



高速炉主配管用超音波温度計の ナトリウム試験

林田 均 小柿 信寿 上田 雅司*
荒 邦章

大洗工学センター ナトリウム・安全工学試験部
*敦賀本部 国際技術センター

資料番号 : 5 - 8

Evaluation Test of Ultrasonic Thermometer for FBR Main Piping
Using the Sodium Test Loop

Hitoshi HAYASHIDA Nobuhisa KOKAKI Masashi UEDA*
Kuniaki ARA

Sodium and Safety Engineering Division, O-arai Engineering Center

*International Cooperation and Technology Development Center,
Tsuruga Head Office

高速炉の主配管において、配管外からナトリウム温度を計測する技術を開発するために、ナトリウム中の音速がその温度に対応して変化する原理を利用した超音波温度計試験体（直付方式とガイド棒方式）について、大洗工学センターのプラント過渡応答試験ループにおいてナトリウム試験を実施し、ナトリウム流速やカバーガス圧力等の影響と温度計測精度を評価した。その結果、超音波温度計は、ナトリウム流速等の影響を受けず、計測値も試験体系の誤差内で小さいばらつきであることなど計測精度も良好であり、配管内ナトリウム温度計測への適用可能性が明らかになった。

今後、実機適用化を目指した実機条件での計測精度評価、応答性評価等について研究開発を進めていく。

As part of the development of a non-intrusive method to measure the temperature of sodium in FBR piping, we tested prototypes of two ultrasonic thermometers (an ultrasonic transducer directly mounted onto the surface of the piping, and an acoustic guide rod type) using the PLANDTL (PLANT Dynamics Test Loop) at O-arai Engineering Center.

In addition to evaluating the accuracy of the thermometry itself, we also evaluated the effect of the velocity of sodium flow and cover gas pressure on the measurement method.

Our results indicate that the ultrasonic thermometers were insensitive to the velocity of sodium flow and cover gas pressure. Measured data showed limited dispersion within the error of the test system and the measurement precision was satisfactory. We conclude that the ultrasonic thermometer has definite potential for actual application.

We will focus further research and development on the evaluation of measurement precision under near actual conditions with the aim of actual application.

キーワード

ナトリウム、温度計測、超音波、高速炉、超音波温度計

Sodium, Thermometry, Ultrasonic, Fast Reactor, Ultrasonic Thermometer

1. はじめに

高速増殖原型炉「もんじゅ」の2次主冷却系ナトリウム（以下、Na）漏洩事故を受けて、漏洩箇所となった温度計さや（熱電対ウェル）のような配管内への挿入物を必要としない温度計測手法の開発を行っている。開発する手法は、配管外から内部のNaを透過して伝搬する超音波を利用する（超音波方式）。これは、Na中の音速がNa温度

に対応して変化するので、配管外から超音波を送受信し、Na中の超音波伝搬時間を測定することで、その伝搬時間からNa温度を求めるものである。

超音波による配管内流体の温度計測については、これまでに水試験等で原理的な確認を行っており、音速の変化から内部流体の温度が算出できることを確認している。しかしながら、水とNa

の温度による音速変化や伝搬特性の違い、使用温度が高温であることによる超音波トランスデューサ特性変化（高温耐久性など）や配管の熱膨張の影響などについては、実際にNaを用いた試験により評価することが必要になる。そこで、本手法のNa温度計測への適用可能性を判断するためにNa試験を実施した^{1),2)}。

本試験に用いた超音波温度計試験体は2種類で、配管内Na中の超音波伝搬時間計測を、Na中のみの伝搬時間算出が容易だが高温用の超音波トランスデューサが必要な方式〔直付方式：高温用超音波トランスデューサ（設計使用温度530）を配管外面に直接取り付け計測〕のものと、音響ガイド棒を配管と超音波トランスデューサの間に介して取り付け、配管内Na中の超音波伝搬時間を全伝搬時間からガイド棒中伝搬時間を除いて算出する方式〔ガイド棒方式：低温用超音波トランスデューサ（設計使用温度80）を使用〕のものを用いた。

試験では、超音波温度計の基本的な配管内Na温度計測特性として、Na流速やカバーガス圧力等のNa温度以外の影響や、同一条件での再現性、総合的なNa温度計測精度などを評価した。さらに、直付方式では、超音波トランスデューサと配管間の音響結合材の違いや、配管への取り付け方法の違いによる影響を、ガイド棒方式では、音響ガイド棒の存在がNa温度計測に及ぼす影響などを評価した。

本報告は、以上のNa試験とその評価結果についてまとめたものである。

2. 試験方法

2.1 超音波温度計の計測概念

超音波温度計は、配管内のNaの音速が温度により変化することを利用して温度計測を行う（図1に計測概念図を示す）。

超音波によるNa温度計測の原理は、Na中の伝搬時間 t (s)を測定し、その値で伝搬距離 D_r (m)を除してNa中の音速 V を求め、音速とNa温度 T ()の関係³⁾からNa温度を求める。

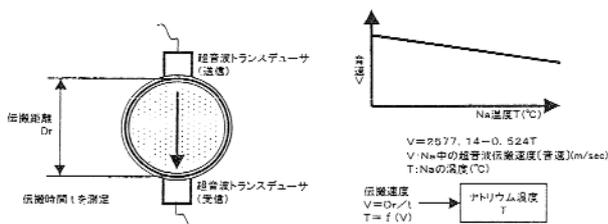


図1 計測原理

$$V = D_r / t \quad \dots\dots$$

$$V = 2577.14 - 0.524T \quad \dots\dots$$

（上記式の係数は文献3の値）

そのため、超音波による温度計測には、安定した超音波の送受信ができ、正確なNa中超音波伝搬時間の計測（Na温度以外のプラント条件で計測値が影響を受けないことや、計測において熱膨張等による配管内Na中伝搬距離の変化を考慮できることなど。さらに、音響ガイド棒を介した計測では、その伝搬時間の影響が除去できること。）が可能となることが必要である。これらを確認し、本手法が高速増殖炉の配管内Na温度計測への適用可能性を判断するために、実際にNaを用いた試験を実施した。

2.2 試験体及び試験装置

試験体

直付方式試験体は、高温用の超音波トランスデューサ（ニオブ酸リチウム：設計使用温度530）を配管に直付けする形式をとり、配管中の超音波伝搬時間の影響を除去するために、配管内を最短距離で透過した直達波（最短距離で到達した波）と1.5往復波（配管内面を反射して1往復分だけ遅れてきた波）の伝搬時間を計測して差を求める方法でNa中の伝搬時間のみを抽出している。また、超音波受信波形は雑音等の影響で変動するので、安定した伝搬時間の計測が可能ないように、複数回の送受信により計測される伝搬時間の平均値を算出して用いる方法を採用している。試験体は、時間分解能等により設定した5 MHzの正弦波の1周期分を増幅し、超音波トランスデューサにより超音波としたものを用い、伝搬時間計測値は、50回の伝搬時間計測により得られた値の平均値を用いている。

直付方式試験体は、図2に示すように、試験装置配管径に合わせた4インチ径の配管部（もんじゅ2次系配管は、22インチ）の上流（図面中の左側）から4基の超音波温度計（Na中伝搬時間を測定してNa温度を求めるのに用いるプローブ部分で、それぞれ対向した1対の高温用超音波トランスデューサで構成される。）が取り付けられている。超音波温度計とは、超音波トランスデューサと配管との音響結合材に高温用の超音波探傷に使用される高温用超音波接触媒質（通称水ガラスとも言われ高温で液体状になり、550程度までの超音波探傷に使用できる。以下、水ガラス）を用い、とは銅板を用いている。さらに、超音波温度計は配管にクランプさせた着脱が

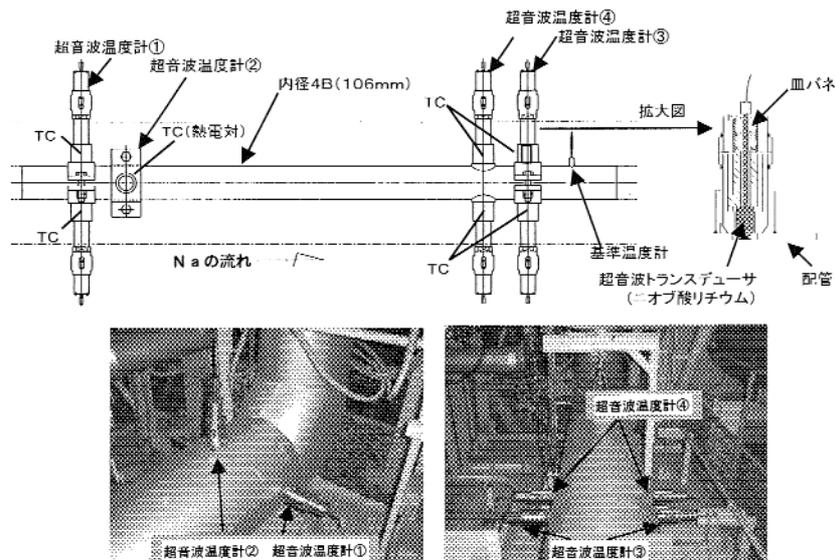


図2 試験体の構造（直付方式）

可能な金具で取り付けしており、は配管に取付金具（台座）を溶接している。これらにより、音響結合材の違いや配管への取り付け方法による計測性の違いを検討する。また、試験時に基準として使用し、超音波温度計の計測値と比較をするために、試験体の最下流側にNa温度を計測する基準温度計を取り付けている。高温用超音波トランスデューサの取付部は、図2に示すように、トランスデューサを、先端に密着させた音響結合材を含めてスペーサを介した皿バネ（温度変化の影響を受け難いように保温材の外側に配置）により配管表面に対して押し付けることで、良好な超音波透過性を確保できる構造としている。

ガイド棒方式試験体は、図3に示すように配管部分に溶接した音響ガイド棒を介して超音波トランスデューサ〔PZT（チタン酸ジルコン酸鉛）〕

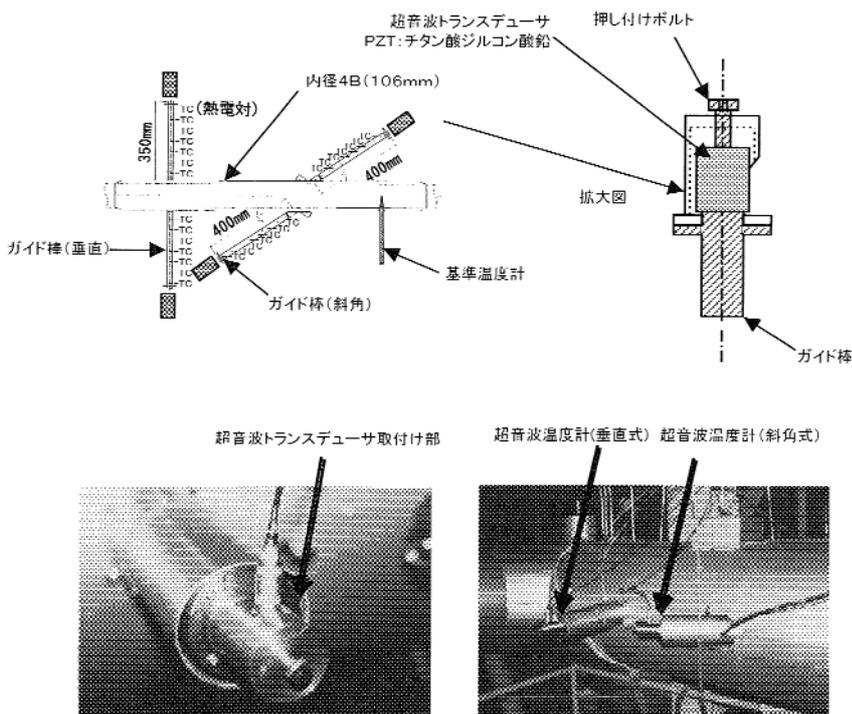


図3 試験体の構造（ガイド棒方式）

設計使用温度80℃)を取り付ける形式をとり、Na中の超音波の伝搬時間を計測する。試験体の音響ガイド棒は試験体配管部に溶接で取り付けられ、垂直に設置した(垂直式)超音波温度計と、斜めに設置した(斜角式)超音波温度計の2種類がそれぞれ1基ずつ取り付けられている。これは、超音波による温度計測のみを考えると垂直式が良いが、斜角式とすることで超音波流量計としても使用できることから、将来的な発展性を考えたためである。ガイド棒方式の超音波温度計では、全超音波伝搬時間からガイド棒中の伝搬時間(ガイド棒内を反射する超音波により求める)を引くことで、Na中での伝搬時間を算出している。また、超音波受信波形は雑音等の影響で変動するので、安定した伝搬時間の計測が可能なる様に、複数回の送受信により計測される伝搬時間の平均値を用いる方法を採用している。なお、本ガイド棒方式試験体の信号処理装置は簡易的なものであるため超音波伝搬時間計測時に手動操作を多く必要とし時間がかかるが、試験装置の制限から長時間試験条件を一定にすることが困難であり、限られた計測時間となったために平均値を得るための伝搬時間計測の回数は5回程度とした。なお、試験体で用いた超音波は、ガイド棒中伝搬特性等により設定した2MHzの正弦波1/2周期分を超音波トランスデューサに送ることで発生させている。

ガイド棒方式試験体は、試験装置配管内径に合わせた4インチ径の配管部の上流(図3の左側)から2種類(垂直式と斜角式)の超音波温度計(Na中伝搬時間を測定してNa温度を求めるのに用いるプローブ部分で、それぞれ対向した1対の超音波トランスデューサとガイド棒で構成される。)が取り付けられている。音響ガイド棒は試験体配管部に溶接で取り付けられ、超音波トランスデューサと音響ガイド棒との音響結合材には超音波探傷に使用される超音波接触媒質(グリセリンペースト)を用いている。また、試験時に基準として使用し、超音波温度計の計測値と比較するために、試験体の最下流側にNa温度を計測する基準温度計を取り付けている。超音波トランスデューサの取付部は、図3のように、トランスデューサの送受波面に音響結合材を塗布して、音響ガイド棒端面に押し付けボルトで押し付けることで、良好な超音波透過性を確保する構造としている。

試験装置

試験に使用したNa試験装置は、大洗工学センターのプラント過渡応答試験ループ(PLANDTL: PLANt Dynamics Test Loop)を用いた。また、超

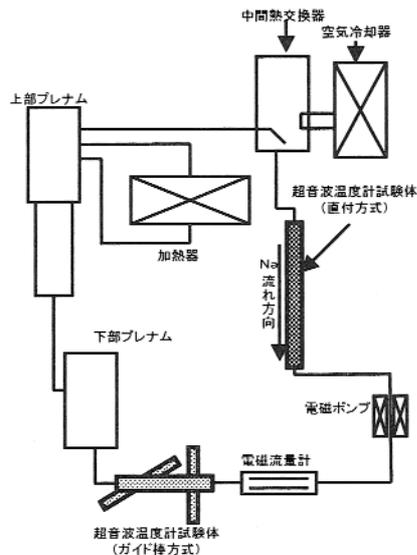


図4 Na試験装置

音波温度計試験体(配管径4インチ)の試験装置への設置は、図4に示す位置とした。

2.3 試験条件

試験では、Na温度範囲として200~500の間(50ステップ)で昇温・降温させた。また、再現性や経時特性を調べるために複数回の同条件測定を行っており、最初の昇温過程を第1サイクル、その次の降温過程を第2サイクル、また次の昇温過程を第3サイクルとし、第4サイクルまで行なった。また、各試験サイクルではNa温度以外の超音波温度計出力への影響を調べるために、プラントの運転状態により変化するNa流速の影響、カバーガス圧力の影響、Na中不純物濃度の影響についても試験パラメータとした(各試験サイクルで用いた試験パラメータを表1に示す)。

表1 試験パラメータ

項目	範囲
Na温度	200 ~ 500
Na流量	0 ~ 1000 /min 1000 /minでの流速は 約1.9m/secで実機の約40%
カバーガス圧力	0.02 ~ 0.2MPa
Na中不純物濃度	コールドトラップ(CT) 温度150、250

全条件を1サイクルとして4サイクル実施

3. 試験結果

3.1 Na温度に対する超音波伝搬時間の変化

超音波温度計は、Na中の音速が温度により変わることを用いて、Na中の伝搬時間と伝搬距離から温度を算出する。Na温度を変えたときの伝搬時間の変化を図5に示す。

図5は、Na温度の変化により伝搬時間がほぼ直線的に変化しており、本方式の超音波温度計で伝搬時間の変化からNa温度が算出可能なことを示している。また、伝搬時間の変化を、Na温度と音速の関係式³⁾に基づき計算により求めたものも図中に示した。図で、Na温度変化による音速変化の関係のみで計算したものが実線で、さらに熱膨張³⁾による伝搬経路長の変化も考慮した場合が破線である。これより、音速変化のみでNa温度を算出すると大きな誤差を生じ、Na温度算出には熱膨張による伝搬経路長変化も考慮する必要があることがわかる。なお、本試験体でガイド棒方式超音波温度計の斜角式は、ガイド棒から配管表面で反射して再び戻ってくる超音波信号が当初想定したものよりも小さくS/N比が悪いため、Na中のみの伝搬時間抽出を正しく行えなかったため図5のように誤差が大きくなっている。

3.2 Na温度の算出について

前項のように、超音波によるNa温度の算出では、式及び式のNa温度と音速の関係式に加えて、Na中の伝搬距離である配管内径 D_r (m)がNa温度により変化することを考慮する必要がある。

熱膨張を考慮すると、配管内径 D_r は次のようになる。

$$D_r = D_0(1 + (\alpha(T - T_0))) \quad \dots\dots$$

D_0 : 初期配管内径 (温度 T_0 の配管内径)

T_0 : 初期温度

α : 熱膨張係数³⁾

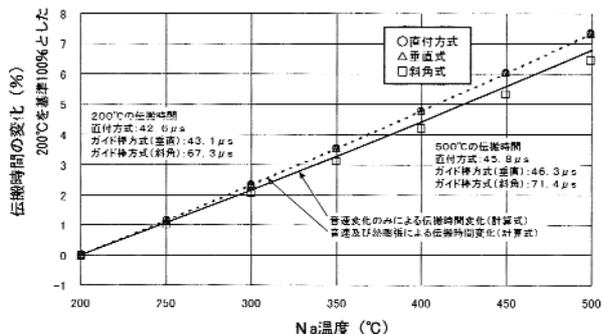


図5 Na温度に対する超音波伝搬時間変化 (直付方式 / ガイド棒方式垂直式及び斜角式)

ただし、本試験結果の検討では、Na温度以外の影響や再現性の評価を実施するという観点から、試験体の各超音波温度計について、200及び500での試験結果から得られたNa温度算出値が基準温度計と合うように各式の係数を設定している(200及び500の2点校正に相当)。

3.3 試験体系誤差

本試験において、超音波温度計の特性の評価は、基準温度計と比較することにより行う。そのために、本試験体系の誤差を考えると、超音波温度計からNa温度を算出する際の誤差として、超音波伝搬時間の計測に伴う誤差や、伝搬時間からNa温度を算出する際に生じる誤差などがある。また、基準温度計には、温度計単体(熱電対)の誤差や温度計測器の誤差などがある。

本試験で用いた基準温度計は、クラス1の熱電対で、許容差(最大誤差限度)として200の時1.5、500の時2である⁴⁾。また、基準温度計の温度変換に用いた計測器精度や温度算出誤差は、温度換算をすると、直付式で約1.4~1.6、ガイド棒方式で約3.7程度になる。

これらより、本試験における超音波温度計による温度算出値と基準温度との比較では、直付式で約2.0~約2.5、ガイド棒方式で約4.0~約4.2の試験体系誤差が考えられる。

3.4 Na温度以外の影響

Na流速の影響

Na試験では、流速0m/sから約1.9m/s(高速増殖原型炉もんじゅ2次冷却系主配管のNa流速の約40%に相当)まで流速を変化させて、その影響を検討した。各超音波温度計(直付式4台、ガイド棒方式垂直式及び斜角式)ごとに、試験結果(Na温度は、200、350、500)をまとめる

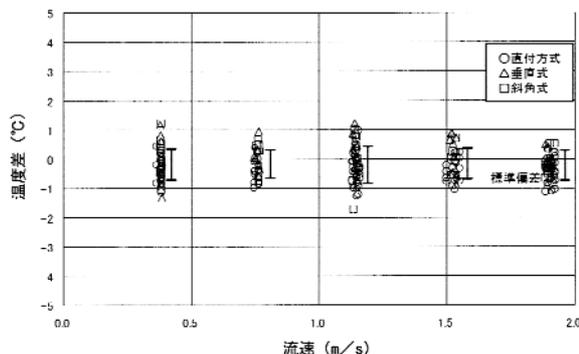


図6 流速の違いによる超音波温度計と基準温度との差 (直付方式 / ガイド棒方式垂直式及び斜角式)

と、図6(図中の標準偏差は±)のようになる。

図から、最小流速(流速 0 m/sを除く)から最大流速までにおいて、基準温度計との差は、最大± 1 程度であるとともに流速の違いによる有意な影響は観測されない。なお、流速 0 m/sにおいて、ループ条件の設定等にある程度の時間が必要なこともあり、試験条件の確定時に試験体内の各部分のNaに温度差が生じた。このため、流速による影響の検討では、流速 0 m/sのデータを除いた。

カバーガス圧力の影響

Na温度が200 と500 で、カバーガス圧力を0.02、0.1、0.2MPaと変化させた試験結果を図7に示す。図で試験の最低圧力から最高圧力までを比較すると、基準温度との差は最大± 2 程度で、圧力の違いによる有為な影響は観測されない。

Na中不純物濃度の影響

Na中の不純物による影響を確認するため、不純物を除去するためのコールドトラップ(CT)の温度を、150 と250 とした場合の試験を行った。これは、CTの温度を変化させることにより、Na中に溶存している不純物がCTへ取り込まれる量が増減し、それに対応してNa中不純物濃度が変化することによる(なお、150 のNa中酸素溶解度は約 3 ppm、250 は約40ppmである。試験時のNa中酸素溶解度もほぼそれに近い値であり、プラントの通常状態より大幅に不純物濃度が高い)。試験ループ(試験体部分を含む)のNa温度を250 、流速を約1.9m/s、カバーガス圧力を0.02MPaとして行った試験結果を図8に示す。図では、基準温度計との差は± 1 以下でNa中不純物濃度の違いによる有意な影響は観測されていない。

再現性

Na試験は、Na温度、流速、圧力をパラメータ

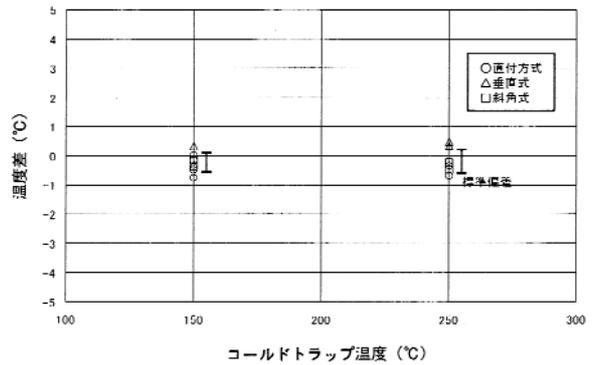


図8 Na中不純物濃度の違いによる超音波温度計と基準温度との差 (直付方式/ガイド棒方式垂直式及び斜角式)

とし、再現性を確認するために同一条件のものを4回(4 サイクル)実施した。流量(約1.9m/s)及び圧力(0.02MPa)を一定にして、Na温度を変えたときの超音波温度計による温度と基準温度との差の平均値を、各試験サイクルごとにまとめたものを図9に示す。

図から各サイクル間の違いは、前記した本試験体系誤差に比べて小さく、再現性が良好であることが示されている。

まとめ

超音波の伝搬時間によるNa温度計測では、流速、カバーガス圧力、Na中不純物濃度の影響は認められなかった。また、再現性についても、第1サイクルから第4サイクルではほとんど変化せず良好な結果が得られた。超音波温度計ごとに、第1サイクルから第4サイクルまでのすべての試験結果(流速、カバーガス圧力、不純物濃度の違いを無視し、Na温度ごとに整理する)をまとめて表すと図10のようになり、各超音波温度計の出力のばらつきは、前記した本試験体系誤差に比べて十分小さい値となることがわかる。このため、

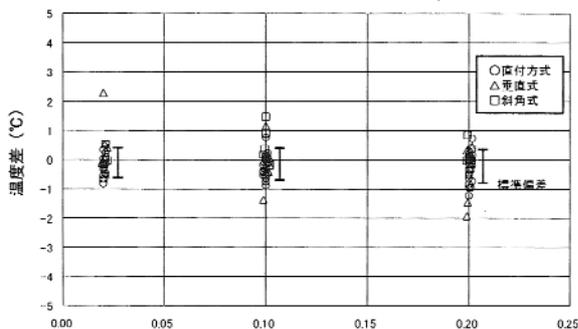


図7 圧力の違いによる超音波温度計と基準温度との差 (直付方式/ガイド棒方式垂直式及び斜角式)

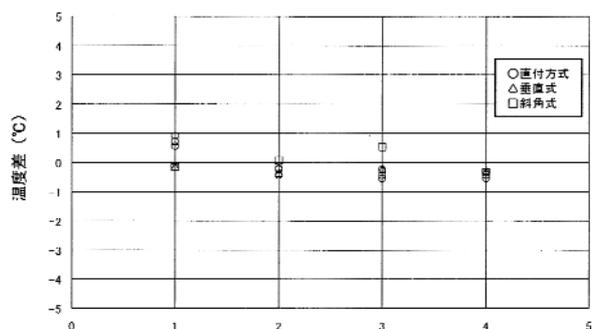


図9 試験サイクル毎の超音波温度計と基準温度との差 (直付方式/ガイド棒方式垂直式及び斜角式)

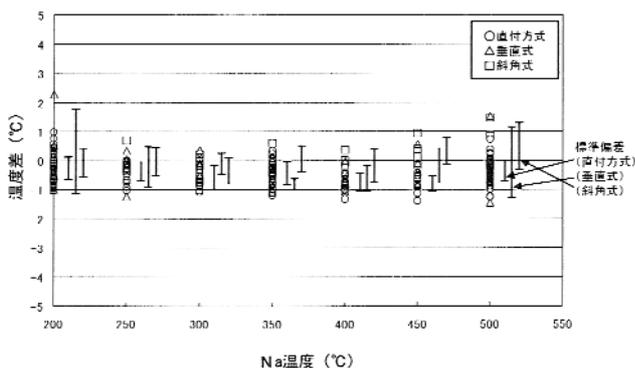


図10 超音波温度計と基準温度との差のまとめ (直付方式 / ガイド棒方式垂直式及び斜角式)

さらに精密な精度評価試験の実施や、超音波温度計信号処理手法の改良などにより、超音波温度計そのものの精度は、高精度なものが期待できる。

これは、本手法による超音波温度計が、既存の温度計（基準温度計として用いた熱電対など）と同様にNa温度計測用として使用可能なことを示している。

また、超音波温度計の校正方法としては、以上の検討で用いたような200 と500 の2点で校正した場合と、低温（200 ）のみの校正と熱膨張係数に既知の文献値³⁾を用いて算出した場合では、約2 程度の差であることもわかった^{1),2)}。

3.5 音響結合特性の検討

本試験では、超音波伝搬時間から求まるNa温度には違いはなかったが、ノイズの増加などの変

化により計測できなかつたり誤差が増える可能性があるため、確実な超音波伝搬時間の計測という点から超音波の伝搬波形について検討した。

図11～図12に、直付方式超音波温度計の200 と500 の第2 サイクル及び第4 サイクルの超音波受信波形を示す。超音波温度計 ~ の違いは、

と は超音波トランスデューサと配管との音響結合材として高温用の超音波探傷に使用される水ガラスを用いており、 と は銅板を用いている点と、 ~ は配管にクランプさせた金具で取り付けられており、 は配管に取付金具（台座）を溶接している点である。

図11の超音波温度計 では、Na温度が200 に低下すると、超音波トランスデューサと配管との間の接触媒質（水ガラス）が固化しだすので音響伝搬特性が悪化し、波形出力値が低下する。これにより低温ではS/N比が悪化している。これに対して、図12の銅板を音響結合材に使用している超音波温度計 は、温度の変化で波形出力値変化はほとんどなく安定している。また、第2 サイクルと第4 サイクルでの波形再現性は良好であり、約2 カ月にわたる試験期間中においても信号強度等は安定している。これらから、広い温度範囲で安定した超音波の伝搬を得るには、銅板のような配管材質に比べて柔らかな金属材料を、音響結合材に用いる方が良いことがわかった。なお、超音波温度計 と では、超音波受信波形の違いはなく、配管への取付方法としては、脱着が容易なクランプ方式が適用可能なことがわかった。

図13にガイド棒方式超音波温度計の200 と

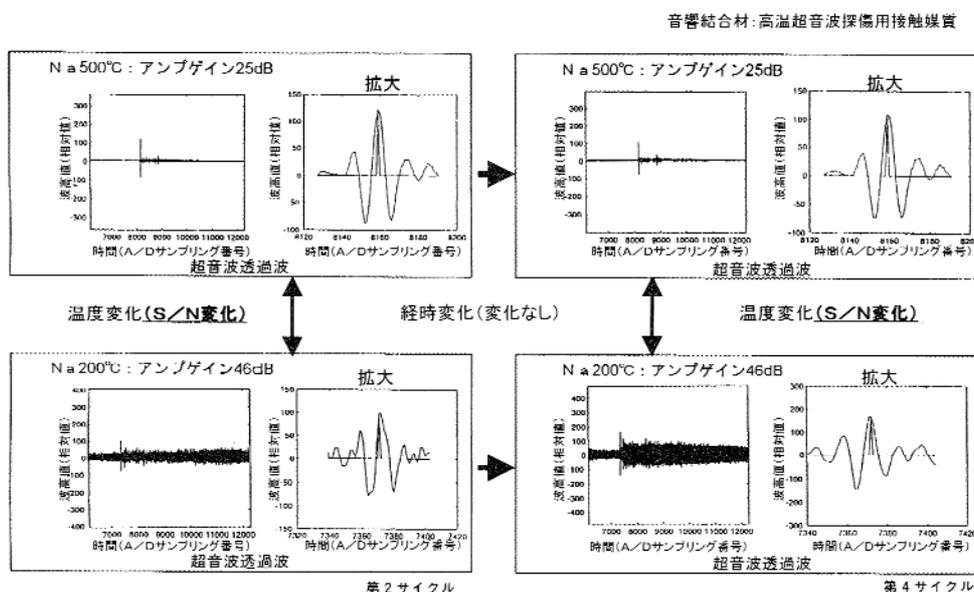


図11 温度と時間による波形変化（直付方式超音波温度計）

音響結合材:銅板

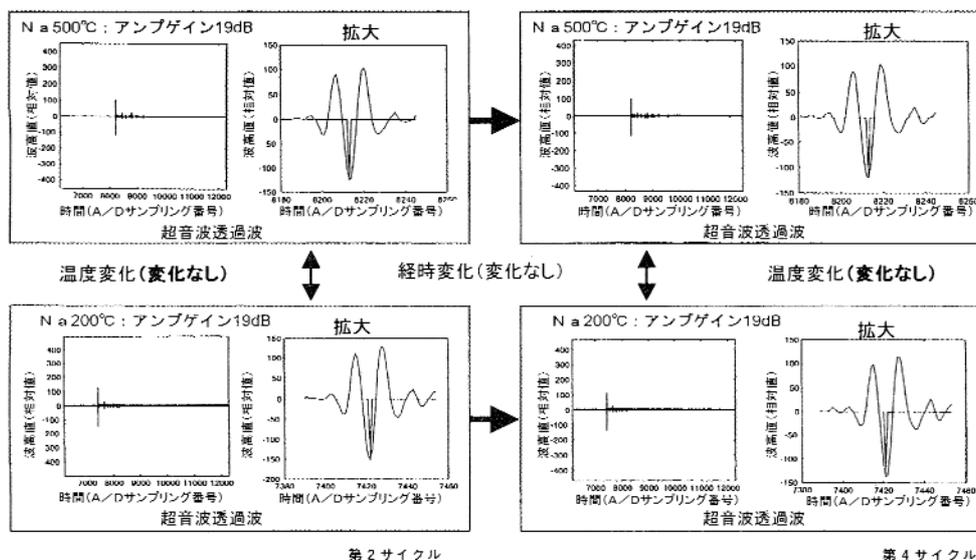


図12 温度と時間による波形変化 (直付方式超音波温度計#)

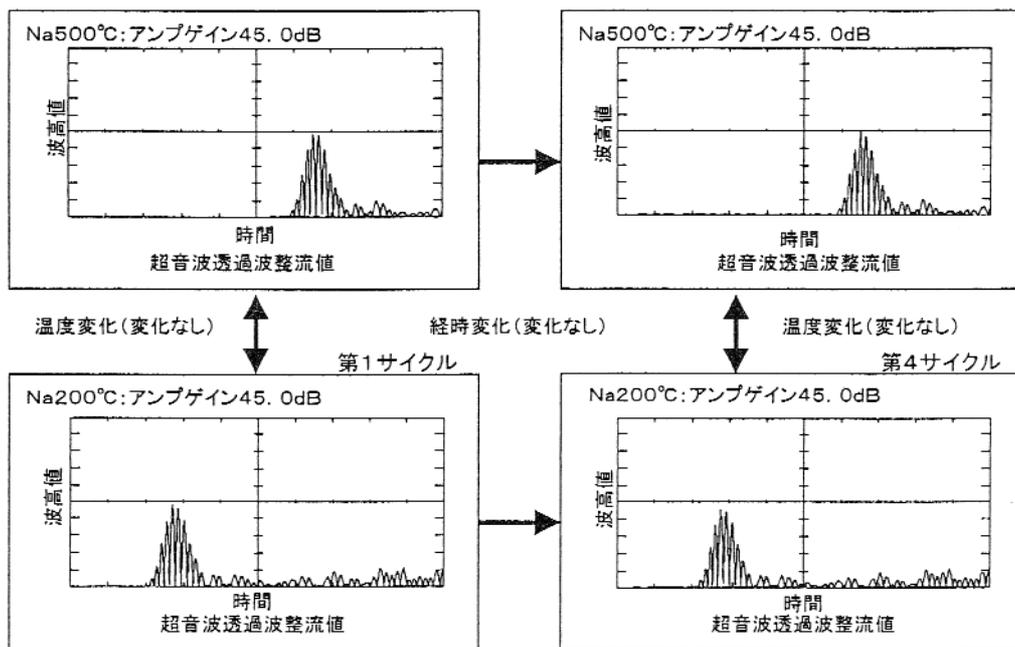


図13 温度と時間による波形変化 (ガイド棒方式垂直式)

500 の第 1 サイクル及び第 4 サイクルの超音波受信波形 (配管透過信号整流値) を示す。ガイド棒方式では、超音波トランスデューサ取付部は高温にならず、さらに温度変化も少ないことから、直付け方式のような音響結合特性変化などは生じず、温度変化及び経時変化に対して信号強度の変化はほとんどなく安定しており、約 2 カ月にわたる試験期間中において良好な計測ができた。

4 . おわりに

配管非貫通で内部流体のNa温度を計測する技術の開発として、高温用超音波トランスデューサ (設計使用温度530) を配管に直付けする形式の超音波温度計試験体 (直付方式) と、配管に溶接した音響ガイド棒と低温用超音波トランスデューサ (設計使用温度80) を用いる形式の超音波温度計試験体 (ガイド棒方式) を用いてNa試験を

実施し、以下のような知見を得た。

超音波温度計のNa温度計測値（範囲200 ~ 500）は2つの方式ともに、本試験範囲のNaの流速変化、カバーガスの圧力変化、Na中の不純物濃度変化の影響を受けず、プラントの運転範囲においても同様に影響されないと考えられる。また、最大約4程度の試験体系誤差を有する本試験において、超音波による温度計測値と基準温度計との差は、最大でも約2強程度の値になり、試験体系誤差内のばらつきになる。このため、超音波温度計の精度としては、高精度なものが期待できる。ただし、本試験体のガイド棒方式超音波温度計の斜角式は、精度向上のためにはS/N比の向上等の改良が必要である。

直付方式試験体の超音波トランスデューサと配管との音響結合材としては、銅板のような配管材質に比べて柔らかな金属材が適している。また、超音波トランスデューサの配管への取り付けは、配管に溶接を必要としないクランプ方式で十分安定して使用できる。

超音波伝搬時間の計測は、複数回の超音波送受信計測の平均値を用いることで安定した値が得られ、超音波温度計の計測精度が向上できる。

約2カ月のNa試験期間では、超音波温度計の計測特性に変化は生じない。

以上から、本手法の超音波温度計は、配管内の

Na温度を計測する温度計として適用可能と考えられる。今後は、実機適用化を目指して、大口径配管などの実機条件での計測精度評価、過渡変化追従性（応答性）評価、各種ノイズ影響評価、配管外表面熱電対による校正の評価等について、水試験やNa試験を通して研究開発を進めて行く予定である。

5. 謝辞

本研究を進めるにあたり、株式会社東芝の唐沢博一氏、小舞正文氏（現 サイクル機構）、福家賢氏、三菱電機株式会社の荒木等氏、古賀達也氏には、試験の実施及びデータ整理において御助言御助力いただいた。また、原子力システム株式会社の大和田康雄氏には試験データ整理において御協力いただいた。以上の方々に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 林田均, 小柿信寿 他: “超音波温度計ナトリウム試験 - 超音波トランスデューサ配管直付型試験体の試験結果のまとめ -”, JNC TN9400 98-001, (1998).
- 2) 林田均, 小柿信寿 他: “超音波温度計ナトリウム試験 - 音響ガイド棒方式試験体の試験結果のまとめ -”, JNC TN9400 99-014, (1999).
- 3) 高須宏雄, 磯崎三喜男 他: “ナトリウム技術実用物性値表”, PNC TN941 81-73, p.9-p.15, (1981).
- 4) 福原原一 編: “日本工業規格 シース熱電対 JIS C1605-1995”, p.3, (1995).