

JAERI-Tech
2001-050



JP0150742



HTTR (高温工学試験研究炉) の1次加圧水冷却器伝熱管の
非破壊検査に対する自動探傷システムの適用
(共同研究)

2001年7月

竹田 武司・古澤 孝之・宮本 智司*

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、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。
入手の問い合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2001

編集兼発行 日本原子力研究所

H T T R (高温工学試験研究炉)の1次加圧水冷却器伝熱管の
非破壊検査に対する自動探傷システムの適用
(共同研究)

日本原子力研究所大洗研究所高温工学試験研究炉開発部

竹田 武司・古澤 孝之・宮本 智司*

(2001年6月12日受理)

H T T R (高温工学試験研究炉)の1次加圧水冷却器(P P W C)伝熱管は、1次冷却材圧力バウンダリを形成しており、安全上重要である。P P W C伝熱管の探傷試験技術を確立するため、渦流探傷試験(E C T)用ボビン型プローブ、回転型プローブおよび超音波探傷試験(U T)用回転型プローブを用いた自動探傷システムを開発した。本システムを用いて、H T T Rの原子炉停止期間(報告時点における最高到達原子炉出力は約55%)において68本(抜取率50%)のP P W C伝熱管の非破壊検査を実施した。その結果、E C Tにおける信号/ノイズ比の最大値は1.8であり、当該P P W C伝熱管で得られたリサージュ波形の軌跡および位相は、模擬欠陥試験体に対して得られた結果と異なった。さらに、U Tにおけるエコー振幅は何れの検査部位も20%距離振幅校正曲線を下回った。故に、検査したP P W C伝熱管にプローブの検出指標を超える深さの外面欠陥は無いことが確認できた。

大洗研究所：〒311-1394 茨城県東茨城郡大洗町成田町新堀 3607

本報は、日本原子力発電(株)との共同研究の成果である。

* 日本原子力発電(株)

JAERI-Tech 2001-050

Application of Automatic Inspection System to Nondestructive Test of
Heat Transfer Tubes of Primary Pressurized Water Cooler
in the High Temperature Engineering Test Reactor
(Joint Research)

Takeshi TAKEDA, Takayuki FURUSAWA and Satoshi MIYAMOTO*

Department of HTTR Project
Oarai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received June 12, 2001)

Heat transfer tubes of a primary pressurized water cooler (PPWC) in the high temperature engineering test reactor (HTTR) form the reactor pressure boundary of the primary coolant, therefore are important from the viewpoint of safety. To establish inspection techniques for the heat transfer tubes of the PPWC, an automatic inspection system was developed. The system employs a bobbin coil probe, a rotating probe for eddy current testing (ECT) and a rotating probe for ultrasonic testing (UT). Nondestructive test of a half of the heat transfer tubes of the PPWC was carried out by the automatic inspection system during reactor shutdown period of the HTTR (about 55 % in the maximum reactor power in this paper). The nondestructive test results showed that the maximum signal-to-noise ratio was 1.8 in ECT. Pattern and phase of Lissajous wave, which were obtained for the heat transfer tube of the PPWC, were different from those obtained for the artificially defected tube. In UT echo amplitude of the PPWC tubes inspected was lower than 20 % of distance-amplitude calibration curve. Thus, it was confirmed that there was no defect in depth, which was more than the detecting standard of the probes, on the outer surface of the heat transfer tubes of the PPWC inspected.

Keywords: HTGR, HTTR, Nondestructive Test, Inspection, Tube, ECT, UT, Defect, Signal-to-noise, Pressurized Water Cooler

* Japan Atomic Power Company

目 次

1. 緒 言	1
2. 1次加圧水冷却器の構造	7
3. 1次加圧水冷却器伝熱管用自動探傷システム	10
4. 1次加圧水冷却器伝熱管の非破壊検査	17
5. 結 言	35
謝 辞	35
参考文献	36

Contents

1. Introduction	1
2. Structure of PPWC	7
3. Automatic Inspection System for Heat Transfer Tubes of PPWC	10
4. Nondestructive Test of Heat Transfer Tubes of PPWC	17
5. Conclusions	35
Acknowledgements	35
References	36

This is a blank page.

1. 緒 言

運転を開始した原子炉施設では、安全上重要な機器に対して計画的に供用期間中検査⁽¹⁾を行うことが必要である。原子力発電プラントの供用期間中検査のうち、1次冷却材圧力バウンダリを形成している蒸気発生器伝熱管(材料:アロイ 600 等)に対する非破壊検査の方法として、交流電流が流れているコイルの電磁誘導効果を利用した渦流探傷試験(Eddy Current Testing: ECT)⁽²⁾が用いられている⁽³⁻⁵⁾。一方、森岡ら⁽⁶⁾は、軽水炉用蒸気発生器伝熱管の非破壊検査に対し、超音波の反射原理を利用した超音波探傷試験(Ultrasonic Testing: UT)⁽⁷⁾の適用性を検討した。しかし、UTはECTに比べて伝熱管の検査に多大な時間を要するため、現時点では実用化に至っていない。

高温工学試験研究炉(High Temperature Engineering Test Reactor: H T T R)⁽⁸⁾は、原子炉出口冷却材温度が 850°C(定格運転時)、950°C(高温試験運転時)、熱出力が 30MW の黒鉛減速、ヘリウムガス冷却型の高温ガス炉である。Table 1.1 に H T T R の主要諸元を示す。H T T R は、高温ガス炉の技術基盤の確立と技術の高度化、高温工学に関する先端的基礎研究への応用を目的として、日本原子力研究所・大洗研究所に設置された。H T T R は平成 10 年 11 月 10 日に初臨界を達成し⁽⁹⁾、平成 11 年 9 月から安全性確保のため段階的に原子炉出力を上昇させる出力上昇試験(1)⁽¹⁰⁾を開始し、原子炉の核特性、熱交換器の伝熱特性、制御特性等を確認するための試験を実施している。Fig. 1.1 に H T T R の原子炉冷却系統施設の系統図を示す。H T T R の 1 次冷却設備には 1 次加圧水冷却器(Primary Pressurized Water Cooler: P P W C)⁽¹¹⁾と中間熱交換器⁽¹²⁾の 2 種類の熱交換器があり、原子炉出口の最高 950°C の 1 次冷却材(ヘリウムガス)を約 400°C まで冷却する。2 種類の熱交換器のうち、胴側、伝熱管側共にヘリウムガスを用いる中間熱交換器の伝熱管の非破壊検査には E C T を用いている⁽¹³⁾。ヘリウムガスの最高温度が 950°C となる加圧水冷却器については、日本原子力研究所・東海研究所の大型構造機器実証試験ループで 1 基の冷却器⁽¹⁴⁾が製作・運転された経験はあるが、原子炉の主冷却系熱交換器として使用された実績は無かった。そのため、1 次冷却材圧力バウンダリを形成している P P W C 伝熱管の探傷試験技術を確立することは、H T T R の供用期間中検査を行う上で重要な課題であった。

P P W C は径方向に 8 列、136 本、外径 25.4mm、肉厚 2.6mm、長さ約 10m の逆 U 字型の伝熱管(材料: 321 ステンレス鋼)を有しており、管外を 1 次冷却材(ヘリウムガス)、管内を加圧水が流れる。Table 1.2 に P P W C の主要諸元、Fig. 1.2 に構造図を示す。P P W C の伝熱設計では、設計精度を向上させるため、バッフル板回りの流れの状態を正確に考慮して実験的に求めた管外熱伝達相関式を用いている。使用環境としては、H T T R の 1 次冷却材ヘリウムガス内の水分濃度は厳しく制限されている(例えば、原子炉出口冷却材温度が 800°C 以上で 0.2volppm 以下)。また、

加圧水はヒドラジンの注入によりpHが9～10となるように管理されている。このヒドラジン濃度は水張り時に13～17ppmとなるように管理されている。PPWC伝熱管の両端は、軽水炉用蒸気発生器伝熱管と同様管板に拡管シール溶接されており、PPWC伝熱管の主な劣化損傷モードとして応力腐食割れ⁽¹⁵⁾が想定される。

PPWC伝熱管の探傷試験技術を確立するため、ECT用ボビン型プローブ、回転型プローブおよびUT用回転型プローブを用いた自動探傷システムを開発した⁽¹⁶⁾。Fig. 1.3にシステム構成図を示す。自動探傷システムでは、検査員の放射線被ばくを低減させる観点から遠隔操作を行えるように、探傷プローブ、探傷プローブ用ガイドスリーブの管板上への位置決めを行うための案内装置、探傷プローブを一定速度で走査するための走引機等を用いている。

ECTにおいて、探傷周波数はプローブの欠陥検出性能を決める重要なパラメータである。PPWC伝熱管は蒸気発生器伝熱管に比べて約2倍の肉厚があり、ECT用プローブの欠陥検出性能が低下する恐れがある。探傷周波数を低くすると、プローブの揺動によるノイズ信号は減少するが、材料、肉厚が異なる伝熱管外部の構造物(管板、バッフル板、熱遮へい板等)からのノイズ信号は増加する。そこで、PPWC伝熱管の肉厚、透磁率、導電率を考慮してECT用プローブの探傷周波数を適切に選定することにより、蒸気発生器伝熱管と同等深さの欠陥を検出可能にしている。また、伝熱管外部の構造物からのノイズが、ECT用ボビン型プローブおよびECT用回転型プローブの信号へ与える影響を低減するため、それぞれ多重周波数演算法⁽²⁾およびフィルタリング法⁽⁶⁾を適用している。さらに、UT用回転型プローブの回転数、探傷データ採取ピッチを調整することにより、検出可能な欠陥深さを蒸気発生器伝熱管と同等としたまま、走査速度を1mm/sと高速化している。管支持板付き模擬欠陥試験体を用いたモックアップ試験により、探傷プローブの欠陥検出性能が確認でき、PPWC伝熱管の非破壊検査に自動探傷システムが適用できる見通しを得た。出力上昇試験前の原子炉停止期間には、供用前検査として、自動探傷システムを用いたECT用ボビン型プローブによるPPWC全伝熱管の初期探傷データの採取を行った。

本研究の目的は、PPWC伝熱管の探傷試験技術を確立することである。そのため、自動探傷システムを用いて、HTTRの原子炉停止期間(報告時点における最高到達原子炉出力は約55%)においてPPWC伝熱管の非破壊検査を実施した。ECT用ボビン型プローブでは、渦電流は伝熱管の周方向に流れるため、周方向に比べて軸方向の欠陥検出性能が優れている。また、ECT用ボビン型プローブの走査速度は、ECT用回転型プローブとUT用回転型プローブの走査速度よりはるかに速い。そこで、今回の非破壊検査では、伝熱管配列の対称性を考慮し、自動探傷システムを用いたPPWC伝熱管の探傷試験技術の信頼性を確認する上で十分な数をECT用ボビン型プローブの内挿により検査することとし、68本(抜取率50%)のPPWC伝熱管の全長を検査対象とした。さらに、伝熱管68本のうち、構造上応力が高いと予想される最小曲げ

半径R64mm, 最大曲げ半径R239mmの伝熱管の管板部, バッフル板部, 熱遮へい板部に対しては, ECT用ボビン型プローブによる非破壊検査に加えて, 周方向の欠陥検出性能が優れているECT用回転型プローブとUT用回転型プローブの内挿による非破壊検査を実施した。

本報は, HTTRの原子炉停止期間におけるPPWC伝熱管の非破壊検査に対する自動探傷システムの適用結果について報告するものである。2章では, PPWCの構造について示す。3章では, 自動探傷システムおよびその特徴について示す。4章では, PPWC伝熱管の非破壊検査の結果について示す。

Table 1.1 Major specifications of the HTTR

Thermal power	30 MW
Outlet coolant temperature	850 / 950°C
Inlet coolant temperature	395°C
Primary coolant pressure	4 MPa
Core structure	Graphite
Equivalent core diameter	2.3 m
Effective core height	2.9 m
Average power density	2.5 W/cm ³
Fuel	Low-enriched UO ₂
Uranium enrichment	3-10 wt% (average 6 wt%)
Fuel type	Pin-in-block
Coolant	Helium gas
Direction of coolant flow	Downward flow
Number of fuel assembly	150
Number of fuel columns	30
Plant lifetime	20 yr

Table 1.2 Major specifications of PPWC

Type	Shell and inverse U tube
Number	1
Thermal capacity	30 MW
Temperature	
Tube side (Inlet / Outlet)	135 / 175°C
Shell side (Inlet / Outlet)	950 / 395°C
Pressure	
Tube side / Shell side	3.5 / 4 MPa
Dimension	
Outer diameter of heat transfer tube	25.4 mm
Thickness of heat transfer tube	2.6 mm
Inner diameter of inner shell	1.6 m
Total height	7.5 m
Material	
Shell and tubesheet	2 1/4 Cr-1 Mo steel
Heat transfer tube	321 stainless steel

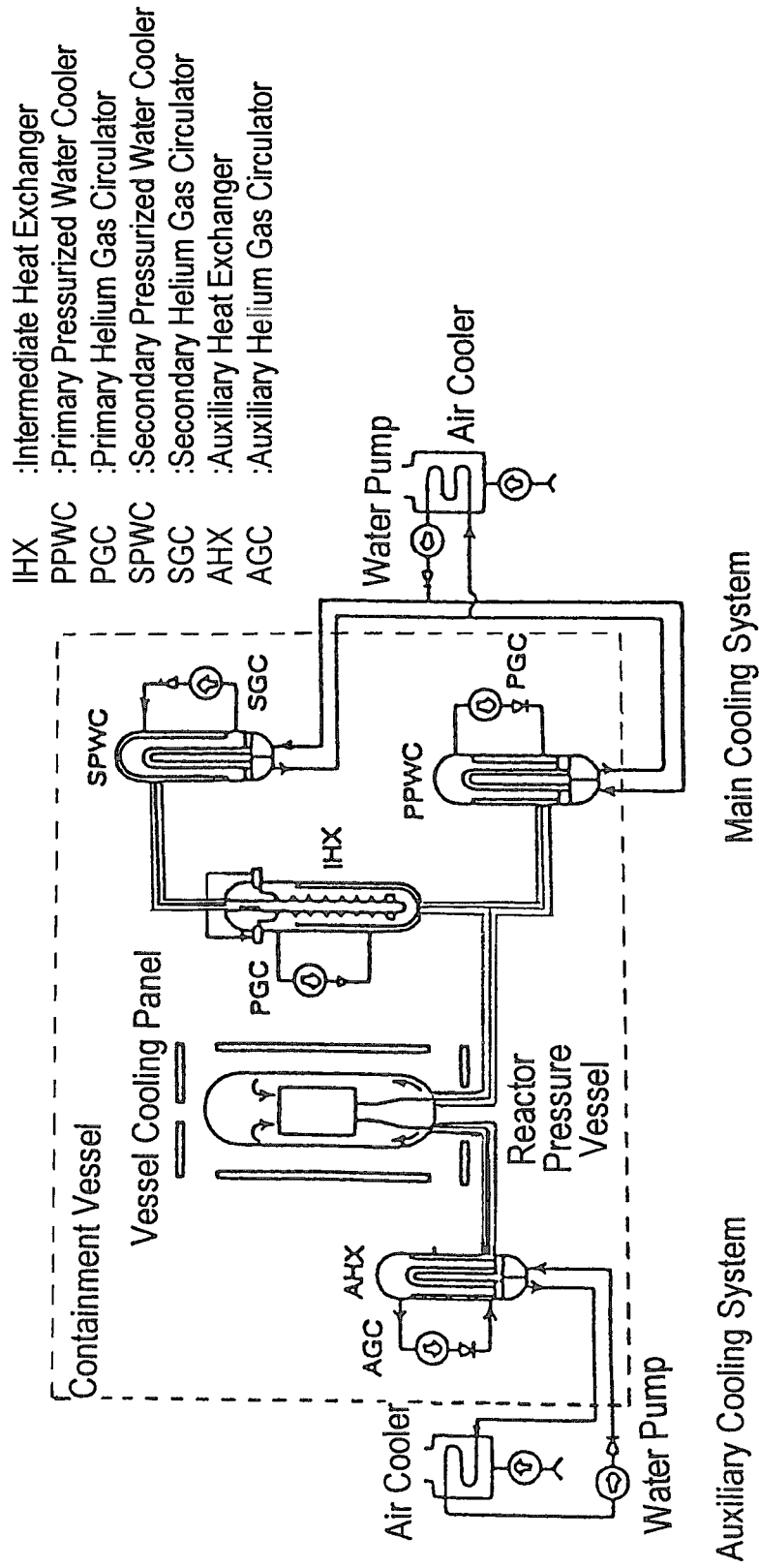


Fig. 1.1 Schematic diagram of reactor cooling system for the HTTR

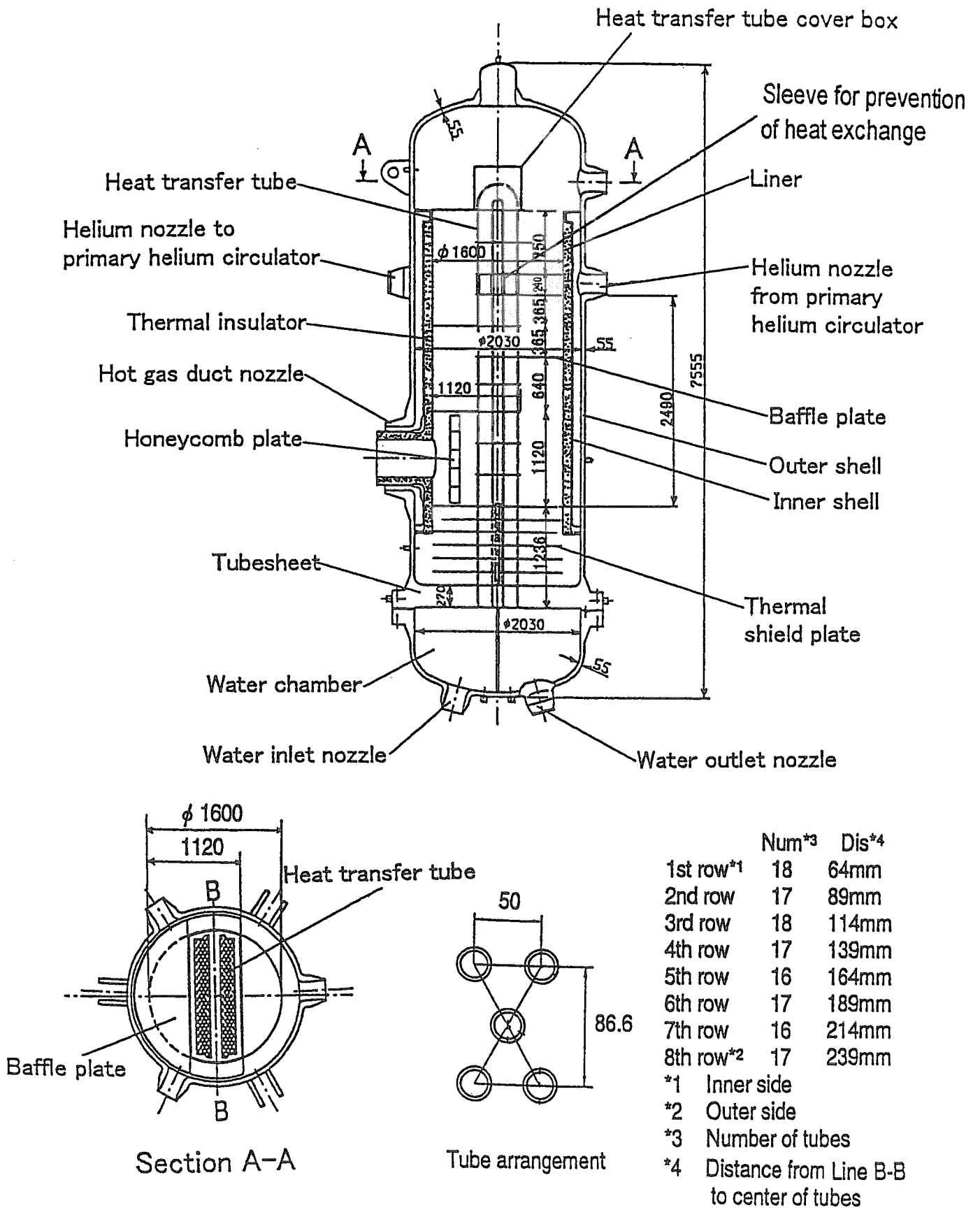
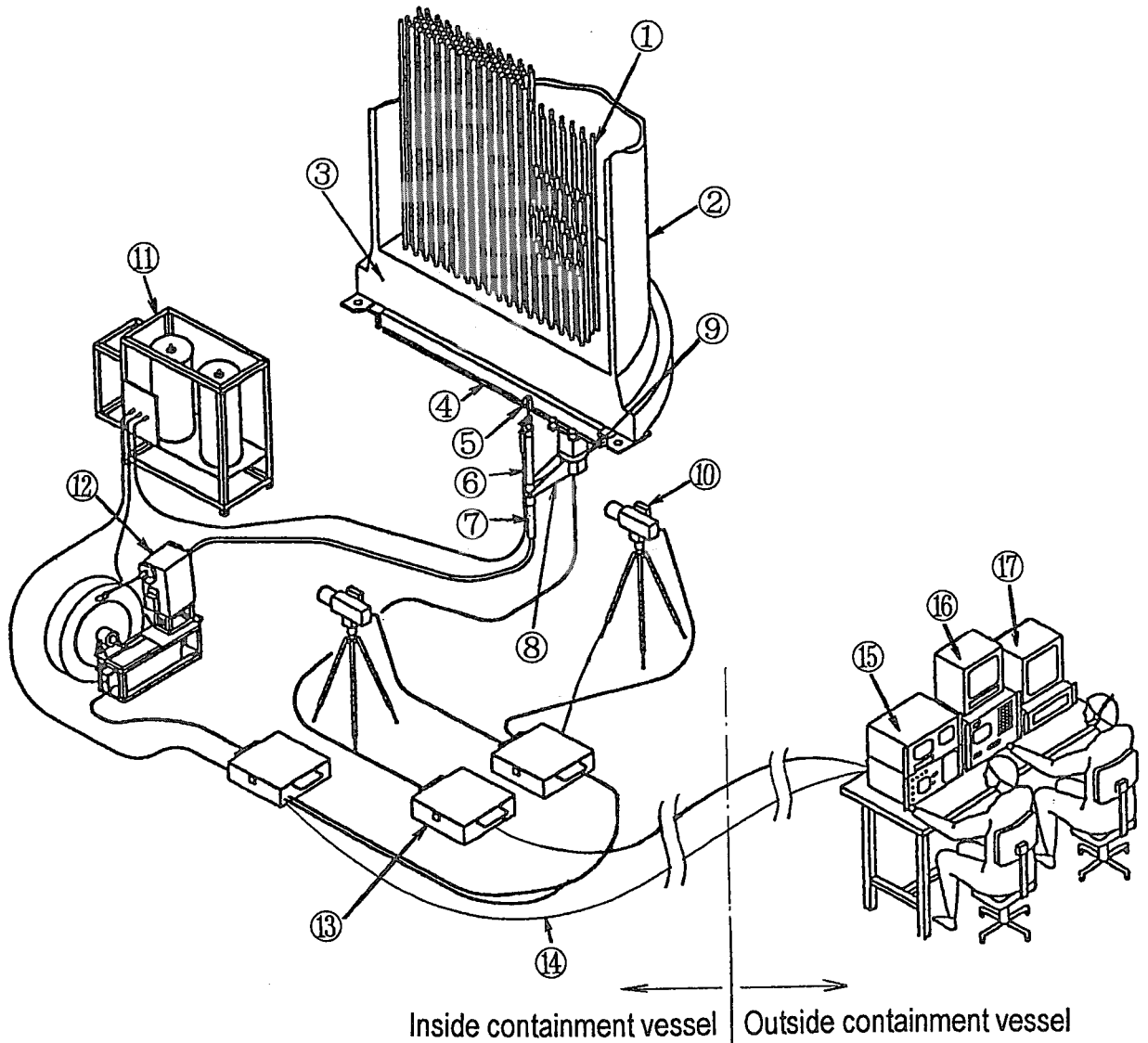


Fig. 1.2 Cross-sectional view of PPWC



1, heat transfer tube; 2, outer shell; 3, tubesheet; 4, rail; 5, inspection probe; 6, guide sleeve; 7, calibration tube; 8, whirling arm; 9, sideways flatcar; 10, monitor and telephone call device; 11, couplant unit; 12, insertion / extraction unit; 13, joint box; 14, connecting cable; 15, control device; 16, monitoring TV; 17, personal computer.

Fig. 1.3 Schematic diagram of automatic inspection system for heat transfer tubes of PPWC

2. 1次加圧水冷却器の構造

Fig. 1.1 に示したように、炉心で加熱された高温のヘリウムガスは、原子炉とPPWCを接続する二重管ライナの内側を通してPPWC内胴内(Fig. 1.2 参照)に流入する。内胴内に流入したヘリウムガスは、伝熱管の外側を上昇しながら加圧水へ熱を伝え、1次冷却材出口管台から1次ヘリウム循環機に導かれる。1次ヘリウム循環機で昇圧されたヘリウムガスは、1次冷却材入口管台からPPWCに戻り、内胴と外胴の間を通る。その後、二重管内管と圧力管の間を流れ、原子炉へ戻る。一方、加圧水は、下鏡の加圧水入口管台から水室内に流入し、伝熱管内を通り高温のヘリウムガスと熱交換後、加圧水出口管台から流出する。1次冷却材ヘリウムガスと加圧水の差圧は自動制御しており、万一伝熱管が破損した際、炉内へ直ちに大量の水が侵入しないようにしている。

伝熱管はピッチ 50mm の千鳥配列である。管板はヘリウムガスと加圧水のバウンダリであり、外胴と溶接されている。バッフル板(水平切欠き 30%)はヘリウムガスの伝熱を促進するとともに、伝熱管部におけるカルマン渦による共振および流力弾性振動の発生を防止する働きがある。熱遮へい板は、管板鉛直上方に設置され、管板上面の温度上昇を防止している。HTTRの運転モードとして、単独運転および並列運転があり、各運転用ノズルの下流に設置している止め弁を開閉することで、ヘリウムガス流路を単独運転で5段、並列運転で4段に切り替えている。これにより、ヘリウムガスと加圧水の熱交換に寄与する伝熱面積を調整している。多孔式受衝板は、高温のヘリウムガス入口部に設置され、伝熱管回りの熱伝達率を均一にしている。従来の熱交換器ではバッフル板が等間隔で設置されたが、高温のヘリウムガスが流入する1段目のバッフル板と熱遮へい板との間隔を広くすることで、ヘリウムガスの流速を遅くし、当該部の熱伝達率を低く抑えている。5段目のバッフル板より鉛直上方の伝熱管は、熱交換防止箱で覆われており、当該部は伝熱面積に含まれていない。

Fig. 2.1, Fig. 2.2 にHTTR出力上昇試験(平成12年4月29日～7月8日)におけるPPWC内を流れるヘリウムガスと加圧水の出入口温度変化および圧力変化を示す。原子炉出力約55%時(平成12年7月8日)のPPWCヘリウムガス入口温度および圧力はそれぞれ約500°C、約2.9MPa、加圧水出口温度および圧力はそれぞれ約100°C、約2.5MPaであった。

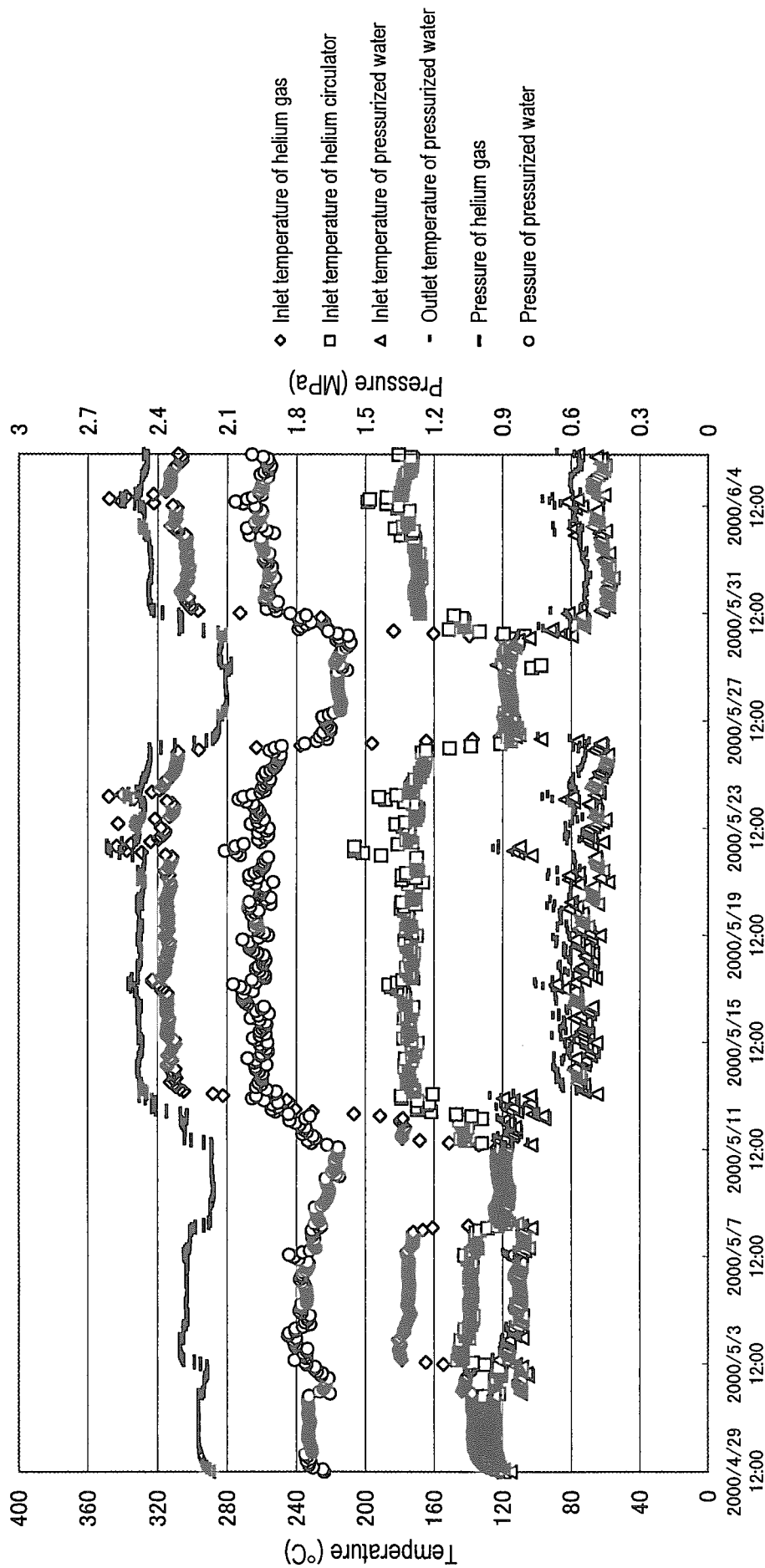


Fig. 2.1 Temperatures, pressures of helium gas and pressurized water of PPWC during rise-to-power test of the HTTR (from April 29 to June 4, 2000)

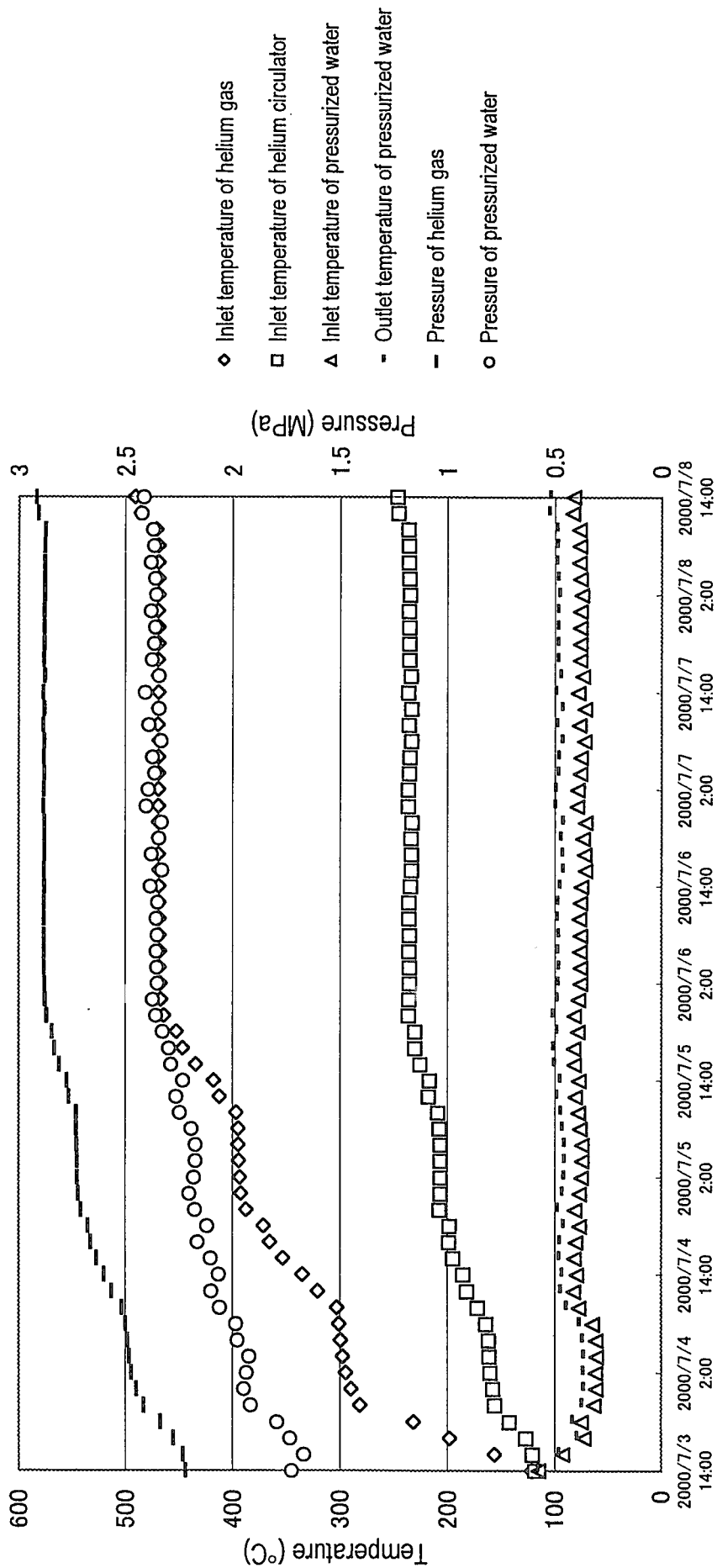


Fig. 2.2 Temperatures, pressures of helium gas and pressurized water of PPWC during rise-to-power test of the HTTR (from July 3 to July 8, 2000)

3. 1次加圧水冷却器伝熱管用自動探傷システム

(1) 構成

PPWC伝熱管用自動探傷システムは、Fig. 1.3 に示したように探傷プローブ(ECT用ボビン型プローブ、ECT用回転型プローブ、UT用回転型プローブ)、探傷プローブ用ガイドスリーブの管板上への位置決めを行うための案内装置、探傷プローブを一定速度で走査するための走引機、案内装置と走引機の制御装置、データ解析を行うための計算機等から構成される。

(2) 探傷プローブの特徴

Table 3.1 に探傷プローブの諸元、Fig. 3.1 に構造図を示す。PPWC伝熱管の透磁率の変化によるノイズを消去するため、ECTにおいて磁気飽和型プローブを使用している。曲げ半径が小さいPPWC伝熱管の逆U字バンド部に対してセンサー外径が16mmのECT用ボビン型プローブ、それ以外の検査部位に対してセンサー外径が18mmのECT用ボビン型プローブ、ECT用回転型プローブを使用している。

UT用回転型プローブには、スタビライザと伝熱管外部の構造物(管板、バッフル板、熱遮へい板等)の位置検出用ECTコイルが取り付けられている。UT用回転型プローブのセンサー外径は5mmであり、欠陥深さの定量化の向上を図るため、高周波数(20MHz)集束型を使用している。なお、UTにおいて、接触媒質として、カプラントユニットから水を供給している。

(3) 案内装置の特徴

案内装置は、PPWC伝熱管の配列(千鳥配列)を考慮し、管板の下面に取り付けるレール部、レールを走行する旋回アーム付き横行台車から構成される。横行台車の移動距離とアームの旋回角を制御することにより、探傷プローブ用ガイドスリーブを管板上に案内している。案内装置の走行系にラックピニオンを採用することにより、走行抵抗の軽減を図り、簡易な構造としている。また、旋回系にノンバックラッシュ歯車構造を採用することにより、アーム旋回に伴う変位を最小限に抑制し、走行系と旋回系全体で $\pm 0.5\text{mm}$ の位置決め精度を確保している。

(4) 走引機の特徴

走引機は、探傷プローブをPPWC伝熱管へ挿入および伝熱管から引抜くためのフィード機構部、ジョイント管を巻き取るリール機構部、探傷プローブの走査速度変化に対応するクラッチ機構部(駆動源はACサーボモータ)から構成される。

(5) P P W C伝熱管における欠陥深さの検出指標

軽水炉用蒸気発生器伝熱管母材部の供用期間中検査における欠陥深さの検出指標は、ASME Code Sec. XI⁽¹⁷⁾に示されている。しかし、P P W Cのような高温ガス炉用主冷却系熱交換器に使用された実績は無く、欠陥深さの検出指標も明確には定まっていなかった。そこで、P P W C伝熱管の限界減肉率(R_t)を超えない範囲で、P P W C伝熱管外面の欠陥深さの検出指標をTable 3.2に示すように定めた。ここで、 R_t は、「黒鉛減速ヘリウムガス冷却型原子炉施設に関する構造等の技術基準」(以下、構造等の技術基準と称す。)⁽¹⁸⁾に基づき、式(3.1)、(3.2)より算定した。

$$R_t = (t - t_{sr}) / t \cdot 100 \quad (3.1)$$

$$t_{sr} = \{P / (1.2 \cdot B) + 0.0833\} \cdot D / 2.167 \quad (3.2)$$

ここで、 R_t ：伝熱管限界減肉率(%)、

t ：伝熱管肉厚(=2.6mm)、

t_{sr} ：伝熱管限界肉厚(mm)、

P ：外圧(=41.5kg/cm²G)、

B ：構造等の技術基準別図第14(321 ステンレス鋼)の値(=650)、

D ：伝熱管外径(=25.4mm)

その結果、外圧に対する制限が最も厳しい運転状態Ⅲ(原子炉施設の故障、異常な動作により原子炉の運転停止が緊急に必要とされる状態)の条件で、 R_t は38%と評価した。

P P W C伝熱管外面の欠陥深さの検出指標は、欠陥形状、探傷プローブ種類、検査部位毎に定めた。同一欠陥深さにおいて、外面スリット状欠陥は外面減肉状欠陥に比べて欠陥体積が小さいため、外面スリット状欠陥の検出は困難となる。また、P P W C伝熱管の管板部、バッフル板部、熱遮へい板部はノイズの影響を受け易く、欠陥検出はそれ以外の検査部位に比べて困難となる。さらに、U T用回転型プローブの欠陥検出性能は、他のプローブに比べて優れている。故に、U T用回転型プローブによるP P W C伝熱管の管板部、バッフル板部、熱遮へい板部における外面スリット状欠陥とE C T用ピン型プローブによるそれ以外の検査部位における外面減肉状欠陥深さの検出指標を最も厳しく定め、管肉厚の10%に相当する欠陥深さとした。

(6) E C T用プローブの探傷周波数の評価

伝熱管を流れる渦電流は、表皮効果から探傷周波数が高くなる程、伝熱管内面側の電流密度が高くなる。一方、探傷周波数を低くすると、探傷プローブの揺動によるノイズ信号は減少するが、伝熱管外部の構造物(管板、バッフル板、熱遮へい板等)からのノイズ信号は増加する。そこで、P P W C伝熱管の肉厚、透磁率、導電率を考慮してE C T用プローブの探傷周波数を評価した。

E C Tにおける探傷周波数(f)と渦電流の浸透深さ(t)の関係は、式(3.3)で表される⁽²⁾。

渦電流の浸透厚さとして、伝熱管の肉厚(2.6mm)を式(3.3)に代入すると、評価探傷周波数は26.2kHzとなる。

$$f = 1 / (\pi \cdot t^2 \cdot \mu \cdot \sigma) \quad (3.3)$$

ここで、 μ : 321 ステンレス鋼の透磁率(= $4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$),

σ : 真空中における 321 ステンレス鋼の導電率(= $1.43 \times 10^6 \text{S/m}$)

(7) 探傷プローブの欠陥検出性能

PPWCのバッフル板5段目の材料は低合金鋼(21/4 Cr-1Mo鋼), 肉厚は4.5mmである。一方、その他のバッフル板、熱遮へい板の材料は、ニッケル基耐食耐熱超合金(ハステロイX, ハステロイXR⁽¹⁹⁾), 肉厚は2, 4, 6, 10, 12mmである。このようにPPWCのバッフル板、熱遮へい板の材料、肉厚は同一でないため、ECT用ポビン型プローブへの当該部からのノイズ信号は異なる。そこで、多重周波数演算法により、これらの伝熱管外部の構造物からのノイズ信号を低減することとした。

まず、材料がハステロイX、肉厚が4mm(実機バッフル板の代表厚さ)の管支持板付き模擬欠陥試験体を用いたモックアップ試験により、ECT用ポビン型プローブの補償周波数、外面欠陥深さをパラメータとして、管支持板部における信号/ノイズ比を調べた。ECT用ポビン型プローブの探傷周波数は、評価探傷周波数26.2kHzを考慮して基本周波数を30kHzとし、補償周波数を7.5, 15, 60kHzとした。プローブの走査速度は400mm/sとした。また、模擬欠陥試験体の材料、外径、肉厚は実機と同じ条件とし、外面欠陥深さは管肉厚の10, 17.5, 25, 35, 45, 60, 80%相当とした。試験の結果、Fig. 3.2に示すように、同一欠陥深さで補償周波数60kHzのケースが他の補償周波数のケースに比べて高い信号/ノイズ比を示した。

次に、多重周波数演算条件下(基本周波数30kHz, 補償周波数60kHz)で管支持板の材料、肉厚を実機の条件にして、管支持板部におけるECT用ポビン型プローブの演算電圧に与える影響を調べた。その結果、Table 3.3に示すように、演算電圧は0.25~0.31Vとほぼ同一の範囲内にあり、基本周波数を30kHz, 補償周波数を60kHzとすることで、材料、肉厚が異なる伝熱管外部の構造物からのノイズ信号を低減できる見通しを得た。

さらに、材料がハステロイX、肉厚が4mmの管支持板付き模擬欠陥試験体(外面欠陥深さはTable 3.2に従う)を用いたモックアップ試験により得られたECTとUTのデータを有意な信号指示レベルと比較することで、探傷プローブの欠陥検出性能を調べた。

この有意な信号指示とは、ノイズ信号レベルを超える信号であって、伝熱管外部の構造物(管板、バッフル板、熱遮へい板等)に起因する信号で無いものを言う。ECTにおける有意な信号指示のレベルは、軽水炉用蒸気発生器伝熱管と同様、信号/ノイズ比が2以上とする。一方、UT時に距離(超音波ビーム路程)が長くなる程、欠陥から得られるエコー振幅が低くなる。そのた

め、UTにおける有意な信号指示のレベルは、文献(7)に基づき、エコー振幅が20%距離振幅校正曲線を超えるものとする。

ECT用プローブの探傷周波数は、基本周波数を30kHzとし、補償周波数を60kHzとした。ECT用ボビン型プローブ、ECT用回転型プローブおよびUT用回転型プローブの走査速度は、それぞれ400mm/s、5mm/sおよび1mm/sとした。ECT用回転型プローブの信号については、フィルタリング法を適用してデータ処理を行った。

このモックアップ試験の結果から、Table 3.4 に示すように、ECTにおける信号/ノイズ比は2を上回り、UTにおけるエコー振幅は20%距離振幅校正曲線を上回った。何れも有意な信号指示のレベルを超えていることから、Table 3.2 に示す深さの伝熱管外面欠陥は自動探傷システムの探傷プローブを用いて検出可能であることを確認できた。

また、自動探傷システムにより、探傷プローブは模擬欠陥試験体の所定の位置に一定速度で円滑に挿入および引抜くことが可能となった。以上により、PPWC伝熱管の非破壊検査に本システムが適用できる見通しを得た。

Table 3.1 Specifications of inspection probes

Inspection probe	Style	Diameter of sensor	Outer diameter of coil
Bobbin coil probe for ECT at inverse-U-bends with smaller radius curvature	Magnetic saturated type	φ 16mm	φ 17.5mm
Bobbin coil probe for ECT at other places	Magnetic saturated type	φ 18mm	φ 18.1mm
Rotating probe for ECT	Magnetic saturated type	φ 18mm	φ 19mm
Rotating probe for UT	Focusing type	φ 5mm	φ 17mm

Table 3.2 Detecting standards of defect depth on outer surface of heat transfer tube of PPWC

Defect style	Probe type	Inspected position	Detecting standard of defect depth
Reduction type Defect	Bobbin coil probe for ECT	Tube except near plates (tubesheet, baffle plates and thermal shield plates)	10 % of tube thickness
		Tube near plates	20 % of tube thickness
Slit type defect	Rotating probe for ECT	Tube near plates	30 % of tube thickness
	Rotating probe for UT	Tube near plates	10 % of tube thickness

ECT, Eddy current testing; UT, Ultrasonic testing

Table 3.3 Relationship among material, thickness of tube plate and voltage of bobbin coil probe for ECT at artificially defected tube near its plate

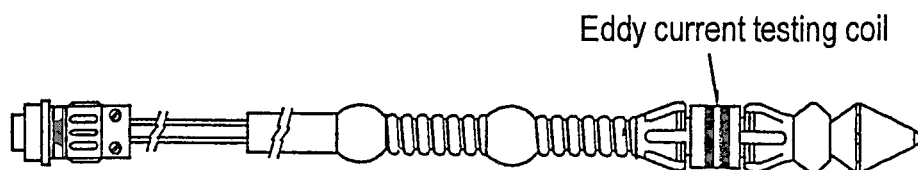
Tube plate		Voltage of bobbin coil probe for ECT
Material	Thickness	
Hastelloy X	2mm	0.25V
Hastelloy X	4mm	0.31V
Hastelloy X	6mm	0.25V
Hastelloy X	10mm	0.31V
Hastelloy X	12mm	0.31V
2 1/4 Cr-1 Mo steel	4.5mm	0.25V

Table 3.4 Relationship between defect depth on outer surface of artificially defected tube and detecting performance of bobbin coil probe, rotating probe for ECT and rotating probe for UT

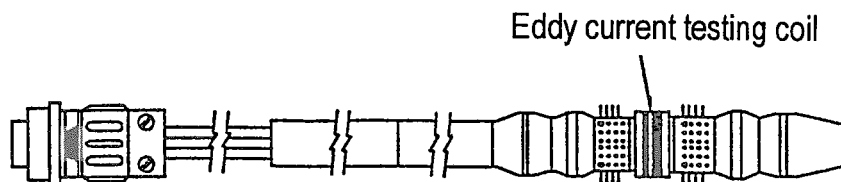
Case number	Defect style	Probe type	Inspected position	Defect depth	Probe traveling velocity	Inspection frequency	SN	Echo amplitude
Case 1	Reduction type defect	Bobbin coil probe for ECT	Tube except near plates	10 % of tube thickness	400 mm s ⁻¹	30 kHz	7.0	-
Case 2	Reduction type defect	Bobbin coil probe for ECT	Tube near plates	20 % of tube thickness	400 mm s ⁻¹	30 and 60 kHz	4.0	-
Case 3	Slit type defect	Rotating probe for ECT	Tube near plates	30 % of tube thickness	5 mm s ⁻¹	30 kHz	2.5	-
Case 4	Slit type defect	Rotating probe for UT	Tube near plates	10 % of tube thickness	1 mm s ⁻¹	-	-	100 % of DAC

SN, Signal-to-noise ratio; ECT, Eddy current testing; UT, Ultrasonic testing; DAC, Distance-amplitude calibration curve

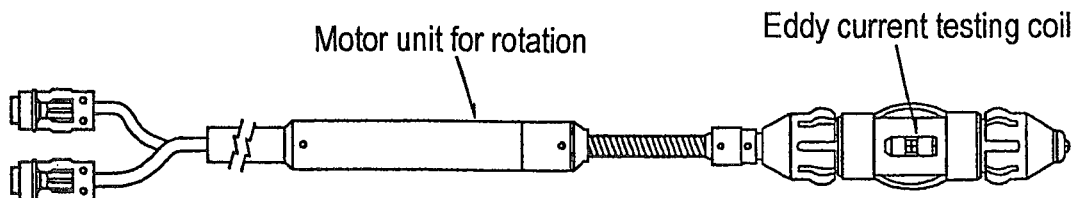
(a) Bobbin coil probe for eddy current testing at inverse-U-bends with smaller radius of curvature



(b) Bobbin coil probe for eddy current testing at other places



(c) Rotating probe for eddy current testing



(d) Rotating probe for ultrasonic testing

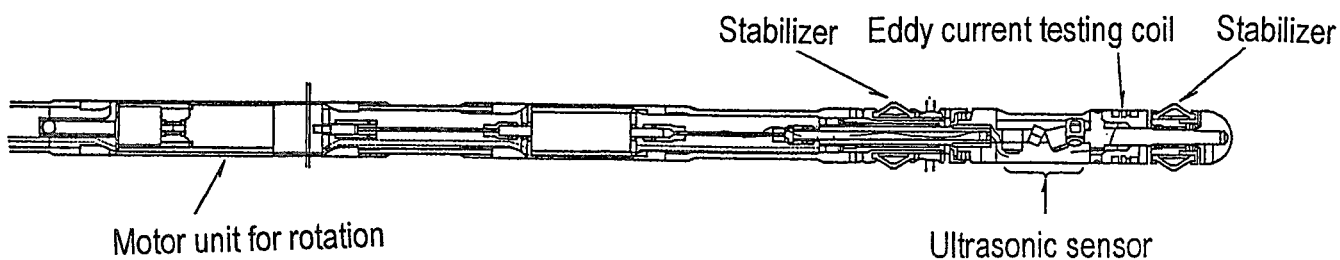


Fig. 3.1 Inspection probes for ECT and UT

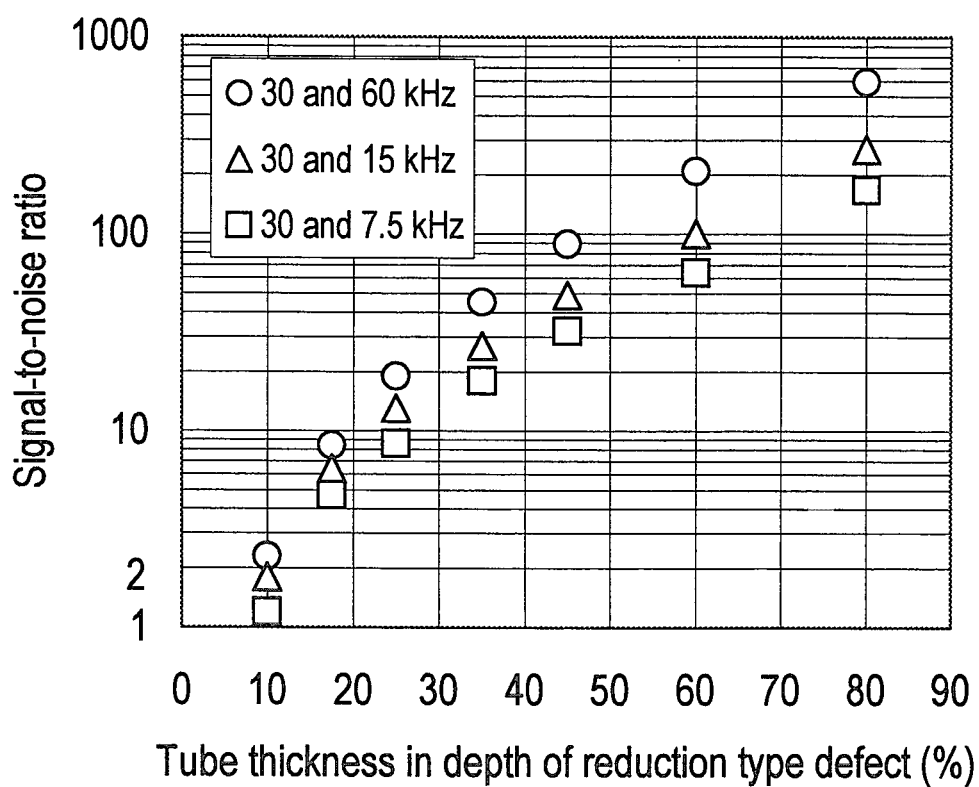


Fig. 3.2 Relationship among reduction type defect depth on outer surface of artificially defected tube near its plates, combination frequencies and signal-to-noise ratio of bobbin coil probe for ECT

4. 1 次加圧水冷却器伝熱管の非破壊検査

(1) ECT用ボビン型プローブによる検査

今回の非破壊検査では、伝熱管配列の対称性を考慮し、自動探傷システムを用いたPPWC伝熱管の探傷試験技術の信頼性を確認する上で十分な数をECT用ボビン型プローブにより検査することとした。そこで、検査対象はFig. 4.1中●印で示す68本(抜取率50%)のPPWC伝熱管の全長とし、Fig. 3.1に示したセンサー外径が異なるプローブにより検査する最小曲げ半径R64mm, 最大曲げ半径R239mmの全伝熱管(35本)に加えて、伝熱管配列の対称性を考慮して選定した曲げ半径R89, 114, 139, 164, 189, 214mmの伝熱管(33本)について検査した。

ECT用ボビン型プローブの探傷周波数は、管支持板付き模擬欠陥試験体を用いたモックアップ試験で管支持板部において管肉厚の20%に相当する深さの外面減肉状欠陥を検出可能にした条件(Table 3.4 参照)を考慮し、基本周波数を30kHzとした。また、PPWC伝熱管の管板部、バッフル板部、熱遮へい板部における補償周波数を60kHzとした。プローブの走査速度は、逆U字バンド部走査中のプローブの揺動によるノイズ信号を低減するため、モックアップ試験時の走査速度(400mm/s)より遅い200mm/sとした。非破壊検査中、プローブは曲げ半径が異なるPPWC伝熱管の所定の位置に一定速度で円滑に挿入および引抜くことができた。

Table 4.1, Table 4.2にECT用ボビン型プローブによるXYアドレス毎の信号/ノイズ比の軸方向最大値とその位置を示す。PPWC伝熱管のXYアドレスはFig. 4.1中の表記に従い、軸(Z)方向位置は後述するFig. 4.5中の表記に従う。曲げ半径R64mm, R239mmの伝熱管において、配列対称となる検査位置での信号/ノイズ比に顕著な違いは生じなかった。高温のヘリウムガスが流入するため、多数のPPWC伝熱管のバッフル板1段目部(7B, 8B, 9B部)が高い信号/ノイズ比を示した。また、13Bと14Bのバッフル板の間隔(240mm)が他のバッフル板の間隔(320~375mm)より小さくなるため、多数のPPWC伝熱管のバッフル板4段目部(13B, 14B部)が高い信号/ノイズ比を示した。

さらに、次の①~⑤のPPWC伝熱管部位における信号/ノイズ比は最大値(1.8)を示した。

- ① 加圧水入口側伝熱管(X:17, Y:1)のバッフル板1段目部(9B部)
- ② 加圧水入口側伝熱管(X:25, Y:1)のバッフル板1段目部(9B部)
- ③ 加圧水入口側伝熱管(X:26, Y:2)のバッフル板1段目部(9B部)
- ④ 加圧水入口側伝熱管(X:23, Y:3)のバッフル板1段目部(9B部)
- ⑤ 加圧水入口側伝熱管(X:27, Y:7)のバッフル板2段目部(11B部)

ここで、モックアップ試験の結果(Table 3.4 参照)では、管支持板部において管肉厚の20%に相当する深さの外面減肉状欠陥に対する信号/ノイズ比は4.0であった。今回ECT用ボビン型プローブにより検査したPPWC伝熱管の信号/ノイズ比の最大値(1.8)は、本外面減肉状欠陥

に対する信号／ノイズ比を下回ったが、3章に示したECTにおける有意な信号指示レベル(信号／ノイズ比が2以上)との裕度は小さかった。そこで、信号／ノイズ比が1.8であるPPWC伝熱管で得られたリサージュ波形と模擬欠陥試験体に対して得られたリサージュ波形を比較した。Fig. 4.2にECT用ポビン型プローブによる信号／ノイズ比が1.8である加圧水入口側伝熱管(X:26, Y:2)のバッフル板1段目部(9B部)における波形データを示す。このリサージュ波形の軌跡および位相は、Fig. 4.3に示すECT用ポビン型プローブ校正試験時の管支持板(材料:ハステロイX,肉厚4mm等)付き模擬欠陥試験体(貫通ドリル孔4個,孔径 $\phi 0.8\text{mm}$ ⁽²⁰⁾)に対する結果と異なった。故に、ECT用ポビン型プローブにより検査したPPWC伝熱管にプローブの検出指標を超える深さの外面欠陥、すなわち、管板部、バッフル板部、熱遮へい板部において管肉厚の20%以上に相当する深さの外面減肉状欠陥、それ以外の検査部位において管肉厚の10%以上に相当する深さの外面減肉状欠陥は無いことが確認できた。

(2) ECT用回転型プローブによる検査

Fig. 4.4, Fig. 4.5にそれぞれPPWC伝熱管の概略水平断面図, 曲げ半径R64mm, R239mmの伝熱管のみ抜粋した概略鉛直断面図を示す。ここで、ECT用回転型プローブ, UT用回転型プローブによる曲げ半径R64mm, R239mmのPPWC伝熱管の検査対象は、伝熱管配列の対称性を考慮して選定し、Fig. 4.4中○印で示す各3本とした。Fig. 4.5の軸方向0B部は管板部, 1B~5B部は熱遮へい板部, 6B~16B部はバッフル板部である。

構造上応力が高いと予想されるFig. 4.5中●印で示す次の①~③のPPWC伝熱管部位をECT用回転型プローブにより検査した。

- ① 加圧水出入口側曲げ半径R64mmの伝熱管のバッフル板5段目部(16B部)
- ② 加圧水出入口側曲げ半径R64mmの伝熱管のバッフル板4段目部(13B部)
- ③ 加圧水出口側曲げ半径R239mmの伝熱管のバッフル板4段目部(13B部)

これらの検査位置の選定理由として、①は逆U字バンド部であり、曲げ半径R64mmが他の伝熱管より小さいためである。②は13Bと14Bのバッフル板の間隔(240mm)が他のバッフル板の間隔(320~375mm)より小さく、かつ、ヘリウムガスの流れの影響を受けて13Bのバッフル板温度は14Bのバッフル板温度より高くなるためである。③は②の理由に加えて、バッフル板4段目部(13B部)においてヘリウムガスとの熱交換に起因して加圧水出口側の加圧水温度が加圧水入口側の加圧水温度より高くなるためである。

ECT用回転型プローブの探傷周波数および走査速度は、管支持板付き模擬欠陥試験体を用いたモックアップ試験で管支持板部において管肉厚の30%に相当する深さの外面スリット状欠陥を検出可能にした条件(Table 3.4参照)を考慮し、それぞれ30kHzおよび5mm/sとした。

Table 4.3に示すように、フィルタリング法を適用してデータ処理をしたECT用回転型プロ

ープの信号／ノイズ比の最大値は1.8であった。その位置は、PPWC内胴に最も近い加圧水出入口側最小曲げ半径R64mmの伝熱管(X:35, Y:1)のバッフル板5段目部(16B部)であった。ここで、当該PPWC伝熱管(X:35, Y:1)におけるECT用ボビン型プローブの最大信号／ノイズ比の軸方向位置は、加圧水入口側伝熱管に対してバッフル板1段目部(9B部)であり、その信号／ノイズ比は1.5であった。また、加圧水出口側伝熱管に対してバッフル板5段目部(15B部)であり、その信号／ノイズ比は1.3であった。このようにPPWC伝熱管の検査位置によっては、周方向の欠陥検出性能が優れているECT用回転型プローブの信号／ノイズ比が、軸方向の欠陥検出性能が優れているECT用ボビン回転型プローブの結果を上回っており、両プローブによる検査が必要となる。

Fig. 4.6にECT用回転型プローブによる信号／ノイズ比が1.8である加圧水入口側伝熱管(X:35, Y:1)のバッフル板5段目部(16B部)における波形データを示す。フィルタリング法を適用したリサージュ波形の軌跡および位相は、Fig. 4.7に示すECT用回転型プローブ校正試験時の管支持板(材料:ハステロイX, 肉厚4mm等)付き模擬欠陥試験体(貫通ドリル孔1個, 孔径 ϕ 1.7mm)に対する結果と異なった。故に、ECT用回転型プローブにより検査したPPWC伝熱管にプローブの検出指標を超える深さの外面欠陥、すなわち、バッフル板部において管肉厚の30%以上に相当する深さの外面スリット状欠陥は無いことが確認できた。

(3) UT用回転型プローブによる検査

ECT用回転型プローブにより検査したPPWC伝熱管について、構造上応力が高いと予想されるFig. 4.5中○印で示す次の①～④の伝熱管部位をUT用回転型プローブにより検査した。

- ① 加圧水出入口側曲げ半径R64mmの伝熱管の管板部(0B部)
- ② 加圧水入口側曲げ半径R239mmの伝熱管の管板部(0B部)
- ③ 加圧水出入口側曲げ半径R64mmの伝熱管の熱遮へい板部(5B部)
- ④ 加圧水入口側曲げ半径R239mmの伝熱管の熱遮へい板部(5B部)

これらの検査位置の選定理由として、①は伝熱管の両端が管板に拡管シール溶接されているためである。②は①の理由に加えて、管板部(0B部)において加圧水入口側のヘリウムガスと加圧水の温度差が加圧水出口側のヘリウムガスと加圧水の温度差より大きくなるためである。③は5Bと6Bの熱遮へい板の温度差と6Bと7Bのバッフル板の温度差はほぼ同じと予想され、かつ、5Bと6Bの熱遮へい板の間隔(150mm)が6Bと7Bのバッフル板の間隔(375mm)より小さいためである。④は③の理由に加えて、熱遮へい板部(5B部)において加圧水入口側のヘリウムガスと加圧水の温度差が加圧水出口側のヘリウムガスと加圧水の温度差より大きくなるためである。ここで、軸方向の欠陥検出性能が優れているECT用ボビン型プローブにより検査したPPWC伝熱管の管板部、熱遮へい板部における信号／ノイズ比は、バッフル板部における結果を概ね下

回った。

UT用回転型プローブの走査速度は、管支持板付き模擬欠陥試験体を用いたモックアップ試験で管支持板部において管肉厚の10%に相当する深さの外面スリット状欠陥を検出可能にした条件(Table 3.4 参照)を考慮し、1mm/sとした。

UT用回転型プローブの軸方向、周方向欠陥検出用センサーによる検査結果の一例として、加圧水入口側伝熱管(X:35, Y:1)の管板部(0B)における波形データをそれぞれ Fig. 4.8, Fig. 4.9 に示す。これらの図のAスコープ波形は距離(超音波ビーム路程)とエコー振幅の関係を示す。Bスコープ波形は距離とセンサー位置の関係、Cスコープ波形はセンサーの軸方向、周方向位置の関係を示す。B, Cスコープの波形内の信号に関する色の差はエコー振幅の大きさの違いを表す。Aスコープ波形内の左側、右側のゲートは、それぞれPPWC伝熱管外面欠陥検出用、内面欠陥検出用の20%距離振幅校正曲線であり、本校正曲線を用いてUT用回転型プローブのエコー振幅を3章に示した有意な信号指示レベルと比較した。ここで、UT用回転型プローブの軸方向、周方向欠陥検出用センサーの校正試験では、一般的に言われているUTデータの分散(バラツキ)を考慮し⁽²¹⁾、深さが管肉厚の20%相当、幅が0.2mmの外面スリット状欠陥から得られるエコーのピーク振幅をCRT目盛の100%+6dBに調整した。軸方向欠陥検出用センサーにより検査したPPWC伝熱管の管板部におけるエコー振幅は、周方向欠陥検出用センサーによる結果を上回ったが、20%距離振幅校正曲線を下回り、何れも有意な信号指示レベルを超えなかった。

Table 4.4 に示すように、UT用回転型プローブのエコー振幅は何れのPPWC伝熱管検査部位も20%距離振幅校正曲線を下回り、UT用回転型プローブにより検査したPPWC伝熱管にプローブの検出指標を超える深さの外面欠陥、すなわち、管板部、熱遮へい板部において管肉厚の10%以上に相当する深さの外面スリット状欠陥は無いことが確認できた。

Table 4.1 Signal-to-noise ratio of ECT bobbin coil probe at overall lengths of half of heat transfer tubes of PPWC (1/2)

No.	Address		Water inlet side tube with max. SN ratio		Water outlet side tube with max. SN ratio	
	X	Y	Axial position	SN ratio	Axial position	SN ratio
1	1	1	9 B	1.4	13B	1.6
2	3	1	9 B	1.7	13B	1.4
3	5	1	9 B	1.6	9 B	1.7
4	7	1	9 B	1.7	15B	1.3
5	9	1	9 B	1.4	9 B	1.2
6	11	1	9 B	1.6	5 B	1.2
7	13	1	9 B	1.4	13B	1.4
8	15	1	9 B	1.4	13B	1.4
9	17	1	9 B	1.8	13B	1.2
10	19	1	9 B	1.6	13B	1.2
11	21	1	9 B	1.7	13B	1.5
12	23	1	9 B	1.7	13B	1.2
13	25	1	9 B	1.8	13B	1.6
14	27	1	9 B	1.7	13B	1.5
15	29	1	9 B	1.6	13B	1.3
16	31	1	9 B	1.7	13B	1.4
17	33	1	9 B	1.7	9 B	1.3
18	35	1	9 B	1.5	15B	1.3
19	18	2	6 B	1.5	8 B	1.5
20	20	2	9 B	1.7	8 B	1.4
21	22	2	9 B	1.7	13B	1.5
22	24	2	9 B	1.7	13B	1.4
23	26	2	9 B	1.8	13B	1.3
24	28	2	9 B	1.7	13B	1.5
25	19	3	9 B	1.7	8 B	1.5
26	21	3	9 B	1.5	8 B	1.4
27	23	3	9 B	1.8	8 B	1.6
28	25	3	9 B	1.6	13B	1.3
29	27	3	13B	1.6	9 B	1.3
30	29	3	7 B	1.5	9 B	1.4
31	18	4	6 B	1.4	14B	1.3
32	20	4	8 B	1.5	7 B	1.5
33	22	4	8 B	1.5	13B	1.2
34	24	4	10B	1.7	15B	1.3

Table 4.2 Signal-to-noise ratio of ECT bobbin coil probe at overall lengths of half of heat transfer tubes of PPWC (2/2)

No.	Address		Water inlet side tube with max. SN ratio		Water outlet side tube with max. SN ratio	
	X	Y	Axial position	SN ratio	Axial position	SN ratio
35	26	4	6 B	1.6	13B	1.6
36	19	5	12B	1.4	13B	1.4
37	21	5	13B	1.5	13B	1.4
38	23	5	14B	1.1	12B	1.4
39	25	5	4 B	1.7	14B	1.2
40	27	5	13B	1.2	11B	1.3
41	18	6	10B	1.5	12B	1.1
42	20	6	12B	1.4	13B	1.2
43	22	6	9 B	1.3	13B	1.3
44	24	6	13B	1.3	9 B	1.5
45	26	6	13B	1.3	13B	1.5
46	19	7	8 B	1.3	9 B	1.5
47	21	7	14B	1.7	11B	1.5
48	23	7	8 B	1.7	11B	1.4
49	25	7	14B	1.2	13B	1.6
50	27	7	11B	1.8	12B	1.2
51	29	7	13B	1.4	10B	1.4
52	2	8	7 B	1.3	10B	1.4
53	4	8	10B	1.2	14B	1.5
54	6	8	14B	1.5	14B	1.4
55	8	8	11B	1.2	10B	1.6
56	10	8	4 B	1.2	10B	1.1
57	12	8	8 B	1.2	12B	1.0
58	14	8	5 B	1.2	9 B	1.6
59	16	8	9 B	1.4	13B	1.3
60	18	8	9 B	1.4	14B	1.4
61	20	8	13B	1.2	10B	1.4
62	22	8	5 B	1.4	12B	1.3
63	24	8	9 B	1.3	9 B	1.6
64	26	8	14B	1.7	11B	1.3
65	28	8	13B	1.5	13B	1.5
66	30	8	14B	1.6	8 B	1.3
67	32	8	14B	1.5	9 B	1.5
68	34	8	13B	1.3	11B	1.3

Table 4.3 Signal-to-noise ratio of ECT rotating probe at inspected positions of heat transfer tubes of PPWC

No.	Address		Axial position	Water inlet side tube	Water outlet side tube
	X	Y		SN ratio	SN ratio
1	19	1	13B	1.2	1.2
2	19	1	16B	1.0	1.4
3	27	1	13B	1.1	1.2
4	27	1	16B	1.2	1.2
5	35	1	13B	1.2	1.3
6	35	1	16B	1.8	1.8
7	18	8	13B	/	1.4
8	26	8	13B		1.2
9	34	8	13B		1.5

Table 4.4 Echo amplitude of UT rotating probe at inspected positions of heat transfer tubes of PPWC

No.	Address		Axial position	Water inlet side tube	Water outlet side tube
	X	Y		Echo amplitude	Echo amplitude
1	19	1	0 B	Below 20 % of DAC	Below 20 % of DAC
2	19	1	5 B	Below 20 % of DAC	Below 20 % of DAC
3	27	1	0 B	Below 20 % of DAC	Below 20 % of DAC
4	27	1	5 B	Below 20 % of DAC	Below 20 % of DAC
5	35	1	0 B	Below 20 % of DAC	Below 20 % of DAC
6	35	1	5 B	Below 20 % of DAC	Below 20 % of DAC
7	18	8	0 B	Below 20 % of DAC	/
8	18	8	5 B	Below 20 % of DAC	
9	26	8	0 B	Below 20 % of DAC	
10	26	8	5 B	Below 20 % of DAC	
11	34	8	0 B	Below 20 % of DAC	
12	34	8	5 B	Below 20 % of DAC	

DAC : Distance-amplitude calibration curve

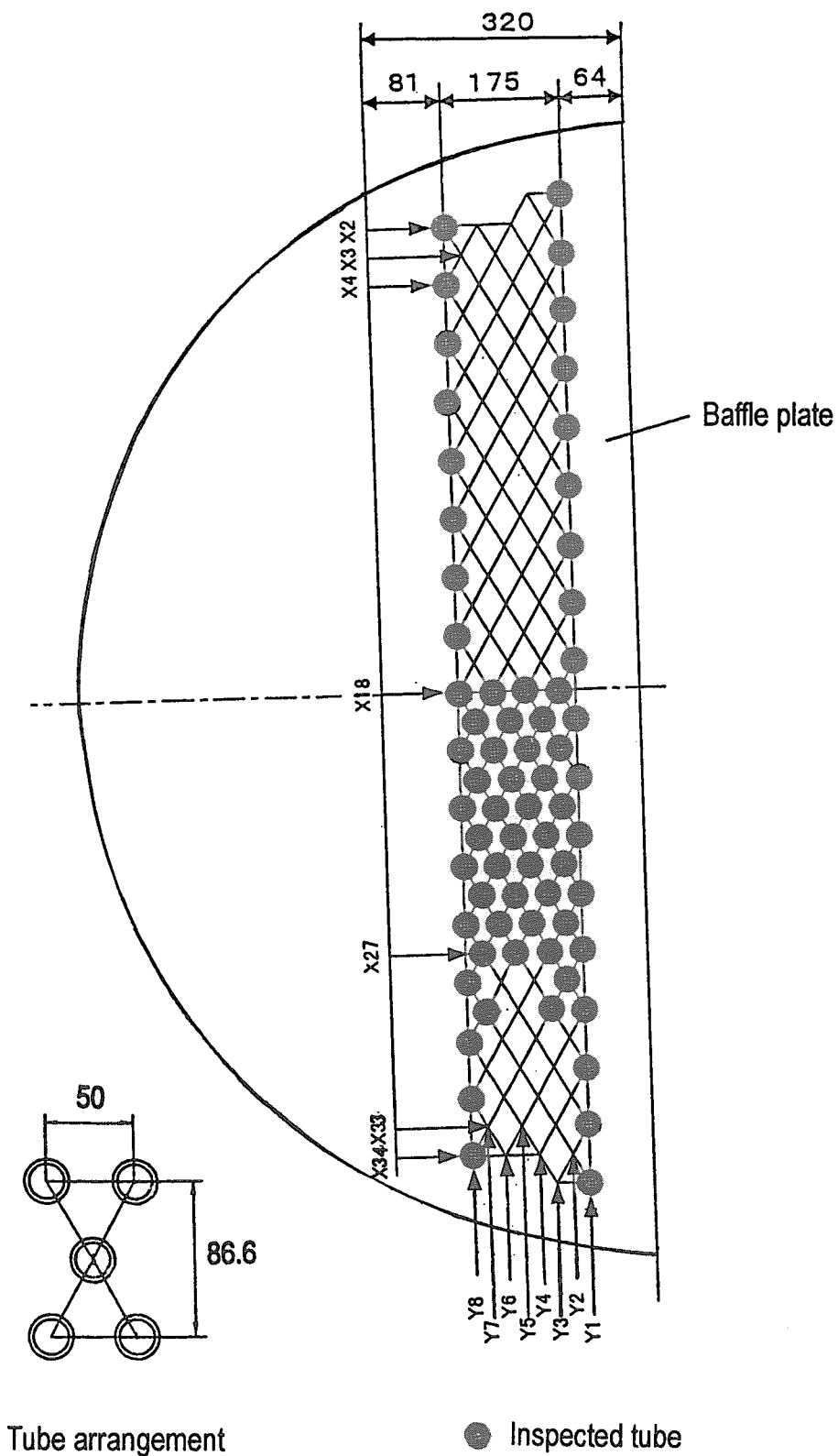


Fig. 4.1 Inspected tubes of PPWC for ECT through bobbin coil probe

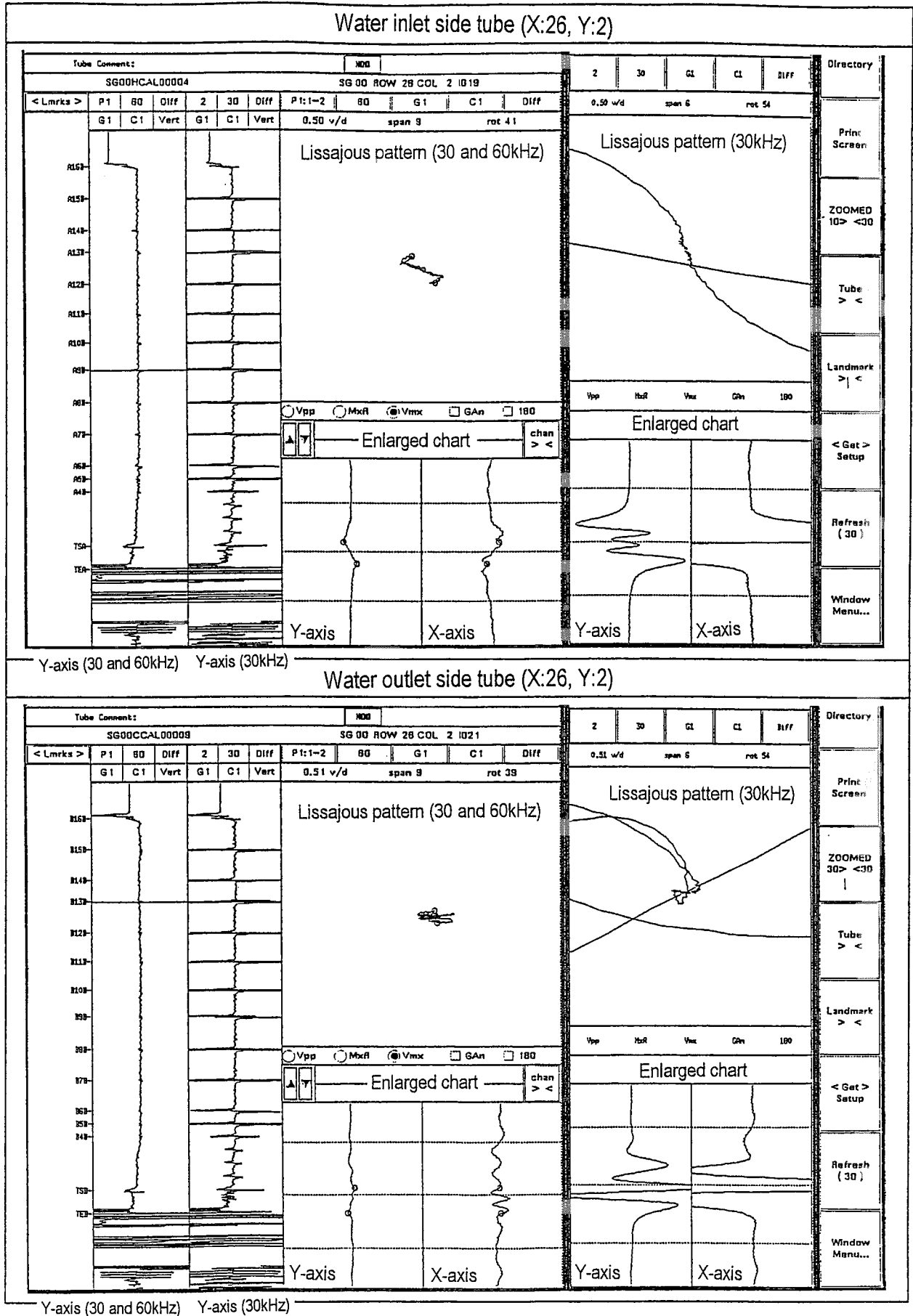


Fig. 4.2 Inspection results at PPWC tube (X:26, Y:2) through ECT bobbin coil probe

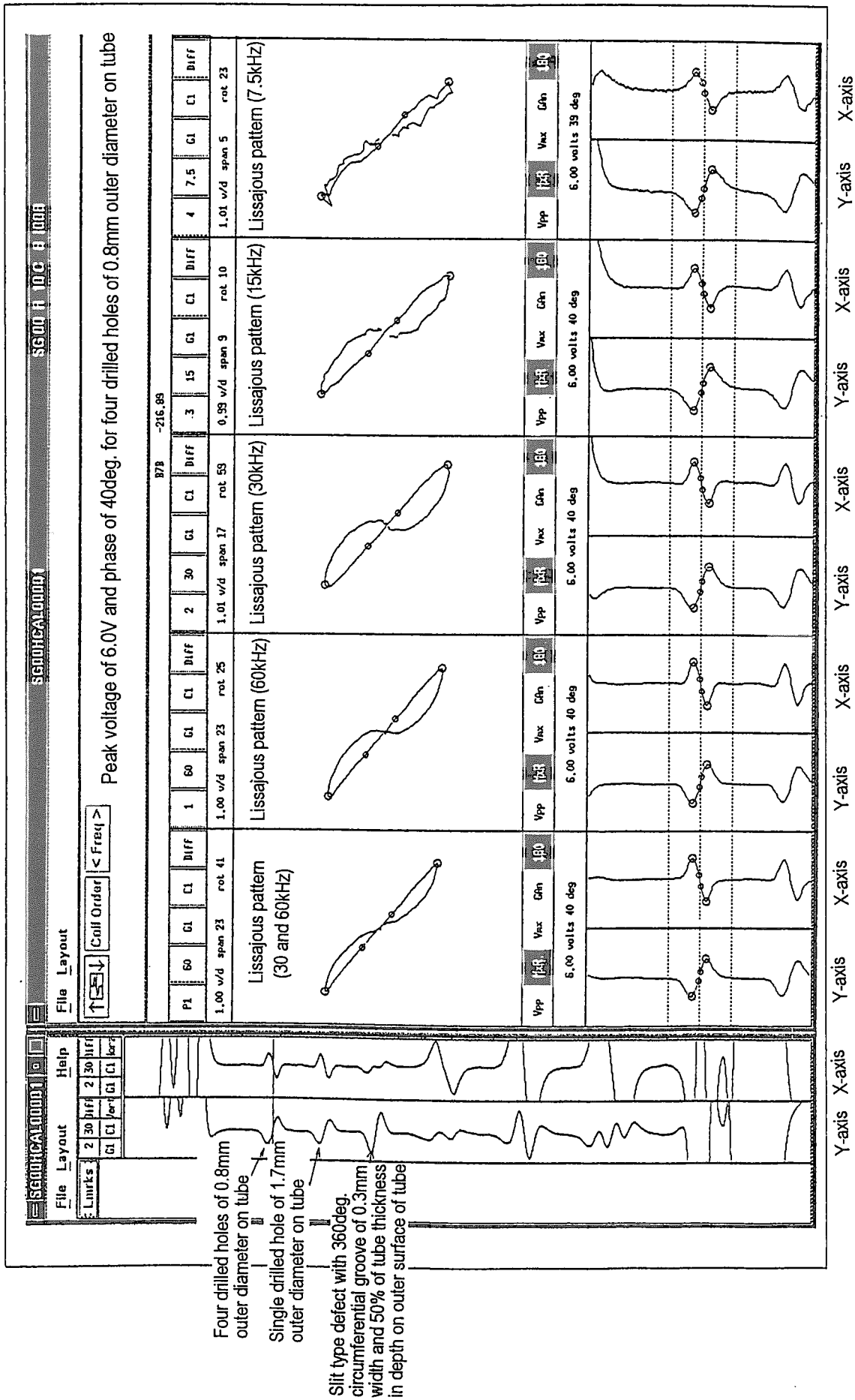


Fig. 4.3 Calibration results for ECT bobbin coil probe

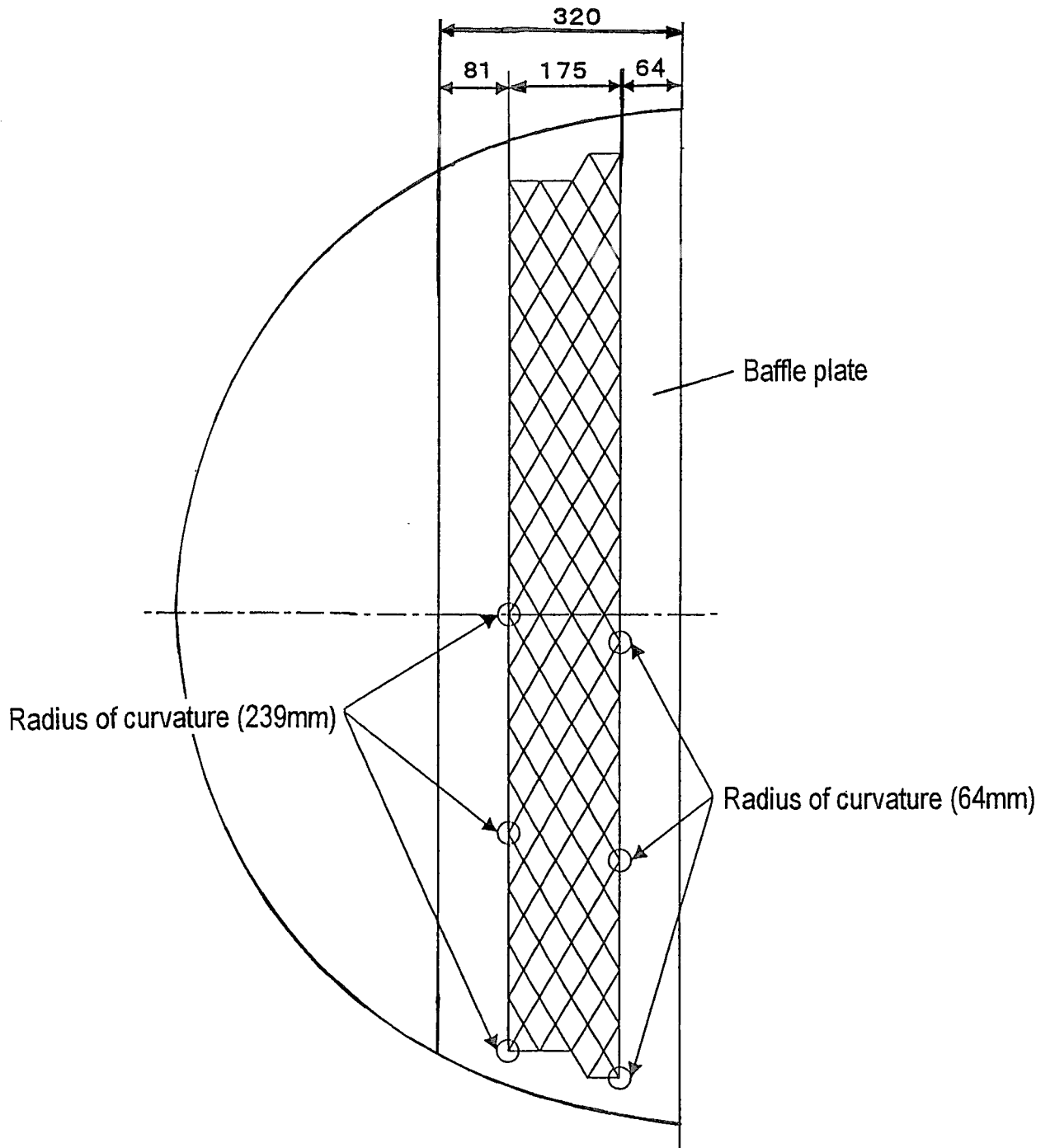


Fig. 4.4 Inspected tubes of PPWC for ECT and UT through rotating probes

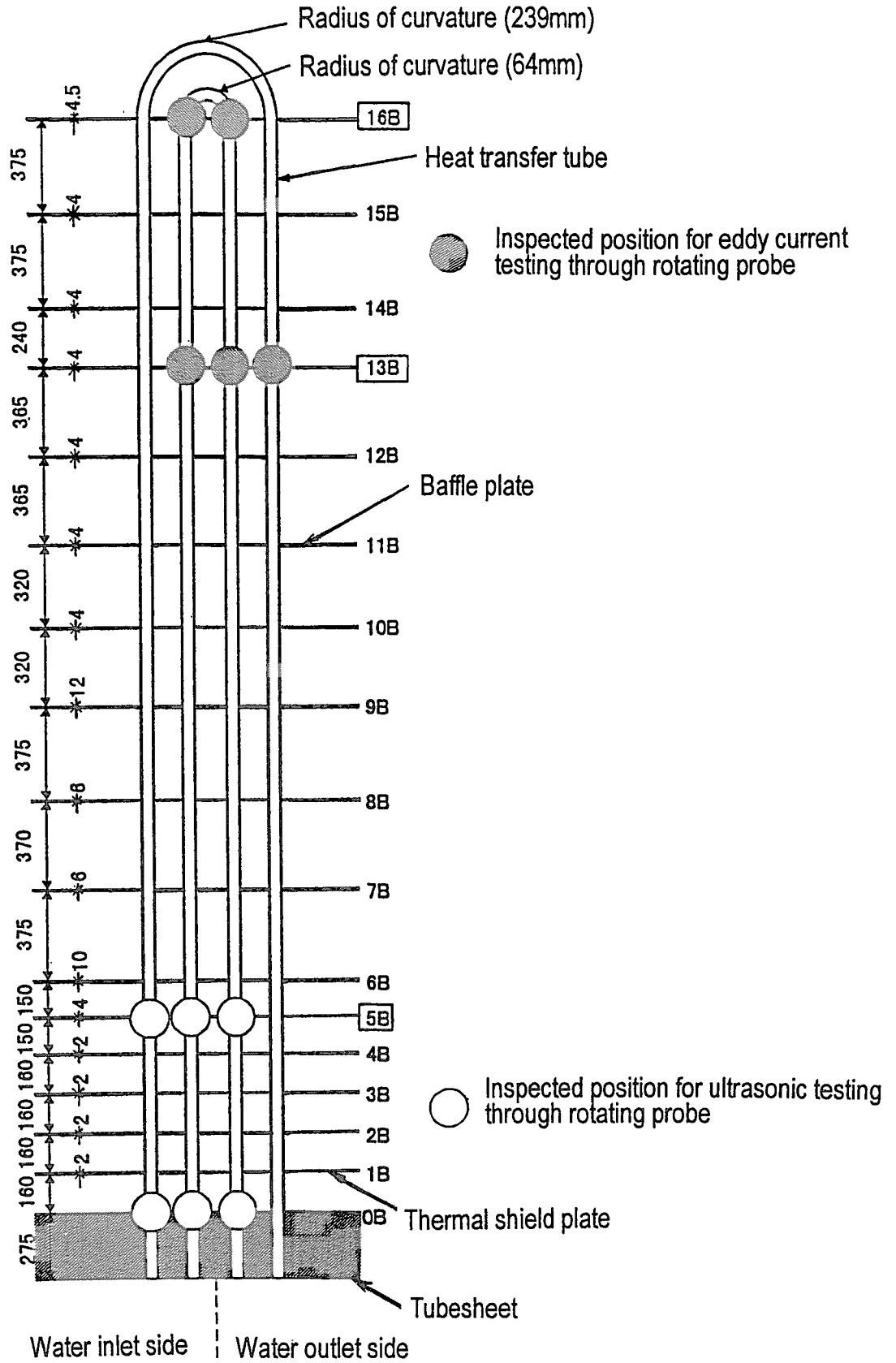


Fig. 4.5 Inspected positions of heat transfer tubes of PPWC for ECT and UT through rotating probes

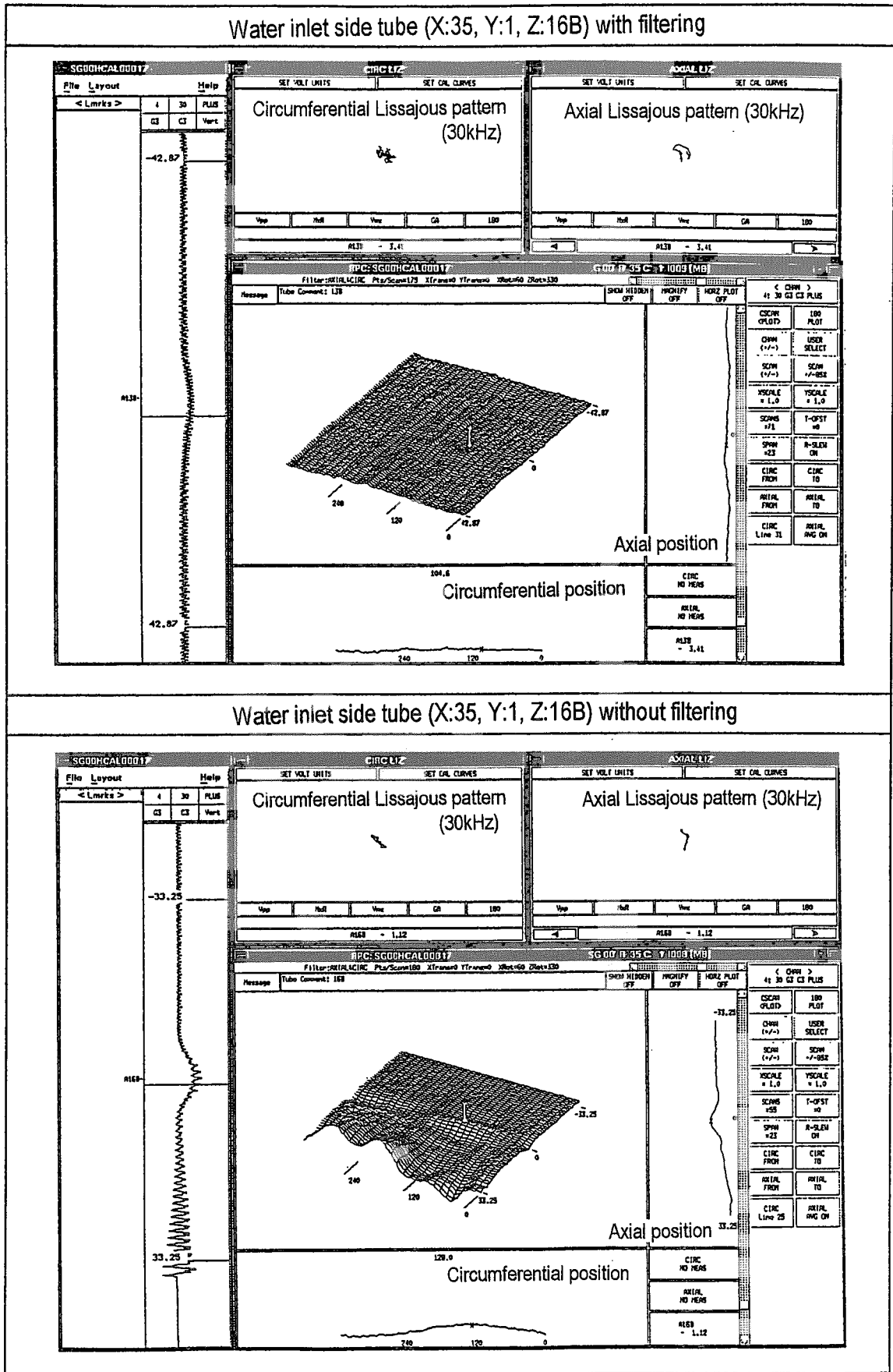


Fig. 4.6 Inspection results at PPWC tube (X:35, Y:1, Z:16B, water inlet side) through ECT rotating probe

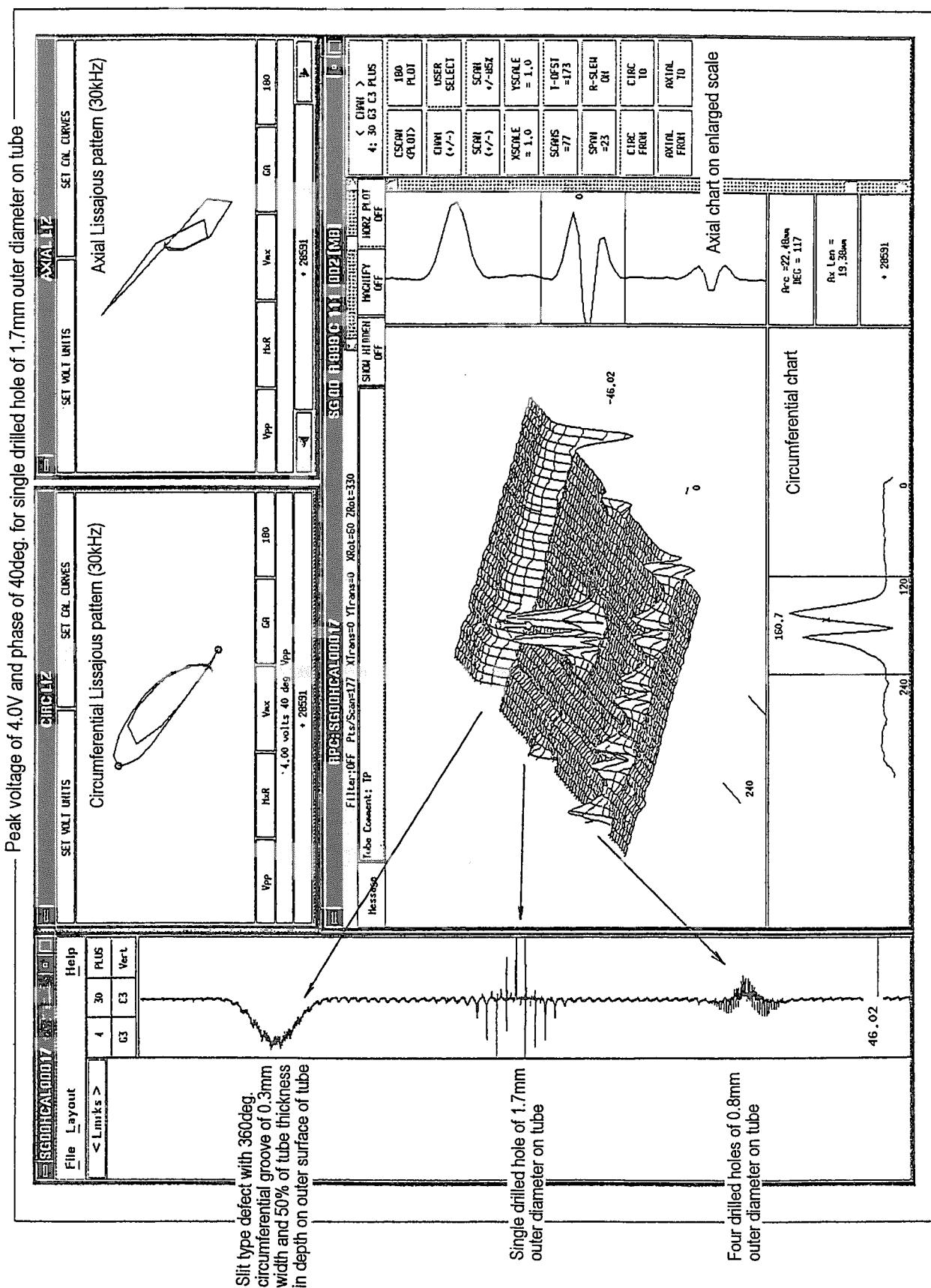


Fig. 4.7 Calibration results for ECT rotating probe

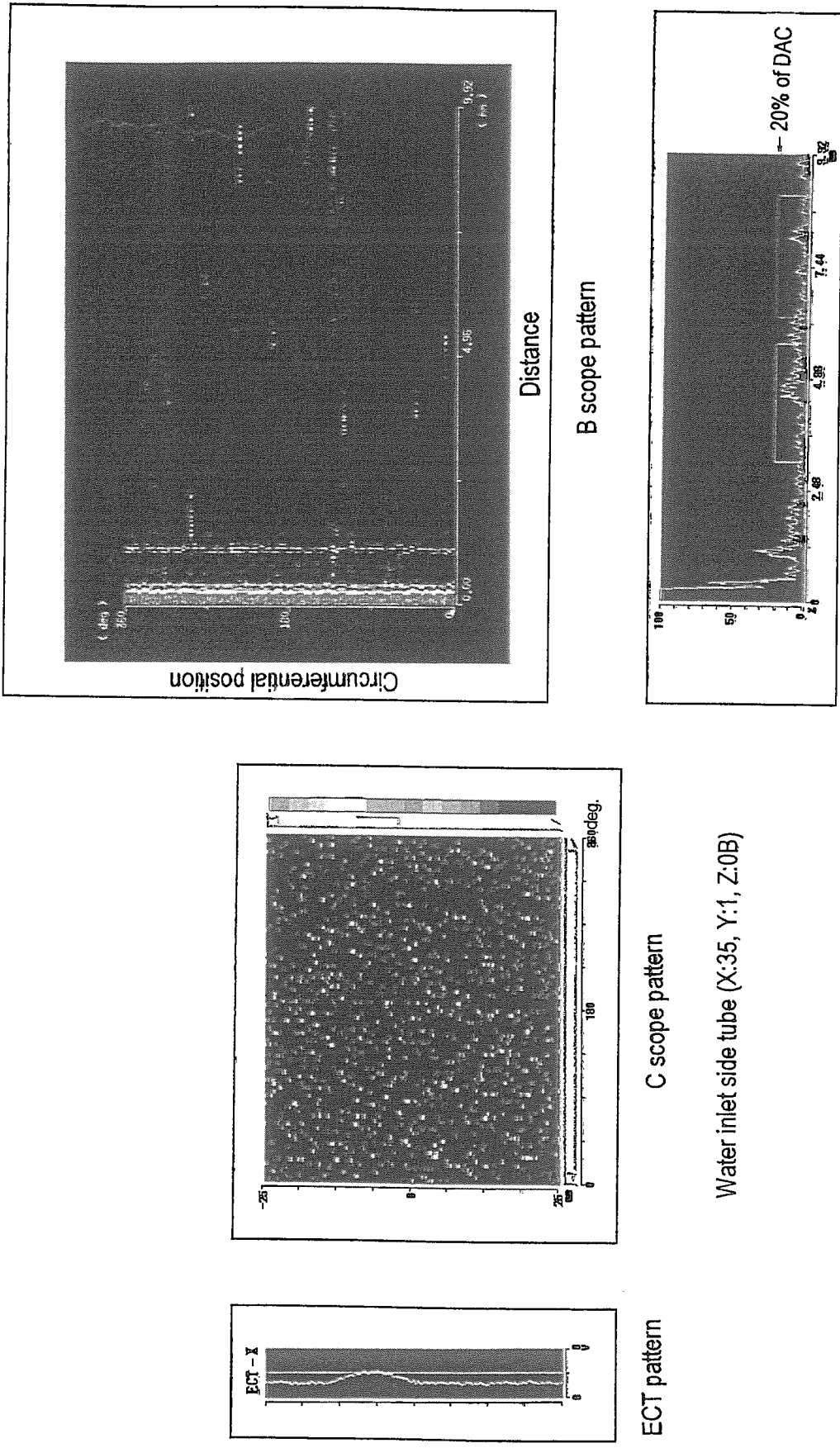
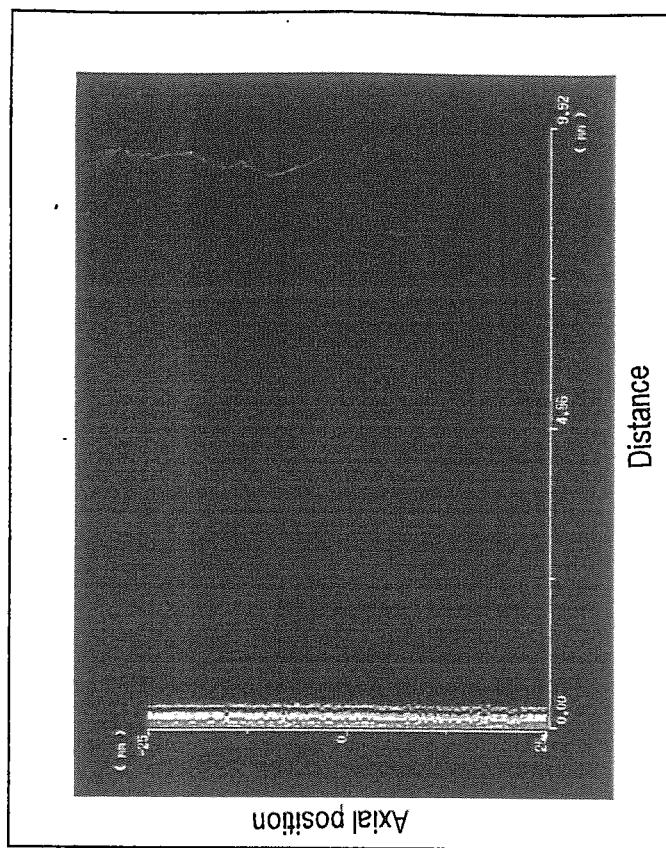
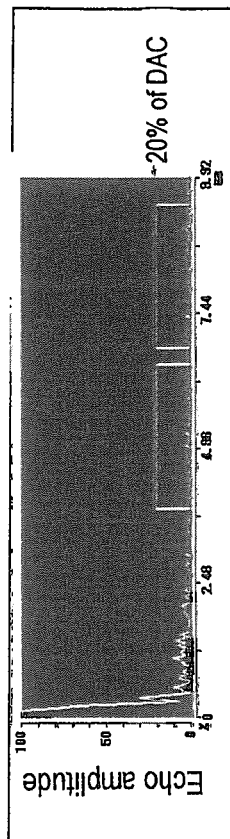


Fig. 4.8 Inspection results at PPWC tube (X:35, Y:1, Z:0B, water inlet side) through axial sensor of UT rotating probe

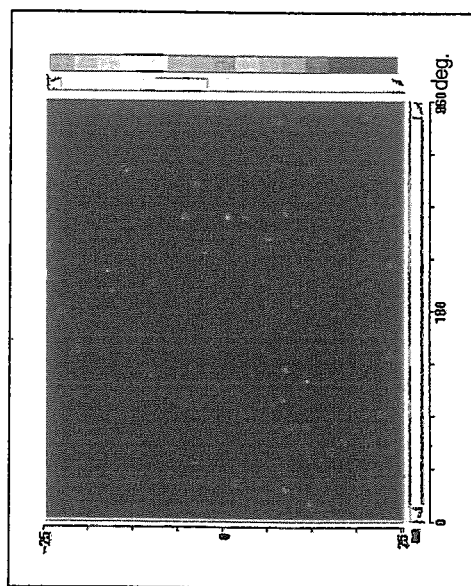
This is a blank page.



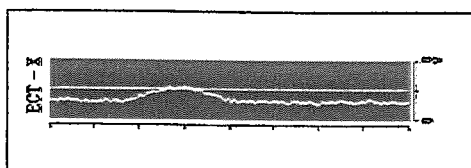
B scope pattern



A scope pattern



C scope pattern



ECT pattern

Fig. 4.9 Inspection results at PPWC tube (X:35, Y:1, Z:0B, water inlet side) through circumferential sensor of UT rotating probe

This is a blank page.

5. 結 言

H T T R用に開発した自動探傷システムを用いて、H T T Rの原子炉停止期間(報告時点における最高到達原子炉出力は約55%)においてP P W C伝熱管の非破壊検査を実施した。まず、E C T用ボビン型プローブの内挿による非破壊検査を68本(抜取率50%)のP P W C伝熱管の全長に対して実施した。さらに、伝熱管68本のうち、構造上応力が高いと予想される最小曲げ半径R64mm、最大曲げ半径R239mmの伝熱管の管板部、バッフル板部、熱遮へい板部に対しては、E C T用ボビン型プローブによる非破壊検査に加えて、E C T用回転型プローブおよびU T用回転型プローブの内挿による非破壊検査を実施した。その結果、E C Tにおける信号/ノイズ比の最大値は1.8であり、当該P P W C伝熱管で得られたリサージュ波形の軌跡および位相は模擬欠陥試験体に対して得られた結果と異なった。また、U Tにおけるエコー振幅は何れの検査部位も20%距離振幅校正曲線を下回った。故に、検査したP P W C伝熱管にプローブの検出指標を超える深さの外面欠陥は無いことが確認できた。今後、自動探傷システムを用いたP P W C伝熱管の供用期間中検査を計画的に実施する予定である。

謝 辞

本報をまとめるに当り有益な助言を戴きました高温工学試験研究炉開発部H T T R試験室の中澤 利雄室長、H T T R技術開発室の伊与久 達夫室長、沢 和弘氏、H T T R計画室の橘 幸男氏、材料試験炉部ホットラボ課の齋藤 順市氏に深謝致します。また、P P W C伝熱管の非破壊検査を実施するに当りご尽力戴きました三菱重工業(株)神戸造船所の丸尾 猛氏、長崎造船所の高見 和男氏に深謝致します。

参考文献

- (1) 日本電気協会, 軽水型原子力発電所用機器の供用期間中検査, JEAC 4205, 1996.
- (2) 星川 洋編, 渦流探傷試験II, 日本非破壊検査協会, 1989.
- (3) Krzywosz, K., Latest Eddy Current Applications in the Nuclear Industry, Proc. 13th Int. Conf. on NDE in the Nuclear and Pressure Vessel Industries, Kyoto, Japan, 1995.
- (4) Cazal, M., Scopelliti, J. D., Mendez, J., Eddy Current Automatic Inspection of Heat Exchangers in Nuclear Power Stations, Regional Congress on Nondestructive and Structural Evaluation, Mendoza, Argentina, 1997.
- (5) Sullivan, S. P., Cecco, V. S., Obrutsky, L. S., Park, A. H., Techniques for Validating Eddy Current Probes for Inspecting CANDU Steam Generator Tubes, Proc. 3rd Int. Steam Generator and Heat Exchanger Conf., Toronto, Canada, 1998.
- (6) 森岡 茂, 津田 光伸, 榎並 宏治, 川田 かよ子, 小松 英伸, 宮 健三, PWR蒸気発生器伝熱管検査技術の信頼性実証試験, 火力原子力発電, 28-35, 1999.
- (7) 電気技術指針原子力編, 軽水型原子力発電所用機器の供用期間中検査における超音波探傷試験指針, JEAG 4207, 1995.
- (8) Saito, S., et al., Design of High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR), Report JAERI 1332, Japan Atomic Energy Research Institute, 1994.
- (9) 田中 利幸, 初臨界に達した高温ガス炉HTTR, 原子力e y e, 45(4),60-63, 1999.
- (10) 國富 一彦, 橘 幸男, 竹田 武司, 七種 明雄, 沢 和弘, 高温ガス炉技術基盤の高度化のための高温工学試験研究炉の試験計画, JAERI-Tech 97-030, 日本原子力研究所, 1997.
- (11) 國富 一彦, 竹田 武司, 今西 克臣, 大久保 実, 溝上 頼賢, 原 輝夫, 菊池 洋, 高温用加圧水冷却器の管外熱伝達相関式の高精度化, 日本原子力学会誌, 38(8), 665-672, 1996.
- (12) 國富 一彦, 竹田 武司, 篠崎 正幸, 大久保 実, 丸山 茂樹, 小池上 一, 高温工学試験研究炉の中間熱交換器の構造設計, 日本原子力学会誌, 37(4), 316-326, 1995.
- (13) Inagaki, Y., Miyamoto, Y., Nakajima, T., Kozuma, T., Shoji, H., Development of an In-service Inspection Technique for the Intermediate Heat Exchanger Tubes of the High-Temperature Engineering Test Reactor, Nucl. Technol., 104, 106-117, 1993.
- (14) Inagaki, Y., Takada, S., Hayashi, H., Kobayashi, T., Ohta, Y., Shimomura, H., Miyamoto, Y., Cooling Performance of Helium-gas / Water Coolers in HENDEL, Nucl. Eng. Des., 146, 301-309, 1994.
- (15) Diercks, D. R., Shack, W. J., Muscara, J., Overview of Steam Generator Tube Degradation and Integrity Issues, Nucl. Eng. Des., 194, 19-30, 1999.

- (16) 篠崎 正幸, 和田 茂行, 古澤 孝之, H T T R 1次加圧水冷却器用 I S I 装置の開発, JAERI-Tech 99-064, 日本原子力研究所, 1999.
- (17) ASME, Boiler and Pressure Vessel Code, Am. Natl. Std., Sec.XI, 1989.
- (18) 科学技術庁(現 文部科学省), 黒鉛減速ヘリウムガス冷却型原子炉施設に関する構造等の技術基準, 私信, 1990.
- (19) Shindo, M., Kondo, T., Studies on Improving Compatibility of Nickel-base Alloys with High Temperature Helium-Cooled Reactor (VHTR) Environment, BNES Conf., Gas-cooled Reactors Today, Bristol, 1982.
- (20) ASME, Boiler and Pressure Vessel Code, Am. Natl. Std., Sec.V, 1989.
- (21) 増山 巖, 太組 健児, 神長 茂里雄, 松島 好人, 飯田 國廣, I S I における超音波探傷の再現性評価, 日本原子力学会誌, 27(8), 51-57, 1985.

This is a blank page.

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J
1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バ	b
バ	bar
ガ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラ	rad
レ	rem

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m
1 b = 100 fm² = 10⁻²⁸ m²
1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa
1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²
1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq
1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg
1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy
1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版, 国際度量衡局 1985年刊行による。ただし, 1 eV および 1 uの値は CODATA の1986年推奨値によった。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは, JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令では bar, barn および「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N (=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s (= N·s/m²) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁴ St (ストークス) (cm²/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg (Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸
	1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1

1 cal = 4.18605 J (計量法)
= 4.184 J (熱化学)
= 4.1855 J (15 °C)
= 4.1868 J (国際蒸気表)

仕事率 1 PS (仏馬力)
= 75 kgf·m/s
= 735.499 W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

