# 海水管減肉測定装置の開発

Development of Sea Water Pipe Thickness Measurement Technique

本 部 本 夫\*1 衏 若 Ш 内 男\*2 五 神戸造船所 郎\*3 Æ 森 滋 ш 下 司\*1 武

原子力・火力発電プラント等の給水管では,腐食/エロージョンにより内面に減肉が発生する可能性がある.機器の信頼性向上 等の観点から,運転中において管外面から板厚計測の実施が望まれている.従来は,20~50 mmの格子各点で,管の外面塗装 を局部的にはがし,スポット的に点検しており,(1)塗膜の補修が必要,(2)格子より小さい範囲の減肉を見逃す等の問題があっ た.そこで,次の特徴を持ち実機への適用性が高い減肉測定装置を開発し,その有効性を確認した.(1)運転中に管外面塗膜上 からの検査が可能.(2)減肉の分布状態を測定,リアルタイムで色分け表示可能.(3)測定データの自動記録による検査作業の軽 減.

In nuclear and thermal power plants, wall wear of sea water pipes is reported to occur in the inner surface due to corrosion and erosion. From the viewpoint of improving the equipments reliability, it is desirable that wall thickness should be measured from the outer surface of the pipe during operation. In the conventional method, paint on the outer surface of the pipe was locally removed at each point of a 20 by 50 mm grid, and inspection was carried out at these spots. However, this method had some problems, such as (1) it was necessary to replace the paint, and (2) it was difficult to obtain the precise distribution of wall thickness. Therefore, we have developed a wall thickness measuring system which has the following features. (1) It is possible to perform inspection from the outer surface without removing paint during operation. (2) It is possible to measure the distribution of wall thickness and display it as color contour map simultaneously. (3) The work of inspectors can be alleviated by the automatic recording of measured data.

# 1. まえがき

原子力・火力発電プラント等の給水管では、腐食/エロージョ ンにより内面に減肉が発生する可能性がある。現在、管内面から の計測では、管内検査ロボット等の開発が別途進められている。 しかし、定期検査時の作業量低減、機器の信頼性向上の観点から、 運転中に管外面からの板厚計測の実施が望まれている。

従来は、一定間隔の格子の各交点部分でのみ、管の外面塗装を 局部的に除去し、超音波厚み計により板厚計測を行っていた。そ のため、スポット的な点検としかならず、管の健全性を十分に確 認しているというものではなかった。

このような背景から、減肉状態が外面から簡易に検査、把握で きる検査システムとして、海水管減肉測定装置を開発した。開発 にあたっては、管外面塗膜上からの検査といった検査の高速化や、 機動性及び適用性の向上といった実機形状への対応に重点を置い て行った。

# 2. 超音波による板厚測定方法

# 2.1 測定原理 (1)

超音波による板厚測定は,超音波を利用して測定物の厚さを片 面から測る方法であり,現在では"パルス反射法"が主流となっ ている.

このパルス反射式超音波厚さ測定の原理は、測定物中を超音波 パルスが往復する時間を測定し表示するものである。図1に示す ように、測定物中に超音波探触子から超音波パルスが送信され、 測定面で一部が裏面で残りが反射し、表面エコーS、底面エコ ー B が発生する。これらのエコーが逆の経路で、元の探触子で 受信される。この表面エコーと底面エコーの時間差から、測定物



中の超音波の伝搬時間 t が得られる. これら, 伝搬時間 t と測定物の厚さD及び測定物中の音速Cとの間には, 次の関係が成立する.

$$t(\mu s) = \frac{2 \times D(mm)}{C(km/s)}$$
(1)

式(1)の伝搬時間 t を得る方法として、本装置では JIS Z



図2 海水管減肉測定装置概略図 開発した海水管減肉測定装置の全体 の概略を示す。 Diagrammatic sketch of device for measuring sea water pipe wall wear

2355 "超音波パルス反射法による厚さ測定方法"における入射

点·第1回底面エコー(R~B<sub>1</sub>)方式を用いた。

 $R \sim B_1$ 方式では, 既知の厚さ $D_0$ の測定物を用いて, 入射点 R を設定し, この入射点 R と第1回底面エコー $B_1$  との時間差から, 測定物の厚さDを求める.

#### 2.2 塗膜の影響の補正

管外面に塗膜がある場合,塗膜中を超音波が伝搬する時間がか かるため,通常,塗膜がない場合に比べ測定される板厚は実際よ り厚い値となる.

また、塗膜中では音速が鋼中に比べおよそ半分であるため、薄 い塗膜でも時には測定誤差を生じることから、塗膜上からの板厚 測定では塗膜分の誤差を補正する必要がある.

本装置においては、あらかじめ、対象とする配管と同様に塗装 された既知の厚さの試験片を用いて、塗膜厚みはほぼ均一に分布 しているものとして入射点Rを補正する方法で、塗膜の影響を 除くこととした.

#### 2.3 従来の測定方法と問題点

従来の方法では、まず、対象とする配管の大きさによるが、お およそ 20~50 mm のピッチで格子をけがき、その格子点部分の 塗膜を部分的にはがし、超音波厚み計で測定を行っている.

この測定方法では,格子点部分を外れた局部的な減肉を見逃す 可能性があること,即時に減肉状態の分布が見れないこと等の問 題を持っていた.また,はがした塗膜の補修等が必要であった.

# 3. 海水管減肉測定装置の構成と特徴

## 3.1 海水管減肉測定装置の開発課題

検査対象となるプラントの配管は、各種の直径や板厚の直管, エルボ、枝管等があり、周辺についても、隣接配管及び支持構造 物が多く狭い環境条件にある.そのため、機械による完全自動走 査による検査は、適用範囲が非常に限定される.

そこで、検査員による走査とし、検査員に負担をかけることな く、測定結果を自動的に記録・処理・表現する装置とし、高速化・



3 海水管減肉測定装置外観 開発した海水管減肉測定装置の外観 を示す。

Appearances of device for measuring sea water pipe wall wear

#### 表1 海水管減肉測定装置仕様

Specification of device for measuring sea water pipe wall wear

項目	内容
対象配管	気中配管 直管部及びエルボ部 ただし,配管支持部分,フランジ部分,溶接部分,枝管部分は除外
対象配管径	4~22 B(φ 114~559 mm) ただし,配管径に合わせた,超音波プローブのケーシングが必要
板厚測定間隔	周方向 10 mm ピッチ, 軸方向 5 mm ピッチ
板厚測定精度	測定可能最小板厚 3.0 mm 以上 測定精度 1.0 mm
測定範囲	一度の走査で, 軸方向 1.2 m まで測定可能
走査速度	およそ 30 cm/s の速度まで測定可能
出力表示	板厚に応じて5段階の階調表示が可能 配管全周のマクロ表示及び,一部分の拡大表示が可能 カラー漢字プリンタに測定結果の表示画面の出力が可能
記 錄	データ処理装置に内蔵のハードディスクに測定データを収納、必要 に応じ、3.5"フロッピーディスクに転送可能

実機形状への対応を主に、次に示す内容の開発を行った.

(1) 超音波探触子

塗装を含め,ある程度の表面凹凸に対応できる超音波探触子 の開発と,検査の高速化のため,マルチ探触子の設計・開発,

及び,各種配管径の曲率に対応できる探触子構造の設計・開発。 (2)板厚測定部

運転中における検査(管外面,塗膜上からの検査)の実現と, 探触子位置の取込み手段の設計・開発。

(3) 測定方法

実機形状に対応できるよう,狭あいな空間でも走査可能な測 定方法や、超音波プローブの位置の検出方法の開発,及び測定 結果の自動記録等による測定作業の簡略化.

(4) 操作・表示機能

操作方法の簡略化・簡素化を行うとともに、減肉測定結果の 減肉量による色分け(階調)表示や、機動性及び適用性の向上。 3.2 海水管減肉測定装置の構成

開発した減肉測定装置の概略図を図2に,外観を図3に示す. また,開発した海水管減肉測定装置の仕様を表1に示す.

(1) 超音波プローブ

8個の超音波センサと軸方向の移動位置検出用エンコーダを 配置した板ばねと、ケーシングから成る.図4に示すように、

126



 図4 マルチ超音波プローブ
 開発した海水管減肉測定装置のマルチ 超音波探触子の構造と各種配管径に合わせたケーシングを示す。
 Multi ultrasonic probe

各種配管径の曲率に応じたケーシングを取りそろえ,ケーシン グのみを取替えることで 4~22 B までの配管に対応できる.

### (2) 周方向位置検出用センサ

配管周方向にセンサを巻付け,測定時に,測定者がこのセン サを指で押さえることで,超音波プローブの位置(押さえられ た位置)を検出する.

- (3) マルチプレクサ
  8 チャンネルのマルチ超音波プローブへの信号の切替えを電子的に高速に行う。
- (4) 減肉測定装置

板厚計測を高速に連続して行うために,超音波プローブのエ ンコーダ信号及び,周方向位置検出センサからの情報により超 音波プローブの位置を検出し,一定の間隔で板厚計測を行う.

(5) データ処理装置

減肉測定装置の制御を行うとともに得られた測定結果により, 減肉状態を色分けマップ表示を行う.同時に,測定結果の記 録・表示・出力を行う.

本減肉測定装置による検査の概略フローを図5に示す.

本減肉測定装置は、超音波プローブを測定者が手に持って走査 を行う、測定者はまず、①超音波プローブを配管に付け、② そ の位置の周方向位置検出センサを指で押さえる、次に、③ 配管 軸方向に超音波プローブを移動させていくことで板厚測定ができ る.超音波プローブの位置は、内蔵のエンコーダと周方向位置検 出センサの押さえられた位置より求められる.

板厚は軸方向1mm間隔で測定し、5mmの間で最も薄い板厚 値を代表値として表示することで、φ5mm以下の局部減肉につ いても検出可能である.

測定結果は、データ処理装置によって自動的に処理され、任意の板厚値で5段階に色分けられ、リアルタイムに表示される.

# 3.3 海水管減肉測定装置の特徴

第一に,塗膜上から計測できるため,前準備の作業を低減でき, マルチ超音波プローブによる効率の良い検査が可能である.

第二に、検査において得られた測定データは、計算機内で即時



Inspection flow

に5段階に色分け表示され、減肉分布状態が一目で分かる.

第三に、プローブを測定者の手で走査するため、測定者の判断 により狭い所への適用等、フレキシブルな対応が可能である。

# 4. 機能試験

開発した海水管減肉測定装置について、社内及び現地で行った 機能試験の結果を以下にまとめた.

# 4.1 位置検出精度

周方向に対しては、開発した周方向位置検出センサによって位 置検出精度は、1周360°の誤差で、設計値10mm以内の3~7 mmにできた.ただし、小径配管(4B)では、曲げによる誤動 作が時に生じる.これについては、周方向位置検出センサの厚み を薄くすることで、曲げによる誤動作を改善することができる.

軸方向に対しては、走査速度、表面状態に影響されることなく、 超音波プローブの動きに応じたエンコーダの回転が得られ、一般 的と考えられる1回の走査距離400~700 mmにおいて、誤差は 設計値の10 mm以内にできた。

4.2 板厚測定精度

各種配管径の階段状に板厚の異なる供試体を用い、塗膜の上から開発した超音波プローブにより、板厚測定精度の試験を行った. 図6に板厚測定精度の試験結果を示す.また、実機における試





験結果を図7に示す。

板厚は、塗膜による影響の補正を加えた計算式で求めており、 静止状態において、±0.2 mm の測定精度が実現できた。

走査状態においては,超音波センサの配管への倣い性を安定させることで,塗膜付きテストピートを用いた試験でも,測定精度±0.5 mm 以内が実現できた.

実機では,超音波厚み計による測定結果とほぼ同様の値が得ら れている.特に,エルボの背と腹では板厚が異なっているが,そ の変化のようすが測定結果に良く表れている.

#### 4.3 適用性の確認

開発した海水管減肉測定装置について実機への適用性の確認・ 評価を行った結果を次に示す.

塗膜については、測定精度への影響はほとんどなかった.

走査速度については,超音波プローブの配管に対する倣い性に 依存するが,板厚測定結果に大きな影響は及ばなかった.

実際には、直管 500 mm で 60~120 mm/s, エルボ部で 10~30 mm/s (4 B), 40~80 mm/s (20 B)の走査速度であった.

走査回数については、板厚測定において、何らかの原因で配管 内面からの底面反射エコーが得られず、測定不可= "未検査"と なる領域が残らない回数にする必要がある。確認試験では、小径 管(4B) については、1~2回の走査で直管(500 mm)部が未 検査となる領域は最大10%以下、エルボ部で同じく最大20%以 下となる。そして、配管径が大きくなるにつれ(14 B, 20 B), 1回の走査で未検査となる領域は数%以下で、2回の走査でほぼ 0%となる。

この未検査領域については、内面の減肉面による超音波の乱反 射による減衰も考えられるが、カプラント切れや超音波プローブ の接触状態の悪さに起因することが多い.そこで、実機において は、周方向について走査範囲を、超音波プローブの1/2の長さず つラップさせながら走査し、未検査領域が残っている場所を局所 的に再度走査していけば良いと考えられる.

走査時間については、同じ長さの配管全周の総走査時間をみる と、配管径によってあまり変化しない.実機での走査時間は、直



図7 実機での測定結果 エルホ部(20B) 開発した海水管脳内測定 置による実機 20 B エルボ管の測定結果を示す。 Result of measurement on actual plant—elbow pipe section (20B)

管部 500 mm で約 10 min(14, 20 B),約 15 min(4 B),作業 姿勢の悪くなるエルボ部 500 mm で約 20 min(20 B),300 mm で約 15 min(4 B)であった.

これらの値から、検査すべき配管長を約1000mとした場合、

およそ4か月の走査時間となるが、検査は運転中にも可能である. エルボ・曲率の影響については、4Bエルボでも十分に、超音 波プローブを倣わすことができた.しかし、配管径に対し超音波 プローブの大きさが大きくなる小径管では、超音波プローブが傾 きやすく、接触不良による未検査領域が多くなる傾向がある.

4.4 課 題

開発した海水管減肉測定装置について、ほぼ設計どおりの機能 が確認できた.しかし、実用にあたっては、機能とともに使いや すさを改善していく点がある.

周方向位置センサについては、内部配線をフレキシブルプリント基板化する等により、センサを薄く、軽くする必要がある。また、配管径に応じた長さのセンサを選択できるようにする。

超音波プローブについては、走査性をさらに向上するため、プ ローブが配管に対してある程度傾いても測定可能なように、倣い 性により多くの余裕を持たせていくことが必要である。

減肉測定装置本体については、可搬性を高めるため、装置自体 のさらなる小型化を図っていく必要がある.

# 5.まとめ

プラントの配管の中で大きな割合を占める直管部,エルボ部に 対し,当初目標とした減肉の分布状態を簡易に塗膜の上からでも 検査・表示できる装置として海水管減肉測定装置を開発した.実 機への適用性が確認でき,このたび,1号機を納入した.

今後,機能向上の課題をさらに検討するとともに,実機検査への本装置の適用を通して,さらに使いやすさを追求し総合的な装置の適用性・機能の向上を進めていく予定である.

次ステップとしては、減肉の発生が予想される配管接続のフランジの際やT字部分等の箇所にも、本装置が適用できる特殊超 音波プローブの開発を計画している。

#### 参考文献

 超音波パルス反射による厚さ測定方法, JIS Z 2355-1987 (1993 確認), 日本規格協会