

原子力発電所の廃止措置における配管等の残水検知技術に関する研究

(株)四国総合研究所 産業応用技術部 岡部 克也

キーワード： 超音波検査
配管内水面検知

原子力発電所
加圧水型軽水炉
廃止措置
横波斜角超音波探触子

ステンレス配管
非破壊検査

Key Words : Ultrasonic Inspection
Water Surface Detection in
Piping
Nuclear power plants
Pressurized water reactor
Decommissioning
Transverse oblique angle
ultrasonic probe
Stainless steel piping
Non-destructive inspection

Study on technology for detecting residual water in piping, etc. in decommissioning of nuclear power plants

Shikoku Research Institute, Inc., Industry Application Technology Department
Katsuya Okabe

Abstract

Currently, 24 out of 57 commercial nuclear reactors in Japan have been decided to be decommissioned (as of the end of October 2022), and decommissioning is in progress. One of the most important issues in decommissioning work is how to minimize radiation exposure of workers. For example, the primary system piping of a pressurized water reactor (PWR) may contain radioactive liquid, and if the drainage is incomplete before cutting the piping, contaminated water may be dispersed and workers may be contaminated. If the drainage is incomplete prior to cutting the pipes, contaminated water could scatter and contaminate workers. To prevent such problems, it would be good if the presence or absence of residual water could be checked by a water level gauge before dismantling, but since most pipes do not have a water level gauge, it is necessary to check for residual water in the pipes by means of a device that can be attached externally.

At the Ikata Power Station, ultrasonic technology developed by the Shikoku Research Institute is used to monitor the water level at the nozzle center of the reactor piping during routine inspections. In this study, we used this knowledge to develop a technology to reliably detect residual water in piping, etc.

1. はじめに

現在、国内の商業用原子炉 57 基中の 24 基で廃炉となることが決定されており（2022 年 10 月末時点）、廃止措置が進行中である。廃止措置作業においては、作業員の放射線被ばくを如何に抑えるかが重要課題の一つとなっている。廃止措置では非常に多数の配管等を解体・撤去する必要があるが、例えば、加圧水型軽水炉（PWR）の一次系配管は放射性物質を含む液体が残っている可能性があるため、配管を切断するときに事前の排水が不完全であれば汚染水が飛散し、作業員が身体汚染する可能性があると考えられる。このようなトラブルを未然に防止するためには、解体前に水位計によって残水の有無を確認できれば良いが、ほとんどの配管では水位計が設置されていないため、外付可能な装置等により配管内の残水の有無を確認することが有効な対策となる。

伊方発電所では、定検時における原子炉配管ノズルセンタ水位の監視に四国総合研究所で開発した超音波技術を使っている。本研究では、この知見を活用し、配管等の残水を確実に検知する技術について開発を行った。

2. 垂直超音波センサによる配管残水検知

図 1 は垂直超音波センサによる水平配管内の残水検知方法を示したものである。これは原子炉配管ノズルセンタ水位計と同じ原理に基づく方法である。この方法では、垂直超音波センサを配管底面に取り付けて水面との間を往復する超音波信号を検出する。このとき、往復する超音波の伝搬時間 T が分かれば(1)式によって配管内の水位 H が算出できるため、残水の有無を判定することが可能になる。

$$H = c_1 \left(\frac{T}{2} - \frac{d}{c_2} \right) \quad (1)$$

この方法は垂直配管の場合にも容易に拡張できる（図 2）。垂直配管の場合は、垂直超音波センサを配管側面に取り付ける。このとき、超音波センサの取り付け位置より水面が高ければ、(2)式で与えられる超音波伝搬時間 T 付近に超音波信号が検出される。

$$T = 2 \left(\frac{D}{c_1} + \frac{d}{c_2} \right) \quad (2)$$

この信号は超音波センサの取り付け位置より水面が低いときは検出されないため、信号の有無から超音波センサより高い位置に水面があるか否かが判定できる。

なお、垂直配管の超音波経路は、水平配管の水位が

100%の場合（満水 $H = D$ を 100%とする）と全く同じであるため、以後は水平配管の特別な場合として扱う。

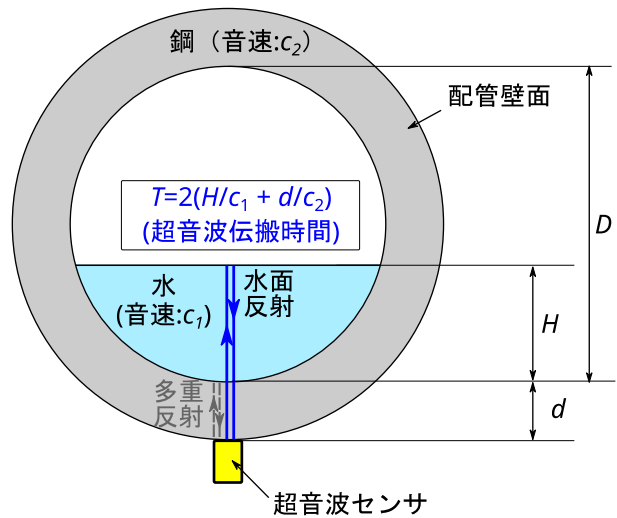


図 1 垂直超音波センサによる残水検知方法
（水平配管の場合）

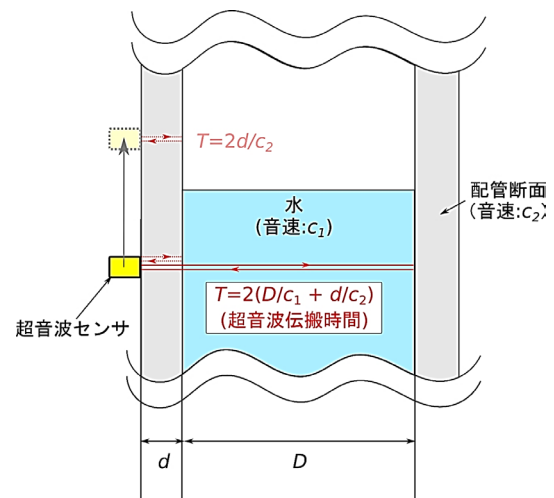


図 2 垂直超音波センサによる残水検知方法
（垂直配管の場合）

垂直超音波センサによる残水検知方法（図 1）の有効性を確認するため、配管モックアップによる検証実験を実施した。表 1 に配管モックアップの仕様を、図 3 に水位が 73.9mm (100%)、37.0mm (50%)、20.0mm (27%)、10.0mm (14%) のときの受信波形を示す。横軸の水位付近の信号が残水を示す水面反射であるが、その他にも多数の信号が検出される。これらは、

- ① 水面と配管内面の間で超音波が反射を繰り返すことで生じる多重反射波
- ② 配管内面と外面の間で超音波が反射を繰り返す

すことで生じる多重反射波

のいずれかである。その間隔は、①の場合は水位と同じであり、②の場合は配管肉厚に比例する（SUS304 中の音速は水中の約4倍であるため、 $7.6\text{mm} \div 4 \div \text{約} 1.9\text{mm}$ 間隔）。水位が低くなると、水面反射が多重反射の山に埋もれて判別が困難になるため、確実に残水を検知するには水位が20mm（配管肉厚の約2.6倍）以上必要であることが分かった。

表 1 配管モックアップの主な仕様

配管外径(D+2d)	89.1mm (呼び径 80A)
配管内径(D)	73.9mm
配管肉厚(d)	7.6mm
配管材質	SUS304

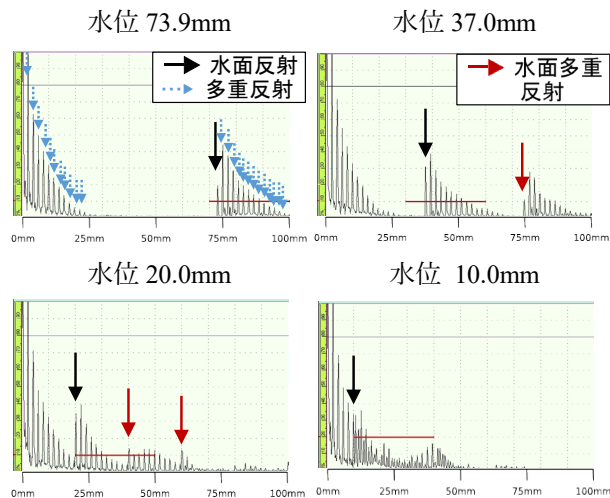


図 3 垂直超音波センサの受信波形

3. 横波斜角超音波センサによる配管残水検知

誤検知の要因となる多重反射の影響を軽減するため、横波斜角超音波センサによる残水検知法を検討した。

前項の垂直超音波センサは縦波を送信するが、物体中を伝搬する波には、横波等の異なる種類（振動モード）も存在する。図 4 は縦波と横波の違いを示したものである。縦波は進行方向と振動方向が平行な波であり、波の中に密度が高いところと低いところが存在することから疎密波とも呼ばれる。横波は進行方向と振動方向が直交する波で、せん断波とも呼ばれる。よく知られた例としては、地震の際に最初に到達する波（P 波）が縦波、2 番目に到達する波（S 波）が横波である。鋼中は縦波と横波どちらも伝わるができるが、水中（液体）では縦波のみ伝わるができる。鋼中の横波の伝搬速度は縦波の約半分である。

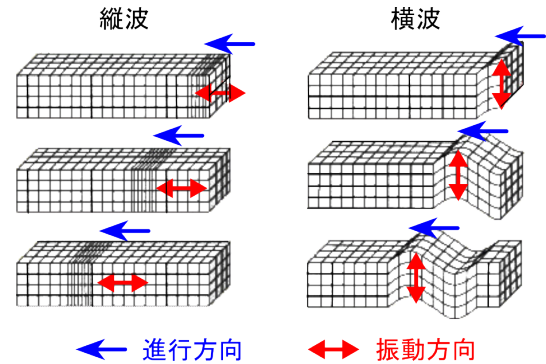


図 4 縦波と横波の違い

超音波が音速の異なる媒質の境界面に斜め方向から入射するとき、屈折や反射によって超音波の一部のモードが変化する（モード変換）。図 5 の例では、アクリルから鋼に向かって縦波超音波が入射し、アクリル内で反射したものが縦波と横波に、鋼中で屈折したものがさらに縦波と横波に分かれている。このとき、入射角が臨界角 27° （縦波屈折角が 90° のときの入射角）を超えると、鋼中を伝搬する超音波は横波だけになる。横波斜角超音波センサ（図 6）は、この特性を利用して横波超音波を送信可能にしたものである。

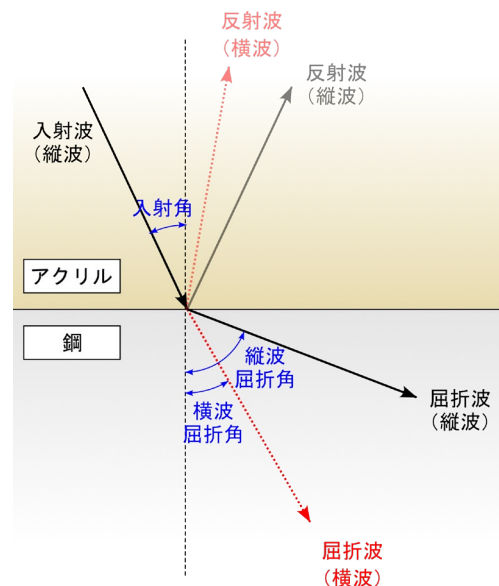


図 5 超音波のモード変換の例

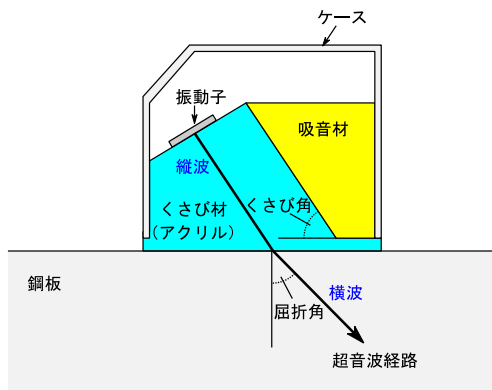


図6 横波斜角超音波センサの構造

図7に横波斜角超音波センサによる残水検知方法を示す。この方法では、横波斜角超音波センサ（鋼中屈折角 45° ）を配管下部の傾斜面に取り付ける。センサ取付位置は、超音波が水中に入射した際に、垂直上向きに伝搬するようにあらかじめ計算しておく必要があるが、通常の配管であれば傾斜角はほぼ一定の範囲に収まる（ $5\sim 10^\circ$ ）。配管壁面で反射した超音波はセンサから遠ざかる方向に反射・伝搬することから、受信波から多重反射の影響をほぼ取り除くことができる。ただし、100%水位付近では、超音波経路上で水面が露出していないことから、水面反射が検出できない可能性が高いため、垂直超音波センサによる方法と使い分ける必要がある。

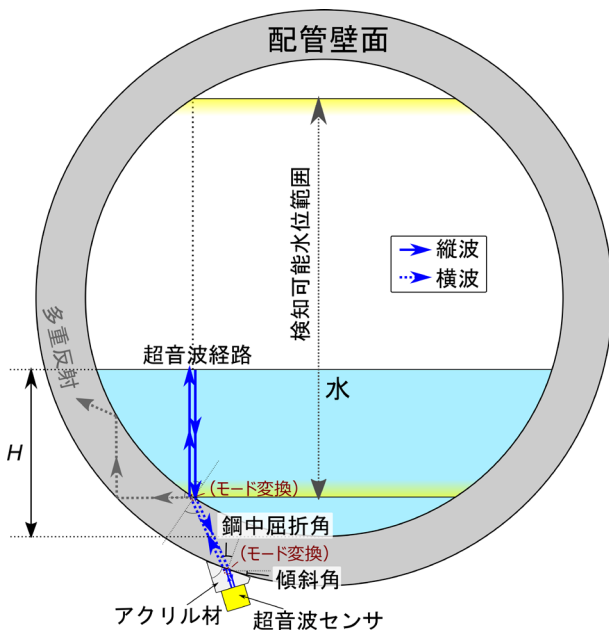


図7 横波斜角超音波センサによる残水検知方法

横波斜角超音波センサによる残水検知法（図7）の有効性を確認するため、配管モックアップ（表1）による検証実験を実施した。実験では水位が73.9mm（100%）から0.0mm（0%）になるまで少しずつ水を抜き、その間の水面反射信号の変化を確認した。図8に実験風景、図9に受信波形を示す。

実験の結果、水面反射の検出を妨げる信号はほとんど存在せず、確実性の高い残水検知が期待できることが分かった。また、確実に水面反射が検出可能な水位の上限は約67mm（91%）、下限は約10mm（13%）であることが確認できた。特に、下限水位は垂直超音波センサによる残水検知の下限水位の約1/2であり、より低水位の残水を検知できることが分かった。

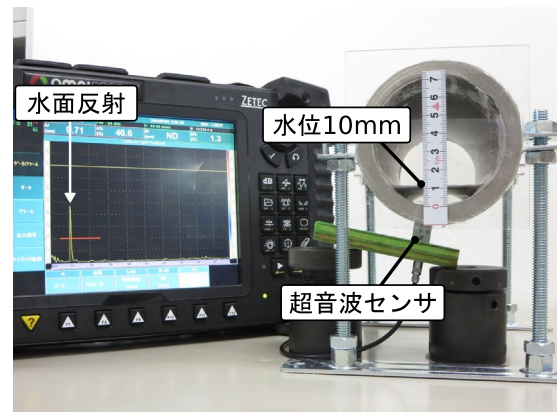


図8 実験風景

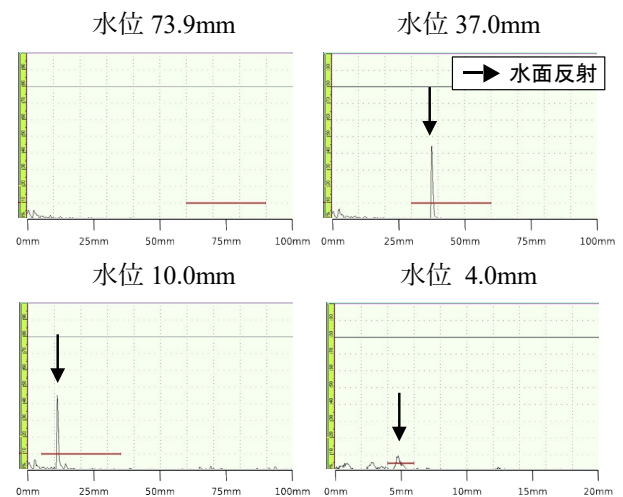


図9 横波斜角超音波センサの受信波形

4. 横波斜角超音波センサの最適化

超音波センサから送信された超音波は、配管内面を透過する度に反射等によりエネルギーを失う。図10は超音波が銅板と水の間を1往復した後に残るエネル

ギーの比率（エネルギー透過率）と水中屈折角（傾斜角に一致）や鋼中屈折角との関係を示したものである。垂直超音波センサのエネルギー透過率は 1.5%程度であるのに対して、鋼中屈折角 45° （水中屈折角 19.5° ）の横波斜角超音波センサは 2.7%と 2 倍近いエネルギーが残っており、垂直超音波センサより横波斜角超音波センサを使った方が超音波の伝達効率が高いことを示している。

図 10 によると超音波伝達効率のピーク位置は鋼中屈折角 45° より小さいところにあるため、超音波センサの屈折角を小さくすることで、さらに超音波の伝達効率が向上する可能性がある。そこで、図 11 のように鋼中屈折角 45° の超音波センサをフライス加工することで、鋼中屈折角 40° の超音波センサを作成し、前項と同様の試験手順で、配管モックアップによる検証実験を実施した。また、この方法が適用可能な配管について確認するため、実験用配管には、80A 配管（表 1）の他に 25A、150A の配管モックアップ（表 2）を追加した。

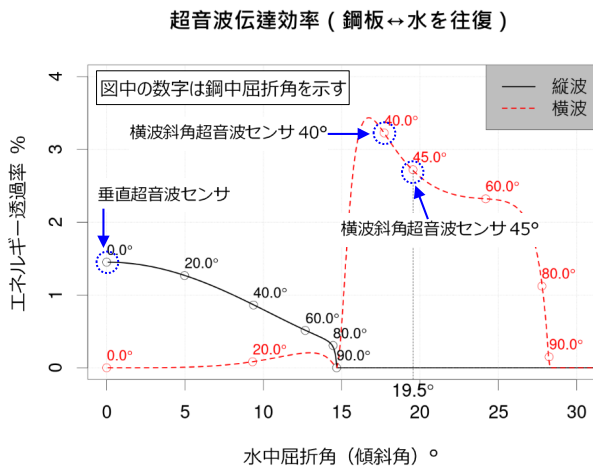


図 10 鋼板と水を往復する超音波の伝達効率

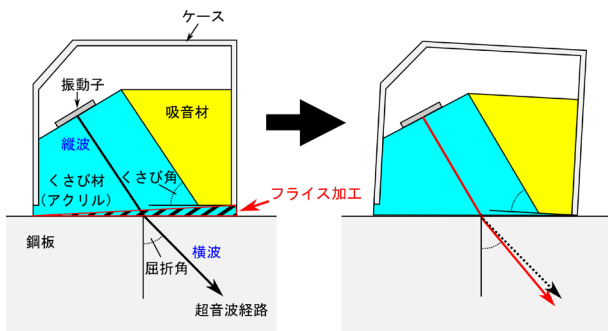


図 11 横波斜角超音波センサの屈折角の変更

表 2 追加した配管モックアップの主な仕様

配管外径(D+2d)	34.0 (呼び径 25A)	165.2 (呼び径 150A)
配管内径(D)	25.0	143.2
配管肉厚(d)	4.5	11.0
配管材質	SUS304	

図 12 に 2 種類（鋼中屈折角 45° と 40° ）の横波斜角超音波センサの受信波形（水位 50%の場合）、表 3 に 2 種類の横波斜角超音波センサと垂直超音波センサの水位の検出限界をまとめた結果を示す。受信波形については、鋼中屈折角 45° の場合よりわずかに 40° の方が信号が高くなっており、超音波伝達効率が上がっているように見えるが、水位検出限界については、ほとんど差がないことが分かった。このことから、横波斜角超音波センサは、鋼中屈折角 45° のみで十分といえる。各配管への適用性については、25A 配管では下限水位は垂直超音波センサと大きな差はないが、80A 配管や 150A 配管では 1/2 程度となっており、横波斜角超音波センサによる方法は外径が大きい配管で効果が高いことが分かった。これは、図 7 に示した理論上の検知可能水位範囲が、肉厚に対する内径の比（25A 配管：5.6、80A 配管：9.7、150A 配管：13.0）が大きいほど広くなることを反映していると考えられる。

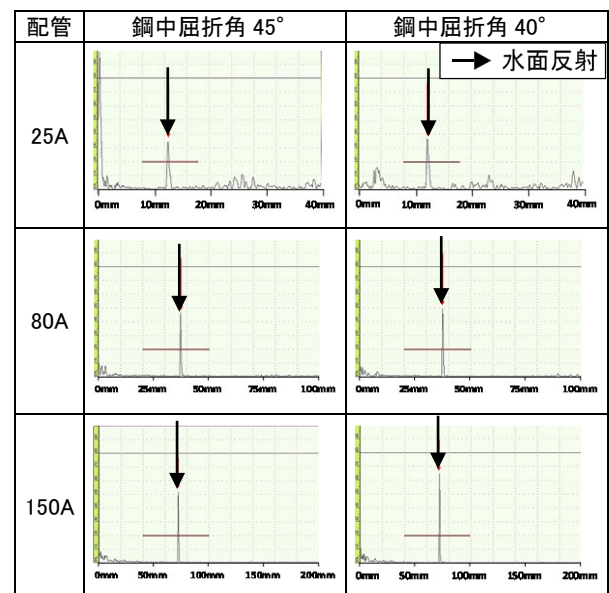


図 12 2 種類の横波斜角超音波センサの受信波形(水位 50%の場合)

表 3 各超音波センサの水位検出限界のまとめ

配管	下限 (mm)			上限 (mm)		
	45°	40°	垂直	45°	40°	垂直
25A	8 (32%)	8 (32%)	10 (40%)	20 (80%)	20 (80%)	25 (100%)
80A	10 (13%)	10 (13%)	20 (27%)	67 (91%)	67 (91%)	73.9 (100%)
150A	10 (7%)	10 (7%)	20 (14%)	135 (94%)	132 (92%)	143.2 (100%)

45° , 40° :横波斜角超音波センサの鋼中屈折角

垂直 :垂直超音波センサ

5. おわりに

本稿では、配管等の残水の有無を超音波により判定する技術に関する研究成果を紹介した。この技術は、原子力発電所の廃止措置において、また運転中においても PWR の一次系配管等の残水を確実に検知することで、配管切断作業における作業員の放射線被ばくリスクの低減が期待できる。

【謝辞】

本研究は、四国電力㈱原子力本部殿より委託を受け実施したもので、ご協力いただいた関係各位に深く感謝いたします。