

高温超音波センサの開発

Development of High Temperature Ultrasonic Transducers

(株)日立製作所 日立研究所	馬場 淳史	Atsushi Baba	Non-member
(株)日立製作所 日立研究所	武捨 義則	Yoshinori Musha	Non-member
日立 GE ニュークリア・エナジー(株)	小池 正浩	Masahiro Koike	Non-member
日立 GE ニュークリア・エナジー(株)	大谷 健一	Kenichi Otani	Non-member
日立 GE ニュークリア・エナジー(株)	平塚 真弘	Masahiro Hiratsuka	Non-member

Abstract

Structural health monitoring (SHM) techniques are needed to maintain the reliability of power plants for long term operation. The high temperature transducers are necessary to realize SHM (monitor wall thickness of the pipings, crack growth in the materials and material evaluation) under the working condition of power plants. We have evaluated lithium niobate (LiNbO_3) single crystal which is well known as a high Curie temperature piezoelectric material to develop high temperature ultrasonic transducers. The LiNbO_3 was bonded onto a stainless steel substrate. The experimental transducer was heated in an electric furnace while measuring the bottom echoes from the substrate. We confirmed that the experimental high temperature transducer could work up to 1000 °C. Thermal and chemical stability of LiNbO_3 were confirmed using TG measurement up to 1260°C (melting point). Additionally, we have developed single and array transducers for high temperature ultrasonic measurement based on those experimental data.

Keywords: high temperature, ultrasonic transducer, lithium niobate, single crystal

1. 緒言

発電プラントの信頼性や健全性を維持向上のため、プラントの状態を監視する技術の確立が求められている。このプラントの状態監視技術の実現のためには、発電プラント稼働中の高温環境で動作可能なセンサが必要である。原子力発電プラントでは、その稼働中の温度条件は約 300°C となり、これに耐えて安定動作するセンサが必要である。

そのため、報告者らは、稼働中の発電プラントに適用可能なセンサの開発を目指して、高温超音波センサを対象として、圧電材料の耐熱性や高温環境での安定性の確認など、基礎的な技術検討を行ってきた[1, 2]。その結果、これらの基礎的な技術検討結果に基づき、高温超音波センサ(シングルセンサ、アレイセンサ)を開発した。

本報告では、基礎検討結果と高温超音波センサの開発状況について報告する。

2. 高温超音波センサの基礎検討

2.1 センサ構成要素の検討

ニオブ酸リチウム(以下、 LiNbO_3)は、光モジュレータや SAW デバイス用の材料として一般的によく知られた圧電材料であり、そのキュリー点(1142~1210°C[3-8])の高さもよく知られている。しかしながら、過去の報告によると、600°C以上で結晶中の酸素を失う点[9]や、650°C以上で抵抗値が増大する点[10]などが指摘されており、高温超音波センサ用の圧電材料としての適用性に課題があった。そこで、報告者らは、まず LiNbO_3 の高温超音波センサへの圧電材料としての適用性を確認するため、高温超音波センサ要素を作製し、耐熱性と化学的な安定性の確認試験を行った。

Table 1 に高温超音波センサ要素の構成とその耐熱温度(及び要因)を示す。高温超音波センサの圧電材料である LiNbO_3 の耐熱温度は、キュリー点である 1210°C と予想される。本研究では、高温での機械的安定性を考慮し、その熱膨張率を合わせることで熱応力を低減するため、 LiNbO_3 単結晶と熱膨張係数の近い基材であるステンレス鋼を用いた。また、その他の構成要素も電極接合用の銀ペースト(融点 962°C)を除いて、1000°C 以上で使用可能な構成材料を選定して用いた。

連絡先: 馬場 淳史

〒319-1221 茨城県日立市大みか町七丁目 2 番 1 号

(株)日立製作所 日立研究所 原子力システム研究部

電話: 0294-52-9249

E-mail: atsushi.baba.br@hitachi.com

Table 1. Allowable temp. limit of transducer component

Component	Allowable temp. limit
LiNbO ₃ single crystal	1210°C (Curie temp.)
gold sputter layer	1064°C (melting temp.)
high temp. adhesive	1650°C (maximum temp.)
silver paste	962°C (melting temp.)
stainless steel	1370 ~ 1400°C (melting temp.)
MI Cable	1150°C (limit temp. for long term use)

2.2 耐熱試験及び方法

耐熱試験の構成を Fig.1 に示ように、2.1 節で示した構成材料による高温超音波センサ要素を管状電気炉に設けた石英管内に設置した。このセンサ要素と超音波送受信用のパルサ/レシーバは、MI(mineral insulated)ケーブルで接続し、デジタルオシロスコープで超音波の波形及び強度を計測した。この状態で電気炉の昇温速度を 1.0°C/min に調整し、基材底面からの超音波の反射波形及び強度を計測した。また、センサ要素の温度は、基材であるステンレス鋼の底部に接触させた熱電対で直接計測した。なお、センサ要素を設置した石英管は、保温のため端部をアルミホイルで覆ったものの、基本的には大気開放と同じ雰囲気条件である。

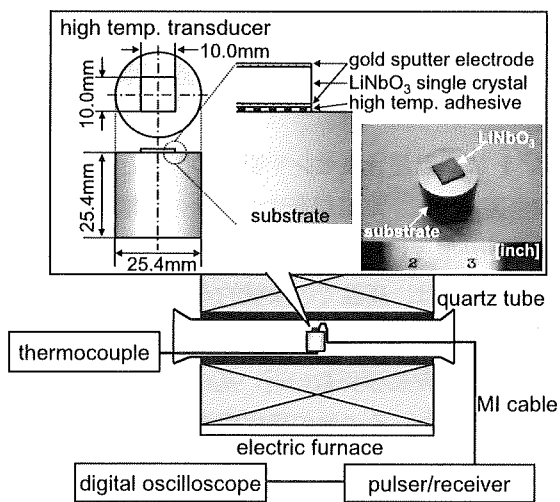


Fig.1 Schematic configuration and photograph of a high temperature transducer.

2.3 耐熱試験結果

耐熱試験により得られた超音波の反射波形の例を Fig.2 に示す。本研究では、厚さの異なる2種類の LiNbO₃ 単結晶(a)4MHz(厚さ: 1.0mm)と(b)8MHz(厚さ: 0.5mm)を用いたが、それぞれにおいて室温(22°C)から 1000°Cまで温度条件において B1~B5 で示される底面反射エコーを計測できている。なお、ここでは電気ノイズ低減のため、平均化処理を行った。

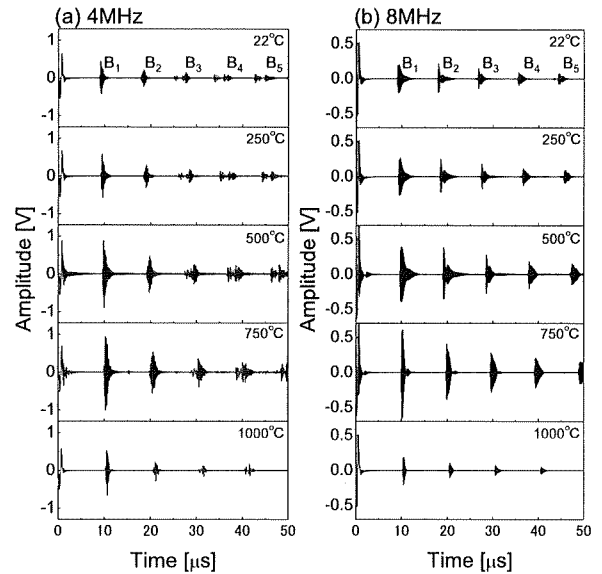


Fig.2 Waveforms of multiple echoes from substrate by (a) 4MHz and (b) 8MHz transducer.

このようにして得られた超音波の反射強度の温度依存性を Fig.3 に示す。ここでは、第1底面反射波(B1)の強度を温度に対して示した。この結果が示すように、600~700°Cの間で受信強度の変化は見られるものの、約 1000°Cまで安定して超音波計測可能なことを確認できた。また、複数回の試験によりその再現性も確認できたといえる。

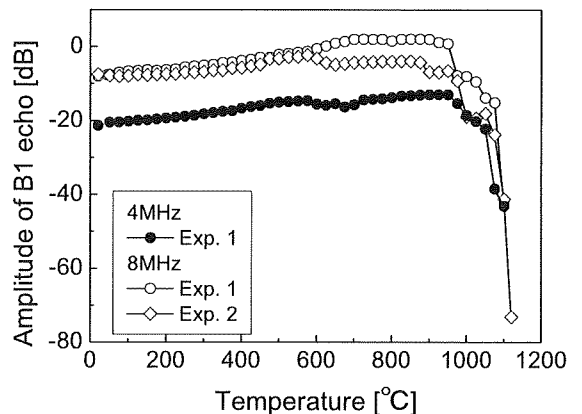


Fig.3 Comparison of the amplitude of B1 echo from substrate.

本研究では昇温速度を 1.0°C/min としたため、600°Cから 1000°Cまで昇温するために要する時間は、400min となる。過去の報告では、LiNbO₃ は 600°C以上で結晶中の酸素を失う点や、650°C以上で抵抗値が増大する点が課題となっていたが、本研究の結果により、数時間であれば超音波の計測に大きな影響が無いことが示された。この点をさらに確認するため、超音波計測と同じ条件で熱天秤による質量変化を分析した。その結果を Fig4 に示す。この図が示すように、LiNbO₃ 単結晶の質量変化は、その融点(1260°C)までほとんど計測されず、水蒸気や酸素などが存在する大気中でも化学的に安定していることが確認できたといえる。

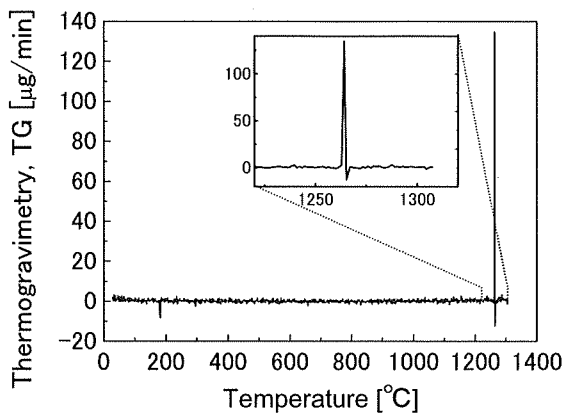


Fig.4 Result of thermogravimetry measurement of LiNbO₃ single crystal.

3. 高温超音波センサ

前述した基礎検討に基づき、原子力発電プラントへの適用(環境温度: 300°C)を想定した高温超音波センサを開発した。その外観を Fig.5 に示す。Fig.5 (a)は、単一の圧電素子によるシングルセンサであり、構造材の肉厚などの計測が可能である。また、Fig.5 (b)は、複数の圧電素子によるアレイセンサであり、フェーズドアレイ装置と組み合わせて使用することで、構造材内部のき裂などを高温環境で画像化して計測することができる。

これらを用いた計測例として、アレイセンサによる計測の例を Fig.6 に示すが、室温のみならず 330°Cの高温環境でも、サイドドリルホール(SDH)を鮮明に計測できている。このように高温環境で使用可能な超音波センサを適用することで、更なる発電プラントの信頼性の維持や保全技術の高度化に貢献するものと考えられる。

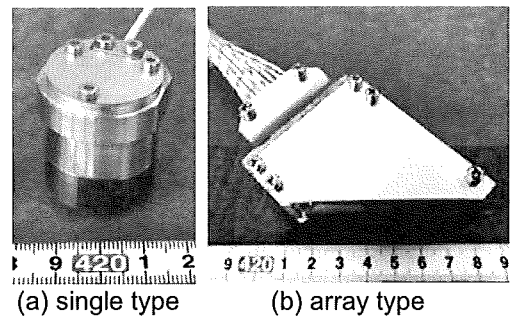


Fig.5 Photo of high temperature ultrasonic transducers, (a) single transducer and (b) array transducer.

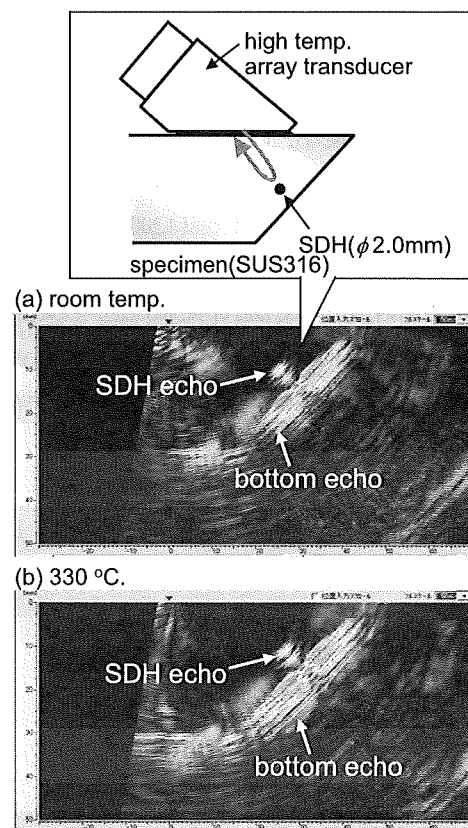


Fig.6 Example of phased array measurement using high temperature array transducer.

4. 結言

稼働中の発電プラントに適用可能な高温超音波センサの開発を目指して、高キュリー一点圧電材料であるニオブ酸リチウムについて検討した。その結果、約 1000°Cまでの耐熱性と、1260°Cまでの安定性を確認した。これにより高温超音波センサへの適用性を確認できた。さらにこの結果に基づき、シングルセンサとアレイセンサを開発した。今後、更なる保全技術の高度化のため、高温超音波センサの適用を目指す。

謝辞

基礎的な検討にご協力頂いたペンシルベニア州立大学
B. R. Tittmann 教授、C. T. Searfass 氏に感謝いたします。

参考文献

- [1] A. Baba, C. T. Searfass and B. R. Tittmann, "High temperature ultrasonic transducer up to 1000 °C using lithium niobate single crystal", J. Appl. Phys. Lett., Vol. 97, 2010, 232901.
- [2] A. Baba, C. T. Searfass and B. R. Tittmann, "Development of high temperature ultrasonic transducer for structural health monitoring", AIP Conf Proc. Vol. 1335, 2011, pp. 793-799.
- [3] S. C. Abrahams, H. J. Levinstein and J. M. Reddy, "Ferroelectric lithium niobate. 5. Polycrystal X-ray diffraction study between 24° and 1200°C", J. Phys. Chem. Solids, Vol. 27, 1966, 1019-1026.
- [4] A. W. Warner, M. Onoe and G. A. Coquin, "Determination of Elastic and Piezoelectric Constants for Crystals in Class(3m)", J. of Acoust. Soc. of Am., Vol. 42, 1976, pp.1224-1231.
- [5] T. Yamada, N. Niizeki and H. Toyoda, "Piezoelectric and Elastic Properties of Lithium Niobate Single Crystals", Jap. J. of Appl. Phys., Vol. 6, 1967, pp. 151-155.
- [6] Crystal Technology, Inc., Palo Alto, CA, Product Catalog for Lithium Niobate / Lithium Tantalate acoustic crystals.
- [7] Boston Piezo-Optics, Inc., Bellingham, MA, Product Catalog for Lithium Niobate.
- [8] MTI Corporation, Richmond, CA, Product Catalog for LiNbO₃ single crystal.
- [9] Innovation in Europe: Research and Results. "Non-destructive testing at 800°C".
- [10] R. C. Turner, P. A. Fuierer, R. E. Newnham and T. R. Shrout, "Materials for High Temperature Acoustic and Vibration Sensors: A Review", Appl. Acoust., Vol. 41, 1994, pp. 299-324.

(平成 24 年 6 月 15 日)