

超音波による原子炉配管水位高精度測定技術に関する研究

(株)四国総合研究所 産業応用技術部 岡部 克也

キーワード : 超音波測定
超音波水位計
加圧水型原子炉
原子炉一次冷却材系統
定期検査/定期事業者検査
カルマンフィルタ

Key Words : Ultrasonic Measurement
Ultrasonic Water Level Gauge
Pressurized Water Reactor (PWR)
Reactor Coolant System (RCS)
Periodic Licensee's Inspection
Kalman Filter

Research on high-precision measurement of reactor piping water level using ultrasonic waves

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

Abstract

During periodic licensee's inspections of PWR plants, there is a period during which the reactor primary coolant is operated with the water level lowered to near the center of the reactor piping while the fuel is loaded (mid-loop operation). Shikoku Research Institute has developed an ultrasonic type "RCS nozzle center ultrasonic water level gauge" (hereinafter referred to as "ultrasonic water level gauge") to measure the water level in the reactor piping of Shikoku Electric Power's Ikata Unit 3, contributing to strengthening measures against loss of reactor core cooling function due to water level lowering during mid-loop operation.

Compared to conventional differential pressure and water column type water level gauges, ultrasonic water level gauges have advantages such as low influence of external pressure and high accuracy, etc. However, when the water level is low (less than 40 mm from the bottom of the reactor piping), the water level cannot be measured due to the influence of background noise peculiar to ultrasonic waves or a drop in ultrasonic signals caused by water surface shaking, etc. In such cases, the water level cannot be measured or an erroneous water level may be detected.

This paper reports on the results of introducing new signal processing and water level evaluation methods to improve the water level measurement accuracy of ultrasonic water level meters.

1. はじめに

PWR プラントの定期検査においては、燃料が装荷された状態で原子炉一次冷却材 (RCS) の水位を原子炉配管中心付近まで下げて運転する期間がある (ミッドループ運転)。四国総合研究所では、四国電力伊方発電所第 3 号機の原子炉配管内の水位測定を目的とした超音波式の「RCS ノズルセンタ超音波水位計」 (以下、超音波水位計) を開発し、従来の差圧式や水柱式の水位計に加え、水位の監視を 3 重化することで、ミッドループ運転時の水位低下による炉心冷却機能喪失対策の強化に貢献している。

超音波水位計は差圧式や水柱式の水位計と比較すると、外圧の影響が小さく高精度である等の利点がある一方、水位が低い (原子炉配管底部から 40mm 未満) 場合には、超音波特有のバックグラウンドノイズの影響や水面の揺れによる超音波信号の低下等により、水位が測定できないことや、誤った水位を検出することがある。

本稿では、超音波水位計の水位測定精度の向上のため、新しい信号処理や水位評価手法を導入した成果について報告する。

2. 既設超音波水位計の水位測定技術

超音波水位計は、超音波パルスの伝搬時間が超音波経路の長さに比例するという性質を利用し、水面で反射される超音波経路の長さから水位の高さを求めるものである。図 1 は超音波水位計の超音波センサ取付位置と超音波経路を示したものである。超音波センサは原子炉配管の底面に固定されており、超音波センサから送信された超音波パルスは、原子炉配管材料 (ステンレス鋼) および一次冷却材 (水) を伝搬し、水面からの反射により往復して戻ってくることで検出される。

図 2 は超音波水位計の超音波信号の検出例である。この信号には明瞭なピークが複数あり、等間隔に並んでいる。原点付近のもっとも大きなピークは、超音波センサから送信された超音波が直後に配管内面で反射されることで生じるもので、水位に関係なく常に同じ位置に存在する (第 0 反射波)。次のピークは、水面で反射して戻ってきた超音波信号である (第 1 反射波)。次のピーク以降 (第 2 反射波、第 3 反射波、...) も、水面で反射した超音波がさらに配管内面で反射することによ

り、同じ経路を何度も往復することで生じるものである (多重反射波)。ここで、第 n 反射波の超音波伝搬時間を T_n ($n = 0, 1, 2, \dots$) とすると、水位の高さ H (原子炉配管底部を $H = 0$ とする) によって以下のように表される。

$$T_n = \frac{2d}{c_l} + \frac{2nH}{c_w} \quad (1)$$

ここで、 c_l は鋼中 (原子炉配管材料) の超音波伝搬速度、 c_w は水中 (一次冷却材) の超音波伝搬速度、 d は原子炉配管の厚さである。

既設超音波水位計は、第 1 反射波 T_1 から水位を測定する (1 回反射法)。(1) 式から水位の高さ H は次式で与えられる。

$$H = \frac{c_w}{2} (T_1 - \Delta t) \quad (2)$$

ここで $\Delta t = \frac{2d}{c_l}$ は、超音波が 1 往復する間で原子炉配管材料を通過するのに要する時間である。

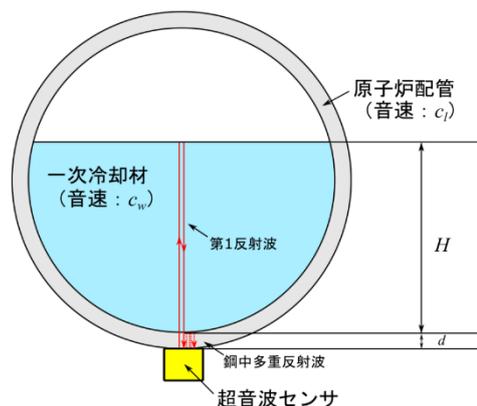


図 1 超音波センサ取付位置と超音波経路

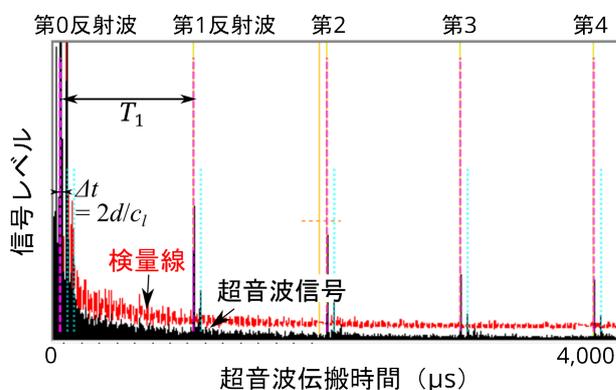


図 2 超音波信号の検出例 (1 回反射法)

超音波信号のバックグラウンドノイズの大半は、ステンレス鋼や超音波センサ内部で発生しており、一次冷却材の有無とはほとんど無関係である。超音波水位計ではしきい値となる検量線（図2の赤線）を設定し、検量線を超えない超音波波形をバックグラウンドノイズとして扱っている。検量線は、満水の際に取り込んだ超音波波形を元に作成されており、通常定期検査の都度更新している。

超音波水位計の基本仕様を表1に示す。超音波水位計では、ノズルセンタと呼ばれる原子炉配管の中心より50mm上方を基準とし、測定範囲内 $\pm 250\text{mm}$ ($168\text{mm} \leq H \leq 668\text{mm}$)の水位が中央制御室に送られる。ただし、信頼性は低下するが、水位が原子炉配管内($0\text{mm} \leq H \leq 736\text{mm}$)であれば、測定範囲外であっても超音波水位計内部において水位測定が行われている。なお、原子炉配管と接する超音波センサや接触媒質には、 300°C を超える運転中の原子炉配管温度に耐えられない高感度・高精度のものを使用しているため、超音波水位計は定期検査時専用の水位計である。

表1 超音波水位計の基本仕様

基準水位	ノズルセンタ ($H^* = 418\text{mm}$)
測定範囲	$\pm 250\text{mm}$ ($168\text{mm} \leq H \leq 668\text{mm}$)
表示範囲(下限)	-418mm ($H = 0\text{mm}$) 底部水位
表示範囲(上限)	$+318\text{mm}$ ($H = 736\text{mm}$) 満水位
測定精度	$\pm 1\% \text{F.S.}$
超音波センサ	周波数 1MHz 使用可能温度 最大 60°C
系統	2系統 (Bループ、Cループ)

※ H : 原子炉配管底部から水面までの高さ

3. 水位誤検出の要因

既設超音波水位計では、水位が -380mm ($H = 38\text{mm}$)以下に下がると、実水位より高い水位を測定することがある。この水位自体は測定範囲外であるが、誤検出した水位が -250mm を超えて測定範囲に入る場合もあるため、誤差を抑えるとともに誤検出頻度を低減するような対策が必要とされる。

水位を誤検出する要因を突き止めるため、 -380mm 以下に水位が下がったときの超音波信号

の変化を追跡したところ、図3に示すように、多重反射を5~6回繰り返した後にピークが高くなる場合があることが分かった。このとき、第1反射波が検量線を超えていないにもかかわらず、第5反射波や第6反射波が検量線を越えた結果、実水位より高い水位を測定したと考えられる。

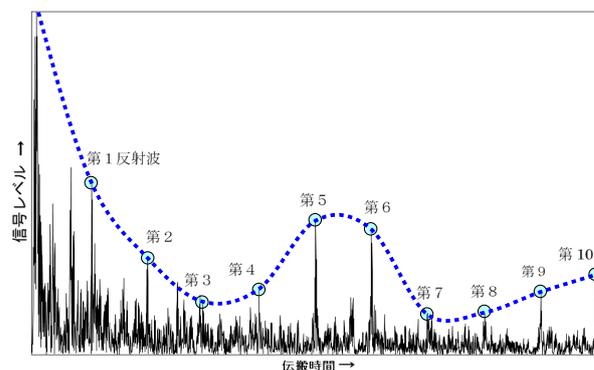


図3 水位 -380mm 以下の超音波信号例

4. 高精度水位測定技術の検討

低水位における水位測定精度の向上のため、次の3つの方法を検討した。

- ・(多重反射法) 多重反射波を利用する。
 - ・(動的検量線) 検量線を可能な限り低く設定し、多重反射波の検出感度を上げる。
 - ・(水位評価手法の最適化) 至近の水位変化から現在の水位を予測し、水位の推定に利用する。
- 以下に、それぞれの方法について説明する。

4.1 多重反射法

多重反射法は、多重反射波の間隔 $\Delta T = T_{n+1} - T_n$ から水位を求める方法である(図4)。(1)式によると多重反射波の間隔は全て同じであり、水位の高さは次式で表される。

$$H = \frac{c_w}{2} \Delta T \quad (3)$$

$n = 1$ の場合、 $T_0 = \Delta t$ とすれば(3)式は(2)式と同じになる。この関係によって、1回反射法を多重反射法に統合することが可能となる。

検出できない多重反射波が存在すると、測定水位の高さが実水位の2倍以上になる恐れがあるが、多数の多重反射波が検出できれば、最頻値を使用することでその危険性を低減することが可能である。

図4の超音波波形をよく観察すると、水面から

の多重反射波(水中多重反射波)のすぐ後にもピークが存在することが分かる。これは原子炉配管材料の中で発生した多重反射によるものであり(鋼中多重反射波(図1参照))、このピークが検出されることにより ΔT が過小評価される恐れがある。鋼中多重反射波の間隔は、水位によらず常に $\Delta t = \frac{2d}{c_l}$ であり、原子炉配管に使われるステンレス鋼では、水に比べて超音波の減衰が著しいため、2~3回往復するとほぼ消滅する。この特徴を利用して、以下のようなしきい値を設ける。

- しきい値の位置は、直前に検出した多重反射波位置の Δt 後方とする。 Δt の誤差を考慮して、しきい値は幅を持たせる($\pm 4\mu\text{s}$ 程度)。
- しきい値の高さは、直前に検出した多重反射波の0.7倍とする。

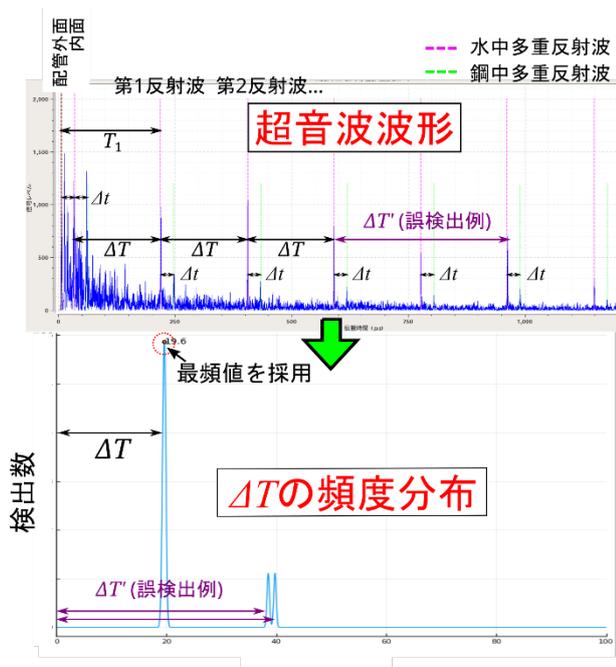


図4 多重反射法の概要

4.2 動的検量線

検量線を下げることで多重反射波の検出感度は向上するが、バックグラウンドノイズを誤検出する可能性も高くなる。また、バックグラウンドノイズや多重反射波のピークは常時変動するため、最適な検量線は時間とともに変化すると考えられる。

そこで、バックグラウンド波形(超音波波形のバックグラウンドノイズ成分)を推定し、それを

元に検量線を更新する方法(動的検量線)を検討した。動的検量線の更新手順は以下の通りである(図5)。

- 一定サイクルで超音波水位計に取り込まれる超音波波形を時系列データとして扱う。時系列データは「時刻」パラメータ $1, 2, \dots, t$ のように時系列順にラベリングする。
- 時刻 $t-1$ のバックグラウンド波形と時刻 t の超音波波形をカルマンフィルタにより合成し、時刻 t のバックグラウンド波形とする。最初(時刻0)のバックグラウンド波形は、満水のときに取り込んだ超音波波形を元で作成しておく(既設超音波水位計と同様)。ここで、カルマンフィルタは観測値の尤もらしさ(バックグラウンドらしさ)が合成結果に反映されるように設計されているため、第1反射波以降の多重反射波(バックグラウンドでない波形)は合成結果からほぼ排除される。
- バックグラウンド波形の β 倍に標準偏差の γ 倍を加算したものを時刻 t の動的検量線とする(標準偏差は過去100個分の超音波波形の平均に対する偏差として導出)。ここで、定数 β, γ は過去の定期検査において採取した超音波信号を元に最適化した結果、 $\beta = 1.2, \gamma = 3$ とした。

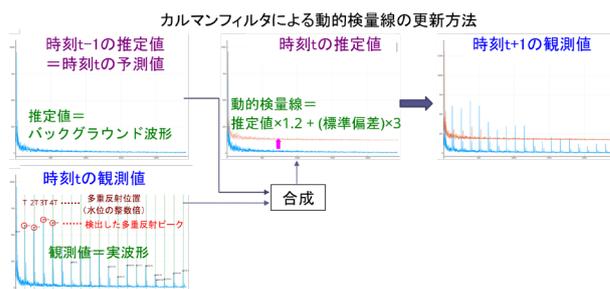


図5 動的検量線の更新方法

bのカルマンフィルタとは、刻々と変化する量Aの観測値から、Aの変化を予測するとともに、観測値と予測値を合成することで、観測値よりも高精度な推定を可能とするデータ処理方法である。代表的な適用例としてカーナビの現在位置推定技術やロケットの位置制御技術などがある。カルマンフィルタは、予測・推定に必要な情報を状態変数(ベクトル量とその共分散行列のセット)として

保持しており、以下の4つのプロセスを1サイクルとして繰り返し実行することにより随時更新される。

観測：一定サイクルで変量Aの観測値を取得。

予測：前回の推定値から現在値を予測（開始時は前回データが無いいため別途初期値が必要）。予測は予め仮定した時間変化モデルに従って遂行される。

合成：観測値と予測値を入力としてカルマンフィルタの状態変数を更新。

推定：カルマンフィルタにより変量Aの現在値を推定。

ここでは、変量Aはバックグラウンド波形、観測値は超音波波形であり、時間変化モデルはランダムウォークを仮定する。ランダムウォーク（別名酔歩）はブラウン運動の数学モデルである。

4.3 水位評価手法の最適化

原子炉水位の変化は概ね滑らかであるため、水位に対してカルマンフィルタを適用することにより、測定水位の時系列データから現在水位の予測・推定が可能である。また、多重反射波を検出する際に、予測水位から大きく外れた超音波信号を誤検出として扱うことで、水位の誤検出頻度を低減することが可能である。

図6にカルマンフィルタによる水位予測・推定手順を示す。ここでは、変量Aは水位、観測値は多重反射法によって検出した水位（観測水位）である。時間変化モデルには図7のように水位の変化速度が一定比率 α （減速係数）で低下するようなモデルを利用する。このモデルは、長期間水位が検出できなかった場合に、予測水位が最後に検出した水位から大きく乖離することを防止するのに有用である。減速係数は、過去の定期検査の水位データを元に最適化した結果、 $\alpha = 0.7$ とした。

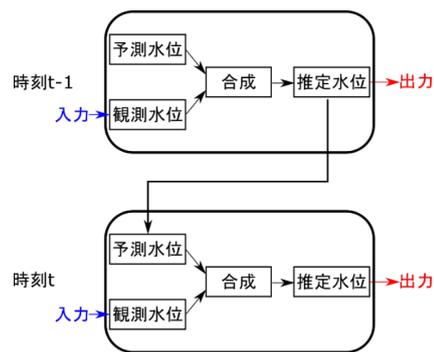


図6 水位予測・推定手順

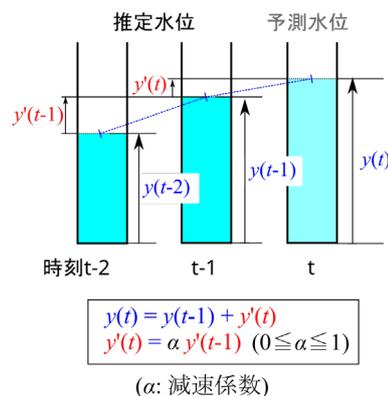


図7 水位予測・推定の時間変化モデル

5. 高精度水位測定技術の検証

5.1 模擬原子炉配管と過去データによる検証実験

高精度水位測定技術（以下同技術）の検証のため、既設超音波水位計と同型の予備超音波水位計を元にした同技術の実証機を用意し、原子炉配管を模擬した実物大カットモデルを使って、全ブロー（ $H = 0\text{mm}$ ）から満水（ $H = 736\text{mm}$ ）まで注水または満水から全ブローまで排水したときの水位を測定した。測定結果を図8、図9に示す。いずれの場合も測定値のばらつきは見られず、満水から全ブロー（全ブローから満水）まで正確に水位が測定できていることが確認できた。

次に、第15回定期検査（2019年12月～2021年12月）で採取した過去の超音波信号データを使って実機における水位測定を模擬し、定期検査時の水位測定結果と比較した。その結果、 -380mm 以下に水位が下がったときの測定水位の変動が大幅に少なくなっており、同技術が水位の誤検出頻度の低減に有効であることが確認できた。

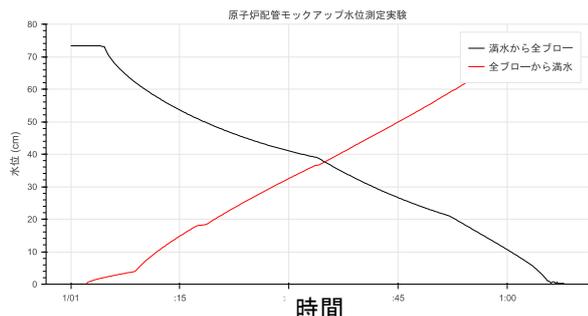


図8 模擬原子炉配管の水位測定結果

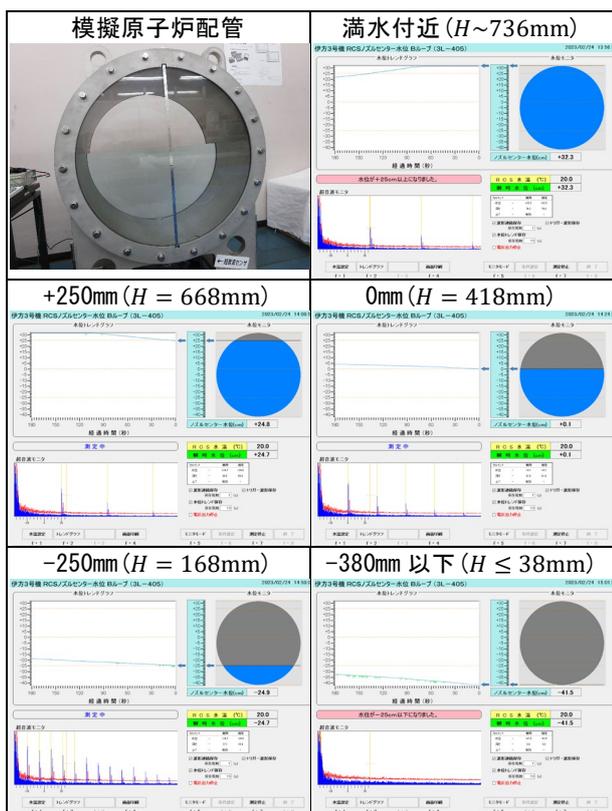


図9 模擬原子炉配管と水位測定画面

5.2 第16回定期検査での検証実験

同技術の実機適用性の検証のため、第16回定期検査（2023年2月～2023年5月）において、既設超音波水位計で受信する超音波信号を分岐する方法により、既設超音波水位計と実証機で同時に水位測定を実施した。その結果、既設超音波水位計と比較して実証機の -380mm 以下の誤検出がほとんど無くなっており、同技術が実機でも有効であることが確認できた。また、満水付近においてバックグラウンドノイズの変動が原因とみられる測定水位の変動が既設超音波水位計のみで発生しており、実証機において、低水位に限らず動的検量線

が有効に働いたことが確認できた。

6. まとめ

本稿では、伊方発電所第3号機のRCSノズルセンタ超音波水位計の高精度水位測定技術に関する研究成果を紹介した。同技術は、水位が -380mm 以下に下がったときの誤検出頻度を低減し、バックグラウンドノイズの変動によらず安定した水位測定が可能となる効果などが期待できる。

今後、同技術の実機適用に向け、超音波水位計のソフトウェアの更新が計画されている。

【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。

【参考文献】

- 1) (一社)日本非破壊検査協会編：「超音波探傷試験Ⅱ」, (一社)日本非破壊検査協会, p.4-42.
- 2) P.J. ブロックウェル, R.A. デービス：「入門時系列解析と予測」, 逸見功訳, シーエーピー出版, p.257-313.