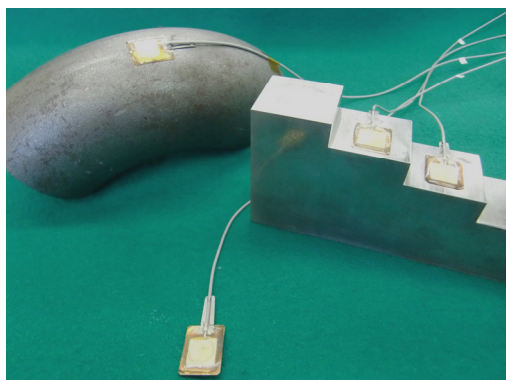


高温耐熱性を有したフレキシブル薄膜超音波センサ技術

The Technique of High Temperature Thin-film Ultrasonic Sensor



山本 裕子^{*1}
Yuko Yamamoto

川浪 精一^{*2}
Seiichi Kawanami

川瀬 直人^{*3}
Naoto Kawase

小平 武志^{*4}
Takeshi Kodaira

薄くて柔軟性があり、高温でも使用可能な薄膜超音波探傷(UT:Ultrasonic Testing)センサを開発した。薄膜 UT センサは、プラントの配管や容器の厚さ測定において、従来型 UT センサの代替や運転中の連続モニタリングといった用途に適用可能である。本稿では、開発した薄膜 UT センサの特徴や性能、適用範囲を拡大するための応用研究、実機工事への展開について述べる。

1. はじめに

発電プラントにおいて、配管の流れ加速型腐食及び液滴衝撃エロージョンによる減肉現象は良く知られおり、設備安全性の一層の向上のためには配管の減肉傾向監視技術の向上が重要である。多くのプラントでは、規格に従い定期検査期間中に膨大な個所の厚さを測定しているが、その多くは作業員が測定箇所に都度センサを接触させて計測値を取得する手動の厚さ測定である。手動の厚さ測定には、以下に示すような課題がある。

- ① 測定位置およびセンサと測定対象との接触状態が測定のたびに微小に変化することで、測定精度に影響する懸念がある。
- ② 毎回の測定において、都度の保温材の取り外し・復旧、足場の設置・解体等の付帯作業が必要である。
- ③ 定期検査ごとの測定では、短期間での減肉変化に追従できない懸念がある。

上記の課題を解決し、アフターサービス工事での厚さ測定や系統運転中の減肉傾向監視技術への適用を図るために、薄くて柔軟性があり、耐熱性に優れた薄膜 UT センサを開発した。

2. 薄膜 UT センサの特徴および適用方法

薄膜 UT センサの構造および従来型 UT センサとの比較を図1に示す。

薄膜 UT センサは下部電極、圧電セラミックス膜、上部電極、および信号線により構成されている。センサ部の厚みは 1.0mm 以下となり柔軟性があるため、配管などの曲面にならって密着させることが可能である。また、薄膜 UT センサを構成する材料は金属とセラミックスのみであるため、樹脂などのダンパ材を含む従来型 UT センサと比較して高温環境での耐久性に優れている。圧電セラミックス膜を構成する機能性セラミックスとしては、PZT(チタン酸ジルコン酸鉛)や LiNbO₃(ニオブ酸リチウム)などを使用しており、適切なキュリー温度(圧電特性を失う温度)を有する材料を選定することで、適用温度領域に適した薄膜 UT センサを構成することが可能である。

*1 ICT ソリューション本部システム技術開発部

*2 ICT ソリューション本部システム技術開発部 主席技師

*3 エネルギー環境ドメイン原子力事業部品質保証部 主席技師

*4 エネルギー環境ドメイン原子力事業部品質保証部

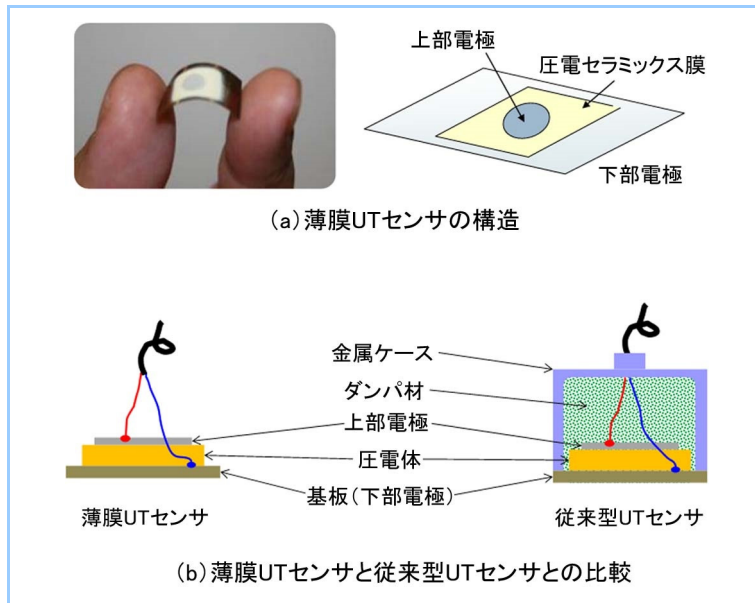


図1 薄膜 UT センサの構造および従来型 UT センサとの比較

薄膜 UT センサを用いた厚さ測定への適用方法としては、大きく3種類が考えられる。

ひとつめは、定期検査における定点手動厚さ測定の代替である。薄膜 UT センサは、薄く耐熱性があるため、プラントの運転中に高温になる配管に常設しておくことが可能である。そのため、測定位置のずれや測定対象との接触状態に起因する測定値のばらつきの解消が見込まれる。さらに、薄膜 UT センサを常設することにより、保温材の取り外し・復旧や足場の設置・解体などの付帯作業が不要となり、工事費用の低減や工程短縮が図れる。

次に、薄膜 UT センサを配管に常設し、プラント運転中も継続的に厚さ測定データを取得する連続モニタリングとしての適用が考えられる。薄膜 UT センサを用いた連続モニタリングにより、水質や運転条件を途中で変化させた場合における減肉進展速度への影響を把握することができる。これにより、減肉抑制のための水質や運転条件の最適化において効果を確認しながらの調整が可能となる。図2に減肉傾向モニタリングによる水質・運転条件調整の概念図を示す。

さらに、薄膜 UT センサの柔軟性を利用して配管や容器などの曲面形状への適用が考えられる。従来型 UT センサは、図 1(b)で示したように金属ケースで覆われた構造であるため、小口径配管やT継手クロッチ部などの曲率が大きい形状変化部にならわせることが困難である。それに対して薄膜 UT センサは、柔軟性があり設置対象面の形状にあわせて湾曲させることができるため、安定した厚さ測定が可能となる。

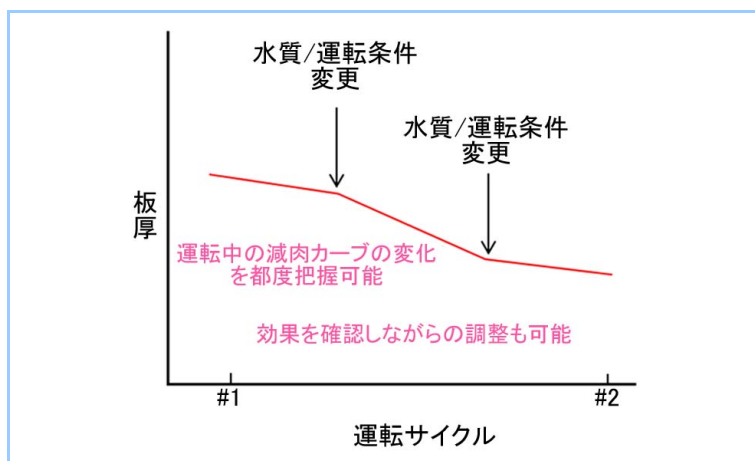


図2 減肉傾向モニタリングによる水質・運転条件の調整の概念図

3. 薄膜 UT センサの性能

本章では、薄膜 UT センサの性能について述べる。最初に、曲率のある検査面における厚さ測定精度の確認結果を紹介する。外径が 25mm～61mm の配管T継手クロッチ部とエルボ腹部に対する厚さ測定を、薄膜 UT センサと特殊用途用の市販ペンシル型 UT センサ(振動子寸法 $\phi 3$ mm)にて実施し、測定値を比較した。表1に検証試験に使用した配管仕様を示す。

表1 形状変化部における厚さ測定精度試験に使用した配管仕様

	種類	B	外径(mm)	Sch
A	エルボ腹部	3/4	27.2	S80
B	クロッチ部	3/4	27.2	S40
C	クロッチ部	1	34	S40
D	クロッチ部	3/4	27.2	S80
E	クロッチ部	1	34	S80
F	クロッチ部	2	60.5	S160

図3に示すように、両センサによる測定値の差は最大で0.1mm以下となり、薄膜UTセンサがペンシル型 UT センサと同等の厚さ測定精度を有するといえる。ただしペンシル型 UT センサは、先端がペン先のように細くなっているため曲率のある検査面に対して点接触となり安定した測定が困難であったが、薄膜 UT センサは柔軟性があり曲率にならうことから面接触となり安定した測定が可能であった。

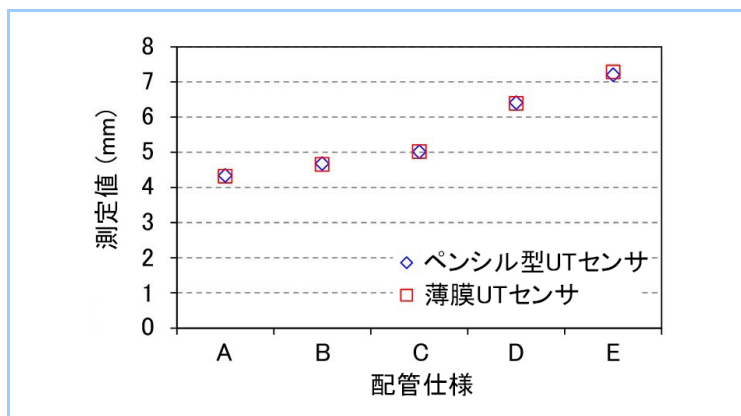


図3 薄膜 UT センサとペンシル型 UT センサの測定値比較

次に、薄膜 UT センサの高温耐久性を検証するために実施した加熱試験について紹介する。使用した薄膜 UT センサの種類などの試験の仕様を表2に示す。薄膜 UT センサが、高温環境においても安定して厚さ測定可能であることを確認するために、薄膜 UT センサを配管部材に固定した試験体を電気炉内にて加熱し、信号波形および厚さ測定値を確認した。最初に、常温と高温(200℃、300℃)の温度変化を繰り返す熱サイクル試験を実施した。その結果、温度変化にともなう熱膨張差に起因する薄膜 UT センサの剥離などの兆候は認められず、10 サイクル終了後も1サイクル目と同等の厚さ測定が可能であることを確認した。

表2 薄膜 UT センサの高温耐久性試験条件

加熱温度 (℃)	圧電体 種類	累積加熱期間 (最長)(日)
200	PZT	916
300	PZT	521
	BiT	1064
	LiNbO ₃	88

PZT:チタン酸ジルコン酸鉛

BiT:チタン酸ビスマス

LiNbO₃:ニオブ酸リチウム

図4に熱サイクル試験における常温時、高温時の信号波形を示す。次に、薄膜 UT センサを固定した試験体を一定温度で連続加熱し、定期的に信号波形および厚さ測定値を取得する連続加熱試験を実施した。その結果、図5に示すように波形の乱れや有意なノイズ、信号感度の急激な減衰などの劣化傾向は認められなかった。この結果から、2年以上安定して厚さ測定が可能であるといえる。なお、本試験の最中に数回の停電による降温を経験したが、この温度変化による信号への影響は確認されなかった。この連続加熱試験は今後も継続し、連続加熱実績データの蓄積を引き続き実施していく計画である。

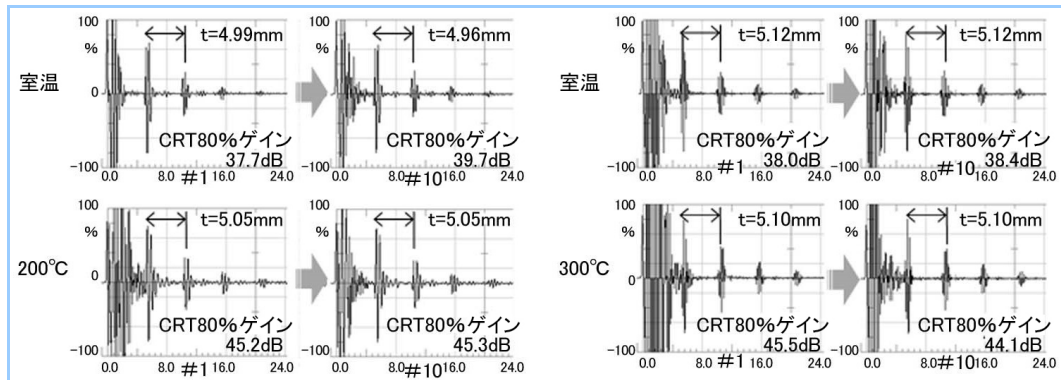


図4 熱サイクル試験における常温時、高温時の信号波形

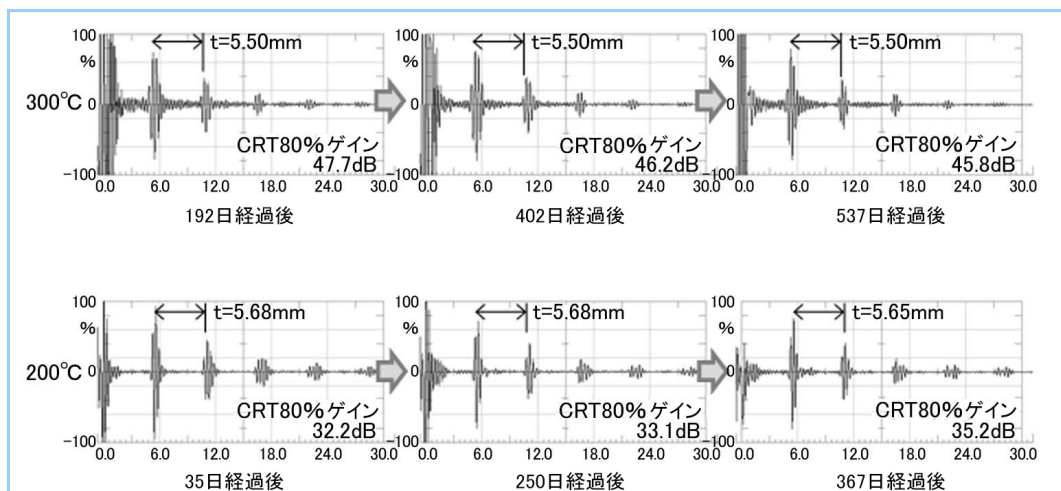


図5 薄膜 UT センサを配管部材に固定した試験体の肉厚値測定結果

4. 薄膜アレイセンサの開発

薄膜 UT センサの適用範囲をき裂検査にも拡大するために、フェーズドアレイ (PA: Phased array) センサとして使用可能な薄膜アレイセンサを開発した。図6に示すように、圧電セラミックス膜上に形成する上部電極を分割することで、上部電極直下の圧電セラミックス膜が個別の圧電素子として作用する構造となっている。上部電極を8分割した8chの薄膜アレイセンサを試作し、厚さ80mmのアルミブロックに横穴を付与した試験体を用いて欠陥検出性能を確認した。比較のために、市販のPAセンサについても、薄膜アレイセンサと同条件にするために8ch分のみ素子を駆動した条件で探傷波形を採取した。それぞれのセンサによる欠陥検出画像およびセンサ設置状況を図7に示す。図7から、薄膜アレイセンサにおいても市販のPAセンサと同様に、付与したすべての横穴欠陥を検出できていることが確認できる。

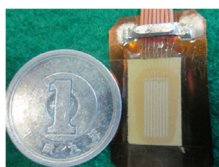


図6 薄膜アレイセンサ

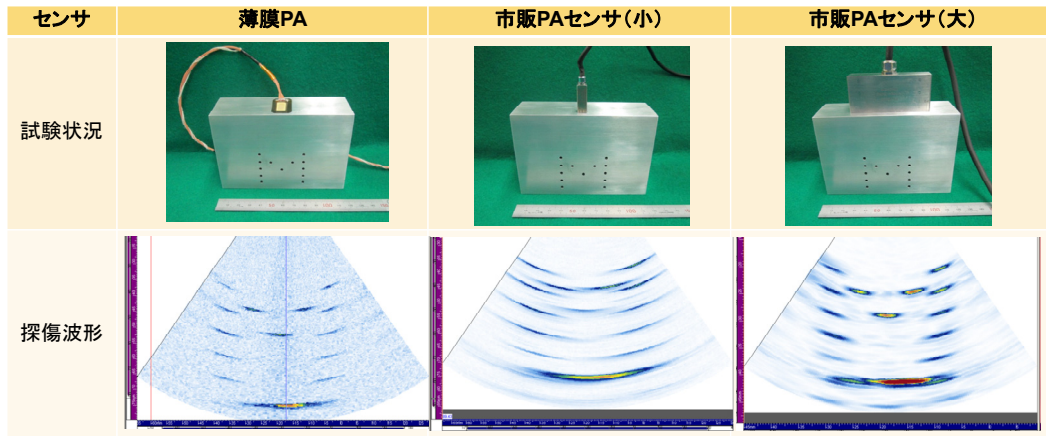


図7 薄膜アレイセンサによる欠陥検出例

次に薄膜アレイセンサによる疲労き裂の検出結果について説明する。厚さ 22mm の炭素鋼平板に初期き裂を導入し、疲労割れ試験機によりき裂を進展させながら、薄膜アレイセンサにてき裂の先端を監視した。図8に示すように、き裂導入時からき裂が約 10mm(板厚の 50%)に進展するまでの間、欠陥コーナーエコー、およびき裂の先端を示す端部エコーを検出することができた。

さらに、き裂深さサイジング精度を検証するために、正確な深さが既知の放電加工(EDM)スリット試験体に対して薄膜アレイセンサで欠陥検出を行い、その測定値とスリット深さを比較した。その結果、薄膜アレイセンサによる測定値と EDM スリット深さとの誤差は5%以内となり、実機工事への適用性を満たすことを確認した。図9に欠陥検出精度試験の結果を示す。

上記の薄膜アレイセンサの性能確認試験の結果を踏まえて、実機検査工事への展開を図るために、さらに多チャンネルの薄膜アレイセンサの製作や圧電膜の感度向上を図っていく計画である。

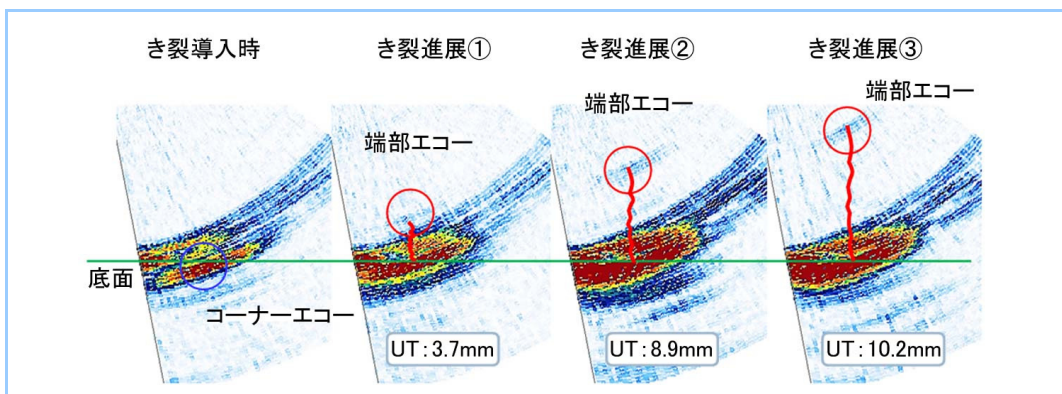


図8 薄膜アレイセンサによる疲労き裂の検出結果

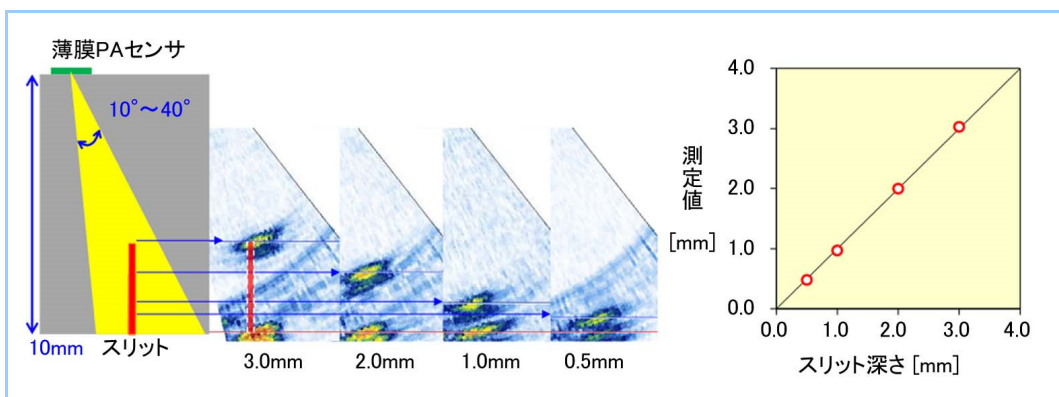


図9 欠陥検出精度試験結果

5. 実機検査工事への適用

薄膜 UT センサの実機検査工事への適用状況について説明する。実機環境での運用に際しての課題の抽出や適用性の評価のために、実機試行として、国内発電プラント内の配管(200℃以下)に薄膜 UT センサを設置し、約1年間の厚さ測定データの取得を実施している。取得した信号波形において、波形の乱れや有意なノイズ、信号感度の急激な減衰などの劣化傾向は認められず、安定した厚さ測定を継続することができている。

また、次のステップとしてさらなる高温環境での試行を計画中である。センサ固定方法等において新たな工夫が必要であり、順次研究開発を進めている。

6. まとめ

配管や容器、各種構造材の健全性を確認し、安心・安全な運転に寄与するための非破壊検査技術のひとつとして、薄膜 UT センサによる厚さ測定技術の開発を推進している。薄膜 UT センサは、薄くて柔軟性があるため曲面形状にならって曲げることが可能であり、セラミックスと金属だけで構成されているため高温耐久性を有しているという特徴がある。当社では、この薄膜 UT センサのセラミックス膜の成膜から信号線の接続、取得した信号波形の評価から分析までの全工程にわたる技術を確認しており、薄膜 UT センサ適用先の寸法や形状、温度条件などの仕様に応じてカスタマイズすることが可能である。また、薄膜 UT センサの性能検証として、従来型センサとの厚さ測定精度の比較、加熱試験による長期耐熱性の検証を行い、実環境での適用の見通しを得ている。さらに、応用研究として、厚さ測定だけでなくき裂のサイジングへの適用を想定した薄膜アレイセンサの開発も行っており、薄膜 UT センサの適用範囲の拡大を図っている。

実機での適用に向けて、実機環境での試行を進めており、200℃環境では適用可能な見通しが得られている。一方、さらなる高温環境への適用のためにセンサ固定方法等の改善を進めている。

今後、高温環境適用に向けての研究開発や量産体制の整備を進めていく。また無線通信技術と薄膜 UT センサを組み合わせた遠隔監視システムを開発し、適切な補修提案と組み合わせることで、新たな顧客価値を提供していきたいと考えている。

参考文献

- (1) 小林高揚ほか, 高温耐熱薄膜状 UT センサーによる減肉監視技術高度化の可能性, 日本機械学会配管減肉規格委員会配管減肉管理高度化に向けた最新技術知見の適用化のための調査研究分科会報告書(2011年度)
- (2) 藤田直樹ほか, 高温用薄膜 UT センサを用いた高精度な厚さ測定・減肉傾向監視技術の開発, 日本保全学会 第10回学術講演会 要旨集 (2013/7)
- (3) 小平ほか, "Development of Thickness Measurement and Wall Thinning Monitoring Technology Using Thin-film UT Sensor for High-Temperature Use", International Conference on Maintenance Science and Technology (ICMST2014)