

高温配管減肉の高精度連続監視システム

System for the High Accuracy Monitoring of Piping Thickness Using High Temperature Probes

森 田 勝 株式会社 IHI 検査計測 研究開発事業部 副事業部長
 加 藤 明 株式会社 IHI 検査計測 研究開発事業部生産技術部
 畠 中 宏 明 技術開発本部生産技術センター生産基盤技術部 主査 博士(工学)
 熱 田 美 道 株式会社 IHI 検査計測 研究開発センター研究管理グループ 課長
 荒 川 敬 弘 株式会社 IHI 検査計測 フェロー 工学博士

腐食を防止するために、各種の防食技術が検討されてきている。これらの防食の効果を短期間で適切に評価するには、 μm 単位での高精度の減肉監視システムが望まれる。耐熱性に優れた高温超音波センサを配管に取り付け、得られた超音波信号をリアルタイムウェーブレットや相互相関処理などの信号処理を用いて高精度に減肉を監視する方法を検討し、高精度減肉連続監視システムを開発した。本システムは、原子力発電所のタービン建屋内配管に設置し、客先で実施中の防食水処理の効果の確認に寄与している。

Various anti-corrosive techniques to control corrosion ratios have been discussed. A system to monitor with high accuracy plate thickness (to the μm level) is needed to evaluate appropriately the effect of these anti-corrosion techniques over a short period of time. Therefore, a system for the high accuracy monitoring of piping thickness using high temperature probes was developed by using the signal processing of waveforms obtained from high temperature ultrasonic sensors that are highly resistant to heat installed onto high temperature piping. This system has set up for the piping in a nuclear plant's turbine building, and is contributing to confirmations by the plant operator of the effectiveness of the anti-corrosion water chemistry processing carried out thereby.

1. 緒 言

古代より人類は金属の腐食と戦ってきた。腐食は錆^{さび}を形成し、外観を損なうだけでなく、減肉によって強度不足を起こし、また、時には貫通して構造物の機能を損なう。このため、多くの防食技術が開発され、効果を上げている。しかし、今日においても、腐食に伴う損傷事例は多く、重大事故に至る例も報告されている。

したがって、重要な部材においては肉厚が定期的に測定される。肉厚の測定には、高い周波数の音である超音波を部材に垂直に入射して、底面で反射した超音波の伝搬時間から一般に求められている。超音波の送信には探触子と呼ばれる超音波センサが用いられる。

腐食のより激しい高温では、この探触子の耐熱性に制約があり、高温構造物では、温度を下げて行われる開放検査時に肉厚も検査されていた。高温での計測を可能にするための、耐熱性に優れた高温超音波センサを開発している。

また、短期間で腐食の動向を知ることができれば、長期的な腐食への対策の策定や防食の効果の確認と最適化が可能になる。このため、減肉の高精度連続監視システムを開発したので、高温超音波センサと併せて紹介する。

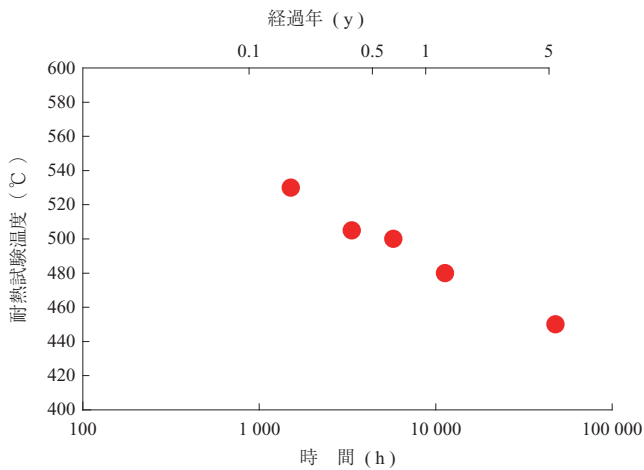
2. 高温超音波センサ

通常の探触子には、電気信号と機械振動を相互に変換できる性質(圧電効果)のある圧電素子が用いられている。この圧電素子の両面に電極を取り付け、これを保護板に接着剤で取り付けられている。高温用の接着剤を用いたとしても、耐熱性には限界がある。

耐熱性を飛躍的に向上させる目的で、有機系の接着剤の代わりに金属接合による取付けを行っている。具体的には、約 1200°C まで圧電効果の損なわれることのないニオブ酸リチウム(単結晶セラミックス)を用いて、これを金属に直接アルミ系のろう材で取り付けている^{(1),(2)}。

第1図に、この超音波センサの耐熱性を測定した結果の例を示す。高温超音波センサを電気炉中に放置し、センサの全体の温度を所定の温度に昇温した後に温度を保持し、底面エコー高さの変化を測定した。ここでは、底面エコー高さが 5 dB 低下(約 45% の低下)するまでの時間を耐熱時間として表している。 450°C の炉中では 5 万時間(約 6 年)を超えて放置しても感度の低下は見られず、極めて優れた耐熱性を示すことが確認された。

また、 10 MGy の放射線(γ 線)照射においてもほと



第 1 図 高温超音波センサの耐熱性の例

Fig. 1 Examples of tests of the heat resistance of the high temperature ultrasonic sensors

んど感度変化のないことも確認できており、核融合炉などの高線量下での供用中検査などへの適用も期待されている⁽³⁾。

このセンサは、カナダの CANDU 炉の炉心近傍の小口径配管に取り付けられ⁽⁴⁾、10 年以上にわたり肉厚の監視を連続して続けている。

3. 高精度減肉連続監視システム

年間の腐食減肉量が 0.1 mm とした場合、1 日当たりの平均減肉量は約 0.3 μm になる。この腐食の傾向を短期間で知ろうとすると、ミクロンメートルオーダでの肉厚の測定精度が必要になる。

このため、高精度に超音波波形の変化量を読み取るため、超音波信号を採取するサンプリングピッチを 1 GHz とし、さらに採取した信号を 10 倍にスプライン補間している。すなわち、1 秒間に 10¹⁰ 分割した数値データを採取した。鋼中の縦波音速は約 5 900 m/s であり、データ間の時間は 0.3 μm の鋼中の往復伝搬時間に相当する。

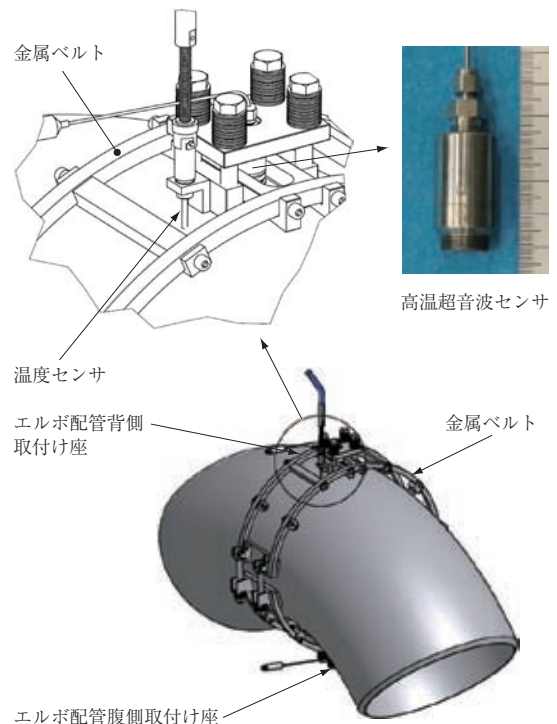
この超音波波形から、超音波センサと被検査体との界面エコーと被検査体の底面エコーとの時間差から音速を用いて肉厚を求めるが、精度を上げるために種々の工夫をしている⁽⁵⁾。

白色光が種々の波長の光を含んでおり、屈折することで七色の虹を形成するように、この超音波信号にも、中心周波数を 5 MHz にして、幅広い周波数の波形が含まれている。まず、リアルタイムウェーブレット（時間領域の情報を残した広い周波数領域の周波数解析法で解析に要する時間を短縮した手法）を用いて、公称周波数の 5 MHz の

単色の波形を抽出した。この波形のなかから超音波センサと被検査体との界面エコーと底面エコーを抽出し、両者の時間差を相互相関処理によって正確に求めている。相互相関処理とは、片方のエコーを動かして重ね合わせていき、両者の数値の積の合計を求めて相関を求める方法で、積の最大値が得られたときの片方のエコーの移動時間を超音波が試験体を伝搬した時間とした。

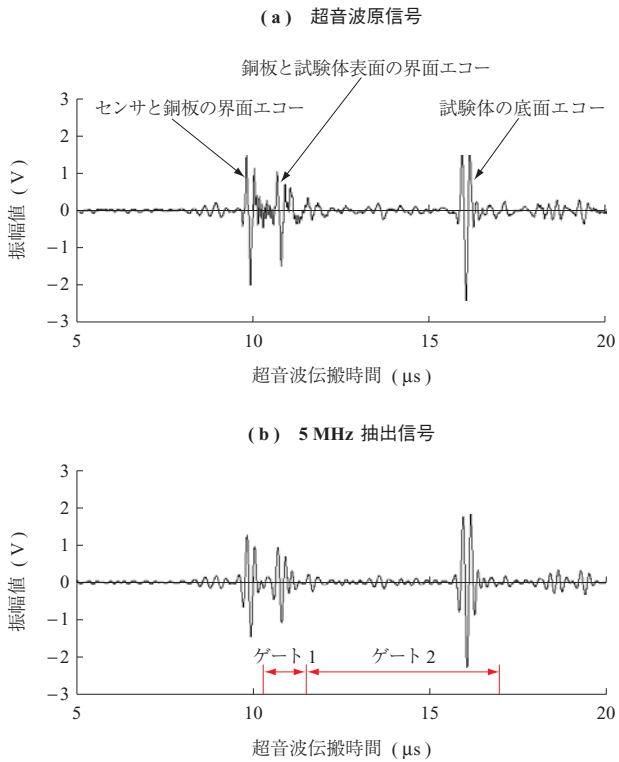
なお、高温超音波センサを構造物に取り付けて、超音波を減肉の監視部位に確実に伝達させることも重要である。超音波探傷試験で、試験片に超音波を伝達させる方法としては、一般に水やグリセリンなどの接触媒質と呼ばれる液体を介して行われる。しかし、高温で長期間の監視では液体は乾燥して伝達損失が損なわれる。このため、超音波センサと減肉を監視する構造物の間に軟金属を挟んで、皿ばね力で密着させ、ドライな環境で超音波を伝達させている。

第 2 図に取付けの様子を示す。また、測定した超音波波形の例を第 3 図に示す。第 3 図 - (a) は測定した原波形を示しており、- (b) はリアルタイムウェーブレットを用いて、5 MHz の周波数の波形を抽出した例を示す。なお、超音波センサと試験体の間に厚さ約 2 mm の銅板を挿入しているので、探傷波形には、超音波センサと銅板の界面エコーと銅板と試験体の界面エコーが隣接して発生し



第 2 図 高温超音波センサの配管への取付け機構

Fig. 2 Method of installation of high temperature ultrasonic sensors onto piping



第3図 減肉量監視試験における探傷波形 (a) とリアルタイムウェーブレットによる 5 MHz 抽出波形 (b) の例
 Fig. 3 Examples of the original waveform (a) and an extracted 5 MHz waveform generated by real-time wavelet analysis (b)

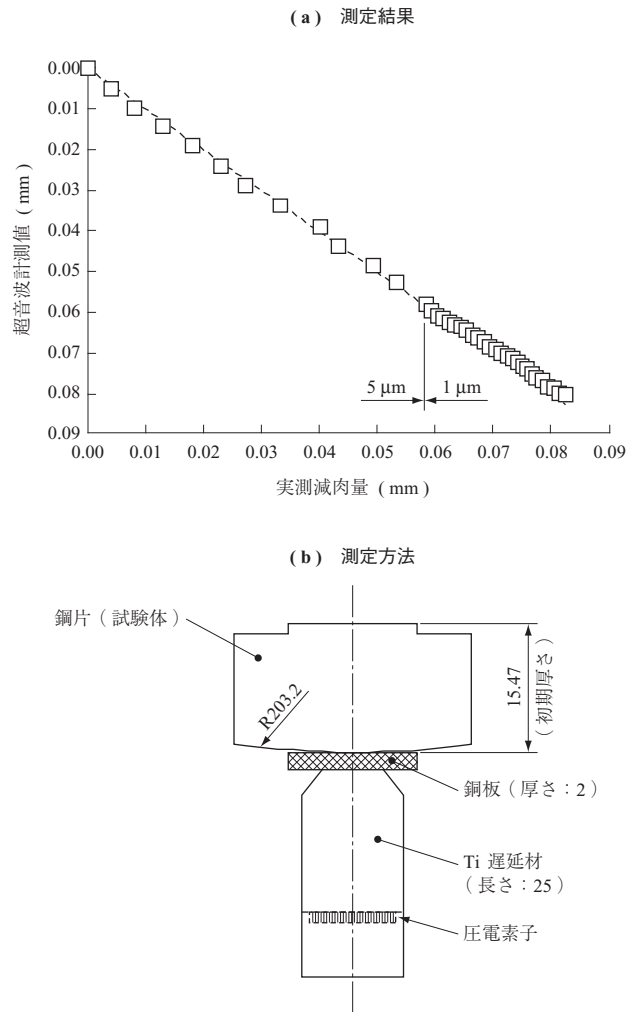
ている。より後方の銅板と試験体の界面エコー（ゲート1）を抽出して、底面エコー（ゲート2）とで相互相関処理を行い、試験体中の超音波伝搬時間を求めている。

構築した監視システムの精度を検証するため、底面を平面研磨盤で 1～5 μm ごとに研削し、肉厚の計測結果がこれに追従できていることを確認している。第4図に確認結果を示す。1 μm 程度のわずかな研削でも測定した肉厚は追従して変化しており、高精度の減肉監視が可能であることが分かる。

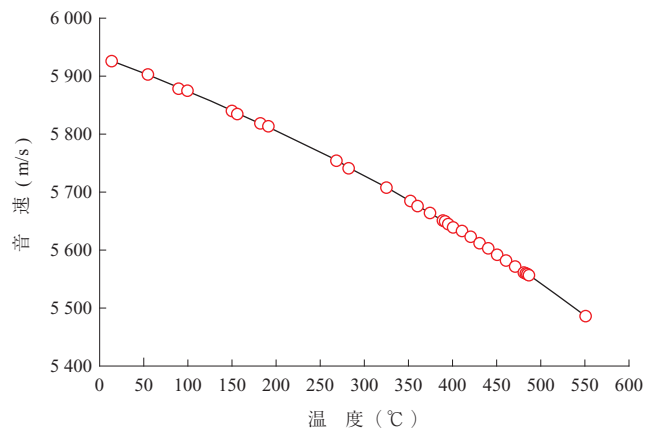
このほか、音速は温度の関数であるために、あらかじめ温度と音速の関係を測定しておき、実機の温度を監視することで音速を補正している。第5図に鋼の音速の温度依存性の測定例を示す。

構築した高温配管減肉の高精度監視システムは、日本原子力発電株式会社敦賀発電所2号機のタービン建屋内配管に設置し、客先で実施中の防食水処理の効果の確認に寄与している⁽⁶⁾。

システムの構成を第6図に示す。高温超音波センサは、屋内の2配管と屋外の3配管の5配管に取り付け、それぞれの配管には、180度対向する位置の2か所に取り付けて、合計10か所の減肉監視を行っている。屋内配管と



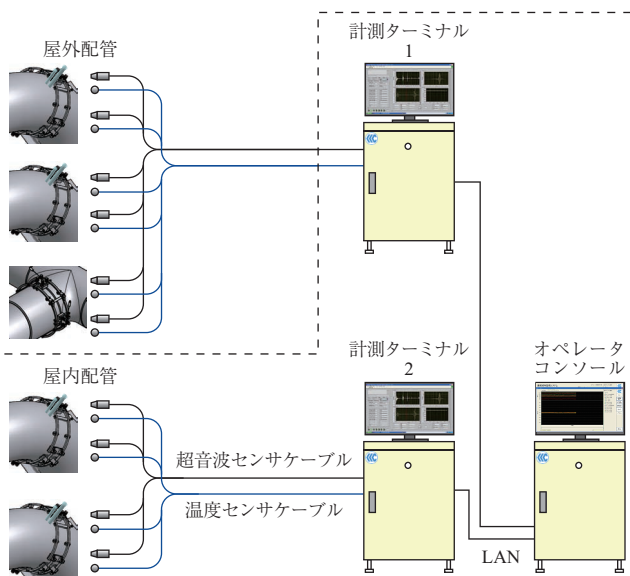
第4図 減肉の高精度監視の確認試験（単位：mm）
 Fig. 4 Results of tests to confirm the system for the high accuracy monitoring of plate thickness (unit : mm)



第5図 鋼の音速の温度依存性測定例
 Fig. 5 Examples of the temperature of steel's dependence on ultrasonic velocity

屋外配管のそれぞれに2台の計測ターミナルの信号処理モジュールを設置した。設置箇所と計測ターミナルの間は約100mの信号ケーブルで接続されている。

2台の計測ターミナルは、LANでオペレータコンソ

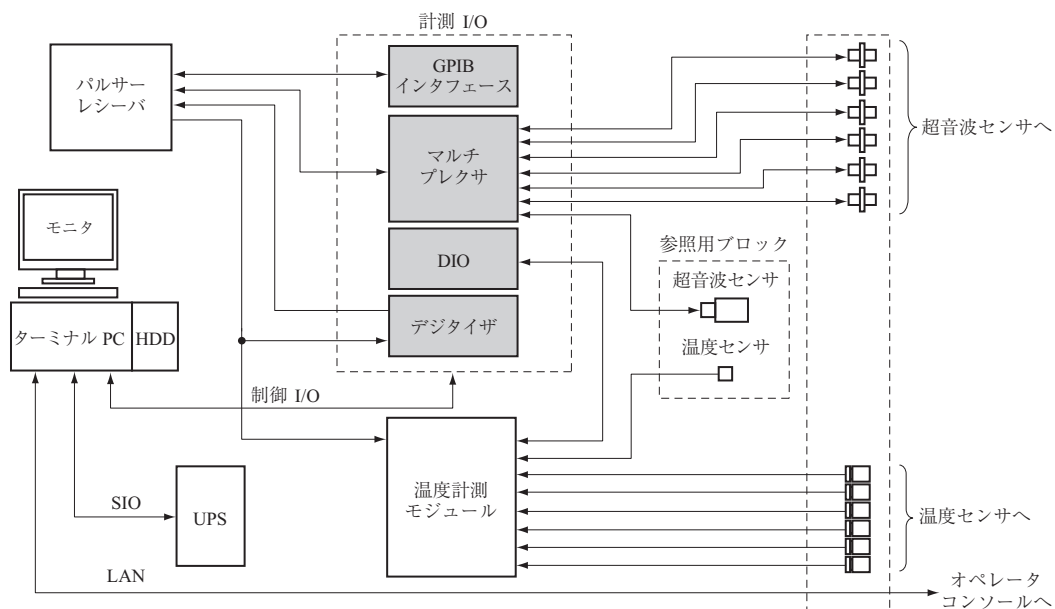


第 6 図 減肉連続監視システムの構成

Fig. 6 Structure of high accuracy monitoring system of plate thickness

の主制御モジュールに接続されている。オペレータコンソールは、定期的な計測を計測ターミナルに指示し、これによって計測ターミナルは接続しているセンサのデータ採取と処理を行い、計測完了をオペレータコンソールに通知する。これを受けて、オペレータコンソールは、計測ターミナル内に保存された計測データを読み取って所定のデータフォーマットによって表示・保存・出力する。

第 7 図に計測ターミナルのモジュール構成を示す。超



(注) SIO : Serial Input Output
 LAN : Local Area Network
 GPIB : General Purpose Interface Bus
 DIO : Digital Input Output
 HDD : Hard Disk Drive
 I/O : Input/Output

第 7 図 計測ターミナルモジュールの構成

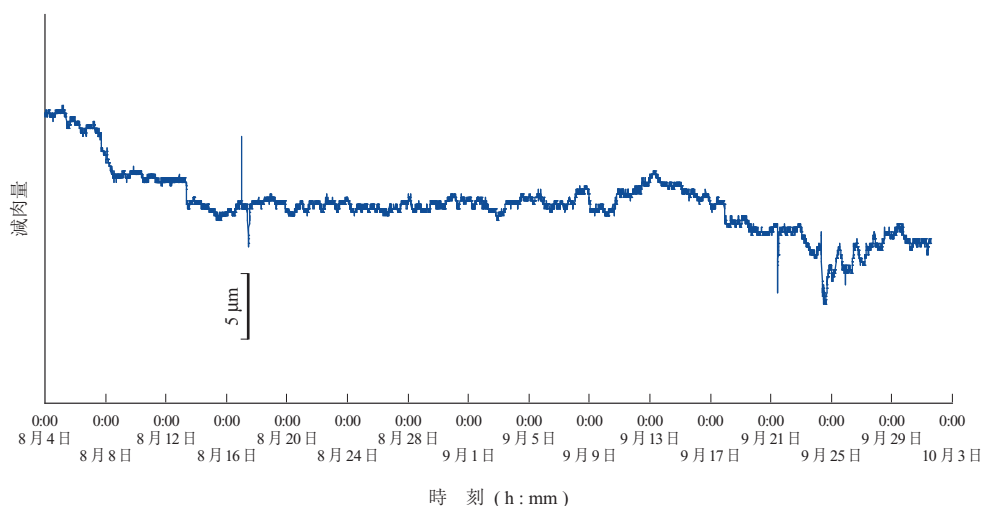
Fig. 7 Block diagram of measurement terminal module

音波の音速の温度依存性を補正する機能が正常に動作することを確認する目的で、筐体内に参照ブロック（肉厚を確認した鋼片）を内蔵し、これに超音波センサと温度センサを取り付けて信号処理系の状態を同時に監視している。筐体内の温度は夏場の 8 月、9 月で約 15℃ の変化があり、肉厚の約 25 μm の変化に相当する。温度補正処理を行うことで、誤差を ±1 μm 以内に収めることができた。

計測ターミナルには、リモートモード（オペレータコンソールの指示によるスレーブ動作）と、メンテナンスモード（個々のセンサに適應するパラメタの設定）があり、計測データは波形データを含めて専用のストレージ用ハードディスクに保存される。

オペレータコンソールには、連続監視の指示、表示部の修正、減肉速度計算や記録や表示を行う連続減肉監視モード、データ編集モード、パラメタ設定やユーザ登録を行う設定メニューモードがあり、計測ターミナルの計測結果を読み取り、初期値の肉厚から減肉量として表示し、CSV 形式のテキストファイルとして外部メディアに出力できる。

第 8 図に、減肉量の計測結果の例を示す。2010 年 8 月 4 日から 2010 年 10 月 3 日までの約 2 か月間の結果であるが、微小減肉を監視できている⁽⁷⁾。



(注) 計測年：2010年
計測場所：A 低圧給水加熱器出口腹側

第 8 図 減肉傾向の測定データ例

Fig. 8 Example measurement data showing the trend for plate thickness to decrease

4. 結 言

防食の効果を短期間で適切に評価するには、 μm 単位での高精度の減肉監視システムが望まれる。耐熱性に優れた高温超音波センサを配管に取付け、得られた超音波信号をリアルタイムウェーブレットや相互相関処理などの信号処理を用いて高精度に減肉を監視する方法を検討し、平面研磨で $1\ \mu\text{m}$ ごとに肉厚を減じた場合でも減肉量をこの方法で監視できることを確認した。

この測定法を用いた高精度減肉連続監視システムを開発した。開発したシステムは、原子力発電所のタービン建屋内配管に設置し、客先で実施中の防食水処理の効果の確認に寄与している。

— 謝 辞 —

本稿作成に当たり減肉監視データをご提供いただいた日本原子力発電株式会社へ感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) 三島宏行, 吉川和夫, 熱田美道, 荒川敬弘：高温・低温用超音波探触子の開発と高温下の割れ監視技術 非破壊検査 第 38 巻 第 10 号 1989 年 10 月 pp. 904 - 908

- (2) T. Arakawa et al. : Application of Brazed-Type Ultrasonic Probes for High and Low Temperature Use Nondestructive Characterization of Materials V Vol. 7 No. 1 (1992. 6) pp. 263 - 272
- (3) 佐々木孝明, 畠中宏明, 荒川敬弘, 原建治郎：耐放射線性超音波探傷技術の開発 石川島播磨技報 第 40 巻 第 4 号 2000 年 7 月 pp. 199 - 202
- (4) P. Kielczynski et al. : Recent Developments in Ultrasonic Devices for Monitoring Critical Parameters in Canadian Nuclear Reactors 1998 IEEE International Ultrasonic Symposium Vol. 1 (1998. 10) pp. 793 - 802
- (5) 熱田美道, 加藤 明, 齋藤勝美, 荒川敬弘, 畠中宏明：高温での減肉の高精度連続監視 IIC REVIEW No. 42 2009 年 10 月 pp. 37 - 42
- (6) 森田 勝, 加藤 明, 畠中宏明, 荒川敬弘：高温超音波センサを用いた高精度連続減肉監視システム IIC REVIEW No. 45 2011 年 4 月 pp. 26 - 31
- (7) 杉野 亘, 福田雄史, 畠中宏明, 加藤 明：PWR 二次系における低濃度酸素処理とオンライン配管減肉モニタリング 社団法人電気化学会 水・蒸気サイクル化学研究会 サイクル化学技術討論会 2010 年 10 月