

本資料は 年 月 日付けで登録区分、
変更する。 2001. 6. -6

[技術情報室]

軽水炉用燃料被覆管の強度延性および 水素化物のふるまいに関する試験研究

(II) ジルカロイ管の2軸応力試験

Mechanical Properties and Hydrogen Effects of Fuel
Cladding Tube for Water Reactor

(II) Deformation Behavior of Zircaloy Tubing under Biaxial Stress.

1974年4月

動力炉・核燃料開発事業団

東海事業所

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

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2001



N 841-74-08

4791年3月20日

軽水炉用燃料被覆管の強度延性および 水素化物のふるまいに関する試験研究

(2) ジルカロイ管の二軸応力試験

実施責任者 青木利昌^{*}(技術部検査課)

三浦信(技術部検査開発課)

報告者 永木裕()

小原勝昭()

神谷和明()

期間：1972年7月1日～1973年7月31日

目的：軽水炉用燃料被覆管としてのジルカロイ-2管の2軸応力下における耐圧挙動を調べ、受入検査方法の確立、安全解析の資料とする。

要旨：管製造時の肉厚減少率対外径減少率の比、焼鈍温度を変えたジルカロイ-2管について原子力安全研究協会燃料安全専門委員会が実施した共同研究とも関連して、応力条件の異なる内圧破裂試験を行ない次の知見を得た。

- 1) 単軸応力試験(オープン・エンド法)では高い延性が生じるが、2軸応力条件では延性が低くなり内圧破裂強度が高くなる。軸方向変形を拘束した固定端法ではさらに延性が低下し、内圧破裂強度は最大となる。
- 2) 端栓と管に絞り加工を施すことによって端栓溶接部を管の縮み変形から保護することができ、管の軸方向縮み変形を0.3%程度に制限できる固定端内圧破裂試験を実施できた。

* 現在プルトニウム燃料部品質管理課

目 次

1. はじめに	1
2. 供試材料と試験方法	10
2.1 供試材料	10
2.2 試験片	16
2.3 試験方法	25
3. 試験結果	28
3.1 オープン・エンド法	28
3.2 クローズド・エンド法	40
3.3 固定端法	51
4. 検 討	68
4.1 Q値の内圧破裂性質におよぼす影響	68
4.2 焼鈍温度の内圧破裂性質におよぼす影響	68
4.3 応力比の内圧破裂性質におよぼす影響	68
5. ま と め	75
6. 参考文献	76
7. 添付図面	77

1 は じ め に

軽水炉で使用されるジルカロイ被覆管は原子炉運転中 300℃付近の高温状態で一次冷却水による外圧、核分裂生成ガス蓄積による内圧、管の厚さ方向温度勾配による熱応力、ペレットとの接触圧力などを受けるので、被覆管の機械的性質はこの使用温度でこれらの応力に対して充分余裕のあることが必要である。応力分布から考えて管の円周方向機械的性質が重要になってくる。このうち使用中の水素吸収、照射効果などから円周方向の延性が重要である。延性におよぼす水素の影響については 500 ppm の水素を水酸化リチウム法により強制添加した管の耐圧挙動を調べ前報 (SN841-72-36¹⁾) で報告した。

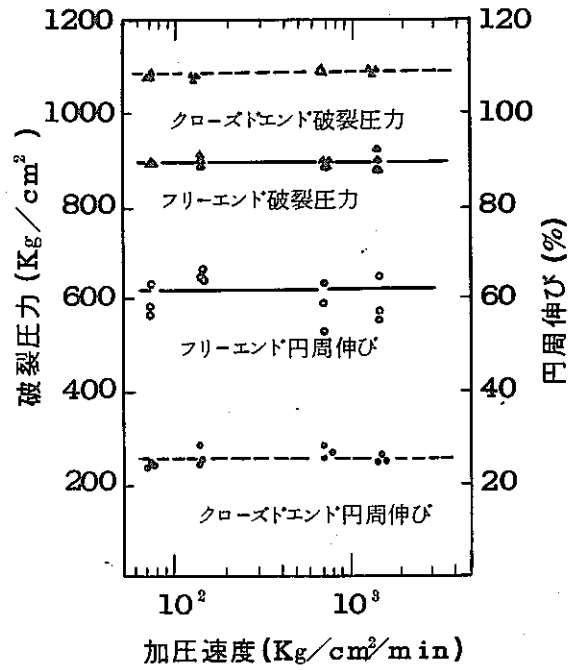
円周方向機械的性質を評価する試験方法として、リング引張試験、拡管試験、押広げ試験、扁平試験、内圧破裂試験などがあり、多くの購入仕様書では内圧破裂試験による破裂圧力、円周伸びの値を規定している。また旧原燃検査専門委員会の標準検査法としても方法が述べられている。ジルカロイは六方晶であり、製造加工時に生じた集合組織のため強度の異方性を有している。そして応力の向き方によって性質に差が出る。ジルコニウム合金材料の引張性質におよぼす集合組織の影響についてかなりの研究が行なわれているが、内圧破裂試験法については余りデータが見あたらない。また内圧破裂試験法それ自体が引張試験とは異なり一般の材料にひろく行なわれていない試験法であるために細部にわたる検討もされておらず、規格化されていない。このため試験方法の差により結果に相違が現われる。

試験結果に影響をおよぼす因子として下記の点が考えられる。

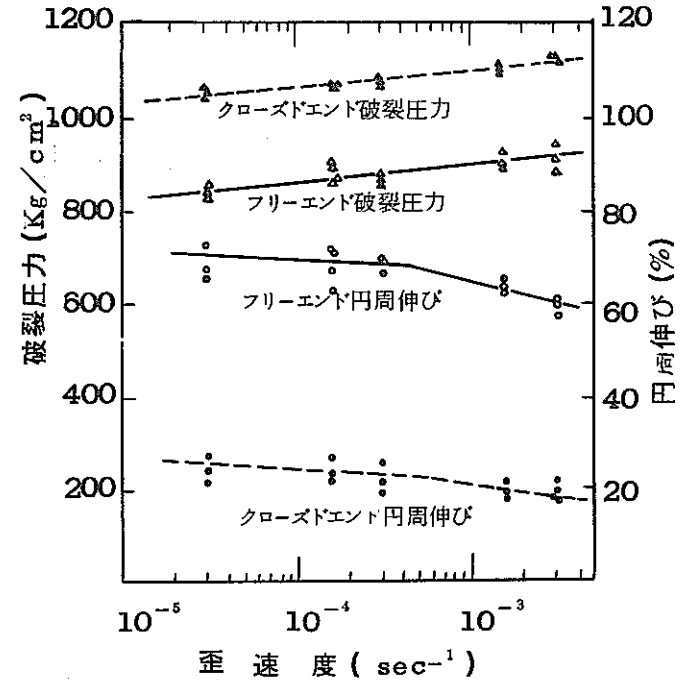
- ① 管の曲り
- ② 加圧速度
- ③ 軸方向歪の拘束 (応力比)
- ④ 試験片形状 (長さ, 偏肉)
- ⑤ 試験片の性質 (集合組織など)

永井²⁾らは、内径 12.675 mm, 肉厚 0.902 mm のジルカロイ - 2 管を用い、歪ゲージの歪値をみながら手動式水圧ポンプで加圧制御し、降伏までの加圧速度の影響と降伏以後の歪速度の影響について調べた。その結果を図 1 に示すが、破裂圧力・円周伸びは降伏までの加圧速度に影響されず、降伏以後の歪速度に影響され、破裂圧力は歪速度の増加とともに増加し、円周伸びは低下すると報告している。しかし加圧速度を 10 kg/cm² ~ 1000 kg/cm² に変えた他の実験³⁾では著しい変化は生じなかったとしている。その結果を図 2 に示す。

内圧破裂性質におよぼす偏肉の影響については、JPDR - I 寸法の管について 400℃で試験した原子力安全協会の報告⁴⁾や東京大学⁵⁾などの報告がある。破裂圧力は最小肉厚にほぼ比例するが、数%程度の偏肉量の場合にはその影響が明瞭に現われないようである (図 3, 図 4)。しかし永井ら²⁾は偏肉量に比例すると報告している。



(a) パースト特性に及ぼす加圧速度の影響
(降伏以後は歪速度 $3.0 \times 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$)



(b) パースト特性に及ぼす歪速度の影響
(降伏までの加圧速度 $140 \text{ Kg/cm}^2/\text{分}$)

図1 内圧破砕性質におよぼす加圧速度の影響 (永井ら²⁾)

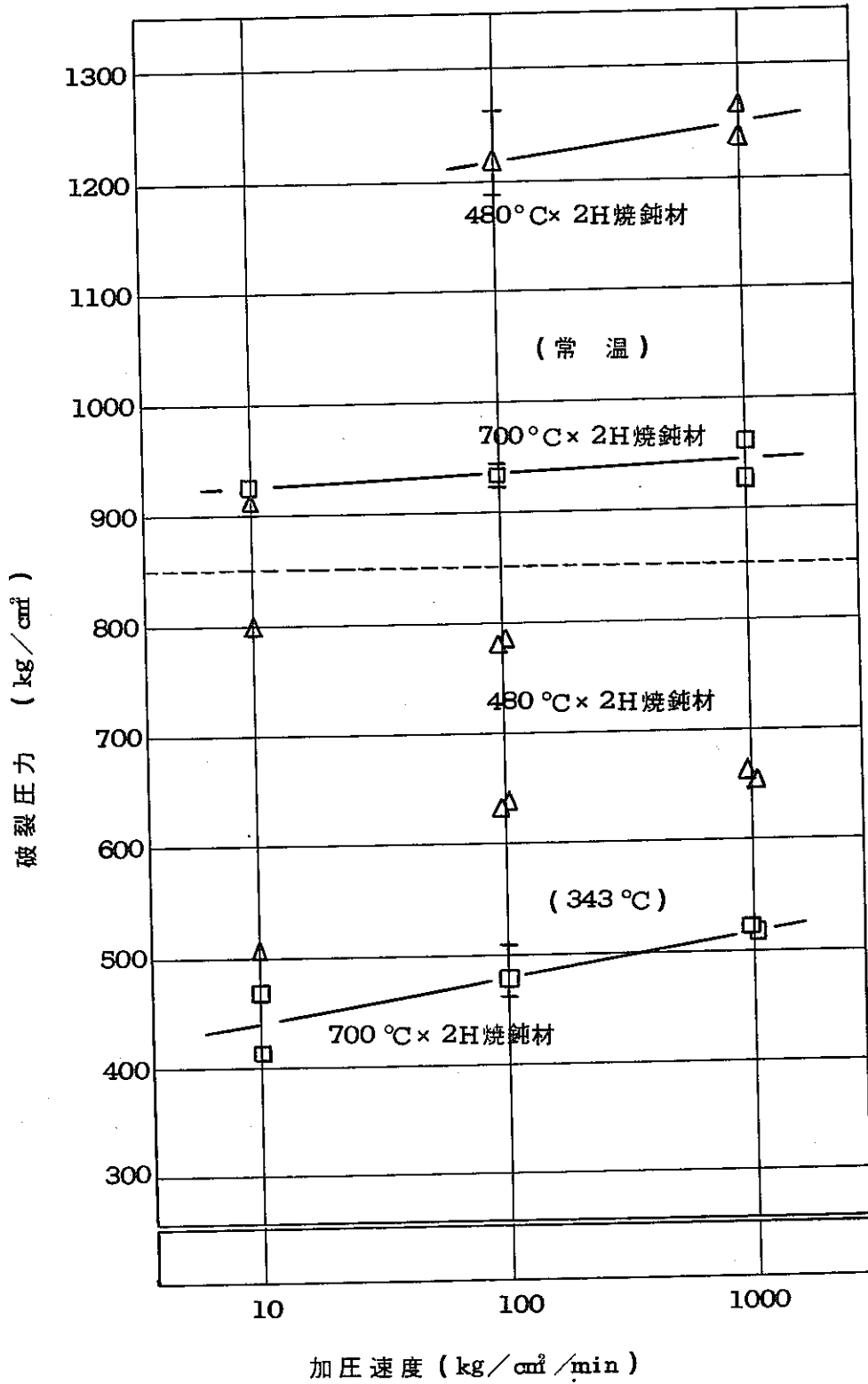
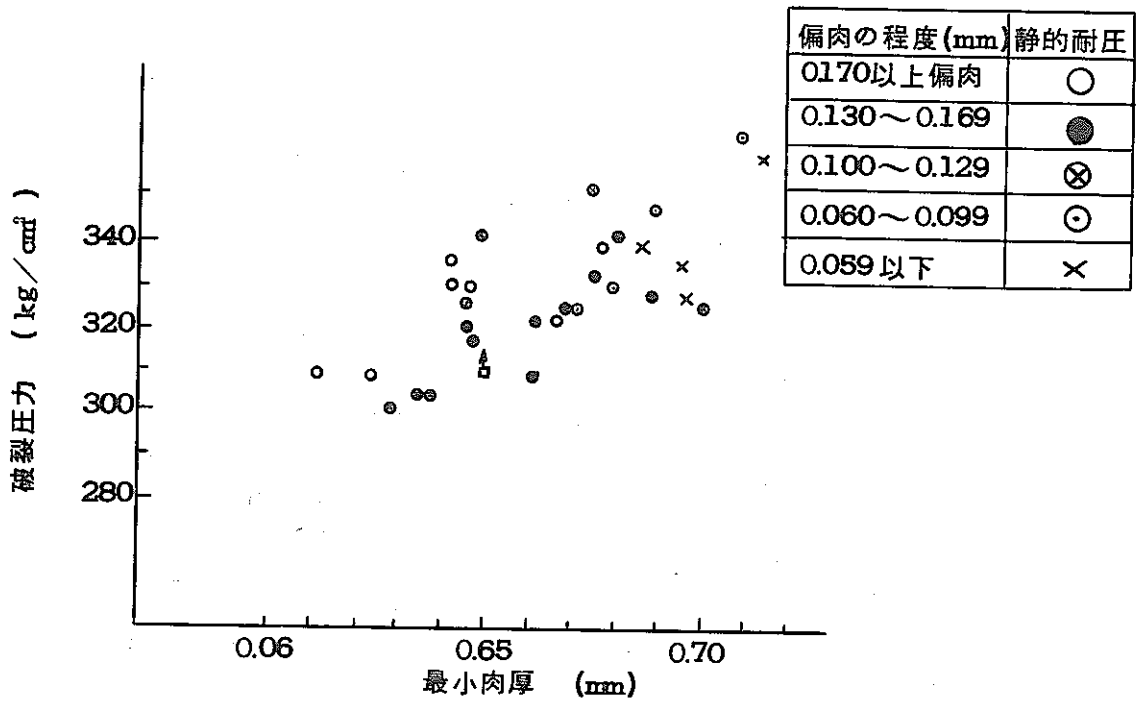
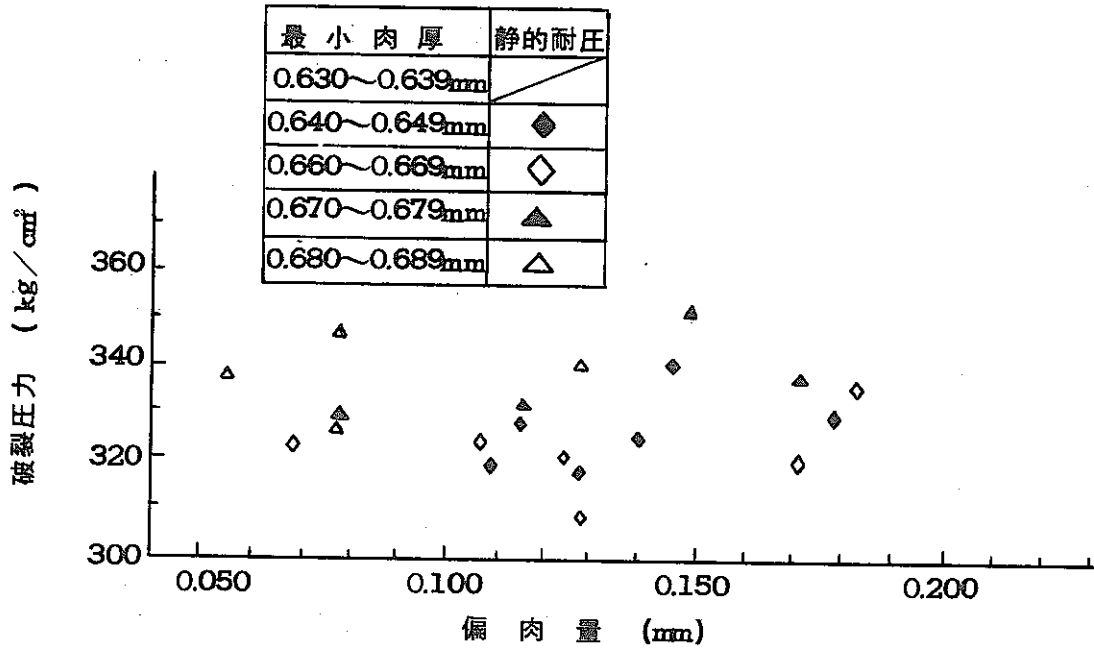


図2 内圧破壊性質におよぼす加圧速度の影響 (三島ら³⁾)

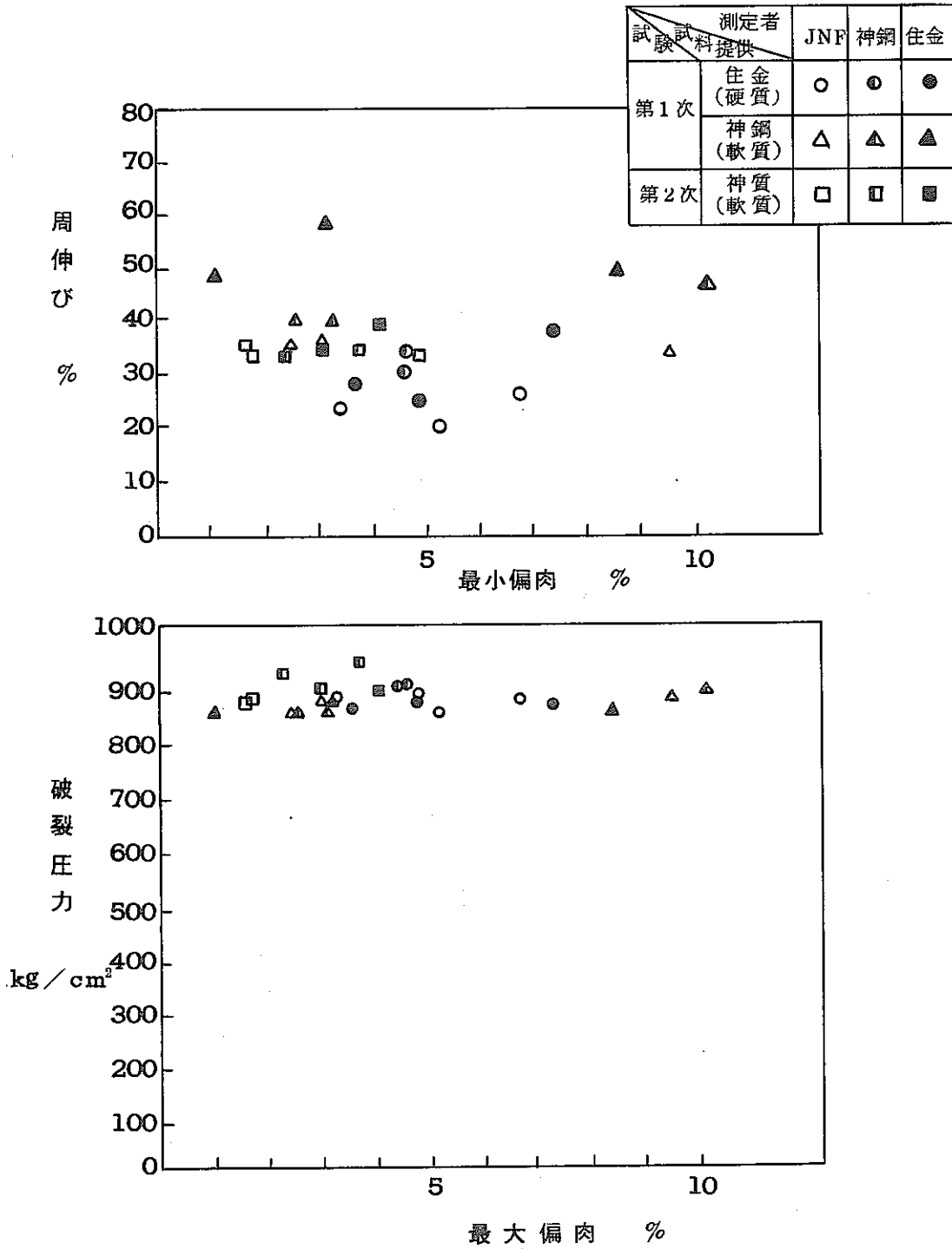


(a) 偏肉JISカロー-2管の破裂圧力と最小肉厚との関係



(b) 偏肉JISカロー-2管の破裂圧力と偏肉量との関係

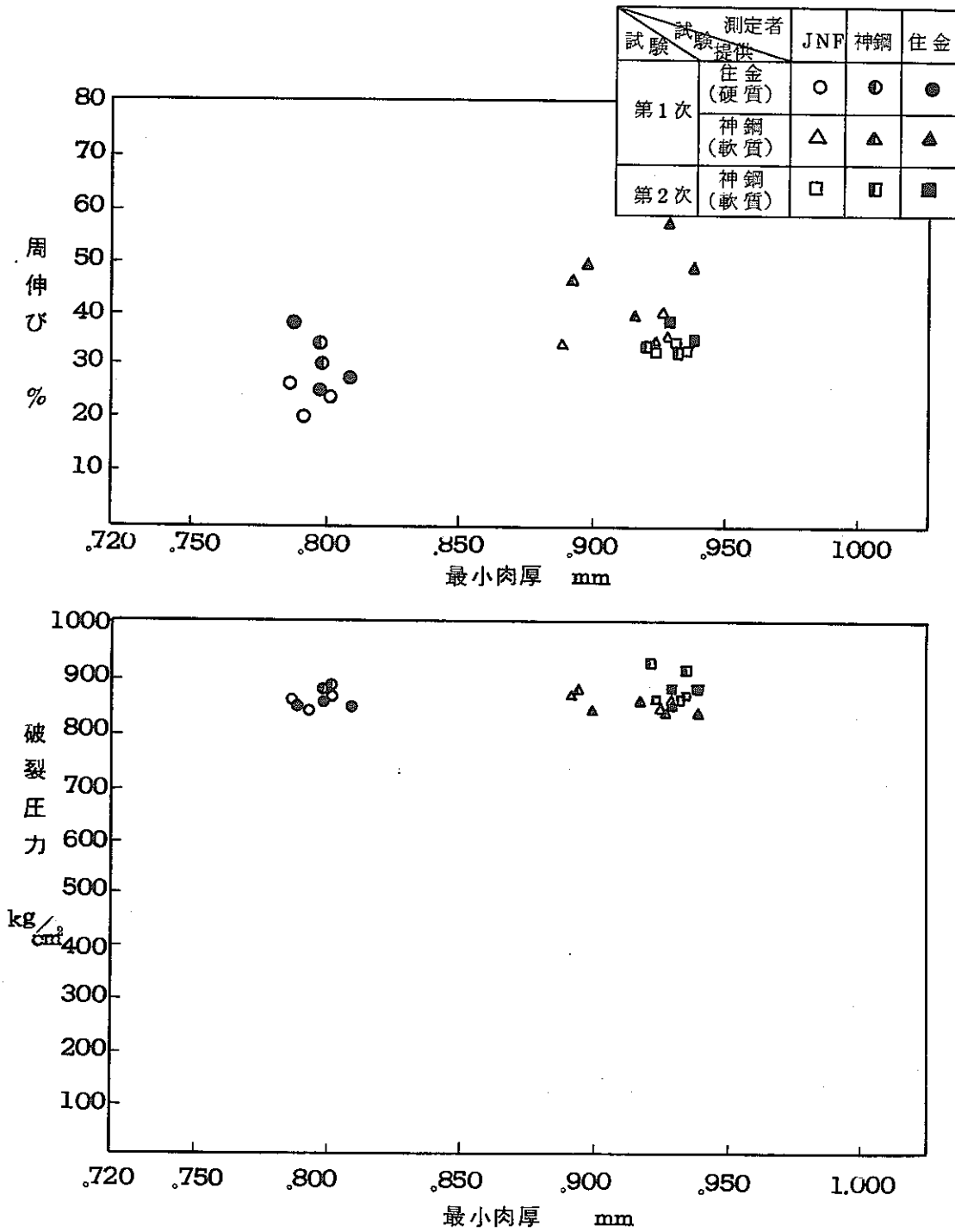
図3 内圧破裂性質におよぼす偏肉の影響⁴⁾



(a) 最大偏肉¹⁾と周伸び, 破裂圧力

注 1) マーク端, 反マーク端のうち, 大きい方を最大偏肉とする。

図 4(a) 内圧破裂性質におよぼす偏肉の影響⁵⁾
最大偏肉の効果



(b) 最小肉厚¹⁾と周伸び, 破裂圧力

注 1) 最小肉厚とは試験片の両端の肉厚の最小値を示す

図4(b) 内圧破裂性質におよぼす偏肉の影響⁵⁾
最小肉厚の効果

O. K. Källström⁶⁾ は管の内部に中子を入れて変形時の曲りを拘束したときに円周伸びが約 1.8 倍大きくなったと報告している (表 1)。動燃においては内圧破裂試験片に中子を入れ、長さを変えた試験をした⁷⁾。その結果を図 5 に示すが Källström の結果と異なり長さの短いものでは中子の有無の影響は顕著ではないが、長さが約 300 mm になると中子の入った試験片の周伸びは大きくなる。

表 1 中金の有無による内圧破裂性質の差 (Källström⁶⁾)

Tabc	1	2	3	4
Method A ^{*)}	7 ± 4	19 ± 3	24 ± 4	30 ± 4
Method B ^{**)}	12 ± 6	32 ± 2	34 ± 5	53 ± 3

*) Method A : 中金なし, 空気圧で水圧のピストンを押す

***) Method B : 中金あり, 全系水圧

圧力の封入の方法によっても内圧破裂性質に影響が現われる。B. A. Cheadle⁸⁾ は Closed End Burst Test と Free End Burst Test を行ない円周伸びに差の生じることを報告している (表 2)。これは一軸応力による試験と二軸応力による試験との相違によるものである。またオープン・エンドバースト試験では変形にしたがい管の収縮が生じるから、それがなんらかの原因で拘束されると試験結果に影響のすることも報告されている。

表 2 試験法の相違による内圧破裂性質の差 (B. A. Cheadle⁸⁾)

(a) Closed End Burst Test Properties of Zircaloy-2 Sheathing Batches at Room Temperature and 300°C

Batch	<i>N</i> _a Averaged	Test Temp, °C	Proportional Limit, kpsi	0.2 pct YS, kpsi	Burst Strength, kpsi	Pct Uniform Elongation on πD	Pct Uniform Elongation GL = πD
VII	3	RT	107.0	111.2	122.0	4.2	12.1
	2	300	66.4	72.9	78.5	2.2	21.5
VIII	3	RT	102.2	106.0	110.8	3.2	12.3
	3	300	62.8	64.9	65.5	1.2	14.8
IX	2	RT	110.5	115.0	120.5	1.7	4.6
	2	300	62.0	65.0	69.2	1.2	4.5

(b) Free End Burst Test Properties of Zircaloy-2 Sheathing Batches at Room Temperature and 300°C

Batch	<i>N</i> _a Averaged	Test Temp, °C	Proportional Limit, kpsi	0.2 pct YS, kpsi	Burst Strength, kpsi	Pct Uniform Elongation on πD	Pct Total Elongation, GL = πD
VI	2	RT	82.0	86.7	91.8	4.4	37.0
	2	300	46.6	53.0	55.0	1.7	45.0
VII	1	RT	91.5	99.0	103.2	1.8	22.5
	1	300	55.0	60.8	63.2	1.5	30.0
IX	1	RT	84.5	96.2	107.2	3.1	9.5
	1	300	52.6	65.0	71.5	2.3	*

* Pinhole leak.

内圧破裂性質は管の集合組織や焼鈍温度の相違によっても上記①～⑤の因子の影響の度合を異なって受けることが表1と表2から分る。

以上、内圧破裂性質におよぼす各種因子の影響に関するこれまでの報告について述べたが、必ずしも明確なデータはない現状である。

このため製造時の肉厚減少率対外径減少率の比と最終焼きなまし条件を変えた管を素材とし、圧力封入方法（応力条件）の異なる次の3試験方法により内圧破裂試験を行ない、試験法の相違による内圧破裂性質を調べた。

A) オープン・エンドバースト試験（開放端）

O-リングで圧力シールを行なう方法である。この方法によると管軸方向応力は(σ_a)は零となり、周方向応力(σ_t)のみとなる。

B) クローズド・エンドバースト試験（両端とじ）

両端栓を溶接して圧力シールを行なう方法である。この方法によると管は $\sigma_a/\sigma_t = 1/2$ となる2軸応力を受ける。

C) 固定端法

普通内圧破裂試験では、内圧負荷につれて軸方向の縮み変形をとともうが、この試験では試験片の両端部を固定し拘束することにより軸方向縮み変形を生じない機構とする方法である。

試験全体の計画を表3に示す。なお、この試験の一部は原子力安全研究協会燃料安全専門委員会の共同実験として実施したものである。

表3 ジルカロイ管の二軸応力試験計画

焼 鈍 条 件	480 °C × 2 H				560 °C × 2 H				700 °C × 2 H				
	Q 値	2.27	2.65	3.1	3.8	2.27	2.65	3.1	3.8	2.27	2.65	3.1	3.8
試験方法													
オープン・エンド法	2	2	2	2						2	2	2	2
クローズド・エンド法	2	2	2	2						2	2	2	2
固 定 端 法	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

* 数字は試験の繰り返し数である。

2 供試材料と試験方法

2.1 供試材料

試験に供したジルカロイ-2被覆管（公称寸法；外径 14,30 mm，内径 12,67 mm，肉厚 0,81 mm）は国内の2社（神戸製鋼所，住友金属工業）で製造された。製造時の仕上げ冷間加工時の肉厚減少率対外径減少率の比（以下 Q 値と称する）を軽水炉用被覆管として製造される条件内としての意味をもたせて $Q=2,27, 2,65, 3,1, 3,8$ の4種とした。また焼きなまし条件は $480^{\circ}\text{C}\times 2\text{H}$ ， $560^{\circ}\text{C}\times 2\text{H}$ ， $700^{\circ}\text{C}\times 2\text{H}$ の3条件である。

この管の化学組成値および性質を製造者から提出されたミルシートによって表4に示す。管の横断面，縦断面について動燃で求めた金相，硬さ値を表5，写真1に示す。焼鈍温度の上昇による硬さの減少傾向はミルシートに示された常温の引張強度の減少傾向に一致している。焼鈍温度の上昇について冷間加工の影響が消えて結晶粒は丸味を帯び， $700^{\circ}\text{C}\times 2\text{H}$ の焼鈍によりほぼ完全な焼鈍組織を呈している。4種の管のうち $Q=3,1$ の管が他と比べてやや結晶粒が細かい。

表4(a) 供試材料の化学組成値

項 目		規 格 値	$S(Q=2,27, 2,65)$			$K(Q=3,1, 3,8)$		
			Top	Middle	Bottom	Top	Middle	Bottom
合 金 元 素 (%)	Sn	1.20 ~ 1.70	1.50	1.49	1.46	1.53	1.50	1.43
	Fe	0.07 ~ 0.20	0.15	0.15	0.15	0.15	0.14	0.13
	Cr	0.05 ~ 0.15	0.11	0.10	0.10	0.11	0.11	0.11
	Ni	0.03 ~ 0.08	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.06
	Fe + Cr + Ni	0.18 ~ 0.38	0.32	0.31	0.31	0.32	0.30	0.30
不 純 物 元 素 (ppm)	Al	≤ 75	57	50	55	< 35	35	< 35
	B	≤ 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.2	0.2	< 0.2
	Cd	≤ 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.2	0.2	< 0.2
	C	≤ 270	80	90	110	160	130	130
	Co	≤ 20	< 5	< 5	< 5	< 10	10	10
	Cu	≤ 50	10	10	10	11	12	13
	Hf	≤ 200	79	83	78	46	51	49
	Mn	≤ 50	10	10	10	< 25	25	< 25
	Si	≤ 200	30	30	30	82	65	55
	Ti	≤ 50	20	10	10	25	25	23
	W	≤ 100	< 10	< 10	< 10	< 25	25	< 25
	U	≤ 3.5	< 3.5	< 3.5	< 3.5	0.9	0.6	< 0.5
	O	900 ~ 1500	1290	1310	1280	1080	1120	1170

表 4 (b) 試験材料試験成績一覽表

(材質: ジルカロイ - 2, 公称寸法: 外径 14.30 mm × 内径 12.67 mm × 肉厚 0.81 mm)

項 目		480 °C × 2 H				560 °C × 2 H				700 °C × 2 H			
		Q ₀ 値				Q ₀ 値				Q ₀ 値			
		メーカー		メーカー		メーカー		メーカー		メーカー		メーカー	
		住友金属		神戸製鋼		住友金属		神戸製鋼		住友金属		神戸製鋼	
常温引張試験	引張強さ (kg/mm ²)	71.2	70.8	70.0	68.8	55.3	54.4	51.3	51.3	51.2	50.0	49.0	47.5
		70.9	71.0	73.2	68.7	58.0	57.6	51.6	50.3	52.0	50.8	48.2	48.6
	耐 力 (kg/mm ²)	54.1	51.9	56.7	53.5	42.4	41.3	41.5	39.4	35.8	35.8	37.3	35.1
		53.6	54.5	59.0	57.5	43.9	44.0	41.7	39.7	36.8	35.9	36.7	35.7
	伸 び (%)	23	22	26	29	35	36	42	42	36	37	42	41
		24	23	25	30	35	35	39	43	36	36	41	42
343 °C 引張試験	引張強さ (kg/mm ²)	44.5	46.0	47.4	43.7	26.7	27.0	27.3	25.1	22.9	25.5	23.1	22.3
		44.6	45.2	49.3	44.7	31.8	29.8	26.3	24.6	23.3	25.0	23.7	22.9
	耐 力 (kg/mm ²)	36.1	37.5	40.2	37.9	17.2	17.6	18.6	16.6	13.8	14.2	14.7	14.6
		35.6	36.3	43.8	38.5	22.3	20.4	18.8	16.6	12.9	13.3	14.9	14.7
	伸 び (%)	21	22	29	28	48	46	58	58	50	51	62	61
		21	21	30	28	36	43	57	59	53	50	61	61
内圧破裂試験	破裂圧力 (kg/cm ²)	940	930	880	840	780	760	720	720	760	740	720	730
		960	950	910	890	800	790	750	690	750	750	700	730
	周 伸 び (%)	61	27	41	32.5	57	56	47	47	48	59	48.2	47
44		28	34.5	37	58	54	40	44.6	61	54	47.5	42.5	
押 拡 げ 試 験 (%)		>15	>15	>15	>15	>15	>15	>15	>15	>15	>15	>15	>15
		>15	>15	>15	>15	>15	>15	>15	>15	>15	>15	>15	>15
結 晶 粒 度	横 断 面	11	11	13	12	11	11	13	12	9.5	9.5	12	11.5
		11	11	13	12	11	11	13	12	9.5	9.5	12	11.5
	縦 断 面	10	10.5	12.5	11.5	10.5	10.5	12.5	11.5	9.5	9.5	11.5	11
		10	10.5	12.5	11.5	10.5	10.5	12.5	11.5	9.5	9.5	11.5	11
水 素 化 物 方 位 (Fn)		<0.1	<0.1	0.00	0.02	<0.1	<0.1	0.00	0.06	0.1	0.1	0.04	0.18
		<0.1	<0.1	0.00	0.00	<0.1	<0.1	0.04	0.08	0.1	0.1	0.03	0.12
腐 食 増 量 (mg/cm ²)		17.1	18.4	12.5	13.5	18.0	17.5	12.8	13.6	18.7	17.8	13.6	12.6
		18.1	18.2	13.3	14.0	17.2	17.6	12.9	12.9	18.9	18.2	11.9	13.0
製 品 分 析	O (ppm)	1300	1310	1180	1170	1290	1340	1020	1220	1280	1300	1170	1150
		1310	1300	1030	1250	1310	1310	1090	1150	1300	1290	1170	1320
	H (ppm)	19	18	7.2	8.3	19	19	6.5	8.3	18	20	7.4	7.6
		17	19	6.7	9.9	20	18	6.5	7.8	17	19	6.6	8.2
	N (ppm)	16	22	49	51	16	20	49	51	19	18	49	55
		17	20	50	49	20	17	54	54	14	18	52	53

表 5 供試材料のビッカース硬さ (Hv) ; 500 g Load 5点測定平均

焼 鈍 条 件	480 °C × 2 H				560 °C × 2 H				700 °C × 2 H			
	Q 値				Q 値				Q 値			
横 断 面	219	219	223	211	185	187	178	177	181	182	174	176
縦 断 面	222	222	225	232	188	182	181	185	181	180	177	179

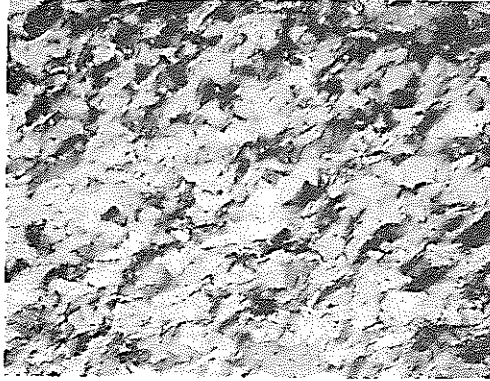
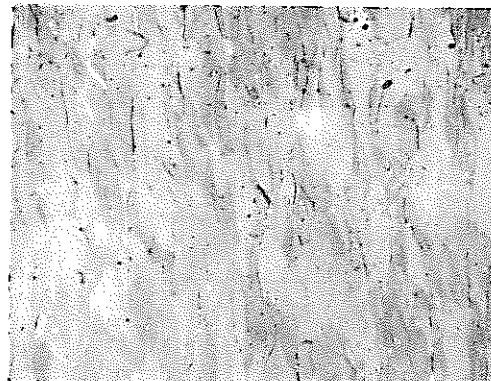
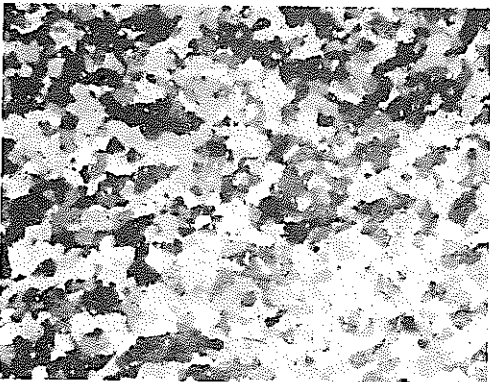
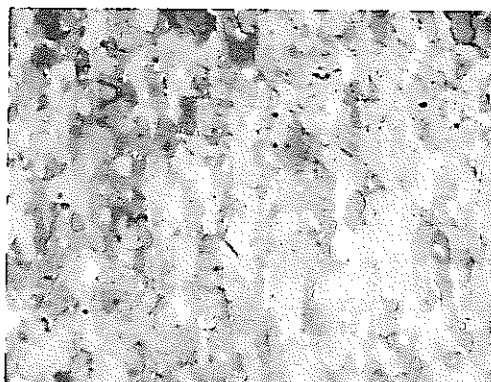
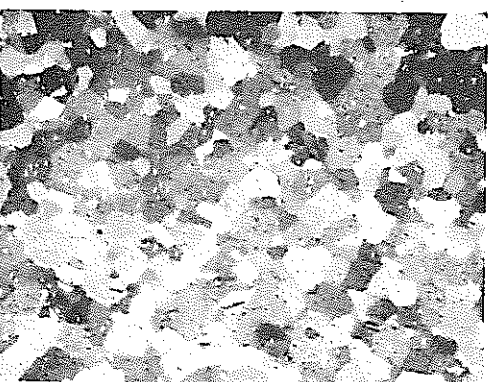
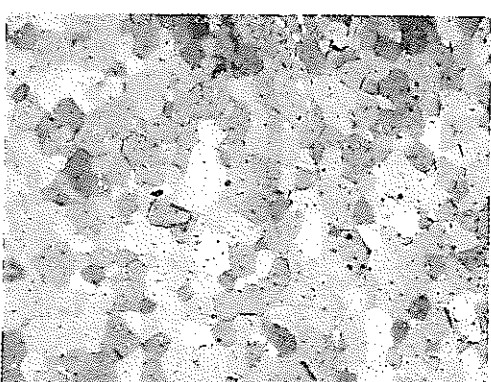
<p>480 °C × 2 H</p>		
<p>560 °C × 2 H</p>	 <p style="text-align: center;">ASTM No. 12.0</p>	 <p style="text-align: center;">ASTM No. 11.5</p>
<p>700 °C × 2 H</p>	 <p style="text-align: center;">ASTM No. 11.0</p>	 <p style="text-align: center;">ASTM No. 11.0</p>
<p>焼鈍 温度</p>	<p style="text-align: center;">横 断 面</p>	<p style="text-align: center;">縦 断 面</p>
<p>$S (Q = 2.27)$</p>		

写真 1 (a) 供試材料の顕微鏡組織 (× 400)


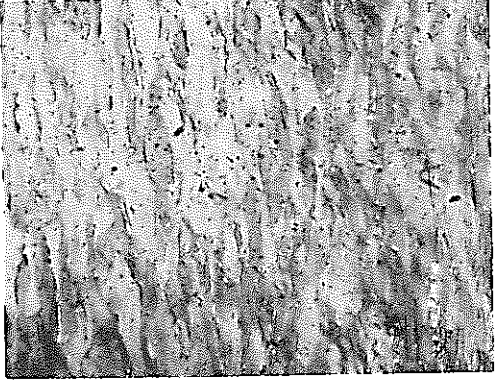
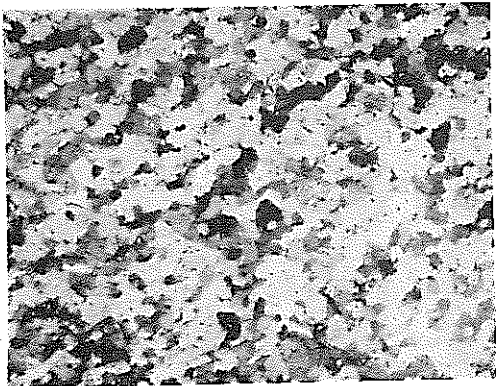
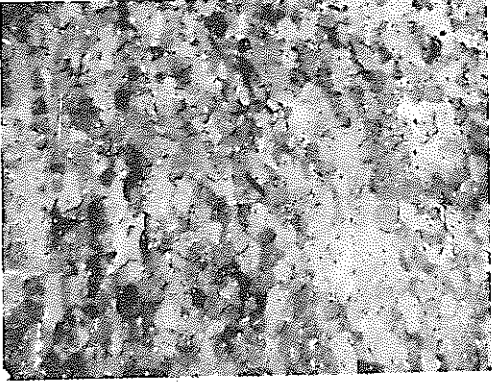
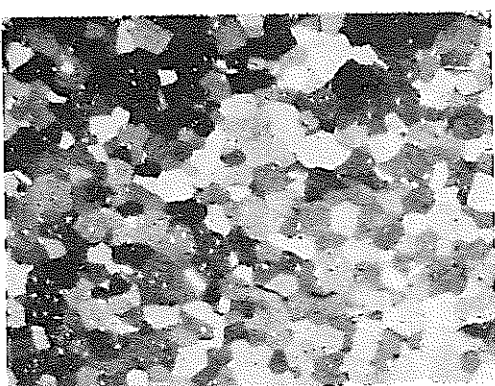
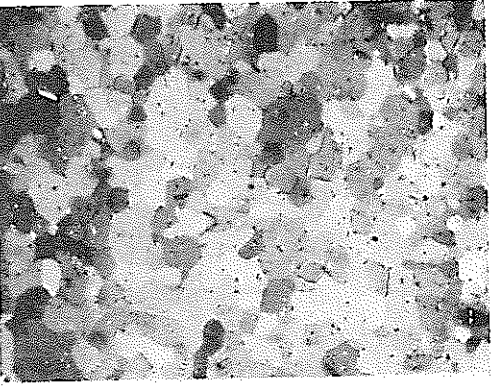
<p>480 °C × 2 H</p>		
<p>560 °C × 2 H</p>	 <p style="text-align: center;">ASTM No. 13.0</p>	 <p style="text-align: center;">ASTM No. 12.0</p>
<p>700 °C × 2 H</p>	 <p style="text-align: center;">ASTM No. 11.0</p>	 <p style="text-align: center;">ASTM No. 11.0</p>
<p>焼鈍 温度</p>	<p style="text-align: center;">横 断 面</p>	<p style="text-align: center;">縦 断 面</p>
<p style="text-align: center;">S (Q = 2.65)</p>		

写真 1 (b) 供試材料の顕微鏡組織 (× 400)


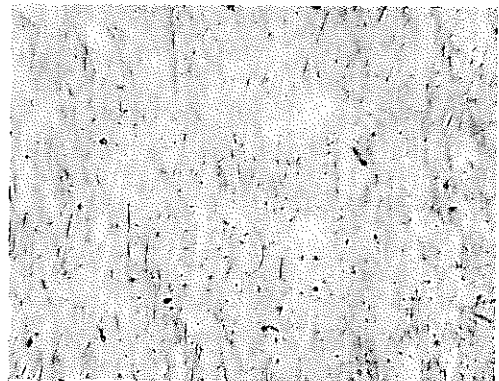
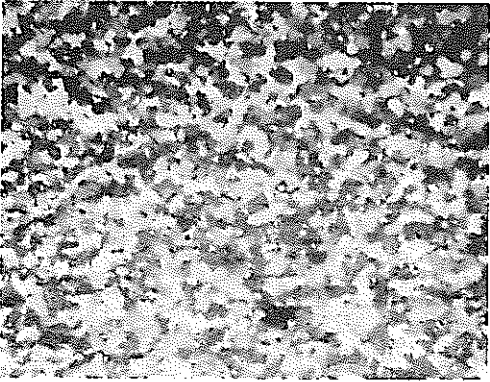

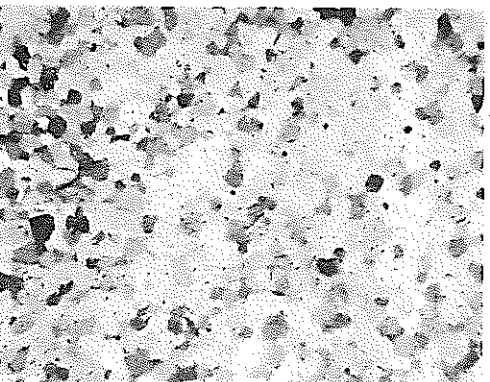
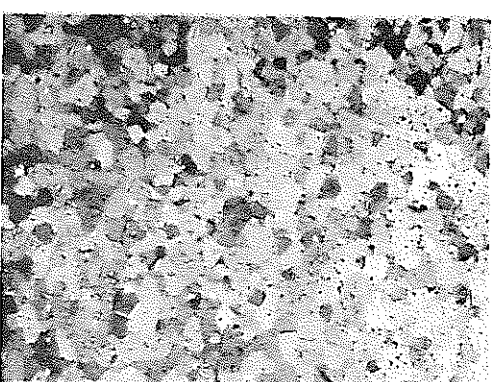
<p>480 °C × 2 H</p>		
<p>560 °C × 2 H</p>	 <p style="text-align: center;">ASTM No. 13.5</p>	 <p style="text-align: center;">ASTM No. 13.5</p>
<p>700 °C × 2 H</p>	 <p style="text-align: center;">ASTM No. 12.5</p>	 <p style="text-align: center;">ASTM No. 12.5</p>
<p>焼鈍 温度</p>	<p style="text-align: center;">横 断 面</p>	<p style="text-align: center;">縦 断 面</p>
<p>K (Q = 3.1)</p>		

写真 1 (c) 供試材料の顕微鏡組織 (× 400)


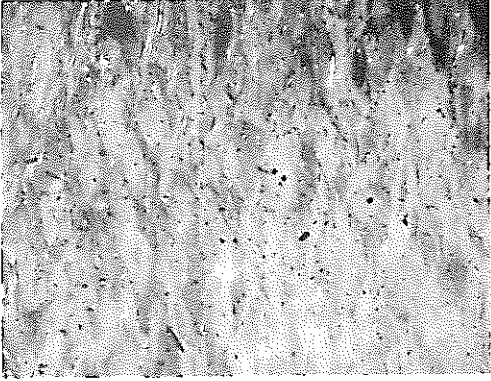
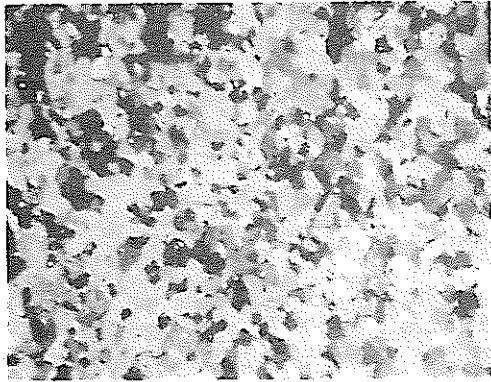
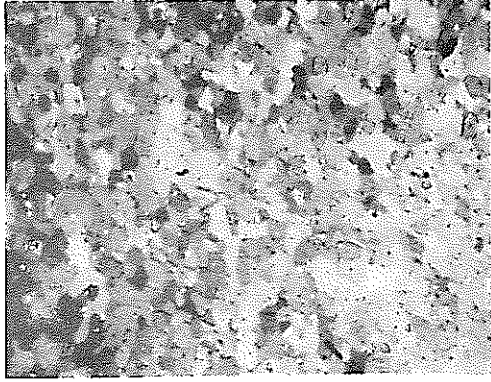
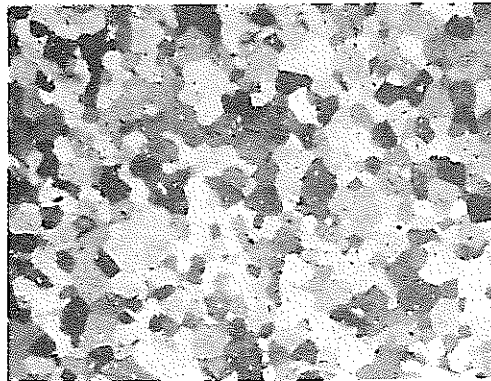
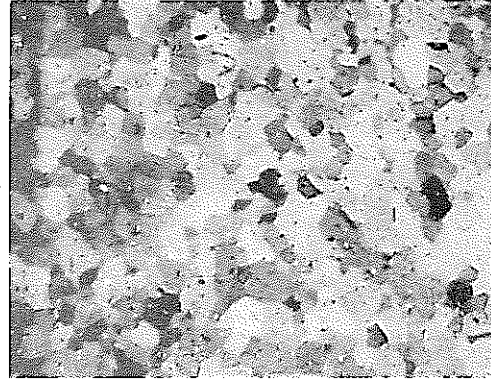
<p>480 °C × 2 H</p>		
<p>560 °C × 2 H</p>	 <p style="text-align: center;">ASTM No. 12.5</p>	 <p style="text-align: center;">ASTM No. 12.0</p>
<p>700 °C × 2 H</p>	 <p style="text-align: center;">ASTM No. 11.0</p>	 <p style="text-align: center;">ASTM No. 11.0</p>
<p>焼鈍 温度</p>	<p style="text-align: center;">横 断 面 縦 断 面</p> <p style="text-align: center;">$K (Q = 3.8)$</p>	

写真 1 (d) 供試材料の顕微鏡組織 (× 400)

2.2 試験片

試験片とするために長さ 200 mm に切断したのち、管の両端で管肉厚を 45 度毎に、管外径を 90 度毎にマイクロメータで測定した。管の変形の様子を調べるために管外表面全周にわたり電解腐食法により直径 5 mm のサークル(スクライブド・サークル)を刻印した。サークル刻印に使用したのはメタコピー(英国エレクトロエッチ製 Model No 3100)である。

① オープン・エンド法試験片

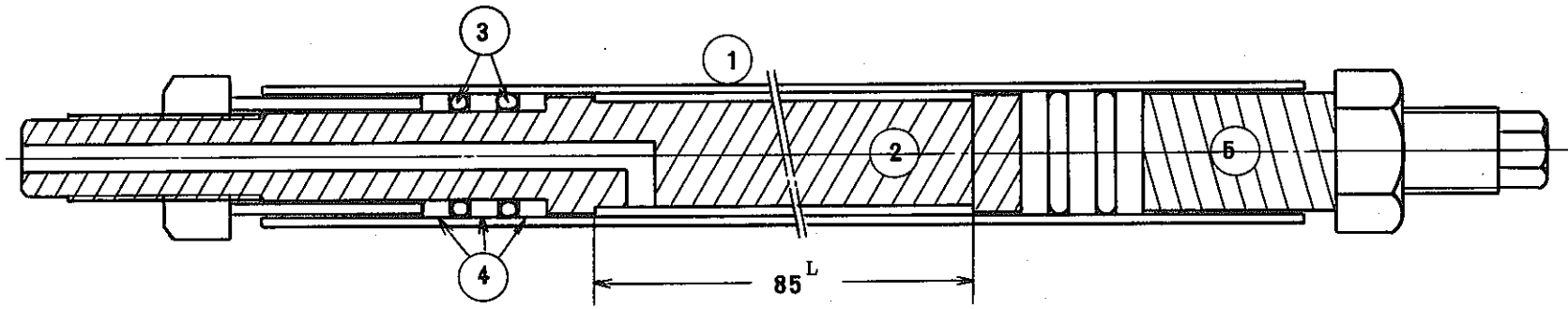
図 6 に示したように管の内側に O-リングとバックアップ・リングにより圧力シールを行なった。加圧により管がふくると圧力シールが有効に行なわれなくなるので、割り型治具で O-リング部を拘束した。この方法では変形の進行とともに管は多少曲がる。変形がさらに進行すると中金に当たり曲りは拘束される。

② クローズド・エンド法試験片

図 7 に示したように両端栓を溶接して圧力シールを行なった。管の曲りを拘束するための中金を入れていない。端栓溶接部から破裂することを防止するためにオープン・エンド法と同様に割り型治具で溶接ビード部、熱影響部を保護した。

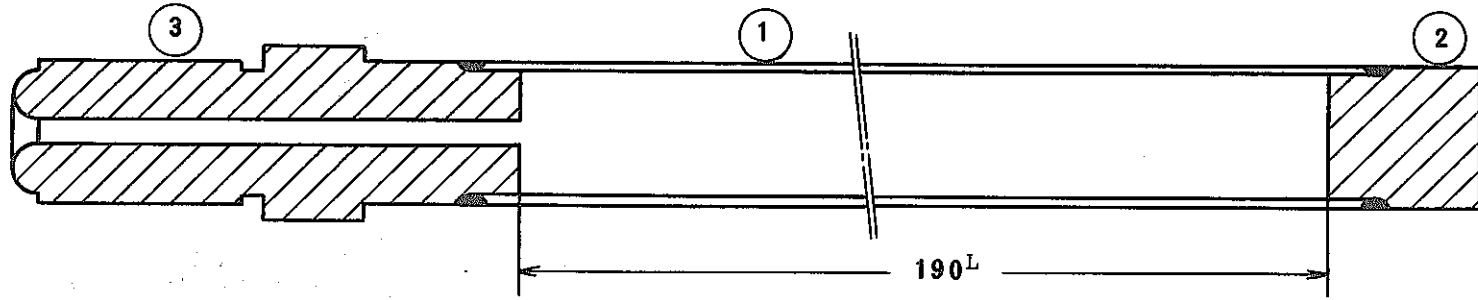
③ 固定端法試験片

固定端法では試験片が塑性変形を起こすと同時に生じる軸方向の縮み変形を如何に拘束するかが問題になる。予備試験ではいずれも中金と一体となった両端栓に管を溶接して管の曲りや軸方向の伸縮を拘束した(添付図面参照)。この溶接法で実施した予備試験の結果を表 6 に示す。しかしこの溶接法では最近の被覆管のように結晶の O 軸方向が半径方向を向いている管では肉厚変化が少ないために管の収縮力が著しく大きく、溶接部から破断してしまう。このために圧力封入端栓、加圧端栓の溶接部から 15 mm の位置に 5 R の円形溝を加工し、管を溶接したのちその溝に合うような絞り加工を施した⁹⁾ その外側から割り型治具で拘束し変形時の溶接部の保護とした。絞り加工も形状設定が悪いと有効な拘束とならない。写真 2 に良い形状のものと悪いものを示す。絞り加工に使用した装置と治具を写真 3、写真 4 に示す。内圧による変形時の縮み防止のために外套管を被せた。この外套管は曲り変形の防止も兼ねている。中金は使用していない。試験片の形状を図 8 に、端栓を含めた治具の様子を写真 5 に示す(固定端法に関する図面を参考図面に示す)。



- 1 : 被覆管
- 2 : 中金
- 3 : Oリング
- 4 : バックアップリング
- 5 : スリーブ

図6 試験片の形状(オープン・エンド法)



- 1 : 被覆管
- 2 : 圧力封入端栓
- 3 : 加圧端栓

図7 試験片の形状（クローズド・エンド法）

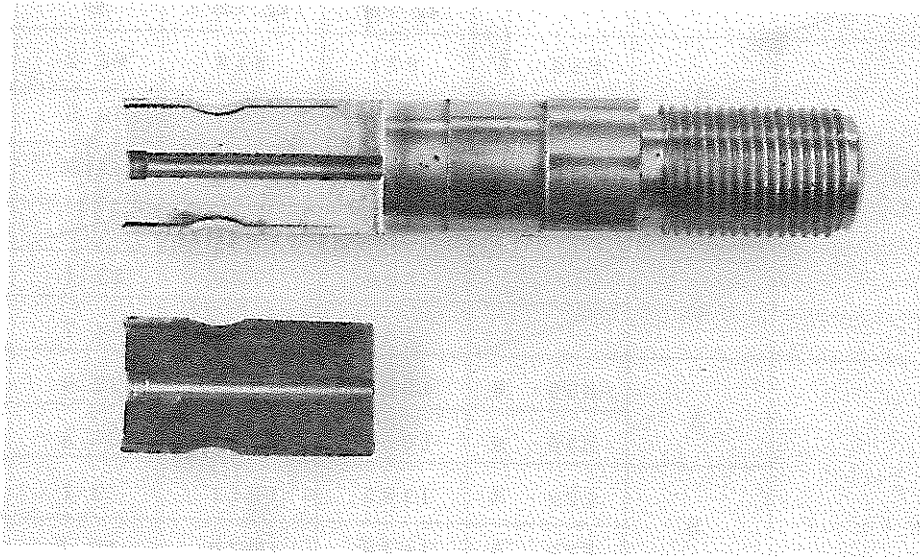
表 6 予備試験として実施した内圧破裂試験結果

破裂性質 試験方法	管の種別*	試験片番号	破 裂 圧 (kg/cm ²)	0.2%耐圧 (kg/cm ²)	周 伸 び (%)	肉厚減少 (%)
オープン・エンド	A	B30-6	971	818	62.2	
		B30-7	968	834	60.5	
	B	P22-3	1035	915	31.5	
	C		806	726	52.1	37.6
			789	725	54.7	42.7
クローズド・エンド	A	B30-8	1053	965	32.9	
		B30-9	1050	1005	27.4	
	B	P22-4	1182	1011	9.7	
		P22-5	1176	1020	10.4	
	C		942	849	15.3	33.0
			930	830	14.2	28.0
固定端（溶接法）	A	B30-12	1080	980	17.8	
		B30-13	1085	957	17.8	
	B	P22-8	1191	1022	7.8	
		P22-9	1191	1004	7.8	
	C		983	846	13.6	25.6
			980	840	9.2	25.2

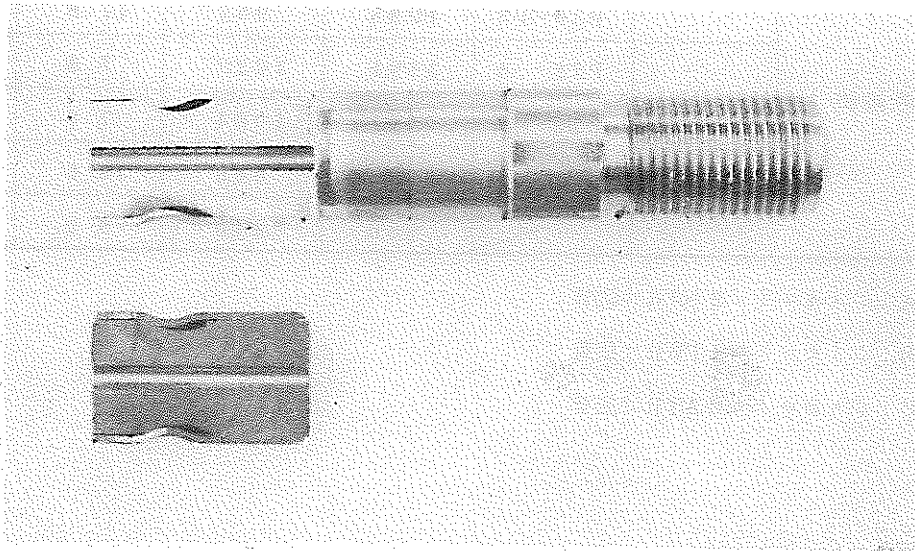
* 記号A：ジルカロイ-2 BWR寸法管

B：ジルカロイ-4 PWR寸法管

C：ジルカロイ-2 ATR寸法管

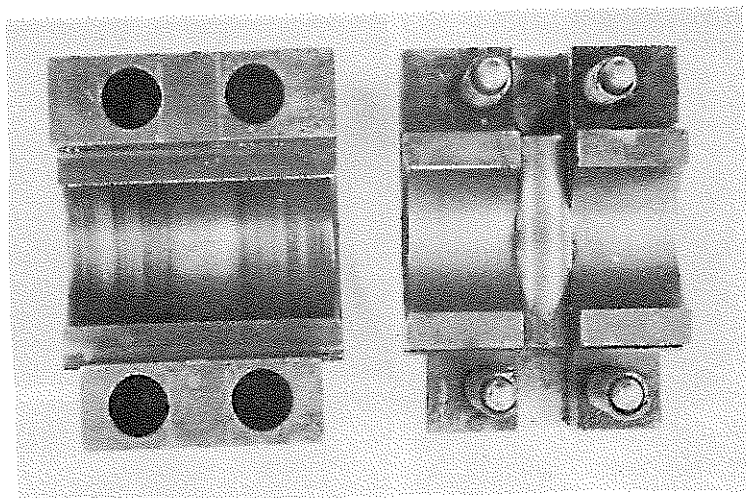


(a) 絞り形状のよいもの：絞り部で変形が拘束され
溶接ビードからの破断を防止している。

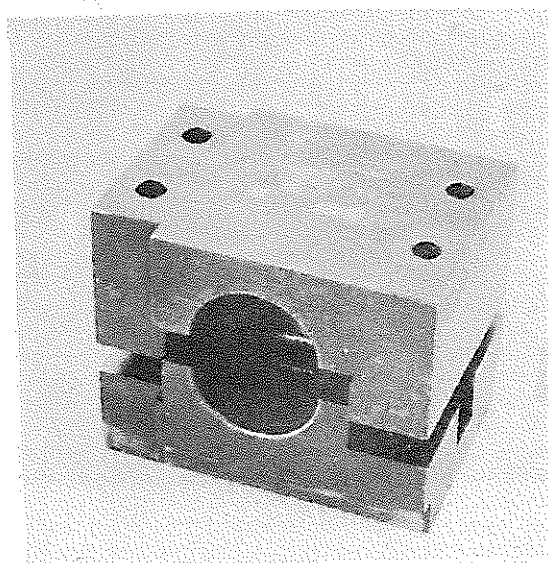


(b) 絞り形状の不適なもの：管の収縮を絞り部で拘束
できなくて、溶接部から破断したもの

写真2 固定端法に採用した絞り加工部の形状



(a) 管外径に合わせた半円溝の中央部に絞り加工用
ロッドが入っている。



(b) 組立てた状態

写真3 絞り加工治具

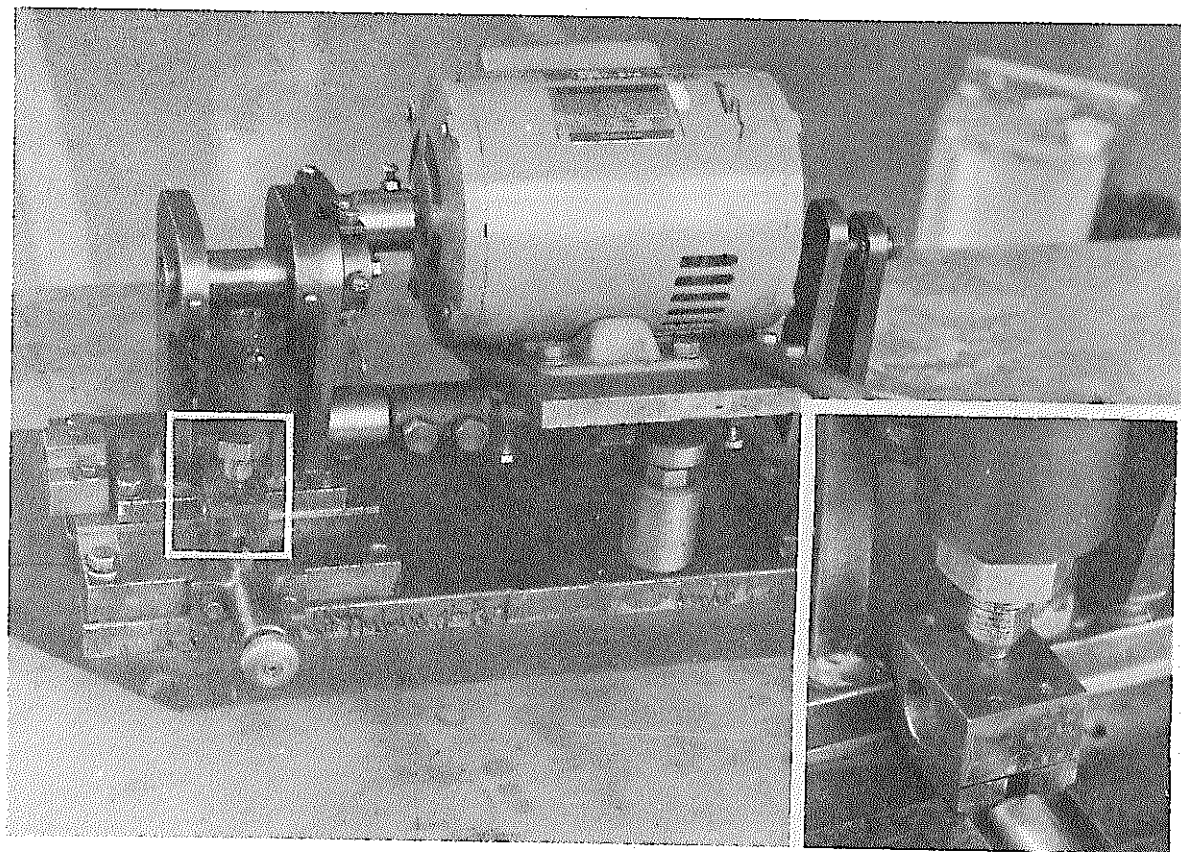


写真4 絞り加工装置

写真3の割り型ダイスの中に管を挿入し、管を回転させながら管を絞る。

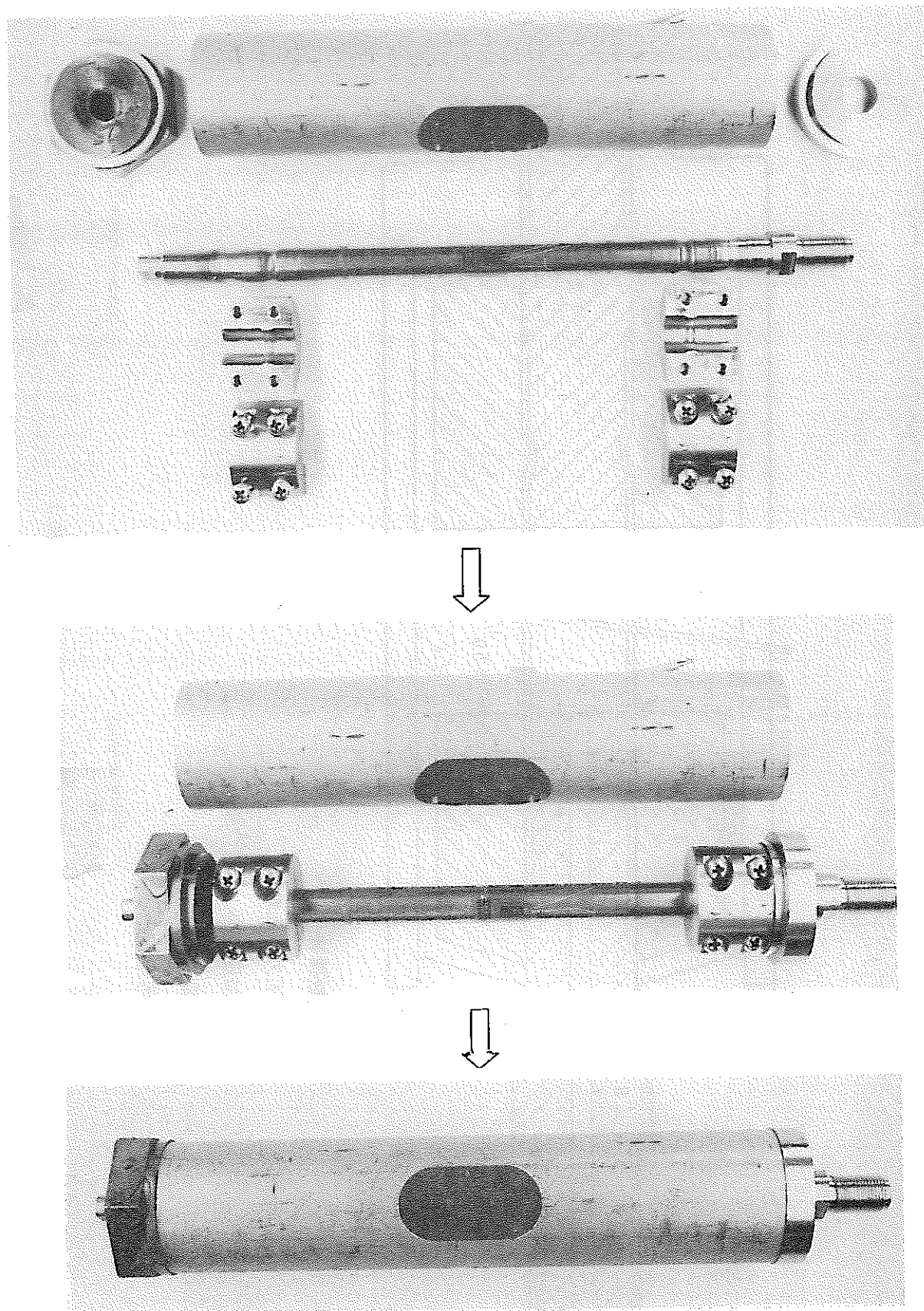
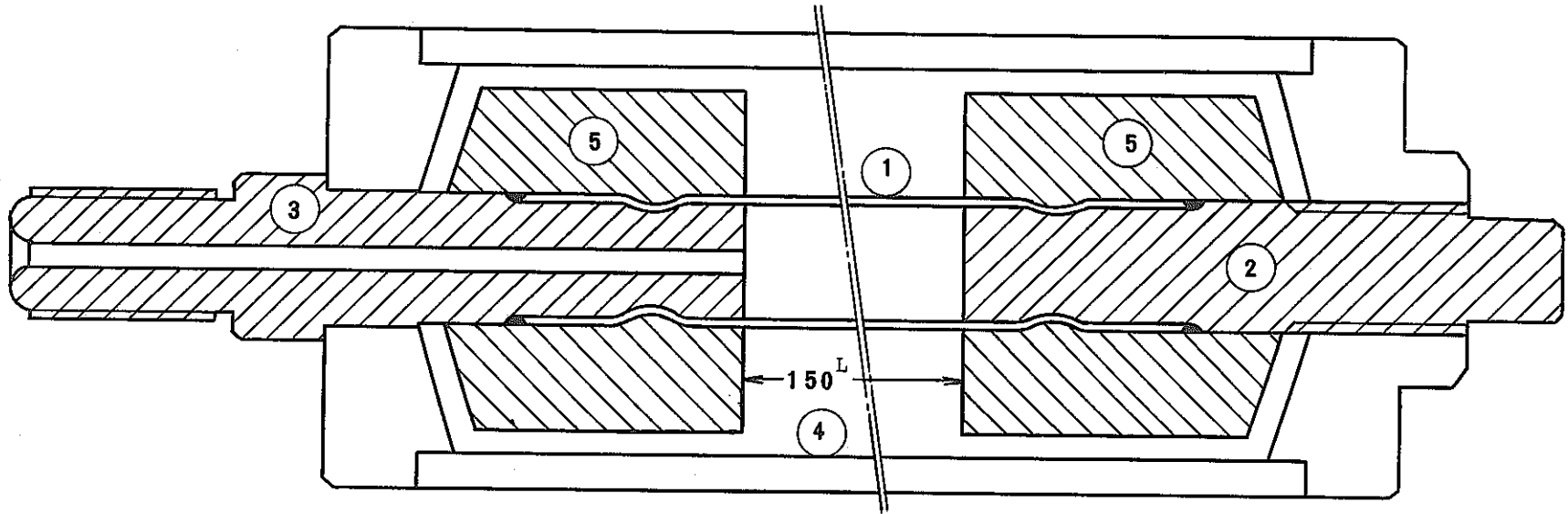


写真5 固定端法試験片の形状（上から組立順序を示す）



- 1 : 被覆管
- 2 : 圧力封入端栓
- 3 : 加圧端栓
- 4 : 変形拘束外罩管
- 5 : 溶接部保護治具

図8 試験片の形状（固定端法）

2.3 試験方法

加圧は図9に示す水圧破壊試験装置を用いて、シリコン油を加圧媒体とし常温大気中で試験した。管の中央部外面の軸方向と周方向にひずみゲージを貼付し、圧力-ひずみ曲線を求めた。ひずみゲージによる測定可能な最大ひずみ量は約2%であるために変形初期の圧力-ひずみ曲線となる。周方向の圧力-ひずみ曲線から0.2%変形時の圧力を求め降伏圧力とした。試験中の最高圧力をもって破裂圧力とした。破裂後のスクライブド・サークルを測定して試験片外表面の周方向、長手方向のひずみ分布を求めた。同時に破裂口近傍の外径をマイクロメータで測定し管のふくれの様相も調べた。破裂させたのち、破裂口中央部を切断し、管横断面の肉厚分布を測定した。

以上の測定項目および測定方法を図10にまとめて示す。

固定端法については外套管の外表面軸方向にひずみゲージを貼付し、変形時に生じる外套管のひずみを求め、万能試験機による圧縮力で較正し外套管にかかる荷重を求めて破裂直前の軸方向応力に対する周方向応力の比 (σ_a/σ_t) を求めた。

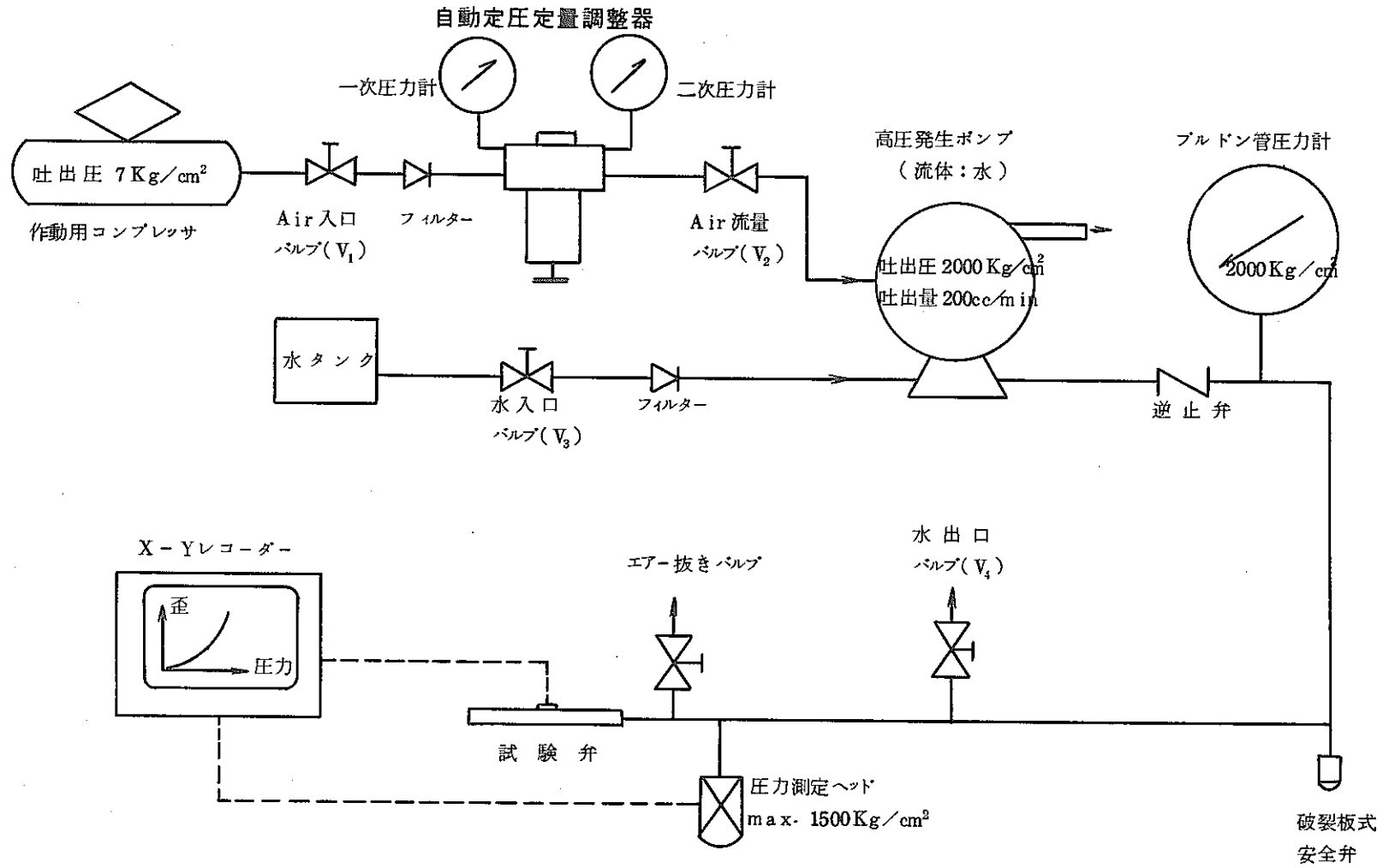
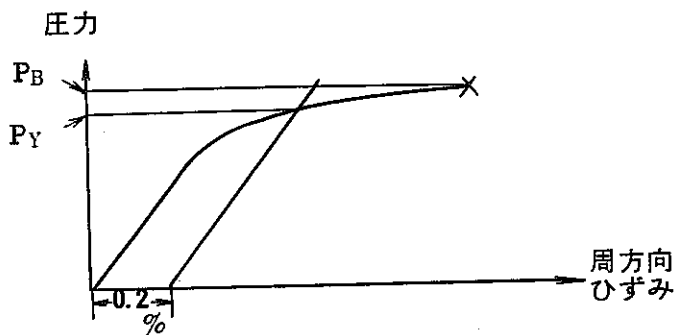
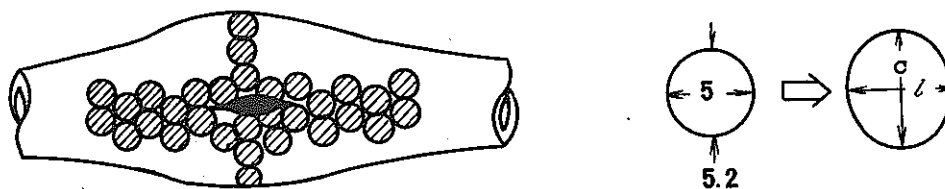


図9 被覆管水圧破壊試験装置フローシート

(1) 破裂圧力 (P_B), 降伏圧力 (P_Y)



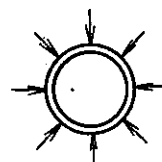
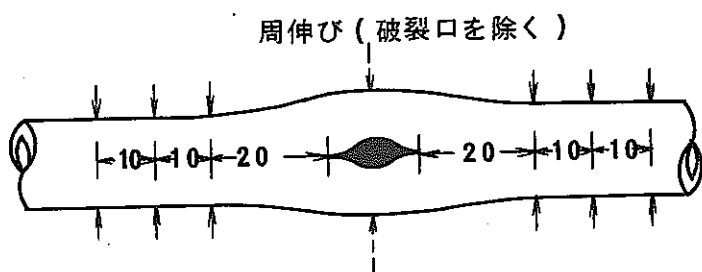
(2) スクライド・サークルによるひずみ分布



周方向ひずみ $\epsilon_c = \ln\left(\frac{C}{5.2}\right)$

長手方向ひずみ $\epsilon_l = \ln\left(\frac{l}{5}\right)$

(3) 周伸び長手方向分布



$$\Delta D = \frac{\bar{D}^1 - \bar{D}_0}{\bar{D}_0} \times 100$$

(4) 破裂部肉厚分布

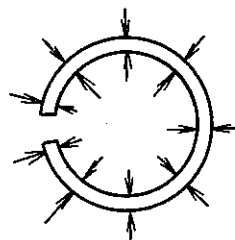
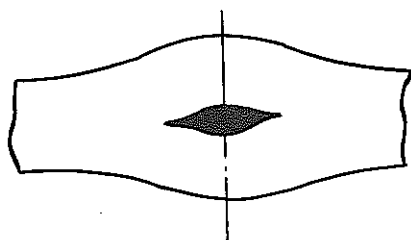


図 10 内圧破裂試験の測定項目

3 試験結果

以下に今回の試験で得られた結果を、オープン・エンド法、クローズド・エンド法、固定端法に分けて示す。

3.1 オープン・エンド法

480℃×2H、700℃×2Hの2条件で鈍焼した管のオープン・エンド法の結果を表7に示す。ここで破裂応力および降伏応力とは次の式により圧力を応力に変換させたものである。

表7 内圧破裂試験結果(オープン・エンド)

焼鈍条件	Q ₀ 値	試料外径 平均値 (mm)	試料番号(mm)			試料番号	破裂圧力 (kg/cm ²)	破裂応力 (kg/mm ²)	降伏圧力 (kg/cm ²)	降伏応力 (kg/mm ²)	周伸び (%)
			最大値	最小値	平均値						
480℃×2H	2.27	14.302	0.849	0.795	0.825	B2.27-L-6	912	69.9	839	64.3	29.2
		14.302	0.845	0.797	0.822	-L-7	908	69.9	840	64.7	36.6
	2.65	14.303	0.840	0.810	0.824	B2.65-L-6	(915)	(70.3)	(821)	(63.0)	(43.7)
		14.302	0.835	0.805	0.821	-L-7	923	71.2	837	64.5	38.1
	3.1	14.305	0.849	0.790	0.816	A3.1-L-6	926	71.9	830	64.4	40.6
		14.310	0.845	0.794	0.818	-L-7	921	71.3	888	68.8	43.7
	3.8	14.278	0.824	0.796	0.811	A3.8-L-6	884	69.0	809	63.1	44.6
		14.277	0.821	0.797	0.810	-L-7	888	69.4	822	64.2	41.4
700℃×2H	2.27	14.292	0.842	0.798	0.816	B2.27-H-6	720	55.8	600	46.5	55.4
		14.292	0.848	0.790	0.815	-H-7	707	54.9	590	45.8	53.7
	2.65	14.316	0.856	0.800	0.825	B2.65-H-6	713	54.7	596	45.7	55.1
		14.316	0.852	0.797	0.825	-H-7	717	55.0	575	44.1	54.8
	3.1	14.313	0.828	0.810	0.820	A3.1-H-6	690	53.3	567	43.8	60.8
		14.314	0.835	0.800	0.820	-H-7	(684)	(52.9)	(570)	(44.0)	(60.9)
	3.8	14.301	0.830	0.791	0.813	A3.8-H-6	690	53.8	558	43.5	56.6
		14.298	0.830	0.790	0.808	-H-7	696	54.6	558	43.8	54.8

()はピンホールリークのもの

$$\sigma = \frac{P \cdot D}{200t}$$

t : 肉厚 (mm) , P : 圧力 (kg/cm²)

D : 内径 (mm) , σ : 応力 (kg/mm²)

諸性質をQ値に対してプロットしたのが図11である。ここで肉厚減少率は破裂部の肉厚をポイントマイクロメータで測定し、破裂は最小肉厚部で生じるものとして次の式で求めた値である。

$$\text{肉厚減少率}(\%) = \frac{(\text{試験前の最小肉厚}) - (\text{試験後の破裂部の肉厚})}{\text{試験前の最小肉厚}} \times 100$$

480℃×2Hで焼鈍した管の周伸びは $Q = 2.26$ のときやや低いようである。他の性質は Q 値に応じて余り変化していない。焼鈍温度が700℃になると、破裂圧力、降伏圧力とも低下し Q 値による変化は認められない。しかし周伸びは50~60%と大きくなり、 $Q = 3.1$ のとき最大となっている。これに対して肉厚減少率は焼鈍温度の上昇があっても余り変化していない。破裂部を中心とした長手方向のひずみ分布をスクライブド・サークルを測定して求めた結果を図12に示す。 Q 値による変化は認められない。この場合 ϵ_c は円周方向自然対数ひずみで、 ϵ_l は軸方向自然対数ひずみである。この両者の差が肉厚方向ひずみを表わすことになる。周方向ひずみと軸方向ひずみとはほぼ対象的に分布している。このことから肉厚の大きな変化のないことが期待される。円周方向の分布を図13に示す。このプロットの両端が破裂部に相当する。分布は焼鈍温度の変化、 Q 値の変化に応じて変化していない。

破裂部近傍の周伸びの長手方向分布を図14に示す。破裂口の長さも図に入れた。周伸びはテープによる外周測定、他の部分はノギスによる外径測定から求めた。

破裂部の肉厚分布測定結果を図15に示す。比較のため試験前寸法として管端の肉厚値をレベルとして示した。破裂後の外観を写真6に示す。

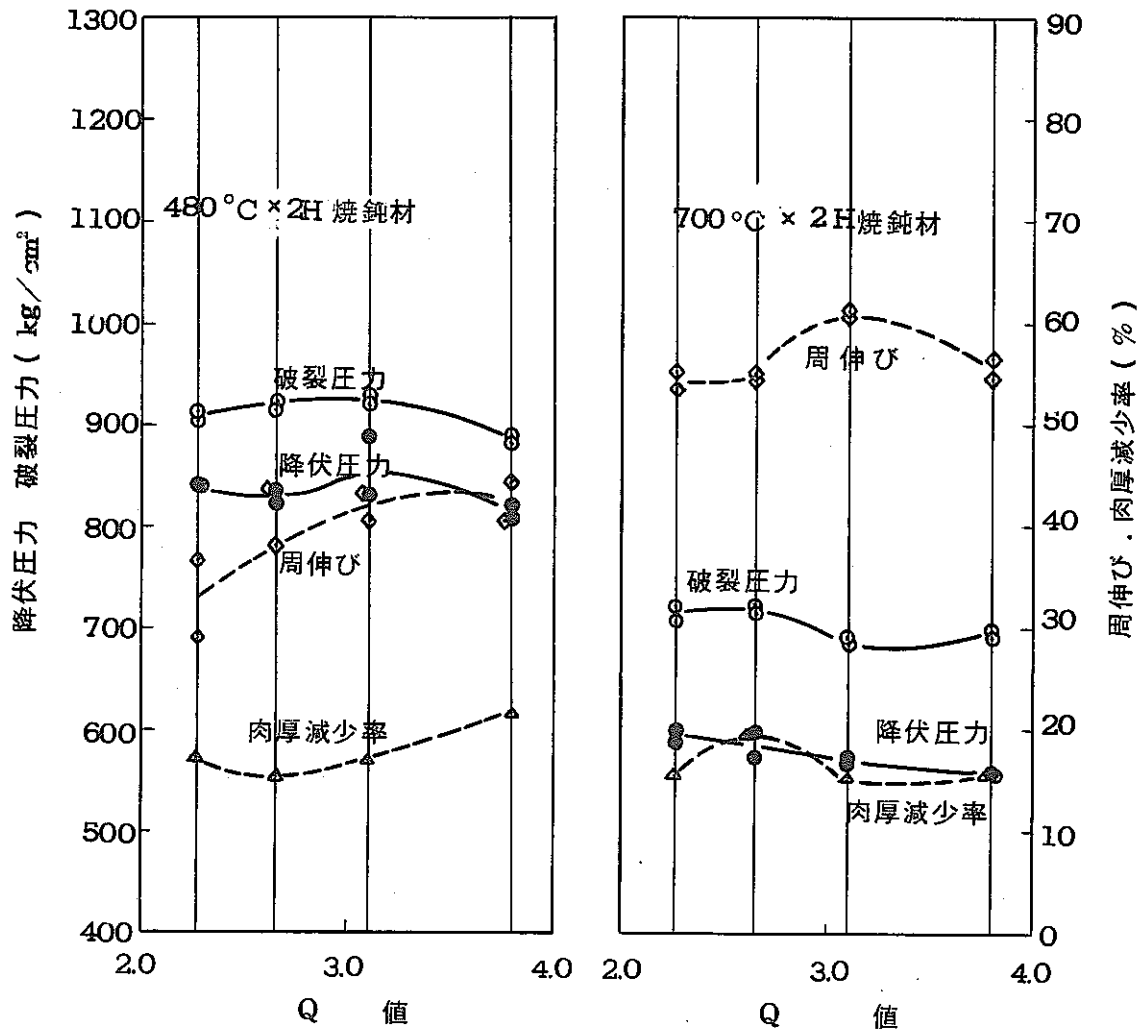


図 11 Q 値と内圧破裂性質 (オープン・エンド法)

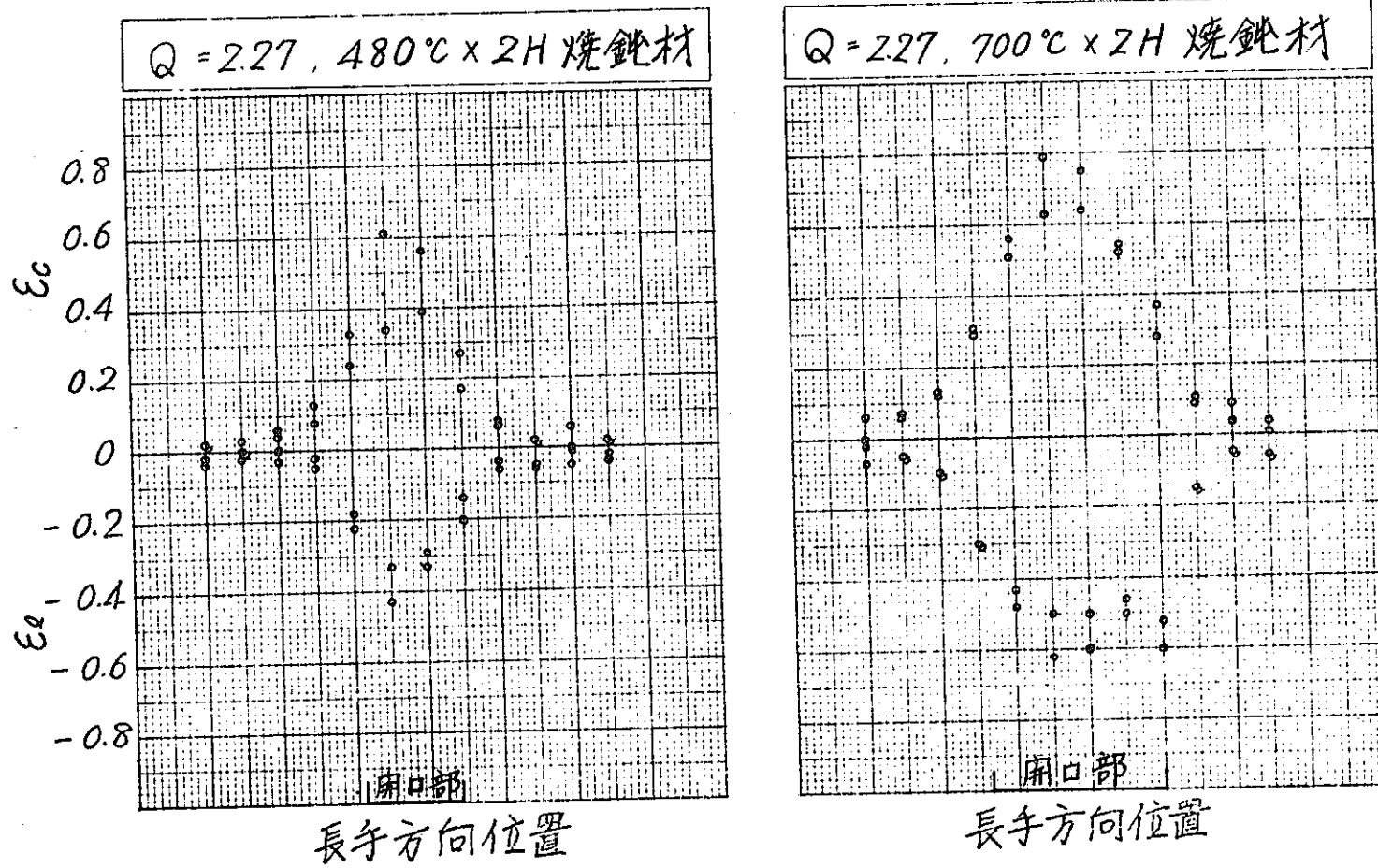


図 12(a) スクライブド・サークルによるひずみの長手方向分布
(オープン・エンド法)

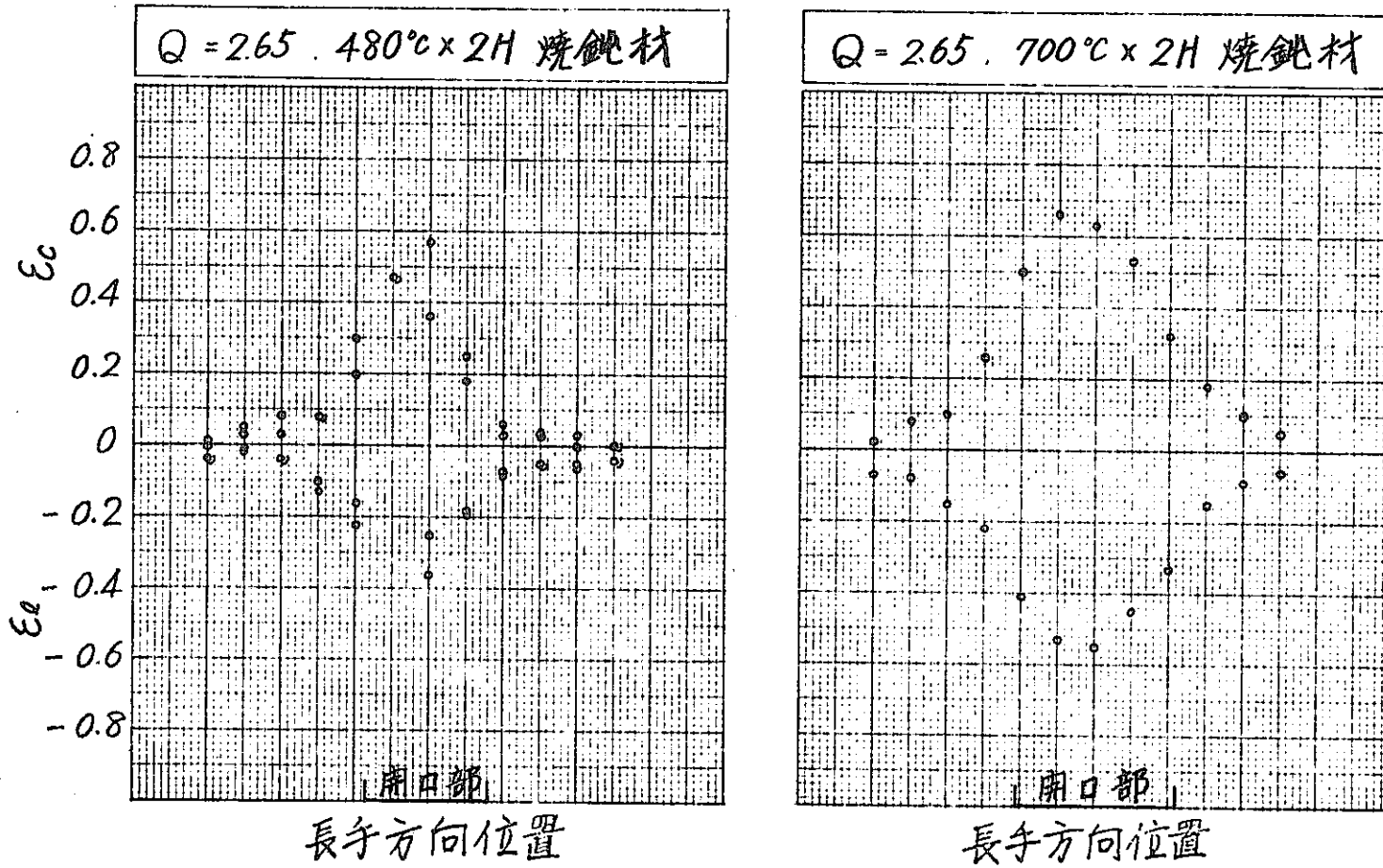


図 12 (b) スクライド・サークルによるひずみの長手方向分布
(オープン・エンド法)

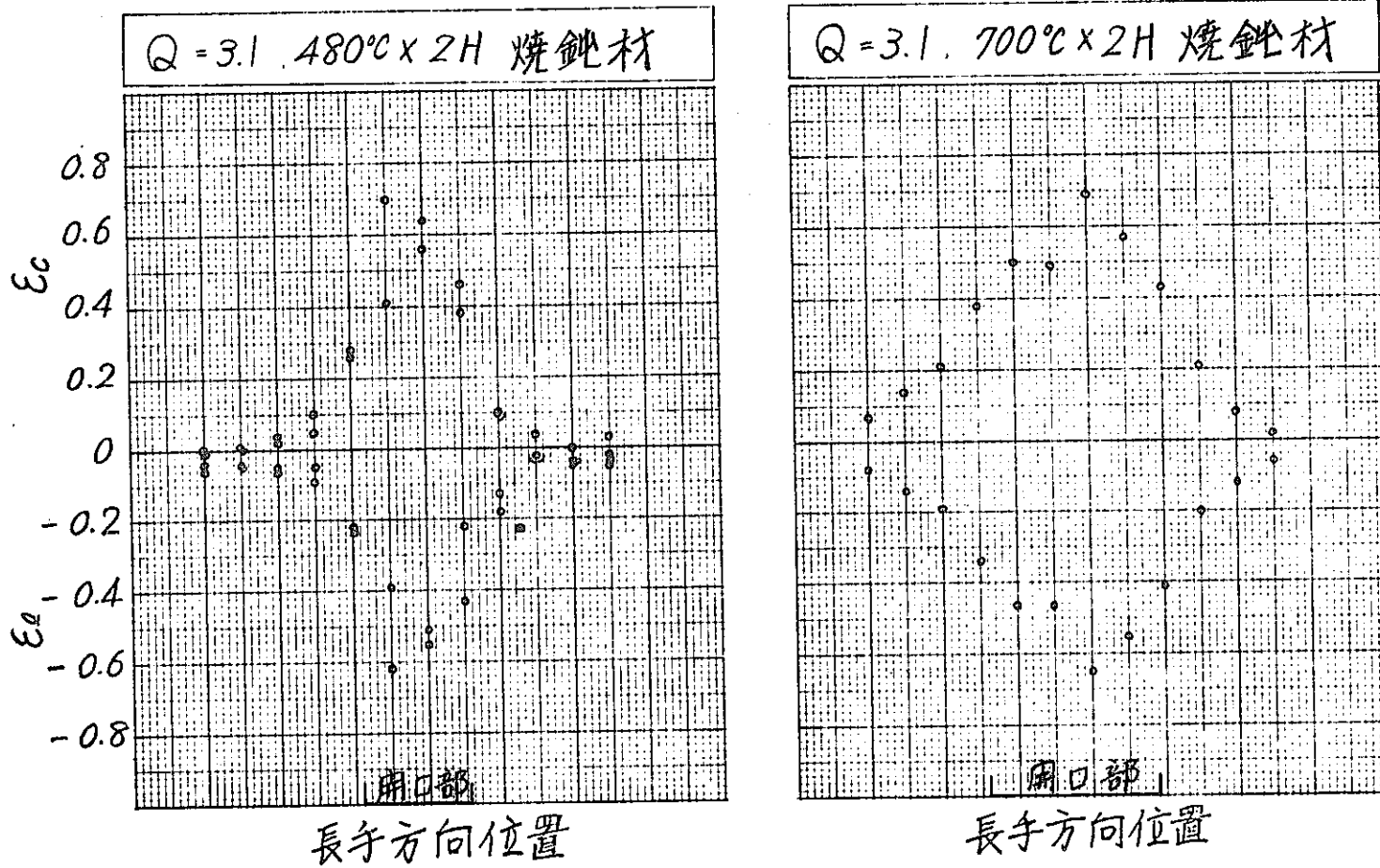


図 12(c) スクライブド・サークルによるひずみの長手方向分布
(オープン・エンド法)

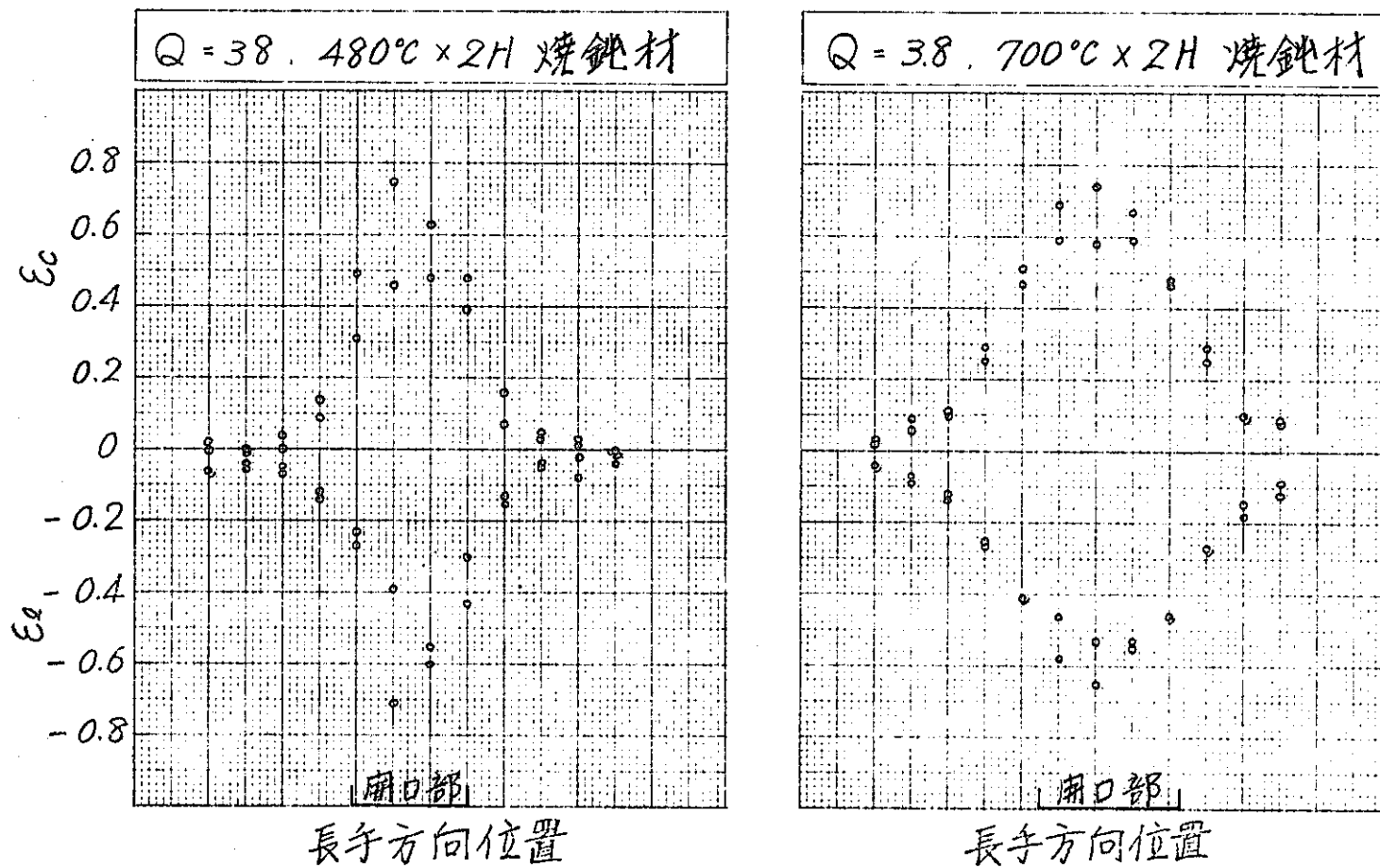


図 12 (d) スクライブド・サークルによるひずみの長手方向分布

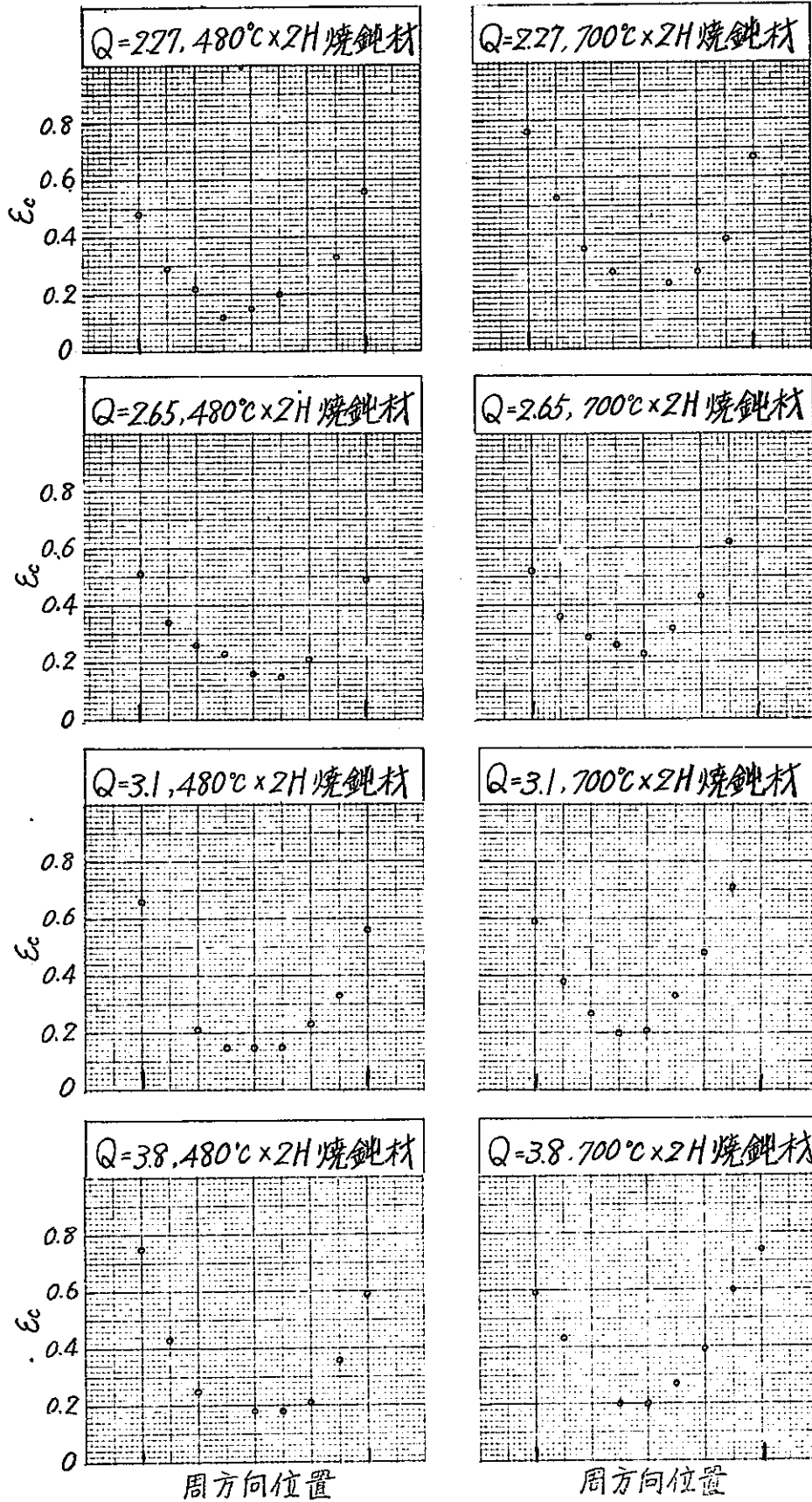


図 13 スクライブド・サークルによるひずみの周方向分布
(オープン・エンド法)

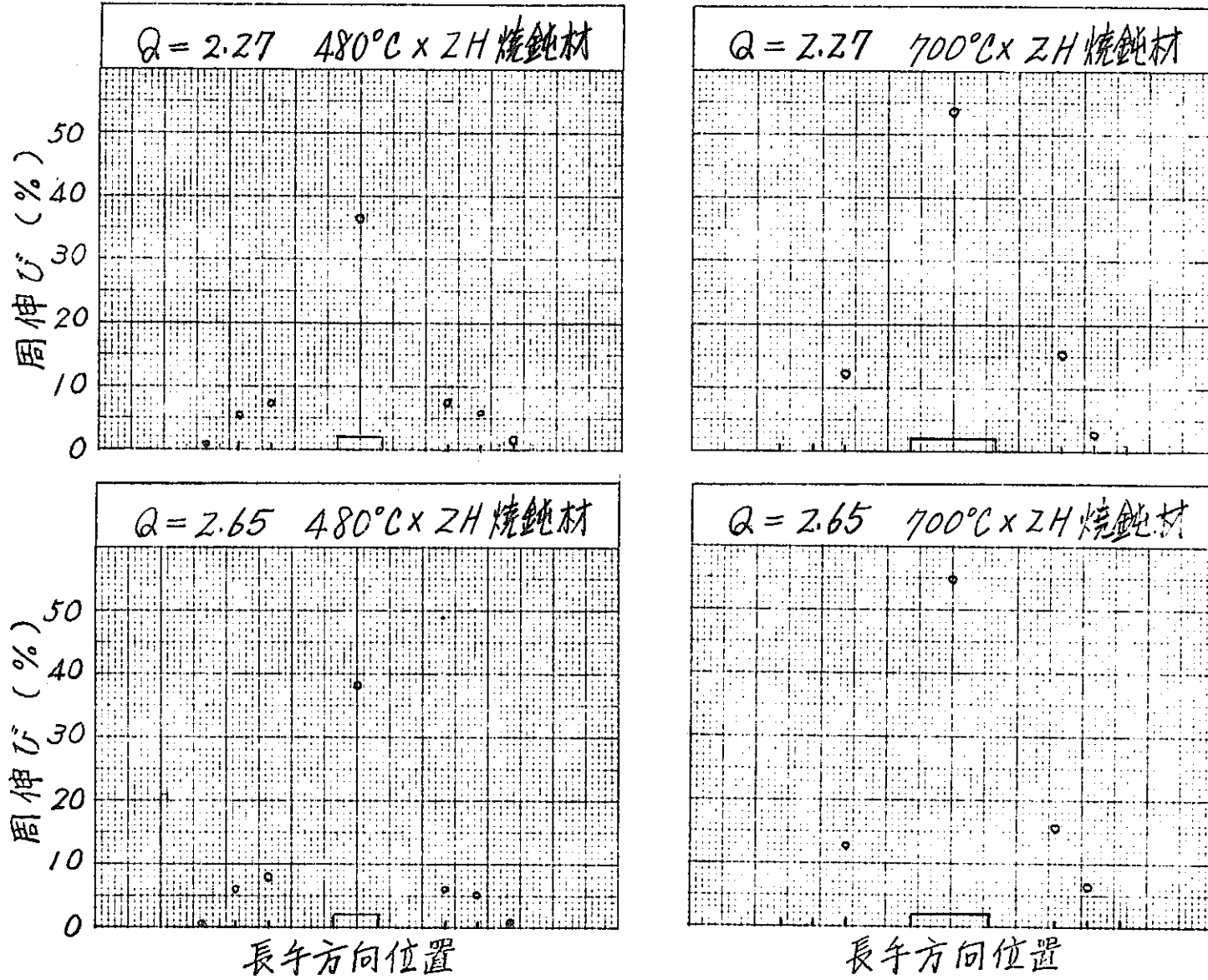


図 14 (a) 周伸びの長手方向分布 (オープン・エンド法)

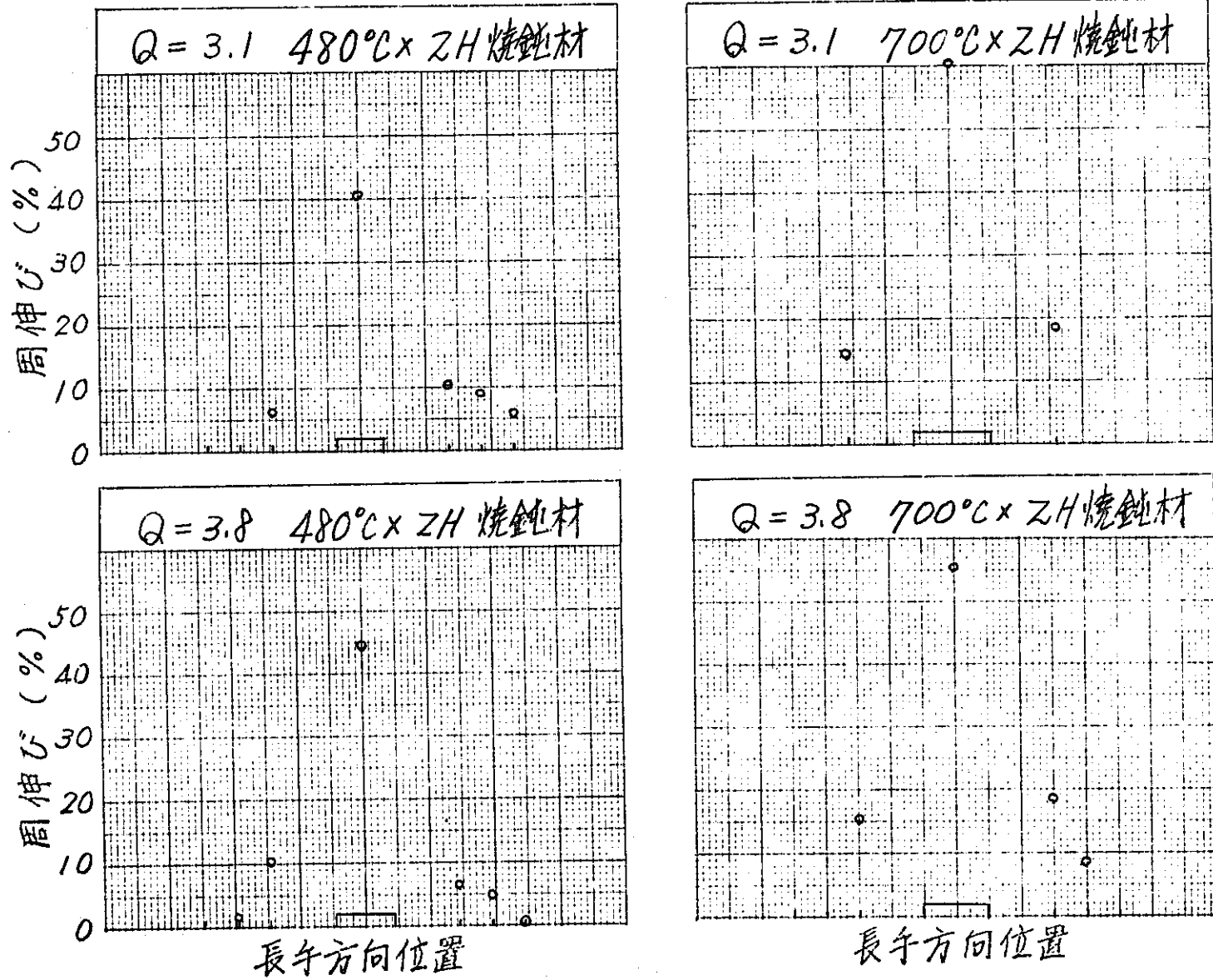


図 14 (b) 周伸びの長手方向分布 (オープン・エンド法)

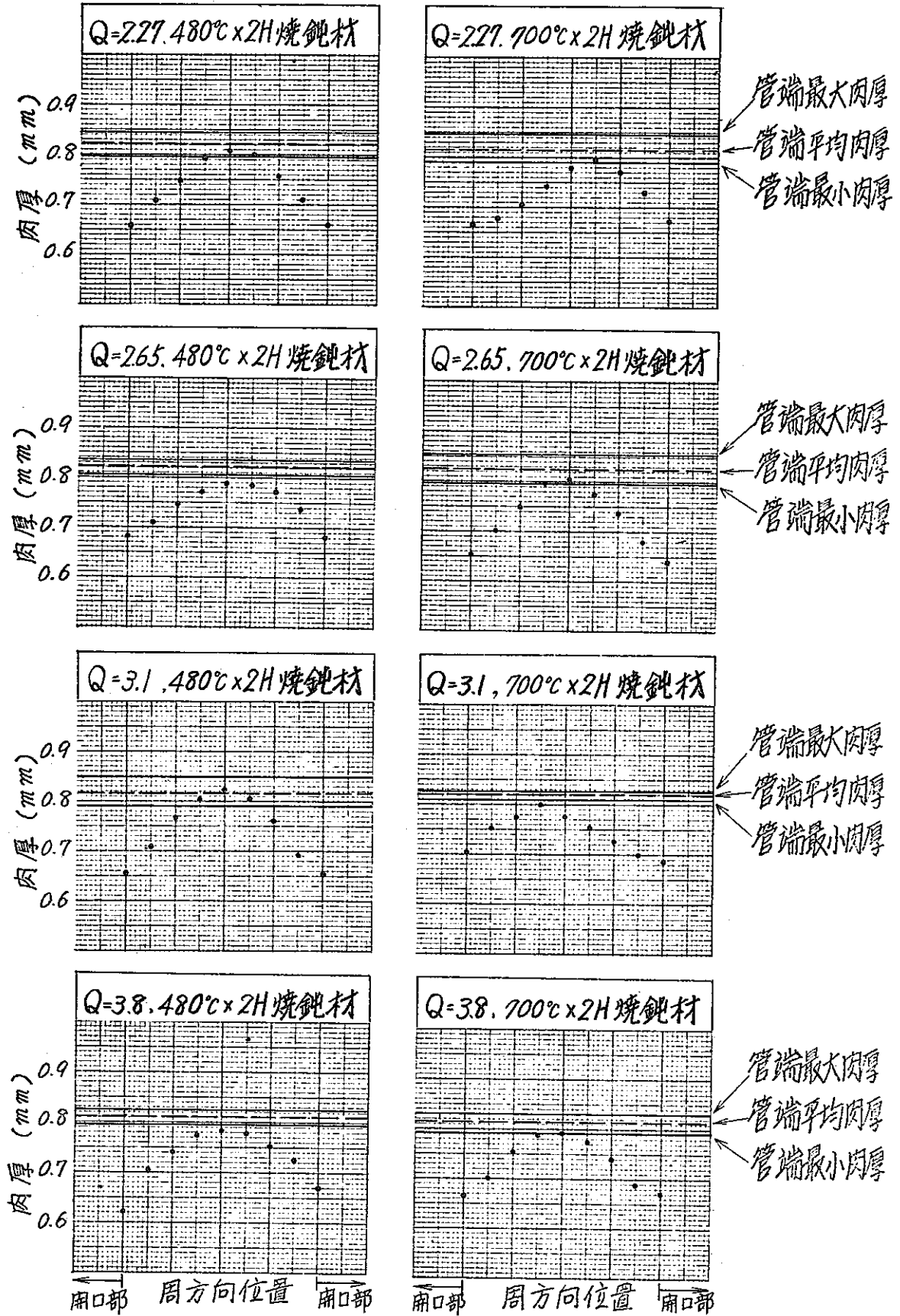
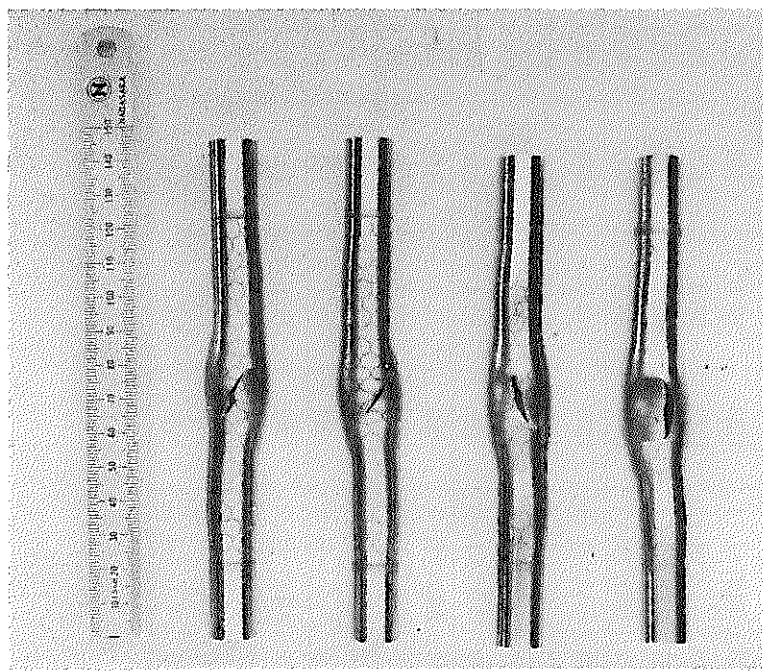
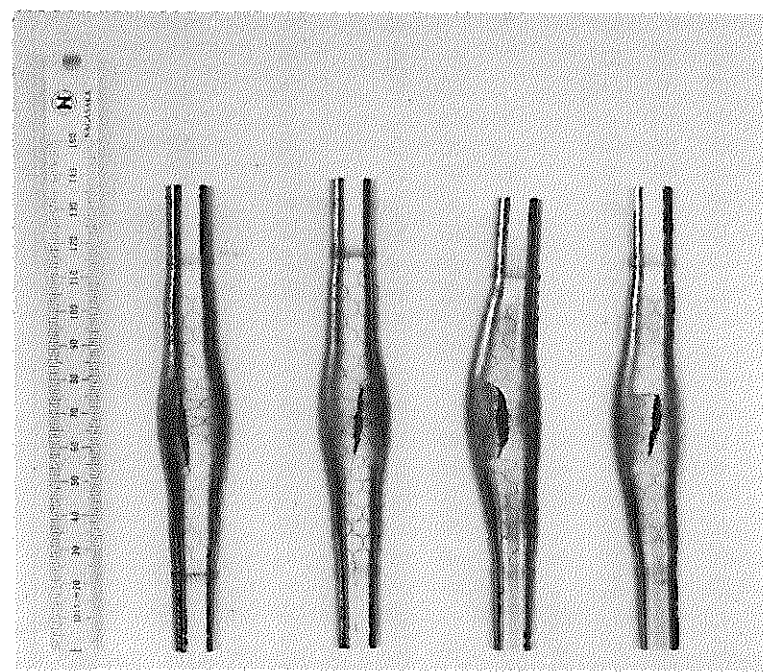


図 15 破裂部肉厚の周方向分布 (オープン・エンド法)



Q ₀ 値	2.27	2.65	3.1	3.8
焼鈍条件	480 °C × 2 H			



Q ₀ 値	2.27	2.65	3.1	3.8
焼鈍条件	700 °C × 2 H			

写真6 オープン・エンド法の内圧破裂後の外観

3.2 クローズド・エンド法

クローズド・エンド法で得られた結果を表8に示す。これらの諸性質をQ値に対してプロットしたのが図16である。焼鈍温度の上昇とともに破裂圧力、降伏圧力は低下しているが、オープン・エンド法と異なり、肉厚減少率は上昇している。480℃×2Hの焼鈍をした管の強度はQ=3.1のとき最も高いようである。

スクライブド・サークルによるひずみの長手方向分布を図17に示す。オープン・エンド法とは異なり周ひずみは軸ひずみよりも多少大きい、周方向分布を図18に示す。480℃×2H焼鈍材は破裂口より180度回転させた部分は殆んどひずんでいない。700℃×2H焼鈍材では多少の変形が現われる。

周伸びの長手方向分布を図19に示す。破裂部肉厚の周方向分布を図20に示す。開口部の反対側は殆んど肉厚が減少していない。

破裂後の外観を写真7に示す。管は彎曲しており破裂はいずれも内側で生じている。

表8 内圧破裂試験結果(クローズド・エンド)

焼鈍条件	Q ₀ 値	試料 外 径 平均値 (mm)	試料番号(mm)			試料番号	破裂圧力 (kg/cm ²)	破裂応力 (kg/mm ²)	降伏圧力 (kg/cm ²)	降伏応力 (kg/mm ²)	周伸び (%)
			最大値	最小値	平均値						
480℃×2H	2.27	14.301	0.845	0.794	0.823	B2.27-L-4	1133	87.1	983	75.6	8.5
		14.297	0.840	0.795	0.819	-L-5	1128	87.2	975	75.3	7.8
	2.65	14.303	0.838	0.805	0.823	B2.65-L-4	1146	88.1	993	76.4	4.0
		14.303	0.833	0.805	0.822	-L-5	1146	88.2	1025	78.9	9.5
	3.1	14.302	0.830	0.804	0.818	A3.1-L-4	1208	93.5	1076	83.5	7.4
		14.302	0.835	0.796	0.815	-L-5	1196	93.0	1091	84.8	8.8
	3.8	14.277	0.818	0.798	0.807	A3.8-L-4	1184	92.9	1035	81.2	9.3
		14.277	0.824	0.791	0.806	-L-5	1178	92.4	1064	83.5	7.1
700℃×2H	2.27	14.293	0.828	0.800	0.814	B2.27-H-4	923	71.8	827	64.3	27.5
		14.292	0.834	0.798	0.815	-H-5	923	72.2	795	61.8	28.1
	2.65	14.315	0.841	0.802	0.822	B2.65-H-4	921	71.0	782	60.3	25.6
		14.315	0.837	0.805	0.823	-H-5	927	71.4	781	60.1	30.3
	3.1	14.313	0.830	0.806	0.821	A3.1-H-4	942	72.7	795	61.4	34.8
		14.315	0.832	0.811	0.822	-H-5	946	72.9	780	60.1	31.3
	3.8	14.302	0.829	0.791	0.810	A3.8-H-4	926	72.5	756	59.2	24.0
		14.301	0.827	0.790	0.810	-H-5	930	72.8	746	58.4	27.3

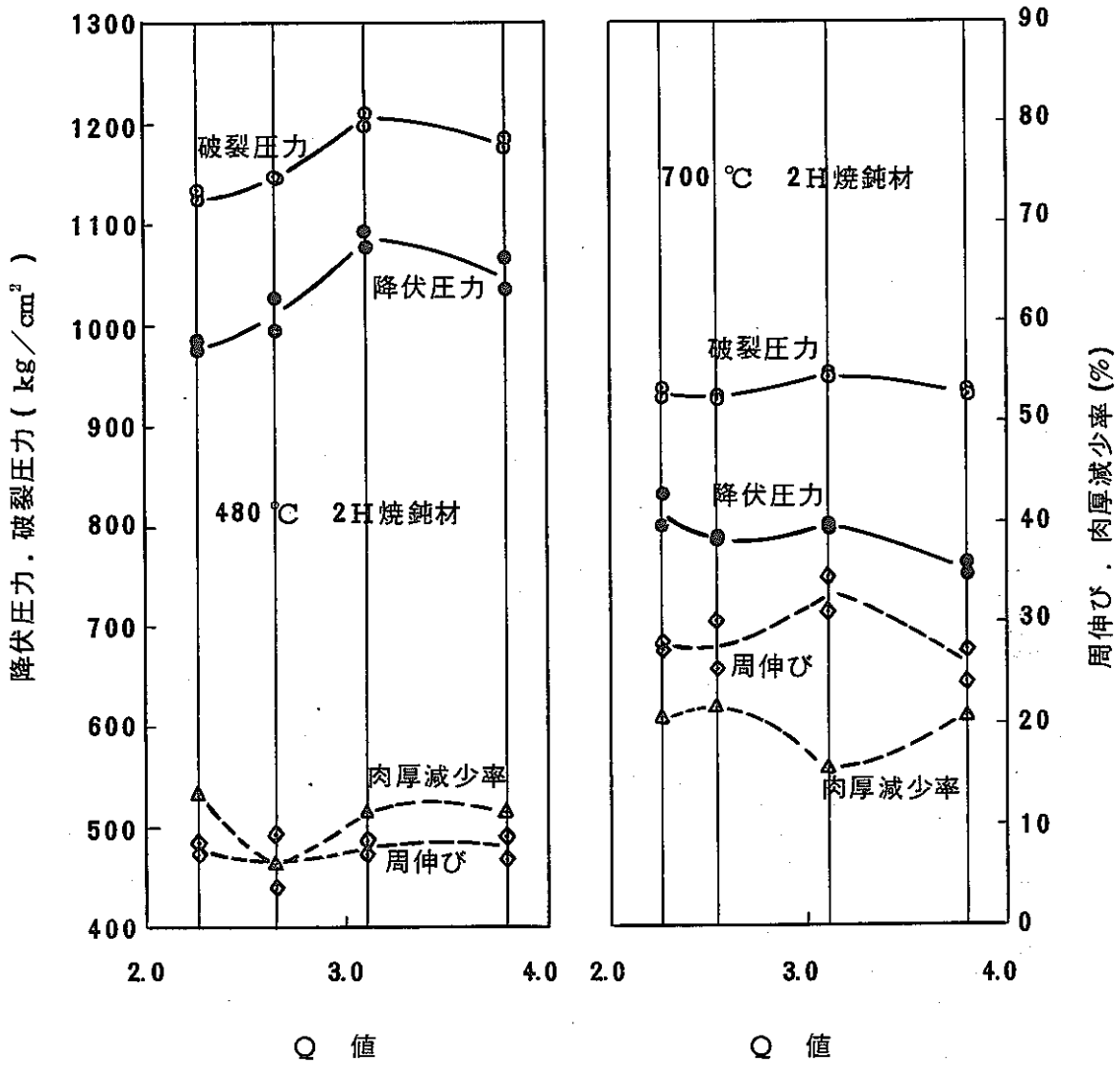


図 16 Q 値と内圧破裂性質 (グローブド・エンド法)

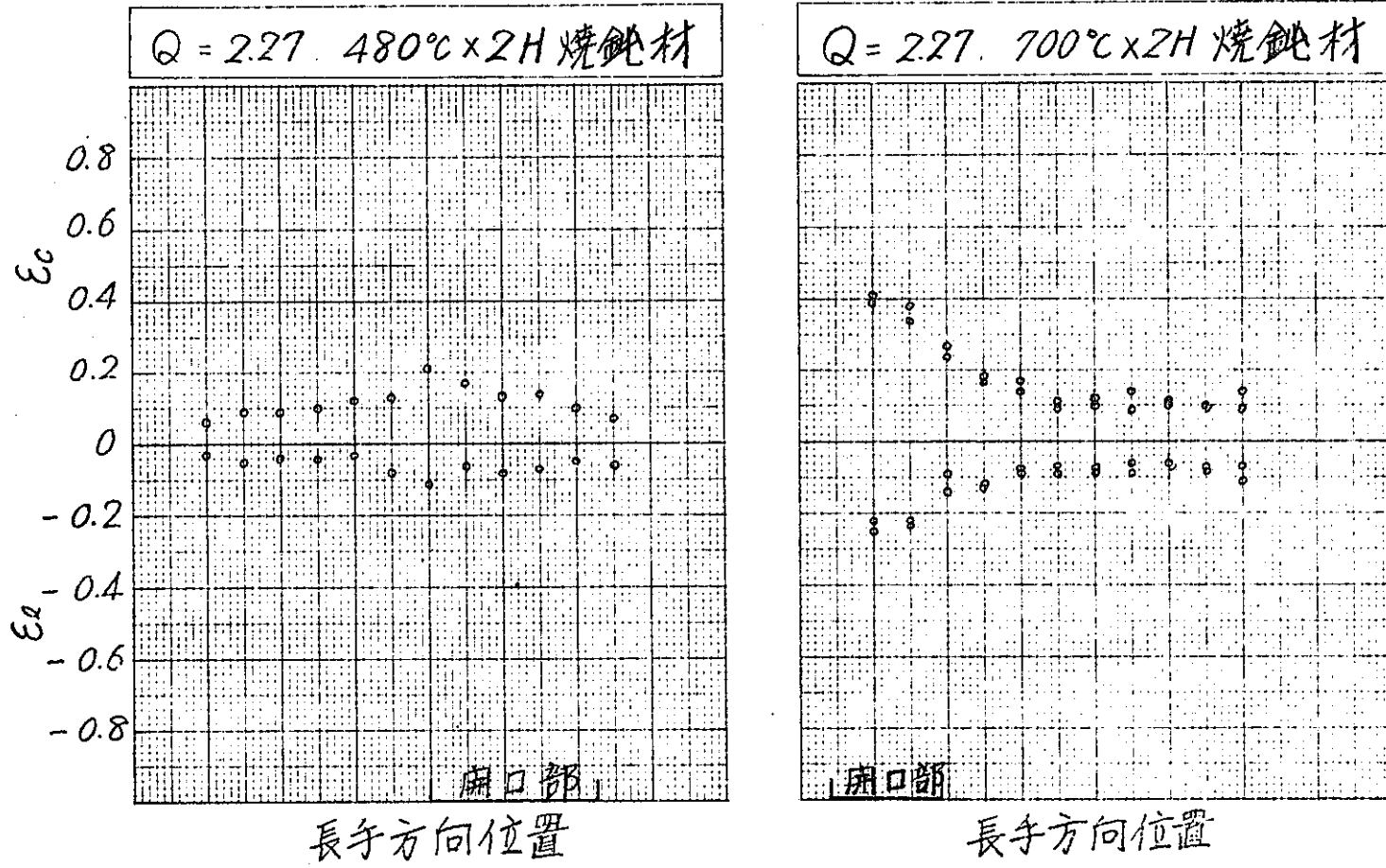


図 17 (a) スクライブド・サークルによるひずみの長手方向分布
(クローズド・エンド法)

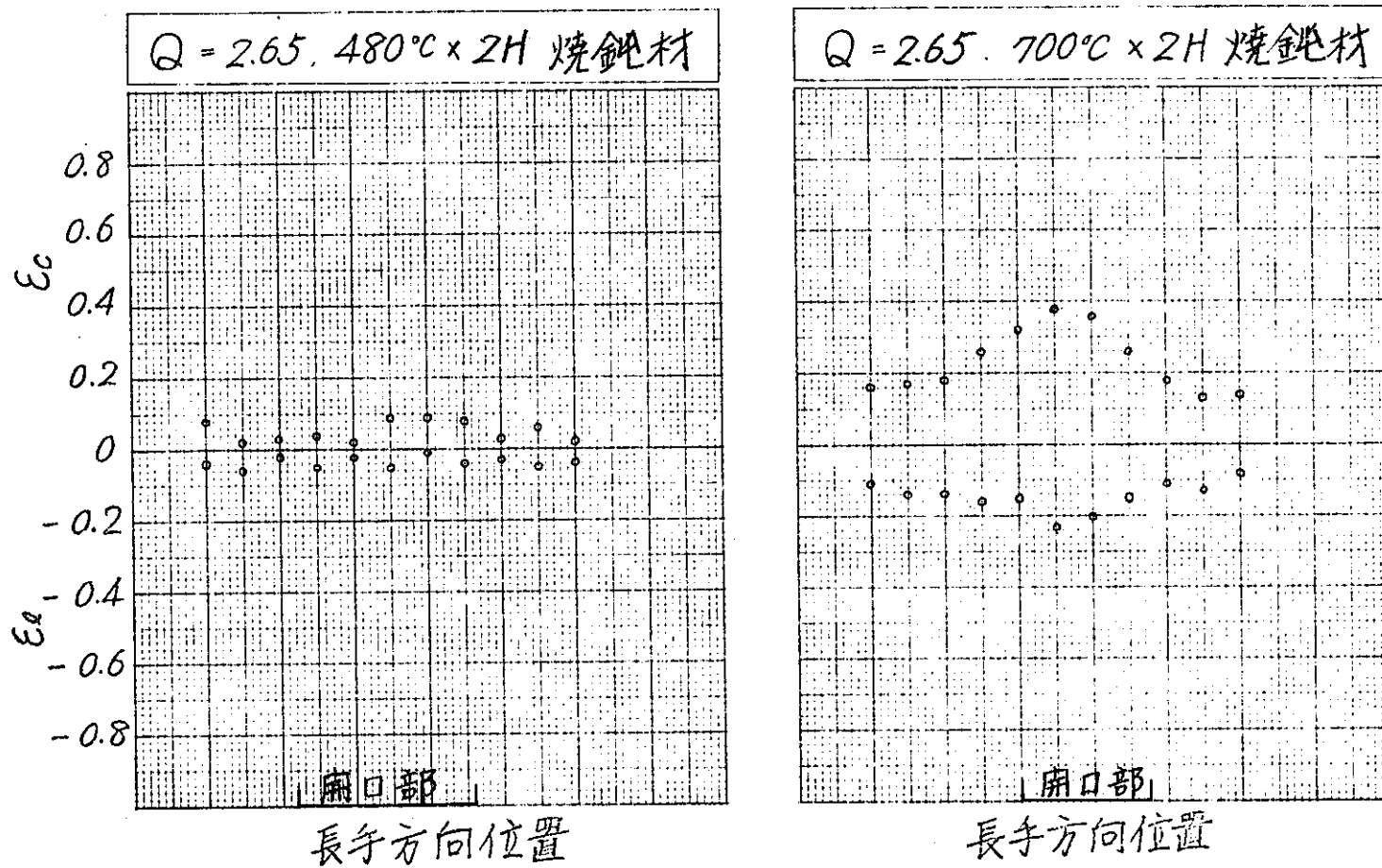


図 17 (b) スクライブド・サークルによるひずみの長手方向分布
(クローズド・エンド法)

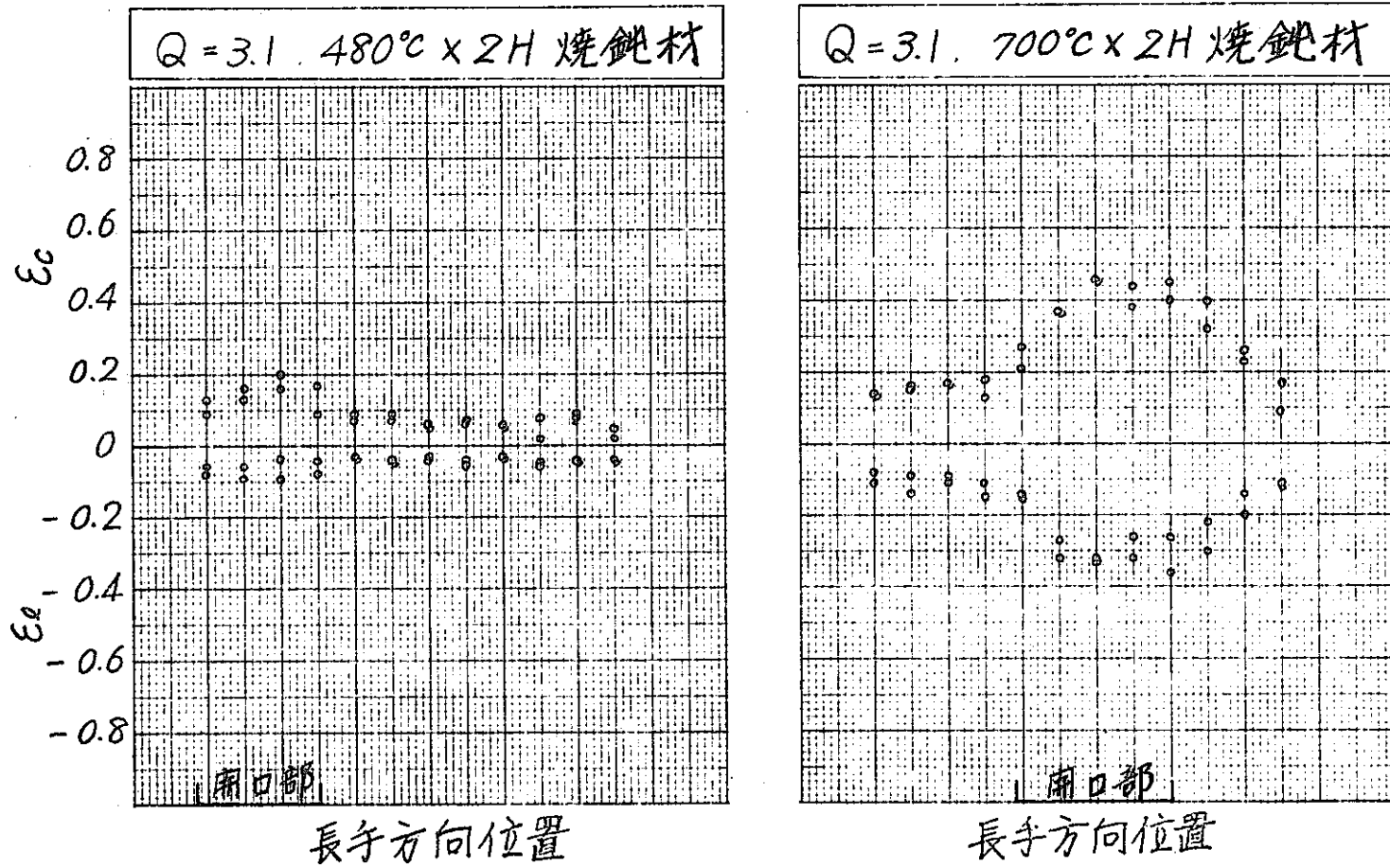


図 17(c) スクライブド・サークルによるひずみの長手方向分布
(クローズド・エンド法)

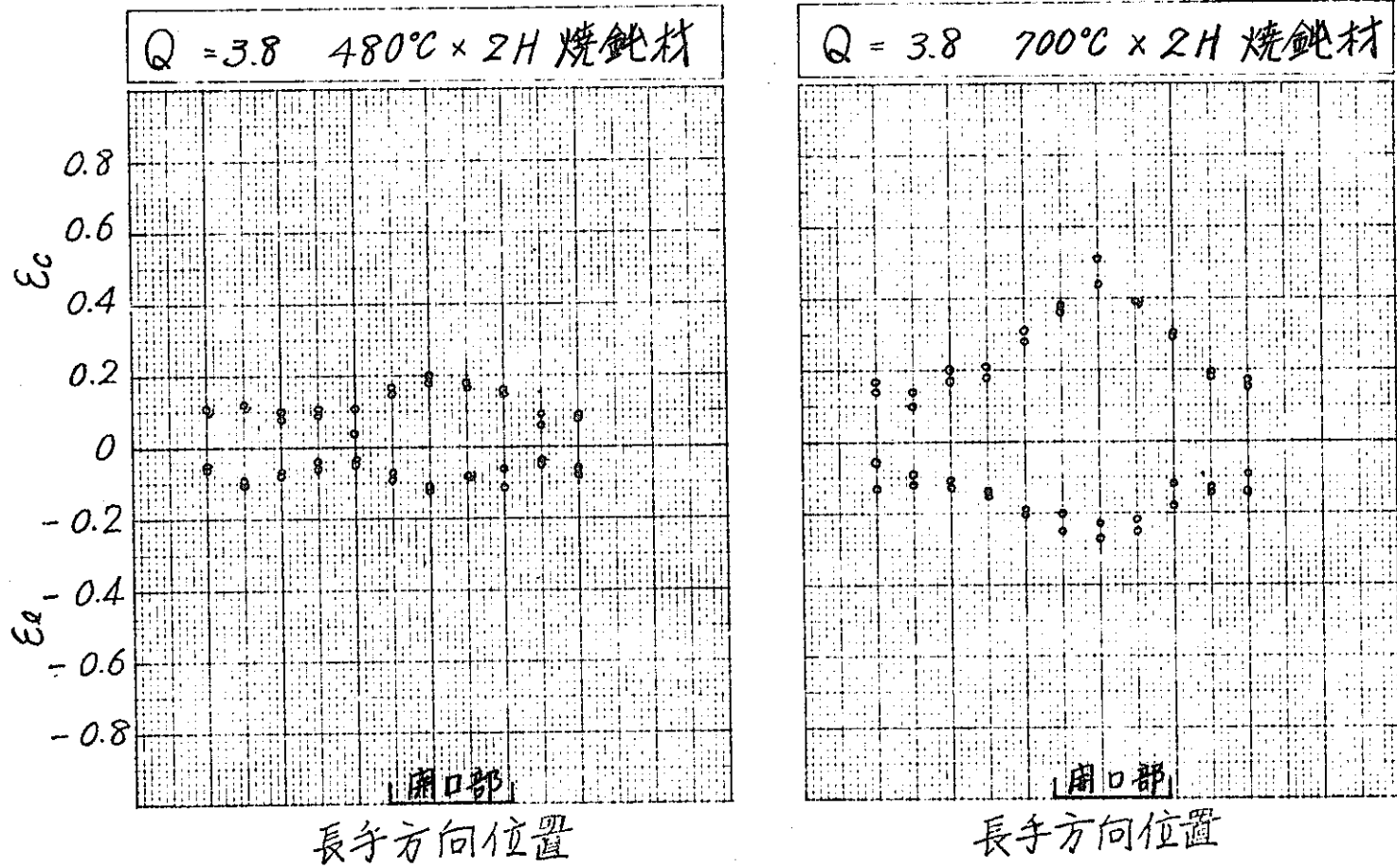


図 17 (d) スクライブド・サークルによるひずみの長手方向分布
(クローズド・エンド法)

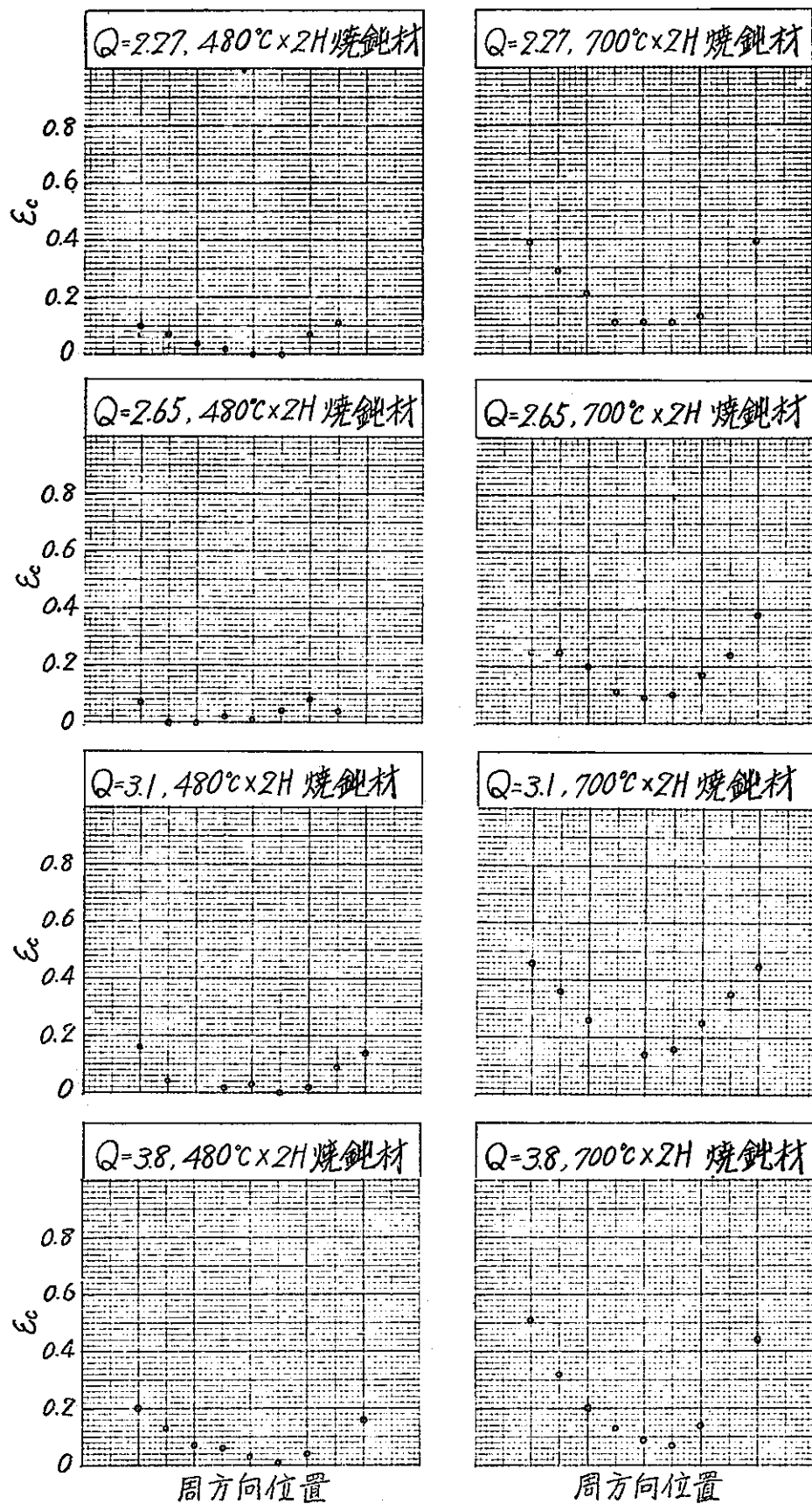


図 18 スクライブド・サークルによるひずみの周方向分布 (クローズド・エンド法)

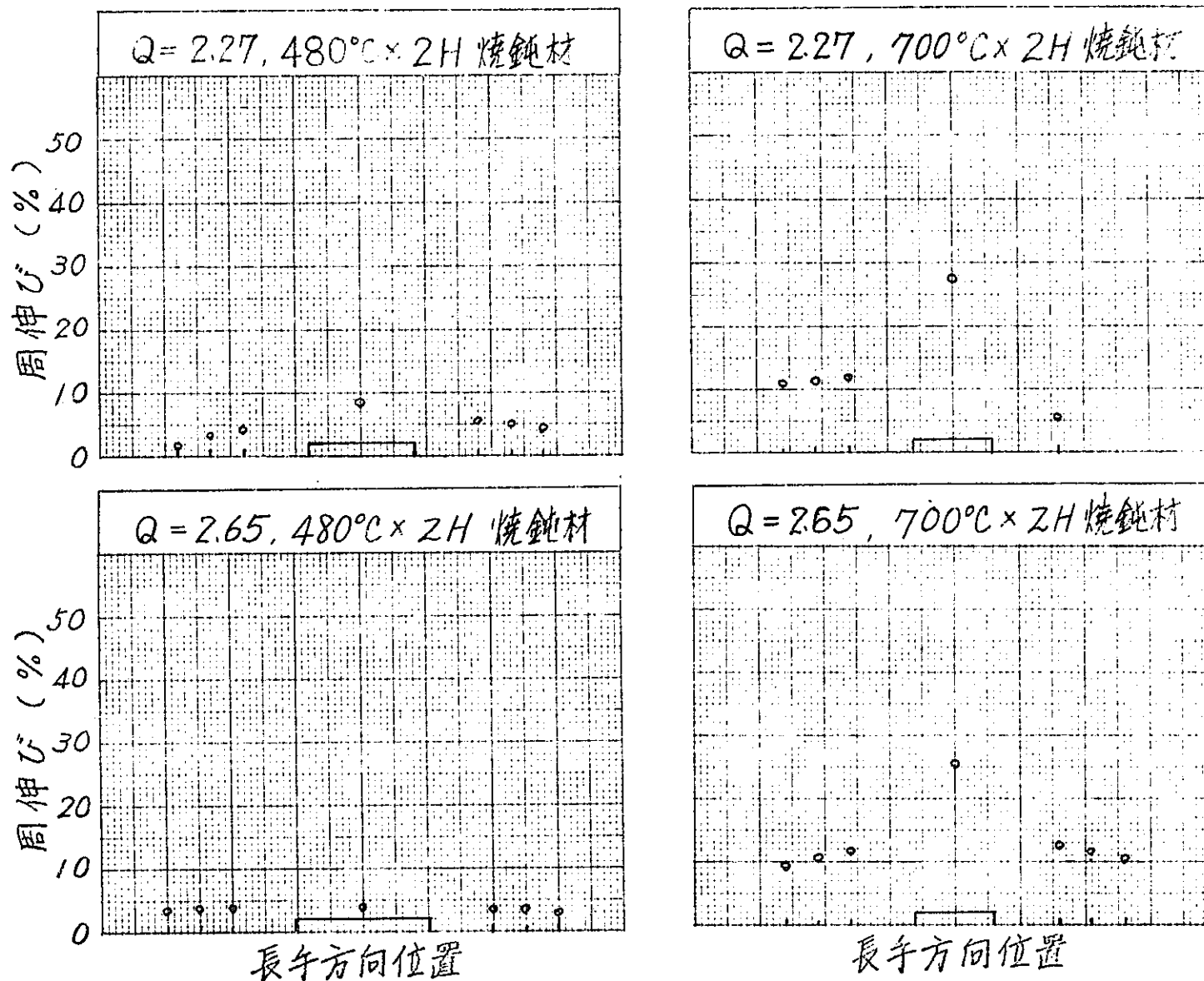


図 19(a) 周伸びの長手方向分布 (クローズド・エンド法)

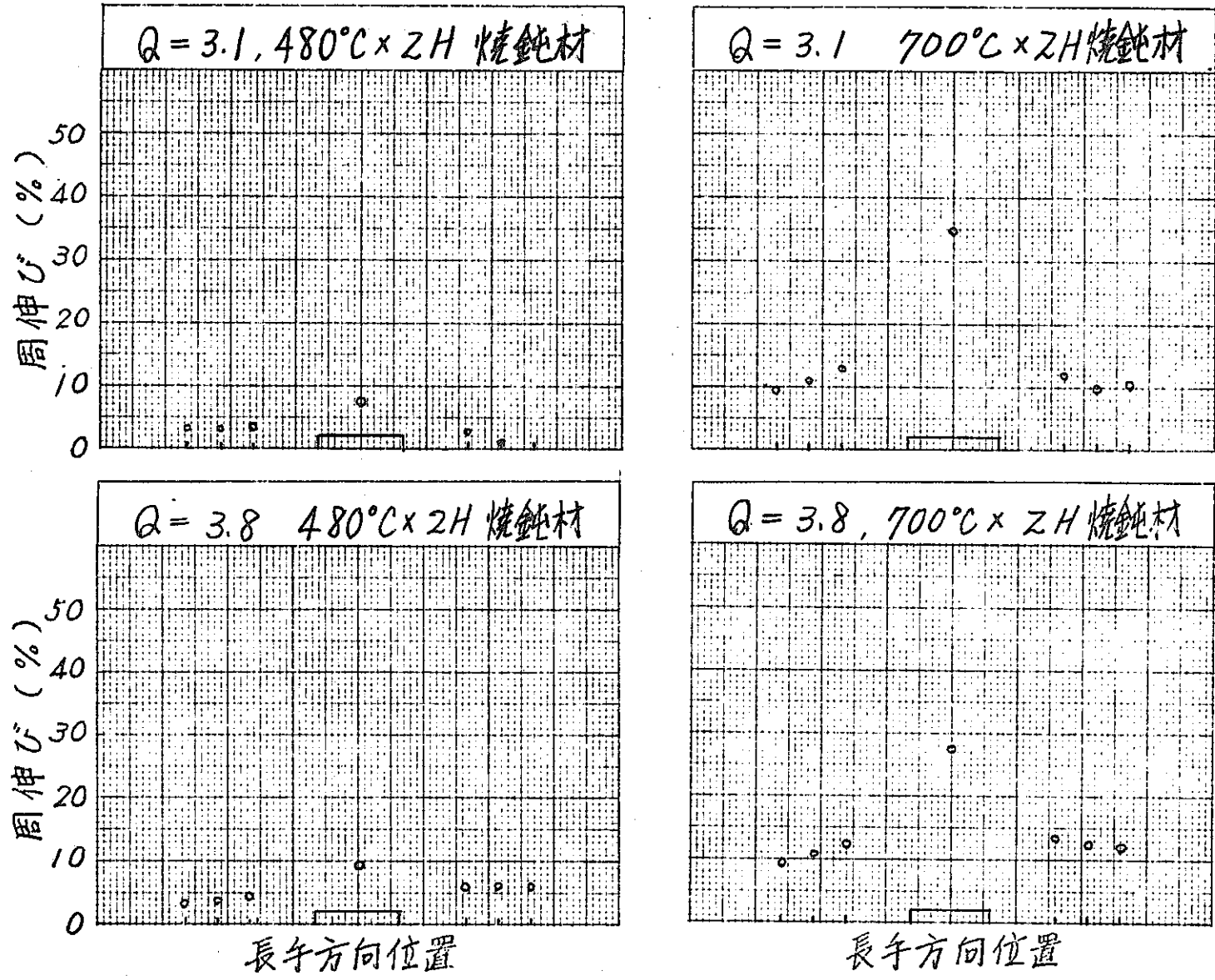


図 19 (b) 周伸びの長手方向分布 (クローズド・エンド法)

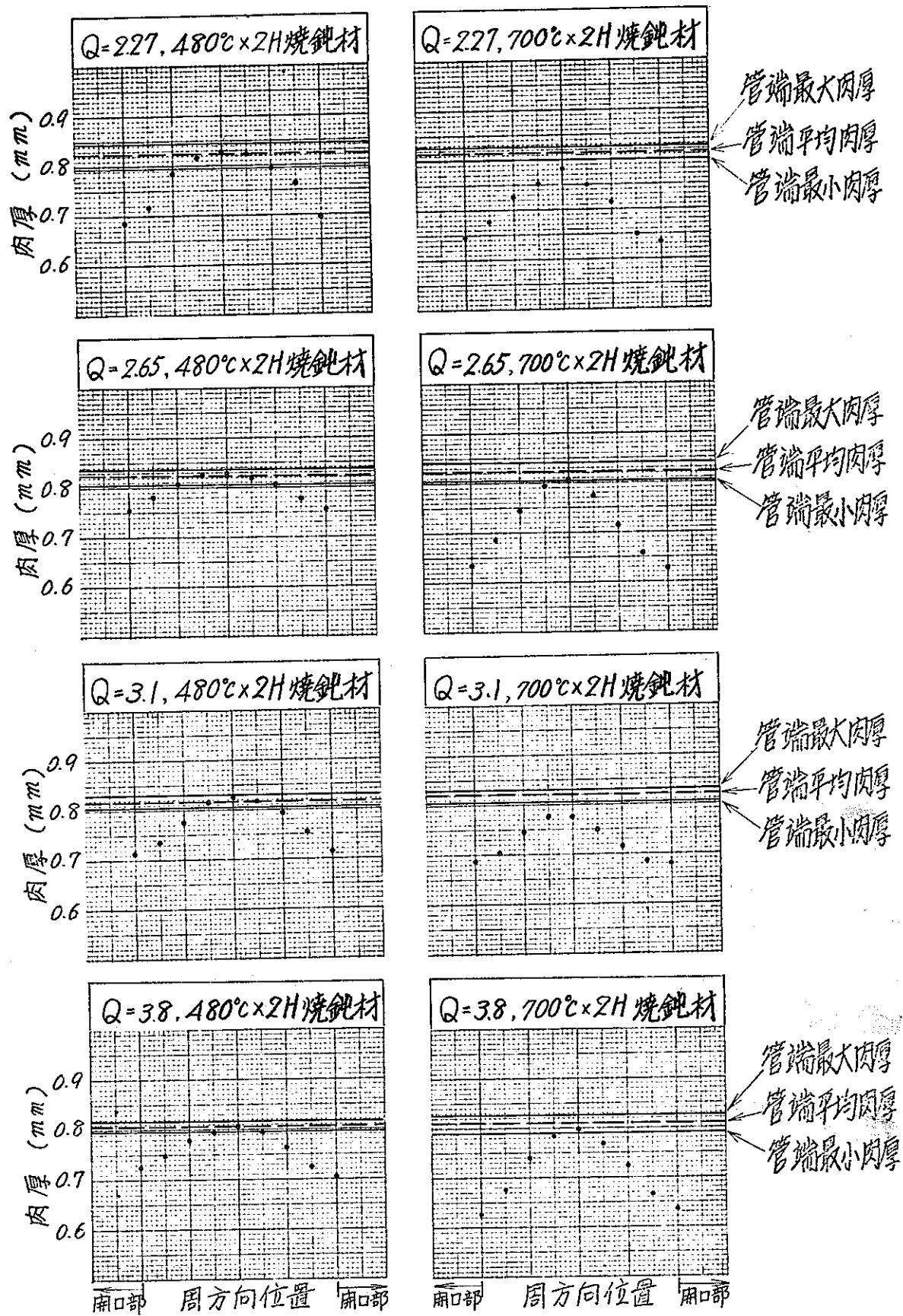
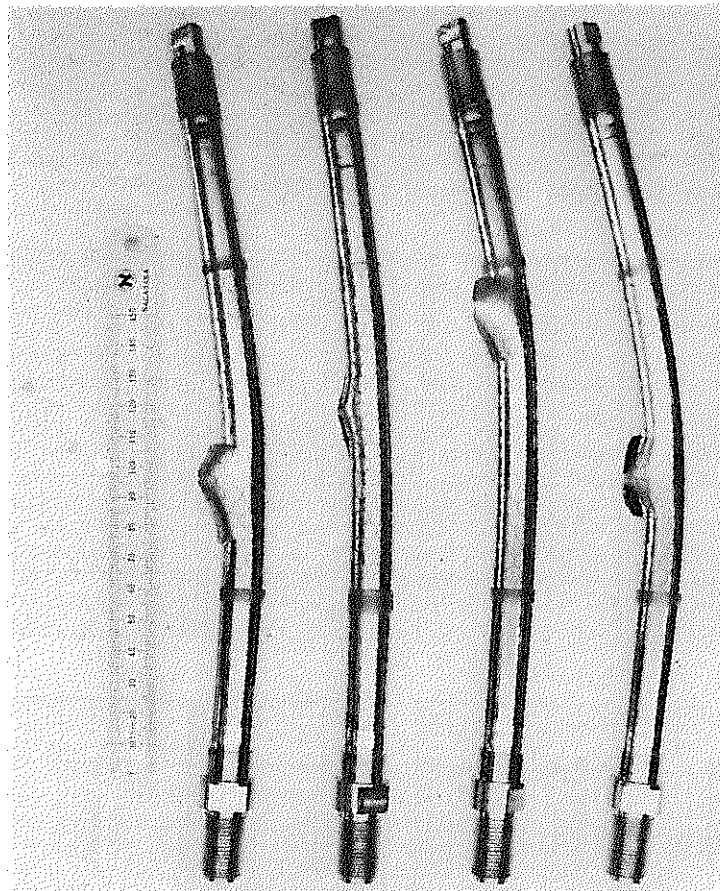
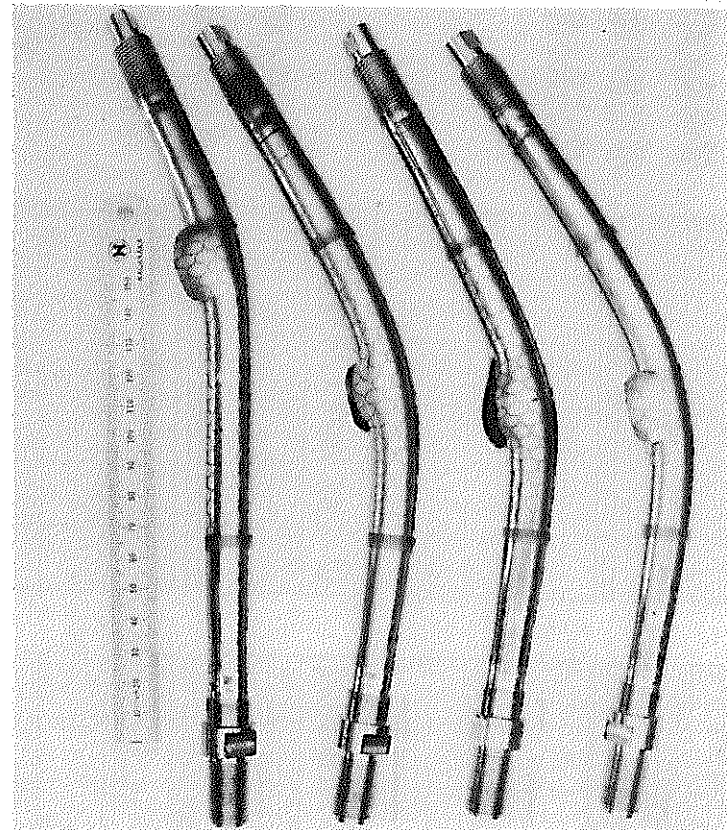


図 20 破裂部肉厚の周方向分布 (クローズド・エンド法)



Q ₀ 値	2.27	2.65	3.1	3.8
焼鈍条件	480 °C × 2 H			



Q ₀ 値	2.27	2.65	3.1	3.8
焼鈍条件	700 °C × 2 H			

写真7 クローズド・エンド法の破裂後の外観

3.3 固定端法

固定端法で得られた結果を表9に示す。オープン・エンド法、クローズド・エンド法とは異なり560℃×2H焼鈍材についても試験した。これをQ値に対してプロットしたのが図21である。焼鈍温度に対してプロットしたのが図22である。Q = 3.1のとき破裂圧力が他と比較して多少高くなっている。560℃×2Hの焼鈍処理ではかなり軟化している。スクライブド・サークルによるひずみの長手方向分布を図23に示す。円周ひずみは生じているが、軸ひずみは殆んど生じておらず、軸方向の拘束が有効に働いていることを示している。周方向分布を図24に示す。これまでの方法とは異なり破裂部位でも殆んど変形していない。

周伸びの長手方向分布を図25に示す。開口部の周伸びは20mm離れた部分と殆んど変化していない。

肉厚の周方向分布を図26に示す。肉厚減少の様子はこれまでの2方法と余り変らない。応力比の測定結果を表10に示す。

外観を写真8に示す。管の曲りは生じていない。

表9 内圧破裂試験結果(固定端法)

焼鈍条件	Q ₀ 値	試料外径 平均値 (mm)	試料番号(mm)			試料番号	破裂圧力 (kg/cm ²)	破裂応力 (kg/mm ²)	降伏圧力 (kg/cm ²)	降伏応力 (kg/cm ²)	周伸び (%)
			最大値	最小値	平均値						
480°C×2H	2.27	14.296	0.849	0.794	0.824	B2.27-L-1	1128	86.6	993	76.2	4.4
		14.305	0.830	0.811	0.821	-L-2	1143	90.2	1002	79.1	7.3
		14.311	0.844	0.811	0.827	-L-3	1181	90.3	1035	79.1	6.8
	2.65	14.301	0.840	0.812	0.825	B2.26-L-1	1193	91.4	1020	78.1	8.7
		14.302	0.844	0.810	0.827	-L-2	1182	90.3	1029	78.6	8.7
		14.304	0.842	0.815	0.827	-L-3	1178	90.1	1020	78.0	6.9
	3.1	14.306	0.843	0.796	0.818	A3.1-L-1	1230	95.2	1023	79.2	3.6
		14.308	0.842	0.797	0.820	-L-2	1200	92.6	1070	72.6	3.5
		14.309	0.846	0.794	0.819	-L-3	1253	96.8	1115	86.2	3.1
	3.8	14.266	0.820	0.793	0.805	A3.8-L-1	1202	94.5	1017	79.9	5.3
		14.269	0.822	0.798	0.808	-L-2	1203	94.2	1020	79.8	5.8
		14.269	0.820	0.793	0.806	-L-3	1205	94.6	1007	79.0	5.4
560°C×2H	2.27	14.315	0.854	0.800	0.827	B2.27-M-1	993	75.9	849	64.9	12.9
		14.317	0.848	0.805	0.826	-M-2	1023	78.4	855	65.6	13.0
		14.316	0.846	0.815	0.827	-M-3	1008	77.1	860	65.8	10.8
	2.65	14.314	0.851	0.805	0.829	B2.65-M-1	973	74.3	812	62.0	10.8
		14.314	0.860	0.810	0.830	-M-2	987	75.2	848	64.6	13.9
		14.309	0.857	0.798	0.826	-M-3	1005	77.0	861	66.0	10.4
	3.1	14.305	0.840	0.798	0.820	A3.1-M-1	1013	78.2	800	61.7	11.3
		14.298	0.846	0.798	0.817	-M-2	1044	80.9	867	67.2	13.2
		14.314	0.890	0.761	0.826	-M-3	1007	77.1	900	68.9	8.6
	3.8	14.304	0.848	0.798	0.824	A3.8-M-1	969	74.4	774	59.4	11.5
		14.302	0.844	0.801	0.823	-M-2	998	76.7	800	61.5	12.3
		14.303	0.845	0.804	0.825	-M-3	987	75.7	824	63.2	12.0
700°C×2H	2.27	14.314	0.874	0.782	0.824	B2.27-H-1	996	76.5	806	61.9	9.7
		14.315	0.866	0.780	0.821	-H-2	981	75.7	816	63.0	9.0
		14.319	0.882	0.776	0.827	-H-3	962	73.6	816	62.4	9.7
	2.65	14.315	0.847	0.811	0.829	B2.65-H-1	990	75.5	792	60.4	13.0
		14.314	0.856	0.807	0.827	-H-2	992	75.9	801	61.3	12.6
		14.320	0.856	0.812	0.833	-H-3	999	75.8	798	60.5	14.1
	3.1	14.299	0.825	0.806	0.816	A3.1-H-1	1029	79.8	782	60.7	13.6
		14.301	0.830	0.804	0.816	-H-2	1041	80.8	810	62.8	13.1
		14.302	0.832	0.806	0.816	-H-3	1050	81.5	806	62.5	14.0
	3.8	14.301	0.830	0.794	0.813	A3.8-H-1	1010	78.7	750	58.4	11.6
		14.306	0.832	0.802	0.816	-H-2	998	77.4	779	60.4	12.9
		14.303	0.828	0.800	0.815	-H-3	1007	78.2	771	59.9	8.7

* 破裂応力, 降伏応力は内径の式($\sigma = PD/2t$)にて換算した。

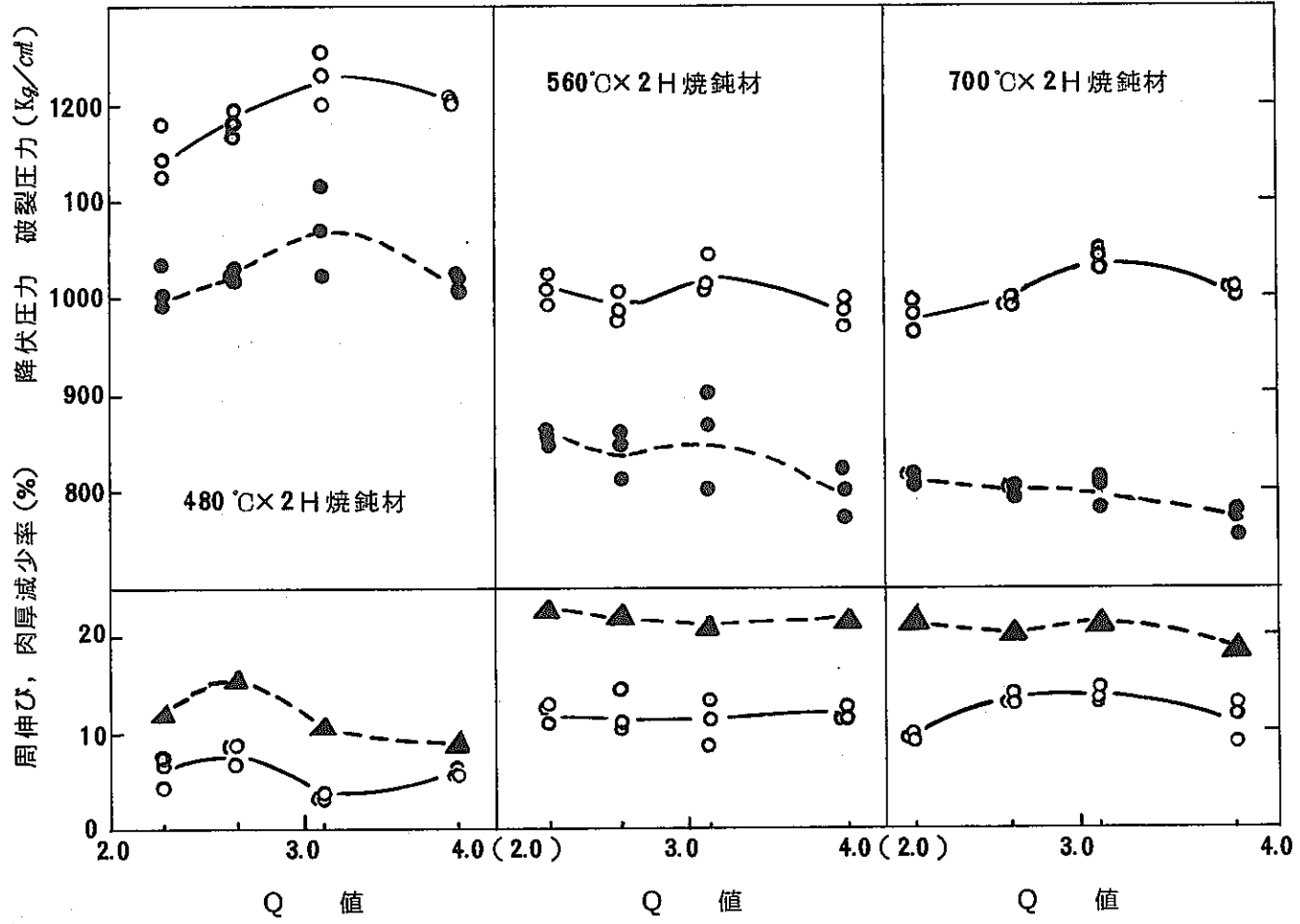


図 21 Q 値と内圧破裂性質 (固定端法)

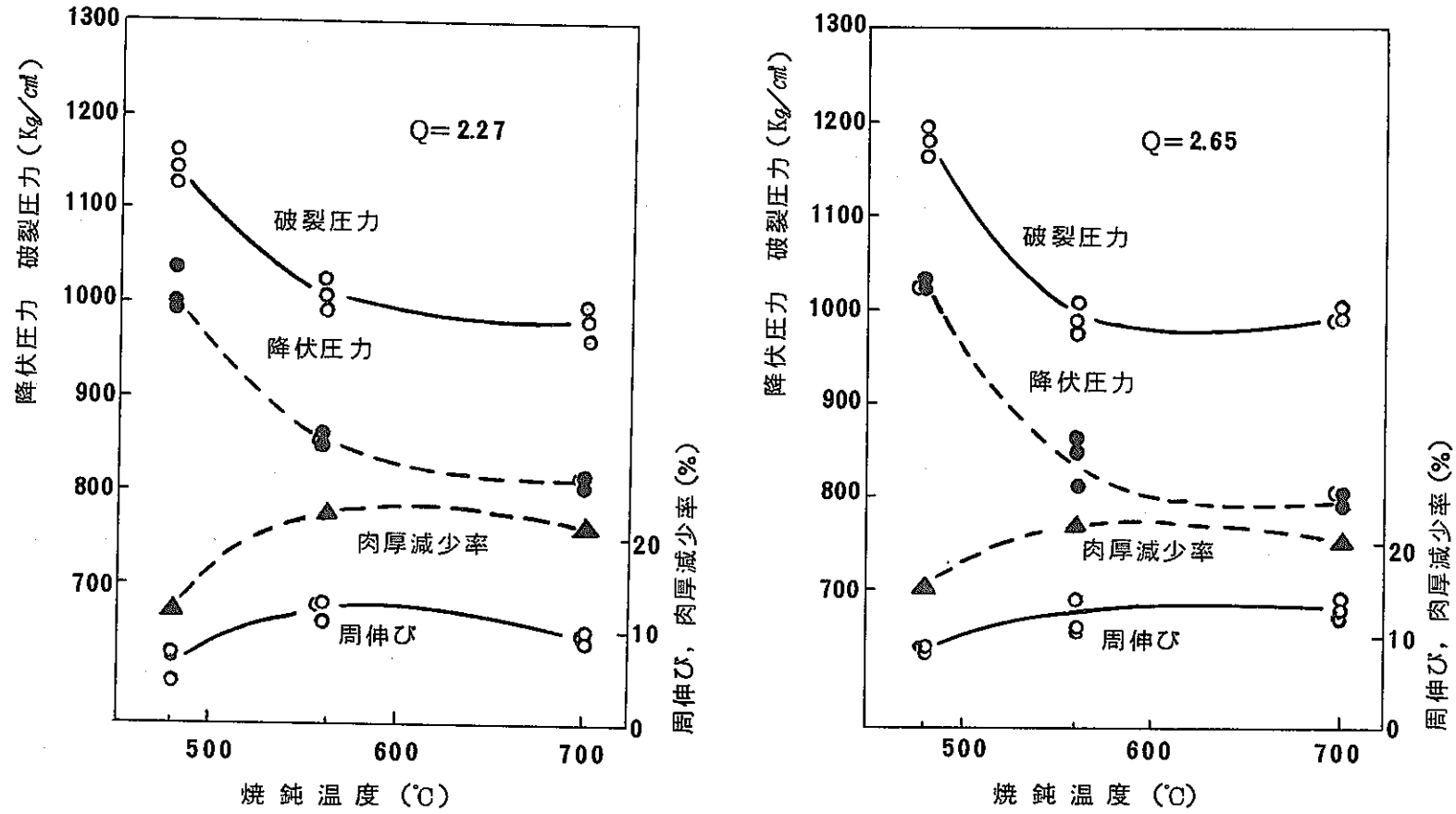


図 22 (a) 焼鈍温度と内圧破裂性質 (固定端法)

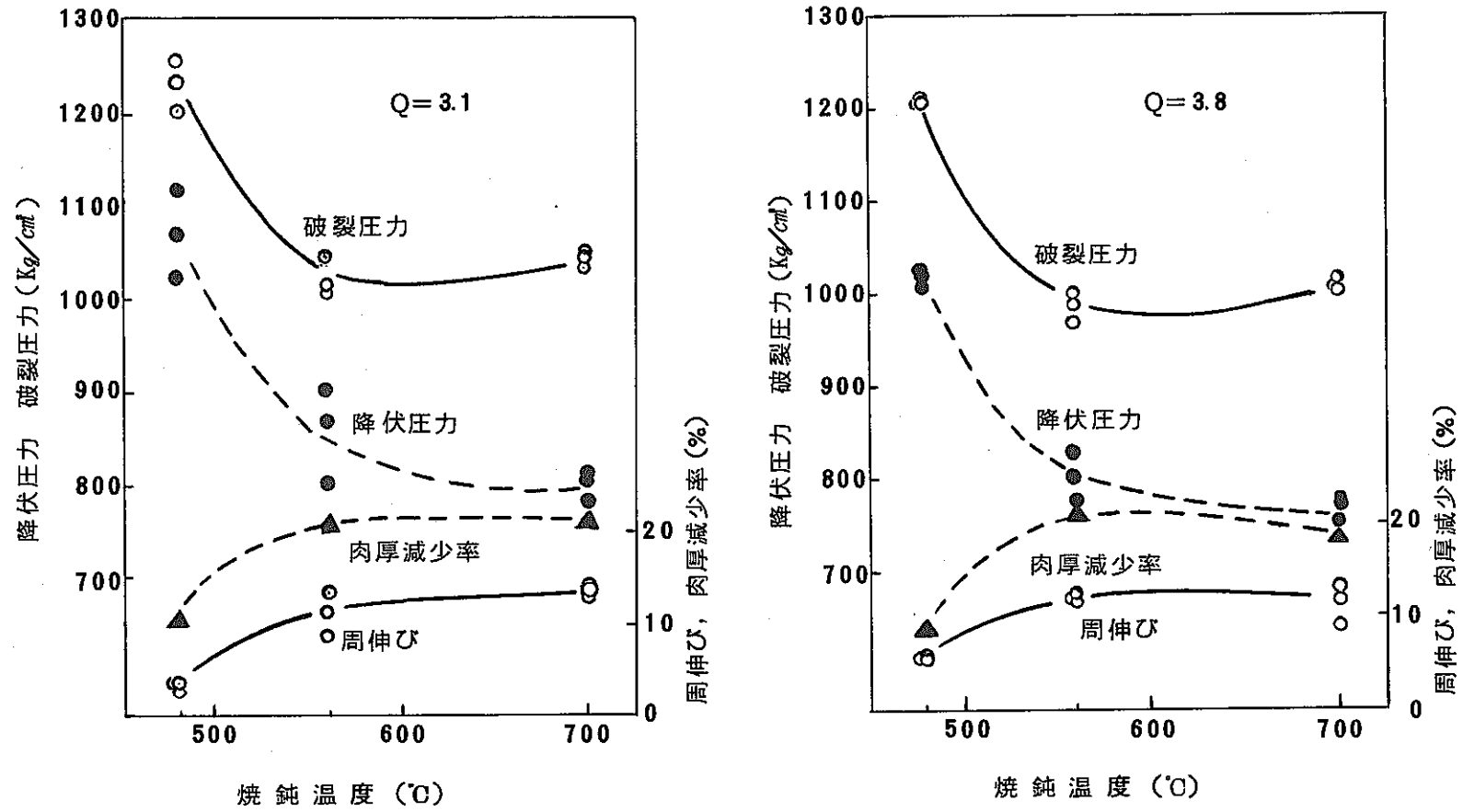


図 22 (b) 焼鈍温度と内圧破裂性質 (固定端法)

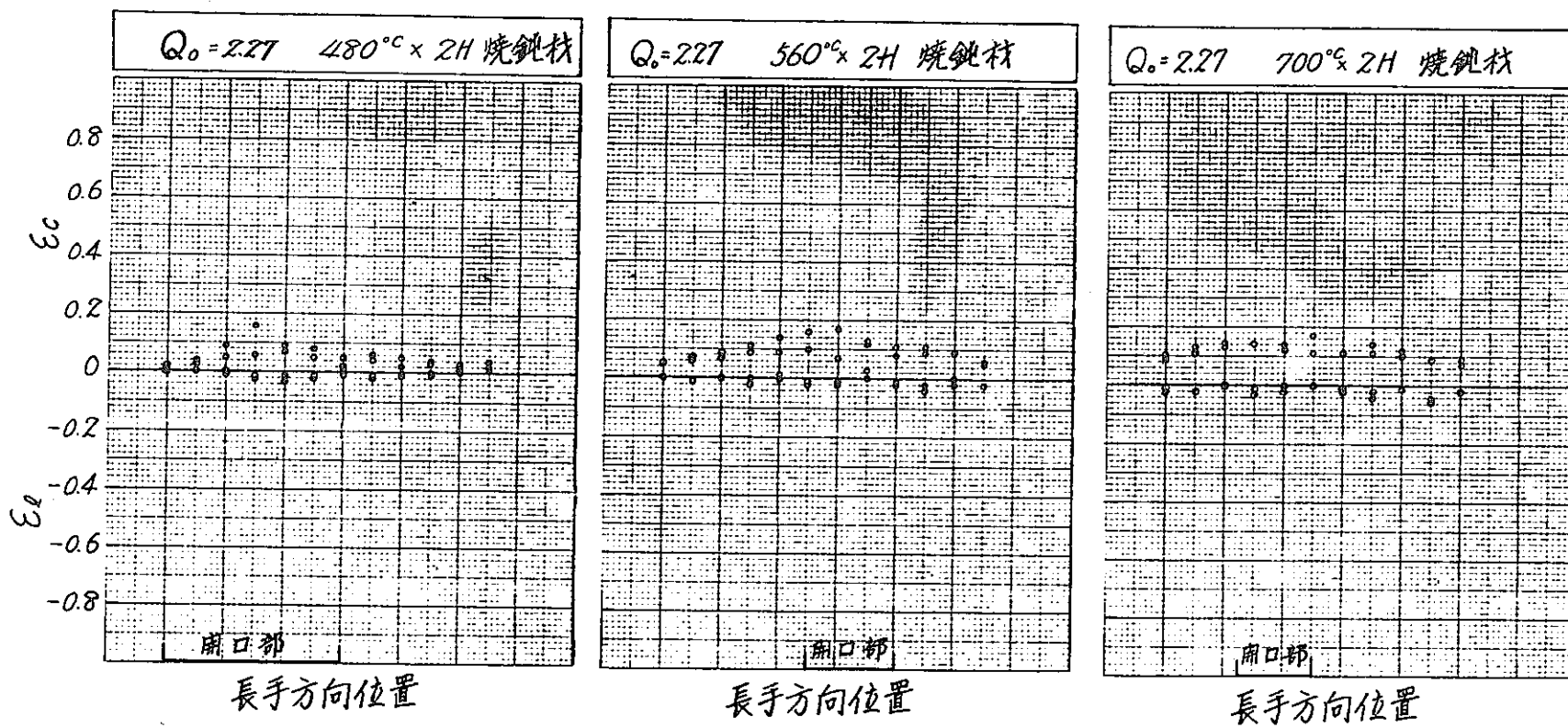


図 23(a) スクライブド・サークルによる ϵ_0 の長手方向分布(固定端法)

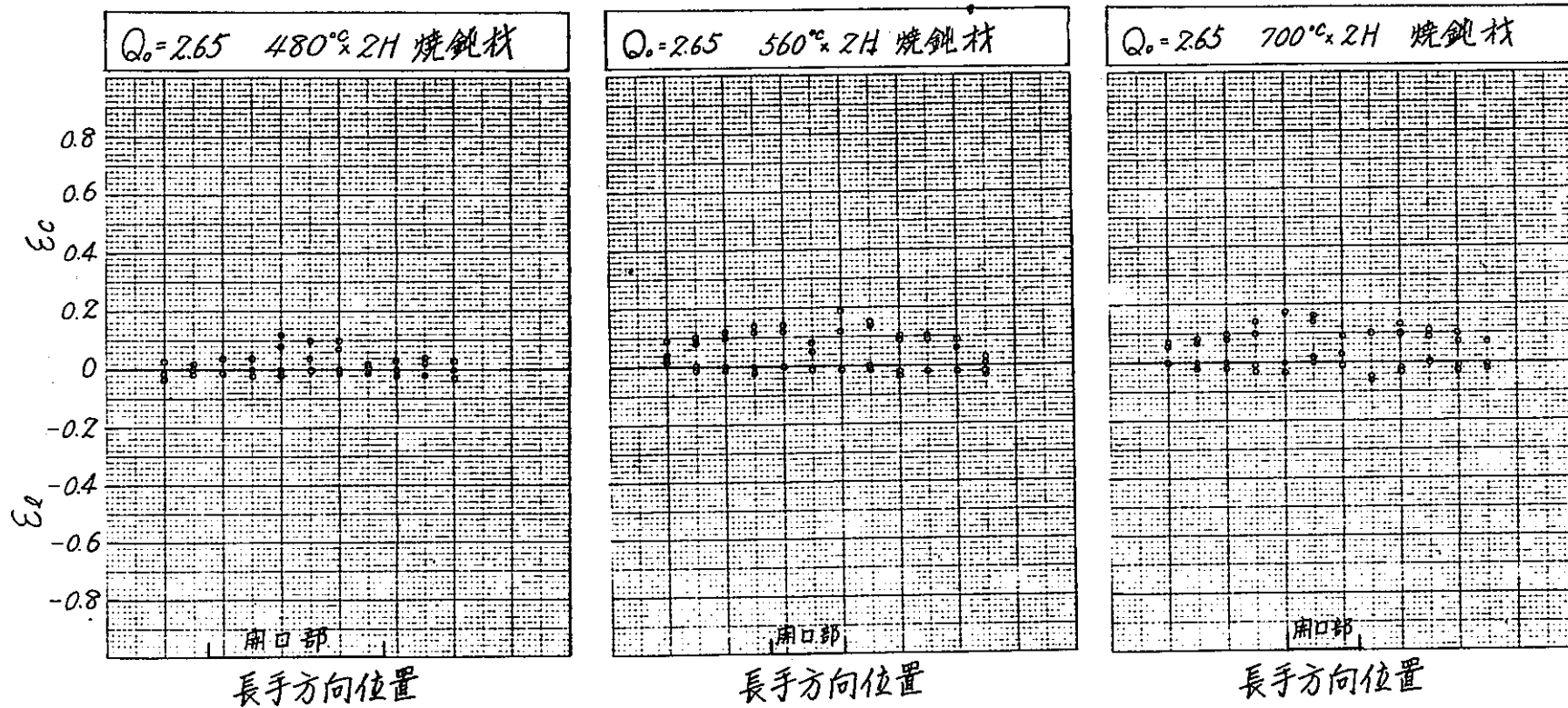


図 23 (b) スクライブド・サークルによるひずみの長手方向分布 (固定端法)

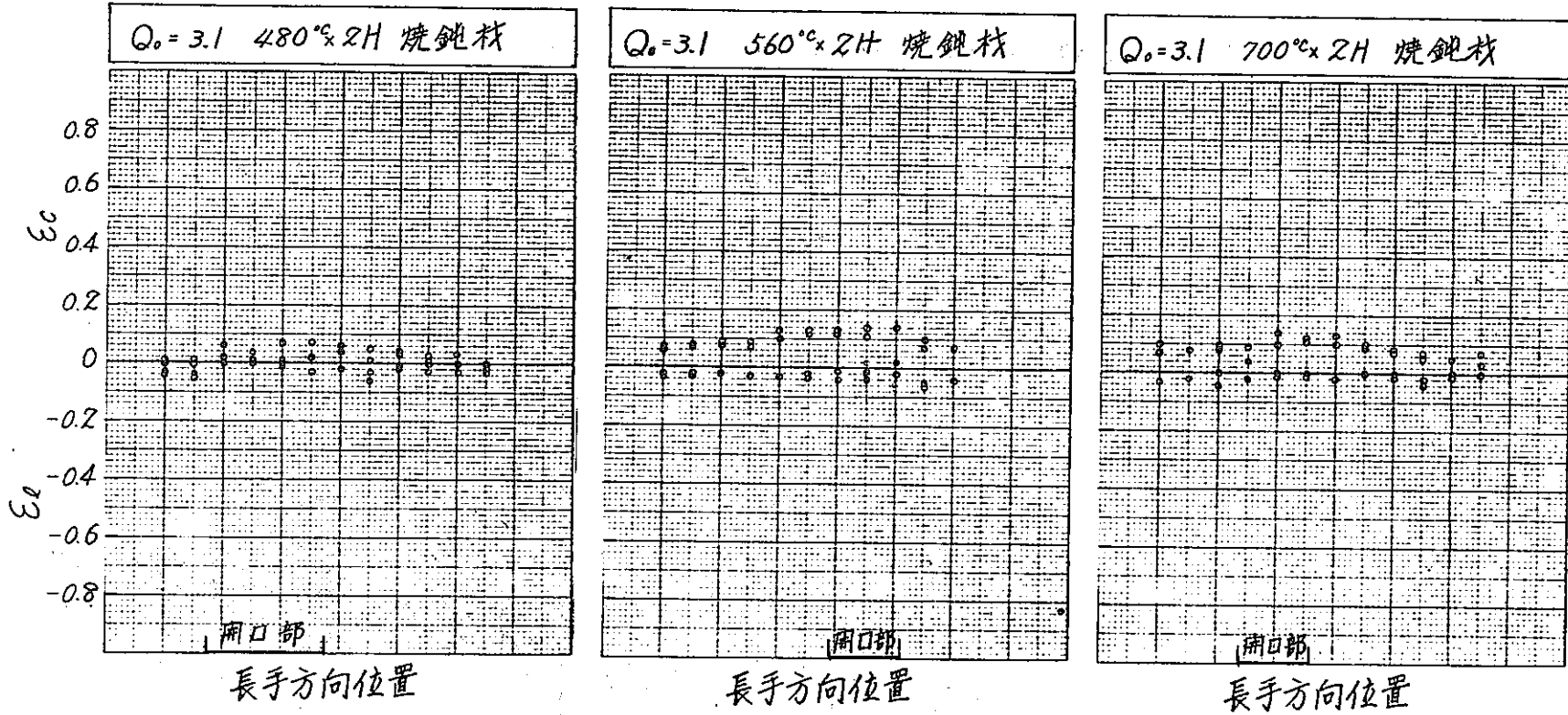


図 23(c) スクライブド・サークルによるひずみの長手方向分布 (固定端法)

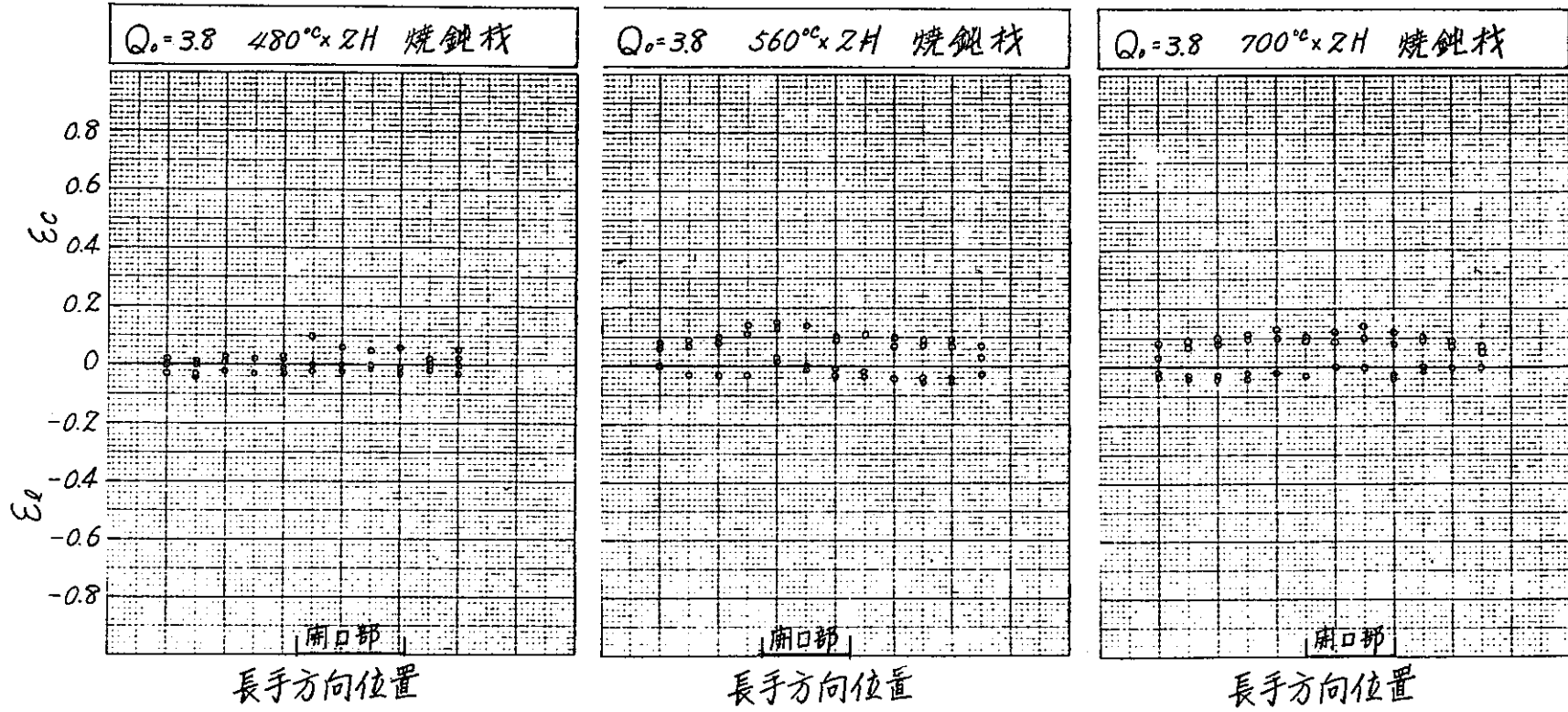


図 23 (d) スクライブド・サークルによるひずみの長手方向分布 (固定端法)

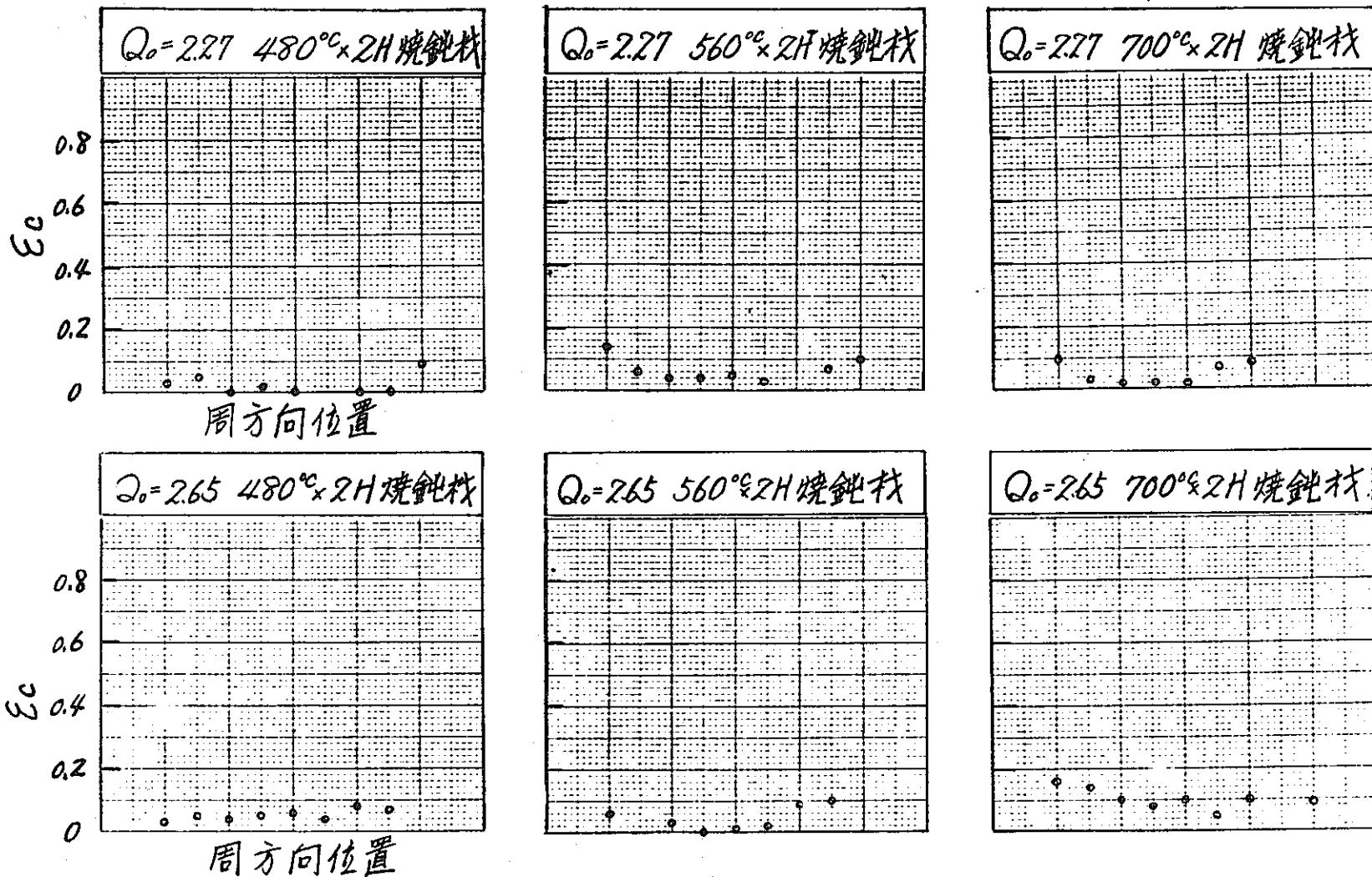


図 24 (a) スクライブド・サークルによるひずみの周方向分布 (固定端法)

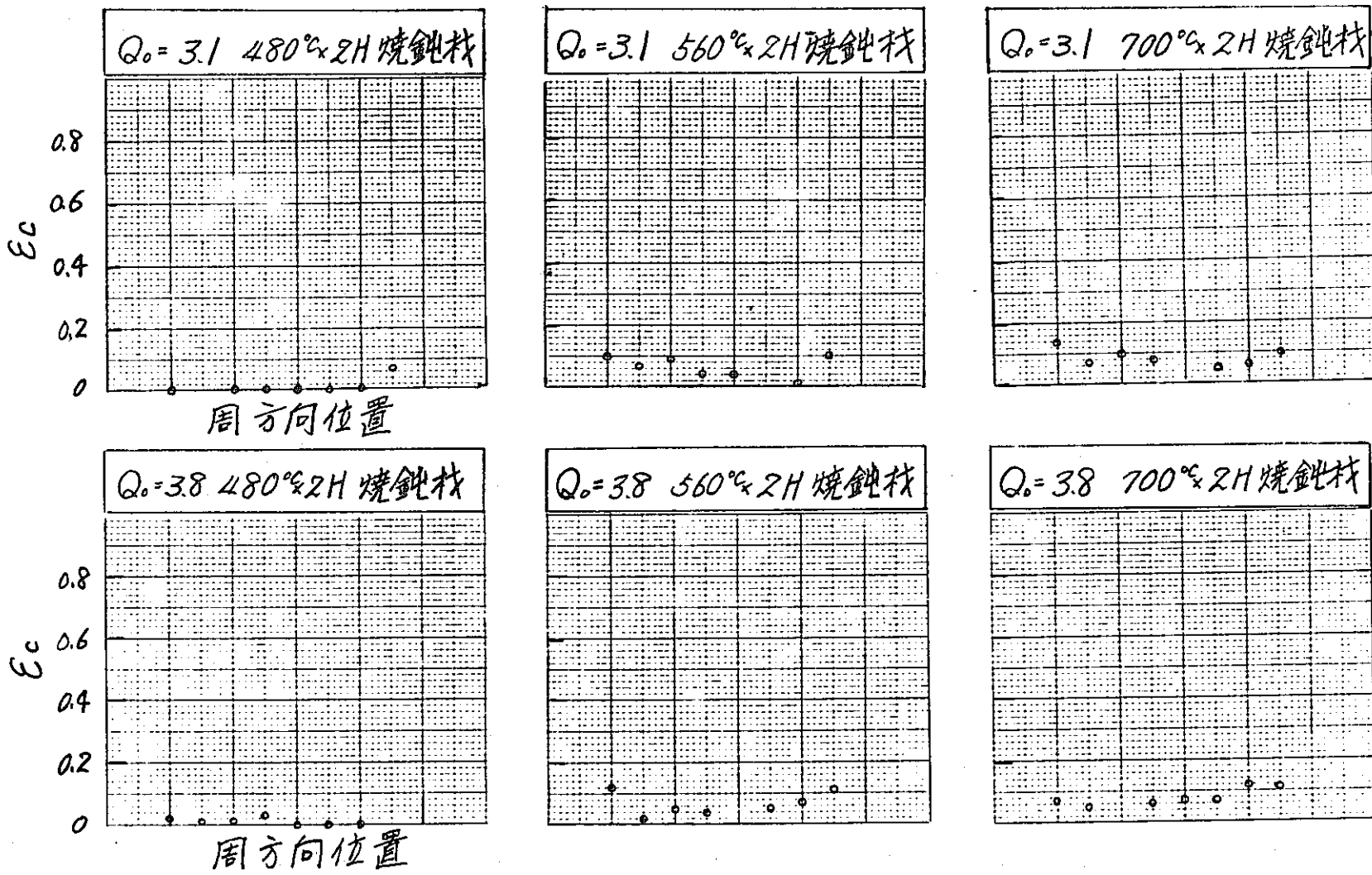


図 24 (b) スクライブ・サークルによるひずみの周方向分布 (固定端法)

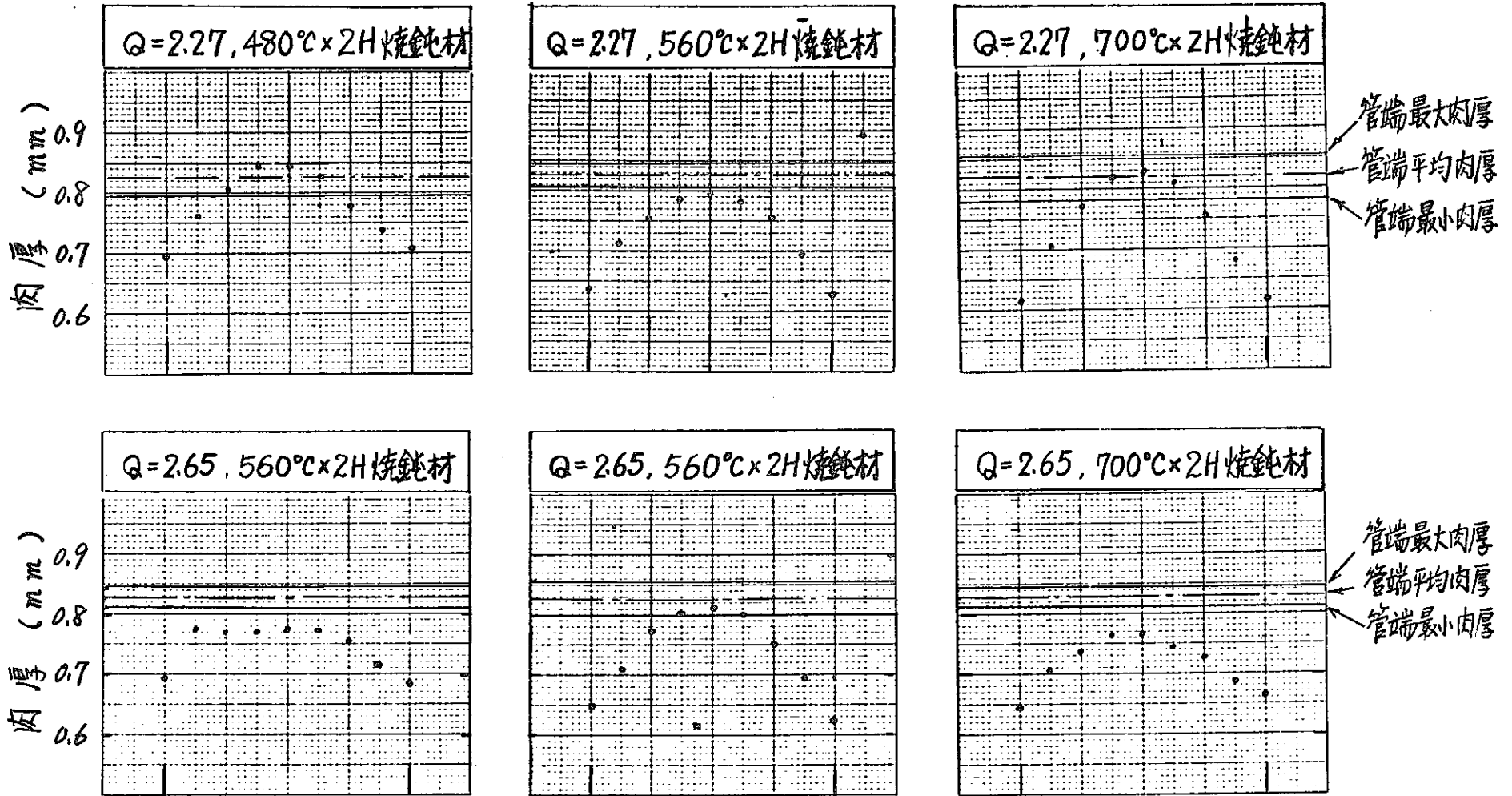


図 25 (a) 破裂部肉厚の周方向分布 (固定端法)

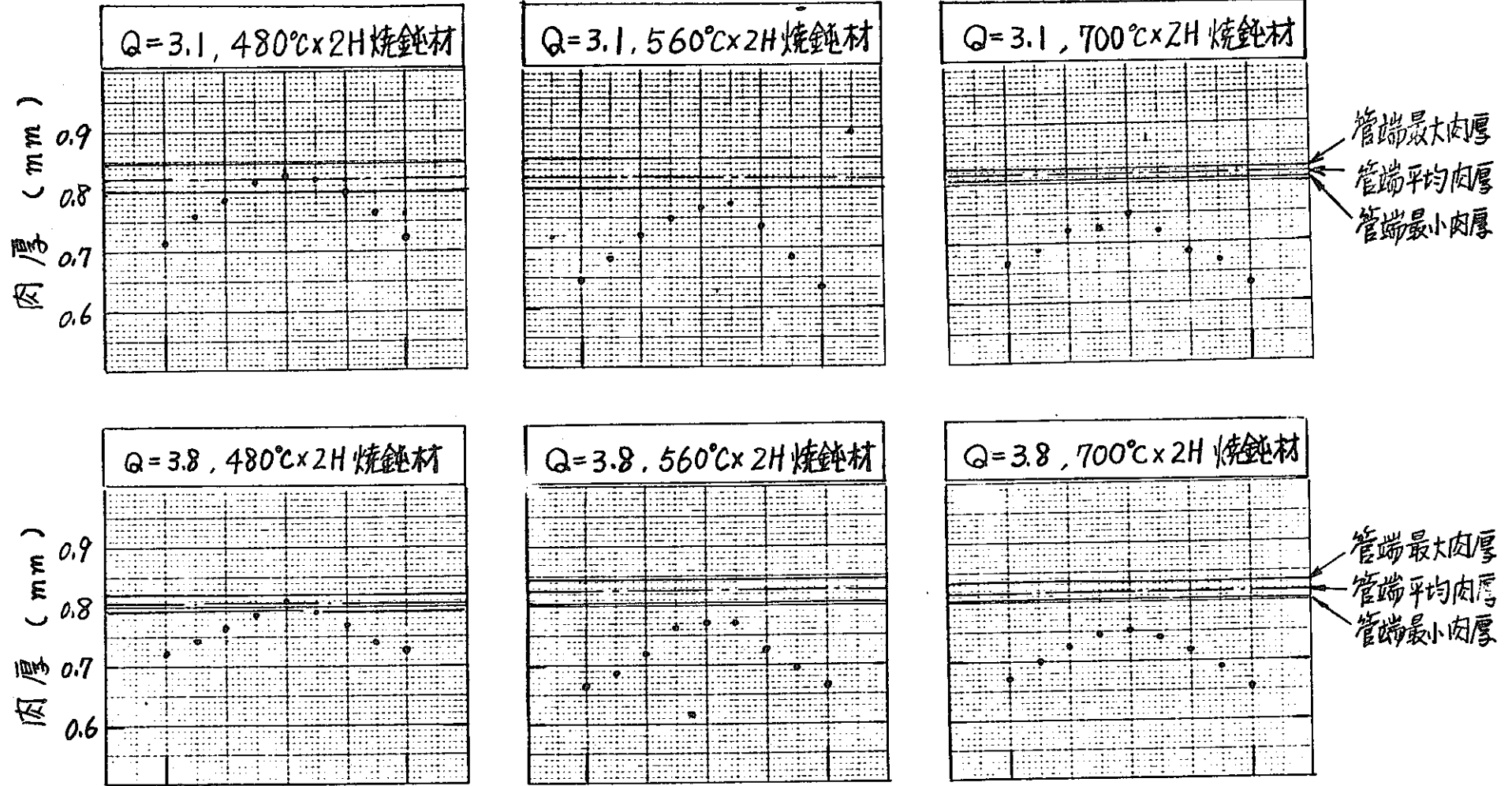


図 25 (b) 破裂部肉厚の周方向分布 (固定端法)

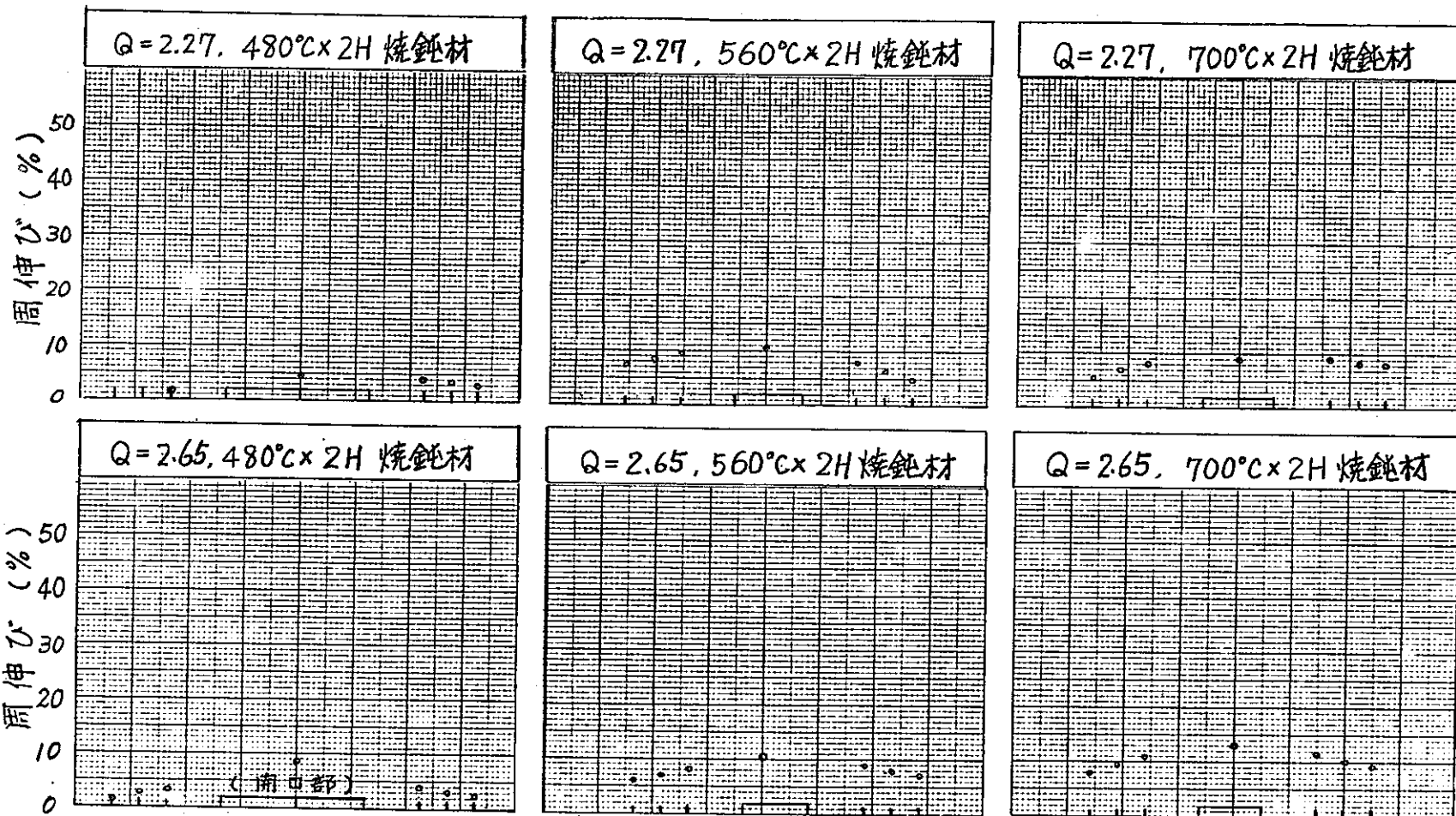


図 26 (a) 周伸びの長手方向分布 (固定端方)

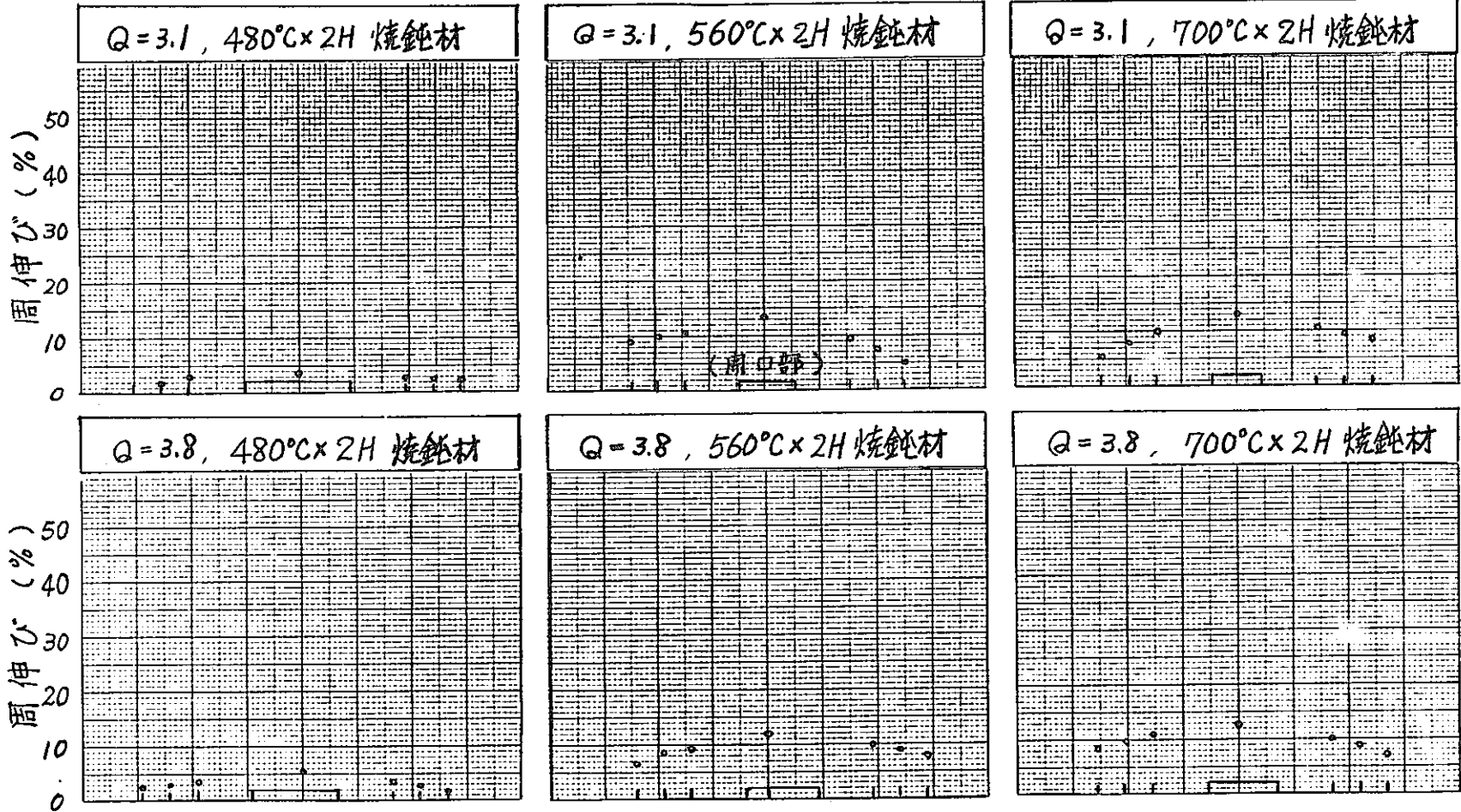


図 26 (b) 周伸びの長手方向分布 (固定端法)

表 10 応力比測定結果 (固定端法)

焼鈍条件	Q 値	試料番号	応力比 (σ_a / σ_t)
480 °C × 2 H	2.27	B2.27-L-3	0.60
	2.65	B2.65-L-3	0.59
	3.1	A3.1 -L-3	0.57
	3.8	A3.8 -L-3	0.60
560 °C × 2 H	2.27	B2.27-M-3	0.64
	2.65	B2.65-M-3	0.60
	3.1	A3.1 -M-3	0.64
	3.8	A3.8 -M-3	0.65
700 °C × 2 H	2.27	B2.27-H-3	0.65
	2.65	B2.65-H-3	0.68
	3.1	A3.1 -H-3	0.67
	3.8	A3.8 -H-3	0.67

$$\sigma_t = PD / 200 \cdot t$$

P : 破裂圧力 (kg/cm²)

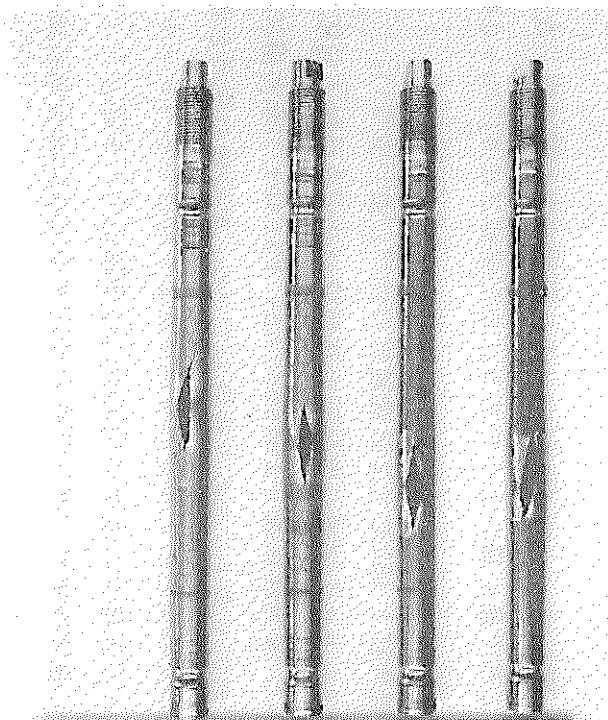
D : 内径 (mm)

t : 肉厚 (mm)

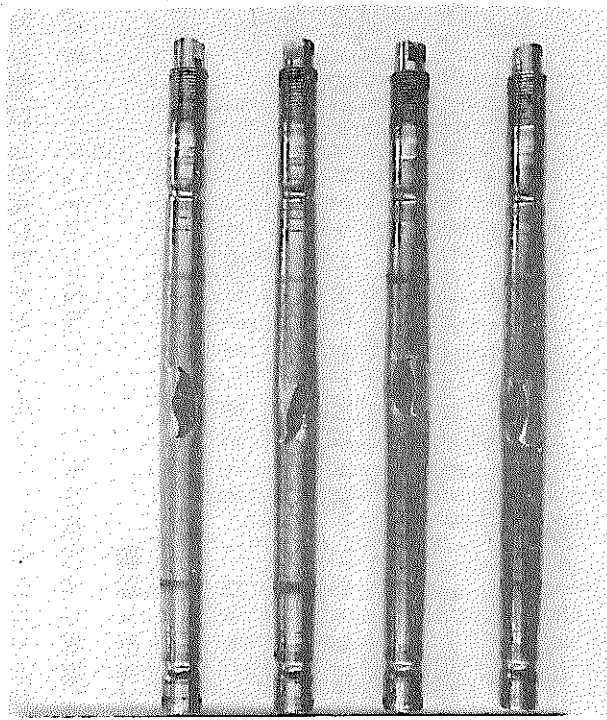
$$\sigma_a = W / A$$

W : 外筒管にかかる荷重 (kg)

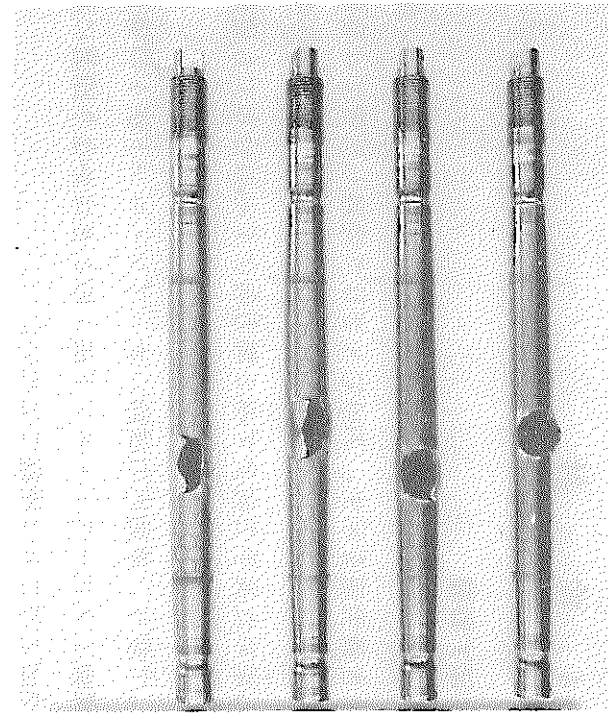
A : 試料の断面積 (mm²)



Q ₀ 値	2.27	2.65	3.1	3.8
焼鈍条件	480 °C × 2 H			



Q ₀ 値	2.27	2.65	3.1	3.8
焼鈍条件	560 °C × 2 H			



Q ₀ 値	2.27	2.65	3.1	3.8
焼鈍条件	700 °C × 2 H			

写真 8 固定端法の破裂後の外観

4 検 討

4.1 Q値の内圧破裂性質におよぼす影響

今回の試験に供した材料のQ値については内圧破裂性質に余り差が見られない。破裂圧力、降伏圧力とも $Q = 3.1$ のとき最大値を示す。700℃×2Hで焼鈍した管ではQ値の影響は明瞭でない。

スクライブド・サークルから求めた長手方向ひずみと周方向ひずみの分布でもQ値による変化が認められない。

Q値の影響は応力状態によって変り、単軸応力試験（オープン・エンド法）の場合は殆んど効果を与えず、2軸応力試験（クローズド・エンド法）のときはかなり顕著に現われるとの報告¹⁰⁾があるが、今回ではこのことは明確ではない。

4.2 焼鈍温度の内圧破裂性質におよぼす影響

焼鈍温度が高くなるにつれて、破裂圧力・降伏圧力は低下し、周伸びは増加する。

オープン・エンド法では、焼鈍温度が増加しても肉厚減小率の増加は認められないが（図11）、クローズド・エンド法、固定端法では焼鈍温度の増加につれて増加する（図16，図11）。

固定端法で実施した場合、560℃×2Hの焼鈍処理では700℃×2Hの焼鈍とほぼ同じ破裂性質を示す。このことから560℃×2Hで十分な延性が期待されることがわかる。また560℃×2H焼鈍材の試験データのばらつきが大きいようである。

4.3 応力比の内圧破裂性質におよぼす影響

横軸に応力比（ σ_a/σ_t ）を、縦軸に各試験結果をとって図27に示す。このうち $\sigma_a/\sigma_t = 1$ のプロットは原子力安全協会におけるデータを記入したものである。Q値による差は認められない。

破裂圧力はオープン・エンド法、クローズド・エンド法、固定端法の順に高くなり $\sigma_a/\sigma_t = 0.6 \sim 0.7$ の応力比のところでも最も高いようである。また周伸びは $\sigma_a/\sigma_t = 0.6 \sim 0.7$ のとき最小となる。

固定端法では700℃×2H焼鈍材と480℃×2H焼鈍材の伸びの差が少ない。

Dumcombeら¹¹⁾によれば、ジルカロイ被覆の燃料棒の破損時のひずみは軸方向応力と周方向応力との比に依存するとし、異方性係数（Anisotropy Factor）を考慮に入れて、破損時ひずみは $\sigma_a/\sigma_t = \frac{1}{2}$ の付近で最小になると報告している。燃料棒の変形を考えると、今回の試験のように流体による加圧により変形を受けるよりはむしろペレットのスエリングやクラックの発生によって被覆管の変形は局部的には多軸応力（平面応力）による変形となることが予想される。通常被覆管の強度延性を測定するためには引張試験が用い

られるが応力比が変化すると延性にも変化の生じることが予想される。この意味で応力比をより細かい条件で変えて試験する必要がある。

図28にひずみゲージを貼付して求めた変形初期の軸ひずみと周ひずみを示す。オープン・エンド法では軸ひずみは弾性変形部から圧縮ひずみとなる。クローズド・エンド法では弾性変形時には引張ひずみとなるが塑性変形の開始とともに急激な圧縮ひずみが生じる。今回の固定端法では軸方向の伸び変形は拘束していないために変形の初期には弾性引張変形が生じる。そののちに塑性変形の開始とともに軸方向の変形は圧縮ひずみとなる。約 3×10^{-3} のひずみに達すると外套管による拘束が働き、圧縮ひずみは止まる。したがって今回の固定端法においては降伏圧力付近の圧力まではクローズド・エンド法になるものと思われる、図27に示したグラフからもクローズド・エンド法の降伏圧力と固定端法の降伏圧力はほぼ等しくなる。なおこの 3×10^{-3} のひずみはネジ部のガタや絞り加工時のゆるみに起因するものと思われる。

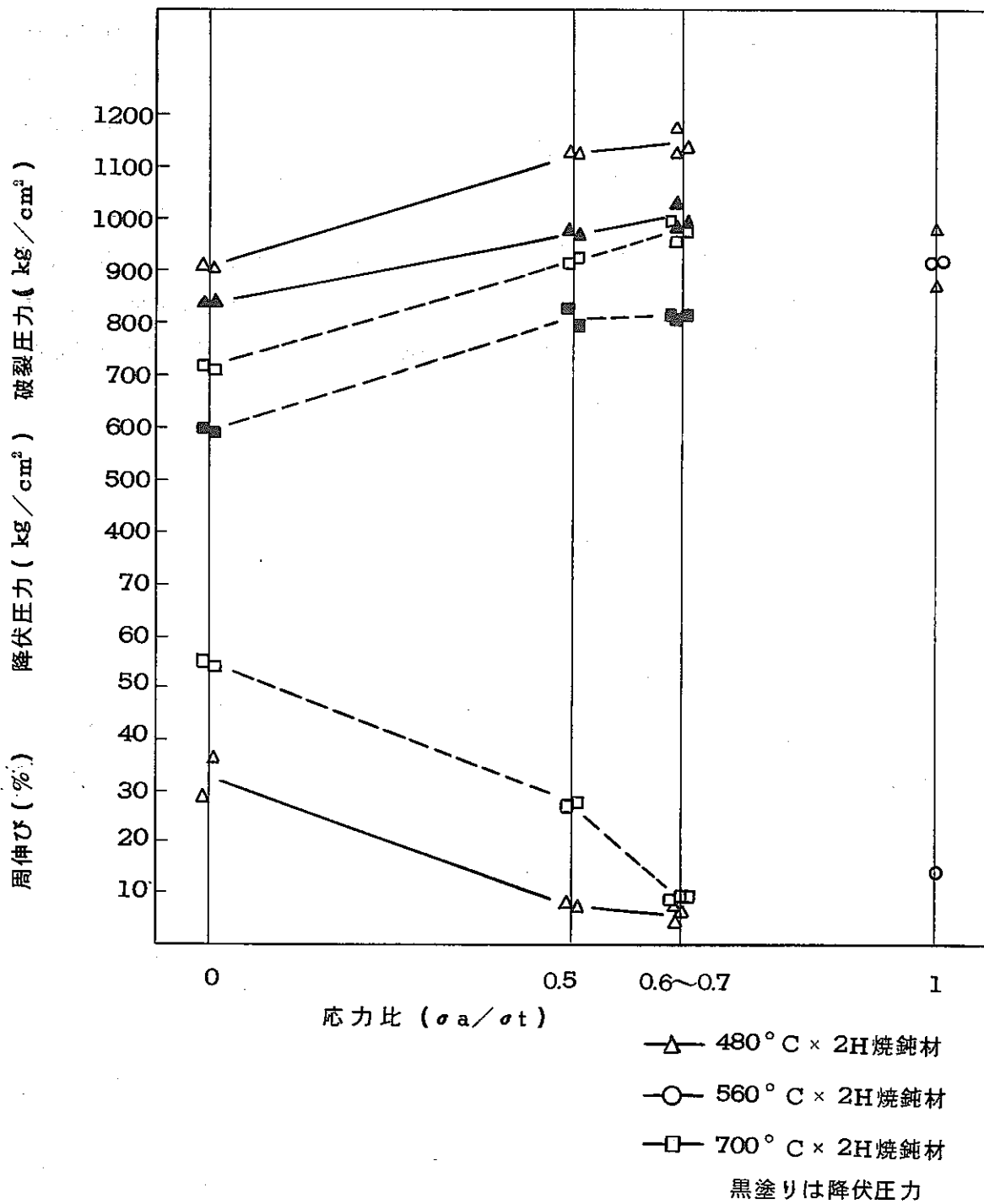


図 27 (a) 応力比と耐圧性質の関係 $Q_0 = 2.27$

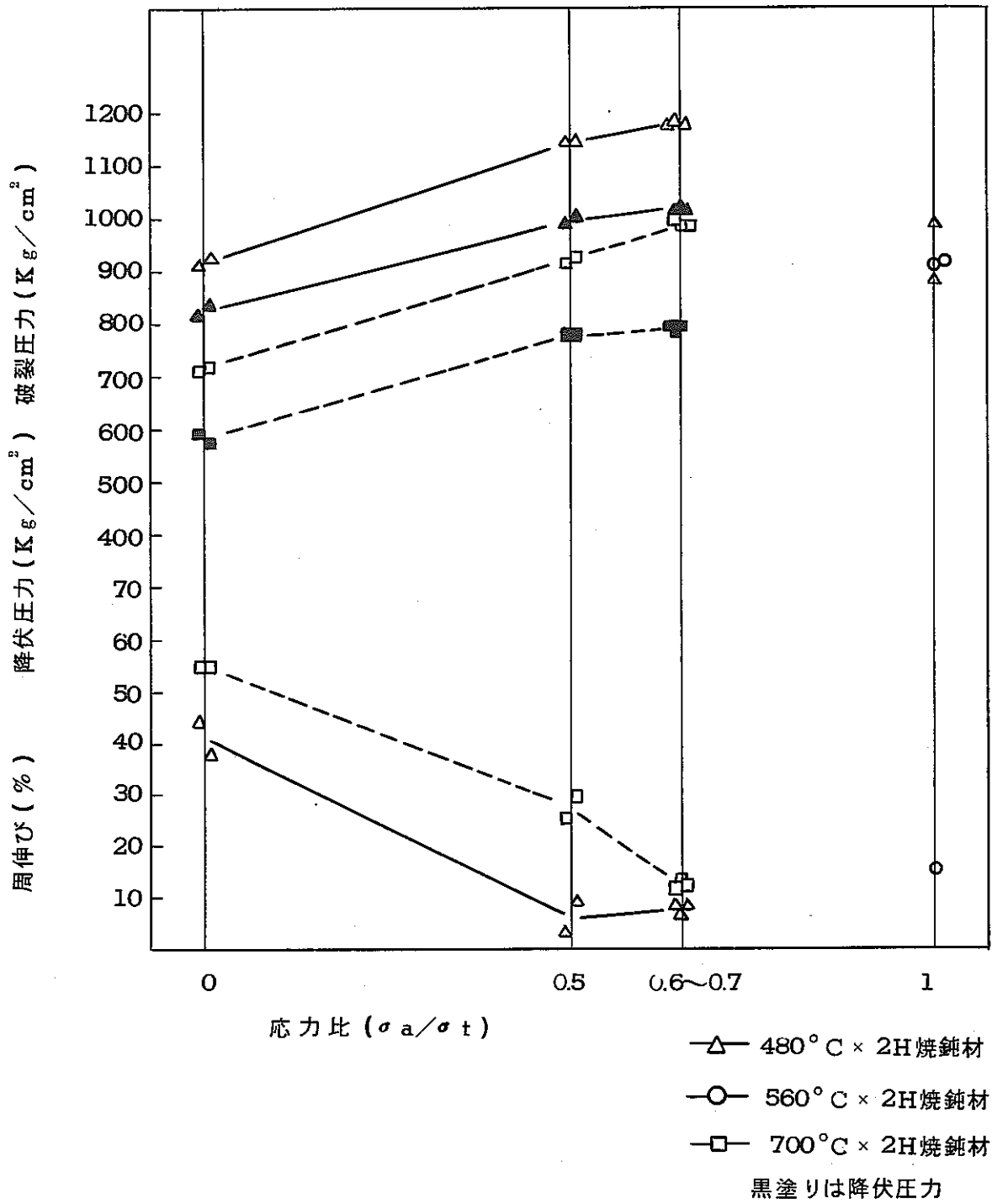


図 27 (b) 応力比と耐圧性質の関係 $Q_0 = 2.65$

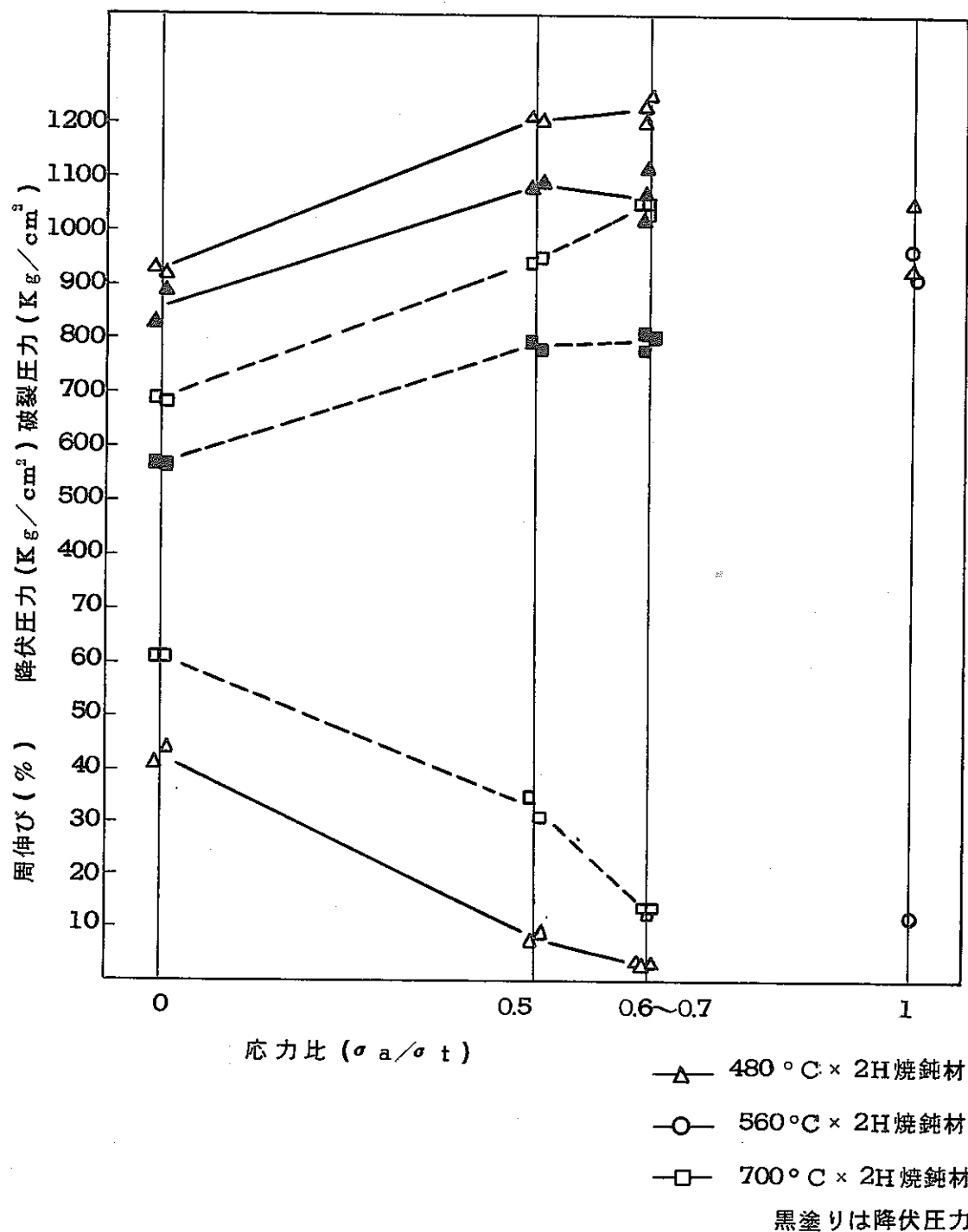


図 27 (c) 応力比と耐圧性質の関係 $Q_0 = 3.1$

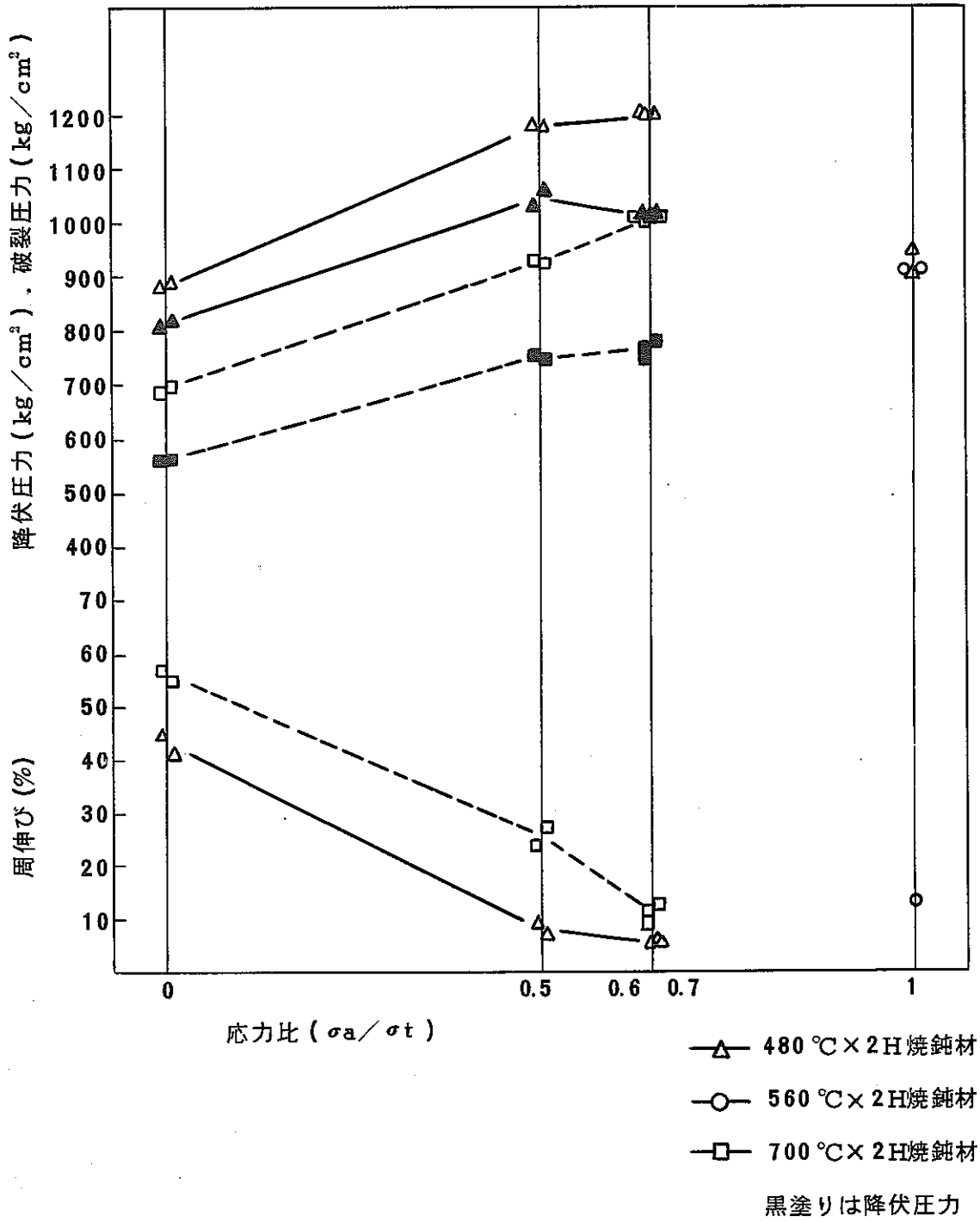


図 27 (d) 応力比と耐圧性質の関係 $Q_0 = 3.8$

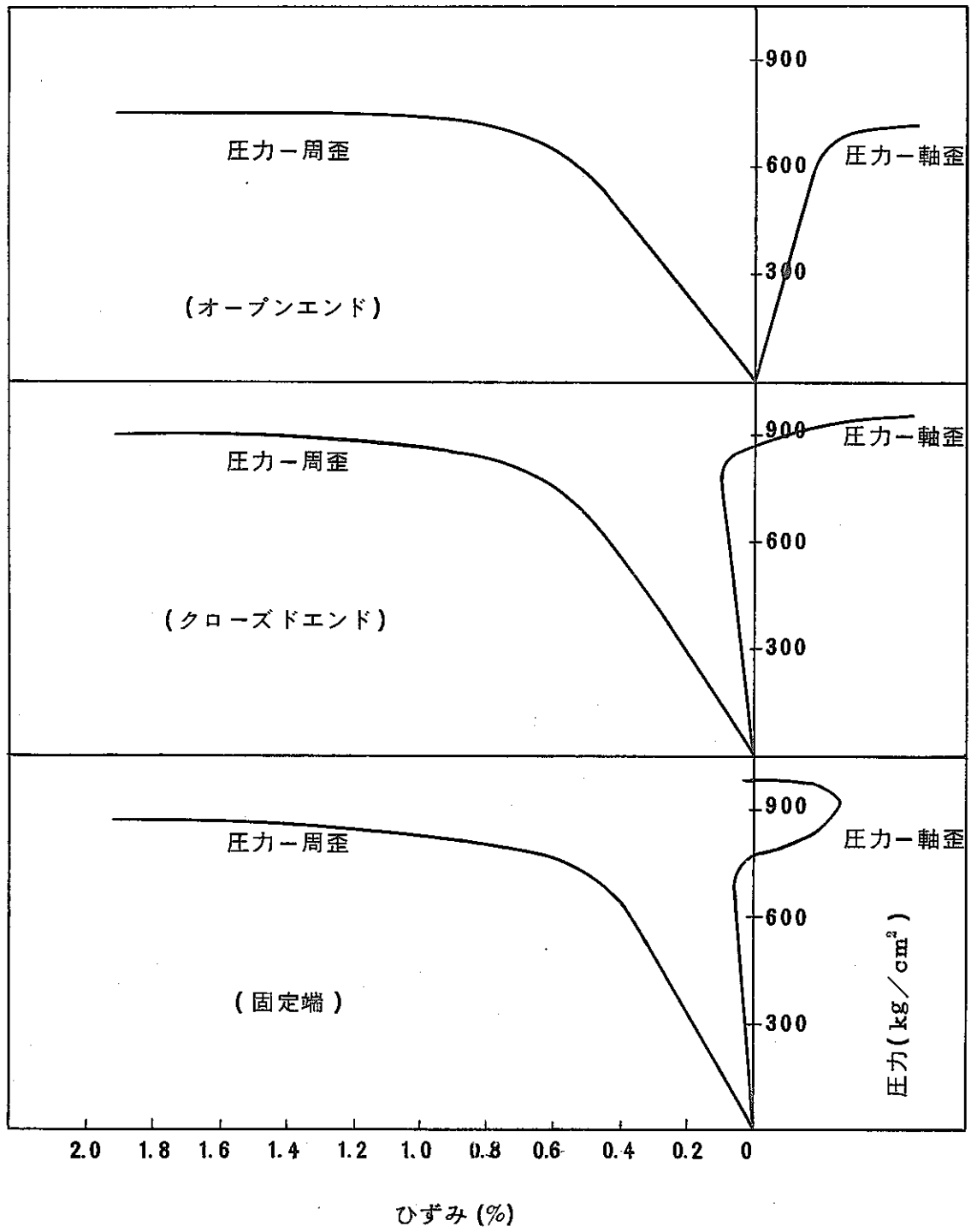


図 28 変形初期の圧力-ひずみ曲線

5 ま と め

管製造時の肉厚減少率対外径減少率の比（Q値）と最終焼きなまし条件を変えた管を素材とし圧力封入方法（応力条件）の異なる内圧破裂試験を行ない、内圧破裂性質におよぼすQ値、焼鈍温度応力条件の影響を調べた。

- (1) 端栓と管とに絞り加工を行なうことによって端栓溶接部を保護し、かつ外套管により管の縮み変形を拘束することによって、管の軸方向縮み変形を0.3%程度におさえる固定端内圧破裂試験を実施できることが分った。

破裂直前の試験片にかかる応力比 (σ_a/σ_t) は0.6～0.7程度である。

- (2) 今回のQ値の範囲では、内圧破裂性質におよぼすQ値の影響は明瞭でなかった。
- (3) 焼鈍温度が480℃×2Hのときはまだ十分に軟化されていないが、560℃×2Hでは700℃×2Hの場合に近くなり軟化が十分に進んでいる。
- (4) 単軸応力試験（オープン・エンド法）では、高い延性（周伸び）が生じるが、2軸応力条件では延性が低くなり内圧破裂強度が高くなる。軸方向変形を拘束した固定端法 ($\sigma_a/\sigma_t = 0.6 \sim 0.7$) ではさらに延性が低下し、内圧破裂強度は最大となる。

本試験の一部は原子力安全研究協会燃料安全専門委員会における共同実験として実施されたものである。終始御指導を頂いた三島良績委員長（東大）、大久保忠恒副委員長（東大）に厚く御礼申し上げます。

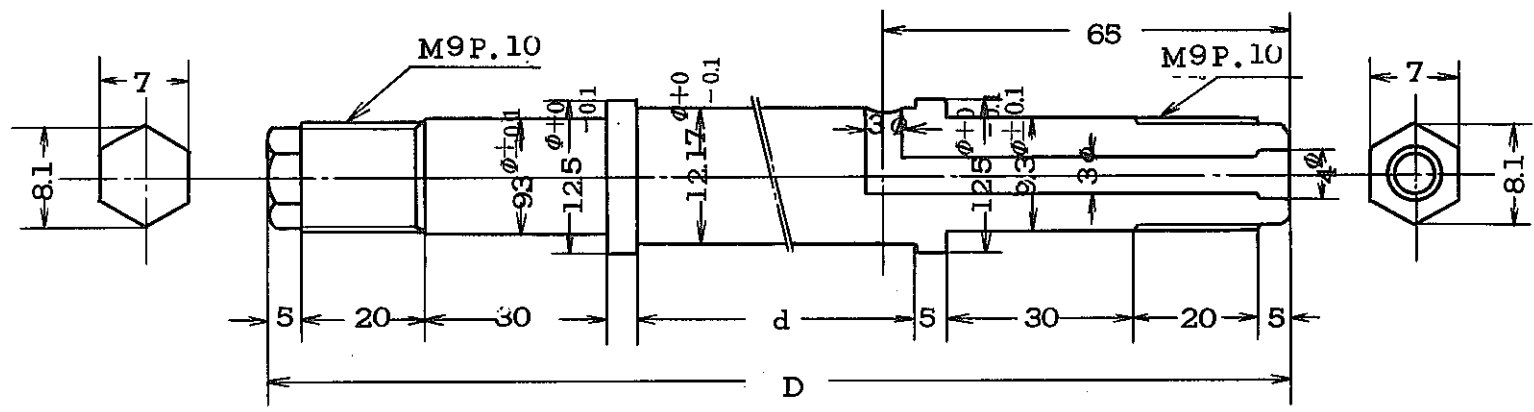
また、端栓・治具の設計・製作、端栓溶接作業、金属組織写真撮影に多くの協力を頂いた照沼宏明、後藤明、坪茂、植野重男の各氏をはじめとする関係者に感謝致します。

6 参 考 文 献

- (1) “軽水炉用燃料被覆管の強度延性および水素化物のふるまいに関する試験研究”
動燃資料：SN 841-72-36
- (2) “ジルカロイ - 2 被覆管の内圧破壊試験に関する研究”
永井ら：日本原子力学会昭和46年燃料分科会予稿集
- (3) “ジルカロイ被覆管の炉内照射挙動およびペレットとの機械的相互作用に関する試験”
原子力安全研究協会昭和47年度平和利用委託研究
- (4) “軽水炉燃料被覆管のふるまい”
原子力安全研究協会：原安協報告-24(1970)
- (5) “ジルカロイ燃料被覆管共通試験報告書”
ジルカロイ委員会(1973)
- (6) “Closed end burst testing of Zircaloy canning tubes”
O. K. Kallstrom : J. Nuc, Mat. 31. (1969)111
- (7) “ジルカロイ被覆管の耐圧挙動——試験法の相違による破裂時の周伸びについて——”
検査課ATR本部打合せ資料(1970)
- (8) “The effect of preferred orientation on the mechanical properties and deformation behavior of Zircaloy-2 fuel sheathing”
K. P. Steward & B. A. Cheadle : Trans. AIME 239(1967)504
- (9) “高速実験炉燃料集合体の試作(FOX-C-2)”
動燃資料：PNCT-3110(1968)
- (10) “水炉燃料のふるまい”
原子力安全研究協会：原安協報告-30(1972)
- (11) “Failure characteristics of fuel cladding with biaxial stresses and anisotropy”
E. Duncombe : Trans. ANS 12(1969)137

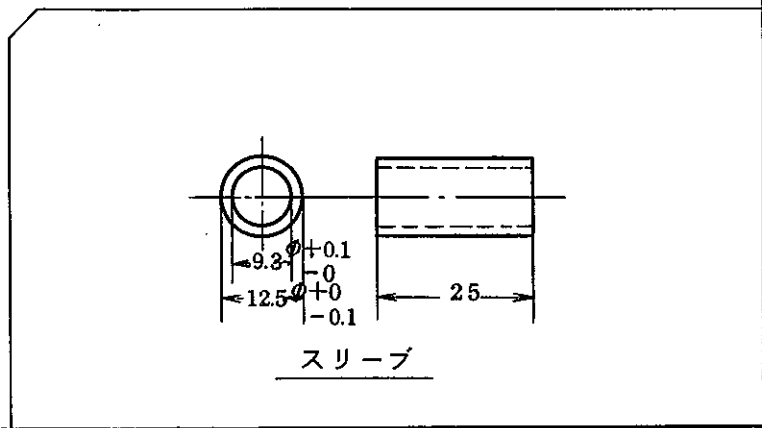
7 添 付 図 面

- (A) オープン・エンド・バースト試験治具
- (B) クローズド・エンド・バースト試験端栓
- (C) 固定端バースト用端栓（溶接法）
- (D) 固定端バースト用端栓（絞り加工法）
- (E) 被覆管ふくれ拘束治具
- (F) 外套管用フランジ

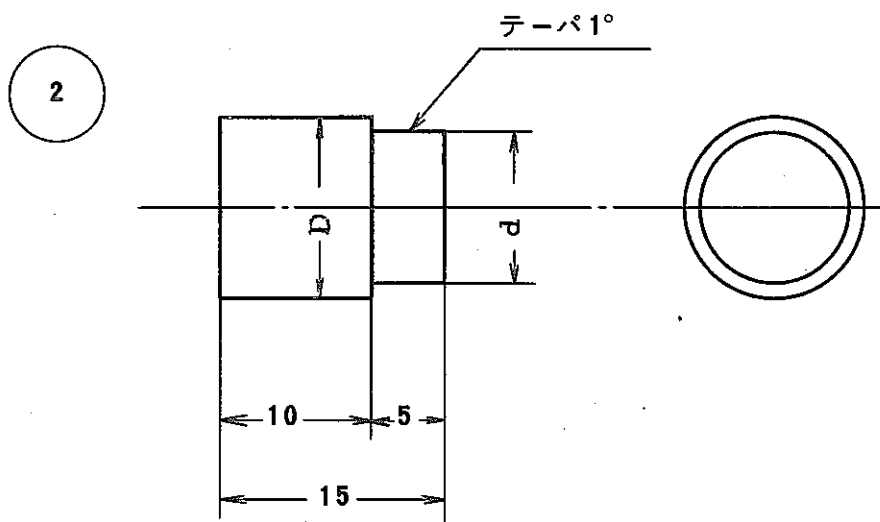
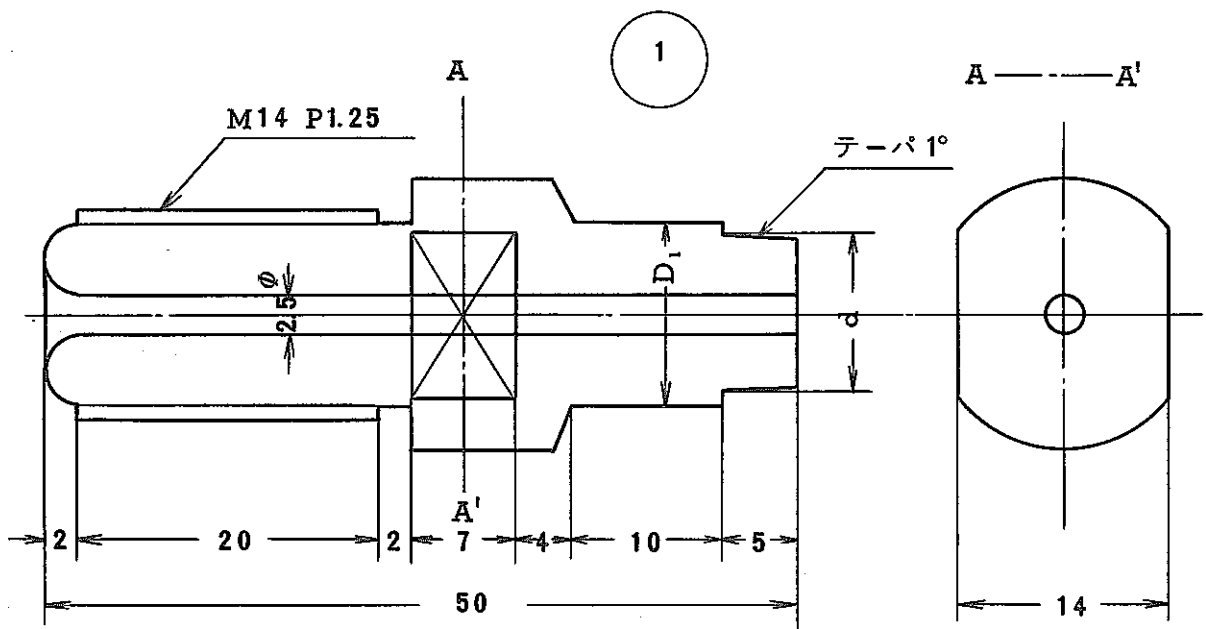


中 金

	d	D
1	140	260
2	290	410

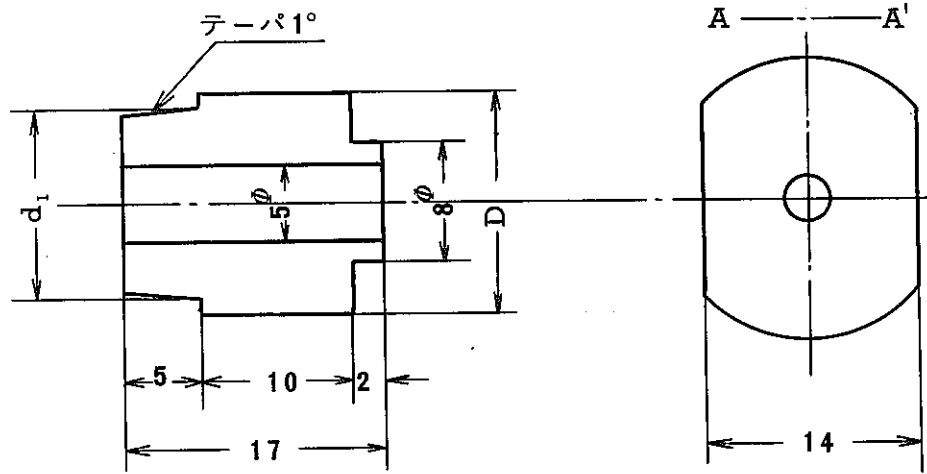
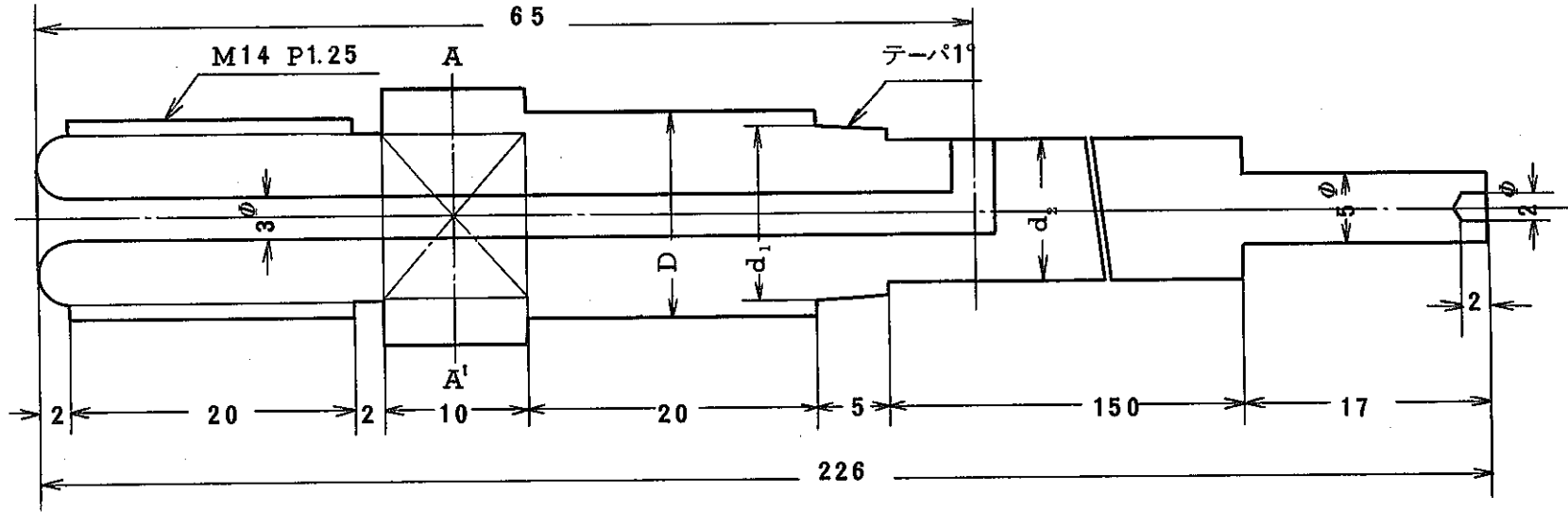


(A) BWR寸法被覆管オープン・エンド・バースト試験治具



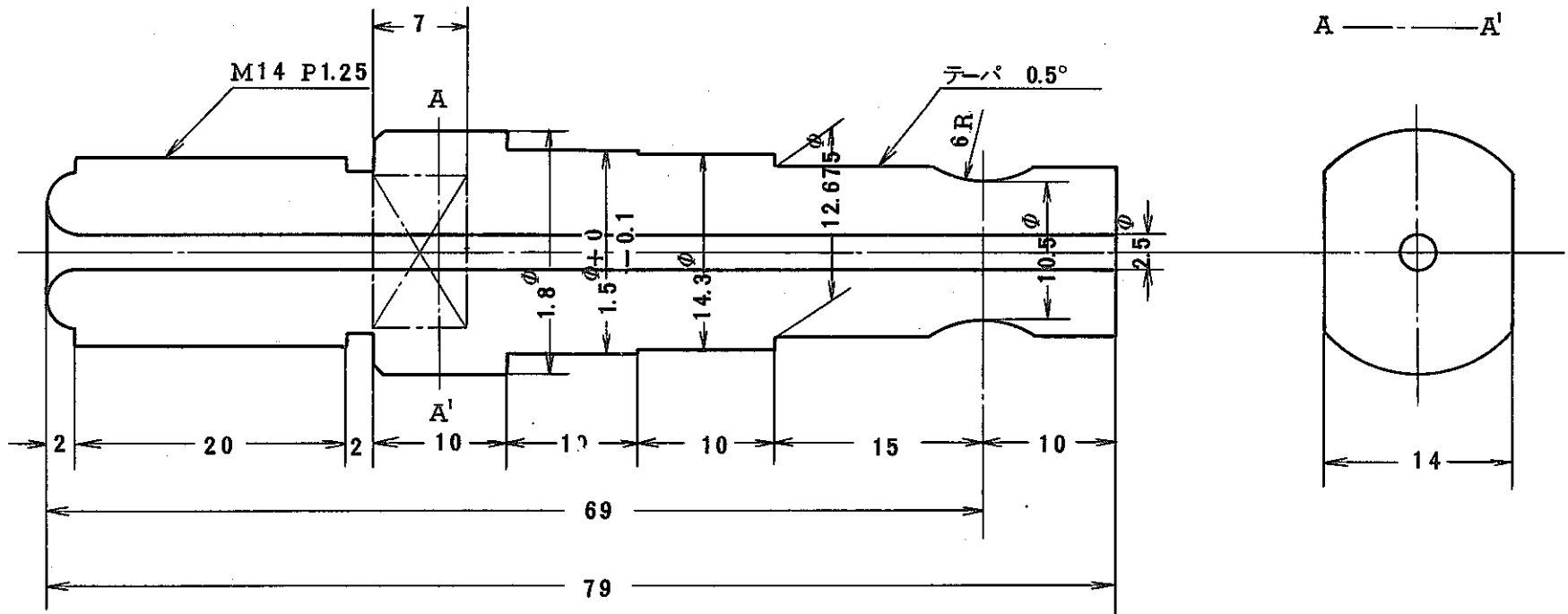
(B) BWR, PWR寸法被覆管用端栓
(クローズド・エンド法)

記号 品番	D	d
1	14.453 ϕ	12.675 ϕ
	10.643 ϕ	9.271 ϕ
2	14.453 ϕ	12.675 ϕ
	10.643 ϕ	9.271 ϕ

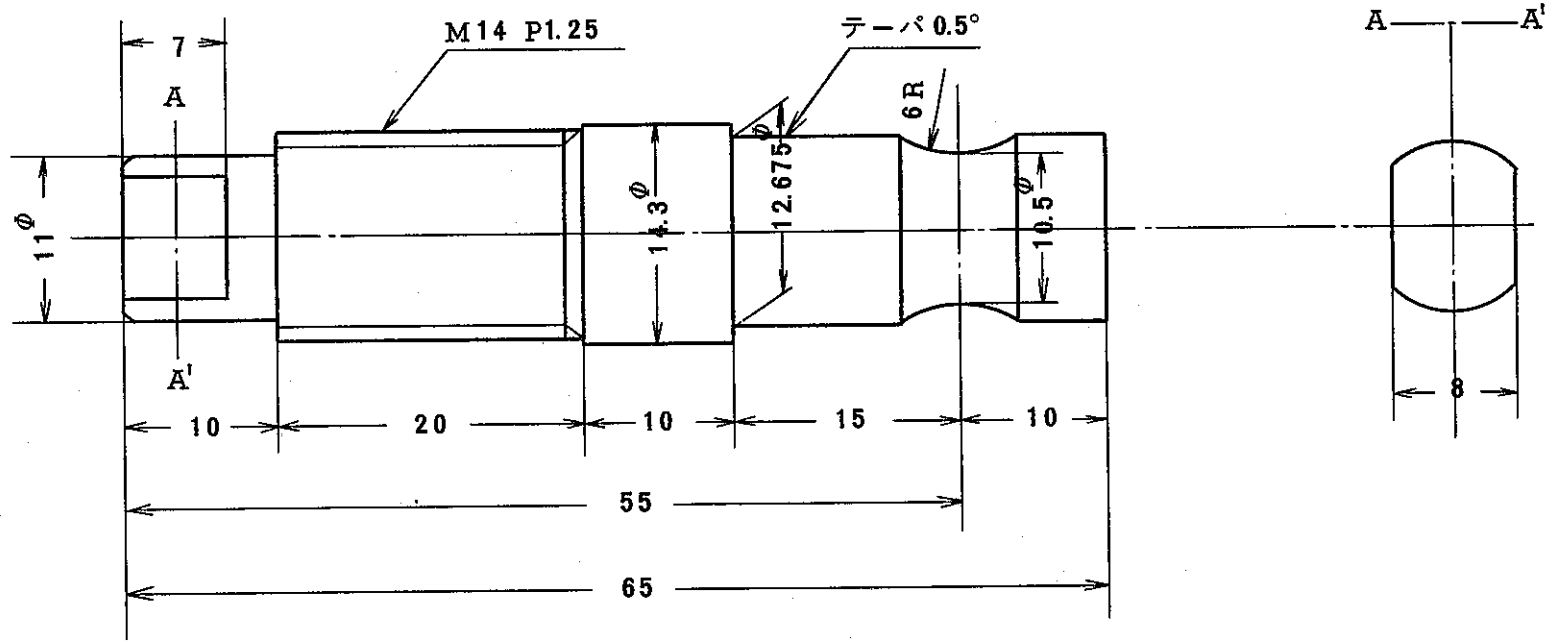


記号 品番	D	d ₁	d ₂
1	14.453 ϕ	12.675 ϕ	11.5 ϕ
2	10.643 ϕ	9.271 ϕ	8.0 ϕ

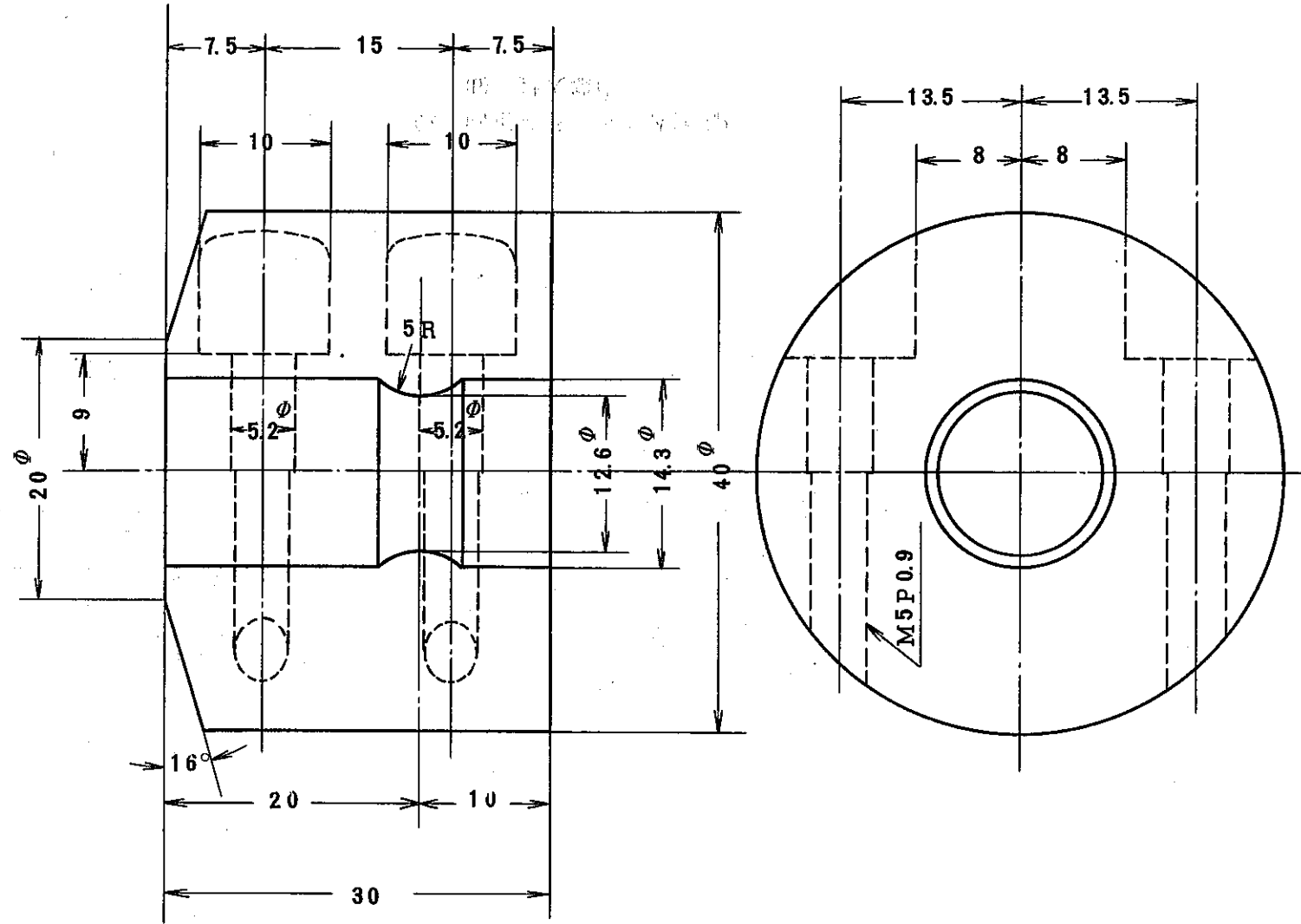
(C) BWR, PWP 寸法被覆管固定端バースト用端栓



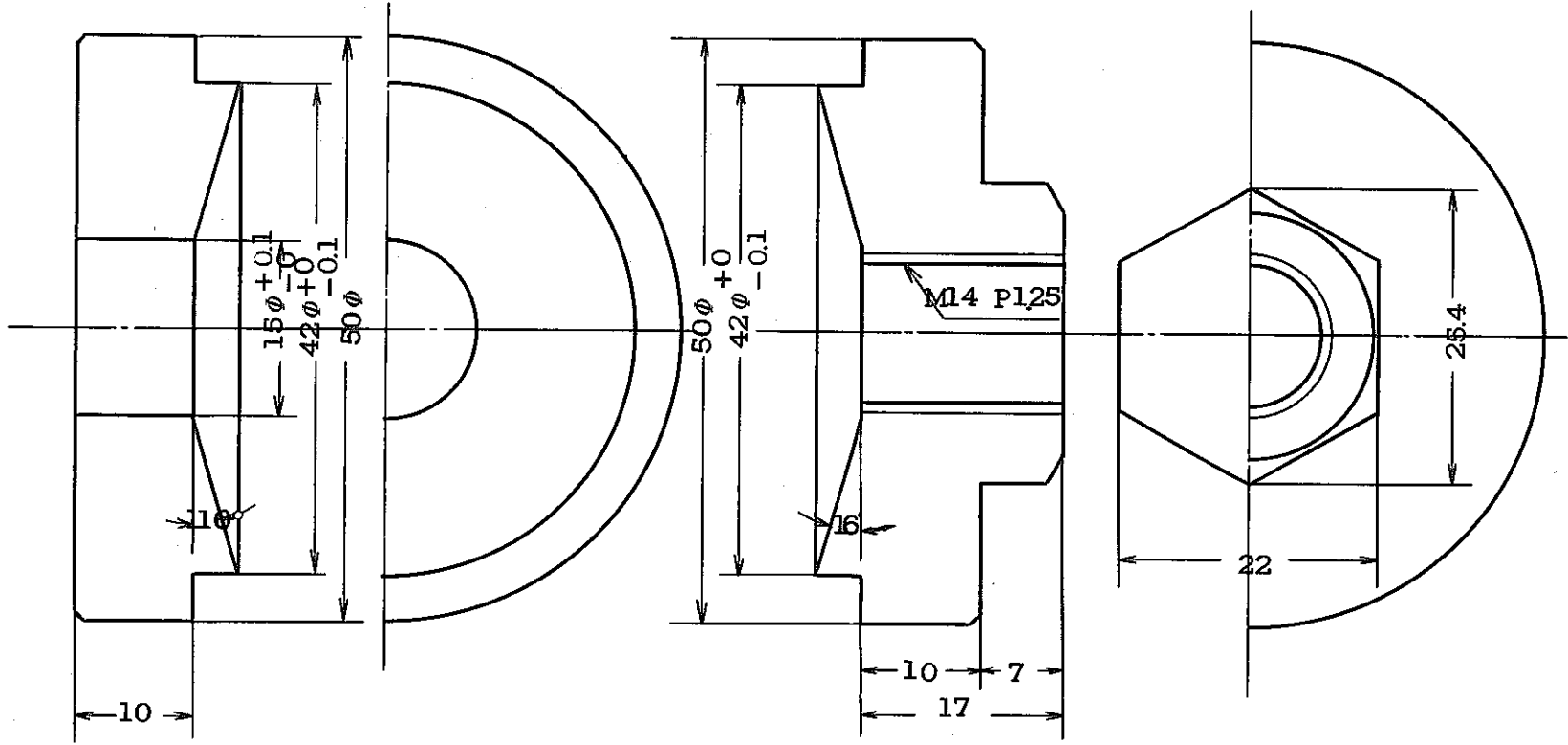
(D) 固定端バースト試験端栓
(a) 導圧端栓



(D) 固定端ボースト試験端栓
(b) 封入端栓



(E) 被覆管ふくれ拘束冶金



(F) 外套管用フランジ