

J A E R I - M
92-151

HTTR中間熱交換器伝熱管の
供用期間中検査機器の性能試験

1992年10月

稲垣 嘉之・宮本 喜晟・加藤 潔*

中島 玉雄*・上妻 強志*・東海林 一*

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し込みください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1992

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 ニッセイエプロ株式会社

HTTR中間熱交換器伝熱管の供用期間中検査機器の性能試験

日本原子力研究所東海研究所高温工学部

稲垣 嘉之・宮本 喜晟・加藤 潔*

中島 玉雄*・上妻 強志*・東海林 一*

(1992年9月9日受理)

HTTR中間熱交換器(IHX)伝熱管の供用期間中検査用の渦流探傷検出器と検出器挿入装置の性能試験を行った。検出器の検出特性は、模擬欠陥を設けたハステロイXR製の試験片を用いて調べており、模擬欠陥は軽水炉蒸気発生器伝熱管のASME Code基準を参考に製作した。試験の結果、伝熱管母材部ではASME Code基準を満足しており、さらに $\phi 0.5\text{mm}$ 貫通穴及び 0.5mm 幅の溝等の小さな欠陥も検出可能であった。伝熱管支持構造部や溶接継手部については、多重周波数法によりノイズの除去が可能であったが、検出性能は低下した。

試作した検出器挿入装置は、モックアップモデルの高温ヘッグ内に安定して据え付けられ、支障なく検出器の挿入・引抜きが可能であった。伝熱管内における検出器の移動挙動については、ケーブルのたわみが移動速度のばらつきや検出器位置の測定誤差の原因になることを確認した。

Performance Test of Inservice Inspection Equipment for
HTTR Intermediate Heat Exchanger Tubes

Yoshiyuki INAGAKI, Yoshiaki MIYAMOTO, Kiyoshi KATO*
Tamao NAKAJIMA*, Tsuyoshi KOZUMA* and Hajime SHOJI*

Department of High Temperature Engineering
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received September 9, 1992)

Experimental study was carried out to clarify the performance of eddy current testing probes and a probe inserting equipment for the inservice inspection of the intermediate heat exchanger tubes of the high-temperature engineering test reactor. The inspection performance of the probes were investigated using test tubes, made of Hastelloy XR and containing artificial discontinuities made with reference to the ASME standards of steam generator tubes in a light-water reactor. It was confirmed that the probe could detect the discontinuities of the ASME standards and the smaller ones, such as a 100% through-wall hole with 0.5-mm diameter and a groove with 0.5-mm width, in the base metal tube. For the tube support and the welded joint, the multi-frequency method could remove the noise. The inspection performance, however, lowered.

* Ishikawajima-Harima Heavy Ind. Co., Ltd.

The probe inserting equipment was manufactured by way of trial. It could be settled stably in the hot header of a mock-up model, and could smoothly insert and extract the probe. The winding of a cable cause the scattering of the probe traveling velocity and the measurement error of the probe location in the tube.

Keywords: HTTR, Intermediate Heat Exchanger, Tube, Inservice Inspection, Eddy Current Testing, Probe, Hastelloy XR, Welded Joint, Probe Inserting Equipment

目 次

1. 緒 言	1
2. 実験装置の概要及び方法	4
2.1 ECT検出器特性試験	4
2.2 検出器挿入装置作動試験	6
3. 検出器特性試験の結果	21
3.1 試験周波数の影響	21
3.2 母材部の検出特性	21
3.3 伝熱管支持構造物の影響	22
3.4 溶接部の影響	23
3.5 周波数組合わせの影響	24
3.6 検出器移動速度の影響	25
3.7 コイル径の影響	25
4. 検出器挿入装置作動試験の結果	43
4.1 伝熱管内の検出器移動速度	43
4.2 伝熱管内の検出器位置の計測	43
5. 結 言	47
謝 辞	48
参考文献	49

Contents

1. Introduction	1
2. Testing Apparatus and Method	4
2.1 Inspection Test of ECT Probes	4
2.2 Working Test of Probe Inserting Equipment	6
3. Results on Inspection Test of ECT Probes	21
3.1 Effect of Test Frequency	21
3.2 Inspection Characteristics for Base Metal	21
3.3 Inspection Characteristics for Tube Support	22
3.4 Inspection Characteristics for Welded Joint	23
3.5 Effect of Frequency Combinations	24
3.6 Effect of Probe Traveling Velocity	25
3.7 Effect of Coil Diameter	25
4. Results on Working Test of Probe Inserting Equipment	43
4.1 Distribution of Probe Traveling Velocity in Tube	43
4.2 Measurement of Probe Location in Tube	43
5. Concluding Remarks	47
Acknowledgements	48
References	49

1. 緒 言

日本原子力研究所で建設を進めている高温工学試験研究炉（HTTR：High-Temperature Engineering Test Reactor）は、冷却材（ヘリウムガス）の原子炉出口温度が約950℃の高温ガス炉である。原子炉の下流には1次側と2次側の冷却材間で熱交換を行うために、中間熱交換器（IHX：Intermediate Heat Exchanger）が設置されている。IHXは熱交換量10 MWtの熱交換器で、径方向に6層、96本の伝熱管を有しており、管外を1次側、管内を2次側の冷却材（ヘリウムガス）が流れる。Fig. 1.1にIHXの構造を、Table 1.1に主要諸元を示す⁽¹⁾。

IHXの伝熱管はHTTRの1次冷却材圧力バウンダリの一部を形成するため、その健全性の確保はHTTRの安全上、非常に重要である。このため、渦流探傷試験（ECT：Eddy Current Testing）によりIHXの供用期間中に定期的に検査（ISI：Inservice Inspection）を実施する計画である。ISI機器は、大きく分類すると、伝熱管の欠陥を検出するためのECT検出器と検出器を伝熱管内で移動させるための検出器挿入装置から構成される。

一本の伝熱管は全長約30mで、熱交換部はヘリカルコイル形状を有しており、その材質はハステロイXRである。ハステロイXRは、Ni基耐熱合金ハステロイXのSi、Mn、Al、Ti、B等の添加物量を最適化して耐腐食性およびクリープ強度等を向上させた合金で、高温ガス炉の高温機器用に原研で開発した素材であり⁽²⁾⁽³⁾、これまでに構造物への使用例はなく、HTTRのIHXや高温配管等で初めて使用される。伝熱管は1本当たり8箇所の溶接継手を有しており、また、伝熱管は周方向6箇所で、支持構造物で位置決めされている。したがって、ECT検出器の検出特性はこれら支持構造物や溶接部の影響を受けることが考えられるため、実機の伝熱管と同形状、同材質の試験片に模擬欠陥を設けて試験を実施した。

伝熱管内への検出器の挿入については、現在、IHX上部にある低温ヘッダ及び下部に位置する高温ヘッダの2箇所からの挿入が考えられている。両者の作業性を比較すると、高温ヘッダからの挿入は、検査時に高温ヘッダ内に挿入装置を設置し、遠隔操作で検出器の挿入・移動を行うのに対し、低温ヘッダの場合ではIHX外部から作業員が状態を確認しながら挿入を行えるため、前者に比べて作業性が良好である。したがって、検出器の挿入は低温ヘッダから行うことが望ましいが、伝熱管は約30mと長く、かつヘリカルコイル部等の湾曲部を有しており、低温ヘッダからの挿入のみでは伝熱管全長にわたる検査は困難と考えられる。このため、高温ヘッダ内に設置する挿入装置を試作し、据付性や検出器の搬送性等について試験を実施した。

本報は、ECT検出器による伝熱管の欠陥検出特性と検出器挿入装置の作動性能等について報告する。

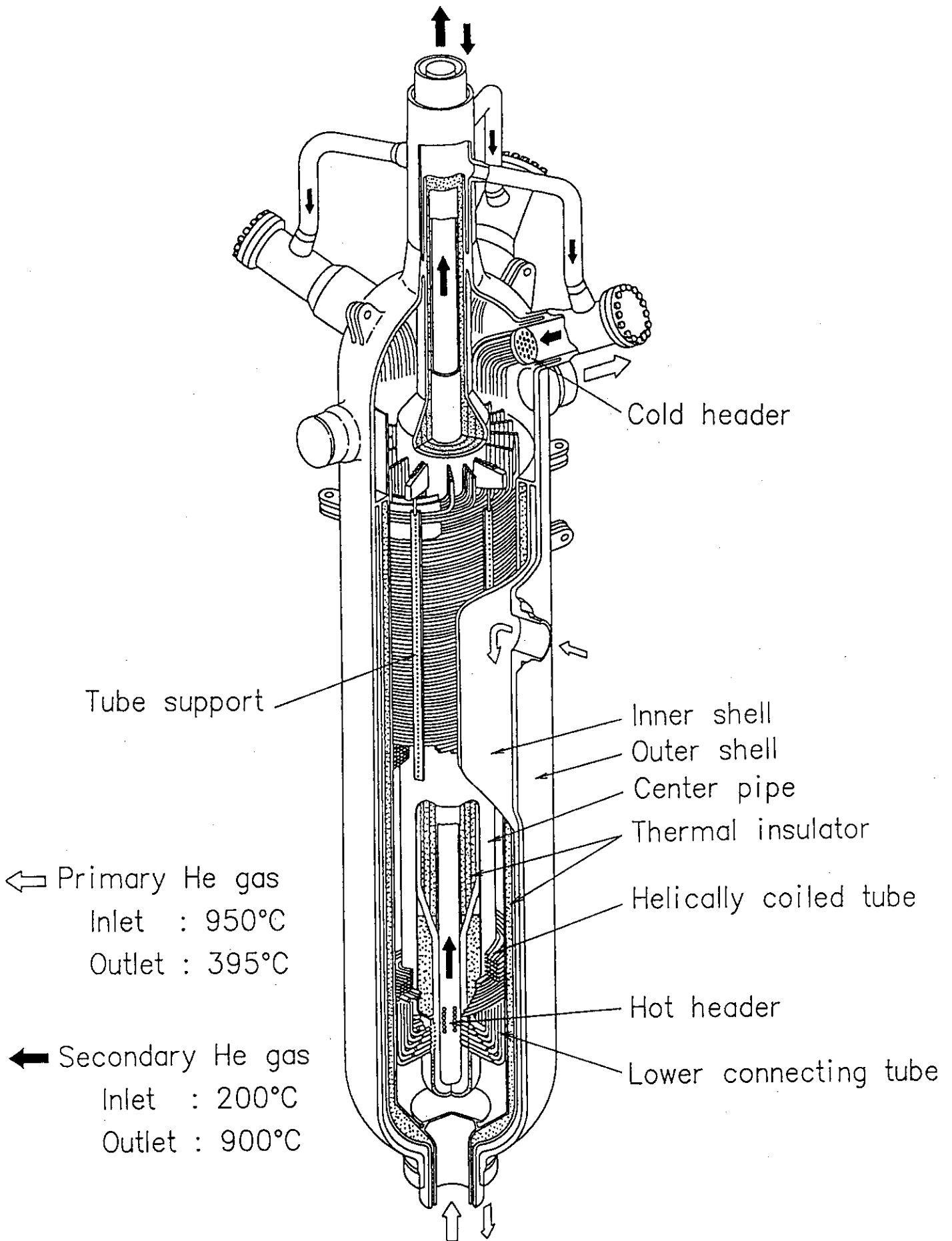


Fig. 1.1 Isometric view of intermediate heat exchanger (IHx)

Table 1.1 Main specifications of IHX

Type	Counter-flow and helically coiled type
Heat transfer rate	10 MW
Fluid	
Primary/secondary	He-gas/He-gas
Temperature	
Primary (inlet/outlet)	950/395 °C
Secondary (inlet/outlet)	200/900 °C
Pressure	
Primary/secondary	4.0/4.1 MPa
Material	
Tube	Hastelloy XR
Tube support	
Hot header	
Center pipe	
Inner and Outer shell	2 1/4Cr-1 Mo steel
Dimension	
Tube	31.8 ^{O. D.} × 3.5 ^t × 30000 ^L mm
Outer shell	1850 ^{O. D.} × 50 ^t × 9900 ^L mm

2. 試験装置の概要及び方法

試験装置は、検出器の特性試験を行うための E C T 検出器と模擬欠陥試験片、並びに検出器挿入装置の作動試験を行うための挿入装置本体と高温ヘッダ及び伝熱管のモックアップモデルから構成される。その基本仕様を Table 2.1 に示す。また、その詳細については以下に述べる。

2.1 E C T 検出器特性試験

試験装置は、E C T 検出器、模擬欠陥試験片、試験片内の検出器を一定速度（10～100mm/s）で移動させるための検出器走引機、検出器コイルに高周波磁界を発生させるための渦流探傷装置（MAGTEST製MT-4G50）、データ解析を行うための計算機等から構成される。試験装置の構成図を Fig. 2.1 に示す。

検出器の設計は、以下の点に留意して行った。

- ① 検出器は、伝熱管（ $\phi 31.8^{\text{O.D.}} \times 3.5^{\text{t}}$ ）のヘリカルコイル部や下部連絡管の曲がり部においても支障なく移動できること。
- ② 検出対象は、ハステロイ X R（非磁性体）製の伝熱管である。
- ③ 検出対象とする欠陥サイズは、後述するように軽水炉蒸気発生器伝熱管の ASME Code 基準とする。

上記①に従って検出器ボビンの形状・寸法を、②及び③に対応してコイルの線径、巻数、幅等を定めている。本試験の検出器は外径 $\phi 20\text{mm}$ 、全長 43mm のボビン状本体の2箇所にもコイルを巻いた構造であり、コイル径を $\phi 16$ （伝熱管内の充填率：約42%）及び $\phi 18\text{mm}$ （同約53%）とする2個の検出器を試作した。コイルの線径は約 $\phi 0.2\text{mm}$ 、巻数は約200で、自己誘導及び自己比較方式とした。検出器の構造を Fig. 2.2 に、その外観を Phot. 2.1 に示す。

試験片は、Fig. 2.3 に示すようにハステロイ X R 製の直管および曲管に人工欠陥を設けたものである。母材部曲管の曲げ半径 $R 160\text{mm}$ は下部連絡管の曲げ半径に対応しており、また、溶接部曲管の曲げ半径 $R 420\text{mm}$ はヘリカルコイル部の最小曲げ半径に合わせている。欠陥形状は、Fig. 2.4 に示すように貫通穴、平底穴、全周溝及び部分溝（周方向に 90° 幅の角溝）状で、試験片の内外面に放電加工により設けた。母材部試験片の一例を Phot. 2.2 に、溶接継手部を Phot. 2.3 に示す。伝熱管の溶接は実機と同様に、母材とほぼ同質の溶加材を用いて試験片の外表面から T I G 溶接により行った。ハステロイ X R および溶加材の化学組成⁽³⁾⁽⁴⁾を Table 2.2 に示す。

軽水炉の蒸気発生器伝熱管母材部の I S I における E C T の欠陥検出指標は、ASME Code Sec. XI⁽⁵⁾等に示されているが、I H X のような原子炉機器における高温のガス／ガス熱交換器の使用例は無く、I S I における欠陥の検出指標も明確には定まっていない。しかし、軽水炉の蒸気発生器では1次側冷却材の圧力が2次側よりも約10 MPa高いのに対し、I H X では1次側冷却材の圧力が2次側よ

りも0.1 MPa 低いため、伝熱管に損傷が生じたとしても2次側冷却材への放射能の漏えいは、蒸気発生器よりもはるかに軽微である。したがって、ASME Codeの蒸気発生器の欠陥指標は、IHXにとって安全側であると考えられる。ASME Codeの指標は、外径 ϕ 19.1mm以上の円管については貫通穴径を ϕ 1.7 mmとしており、周方向に360°の全周溝の幅は1.5 mmで、欠陥深さは管内面で管壁肉厚の10%以上である。また、平底穴径は ϕ 4.8 mmで、管外面で深さ20%以上の穴を90°間隔で周方向に4個配置している⁽⁶⁾。本試験ではこれらの指標を考慮して欠陥サイズを定めた。すなわち、直管母材部の直径 ϕ 1.7 mmの貫通穴および幅1.5 mm、管内外面で深さ10%以上の全周溝状欠陥を標準試料として基本特性を調べ、また、平底穴径についてはASME Codeの指標よりも小さな ϕ 1.7 mmおよび ϕ 3.2 mmとし、管内外面で深さ20%以上の欠陥を周方向に1個配置した。更に ϕ 0.5mmの貫通穴および幅0.5mmの溝状欠陥等の小さな欠陥についても検出特性を調べた。母材部および溶接部の人工欠陥の寸法をTable 2.3、2.4に示す。表の欠陥深さは管壁の肉厚に対する割合(%)で示しており、内外面の欠陥については検出がより困難と思われる外面欠陥を重点的に選択している。また、本試験で使用した欠陥とASME Codeの欠陥指標との比較をTable 2.5に示す。同表に示すように、本試験の欠陥はASME Codeよりも小さく、安全側の欠陥といえる。

E C Tにおける試験周波数 f と渦電流の浸透深さ t の関係は次式で示される⁽⁷⁾。

$$t = 1 / \sqrt{\pi f \mu \sigma} \quad (2.1)$$

μ : 導体の透磁率

σ : 導体の導電率

ハステロイXRの導電率は 8.47×10^5 S/m、また、非磁性体であるので真空中の透磁率 $\mu = 4 \pi \times 10^{-7}$ H/mを用いる。ここで、浸透深さとして伝熱管の肉厚(3.5 mm)を(2.1)式に代入すると試験周波数は24.4 kHzとなる。したがって、本試験ではこの周波数を含む12~64 kHzの試験周波数で実施した。

Fig. 2.5は欠陥に対するE C Tの信号応答を示したものである。1対のコイルによって検出される欠陥信号は、振幅および位相の2つの情報を持っており、Fig. 2.5(b)に示すXY2成分の電圧出力の時間変化をX-Y座標のベクトル表示にすると、同図(a)に示すリサージュ図形が形成され、その位相角 θ から欠陥の深さを推定できる。リサージュ図形の位相角および振幅 E_z はXYの電圧出力成分から次式により求められる⁽⁷⁾。

$$E_z = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} \quad (2.2)$$

$$\theta = \tan^{-1} (E_y / E_x) \quad (2.3)$$

E_x 、 E_y : XYの電圧出力成分の振幅

本試験では、直管母材部の内外面の1.5 mm幅全周溝および ϕ 1.7 mmの貫通穴を標準試料として、各周波数における位相角と欠陥深さの関係を示す較正曲線を作成した。それ以外の欠陥の検出特性については、較正曲線に対する位相角のばらつきより評価している。試験パラメータは、試験周波数、人工欠陥の穴径、溝幅および深さ等である。また、伝熱管支持構造物のような伝熱管の外部に配置された

構造物や溶接部に欠陥が重なった場合には、多重周波数により検出特性を調べた。なお、内挿検出器外径と伝熱管内径の差による隙間（偏心）によって生じるがた信号は、X軸に一致（ $\theta = 0^\circ$ ）するように予め位相を調整した。

2.2 検出器挿入装置作動試験

検出器挿入装置は、高温ヘッド内で挿入装置を安定に保持し、検出器を伝熱管内で移動させるとともに、伝熱管内での検出器位置を検知する機能を有している。Fig. 2.6に挿入装置とモックアップモデルの構造を、Phot 2.4(a)に挿入装置の外観を、(b)にモックアップモデル内に設置された様子を示す。

挿入装置が高温ヘッド内に設置されると、その自重により底板下部の自己保持機構部の脚部が折れ、脚部に取付けられたパッドが高温ヘッド内壁を押し、挿入装置の下部が高温ヘッド内で固定される。検出器搬送部及び検出器位置検知部が載った上部基板がガイドバーに沿って上下動し、また、下部基板が周方向に回転することにより検査対象として任意の伝熱管を選択できる。伝熱管の選択後、最後に天井板のロックピンが高温ヘッドの内壁を押し、挿入装置は高温ヘッド内で安定に保持される。

検出器を伝熱管内で遠距離まで輸送する手段としては、圧縮空気を作動流体とした空送式がよく使用される。この方法は、ケーブルに一定の間隔でフロートを設け、このフロートが抵抗体となって空気圧により検出器が搬送されるものである。しかし、本挿入装置は高温ヘッド内に設置されるために収納スペースが限られており、できる限り装置を小型化かつ簡略化する必要がある。したがって、本装置ではケーブルの剛性を利用する方法を採用している。剛性を維持するために、ケーブル内には2本の樹脂性ロッドが内蔵されている。ケーブルは、モーターで駆動されたキャリアローラーにより一定速度で搬送及び引抜きが行われる。ケーブルの搬送長さは計測ローラーで測定され、その長さから伝熱管内の検出器位置が求められる。

モックアップモデルは、高温ヘッドと伝熱管を実寸大で模擬したものである。伝熱管は、下部連絡管のみを模擬したアクリル製の短管と、下部連絡管及びヘリカルコイル巻きを模擬したSUS304製の長管から構成される。アクリル製の短管は、曲率の大きな下部連絡管内での移動挙動を目視観察するためのものである。長管の軸方向には16個のドリル穴があり、伝熱管内での検出器の位置が確認できるようになっている。

検出器の挿入性試験は、ケーブル搬送速度が10～100 mm/sの範囲で行われ、各速度における検出器の移動挙動が調べられた。また、ケーブル搬送距離と実際の検出器位置との関係が調べられた。

Table 2.1 Main specifications of testing apparatus

- 1) Eddy current testing probe
 - Dimensions: $\phi 20^{\text{O. D.}} \times 43^{\text{L}}$ mm
 - Coil arrangement: Differential and self-induction
 - Coil diameter : $\phi 16$ and $\phi 18$ mm
 - Fill factor : 42 and 53%
 - Test frequency : 12~64 kHz
- 2) Test tube
 - Material : Hastelloy XR
 - Dimensions: $\phi 31.8^{\text{O. D.}} \times 3.5^{\text{t}}$ mm
 - Artificial discontinuities: ASME standards of steam generator tubes in a light-water reactor plant
- 3) Probe inserting equipment
 - Material : SUS304
 - Dimensions: $\phi 230^{\text{O. D.}} \times 1010^{\text{H}}$ mm
 - Functions : Self-support, probe transportation and measurement of probe location
 - Method of transportation: Rigidity of the probe cable
 - Cable transporting velocity: 10~100 mm/s
- 4) Mock-up model (simulating the hot header and one-scroll of the helically coiled tube)
 - Material : SUS304
 - Dimensions: Hot header $\phi 267^{\text{O. D.}} \times 9.3^{\text{t}} \times 1100^{\text{H}}$ mm
 Tube $\phi 31.8^{\text{O. D.}} \times 3.5^{\text{t}} \times 3540^{\text{L}}$ mm

Table 2.2 Chemical composition of Hastelloy XR and filler metal (mass %) ⁽³⁾ ⁽⁴⁾

	C	Mn	Si	P	S	Cr	Co	Mo	W	Fe	Ni	B	Al	Ti	Cu	Mg	N	O
Hastelloy XR																		
max.	0.15	1.00	0.50	0.04	0.03	23.0	2.50	10.0	1.00	20.0	Bal.	0.01	0.05	0.03	0.50	-	-	-
min.	0.05	0.75	0.25	-	-	20.5	-	8.00	0.20	17.0	Bal.	-	-	-	-	-	-	-
Filler metal																		
max.	0.07	0.85	0.50	0.003	0.002	21.5	0.10	8.50	0.60	19.0	Bal.	0.003	0.05	0.03	0.50	0.04	0.003	0.002
min.	0.05	0.75	0.20	-	-	20.5	-	8.00	0.20	18.0	Bal.	0.001	-	-	-	0.01	-	-

Table 2.3 Dimensions of artificial discontinuities in base metal

(a) Straight tube

Dimension	100% through-wall hole	Flat bottom hole		360-deg circumferential groove I.S.	90-deg circumferential groove I.S.
		I.S.	O.S.		
Diameter (mm)	0.5, 1.7, 2.0 3.2	3.2	1.7 3.2	—	—
Width (mm)	—	—	—	1.5	0.5 1.5
Depth (%)	100	20, 60	20, 40 20, 40 80	10, 20, 30 60	20, 40 20, 40

(b) Curved tube

Dimension	Flat bottom hole O.S.	360 deg. circumferential groove O.S.	90 deg. circumferential groove O.S.
Width (mm)	—	1.5	1.5
Depth (%)	20, 40	30	20

I.S.: Inner surface, O.S.: Outer surface

Table 2.4 Dimensions of artificial discontinuities in welded joint

(a) Straight tube				
Dimension	Flat bottom hole		90-deg circum-ferential groove	
	I.S.	O.S.	I.S.	O.S.
Diameter (mm)	1.7	1.7	—	—
Width (mm)	—	—	1.5	1.5
Depth (%)	40, 60	40, 60	40, 60	20, 40, 60

(b) Curved tube	
Dimension	90-deg circum-ferential groove O.S.
Diameter (mm)	—
Width (mm)	1.5
Depth (%)	20, 60

I.S.: Inner surface, O.S.: Outer surface

Table 2.5 Comparison of discontinuities between experiment and ASME standards in base metal

Items	Experimental discontinuities	ASME standards ^(e)	Remarks
100% through-wall hole	Diameter	ϕ 0.5, ϕ 1.7, ϕ 2.0 and ϕ 3.2 mm	ϕ 0.067 inch (ϕ 1.70 mm)
	Diameter	ϕ 1.7 and ϕ 3.2 mm	ϕ 3/16 inch (ϕ 4.76 mm)
Flat bottom hole	Depth	20, 40, 60 and 80% at inner and outer tube surfaces	20% through from tube outer surface
	Width	0.5 and 1.5 mm	1/16 inch (1.59 mm)
360-deg circumferential groove	Depth	10, 20, 30, 60 and 80% at inner and outer tube surfaces	10% through from tube inner surface

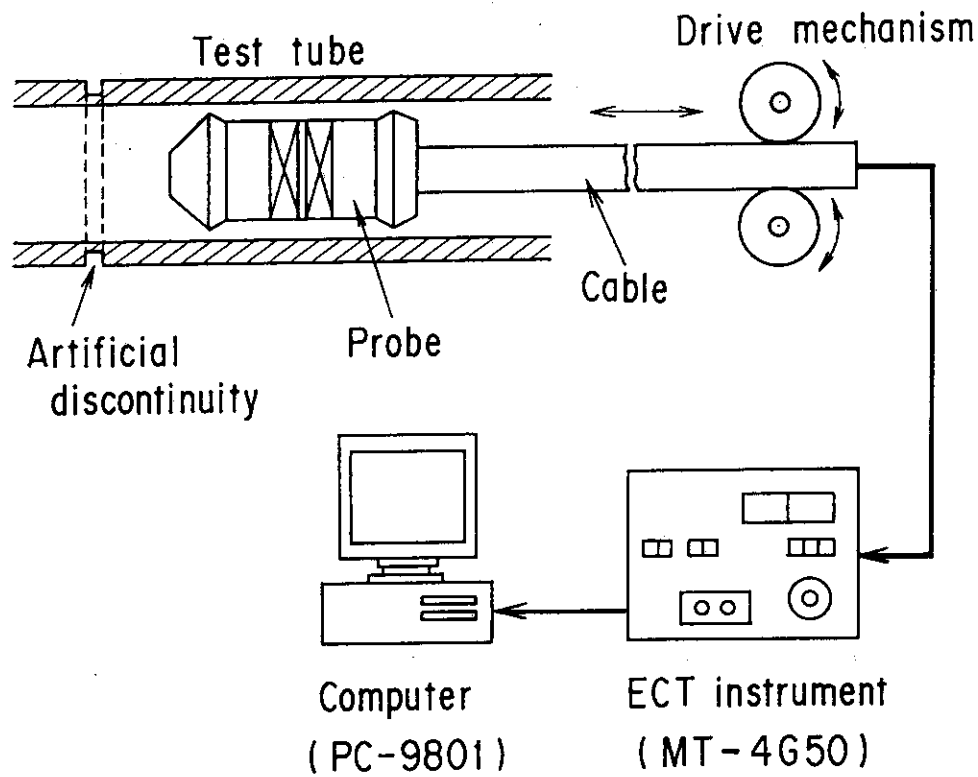


Fig. 2.1 Schematic diagram of testing apparatus for inspection test

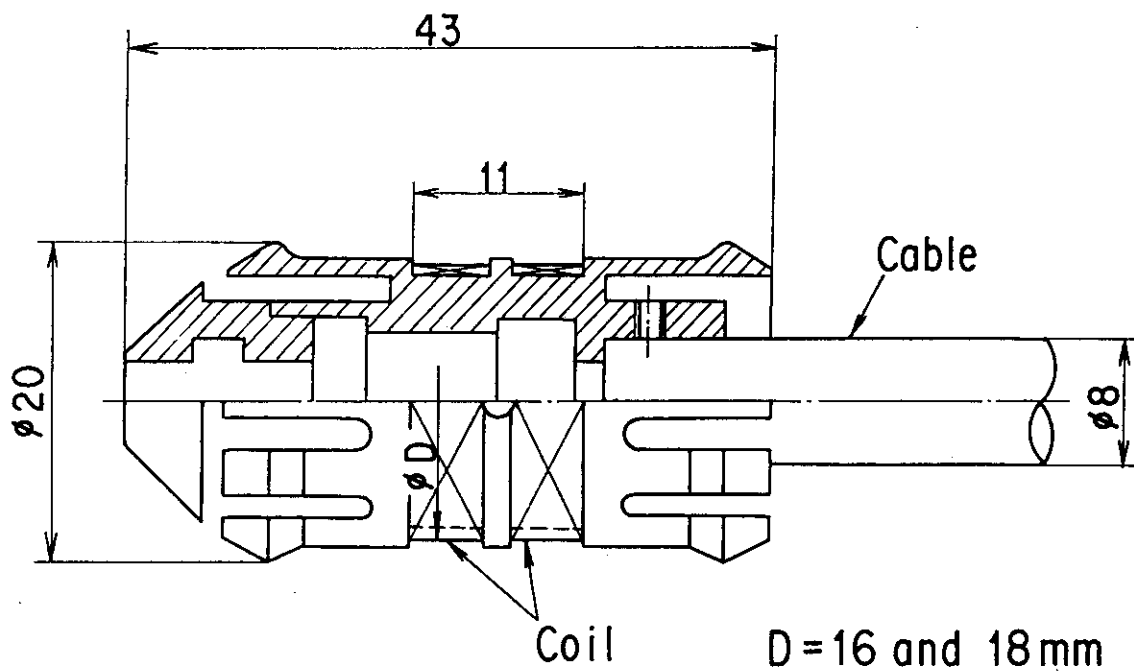
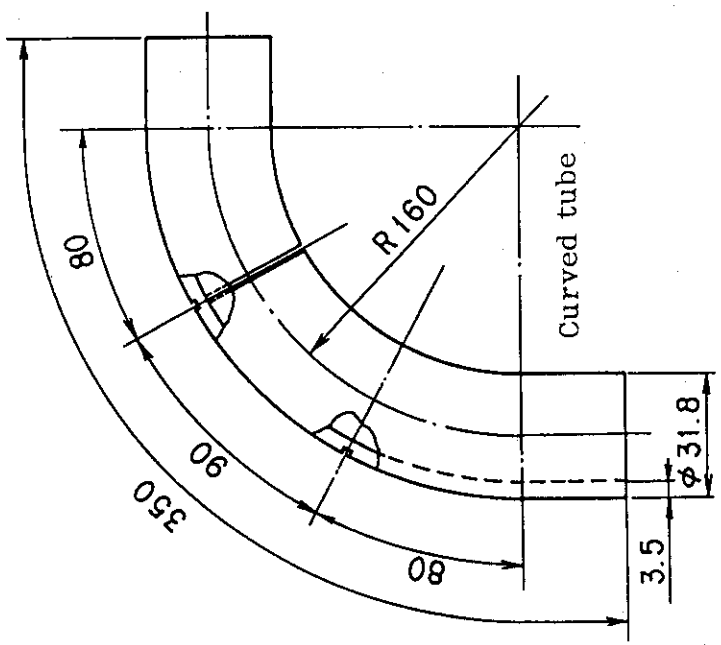
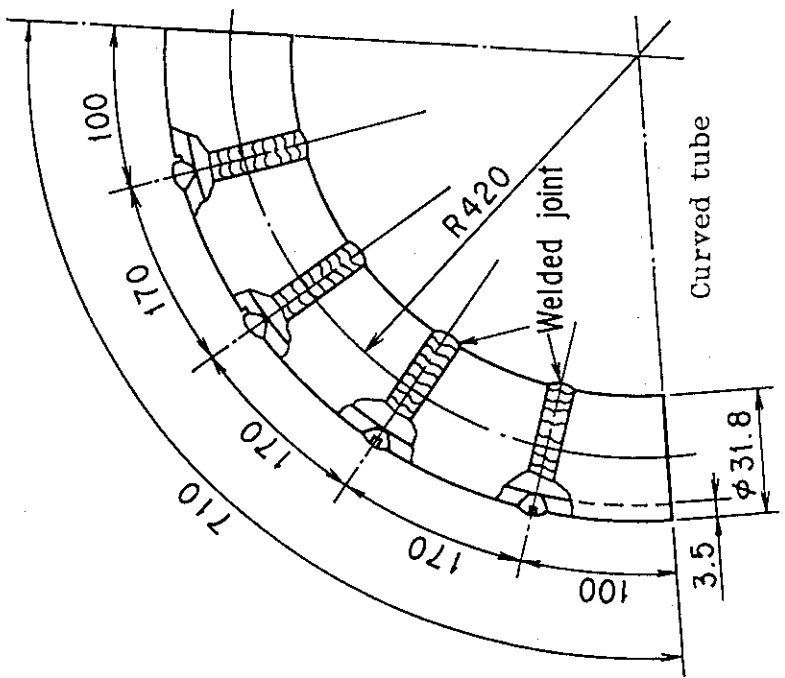
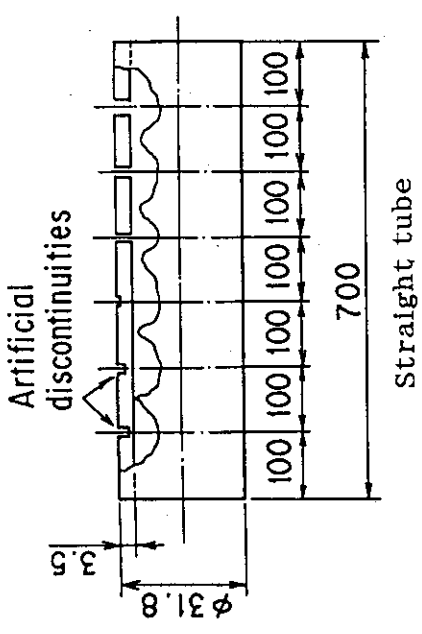
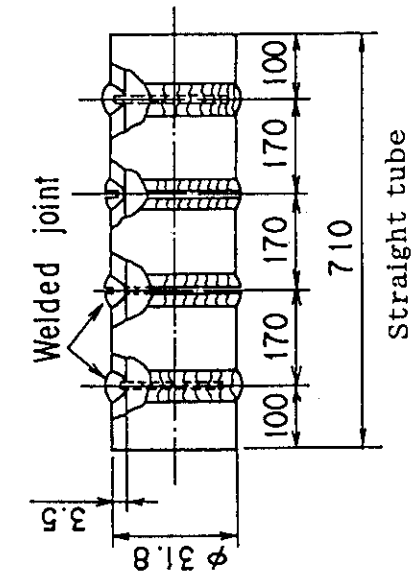


Fig. 2.2 Cross section of ECT probe



(a) Base metal

(b) Welded joint

Fig. 2.3 Test tubes including artificial discontinuities

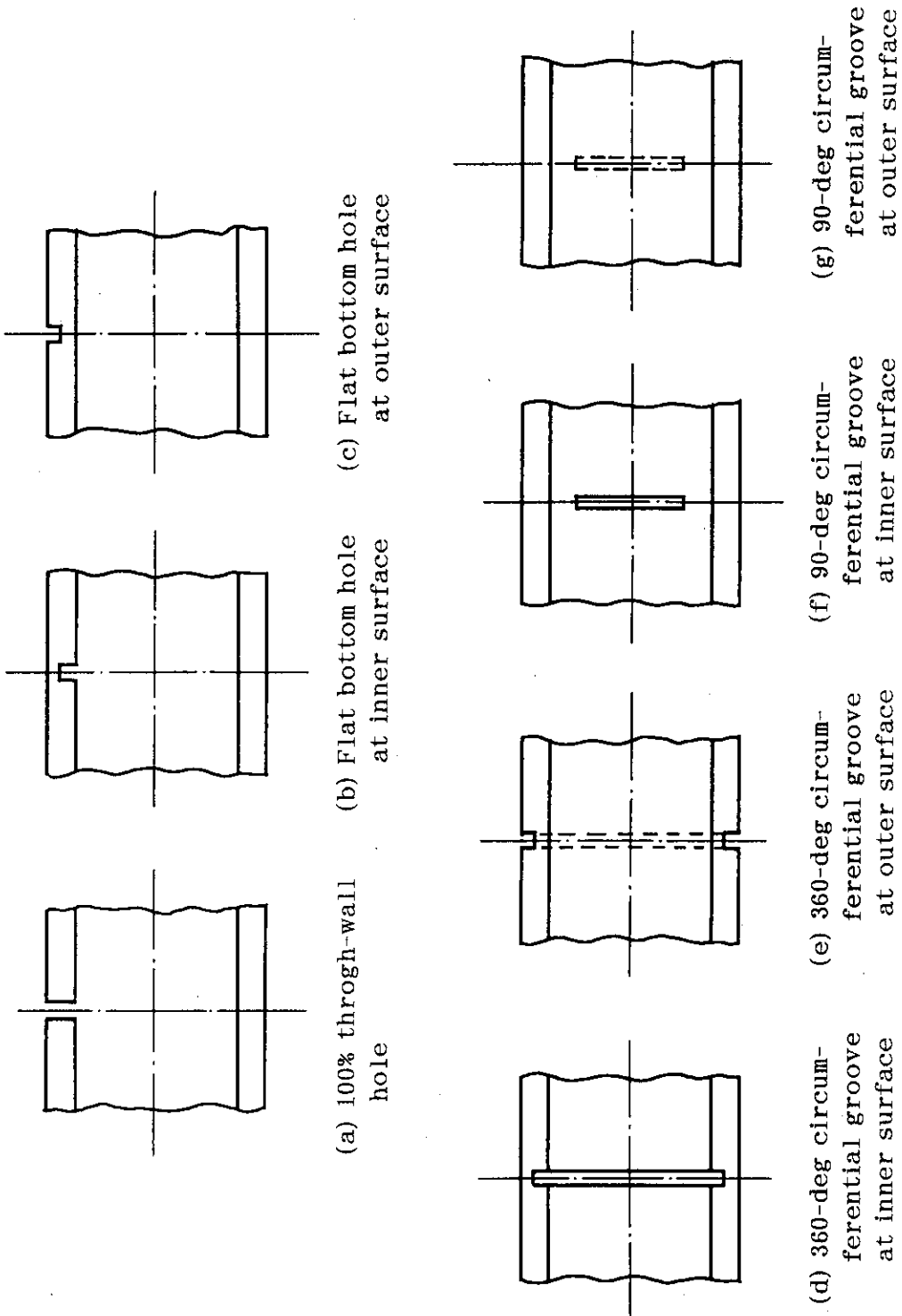
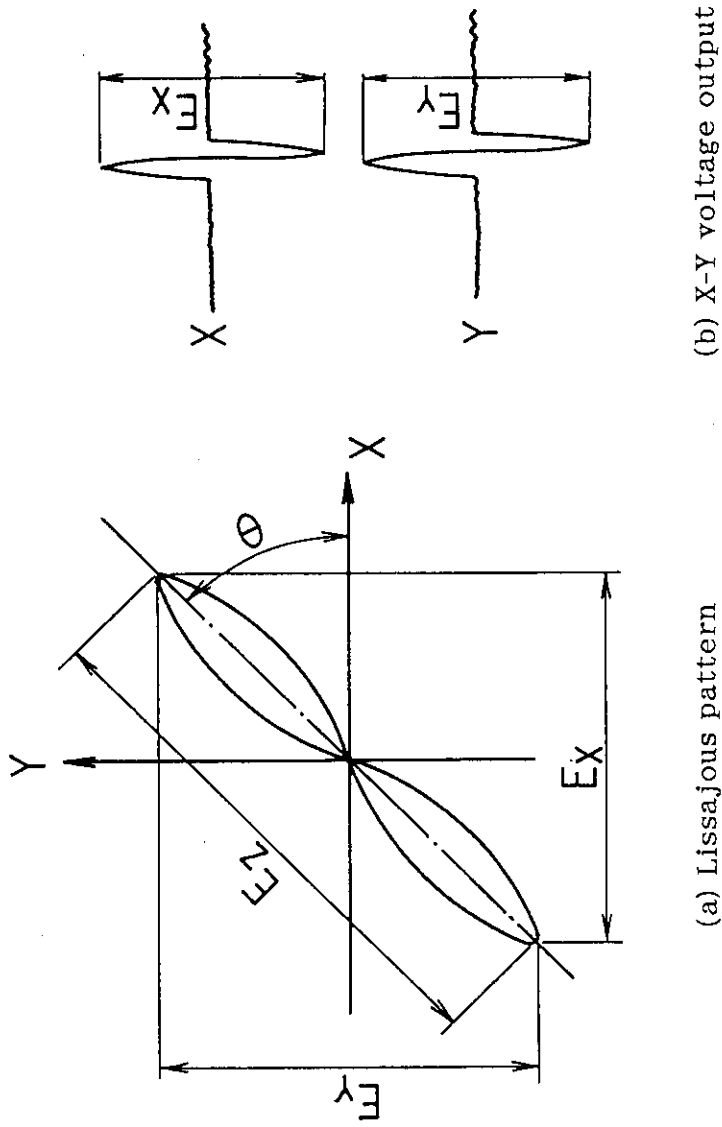


Fig. 2.4 Illustrated shapes of artificial discontinuities



(a) Lissajous pattern

(b) X-Y voltage output

Fig. 2.5 Eddy current signal for discontinuity

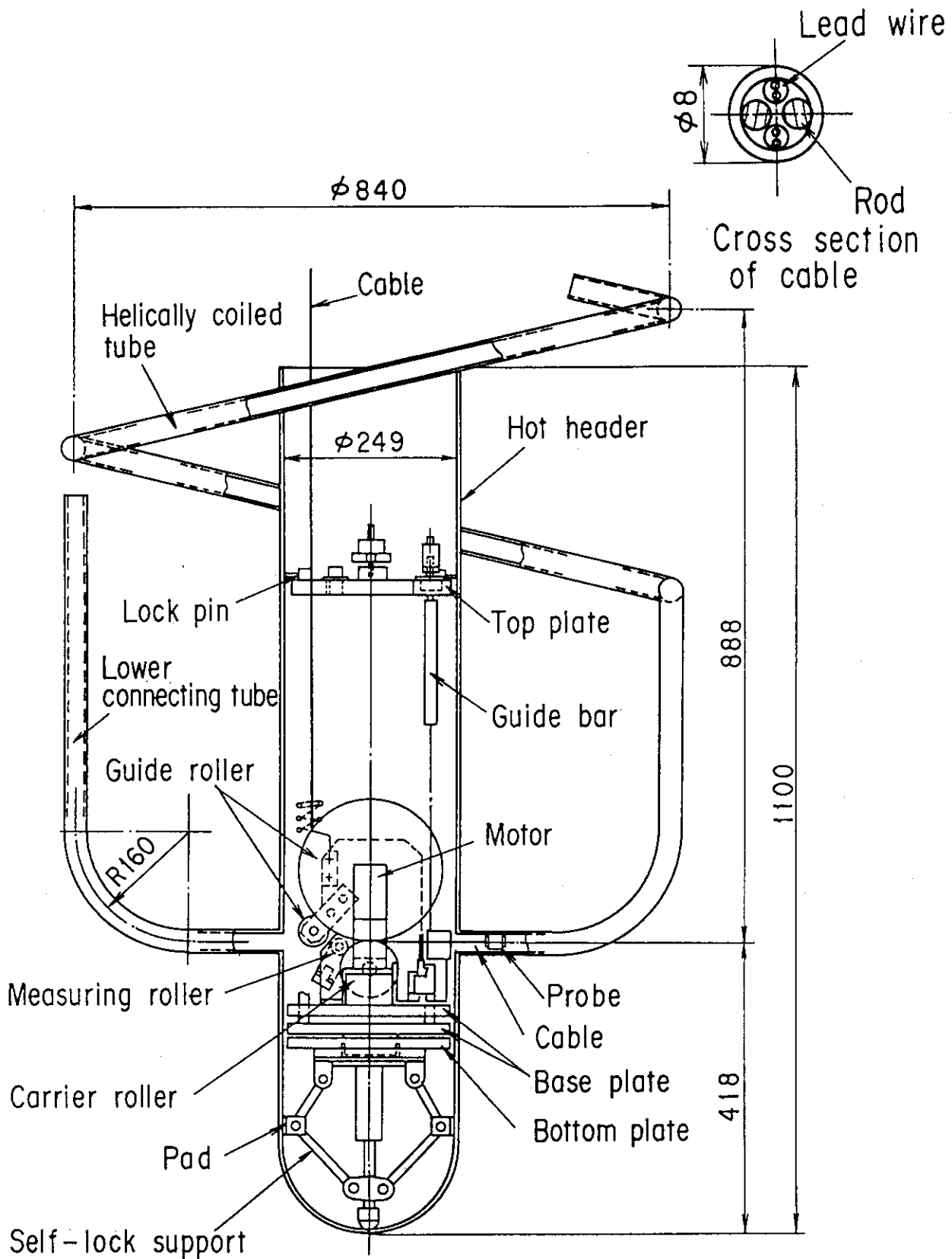
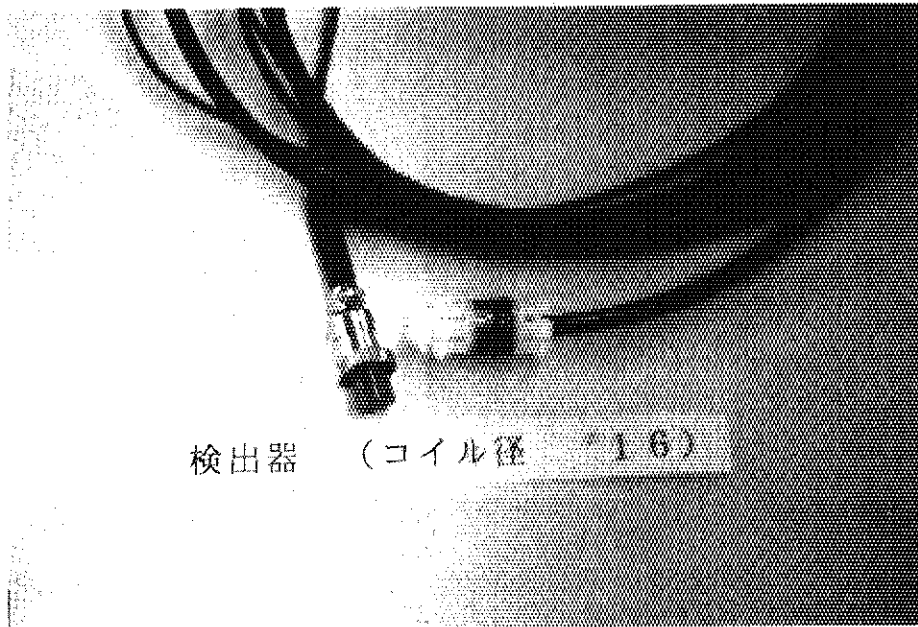
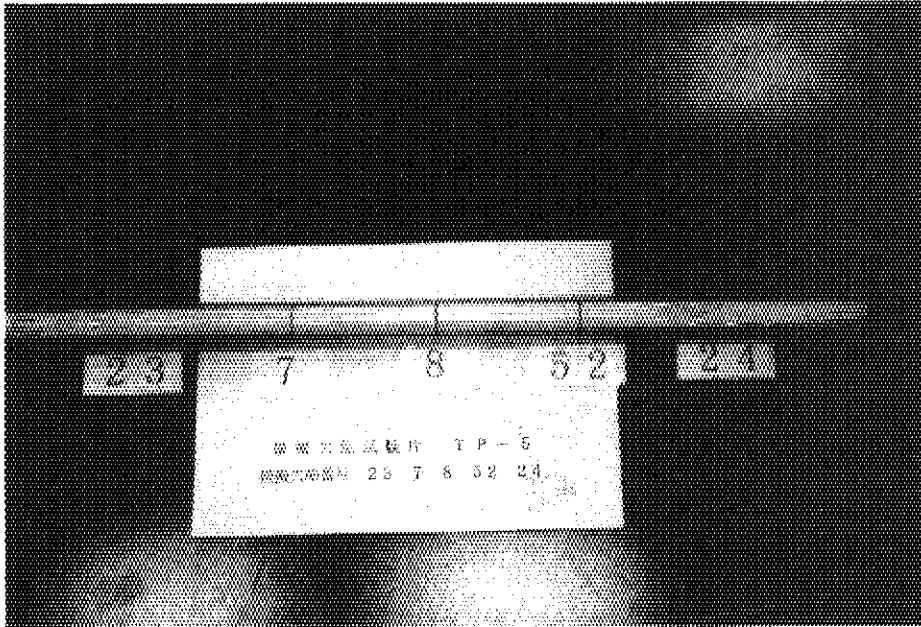


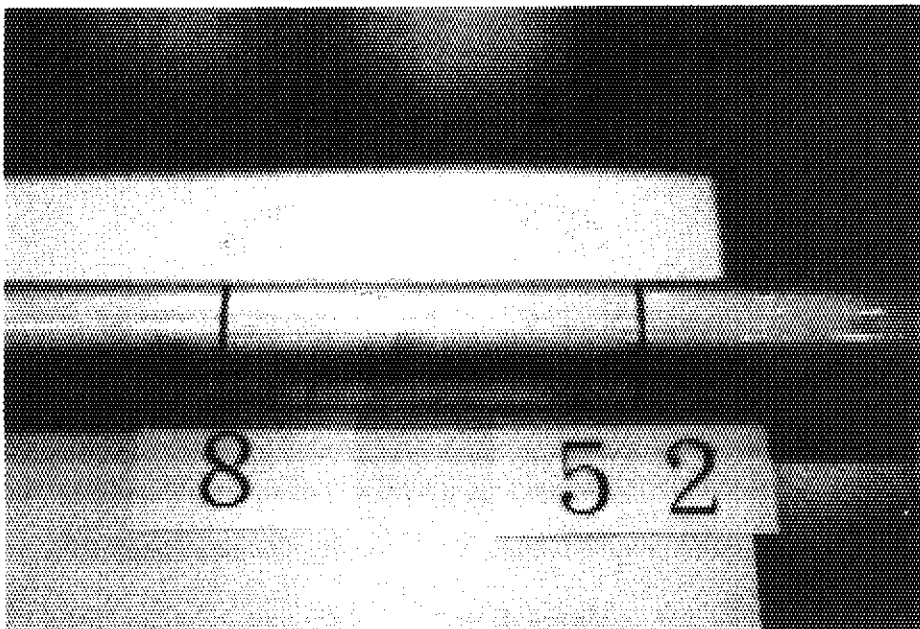
Fig. 2.6 Schematic view of probe inserting equipment and mock-up model of hot header and tubes



Phot. 2.1 External appearance of ECT probe

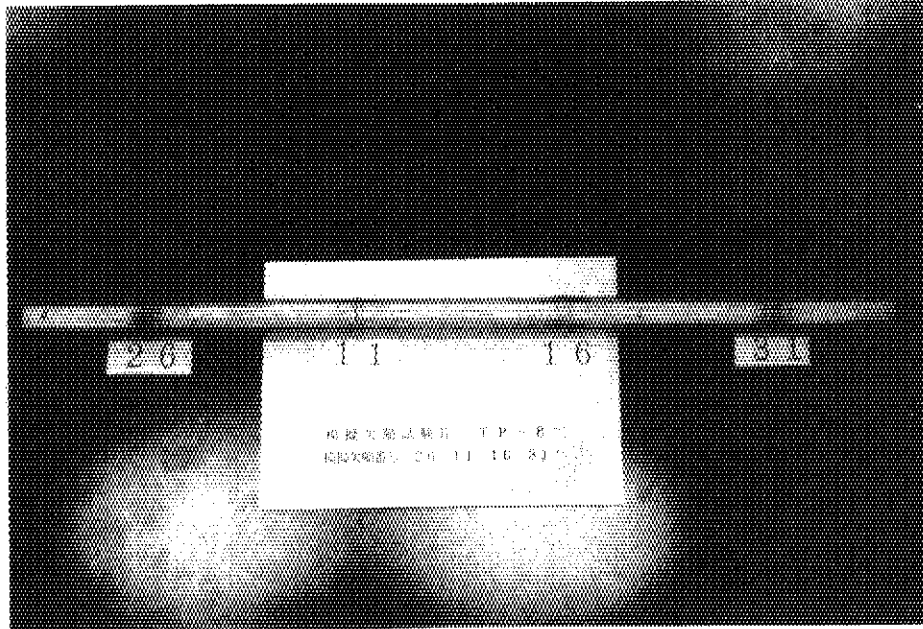


(a) Test tube

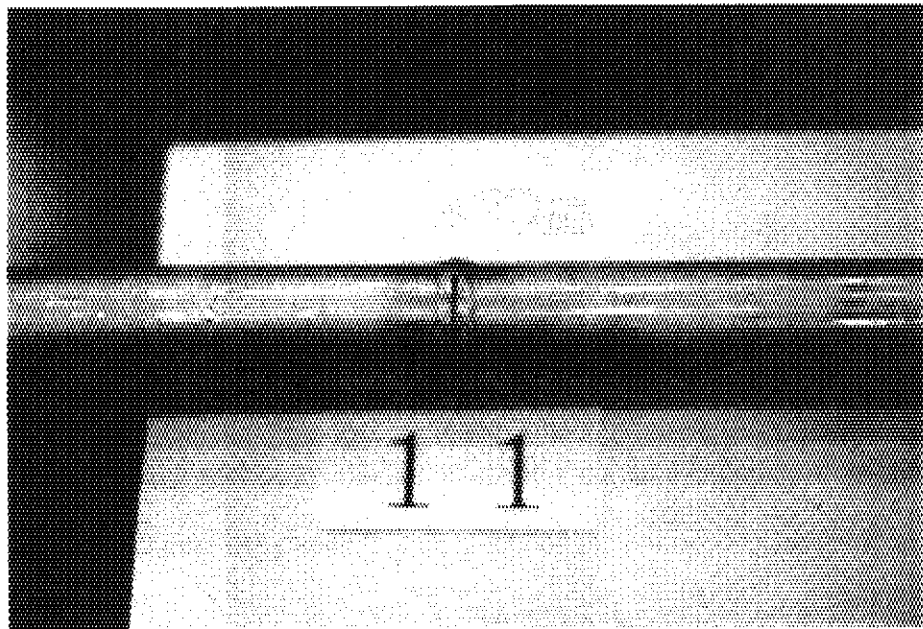


(b) 90- and 360-deg grooves

Phot. 2.2 Test tube of base metal

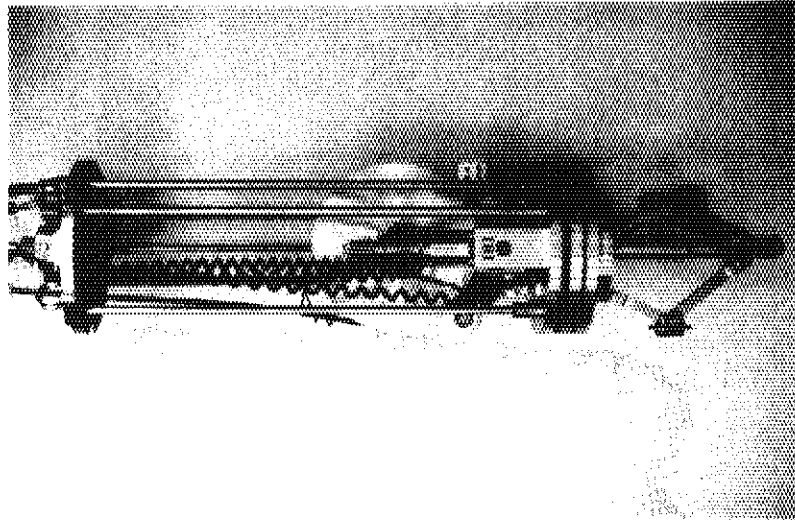


(a) Test tube

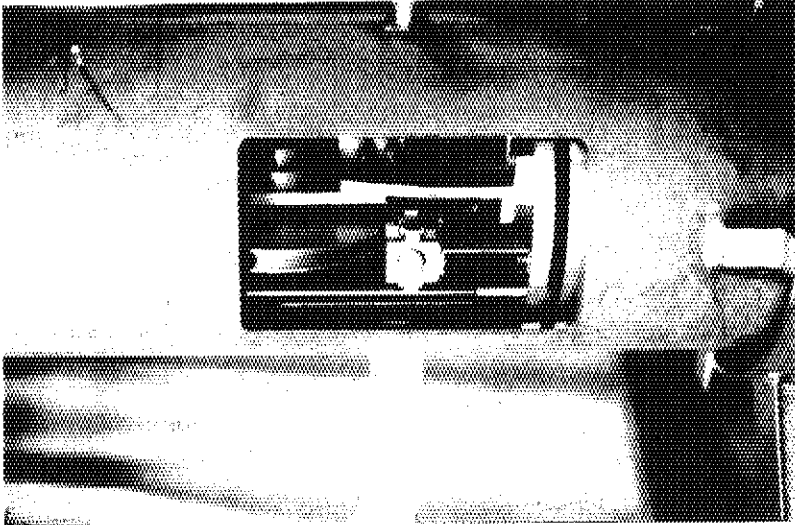


(b) 90-deg groove

Phot. 2.3 Test tube of welded joint



(a) External appearance



(b) PIE settled in mock-up model

Phot. 2.4 Probe inserting equipment (PIE)

3. 検出器特性試験の結果

検出器の特性試験は、コイル径 ϕ 16mmの検出器を中心に実施しており、以下に述べる3.1～3.6章の結果はコイル径 ϕ 16mmの検出器のものである。なお、コイル径 ϕ 18mmの検出器との相違点は3.7節で述べる。

3.1 試験周波数の影響

E C T 検出器の基本特性を確認するために、伝熱管母材部の欠陥について、単一周波数で検出特性を調べた。Fig. 3.1に標準試料を用いて作成したリサージュ図形の位相角 θ と欠陥深さ δ （管壁厚さの10～100%）の関係を表す較正曲線を示す。使用した検出器のコイル径は ϕ 16mm、検出器の移動速度は50 mm/sである。図の記号は各周波数における欠陥の位相角実測値を示したもので、約 $0\sim 140^\circ$ の範囲が試験片外面の欠陥（図のO.S.）に、約 $140\sim 180^\circ$ が内面欠陥（同I.S.）に対応している。較正曲線はこの実測値から最適な3次曲線で作成した。試験周波数によって欠陥の位相角は大きく変化しており、周波数が高くなるほど欠陥深さに対する位相角の幅が広がる。64 kHzを超える周波数では、(2.1)式に示すように周波数が高いほど渦電流の浸透深さが低減するために外面の浅い欠陥が検出不可可能となり、較正曲線の作成ができなかった。

Fig. 3.2は内外面の全周溝の各周波数におけるリサージュ図形の振幅 E_z 、電圧出力値を示したもので、出力ゲインは各欠陥に対して共通である。内面欠陥では周波数と電圧出力の関係が明確ではないが、外面欠陥では周波数が低いほど電圧出力が大きくなっており、12 kHzの電圧出力は64 kHzの場合の4～5倍である。これは、(2.1)式の渦電流の浸透深さ t と周波数 f の関係 $t \propto f^{-0.5}$ に示されるように、周波数が低いほど浸透深さが深くなり、電圧出力が大きくなったと考えられる。Fig. 3.3は貫通穴の穴径及び周波数による電圧出力変化を示したものである。全周溝と同様に低い周波数ほど、また、穴径が大きなものほど電圧出力は高い。この電圧出力は、欠陥の応答信号から欠陥サイズ（例えば、穴状欠陥の直径、溝状欠陥の幅等）を推測する上で重要な値である。

64 kHzでは、 ϕ 1.7および ϕ 3.2 mmの深さ20%の外面平底穴の検出が不可能であったが、12～48 kHzの周波数範囲では、どの周波数においてもTable 2.3に示す欠陥は全て検出可能であった。電圧出力から判断すると最適な周波数は12 kHzとなるが、各欠陥深さに対する位相角の範囲はFig. 3.1に示すように他の周波数に比較して非常に狭い。したがって、本試験では、特に外面欠陥の位相角が広範囲で計測できる周波数48 kHzを基本周波数として選択した。

3.2 母材部の検出特性

試験周波数48 kHzのリサージュ図形の一例（1.5 mm幅、深さ60%の内外面全周溝）をFig. 3.4に示す。Fig. 3.5は、各欠陥の位相角と深さの関係を示したもの

である。較正曲線は周波数48 kHzにおける標準試料の計測値から作成されたもので、較正曲線に対する標準試料の標準偏差は、外面欠陥については 2.9° 、内面欠陥については 0.6° である。標準試料以外の外面欠陥および貫通穴は較正曲線に対して約 $\pm 11^\circ$ 、内面欠陥では $\pm 6^\circ$ の範囲内ではばらつきがみられる。母材部では、ASME Codeで指定された欠陥検出能力を十分満足しており、更に $\phi 0.5$ mmの貫通穴および0.5 mm幅の部分溝等の小さな欠陥も十分検出可能であることを確認した。

Fig. 3.6は各欠陥の実深さと予測深さの比較を示したもので、予測深さは各欠陥の位相角実測値から求められた較正曲線上の深さである。実深さに対して予測深さは $\pm 18\%$ の範囲内ではばらつきが生じており、本試験で得られた較正曲線を使用すれば、IHX伝熱管の母材部に対してこの精度内で欠陥深さを推定することが可能と思われる。

Fig. 3.5及び3.6にみられるように、曲管部の欠陥については試験個数は少ないが、直管部の欠陥と比較して較正曲線に対する位相角のばらつきおよび実深さと予測深さの誤差等に顕著な差はみられず、直管と同じ方法で欠陥の検出が可能であると考えられる。これは、自己比較型方式のコイル配列により、曲管の曲率の影響が削除されたことによる。

3.3 伝熱管支持構造物の影響

IHX伝熱管の支持構造は、Fig. 3.7に示すように伝熱管保護の目的で伝熱管の外周にハステロイXR製の円筒状のスリーブを設置し、更に板状の支持構造物で伝熱管の位置決めおよび支持を行う設計としている。したがって、伝熱管支持構造物が存在する部分のECTでは伝熱管に密接したこのスリーブが最も影響を及ぼすと考えられるため、その影響について試験した。

一般に熱交換器のECTにおいて、管板等の伝熱管の外部にある構造物の影響を削除するために多重周波数が使用されており⁽⁷⁾、本試験でも基本周波数を48 kHzとし、他の周波数（補償周波数）を重複させて伝熱管支持構造物部の欠陥検出を行った。

本試験で使用したスリーブは $\phi 40^{D_1} \times 4^t$ mm、長さ L_0 は5 mm（スリーブA）及び50 mm（スリーブB）とし、スリーブ長さの影響についても調べた。Fig. 3.8はスリーブBが存在する場合のリサージュ図形を示したもので、(a) 欠陥がない母材部でのスリーブのみの図形、(b) 幅1.5 mm、スリーブの端部に深さ60%の外面全周溝が位置したものを単一周波数（48 kHz）で計測した場合、(c) (b)の欠陥を多重周波数（48+23 kHz）で計測した場合を示している。補償周波数を変化させ、そのときのリサージュ図形を調べたところ、補償周波数が23 kHz（基本周波数の約1/2）のときにスリーブの雑音が低減され、欠陥のみの信号が得られることがわかった。したがって、母材部の欠陥検出と同様に、スリーブがない状態で標準試料を用いて周波数48+23 kHzの較正曲線を作成し、各欠陥との比較検出を行った。較正曲線に対する標準試料の標準偏差は、外面欠陥については 3.8° 、

内面欠陥については 0.2° である。

Fig. 3.9及び3.10は、スリーブAにおける各欠陥の位相角と深さの関係及び実深さと予測深さの比較を示したものである。スリーブと欠陥の位置関係による検出特性を確認するために、①欠陥がスリーブの中央に位置する場合（図中のLocation a）、②欠陥がスリーブの端部に位置する場合（同Location b）の2条件について調べている。Table 2.3 に示す欠陥は全て検出可能であったが、0.5mm幅溝の位相角のばらつきが非常に大きくなっており、実深さと予測深さの誤差は±30%以下であった。また、スリーブと欠陥の位置関係については、上記の①及び②の位置でも検出特性はほぼ同じであった。

Fig. 3.11及び3.12は、スリーブBにおける各欠陥の位相角と深さの関係及び実深さと予測深さの比較を示したものである。スリーブAと比較して大きく異なっていることは、スリーブB内に欠陥が位置する場合には検出性能が低下し、一部の外面欠陥が検出不可能となった。検出性能が低下する欠陥の位置は、スリーブ内で端部から5～10mmの距離からであり、検出不可能な外面欠陥は $\phi 1.7$ および $\phi 3.2$ mmの平底穴、並びに0.5 mm幅の部分溝で、深さはともに20および40%の体積の小さな欠陥である。この検出性能が低下した理由としては以下のことが考えられる。コイル幅とスリーブBの長さの差が顕著（コイル幅の約10倍）であるために、検出器はスリーブBが存在する部分で試験片の肉厚にスリーブの肉厚が加わった伝熱管と判断している。そして、伝熱管の実効的板厚が増したことにより欠陥の体積率が相対的に減少し、検出性能が低下したと考えられる。

また、スリーブBに欠陥が重なった場合には、実深さと予想深さの誤差は±23%以下であった。

IHXの伝熱管支持構造部ではスリーブの中央に伝熱管支持板があり、本試験の結果から判断するとこの位置に欠陥が発生した場合には検出が困難となる可能性が高い。しかし、HTTRで使用される冷却材はヘリウムガスであり、かつ、炉内構造物の主要素材である黒鉛の腐食を防止するためにヘリウムガス内の不純物濃度は厳しく制限され、腐食による伝熱管の欠陥の発生は考え難い。したがって、欠陥が発生する原因は摩耗等の機械的な要因が主であると考えられ、伝熱管支持構造部ではスリーブの端部で欠陥が発生すると考えられる。本試験ではスリーブ端部においても0.5 mm幅の部分溝状欠陥が検出可能なことを確認しており、実機においても本試験で使用した検出器および試験周波数で十分対応可能と思われる。

3.4 溶接部の影響

IHX伝熱管の溶接は伝熱管の外面から行い、内面に僅かながらに溶接金属の盛上がりが生じる。Fig. 3.13は欠陥のない溶接部におけるリサーチ図形を示したもので、(a)は外面の余盛りと内面の溶接金属の盛上がりがある場合、(b)は外面の余盛りのみを機械加工により平滑化した場合、(c)は内外面を平滑化した場合で、周波数48 kHzで探傷した。(c)ではほとんど信号が現れていないが、

(a)および(b)では欠陥が存在しないにもかかわらず位相角が約 175° のリサージュ図形が現れている。このことは、内面の溶接金属が雑音の主原因であることを示している。本試験片内面の溶接金属の盛上がりは、高さが約 0.5mm と微小ではあるが、検出器に近いためにその影響が現れたと考えられる。

Fig. 3.14 は溶接部における 1.5mm 幅、深さ 60% の内面全周溝のリサージュ図形を示したもので、(a)が単一周波数(48kHz)、(b)が多重周波数($48+180\text{kHz}$)で計測した。(a)では欠陥と溶接部の信号が区別できないのに対して、(b)では溶接部の信号が低減されて欠陥の信号のみが示されている。溶接部の影響を低減するために最適な補償周波数は基本周波数の約 3.75 倍であり、これは伝熱管支持構造物の影響を低減させる周波数の組み合わせとは逆である。この理由は、伝熱管支持構造物の場合には伝熱管外部の障害物の影響を削除するのに対し、溶接部では伝熱管内面の溶接金属の影響が顕著であり、伝熱管内部の障害物の影響を削除することによる。実機では伝熱管長が約 30m と長いために、その内面を平滑に加工することは不可能であり、また、Fig. 3.13 に示されているように外面の余盛りの影響が小さいことから、外面の余盛りおよび内面の溶接金属の盛上がりがある溶接部にTable 2.3 に示す欠陥を加工して試験を実施した。試験は伝熱管支持構造部の欠陥検出と同様に、標準試料を用いて周波数 $48+180\text{kHz}$ の較正曲線を作成し、各欠陥との比較検討を行った。較正曲線に対する標準試料の標準偏差は、外面欠陥については 2.3° 、内面欠陥については 1.1° である。

Fig. 3.15及び3.16 は、各欠陥の位相角と深さの関係及び実深さと予測深さの比較を示したものである。溶接部と欠陥の位置関係による検出特性を確認するために、①欠陥が溶接部の中央に位置する場合、②欠陥が溶接金属と母材の融合部に位置する場合の2条件について調べた。周波数 $48+180\text{kHz}$ の較正曲線は、単一周波数 48kHz および多重周波数 $48+23\text{kHz}$ の較正曲線に比較して大きく変化しており、貫通穴の位相角は約 95° となった。溶接部体積の小さな欠陥の検出能力が低下しており、 $\phi 1.7\text{mm}$ 、深さ 40 、 60% の内外面平底穴が検出不可能であった。 1.5mm 幅の内面部分は深さ 20% からの検出が可能であるのに対し、外面部分溝は $20\sim 40\%$ の深さが検出不可能となり、深さ 60% については検出可能であった。また、検出可能な欠陥の実深さと予想深さの誤差は $\pm 20\%$ 以下であった。

3.5 周波数組合わせの影響

多重周波数における周波数組合わせの影響を確認するため、 $48+180\text{kHz}$ 以外の多重周波数により溶接部欠陥の検出特性を調べた。基本周波数は 32 及び 64kHz とし、溶接部のノイズを削除して欠陥部の信号のみが取出せる補償周波数を求めた。多重周波数の組合わせは、 $32+116\text{kHz}$ 及び $64+250\text{kHz}$ であり、各々、基本周波数に対する補償周波数の比率は 3.63 及び 3.91 倍で、 $48+180\text{kHz}$ の組合わせとほぼ同じである。Fig. 3.17及び3.18 は、 $32+116\text{kHz}$ 及び $64+250\text{kHz}$ における各欠陥の位相角と深さの関係を示したものである。 $48+180\text{kHz}$ の結果(Fig. 3.15)と比較すると、両図とも較正曲線及び各欠陥の位相角の指示値は

大きく変化しており、較正曲線に対する位相角のばらつきも $48+180$ kHzの結果よりも大きくなっている。内外面の欠陥深さに対する位相角の変化範囲は、 $32+116$ kHzでは外面欠陥が約 $3\sim 71^\circ$ に対して内面欠陥は約 $71\sim 176^\circ$ と後者が大きいのに対し、 $64+250$ kHzでは外面欠陥が約 $8\sim 137^\circ$ に対して内面欠陥は約 $137\sim 173^\circ$ と前者が大きくなっており、位相角の変化範囲は内外面欠陥のどちらかに片寄っている。しかし、 $48+180$ kHzでは外面欠陥が約 $9\sim 95^\circ$ に対して内面欠陥は約 $95\sim 166^\circ$ であるため、内外面の欠陥をほぼ均等な変化範囲で測定することが可能であり、また、各欠陥の位相角のばらつきも小さい。このことから、溶接部の欠陥については、多重周波数 $48+180$ kHzが最適な周波数組合わせと判断できる。

多重周波数の場合には検出感度が低下する傾向がみられ、これは母材部の欠陥に対しても同様であった。Fig. 3.19は多重周波数 $48+180$ kHzによる母材部欠陥の位相角と深さの関係を示したものである。単一周波数 48 kHzの場合にはTable 2.3に示す欠陥は全て検出可能であったが、多重周波数 $48+180$ kHzでは直径 $\phi 0.5$ mmの貫通穴及び直径 $\phi 1.7$ mm、深さ 20% の外面平底穴が検出不能となった。この結果より、伝熱管支持部及び溶接部ではノイズを削除するために多重周波数を使用せざるをえないが、母材部では単一周波数がよいと考えられる。

3.6 検出器移動速度の影響

一般に、検出器が導体内を移動する場合には、導体内に速度に比例した起電力が発生する。この起電力は渦電流の流れを変えるため、検出器の移動速度によって検出特性が変化する可能性がある。このため、 $10\sim 100$ mm/sの範囲で移動速度 V を変化させて検出特性を調べた。Fig. 3.20は検出器の移動速度の変化による特性を示したもので、母材部の欠陥については単一周波数(48 kHz)、スリーブA部については多重周波数($48+23$ kHz)、溶接部については多重周波数($48+180$ kHz)で試験している。移動速度が変化しても各欠陥の位相角はほぼ一定で、平均値に対して $\pm 3^\circ$ 以内の変化であり、また、電圧出力にも変化はみられず、本試験の速度範囲内では検出特性は移動速度の影響を受けないことを確認した。

3.7 コイル径の影響

一般に、伝熱管内において検出器の充填率が高いほど、検出感度は優れているといわれている。コイル径の影響を確認するために、母材部の欠陥についてコイル径 $\phi 18$ mmの検出器(検出器B)を用いて探傷試験を行い、コイル径 $\phi 16$ mm(検出器A)との比較検討を実施した。

Fig. 3.21は、検出器Bの各周波数における標準試料(伝熱管母材部の $\phi 1.7$ mm貫通穴及び 1.5 mm幅全周溝)の位相角と深さの関係を示したものである。周波数が 64 kHzの場合には深さ 10% の外面全周溝が検出不能となったが、検出器Aの結果(Fig. 3.1)と比べても顕著な差はみられない。

Fig. 3.22及び3.23は、検出器Bの各周波数における全周溝及び貫通穴の電圧

出力を示したものである。同図にみられるように、低い周波数ほど電圧出力が大きくなっており、この傾向は検出器 A の結果と同じである。しかし、検出器 B の電圧出力の絶対値は、検出器 A の 1.5~1.7 倍であり、検出器 B の感度が高いことが示されている。

Fig. 3.24 及び 3.25 は、周波数 48 kHz における検出器 B の各欠陥の位相角と深さの関係及び実深さと予測深さの比較を示したものである。検出器 A の結果 (Fig. 3.5 及び 3.6) と比較すると、各欠陥に位相角のばらつきが検出器 A よりもやや大きく、予想深さの誤差も検出器 A の $\pm 18\%$ に対し、検出器 B では $\pm 22\%$ と僅かに大きくなっている。

母材部欠陥に対する検出器 A 及び B の検出性能を比較すると、信号出力では検出器 B が優れているのに対し、位相角のばらつき及び予想深さの誤差の点では検出器 B がやや劣っているが、両者の検出性能については大差ないといえる。検出器 A 及び B の優劣については、伝熱管支持構造部及び溶接部の検出特性を含めて考慮すべきである。

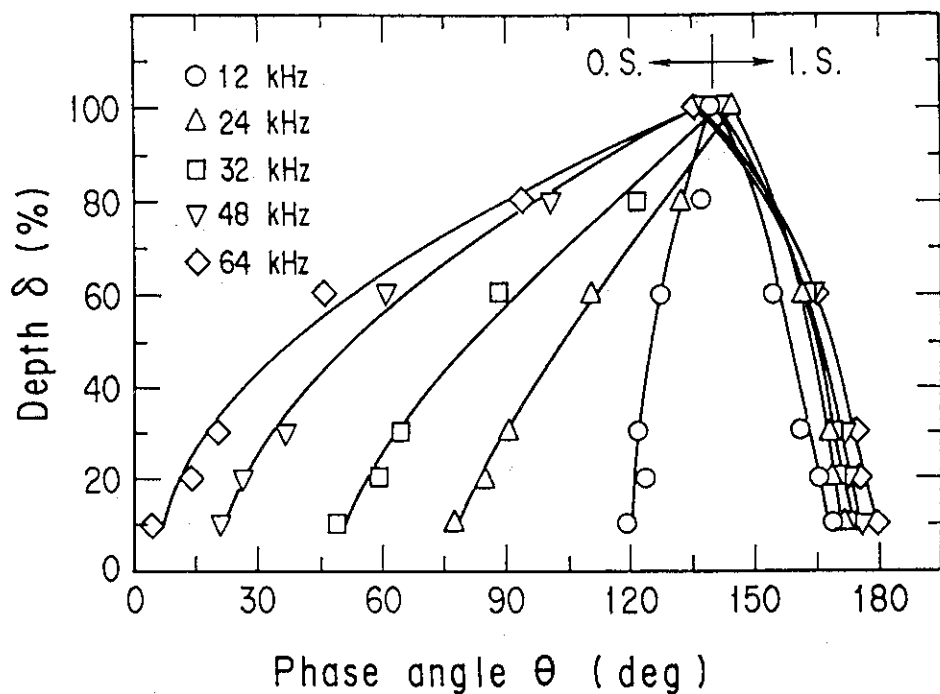


Fig. 3.1 Calibration curves obtained from 360-deg circumferential grooves, 1.5 mm in width, and a 100% through-wall hole, 1.7 mm in diameter, in base metal

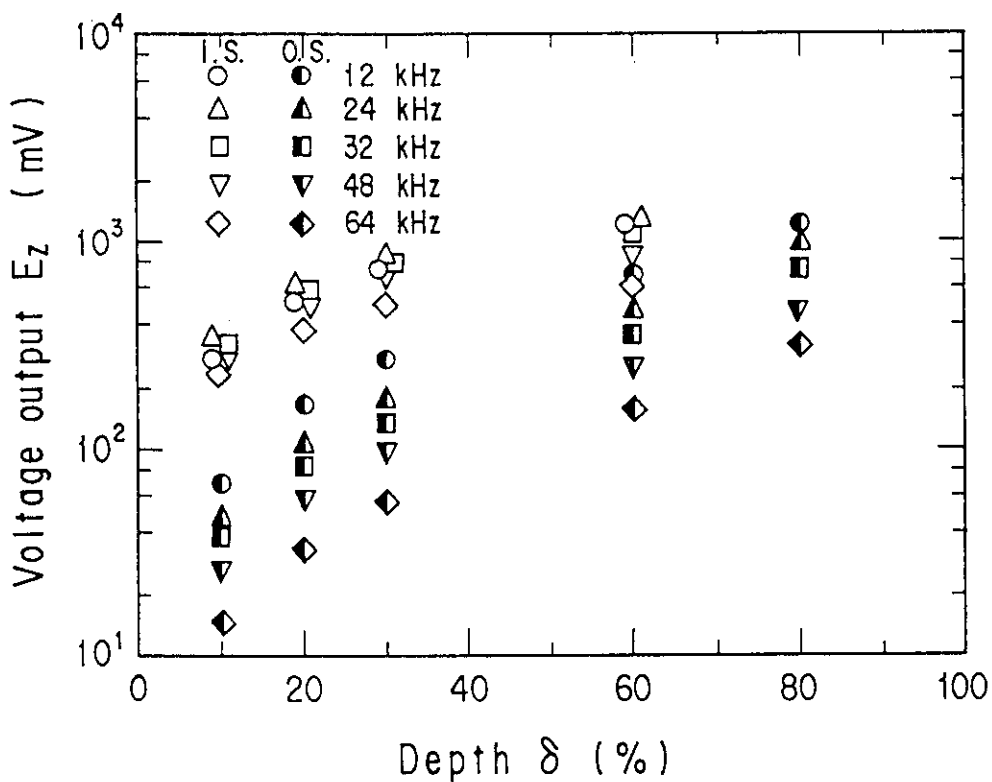


Fig. 3.2 Voltage outputs of Lissajous patterns of 360-deg circumferential grooves in base metal

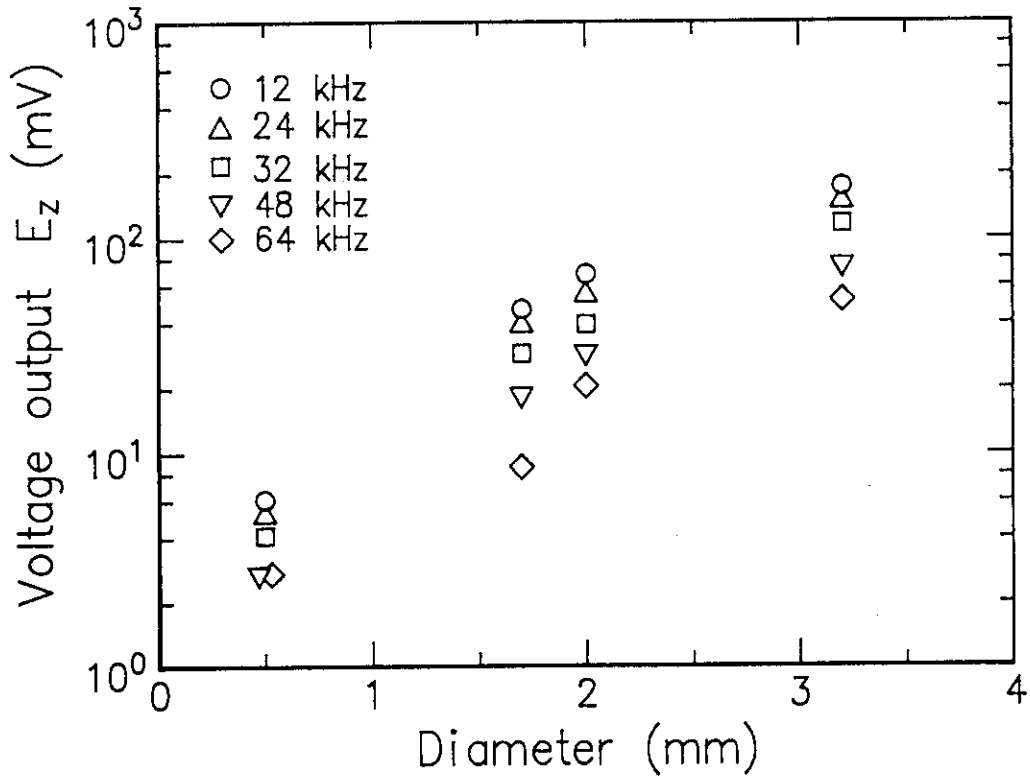


Fig. 3.3 Voltage outputs of Lissajous patterns of 100% through-wall holes in base metal

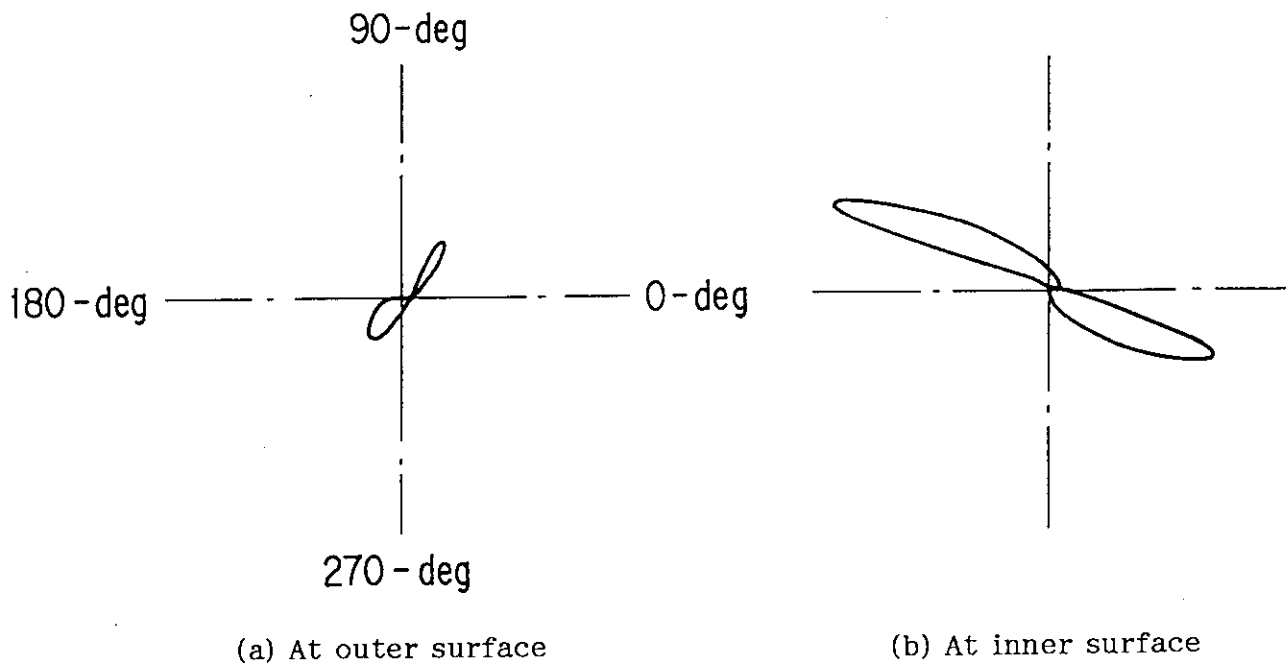


Fig. 3.4 Lissajous patterns of 360-deg circumferential grooves, 1.5 mm in width and 60 % in depth, in base metal (frequency: 48 kHz)

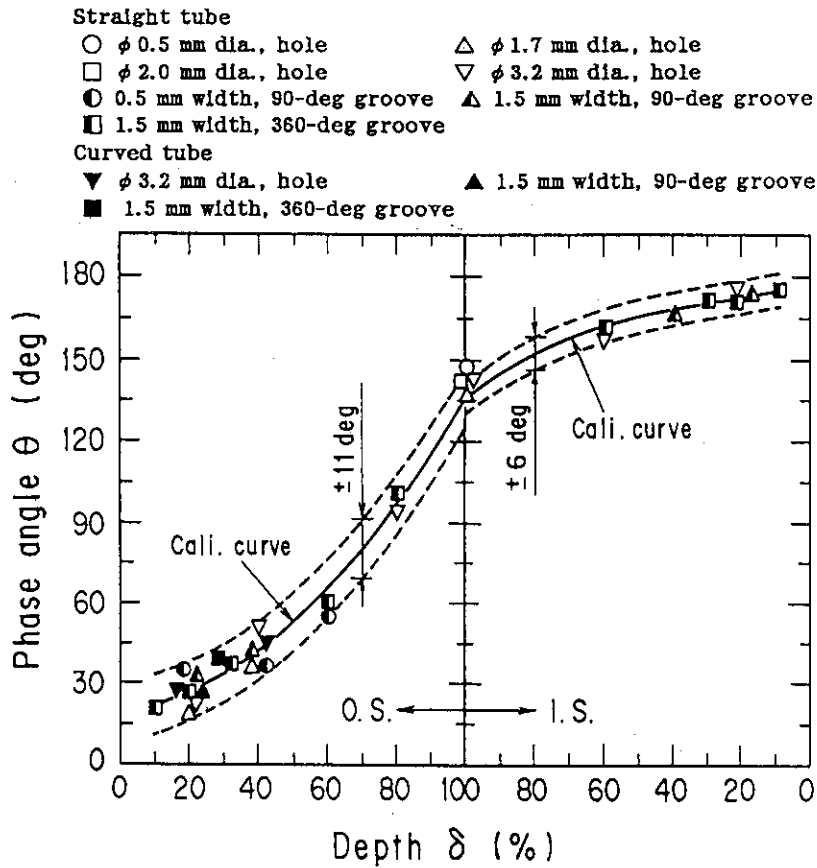


Fig. 3.5 Relation between phase angle and depth of discontinuities in base metal (frequency: 48 kHz)

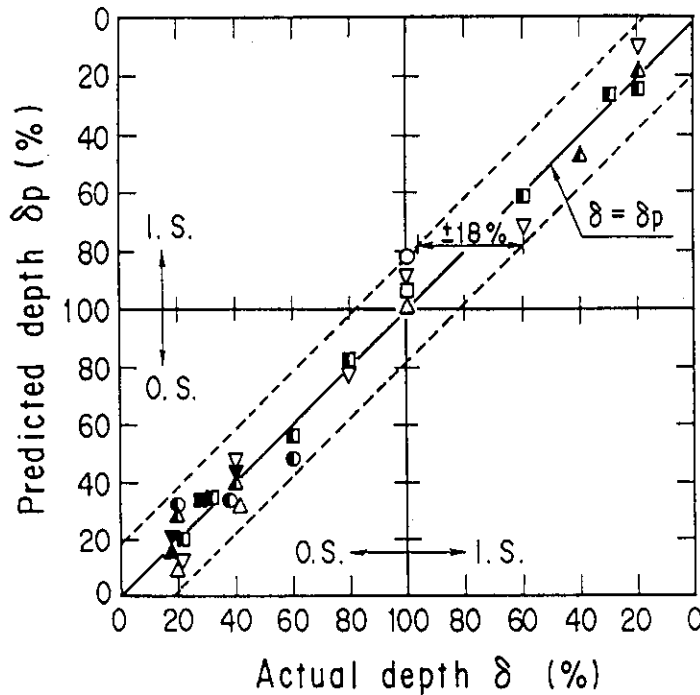


Fig. 3.6 Comparison between actual and predicted depth of discontinuities in base metal (frequency: 48 kHz, the same symbols in Fig. 3.5)

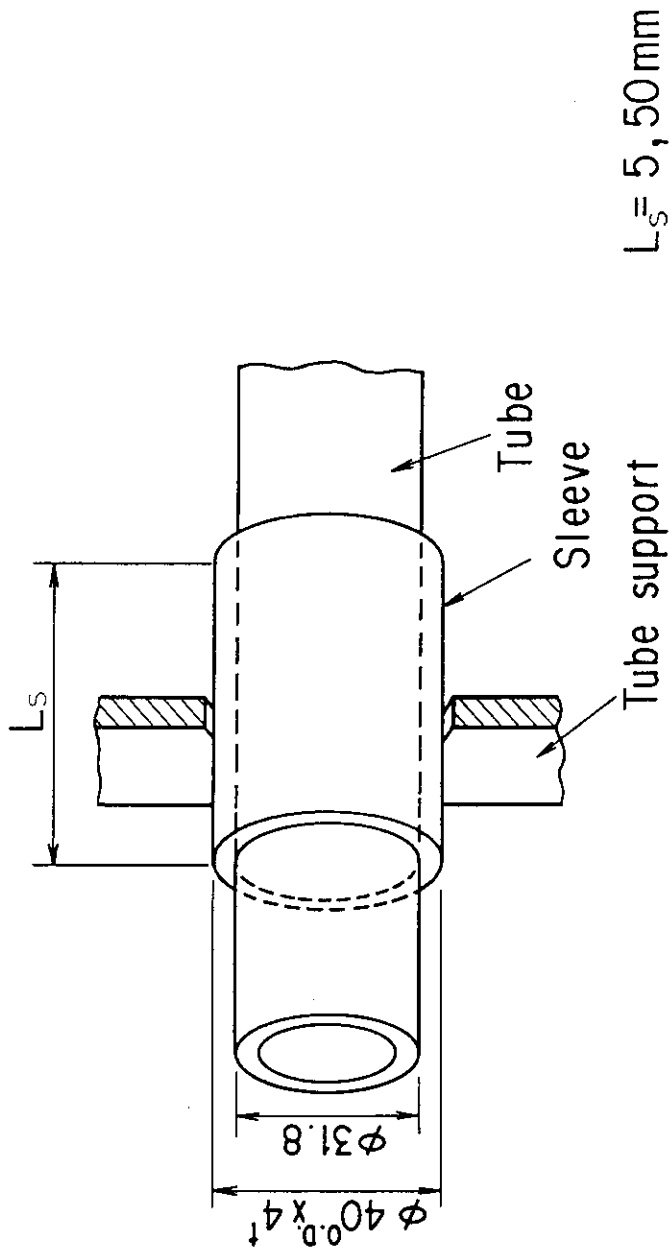


Fig. 3.7 Tube support in IHX

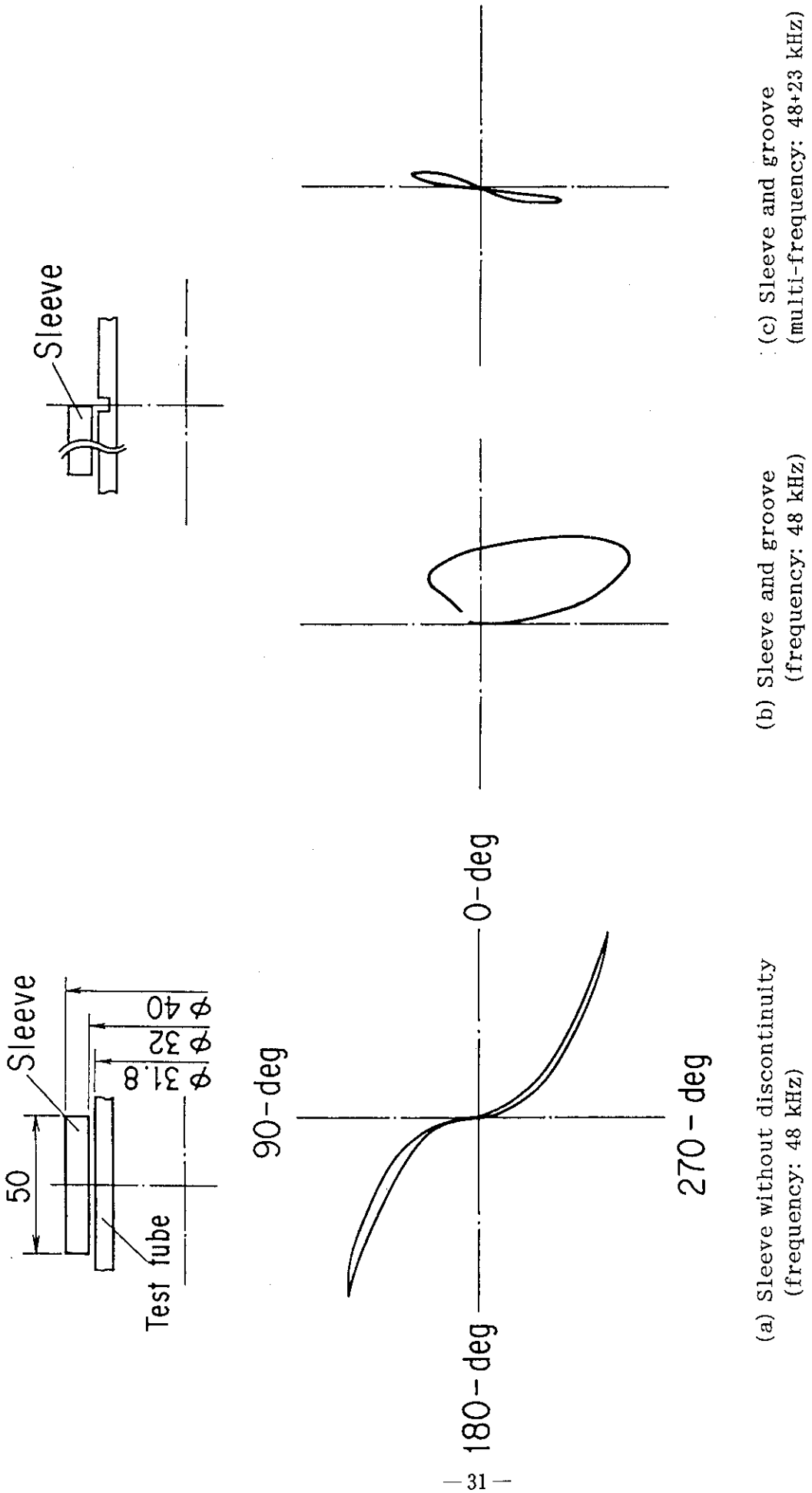


Fig. 3.8 Lissajous patterns of sleeve-B and 360-deg circumferential grooves, 1.5mm in width and 60% in depth, at outer surface

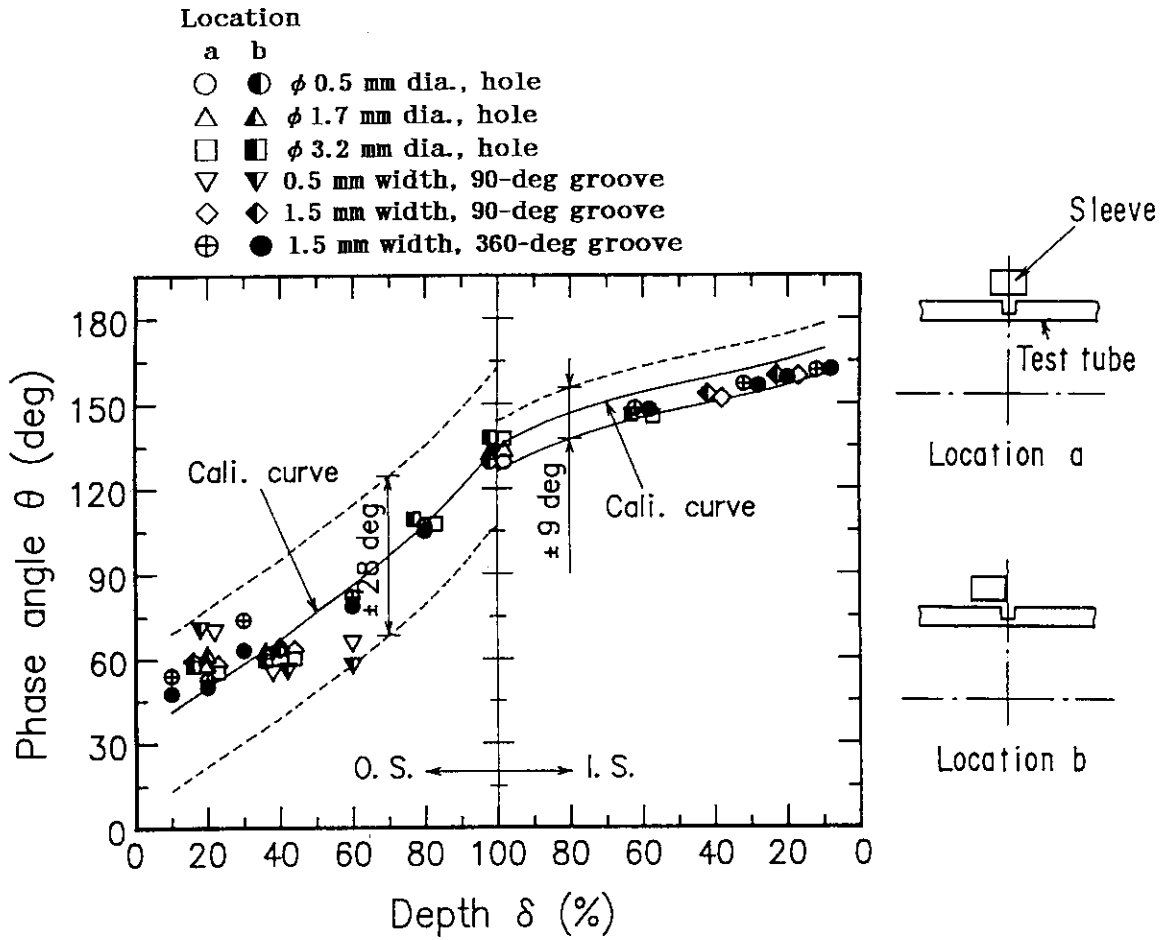


Fig. 3.9 Relation between phase angle and depth of discontinuities with sleeve-A in base metal (multi-frequency: 48+23 kHz)

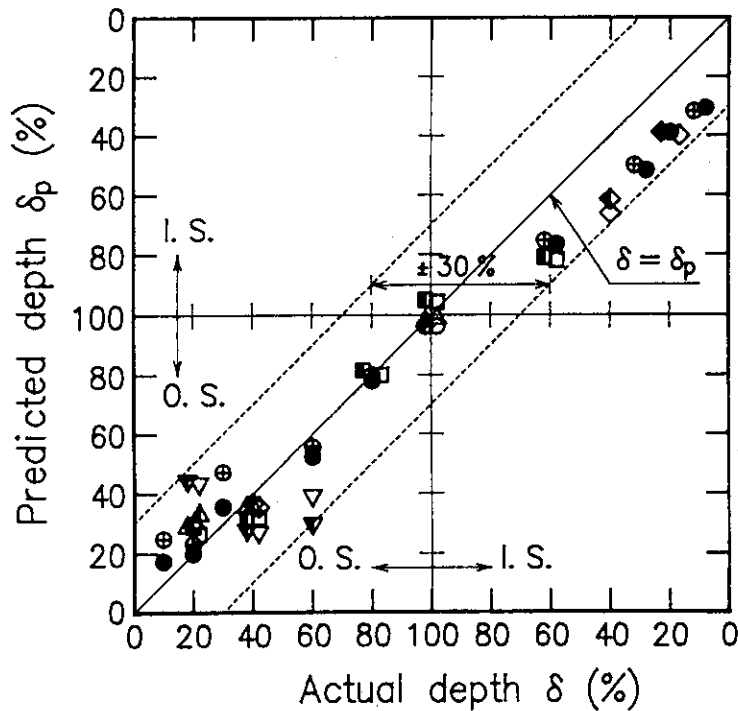


Fig. 3.10 Comparison between actual and predicted depth of discontinuities with sleeve-A in base metal (multi-frequency: 48+23 kHz, the same symbols in Fig. 3.9)

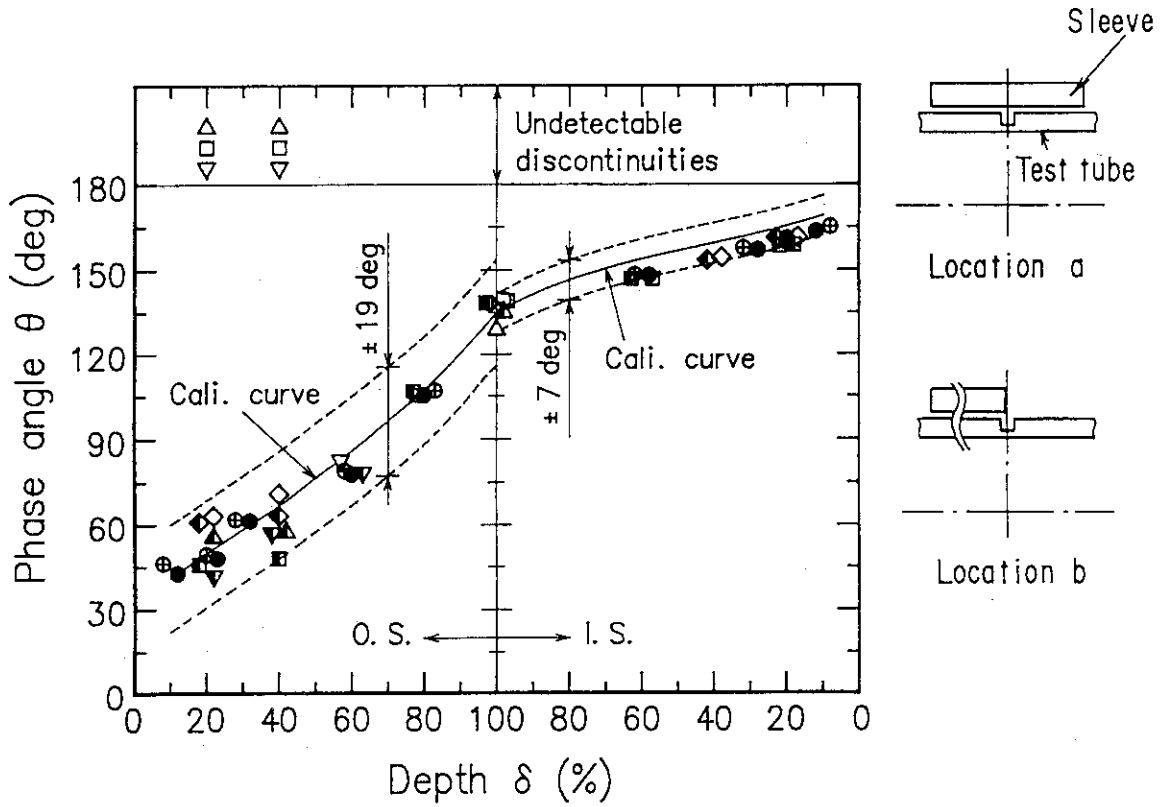


Fig. 3.11 Relation between phase angle and depth of discontinuities with sleeve-B in base metal (multi-frequency: 48+23 kHz, the same symbols in Fig. 3.9)

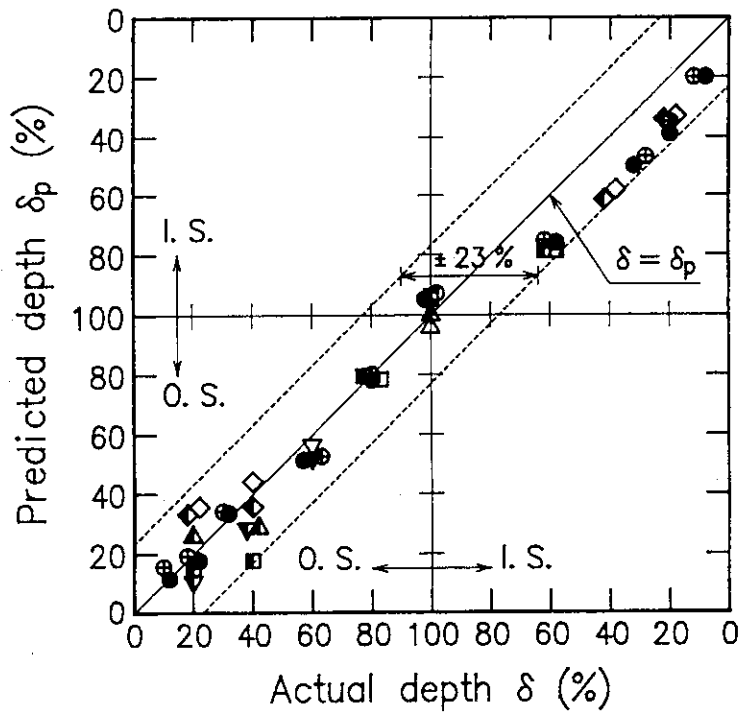


Fig. 3.12 Comparison between actual and predicted depth of discontinuities with sleeve-B in base metal (multi-frequency: 48+23 kHz, the same symbols in Fig. 3.9)

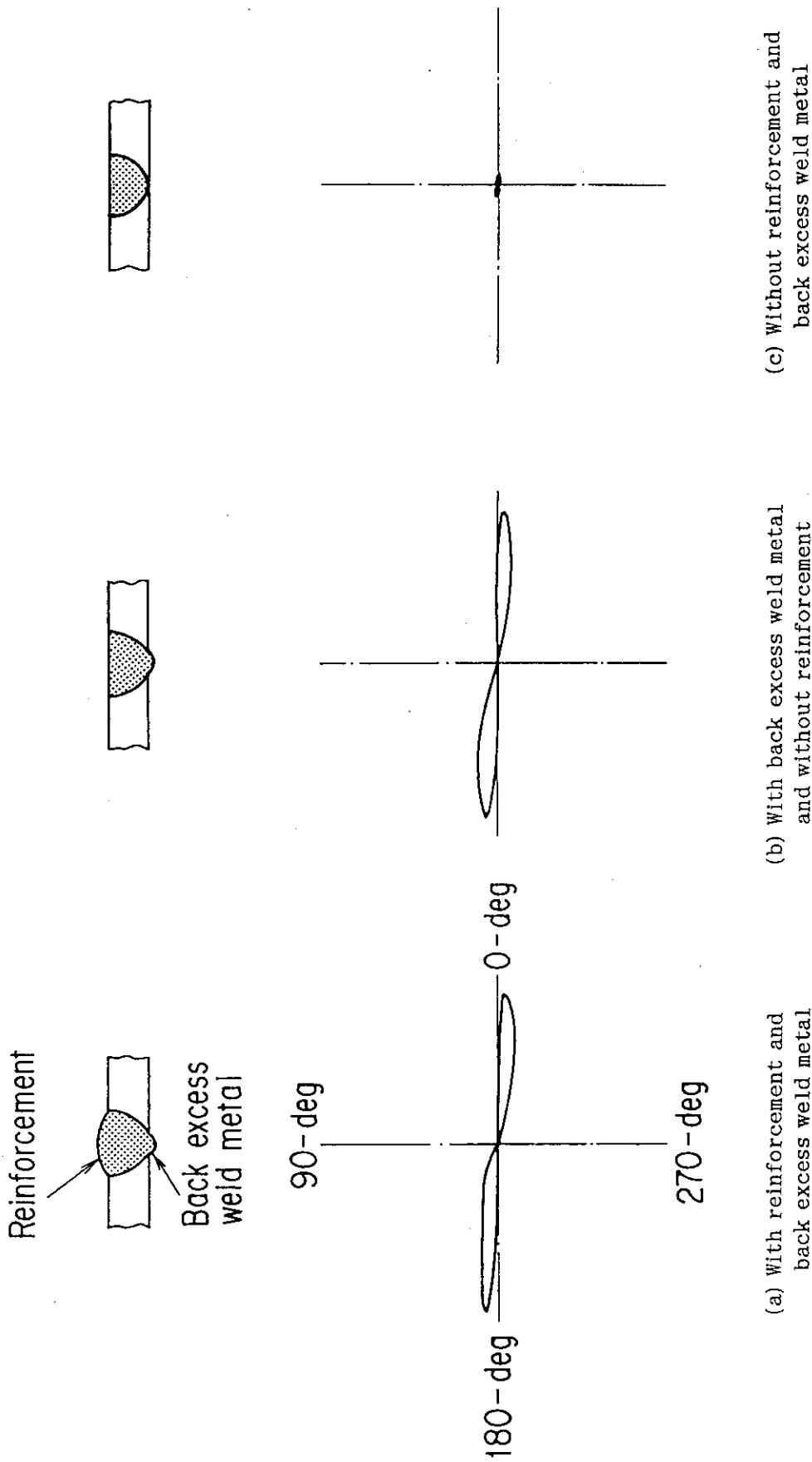


Fig. 3.13 Lissajous patterns of welded joint without discontinuities (frequency: 48 kHz)

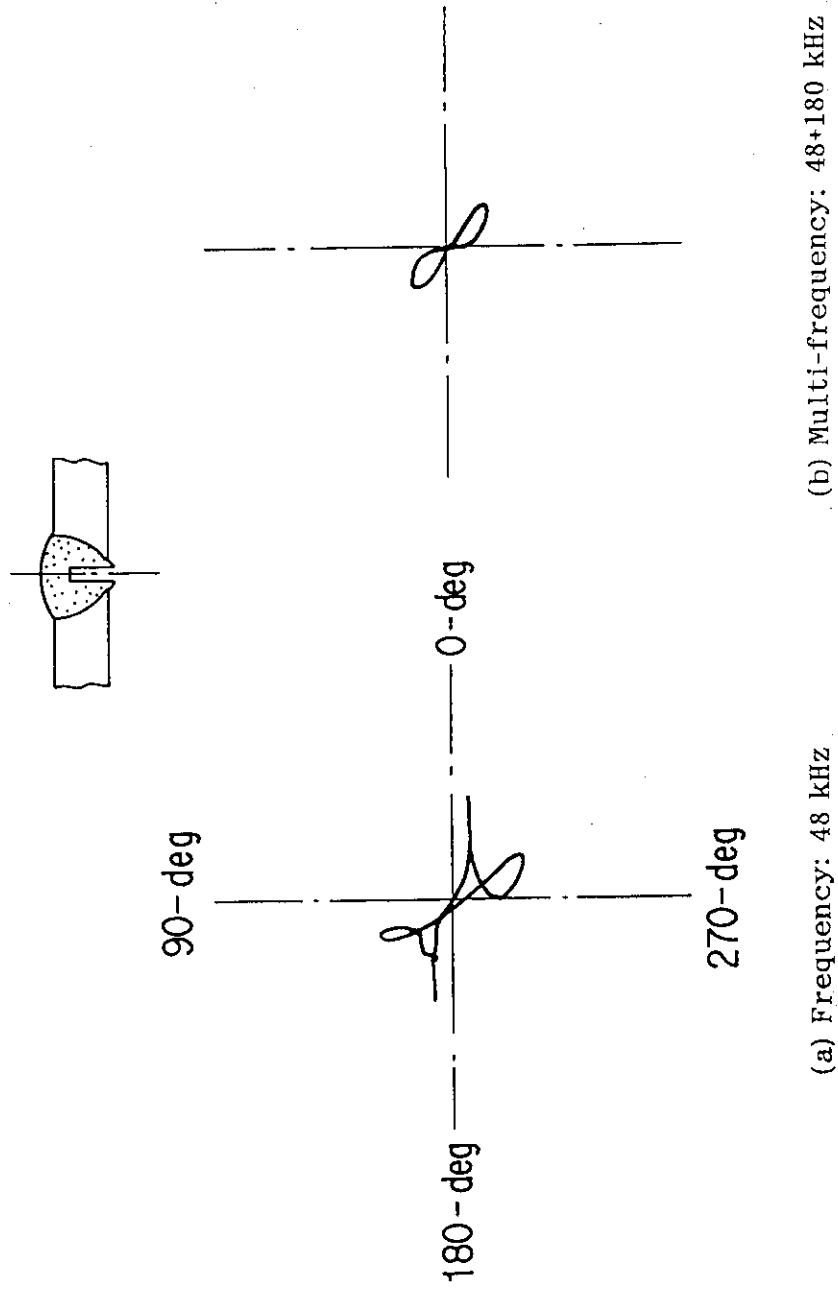


Fig. 3.14 Lissajous patterns of inner 360-deg circumferential groove, 60% in depth, at welded joint

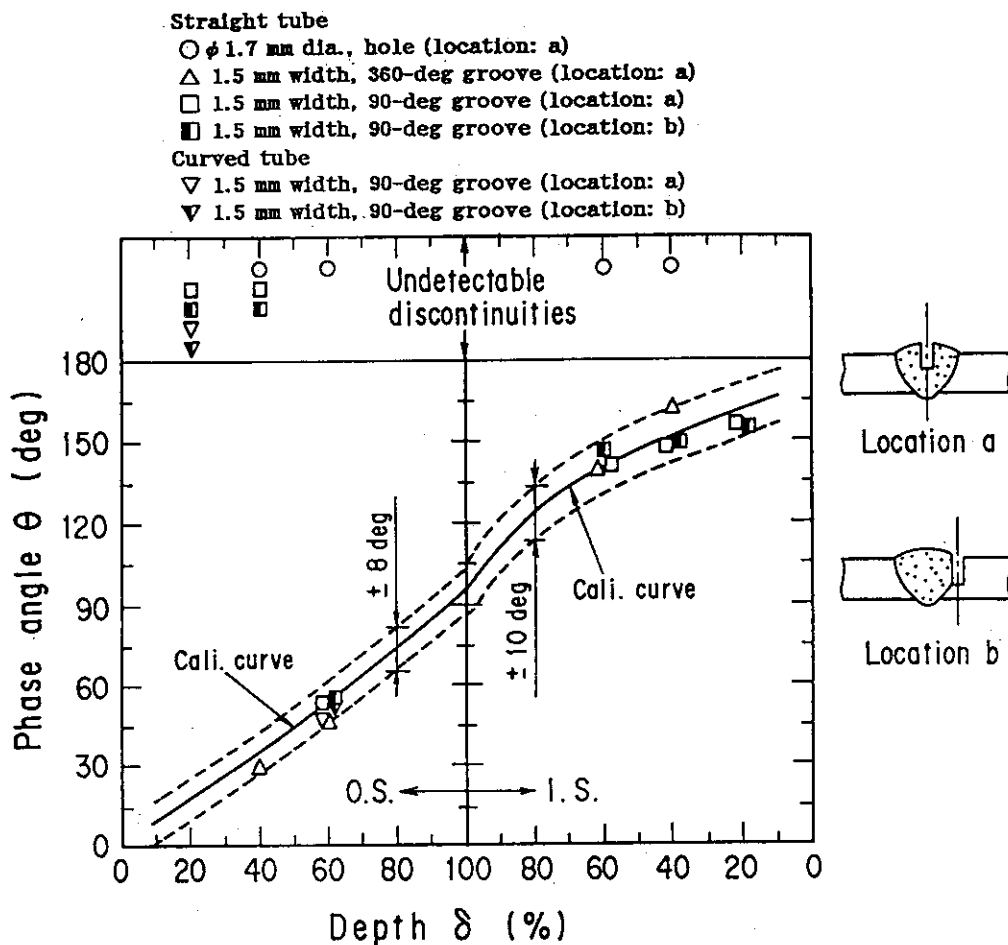


Fig. 3.15 Relation between phase angle and depth of discontinuities in welded joint (multi-frequency: 48+180 kHz)

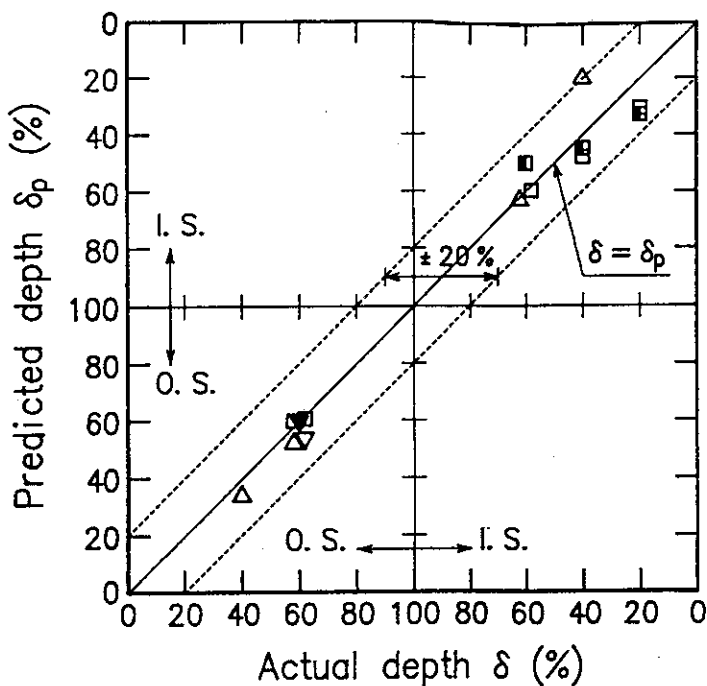


Fig. 3.16 Comparison between actual and predicted depth of discontinuities in welded joint (multi-frequency: 48+180 kHz, the same symbols in Fig. 3.15)

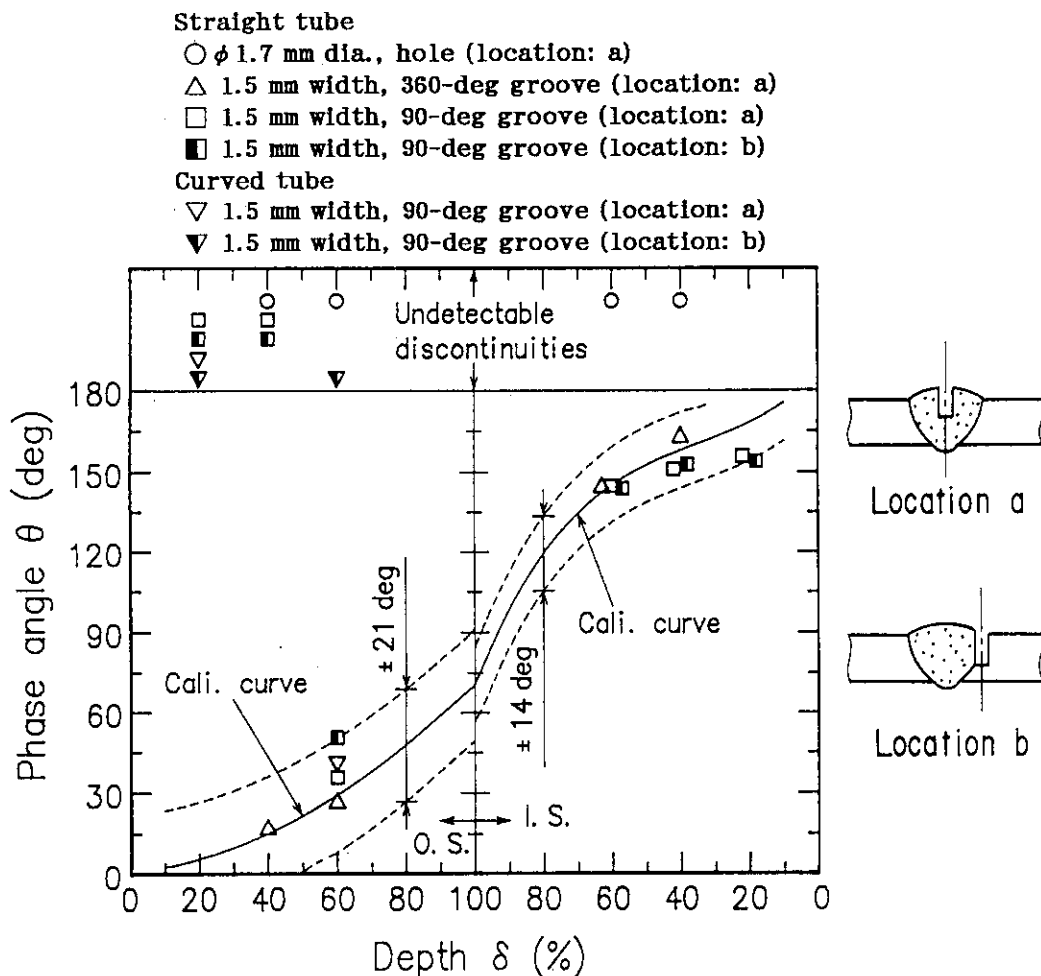


Fig. 3.17 Relation between phase angle and depth of discontinuities in welded joint (multi-frequency: 32+116 kHz)

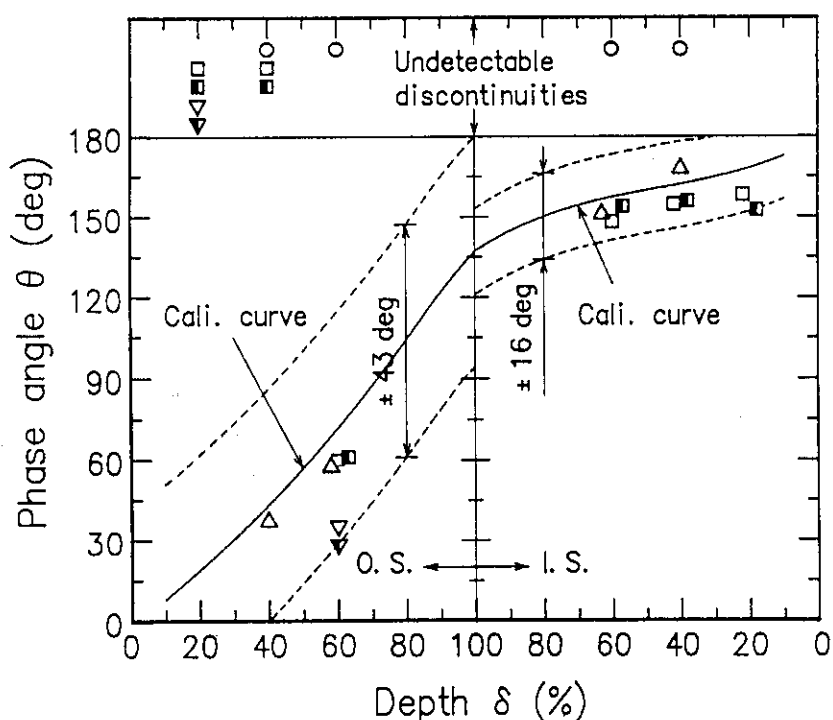


Fig. 3.18 Relation between phase angle and depth of discontinuities in welded joint (multi-frequency: 64+250 kHz, the same symbols in Fig. 3.17)

Straight tube

- ϕ 0.5 mm dia., hole
- ϕ 2.0 mm dia., hole
- 0.5 mm width, 90-deg groove
- 1.5 mm width, 360-deg groove
- △ ϕ 1.7 mm dia., hole
- ▽ ϕ 3.2 mm dia., hole
- ▲ 1.5 mm width, 90-deg groove

Curved tube

- ▼ ϕ 3.2 mm dia., hole
- 1.5 mm width, 360-deg groove
- ▲ 1.5 mm width, 90-deg groove

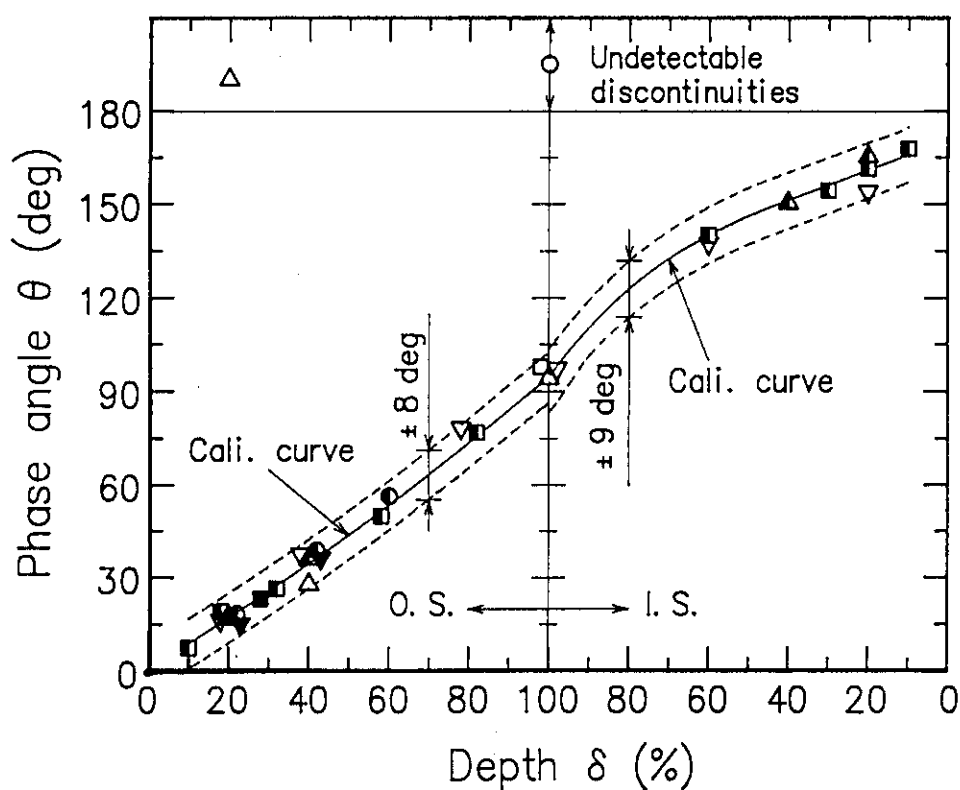


Fig. 3.19 Relation between phase angle and depth of discontinuities in base metal (multi-frequency: 48+180 kHz)

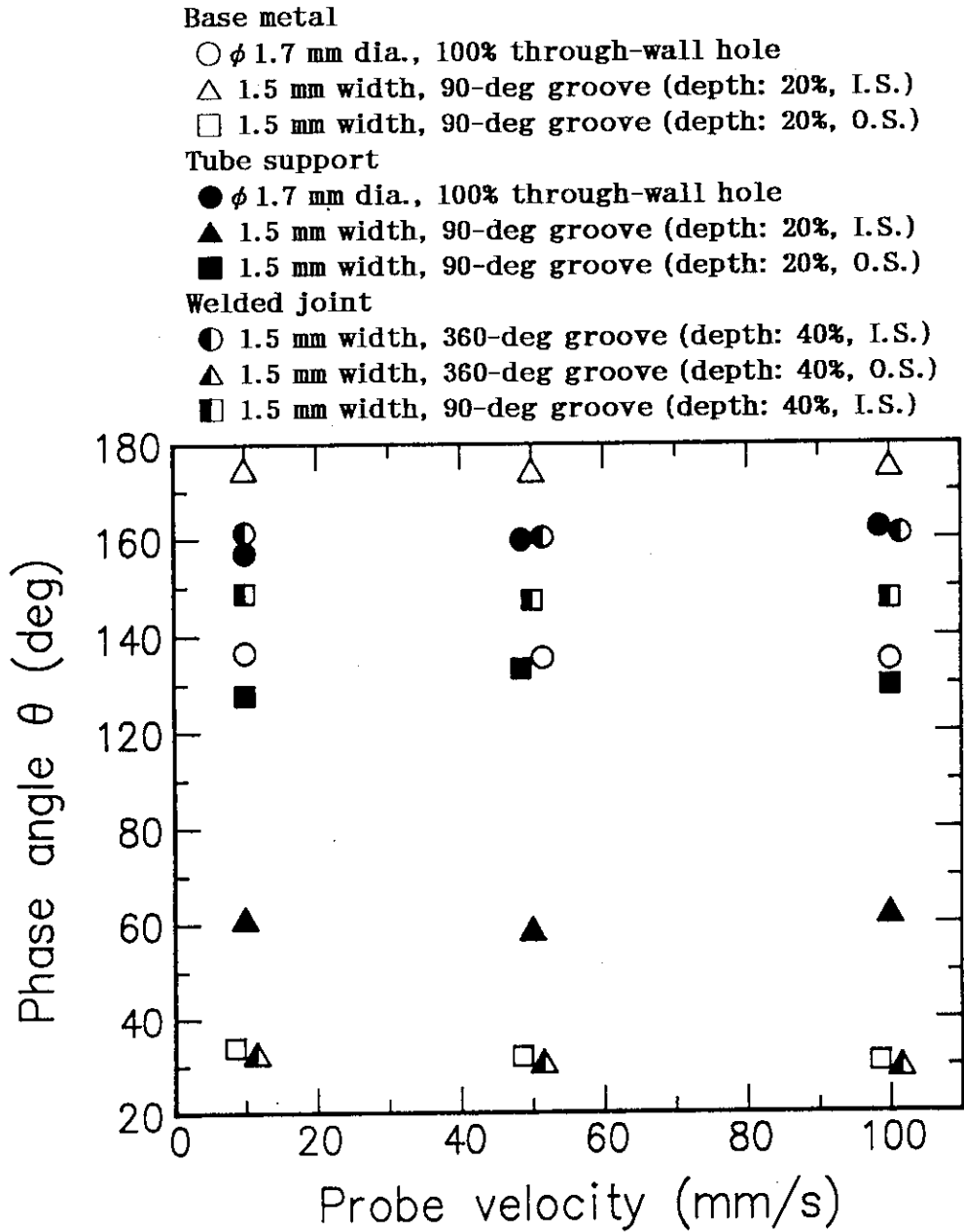


Fig. 3.20 Change of phase angle of discontinuities with probe traveling velocity

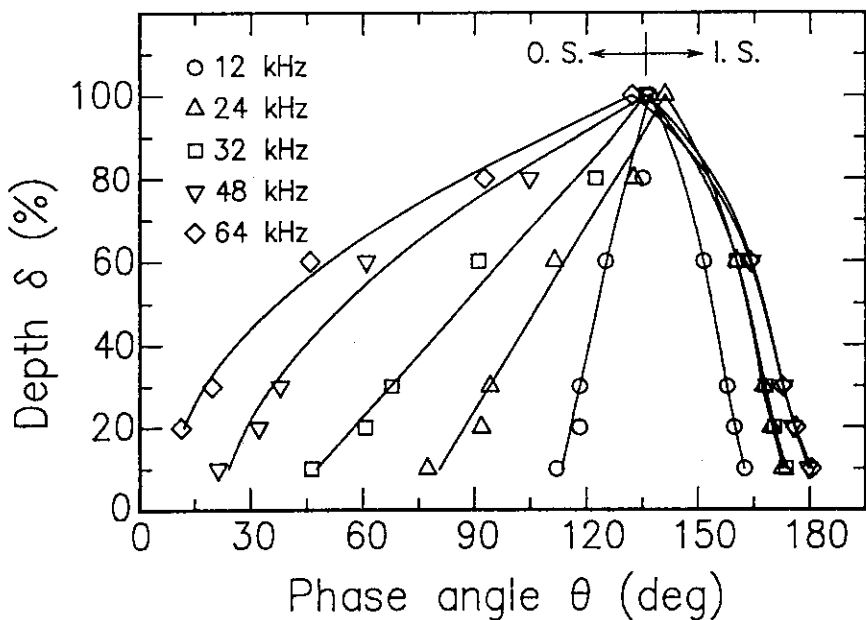


Fig. 3.21 Calibration curves obtained from 360-deg circumferential grooves, 1.5 mm in width, and a 100% through-wall hole, 1.7 mm in diameter, in base metal (coil diameter: ϕ 18 mm)

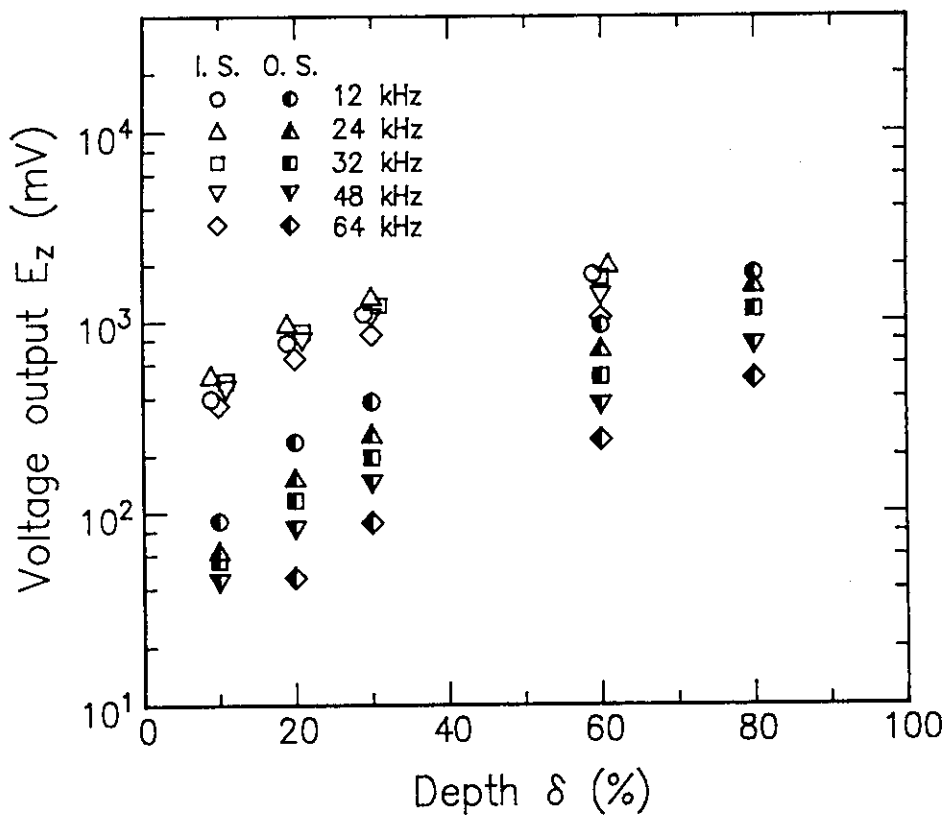


Fig. 3.22 Voltage outputs of Lissajous patterns of 360-deg circumferential grooves in base metal (coil diameter: ϕ 18 mm)

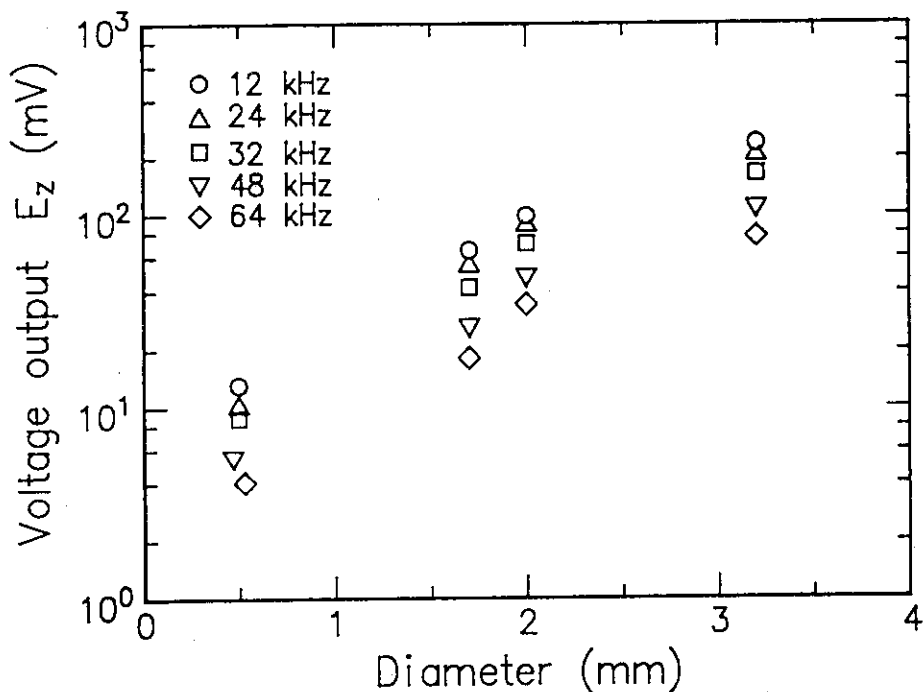


Fig. 3.23 Voltage outputs of Lissajous patterns of 100% through-wall holes in base metal (coil diameter: ϕ 18 mm)

Straight tube

- ϕ 0.5 mm dia., hole
- ϕ 2.0 mm dia., hole
- 0.5 mm width, 90-deg groove
- 1.5 mm width, 360-deg groove
- △ ϕ 1.7 mm dia., hole
- ▽ ϕ 3.2 mm dia., hole
- ▲ 1.5 mm width, 90-deg groove

Curved tube

- ▼ ϕ 3.2 mm dia., hole
- 1.5 mm width, 360-deg groove
- ▲ 1.5 mm width, 90-deg groove

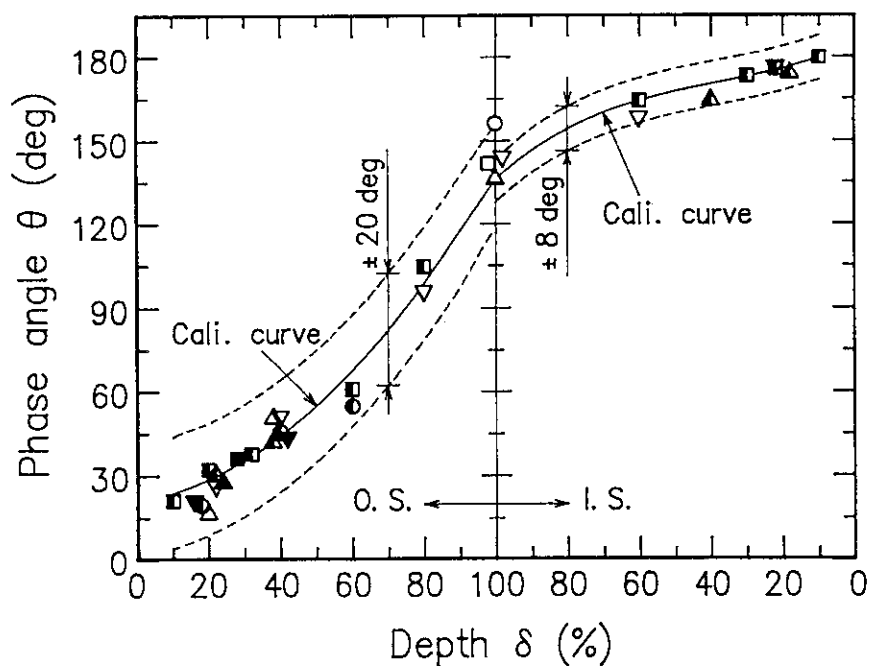


Fig. 3.24 Relation between phase angle and depth of discontinuities in base metal (coil diameter: ϕ 18 mm, frequency: 48 kHz)

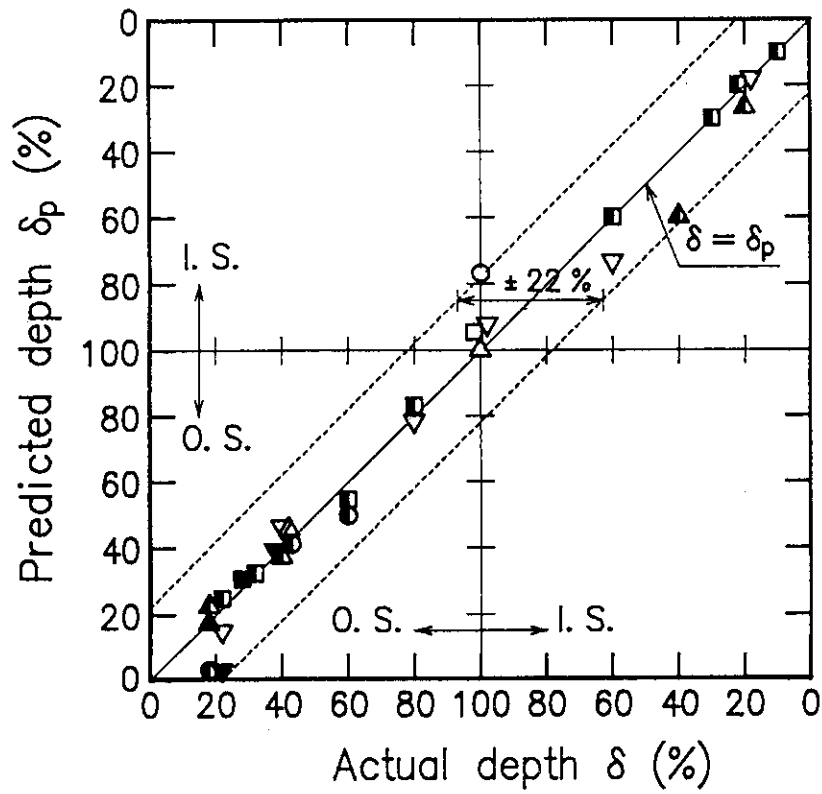


Fig. 3.25 Comparison between actual and predicted depth of discontinuities in base metal (coil diameter: ϕ 18 mm, frequency: 48 kHz, the same symbols in Fig. 3.24)

4. 検出器挿入装置作動試験の結果

検出器挿入装置をモックアップモデル内に設置して自己保持機能について確認した結果、本装置は高温ヘッド内で安定に保持されており、ISIに有害となる装置のがたは生じなかった。また、伝熱管の中心軸に対して上下左右に5 mm以内のずれであれば、検出器の挿入及び引抜きが可能であることを確認した。

以下に、伝熱管内における検出器の移動挙動を述べる。

4.1 伝熱管内の検出器移動速度

検出器はケーブルの剛性を利用して伝熱管内へ送られるが、ケーブルの湾曲により検出器移動速度が不安定になるとともに、検出器位置の検知に誤差が生じる可能性がある。このため、伝熱管内での検出器の速度分布を調べた。

Fig. 4.1は、伝熱管（長管）内の検出器の速度分布を示したもので、図の縦軸は検出器の無次元移動速度、横軸は高温ヘッドからの伝熱管中心軸の距離Lである。検出器の移動速度 V_p は、隣接した2個のドリル穴間の距離と移動に要した時間から算出され、ケーブルの搬送速度 V_c で無次元化している。試験におけるケーブルの搬送速度は10、50及び100 mm/sである。検出器の挿入時では、検出器と伝熱管内壁管の摩擦によりケーブルの湾曲が増大し、出口管長手方向に進むにつれて検出器速度は徐々に低下している。一方、引抜き時には摩擦はケーブルにほとんど影響を及ぼさないため、ヘリカルコイル内の検出器速度はほぼ一定で、 V_p/V_c の変動幅は0.95～1.05であった。

4.2 伝熱管内の検出器位置の計測

Fig. 4.2は、検出器移動速度100 mm/sにおける伝熱管内の検出器位置の測定誤差を示したもので、図の縦軸の測定誤差 ΔL は次式で定義した。

$$\Delta L = (L_p - L) / L \quad (4.1)$$

ここで、 L_p はケーブルの搬送長さから求められる予測位置である。曲率の大きな下部連絡管では、挿入及び引抜き時とも誤差が大きく変動し、引き抜き時では負の誤差となる場合もある。Fig. 4.3は、下部連絡管を模擬したアクリル製の短管内における挿入及び引抜き時の検出器及びケーブルの挙動を示したものである。挿入時には伝熱管の中心軸に対して常にケーブルは大きく湾曲しているのに対し、引抜き時では中心軸に対して局所的にショートカットが生じている。このため、引抜き時では、ケーブルの引抜き長さよりも検出器の移動距離が大きくなり、負の測定誤差が生じている。

曲率の小さなヘリカルコイル部では、下部連絡管に比較してケーブルの湾曲やショートカットが小さなために誤差の変動は少なく、伝熱管の軸方向に沿って緩やかに上昇する。挿入時と引抜き時の誤差を比較すると、摩擦によるケーブルの湾曲が大きな前者が後者よりも誤差が大きく、約3倍の誤差を有していた。引抜

き時の検出器位置の測定誤差は、ヘリカルコイル部で約1%であった。

以上の検出器移動速度及び検出器位置測定試験の結果から判断すると、伝熱管の検査は検出器の引抜き時に行う方法が良いと考えられる。これは、挿入時に比べて引抜き時の場合が検出器速度が一定しており、また、検出器位置の測定誤差が小さいことによる。IHXでは、伝熱管のヘリカルコイル部は、周方向6箇所支持構造物により支持されており、3.3節で述べたように検出器はこの支持構造物を検知する。したがって、実際のISIにおいて支持構造物の位置を常に照合すれば、伝熱管内の検出器位置をより正確に測定することが可能であると考えられる。

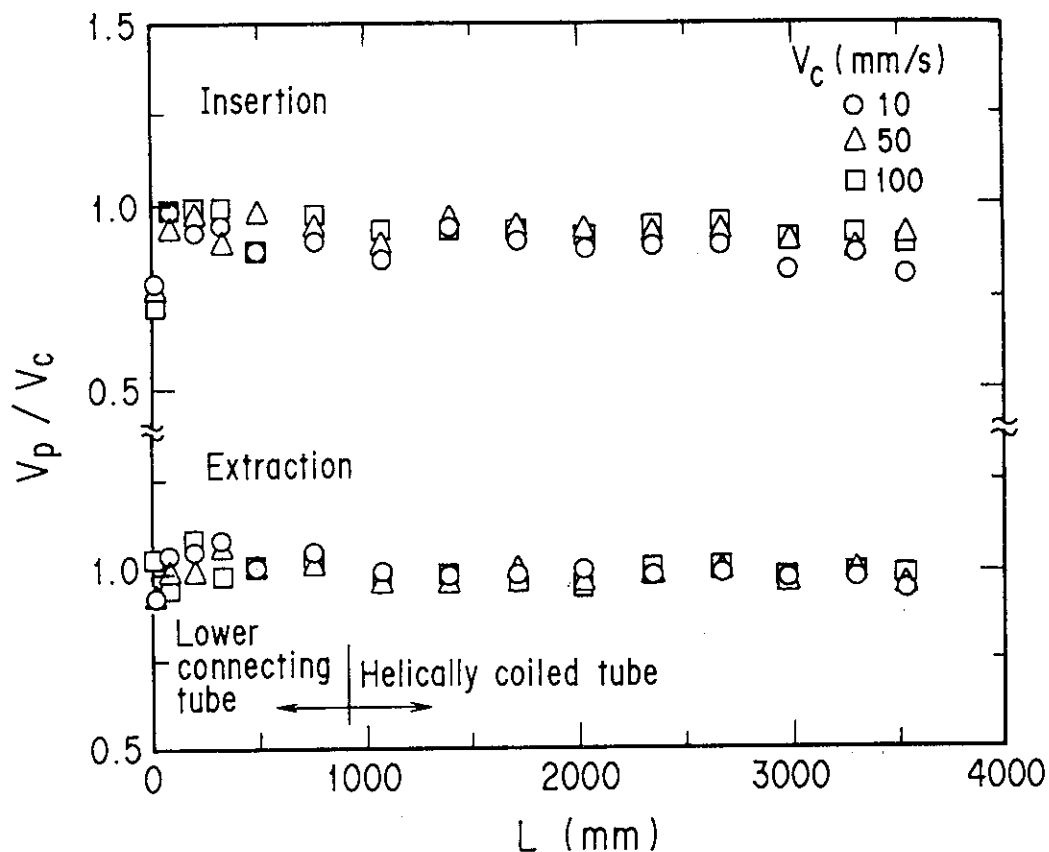


Fig. 4.1 Distribution of probe traveling velocity in axial direction of tube

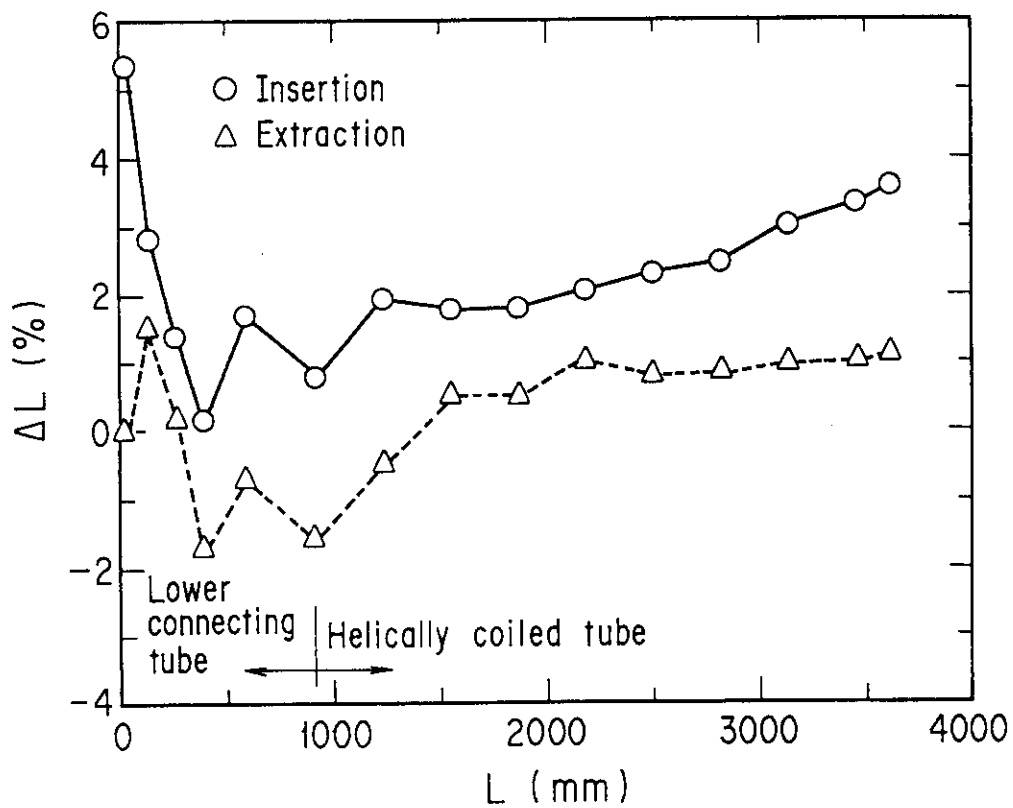


Fig. 4.2 Measurement errors of probe location in axial direction of tube

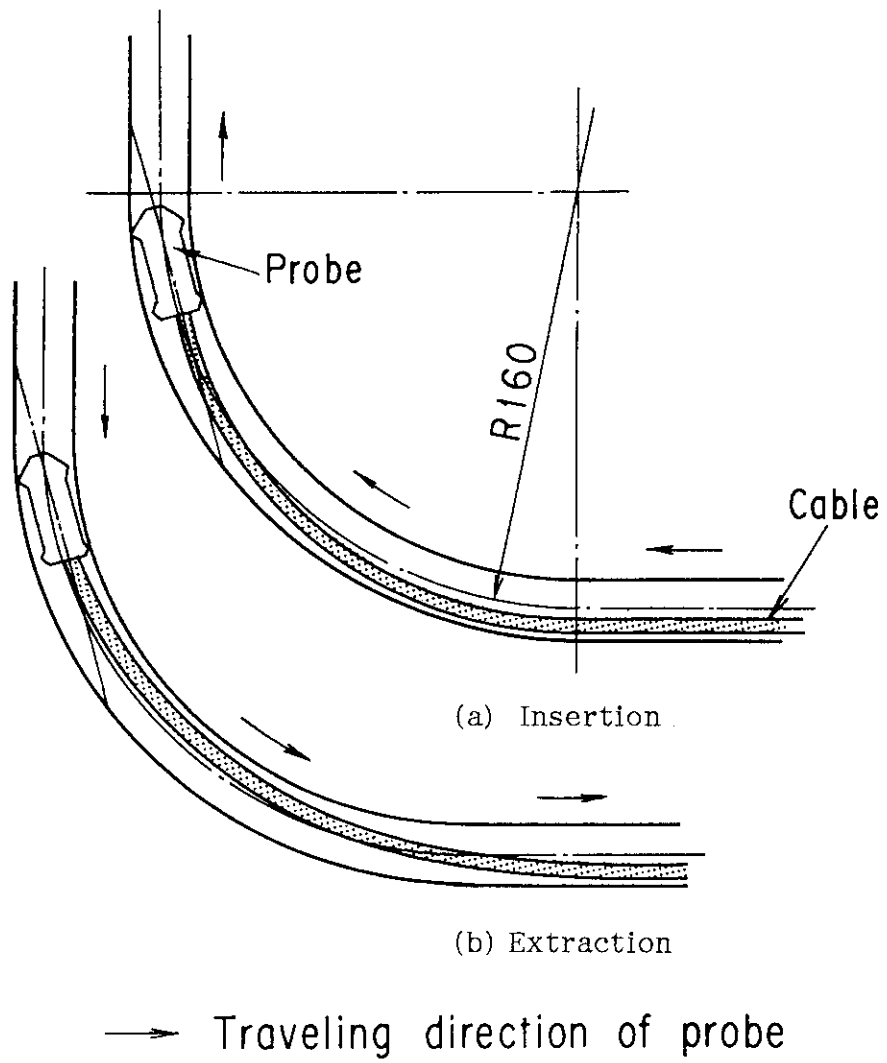


Fig. 4.3 Traveling behavior of probe and cable

5. 結 言

IHX伝熱管と同素材および同寸法の試験片に人工欠陥を加工して渦流探傷法による欠陥検出試験を行い、以下の結論を得た。

コイル径 $\phi 16$ mmの検出器の特性については、

- (1) 伝熱管母材部の欠陥については、ASME Codeの基準を十分満足しており、更に $\phi 0.5$ mmの貫通穴、 $\phi 1.7$ mmの平底穴および幅 0.5 mmの部分溝の深さ20%の欠陥等が検出可能であった。また、直管部と曲管部では検出特性の差は認められなかった。位相角実測値より求めた欠陥の予測深さは、実深さに対して $\pm 18\%$ 以下の誤差を有していた。
- (2) 伝熱管支持構造物のうち、欠陥検出に最も影響を及ぼすと考えられるスリーブについては、多重周波数（例えば $48+23$ kHz）によりその影響を除去することが可能であった。しかし、スリーブが長い（長さ： 50 mm）場合には端部を除くスリーブ内で、体積の小さな外面欠陥（ $\phi 1.7$ および $\phi 3.2$ mmの平底穴、並びに 0.5 mm幅の部分溝で、深さはともに20および40%）が検出不能となった。また、検出可能な欠陥については、欠陥に対するスリーブの位置は検出特性に有意な影響を及ぼさなかった。位相角実測値より求めた欠陥の予測深さは、実深さに対して $\pm 30\%$ 以下の誤差を有していた。
- (3) 溶接部では内面の溶接金属が雑音の主原因であり、多重周波数（ $48+180$ kHz）によりその影響を除去することが可能であった。しかし、一部の欠陥（ $\phi 1.7$ mm、深さ60%以下の内外面平底穴および 1.5 mm幅、深さ40%以下の外面部分溝）が検出不能となった。溶接部に対する欠陥の位置に関しては、検出可能な欠陥では、溶接の中央部、並びに溶接金属と母材の融合部に欠陥が存在した場合とも検出特性に有意な変化は認められなかった。位相角実測値より求めた欠陥の予測深さは、実深さに対して $\pm 20\%$ 以下の誤差を有していた。他の多重周波数の組み合わせ（ $32+116$ 及び $64+250$ kHz）と比較すると、 $48+180$ kHzの場合が最も位相角のばらつきが小さく、溶接部に対してはこの周波数組み合わせが最適であると考えられる。
- (4) 多重周波数の場合には検出性能が低下する傾向があり、 $48+180$ kHzの周波数では、母材部の直径 $\phi 0.5$ mmの貫通穴及び直径 $\phi 1.7$ mm、深さ20%の外面平底穴が検出不能となった。この結果より、母材部の欠陥検出では単一周波数が適切であると考えられる。
- (5) 検出器の移動速度を $10\sim 100$ mm/sで変化させても検出特性に有意な差は認められなかった。

コイル径 $\phi 18$ mmの検出器については、

(6) 母材部の欠陥について検出特性を調べ、コイル径 ϕ 16 mm の検出器との比較検討を実施したが、両者の検出特性に大差なく、本試験の範囲内では両者の性能の優劣の判定はできなかった。

また、検出器挿入装置をモックアップモデル内に設置して、検出器挿入装置の作動性能及び検出器の移動性能を調べ、以下の結論を得た。

(7) 自己保持機能により、挿入装置は高温ヘッダ内で安定に保持されており、I S I に有害となるような装置のがたは生じなかった。また、検出器の中心軸が伝熱管の中心軸に対して上下左右に5 mm以内のずれであれば、検出器の挿入・引抜きは可能であった。

(8) 検出器ケーブルの剛性を利用して検出器の挿入・引抜きを行っているため、ケーブルの湾曲が伝熱管内の検出器移動速度のばらつき及びケーブル位置の測定に誤差を生じさせる原因となる。引抜き時では、挿入時に比較してケーブルの湾曲の影響が小さく、ヘリカルコイル伝熱管内での検出器移動速度のばらつきは $\pm 5\%$ 以内、また、検出器位置の測定誤差は約1%であった。

以上、本試験により、渦流探傷法によるIHX伝熱管の欠陥検出特性について基本的な知見を得ることができた。しかし、伝熱管支持構造部や溶接部では一部の欠陥が検出不能となる等の問題点が残されており、今後検討すべき課題が明らかになった。また、挿入装置の作動性についてはほぼ期待通りの性能を得たが、試験で実施した挿入距離は全長の約11%であり、今後、更に長い伝熱管に対して検出器の移動挙動を確認する必要があると思われる。

謝 辞

本試験の実施に当たり有益なご助言およびご協力を頂いた日本原子力研究所高温工学部長若山直昭氏、同部高温構造工学研究室長武藤康氏、同研究所高温工学試験研究炉開発部深谷好夫氏、石川島播磨重工業（株）小林輝男氏及び高橋正夫氏を初めとして関係各位に深く感謝する。

(6) 母材部の欠陥について検出特性を調べ、コイル径 ϕ 16 mm の検出器との比較検討を実施したが、両者の検出特性に大差なく、本試験の範囲内では両者の性能の優劣の判定はできなかった。

また、検出器挿入装置をモックアップモデル内に設置して、検出器挿入装置の作動性能及び検出器の移動性能を調べ、以下の結論を得た。

(7) 自己保持機能により、挿入装置は高温ヘッダ内で安定に保持されており、I S I に有害となるような装置のがたは生じなかった。また、検出器の中心軸が伝熱管の中心軸に対して上下左右に5 mm以内のずれであれば、検出器の挿入・引抜きは可能であった。

(8) 検出器ケーブルの剛性を利用して検出器の挿入・引抜きを行っているため、ケーブルの湾曲が伝熱管内の検出器移動速度のばらつき及びケーブル位置の測定に誤差を生じさせる原因となる。引抜き時では、挿入時に比較してケーブルの湾曲の影響が小さく、ヘリカルコイル伝熱管内での検出器移動速度のばらつきは $\pm 5\%$ 以内、また、検出器位置の測定誤差は約1%であった。

以上、本試験により、渦流探傷法によるI H X 伝熱管の欠陥検出特性について基本的な知見を得ることができた。しかし、伝熱管支持構造部や溶接部では一部の欠陥が検出不能となる等の問題点が残されており、今後検討すべき課題が明らかになった。また、挿入装置の作動性についてはほぼ期待通りの性能を得たが、試験で実施した挿入距離は全長の約11%であり、今後、更に長い伝熱管に対して検出器の移動挙動を確認する必要があると思われる。

謝 辞

本試験の実施に当たり有益なご助言およびご協力を頂いた日本原子力研究所高温工学部長若山直昭氏、同部高温構造工学研究室長武藤康氏、同研究所高温工学試験研究炉開発部深谷好夫氏、石川島播磨重工業（株）小林輝男氏及び高橋正夫氏を初めとして関係各位に深く感謝する。

参考文献

- (1) 原研：高温工学試験研究の現状，(1991)。
- (2) Kondo, T., et al.: United States Patent No. 712760 (1976)。
- (3) Hada, K., et al.: Nucl. Eng. Des., 132, 1 (1991)。
- (4) 渡辺 勝利，他：JAERI-M, 91-189 (1991)。
- (5) ASME: Boiler and Pressure Vessel Code, An American National Standard Sec. XI, 14(1989)。
- (6) ASME: Boiler and Pressure Vessel Code, An American National Standard Sec. V, 119(1989)。
- (7) 日本非破壊検査協会：渦流探傷試験Ⅱ，95-132(1989)。