

電磁超音波共鳴法による 配管減肉モニタリング技術

Pipe wall thinning monitoring technology by electromagnetic acoustic resonance method

東北大学 孫 宏君・高木 敏行・内一 哲哉

1. はじめに

原子力及び火力発電所において流れ加速型腐食（FAC, Flow Accelerated Corrosion）と液滴衝撃エロージョン（LDI, Liquid Droplet Impingement Erosion）による配管減肉現象は重大事故に繋がるため、適切に管理することが要求される。現在の配管管理では、発電用設備規格により定期的な肉厚測定結果から余寿命を予測し、設計時に定められた配管の最小肉厚に達する前に配管を交換するため、肉厚検査技術は減肉管理にとって重要な技術である⁽¹⁾⁽²⁾。しかし、定期的な点検は設備の運転停止を伴い、作業時間がかかる。また、原子力発電所における配管減肉の検査においては、作業員の被ばく線量の低減が求められている。検査の高度化・効率化・現場での無人化ができる配管減肉モニタリング技術が期待されている。

一般的な肉厚検査に用いられる圧電素子を用いた超音波厚さ計は、接触媒体を必要とするため、モニタリングでの利用は難しい。一方、接触媒体を必要としない電磁超音波探触子（EMAT, Electromagnetic acoustic transducer）を配管減肉モニタリングに使用することが検討されてきた⁽¹⁾⁽²⁾。しかし、圧電素子と比べ、EMATは送受信の信号が弱く、SN比が小さい問題点がある。それを解決するため、EMATを用い

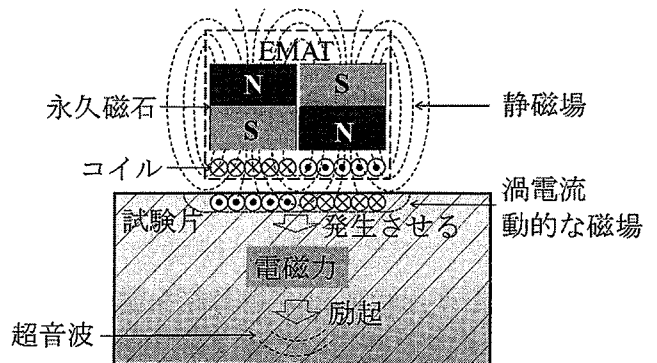
た電磁超音波共鳴法（EMAR, Electromagnetic acoustic resonance）が提案されている。

本稿では、EMATとEMARの原理を説明し、配管減肉モニタリングに関する研究及び適用例について紹介する。

2. 電磁超音波共鳴法

(1) 電磁超音波探触子

EMATは静磁場を印加する永久磁石及び渦電流を励起するコイルから構成される。代表的なEMATの構造は第1図に示した通りである。静磁場及び渦電流の作用により試験片の表面近傍に電磁力を発生させ、超音波を励起する。一方、受信の原理は、超音波の振動による電磁場への摂動により動的な磁場が励起されるため、受信コイルはその動的な磁場を検出する。発信



第1図 EMATの構成と超音波発生原理

の電磁力は試験片の材料により異なる。非磁性材料では、ローレンツ力が電磁力のメカニズムとして超音波を励起するが、磁性材料では、ローレンツ力、磁歪力と磁化力が電磁力の発生メカニズムとなる⁽³⁾。原子力及び火力発電所で使用されている炭素鋼材料に対しては、磁歪力と磁化力は超音波の発生に顕著な影響を与えることなく、磁歪力と磁化力を考慮する必要がない⁽⁴⁾。EMATは接触媒質を必要とせず、非接触で測定できる超音波探触子であるため、試験体表面の錆、凹凸の影響を受けにくく、高温などの過酷な環境での利用も可能である。

(2) 電磁超音波共鳴法

EMAR法はEMATを用いて、バースト波を周波数掃引しながら発信し、試験片の表面と裏面で繰り返し伝搬している反射波が入射波と合成する現象（超音波の干渉現象）により試験片の厚さに対応する共鳴周波数を求める手法である。試験片の厚さが半波長の整数倍の時に、定在波が合成され、それに対応する周波数が共鳴周波数である。定在波が発生する条件は下式で表される。

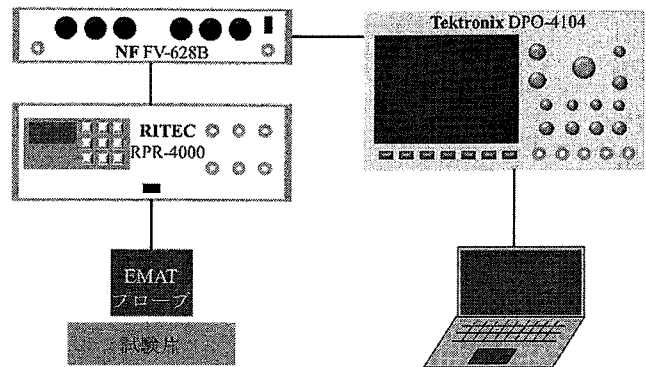
$$d = \frac{k\lambda}{2}, (k \in N^+) \quad \dots(1)$$

ここで、 d は試験片の肉厚、 N^+ は正の整数、 λ は超音波の波長である。超音波の周波数と波長の関係により、下記の式が得られる。

$$d = \frac{kc}{2f^k}, (k \in N^+) \quad \dots(2)$$

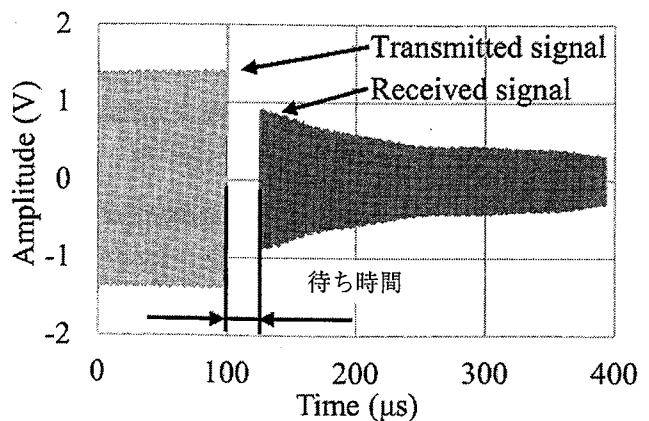
ここで、 f^k は超音波の第 k 番目の共鳴周波数、 $k=1$ の場合、 f^k は基本共鳴周波数である。 c は超音波の速度である。普通、圧電素子を用いた超音波厚さ計は縦波を励起して厚さ測定を行うため、超音波の速度は縦波の速度である。しかし、厚さ測定用のEMATは横波を励起する。EMATでは、超音波の速度は横波の速度を指す。被測定対象の肉厚は式(2)により計算する。

EMAR法の実験システムの例を第2図に示す⁽⁵⁾。EMATプローブ、高出力超音波パルサー・レシーバー (RPR-4000, RITEC Inc.)、フィルター (FV-628B, NF Corporation)、オシロスコープ (DPO-4104, Tektronix Inc.) 及びパソコンから構成される。



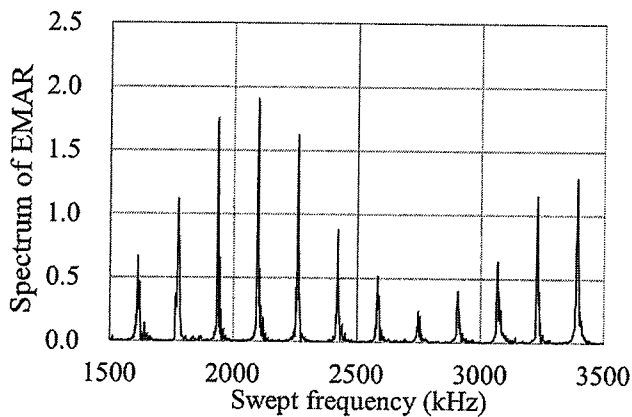
第2図 EMAR法の実験システムの構成例

10.0mmの厚さの炭素鋼平板試験片の厚さ測定を例としてEMAR法の操作を説明する。炭素鋼試験片の材料は一般構造用圧延鋼材SS400である。SS400の横波の速度は3,240m/s（室温）である。はじめに、第3図に示すように、特定周波数の100 μ sのバースト波を発信する。発信の直後、電磁現象の影響で、受信回路で大きなノイズ信号ができるため不感帯ができる。発信が終わってから不感帯等を考慮して待ち時間を



第3図 測定周波数2,260kHzのEMAR信号（共鳴）⁽⁵⁾

設定する（ここでは待ち時間は $25\mu\text{s}$ とする）。次に、受信回路により、受信信号を得る（ここでは待ち時間の後の $125\sim 325\mu\text{s}$ の間の受信信号である）。第3図は周波数が $2,260\text{kHz}$ のバースト波の送受信を示しており、受信信号がほぼ共鳴状態である。図から送信信号の後も試験片内で反射を繰り返しており、振幅の減衰が少ないことがわかる。このように周波数を掃引し（ここでは測定周波数範囲を $1.5\sim 3.5\text{MHz}$ 、周波数を 10kHz ごとに掃引とする）、各周波数の受信信号の振幅を求め、第4図のような振幅スペクトルを作成する。図より隣り合う二つの共鳴ピークの周波数差は約 162kHz であり、式(2)から試験片の測定厚さは 10.0mm である。



第4図 EMARによる振幅スペクトル⁽⁵⁾

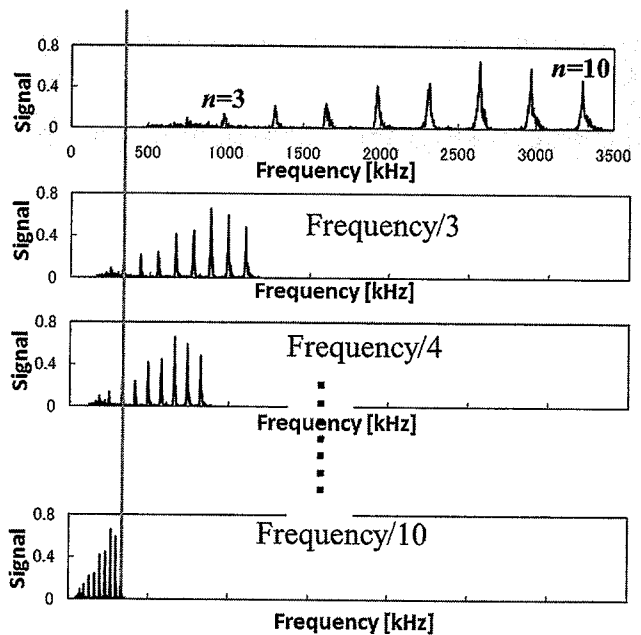
(3) データ処理法 (N周期加算法)

式(2)により、平板試験片の各共鳴周波数は基本共鳴周波数の整数倍なので、隣り合う二つの共鳴周波数の周波数の差は基本共鳴周波数である。しかし、配管壁は曲面であり、且つ、腐食減肉した配管壁は粗い内面を有するため、超音波が散乱して、EMARスペクトルのピーク値は減衰し、共鳴ピークからの基本共鳴周波数の特定は困難となる場合がある。それを解決するため、N周期加算法 (SNC, Superposition of n^{th} compression) が提案されている⁽⁶⁾。各共鳴周波数は基本共鳴周波数の整数倍である条件を満たすことを考慮して、測定周波数軸を $1/n$ に

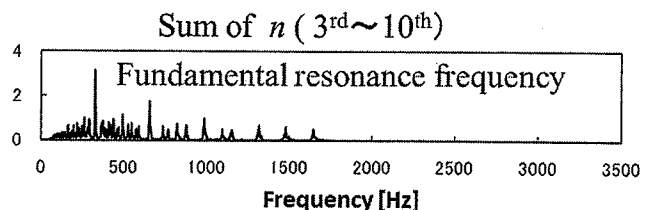
圧縮する。原理は第5図に示した通りである。つまり、 n 番目の共鳴ピーク周波数 (f_n) を基本周波数 (f_1) に圧縮する。その後、圧縮した各ピークを基本共鳴周波数のピークに重ねる。結果の例を第6図に示す。SNC法の原理を下式で表す。

$$f_1 = \arg_f \max \left\{ \sum_n x(nf) \right\} \quad \dots(3)$$

ここで、 f_1 は基本共鳴周波数、 $x(f)$ はスペクトル強度、 n は正の整数、 $\arg \max$ はスペクトル強度が最大の時の周波数である。基本共鳴周波数に複数の共鳴ピークが加算され、基本共鳴周波数のピークが増幅される。



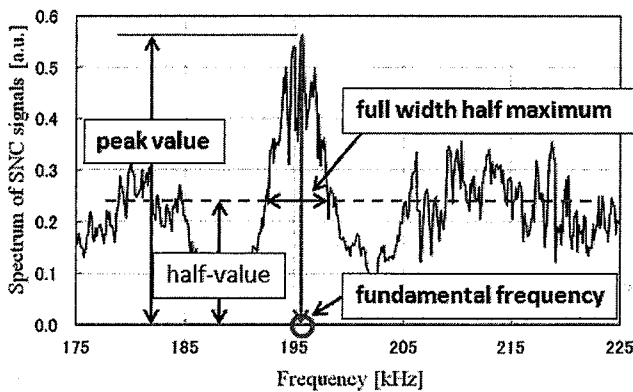
第5図 N周期加算法の原理



第6図 N周期加算法の結果の例

SNC法によりEMARスペクトルから基本共鳴周波数を特定することができる。得られた結果の信頼性を評価するため、規格化SNCピーク値と

半値幅 (FWHM, Full width at half maximum) を定義する⁽⁶⁾。SNCピーク値を規格化するために、EMARの測定条件 (材質、発信信号、ゲイン、試験周波数範囲、掃引周波数など) を同条件に設定する。また、基準試験片として測定対象と同材質の平板を用意し、その測定結果のSNCピーク値を1として、同じ条件で測定することでSNCピーク値を規格化する。この規格化した相対値を規格化SNCピーク値と呼ぶ。試験片内面の乱反射等により受信信号が弱ければ弱いほど、規格化SNCピーク値は小さい。つまり、特定した基本共鳴周波数の信頼性が低くなると考える。もう一つの信頼性の評価に関わるパラメータはFWHMである。第7図に示されるように、FWHMは、得られた基本共鳴周波数の規格化SNCピーク値の半値に対応する共鳴ピークの前後の周波数間隔である。FWHMは厚さに換算し、測定肉厚の範囲として評価することができる。



第7図 評価パラメータとしての半値幅 (FWHM)⁽⁵⁾

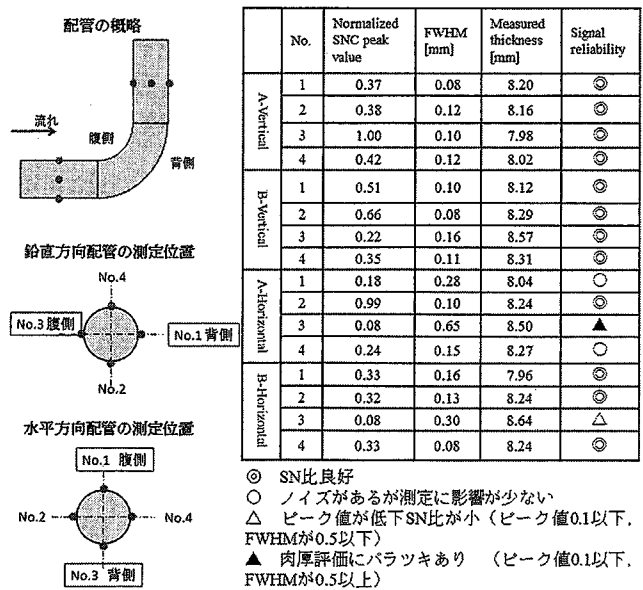
3. EMAR法によるモニタリングの事例

配管減肉検査及び管理は日本機械学会の技術規格等に基づき行う。また、配管減肉の進展状況をより把握し、コスト及びリスクを低減するための改善が求められている。モニタリングにより配管減肉を定点監視することは前記の要求を満たす方法の一つである。しかし、従来

の圧電素子を使用した超音波による減肉測定の手法は接触媒体を要するため、モニタリングに適用することは難しい。また、2009版と2016版の日本機械学会の発電用火力設備規格火力設備配管減肉管理技術規格において、電磁超音波法による試験はすでに規格されている。しかし、EMATは発信プローブだけに使用され、受信のプローブは光ファイバセンサと定められている。従って、測定できる配管の部位は制限され⁽⁸⁾、特に塗装されている配管のモニタリングは困難である。本稿では筆者らが実施したEMATを用いたEMAR法による実機配管の測定とモニタリングの結果⁽⁵⁾⁽⁸⁾を説明する。EMAR法の送受信プローブはともにEMATを使用し、データ処理にSNC法を適用することにより、過酷環境下での配管のモニタリングを実現できる。

(1) 火力発電所配管の測定

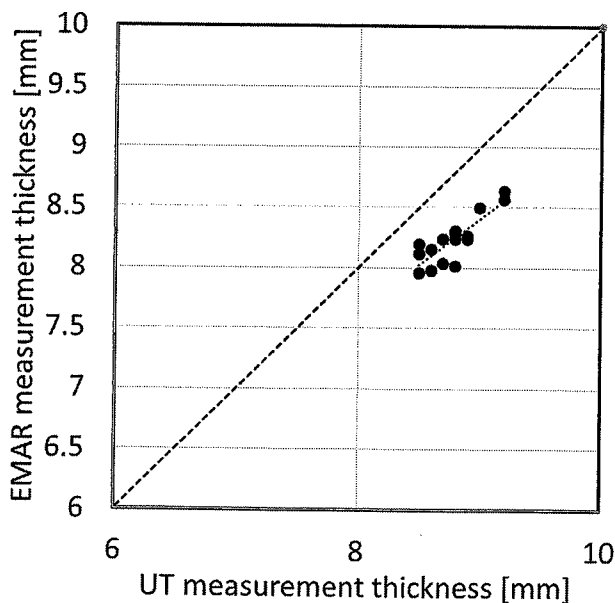
第8図はEMAR法による稼働中の火力発電所配管の減肉評価の結果である⁽⁵⁾⁽⁸⁾。この測定評価は長時間のモニタリングによるものではないが、配管表面の塗装は除去せずにそのまま測定を行う。従って、塗装の有無を問わず、プローブを長時間にわたり固定して、稼働中の発電



第8図 火力発電所配管の減肉評価の結果⁽⁵⁾⁽⁸⁾

所の配管に対して、そのままモニタリングを行うことも可能となる。また、この配管の設計温度は60℃であり、高温配管ではないが、今後稼働中の高温配管のモニタリングに適用することを考慮し、サマリウムコバルト磁石をEMATを構成する永久磁石とする。評価結果から、規格化SNCピークが小さければ小さいほど半値幅は大きい傾向があることが分かった。規格化SNCピークが小さくて、それに半値幅が大きい場合、評価結果の信頼性が低くなる。

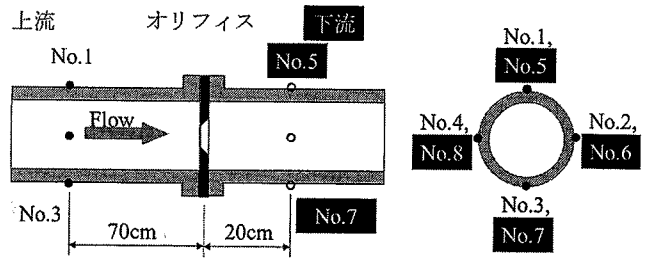
超音波厚さ計でEMAR法と同じ測定点の厚さを測定して、測定厚さを比較する。ただし、配管表面の塗装を除去しないため、接触媒質は塗装の表面に塗布して超音波厚さ計で測定する。第9図はEMAR法と超音波厚さ計との測定厚さの比較である。超音波厚さ計による評価結果は、EMAR法より0.5~1mm程度厚くなることが分かった。これは超音波厚さ計が塗装の厚さも計測したためと考えられる。つまり、EMAR法は送受信も金属である配管の表面で行うため、塗装の影響を受けない。従って、EMAR法による火力発電所や原子力発電所の常温や高温の配管モニタリングに使用することが期待できる。



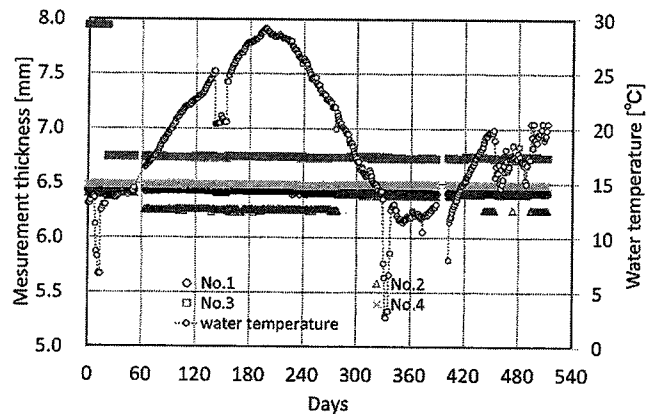
第9図 EMAR法と超音波厚さ計の評価結果の比較⁽⁶⁾⁽⁸⁾

(2) 原子力発電所配管のモニタリング

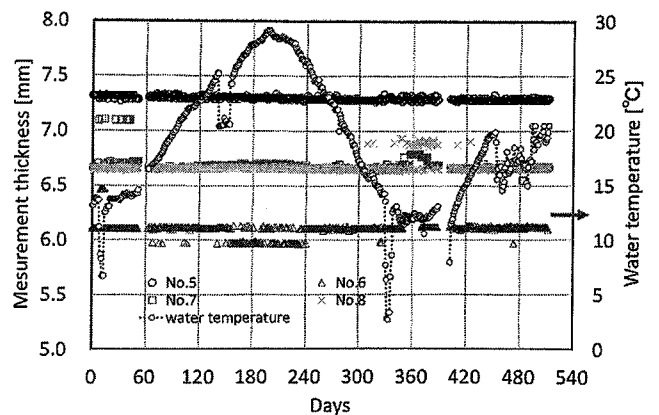
第10図は廃止措置中の東京電力福島第一原子力発電所(1F) 4号機使用済燃料プール循環冷却一次系配管の肉厚のモニタリングのEMATプローブの設置箇所を示す。モニタリングの結果を第11図と第12図に示す⁽⁵⁾⁽⁸⁾。一部の測定点における結果は不安定であるが、長期



第10図 EMATプローブの設定の箇所

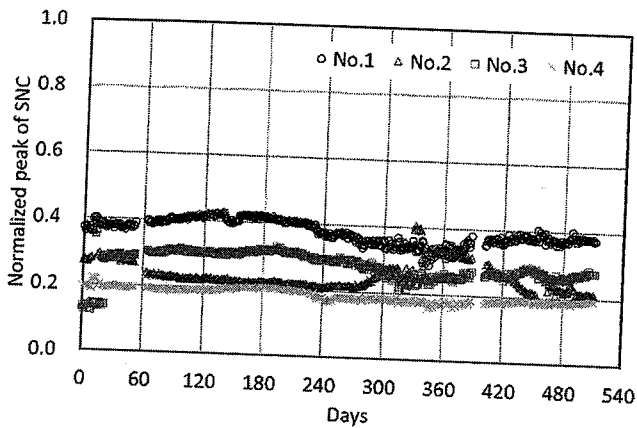


第11図 オリフィス上流での肉厚モニタリング経過⁽⁶⁾⁽⁹⁾

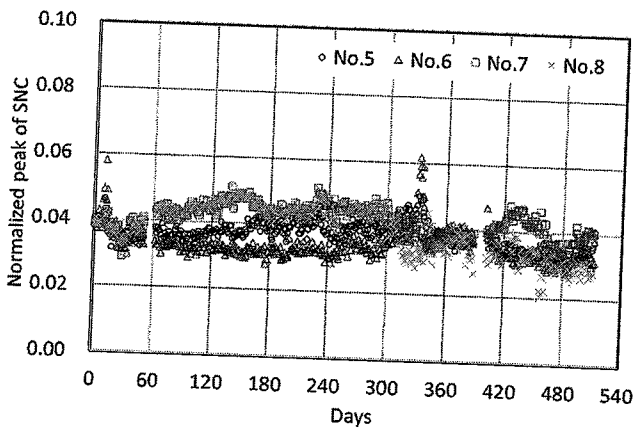


第12図 オリフィス下流での肉厚モニタリング経過⁽⁵⁾⁽⁸⁾

間の肉厚の評価ができています。また、第13図と第14図は減肉評価に対応する規格化SNCピーク値である。オリフィス下流の規格化SNCピーク値は上流と比べ、大きく減衰している。これはオリフィス下流の測定点において腐食減肉により配管内面に形状変化が表れていると考えられる。



第13図 オリフィス上流の規格化SNCピーク値⁽⁵⁾⁽⁸⁾



第14図 オリフィス下流の規格化SNCピーク値⁽⁵⁾⁽⁸⁾

EMATプローブは固定バンドを使用して配管に設置し、測定は一日一回とした。設置場所の空間線量は0.2~1.0mSv/h、配管表面線量は3.5mSv/hであるが、モニタリング測定への影響はなかった。電磁超音波共鳴法は福島第一原子力発電所の廃止措置中の減肉管理に貢献することが期待される。

4. おわりに

原子力や火力発電所の配管減肉管理の高度化・効率化ができるモニタリングが期待されている。本稿では、EMATとEMARの原理を説明し、配管減肉モニタリングに向けた研究及び適用例について紹介した。今後、EMATプローブやEMAR装置の小型化、IoTも含めたデータ処理の高度化は重要な課題である。EMAR法は発電所や化学プラントなどの配管減肉モニタリングに応用することが期待できる。

<参考文献>

- (1) F.Kojima, D.Kosaka, K.Umetani, "Continuous Surveillance Technique for Flow Accelerated Corrosion of Pipe Wall Using Electromagnetic Acoustic Transducer", AIP Conference Proceedings. AIP, Vol.1335, No.1, pp.1341-1346 (2011)
- (2) D.Kosaka, F.Kojima, H.Yamaguchi, K.Umetani, "Monitoring system for pipe wall thinning management using electromagnetic acoustic transducer", E-Journal of Advanced Maintenance, Vol.2, pp.34-42 (2010)
- (3) M.Hirao, H.Ogi, "EMATs for science and industry : noncontacting ultrasonic measurements", Springer Science & Business Media (2013)
- (4) R.Ribichini, P.B.Nagy, H.Ogi, "The impact of magnetostriction on the transduction of normal bias field EMATs", NDT & E International, Vol.51, pp.8-15 (2012)
- (5) 高木敏行・孫宏君・浦山良一・内一哲哉: "電磁超音波を用いた配管減肉測定技術", 保全学, Vol.17, No.4, pp.18-25 (2019)
- (6) T.Takagi, R.Urayama, T.Ichihara, T.Uchimoto, T.Ohira and T.Kikuchi, "Pipe wall thinning inspection using EMAR", Nuclear Engineering International, Vol.58, pp.18-21 (2013)
- (7) (社)日本機械学会: "発電用火力設備規格火力設備配管減肉管理技術規格, JSME S TBI-2016 (2016)
- (8) T.Takagi, R.Urayama, T.Uchimoto, H.Sun, "Pipe-wall-thinning measurement technique employing electromagnetic acoustic resonance and its application to power plant piping", Nuclear Safety add Simulation, Vol.9, No.1, pp.10-21 (2018)

(筆者紹介はp.67参照)