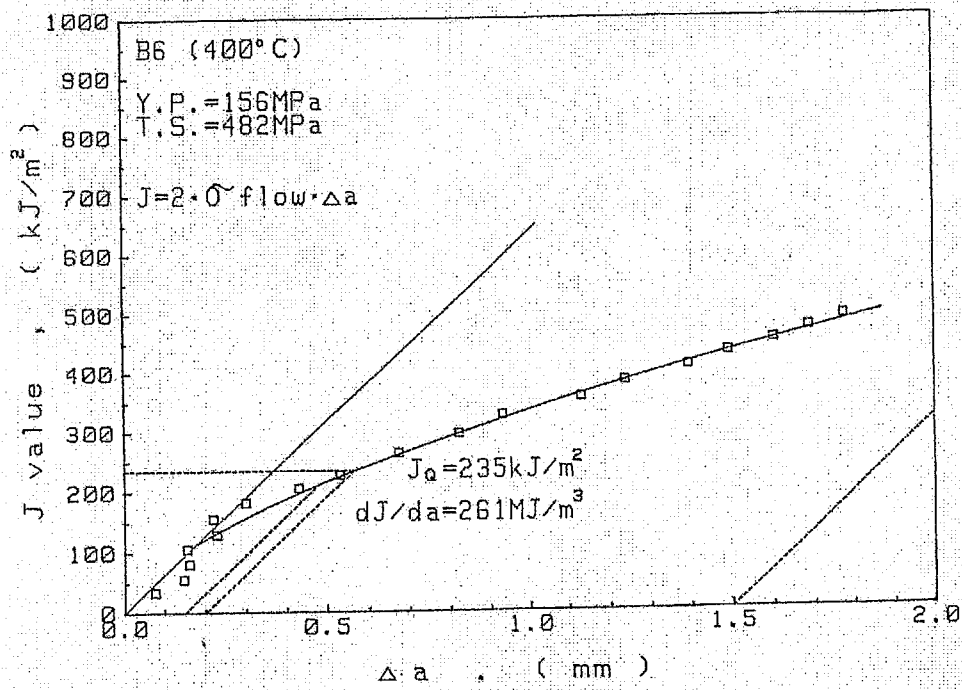
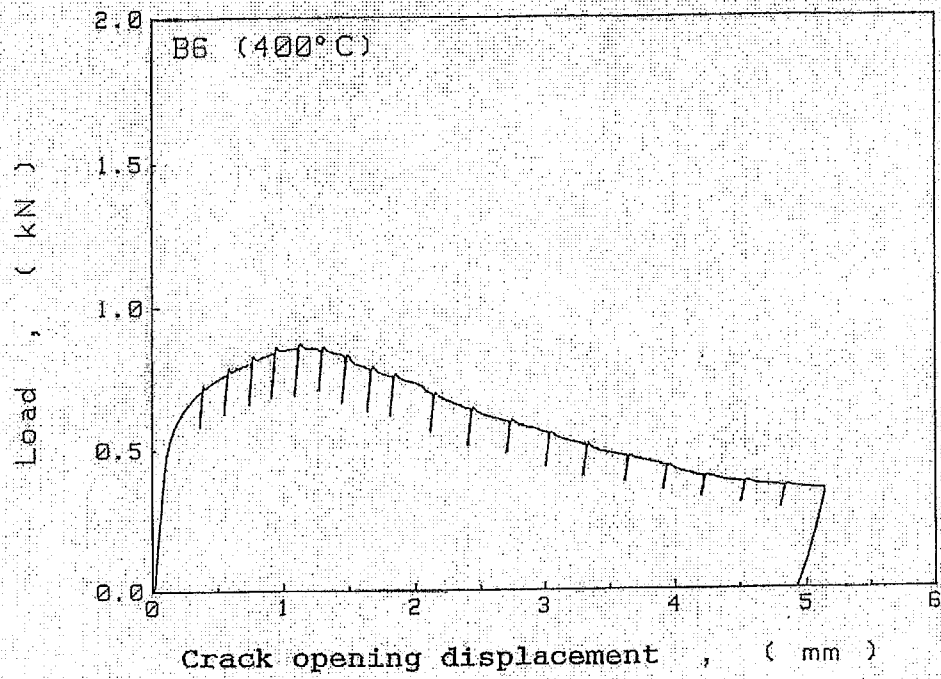
付図 9 J_{IC} 試験結果



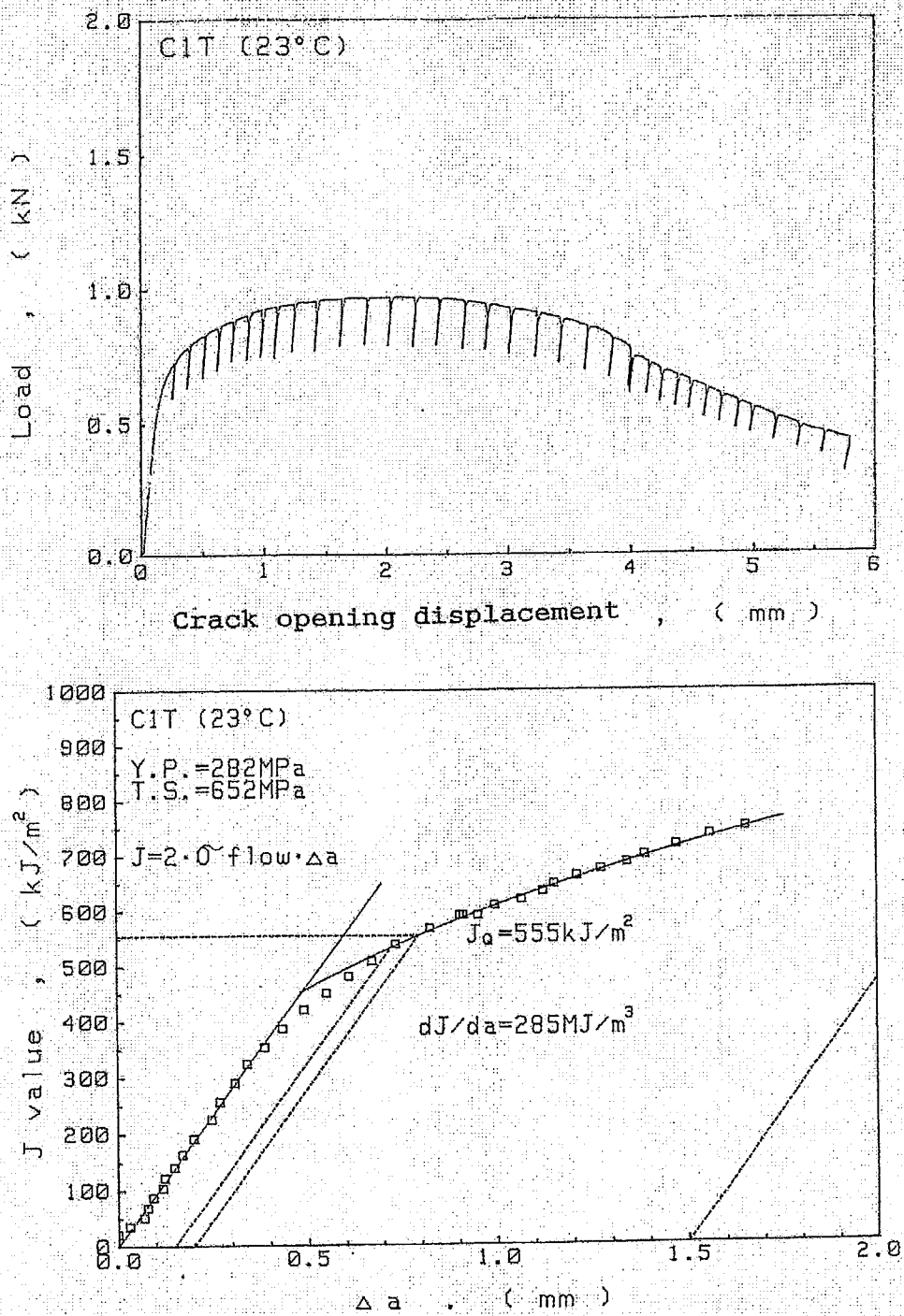
付図10 J_{IC}試験結果



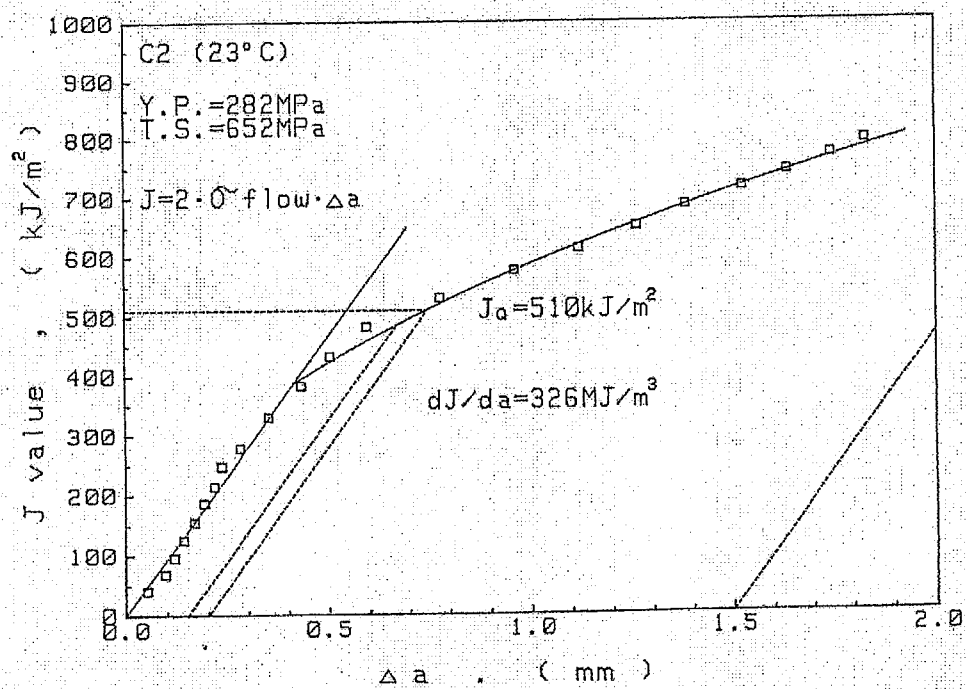
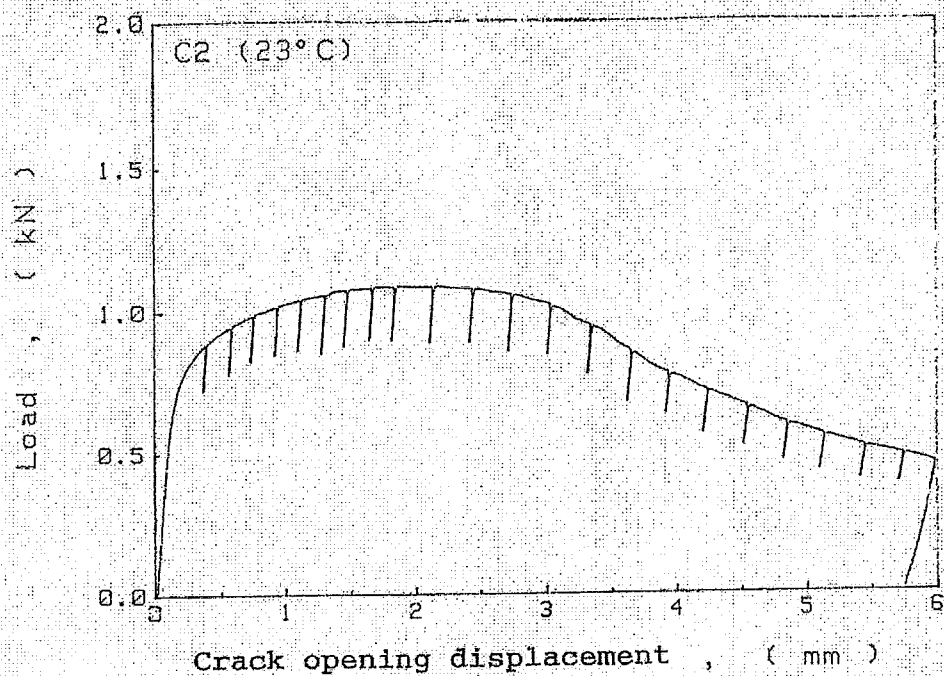
付図11 J_{IC} 試験結果

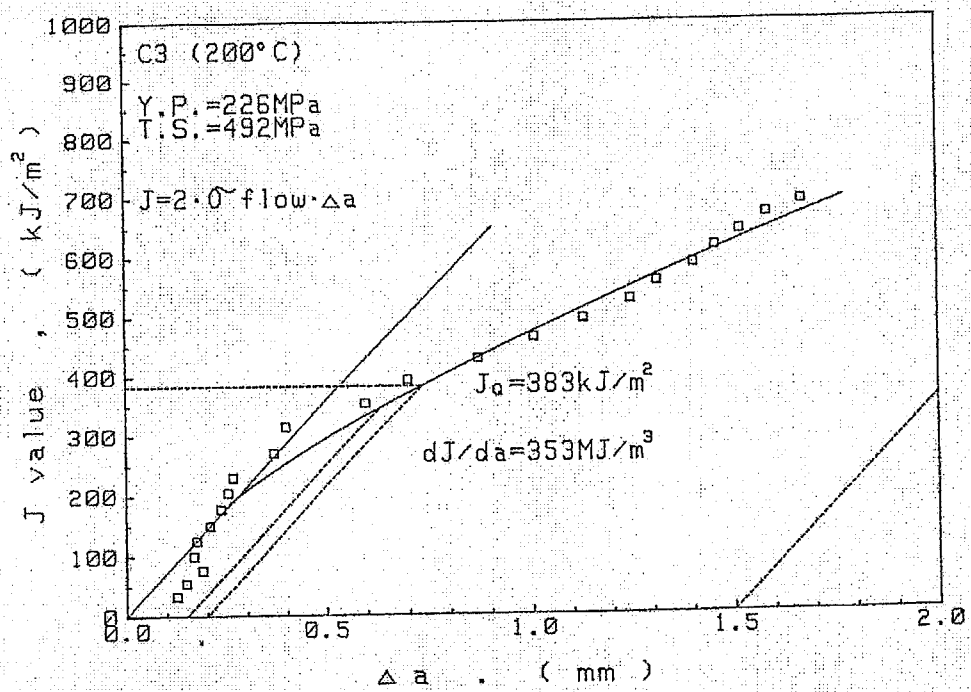
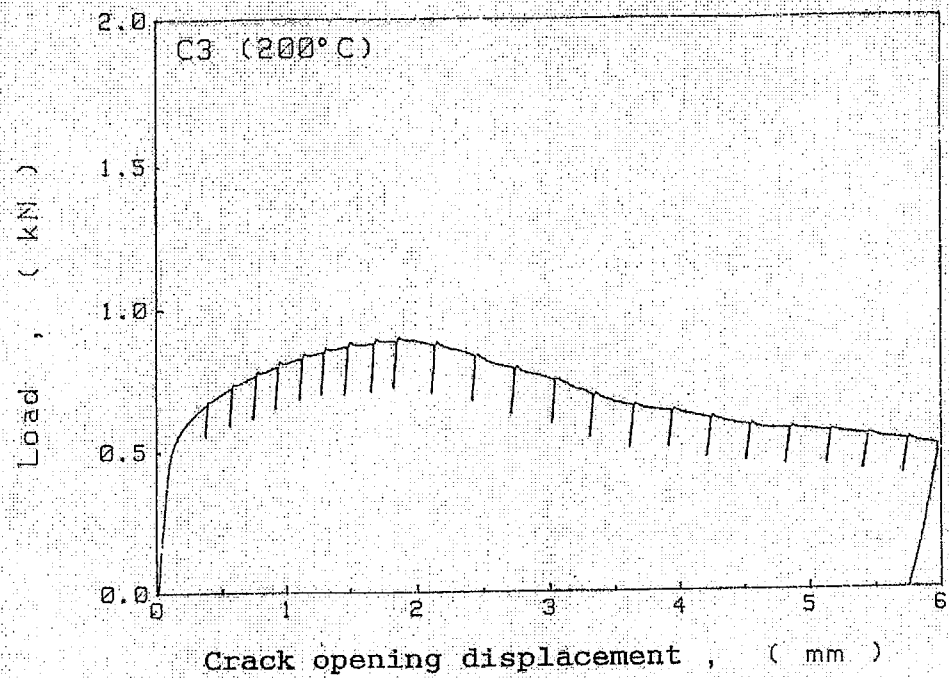


付図 12 J_{IC} 試験結果

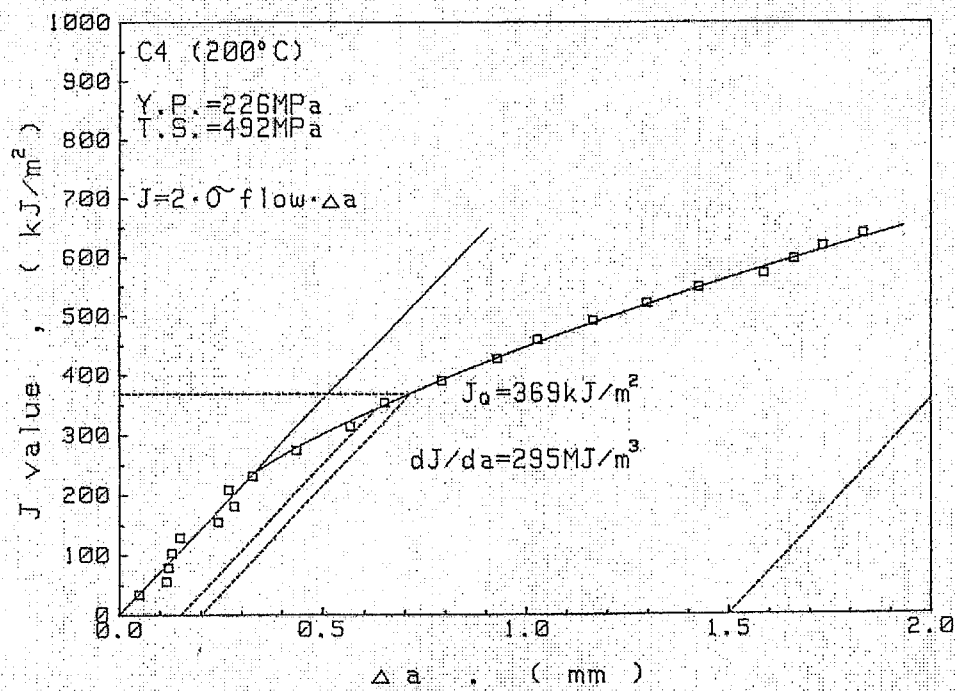
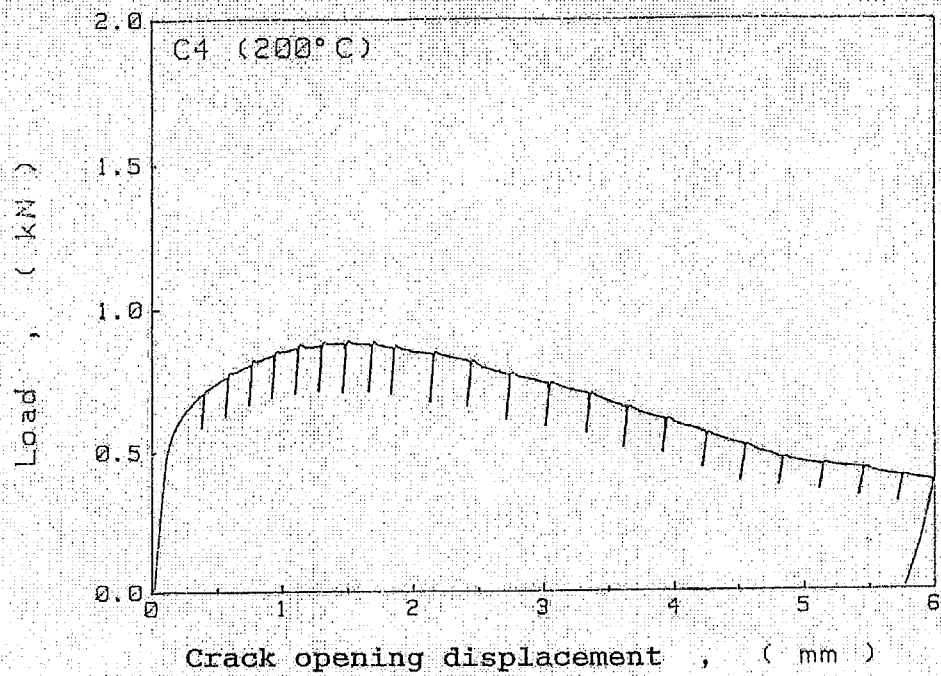


付図 13 J_{IC} 試験結果

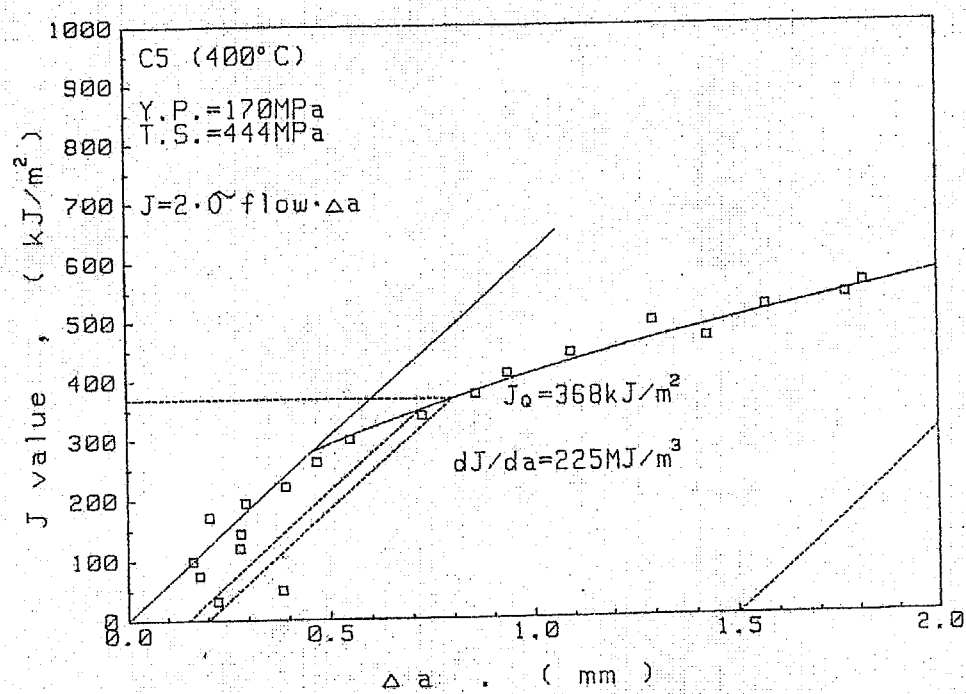
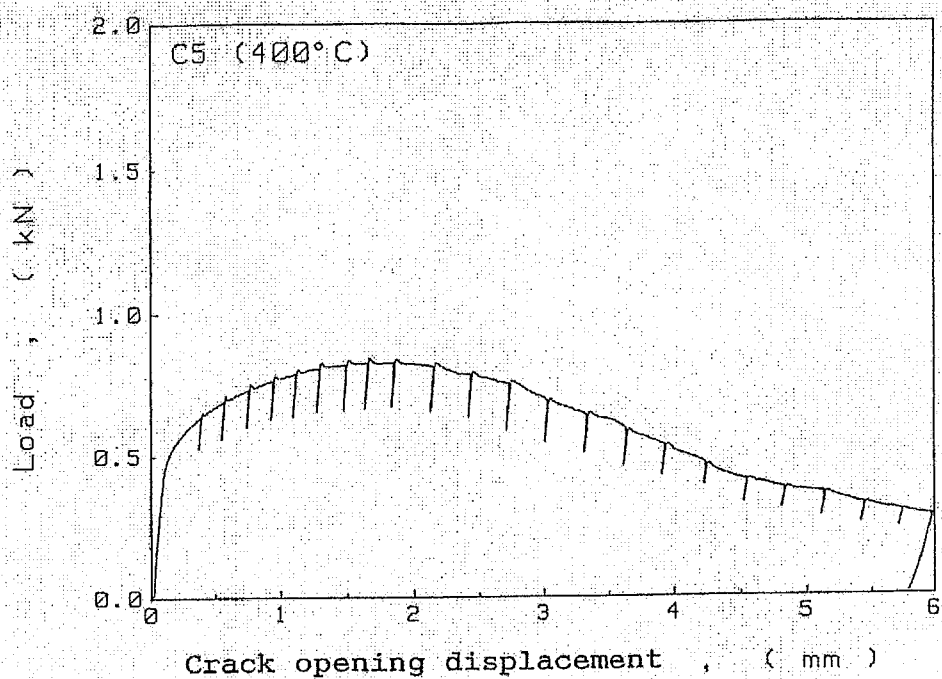
付図14 J_{IC} 試験結果



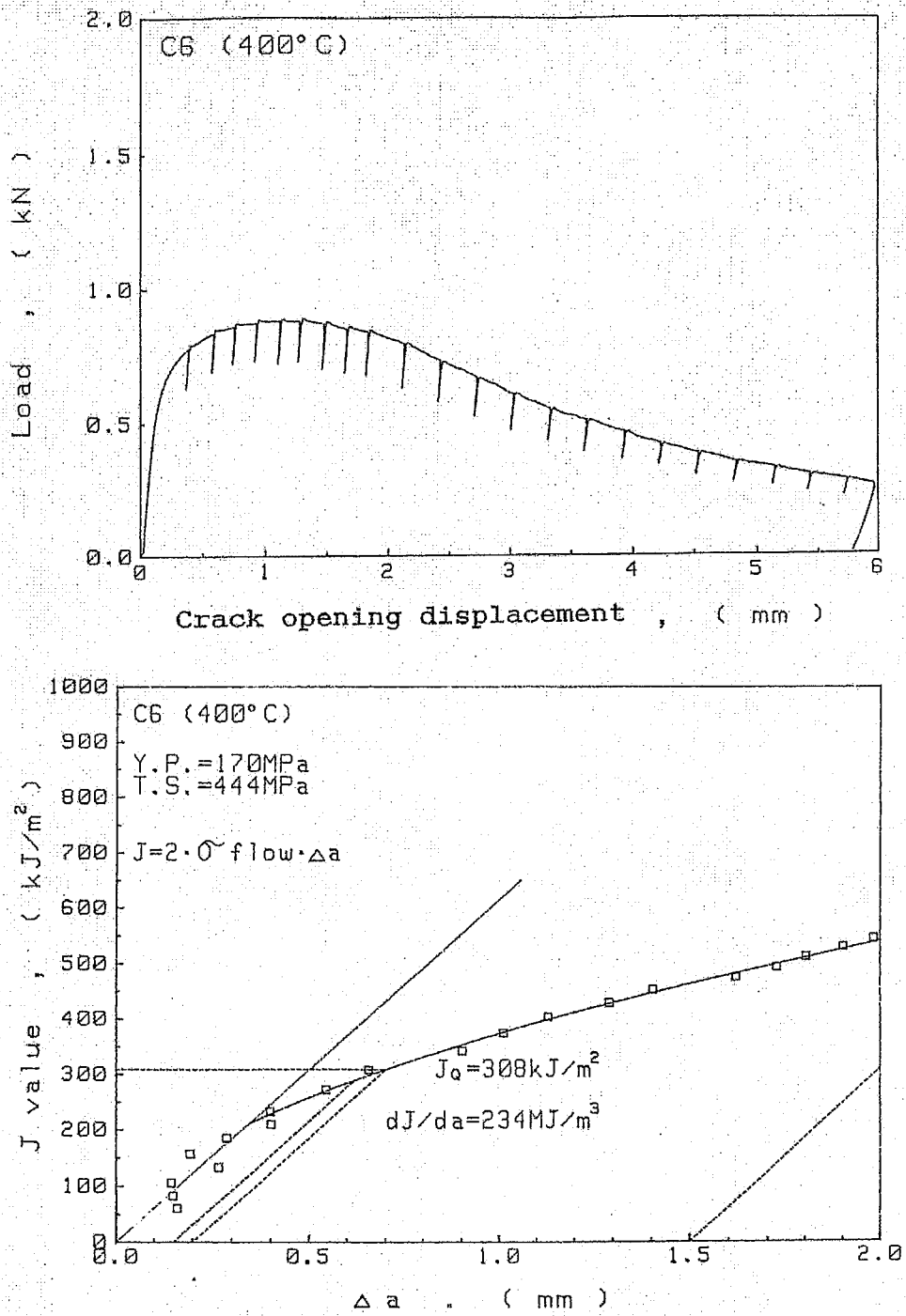
付図 15 J_{IC} 試験結果



付図16 J_{IC}試験結果



付図 17 J_{IC} 試験結果



付圖 18 J_{IC} 試驗結果

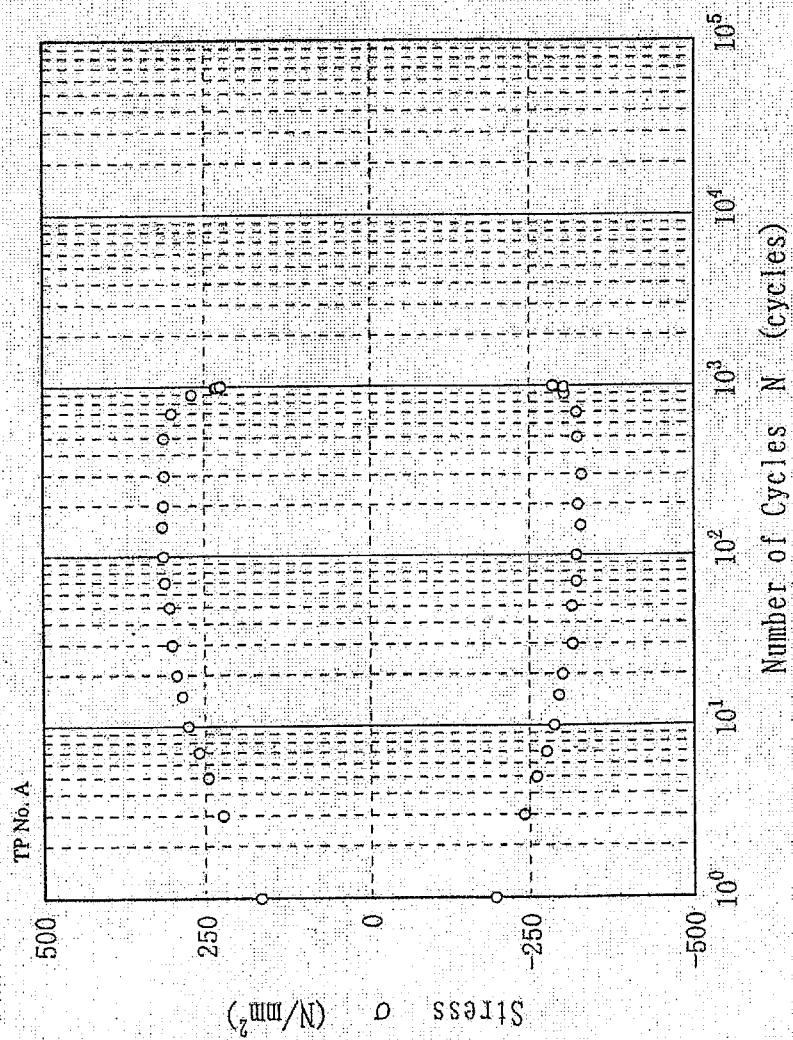
添付資料 4

高温低サイクル疲労試験結果

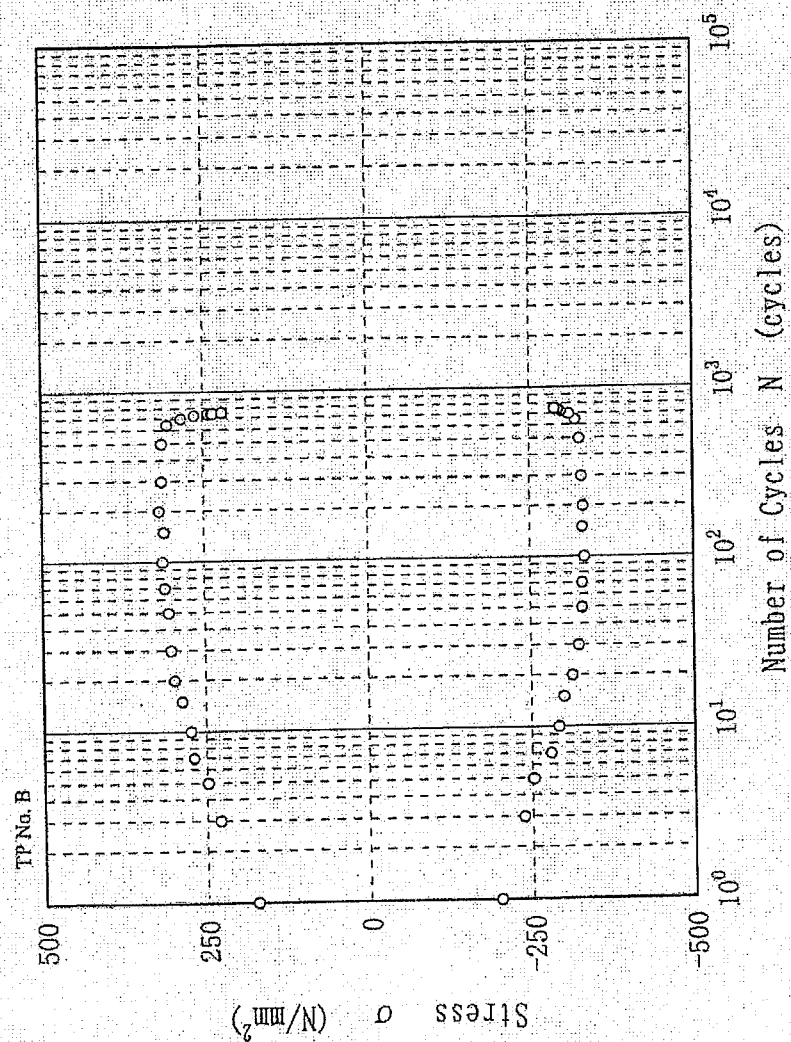
付図 1 応力と繰返し数の関係

付図 2 応力とひずみの関係

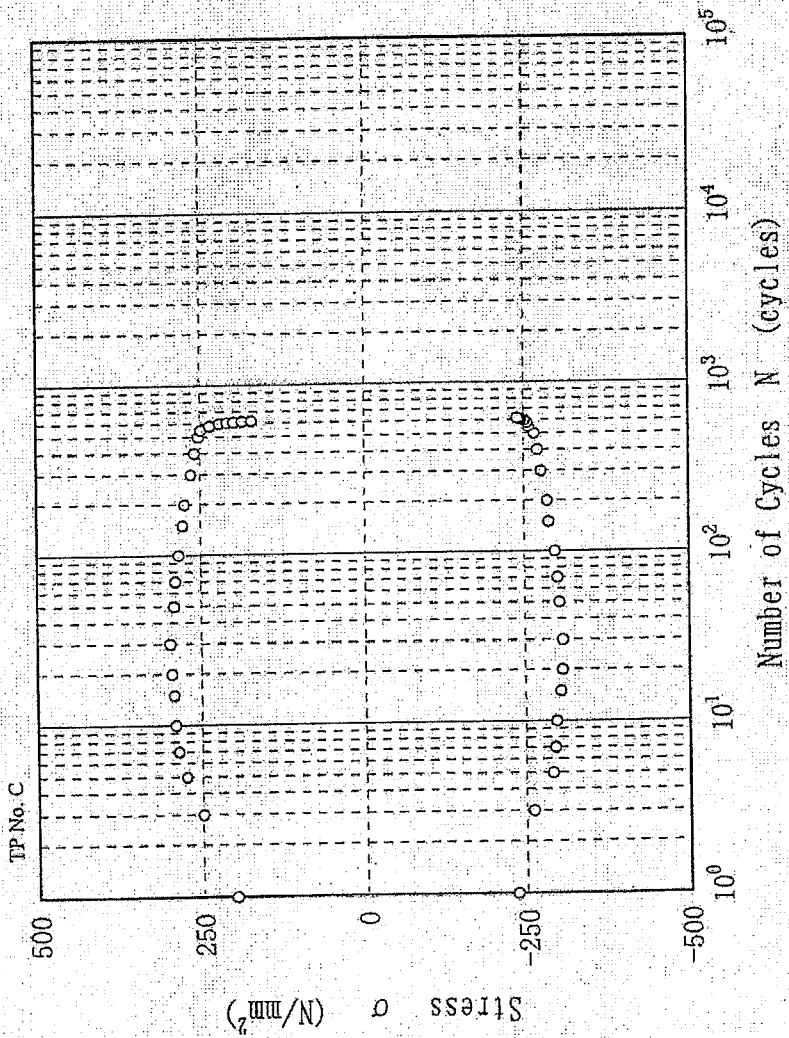
付表 1～3 低サイクル疲労試験データシート



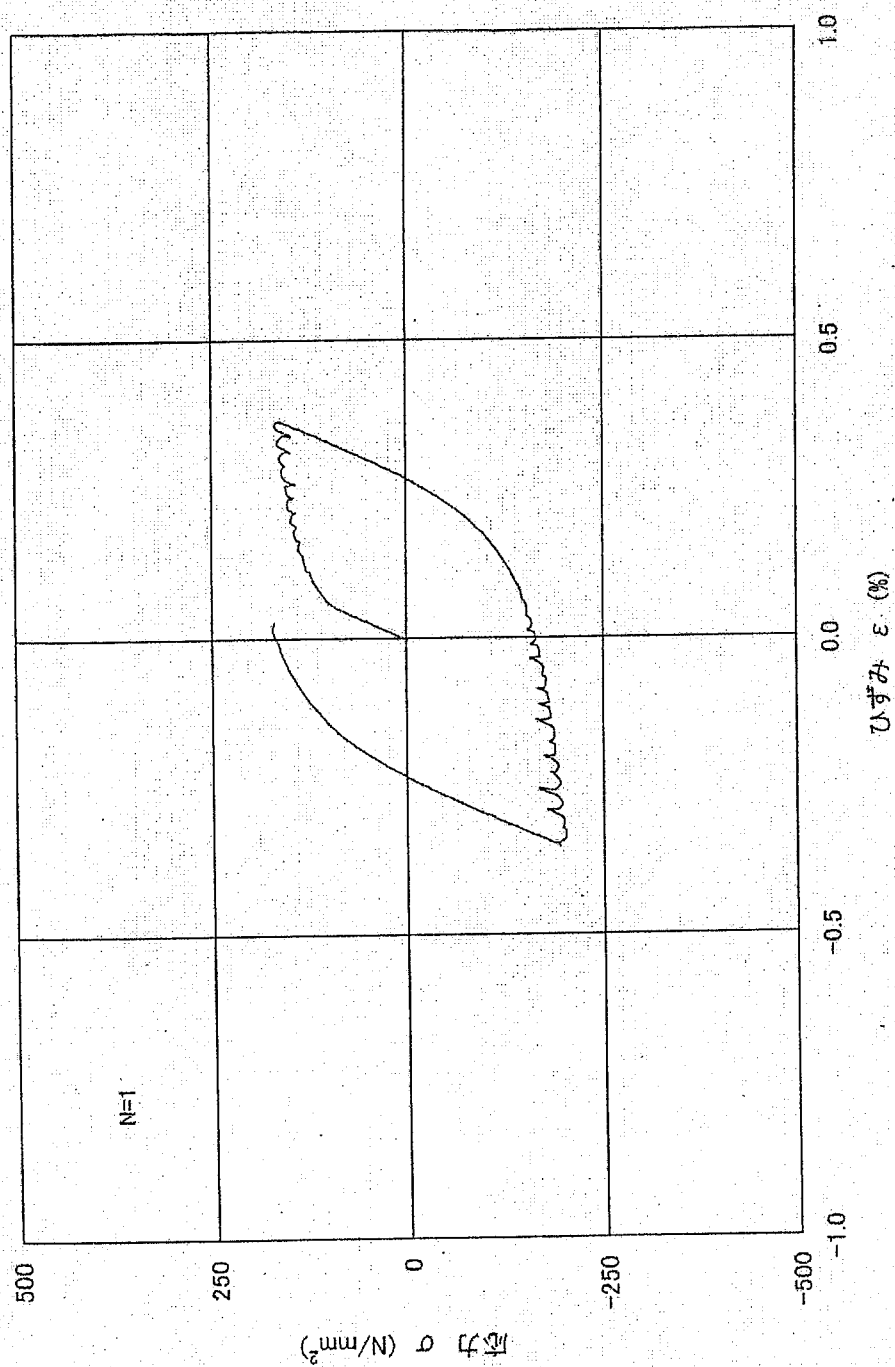
付図1-1 Number of Cycles vs. Stress



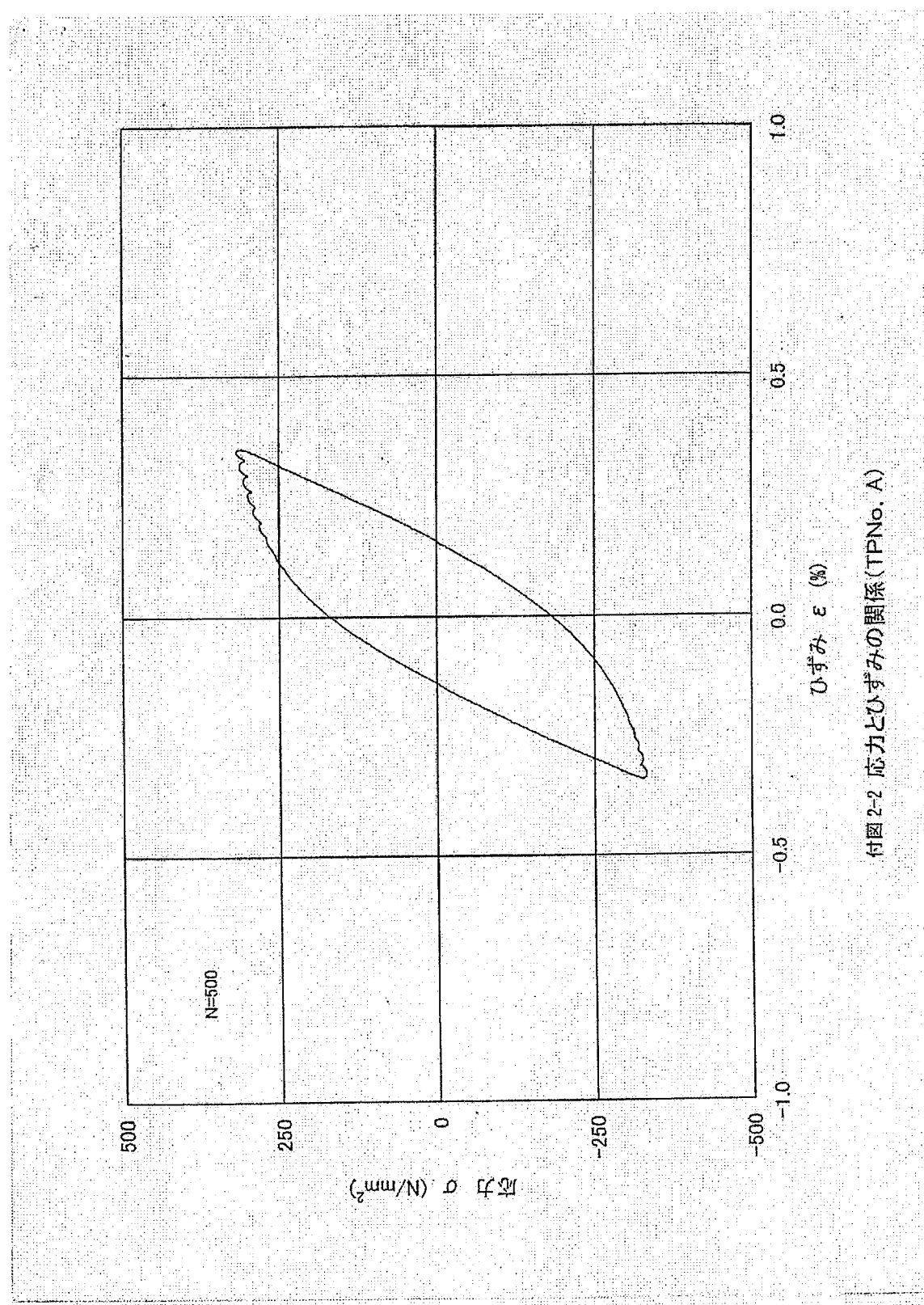
付図1-2 Number of Cycles vs. Stress



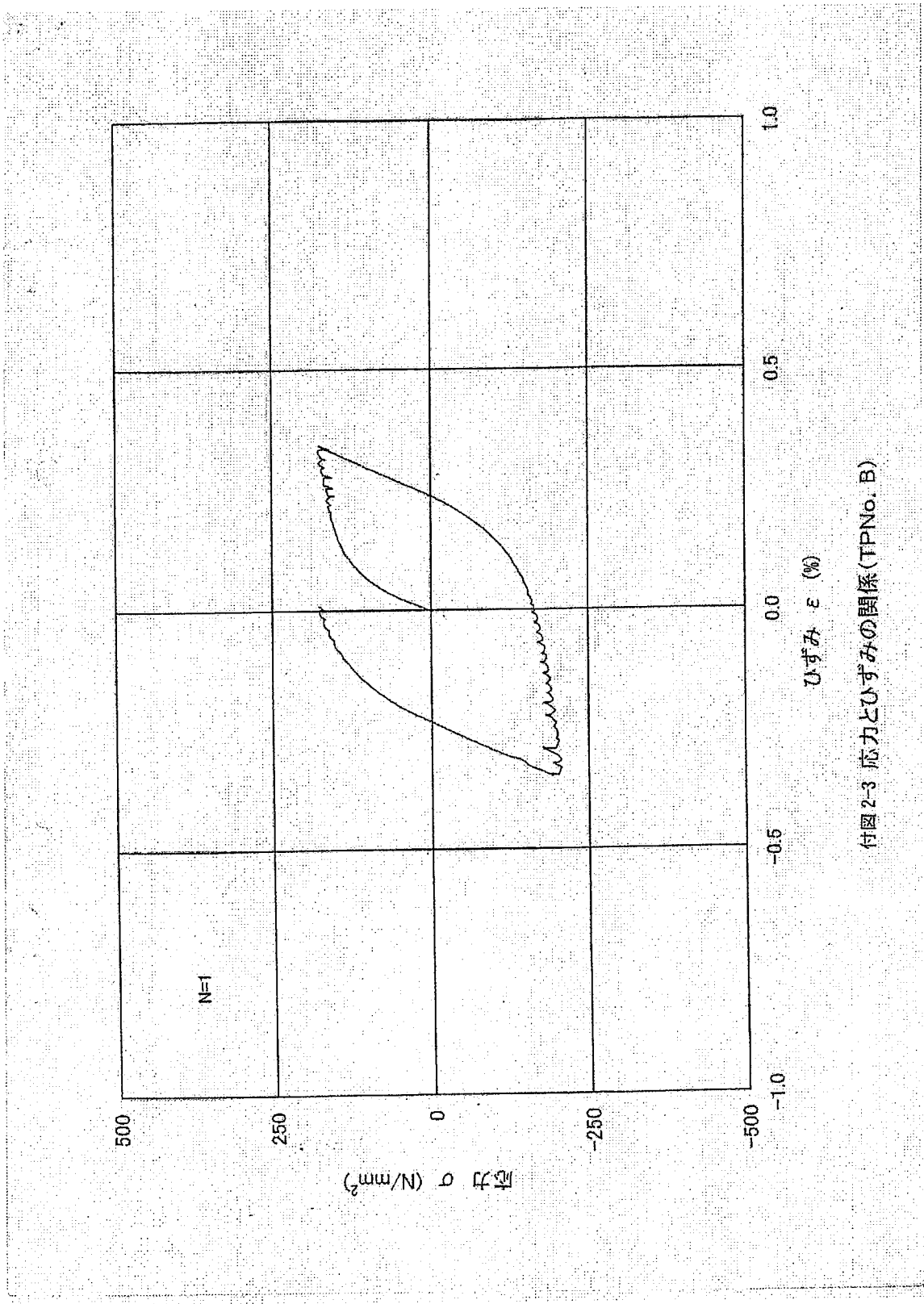
付図1-3 Number of Cycles vs. Stress



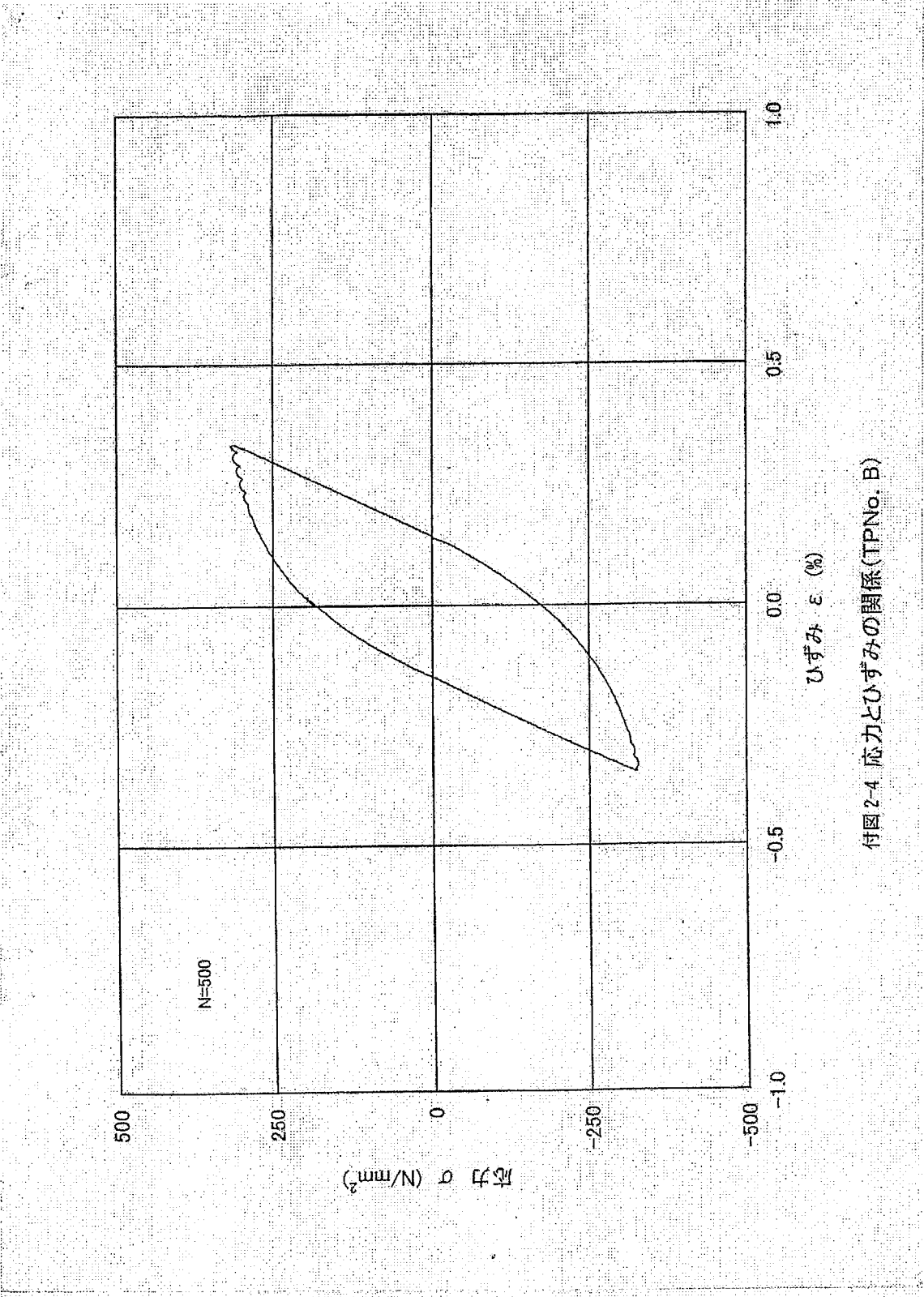
付図 2-1 応力とひずみの関係 (TPNo. A)



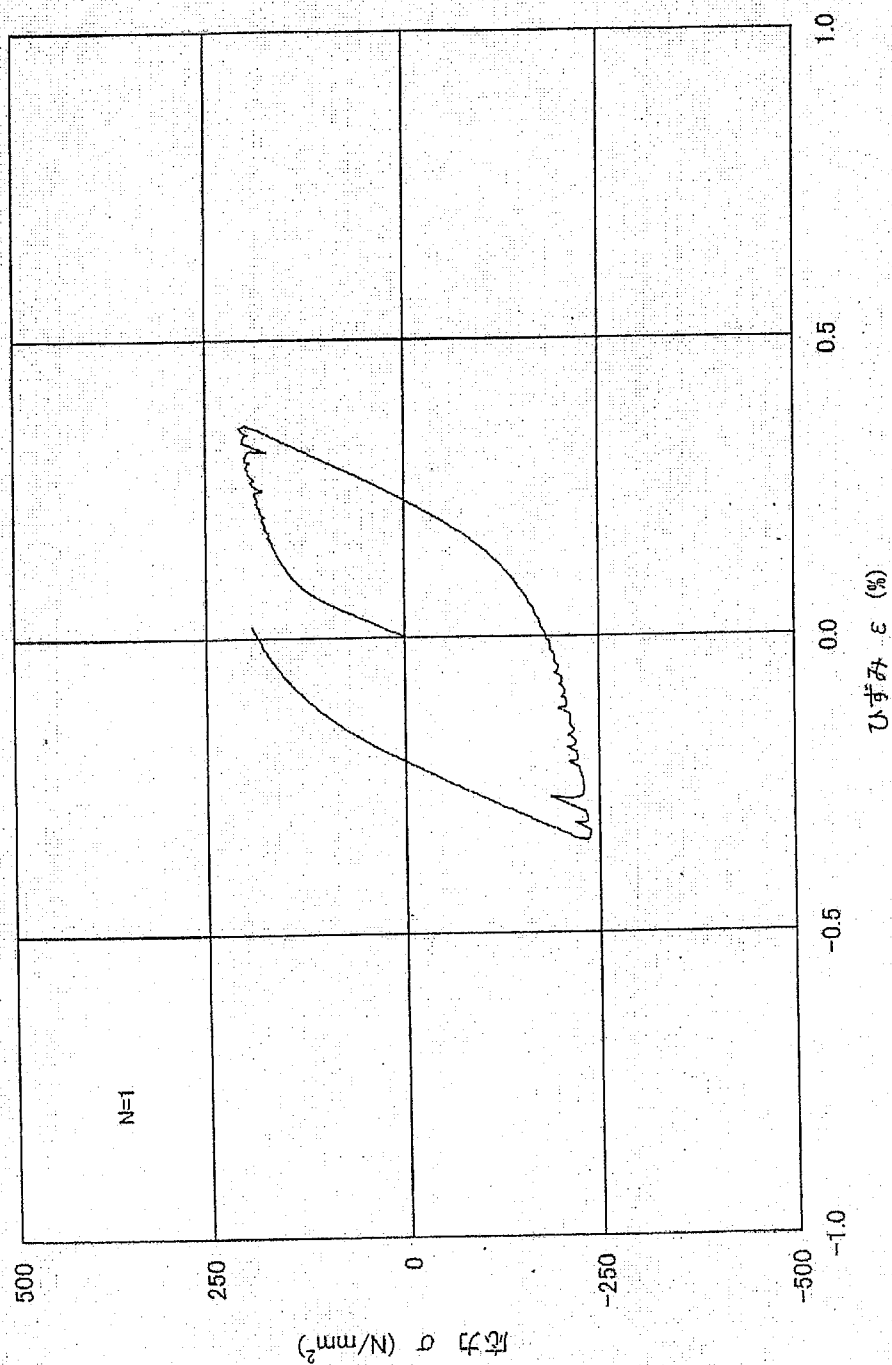
付図 2-2 応力とひずみの関係 (TPNo. A)



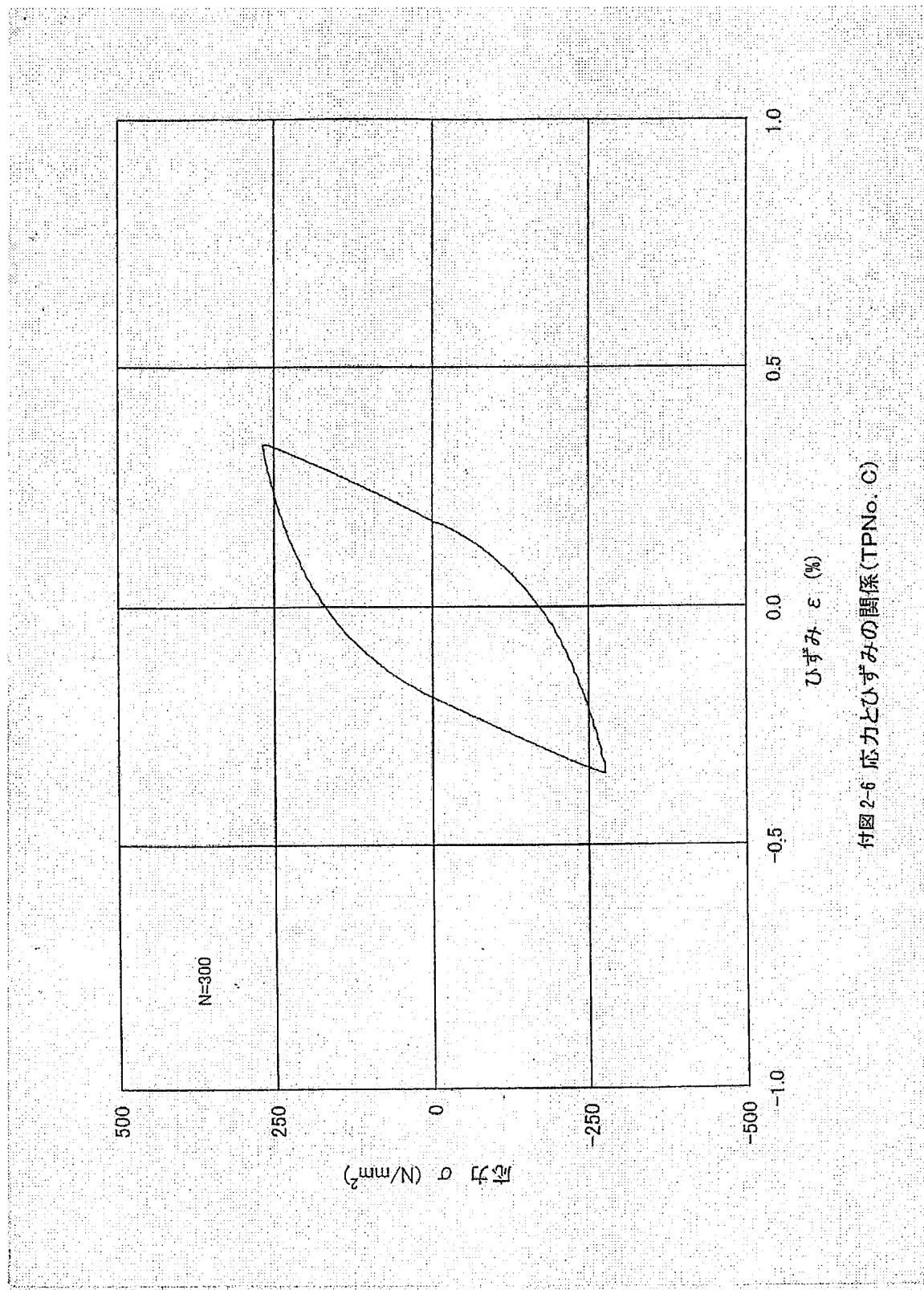
付図 2-3 応力とひずみの関係 (TPNo. B)



付図 2-4 応力とひずみの関係 (TPNo. B)



付図 2-5 応力とひずみの関係 (TPNo. C)



付図 2-6 応力とひずみの関係 (TPNo. C)

付表1 低サイクル疲労試験データシート(1)

試験片符号 : A 試験機 : ハイトロハルス 制御比 : -1
 温度 : 600 (°C) 材質 : FMS+SUS316 波形 : 三角波
 試験片直径 : 8.00 (mm) 周波数(Hz): 0.0714

N (cycle)	$\sigma_{\max}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\min}$ (N/mm ²)	$\Delta \sigma$ (N/mm ²)	N (cycle)	$\sigma_{\max}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\min}$ (N/mm ²)	$\Delta \sigma$ (N/mm ²)
1	166	-194	360	900	270	-305	575
3	222	-241	463	985	234	-304	538
5	244	-261	505	990	230	-290	520
7	259	-276	535	1000	224	-287	511
10	276	-289	565				
15	285	-296	581				
20	294	-302	596				
30	301	-318	619				
50	305	-317	622				
70	312	-324	636				
100	314	-324	638				
150	316	-330	646				
200	314	-327	641				
300	313	-332	645				
500	314	-326	640				
700	302	-324	626				

*** Nf/2 近傍のデータ ***

Nf/2= 500 (cycle)

 $\Delta \epsilon_t = 0.70$ (%) $\Delta \epsilon_p = 0.30$ (%) $\Delta \epsilon_e = 0.40$ (%)

破断位置 : B

Nf= 985 (cycle)

 $\sigma_{\max} = 314$ (N/mm²) $\sigma_{\min} = -326$ (N/mm²) $\Delta \sigma = 640$ (N/mm²)

付表2 低サイクル疲労試験データシート(2)

試験片符号 : B 試験機 : ハイロバリス 制御比 : -1
 温度 : 600 (°C) 材質 : FMS+SUS316 波形 : 三角波
 試験片直径 : 7.99 (mm) 周波数(Hz) : 0.0714

N (cycle)	σ_{max} (N/mm ²)	σ_{min} (N/mm ²)	$\Delta \sigma$ (N/mm ²)	N (cycle)	σ_{max} (N/mm ²)	σ_{min} (N/mm ²)	$\Delta \sigma$ (N/mm ²)
1	173	-201	374	700	284	-310	594
3	229	-237	466	727	263	-298	561
5	248	-252	500	741	242	-294	536
7	269	-278	547	744	236	-289	525
10	274	-291	565	746	235	-293	528
15	287	-299	586	753	221	-288	509
20	299	-312	611				
30	303	-322	625				
50	306	-328	634				
70	312	-329	641				
100	315	-332	647				
150	312	-329	641				
200	319	-331	650				
300	315	-329	644				
500	315	-325	640				
646	306	-320	626				

*** Nf/2 近傍のデータ ***

Nf/2 = 500 (cycle)

 $\Delta \epsilon_t = 0.69$ (%) $\Delta \epsilon_p = 0.30$ (%) $\Delta \epsilon_e = 0.39$ (%)

Nf = 753 (cycle)

 $\sigma_{max} = 315$ (N/mm²) $\sigma_{min} = -325$ (N/mm²) $\Delta \sigma = 640$ (N/mm²)

破断位置 : A

付表3 低サイクル疲労試験データシート(3)

試験片符号 : C 試験機 : ハイロハス 制御比 : -1
 温度 : 600 (°C) 材質 : FMS+SUS316 波形 : 三角波
 試験片直径 : 7.99 (mm) 周波数(Hz): 0.0714

N (cycle)	$\sigma_{\max}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\min}$ (N/mm ²)	$\Delta \sigma$ (N/mm ²)	N (cycle)	$\sigma_{\max}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\min}$ (N/mm ²)	$\Delta \sigma$ (N/mm ²)
1	198	-236	434	550	248	-257	505
3	249	-261	510	580	234	-255	489
5	274	-291	565	600	219	-251	470
7	287	-295	582	606	207	-247	454
10	291	-297	588	610	197	-245	442
15	293	-304	597	615	185	-242	427
20	297	-307	604	619	171	-240	411
30	299	-307	606				
50	293	-303	596				
70	290	-300	590				
100	284	-297	581				
150	278	-287	565				
200	275	-285	560				
300	264	-276	540				
400	258	-270	528				
500	252	-266	518				

*** Nf/2 近傍のデータ ***

Nf/2= 300 (cycle)

 $\Delta \epsilon_t = 0.70$ (%) $\Delta \epsilon_p = 0.38$ (%) $\Delta \epsilon_e = 0.32$ (%)

Nf= 619 (cycle)

 $\sigma_{\max} = 264$ (N/mm²) $\sigma_{\min} = -276$ (N/mm²) $\Delta \sigma = 540$ (N/mm²)

破断位置 : A