

減肉モニタリング用 EMAT の高温耐久試験結果

The durability test result in high temperature of EMAT for pipe wall thinning monitoring

(独)日本原子力研究開発機構 田川 明広 Akihiro TAGAWA Member

(独)日本原子力研究開発機構 藤木 一成 Kazunari FUJIKI Non Member

This study checks the high-temperature durability of the electromagnetic acoustic transducer (EMAT) for pipe wall thinning. We inserted EMAT into the oven and measured the 10mm thickness specimen by EMAT about two years. Measurement was carried out by two kinds, a pulse echo method and a pulse echo resonance method. And high-temperature durability was checked by both of the measuring methods. Compared with the pulse echo method, the pulse echo resonance method of measurement accuracy was better. The filter processing of removing magnet signal is required high-temperature measurement. EMAT is a simple configuration of a coil and a magnetic combination. Therefore, a sensor does not break easily. Therefore, EMAT is applicable to the pipe wall thinning monitoring of a nuclear power plant.

Keywords: 高温耐久性, 電磁超音波探触子, モニタリング, 配管減肉, パルスエコー法, 共振法

1. はじめに

2009年1月より新検査制度が施行された。新検査制度のもとでは従来と異なり状態監視技術を適用し、そのデータを活用することが可能となり、事業者には科学的・合理性を有する保全計画を立案することが義務付けられた。これにより、発電所は最長24ヶ月までの連続運転が可能となった。本制度に伴い、静的機器の状態監視技術として、電磁超音波探触子(EMAT)を用いた配管減肉モニタリングの研究開発が行われている。従来の研究成果では、配管の減肉測定は可能であるが、その耐久性については磁石の初期減磁特性が把握できる約200時間までの耐久性[1]は確認されているものの、プラント運転期間利用できる耐久性は確認されていない。

そこで、本研究では、EMATを約2年間200°Cの高温環境下で測定し、その高温耐久性を確認するものである。

2. 試験内容

2.1 試験体系

試験体系をFig.1に示す。EMATは、恒温槽内に試験片と共に挿入し、ケーブルのみ恒温槽外に出す。

連絡先: 田川 明広、〒919-1279 福井県敦賀市白木1丁目、独立行政法人日本原子力研究開発機構 FBRプラント工学研究センター ナトリウム技術グループ
TEL. 0770-39-1031、tagawa.akihiro@jaea.go.jp

受信データは、ダイプレクサ、プリアンプ、オシロスコープでAD変換してPCに取り込む。恒温槽はPID制御により200°C/hrで昇温できる。

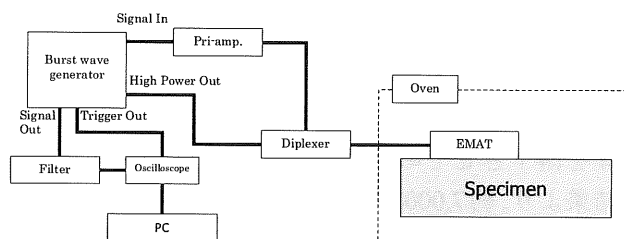


Fig.1 試験体系

2.2 センサ仕様

Fig.2にセンサ仕様を記す。磁石は、高温で使用実績[2]のあるサマリウムコバルト(W10×L2.4×T7mm)4個配列を2組作成した。これをS極N極が対向する向きに配置する。コイルは、インピーダンスマッチングを考慮したφ0.2mm×60巻きを採用し、超音波発振部として30×40mm以内の小型センサを試作した。

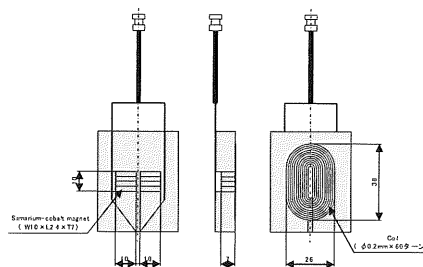


Fig.2 試作センサ外形図

2.3 試験条件

試験は、常温試験と高温試験に分けて実施する。常温試験、高温試験に共通の条件を Table 1 に示す。試験片板厚は、公称 10mm であるが、マイクロメータを用いて実測したところ 9.99mm であった。

Table 1 共通試験条件

周波数 (MHz)	2.0
バースト波数	2
バンドパスフィルタ (MHz)	0.25~5
装置 Gain (dB)	34
プリアンプ Gain (dB)	40
試験片材質	SUS304
試験片寸法 (mm)	70×100
試験片板厚 (公称値)	10.0
(mm) (実測値)	9.99

温度：常温 (20°C)、200°C

測定目標：約 2 年 (17520 時間 (経過時間))

測定期間：2007 年 7 月 12 日～2009 年 7 月 12 日※

※本報告は、2009 年 6 月 1 日現在 (16512 時間)

2.4 試験方法

(1) 板厚測定方法

①パルスエコー法 (以下、PE 法：Pulse echo method)

超音波が鋼材中を伝播し、多重反射する時間差を利用する。板厚は、(1) 式の通り計算できる。

$$T = \frac{v(t_{n+1} - t_n)}{2} = \frac{v\Delta t}{2} \quad (1)$$

T : Thickness (mm)、t : Time (μ s)

v : Velocity (mm/s)

②パルスエコー共振法 (以下、PER 法：Pulse echo resonance method)

受信した超音波を周波数解析し、共振周波数を求めることで板厚に変換する。このとき、板厚は、(2)式[3]の通り計算できる。電磁超音波共鳴法[3]の原理は、送信周波数を掃引し、共鳴スペクトルを変化させ個々の周波数の振幅を検出することに対し、本研究では特定の周波数を送信し、周波数解析により受信波形の共振周波数を検出するため、「パルスエコー

共振法」と言う。

$$T = \frac{n\lambda}{2} = n \left(\frac{v}{2f_n} \right) \quad (2)$$

n : Number of resonance、f : Frequency (Hz)

(2) 高温試験時の熱膨張

200°Cでは熱膨張することから、試験片の熱膨張を考慮した測定が必要となる。ここで、 α は線膨張係数、 L は常温(RT)での試験片板厚、 ΔT は常温と高温(HT)の温度差とすると。熱膨張後の板厚は、(3)式の通りとなる。

$$L_{HT} = L_{RT} + \alpha L_{RT} \Delta T \quad (3)$$

ここで、 $\alpha=17.3 \times 10^{-6} [1/^\circ\text{C}]$ [4]、 $L=9.99 [\text{mm}]$ 、 $\Delta T=180 [^\circ\text{C}]$ (常温 20°C) より、 ΔL を求めると $\Delta L=0.031 [\text{mm}]$ となり、200°Cでの板厚は、10.02mm となる。

3. 試験結果

3.1 常温試験

常温試験結果を Fig.3、Fig.4 に記す。

矢印部が底面からの反射に相当する信号と共振周波数である。

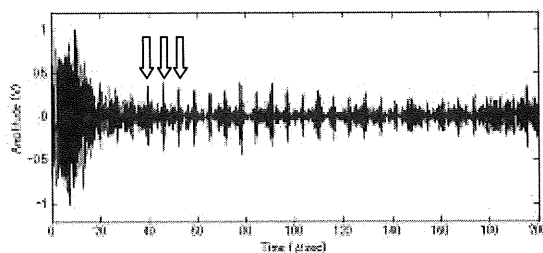


Fig.3 エコー波形 (矢印は、底面反射代表部)

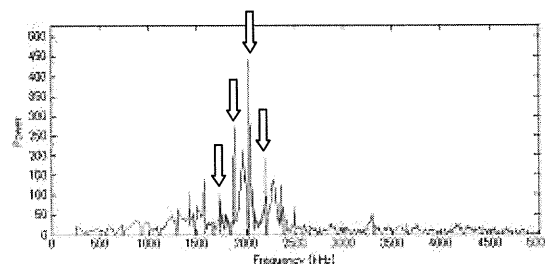


Fig.4 受信波の周波数解析結果 (矢印は、共振周波数代表部)

Fig.3、Fig.4 には、磁石からの反射波も含まれる。磁石の板厚、音速は試験片とは異なるため

試験片信号と重ならないが、温度変化による音速変化や減肉の進展により波が打ち消しあう場合も考えられる。磁石成分をカットするフィルタ処理を行った。フィルタは、磁石の音速を(4)式で、反射波の共振ピークを高速フーリエ変換(FFT)で求め、磁石に該当する周波数成分を除去したあとで、逆FFT変換するものである。磁石信号カット前後の比較を Fig.5、Fig6 で行う。

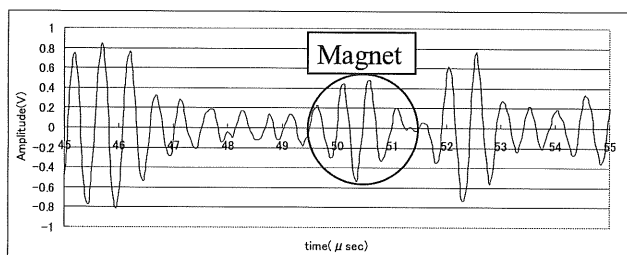


Fig.5 磁石信号カット前のエコー波形
(45μsec から 55μsec)

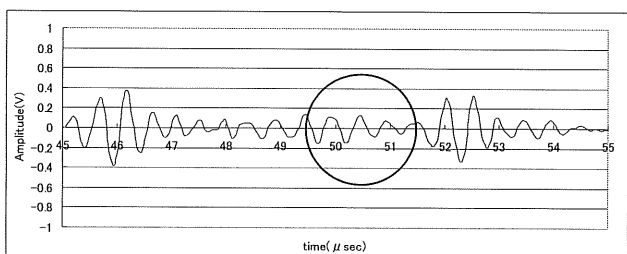


Fig.6 磁石信号カット後のエコー波形
(45μsec から 55μsec)

46μsec 近辺と 52.5μsec 近辺に試験片からの反射波が確認でき、フィルタ処理前には 50~51μsec (丸部) に磁石からの反射波が確認できる。磁石からの反射で得られる共振周波数を除去するため、フィルタ後の試験片からの反射波の信号レベルは約 50%程度に低下する。しかし、信号ノイズ比 (SN 比) を比較すると、フィルタ処理前は、SN 比が 1.47~1.62 であるが、フィルタ後は、2.3~2.65 と 1.5 倍以上改善された。

なお、磁石の音速は文献等に記載がないことから、別試験で確認し、(4)式の関係にあることを確認している。本研究での磁石音速は(4)式を利用して求めることとした。

$$v = -0.173Te + 2578.96 \quad (4)$$

v : Velocity (m/sec) Te : Temperature (°C)

(常温 (20°C) : 2575.5m/sec 高温 (200°C) : 2544.4m/sec を利用)

また、試験片(SUS304)音速も正確に把握するには試験片毎の音速測定が必要であるため、事前に音速を測定した。常温(20°C)で 3126m/sec、高温(200°C)で 3015m/sec であったので、本研究では、この音速を利用する。

Table2 は、PE 法による板厚測定結果である。9.99mm の実測値に対し測定値の平均値は 10.00mm±0.04mm であった。Table3 は、PER 法による板厚測定結果である。測定値の平均値は 9.99mm±0.01mm と PER 法の測定精度は PE 法に比べ高いことが確認できた。

磁石ノイズを除去することで、ピーク判別も容易になった。

Table 2 PE 法による板厚測定結果 (常温 20°C)

Pulse number [time]	Peak time [μ sec]	ΔT [μ sec]	Thickness [mm]
5	33.12		
6	39.52	6.40	10.00
7	45.96	6.44	10.07
8	52.32	6.36	9.94
9	58.72	6.40	10.00
10	65.12	6.40	10.00
11	71.52	6.40	10.00
12	77.92	6.40	10.00
13	84.28	6.36	9.94
14	90.68	6.40	10.00
15	97.08	6.40	10.00
Average		6.40	10.00
Standard deviation		0.02	0.04

Table 3 PER 法による板厚測定結果 (常温 20°C)

Resonance Freq. [kHz]	Resonance number [time]	Thickness [mm]
1409.7	9	9.98
1564.7	10	9.99
1719.7	11	10.00
1879.6	12	9.98
2029.6	13	10.01
2194.6	14	9.97
2349.5	15	9.98
Average		9.99
Standard deviation		0.01

3. 2 高温試験

①熱履歴

原子炉の連続運転を模擬するために 200°Cの高

温環境を保つため、試験施設のメンテナンス等で電源を落とさなければならない場合以外は、常に高温を維持した。ただし、測定は1日に1回程度とし、センサへの通電は測定時のみとした。これは、配管減肉は時間オーダーで進展するものではないため、1日に1回の測定で十分であると考えられる。Fig.7に高温試験の熱履歴を示す。使用時間は、試験開始からの経過時間で評価し、高温耐久性は、センサが高温である時間を高温時間とし評価する。熱履歴のみ経過時間で表記し、Fig.8~Fig.14の時間は高温時間で表記する。センサにかかる、熱応力制御は行っていないが、昇温は200°C/hrで上昇させており、7回/2年の昇温、降温を行っていることから、繰り返し熱疲労の影響も観察できる。

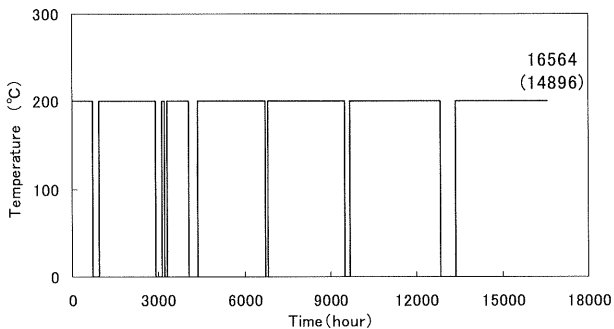


Fig.7 高温試験熱履歴 (経過時間 16564 時間、高温時間 14896 時間 2009/6/1 現在)

②試験結果

Fig.8~Fig.11に高温試験結果を示す。受信波形は、常温同様、磁石信号除去のフィルタ処理を行った。高温時間 14896 時間経過後も底面からの多重反射がはっきりと確認できる。

Fig.12は、高温時間 14896 時間後の周波数解析結果であるが一部磁石ではないノイズが確認されるが、共振周波数ははっきりと区別可能である。

次に、Table1にPE法による板厚測定結果をTable2にPER法による板厚測定結果を示す。PE法は、熱膨張を考慮した板厚 10.02mm に対し、10.04±0.05mm、PER法は、10.02±0.01mm と常温同様にPER法の測定精度がPE法より高いことがわかった。また、このことから、高温状態で約 15000 時間経過後も高精度で測定可能であることがわかった。

Fig.13は、磁石信号除去のフィルタ処理を実施していない周波数解析結果であるが、高温では、磁石信号が大きくなり試験片の多重反射信号と干渉する

ことが確認されたことから、フィルタ処理や磁石高さを被検体に合わせた最適化する設計は必要である。

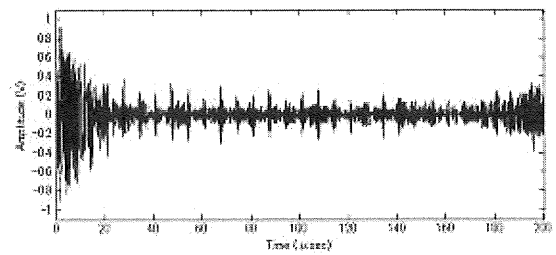


Fig.8 200°C, 0 時間の受信波形

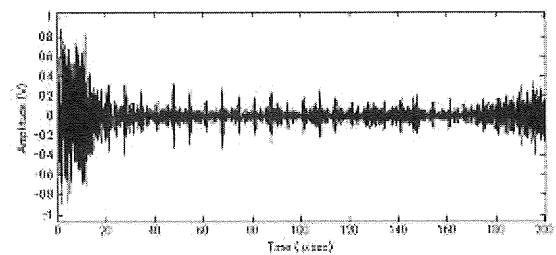


Fig.9 200°C, 1032 時間後の受信波形

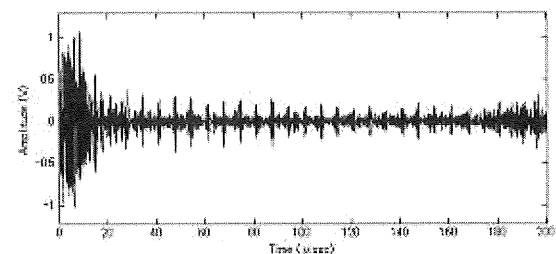


Fig.10 200°C, 10048 時間後の受信波形

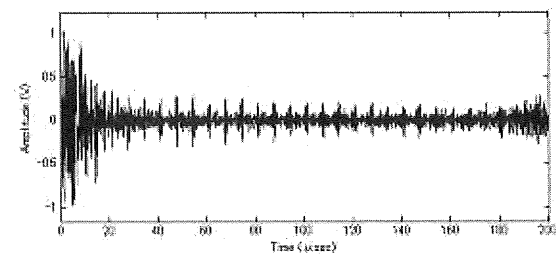


Fig.11 200°C, 14896 時間後の受信波形

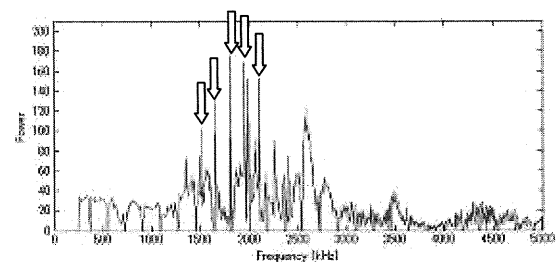


Fig.12 200°C, 14896 時間後の周波数解析結果 (矢印は、共振周波数代表部)

Table 4 PE 法による板厚測定結果 (高温 200°C)

Pulse number [time]	Peak time [μ sec]	ΔT [μ sec]	Thickness [mm]
5	34.67		
6	41.36	6.69	10.09
7	48	6.64	10.01
8	54.64	6.64	10.01
9	61.28	6.64	10.01
10	67.96	6.68	10.07
11	74.63	6.67	10.06
12	81.28	6.65	10.02
13	87.92	6.64	10.01
14	94.52	6.60	9.95
15	101.24	6.72	10.13
Average		6.66	10.04
Standard deviation		0.03	0.05

Table 5 PER 法による板厚測定結果 (高温 200°C)

Resonance Freq. [kHz]	Resonance number [time]	Thickness [mm]
1354.7	9	10.02
1504.7	10	10.02
1654.66	11	10.02
1804.64	12	10.02
1954.6	13	10.03
2104.58	14	10.03
2254.549	15	10.03
Average		10.02
Standard deviation		0.01

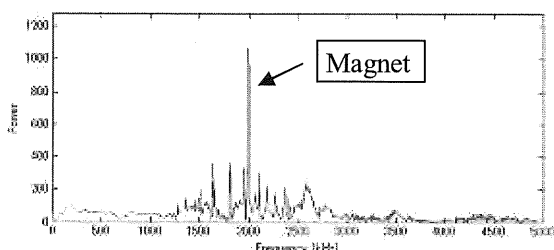


Fig.13 200°C, 14896 時間後の周波数解析結果 (磁石フィルタなし)

Fig.14 は、受信感度と時間の関係である。高温では、常温に比べばらつきは大きいものの、平均約20%の感度低下が見られた。

しかし、時間経過とともに受信感度が減少する傾向もないことから、経過時間で 16564 時間、高温時間で 14896 時間の耐久性を有することを確認した。外挿すると、目標とする経過時間 17520 時間 (2年) を達成できる見通しがあると判断する。

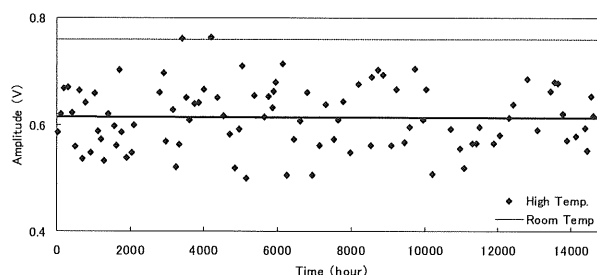


Fig.14 受信感度と時間の関係 (経過時間 16564 時間、高温時間 14896 時間 2009/6/1 現在)

4. まとめ

試作した EMAT に対し、200°C の高温環境下で約 2 年間の耐熱・耐久試験を実施し、その性能を確認した。試験の結果、約 15000 時間後も著しい感度低下は確認されず、必要な板厚測定精度を維持できた。測定精度は、PE 法に比べ PER 法の方がよいことが確認できた。しかし、磁石ノイズは高温では高くなることからフィルタが必要であることがわかった。

EMAT は、コイルと磁石の組み合わせというシンプルな構造であることから、耐久性という観点での個体差は発生しにくい。このことから、EMAT は、プラント配管の減肉モニタリングに適用できる耐久性を有しているといえる。

参考文献

- [1] A. TAGAWA, et al., "Investigation of the On-line Monitoring Sensor for a Pipe Wall Thinning with High Accuracy", E-Journal of Advance Maintenance Vol.1 (2009) p.52 - p.62
- [2] Y. XU, et al., "Characterization of SH Wave Electromagnetic Acoustic Transducer (EMAT) at Elevated Temperature, in Recent Advances in Nondestructive Evaluation Techniques for Material Science and Industries", ASME/JSME Pressure Vessels and Piping Conference, PVP-Vol.484, pp.177-184(2004)
- [3] M. HIRAO, et al., "Electromagnetic acoustic resonance and materials characterization", Ultrasonics, Vol. 35, No.6, pp. 413-421(1997)
- [4] ステンレス協会, ステンレス鋼便覧, pp.430-431