

## フェーズドアレイ法による複雑な裏面形状を有する ボイラ配管の割れ探傷技術

芝田 三郎\*  
*Saburou Shibata*

梶ヶ谷 一郎\*\*  
*Ichiro Kajigaya*

中川 博勝\*\*\*  
*Hirokatsu Nakagawa*

フェーズドアレイ法は、きず検出法として用いられる場合が多い。本報では、ボイラ部材のスプレー管を対象に、きず検出だけでなく裏面形状の計測法として適用できることの見通しを得た。さらに、損傷が想定される部位に対してきず検出性についても検討し、フェーズドアレイ法によるスプレー管の健全性評価方法として有効であることを確認した。

キーワード：超音波探傷法、フェーズドアレイ法、アレイプローブ、リニアスキャン、セクタスキャン、垂直法、斜角法

### 1. はじめに

ボイラ配管には、表面が単純な形状の面であっても裏面は複雑な加工形状や部材が溶接されて複雑構造となっているものがある。裏面側からの検査が可能であれば、種々の検査方法を選択して健全性評価を行うことができる。しかし、裏面へのアクセスが困難な場合も多く、この場合には表面側からの放射線透過試験や超音波探傷試験によって健全性を評価する必要がある。

特に、損傷が割れである場合には、割れに対する検出性や板厚方向のきず高さ寸法の評価の必要性を考慮して、超音波探傷試験が多く用いられる。時間軸上に発生するエコー画像（A スコープ）を

検査員が監視して行う通常の超音波探傷では、きずのエコーに加えて、複雑な裏面形状に起因する形状エコーが多く発生して、きずの評価を極めて困難にする。

他方、フェーズドアレイ法は、微小な素子を多数隣接して、電子的に各素子を励起させることでリニアスキャン（直線的に超音波ビームを移動させる走査）やセクタスキャン（超音波ビームの屈折角を順次変化させることで行う扇状の走査）などが可能であり、これによって探触子を置いたまま高速でデータを取り込み、きずを画像化して表示できる。この他にも、超音波ビームの幅を任意の深さに集束させる集束機能を用いることによって、狭いビーム幅できずを評価できて評価精度を

\* 元 検査事業部 技術部 NDE 技術グループ（現 株式会社アデルコ）

\*\* 検査事業部 技師長／第一検査部 部長 博士（工学）

\*\*\* 株式会社 IHI エネルギープラント事業本部 電力事業部 保守技術部 技術グループ 課長

改善できる。

このフェーズドアレイ法の優れた長所を活用して、既に原子力プラントの SCC の寸法計測や水力発電プラントの鋳鋼や鋳鉄部材の寿命評価などに適用してきている<sup>1) 2)</sup>。また、本方法は、複雑な形状の部位の探傷にも有効であると考えられ、今回、裏面形状が複雑となっている過熱低減器(スプレー管)の内面側に溶接されている固定リングを対象に、割れの評価に関する検討を行ったので報告する。

## 2. フェーズドアレイ法による裏面形状の計測

裏面形状が複雑な部位に発生する割れを評価するには、複雑な裏面形状を正確に把握する必要がある。裏面形状の確認精度を検討する目的で、標準試験片 STB-A1 (JIS Z2345) の裏面形状の測定試験を行った。周波数 5MHz で 32 チャンネルのアレイプローブを屈折角 60 度のシューに設置し、 $-20^{\circ}$  ~  $+89^{\circ}$  度の屈折角の範囲でセクタスキャン(扇形走査)を行った結果を図 1 に示す。この

とき、アレイプローブを、標準試験片 STB-A1 (JIS Z2345) の入射点計測用のスリット付近を起点に 100R 面方向に向かって走査している。裏面形状は、試験片の底面の形状および 100R 面の形状が精度よく描写され、スリットの高さも 15mm と計測され実寸とほぼ一致した。本結果から、フェーズドアレイ法は裏面の形状把握にも有効であることが確認され、複雑な裏面形状のスプレー管の評価に対して有効な手法であると考えられた。

## 3. スプレー管の裏面さぎの評価

### 3.1 試験方法

試験に用いたフェーズドアレイ探傷システムは、①データ採取本体 ②データ解析用コンピュータ ③アレイプローブで構成されており、プローブの走査機構として簡易的な一軸走査機構(リニアエンコーダ)を用いた。データ採取本体及びアレイプローブの主な仕様を以下に示す。

(1) フェーズドアレイ装置 ( $\mu$ -Tomo Scan Focus R&D Tech 社)

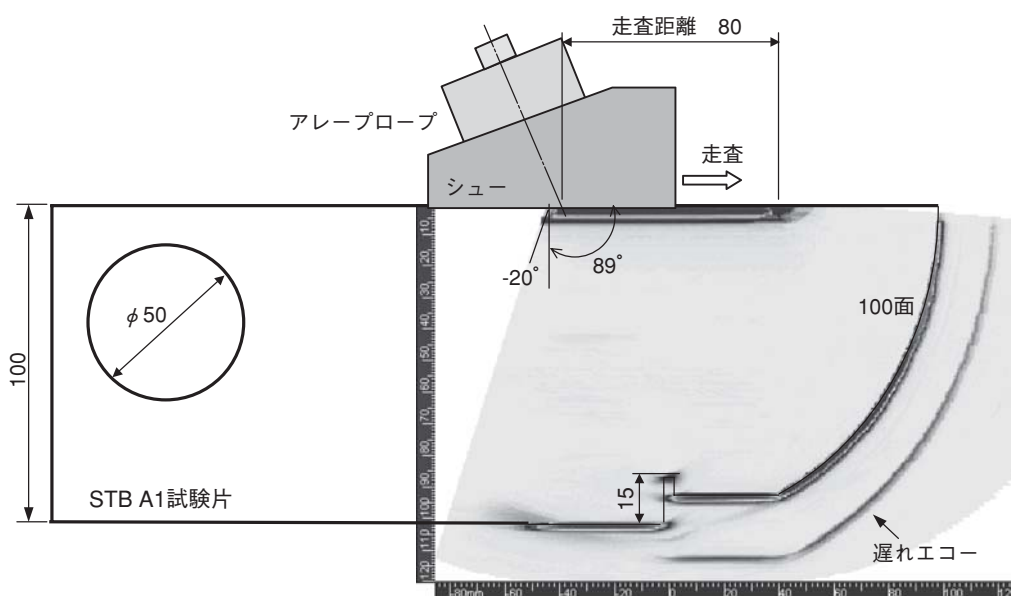


図1 フェーズドアレイ法による形状探査例

外形寸法：520 × 420 × 200  
 重量：20Kg  
 PFR：最大 6887  
 サンプル周波数：100MHz  
 バンドパス周波数：0.5MHz ~ 15MHz  
 ゲイン：最大 105dB

(2) アレイプローブ (IMASONIC 社)

外形寸法：72 × 38 × 45  
 周波数：5MHz  
 CH 数：64CH  
 振動子寸法：1 × 27mm  
 振動子ピッチ：0.25mm  
 プローブシュー：屈折角 45° (鋼中)

試験に供した供試体の外観、断面写真および主要寸法を図 2 に示す。実機ボイラから採取した材質 2.25Cr-1Mo 鋼の外径 φ570 肉厚 83t の配管から短冊状に切り出したものを用いた。管の内面には、周方向へ幅 30mm、肉厚 15mm の板材 (固定

リング) を未溶着部が存在する隅肉溶接で接合されているために複雑な形状となっている。これに割れを模擬して、長さ 15mm と一定として、深さ 1、3、5、10mm のノッチを底面にほぼ平行に放電加工で付与している (放電加工を施すために、わずかに母材側に傾きを持って加工した)。

試験は、探傷面から裏面側の複雑な形状を把握する必要があるため、割れの検出性確認の前にフェーズドアレイ法による裏面形状の確認試験を行った。その後に、放電加工によるノッチ加工を行って検出性の検討を行っている。

焦点位置の設定にあたっては、予めシミュレーションにより決定している。その結果を図 3 の (A) に示しているが 64ch のプローブで十分に当該部に焦点を結ぶことを確認している。(B) および (C) 図は、周方向の焦点についての検討を試みた結果であるが、周方向では 42ch 以上であれば当該部に焦点を結ぶことが可能である結果と

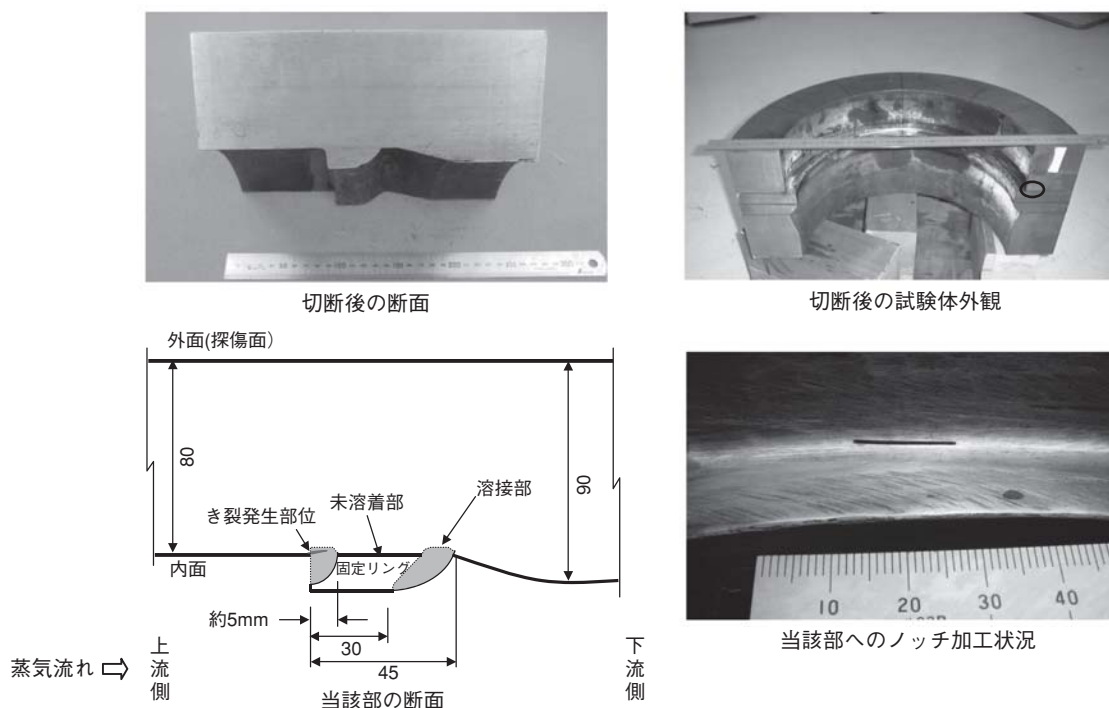
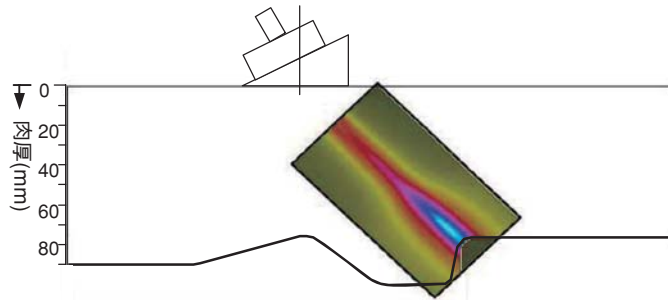


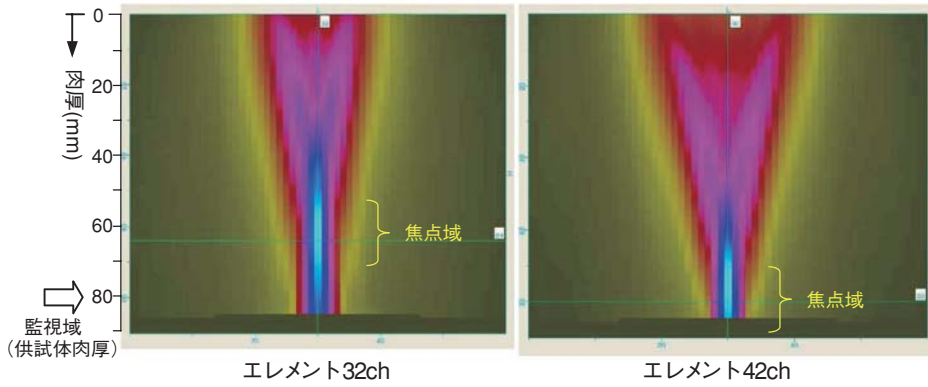
図2 供試体の外観



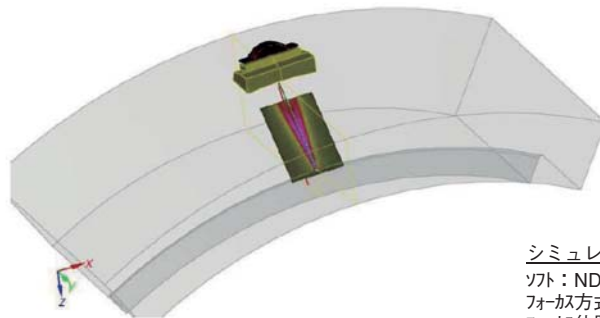
(A) 軸方向の焦点位置の検討結果

シミュレーション条件

ソフト：NDTモテリング・シミュレーションソフトウェア (CIVA9)  
 フォกัส方式：1指定点電子フォーカス  
 フォกัส位置：80mm  
 エレメント：64ch 1×20×64 (ピッチ0.1)  
 周波数：5MHz 屈折角：縦波45度  
 エレメント配置法：軸方向へ64chを配置  
 音速：ウエッジ2460m/sec 鋼中5900m/sec



(B) 周方向における最適エレメント数の検討結果



(C) 周方向の焦点位置の検討

シミュレーション条件

ソフト：NDTモテリング・シミュレーションソフトウェア (CIVA9)  
 フォกัส方式：1指定点電子フォーカス  
 フォกัส位置：80mm  
 エレメント：64ch 1×20×64 (ピッチ0.1)  
 周波数：5MHz 屈折角：縦波45度  
 エレメント配置法：周方向へ64chを配置  
 音速：ウエッジ2460m/sec 鋼中5900m/sec

図3 シミュレーションによるビームのプロファイル検討結果

なった。これは、曲率の影響により焦点効果が得られるためと考えられた。

シミュレーションの結果をもとに、裏面形状の計測目的に対しては、板厚に相当するビーム路程に焦点を設定して、 $-40 \sim +40$ 度の屈折角の範囲でのセクタスキャンを行った。走査は直交走査(軸方向走査)とし、上流側及び下流側からの両側から底面の形状を計測した。なお、裏面の形状計測には従来のAスコープを監視する超音波探傷法とTOFD法でも計測し、計測精度を比較した。

一方、きずの検出性については、板厚に相当するビーム路程に焦点を設定し $0 \sim 60$ 度のセクタ

スキャンを行いながら、直交走査および平行走査(周方向走査)を各々上流側および下流側から行ってきずを採傷した。

### 3.2 裏面形状の計測結果及び検討

フェーズドアレー法による供試体の健全部での裏面形状を計測した結果の例を図4に示す。図中には供試体の断面形状を比較して示しているが、裏面形状は、供試体の底面や固定リングの形状が明瞭に描写され、実寸法とほぼ一致していることが確認された。特に、割れの発生箇所は、固定リングの取付け部の未溶着部と近接するために、割

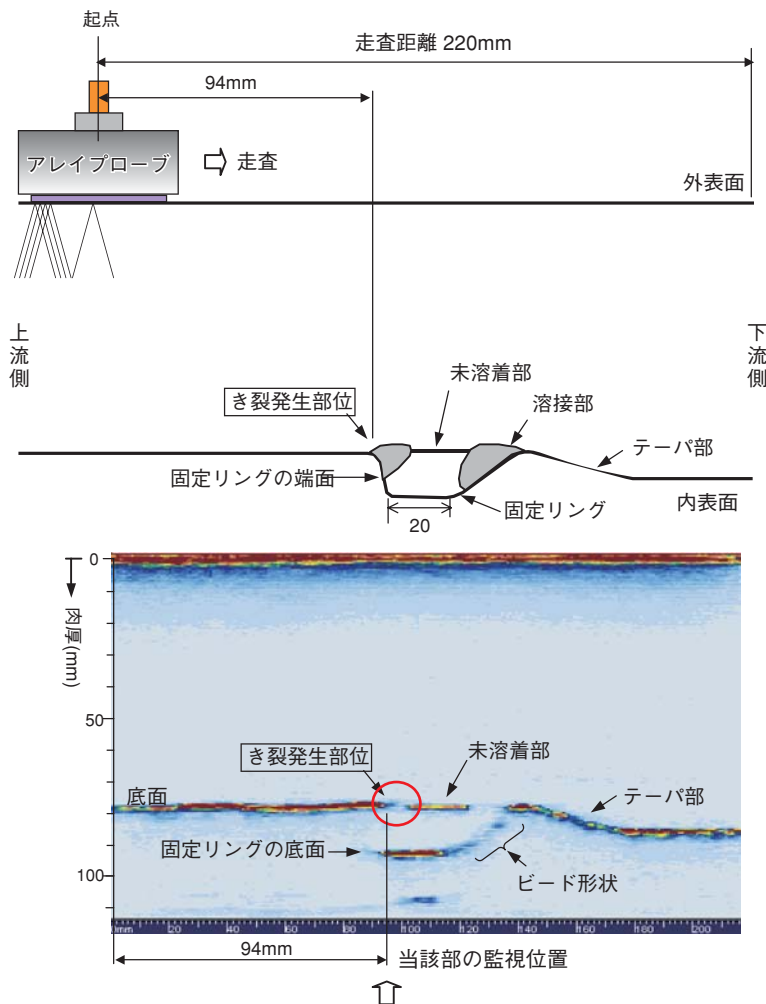


図4 UPA法による裏面形状の探査結果

れの評価が困難になることが危惧されたが、割れの有無を判断する上で十分な間隔で分離されて描写されていることが確認できた。これは、ビームを  $-40 \sim +40$  度の屈折角範囲でのセクタスキャンとしたことと、励振数を 64ch として見掛けの振動子寸法を大きくしたことで、裏面に焦点を精度よく結ぶことができたためと考えられる。

なお、裏面形状については通常の超音波探傷による垂直 B スコープ法（エコーの伝播時間と探傷位置の関係を求めて、探傷結果を断面形状で表示する方法）でも計測を試みたが、画像はぼやけた固定リングの形状となった。これは、焦点の無い探触子を用いたことにもよるが、集束探触子を用いたとしても、セクタスキャン（扇状走査）での画像化ができないので、傾いた面の表示が困難になることが原因として考えられる。また、TOFD 法でも試みたが、ビームを集束していないために画像はぼやけ、割れの識別は困難と考えら

れ、本探査には適さないと考えられた。これより、裏面形状の探査は、集束機能とセクタスキャン（扇状走査）を組合せたフェーズドアレー法による計測が最適であると判断できた。

### 3.3 ノッチの検出性検討結果及び考察

配管の上流側および下流側からの探傷結果の代表例を図 5 に示す。図中には健全全部の探傷画像をも比較して示しており、固定リングの端面の位置を縦の一点鎖線で示している。上流側探傷では、底面反射波の指示が未溶着部側へ長く伸びていることでノッチを検出していると判断でき、ノッチ深さが 3mm 以上のものの検出が可能であった。特に、ノッチ深さ 5mm 以上のものは明瞭に欠陥指示と判断できたが、ノッチ深さ 3mm は底面エコーの指示がわずかに伸びているだけの小さな指示で、拡大図から判断できた。下流側探傷においては、上流側と同じ結果となり 3mm 以上が検出

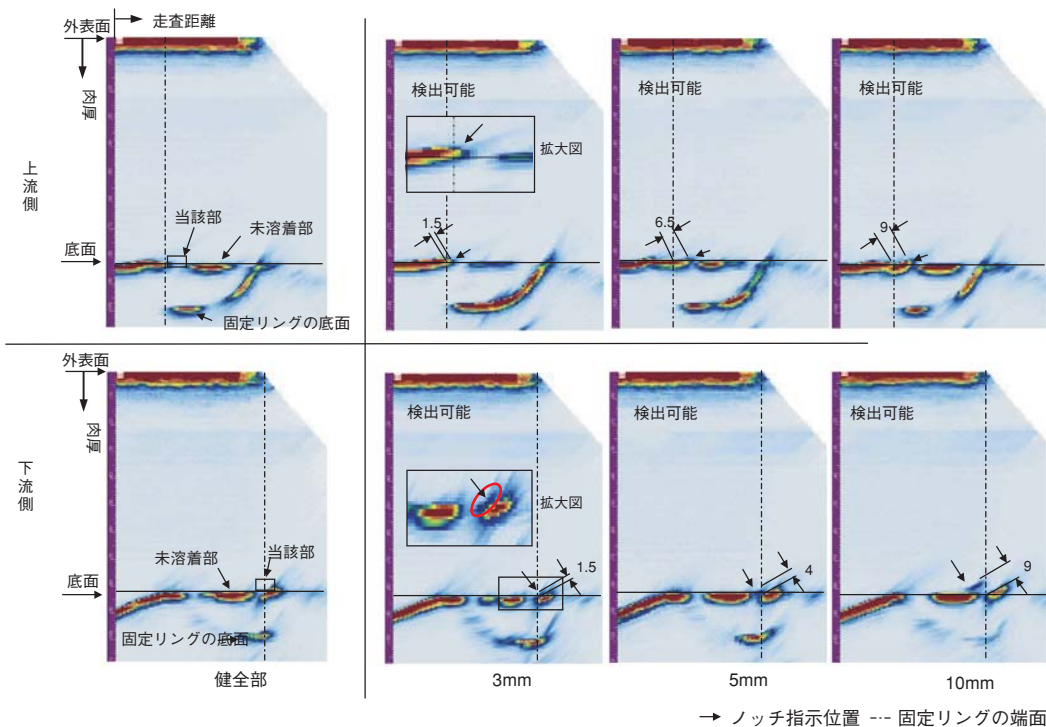


図5 直交走査結果の例（探傷角 $0^{\circ} \sim 60^{\circ}$ ）

可能であったものの、やはり 3mm は拡大図で判断できる程度であった。

直交走査において、ノッチを最も検出できる探触子位置の検討を行った。図 6 は、深さ 10mm のノッチに対して、0 から 80 までの Y 距離を 10、20、30 及び 40mm と変えて、それぞれの位置でセクタスキャンを行って画像化してノッチの検出性を比較した結果を示している。

これより、Y 距離が 30mm のときに最もノッチ

をよく識別できていることがわかる。この最も検出性が改善できた Y 距離 30mm において平行走査を行い、ノッチの検出性を検討した。図 7 に上流側の探傷例を示しているが、上流側では、全てのノッチが検出可能であり SN 比も 6dB 以上で十分な識別性であった。しかし、1mm ノッチにおいては、端部が底面と近接するために画像化するときのゲートの設定によっては検出困難となる場合があるので慎重なゲート設定が必要であった。

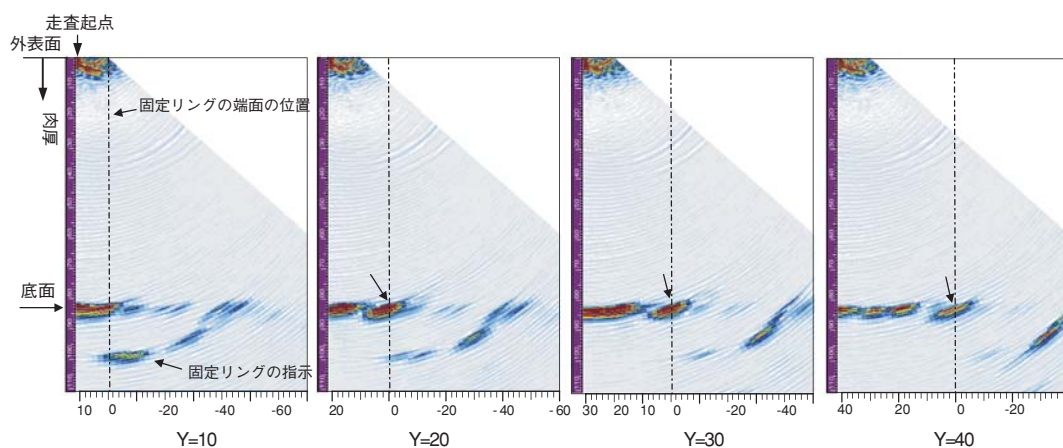


図6 平行走査における適正なプローブ位置の検討

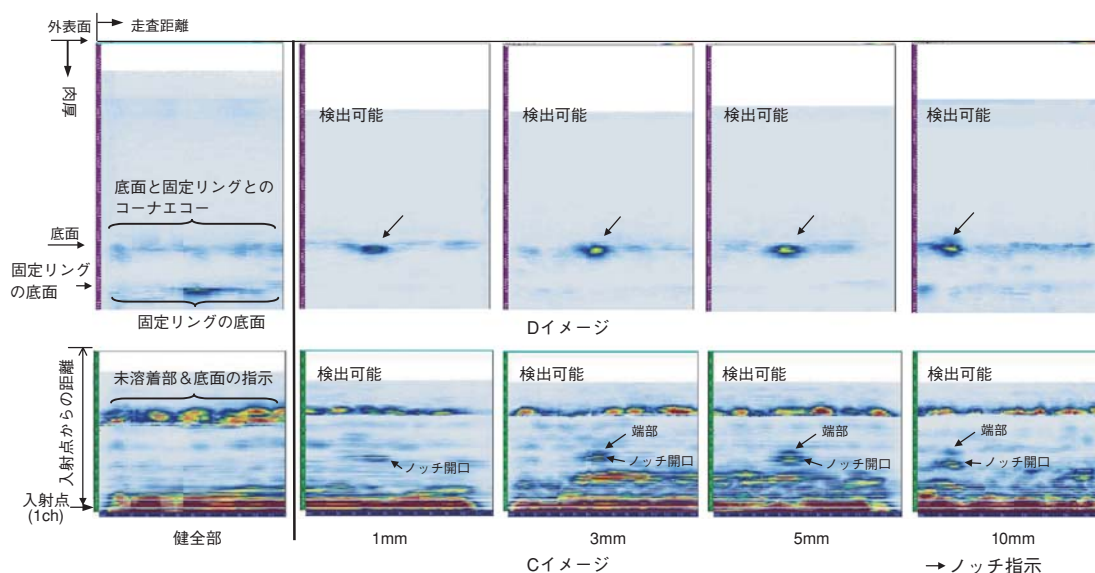


図7 平行走査による上流側探傷結果 (Y=30mm)

下流側探傷では、5mm 以上は未溶着部の指示とノッチの指示とが分離するので識別は容易であったが、3mm 以下は未溶着部の指示に近接するので識別性は低下した。特に、1mm は未溶着部の指示に重畳するので検出困難であった。

以上のように平行走査においては、検出性は前後走査と異なり上流側がよいことが判ったが、これはノッチが肉厚方向へやや傾いて加工されているためと考えられた。

ノッチ深さ寸法の測定精度を検討するために、直交走査の B イメージ（断面画像）上でノッチの深さ寸法を測定した。得られた結果を図 8 に示すが、いずれもやや過小評価の傾向が見られ、実寸法と指示寸法の比率では小さなノッチほど過小

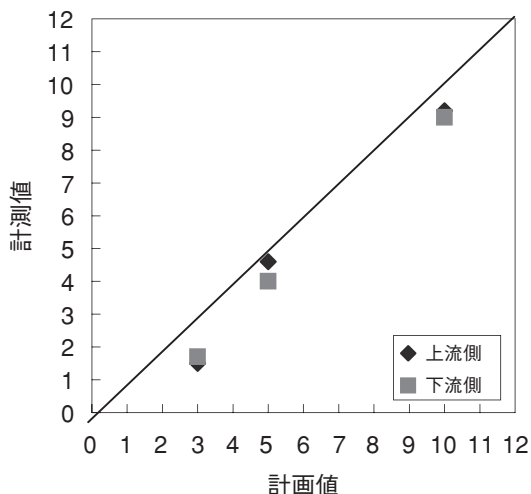


図8 ノッチ深さ計測結果

表 上流・下流側からのノッチ高さ計測結果

単位：mm

深さ	上流側	下流側
1	—	—
3	1.5	1.7
5	4.6	4
10	9.2	9

評価の度合が大きくなる傾向が見られた。

指示長さについては、指示エコー高さのピークから -6dB の範囲をノッチ範囲とし、管の外径と内径との比から幾何学的にノッチ深さを求めた。その結果、いずれも開口幅 15mm に対し +20% ~ +40% の過大評価で計測された。これは、一つの素子が 1 × 27mm の方形のアレイ探触子を用いているために、管の軸方向に対しては集束効果が得られるものの、周方向に対しては集束効果がなく、超音波ビームは広がりを持つためと考えられる。

## 5. まとめ

固定リングが内面に隅肉溶接で取り付けられ、複雑な内面形状を有するボイラ極厚配管で、固定リング取り付け部に生じるき裂の超音波探傷手法の検討を行った。試験は実機ボイラから採取した材質 2.25Cr-1Mo 鋼の外径 φ 570 肉厚 83t の配管から短冊状に切り出したものを用いて行った。また、き裂の検出性を検出するために、固定リングの内面への隅肉溶接部に種々の深さで配管表面にはほぼ平行なノッチを加工して行った。この結果、周波数 5MHz で 62 チャンネル（素子寸法：1 × 27mm）のアレイプローブを用いて、裏面位置に相当するビーム路程で焦点を結ばせて、屈折角 -40 から +40 度までのセクタスキャンを用いて走査することで裏面形状を精度よく再現できることがわかった。またノッチに対して、屈折角 0 から +60 度のセクタスキャンを行うことで、前後走査及び平行走査共に、ノッチ深さ 3mm 以上のノッチを検出できることがわかった。特に、最もノッチを検出する位置にアレイプローブをおいてセクタスキャンを行いながら平行走査を行うことでノッチの識別をより改善できた。今後更に検証を進めると共に、実機に適用を図り、保全の合理化に寄与する所存である。



### 参考文献

- 1) 芝田、船戸：フェーズドアレイ法による欠陥検出技術、IIC REVIEW No.33 (2005) pp.27-35
- 2) 船戸、引地：水車ステーベーンの超音波フェーズドアレイ法の適用、IIC REVIEW No.37 (2007) pp.2-7
- 3) 平沢他：鋼溶接部探傷用 256ch フェーズドアレイ UT 装置の開発：平成 9 年度秋季大会講演概要集 (1997)
- 4) ブラコニエ：超音波フェーズドアレイによる
- 5) 古村他：多機能フェーズドアレイ探傷技術の開発：検査技術 Vol.7 No.8 (2002)
- 6) 後河内：フェーズドアレイ UT 装置「PAL」：検査技術 Vol.8 No.3(2003)
- 7) 古川他：Phased Array 超音波探触子音場の数値シミュレーション：第 12 回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集 (2005)
- 8) 芝田：フェーズドアレイ法による欠陥検出技術：検査技術 Vol.10 No.12 (2005)

元 検査事業部  
技術部 NDE 技術グループ  
(現 株式会社アデルコ)

芝田 三郎  
TEL. 045-759-2163  
FAX. 045-759-2146

検査事業部  
技師長／第一検査部 部長  
博士 (工学)

梶ヶ谷 一郎  
TEL. 03-3778-7913  
FAX. 03-3778-7951

株式会社 IHI エネルギープラント事業本部  
電力事業部 保守技術部  
技術グループ 課長

中川 博勝  
TEL. 03-6204-7517  
FAX. 03-6204-8791