

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

Development of Phased Array UT procedure for Crack Depth Sizing
on Nickel Based Alloy Weld

財団法人 電力中央研究所 平澤 泰治 Taiji HIRASAWA Member
財団法人 電力中央研究所 岡田 久雄 Hisao OKADA
財団法人 電力中央研究所 福富 広幸 Hiroyuki FUKUTOMI

Recently, it is reported that the primary water stress corrosion cracking (PWSCC) has been occurred at the 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 is 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 crack was detected in the axial direction of the safe end weld. Furthermore, the crack had some features such as shallow, large aspect ratio (ratio of crack depth and length), sharp geometry of crack tip, and so on. Therefore, development and improvement of defect detection and sizing capabilities for ultrasonic inspection technique is required. Phased array UT technique was applied to nickel based alloy weld specimen with SCC cracks. From the experimental results, good accuracy of crack depth sizing by phased array UT for the inside inspection was shown. From these results, UT procedure for crack depth sizing was verified. Therefore, effectiveness of phased array UT for crack depth sizing in the nickel based alloy welds was shown.

Keywords: Ni Based Alloy Weld, Phased Array UT Procedure, Crack Depth Sizing, PWSCC

1. 緒言

近年、国内外の加圧水型原子力発電プラントの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[1]、原子炉容器管台溶接部では、超音波探傷試験(UT)により、SCCき裂の深さ測定が困難な事例が報告された[2]。検出されたき裂は、表面長さが短く巾着状の深いき裂であったため、従来のUTでは、深さ測定が困難であったとされている[3]。

従来、ニッケル基合金溶接部は、溶接金属組織(柱状晶組織)の異方性から超音波難探傷材と言われている。これは、溶接金属組織における超音波の屈曲、減衰に加えて、溶接金属組織からの材料ノイズエコーにより、端部エコーの検出性が低下し、深さ測定が困難となるためである。

フェーズドアレイ UT は、探傷条件の最適化、探傷データの画像化などの特徴を有する技術であり、ニッケル基合金溶接部を対象に、多くの機関で研究開発が行なわれている[4]。

著者らは、これらのき裂を高精度に測定する技術

開発を進めてきた[5]~[9]。前報[7],[8]では、浅いき裂から深いき裂(対象部位の板厚の1/2である40mm程度)の広い範囲を対象とした「欠陥深さ測定要領」を提案し、EDMノッチ付与試験体(深さ5mm~40mm)に対してその有効性を明らかにした。

しかしながら、SCCき裂に対する深さ測定および深さ測定要領の適用性は明らかにされていない。

本報告では、ニッケル基合金溶接部にSCCき裂を付与した試験体を用いて、フェーズドアレイ UT を適用し、き裂深さサイジング性能を明らかにするとともに、き裂深さ測定要領の有効性についても明らかにした。さらに、き裂深さ測定における測定誤差要因を分析し、深さ測定の更なる高精度化についても検討したので、これらの結果について報告する。

2. 試験方法

2.1 供試体

試験体は、SCCき裂を付与したニッケル基合金溶接部試験体であり、試験体の形状、寸法の一例をFig.1に示す。また、Table 1にSCCき裂の付与条件を示す。SCCき裂は、突合せ溶接部およびバタリング部の溶接線直交方向に付与されており、目標深さは3~40mmである。

連絡先: 平澤 泰治, 〒240-0196 横須賀市長坂 2-6-1,
(一財)電力中央研究所 材料科学研究所
電話: 046-856-2121, E-mail: hirasawa@criepi.denken.or.jp

2.2 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、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、直接接触法で X-Y スキャナを用いた自動 UT で行った。

3. き裂深さ測定要領の検証

3.1 き裂深さ測定法

前報[7],[8]では、ニッケル基合金溶接部のき裂深さ測定において、板厚の半分程度の大きさ (深さ 40mm 程度) までの欠陥を対象とした深さ測定要領を提案した。そのフロー図を Fig.3 に示す。

ステップ 1 では、深さ測定領域を板厚方向に領域分けして選定した 3 種類のアレイ探触子を用いて探傷する。ステップ 2 では、アレイ探触子①の UT データをもとに、探傷画像 (C スコープ及び D スコープ画像) から欠陥情報 (欠陥位置、概略長さ等) を把握する。ステップ 3 では、3 種類のアレイ探触子から欠陥検出の有無を評価し、欠陥深さの大小判別を行う。ステップ 4 では、き裂深さの大小判別から選定されたアレイ探触子のデータについて詳細解析を行い、ステップ 5 で、き裂深さを求める。

3.2 き裂深さ測定結果

ニッケル基合金溶接部 SCC き裂付与試験体を用い、Fig.2 に示す欠陥深さ測定要領に従って、深さ測定を行った。

き裂深さ測定の代表例として、浅いき裂の場合および深いき裂の場合の解析例を以下に記載する。

(a) 浅いき裂の解析例

浅いき裂の解析例を Fig.3 に示す。欠陥深さ測定要領のステップ 2 において、①小型アレイ探触子 2L(10) の探傷画像を Fig.3 (a) に示す。C スコープ画像からき裂は、試験体の中央部近傍に位置し、D スコープからき裂の概略形状が確認できた。

欠陥深さ測定要領のステップ 3 において、3 種類のアレイ探触子の探傷画像 (B スコープ) を Fig.3 (b)

に示す。図より、①2L(10) および②中型アレイ探触子 2L(20) の B スコープ画像では、き裂指示が認められたが、③2 分割型マトリクスアレイ探触子 2MPC の B スコープ画像では、き裂指示が認められなかった。この結果から、このき裂は浅いき裂と評価した。

次に、欠陥深さ測定要領のステップ 4 では、ステップ 3 で浅いき裂と評価したことから、①2L(10) および②2L(20) の UT データをもとに、き裂深さ測定を行った。き裂深さは、①2L(10) の詳細解析により 8.6mm と評価された。このき裂は、破壊調査から深さ 6.2mm のき裂であり、UT による深さは、若干過大評価 (誤差+2.4mm) ではあるが、良好な結果であった。

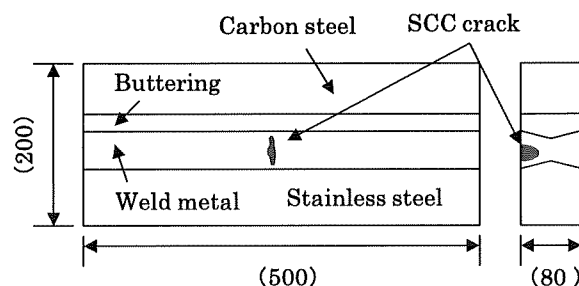


Fig.1 Nickel based alloy weld specimen with SCC cracks in weld metal area

Table 1 SCC crack conditions of nickel alloy weld specimen

Area	Direction	Depth (mm)	Length (mm)
・Weld metal ・Buttering	Axial	d=3~40	10~15

Table2 Specification of phased array probes

	name	Specification	Target
①	2L(10)	Type : Linear (Small size) Freq. : 2MHz Mode : Longitudinal Element size : 10x0.8mm No. of channels : 64ch	Shallow crack
②	2L(20)	Type : Linear (Middle size) Freq. : 2MHz Mode : Longitudinal Element size : 20x0.6mm No. of channels : 64ch	Middle crack
③	2MPC	Type : Dual matrix Freq. : 2MHz Mode : Longitudinal Element size : 3.1x3.1mm No. of channels : 72ch (T/R)	Deep crack

(b) 深いき裂の解析例

深いき裂の解析例を Fig.4 に示す。

ステップ 2 において、アレイ探触子①2L(10)の探傷画像を、Fig.4 (a) に示す。浅いき裂の場合と同様、き裂位置およびき裂形状が確認できる。なお、D スコープ画像からアスペクト比の大きな形状を有していることが推定できる。

ステップ 3 において、3 種類のアレイ探触子の探傷画像 (B スコープ) から、き裂の大小判別を行った結果を、Fig.4 (b) に示す。図の B スコープ画像から、3 種類のアレイ探触子①2L(10)、②2L(20)および③2MPC のいずれも、き裂指示が認められたことから、このき裂は深いき裂と評価した。

次に、ステップ 4 およびステップ 5 では、ステップ 3 で深いき裂と評価したことから、アレイ探触子③2MPC の UT データを用いて深さ測定を行った。その結果、このき裂は深さ 18.3mm と評価され、破壊調査で求めたき裂深さ 19.4mm と比較すると、若干過大評価 (誤差+1.1mm) ではあるが、極めて良好な結果であった。

対象としたすべての SCC き裂は、前記同様、Fig.2 に示す欠陥深さ測定要領に従って深さ評価を行った。各き裂に対して左右両方向からのデータを用い、最終的に深さ評価した探傷画像 (B スコープ) を、Fig.5 に示す。図より、欠陥番号 A~H は、突合せ溶接部の溶接金属部に付与した SCC き裂であり、欠陥番号 I および J は、バタリング部に付与した SCC き裂である。突合せ溶接部とバタリング部の探傷画像 (B スコープ) を比較すると、バタリング部は、突合せ溶接部に比べて、材料ノイズエコーが顕著に認められ、SN 比が低くき裂深さ評価が難しい部位であることがわかる。

UT によるき裂深さサイジング精度は、破壊調査から求めたき裂深さとの比較で評価した。その結果を Fig.6 に示す。統計的な誤差評価を試みた結果、誤差平均は-1.78mm、RMS 誤差は 2.93mm であり、き裂深さは、非常に良好な精度で評価された。ニッケル基合金溶接部の SCC き裂に対する深さ測定誤差は、一般に RMS 誤差 5mm 程度とされており、それに比べて極めて良好であった。

以上の結果から、ニッケル基合金溶接部にフェーズドアレイ UT を適用し、SCC き裂深さを高精度で評価できたことから、本研究で提案した「欠陥深さ測定要領」の有効性が検証されたと言える。

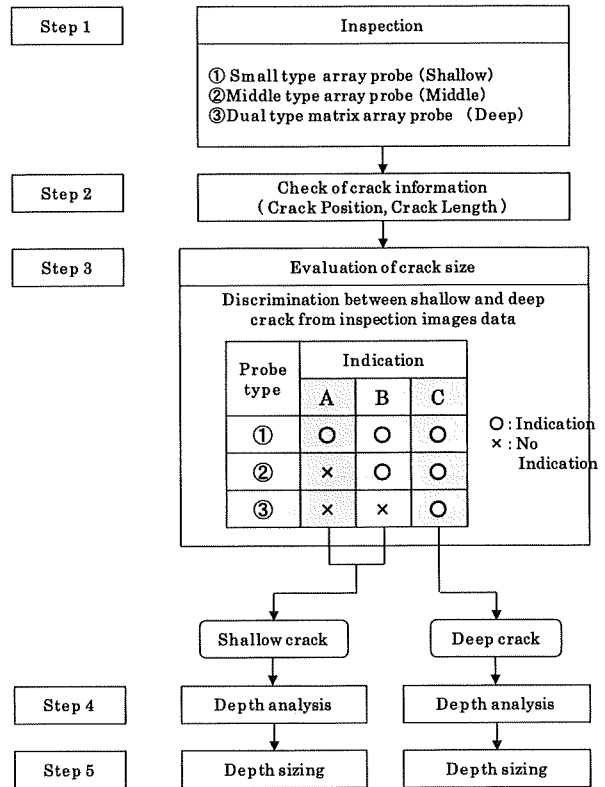


Fig.2 Flowchart of defect depth sizing procedure

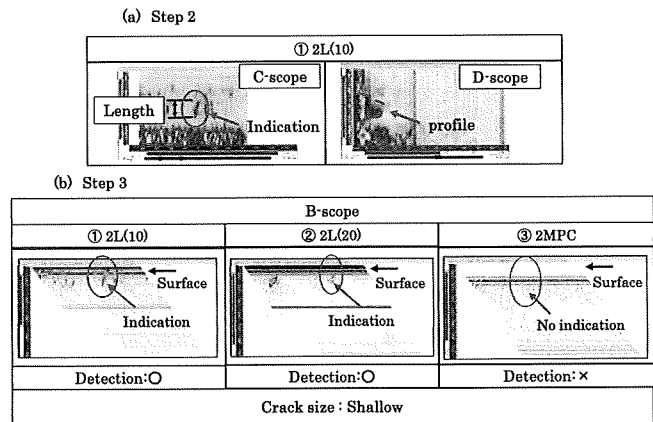


Fig.3 UT procedure for crack depth sizing in shallow crack

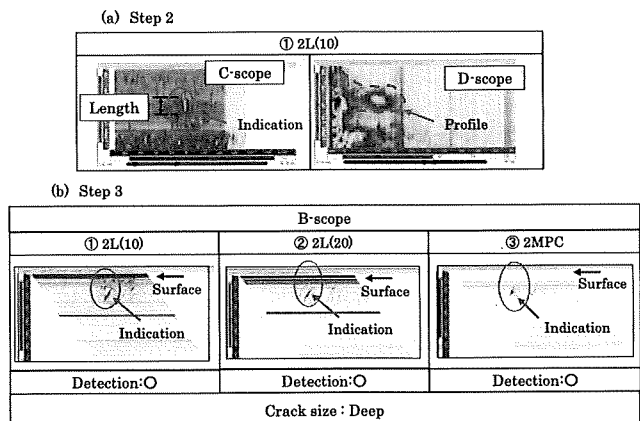


Fig.4 UT procedure for crack depth sizing in deep crack

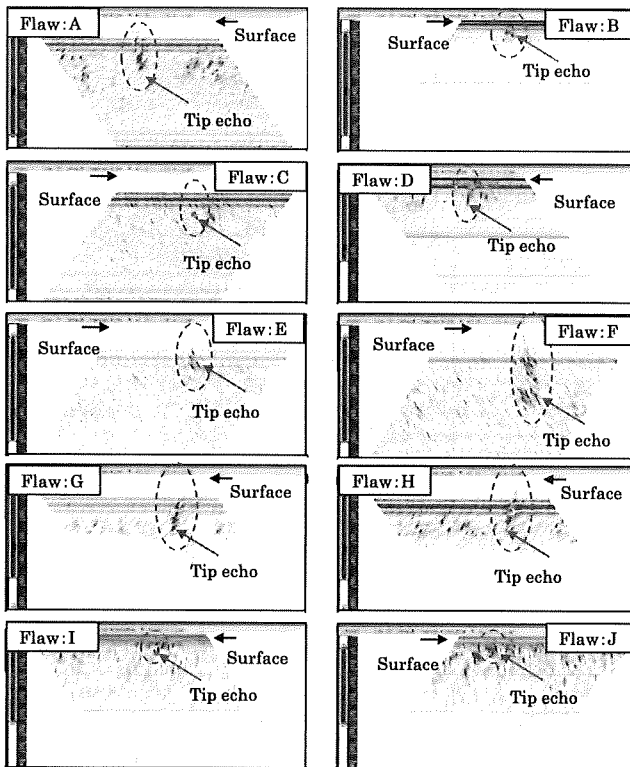


Fig.5 B-scan images of nickel based alloy weld specimen with SCC cracks by Phased Array UT

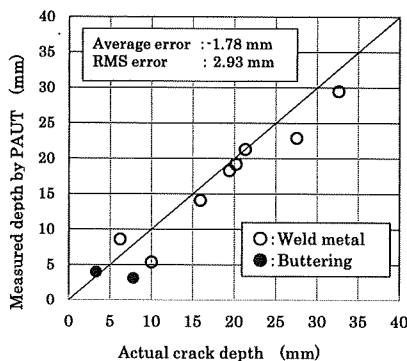


Fig.6 SCC crack depth sizing accuracy by Phased Array UT

4. き裂深さ測定の誤差要因分析

SCC き裂深さを高精度に測定するためには、深さ測定における誤差要因を分析し、改善を図ることが重要である。ここでは、ニッケル基合金溶接部の UT における従来の知見、前述の深さ測定結果などから、想定される主要な誤差要因を抽出し、深さ測定に及ぼす影響および測定誤差の低減策について検討した結果を纏め Table 3 に示す。また、き裂深さ測定要領に係る誤差要因についても検討し Table 4 に纏めた。これらの内容を以下に記述する。

4.1 微弱な指示の識別

ニッケル基合金溶接部の探傷では、溶接金属組織（柱状晶組織）が異方性材料であり、結晶組織により超音波の屈曲、減衰が生じ、端部エコーは微弱な信号となり、結晶組織からの金属組織エコー（ノイズエコー）との識別が難しい場合がある。

微弱な信号の誤認識には、ノイズエコーをき裂エコーと認識し、き裂深さを過大評価する場合、あるいは、き裂エコーをノイズエコーと認識し、き裂深さを過小評価あるいはき裂なしと評価する場合がある。

これらの誤差低減としては、複数条件の探傷データをもとに総合的に評価する方法があげられる。

4.2 溶接金属組織の影響

超音波音速異方性を有する材料では、探傷領域で音速が異なるため、探傷器上に表示される波形の位置が実際の位置と異なる位置に表示され、そのための測定誤差が生じることになる。

また、超音波屈曲が生じる場合では、測定されたき裂先端部エコーのビーム路程が、実際のき裂先端位置と異なって測定されるため過大評価となる。

これらの誤差低減方法としては、事前に対象部位である溶接金属部と同等の確認用試験片（対比欠陥付与）を製作し、探傷屈折角と超音波音速との関係および探傷屈折角と超音波屈曲程度の関係等を求め、深さ補正を行う方法がある。

4.3 き裂形状の影響

ニッケル基合金溶接部試験体に付与した SCC き裂の破面解放試験によるき裂形状写真の一例を、Fig.7 に示す。図より、き裂は、アスペクト比が大きく（2 程度：長さ 14.6mm、深さ 27.5mm）かつ巾着状の様相を呈し、さらにき裂先端が楕状に尖った形状であることがわかる。き裂形状を詳細にみると、深さ 23mm 程度までは円弧状に進展し、その後楕状に先端が尖った形状（幅 1mm 程度）を呈している。このようなき裂の探傷では、上記の円弧状の深さ位置（23mm 程度）から大きな信号が検出され、き裂先端部からの微弱な信号を見逃す場合がある。

き裂先端の微弱な信号を検出するためには、適正な集束条件の選定を図ること、探傷感度を高くすること、高出力探触子を用いた探傷を行うこと等、き裂先端に高出力の超音波を入射させ、端部エコーを高感度に検出することが重要となる。

また、他のき裂形状に起因する誤差要因としては、き裂先端部の傾きを有する場合、き裂先端部の開口幅が狭くて超音波が透過する場合、複数き裂の中央部に最も深いき裂が存在し、き裂先端部への超音波入射が困難な場合などがある。

これらの誤差要因を低減させる方法としては、上記と同様、き裂先端に高パワーの超音波を入射させること、複数方向から探傷すること等が上げられる。しかしながら、複数き裂の中央部に最も深いき裂が存在し、き裂先端部への超音波入射が困難の場合、など UT の限界もある。

4.4 溶接欠陥の影響

ニッケル基合金溶接部試験体は、SCC 感受性の高い溶接材料を用いて部分的に補修溶接を行って製作する場合、補修溶接部の溶接金属部あるいは補修溶接部の境界等に溶接欠陥が発生することがある。

これらの溶接欠陥は、UT で検出され誤認識する場合があるが、これらの溶接欠陥は、模擬試験体特有の事象であり実機では対応不要である。実機の UT 検査では、溶接部の開先形状、溶接施工状態を可能な限り調査し、補修溶接の有無、溶接欠陥の有無などを把握し、かつ PSI の UT データを確認することが、誤差要因の低減にとって重要である。

4.5 深さ測定要領に係る誤差要因

き裂深さ測定要領に係る誤差要因としては、Table4 に示すように、探傷装置、探触子等の機材の整備不足、探傷条件の選定ミス、解析条件の選定ミス等があげられる。また検査員の技量不足も考えられる。これらの誤差要因の低減には、要領の改善・整備、検査員の習熟度の向上が重要である。

5. 深さ測定精度向上のための対応

ニッケル基合金溶接部の SCC き裂に対する深さ測定において、前記のき裂深さ測定結果、測定誤差要因分析結果および従来のニッケル基合金溶接部の UT に関する知見をもとに、き裂深さ測定精度向上のための対応策について検討し、その結果を Table 5 にまとめた。

(1) き裂先端部エコーの検出性向上

き裂先端部からのエコーを高い SN 比で検出するには、高出力の超音波をき裂先端部に入射させ、き裂先端部からの信号を高感度で検出する方法がある。この場合は、適用するアレイ探触子の超音波ビーム集束条件を適正に選定しき裂先端部に入射させること、また高出力超音波探傷装置、高出力超音波探触子等ハードウェアを適用することなどが必要となる。

Table 3 Main factors of crack depth sizing error

	誤差要因	深さ評価	対応策(誤差低減策)
①	微弱な指示の識別 ・微弱な指示(材料ノイズ)をき裂と評価 ・微弱な指示(き裂の指示)をノイズと評価	・過大評価 ・過小評価	・複数探傷データからき裂とノイズを識別 ・UTデータの解析・評価の習熟度向上
②	溶接金属組織の影響 ・超音波音速異方性によるき裂指示位置のズレ ・超音波屈曲によるき裂指示位置のズレ	過大/過小評価	・対象部位と同等の確認試験片で補正量を求め、必要に応じて深さを補正
③	き裂形状の影響 ・尖ったき裂先端部の検出性が低下 ・き裂先端部の傾きで、先端への超音波が入射困難 ・き裂先端部の開口幅が狭く、超音波が透過しき裂先端部の検出性が低下 ・複数き裂の中央部では、最深き裂先端への超音波が入射困難	過小評価	・き裂先端部に高パワー超音波を入射(装置、要領の改善・整備)
④	溶接欠陥の影響 ・補修溶接等で発生した溶接欠陥をき裂と誤認識	過大評価	・模擬試験体では、特有事象で対応不要 ・実機の場合、施工時の溶接状況を把握

Table 4 Main factors of crack depth sizing error regarding as UT procedure

	誤差要因	深さ評価	対応策(誤差低減策)
A	機材の整備 探傷装置、探触子、走査装置等の機材が不十分のため適正な探傷が困難	過大/過小評価	・適正な機材を整備 ・要領の改善・整備
B	探傷条件の選定 探傷条件の選定ミスにより、適正条件での探傷が困難	過大/過小評価	・要領の改善・整備
C	解析条件の選定 解析条件の選定ミスにより、適正条件での解析が困難	過大/過小評価	・要領の改善・整備
D	検査員の技量 技量不足により、微弱な指示を誤認識	過大/過小評価	・UTデータの解析、評価の習熟度向上

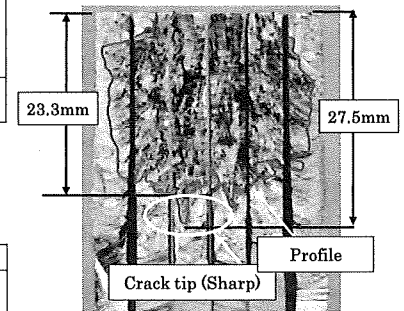


Fig.7 SCC crack shape by destructive test

(2) き裂とノイズの識別性向上

き裂先端部からのエコーと材料ノイズエコーの識別性を向上させるには、複数条件の探傷データから総合的に評価することが重要である。Fig.2の「欠陥深さ測定要領」では、ステップ2において、き裂の表面位置、形状、傾き等の情報から、ノイズ信号の誤認識、き裂信号の見逃し等の低減を図ることを示した。このように、複数データの解析を行うことが、き裂とノイズの識別性向上に極めて有効である。

(3) 探傷要領の整備・改善

上記(1)、(2)で述べたような、き裂深さ測定精度向上のための改善が行われた場合は、深さ測定要領に反映させる。

(4) 教育・訓練

き裂深さを高精度に測定するためには、検査員に対して、①対象部位の把握、②UTの習熟等の教育・訓練を行い、検査員の技術レベルの維持・向上を図ることが重要である。

4. 結言

ニッケル基合金溶接部 SCC き裂付与試験体に対して、欠陥開口面側からフェーズドアレイ UT を適用し、き裂深さサイジング性能および「欠陥深さ測定要領」の有効性を明らかにした。また、き裂深さ測定に及ぼす誤差要因を分析し、深さ測定の更なる高精度化案についても検討した。その知見を以下に纏める。

- (1) ニッケル基合金溶接部に付与した SCC き裂に対して、「フェーズドアレイ UT によるき裂深さ測定要領」に従って深さ評価を行った結果、き裂深さは、誤差平均-1.78mm、RMS 誤差 2.93mm と良好な精度で評価できた。
- (2) 上記の結果から、本研究で提案した「欠陥深さ測定要領」の有効性が検証された。
- (3) き裂深さ測定に及ぼす測定誤差要因を分析し、深さ測定の更なる高精度化のための対応案を纏めた。
- (4) 上記の結果から、ニッケル基合金溶接部の SCC き裂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。

Table 5 Improvement items of crack depth sizing accuracy

	項目	内容
1	き裂先端部エコーの検出性向上 (SN比向上)	・高パワー探傷装置、高パワーアレイ探触子の活用、開発 ・超音波ビームの高集束化(マトリクスアレイ探触子の活用)
2	き裂とノイズの識別性向上	・適正UT条件によるき裂情報の採取、識別 (き裂の表面位置、形状、傾き等)
3	探傷要領の整備、改善	・上記改善策の要領への反映、整備
4	教育・訓練	・実機事例の調査、把握(き裂形態、溶接部施工等) ・検査員の習熟度向上

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] 西田純一朗他：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，pp.236-240，(2009.9)
- [4] 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，pp.48，(2005)
- [5] 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)
- [6] 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，pp.61-66，(2010.7)
- [7] 平澤泰治，岡田久雄，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，Q10031，(2011.6)
- [8] 平澤泰治，岡田久雄，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 8 回学術講演会要旨集，pp.17-22，(2011.10)
- [9] 平澤泰治，岡田久雄，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，Q11011，(2012.5)