

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

Application of Phased Array UT Technique 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 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 has occurred 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 have been required. Phased array technique was applied to nickel based alloy weld specimen with EDM notches. From the experimental results, the superior performance of phased array UT for the inside inspection was shown.

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

1. 緒言

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、PWSCC（一次冷却水環境下での応力腐食割れ）の発生が報告されており[1]、これらのき裂深さを高精度に測定することは、機器の健全性評価にとって重要である。原子炉容器管台溶接部に発生した SCC き裂は、表面長さが短く深い形状であったため、超音波探傷試験（UT）でき裂先端からの端部エコーが検出できず、深さ測定が困難であった[2]。

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た。これは、溶接金属組織により超音波の屈曲、減衰が生じ、さらに溶接金属組織からの材料ノイズエコーの発生により、端部エコーの検出性が低下し、欠陥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として、近年国内外で注目され、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[3]。

そこで、本研究では、600 系ニッケル基合金溶接部の SCC き裂に対して、UT による高精度な深さサイジング技術を確立することを目的とし、本報告ではその第 1 報として、ニッケル基合金溶接部（突合せ溶接部とバタリング部を有する異種金属溶接部）に付与した EDM ノッチ試験体を用い、欠陥開口面側からフェーズドアレイ UT 法を適用し、深さサイジングに対する適用性を明らかにしたので報告する。

2. 試験方法

2.1 供試体

試験体は、ニッケル基合金溶接部試験体で、突合せ溶接部およびバタリング部の溶接線直交方向に EDM ノッチが付与されている。突合せ溶接部に EDM ノッチを付与した試験体の形状、寸法を Fig.1 に、その外観を Fig.2 に示す。また、Table 1 に、EDM ノッチ付与条件を示す。突合せ溶接部およびバタリング部ともに 4 個の EDM ノッチが付与され、深さは 2, 5, 10, 20mm の 4 種類、長さはすべて 10mm である。

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（Tomoscan III : Zetec 社製）である。

連絡先: 平澤 泰治, 〒240-0196 横須賀市長坂 2-6-1,
(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

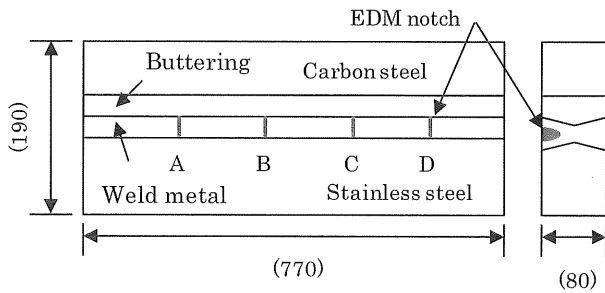


Fig.1 Nickel based alloy weld specimen with EDM notches in butt weld area

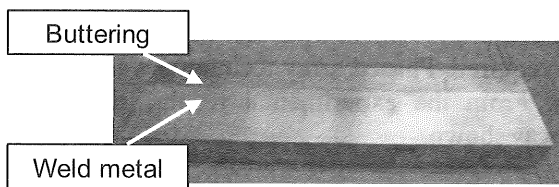


Fig.2 Overview of specimen

Table 1 EDM notch conditions of nickel based alloy weld specimen

Specimen	Area	Direction	No.	Depth (mm)	Length (mm)	shape
EDM-1	Weld metal	Axial	A	2	10	Semi-ellipse
			B	5		
			C	10		
			D	20		
EDM-2	Buttering	Axial	E	2	10	Semi-ellipse
			F	5		
			G	10		
			H	20		

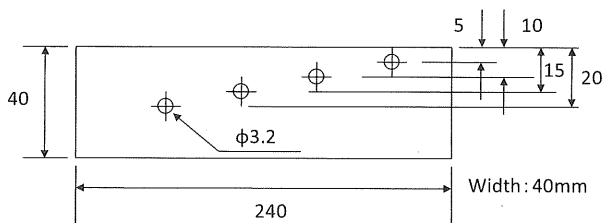


Fig.3 Shape and dimensions of side drilled holes specimen

用いたアレイ探触子は 2 種類で、①公称周波数 2MHz、振動子寸法 10mm×0.8mm、チャンネル数 64ch (以下、略号 2L(10))、②、公称周波数 2MHz、振動子寸法 20mm×0.6mm、チャンネル数 64ch (以下、略号 2L(20)) で、①は深さの浅いき裂の探傷用 (深さ 10mm 程度)、②は深さの深い欠陥 (深さ 20mm 程度) を対象として選定した。

探傷条件の選定にあたり、アレイ探触子 2L(10) および 2L(20) について、開口寸法、集束位置に関する探傷条件の選定を行った。探傷条件の選定は、Fig.3 に示す横穴試験片を用い、横穴からの反射エコー分布を測定して各パラメータの影響を評価した。なお試験片には、直径 3.2mm の横穴が板厚方向の深さ位置 Z=5, 10, 15, 20mm に付与されている。

3. 試験結果および考察

3.1 探傷条件の選定

横穴試験片に対して、アレイ探触子 2L(10)を用いた探傷結果を Fig.4 に示す。図は、開口寸法 (a)10mm×6.4mm (8ch)、(b)10mm×12.8mm (16ch) に対して、探傷屈折角 45°、集束位置 F=10mm、探傷感度 42dB で試験した時の探傷断面画像 (図の上段) および横穴からの反射エコー高さ分布 (図の下段) である。図より、深さ位置 Z=5~20mm のいずれの横穴についても、開口寸法 (a)10mm×12.8mm の方が、(b)10mm×6.4mm に比べて、エコー高さ分布の広がり小さく集束効果が良好であった。この結果から、開口寸法として 10mm×12.8mm を選定した。

また、アレイ探触子 2L(10)の集束効果については、開口寸法 10mm×12.8mm を一定とし、集束位置を F=5, 10, 20mm と変えたときの横穴からの反射エコー分布を調べた結果、いずれの集束位置でも超音波の広がりが小さく、エコー高さ分布に大きな差異は認められなかったため、集束位置は、アレイ探触子 2L(10)の適用目的である深さの浅い欠陥 (深さ 10mm) と同じ F=10mm を選定した。

次に、アレイ探触子 2L(20)の探傷条件の選定を行った。開口寸法は、探触子の適用目的である深さの深い欠陥 (深さ 20mm) である 20mm×19.2mm とし、集束位置の選定を行った。Fig.5 に、集束位置を F=10, 20, 30mm と変えたときの探傷結果を示す。図は、

探傷屈折角 45° 、探傷感度 34dB における探傷断面画像 (図の上段) および横穴からの反射エコー高さ分布 (図の下段) である。図より、横穴からの反射エコー高さ分布に大きな違いは認められなかったため、アレイ探触子の適用目的である欠陥深さ 20mm と同一の集束位置 $F=20\text{mm}$ を選定した。

以上より、アレイ探触子 2L(20) の条件は、開口寸法 $20\text{mm} \times 19.2\text{mm}$ 、集束位置 $F=20\text{mm}$ とした。

ニッケル基合金溶接部試験体に対するフェーズドアレイ UT 条件を以下に示す。探傷方法は自動走査による直接接触法とし、探傷面は欠陥開口面側 (内面 UT)、探傷方向は欠陥に対して両側から行った。

探傷における超音波走査方式はセクタ走査 (扇形走査) とし、探傷屈折角範囲は、 30° から 80° 、走査ピッチは 1° とした。

アレイ探触子の機械的走査は、X-Y スキャナによる矩形走査 (自動探傷) とし、走査範囲は、溶接線平行方向 (Y 方向) は $Y=80\text{mm}$ 以上、溶接線直交方向 (X 方向) は欠陥がその中央になるように $X=30\text{mm}$ とし、走査ピッチは、Y 方向で 0.5mm 、X 方向で 1mm とした。

データ解析は、セクタ走査で収録したデータをリニア走査の表示に変換して行った。基本となる探傷屈折角データは、 45° および 60° とし、その他の屈折角は適宜解析に用いることとした。欠陥深さ測定は、探傷波形データから端部エコーを検出して測定する端部エコー法にて行った。

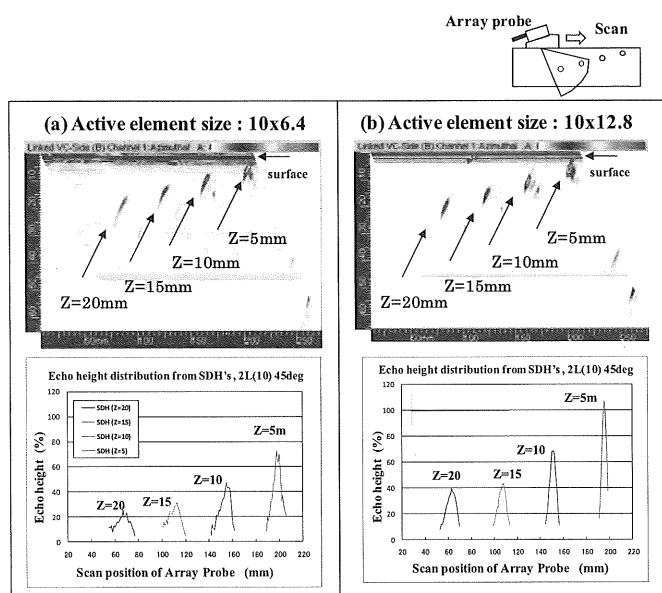


Fig.4 Effect of active element size of phased array probe 2L(10)

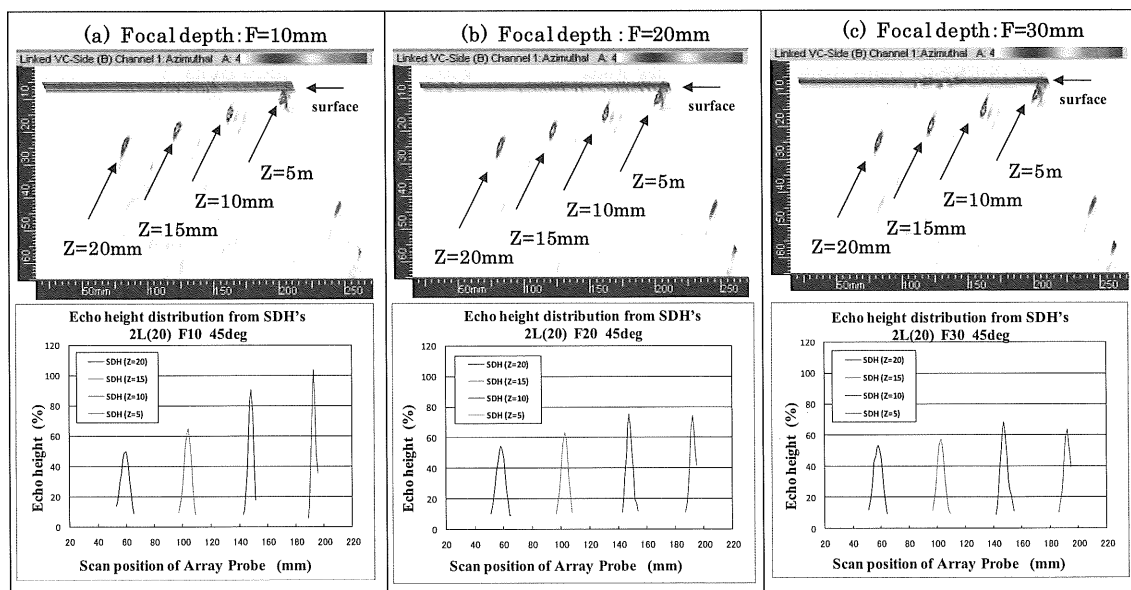


Fig.5 Effect of focal depth of phased array probe 2L(20)

3.2 突合せ溶接部への適用

突合せ溶接部に EDM ノッチを付与した試験体（試験体名：EDM-1）に対してフェーズドアレイ UT を適用した結果を、Fig.6 に示す。図は、各ノッチ深さに対する探傷断面画像であり、ノッチ開口部および先端部からの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。

Fig.6 から、深さ 2, 5, 10, 20mm のノッチのいずれの欠陥においても開口部エコーが観察されている。深さ 2mm の欠陥では、ノッチ深さが 2mm と浅いため、端部エコーが不感帯（試験体表面で探傷不可能な範囲）に埋もれたことによる。

一方、深さ 5, 10, 20mm のノッチでは、端部エコーが明瞭に認められている。これらの探傷データから端部エコー法による深さ測定を行い、その結果を、Fig.7 に示す。図より、ノッチ深さ 5~20mm の範囲で、深さは誤差 3mm 以内で評価された。

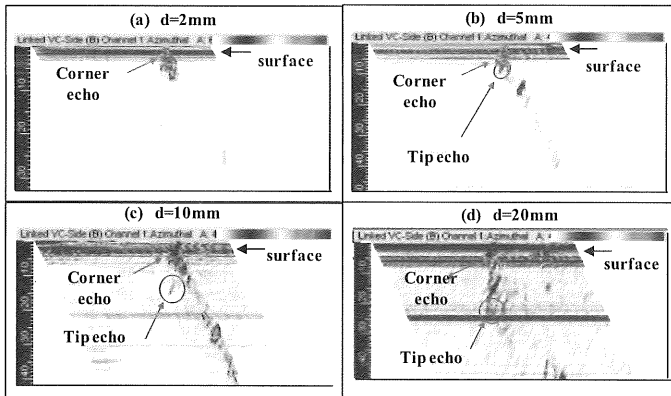


Fig.6 B-scan image of EDM notch specimen by PAUT (Weld metal)

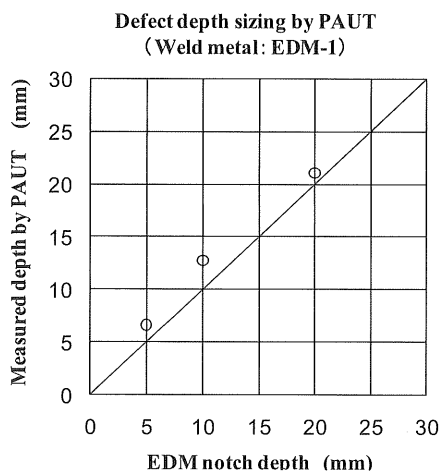


Fig.7 EDM notch depth sizing result (Weld metal)

3.3 バタリング部への適用

バタリング部に EDM ノッチを付与した試験体（試験体名：EDM-2）に対するフェーズドアレイ UT 結果を、Fig.8 に示す。図には、前項と同様の探傷断面画像であり、ノッチ開口部からの開口部エコーおよび先端部からの端部エコーを矢印および丸印で示してある。図より、深さ 2, 5, 10, 20mm のノッチのいずれにおいても開口部エコーが認められている。

また端部エコーは、深さ 2mm のノッチを除き、深さ 5, 10, 20mm のノッチで認められた。

Fig.9 に、端部エコー法による深さ測定結果を示す。図より、ノッチ深さ 5~20mm の範囲で、深さは誤差±2mm 以内で評価された。

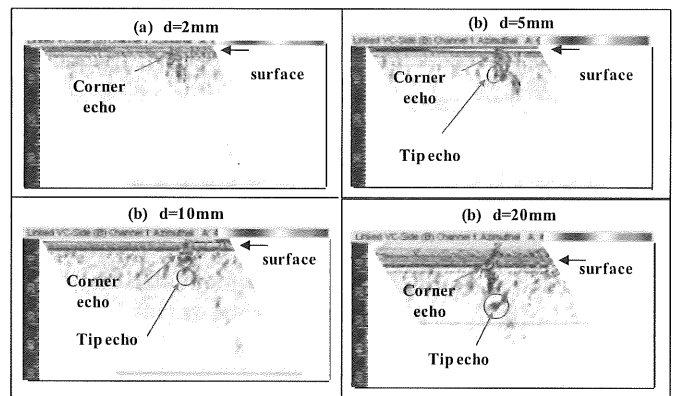


Fig.8 B-scan image of EDM notch specimen by PAUT (Buttering)

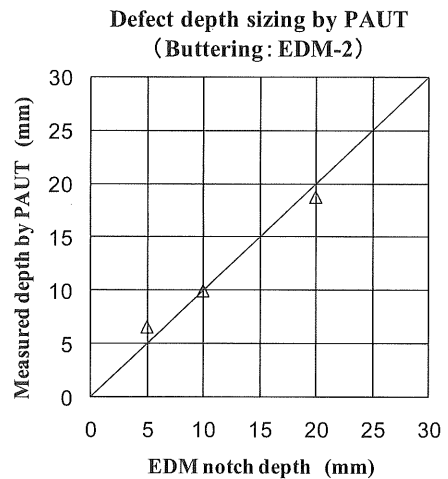


Fig.9 EDM notch depth sizing result (Buttering)

3.4 EDM ノッチに対する深さ評価

突合せ溶接部とバタリング部に付与した EDM ノッチの深さ測定結果をまとめ、Fig.10 に示す。データ数は少ないが、統計的な誤差評価を試みた結果、誤差平均は 0.92mm、RMS 誤差は 1.58mm であった。上記 RMS 誤差 1.58mm は、ASME Code Sec.XI App.VIII の技量認証時の配管等の合格基準である RMS 誤差 3.2mm と比較しても、良好な精度で評価されたと言える。

上記結果から、ニッケル基合金溶接部（突合せ溶接部およびバタリング部）の欠陥深さサイジングに対して、フェーズドアレイ UT 法は有効な手法であることが明らかとなった

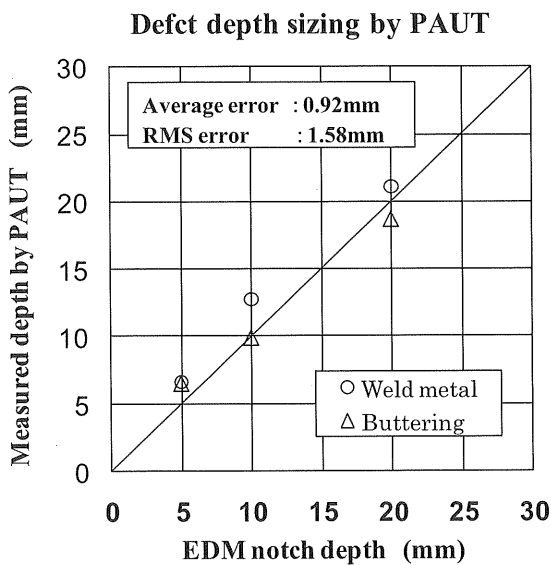


Fig.10 EDM notch depth sizing result by PAUT

3.5 金属組織エコーの発生状況

一般に、ニッケル基合金溶接部は超音波難探傷材と言われている。これは、溶接金属組織（柱状晶組織）からの金属組織エコーが疑似エコー（材料ノイズエコー）として発生し、欠陥先端からの端部エコーが材料ノイズエコーに埋もれ、検出性が低下するためである。

そこで、突合せ溶接部とバタリング部における材料ノイズエコーの発生状況を調べた。Fig.11 に、アレイ探触子 2L(10)を用いて探傷したときの突合せ溶接部およびバタリング部の探傷画像を並べて示す。両者は同一探傷条件の結果であり、突合せ溶接部で

は材料ノイズエコーが小さく、バタリング部では明瞭な材料ノイズエコー（図中の矢印近傍）が全体にわたって認められる。Fig.12 は、アレイ探触子 2L(20)を用いたときの探傷画像を示しており、突合せ溶接部では、探傷感度が 58dB と大きいため、材料ノイズエコーが若干認められるが、バタリング部では、探傷感度が 48dB と突合せ溶接部に比べて 10dB 低いにも拘わらず、材料ノイズエコーが全体に大きく検出されている。

一般に、SCC き裂の端部エコーは微弱な信号であるとされており、ニッケル基合金溶接部の探傷では、材料ノイズエコーが発生するため、端部エコーを高感度で検出するには、SN 比の向上、材料ノイズエコーとの識別が重要となる。

本研究では、フェーズドアレイ UT の探傷条件の最適化で、EDM ノッチからの端部エコーの検出が可能であったが、SCC き裂の探傷では、SN 比の低下が懸念されるため、SN 比をさらに向上させるための手法の検討も必要である。

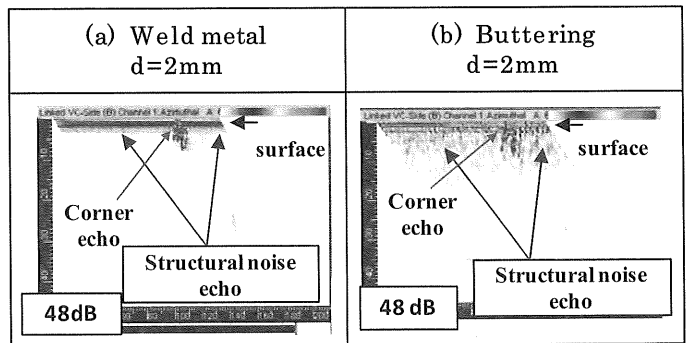


Fig.11 Comparison of structural echoes between weld metal and buttering using by array probe 2L(10)

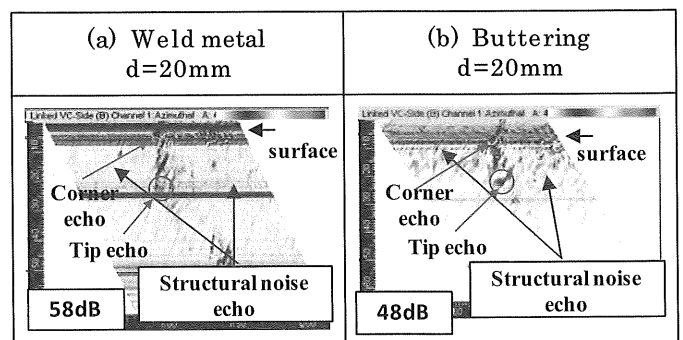


Fig.12 Comparison of structural echoes between weld metal and buttering using by array probe 2L(20)

4. 結言

本研究では、600系ニッケル基合金溶接部の SCC 裂に対して、UT による高精度な深さサイジング技術を確立するための第一段階として、ニッケル基合金溶接部試験体の突合せ溶接部およびバタリング部に付与した EDM ノッチに対して、フェーズドアレイ UT 法を適用し、深さサイジング性を評価した。それらの結果を以下にまとめる。

- (1) 半楕円状の EDM ノッチを付与したニッケル基合金溶接部試験体を用い、欠陥開口面側からのフェーズドアレイ UT を適用するため、超音波送受信時のアレイ探触子の開口寸法、集束位置等の探傷条件を最適化した。
- (2) フェーズドアレイ UT を突合せ溶接部およびバタリング部に付与した EDM ノッチ試験体に適用した結果、ノッチ深さ 5mm～20mm の範囲で深さ測定が可能であり、深さは、誤差平均 0.92mm、RMS 誤差 1.58mm と良好な精度で評価できた。
- (3) 上記の結果から、フェーズドアレイ UT 法は、ニッケル基合金溶接部の欠陥深さ測定法として有効な手法であることが明らかとなった。

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] 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)