

H.T.Zr-2.5wt%Nb国産圧力管材のJIC試験

1990年1月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

この資料は、動燃事業団の開発業務を進めるため、限られた関係者だけに配布するものです。従って、その取扱いには十分注意を払って下さい。なお、この資料の供覧、複製、転載、引用等には事業団の承認が必要です。

H.T.Zr-2.5wt%Nb国産圧力管材のJ_{1c}試験

小池 通 崇^{*}

要 旨

H.T.Zr-2.5wt%Nb国産圧力管材料の周方向試験片について、日本機械学会基準に基づいて室温でコンパクト試験を行い、弾塑性破壊靱性値J_{1c}及びJ-R曲線を得ることができた。判定基準は満たしていた。新型転換炉圧力管材について、平面ひずみ型の弾塑性破壊靱性値J_{1c}(基本物性値)を求める手法が確立された。

* 機器システム開発室、大洗工学センター

J_{IC} Experiments for Domestically-Made H.T.Zr-2.5wt%Nb
Pressure Tube Material

Mitsutaka H. Koike *

Abstract

Elastic-plastic fracture toughness value J_{IC} and J-R curve were obtained by compact tests at room temperature, according to the JSME standard for circumferential specimens sampled from H.T.Zr-2.5wt%Nb pressure tube which was domestically made. Judgement conditions of JSME standard for J_{IC} tests were fulfilled for the present test results. For the ATR pressure tube material, the method to obtain plane-strain type elastic-plastic fracture toughness value J_{IC} has been established.

* Systems and Components Development Section,
O-arai Engineering Center

目 次

1. 緒 言	1
2. 試験方法	2
2.1 供試材・試験片	2
2.2 試験装置及び試験条件	2
3. 試験結果及び考察	5
3.1 試験結果	5
3.2 考 察	6
4. 結 言	11
謝 辞	12
参考文献	13
図・表	14

List of Tables

Table 2.1	Specifications of Pressure Tube Developed Domestically -----	14
Table 2.2	Mill Sheet of Billets for Pressure Tube ----	15
Table 2.3	Checked Values Analyzed and Analyzing Methods -----	16
Table 2.4	Test and Inspection Results of the Pressure Tube -----	17
Table 2.5	Tensile Test Results of the Pressure Tube Material -----	18
Table 2.6	Resolved Fractions of the Texture of the Pressure Tube -----	19
Table 2.7	Dimension of CT Specimens -----	20
Table 2.8	Test Conditions and Judgement Conditions of J _{IC} Test -----	21
Table 3.1	J _{IC} Test Results -----	22
Table 3.2	Crack Length Measured after the Test -----	23
Table 3.3	Results on Fatigue Crack -----	24
Table 3.4	Stretch Zone Width Measured by Planimeter --	25

List of Figures

Fig.2.1	Manufacturing Process of H.T.Zr-2.5wt%Nb Pressure Tube -----	26
Fig.2.2	Solution Heat Treatment for the Pressure Tube -----	27
Fig.2.3	Metallographical Photograph of Primary α Phase of the Pressure Tube -----	28
Fig.2.4	Metallographical Photograph of Microstructure of the Pressure Tube-----	29
Fig.2.5	Metallographical Photograph of Hydrides of the Pressure Tube -----	30
Fig.2.6(a)	Texture Pole Figures of the Pressure Tube, (0002) Plane -----	31
Fig.2.6(b)	Texture Pole Figures of the Pressure Tube, (1010) Plane -----	32
Fig.2.7	Sampling Diagram of CT Specimen from Pressure Tube -----	33
Fig.2.8	CT Specimen -----	34
Fig.2.9	J _{IC} Test Apparatus-----	35
Fig.2.10	Clip Gauge -----	36
Fig.3.1	Photograph of Specimens after the Test-----	37
Fig.3.2	Load-Load Line Displacement for C-01 Specimen -----	38
Fig.3.3	Load-Load Line Displacement for C-03 Specimen -----	39
Fig.3.4	Load-Load Line Displacement for C-04 Specimen -----	40
Fig.3.5	Load-Load Line Displacement for C-05 Specimen -----	41
Fig.3.6	Load-Load Line Displacement for C-06 Specimen -----	42
Fig.3.7	Load-Load Line Displacement for C-08 Specimen -----	43
Fig.3.8	SEM Photograph of C-01 Fracture Surface-----	44
Fig.3.9	SEM Photograph of C-03 Fracture Surface-----	45
Fig.3.10	SEM Photograph of C-04 Fracture Surface-----	46
Fig.3.11	SEM Photograph of C-05 Fracture Surface-----	47
Fig.3.12	SEM Photograph of C-06 Fracture Surface-----	48

Fig.3.13	SEM Photograph of C-08 Fracture Surface-----	49
Fig.3.14	Determination of a1, a2, a3, Δ a1, Δ a2 and Δ a3 for C-01 Specimen -----	50
Fig.3.15	Determination of a1, a2, a3, Δ a1, Δ a2 and Δ a3 for C-03 Specimen -----	51
Fig.3.16	Determination of a1, a2, a3, Δ a1, Δ a2 and Δ a3 for C-04 Specimen -----	52
Fig.3.17	Determination of a1, a2, a3, Δ a1, Δ a2 and Δ a3 for C-05 Specimen -----	53
Fig.3.18	Determination of a1, a2, a3, Δ a1, Δ a2 and Δ a3 for C-06 Specimen -----	54
Fig.3.19	Determination of a1, a2, a3, Δ a1, Δ a2 and Δ a3 for C-08 Specimen -----	55
Fig.3.20(a)	SEM Photographs about Stretch Zone at 3/8B for C-01 Specimen -----	56
Fig.3.20(b)	SEM Photographs about Stretch Zone at 4/8B for C-01 Specimen -----	57
Fig.3.20(c)	SEM Photographs about Stretch Zone at 5/8B for C-01 Specimen -----	58
Fig.3.21(a)	SEM Photographs about Stretch Zone at 3/8B for C-03 Specimen -----	59
Fig.3.21(b)	SEM Photographs about Stretch Zone at 4/8B for C-03 Specimen -----	60
Fig.3.21(c)	SEM Photographs about Stretch Zone at 5/8B for C-03 Specimen -----	61
Fig.3.22(a)	SEM Photographs about Stretch Zone at 3/8B for C-04 Specimen -----	62
Fig.3.22(b)	SEM Photographs about Stretch Zone at 4/8B for C-04 Specimen -----	63
Fig.3.22(c)	SEM Photographs about Stretch Zone at 5/8B for C-04 Specimen -----	64
Fig.3.23(a)	SEM Photographs about Stretch Zone at 3/8B for C-05 Specimen -----	65
Fig.3.23(b)	SEM Photographs about Stretch Zone at 4/8B for C-05 Specimen -----	66
Fig.3.23(c)	SEM Photographs about Stretch Zone at 5/8B for C-05 Specimen -----	67
Fig.3.24(a)	SEM Photographs about Stretch Zone at 3/8B for C-06 Specimen -----	68

Fig.3.24(b)	SEM Photographs about Stretch Zone at 4/8B for C-06 Specimen -----	69
Fig.3.24(c)	SEM Photographs about Stretch Zone at 5/8B for C-06 Specimen -----	70
Fig.3.25(a)	SEM Photographs about Stretch Zone at 3/8B for C-08 Specimen -----	71
Fig.3.25(b)	SEM Photographs about Stretch Zone at 4/8B for C-08 Specimen -----	72
Fig.3.25(c)	SEM Photographs about Stretch Zone at 5/8B for C-08 Specimen -----	73
Fig.3.26	J _{IC} Test Results According to JSME Method for H.T.Zr-2.5wt%Nb Pressure Tube -----	74
Fig.3.27	J _{IC} Test Results According to JSME Method with Δ peak for H.T.Zr-2.5wt%Nb Pressure Tube -----	75
Fig.3.28	J _{IC} Test Results According to Stretch Zone Method for H.T.Zr-2.5wt%Nb Pressure Tube---	76

1. 緒 言

新型転換炉の特有な機器である Heat Treated (熱処理) Zr-2.5 wt % Nb 製の圧力管は、内部に燃料集合体を有し原子炉一次系の圧力バウンダリーを形成している。この圧力管材料については、照射効果も含めて引張特性及び破壊靱性等について評価が行われている¹⁾。

新型転換炉実証炉に関しては、圧力管を我が国で製造し使用することを目的に国産圧力管試作開発が照射特性試験を含めて進められてきた²⁾³⁾。これまでは、破壊靱性の評価として主に K_{Ic} (最大荷重に相当) 値を使用してきた。本研究は、この国産製作圧力管材料について、弾塑性破壊靱性値である J_{Ic} 値及びき裂進展挙動を示す $J-R$ 曲線を求めることを目的に、日本機械学会基準⁴⁾ (J S M E S 0 0 1) に基づいてコンパクト試験を行い評価したものである。 J_{Ic} 値は降伏規模にかかわらず、試験片形状・寸法及び負荷方式に依存しない材料定数で、予き裂からモード I の平面ひずみ型延性引裂き破壊が開始する際の破壊抵抗である。

圧力管の肉厚は 4.3 mm と非常に薄く、そこから試験片を採取して機器システム開発室で試験を行い、室温における J_{Ic} 値を求めることができた(判定基準は成立)。J E M E S 0 0 1 に基づいた圧力管材の J_{Ic} 試験はこれが初めてで、その試験及び評価法を確立することができた。今後、高温での J_{Ic} 値を求め、FAD (Failure Assessment Diagram) 法⁵⁾ や R 曲線と構造物の J 積分値による手法⁶⁾ を適用し、圧力管の弾塑性破壊力学評価を行っていく予定である。

2. 試験方法

2.1 供試材・試験片

供試圧力管は、国産試作圧力管（第一次～第五次試作）の製作実績をふまえて製作（神戸製鋼（株）による）されたものである。Table 2.1に開発目標値を、Fig. 2.1に圧力管製造工程を、Table 2.2に供試圧力管ピレットのミルシート（Teledyne Wah Chang Albany社製）を示す。Table 2.3にそのピレットのチェック分析値と分析方法を示す。Fig. 2.2に溶体化熱処理の記録を示す。Fig. 2.3に製品としての圧力管の初析 α 相をFig. 2.4にマイクロ組織をFig. 2.5に水素化物金相写真を示す。Table 2.4に製品の試験・検査結果を示す。Table 2.5に引張試験結果を、Table 2.6に集合組織の結果を、Fig. 2.6に集合組織の極点図を示す。

Fig. 2.7に本試験用のコンパクト試験片の採取法を示す。肉厚が4.3mmという非常に薄い圧力管から肉厚2mmのコンパクト試験片をそのまま採取して試験片とした約1.インチの試験片をそのまま採取するのに、肉厚2mmというものは最大の肉厚に相当する。平板化等の加工をせずにそのまま採取するのが最も実機圧力管の材料に近いと考える。また、この試験片で J_{Ic} 値が各種判定条件のもとで求められるならば、この値は実機圧力管の平面ひずみ弾塑性破壊靱性値となる。また、この J_{Ic} 値より K_{Ic} 値への換算も可能である。Fig. 2.8に試験片の寸法図を、Table 2.7に使用した試験片の寸法測定結果を示す。き裂の進展方向が周方向の試験片（L-C）を採取して J_{Ic} 試験を実施し、 J_{Ic} 試験法の確立を試みた。軸方向試験片（C-L）についても今後行う予定である。

2.2 試験装置及び試験方法

コンパクト試験の複数試験法により圧力管材の J_{Ic} 試験を行った。Fig. 2.9に試験装置の構成図を示す。

以下に試験装置の仕様を示す。

試験機本体

型 式	島津サーボバルサ EHF-ED10-20L形
負荷方式	電気油圧サーボ方式
最大荷重	動的 10 ton 静的 15 ton
繰返し速度（正弦波振幅±0.1mm以上）	0.00001～45 Hz
制 御	荷重制御，ひずみ制御，ストローク制御
荷重測定精度	指示値の±1.0%又はフルスケールの±0.2%

ロードセル(2種あり交換可能, 本試験ではSFL-05形を用いた)

SFL-05形 動的 0.5 ton, 静的 0.75 ton

SFL-10形 動的 10 ton, 静的 15 ton

油圧源

型式 QF-2.0

吐出量 19 l/min

圧力(常用) 210 kg/cm²

電動機 11 kW 4P

演算制御装置

型式 4875形

試験波形 ランプ波, サイン波, 三角波, ランプホールド波

ソフトウェア 静的引張試験プログラム

高サイクル疲労試験プログラム

低サイクル疲労試験プログラム

K値制御試験プログラム

J_{1c}試験プログラム(ASTM, E813-81)

恒温槽

槽内寸法 幅300×高さ600×奥行300mm

扉 蝶番片開き式

観測窓 高温用観測窓付

クリップゲージ (Fig. 2.10 参照)

型式 B63-2552S

測定範囲 +3mm

標点間距離 3mm

出力 約4000 μ strain

使用温度 常温

試験は, 日本機械学会のJSME S001-1981「弾塑性破壊靱性J_{1c}試験法」に従って
行い, 各種判定条件を適用することによりJ_{1c}の有効性の評価を行った。試験条件及び判定条
件をTable 2.8に示す。J_{1c}試験によるき裂長さ進展量 $4a$ が1.0mm以下(JSME S001
-1981による)のデータを5点得た。そして, これらの破面写真(SEM)によりストレッチ
ゾーン幅(SZWC)を求めた。このSZWCより小さいストレッチゾーン幅(SZW)が得られ
る様な試験を行い, そのデータよりJ値と $4a(=SZW)$ が得られるので, それにより鈍化直線
を決定した。この様にして, 日本機械学会のJ_{1c}判定条件を満足するべく試験を行いJ_{1c}値を
決定した。以下に主要試験条件を示す。

PNC SN9410 90-033

温 度 : 室温

試 験 片 : H.T.Zr - 2.5 wt% Nb 圧力管材から採取した周方向き裂進展試験片 (L -
C 試験片)

3. 試験結果及び考察

3.1 試験結果

Table 3.1 及び Table 3.2 に J_{IC} 試験結果を示す。ここで、 B は試験片厚さ (mm)、 W は試験片幅 (mm)、 a_0 は予き裂長さ (mm)、 $b_0 = W - a_0$ はリガメント幅 (mm) で、 A は荷重-荷重線変位曲線下の面積でプランメータにより測定した。

J 積分 (kgf/mm) は以下の式により計算した。

$$J = \frac{A}{B b_0} f\left(\frac{a_0}{W}\right),$$

$$f\left(\frac{a_0}{W}\right) = 2 \frac{1 + \beta}{1 + \beta^2},$$

$$\beta = \left[\left(\frac{2 a_0}{b_0} \right)^2 + 2 \left(\frac{2 a_0}{b_0} \right) + 2 \right]^{1/2} - \left(\frac{2 a_0}{b_0} + 1 \right)$$

J_{IC} 試験後、マーキング (J_{IC} 破面と区別するために更に疲労き裂を入れること) を行い、破面を開いて SEM により破面観察を行った。そして、疲労予き裂と J_{IC} 試験によるき裂長さ進展量 Δa を測定した。そして、破面を厚さ (B) 方向に 4 等分して、そこでの疲労予き裂長さ a_1 , a_2 , a_3 を測定し、その平均値を

$$a_0 = \frac{a_1 + a_2 + a_3}{3}$$

とした。一方、 Δa については B 方向に 8 等分して中心部分の $3/8 B$, $4/8 B$, $5/8 B$ での Δa (それぞれ Δa_1 , Δa_2 , Δa_3) を測定し、その平均値を

$$\Delta a = \frac{\Delta a_1 + \Delta a_2 + \Delta a_3}{3}$$

とし、また、 Δa の最大値を Δa_{peak} とした。また、疲労予き裂導入のときの最大荷重を P_f 、最大応力拡大係数を K_f とする。 K は次式により求めた。また、Table 3.3 には疲労予き裂導入結果をまとめて示す。

$$K = \frac{P}{B \sqrt{W}} f(\alpha),$$

$$f(\alpha) = \frac{(2 + \alpha)(0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4)}{(1 - \alpha)^{3/2}},$$

$$\alpha = \frac{a}{W}$$

Fig. 3.1 に試験後の試験片の写真を示す。また、Fig. 3.2 ~ Fig. 3.7 に荷重-荷重線変位（クリップゲージ）曲線を示す。

Fig. 3.8 ~ Fig. 3.13 には破面の写真を示す。

Fig. 3.14 ~ Fig. 3.19 には破面SEM写真により測定した a_1 , a_2 , a_3 , Δa_1 , Δa_2 , Δa_3 , Δa_{peak} を求めるための座標測定データを示す。Fig. 3.20 ~ Fig. 3.25 には、破面上のストレッチゾーン部分のSEM写真を示す。

これらのデータにより得られた鈍化直線とR曲線をFig. 3.26に示す。各試験により得られた (Δa , J) の値を5点(○印)プロットし、限界ストレッチゾーン幅 SZW_c 以下での試験データを1点(●印)プロットした。原点と●を結ぶ直線を鈍化直線とし、○印で作られる直線との交点の J 値を J_{in} とした。

Fig. 3.27 には Δa_{peak} によるR曲線を参考として示す。また、日本機械学会規準により測定した SZW 及び SZW_c の測定結果をTable 3.4に、まとめたものをFig. 3.28に参考として示す。以下に総合結果として得られた実験による J_{IC} 値 $\equiv J_{in}$ (判定前の値) を記す。

(1) 日本機械学会基準, R曲線法 (Fig. 3.26) : $J_{in} = 3.2 \text{ kgf/mm}$

参考(2) Δa_{peak} 値による方法, R曲線法 (Fig. 3.27) : $J_{in} = 3.1 \text{ kgf/mm}$

参考(3) 日本機械学会基準, SZW 法 (Fig. 3.28) : $J_{in} = 3.6 \text{ kgf/mm}$

(1)の値に比して, (2), (3)の値はほぼ同程度の値となっている。

3.2 考 察

ここでは、得られた $J_{in} = 3.2 \text{ kgf/mm}$ の値について、日本機械学会基準による J_{IC} 値として使えるかどうかの判定を行う。

判定項目はTable 2.8に示す。以下に J_{IC} の判定結果を簡条書きにして示す。

J I C 試験結果判定

(1) 疲労予き裂導入時の最大荷重 P_f , 及び最大応力係数 K_f

判定式 ① $P_f \leq 0.4 \cdot P_L$ (但し $P_L = B \cdot b_0^2 \cdot \sigma_{fs} \cdot (2W + a_0)$)

判定式 ② $K_f \leq 0.005 \cdot E$

判定式 ③ $K_f \leq 0.6 \cdot \{ E \cdot J_{in} / (1 - \nu^2) \}^{0.5} \cdot (\sigma_{fs1} / \sigma_{fs2})$

E : ヤング率 9600 (kgf/mm²) ν : ホアソン比 0.3

σ_{fs1} : 疲労予き裂導入時の有効降伏強度 78.1 (kgf/mm²)

σ_{fs2} : J I C 試験時の有効降伏強度 78.1 (kgf/mm²)

$J_{in} = 3.3$ (kgf/mm)

判定式②より $K_f \leq 48.0$ (kgf/mm^{1.5})

判定式③より $K_f \leq 109.5$ (kgf/mm^{1.5})

疲労予き裂導入条件の判定結果

試験片No.	$0.4 \cdot P_L$ (kgf)	P_f (kgf)	K_f (kgf/mm ^{1.5})	応力比	判定結果
C-01	112.4	49.4	44.74	0.08	VALID
C-03	111.6	46.6	44.66	0.08	VALID
C-04	109.6	46.4	45.56	0.08	VALID
C-05	110.4	48.1	45.79	0.08	VALID
C-06	108.7	49.0	47.75	0.08	VALID
C-08	113.9	48.9	45.73	0.08	VALID
判定基準		$0.4 \cdot P_L$ 以下	48.0以下	0.1以下	

(2) 疲労予き裂長さ

判定式 ④ $a_f \geq 0.05 a_0$, $a_f \geq 1.25$ (mm)

判定式 ⑤ $|a_1 - a_2|$, $|a_2 - a_3|$, $|a_3 - a_1| \leq 0.05 a_0$

試験片No.	$0.05 a_0$ (mm)	a_f (mm)	$ a_1 - a_2 $ (mm)	$ a_2 - a_3 $ (mm)	$ a_3 - a_1 $ (mm)	判定結果
C-01	0.715	1.698	0.078	0.152	0.230	VALID
C-03	0.712	1.735	0.054	0.116	0.170	VALID
C-04	0.716	1.825	0.049	0.108	0.157	VALID
C-05	0.716	1.811	0.006	0.079	0.073	VALID
C-06	0.716	1.816	0.065	0.117	0.182	VALID
C-08	0.709	1.68	0.202	0.144	0.316	VALID
判定基準		1.25以上	$0.05 a_0$ 以下	$0.05 a_0$ 以下	$0.05 a_0$ 以下	

(3) 試験片表面の予き裂長さ

判定式 ⑥ 表裏の差が0.025W以下

判定式 ⑦ $a_0' \leq 0.9 a_0$ (a_0' は試験片表面の予き裂長さ)

判定式 ⑧ 6個の試験について、 a_0 の最大値、最小値の差が0.025W未満

試験片No.	0.025W (mm)	表裏の差 (mm)	$0.9 a_0$ (mm)	a_0' (mm)	a_0' (mm)	判定結果
C-01	0.625	0.420	12.778	14.196	13.776	VALID
C-03	0.625	0.246	12.182	14.164	13.918	VALID
C-04	0.625	0.319	12.893	14.279	13.960	VALID
C-05	0.625	0.187	12.880	14.202	14.015	VALID
C-06	0.625	0.303	12.884	14.273	13.970	VALID
C-08	0.625	0.438	12.767	13.776	14.215	VALID
判定基準		0.025W以下		$0.9 a_0$ 以上	$0.9 a_0$ 以下	

a_0 の最大値 = 14.325, a_0 の最小値 = 14.185, $0.025W = 0.625$

$14.325 - 14.185 = 0.14$ (VALID)

(4) 疲労予き裂の挿入角度

切り欠き面に対して $\pm 5^\circ$ 以下 (VALID)

(5) 負荷速度

試験片No.	負荷速度 (mm/min)	P_L (kgf)	$0.4 P_L$ (kgf)	t_0 (min.)	判定結果
C-01	0.3	281.1	112.4	1.09	VALID
C-03	0.3	279.0	111.6	1.08	VALID
C-04	0.3	275.3	110.1	1.10	VALID
C-05	0.3	276.1	110.4	1.13	VALID
C-06	0.3	271.7	108.7	1.10	VALID
C-08	0.34	284.8	113.9	1.14	VALID
判定基準				$0.1 \leq t_p \leq 10$	

(6) 破面の作製(マーキング)に関する判定結果

判定式 (8) $a_{m.} \leq 0.05 a_0$, $a_{m.} \leq 1.25$ (mm) (a_m はマーキング疲労き裂長さ)

判定式 (9) $P_{max.} \leq 3/4 P_{tmax.}$

($P_{max.}$ はマーキング疲労き裂導入時の最大荷重)

($P_{tmax.}$ は J_{IC} 試験時において所定変位に対応する負荷)

判定式 (8) について 6 個の試験片すべて $a_{m.} \geq 1.5$ (mm) 以上 (VALID)

試験片 No.	$P_{max.}$ (kgf)	$3/4 P_{tmax.}$ (kgf)	判定結果
C-01	77.3	150.8	VALID
C-03	74.3	138.4	VALID
C-04	70.9	119.3	VALID
C-05	71.1	108.8	VALID
C-06	76.9	123.8	VALID
C-08	50.8	75.9	VALID
判定基準	3/4 $P_{tmax.}$ 以下		

(7) R 曲線

判定式 (10) $\Delta a_{max.} \leq 1.0$ (mm) (VALID)

判定式 (11) $(\Delta a_{max.} - \Delta a_{min.}) > 3(\Delta a_{min.} - \Delta a_{in.})$ (VALID)

判定式 (12) $(dJ/da)_R \leq 0.5 (dJ/da)_B$ (VALID)

(8) J_{in} の有効性の評価

(a) $b_0 \geq 2.5 (J_{in} / \sigma_{fs})$ (VALID)

b_0 の最小値 = 10.684

$2.5 (J_{in} / \sigma_{fs}) = 1.02$

(b) $B \geq 2.5 (J_{in} / \sigma_{fs})$ (VALID)

B の最小値 = 1.96

(c) $K_f \leq 0.6 \cdot \{ E \cdot J_{in} / (1 - \nu^2) \}^{0.5} \cdot (\sigma_{fs1} / \sigma_{fs2})$ (VALID)

$0.6 \cdot \{ E \cdot J_{in} / (1 - \nu^2) \}^{0.5} \cdot (\sigma_{fs1} / \sigma_{fs2}) = 111.9$

K_f の最大値 = 47.75

よって $J_{ic} = 3.2$ (kgf/mm)

$K_{ic} = \{ E J_{ic} / (1 - \nu^2) \}^{0.5}$

= 183.7 (kgf/mm^{1.5})

Δa ピークのグラフより

$J_{ic} = 3.1$ (kgf/mm)

$K_{ic} = 180.8$ (kgf/mm^{1.5})

以上より、いずれの判定条件も満足していることがわかった。

従って、実験により得られた J_{in} は J_{IC} を与えることがわかった。

$$J_{IC} = 3.2 \text{ kgf}/\text{mm}$$

4. 結 言

新型転換炉用として開発した国産試作圧力管（基本的には「ふげん」と同等）から採取した周方向き裂入りコンパクト試験片（肉厚2 mm）について、日本機械学会基準に従って J_{1c} 試験を行い以下の結論を得た。

- (1) 複数試験片、R曲線法によると、 J_{in} として以下の値が得られた。

$$J_{in} = 3.2 \text{ kgf/mm}$$

そして、日本機械学会の判定条件を満足し、 J_{1c} として次の値が得られた。

$$J_{1c} = 3.2 \text{ kgf/mm}$$

- (2) 圧力管材料について、平面ひずみ型の弾塑性破壊靱性値 J_{1c} を求める手法が確立された。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、試験法等に関して御指導していただいた小林英男教授（東京工業大学）、ならびに試験に協力していただいた大川亮三（菱和工業㈱）氏に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) M.Koike, T.Asada, F.Miyamoto, S.Taniyama and Y.Komine, Irradiation and Post Irradiation Examination of Pressure Tubes of ATR "FUGEN" (PNC N3410 88-026), 1988年10月.
- 2) 浅田, 金子: 国産圧力管の開発について (PNC SN3410 88-004), 1988年2月.
- 3) 小池, 小峰, 谷山, 平井, 両角, 大滝, 伊藤, 柚原: ATR実証炉用国産試作圧力管材料の照射特性評価 (PNC ZN9410 87-127), 1987年7月.
- 4) JSME日本機械学会基準 弾塑性破壊靱性 J_{IC} 試験方法
JSME S 001-1981 (主査: 宮本 博), 1981年10月.
- 5) 小林, 中村, 柏木: 弾塑性破壊の2パラメータ法と破壊評価線図, 日本機械学会論文集 (A編) 53巻496号 p.2363, 1987年12月.
- 6) 小林: 破壊力学入門, 材料第32巻第363号 p.1410, 1983年12月.

Table 2.1 Specifications of Pressure Tube Developed Domestically
開発された国産圧力管の仕様(本試験用)

(1) ビレット購入

(a) 化学成分

「ふげん」と同様の仕様で製造，試験検査されたものとし，成分の規定値は表1に示す通りとする。

(b) 購入ビレット本数：5.5 m用（材料試験用圧力管）1本

(2) 熱間押出・冷間抽伸

熱間押出・冷間抽伸は，昭和55年度に第一次試作，昭和56年度に実施した材料試験用圧力管の試作，材料試験用圧力管の追加試作，58年度に実施した第三次試作，59年度に実施した第四次，第五次，神戸自主試作結果を反映させて実施する。

(3) 溶体化処理／水焼入

溶体化処理温度は， $870\text{C}\pm 15\text{C}$ ($1600\text{F}\pm 25\text{F}$)とし目標温度は， 870C とする。

溶体化処理／水焼入は，上記温度に5分以上（目標30～40分）保持後， 50C (122F)以下の水中へ水焼入する。その場合の焼入速度（搬入速度）は， $300\text{mm}/\text{sec}$ 以上とする。

溶体化処理／水焼入後「ふげん」の場合と同様に各管の管端より試験片を採取して金属組織（初析 α 量）及び硬さ試験（目標値： $\pm\text{Hv}235$ ）を実施する。

(4) 冷間抽伸

溶体化処理／水焼入後，5～15%の加工率で冷間抽伸を実施する。

(5) 時効処理

$500\text{C}\pm 15\text{C}$ ($932\text{F}\pm 25\text{F}$)の真空中で $24\text{Hr}\pm 1\text{Hr}$ の時効処理を実施する。

(6) 最終寸法調整

最終 $\#300$ ， $\#600$ の砥石研磨により調整を実施する。

(7) 寸法

(a) 材料試験用圧力管の寸法は，下記の通りとする。

(i) 内径： $117.8\text{mm}\begin{matrix} +0.76 \\ -0 \end{matrix}\text{mm}$ （目標 $118.0\begin{matrix} +0.5 \\ -0.1 \end{matrix}\text{mm}$ ）

(ii) 肉厚： $4.3\text{mm}\pm 7.5\%$ （目標偏肉 0.30mm 以下）

(iii) 外径：約 126.4mm

(iv) 長さ： $5500\text{mm}\pm 8\text{mm}$

(v) 大曲がり： $2.68\text{mm}/4300\text{mm}$ （目標 $\leq 1.3\text{mm}/4300\text{mm}$ ）

小曲がり： $0.34\text{mm}/410\text{mm}$ （目標 $\leq 0.20\text{mm}/410\text{mm}$ ）

(vi) 表面粗さ：内外表面 50rms 以下（目標内外面 20rms 以下）

Table 2.2 Mill Sheet of Billets for Pressure Tube
TWCA ミルシート



P.O. BOX 460
ALBANY, OREGON 97321
(503) 928-4211 TWX (510) 595-0973

TO Mitsui & Co.
ADDRESS One California Street
Suite 3000
San Francisco, CA 94111

ATTENTION OF: Mr. Ikeda

IN REGARD TO YOUR			DATE	October 21, 1986
PURCHASE ORDER NO.	803-743		DATE SHIPPED	Ref. P.L.#
ITEM NO.	1		QUANTITY SHIPPED	4 pcs.
DESCRIPTION	Zr 2.5 Nb Billets		WEIGHT SHIPPED	1125.0 lbs.
DIMENSIONS	7.717" dia. x 25.197"L		SALES ORDER NO.	3239
DIMENSIONS	196mm dia. x 640mm L		HEAT NO.	222331Q Zr2.5Nb
SPECIFICATIONS	KSL 80C-QT-054 Rev. 1, TWCA comments and P.O.		MACS NO.	50563

THE TEST REPORT FOLLOWS:
Material Condition: Forged, Quenched, Machined

INGOT CHEMISTRY
COMPOSITION IN WEIGHT PERCENT

Element	Spec.	1	2	3	4	5	6	7	
Nb:	2.40-2.80	2.62	2.63	2.63	2.64	2.65	2.62	2.59	
O:	900-1300ppm	1130	1110	1120	1060	1040	1140	1130	
Zr			B	A	L	A	N	C	E

MAXIMUM IMPURITIES IN PPM

Al:	75	45	53	45	43	43	44	45
B:	0.5	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2
C:	270	140	160	150	140	120	140	150
Cd:	0.5	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2
Co:	20	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Cr:	200	<100	<100	<100	<100	<100	<100	<100
Cu:	50	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25
Fe:	1500	630	650	630	660	680	630	580
H:	25	<5	<5	<5	<5	<5	6	<5
Hf:	100	39	40	37	38	38	35	38
Mg:	20	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
Mn:	50	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25
Mo:	50	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25
N:	65	35	22	28	23	24	25	28
Ni:	70	<35	<35	<35	<35	<35	<35	<35
Pb:	130	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25
Si:	120	49	59	50	48	47	48	48
Sn:	100	25	25	25	25	30	25	25
Ta:	200	28	<25	<25	25	<25	<25	<25
Ti:	50	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25
U:	3.5	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0	<1.0
V:	50	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25
W:	100	<25	<25	<25	<25	<25	<25	<25

PRODUCT CHEMISTRY IN PPM

Element	Spec.	Results
H:	25	8
N:	65	23
Nb:	2.40-2.80%	2.63%

AI.04.11.05 P1-3
CI.06.07.10

Table 2.3 Checked Values Analyzed and Analyzing Methods
 管材(ビレット)のT.W.C.A社ミルシート値及びチェック分析値とその分析方法

分析元素	購入規格	T.W.C.A.社ミルシート値				チェック分析値	分析方法
		インゴットの分析値			製品分析値		
		Top	Middle	Bottom			
Nb	240~280	2.62	2.64	2.59	2.65	2.65	吸光々度法
Zr	~		Balance			Balance	-
O	900~1300	1130	1060	1130	1020	1050	溶融熱伝導法
H	<25	<5	<5	<5	8.9	2.8	"
N	<65	35	23	28	29	26	"
Al	<75	45	43	45		47	ケイ光X線法
B	<0.5	<0.2	<0.2	<0.2		<0.2	吸光々度法
Cd	<0.5	<0.2	<0.2	<0.2		<0.2	"
Co	<20	<10	<10	<10		<10	ケイ光X線法
Cu	<50	<25	<25	<25		<20	"
Hf	<100	39	38	38		36	"
Fe	<1500	630	660	580		690	"
Pb	<130	<25	<25	<25		<3	吸光々度法
Mg	<20	<10	<10	<10		<1	"
Mn	<50	<25	<25	<25		<20	ケイ光X線法
Mo	<50	<25	<25	<25		<10	吸光々度法
Ni	<70	<35	<35	<35		24	ケイ光X線法
Si	<120	<19	48	48		49	"
Ta	<200	28	25	<25		<20	"
C	<270	140	140	150		120	赤外線吸収法
Cr	<200	<100	<100	<100		<100	ケイ光X線法
Sn	<100	25	25	25		36	"
Ti	<50	<25	<25	<25		15	"
W	<100	<25	<25	<25		<20	"
U	<3.5	<1.0	<1.0	<1.0		<1	吸光々度法
V	<50	<25	<25	<25		<10	ケイ光X線法

※ インゴット分析値の単位はNbのみwt%で、他はppmである。

Table 2.4 Test and Inspection Results of the Pressure Tube
試験・検査結果

No	項目	判定基準	試験検査結果			備考	No	項目	判定基準	試験検査結果		備考
			実績値	結果						実績値	結果	
1	製品分析	(1)O: 900~1300ppm (2)H: ≤ 25 ppm (3)N: ≤ 80 ppm	(1)O: 1000~1020ppm (2)H: 8.4~8.9 ppm (3)N: 2.7~2.9 ppm	判定基準を満足している。	表15参照	9	表面粗度	(1) 内面: ≤ 50rms (目標 < 20rms) (2) 外面: ≤ 50rms (目標 ≤ 20rms)	(1) 内面: 10.6~11.3rms (2) 外面: 11.6~12.1rms	判定基準を満足している。	表13参照	
2	引張試験	常温	高温	常温	高温	判定基準を満足している 表16参照 図3参照	10	重量	-	-	-	表12参照
		0.2%YS (kg/mm ²) ≥ 70.2	≥ 40.0	0.2%YS (kg/mm ²) 70.4~73.6	51.2~57.1		11	腐食試験	> 35 mg/dm ²	20.0~21.0mg/dm ²	判定基準を満足している	表17参照
		UTS (kg/mm ²) ≥ 77.9	≥ 54.8	UTS (kg/mm ²) 84.2~86.6	60.1~64.0		12	硬さ試験	ビッカース硬さ: > 235 溶体化熱処理の評価試験として溶体化後に実施。	Hv: 245~260	判定基準を満足している	表9参照
		E (%) ≥ 10	≥ 10	E (%) 1.47~18.7	13.5~18.7		13	金属組織試験	初析α量: 5~20%	13.0%	判定基準を満足している	表10, 11参照
		RA (%) ≥ 10	≥ 50	RA (%) 58.6~61.0	59.7~63.8							
		※「ふげん」圧力管の最低値 56.1kg/mm ²										
3	超音波探傷	標準TPのエコー高さをブラウン管上の50%に設定しその高さ以下。 (1) 肉厚の2%	(1) インジケーションなし	(1) 判定基準を満足している	図4~6参照							
4	内径	117.8 ^{+0.76} ₋₀ (目標 118.0 ^{+0.5} _{-0.1})	118.06~118.23mm	判定基準を満足している	表12参照 図7参照							
5	外径	-	Top側 126.91~127.03 Bottom側 126.85~127.07mm		表12参照							
6	肉厚 (偏肉)	4.3mm ± 7.5%	4.30~4.53mm 偏肉 ≤ 0.19mm	判定基準を満足している	表12参照 図7参照							
7	長さ	5500mm ± 8mm	5505.0mm	判定基準を満足している	表12参照							
8	真直度	(1) 大曲り: ≤ 2.68mm/4300mm (目標 ≤ 1.3mm/4300mm) (2) 小曲り: ≤ 0.34mm/410mm (目標 ≤ 0.20mm/410mm)	(1) 大曲り: ≤ 0.55mm (2) 小曲り: ≤ 0.18mm	判定基準を満足している	表12参照 図8~45参照							

Table 2.5 Tensile Test Results of the Pressure Tube Material
 圧力管材料の引張試験結果

目標値		UTS (kg/mm ²)	0.2%Y.S (kg/mm ²)	E.L (%)	R.A (%)	破断位置 *2
常温		≥77.9	≥70.2 *1	≥10	≥40 *1	
高温		≥54.8	≥40.0	≥10	≥50 *1	
常温	T	84.2	71.1	18.7	61.0	A
		84.4	70.4	18.7	59.8	A
	B	84.6	70.5	14.7	58.6	B
		86.6	73.6	18.3	58.8	A
高温	T	61.8	53.0	13.7	63.2	B
		64.0	57.1	15.3	59.7	A
	B	61.3	52.8	18.7	61.6	A
		60.1	51.2	18.7	63.8	A

*1 参考値

*2 A: 標点距離の中心から標点距離の1/4以内で破断した場合

B: 標点距離の中心から標点距離の1/4を越え標点以内で破断した場合

試験片形状

(試験片) 常温及び高温

JIS Z2201 14号B試験片

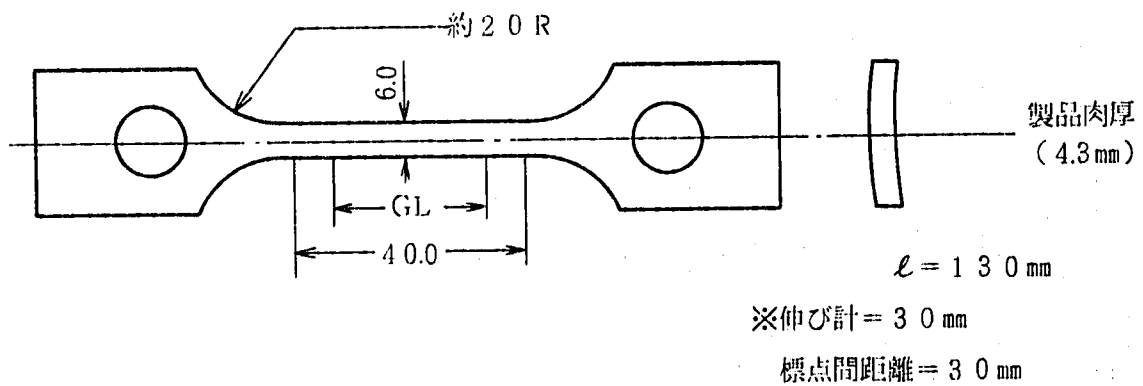


Table.2.6 Resolved Fractions of the Texture of the Pressure Tube
 供試実寸圧力管(管No.31)の(1010)面方向パラメータ(f値)

管No.	管位置	方向パラメータ			
		F_r	F_t	F_l	F_{total}
31	T	0.318	0.313	0.374	1.005
	B	0.317	0.316	0.374	1.007
比較データ(5次試作管 No.21, 22, 23, 24)の平均値	T	0.316	0.317	0.372	1.005
	B	0.319	0.318	0.367	1.004
比較データ(No.24)	T	0.314	0.320	0.371	1.005
	B	0.318	0.321	0.365	1.004

供試実寸圧力管(管No.31)の(0002)面方向パラメータ(f値)

管No.	管位置	方向パラメータ			
		F_r	F_t	F_l	F_{total}
31	T	0.339	0.377	0.298	1.014
	B	0.334	0.375	0.308	1.017
比較データ(5次試作管 No.21, 22, 23, 24)の平均値	T	0.333	0.375	0.311	1.019
	B	0.345	0.364	0.305	1.014
比較データ(No.24)	T	0.323	0.377	0.324	1.024
	B	0.345	0.360	0.308	1.013

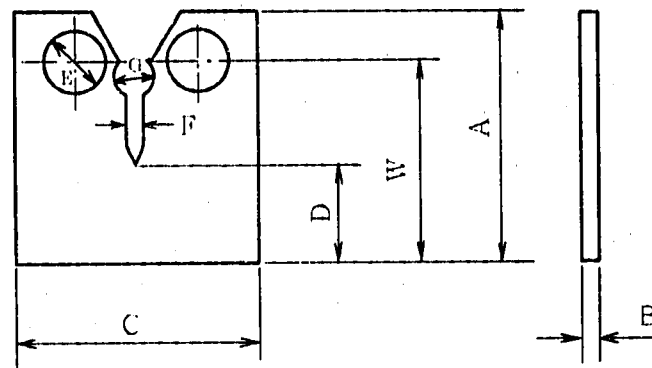
r : 半径方向

t : 周方向

l : 軸方向

Table 2.7 Dimension of CT Specimens
CT試験片の寸法測定結果

	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)	E (mm)	F (mm)	G (mm)	W (mm)
C-01	31.25	1.98	30.00	12.5	6.25	1.5	5.0	25.0
C-03	31.25	1.98	30.00	12.5	6.30	1.5	5.0	25.0
C-04	31.20	1.99	30.00	12.5	6.25	1.5	5.0	25.0
C-05	31.25	1.99	30.05	12.5	6.30	1.5	5.0	25.0
C-06	31.25	1.96	30.05	12.5	6.25	1.5	5.0	25.0
C-08	31.25	2.00	30.00	12.5	6.25	1.5	5.0	25.0



$A = 31.25 \pm 0.25$

$B = 2 \pm 0.04$

$C = 30 \pm 0.12$

$D = 12.5 \pm 0.12$

$E = 6.25 \pm 0.12$

$F = 1.5$

$G = 5$

$W = 25 \pm 0.12$

Table 2.8 Test Conditions and Judgement Conditions of J_{1c} Test
 J_{1c} 試験条件と判定条件

	J _{1c} 試験 (ASTM) (参考)	J _{1c} 試験 (JSME)
試験片の条件	① $B \geq 2.5 (J_{1c} / \sigma_{fs})^2$	BとWに規定なし
予き裂挿入条件	① $\Delta k / E \leq 0.005 \text{ (mm}^{0.5}\text{)}$ ② $Pf_{max} \leq 0.4 PL$ $[PL = Bb_0^2 \sigma_{fs} / (2W+a)]$ ③ 応力比 $R \leq 0.1$	① $k_{fmax} / E \leq 0.005 \text{ (mm}^{0.5}\text{)}$ ② $Pf_{max} \leq 0.4 PL$ ③ $k_{fmax} \leq 0.6 \sqrt{\frac{EJ_{in}}{1-V^2}} \left(\frac{\sigma_{fs1}}{\sigma_{fs2}} \right)$ ④ 応力比 $R \leq 0.1$
予き裂長さの求め方	① $a_0 = \{ (a_1+a_9)/2 + a_2 + \dots + a_9 \} / 8$ (8等分で予き裂長さを求め端も考慮する。)	① $a_0 = (a_1+a_2+a_3)/3$ (1/4, 2/4, 3/4Bにおける予き裂長さの平均値)
予き裂長さの判定条件	① $0.45W < a_0 < 0.75W$ ② $a_f \geq 0.05a_0$ or $a_f \geq 1.27 \text{ (mm)}$ ③ $a_1 \sim a_9$ の最大偏差が $0.07a_0$ 以下	① $0.5W \leq a_0 \leq 0.75W$ ② $a_f \geq 0.05a_0$ ③ $a_f \geq 1.25 \text{ (mm)}$ ④ a_1, a_2, a_3 の最大偏差が $0.05a_0$ 以下 ⑤ 試験片表裏の予き裂長さの平均値が $0.9a_0$ 以上。
き裂長さ増分の求め方 (Δa)	① $\Delta a = \{ (\Delta a_1 + \Delta a_9) / 2 + \Delta a_2 + \dots + \Delta a_9 \}$ (予き裂長さと同様)	① $\Delta a = (\Delta a_1 + \Delta a_2 + \dots + \Delta a_n) / n$ n は 3 以上 (但し, $\Delta a_1, \Delta a_2, \dots, \Delta a_n$ は $(3/8) \sim (5/8)_B$ におけるき裂長さ増分)
引張速度	① $0.1 \leq t_p \leq 10 \text{ (min)}$ (t_p は $0.4PL$ に至るまでの時間)	① $0.1 \leq t_p \leq 10 \text{ (min)}$
鈍化直線の求め方	① $J = 2 \sigma_{fs} \cdot \Delta a$	② 実験により求める。
R曲線の求め方	① $B(B_N) \geq 15 (J / \sigma_{fs})$ ② $b \geq 15 (J / \sigma_{fs})$ ③ $\xi_B \leq \xi_A / 3$ ④ 上下オフセットライン内に有効なデータが4点以上で直線近似する。	① $(\Delta a_{max} - \Delta a_{min}) > 3(\Delta a_{min} - \Delta a_{in})$ (Δa_{in} は J_{in} に対応する Δa) ② $\Delta a \leq 1.0 \text{ (mm)}$ の有効データが4点以上で直線近似する。
J _{in} の有効性の評価	① 鈍化直線とR曲線の交点より J_{in} を求める。 ② $B(B_N) \geq 25 (J_{in} / \sigma_{fs})$ ③ $b_0 \geq 25 (J_{in} / \sigma_{fs})$ ④ $dJ / da \leq \sigma_{fs}$	① 鈍化直線とR曲線の交点より J_{in} を求める。 ② $B \geq 25 (J_{in} / \sigma_{fs})$ ③ $b_0 \geq 25 (J_{in} / \sigma_{fs})$ ④ $(dJ/da)_R \leq 1/2 (dJ/da)_B$ (R曲線の勾配) (鈍化直線の勾配)

Table 3.1 J_{Ic} Test Results
J I C 試験結果

試験片No	試験片厚さ B(mm)	試験片幅 W(mm)	予き裂長さ a ₀ (mm)	リガメント幅 b ₀ (mm)	試験温度 (°C)	エネルギー面積 A (kg・mm)	f(a ₀ /w)	J 値 (kgf/mm)
C-01	1.98	25.0	14.198	10.802	23.0	115.02	2.234	11.991
C-03	1.98	25.0	14.235	10.765	25.0	74.64	2.229	7.805
C-04	1.99	25.0	14.325	10.675	23.0	47.28	2.229	4.957
C-05	1.99	25.0	14.311	10.689	22.5	37.68	2.227	3.946
C-06	1.96	25.0	14.316	10.684	22.0	59.04	2.227	6.280
C-08	2.00	25.0	14.185	10.815	14.5	15.04	2.230	1.600

試験片タイプ: コンパクト試験片

材質: Zr-2.5%Nb (国産化圧力管材)

採取方向: L-C (周方向)

降伏応力: $\sigma_{ys} = 75.1$ (kgf/mm²)

引張強度: $\sigma_B = 84.7$ (kgf/mm²)

有効降伏強度: $\sigma_{fs} = 78.1$ (kgf/mm²)

J_{Ic} 試験負荷速度 0.3 (mm/min), t_p = 1.1 (min)

※ J_{Ic} = 3.2 (kgf/mm)

Table 3.2 Crack Length Measured after the Test
試験後のき裂長さ測定結果

試験片No.	a_1 (mm)	a_2 (mm)	a_3 (mm)	a_0 (mm)	Δa_1 (mm)	Δa_2 (mm)	Δa_3 (mm)	Δa (mm)	Δa_{peak} (mm)
C-01	14.301	14.223	14.071	14.198	0.773	0.910	0.668	0.784	0.934
C-03	14.300	14.246	14.130	14.235	0.370	0.394	0.244	0.336	0.443
C-04	14.394	14.345	14.237	14.325	0.131	0.190	0.137	0.153	0.194
C-05	14.333	14.339	14.260	14.311	0.109	0.142	0.078	0.110	0.144
C-06	14.399	14.333	14.216	14.316	0.306	0.319	0.181	0.269	0.332
C-08	14.013	14.215	14.329	14.185					

Table 3.3 Results on Fatigue Crack
疲労予き裂導入結果

試験片No.	最大荷重 P_f (kg f)	最大応力拡大係数 K_f (kg f / mm ^{1.5})	疲労予き裂長さ (mm)	疲労予き裂導入温度 (℃)
C-01	49.4	44.74	1.698	24.0
C-03	46.6	44.66	1.735	23.0
C-04	46.4	45.56	1.825	25.0
C-05	48.1	45.79	1.811	25.5
C-06	49.0	47.75	1.816	24.5
C-08	48.9	45.73	1.685	15.0

Table.3.4 Stretch Zone Width Measured by Planimeter
 プラニメータによるストレッチゾーン幅の測定結果

試験片No.	測定箇所	A _i				ℓ (mm)	倍率	SZW _i (μm)	SZW (μm)
		1回目 (mm)	2回目 (mm)	3回目 (mm)	平均 (mm)				
C-01	A ₁ (3/8)	800	830	820	816.7	75.0	×800	13.6	11.9
	A ₂ (4/8)	710	710	710	710.	75.0	×800	11.8	
	A ₃ (5/8)	650	620	610	626.7	76.2	×800	10.3	
C-03	A ₁ (3/8)	910	920	920	916.7	73.0	×800	15.7	15.8
	A ₂ (4/8)	940	940	930	936.7	74.5	×800	15.7	
	A ₂ (5/8)	960	960	960	960	74.5	×800	16.2	
C-04	A ₁ (3/8)	830	830	830	830	73.0	×800	14.2	14.5
	A ₂ (4/8)	940	940	940	940	73.5	×800	16.0	
	A ₃ (5/8)	790	800	800	796.7	75.0	×800	13.3	
C-05	A ₁ (3/8)	810	800	780	796.7	73.0	×800	13.6	14.0
	A ₂ (4/8)	730	750	750	743.3	74.0	×800	12.6	
	A ₃ (5/8)	950	940	920	936.7	74.0	×800	15.8	
C-06	A ₁ (3/8)	800	810	810	806.7	74.0	×800	13.6	13.0
	A ₂ (4/8)	680	690	680	683.3	74.3	×800	11.5	
	A ₂ (5/8)	820	810	820	816.7	74.0	×800	13.8	
C-08	A ₁ (3/8)	410	390	400	400	79.2	×800	6.3	6.1
	A ₂ (4/8)	390	390	390	390	76.0	×800	6.4	
	A ₃ (5/8)	340	340	340	340	76.0	×800	5.6	

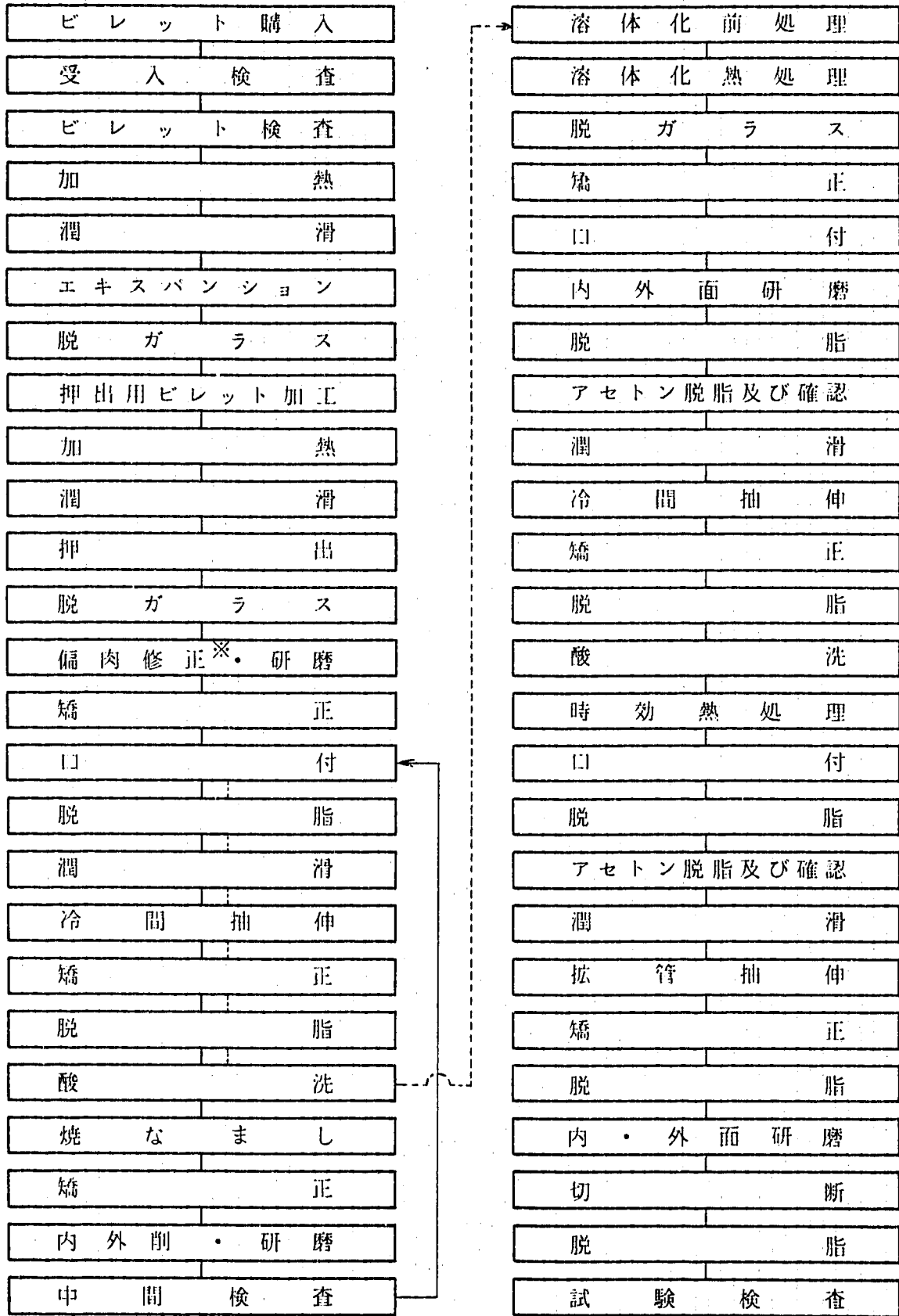


Fig. 2.1 Manufacturing Process of H.T.Zr-2.5wt%Nb Pressure Tube
H.T.Zr-Nb 圧力管製作工程

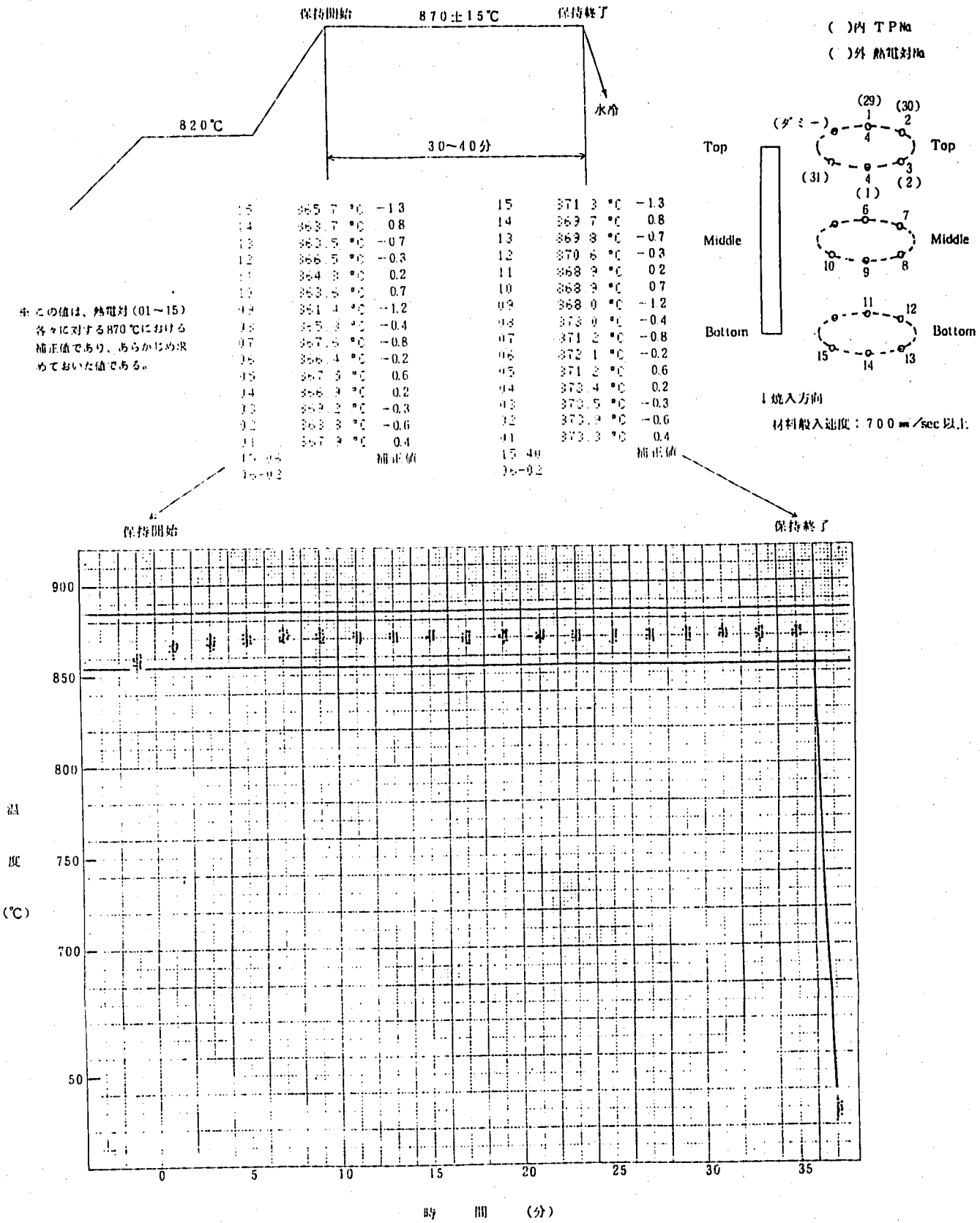


Fig. 2.2 Solution Heat Treatment for the Pressure Tube
溶体化熱処理状況

(観察位置)

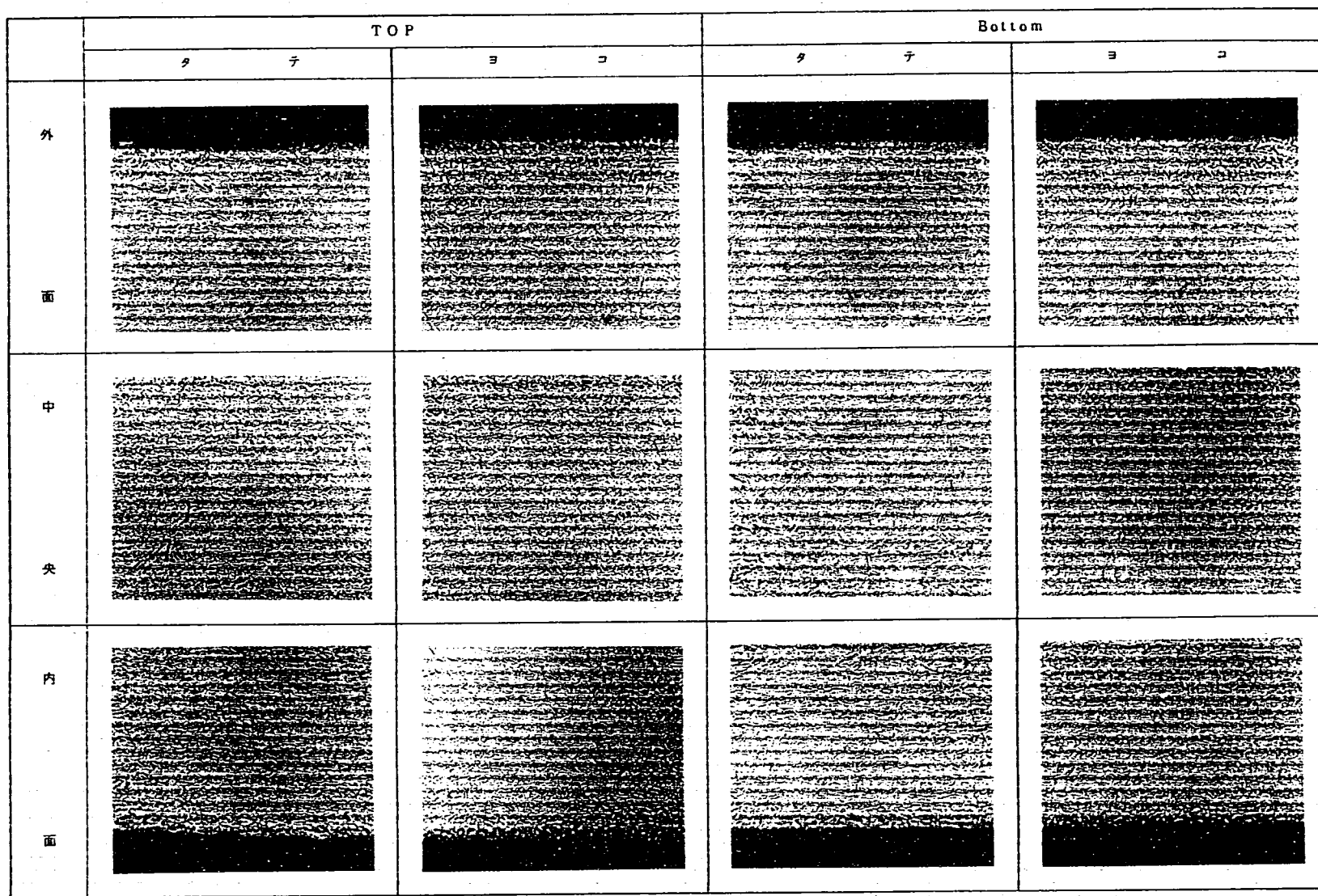
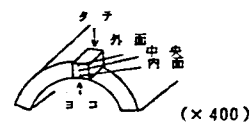


Fig. 2.3 Metallographical Photograph of Primary α Phase of the Pressure Tube
最終成型後の初析 α 相

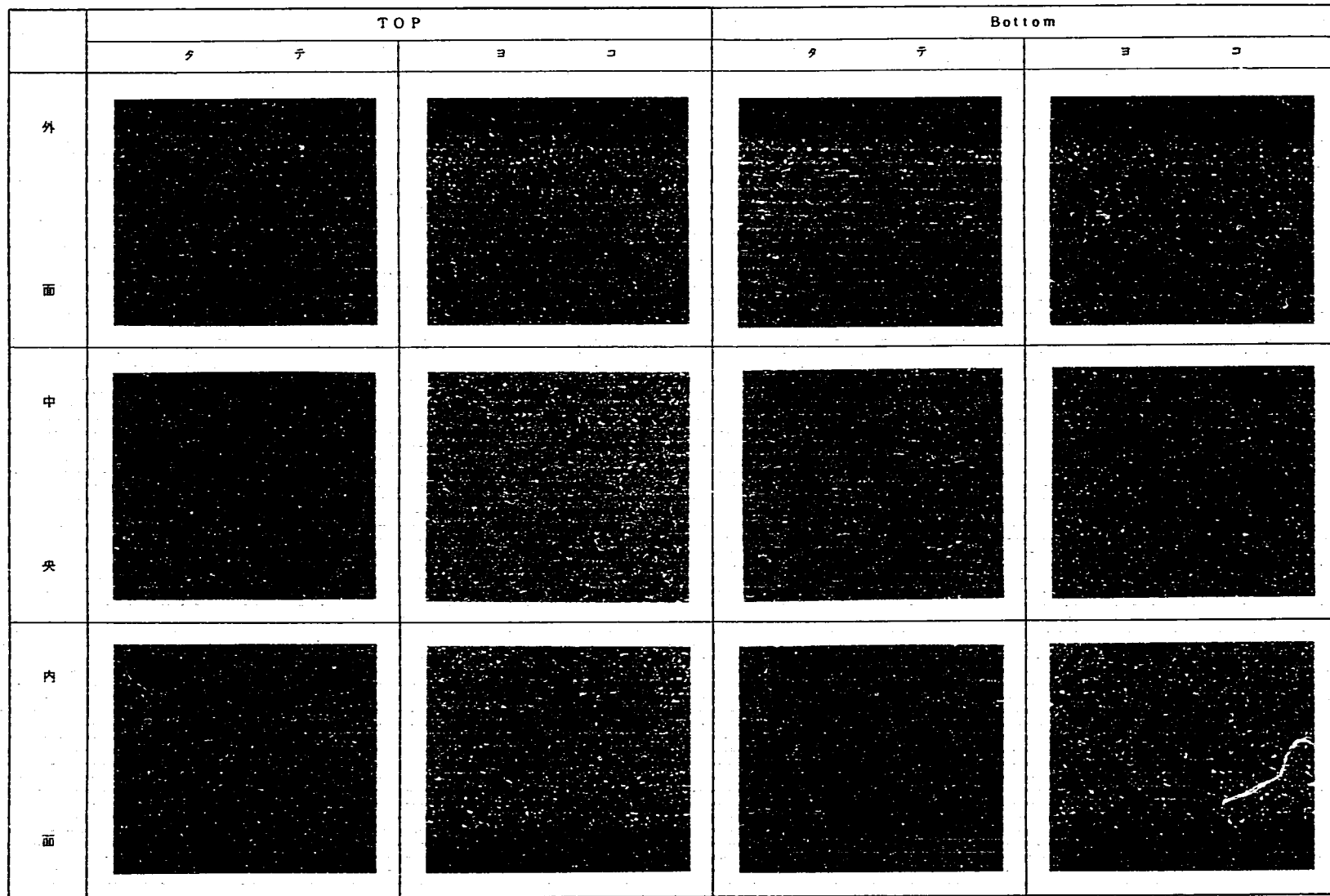
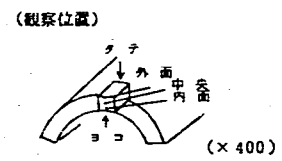
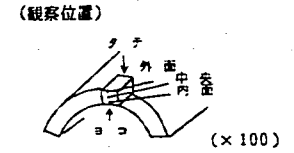


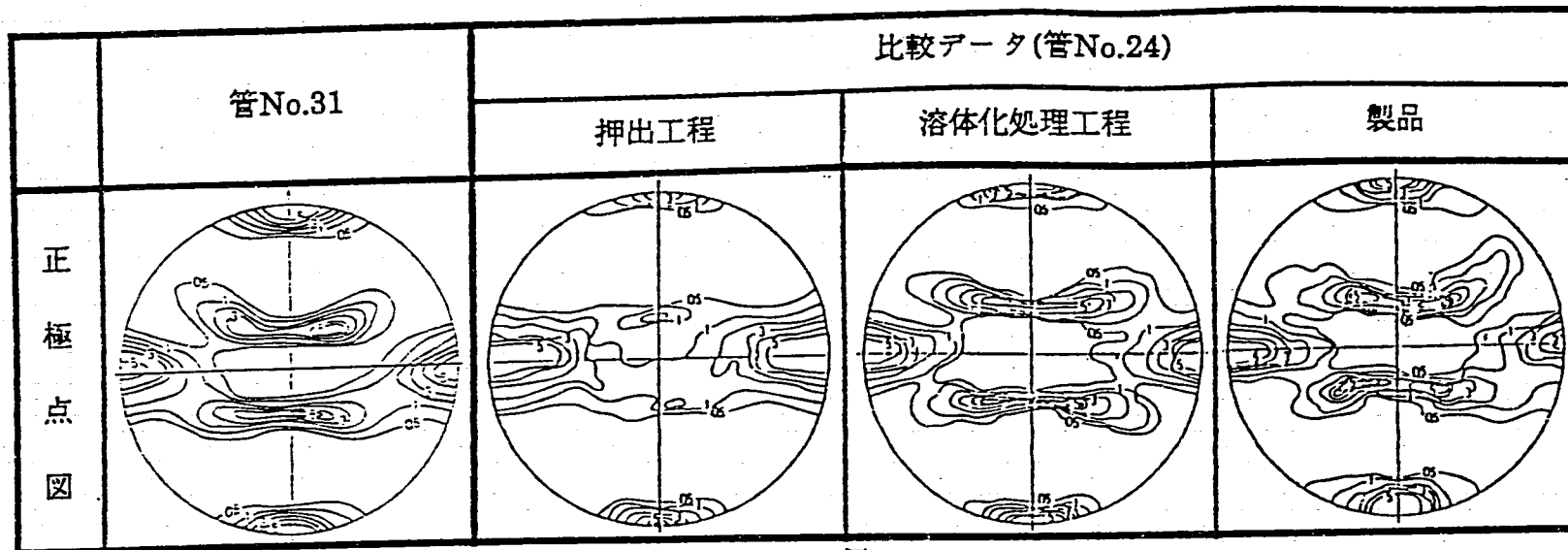
Fig. 2.4 Metallographical Photograph of Microstructure of the Pressure Tube

最終成型後のマイクロ組織

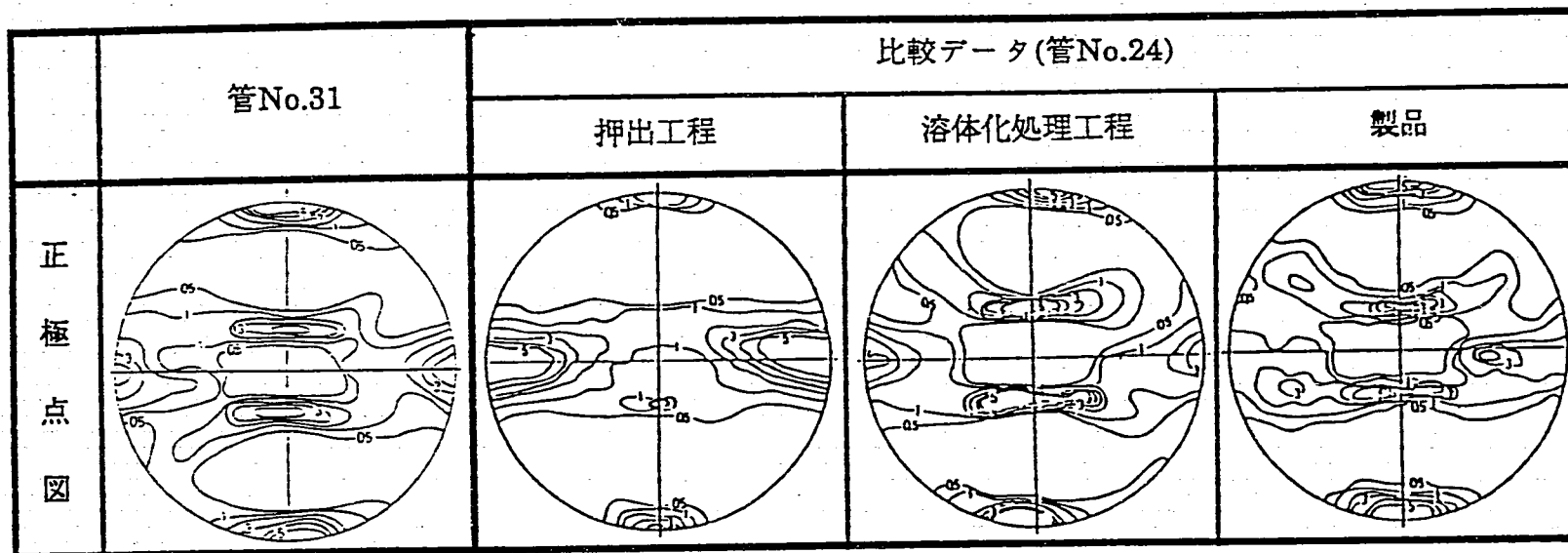


	水素富化材		水素無富化材	
	TOP (㊦)	Bottom (㊦)	TOP (㊦)	Bottom (㊦)
外 面				
中 央				
内 面				

Fig. 2.5 Metallographical Photograph of Hydrides of the Pressure Tube
最終成型後の水素化物

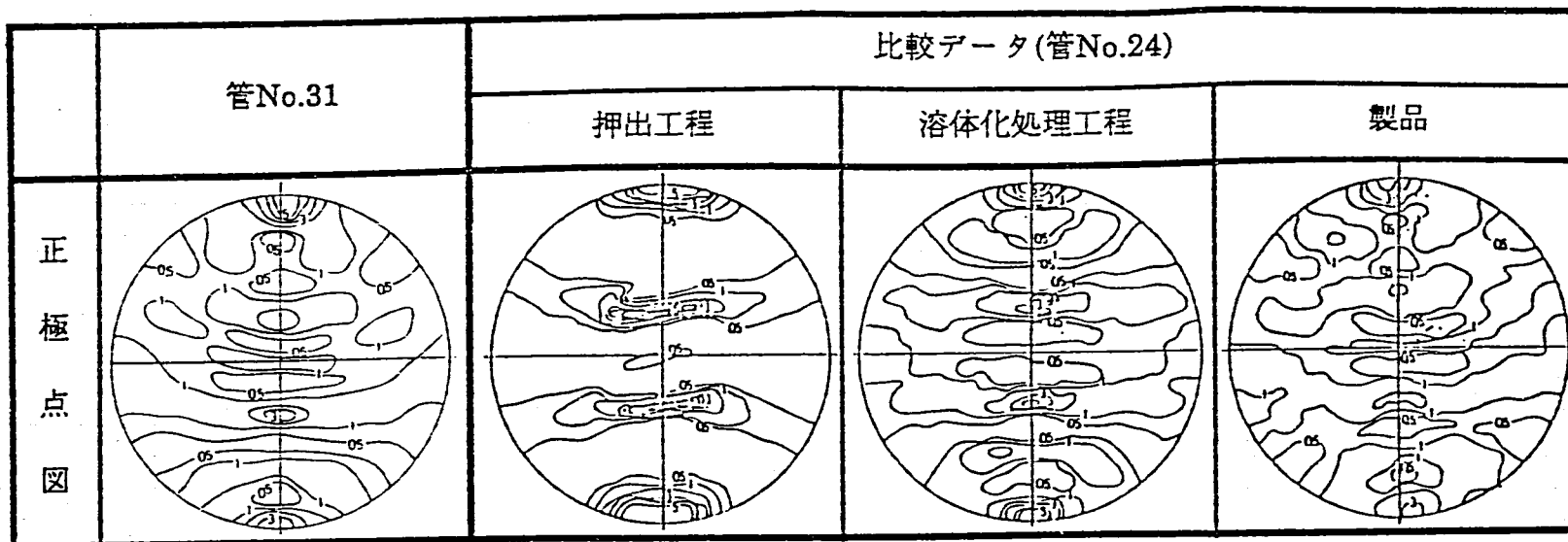


(A) Top側

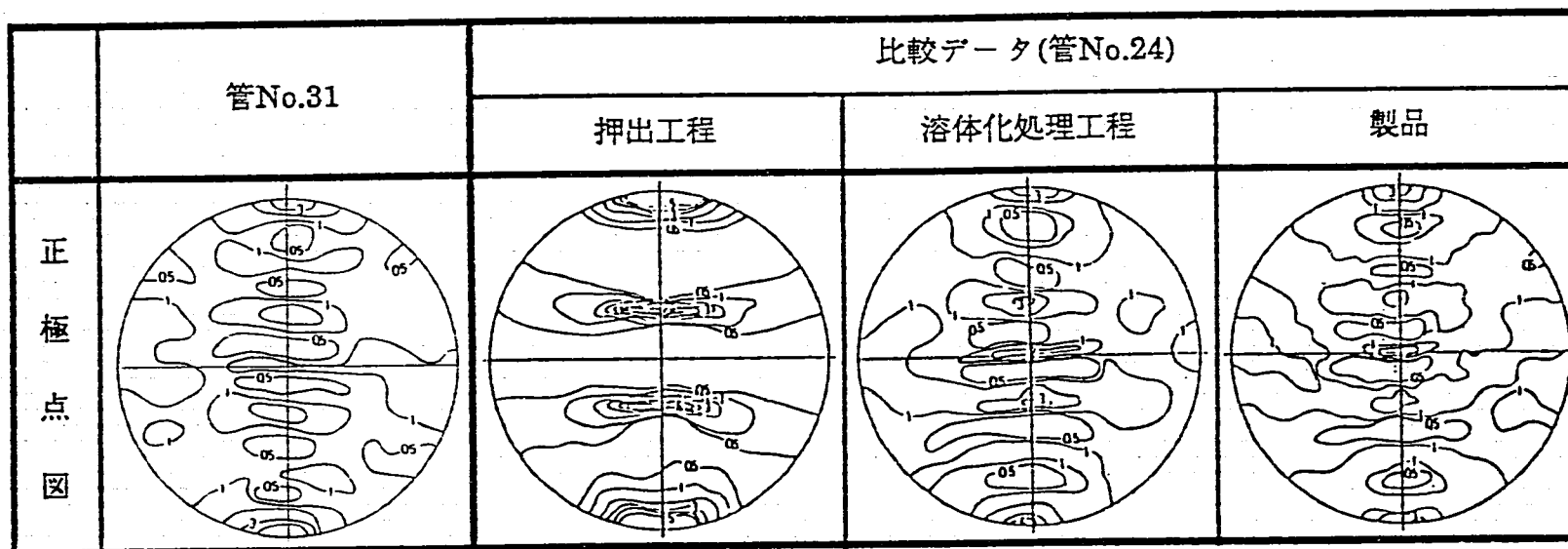


(B) Bottom側

Fig. 2.6(a) Texture Pole Figures of the Pressure Tube, (0002) Plane
 供試実寸圧力管(管No.31)の(0002)面正極点図



(A) Top側



(B) Bottom側

Fig. 2.6(b) Texture Pole Figures of the Pressure Tube, (1010) Plane
 供試実寸圧力管(管No.31)の(0101)面正極点図

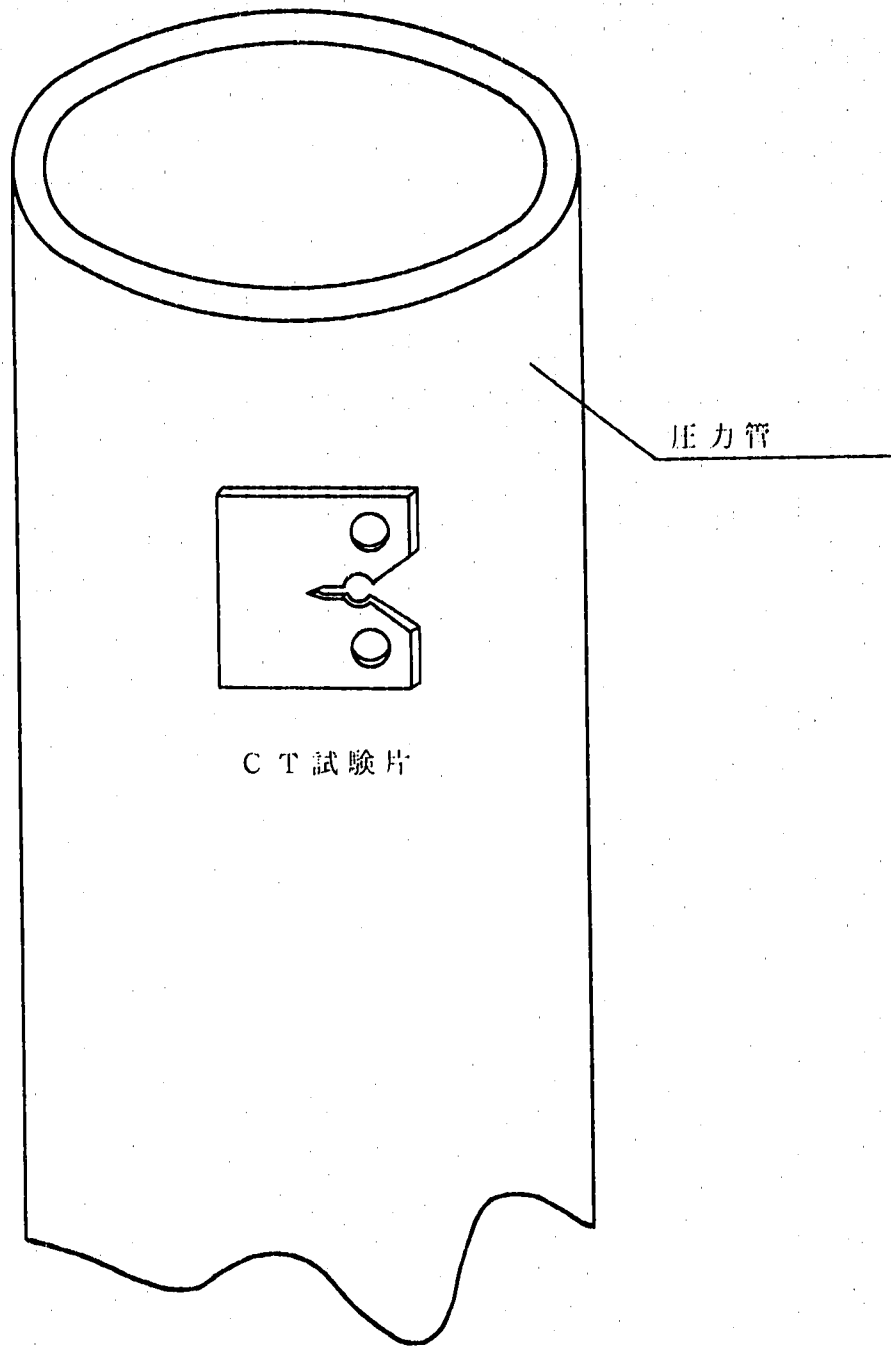


Fig. 2.7 Sampling Diagram of CT Specimen from Pressure Tube
圧力管からのCT試験片の採取図

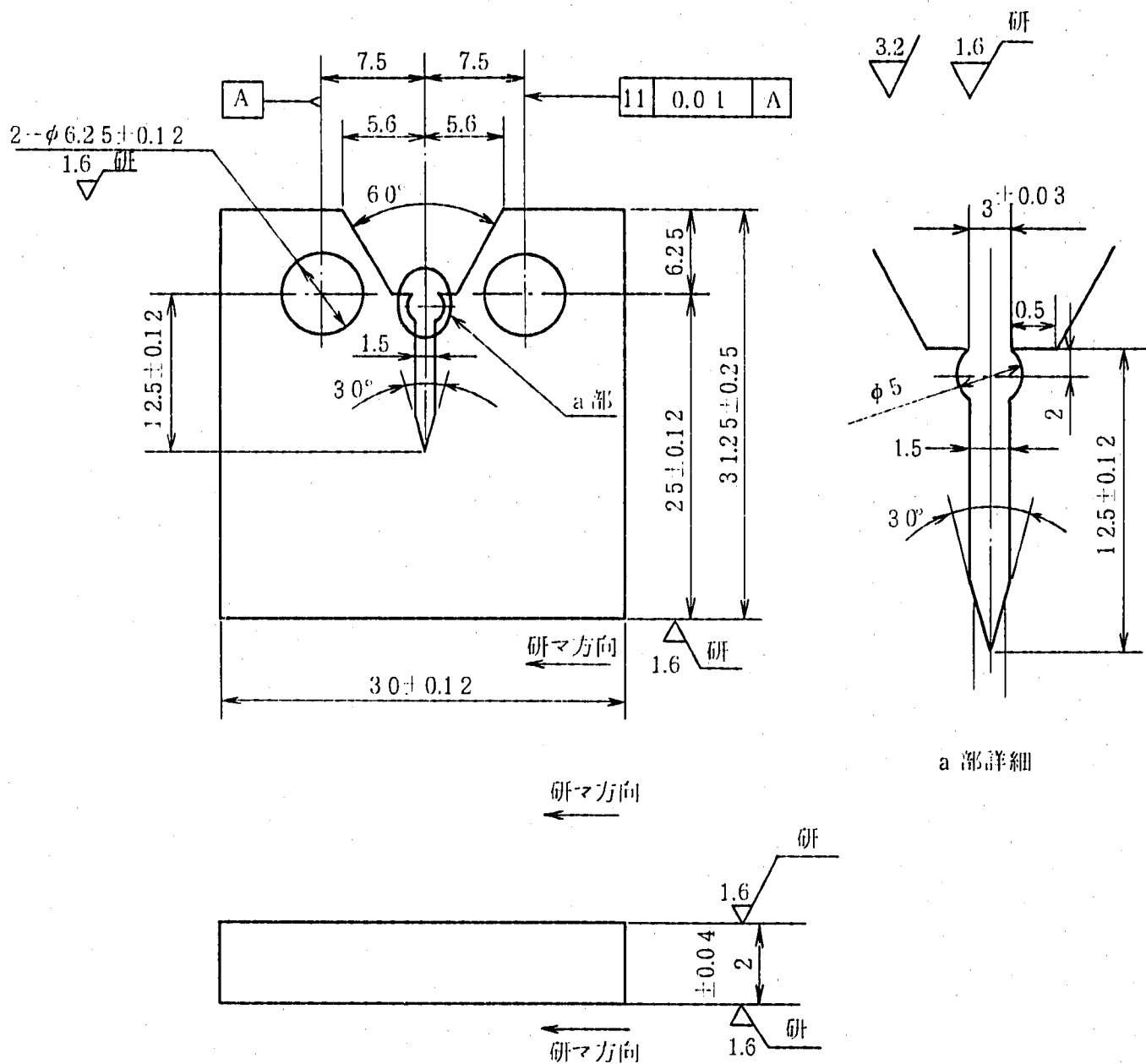


Fig. 2.8 CT Specimen
CT試験片 (JSME S001に準拠), 1/2インチ

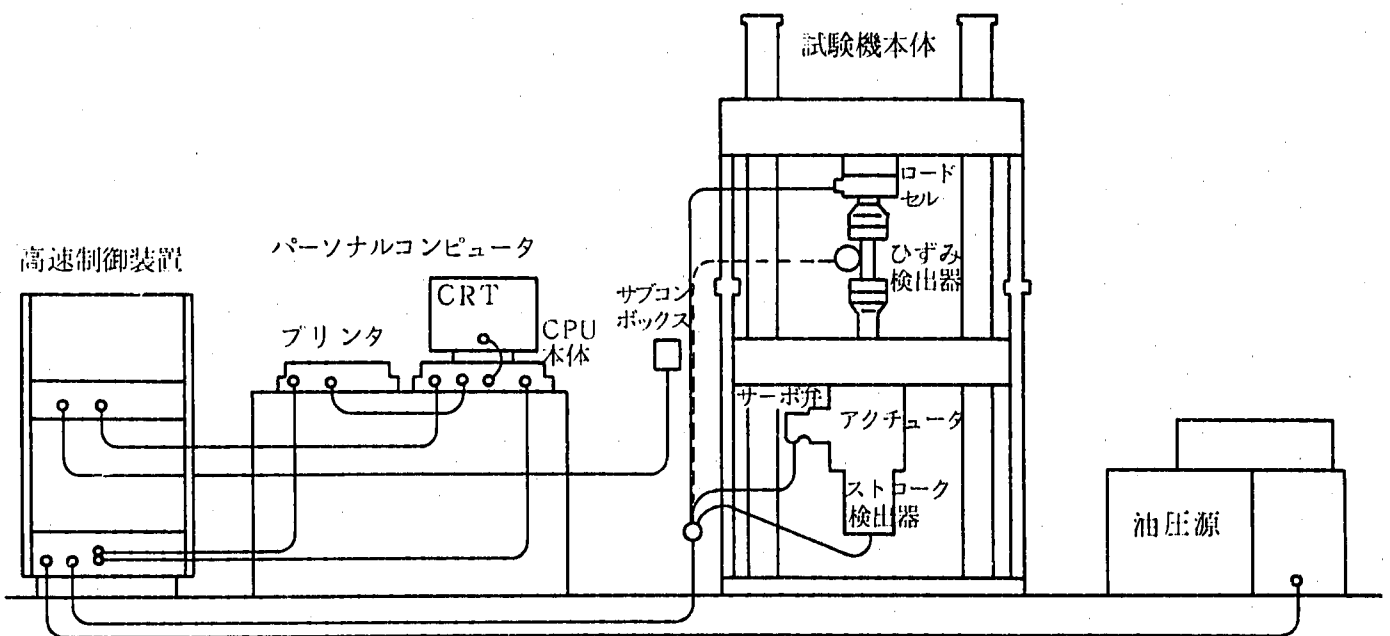
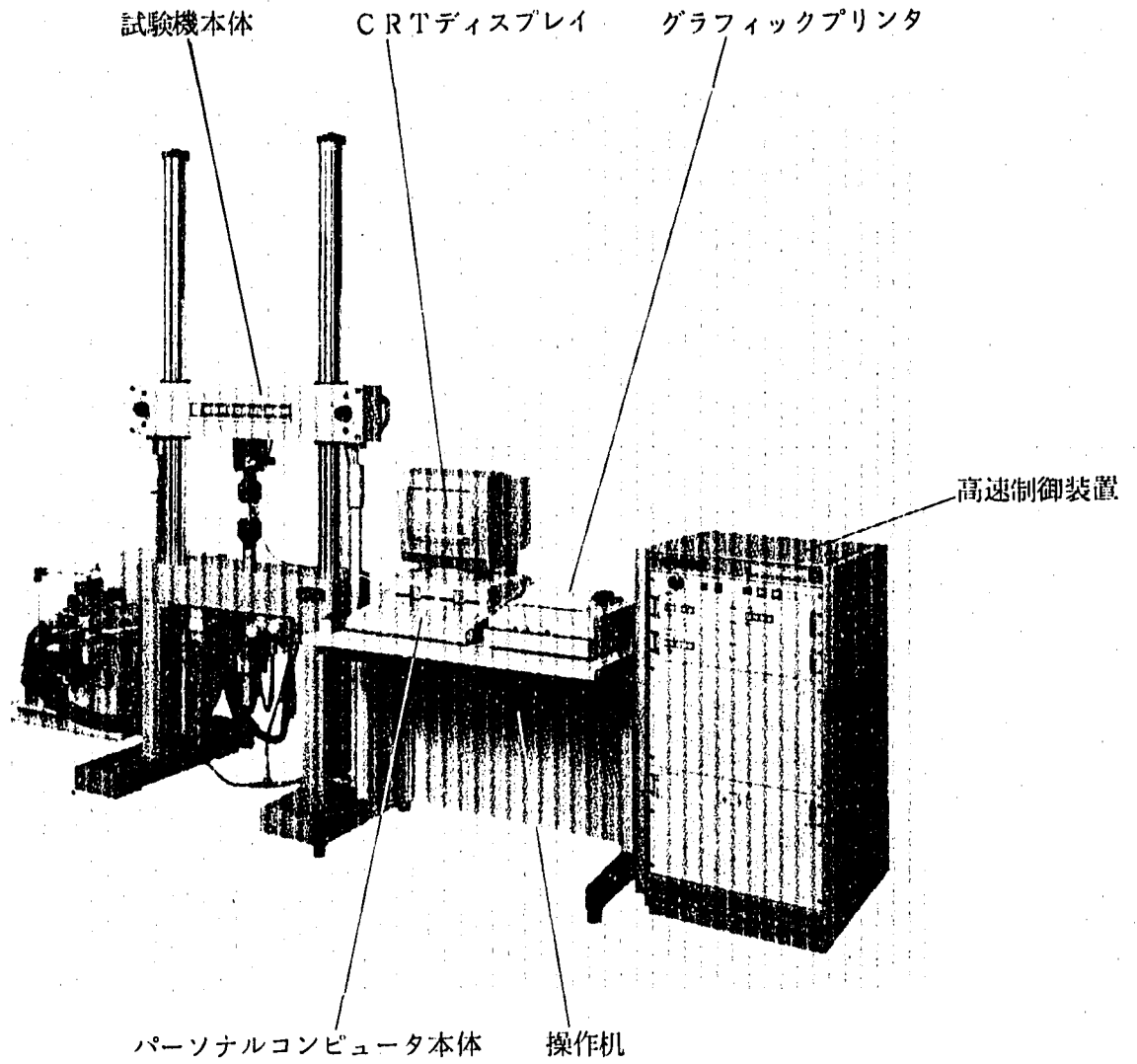


Fig. 2.9 J1c Test Apparatus
J1c 試験装置

型式	B 6 3 - 2 5 5 2 S	
測定範囲	3 ~ 6	(m m)
標点間距離	3	(m m)
入出力抵抗	3 5 0	(Ω)
出力	約 4 0 1 0	(μ s t r a i n)
使用温度	常 温	

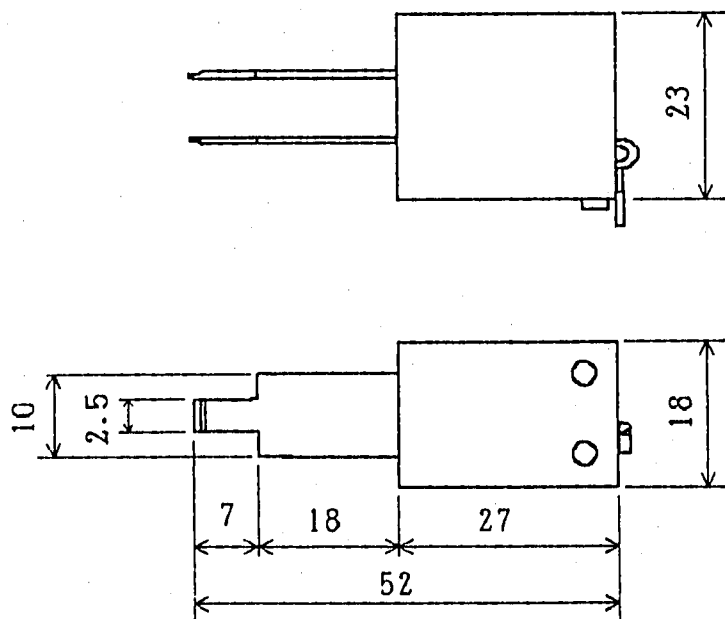
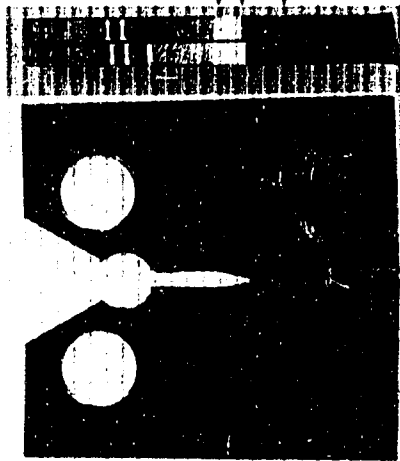
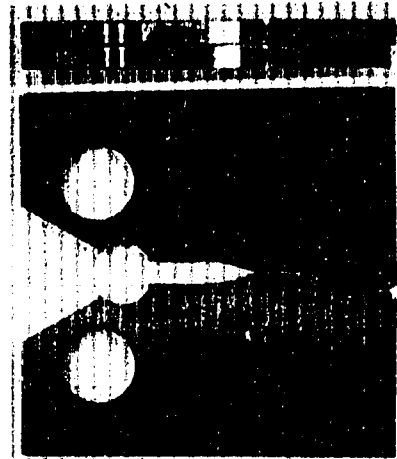


Fig. 2.10 Clip Gauge
クリップゲージ

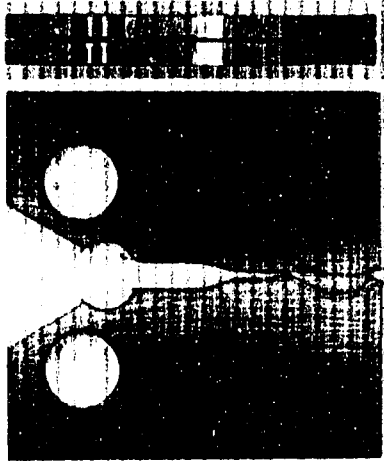
J1c破面
疲労予き裂破面 マーキング破面



C-01
C-01 試験片



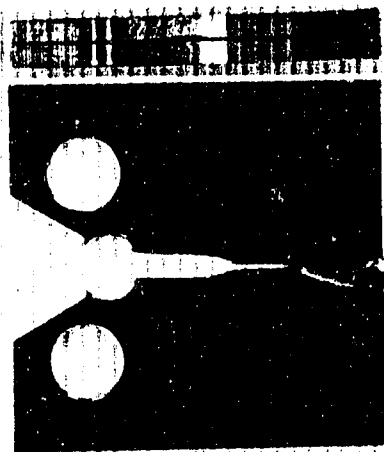
C-03
C-03 試験片



C-04
C-04 試験片



C-05
C-05 試験片



C-06
C-06 試験片



C-08
C-08 試験片

Fig. 3.1 Photograph Specimens after the Test
試験後の試験片の写真

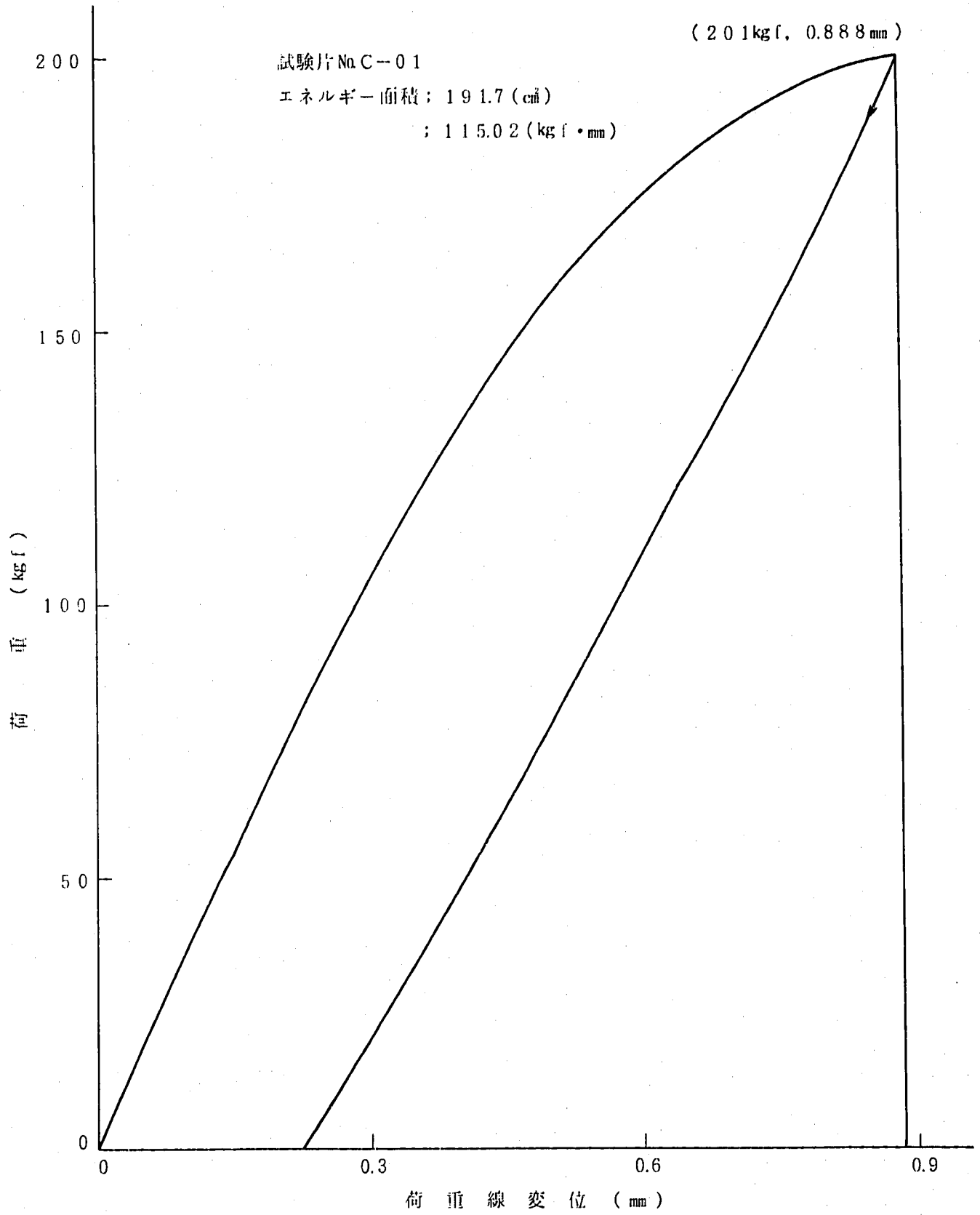


Fig. 3.2 Load-Load Line Displacement for C-01 Specimen
C-01 試験片の荷重-荷重線変位曲線

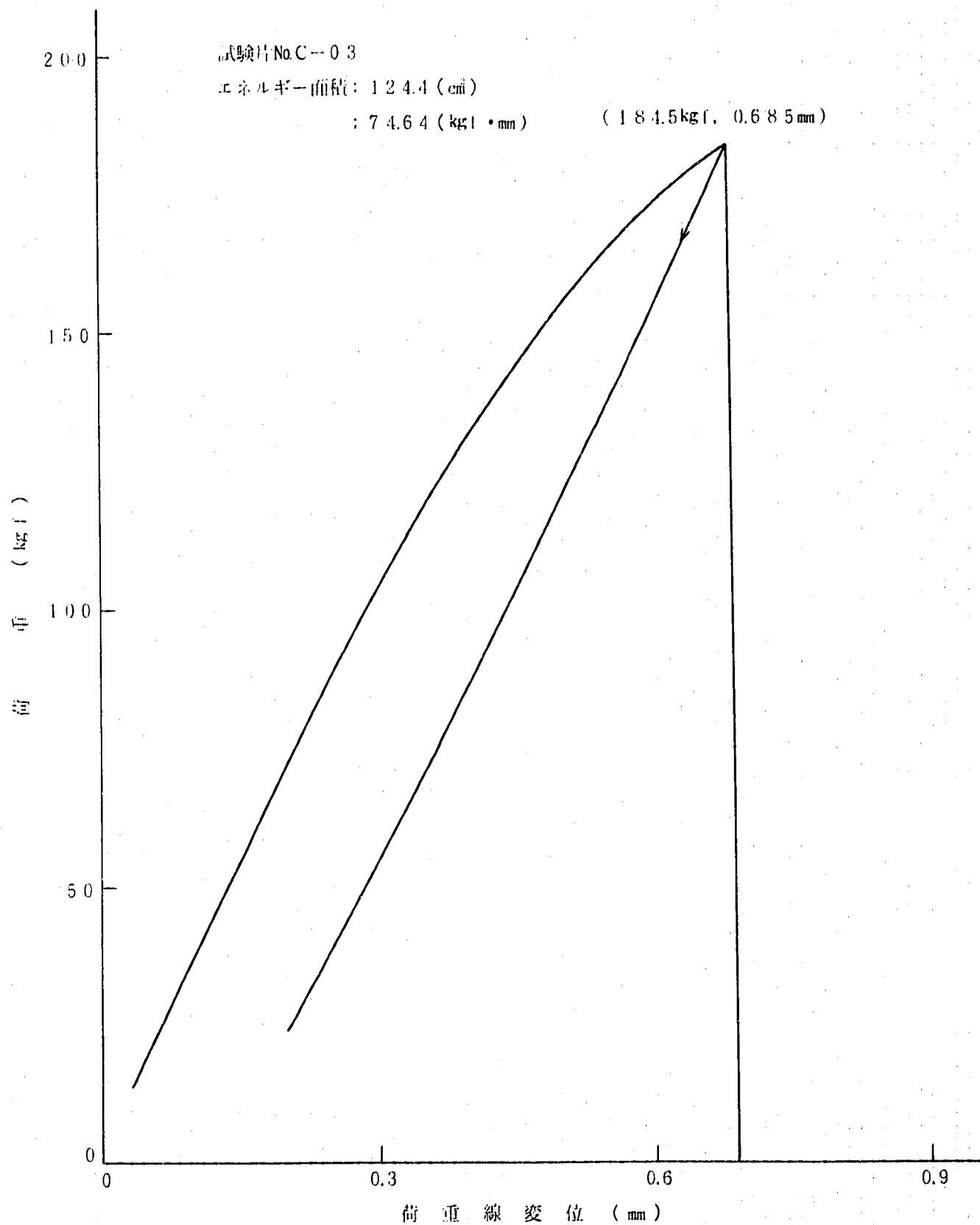


Fig. 3.3 Load-Load Line Displacement for C-03 Specimen
 C-03 試験片の荷重-荷重線変位曲線

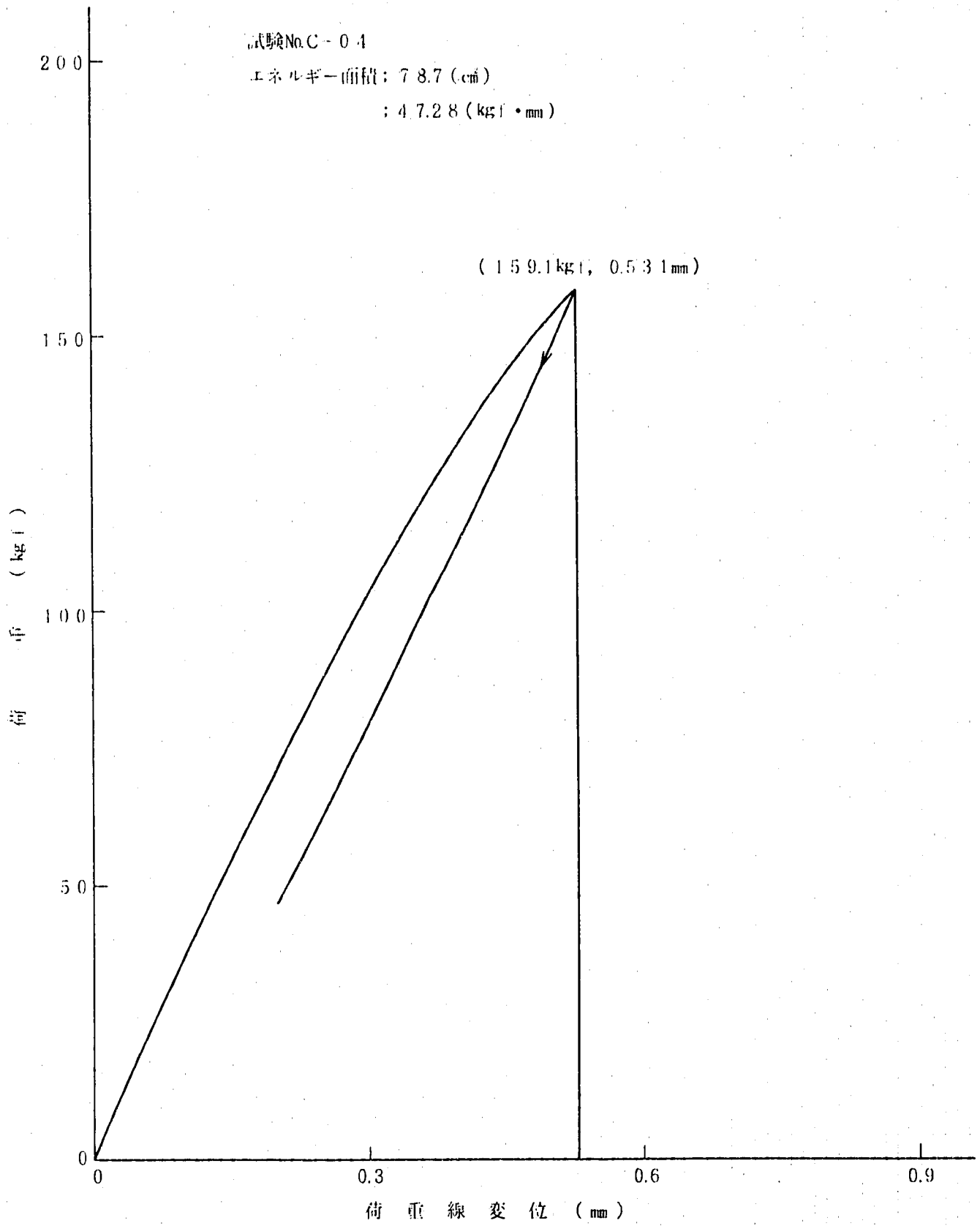


Fig. 3.4 Load-Load Line Displacement for C-04 Specimen
C-04 試験片の荷重-荷重線変位曲線

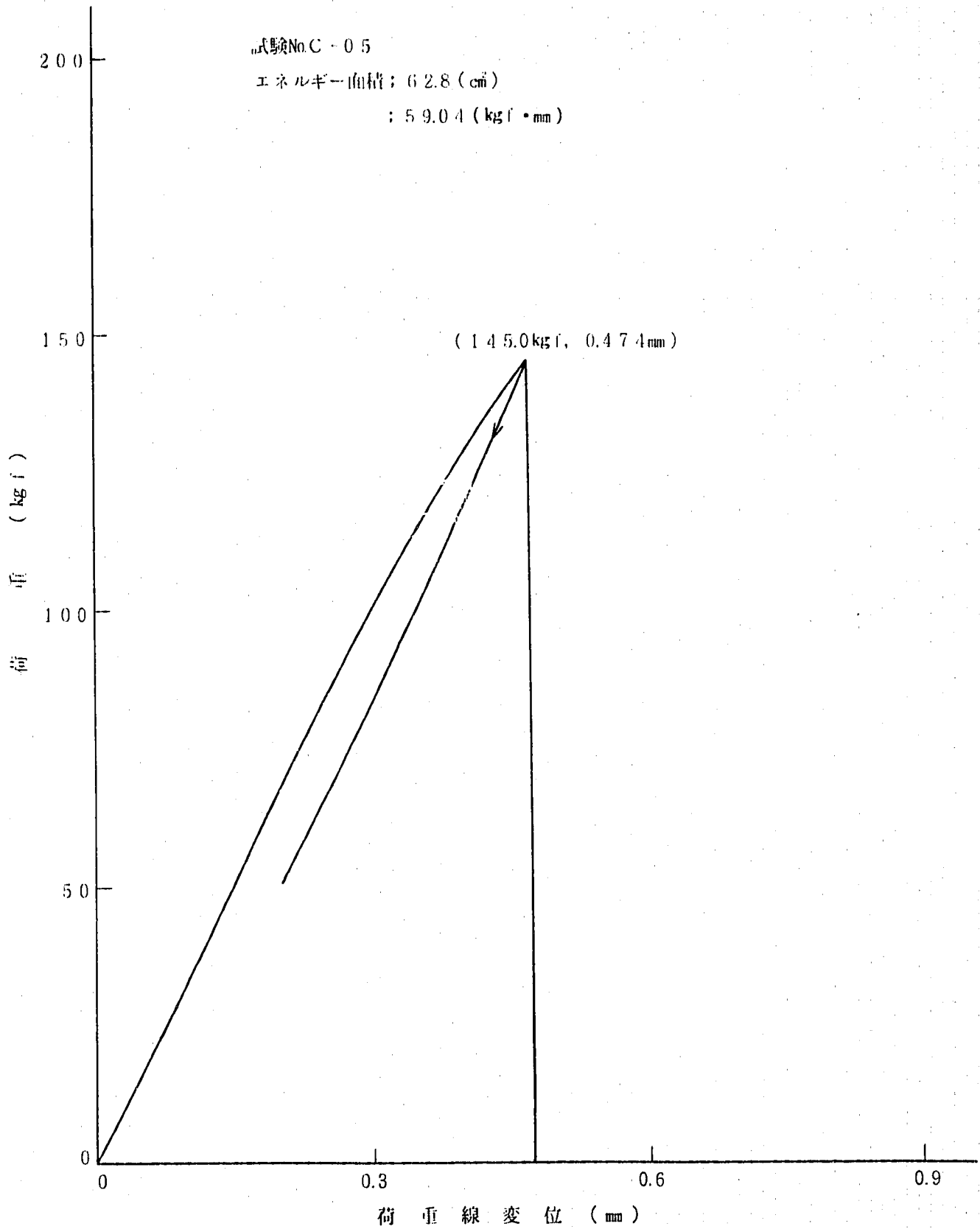


Fig. 3.5 Load-Load Line Displacement for C-05 Specimen
C-05試験片の荷重-荷重線変位曲線

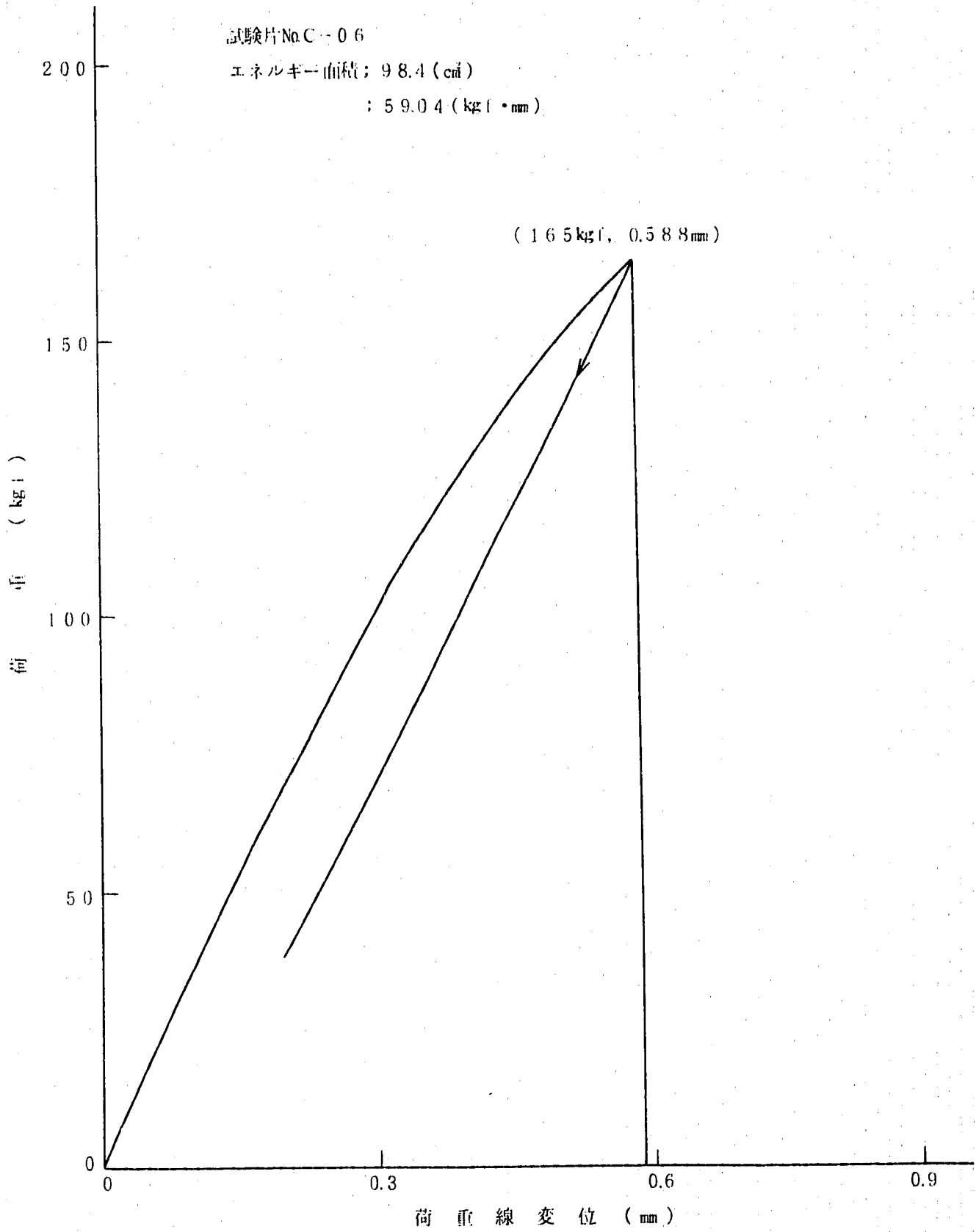


Fig. 3.6 Load-Load Line Displacement for C-06 Specimen
C-06 試験片の荷重-荷重線変位曲線

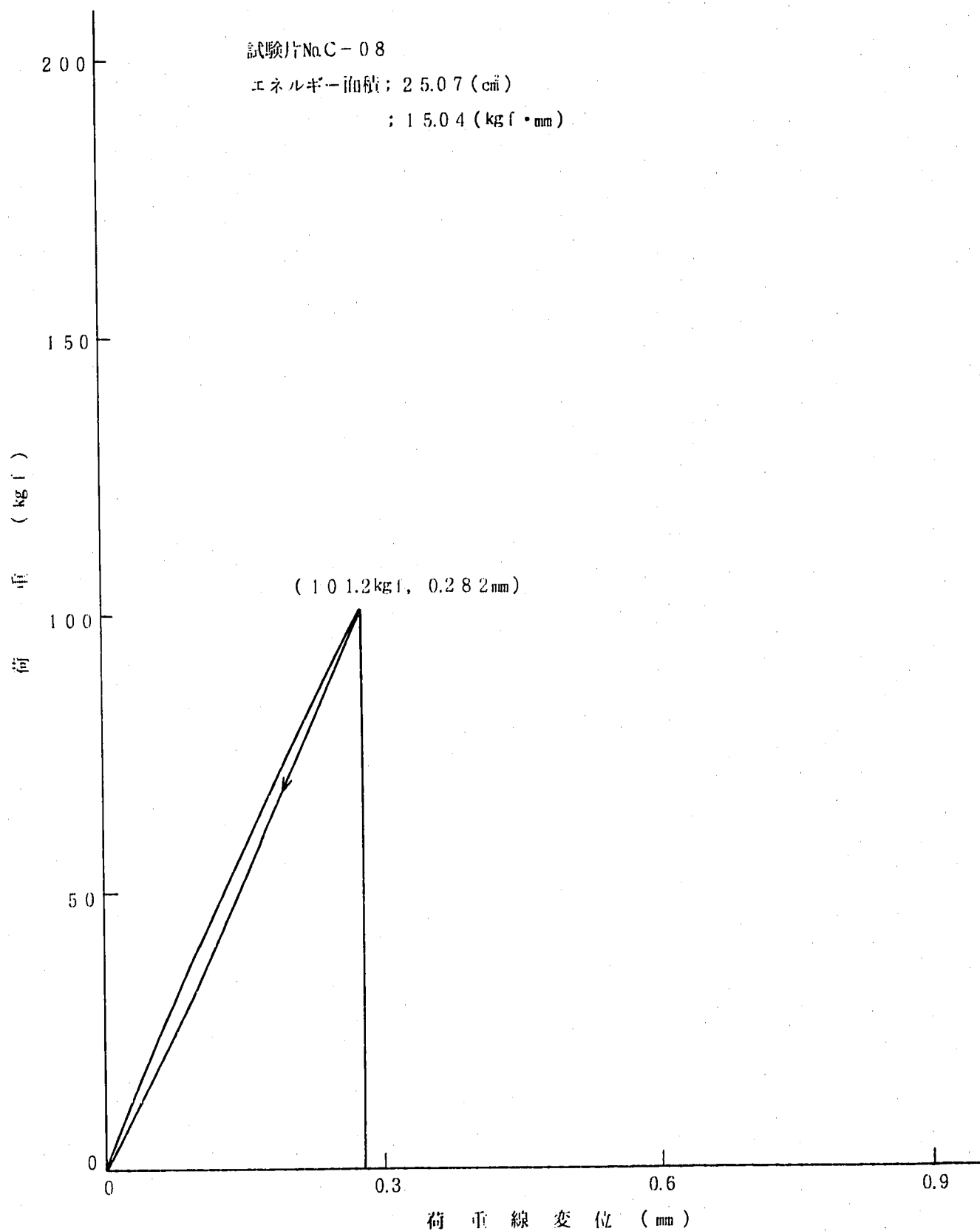


Fig. 3.7 Load-Load Line Displacement for C-08 Specimen
C-08 試験片の荷重-荷重線変位曲線

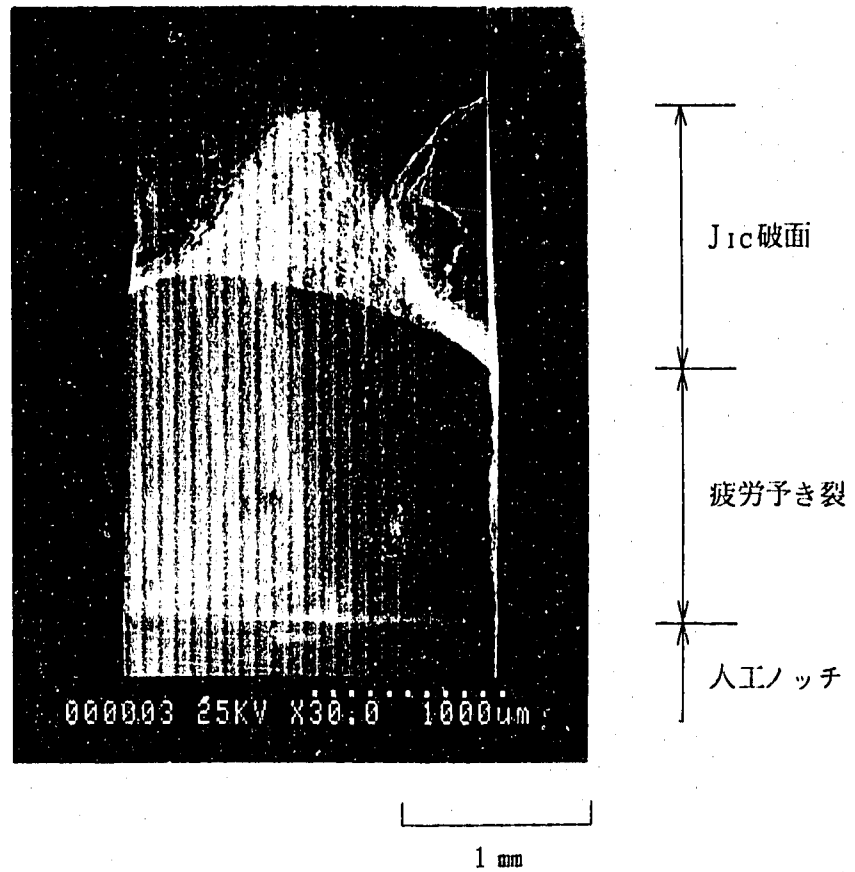


Fig.3.8 SEM Photograph of C-01 Fracture Surface
C-01 試験片破面のSEM写真

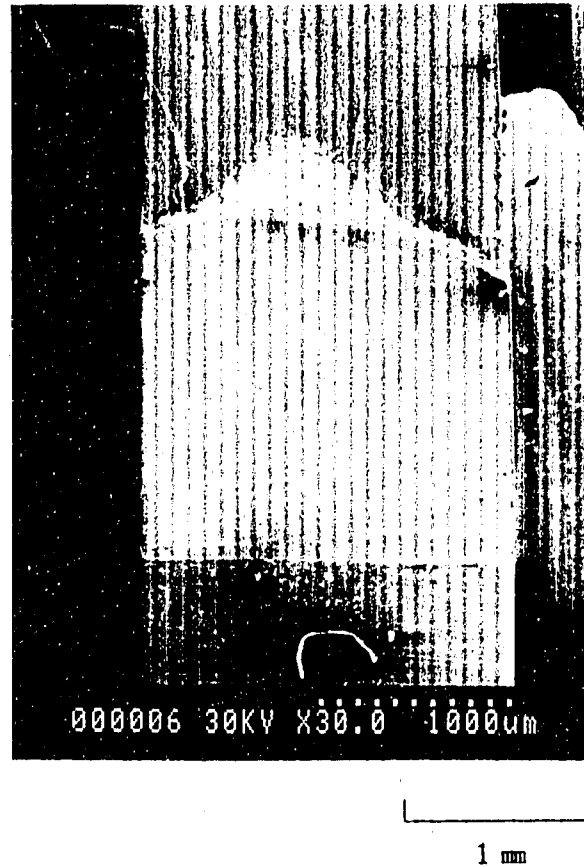
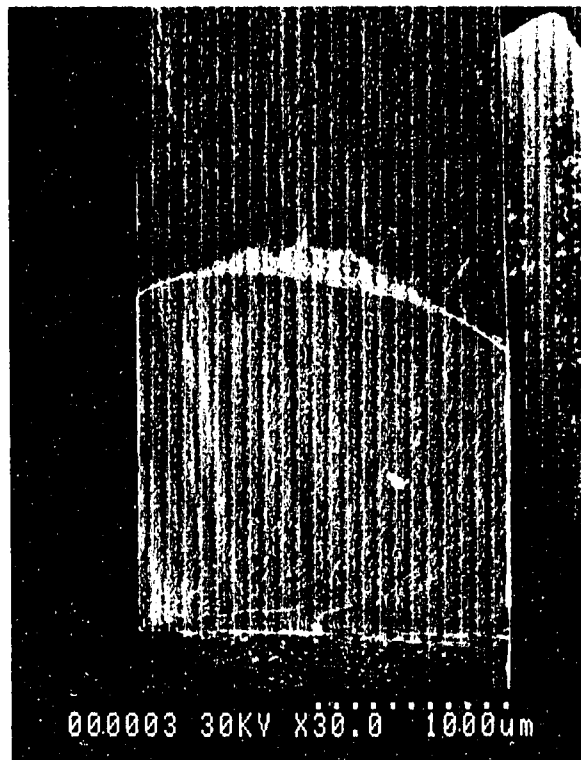
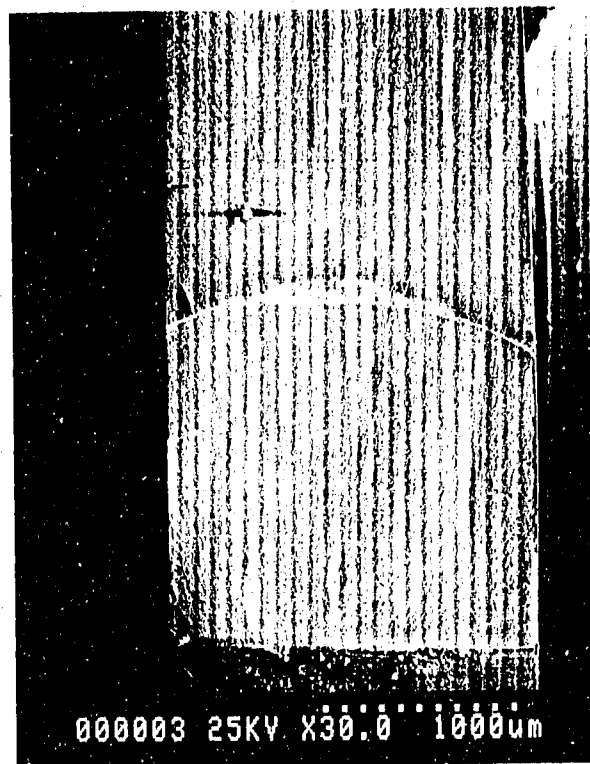


Fig. 3.9 SEM Photograph of C-03 Fracture Surface
C-03 試験片破面のSEM写真



1 mm

Fig.3.10 SEM Photograph of C-04 Fracture Surface
C-04 試験片破面のSEM写真



1 mm

Fig.3.11 SEM Photograph of C-05 Fracture Surface
C-05 試験片破面のSEM写真



1 mm

Fig. 3.12 SEM Photograph of C-06 Fracture Surface
C-06 試験片破面のSEM写真

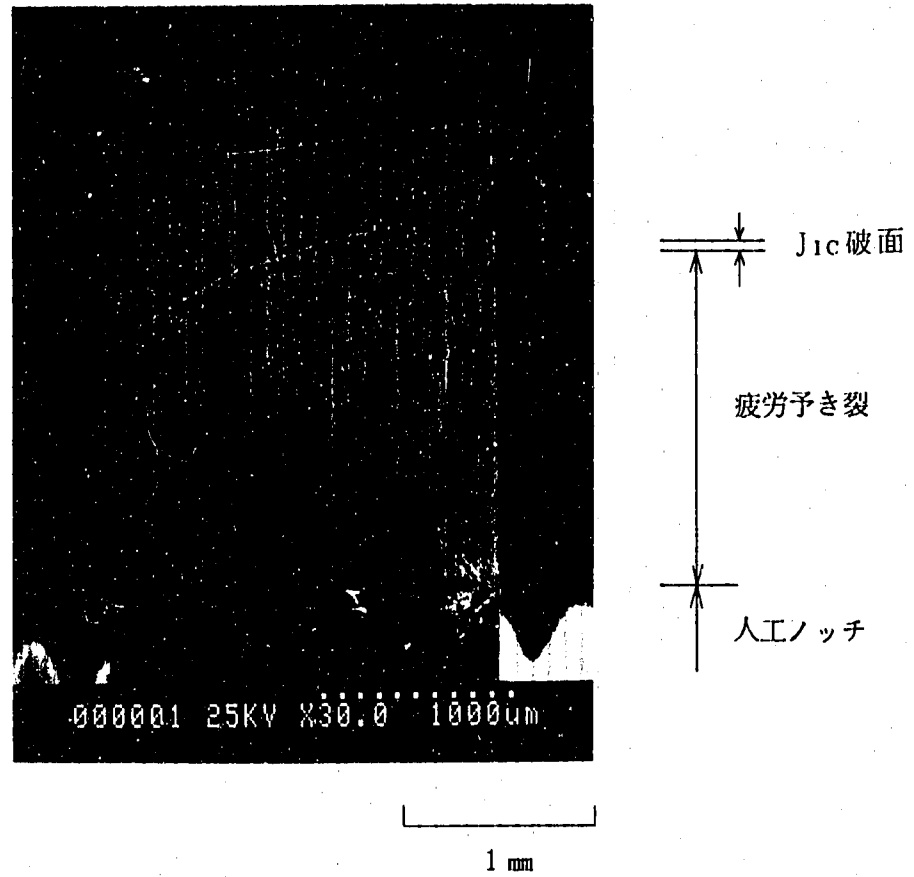
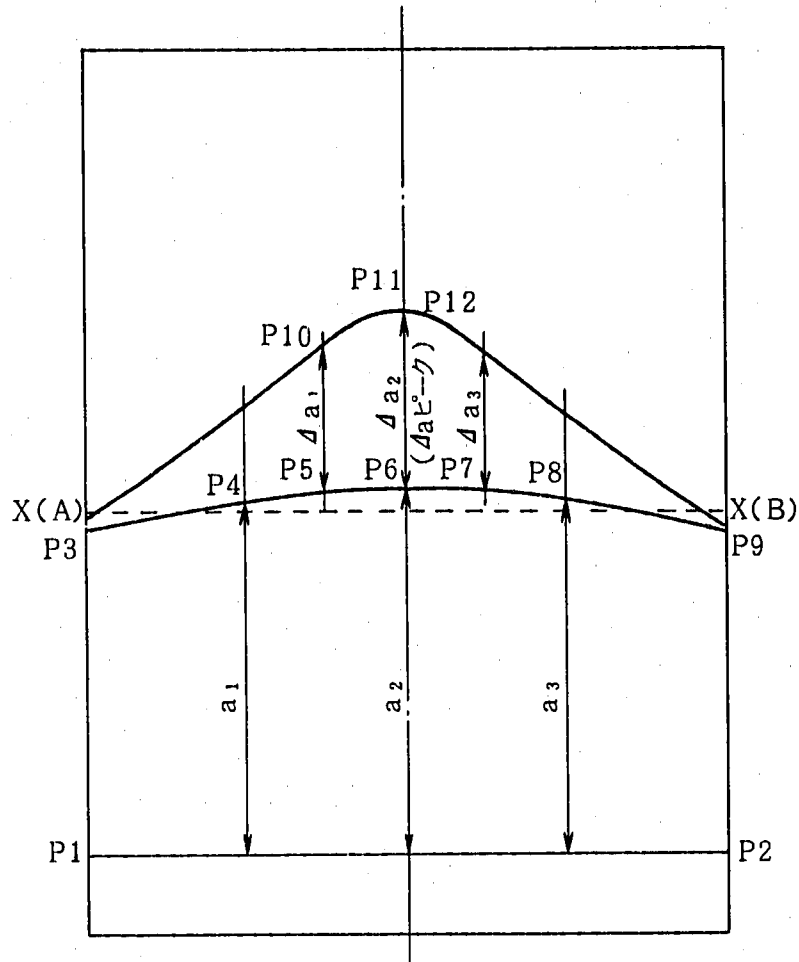


Fig. 3.13 SEM Photograph of C-08 Fracture Surface
C-08 試験片破面のSEM写真



C-01

×500でSEMによりプロット

	X 座 標	Y 座 標		X 座 標	Y 座 標
P1	11.116	10.411	P8	12.464	8.588
P2	13.099	10.231	P9	12.964	8.329
P3	10.964	8.625	P10	11.714	7.659
P4	11.464	8.447	P11	11.964	7.567
P5	11.714	8.455	P12	12.214	7.910
P6	11.964	8.483	P13		
P7	12.214	8.529	P14		

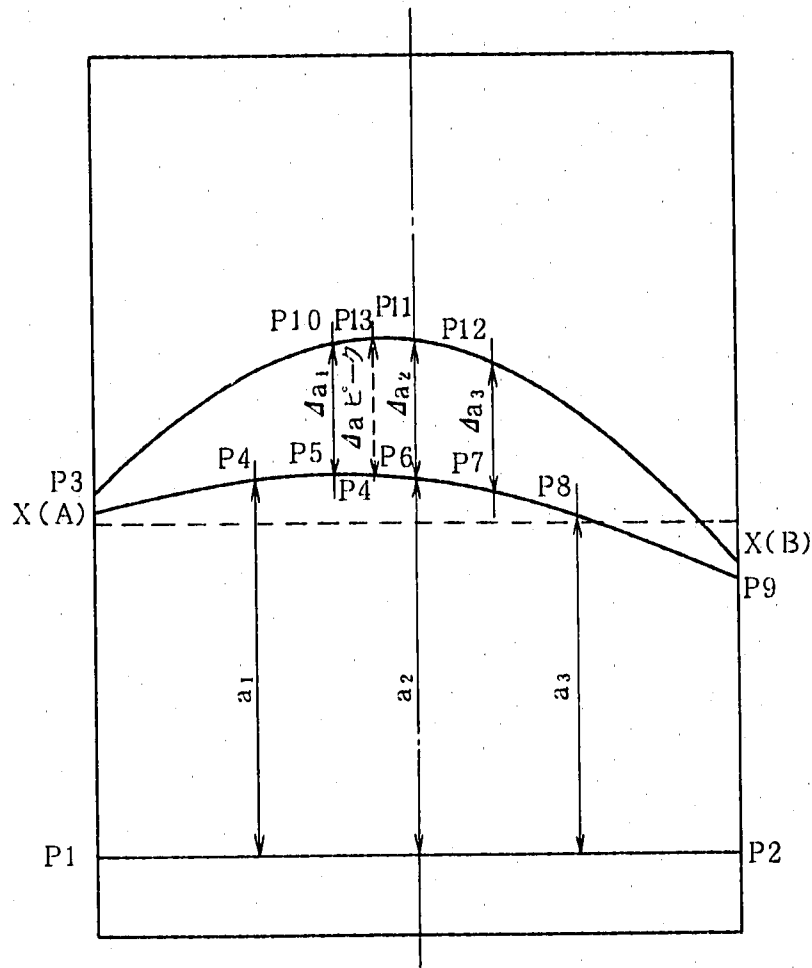
X(A)=10.964 X(B)=12.964 単位(mm)

疲労予き裂長さ及び Δa を求める為SEMで各点の座標を求めた。

座標はSEMの試験片ステージ座標である。

Fig. 3.14 Determination of $a_1, a_2, a_3, \Delta a_1, \Delta a_2$ and Δa_3 for C-01 Specimen

C-01 試験片の $a_1, a_2, a_3, \Delta a_1, \Delta a_2, \Delta a_3$ を決めるためのデータ



C-03

×500でSEMによりプロット

	X 座標	Y 座標		X 座標	Y 座標
P1	10.810	9.088	P8	12.120	7.289
P2	12.789	8.894	P9	12.645	7.483
P3	10.652	7.413	P10	11.383	6.870
P4	11.137	7.247	P11	11.629	6.859
P5	11.383	7.240	P12	11.847	7.021
P6	11.629	7.253	P13	11.581	6.814
P7	11.847	7.265	P14	11.581	7.257

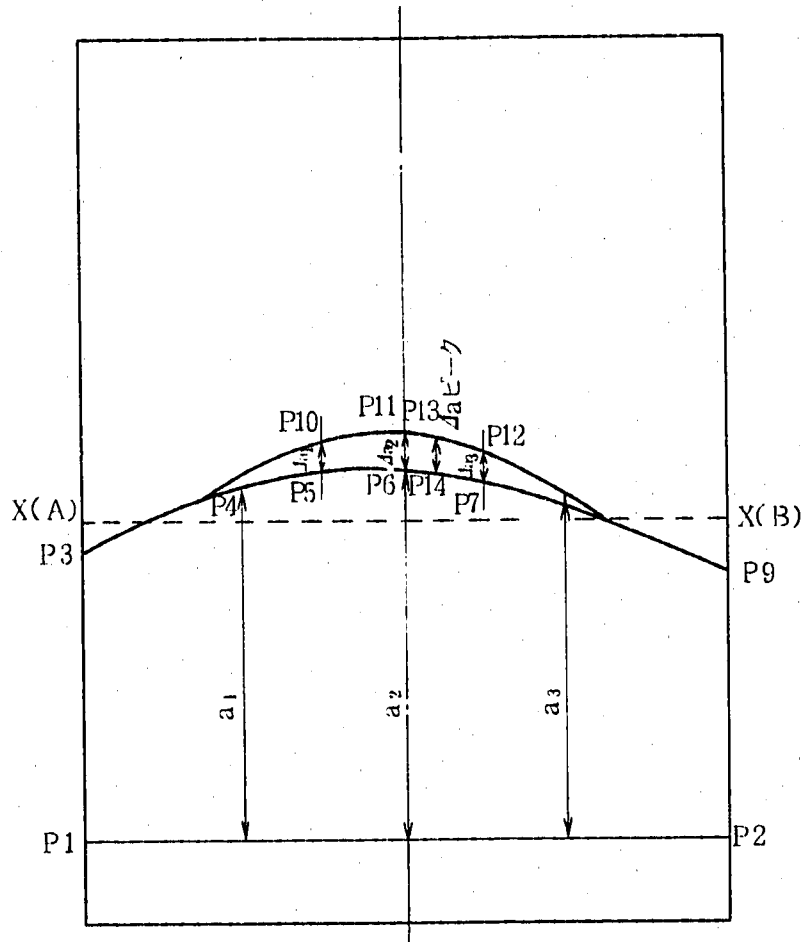
X(A) = 10.654 X(B) = 12.612 単位 (mm)

疲労予き裂長さ及び Δa を求める為 SEM で各点の座標を求めた。

座標は SEM の試験片ステージ座標である。

Fig. 3.15 Determination of $a_1, a_2, a_3, \Delta a_1, \Delta a_2$ and Δa_3 for C-03 Specimen

C-03 試験片の $a_1, a_2, a_3, \Delta a_1, \Delta a_2, \Delta a_3$ を決めるためのデータ



C-04

×500でSEMによりプロット

	X 座 標	Y 座 標		X 座 標	Y 座 標
P1	11.061	10.011	P8	12.389	8.144
P2	13.058	9.826	P9	12.909	8.374
P3	10.905	8.239	P10	11.648	7.934
P4	11.402	8.077	P11	11.895	7.891
P5	11.648	8.065	P12	12.142	7.975
P6	11.859	8.081	P13	12.052	7.903
P7	12.142	8.112	P14	12.052	8.097

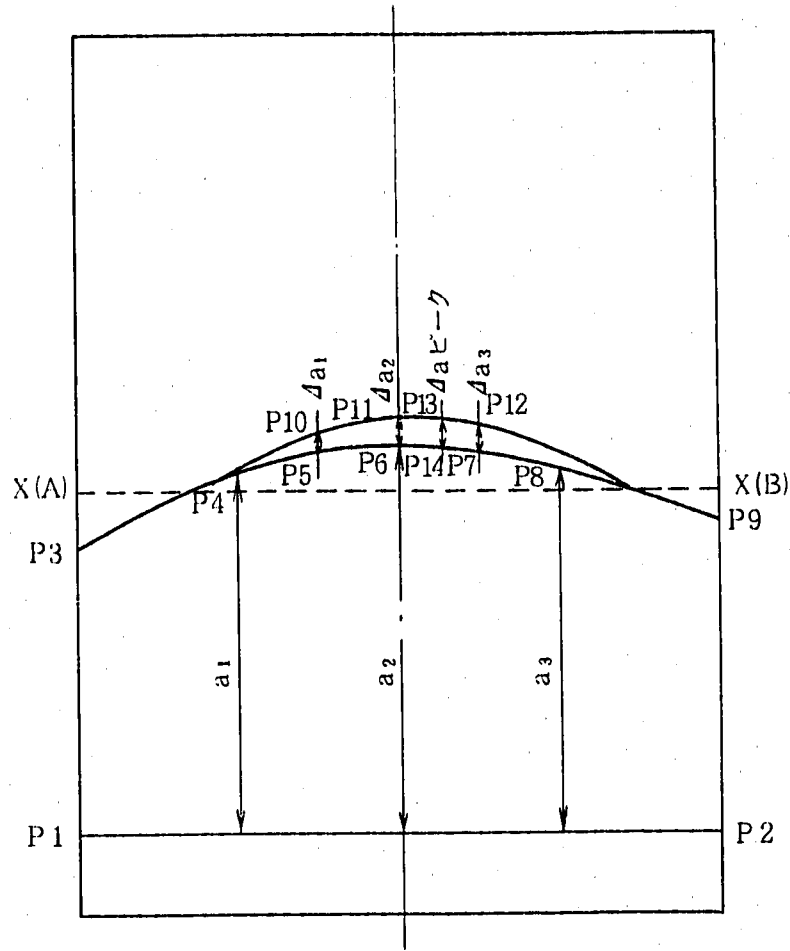
X(A)= 10.908 X(B)= 12.882 単位(mm)

疲労予き裂長さ及び Δa を求める為SEMで各点の座標を求めた。

座標はSEMの試験片ステージ座標である。

Fig. 3.16 Determination of $a_1, a_2, a_3, \Delta a_1, \Delta a_2$ and Δa_3 for C-04 Specimen

C-04 試験片の $a_1, a_2, a_3, \Delta a_1, \Delta a_2, \Delta a_3$ を決めるためのデータ



C-05

×500でSEMによりプロット

	X 座 標	Y 座 標	P	X 座 標	Y 座 標
P 1	11.758	10.061	P 8	13.103	8.167
P 2	13.749	9.874	P 9	13.605	8.366
P 3	11.605	8.366	P 10	12.355	8.043
P 4	12.105	8.187	P 11	12.605	7.993
P 5	12.355	8.152	P 12	12.855	8.064
P 6	12.605	8.135	P 13	12.587	7.993
P 7	12.855	8.142	P 14	12.587	8.137

単位 (mm)

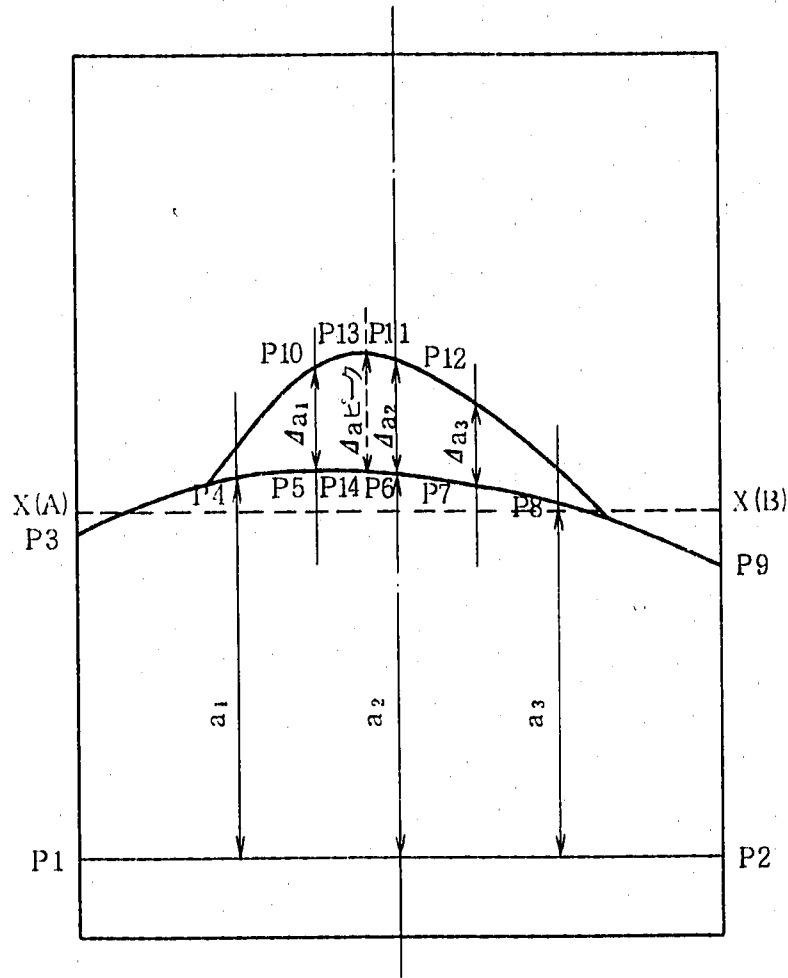
$X(A) = 11.605$ $X(B) = 13.605$

疲労予き裂長さ及び Δa を求める為SEMで各点の座標を求めた。

座標はSEMの試験片ステージ座標である。

Fig. 3.17 Determination of $a_1, a_2, a_3, \Delta a_1, \Delta a_2$ and Δa_3 for C-05 Specimen.

C-05 試験片の $a_1, a_2, a_3, \Delta a_1, \Delta a_2, \Delta a_3$ を決めるためのデータ



C-06

×500でSEMによりプロット

	X 座 標	Y 座 標		X 座 標	Y 座 標
P 1	11.278	9.754	P 8	12.558	7.906
P 2	13.222	9.566	P 9	13.082	8.103
P 3	11.113	7.989	P 10	11.836	7.513
P 4	11.595	7.816	P 11	12.077	7.516
P 5	11.836	7.819	P 12	12.317	7.677
P 6	12.077	7.835	P 13	11.467	7.490
P 7	12.317	7.858	P 14	11.467	7.822

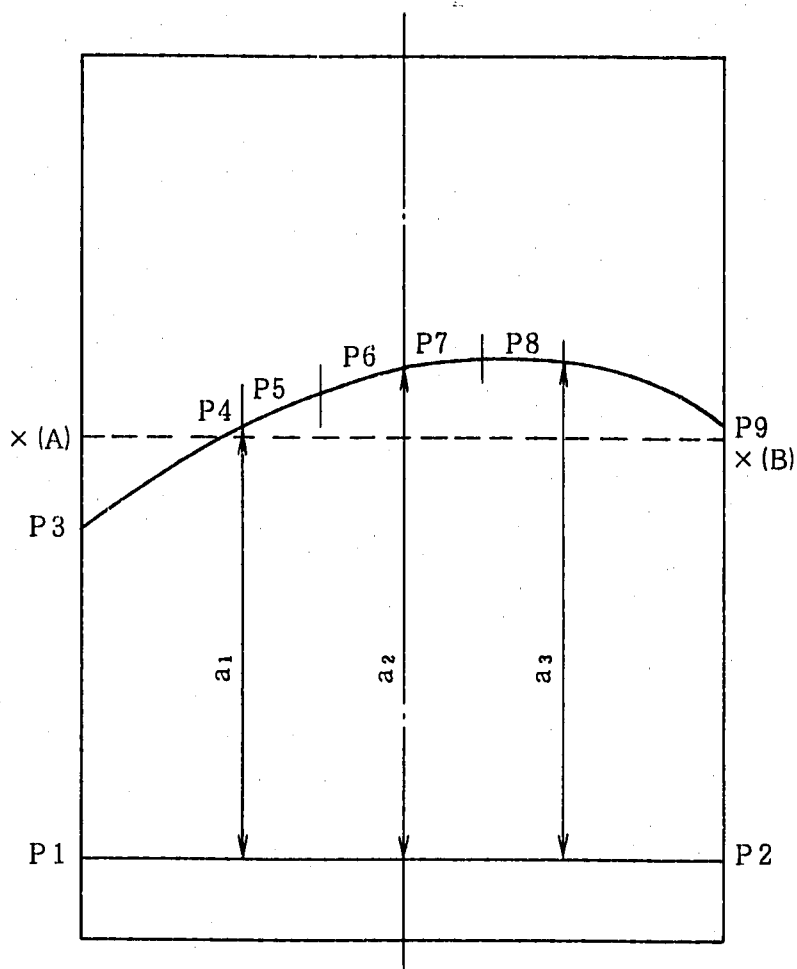
単位 (mm)

$$X(A) = 11.114 \quad X(B) = 13.039$$

疲労予き裂長さ Δa を求める為SEMで各点の座標を求めた。

座標はSEMの試験片ステージ座標である。

Fig.3.18 Determination of $a_1, a_2, a_3, \Delta a_1, \Delta a_2, \Delta a_3$ for C-06 Specimen
C-06 試験片の $a_1, a_2, a_3, \Delta a_1, \Delta a_2, \Delta a_3$ を決めるためのデータ



C-08

×500でSEMによりプロット

	X 座 標	Y 座 標		X 座 標	Y 座 標
P 1	1 1.2 2 8	1 0.7 4 8	P 8	1 2.4 7 4	8.7 7 7
P 2	1 3.2 3 1	1 0.5 3 4	P 9	1 3.0 9 9	8.7 7 7
P 3	1 1.1 3 6	9.4 7 5	P 1 0	—	—
P 4	1 1.4 8 2	9.2 0 2	P 1 1	—	—
P 5	1 1.7 3 0	9.0 4 4	P 1 2	—	—
P 6	1 1.9 7 8	8.9 4 5	P 1 3	—	—
P 7	1 2.2 2 6	8.8 4 7	P 1 4	—	—

単位 (mm)

$X(A) = 10.986$ $X(B) = 12.970$

疲労予き裂長さを求める為SEMで各点の座標を求めた。

座標はSEMの試験片ステージ座標である。

Fig. 3.19 Determination of $a_1, a_2, a_3, \Delta a_1, \Delta a_2, \Delta a_3$ for C-08 Specimen
C-08試験片の $a_1, a_2, a_3, \Delta a_1, \Delta a_2, \Delta a_3$ を決めるためのデータ

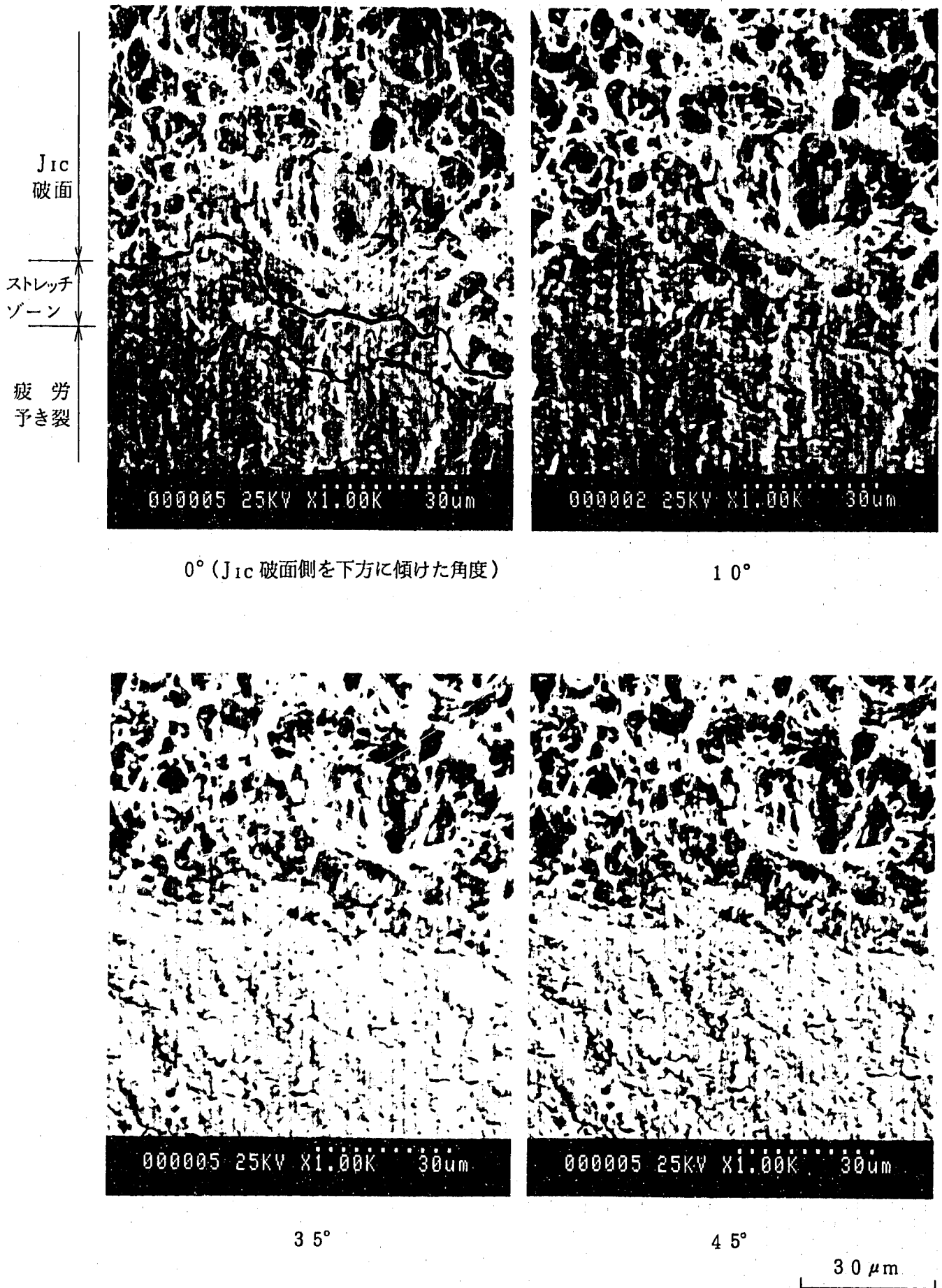


Fig. 3.2 0(a) SEM Photographs about Stretch Zone at 3/8B for C-01 Specimen
 C-01 試験片の 3/8 B (B : 板厚) 位置でのストレッチゾーンの SEM 写真



0°



10°



35°



45°

30 μm

Fig. 3.20(b) SEM Photographs about Stretch Zone at 4/8B for C-01 Specimen
C-01 試験片の4/8B (B:板厚)位置でのストレッチゾーンのSEM写真



0°



10°



35°



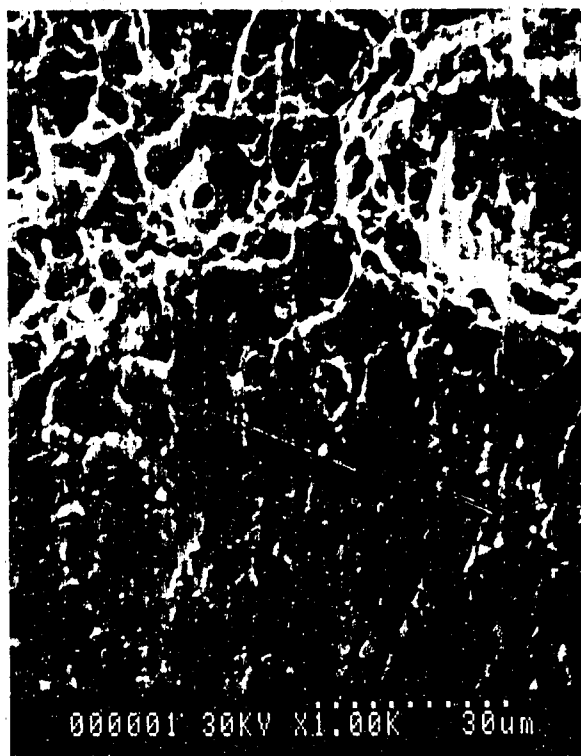
45°

30 μm

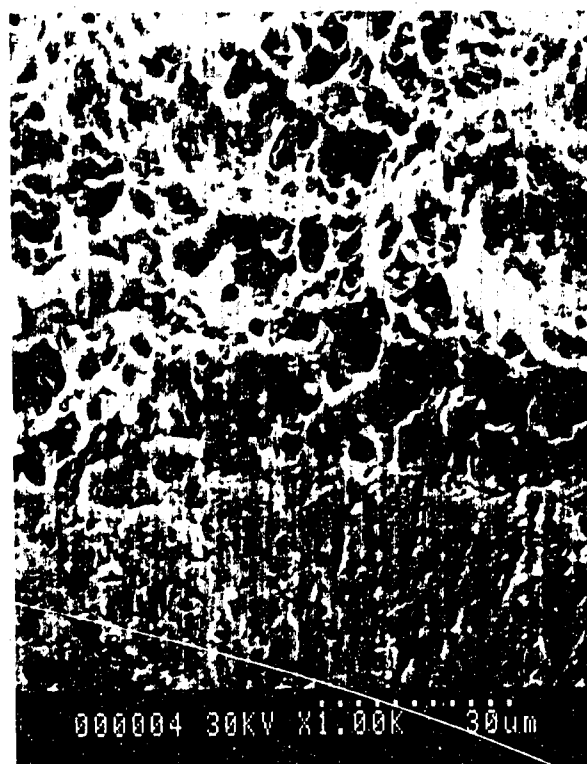
Fig. 3.20(c) SEM Photographs about Stretch Zone at 5/8B for C-01 Specimen
C-01 試験片の5/8B (B:板厚)位置でのストレッチゾーンのSEM写真



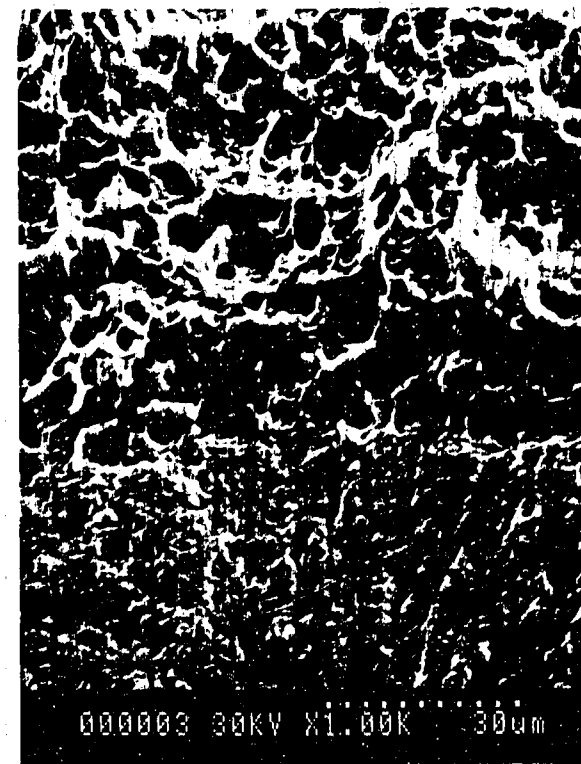
0°



10°



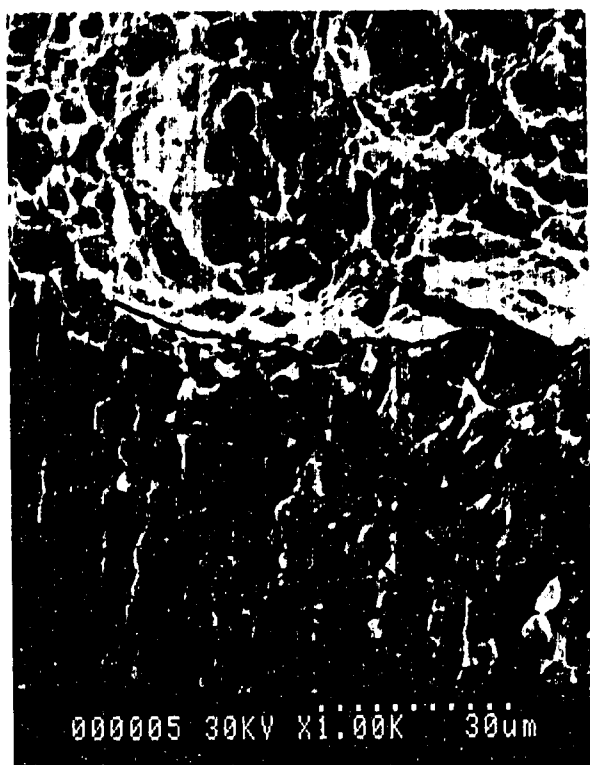
35°



45°

30 μm

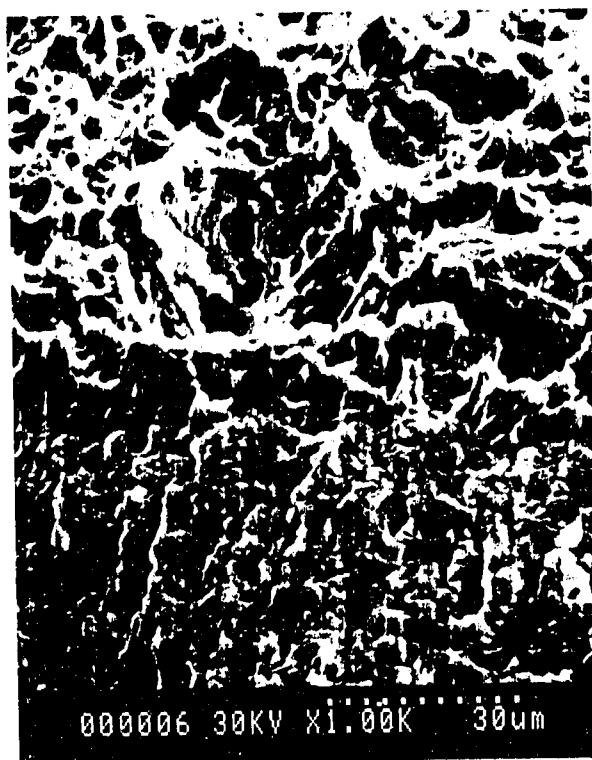
Fig. 3.2 1(a) SEM Photographs about Stretch Zone at 3/8B for C-03 Specimen
C-03試験片の3/8位置でのストレッチゾーンのSEM写真



0°



10°



35°



45°

30 μm

Fig.3.21(b) SEM Photographs about Stretch Zone at 4/8B for C-03 Specimen
C-03 試験片の4/8位置でのストレッチゾーンのSEM写真



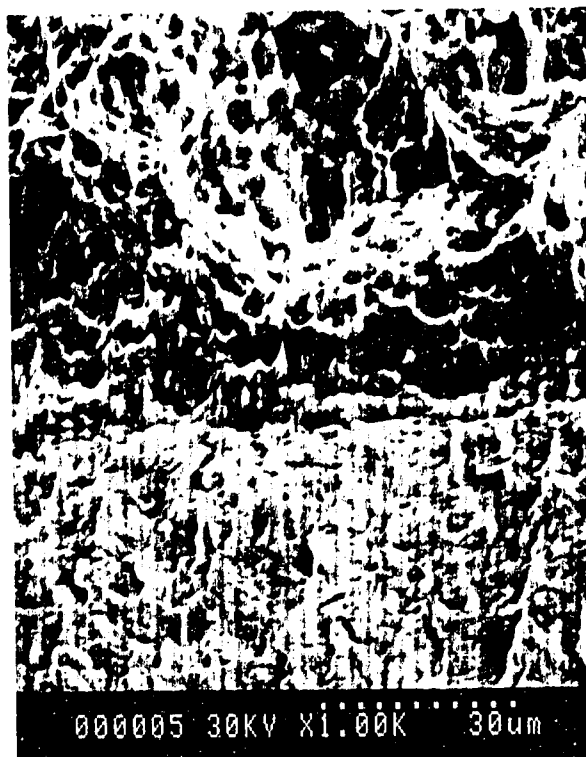
0°



10°



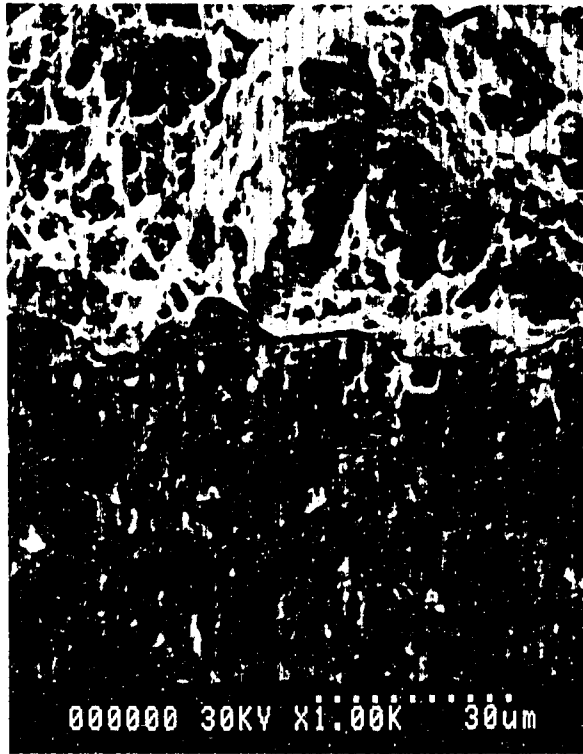
35°



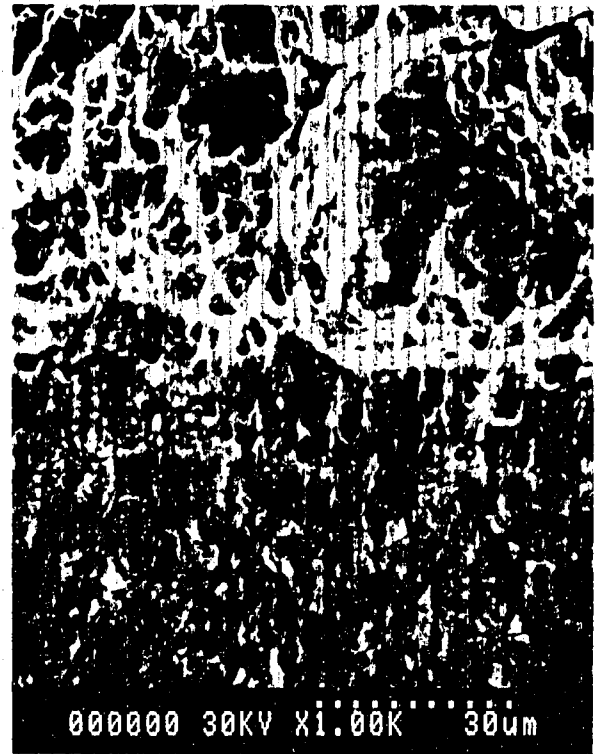
45°

30 μm

Fig. 3.2 1(c) SEM Photographs about Stretch Zone at 5/8 B for C-03 Specimen
C-03 試験片の5/8位置でのストレッチゾーンのSEM写真



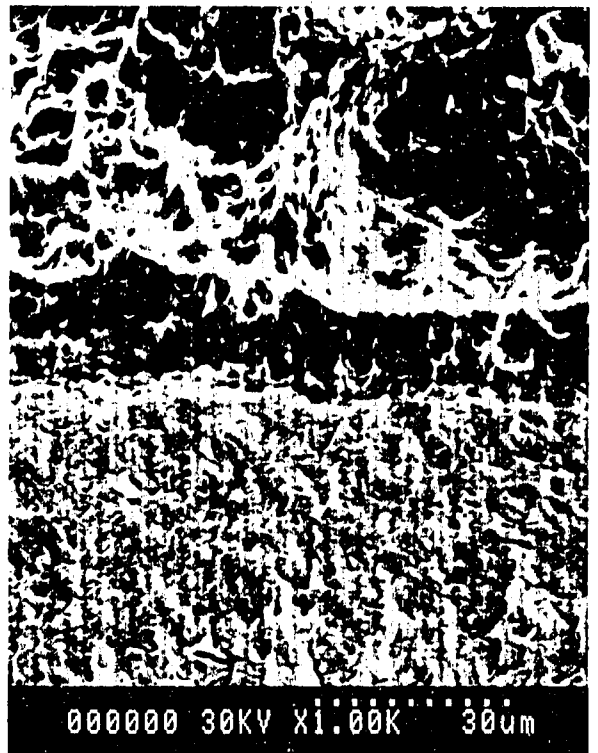
0°



10°



35°



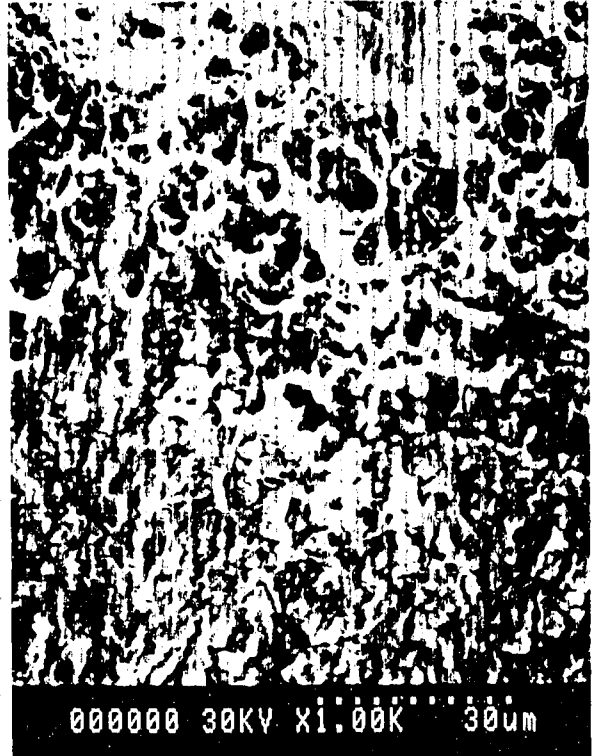
45°

30 μm

Fig. 3.2 2(a) SEM Photographs about Stretch Zone at 3/8B for C-04 Specimen
C-04 試験片の3/8位置でのストレッチゾーンのSEM写真



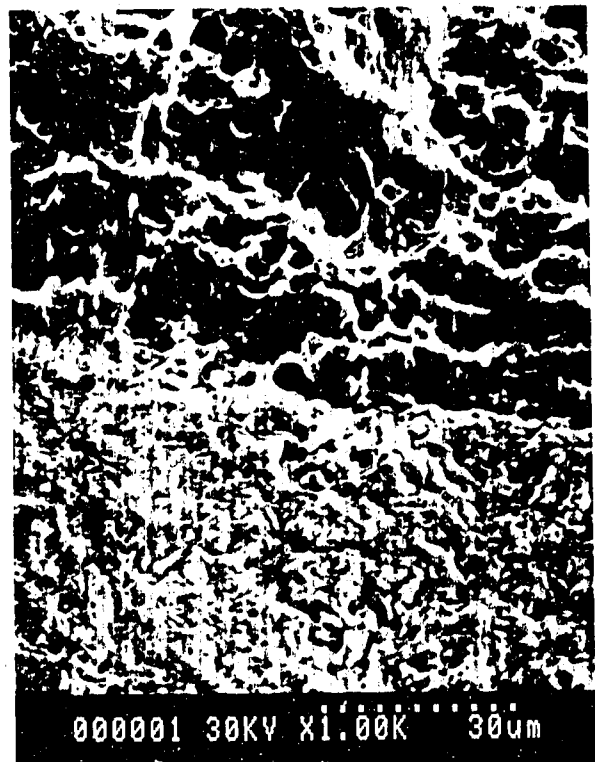
0°



10°



35°



45°

30 μm

Fig. 3.2 2(b) SEM Photographs about Stretch Zone at 4/8 B for C-04 Specimen
C-04 試験片の4/8位置でのストレッチゾーンのSEM写真



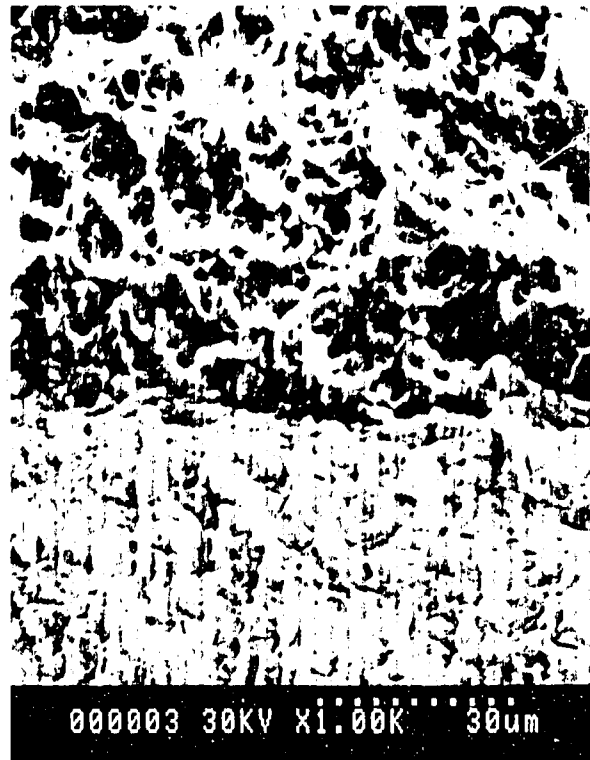
0°



10°



35°



45°

30 μm

Fig. 3.2 2(c) SEM Photographs about Stretch Zone at 5/8B for C-04 Specimen
C-04 試験片の5/8位置でのストレッチゾーンのSEM写真



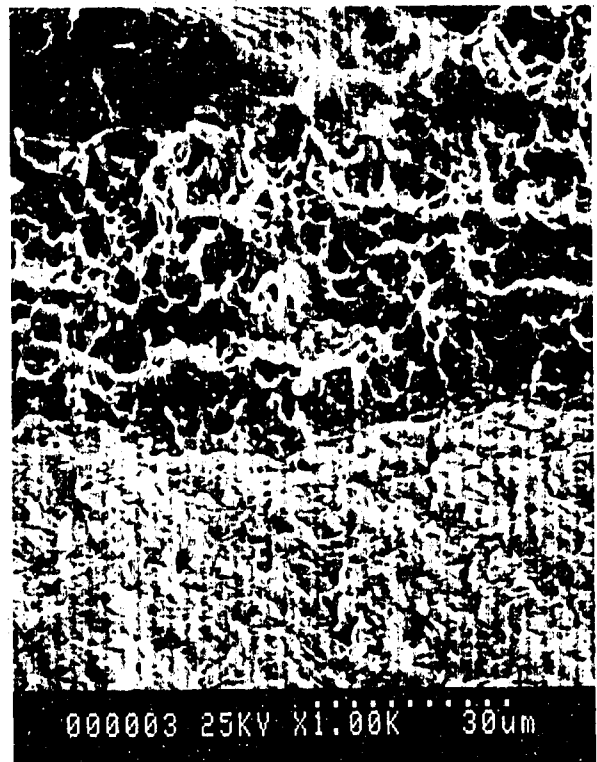
0°



10°



35°



45°

30 μm

Fig. 3.23(a) SEM Photographs about Stretch Zone at 3/8B for C-05 Specimen
C-05 試験片の3/8位置でのストレッチゾーンのSEM写真



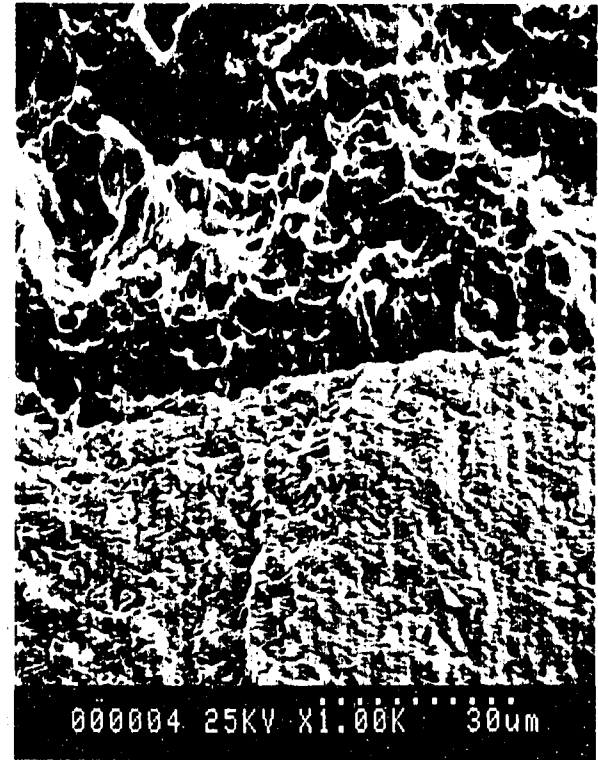
0°



1°



3.5°



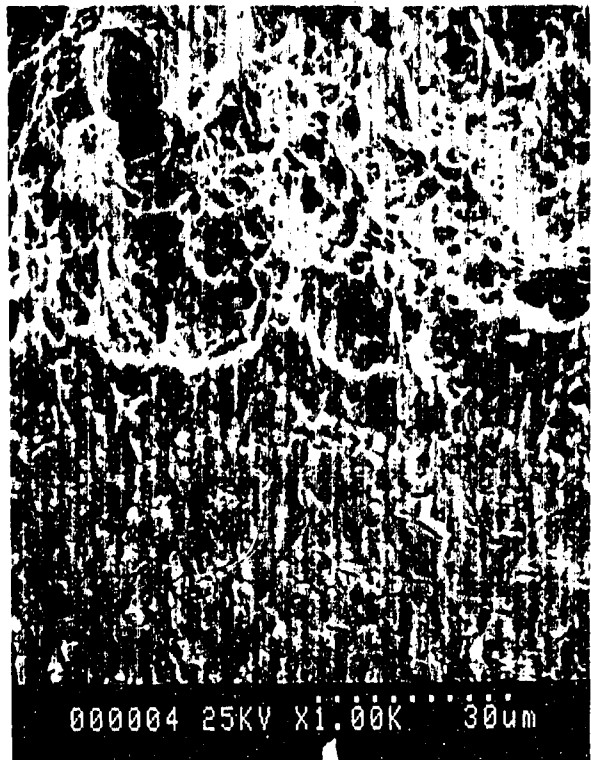
4.5°

30 μm

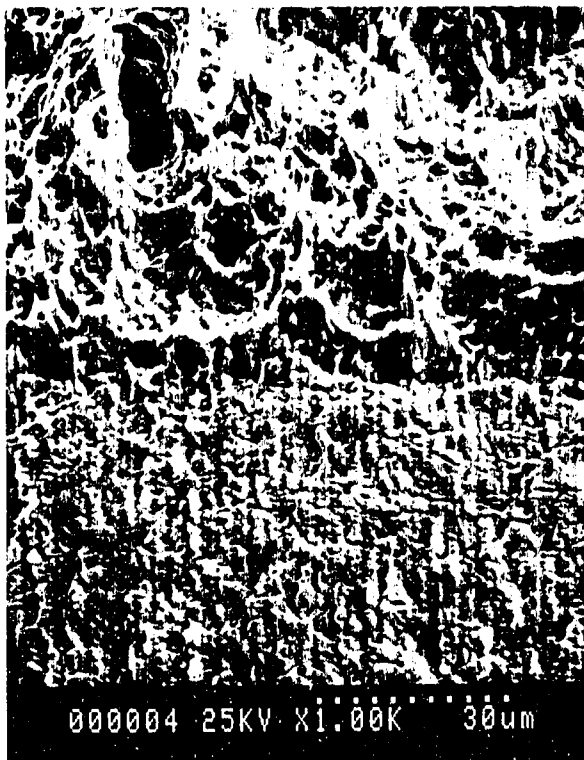
Fig. 3.2 3(b) SEM Photographs about Stretch Zone at 4/8B for C-05 Specimen
C-05 試験片の4/8位置でのストレッチゾーンのSEM写真



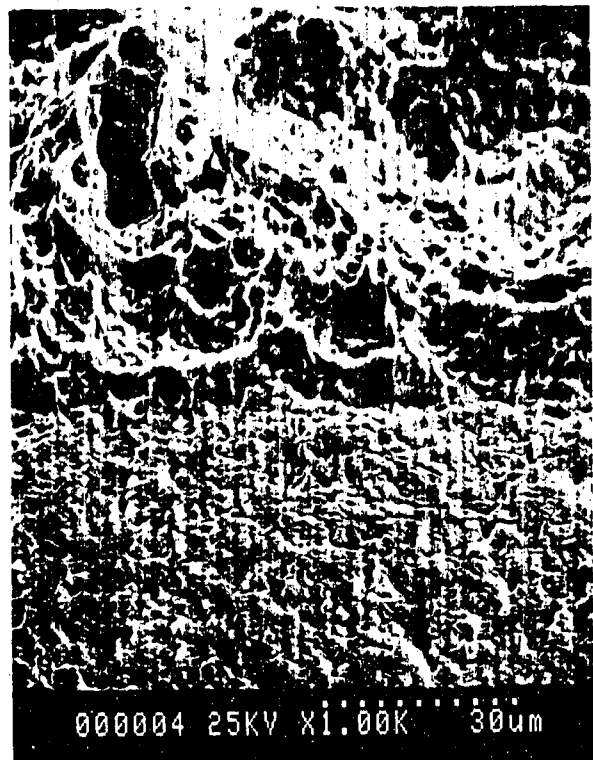
0°



10°



35°



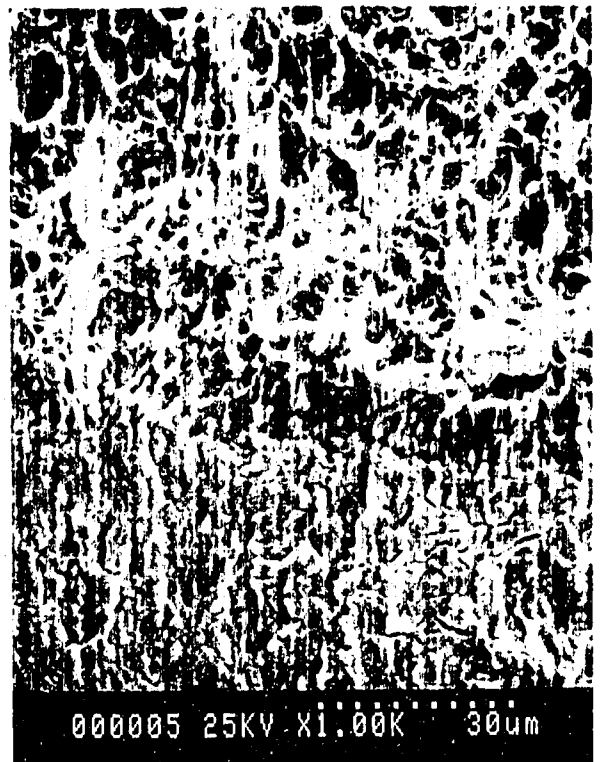
45°

30 μm

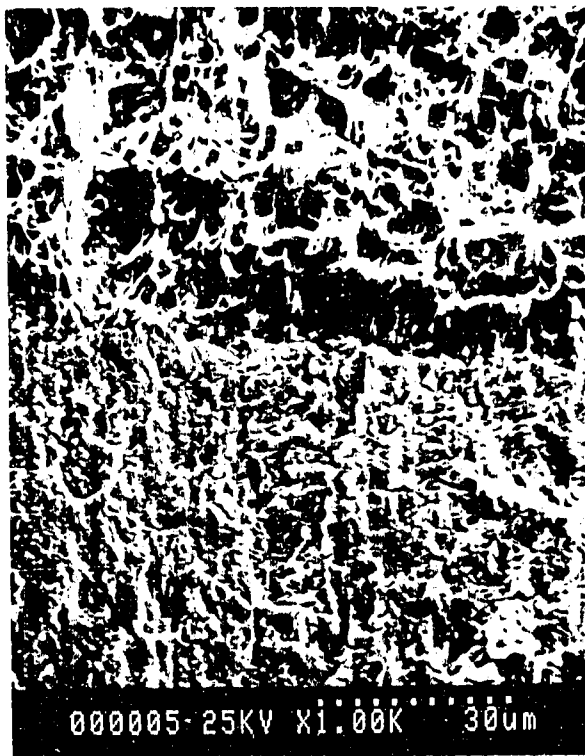
Fig. 3.2 3(c) SEM Photographs about Stretch Zone at 5/8B for C-05 Specimen
C-05 試験片の5/8位置でのストレッチゾーンのSEM写真



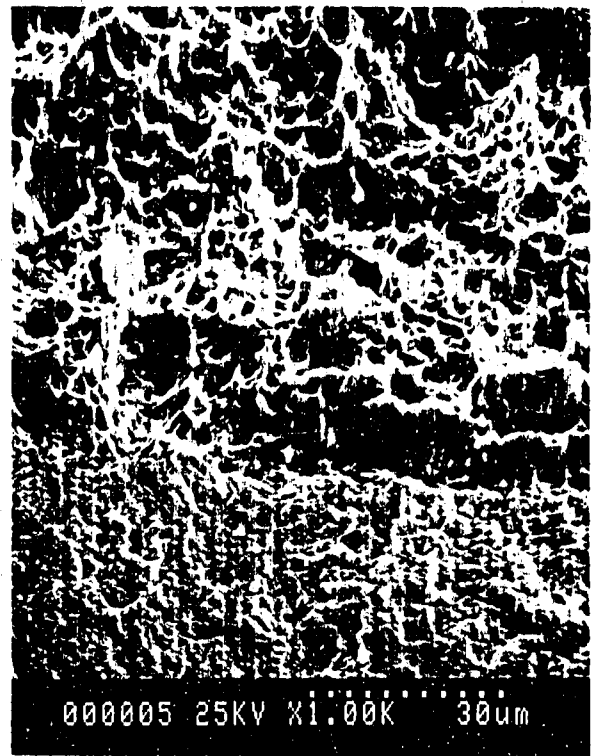
0°



10°



35°



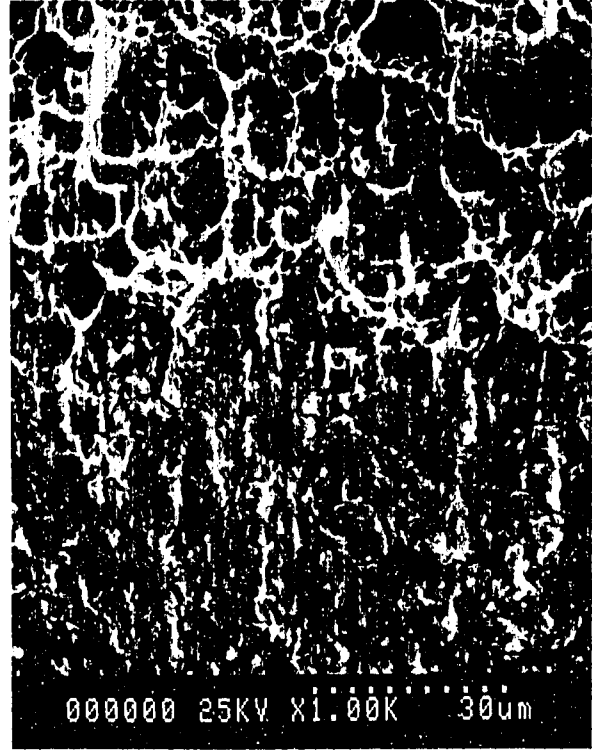
45°

30 μm

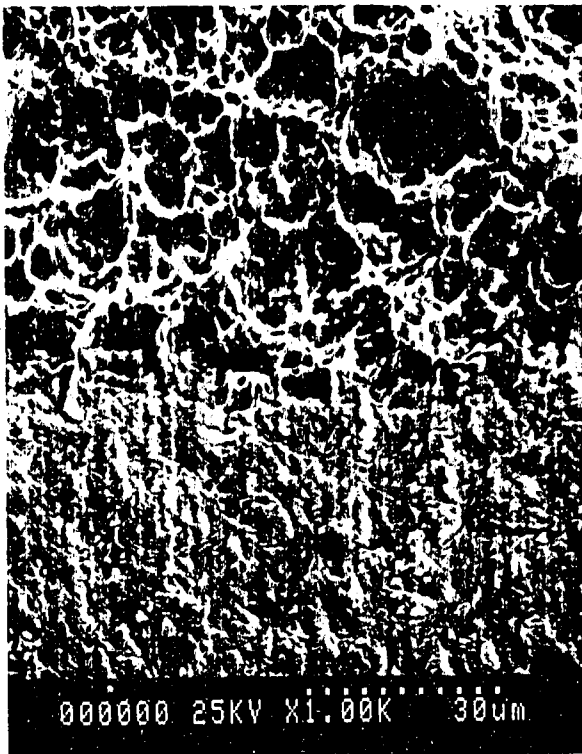
Fig. 3.24(a) SEM Photographs about Stretch Zone at 3/8B for C-06 Specimen
C-06 試験片の3/8位置でのストレッチゾーンのSEM写真



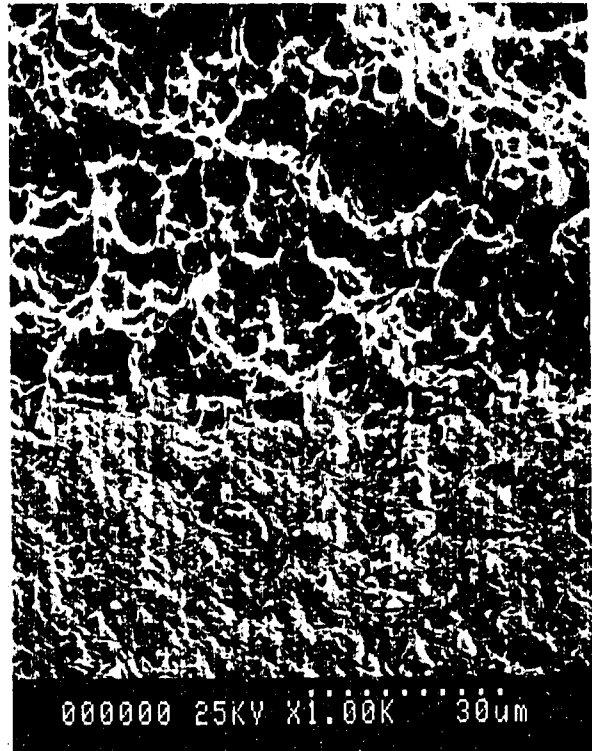
0°



10°



35°



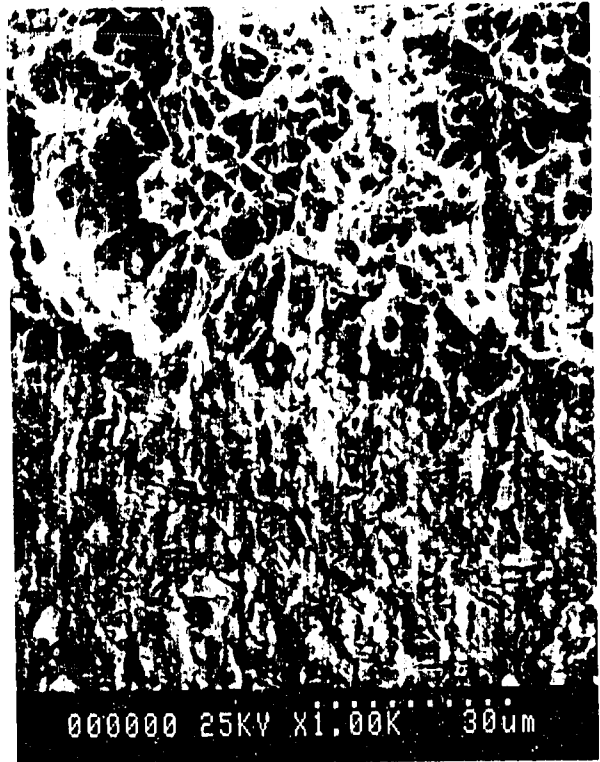
45°

30 μm

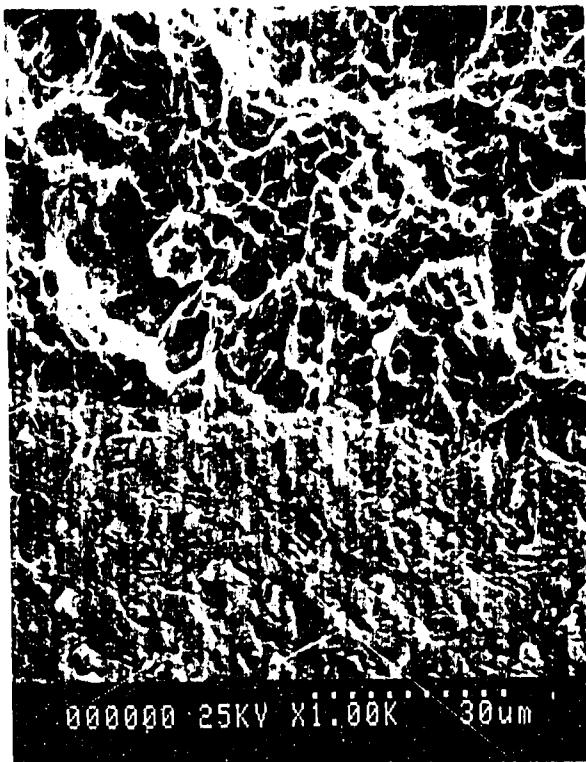
Fig. 3.2 4(b) SEM Photographs about Stretch Zone at 4/8B for C-06 Specimen
C-06 試験片の4/8位置でのストレッチゾーンのSEM写真



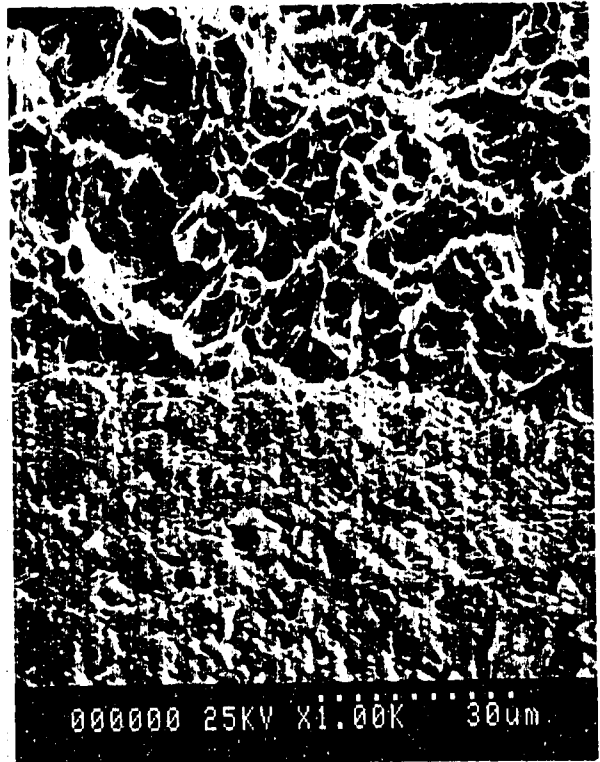
0°



10°



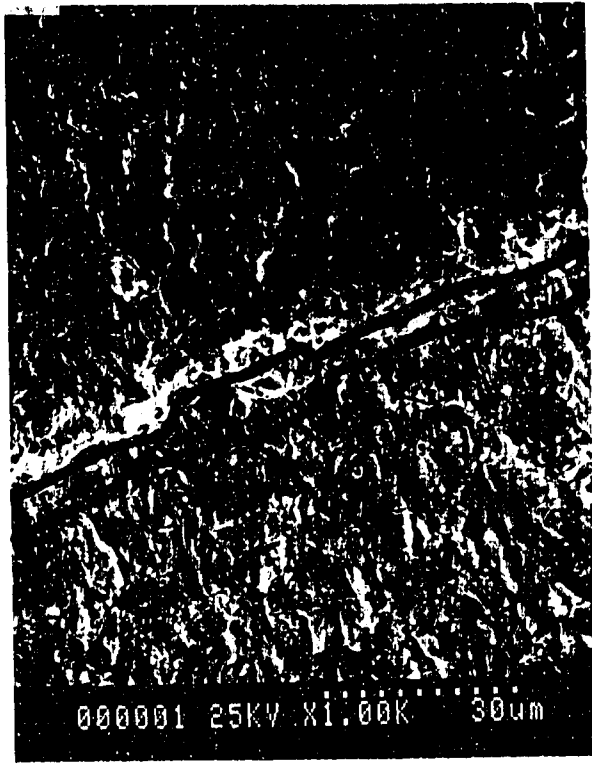
35°



45°

30 μm

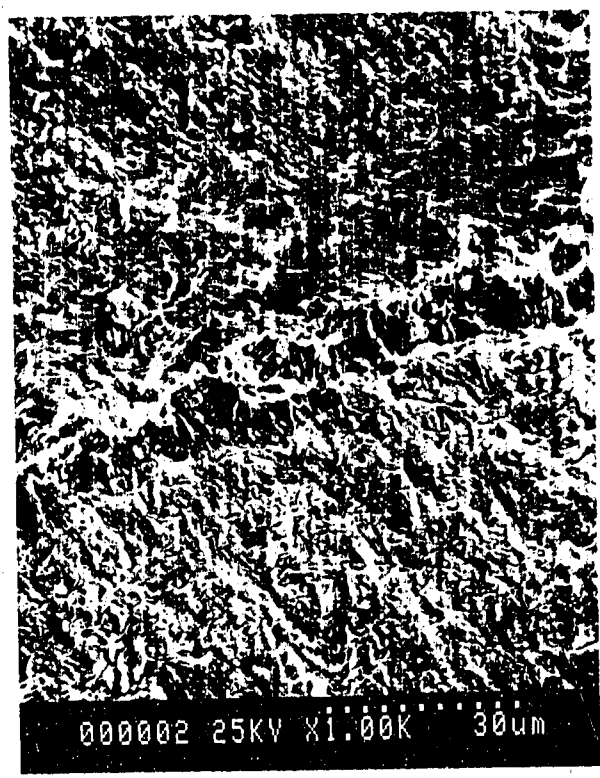
Fig. 3.2 4(c) SEM Photographs about Stretch Zone at 5/8B for C-06 Specimen
C-06 試験片の5/8位置でのストレッチゾーンのSEM写真



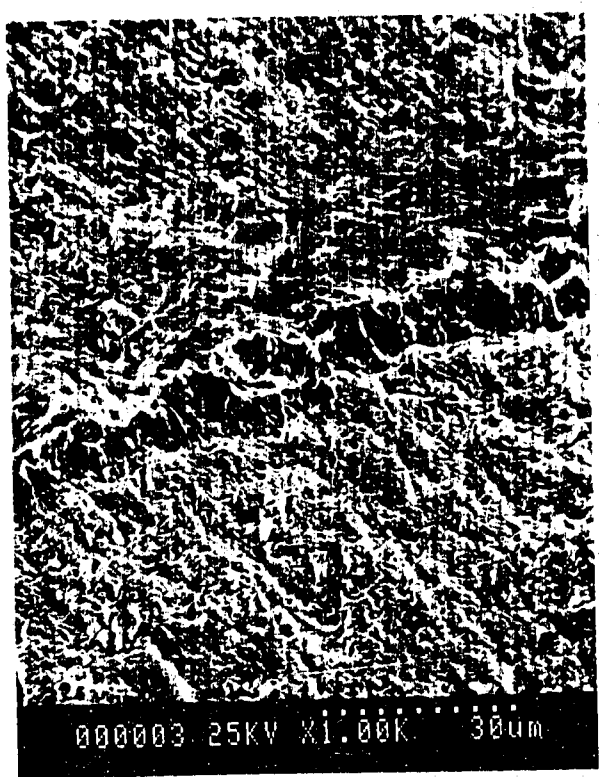
0°



10°



35°



45°

30 μm

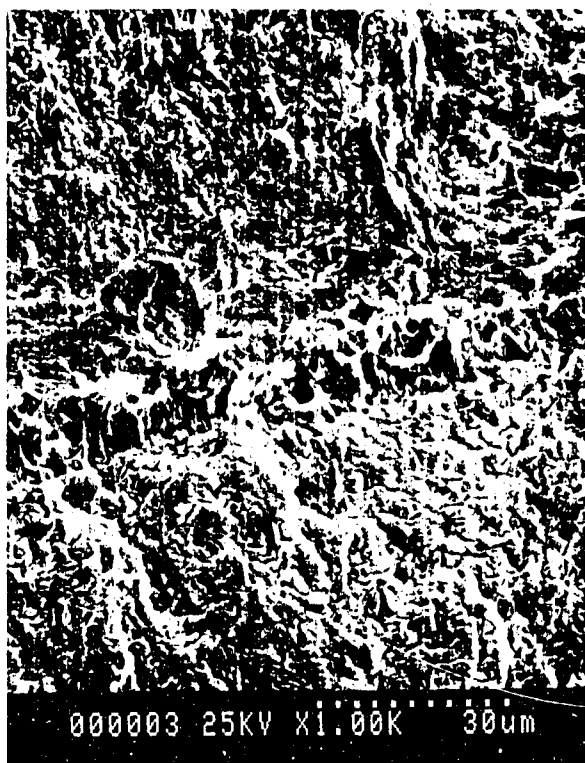
Fig. 3.2 5(a) SEM Photographs about Stretch Zone at 3/8B for C-08 Specimen
C-08 試験片の3/8位置でのストレッチゾーンのSEM写真



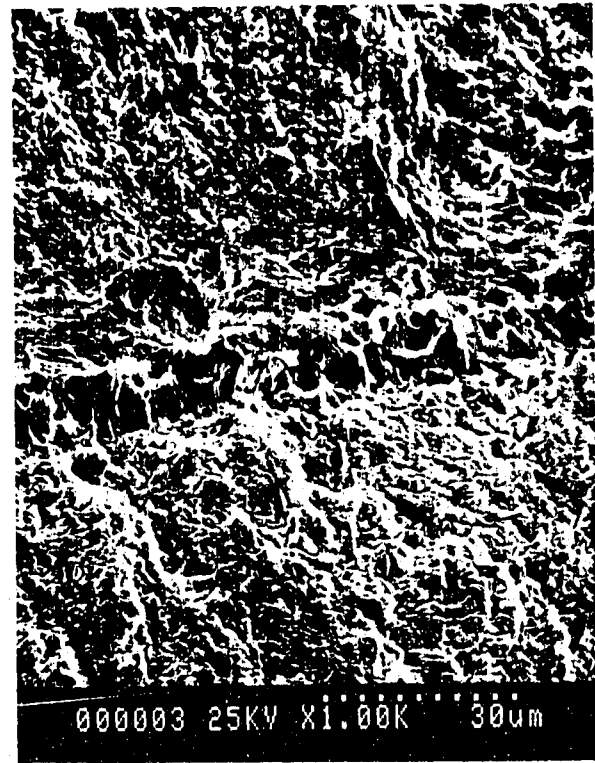
0°



10°



35°



45°

30 μm

Fig. 3.25(b) SEM Photographs about Stretch Zone at 4/8B for C-08 Specimen
C-08 試験片の4/8位置でのストレッチゾーンのSEM写真



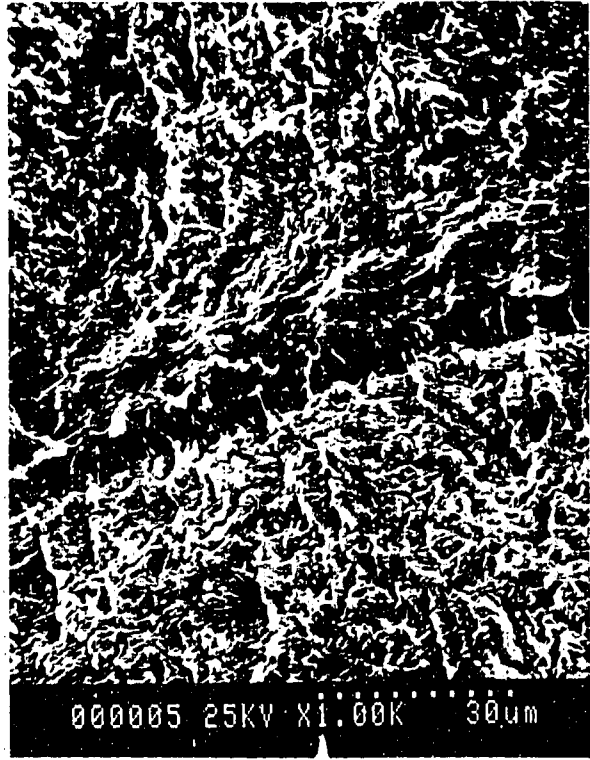
0°



10°



35°



45°

30 μm

Fig. 3.25(c) SEM Photographs about Stretch Zone at 5/8B for C-08 Specimen.
C-08 試験片の5/8位置でのストレッチゾーンのSEM写真

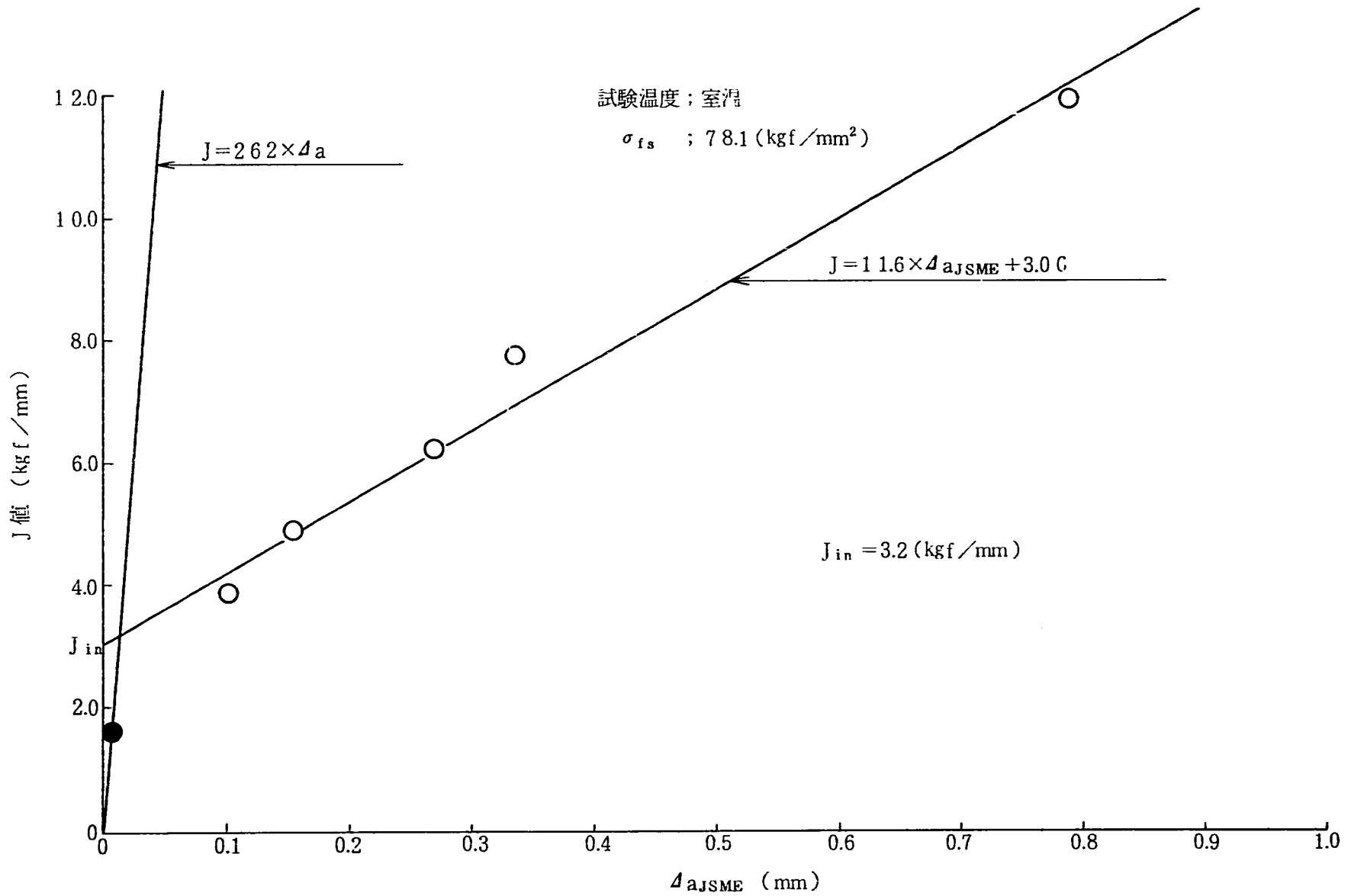


Fig. 3.26 J_{IC} Test Results According to JSME Method for H.T. Zr-2.5wt% Nb Pressure Tube
 H. T. Zr-2.5wt% Nb 圧力管の J S M E 法による J_{IC} 試験結果

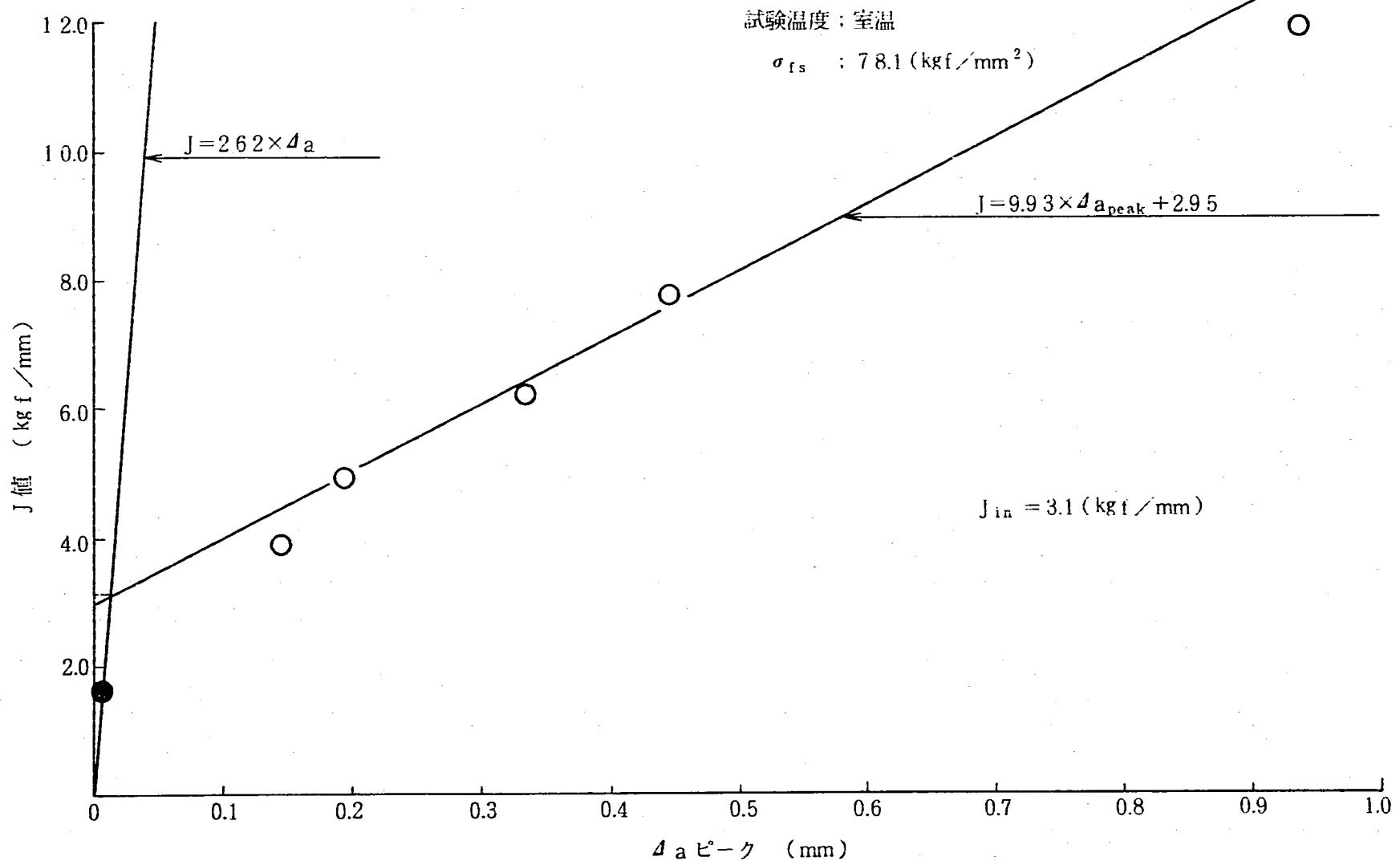


Fig. 3.27 J_{1c} Test Results According to JSME Method with Δa_{peak} for H.T. Zr-2.5wt% Nb Pressure Tube
 H. T. Zr-2.5wt% Nb 圧力管の JSME 法 (Δa_{peak} を用いた場合) による J_{1c} 試験結果

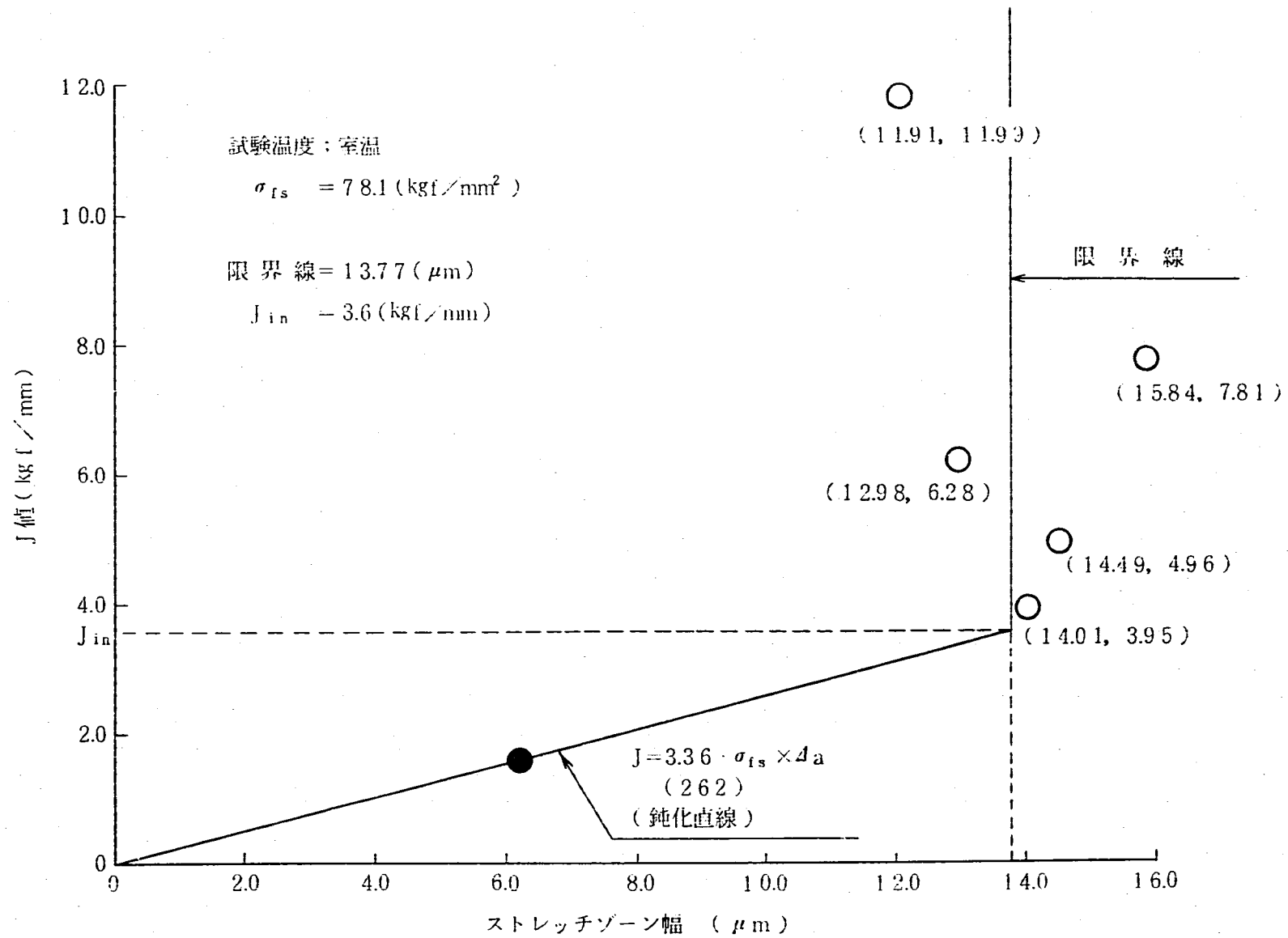


Fig. 3.28 J_{IC} Test Results According to Stretch Zone Method for H.T. Zr-2.5wt% Nb Pressure Tube
 H. T. Zr-2.5wt% Nb 圧力管のストレッチゾーン法による J_{IC} 試験結果