

# 異種金属溶接部の溶接線平行欠陥に対する UT 深さ測定法の検討

## Investigation of Phased Array UT technique for Circumferential Crack Depth Sizing in Dissimilar Metal Weld

一般財団法人 電力中央研究所 平澤 泰治 Taiji HIRASAWA Member  
一般財団法人 電力中央研究所 福富 広幸 Hiroyuki FUKUTOMI  
一般財団法人 電力中央研究所 秀 耕一郎 Koichiro HIDE Member

In recent years, it has been reported that the primary water stress corrosion cracking (PWSCC) has occurred in dissimilar metal weld (DMW) components such as steam generator safe end weld, reactor vessel safe end weld, and so on, in PWR. The depth sizing of such cracks with high accuracy is important in order to ensure the reliable operation and life extension of nuclear power plants. Therefore, construction of the performance demonstration (PD) system for certifying DMW inspection method is being investigated, in Japan. In order to establish the PD system of DMW inspection method, the effective fabrication technology of DMW test specimen with SCC crack and development of phased array UT technique for crack depth sizing are required. In this paper, the results of fabrication procedure of DMW specimen with circumferential SCC crack are described. And then, phased array UT technique for defect depth sizing was applied to the DMW specimen with circumferential defect. From the experimental results, superior performance of phased array UT at the inside inspection of DMW specimen was shown.

**Keywords:** Dissimilar Metal Weld, Circumferential Defect, Defect Depth Sizing, Phased Array UT, Performance Demonstration

### 1. 緒言

近年、原子力プラントの耐圧バウンダリで使用されている異種金属溶接部 (Dissimilar metal weld : DMW) では、国内外で応力腐食割れ (SCC) き裂による損傷事例が報告され[1][2]、PWR では原子炉容器管台 (RV 管台)、蒸気発生器管台等が、また BWR では PLR ノズル、原子炉再循環水ノズル等があげられている。一方、原子力発電所の供用期間中検査 (ISI) における超音波探傷試験 (UT) において、DMW は、溶接金属組織の異方性による超音波散乱・減衰、金属組織からのノイズによる欠陥の検出性の低下等により難探傷部位とされている。

このような背景から、わが国では、DMW の UT 検査の信頼性確保を目的として、「PD 認証制度」の構築に向けて検討されており、DMW 試験体の付与欠陥、UT による欠陥深さサイジングが課題としてあげられている。

PD 試験に用いる試験体としては、実機で発生する SCC き裂と同様なき裂を模擬し、き裂深さも板厚の 60% 程度以上の深いき裂を付与した試験体を準備する必要があるが、このような試験体の製作は極め

て困難である。そこで、SCC 代替欠陥として、ウェルドオーバーレイ施工部に対する PD 試験における試験体の考え方[3]と同様、非 SCC 欠陥を付与した試験体の適用について検討されている。その場合は、SCC 欠陥と非 SCC 欠陥の超音波同等性を確認する必要があり、そのためにも技術面および経済面で効果的な方法で SCC き裂付与 DMW 試験体を製作する必要がある。

DMW 試験体への SCC き裂付与については、著者らは、DMW の溶接線に直交方向に進展するき裂の付与方法を、すでに報告[4]しているが、溶接線に平行方向に進展する SCC き裂について、効果的な付与方法に関する報告は少ない。

PD 試験では、PD 用 DMW 試験体の付与欠陥に対して真とする深さ (正答値) を特定する技術の確立が必要となる。著者らは、DMW の溶接線直交方向の SCC き裂に対して、フェーズドアレイ UT を適用し良好な深さ測定精度が得られたことを報告した[5]。しかしながら、溶接線平行方向のき裂に対する深さサイジング評価は、いまだ十分とは言えず、これらのき裂に対する高精度なサイジング技術を確立することが必要である。

本研究では、DMW の PD 制度構築に向けた取り組みとして、効果的な DMW 試験体の製作技術 (SCC き裂付与) の確立および DMW の溶接線平行欠陥の

UT による高精度深さサイジング技術の開発に関する研究を進めており、本報告では、これらの基礎検討結果について報告する。

## 2. PD 用 DMW 試験体

PD 試験に用いる試験体に付与する欠陥は、DMW の溶接線に対して直交方向に進展する欠陥（以下、直交欠陥と称す）と溶接線に平行方向に進展する欠陥（以下、平行欠陥と称す）の 2 種類があげられる。

直交欠陥の付与方法については、著者らがすでに報告[4]しており、ここでは、平行欠陥付与の効果的な方法について検討した。

SCC き裂付与の主要因子として、試験環境、応力付与方法、溶接材料および SCC き裂形状があり、以下のように検討した。

### (1) 試験環境

試験環境としては、実機環境を模擬したループの一部に試験体を配置して SCC き裂を付与する方法と薬液に浸漬して付与する方法がある。前者の方法は、実機に近いき裂が生成される可能性が高いという利点があるが、実機環境を模擬するための設備が大掛りになること、試験体設置のハンドリングが複雑になること、長時間の SCC き裂付与が必要になる等の欠点がある。

次に、薬液に浸漬して SCC き裂を付与する方法としては、試験体の当該部に小型のカプセル状の槽を設置し、その中に薬液を充填させて行う方法があり、薬液の補充、き裂進展量の測定時の段取り等のハンドリングが容易に行えること、SCC き裂付与時間も比較的短時間で終了すること等の利点がある。欠点としては、薬液の設定条件により実機の形状と異なる可能性があることがあげられる。

上記検討結果から、ハンドリングが容易でかつ比較的短時間に SCC き裂を付与する方法として、き裂付与位置に局部的に薬液（ポリチオン酸水溶液）を浸漬させる方法を採用することとした。

### (2) 応力付与方法

一般に応力付与する方法は、3 点曲げあるいは 4 点曲げ試験にて試験体に曲げ応力を負荷する方法があるが、この方法では、表面き裂の開口幅が大きくなること、また試験体を機械的に曲げ戻し施工しても、き裂面が潰れること等が想定される。

そこで、表面き裂の開口幅を狭くするための方法として引張応力の付与を検討した。応力付与方法の

模式図を Fig.1 に示す。試験体の外側に大型の拘束架台を設置し、試験体と架台を溶接することで引張応力を発生させる方法であり、曲げに比べて表面き裂の開口幅が狭くなる。なお、板厚の 1/2 程度以上の深いき裂を短時間で付与するためには、図に示すような曲げ応力を負荷する必要があり、その場合、SUS 母材と CS 母材で強度が異なるため、SUS 母材側に補強材を溶接することで強度のバランスをとることとする。

### (3) 溶接材料および SCC き裂形状

実機相当の 600 系ニッケル基合金の溶接材料は SCC 感受性が低く、短時間での SCC き裂付与が困難と考えられるため、SCC 感受性が高い溶接材料として、炭素量の多い溶接材（高 C 量溶接材）を使用することとする。SCC き裂の形状制御方法の模式図を、Fig.2 に示す。図より、突合せ溶接部のき裂付与位置に、高 C 量の 600 系合金の溶接材を用いて部分溶接（図中の部分溶接部 A）を行うことで、SCC き裂を発生、進展させることが可能となる。ここで、き裂長さは、SCC 感受性の低い 600 系ニッケル基合金の溶接材を用いて、突合せ溶接部と部分溶接部 A との境界部に部分溶接（部分溶接部 B）を行うことで、表面で溶接線方向に進展するき裂は、部分溶接部 B に達して停留することで制御できる。また、き裂深さは、SCC き裂付与試験を途中止めし、UT により確認することとする。

上記の方法で RV 管台を模擬した DMW 試験体に平行 SCC き裂付与を行った。なお、目標き裂は、深さ 30mm、アスペクト比 1 である。SCC き裂付与試験を途中止めし、き裂開口側からフェーズド UT を行った結果の一例を Fig.3 に示す。図は、SUS 側から探傷したときの断面画像（B スコープ）と超音波入射方向から見た投影画像（D スコープ）である。図の B スコープより、溶接部の溶融境界（溶接金属部と SUS 母材の境界）からの指示が認められている。また、SCC き裂面からの反射エコーから概略のき裂位置、き裂深さが確認できる。この試験体では、溶接金属部の中央近傍に SCC き裂が付与されていることがわかる。

次に、Fig.3 の D スコープをみると、き裂面からの指示が明瞭に認められ、これらの画像から、き裂の概略形状、深さが確認でき、目標とする SCC き裂を付与できる見通しが得られた。

なお、今後切断調査により、付与き裂の形状、寸法を測定し、き裂付与方法の評価を行う予定である。

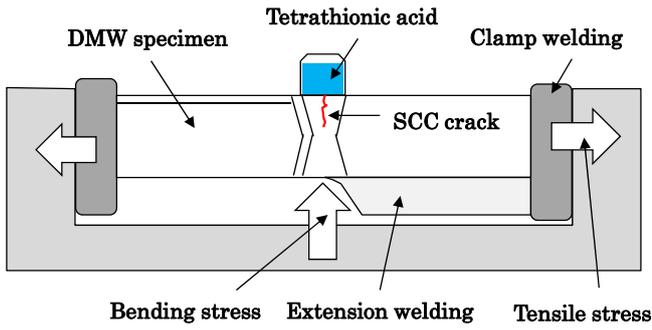


Fig.1 Overview of introduction of circumferential SCC crack in weld metal

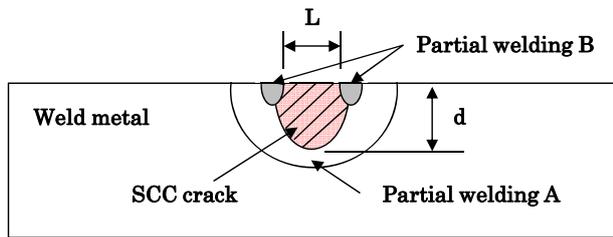


Fig.2 Overview of control of crack shape

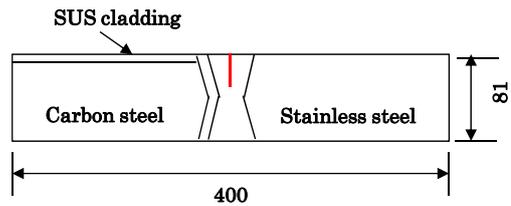
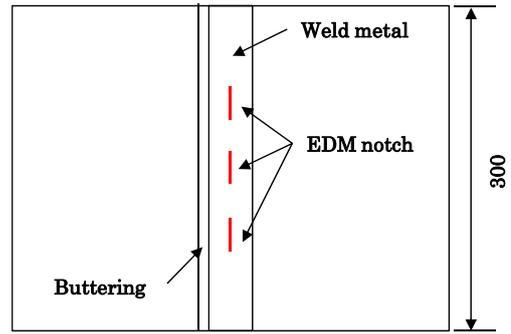


Fig.4 DMW specimen with circumferential EDM notches in weld metal

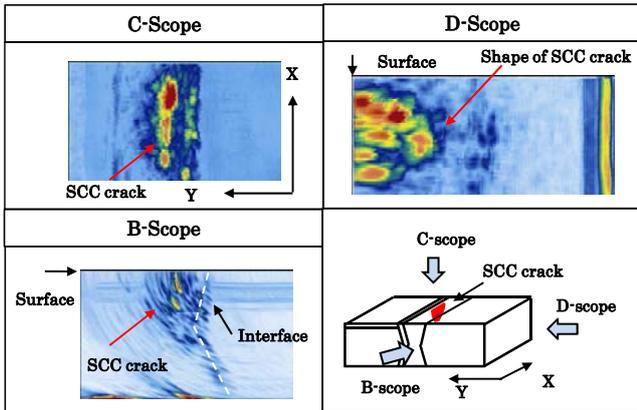


Fig.3 Inspection images of circumferential SCC crack in DMW specimen

### 3. 平行欠陥の深さサイジング

#### 3.1 試験体

試験体は、溶接線平行方向に EDM ノッチを付与した RV 管台を模擬した DMW 試験体である。試験体の一例を Fig.4 に示す。試験体の突合せ溶接部は、ニッケル基合金溶接部であり、バターリングと SUS クラッドが施工されている。EDM ノッチは、突合せ溶接部の中央部分に付与されており、EDM ノッチ付与条件を Table 1 に示す。EDM ノッチは 5 個で、深さは  $d=5,10,20,30,50\text{mm}$ 、長さはずべて  $20\text{mm}$  とした。

Table 1 EDM notch conditions in DMW specimen

Area	Direction	Depth (mm)	Length (mm)
Weld metal	Circumferential	$d=5,10,20,30,50$	20

Table 2 Specification of phased array probes

	Probe	Specification	Target
①	2L(10)	Type : Linear Frequency : 2MHz Mode : Longitudinal Element size : $10 \times 0.8\text{mm}$ No. of channels : 64ch	Shallow crack
②	2L(20)	Type : Linear Frequency : 2MHz Mode : Longitudinal Element size : $20 \times 0.6\text{mm}$ No. of channels : 64ch	Medium crack
③	2MPC	Type : Dual Matrix Frequency : 2MHz Mode : Longitudinal Element size : $3.1 \times 3.1\text{mm}$ No. of channels : 72ch (T/R)	Deep Crack

### 3.2 試験方法

試験に用いた探傷装置は、フェーズドアレイ UT 装置 (DYNARAY 256/256 : Zetec 社製) である。用いたアレイ探触子は 3 種類で、仕様および適用対象を Table 2 に示す。表より、①は、略号 2L(10)で浅い欠陥探傷用、②は、略号 2L(20)で中程度深さの欠陥探傷用、③は、2 個のマトリクスアレイ探触子を配置したピッチキャッチ探傷用探触子であり、略号 2MPC で、深い欠陥探傷用として選定した。

試験体の探傷は、Fig.5 に示すように、欠陥開口面側からの探傷とし、欠陥を挟んで両側 (SUS 側、CS 側) から直接接触法 (ギャップ法 : ギャップ寸法 0.2mm) で行った。また UT データの採取は、X-Y スキャナを用いた自動 UT である。

### 3.3 試験結果および考察

EDM ノッチを付与した DMW 試験体に対してフェーズドアレイ UT を適用し、Fig.6 に示す欠陥深さ測定要領[5]に従って深さ測定を行った。得られた探傷画像の一例を Fig.7 に示す。図は、EDM ノッチ深さ 5mm に対して SUS 側から探傷した時の各種探傷画像を示したものであり、溶接部の開先形状や EDM ノッチ形状を表すための条件での探傷画像である。

図より、B スコープ画像には、EDM ノッチの指示とともに、熔融境界 (溶接金属部と SUS 母材の境界) からの指示が明瞭に認められ、EDM ノッチが溶接金属部の中央に位置していることが分かる。また、D スコープ画像には、EDM ノッチの形状 (矩形形状) が明瞭に認められている。さらに C スコープには EDM ノッチと熔融境界の指示が認められ、また、概略き裂長さも測定することができる。

次に、各 EDM ノッチの探傷画像を Fig.8 に示す。図は、SUS 側から探傷し深さ評価を行った条件で得られた断面画像 (B スコープ) であり、端部エコーを丸印で示してある。図より、すべての B スコープ画像には端部エコーが明瞭に認められた。また、図示していないが、CS 側からの断面画像においても、SUS 側と同様、すべての EDM ノッチで端部エコーが明瞭に認められた。

次に、端部エコー法にて深さ評価を行った。その結果を Fig.8 に示す。図には、SUS 側および CS 側の結果を分けて示してある。深さ評価結果は、SUS 側と CS 側で深さに差異は認められなかった。これらのデータを用いて統計的な誤差評価を試みた結果、誤差平均は -0.55mm、RMS 誤差は 0.98mm であつ

た。ここで、深さ測定誤差である RMS 誤差 0.98mm は、ASME Code Sec.XI App. VIII[6]の PD 試験の合格基準である RMS 誤差 3.2mm に比べて、極めて良好な精度で評価されたといえる。

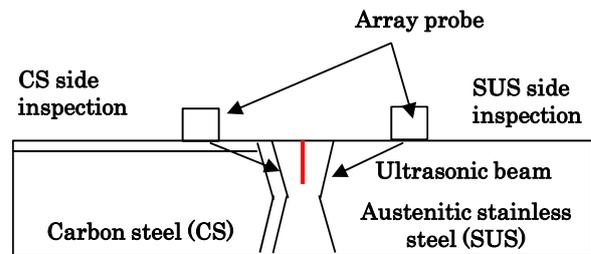


Fig.5 Inspection status of DMW specimen by phased array UT

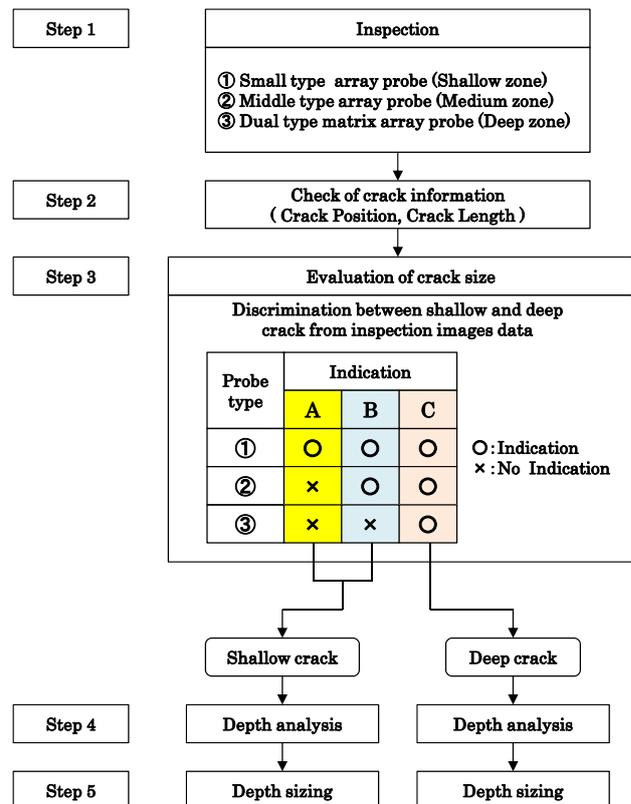


Fig.6 Flowchart of defect depth sizing procedure

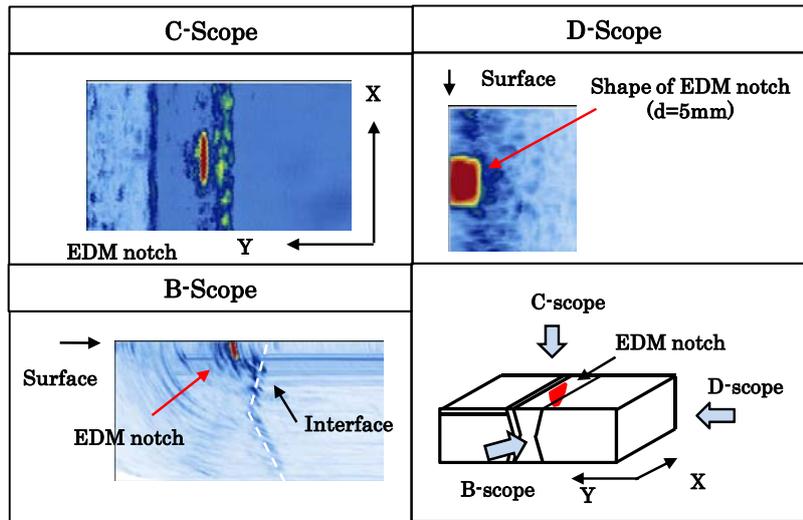


Fig.7 Inspection images in DMW specimen with EDM notch by phased array UT

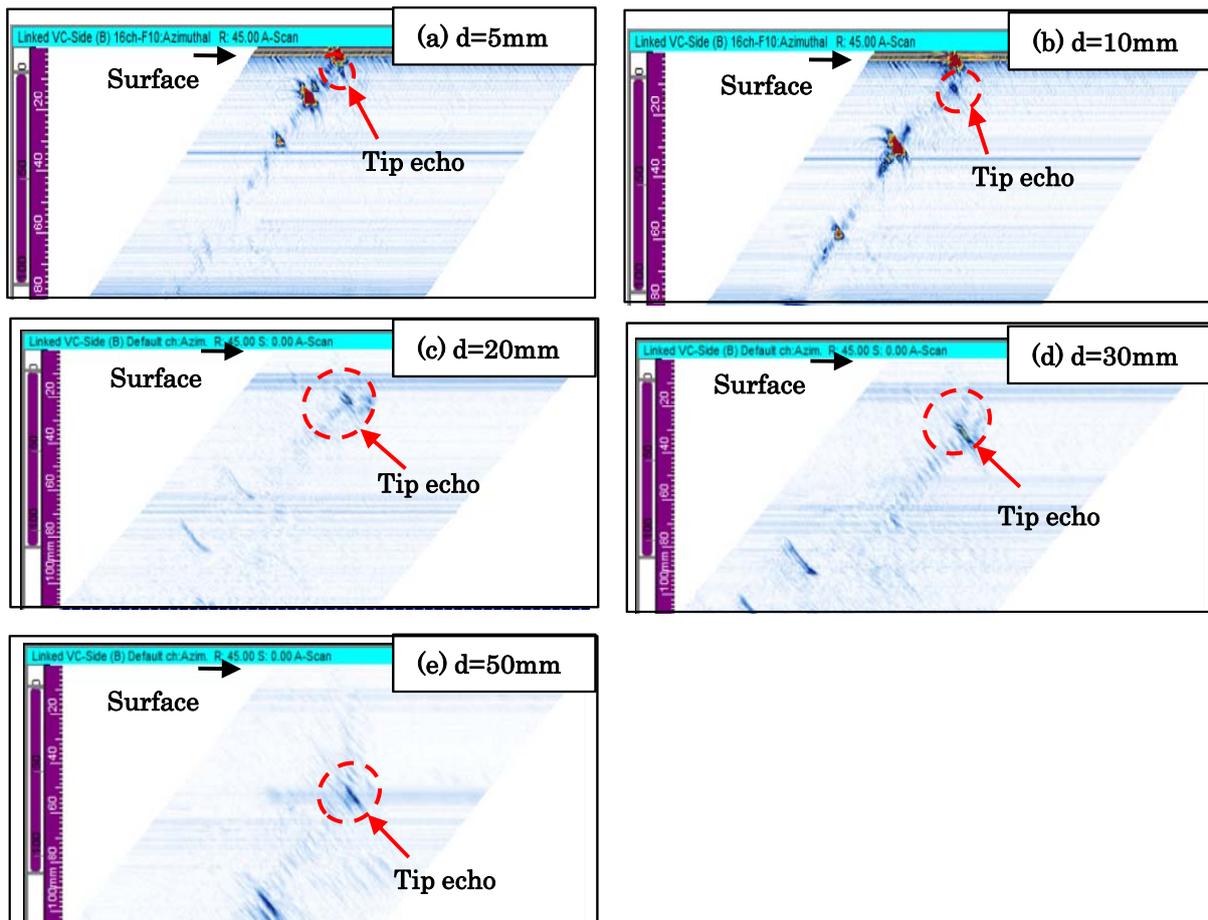


Fig.8 B-scan images of DMW specimen with EDM notches by phased array UT

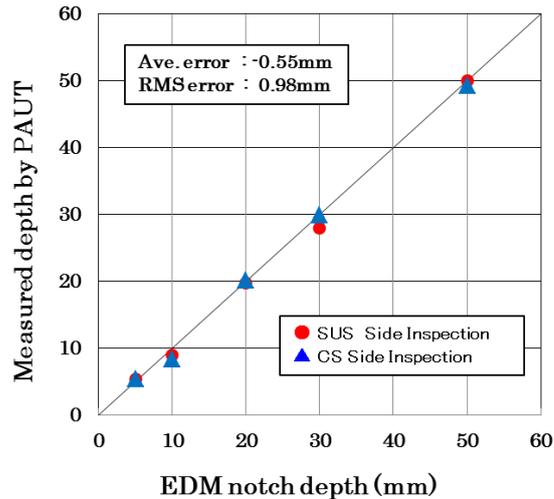


Fig.9 EDM notch depth sizing accuracy by phased array UT

#### 4. 結言

異種金属溶接部 (DMW) の PD 試験制度構築の検討の一環として、所定の SCC き裂 (深さと長さを制御) を付与する試験体製作技術および DMW 試験体の溶接線平行欠陥の UT による深さサイジングに関する研究を進め、これらの基礎検討を行った。その知見を以下に纏める。

- (1) DMW の溶接線に対して平行方向に進展する SCC き裂の付与方法について、各種試験条件 (試験環境、応力付与方法、溶接材料およびき裂形状制御方法) を絞込み、SCC き裂付与 DMW 試験体を試作し、フェーズドアレイ UT を適用した結果、目標とする SCC き裂を付与できる見通しが得られた。
- (2) 溶接線平行欠陥 (EDM ノッチ) 付与 DMW 試験体に対して、フェーズドアレイ UT を適用した結果、欠陥深さは、誤差平均-0.55mm、RMS 誤差 0.98mm と良好な精度で評価できた。
- (3) 上記のフェーズドアレイ UT の適用結果から、平行欠陥 (EDM ノッチ) の欠陥深さ測定に対するフェーズドアレイ UT の有効性が明らかとなった。

#### 参考文献

- [1] 原子力・安全保安院：加圧水型軽水炉の一次冷却材圧力バウンダリにおける Ni 基合金使用部位に係る検査等について，NISA-163a05-2 (2005)
- [2] 関西電力(株)プレスリリース：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)，(2008.9.26)
- [3] 日本非破壊検査協会規格：超音波探傷試験システムの性能実証における技術者の資格及び認証，NDIS 0603：2013，(一社) 日本非破壊検査協会
- [4] 平澤泰治，福富広幸：ニッケル基合金溶接部の欠陥深さサイジングに対する超音波探傷法の適用性評価，電力中央研究所報告，Q09025，(2010.5)
- [5] 平澤泰治，岡田久雄，福富広幸：フェーズドアレイ UT によるニッケル基合金溶接部の欠陥深さ測定法の開発，日本保全学会 第 9 回学術講演会要旨集，pp.231-236，(2012.7)

