

# もんじゅ蒸気発生器伝熱管用超音波探傷装置の開発

R&D (試作試験) 成果のまとめ

1992年11月

動力炉・核燃料開発事業団  
大洗工学センター

この資料は、動燃事業団社内における検討を目的とする社内資料です。ついでに複製、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないよう管理して下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう注意して下さい。

本資料についての問合せは下記に願います。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

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)

## もんじゅ蒸気発生器伝熱管用超音波探傷装置の開発 R&D（試作試験）成果のまとめ

為平浩一<sup>\*1</sup>、永井桂一<sup>\*1</sup>、横山邦彦<sup>\*1</sup>、  
荒邦彦<sup>\*2</sup>、林道寛<sup>\*1</sup>

### 要 旨

本報告書は、高速増殖原型炉もんじゅ建設所蒸気発生器伝熱管の体積試験に使用する超音波探傷試験装置の開発に関し、昭和55年より59年にかけて実施された試作試験に関するR&D成果についてまとめたものである。

当該R&Dは、超音波ビームを電子的に回転走査することで伝熱管の全周全長を内面より漏れなく探傷する、管内挿入マルチアレイ型電子的回転走査式プローブを中心とした試験装置の開発に関するものである。ここではプローブの複合化、プローブ位置検出性能の向上、マルチチャンネル超音波探傷器の構成等に関する検討及び試作試験を実施し、装置単体レベルで所定の機能性能を確保するに至った。

実機仕様はここでのR&D成果をベースとして定めたものであり、本成果のまとめは実機全体システムを構築する上での指針となるものである。

---

\*1：大洗工学センター 機器システム開発室

\*2：高速増殖炉もんじゅ建設所 開発推進室

# Development of the ultrasonic testing equipment for FBR Result of R&D

Koichi Tamehira<sup>\*1</sup>, Keichi Nagai<sup>\*1</sup>,  
Kunihiko Yokoyama<sup>\*1</sup>, Kuniaki Ara<sup>\*2</sup>,  
Hiroshi Rindo<sup>\*1</sup>

## abstract

This report describes the development of multi-array type probe for FBR steamgenerator tube.

We studied integration between three kinds of probes, which were for axial flaw, for circumferential flaw and for wall thickness flaw, detecting method of accuracy locating probe and basic composition of multi-channel detector. It was confirmed that each device had object performance in performance test.

We shall use this result to study design and manufacture of ultrasonic testing equipment for steamgenerator of FBR Monju.

---

\*1 : System and Components Development Section, O-arai Engineering Center

\*2 : Development Co-ordination Section, Monju Construction Office

## 目 次

1、まえがき	1
2、超音波探傷システム	10
2.1 検査対象及び欠陥検出目標	10
2.2 システム構成	10
2.3 検査手順	10
3、マルチアレイ型複合プローブ	18
3.1 プローブ方式	18
3.2 マルチアレイ型複合プローブの構成	18
3.3 送受波子条件	19
3.4 構成部品の検討	19
3.5 内蔵回路	20
3.6 複合プローブ試作試験	23
4、プローブ位置検出装置	72
4.1 構 成	72
4.2 プローブ位置検出試験	72
4.3 プローブ位置表示	72
5、超音波探傷装置	80
5.1 構 成	80
5.2 機能確認試験	82
6、組合せ試験	100
6.1 プローブ挿入試験	100
6.2 超音波探傷装置組合せ試験	101
7、まとめ	122
8、あとがき	124
参考文献	125

## 表リスト

表-1.1	R&D成果一覧表	2
表-1.2	成果内容	3
表-2.1	装置構成	12
表-2.2	超音波探傷装置の機能	13
表-2.3	基本要件	14
表-3.1	各種高速化プローブの検討	26
表-3.2	条件設定用送受波子の仕様	27
表-3.3	送受波子条件の検討	28
表-3.4	構成部品の検討	29
表-3.5	複合プローブ回路の共用性	32
表-3.6	複合プローブ性能確認試験（軸方向欠陥）	33
表-3.7	複合プローブ性能確認試験（周方向欠陥）	34
表-3.8	複合プローブの仕様	35
表-5.1	マルチチャンネル式超音波探傷装置仕様	83
表-5.2	機能確認試験	84
表-6.1	各挿入位置での挿入圧力と速度	103

## 図リスト

図-2.1	超音波探傷全体システムの構成	16
図-2.2	検査フロー	17
図-3.1	超音波ビームの走査方法	36
図-3.2	複合プローブの全体配置	37
図-3.3	各種欠陥探傷方式	38
図-3.4	超音波探傷装置の構成ブロック図	39
図-3.5	マルチアレイ型プローブ回路構成ブロック図	40
図-3.6	チャンネル走査方式による探傷速度の検討	41
図-3.7	試作パルサ回路 (1ch.分)	42
図-3.8	パルサ信号切換方式	43
図-3.9	複合プローブ回路の1グループのユニット構成	44
図-3.10	中継アンプ回路図	45
図-3.11	ダミープローブ挿入試験	46
図-3.12	短縮化後の複合プローブ回路構成 (24ユニット)	47
図-3.13	マルチアレイ型複合プローブ	48
図-3.14	マルチアレイ型複合プローブ用内蔵回路図 (23ユニット)	49
図-3.15	超音波探傷装置の校正 (実験用)	50
図-3.16	試験片 T P 1 の形状図 (STBA24)	51
図-3.17	試験片 T P . 2 , 3 の形状図 (STBA24)	52
図-3.18	試験片 T P 4 の形状図 (STBA24)	53
図-3.19	試験片 T P 6 . 2 の形状図 (SUS304HTB)	54
図-3.20	試作複合プローブによる軸・周方向欠陥同時探傷試験結果	55
図-3.21	送受波感度分布測定装置の構成	56
図-3.22	軸方向欠陥探傷用プローブ送受波感度分布の測定結果 (58A-60-60-35)	57
図-3.23	複合プローブの軸方向欠陥探傷感度分布の測定結果	58
図-3.24	軸方向欠陥推定範囲	59
図-3.25	軸方向欠陥探傷結果 (直管、母材)	60
図-3.26	複合プローブによる探傷波形例 [5MHz、母材部 T P 1 (STBA24)]	61
図-3.27	軸方向欠陥探傷結果 (直管、溶接部)	62
図-3.28	軸方向欠陥探傷結果 (曲管 R 700)	63
図-3.29	周方向欠陥探傷用プローブ送受波感度分布の測定結果(58C-60-50)	64
図-3.30	複合プローブの周方向欠陥探傷感度分布の測定結果	65
図-3.31	周方向欠陥捕捉範囲	66
図-3.32	周方向欠陥探傷結果 (直管、母材部)	67
図-3.33	複合プローブによる探傷波形例 [5MHz、母材部 T P 1 (STBA24)]	68
図-3.34	周方向欠陥探傷結果 (直管、溶接部)	69

図-3.35	周方向欠陥探傷結果 (曲管 R700)	70
図-3.36	ピンホール欠陥探傷結果 [母材部直管 TP 1 (STBA24)]	71
図-3.37	ピンホール欠陥探傷結果 [溶接部直管 TP 4 (STBA24)]	71
図-4.1	プローブ位置検出機構の構成	73
図-4.2	プローブ位置検出装置の全体系統図	74
図-4.3	試験装置概要	75
図-4.4	プローブ位置検出試験結果	76
図-4.5	CRT画面への表示例	77
図-4.6	プローブ空間位置検出プログラム	78
図-4.7	挿入長さとの空間位置のシミュレーション結果	79
図-5.1	試験超音波探傷装置構成図	86
図-5.2	ソフトウェア構成	87
図-5.3	プローブ及び超音波深傷装置全体構成図	88
図-5.4	メインアンプ増幅特性	89
図-5.5	感度平準化設定例	90
図-5.6	感度平準化アンプの増幅特性	91
図-5.7	感度平準化アンプのゲイン確認	92
図-5.8	ゲート範囲の設定例	93
図-5.9	ゲート回路による信号選別機能例	94
図-5.10	Aスコープ表示例	95
図-5.11	Bスコープ表示例	96
図-5.12	ビデオ信号出力波形例	97
図-5.13	RF信号出力波形例	97
図-5.14	ピークホールド信号出力波形例	98
図-5.15	トリガ信号出力波形例	99
図-6.1	ヘリカコイル伝熱管試験体	104
図-6.2	組合せ試験装置構成図	105
図-6.3	組合せ試験における軸及び周方向欠陥探傷結果の記録例	106
図-6.4	ケーブル挿入距離と挿入圧力、挿入速度	107
図-6.5	探傷試験用モデル	108
図-6.6	複合プローブによる探傷性の検討	109
図-6.7	探傷結果表示方式	110
図-6.8	軸方向欠陥探傷結果例 (TP 1、外面欠陥)	111
図-6.9	軸方向欠陥探傷結果表示例 (TP 13)	112
図-6.10	周方向欠陥探傷結果表示例 (TP 1、外面欠陥)	113
図-6.11	伝熱管周方向模擬欠陥試験片 (TP 12)	114
図-6.12	伝熱管周方向模擬欠陥試験片 (TP 11)	115
図-6.13	超音波ビームの電子的回転走査による管周方向深傷性 (TP 11)	116
図-6.14	周方向欠陥の分布表示例	118



図-6.15	軸方向欠陥探傷結果	119
図-6.16	周方向欠陥探傷結果（直管、母材部）	120
図-6.17	ピンホール欠陥探傷結果	121

## 1. まえがき

「もんじゅ」蒸気発生器伝熱管の健全性確認試験用超音波探傷装置の開発は、昭和48年より開始されており、当初は伝熱管全周を探傷するのに探触子をモータにより回転させて行う機械的な方式がとられていた。しかし、機械的方式の場合探傷速度が遅いという問題があり、昭和55年から機械的方式に比して非常に高速で探傷可能な、電子的回転走査方式に関する装置の試作試験を実施している。実機であるもんじゅ蒸気発生器用超音波試験装置はこの電子的回転走査方式によるものであり、昭和55年より59年にかけて行われた試作試験に関するR & Dがベースとなっている。ここで得られた成果内容の概要を表-1.1、に又各年度毎の成果概要を表-1.2.1~1.2.5に示す。当該R & Dでは単一機能プローブより複合一体型へとプローブを開発すると共に、プローブを伝熱管内へ挿入引抜きを行うプローブ挿入引抜装置、マルチアレイ型プローブに対応した多チャンネル式超音波探傷器、及び実機伝熱管探傷に対する全体的なシステム構成等に関する開発を並行して行い、各装置単位で実用化の目処を得るに至った。

本書は実機全体システムの設計、製作を行う上で指針とすることを目的に、当該R&Dでの最終スペックに至るまでの開発経緯についてまとめたものである。

表-1.1 R&D成果一覧表

機器名称	55	56	57	58	59
プローブ	<p style="text-align: center;">単体機能プローブ試作試験</p> <p>1, 探傷時間短縮化を考慮した走査方式の検討 2, マルチアレイ型単一機能プローブの試作試験</p>	<p>1, 軸, 周, 減肉欠陥用プローブ部分試作 (5% t 検出可能) 2, 実規模ヘリカル挿入試験で4m/minにて10% t 検出可能</p>	<p style="text-align: center;">複合一体型プローブの試作試験</p> <p>1, 内蔵回路の検討 (48ユニット試作) 2, 48ユニットの実規模ヘリカル挿入試験 (3 at g で挿入可能)</p>	<p>1, 複合プローブ (軸, 周) 設計, 試作 2, 内蔵回路構成短縮化 (24ユニット) 3, 実規模ヘリカルへ低圧で挿入引き抜き可</p>	
プローブ挿入 引抜き装置	<p style="text-align: center;">プローブ位置検出装置の開発</p> <p>1, プローブ位置検出装置の開発</p>				
超音波探傷装置		<p style="text-align: center;">予備設計</p> <p style="text-align: center;">要素試作試験</p> <p>1, マルチチャンネル式超音波探傷装置の部分試作試験 (パルサ回路, 感度平準化回路)</p>	<p>1, 信号選別回路及び時間差測定回路につき要素試作試験を実施, 所定の性能をえた。</p>		<p style="text-align: center;">32ch超音波探傷装置の設計製作</p> <p>1, 回路各部分は所定の機能を満足した。 2, プローブとの組合せ試験 a) 複致種類の欠陥検出確認 b) 高速探傷性 (4m/min) 確認 c) 所定の欠陥検出能を確認</p>
信号収録処理装置	<p style="text-align: center;">基礎検討</p> <p>1, 信号処理システムの検討</p>	<p style="text-align: center;">モデルシステム試設計</p> <p>1, プログラムフローの検討</p>			

表-1.2.1 成果内容1

昭和55年度 R&D 成果																			
機器名称	内 容																		
1. プローブ	<p>a) 探傷時間を考慮し回転走査方式を従来の機械的方式より電子的な方式によるものに変更</p> <p>b) マルチアレイ型単一機能プローブを試作</p> <p>c) プローブ探傷性能</p> <p>①32ch軸方向欠陥探傷用プローブ</p> <table> <tr> <td>母材部</td> <td>5, 10, 20% t</td> </tr> <tr> <td>溶接部</td> <td>10, 20% t</td> </tr> </table> <p>②16ch周方向欠陥探傷用プローブ</p> <table> <tr> <td>母材部</td> <td>5, 10, 20% t</td> </tr> <tr> <td>溶接部</td> <td>10, 20% t</td> </tr> </table> <p>③16ch減肉欠陥探傷用プローブ</p> <table> <tr> <td>人工欠陥</td> <td><math>\pm 0.06</math> mm</td> </tr> <tr> <td>Na-水反応損耗部</td> <td><math>+0.45</math> mm <math>-0</math></td> </tr> </table> <p>④Uベント (R100)</p> <p>軸方向欠陥, 周方欠陥向共に20% t</p> <p>⑤感度バラツキ</p> <table> <tr> <td>軸方向欠陥探傷用プローブ (32ch)</td> <td><math>\leq 10</math> dB</td> </tr> <tr> <td>周方向欠陥探傷用プローブ (16ch)</td> <td><math>\leq 8</math> dB</td> </tr> <tr> <td>減肉欠陥探傷用プローブ (16ch)</td> <td><math>+0.03</math> mm <math>-0.04</math> mm</td> </tr> </table> <p>⑥120mケーブルによる信号の減衰</p> <p>ケーブル長2mに対して28dB減衰</p>	母材部	5, 10, 20% t	溶接部	10, 20% t	母材部	5, 10, 20% t	溶接部	10, 20% t	人工欠陥	$\pm 0.06$ mm	Na-水反応損耗部	$+0.45$ mm $-0$	軸方向欠陥探傷用プローブ (32ch)	$\leq 10$ dB	周方向欠陥探傷用プローブ (16ch)	$\leq 8$ dB	減肉欠陥探傷用プローブ (16ch)	$+0.03$ mm $-0.04$ mm
母材部	5, 10, 20% t																		
溶接部	10, 20% t																		
母材部	5, 10, 20% t																		
溶接部	10, 20% t																		
人工欠陥	$\pm 0.06$ mm																		
Na-水反応損耗部	$+0.45$ mm $-0$																		
軸方向欠陥探傷用プローブ (32ch)	$\leq 10$ dB																		
周方向欠陥探傷用プローブ (16ch)	$\leq 8$ dB																		
減肉欠陥探傷用プローブ (16ch)	$+0.03$ mm $-0.04$ mm																		

表-1.2.1 (続き)

機器名称	内 容
2. プロープ位置検出装置	<p>a) 本装置はケーブル巻取りドラムの回転数とケーブルの浮子数の信号及び伝熱管溶接部の探傷信号の3種の情報を組合せることによりプロープの挿入位置を検出するものである。試作機の位置検出精度を以下に示す(70m挿入時)。</p> <p>①ケーブル挿入長さから求めた位置 —— 0~0.4 m</p> <p>②3種類の信号より求めた位置 ————— ±0.1 m</p>
3. 組合せ試験	<p>a) プロープは2~3atgの水圧で実規模ヘリカルコイル伝熱管全長に亘り挿入可能。</p> <p>b) 実規模ヘリカルコイル伝熱管へプロープを挿入し探傷試験を行った結果、20% tの軸方向及び周方向欠陥が検出可能であった。</p>
	以下余白

表-1.2.2 成果内容2

昭和56年 R&D 成果																						
機器名称	内 容																					
1. プローブ	<p>a) 探傷精度向上を考慮し、送受波子条件を決定</p> <table border="0"> <tr> <td>56A60-60-35</td> <td>( 5MHz )</td> </tr> <tr> <td>56C60-50</td> <td>( 5MHz )</td> </tr> <tr> <td>56T10-10</td> <td>(10MHz )</td> </tr> </table> <p>b) 単体検出性能</p> <table border="0"> <thead> <tr> <th></th> <th>母 材</th> <th>溶接部</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>軸方向欠陥</td> <td>5% t</td> <td>10% t</td> </tr> <tr> <td>周方向欠陥</td> <td>5% t</td> <td>10% t</td> </tr> <tr> <td>ピンホール</td> <td>φ0.5</td> <td>φ0.5</td> </tr> <tr> <td>減肉欠陥</td> <td colspan="2">5% t ± 0.03mm</td> </tr> </tbody> </table> <p>c) 32chマルチアレイ型プローブ試作試験</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>①中継アンプ設置120mケーブル接続状態で5% t 欠陥検出可</li> <li>②プローブ回路のアースライン、シールド強化によりSN比向上</li> <li>③プローブ回路のプリント基板化により電氣的機械的信頼性向上</li> </ol> <p>d) マルチチャンネル式超音波探傷器の予備設計</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>①送受信部の部分試作を行い機能を確認し基本回路を設計した。</li> </ol>	56A60-60-35	( 5MHz )	56C60-50	( 5MHz )	56T10-10	(10MHz )		母 材	溶接部	軸方向欠陥	5% t	10% t	周方向欠陥	5% t	10% t	ピンホール	φ0.5	φ0.5	減肉欠陥	5% t ± 0.03mm	
56A60-60-35	( 5MHz )																					
56C60-50	( 5MHz )																					
56T10-10	(10MHz )																					
	母 材	溶接部																				
軸方向欠陥	5% t	10% t																				
周方向欠陥	5% t	10% t																				
ピンホール	φ0.5	φ0.5																				
減肉欠陥	5% t ± 0.03mm																					
2. 信号処理 プログラム	<p>a) 詳細フロー線図作成</p>																					

表-1.2.2 (続き)

機器名称	内 容
3. 組合せ 試験	a) ヘルカルコイル (R700) に4m/minで挿入、10%t, 20%t 軸方向欠陥を検出可能であることを確認。
	以下余白

表-1.2.3 成果内容3

昭和57年 R&D 成果	
機器名称	内 容
1. プローブ	<p>a) プローブの複合一体化について回路構成、動作方式及びプローブユニットの配置等を検討した。</p> <p>①チャンネル走査方式について検討し3種並列駆動方式を採用。</p> <p>②パルサ回路を2分割することにより内蔵が可能となった。</p> <p>③48ユニット回路構成。</p> <p>④ダミープローブによる挿入試験にて48ユニットでの挿入引抜きが可能である見通しを得た。</p>
2. マルチチャンネル式 超音波探傷 装置	<p>a) 信号選別回路試作、時系列的に入力される信号より任意チャンネルが選択可能なことを確認。</p> <p>b) 時間差測定回路試作、50MHz高速カウンタの実現で5% t減肉測定の見通しを得た。</p>
3. 実規模ヘリカル挿入 試験	<p>a) 48ユニットダミープローブが実規模ヘリカルコイル伝熱管全長に亘り挿入可能であることを確認。</p>



表-1.2.4 成果内容4

昭和58年 R&D 成果													
機器名称	内 容												
1. プローブ	<p>a) 23ユニット構成複合プローブ試作試験</p> <p>①軸、周両方向欠陥の同時探傷確認</p> <p>②探傷試験</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・管周方向感度分布      10 dB程度 (感度平準化回路で対応可能)</li> <li>・軸周方向欠陥捕捉範囲      軸方向欠陥 max 5 dB 周方向欠陥 max 3 dB</li> <li>・欠陥検出性能</li> </ul> <table style="margin-left: auto; margin-right: auto; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="padding: 0 10px;"></th> <th style="padding: 0 10px;">母 材</th> <th style="padding: 0 10px;">溶接部</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="padding: 0 10px;">軸方向欠陥</td> <td style="padding: 0 10px;">5% t</td> <td style="padding: 0 10px;">10% t</td> </tr> <tr> <td style="padding: 0 10px;">周方向欠陥</td> <td style="padding: 0 10px;">5% t</td> <td style="padding: 0 10px;">10% t</td> </tr> <tr> <td style="padding: 0 10px;">ピンホール</td> <td style="padding: 0 10px;">φ 0.2</td> <td style="padding: 0 10px;">φ 0.5</td> </tr> </tbody> </table>		母 材	溶接部	軸方向欠陥	5% t	10% t	周方向欠陥	5% t	10% t	ピンホール	φ 0.2	φ 0.5
	母 材	溶接部											
軸方向欠陥	5% t	10% t											
周方向欠陥	5% t	10% t											
ピンホール	φ 0.2	φ 0.5											
2. 組合せ試験	<p>a) 実規模ヘリカル挿入、探傷試験</p> <p>比較的低下で挿入引抜き可能</p> <p>ヘリカル内に取付けた人工欠陥を検出可能なことを確認</p>												

表-1.2.5 成果内容5

昭和59年 R&D 成果														
機器名称	内 容													
1. 32ch マルチチャ ンネル超音 波探傷装置	a) 機能確認試験 装置単体基本動作確認 模擬複合プローブ接続により電氣的探傷機能を確認													
2. 組合せ試 験	<p>a) S58の軸、周両方向探傷用複合プローブ接続による組合せ試験</p> <p>①電子走査による高速回転で管全周をもれなく探傷できることを確認(7500rpm)。</p> <p>②4m/min以上の高速度で探傷できることを確認。</p> <p>③時系列で入力される32chマルチ信号をリアルタイムでA及びBスコープ表示できることを確認。</p> <p>④1～16chと17～32chの探傷信号を合成し、管周方向及び管軸方向断面で欠陥の分布(位置、信号レベル)が直視的に表示でき、かつ断面毎に記憶できることを確認。</p> <p>⑤探傷性能</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th></th> <th>母 材</th> <th>溶接部</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>軸方向</td> <td>5% t</td> <td>10% t</td> </tr> <tr> <td>周方向</td> <td>5% t</td> <td>10% t</td> </tr> <tr> <td>ピンホール</td> <td>φ0.2</td> <td>φ0.5</td> </tr> </tbody> </table>			母 材	溶接部	軸方向	5% t	10% t	周方向	5% t	10% t	ピンホール	φ0.2	φ0.5
	母 材	溶接部												
軸方向	5% t	10% t												
周方向	5% t	10% t												
ピンホール	φ0.2	φ0.5												

## 2. 超音波探傷システム<sup>2)</sup>

### 2.1 検査対象及び欠陥検出目標

検査対象である蒸気発生器伝熱管の概要と当該R & Dにて検出目標とした欠陥の仕様を以下に示す。尚、これらは実機の目標とする仕様と同一のものである。

#### (1) 検査対象伝熱管仕様

検査の対象である高速増殖原型炉「もんじゅ」蒸気発生器伝熱管の主な仕様を以下に示す。

管 外 径	: 31.8mm
管 肉 厚	: 3.5mm (S H)、3.8mm (E V)
最小ヘリカルコイル径	: 約1.4m
ヘリカルコイル高さ	: 約6m
最小曲げ半径	: 160mm
材 質	: SUS321HTB (S H)、STBA24 (E V)
全 長	: 約60~80m

#### (2) 欠陥検出目標

現在、超音波探傷法に対する欠陥検出精度については規格上規定されていないが、(a)規格・基準等規制側の要求、(b)プローブ開発における実績及び見通し、(c)原子力プラント類似設備における状況等を考慮し、軸方向欠陥、周方向欠陥、減肉欠陥それぞれについて母材部欠陥に対する検出目標を以下のように設定した。

- 軸・周方向欠陥：管肉厚10%の深さの欠陥
- 減 肉 欠 陥：管肉厚10%の深さの減肉
- ピンホール欠陥：直径1mmのピンホール

軸・周方向欠陥、減肉欠陥に対する管肉厚10%の検出目標は、U.S. NRC Regulatory Guide 1.83<sup>7)</sup>に規定される最大許容限界肉厚の20%tに対し1/2であり、他の原子力プラントで現時点の開発状況と比較して同等である。尚、ピンホール欠陥については、従来より開発検討してきた結果を踏まえた検出目標値である。

### 2.2 システム構成

図-2.1 に全体システム構成を示す。本装置は蒸気発生器伝熱管へ120mのケーブルで接続したプローブを挿入し、伝熱管の全周全長に亘って探傷を行うものである。プローブはプローブ挿入引抜装置により速度制御及び位置検出を行いつつ水圧により伝熱管内へ挿入される。検査対象伝熱管の選択についても挿入引抜装置により行われる。プローブにより検出された欠陥信号は120mケーブルを通り超音波探傷器でリアルタイム表示される他、信号収録装置により一旦フロッピーディスクにセーブしたのち信号処理装置にてデータ処理を行い、欠陥評価等を行う。

各装置の構成を表-2.1 に、基本機能を表-2.2 に示す。又、基本機能を満たすための要求事項を表-2.3 に示す。

### 2.3 検査手順

蒸気発生器伝熱管の検査時期としては下記2項が上げられる。

- (1) 定期検査時
- (2) 伝熱管破損時

これらの検査手順を図-2.2 に示す。又ここでは、蒸気発生器上部への機器設置手順についても示した。

表-2.1 装置構成

装置名	構成機器	備 考
1.超音波探傷プローブ	送受波子ユニット	軸方向, 周方向, 減肉各欠陥の探傷を行う
	電気回路ユニット	送受波子を駆動するパルス回路, アレイ回路等を内蔵
	信号ケーブル	探傷信号を送信する
2.プローブ挿入引抜装置	入口管板位置決め装置	探傷対象伝熱管を選択位置決めする
	出口管板位置決め装置	探傷対象伝熱管を選択位置決めする
	プローブ位置検出機構	プローブの挿入位置, 速度を検出する
	プローブ駆動圧送機構	水圧によりプローブを駆動する
3.超音波探傷装置	超音波探傷器	多チャンネル式超音波探傷器
	表示装置	リアルタイム表示装置
4.信号収録処理装置	データ収録装置	オンラインにて探傷データを収録する
	データ処理装置	オフラインにて探傷データを処理する
5.伝熱管水抜き乾燥装置	ガスパーズ制御配管	伝熱管の水抜き及びN <sub>2</sub> パーズを行う
	ヒータ	伝熱管乾燥用N <sub>2</sub> を加熱する
	湿度センサ	伝熱管の乾燥度を確認する

表 - 2.2 超音波探傷装置の機能

№	装置名称	機能
1	超音波探傷プローブ	伝熱管の全長及び全周を迅速に探傷する。
2	ケーブル	伝熱管全長を探傷できるよう、約120mの長さを有し、軸方向所定ピッチに受圧体が取付られており、必要な信号を伝送する。
3	圧送ユニット ケーブル駆動装置	長尺(約120m)のケーブルを収納でき、ケーブルの挿入巻取りを所定の速度で円滑に行う。
4	管板アクセス装置	管板部において、プローブの先端部を伝熱管内に導入し、管板面においてカプラントが該当伝熱管外へ漏洩しないようシールする。
5	制御装置	圧送ユニット、ケーブル駆動装置、管板アクセス装置の動作制御を行う。
6	プローブ位置検出装置	伝熱管内プローブ位置を、巻取ドラムの回転数、フロートノブの計数量から求める。
7	超音波探傷器	マルチアレイ型プローブを用いて、信号の時系列的スキャン、多重化信号の処理及び探傷信号の表示を行う。
8	信号収録装置	探傷信号を、伝熱管の全長・全周に対して記録する。
9	信号処理装置	探傷記録を、所定の表示方法でプリンタプロッタ及びCRTに表示する。

表-2.3 基本要 求 (1/2)

項 目	内 容
1. 超音波探傷プローブ	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 蒸気発生器の構造上、伝熱管の探傷は、管内挿入型探傷プローブを用いて行なう。</li> <li>・ 伝熱管全長及び全周にわたり、できるだけ速やか（目標4m/min程度）に探傷が可能であること。</li> <li>・ 伝熱管の最小ベンド部を通過できること。</li> <li>・ 伝熱管の母材部及び溶接部において想定される欠陥に対し、十分な検出性能を有すること。</li> <li>・ 信号ケーブルを細くできるように、信号の多重化及び多重化信号の分配ができること。</li> <li>・ 伝熱管全長にわたり、挿入に必要なケーブルに接続した状態で必要なSN比を有すること。</li> <li>・ プローブ挿入時の必要水圧に対し健全であること。</li> <li>・ 電氣的及び機械的信頼性を有すること。</li> </ul>
2. ケーブル	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 両端に超音波探傷プローブと超音波探傷装置が接続され、ケーブル駆動装置に巻取られると共に、伝熱管全長へ挿入され、超音波探傷信号を伝送する。</li> <li>・ 伝熱管全長に挿入し、探傷を行える長さを有すること。</li> <li>・ 約120mにわたる伝送を行なっても信号の減衰が少ないこと。</li> <li>・ 軸方向定ピッチに受圧体が設けられていること。</li> <li>・ フロートの受圧面積を広く取るため、十分に細く、最小ベンド部を通過できるフレキシビリティを持つこと。</li> <li>・ 超音波信号と制御信号を伝送するために必要な本数の芯線を有すること。</li> <li>・ 高周波パルスを伝送するので、同軸ケーブルであること。</li> </ul>
3. ケーブル駆動装置及び圧送ユニット	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 対象のヘリカコイルが約80mと長いのでケーブルも長尺となり、その挿入は流体を用いた圧送を行なう。このためケーブルの送り出し、巻取りを行なうケーブル駆動装置及び圧送するための圧送ユニットが必要となる。ケーブルを圧送するための流体と超音波伝播のためのカプラントを共用して水が用いられる。</li> <li>・ ケーブルの挿入・引拔を円滑に行い、探傷に必要な速度で挿入できること。</li> <li>・ 長尺ケーブル全長を収納できること。</li> <li>・ ケーブルに所定以上の張力がかからぬよう保護されていること。</li> <li>・ 所定の水質に調節された圧送用水が、管内に充填またはドレンできる容量を有すること。</li> </ul>
4. 管板アクセス装置	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 探傷プローブを蒸気出口管板より挿入する際、探傷を行う伝熱管の選択に従い、プローブを管板面にて位置決めする必要があり、本装置を蒸気出入口メンテナンスフランジ上に固定し伝熱管を選択する。</li> </ul>

表-2.3 続き (2/2)

項 目	内 容
	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 蒸気出入口メンテナンスフランジと管板とが、最大約2.5mと離れているのでプローブの案内管を有し、その案内管は管板面に対し2次元的に移動できること。</li> <li>・ 圧送用流体は、探傷伝熱管のみに導入すること。</li> <li>・ プローブ挿入・引抜に影響を与えぬよう、案内管と管板孔が接続されていること。</li> <li>・ 探傷伝熱管の位置決めが蒸気出口管板と蒸気入口管板との連動で可能であること。</li> </ul>
5. 制御装置	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ケーブル駆動装置、管板アクセス装置及び圧送ユニットの制御を行なう。さらに探傷伝熱管の探傷位置まで約4m/minの速度でプローブを挿入するための制御を行なう。</li> </ul>
6. プローブ位置検出装置	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 欠陥信号の検出と同時に必要な欠陥位置の正確な把握を挿入されたケーブル長さの測定により、所定の精度で検出する。</li> </ul>
7. 超音波探傷器	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ マルチアレイ型プローブは、マルチチャンネル用の超音波探傷器を用いる。</li> <li>・ 探傷時間短縮に必要な繰り返し周波数を確保しつつ、高周波数パルスをプローブに伝送できること。</li> <li>・ 信号ケーブル径を細くできるよう、信号の多重化及びその分配ができること。</li> <li>・ 減衰による影響を低減し、所定のレベルで伝送できること。</li> <li>・ 伝熱管の全周にわたり、同一レベルで欠陥を検出するためにチャンネル間の感度の平準化が可能であること。</li> <li>・ 欠陥信号の検知、表示がチャンネルのスキャンに対応し高速でできること。</li> </ul>
8. 信号収録装置	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 超音波探傷装置他とオンラインで接続され、探傷信号及びプローブ位置信号等、全ての情報をフロッピーディスク等に記録する。</li> </ul>
9. 信号処理装置	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 集録された信号を所定の表示方法を用いてプリンタプロッタ、CRT等に表示する。</li> <li>・ 探傷伝熱管全てについて、全長、全周にわたる情報を処理、出力させることが可能であること。</li> </ul>
	以 下 余 白



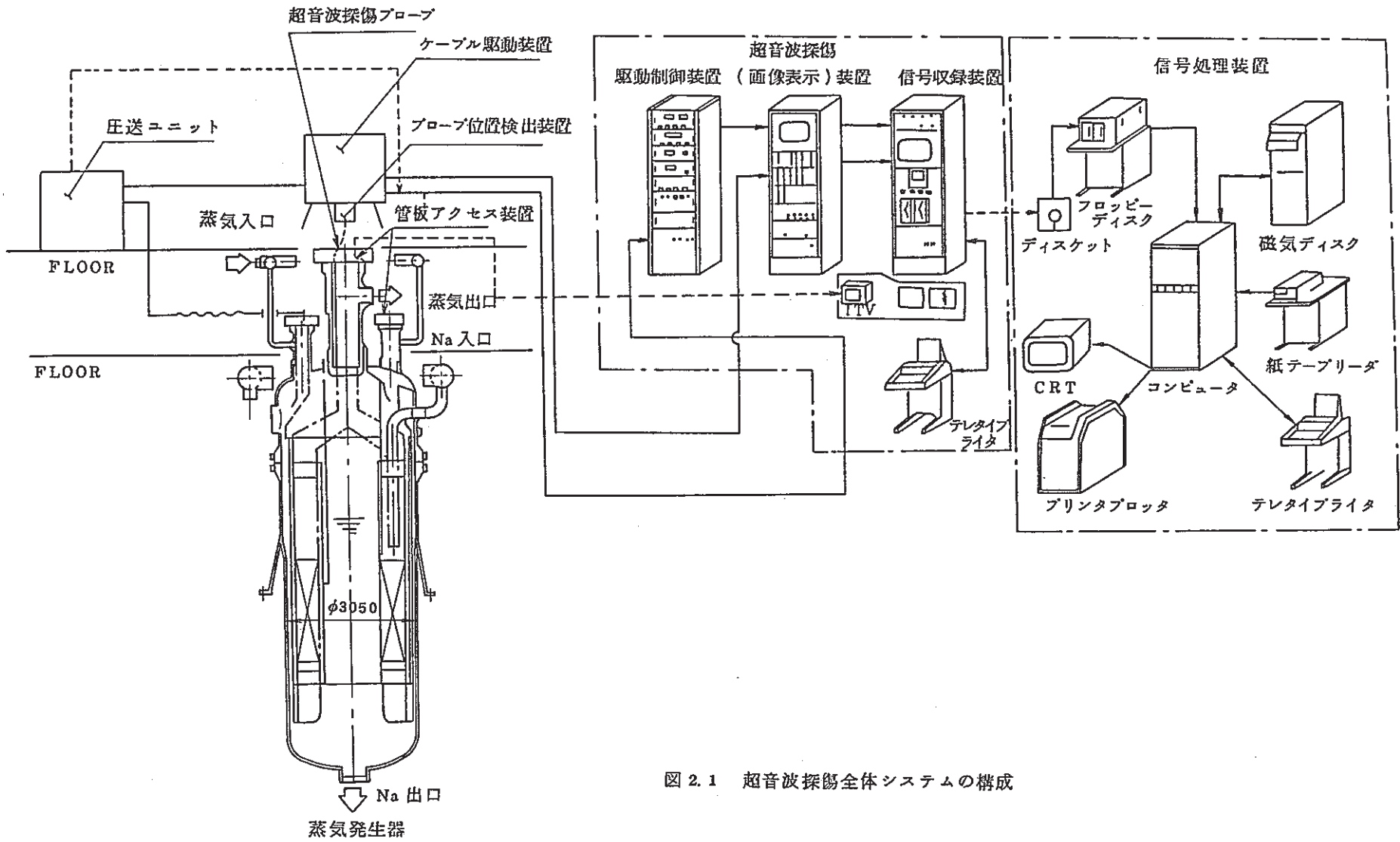


図 2.1 超音波探傷全体システムの構成

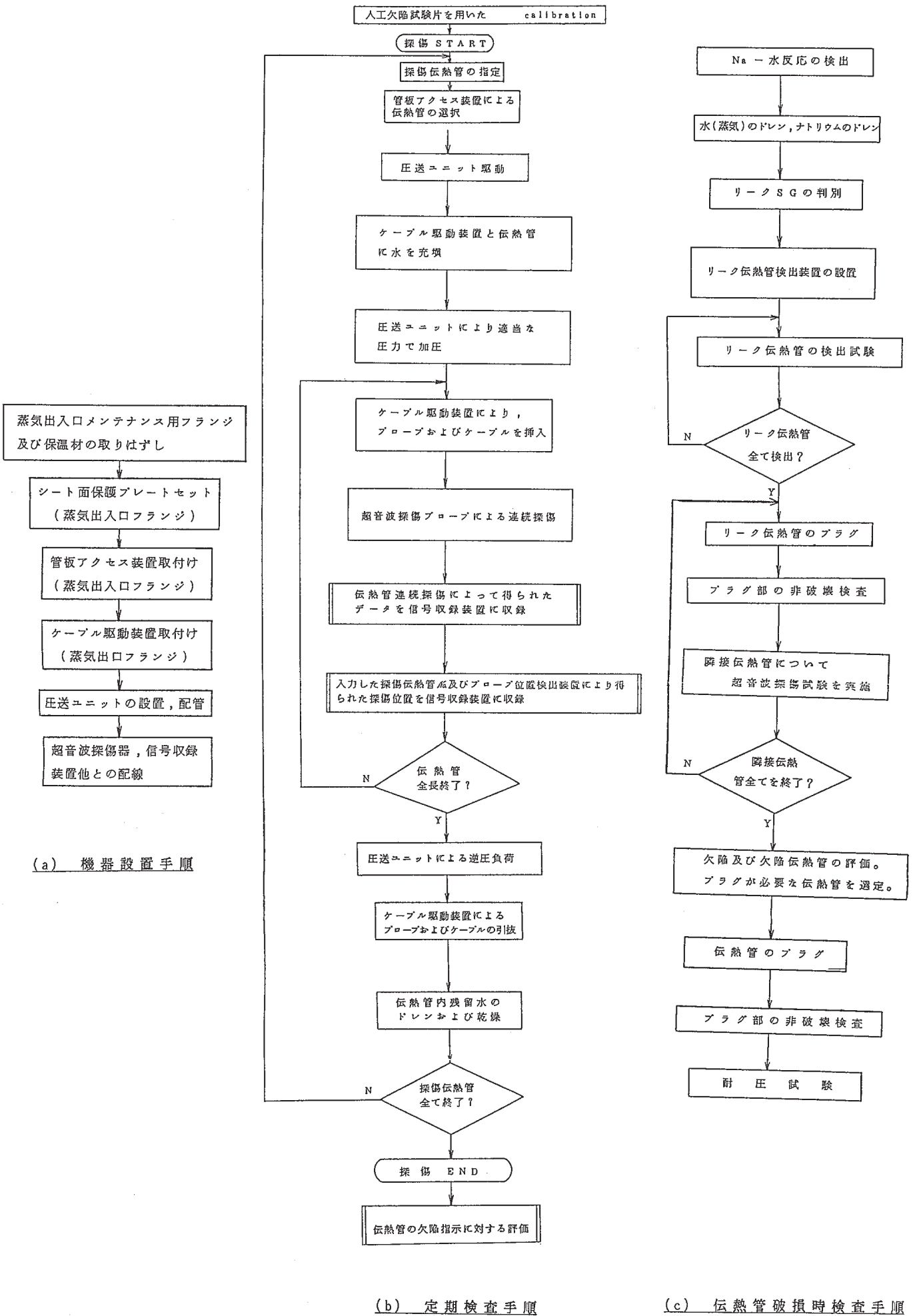


図 - 2.2 検査フロー

### 3. マルチアレイ型複合プローブ

伝熱管の全周全長を超音波法にて探傷するプローブ方式は最終的にマルチアレイ型複合プローブが採用されている。以下マルチアレイ型複合プローブの開発について行われた検討や試作試験について記述する。

#### 3.1 プローブ方式<sup>3)</sup>

伝熱管々壁の全面を漏れなく探傷するためには、通常は超音波プローブで送受波される超音波ビームを管壁に沿って螺旋状に走査する図-3.1に示すような方法が採られている。同図において、超音波ビームが1回転する際の管軸方向の送り長さ $\Delta P$ を送受波子の有効ビーム径 $\ell_c$ と同等または小さい値に設定することによって管壁全面の探傷が可能となる。

したがって、超音波プローブの管軸方向の探傷速度 $V_p$ は(3.1)式で示されるようになる。

$$V_p = N \cdot \Delta P \quad (\text{m/min}) \quad \text{--- (3.1)}$$

ここで、 $N$ は単位時間における超音波ビームの回転走査数である。(3.1)式から、管軸方向の送り長さ $\Delta P$ を一定とした場合に探傷速度を高速化するためには、超音波ビームの回転走査数 $N$ を大きくする必要がある。

超音波ビームの走査方法としては下記の3方式が挙げられる。

- 1) モータ駆動方式——探触子をモータにより回転する。
- 2) 流体駆動方式——流体の流れによりミラー動翼を回転し、これと同軸に取り付けた探触子を回転させる。
- 3) マルチアレイ方式——周方向に分割配置された探触子を電子的に回転走査する方法

探傷速度向上の観点から検討した結果を表-3.1に示す。同表よりモータ駆動方式による探傷速度を1とするとマルチアレイ方式は25~38倍と最も高速であることより超音波ビームの回転走査法としてはマルチアレイ方式が最も優れている。

以上プローブの回転走査方式について検討を行ったが、これは1回の伝熱管への挿入で1種類の欠陥しか探傷できない単一機能型プローブについてのものである。単一機能型プローブで伝熱管を探傷する場合、軸方向、周方向及び減肉の各欠陥探傷用の3つのプローブを順次挿入する必要がある。しかし、1本のプローブに3種類の欠陥探傷用探触子を備えた複合プローブにすれば、走査速度は単一機能型プローブの3倍となり、マルチアレイ方式で複合化したとすると探傷速度はモータ駆動型単一機能型プローブの75~113倍となり、伝熱管1本を探傷する所用時間は20~30分程度となる。

探傷時間短縮の観点より行った以上の検討よりプローブはマルチアレイ型複合方式を採用した。

#### 3.2 マルチアレイ型複合プローブの構成

本プローブは図-3.2に示すように軸方向、周方向、減肉各欠陥探傷用ユニットを直列に接続しており、これと伝熱管の全長に亘って挿入を行うための120mケーブルと欠陥信号が長尺なケーブルを伝わる際の減衰を防ぐ中継アンプによって構成

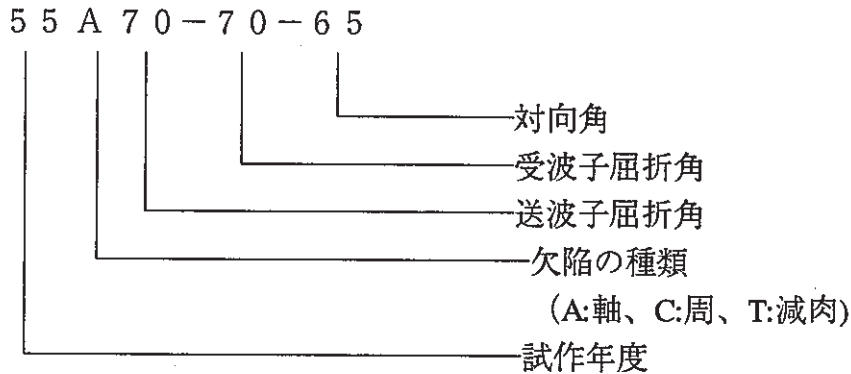
されている。

各欠陥の探傷方法は、図-3.3に示すように送波子と受波子を遮音板を介して配置した二振動子法を適用している。軸方向欠陥は送受左右配置型、周方向欠陥は送受前後配置型、減肉欠陥は送受分割型にて探傷する。尚、ピンホール欠陥は周方向用で探傷する。各ユニットの振動子は従来プローブで実績のある寸法 ( $3 \times 2\text{mm}^2$  or  $4 \times 2\text{mm}^2$ ) を使用し、電子走査性を考慮して32ch( $2^5$ )設定とした。32chの配置は円周方向に16chずつ前後に1/2ピッチずらして配置しており隣接振動子との隙を補間するようになっている。

ケーブルには等間隔でフロートが取り付けられ、圧送がスムーズに行われるようになっている。

### 3.3 送受波子条件<sup>2)</sup>

超音波ビームの設定条件を部分試作試験を行い検討した。表-3.2に条件設定用送受波子の仕様を示す。同表の形式は次のとおりである。



昭和55年度試作品は「溶接部探傷用プローブの概念設計」<sup>6)</sup>に基づいた条件である。又、昭和56年度試作品は昭和55年度R & Dの結果、摘出された問題を踏まえた上で作成したものである。表-3.3に示す部分試作試験での検討で選定した送受波子条件を以下に示す。

- 1) 軸方向欠陥： S/N比が最も高く内外表面の感度差が少なく安定した56A60-60-35の条件を選定した。性能確認試験でも所定の性能が得られた。
- 2) 周方向欠陥： 内外表面の感度差が少なく安定した特性をもった56C60-50の条件を選定した。性能確認試験でも所定の性能が得られた。
- 3) 減肉欠陥： 検出感度の差は各条件で差はなかったが時間バラツキが低く、波形が最も良好な56T10-10を選定した。性能確認試験でも所定の性能が確認できた。

### 3.4 構成部品の検討<sup>2)</sup>

#### 3.4.1 送受波子

プローブに取付けた送受波子の取付け角度にバラツキが生じていた場合、それは即探傷性能の低下につながる。この対策として送受波子の貼り付けに際し、ダンパ材を三次元測定器により角度及び平面度を測定することにより加工精度を向

上するとともに貼り付け作業を接着用加圧治具を使用して行い、更に組立後感度を測定することにより対応している。送受波子についてはこの他、振動子から引き出されるリード線と送受波子ユニット内の他の信号線を金属製ホルダにより外周側と内周側に区分し、電気的なシールド効果や組立性を容易にしている。又、周方向及び減肉用プローブの送受波子を1枚のリング状とし、表面の電極を16等分する方式をとる等加工法の簡略化を実現している。

### 3.4.2 その他各部

プローブを構成する部品について水シール性、探傷感度向上の観点より以下について行った検討内容を表-3.4 に示す。

- |             |                         |
|-------------|-------------------------|
| (1) ユニットケース | (6) フロート                |
| (2) 連結部     | (7) プローブ内回路の電氣的機械的信頼性向上 |
| (3) コネクタ    | (8) 前置増幅器               |
| (4) ガイドフィン  | (9) 中継アンプ               |
| (5) ケーブル    |                         |

## 3.5 内蔵回路

### 3.5.1 基本回路構成<sup>3)</sup>

最初にマルチアレイ型単能プローブの回路構成について述べる。図-3.4 に32ch電子的回転走査を行う装置のブロック図を示す。電子スキャン制御信号発生部はメインクロック発生部よりのクロック信号を受けパルス回路を駆動するクロック信号と32chの受波子を周期的に切り換えるためのクロック信号及びクリア信号を発生する。受波子切換制御回路はクロック信号をカウントして受波子の切換を行い、32個周期でリセットされる。受信した超音波パルスは多重化处理され順次時系列的に出力され、前置増幅器を通して超音波探傷器へ入力する。超音波探傷器はメインクロック発生部よりの同期信号により入力した超音波信号を処理する。本回路は電子スキャン切換用のカウンタ回路を各所に使用しており、カウンタ回路の誤動作は即探傷不能に結び付くため十分なノイズ対策が必要である。マルチアレイ型プローブは従来方式と異なり信号線がかなり増加するため送受波子のみでプローブを構成することは困難であり、送受波子の他に信号処理回路も付属したプローブ構成が必要である。この場合、伝熱管への挿入性、回路数やケーブル数の少数化が一つの課題となる。

図-3.5 に単能プローブ回路構成図を示す。これは電源回路、受波子切換制御回路、前置増幅器、受波子切換回路(8ch×4)、送受波子(16ch×2)の9ユニットで構成されている。

複合化プローブにこの単機能型回路3組を組み込み形成すると、信号ケーブルが単一機能型の4本より12本となり同軸ケーブルが太径化する等の問題が生じることより、複合化に対しさまざまな検討が必要である。

### 3.5.2 内蔵回路方式<sup>3)</sup>

3種類の欠陥を1本のプローブで探傷するマルチアレイ型複合プローブの回路方式は図-3.6 に示す96ch時系列走査方式と3種並列駆動32ch時系列走査方式の

2種類がある。前者は96chの信号を軸方向欠陥→周方向欠陥→減肉欠陥という順で繰り返し走査する方式であり、後者は3種の欠陥を並列に探傷するため探傷速度は前者の3倍となる。

### 3.5.3 パルス回路内蔵化

3.5.1 で述べたケーブル数の増加に対する対策として、プローブ内で送信パルスが発生させることを計画した。従来送波子を励振する高圧パルスは120m離れた超音波探傷器に備えたパルス回路より伝送されていたため、ケーブル内での伝達損失によるパルスの減衰が直接探傷性能に影響していた。又、今回の複合化により3種の送波子を並列に駆動することより、その影響は更に顕著となる。その他、高圧パルス伝送ケーブルを3倍にするためケーブル径が増加すると共に回路ユニットが大きくなるなどし、伝熱管への挿入性に悪影響を及ぼしかねない。以上よりプローブ内でパルスが発生する本方式はケーブル数の減少や探傷感度向上といった観点より妥当な対策と考えられる。以下パルス回路内蔵化について行った検討内容を示す。

#### i) パルス回路基本動作

図3.7に1ch分のパルス回路を示す。本回路はトリガ信号発生部と高圧パルス発生部より成っている。トリガ信号発生部は、TTL（トランジスタ・トランジスタロジック）レベルのトリガ信号入力を十分増幅して、次段のコンデンサに充電される高電圧を切り換えるパワーMOSFETを駆動するためのドライバー回路である。又、パワーMOSFETにはなるべくスイッチング時間が速い特性をもつ素子を使用し、高圧パルスの立ち下がりを速くすることが時間分解能の良い探傷波形を得るために必要である。

#### ii) ユニット内装荷に係わる検討

パルス回路を構成する電気部品の中で、特に高電圧信号の切換を行うパワーMOSFETと高電圧を充放電するコンデンサーは、200～400V以上の耐圧性能が要求されるため、部品の外形が大きくなり、広い収納スペースが必要となる。一方、プローブを構成する各ユニットの電気部品の実装容積は最大 $\phi$ 12×30mm程度である。従って、1つのユニット内に現在構成するパルス回路部品をそのまま全部収納することは物理的に不可能である。そこで、パルス回路をトリガ信号発生部と高圧パルス信号発生部とに分割し、2ユニットとして収納し、かつ、パワーMOSFETの放熱フィンをカットしたり、できるだけ小型のコンデンサーを採用するなどの配慮をして、回路を収納できるようにした。

#### iii) パルス信号切換方式の検討<sup>3)</sup>

複合プローブ全体配置は、基本的には従来の3種類（3グループ）のマルチアレイ型プローブを縦列に接続した形となり、電気的には3グループが並列に接続されて動作する。

現在、1種類の欠陥を検出するために備えた32個（2ユニット）の送波子を励振するために4つのパルス回路を用いている。したがって、1個のバル

ス回路は8個の送波子を同時に励振する。そして、4つのパルス回路は32個の受波子の切換に同期して順次切り換える必要がある。そこで、1グループに備える4つのパルス回路を順次切換制御するためのパルス信号切換方式について検討した結果について述べる。

図-3.8は3方式のパルス信号切換方式について示した図である。図中の円内の数字はユニット番号を示している。

図-3.8(a)は、高圧パルス発生回路とトリガ信号発生回路各4系統を備え、時系列的に入力されるクロック信号をクロック分配回路①により4系統に分配し、4つの高圧パルス電圧を順次発生する。本方式は、4つの高圧パルス発生回路に対しそれぞれ1個のトリガ信号発生回路が備わっているので安定した高圧パルス電圧が得られるが、ユニット数が9ユニットと多くなるのが欠点である。

図-3.8(b)は、高圧パルス発生回路とトリガ信号発生回路各1系統を備えた方式で、高圧パルス電圧を直接PINダイオードで切り換えて分配する方式である。本方式は、ユニット数が4ユニットと最も少なく望ましい回路構成であるが、PINダイオードの高圧パルス電圧に対する遮断特性が不十分であった。また、高圧パルス発生回路（パルス回路）の駆動繰り返し周波数が(a)方式の4倍となる。

図-3.8(c)は、高圧パルス発生回路4系統とトリガ発生回路1系統を備えた方式で、PINダイオードを漏れ込みの影響の少ない低電圧パルスであるトリガ信号の切換に使用し、トリガ信号発生回路の省略を図った。本方式は、(a)(b)両方式の利点を採り入れた方式で、ユニット数が7ユニットとなり最も実現性が高い方式である。

以上、3方式のパルス信号切換方式について検討した結果、複合プローブには(c)方式を採用することとした。

#### 3.5.4 複合プローブの回路構成<sup>4)</sup>

##### i) パルス回路内蔵による回路構成

図-3.9は3.5.3項で行ったパルス回路内蔵化に関する検討に基づいた複合プローブ全回路中の1グループ（1種類の欠陥検出用）についての回路構成を示したものである。二重枠で囲んだ回路はパルス回路内蔵により新設したものであり、単能プローブの9ユニットに比べ7ユニット増して16ユニットとなり、複合プローブ全体では48ユニットとなる。

ユニット数が48ユニットとなった場合、各ユニット毎の受圧面積がケーブルに取り付けたフロートに比して小さいため、挿入性に悪影響を及ぼす可能性がある。又、送受波子間の距離が大きいため伝熱管の全長を探傷するためには伝熱管端部にオーバーランスペースを設けなければならない等の問題がある。プローブの挿入性については図-3.11(a)に示すダミープローブにより実規模のヘリカコイルへユニット数を変えて挿入し、挿入圧力のユニット数に対する変化を調べた結果、ユニット数の増加による大幅な挿入性低下は認

められず48ユニットでも十分挿入できることが分かった。しかし、伝熱管全長の探傷を行うことに関しては長いオーバーランスペースを設けるよりもユニット数を減少させ、3種類の送受波子を近づける方が望ましい。

#### ii) 回路の共用化

ユニット数の短縮に対し回路の共用化について検討した結果を表-3.5に示す。これは各回路の出力端子に1グループの3倍の負荷を接続し、クロック信号のカウント動作及びトリガ回路、パルス回路の出力電圧を確認し、全回路が正常に動作するかを調べたものである。

この結果、カウンタ回路とトリガ分配回路については、出力信号波形に変化は見られず共用可能であることがわかった。又、パルス回路は、高圧パルス出力電圧が低下し、受信信号強度にして-7dBの低下が認められたが、信号増幅を行えば共用可能である。

一方、整形回路、トリガ発生回路及びPINダイオード回路については、クロックカウント誤動作やトリガ信号振幅の低下等の問題が発生し共用は困難であることがわかった。

その他、MPX回路については、ICをDIP（デュアルインパッケージ）タイプからフラットタイプに変更したことにより、ICの外形形状が1/2以下の大きさとなり、従来の2ユニットを1ユニットに収納できるようになった。これにより、MPX回路は、従来1グループに4ユニット備えられていたが2ユニットで済み、2ユニット分短縮することができる。

#### iii) 24ユニット回路構成

以上ユニット数の短縮に関し行った検討の結果に基づいた回路構成を図-3.12に示す。本回路を組立て5、10、20%tの軸方向外表面欠陥に対し、探傷試験を行った結果、5~10dBのS/N比で良好に検出できた。検出感度は48ユニット回路と比較すると9~11dBの低下が認められるが、従来の単一機能プローブに比べると4~6dB向上しており、短縮化した回路の実用性が認められた。

### 3.6 複合プローブ試作試験

#### 3.6.1 複合プローブの試作

図-3.13に試作した複合プローブを示す。これは軸方向及び周方向欠陥探傷用であり減肉欠陥探傷用については接続端子で増設できる。本プローブの回路構成は、図-3.14に示すような23ユニットとなっている。

以下図-3.14により複合プローブ回路の動作を説明する。複合プローブ回路には、8本の同軸ケーブルにより各ユニット内回路用電源として±15V（V+、V-）、送受信タイミング制御用としてカウンタ回路に入力するクロック信号及びクリアー信号、4つのMPX回路（受波子切換回路）を切り換えるEN1、2、パルス回路用高圧電源として400V並びに3グループのプリアンプから出力される超音波受信信号線OUT 1、2、3がそれぞれ各グループに並列に接続されている。

まず、超音波探傷装置から120mの信号伝送ケーブルを通して送信されるクロ



ック信号は、整形回路によりケーブル内で受けた波形の立ち上がり、立ち下がりの歪みを整形する。次に、トリガ回路ではクロック信号を基準としてトリガ信号を発生し、この信号はトリガ切換回路とPINダイオード回路により4つのパルス回路に順次分配し、パルス回路の負荷として接続している32個の送波子を順次励振する。一方、これと同期して各送波子に対向して配備した32個の受波子を、カウンタ回路の出力信号とEN信号とにより1個ずつ順次選択して、伝熱管の管壁から得られる超音波受信信号を時系列的にプリアンプ回路へ入力する。そして、1走査32パルスを1周期として8kHzで送受信動作を繰り返す。

また、信号伝送ケーブルの中間に設置された中継アンプ回路（図-3.10参照）についても、従来2ユニットであったものが、さらに2ユニットの中継アンプ回路を新設して合計4ユニットとなり、ケーブル中の超音波信号の減衰を補う。

尚、アンプの増幅度は中継アンプ及びプローブ中のプリアンプ共に約30dBである。

### 3.6.2 機能確認試験<sup>4)</sup>

複合プローブにより探傷を行うためには多チャンネル式の超音波探傷器が必要であるが、本機能確認試験を行った段階ではまだ開発途上であったため図-3.15に示す構成の超音波探傷器を使用した。

図-3.15において、電子スキャン制御信号発生部（試作）から出力される制御信号により試作複合プローブを駆動し、超音波ビームの走査を行い、得られる探傷信号（高周波波形）を超音波探傷器（マークⅢ、ソニック社製）で増幅及び検波などの処理を行って信号波形を表示部（Aスコープ）に表示する。

この場合、超音波探傷器は単チャンネル用であり、複合プローブから得られる2系統の探傷信号（軸方向欠陥または周方向欠陥）のうち、いずれか一方の探傷信号を選択して探傷器に入力することになる。また、各系統の探傷信号はそれぞれ1～32チャンネルの送受波子から得られる探傷信号が時系列的に入力されるため、探傷信号波形の観測に際しては、所望の単チャンネルを選択してAスコープ上に表示する。

一方、全チャンネルから得られる探傷信号を同時に観測する際はBスコープモードに切り換えて、ゲート出力されたエコー信号を記録部に記録するか、或いはBスコープ画像表示部の画面上に画像を表示することができる。ただし、Bスコープ画像表示部は応答速度が遅く、探傷速度が0.5m/min以下の場合しか使用できない。

尚、以後の機能確認試験においては、複合プローブと超音波探傷装置間のケーブル長さを120mとし、図-3.16～図-3.19に示す伝熱管試験片（TP1、2、3、4、6.2）を供試した。

先ず複合化したプローブで同時に2種の欠陥が探傷できるかを確認する試験を行った。TP1内面の20%t軸方向及び周方向欠陥について同時探傷を行ったところ、図-3.20に示すように2現象オシロスコープに2種類の欠陥によるRF波形が受信された。次に欠陥検出に係わる送受波子の特性や探傷性能について表-

3.6、3.7に示す試験を行った結果、同表に示すように所定の性能が確保できていることが確認できた。表-3.8 に複合プローブの仕様を示す。

表-3.1 各種高速化プローブの検討

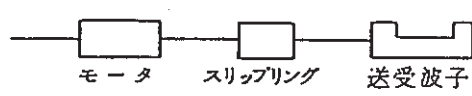
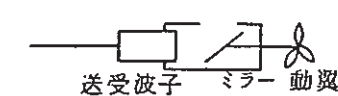
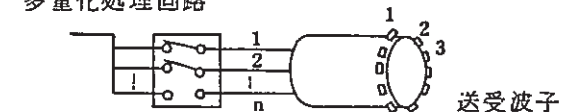
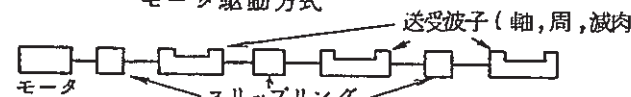
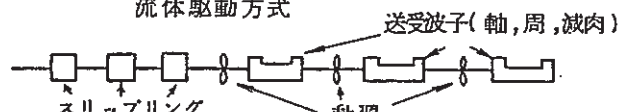
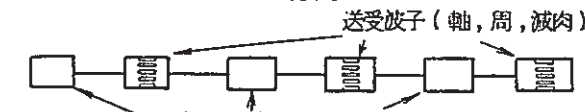
分類	ビーム走査方式	構 成	特 徴	速度 V [m/min]	80m×3回の探傷時間 (従来比)
単一機能型 プローブ	機械的回転走査	<p>モータ駆動方式</p>  <p>モータ      スリップリング      送受波子</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 全周を連続的に走査できる。</li> <li>2. 水シール部やスリップリング機構が必要なため、回転数の向上は困難</li> </ol>	$\left( \begin{array}{l} 0.2 \\ 1 \text{ 回転当りの管軸} \\ \text{方向送り長さ} \\ \Delta P = 1.3 \text{ mm} \end{array} \right)$	約 20.5 hr (1)
		<p>流体駆動方式</p>  <p>送受波子      ミラー      動翼</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 全周を連続的に走査できる。</li> <li>2. 回転制御が困難</li> <li>3. 角度設定条件が制約される。</li> <li>4. ミラーによるSN比低下</li> </ol>		
	電子的回転走査	<p>マルチアレイ方式</p> <p>多重化処理回路</p>  <p>送受波子</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ビームをステップ的に走査する。</li> <li>2. 飛躍的な速度向上が期待できる。</li> <li>3. 機械的な回転動作がなく寿命が長い</li> <li>4. 構造が複雑、ユニット数が増加</li> </ol>	$\left. \begin{array}{l} 4.9 \\ 7.4 \end{array} \right\}$	約 0.8 ~ 0.5 hr (1/25 ~ 1/38)
複合型 プローブ	機械的回転走査	<p>モータ駆動方式</p>  <p>送受波子(軸,周,減肉)</p> <p>モータ      スリップリング</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 種類の異なる欠陥を同時に探傷できる。</li> <li>2. 構造が複雑、ユニット数が増加</li> </ol>	3×0.2	約 6.8 hr (1/3)
		<p>流体駆動方式</p>  <p>送受波子(軸,周,減肉)</p> <p>スリップリング      動翼</p>	同 上	3×2.3	約 0.6 hr (1/36)
	電子的回転走査	<p>マルチアレイ方式</p>  <p>送受波子(軸,周,減肉)</p> <p>多重化処理回路</p>	同 上	$\left. \begin{array}{l} 3 \times 4.9 \\ 3 \times 7.4 \end{array} \right\}$	約 0.3 ~ 0.2 hr (1/75 ~ 1/113)

表-3.2 条件設定用送受波子の仕様

用途	試作年度	形式	周波数	ビーム設定用				対向角 $\phi$	間隔 L	指向性 (スキップ <sup>°</sup> )	配置	備考
				送波子		受波子						
				$\theta_{T1}$	$\theta_{T2}$	$\theta_{R1}$	$\theta_{R2}$					
軸方向欠探 備用	S55	55A70-70-85	5MHz	25.5°	70°	25.5°	70°	65°	9.3m	1	㊸	S55年度試作品は内面散乱エコーが大きくなり1スキップとしたことから外表面エコーのSN比が低く、内外表面での感度差が大きくなったため、指向性を0.75スキップとし、屈折角、対向角を変化させてその挙動を調べた。
	S56	56A70-70-25		25.5°	70°	25.5°	70°	25°	5.4m	0.75		
		56A60-60-25		23.4°	60°	23.4°	60°	25°	6.7m			
		56A60-60-35		23.4°	60°	23.4°	60°	35°	9.4m			
周方向欠探 備用	S55	55C70-60	5MHz	25.5°	70°	25.5°	-	-	5.8m	1	㊹	S55年度試作品は内面散乱エコーが大きくなり1スキップとしたことから外表面エコーのSN比が低く、内外表面での感度差が大きくなったため、指向性を0.75スキップとし、屈折角、対向角を変化させてその挙動を調べた。
	S56	56C50-50		20.5°	50°	20.5°	50°	-	9.8m	0.75		
		56C60-50		23.4°	60°	20.5°	50°	-	3.1m			
		56C70-65		25.5°	70°	24.5°	65°	-	3.4m			
減肉欠探 備用	S55	55T10-10	10MHz	2.5°	10°	2.5°	10°	-	2.8m	0.75	㊺	S55年度試作品は内表面エコーの漏れ込みが大きく、遮音板と内表面の間隔が多少大きくなると外表面エコーの対雑識別が困難となったため、内表面エコーが弱まるような屈折角や間隔Lを変化させ、その挙動を調べた。
	S56	56T0-0		0°	0°	0°	0°	-	3.8m			
		56T10-10		2.5°	10°	10°	10°	-	2.9m			
		56T20-20		5°	20°	20°	20°	-	2.6m			

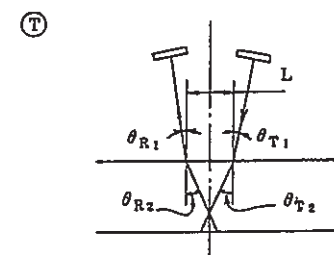
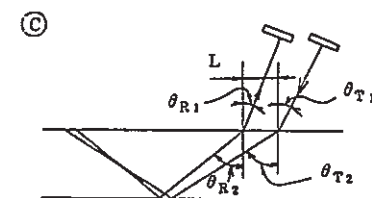
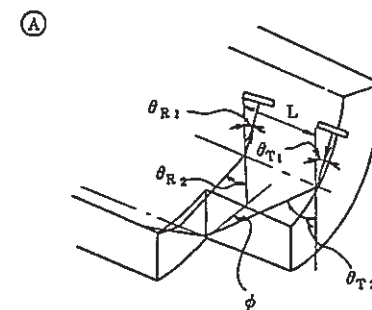


表-3.3 送受波子条件の検討

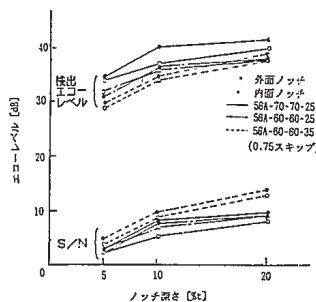
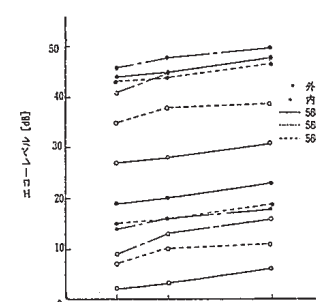
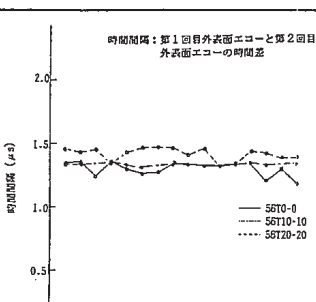
探傷対象	選定探傷条件	選定理由	性能確認試験	備考	
軸方向欠陥	<ul style="list-style-type: none"> <li>周波数 : 5MHz</li> <li>送波子 <math>\theta T1 : 23.4^\circ</math> <math>\theta T2 : 60^\circ</math></li> <li>受波子 <math>\theta R1 : 23.4^\circ</math> <math>\theta R2 : 60^\circ</math></li> <li>対向角 <math>\phi : 35^\circ</math></li> <li>間隔L : 9.4mm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>比較送受波子 56A70-70-25 56A60-60-25 56A60-60-35</li> <li>理由 右にTP1*軸方向欠陥の探傷試験結果を示す。これより56A60-60-35が内外表面での検出エコーレベル差が少なく安定しており、SN比が最大であることより本供試体の送受波子条件を選定している。</li> </ul>	 <p>軸方向欠陥探傷結果</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>選定送受波子 : 56A60-60-35</li> <li>感度分布 : 感度バラツキは送受波子共概ね 3dB以内と少なく、SN比は送波側で40~45dB、受波側で26~33dBであった。これらは貼付作業の精密化でより向上できる。</li> <li>溶接部探傷性能 : 10%t、20%t共ノイズレベル以上で検出できた。エコーレベルを母材部と比較すると、内面で3~5dB高く、外面で2dB低くなっており、内外表面での検出感度差が大きくなっている。</li> <li>曲管部探傷性能 : 10%t、20%t両外面欠陥共ノイズレベル以上で十分検出できた。</li> </ul>	
周方向欠陥	<ul style="list-style-type: none"> <li>周波数 : 5MHz</li> <li>送波子 <math>\theta T1 : 23.4^\circ</math> <math>\theta T2 : 60^\circ</math></li> <li>受波子 <math>\theta R1 : 20.5^\circ</math> <math>\theta R2 : 50^\circ</math></li> <li>間隔L : 3.1mm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>比較送受波子 56C50-50 56C60-50 56C70-65</li> <li>理由 右にTP1*周方向欠陥の探傷試験結果を示す。56C60-50及び56C50-50が優れており、両者につき溶接部探傷を行った結果、前者の方が安定した特性を示すことより56C60-50の条件を採用している。</li> </ul>	 <p>周方向欠陥探傷結果</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>選定送受波子 : 56C60-50</li> <li>送受波感度分布 : 感度バラツキは送受波子共 3dB以内であり、SN比は送波側で28~35dB、受波側で17~24dBであった。</li> <li>探傷感度分布測定 : 感度バラツキは 6dB以内であった。</li> <li>曲管部探傷性能 : 母材部溶接部の外部欠陥を同様なエコーレベルで検出でき、SN比は共に 8dB以上であった。</li> <li>ピンホール欠陥探傷性能 : 送受波子が母材部及び溶接部におけるピンホール欠陥に対して、SN比が母材部で 4dB以上、溶接部で 7dB以上と十分な欠陥検出性能を有していた。</li> <li>欠陥補足範囲 : ch15・16・1・2・3による感度分布の谷間は最大で11dB、最少で 6dBであった。16chの補間ユニットを用いると約 3dBの感度差となる。</li> </ul>	
減肉欠陥	<ul style="list-style-type: none"> <li>周波数 : 10MHz</li> <li>送波子 <math>\theta T1 : 2.5^\circ</math> <math>\theta T2 : 10^\circ</math></li> <li>受波子 <math>\theta R1 : 2.5^\circ</math> <math>\theta R2 : 10^\circ</math></li> <li>間隔L : 2.9mm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>比較送受波子 56T 0-0 56T10-10 56T20-20</li> <li>理由 右にTP1* 健全部における管外表面の第1及び第2反射エコーの時間差による各チャンネルのバラツキを示す。56T10-10が他に比して時間バラツキ(0.04μs)が低く、かつ探傷波形が最も良好であったことより本送受波子条件を採用している。</li> </ul>	 <p>減肉欠陥探傷用送受波子の時間差バラツキ測定結果</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>選定送受波子 : 56T10-10</li> <li>感度分布 : 感度バラツキは送受波子共 3dB以内と少なく、SN比は送受波側で34~48dB、受波側で21~30dBであった。</li> <li>減肉欠陥探傷性能 : 減肉欠陥探傷結果で実測値と推定値の関係はほぼ良好な関係が得られ、誤差は最大±0.03mmであった。また、減肉部軸方向探傷結果では、非常に良好な特性が得られ、誤差は最大±0.02mmであった。</li> <li>各チャンネルの応答特性 : 各部分減肉欠陥の減肉部最大部付近では、測定値と計算値の差が比較的少なく、しかも各チャンネルの測定値から減肉欠陥の全体形状を概ね検知できることが認められた。</li> </ul>	

表-3.4 構成部品の検討 (1/3)

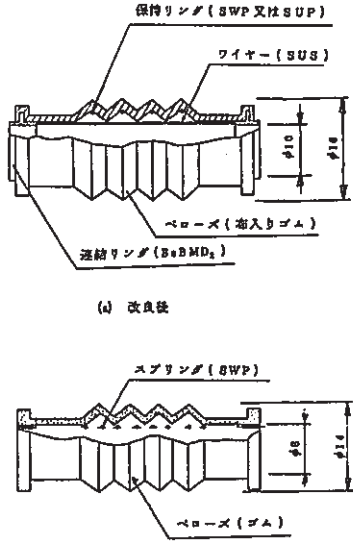
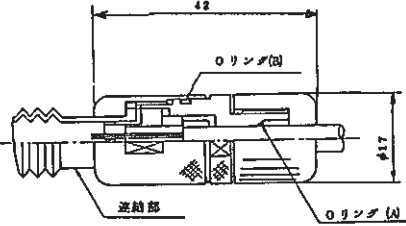
項目	検討内容	備考
1.ユニットケース	<ul style="list-style-type: none"> <li>・軽量化を図るため、材質をSUS304からA2に変更。</li> </ul>	
2.連結部	<ul style="list-style-type: none"> <li>・電氣的SN比を向上させるために送受波子の連結部内径をφ8からφ10に太径化。</li> <li>・連結部の伸びに伴うリード線の断線を回避するために90°間隔でステンレス製ワイヤを取付た(右図)。</li> <li>・2組の送受波子間の円周方向のねじれを考慮し、布入りゴム製ベローズとしたが、更に経年変化の少ないFEPを採用した。</li> </ul>	 <p>(a) 改良後</p> <p>(b) 改良前</p>
3.コネクタ	<ul style="list-style-type: none"> <li>・プローブの長時間使用に対する水シール性を改善するためコネクタ後方にOリングによる水シール部を設けた。Oリングはステンレス製リングバネ(φ1)を使用。</li> </ul>	
4.プローブ内回路の電機的機械的信頼性の向上	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ユニット内回路の電気部品をすべてプリント基板上に配置、配線面と部品取付面とを分離し、各端子間及び端子と外ケースとの絶縁面での信頼性、回路の補修性の向上を図った治具等を使用して慎重に行い、更に組立後は感度を測定するものとした</li> </ul>	

表-3.4 (2/3)

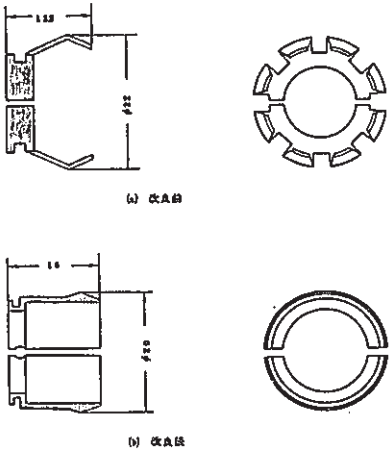
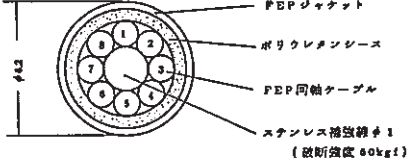
項 目	検 討 内 容	備 考
5.ガイドファン	<p>・ユニットケース用のガイドファンは加工性を考慮し、従来の8分割パネ状フィンより2分割固定リングへ変更した。</p>	 <p>(a) 改良前</p> <p>(b) 改良後</p>
6.ケーブル	<p>・FEP製シースを使用していたが使用時損傷し水漏れが生じたためポリウレタン製シース（厚さ 0.6mm）を施した外側を更にFEP製シースで覆う二重シース構造とした。</p> <p>・挿入時ケーブルにかかる張力による切断を防止するためステンレス製補強線を通し強度を向上させた。</p> <p>・プローブからケーブル長さ 60mの位置に中継増幅器が装着できるようにした。</p>	 <p>改良型ケーブルの断面構造</p>
6.フロート	<p>・従来発泡ゴムを使用していたが、損傷しやすいため発泡ポリエチレンを採用した。</p>	

表-3.4 (3/3)

項目	検討内容	備考
7.前置増幅器	<p>・前置増幅器の入出力特性を右に示す。ケーブルの出力端で得られる信号は 60mまでは増幅されているが、それ以上では減衰が著しくケーブルの中間地点（60m）に中継アンプを設ける必要がある。</p>	
9.中継アンプ	<p>右図に示す構成にて中継アンプの有無による探傷器での信号波形を調べたところ、中継アンプ無しでは、欠陥信号の識別が困難であったが中継アンプを介すると47dB以上の感度余裕GS得られた。</p>	<p>ケーブル長さによる前置増幅器の入出力特性</p>
	以下余白	



表-3.5 複合プローブ回路の共用性

	回路名称	入力線数	出力線数	* 検討結果	共用性
1	整形回路	1	2	波形の立ち上がりが歪み誤動作	×
2	トリガー回路	1	1	トリガー信号の振幅低下 (探傷感度 - 2dB down)	△
3	カウンター	2	5	変化なし	○
4	トリガー切替回路	3	4	＼	○
5	PIN・ダイオード 回路	5	4	高圧パルス電圧の振幅低下 (探傷感度 - 3dB down)	△
6	パルサー回路	1	1	＼ (探傷感度 - 7dB down)	△
7	M P X回路	1 2	1	併用不可(機能上)	×
8	ブリアンプ	1	1	＼	×

\* 検討結果は、各回路の負荷を3倍にした時の状態を調べた。

表-3.6 複合プローブ性能確認試験 (軸方向欠陥)

項目	試験方法	試験結果
1. 感度分布試験	図-3.21に示す装置にて各送受波子の感度を測定した。	軸方向欠陥用送受波子ユニットのSN比は、図-3.22に示すように送波側で36~39dB、受波側で32~35dBでありバラツキは送受波双方共3dB以内であった。
2. 探傷感度分布試験	TP1、20%t×3 <sup>φ</sup> 軸方向欠陥を各送受波子にて探傷した。	探傷感度バラツキは図-3.23に示すように10dB以内であった。
3. 欠陥補足範囲	TP1、20%t×3 <sup>φ</sup> 軸方向欠陥について、一連の5ch毎の欠陥補足範囲を測定した。	図-3.24に5ch~9chとこれらのchを補間する21ch~24chについての測定結果を示す。これより最大の谷は11dB (ch5-6) であり最小は8dB (ch8~9) であるが補間する送受波子の効果を入れると5dB以内の感度差で欠陥が検出できる。
4. 探傷性試験	下記の欠陥に対し、探傷試験を行なった。 a) 直管母材部内外表面欠陥 (TP1) b) 直管溶接部内外表面欠陥 (TP2) c) 曲管母材部外表面欠陥 (TP6.2) d) 曲管溶接部外表面欠陥 (TP6.2)	a) 図-3.25より内面欠陥は12dB以上、外面欠陥は9dB以上のSN比で検出できた。内外表面でのレベル差は2~4dBであった。図-3.26にAスコープ表示写真得尾示す。 b) 図-3.27より内面欠陥は15dB以上、外面欠陥は10%tで5dB以上、20%tで12dB以上のSN比で検出できた。内外表面でのレベル差は4~10dBであった。 c) 図-3.28 (a)より9dB以上のSN比で検出できた。 d) 図-3.28 (b)より11dB以上のSN比で検出できた。曲管に対する探傷の場合、溶接部の方が母材部よりエコーレベルが3dB程度高く検出された。

表-3.7 複合プローブ性能確認試験（周方向欠陥）

項 目	試 験 方 法	試 験 結 果
1. 感度分布試験	図-3.21に示す装置にて各送受波子の感度を測定した。	周方向欠陥用送受波子ユニットのSN比は、図-3.29に示すように送波側で28~32dB、受波側で25~32dBでありバラツキは送受波双方共5~8dB程度であった。
2. 探傷感度分布試験	TP1、20%t（外面）周方向欠陥を各送受波子にて探傷した。	探傷感度バラツキは図-3.30に示すように10dB程度であった。
3. 欠陥補足範囲	TP1、20%t（外面）周方向欠陥について、一連の5ch毎の欠陥補足範囲を測定した。	図-3.31に9ch~13chとこれらのchを補間する25ch~28chについての測定結果を示す。これより最大の谷は15dB（ch10-11）であり最小は10dB（ch11~12）であるが補間する送受波子の効果を入れると3dB以内の感度差で欠陥が検出できる。
4. 探傷性試験	下記の欠陥に対し、探傷試験を行なった。 a) 直管母材部内外表面欠陥（TP1） b) 直管溶接部内外表面欠陥（TP3） c) 曲管母材部外表面欠陥（TP6.2） d) 曲管溶接部外表面欠陥（TP6.2） e) 直管母材部内外ピンホール欠陥（TP1） f) 直管溶接部内外ピンホール欠陥（TP4）	a) 図-3.32より内面欠陥は23dB以上、外面欠陥は14dB以上のSN比で検出できた。内外表面でのレベル差は7~12dBであった。図-3.33にAスコープ表示写真得尾示す。 b) 図-3.34より内面欠陥は17dB以上、外面欠陥は10%tで9dB以上、20%tで16dB以上のSN比で検出できた。内外表面でのレベル差は7~15dBであった。 c) 図-3.35（a）より12dB以上のSN比で検出できた。 d) 図-3.35（b）より5dB以上のSN比で検出できた。曲管に対する探傷の場合、溶接部の方が母材部よりエコーレベルが3~5dB程度低下して検出された。 e) 図-3.36より $\phi 0.2 \sim 0.5 \times 2$ で未貫通 $\phi 0.5 \sim 1.5 \times 2$ で貫通した。 $\phi 0.2$ 以上のピンホールでSN比5dB以上で検出できた。 $\phi 0.5$ 以上のピンホールでは貫通ピンホールのエコーがmaxであった。未貫通と貫通との差は外面で2~4dB、内面で4~6dBであった。 $\phi$ が大きくなるのに比例してエコーも大きくなっている。 f) $\phi 0.5$ 、 $1 \times 2$ で貫通した。図-3.37より9dB以上のSN比で全て検出できた。

表 - 3.8 複合プローブの仕様

型 式		64 ch 電子走査式マルチアレイ型			
検 査 対 象		管外径 3'1.8 mm, 肉厚 3.5~3.8 mm, 最小曲げ半径 100 mm			
探 傷 速 度		4 m/min に対応			
対 象 欠 陥		軸方向欠陥	周方向欠陥, ピンホール	減肉欠陥※	
送 受 波 子 ユ ニ ツ ト	ユ ニ ッ ト 名	軸方向欠陥探傷用	周方向欠陥探傷用	減肉欠陥探傷用	
	チ ャ ン ネ ル 数	16 ch × 2 ユニット	16 ch × 2 ユニット	16 ch × 2 ユニット	
	配 置 形 式	送受左右配置形	送受前後配置形	送受分割形	
	周 波 数	5 MHz	5 MHz	10 MHz	
	振 動 子	2.8 × 2 (平板)	約 2.8 × 2 (リング)	約 2.8 × 2 (リング)	
	設 定 角	送 波 子	60° (横波)	60° (横波)	10° (縦波)
		受 波 子	60° (横波)	50° (横波)	10° (縦波)
		対 向 角	35°	—	—
調 心 機 構		センタリングフィン (樹脂製)			
走 査 制 御 回 路	チャンネル走査方式	3種並列駆動 32 ch 時系列走査			
	送 信 系	内蔵パルサー (トリガ切換えパルス分配方式)			
	受 信 系	時系列多重化処理方式			
	走 査 速 度	15000 rpm (Max)			
挿 入 方 式		水流による圧送方式 (1.5~3 atg)			
受圧体 (フロート)		取付間隔 150 mm (φ18-40, ポリエチレン製)			
ケ ー ブ ル		8心50Ω同軸ケーブル, 外径約 6 mm			

※ 更に減肉欠陥探傷用 (32 ch) が増設可能

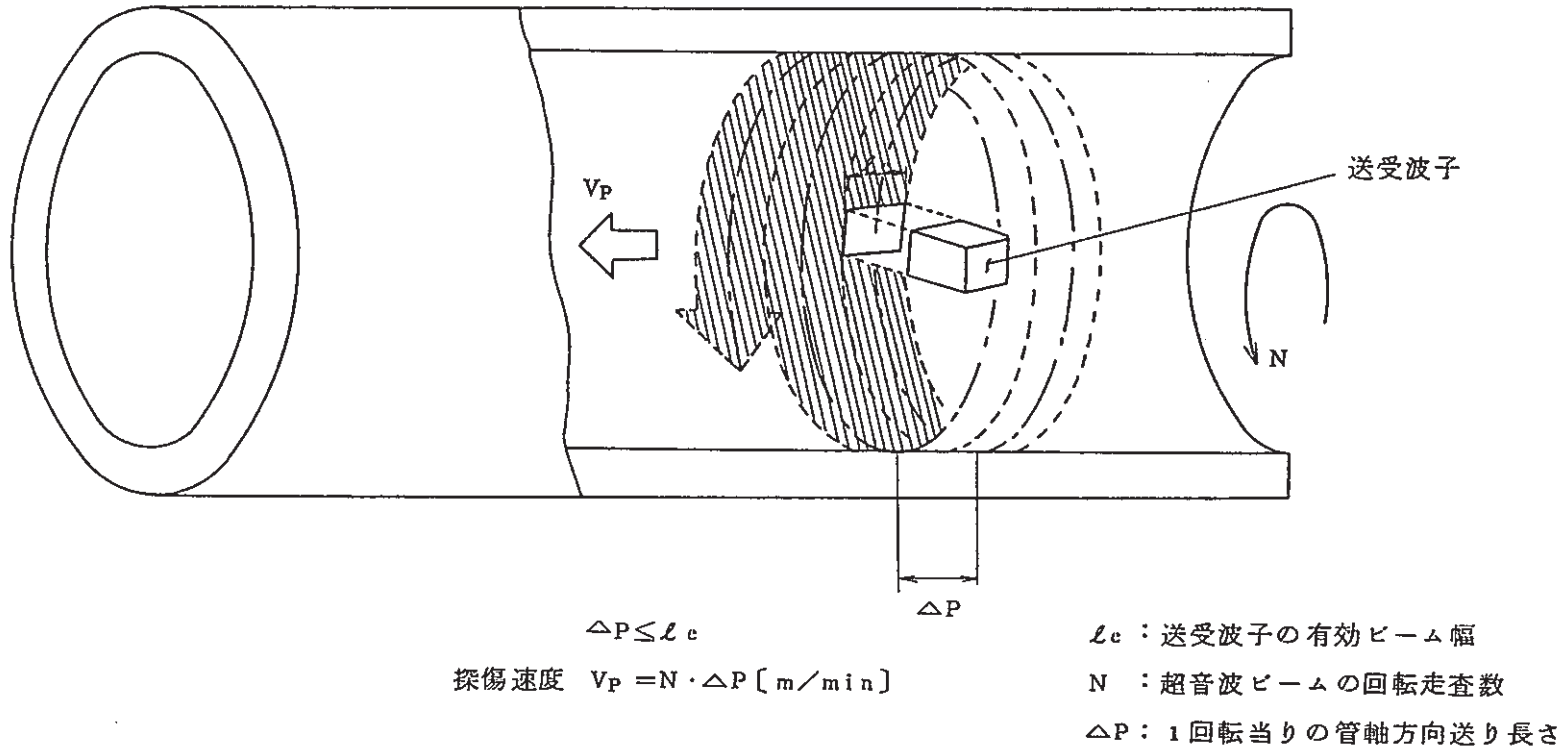


図-3.1 超音波ビームの走査方法

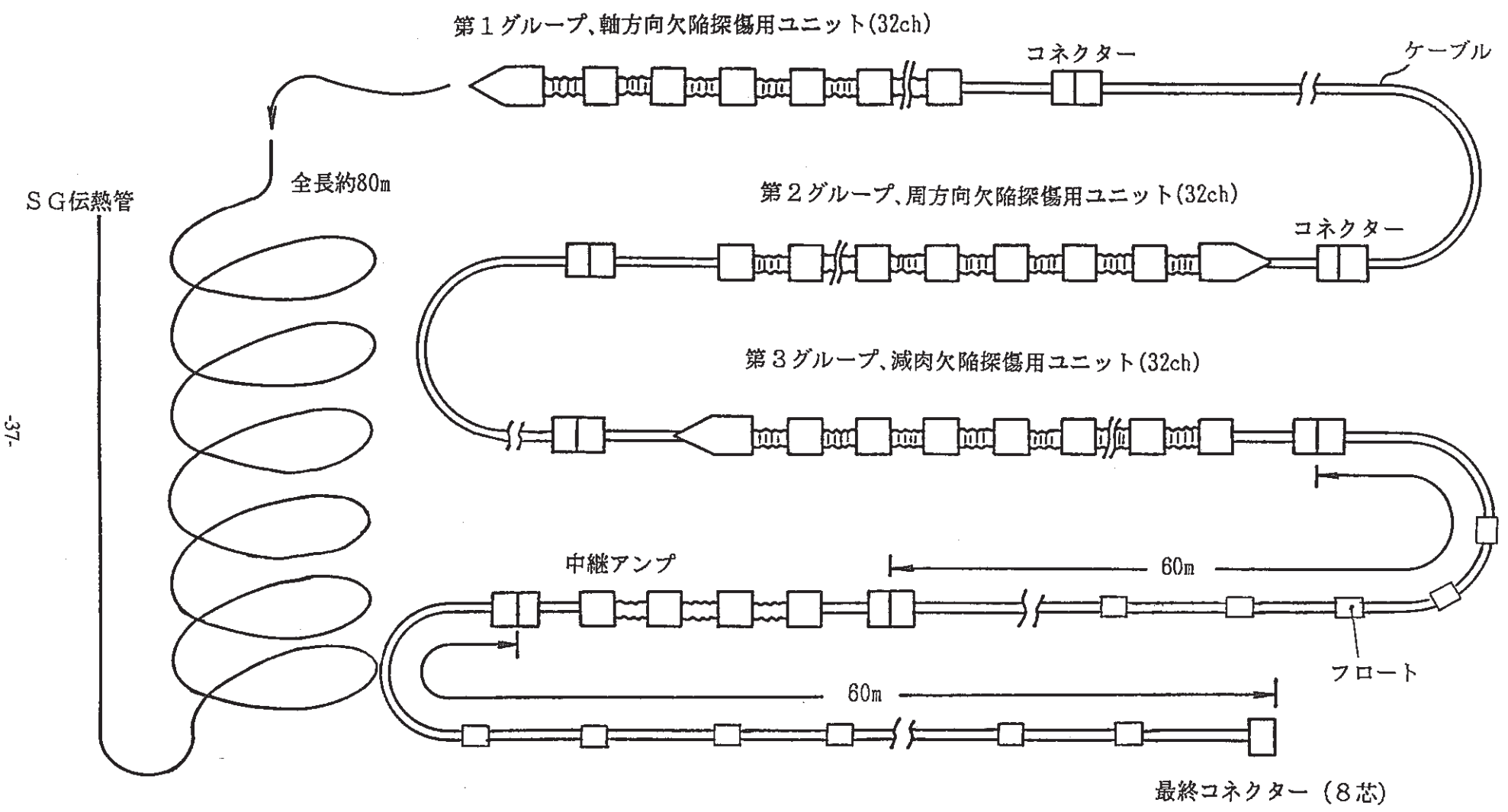
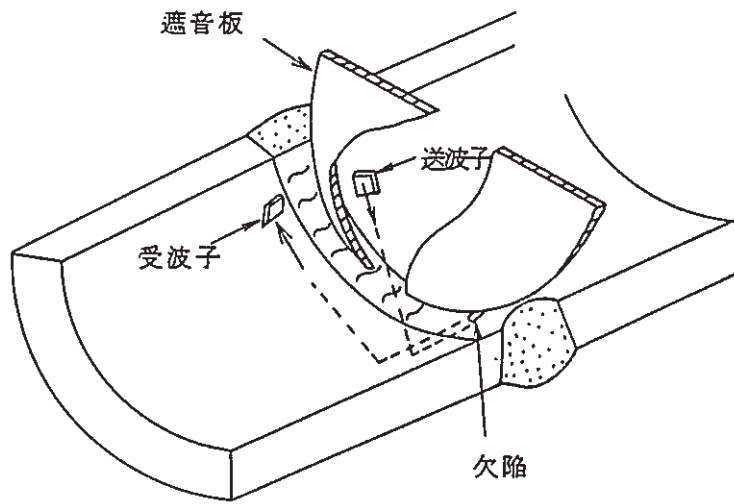
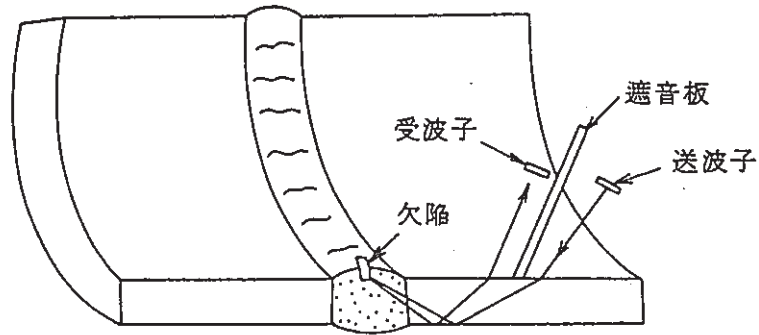


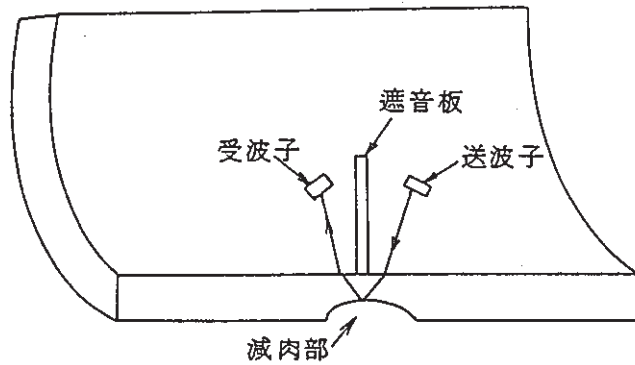
図-3.2 複合プローブの全体配置



軸方向欠陥用（送受左右配置形）



周方向欠陥用（送受前後配置形）



減肉欠陥用（送受分割形）

圖-3.3 各種欠陥探傷方式

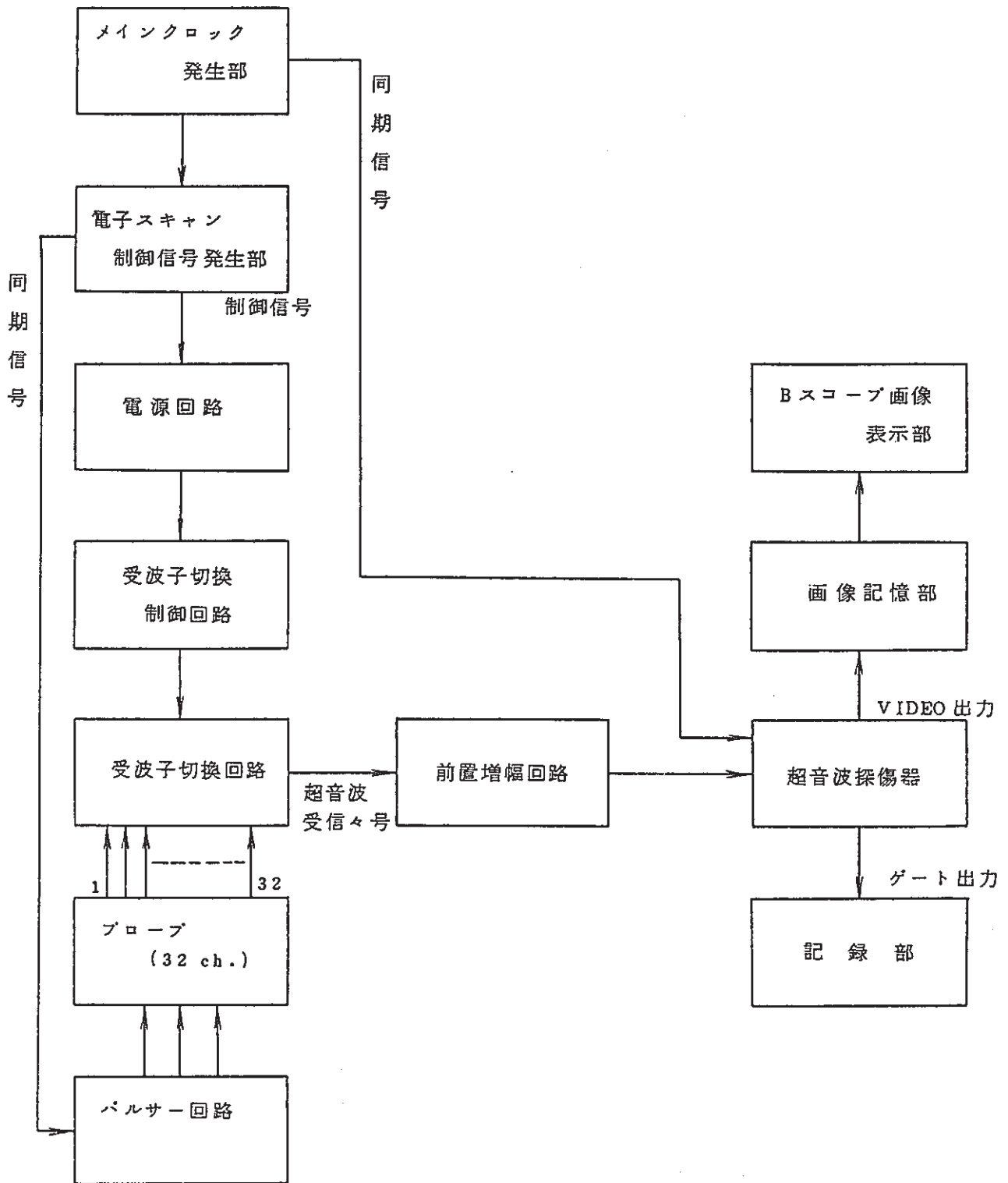


図-3.4 超音波探傷装置の構成ブロック図



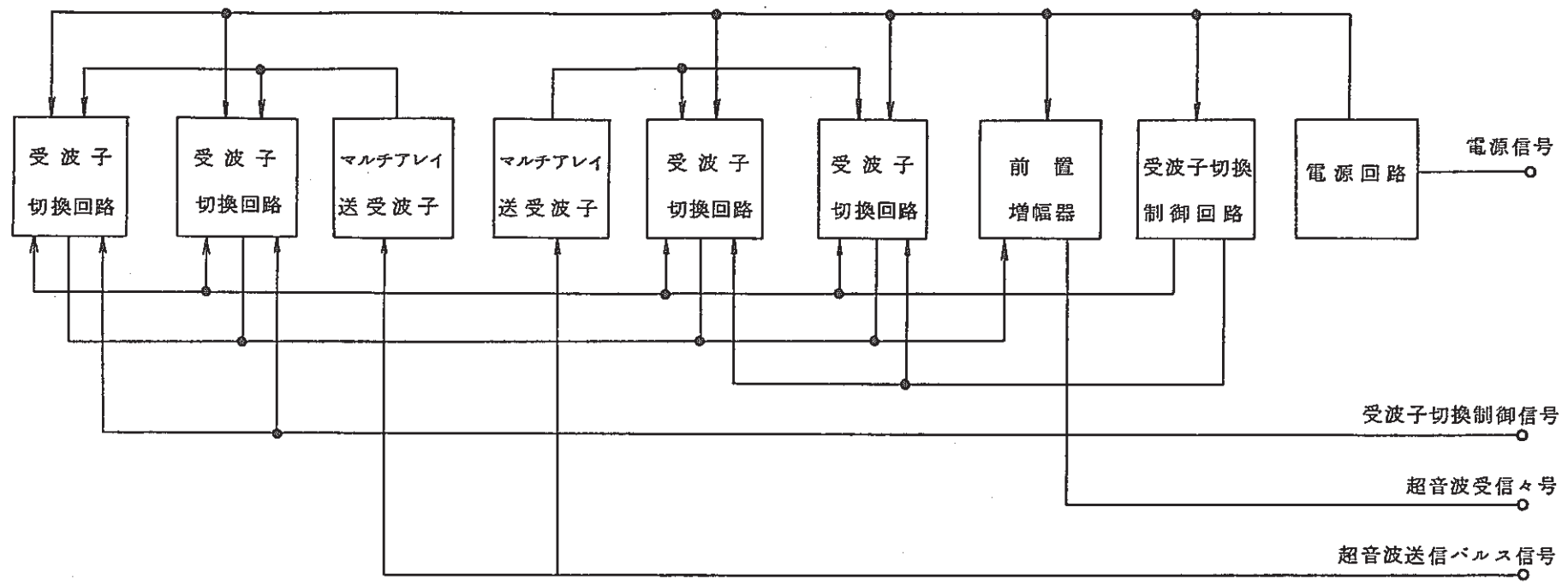
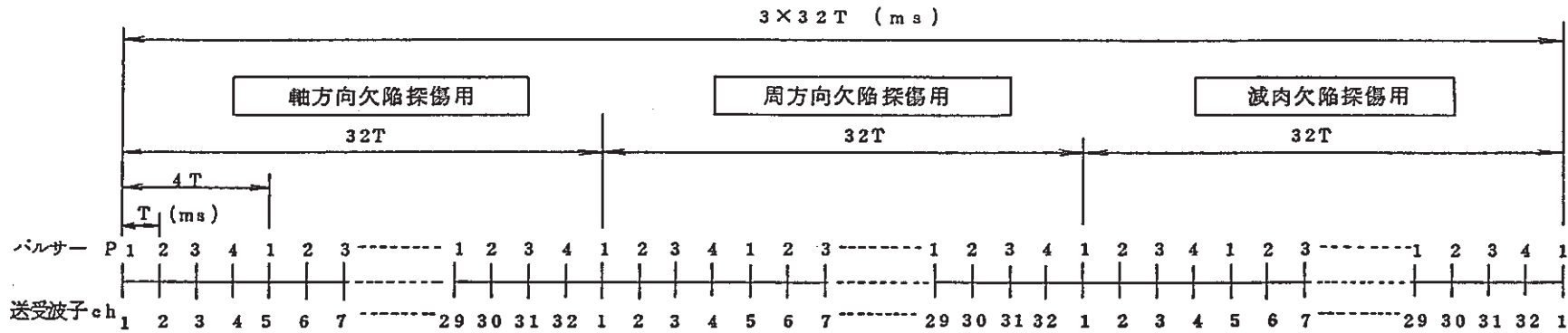
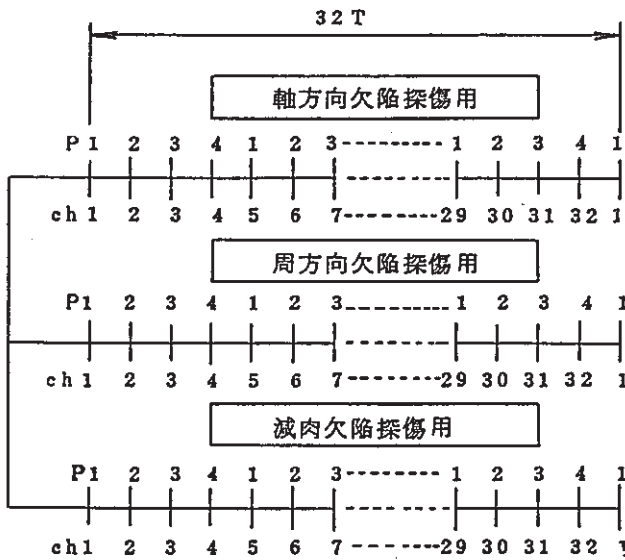


図-3.5 マルチアレイ型プローブ回路構成ブロック図



(a) 96ch. 時系列走査方式



(b) 3種並列駆動 32ch. 時系列走査方式

回路方式	最大探傷速度 (繰返し周波数2kHz)	同一箇所走査回数 (探傷速度4m/min) (繰返し周波数2kHz)	備考
96ch時系列走査	6.5m/min	1	探傷速度: V $V = \frac{W \times 10^{-3} \times 6 \times 10^4}{T \cdot N} \quad [\text{m/min}]$ W: 振動子の有効ビーム幅 [mm] (W=1.3mm) T: チャンネル間周期 [ms]
3種並列駆動 32ch時系列走査	19.5m/min	4	$T = \frac{1}{4Prf}$ Prf: 1ch当りのパルサ繰返し周波数

図-3.6 チャンネル走査方式による探傷速度の検討

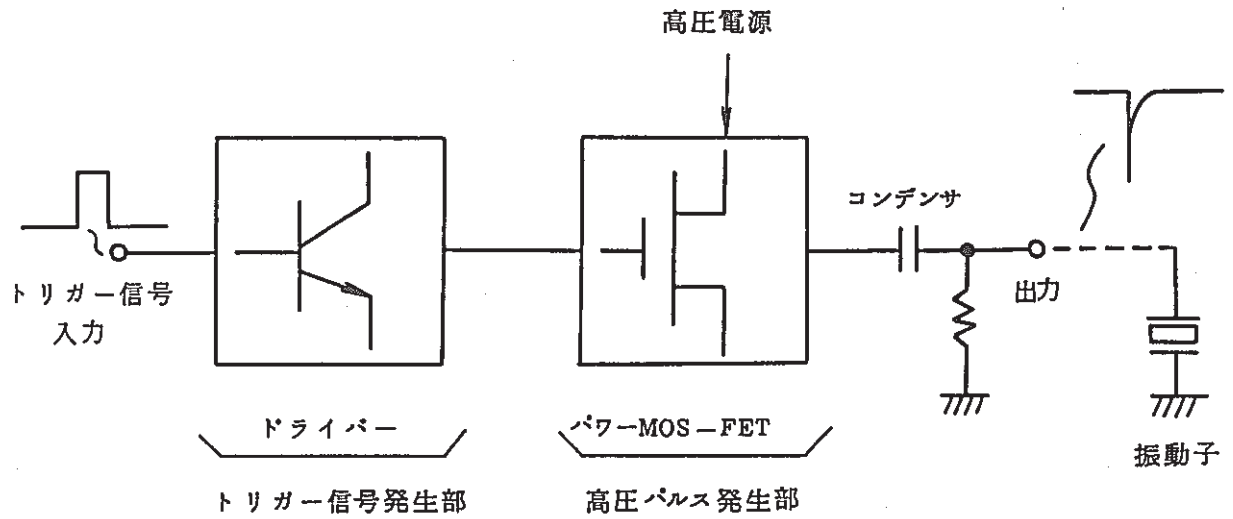
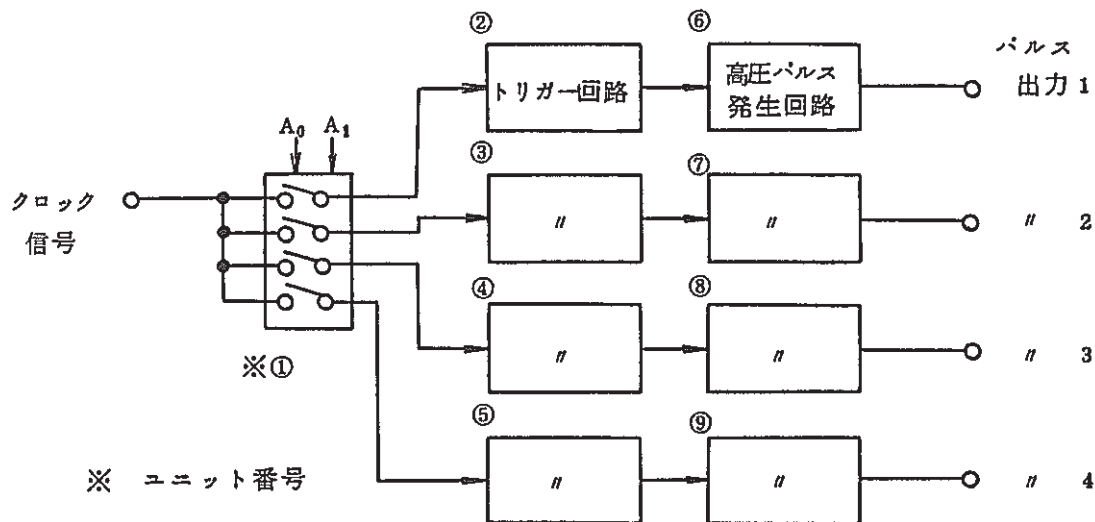
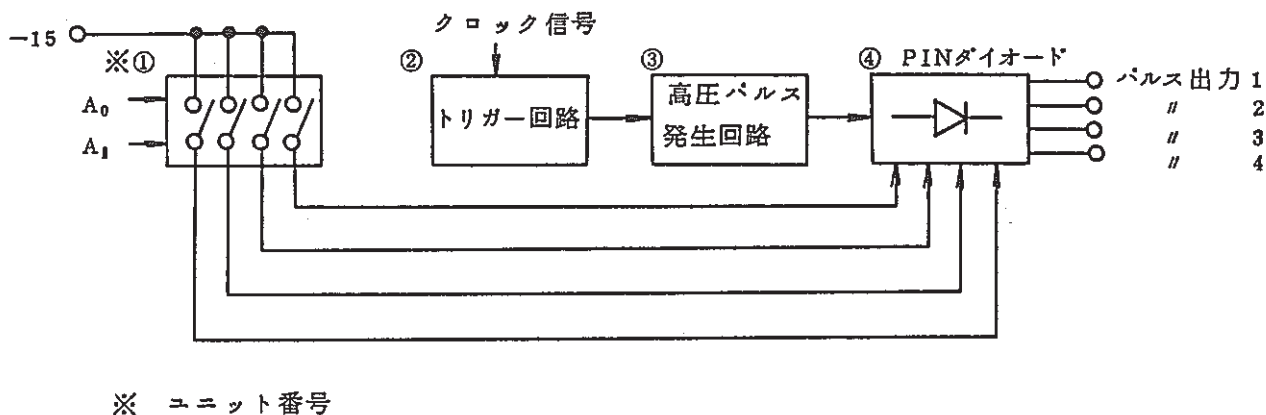


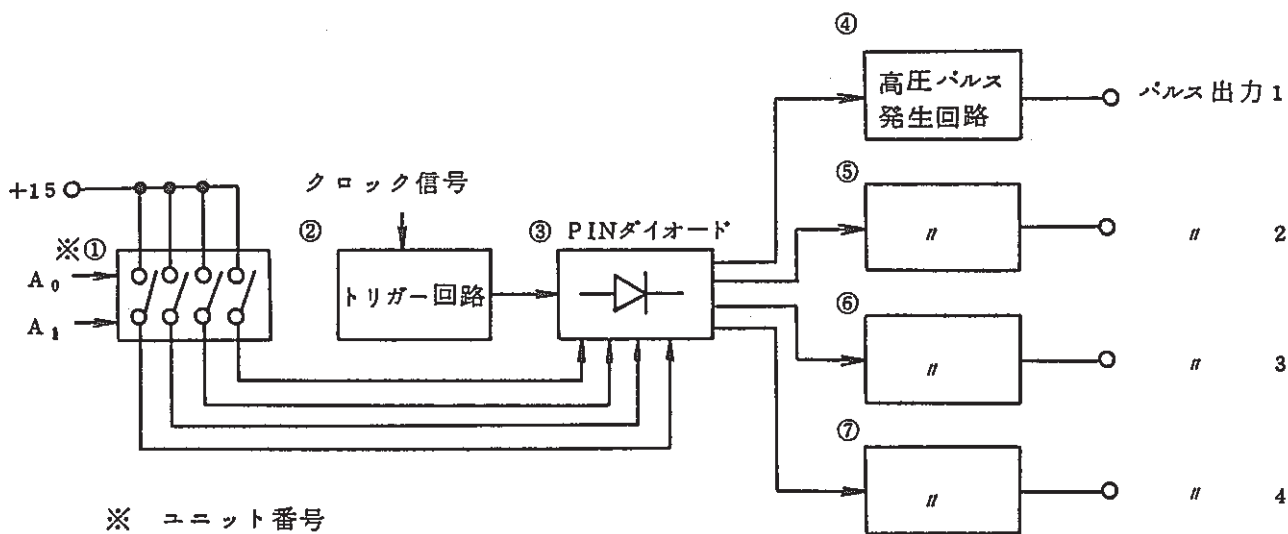
図-3.7 試作パルサ回路 (1ch.分)



(a) 高圧パルス発生回路とトリガー回路各 4 系統



(b) 高圧パルス発生回路とトリガー回路各 1 系統



(c) 高圧パルス発生回路 4 系統とトリガー回路 1 系統

図-3.8 パルサ信号切換方式

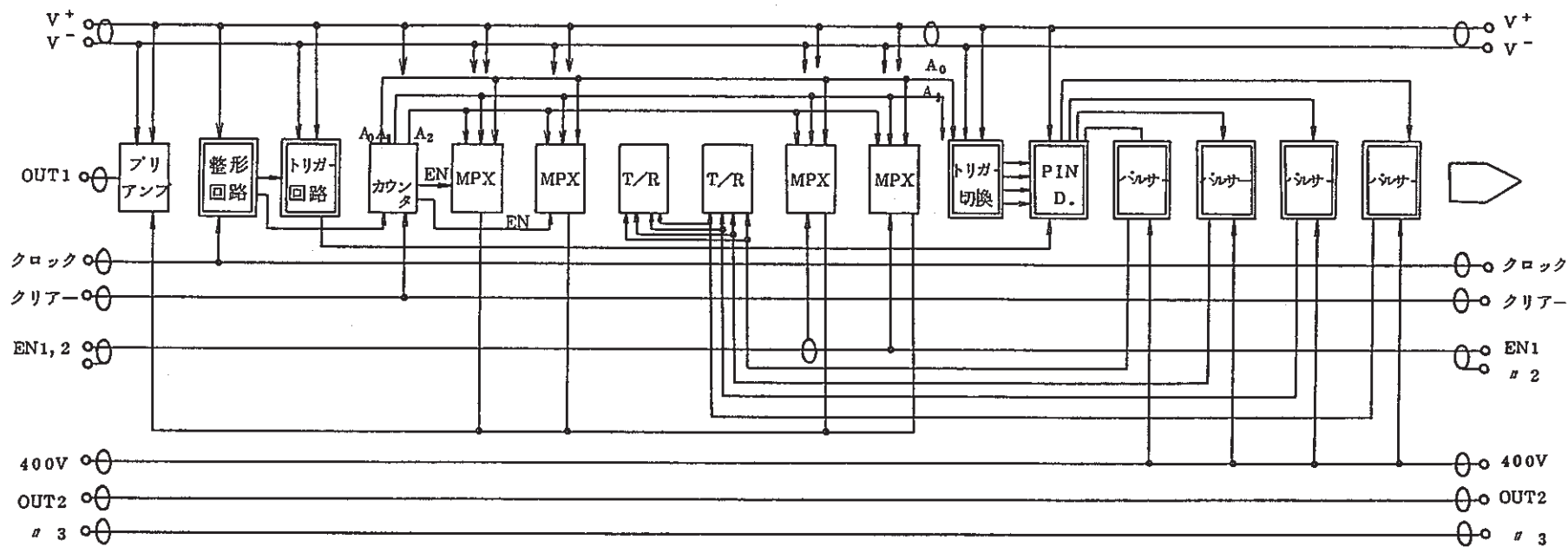


図-3.9 複合プローブ回路の1グループのユニット構成

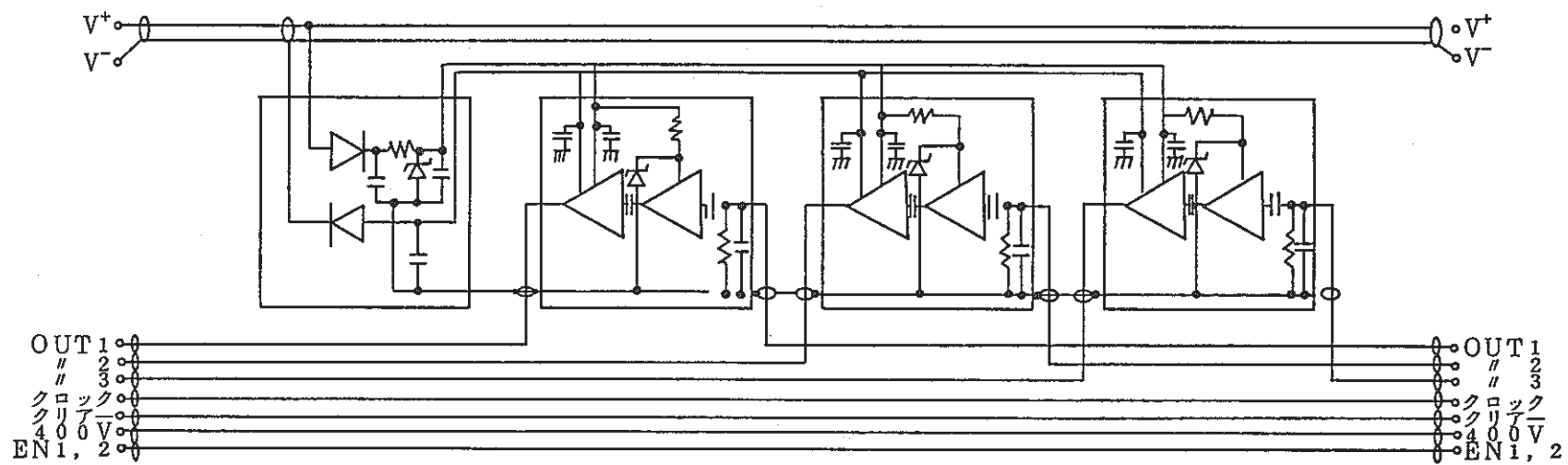
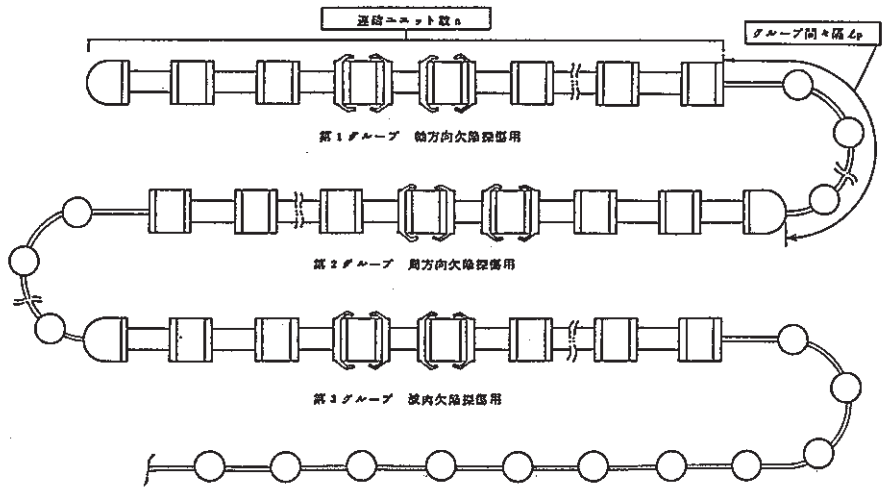


図-3.10 中継アンプ回路図



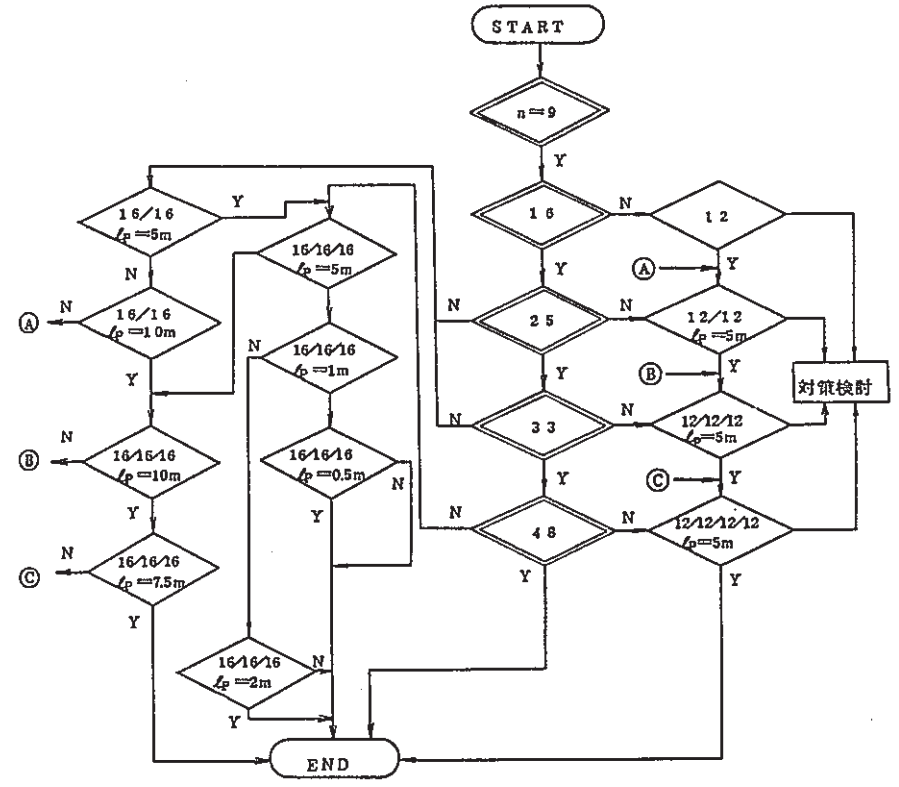
(a) ダミープローブ構成

連結ユニット数とダミープローブの挿入圧力

挿入長さ	ユニット数			$l_p = 5m$ 16/16/16
	16 *	33 *	48 *	
3.4 m	0.8	1.1	1.2	0.7
2 1.0 m	1.4	1.6	1.6	1.1
2 5.5 m	1.7	1.7	1.6	1.2
4 3.1 m	1.8	1.8	1.7	1.3
6 5.2 m	1.8	1.8	1.8	1.4
6 9.0 m	1.8	1.8	2.0	1.4
7 5.4 m	1.8	1.8	2.0	1.4

(単位: atg)

\*グループ間間隔なし



凡例: 数字は, 連結ユニット数 n を表わす。

(b) 挿入試験フローチャート

図-3.11 ダミープローブ挿入試験

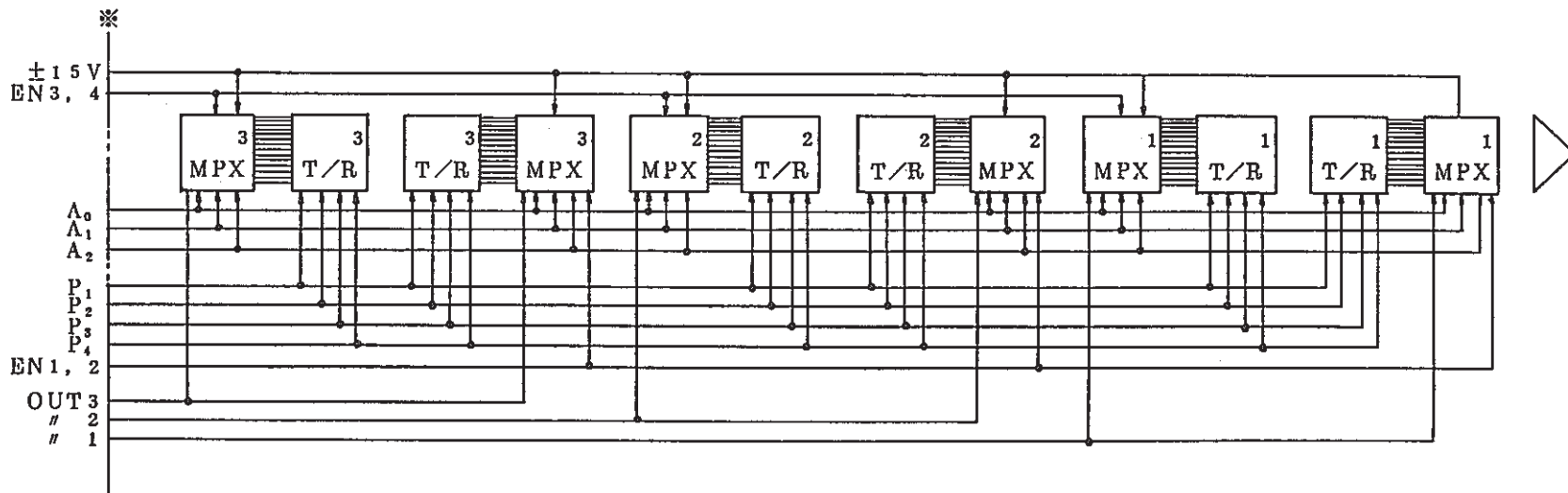
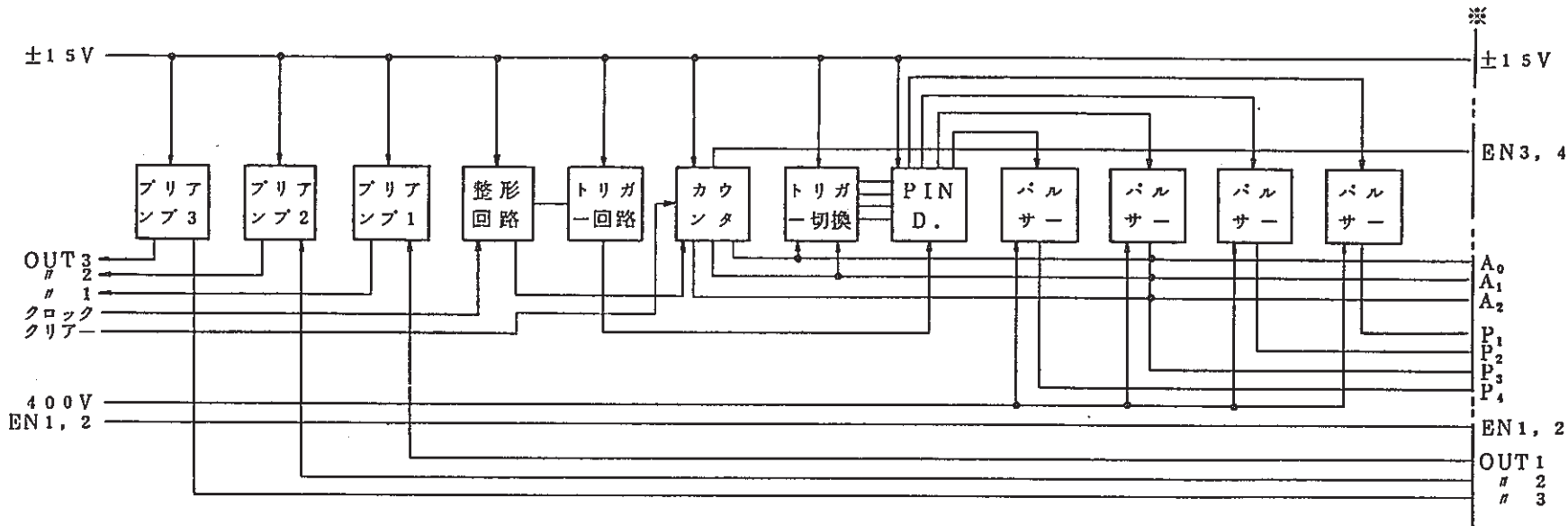
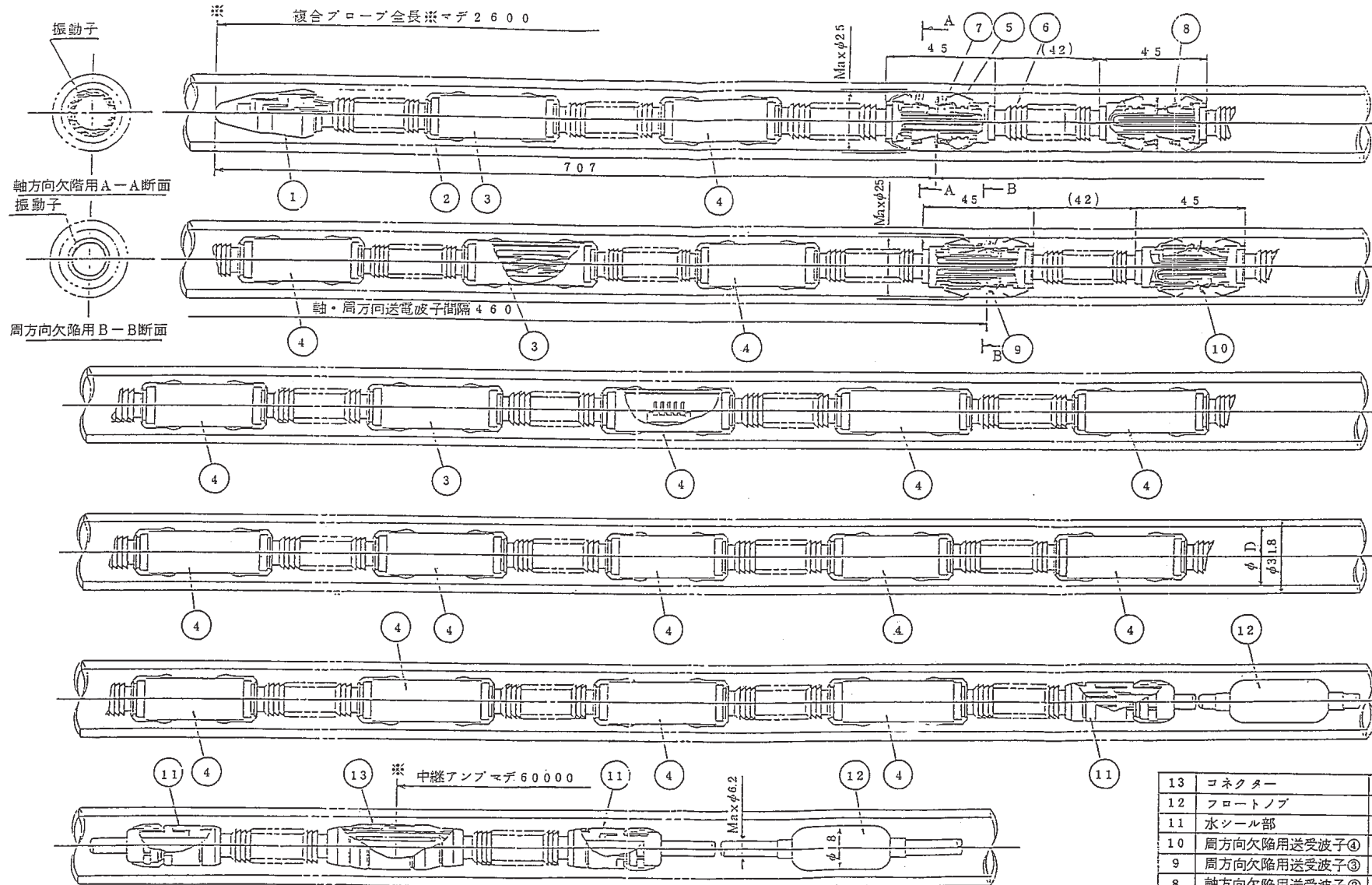


図-3.12 短縮化後の複合プローブ回路構成 (24ユニット)

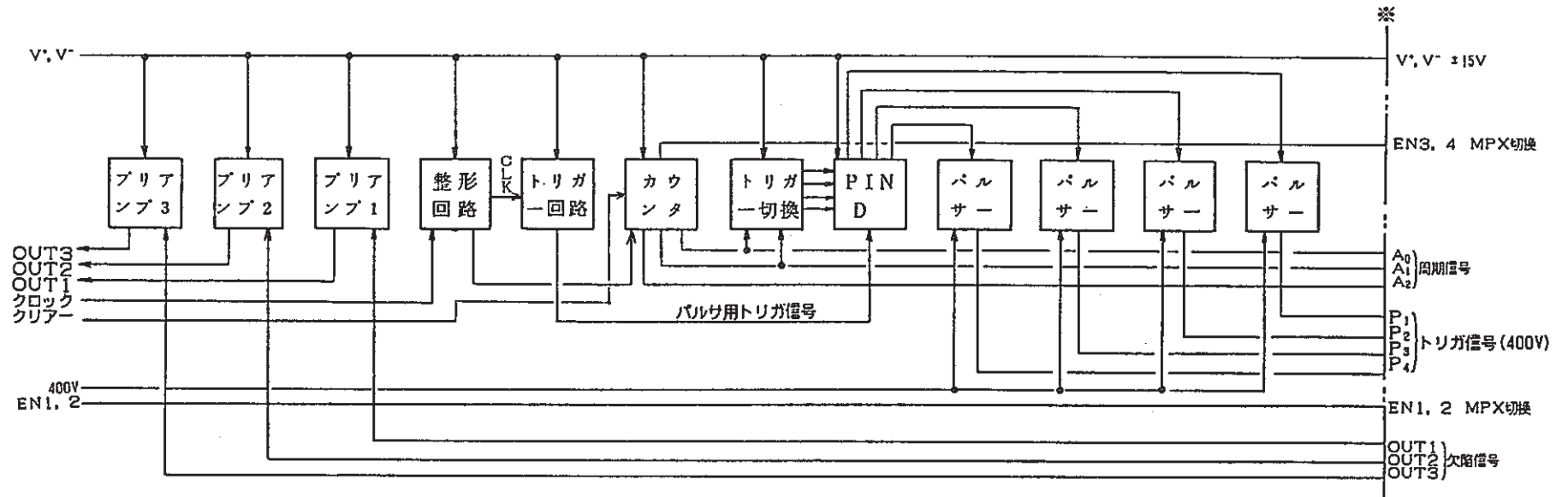




材質	φ D (公称値)
STBA24	φ 24.2
SUS321HTB	φ 24.8

13	コネクタ	同軸コネクター及ビSUS304他
12	フロントノブ	合成樹脂
11	水ツール部	SUS304及ビアルミ他
10	周方向欠陥用送受波子④	SUS304及ビベーク他
9	周方向欠陥用送受波子③	〃
8	軸方向欠陥用送受波子②	〃
7	軸方向欠陥用送受波子①	SUS304及ビベーク他
6	連結部	合成樹脂及ビSUS銅線
5	調芯フィン	デルリン
4	回路部	電子部品, アルミ及ビSUS304
3	接続端子部	電子部品, アルミ及ビSUS304
2	フィン	デルリン
1	パイロット	デルリン及ビSUS304
品番	品名	材質

図-3.13 マルチアレイ型複合プローブ



MPX: A<sub>0</sub>, A<sub>2</sub>, EN1, 2で受波子を選択, 受信々号を時系列的にプリアンプへ出力する

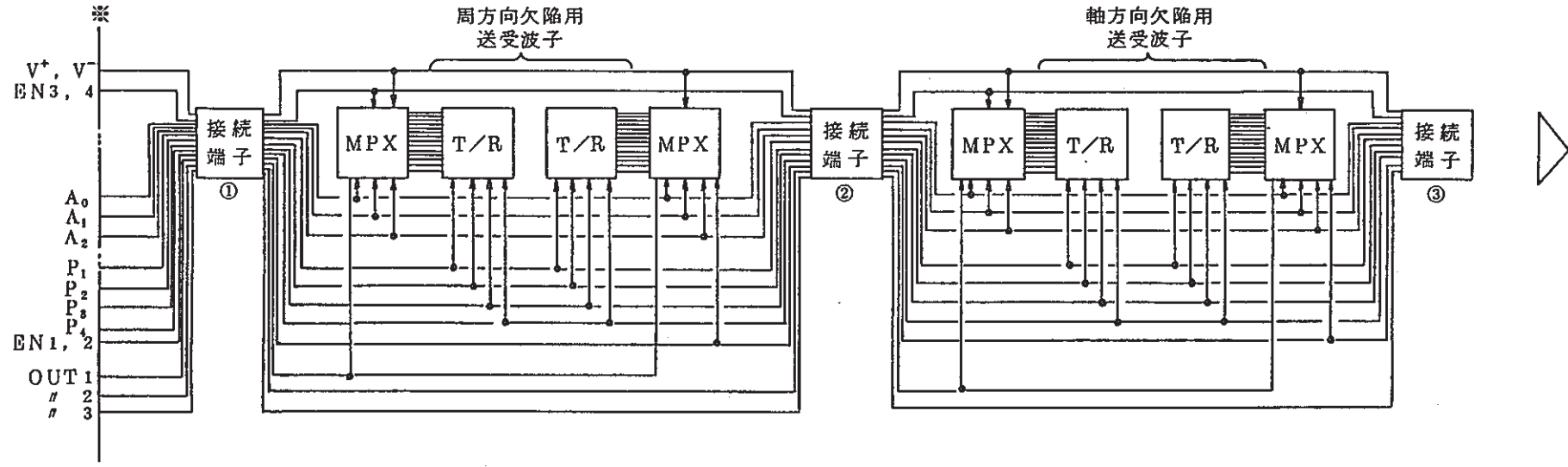


図-3.14 マルチアレイ型複合プローブ用内蔵回路図 (23ユニット)

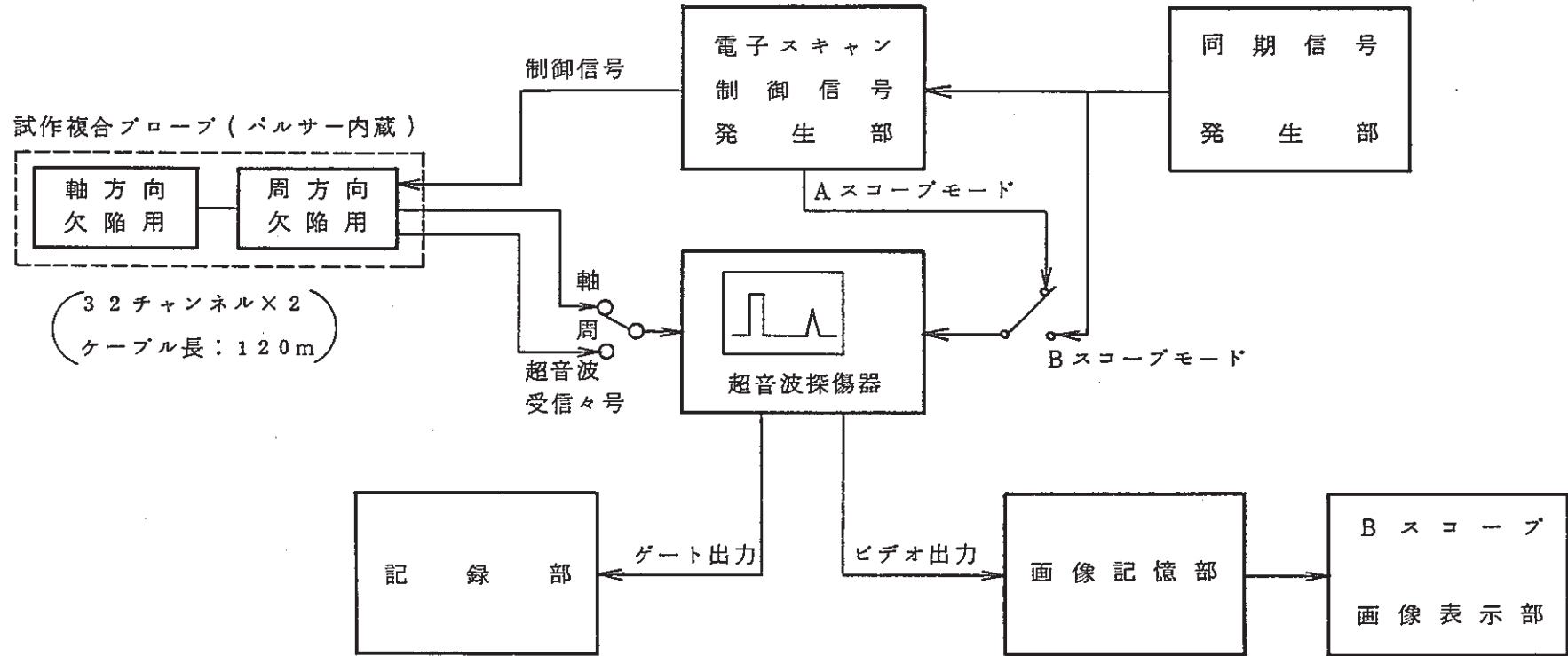
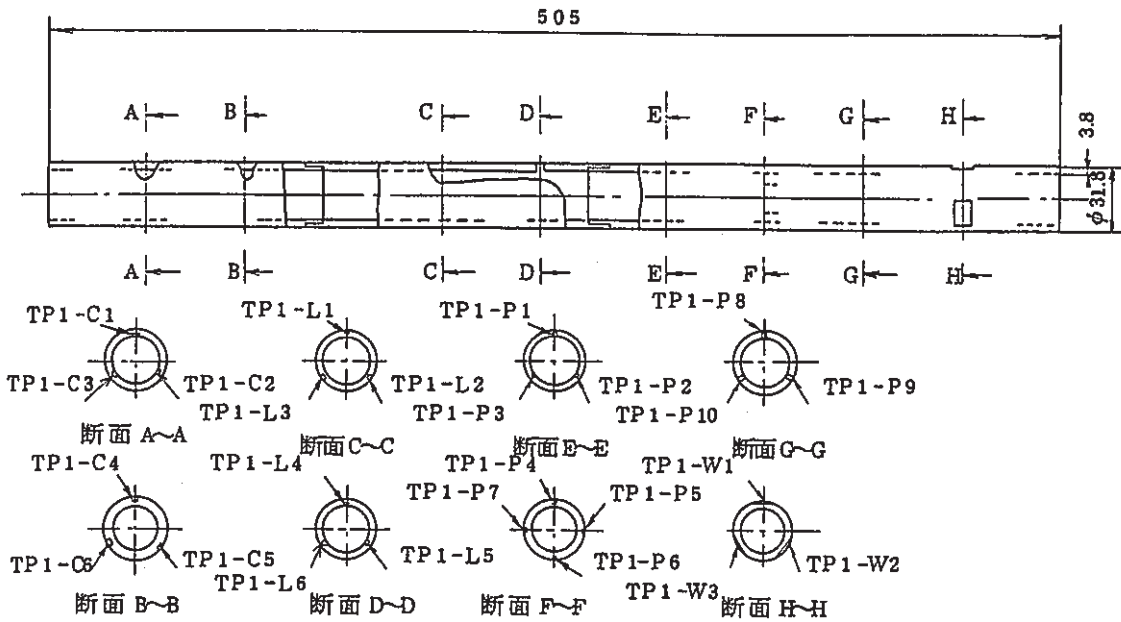
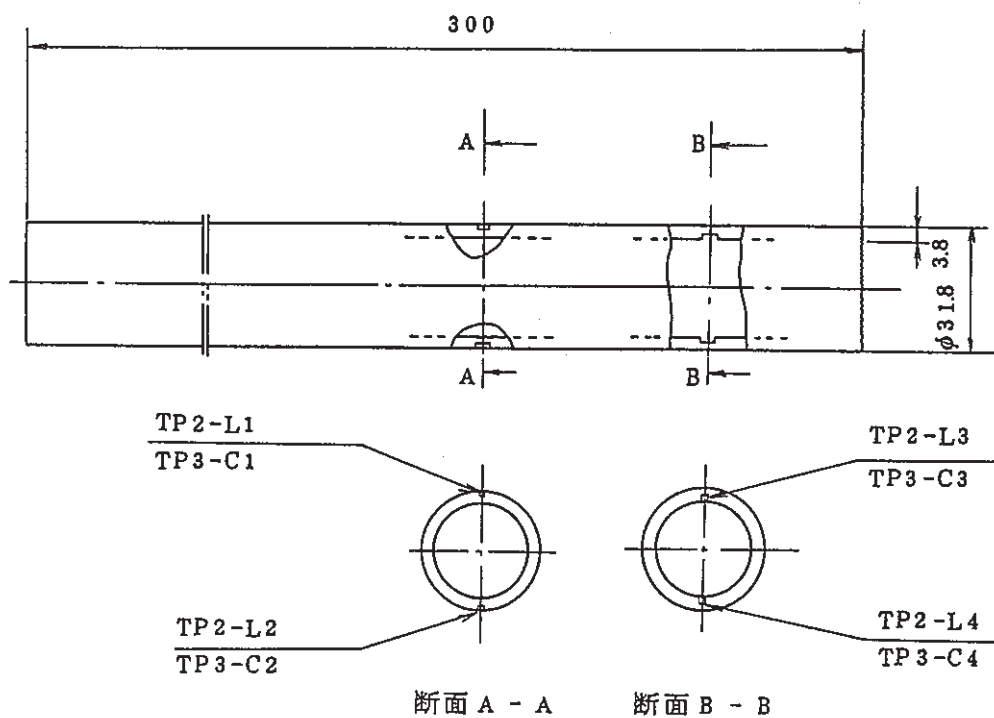


図-3.15 超音波探傷装置の校正 (実験用)



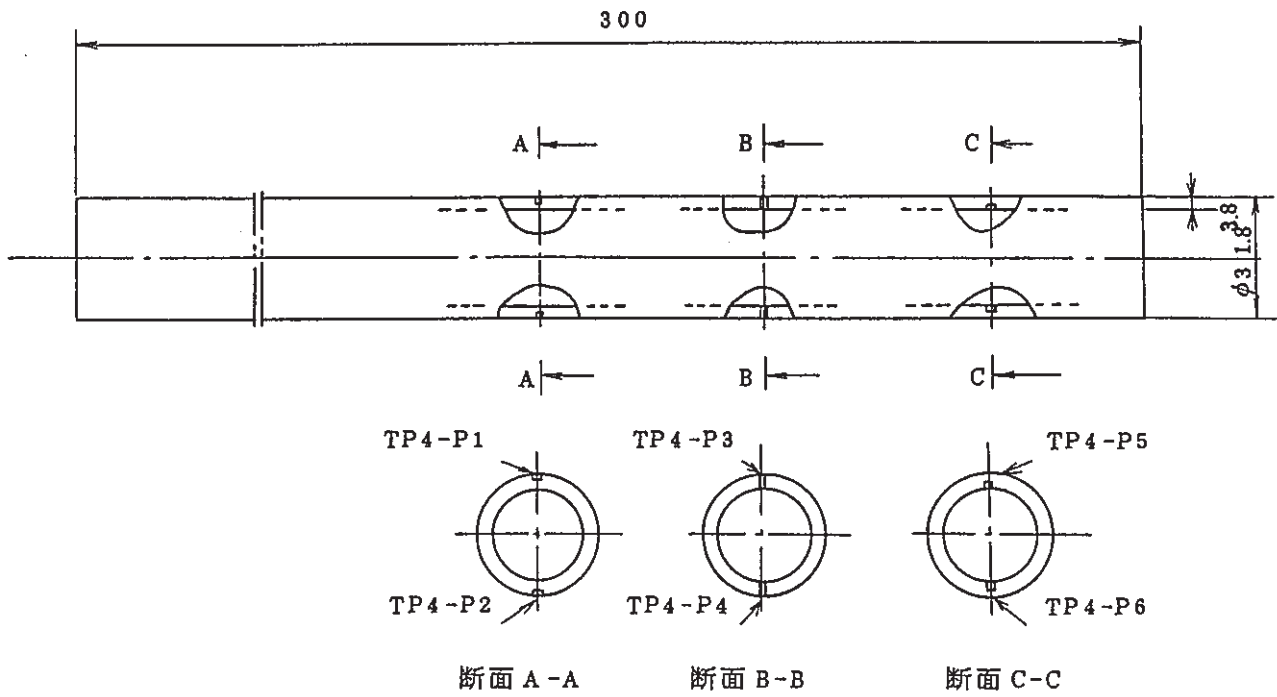
欠陥番号	欠陥性状	欠陥位置	深さ(%) (目標値)	長さ (mm)	幅 (mm)	直径 (mm)	備考
TP1-C1	周方向 欠陥	内面	5	3	0.5以下	X	
" -C2		"	10	"	"		
" -C3		"	20	"	"		
" -C4		外面	5	"	"		
" -C5		"	10	"	"		
" -C6		"	20	"	"		
TP1-L1	軸方向 欠陥	外面	5	"	"		
" -L2		"	10	"	"		
" -L3		"	20	"	"		
" -L4		内面	5	"	"		
" -L5		"	10	"	"		
" -L6		"	20	3	0.5以下		
TP1-P1	ピンホール 欠陥	内面	2mm	X	X	0.5	
" -P2		"	"			1.0	
" -P3		"	"			1.5	
" -P4		外面	"			0.2	
" -P5		"	"			0.5	
" -P6		"	"			1.0	
" -P7		"	"			1.5	
" -P8		(貫通ピンホール)	—			0.5	
" -P9		"	—			1.0	
" -P10		"	—			1.5	
TP1-W1	減肉欠陥	外面	5	10	5	X	
" -W2		"	10	"	7		
" -W3		"	20	"	10		

図-3.16 試験片TP1の形状図 (STBA24)



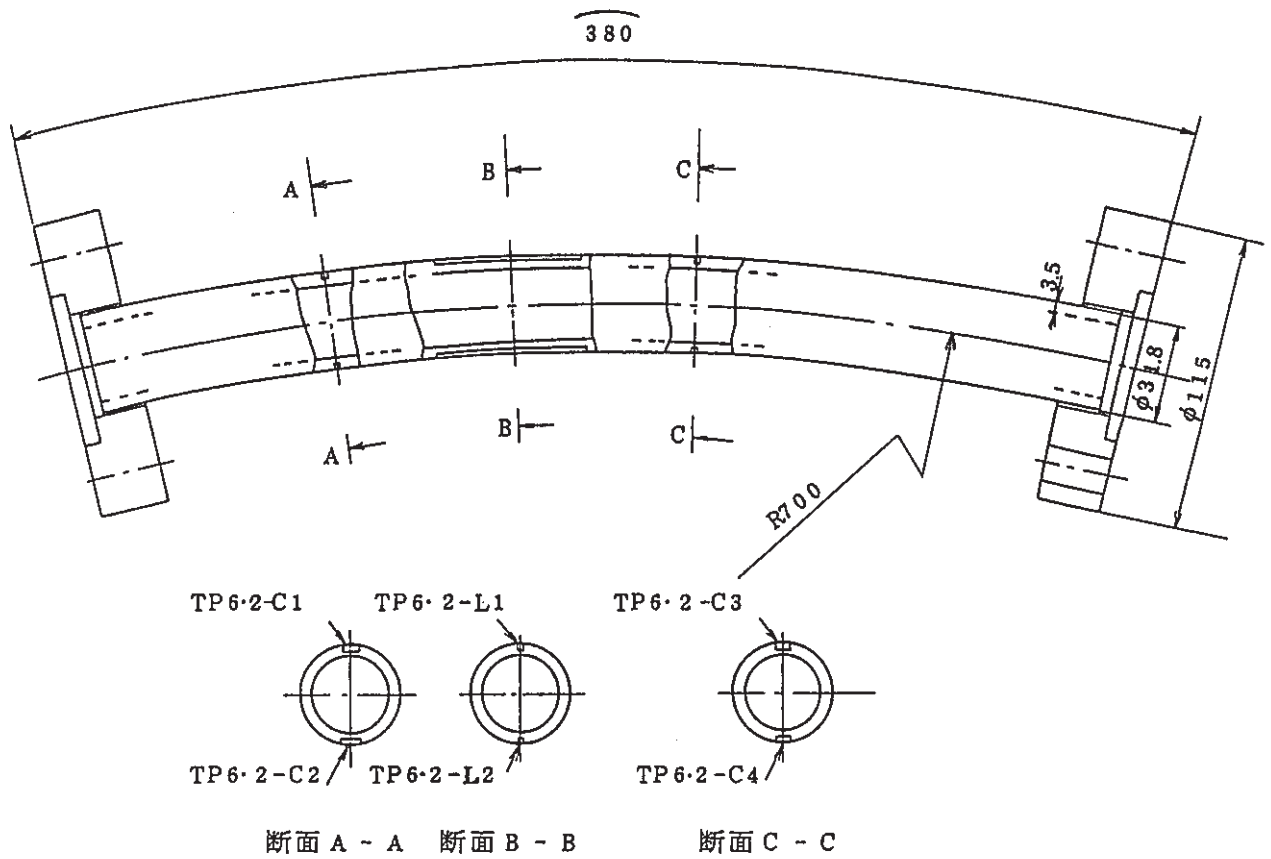
試験片番号	欠陥番号	欠陥性状	欠陥位置	深さ(%) (目標値)	長さ (mm)	幅 (mm)	備 考
TP2	TP2-L1	軸方向 欠 陥	外 面	10	3	0.5以下	溶 接 部
	" L2		"	20			"
	" L3		内 面	10			"
	" L4		"	20			"
TP3	TP3-C1	周方向 欠 陥	外 面	10			"
	" C2		"	20			"
	" C3		内 面	10			"
	" C4		"	20			"

図-3.17 試験片TP.2,3の形状図 (STBA24)



欠陥番号	欠陥性状	欠陥位置	深さ (mm) (目標値)	直径 (mm)	備考
TP4-P1		外面	2	0.5	溶接部
// P2		外面	2	1.0	//
// P3	ピンホール	(貫通ピンホール)	—	0.5	//
// P4	欠陥	(貫通ピンホール)	—	1.0	//
// P5		内面	2	0.5	//
// P6		内面	2	1.0	//

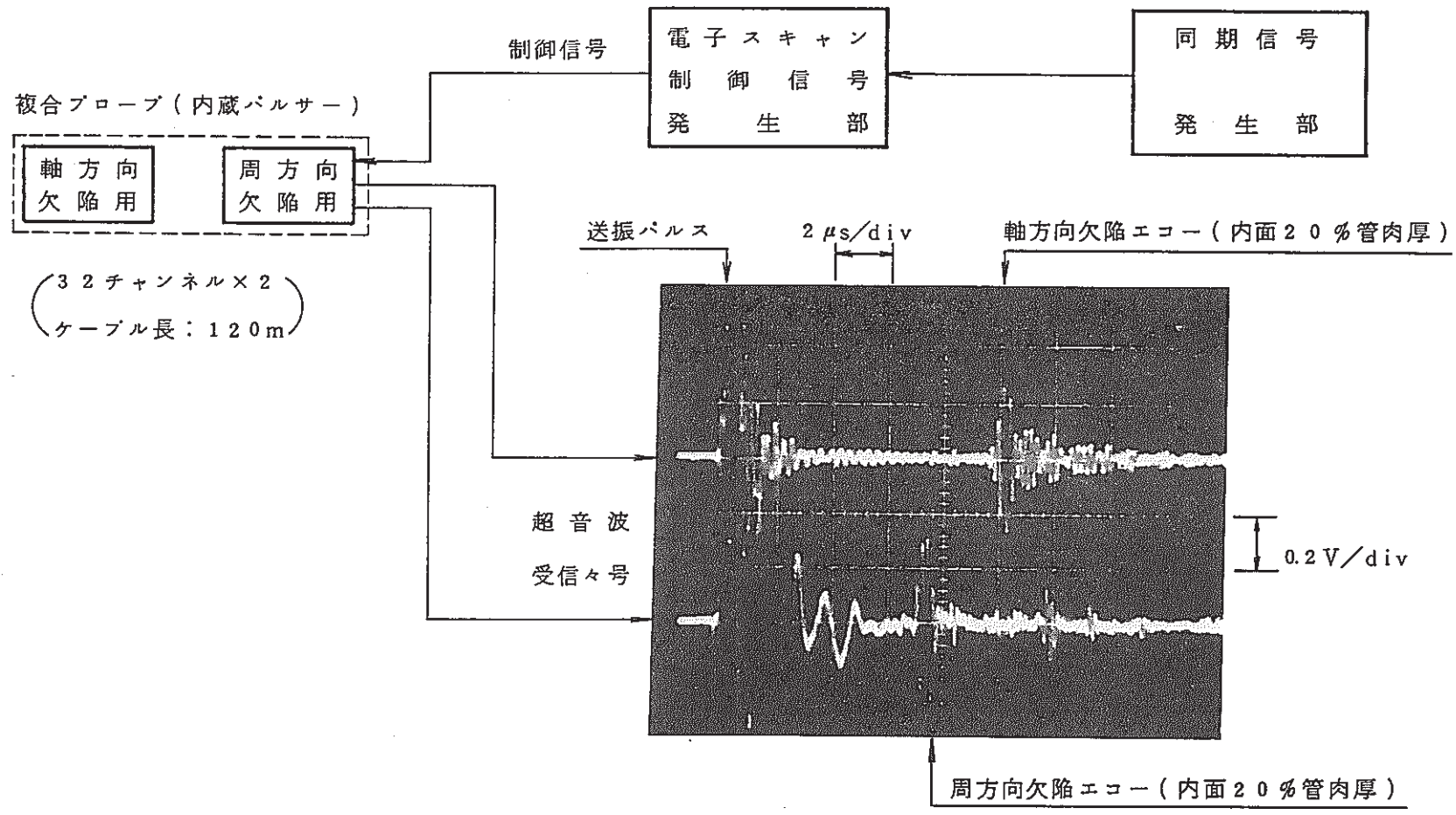
図-3.18 試験片TP4の形状図 (STBA24)



欠陥番号	欠陥性状	欠陥位置	深さ(%) (目標値)	長さ (mm)	幅 (mm)	備 考
TP6.2-C1	周方向	外 面	10	8	0.5 以下	溶 接 部
" C2	欠 陥	"	20	8	"	"
" L1	軸方向	"	10	50 以上	1.0	溶 接 部*
" L2	欠 陥	"	20	"	"	溶 接 部*
" C3	周方向	"	10	8	0.5 以下	
" C4	欠 陥	"	20	8	"	

\* 溶接部及び母材部にまたがる。

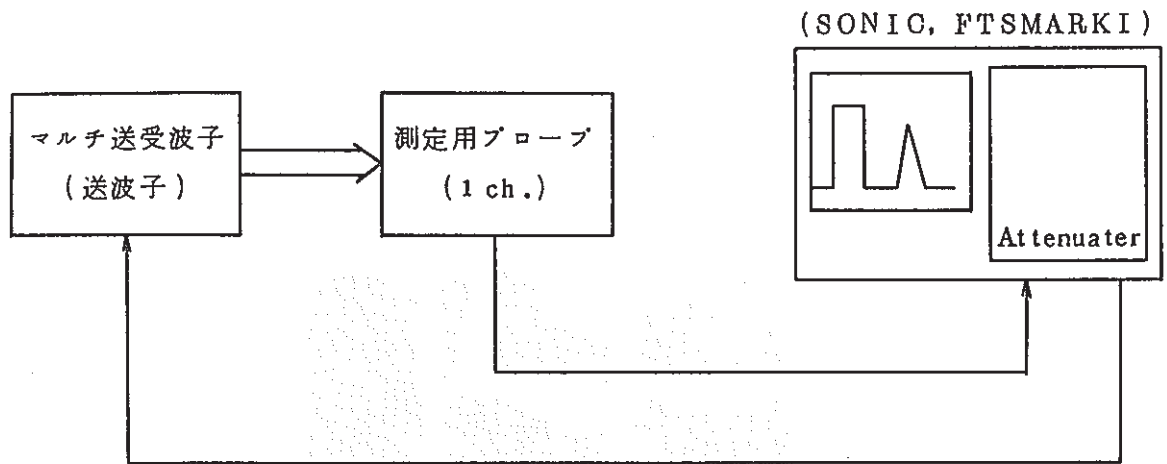
図-3.19 試験片TP 6.2の形状図  
(SUS304HTB)



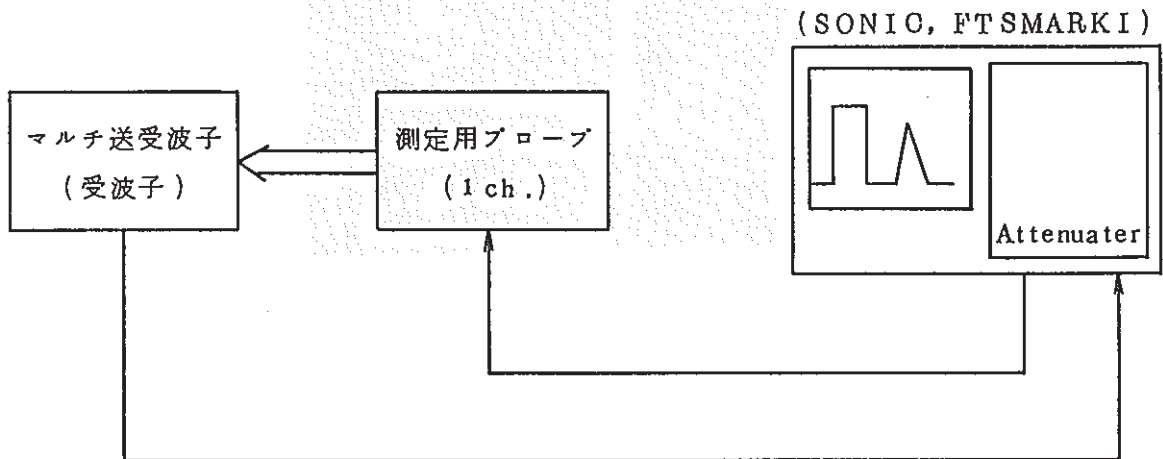
探傷波形例 (2現象オシロスコープ)

図-3.20 試作複合プローブによる軸・周方向欠陥同時探傷試験結果



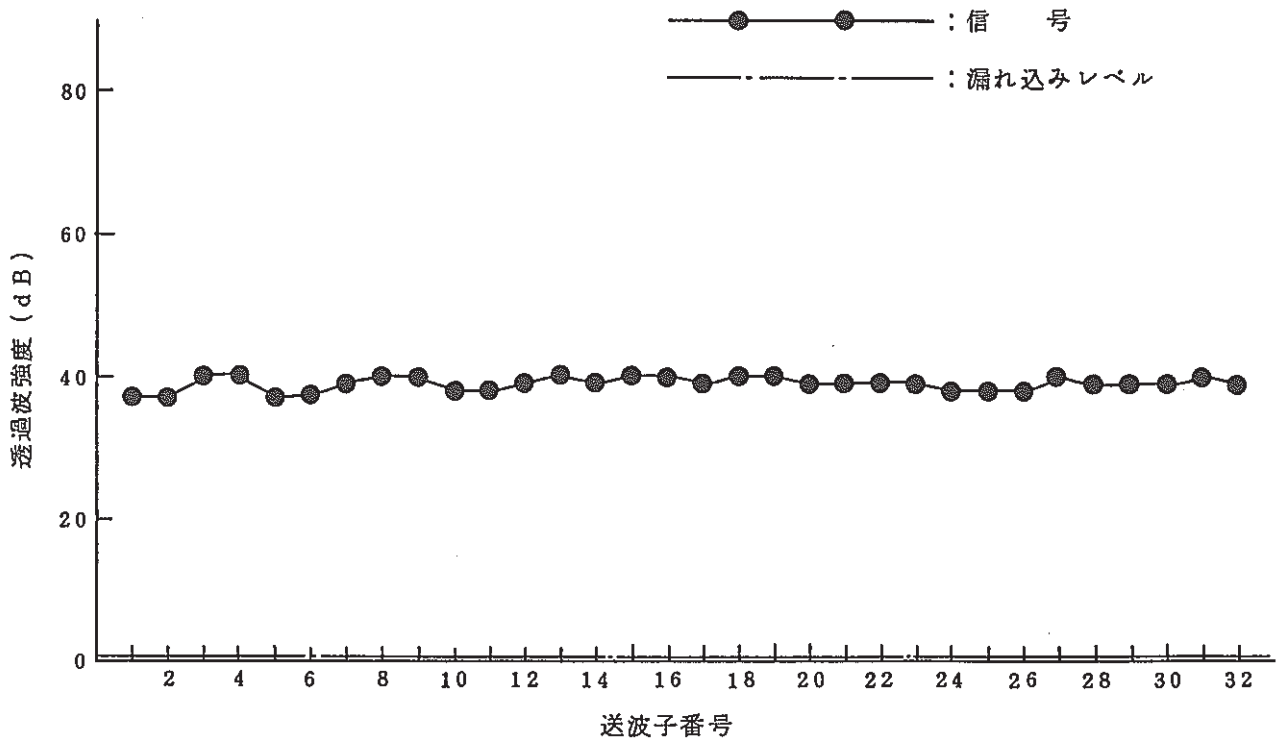


(a) 送波感度測定

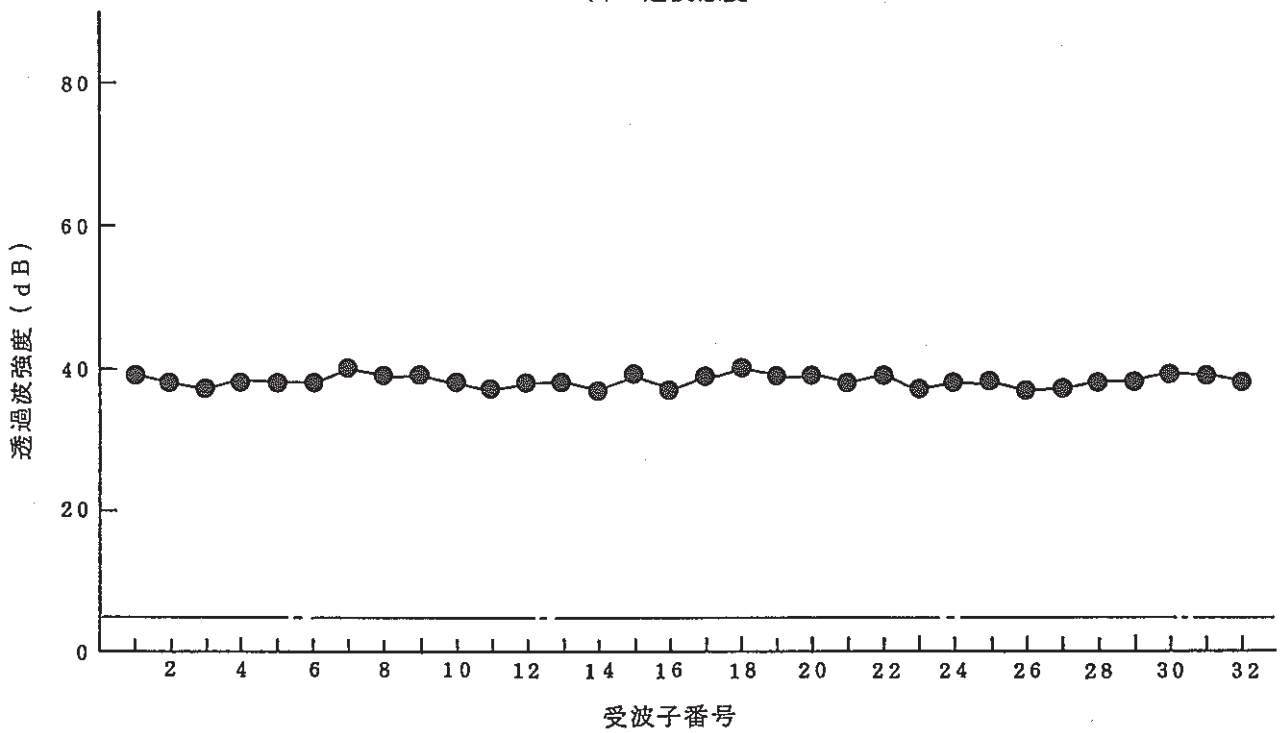


(b) 受波感度測定

図-3.21 送受波感度分布測定装置の構成



(a) 送波感度



(b) 受波感度

図-3.22 軸方向欠陥探傷用プローブ送受波感度分布の測定結果(58A-60-60-35)

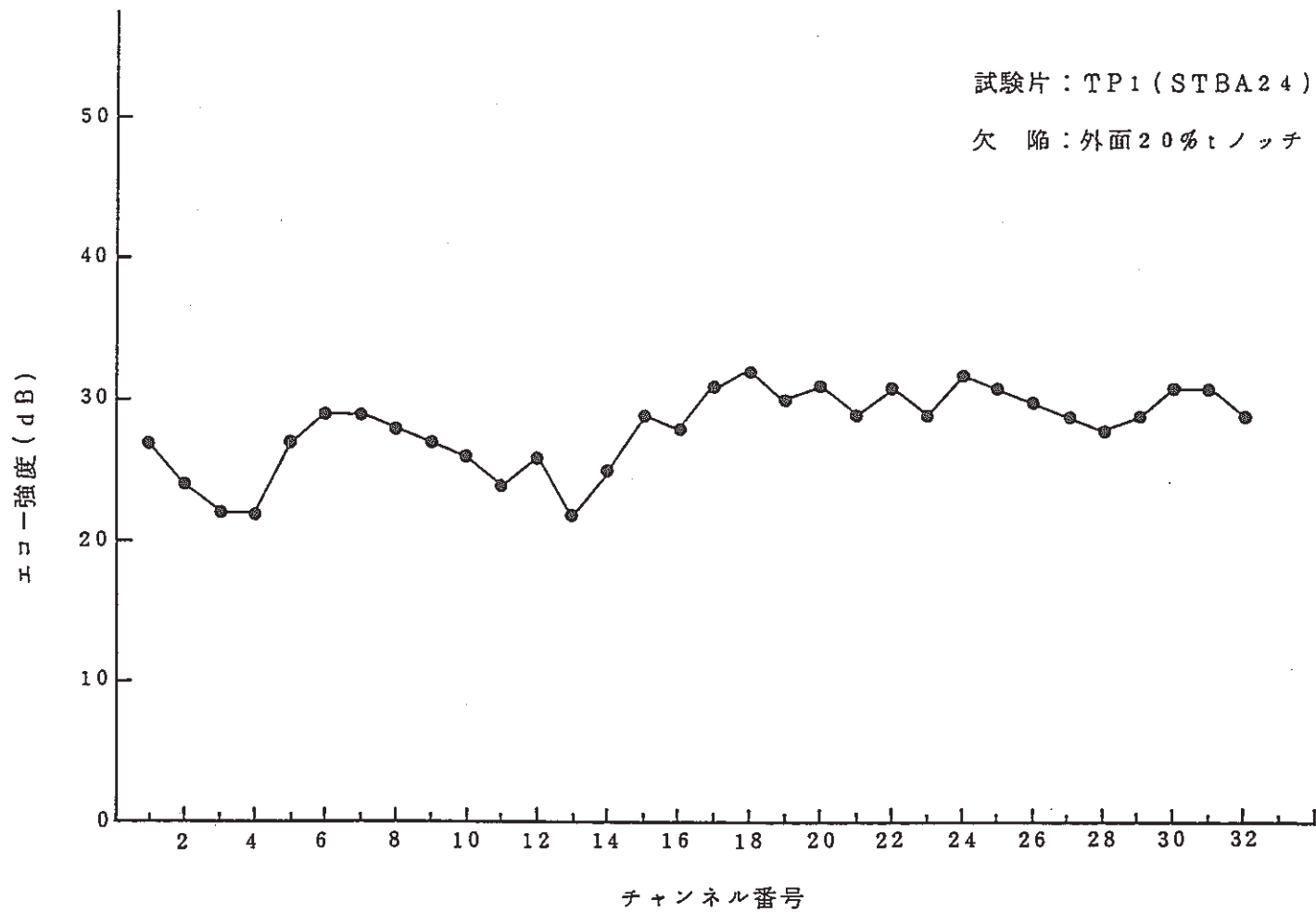


図-3.23 複合プローブの軸方向欠陥探傷感度分布の測定結果

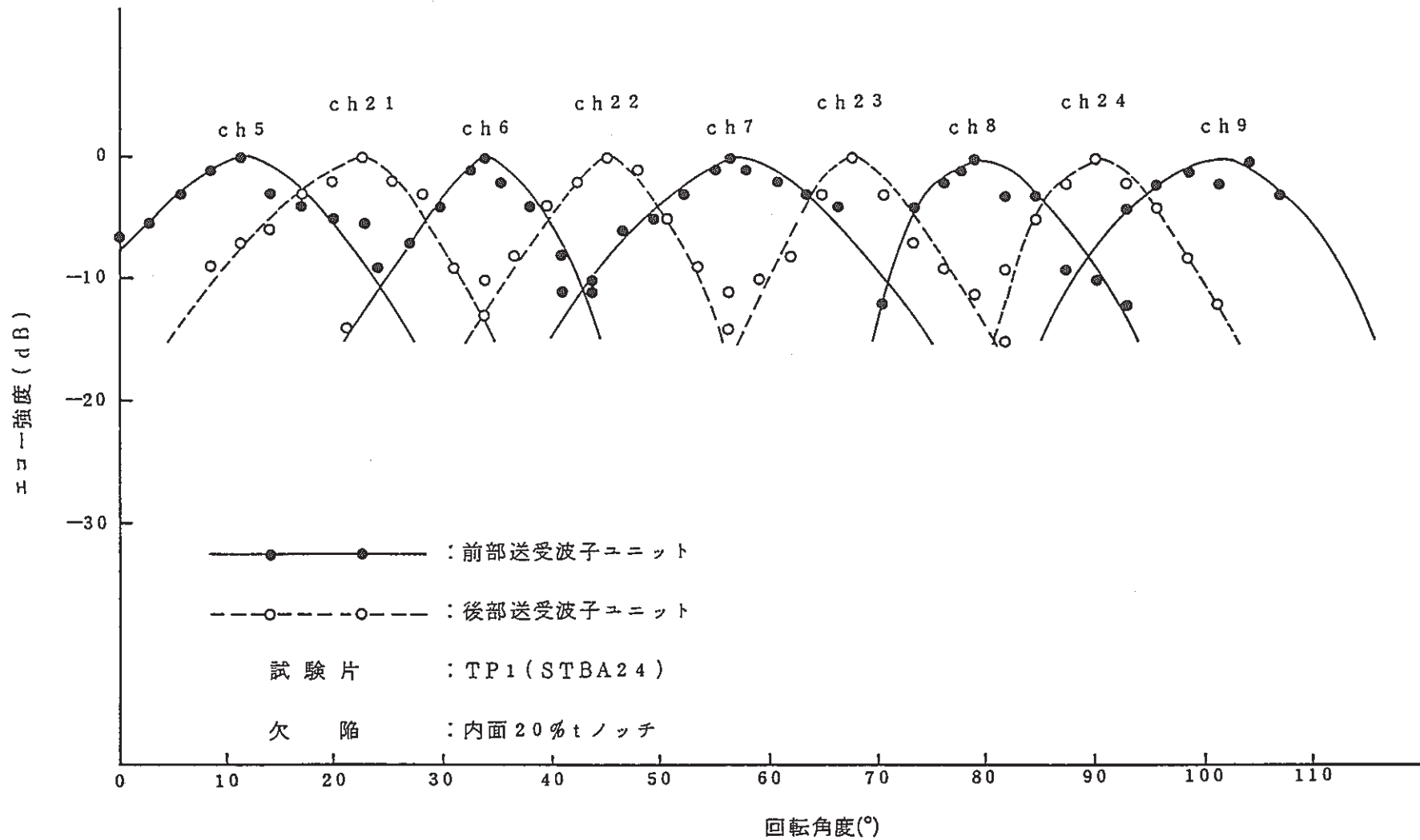
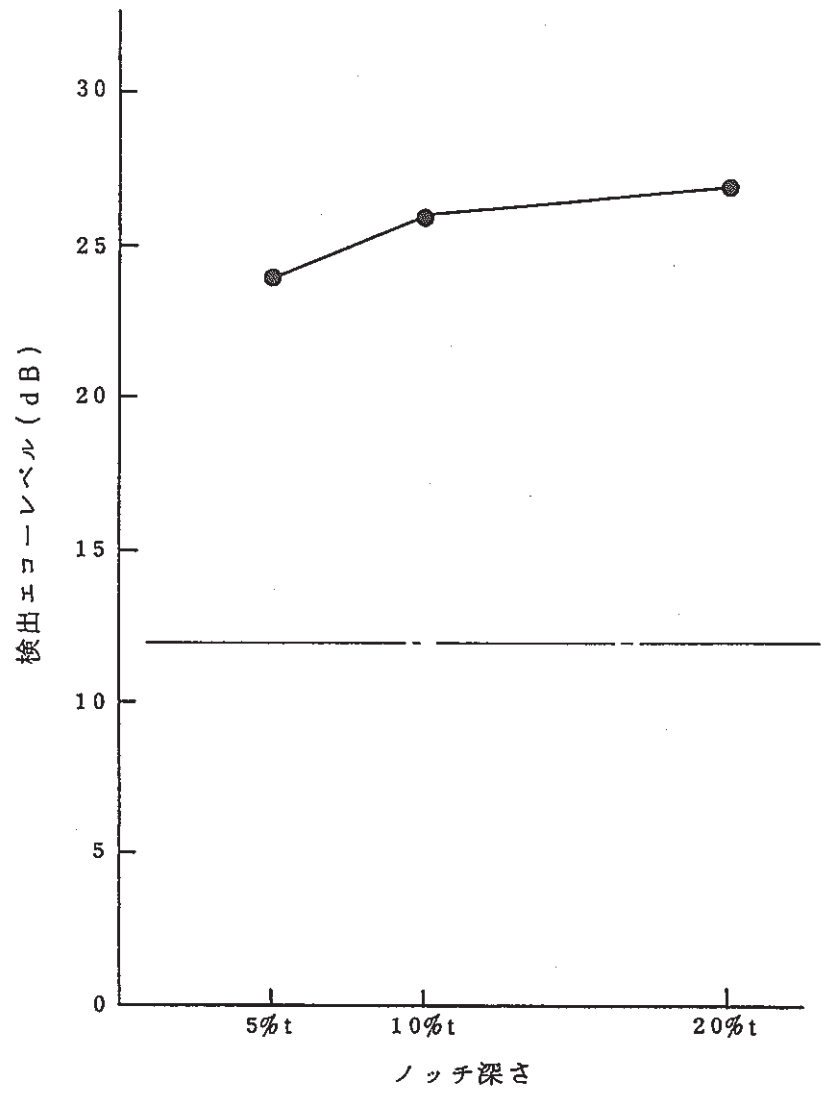
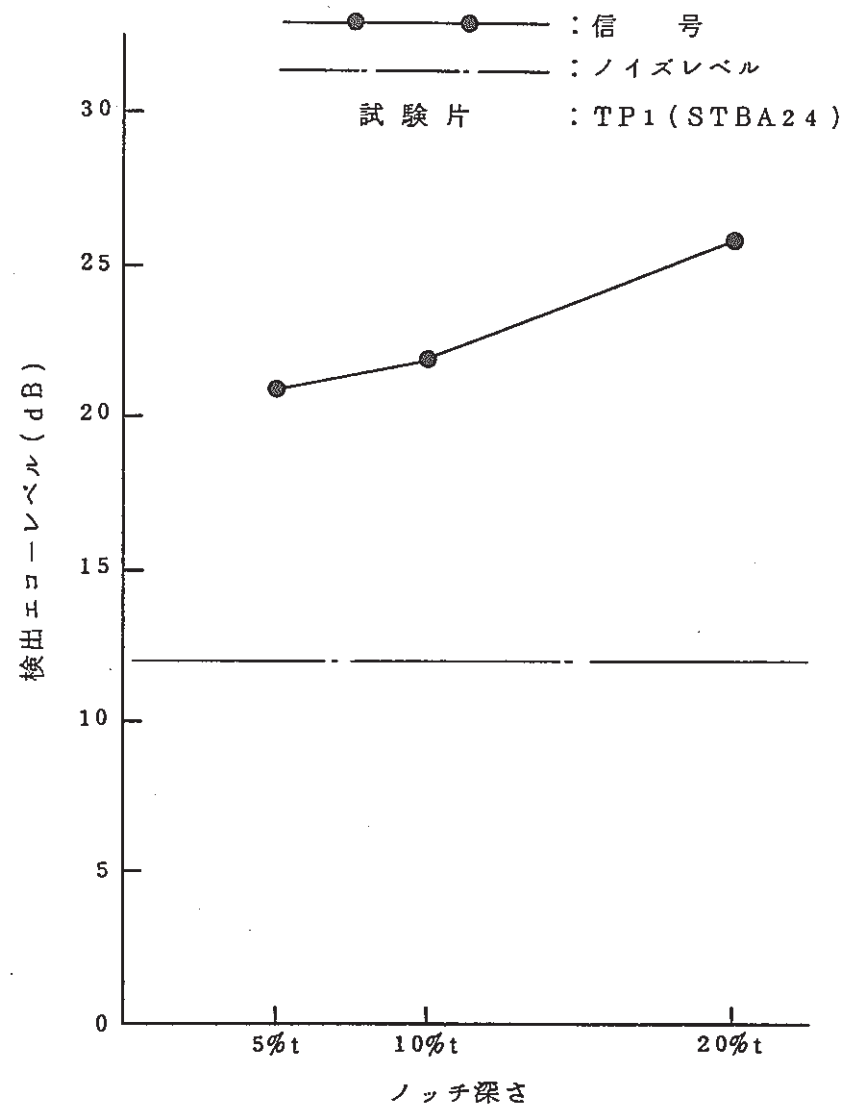


図-3.24 軸方向欠陥推定範囲



(a) 内面欠陥



(b) 外面欠陥

図-3.25 軸方向欠陥探傷結果 (直管、母材)

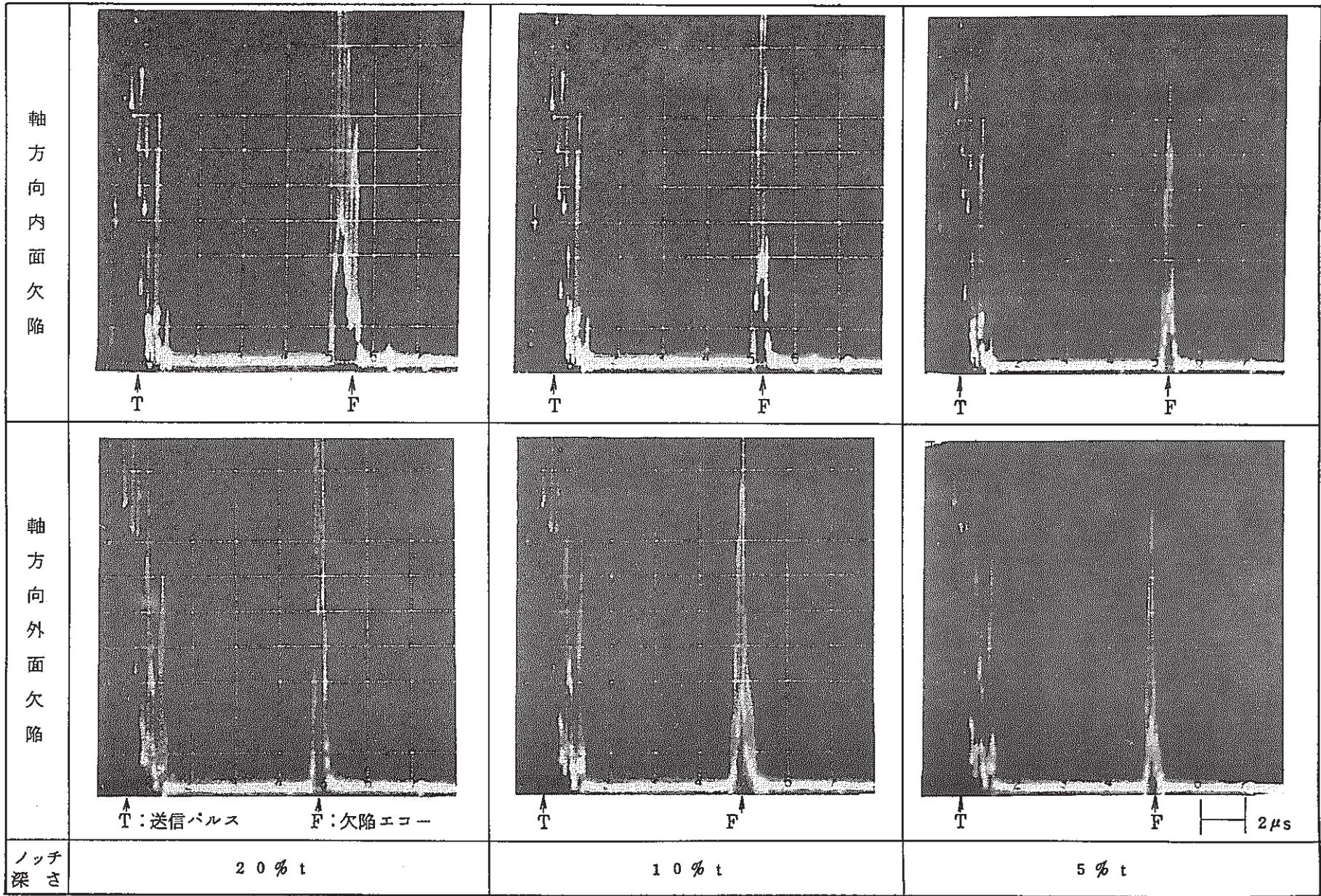
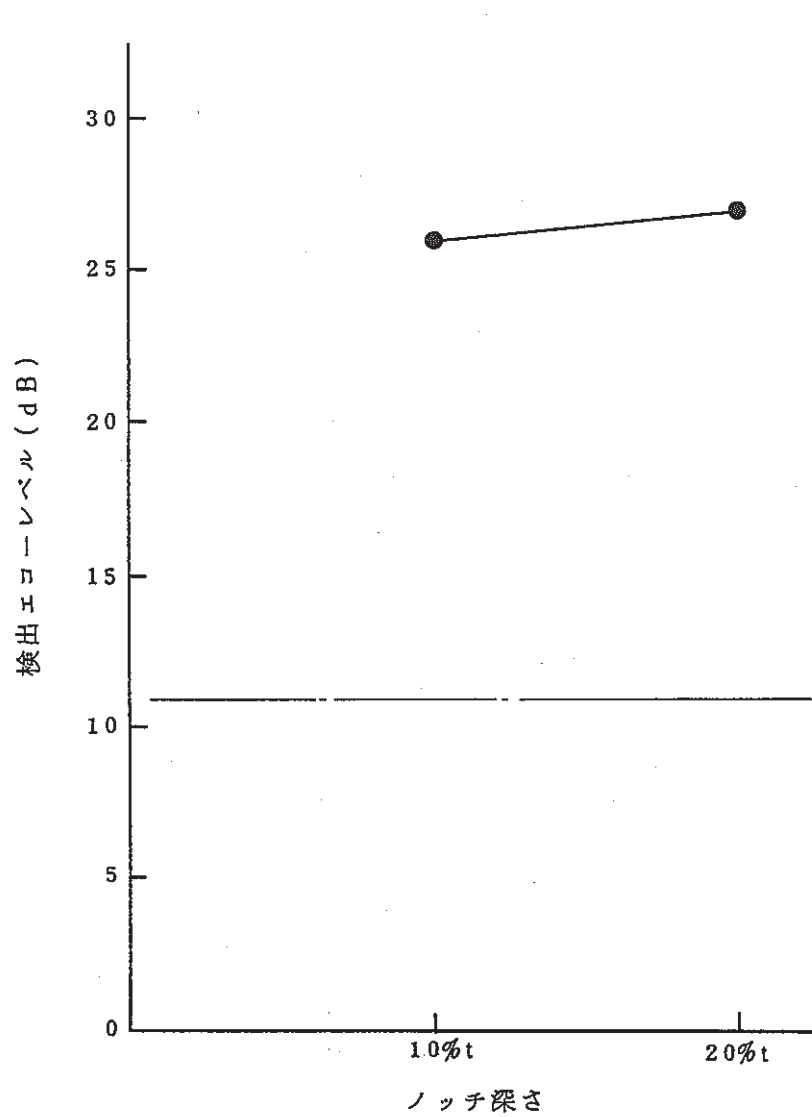
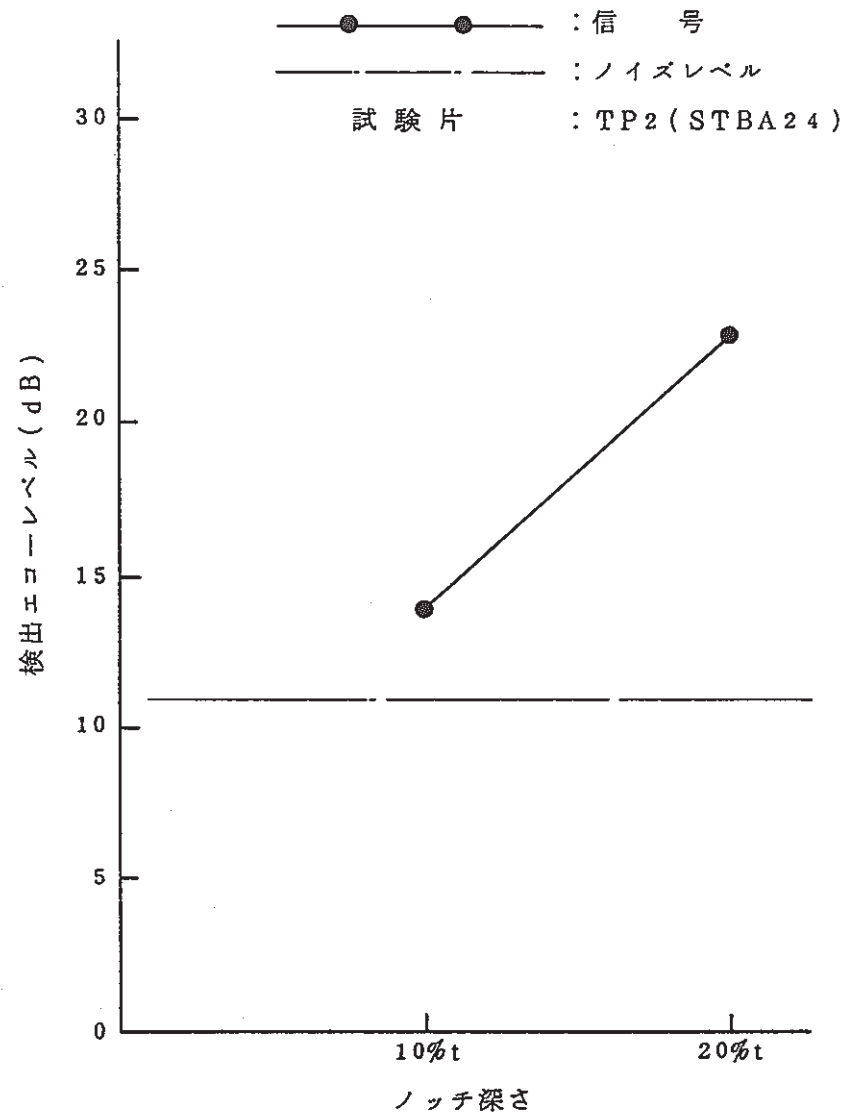


図-3.26 複合プローブによる探傷波形例 [5MHz、母材部TP1 (STBA24)]



(a) 内面欠陥



(b) 外面欠陥

図-3.27 軸方向欠陥探傷結果 (直管、溶接部)

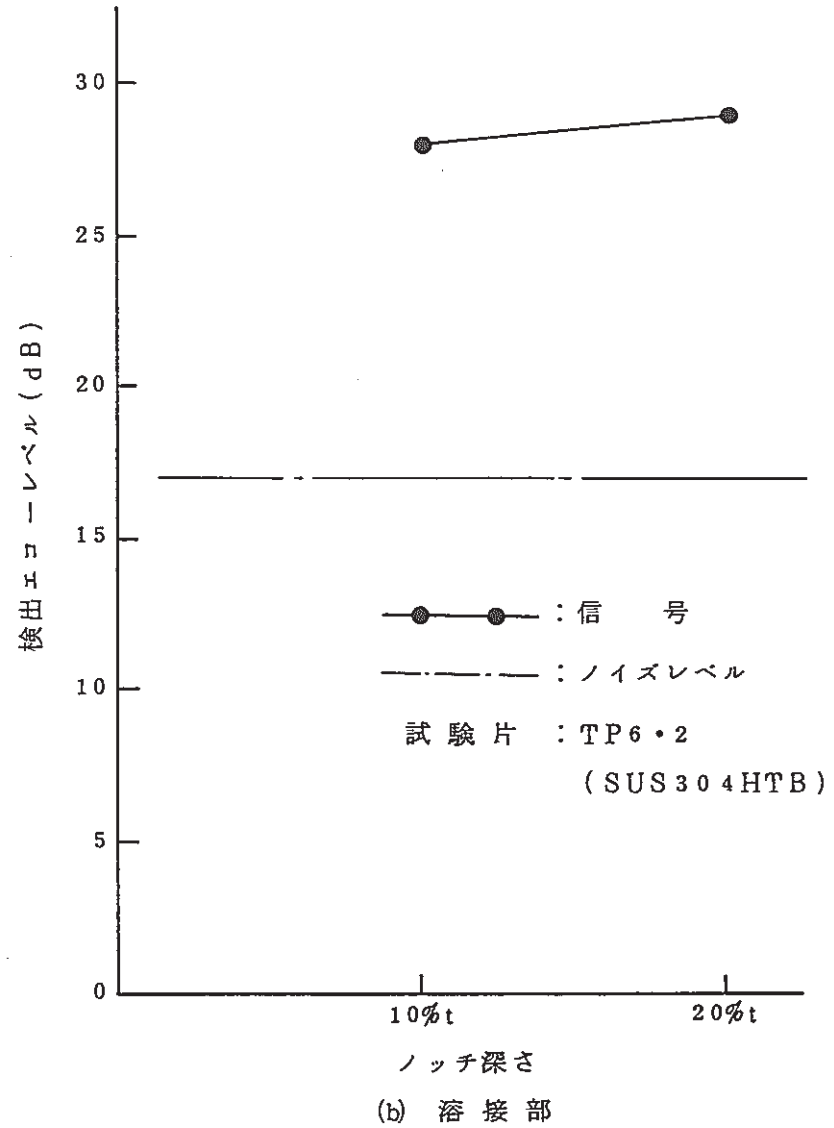
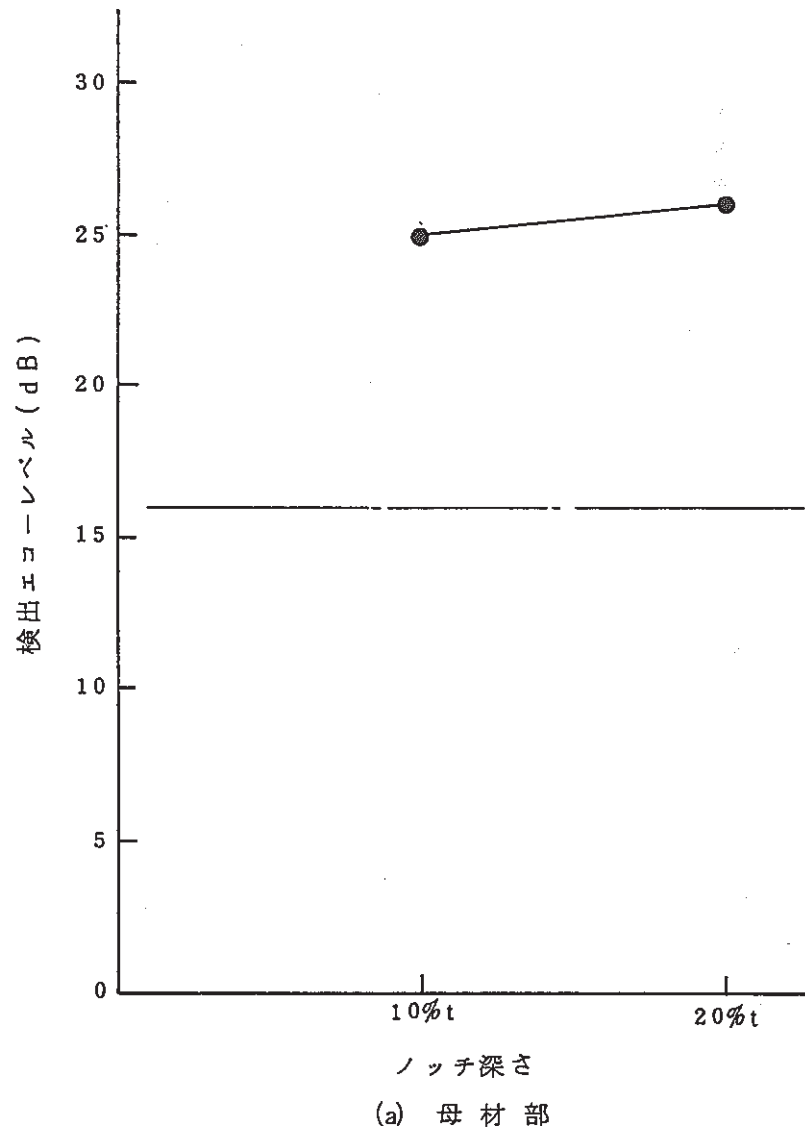
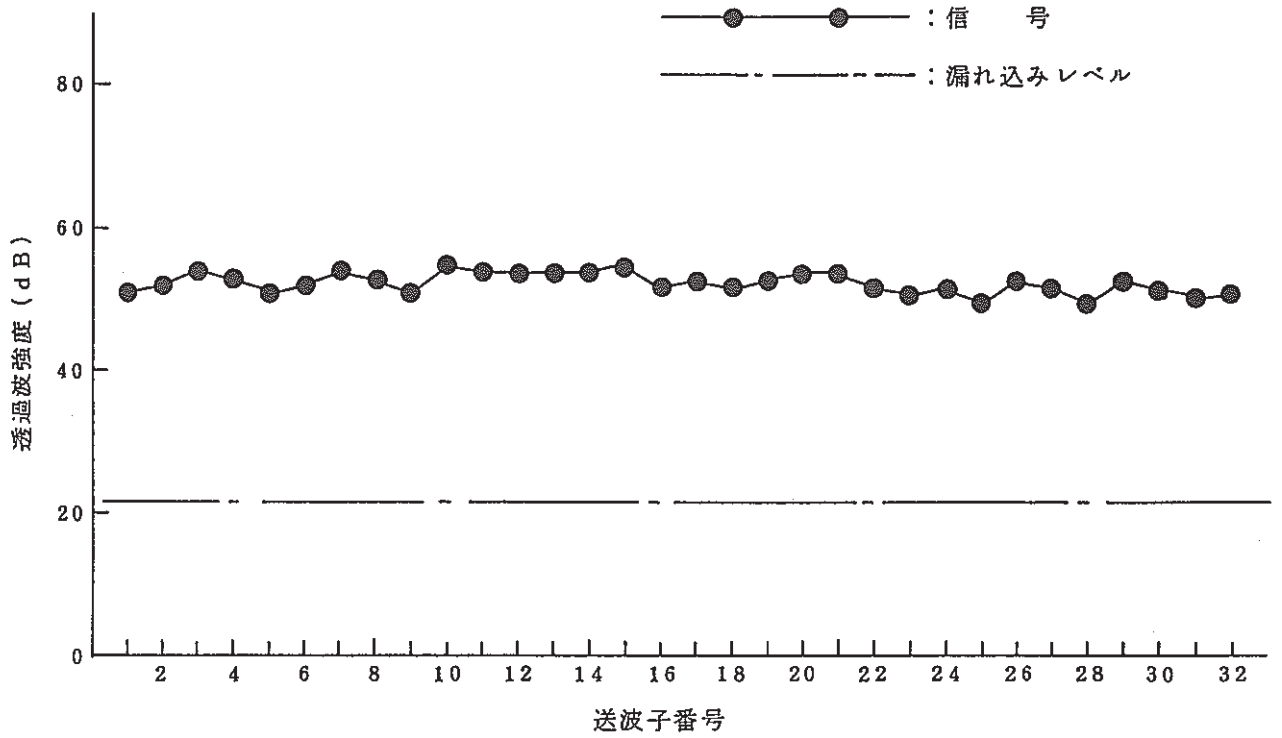
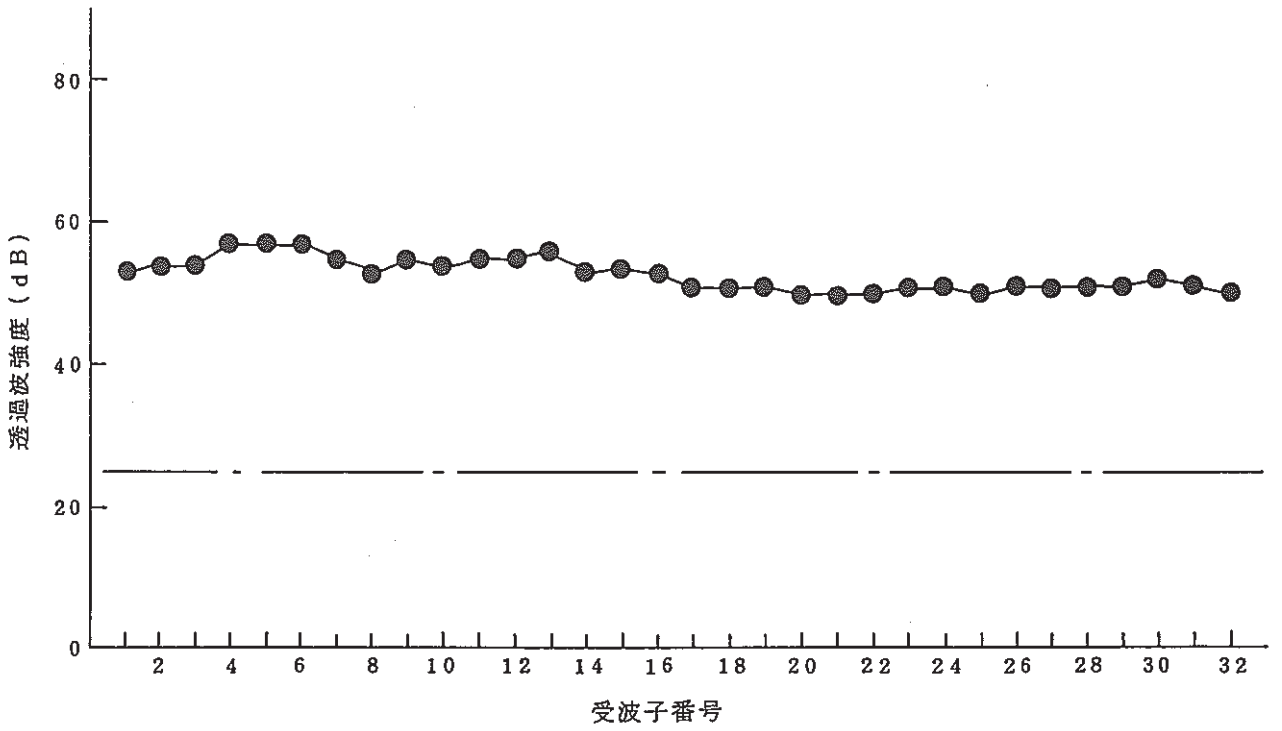


図-3.28 軸方向欠陥探傷結果 (曲管R700)





(a) 送波感度



(b) 受波子感度

図-3.29 周方向欠陥探傷用プローブ送受波感度分布の測定結果(58C-60-50)

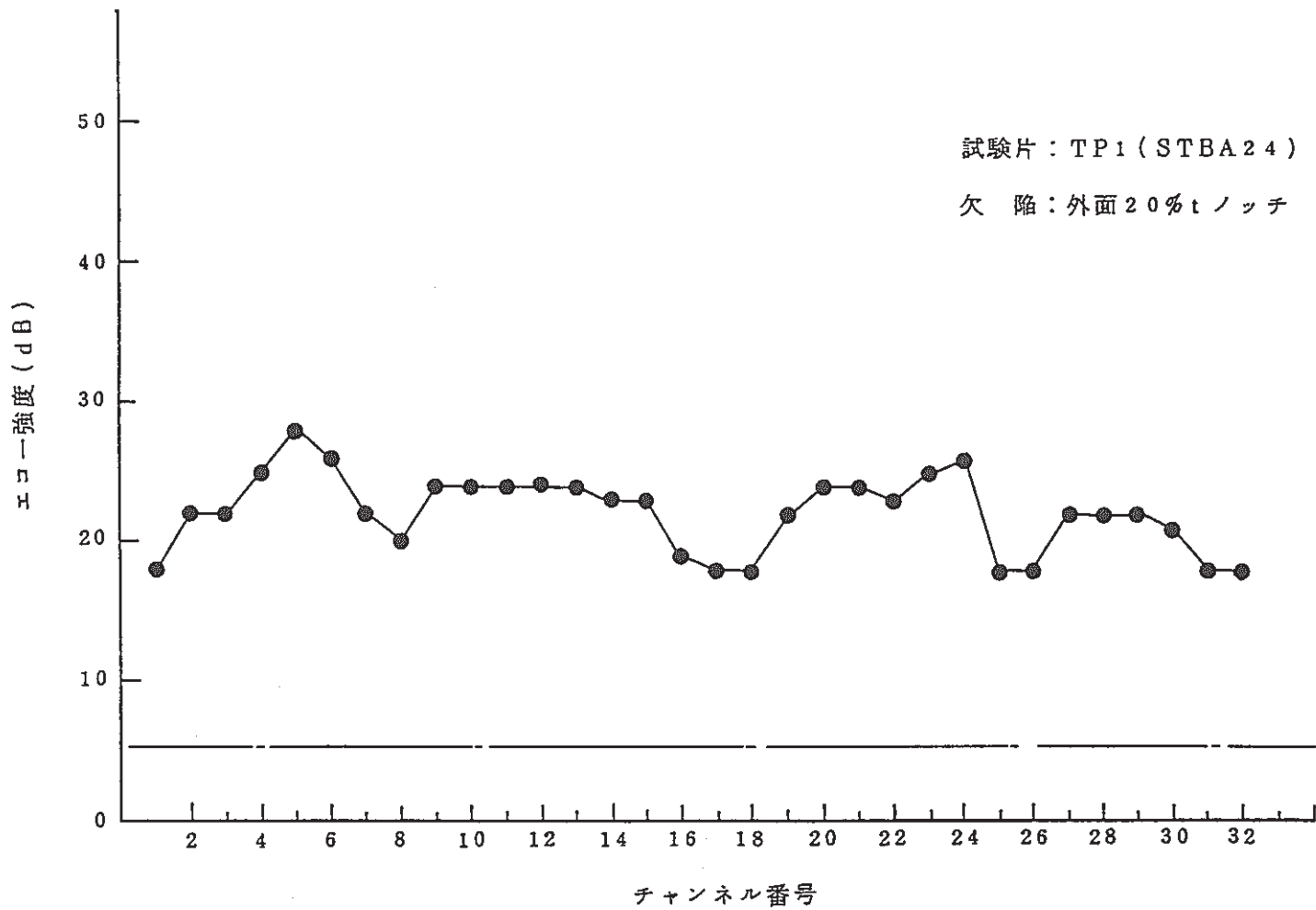


図-3.30 複合プローブの周方向欠陥探傷感度分布の測定結果

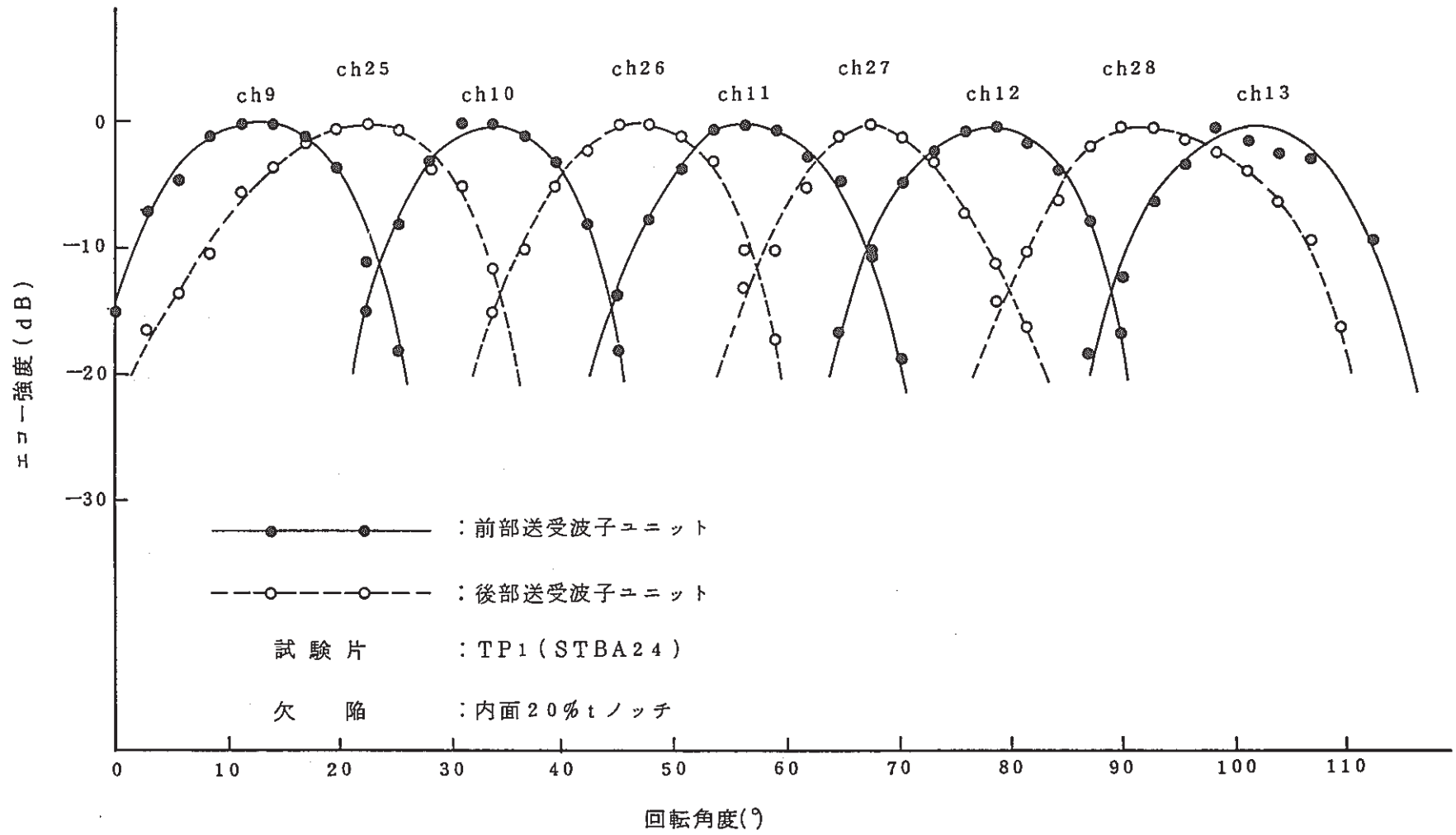


図-3.31 周方向欠陥捕捉範囲

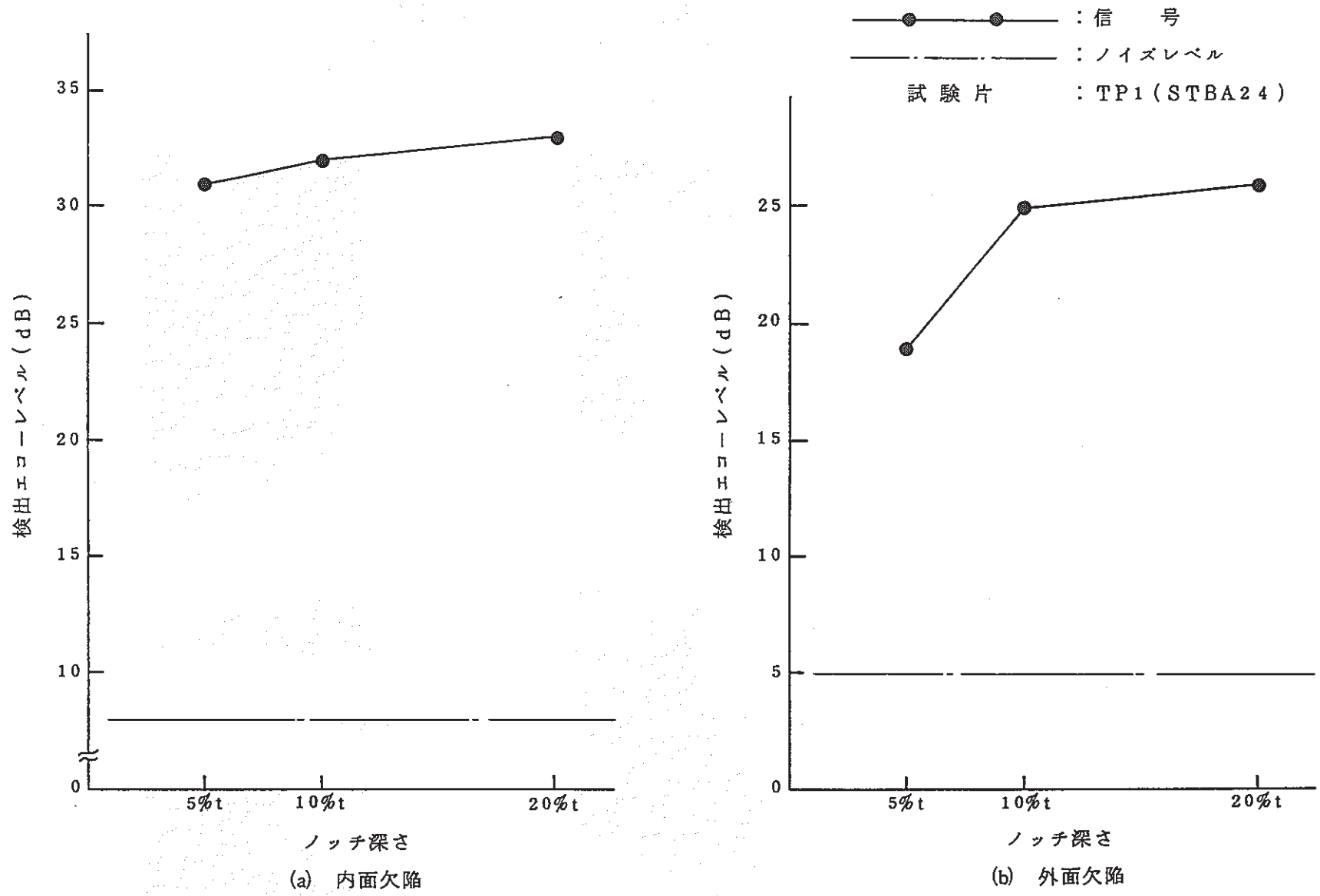


図-3.32 周方向欠陥探傷結果 (直管、母材部)

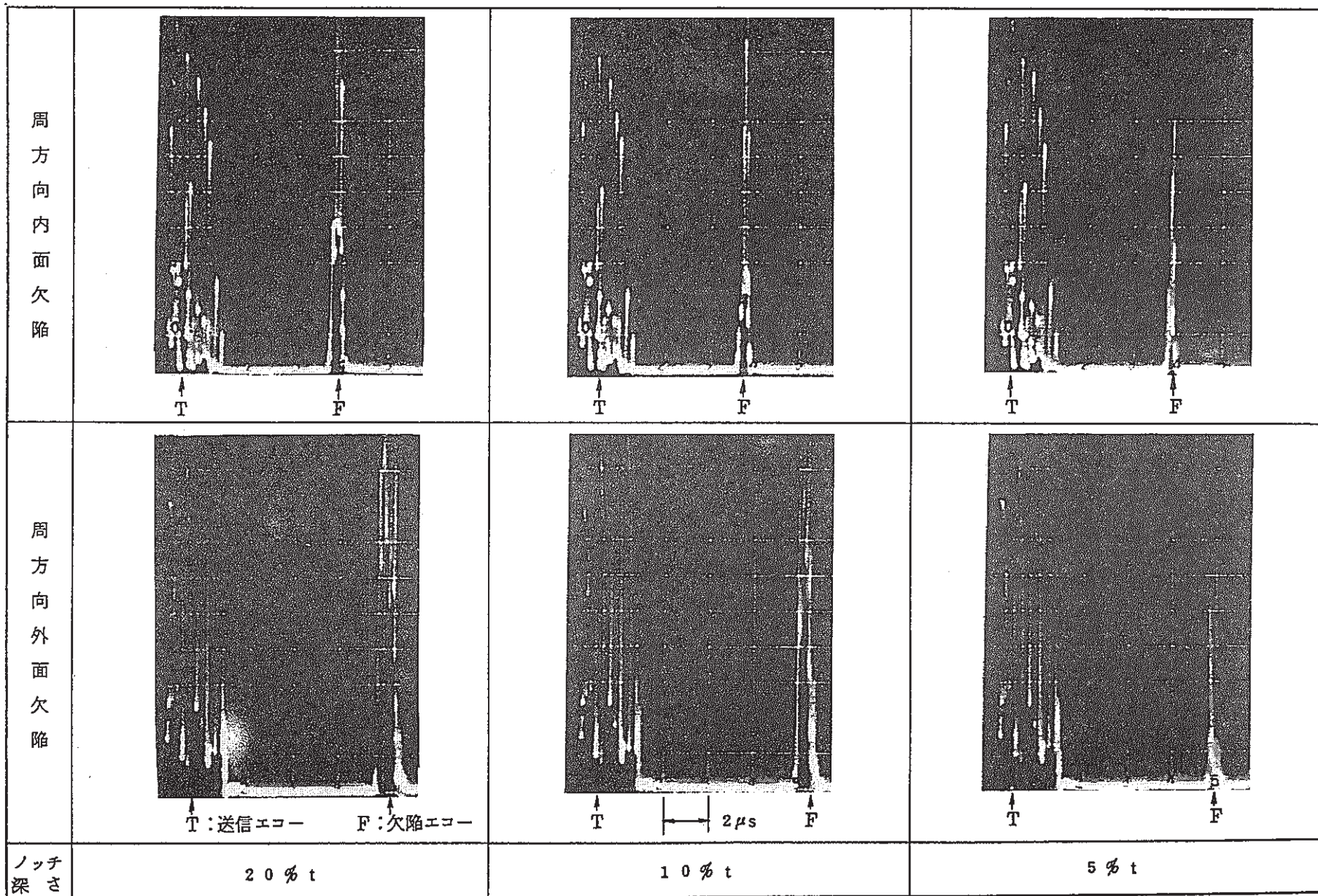


図-3.33 複合プローブによる探傷波形例 [5MHz、母材部TP1 (STBA24)]

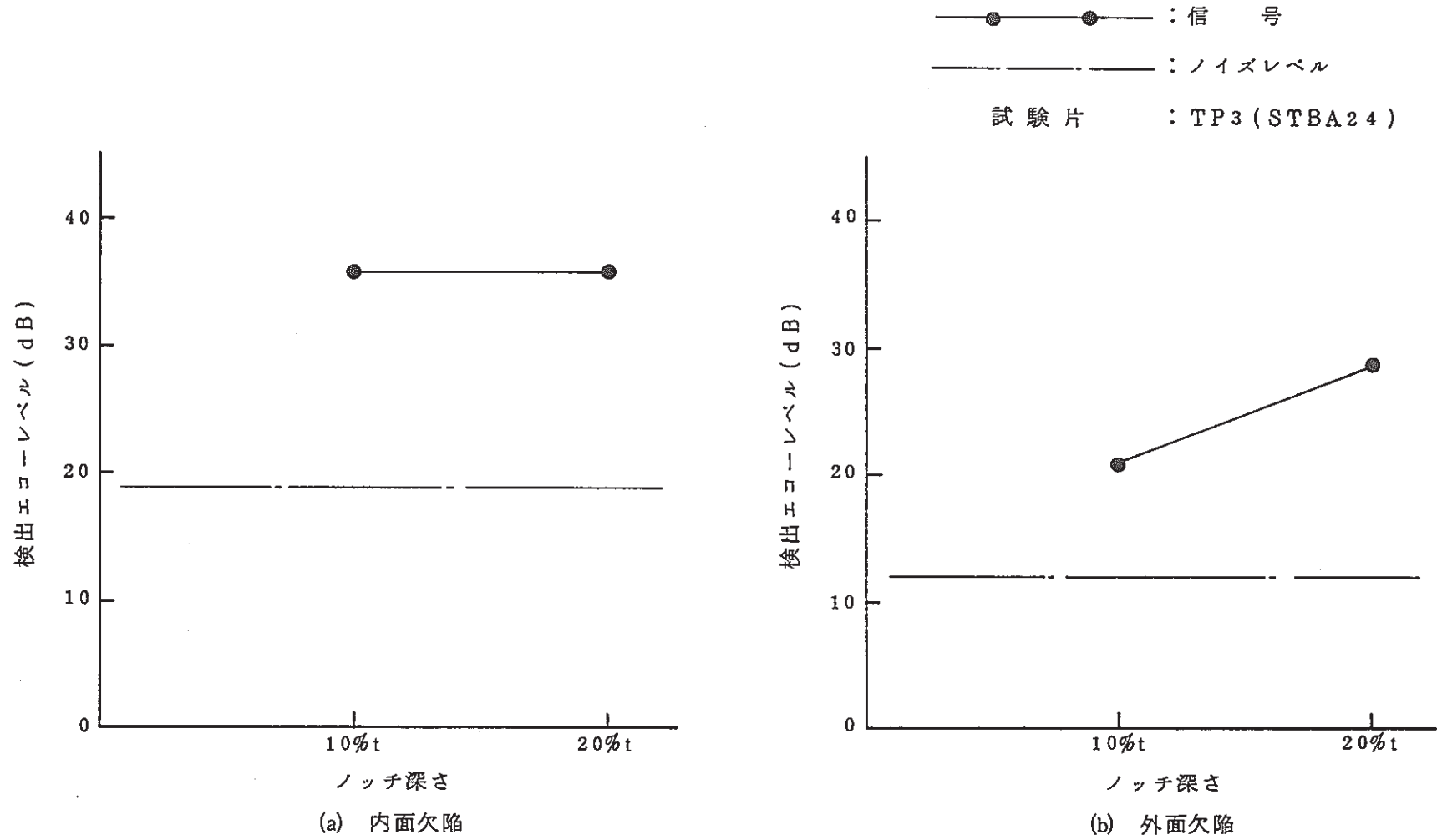
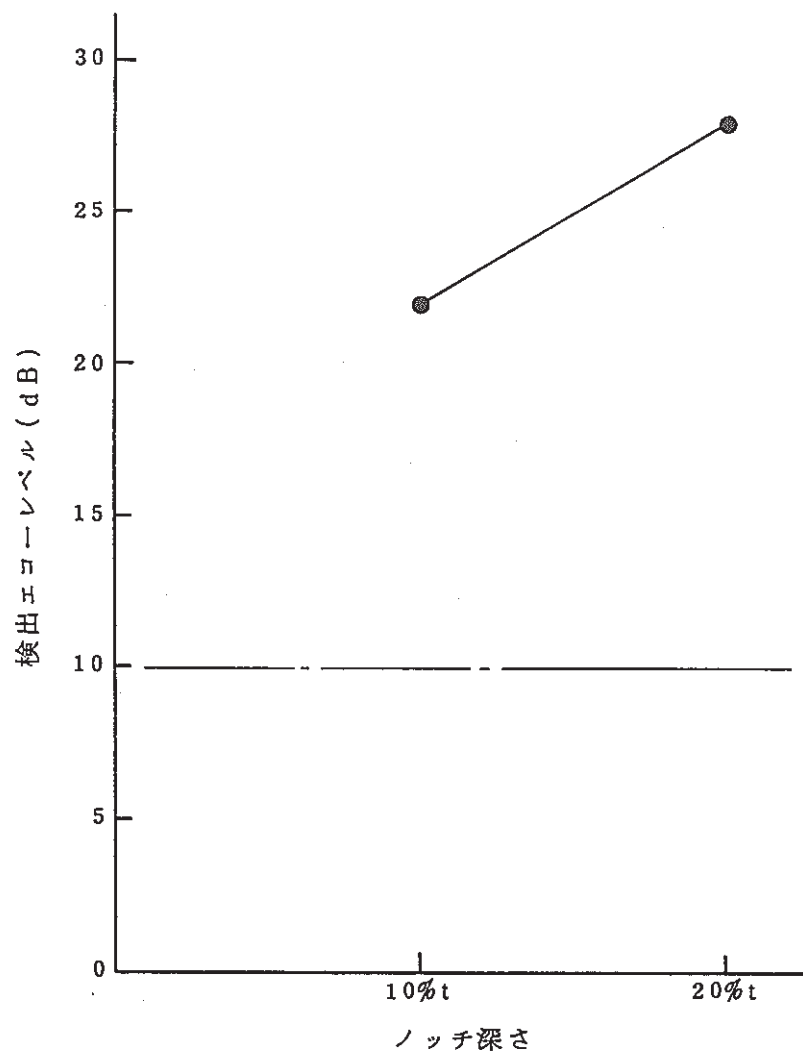
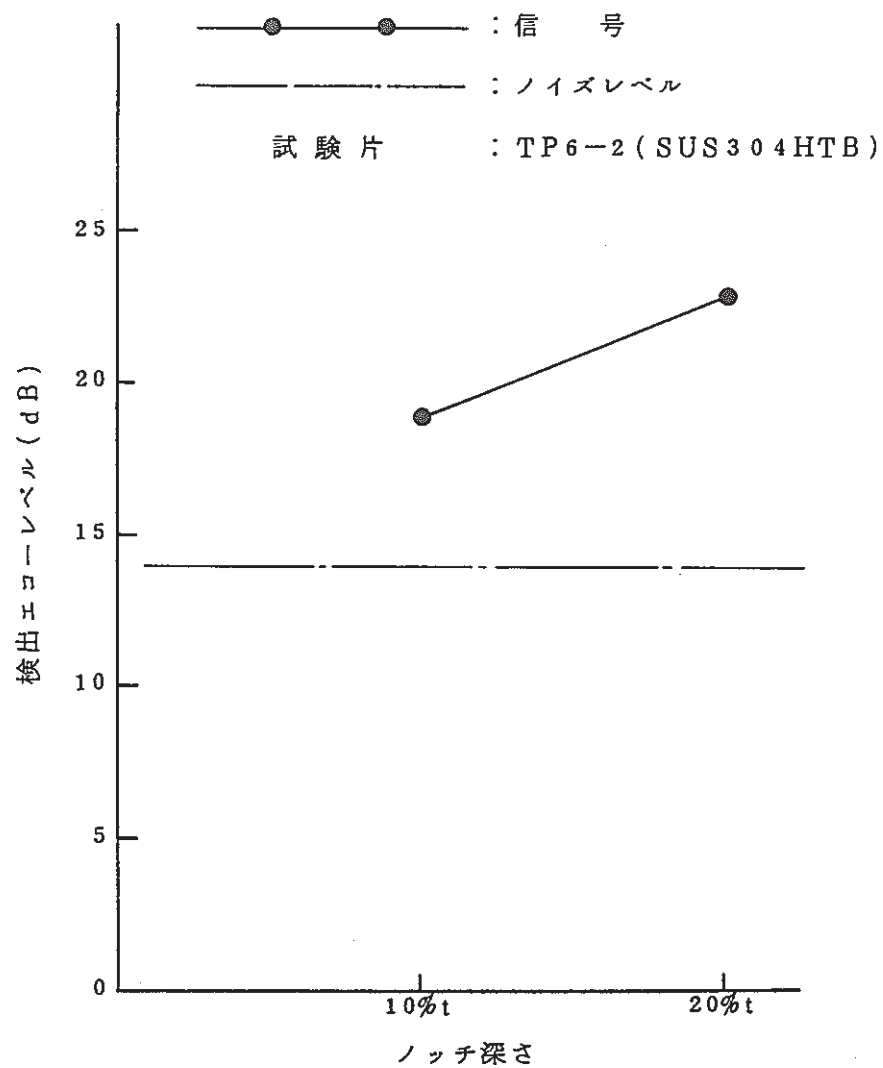


図-3.34 周方向欠陥探傷結果 (直管、溶接部)



(a) 母材部



(b) 溶接部

図-3.35 周方向欠陥探傷結果 (曲管R700)

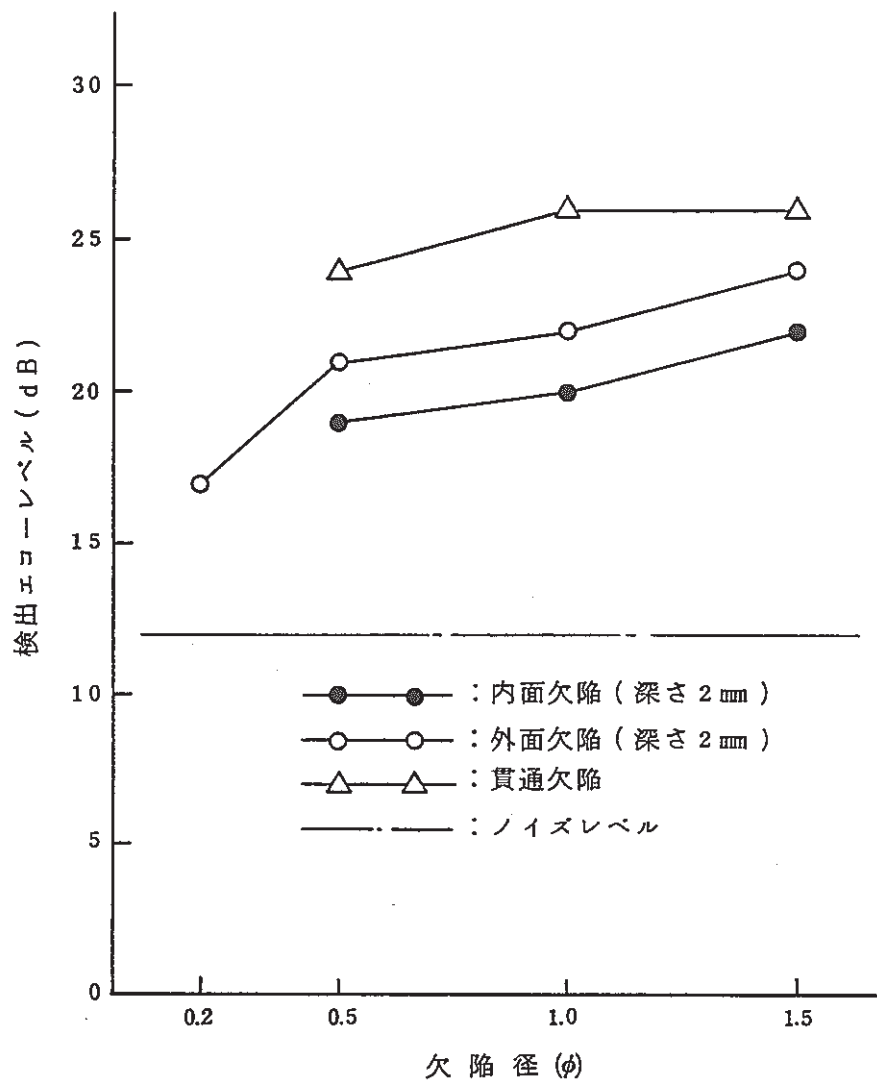


図-3.36 ピンホール欠陥探傷結果  
[母材部直管TP1 (STBA24)]

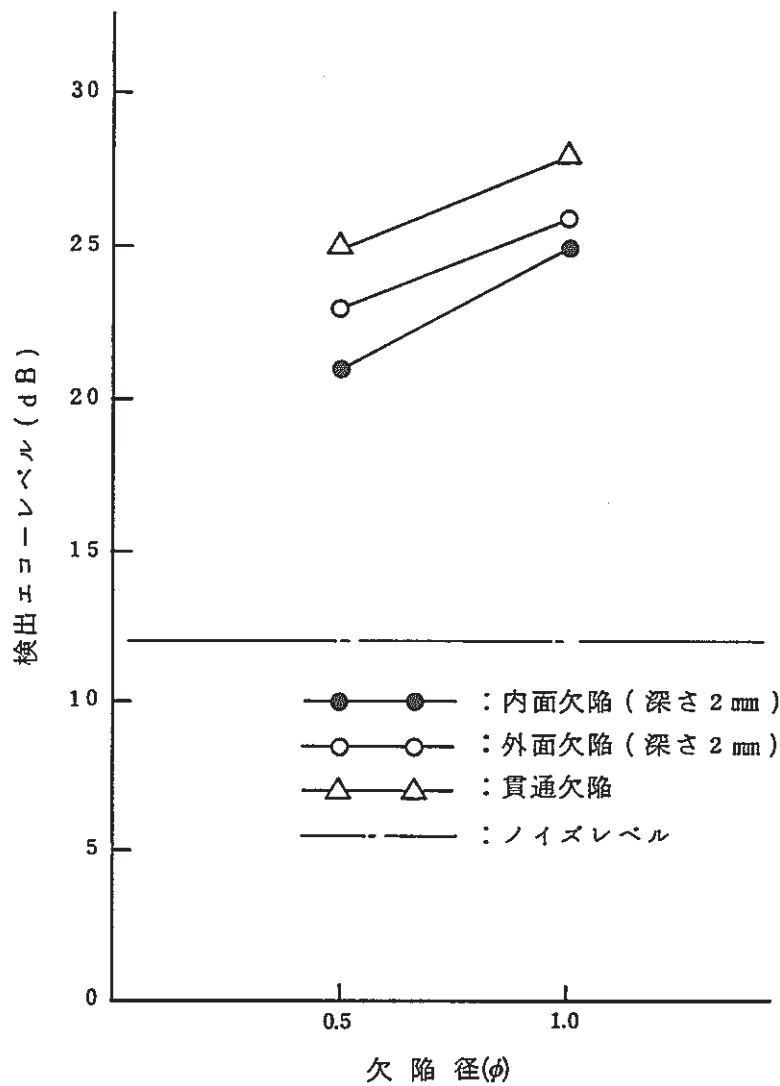


図-3.37 ピンホール欠陥探傷結果  
[溶接部直管TP4 (STBA24)]



## 4. プローブ位置検出装置<sup>1)</sup>

### 4.1 構成

プローブ位置検出装置は伝熱管へ挿入したプローブの位置をリアルタイムで検出するものである。プローブの位置検出は図-4.1 に示す駆動装置のドラムの回転数を検出するエンコーダ、ケーブルに一定間隔で取り付けられた浮子を検出するフォトカプラント及びプローブより検出される伝熱管の突合せ溶接部の信号を超音波探傷器（入射角 $23^\circ$ ）を介して入手する溶接部検出器から得られる信号を総合して行うものである。

位置検出は、先ずエンコーダによりプローブの送り込み量を連続的に検出し、フォトカプラントが浮子を検出した時点で浮子間隔とフォトカプラント部を通過した浮子数より得られる値にプローブ挿入距離を置き換え、その後はエンコーダの値を加算していくものである。又、溶接部を検出するとそれまでのエンコーダとフォトカプラントにより得られた挿入距離を一旦クリアし、探傷対象伝熱管の溶接部毎に設定されたデータに置き換え、その後はエンコーダとフォトカプラントによる値を加算していく。このように溶接部検出器、フォトカプラント、エンコーダの優先順位で下位の情報を補正し連続的に位置検出を行う。図-4.2 に全体系統図を示す。

### 4.2 プローブ位置検出試験

図-4.3 に示す実機模擬伝熱管に溶接部検出用超音波探傷装置を取り付けたケーブル付ダミープローブを挿入して位置検出試験を行った。試験方法は先ずフォトセンサ下部フランジに超音波探傷器を位置決めしゼロ点調整を行った後ダミープローブを挿入し、ダミープローブが透視管部を通過する際の位置情報と実際の位置との誤差を測定するものである。試験結果を図-4.4 に示す。

位置検出装置の誤差は挿入長さが増すに従いマイナス側に増加する傾向にある。エンコーダ+フォトカプラントの出力信号で伝熱管全長で800mm程度（伝熱管全長に対し1%）、溶接信号+フォトカプラント+エンコーダの出力信号では最大200mm程度の誤差となっている。誤差の原因としてはケーブルがヘリカルコイル部で伝熱管の内側に沿って移動し、浮子間のケーブルが直線的に張った状態になることが考えられる。これらの誤差を計算すると10m 当り64mmとなりこの分を補正值として加味すると、プローブ位置検出装置の精度は±100mm 以内となる見通しが得られた。

### 4.3 プローブ位置表示

#### (1) CRT画面表示

CRT画面への表示例を図-4.5 に示す。プローブ位置表示はエンコーダのみによるもの、エンコーダ+フォトカプラントによるもの、及び溶接信号+フォトカプラント+エンコーダによるものの3種類がある。

#### (2) 空間位置の表示

伝熱管へ挿入したプローブの空間位置を挿入距離より計算するプログラムのフローを図-4.6 に示す。又、このプログラムによる表示例を図-4.7 に示す。

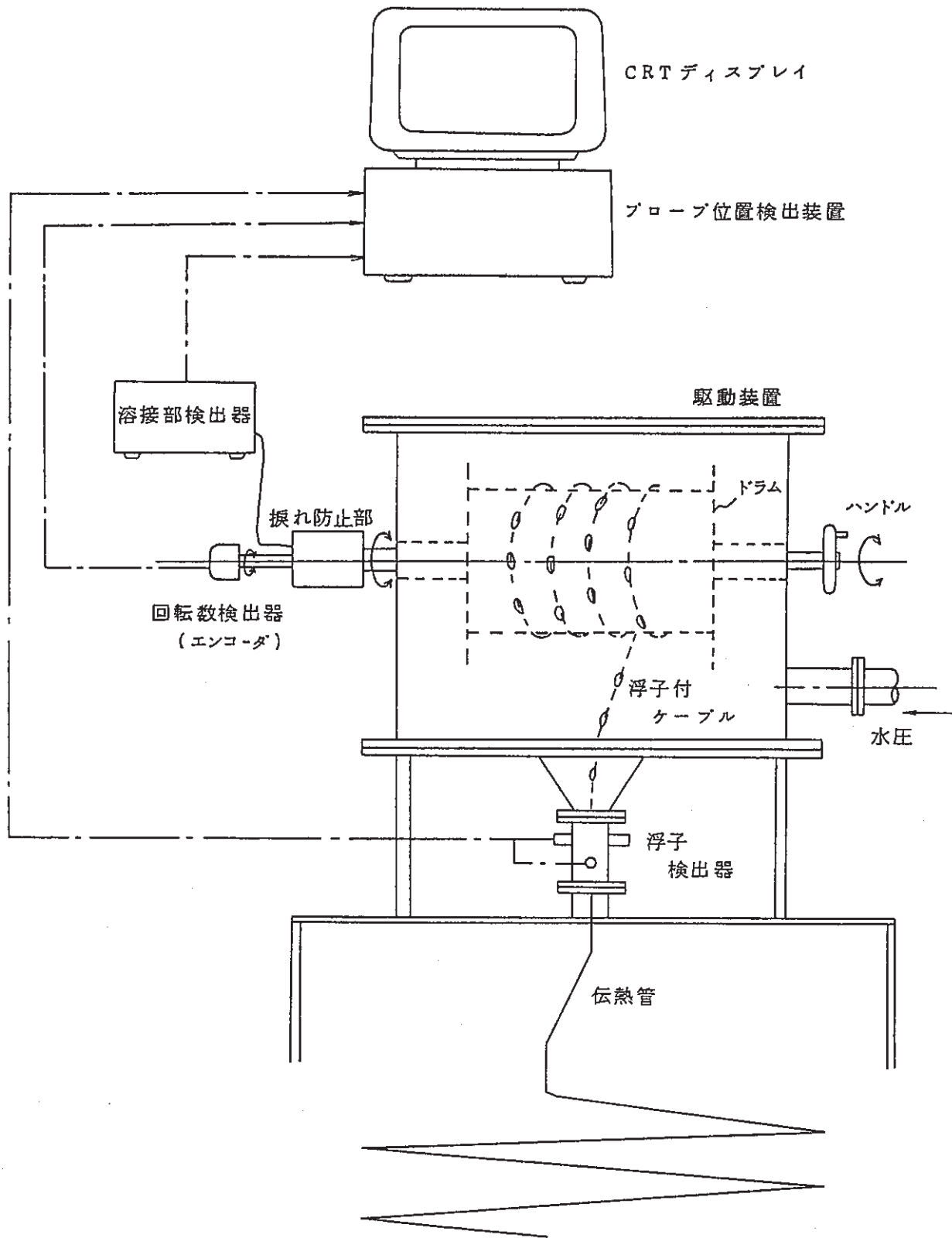


図-4.1 プローブ位置検出機構の構成

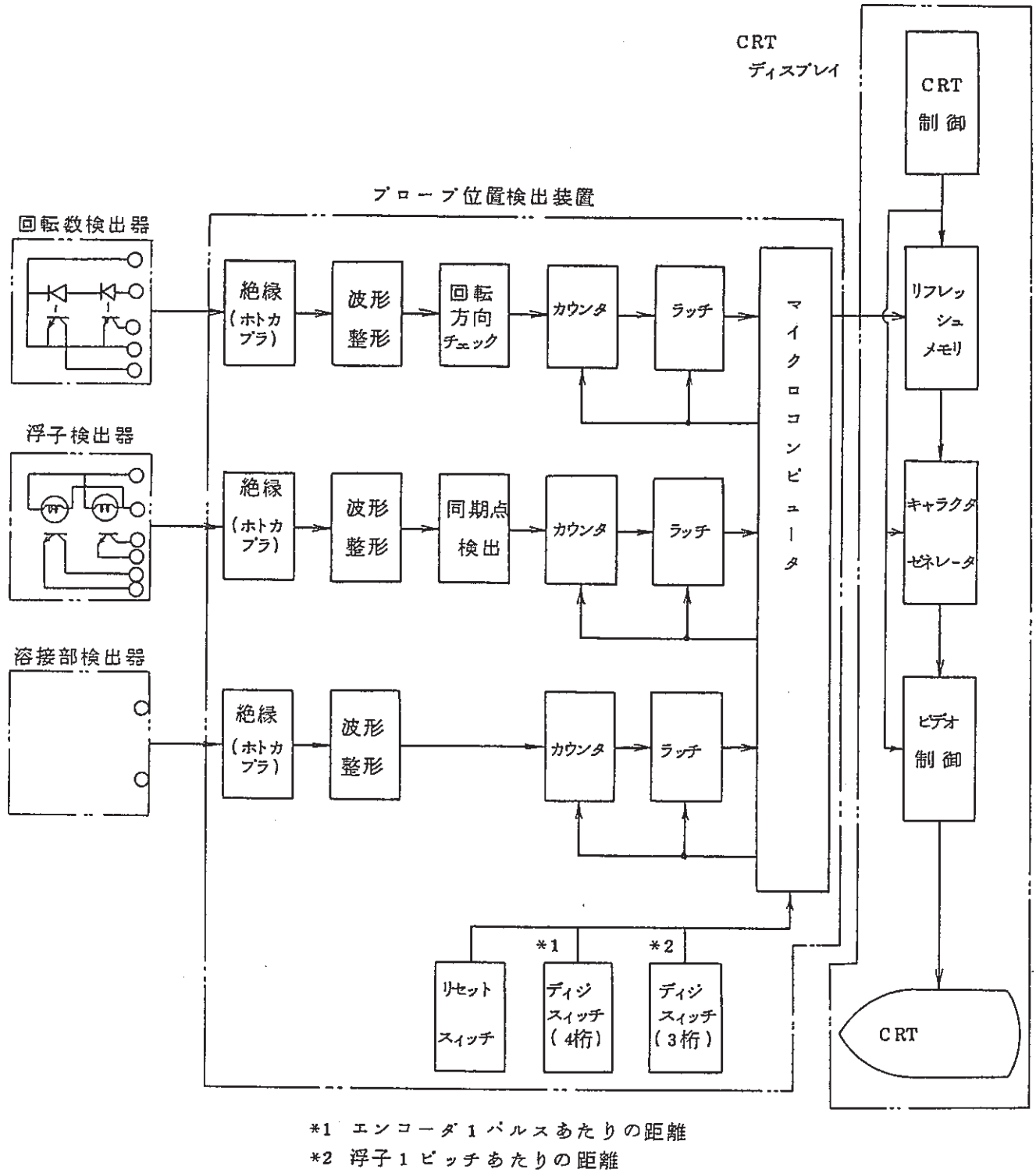


図-4.2 プローブ位置検出装置の全体系統図

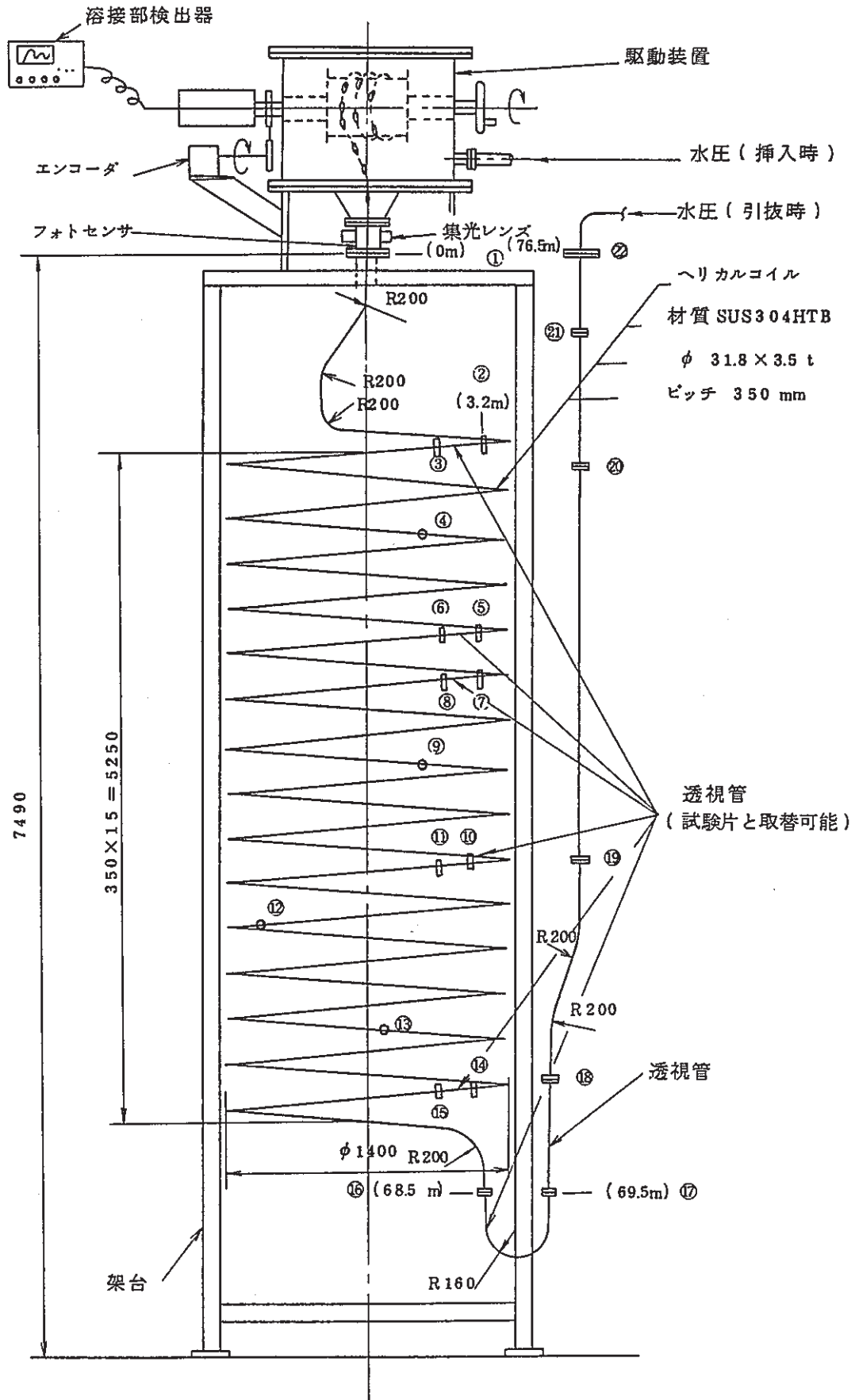


図-4.3 試験装置概要

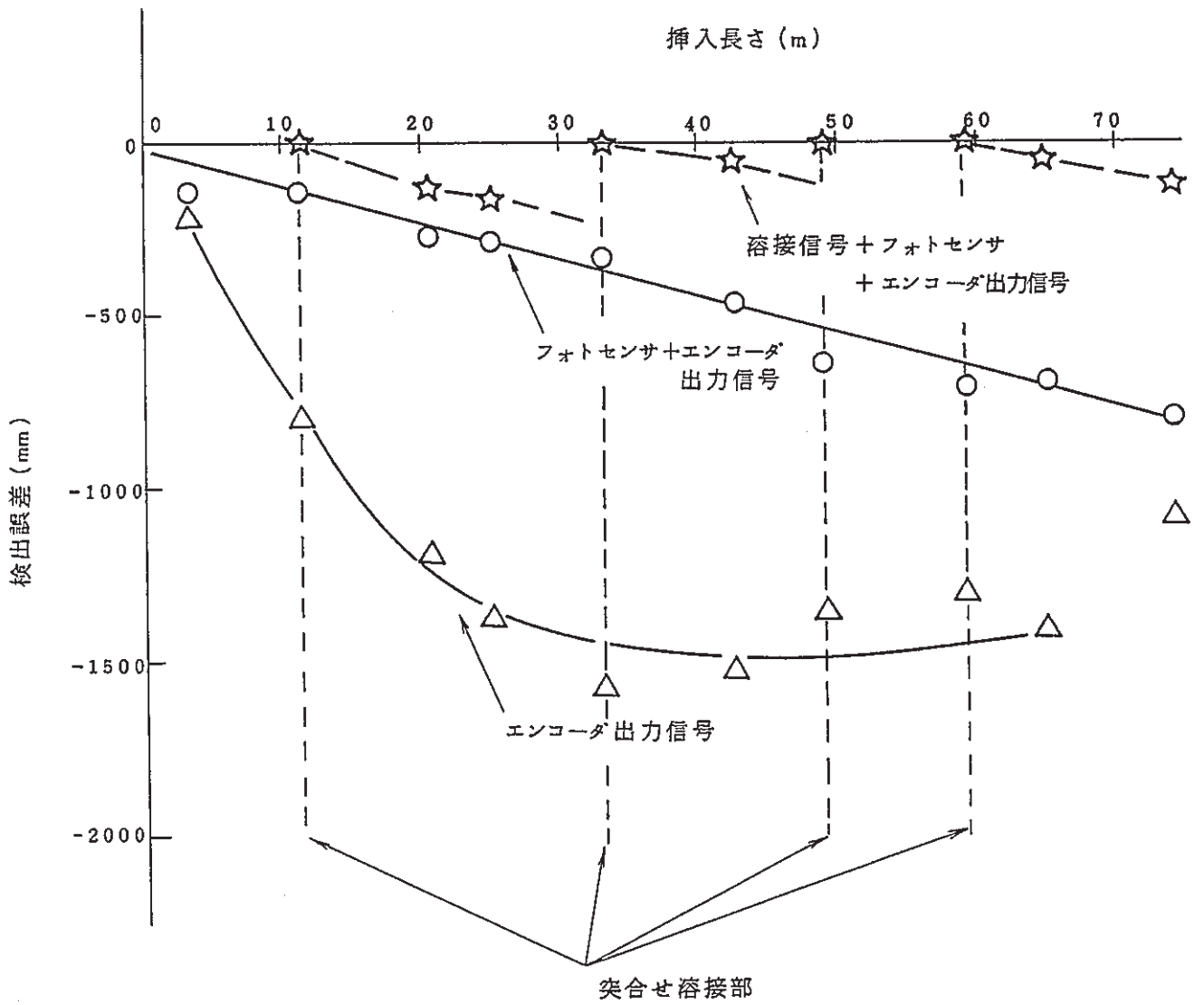


図-4.4 プローブ位置検出試験結果

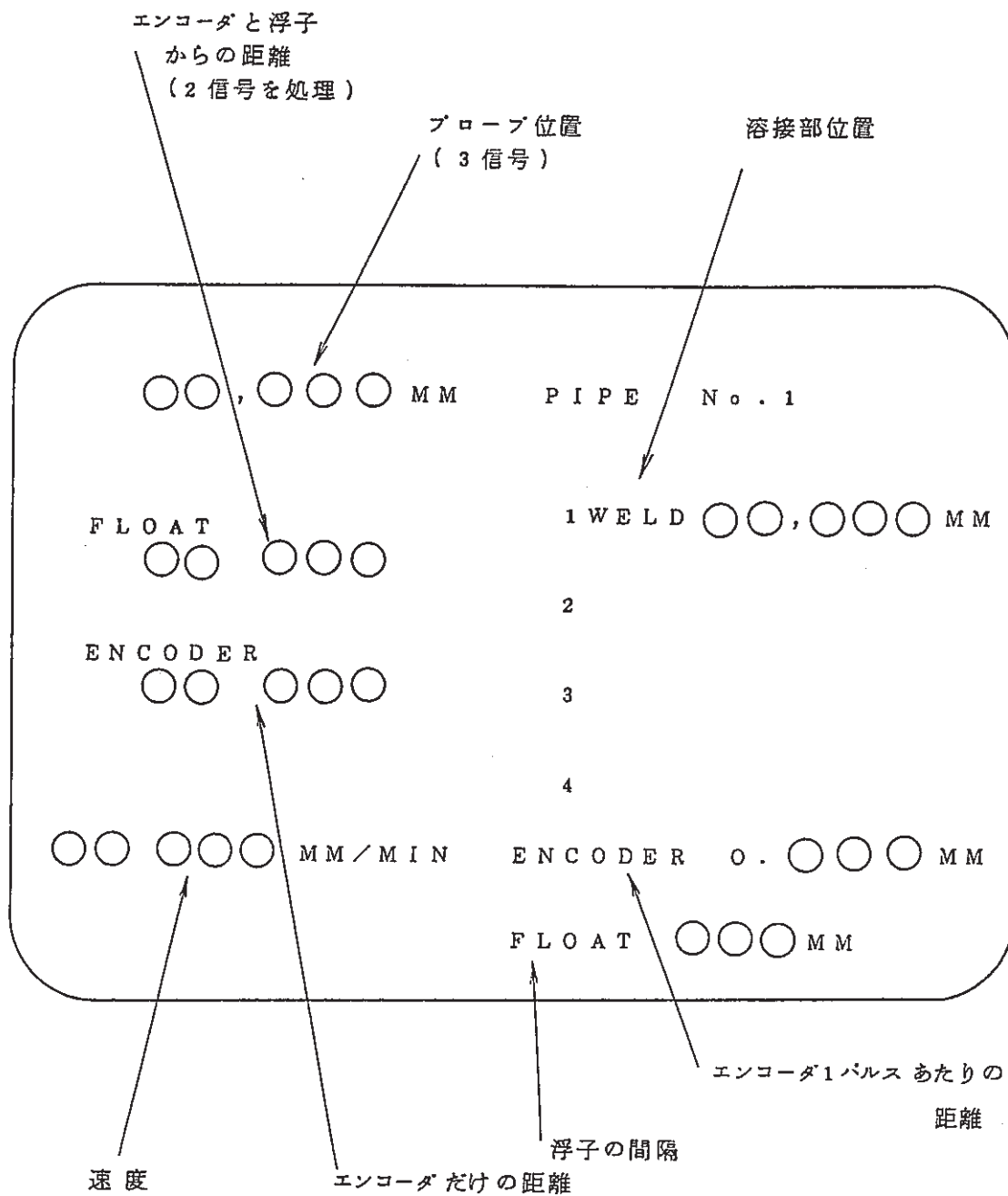


図-4.5 CRT画面への表示例

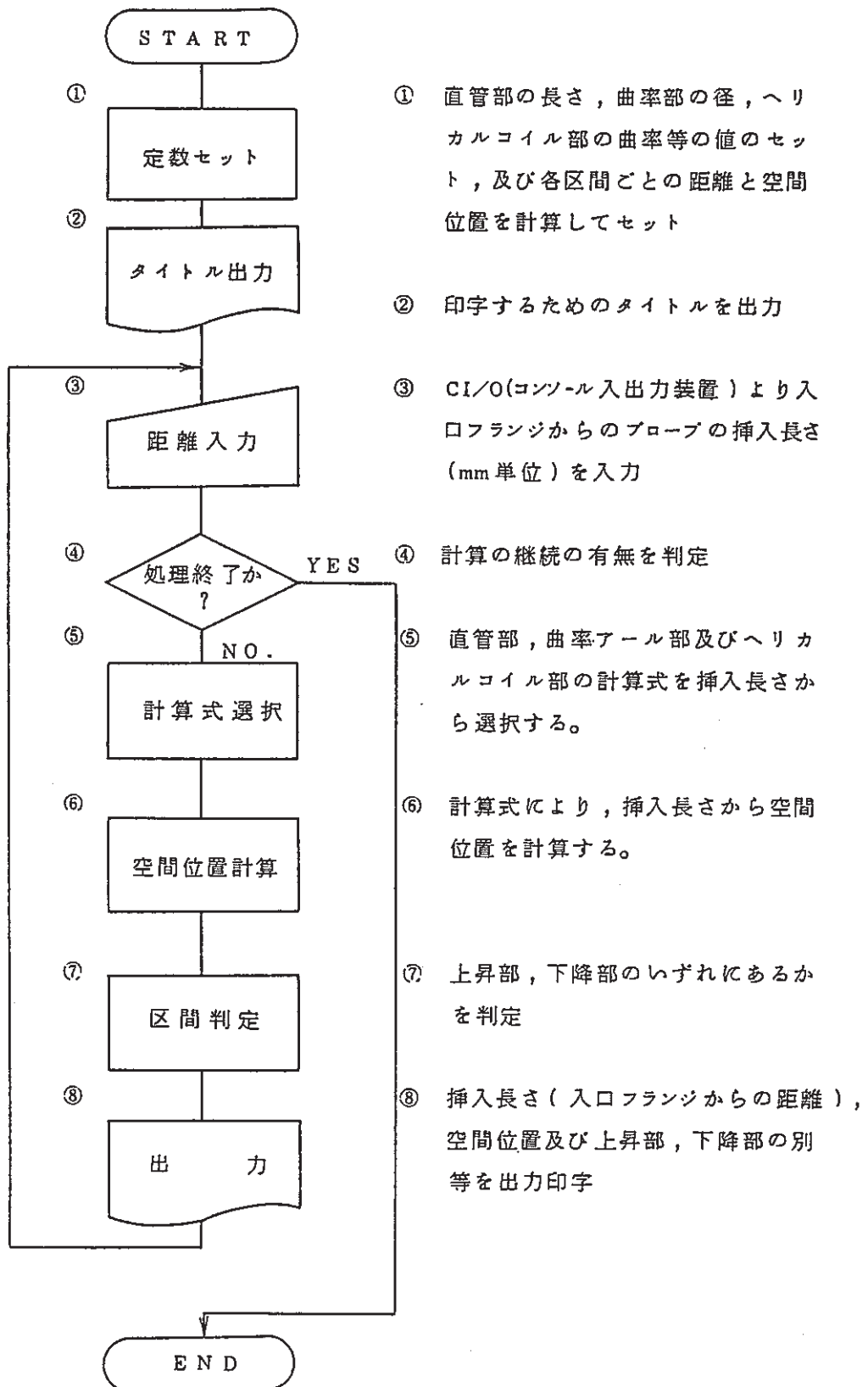


図-4.6 プローブ空間位置検出プログラム

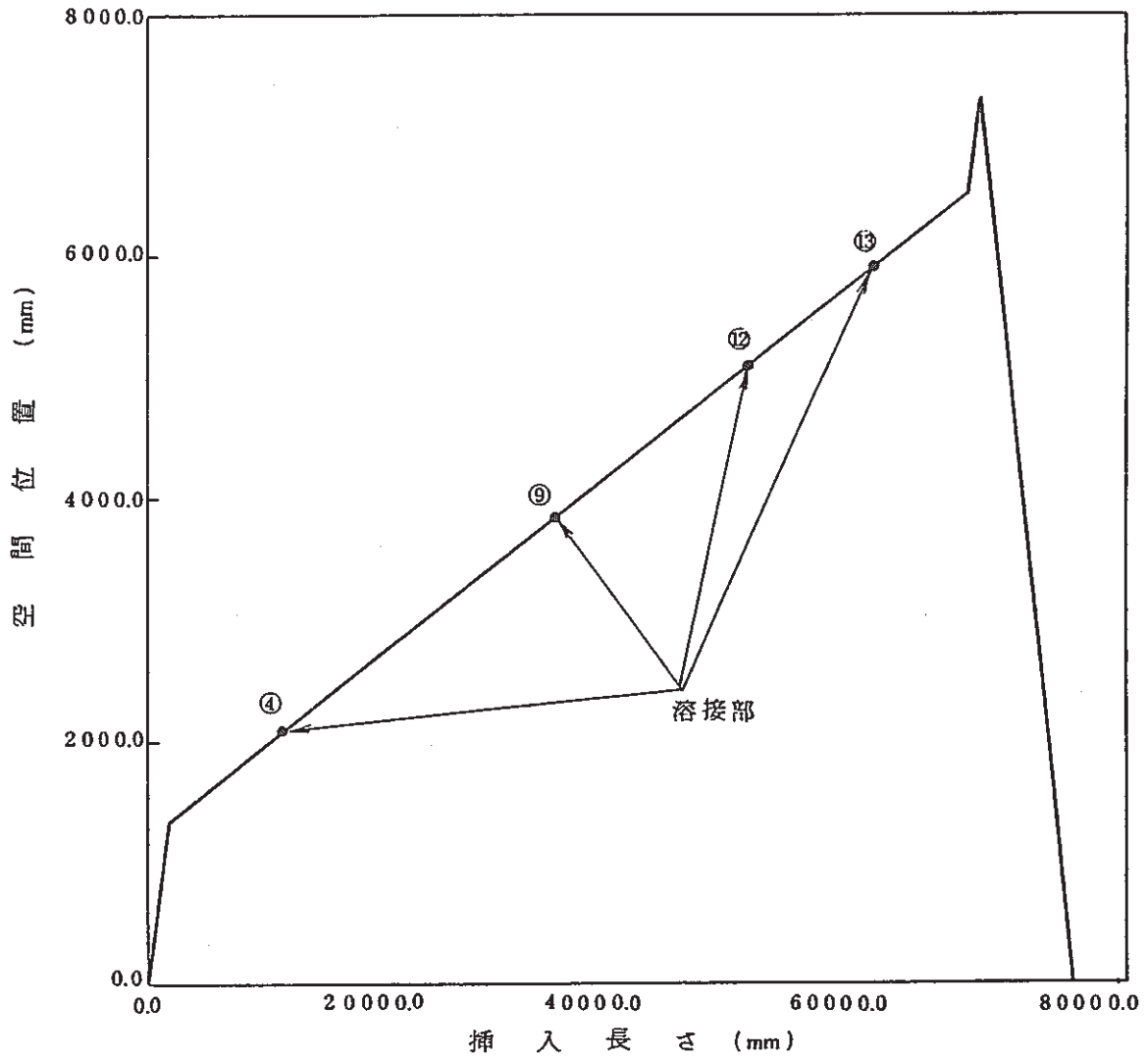


図-4.7 挿入長さと空間位置のシミュレーション結果



## 5. 超音波探傷装置<sup>5)</sup>

3種類の欠陥を一本のプロープで探傷するマルチアレイ型複合プロープにはそれと同数のchを持った超音波探傷装置が必要である。本項では昭和59年度R & Dにて試作試験を行った32ch超音波探傷器について記す。

### 5.1構成

マルチチャンネル式超音波探傷装置の全体構成図を図-5.1に、ソフトウェア構成を図-5.2に示す。又、表-5.1に仕様を示す。

本装置の動作としては電源投入後パネル操作部より探傷条件を設定する。その後、制御回路よりプロープへ制御信号等を出し、プロープを駆動する。プロープよりの欠陥信号は感度平準化回路で各ch間のバラツキを補正し、メインアンプでゲインを適切に調整してVIDEO信号を出力する。VIDEO信号は表示制御回路及びゲート回路へ入力する。表示制御回路では欠陥信号をAスコープ及びBスコープで表示する。ゲート回路ではVIDEO信号より必要な信号のみ抽出し、その信号をピーク検出部へ出力する。各回路内及びプロープを含めた全体構成を図-5.3に示す。また、各回路の仕様を以下に示す。

#### (1) 同期回路

同期信号は、超音波探傷装置全体の同期をとるための信号となる。又、同期信号に合わせて超音波の送受信を行う。同期信号（繰り返し周波数または、切り換え周波数）が速いほど探傷スピードは増加する。本試作装置では、同期信号を2kHz（目標）とした。更に、記録、表示装置等の同期信号により動作できることを考慮して外部同期信号入力をつけた。外部同期と内部同期の切り換えは、スイッチにより設定できるようにした。

#### (2) 制御回路

制御回路は、同期信号により、複合プロープを制御するための各種制御信号を出力する。この制御信号により、複合プロープ内にて32chの送受波子の送受信動作が制御される。制御信号としては、CLK（クロック）、CLR（クリア）、EN1/2（イネーブル）を出力し、複合プロープ内のパルス用に高電圧（400V）、制御回路用に±15Vを出力している。

#### (3) マイクロコンピュータ制御部

本試作装置は、装置全体の制御をマイクロコンピュータにより行っている。プログラムは、ROM化されており、電源投入後、プログラムがRUNする。パネル操作部からのキー入力によりマイクロコンピュータに各種のデータが入力され、パラメータ表示部（9インチCRT）に表示される。又、各回路へ必要データをデジタル信号として出力する。尚、マイクロコンピュータは、8ビットを使用している。マイクロコンピュータへのデータの入出力は、バスラインを通して行われる。

#### (4) 感度平準化回路ブロック図

感度平準化回路は、複合プロープからの探傷信号を時系列に入力して、各chご

とに感度を補正し、32ch全体を平準化するものである。本回路は、周方向欠陥用と軸方向欠陥用の2回路を備えている。マイクロコンピュータは、各chに対応する感度補正データを記憶しており、時系列に入力される探傷信号に対して感度補正データを選択する。この感度補正データをD/A変換して、アナログ電圧によりAGC（自動利得制御）が可能なアンプのゲインを変化させ、各ch毎の感度補正を行っている。ここで、アンプの総合ゲインは、30dBであり、設定パネルにより各chに対して0～30dBの範囲でゲインを設定できる。又、選択回路により周方向欠陥用と軸方向欠陥用の各送受波子から出力される探傷信号を切換可能とした。

#### (5) メインアンプ回路

メインアンプ回路では、感度平準化回路からの平準化された探傷信号を、ゲイン設定方式により最大60dBまで増幅する。この場合もゲイン設定値により、マイクロコンピュータから出力されるゲインデータに基づいてAGCアンプを制御し、ゲインを変化させる。増幅された探傷信号はRF信号であり、検波回路において検波整流を行うことにより、VIDEO信号を出力する。リジェクション回路では、VIDEO信号の低レベルのノイズをカットする機能をもっており、パネル設定により、0～50%の範囲で、リジェクションが可変できる。

#### (6) ゲート回路

ゲート回路は、VIDEO信号のうち必要な信号のみを選別するものである。パネル設定値によりマイクロコンピュータからゲートデータ（スタート点、幅）が出力されると、ゲート発生回路では、ゲートスタート点と幅で設定された時間だけアナログSWがONし、その間に入力したVIDEO信号を選別することができる。ゲートの精度は、カウンタへの基準クロック（FCLK）によって決められるが、本装置では、基準クロックを1MHz（1 $\mu$ sec）としている。ゲートスタート点は、0～20 $\mu$ sec、ゲート幅は0～20 $\mu$ secの範囲で設定できる。

#### (7) ピーク検出回路

ピーク検出回路は、VIDEO信号から選別された信号（ゲーテッドVIDEO）のピーク（最大波高値）を検出して、ピーク値をホールドし、アナログ出力する。本装置ではピークホールド時間を0～100msecの範囲で測定できるようにした。パネル設定によりマイクロコンピュータからピークホールドタイムデータが出力される。

#### (8) 表示回路

表示回路は、VIDEO信号をもとに、Aスコープ表示（X軸—時間、Y軸—ch信号及びエコー高さ）、Bスコープ表示（X軸—時間、Y軸—ch信号、Z軸—エコー有無）を行う。本装置は、最大で32ch分の信号表示が必要となるため、同期信号によりch数をカウントして、D/A変換し、Y軸上に2本表示するようにした。表示もパネル設定によりマイクロコンピュータから制御データが出力され、Aスコープ表示/Bスコープ表示の切換や、指定chのみの表示も可能とした。

#### (9) 装置の基本動作

電源投入後、標準の探傷条件設定データが表示され、探傷可能となる。もし、

探傷条件設定データに変更がある場合は、データを入力して実際の探傷に合った傷確条件を設定する。

## 5.2 機能確認試験

表-5.2 に超音波探傷装置の機能確認試験結果を示す。これより本装置の各部分は所定の性能を満足していることが確認できた。

表-5.1 マルチチャンネル式超音波探傷装置仕様

	項 目	仕 様	
1	探傷器回路方式	マルチチャンネル方式 (32チャンネル×3式)	
2	探傷モード	軸方向探傷	伝熱管の軸方向探傷を行う。
		周方向探傷	伝熱管の周方向探傷を行う。
		減肉測定	伝熱管の減肉測定を行う。
3	制御モード	オートモード	32チャンネルを連続的にスキャン
4	マルチアレイ型プローブ信号	CLK信号, CLR信号, ENI, 2信号, 高圧電源, ±15V電源, 受信信号(3)	
5	同期信号繰り返し周波数	max 8KHz	
6	プローブ用電源	高圧電源	400V以下
		低圧電源	±15V
7	感度平準化回路	増幅度粗調	0～30dB
		増幅度微調	パネル設定及びROM設定
		増幅度微調回路数	32チャンネル
		周波数帯域	2～10MHz
8	メインアンプ	増幅度	60dB
		増幅度調整	0～60dB
		周波数帯域	2～10MHz
9	リジェクション	0～50%	
10	ゲート	ゲートスタート点	0～20μs 任意設定
		ゲート幅	0～20μs 任意設定
11	エコー検出データ	ピークホールド	0～100ms
		ビーム路程	12ビットデジタル出力 (0.0016μs/1ビット)
12	ビデオ出力	0～4Vビデオ出力及びゲーテッドビデオ出力	
13	減肉測定	方 式	ビーム路程によるソフト演算方式 擬似表面エコーによる測定も可能とする。
		分 解 能	0.1mm
		出力表示	デジタル表示
		アナログ出力	0～10Vアナログ出力
14	表 示	Aスコープ表示	
		Bスコープ表示	

表-5.2 機能確認試験 (1/2)

項 目	内 容	試 験 結 果
メインアンプのゲイン制御機能	<p>a) ゲイン設定キーからの入力によりゲイン値が変化することを確認。</p> <p>b) ゲイン値が 0~50dBの範囲であることを確認。</p>	<p>a) ゲイン値の変化が確認できた。図-5.4 にメインアンプの増幅特性を示す。この図は、入力信号と出力信号の振幅比をdB換算したものである。</p> <p>b) 図-5.4 より 0~60dBの範囲で設定可能である。</p>
感度平準化制御機能	<p>a) 1~32の各チャンネルごとにゲイン設定ができることを確認。</p> <p>b) ゲイン設定が 0~30dBの範囲で出来ることを確認。</p>	<p>a) 各チャンネルごとのゲイン設定ができることを確認した。図-5.5 は 1~32の各チャンネルごとにゲインを設定し、一定の入力信号に対して感度平準化を行なった例である。</p> <p>b) 0~30dBの範囲で設定できることを確認した。図-5.6 に感度平準化アンプの増幅特性を示す。又、図-5.7 に感度平準化アンプのゲイン確認例を示す。これは一定の入力に対し、1~31チャンネルのゲインデータを 0~32dBまで設定して行なったものである。</p>
ゲート制御機能	<p>a) ゲート設定キーからの入力によりゲートSTART点とゲートWIDTHが変化することを確認。</p> <p>b) ゲートSTART、ゲートWIDTHの設定が 0~20<math>\mu</math>secの範囲でできることを確認。</p> <p>c) ゲート内の信号を選別し、出力できることを確認 (G・VIDEO信号)。</p>	<p>a) ゲートSTART点とゲートWIDTHが変化することを確認できた。</p> <p>b) ゲートSTART、ゲートWIDTHが 0~20<math>\mu</math>secの範囲で設定できることを確認した。図-5.8 にゲート範囲設定例を示す。これはゲートSTARTを20<math>\mu</math>sec、ゲートWIDTHを20<math>\mu</math>secに設定したものである。</p> <p>c) ゲート内の信号を選別し、出力できることを確認した。図-5.9 に信号選別機能例を示す。</p>
プローブ接続時の機能	<p>a) 模擬複合プローブ内蔵回路と接続し、所定の送受信動作を繰り返し周波数2kHzにおいて問題なく行なうことを確認。</p>	<p>a) 目標繰り返し周波数2kHzに対し、4kHzまで問題なく行なうことを確認できた。</p>

表-5.2 (続き) (2/2)

項 目	内 容	試 験 結 果
プローブ切換機能	a) パネル設定により周方向 又は軸方向欠陥探傷用回路からの探傷信号切換可能なことを確認。	a) パネル設定により周方向又は、軸方向欠陥探傷用送受波子からの探傷記号を切り換えて処理可能なことを確認できた。
表示機能	a) Aスコープ表示/Bスコープ表示において マルチ表示 (32チャンネル) / ハーフ表示 (16チャンネル) / シングル表示 (1チャンネル) のいずれかをパネル設定により 選択できることを確認。	a) 選択できることを確認した。 図-5.10にAスコープ表示例を示す。送受波子のチャンネル1で模擬エコー信号を受信しているためチャンネル1だけエコー信号が表示されている。同図(a)(b)(c)は同一探傷条件で表示チャンネル数を変えたものである。図-5.11にBスコープ表示例を示す。
外部同期動作機能	a) 外部同期信号により、動作することを確認。繰り返し周波数は2kHz (目標)。	a) 外部同期信号により、動作することを確認できた。
リジェクション 制御機能	a) リジェクション設定キーからの入力により、リジェクション値が変化することを確認。 b) リジェクションが0~50%の範囲で設定できることを確認。	a) リジェクション設定キーからの入力により、リジェクション値が変化することを確認できた。 b) リジェクションが0~50%の範囲で設定できることを確認した。
出力信号	a) 各コネクタからの出力信号が異常のないことを確認。 (イ)ビデオ出力 (VIDEO)  (ロ)ゲーテッドビデオ出力 (G・VIDEO) (ハ)RF出力 (RF)  (ニ)ピークホールド出力 (PEAK) (ホ)ゲート出力 (GATE)  (ヘ)トリガ出力 (TRIG)	a) 各コネクタからの出力信号が異常ないことを確認できた。 (イ) 図-5.12にビデオ出力波形例を示す。 (ロ) 図-5.9(c)にゲーテッドビデオ信号出力波形例を示す。 (ハ) 図-5.13にRF信号出力波形例を示す。 (ニ) 図-5.14にピークホールド信号出力波形例を示す。 (ホ) 図-5.8(a)にゲート信号出力波形例を示す。 (ヘ) 図-5.15にトリガ信号出力波形例を示す。

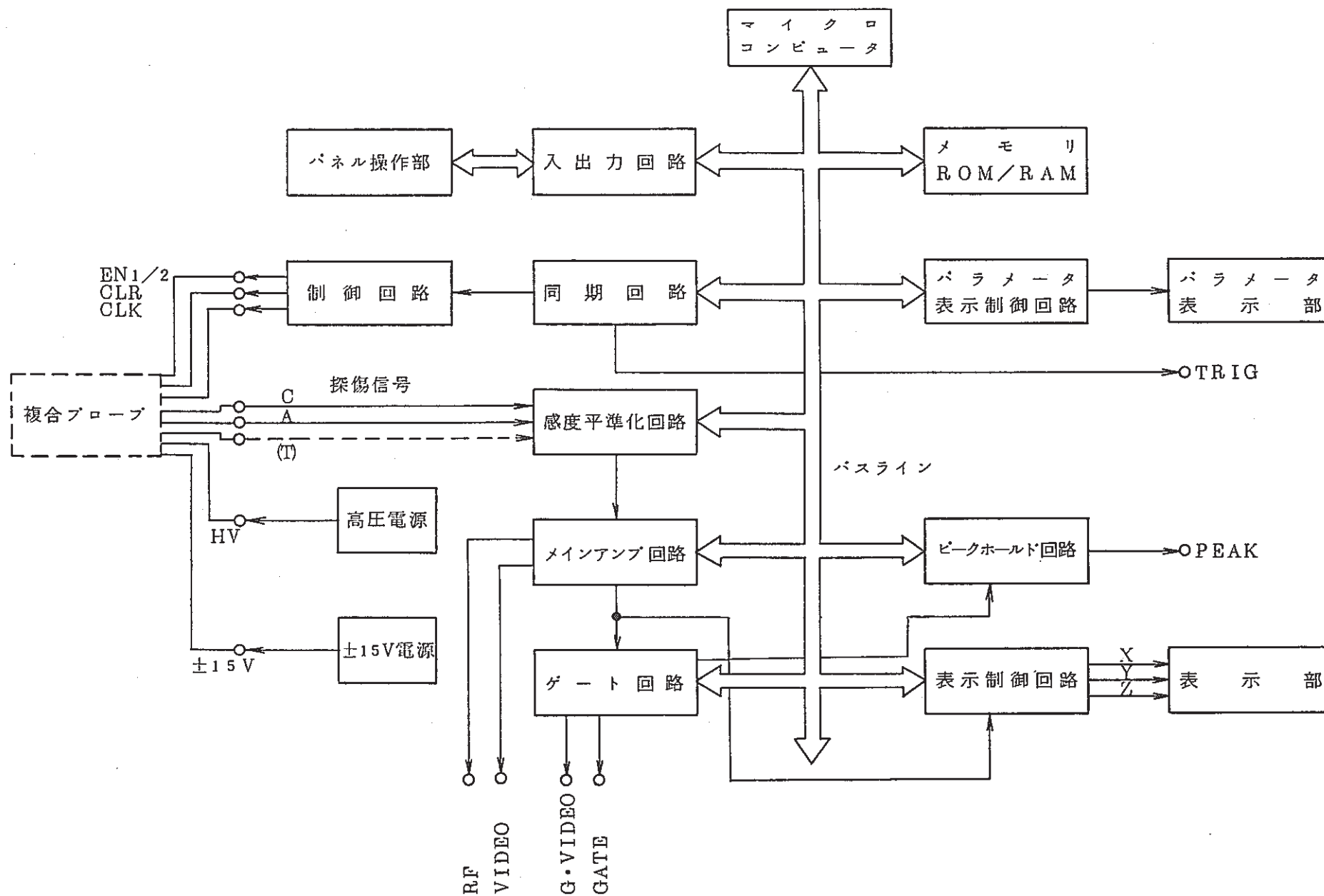


図-5.1 試験超音波探傷装置構成図

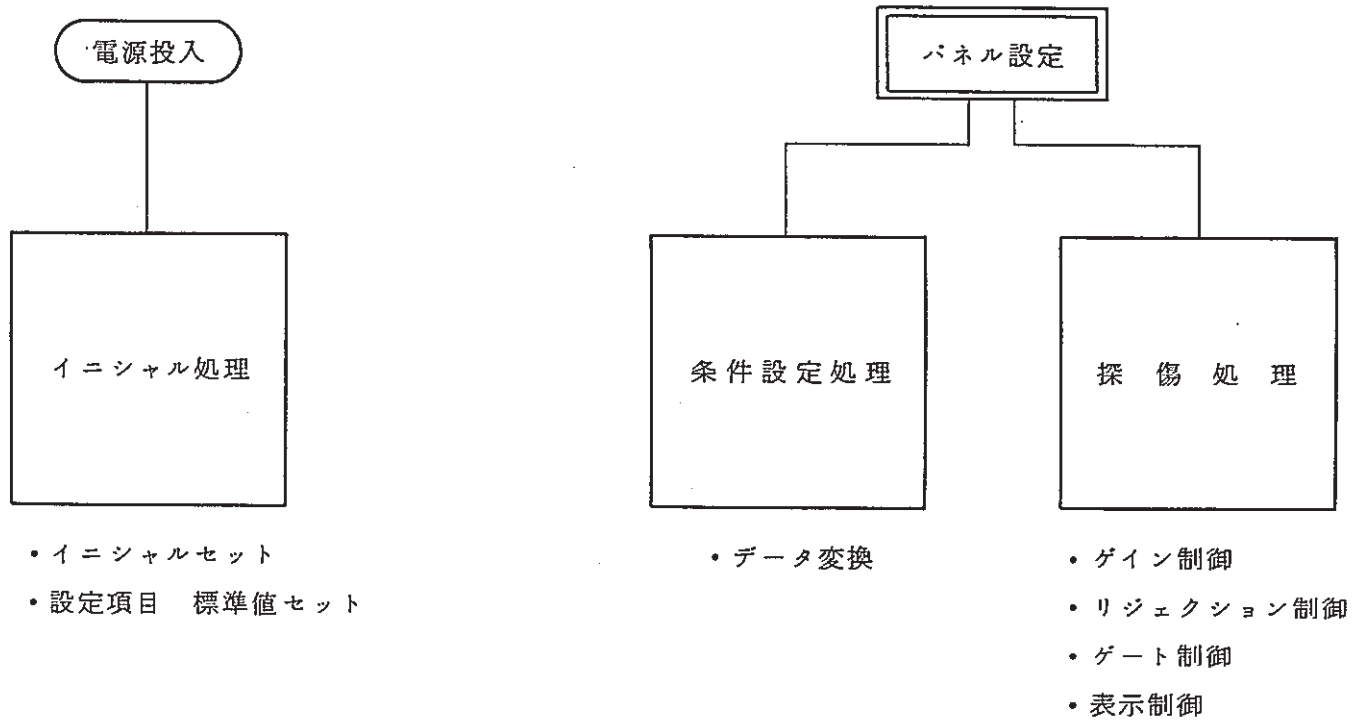
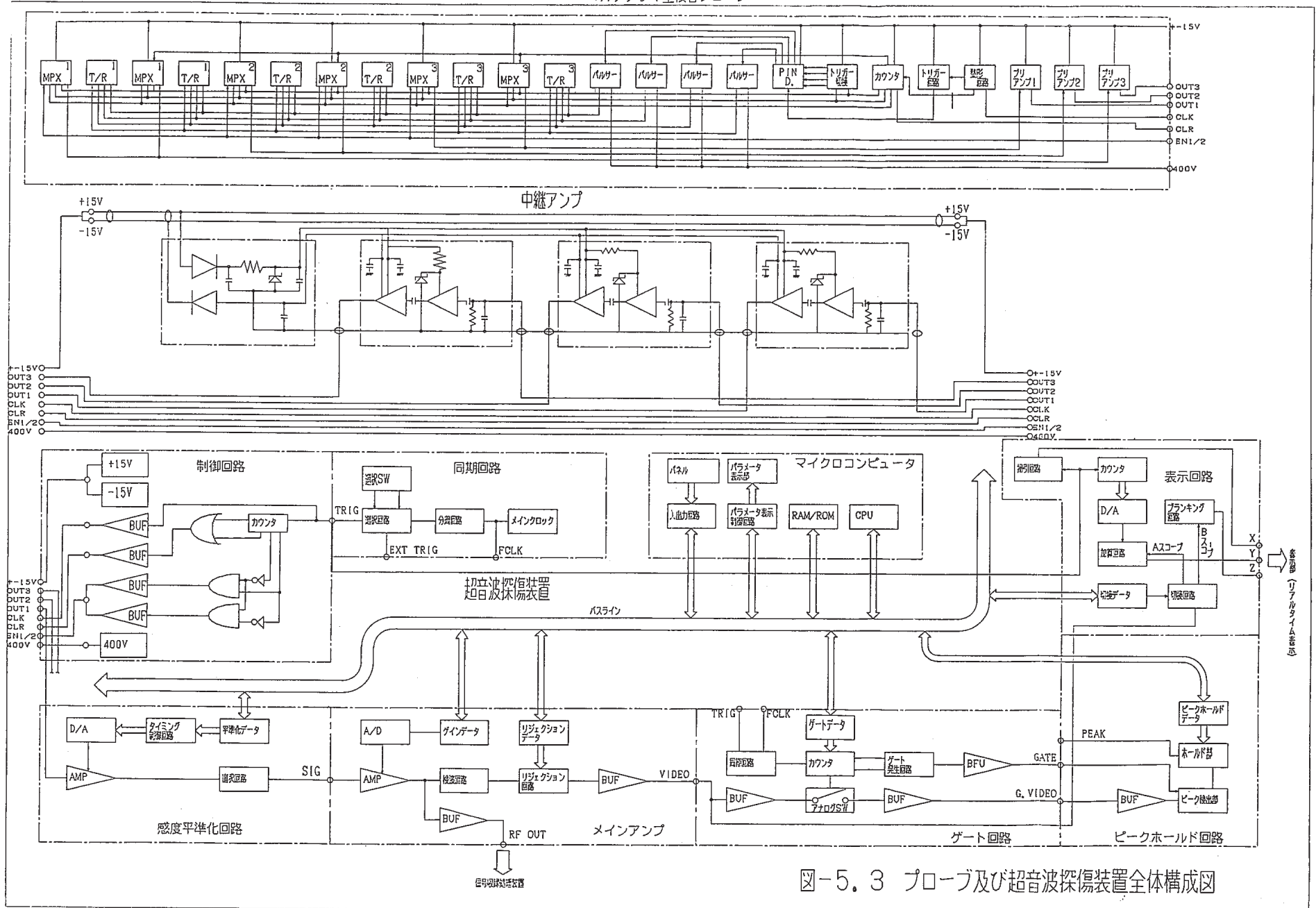


図-5.2 ソフトウェア構成



マルチアレイ型複合プローブ



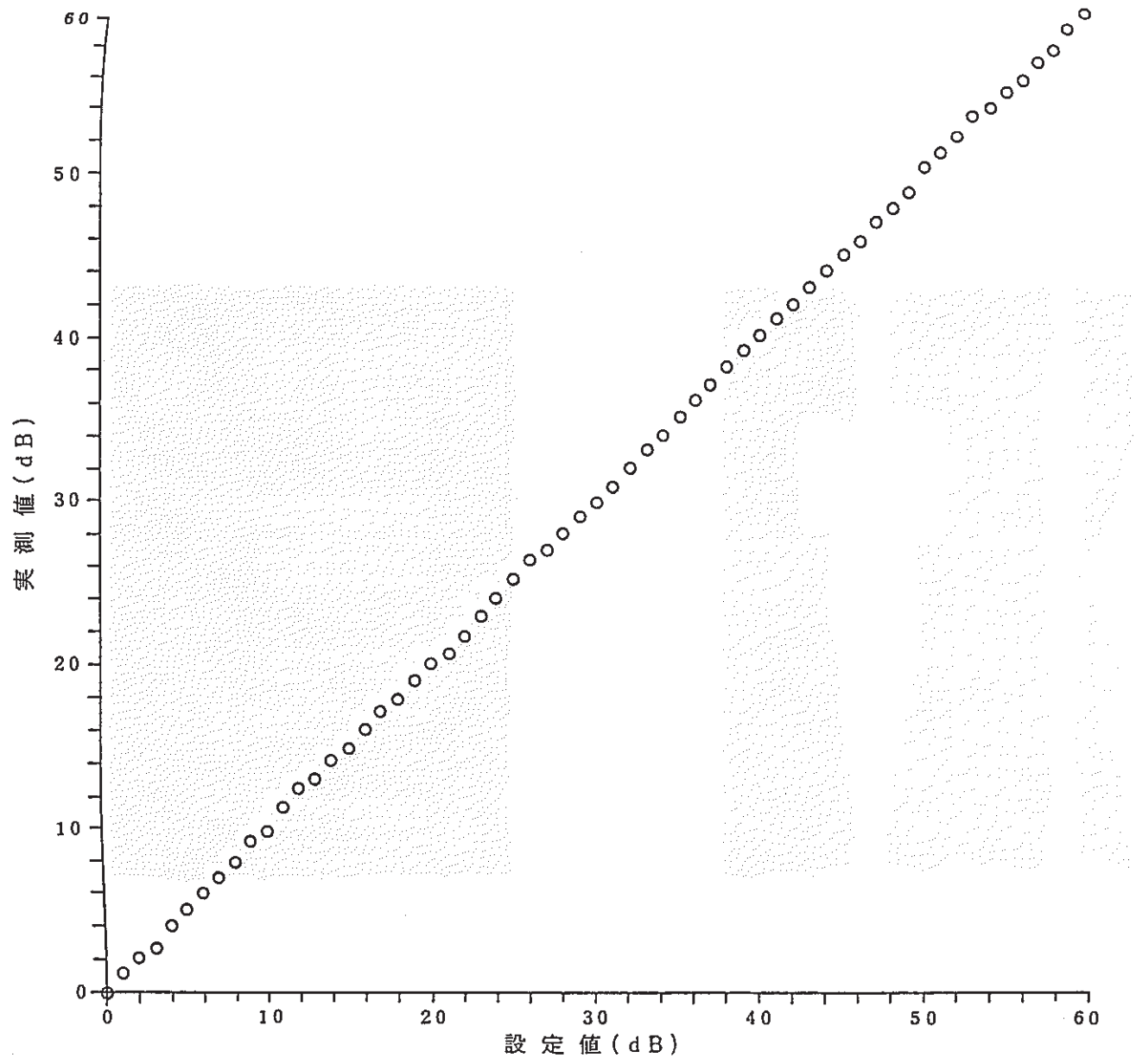
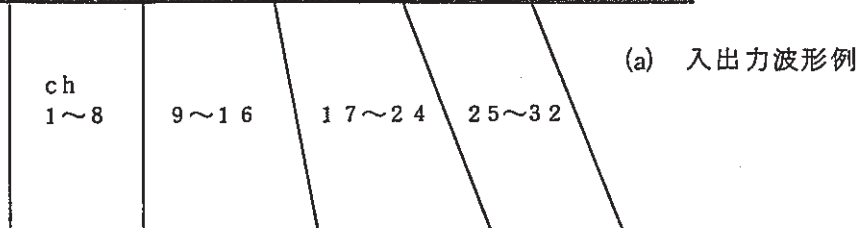
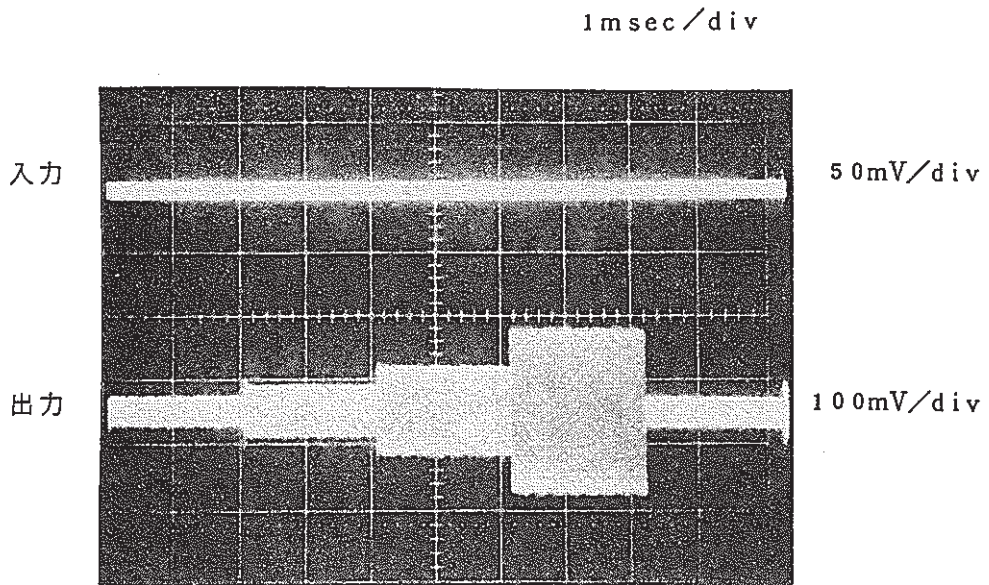


図-5.4 メインアンプ増幅特性



フローパス: A		ゲイン		ゲイン	ゲイン	ゲイン	
		カット・ハイパス		ゲイン (dB)			
1:	10	9:	15	17:	20	25:	25
2:	10	10:	15	18:	20	26:	25
3:	10	11:	15	19:	20	27:	25
4:	10	12:	15	20:	20	28:	25
5:	10	13:	15	21:	20	29:	25
6:	10	14:	15	22:	20	30:	25
7:	10	15:	15	23:	20	31:	25
8:	10	16:	15	24:	20	32:	25

チャンネル =

F1	F2	F3	F4	F5
キリカ				テイ

(b) 感度平準化設定データ

図-5.5 感度平準化設定例

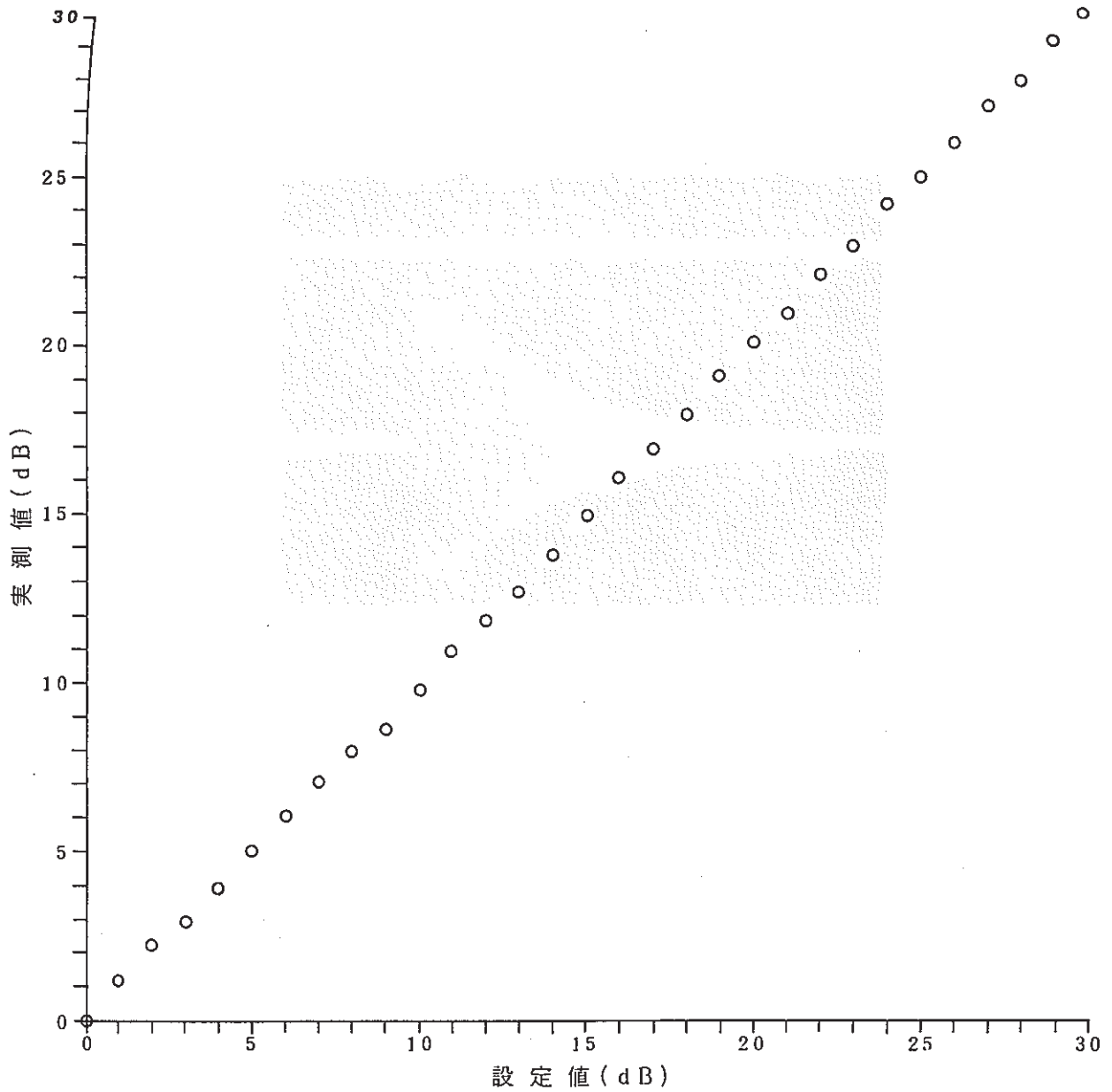
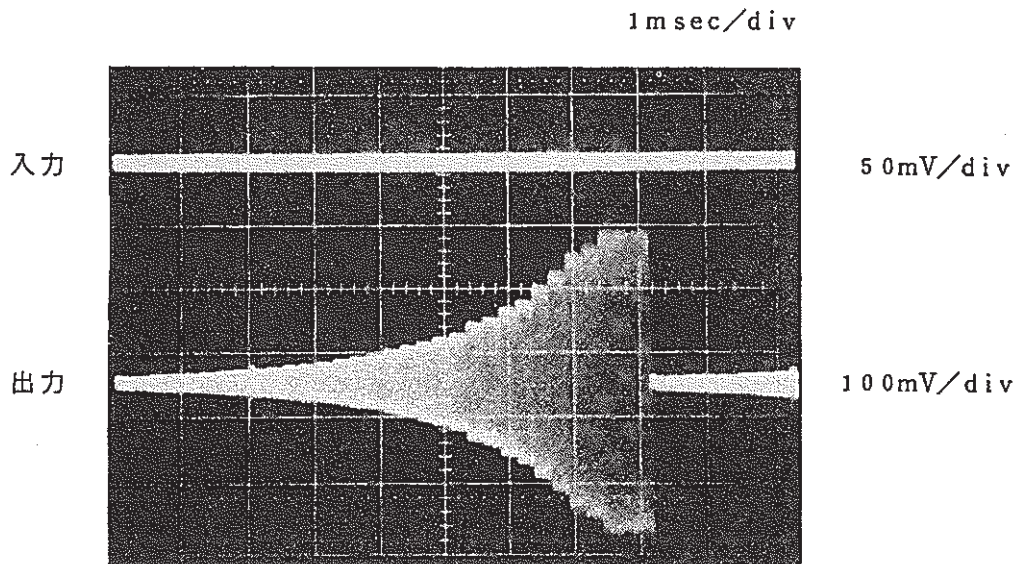
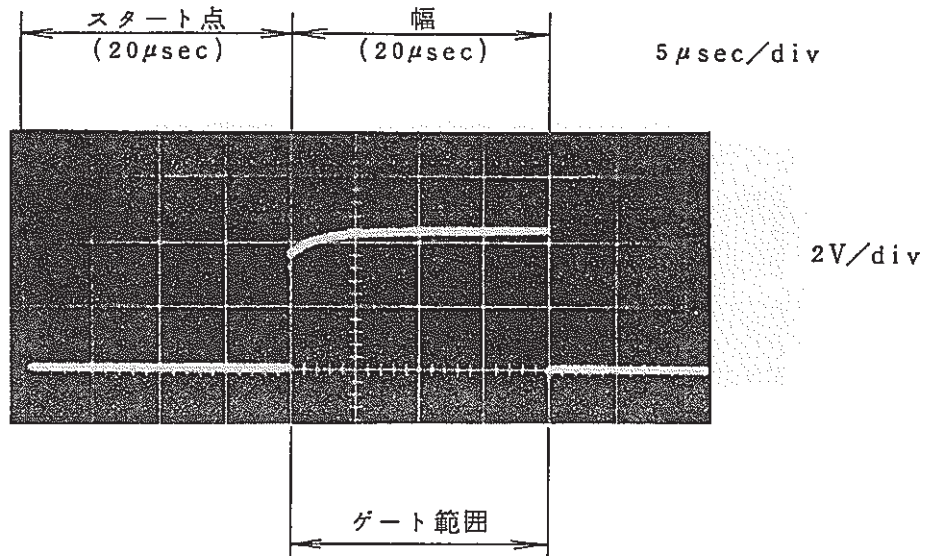


図-5.6 感度平準化アンプの増幅特性



チャンネル 0, 1, 2, 3 ..... 30・31・32  
 ゲイン 0, 1, 2, 3 ..... 28・29・30・30・30  
 (dB)

図-5.7 感度平準化アンプのゲイン確認



(a) ゲート信号波形

1	GAIN	(0-60)	40 (dB)	
2	REJ	(0-100)	0 (%)	
3	GATE-ST	(0-20)	20 (μS)	
4	GATE-W	(0-20)	20 (μS)	
5	フールド	(1:C 2:A 3:T)	1:C	
6	エッジ	(1:A 2:B)	2:B	
7	エッジ	(1,2,3,4)	4:1-32	
8	CH SEL	(1-32)	1	
9	P/H	(0-200)	100 (mS)	
10	T/H	(0-100)	50 (%)	

コマンド=

F1	F2	F3	F4	F5
メモリ				ディスプレイ

設定値

(b) ゲート範囲設定データ

図-5.8 ゲート範囲の設定例

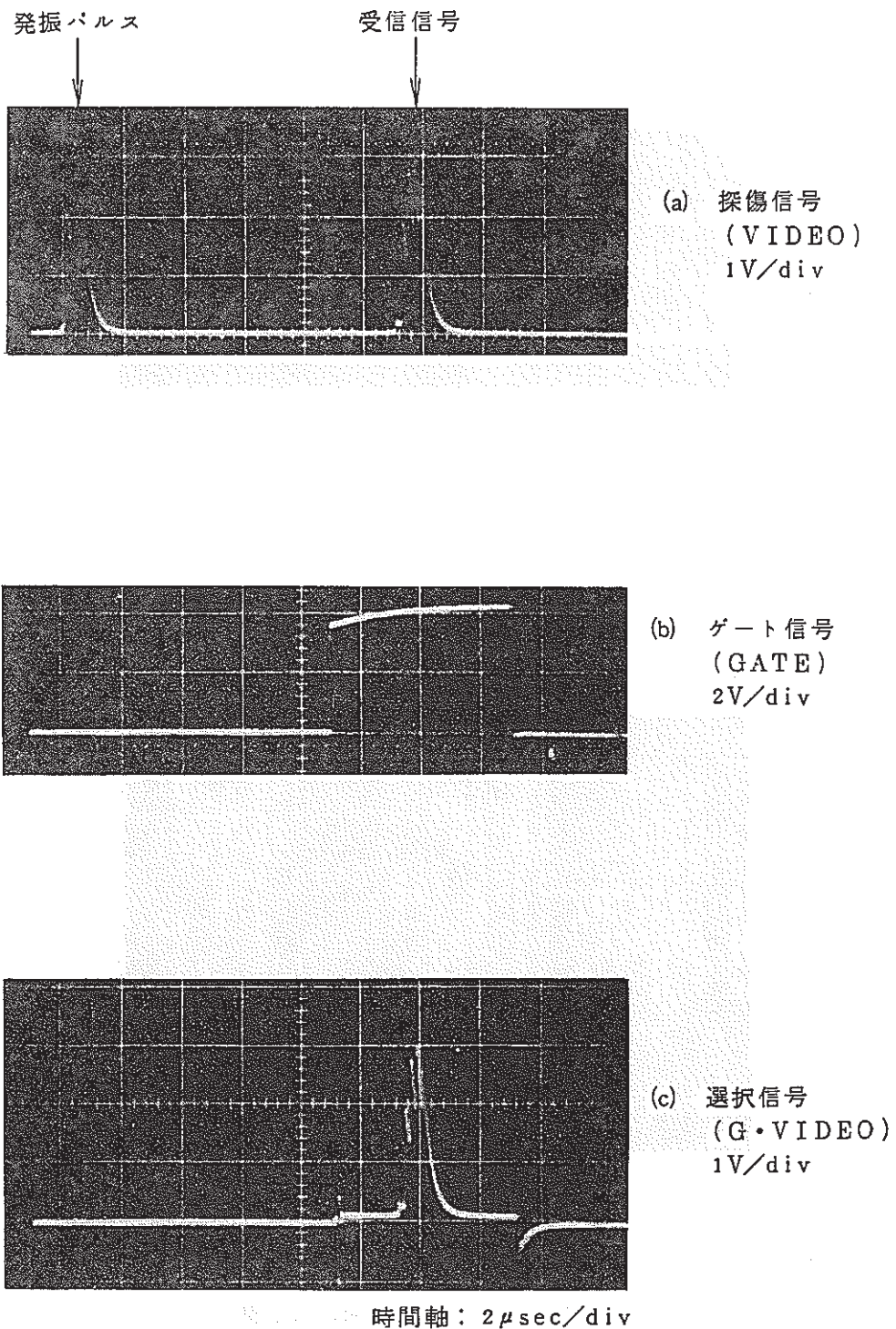
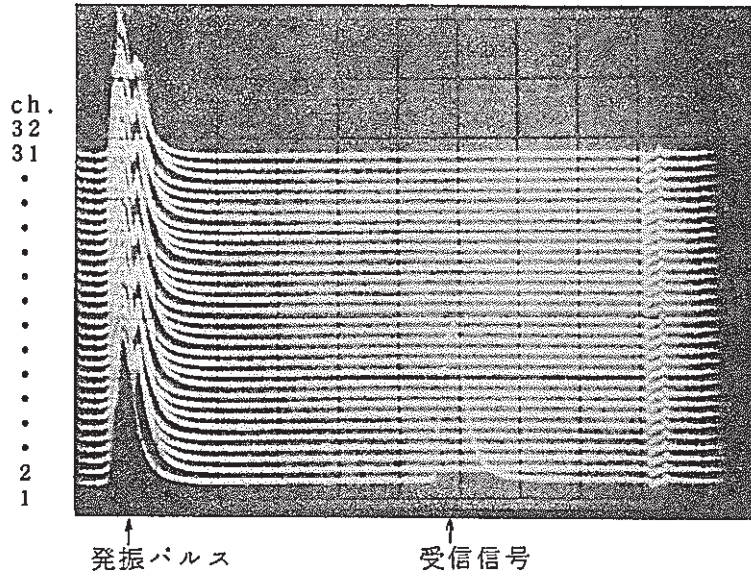
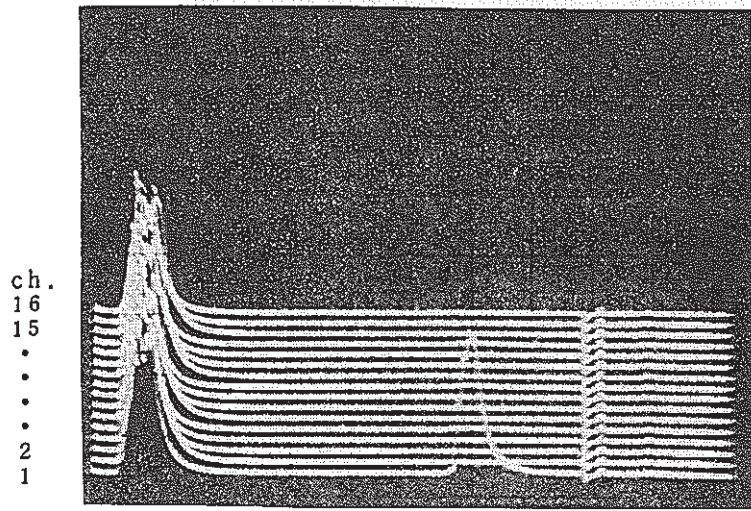


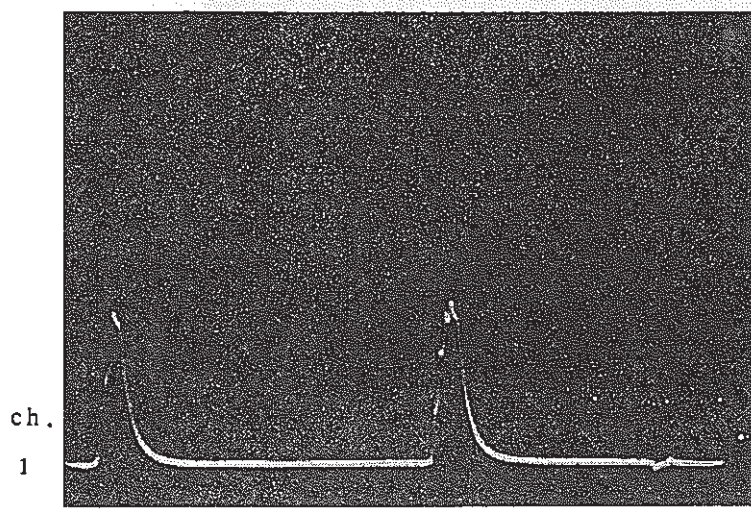
図-5.9 ゲート回路による信号選別機能例



(a) マルチ表示  
ch. 1~32



(b) ハーフ表示  
ch. 1~16



(c) シングル表示  
ch 1

図-5.10 Aスコープ表示例



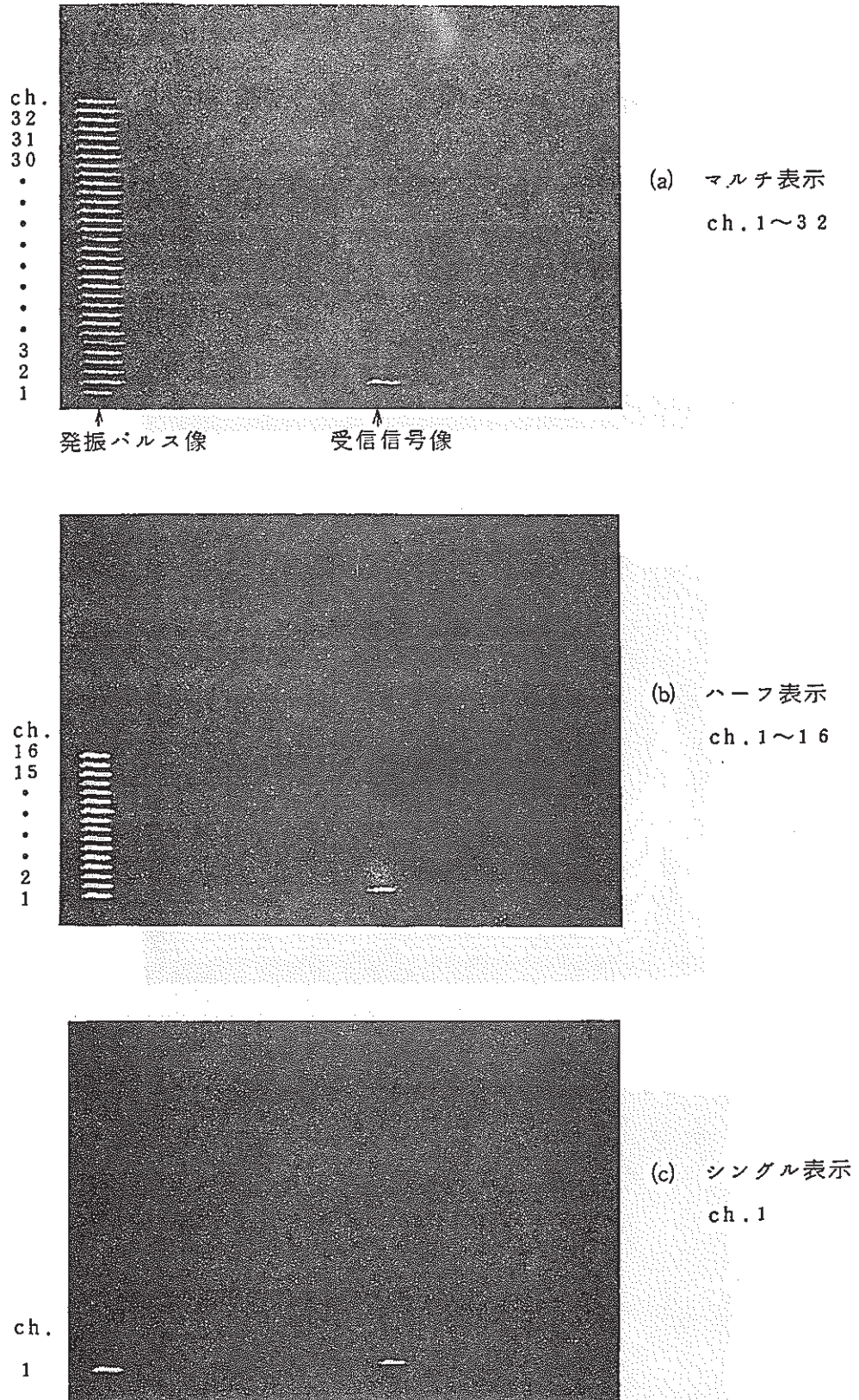


図-5.11 Bスコープ表示例

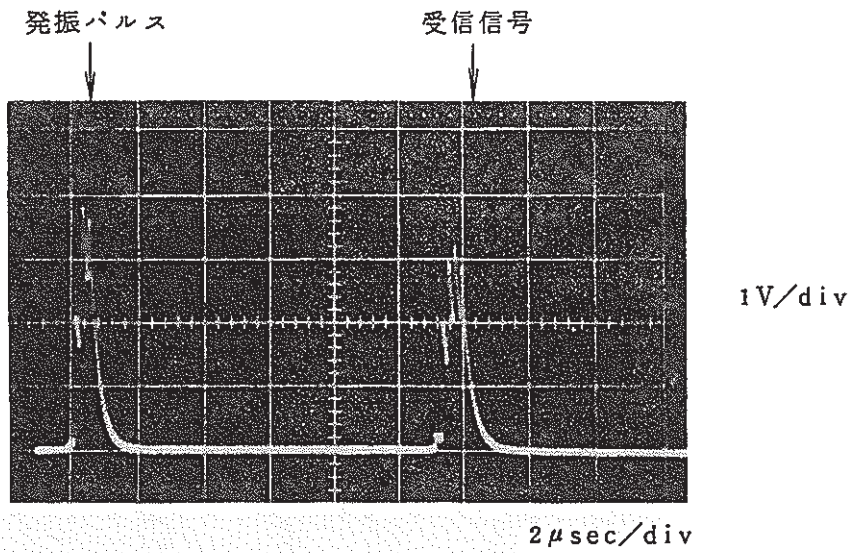


図-5.12 ビデオ信号出力波形例

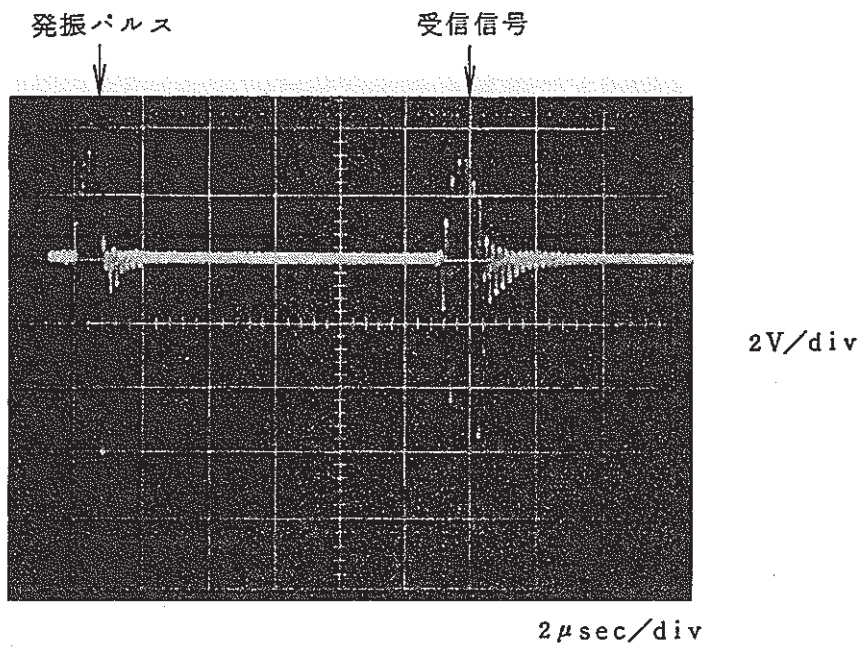


図-5.13 RF信号出力波形例

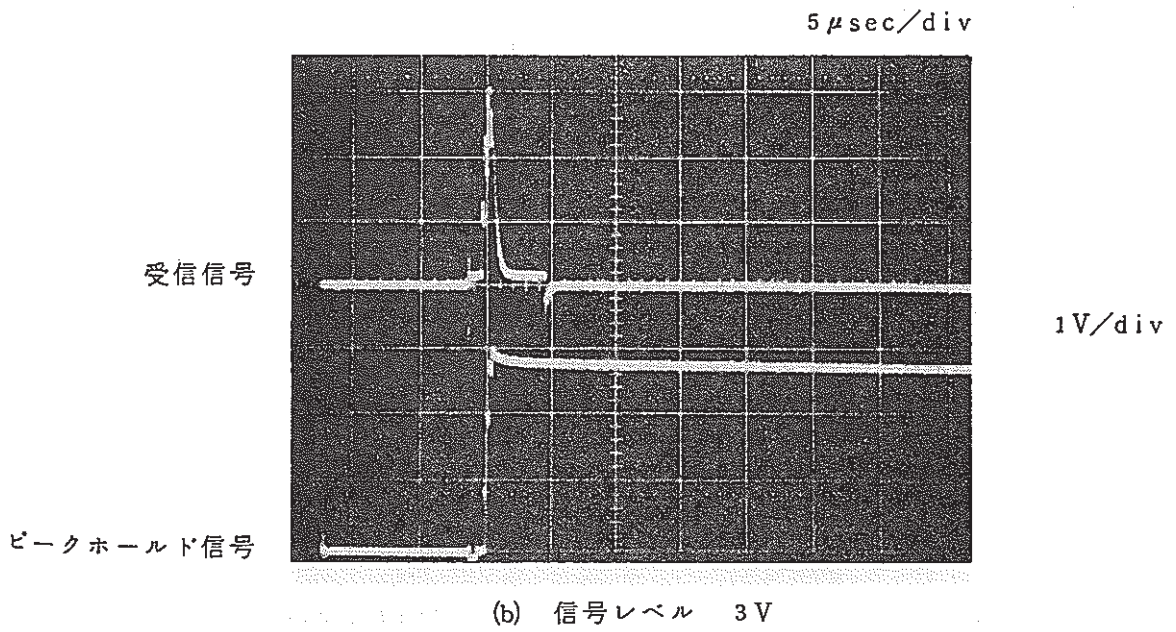
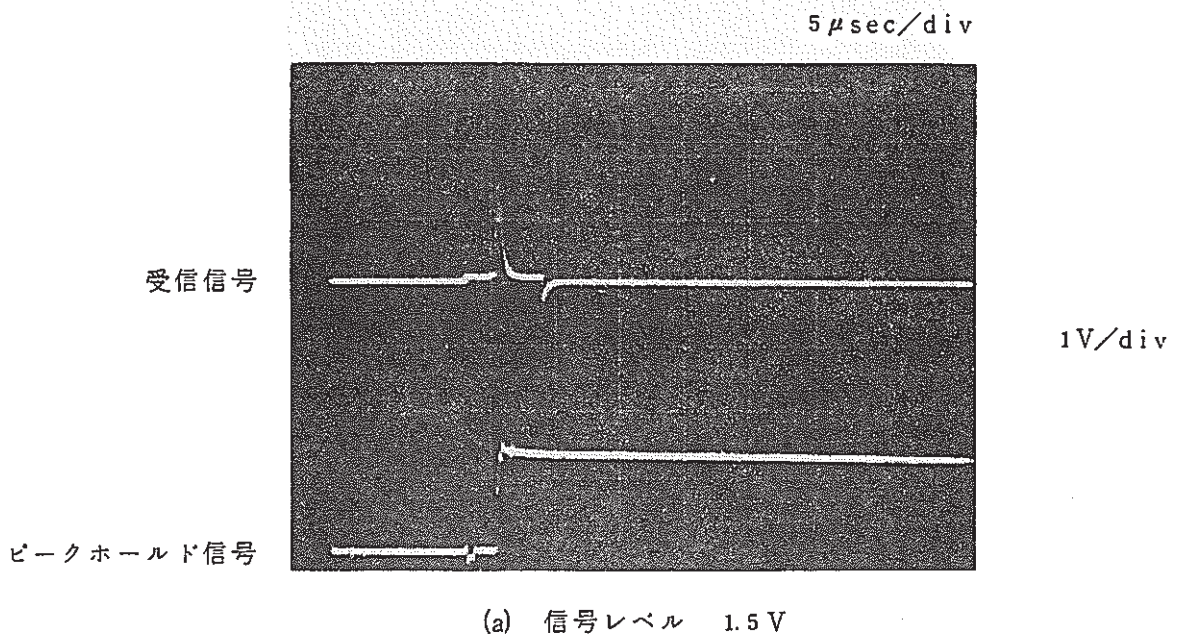


図-5.14 ピークホールド信号出力波形例

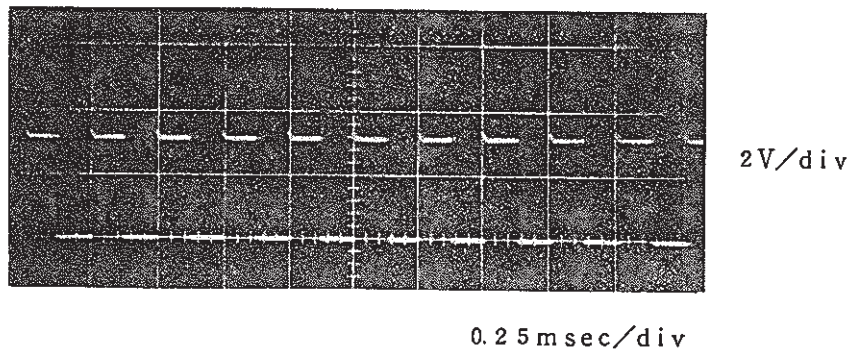


図-5.15 トリガ信号出力波形例

## 6. 組合せ試験

### 6.1 プローブ挿入試験<sup>3)</sup>

図-6.1 に示す実機模擬伝熱管を用いて64chマルチアレイ型複合プローブの伝熱管への挿入性及び水圧送時の欠陥検出性について試験を行った。

#### (1) 試験方法

図-6.2 に試験装置の構成を示す。ケーブル駆動装置のケーブル巻取りドラムに巻かれた120mの浮子付ケーブルの先端に軸方向及び周方向各々32chの送受波子を持つマルチアレイ型複合プローブが接続されている。プローブは水圧により伝熱管へ挿入引抜を行う。その際、プローブの挿入引抜量に応じケーブル巻取りドラムが回転してケーブルの送り、巻取りを行う。又、ケーブルの末端部は超音波探傷器に接続され、プローブよりの欠陥信号の処理を行うようになっている。

プローブは出口水室管板部よりヘリカルコイル部を通り、Uベント部を経て下降管の透視部分まで水圧送し、そこで一旦停止した後、引抜を行う。尚、プローブの挿入時には探傷も平行して行う。以下に本試験での計測項目を示す。

- i) 挿入圧力
- ii) 欠陥探傷信号

i)についてはプローブ挿入速度を4m/minとし、透視管通過時の圧力を測定した。ii)については欠陥エコー出現位置に選別ゲートを設定して、そのゲート出力電圧をホールド回路を通してストリップチャートレコーダに記録した。

#### (2) 試験結果

##### i) 挿入圧力

表-6.1 に代表挿入距離での挿入圧力と挿入速度を示す。これより、複合プローブは最大3.2atgの圧力で3.5~4.5m/minの挿入速度でヘリカルコイル全長に挿入可能である。又、ヘリカルコイル部、Uベント部、下降管部に取り付けた透視管でプローブを観察したところではスムーズな挿入が行われている。

次に引抜時間であるが、この際は最高1.8atgにて約4.5分で引き抜けたことより平均引抜速度は18m/minであった。

##### ii) 欠陥探傷信号

複合プローブよりの信号は軸方向及び周方向各欠陥探傷信号が超音波探傷器へ入力される。しかし、ここで使用した超音波探傷器は単機能であるため、欠陥の種類毎にケーブルを差し替えて探傷試験を行った。図-6.3 にヘリカル最下部透視管位置 (SG-5、入口より約65m) に取り付けられたTP6.2の探傷波形を示す。これより軸方向及び周方向各欠陥が検出されていることを認めた。しかし軸方向及び周方向共10%t、20%tがそれぞれ背中合わせに施されており、どちらの信号であるかをチャートより読むことは不可能である。

#### (3) 検討

図-6.4 に複合プローブをヘリカルコイル伝熱管全長に挿入する際、連続的に採取した挿入圧力及び速度のデータを示す。これによると、伝熱管への必要挿入圧力

は、挿入距離に対しリニアに変化し、Uベント部やダウンカマーの立ち上がり部においてもその傾向は変わらない。これは、ケーブルの挿入距離が大きくなるに従い、受圧体であるフロートの伝熱管内での数が増加するので、ダウンカマー部を立ち上げる場合でも十分余裕のある挿入力をケーブルが有するためと推察される。

又、48ユニットモデルプローブの挿入圧力と比較すると、プローブのユニット数が半分になっているにもかかわらず、その最大圧力に大きな違いは見られないことがわかる。これは、全長90mに及ぶケーブルの重量が、プローブユニット数の増減により変化した重量と比べ非常に大きく、ケーブル駆動圧力に与える影響が小さいためと考えられる。

ケーブル挿入速度は、当初設定した4m/minに対し±10%程度の誤差内に収まり、実用上問題ないことが確認された。

さらに、複合プローブの探傷性能としては、ヘリカルコイル試験体での探傷試験の結果、4m/minの探傷速度で軸方向及び周方向欠陥が検出できることを確認した。

ただし、欠陥位置に低感度の送受波子chが遭遇する場合には欠陥が検出されないこともあるが、これは複合プローブに整合した機能を有する超音波探傷装置によって解決できる問題である。

以上の結果、試作した複合プローブは挿入性及び探傷性のいずれにおいても実用的な性能を有していることが確認された。

## 6.2 超音波探傷装置組合せ試験<sup>4)</sup>

### 6.2.1 試験装置及び方法

マルチチャンネル式超音波探傷装置 (32ch) とマルチアレイ型複合プローブ (64ch) の組合せによる探傷試験を図-6.5 に示す装置にて実施した。尚、プローブと超音波探傷器とは120m浮子付ケーブルを介して接続した。又、超音波探傷装置が32chであることより軸方向及び周方向各欠陥の同時探傷は不可能であるため、図-6.6(a)に示す様に軸方向及び周方向各試験片を上下に分離して設置し、各方向の欠陥を探傷毎にプローブよりの信号入力を切替える方法とした。この時、探傷モードを切替える毎に感度平準化を行う (図-6.6(b))。

以下に試験項目を示す。

- 1) 多種欠陥の同時探傷性試験
- 2) 電子走査による管全周の探傷性試験
- 3) 高精度探傷性試験

これらの試験は探傷により得られる欠陥信号を図-6.7(b)に示すように管周方向及び管軸方向の分布として直感的に表す方法をとっている。これは欠陥の周方向及び軸方向の位置と欠陥信号レベルを3段階の色調で表すものである。

### 6.2.3 試験結果

- 1) 多種欠陥の同時探傷性試験

#### i) 軸方向欠陥

TP 1の5%t、10%t、20%t軸方向欠陥に対する探傷結果を図-6.8 に示す。12chに5%t、7chに10%t、2chではうまくとらえられてないが1chと2chを補

間する17chに7chより高いピーク、すなわち20%tが表示されている。又、欠陥の軸方向分布についてTP-13の幅0.6、長さが10、20、30mmの欠陥についてそれに対応した表示がされている(図-6.9参照)。

## ii) 周方向欠陥

TP1の5%t、10%t、20%t周方向欠陥に対する探傷結果を図-6.10に示す。Aユニット4ch、15chに5%t、20%t、Bユニットの25ch、30chに10%t、20%t欠陥が検出された。

## 2) 電子走査による管全周の探傷試験

i) TP12(図-6.11)の周方向欠陥に対し、周方向欠陥探傷用の32ch送受波子の周方向へ45°ずつ回転させた時の欠陥検出性を調べた。その結果を図-6.13に示す。表示部Aに $l=10$ 、Bに $l=14$ の欠陥を表示している。いずれの角度でも欠陥は検出されているので全周の探傷が可能なのが確認できた。又、 $l=10$ で3つの送受波子分、 $l=14$ で5つの送受波子分となっていることより1つの送受波子で3mmの周方向長さの欠陥を探傷できる。

ii) 図-6.12に示すTP11の大きさを少しずつ変えた欠陥を順次探傷した結果を図-6.14に示す。 $l=10$ は3つ、 $l=20$ は7つの送受波子で検出されており検出感度もi)は緑、黄( $d=0.7$ )が点灯したのに対し、緑、黄、赤( $d=1.4$ )が点灯し、欠陥深さに対応したものとなっている。

## 3) 高精度探傷試験

マルチアレイ型複合プローブとマルチチャンネル式超音波探傷装置の組合せによる探傷試験を行った。その結果を図-6.15~6.17に示す。

欠陥は総てノイズレベル以上で検出されておりS/N比では、最低で曲管溶接部外面10%t外面欠陥の4dB、最高で直管母材部外面20%t軸方向欠陥の18dBであった。

表-6.1 各挿入位置での挿入圧力と速度

項目 挿入位置	1		2		3		4	
	挿入圧力 (atg)	挿入速度 (m/min)	挿入圧力 (atg)	挿入速度 (m/min)	挿入圧力 (atg)	挿入速度 (m/min)	挿入圧力 (atg)	挿入速度 (m/min)
SG-1 (3.4 m)	1.1	4.5	1.0	4.2	1.1	4.4	1.2	4.0
SG-2 (21.0 m)	1.7	4.2	1.8	4.1	1.8	4.0	1.7	4.0
SG-3 (25.5 m)	1.8	4.1	1.9	4.0	1.9	4.0	1.9	3.9
SG-4 (43.1 m)	2.3	3.8	2.1	3.8	2.5	4.0	2.4	3.8
SG-5 (65.2 m)	3.0	3.6	2.7	4.0	2.9	3.8	3.0	3.7
U bend (69.0 m)	3.1	3.6	2.8	4.0	3.0	3.6	3.1	3.6
D/C (75.4 m)	3.2	3.5	3.0	3.8	3.2	3.5	3.2	3.5



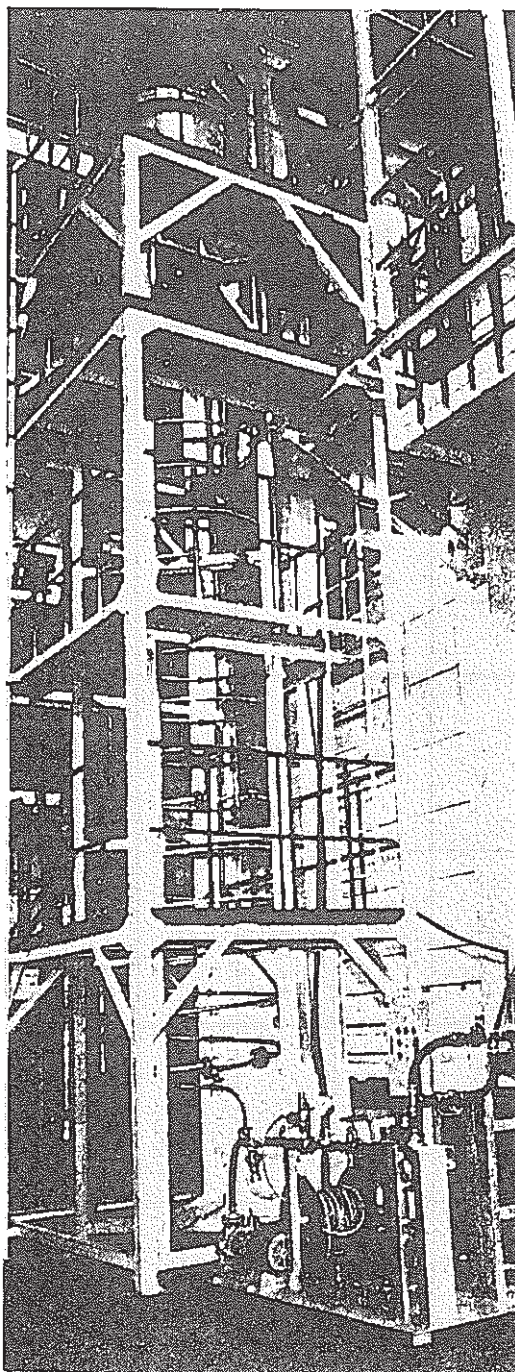


図-6.1 ヘリカコイル伝熱管試験体

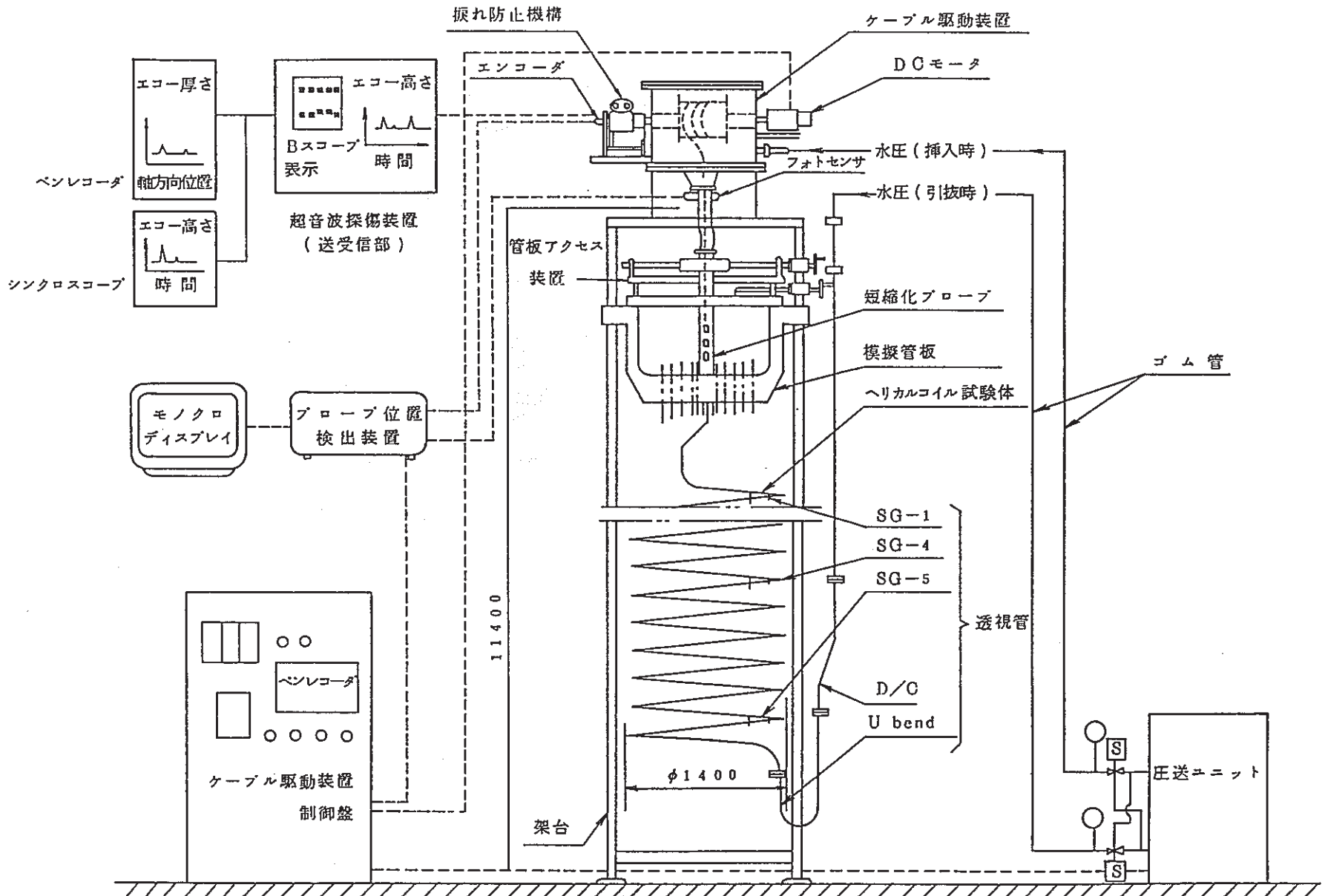
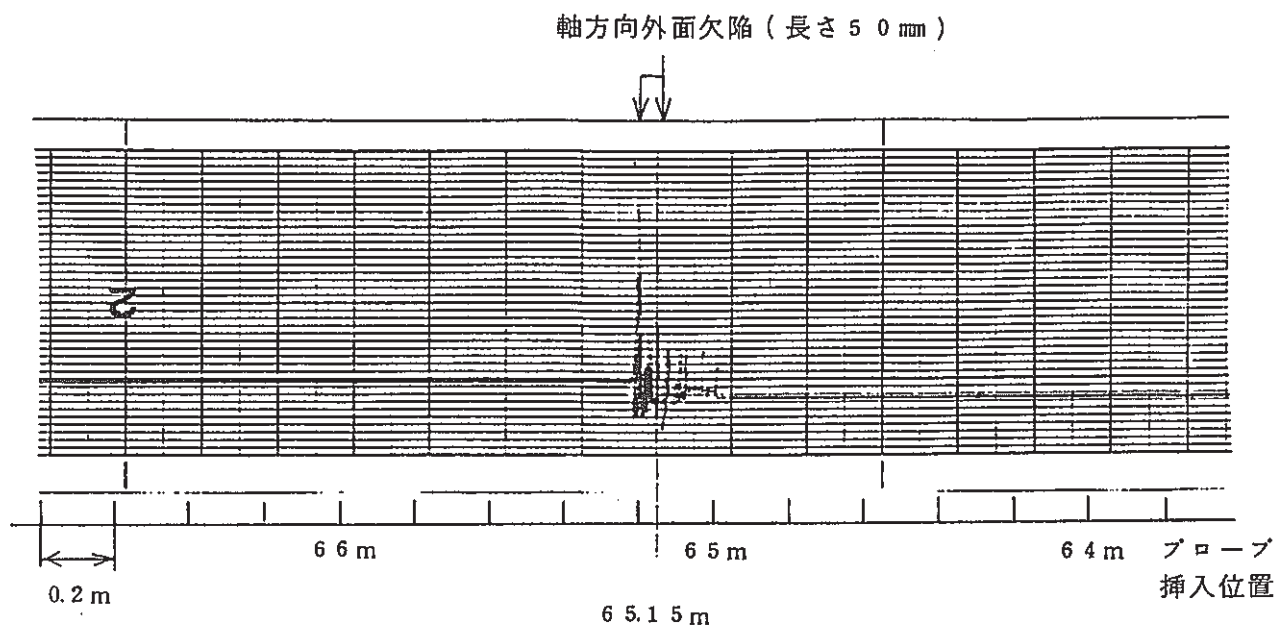
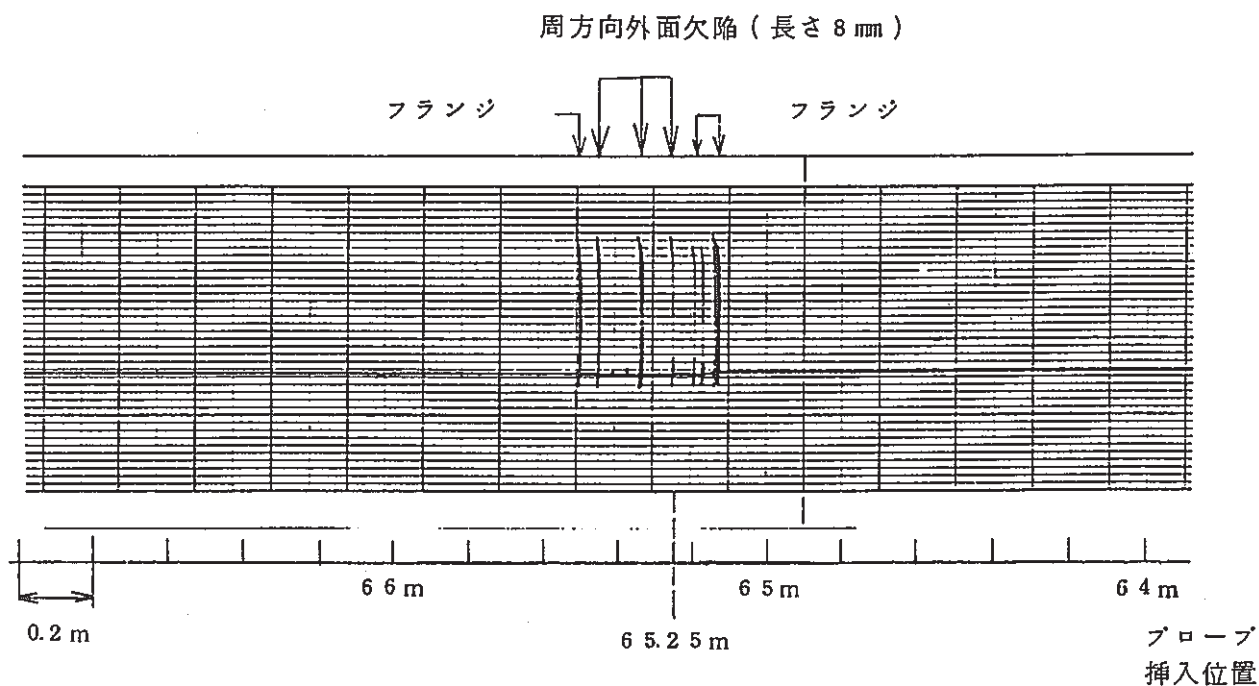


図-6.2 組合せ試験装置構成図



(a) 軸方向欠陥探傷結果



(b) 周方向欠陥探傷結果

図-6.3 組合せ試験における軸及び周方向欠陥探傷結果の記録例

（複合プローブ，探傷速度：4 m/min  
TP 6.2：SUS 304 HTB，R=700 mm）

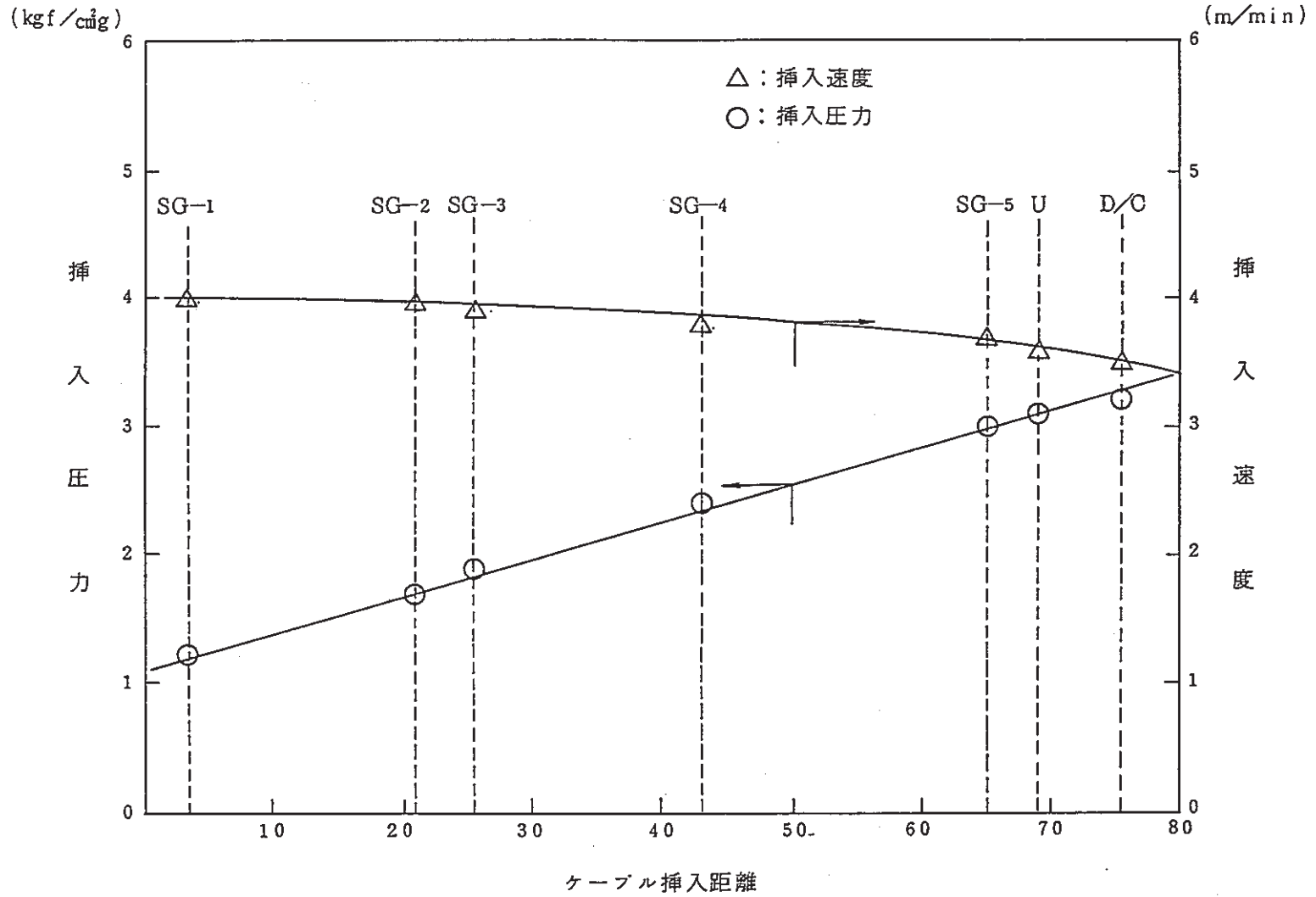


図-6.4 ケーブル挿入距離と挿入圧力、挿入速度

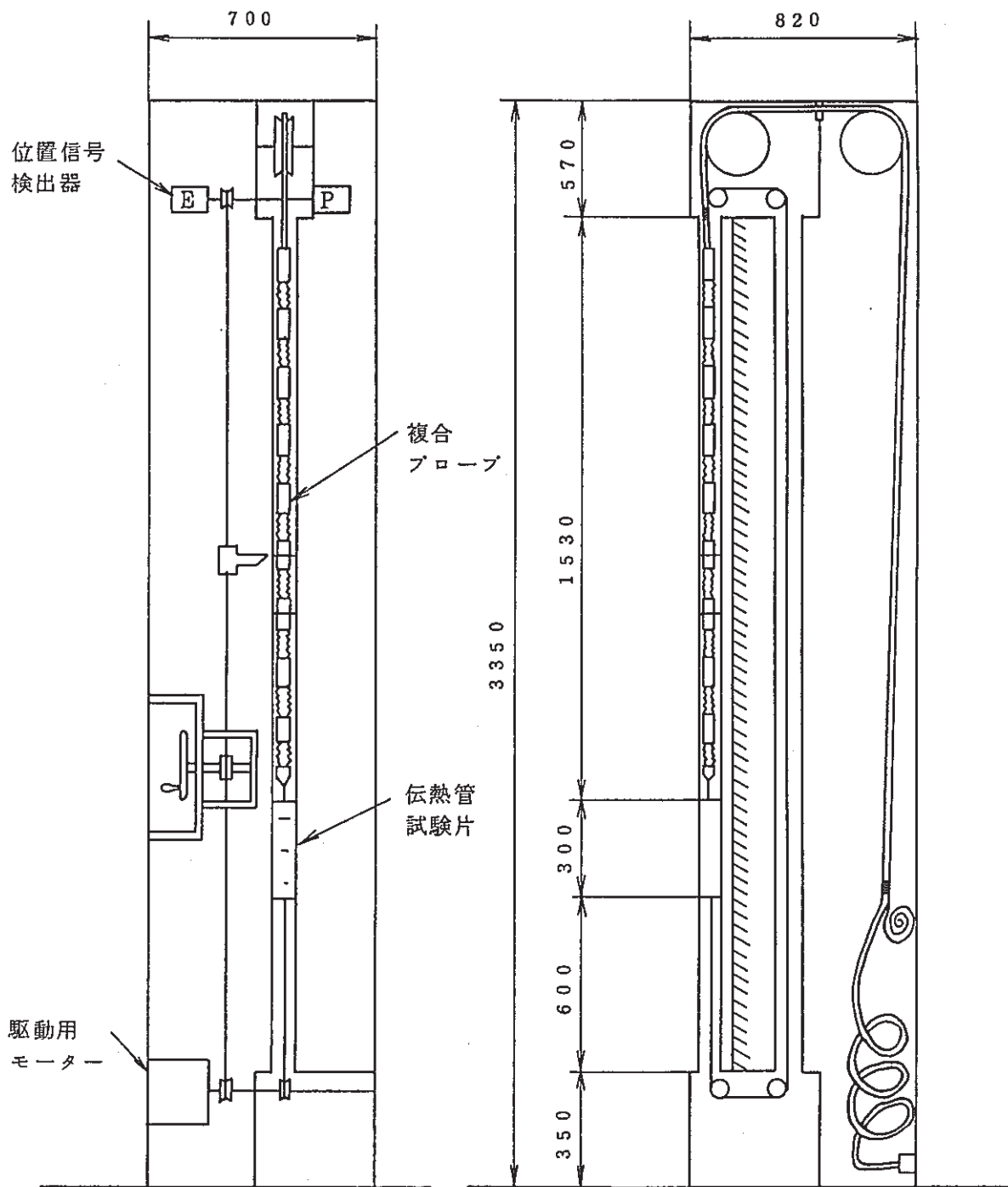


図-6.5 探傷試験用モデル

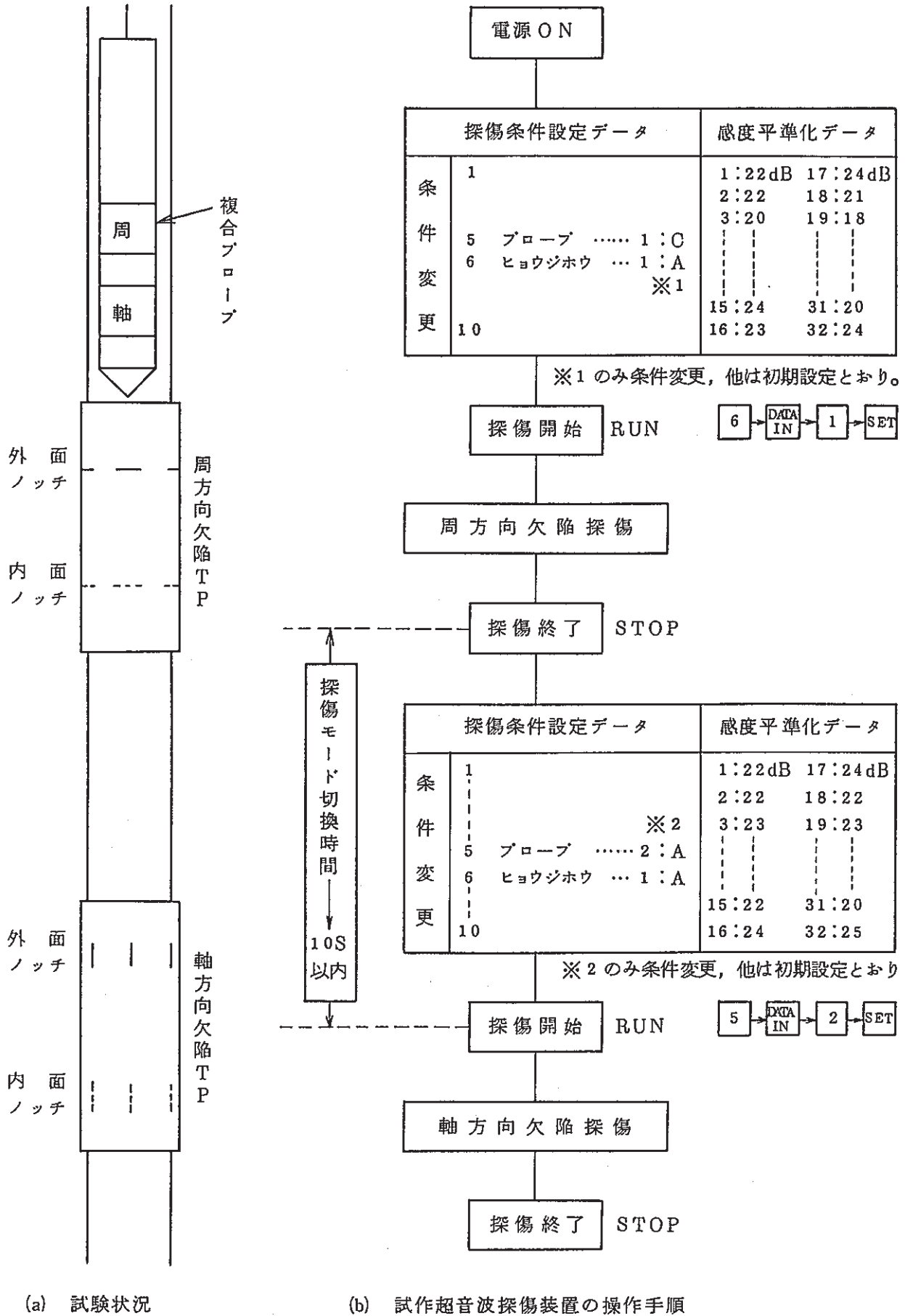
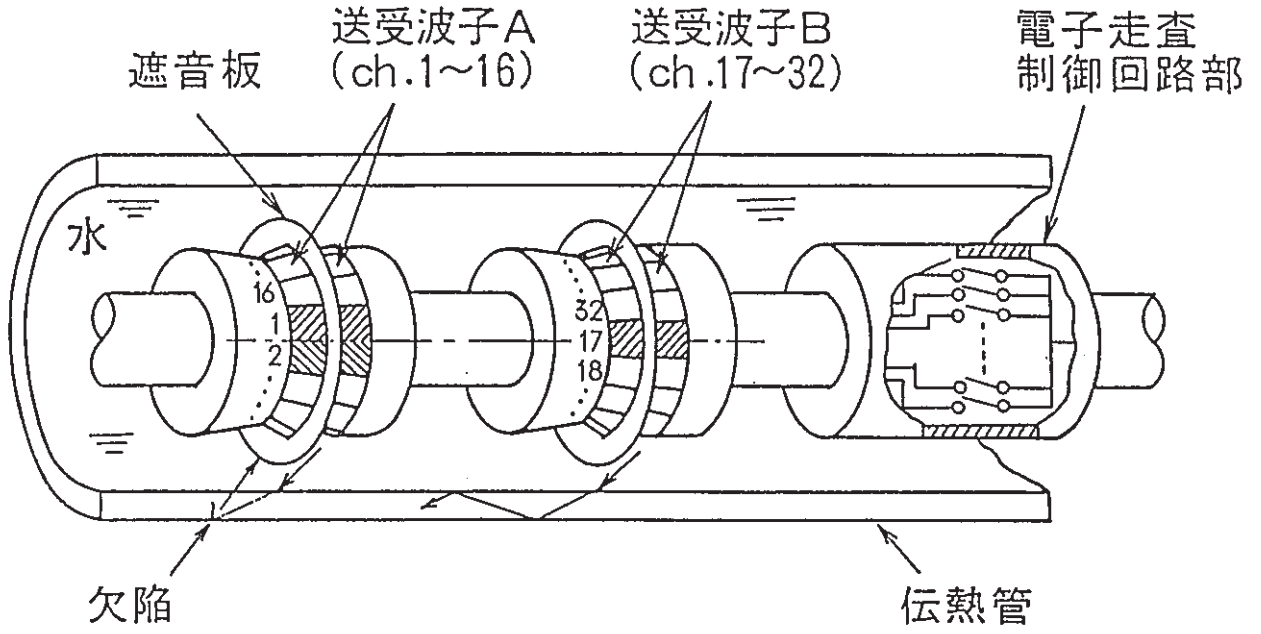
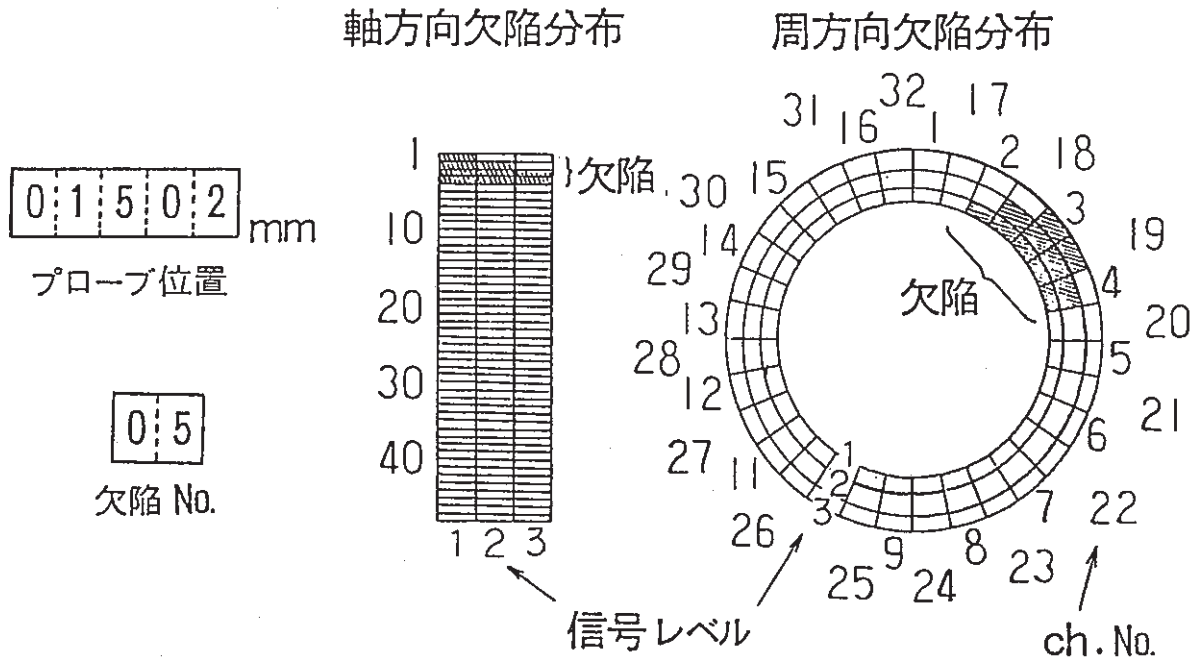


図-6.6 複合プローブによる探傷性の検討



(a) マルチアレイ型送受波子部



(b) 探傷結果表示例

図-6.7 探傷結果表示方式

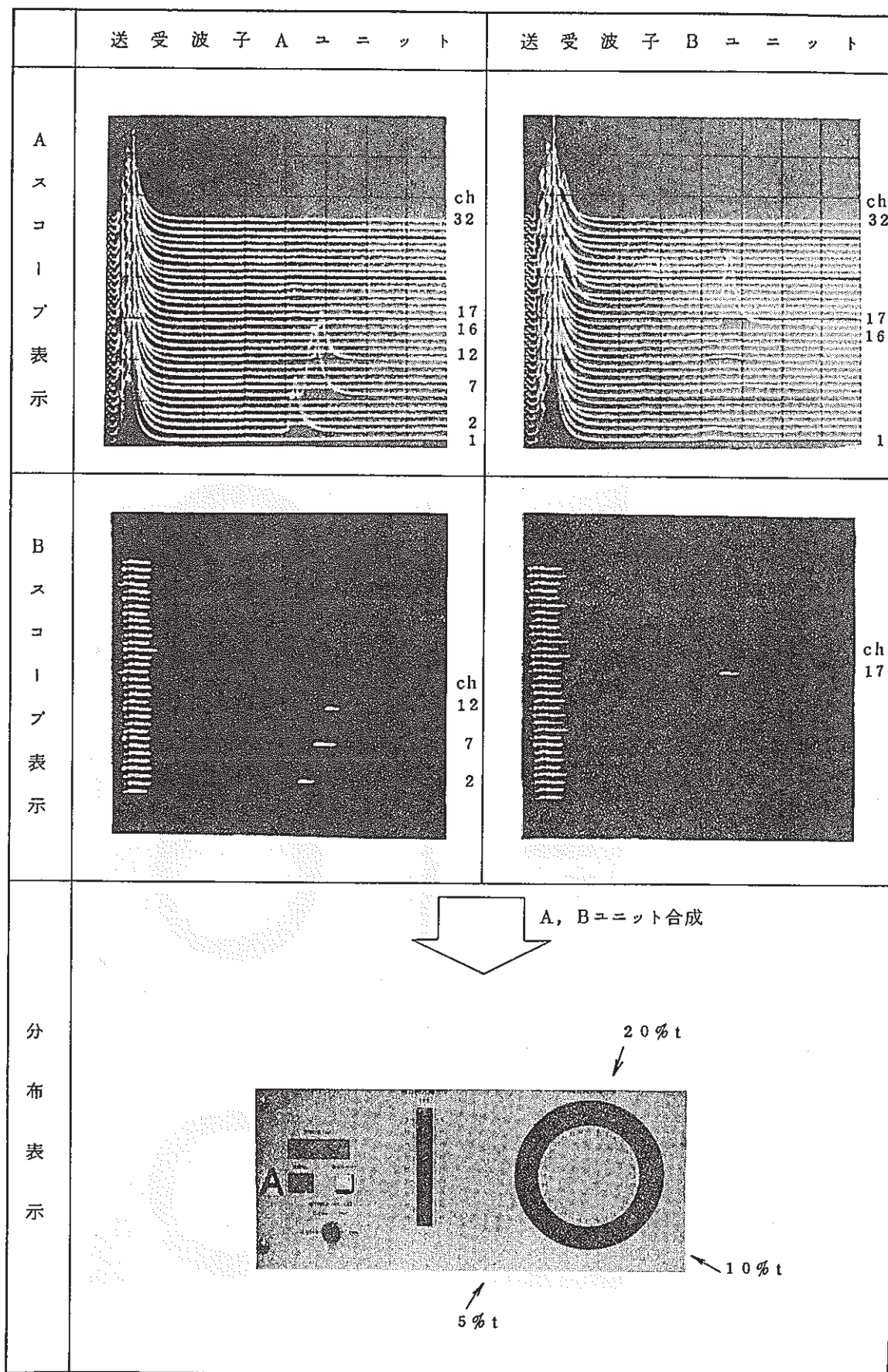
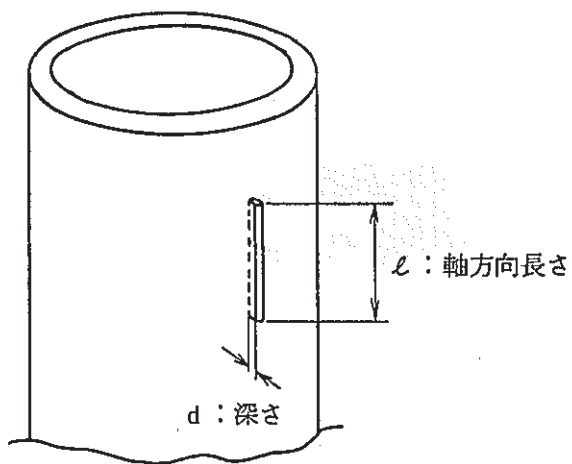
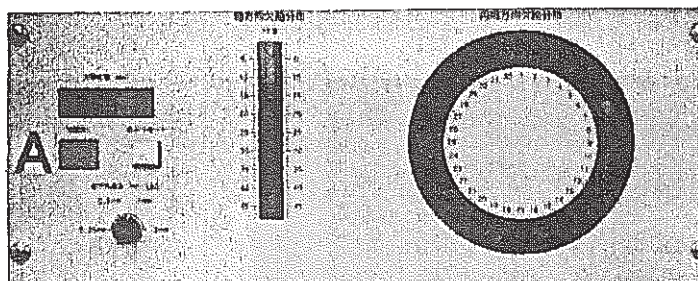


図-6.8 軸方向欠陥探傷結果例 (TP1、外面欠陥)

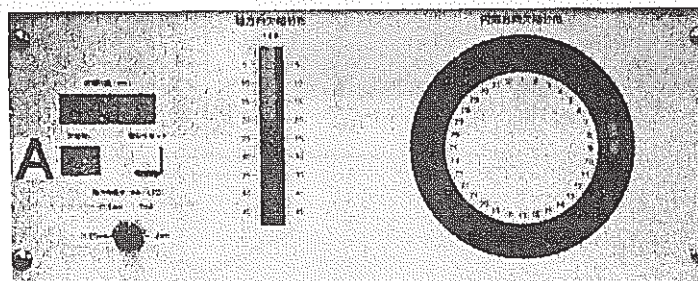




$\ell = 1.0 \text{ mm}$   
 $d = 0.7 \text{ mm}$



$\ell = 2.0 \text{ mm}$   
 $d = 0.7 \text{ mm}$



$\ell = 3.0 \text{ mm}$   
 $d = 0.7 \text{ mm}$

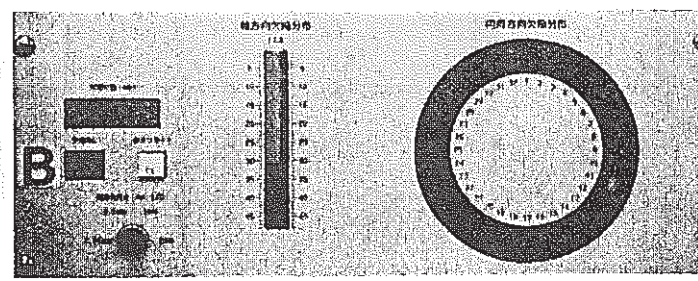


図-6.9 軸方向欠陥探傷結果表示例 (TP13)

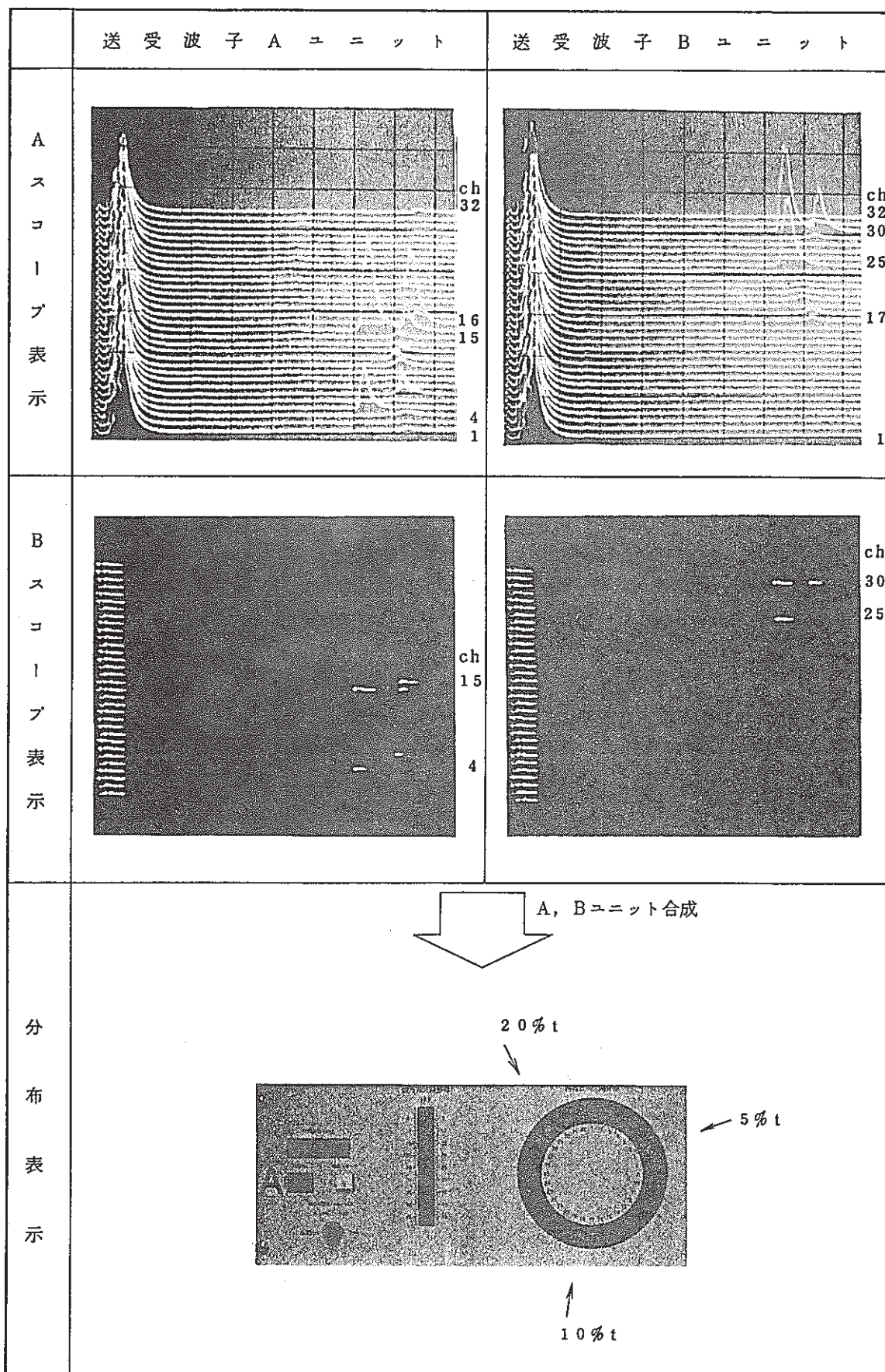


図-6.10 周方向欠陥探傷結果表示例 (TP1、外面欠陥)

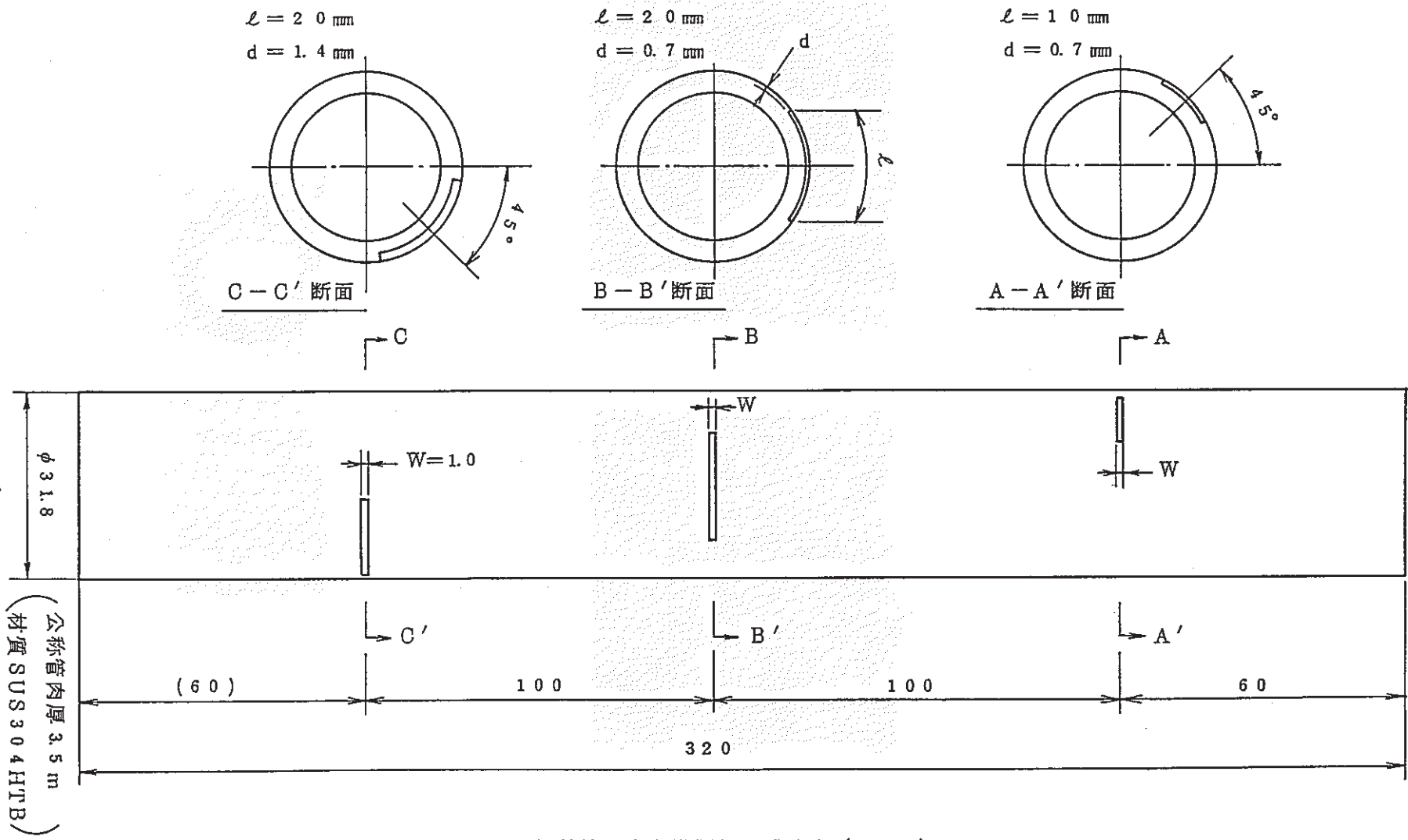


图-6.11 伝熱管周方向模擬欠陥試験片 (TP12)

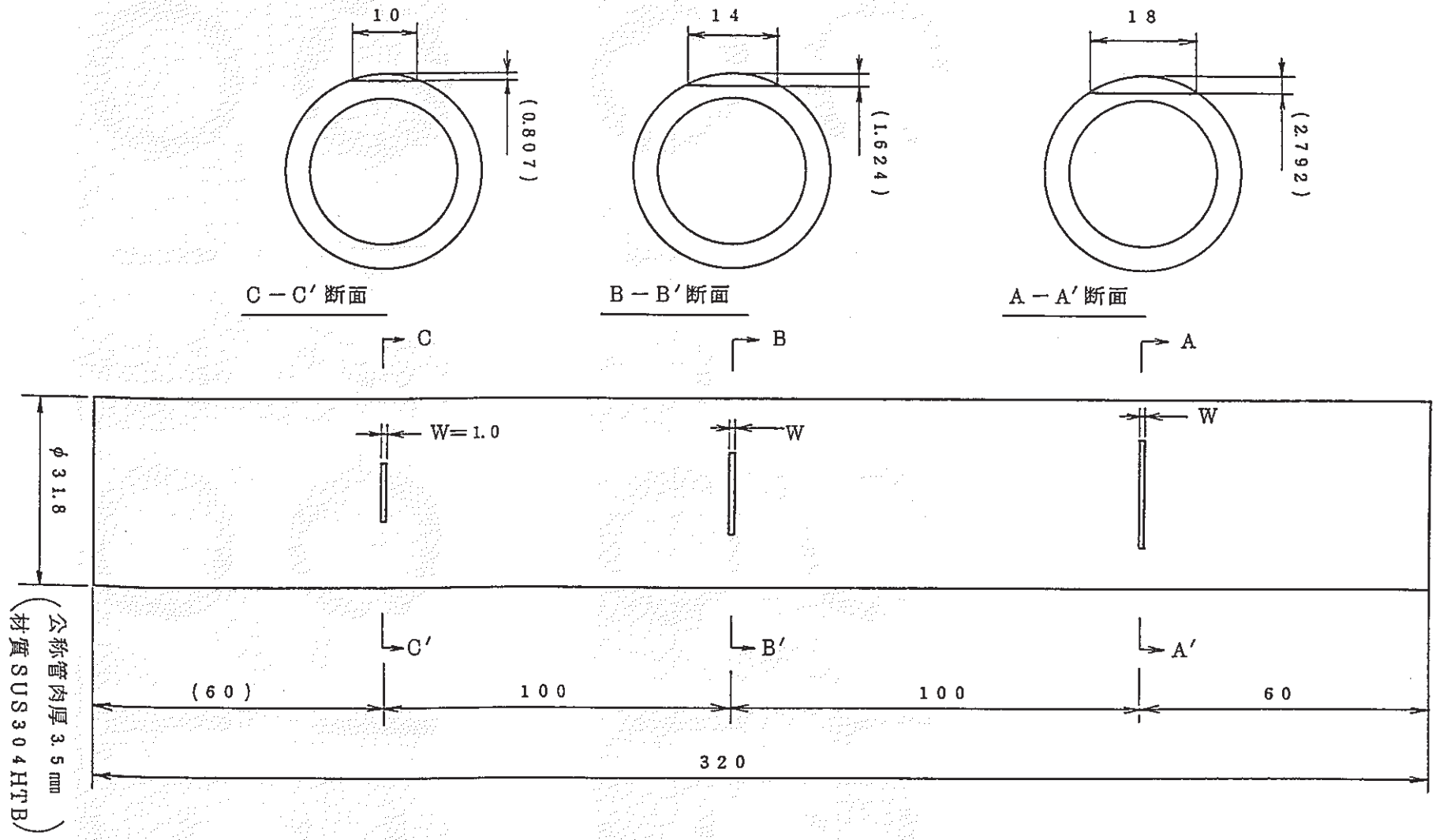


图-6.12 伝熱管周方向模擬欠陥試験片 (TP11)

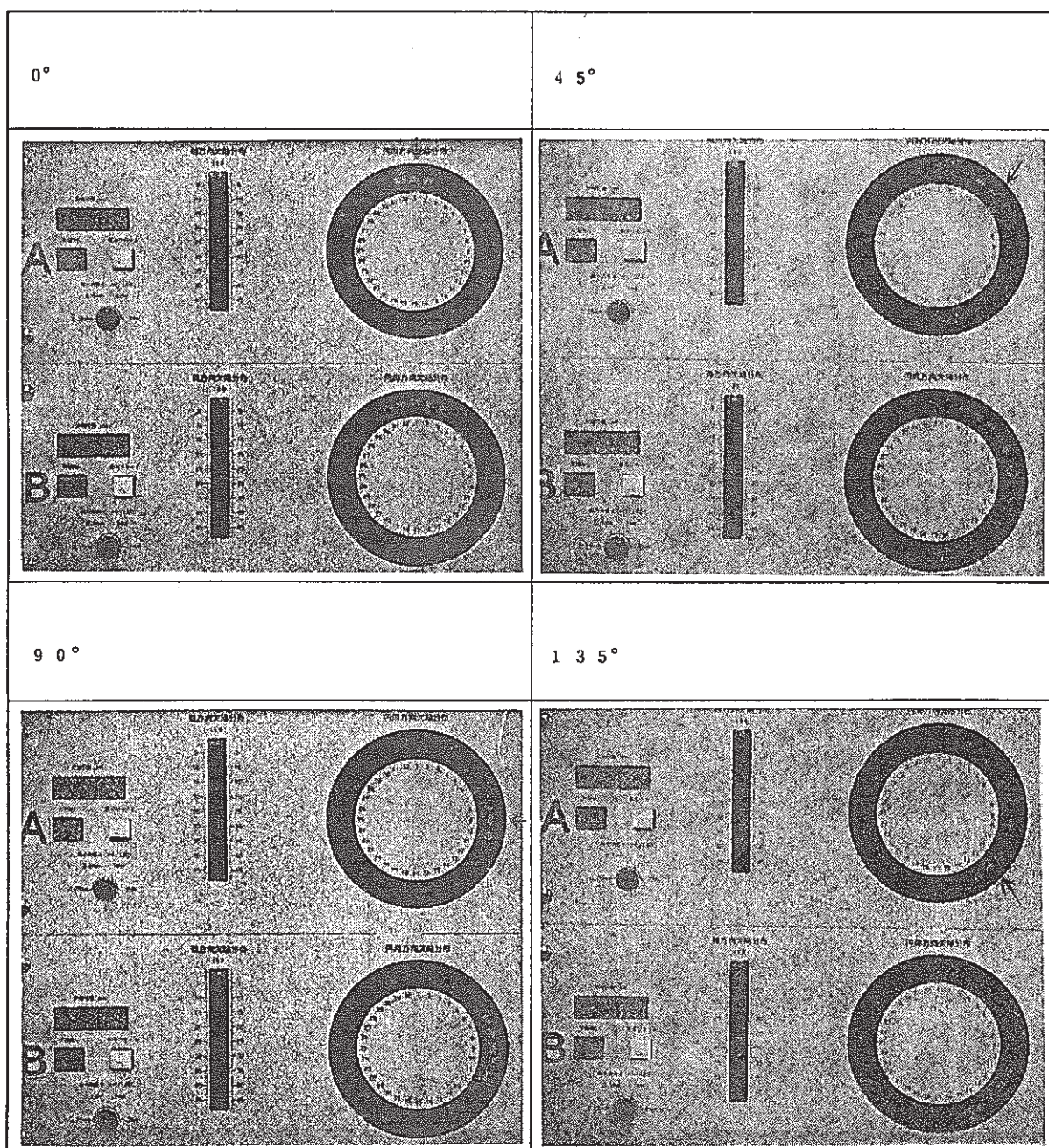
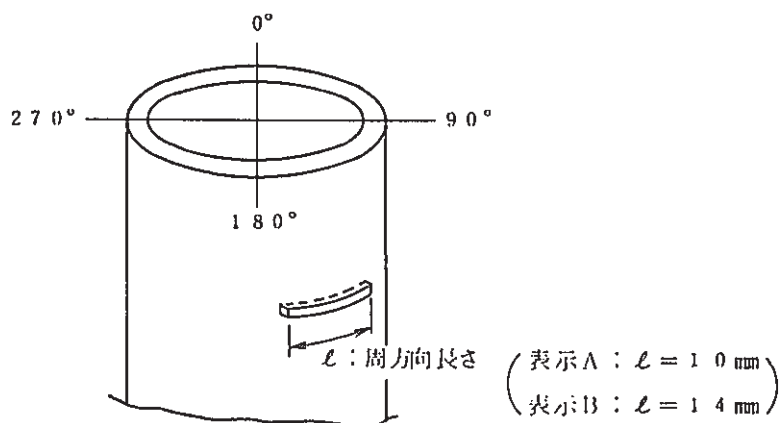


図-6.13 超音波ビームの電子的回転走査による管周方向深傷性 (TP11) (1/2)

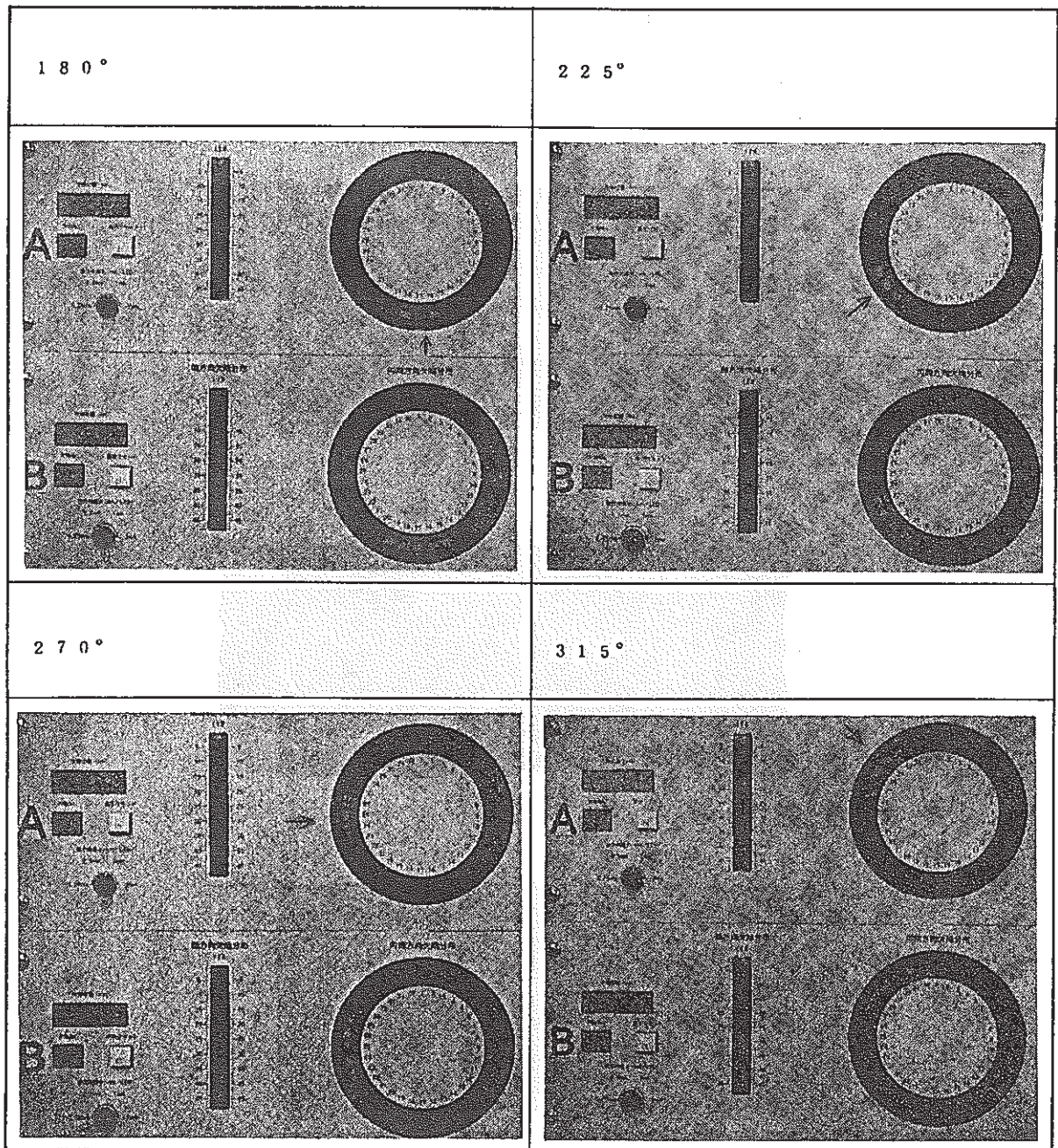
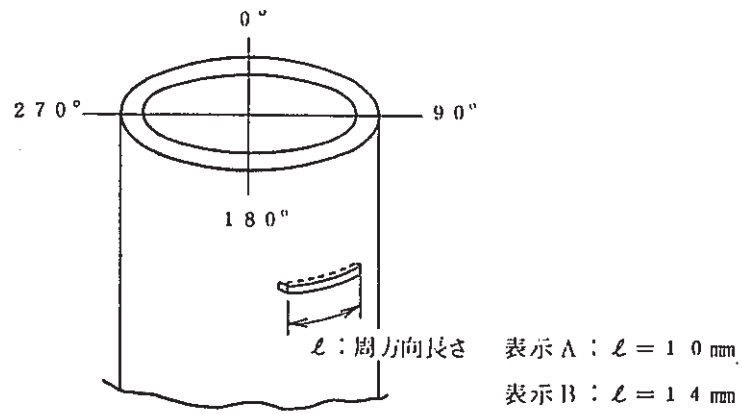
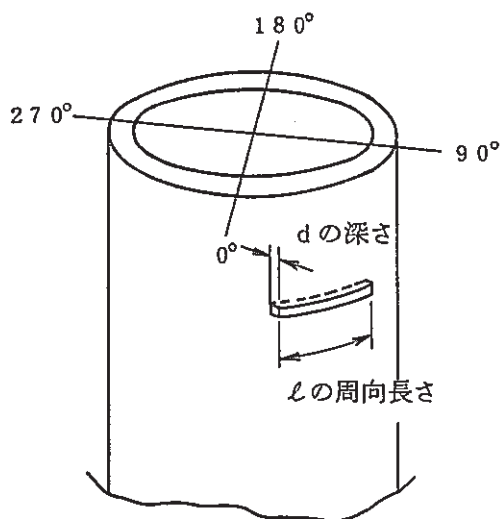
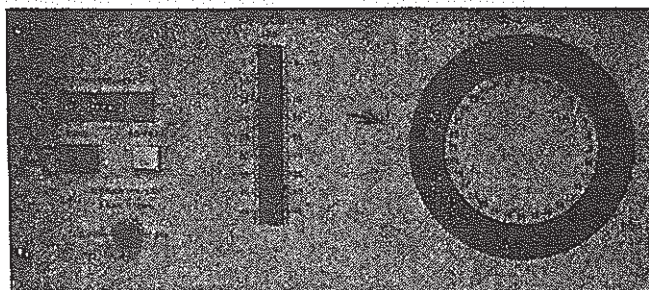


図-6.13 超音波ビームの電子的回転走査による管周方向深傷性 (TP11) (2/2)



$\ell = 10 \text{ mm}$

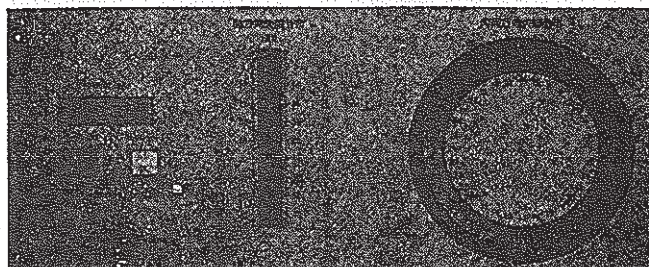
$d = 0.7 \text{ mm}$



( 0° )

$\ell = 20 \text{ mm}$

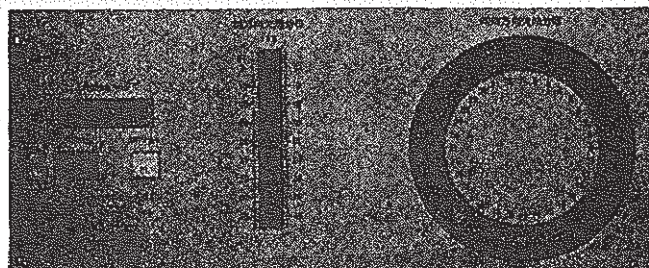
$d = 0.7 \text{ mm}$



( 45° )

$\ell = 20 \text{ mm}$

$d = 1.4 \text{ mm}$



( 90° )

図-6.14 周方向欠陥の分布表示例 ( TP 1 2 )

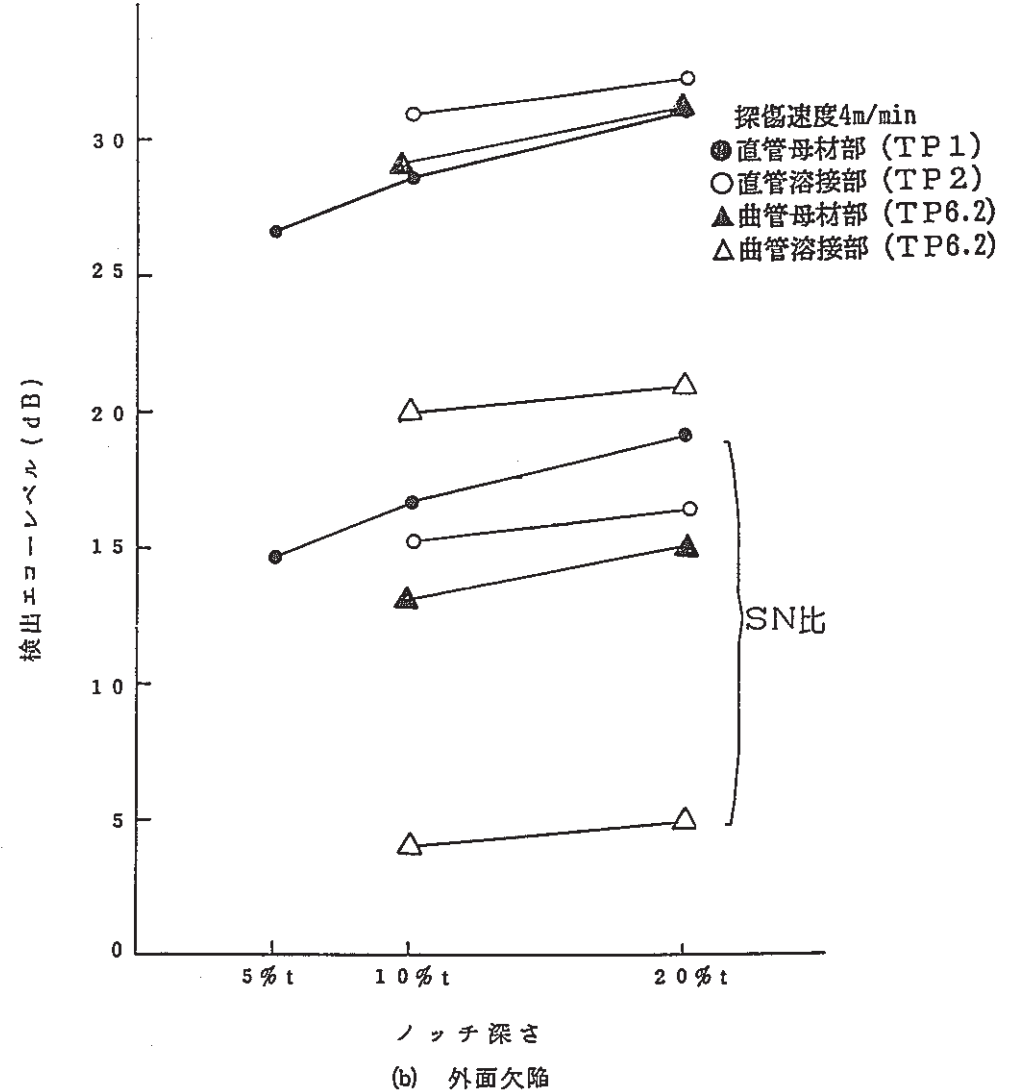
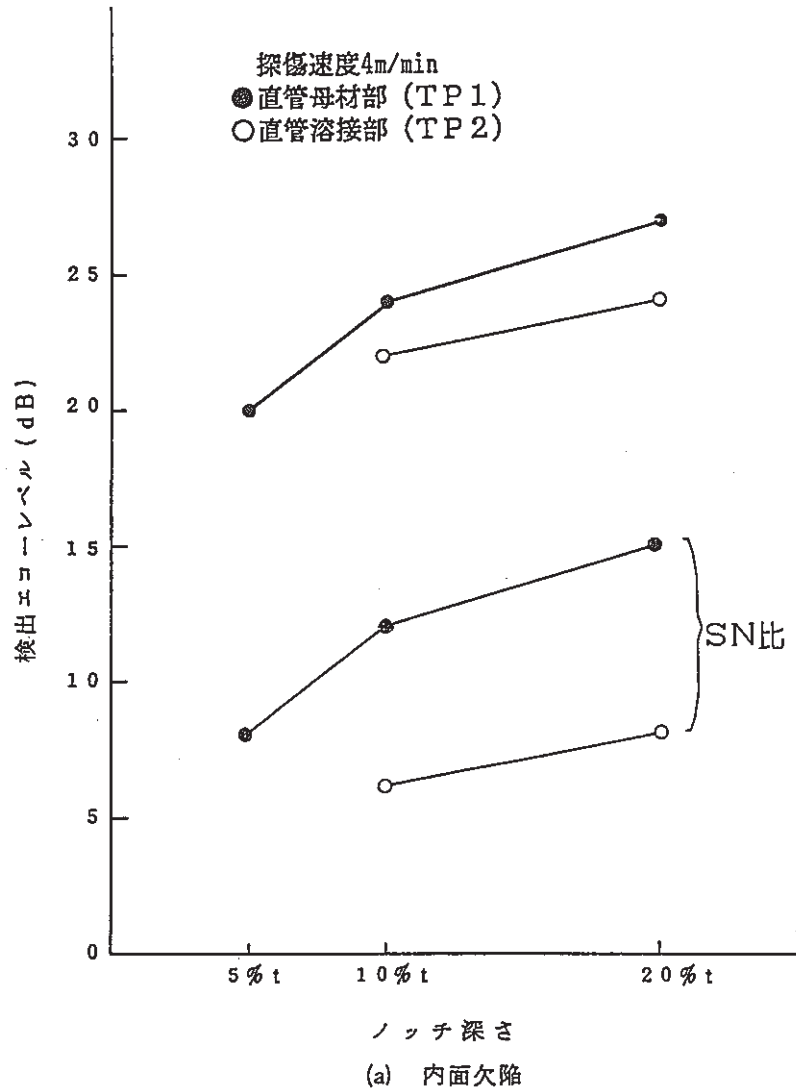


図-6.15 軸方向欠陥探傷結果



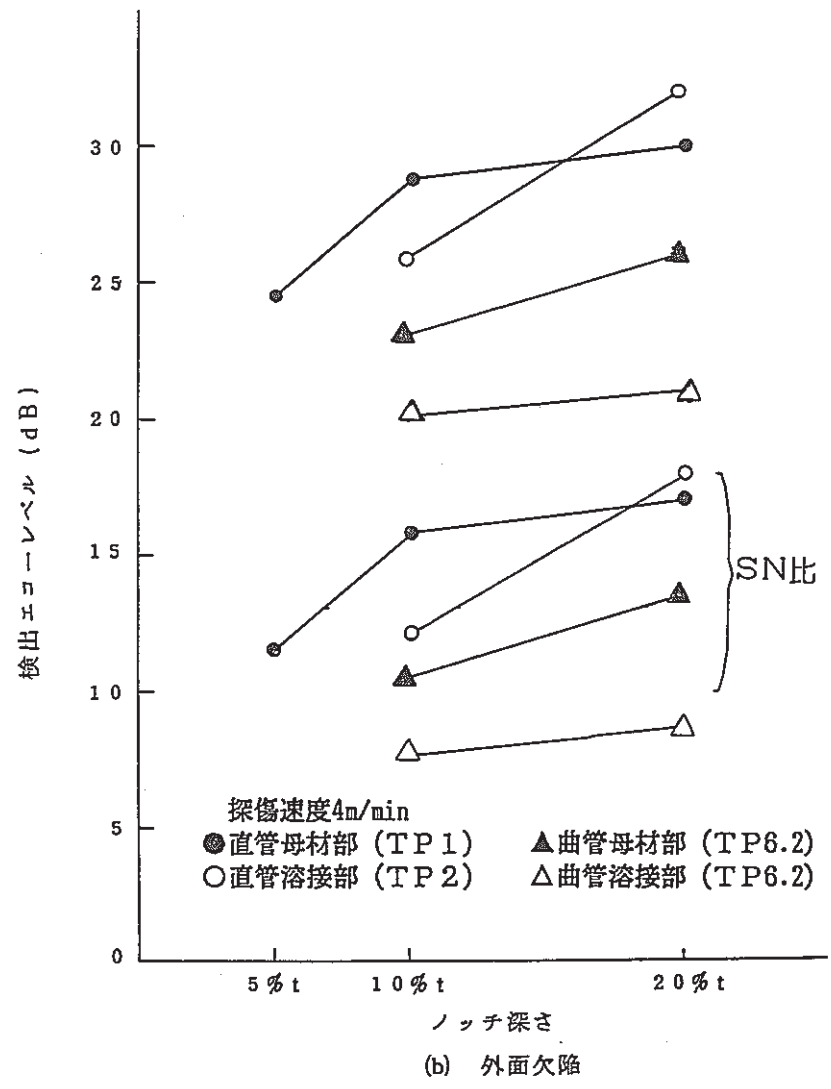
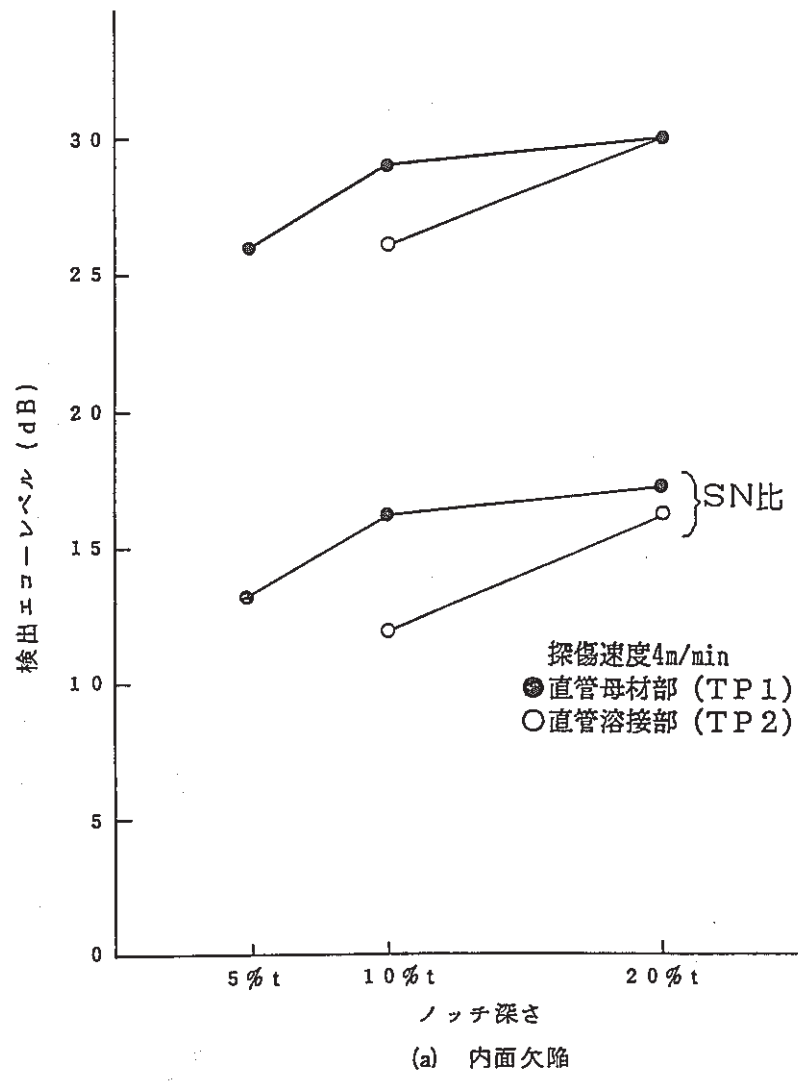
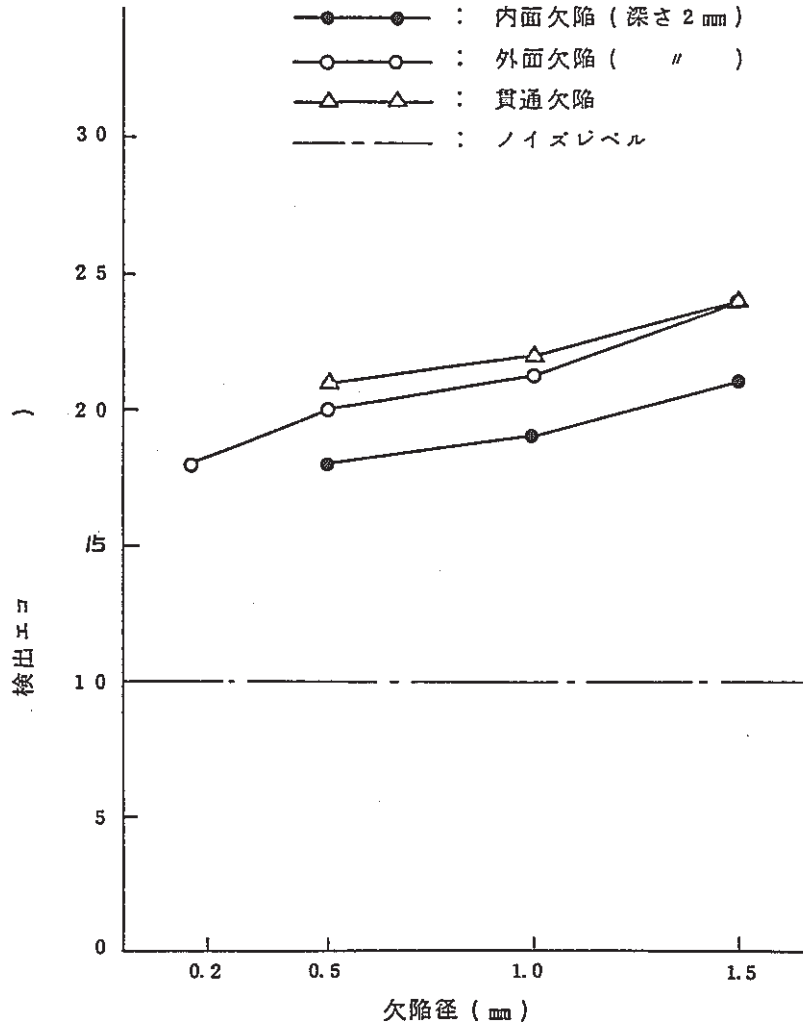
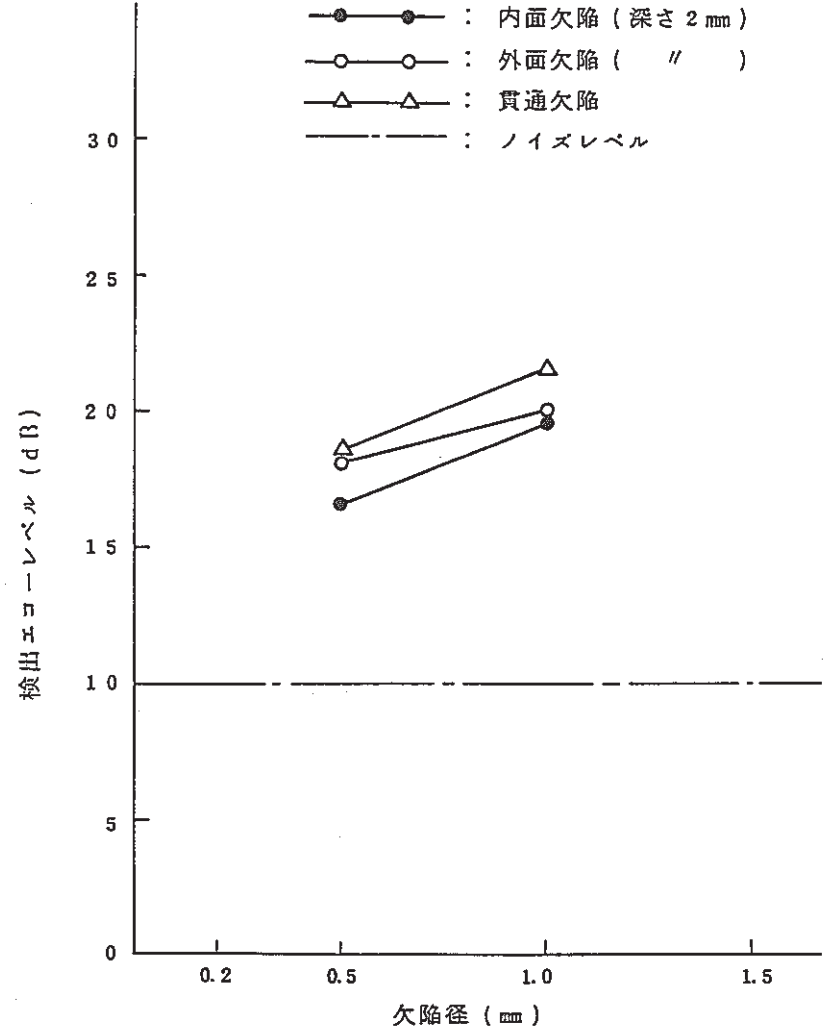


図-6.16 周方向欠陥探傷結果 (直管、母材部)



(a) ピンホール欠陥探傷結果  
〔母材部, 直管, TP1 (STBA24)〕



(b) ピンホール欠陥探傷結果  
〔溶接部, 直管, TP4 (STBA24)〕

図-6.17 ピンホール欠陥探傷結果

## 7. まとめ

## (1) プローブ

- i) プローブ方式は探傷速度の高速化という観点で検討した結果、マルチアレイ型複合プローブ方式とした。
- ii) 回路構成
  - a) 回路方式は3種類の欠陥探傷用送受波子96chを順次時系列走査する方式に比し探傷速度が3倍になる3種並列駆動32ch時系列走査方式とした。
  - b) パルス回路をプローブ内へ内蔵し、ケーブル本数を減らすことで同軸ケーブルの外径減少を図った。同時にパルス発生部が送受波子に接近したことで検出感度が向上した。又、パルス切換方式はユニット数が少なく高圧パルス電圧に対する遮断特性も良い高圧パルス発生回路4系統とトリガ回路1系統の組合せとした。
  - c) 回路ユニット数はカウンタ回路、トリガ切換回路を共用化し、24ユニット構成とした。
  - d) 120mケーブルの中間部に中継アンプを設け信号の感度減衰対策に対応した。
- iii) 構成部品
 

構成部品は探傷感度の向上、水シール性、耐久性等を考慮したものとした。
- iv) 試作複合プローブの基本的な探傷性能
  - a) 管周方向の感度分布は軸方向、周方向各欠陥共、最大と最小の感度差は10dB程度であった。
  - b) 管周方向欠陥補足範囲におけるch間の感度低下は軸方向プローブで最大5 dB、周方向プローブで最大3 dBを示した。
  - c) 欠陥検出能

	母材	溶接部
・ 軸方向欠陥	5%t	10%t
・ 周方向欠陥	5%t	10%t
・ ピンホール欠陥	φ 0.2	φ 0.5

## (2) プローブ位置検出

ケーブル巻取り部のエンコーダと浮子間隔を検出するフォトカプラントの組合せにより $\pm 500$ の誤差で検出できた。更にケーブルの片寄りを考慮することにより $\pm 200$ まで向上でき、又超音波探傷器より溶接部信号を入力し補正すれば $\pm 100$ mmまで向上できる。

## (3) 超音波探傷装置

装置本体の基本動作確認試験、並びに模擬複合プローブ内蔵回路と接続して行った電気的な探傷機能確認試験の結果、基本動作及び各種の機能は所期の目標仕様を十分満足し、複合プローブに整合するものであることを認めた。

## (4) 組合せ試験

i) プローブ圧送性

実規模ヘリカコイルへのプローブ挿入試験を行った結果、比較的低い圧力（挿入：max 3.2atg、引抜：max 1.8atg）で挿入引抜が行えた。

ii) 電子走査により管全周の探傷が可能であり、感度平準化回路により検出感度が均一化できることが確認できた。

iii) 4m/min以上の高速で探傷できることを確認できた。

iv) 欠陥検出性能は所定の性能が得られた。

## 8. おわりに

以上マルチアレイ型複合プローブについてのR & D成果について述べてきたが、本装置の実機への対応について、走査中での具体的な欠陥探傷性能、プローブ挿入引抜位置検出法、データ処理方法、伝熱管水抜き乾燥法等が懸案事項としてあげられる。

走査中の具体的な欠陥探傷性能については、現状走査中でRFチャートにて10%tの欠陥が検出されていることを確認しているが、どの程度のS/N比で検出できているかはデータ処理装置が未開発なことより詳細な値は判明していない。又、プローブ挿入位置検出法についても伝熱管の溶接位置による補正で±100mmの精度で位置検出ができたが、実機伝熱管では製作工程で溶接位置を明確に管理していないことより挿入装置側のみで位置検出を行わなければならない。挿入装置のみでの位置検出精度は実質0～500mmでありヘリカルコイル部でのプローブ片寄りを補正することで0～200mmの高い精度を得ている。実機では片寄り補正はデータ処理装置でソフト処理を行うことにより高い精度を確保するが、これにはバックデータとなる実機伝熱管の正確な製作寸法等の収集が必要である。このほか当該R & Dでは実施していない伝熱管の水抜き乾燥についてもメーカーでの自主研究データの提示を求め検討していく必要がある。

以上より当該R & Dでは本装置各要素レベルでの機能性能に関しては充分所定の性能を得ていることが確認されたが、システムとしての成立性に関しては未だ不十分である。本装置実機はここで確認された各要素レベルでの技術を基にこれらを組合せ、システムとして運用しなければならない。本装置実機的设计、製作においてはシステムとしての成立性に関し、各装置間のインターフェース、プローブ挿入状態での欠陥検出能等に関し、詳細な検討を実施する必要がある。

参考文献

- 1)日立製作所、バブコック日立：蒸気発生器伝熱管健全性確認試験  
超音波探傷法試験、PNC SJ202 81-05,1981
- 2)日立製作所、バブコック日立：蒸気発生器伝熱管健全性確認試験  
超音波探傷法試験（Ⅱ）、PNC SJ202 82-20,1982
- 3)日立製作所、バブコック日立：蒸気発生器伝熱管健全性確認試験  
超音波探傷法試験（Ⅲ）、PNC SJ202 83-13,1983
- 4)日立製作所、バブコック日立：蒸気発生器伝熱管健全性確認試験  
超音波探傷法試験マルチアレイ型  
プローブ実用化試験、PNC SJ202 84-11,1984
- 5)日立製作所：蒸気発生器伝熱管健全性確認試験、超音波探傷装置実用化試験、  
PNC SJ202 85-14,1985
- 6)日立製作所：蒸気発生器伝熱管溶接部ISI用超音波探傷法の開発、SJ-202 79-13,1979
- 7)U.S.N.R.C : Regulatory Guide、 1.83