フェーズドアレイ UT によるニッケル基合金溶接部の 欠陥深さ測定要領の検討*

平澤 泰治^{*1}, 福富 広幸^{*1}

Investigation of UT Procedure for Crack Depth Sizing by Phased Array UT in Ni-Based Alloy Weld

Taiji HIRASAWA ^{*1} and Hiroyuki FUKUTOMI

^{*1} Central Research Institute of Electric Power Industry
2-6-1, Nagasaka, Yokosuka, Kanagawa, 240-0196 Japan

Recently, it has been reported that the primary water stress corrosion cracking (PWSCC) has occurred in nickel based alloy weld components such as steam generator safe end weld, reactor vessel safe end weld, and so on, in PWR. Defect detection and sizing are important in order to ensure the reliable operation and life extension of nuclear power plants. In the reactor vessel safe end weld, it was impossible to measure crack depth of PWSCC. The cracks have occurred in the axial direction of the safe end weld. Furthermore, the cracks had some features such as deep, large aspect ratio (ratio of crack depth and length), sharp geometry of crack tip, and so on. Therefore, development and improvement of defect depth sizing capabilities by ultrasonic testing (UT) have been required. Phased array UT technique was applied with regard to defect depth sizing at the inside inspection in Ni-based alloy welds. Phased array UT was examined a standard block specimen with side drilled holes (SDHs). From the experimental results, the performance of linear array probes and dual matrix array probe were investigated. In the basis of the results, UT procedure for defect depth sizing was investigated and proposed. The UT procedure was applied to the defect depth measurement in Ni-based alloy weld specimen with electric discharge machine (EDM) notches. From these results, good accuracy of defect depth sizing by phased array UT for the inside inspection was shown. Therefore, it was clarified the effectiveness of the UT procedure for defect depth sizing in Ni-based alloy weld.

Key Words : Ni-Based Alloy Weld, Primary Water Stress Corrosion Cracking, Phased Array UT Technique, Crack Depth Sizing, UT Procedure for Crack Depth Sizing

1. 結 言

原子力プラントの主要構造物の溶接部は、供用期間中検査の体積検査として超音波探傷試験が行われており、万一き裂が検出された場合には、き裂深さを測定し、その結果をもとに（一社）日本機械学会 発電用原子力設備規格 維持規格⁽¹⁾に従って健全性評価を行い、その後の運用（補修、取替等）を決めている。そのため、き裂深さを高精度に測定することは、構造物の健全性評価にとって極めて重要である。

近年、国内外の加圧水型原子力発電プラント（以下、PWR）の 600 系ニッケル基合金溶接部において、一次冷却水環境下での応力腐食割れ（PWSCC）の発生が報告され⁽²⁾、原子炉容器管台では、き裂開口面側からの超音波探傷試験（以下、UT）により SCC き裂の深さ測定が困難な事例⁽³⁾が報告された。検出されたき裂は、アスペクト比（き裂深さと表面き裂長さの比）が大きく、先端が尖った形状を有していたこと、溶接金属組織部からのノイズ信号が大きく、き裂先端部からの端部エコーが検出困難であったことなどが、その要因とされている⁽⁴⁾。

ニッケル基合金溶接部のき裂開口面側からの UT によるき裂深さ測定法としては、従来から固定角縦波斜角探傷法が適用されているが、ニッケル基合金溶接部の溶接金属組織（柱状晶組織）が異方性材料であるため、超音

* 原稿受付 2013 年 5 月 20 日

^{*1} 正員, (一財)電力中央研究所 (〒240-0196 神奈川県横須賀市長坂 2-1-6)
E-mail: hirasawa@criepi.denken.or.jp

波入射により超音波の屈曲・減衰が大きく、き裂先端部からの端部エコーを検出することが難しい場合がある。さらに SCC き裂は、深さ方向への進展過程で、分岐、傾斜など複雑な形態を示すため、端部エコーを適正に検出するためには、探傷角度の異なる多数の探触子を用いて探傷を行う必要があるが、多数の探触子を交換しながら探傷を行うため多くの検査時間が必要となり実用的ではない。

一方、フェーズドアレイ UT は、アレイ探触子の各振動子からの送信および受信タイミングの制御により、探傷角度と集束位置を任意に設定でき、かつ強い超音波を入射させることができる方法であり、一つの探触子で同時に複数条件の探傷が可能であること、探傷結果を画像化して構造物内部を可視化できること等の特徴有することから、近年、オーステナイト系ステンレス鋼溶接部やニッケル基合金溶接部に発生する SCC き裂の深さ測定に対して、多くの機関で、き裂深さサイジング技術向上のための研究開発が行われている⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾。また実機への適用も一般的に行われており、スタブチューブ下部溶接部への適用例⁽⁸⁾では、ニッケル基合金溶接部に対してき裂開口面側からフェーズドアレイ UT を適用し、き裂深さを高精度に測定できたことが報告されている。しかしながら、この溶接部は板厚が 30mm 程度であるのに対して、本研究で対象とする溶接部の厚さは 80mm 程度と厚いため、超音波の散乱・減衰が大きく SN 比が低下しき裂先端からの端部エコーの検出性の低下が懸念される。さらにき裂先端の端部エコーと材料ノイズエコーの識別性が低下し、き裂の誤検出、見逃しの可能性も懸念される。

そこで、本研究では、き裂開口面側からのフェーズドアレイ UT 法によるき裂深さ測定として、板厚の 1/2 程度の深さまでの広い範囲を対象とし、き裂の大小判別、き裂の誤認識・見逃しの低減を図る方法を検討し、欠陥深さ測定要領をまとめフローとして提案した。さらに、異なる深さの EDM ノッチを付与したニッケル基合金溶接部試験体に対して、前記欠陥深さ測定要領に従って深さ測定を行い、欠陥深さ測定精度を評価し、その結果から、提案した欠陥深さ測定要領の有効性を明らかにした。

2. き裂深さ測定要領の概念

本研究対象である、ニッケル基合金溶接部に生じるき裂の深さ測定における課題は、以下のことがあげられる。

- ① 浅い欠陥から深い欠陥の深さ測定が困難。
- ② き裂先端の端部エコーは、溶接金属組織の影響を受けて SN 比が低下。
- ③ 端部エコーと材料ノイズエコーの識別性が低下し、き裂の誤検出、見逃しが発生。

ここでは、上記課題を改善し、高精度なき裂深さ測定を可能とする探傷要領を検討し、構築することとした。

なお、上記①については、本研究の対象であるニッケル基合金溶接部の板厚が 80mm 程度と厚いこと、また検査対象である溶接金属部は、超音波の減衰・散乱が大きく難探傷部位であることを考慮し、き裂深さが板厚の 1/2 程度（40mm 程度）までの広い範囲に発生するき裂を対象とすることとした。

上記①および②の課題については、探傷領域を板厚方向に領域分けし、それぞれの領域について選定した探触子を用いて探傷性能を明らかにする。著者らは、深さが 20mm 程度までのき裂については、2 種類のアレイ探触子を選定し良好な結果を得ているため⁽⁹⁾、これらの探触子を選定することとした。また、深さが 20mm 程度を越えるき裂については、SN 比の高い端部エコーを検出するために高パワー型のアレイ探触子（2 分割型マトリクスアレイ探触子）を選定することとした。選定されたアレイ探触子は、横穴試験体を用いて超音波ビームの集束特性を評価し、その結果に基づいて探傷条件の絞り込みを行う。

次に、上記③の課題については、UT により表面き裂情報（き裂位置およびき裂長さ）およびき裂の内部情報（き裂プロファイルおよび深さ位置）を収集し、両者の UT データを照合してこれらが同一のき裂であるか否かを評価することについて検討する。また、複数のアレイ探触子で得られた情報から、き裂の大小判別を行う方法を検討する。これにより、き裂の誤認識およびき裂の見逃しの低減を図ることが可能となる。

上記課題を改善するための方法をき裂深さ測定要領としてまとめることとする。

以上、述べた考え方にに基づき、第 3 章では、各種アレイ探触子の超音波ビーム集束効果から導き出した最適探傷条件について記載し、第 4 章では、欠陥情報の把握（欠陥位置、長さおよびプロファイル）、欠陥の大小判別方法について記載し、第 5 章では、第 3 章と第 4 章の結果をもとに欠陥深さ測定要領をフローとしてまとめ、このフローに示した測定手順をステップごとに記載した。さらに、第 6 章では、EDM ノッチ付与のニッケル基合金溶

接部試験体に対して、フェーズドアレイ UT 法を適用し、前記欠陥深さ測定要領に従って深さ評価を行い、深さ測定精度を評価するとともに、その結果から提案した深さ測定要領の有効性についての検討結果を記載した。

3. 探傷条件の最適化

3・1 探傷装置および試験体

用いた探傷装置は、フェーズドアレイ UT 装置 (DynaRay256/256 : Zetec 社製) である。

適用したアレイ探触子は 3 種類で、仕様および適用対象を表 1 に示す。表より、1 番目の探触子 (以下、略号 2L(10)) は、公称周波数 2MHz、振動子寸法 10mm×0.8mm、チャンネル数 64ch で、浅いき裂の探傷用 (深さ 10mm 程度) である。2 番目の探触子 (以下、略号 2L(20)) は、公称周波数 2MHz、振動子寸法 20mm×0.6mm、チャンネル数 64ch で、中程度の深さの探傷用 (深さ 20mm 程度) である。次に、3 番目の探触子 (以下、略号 2MPC) は、マトリクスアレイ探触子を 2 個配置したピッチキャッチ探傷法用の探触子である。1 個のマトリクスアレイ探触子は、公称周波数 2MHz、振動子寸法 3.1mm×3.1mm、チャンネル数 72ch である。この探触子は深いき裂探傷用 (深さ 20~40mm 程度) として選定した。

探傷性能評価に用いた試験体は、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L の横穴試験体である。図 1 に試験体の形状、寸法を示す。試験体には、直径は 2mm で板幅方向に貫通の横穴が 9 個付与されている。ここで、横穴中心の深さ位置 Z は、Z=3, 5~40 (5mm ピッチ) である。

探傷は、図 2 に示すように、樹脂製ウェッジを装着したアレイ探触子を横穴試験体上に走査して行った。探傷条件は、振動モードは縦波、屈折角 θ は、 $\theta=30\sim80^\circ$ (1° ピッチ) とし、ギャップ法 (ギャップ寸法: 0.2mm) にて行った。探傷データの採取は、アレイ探触子を X-Y スキャナで矩形走査した自動 UT で行い、横穴からの反射波のエコー高さを測定し、反射エコー強度に及ぼす集束深さの影響について調べた。

Table 1 Specification of phased array probes

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

Fig.1 Standard block with side drilled holes

Fig.2 Schematic illustration of UT inspection

3・2 アレイ探触子 2L(10) の探傷性能

アレイ探触子 2L(10)の探傷性能を、図 1 に示す横穴試験体を用いて調べた。探傷に当たり、アレイ探触子 2L(10)の開口寸法について検討した。アレイ探触子は、浅い欠陥の深さ測定用（深さ 10mm）として選定した探触子である。一般に、開口寸法を大きくすると集束強度を大きくすることが可能であるが、表面の不感帯も大きくなり、表層の浅い欠陥の検出が困難となる。そこで、表面の不感帯を 2mm 程度に抑える条件として、アレイ探触子 2L(10)の開口寸法は 10mm×12.8mm に設定した。探傷性能試験では、開口寸法を前記寸法に固定し、集束深さを $F=10, 20, 30\text{mm}$ と変えて行った。

探傷結果の代表例を図 3 に示す。図には、屈折角 45° における探傷断面画像（B スコープ；上段）と横穴からの反射エコー高さ分布（反射エコーのエンベロープ：下段）を示してある。反射エコー強度は、横穴中心の深さ位置 $Z=3\text{mm}$ の横穴からが最も大きく、横穴の深さ位置が大きくなるに従い減少し、かつ超音波ビームの広がりも大きくなる傾向が認められる。

次に、各横穴からの反射エコーの最大振幅を測定し、横穴中心の深さ位置 Z との関係調べた。その結果を図 4 に示す。ここで、図は、基準反射源（横穴）からの最大エコー高さに基づいて校正された基準曲線で距離振幅補正曲線（DAC）と称し、本論文では探傷条件の比較評価に用いた。図 4 より、横穴からの反射エコー高さは、集束深さ F に依らず、横穴中心の深さ位置 Z が大きくなるに従い減少する傾向を示す。ここで、集束深さ $F=10, 20, 30\text{mm}$ の結果をみると、エコー高さに大きな違いは認められなかった。そこで、アレイ探触子 2L (10) は浅い欠陥（深さ 10mm）測定用として選定したことを考慮して、探傷条件として、開口寸法を 10mm×12.8mm、集束深さを $F=10\text{mm}$ に選定した。

Fig.3 Effect of focal depth of phased array probe 2L(10)

Fig.4 DAC curve of phased array probe 2L(10)

3・3 アレイ探触子 2L(20) の探傷性能

横穴試験体を用いてアレイ探触子 2L(20)の探傷性能を調べた。アレイ探触子 2L(20) は、中程度の深さ測定用（深さ 20mm）として選定した探触子であり、開口寸法は、既報⁹⁾の結果をもとに 20mm×19.2mm（32ch）に設定し、集束深さを $F=10, 20, 30\text{mm}$ と変えて横穴からの反射エコーを測定した。探傷結果の代表例を図 5 に示す。図には、アレイ探触子 2L(10)と同様、屈折角 45° における探傷断面画像（B スコープ；上段）と横穴からの反射エコー高さ分布（反射エコーのエンベロープ：下段）を示してある。図より、横穴からの反射エコーは、横穴の深さ位置が大きくなるに従い減少する。また、すべての横穴（横穴中心の深さ位置 $Z=3\sim 40\text{mm}$ ）から反射エコーのピークが認められており、アレイ探触子 2L(10)に比べて板厚方向の広い範囲で集束効果が大きいことがわかる。

次に、各横穴からの反射エコーの最大振幅を測定し、横穴中心の深さ位置 Z との関係性を調べた。測定結果の代表例を図 6 に示す。図は屈折角 45° の結果であり、横穴からの反射エコー高さは、集束深さ F に依らず、 Z が大きくなるに従い減少する傾向を示す。ここで、 $Z=10\sim 30\text{mm}$ の範囲では、 $F=20\text{mm}$ のエコー高さは、 $F=10\text{mm}$ および 30mm に比べて若干大きい、その差はエコー高さの比率で 1.1 倍程度（約 1dB）であった。これらの結果から、アレイ探触子 2L(20)は、中程度の深さ測定用（深さ 20mm）の探触子であることも考慮して、探傷条件は、開口寸法 20mm×19.2mm、集束深さ $F=20\text{mm}$ を選定した。

Fig.5 Effect of focal depth at phased array probe 2L(20)

Fig.6 DAC curve of phased array probe 2L(20)

3・4 アレイ探触子 2MPC の探傷性能

2分割型マトリクスアレイ探触子 2MPC を用いた探傷は、強い超音波ビームを入射することを目的としてアレイ探触子の全素子 (72ch) を用いたピッチキャッチ法にて行った。横穴試験体の探傷では、送受信の開口寸法を $37.2\text{mm} \times 18.6\text{mm}$ (72ch) に固定し、集束深さを $F=10, 20, 30, 40\text{mm}$ と変えて、横穴からの反射エコーを測定した。代表的な測定結果を図 7 に示す。図は、屈折角 45° における探傷断面画像 ((B スコープ; 上段) と横穴からの反射エコー高さ分布 (反射エコーのエンベロープ: 下段) である。図より、集束深さ $F=10 \sim 40\text{mm}$ の範囲では、横穴からの反射強度は、 F と同じ横穴中心の深さ位置 Z で最も高くなっており、超音波ビームの集束効果が良好に得られていることがわかる。

次に、各横穴からの反射エコーの最大振幅を測定し Z との関係調べ、代表的な測定結果を図 8 に示す。図は、屈折角 45° の結果であり、 $F=10 \sim 40\text{mm}$ における横穴からの反射エコー高さは、それぞれ最大振幅を 100% として規格化して示している。また、図中の点線は、最大振幅 (100%) から -3dB (約 70%) のラインであり、 $F=20, 30, 40\text{mm}$ で探傷を行うことで、深さが $20 \sim 40\text{mm}$ の範囲の欠陥に対してほぼ同一の感度で探傷することが可能となり、この範囲において欠陥端部の検出性を向上させることが可能となる。これらの結果から、2MPC の探傷条件を、開口寸法 $37.2\text{mm} \times 18.6\text{mm}$ (72ch)、集束深さ $F=20, 30, 40\text{mm}$ として選定した。また、図 8 より、横穴中心の深さ位置 $Z=3\text{mm}$ および 5mm では、反射エコーが検出されず、この条件では深さ 10mm 程度以下を不感帯として評価した。

ここで、アレイ探触子 2L(10)、2L(20) および 2MPC の探傷結果から、選定した探傷条件をまとめ表 2 に示す。

Fig.7 Effect of focal depth at phased array probe 2MPC

Fig.8 DAC curve of phased array probe 2MPC

Table 2 Phased array UT conditions at 2L(10), 2L(20) and 2MPC

Array probe	Active aperture (mm)	Focal depth (mm)
2L(10)	12.8×10	$F=10$
2L(20)	19.2×20	$F=20$
2MPC	37.2×18.6	$F=20, 30, 40$

4. 欠陥情報の把握

UT による欠陥深さ測定において、複数の探傷データから欠陥情報を把握し、評価すべき指示が欠陥かノイズかを判断できれば、欠陥の誤認識あるいは欠陥の見逃しが低減される。また、欠陥の大小判別が可能になれば、欠陥深さ測定において有用な情報となる。これらを可能とすることで、高精度な深さ測定が可能となる。

そこで、これら欠陥情報を把握するための方法について検討した。

4・1 欠陥位置および欠陥長さの把握

対象表面の欠陥情報を得るために、浅いき裂の深さ測定を目的としたアレイ探触子 2L(10)の探傷データを用いて検討した。アレイ探触子 2L(10) の探傷は、探傷屈折角 θ を $\theta=30\sim80^\circ$ (1° ピッチ) に設定したセクター走査による探傷方式で行っており、これらの探傷データの中から、屈折角 70° 成分 (クリーピング波) に着目し、欠陥の表面近傍 (欠陥開口部近傍) の情報を抽出することとした。

アレイ探触子 2L(10)を用いて、溶接線直交方向に深さ 2mm の EDM ノッチ (半楕円形状) を付与したニッケル基合金溶接部試験体に適用した。表 2 に示す条件で探傷したときに得られた屈折角 70° の探傷画像を図 9 に示す。図において、断面画像 (B スコープ) には EDM ノッチの開口部エコー (図中の○印) が認められ、ノッチの表面位置が把握できる。また、平面画像 (C スコープ) では、探傷面における欠陥の位置と長さが把握できる。さらに、超音波ビーム入射方向から見た投影画像 (D スコープ) では、半楕円形状を表す指示 (図中に点線で輪郭を記載) が認められ、付与ノッチと類似の欠陥プロファイルの推定が可能となる。

このように、屈折角 70° の画像表示 (B, C, D スコープ) を観察することで、欠陥位置、概略欠陥長さおよび欠陥のプロファイル等の欠陥情報が把握でき、試験体内部の指示と欠陥情報を照合することで、欠陥深さ測定において、端部エコーと推定される指示が欠陥かノイズかを判断することができる。その結果、欠陥の誤検出あるいは欠陥の見逃しの低減を図ることができる。

Fig.9 Typical inspection image of nickel based alloy weld with EDM notched at 2L(10)

4・2 欠陥深さの大小判別

対象とするニッケル基合金溶接部は、超音波異方性を有し、かつ超音波散乱・減衰の大きい材料であるため、欠陥深さ測定時に欠陥の端部エコーと材料ノイズエコーの識別性が低下し、欠陥の誤認識や見逃しを引き起こす場合が想定される。このような場合に欠陥の大小判別を行うことが可能であれば、端部エコーの検出にとって有用となり、最終的にはき裂深さ測定精度の向上にも繋がる。

そこで、欠陥深さの大小判別を行うために、アレイ探触子 2L(10)と 2MPC の探傷データを用いた方法について検討した。

ニッケル基合金溶接部の溶接線直交方向に深さ 5mm と 20mm の EDM ノッチ（半楕円形状）を付与した試験体に対して、アレイ探触子 2L(10)と 2MPC を適用した。代表的な断面画像（B スコープ）を図 10 に示す。図には、アレイ探触子 2L(10)では屈折角 70° のデータを、またアレイ探触子 2MPC では屈折角 45° のデータを示してある。図より、深さ 5mm のノッチに対して 2 つの探触子の B スコープ画像を見ると、アレイ探触子 2L(10)では、ノッチの開口部エコーが観察されているのに対して、アレイ探触子 2MPC では、ノッチの指示が観察されなかった（図中の○印が欠陥の指示が出現する領域）。アレイ探触子 2MPC は、第 3 章の結果から不感帯が 10mm 程度以下であることから、深さ 5mm の EDM ノッチは、深さ 10mm 程度以下であると判断できる。一方、深さが 20mm の EDM ノッチの B スコープ画像をみると、アレイ探触子 2L(10)では、断面画像（B スコープ）にノッチの開口部エコーが認められ、またアレイ探触子 2MPC では、欠陥端部エコーが深さ 20mm 近傍に認められた。この結果から、このノッチは、深さ 10mm 以上であり深さ 20mm 程度と推定される。

これらの結果から、アレイ探触子 2L(10)で指示が認められ、アレイ探触子 2MPC で指示が認められなかった場合は、欠陥深さは 10mm 程度以下と評価し、アレイ探触子 2L(10)および 2MPC の両方で指示が認められた場合は、欠陥深さは 10mm 程度以上と評価する。このような方法を適用することで、対象欠陥に対して大小判別が可能となる。

次に、欠陥の深さ測定方法について記載する。ここでは、一例として EDM ノッチ深さ 20mm の場合の場合について記載する。図 11 には、アレイ探触子 2MPC を用い、集束深さを $F=10\text{mm}$ 、 20mm および 30mm と変えて探傷した時の断面画像を示す。図は屈折角 45° における画像であり、欠陥の端部エコーは集束深さ F に依らず、深さ 20mm 程度の位置に検出された。そこで、欠陥深さ測定には、集束深さのことなる 3 つのデータの中から $F=20$ のデータを採用し、深さ測定を行った結果、ノッチ深さは 21.0mm と評価した。

上記方法により、欠陥深さの大小が判別可能となり、さらに欠陥深さが測定可能となる。

Fig.10 B-scan images of EDM notch by phased array UT (Array probe : 2L(10), 2MPC)

Fig.11 B-scan images of EDM notch by phased array UT
(Array probe : 2MPC, Refraction angle : 45deg, Focal depth : $F=10, 20, 30\text{mm}$)

5. 欠陥深さ測定要領の構築

第4章では、アレイ探触子 2L(10), 2L(20)および 2MPC を用いたフェーズドアレイ UT による探傷結果から、各探触子の適用範囲を明らかにし、欠陥情報の把握方法および欠陥深さの大小判別方法について記載した。

これらの結果をもとに、ニッケル基合金溶接部の欠陥開口面側探傷における欠陥深さ測定に関する測定要領を検討し、フローとして纏めた。欠陥深さ測定要領のフローを図 12 に示す。

本フローを適用する際の探傷条件は、以下の通りである。

フェーズドアレイ UT によるアレイ探触子の走査は、溶接線に対して直交方向に進展するき裂を対象とするため、溶接線平行方向の矩形走査とし、探傷は、セクター走査で、探傷屈折角は、 $\theta=30^{\circ} \sim 80^{\circ}$ ($30^{\circ} \sim 70^{\circ}$ も可とする) とする。また、UT データの採取は X-Y スキャナを用いた自動探傷とし、探傷波形 (A スコープ)、探傷画像 (B, C, D スコープ) にて解析評価を行うこととする。

図 12 に示す欠陥深さ測定のフローについて、ステップごとにその要点を記載する。

・ステップ 1

選定した 3 種類のアレイ探触子を用いて探傷し、データ収録を行う。ここで、適用するアレイ探触子は、板厚方向に領域分けし、浅い領域は、①小型アレイ探触子を、深い領域は、③2 分割型マトリクスアレイ探触子を、その中間領域は、②中型アレイ探触子である。なお、適用周波数は 2MHz とする。

探傷は、セクター走査とし、屈折角は $\theta=30^{\circ} \sim 80^{\circ}$ ($30^{\circ} \sim 70^{\circ}$ も可) で行う。探傷屈折角には、き裂検出用として 70° 、深さ評価用として 45° および 60° が含まれていることとする。また、対象部位に対して両方向から探傷し、き裂が深さ方向に傾いて進展する場合にも対応できるようにする。

・ステップ 2

ここでは、き裂の位置および概略長さ情報を抽出する。①小型アレイ探触子で採取した探傷データから屈折角 70° の探傷画像 (B, C, D スコープ) を表示し、これらの画像から欠陥の位置、概略長さおよび欠陥のプロファイル等の欠陥情報を把握する。これらのデータを深さ測定時に得られた試験体内部の UT 指示と照合し、両者の指示が試験体表面から内部にわたる同一な欠陥であるか否かを判断する。

・ステップ 3

アレイ探触子①、②、③の探傷画像から、き裂の大小の判別を行う。

最初に、小型アレイ探触子①の屈折角 70° の探傷画像 (B, C, D スコープ) から、表面き裂情報を取得する。中型アレイ探触子②では、屈折角 45° の探傷画像から、き裂面あるいはき裂端部エコーを検出する。2 分割型マトリクスアレイ探触子③では、屈折角 45° の探傷画像から、き裂面エコーあるいはき裂端部エコーを検出する。

各アレイ探触子①、②、③の探傷結果を 3 つのパターン (A, B, C) に分けてき裂の大小判別を行う。

パターン A は、アレイ探触子①で欠陥指示あり (図中の○)、アレイ探触子②で指示なし (図中の×)、アレイ探触子③で指示なし (図中の×) と評価された場合で、この場合は浅いき裂と評価する。

パターン B は、アレイ探触子①で欠陥指示あり (図中の○)、アレイ探触子②で指示あり (図中の○)、アレイ探触子③で指示なし (図中の×) と評価された場合で、この場合も浅いき裂と評価する。

パターン C は、アレイ探触子①で欠陥指示あり (図中の○)、アレイ探触子②で指示あり (図中の○)、アレイ探触子③で指示なし (図中の○) と評価された場合で、この場合は深いき裂と評価する。

ここで、浅いき裂と深いき裂の境界は、2 分割型マトリクスアレイ探触子の不感帯領域 10mm 程度である。

・ステップ 4

ここでは、き裂深さの詳細解析を行う。

き裂深さ測定では、収録した膨大なデータを解析評価する必要があるが、効率的な測定を行うために、予め評価用基本屈折角を設定して解析を行う。評価用屈折角は、①小型アレイ探触子では、 60° および 45° 、②中型アレイ探触子および③2 分割型マトリクスアレイ探触子では、 45° とする。

詳細解析では、探傷波形データ（A スコープ）および探傷画像（B, C 及び D スコープ）から、き裂指示（き裂面および端部からの指示）の発生状況、き裂指示の連続性等を確認するとともに、疑似エコー（材料ノイズエコー）との識別を行い、端部エコー法にて深さ測定を行う。

ステップ3で浅いき裂（深さ 10mm 程度以下）と評価された欠陥については、①小型アレイ探触子のデータを用いて深さ測定する。さらに、②中型アレイ探触子のデータについてもき裂深さを測定し、小型アレイ探触子によるき裂深さと比較、評価し、両者で整合性があることを確認する。

また、ステップ3で深いき裂（深さ 10mm 程度以上）と評価された欠陥については、③2 分割型マトリクスアレイ探触子の探傷データを用いて深さ測定する。ここでは、複数の集束条件（F=10, 20, 30, 40mm）の探傷データの解析から求めたき裂深さが、集束深さ位置とほぼ同じであるデータを評価深さとするすることで、高精度な評価が可能となる。さらに、②中型アレイ探触子の探傷データからき裂深さを求め、③2 分割型マトリクスアレイ探触子の探傷データと比較し、き裂の存在を確認する。

・ステップ5

ステップ4の結果から、最終的なき裂深さを求める。

Fig.12 Flowchart of defect depth sizing procedure by Phased Array UT

6. 欠陥深さ測定要領の検証

6・1 試験体および探傷装置

用いた試験体は、突合せ溶接部の溶接線直交方向に EDM ノッチが付与されているニッケル基合金溶接部試験体である。試験体形状の一例を図 13 に示す。また、表 3 には試験体に付与した EDM ノッチ付与条件を示す。EDM ノッチは、深さが 2, 5, 7, 10, 15, 20, 30, 40mm で、長さはすべて 10mm である。またノッチ形状は半楕円形状である。

試験装置は、第 2 章で用いたフェーズドアレイ UT 装置であり、また、適用したアレイ探触子は、表 1 に示すような小型アレイ探触子 2L(10)、中型アレイ探触子 2L(20)および 2 分割マトリクスアレイ探触子 2MPC である。

探傷は、直接接触法（ギャップ法、ギャップ寸法：0.2mm）とし、探傷面は EDM ノッチの開口面側で、探傷方向は EDM ノッチに対して両方向とし。アレイ探触子の走査は、X-Y スキャナによる矩形走査で行った。

ニッケル基合金溶接部 EDM ノッチ付与試験体に対して、フェーズドアレイ UT を適用し、図 13 に示す深さ測定要領に従って探傷および解析し、欠陥深さ測定を行った。

6・2 試験結果および考察

EDM ノッチを付与したニッケル基合金溶接部試験体に対してフェーズドアレイ UT を適用し、図 12 に示す欠陥深さ測定要領に従って深さ測定を行った。得られた探傷画像の一例を図 14 に示す。図は、各ノッチに対して最終的に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、開口部エコーおよび端部エコーを矢印および丸印で示してある。図より、すべての B スコープ画像には、開口部エコーおよび端部エコーが明瞭に認められた。この結果から、2mm 以上のノッチをすべて検出することができたといえる。ここで、深さ 2mm～15mm のノッチは、小型アレイ探触子 2L(10)の結果であり、深さ測定に用いた屈折角は、深さ 2mm では 60° 、深さ 5mm 以上は 45° である。また、深さ 20mm～40mm のノッチは、2 分割マトリクスアレイ探触子 2MPC の結果（屈折角： 45° ）である。深さ 5mm～40mm のノッチのすべての B スコープ画像に端部エコーが認められた。

端部エコーが検出された深さ 5mm～40mm のノッチに対して、端部エコー法により深さ測定を行い、実ノッチ深さとの関係で図 15 に示す。データ数は少ないが、統計的な誤差評価を行った結果、誤差平均は 0.91mm、RMS 誤差は 1.03mm であった。ここで、深さ測定誤差である RMS 誤差 1.03mm は、ASME Code Sec. XI App. VIII⁽¹⁰⁾ の性能実証（PD：Performance Demonstration）時の合格基準である RMS 誤差 3.2mm と比べると、極めて良好な精度で評価されたといえる。

上記結果で、欠陥深さが良好な精度で評価されたことから、提案したフェーズドアレイ UT によるき裂深さ測定要領が、深さ測定に対して有効な方法であることが明らかとなった。

一方、実機プラントで生じる欠陥は SCC き裂であり、SCC き裂に対する深さ測定評価が必要である。今後、SCC き裂に対する本提案手法の有効性について検討する予定である。

Fig.13 Nickel based alloy weld specimen with EDM notches in weld metal area

Table 3 EDM notch conditions of nickel based weld specimen

Area	Direction	Depth (mm)	Length (mm)	Shape
Weld metal	Axial	d=2,5,7,10,15,20,30,40	L=10	Semi-ellipse

Fig.14 B-scan images of EDM notch specimen by Phased Array UT

Fig.15 EDM notch depth sizing accuracy by Phased Array UT

7. 結 言

ニッケル基合金溶接部に発生する欠陥に対して、欠陥開口面側からの UT による高精度な深さ測定法を開発することを目的に、フェーズドアレイ UT による欠陥深さ測定要領を提案した。さらに、深さの異なる EDM ノッチを付与したニッケル基合金溶接部試験体に適用し、欠陥深さ測定精度を明らかにするとともに、欠陥深さ測定要領の有効性を明らかにした。これらの知見を以下にまとめる。

- (1) 対象部位の板厚の半分程度 (40mm) の欠陥に適用するため、選定した 3 種類のアレイ探触子の探傷試験結果から、各々のアレイ探触子における板厚方向の適用範囲および探傷条件を明らかにした。
- (2) 適用したアレイ探触子の探傷画像 (B, C, D スコープ表示) から、欠陥情報 (欠陥位置および概略欠陥長さ) の把握および欠陥大小の判別が可能な欠陥深さ測定要領を提案し、フローとしてまとめた。
- (3) フェーズドアレイ UT をニッケル基合金溶接部 EDM ノッチ付与試験体に適用し、提案した欠陥深さ測定要領に従って探傷・解析・評価した結果、ノッチ深さ 5mm~40mm の範囲で深さ測定が可能であり、深さは、誤差平均 0.91mm, RMS 誤差 1.03mm と良好な精度で評価できた。
- (4) 上記フェーズドアレイ UT の適用結果から、提案した欠陥深さ測定要領の有効性を明らかにした。

謝 辞

本研究の遂行に多大な尽力を頂いた客員研究員 岡田久雄氏 (現, (株) 検査技術研究所) に感謝の意を表す。

文 献

- (1) 発電用原子力設備規格 維持規格 (2008 年度版) JSME S NA1-2008 (2008), 日本機械学会
- (2) 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)
- (3) 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)
- (4) 西田純一郎, 川浪精一, 黒川政秋, 井出尾光司, 松浦貴之, 平野伸郎, 瀬良健彦, “セーフエンド溶接部に対する UT サイジング手法の高度化”, 日本保全学会 第 6 回学術講演会要旨集, (2009), pp.236-240
- (5) 平澤泰治, “原子力プラント用フェーズドアレイ超音波探傷技術”, 東芝レビュー, Vol.60, No.10, (2005), p.48
- (6) (独)原子力安全基盤機構, “平成 20 年度 ニッケル基合金溶接部の非破壊検査技術実証事業に関する事業報告書”, (2009)
- (7) 平澤泰治, 古村一朗, 成瀬克彦, “フェーズドアレイ UT 法を用いたインコネル溶接部欠陥検査への適用”, 日本非破壊検査協会 第 8 回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集, (2001), Vol.8, pp.131-134
- (8) T. Hirasawa, K. Naruse, I. Komura, S. Yamamoto, Y. Yuguchi, T. Ohtsubo, “Phased Array Application for Hamaoka-1 CRD Housing Stub-tube Inconel Welds”, 3rd EPRI Phased Array Inspection Seminar, (2003)
- (9) 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フェーズドアレイ UT 法の適用性評価”, 日本保全学会 第 7 回学術講演会要旨集, (2010), pp.61-66
- (10) “Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components”, ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. XI Appendix VIII, (2006)