

本資料は 年 月 日付で登録区分、
変更する。
2001. 6. 6

[技術情報室]

溶接部超音波欠陥検査装置の開発

「その1 据付、試運転報告書」

1991年1月

動力炉・核燃料開発事業団
東 海 事 業 所

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

複製、
て下さ

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2001

溶接部超音波欠陥検査装置の開発

「その1 据付、試運転報告書」



長井修一郎* 上村勝一郎* 飛田典章*

関 正之* 蔦木浩一* 平子一仁**

井坂和彦** 田村賢治** 三島 毅***

要 旨

PMW(パルス磁気溶接)法による溶接は固相接合法であるため、従来のX線検査では、PMW溶接部の機械的強度を保証するための接合長さの測定は行えない。そこでX線よりも欠陥分解能の高い超音波を利用した溶接部欠陥検査装置の開発を実施した。本報告書は、この検査装置の設計、製作、試運転の結果とPMW試料を用いての溶接部欠陥検査結果について報告する。

本装置の組立精度、駆動精度及び欠陥分解能については、設計値を十分満足したが、自動駆動時の試料形状の認識が完全に行えず、自動駆動時の超音波条件の確保が不十分であった。

(結 論)

自動駆動時の実試料形状と探触子トレース形状の誤差は、設計時に想定した試料形状よりも実際は複雑な形状(2段テーパー等)であるため、それに駆動ソフトが追従できずになると想られる。従って、今後、この駆動用ソフトを改造することにより探触子のトレース形状を確保できると考える。又、それにより探傷条件の安定が計られれば、超音波による溶接部の欠陥検査は、十分に可能であると思われる。

* 東海事業所 核燃料技術開発部 プルトニウム燃料開発部

** 原子力技術係

*** 本社 核物質管理部

目 次

| | 頁 |
|-------------------------------|----|
| 1. はじめに | 1 |
| 2. 超音波検査の理論 | 2 |
| 2.1 超音波の特長 | 2 |
| 2.2 超音波の発信と受信 | 2 |
| 2.3 超音波探傷の理論 | 2 |
| 3. 溶接部超音波欠陥検査装置 | 4 |
| 3.1 PMW法溶接部超音波探傷法の基本的概念 | 4 |
| 3.2 PMW法溶接部超音波探傷方法 | 5 |
| 3.3 溶接部超音波欠陥検査装置の設計性能 | 6 |
| 3.4 溶接部超音波欠陥検査装置の構成 | 7 |
| 4. 装置性能試験 | 18 |
| 4.1 装置駆動精度の確認 | 18 |
| 4.2 水循環系性能試験 | 22 |
| 4.3 超音波探傷器 | 27 |
| 4.4 各モードにおける自動駆動精度 | 28 |
| 4.5 その他の装置問題点 | 33 |
| 5. 試料探傷能力の確認 | 34 |
| 5.1 管部波型, 接合部波型, 未接合部波型 | 34 |
| 5.2 未接合部の寸法測定 | 35 |
| 6. 考 察 | 39 |
| 7. まとめ | 40 |
| 8. 今後の課題 | 41 |
| 8.1 PMW試料の検査に関する課題 | 41 |

図リスト

| | 頁 |
|------------------------------|----|
| 図－1 超音波の反射と通過 | 3 |
| 図－2 水中における鋼に対する通過と欠陥からの反射 | 3 |
| 図－3 PMW法溶接試料概略図 | 4 |
| 図－4 従来の管材、棒材における探傷方法 | 4 |
| 図－5 従来の探傷方法によるPMW法溶接試料の探傷 | 5 |
| 図－6 本装置の形状認識方法 | 5 |
| 図－7 本駆動システムによる探傷方法 | 6 |
| 図－8 溶接部超音波欠陥検査装置概略図 | 9 |
| 図－9 探触子駆動方向と駆動範囲 | 10 |
| 図－10 溶接部超音波欠陥検査装置 駆動部概略図 | 12 |
| 図－11 溶接部超音波欠陥検査装置 システムフロー概略図 | 14 |
| 図－12 溶接部超音波欠陥検査装置 水槽部概略図 | 16 |
| 図－13 主軸に対するX軸の平行度 測定方法 | 18 |
| 図－14 主軸に対するY軸の傾き 測定方法 | 18 |
| 図－15 主軸に対するY軸の直角度 測定方法 | 19 |
| 図－16 主軸に対するZ軸の直角度 測定方法 | 19 |
| 図－17 主軸の芯振れ精度 測定方法 | 20 |
| 図－18 水槽位置による温度差測定の測定位置図 | 25 |
| 図－19 水距離測定誤差試験方法 | 28 |
| 図－20 自動駆動設定試験データ採取位置 | 29 |
| 図－21 芯ズレ量測定位置図 | 32 |
| 図－22 波型確認位置図 | 34 |

表リスト

| | 頁 |
|----------------------------|----|
| 表－1 各軸サーボモータ及びステッピングモータの性能 | 8 |
| 表－2 交換コレットチャックと検査可能試料外形 | 11 |
| 表－3 各軸の平行度及び直角度測定結果 | 19 |
| 表－4 主軸の芯振れ精度 | 20 |
| 表－5 X 軸移動速度 | 21 |
| 表－6 主軸回転速度 | 22 |
| 表－7 水温位置による水温の差 | 25 |
| 表－8 増幅直線性測定結果 | 27 |
| 表－9 水距離測定誤差 | 28 |
| 表－10 傾斜開始点及び終了点における水距離－1 | 30 |
| 表－11 傾斜開始点及び終了点における水距離－2 | 31 |
| 表－12 投影器によるPMW試料寸法測定結果 | 32 |
| 表－13 芯ズレ量測定結果 | 33 |

写真リスト

| | 頁 |
|-------------------|----|
| 写真-1 溶接部超音波欠陥検査装置 | 8 |
| 写真-2 操作系 | 13 |
| 写真-3 PMW溶接試料形状 | 32 |
| 写真-4 管部波型写真 | 34 |
| 写真-5 接合部波型写真 | 35 |
| 写真-6 未接合部波型写真 | 35 |

グラフリスト

| | 頁 |
|---|----|
| グラフ－1 水槽温度の短時間安定性試験（4時間） | 23 |
| グラフ－2 水槽温度の長時間安定性試験（8時間） | 24 |
| グラフ－3 純水再生能力の確認 | 26 |
| グラフ－4 未接合部波型確認位置（長さ 0～10.0mm, 角度 0°～359°） | 37 |
| グラフ－5 未接合部波型確認位置（長さ 0～0.40mm, 角度 145°～220°） | 38 |

1. はじめに

パルス磁気溶接法（以下「PMW法」とする。）による端栓と被覆管の溶接は、従来のTIG法による溶融接合とは異なる固相接合であるため、溶接の際に発生する欠陥の種類、形状等に違いが生ずる。TIG溶接により発生する欠陥は、空孔によるものが大部分を占めるためにX線による検査が可能であるが、その欠陥の識別限界は約0.2mm程度である。

しかし、PMW法により発生する欠陥の寸法は、X線で識別できる寸法より遥かに小さい。又、PMW法の場合、端栓と被覆管両者の金属間での固相接合となるため、溶接部の機械的強度を保証する上でその接合長さ（或いは未接合長さ）の測定及びその位置の同定が大きな役割を占める。そのため従来行われててきたX線による欠陥検査では、PMW法による溶接部の検査を行うことは不可能となる。

そこで、PMW法溶接部の検査を実施するために超音波の特性を利用した検査方法の開発を行うとともに検査を実施するための超音波欠陥検査装置の製作を行った。

本報告書は、その超音波検査装置の設計、製作、試運転結果を記すとともに超音波による溶接部検査方法の妥当性と今後の課題について検討を加えたものである。

2. 超音波検査の理論

超音波による検査は、音響検査として広く一般で用いられており、事業所においても被覆管の探傷及び寸法検査、端栓棒材の探傷検査等に用いられている。

ここで先ず超音波の特徴と探傷理論について簡単にふれておく。

2.1 超音波の特長

超音波とは、通常、人間の可聴音（30Hz～20KHzぐらい）以上の振動数の音波をいい、探傷検査に用いられる音波は、500KHz～100MHzぐらいの振動数のものである。

超音波は、可聴音に比べ波長が短く、X線よりも物質内部に伝わり易いという性質を持つ。

2.2 超音波の発信と受信

超音波の発信と受信は、探触子により行われる。探触子は、大まかに電歪を持つ物質（水晶、チタン酸バリウム、特殊セラミック等）の振動子と電極から構成される。

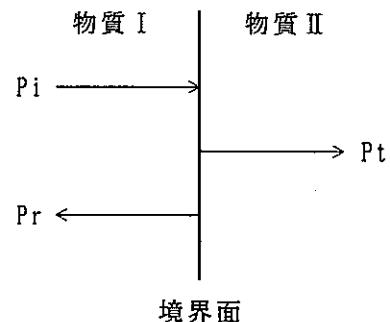
振動子は、電圧を加えると伸縮する。この振動が水（又は、油）を介して被検材に加わると被検材表面も振動し、音の波動として内部に伝わって行く。逆に受信は、全く反対の過程で反射した超音波が表面まで戻ってくると被検材表面が振動し、それにより振動子が伸縮させられ電極間に電圧が生じ、これを増幅してシンクロスコープ等で観測が行える。

2.3 超音波探傷の理論

超音波による欠陥検査は、超音波の反射によるものである。これは、超音波が異なった材質の境界面で通過する成分と反射する成分に分かれる性質を利用している。

図-1に示すように第Ⅰの物質と第Ⅱの物質との境界面に音波が当たったとき、その入射する音の大きさ（音圧） P_i は、境界面で反射する音圧 P_r と第Ⅱの物質に通過する音圧 P_t とに分かれる。この時 P_r と P_t の音圧の大きさは、各々の物質の持つ密度 ρ と音速 C の積、音響インピーダンス Z により決定する。（音響インピーダンスは、物質により定

まつた値。)



$$Z_1 = \rho_1 C_1 \quad Z_2 = \rho_2 C_2$$

図-1 超音波の反射と通過

このそれぞれの物質の入射波の音圧に対する反射波の音圧の比を音圧反射率 r といい次式で表される。

$$r = \frac{Pr}{Pi} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

この r の数値が 1 に近い程、反射率は高くなる。

鋼と空気の境界面では、 r はほぼ 1 ($\approx 100\%$) となる為、金属中に存在する欠陥の識別が可能となる。水浸式検査の場合、図-2 に示すように水中で発信された音波は、鋼との境界面で 94% 反射し、残りが鋼の内部に伝わる。その音波は、欠陥等の空気層で 100% 反射され欠陥と識別される。しかし、実際の探傷の場合、結晶粒の大きさから来る林状エコーや音波の減衰、表面を伝わる波（表面波）等の影響を受ける為、これらを考慮しなくてはならない。

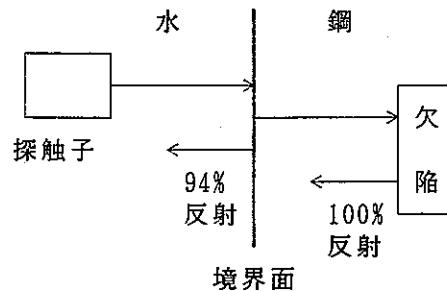


図-2 水中における鋼に対する通過と欠陥からの反射

3. 溶接部超音波欠陥検査装置

3.1 PMW法溶接部超音波探傷法の基本的概念

PMW法による溶接部は、一般で行われている管材、棒材とは異なり図-3に示すような形状を持っている。

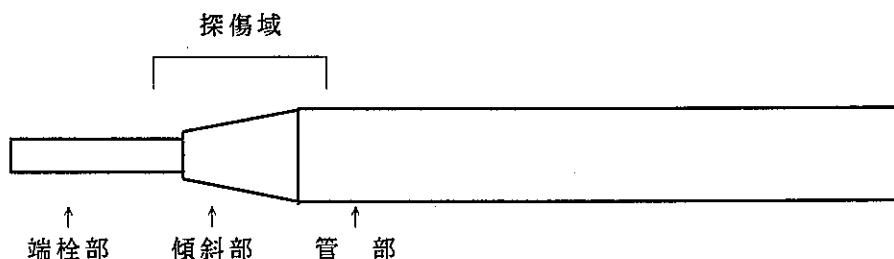


図-3 PMW法溶接試料概略図

そのため探傷域は、端栓部、傾斜部（主溶接部）、管部の異なった径を持つ3つの区间に跨がってしまう。超音波検査の場合、探触子から発信される音波の焦点距離は、限られた範囲しか持たないため、超音波の強度（音圧）が一定となるように探触子と被検材の距離（以下「水距離」とする。）を一定にし、しかも被検材表面に対して常に垂直にする必要がある。

管材や棒材の場合、図-4に示すように径の変化がないため、探触子を固定し、被検材を回転させながら送るだけで前述の条件を満足することができる。

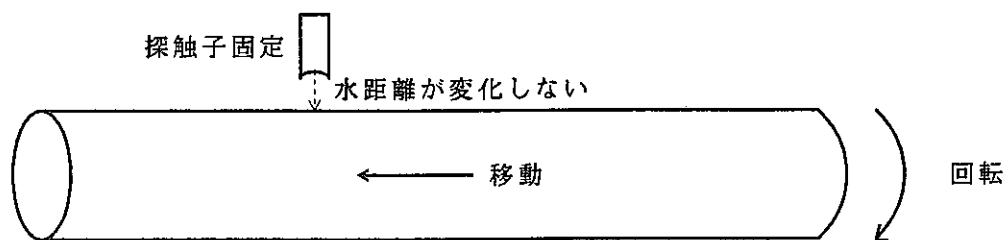


図-4 従来の管材、棒材における探傷方法

しかし、この方法で溶接部の探傷を行おうとすると図-5に示すように端栓部、傾斜部、管部で水距離が変化してしまうとともに傾斜面では、探触子が表面と垂直にならな

いため、均一な検査を行うことが不可能となる。

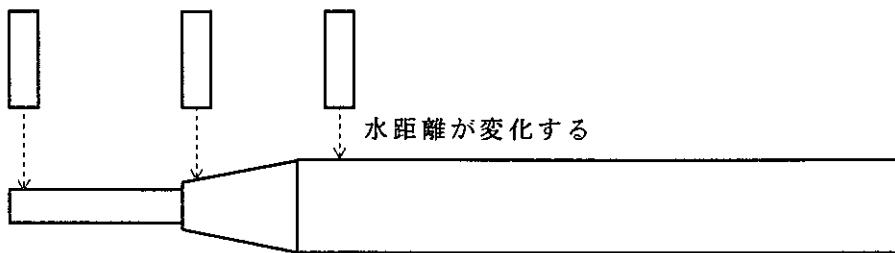


図-5 従来の探傷方法によるPMW法溶接試料の探傷

3.2 PMW法溶接部超音波探傷方法

3.1項で述べたようにPMW法溶接部の探傷を行うには、従来、実施されていた探触子固定型とは異なる探触子移動型の駆動機構が必要であり、同時にその駆動方式を用いて試料形状に合わせて検査を実施する駆動システムが必要となる。

形状に合わせた形での駆動の場合、問題となるのが、被検材形状の認識を如何に行うかということである。形状の認識方法としては、① あらかじめ被検材のデータを入力する方法。② 形状を測定して認識する方法の2種類が考えられ、検討を行った結果、①の場合、試料毎に形状の誤差（傾斜角度、溶接開始位置の誤差、傾斜面長さの誤差等）を持つことと自動化、省力化の観点から本装置では、②の方式を用いることにし、以下のプロセスによりPMW法溶接部の探傷検査を実施する。

本装置の検査プロセスを簡単に説明すると、まず、図-6に示す様に被検材と探触子の水距離を測定する。

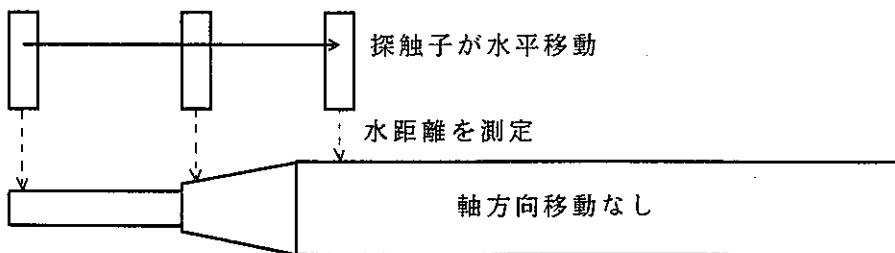


図-6 本装置の形状認識方法

この水距離の値から傾斜の開始位置、終了位置を決め傾斜の角度を計算し、被検材の形状を認識する。次に図-7に示す様に探触子が傾斜面では、傾斜角に対して垂直にしかも水距離が一定となる様に上下高さと角度を調整しながら左右方向に駆動する。

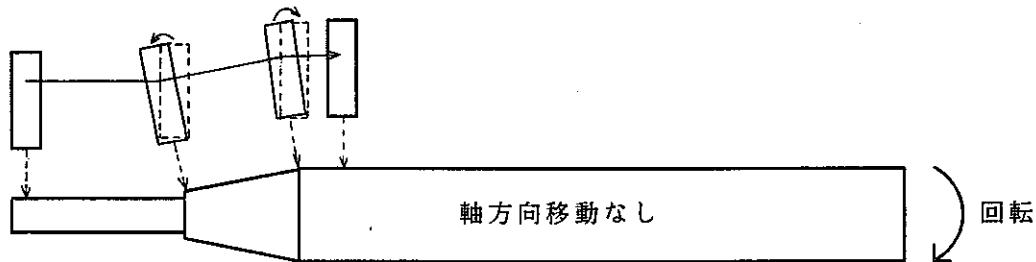


図-7 本駆動システムによる探傷方法

3.3 溶接部超音波欠陥検査装置の設計性能

(1) 欠陥分解能力の決定

本装置の設計を行う上でその欠陥探傷能力は、重要な意味を持っている。2.3項で述べた様に超音波は、鋼中に欠陥（空孔）が存在する限り論理的には、たとえその欠陥が $1 \mu\text{m}$ であっても反射するが、実際は、材料から来る雑エコーのために欠陥の分離が行えなくなる。又、超音波の反射エコー高さは、超音波の入射方向に対する開口面積と密接な関係を持つ。（垂直探傷の場合、開口面積が大きい程、欠陥エコー高さが高い。）

以上のことから装置駆動機構の精度、探傷器の性能、探触子の周波数等の決定には、欠陥の分解能力の目標をどこに置くかが重要な要因であることが分かる。

本装置の場合、細径薄肉管の溶接部探傷については、一般的にも前例がないため、現在、行われているX線による溶接部欠陥検査の分解能（ $\phi 0.2\text{mm}$ ）を越える分解能 $\phi 0.1\text{mm}$ を目標とした。

(2) 駆動最小値の決定

PMW溶接部の健全性を保証するには、その結合長さを測定する必要がある。しかし、超音波は、音波の当たっている部分の欠陥の有無を識別する方法であるから、通常のままでは結合長さを測定することは不可能である。そこでこの接合長さ及び欠陥の位置を表示させるためには、探触子の位置及び被検材の角度を出力しながらそれに探傷

器からの欠陥信号を載せ、マトリックスを作成し、このマトリックスを用いることにより接合部の長さの読み取りと欠陥の位置の表示をさせることが必要となる。

このマトリックスの分解能力が接合長さの最小値となるため、マトリックスの枠目を小さくするほど接合部長さの分解能力は向上する。しかし、市販のサーボモータ、パルスモータ、ステッピングモータには、最小駆動ピッチに限界があり、又、駆動ピッチの細分化による操作系統のパソコン容量にも限界があるため、モータの駆動最小値を0.01mm（回転系は、1°）とした。

(3) 駆動精度の決定

(2)項で述べたように駆動機構には、市販のモータを用いたため、駆動精度は、そのモータの公称精度となる。しかし、モータの場合、負荷状態と無負荷状態では、駆動精度に大きな差が生ずる。そこで設計時にモータへの負荷をできるだけ軽減し、モータの駆動精度を無負荷状態に近い状態とし、モータ駆動精度を1000パルス当たり1パルスとした。

3.4 溶接部超音波欠陥検査装置の構成

3.3項の設計条件を踏まえ組み立てられた本装置は、探触子駆動部、回転機構部、操作系、水循環系及び超音波探傷器により構成される。本装置の概略を図-8及び写真-1に示す。

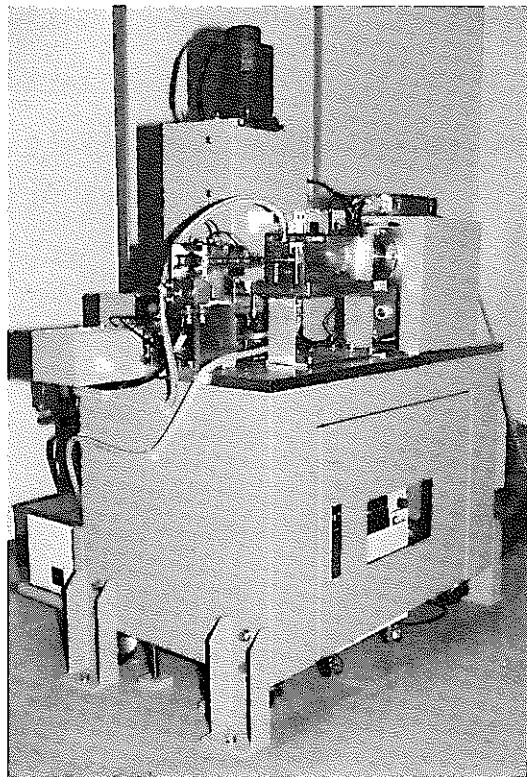


写真 - 1 溶接部超音波欠陥検査装置

(1) 探触子駆動部

3. 2 項で述べた探触子の駆動を行うために 3 つのサーボモータ (X 軸, Z 軸, θ 軸) と 1 つのステッピングモータ (Y 軸) により構成される。駆動性能を表 - 1 に示すとともに各モータの駆動方向を図 - 9 に駆動部概略図を図 - 10 に示す。

表 - 1 各軸サーボモータ及びステッピングモータの性能

| 名 称 | 移動方向 | ストローク | 最小ピッチ | スピード | 出 力 | モータ |
|-----|--------|------------|----------|-------------|------|-----------|
| X 軸 | 軸方向左・右 | 0 ~ 100 mm | 0.01 mm | 0.01~50mm/S | 120W | サーボモータ |
| Y 軸 | 中心軸前・後 | 中心から±8 mm | 0.005 mm | 0.005mm/S | 120W | ステッピングモータ |
| Z 軸 | 軸方向上・下 | 0 ~ 50 mm | 0.01 mm | 0.01~50mm/S | 120W | サーボモータ |
| θ 軸 | 探触子角度軸 | 中心から±30° | 0.01° | 0.01~25°/S | 30W | " |

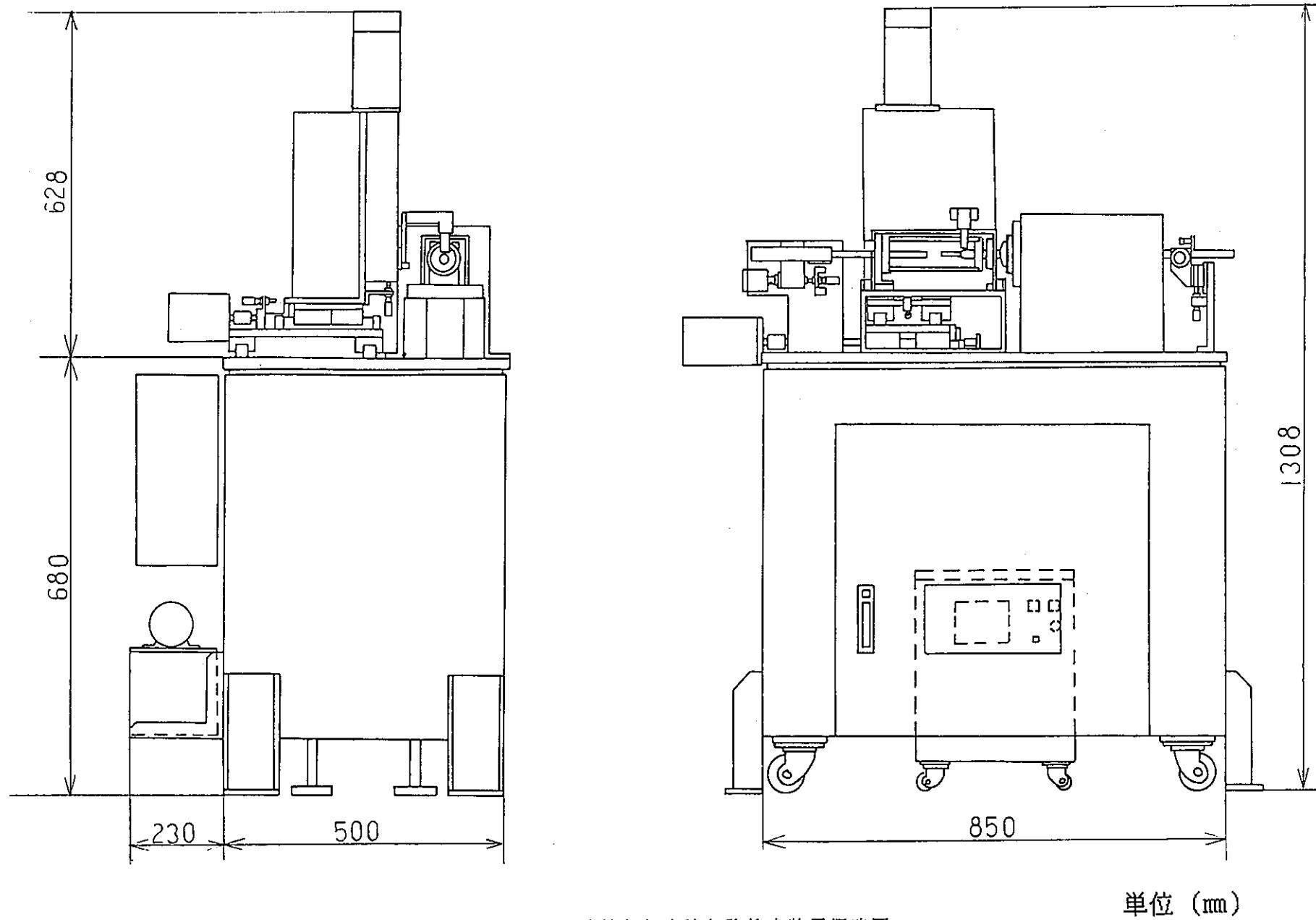


図-8 溶接部超音波欠陥検査装置概略図

各軸の移動管理に於いてY軸は、探触子と被検材の芯合わせを行うためのものであり、他の軸のような移動量管理を自動で行う必要がないため、ステッピングモータにより手動で駆動を行っている。

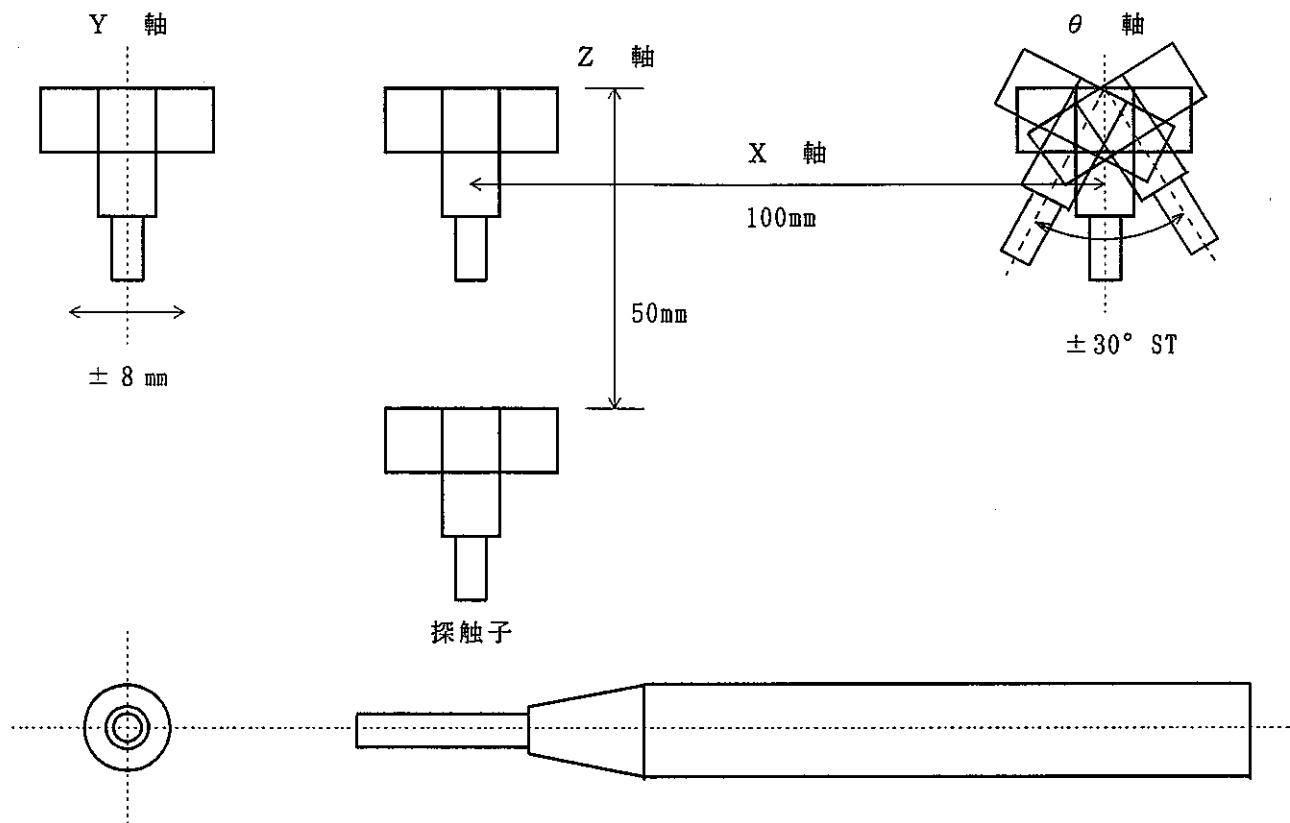


図-9 探触子駆動方向と駆動範囲

(2) 回転駆動機構部

回転駆動機構部は、エアー開閉式コレットチャックとサーボモータにより構成され、試料を 1° 毎のピッチ送りから最大500rpm連続回転まで任意に設定することが可能である。試料径の変化は、コレットチャックの交換により可能となる。表-2にコレットチャックの径と試料外径を示す。

表-2 交換コレットチャックと検査可能試料外径

| No. | コレット口径 | 材 質 | チャック試料外径 | 備 考 |
|-----|-----------|-----|-----------|----------|
| 1 | φ 7.0 mm | SK3 | φ 6.5 mm | ハードクロム処理 |
| 2 | φ 7.4 mm | " | φ 6.9 mm | " |
| 3 | φ 8.0 mm | " | φ 7.5 mm | " |
| 4 | φ 9.0 mm | " | φ 8.5 mm | " |
| 5 | φ 15.0 mm | " | φ 14.5 mm | " |

また、コレットチャックの開閉は、空圧シリンダにより行われる。

回転駆動部の諸性能を下記に示す。

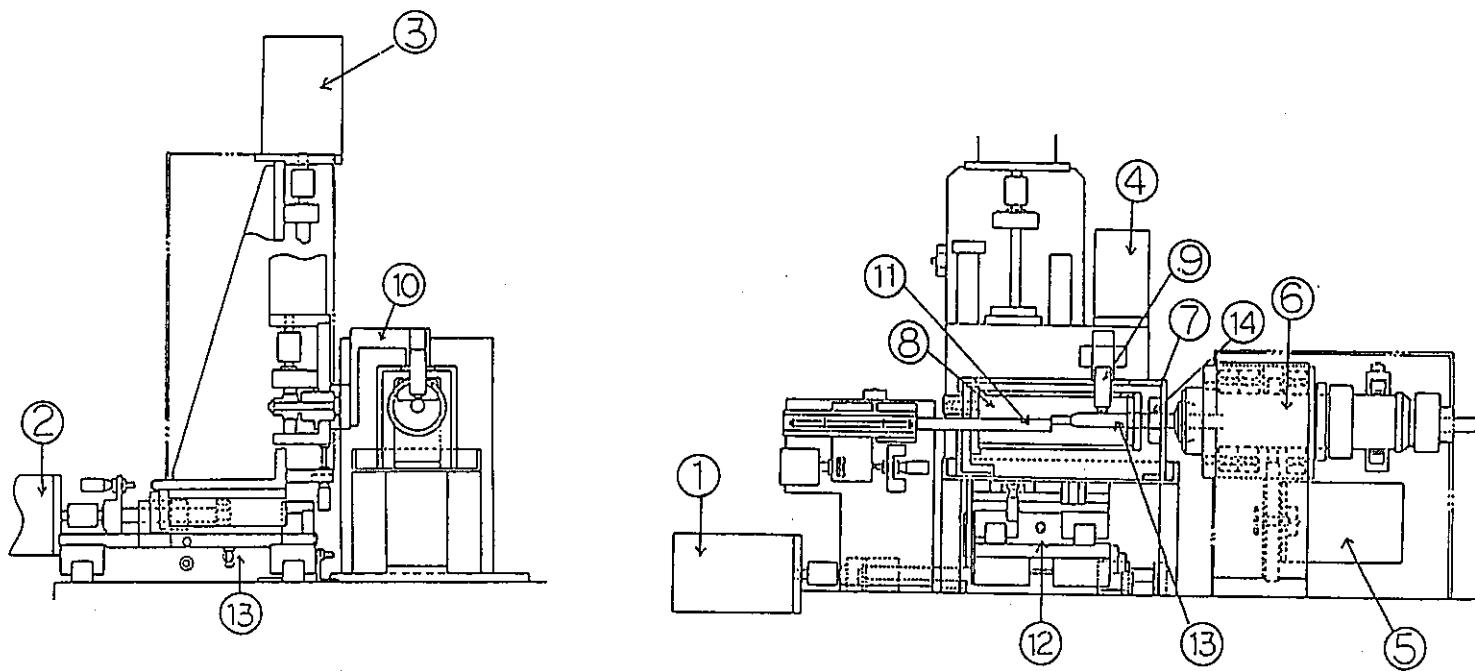
- ① 駆 動 源 : ACサーボモータ
- ② 出 力 : 120W
- ③ 回 転 数 : 1° ピッチ送り～500rpm
- ④ チャック形式 : 引込開閉型コレットチャック
- ⑤ 開閉駆動源 : 空圧シリンダ (φ40×40st)
- ⑥ チャック交換 : 手 動

(3) 操作系

操作系は、写真-2に示すように操作盤とパソコンにより構成されている。

操作盤は、操作モードの切り替え（手動／自動）、各軸の手動操作釦とシーケンサにより校正されている。シーケンサは、各軸の原点位置（0位置）、及び移動位置をサーボモータの1パルス毎に管理し、パソコン側へ出力している。パソコン側は、各軸モータの速度の設定、管理、超音波探傷器よりの水距離データの管理及び検査時の検査条件の管理を行うとともにこれら全ての条件、データをCRT画面に出力、表示する。また、全ての条件入力は、パソコンのキーボードにより行われる。

操作系の主な構成機器を下記に示すとともに本装置のシステム図を図-11に示す。



- | | |
|-------------------------|--------------|
| ① X軸用サーボモータ（左右方向移動用） | ⑧ 内装水槽 |
| ② Y軸用ステッピングモータ（前後方向移動用） | ⑨ 探触子 |
| ③ Z軸用サーボモータ（上下方向移動用） | ⑩ 探触子指示アーム |
| ④ θ軸用サーボモータ（探触子首振り用） | ⑪ 位置検出用ストッパー |
| ⑤ 試料回転用サーボモータ（左右方向移動用） | ⑫ X・Yテーブル |
| ⑥ コレットチャック | ⑬ 被検材 |
| ⑦ 外装水槽 | ⑭ エアーナイフ |

図-10 溶接部超音波欠陥検査装置 駆動部概略図

① 操作盤

- (a) シーケンサ
- (b) 前後移動（Y軸）パルス表示器
- (c) 主軸回転計
- (d) DC電源サプライ
- (e) 操作スイッチ及び表示灯

② パソコン

- (a) PC9801RX
- (b) CRTディスプレイ
- (c) I/O拡張ユニット
- (d) モータコントロールモジュール
- (e) パラレル入出力モジュール



写真-2 操作系

(4) システム

本装置のシステムは、この操作盤により手動操作の他に以下に示す自動モードの操作が可能である。これらの自動モード時のデータは、フロッピーディスクにより保管する。

① 自動駆動モード

諸条件（被覆管外径、端栓外径、移動速度、回転速度等）の入力により水距離を自動測定し、形状認識後、探傷走査を行う。

② 設定駆動モード（半自動モード）

①項の入力条件に傾斜開始位置、傾斜終了位置を加え、入力することにより傾斜角度を計算し、水距離測定を行わないで探傷走査を行う。

③ 自動位置決めモード

各軸の停止位置（距離及び角度）を入力することにより指定位置で探触子が停止する。

④ 手動位置表示モード

手動操作による各軸の位置（距離及び角度）を表示するとともに探傷器から送られる水距離データの表示をCRT画面に行う。

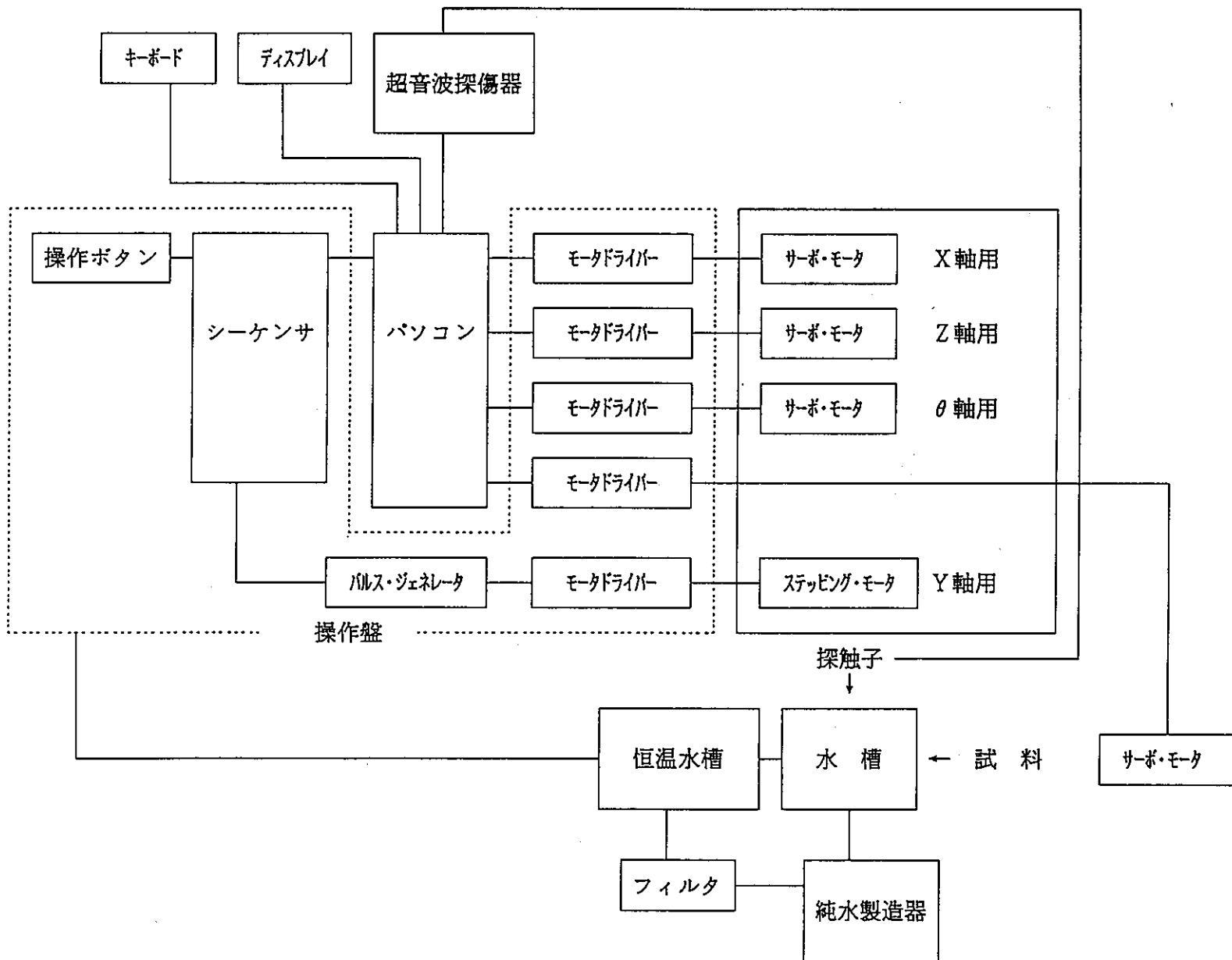


図-11 溶接部超音波欠陥検査装置 システムフロー概略図

(5) 水循環系

本装置の水槽は、図-12に示すように円筒型内装水槽とエアーナイフ付の外装水槽により構成されている。従来の燃料被覆管の検査に用いられている水槽は、探触子が固定型のため、水槽内を被覆管が移動するものであるが、本装置の場合、燃料棒の水に対する影響を考え、被検査部（燃料棒の先端）のみが水没するようになっている。また、水が管に伝わって流れでないように内装水槽をスクリューキャップ式にし、被検材寸法に合わせて交換できるようにするとともに外装水槽のエアーナイフにより外装水槽内に飛散させている。

超音波検査の場合、水そのものが超音波に与える影響が大きく通常純水を用いていが、純水は、大気中の二酸化炭素の溶解により劣化してしまう。そのためかなりの頻度で水を交換しなくてはならず、交換後の脱氣等処理も含め多くの時間を費やさねばならない。そこで本装置は、水循環系内にフィルター及び純水製造装置（イオン交換樹脂）を設け、水の劣化を極力抑えている。また、水温の超音波に与える影響も考えヒータとクーラを用い水温を一定温度に保つようにしている。水循環系の構成を下記に示す。

① 水循環ポンプ

- (a) 最大吐出量 : 2 ℥ / 分
- (b) 最大吐出圧 : 2 kg / cm²

② 恒温槽

- (a) 設定温度 : 15~35°C

③ 純水製造装置

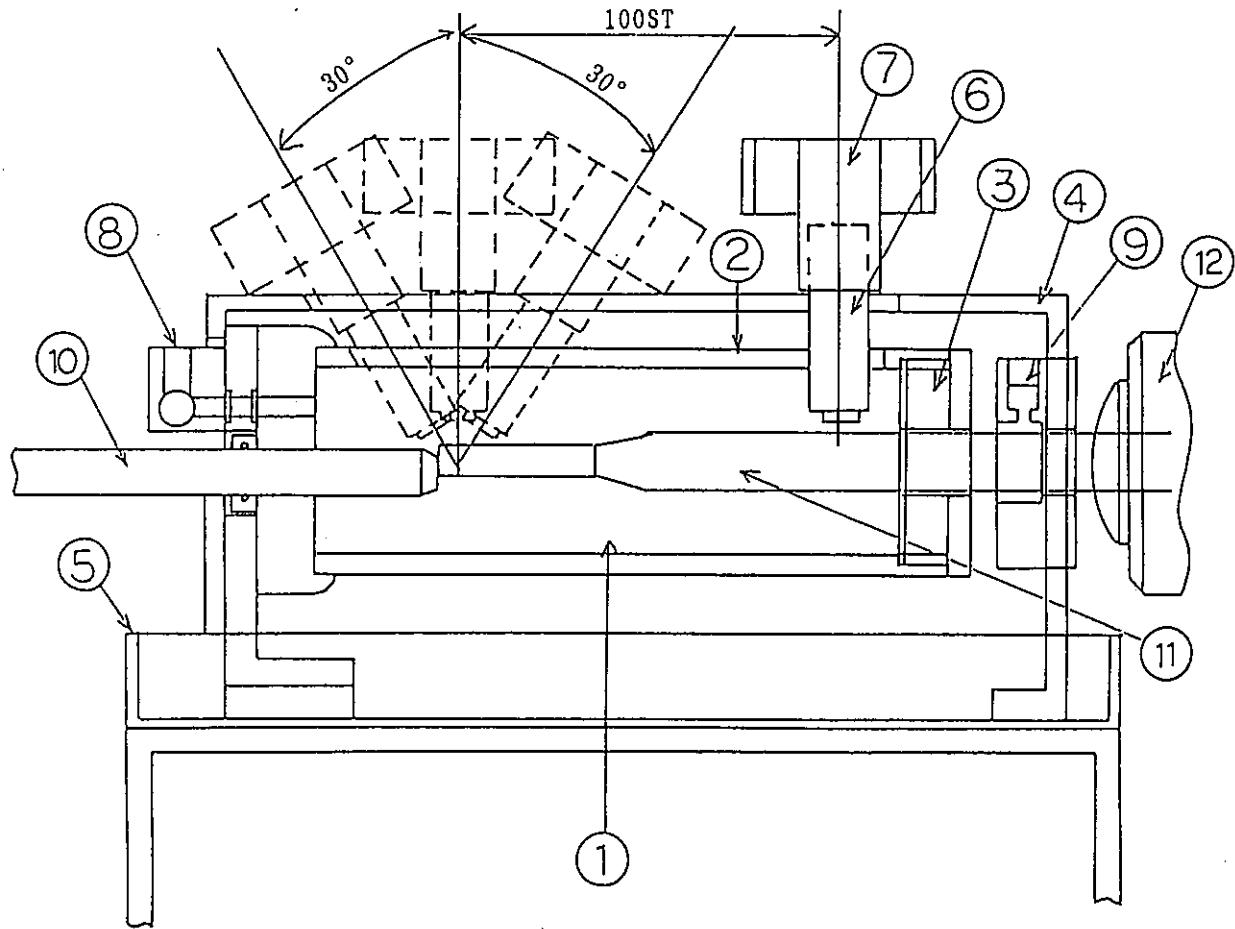
- (a) イオン交換方式

④ 水槽

- (a) 透明アクリル製
- (b) 容積 : 0.5 ℥

(5) 超音波探傷器

本探傷器は、本駆動システムの概念である被検材の形状認識のための水距離測定と探傷検査の2つの測定を1台で行っている。また、この水距離データの値は、操作系



- | | | |
|---------------|-----------|--------------|
| ① 内装水槽 | ⑤ 水受け皿 | ⑨ エアーナイフ |
| ② 内装水槽オーバーフロー | ⑥ 探触子 | ⑩ 位置検出用ストッパー |
| ③ 交換式水槽キャップ | ⑦ 探触子ホルダー | ⑪ 被検材 |
| ④ 外装水槽 | ⑧ 給水口 | ⑫ コレットチャック |

図-12 溶接部超音波欠陥検査装置 水槽部概略図

への出力のため、デジタル値として出力しなくてはならないが、本探傷器は、従来のアナログ探傷器とは異なるデジタル探傷器であるため、デジタイザ等の信号処理を行わずにダイレクトでパソコンへの出力が可能となっている。

水距離の測定方法としては、探傷器本体の音速設定スイッチにより水の音速を設定することにより行われる。また、波型の確認は、附属のストレージスコープとX・Yプロッタにより行う。

本探傷器の性能を下記に示す。

- ① パルサー出力 : 200V以上
- ② 増幅度 : 80dB / 20MHz
- ③ 周波数特性 : 1.5~100MHz
- ④ 感度調整 : 0 ~ 79dB
- ⑤ 繰返周波数 : 最大10KHz及びEXT
- (6) 超音波探触子

本装置に使用している探触子は、従来のものとは異なり振動子に高分子材（ポリマー）を用いている。このポリマー材の使用により周波数が従来の製品（最大20MHz）と比較して最大で100MHzと向上した。また、高周波数化に伴いビーム径も従来の1/2~1/3に絞ることが可能となった。尚、本装置で現在使用している探触子を以下に示す。

- ① 周波数 35MHz 焦点径 ϕ 0.18mm
- ② 周波数 50MHz 焦点径 ϕ 0.15mm

4. 装置性能試験

4.1 装置駆動精度の確認

3.3項で述べた様に本装置の駆動精度は、探傷能力に大きな影響を及ぼす。これら各軸の移動時の平行度、直角度、ブレ、曲がりの度合いは、探傷精度ばかりではなく、画像処理時の画像の精度にも大きな影響を及ぼす。そこでこれら各軸の組み立て精度の測定を行い、設計時の性能を満足し、検査装置として十分な性能を保持しているか否かの確認を行った。測定には、ダイヤルゲージ、テストバー、基準直角を用いた。

(1) X軸、Y軸、Z軸の平行度及び直角度

各軸の平行度及び直角度の測定を実施し、その精度を確認した。測定方法を図-13～図-16に示し、その結果を表-3に示す。

① 主軸に対するX軸の平行度

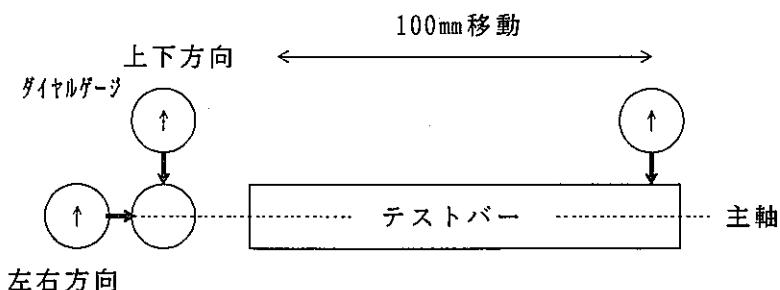


図-13 主軸に対するX軸の平行度 測定方法

② 主軸に対するY軸の傾き

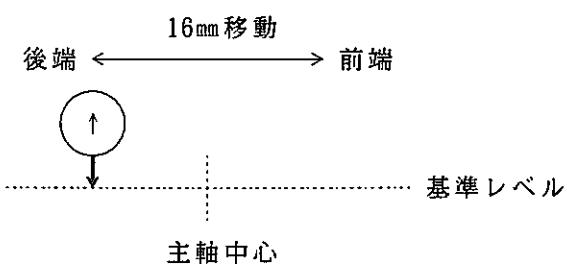


図-14 主軸に対するY軸の傾き 測定方法

③ 主軸に対するY軸の直角度

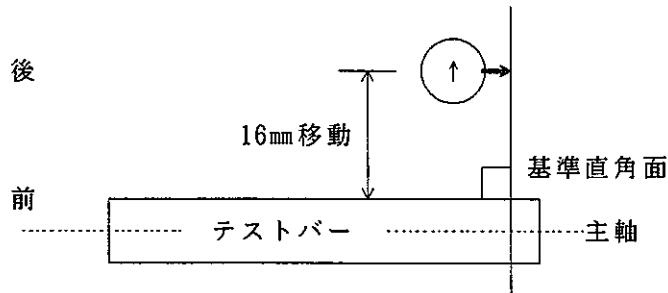


図-15 主軸に対するY軸の直角度 測定方法

④ 主軸に対するZ軸の直角度

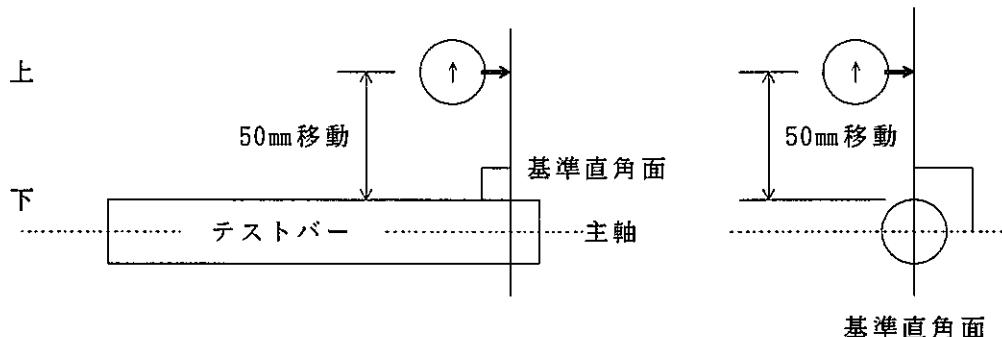


図-16 主軸に対するZ軸の直角度 測定方法

表-3 各軸の平行度及び直角度測定結果

| | 測定方向 | 設計時目標値 | 測定結果 |
|--------|------|-------------|--------------|
| X軸の平行度 | 上下方向 | 0.01/100 mm | 0.005/ 100mm |
| | 左右方向 | 0.01/100 mm | 0.005/ 100mm |
| Y軸の平行度 | 対主軸 | 0.01/16mm | 0.005/ 16mm |
| Y軸の直角度 | 対主軸 | 0.01/16mm | 0.007/ 16mm |
| Z軸の直角度 | 対主軸 | 0.01/50mm | 0.010/ 50mm |
| | 対主軸 | 0.01/50mm | 0.007/ 50mm |

表-3からも分かる様に本装置の駆動状態における各軸の平行度及び直角度は、設計時の目標を十分満足するものであった。

(2) 主軸の芯振れ精度

主軸の芯振れは、探傷時のビーム路程に大きな影響を与え、欠陥分解能を低下させる。従って本来、芯振れは0が望ましいが、燃料棒の端栓取付角度及び燃料棒の曲がりには許容値がある。これらの製品スペックと探触子の焦点長さからテストバー時の芯振れ精度を決定し、その測定を行った。測定位置については、水槽で最も測定を行う場所の最大値(70mm)を判定位置とし、水槽左端(100mm)と右端(10mm)を参考値として図-17に示す方法で測定を行い、次式に従い芯の振れ量を計算した。

$$\text{芯振れ精度} = \frac{(\text{ゲージ最大値}) - (\text{ゲージ最小値})}{2}$$

その結果を表-4に示す。

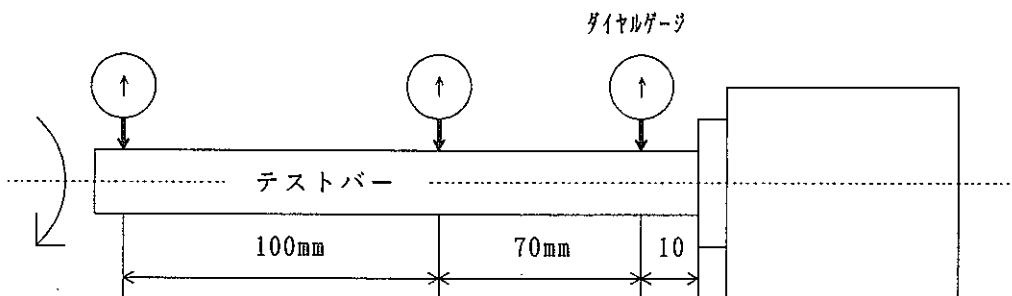


図-17 主軸の芯振れ精度 測定方法

表-4 主軸の芯振れ精度

| | 設計時目標値 | 測定位置 | | |
|--------|-------------|--------|--------|--------|
| | | 10 mm | 70 mm | 100 mm |
| φ 6.5 | 0.01 / 70mm | 0.005 | 0.0075 | 0.015 |
| φ 6.9 | | 0.005 | 0.0075 | 0.025 |
| φ 7.5 | | 0.004 | 0.007 | 0.0175 |
| φ 8.5 | | 0.0025 | 0.004 | 0.0125 |
| φ 14.5 | | 0.005 | 0.0075 | 0.014 |

注) 10, 100mm位置は、参考値

回転数 : 100 rpm

各数値とも10回測定の平均値

表-4 からも分かるとおり芯振れ精度は、設計時の目標値を越える組み立て精度を持つことが、証明された。

(3) X 軸移動速度

X 軸の移動速度は、超音波検査時のビームのラップ率に大きく影響する。又、X 軸の移動の正確さが、画像処理時の軸方向寸法表示に大きく影響する。そこで X 軸の移動速度を繰り返し測定し、その精度を確認した。測定方法は、移動距離とモータ速度を操作系に入力し、その移動時間をストップウォッチにより 3 回測定、計算により速度を求めた。

その結果は、表-5 に示すように満足の行くものであった。

表-5 X 軸移動速度

| 設定パルス数 | 移動距離 | 移動時間 | | | 移動速度(計算値) mm/sec | | | |
|---------|-------|-------|-------|-------|------------------|-------|-------|-------|
| | | ① | ② | ③ | ① | ② | ③ | 平均値 |
| 5000pps | 105mm | 6.4s | 6.4s | 6.4s | 16.40 | 16.40 | 16.40 | 16.40 |
| 100pps | | 31.5s | 31.4s | 31.4s | 3.35 | 3.34 | 3.34 | 3.337 |

(4) 主軸の回転精度

主軸を回転精度も X 軸と同様に超音波ビームのラップ率及び画像処理時の周方向欠陥位置の表示に大きく影響する。そこで主軸を回転させ、光学式タコメータにより 3 回、繰り返し測定を実施し、その精度を確認した。その結果は表-6 に示すように満足の行くものであった。

表 - 6 主軸回転速度

| 設定回転数 | 測定回転数 | | | | 精度 |
|--------|----------|----------|----------|----------|-------|
| | ① | ② | ③ | 平均 | |
| 500rpm | 500.2rpm | 500.4rpm | 500.0rpm | 500.2rpm | + 0.4 |
| 400rpm | 400.0rpm | 400.0rpm | 400.0rpm | 400.0rpm | ± 0 |
| 300rpm | 300.0rpm | 300.2rpm | 300.1rpm | 300.1rpm | + 0.2 |
| 200rpm | 200.1rpm | 200.2rpm | 200.0rpm | 200.1rpm | + 0.2 |
| 100rpm | 100.0rpm | 100.0rpm | 100.0rpm | 100.0rpm | ± 0 |

4. 2 水循環系性能試験

超音波は、通常、探触子と被検材の間に音波を伝えるための媒質（油、グリセリン、水等）を用いる。本装置の場合、被検材（燃料棒）に与える影響（錆、着色等）を考慮し、水を媒質として（水浸法）を用いているがこの水の温度変化及び汚れが超音波検査の精度に与える影響は大きく、水循環系の性能もこれらを考慮し設計した。設計時の水温の安定度の目標は、1時間当たり±0.5°C、水の純度に関しては、通常、被覆管の受入検査等で規定される水の純度 $10M\Omega/cm^2$ を目標とした。

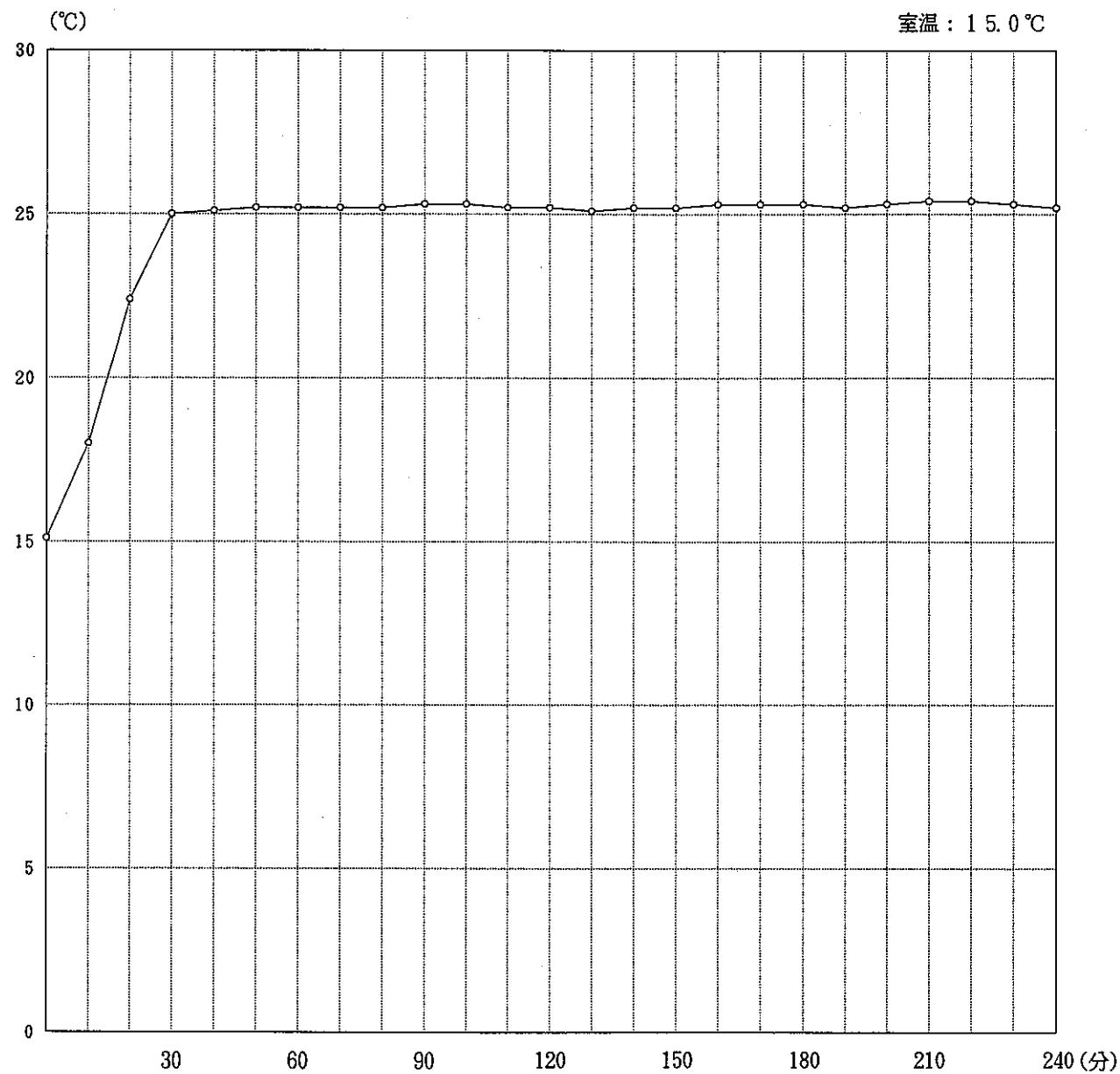
(1) 恒温試験 - 1

水槽内に水を循環させ、恒温槽のスイッチを入れ、水温の立ち上がりと設定水温からのバラツキを確認した。試験は、短時間における安定性（10分毎に4時間の測定）と長時間における安定性（1時間毎に8時間の測定）の測定を行った。その結果をグラフ-1及びグラフ-2に示す。

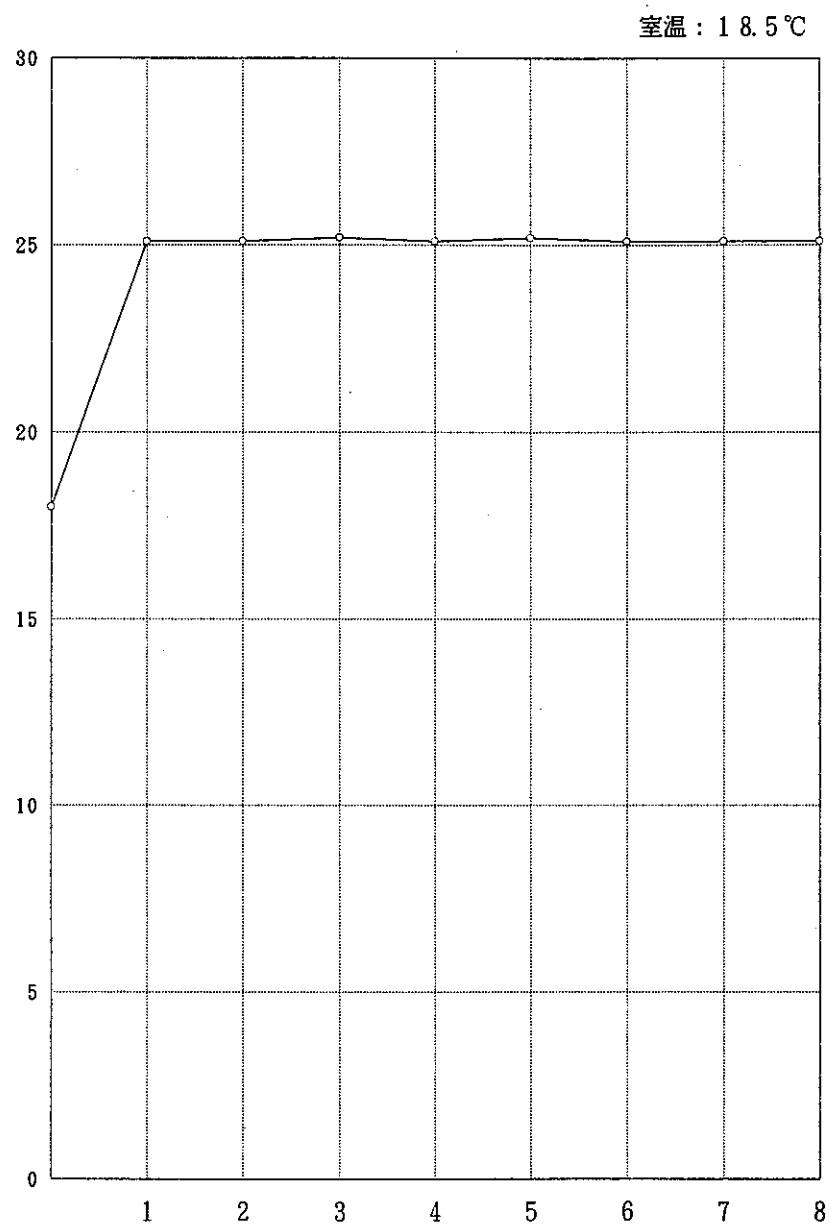
その結果、水温の安定性は、設定値25°Cに対して±0.2°C（8時間）であり超音波の音速に影響のない範囲で恒温されることが分かった。

(2) 恒温試験 - 2

水槽の形状は、水槽内での水温の差を生ずる原因となり超音波の音速に影響を与える。本装置の場合、一般であまり用いられない円筒形の水槽を用いていることからこれらの問題が生ずる可能性もあり、その確認を行うために図-18の測定位置において水温を測定した。その結果を表-7に示す。



グラフ - 1 水槽温度の短時間安定性試験（4時間）



グラフ～2 水槽温度の長時間安定性試験（8時間）

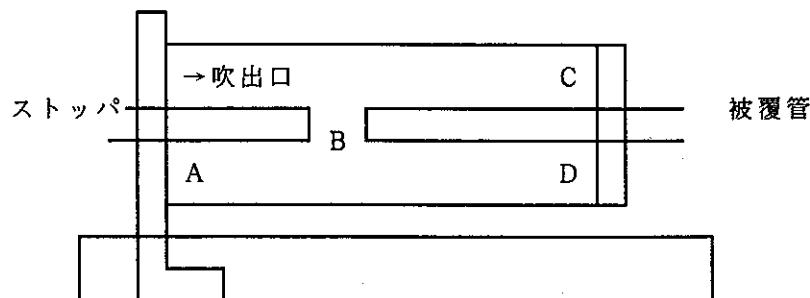


図-18 水槽位置による温度差測定の測定位置図

表-7 水槽位置による水温の差

単位: °C, 室温 16°C

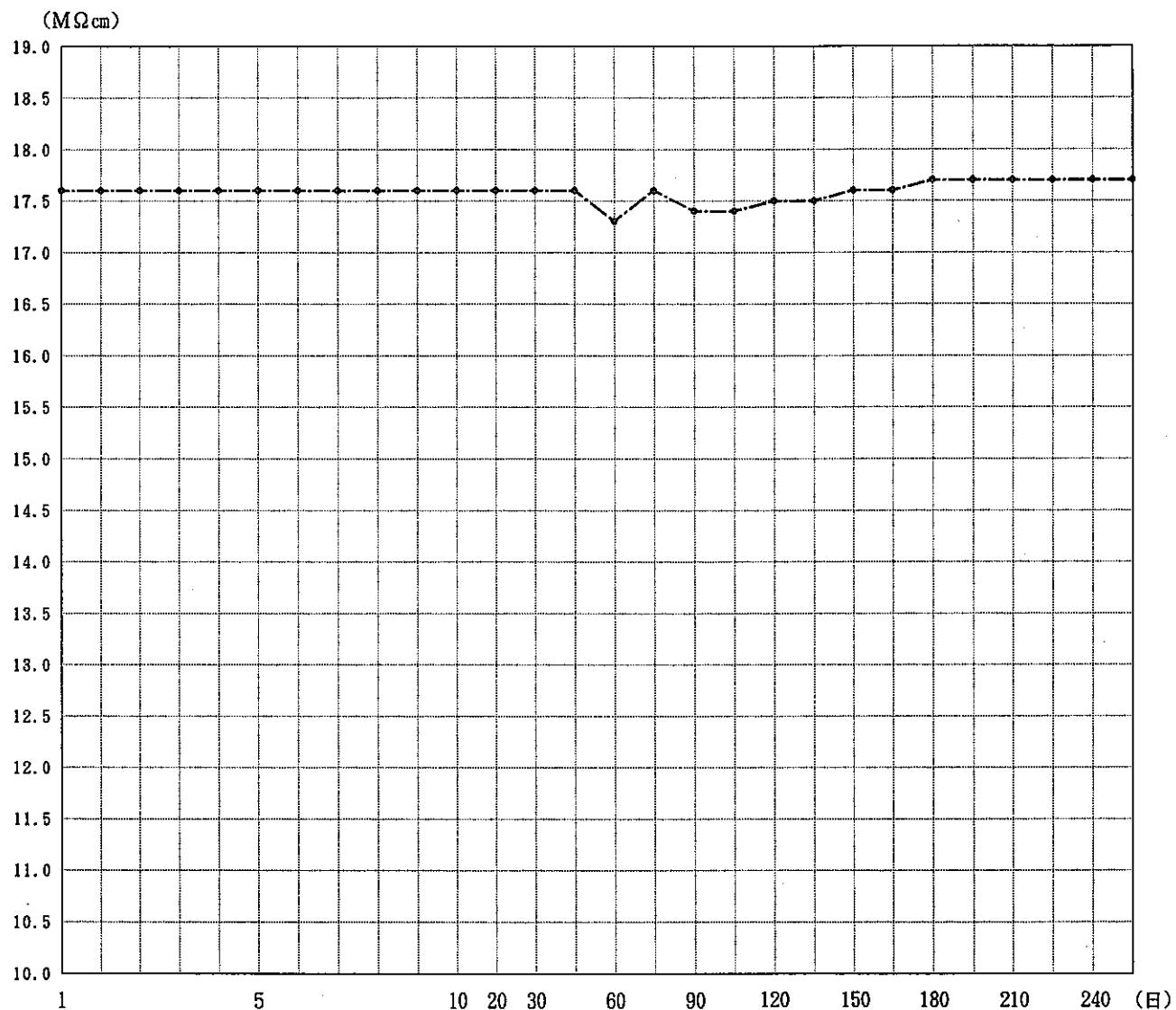
| 測定点 | 測定時間(分) | | | | | | | | | | | |
|-----|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 |
| A | 18.0 | 22.4 | 25.0 | 25.1 | 25.2 | 25.2 | 25.2 | 25.2 | 25.1 | 25.2 | 25.2 | 25.2 |
| B | 18.0 | 22.4 | 25.1 | 25.1 | 25.2 | 25.2 | 25.2 | 25.2 | 25.2 | 25.2 | 25.2 | 25.2 |
| C | 18.0 | 22.4 | 25.1 | 25.1 | 25.2 | 25.2 | 25.2 | 25.2 | 25.2 | 25.2 | 25.2 | 25.2 |
| D | 17.9 | 22.4 | 25.0 | 25.1 | 25.2 | 25.2 | 25.2 | 25.2 | 25.2 | 25.2 | 25.2 | 25.2 |

その結果、水槽の位置による水温の差は見られなかった。

(3) 純水再生限度の確認

水の汚れ及び劣化は、超音波そのものには影響を及ぼさないが、探傷時のノイズ等の原因となる。そこで本装置では、空気中の二酸化炭素の溶解と埃等による水の汚れを除去するために水循環系内にフィルタと純水再生装置を組み込んだ。本試験は、この純水再生装置のイオン交換樹脂の再生能力の限界を確認するために実施した。その結果をグラフ-3に示す。

グラフからも分かるように純水の再生能力は、8ヶ月を経過しても衰えず、純水の純度限界 $10 M\Omega \text{ cm}$ を十分満足している。



グラフ-3 純水再生能力の確認

4.3 超音波探傷器

(1) 増幅直線性試験

JIS Z2344付隨書1に従い、超音波探傷器の増幅直線性を測定した結果を表-8に

表-8 増幅直線性測定結果

| dB | 理想値 | 測定値 | d(±) % |
|-----|-------|-------|--------|
| 0 | 100.0 | 100.0 | 0 |
| -2 | 79.4 | 85.0 | +5.6 |
| -4 | 63.1 | 67.5 | +4.4 |
| -6 | 50.1 | 55.0 | +4.9 |
| -8 | 39.8 | 45.0 | +5.2 |
| -10 | 31.6 | 35.0 | +3.4 |
| -12 | 25.1 | 27.5 | +2.4 |
| -14 | 20.0 | 22.5 | +2.5 |
| -16 | 15.8 | 17.5 | +1.7 |
| -18 | 12.5 | 14.5 | +2.0 |
| -20 | 10.0 | 11.5 | +1.5 |
| -22 | 7.9 | 9.0 | +1.1 |
| -24 | 6.3 | 7.5 | +0.8 |
| -26 | 5.0 | 5.5 | +0.5 |

示す。試験方法は、超音波を試験片に当て、その時に得られるエコー高さを100%に調整し、増幅器を-2dBづつ減衰させてそのエコー高さをシンクロ画面より読み取る。

読み取られた値とJISにより規定される理想値の誤差を比較し、次式によりその最大誤差を計算して等級を分類する。

精密探傷に用いられる増幅直線性の等級は1級以上($d \leq 10.0\%$)となっている。

$$d = [d(+)] + [d(-)] \%$$

$$d = 5.6 + 0 = 5.6\%$$

等級 = 1級

測定結果より計算で、本探傷器の増幅直線性の等級は、1級であることが証明された。

(2) 水距離測定誤差試験

探傷器より出力される水距離は、データ処理段階で被検材の外形形状を作画するために必要をデータとなる。又、探触子の焦点はある一定の長さしか持たないため、指定水距離に探触子を維持することが探傷性能(条件)の安定性となる。そこでこれら探触子の指示位置に対する出力誤差を確認するために図-19に示すように被覆管と探触子の間を6~12mmに1mm間隔でノギスで測定しながら探触子昇降高さを設定し、そ

の値と探傷器から出力される水距離との誤差を確認した。設計時の目標値は、探触子のビームフォーカス長さから±0.05mmとした。

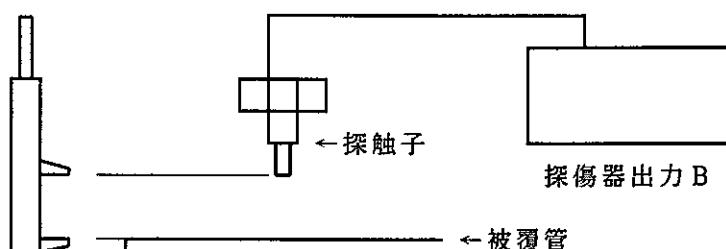


図-19 水距離測定誤差試験方法

表-9 水距離測定誤差 水温：25.1°C

| 設定値 A | 探傷器出力 B | 誤差 A - B |
|-------|----------|----------|
| 6 mm | 6.00 mm | 0 |
| 7 mm | 6.98 mm | -0.02 |
| 8 mm | 7.99 mm | -0.01 |
| 9 mm | 8.99 mm | -0.01 |
| 10mm | 10.00 mm | 0 |
| 11mm | 10.99 mm | -0.01 |
| 12mm | 12.00 mm | 0 |

注) 探傷器出力 B は、10回の平均値。

その結果、表-9に示すように概ね満足の行く値であった。

4.4 各モードにおける自動駆動精度

自動駆動における形状の認識は、3.2項で述べた様に探触子が被検材の外形形状を測定し、それにより傾斜の開始点及び終了点を見つけ出し、探傷部の傾斜角度を計算して求められる。この認識した形状により探触子は、被検材との距離、位置、角度を補正しながら探傷を行って行く。

この形状認識が、本装置の設計条件の基盤であり、この駆動精度が探傷データの精度となる。そこでこの自動駆動における駆動精度、探傷条件の正確さ及び安定性を確認するための試験を実施した。

(1) 自動駆動設定試験 - 1

PMW溶接試料を用いて自動駆動試験を繰り返し実施し、図-20に示す傾斜開始点、終了点のバラツキ及び水距離のバラツキを下記に示す装置駆動条件により測定した。

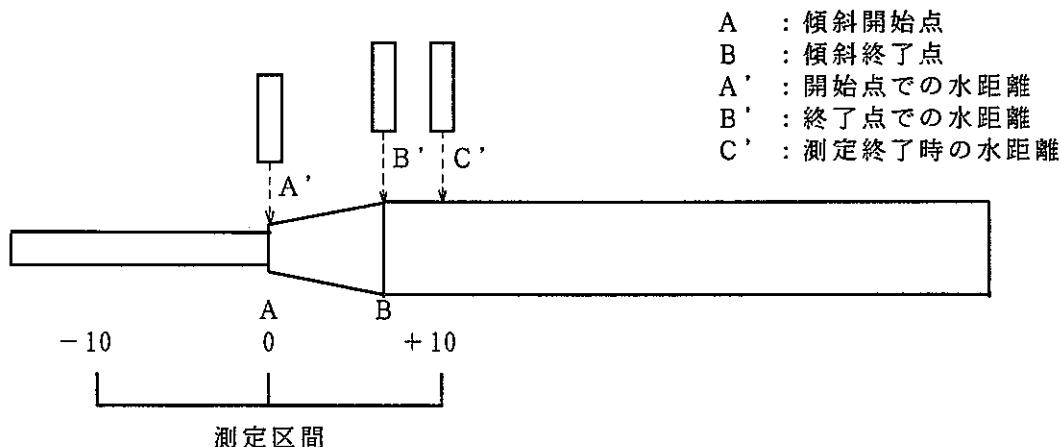


図-20 自動駆動設定試験データ採取位置

装置駆動条件：回転数200rpm、探触子駆動0.15mmピッチ、測定区間-10~10mmその結果、表-10からもわかるとおり傾斜終了位置のバラツキが見られた。

表-10 傾斜開始点及び終了点における水距離-1

(単位:mm)

| | 設 定 水 距 離 | 開始点 位 置 A | 開始点 水 距 離 A' | 終了点 位 置 B | 終了点 水 距 離 B' | 管 部 水 距 離 C' | 探触子 首 振 角 (°) |
|---|--------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| 1 | 10.00 | 0.00 | 9.86 | 8.70 | 10.01 | 10.02 | 5.25 |
| 2 | 10.00 | 0.04 | 9.84 | 6.47 | 9.99 | 10.01 | 7.09 |
| 3 | 9.00 | 0.00 | 9.09 | 8.66 | 9.02 | 9.00 | 5.11 |
| 4 | 9.00 | 0.06 | 8.85 | 8.93 | 9.04 | 8.98 | 5.15 |
| 5 | 8.00 | 0.00 | 8.13 | 9.00 | 7.97 | 8.01 | 5.08 |
| 6 | 8.00 | 0.00 | 8.08 | 8.91 | 7.97 | 7.91 | 5.13 |
| 7 | 7.00 | 0.00 | 7.04 | 9.00 | 7.01 | 6.99 | 5.15 |
| 8 | 7.00 | 0.03 | 7.07 | 8.21 | 6.86 | 6.98 | 5.59 |

(2) 自動駆動設定試験-2

(1)の試験において傾斜終了点に誤差が生じたため、再度、同一水距離にて下記の駆動条件で試験を実施した。

装置駆動条件：回転数200rpm、探触子駆動0.15mmピッチ、測定区間-10~10mmその結果を表-11に示す様に傾斜終了位置に関しては、傾斜の終了点を確認しておらず水距離も設定水距離に対して最大0.8mmの誤差を生じていることが分かった。

表-11 傾斜開始点及び終了点における水距離 - 2
(単位 : mm)

| | 設 定 水 距 離 | 開始点 位 置 A | 開始点 水 距 離 A' | 終了点 位 置 B | 終了点 水 距 離 B' | 管 部 水 距 離 C' | 探触子 首 振 角 (°) |
|----|--------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| 1 | 10.00 | 0.00 | 10.19 | 8.35 | 9.97 | 10.00 | 5.47 |
| 2 | 10.00 | 0.00 | 9.99 | 7.49 | 9.93 | 9.97 | 6.09 |
| 3 | 10.00 | 0.00 | 10.07 | 7.67 | 10.02 | 10.00 | 5.95 |
| 4 | 10.00 | 0.00 | 10.10 | 8.39 | 9.95 | 9.98 | 5.46 |
| 5 | 10.00 | 0.00 | 10.02 | 7.57 | 10.02 | 9.96 | 6.03 |
| 6 | 10.00 | 0.00 | 10.01 | 7.78 | 9.93 | 10.00 | 5.87 |
| 7 | 10.00 | 0.00 | 10.17 | 8.48 | 9.98 | 10.02 | 5.38 |
| 8 | 10.00 | 0.00 | 10.01 | 8.50 | 10.01 | 10.00 | 5.38 |
| 9 | 10.00 | 0.00 | 10.08 | 7.62 | 9.98 | 10.04 | 5.99 |
| 10 | 10.00 | 0.00 | 10.08 | 7.15 | 9.92 | 10.00 | 6.38 |

(3) 自動駆動確認試験 - 1

傾斜終了位置の確認が行えない原因として考えられるのは、① 試料の形状に問題がある。② 傾斜終了地点の識別ソフトに問題がある。の 2 点が考えられる。そこで先ず試料の形状を確認することとし、試料形状を投影器により測定したその写真を - 3 に測定結果を表-12に示す。

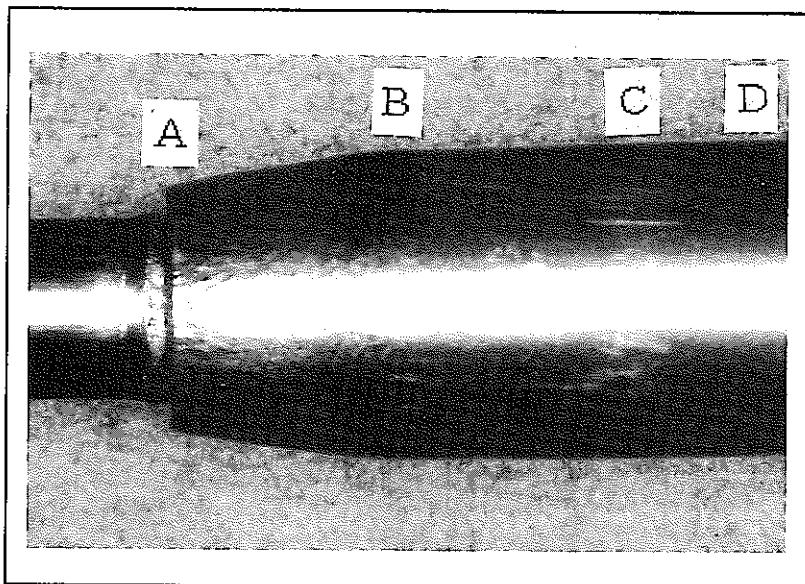


写真-3 PMW溶接試料形状

表-12

| | 測定距離 | 測定外径 |
|---|-------|-------|
| A | 0 | 4.893 |
| B | 4.561 | 6.281 |
| C | 7.751 | 6.422 |
| D | 7.947 | 6.485 |

(単位: mm)

その結果、本来の傾斜終了点であるB点とその後ろC点においてもテーパーが形成されている（テーパーが2段形状になっている。）ことが分かる。

(4) 自動駆動確認試験-2

試料の水距離の変化は、探触子のトレース状態とともに試料の芯ズレも大きく影響する。4.1(2)項においてテストバーによる主軸の芯ブレを測定したが、実際の試料には、被覆管の中心と端栓の中心がありこの両者のセット状態により試料の芯が微妙に変化してしまう。そこで自動駆動精度試験に用いた試料芯のズレを測定し、水距離の変化との相関を調べた。

測定位置を図-21に示し、その測定結果を表-13に示す。

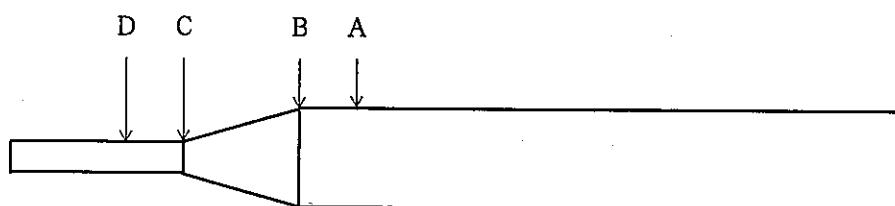


図-21 芯ズレ量測定位置図

表-13 芯ズレ量測定結果

(単位 : mm)

| | 測定距離 | 芯ズレ量 | 水距離値 | 偏芯量 |
|---|-------|------|---------------|------|
| A | 10.00 | 0 | 10.51 ~ 10.57 | 0.06 |
| B | 4.56 | 0.22 | 10.52 ~ 10.61 | 0.06 |
| C | 0.00 | 0.63 | 11.14 ~ 11.25 | 0.11 |
| D | -1.00 | 0.55 | 11.73 ~ 11.87 | 0.14 |

その結果、試料には、芯ズレがあり同時に偏芯していることが分かる。

(5) その他の自動モード（設定駆動・自動位置決め）試験

その他の自動モード（設定駆動・自動位置決め）の駆動試験を任意に実施した結果、設計通りの駆動を行えることを確認した。

4.5 その他の装置問題点

本装置の試験中に起きたその他、駆動中における何点かの問題についてここで挙げて置く。尚、これらの問題点については、早急に対処、改善を実施する。

- (1) 各軸、駆動モータにおける共振点が探傷条件に微妙に影響するので共振点の見極めと防振対策を施す。
- (2) 水槽内の気泡が探触子の凹面に溜まり超音波の発振に影響するので気泡除去方法を確立する。
- (3) 外層水槽内の温度と外気温度差により外層水槽内が曇ってしまい水槽内を確認出来なくなるので曇り防止加工を行う。
- (4) モータノイズ、外部からのノイズが探傷器にのってしまうのでシールドを完全に行えるようにする。
- (5) コンプレッサ容量が全体的に不足している（現在、 5 kg/cm^2 , 12ℓ ）ので容量を増やす。（現状では、エアーナイフの効果がタンク容量の減少とともに落ちてしまう。）

5. 試料探傷能力の確認

5.1 管部波型，接合部波型，未接合部波型

PMWによる溶接試料を用いて図-22に示す部位の欠陥波型の確認を行い、探傷検査の可能性について検討を行った。確認方法は、装置を手動操作にて探傷試験を行い、それぞれの部位における波型状態の差を確認した。確認部位は、管部、接合部、未接合部の3ヶ所とし、スコープに表示される波型をポラロイドにより撮影し波型確認を行った。その結果を写真-4～写真-6に示す。

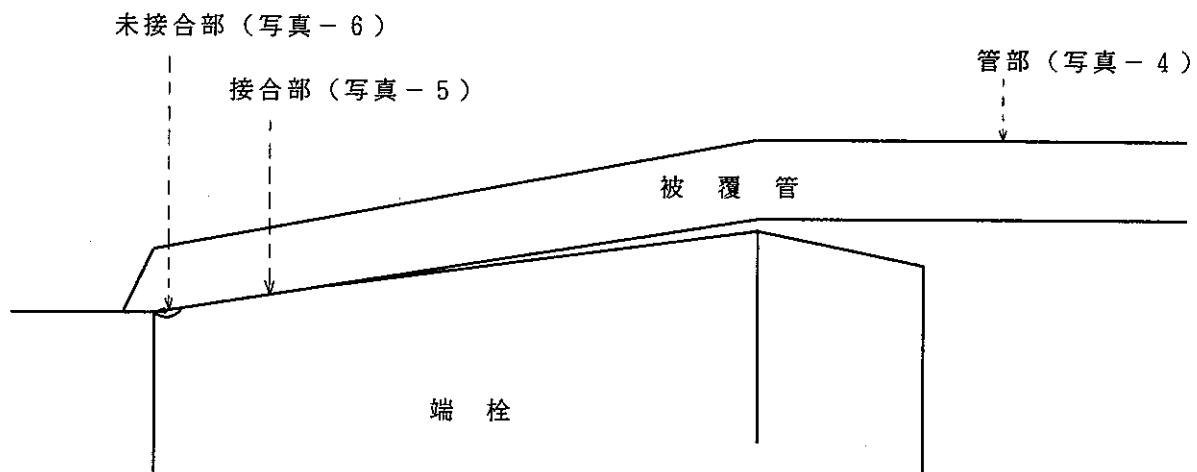
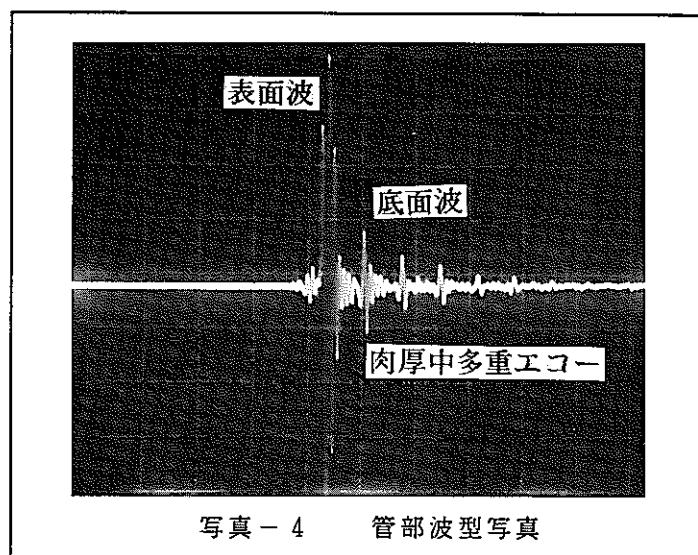


図-22 波型確認位置図

(1) 管部波型

管部における欠陥波型は、肉厚中での超音波の多重エコーが見られる。



(2) 接合部波型

接合部は、管部のような多重エコーは見られない。これは、接合部では、透過した音波が、反対側の傾斜面で底面反射しても探触子に戻ってこないためである。

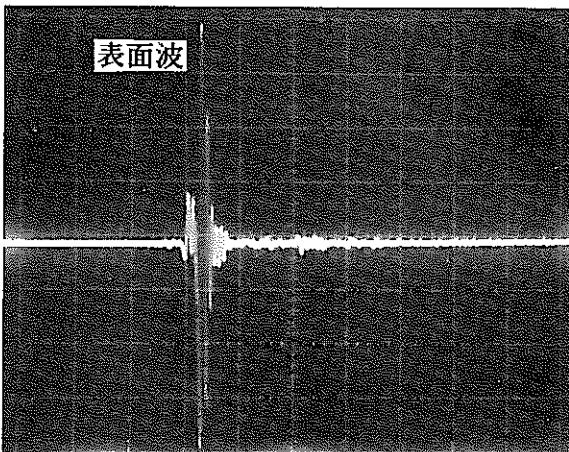


写真-5 接合部波型写真

(3) 未接合部波型

未接合部は、端栓と被覆管の隙間ににより音波が反射し、エコーが確認できる。しかし、空間の寸法、内面の状態により管部のような奇麗な多重エコーは、見られない。

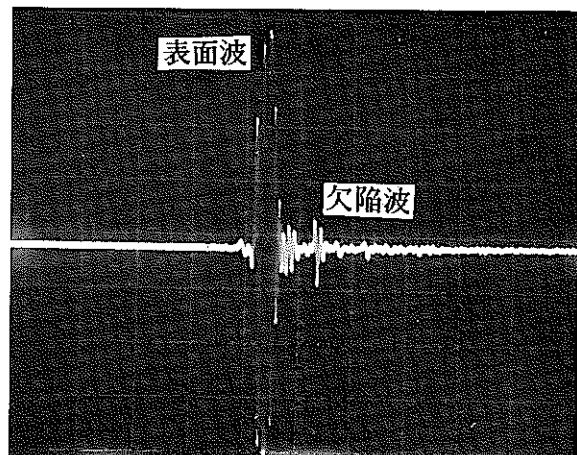


写真-6 未接合部波型写真

5.2 未接合部の寸法測定

PMWによる溶接試料を手動操作により0.01mm間隔1°ピッチづつ手動操作により下記の探傷条件により探傷し、試料内の未接合部位を識別、その寸法を操作系CRT画面より読み取りグラフ-4に示すようなマトリックスにプロットした。

① 探傷器条件

ゲイン : 59dB

ダンピング : MAX

パルスエネルギー : 1

② 駆動条件

水温 : 25°C

水距離 : 9.16mm

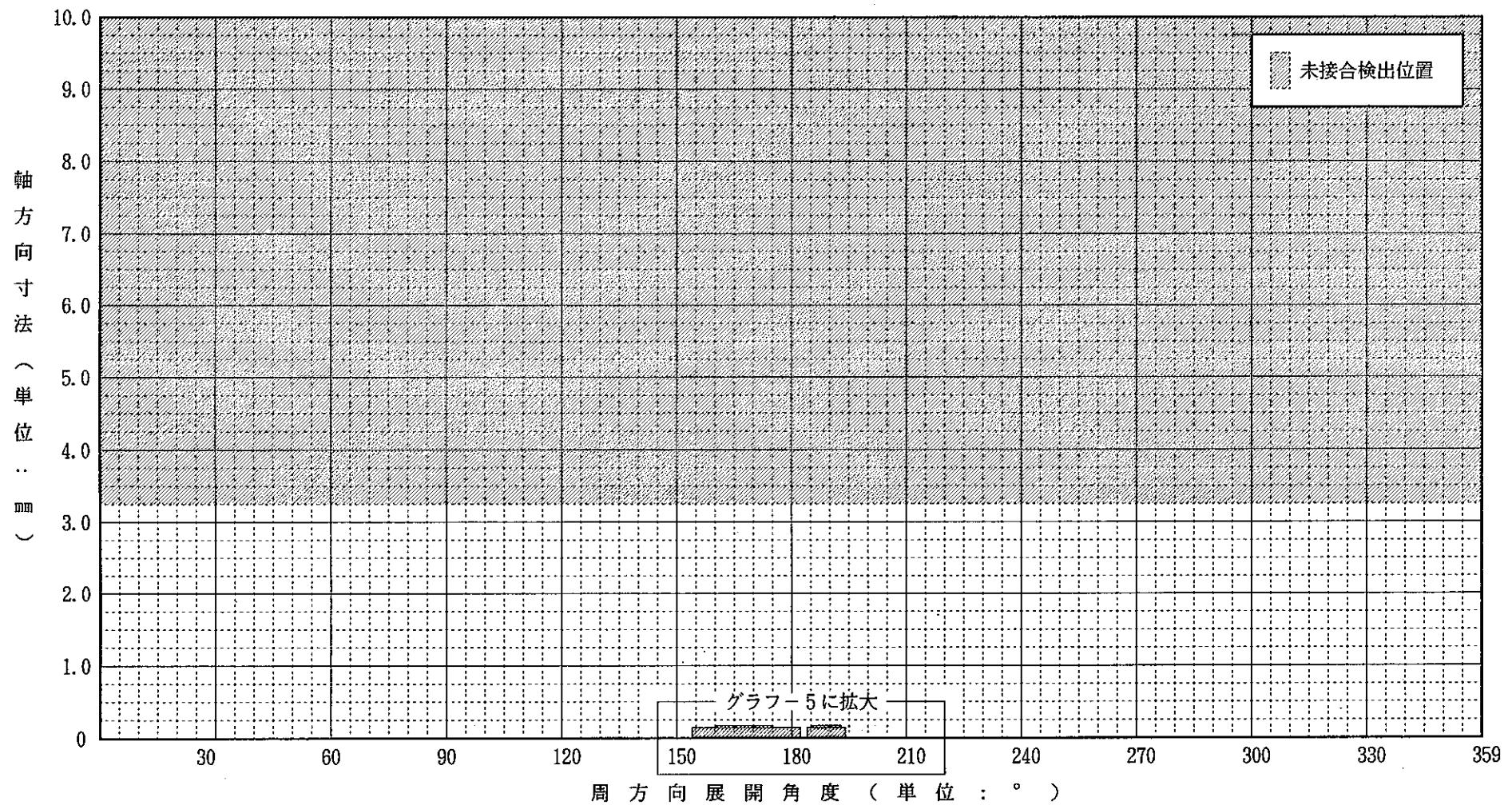
探触子首振角 : 10.0°

繰返周波数 : 10 KHz

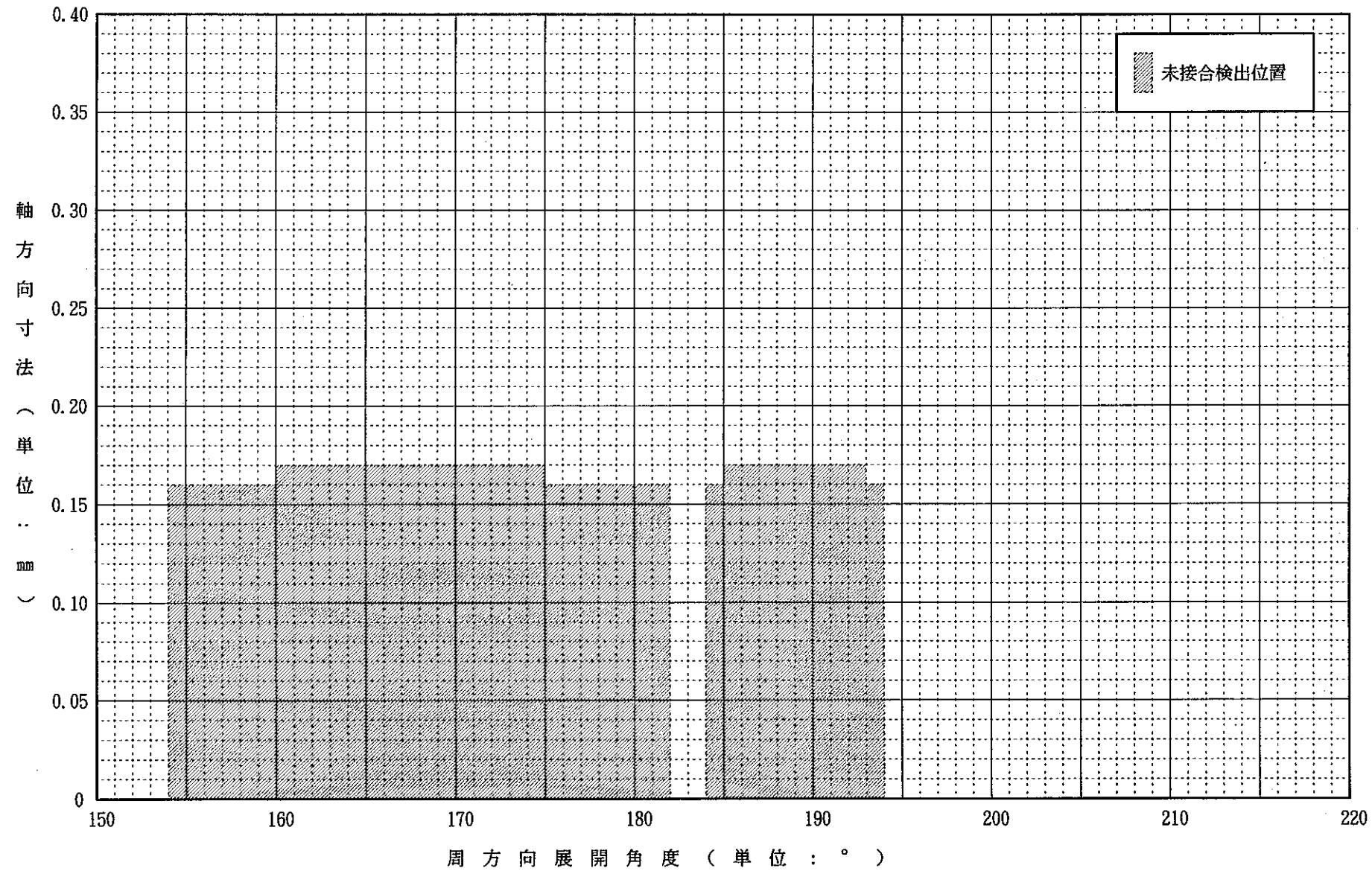
探触子 : 35MHz, ポイントフォーカス フォーカス径

ϕ 0.2mm

その結果、管端の一部に未接合部を確認し、超音波による未接合部の確認とその位置、長さの確認が行えることが分かった。（尚、未接合部は、小さな範囲しか持たないため、グラフ-5にその部位を拡大表示する。）



グラフ-4 未接合部波型確認位置（長さ 0 ~ 10.0mm・角度 0° ~ 359°）



グラフ-5 未接合部波型確認位置(長さ0~0.40mm・角度145°~220°)

6. 考 察

装置の諸性能については、何点かの改良点はあるものの駆動系、操作系、探傷器とも当初の設計性能を満足するものであった。しかし、実際にPMW試料の形状測定を行い、探傷動作を行うにあたり実際の試料の形状と探触子のトレース形状に誤差が生じた。

4.4-(1)項及び(2)項の試験において、傾斜開始点におけるバラツキは見られないが、傾斜終了点は、計測毎に違う値を示している。本装置の場合、探触子の首振り角度は、傾斜開始点と終了点の距離により演算により求めているためこのズレにより実際の傾斜角度（約10°）よりも小さな角度（5～6°）となってしまう。この傾斜終了点の誤差は、検査を実施する上で大きな障害となる。現時点においては、4.4-(3)項の写真-3からも判るように本試料における、テーパ部の2段形状が主原因と思われるが、傾斜開始点、終了点の判定ソフトに問題があることも懸念される。又、現状のソフトでは、テーパ部の2段形状の判別ができないこと、それに追従して駆動するシステムソフトではないことも傾斜角度推定の上での問題点と思われる。

また、実際に試料を測定した結果、指定水距離と探傷駆動時の水距離に誤差（最大0.2mm）が見られるが、これは、4.4-(4)項の試験で分かる様に試料の芯ズレがあり、これが回転中にブレとなり水距離誤差となると考えられる。

平成2年度前期には、本装置のデータを収集、画像表示する画像処理システムが付加されるため、このシステムを用いることにより前述の問題点をより明確化できると思われる。又、そのデータを利用し、ソフトに関する問題、試料のブレの問題について装置の改造を実施する予定である。

7. ま と め

- (1) 駆動系の組立精度、速度精度及び回転精度は、設計値通りのものであった。
- (2) 水槽内、水温の安定性、純粋製造精度共に超音波試験を行う上で十分な性能である。
- (3) 超音波探傷器の性能については、JIS Z2344に規定される性能を満足した。
- (4) 静止状態における水距離測定精度については、最大で-0.02mm (20μm) であった。
- (5) 各自動モードにおける操作は、設計通りの仕様で駆動することを確認した。
- (6) 自動駆動モードにおいて傾斜終了点の認識にかなりのバラツキを生じ、そのために傾斜角度の計算に実際の試料との誤差(4~5°)を生じた。
- (7) (6)に付随し、自動モード時の水距離に誤差(最大 0.2mm)を生ずる。
- (8) PMW溶接試料において未接合部位の識別が可能であり、その部位の寸法測定が可能である。

8. 今後の課題

8.1 PMW試料の検査に関する課題

- (1) 現状のソフトの問題点（テーパ部2段形状の対応，テーパ開始位置・終了位置の確実な判定）を改造する。
- (2) 水距離誤差の原因と思われる芯ブレを取り除くため，端栓側をチャッキングし，駆動させるための端栓チャックの設計，製作，取付けを行う。
- (3) PMW試料による画像解析データの収集を行い探傷時の問題点を洗い出す。
- (4) 製作したSTBによりデータを収集，解析し，最終的なSTBの形状，製作方法を検討する。
- (5) 模擬ピン等を用いてピン内部のペレットが検査中の回転でどのような挙動を示すか解明し，検査に適切な試料回転数を決定する。