

電磁超音波共鳴法を用いた配管検査技術の 実施適用性の検討

Implementation applicability of piping inspection using electromagnetic
acoustic resonance

東北大学	浦山 良一	Ryoichi URAYAMA	Non-Member
東北大学	高木 敏行	Toshiyuki TAKAGI	Member
東北大学	内一 哲哉	Tetsuya UCHIMOTO	Member
会津大学	兼本 茂	Shigeru KANEMOTO	Member
日本原子力発電(株)	大平 拓	Taku OHIRA	Non-Member
日本原子力発電(株)	菊池 貴好	Takayoshi KIKUCHI	Non-Member

Abstract

The electromagnetic acoustic resonance (EMAR) method provides accurate and stable evaluation and its capability has been demonstrated through online monitoring using a large-scale corrosion test loop in operation at high temperature. This study applies EMAR with the signal processing method of the superposition of n^{th} compression to the thickness evaluation of piping in a nuclear power plant during shutdown. Sections of piping evaluated by EMAR include those having long-term service, where thinning may produce scale-like surfaces, and those having complicated geometry. Moreover, measurement results obtained with EMAR and in ultrasonic testing are compared. The accuracy of the EMAR method depends on the pipe geometry, such as the pipe diameter and whether the pipe is straight or an elbow, the presence of welding, and complicated wall thinning.

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

1. 緒言

原子力発電所において、配管減肉管理は重要な課題である。配管減肉は高経年化に伴い進行することが知られており、安全・安定運転の維持のために配管の減肉状態を適切に把握することが求められている。原子力発電プラントにおける配管減肉管理は、社団法人日本機械学会で定める「発電用原子力設備規格 配管減肉管理に関する技術規格 沸騰水型及び加圧水型原子力発電所」(JSME S NH1/NG1 - 2006)の配管肉厚測定要領に従って、主に超音波厚さ計(Ultrasonic thickness gage, UT)を用いて実施されている。配管肉厚測定結果により算出された減肉率に基づき、配管取替え時期が評価されるため、適切な配管取替え時期を評価するためには、精度の良い配管肉厚測定が必要である。

電磁超音波共鳴法(electromagnetic acoustic resonance, EMAR)は非接触のため、配管外面の塗膜による測定結果への影響が少なく取り付けが簡単など、作業性に優れ減肉のモニタリング用に開発が進められている^(1,2)。また、

り、実機適用が期待されている^(3,4,5)。

本研究では、EMARを用いて停止中の原子力発電所において実機配管の肉厚を測定し、別途測定した超音波厚さ検査による測定結果と比較することにより、配管形状(エルボー、直管、配管径)、溶接部の影響、減肉状態等の関連因子による測定結果への影響を検討する。

2. 試験方法

2.1 電磁超音波共鳴法の原理

電磁超音波を送受信するプローブである電磁超音波探触子(electromagnetic acoustic transducer, EMAT)はコイル及び永久磁石から構成される。試験体が非磁性体のときは、コイルに流れる高周波パルス電流により試験体表面近傍に渦電流が誘導され、そこに永久磁石による静磁場を印加すると試験体表面近傍に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。このパイアス磁場と周期的な動磁場は磁歪力による振動を発生し、横波が試験体内を垂直に伝播することとなる。受信は上記の逆過程によりコイルに発生する電圧変化を受信することにより行う⁽⁶⁾。

ここで、振動源と受信源が試験体表面内部にあるため

連絡先: 高木敏行, 〒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: takagi@ifs.tohoku.ac.jp

良好な測定精度が、ラボ試験結果等により確認されてお

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特徴がある。

また、コイルにバースト波を流すと連続した超音波が試験体に伝播し、試験体の両面で反射を繰り返す。超音波の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。

2.2 N 周期加算法

EMAR 信号の信号処理法である N 周期加算法 (Signal of superposition of nth compression, SNC) 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⁷⁾。すなわち、EMAR 信号の基本波形に対して周波数軸を $1/n$ だけ縮小することで、 n 次の共鳴周波数 f_n を基本周波数 f_1 に重ね合わせることができる。

式 (2) に表すように、EMAR の基本波形を $1/n$ した波形を重ね合わせた信号の最大値から、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。

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

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

ここで、 d は肉厚、 v は試験体の音速、 $x(f)$ は共鳴スペクトル強度である。

3. 実機配管の配管厚さ測定

3.1 試験配管

原子力発電所の給復水系配管の直管、曲管の 8 箇所において電磁超音波共鳴法により測定した。表 1 に測定した配管の概略を示す。測定配管は直管と曲管の各 4 箇所を測定した。直管は材質が STPT38 (高温配管用炭素鋼配管) で外径が No.1 と No.2 が 48.6mm, No.3 が 114.3mm, No.4 が 465.2mm であり、公称肉厚はそれぞれ 5.1, 8.6, 7.1mm である。また、曲管の材質は Nos.5, 6, 7 が STPT38,

Table 1 List of the measurement locations.

Shape	Material	No. of location	Outer diameter [mm]	Nominal thickness [mm]
Straight pipe	STPT38	Nos.1, 2	48.6	5.1
		No.3	114.3	8.6
		No.4	465.2	7.1
Bent pipe	STPT38	Nos.5, 6, 7	89.1	5.5
	SB410	No.8	558.8	10

No.8 が SB410 (ボイラおよび圧力容器用炭素鋼) で、それぞれ外径は 89.1 と 558.8mm, 公称肉厚が 5.5, と 10mm である。

全ての配管の両端は他配管と溶接により繋がれている。なお、同発電所は定期点検のためプラントは停止状態であり、配管の保温材を外した状態で測定を行っている。

3.2 実験方法

EMAT の送信コイルは外径 ϕ 10mm の円形コイルで巻き数が 40 回である。受信コイルは外径 ϕ 20mm の円形コイルで巻き数が 80 回でありコイル線径はともに ϕ 0.12mm である。送信コイルと受信コイルの外径の違いは、送信コイルは底面の傾斜や凹凸の影響を少なくするため狭い範囲に超音波が当たるようにコイル径を小さくし、受信コイルは受信信号の振幅が低下しないように送信コイルよりも大きくしてある。永久磁石はサマリウムコバルト磁石、大きさ $10 \times 20 \times 20 \text{mm}^3$ を 2 個使用する。

試験周波数範囲は 1.5MHz~3.5MHz, 周波数掃引間隔を 10kHz さらに解析周波数単位を 1kHz とし、入射波であるバーストの印加時間を 100 μ m, 電圧を 1290V_{p-p} (2MHz) とし、受信信号の GAIN を 70dB, サンプリングレートを 50MS/sec とする。ただし、測定時間短縮のためにいくつかの測定箇所においては、試験周波数範囲を共鳴周波数のピークが 3 個以上確認できる範囲で測定している。

測定箇所の表面の状態は、UT 測定後の測定であったため塗膜を剥がした状態であり、UT 測定箇所を示すペイントによるマーキングの上から測定する。溶接部近傍での測定では、溶接の肉盛りによって EMAT が傾くため、EMAT が溶接部にかからないように UT のマーキングから 5~10mm 程度離れた箇所で測定する。EMAT の取り付けは測定部位が炭素鋼配管であるため、EMAT 自体の永久磁石の磁気力により配管に保持する。

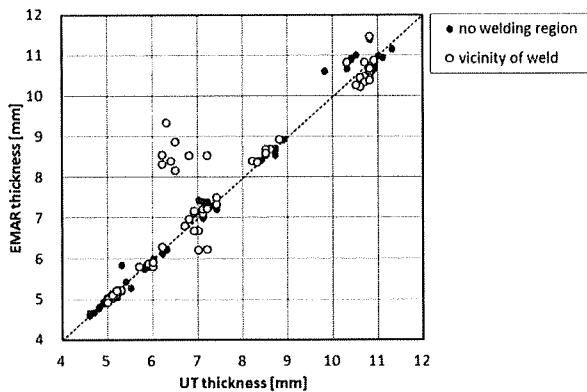


Fig.1 Relationship between UT and EMAR.

UTはEMARと同じ定期点検中に測定し、測定者は発電用原子力設備規格 JSME S NH1 / NG1 - 2006 に定めた技量を有することの認定を得た者である。UTの測定法は、マーキングされた測定位置の範囲で測定厚さが最小となる点を測定するものである。これに対して、EMARの測定は測定箇所にて EMAT を固定して測定している。UTが測定範囲内の最小厚さを観測するのに対して、EMARは測定箇所において EMAT のコイル範囲の信号を評価する違いがある。

4. 実験結果及び考察

図1にUTとEMARの肉厚測定結果の関係を示す。図中の黒丸が溶接部がない箇所での測定結果であり、白丸が溶接部近傍での測定結果である。溶接部近傍の一部でEMARとUTとの差が大きくなる傾向がある。また、溶接部を除いた直管とエルボの差のRMSはともに0.26であり、また配管径による大きな影響は見られなかった。UTの過去の測定結果から算出された減肉率の大小からも影響は見られなかった。

図2にSNCピーク値とEMARとUTの差の関係を示す。SNCピーク値が低下するに従いUTとの差が大きくなる傾向にある。SNCピーク値が0.5以上のときにUTとの差は0.2mm以下であり信頼性の高い関係を示している。しかし、ピーク値が0.1以下になるとその差は拡大して最大で3mmの差が見られる。

UTとの値に差が認められるのは直管のNo.3である。図3に直管No.3の配管部の概要と測定位置を示す。また、表2に直管No.3のEMARとUTの厚さ測定結果を示す。溶接部に近い周方向の測定箇所A列でUTとの差が大きくなっている。

測定点がA-5の溶接部からの距離によるEMAR信号

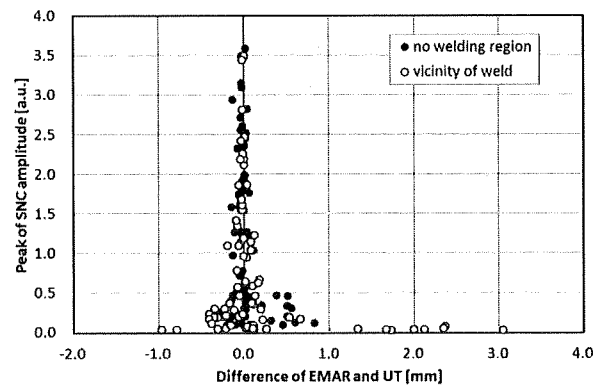


Fig.2 Relationship between difference and SNC peak.

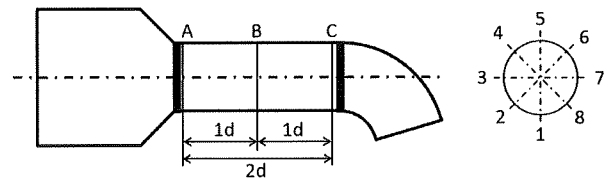


Fig.3 Measurement points of straight pipe No.3.

Table2 Measurement thickness of EMAR and UT. [mm]

No.	EMAR			UT		
	A	B	C	A	B	C
1	-	8.66	8.68	6.1	8.7	8.6
2	9.34	8.71	8.68	6.3	8.7	8.6
3	8.86	8.92	8.92	6.5	8.9	8.8
4	8.53	8.71	8.68	6.8	8.6	8.5
5	8.39	8.42	8.39	6.4	8.4	8.2
6	8.17	8.41	8.37	6.5	8.3	8.3
7	8.32	8.54	8.58	6.2	8.7	8.5
8	8.54	8.54	8.6	6.2	8.5	8.5

を比較する。図4、5にEMATプローブを溶接部から軸方向にそれぞれ10mm、20mm離れたときのSNCの結果を示す。EMARの厚さ測定結果は、8.39、8.31mmで差が小さく公称肉厚8.6mmに近い値を示している。A-5でのUTの測定結果は6.4mmであった。EMATプローブが溶接部から10mm離れた位置では、SNCピークが低いが、20mmの位置では次第にピーク値が大きくなり明確なピークが観測されている。溶接部近傍ではSNCピーク値が減衰しUTとの差が大きくなる傾向が現れたことから、溶接部の裏面若しくは溶接部周辺に超音波を散乱させる底面形状の変化があると思われる。

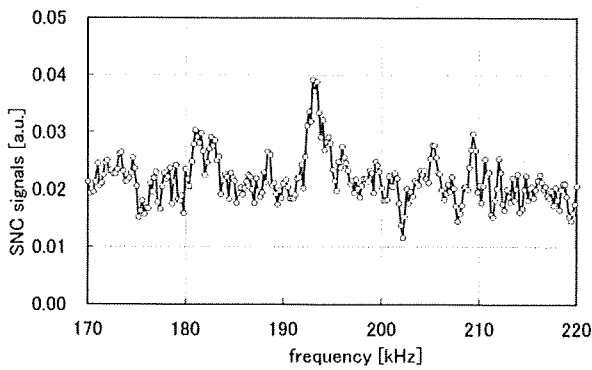


Fig.4 SNC signal at 10mm from the end of weld.

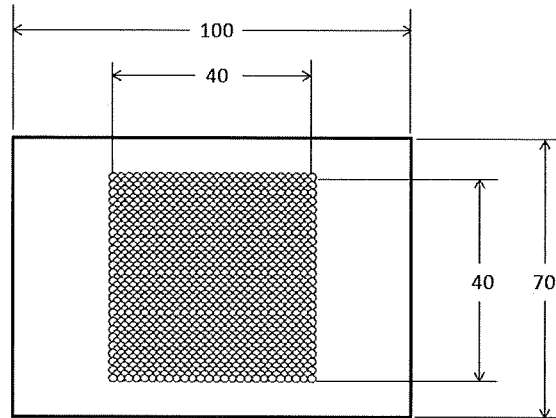


Fig.7 Simulated specimen of scale-like surfaces.

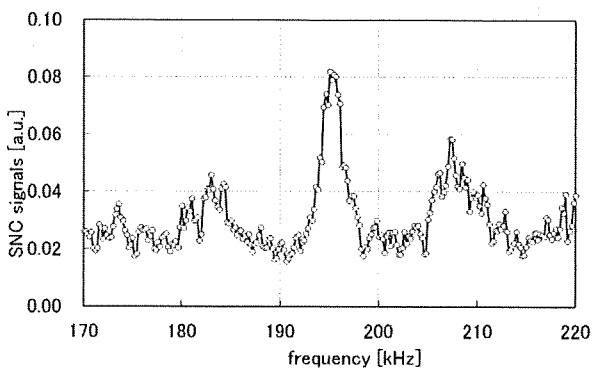


Fig.5 SNC signal at 20mm from the end of weld

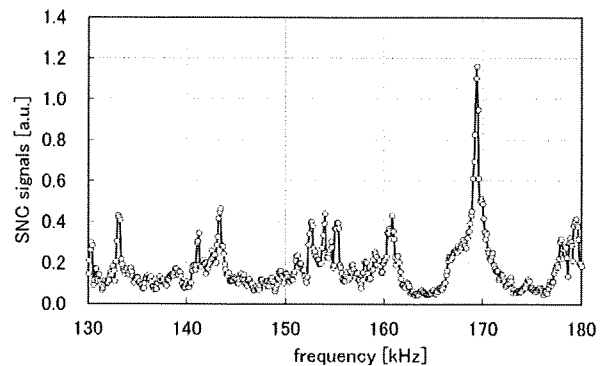


Fig.8 SNC signal of scale-like surfaces.

底面の形状が EMAR 信号に及ぼす影響を模擬減肉試験片との比較により検討する。図 5 に模擬鱗辺状試験片の概要を示す。大きさは $100 \times 100\text{mm}$ で厚さ 9.9mm 、材質 SS400 に直径 3mm のボールミルで、深さ 0.4mm 、ピッチ 2mm で模擬減肉を加工してある。図 6 に模擬鱗辺状試験片の EMAR による測定結果を示す。SNC ピークの減衰は小さくピークが明確に表れ、基本共鳴周波数から算出された減肉は加工寸法の 0.4mm に対して 0.3mm であった。鱗辺状の連続した $R1.5\text{mm}$ の小さい凹凸は EMAR 信号に大きな影響を与えないと考えられる。

図 7 に底面が勾配を持った試験片を示す。大きさは $100 \times 120\text{mm}$ 、厚さ 12mm で底面に 5° の勾配が加工してある。図 8 に EMAR の測定結果を示す。SNC ピークが減衰を示している。これは、図 3 の溶接部近傍の信号に似ている。しかし、直管 No.3 の A-5 位置と隣接する測定点の厚さに大きな差が見られないため傾斜が発生しているとは考えにくい。

No.3 の直管には径の大きい配管が絞るように接続されており、A 列近傍の溶接は通常の同じ径のパイプを接続するよりも複雑になっている。EMAR と UT との差が大きくなった原因として、減肉の形状変化ではなく

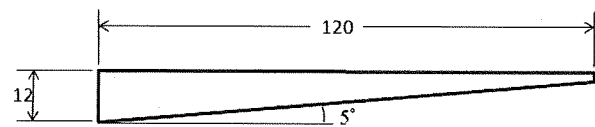


Fig.9 Specimen of the inclined bottom.

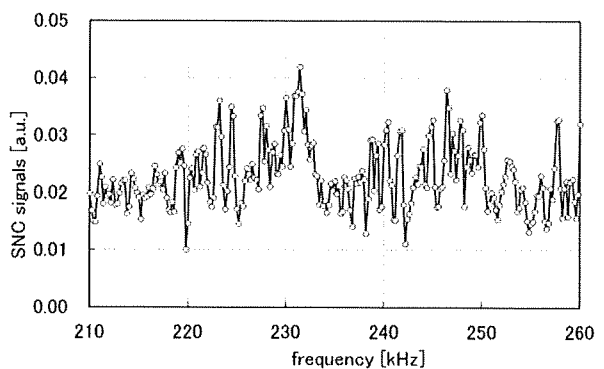


Fig.10 SNC signal of the inclination.

溶接による裏面若しくは溶接部内の欠陥があげられる。また、UT が溶接肉盛りの端から $0 \sim 5\text{mm}$ の位置で最小厚さを観測するため溶接部の影響を受けやすく公称肉厚よりも小さい値となり、一方 EMAR は溶接端部から

10mm 離れた箇所測定を行っているので溶接部の影響が小さく公称肉厚に近い値を示したと考えられる。ただし、「発電用原子力設備規格 JSME S NH1 - 2006」には溶接線がある場合に下流側に約 20mm 程度離れたところで測定することが定められており、今回の EMAR の測定位置はこの値から大きく外れてはいない。

4. 結語

本研究は、EMAR を用いて停止中の原子力発電所内の実機配管の肉厚を測定し、別途測定した超音波探傷検査による測定結果と比較することにより、配管形状（エルボ、直管、配管径）、溶接部の影響、減肉状態等の関連因子による測定結果への影響を検討した。

①直管、エルボ、配管径の形状による影響は少ない。

②減肉率の大小による際立った影響は見られなかった。

③UT と EMAR の測定厚さに大きな影響を与える要因は溶接部にある。

溶接部での UT と EMAR の測定厚さの差は両者の測定法の違いと測定箇所のずれがあげられる。

EMAR の実機への適用性として、

①NSC ピーク値が 0.5 以上では UT と同様に信頼性の高い肉厚評価が可能である。

②溶接部においては、溶接線からの距離により溶接部の影響の違いが現れることがあるため、UT と EMAR の測定厚さに差が出る可能性がある。ただし、EMAR を用いた同一測定点での継続的な測定により減肉の進展を評価することは可能と考える。

今後は、さらなる高信頼性と高精度を持った減肉検査

法とするため、SNC ピークの減衰の原因である溶接部や配管内面の傾斜においても信号強度の高い受信信号が得られるよう EMAT プローブの改良を試みる予定である。

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] 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.
- [4] 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.
- [5] F. Hernandez-Valle and S. Dixon, “Pulsed electromagnetic EMAT for ultrasonic measurements at elevated temperature”, *INSIGHT*, Vol.53, No.2, 2011, pp96-99.
- [6] R. B. Thompson, “Physical principles of measurements with EMAT Transducer”, *Physical Acoustics Vol.XIX*, Academic Press Inc., 1990, pp.157-200.
- [7] 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.

(平成 24 年 6 月 15 日)