

# 高速増殖炉原型炉「もんじゅ」蒸気発生器伝熱管超音波探傷システムの開発

## Development of the Ultrasonic Flaw Detection System for Prototype FBR "Monju" Steam Generator

高速増殖炉蒸気発生器の伝熱管を短時間に精度良く検査し、その健全性を確認するために必要とされる伝熱管超音波探傷システムを開発し、機能実証のため全体システム総合試験を実施した。

本システムは、電子走査式マルチアレイ型超音波探傷プローブ(複合型)を水流圧送して管内側から伝熱管を探傷することを特長としており、長さ約100mのヘリカルコイル伝熱管を、探傷速度4 m/minで各種欠陥(周方向欠陥、軸方向欠陥、減肉欠陥)の同時探傷を行なう機能をもっている。また探傷性能として、実験室的には伝熱管肉厚の5%相当(0.2mm)の深さの欠陥を検出することが可能である。全体システム総合試験では、「もんじゅ」蒸気発生器の実寸大伝熱管を用いて、探傷プローブの管内挿入性と欠陥(20%肉厚深さ)探傷性を確認した。

阿部興司\* Kōji Abe  
 木野裕敏\*\* Hirotoshi Kino  
 武捨義則\*\* Yoshinori Musha  
 梶山 茂\*\*\* Shigeru Kajiyama  
 七田弘之\*\*\*\* Hiroyuki Shichida

### 1 緒 言

高速増殖炉蒸気発生器は、高温のナトリウムにより水を加熱し高温高压の蒸気を発生させる熱交換器であり、その伝熱管はナトリウムと水・蒸気の隔壁を構成することから、高い信頼性をもつように設計・製作されるが、更にこの伝熱管の健全性を確認するための非破壊検査法として、超音波探傷技術の開発が進められてきた。蒸気発生器の伝熱管は、**図1**に示すようにヘリカルコイル状に成形された小口径長尺管の多層構造となっており、その構造上、伝熱管の外側から伝熱管を検査することは困難である。したがって、伝熱管の管内に探傷プローブを挿入して検査する技術が必要とされる。

日立製作所は、この伝熱管内挿入式超音波探傷技術の開発に早くから着手し、ヘリカルコイル部及びベンド部をもつ小口径長尺管内に探傷プローブを挿入する技術、及び伝熱管を管内側から超音波探傷する技術を確立してきた。特に近年は、超音波振動子を小型電動機で回転させながら探傷する従来方式に替えて複数の超音波振動子をプローブ上に配置して、電子的に走査するマルチアレイ型探傷プローブの開発に成功したことで、その探傷速度の飛躍的向上を実現させた。この新技術に加えて、各種欠陥を同時に探傷することができる複合プローブの開発、マルチアレイ型探傷プローブに対応する多重信号処理方式超音波探傷装置の開発、探傷プローブの伝熱管内への挿入駆動及び位置決め装置の開発、並びに探傷信号処理システムの研究を合わせて実施し、ここに蒸気発生器伝熱管超音波探傷システムとしての機能を達成するに至った。

本論文では、この蒸気発生器伝熱管超音波探傷システムの構成、機能、特長などについて述べる。

### 2 蒸気発生器伝熱管超音波探傷システムの構成

本システムは大別して、超音波探傷プローブ、超音波探傷装置、信号処理装置及びケーブル駆動・位置決め装置から構成されている。蒸気発生器伝熱管検査のため、蒸気発生器に接続された状態でのシステム構成を**図2**に示す。

超音波探傷プローブには、先端部分に超音波の送受波子ユニットが設置されており、電気回路ユニットを介して約100mの信号ケーブルに接続されている。送受波子ユニットとしては、各種欠陥(周方向欠陥、軸方向欠陥、減肉欠陥)検出用の

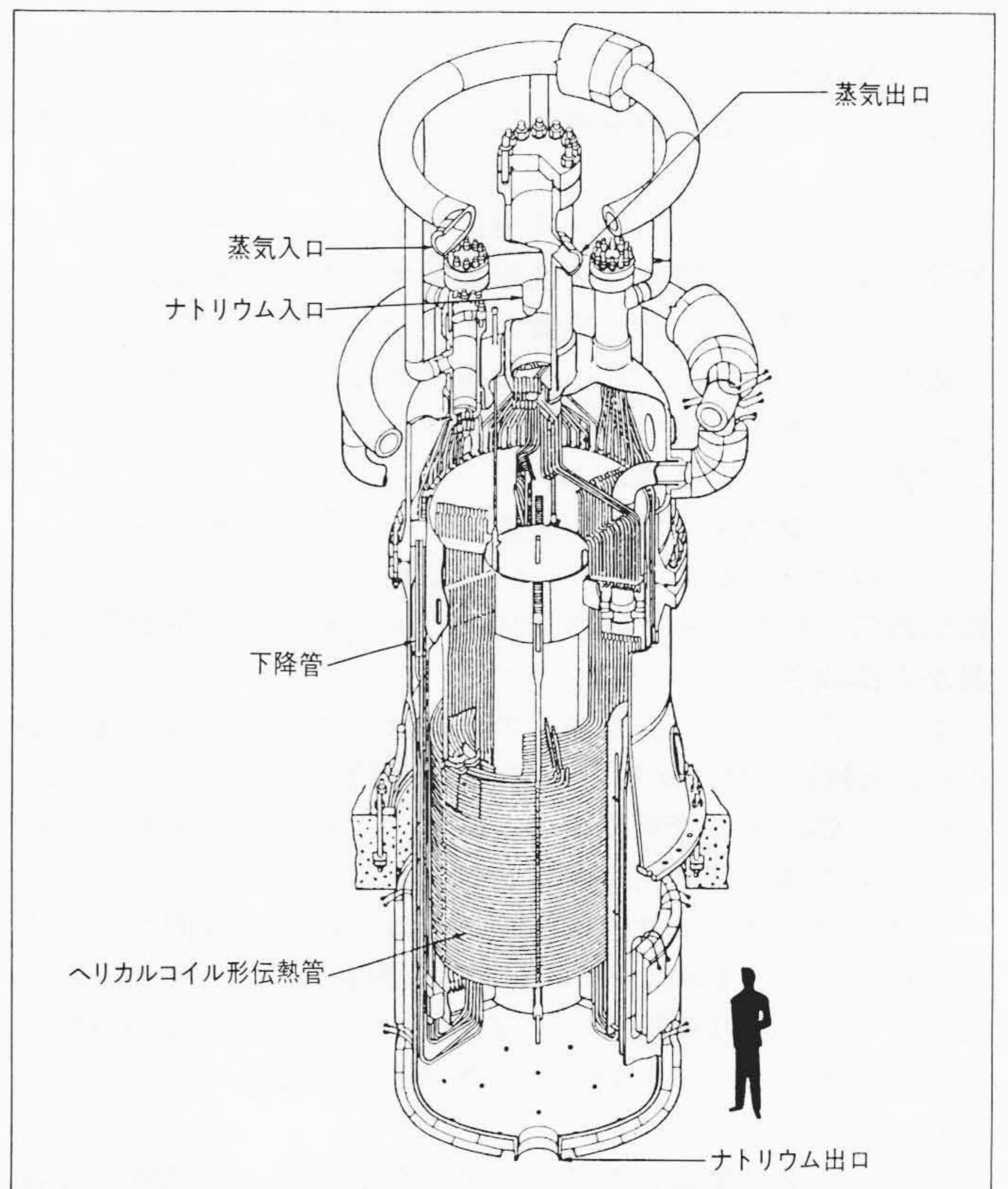


図1 蒸気発生器の構造 伝熱管は、ヘリカルコイル状に成形された小口径長尺管の多層構造となっており、入口管板、出口管板に集合し、接続されている。

\* 日立製作所日立工場 \*\* 日立製作所日立研究所 \*\*\* 日立製作所エネルギー研究所 \*\*\*\* バブコック日立株式会社呉工場

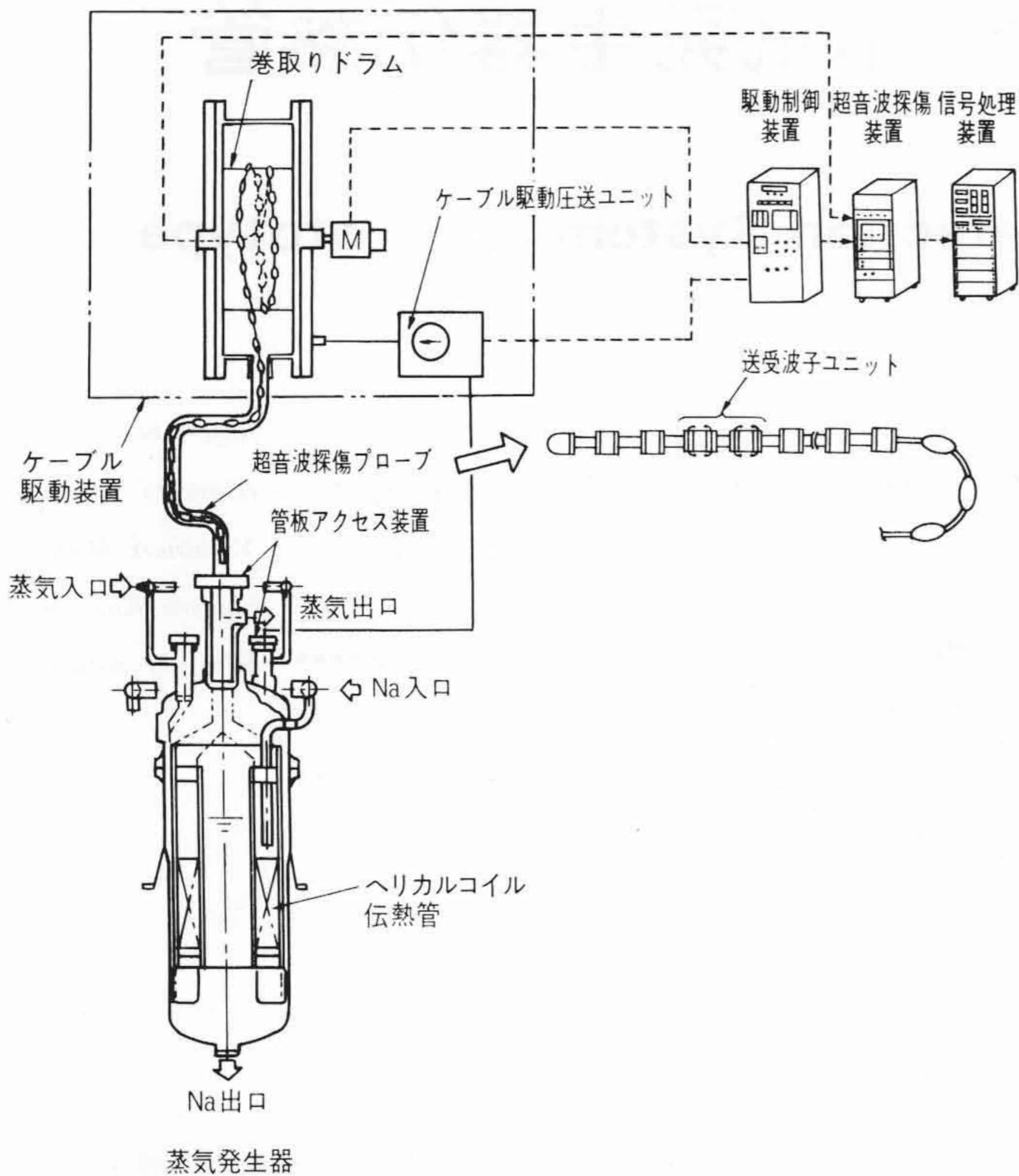


図2 蒸気発生器伝熱管超音波探傷システムの構成 本システムは、超音波探傷プローブ、超音波探傷装置、信号処理装置及びケーブル駆動位置決め装置から構成されている。

ものが連結された複合プローブが用いられる。

超音波探傷装置は、マルチアレイ型探傷プローブに対して超音波ビームの電子的走査の制御及び探傷信号の取込処理を行なう。

信号処理装置は、超音波探傷信号を、欠陥の有無、場所、欠陥の深さなどの情報に変換し表示するものであり、オンラインモニタ用の欠陥表示装置とオフライン処理のデータ収録装置から成っている。データ収録装置に取り込まれたデータは、データ処理装置で解析・処理されて欠陥分布、形状などが図表化されて出力される。

ケーブル駆動・位置決め装置は、ケーブル駆動圧送ユニットと巻取ドラムから成るケーブル駆動装置、並びに蒸気発生器伝熱管へ接続するための管板アクセス装置及び駆動制御装置から構成されている。

本システムの蒸気発生器への接続は、蒸気発生器の運転停止後、伝熱管の端部が集合している管板部を利用して行ない、出口管板部、入口管板部で各々管板アクセス装置を介して探傷システム側と蒸気発生器伝熱管側が結合される。

探傷プローブの伝熱管内への挿入は、出口管板側からの水流圧送による。水流は入口管板側に流れて、ケーブル駆動圧送ユニットに戻り循環する。探傷プローブを伝熱管から引き抜くときは、水流の方向を反転させることによって迅速に行なわれる。

以上、蒸気発生器伝熱管超音波探傷システムを構成する各装置類について述べたが、これらの、装置は小型可搬式に設計されており、伝熱管検査を実施するとき、蒸気発生器室への搬入設置を容易に行なうことができる。

表1に本システムの主な仕様を示す。本システムは、蒸気発生器の伝熱管材質によらず、高速(4 m/min)かつ高精度の

表1 蒸気発生器伝熱管超音波探傷システム仕様 本システムは、探傷プローブ径の調整により、管径が若干異なる伝熱管への使用も可能である。

項目	仕様			
探傷プローブ	型式	電子走査式マルチアレイ複合プローブ型		
	送受波子ユニット	対象欠陥	軸方向欠陥	周方向欠陥, ピンホール
		減肉欠陥		
		チャンネル数	32	32
		配置形式	送受左右配置形	送受前後配置形
		周波数	5 MHz	5 MHz
		調心機構	センタリングフィン	
		走査速度	3,750-15,000rpm	
超音波探傷装置	高速走査型多重信号処理方式			
探傷プローブ	探傷速度	4 m/min(プローブ挿入速度)		
駆動位置決めシステム	駆動方式	水流圧送・巻取りドラム方式		
	位置決め	3軸位置決め管板アクセス方式		
蒸気発生器伝熱管仕様	材質	Cr-Mo鋼, ステンレス鋼		
	寸法	管径31.8mm, 肉厚3.5-3.8mm, 管長~100m, ヘリカルコイル径~1,200mm, 小ベント半径~150mm		
検出可能欠陥例 (母材試験片)	軸方向欠陥 周方向欠陥 ピンホール欠陥 減肉欠陥 5%肉厚, 5%肉厚, φ0.5mm, 5%肉厚			

超音波探傷性能をもっている。また、管径31.8mm、肉厚3.5~3.8mm、ヘリカルコイル径1,200mmの伝熱管の管長約100mにわたり挿入でき、管全面を探傷する性能をもっている。またプローブ径に付加された調心フィンの調整により、管径が若干異なる伝熱管への使用も可能である。

### 3 電子走査式マルチアレイ型探傷プローブの開発

#### 3.1 探傷プローブの機能と構造

伝熱管内挿入式の超音波探傷プローブの開発過程では、1個の超音波振動子を電動機により回転させながら、管内に挿入して探傷する電動機駆動走査式の探傷プローブの開発も試みられたが、電動機の容量の制約から、管全面を検査するのに要する探傷速度は約0.2m/min程度であり、この探傷速度の改善が大きな課題であった。このため、日立製作所では昭和55年からマルチアレイ型探傷プローブの開発に着手し、超音波ビームを電子的回転走査する方式を採用することにより、4 m/minの高速に追従できる探傷性能を実現するに至った。

マルチアレイ型探傷プローブとしては、伝熱管で想定される欠陥の基本的性状である軸方向欠陥、周方向欠陥、減肉欠陥を検出するために、対応する種類のプローブ及びこれらを一体化した複合プローブを開発した。なお、ピンホール状の欠陥は、周方向欠陥検出プローブを用いて検出可能である。

この3種類の欠陥の探傷方式としては、伝熱管溶接部などでのSN比を向上させるために、図3に示すように、送波子と受波子を分割した二探触子法を適用することとした。すなわち、軸方向欠陥探傷用が送受左右配置形、周方向欠陥探傷用が送受前後配置形、減肉欠陥探傷用が送受分割形にしてある。

各種送受波子は遮音板を介して16対の送受波子が円周方向に配列された構造となっている。軸方向欠陥探傷用送受波子は、3mm×2mmの平面振動子を16個ずつ配列したが、周方向欠陥探傷用と減肉欠陥探傷用送受波子は、チャンネル境界での感度低下を少なくするために、リング状の振動子を円周方向に16個分割したものを採用した。ただし、管の全周にわたってできるだけ均一な欠陥検出感度を得るため、32対の送受波子で管の全周を網羅することとし、一組当たり16対の送受波子から成る2組の送受波子ユニットを縦列に連結して前後の送受波子がチャンネル境界での感度低下を相互に補間するよ

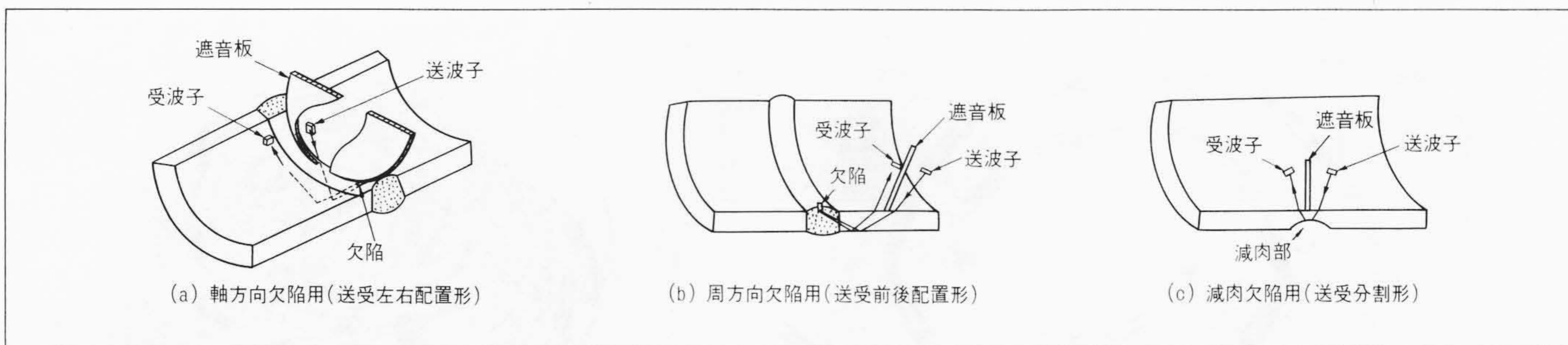
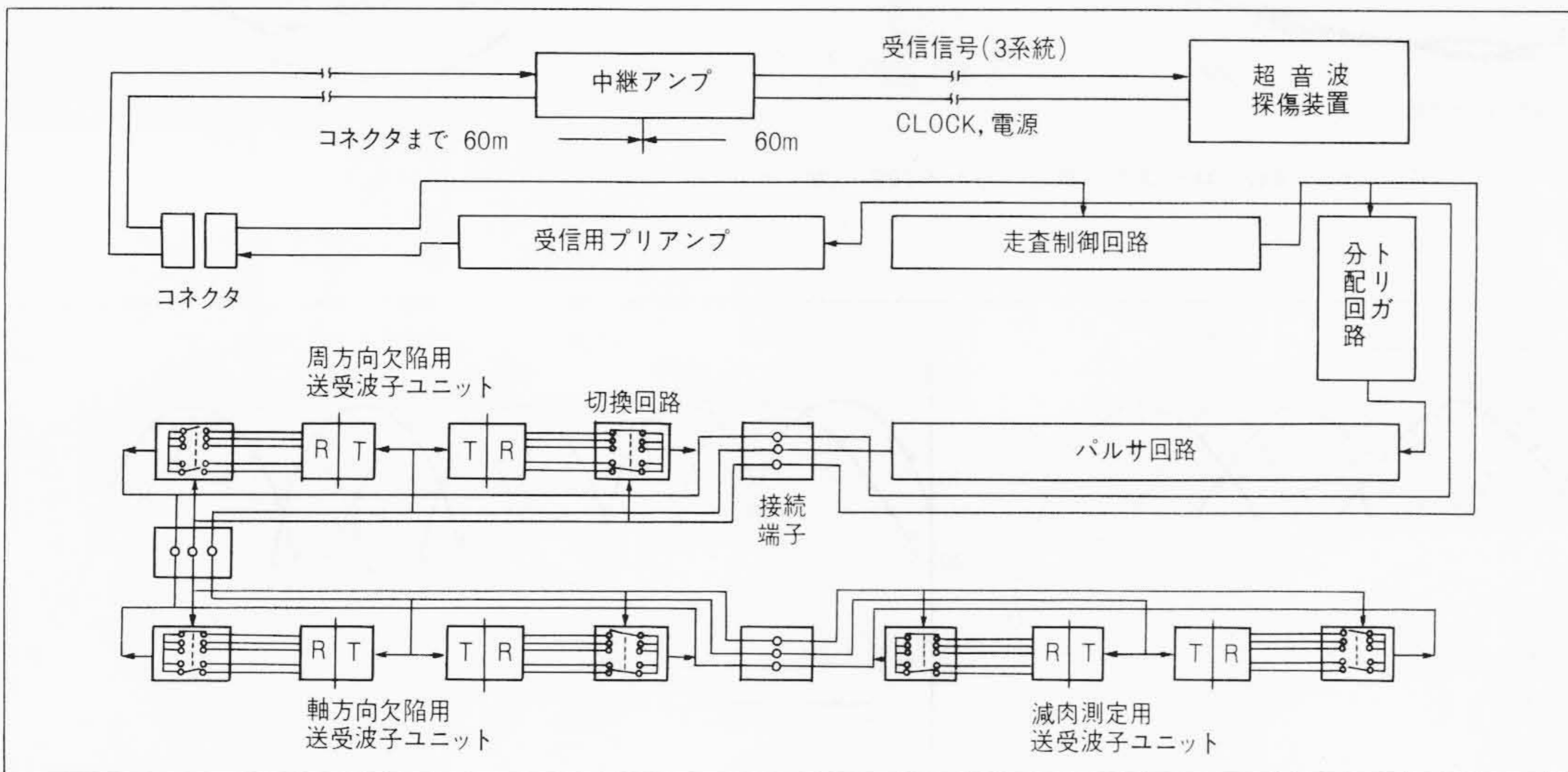


図3 各種欠陥検出用探触子配置 SN比を向上させるため、送波子と受波子を分割した二探触子法を適用している。



注：略語説明  
R(受波子)  
T(送波子)

図4 マルチアレイ型複合プローブの回路構成 超音波探傷信号は、時系列信号に多重化処理され、超音波探傷装置へ送り出されてくる。

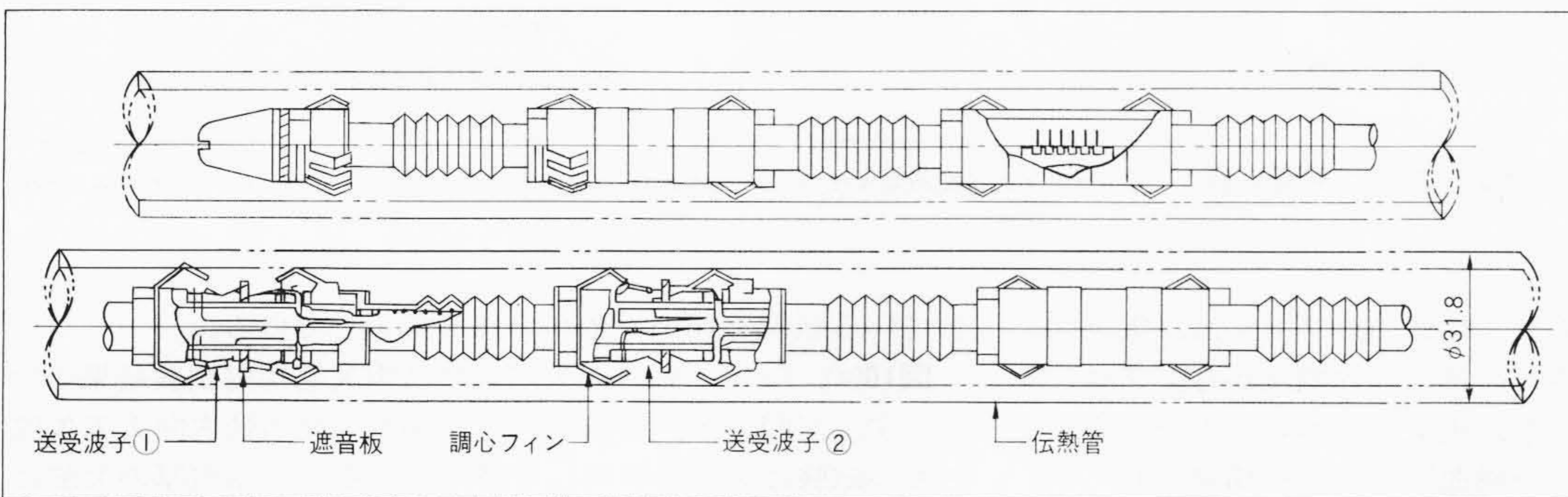


図5 電子走査式マルチアレイ型超音波探傷プローブ 送受波子①及び送受波子②はそれぞれ16対の振動子をもっており、この前後の送受波子上の振動子の対を円周方向に重ならないように配置することでチャンネル境界での感度低下を相互に補間している。

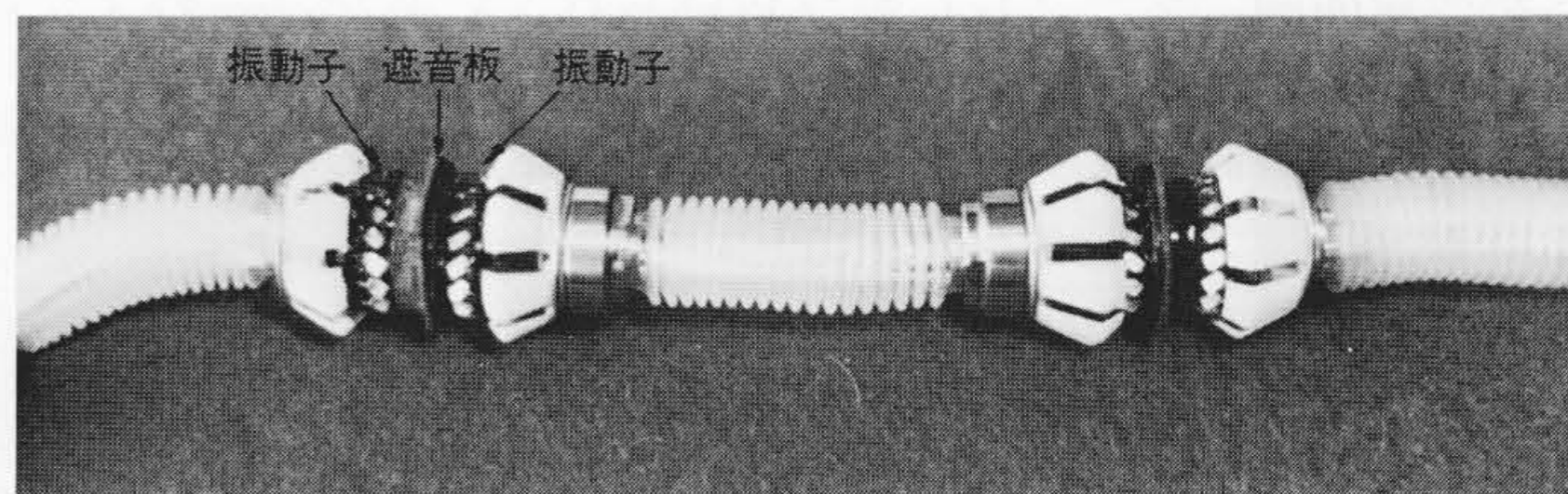
うな配列とした。

このようなマルチアレイ型探傷プローブでの超音波ビームの電子的走査は、図4のブロックダイアグラムに示される電気回路で達成される。同図は、3種類のプローブを連結した複合プローブの電気回路を示している。パルサは電子走査制御回路部からの信号に基づき、送波子を順番に振動させ超音波を発生させる。受波子で受信された超音波探傷信号は、時系列信号に、多重化処理されて、プリアンプ、中継アンプを経て信号ケーブルに送り出され、超音波探傷装置へ取り込まれることになる。

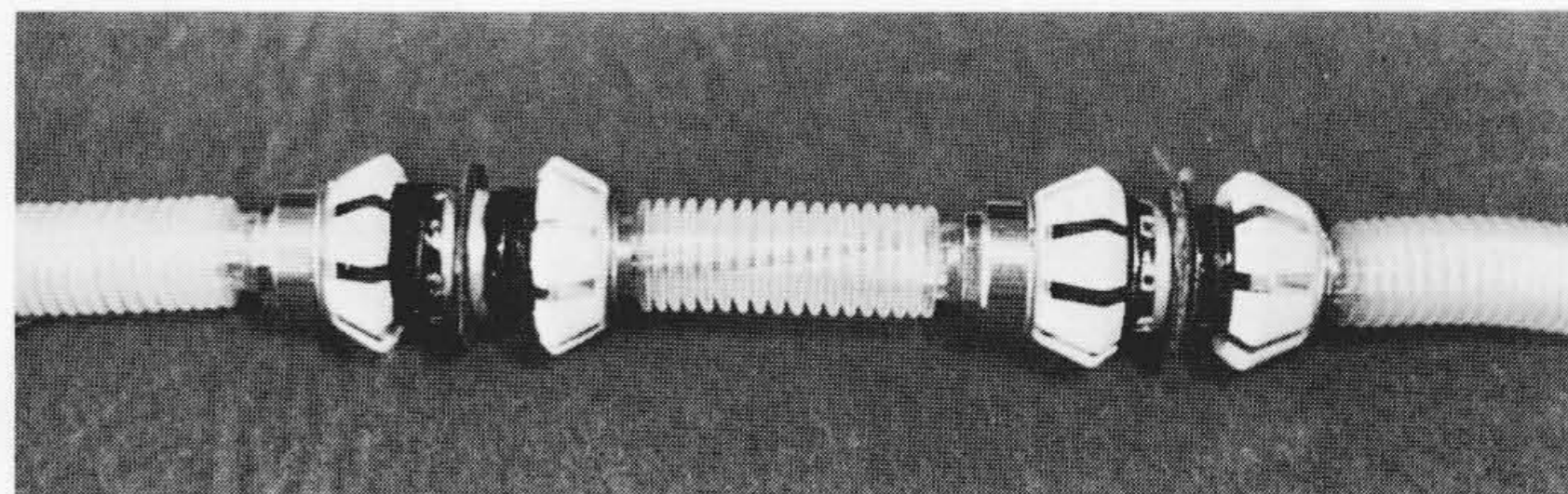
図5に、電子走査式マルチアレイ型超音波探傷プローブの概略構造を示す。同図中の送受波子①、送受波子②はそれぞれ16対の振動子をもっており、調心フィンで伝熱管内径に対して振動子の位置が保持されている。

探傷プローブ送受波子部分の外観を図6に示す。

図7に、マルチアレイ型複合プローブ例(軸方向欠陥探傷用及び周方向欠陥探傷用)の外観とフロート付きケーブルの外観



(a) 軸方向欠陥探傷用送受波子部



(b) 周方向欠陥探傷用送受波子部

図6 超音波探傷プローブ送受波子部外観 写真中遮音板の両側に振動子が対をなして並んでいる。

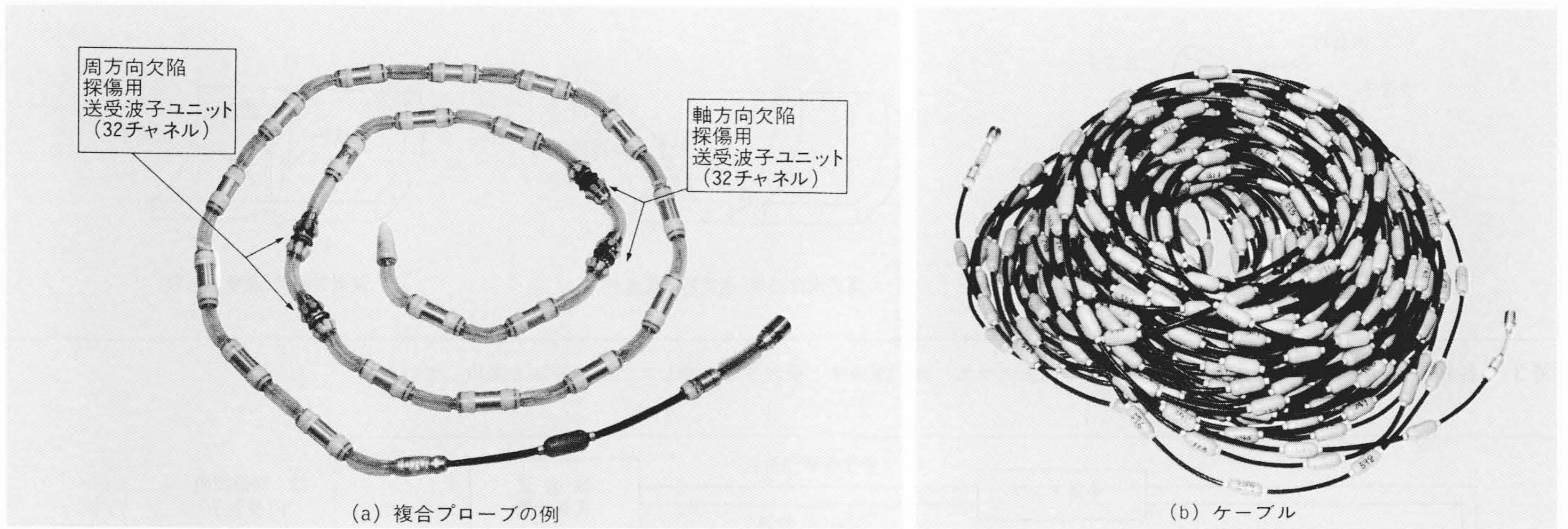


図7 超音波探傷プローブ及びケーブル (a)の複合プローブ例外観にみられる19個のカプセルは、電気回路を収納している。

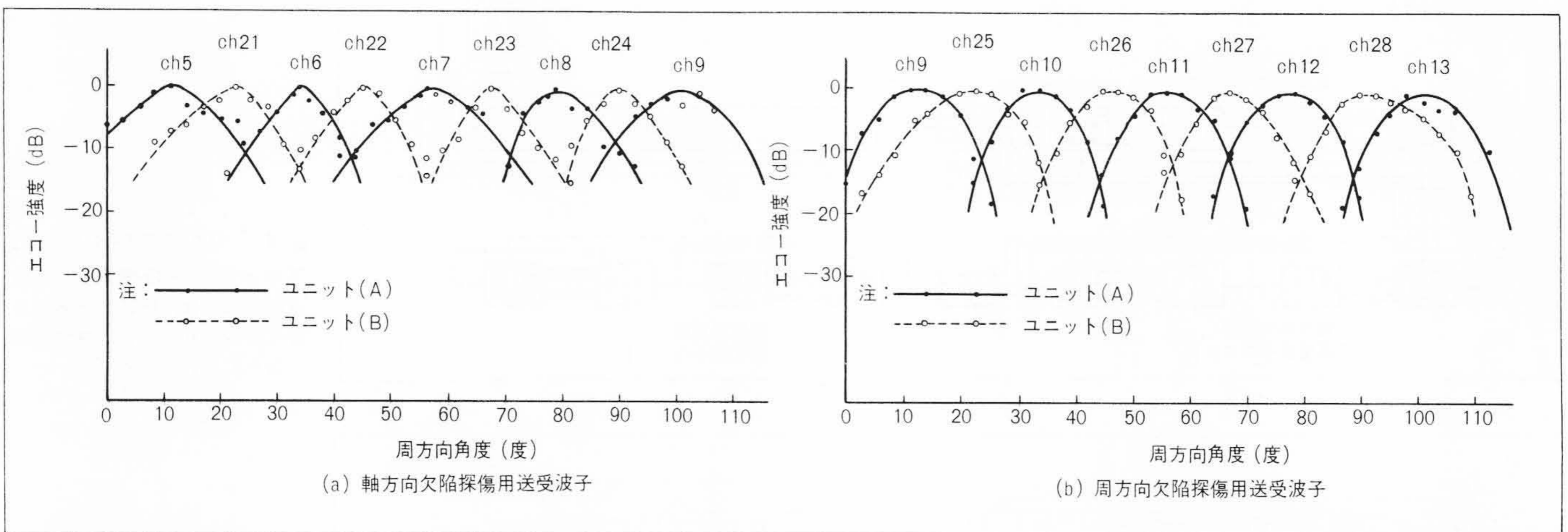


図8 マルチアレイ型探傷プローブの円周方向感度特性 チャンネル間の谷間の深さは、6 dB(軸方向)～3 dB(周方向)であり、全周にわたって十分な検出感度をもっている。

を示す。送受波子以外に見られる19個のカプセルは、電気回路を収納している。伝熱管内への挿入性の観点から、プローブを構成する送受波子ユニット、電気回路ユニットを小型化するとともに、各ユニット間を屈曲可能な連節構造としている。

また、図7(b)のケーブル外観で見ると、多数のフロートが一定間隔でケーブルに取り付けられているが、このまゆ型フロートは、水流を受けて、ケーブルに駆動力を与える機能と、伝熱管内壁とケーブルとの摩擦を低減する機能をもっている。

### 3.2 探傷プローブの特性

マルチアレイ型探傷プローブの円周方向感度特性を、軸方向欠陥探傷用プローブ及び周方向欠陥探傷用プローブについてそれぞれ図8(a)、(b)に示す。同図中ユニット(A)の実線は前方ユニット(A)での振動子対の感度変化を示し、ユニット(B)の破線は後方ユニット(B)のものを示している。各チャンネル間の谷間の深さは、軸方向欠陥探傷用では6 dB、周方向欠陥探傷用では3 dB以内であることから、全周にわたって十分な検出感度をもっている。

次に本プローブの探傷性能に関して、人工欠陥を設けた試験片による試験結果について述べる。

図9に、マルチアレイ型探傷プローブから得られた信号波形の例を示す。3種類の深さの異なる周方向人工欠陥を検出

している状況を16チャンネルの波形で示している。

図10(a)、(b)に、軸方向欠陥及び減肉欠陥探傷試験結果の例を示す。同図(a)は、5%、10%、20%肉厚の軸方向人工欠陥をもつ試験片を探傷試験した結果である。5%肉厚の欠陥に対してもノイズレベルを超えるエコー強度を得ており、実験

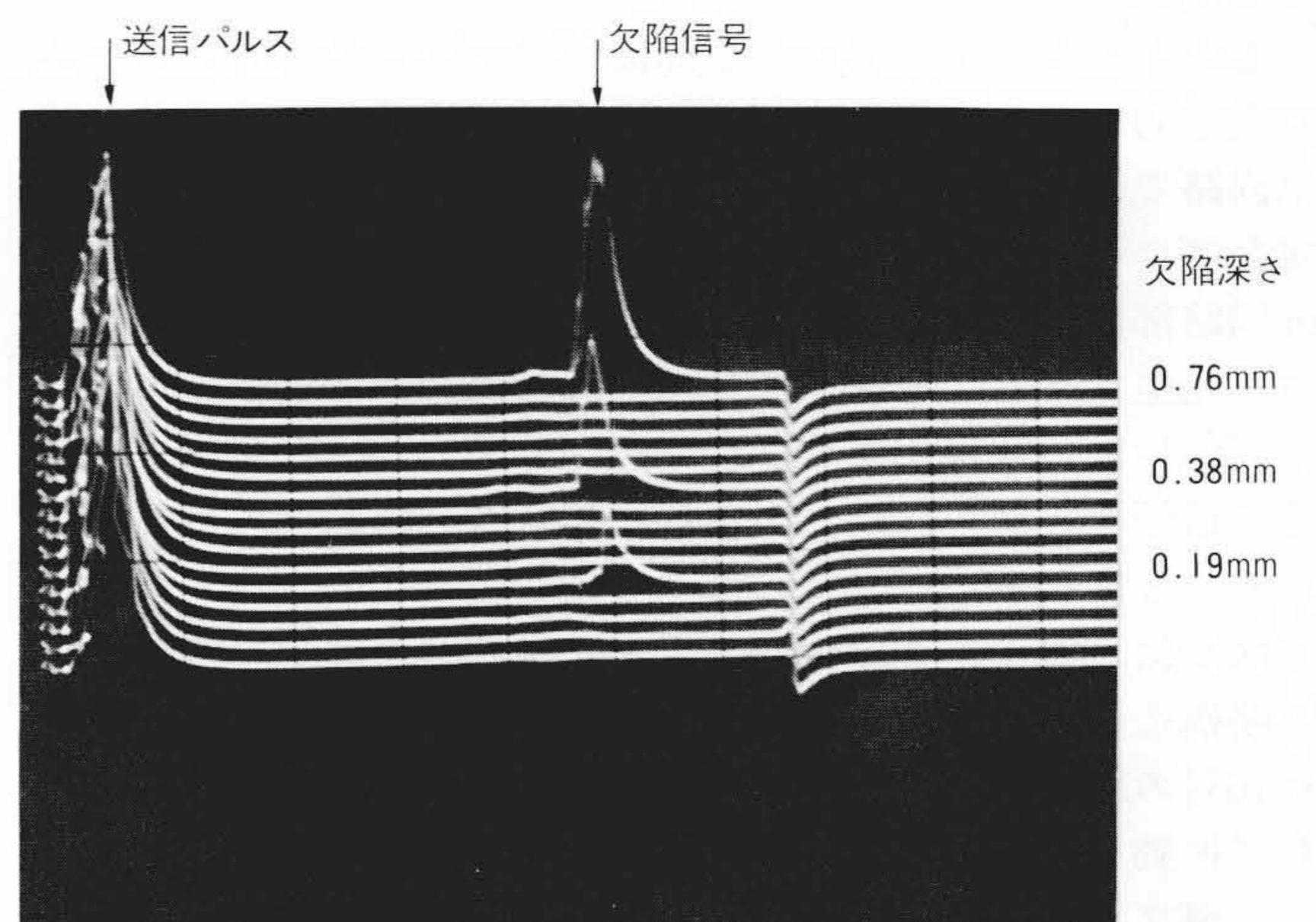


図9 マルチアレイ型探傷プローブによる周方向欠陥検出信号波形例 図中左端の山は発信パルスを示し、中央部の山が欠陥信号を示す。

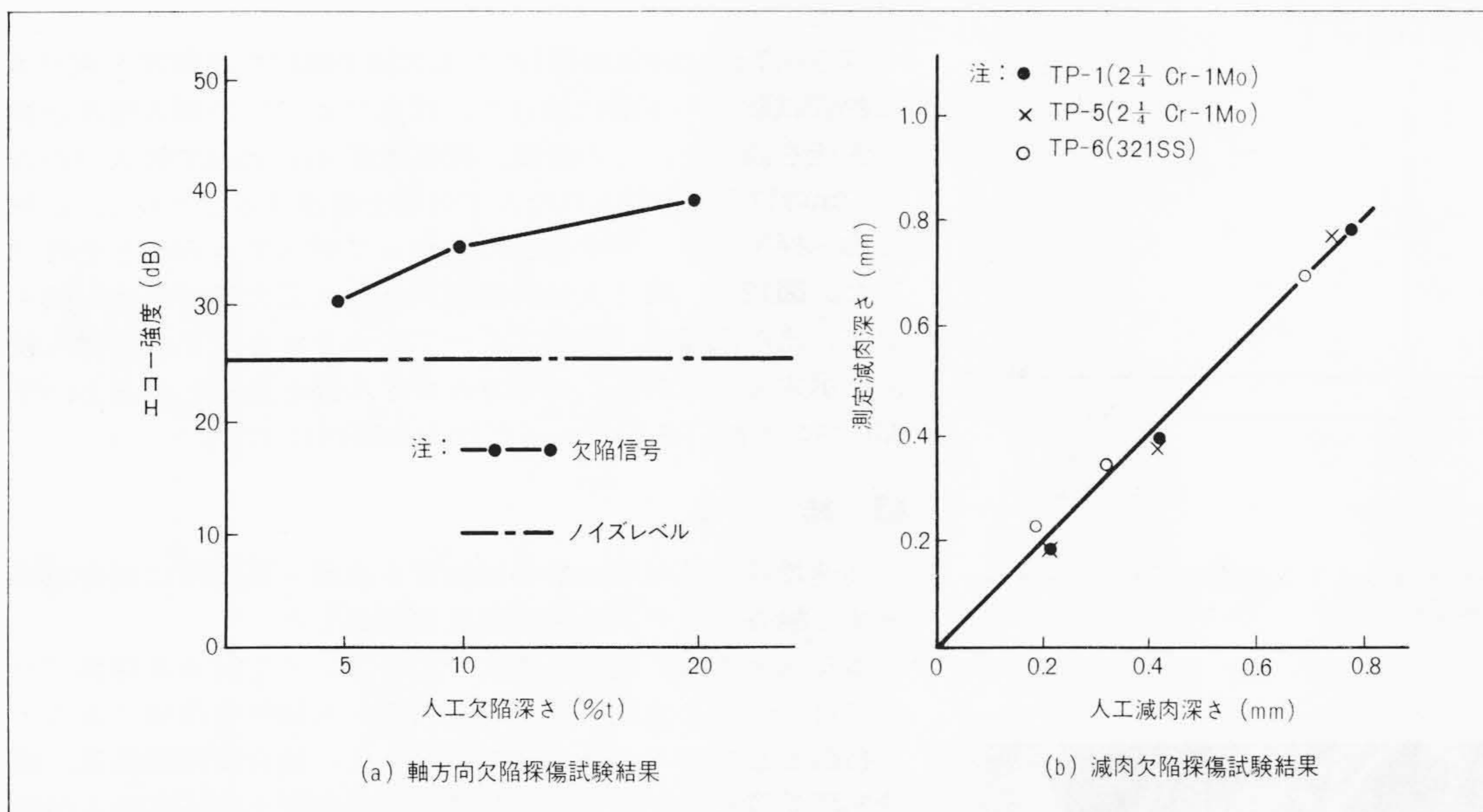


図10 欠陥探傷試験結果例 軸方向欠陥については5%肉厚，減肉欠陥については0.2mmを検出する感度をもっている。

室的に十分な検出感度をもっていることを認めた。

図10(b)は，減肉欠陥に対する検出感度を示したものであり，直線性が良好なこと及び検出感度としては，0.2mm以上の減肉は，Cr-Mo鋼，ステンレス鋼共に十分に検出可能であることが分かる。

#### 4 ケーブル駆動位置決め装置の開発

##### 4.1 ケーブル駆動装置

ケーブル駆動装置は巻取りドラムと圧送水を循環させる圧送ユニット部から構成されている。プローブが接続されたケーブルは巻取りドラムに全長(約120m)が巻き取られており，電動機によってドラムを回転するとともに圧送水を送り出すことにより伝熱管内へ挿入される。電動機の回転速度は，プローブ位置検出装置で検出されたプローブ挿入速度をフィードバックし制御されるので，4 m/minの安定した速度で連続的に探傷を行うことができる。また超音波信号は，ねじれ防止機構を介して超音波探傷装置に伝送されるので，巻取りドラムの回転によるケーブルのねじれは発生しない。

圧送ユニット部は，水を送り出すためのポンプ，弁及び種々

の検出器により構成されており，圧送水の流量を制御することによって，ケーブルの送り出し量の変化に対しても安定な挿入性が得られるようになっている。

##### 4.2 管板アクセス装置

管板アクセス装置は，蒸気発生器管板上部に設置され，探傷を行う管板孔を選択し，探傷プローブを案内するための案内管をもっている。図11(a)，(b)にその構成と位置決め試験の状況図を示す。

案内管は管板の上部に設けられた小径のアクセス孔から，管板のすべての孔へ位置決めできるように曲り部をもち，X，Yの直線移動とθの回転運動の3軸を数値制御することにより位置決めされる。また案内管下部はエアシリンダ構造になっており，位置決め終了後下降させることにより，先端部管板に圧着される。図11(b)は，位置決め後，先端部が管板に圧着された状況を示している。

#### 5 全体システム総合試験

上述の伝熱管超音波探傷システムを実機蒸気発生器に適用した場合の模擬試験を，全長約80mの実寸大伝熱管を用いて実

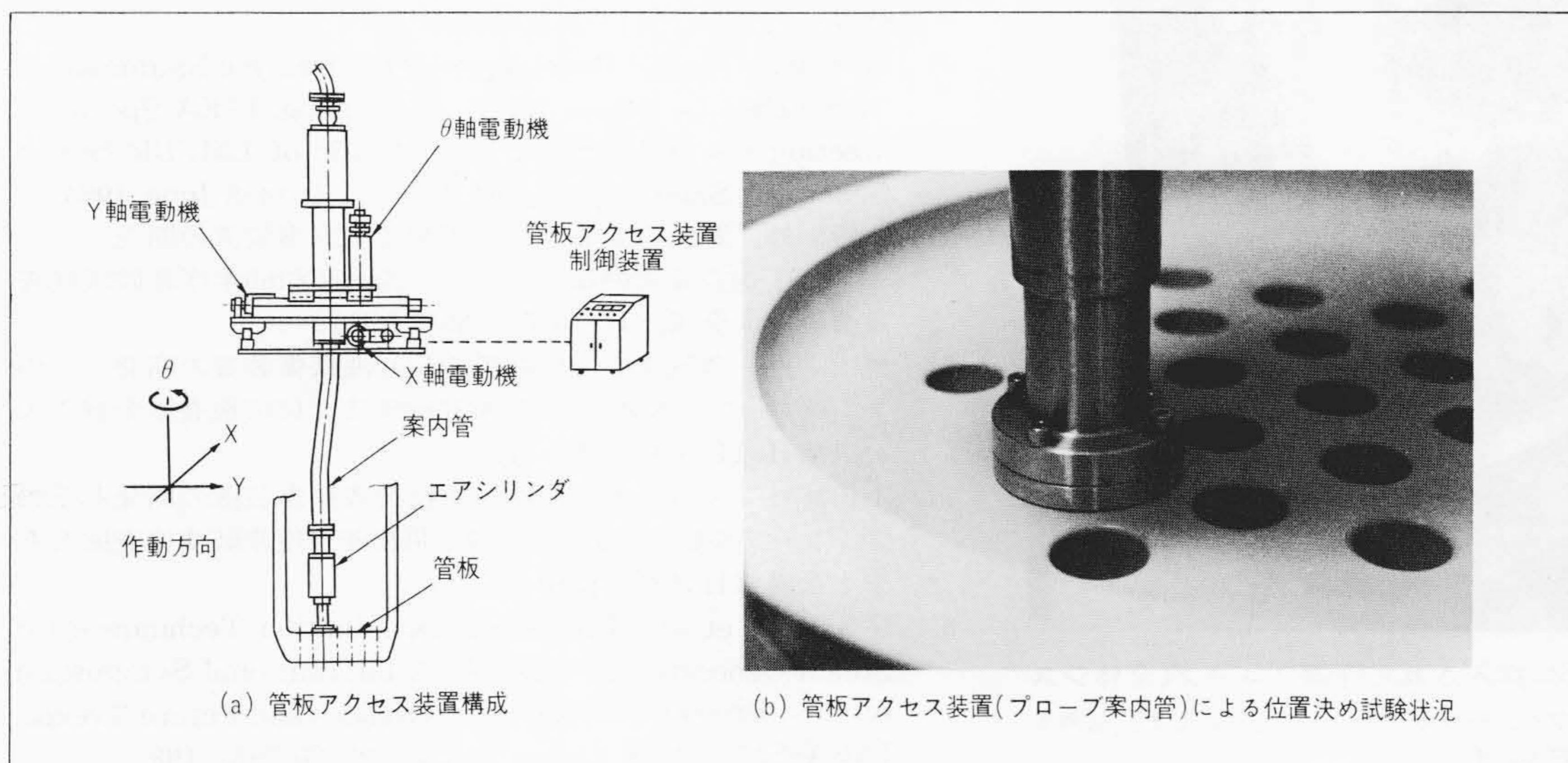


図11 管板アクセス装置の構成及び位置決め試験 X，Y，θ3軸位置決め管板アクセス方式が用いられている。(b)の位置決め試験状況は，模擬管板の管板孔に案内管下端が圧着されたところを示す。

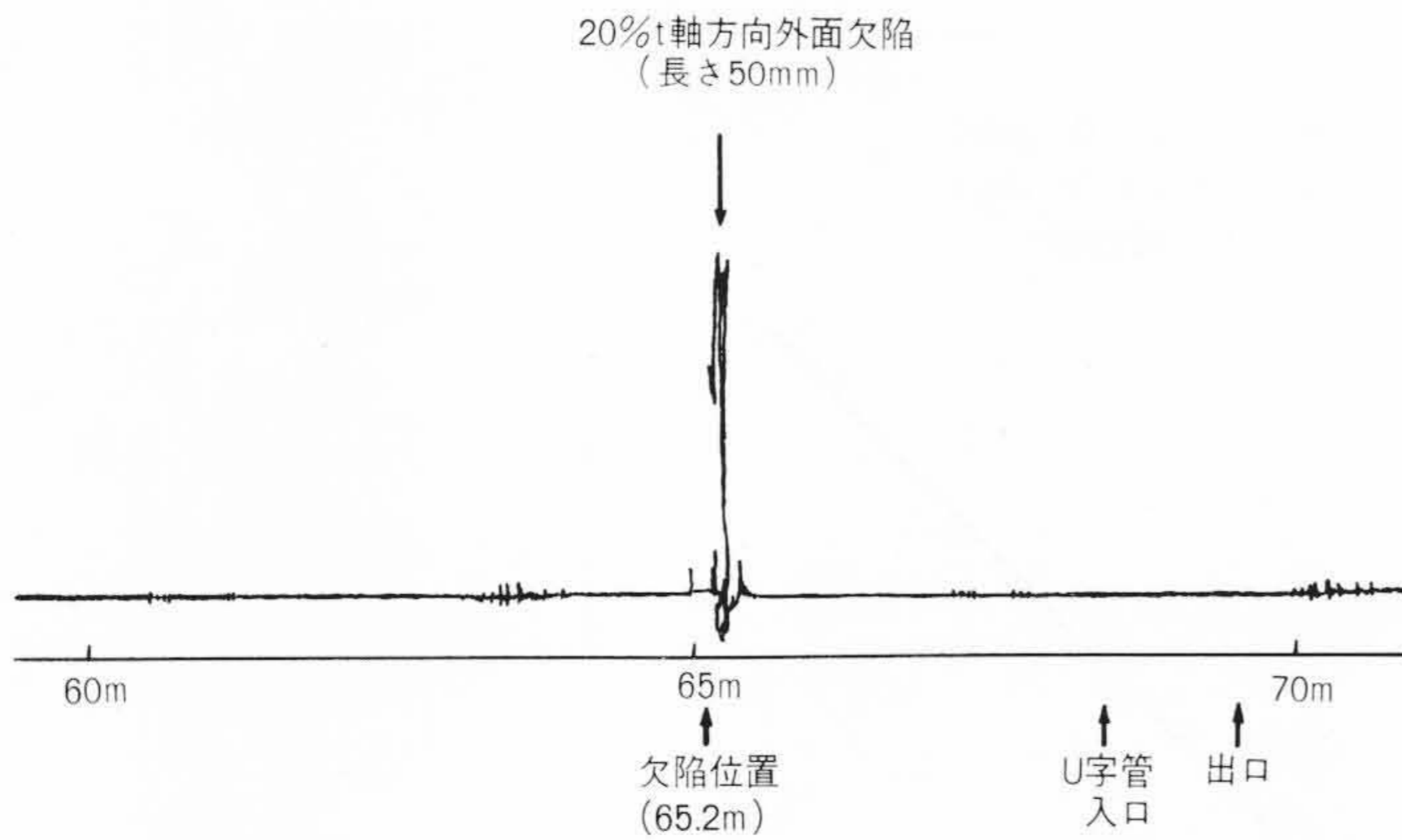


図12 全体システム総合試験における人工欠陥探傷記録 実寸大伝熱管試験体を用いて、挿入探傷試験を実施した。

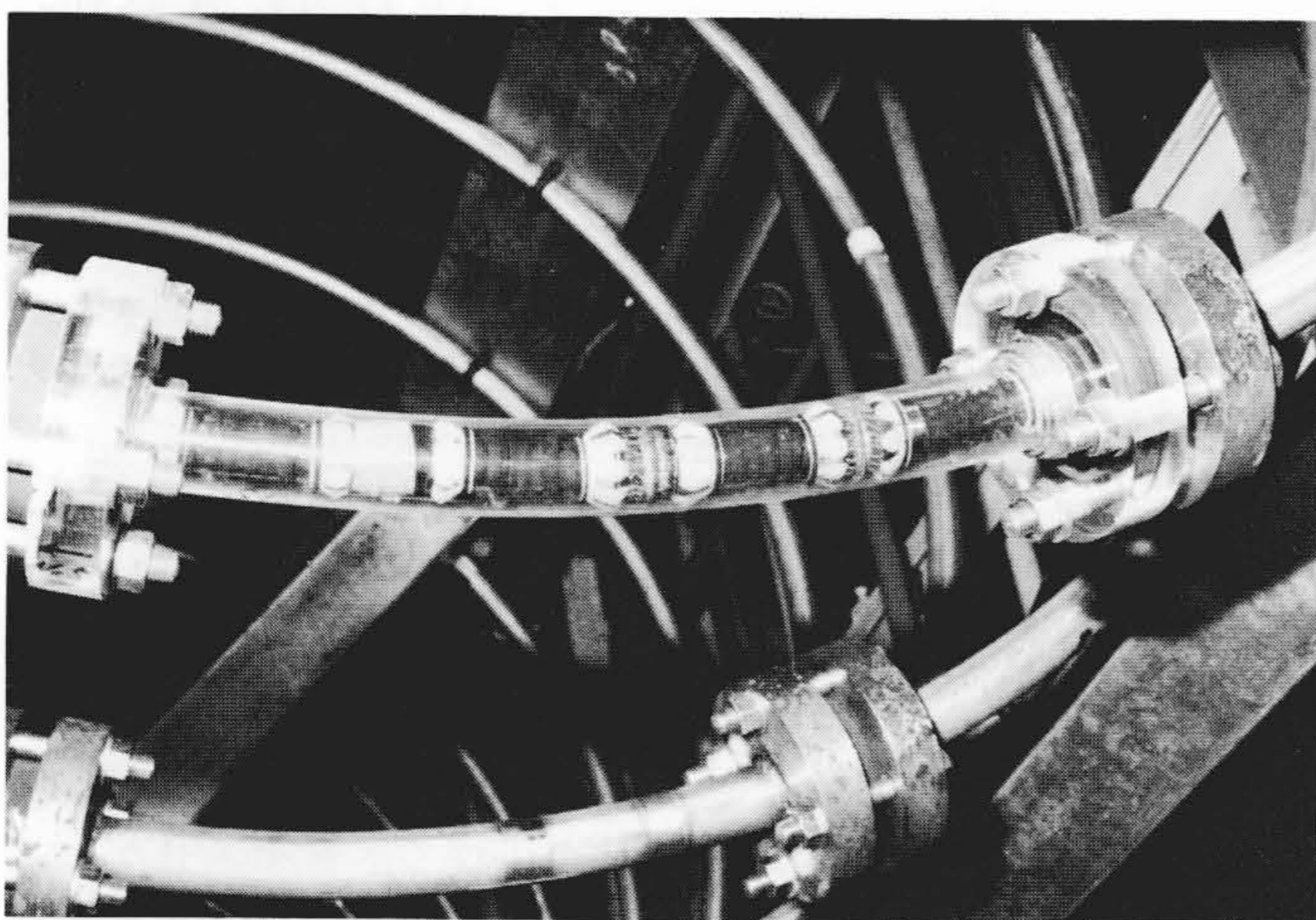


図13 ヘリカルコイル伝熱管内に挿入された探傷プローブ(全体システム総合試験) 実寸大伝熱管試験体に数箇所設けられた透明管部分を、送受波子ユニットが4 m/minの速度で通過している状況を示す。



図14 伝熱管下部Uベンド部に挿入された探傷プローブ(全体システム総合試験) 探傷プローブが、ヘリカルコイル部を通過して、伝熱管下部Uベンド部を通過している状況を示す。

施した。

深さ0.7mm(20%肉厚)の人工欠陥を設けた試験片を実寸大伝熱管試験体の下部に設けて、探傷プローブの挿入性及び探傷性能を調べた。この結果、探傷速度4 m/minで管入口から65.2mの位置に設けられた人工欠陥を検出するとともに、伝熱管内へ探傷プローブを全長にわたって挿入できることを確認した。図12に、実寸大伝熱管試験体の人工欠陥探傷状況図を示す。また図13は、探傷プローブのヘリカルコイル内挿入状況を示すものである。ヘリカルコイル部を通過したあと、下部Uベンド部にさしかかった状況を図14に示す。

## 6 結 言

高速増殖炉蒸気発生器の伝熱管を高速・高精度に超音波探傷する検査システムの機能開発を達成した。

本システムは、電子走査式マルチアレイ型超音波探傷プローブ(複合型)を水流圧送して管内側から伝熱管探傷することを特徴としており、合わせて開発された超音波探傷装置、信号処理装置及びケーブル駆動位置決め装置を含めて成る伝熱管超音波探傷システムとして、小口径長尺(管径31.8mm、肉厚3.5~3.8mm、長さ約100m)のヘリカルコイル伝熱管を、速度4 m/minで各種欠陥の同時探傷を行なう機能をもっている。また、探傷性能として、実験室的には、伝熱管肉厚の5%相当(0.2mm)の深さの欠陥を検出することが可能である。

本システムの使用により、蒸気発生器内の多数の伝熱管の高精度探傷を容易かつ短時間に実施することができるので、蒸気発生器の健全性確認及び信頼性向上に資するものと期待される。

今後は本システムの実用上の性能向上を図るとともに、適用性の拡張を期すものである。

最後に、本システムの開発は、日立製作所自社研究に加えて、動力炉・核燃料開発事業団からの委託研究の成果に負っており、ここに動力炉・核燃料開発事業団の関係各位に対し、深謝する次第である。

## 参考文献

- 1) 木野, 外: 蒸気発生器伝熱管用管内挿入式超音波探傷技術, 非破壊検査, 28, 2, 114~115(昭和54-2)
- 2) 河原, 外: 高速増殖原型炉「もんじゅ」用冷却系機器の研究開発, 日立評論, 64, 8, 617~624(昭和57-8)
- 3) 木野, 外: 管内挿入式マルチアレイ型超音波プローブ, 非破壊検査, 32, 2, 142~143(昭和58-2)
- 4) H. Tsuda, et al.: Development of Ultrasonic Examination Techniques for Steam Generator Tubing, IAEA Specialist Meeting on Maintenance and Repair of LMFBR Steam Generator Summary Report, 2-81~2-91(4-8 June 1984)
- 5) 木野, 外: 蒸気発生器伝熱管用超音波探傷装置の開発 その1 電子走査式管内超音波探傷技術, 昭和60年度非破壊検査協会春季大会講演II-10(昭和60年2月)
- 6) 梶山, 外: 蒸気発生器伝熱管用超音波探傷装置の開発 その2 プローブ位置検出装置, 昭和60年度非破壊検査協会春季大会講演II-11(昭和60年2月)
- 7) 七田, 外: 蒸気発生器伝熱管用超音波探傷装置の開発 その3 ケーブル駆動位置決め装置, 昭和60年度非破壊検査協会春季大会講演II-12(昭和60年2月)
- 8) S. Sasaki, et al.: Ultrasonic Examination Techniques for Steam Generator Tubing, IAEA International Symposium on Fast Breeder Reactors-Experiences and Future Trends, IAEA-SM-284/38(Lyons, France, 22-26 July, 1985)