

装置肉厚の連続モニタリング技術の開発

1998年9月

動力炉・核燃料開発事業団
東 海 事 業 所

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒319-11 茨城県那珂郡東海村大字村松 4-33

動力炉・核燃料開発事業団

東海事業所 技術開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section, Tokai Works, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation, 4-33 O-aza-Muramatsu, Tokai-mura, Naka, Ibaraki-ken, 319-11, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

装置肉厚の連続モニタリング技術の開発

藤咲 和彦*，竹内 正行**，石橋 祐三**
大橋 和夫**，武田誠一郎**

要 旨

再処理用機器の構造材料であるステンレス鋼およびバルブメタルの微量な減肉を機器の運転中に連続的に測定する、連続モニタリング技術の開発の一環として、超音波パルス法を測定原理とする水ジェット型および高温型連続モニタリング技術について、連続肉厚モニタリング技術としての適用性を評価した。

評価の結果、水ジェット型連続モニタリング技術の測定誤差は±0.01mm程度であり、約1800時間の測定が可能であった。しかし、水ジェットの連続供給に起因した測定部の温度低下による腐食環境の緩和や、実環境への採用に際し、受槽の取り付けや廃液発生を伴うといった問題があり、連続モニタリング技術として適用するにはいまだ解決すべき課題が多く残されている。一方、高温型連続モニタリング技術は±0.01mm以下の測定誤差により、直線性に優れたデータが取得できることおよび探触子保持用治具を準備することでさまざまな測定部に対応できることなどから、実環境への適用性が高い技術と判断される。

今後、高温型連続モニタリング技術の実用化を図っていくには、探触子の接触状態の長期安定性が求められ、探触子保持用治具の改良や測定器の機能向上が必要となる。さらに、モニタリングデータの検証、探触子の寿命評価、耐放性などモニタリングシステムに求められる機能および性能を明確にし、連続モニタリングシステムの構築を図る必要がある。

*：常陽産業株式会社

**：再処理技術開発部 機器材料開発室

目 次

1.はじめに	1
2.モニタリング方法の選定	3
3.試験方法	5
3. 1. 連続モニタリングのフィールド試験装置	5
3. 2. 水ジェット型連続モニタリング技術	5
(1)試験体	5
(2)測定方法	5
(3)評価方法	6
①測定誤差の確認	6
②フィールド試験	6
3. 3. 高温型連続モニタリング技術	7
(1)高温型探触子および接触媒質の選定	7
(2)基本性能の確認	8
①高温型探触子の基本性能	8
②測定誤差の確認	8
③超音波厚さ計の分解能の確認	9
④高温部での安定性確認	10
(3) フィールド試験	10
①初期型治具によるフィールド試験	10
②先端形状を変更した遅延材によるフィールド試験	10
③改良型治具によるフィールド試験	11
4.試験結果および考察	12
4. 1. 水ジェット型連続モニタリング技術	12
(1)測定誤差の確認	12
(2)フィールド試験結果	12
4. 2. 高温型連続モニタリング技術	13
(1)基本性能の確認結果	13
①高温型探触子の基本性能の確認結果	13
②測定誤差の確認結果	14

③超音波厚さ計の分解能の確認結果	14
④高温での安定性確認結果	15
(2)フィールド試験結果	16
①初期型治具によるフィールド試験結果	16
②先端形状を変更した遅延材によるフィールド試験結果	17
③改良型治具によるフィールド試験結果	18
5.今後の検討課題	21
(1)水ジェット型連続モニタリング技術	21
(2)高温型連続モニタリング技術	21
(3)検討課題	21
6.まとめ	23
7.参考文献	24

1. はじめに

再処理工程では、使用済み燃料からウラン（U）、プルトニウム（Pu）を回収する方式としてピューレックス法を採用し、塩析剤として硝酸を用いている。硝酸は酸化性の強い酸で、硝酸と接する金属材料は過酷な腐食環境に曝されている。そのため再処理機器用の材料には、該当する腐食環境を考慮し、硝酸環境で耐食性を示すオーステナイト系ステンレス鋼がおもに用いられている。しかし、機器が硝酸溶液に曝されている実環境下においては材料選定時に予想しえない腐食因子によって思わぬ腐食損傷を招くことも考えられる。東海再処理工場においても、ステンレス鋼製機器の腐食故障により長期間の操業停止の経験がある¹⁾。その後の研究により、ステンレス鋼の腐食に影響を及ぼす因子の解析が進むとともに²⁾、ステンレス鋼にとって厳しい環境となる再処理機器用の構造材料には、当該環境においてステンレス鋼より優れた耐食性を示すチタン（Ti）やチタン5%タンタル合金（Ti-5Ta）などのバルブメタルの適用が進められている³⁾。

構造材料によらず、プラントの安定かつ安全な操業にあたっては、機器や付帯設備の材料内外面の欠陥の有無、腐食による減肉状況等の経年劣化を把握し、余寿命の推定を始めとし、実施すべき処置などの検討を含めた総合的な判断が重要となる。判断に必要な情報を取得する方法は、表1.1に示すよう各種方法があり、それらは必要に応じて使い分けられている。そのなかでも、放射線（X線、γ線）透過、染色浸透探傷、超音波探傷・肉厚測定および渦流探傷などに代表される非破壊検査が一般的な検査方法である。これらによる検査は、機器の運転を停止したうえでないと行えず、機器の運転中に生じる変化をリアルタイムで知ることは不可能である。また、検査はセンサ部の固定操作を人的に行うものが多く、かつ時間的に断続して取得するデータであるため、測定装置の調整および測定者の技能の違いなどの定量化が困難な要因による誤差がデータには含まれる。これらが測定値に及ぼす影響は無視できないものであり⁴⁾、変化に関する判断は定性的とならざるをえない。たとえば、酸回収蒸発缶小型モックアップ設備（以下「モックアップ設備」）による運転試験において定期的に行った超音波肉厚測定では、上記に起因する誤差を考慮し接触式で±0.05mm、非接触式で±0.2 mmの測定誤差を見積もっている⁵⁾。運転開始時に調整および設置した装置により、運転中の機器に生じる変化をリアルタイムで把握することが可能であれば、次のような利点がある。

- ①定量化が困難な誤差を排除した信頼性の高い、すなわち高精度なデータが取得でき、値の変化に関して定量的な判断が可能となる。

②機器の運転中に急激な変化が生じた場合においても、それを検知することが可能となり、液の漏洩などの異常に至る前に対応が可能となる。

つまり、機器が運転している状態において機器に生じる変化をリアルタイムに把握する技術、すなわち連続モニタリング技術は機器の保全において有効な手段であるといえる。また、主要な再処理機器は放射線量が高い環境にあり、定期的に検査を実施することは困難である。再処理機器に内包されるプロセス液は放射性物質を含むものであることから、機器の損傷に至る前に機器の現状が把握できる連続モニタリングは、再処理工程において必要不可欠の技術と考えられる。

本報は、運転中の機器の保全に資することを目的とした連続モニタリング技術開発の一環として、超音波パルス法による非接触式および接触式の2方式の連続モニタリング技術への適用性について評価した結果を述べる。

2. モニタリング方法の選定

これまでに主要な再処理機器において経験した腐食故障のほとんどは、局部腐食によるものである¹⁾。これは、当該機器が曝された腐食環境において、ステンレス鋼が耐食性を維持できなくなった結果である。そのような環境に設置される機器の構造材料はすでに述べたとおり、より耐食性に優れたバルブメタル製に変更されてきている。材料変更した以外の再処理機器は、ステンレス鋼であっても十分な耐食性を維持してきている。そこで、この開発ではステンレス鋼およびバルブメタルが耐食性を維持しているときに呈する全面腐食²⁾の連続モニタリングを対象とした。したがって、連続モニタリング技術にはステンレス鋼やバルブメタルの全面腐食による微量な減肉³⁾を検出できる性能が要求される。再処理機器で取り扱うプロセス液は硝酸であることから、沸騰状態で100～120℃程度となり、それを内包する機器の表面温度は熱伝達率等を考慮すると、液温より約10℃程度低下するものと考えられる。なお、再処理機器をモニタリングする場合には、装置の設置に係る諸作業は放射線環境下で行われる。被ばくの低減を図るためにもモニタリング装置の構成はできるかぎり単純、かつ設置が容易であることが望まれる。以下に連続モニタリング技術に必要と考えられる仕様を示す。

- ・測定すべき現象：全面腐食による肉厚変化
- ・測定誤差：連続モニタリングでは装置の調整および測定者に起因する誤差が排除可能であることから、±0.01mm以下を目標とする。
- ・測定温度：90～110℃程度において安定して測定ができること。
- ・測定時間：各工程における再処理用機器の運転時間を考慮すれば、最低でも連続して数千時間の測定が可能であること。
- ・装置構成：測定前の調整および設置が簡単であり、かつ遠隔で測定が可能であること。
- ・耐放性：放射線環境下で安定して測定ができること。

測定装置の構成、測定精度、これまでの実績などを判断材料として検討した結果、現在実用化されている非破壊検査方法のなかから、超音波パルス法を測定原理とする超音波肉厚測定を連続モニタリング技術として選定した。超音波肉厚測定は、電圧－振動の両方向変換を行う圧電素子を先端に内蔵した、探触子と呼ばれるセンサ部から超音波（送信エコー（T波））を発生し、接触媒質を介して材料内に入射する。入射した超音波の一部は、材料の表面で反射して探触子に戻る表面エコー（S波）および材料の裏面で反射して探触

子に戻る裏面エコー (B_1 , B_2 , …, B_n 波) を発生する。そしてオシロスコープで観測された波形から、あるいは超音波厚さ計などにより、パルス反射波の時間差から材料の肉厚を算出する。肉厚の算出には測定対象の肉厚、測定方法等に応じ、T波とB波、S波とB波あるいはB波どうしの時間差が用いられる。本技術開発において目標とする測定誤差は極めて小さいことから、目視による読み取り誤差等の人的要因を排除するため、パルス解析、演算処理等を瞬時かつ正確に行い、計算結果を表示するデジタル式超音波厚さ計を測定器として用いることとした。

なお、超音波肉厚測定には探触子が測定対象と接触しない非接触式と、接触する接触式の2つの方式がある。通常の非破壊検査で用いる一般的な探触子の耐熱性は60°C以下とされる。ところが、本開発で対象とする再処理機器の表面温度は、上述のとおり90~110 °Cである。つまり連続モニタリング技術では、探触子が熱の影響を直接受けない非接触式とするか、もしくは耐熱性のある探触子（接触式）を用いる必要がある。本開発では、非接触式として探触子の先端に取り付けたノズルから噴出させた水柱中を超音波が往復する水ジェット型連続モニタリング技術を、また接触式として、高温適用型の探触子を接触させる高温型連続モニタリング技術とも、測定に用いた超音波厚さ計は反射パルスの時間差から肉厚を算出・表示するポータブルタイプのものである。また、連続モニタリングは長時間の測定となることから、超音波厚さ計の駆動には商用電源を用いることとし、その他の短時間の測定や測定前の調整等についても商用電源を用いて行った。超音波肉厚測定の原理を図2.1に、水ジェット型および高温型連続モニタリング技術による測定概要を図2.2に示す。

水ジェット型および高温型とも、基本的な装置構成は探触子、超音波厚さ計、両者を接続する同軸ケーブルおよび接触媒質からなる。また、超音波肉厚測定値の信頼性および再現性は、探触子の接触状態により大きく影響を受ける¹⁾。したがって、連続モニタリングを行うには、水ジェット型および高温型のいずれについても、探触子の接触状態を保持する治具が必要となる。

3. 試験方法

3.1 連続モニタリングのフィールド試験装置

実際に運転中の機器を連続モニタリングする場合、測定部は平板の場合よりも曲面を呈する等の複雑なものであることが多いと考えられる。水ジェット型および高温型連続モニタリング技術の評価を行うには、測定部の形状も含めて実際の測定環境を模擬した条件において長時間の測定を行い、そのうえで連続モニタリングに必要な仕様を満足するか確認することが重要である。そこで、機器材料開発室が所有するモックアップ設備をフィールド試験装置として用い、モックアップ設備の運転目的を阻害しない範囲で長期フィールド試験を行うこととした。モックアップ設備は、図3.1に示すような機器構成であり、小型蒸発缶内には約112 °C, 8 Mの硝酸溶液が保持され、液相部、エントレーション部および気相部の腐食環境が存在する⁵⁾。モックアップ設備をフィールド試験装置として用いることにより、実際の機器の運転において生じる肉厚変化を長時間にわたって測定することができる。なお、これまでの知見⁶⁾およびモックアップ設備の運転結果を参考にして、小型蒸発缶の気相部に設置されるTi製配管を連続モニタリングの技術評価のための試験体とした。当該環境に設置したTi製配管の表面温度は100 °C程度であることを確認している。試験体の材質はJIS 2種チタンである。

3.2 水ジェット型連続モニタリング技術

(1) 試験体

連続モニタリング技術は実環境への適用が前提であることを踏まえると、水ジェット型連続モニタリング技術は、ジェットとして供給した水の回収方法に関して問題がある。本検討においては、Ti製試験体に水の受け槽となるジャケットを溶接により直接取り付けることとした。図3.2にジャケットを取り付けた試験体の形状を示す。

(2) 測定方法

水ジェット型連続モニタリング装置は、冷却水循環装置、水ジェットノズル、探触子、超音波厚さ計などから構成される。また、図3.3に示すように水ジェットノズルはジャケットに固定され、探触子は水ジェットノズルに固定される。これにより、探触子は肉厚測定部に対して固定され、測定中に両者の位置関係がずれることはない。なお、後述する探触子は音響レンズによる点集束探触子であり、焦点は水ジェットノズルをジャケットに取り付けたとき、探触子先端から測定部までの距離が約90mmとな

るよう調整してある。冷却水循環装置から供給された水はジェットとして噴出し、ジャケット内を満たすとともに探触子の冷却剤として作用した後、ジャケット側面上部に設けた排出口からオーバーフローして冷却水循環装置へ戻る。ジャケット内における水温は、探触子への熱影響および気泡による超音波への影響を考慮して40°C以下となるように管理した。なお、原理的に測定中に水を供給する必要がある本法では、供給した水が測定面で反射し、ジャケット内において水の流動が生じる。水の流動は超音波を散乱させるため、測定値が影響を受けることになる。そこで、ノズル先端から水をジェットとして噴出することによって超音波の散乱を防止している。ジェットの噴出量は、超音波が水の流動の影響を受けない量をあらかじめ実験により確認し、9 l/min 以上とした。以下に探触子および超音波厚さ計の仕様を示す。

- ・探触子 : ハリソニック㈱製 広帯域探触子 I 4 - 0 5 0 8 - G
- ・超音波厚さ計 : 川鉄アドバンテック㈱製 T G - 7 A 型

(3)評価方法

①測定誤差の確認

本技術開発で用いた超音波厚さ計は、±0.002 mm（カタログデータ）の測定精度を有する。連続モニタリングでは、超音波厚さ計の調整および測定者の技能の違い等の因子を排除できることから、上記測定精度に近い値を得られることが期待される。なお、連続モニタリング技術は機器の運転期間中における肉厚変化を正確に把握することが重要であることから、測定値がどの程度の誤差をもっているのか確認する必要がある。測定誤差は、測定系を構成するすべての要素により決まるところから、それらの要素をすべて包含した水ジェット型連続モニタリング装置全体としての測定誤差の確認を行った。

確認方法は、マイクロメータによる計測で肉厚を決定してあるTi, Ti-5TaおよびZr製の標準試験片について、常温において水ジェット型連続モニタリング装置により肉厚測定を行い、実際の肉厚と測定値を比較することによった。測定誤差の確認に用いた標準試験片は、いずれも1.0, 3.0 および4.0 mmを目標に仕上げてある。

②フィールド試験

ジャケット付きTi製試験体および水ジェット型連続モニタリング装置一式をそれぞれ設置し、モックアップ設備の連続運転にともなうフィールド試験を行った。測定前に試験体の径方向に90°ずつ4方向にマーキングし、270°の部位（ジャケッ

トにより覆われた部位)を連続モニタリングによる測定部位とした。なお、試験体の形状による制約から、マイクロメータ等によりマーキング部の肉厚を測定することはできない。そこで、モニタリングデータを検証する指標として、試験前後に常温型探触子により各マーキング部の肉厚を測定し、定性的な減肉量を算出したうえで、連続モニタリングで得られた測定値と比較評価した。また、試験終了後に試験体内面の外観観察を行った。

3.3. 高温型連続モニタリング技術

(1)高温型探触子および接触媒質の選定

高温型探触子は、近年の一般産業界における運転中の機器に対する保全管理への要求の高まりに応じ、各種メーカーにより開発が進められたものである。高温型探触子は、振動子や振動子の取り付け方法に耐熱性をもたせるためにメーカーごとにそれぞれ新たな技術を採用している。高温型探触子の選定に際して行った調査の結果、温度条件は満たすものの、連続モニタリング技術で必要とする測定精度を期待できるものはほとんど存在しなかった。そのため、連続モニタリング技術に必要とする温度仕様に対して、探触子の最高使用温度の裕度が小さくなってしまうものの他の探触子より良好な測定精度を期待できると考えられた以下のものを選定した。また、選定した探触子は測定面の状態にあまり影響を受けず、かつ薄板の測定が行える遅延材付きとした(以下、探触子に遅延材を取り付けた状態を「探触子」と記す)。

- ・高温型探触子：ビーイー電気㈱製 広帯域高温用垂直探触子 HB0513
- ・遅延材：ビーイー電気㈱製 特殊ポリイミド樹脂

選定した高温型探触子は、接触面の温度が連続120 °Cに耐えるものである。また、遅延材は音速の温度係数が-0.07 %/°C以下と小さく(耐熱温度および温度係数とともにカタログデータ)，温度変化に起因する音速変化の影響はほとんどないものといえる。

超音波肉厚測定では探触子と測定部を音響的に結合させる接触媒質が不可欠である。また2.項で述べたとおり、探触子の接触状態は測定値の信頼性および再現性に直接的に影響する。探触子を人的に操作する場合、測定者は接触角度や圧力等を微妙に調整することで、探触子と測定部との界面に接触媒質による均一な膜を形成させ音響的に最良の状態を得ている。治具によって探触子を固定する高温型連続モニタリングにおいては、測定ごとに探触子の調整を行うことはできないので、測定前

の接触状態を長時間にわたり維持するためには、接触媒質の性能が重要となる。

接触媒質にもとめられる性能は、測定部表面の粗さの程度によらず音響伝達損失が少なく、かつ感度が良好であること、また、測定全方位で流れ落ちることなく均一な塗布状態を保持すること、継続使用によっても物性が変化しないこと、測定材料に対して腐食劣化を生じさせないことなど多岐にわたる。もちろんここに述べた性能は高温部においても満足することが必要であり、各種実験および調査の結果、75%グリセリンペーストが最適であると判断し、以下のものを選定した。

- ・接触媒質：日合アセチレン㈱製 ソニコートHT

選定した接触媒質の使用温度範囲は70～400 °Cである（カタログデータ）。

(2) 基本性能の確認

① 高温型探触子の基本性能

選定した高温型探触子は開発後間もなかったこともあり、実環境における使用実績が乏しかったことからその基本性能を確認する必要があった。高温型探触子の基本性能の確認は、マイクロメータによる測定で肉厚が決定されているいくつかの鋼製の標準試験片に常温状態で高温型および常温型探触子をそれぞれ接触させた。そのときのB：エコーをオシロスコープで観測し、高温型および常温型それぞれのエコーのピーク高さを比較した。用いた標準試験片の肉厚は3.0，5.0，10.0および19.0mmを目標に仕上げたものである。オシロスコープおよび常温型探触子の仕様は以下のとおりである。

- ・オシロスコープ：YHP製 100 MHz帯域
- ・常温型探触子：ハリソニック社製 広帯域探触子 GR2004

つぎにプレートヒータにより高温に加熱した鋼製の標準試験片の肉厚を高温型探触子により測定し、その際の受信感度と肉厚表示値から高温における高温型探触子の基本性能を確認した。用いた標準試験片は、1.5，2.0，4.5，5.0および10.0mmを目標に仕上げたものである。測定は100，150 および200 °Cで行った。なお、超音波厚さ計の音速設定は100 °Cにおける設定値のまま150 および200 °Cで測定を行なった。高温における性能評価では、超音波厚さ計に内蔵された受信レベル表示によって確認した。

② 測定誤差の確認

水ジェット型連続モニタリングと同様に、高温型連続モニタリング装置におい

ても測定誤差をあらかじめ確認する必要がある。また、本法のように探触子が測定部に直接接触する場合は熱による影響についても把握しなければならない。測定誤差の確認方法は、マイクロメータによる計測によって肉厚が決定しているTi, Ti-5TaおよびZr製の標準試験片を常温または加熱した状態で、それぞれの温度において高温型探触子により肉厚を測定し、実際の肉厚と測定値とを比較することによった。超音波厚さ計のゼロ点および音速は、常温または高温での測定ごとにそれぞれ調整した。測定誤差の確認で用いた標準試験片は、いずれについても3.0 および7.0 mmを目標に仕上げてある。また、測定温度は常温と115 °Cとした。

③超音波厚さ計の分解能の確認

金属内に入射した超音波は、おもに結晶粒子や組織界面において散乱減衰することが知られる⁸⁾。また、材料固有の音速値は材料の温度上昇とともに低下していくが、この現象が示唆するように、高温部ではさらに散乱減衰が増大し、それとともにノイズも増加すると考えられる。連続モニタリングにおいては、微量な肉厚変化の検出が必要であるが、探触子が測定部に直接接触する高温型連続モニタリングでは、散乱減衰およびノイズの増加により超音波厚さ計の分解能の低下が懸念される。そのため、超音波厚さ計の分解能の確認を行った。

分解能の確認は、測定対象の温度変化とともにその音速が変化することを利用した。つまり、金属内における超音波の伝播速度は金属の音速により変化することから、温度変化とともに超音波の伝播速度も変化し、超音波厚さ計に戻る反射波の時間差も温度によって変化することになる。一方、超音波厚さ計が肉厚の算出に用いる音速設定値は固定した状態であるので、設定値と実際の音速値のずれによって超音波厚さ計に表示される測定値が変化する。このことにより、測定対象を実際に腐食させることなく、腐食による肉厚変化を模擬することが可能となる。

具体的な確認方法は、図3.4に示すようにプレートヒータ、温度制御装置、熱電対、探触子支持板などからなる試験装置を用い、プレートヒータによってTi-5Ta製平板の温度を上昇および下降させながら肉厚を連続測定した。Ti-5Ta製平板には図示する部位に熱電対挿入溝を加工し、そこで温度を測定した。探触子上部には、接触状態を一定とするために500 gの重りを加重のため乗せた。なお、Ti-5Ta製平板の温度上昇および下降は2回行い、同じ温度における測定値の再現性

についても確認した。

④高温部での安定性確認

高温型連続モニタリング装置を構成する各要素を組合せ、モックアップ設備の試験体設置部の温度において測定安定性を確認した。安定性は、測定対象の温度を約100 °C程度に加熱・保持した状態、すなわち経時的減肉がない状態において高温型探触子（H B 0 5 1 3），超音波厚さ計（T G - 7 A）および高温用接触媒質（ソニコートHT）によって肉厚測定を約300 時間行った。試験装置は、図3.4に示したものと同様のものを用いた。

(3) フィールド試験

高温型連続モニタリング装置を用いて、モックアップ設備の連続運転試験とともにフィールド試験を以下のように行った。フィールド試験においては、基本性能を確認した結果を踏まえ、測定ごとに超音波厚さ計の電源をONとして測定値を読み取った。

①初期型治具によるフィールド試験

測定部に探触子を接触させる高温型連続モニタリングでは、探触子の接触状態により測定値が変化するため、接触状態を一定に保持することが重要である。そこで、探触子の接触状態を保持するための治具を作成した。治具は図3.5に示す形状であり、探触子は探触子固定部により水平方向のずれが固定され、かつ探触子後部から荷重用板によって荷重されて配管へ密着するようになっている。配管と接触する遅延材の先端は、配管の曲率と合致するように曲面加工を施した。探触子の接触状態の良否は、探触子を接触し荷重をかけたときの測定値および受信感度により判断した。なお、探触子固定部の厚さは、基本性能の確認④項の結果を踏まえて、できる限り遅延材部からの放熱が容易となるよう薄くしてある。また、連続モニタリングによる測定前後には、モニタリングデータを検証する指標として常温型探触子による肉厚測定を行った。

②先端形状を変更した遅延材によるフィールド試験

上記①によるフィールド試験の結果から、測定中に探触子の接触状態がずれてしまうことが分かった。これを防止するために、遅延材の先端に配管の管軸方向および径方向の十字形に足を付けた形状とした。遅延材の形状を図3.6に示す。先端形状を変更した遅延材を初期型治具により測定部に固定してフィールド試験

を行った。

③改良型治具によるフィールド試験

上記②によるフィールド試験の結果、測定中の受信感度の低下、表示値の再現性不良等の問題が生じた。検討の結果、十字形の形状は探触子の配管への接触状態の拘束度が高い反面、実際の測定対象である配管が有する歪みなどに起因して探触子の接触面がわずかに浮き上がってしまうものと判断した。したがって、遅延材の先端形状は接触の拘束度に裕度がある曲面加工のままでし、治具によって接触状態を固定させるものとした。この方針にしたがい改良型治具を製作した。改良型治具は、遅延材胴部をクランピングスクリュー2本およびプランジャー1本による3点で支持し、ばね定数の明らかなばねを圧縮することで任意の垂直荷重が探触子後部からかけられるようにした。改良型治具の形状を図3.7.に示す。

4. 試験結果および考察

4.1. 水ジェット型連続モニタリング技術

(1) 測定誤差の確認

水ジェット型連続モニタリング装置の測定誤差の確認結果を表4.1に示す。超音波厚さ計の測定値は、 $1/1000\text{mm}$ の桁で表示させた。しかし、表示値の最終桁には変動が認められたため、変動の中央値を読み取りそれを四捨五入した値を測定値とした。これは、接触媒質である水の音響インピーダンスが、接触媒質としては比較的小小さく、また感度が劣る¹⁾ことに起因していると考えられる。よって、水を接触媒質として用いる限り、 $1/1000\text{mm}$ の桁で測定値を安定させることはできないと考えられる。なお、測定値と板厚との誤差は、材質および板厚によらず $\pm 0.01\text{mm}$ もしくは 0mm であった。測定値は $1/1000\text{mm}$ の桁を四捨五入して読み取ったものであることを考慮すると、水ジェット型連続モニタリング装置の測定誤差は $\pm 0.01\text{mm}$ 程度と見積もられる。上述した接触媒質としての水の性質を考慮すると、測定誤差をさらに小さくするためには、接触媒質についての検討が必要である。

(2) フィールド試験結果

水ジェット型連続モニタリングによるフィールド試験は1841時間となった。フィールド試験前後の試験体各部位の肉厚を常温型探触子により測定した結果を表4.2に、フィールド試験中の連続モニタリング結果を表4.3に示す。また、フィールド試験終了後の試験体内部の観察結果を写真4.1に示す。

写真4.1に示すように、ジャケットに覆われていない側の内面には、白色物質の付着が認められるのに対し、ジャケット側の内面には認められなかった。内面の状況は、白色物質が付着した側はざらついており、付着しなかった側は滑らかであった。白色物質は、モックアップ設備のこれまでの運転結果からTiの腐食生成物である TiO_2 と考えられる。以上のことから、ジャケットに覆われた部分はジャケット内にジェットとして供給された水により試験体の外表面から冷却され、その結果内部の腐食環境が緩和されたものといえる。常温型探触子による肉厚測定では、モニタリング部である 270° に減肉は認められず、その他の部位では平均 0.09mm ($0.42\text{mm}/y$) の減肉を示し、外観観察結果を支持している。なお、モニタリング結果はわずかに減肉傾向を示し、試験前に比べ 0.02mm の減肉となった。この値は、測定誤差として確認した値よりも大きなものである。ここで、連続モニタリング部はジャケッ

ト内部が狭隘であることから、常温型探触子による肉厚測定の際の探触子の接触状態が、他の部位と異なっていた可能性がある。また、試験体外表面からの冷却を考慮しても、試験体内面は高温の硝酸蒸気に常に曝されていることから、腐食がまったく生じていないとは考えにくい。したがって、ジャケットによって覆われた部位についても水ジェット型連続モニタリング装置が検出した程度の腐食は生じているものと推察される。

本試験では連続測定という観点から、水ジェットを連続供給したため、測定部の腐食環境を緩和する結果となった。したがって、水ジェット型連続モニタリング技術を実環境へ採用するには、測定方法についての検討が必要であろう。たとえば、測定を数時間ごとに行うものとするならば、そのつど水ジェットを供給することになり、かつ測定値を得るには10秒程度あれば十分であることから、測定部の腐食状態にほとんど影響を与えることなくモニタリングが可能と考えられる。この場合には、腐食環境への影響を排除する観点から、測定を行っていないときにはジャケット内が空となるよう水の排出口をジャケット下部に設定する必要がある。また、測定を行っていない状態では探触子は冷却されないことになるので、探触子の温度管理が必要である。ただし、いずれにしても本技術を連続モニタリング技術として適用するには、ジェットとして供給する水の受槽が必要であり、また、ステンレス鋼では溶接部の耐食性が母材部と異なる場合があるので受槽の取り付け方法に関する問題が残ると思われる。さらに、最終的には水が廃液となることから、その処分に関しての問題がある。

4.2. 高温型連続モニタリング技術

(1) 基本性能の確認結果

① 高温型探触子の基本性能の確認結果

厚さの異なる標準試験片に常温型および高温型探触子を接触させ、オシロスコープのブラウン管上に表示された波形から読み取ったB₁エコー高さを表4.4に示す。また、加熱した標準試験片の肉厚を高温型探触子により測定した結果を表4.5に示す。

高温型探触子のB₁エコーは、3～10mmの板厚において120%以上であり、19mmで100%を示した。この結果は、常温型探触子も同様であり、したがって高温

型探触子は常温型探触子と同等の性能を有しているものと判断できる。高温型探触子により高温部の肉厚を測定した結果、測定を行なったいずれの温度においても10mmの板厚の測定が可能であった。また、いずれの温度についても3回の測定での測定値の再現性は良好であった。ここで、測定温度の上昇とともに測定値に違いが生じているのは、測定温度の変化にかかわらず、超音波厚さ計の音速設定値を100 °Cにおける値としたことによるものである。なお、反射エコーの受信感度はすべて良好であった。

②測定誤差の確認結果

常温および115 °Cにおける高温型連続モニタリング装置の測定誤差の確認結果を表4.6.に示す。高温型連続モニタリングでは、0.001 mmの桁まで安定した値が得られたため、表示値を測定値として読み取った。

測定誤差は、板厚3mmのTi製試験片の常温において最大であり、-0.01mmである。それ以外は、試験片の材質および測定温度によらず1/1000mmオーダの誤差である。なお、測定誤差は試験片の板厚が7mmの場合よりも3mmの場合において大きい傾向が認められた。この原因として、探触子に内蔵された振動子近傍の近距離音場における複雑な音波の干渉の影響が推察される⁸⁾。

以上の結果から、薄板において誤差が大きかったことを含めても、この高温型連続モニタリング装置の測定誤差は±0.01mm以下と見積もることができる。

③超音波厚さ計の分解能の確認結果

高温型連続モニタリングにおける超音波厚さ計の分解能の確認の結果、Ti-5Ta製平板の温度を上昇させても、値は常温での測定値(4.011 mm)のまま変化しなかった。そこで、超音波厚さ計の電源を一度OFFとした後、再度電源をONにすると測定値は4.051 mmへ変化した。その状態からプレートヒータによる加熱を停止し、温度を下降させた場合にも、測定値は高温における値のまま変化せず、常温まで下降した時点で超音波厚さ計の電源をOFF→ONとすると、常温での測定値を示した。この結果は、繰り返し行った2回目の確認においても同様であった。確認結果を表4.7.および図4.1.として示す。この結果から、電源を連続してONとした場合には、本試験で用いた超音波厚さ計は微量な肉厚変化を検出できないものと判断した。そこで、電源をOFF→ONとした場合に測定値が変化したことを踏まえて、同じ試験装置により測定ごとに電源をONとした場合の測

定値の変化を観察した。なお、超音波厚さ計の駆動には商用電源を用いていることから、試験前に調整したゼロ点などは厚さ計内でバックアップされるので、電源のONおよびOFFによる測定値への影響はない。

測定ごとに超音波厚さ計の電源をONとした場合には、表4.8.および図4.2.に示すとおり、測定値はTi-5Ta製平板の温度上昇または下降にともない変化した。なお、測定値は同温度でも加熱過程と冷却過程とで異なり、冷却過程のほうが低い値を示し、いわゆるヒステリシスループ状となった。繰り返し2回行った温度の上昇および下降における測定値の再現性は良好であり、すべて±0.005 mm以内の誤差であった。なお、測定値は上述したようにヒステリシスループ状であることから、その原因として探触子内部またはプレートヒータにおける電磁気学的な現象の影響が考えられる。ただし、実際のモニタリングでは機器が定常運転中であれば探触子近傍での雰囲気環境はほぼ一定であることから、とくに問題はないものと考える。

高温型連続モニタリングにおいて超音波厚さ計は微量な肉厚変化を検出できないことが分かった。これは、ノイズによる誤測定を防止するために本超音波厚さ計に組み込まれている判定回路が、反射パルスの時間間隔のわずかな変化をノイズとして判断したためと考えられる。パルス解析部では、反射パルスの時間差を計測する指標となるクロックパルスを発振しており、これに同調して電気的なゲートが一定の間隔で開く。ゲートが開いているときに入射した反射パルスの時間差から肉厚を算出するが、上記判定回路は、ゲートごとに算出した肉厚どうしを比較判別し、後続のゲートで算出された値が否と判定された場合には先行のゲートで算出した値をホールドするものである。一方、測定ごとに電源をONとした場合には、その瞬間に開いた1回目のゲートに入射した反射パルスから肉厚を算出するので、温度ごとに測定値が変化すると考えられる。なお、高温型連続モニタリングを実施するにあたっては、ノイズによる誤測定を防止する観点から判定回路は必要と考えられるので、測定ごとに超音波厚さ計の電源をONとすることとした。

④高温での安定性確認結果

高温における測定値の長時間安定性の確認結果を表4.9.および図4.3.に示す。測定値は、試験開始初期には4.048 mmを示し、試験時間の増加にともなってしだ

いに増加傾向となり、335時間後には4.054mmとなった。この間、試験片の温度はほぼ105°Cで安定していた。測定値の初期と終了時点での誤差は+0.006mmであり、仕様目標とする±0.01mm以下ではあるが、本結果は約300時間程度の測定結果であり、実際の連続モニタリングでは数千時間単位での測定となる。また、探触子の接触状態は変化していないものであることから、本結果で得られた安定性は満足できるものではない。上記③項の結果において、温度上昇にともない測定値が増加すること、および探触子の支持板によって遮断材のほとんどが覆われた状態であることに着目すると、測定値が増加した原因として、遮断材の排熱不良によって遮断材と探触子本体の接触面の温度がわずかに変化したことが考えられる。したがって、探触子の保持用治具を製作する場合には、遮断材部分はできる限り外気に曝されるようにする必要があるといえる。

(2) フィールド試験結果

① 初期型治具によるフィールド試験結果

初期型治具によるフィールド試験を行った結果、24~48時間程度で受信感度が低下し、測定が不可能となった。この事象は、探触子の接触状態を調整することにより受信感度は回復し、測定が可能となったことから、時間の経過とともに探触子の接触状態に変化が生じたためと判断した。接触面に塗付した接触媒質はチクソトロピー性流体であり、探触子をずらす力を加えたときの抵抗が小さいという特長を有している。このチクソトロピー性を考慮すると、探触子にずれ方向の力が加えられたとき探触子は容易に滑り易い状態であると考えられる。つまり、本結果における探触子の接触状態の変化という現象から、治具によって加えられた荷重が探触子に垂直に負荷されていなかったことが示唆される。そこで、探触子に加わる荷重が垂直から若干ずれたとしても、荷重を増加させることによって探触子の接触面を物理的に拘束することとして試験を継続した。荷重を増加させた場合においても、受信感度の低下や測定値の不安定等が認められたため、そのつど探触子を左右に微動させて測定を行ったが、約1500時間程度使用した時点で探触子が破損した。破損状況を調査した結果、破損は振動子自体ではなく、振動子保護板と振動子の接着部に生じたことが判明した。探触子の直接的な破損原因是明確とならなかったが、荷重の増加が破損を誘起した一因であると推察される。

探触子の破損に至るまでに取得したデータはかなりばらつきが大きかったこと

から、破損した探触子と同型の探触子を用い新規データの取得を行うこととし、フィールド試験を継続した。継続にあたっては、荷重が過負荷とならないように注意した。しかし、測定開始後数十時間において受信感度が低下し、測定が不可能となる現象に変化は認められなかった。なお、やむを得ず測定が不可能となつた時点（48時間以降）から、治具を取り外して探触子を測定部に乗せただけの状態で測定を継続した。この状態において、モニタリング開始からモックアップ設備の中間検査のための運転停止までの744時間の測定が可能であった。その結果を表4.10. および図4.4として示す。

測定部に探触子を乗せただけの状態では、測定ごとに値は表示され、また受信感度の低下も認められなかった。測定値の経時変化は、若干変動が認められるものの、その回帰関数は $y = 0.99x$ と優れた直線性を示した。また、回帰直線の傾きは -7.221×10^{-5} であり、この値からもとめられる減肉量は 0.054 mm (0.64mm/y) である。測定により得られた初期値は 3.922 mm、最終値は 3.871 mm であり、減肉量は 0.051 mm (0.60mm/y) となり、回帰直線からもとめた結果とよく合致している。フィールド試験前後に連続モニタリング部の肉厚を常温型探触子により測定した値は、試験前 3.918 mm および試験後 3.875 mm であり、減肉量は 0.043 mm (0.51mm/y) となる。つまり常温型探触子による測定結果から算出した減肉量は、連続モニタリングデータより若干小さい結果となった。連続モニタリングデータおよび常温型探触子による測定結果のどちらが、より正確な減肉を反映したものであるかは、現時点では判断はできない。

②先端形状を変更した遅延材によるフィールド試験結果

上記フィールド試験結果から、探触子にはあまり荷重をかける必要がないことが判明したが、いかなる方位の測定部に対しても、探触子を一定の状態で安定して接触させるためには、探触子の垂直方向に若干の荷重を加えることは不可欠である。ただし、探触子に荷重を加えた場合、探触子のずれによって測定が不可能となるおそれがある。そこで、探触子に荷重を加えても探触子の接触状態がずれにくく構造を遅延材先端に付加してフィールド試験を行った。具体的には、遅延材の先端に配管の長手方向および径方向の十字形に足を付ける形状に加工することとずれの防止を図った。先端の形状を変更した遅延材によるフィールド試験結果を表4.11. および図4.5として示す。

本フィールド試験においても、試験の初期において超音波厚さ計の受信感度が低下するとともに測定値がばらつき、または測定不能となつたため、初期状態より若干荷重を増加した。その直後には測定値が得られたが、やはり受信感度はしだいに低下し、最終的に荷重を増加させても感度は回復せず、測定が不可能となつた。測定時間は、測定不能となるまでの243時間であり、この期間において測定値にはほとんど変化は認められなかつた。モックアップ設備の運転が優先されるためフィールド試験終了時点における常温の肉厚測定が行えず、モニタリング結果を検証することはできない。しかし、水ジェット型連続モニタリングのフィールド試験および上記①のフィールド試験の各結果を考慮すれば、本試験においても試験体には確實に腐食減肉が生じていると考えられる。

モニタリング結果と実際の減肉状況との相関にかかわらず、測定自体は受信感度の低下による測定不能によって試験を終了した事実から、探触子の接触状態が不良であったものと考えられる。上述したように荷重を加えると、受信感度の回復が認められたことから、探触子の接触面が測定部からわずかに浮き上がっていたものと考えられる。この原因として、遅延材先端に付加した足のうち、配管の径方向を拘束するものの曲率と配管の曲率が合致していない状態が考えられる。つまり、遅延材先端は配管がほぼ真円であるとして加工しているが、実際の配管は製作時に若干の歪みを生じており、それが曲率の違いになつたものと推察される。実際のモニタリング対象となる部位についても、歪みをもつてゐる可能性があり、遅延材の先端形状によって探触子の接触状態を拘束する方法では良好な接触状態を維持することは難しいと考えられる。

③改良型治具によるフィールド試験結果

本フィールド試験は、①の場合と同様に曲面加工を施した遅延材を用い、探触子支持の安定性および荷重方法の改善を図った改良型治具により探触子を保持して行った。測定時間は、モニタリング開始からモックアップ設備の中間検査による運転停止までの期間の936時間となつた。改良型治具によるフィールド試験結果を表4.12. および図4.6. として示す。

フィールド試験中は、モニタリング時間で172時間後、386時間後、644時間後および714時間後の計4回、モックアップ設備の運転停止によるモニタリング中断があつた。測定中は、若干の受信感度の変動は認められたものの、おおむね

良好であって試験期間中に測定不能となることはなかった。また、フィールド試験終了後に確認した結果、探触子に損傷および劣化の兆候は認められなかった。なお試験前、172 時間後、714 時間後および試験後には、常温型探触子により肉厚測定を行っている。図4.6.から、モックアップ設備の運転停止ごとの5区間に分けて各測定値をみると、期間ⅡおよびⅢの初期値は、あきらかに異常値となつておらず、測定部温度の低下および上昇の影響を受ける場合があることが分かる。異常値を除くと各期間ごとの測定値は緩やかな減少傾向を示したが、測定値は測定期間が変わると0.02mm程度変動し、連続的な経時変化ではない。回帰分析の結果、各期間ごとの回帰関数は期間Ⅰから順に、 $y \approx 0.97x$, $y \approx 0.95x$, $y = 1.x$, $y \approx 0.23x$ および $y \approx 1.x$ であり、期間Ⅳ以外は優れた直線性を示した。また、各回帰直線の傾きは期間Ⅰから順に、 -9.915×10^{-5} , -6.264×10^{-5} , -3.315×10^{-5} , -2.168×10^{-5} および -6.688×10^{-5} である。これに基づき算出される減肉量は順に、0.017 mm (0.87mm/y), 0.013 mm (0.55mm/y), 0.009 mm (0.29mm/y), 0.002 mm (0.19mm/y) および 0.015 mm (0.59mm/y) となり、期間ごとの減肉量はかなり異なる結果となった。常温型探触子による肉厚測定結果から算出される期間Ⅰおよび期間Ⅴの腐食速度は0.013 mm (0.66mm/y) および 0.011 mm (0.43mm/y) であり、モニタリング結果と比べると20%程度の違いがある。モニタリング結果と常温型探触子による測定結果のどちらがより正確な減肉を反映しているかは不明である。しかし、いずれの結果についても当該腐食環境から予想される腐食速度と大きく乖離したものではないと考える。また、連続モニタリング結果および常温での測定結果ともに、期間によって腐食速度が異なっていることから、たとえ運転条件が同一、かつ同部位であっても実際の腐食速度は一定ではないことが分かる。このことは機器の運転中にどのような腐食が生じるか不明であることを示唆しており、連続モニタリング技術の必要性が再認識される。

上述したように、モニタリング値の経時変化は連続的なものではなく、値の再現性が不良であることが示された。原因のひとつとして、測定部の温度変化に起因する音速の変化が考えられる。しかし、超音波厚さ計の分解能の確認結果において、Tiの温度が90～100 °Cへ10°C変化した場合の測定値の変化は0.005 mm程度であり（表4.8.参照），本結果を説明できない。したがって、再現性不良の原因

はここまでにいくどか触れてきたように、探触子の接触状態にあるものと考えられる。接触状態に影響を及ぼす因子として、接触角度、接触圧力、接触媒質の膜厚等があげられる。実際には受信した波形を観測していないので、接触状態を変化させた原因について断定はできないが、たとえばモックアップ設備の停止および運転による温度変化によって、治具の固定部に熱膨張による歪みが生じ、接触角度または圧力が変化した、もしくは温度とともに接触媒質の粘性が変化し、接触媒質の膜厚が変化した、などが推察される。したがって、連続モニタリング技術として転用する場合には、さらに長時間にわたり探触子の接触状態を安定して保持できるよう、治具の改良が必要である。

なお、期間ⅡおよびⅢで認められた異常値は、探触子の接触状態が前期間から変化している過渡期において測定されたものと考えられ、また異常値以降の測定値は優れた直線性を示していることから、過渡期を経て安定した接触状態に移行した状態で測定されたものと推定される。したがって、接触状態が安定した状態で測定されたモニタリング値は、絶対値が異なる他の期間との比較はできないものの、その期間に算出される減肉量についての比較は可能であると考えられる。

5. 今後の検討課題

水ジェット型および高温型連続モニタリング技術について行った各評価結果を踏まえ、両技術を比較し、連続モニタリング技術としての適用性を判断するとともに、今後の検討課題を明確にする。水ジェット型および高温型連続モニタリング技術の比較結果を表5.1.として示す。

(1) 水ジェット型連続モニタリング技術

水ジェット型連続モニタリング技術の測定誤差は $\pm 0.01\text{mm}$ 程度と見積もられ、測定部温度が約100 °C程度となる小型蒸発缶の気相部において約1800時間の測定が可能であった。また、測定部に対する探触子の位置が固定されるため、探触子の接触状態の安定性が優れるという特長を有している。しかし、本技術は水ジェットを連続的に供給した場合、測定部の外面から冷却されることによって腐食環境が緩和されてしまう問題を有している。測定方法の変更によりこの問題を解決したとしても、水の受槽の取り付け方法および最終的に廃液となる水の処分方法に関する問題などがある。

(2) 高温型連続モニタリング技術

高温型連続モニタリング技術は小型蒸発缶の気相部において、 $\pm 0.01\text{mm}$ 以下の測定誤差により約900 時間の測定が可能であった。また、取得したデータは直線性に優れたものであった。測定に際しては、測定対象の形状に応じた探触子保持用治具を準備することで測定部の腐食環境に影響を及ぼすことなく、さまざまな部位の測定が可能であるという特長がある。これらのことから、高温型連続モニタリング技術は、実環境への適用性が高い技術であると判断できる。よって、本技術を連続モニタリング技術として採用するものとする。

(3) 検討課題

今後、高温型連続モニタリング技術の実用化を図るためにには、以下の事項について検討する必要がある。

① 探触子の接触方法

本評価において、測定部での大きな温度変化は測定値の再現性に影響を及ぼす場合があることが確認された。これは、温度変化により探触子の接触状態に変化が生じたためと考えられる。そこで、探触子の接触状態を長時間にわたり安定させるため、治具の改良が必要である。

②探触子の寿命評価

連続モニタリング装置の寿命律速は探触子であると考えられる。したがって、高温環境での連続測定をさらに継続して行い、探触子の経時的劣化状況を評価する必要がある。なお、探触子の寿命は探触子に加わる荷重の影響を受けることが推察される。そのため、荷重と探触子の寿命との関連性の他、荷重と測定値の信頼性との関係について明確にする必要がある。

③測定器の機能向上

本評価結果以上に測定誤差を小さくし、連続モニタリングによるデータの精度を向上させるには、測定モード、クロックパルス、ゲートなどの設定を検討し、測定器の機能向上を図ることが重要な事項である。

④モニタリングデータの検証方法

減肉量について定量的なデータが取得できる機構を試験体に組み込み、それを用いたフィールド試験により、モニタリングデータを検証する必要がある。

⑤耐放性の確認

本技術は、放射線環境下での使用を目的としていることから、測定系の耐放性を確認する必要がある。

6.まとめ

機器保全の観点から、運転中の機器に生じる変化をリアルタイムに把握することのメリットは大きく、それを実現する連続モニタリング技術は再処理工程において必要不可欠なものと考えられる。そこで、主要な再処理機器の構造材料であるステンレス鋼およびバルブメタルの微量な減肉による肉厚変化を、機器の運転中に測定する連続モニタリング技術を開発する一環として、超音波パルス法を測定原理とする水ジェット型および高温型連続モニタリング技術について各種試験を行い、連続モニタリング技術としての適用性を評価した。

- (1) 水ジェット型連続モニタリング技術の測定誤差は $\pm 0.01\text{mm}$ 程度であり、約1800時間の測定が可能であった。ただし、水ジェットの連続供給に起因した測定部の腐食環境の緩和や、実環境への採用を踏まえた場合、水の受槽の取り付け方法や廃液発生を伴うといった問題があり、連続モニタリング技術として適用するにはいまだ解決すべき課題が多く残されている。
- (2) 高温型連続モニタリング技術は $\pm 0.01\text{mm}$ 以下の測定誤差で、約900時間の測定が可能であった。また、取得したデータは優れた直線性を示し、微量な減肉を高精度に測定できると考えられる。
- (3) 高温型連続モニタリング技術は、測定部の形状に応じた探触子保持用治具を準備することで、測定部の腐食環境に影響を与えることなく、さまざまな部位の測定ができる。
- (4) 高温型連続モニタリング技術において、機器の停止および運転にともなう測定部の大きな温度変化は探触子の接触状態を変化させ、よって測定値の再現性が不良となる場合がある。

以上の結果から、高温型連続モニタリング技術が実環境への適用性が高い技術であると判断できる。したがって、高温型連続モニタリング技術を連続モニタリング技術として採用することとする。今後、実用化する際には探触子の接触状態の長期安定化を図るために、探触子保持用治具を改良するとともに、測定器の機能向上が重要な事項となる。さらに、モニタリングデータの検証、探触子の寿命評価、耐放性などモニタリングシステムに求められる機能・性能を明確にし、連続モニタリングシステムの構築を図る必要がある。

7. 参考文献

1) 武田誠一郎 他：「再処理分野における材料技術開発の現状」

動燃技報 No.67 1988年9月

2) 竹内 正行 他：「ステンレス鋼の腐食に与えるルテニウムの影響」など

PNC ZN8410 94-291 1994年8月

3) M.KOZEKI 他：「新型酸回収蒸発缶 (Ti-5Ta製) 基本設計」

PNC ZN6410 87-011 1987年12月

4) 社団法人日本非破壊検査協会：「非破壊検査技術シリーズ 超音波探傷Ⅲ 1989」

1990年 社団法人日本非破壊検査協会 発行

5) 根本 健志 他：「小型酸回収蒸発缶による耐久試験 (VII)

—35,000時間までの運転試験結果—」など

PNC ZN8410 95-322 1995年10月

6) 中村 康治 他：「新型プルトニウム溶液蒸発缶材料選定の調査・研究」など

PNC ZJ116 85-03 1985年10月

7) 林 傳三：「超音波探傷用接触媒質に必要な条件」

溶接技術 1987年8月号 P104～P109

8) 日本学術振興会製鋼第19委員会編：「超音波探傷法 改訂新版」

昭和49年7月 日刊工業新聞社発行

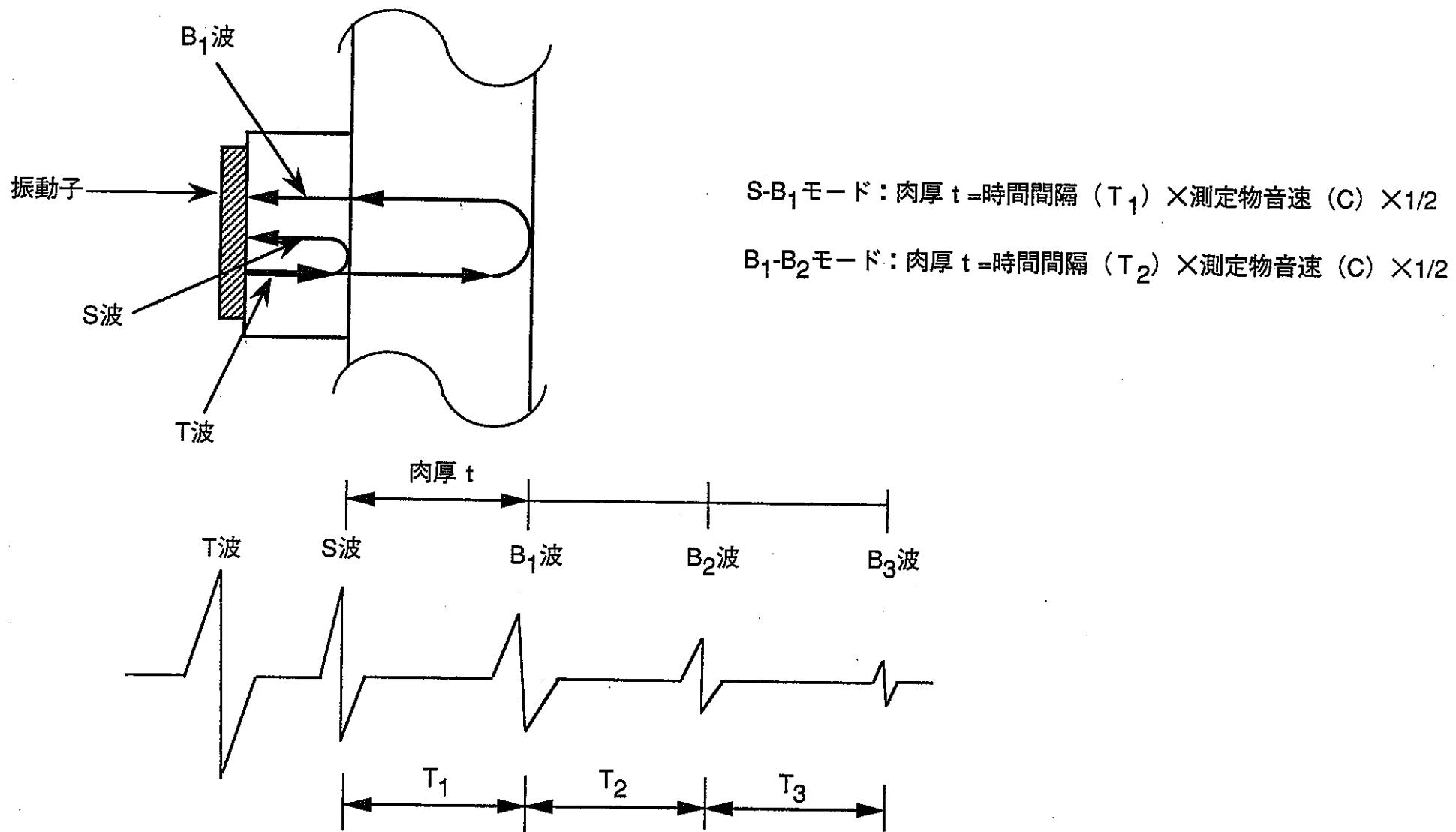
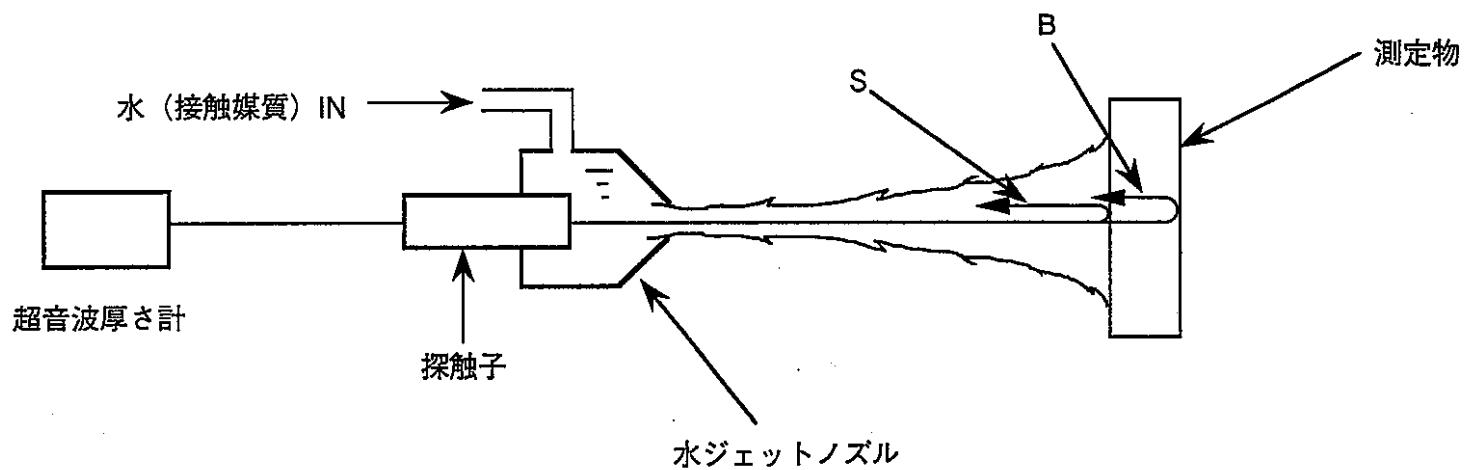
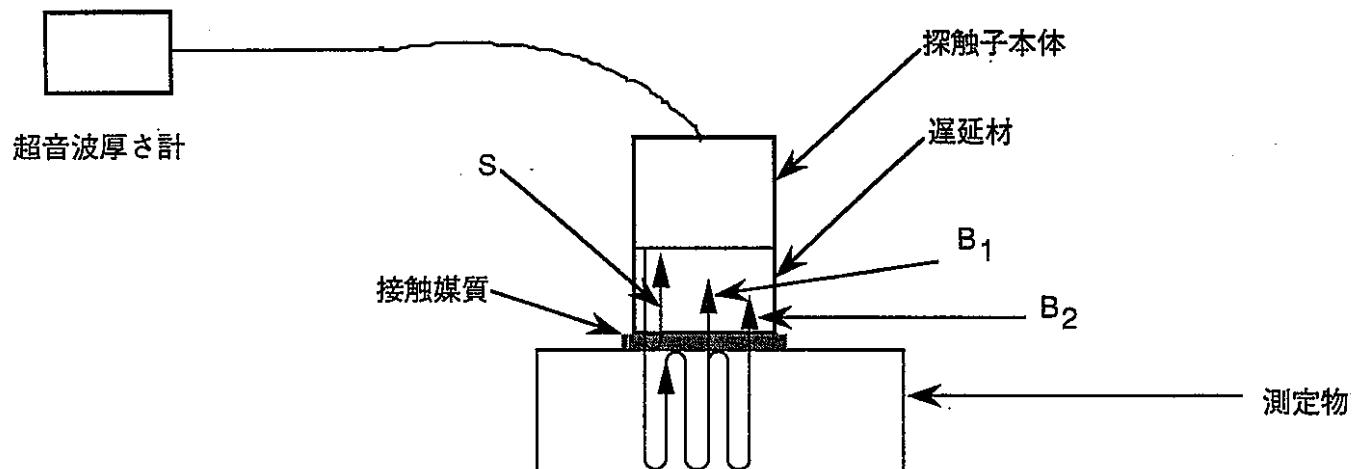


図2.1. 超音波肉厚測定の原理

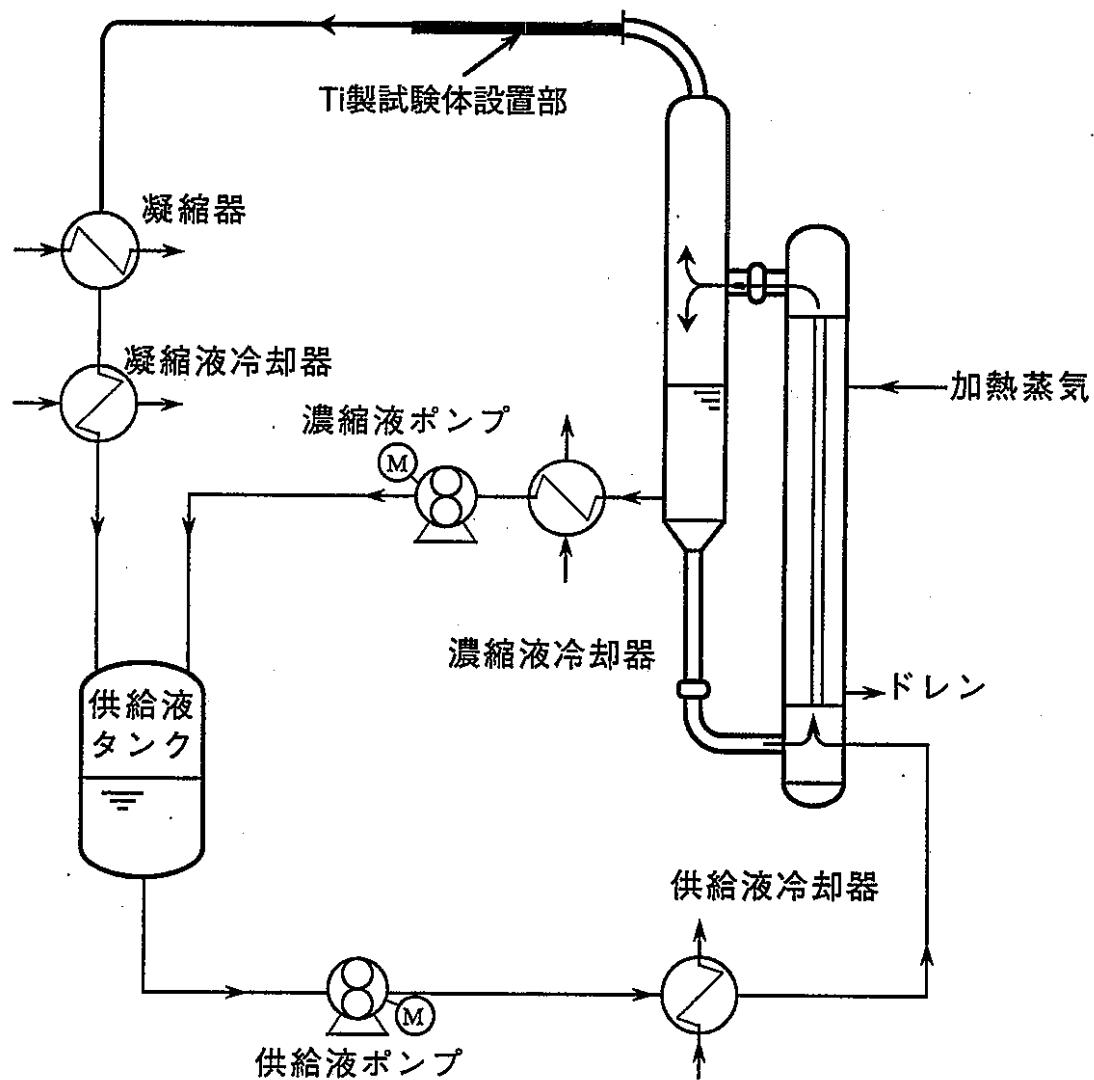


(a) 水ジェット型連続モニタリングの原理



(b) 高温型連続モニタリングの原理

図2.2. 連続モニタリング技術の測定概要



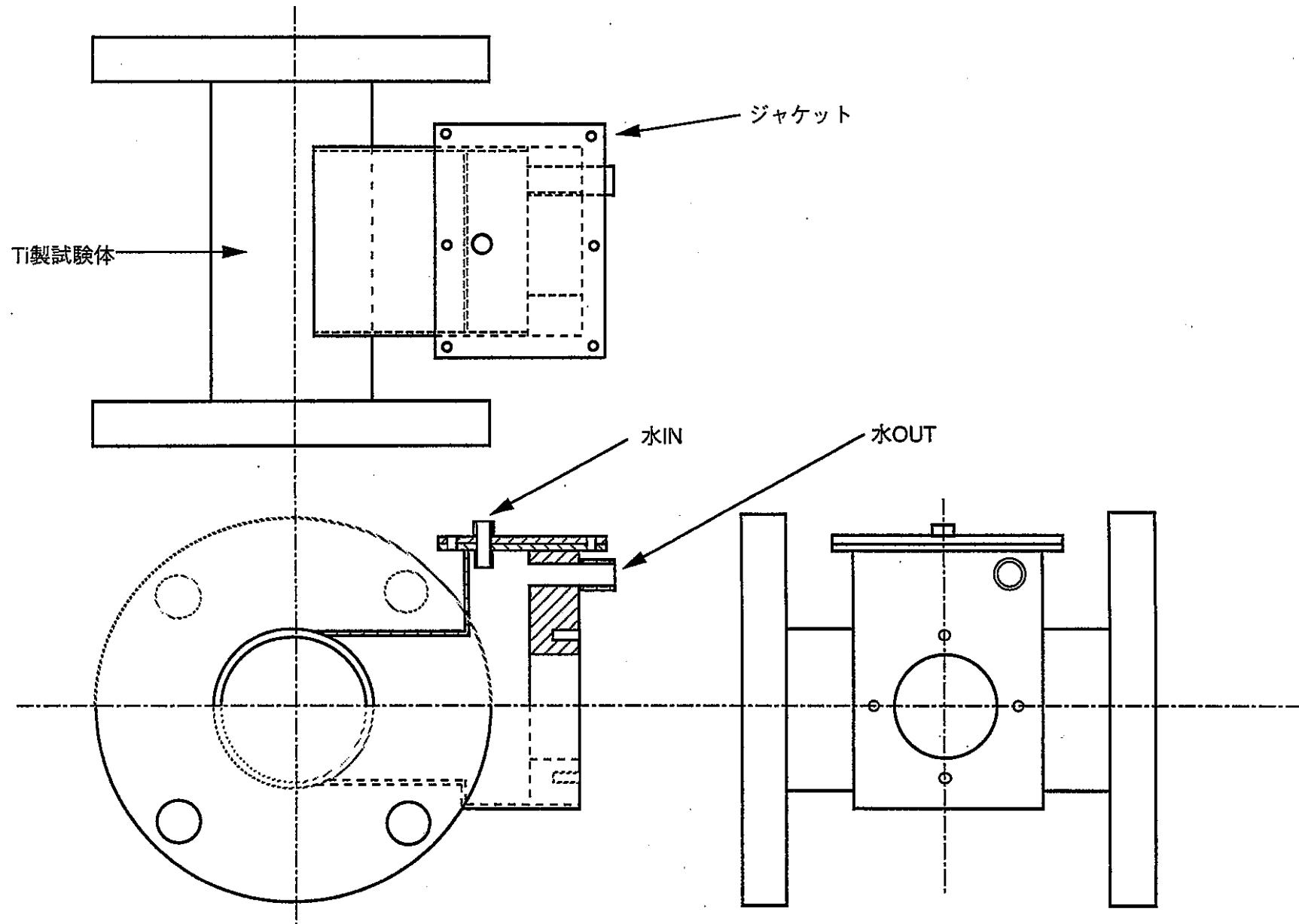


図3.2. 水ジェット型連続モニタリング用試験体形状

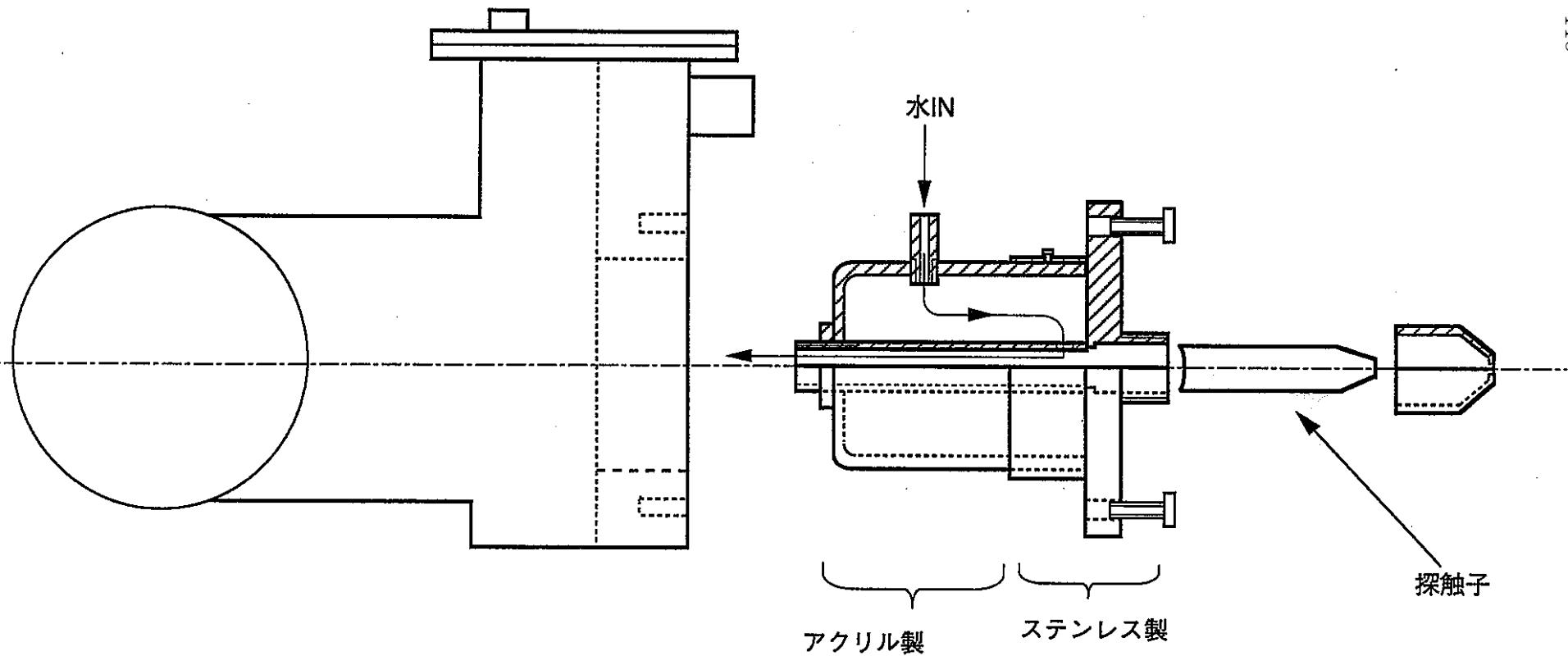


図3.3. 水ジェットノズル部の取り付け概要

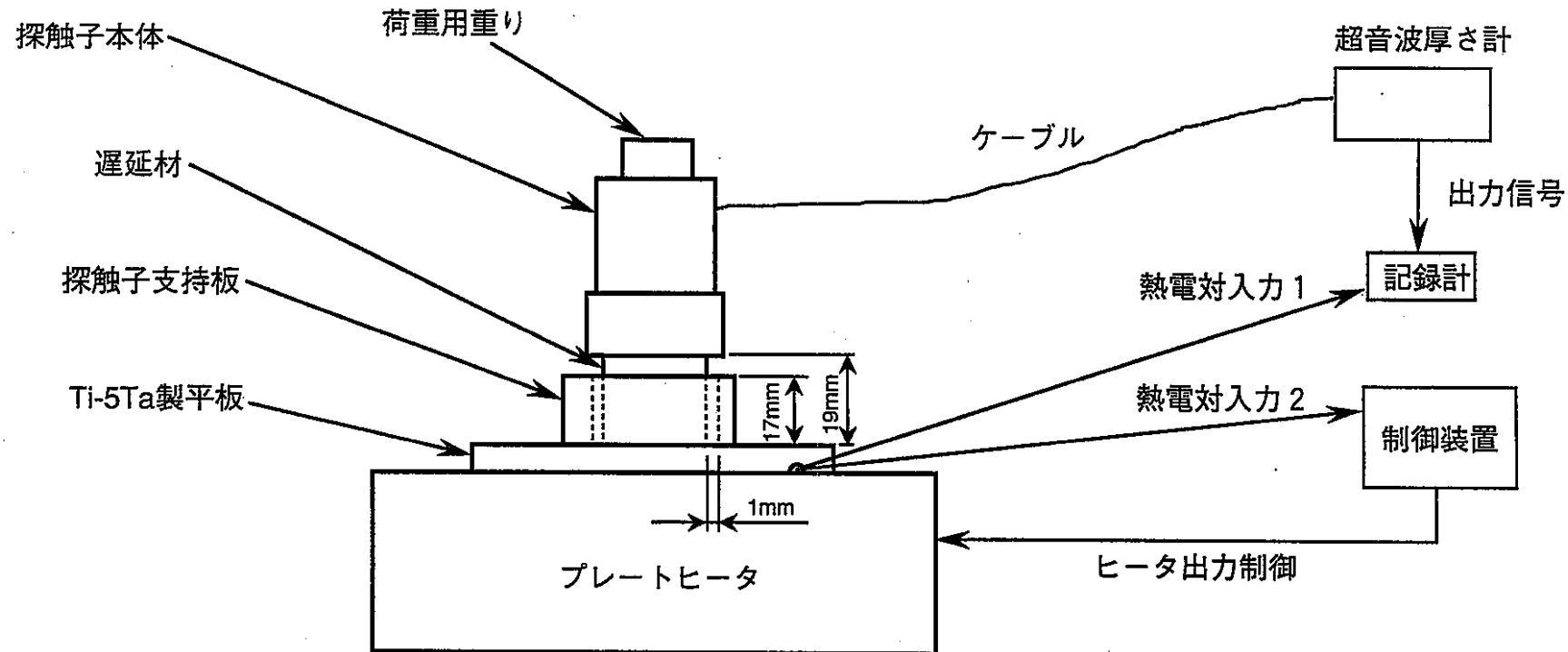


図3.4. 超音波厚さ計の分解能の確認方法

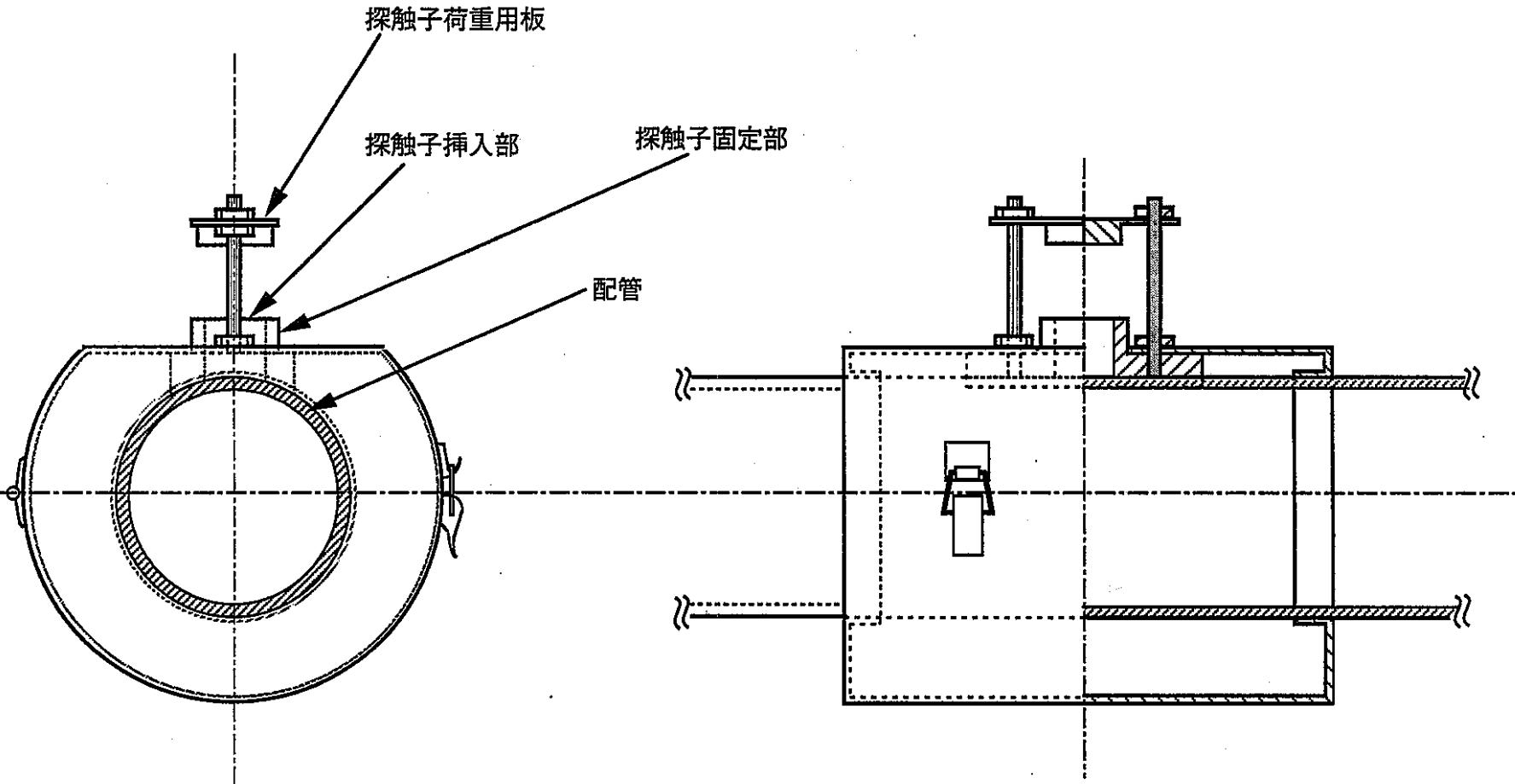


図3.5. 初期型治具の形状

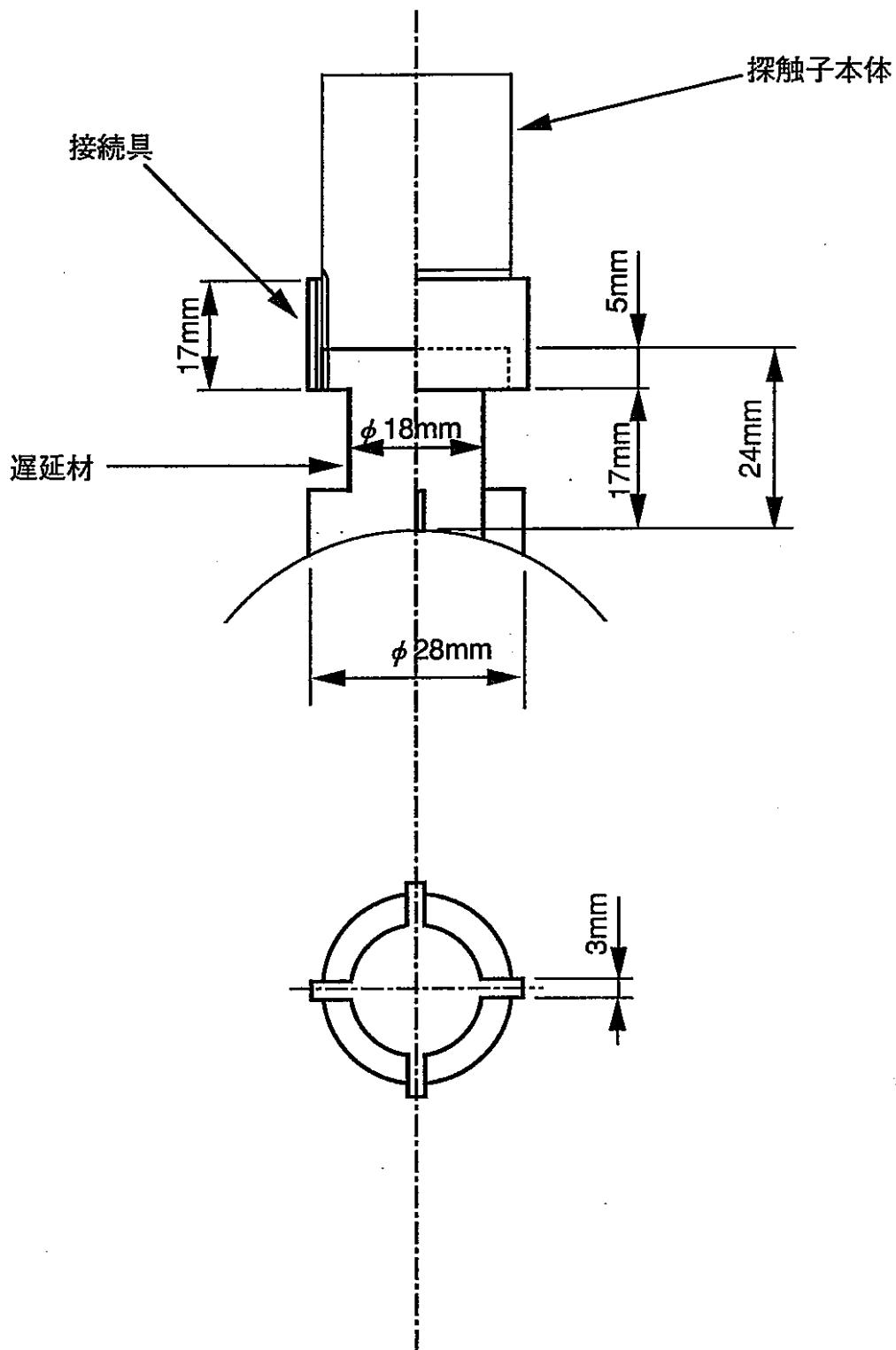


図3.6. 先端形状を変更した遅延材の形状

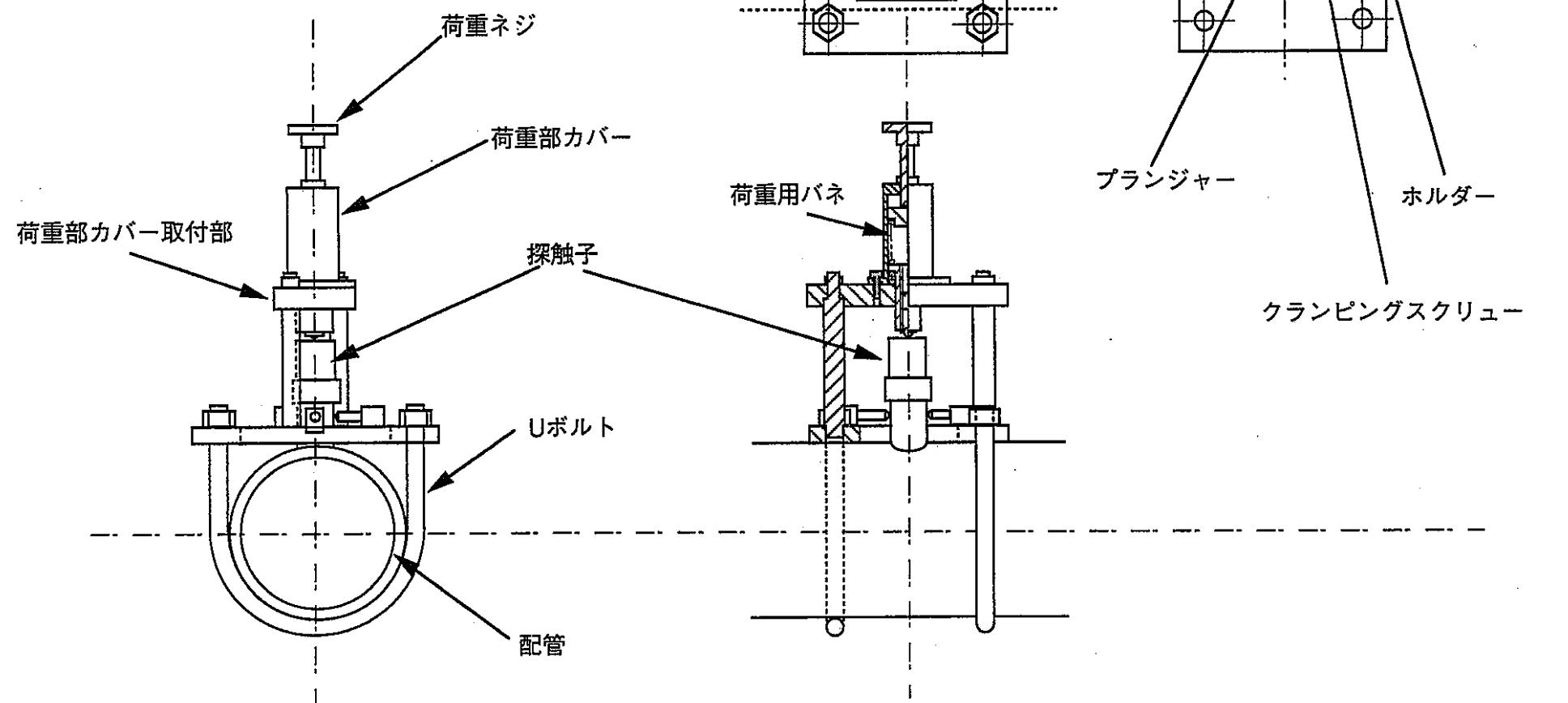


図3.7. 改良型治具の形状

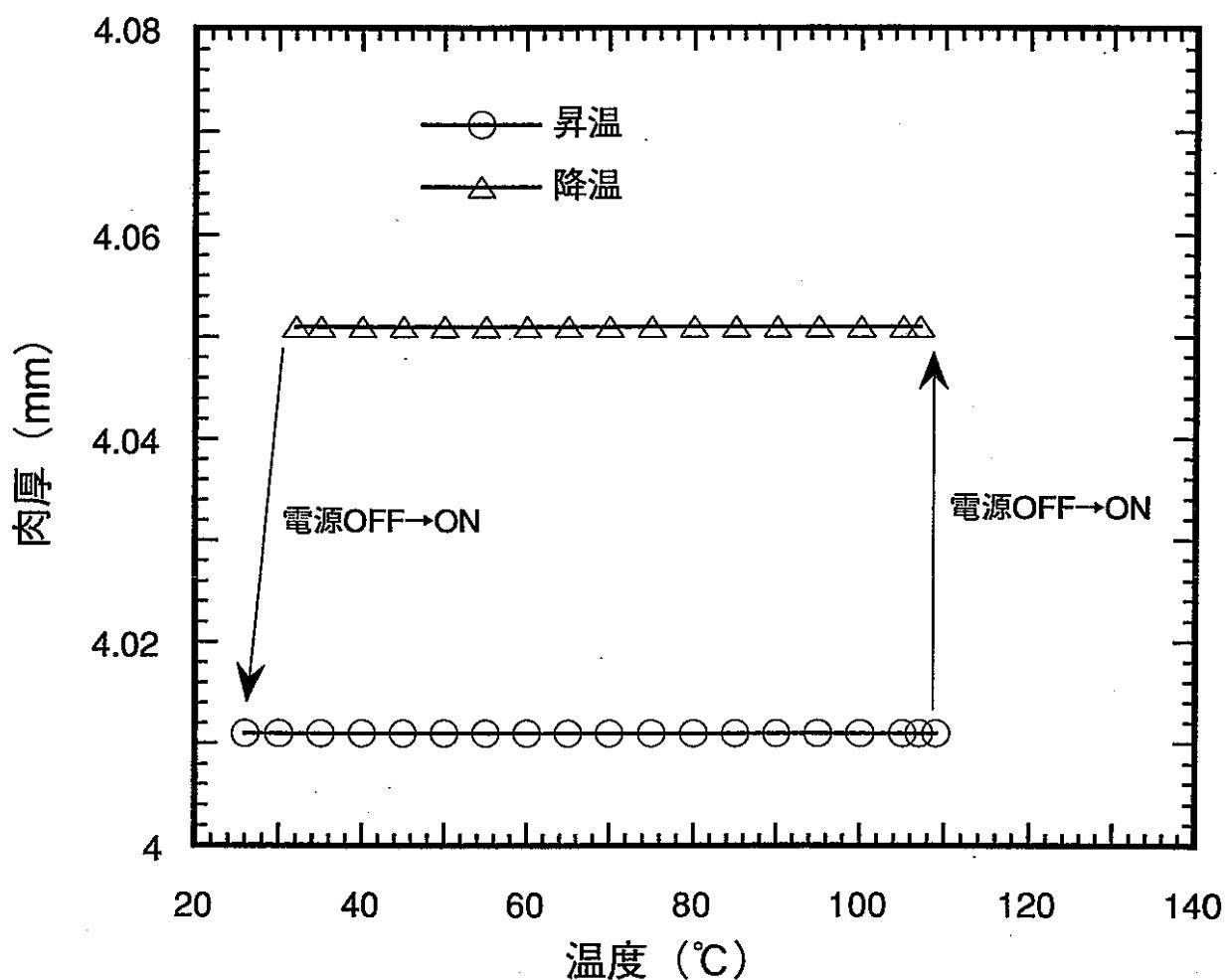


図4.1. 超音波厚さ計の分解能の確認結果（常時電源ON）

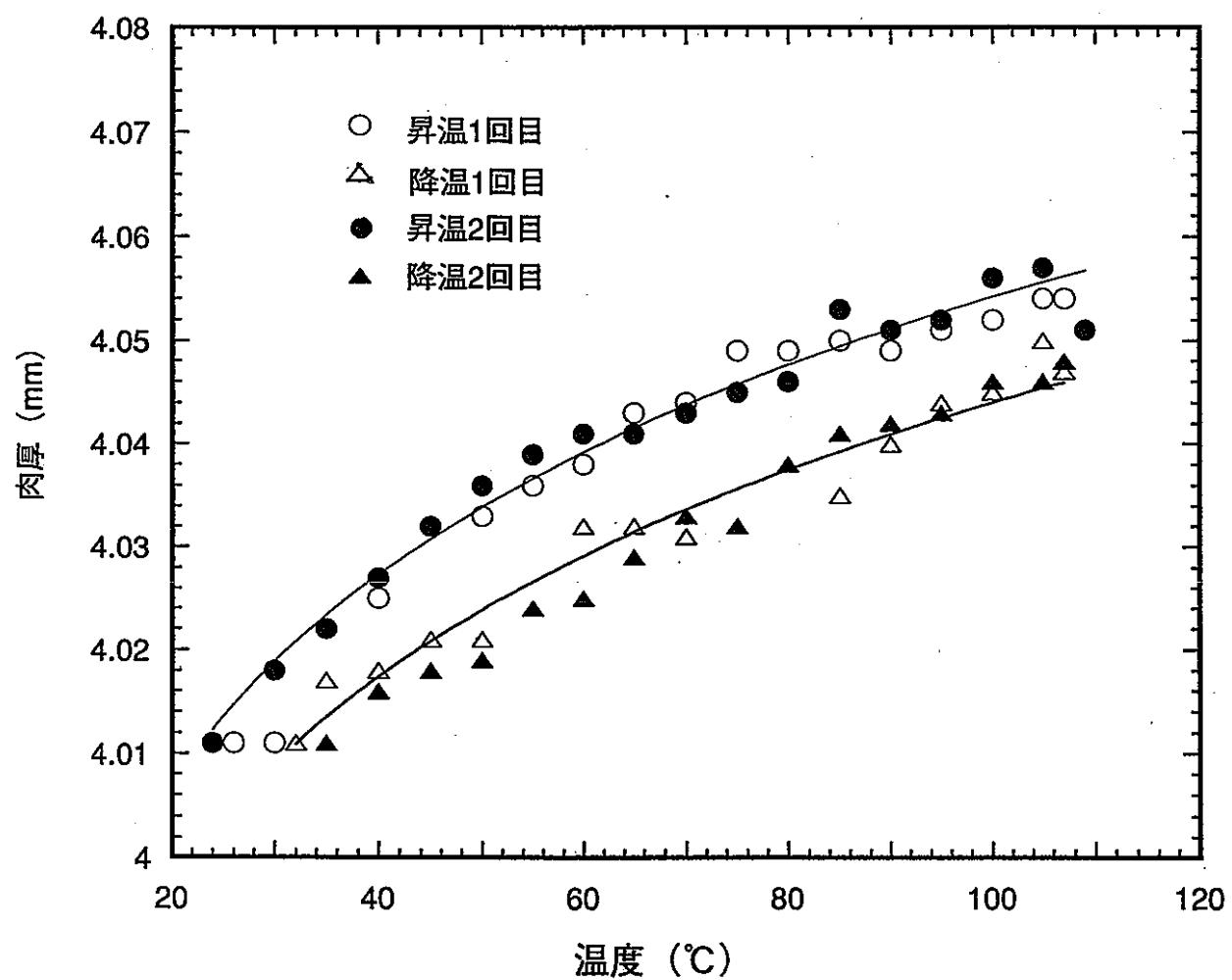


図4.2. 超音波厚さ計の分解能の確認結果（測定ごとに電源ON）

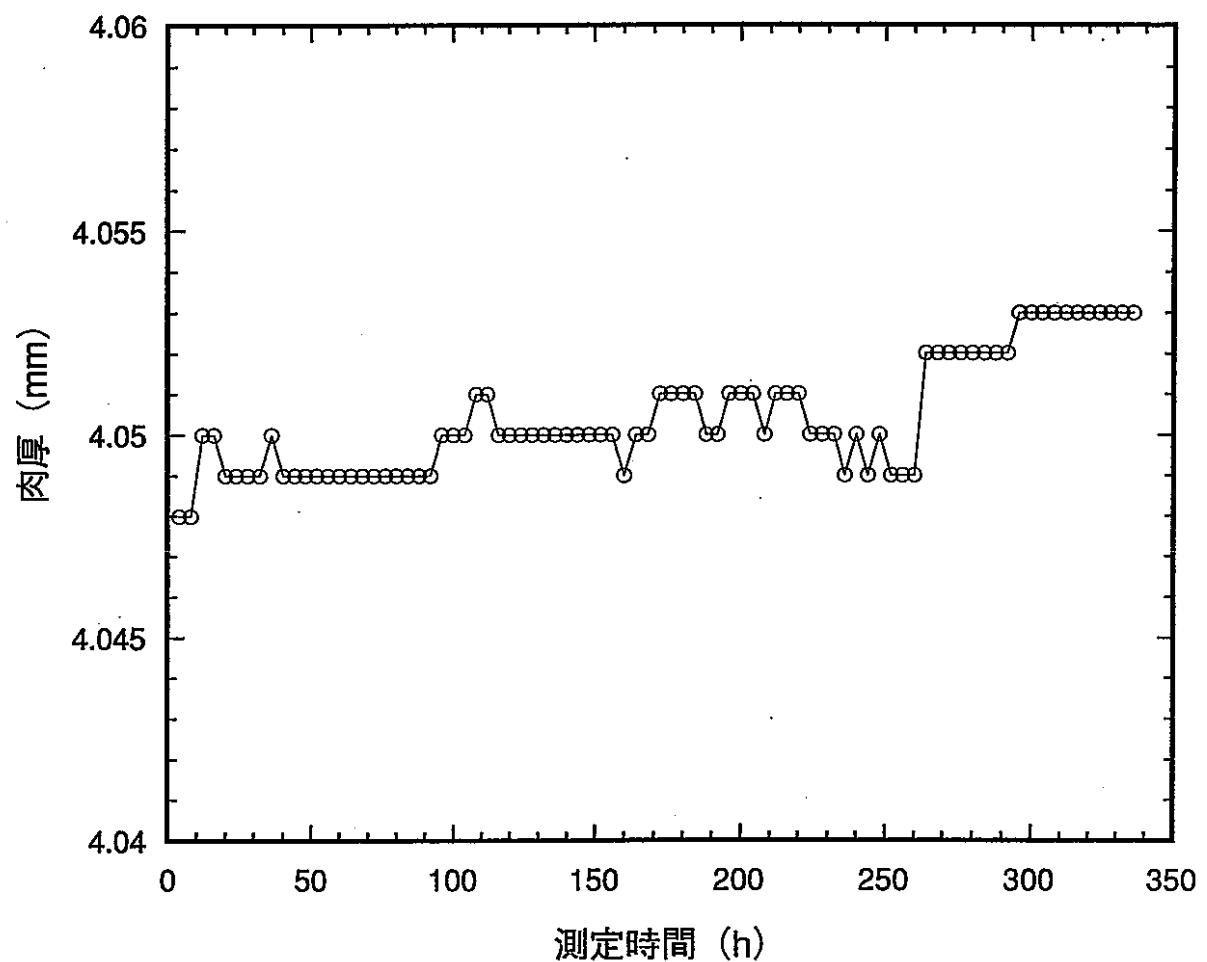


図4.3. 高温における測定値の安定性確認結果

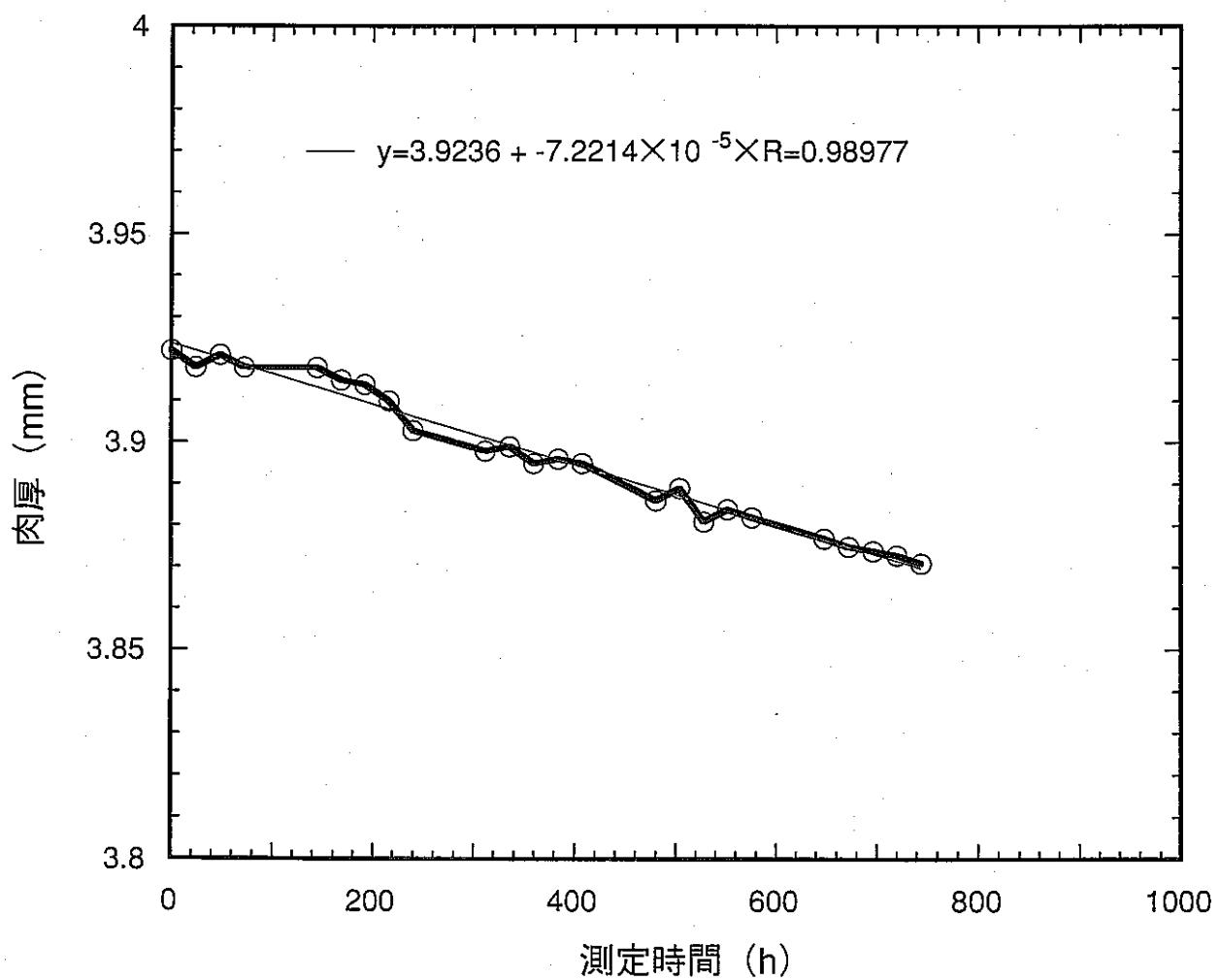


図4.4. 初期型治具によるフィールド試験結果

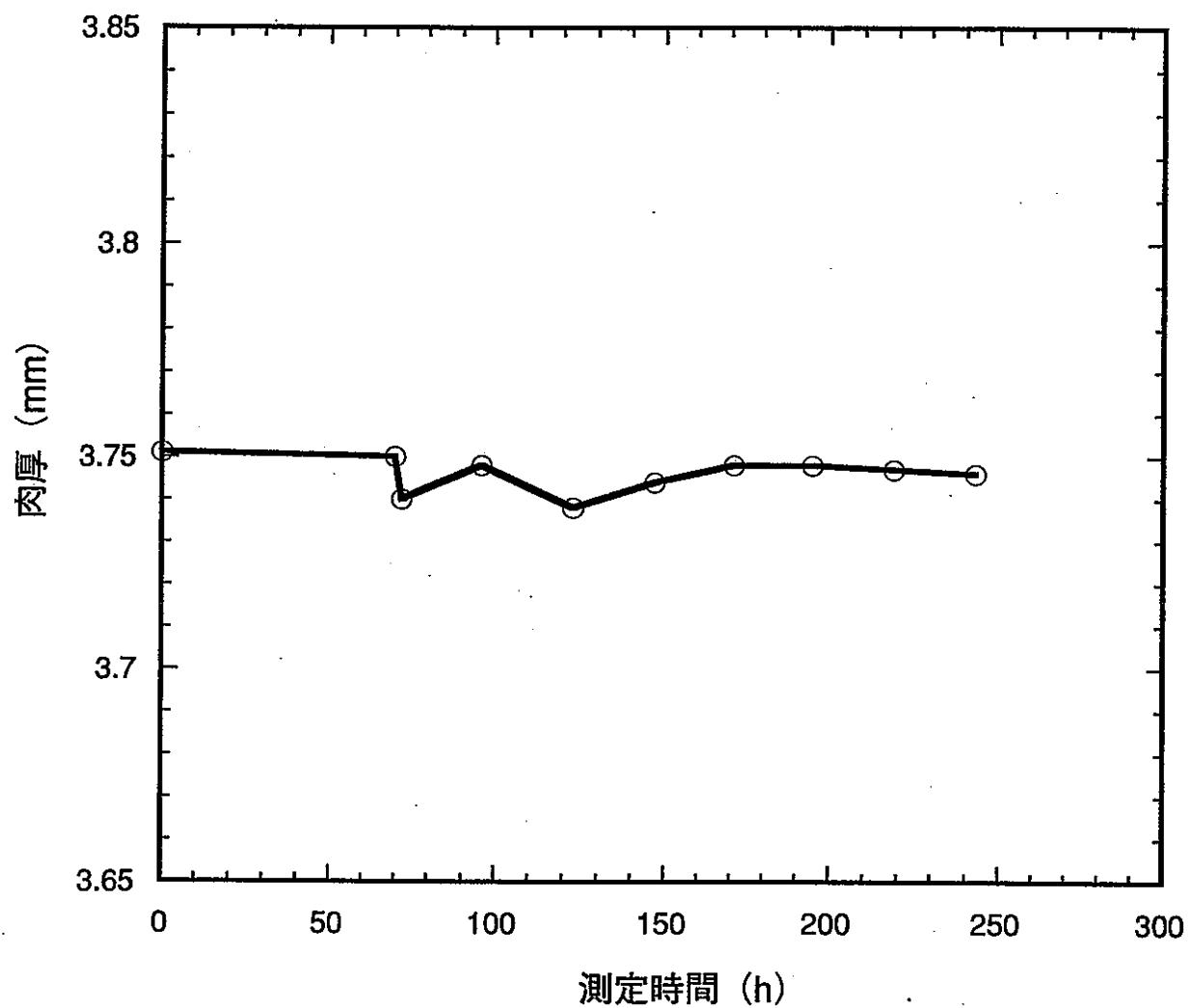


図4.5. 先端形状を変更した遅延材によるフィールド試験結果

期間 I $y=3.6608 + -9.9151 \times 10^{-5} \times R=0.9708$

期間 II $y=3.6876 + -6.2635 \times 10^{-5} \times R=0.9512$

期間 III $y=3.6643 + -3.3149 \times 10^{-5} \times R=1$

期間 IV $y=3.6568 + -2.1684 \times 10^{-5} \times R=0.22892$

期間 V $y=3.6911 + -6.688 \times 10^{-5} \times R=0.99546$

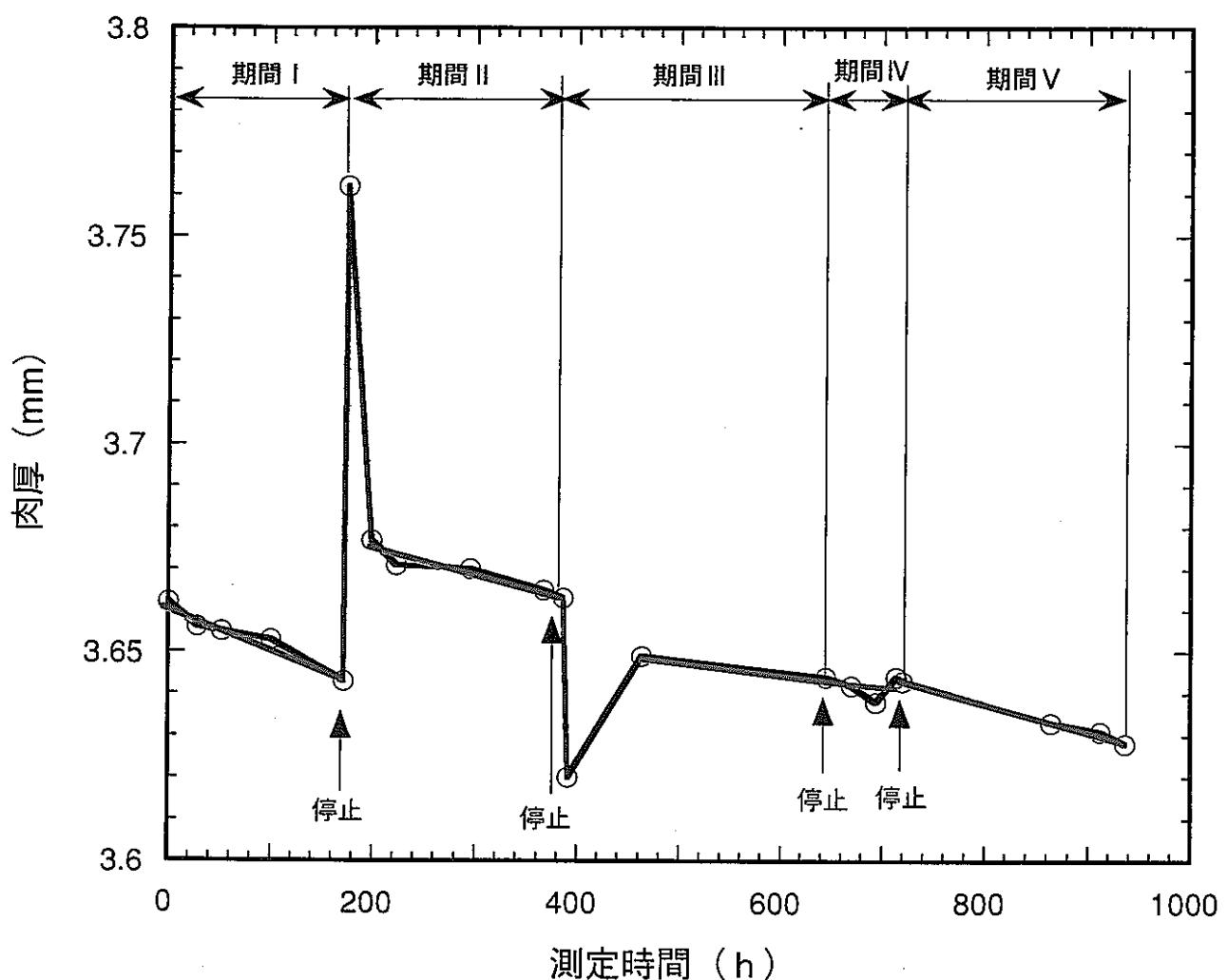


図4.6. 改良型治具によるフィールド試験結果

表1.1. 各種検査方法

検出項目	検査方法
腐食による減肉	渦流探傷 超音波肉厚測定 X線透過測定 ファイバースコープ
割れ	渦流探傷 超音波探傷 X線探傷 浸透探傷
腐食速度	腐食試験片 電気抵抗法 直線分極法 交流インピーダンス法

表4.1. 水ジェット型連続モニタリングの測定誤差の確認結果

材 料	板 厚 (mm)	測定値 (mm)	誤 差 (mm)	備 考
Ti	0.946	0.95	0.00	音速 : 6130m/s
	2.944	2.96	+0.02	
	4.082	4.08	0.00	
Ti-5Ta	0.962	0.97	+0.01	音速 : 6041m/s
	2.958	2.96	0.00	
	3.984	3.98	0.00	
Zr	0.952	0.96	+0.01	音速 : 4880m/s
	2.976	2.97	-0.01	
	4.148	4.15	0.00	

表4.2. 常温型探触子による試験前後の試験体各部位の肉厚

部 位	測定値 (mm)		減肉量 (mm)
	試験前	試験後	
0°	5.52	5.43	0.09
90°	5.41	5.33	0.08
180°	5.54	5.44	0.10
270°	5.66	5.66	0.00

表4.3. フィールド試験中の連続モニタリング結果

試験時間 (h)	モニタリング値 (mm)
0 ~500	5.67
500 ~1700	5.66~5.65で変動
1700~1814	5.65

表4.4. 常温型探触子と高温型探触子のB₁ エコーの高さの比較結果

探触子	試験片 (mm)	エコー高さ (%)
高温型	3	120 以上
	5	120 以上
	10	120 以上
	19	100
常温型	3	120 以上
	5	120 以上
	10	120 以上
	19	100

表4.5. 加熱した標準試験片の肉厚測定結果

測定 温 度 (°C)	測定 回数	試験片肉厚 (mm)				
		1.5	2.0	4.5	5.0	10.0
100	1回	1.51	2.01	4.53	5.05	10.12
	2回	1.51	2.01	4.53	5.06	10.12
	3回	1.52	2.01	4.53	5.05	10.13
150	1回	1.51	2.01	4.56	5.09	10.19
	2回	1.51	2.01	4.55	5.09	10.19
	3回	1.52	2.02	4.55	5.10	10.20
200	1回	1.53	2.03	4.59	5.14	10.24
	2回	1.54	2.02	4.58	5.13	10.25
	3回	1.56	2.03	4.58	5.13	10.24

表4.6. 高温型連続モニタリングの測定誤差の確認結果

材質	温度(°C)	板厚(mm)	測定値(mm)	誤差(mm)	音速(m/s)
Ti	25	3.006	2.996	-0.010	6160
		7.007	7.007	0.000	
	115	3.006	3.001	-0.005	6085
		7.007	7.006	-0.001	
Ti-5Ta	25	3.007	3.004	-0.003	6015
		7.008	7.009	-0.001	
	115	3.007	3.005	-0.002	5945
		7.008	7.009	+0.001	
Zr	25	3.005	2.999	-0.006	4813
		6.507	6.506	-0.001	
	115	3.005	2.998	-0.007	4755
		6.507	6.506	-0.001	

表4.7. 超音波厚さ計の分解能の確認（常時電源ONの場合）

温 度 上 升 (°C)	表示値 (mm)	温 度 下 降 (°C)	表示値 (mm)
23	4.011	107	4.051
30	4.011	105	4.051
35	4.011	100	4.051
40	4.011	95	4.051
45	4.011	90	4.051
50	4.011	85	4.051
55	4.011	80	4.051
60	4.011	75	4.051
65	4.011	70	4.051
70	4.011	65	4.051
75	4.011	60	4.051
80	4.011	55	4.051
85	4.011	50	4.051
90	4.011	45	4.051
95	4.011	40	4.051
100	4.011	35	4.051
105	4.011	30	4.051
110	4.011		
電源OFF → ON後4.051		電源OFF → ON後4.011	

表4.8. 超音波厚さ計の分解能の確認（測定ごとに電源ON）

1回目

温度上昇		温度下降	
温 度 (°C)	測定値 (mm)	温 度 (°C)	測定値 (mm)
25	4.012	107	4.055
30	4.015	105	4.053
35	4.025	100	4.049
40	4.029	95	4.048
45	4.033	90	4.043
50	4.041	85	4.041
55	4.039	80	4.039
60	4.042	75	4.040
65	4.045	70	4.033
70	4.047	65	4.032
75	4.051	60	4.031
80	4.056	55	4.026
85	4.054	50	4.023
90	4.056	45	4.022
95	4.056	40	4.019
100	4.057	35	4.018
105	4.058		
107	4.060		
110	4.061		

2回目

温度上昇		温度下降	
温 度 (°C)	測定値 (mm)	温 度 (°C)	測定値 (mm)
23	4.012	107	4.057
30	4.021	105	4.057
35	4.027	100	4.049
40	4.032	95	4.046
45	4.034	90	4.042
50	4.036	85	4.040
55	4.043	80	4.038
60	4.046	75	4.035
65	4.051	70	4.033
70	4.048	65	4.032
75	4.051	60	4.029
80	4.051	55	4.025
85	4.052	50	4.018
90	4.053	45	4.018
95	4.054	40	4.019
100	4.057	35	4.015
105	4.058	30	4.014
107	4.061		
110	4.059		

表4.9. 高温における測定値の安定性確認結果

測定時間 (h)	測定値 (mm)	測定時間 (h)	測定値 (mm)
8	4.048	176	4.051
16	4.050	184	4.051
24	4.049	192	4.050
32	4.049	200	4.051
40	4.050	208	4.050
48	4.049	216	4.051
56	4.049	224	4.050
64	4.049	232	4.050
72	4.049	240	4.050
80	4.049	248	4.050
88	4.049	256	4.049
96	4.050	264	4.052
104	4.050	272	4.052
112	4.051	280	4.052
120	4.050	288	4.052
128	4.050	296	4.053
136	4.050	304	4.053
144	4.050	312	4.053
152	4.050	320	4.053
160	4.049	328	4.053
168	4.050	336	4.053

表4.10. 初期型治具によるフィールド試験結果

測定時間 (h)	測定値 (mm)	測定時間 (h)	測定値 (mm)
0	3.922	384	3.896
24	3.918	408	3.895
48	3.921	480	3.886
72*	3.918	504	3.889
144	3.918	528	3.881
168	3.915	552	3.884
192	3.914	576	3.882
216	3.910	648	3.877
240	3.903	672	3.875
312	3.898	696	3.874
336	3.899	720	3.873
360	3.895	744	3.871

* : 48時間以降の測定からは、治具を取り外し、測定部へ探触子を乗せただけの状態で測定した値である。

表4.11. 先端形状を変更した遅延材によるフィールド試験結果

測定時間 (h)	測定値 (mm)
0	3.751
70	3.750
72	3.740
96	3.748
123	3.738
147	3.744
171	3.748
195	3.748
219	3.747
243	3.746

表4.12. 改良型治具によるフィールド試験結果

測定時間 (h)	測定値 (mm)	
	連続モニタリング	常温型探触子
0	3.662	3.619
28	3.656	
52	3.655	
100	3.653	
172	3.643	3.606
175	3.762	
199	3.677	
223	3.671	
295	3.670	
367	3.665	
386	3.663	
391	3.620	
463	3.649	
644	3.643	3.499
645	3.644	
670	3.642	
694	3.638	
714	3.644	
720	3.643	3.588
864	3.633	
912	3.631	
936	3.628	3.577

表5.1. 検討した連続モニタリング法の技術的比較

項目	水ジェット型	高温型
接触媒質	水	グリセリンペースト
測定方式	非接触式	接触式
測定誤差	±0.01mm程度	±0.01mm以下
高温部の測定	可能（ただし探触子の温度を60°C以下に保持すること）	可能（接触面の温度が連続120°C）
長期測定実績	小型酸回収蒸発缶の気相部において約1800時間	同左測定部において約900時間
曲面部の測定	可能（上記気相部配管径は65Aである）	同左
利点	<ul style="list-style-type: none"> 測定部に対する探触子の位置が固定され、探触子の接触状態が安定している。 	<ul style="list-style-type: none"> 測定誤差が小さく、直線性に優れたデータが取得できる。 探触子保持用治具の形状によってさまざまな部位の測定が可能である。 測定部の腐食環境に影響を与えることなく測定が可能である。
問題点	<ul style="list-style-type: none"> 水ジェットを連続的に供給すると、測定部外面からの冷却により腐食環境を緩和してしまう。 測定にあたっては、水の受槽が必要であり、その取り付け方法および最終的に廃液となる水の処分方法について問題がある。 	<ul style="list-style-type: none"> 測定部における大きな温度変化が、測定値の再現性に影響を及ぼす場合がある。
検討課題		<ul style="list-style-type: none"> 長時間にわたり安定した接触状態を保持するための探触子の接触方法（治具の構造） 探触子の寿命および探触子の寿命と荷重との関連性 連続モニタリングの高精度化のための測定器の機能向上 モニタリングデータの検証方法 耐放性

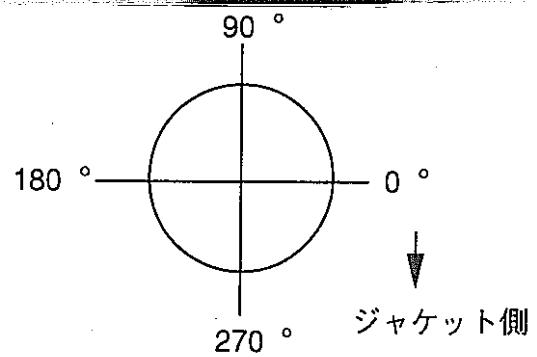
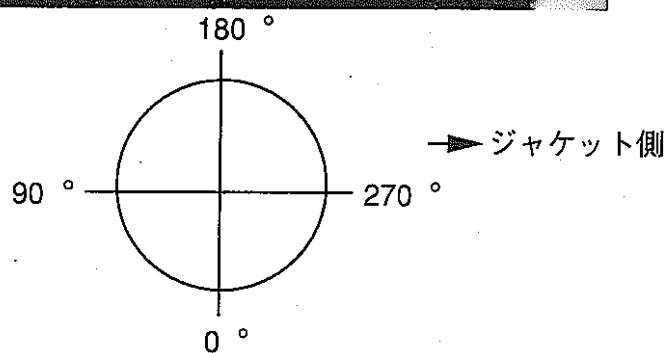
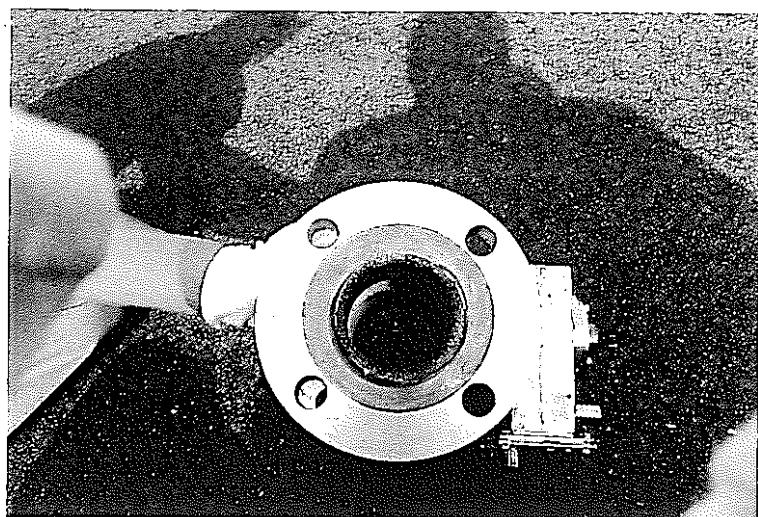


写真4.1. 水ジェット型連続モニタリング後の試験体の外観観察結果