

分析論文

原子炉再循環系配管のSCC深さサイジング技術

財団法人 発電設備技術検査協会 溶接・非破壊検査技術センター・古川 敬・古村 一朗

Takashi FURUKAWA Ichiro KOMURA

東京電力株式会社 原子力運営管理部・山下 裕宣・徳間 英昭

Hironobu YAMASHITA Hideaki TOKUMA

東京電力株式会社 福島第二原子力発電所 第一保全部・福田 俊彦

Toshihiko FUKUDA

1. はじめに

国内の沸騰水型原子力発電設備の再循環系配管（以下PLR配管と記す）で使用されている低炭素オーステナイト系ステンレス鋼（以下SUS316L系材と記す）配管の一部でひび割れが発見され、超音波探傷試験（以下UTと記す）による深さ測定が行われた。この測定に用いられたUT手法は、横波を用いた端部エコー法（以下従来UTと呼ぶ）を適用した。その後の金属調査の結果、ひび割れは応力腐食割れ（Stress Corrosion Cracking 以下SCCと記す）であることが判明した。また従来UTで測定したひび割れ深さと、切断や切削により測定したひび割れ深さとを比べた結果、一部のひび割れでは従来UTで測定した深さが過小評価する場合のあることが示された。この誤差の主な原因としては、SUS316L系材のSCCでは、ひび割れ先端部が溶接金属内に進む^[1]場合があり、横波を用いた従来UTでは、溶接金属に達するような先端部を捉えきれないことなどが挙げられた。

そこで、ひび割れ先端部が溶接金属に達していても十分なひび割れ深さ測定精度が得られるように改良したUT手法（以下改良UT手法と記す）の適用が検討された。この改良UT手法のひび割れ深さ測定精度を客観的に評価・検証する「超音波探傷試験による再循環系配管サイジング精度向上に関する確性試験」（以下確性試験と記す）が実施され、学識経験者から構成された委員会で、改良UT手法の深さ測定精度が公開の下に評価された^[2]。また、各発電所においても、ひび割れが検出されたPLR配管に対して改良UT手法によるひび割れ深さ測定が行われ、測定精度に関するデータが蓄積された。

本報では、PLR配管のひび割れ深さ測定に適用され

た改良UT手法の概要を示すとともに、確性試験等により得られた、改良UT手法のSCC深さ測定精度について示す。

2. ひび割れ深さサイジングの原理及び改良UT手法の例

ひび割れの深さを測定する方法の一つである端部エコー法の原理を図-1に示す。ひび割れ先端部に超音波を当てた際に、図-1(b)に示す様に、ひび割れの先端部で円弧状の超音波が発生する。この超音波は端部エコーであり、ビーム路程(W_2)と、図-1(a)の開口部からのコーナーエコーのビーム路程(W_1)を測定し、次式より開口部と先端部との差、すなわちひび割れ深さを測定するのが端部エコー法の原理である。

$$\text{ひび割れ深さ} = (W_1 - W_2) \cos \theta \quad (1)$$

改良UT手法は、SUS316L系材のひび割れの形態を把握した上で超音波の縦波と横波を用いた手法を適切に組み合わせて適用するUT方法で、代表的な方法として、縦波による焦点型端部エコー法、フェーズドアレイ（Phased array）法等が挙げられる。また、ひび割れ深さを予備判定する方法の一つとしてモード変換波法も用いられる。各方法の概要を以下に示す。

縦波による焦点型端部エコー法は、横波に比べてオーステナイト系鋼溶接金属内を通過しやすいという縦波の特長^[3]を利用し、溶接金属内に進んだひび割れであっても先端部を的確に捉えようとするものである。また、ひび割れ先端部付近に焦点を合わせて超音波を集束することで、ひび割れ先端部に強い超音波が当たり端部エコーのSN比向上が期待できる。図-2は、オーステナイト系鋼溶接部の金属組織の弾性定数、密度等をモデル化し、縦波による焦点型端部エコー法をシミュレーション解析した結果の例である。

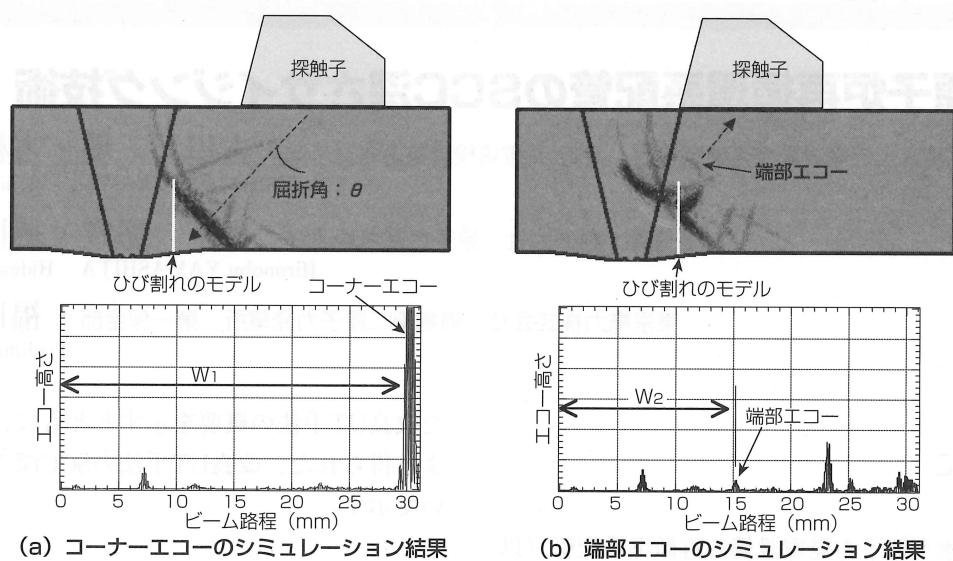


図-1 シミュレーション解析による端部エコー法の概要

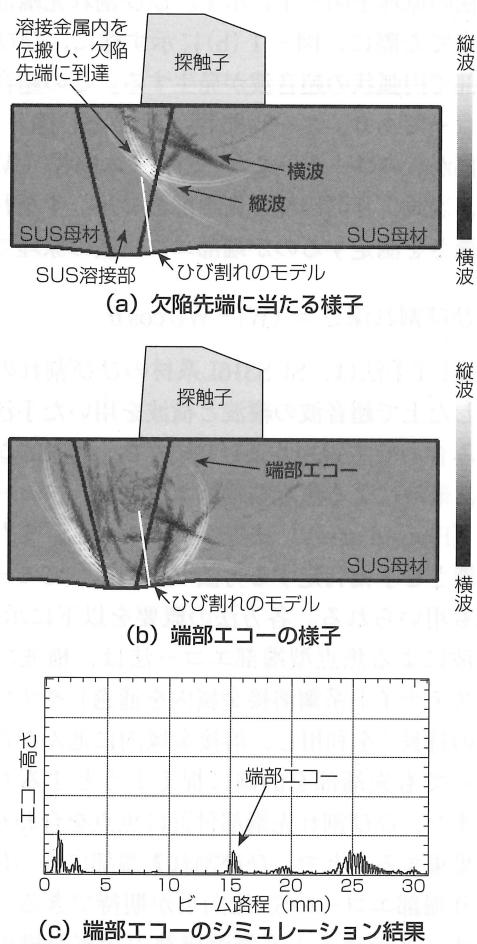


図-2 シミュレーション解析による焦点型縦波端部エコー法の概要

欠陥の先端部が溶接金属内まで達したモデルであるが、縦波（図中で白色のグラデーションで示す）は、図-2 (a)に示す様に溶接金属内を伝搬し、焦点を設定した欠陥の先端部に当たり、図-2 (b)に示す様に欠陥の先端部で端部エコーが発生している。

フェーズドアレイ法は、幅の狭い振動子を複数並べた探触子を用い、個々の振動子から超音波を送信させるタイミングを変えて、超音波の入射方向（屈折角）、集束の深さや入射位置を電子的に変えて探傷する方法である。異なる角度や集束の設定で超音波を当てる所以ができるので、端部エコーの識別性向上が期待できる。ひび割れ深さサイジングの原理は端部エコー法の原理に基づく。

モード変換波法は、配管内面で2次クリーピング波とともに発生した縦波を利用する方法であり、図-3にその原理を示す。図中に白点線で示した矢印は縦波の経路を、黒点線の矢印は横波の経路を示す。配管内面で発生した縦波は、ひび割れが深い場合には図-3 (a)に示す様に、ひび割れで反射してエコーが得られるものの、浅い場合には図-3 (b)に示す様に、ひび割れに当たらないのでエコーが得られない。このエコーのパターンによりひび割れ深さの概略を把握する方法である。ひび割れが浅いのか深いのかを予備的に把握することで、集束深さの設定等の探傷条件選択や、端部エコーの誤認識防止に効果が期待できる。

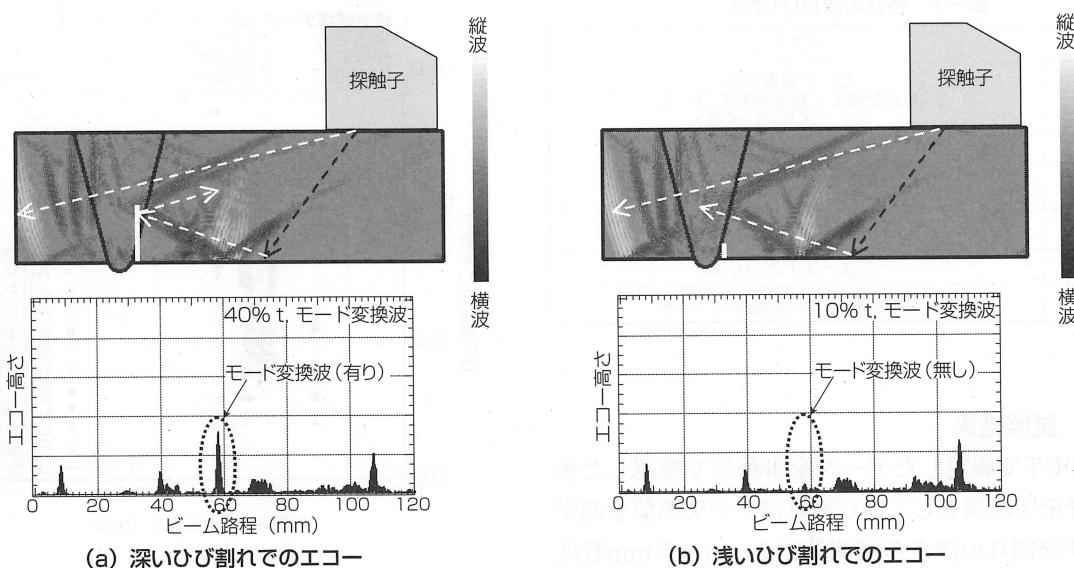


図-3 シミュレーション解析によるモード変換波法によるひび割れ深さの予備判定の概要

3. 改良UT手法によるひび割れ深さ測定精度

3-1) サイジング精度向上に関する確性試験

改良UT手法によるひび割れ深さ測定精度を評価し、その有効性を客観的に確認するために、PLR配管の検査実績を有している5社（(株)東芝、(株)日立製作所、Westinghouse、Framatome ANP GmbH、General Electric International Inc.）及び研究機関1社（Southwest Research Institute）の依頼により確性試験が実施された。確性試験では、東京電力 柏崎刈羽原子力発電所1号機のPLR配管より切出された実機配管を試験体として用い、ひび割れを直接確認できないブラインド試験とした。UTは、確性試験の依頼者である6社により行われ、各社が測定したひび割れ深さのデータは、各々直接事務局へ提出され、データの整理、切断調査によるひび割れ深さの実測値との比較といった分析は全て事務局で実施し、確性委員会でその精度を評価した。

3-1-1) 試験体の準備

確性試験では、実機のPLR配管に発生したひび割れを対象とし、図-4に示す様に切出された配管に延長管を溶接し、さらにその両端に封し板を溶接して配管の内面が確認できないようにした。試験体の準備は、試験体を提供する東京電力が行い、事務局が適宜立会い確認を行った。準備した試験体の員数は次の通りである。



図-4 確性試験に使用した試験体の例

- ・口径600mm 厚さ 約39mm：2体
- ・口径400mm 厚さ 約30mm：2体
- ・口径300mm 厚さ 約20mm：2体

3-1-2) 試験の実施

PLR配管の検査実績を有している5社がひび割れ深さ測定に適用したUT手法は、一振動子又は二振動子型の集束型探触子を用いた端部エコー法あるいはフェーズドアレイ法を単独又は組み合わせた方法である。各社の手法を表-1に示す。改良UT手法の適用にあたっては、事前に十分な教育と訓練を実施することとした。

なお、GEII社とWestinghouse社は米国の認証制度による認証を、Framatome ANP社は欧州の認証制度による認証を教育と訓練に相当するものとした。

表-1 各社の改良UT手法

	測定手法
A社	モード変換波法 焦点型縦波／横波端部エコー法 フェーズドアレイ法
B社	モード変換波法 焦点型縦波／横波端部エコー法 フェーズドアレイ法
C社	焦点型縦波／横波端部エコー法
D社	フェーズドアレイ法
E社	焦点型縦波／横波端部エコー法

3-1-3) 試験結果

各社がUTで測定したデータを事務局で確認した後に、配管を切断調査してひび割れ深さの実測値を測定した。ひび割れの深さの実測値は5 mm～7 mm程度の範囲にあり、また、5つのひび割れで先端部が溶接金属へ達していた。UTで測定したひび割れ深さと切断調査で実測したひび割れ深さの結果を図-5に示す。また、UTで測定した値と切断調査で測定したひび割れ深さとの差を誤差とし、誤差の平均値、標準偏差(σ)及びRMS (Root Mean Square; 二乗平均の平方根)を測定精度の指標とした。

改良UT手法によるひび割れ深さ測定精度は、国の実証事業^[4](以下UTSと記す)において実施された従来UT手法による深さ測定精度と比較して評価した。UTSで平成14年度までに実施したSUS304製の直管溶接部のSCCに対する従来UTの深さ測定精度は、[誤差平均-2 σ]の値が-4.4mmであり、この値を超えた過小評価の有無により改良UT手法の測定精度を評価した。

図-5に示す様に、PLR配管の検査実績を有している5社が用いた手法は、測定誤差がUTSの[誤差平均-2 σ](-4.4mm)に比べて小さく、ひび割れの先端が溶接金属内にあっても、改良UT手法ではひび割れ深さ測定精度が確保できることが確認された。一部のデータでは、ひび割れ深さを実際よりも大きく測定するものがあったが、その原因の一つは、溶接金属組織からのエコーを端部エコーと誤認識したことがあり、これは今後の要領書の改善や経験等により適正化されると考察された。

3-2) プラント個別試験

3-2-1) 試験の実施

確性試験で実施されたものと同等の改良UT手法を用いて、東北電力、中部電力及び東京電力の原子力発

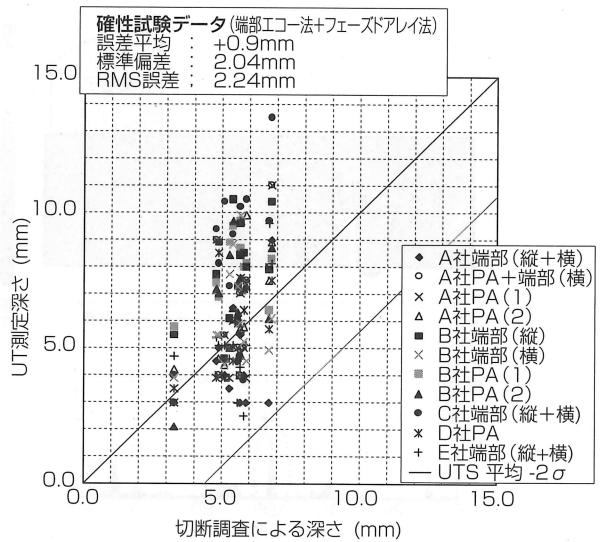


図-5 確性試験におけるひび割れ深さ測定精度

電所において、3社(東芝、日立、GEII)によりPLR配管のひび割れ深さ測定が行われた。各発電所では、実機のPLR配管に対して直接改良UT手法によるひび割れ深さ測定が行われた。

3-2-2) 試験結果

改良UT手法によりひび割れ深さ測定が行われた後に、切断調査によりひび割れ深さが実測された。UTで測定したひび割れ深さと切断調査で実測したひび割れ深さの結果を図-6に示す。大部分のひび割れは深

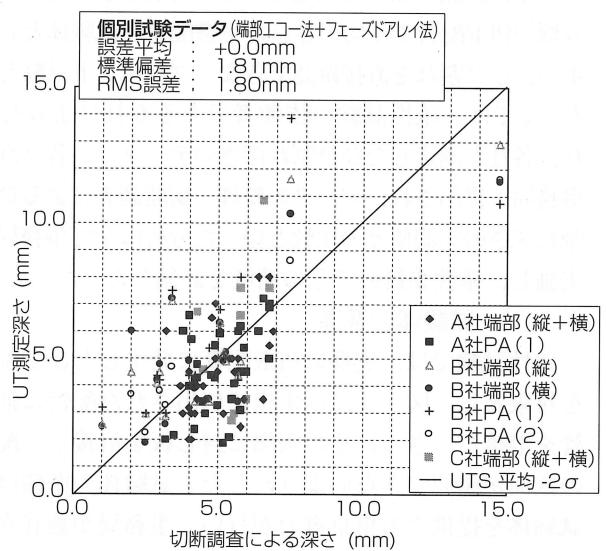


図-6 各発電所におけるひび割れ深さ測定精度

さが3mm～7mm程度であったが、深さ約15mmのひび割れのデータが1点あった。改良UTでは、深さ約15mmのひび割れにおいても、誤差がUTSの「誤差平均- 2σ 」(-4.4mm)に比べて小さく測定精度が確保された結果であった。

3-3) ひび割れ深さ測定精度

確性試験と各発電所で実施した改良UT手法による、ひび割れ深さ測定精度を図-7にまとめて示す。双方の測定試験による測定精度はほぼ同等で、精度の目安としたUTSによる従来UT手法の測定精度と同程度であった。また、端部エコー法とフェーズドアレイ法の各手法においても、測定精度に顕著な差異は無かった。

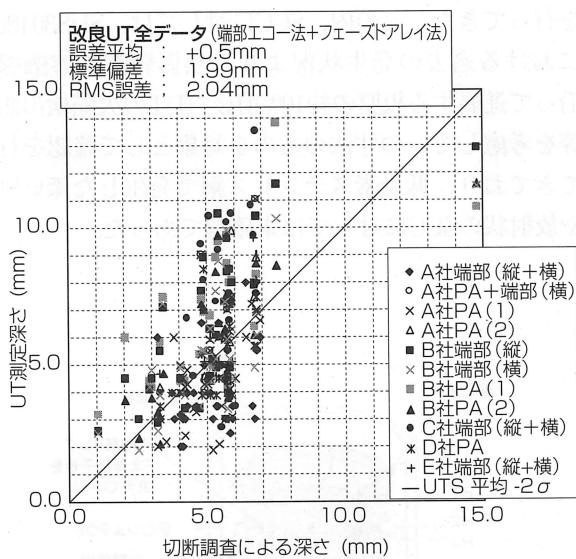


図-7 改良UT手法によるひび割れ深さ測定精度

4. まとめ

SUS316L系材のSCCに対して、改良UT手法によるひび割れ深さ測定精度は、ひび割れの先端が溶接金属に達していても従来UTと同等であることが示された。プラント個別試験では実機のPLR配管で直接測定されており、実機環境下の測定においても改良UT手法の有効性が確認されたと考えられる。この様に、十分な技量を有する試験員が改良UT手法を適用することにより、SUS316L系材においても、健全性評価に資するサイジング精度が得られることが示された。今後、サイジング技術の維持ならびに技術向上に際し、客観的な技量認証制度の構築が重要になると考えられる。

謝辞

本報の執筆にあたり、データを提供していただいた関係各社及び、超音波探傷試験による再循環系配管サイジング精度向上に関する確性委員会（委員長 宮慶応大学教授）に感謝いたします。

参考文献

- [1] 鈴木、他 6 名、“原子炉再循環系配管のSCC損傷評価”、保全学、3-2(2004)、pp.65-70.
- [2] 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会、“原子力発電設備の健全性評価等に関する小委員会（第8回）資料8-2”、（財）発電設備技術検査協会“超音波探傷試験による再循環系配管サイジング精度向上に関する確性試験について”、2003年6月。
- [3] (社)日本非破壊検査協会規格、NDIS 2424: 2004、“オーステナイト系ステンレス鋼溶接部の超音波探傷試験方法”2004年制定。
- [4] (財)発電設備技術検査協会、“平成15年度 原子力発電施設検査技術実証事業に関する事業報告書（超音波探傷試験における欠陥検出及びサイジング精度の確認に関するもの）”、2003年9月。

(平成16年9月2日)