

本資料は 年 月 日付けで登録区分、  
変更する。

01.11.30 [技術情報室]

高速増殖炉用燃料被覆管のクリープ強度  
および超音波探傷時における  
シャワーエコーに及ぼす結晶粒度の影響

(共同研究報告書)

昭和 57 年 10 月

動力炉・核燃料開発事業団  
株 神 戸 製 鋼 所  
住 友 金 属 工 業 株

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)

## 共同研究報告者

- 太 田 定 雄 ( ㈱ 神 戸 製 鋼 所 )  
内 田 博 幸 (       "       )  
藤 井 教 嗣 (       "       )  
児 玉 達 朗 ( 住 友 金 属 工 業 ㈱ )  
井 上       守 (       "       )  
寺 西 洋 志 (       "       )  
小 山 真 弘 ( 動 燃 事 業 団 高 速 増 殖 炉 開 発 本 部 )  
藤 原 優 行 (               "               )  
池 永 慶 章 (               "               )  
立 石 嘉 徳 ( 動 燃 事 業 団 東 海 事 業 所 技 術 部 檢 査 課 )  
田 中 康 正 (               "               )

# 目 次

第1章 高速炉炉心燃料被覆管超音波探傷試験共同研究要旨 .....	1
1. 目的 .....	1
2. 試験項目 .....	1
3. 結果 .....	1
4. まとめおよび今後の研究開発についての提言 .....	3
第2章 (株)神戸製鋼所で実施された研究成果 .....	5
第3章 住友金属工業(株)で実施された研究成果 .....	27
第4章 動燃事業団で実施された研究成果 .....	61

## 第 1 章

### 高速炉炉心燃料被覆管超音波探傷試驗共同研究要旨

## 1. 目 的

高速原型炉「もんじゅ」初装荷用炉心燃料被覆管は、高温、高速、中性子照射下での耐スウェリング性が良好で、かつクリープ強度の高いものが要求される。そのため、近年、R&Dの結果にもとづいて、TiNbの微量添加等の成分調整を行い、かつ溶体化処理温度を高くして被覆管の試作を行ってきた結果、従来のSUS 316ステンレス鋼被覆管に比べてクリープ強度が高く、またイオン照射ではあるがスウェリングの小さな優れたSUS 316相当鋼被覆管が製造された。しかし一方では、結晶粒径を大きくした場合には、超音波欠陥探傷時にシャワーエコーが大きくなり、検査結果に支障をきたす。

そこで、動燃事業団および製管メーカー2社（㈱神戸製鋼所、住友金属工業㈱）による共同研究を実施し、クリープ強度およびシャワーエコーに及ぼす結晶粒度の影響を調べることにした。合わせて、現時点における超音波探傷検査技術のレベルを再確認し、今後の対応を明確にしておくことにした。

## 2. 試験項目

共同研究に使用する供試材は、両メーカーで製造され、合わせて結晶粒度の異なる6種類の被覆管を用意した。試験項目は、結晶粒度測定、引張試験、内圧クリープ破断試験および超音波探傷検査とし、引張試験およびクリープ試験はメーカーにて、結晶粒度測定および超音波探傷検査は同一の供試材を用いて動燃事業団およびメーカーで実施された。試験分担をまとめると以下のようなになる。

目標結晶粒度 (ASTMNo.)	製造メーカー	試験実施機関			
		粒度測定	引張	内圧クリープ	超音波探傷
7.5	神 鋼	PNC, 神鋼	神 鋼	神 鋼	PNC, 神鋼
	住 金	PNC, 住金	住 金	住 金	PNC, 住金
8.5	神 鋼	PNC, 神鋼	神 鋼	神 鋼	PNC, 神鋼
	住 金	PNC, 住金	住 金	住 金	PNC, 住金
9.5	神 鋼	PNC, 神鋼	神 鋼	神 鋼	PNC, 神鋼
	住 金	PNC, 住金	住 金	住 金	PNC, 住金

## 3. 結 果

項目毎に、各試験機関で実施された結果を整理した。

#### 1) 結晶粒度測定

試験機関は、被覆管の任意の位置から試験片を採取し、それぞれの方法で結晶粒度を測定した。その結果、測定値に若干のバラツキが見られた。

目標結晶粒度 (ASTM No)	製造メーカー	縦断面			横断面		
		PNC	神鋼	住金	PNC	神鋼	住金
7.5	神鋼	7.1	7.0		7.6	7.3	
	住金	6.8		7.2	7.3		7.7
8.5	神鋼	8.4	8.0		8.9	8.3	
	住金	8.0		8.3	8.5		8.5
9.5	神鋼	9.0	8.5		9.5	8.8	
	住金	9.0		9.3	9.5		9.3

#### ii) 引張試験

引張試験は、神鋼、住金で実施された。常温および650℃で行った結果、いずれの供試材も「もんじゅ」炉心燃料用被覆管の規格値を満足していた。引張強さ、0.2%耐力は結晶粒が大きくなるにつれて若干低下し、逆に破断伸びは若干増加する傾向が認められた。詳細な結果は第2章および第3章を参照のこと。

#### iii) 内圧クリープ破断試験

内圧クリープ破断試験は、神鋼、住金で実施された。700℃で行った結果、結晶粒が大きくなるにつれて、クリープ破断強度は高くなるが、結晶粒度がASTM No. 8.5とNo. 7.5ではほとんど変わらず、溶体化処理温度がある値以上になるとクリープ破断強度は飽和する傾向がみられる。しかし、750℃ではASTM No. 8.5より7.5の方が高くなっている。

最近試作された被覆管のクリープ破断強度と比較すると、クリープサブグループ第10次、第11次試験に対して、結晶粒度がASTM No. 9では若干低目であったが、ASTM No. 8.5、No. 7.5では同等か若干高目の強度を有していた。詳細な結果は第2章、第3章を参照のこと。

#### iv) 超音波探傷検査

超音波探傷検査は、神鋼、住金、動燃の3機関で同一の供試材、標準試験片を用いて行った。探傷条件は、各試験機関が独自に、標準欠陥を基準感度として最適の条件を設定し、その状態で探傷検査を行い、比較した。その結果、各試験機関の探傷可能な結晶

粒度は、同じ結果が得られた。すなわち、神鋼材の場合、結晶粒度 8.5（目標値）より細粒ではシャワーエコーは抑制され、充分検査ができることを確認した。結晶粒度 7.5 では粒界からのシャワーエコーレベルが高くなるが、軸・周方向探傷は可能である。一方、住金材では前者と同様、結晶粒度が 8.5（目標値）より細粒では検査ができることを確認したが、7.5 では粒界からのシャワーエコーレベルが前者よりも高く、探傷可能にまで至らなかった。各試験機関の使用機器、探傷条件および探傷チャートを第 2 章～第 4 章に示しておくので参照のこと。

#### 4. まとめおよび今後の研究開発についての提言

今回の共同研究で得られた結果をまとめると次のようになる。

- 1) 結晶粒度の測定値には、試料の採取位置、試験機関の所間差を考慮して、0.5 程度のちがいがみられる。
- 2) 引張試験では、特に問題になるような結果は無かった。結晶粒が大きくなるにつれて若干強度が低下し、伸びが増加する傾向が見られた。
- 3) 内圧クリープ破断強度は、最近の試作被覆管とほぼ同等であった。700℃では結晶粒が 8.5 より大きくなると強度が飽和する傾向が見うけられた。
- 4) 超音波探傷検査において目標結晶粒度 ASTM No. 7.5（動燃実測値：縦断面 7.1，横断面 7.6）より細粒では探傷可能であることを確認できたが、それより粗粒（動燃実測値：縦断面 6.8，横断面 7.3）では完全に探傷可能まで至らなかった。
- 5) この両者の結晶粒径の差は数 $\mu$ であるにもかかわらずシャワーエコーの差は大きく、これは単なる結晶粒度の影響のみとは考えにくく、製造方法、特に溶体化処理条件のちがい（前者：神鋼材 1,100℃×4分，後者：住金材 1,100℃×30秒）や化学成分の微妙なちがいがシャワーエコーの現れ方に影響していると推測される。
- 6) 一本の管でもシャワーエコーの大きさに変化のある管があった。その原因は熱処理方法に何らかの問題があった可能性がある。
- 7) これらの結果から判断して結晶粒度 7.5～8.0 で被覆管を製作した場合、超音波探傷は充分可能である。

このように超音波探傷ならびにクリープ強度の観点から結晶粒度 7.5～8.0 を目標に被覆管を製造するのが最適と考えられるが、その範囲は狭く、今後、高速炉用燃料被覆管を工業的に大量製作してゆく場合にそなえて、より合理的な検査技術の確立をも計る必要があ



ると考えられる。

なお、本共同研究で実施した結晶粒度と超音波探傷検査との関係は、現段階における機器を使って得られた結論であり、今後さらに粗粒側まで探傷可能にするには、非常な困難が予想される。我々は、現状のままでの技術開発に合わせて、次のような調査および研究を行い、より可能性のある技術の確立を計りたい。

- 1) 高速炉用燃料被覆管の許容欠陥の大きさ、基準、検査方法等について諸外国（米、英、仏、西独等）の情報を収集し、我が国の基準の妥当性を評価する。
- 2) 超音波探傷検査において現状の標準試験片（人工欠陥）を用いる限り、粗粒の被覆管に対する検査可能な条件設定は、ほぼ限界にきていると考えられる。従って標準試験片を見直し寸法変更（たとえば欠陥長さを大きくする）を行った場合の探傷検査の可能性を研究する。合わせて標準欠陥の寸法変更によるクリープ強度等への影響を調べることで、燃料設計から見た場合の許容欠陥の妥当性を評価する。
- 3) 結晶粒度すなわち溶体化処理温度とスウェリングの関係について系統的に調べたデータはほとんどない。本件についての調査と、今回の共同研究で使用した被覆管等を用い MK-II での照射試験を計画し、有効なデータを得る。
- 4) 超音波探傷検査でスペックアウトとなった被覆管を燃料ピンとして照射試験し、スペックの妥当性を評価して被覆管の製造コスト低減に努力を行う。

以上

## 第 2 章

(株)神戸製鋼所で実施された研究成果

## 1. 目 的

高速原型炉「もんじゅ」の初装荷用の被覆管として、微量のTi,Nbを添加した改良316鋼が考えられている。改良316鋼が従来の316鋼よりも優れたクリープ強度を有することはすでに板材および被覆管で確かめられているが、安定した高いクリープ強度を維持するには溶体化処理温度を超音波探傷に支障ないものとしなければならない。

本研究は、溶体化処理条件を結晶粒度 ASTM No. 7, 8, 9 が得られるように選定して、クリープ破断強度に及ぼす溶体化処理温度の影響および超音波探傷時のシャワーエコーに及ぼす結晶粒度の影響を調べ、クリープ強度が優れしかも超音波探傷に支障のない、最適な結晶粒度について検討した。

## 2. 研究内容

- (1) 結晶粒度調整の熱処理
- (2) 結晶粒度測定
- (3) 超音波探傷試験
- (4) 引張試験（常温および650℃）
- (5) 700℃における内圧クリープ破断試験

## 3. 供 試 材

供試材の化学成分を表1に示す。供試材は結晶粒度が ASTM No. 7, 8, 9 になるように溶体化処理条件を3水準に変化させた“もんじゅ”用被覆管（寸法：外径6.5φmm，肉厚0.47mm）である。

供試管の履歴，結晶粒度および硬さを表2に，また各溶体化処理条件での顕微鏡組織を表3～表5に示す。

## 4. 試験方法

### 4.1 超音波探傷試験

結晶粒度8.5\*，8\*，7\*のものについて，それぞれ4本を供試管とした。本試験に用いた標準人工欠陥試験片（K-7，K-8，K-9，数字は目標結晶粒度を示す）の検定結果を表6～8に，試験条件を表9に示す。

\* いずれも縦断面の結晶粒度。

表1 供試材の化学成分

昭和54年度試作材	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Co	B	N	Ti	Nb
レール	0.062	0.80	1.92	0.025	0.009	13.57	16.40	2.58	<0.01	0.0054	0.0023	0.081	0.047
	0.062	0.81	1.88	0.025	0.009	13.59	16.54	2.59	<0.01	0.0054	0.0025	0.080	0.043
チェック	0.062	0.82	1.95	0.028	0.009	13.77	16.70	2.34	<0.01	0.0054	0.0024	0.084	0.042

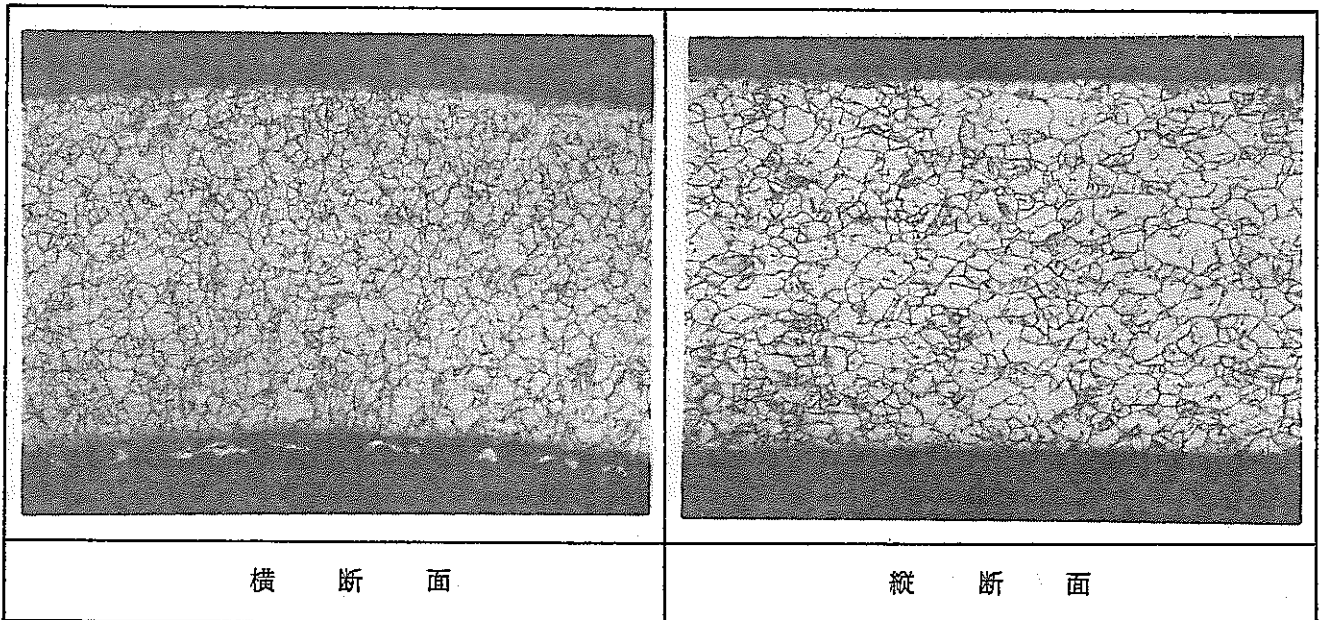
表2 供試材の履歴、結晶粒度および硬さ

目標結晶粒度 (ASTM No.)	最終溶体化 処理条件	仕上冷間加工率 (%)	結晶粒度* (ASTM No.)	硬さ (Hv 500 gf)
7	1,100°C×4分	20	(横) 7.3 (縦) 7.0	(横) 283 (縦) 280
8	1,070°C×2分	20	(横) 8.3 (縦) 8.0	(横) 285 (縦) 284
9	1,050°C×2分	20	(横) 8.8 (縦) 8.5	(横) 293 (縦) 291

\* 結晶粒度は縦断面の測定値を用いた。

表3 供試材の組織，結晶粒度および硬さ

管 No. 29 ( S.T. 1,100 ℃ )

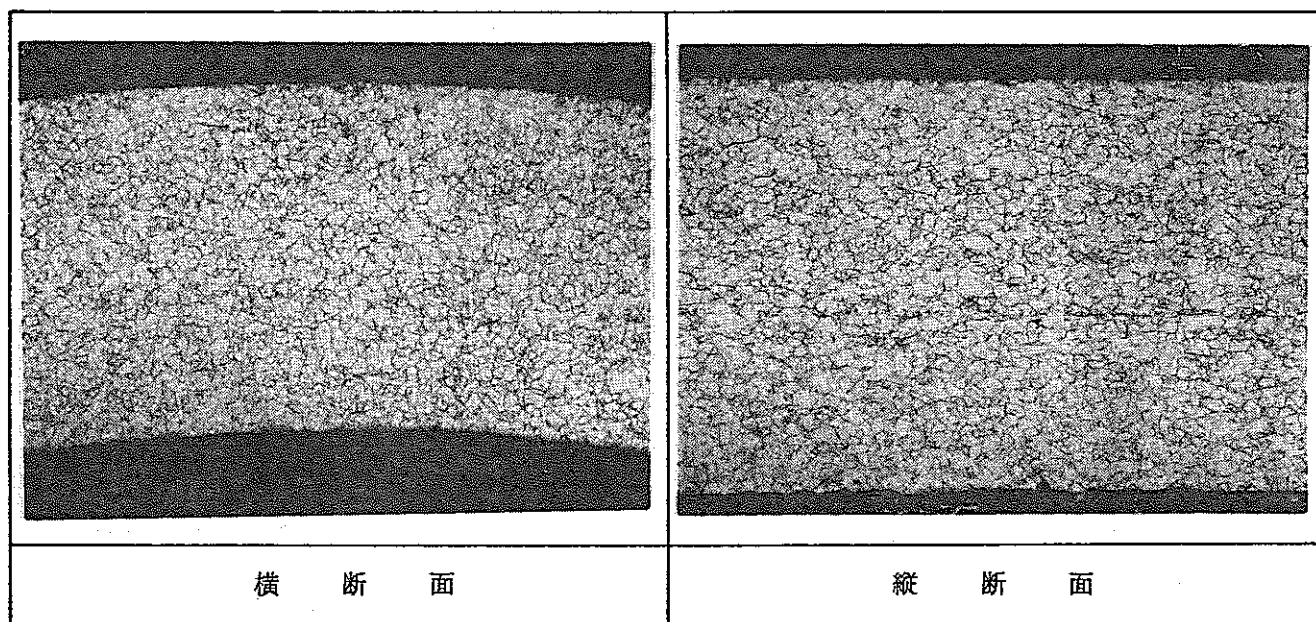


( × 100 )

<p>結 晶 粒 度 ( ASTM No. )</p>	<p>縦 断 面 7.0</p>	<p>硬 さ ( Hv 500gf )</p>	<p>横 断 面 283 縦 断 面 280</p>
---------------------------------	------------------	-----------------------------	--------------------------------

表 4 供試材の組織，結晶粒度および硬さ

管 No. 4 ( S.T. 1,070 °C )

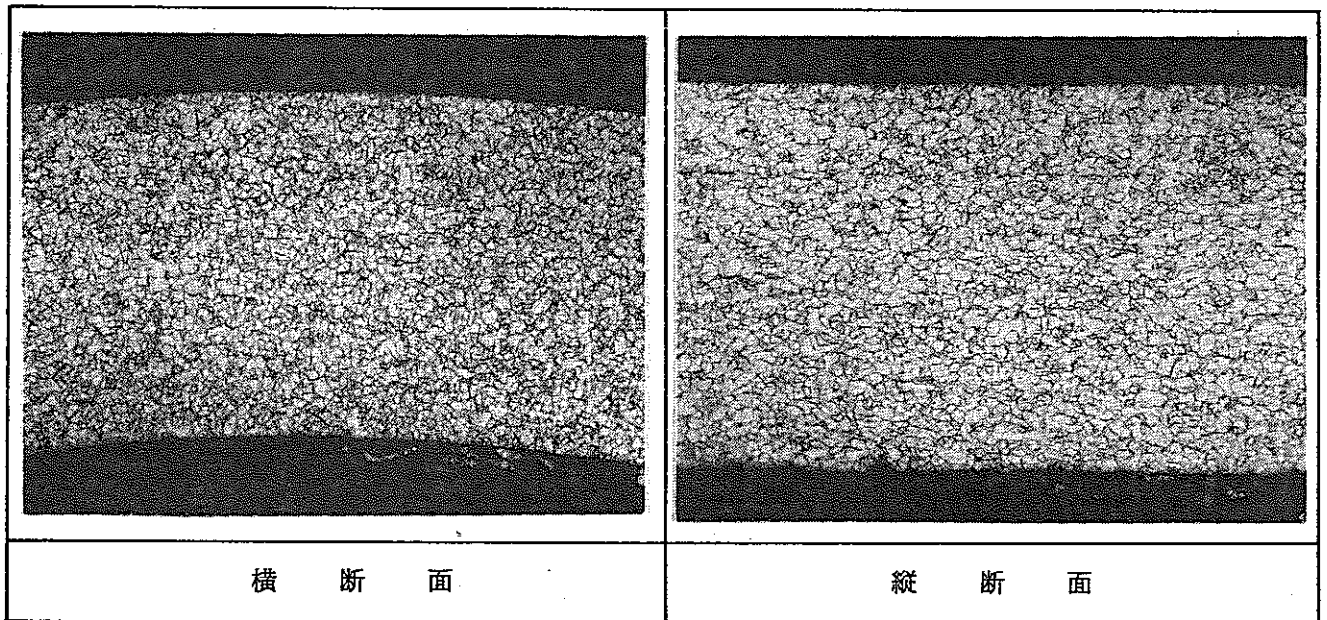


( × 100 )

<p>結 晶 粒 度 ( ASTM No. )</p>	<p>縦 断 面 8.0</p>	<p>硬 さ ( Hv 500gf )</p>	<p>横 断 面 285 縦 断 面 284</p>
---------------------------------	------------------	-----------------------------	--------------------------------

表5 供試材の組織, 結晶粒度および硬さ

管 No. 47 ( S.T. 1,050 ℃ )



( × 100 )

<p>結 晶 粒 度 ( ASTM No. )</p>	<p>縦 断 面 8.5</p>	<p>硬 さ ( Hv 500gf )</p>	<p>横 断 面 293 縦 断 面 291</p>
---------------------------------	------------------	-----------------------------	--------------------------------

表6 標準人工欠陥検定結果 (K-7)

標準人工欠陥検定結果

昭和57年2月19日 動力炉核燃料開発事業団

東海事業所 技術部検査業務課

1. 依頼者

2. 試験片名称 標準人工欠陥試験片

3. 試験片No K-7

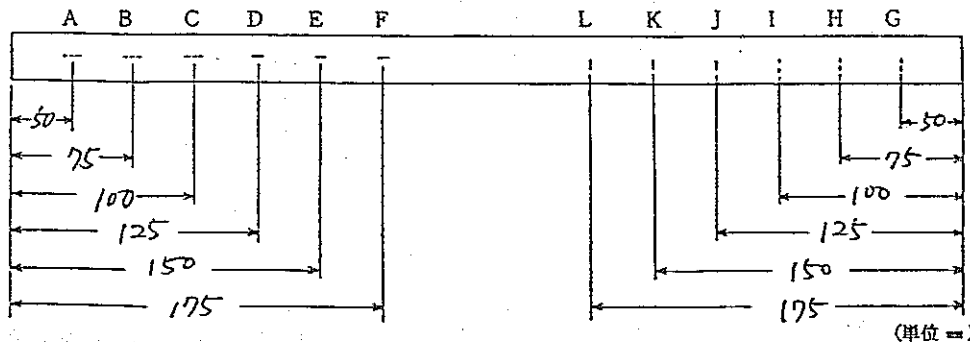
4. 試験片寸法 外径 6.50 mm, 内径 5.56 mm, 肉厚 0.47 mm, 長さ 600 mm

5. 欠陥加工者

6. 欠陥加工法 放電加工

7. 欠陥Noおよび加工位置

課長	係長	担当
(印)		(印)



8. 人工欠陥検定結果 外面欠陥は深度顕微鏡で測定  
内面欠陥はシリコンレプリカを採取し深度顕微鏡で測定

欠陥No	軸方向欠陥			備考	欠陥No	円周方向欠陥			備考
	深さ(μ)	巾(μ)	長さ(mm)			深さ(μ)	巾(μ)	長さ(mm)	
A	21	30	0.77	内面	G	22	30	0.75	内面
B	32	31	0.77	"	H	32	31	0.75	"
C	41	31	0.77	"	I	43	31	0.76	"
D	23	28	0.76	外面	J	21	29	0.76	外面
E	32	28	0.75	"	K	30	29	0.76	"
F	42	27	0.75	"	L	40	29	0.76	"



表7 標準人工欠陥検定結果 (K-8)

標準人工欠陥検定結果

昭和57年2月19日 動力炉核燃料開発事業団

東海事業所 技術部検査課

1. 依頼者

2. 試験片名称 標準人工欠陥試験片

3. 試験片No K-8

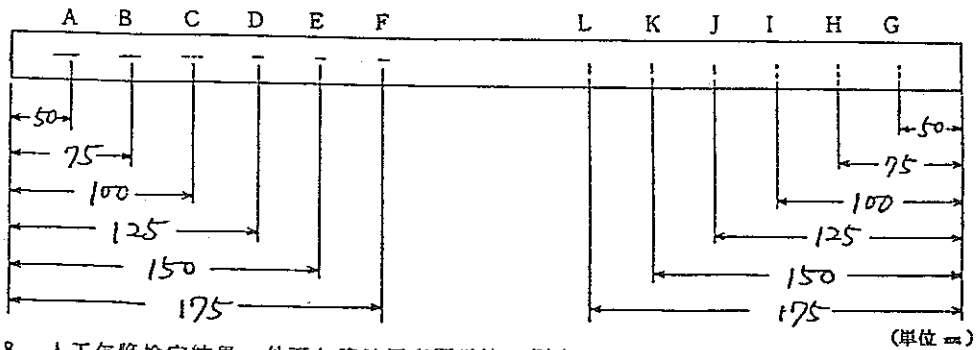
4. 試験片寸法 外径 6.50 mm, 内径 5.56 mm, 肉厚 0.47 mm, 長さ 600 mm

5. 欠陥加工者

6. 欠陥加工法 放電加工

7. 欠陥Noおよび加工位置

課長	係長	担当



8. 人工欠陥検定結果 外面欠陥は深度顕微鏡で測定  
内面欠陥はシリコンラバーレプリカを採取し深度顕微鏡で測定 (単位 mm)

欠陥No	軸方向欠陥			備考	欠陥No	円周方向欠陥			備考
	深さ(μ)	巾(μ)	長さ(mm)			深さ(μ)	巾(μ)	長さ(mm)	
A	21	29	0.76	内面	G	21	30	0.75	内面
B	31	31	0.76	"	H	31	30	0.76	"
C	41	31	0.76	"	I	48	30	0.76	"
D	22	28	0.75	外面	J	21	29	0.76	外面
E	33	28	0.76	"	K	32	31	0.76	"
F	40	27	0.75	"	L	40	30	0.76	"

表8 標準人工欠陥検定結果 (K-9)

標準人工欠陥検定結果

昭和57年2月19日 動力炉核燃料開発事業団

東海事業所 技術部検査課

1. 依頼者

2. 試験片名称 標準人工欠陥試験片

3. 試験片No K-9

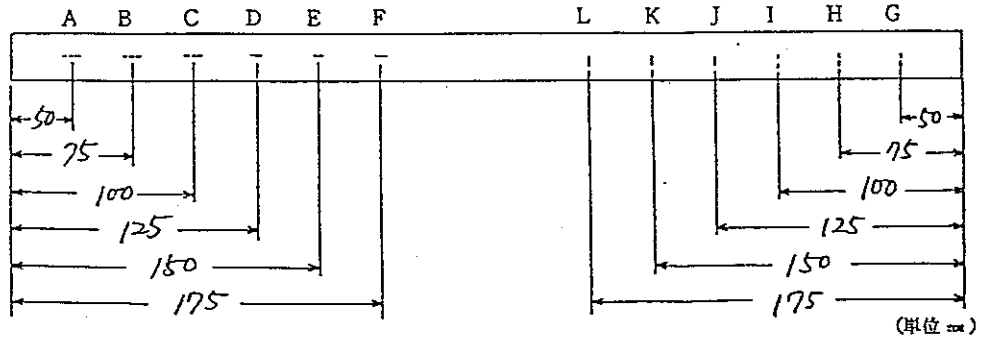
4. 試験片寸法 外径 6.50 mm, 内径 5.56 mm, 肉厚 0.47 mm; 長さ 600 mm

5. 欠陥加工者

6. 欠陥加工法 放電加工

7. 欠陥Noおよび加工位置

課長	係長	担当



8. 人工欠陥検定結果 外面欠陥は深度顕微鏡で測定  
内面欠陥はシリコンラバーレプリカを採取し深度顕微鏡で測定

欠陥No	軸方向欠陥			備考	欠陥No	円周方向欠陥			備考
	深さ(μ)	巾(μ)	長さ(mm)			深さ(μ)	巾(μ)	長さ(mm)	
A	21	29	0.76	内面	G	21	31	0.76	内面
B	32	29	0.76	"	H	31	30	0.76	"
C	41	29	0.76	"	I	41	30	0.76	"
D	21	27	0.76	外面	J	20	29	0.76	外面
E	31	27	0.76	"	K	30	30	0.76	"
F	40	27	0.75	"	L	41	29	0.76	"

表 9 超音波探傷条件および使用機器

探 傷 器	広帯域増幅型探傷器 型式：MARK-II， メーカー：ソニック社
探 触 子	周波数：10 MHz ポイントフォーカス： $\pm 0.4$ mm (-3 dB) メーカー：ソニック社
探 傷 方 式	水浸式-探横波斜角探傷法
探 傷 角 度	入射角：19度， 水距離：18 mm
ゲート位置	1.5~2.0 skip
水浸試験装置	X, Y, Z 方向連続可変調整機能
管 の 送 り	管回転数 2,000 rpm, ラップ率 50%

#### 4.2 引張試験

結晶粒度 8.5, 8, 7 のものについて，以下の試験条件および方法で行った。

##### (1) 引張速度

加熱炉温度均熱部 50 mm に対して，耐力まで 0.3 %/min，耐力後 7.5 %/min で変形させた。

##### (2) 試験温度

試験は常温および 650 °C で行った。

##### (3) 0.2 %耐力，破断伸びの測定方法

0.2 %耐力は GL=50 mm で DTF により伸びを測定し，荷重-伸び線図から求めた。また，破断伸びは GL=50 mm で測定した。

#### 4.3 内圧クリーブ破断試験

試験片の形状を図 1，内圧クリーブ試験装置の概略を図 2 に示す。加圧ユニットからアキュムレータへ水を送り込むことにより発生した水圧をアルゴンのガス圧に変換し，これが高圧バルブを経て，試験片に負荷される。試験圧は試験片とストップバルブの間に設けられたブルドン管式圧力計により測定される。加熱装置は加熱炉と SCR 方式の温度調節装置とから構成され，加熱炉炉心部は温度分布をよくするため二重炉心構造とし，仕切板により 4 分割されている。

温度は 1 本目の試験片の端栓および 2 本目の試験片の圧力導入用端栓の近傍およびダミー試験片の中央部に取付けた熱電対により測定される。

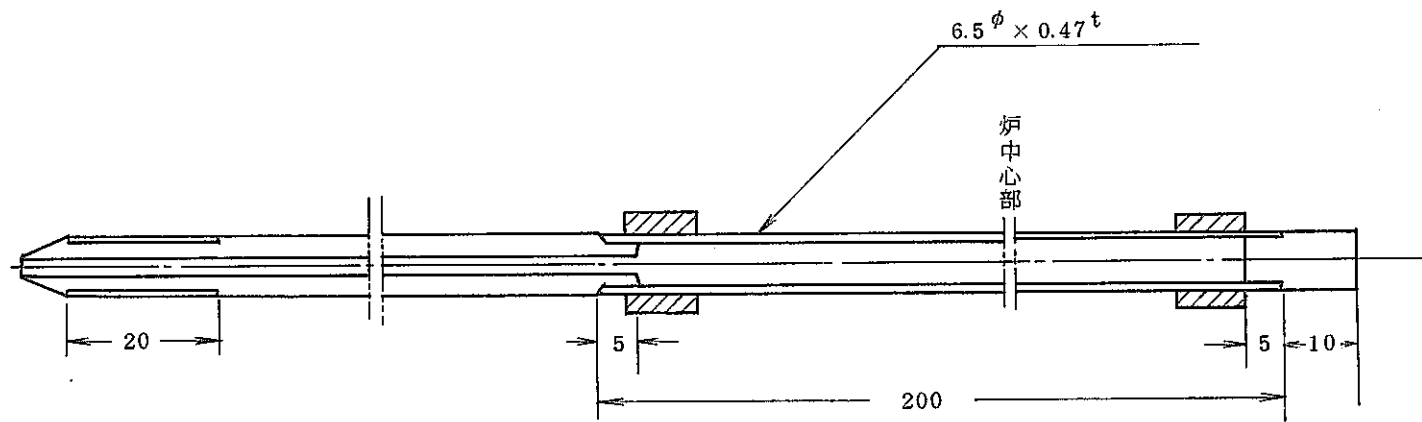


図1 内圧クリープ破断試験片の形状

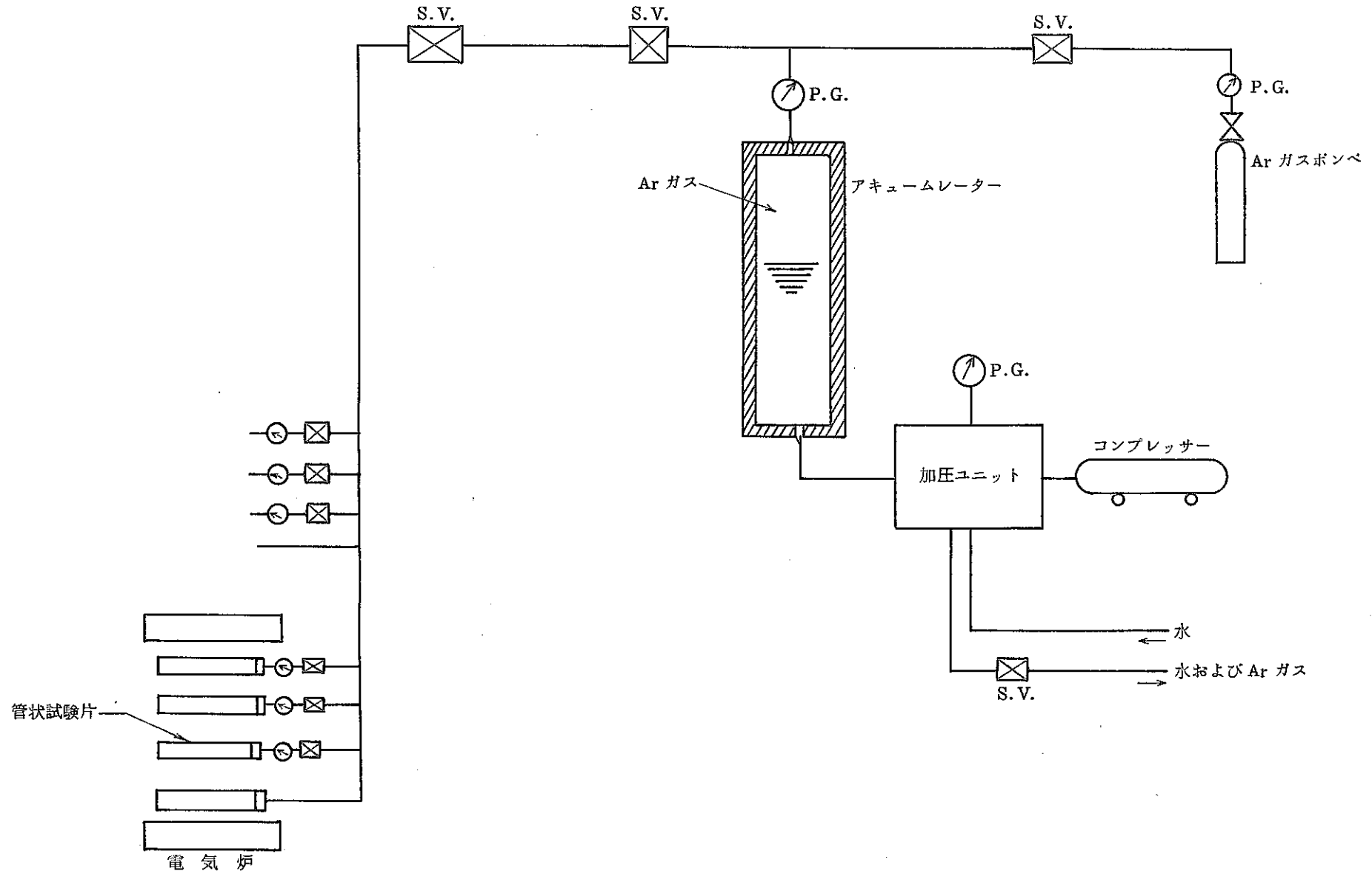


図2 内圧クリープ試験装置の概略

内圧クリープ破断試験の温度，目標時間を以下に示す。

温度 (°C)	目標時間 (h)
700	300, 1,000, 3,000

## 5. 試験結果

### 5.1 超音波探傷試験結果

超音波探傷試験の結果を軸方向について図3に，周方向について図4に示す。

結晶粒度 ASTM No. 8 より細粒の管のシャワーエコーの高さは低く，十分探傷可能である。



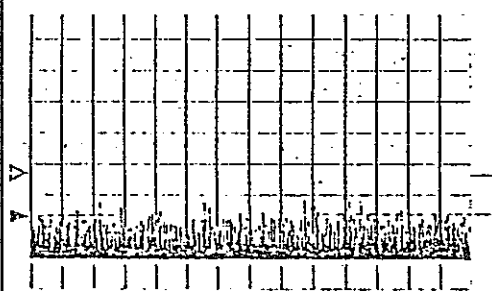
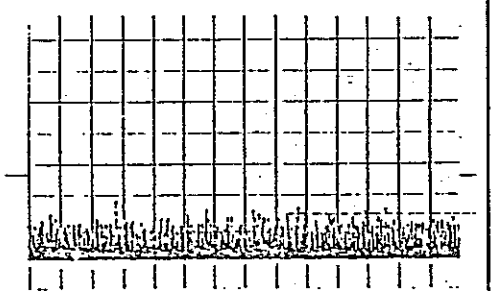
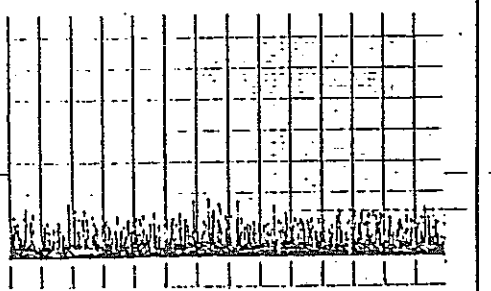
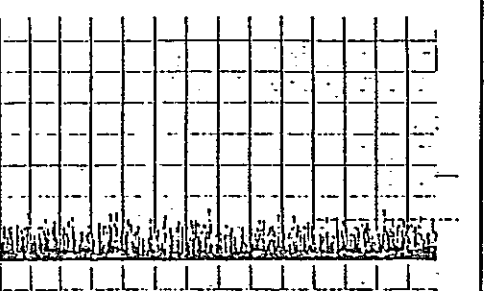
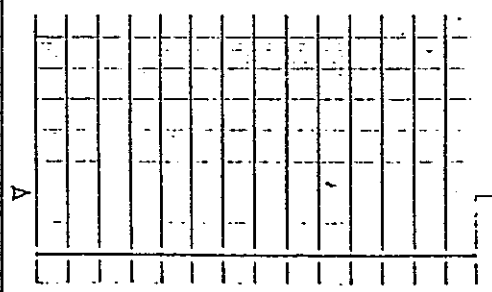
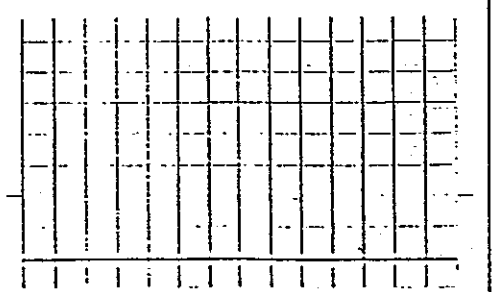
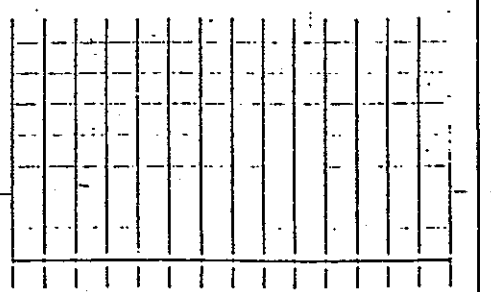
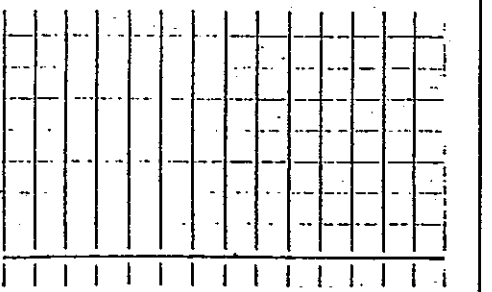
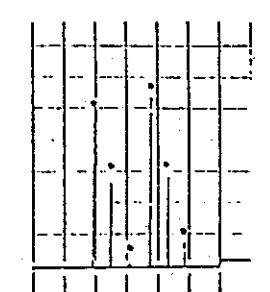
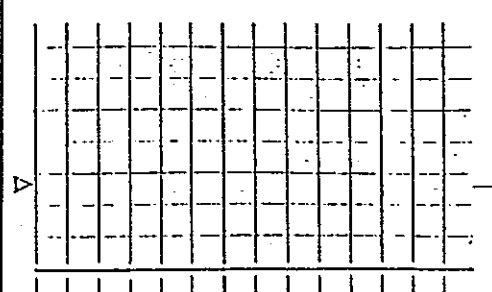
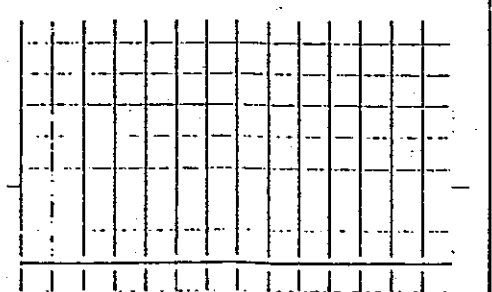
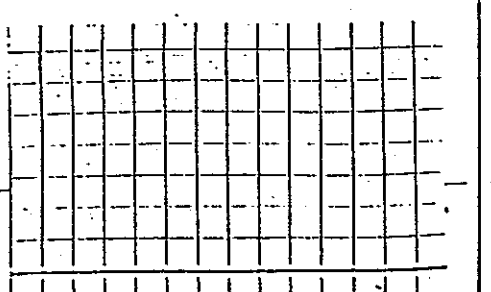
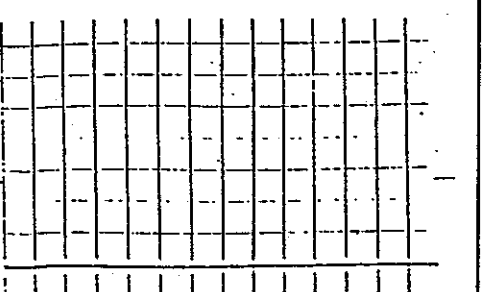
結晶粒度 7 の管では軸，周方向共，標準欠陥深さ 31~33 $\mu$  の基準感度波高値に対し  $\frac{1}{2}$  のシャワーエコーを検出するが，探傷は可能である。

### 5.2 引張試験結果

常温および 650°C での引張試験結果を表 10 および図 5 に示す。いずれの供試材も規格を十分満足しており問題はない。引張強さ，0.2% 耐力は常温，650°C とともに溶体化処理温度が高くなる（結晶粒が大きくなる）につれて低下しており，その低下量は常温の方が著しい。破断伸びは溶体化処理温度が高くなるにつれて，わずかに増加する傾向が認められる。

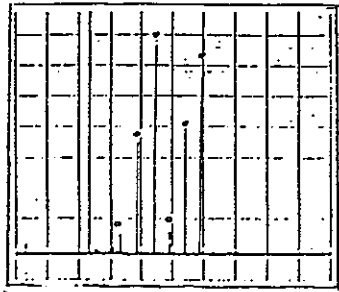
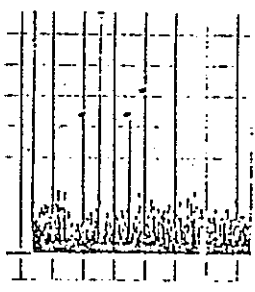
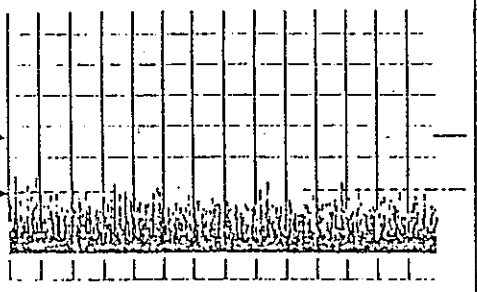
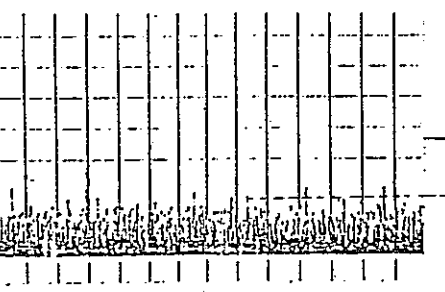
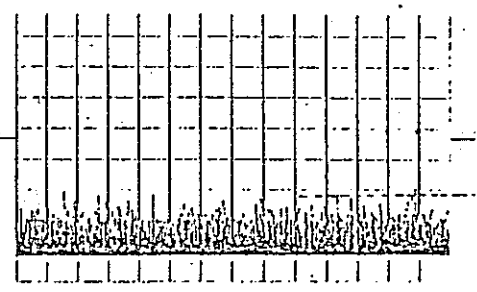
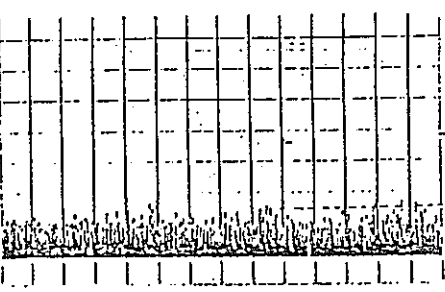

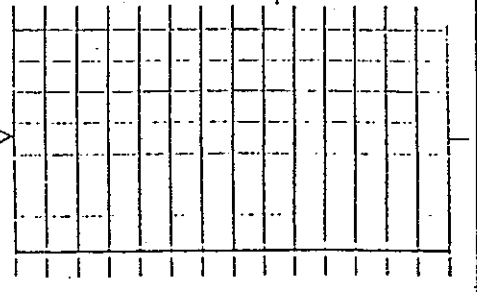
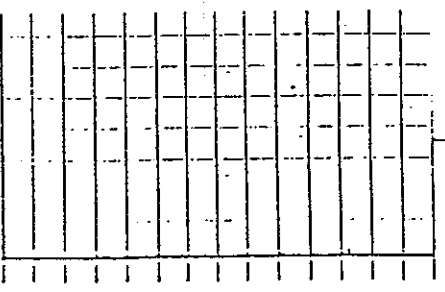
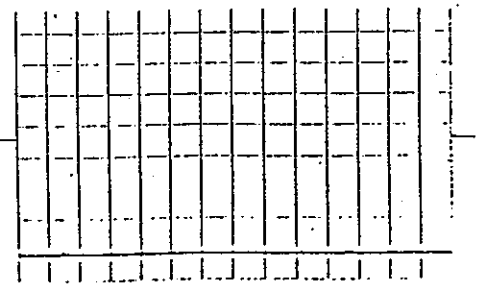
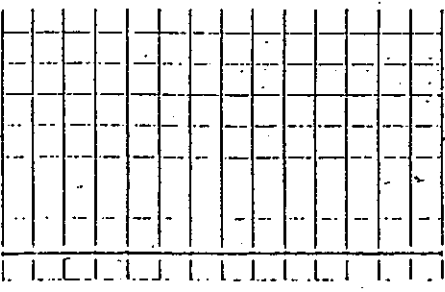
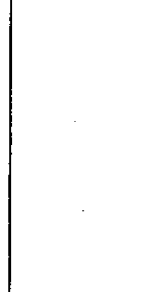

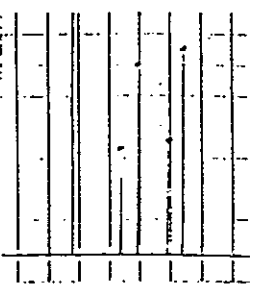
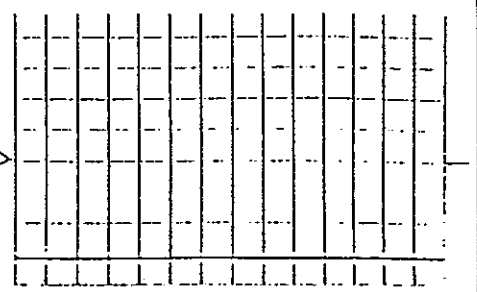
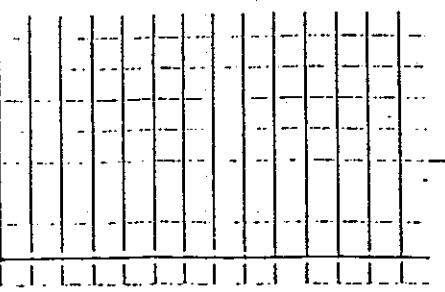
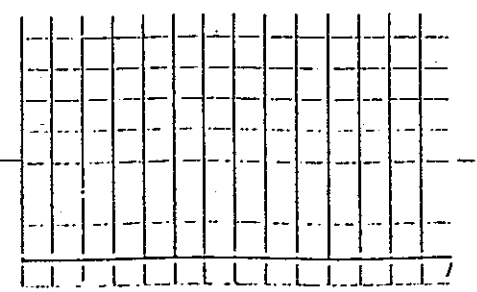
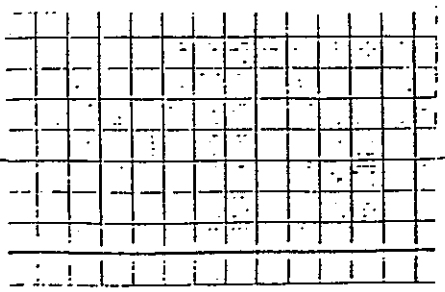


表 10 引張試験結果

溶体化処理温度 (°C)	結晶粒度 (ASTM No)	試験温度 (°C)	引張強さ (kgf/mm <sup>2</sup> )	0.2% 耐力 (kgf/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)
1,100	7	R. T.	83.6	73.4	17.8
			83.7	74.1	17.0
		650	59.1	50.0	11.0
			59.5	49.7	10.3
1,070	8	R. T.	86.1	75.4	17.2
			86.3	76.6	16.7
		650	61.1	51.4	10.0
			62.0	50.7	9.3
1,050	8.5	R. T.	88.8	77.9	14.7
			88.8	79.0	14.6
		650	62.1	53.0	9.0
			63.0	51.7	11.0
規 格		R. T.	$\geq 75$	$\geq 60$	$\geq 10$
		650	$\geq 40$	$\geq 30$	$\geq 7$

ASTM G.S #		# 8.0						
基準 感 度	超音波探傷条件 と 較 正	1. 探傷装置 (1) 超音波探傷器 型式: Mark II メーカー: Sonic (2) 超音波探触子 型式: Sonic		2. 超音波探傷条件 (1) 管送り: 2,000 rpm × 0.2 mm/rev (2) 軸方向入射角: 19度 (3) 周波数: 10 MHz		3. STBの較正記録 STB番号 K-8		
	G.S #							
	7.0							
	8.0	CAL						
8.5								

—▷— Spec: 規格レベル  
 - - - - - SE: シャワーエコーレベル

図3 GS # 8.0 の軸方向探傷結果

ASTM G.S #		# 8.0						
基準 感 度	超音波探傷条件 と 校正	1. 探傷装置 (1) 超音波探傷器 型式: Mark II メーカー: Sonic (2) 超音波探触子 型式: Sonic		2. 超音波探傷条件 (1) 管送り: 2,000 rpm × 0.2 mm/rev (2) 周方向入射角: 20 度 (3) 周波数: 10 MHz		3. STB の校正記録 STB 番号 K-8		
	G.S #	CAL						
	対 比 感 度	7.0						
8.0	CAL							
8.5								

—▷— Spec : 規格レベル  
 - - - - - SE : シャワーエコーレベル

図4 GS # 8.0 の軸方向探傷結果



G.S. (ASTM No.)

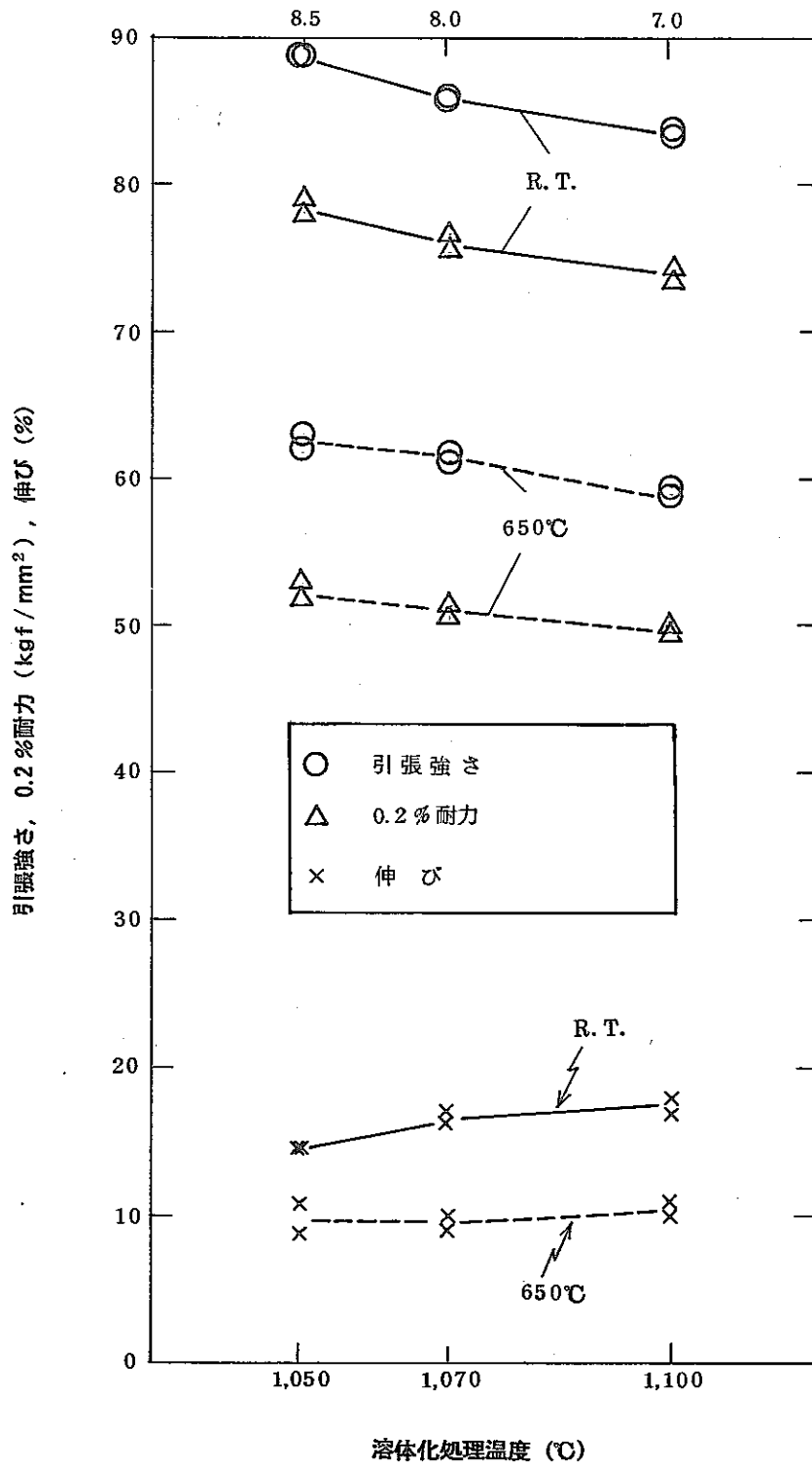


図5 常温および650°Cにおける引張試験結果

### 5.3 内圧クリーブ破断試験結果

700℃における内圧クリーブ破断試験結果を表11に、内圧-破断時間線図を図6、および hoop 応力-破断時間線図を図7に示す。

クリーブ破断強度は溶体化処理温度が高くなるにつれて上昇するが、溶体化処理温度が1,070℃以上になるとほとんど変らなくなる。この場合の結晶粒度は ASTM No. 8である。また、同成分の第10次内圧クリーブ破断試験の結果と比較すると、溶体化処理温度1,050℃のものはやや低目の強度を、1,070℃以上のものはやや高目の強度を有している(図6)。

316鋼20%冷間加工材の中で最も高い強度を有する常陽被覆管(51JK)と微量のTi, Nbを添加した改良316鋼の強度を比較すると、溶体化処理温度が1,050℃(G. S. ASTM No. 8.5)の改良316鋼でも、クリーブ破断強度は316鋼にくらべ約50%高くなっている(図7)。

表11 内圧クリーブ破断試験結果

溶体化処理温度 (℃)	結晶粒度 (ASTM No.)	管 No.	温度 (℃)	圧力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	hoop 応力 (kgf/mm <sup>2</sup> )	破断時間 (h)
1,100	7.0	30	700	400	24.86	392
		29		320	20.52	1,745
		28		260	16.67	3,840 中止
1,070	8.0	8	700	400	24.86	381
		4		320	20.33	1,805
		7		260	16.42	3,840 中止
1,050	8.5	47	700	400	24.49	251
		49		320	20.33	1,104
		50		260	16.67	3,541

### 6. 検 討

本研究の目的の一つは改良316鋼のクリーブ破断強度に及ぼす溶体化処理温度の影響を明らかにすることにある。そこで、被覆管とは別に板材で詳細な検討を行った。

試験材は昭和54年度試作材のブルームより試料を切り出し、それを鍛造後、冷間圧延により板厚2.5mmとし、1,020℃~1,100℃で溶体化処理後、20%の冷間加工を施したものである。

700℃におけるクリープ破断試験の結果を図8に示す。クリープ破断強度は溶体化処理温度が高くなるにつれて上昇するが、特に溶体化処理温度が1,040℃～1,080℃の範囲で最も著しい。

図9は700℃、1,000時間強度と溶体化処理温度との関係を示したものである。被覆管と板材のクリープ破断強度は加工方法、肉厚、試験方法（内圧と単軸）が異なるため、絶対値は異なるがクリープ破断強度に及ぼす溶体化処理温度の影響についてはよい対応が得られている。これより溶体化処理温度は低くとも1,070℃以上にする必要があり、その場合の結晶粒度はASTM No. 8～7.5になる。

一方、超音波探傷の結果は結晶粒度ASTM No. 7より細粒であれば探傷可能であり、クリープ強度と超音波探傷の両者を満足する結晶粒度範囲が存在する。しかし、その範囲が狭いこと、ASTM No. 7のものではシャワーエコーのレベルがASTM No. 8のものより著しく高くなっており、工業的に大量生産される場合にはまだ問題があることから、現状のままでは安定した高い強度を維持してゆくのは難しいように思われる。

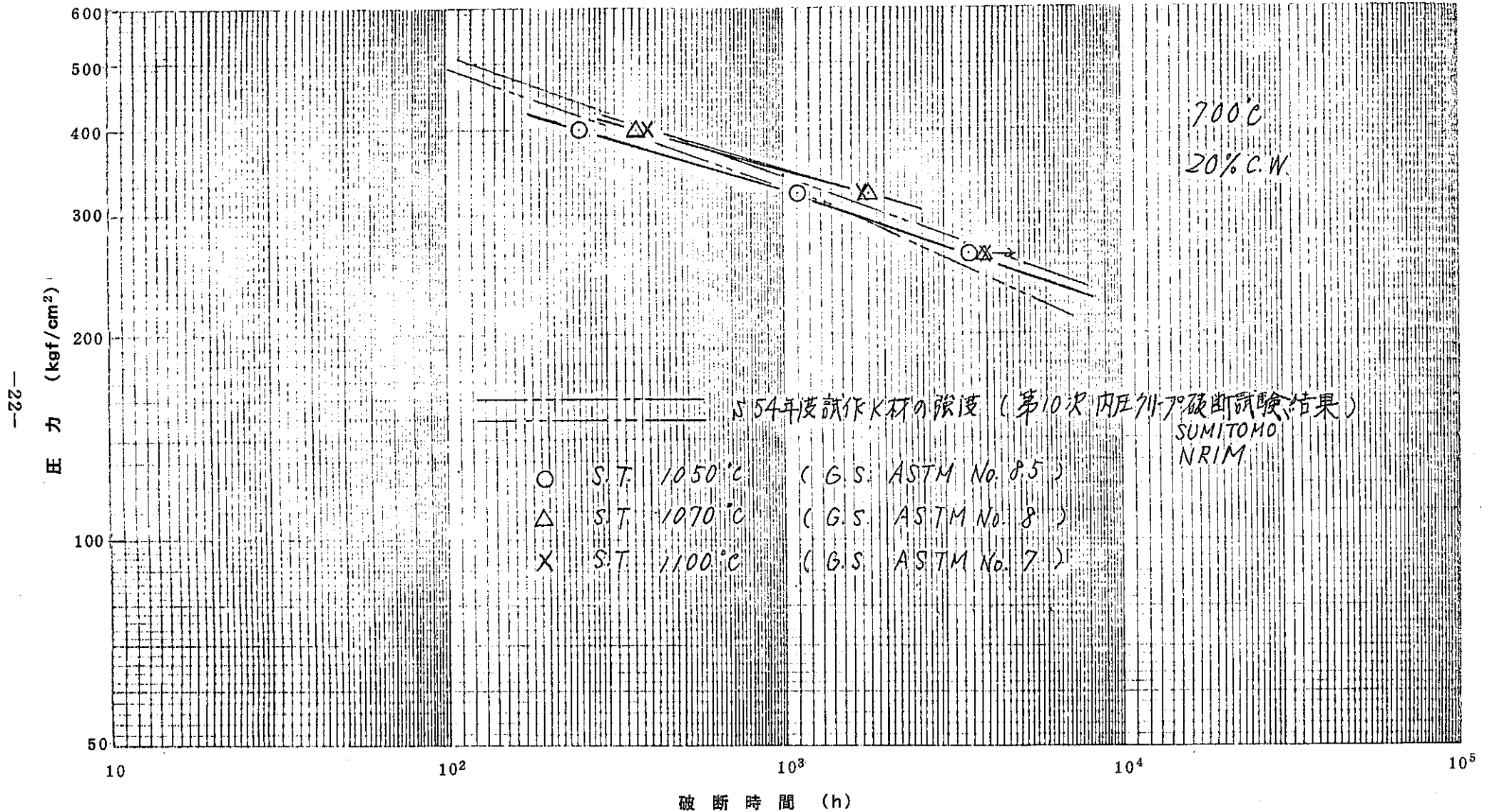


図6 内圧クリープ破断試験結果

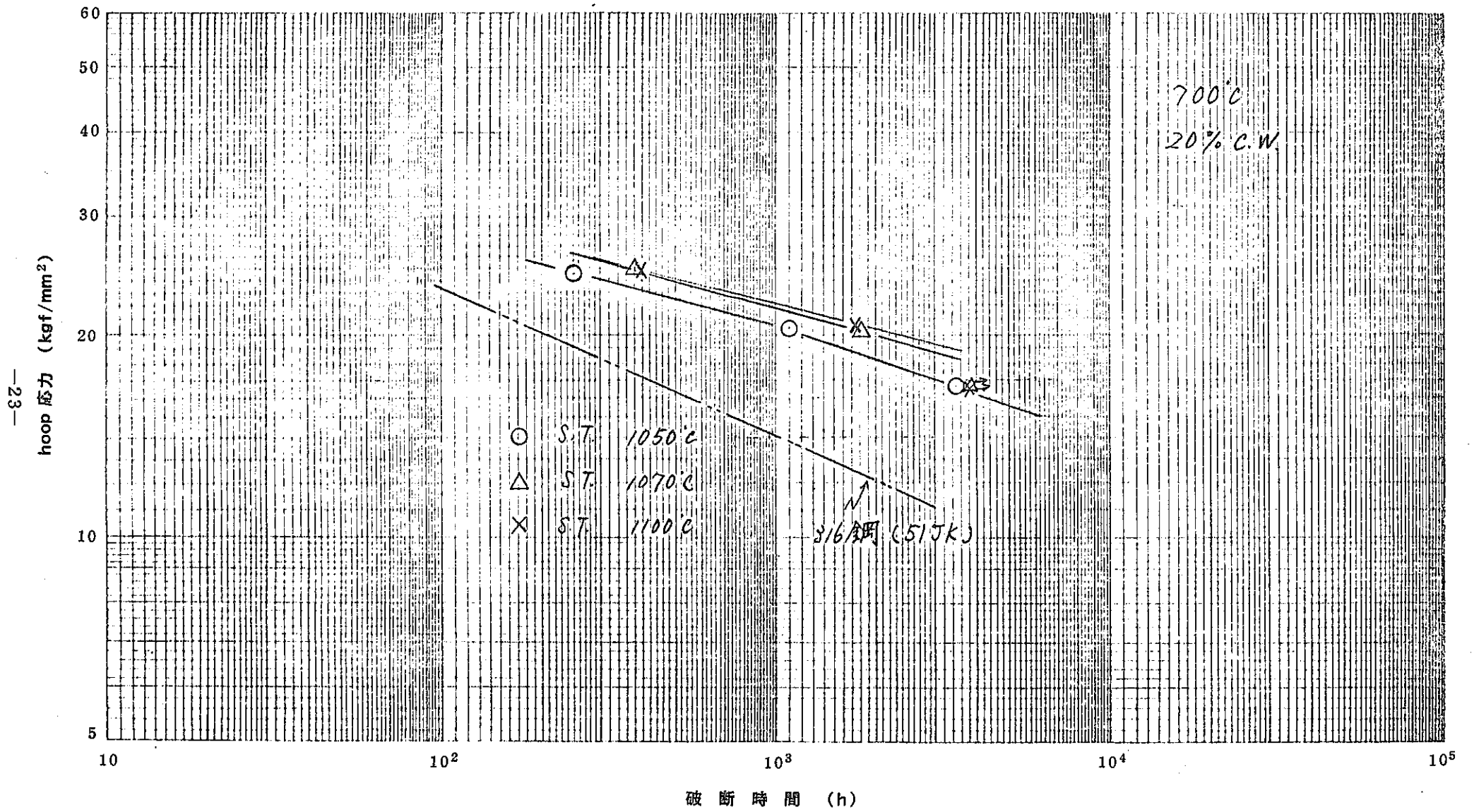


図7 hoop 応力-破断時間線図

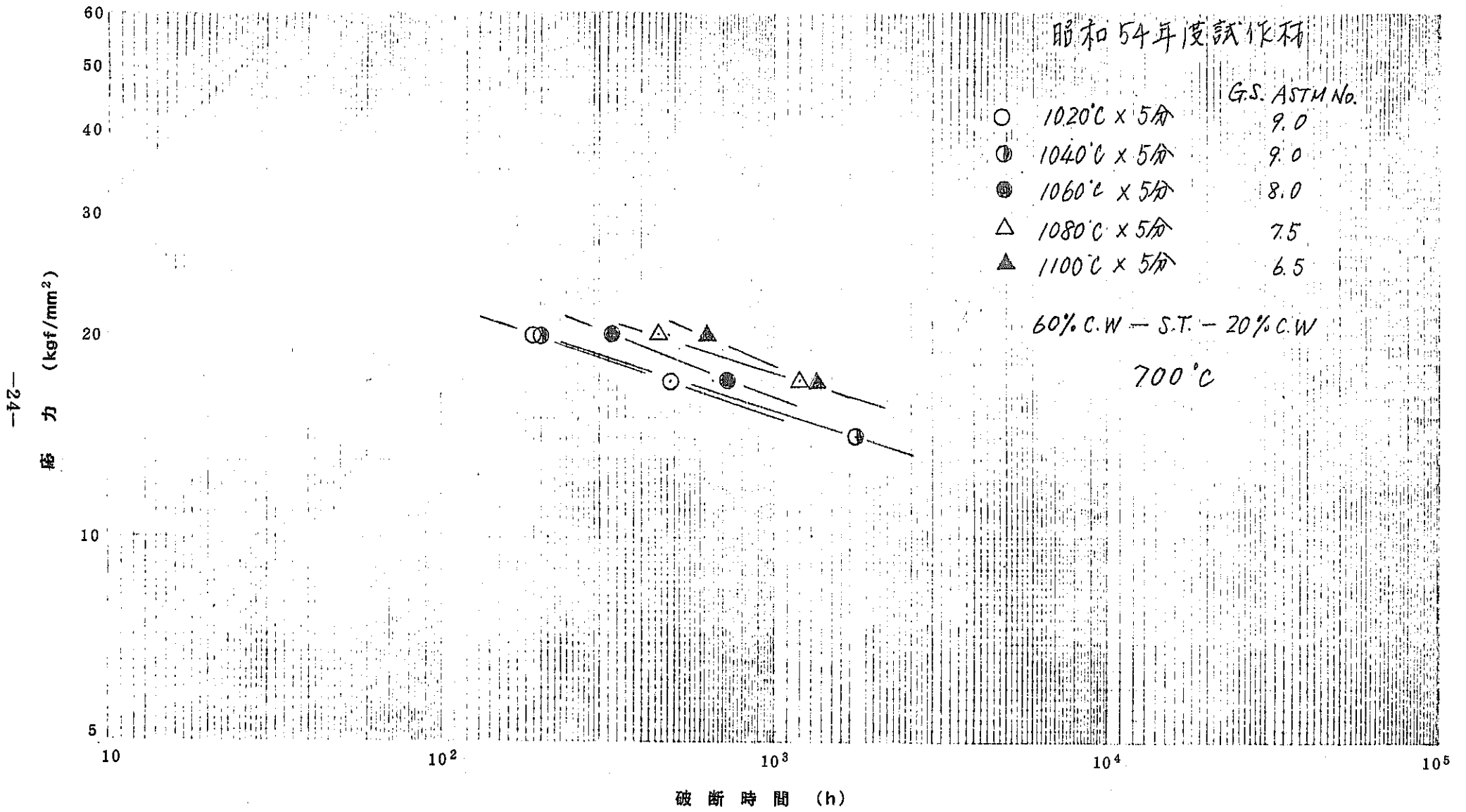


図8 クリープ破断強度に及ぼす溶体化処理温度の影響 (板材)

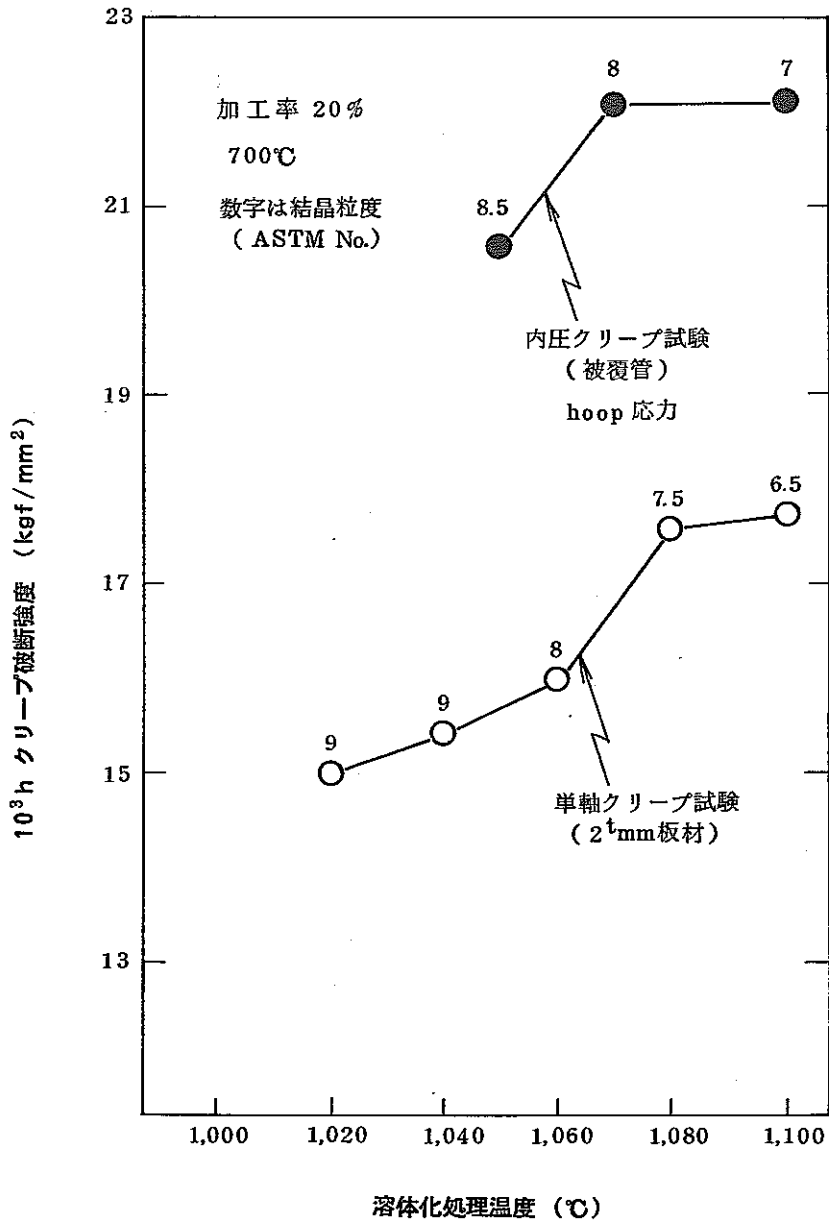


図9 クリープ破断強度に及ぼす溶体化処理温度の影響 (昭和54年度試作材)

## 7. ま と め

溶体化処理温度を 1,050℃～1,110℃まで変化させて、結晶粒度を ASTM No. 8.5～7 に調整した改良 316 鋼被覆管について引張試験，クリープ破断試験，超音波探傷試験を行い，以下の結果を得た。

- 1) クリープ破断強度は溶体化処理温度が 1,070℃以上で飽和する傾向がある。この場合、結晶粒度は ASTM No.8 より粗粒となる。これは板材で検討した結果でもほぼ同様であった。
- 2) 結晶粒度 ASTM No.8 より細粒のものでは超音波探傷は十分可能である。結晶粒度 ASTM No. 7 のものではシャワーエコーのレベルは他のものにくらべ著しく高くなるが、探傷は可能である。しかし、ASTM No.7のものについては、工業的に大量生産される場合にはまだ問題がある。
- 3) 今後の課題として、使用寿命までのクリープ強度に及ぼす溶体化処理温度の影響や、さらに今回検討には含まれていなかったがスウェリング量に及ぼす溶体化処理温度の影響も検討する必要があるものと考えられる。
- 4) 超音波探傷技術については、これ以上改善するのは困難なように思われるので、さらに粗粒側まで探傷できるようにするためには、許容欠陥の見直しが必要と考えられる。



## 第 3 章

住友金属工業(株)で実施された研究成果

## 1. 目 的

従来の 316 鋼では、クリープ強度は粗粒の方が良いが、超音波探傷のためには細粒が望ましいので、結晶粒度は、GS № 6～9 と規定されている。

“もんじゅ”初装荷用に考えている 316 鋼は、微量の Ti, Nb 等の析出物形成元素の添加により、結晶粒度微細化の傾向にある。

この 316 鋼に関し、適性な溶体化処理温度を検討するとともに、超音波探傷技術を確立して、十分な強度を有し、かつ超音波探傷に支障のない結晶粒度規定の基礎データを得る。

## 2. 研究内容

- (a) 結晶粒度調整の熱処理
- (b) 超音波試験
- (c) 内圧クリープ試験
- (d) 結晶粒度測定
- (e) 引張試験

## 3. 供 試 材

### 3.1 供試材鋼種

SUS316 の微量 Ti, Nb 添加鋼で最終冷間加工度 20% の製品である。

### 3.2 供試材詳細

供試材寸法は  $6.5\text{ mm}\phi \times 0.47\text{ mm t}$  である。最終製品の目標結晶粒度 9.5, 8.5, 7.5 をえるために、溶体化温度を 1070, 1090, 1100 °C と 3 種の温度で溶体化処理した。

供試材の化学成分を表 1 に示す。供試材の結晶粒度と溶体化条件を表 2 に示す。また、写真 1.2 に代表的な顕微鏡組織を示す。

### 3.3 試 験 片

#### (1) 高温引張試験片

長さ 500 mm の試験片により実施した。

#### (2) 内圧クリープ破断試験片

内圧クリープ破断試験片の形状を図 1 に示す。

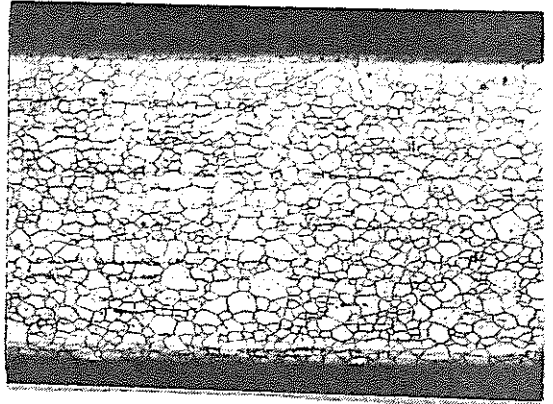
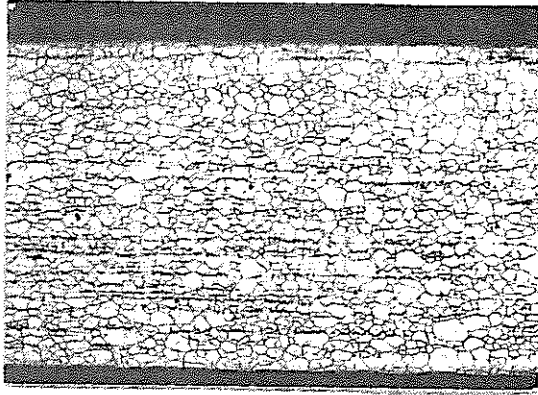
表 1 供試材の化学成分

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Ti	Nb	Cu	A	Zr	Al	V	Co	B	N	O
0.049	0.86	1.69	0.029	0.005	13.75	16.25	2.50	0.098	0.072	0.01	<0.002	<0.005	0.039	0.001	0.009	0.0042	0.0081	0.0010

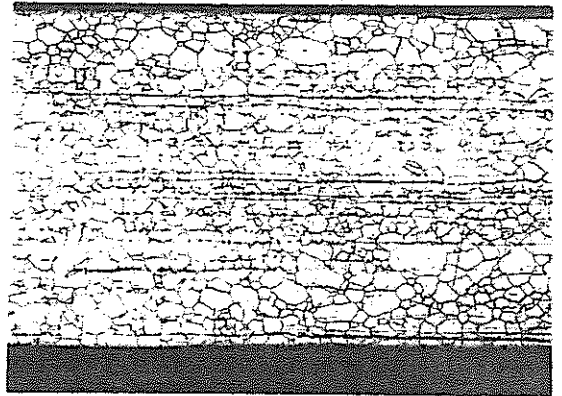
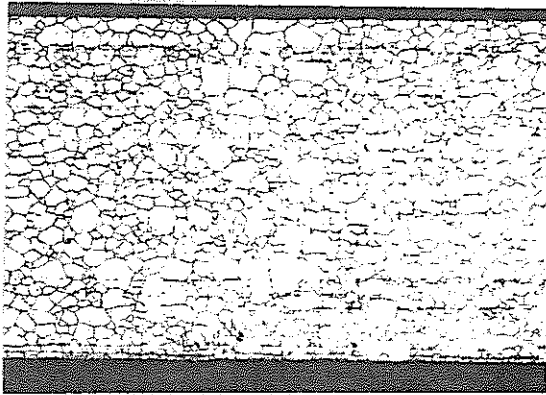
表 2 供試材の結晶粒度と溶体化条件

目標結晶粒度	結晶粒度 (ASTM%)		HT 条件
	軸 方 向	周 方 向	
9.5	9.3 (9.5~9)	9.5 (9~10)	1070°C×1分
	9.3 (9.5~9)	9.5 (9~10)	
8.5	8.3 (8.5~8)	8.6 (9~8)	1090°C×30秒
	8.3 (8.5~8)	8.7 (8.5~9)	
7.5	7.2 (7~7.5)	7.7 (8~7.5)	1100°C×30秒
	7.2 (7~7.5)	7.6 (7.5~8)	

9



8



7

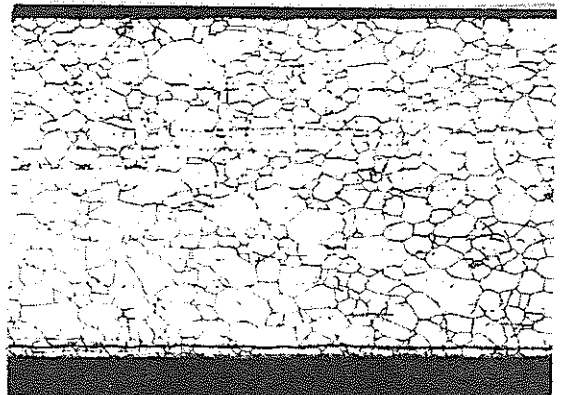
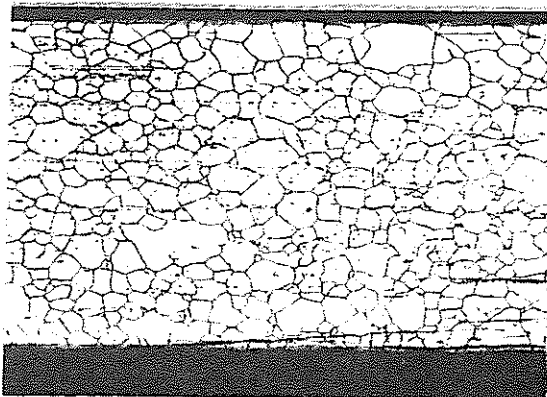
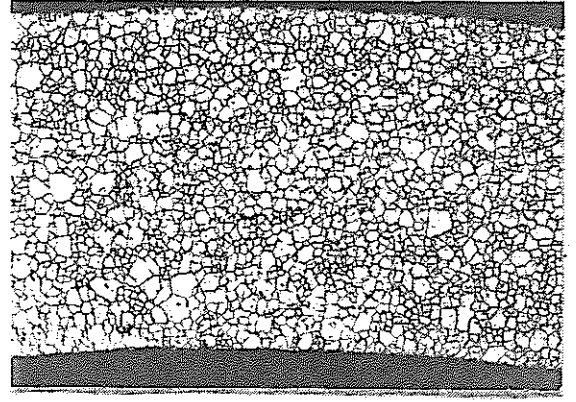
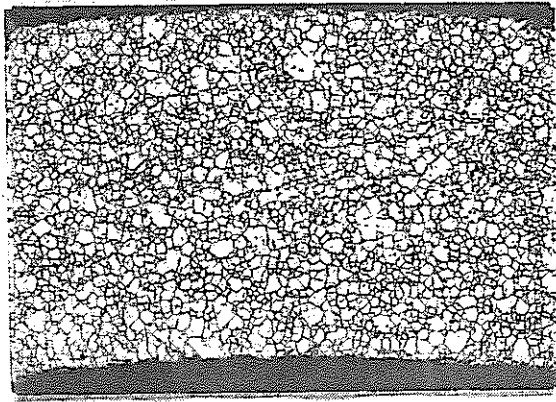
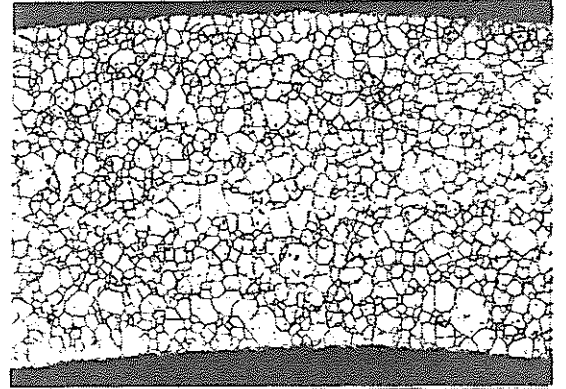
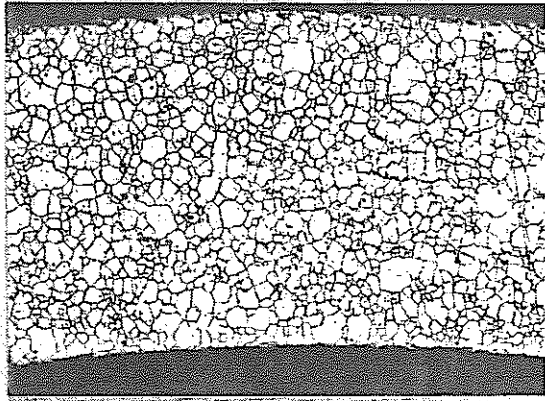


写真1 結晶粒度(軸方向) ×100

9



8



7

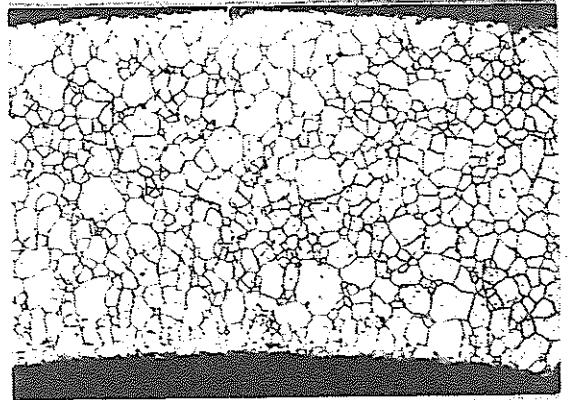
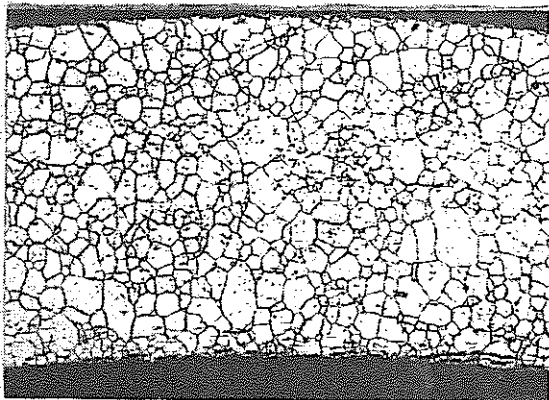


写真2 結晶粒度（周方向） ×100

## 4. 試験方法

### 4.1 高温引張試験

本試験で使用した高温引張試験装置は、電子管自動平衡式万能試験機（荷重容量10 ton）であり、油圧により荷重を負荷するものであり、ひずみ速度の制御は、耐力まで自動制御、耐力以降はストレンペーサにより手動で制御した。

試験方法は500mmの長さの試験片を使用し、次の条件でJISG0567-1978により試験した。

耐力まで：GL50mmでDTFにより伸び測定

引張速度：0.3%/min

耐力以降：GL100mmと仮定して

引張速度7.5mm/minを目標とした。

### 4.2 内圧クリープ破断試験

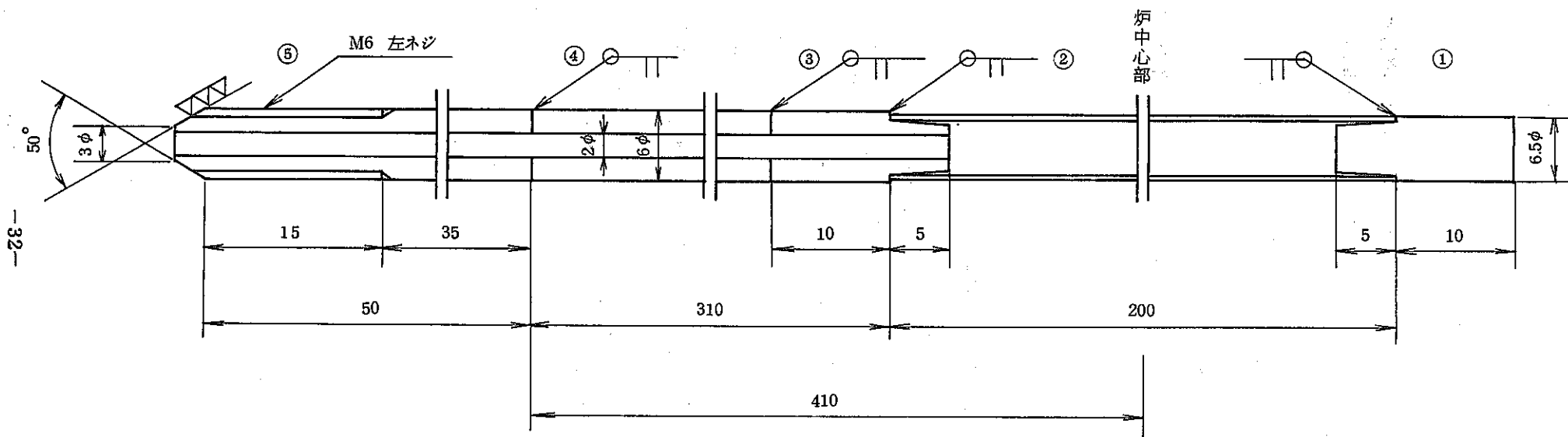
図2に試験装置の配管系統図を示す。常用試験圧力0~500kg/cm<sup>2</sup>、試験温度350~800°Cで加熱装置、圧力調整装置および温度調節装置等から構成されている。

試験機は横型シングルタイプと縦型マルチプルタイプ（4連式、圧力は各々独立に設定可能）を使用した。

加圧装置は空気圧により加圧ポンプを作動させるもので、水を圧力媒体として試験圧力を負荷する。途中、蓄圧槽内において、圧力媒体を水からアルゴンガスに変換し加熱炉中の試験片に負荷する。

加熱装置は管状抵抗炉および温度調節装置よりなっている。試験片は図1に示すものを使用した。

試験片温度はPR熱電対を用いた。また、外雰囲気は大気とした。その他の試験方法は高速炉燃料被覆管の内圧クリープ破断試験要領（N25280-02）により行った。



- |   |           |        |
|---|-----------|--------|
| ① | 端 栓       | SUS304 |
| ② | 被 覆 管     | SUS316 |
| ③ | 接 続 用 端   | SUS304 |
| ④ | 接 続 用 導 管 | SUS304 |
| ⑤ | ジョイント用プラグ | SUS304 |

図1 内圧クリープ試験片形状 (2/1)

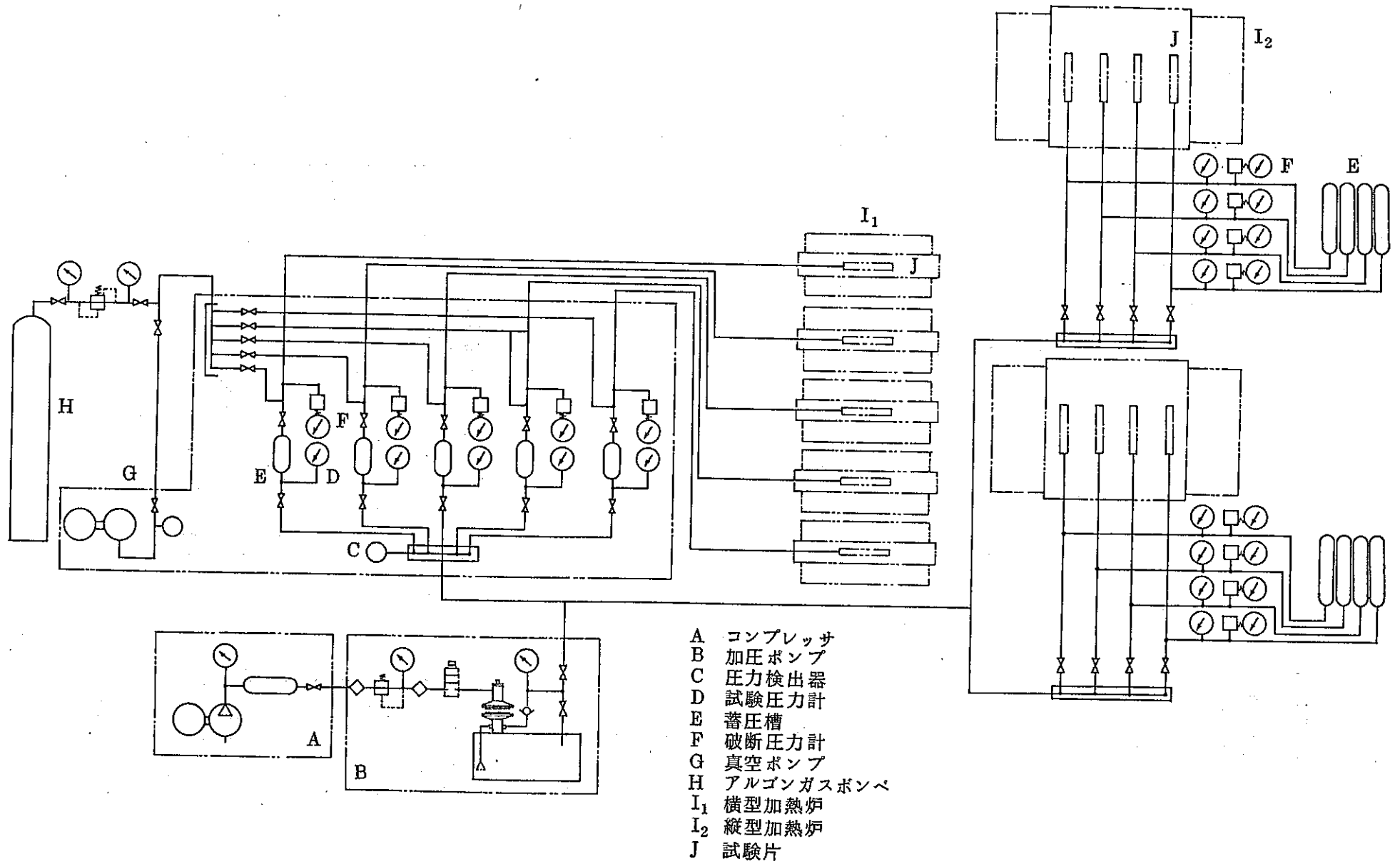


図2 内圧クリープ試験装置



#### 4.3 超音波探傷試験

##### 4.3.1 使用装置

(1) 探傷器

型 式 (米) ソニック社製 Mark IV

(2) 探触子

(米) ハリソニック社製 超音波探触子

周 波 数 10 MHz

公称焦点距離 7.6 mm

公称ビーム径 0.4 mm

材 質 ニオブ酸鉛

(3) 搬送装置

型 式 クラウトクレーマ社製 RDR 25

##### 4.3.2 探傷条件

(1) 探傷周波数 10 MHz

(2) パルス繰返し数 10 kHz

(3) 管回転速度 3,000 rpm

(4) ラップ率 50 %

(5) 設定条件 図 3 に示す。

表 3. 設定条件

STB №	軸方向探傷		周方向探傷	
	変位量(mm)	ゲート位置	入射角(度)	ゲート位置
S-7	1.25	ID <sub>2</sub> , OD <sub>2</sub>	22	ID <sub>2</sub> , OD <sub>2</sub>
S-8	1.22	"	22	"
S-9	1.29	"	21	"

但し、S-7、S-8、S-9は動燃事業団殿より拝借の標準試験片(もんじゅサイズ)である。

## 5. 試験結果

### 5.1 引張試験結果

常温および 650°C 引張試験結果を表 4 に示す。

表 4 供試鋼の引張性質

目標結晶粒度	RT引張性質			650°C引張性質		
	TS	YS	EL	TS	YS	EL
9.5	80.9	72.1	17.4	54.1	48.4	11.2
	79.6	72.4	18.0	54.9	49.2	12.0
8.5	77.7	72.1	18.4	53.9	49.0	10.0
	77.7	71.7	18.0	53.0	48.5	10.4
7.5	76.5	70.6	21.8	53.2	47.6	10.6
	76.5	70.5	22.0	53.0	47.8	10.2
規 格	≥ 75	≥ 60	≥ 10	≥ 40	≥ 30	≥ 7

いずれも規格値は十分満足するものである。また、11次クリープ委託試験で報告の同種の被覆管の引張性質とほぼ同等である（図 3）。

### 5.2 内圧クリープ破断試験結果

700°C および 750°C の内圧クリープ破断試験結果を図 4 に示す。1090°, 1100°C で溶体化処理した管は11次委託試験での内圧クリープ破断強度と同等以上の強度である。1070°C 溶体化材（GS 9.5）の強度は11次試験よりやや低めであるが、Ti, Nbなどを添加しないプレーンな 316 被覆管について実施した 7 次クリープ試験での強度にくらべて約 50% 程度強度が高い。また、1070°C 溶体化材は 9 次委託試験材と同等の強度である。第 7 次委託の強度をベースに考えるならば、本研究に用いた微量 Ti および Nb を添加した鋼は 1070°C 溶体化処理（即ち結晶粒度 9.5）でも十分な強度を有している。破断強度が数 10% も増加する原因として従来説明されたような  $M_{23}C_6$  の微細析出のみでは不十分であると考えられる。その原因として有力であると考えられるのは微細 TiC の析出物による転位ピンニング効果である（写真 3）。数 10 Å 程度の TiC が微細に析出することにより強度を高めているものと考えられる。

### 5.3 超音波探傷試験結果

超音波探傷試験には、表5に示す供試管を用いた。

表5 供試管

管 マ ー ク	平均粒度 (ASTM №)*		目標結晶粒度
	T 面	L 面	
7-1, 7-3, 7-5, 7-6	7.7	7.2	7.5
8-2, 8-3, 8-4, 8-5	8.5	8.3	8.5
9-1, 9-2, 9-3, 9-4	9.3	9.3	9.5

\* 住友金属測定値。

探傷試験結果の要約を表6に示す。また、附録に探傷チャートを一括して示す。超音波探傷試験結果をまとめると、

- (1) 粒度 7.5 の材料については、シャワーレベルが 100% 以上になり、現状では探傷は困難である。
- (2) 粒度 8.5, 9.5 の材料については、シャワーレベルが低く、十分探傷可能である。
- (3) 一部の管に管の長手方向でシャワーレベルが異なるものが認められ、今後検討を要する。

表6 探傷結果 (シャワーレベル)\*

目標結晶粒度	探傷方向	
	周 方 向	軸 方 向
7.5	111 %	110 %
8.5	22 %	38 %
9.5	18 %	8 %

\* ① 数値はいずれも供試材 4 本の平均値 (エコー高さのピーク値をもってシャワーレベルと判定)。

② 各測定ごとの STB ノッチ高さを 100 として、試験材シャワーエコー高さを測定。

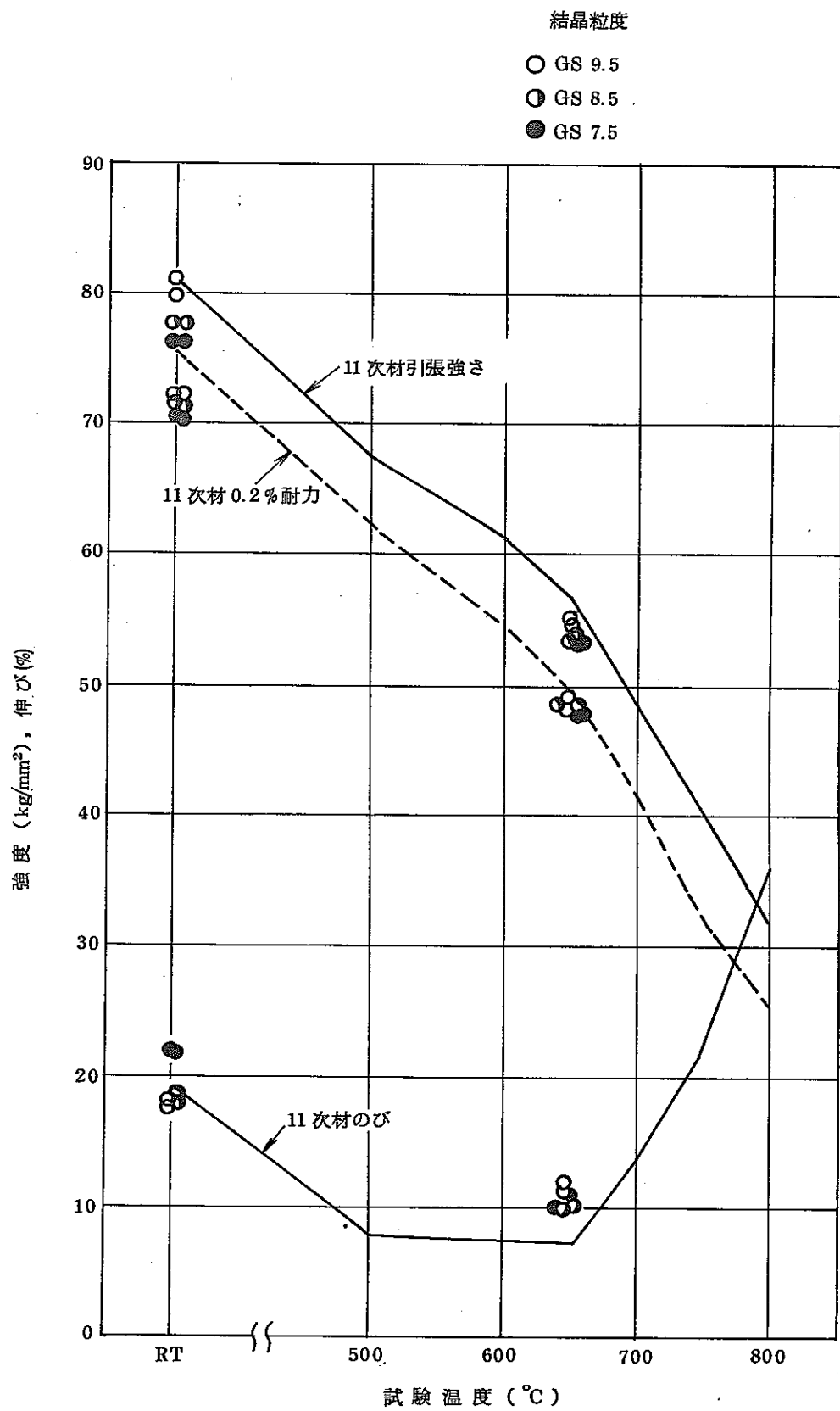


図3 共研材の引張性質

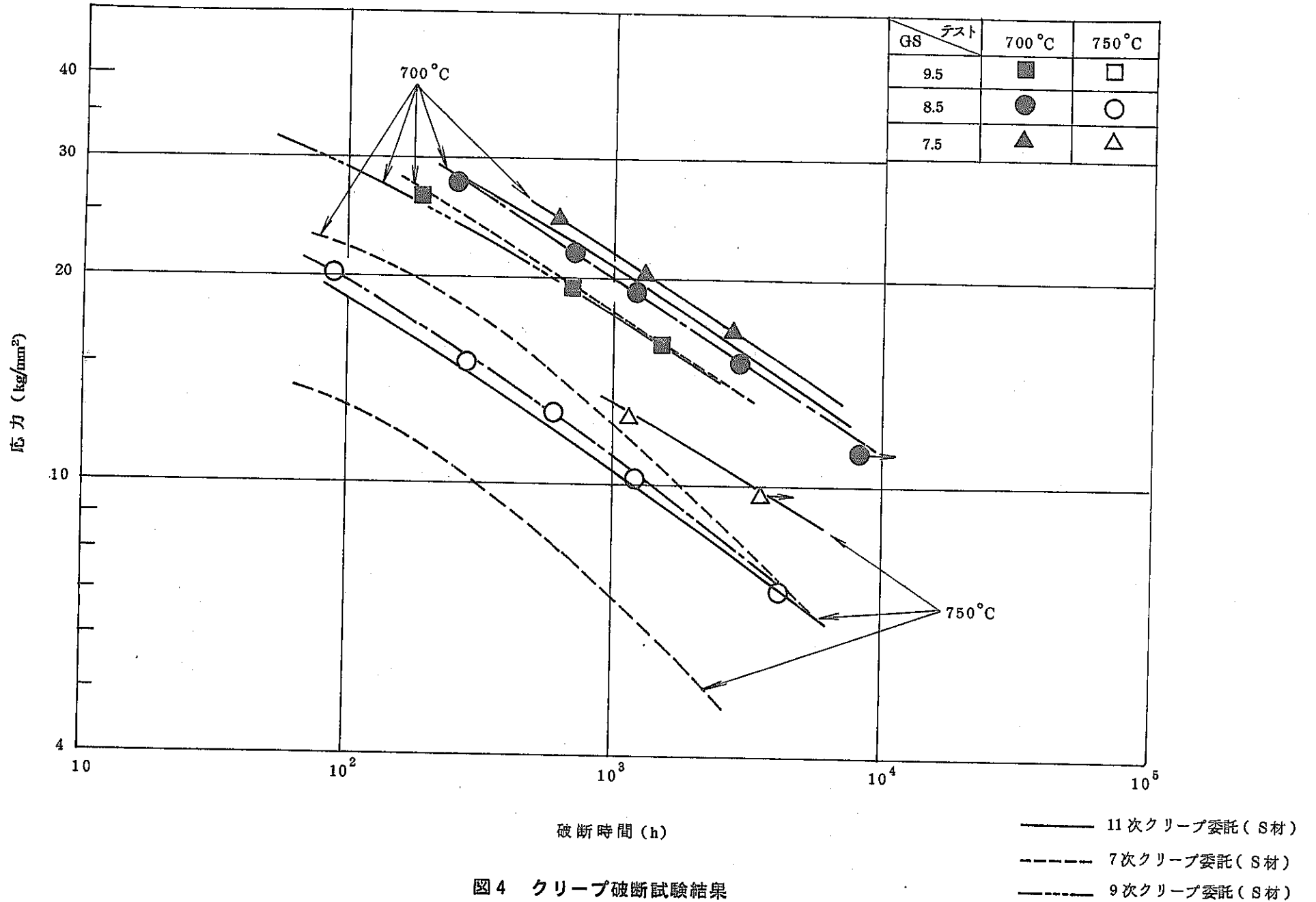
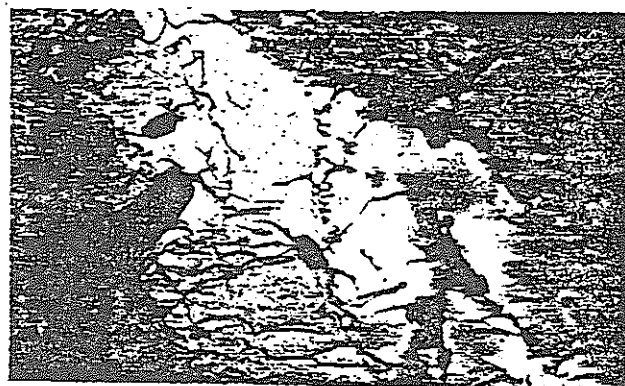


図4 クリープ破断試験結果

鋼管の化学成分

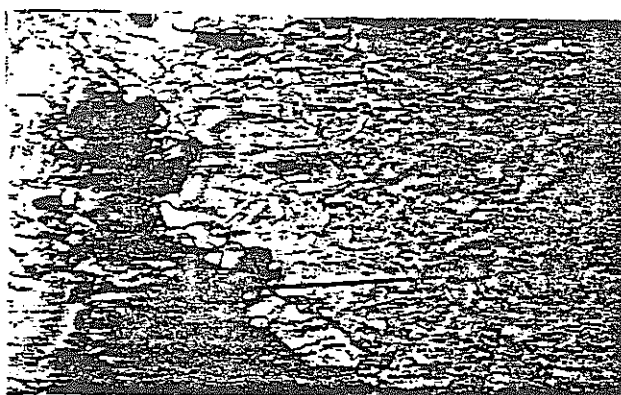
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	No	Ti	Nb	Zr	B
C	0.055	0.90	1.73	0.025	0.002	16.35	13.83	2.53	0.057	—	—	0.0030
D	0.050	0.91	1.70	0.021	0.003	16.55	13.69	2.48	0.070	0.067	—	0.0037

C鋼



700 °C × 1233.5 h 破断

D鋼



750 °C × 4539.5 h 破断

0.5 μ

写真3 C, D鋼のクリープ材にみられる微細析出物(～50 Å)

## 6. 検 討

適正熱処理条件，適正結晶粒度規定を定めるための一つの基準としては図5に示す316燃料被覆管の設定強度（図中①で示す）またはもんじゅの目標値と考えられる， $675^{\circ}\text{C} \times 18,000 \text{ h}$  大気中で  $\sigma_{\text{rupture}} > 10 \text{ kg/mm}^2$ （図中②で示す）がある。

仮りに①，②の高温強度を満足することを前提とすれば，少なくとも9次材の高温強度を有するものであればよいと考えられる。

9次S材は $1040^{\circ}\text{C}$  溶体化材であり，このときの $700^{\circ}\text{C} \times 10^3 \text{ h}$  クリープ破断強度は $17 \text{ kg/mm}^2$  である（図6）。図6に示すように比較すると， $700^{\circ}\text{C} \times 10^3 \text{ h}$  で $17 \text{ kg/mm}^2$  以上を目標とするには今回の材料では最低 $1060^{\circ}\text{C}$  以上で溶体化すればよいと考えられる。

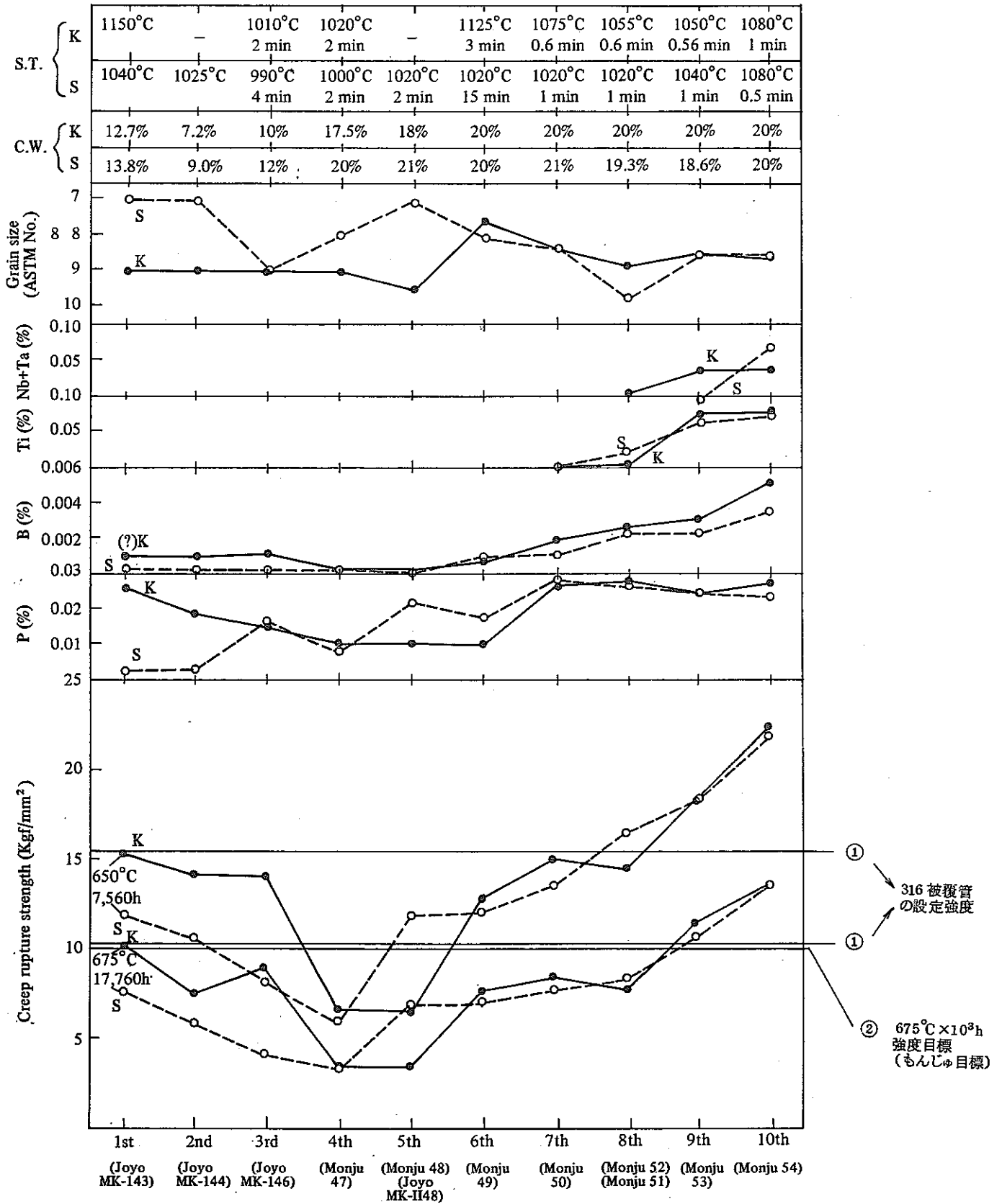


Fig. 5 Creep rupture strength and metallurgical conditions of claddings under the service conditions in Monju and Joyo MK-II cores, conducted as first to ninth creep test programs



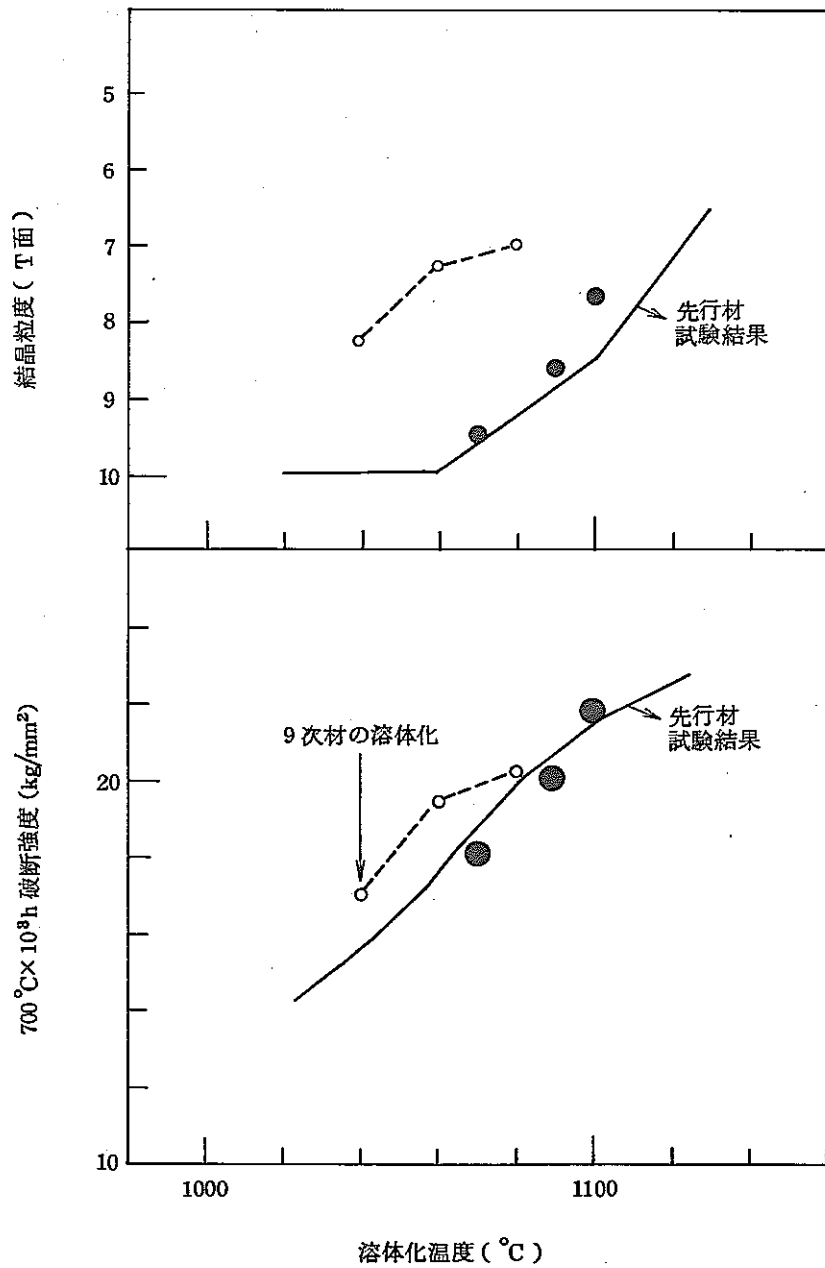


図6 溶体化温度と内圧クリープ破断強度 (9次材との比較)

—— 11次材先行テスト  
 - - - 9次材先行テスト

## 7. 結 論

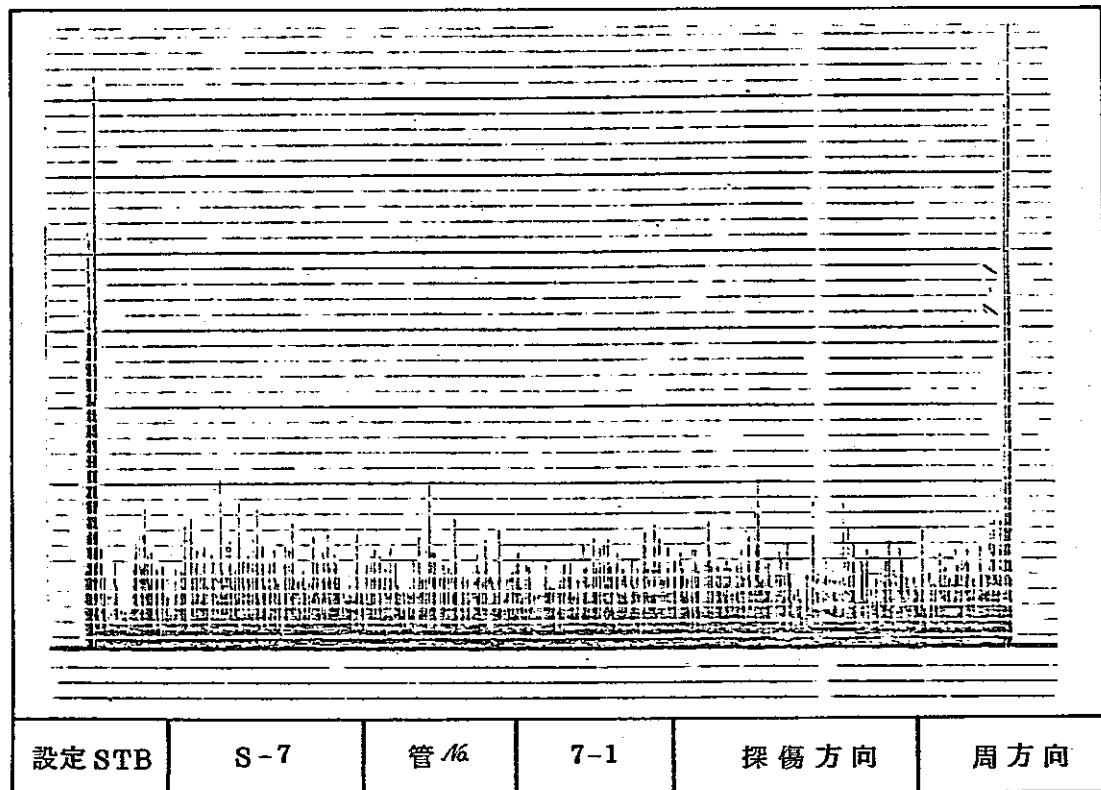
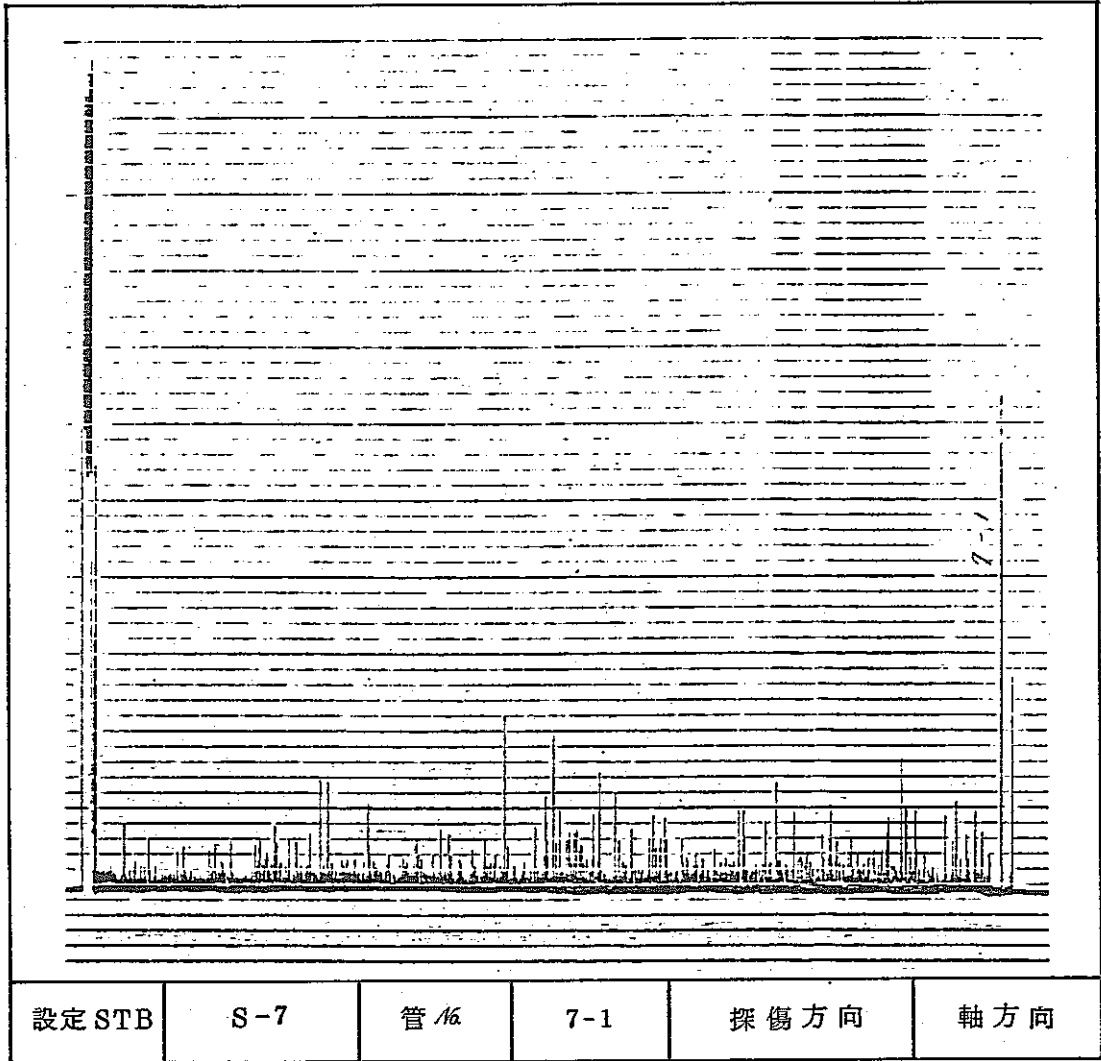
以上、溶体化処理条件、結晶粒度を調整した燃料被覆管を用いて引張試験、内圧クリープ破断試験、超音波シャワーエコー試験を実施して得られた結果は以下のとおりである。

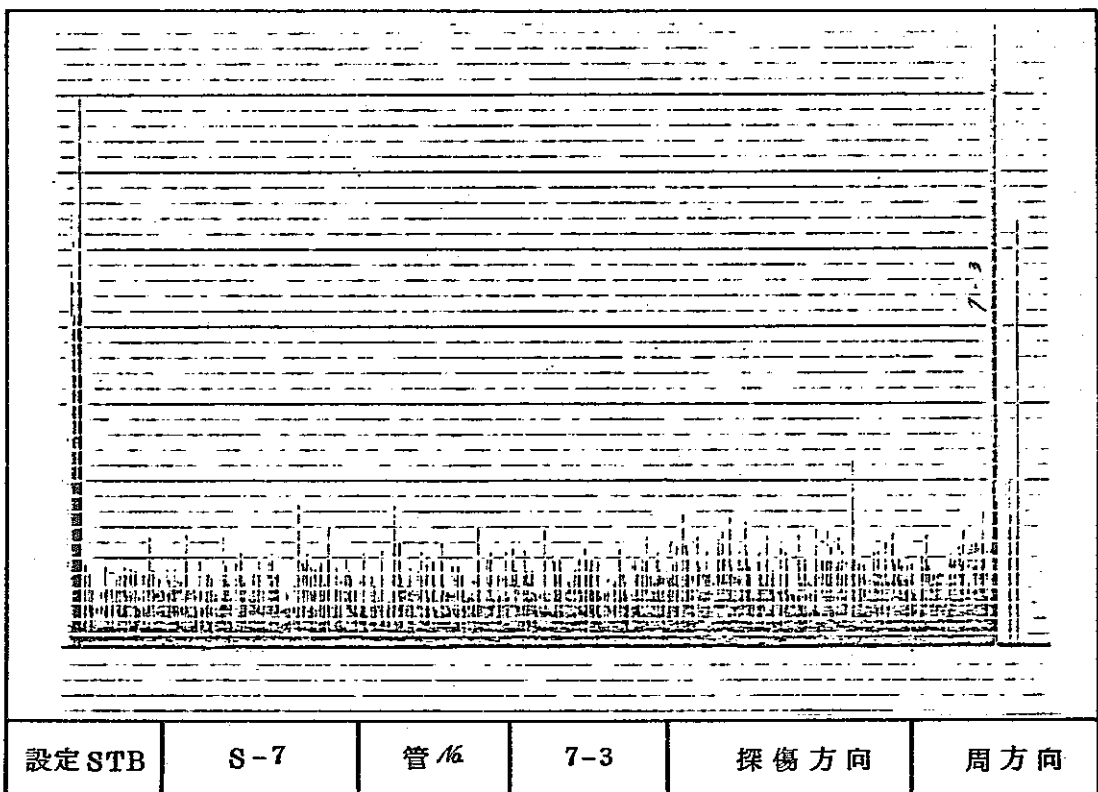
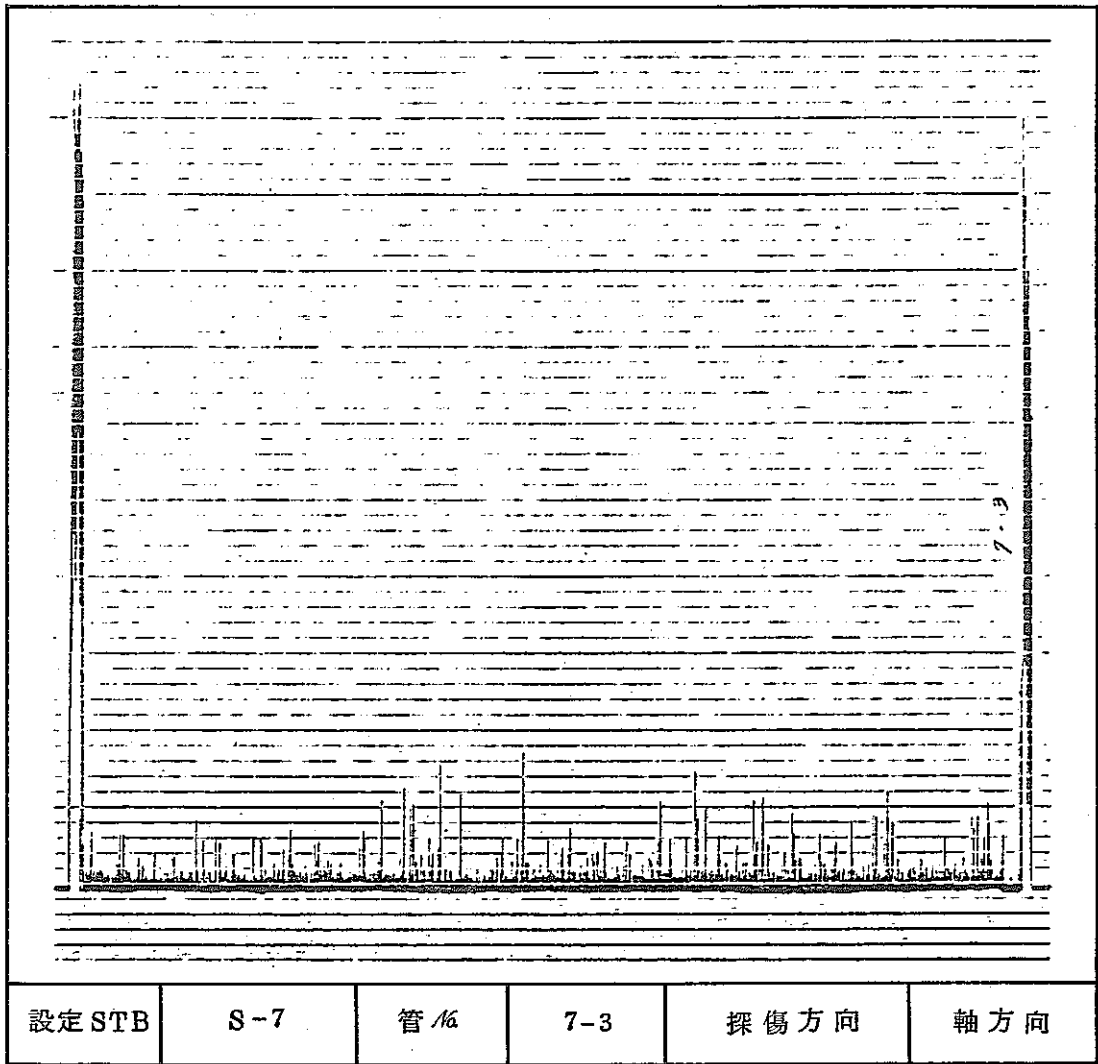
- (1) クリープ破断強度は、GS 8.5 より粗粒管が同系統の鋼について行われた第 11 次クリープ試験の強度と同等であった。
- (2) GS 9.5 の細粒管の強度は、第 11 次材より若干低めであるが、第 7 次材に比べると 50% 程度クリープ強度が高い。しかし、9 次材と同等である。
- (3) 強度の観点からは、もんじゅ目標強度のベースと考えれば、改良 316 鋼の結晶粒度は 9.5 でも十分な強度を有している。
- (4) 超音波シャワーエコーは、現状の技術レベルでは結晶粒度 7.5 の管で 100% を超え、探傷に問題がある。GS 8.5 の管ではシャワーエコーレベルは許容しうる範囲内にある。GS 9.5 の管ではシャワーエコーは低く探傷上問題はない。
- (5) 性能と品質管理の両立を図るためには超音波基準片の合理的な検討が必要と考えられる。そのためには各国（仏，米，独，英）の実情把握，設計上許容しうる欠陥長さの評価などの検討を要するものと思われる。
- (6) クリープ強度は、溶体化温度が一定以上になると飽和する傾向があり、強度からみると、一定以上溶体化温度を上げてても効果が少ない。溶体化温度がスウェリングに有効であるかどうかを今後検討を行う必要があると思われる。

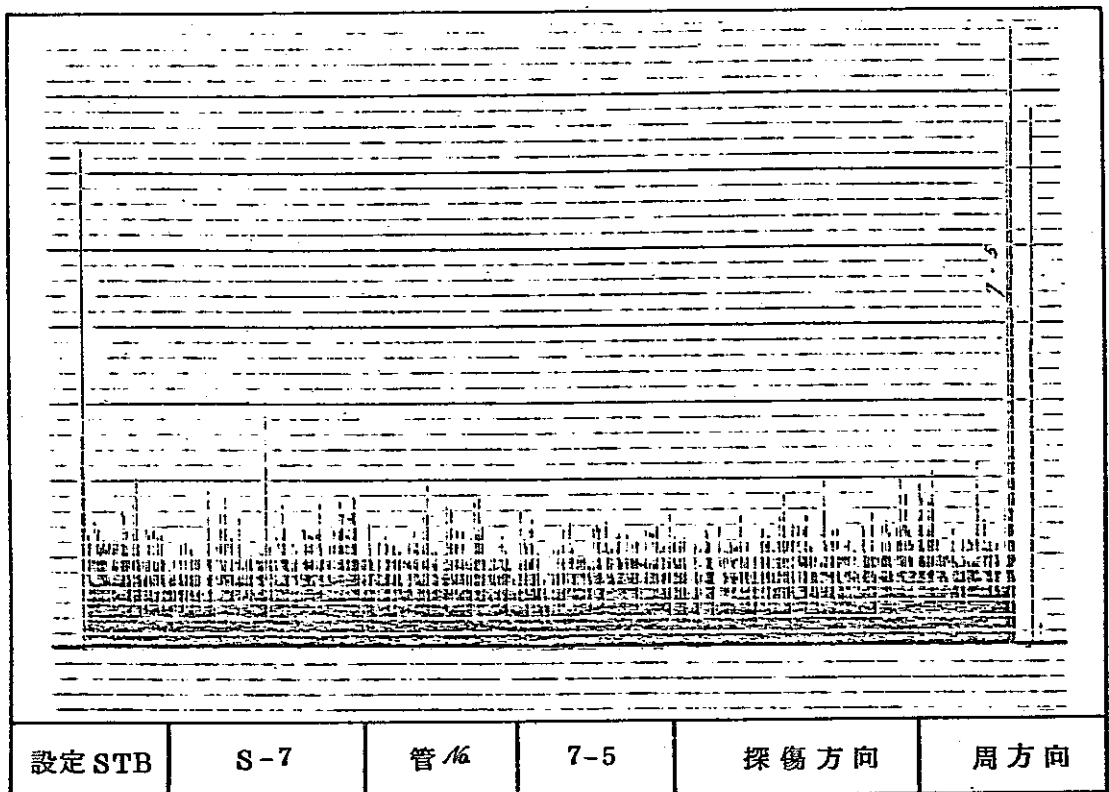
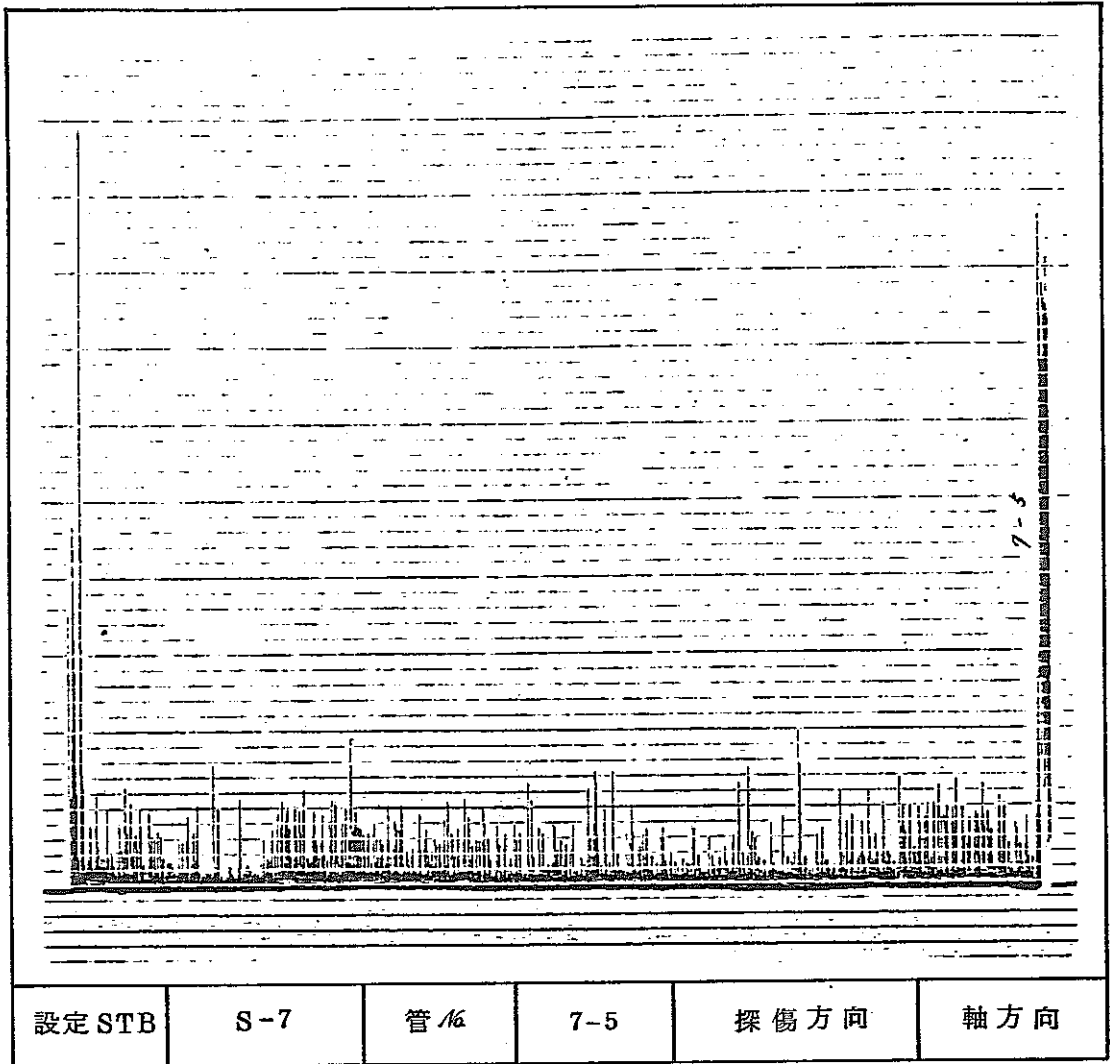
附 録

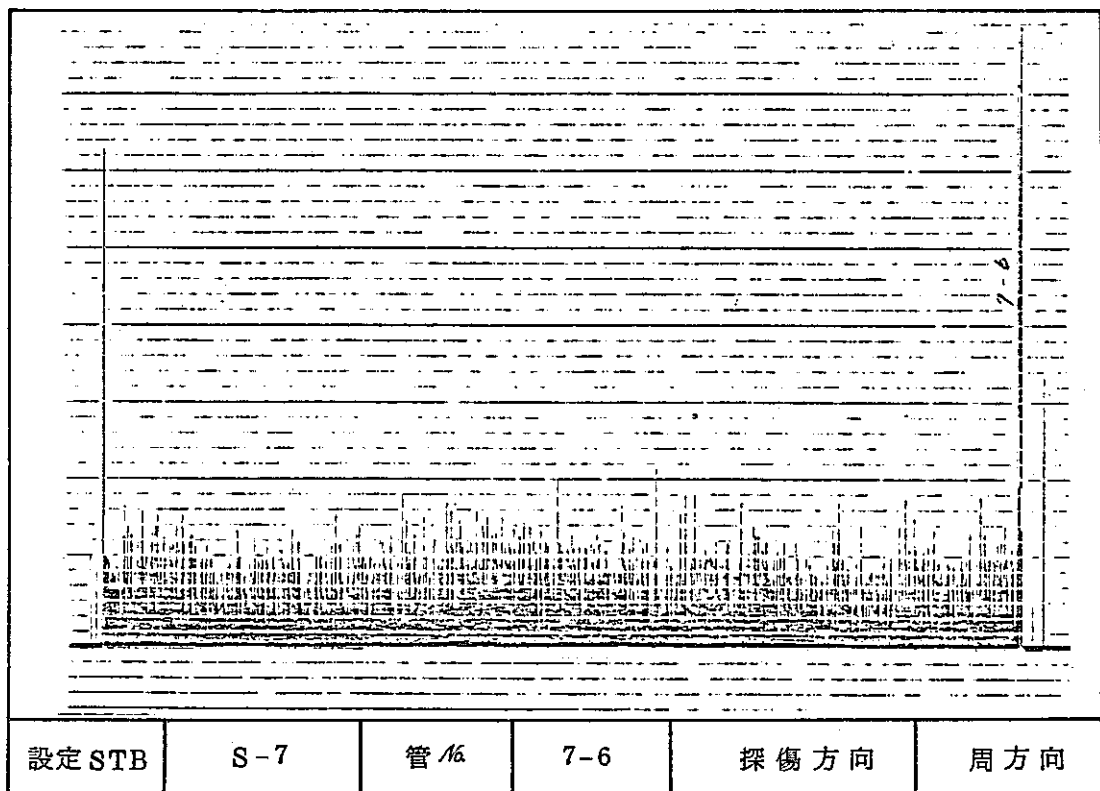
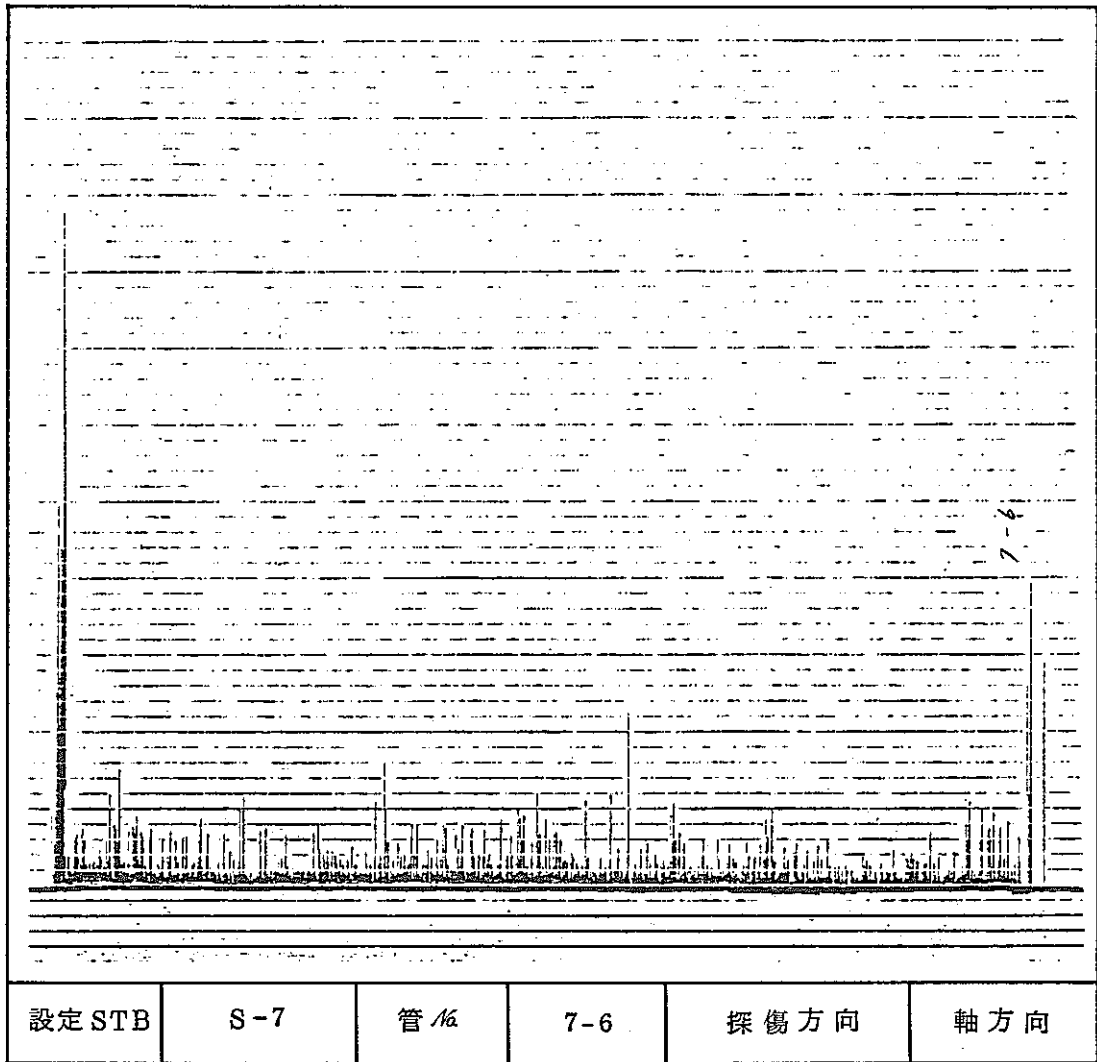
超音波探傷チャート

	START	END
軸 方 向 探 傷		
周 方 向 探 傷		



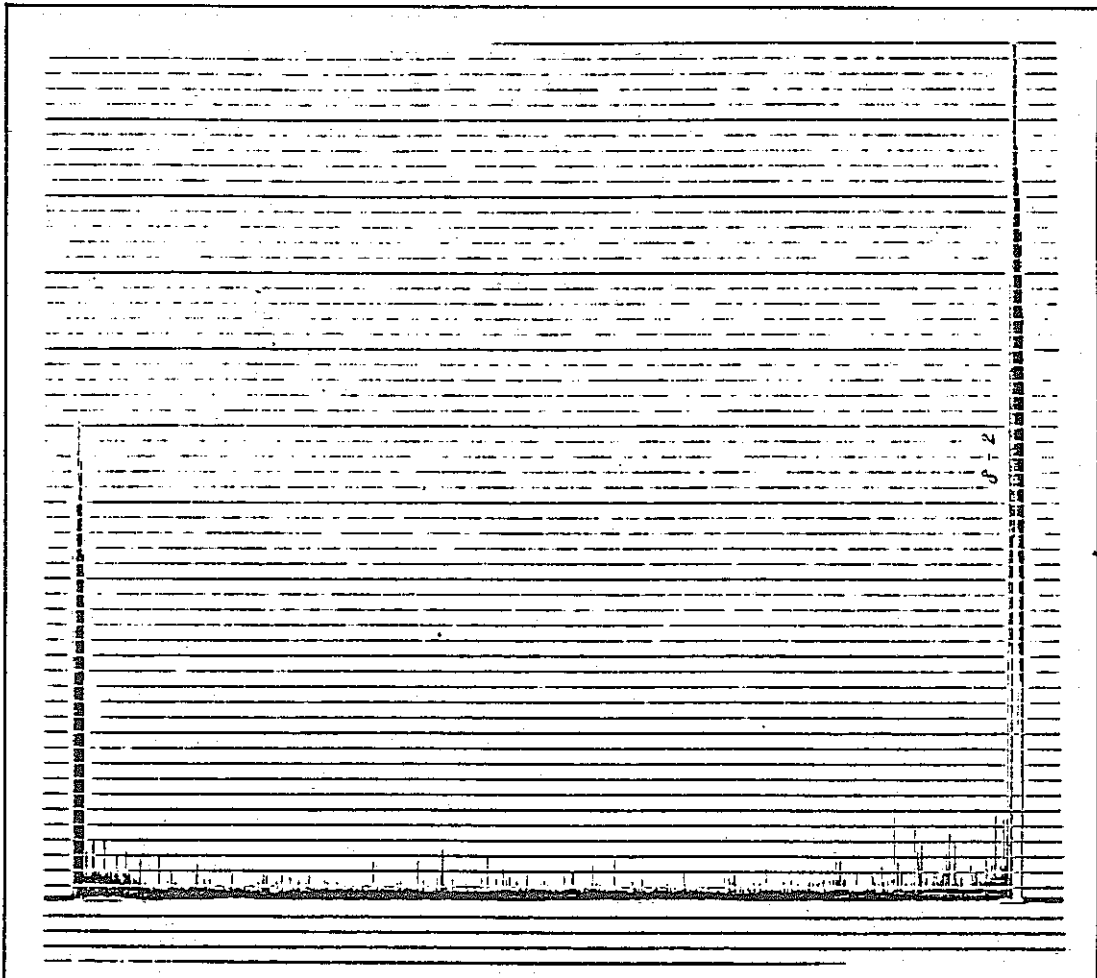




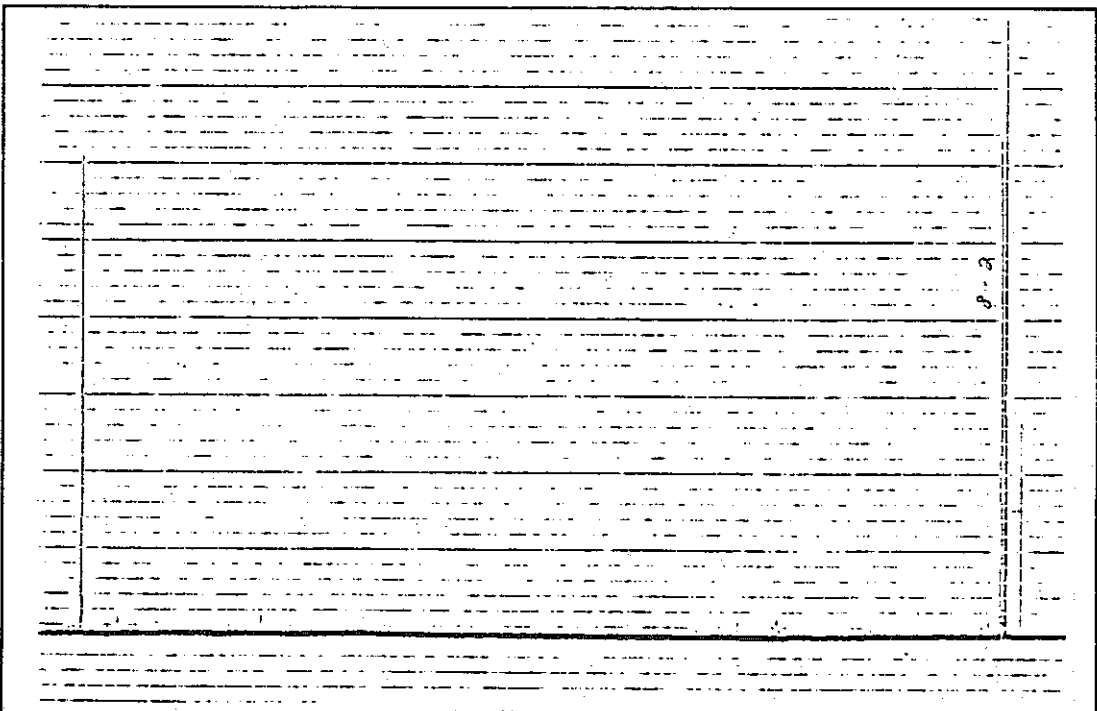




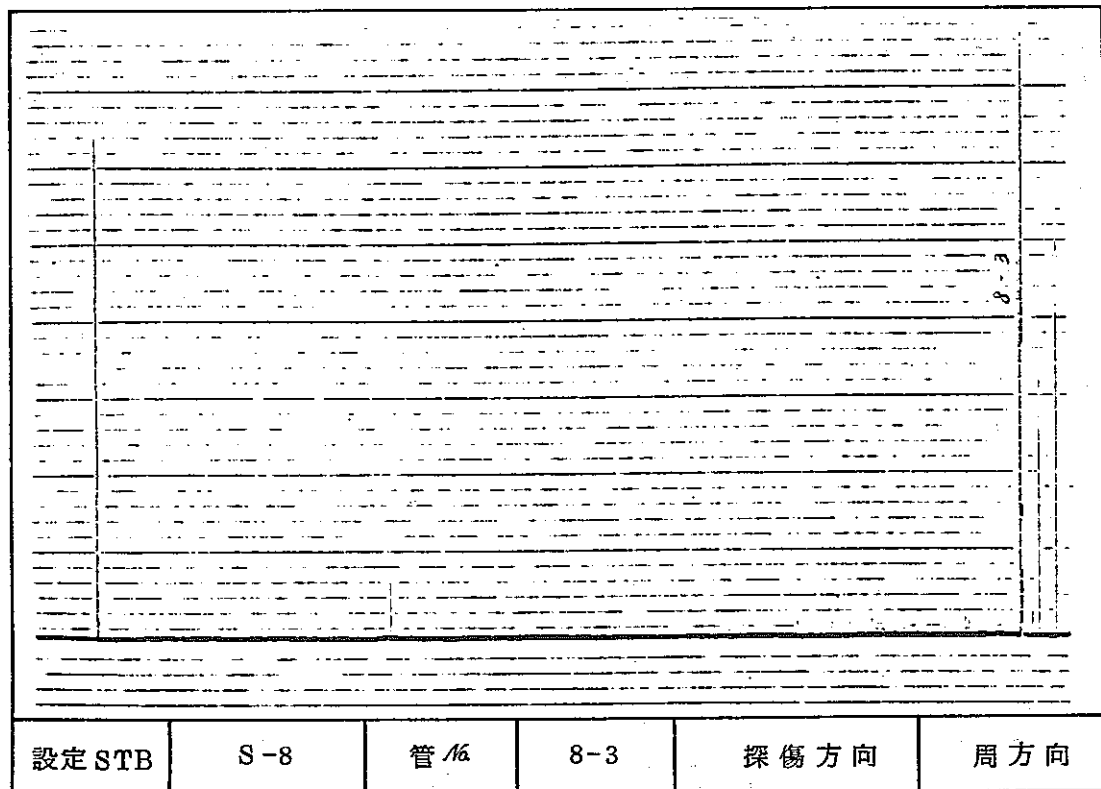
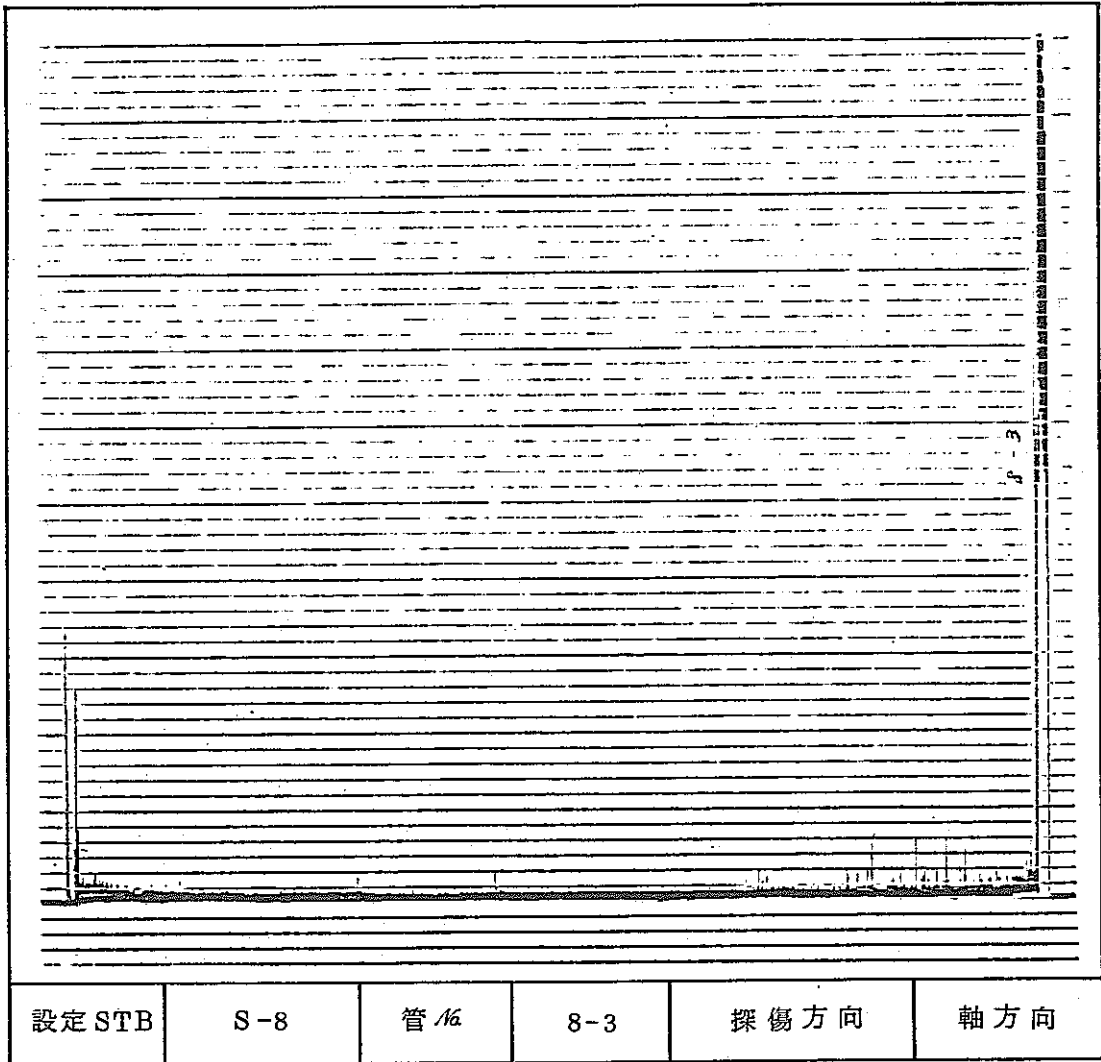
	START	END
軸 方 向 探 傷		
周 方 向 探 傷		

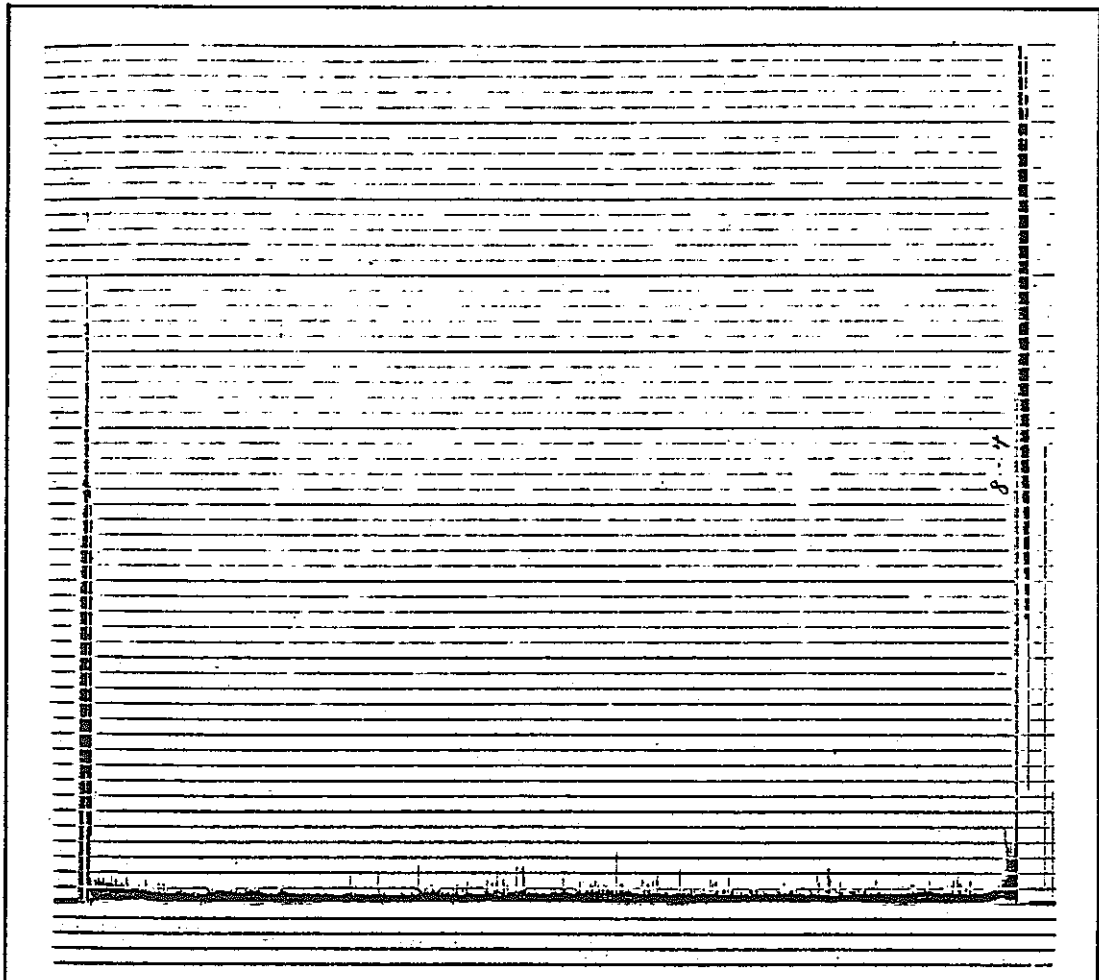


設定 STB	S-8	管 1/6	8-2	探傷方向	軸方向
--------	-----	-------	-----	------	-----

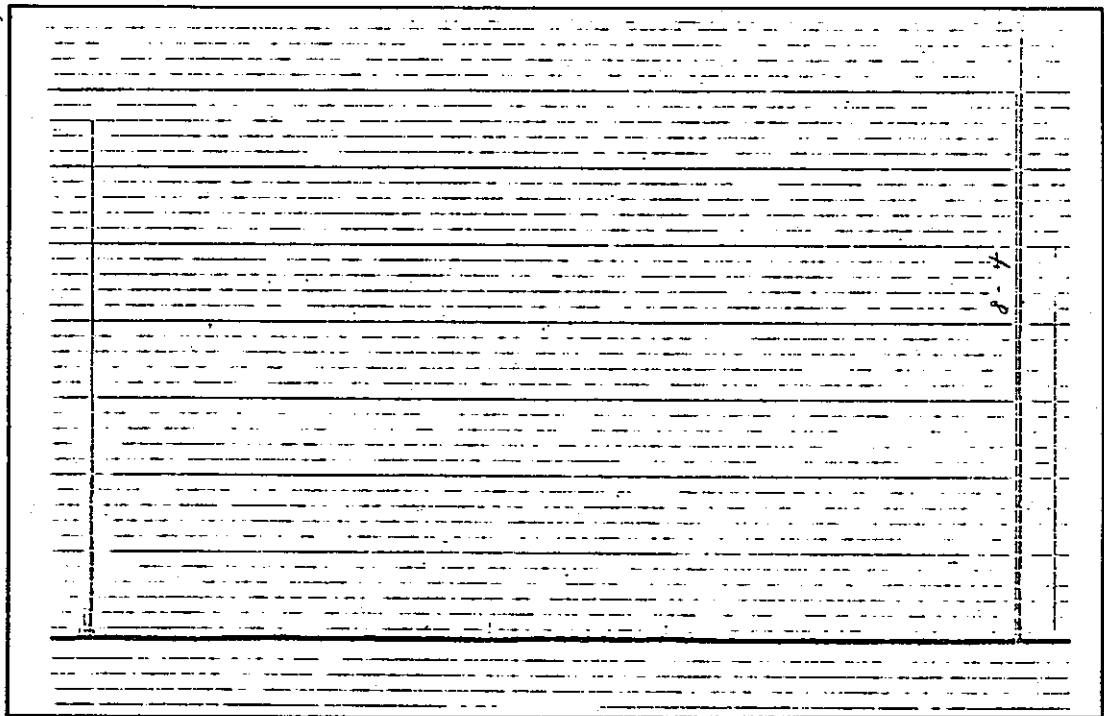


設定 STB	S-8	管 1/6	8-2	探傷方向	周方向
--------	-----	-------	-----	------	-----

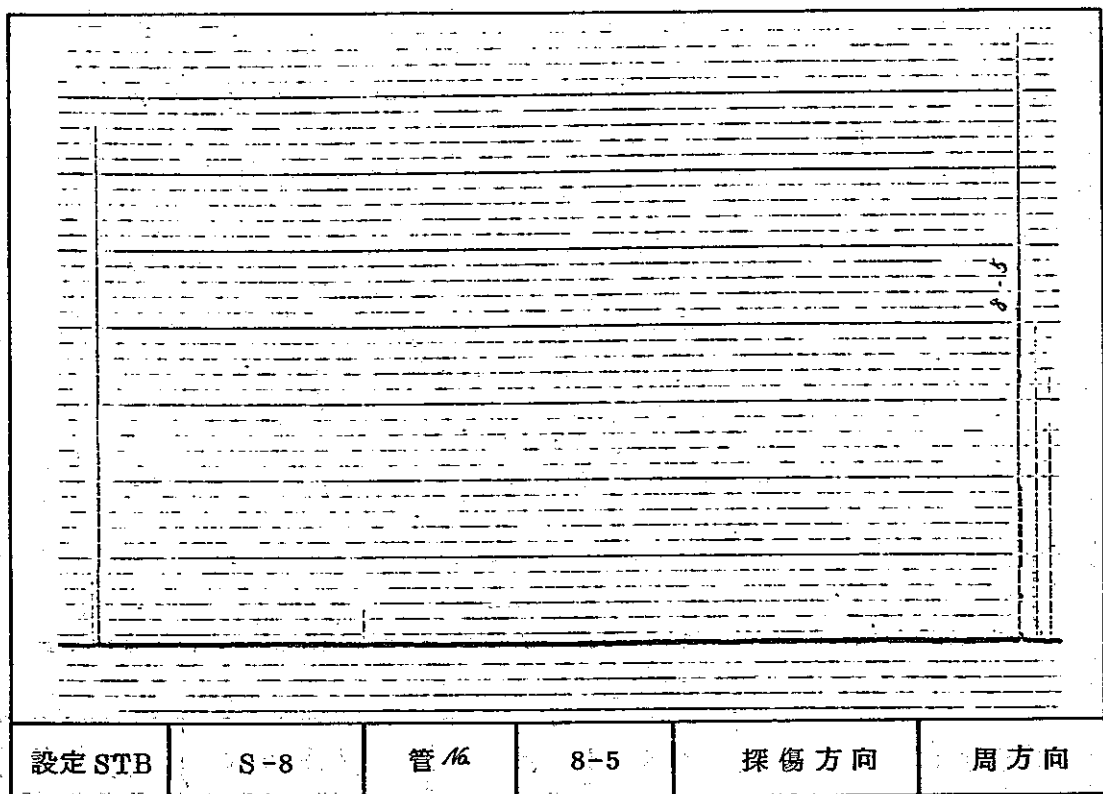
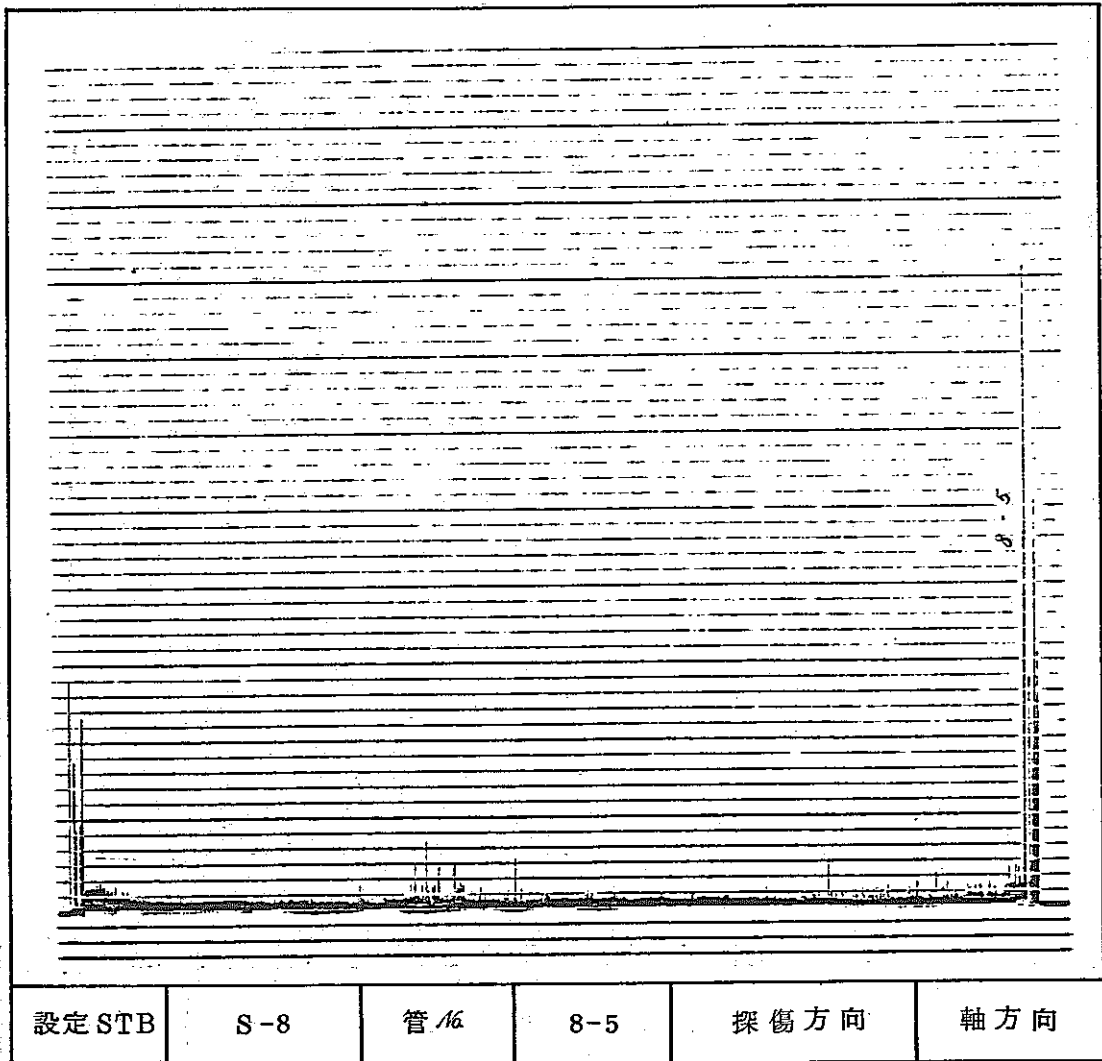




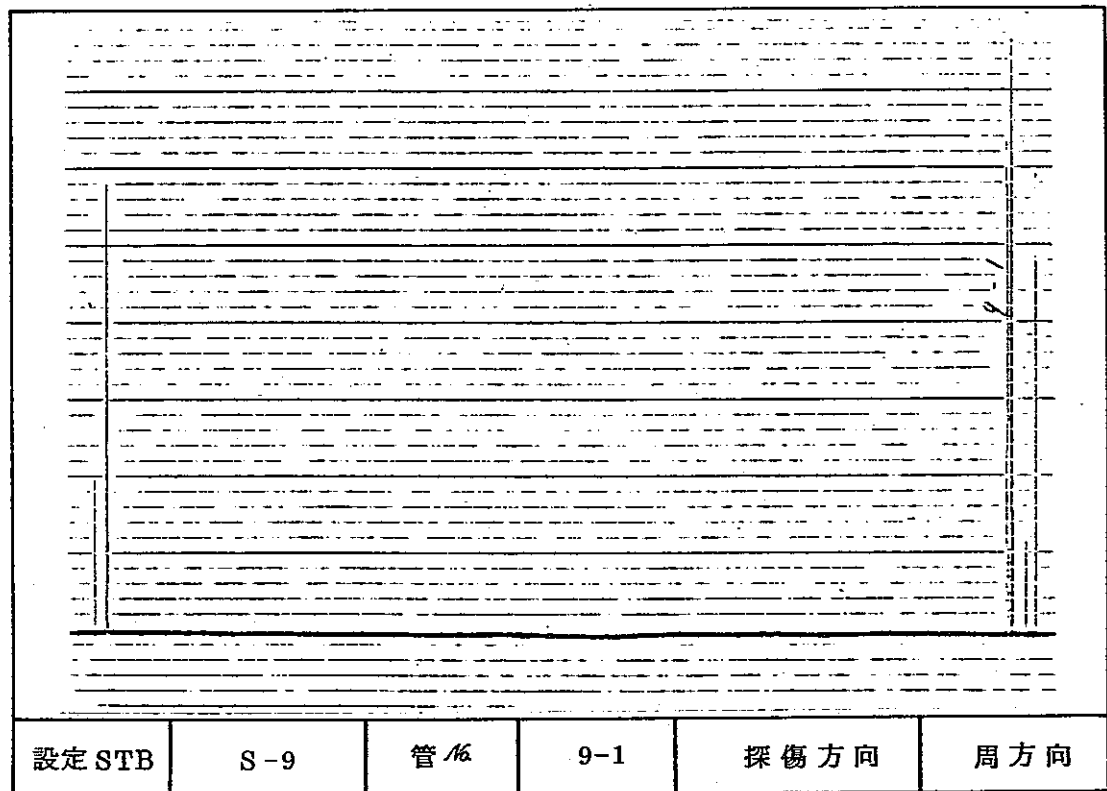
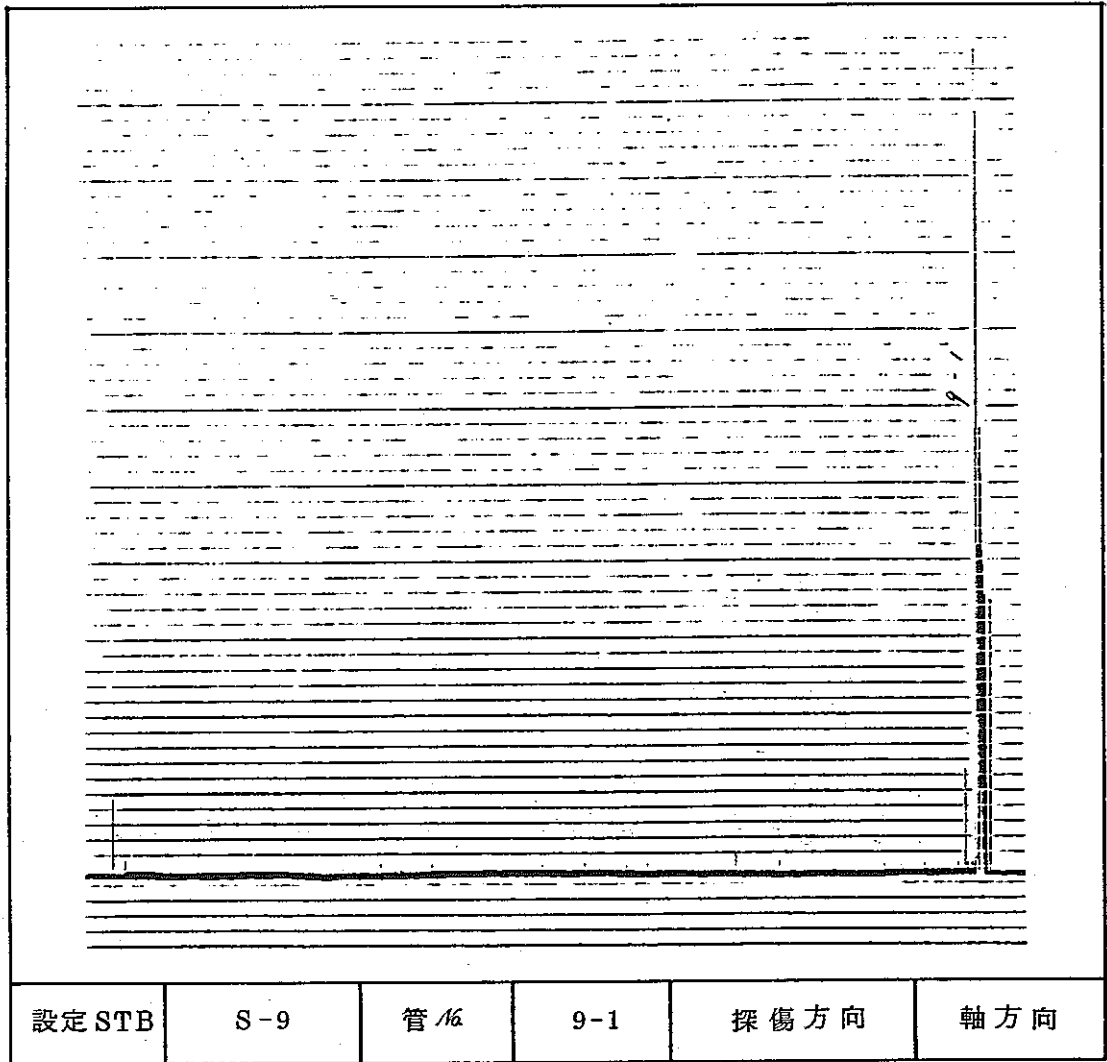
設定 STB	S-8	管 16	8-4	探傷方向	軸方向
--------	-----	------	-----	------	-----

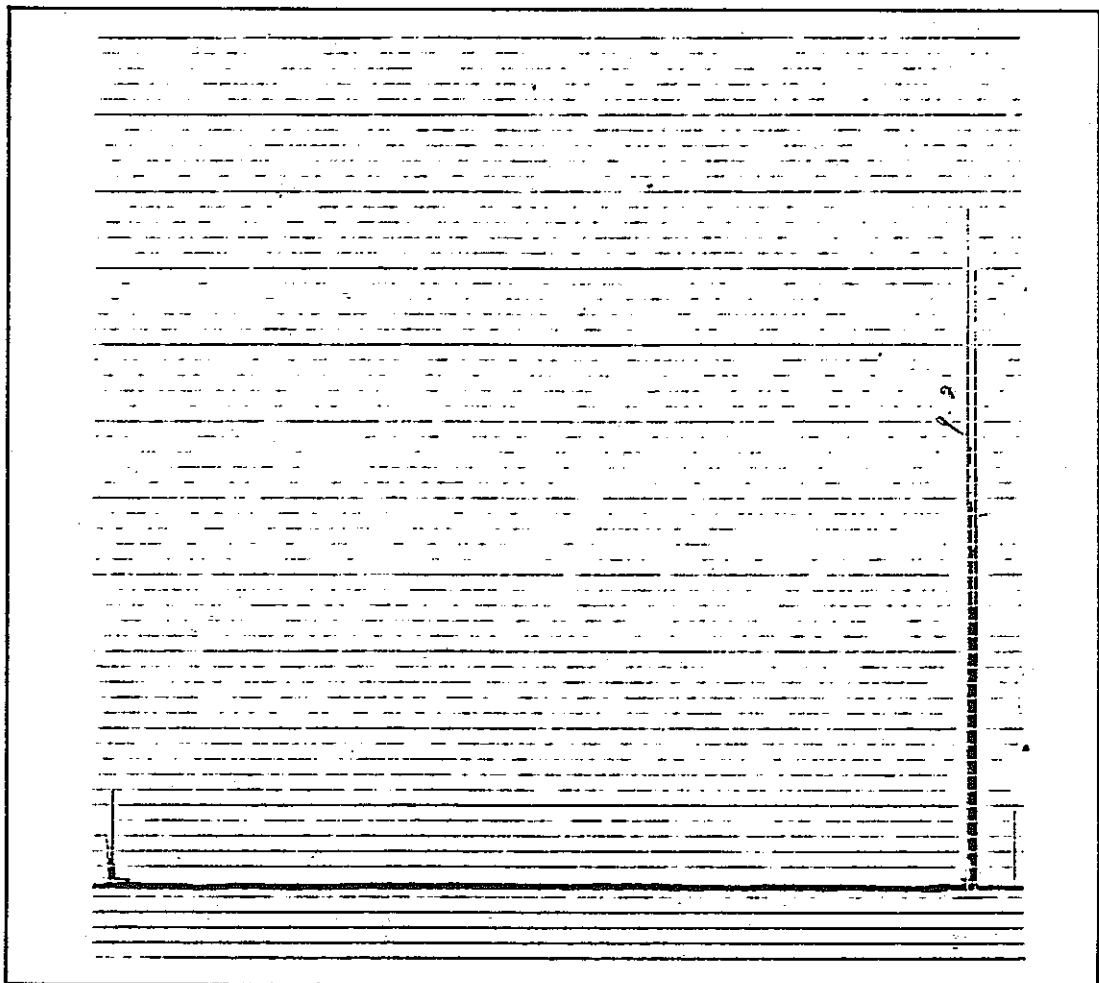


設定 STB	S-8	管 16	8-4	探傷方向	周方向
--------	-----	------	-----	------	-----

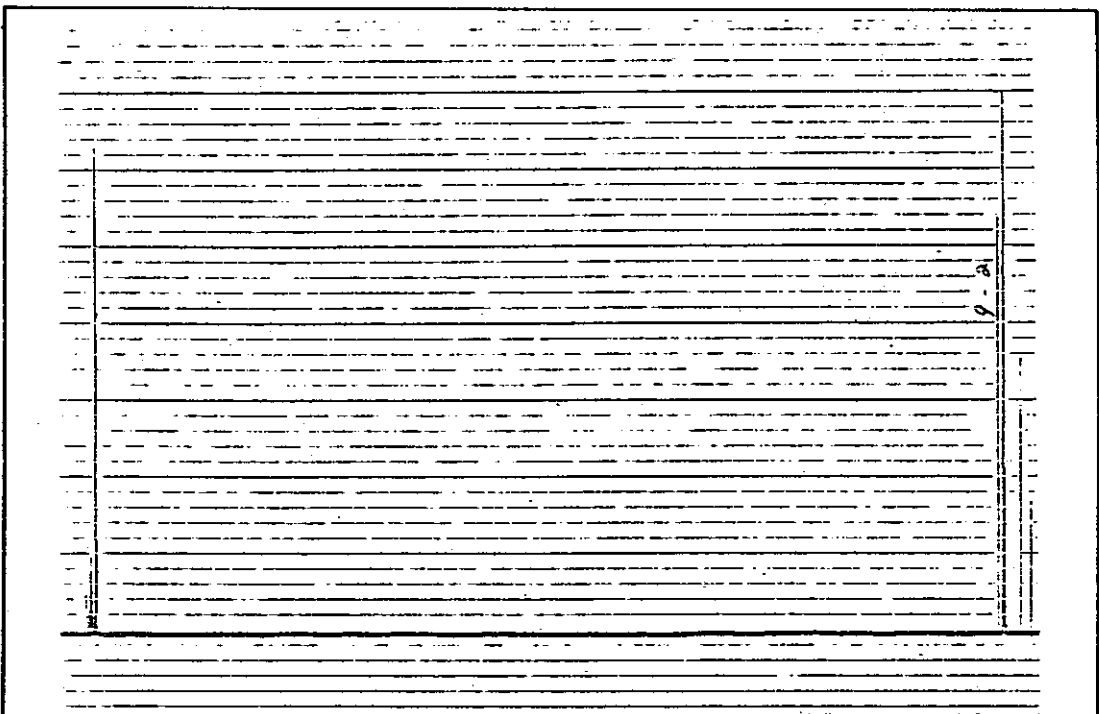


	START	END
軸 方 向 探 傷		
周 方 向 探 傷		



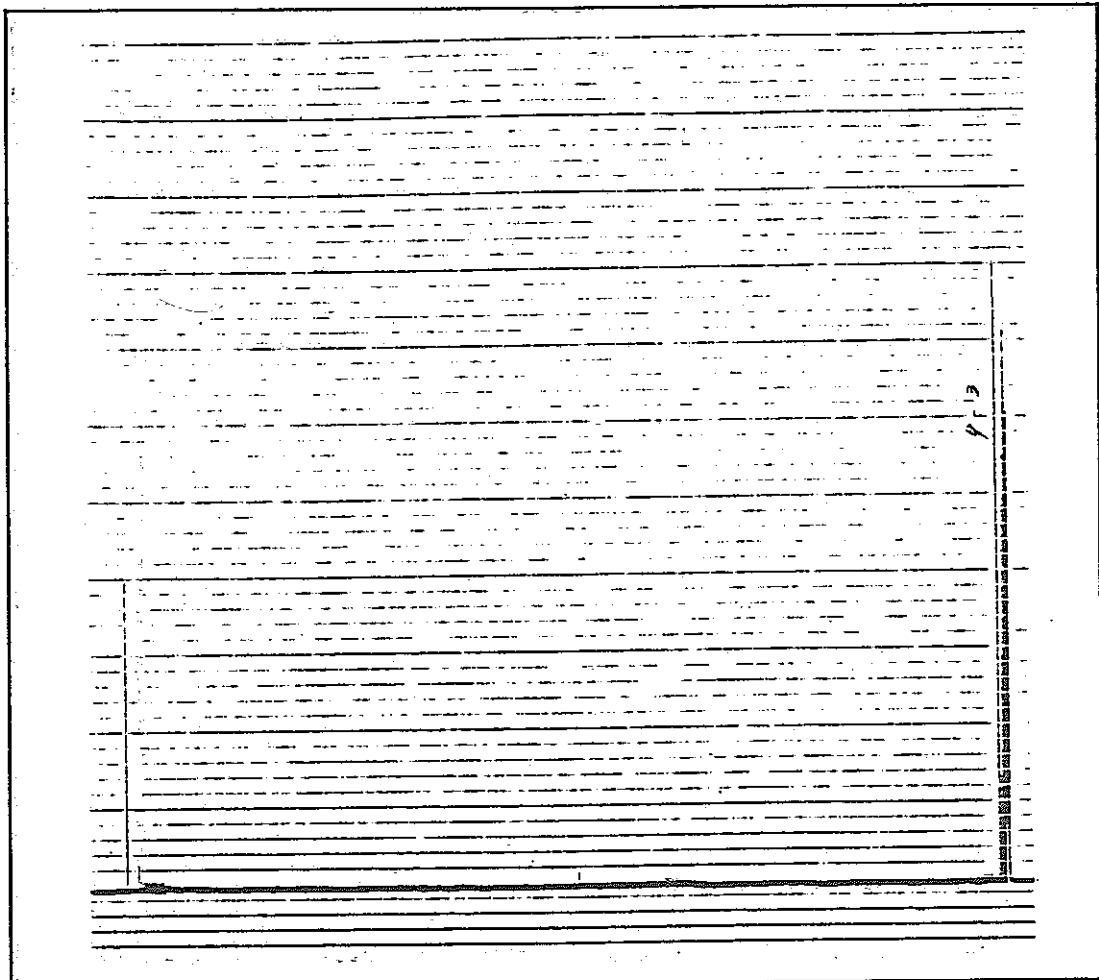


設定 STB	S-9	管 16	9-2	探傷方向	軸方向
--------	-----	------	-----	------	-----

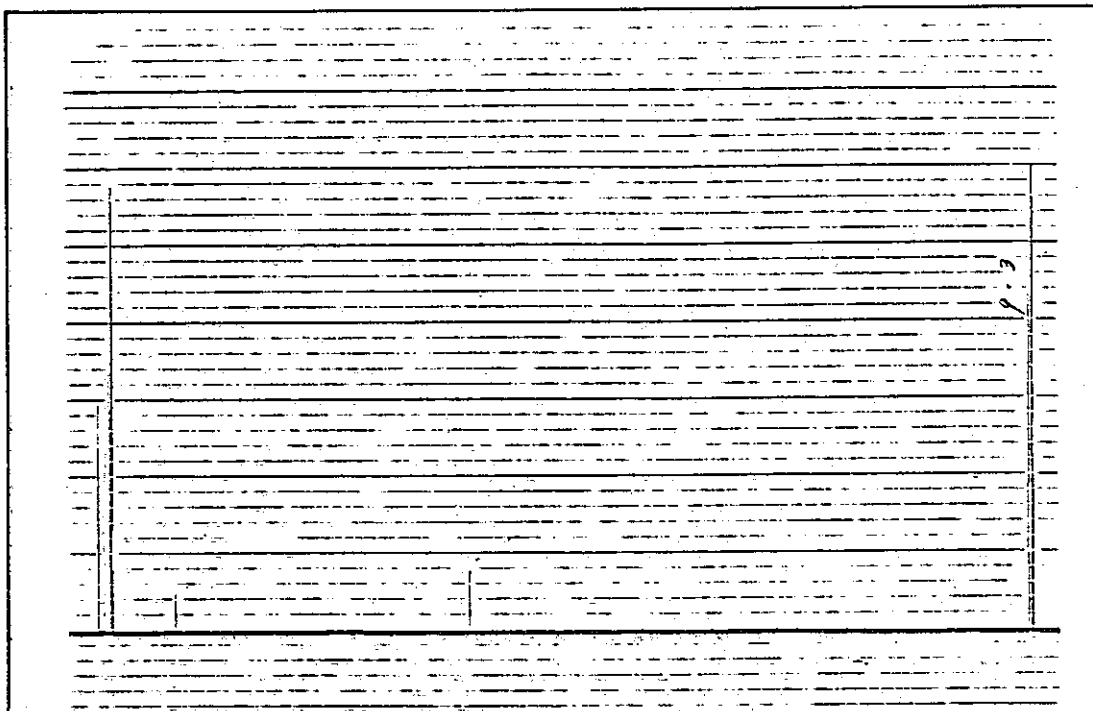


設定 STB	S-9	管 16	9-2	探傷方向	周方向
--------	-----	------	-----	------	-----

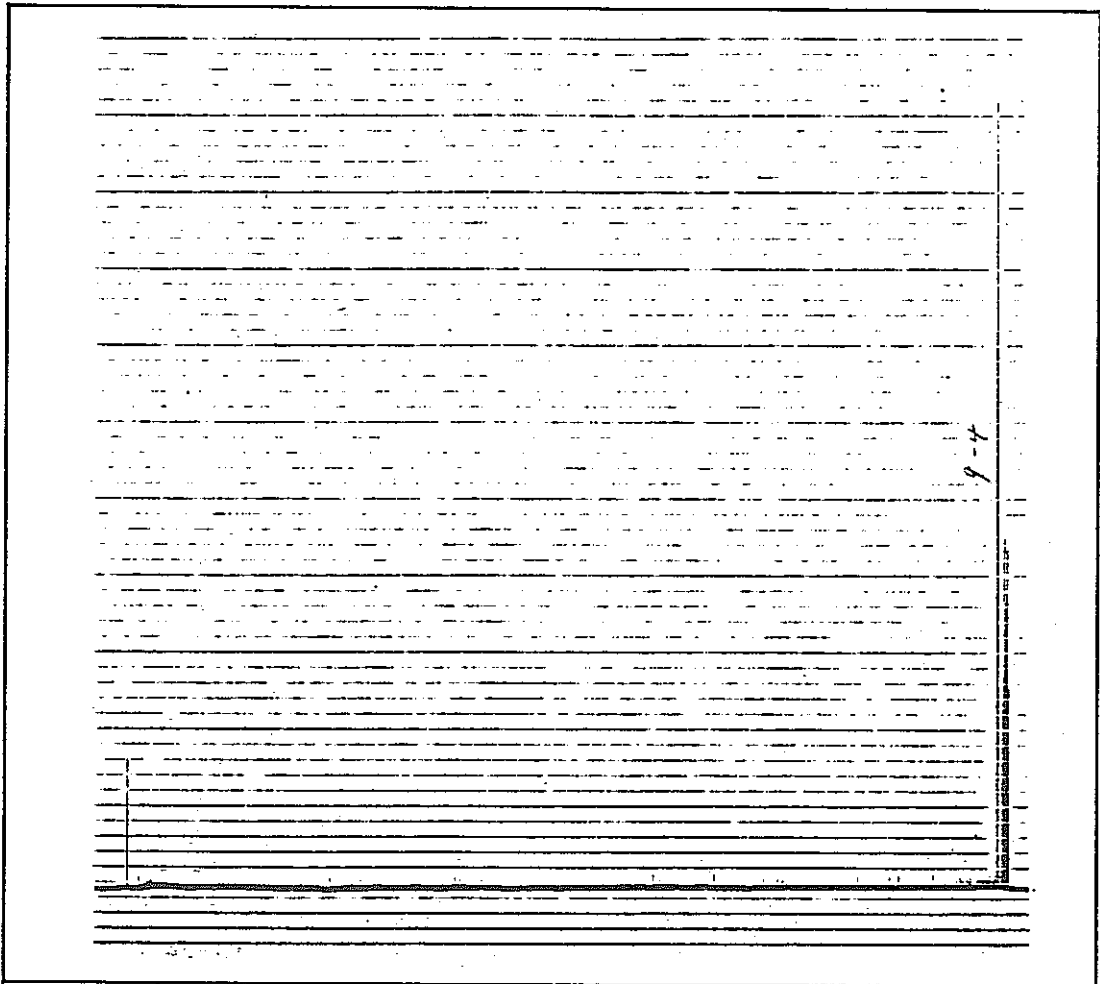




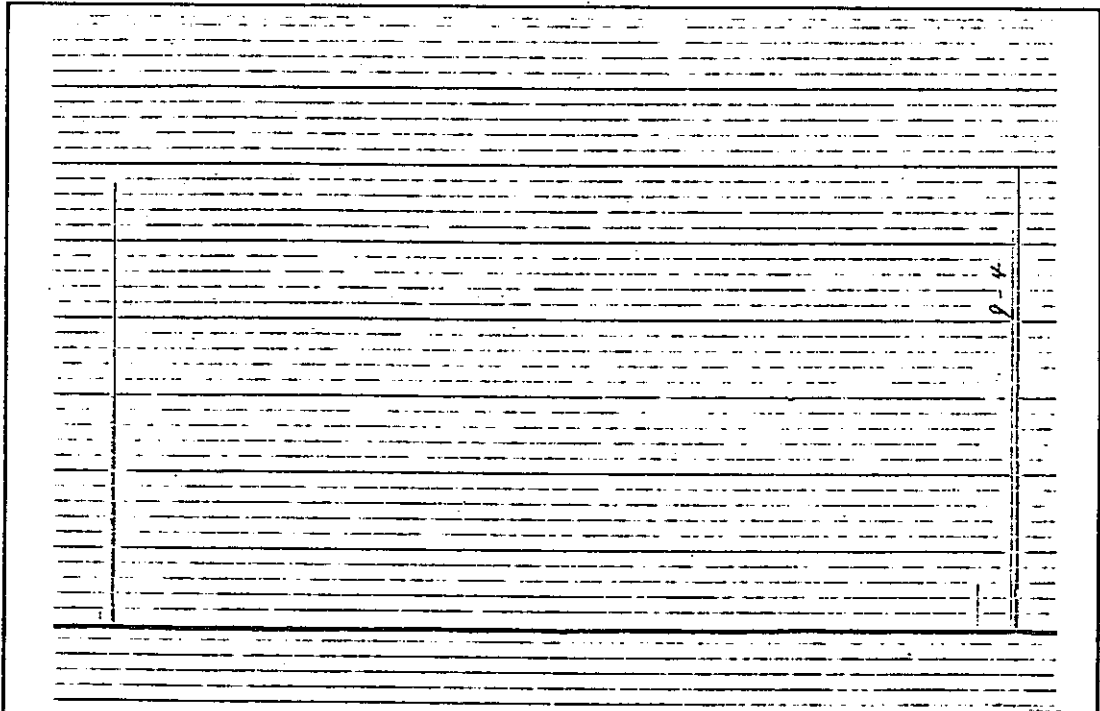
設定 STB	S-9	管 16	9-3	探傷方向	軸方向
--------	-----	------	-----	------	-----



設定 STB	S-9	管 16	9-3	探傷方向	周方向
--------	-----	------	-----	------	-----



設定 STB	S-9	管 1/6	9-4	探傷方向	軸方向
--------	-----	-------	-----	------	-----



設定 STB	S-9	管 1/6	9-4	探傷方向	周方向
--------	-----	-------	-----	------	-----

## 第 4 章

### 動燃事業団で実施された研究成果

## 1. 経 緯

本研究の目的は、第1章要旨に記載したとおり、もんじゅ用炉心燃料被覆管のクリープ破断強度および超音波探傷時のシャワーエコーに及ぼす結晶粒度の影響を調べることであり、動燃事業団も一検査機関として結晶粒度の異なる6種類の被覆管の超音波探傷検査を行った。超音波探傷検査は同一の供試材、標準試験片を用いて、動燃事業団および製管メーカー2社で実施された。

ここでは、動燃で実施した結晶粒度とシャワーエコーの関係についての結果を報告する。

## 2. 検査方法

### 1) 供試材

結晶粒度 ASTM № 7.5, 8.5, 9.5 を目標として、神鋼、住金で製作されたもんじゅサイズの被覆管を供試材とした。

メーカー	目標 G.S.	管 №				寸 法
神 鋼	7.5	21	22	23	24	6.50 OD
	8.5	1	2	6	10	0.47 T
	9.5	41	43	45	48	3000 L
住 金	7.5	7-1	7-3	7-5	7-6	6.50 OD
	8.5	8-2	8-3	8-4	8-5	0.47 T
	9.5	9-1	9-2	9-3	9-4	1460 L

(材料ミルシートは提出されず)

### 2) 標準人工欠陥の加工

各結晶粒度毎に標準人工欠陥を加工した。

メーカー	目標 G.S.	管 №	STB №
神 鋼	7.5	21	K-7
	8.5	1	K-8
	9.5	41	K-9
住 金	7.5	7-8	S-7
	8.5	8-6	S-8
	9.5	9-5	S-9

標準人工欠陥の検定結果を、神鋼材は表1～表3に、住金材は表4～表6に示す。

### 3) 結晶粒度測定

標準人工欠陥試料を採取した被覆管の結晶粒度を測定した。縦断面，横断面各々5視野の測定結果を以下に，また代表的な視野の写真を図1～図2に示す。

STB №	測定位置	測定値					平均値
K-7	縦断面	7.0	7.0	7.0	7.0	7.5	7.1
	横断面	8.0	7.5	7.5	7.5	7.5	7.6
K-8	縦断面	8.5	8.5	8.5	8.0	8.5	8.4
	横断面	9.0	9.0	9.0	9.0	8.5	8.9
K-9	縦断面	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0
	横断面	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5
S-7	縦断面	7.0	7.0	7.0	6.5	6.5	6.8
	横断面	7.5	7.5	7.0	7.0	7.5	7.3
S-8	縦断面	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0
	横断面	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5
S-9	縦断面	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0
	横断面	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5

### 4) 検査機器

機器名	メーカー	型式	仕様
探傷機	SONIC	Mark-II	(軸) S/N : 773705 (周) S/N : 773706 周波数 10MHz P/R 10 kHz
探触子	NORTEC	(軸) CZ-3-10-4-1825 (周) CZ-3-10-4-1826	広帯域形 周波数 10MHz ポイントフォーカス 0.3φmm(-3dB)
記録計	三栄測器	5L-16	ガルバノメータ 3305 周波数 DC~2000Hz
駆動装置	三恭製作所		回転数 2000 rpm 送りピッチ 0.15mm 試料送り速度 300 mm/min 水温 30°C

### 5) 探傷条件

各標準試験片毎に，標準欠陥を基準感度として，最適の探傷条件を設定し，その状態

で供試材の探傷を行った。探傷条件を以下に示す。

STB 号		軸 方 向	周 方 向
K 7	入 射 角	26.8° (71.9°)	22.0° (52.2°)
	ゲ ー ト	ID <sub>2</sub> -OD <sub>2</sub>	ID <sub>2</sub> -OD <sub>2</sub>
	Rej.	6.7	7.0
K 8	入 射 角	21.4° (50.3°)	22.3° (53.1°)
	ゲ ー ト	ID <sub>2</sub> -OD <sub>2</sub>	ID <sub>2</sub> -OD <sub>2</sub>
	Rej.	4.4	3.8
K 9	入 射 角	22.9° (55.1°)	22.0° (52.2°)
	ゲ ー ト	ID <sub>3</sub> -OD <sub>3</sub>	ID <sub>2</sub> -OD <sub>2</sub>
	Rej.	4.5	3.0
S 7	入 射 角	24.4° (60.6°)	26.7° (71.3°)
	ゲ ー ト	ID <sub>3</sub> -OD <sub>3</sub>	ID <sub>2</sub> -OD <sub>2</sub>
	Rej.	8.1	8.0
S 8	入 射 角	21.5° (50.6°)	21.5° (50.6°)
	ゲ ー ト	ID <sub>2</sub> -OD <sub>2</sub>	ID <sub>2</sub> -OD <sub>2</sub>
	Rej.	7.2	7.5
S 9	入 射 角	23.2° (56.2°)	22.3° (53.1°)
	ゲ ー ト	ID <sub>3</sub> -OD <sub>3</sub>	ID <sub>2</sub> -OD <sub>2</sub>
	Rej.	4.8	7.0

( )内は伝搬角。

### 3. 検査結果

各結晶粒度毎に設定した探傷条件で検査を行った。結果を図3～図26に示す。

- 神 鋼 材 GS 7.5 : 図 3 ~ 図 6
- ” GS 8.5 : 図 7 ~ 図 10
- ” GS 9.5 : 図 11 ~ 図 14
- 住 金 材 GS 7.5 : 図 15 ~ 図 18
- ” GS 8.5 : 図 19 ~ 図 22
- ” GS 9.5 : 図 23 ~ 図 26

神鋼材の場合、結晶粒度が 8.5（実測 8.4）より細粒ではシャワーエコーは抑制され、十分検査ができることを確認した。結晶粒度 7.5（実測 7.1）では、粒界からのシャワーエコーレベルが高くなるが、軸-周方向探傷は可能である。

住金材の場合、前者と同様、結晶粒度が 8.5（実測 8.0）より細粒では検査ができることを確認した。しかし、結晶粒度 7.5（実測 6.8）では粒界からのシャワーエコーレベルが前者よりも高く、探傷可能にまで至らなかった。

#### 4. まとめ

動燃で実施した検査の結果をまとめると、次のようになる。

- 1) 結晶粒度 7.5（実測：縦断面 7.1，横断面 7.6）より細粒は探傷可能であることを確認した。これは従来の結果を再確認したことになる。
- 2) 結晶粒度（実測：縦断面 6.8，横断面 7.3）では完全に探傷可能まで至らなかった。
- 3) 特に試料 7.5 については、K材とS材の結晶粒径の差が数 $\mu$ であるにも拘らず、シャワーエコーの差は大きく、これは単なる結晶粒度の影響のみとは考えにくい。
- 4) 一本の管でもシャワーエコーの大きさに変化のある管があった。
- 5) 以上の結果から判断して、結晶粒度 7.5～8.0 で被覆管を製作した場合、探傷は十分可能である。

なお、今後とも結晶粒の比較的大きな被覆管の探傷が完全にできるように技術の確立を図って行かなければならない。

以上

[表1]

## 標準人工欠陥検定結果

昭和 57年 2月 19日 動力炉核燃料開発事業団

東海事業所 技術部検査業務課

1. 依頼者

2. 試験片名称

標準人工欠陥試験片

3. 試験片No

K-7

4. 試験片寸法

外径 6.50 mm, 内径 5.56 mm, 肉厚 0.47 mm, 長さ 600 mm

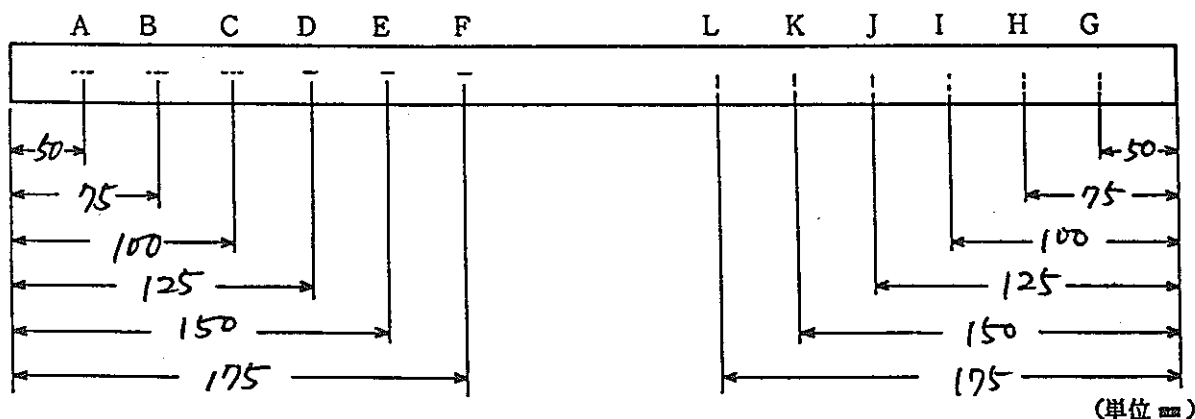
5. 欠陥加工者

6. 欠陥加工法

放電加工

7. 欠陥Noおよび加工位置

課長	係長	担当
☺		☺



8. 人工欠陥検定結果 外面欠陥は深度顕微鏡で測定  
内面欠陥はシリコンラバーレプリカを採取し深度顕微鏡で測定

欠陥No	軸方向欠陥			備考	欠陥No	円周方向欠陥			備考
	深さ(μ)	巾(μ)	長さ(mm)			深さ(μ)	巾(μ)	長さ(mm)	
A	21	30	0.77	内面	G	22	30	0.75	内面
B	32	31	0.77	"	H	32	31	0.75	"
C	41	31	0.77	"	I	43	31	0.76	"
D	23	28	0.76	外面	J	21	29	0.76	外面
E	32	28	0.75	"	K	30	29	0.76	"
F	42	27	0.75	"	L	40	29	0.76	"

所見：



〔表2〕

## 標準人工欠陥検定結果

昭和57年2月19日 動力炉核燃料開発事業団

東海事業所 技術部検査業務課

1. 依頼者

2. 試験片名称

標準人工欠陥試験片

3. 試験片No

K-8

4. 試験片寸法



外径 6.50 mm, 内径 5.56 mm, 肉厚 0.47 mm, 長さ 600 mm

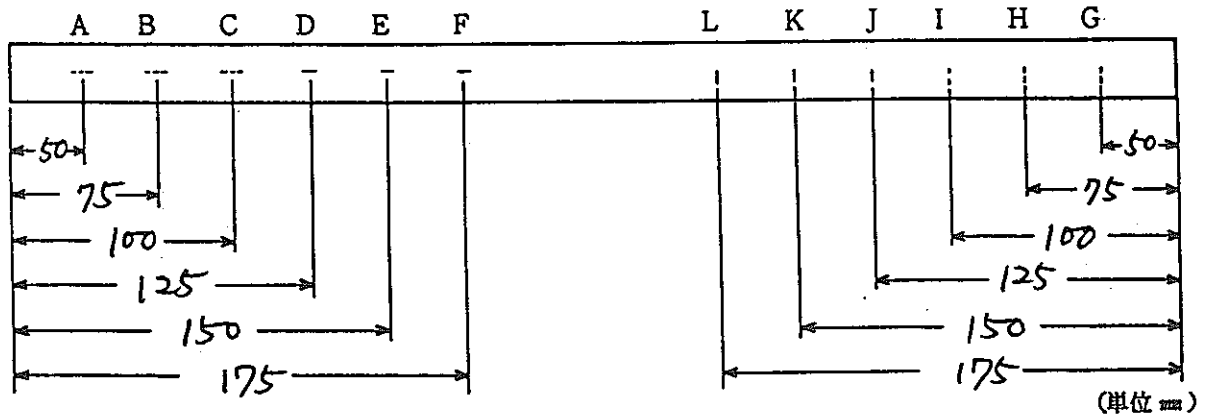
5. 欠陥加工者

6. 欠陥加工法

放電加工

7. 欠陥Noおよび加工位置

課長	係長	担当
		



8. 人工欠陥検定結果 外面欠陥は深度顕微鏡で測定  
内面欠陥はシリコンラバーレプリカを採取し深度顕微鏡で測定

欠陥No	軸方向欠陥			備考	欠陥No	円周方向欠陥			備考
	深さ(μ)	巾(μ)	長さ(mm)			深さ(μ)	巾(μ)	長さ(mm)	
A	21	29	0.76	内面	G	21	30	0.75	内面
B	31	31	0.76	"	H	31	30	0.76	"
C	41	31	0.76	"	I	48	30	0.76	"
D	22	28	0.75	外面	J	21	29	0.76	外面
E	33	28	0.76	"	K	32	31	0.76	"
F	40	27	0.75	"	L	40	30	0.76	"

所見：

[表3]

## 標準人工欠陥検定結果

昭和57年2月19日 動力炉核燃料開発事業団

東海事業所 技術部検査業務課

1. 依頼者

2. 試験片名称 **標準人工欠陥試験片**


3. 試験片No **K-9**

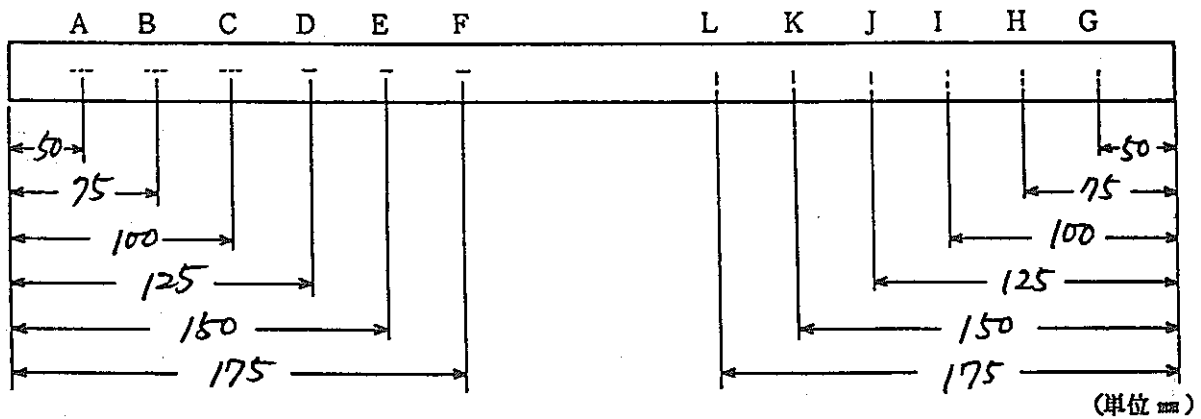
4. 試験片寸法 **外径 6.50 mm, 内径 5.56 mm, 肉厚 0.47 mm; 長さ 600 mm**

5. 欠陥加工者

6. 欠陥加工法 **放電加工**

7. 欠陥Noおよび加工位置

課長	係長	担当
		



8. 人工欠陥検定結果 外面欠陥は深度顕微鏡で測定  
内面欠陥はシリコンラバーレプリカを採取し深度顕微鏡で測定

欠陥No	軸方向欠陥			備考	欠陥No	円周方向欠陥			備考
	深さ(μ)	巾(μ)	長さ(mm)			深さ(μ)	巾(μ)	長さ(mm)	
A	21	29	0.76	内面	G	21	31	0.76	内面
B	32	29	0.76	"	H	31	30	0.76	"
C	41	29	0.76	"	I	41	30	0.76	"
D	21	27	0.76	外面	J	20	29	0.76	外面
E	31	27	0.76	"	K	30	30	0.76	"
F	40	27	0.75	"	L	41	29	0.76	"

所見：

〔表4〕

## 標準人工欠陥検定結果

昭和57年2月19日 動力炉核燃料開発事業団

東海事業所 技術部検査業務課

1. 依頼者

2. 試験片名称

標準人工欠陥試験片

3. 試験片No

S-7

4. 試験片寸法

外径 6.50 mm, 内径 5.56 mm, 肉厚 0.47 mm, 長さ 600 mm

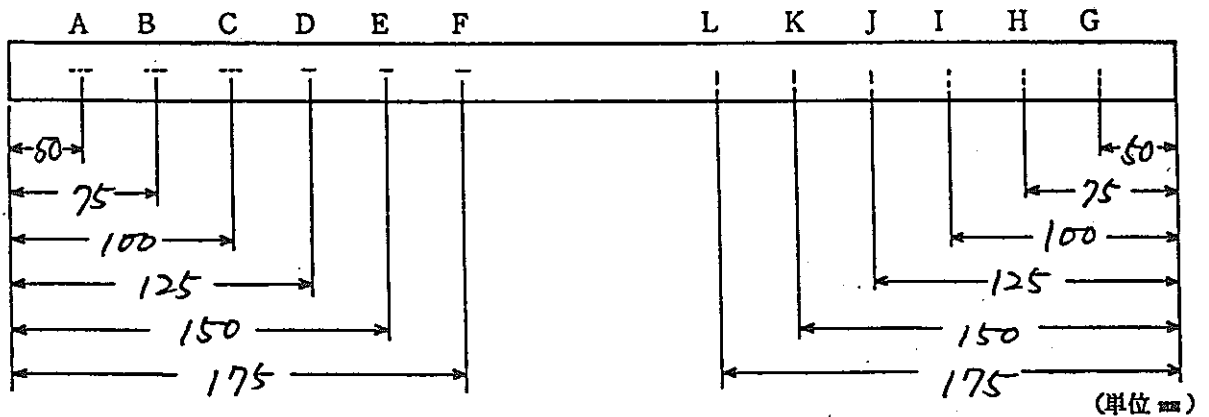
5. 欠陥加工者

6. 欠陥加工法

放電加工

7. 欠陥Noおよび加工位置

課長	係長	担当
(印)		(印)



8. 人工欠陥検定結果 外面欠陥は深度顕微鏡で測定  
内面欠陥はシリコンラバーレプリカを採取し深度顕微鏡で測定

欠陥No	軸方向欠陥			備考	欠陥No	円周方向欠陥			備考
	深さ(μ)	巾(μ)	長さ(mm)			深さ(μ)	巾(μ)	長さ(mm)	
A	20	33	0.75	内面	G	20	32	0.73	内面
B	32	33	0.76	"	H	29	33	0.74	"
C	42	33	0.76	"	I	40	32	0.74	"
D	20	31	0.77	外面	J	20	34	0.76	外面
E	30	31	0.77	"	K	30	33	0.76	"
F	41	30	0.76	"	L	41	32	0.75	"

所見：

〔表5〕

## 標準人工欠陥検定結果

昭和57年2月19日 動力炉核燃料開発事業団

東海事業所 技術部検査業務課

1. 依頼者

2. 試験片名称

標準人工欠陥試験片

3. 試験片No

S-8

4. 試験片寸法



外径 6.50 mm, 内径 5.56 mm, 肉厚 0.47 mm, 長さ 600 mm

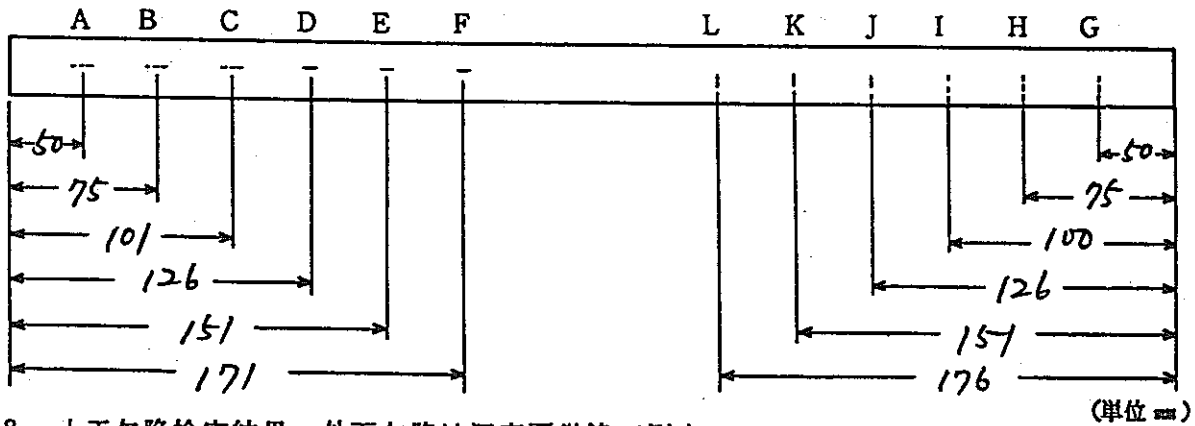
5. 欠陥加工者

6. 欠陥加工法

放電加工

7. 欠陥Noおよび加工位置

課長	係長	担当
		



8. 人工欠陥検定結果 外面欠陥は深度顕微鏡で測定  
内面欠陥はシリコンラバーレプリカを採取し深度顕微鏡で測定

欠陥No	軸方向欠陥			備考	欠陥No	円周方向欠陥			備考
	深さ(μ)	巾(μ)	長さ(mm)			深さ(μ)	巾(μ)	長さ(mm)	
A	20	32	0.76	内面	G	20	36	0.74	内面
B	30	33	0.75	"	H	30	33	0.74	"
C	40	33	0.75	"	I	41	32	0.74	"
D	20	30	0.76	外面	J	20	34	0.76	外面
E	31	30	0.77	"	K	29	33	0.75	"
F	41	30	0.77	"	L	39	32	0.75	"

所見：

[表6]

## 標準人工欠陥検定結果

昭和57年2月19日 動力炉核燃料開発事業団

東海事業所 技術部検査業務課

1. 依頼者

2. 試験片名称

標準人工欠陥試験片

3. 試験片No

S-9

4. 試験片寸法



外径 6.50 mm, 内径 5.56 mm, 肉厚 0.47 mm, 長さ 600 mm

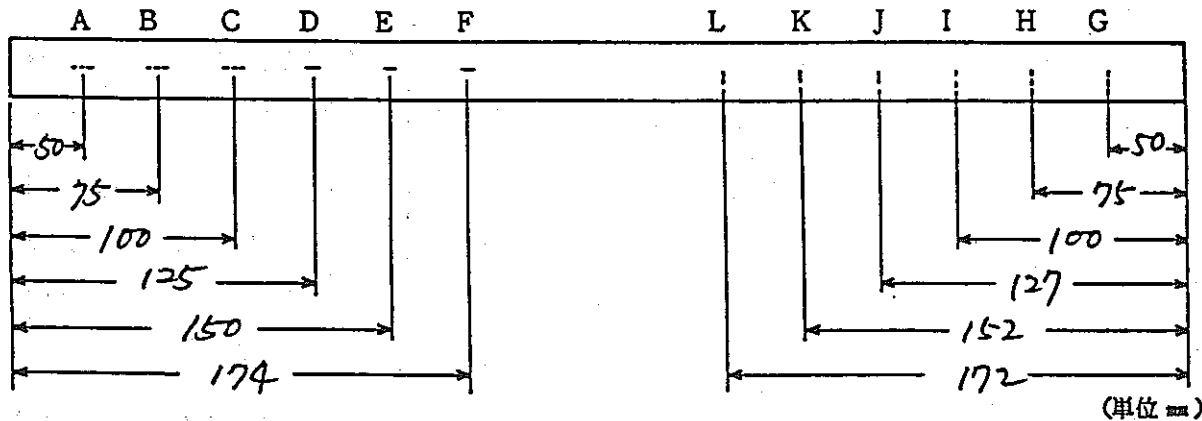
5. 欠陥加工者

6. 欠陥加工法

放電加工

7. 欠陥Noおよび加工位置

課長	係長	担当
		



8. 人工欠陥検定結果 外面欠陥は深度顕微鏡で測定  
内面欠陥はシリコンラバーレプリカを採取し深度顕微鏡で測定

欠陥No	軸方向欠陥			備考	欠陥No	円周方向欠陥			備考
	深さ(μ)	巾(μ)	長さ(mm)			深さ(μ)	巾(μ)	長さ(mm)	
A	20	34	0.75	内面	G	19	32	0.73	内面
B	29	33	0.75	"	H	30	31	0.74	"
C	41	33	0.76	"	I	39	33	0.74	"
D	20	30	0.77	外面	J	20	33	0.76	外面
E	30	31	0.77	"	K	30	32	0.76	"
F	41	32	0.77	"	L	39	32	0.76	"

所見：

图1 結晶粒度測定結果

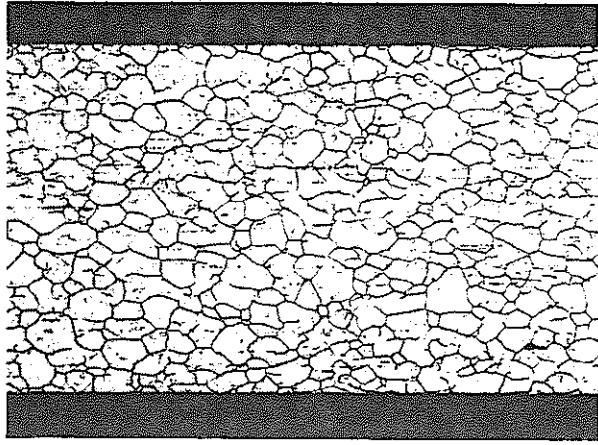
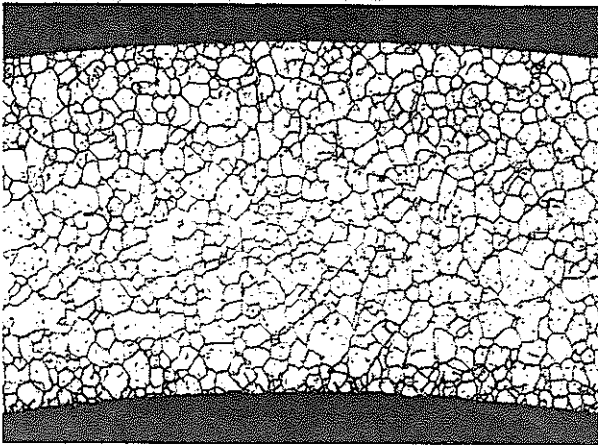
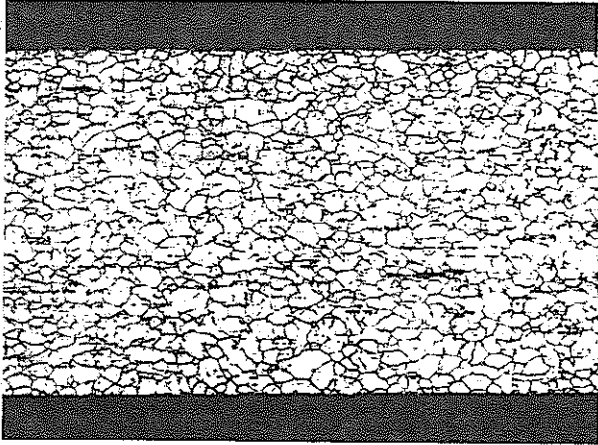
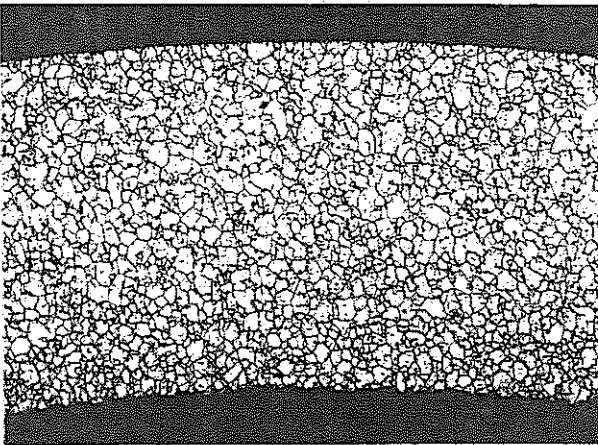
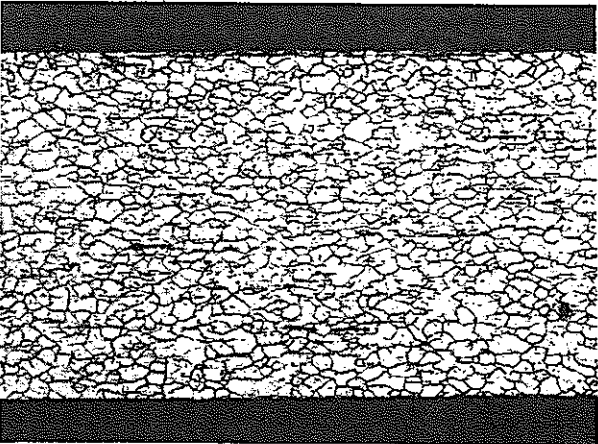
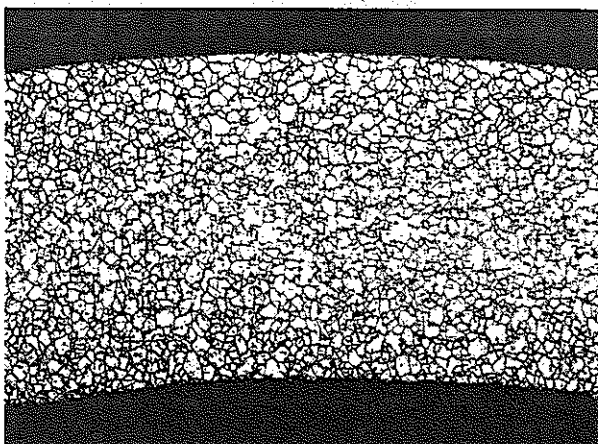
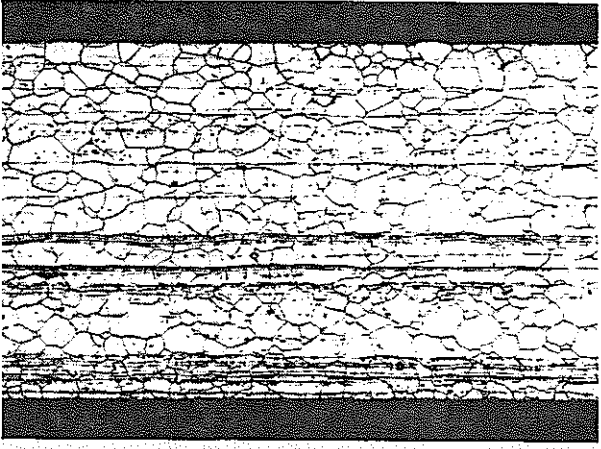
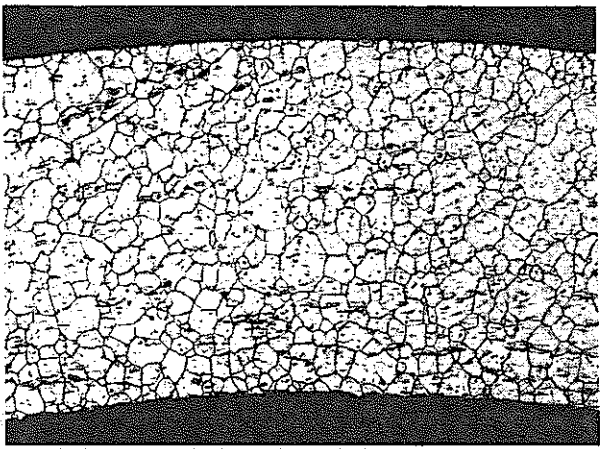
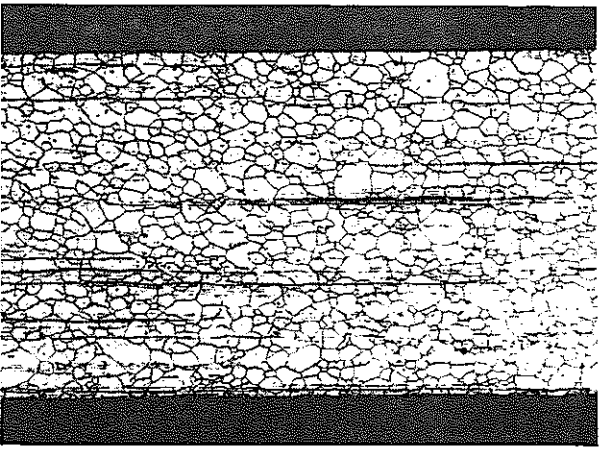
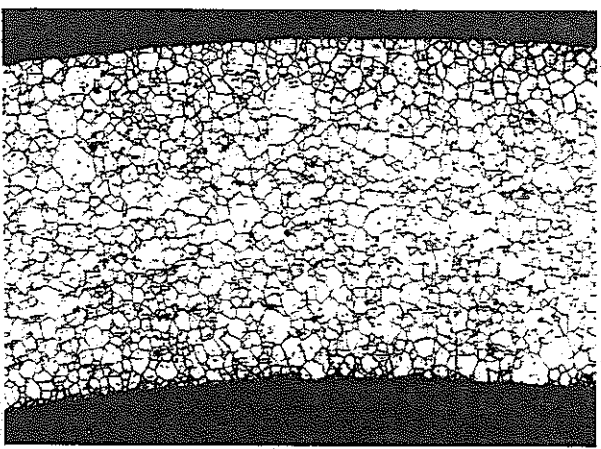
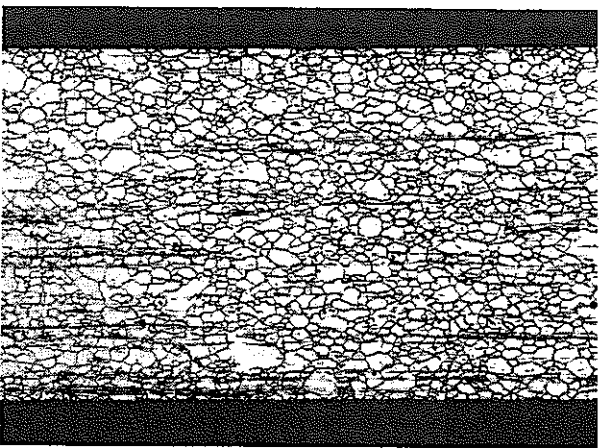
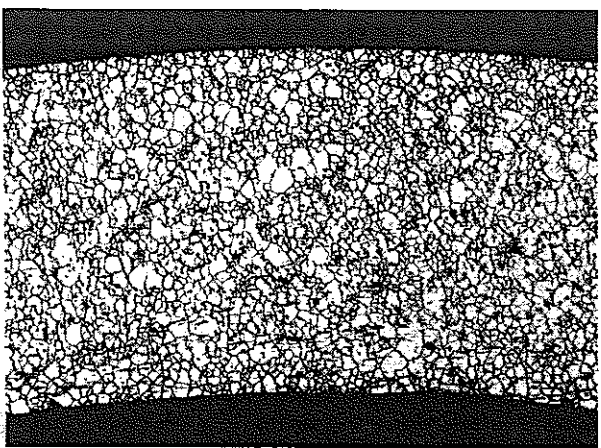
STB №	縦断面 × 100	横断面 × 100
K-7	 <p data-bbox="445 864 639 898">7.0 (Ave. 7.1)</p>	 <p data-bbox="1091 864 1285 898">7.5 (Ave. 7.6)</p>
K-8	 <p data-bbox="492 1442 624 1476">8.5 (8.4)</p>	 <p data-bbox="1119 1442 1251 1476">9.0 (8.9)</p>
K-9	 <p data-bbox="492 2020 624 2054">9.0 (9.0)</p>	 <p data-bbox="1119 2020 1251 2054">9.5 (9.5)</p>

图2 结晶粒度测定结果

STB %	縦断面 × 100	横断面 × 100
S-7	 7.0 (Ave. 6.8)	 7.5 (Ave. 7.3)
S-8	 8.0 (8.0)	 8.5 (8.5)
S-9	 9.0 (9.0)	 9.5 (9.5)

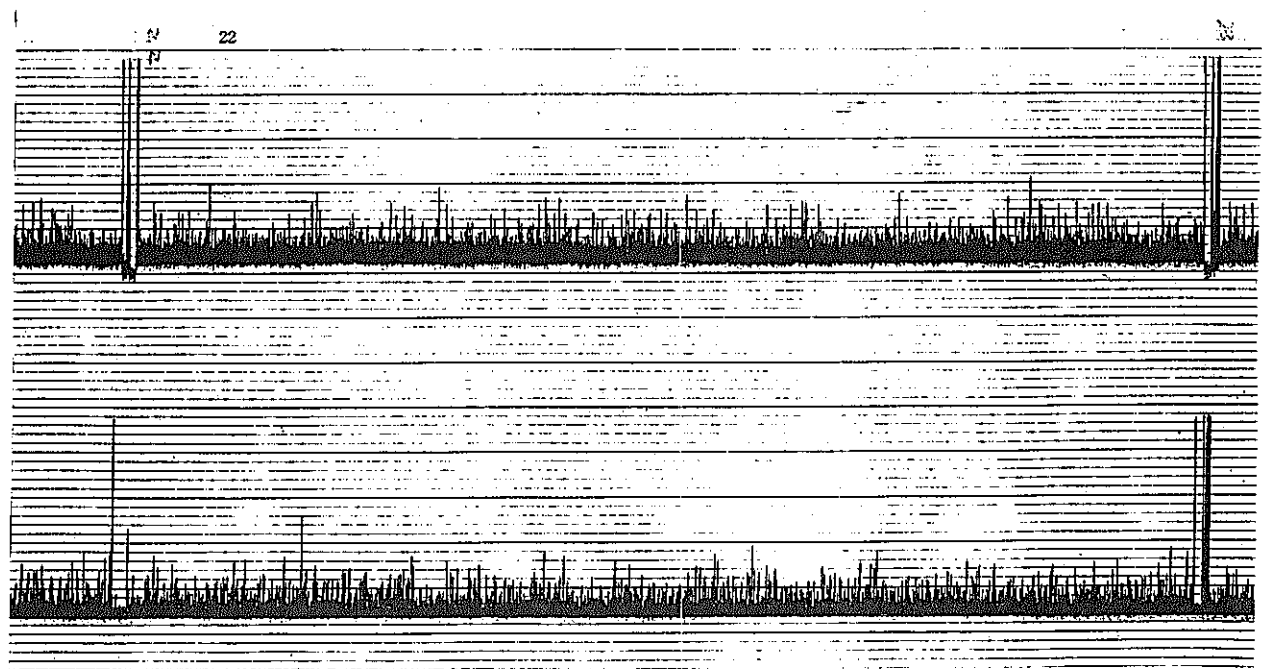
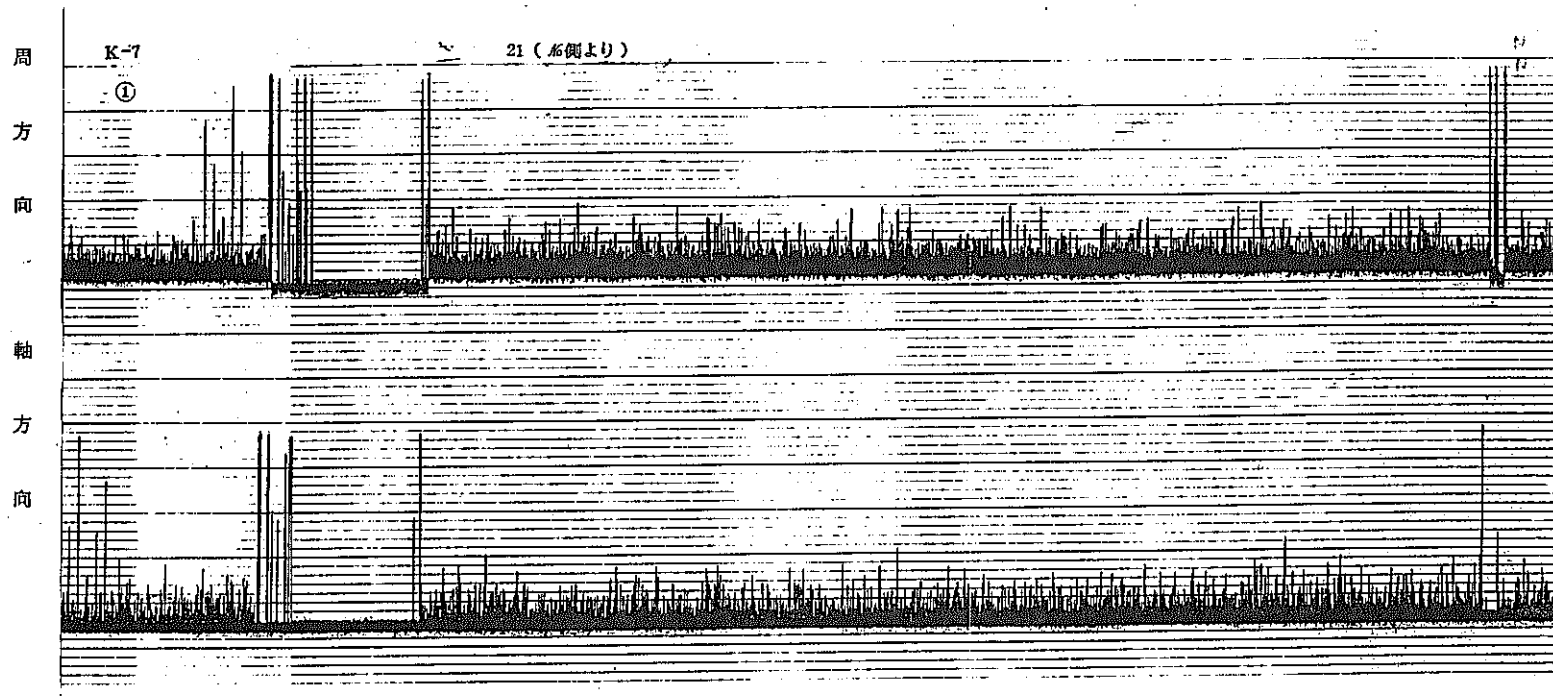


図 3 超音波探傷結果  
(K材 GS7.5)



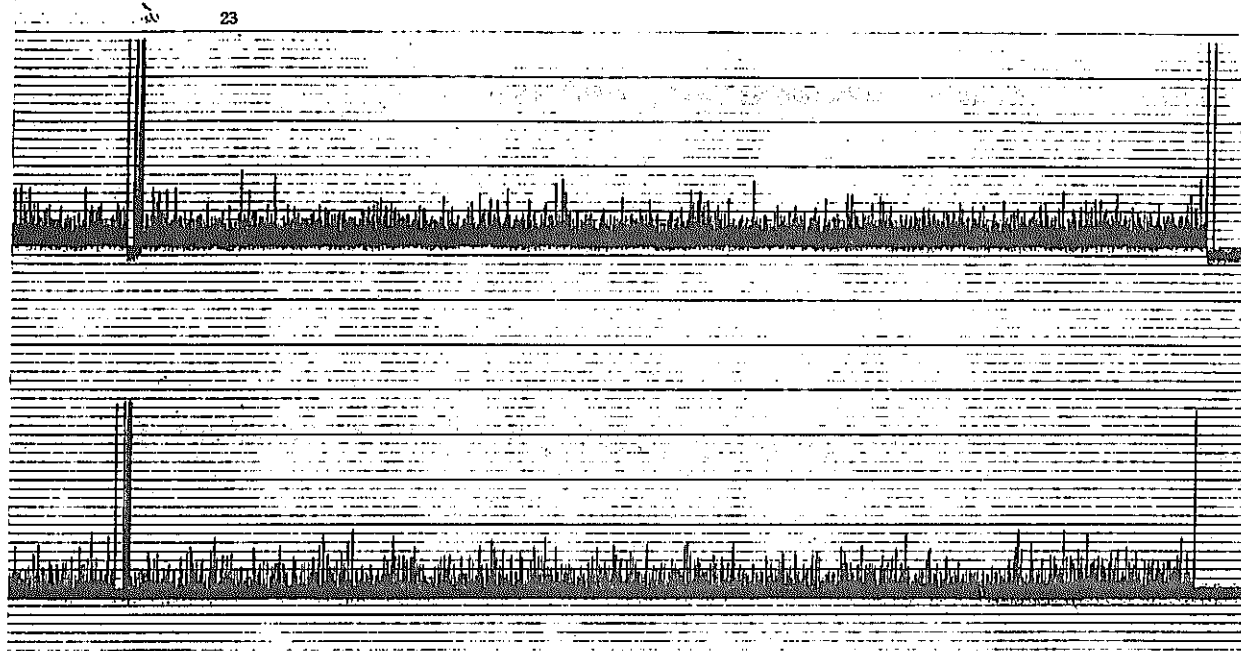
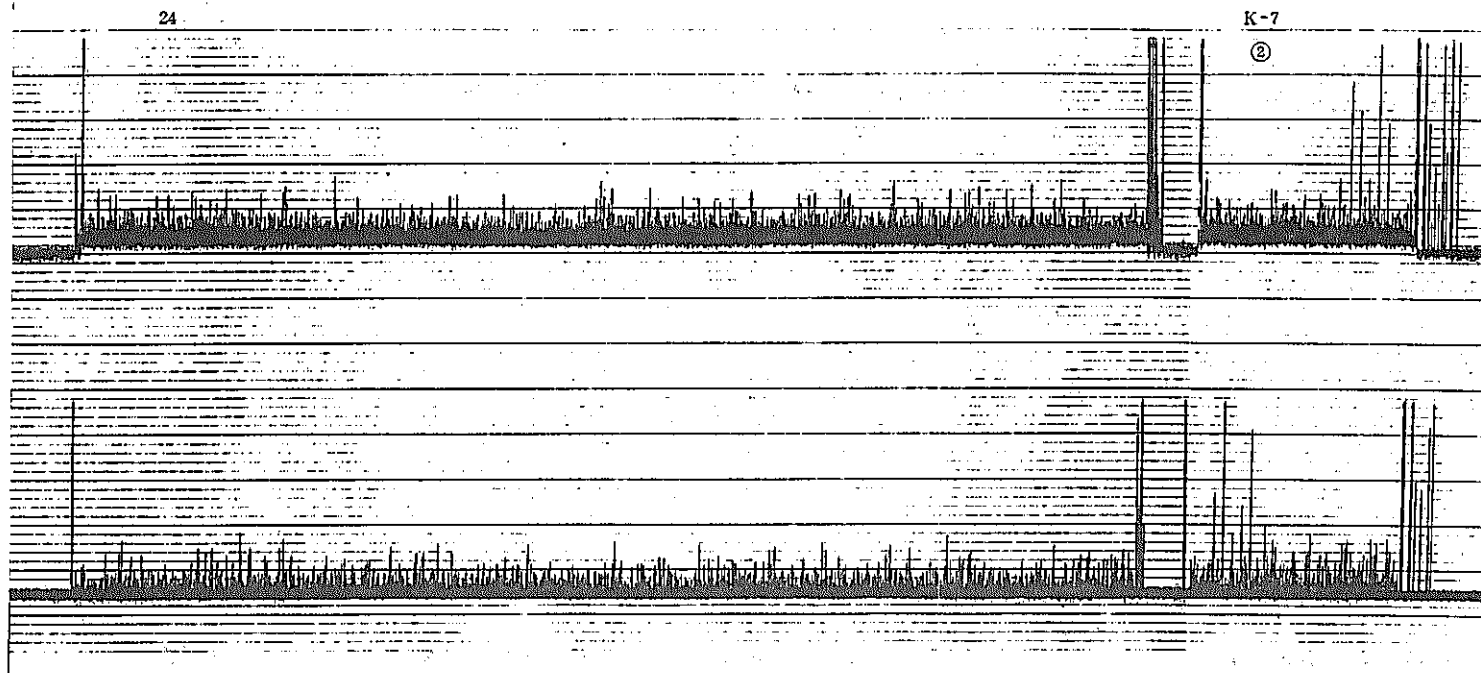


圖 4 超音波探傷結果  
(K材 GS7.5)



周  
方  
向  
  
軸  
方  
向

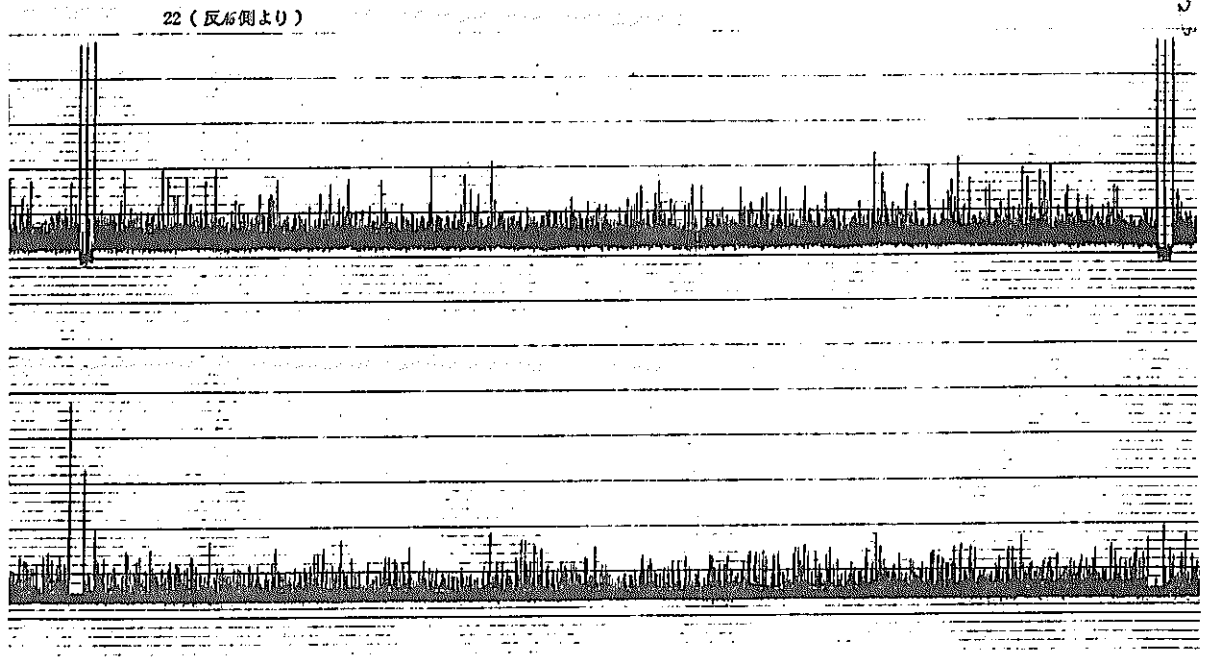
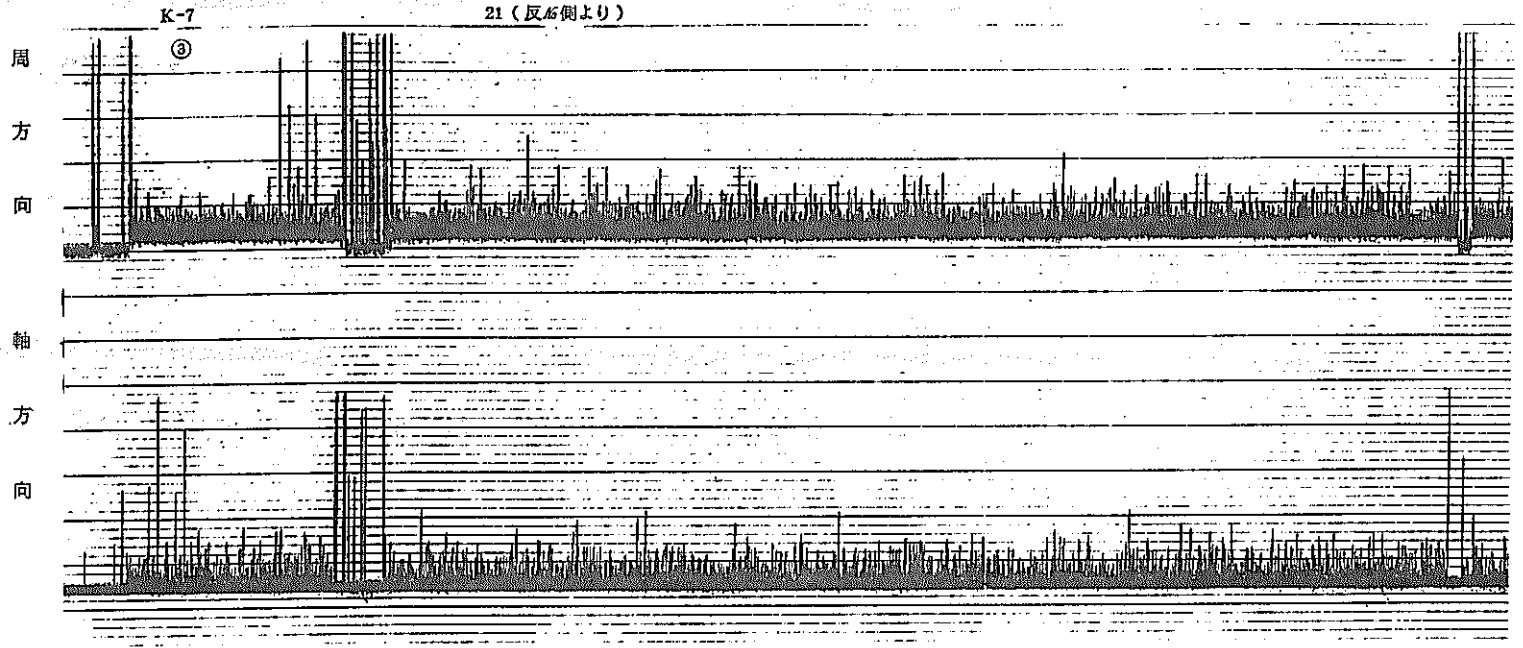


図 5 超音波探傷結果  
(K材 GS7.5)

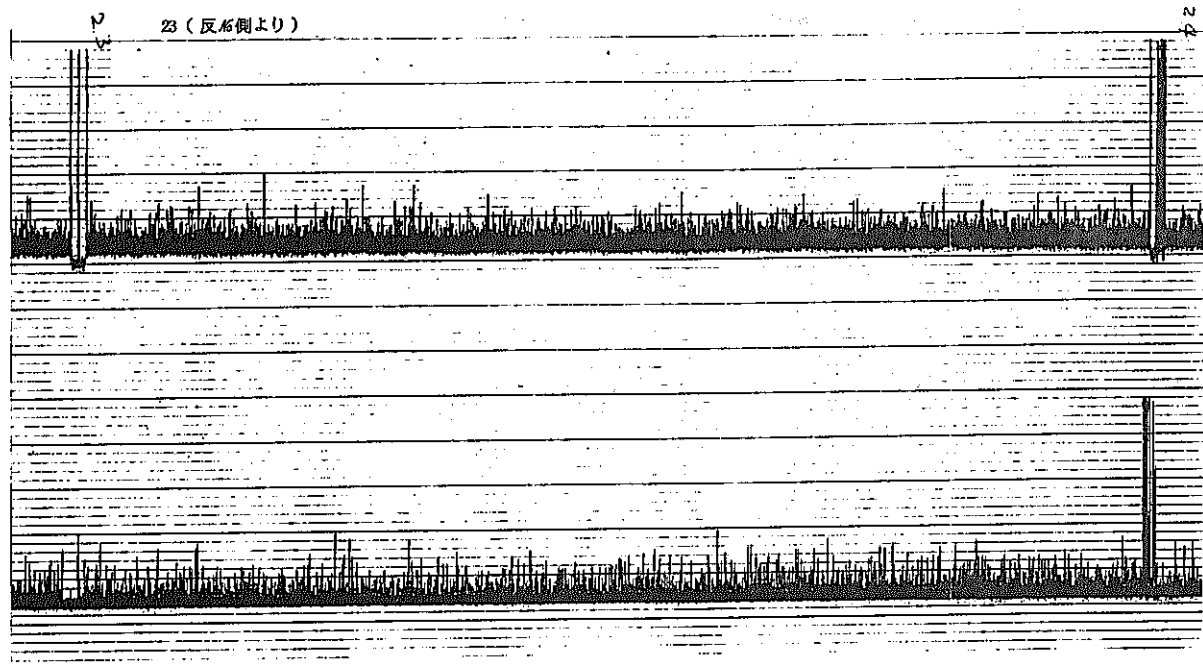
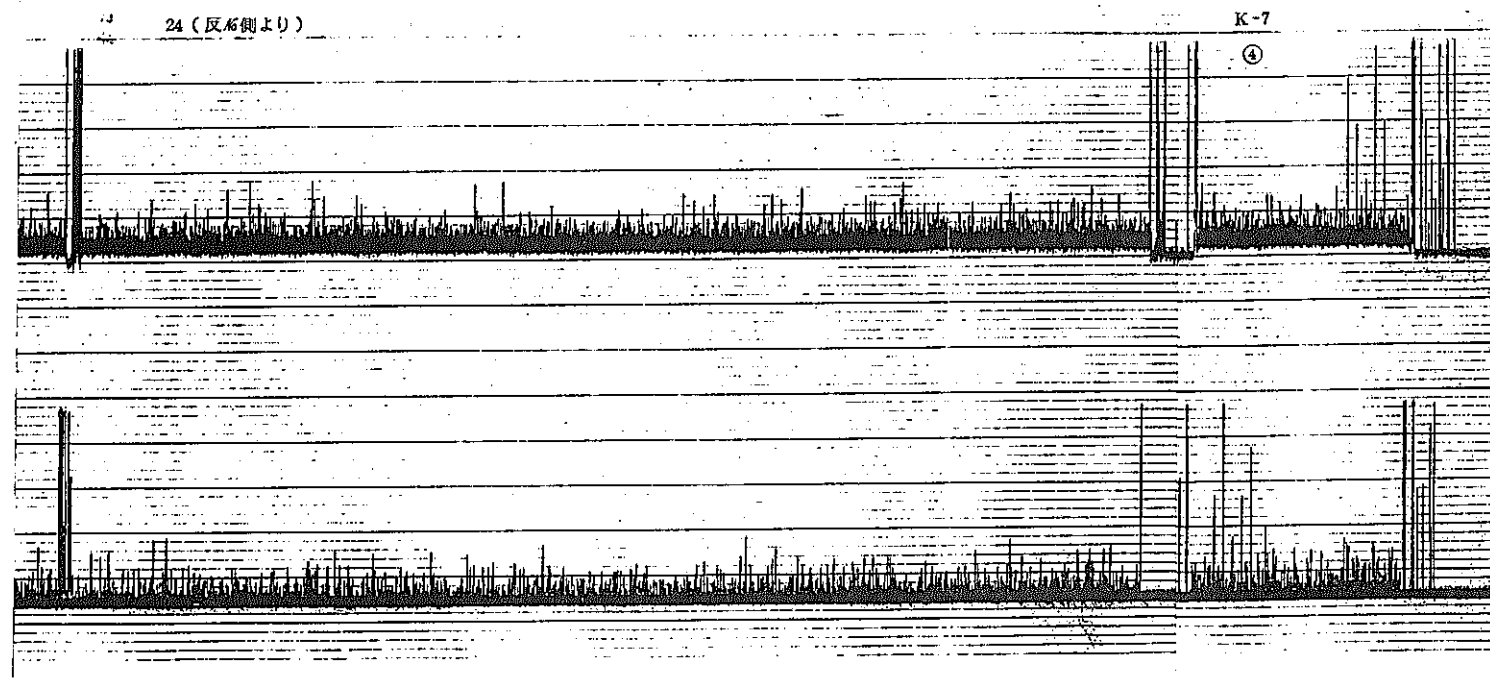


図 6 超音波探傷結果  
( K材 GS7.5 )



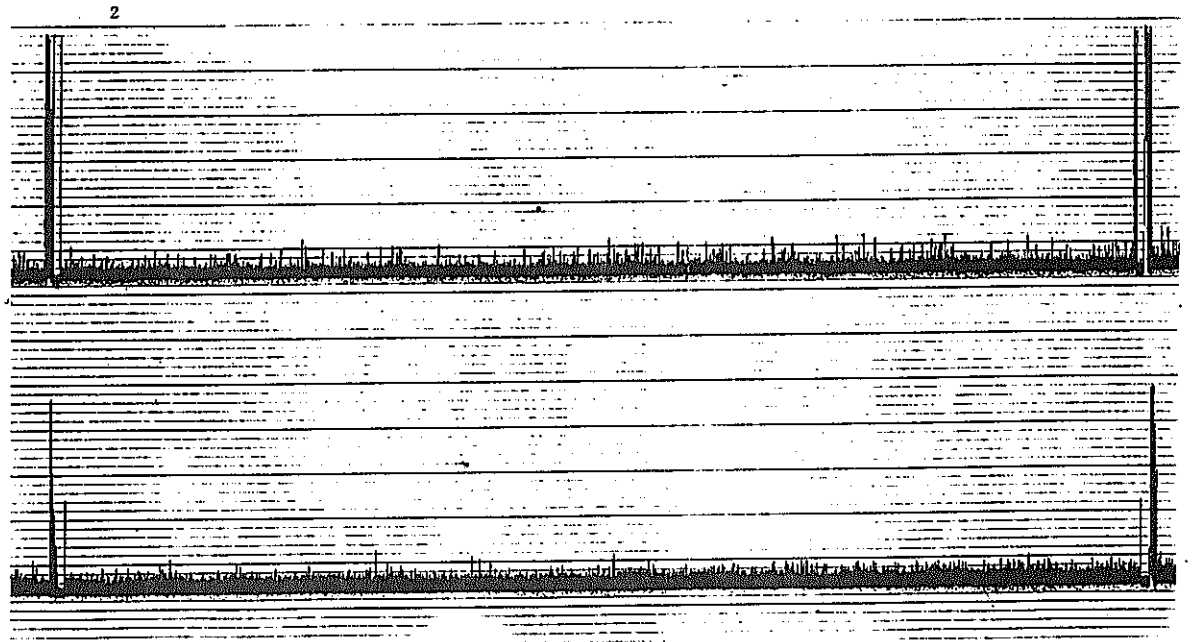
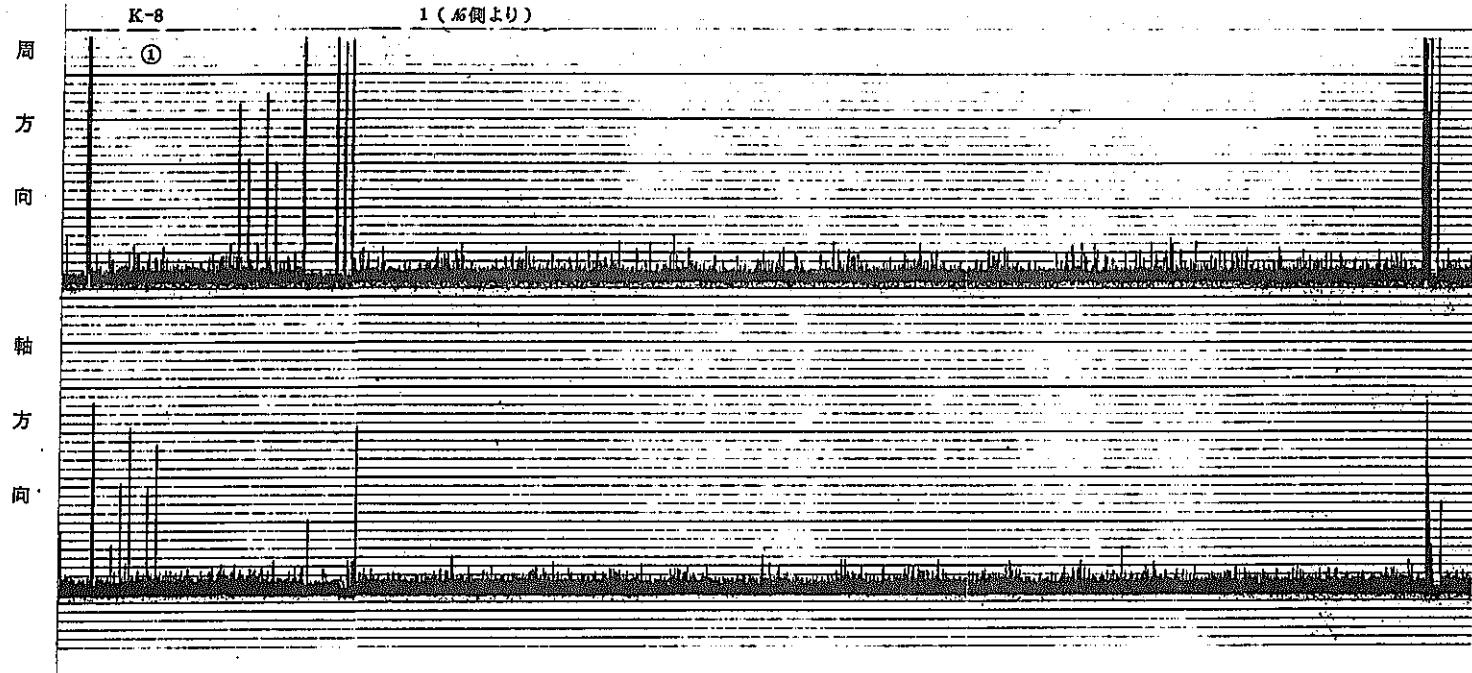


図 7 超音波探傷結果  
(K材 GS8.5)

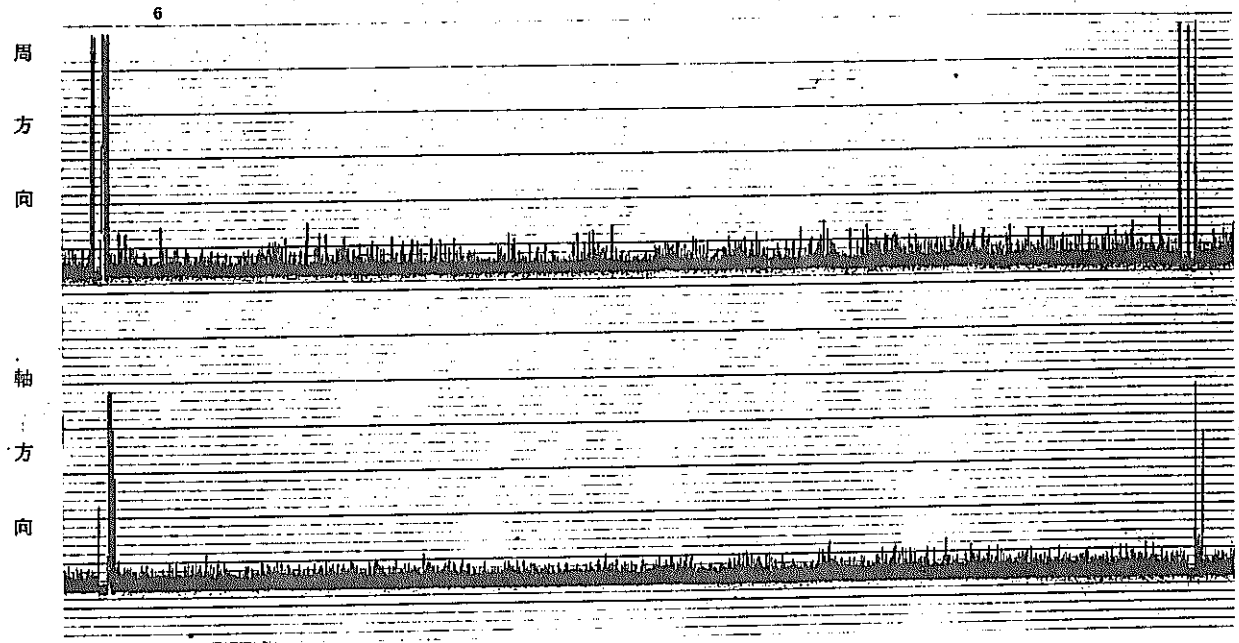
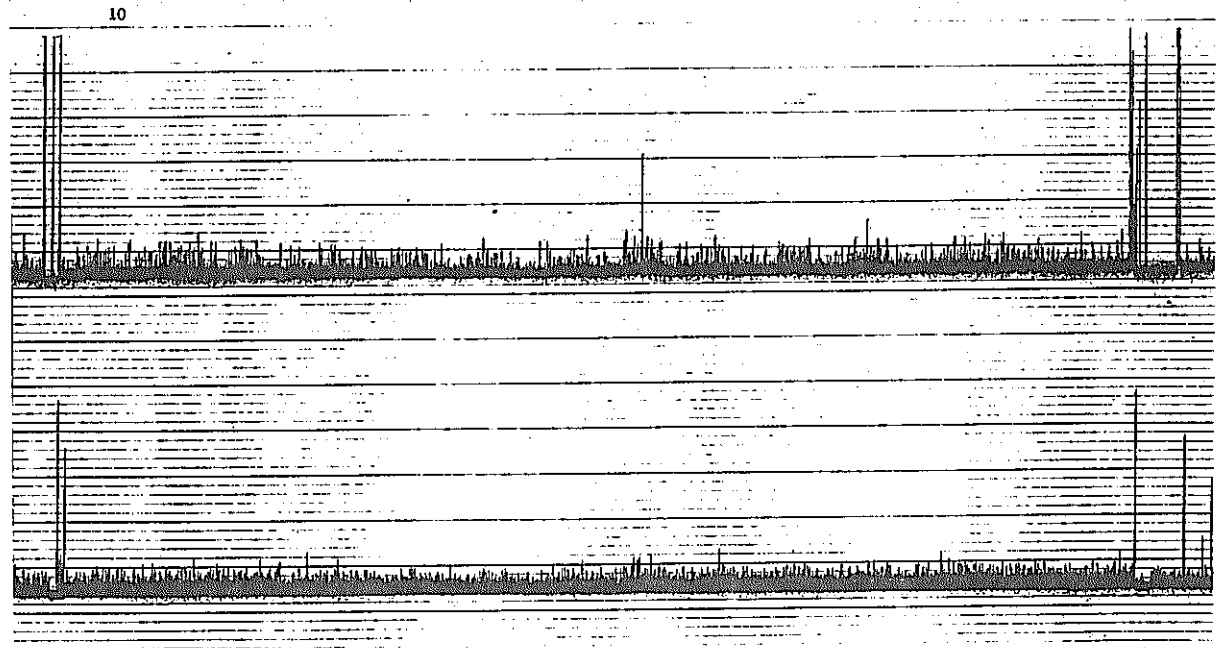


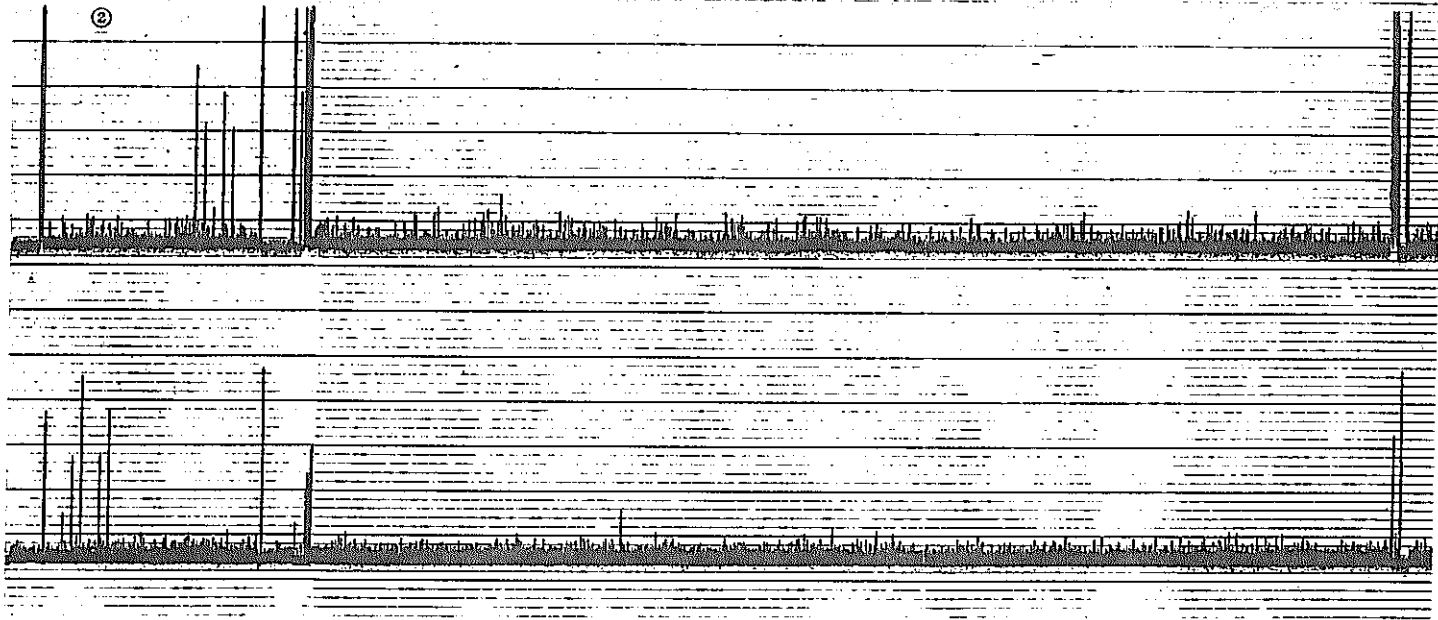
圖 8 超音波探傷結果  
(K材 GS8.5)



K-8

1 (反右側より)

周  
方  
向  
  
軸  
方  
向



2 (反右側より)

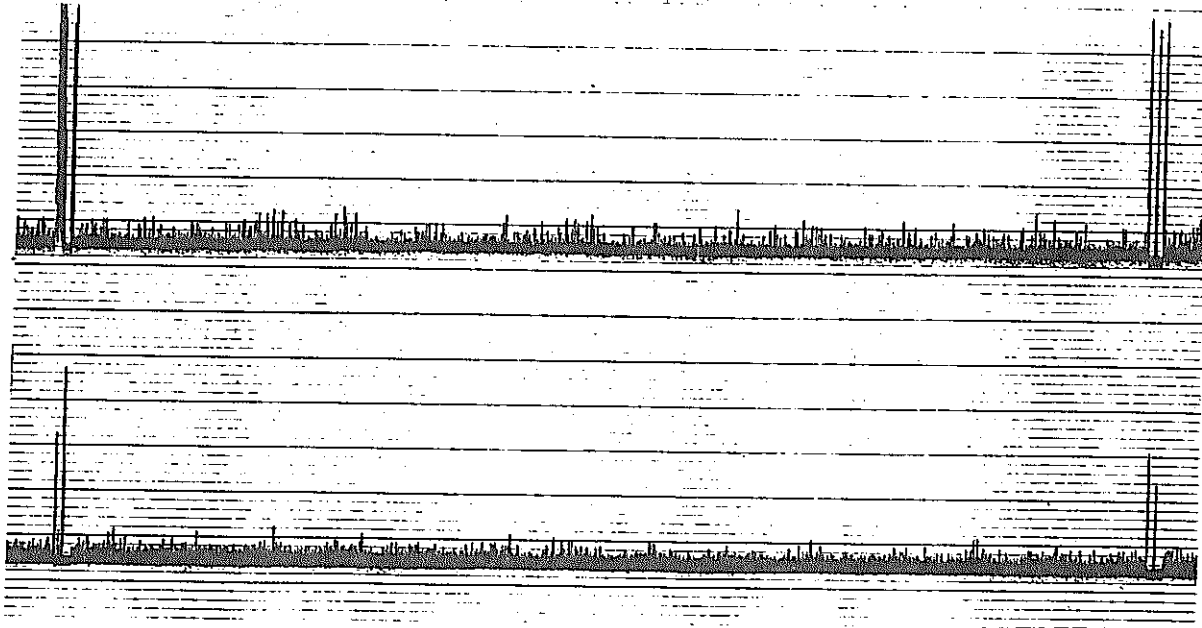


図 9 超音波探傷結果  
(K材 GS8.5)

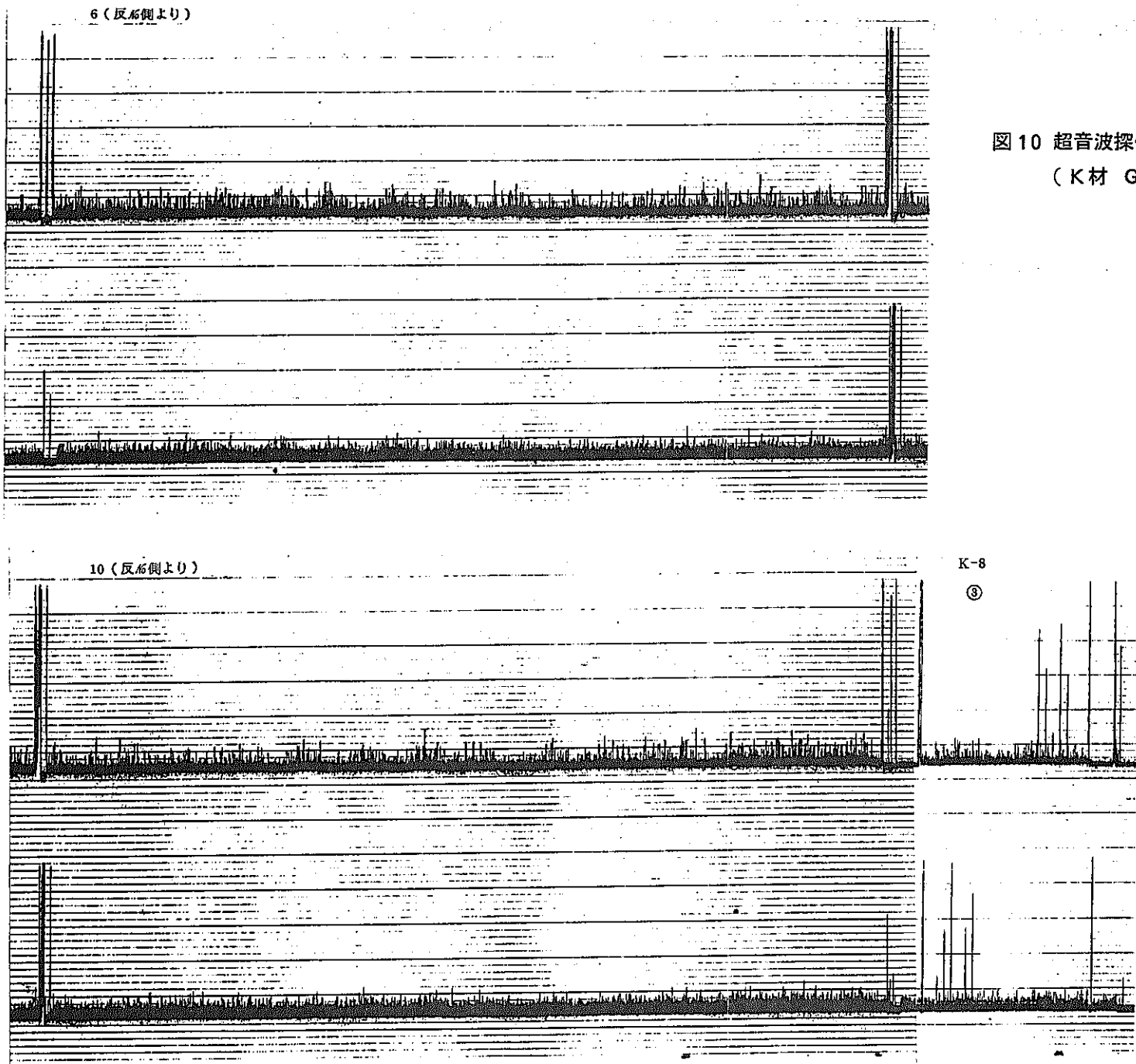


図 10 超音波探傷結果  
( K材 GS8.5 )

周  
方  
向  
  
軸  
方  
向

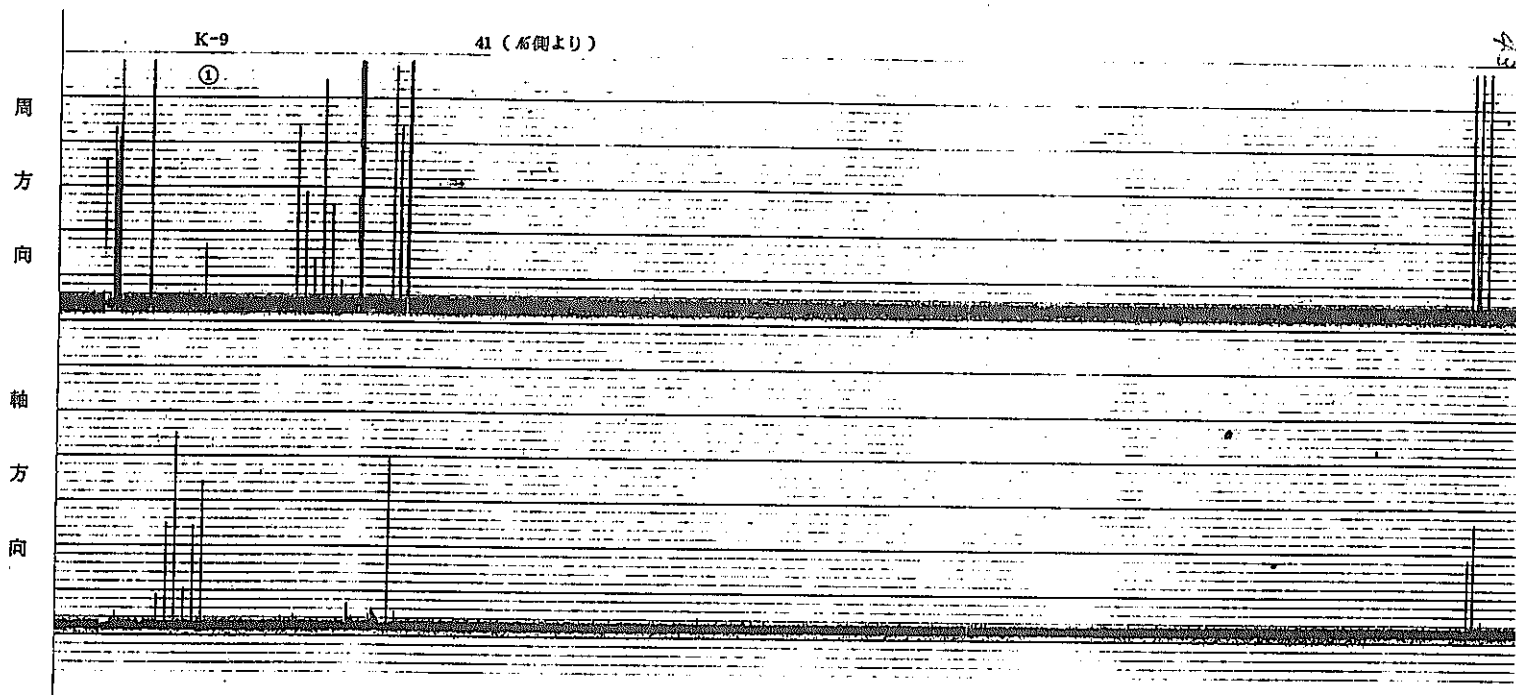
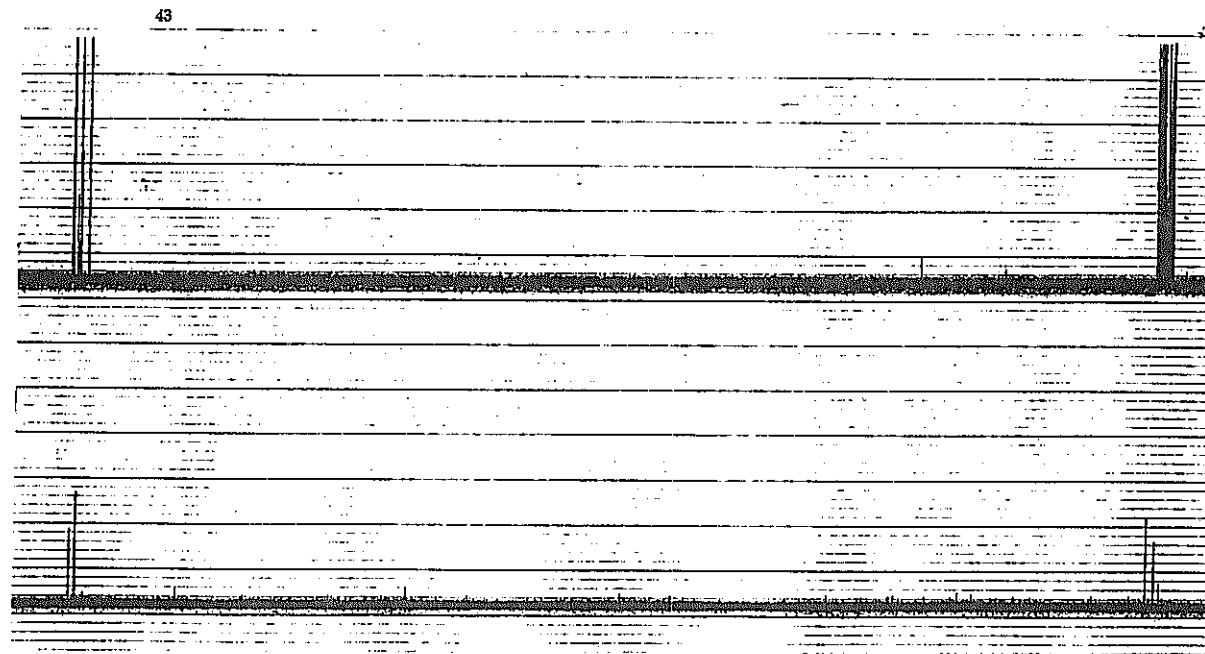


図 11 超音波探傷結果  
( K材 GS9.5 )





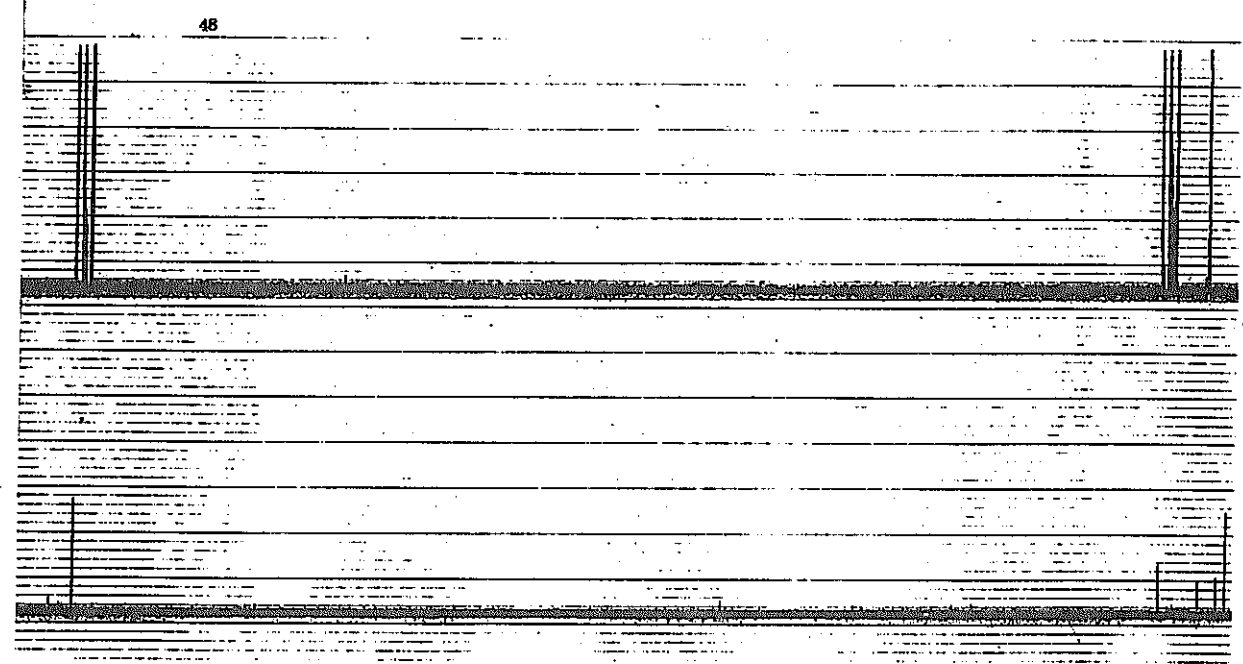
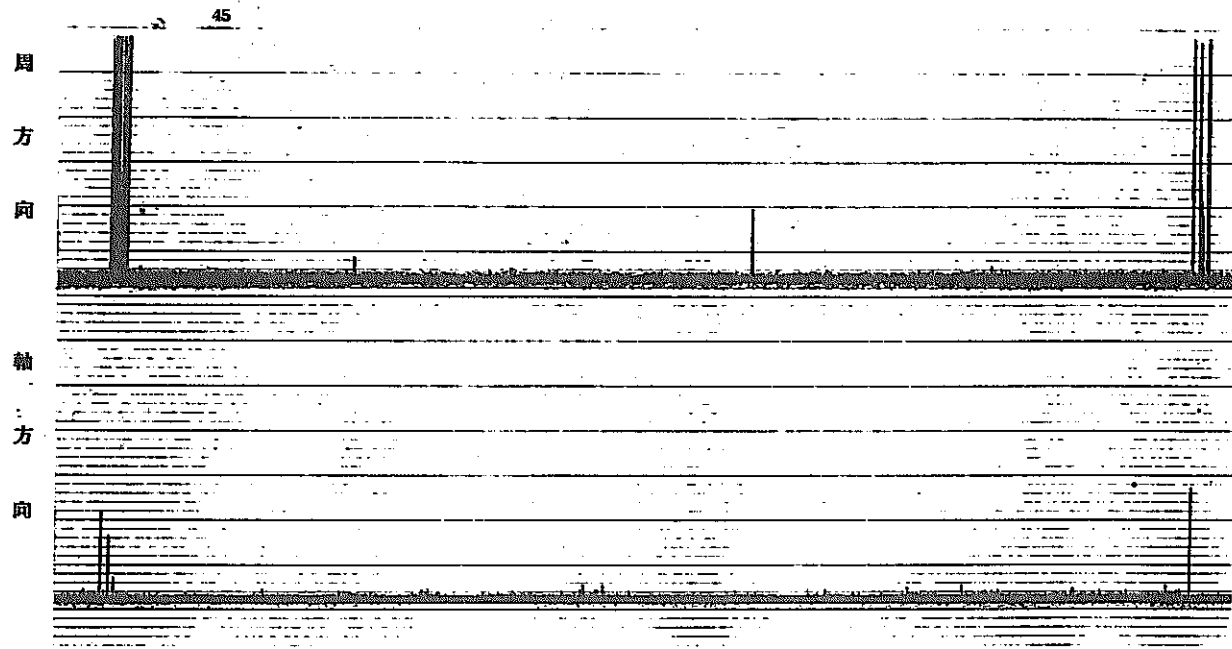


图 12 超音波探傷結果  
( K材 GS9.5 )

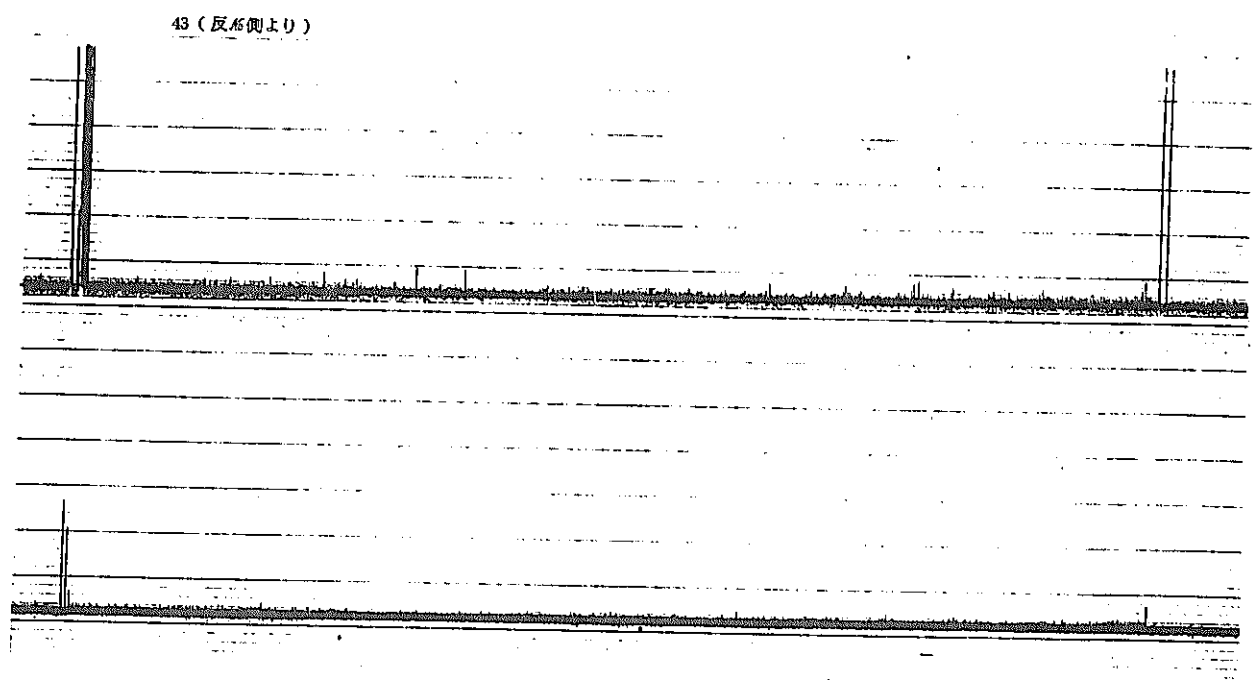
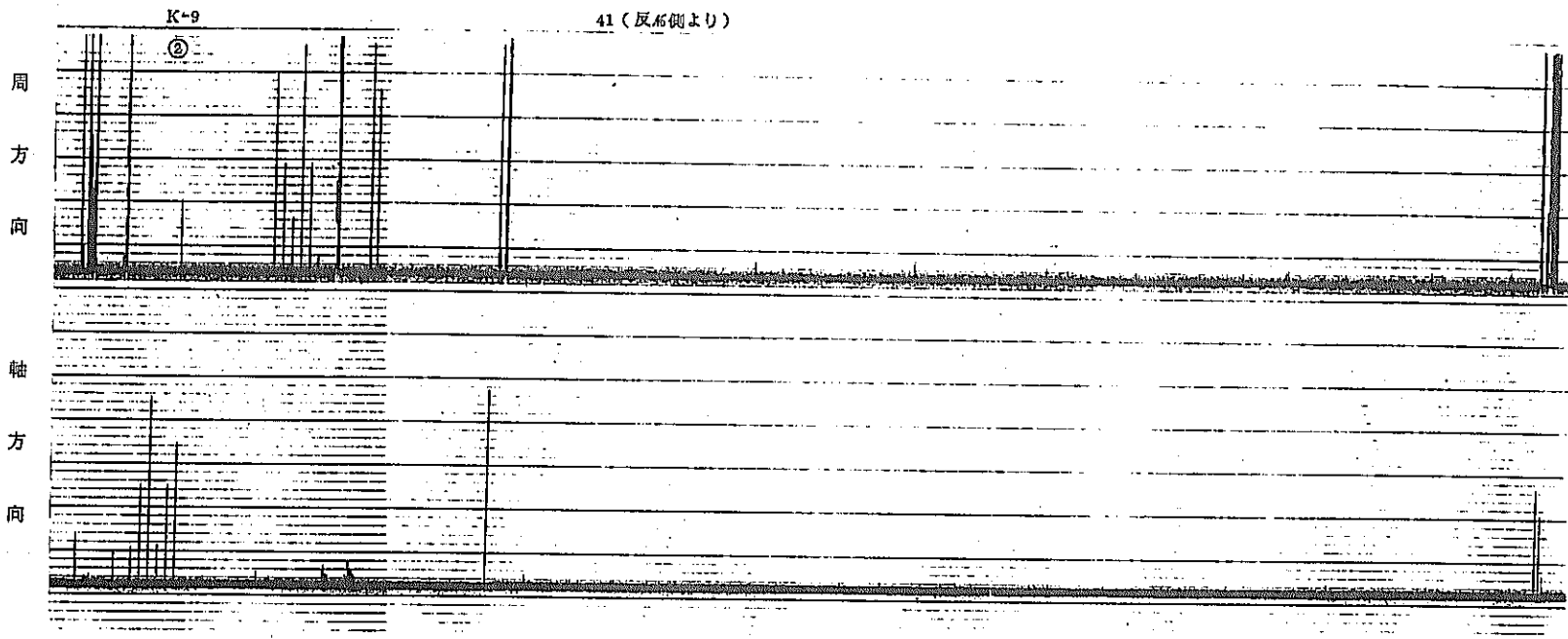


图 13 超声波探傷結果  
(K材 GS9.5)

45 (反転側より)

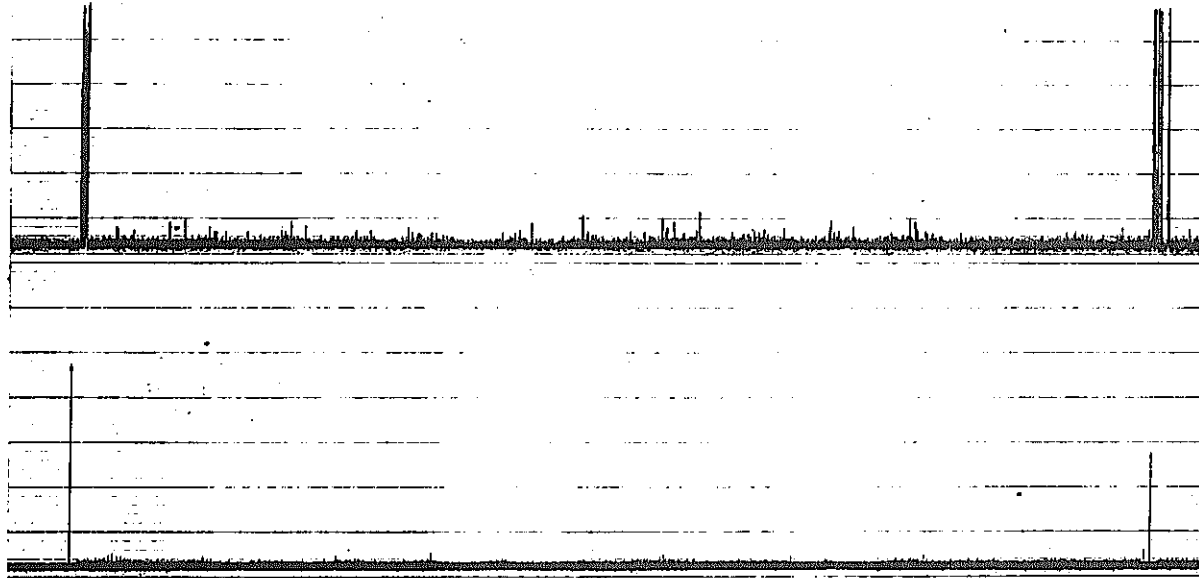
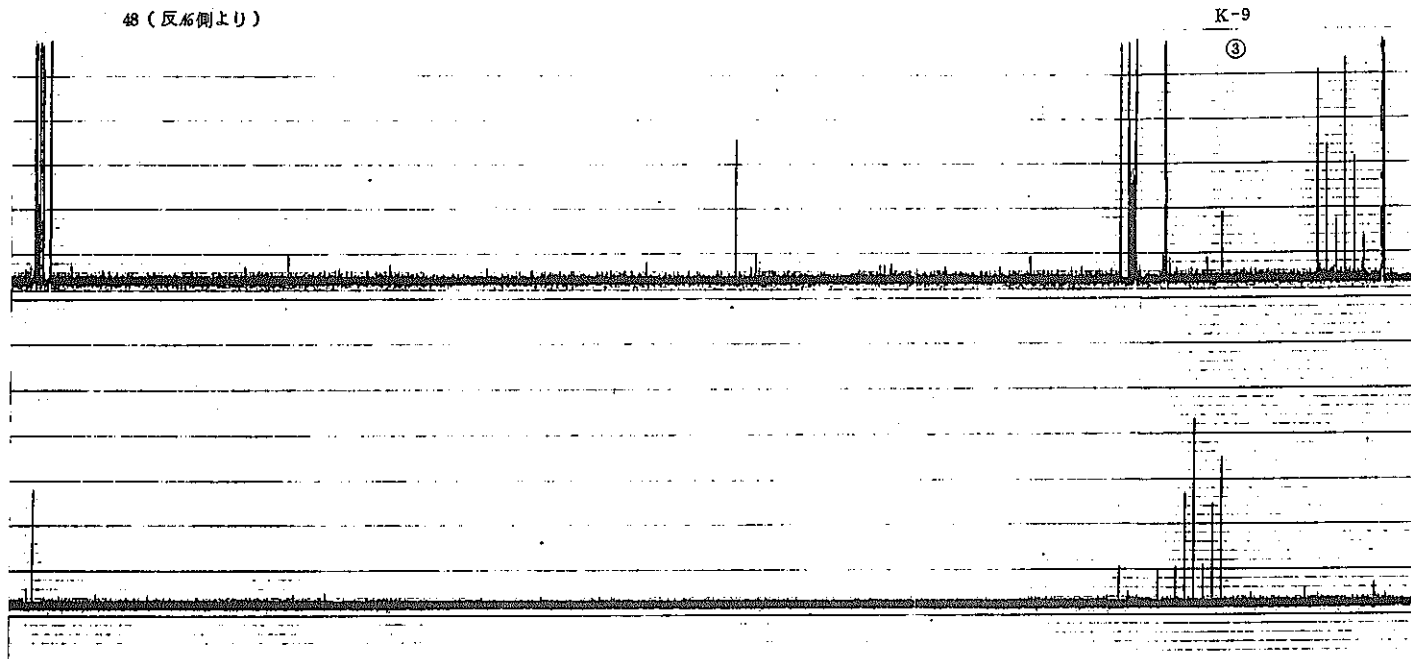


図14 超音波探傷結果  
(K材 GS9.5)

48 (反転側より)



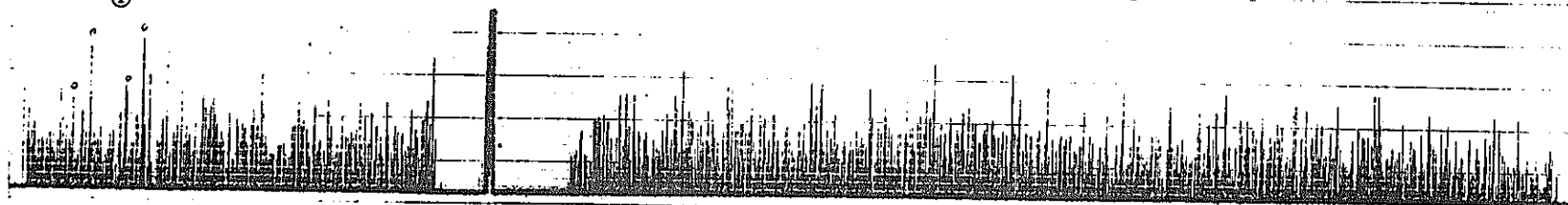
周  
方  
向  
  
軸  
方  
向

7-1 (左側より)

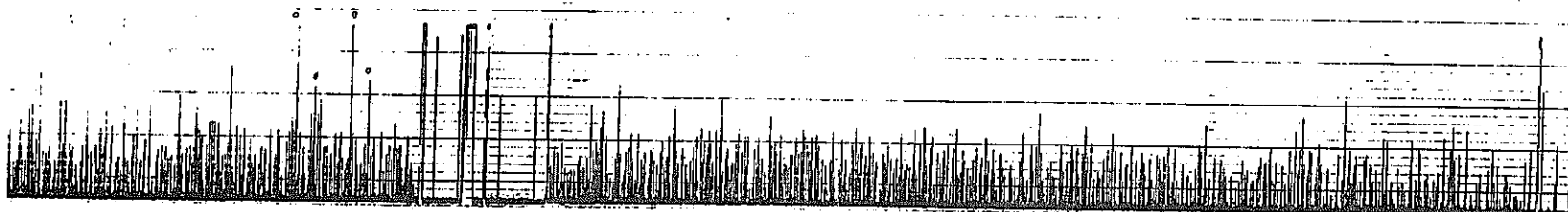
S-7

①

軸  
方  
向



周  
方  
向



7-3

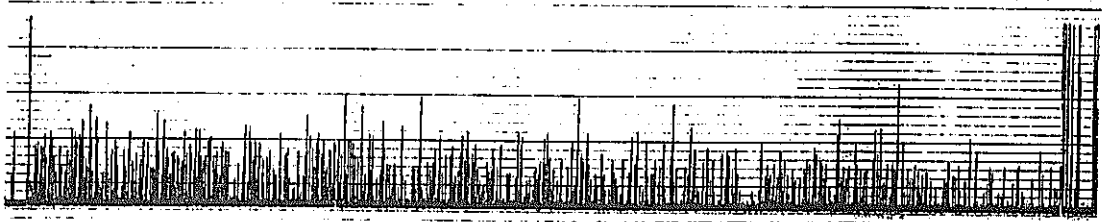
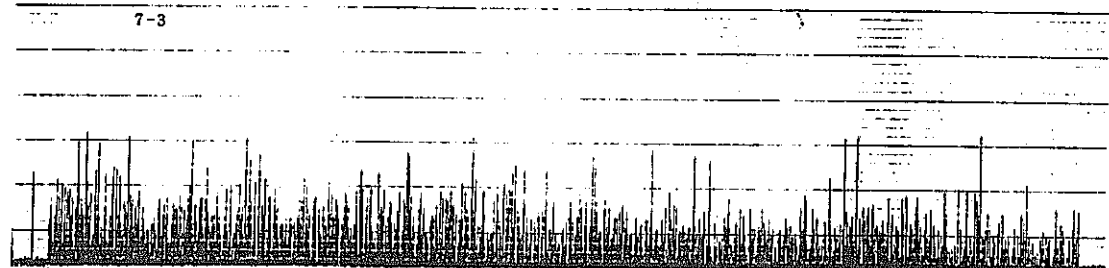
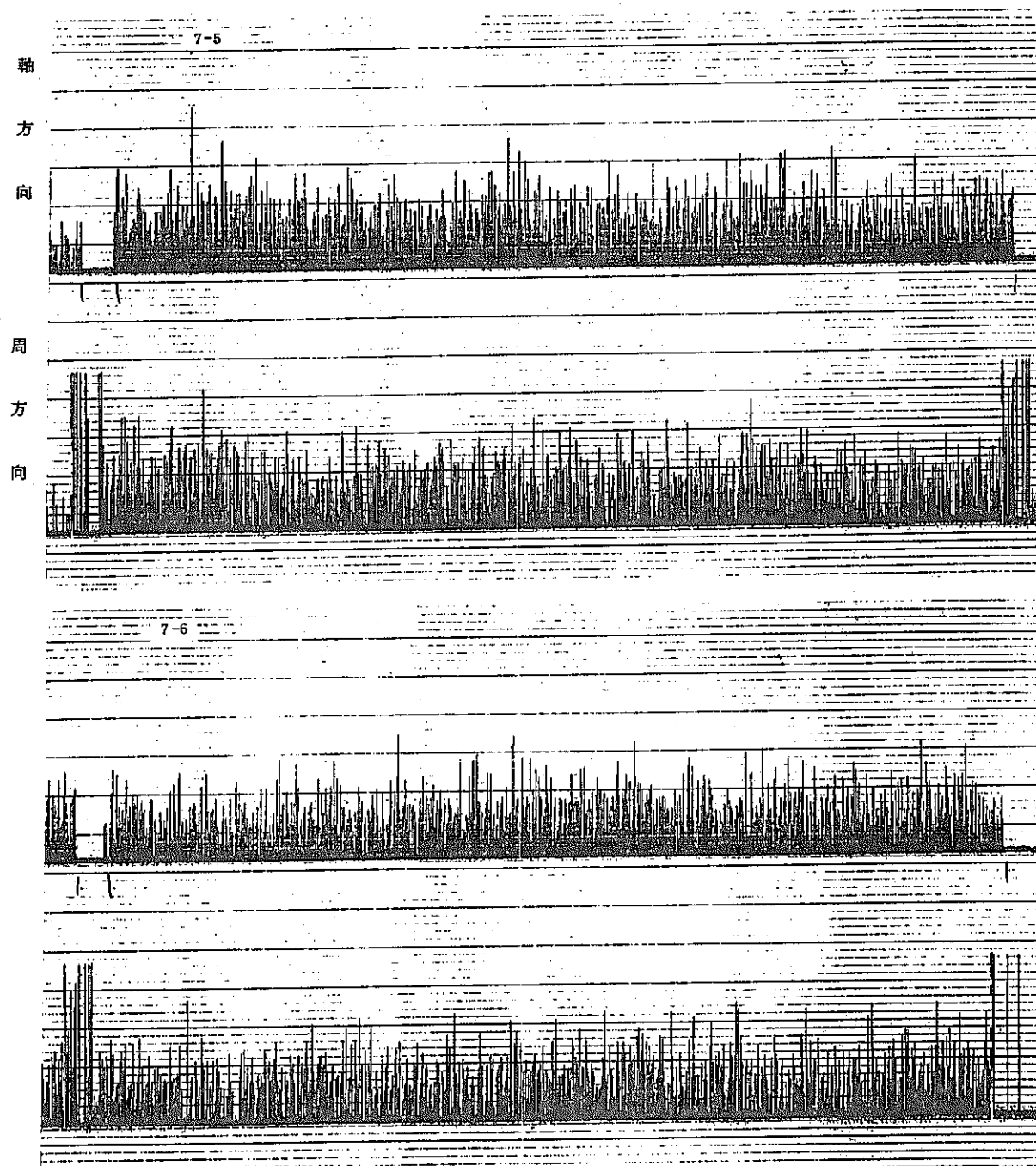


图 15 超音波探傷結果  
(S材 GS7.5)

图 16 超音波探傷結果  
(S材 GS7.5)



7-1 (反側より)

8-7

②

軸

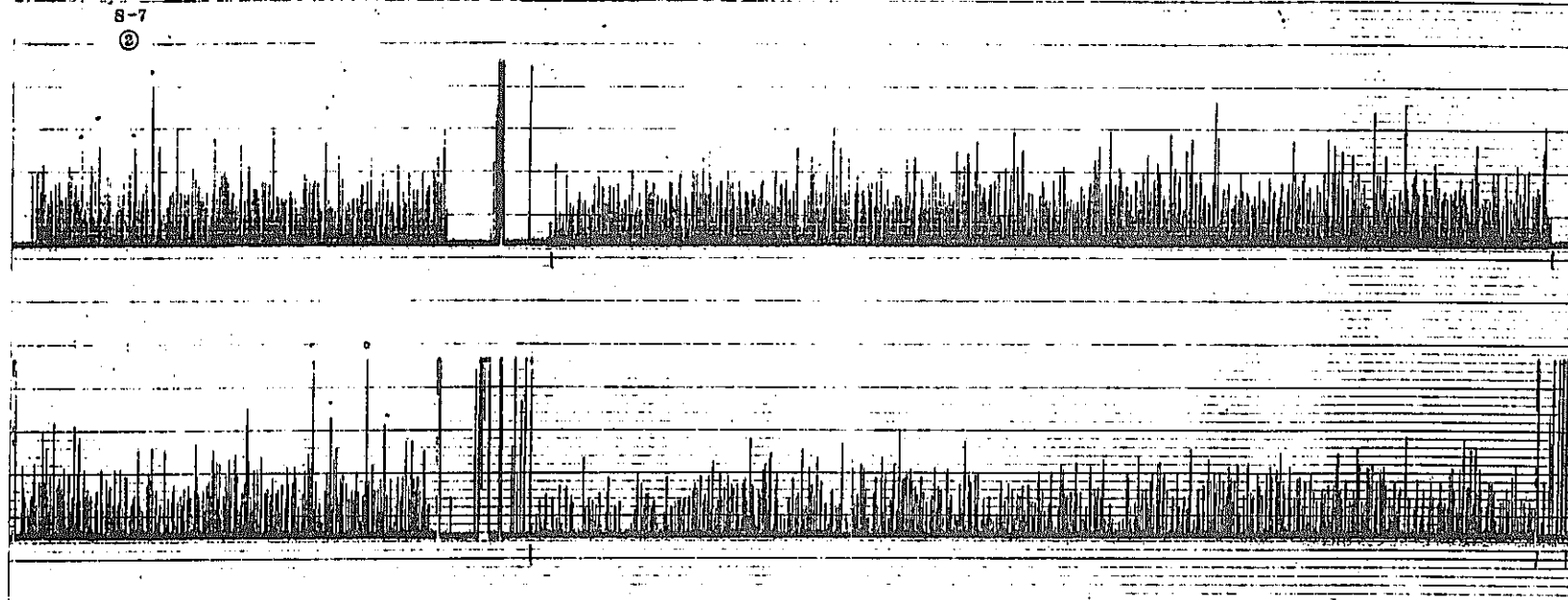
方

向

周

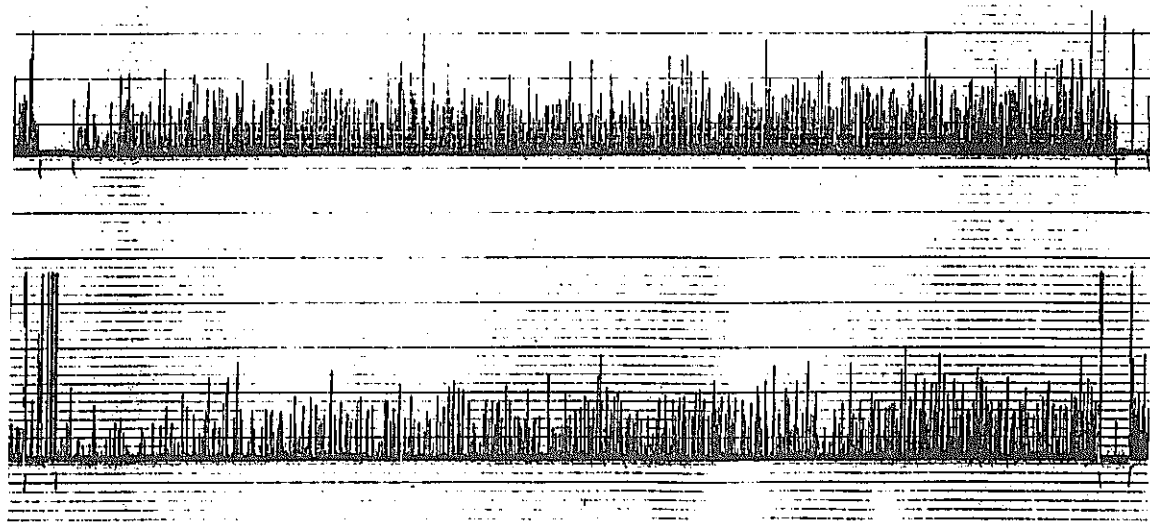
方

向



7-3

図17 超音波探傷結果  
(S材 GS7.5)



7-5

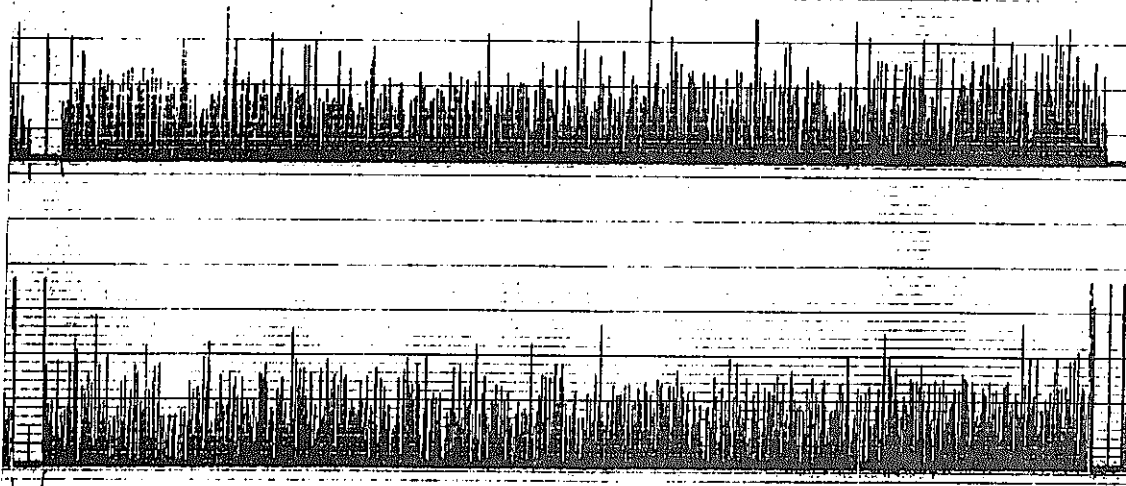
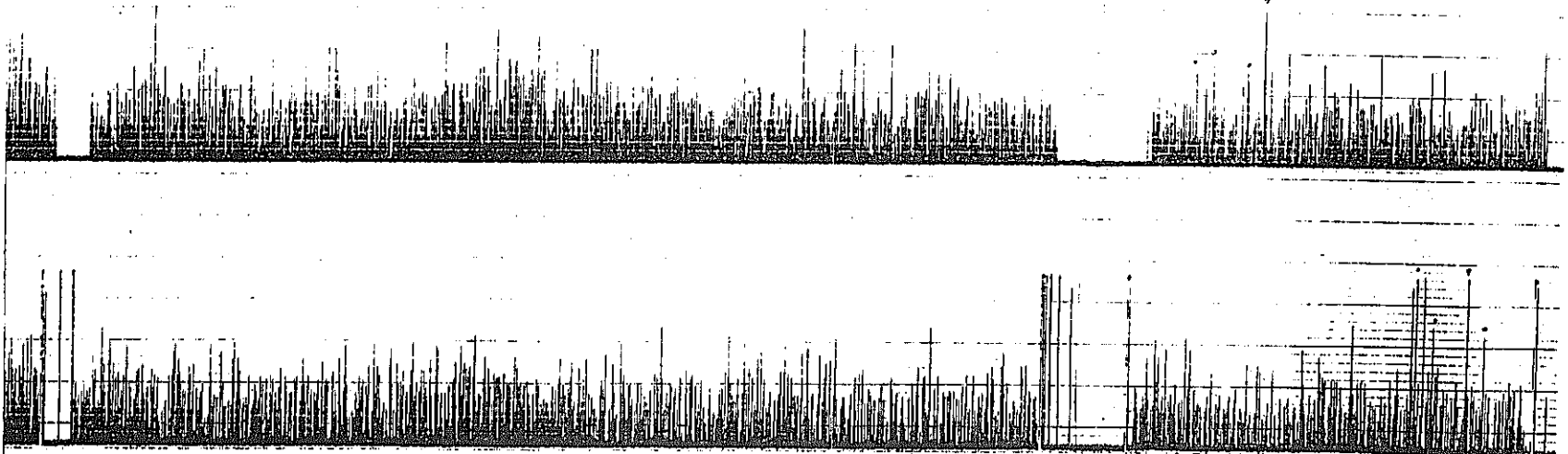


图 18 超音波探傷結果  
(S材 GS7.5)

7-6



S-7

③

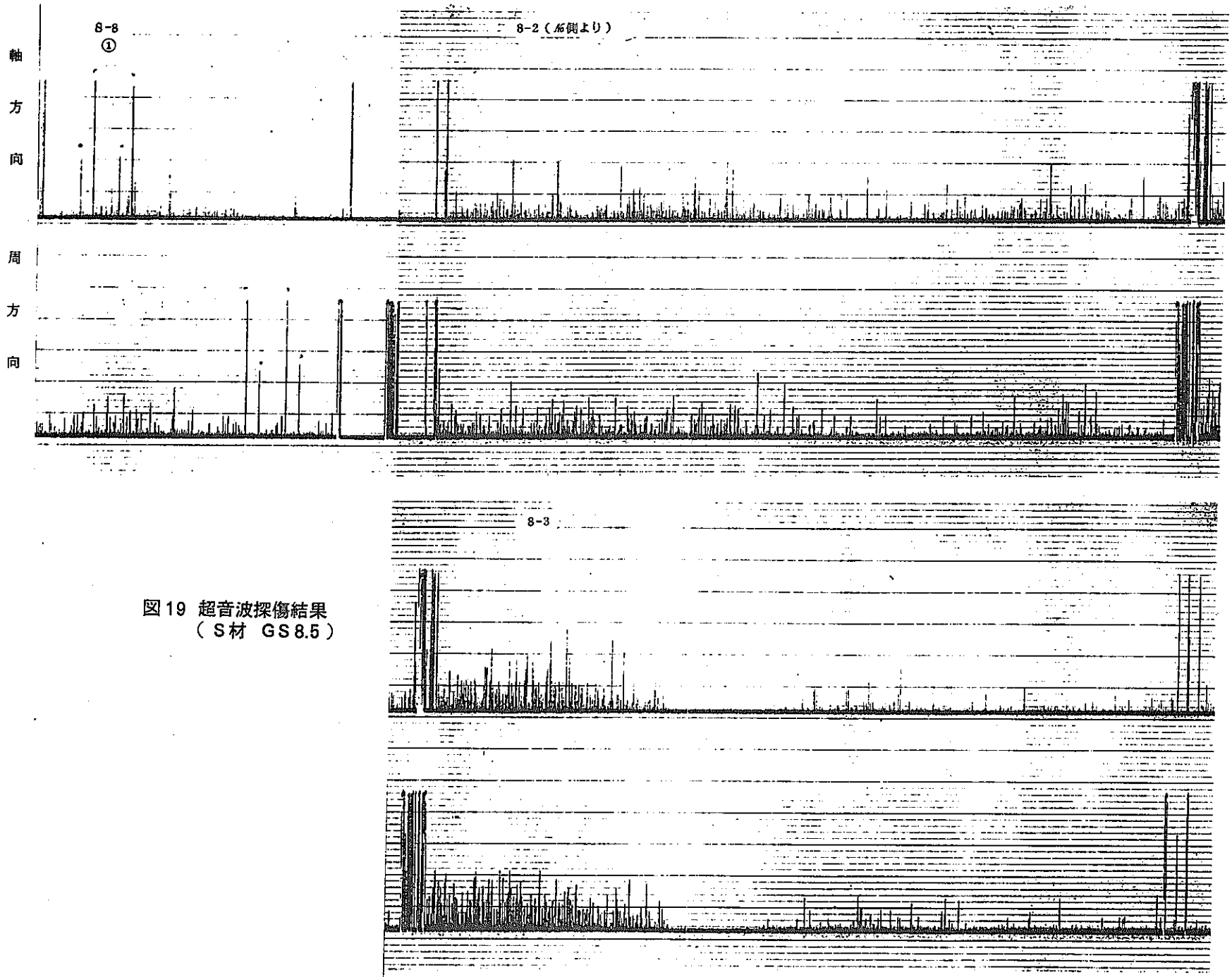


図19 超音波探傷結果  
(S材 GS8.5)



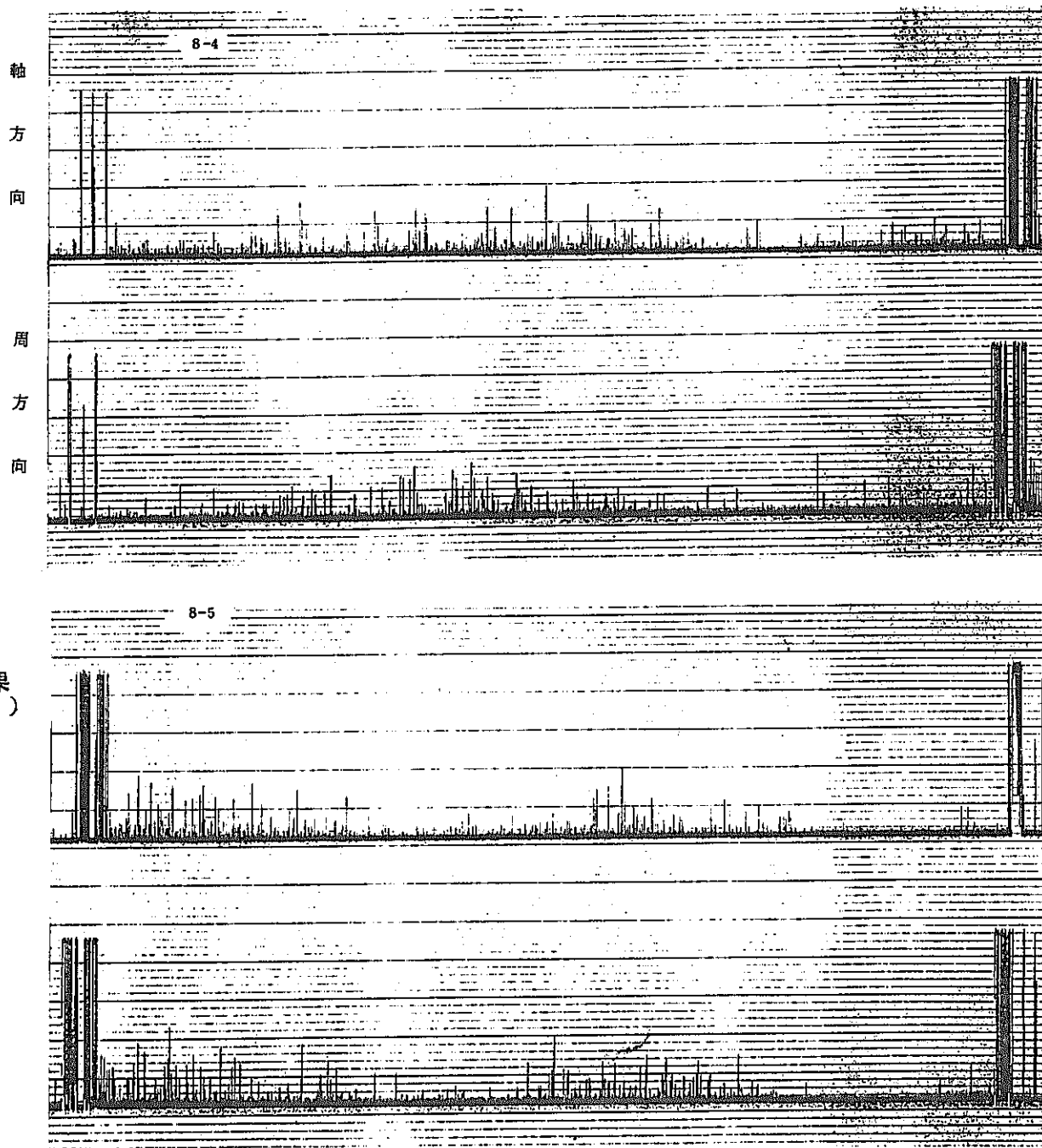


圖 20 超音波探傷結果  
(S材 GS8.5)

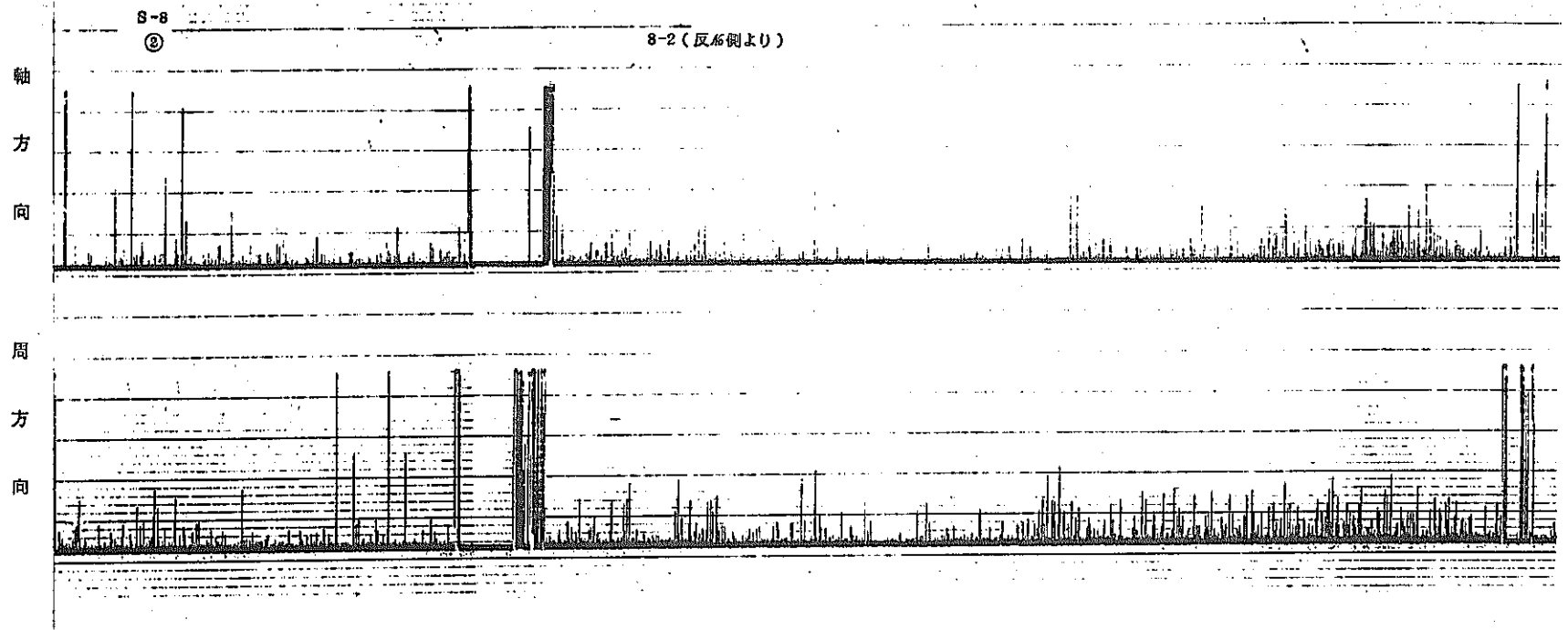
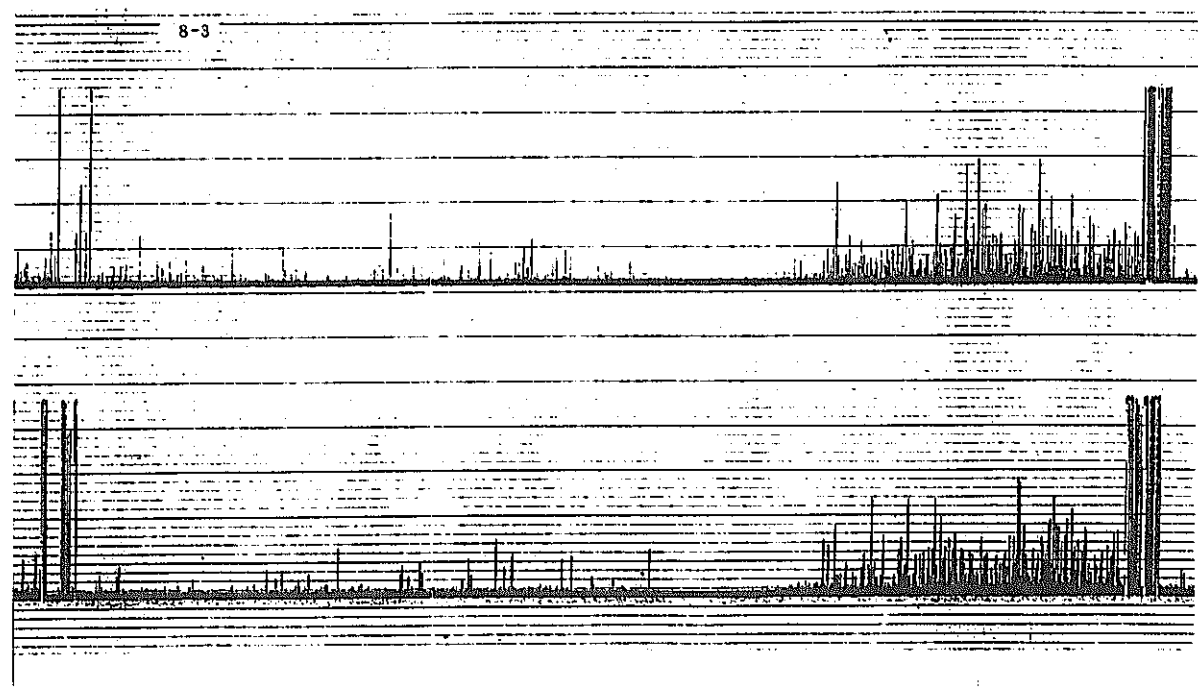


图 21 超音波探傷結果  
(S材 GS8.5)



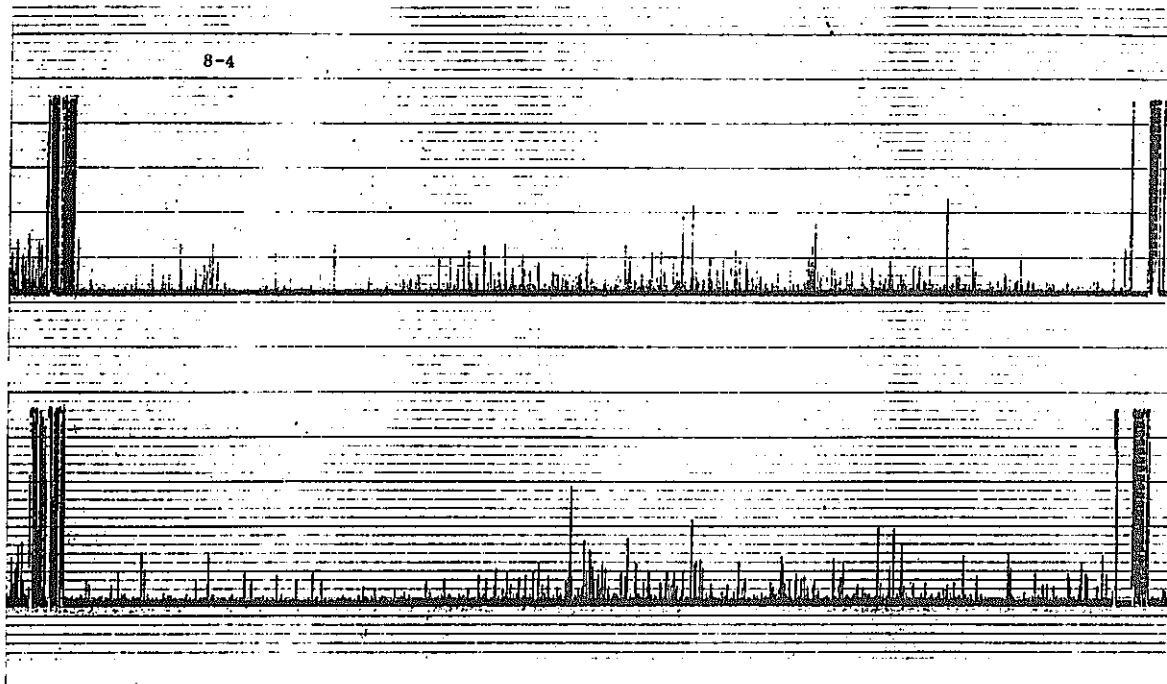
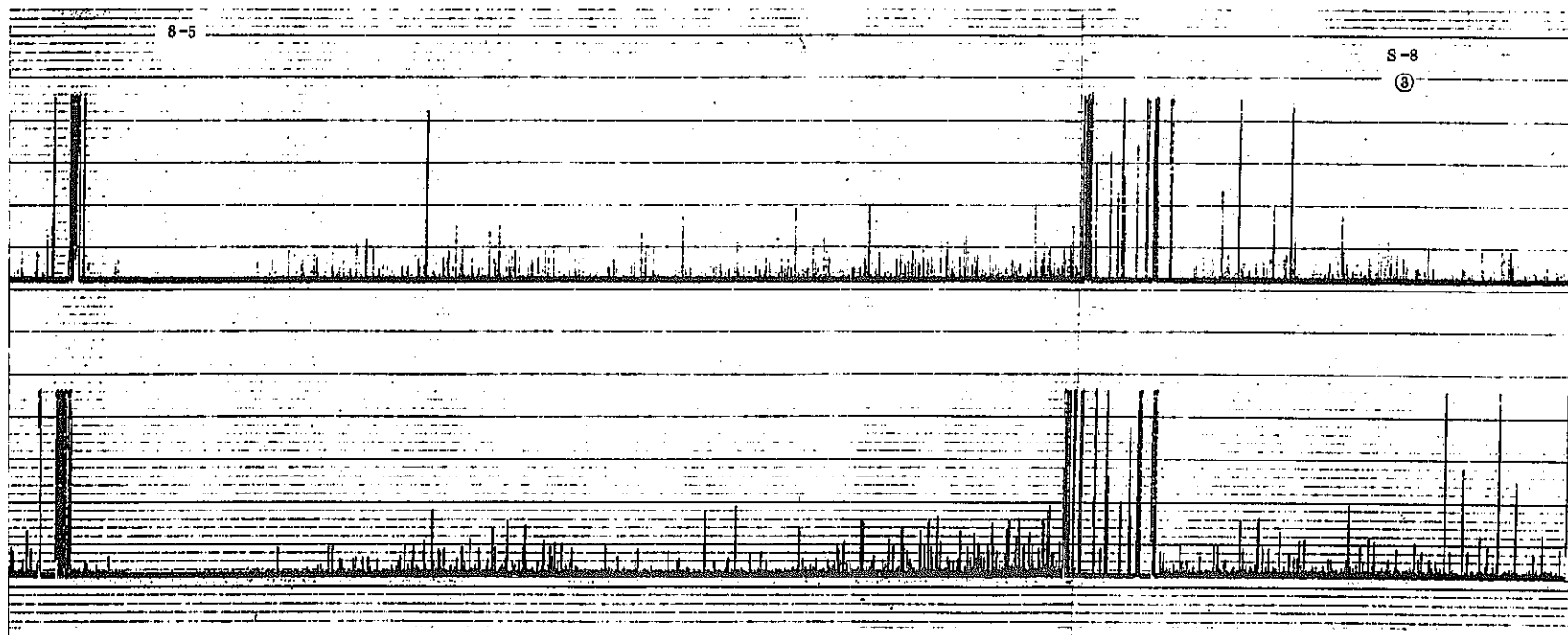


图 22 超音波探傷結果  
(S材 GS8.5)



軸  
方  
向  
  
周  
方  
向

軸  
方  
向  
  
周  
方  
向

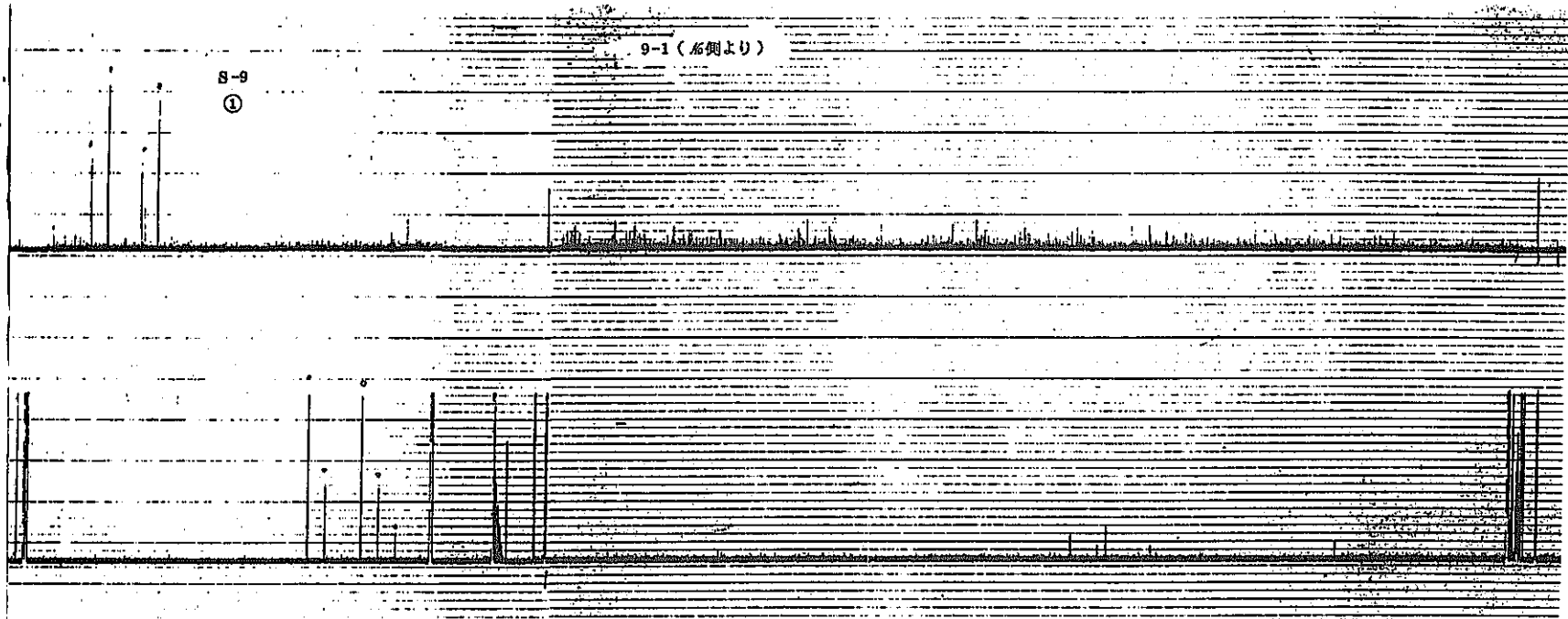
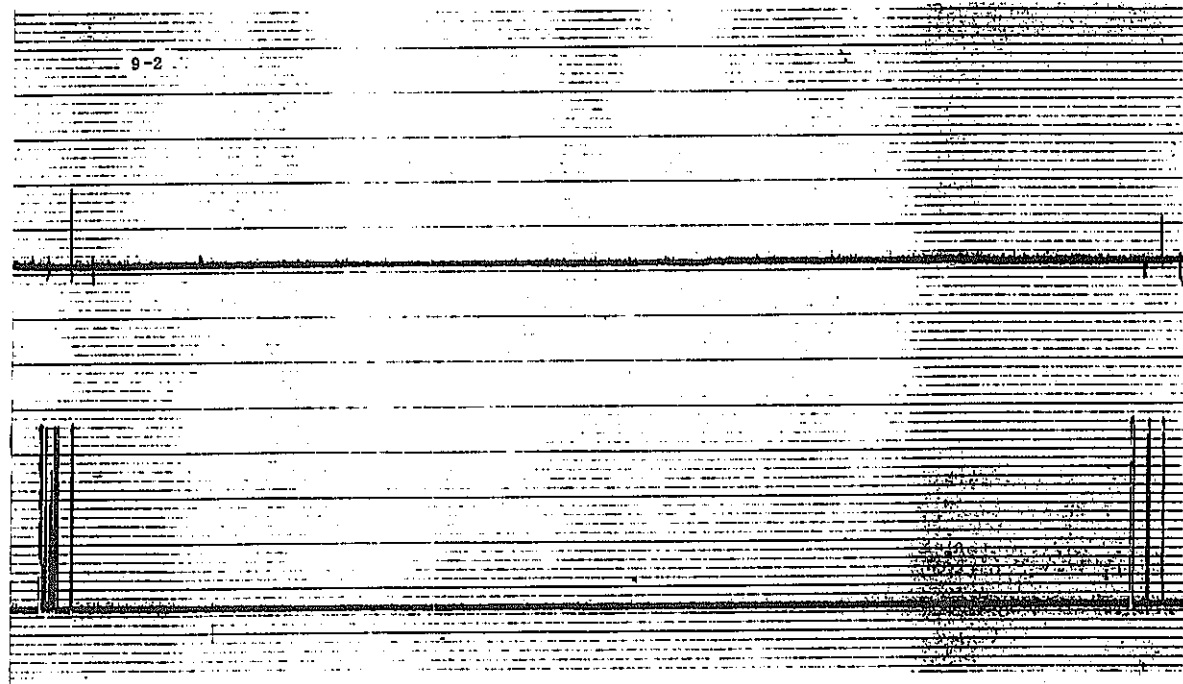


図 23 超音波探傷結果  
(S材 GS9.5)



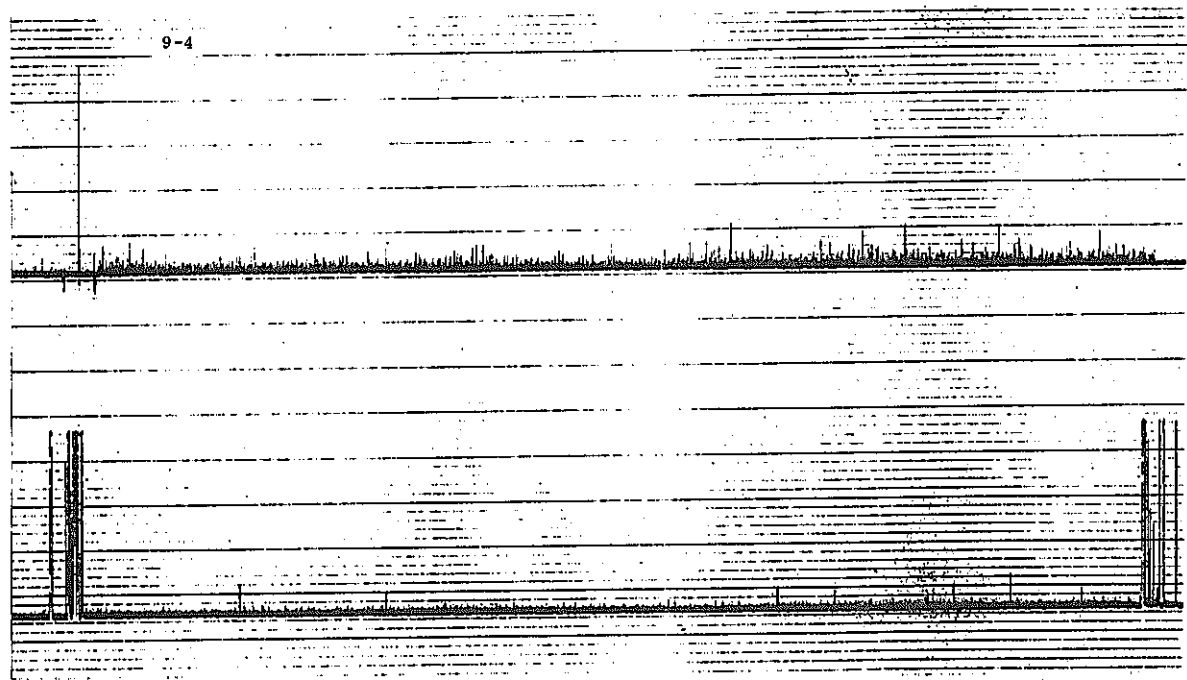
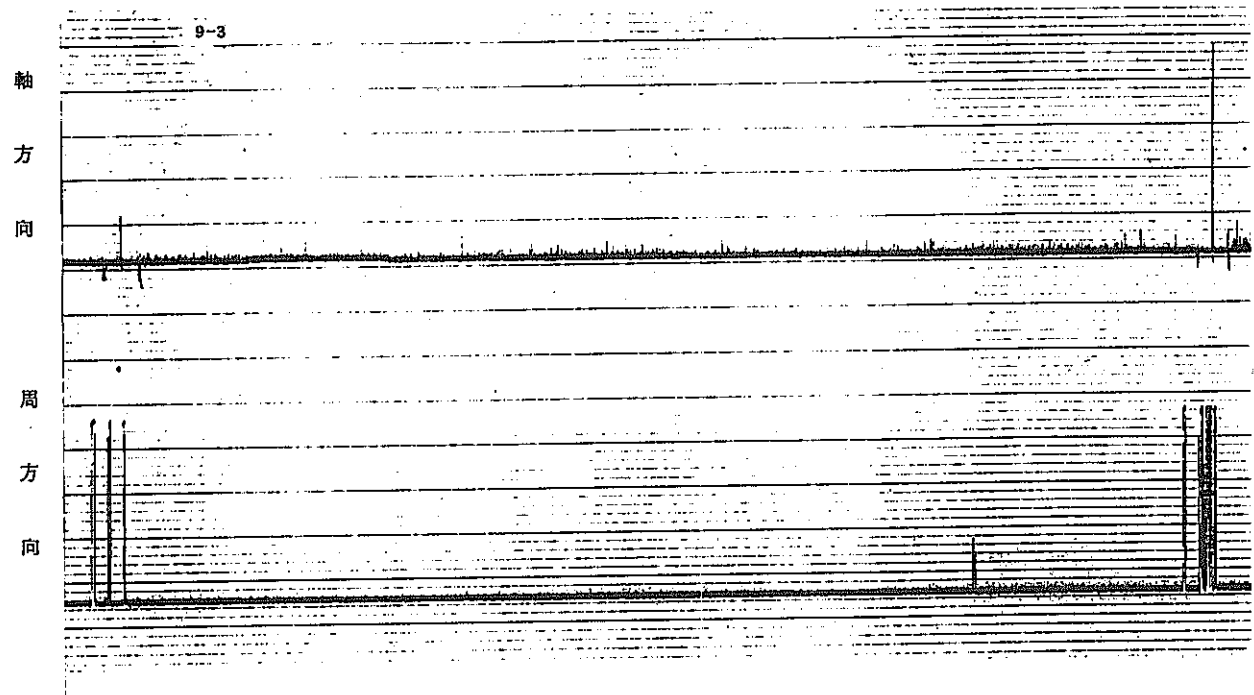


图 24 超声波探傷結果  
(S材 GS9.5)

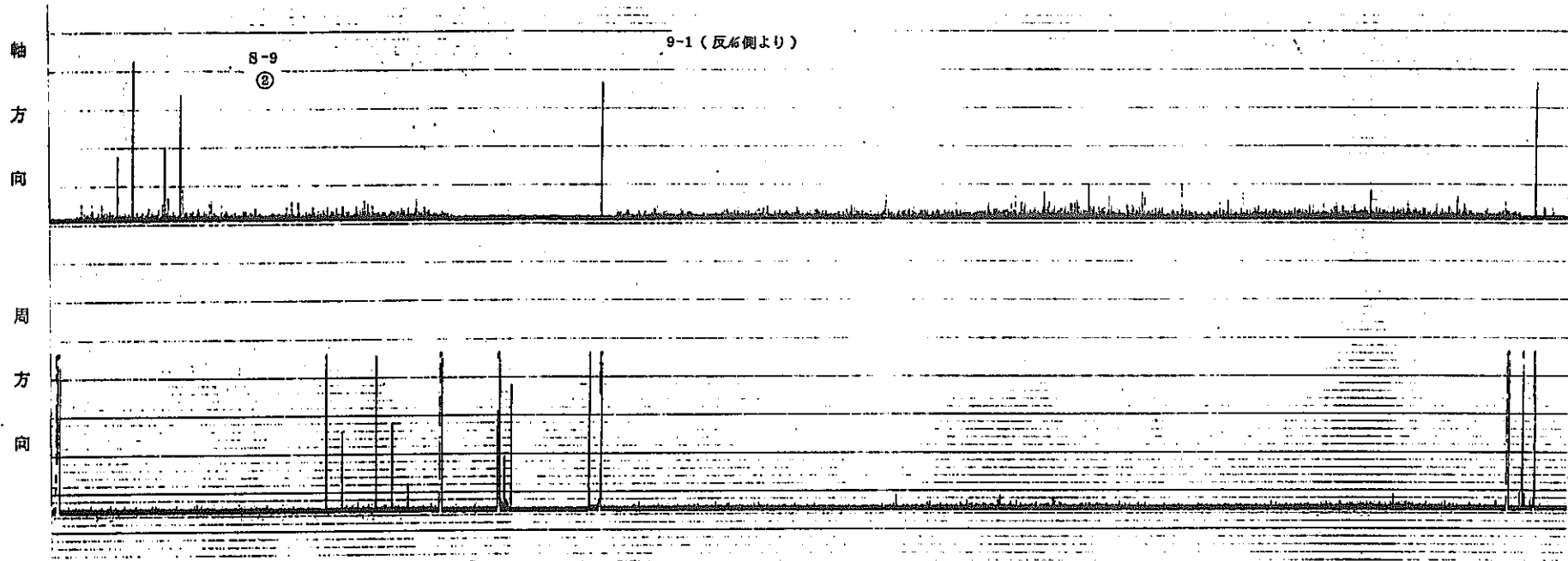
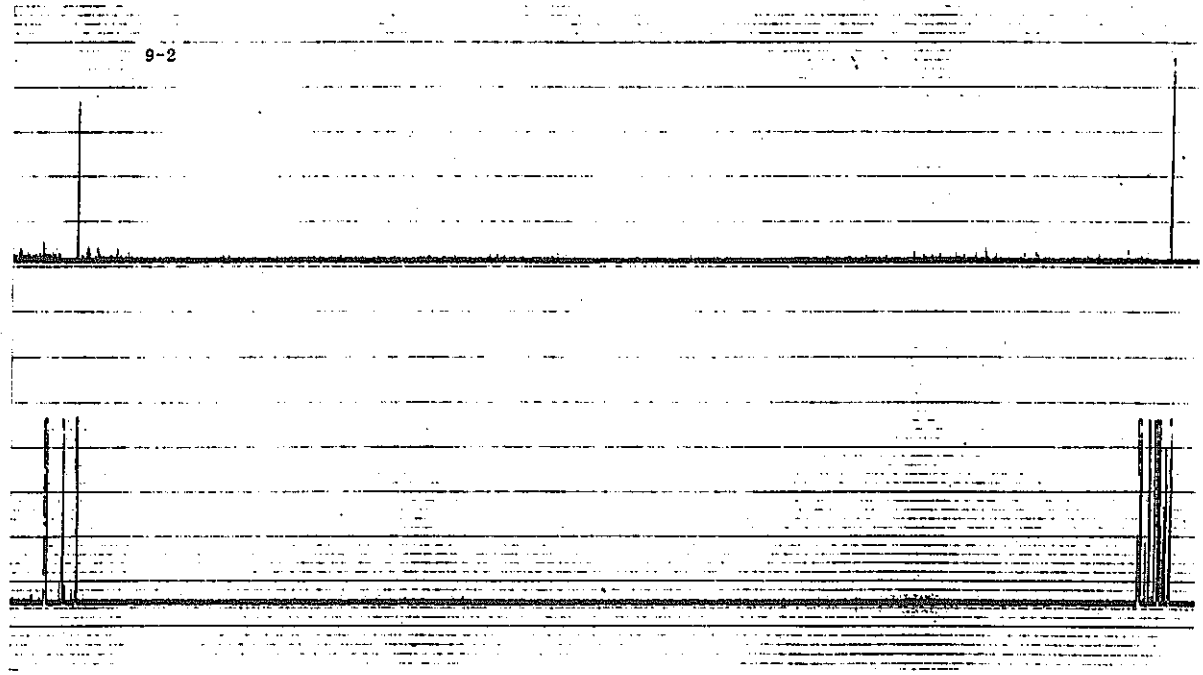


図 25 超音波探傷結果  
( S材 GS9.5 )



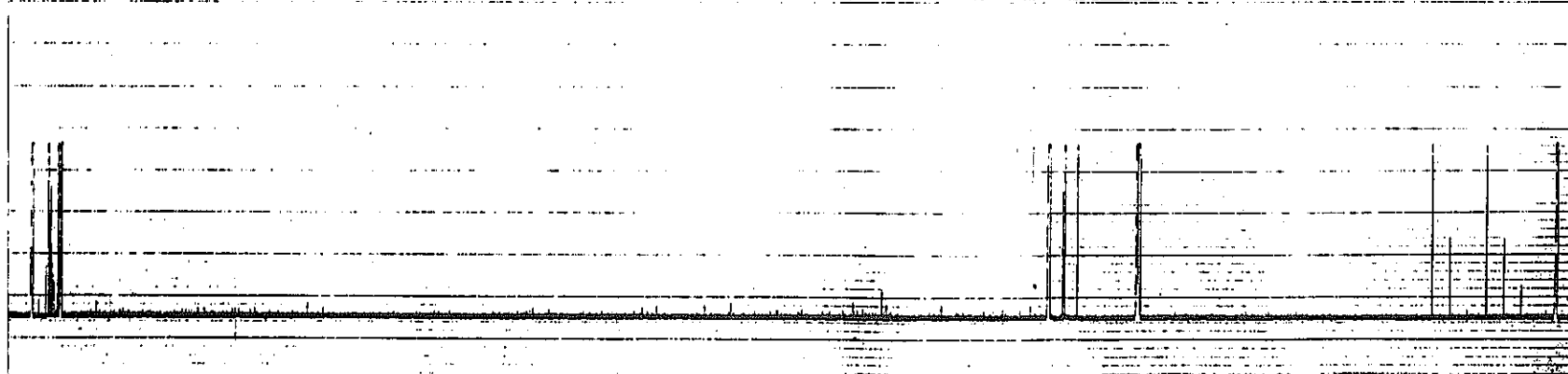
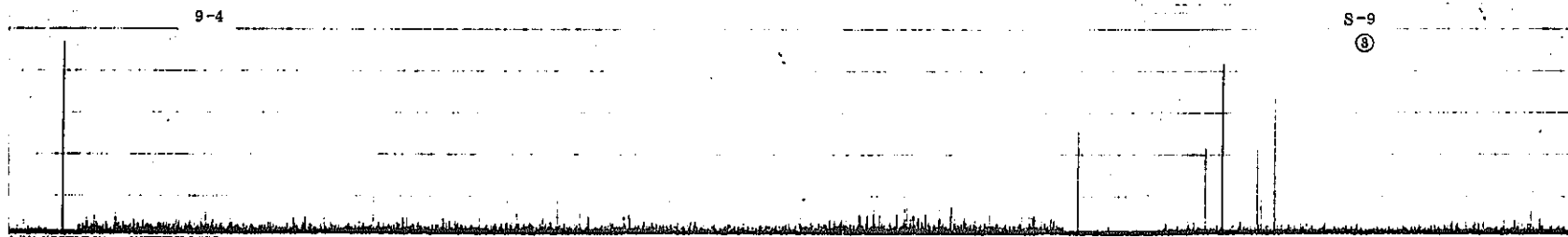
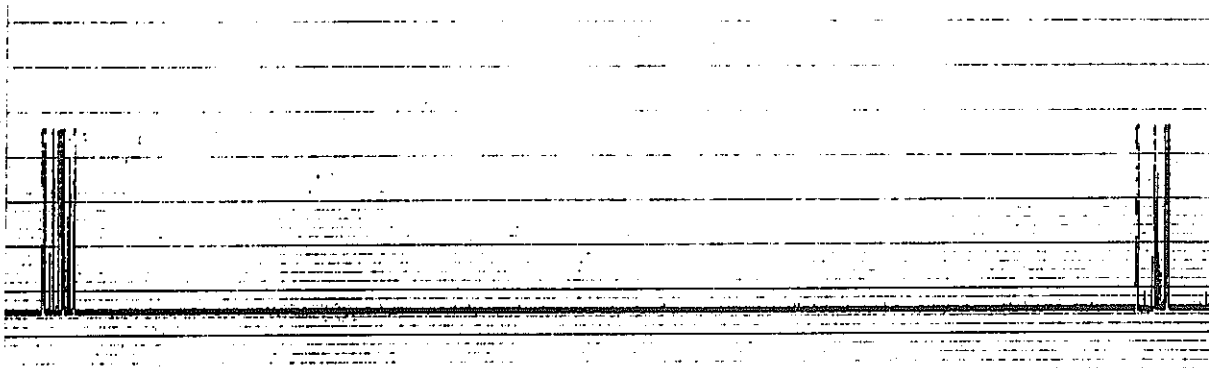
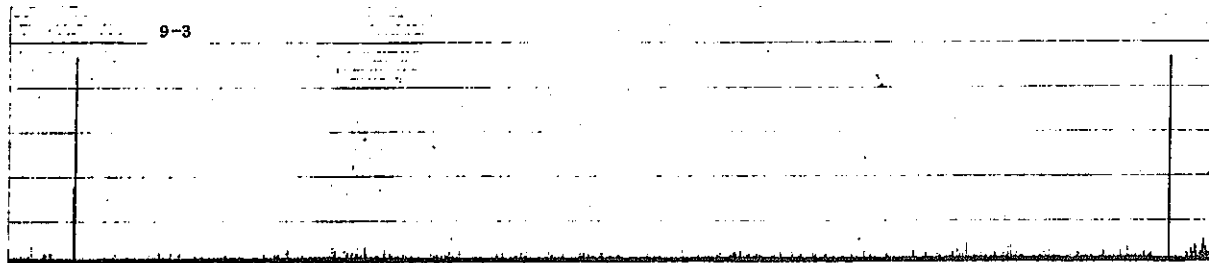


图 26 超音波探傷結果  
(S材 GS9.5)

軸  
方  
向  
周  
方  
向