

フェーズドアレイ非対称ビーム TOFD 超音波探傷法による Ni 基合金溶接部 SCC の測定 (第 2 報) — 曲率のある欠陥開口面および非開口面測定への適用 —

Measurement of depth of SCC in Ni based alloy weldment
by a Phased Array TOFD UT Method with asymmetrical ultrasonic beams (II)
— Application to measurement on the crack side
and the not crack side with nozzle shape —

石田 仁志 (Hitoshi Ishida)*¹ 遠藤 賢 (Ken Endoh)*² 北阪 純一 (Junichi Kitasaka)*²

要約 2008 年に大飯 3 号機原子炉容器出口管台異材継手部の内面に、軸方向に割れ面が走り、先端が尖鋭な応力腐食割れ (Stress Corrosion Cracking; SCC) が発見された。この割れは、内面側からの探傷に使用されていた従来の超音波探傷法では深さ測定が困難であった。

そのために、容器管台の異材継手部の応力腐食割れ (Stress Corrosion Cracking; SCC) の深さの内面 (欠陥開口面) からの測定手法として開発した、① フェーズドアレイ法を用いた非対称超音波ビームによる TOFD (Time of Flight Diffraction) 超音波探傷法、② 異なる複数の屈折角条件による探傷結果を重ね合わせるマルチアングル合成法と組み合わせた評価法について、曲率のある管台内面 (欠陥開口面) および管台外面 (欠陥非開口面) に対する適用性を検討した。

開発手法は、容器管台内面の欠陥に対して、管台内面および容器外面から、測定および評価が可能なることを確認した。

キーワード フェーズドアレイ非対称 TOFD 法, マルチアングル合成法, Ni 基合金溶接部, SCC

Abstract In 2008, stress corrosion cracking (SCC) was found on the inner surface of a dissimilar metal weld of an outlet nozzle of the reactor vessel at the Ohi Nuclear Power Plant Unit-3. The crack was running along the axial direction of the nozzle and had a sharp tip, which made it difficult to measure the depth of SCC using existing ultrasonic testing (UT) techniques for the inspection from the inner surface.

New UT methods were developed for measuring the depth of SCC on the inner surface (the crack side) of a dissimilar metal weld of a reactor vessel nozzle. They were, ① a TOFD UT method using asymmetrical ultrasonic beams of a phased array method to scan at different refraction angles and ② a combined evaluation method incorporating both ① and a multi-angle synthesis method to synthesize measurement results at different refraction angles. The two methods were evaluated by applying them to the inner surface (crack side) and the outer surface (non-crack side) of a nozzle shape.

The developed UT methods were found to be applicable to measurement and evaluation of the depth of SCC on the inner surface by scanning from both the inner surface and the outer surface of the vessel nozzle.

Keywords Phased array asymmetrical TOFD method, Multi-angle synthesis method, Ni based alloy weldment, SCC

1. はじめに

2008 年に大飯 3 号機原子炉容器出口管台異材継手

部の内面に割れが発見され⁽¹⁾、切削調査の結果、軸方向に割れ面を持ち、長さ 13mm、深さ 21mm の、尖鋭な先端の応力腐食割れ (Stress Corrosion Crack-

* 1 原子力安全システム研究所 技術システム研究所

* 2 非破壊検査株式会社

ing: SCC) であることが分かった. このような尖鋭な先端を持つ SCC の割れの開口面側からの深さ測定が課題であると考え, これに対する超音波探傷法を開発することとした.

割れの開口面側からの探傷に有効で, 原理的に精度の良い深さ測定が可能な TOFD (Time of Flight Diffraction) 法に着目し, 超音波の減衰が大きい Ni 基合金溶接部に適用するために, フェーズドアレイ探触子を用いて, フェーズドアレイ TOFD 法⁽²⁾の適用を選定した.

これまでに, フェーズドアレイ TOFD 法を基に, 従来の手法にはない以下のような特徴を持つ新たな手法を開発している⁽³⁾. ① 送信と受信の超音波ビームの屈折角および伝搬経路が異なる非対称とすること, ② 屈折角と焦点深さの異なる条件の探傷結果を重ね合わせること.

開発した手法は, 特徴①からフェーズドアレイ非対称 TOFD 法, 特徴②からマルチアングル合成法と名付け, 平板試験体の Ni 基合金溶接部の SCC の開口面側から深さ測定手法としての有効性を確認した.

本手法は欠陥端部エコーのような材料中の反射源を検出するものであり, 探傷面が割れの開口面および非開口面のいずれの場合にも, また実機管台のような曲率を有する探傷面の場合にも, 原理的に適用可能であると考えられる.

本報では, 実機のような曲率がある管台の内外面(欠陥開口面/非開口面)からの探傷について, 開発した手法の適用性を検討した.

2. 測定手法の概要

2.1 フェーズドアレイ非対称 TOFD 法

図 1 にフェーズドアレイ非対称 TOFD 法概念を示す. 従来のフェーズドアレイ TOFD 法では, 送信と受信の超音波ビームが対象であるのに対して, 送信と受信とで異なる屈折角を持つ超音波ビームを持ち, 異なる深さに加えて, さらに異なる方向の任意の位置に焦点(交点)を設定することを可能とするものである. 送信用と受信用のフェーズドアレイ探触子を一定間隔で向い合せに配置して移動させる. フェーズドアレイ探触子には, 2次元行列の配列をもつマトリクスアレイ探触子を使用することとした.

送信と受信の屈折角が異なることから, 本手法による探傷条件において, 送信および受信探触子の中点と

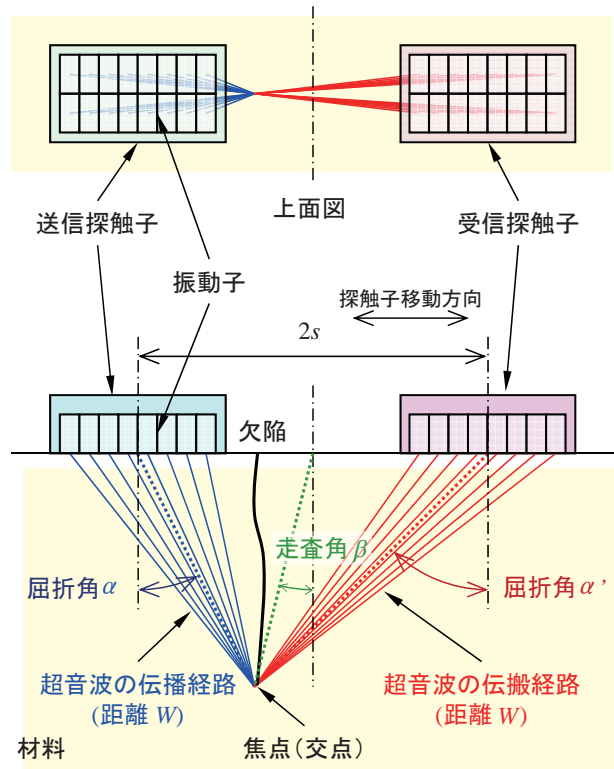


図 1 フェーズドアレイ非対称 TOFD 法

焦点(交点)を結ぶ線の中点における材料表面の法線との角度を走査角と呼んで表示することとしている.

2.2 マルチアングル合成法

本手法は, 複数の異なる走査角条件による探傷結果を重ね合わせる方法として考案した. 超音波探傷試験における受信信号には, 欠陥位置から得られる欠陥エコーと材料中のランダムな位置に生じる散乱波ノイズがある. 複数の異なる走査角による探傷データを重ね合わせることによって, 欠陥エコーは重畳して強調され, 散乱波ノイズは相殺されて低減すると考えた.

図 2 にマルチアングル合成法概念を示す. 表面(探傷面)からの深さ d_1 の位置に割れ先端のある開口欠陥と同じく深さ d_2 の位置に材料中欠陥がある材料を, 焦点深さ d_1, d_2 で探傷した場合を例に示している.

焦点深さ d_1 で探傷すると, 異なる走査角にて表面からの深さ d_1 の開口欠陥の端部エコーが得られる. また, 異なる走査角条件でそれぞれ異なる位置で得られる散乱ノイズも示している. これらの異なる走査角条件のデータを平均化により合成すると, 開口欠陥の端部エコーの強度はそのままに, 散乱ノイズは平均化

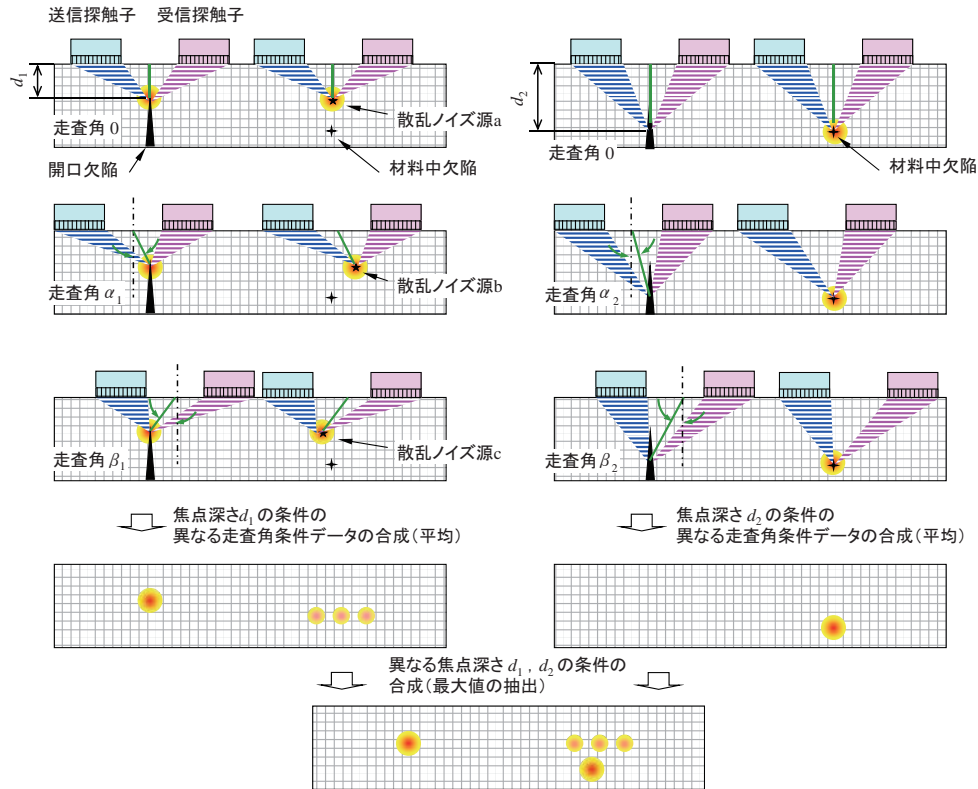


図2 マルチアングル合成法

により低減される。表面からの焦点深さ d_1 の条件では、深さ d_2 の位置の材料中欠陥の反射波は得られない。

焦点深さ d_2 で探傷すると、異なる走査角にて表面からの深さ d_2 の材料中欠陥の反射波が得られる。同様に、これらの異なる走査角条件のデータを平均化により合成すると、材料中欠陥の反射波の強度はそのまま得られる。

さらに、異なる焦点深さ条件において合成されたデータを、材料中の位置毎に最大値を抽出して合成すると、材料断面の探傷結果が1枚の画像として得られる。

曲率のある材料表面からの探傷データのマルチアングル合成法による重ね合わせにおいては、曲率のある探傷面を考慮して材料中の座標における異なる走査角条件による探傷データにより計算を行った。

3. 試験方法

3.1 試験体

図3に測定試験に使用した試験体を示す。容器管台を模擬し、炭素鋼 S25C による管台部とステンレス鋼 SUS316 によるセーフエンド部をインコネル 600 溶接

材により突合せ溶接したものである。溶接部に溶接線と直交する方向に主たる割れ面を持つ SCC および放電加工 (Electric Discharge Machining ; EDM) スリット (深さ 10mm) を付与した。

SCC は次の方法により付与した。溶接部の SCC を付与する領域の表面を削除し、SCC が発生、進展しやすくさせるために高炭素量のインコネル 600 溶接材を用いて肉盛、再溶接を行い、起点となる EDM スリットを加工した。肉盛溶接部に加工した EDM スリットを起点に、試験体の溶接線と平行方向に引張荷重を加え、テトラチオン酸水溶液に浸漬させて SCC を発生、進展させた。

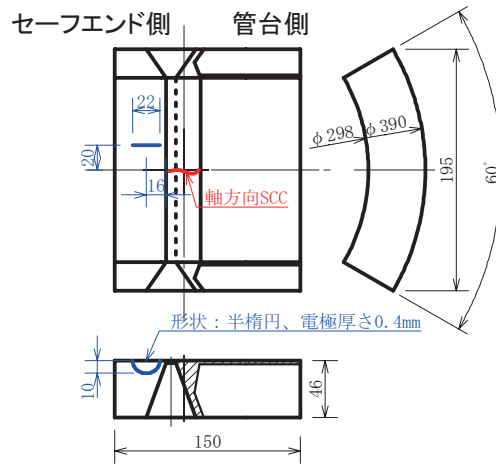
3.2 試験装置

表1に測定試験に使用したフェーズドアレイ探触子

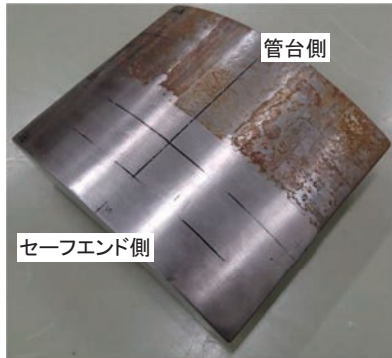
表1 フェーズドアレイ探触子の主要仕様

	内面探傷用	外面探傷用
周波数	2.25MHz	1MHz
振動子数	32	256
振動子配列数*	4×8	8×32
探触子寸法*	15.8mm×15.8mm	25.0mm×71.8mm

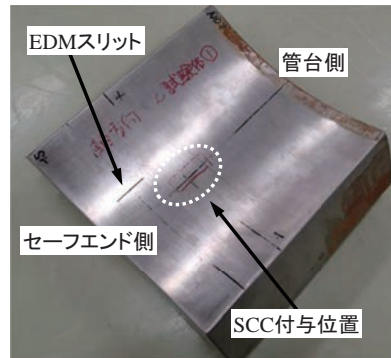
* : 左右方向 × 前後方向を示す



(1) 寸法図



(2) 外観写真 (外面(欠陥非開口面))



(3) 外観写真 (内面(欠陥開口面))

図3 容器管台 Ni 基合金溶接部試験体



(1) 4×8マトリクスアレイ探触子



(2) 4×8マトリクスアレイ探触子
内面探傷用ウェッジ



(3) 8×32マトリクスアレイ探触子



(4) 8×32マトリクスアレイ探触子
外面探傷用ウェッジ

図4 フェーズドアレイ探触子

の仕様を示す。図4にはフェーズドアレイ探触子およびウェッジの外観を示す。使用したフェーズドアレイ探触子は、内面探傷用に配列4×8からなる合計32チャンネル、外面探傷用に配列8×32からなる合計256チャンネルのマトリクスアレイ探触子である。これを送信用と受信用として同じものをそれぞれ1個ずつ使用する。

フェーズドアレイ探触子は試験体表面にウェッジを介して接触させて測定を行った。ウェッジは探傷面の曲率に応じて曲面に加工されている。

3.3 試験条件

フェーズドアレイ非対称 TOFD 法に使用する送信用と受信用のフェーズドアレイ探触子を移動させるために、走査スキャナを用いた。走査スキャナは、送信用と受信用のフェーズドアレイ探触子を一定間隔で保持して、試験体表面上を2次元方向に移動走査する。

送信と受信のアレイ探触子の超音波ビームの方向および移動走査方向は、SCCの割れ面に対して垂直方向とした。

フェーズドアレイ装置として、Zetec社製フェーズドアレイ超音波探傷装置 Dynaray⁽⁴⁾と制御・データ収集ソフト Ultra Vision⁽⁵⁾を使用した。Ultra Visionには、筆者らが考案したフェーズドアレイ非対称 TOFD 法の機能は備えていない。そこで、Ultra Visionの持つフェーズドアレイ探触子の振動子駆動時刻の設定機能により、フェーズドアレイ非対称 TOFD 法の走査角条件を設定して探傷データの収録と表示を行った。

マルチアングル合成法による処理は、数学計算ソフト MATLAB⁽⁶⁾を使用した。Ultra Visionにより収録した探傷データを、MATLABにより処理したものである。

探傷条件として設定した焦点深さは、内面探傷の場合4~24mm範囲の4mm毎、外面探傷の場合30~46mm範囲の4mm毎とした。2.1項で定義した走査角は、内面探傷の場合垂直方向を中心に最大±約48度、外面探傷の場合同じく±約26度の範囲の約1度毎とした。

4. 試験結果

4.1 内面（欠陥開口面）探傷

4.1.1 フェーズドアレイ非対称 TOFD 法

図5に、EDMスリットおよびSCCの4×8マトリクスアレイ探触子を使用したフェーズドアレイ非対称 TOFD 法による内面すなわち欠陥開口面からの探傷結果の例を示す。上段から焦点深さ4, 8, 12mmの場合の、Ultra Visionにより描画したBスコープ(欠陥面に垂直方向における断面図)探傷画像を示している。水平方向には、走査角-31, -15, 0, 15, 31度の探傷画像を示している。

深さ10mmのEDMスリットの端部エコーが、焦点深さ8mmおよび12mmの異なる走査角条件で明瞭に検出されている。SCCの端部エコーも、焦点深さ8mmおよび12mmの異なるいくつかの走査角条件で検出されたが、その信号強度はEDMスリットに比べて低い。このことは、ステンレス鋼の母材部に加工されたEDMスリットに対して、SCCはインコネル溶接部に付与加工されており、その溶接部のノイズの影響が原因の一つである。

4.1.2 マルチアングル合成法

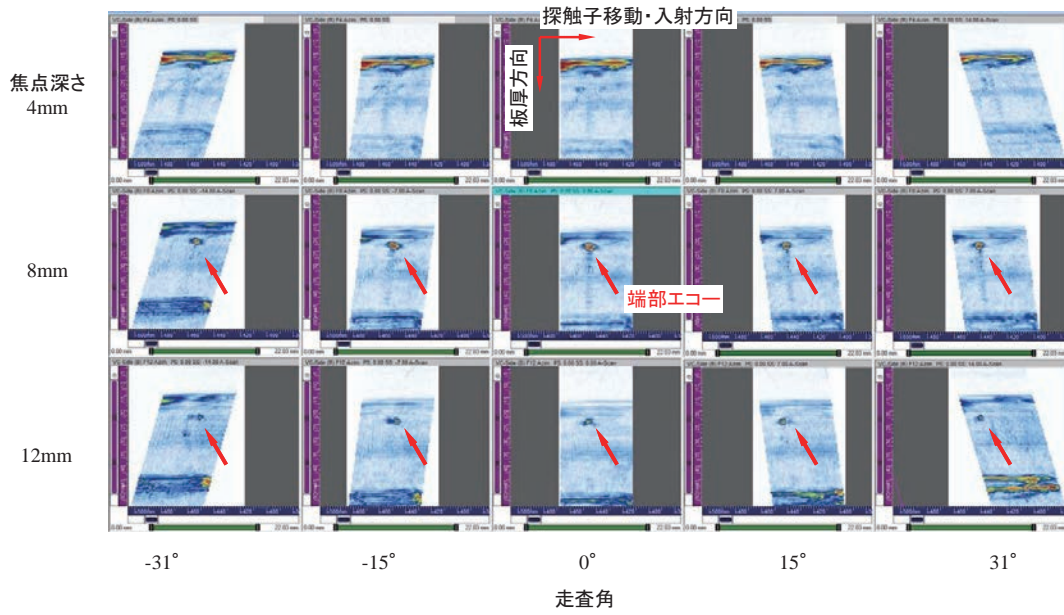
図6に、図5に示した探傷データに対して、焦点深さ8, 12, 16, 20mmの条件毎に、異なる走査角条件の探傷データを重ね合わせた結果の例を示す。

EDMスリットに対しては、端部エコーが焦点深さ8mm, 12mmの条件で鮮やかな合成画像として得られた。

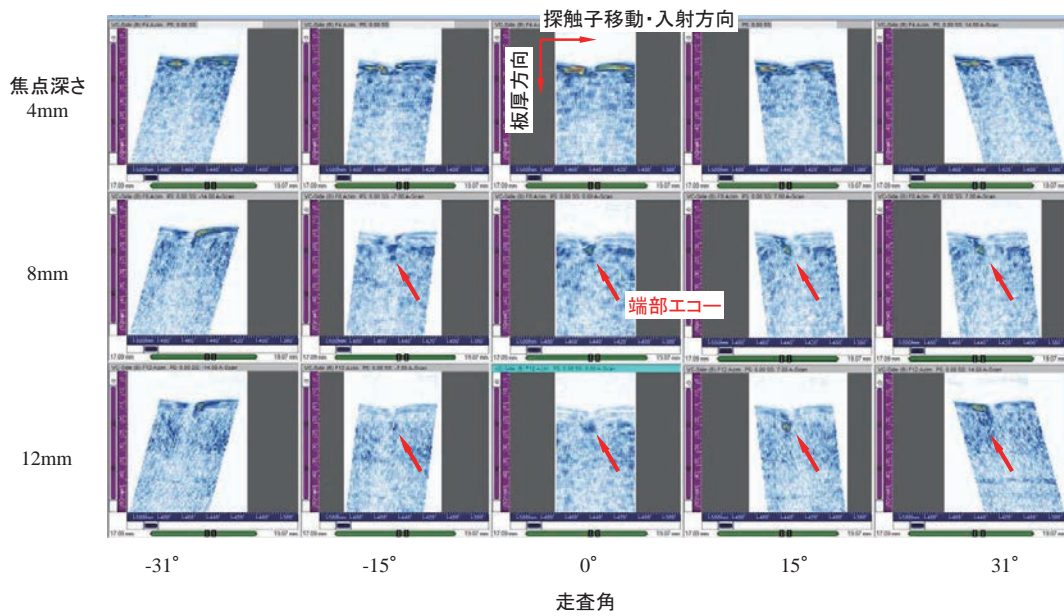
SCCに対しては、元のフェーズドアレイ非対称 TOFD 法による探傷画像で表れていた材料中のノイズは低減され、焦点深さ8mm, 12mmの条件で端部エコーと推定されるエコーが得られた。

図7に、さらに異なる焦点深さ条件のデータを重ね合わせた結果の例を示す。材料断面に相当する探傷結果が1枚の画像として得られた。合成画像から読み取った端部エコーの深さ位置は、EDMスリットが14mm, SCCが6mmであった。

マルチアングル合成法による処理は、曲率のある探傷面において測定したデータに対しても適用可能なことが確認できた。

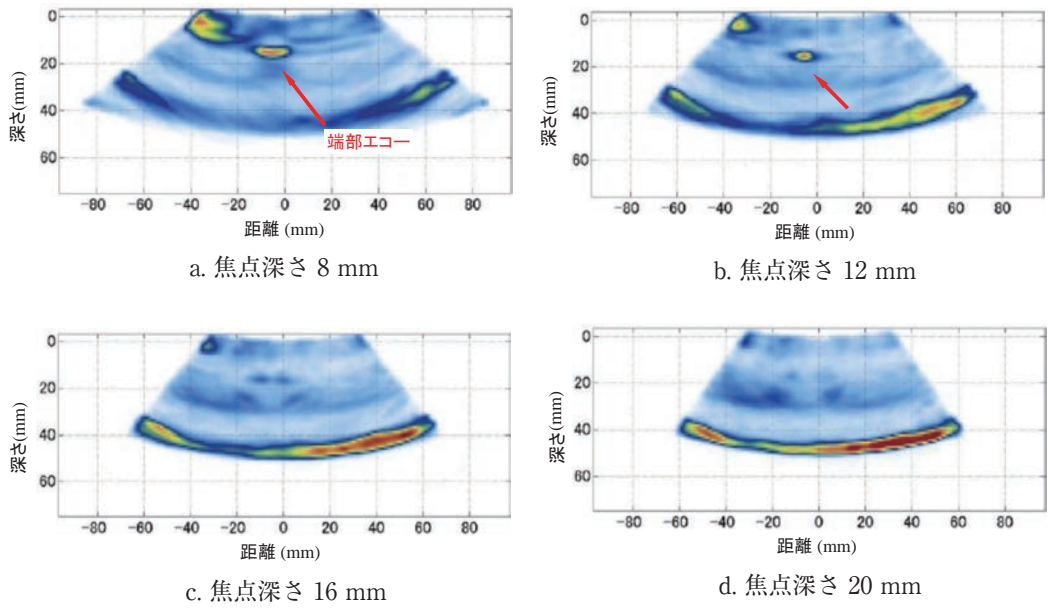


(1) EDMスリット

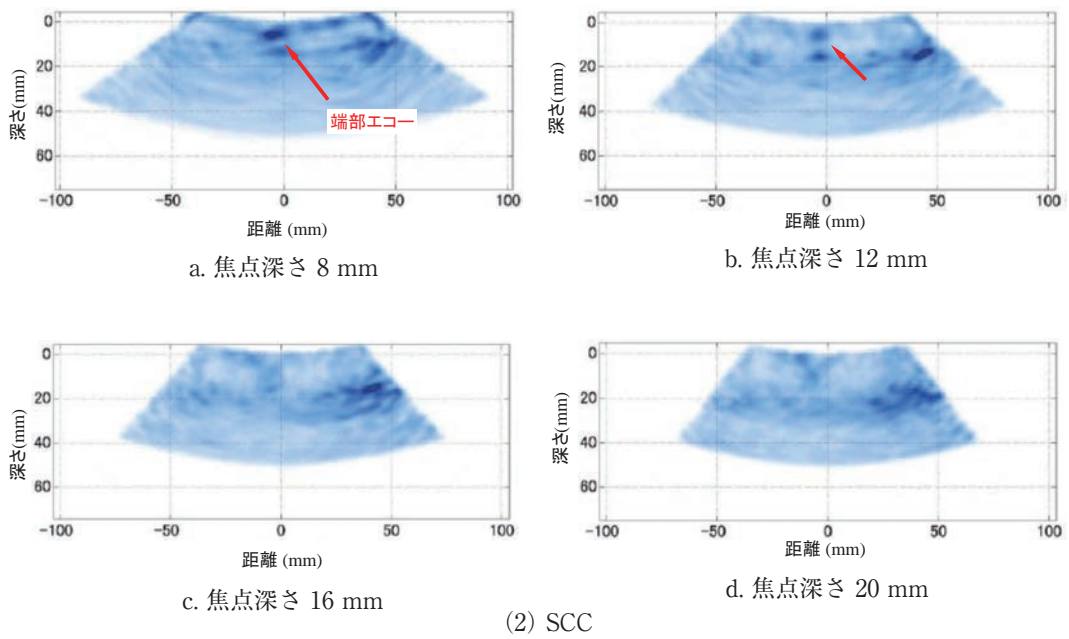


(2) SCC

図5 フェーズドアレイ非対称 TOFD 法による内面 (欠陥開口面) 探傷結果 (4×8マトリクスアレイ探触子)



(1) EDMスリット



(2) SCC

図6 マルチアングル合成法による内面（欠陥開口面）探傷結果の評価画像
 (4×8マトリクスアレイ探触子/焦点深さ条件毎の走査角の合成)

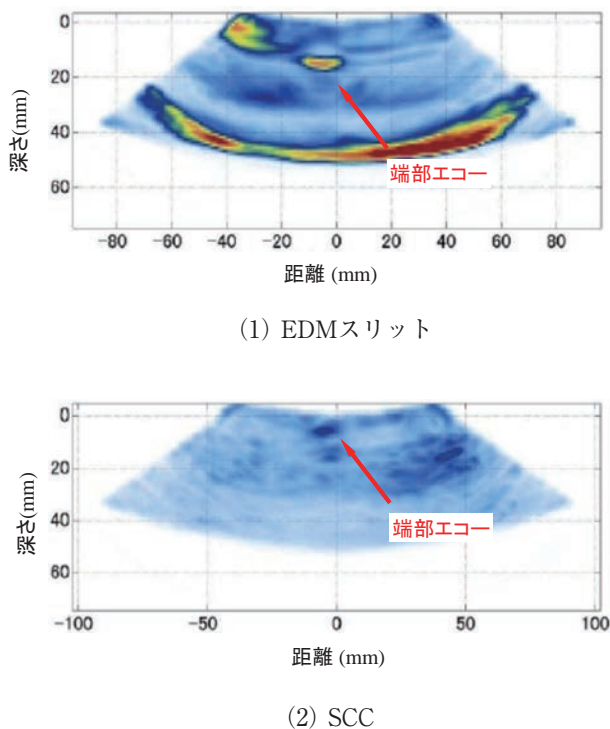


図7 マルチアングル合成法による内面（欠陥開口面）探傷結果の評価画像
（4×8マトリクスアレイ探触子／焦点深さ条件の合成）

4.2 外面（欠陥非開口面）探傷

4.2.1 フェーズドアレイ非対称 TOFD 法

図8に、EDMスリットおよびSCCの8×32マトリクスアレイ探触子を使用したフェーズドアレイ非対称TOFD法による外面すなわち欠陥非開口面からの探傷結果の例を示す。上段から焦点深さ30、34、38mmの場合の、Ultra Visionにより描画したBスコープ探傷画像を示している。水平方向には、走査角-24、-12、0、12、24度の探傷画像を示している。

深さ10mmのEDMスリットの端部エコーが、焦点深さ34mmおよび38mmの異なる走査角条件で明瞭に検出されている。SCCの端部エコーと推定されるエコーが、焦点深さ30mmのいくつかの走査角条件で検出された。その信号強度はEDMスリットに比べて低い。内面探傷の場合と同様、SCCはインコネル溶接部に付与されていることが原因の一つとして考えられる。

4.2.2 マルチアングル合成法

図9に、図8に示した探傷データに対して、焦点深さ30、34、38、42mmの条件毎に、異なる走査角条件の探傷データを重ね合わせた結果の例を示す。

EDMスリットに対しては、端部エコーが焦点深さ34mm、38mmの条件で鮮明な合成画像として得られた。

SCCに対しては、元のフェーズドアレイ非対称TOFD法による探傷画像で表れていた材料中のノイズは低減され、焦点深さ30mmの条件で端部エコーと推定されるエコーが得られた。

図10に、さらに異なる焦点深さ条件のデータも重ね合わせた結果の例を示す。曲率のある材料の断面に相当する探傷結果が1枚の画像として得られた。合成画像から読み取った端部エコーの深さ位置は、EDMスリットが6mm、SCCが16mmであった。

マルチアングル合成法による処理は、欠陥開口面と反対側の曲率のある探傷面において測定したデータに対しても適用可能なことが確認できた。しかし、SCCの探傷結果においては、SCC位置とは異なる位置にインコネル溶接部における散乱波と推定される反射源が観察された。このような散乱波ノイズの低減と欠陥端部エコーの識別性の向上が課題である。

5. おわりに

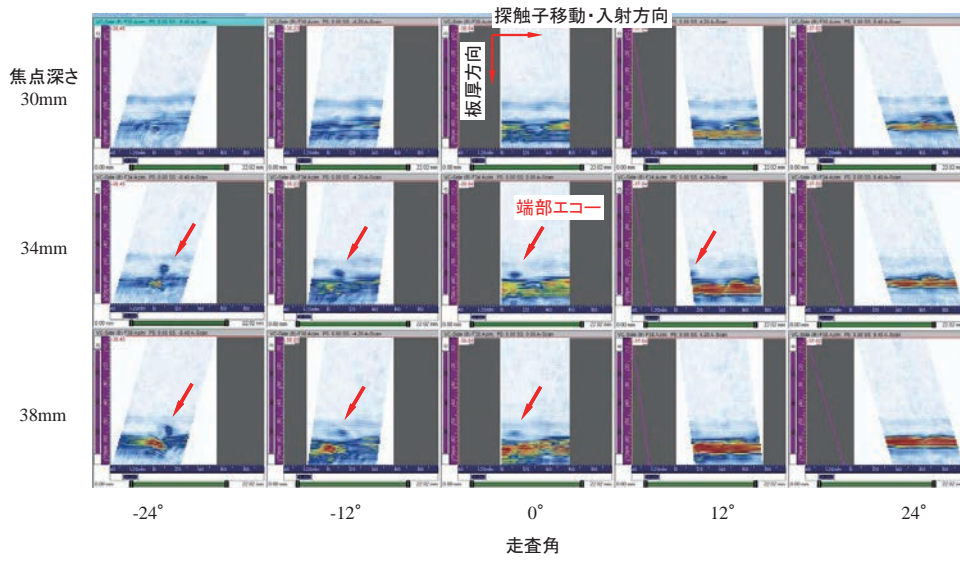
フェーズドアレイ非対称TOFD法による探傷法、これとマルチアングル合成法と組み合わせた評価法について、曲率面および欠陥非開口面における適用性を検討した。

その結果、実機の曲率を有する管台内外面における測定と評価に適用できることを確認した。

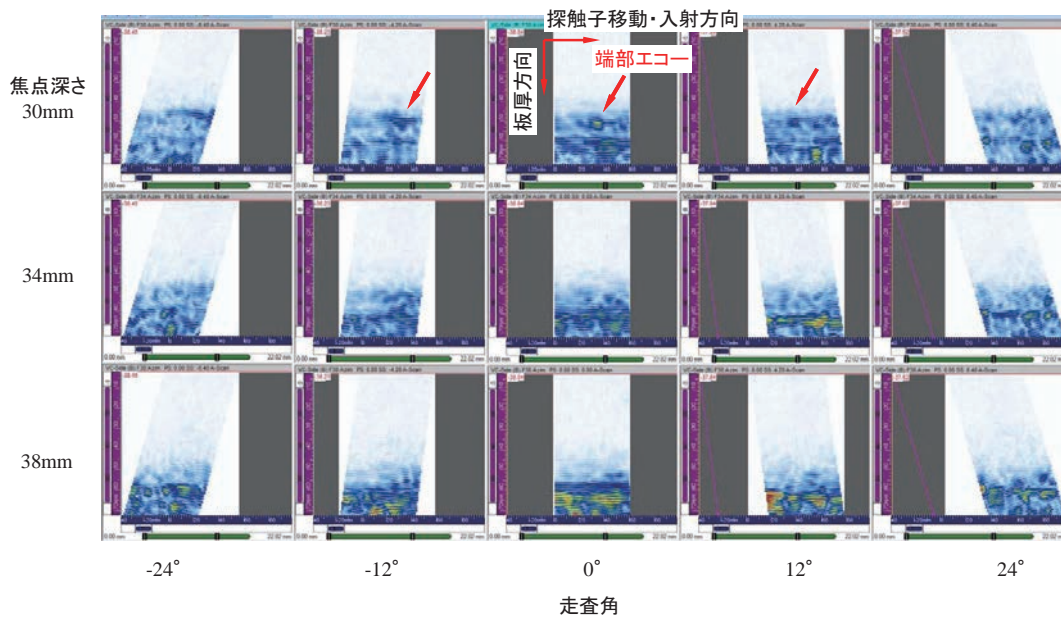
今後は、探傷条件の最適化と深さ測定精度の向上を図るとともに、外部の試験体等多くの測定データの収集により開発手法のさらなる検証を進める予定である。

参考文献

- (1) 関西電力, “大飯発電所3号機の定期検査状況について（原子炉容器Aループ出口管台溶接部の傷の原因と対策）,”
<http://www1.kepco.co.jp/pressre/2008/0926-3j.html>
- (2) 石田仁志, “超音波フェーズドアレイTOFD法による厚肉ステンレス鋼配管溶接部の欠陥深さ測

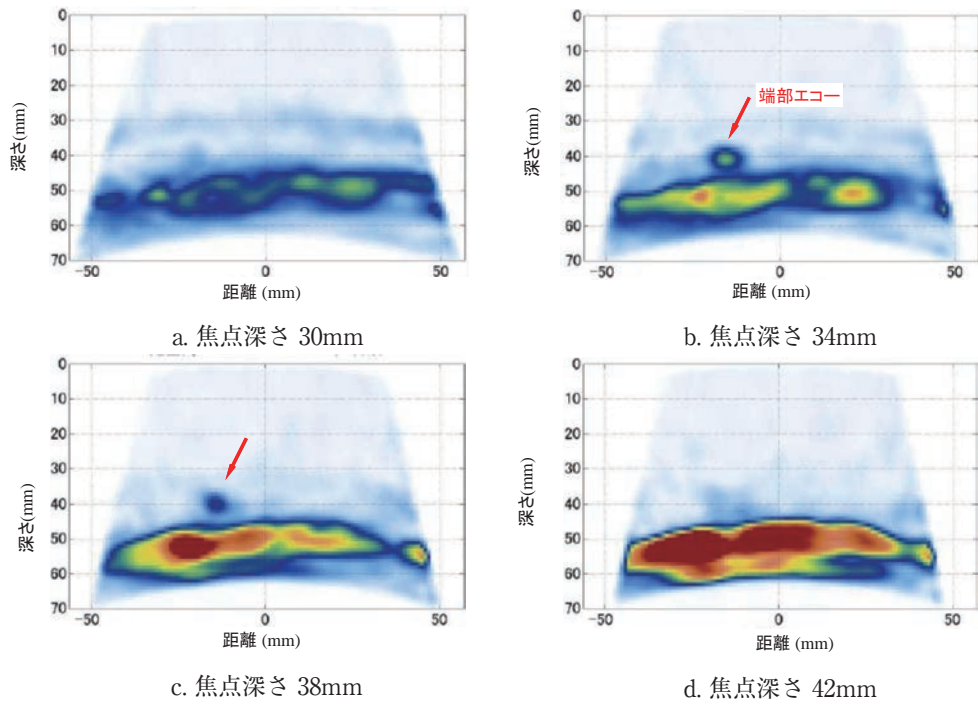


(1) EDMスリット

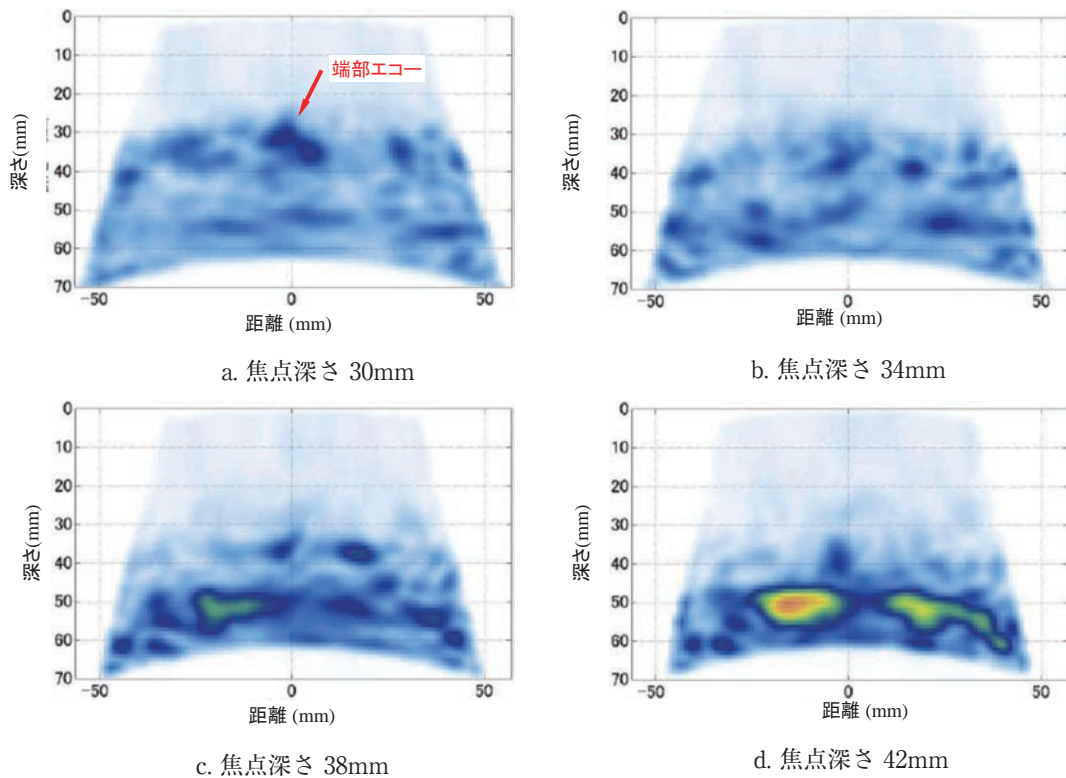


(2) SCC

図8 フェーズドアレイ非対称 TOFD 法による外面（欠陥非開口面）探傷結果
（8×32マトリクスアレイ探触子）

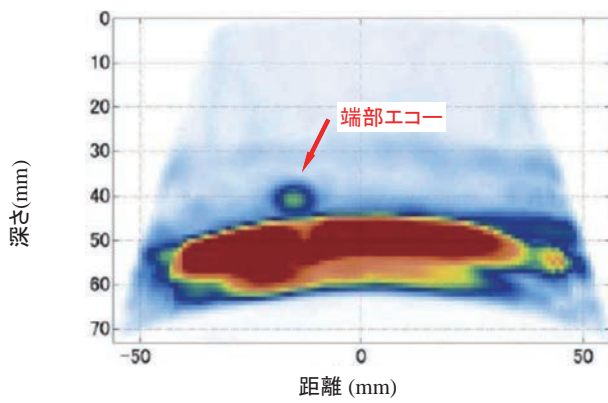


(1) EDMスリット

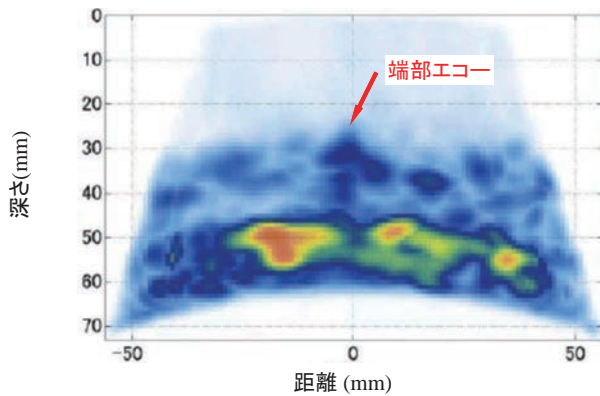


(2) SCC

図9 マルチアングル合成法による外面（欠陥非開口面）探傷結果の評価画像
 (8×32マトリクスアレイ探触子／焦点深さ条件毎の走査角の合成)



(1) EDMスリット



(2) SCC

図 10 マルチアングル合成法による外面（欠陥非開口面）探傷結果の評価画像
 (8×32マトリクスアレイ探触子／焦点深さ条件の合成)

定技術の開発,” INSS Journal, Vol.13, p.246, (2006).

- (3) 石田仁志, 北阪純一, 遠藤賢, “フェーズドアレイ非対称ビーム TOFD 超音波探傷法による Ni 基合金溶接部 SCC の測定,” INSS Journal, Vol.19, p.195, (2012).
- (4) Zetec, フェーズドアレイ探傷装置 Dynaray, <http://www.zetec.com/2010/06/dynaray-product-line/>
- (5) Zetec, 制御・データ収集ソフト Ultra Vision, <http://www.zetec.com/2010/06/ultravision/>
- (6) MathWorks, 数値解析ソフト MATLAB, <http://www.mathworks.com/products/matlab/>