



電磁超音波共鳴法による配管減肉のオンラインモニタリング

Online Monitoring of Pipe Wall Thinning with Electromagnetic Acoustic Resonance Method

東北大学	浦山 良一	Ryoichi URAYAMA	Non-Member
東北大学	内一 哲哉	Tetsuya UCHIMOTO	Member
東北大学	高木 敏行	Toshiyuki TAKAGI	Member
会津大学	兼本 茂	Shigeru KANEMOTO	Member

The electromagnetic acoustic resonance (EMAR) method provides accurate and stable evaluation in high temperature environment, and it is an effective tool for online monitoring. In this study, the EMAR method and the superposition of the n th compression (SNC) for data processing are applied to online monitoring of pipe wall thinning, and the accuracy and reliability of the measurements are demonstrated through field tests using a large-scale corrosion test loop at high temperature. To measure the thickness of pipes with complicated wall thinning, the SNC extracts thickness information from the spectral responses of the EMAR. Results from monitoring test show that EMAR with SNC can evaluate pipe wall thinning with an accuracy of $10\ \mu\text{m}$ at 165°C . In addition, time evaluation of evaluated thickness decreases monotonically all over the test duration, which indicates high stability of this measurement technique.

Keywords: online monitoring, NDT, EMAR, pipe wall thinning, thickness measurement, signal processing.

1. 緒言

原子力・火力発電設備の配管において、経年化が進むことにより流れ加速型腐食や液滴衝撃エロージョンによる配管減肉が問題となり、その管理が課題となっている。事業者は保全活動における安全性確保の徹底のため、停止中に集中している検査に加え、運転中のオンラインモニタリングによる検査を充実強化することが求められている。配管減肉オンラインモニタリングは運転中に減肉傾向を把握することができ、配管減肉を時間経過に対して詳細に評価することが可能であることから、設備の信頼性を向上させるとともに安全性の一層の向上が期待される。

電磁超音波探触子 (Electromagnetic acoustic transducer, EMAT) を配管減肉のモニタリングに適用する研究がなされている^(1,2)。EMAT は非接触による測定が可能であり、探傷面の状態に左右されにくいという利点がある。また、高温環境下での肉厚測定にも使用されている。しかし、電気音響変換効率が圧電素子と比べ低く、SN 比が小さい。

EMAT を用いた電磁超音波共鳴法 (Electromagnetic acoustic resonance method, EMAR) は、板厚方向に伝播する超音波が共鳴する現象に基づくもので、受信信号を増幅し SN 比を改善することができる。しかし、肉厚が複雑に変化する減肉部においては、超音波が散乱して共鳴スペクトルの振幅が低下し、また底面の凹凸や傾斜により複数の共鳴周波数を検出することとなる。そのため、肉厚の評価が困難となる場合がある。そこで、筆者らは、電磁超音波共鳴法の信号処理法として N 周期加算法 (Signal of superposition of n th compression, SNC) を提案し、曲面での評価を行ってきた⁽³⁾。

また、EMAT によるモニタリングの利点として、取り付けの容易さがあげられる。流れ加速型腐食が予想される炭素鋼配管への取り付けは EMAT プローブの永久磁石により固定ができ、また非接触測定のため配管の塗装面の剥離の必要がない。さらに、 300 から 500°C の高温に耐える EMAT が開発されており^(4,5,6)、配管の断熱材の下に設置することができる。

本研究は、実機高温環境下における配管減肉のオンラインモニタリングに EMAR を適用し、配管減肉の定量的評価の可能性を検討する。そこで、配管内の流体条件を制御して減肉を加速し実機配管に近い減肉を再現できる

連絡先: 内一哲哉, 〒980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1, 東北大学 流体科学研究所,
e-mail: uchimoto@ifs.tohoku.ac.jp

大規模な配管減肉試験装置を用いた配管減肉モニタリングをオンラインで行う。また、測定する肉厚を予想して共鳴次数を与えることにより、N 周期加算法の解析の精度を高めるように改良する。

2. 電磁超音波共鳴法

2.1 電磁超音波共鳴法の原理

EMAT はコイル及び永久磁石から構成される。非磁性体の導体試験体の上に置かれたコイルに高周波パルス電流を流すと、試験体の表面近傍に渦電流が誘導される。そこに永久磁石により試験体表面に垂直な静磁場を印加すると試験体表面に平行なアンペール力が発生し、試験体内をコイルに印加した高周波パルスと同じ周波数の横波が伝播する。また、磁性材料の試験体ではコイルの誘導磁場と永久磁石の静磁場による磁歪効果に基づいて磁歪が周期的に変化し、超音波が発生する。超音波の受信は上記の逆過程によりコイルに発生する電圧を受信することにより行う⁷⁾。

ここで、振動源と受信源が試験体表面内部にあるため非接触での測定が可能である。従って、圧電素子を用いた超音波厚さ計に必要な接触媒体が不要であり、また試験体表面の塗料や錆などの影響を受けにくいという特徴がある。

バースト波を試験体に入射すると、超音波は試験体の両面で反射を繰り返し、波長が試験体内の伝播距離の整数倍のとき入射波と反射波の位相がそろうため共鳴現象が生ずる。この現象を用いた測定法が EMAR である。

EMAR は、散乱により減衰した振幅の小さなエコー波を増幅させ、受信信号の SN 比を向上させることができる。

下式に共鳴周波数と厚さとの関係を示す。

$$f_n = n \times f_1 = n \times \frac{v}{2d} \quad (1)$$

ここで、 f_n : 共鳴周波数、 f_1 : 基本共鳴周波数、 n : 共鳴次数、 v : 試験体の音速、 d : 試験体厚さである。

2.2 N 周期加算法による信号処理

図 1 に模擬減肉試験片を示す。材質が炭素鋼 SS400 で長さ 150mm×幅 50mm×厚さ 10mm の板の底面に深さ 2mm で幅 70mm の R 形状の模擬減肉を二次元加工してある。音速は室温で 3240m/s である。図 2 に減肉部中央から端部へ 12.5mm 離れた位置での EMAR の測定結果を

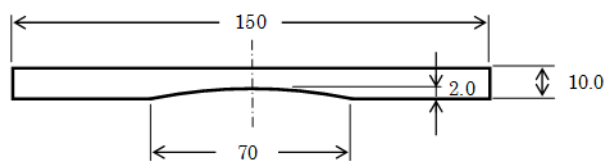


Fig.1 Cross section of the specimen with a simulated wall thinning.

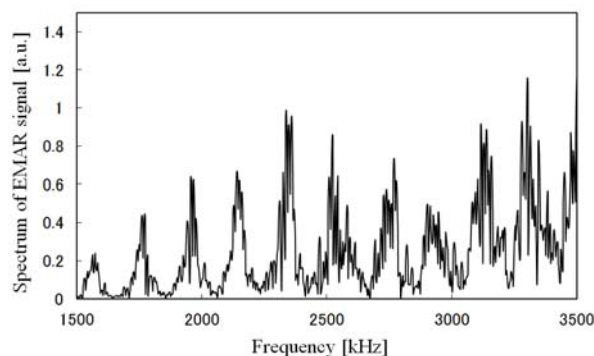


Fig.2 EMAR signal of wall thinning position.

示す。減肉部では底面形状に傾斜があるため、超音波の散乱により信号強度が低く共鳴周波数のピークが不確定である。基本周波数は理論的には 195kHz となるはずであるが、共鳴周波数の周辺に複数のピークがあるためピーク間隔から正確な基本共鳴周波数を求めることが困難である。

N 周期加算法は、共鳴周波数が整数倍の時に周期的に現れることを利用した解析法である。すなわち、EMAR の測定結果の周波数軸を $1/n$ だけ縮小することで、 n 次の共鳴周波数 f_n の強度を基本周波数 f_1 の強度に重ね合わせることができる。例えば、理論的には 2 番目の共鳴周波数 f_2 を $1/2$ に圧縮することにより f_1 となり、 f_3 , f_4 をそれぞれ $1/3$, $1/4$ に圧縮することにより同じく f_1 となる。

式 (2) に表すように、EMAR の測定結果の周波数を $1/n$ した波形を重ね合わせたスペクトル強度の平均の最大値から、基本共鳴周波数 f_1 を求め、さらに式 (3) により音速を用いて肉厚に変換することができる。このときの最大スペクトル強度を SNC ピーク値とする。

$$f_1 = \arg \max_f \left\{ \sum_n x \left(\frac{f}{n} \right) / m \right\} \quad (2)$$

$$d = \frac{v}{2f_1} \quad (3)$$

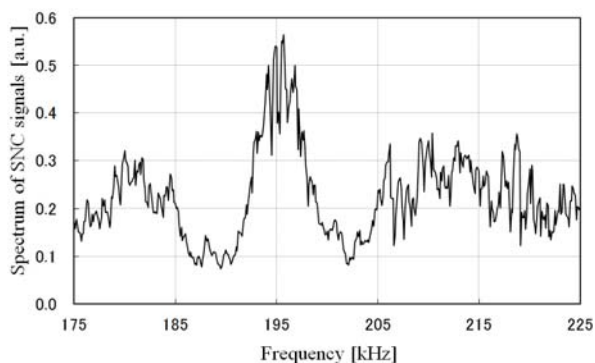


Fig.3 Signal of superposition of nth compression (SNC).

ここで、 $x(f)$ はSNCスペクトル強度、 m は重ね合わせた共鳴次数の数である。

肉厚と音速により共鳴周波数は変化することになり、試験周波数範囲に含まれる共鳴周波数の次数が変化することになる。例えば、試験配管の肉厚が5.0mmで、音速が3240m/sの時には、共鳴周波数が324kHzであり、試験周波数範囲を1.5~3.5MHzとすると含まれる共鳴次数は5~10の整数となる。EMARの測定結果の周波数を1/5~1/10に圧縮して足し合わせるにより、基本共鳴周波数におけるピークが強調され、基本共鳴周波数が明確になる。ここで、SNCスペクトル強度は加算される次数範囲の数で平均化することとする。

オンラインモニタリング試験において、音速は配管の材質と同等の校正試験片により求める。またN周期加算法に使用する予想肉厚は初回試験時では公称肉厚とし、 x 回目の試験の場合は $x-1$ 回目の測定厚さとする。

図3に図2の模擬減肉部でのEMARの測定結果をN周期加算法により解析した結果を示す。予想肉厚を8mmで n 次数範囲を8~17として解析した結果である。複数の基本共鳴周波数が現れて、底面形状の変化を示している。ここで、最大ピークである共鳴周波数(195.7kHz)に対応する厚さ8.28mmを肉厚とする。

2.3 測定概要

EMARの測定機器は、大出力パルサーレーザ（RPR-4000 RITEC社製）、受信信号を増幅するプリアンプ（PASJ-0.1-20 RITEC社製）、受信信号のフィルタとして広帯域ディケードフィルタ（FV-628B NF社製）、波形観測およびデータ収集用のオシロスコープ（DPO4104 TEKTRONIX社製）、および波形データを保存・解析するPCである。

本研究の試験条件は配管温度が165℃であるので

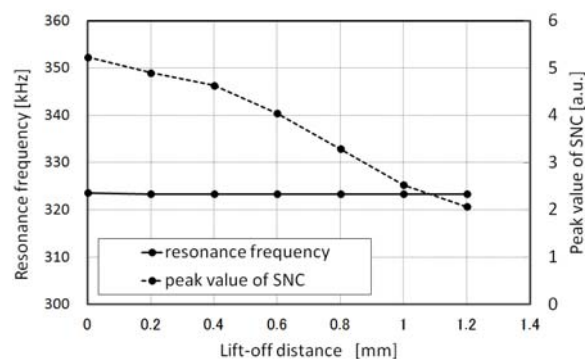


Fig.4 Relationship between SNC peak, resonance frequency and lift-off distance.

EMATプローブには耐熱性を持たせることが必要である。このためコイルは耐熱性のポリイミド被覆線を使用し、永久磁石は大きさが幅10mm×長さ20mm×高さ(励磁方向)20mmのキュリー温度が高いサマリウムコバルト磁石を2個組み合わせて使用する。送信コイルと受信コイルを別個に構成する。送信コイルを直径10mmとし入射面積を小さくして底面の形状変化による超音波の散乱の影響を小さくし、受信コイルを直径20mmとして受信信号の減衰を小さくすることにした。コイルの線径が0.12mmで、送信コイルの巻き数が40回、受信コイルが80回である。なお、送信コイルと受信コイルを別個に構成することによりプリアンプの設置場所をプローブ設置場所に近づけることができSN比が改善した。試験周波数を1.5~3.5MHz、掃引間隔を10kHzとし、受信信号にスーパーヘテロダイン処理を施して1kHzの周波数刻みにより同期検波を行いEMARの測定データを得る。

配管へのEMATプローブの取り付けは、塗装を剥がさずに塗装面の上からとする。リフトオフ距離とSNC信号の関係を確認するために予備テストを実施した。試験体はSTPT370の厚さ5mmの校正試験片で、EMATと試験体の間に厚さ0.2mmのプラスチックシートをはさみ込み、リフトオフ距離を変化させて測定した。図4に上記の測定条件で、試験体とのリフトオフ距離を変化させたときの受信信号のSNCピーク値を評価した結果を示す。リフトオフ距離が増えるとピーク値は減衰し、リフトオフ距離1mmでピーク値は半減するが、塗料の厚さは200μm以下程度であるのでピークの減衰は1割以下と予想され、塗装面上からの測定でも充分測定が可能であることが示された。共鳴周波数は323.4kHzで一定であり、リフトオフ変化による共鳴周波数への影響はなかった。

3. 配管減肉試験装置でのモニタリング試験

3.1 試験内容

配管減肉試験装置は、原子力発電プラントの水流条件を模擬し、単相流及び二相流状態での配管減肉試験が可能である⁽⁸⁾。図5に配管減肉試験装置への試験配管の設置状態の概要を示す。試験配管は炭素鋼配管 STPT370, 50A Sch80, 内径 49.5mm, 外径 60.5mm, 公称肉厚 5.5mm, 長さ 1350mm である。試験配管の手前にエルボによる曲がり部とオリフィスによる絞り部を設け、図中の下から上方向へ流体が流れる状況であり、下流にはU字管を設置する。これらの部位により試験配管内に流体の乱れを起こすことができ、減肉を加速することが可能となる。

模擬減肉試験は試験配管の内部に二相流を発生させ減肉させる試験と、単相流で溶存酸素量を変化させる二回の試験を行う。配管内の流体温度は 165°C で、流れ加速型腐食が起きやすい温度領域としている。テスト部の配管は保温材が巻かれ金属製のプロテクタにより囲われており、配管内の流体と配管は同温度である。

EMAT の配管への取り付けは、塗装を剥がさずに塗装面上に直接配置とし EMAT を構成する永久磁石の磁力により保持し、断熱材の脱着などの作業で不慮の接触により EMAT がずれないように針金により固定する。

試験部位に設置した EMAT プローブから制御室に設置した測定機器までの配線ケーブルの長さは約 32m である。その間に受信信号が減衰しノイズが加わり SN 比が低下することが分かった。この問題を解決するためプ

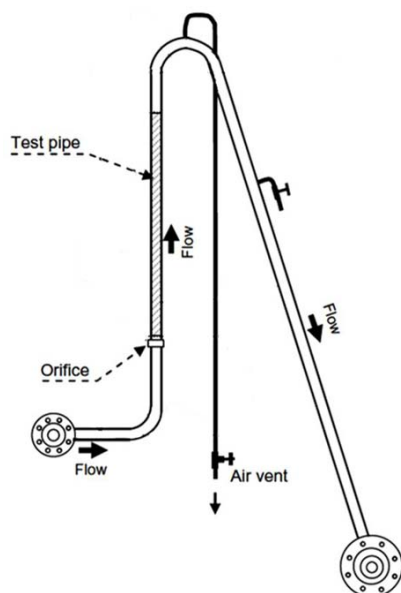


Fig.5 Layout drawing of test pipe.

リアンプを測定部位近くに設置し受信信号のみを増幅させ、また配線ケーブルを減衰係数の小さいものとするこ
とにより SN 比を改善した。

3.2 二相流における減肉モニタリング試験結果

第一回試験として、脱気条件の二相流環境下で配管温度 165°C にて模擬減肉試験を実施した。試験期間は約 2 ヶ月間である。ただし、期間中に二度装置を止めて定期点検が行われている。また、プローブの設置箇所は、オリフィス端部から約 650mm の位置であり、配線ケーブルは二軸ケーブルを使用した。

室温で厚さ 5mm の校正試験片を用いて EMAR により基本共鳴周波数を測定して音速を求め、音速は 2340m/s であった。図6に装置起動における配管の温度上昇時における開始前の室温と 165°C での SNC 信号の比較を示す。高温域では室温に比べ SNC ピークが減衰し共鳴周波数が低くなる傾向が示された。これは、温度上昇に伴って、磁石の磁束密度強度の低下によるピーク減衰と、試験体の弾性係数が低下することにより音速が低下したためと

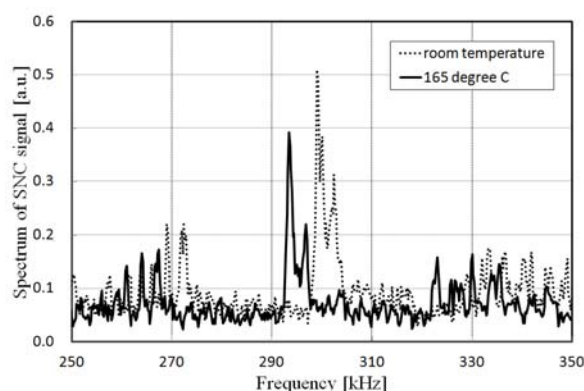


Fig.6 Comparison between signals at high and room temperature.

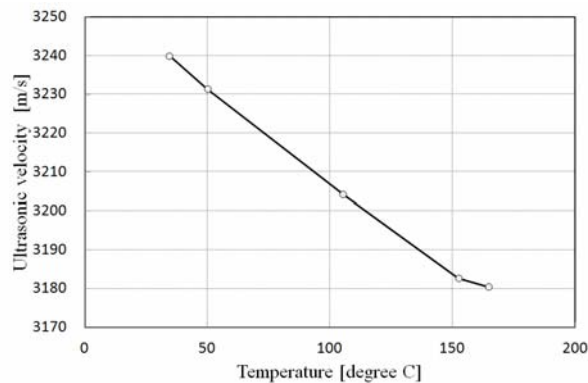


Fig.7 Temperature dependence of acoustic velocity.

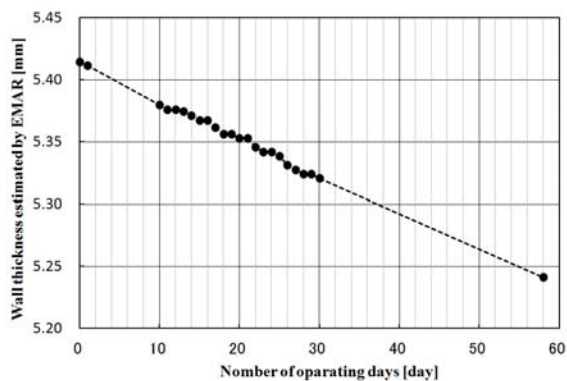


Fig.8 Measurement result with two-phase flow.

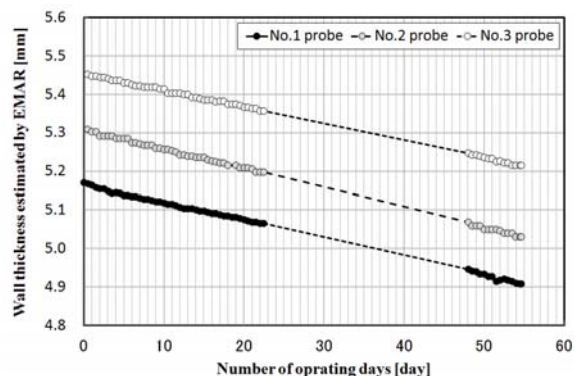


Fig.10 Measurement result with single-phase flow.

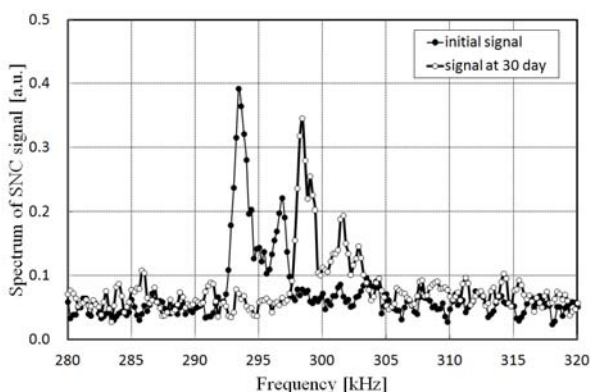


Fig.9 Comparison between initial signal and the signal at 30 days.

考えられる。図7に装置立ち上げ時の配管温度上昇に伴う音速の変化を示す。初期肉厚は校正試験片を用いて求めた音速を用いて算出し、温度上昇時には肉厚を一定として音速を求めている。配管温度が上昇するに従いほぼ線形的に音速が低下しており、運転温度における音速3180m/sを肉厚評価に用いた。

モニタリング試験でのN周期加算法における共鳴周波数の次数の設定を以下に示す。初期の測定では試験開始時の肉厚を公称肉厚の5.5mmとし、稼働中の165°Cでの音速が3180m/sであるので、試験周波数範囲の1.5～3.5MHzに含まれる共鳴周波数のn次数は6～12とする。その後は試験開始からx回目の測定ではx-1回目の測定厚さから共鳴周波数の次数を決めて、N周期加算法で共鳴周波数を求めて厚さを算出する。

図8に配管減肉試験装置稼働時の高温環境下での時間経過におけるEMARによる配管肉厚の評価を示す。EMARによる初期測定肉厚は5.42mm、最終肉厚は5.24mmで、減肉量は0.18mmの評価であった。試験終了後に試験配管を切断して断面をマイクロ스코プにて測定した。EMATを設置した箇所における肉厚は5.18mm

Table.1 Amount of thinning [$\mu\text{m}/\text{day}$].

Period	No.1probe	No.2 probe	No.3 probe
I	4.8	5.1	4.3
II	5.2	5.5	4.4

であり、EMARの最終測定肉厚との差は0.06mmであった。EMARではEMATプローブの大きさ $\phi 10\text{mm}$ の測定範囲内の肉厚を測定評価するが、マイクロSCOプの測定ではプローブの中心位置を測定することから、肉厚評価に差が出たものと思われる。ただし、超音波厚さ計の誤差範囲 $\pm 0.1\text{mm}$ と比較して許容範囲内である。

図8は時間経過時の減肉の様子を示す。測定期間58日間で減肉率は一日当たり $3.0\mu\text{m}$ であった。

図9にSNC解析による初期のSNC波形と30日目のSNC波形を示す。30日目のSNC波形は初期のSNC波形と比べ共鳴周波数が高周波側にずれて振幅が減少し、ピーク数が増えている。これは、減肉により配管内面に凹凸や傾斜が発生していることを示す。この底面の形状変化により、超音波の散乱が発生して振幅が減衰し複数のピークが現れたと考えられる。

3.3 単相流における減肉モニタリング試験結果

第二回目の試験として、配管温度165°Cにて、微量溶存酸素を添加した単相流環境下で、装置稼働から24日目までを第一試験期間とする。その後に水質調整運転を6日間行い、装置稼働日数が25～55日目を第二試験期間として試験を行った。二つの期間で溶存酸素を変化させている。なお、水質調整運転時には試験配管をバイパスしているため、この期間の減肉は基本的にないと考えられる。

EMAT プロブはオリフィス端部から約 160mm の位置に、周方向に三個を取り付けてある。取り付け位置の塗料の剥離はせずに塗膜の上から測定を行っている。なお、配線ケーブルは減衰率の小さい 3D-2V の同軸ケーブルを使用した。

室温で 3 個の EMAT プロブを厚さ 5mm の校正試験片を用いて EMAR により基本共鳴周波数を測定して音速を求めた結果では、各々の音速は 2340m/s であった。EMAR では共鳴周波数により厚さを評価するため、今回使用した 3 個のプロブの違いによる厚さ測定値の差はないと考える。

図 10 にオンラインモニタリングによる肉厚評価結果を示す。3 個のプロブで初期の肉厚に相違がある。同種類の配管をマイクロメータを使用して測定した結果では公称肉厚 5.5mm に対して 5.1~5.6mm であった。また、製造上の許容誤差は厚さに対して ±10% と定められており、厚さの許容範囲は ±0.55mm となり測定値はその範囲内であった。また、3 個のプロブの音速測定に差がないことから、初期肉厚測定時における肉厚の違いは配管を製造した時に発生した肉厚の差と考えられる。

3 個のプロブとも時間経過に対して相関的に減肉傾向が現れている。第一試験期間でのテスト期間である装置稼働から 23 日間で、No.1 プロブで 0.10mm、No.2 プロブで 0.09mm、No.3 プロブで 0.11mm の肉厚変化を捉えている。

表 1 に水質の異なる二つの試験期間での一日当たりの減肉量を示す。第一試験期間での一日当たりの減肉量は No.1 プロブ位置で 4.8 μ m、No.2 プロブで 5.1 μ m、No.3 プロブで 4.3 μ m、第二試験期間での各プロブ位置では、5.2 μ m、5.5 μ m、4.4 μ m である。各プロブとも第二試験期間の減肉量が第一期間のそれよりも大きい値を示した。EMAR での測定結果において溶存酸素量の違う二つの期間において減肉速度に変化が確認された。

4. 結言

本研究は、実機高温環境下における配管減肉のオンラインモニタリングに N 周期加算法を用いた EMAR を適用し、配管減肉速度の定量的評価の可能性について検討した。減肉を加速し実機配管に近い減肉状態を再現できる配管減肉試験装置において配管温度 165°C で二相流及び単相流での配管減肉のオンラインモニタリングを二回実施した。

- 1) 配管減肉試験装置での二回のオンラインモニタリング試験では、165°C の高温下で時間経過に伴う減肉傾向を評価し、異なった流水条件で減肉率の違いを確認することができた。
- 2) 第一回試験では、試験終了時の EMAR 測定とマイクロスコプの測定厚さとの差を 0.06mm で評価することができた。
- 3) 第一回試験の SNC 解析波形の比較から減肉進展後の波形に底面形状の変化を表す SNC ピークの減衰と複数のピークが観測された。
- 4) 塗装面上からでも測定が可能であり、塗料の剥離の必要性がなくプロブの磁石により測定位置に保持でき取付けの作業が容易にできた。

以上のことから、プロブの取付けに専門的技能を必要とせず、高温下で UT と同等の厚さ評価で、SNC ピークの減衰と SNC ピーク周辺のピーク数により底面形状変化の有無を推定でき、時間経過における減肉傾向を評価できた。

EMAR 及び SNC 解析を使用したモニタリング検査により下記の効果が期待される。

- ① 0.01mm 単位での減肉量の変化を評価することが可能なことから、減肉速度を高い精度で評価でき、設備の信頼性を向上させるとともに安全性の一層の向上が期待される。
- ② 配管減肉評価法の検証や減肉箇所の代表測定点の妥当性の検証、減肉のメカニズム解明にも応用可能であると考えられる。
- ③ 原子炉の高出力化に対する配管内の流水条件変化などによる減肉量の詳細をモニタリング計測することにより、配管設備の安全性を確保した原子炉の出力向上が期待できる。

謝辞

本研究は、原子力安全・保安院の平成 22 年度高経年化対策強化基盤整備事業（経年劣化事象の解明等）、東北大学グローバル COE プログラム（流動ダイナミクス知の融合教育研究世界拠点）の一部として行われたものである。研究遂行にあたりモニタリング試験は東京電力技術開発研究所による大型配管減肉試験の実施において併設したものである。関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] D. Kosaka, F. Kojima, H. Yamaguchi, “Quantitative evaluation of wall thinning in pipe wall using electromagnetic acoustic transducer”, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol.33, 2010, pp.1195-1200.
- [2] A. Tagawa, K. Fujiki, F. Kojima, “Investigation of an on-line pipe wall defect monitoring sensor”, *International Journal of Applied Electromagnetics & Mechanics*, Vol.33, 2010, pp.639-647.
- [3] R. Urayama, T. Uchimoto, T. Takagi, S. Kanemoto, “Quantitative Evaluation of Pipe Wall Thinning by Electromagnetic Acoustic Resonance”, *E-Journal of Advanced Maintenance*, Vol.2, 2010/2011, pp25-33.
- [4] N. Yamagata, M. Takahashi and N. Ahiko, “Thickness Measuring Technology for Pipes of Thermal Power Plants”, *Toshiba Review* (in Japanese), Vol.63 (4), 2008, pp.46-49.
- [5] R. Urayama, T. Uchimoto, T. Takagi, “Application of EMAT/EC Dual Probe to Monitoring of Wall Thinning in High Temperature Environment”, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol.33, 2010, pp.1317-1327.
- [6] F. Hernandez-Valle and S. Dixon, “Pulsed electromagnetic EMAT for ultrasonic measurements at elevated temperature”, *INSIGHT*, Vol.53, No.2, 2011, pp96-99.
- [7] R. B. Thompson, “Physical principles of measurements with EMAT Transducer”, *Physical Acoustics Vol.XIX*, Academic Press Inc., 1990, pp.157-200.
- [8] 黒崎裕一, 高木愛夫, “配管減肉試験での肉厚連続モニタリング手法の性能確認”, *日本機械学会論文集, B編*, Vol.75, No751, 2009, pp.429-430.

(平成 24 年 5 月 8 日)