

ニッケル基合金溶接部に対する高精度
超音波探傷技術に関する研究

平成 26 年 9 月

平 澤 泰 治

目 次

第1章 緒論	1
1.1 研究の背景	1
1.1.1 研究の背景	1
1.1.2 原子力発電プラント	2
1.1.3 ニッケル基合金溶接部の損傷事例	3
1.2 原子力発電プラントの非破壊検査	4
1.2.1 概要	4
1.2.2 UTによるき裂深さ測定技術	4
1.2.2.1 固定角斜角探傷法	4
1.2.2.2 フェーズドアレイUT法	6
1.2.2.3 超音波TOFD法	10
1.2.2.4 超音波開口合成法	11
1.2.3 ニッケル基合金溶接部のき裂深さ測定法の選定	12
1.3 研究の目的	14
1.4 本論文の構成	15
参考文献	16
第2章 基礎試験体による探傷性能評価	35
2.1 緒言	35
2.2 探傷条件の選定	36
2.2.1 試験体	36
2.2.2 試験方法	36
2.2.3 試験結果	37
2.3 ニッケル基合金溶接部への適用	38
2.3.1 試験体	38
2.3.2 試験方法	38
2.3.3 欠陥深さ評価	39
2.4 金属組織エコーの発生状況	40
2.5 結言	42
参考文献	43
第3章 欠陥深さ測定要領の開発	54
3.1 緒言	54
3.2 欠陥深さ測定要領の概念	55
3.3 探傷条件の最適化	57

3.3.1	試験体および試験方法	57
3.3.2	アレイ探触子 2L(10)の探傷性能	57
3.3.3	アレイ探触子 2L(20)の探傷性能	58
3.3.4	アレイ探触子 2MPC の探傷性能	59
3.4	欠陥情報の把握	60
3.4.1	欠陥位置および欠陥長さの把握	60
3.4.2	欠陥形状の推定	60
3.4.3	欠陥深さの大小判別	61
3.5	欠陥深さ測定要領の構築	62
3.6	欠陥深さ測定要領の検証	65
3.6.1	試験体および試験方法	65
3.6.2	欠陥深さ評価	65
3.7	結言	67
	参考文献	68
第4章	SCCき裂に対するき裂深さ測定法の評価	81
4.1	緒言	81
4.2	SCCき裂付与技術	82
4.2.1	SCCき裂付与条件の設定	82
4.2.2	SCCき裂付与試験体の製作・評価	84
4.3	き裂深さ測定精度評価およびき裂深さ測定法の検証	85
4.3.1	試験体および試験方法	85
4.3.2	き裂深さ測定精度およびき裂深さ測定法の検証	86
4.3.2.1	き裂深さ測定要領	86
4.3.2.2	き裂深さ測定結果	86
4.4	結言	88
	参考文献	89
第5章	き裂深さ測定における誤差要因分析および測定精度の改善策	100
5.1	緒言	100
5.2	き裂深さ測定の誤差要因分析	100
5.2.1	溶接金属組織の影響	101
5.2.2	き裂形状の影響	103
5.2.3	測定要領および検査員に係る誤差要因	105
5.3	き裂深さ測定精度の改善	106
5.4	結言	109
	参考文献	110

第 6 章 結論	116
各章構成論文リスト	118
謝辞	121

第1章 緒論

第1章 緒論

1.1 研究の背景

1.1.1 研究の背景

近年、火力発電プラントや原子力発電プラントに代表される主要な発電プラントは、長期運転や使用環境条件の苛酷化に伴い、これらの機器・構造物に対する高い信頼性が要求されている。これらの発電プラントを健全かつ安定に運転し、エネルギーの安定供給を図ることは社会的使命である。エネルギーの安定供給のためには発電プラントの健全性維持が必要不可欠であり、特に、非破壊検査は、保守検査において頻繁に行われ、機器・構造物の健全性評価およびプラントの安全性の維持・確保を担っている。

発電プラントの主要な機器・構造物の溶接部は、定期検査において、非破壊試験により点検・検査を行っている。代表的な非破壊試験方法を表 1.1 に示す。非破壊試験方法としては、対象部位の表面の割れ等の検出を目的とした表面検査および対象部位の内部の割れ等の検出を目的とした内部検査（体積検査）がある。表面検査としては、目視試験（VT: Visual Testing）、浸透探傷試験（PT: Penetrant Testing）、磁粉探傷試験（MT: Magnetic Particle Testing）および渦電流探傷試験（ECT: Eddy Current Testing）があり、また、内部検査としては、放射線透過試験（RT: Radiographic Testing）および超音波探傷試験（UT: Ultrasonic Testing）がある。機器・構造物の溶接部の点検・検査では、対象材料、対象位置、対象欠陥等を考慮して、予め選定された試験方法により実施されている。

原子力プラントの主要な機器・構造物における溶接部は、供用期間中検査の内部検査として UT 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、その結果をもとに日本機械学会の発電用原子力設備規格 維持規格（維持規格）⁽¹⁾ に従って健全性評価を行い、その後の管理、運用を決めている。

維持規格の点検・評価の考え方を、図 1.1 に示す。非破壊試験で検出されたき裂は、UT で寸法測定（長さおよび深さ）を行い、その結果をもとに欠陥評価を行う。欠陥評価では、UT で求めたき裂寸法から、き裂をモデル化してき裂進展解析を行い、設定した評価期間のき裂進展量を求め、設定期間に到達した時点の残余寿命の評価を行う。次に、求めた評価結果をもとに、判定されたき裂が許容欠陥以下の場合は、安全性を確認して運転を継続する。また、許容欠陥以下でない場合は、補修あるいは交換（取替）を行い、安全性が確認された後運転を継続する、などの弾力的な運用が図られている。

ここで、き裂は板厚方向に進展し、き裂深さの測定精度は、欠陥評価（残余寿命評価）に大きく影響を及ぼす。

このように UT で求めたき裂寸法が、構造物の健全性評価に使用されるため、

構造物の適切な管理・運用を図るためには、き裂寸法、特に、き裂深さの高精度な寸法測定技術を開発することが極めて重要である。

1.1.2 原子力発電プラント

わが国の原子力発電プラントの軽水炉（中性子の減速材および冷却材として水を使用）は、沸騰水型原子炉（BWR：Boiling Water Reactor）および加圧水型原子炉（PWR：Pressurized Water Reactor）に分類される。

BWR 発電プラントは、図 1.2 ② に示すように、一次系の水を原子炉圧力容器内で核燃料により沸騰させて蒸気を取り出し、配管を経由して蒸気タービンをまわしてタービン発電機にて発電する方式であり、蒸気タービンをまわした蒸気は、復水器で冷却されて水になり、この水は給水ポンプによって配管を経由して、再度、原子炉圧力容器内へと戻る仕組みとなっている。

このように、高温の蒸気あるいは高温高压水が循環する機器・構造物は、オーステナイト系ステンレス鋼、ニッケル基合金等の耐食性および耐圧性に優れた材料が使用されている。BWR 発電プラントの原子炉圧力容器および炉内構造物の概要を図 1.3 に示す。ここで、主要な機器・構造物の使用材料の一例を、表 1.2 に示す。ニッケル基合金は、シュラウドサポートや制御棒駆動機構（CRD：Control Rod Drive）ハウジング／スタブチューブ等で使用されている。また、ノズルセーフエンドでは、原子炉圧力容器（低合金鋼）とステンレス配管をニッケル基合金の溶接材料で繋いでいる異種金属溶接部（低合金鋼－ニッケル基合金－ステンレス鋼）に使用されている。

PWR 発電プラントは、図 1.4 ② に示すように、一次系の水を原子炉容器内で核燃料によって高温高压水として蒸気発生器に送り、蒸気発生器では、伝熱管で復水器から送られた水を熱交換により二次系の蒸気として取り出し、配管を経由して蒸気タービンをまわして、タービン発電機にて発電する方式である。蒸気タービンをまわした蒸気は復水器で冷却されて水になり、この水は、配管を経由して再度蒸気発生器へと戻る。一方、蒸気発生器に送られた一次系の高温高压水は、熱交換によって冷却され、冷却材ポンプによって配管を経由して、再度、原子炉容器に戻る仕組みとなっている。

このように、高温の蒸気および高温高压水が循環する機器・構造物は、BWR 発電プラントと同様、オーステナイト系ステンレス鋼、ニッケル基合金等の材料が使用されている。PWR 発電プラントの原子炉圧力容器および炉内構造物の概要を図 1.5 ③に示す。ここで、主要な機器・構造物の使用材料の一例を、表 1.3 に示す。ニッケル基合金は、炉内計装筒、上蓋管台等で使用されている。また、炉水の出入口部である原子炉容器入口管台および原子炉容器出口管台では、図 1.6 に示すように、BWR 発電プラントと同様、原子炉容器（低合金鋼）とステンレス鋼配管をニッケル基合金の溶接材料で繋いでいる異種金属溶接部（低合金鋼

ーニッケル基合金ーステンレス鋼) に使用されている。

上記で述べたように、BWR および PWR 発電プラントの主要な機器・構造物は、高温の蒸気あるいは高温高圧水に曝されているため、長期間の運転により、劣化損傷の発生が懸念され、その対策として溶接部に対して、予防保全工事（例えば、対象部位の表面を圧縮応力状態にするためのピーニング施工等）が計画され、施工されている。

1.1.3 ニッケル基合金溶接部の損傷事例

近年、原子力発電プラントの炉内構造物、耐圧バウンダリ等の主要な構造物に使用されているニッケル基合金溶接部では、国内外で応力腐食割れ (SCC : Stress Corrosion Cracking) に起因したき裂の発生に関する損傷事例が多数報告されている^{(4)・(6)}。BWR 発電プラントでは、1999 年のシュラウドサポート、2001 年の制御棒駆動機構 (CRD : Control Rod Drive) ハウジング/スタブチューブ下部溶接部等が報告されており、補修、取替等による対策（例えば、アロイ 182 合金から耐食性に優れたアロイ 82 合金への変更）が実施された。また、PWR 発電プラントでは、2003 年の加圧器逃がし弁管台セーフエンド溶接部、2004 年の原子炉容器上蓋管台溶接部、2007 年の蒸気発生器入口管台セーフエンド溶接部、2008 年の原子炉容器出口管台セーフエンド溶接部等が報告されている。これら管台セーフエンド部の 600 系ニッケル基合金溶接部では、一次冷却水環境下での応力腐食割れ (PWSCC : Primary Water Stress Corrosion Cracking) によるき裂の発生が報告されており、補修、取替による対策（耐食性に優れた 690 系合金へ変更）が実施された。さらに、PWSCC の発生メカニズムに関する研究^{(7)・(8)} や PWSCC の発生を防止するための予防保全対策⁽⁹⁾ 等が実施されている。

ここで、2008 年の原子炉容器 (RV : Reactor Vessel) 出口管台セーフエンド溶接部の損傷事例をみると、表面検査 (VT および ECT) で検出されたき裂に対して、き裂開口面側 (内面側) から通常の UT (固定角斜角探傷法) を実施したところ、SCC き裂の深さ測定が困難であったことが報告された^{(10)・(11)}。この事例では、図 1.7 に示すように、RV 管台セーフエンド溶接部の内面の予防保全施工 (ピーニング施工) を実施する際に、施工前検査として実施した表面検査 (VT および ECT) において、管台内面側の溶接部 (突合せ溶接部の溶接金属部) に、溶接線方向に対して直交する方向に進展する SCC き裂が検出され、き裂開口面側から UT を実施したところ、浅いき裂と評価した。しかしながら、き裂を除去するために、切削と外観試験を繰り返し実施しながら、き裂の寸法および形状を測定した結果、き裂は、図 1.8 に示すように、表面き裂長さが約 10mm、深さが約 20.3mm とアスペクト比 (き裂の深さと表面き裂長さの比率) が大きく、巾着状でかつ先端が尖った複雑な形状を有していたことが示された⁽¹⁰⁾。

ここで、UT によりき裂深さが測定困難であった原因は、超音波異方性材料で

ある溶接金属組織（柱状晶部組織）からの材料ノイズエコーが大きく、かつ、き裂先端部が複雑な形状であったことから、き裂先端部からのエコー（端部エコー）が微弱な信号となり、端部エコーが検出できなかったものとされている⁽¹¹⁾。

ニッケル基合金溶接部は、超音波異方性材料であるため、溶接金属組織への超音波入射により、散乱・減衰あるいは屈曲等の複雑な超音波伝搬挙動を示すことから、一般に超音波難探傷材料と言われている。また、上記で述べた損傷事例でき裂深さ測定が困難であったことに加えて、機器・構造物の適切な健全性評価を行う上からも、UTによる高精度なき裂深さ測定法の開発が必須となった。

1.2 原子力発電プラントの非破壊検査

1.2.1 概要

原子力発電プラントでは、製造時の検査および供用期間中検査において、表 1.1 に示すような非破壊試験を行い、機器・構造物の健全性を評価している。

製造時の検査は、日本機械学会の発電用原子力設備規格 設計・建設規格⁽¹²⁾ および発電用原子力設備規格 溶接規格⁽¹³⁾ に従って実施されており、製造段階における機器・構造物の母材部および溶接部の健全性が確認されている。

一方、供用期間中検査は、維持規格⁽¹⁾ に従って実施され、供用期間中における機器・構造物、特に溶接部の健全性が確認されている。

供用期間中検査において、非破壊試験により万一き裂が検出された場合は、UTによりき裂深さ測定を行い、図 1.1 に示す維持規格の点検・評価の考え方に従って健全性評価を行うことになる。

前記、1.1.3 項で述べたように、RV 管台セーフエンド溶接部の損傷事例⁽¹⁰⁾ では、ニッケル基合金溶接部に発生した SCC き裂の深さが測定困難であったことから、UTによる高精度なき裂深さ測定法の開発が必須となった。

そこで、UTによるき裂深さ測定法の代表的な手法として、固定角斜角探傷法、フェーズドアレイ UT 法、超音波 TOFD 法、超音波開口合成法を取上げ、各々の手法について、原理、特徴、適用事例、ニッケル基合金溶接部への適用性等を検討し、本研究で取組む UT 法を選定することとした。

1.2.2 UTによるき裂深さ測定技術

1.2.2.1 固定角斜角探傷法

(1) 原理および特徴

固定角斜角探傷法（斜角探傷法）は、一般に、一振動子斜角探触子、二振動子斜角探触子（2分割型斜角探触子）、集束型斜角探触子等の探傷屈折角が固定されている探触子を用いて、欠陥検出および深さ測定を行う方法である。

一振動子斜角探触子および二振動子斜角探触子を用いたときの斜角探傷の模式

図を図 1.9 に示す。図 1.9(1) は、表面開口き裂の探傷例であり、図 1.9(2) は、裏面開口き裂の探傷例である。いずれの場合も、き裂先端からの端部エコーを検出して、端部エコー法を用いてき裂深さ測定を行う。

集束型斜角探触子は、き裂先端部に強い超音波を入射させて、端部エコーを SN 比の高い信号として検出するために用いる。集束型斜角探触子を用いたときの探傷模式図を図 1.10 に示す。図 1.10(1) は、表面開口き裂の探傷例であり、図 1.10(2) は、裏面開口き裂の探傷例である。き裂深さ測定は、前記同様、いずれの場合も、き裂先端からの端部エコーを検出して端部エコー法を用いて行う。

固定角斜角探傷法では、汎用の超音波探触子および超音波探傷器を用いて探傷することが可能であり、これらの試験機材は操作が容易であり、UT 検査員の技量に依存しにくい方法である。

しかしながら、欠陥深さ測定において、欠陥深さが事前に推定（想定）できる場合は有効な手法であるが、板厚が厚くかつき裂深さが未知の場合は、探傷屈折角あるいは集束位置が異なる複数の超音波探触子を用いて探傷する必要があり、検査時間が膨大となるなどの課題がある。

（2）端部エコー法

端部エコー法⁽¹⁴⁾の原理図を、図 1.11 に示す。図 1.11(1) は、裏面開口き裂の探傷例であり、図 1.11(2) は、表面開口き裂の探傷例である。端部エコー法は、図 1.11(1) に示すように、き裂に対して超音波を斜め方向から入射させると、き裂先端で回折波（端部エコー）が発生し、このエコーのピークが得られたときのビーム路程と使用した超音波探触子の探傷屈折角からき裂深さを計算で求める方法である。

端部エコー法によるき裂深さ測定手順を、裏面開口き裂を例として示す。図 1.11(1) に示すように、超音波探触子を探傷面に設置し、き裂が存在する方向に超音波を入射させて探傷する。初めに、き裂開口部エコーを検出し、このエコーのピークが得られるときのビーム路程（ W_1 ）を測定する。次に、き裂端部からのエコーを検出し、このエコーのピークが得られるときの超音波ビーム路程（ W_2 ）を測定する。き裂深さ d は、超音波探触子の探傷屈折角 θ および上記で測定したビーム路程から、下式により求める。

$$d = (W_1 - W_2) \cos \theta \quad (1-1)$$

次に、表面開口き裂の測定例を示す。図 1.11(2) に示すように、超音波探触子を試験体の探傷面に設置し、き裂が存在する方向に超音波を入射させて探傷し、き裂端部からのエコーを検出し、このエコーのピークが得られるときの超音波ビーム路程（ W ）を測定する。ここで、き裂深さ d は、超音波探触子の探傷屈折角

θ および上記で測定したビーム路程から、下式により求める。

$$d=W \cos \theta \quad (1-2)$$

端部エコー法は、欠陥深さ測定法として最も一般的に普及している方法である。原子力発電プラントの供用期間中検査では、「軽水型原子力発電所用機器の供用期間中検査にける超音波探傷試験規程 JEAC4207-2008⁽¹⁵⁾」に準拠して実施されている。

(3) 固定角斜角探傷法の適用例

固定角斜角探傷法によるき裂深さ測定は、原子力発電プラントの供用期間中検査の UT において、主に、フェライト系鋼に対して適用されている。しかしながら、ステンレス鋼およびニッケル基合金の溶接部（特に、溶接金属部）に対しては、前記 1.1.3 項で述べたように、近年、き裂深さ測定が困難な事例が報告されており、き裂の端部エコーと材料ノイズエコーの識別性が低く、本手法の適用性は低い。

1.2.2.2 フェーズドアレイ UT 法

(1) 原理および特徴

フェーズドアレイ超音波探傷法（フェーズドアレイ UT 法）^{(16),(17)} は、医療用のエコー診断技術と同様な原理を用いた手法であり、図 1.12⁽¹⁸⁾ に示すように、複数の微小な振動子で構成されたアレイ探触子の各振動子から異なったタイミング（遅延時間制御）で超音波を発生することによって、任意の方向および任意の深さ位置に、送信波よりも振幅の大きな合成平面波を形成させて、対象部位における欠陥検出、寸法（深さ、長さ）測定等を行う方法である。

この手法の主な特徴は、以下のとおりである。

- ① 各振動子の発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る。
- ② 1 個のアレイ探触子で、複数条件（探傷角度、集束位置等）の探傷が可能のため、探傷時間が短縮でき、検査効率が向上する。
- ③ 1 個のアレイ探触子で、横波探傷と縦波探傷が可能であり、対象材料に応じた使い分けが可能である。
- ④ 探傷結果の画像表示（断面画像、平面画像等）により、試験体内部が可視化でき、欠陥の視認性、識別性が向上する。
- ⑤ リニア走査、セクタ走査、フェーズドアレイ TOFD 走査等、対象部位に合わせて種々の探傷法を適用できる。

(2) 試験機材

フェーズドアレイ UT 法の探傷は、アレイ探触子と専用のフェーズドアレイ UT 装置を用いて行う。また、自動探傷を行う場合は、アレイ探触子を自動走行させるための走行装置（例えば、X-Y スキャナ）を用いる。

代表的なアレイ探触子には、リニアアレイ探触子とマトリクスアレイ探触子があり、これらの模式図を図 1.13 に示す。図より、リニアアレイ探触子は、多数の小型振動子を直線的に配列した探触子であり、マトリクスアレイ探触子は、小型の振動子を格子状に配列した探触子である。

アレイ探触子の超音波ビームの集束制御の模式図を、図 1.14 に示す。図より、リニアアレイ探触子は、超音波ビームをライン状に集束させた状態（ラインフォーカス）で 2 次元走査することが可能である。一方、マトリクスアレイ探触子は、超音波ビームを点集束させた状態（ポイントフォーカス）で 3 次元走査することが可能である。

(3) 超音波ビーム走査方式

フェーズドアレイ UT 法における超音波ビーム走査方式には、リニア走査、セクタ走査、フェーズドアレイ TOFD 走査、ダイナミックフォーカス走査等の走査方式がある。ここでは、代表的な超音波ビーム走査方式として、リニア走査およびセクタ走査について述べる。

(a) リニア走査

リニア走査は、図 1.15(1) に示すように、多数の振動子から成るアレイ探触子の中から、選定した振動子群（ n 個の振動子）を 1 組の探触子として、順次 1ch ずつシフトさせて電子走査して探傷する方式で、アレイ探触子を移動させることなく、同一探傷条件（探傷屈折角、集束位置等）で、集束位置近傍の広い範囲を探傷することが可能である。

リニア走査による探傷例を、図 1.15(2) に示す。図は、深さ 10mm の EDM ノッチを裏面に付与した試験体（ステンレス鋼母材）に対して、探傷屈折角 45° で探傷した時の断面画像である。探傷画像には、EDM ノッチの開口部エコーと端部エコーが認められ、欠陥の位置あるいは欠陥深さに関する情報を得ることができる。

欠陥の深さ測定は、前記 1.2.2.1 項の端部エコー法を用いて行う。図 1.15(2) の探傷例では、欠陥の開口部エコーおよび端部エコーの超音波ビーム路程および探傷屈折角から、前記 (1-1) 式を用いて計算で求める。

なお、アレイ探触子の振動子が多いほど広い範囲を同時に探傷することが可能となる。

(b) セクタ走査

セクタ走査は、図 1.16(1) に示すように、アレイ探触子の中から選定した振動子群を 1 組の探触子として、扇形状（セクタ）の範囲の探傷を行う方式である。

セクタ走査による探傷例を、図 1.16(2) に示す。図は、深さ 10mm の EDM ノッチを裏面に付与した試験体（ステンレス鋼母材）に対して、探傷屈折角を 30° ～ 80° の範囲で 1° ピッチに連続的に探傷したときの断面画像（扇形状の探傷画像）である。探傷画像には、欠陥の開口部エコーと端部エコーが同時に表示されている。このように、セクタ走査では、板厚方向の広い範囲を探傷することが可能となる。

(4) 探傷画像表示

フェーズドアレイ UT 法では、探傷データの画像処理による探傷画像から、対象部位の内部を可視化することが可能である。

本手法の基本的な画像処理法としては、取得した超音波波形データをアレイ探触子位置、探傷角度等の探傷条件をもとに、画像表示エリアに埋め込み、3 次元のボックスデータ（各セルには反射エコーの振幅データが埋め込まれている）を作成する方法である。画像表示では、この 3 次元ボックスデータを用いて、指定した画像（平面画像、断面画像等）を作成する。図 1.17 に代表的な探傷画像を示す。

探傷画像としては、B スキャン画像（断面画像、B スコープ表示）、C スキャン画像（平面画像、C スコープ表示）、D スキャン画像（アレイ探触子の後方から見たときの断面画像、D スコープ表示）があり、任意の一断面画像あるいは複数断面の合成画像を表示することができる。

フェーズドアレイ UT 法では、これらの探傷画像から、き裂の位置、き裂長さ、き裂形状（き裂のプロファイル）等を把握することができ、視覚的な検査が可能となる。

(5) フェーズドアレイ UT 法の適用例

フェーズドアレイ UT 法は、オーステナイト系ステンレス鋼およびニッケル基合金の溶接部に発生する SCC き裂の深さ測定に関し、き裂深さ測定技術向上のため、多くの機関で研究開発が行われており、また、実機原子力発電プラントへの適用も多数報告されている。ここでは、それらの中から代表的な適用例を以下に述べる。

フェーズドアレイ UT 法によるニッケル基合金溶接部試験体への適用例⁽¹⁸⁾ を図 1.18 に示す。ここでは、ニッケル基合金溶接部の溶接金属部に付与した疲労き裂および EDM ノッチに対する欠陥深さ測定精度について示したものである。

図 1.18(1) は、疲労き裂を付与した試験体に対して、リニア走査による探傷を行ったときの断面画像である。図より、疲労き裂の開口部エコー（コーナエコー）と端部エコーが明瞭に認められている。また、図 1.18(2) は、疲労き裂および EDM ノッチに対する欠陥深さ測定精度を示した図であり、疲労き裂の測定精度は、EDM スリットの結果とほぼ同様の結果であり、誤差±2mm 程度と高精度に測定されたことが報告されている。

フェーズドアレイ UT 法の実機プラントへの適用として、2001 年の実機 BWR 発電プラントの制御棒駆動機構（CRD：Control Rod Drive）ハウジング／スタブチューブ下部溶接部への適用例^{(18),(20),(21)}を、図 1.19 に示す。図 1.19(1) は、BWR 発電プラントの原子炉圧力容器（RPV：Reactor Pressure Vessel）の構造図であり、対象部位である CRD ハウジング／スタブチューブ下部溶接部（ニッケル基合金溶接部）は、RPV の炉底部に位置している。図 1.19(2) は、スタブチューブ下部溶接部の模式図であり、SCC き裂の発生位置が示されている。また、図 1.19(3) は、フェーズドアレイ UT 法の適用結果を示しており、炉内側（き裂の開口面側）から遠隔操作でアレイ探触子を走査して探傷したときの結果である。図 1.19(3) (a) は、検査治具の先端部に装着したアレイ探触子の走行状況の模式図を示している。また、図 1.19(3) (b) は、き裂深さ測定結果を示したものである。図より、グレー色で塗り潰された領域は、プログレス PT（切削と PT をき裂が消失するまで繰り返し実施する方法）で測定された SCC き裂の形状を示し、赤字のプロット点（エラーバー付）は、フェーズドアレイ UT 法によるき裂深さ評価位置を示しており、き裂の形状（プロファイル）は、PPT で求めた実際の SCC き裂と極めて良く一致していたとされている。

当該溶接部は、配管に楕円状の溶接を施工したような複雑な形状をしていることから、水浸法（炉水を超音波探触子の接触媒質として用い、数 10mm の水ギャップを設けた探傷方法）を適用したとしている。なお、この事例は、炉内側からフェーズドアレイ UT 法を適用した世界で初めて例であり、さらに、図 19(3) に示すように、測定されたき裂の深さが極めて良好な結果がであったことから、わが国では、この事例を契機に、フェーズドアレイ UT 法が広く認知され、その後、原子力発電プラントのステンレス鋼溶接部、ニッケル基合金溶接部等の超音波難探傷部位に対する実機 UT 検査において広く適用されてきた。

次に、実機 BWR 発電プラントの炉心シュラウド溶接部（オーステナイト系ステンレス鋼）へのフェーズドアレイ UT 法の適用例について示す。シュラウド溶接部モックアップ試験体への適用例を、図 1.20⁽¹⁸⁾ に示す。図 1.20(a) は、遠隔操作による走行装置に搭載した大型のアレイ探触子の走行状況を示す模式図である。また、図 1.20(b) は、モックアップ試験体に付与したき裂に対する探傷画像を示し

ており、き裂からの反射エコー（図中の赤丸印）が、試験体表面近傍に認められている。多数の実機プラントのシュラウド溶接部に、上記同様なフェーズドアレイ UT 法が適用され、多くのプラントで、良好な深さ測定結果が得られたことが報告されている。

フェーズドアレイ UT 法の適用に当たっては、初めに、対象部位の材料、形状・寸法、溶接部情報（溶接材、開先形状）、表面状態（凹凸、粗さ等）、き裂情報（発生位置、進展方向等）、アレイ探触子のアクセス性などの情報をもとに、探傷方法（直接接触法、水浸法等）、アレイ探触子の選定、超音波ビーム方式の選定などの探傷条件を設定し、対象部位を模擬したモックアップ試験体へ適用する。モックアップ試験体から得られた結果から、き裂深さ測定精度を確認し、探傷法の有効性を確認する。即ち、対象部位が変わるたびに、探傷条件の設定、性能確認、有効性評価を行う必要があり、ある対象部位で適用した方法を、異なる形状の他の対象部位にそのまま適用することは極めて難しい。

また、実機原子力発電プラントへ適用する場合は、上記の検討結果に加えて、放射線量などの試験環境、アレイ探触子のアクセス性および遠隔操作性などを考慮した探傷法の検討も必要となる。

なお、フェーズドアレイ UT 法は、前記、端部エコー法と同様に、「軽水型原子力発電所用機器の供用期間中検査にける超音波探傷試験規程 JEAC4207-2008⁽¹⁵⁾」に記載されている。

1.2.2.3 超音波 TOFD 法

(1) 原理および特徴

超音波 TOFD (Time of Flight Diffraction) 法⁽²²⁾ は、図 1.21 に示すように、試験体表面に 2 個の探触子（送信用探触子と受信用探触子）を一定の間隔で対向配置し、ラテラル波、試験体裏面反射波、欠陥端部からの回折波を検出し、その伝搬時間差から欠陥検出および寸法測定（欠陥長さ、深さ）を行う方法である。

超音波 TOFD 法による裏面開口き裂の深さ測定は、図 1.21 に示すように、試験体の音速、裏面反射波の伝搬時間、欠陥端部の伝搬時間および 2 個の探触子間距離（送受信探触子の入射点間距離）から計算で求めることができる。また、図 1.22 は、表面開口き裂の探傷例であり、き裂深さは、前記の裏面開口き裂の探傷例と同様、計算により求めることができる。

本手法の主な特徴は、以下の通りである。

- ① 探傷画像（TOFD 画像）から、欠陥深さを直読できる。
- ② 板厚方向の欠陥深さの測定精度が良い。
- ③ 探傷画像から視覚的な検査が可能であり、検査員の技量に依存しにくい。

- ④ ステンレス鋼溶接部、ニッケル基合金溶接部等の超音波異方性材料は、適用範囲（適用板厚）が限定される。
- ⑤ 表層部および裏面部に探傷困難部位があり、浅い欠陥の測定は難しい。

超音波 TOFD 法に用いる試験機材は、汎用の超音波探触子および専用の探傷装置を用いて行うことになる。また、フェーズドアレイ UT 法で超音波 TOFD 法を実現する方法をフェーズドアレイ TOFD 法⁽²³⁾という。

フェーズドアレイ TOFD 法による探傷画像の一例を、図 1.23 に示す。図は、オーステナイト系ステンレス鋼母材の裏面側に深さ 10mm の EDM スリットを付与した試験体への適用結果であり、図の円弧上の位置を指定することで、き裂深さを求めることができる。また、ステンレス鋼溶接部への適用については、試験体の裏面に EDM ノッチが付与されている試験体の探傷結果から、端部エコーと溶接金属組織（柱状晶組織）からのノイズエコーの識別性が低下することも示された。

（2）超音波 TOFD 法の適用例

超音波 TOFD 法は、フェライト系鋼への適用例は、多数報告されている。一方、ステンレス鋼溶接部、ニッケル基合金溶接部等の超音波異方性材料への適用例は少ない。これは、上記で示したように、欠陥の端部エコーとノイズエコーの識別性が低いためであり、従って、本研究の対象材料であるニッケル基合金溶接部への適用性は低い。

超音波 TOFD 法は、前記端部エコー法およびフェーズドアレイ UT 法と同様に、「軽水型原子力発電所用機器の供用期間中検査にける超音波探傷試験規程 JEAC4207-2008⁽¹⁵⁾」に記載されている。

1.2.2.4 超音波開口合成法

超音波開口合成（SAFT : Synthetic Aperture Focusing Technique）法（SAFT-UT 法）⁽²⁴⁾ は、図 1.24 に示すように、広い指向角を持つ小さな探触子を用いて、試験体表面を所定のピッチで移動させて超音波送受信し、各探触子位置で得られた反射エコーデータを各振動子の位置を原点として同心円状に当てはめて画像化することで、欠陥像を再構成する方法をいう。微小な探触子を細かなピッチで走査することで、高い分解能が得られる。しかしながら、広い範囲を探傷する場合、探傷データが膨大となるため解析時間が多大となり、それに伴って検査時間もまた膨大となるなどの課題がある。なお、近年、ニッケル基合金溶接部への SAFT-UT 法の適用研究^{(25),(26)}が進められつつあるが、ステンレス鋼溶接部、ニッケル基合金溶接部への適用例は、極めて少ない。

1.2.3 ニッケル基合金溶接部に対するき裂深さ測定法の選定

ニッケル基合金溶接部は、その溶接金属組織（柱状晶組織）が超音波異方性材料であるため、この部位に発生する SCC き裂は、デンドライト組織からなる柱状晶に沿って分岐、屈曲など複雑な進展挙動を呈し、き裂先端では櫛歯状（ギザギザした形態）の様相を呈することが知られている。

本研究では、ニッケル基合金溶接部に発生する SCC き裂に対して、高精度なき裂深さ測定法を開発することを目的としており、そのために、上記で述べた UT によるき裂深さ測定法について、ニッケル基合金溶接部への適用性を検討し、本研究で取り扱う UT 法の選定を行った。

(1) 固定角斜角探傷法

固定角斜角探傷法は、汎用の斜角探触子を用い、端部エコー法にてき裂深さを測定する方法である。

本手法は、原子力発電プラントの供用期間中検査において、一般に適用されている方法であるが、ニッケル基合金溶接部のような超音波異方性材料への適用では、複雑な超音波伝搬挙動を示すため、き裂深さ測定に及ぼす影響が大きい。

一般に、フェライト系鋼には、横波斜角探触子が使用されているが、オーステナイト系ステンレス鋼溶接部のような超音波異方性を有する材料には、縦波斜角探触子あるいは高性能斜角探触子（広帯域探触子、集束型斜角探触子等）を適用する。ここで、ニッケル基合金溶接部に発生する SCC き裂は、複雑なき裂形態を呈するため、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り、超音波探触子の交換、探傷データの解析・評価など、検査時間が多大となり実用的ではない。

さらに、前記、1.1.3 項で示したように、実機の PWR 発電プラントの RV 管台セーフエンド溶接部の損傷事例では、本手法の適用で、き裂深さ測定が困難であったことが報告されている。

上記の検討結果から、本手法の適用性は低いと考えられる。

(2) フェーズドアレイ UT 法

フェーズドアレイ UT 法は、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、かつ強い超音波をき裂先端部に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を有していることから、オーステナイト系ステンレス鋼溶接部および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する適用例が示されている⁽³⁾。

また、前記 1.2.2.2 項で述べたように、フェーズドアレイ UT 法の実機適用例

は多く、ニッケル基合金溶接部では、CRDハウジング／スタブチューブ下部溶接部への適用例など、また、オーステナイト系ステンレス鋼溶接部では、シユラウド溶接部への適用例などがあげられる。それらの適用事例では、適切な探傷条件の設定により、き裂深さが高精度に測定できたことが報告されている。

このように、フェーズドアレイ UT 法は、実機プラントへの適用実績が豊富であり、また、供用期間中検査における適用規格⁽¹⁴⁾ が整備されていること等から、ニッケル基合金溶接部への適用性が高いものと考えられる。

なお、本研究における対象材料は、板厚が 80mm 程度と厚いため、き裂深さ測定精度などの確認が必要である。

(3) 超音波 TOFD 法

超音波 TOFD 法は、ノズルコーナ等の低合金鋼あるいは炭素鋼溶接部への適用例はあるが、オーステナイト系ステンレス鋼溶接部、ニッケル基合金溶接部等の超音波異方性を有する溶接部への適用では、板厚が厚くなるに従って柱状晶組織からのノイズエコーの影響が大きくなる。本研究の対象材料は、板厚が 80mm 程度と厚いため、き裂先端からの回折波とノイズエコーの識別性は低くなり、本手法のき裂深さ測定に対する適用性は低い。

(4) 超音波開口合成法

本手法は、原理的には高分解能な探傷が可能な方法である。しかしながら、ニッケル基合金溶接部への適用例は少なく、かつ供用期間中検査における適用規格が整備されていないことから、ニッケル基合金溶接部に対して本手法を適用するためには、SCC き裂を付与した試験体を用いてき裂深さ測定精度の確認、適用規格の整備など、多くの課題があり、現時点では、ニッケル基合金溶接部への適用性が低いと考える。

(5) 深さ測定法の選定

上記(1)～(4)の検討結果を、表 1.4 にまとめた。これらの結果から、本研究で取り組む方法として、フェーズドアレイ UT 法を選定することとした。

1.3 研究の目的

原子力発電プラントの主要な構造物に使用されているニッケル基合金溶接部は、近年、国内外で SCC き裂による損傷事例が報告され、特に、PWR 発電プラントの RV 管台セーフエンド溶接部に対して、き裂開口面側からの UT（固定角縦波斜角探傷法）を適用したところ、SCC き裂の深さ測定が困難な事例が報告された。UT により、き裂深さが測定困難であった原因は、溶接金属組織（柱状晶組織）からの材料ノイズエコーが大きく、また、SCC き裂が複雑な形状（先端が尖った形状）を呈していたことから端部エコーが微弱な信号となり、き裂先端部からの端部エコーを検出できなかったものとされている。

そのため、ニッケル基合金溶接部に対して、UT によるき裂深さの高精度な測定法の開発が、構造物の健全性確保の点から強く望まれている。

また、従来から、ニッケル基合金溶接部は、超音波難探傷材と言われており、さらに、UT によるき裂深さ測定誤差は、RMS 誤差で 5mm 程度とも言われている。これらのことから、ニッケル基合金溶接部に対するき裂深さ測定精度の向上が、大きな課題となっている。

そこで、本研究では、ニッケル基合金溶接部に発生する SCC き裂に対して、フェーズドアレイ UT 法による高精度なき裂深さ測定法の開発を目的とする。

ここでは、実機 RV 管台セーフエンド溶接部の損傷事例から、以下に示す内容を実現し、その結果、き裂深さ測定精度を従来に比べてさらに向上させることを目標とする。

- ① SCC き裂における端部エコーの検出性を向上させる。
- ② 深いき裂に対しても、深さ測定を可能とする。
- ③ き裂の誤検出、見逃しの低減を図る。

1.4 本論文の構成

本論文は、6章から構成される。

第1章は、緒論であり、原子力発電プラントのニッケル基合金溶接部に発生する SCC き裂に対して、高精度なき裂深さ測定法の開発の重要性を述べ、本研究で取り組む UT 法の選定について述べ、その上で、本研究の目的および構成について述べる。

第2章では、ニッケル基合金溶接部のき裂深さ測定法として選定したフェーズドアレイ UT 法について、アレイ探触子の選定および各種探傷条件の最適化を図るとともに、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、欠陥深さ測定精度の評価から、フェーズドアレイ UT 法のニッケル基合金溶接部への適用性を明らかにする。

第3章では、ニッケル基合金溶接部のき裂深さ測定において、深さが板厚の 1/2 程度（約 40mm）までの浅いき裂から深いき裂を対象に、フェーズドアレイ UT 法の適用による探傷画像から、き裂情報の把握（き裂の表面位置、長さ、形状等）およびき裂の大小判別から、き裂の誤認識および見逃しの低減を可能とした、フェーズドアレイ UT 法による欠陥深さ測定要領を作成する。さらに、深さ 40mm までの深さの異なる 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、欠陥深さ測定精度の評価結果から、フェーズドアレイ UT 法の有効性を明らかにする。

第4章では、実機で発生したき裂の形状を模擬した SCC き裂のニッケル基合金溶接部への付与方法について、試験環境、応力付与方法、溶接材料面等から検討し、製作した試験体の破壊調査結果から、SCC き裂の模擬性について評価する。次に、前記方法をもとに製作した、SCC き裂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、き裂深さ測定精度の評価結果から、本手法の有効性を明らかにする。

第5章では、SCC き裂深さ測定に及ぼす主要な誤差要因を抽出し、分析、評価を行い、さらに、き裂深さの測定誤差を低減させるための対応策（改善策）についてまとめる。

第6章は、結論であり、本研究で得られた結果を総括して述べる。

参考文献

- (1) (社) 日本機械学会：発電用原子力設備規格 維持規格 (2008 年度版) JSME S NA1-2008, (2008).
- (2) 電気事業連合会：原子力・エネルギー図面集, (2011).
- (3) 福村卓也、戸塚信夫：原子炉容器上蓋管台部の 1 次冷却材漏洩経路等調査, INSS JOURNAL, Vol.15, (2008), pp.113-124
- (4) (独) 原子力安全基盤機構：平成 20 年度 ニッケル合金溶接部の非破壊技術実証に関する事業報告書, 09 基高報-0006, (2009.12).
- (5) 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原子における Ni 基合金使用部位に係る検査等について, NISA-163a05-2, (2007).
- (6) K. Kono, M. Otaka, H. Miharada, K. Sakamoto, I. Komura and T. Furukawa : Detectability and sizing capability of UT to SCC in nickel based alloy welded joint, Proceedings of the 7th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurised Components, (2009) , pp.360-365.
- (7) 酒井俊治, 戸塚信夫, 釜屋昌幸, 中島宣雄 : MA600 合金 1 次冷却水中応力腐食割れ (PWSCC) 進展速度に関する研究, INSS JOURNAL, Vol.7, (2000), pp.129-136.
- (8) (独) 原子力安全基盤機構：「平成 20 年度 Ni 基合金応力腐食割れ進展評価に技術実証に関する事業報告書」, 09 原高報-0013, (2009).
- (9) 日本原子力技術協会：PWR 炉内構造物点検評価ガイドライン [クラス 1 容器管台セーフエンド異材継手部], JANTI-VIP-08-第 1 版, (2009).
- (10) 関西電力ホームページ：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)
http://www.kepco.co.jp/corporate/pr/2008/_icsFiles/afieldfile/2008/09/26/1_0926_3j_01.pdf.
- (11) S. Kawanami, T. Matsuura, J. Nishida, M. Ideo, M. Kurokawa, T. Sera and S. Hirano : Development advanced defect sizing technique using ultrasonic testing for nozzle welding, Proceeding of the 7th International conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, (2009), pp.417-423.
- (12) (社) 日本機械学会：発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (2007 年度版) JSME S NC1-2007, (2007).
- (13) (社) 日本機械学会：発電用原子力設備規格 溶接規格 (2007 年度版) JSME S NB1-2007, (2007).
- (14) 岸上守孝：「鋼溶接部の端部エコー法による欠陥高さ測定法」, 日本非破壊検

- 査協会, Vol.25, No.1, (1985), pp.245-251
- (15) (社) 日本電気協会：軽水型原子力発電所用機器の供用期間中検査における超音波探傷試験規程（2008年版）JEAC4207-2008, (2008) .
- (16) 平澤泰治, 長井敏, 古村一朗, 村上功治, 高林順一, 櫻井善茂：鋼溶接部探傷用 256ch フェーズドアレイ UT 装置の開発, 日本非破壊検査協会 平成 9 年度秋季講演大会, (1997), pp.21-24.
- (17) (社) 日本非破壊検査協会：「非破壊検査シリーズ 超音波探傷試験 III (2001年版)」, (2001), p.211
- (18) 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, (2005), pp.48-49
- (19) 平澤泰治, 古村一朗, 天内淑文, 成瀬克彦：フェーズドアレイ UT 法を用いた炉内機器溶接部の探傷技術開発, 日本非破壊検査協会 平成 13 年度春季講演大会, (2001), pp.1-2
- (20) 平澤泰治, 長井敏, 川原田義幸, 村上功治, 湯口康弘：原子炉内構造物への超音波探傷技術の適用, 日本保全学会 第 3 回学術講演会 要旨集, (2006), pp.365-368.
- (21) T. Hirasawa, K. Naruse, I. Komura, S. Yamamoto, Y. Yuguchi, T. Ohtsubo, T. Matsunaga, M. Torii：“Phased Array Applications for Hamaoka unit-1 CRD Housing Stub-tube Inconel Welds”, 3rd EPRI Phased Array Seminar on Phased Array Ultrasonic Examination, Seattle, Washington, USA, 2003-06, EPRI, Paper24.
- (22) M.G. Silk：Defect Sizing using Ultrasonic Diffraction, J. of NDT, (1979), p.13
- (23) 平澤泰治, 古村一朗, 櫻井善茂：高速 TOFD 法探傷・サイジング技術開発, 日本非破壊検査協会 平成 10 年度秋季大会講演概要集, (1998), pp.13-16
- (24) (社) 日本非破壊検査協会：「非破壊検査シリーズ 超音波探傷試験 III (2001年版)」, (2001), p.213.
- (25) J.P. Lareau：Inspection of Dissimilar Metal Welds to Resolve False Positive Indications, Proceeding of the 8th International conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, (2010), pp.826-830.
- (26) I. Komura and T. Furukawa：Improvement of SCC Sizing Capability by 3D-SAFT UT Method in Ni Alloy Weld, Proceeding of the 8th International conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, (2010), pp.831-837.

表 1.1 主な非破壊試験方法

表面検査	目視試験 (VT: Visual Testing)
	浸透探傷試験 (PT: Penetrant Testing)
	磁粉探傷試験 (MT: Magnetic Particle Testing)
	渦電流探傷試験 (ECT: Eddy Current Testing)
内部検査	放射線透過試験 (RT: Radiographic Testing)
	超音波探傷試験 (UT: Ultrasonic Testing)

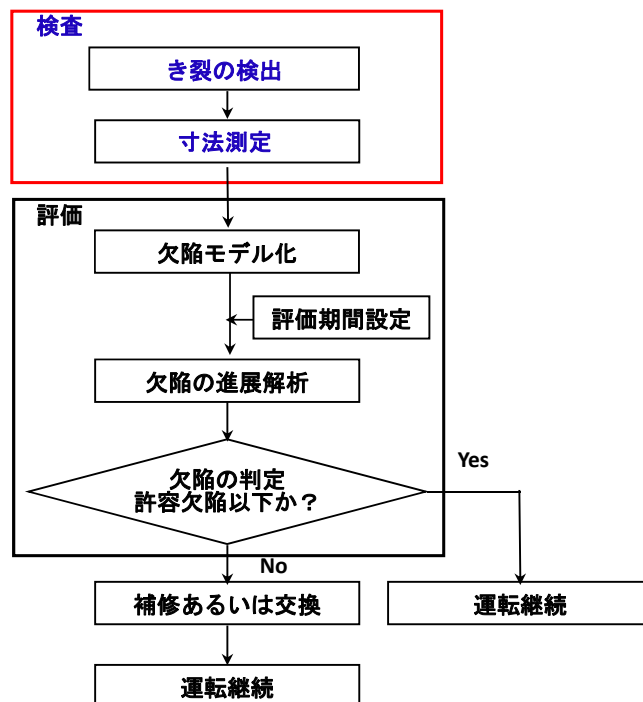
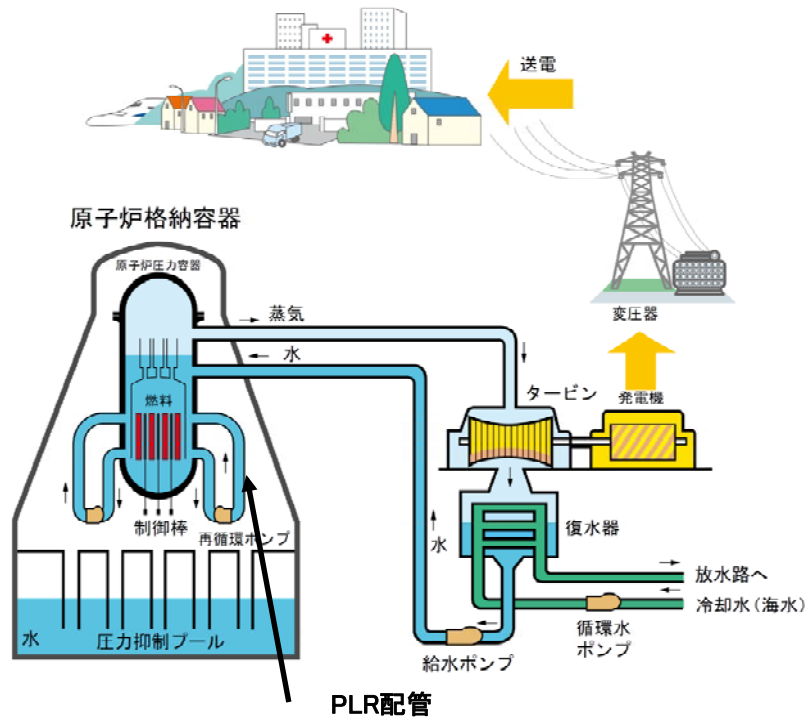
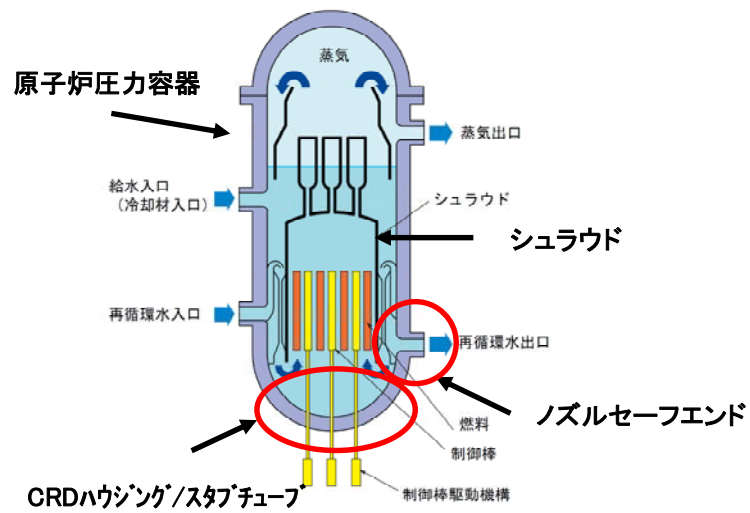


図 1.1 維持規格の点検・評価の考え方



(a) BWR の発電のしくみ



(b) 原子炉圧力容器の模式図

図 1.2 BWR プラントの概要 (2)

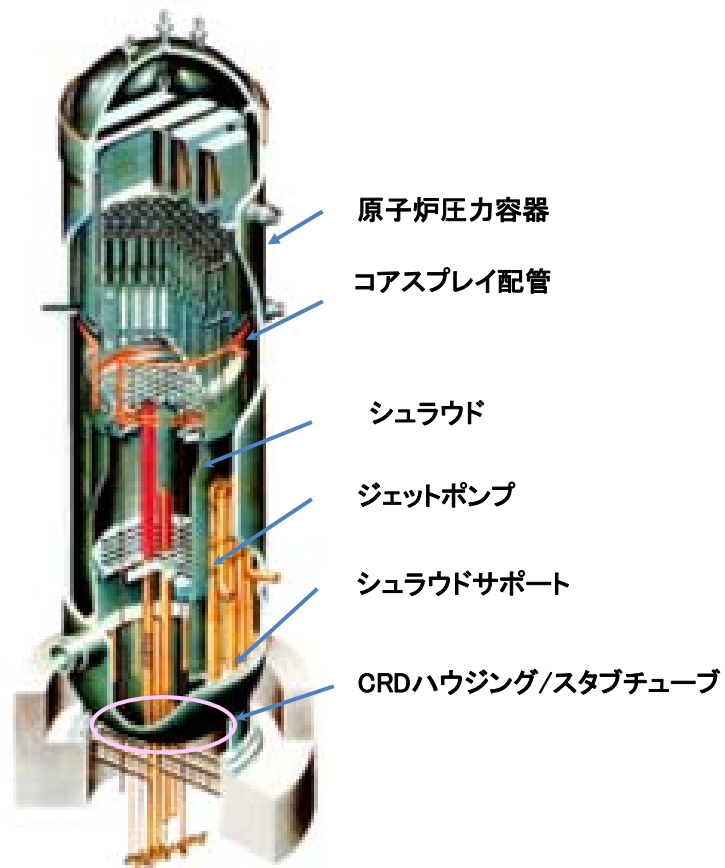
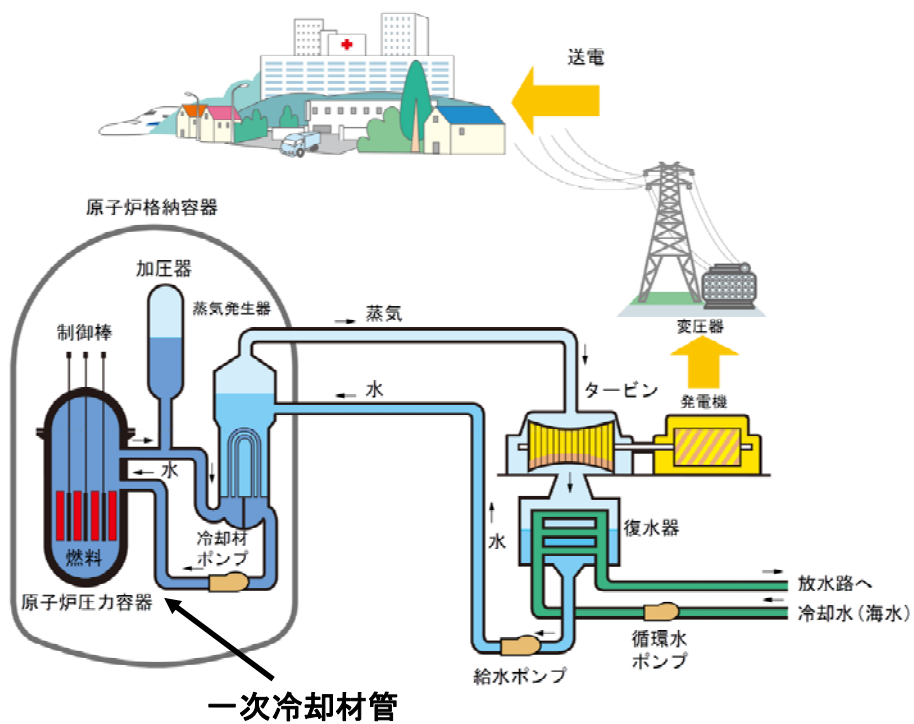


図 1.3 BWR における原子炉圧力容器および炉内構造物

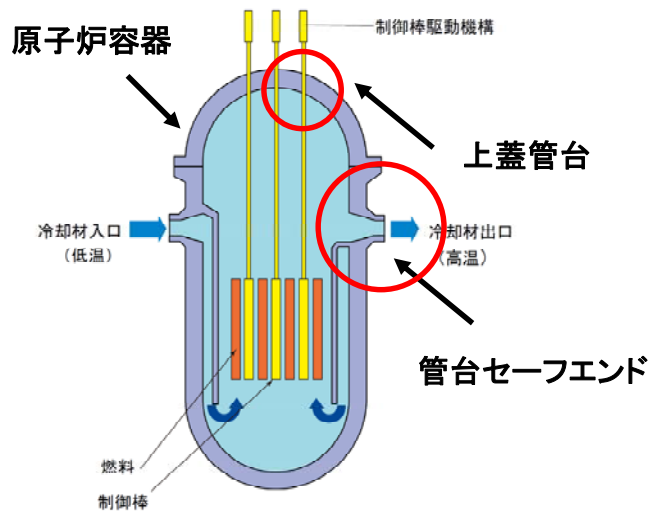
表 1.2 BWR プラントの主要機器・構造物の使用材料

機器・構造物	主な使用材料
原子炉圧力容器	低合金鋼(内面ステンレス鋼内張り)
炉心シュラウド 原子炉再循環系配管	ステンレス鋼
シュラウドサポート CRDハウジング/スタブチューブ	ニッケル基合金
ノズルセーフエンド	異種金属溶接部(低合金鋼-ニッケル基合金-ステンレス鋼)

*) CRD: Control Rod Drive(制御棒駆動機構)



(b) PWR の発電のしくみ



(b) 原子炉容器の模式図

図 1.4 PWR プラントの概要 (2)

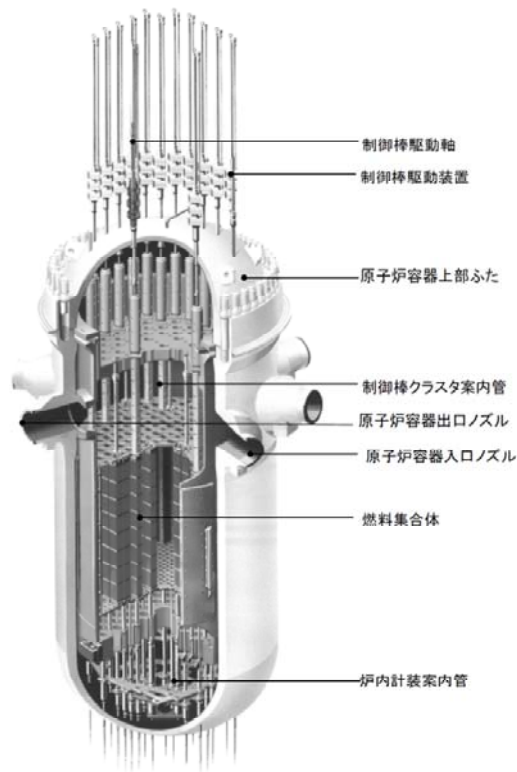


図 1.5 PWR における原子炉容器および炉内構造物⁽³⁾

表 1.3 PWR プラントの主要機器・構造物の使用材料

機器・構造物	主な使用材料
原子炉容器、加圧器	低合金鋼(内面ステンレス鋼内張り)
一次冷却材管	ステンレス鋳鋼
炉内計装筒、上蓋管台	ニッケル基合金
管台セーフエンド	異種金属溶接部(低合金鋼-ニッケル基合金-ステンレス鋼)

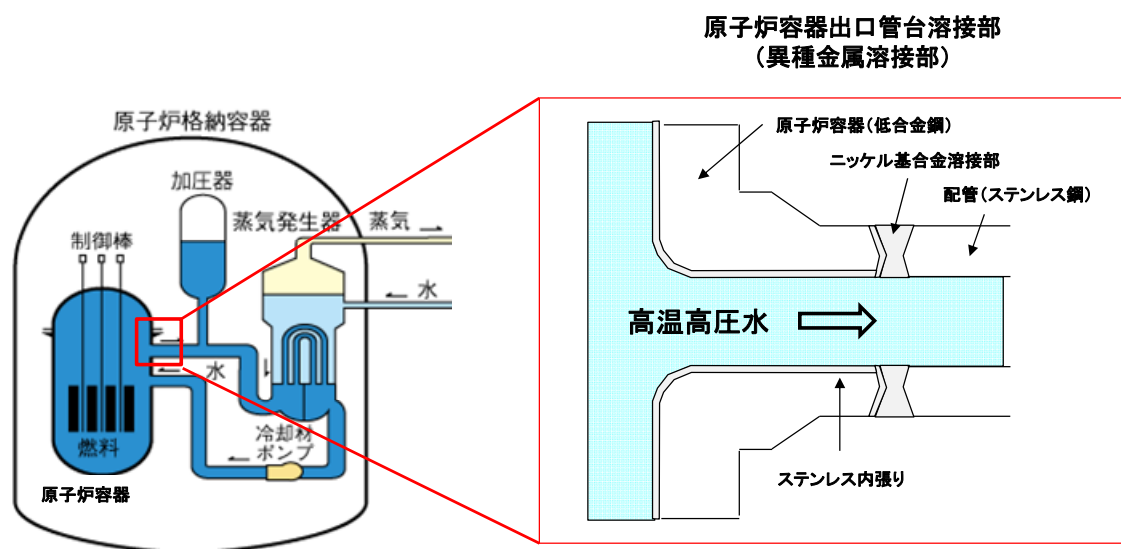


図 1.6 PWR プラントの管台溶接部の構造例

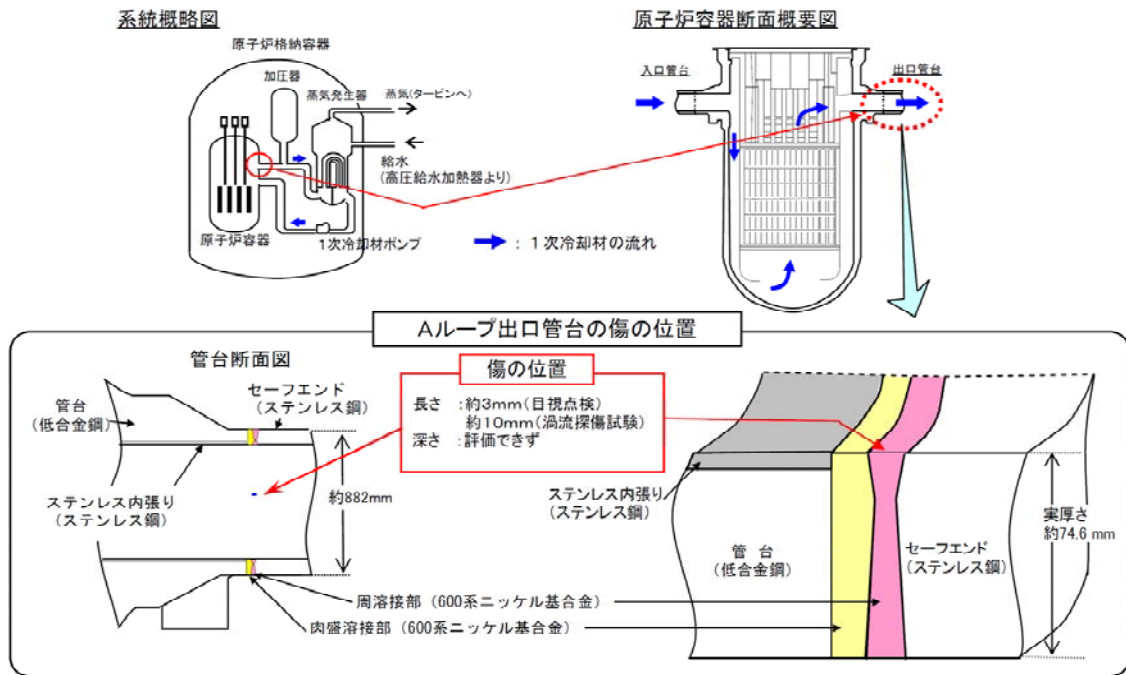


図 1.7 PWR の原子炉容器管台溶接部の損傷事例⁽⁹⁾

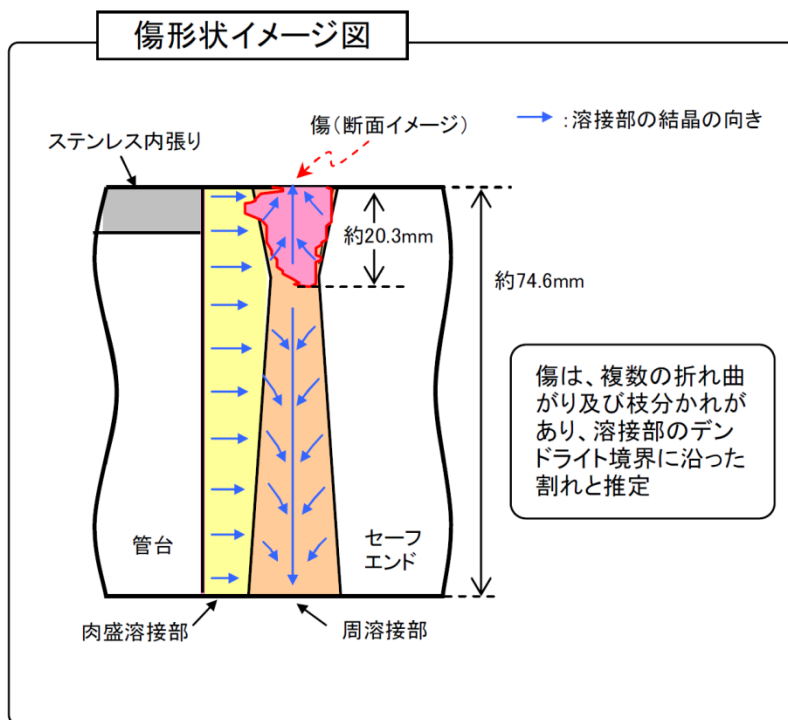
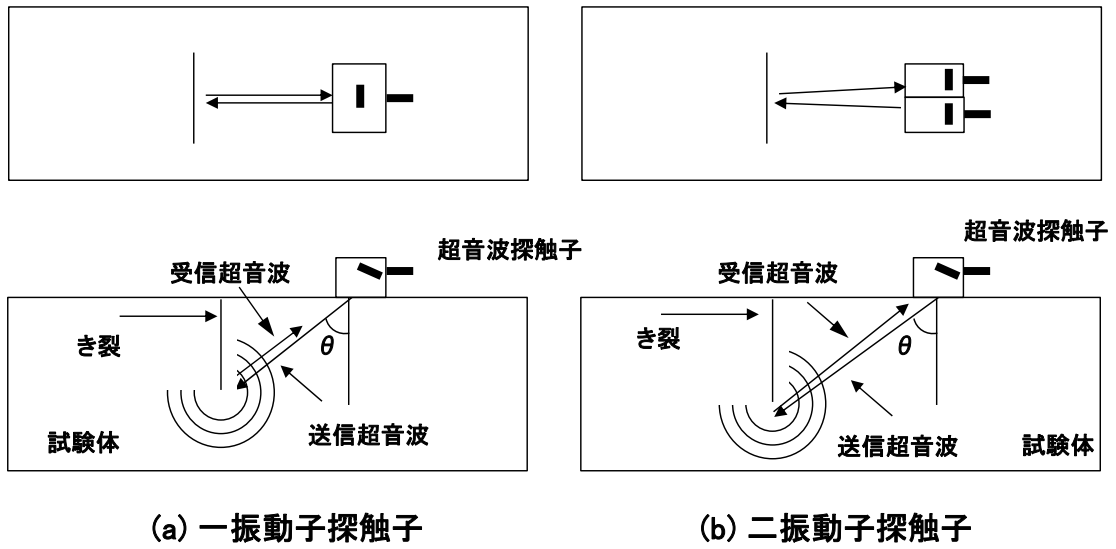
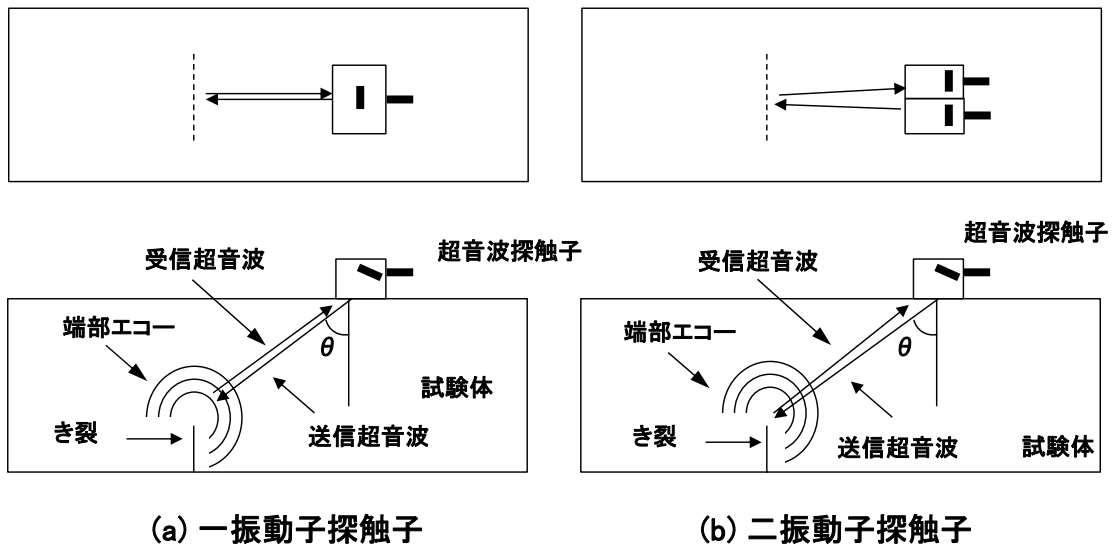


図 1.8 原子炉容器管台セーフエンド溶接部の損傷事例⁽⁹⁾

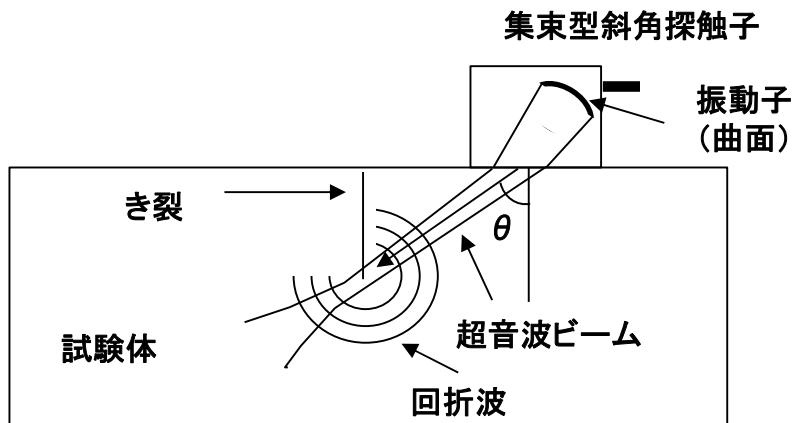


(1) 表面開口き裂の場合



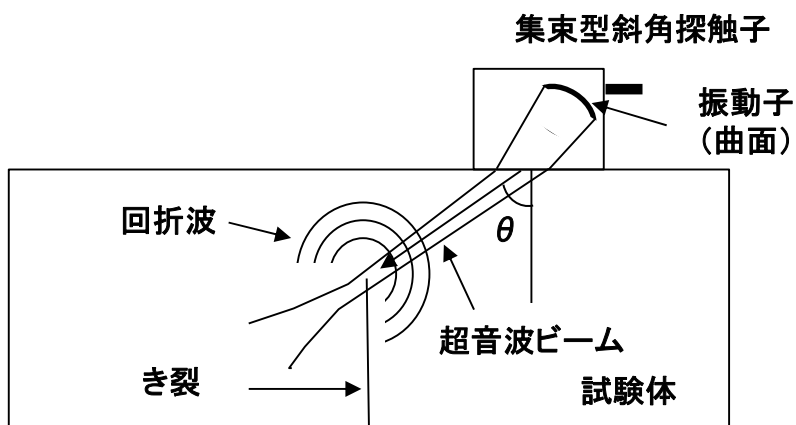
(2) 裏面開口き裂の場合

図 1.9 固定角斜角探傷法の探傷模式図



θ : 探傷屈折角

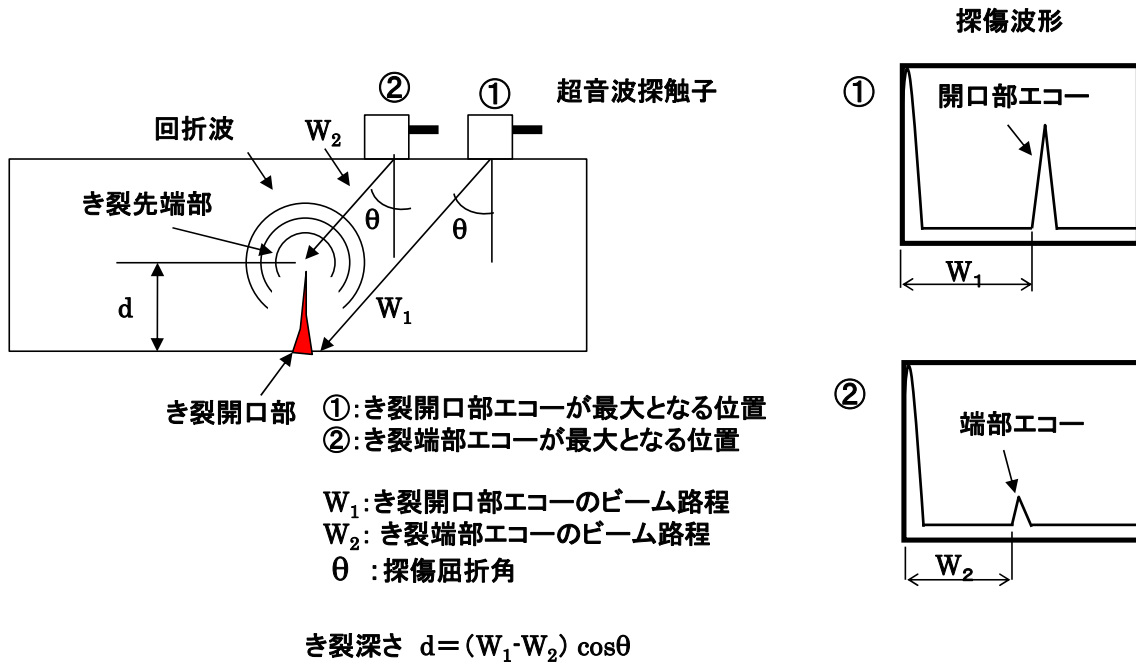
(1) 表面開口き裂の場合



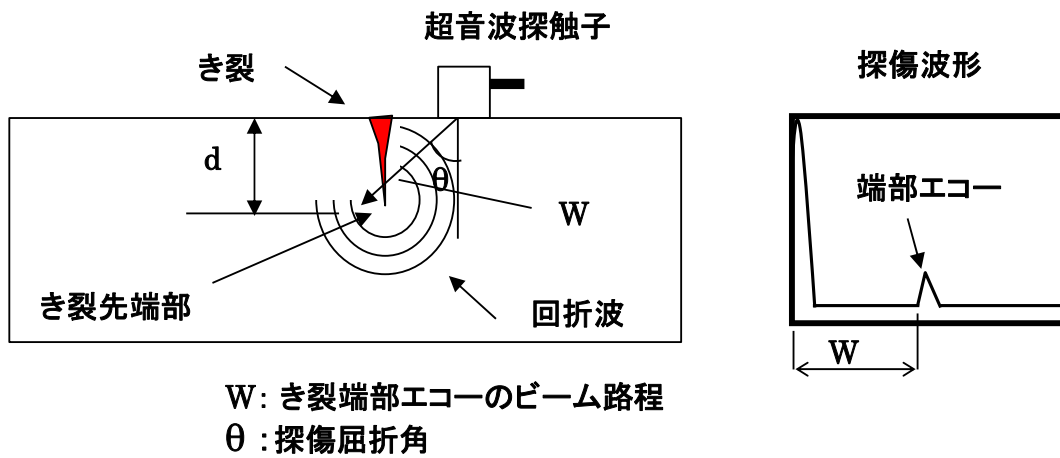
θ : 探傷屈折角

(2) 裏面開口き裂の場合

図 1.10 集束型斜角探触子による探傷模式図



(1) 裏面開口き裂の場合



(2) 表面開口き裂の場合

図 1.11 端部エコー法の原理図

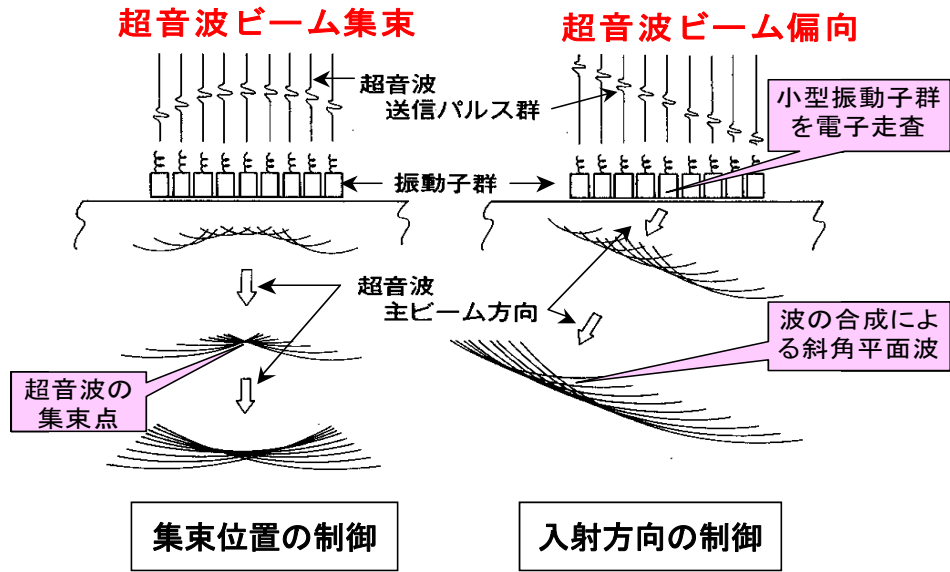


図 1.12 フェーズドアレイ UT 法の原理図⁽¹⁷⁾

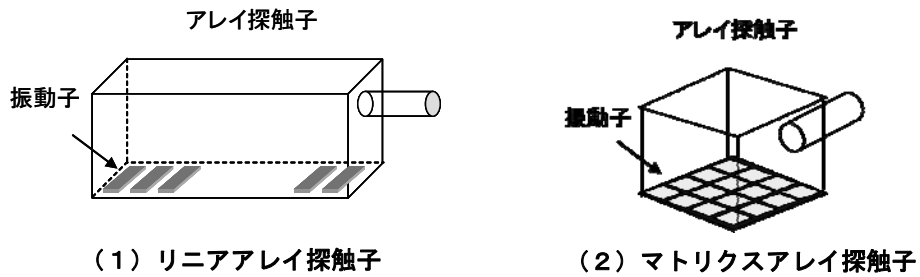


図 1.13 代表的なアレイ探触子

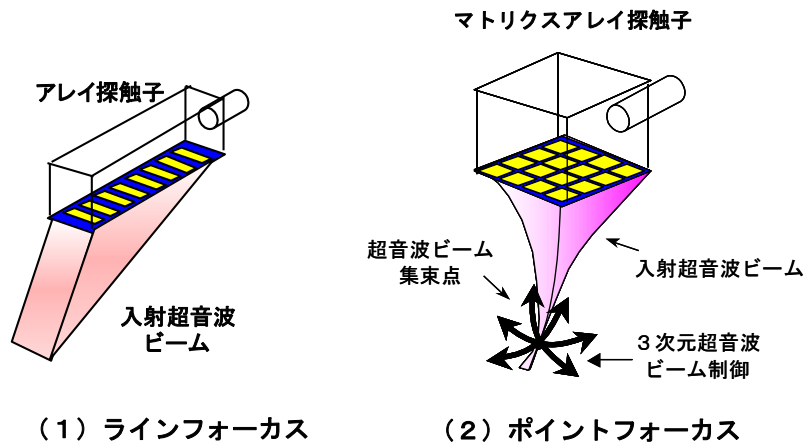


図 1.14 超音波ビームの集束制御

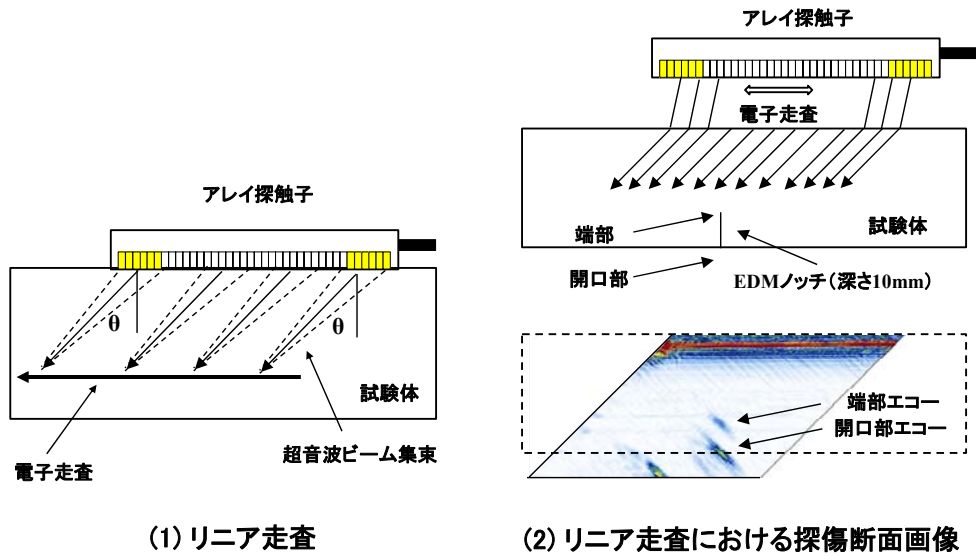


図 1.15 リニア走査

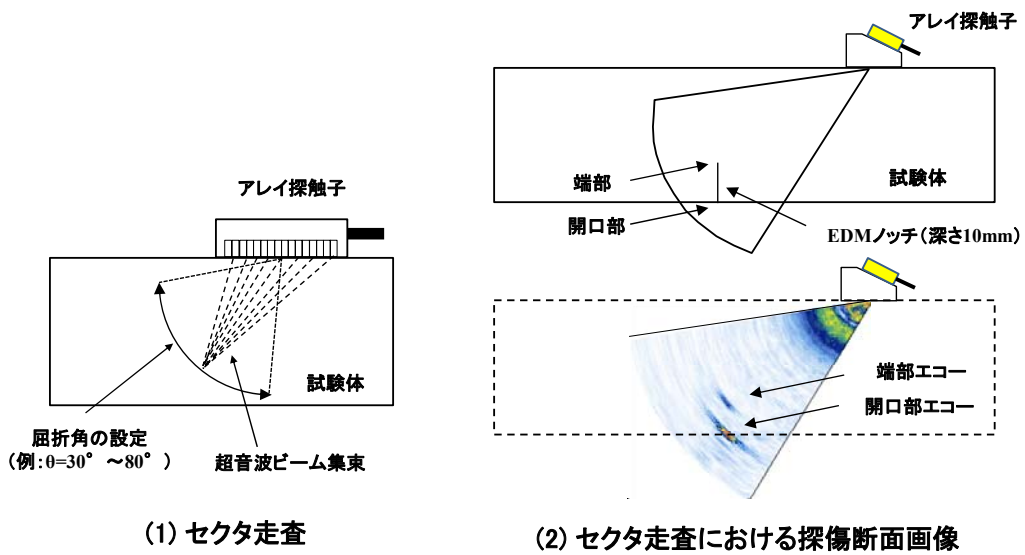


図 1.16 セクタ走査

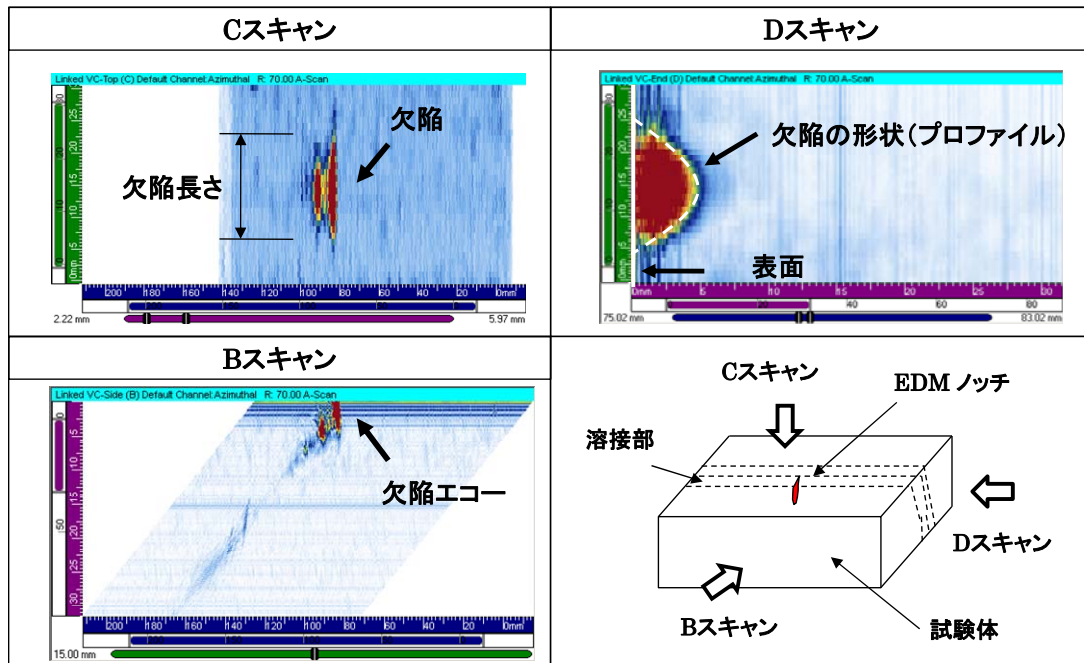
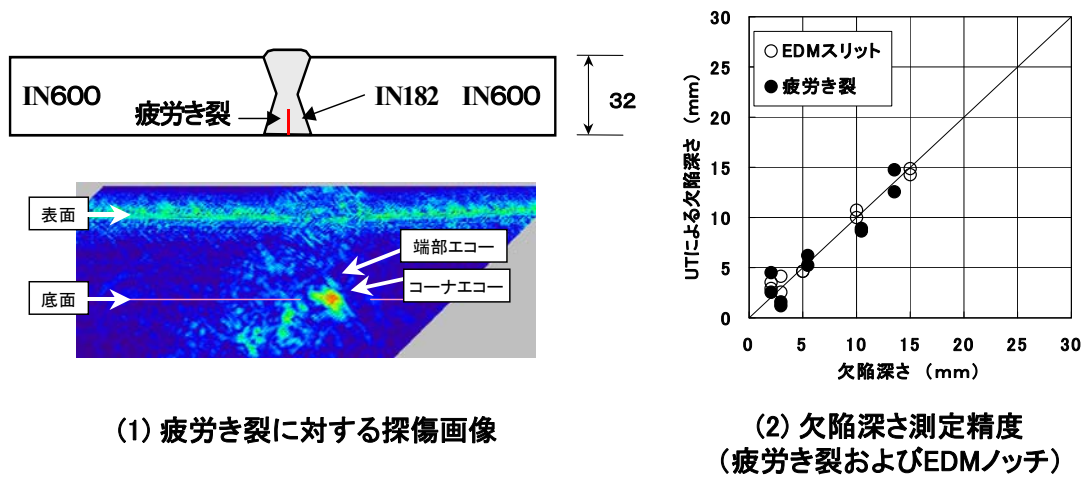


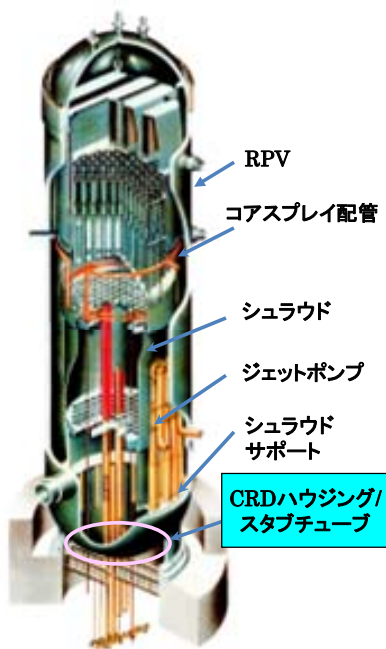
図 1.17 フェーズドアレイ UT 法における代表的な探傷画像



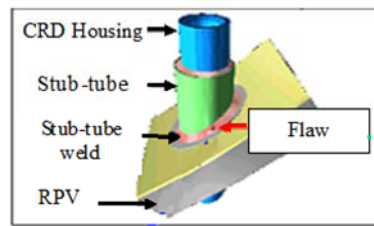
(1) 疲労き裂に対する探傷画像

(2) 欠陥深さ測定精度
(疲労き裂およびEDMノッチ)

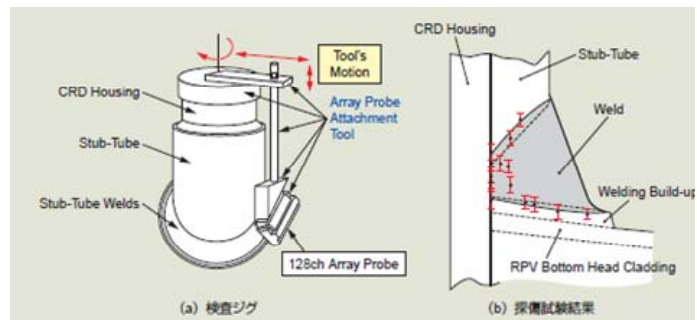
図 1.18 フェーズドアレイ UT 法による Ni 基合金溶接部への適用例⁽¹⁸⁾
(付与欠陥: 疲労き裂、EDM ノッチ)



(1) BWRの構造



(2) スタブチューブの模式図 (19)



(3) CRDハウジング/スタブチューブ下部溶接部への適用例 (17)

図 1.19 フェーズドアレイ UT 法による CRD ハウジング/スタブチューブ下部溶接部への適用例

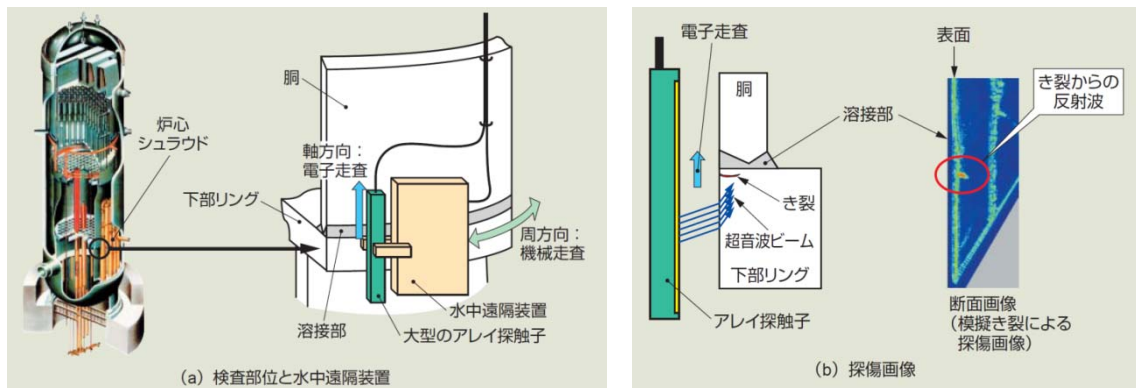
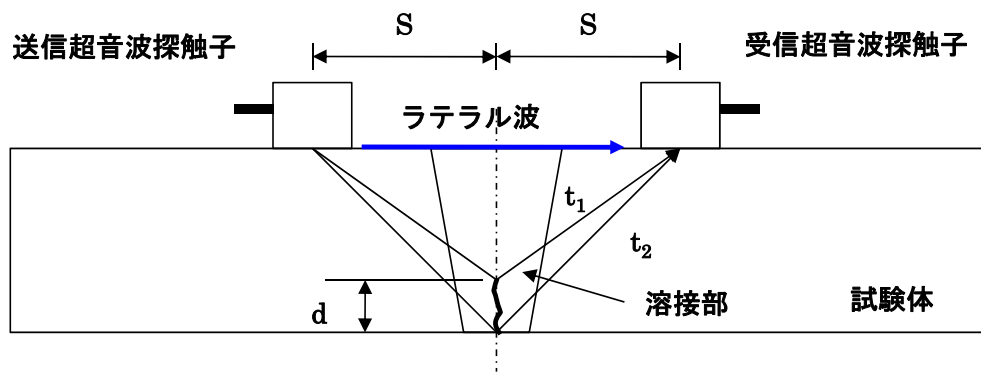


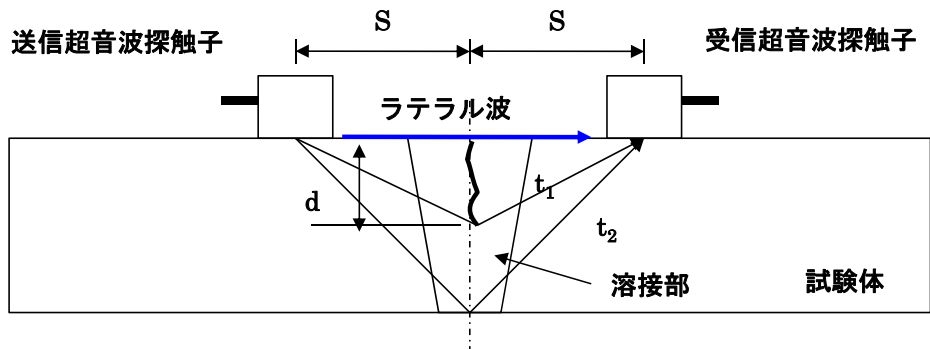
図 1.20 フェーズドアレイ UT 法によるシュラウド溶接部モックアップへの適用例 (17)



$$d = [(C^2 t_2^2)/4 - S^2]^{1/2} - [(C^2 t_1^2)/4 - S^2]^{1/2}$$

- d : き裂深さ
- C : 試験体の音速
- t₂ : 裏面反射波の伝搬時間
- t₁ : 欠陥端部の伝搬時間

図 1.21 超音波 TOFD 法の原理図(裏面開口欠陥の探傷例)



$$d = [(C^2 t_1^2)/4 - S^2]^{1/2}$$

- d : き裂深さ
- C : 試験体の音速
- t₂ : 裏面反射波の伝搬時間
- t₁ : 欠陥端部の伝搬時間

図 1.22 超音波 TOFD 法の原理図(表面開口欠陥の探傷例)

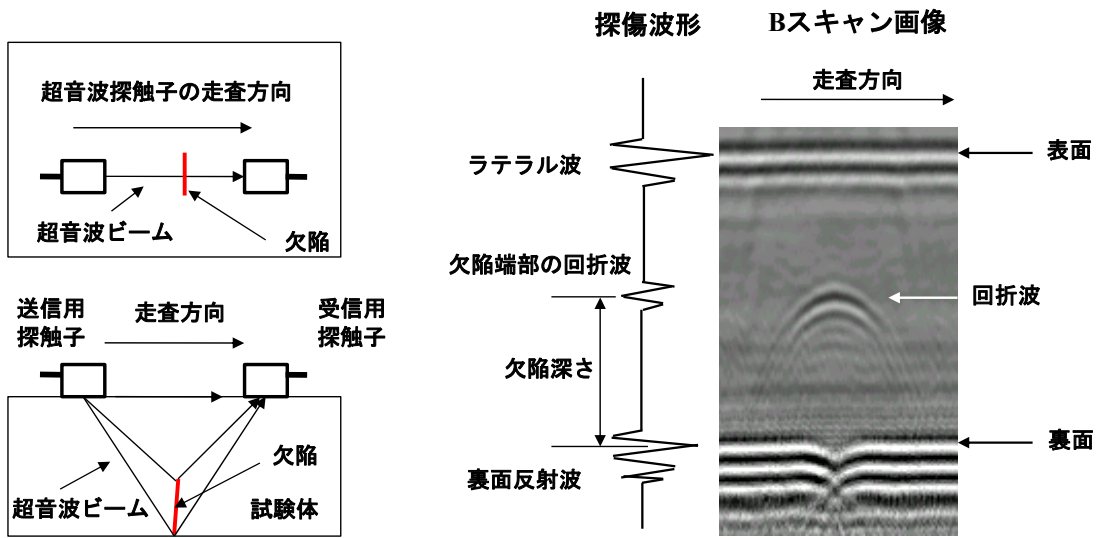


図 1.23 フェーズドアレイ TOFD 法による探傷画像例⁽²²⁾
 (材料:ステンレス鋼母材, 付与欠陥:EDM ノッチ)

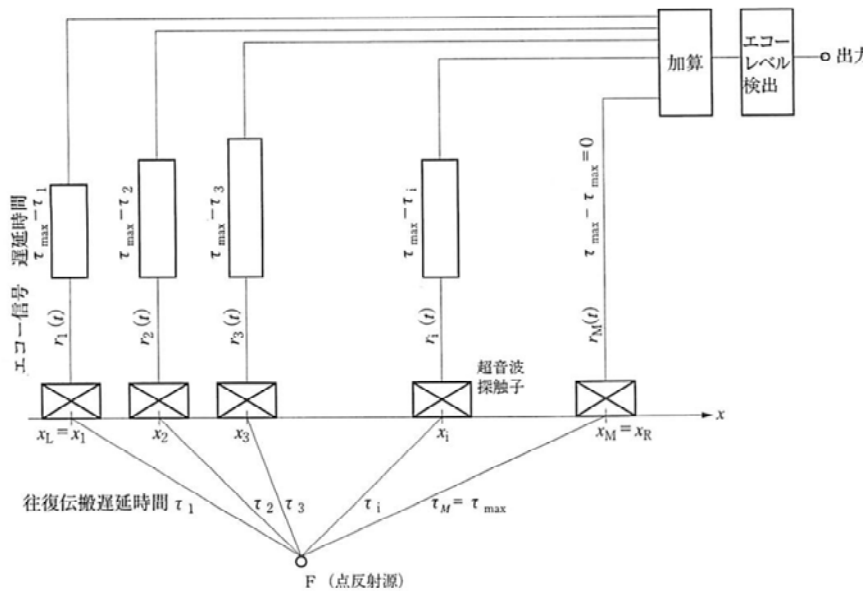


図 1.24 超音波開口合成法の原理図⁽²³⁾

表 1.4 UTによるき裂深さ測定法の評価

測定法	適用性	適用規格 ^{*)}	評価
固定角斜角探傷法	<ul style="list-style-type: none"> ・一般的な定期検査に適用 ・難探傷材、高減衰材では、適用性が低い 	あり	
フェーズドアレイ UT法	<ul style="list-style-type: none"> ・複数条件(探傷屈折角, 集束深さ 等)の探傷が可能 ・高パワーUT装置等の機材が入手可 ・原子力プラントの実機適用実績が多い ・適用性が高い 	あり	○
超音波TOFD法	<ul style="list-style-type: none"> ・均質材(炭素鋼等)には有効 ・異方性材料を有する溶接部では、き裂信号とノイズ信号の識別性が低い ・適用性が低い 	あり	
超音波開口合成法	<ul style="list-style-type: none"> ・原理的に分解能が良好 ・探傷データが少なく、データの蓄積が必要 ・適用規格の整備が必要 ・適用性が低い 	なし	

*)適用規格: 軽水型原子力発電所用機器の[供用期間中検査における超音波探傷試験規程, JEAC4207-2008

第2章 基礎試験体による探傷性能評価

第2章 基礎試験体による探傷性能評価

2.1 緒言

原子力発電プラントの炉内構造物、耐圧バウンダリ等の主要構造物で使用されているニッケル基合金溶接部では、国内外で応力負傷割れ（SCC）に起因したき裂による損傷事例が報告されている⁽¹⁾。特に、PWR 発電プラントの RV 管台セーフエンド溶接部では、従来の UT 法（固定角縦波斜角探傷法）を適用したところ、SCC き裂の深さ測定が困難な事例が報告された⁽²⁾。

ニッケル基合金溶接部は、超音波異方性材料であり、複雑な超音波伝搬挙動を示すことから、超音波難探傷材と言われている。これは、溶接部に入射された超音波は、溶接金属組織（柱状晶組織）で散乱・減衰あるいは屈曲が生じ、さらに、結晶組織からの金属組織エコー（材料ノイズエコー）により、き裂先端からの端部エコーの検出性が低下し、き裂深さ測定が困難になるためである。

このような状況から、き裂深さの高精度な深さ測定法の確立が、原子力発電プラントの健全性確保の点から強く望まれている。

一方、ニッケル基合金溶接部の SCC き裂に対して、UT によるき裂深さ測定法の調査結果から、フェーズドアレイ UT 法は、複数条件での探傷が可能なこと、探傷画像による可視化が可能なこと等の特徴を有していることから、ニッケル基合金溶接部を対象とした各種研究開発⁽³⁾⁻⁽⁶⁾、実機プラントへの適用実績⁽⁷⁾等、多数の事例が報告されており、さらに、適用規格⁽⁸⁾が整備されていることから、本研究で取り組む手法として、フェーズドアレイ UT 法を選定したことを述べた。

ここで、ニッケル基合金溶接部に対する実機適用例として、CRD ハウジング／スタブチューブ下部溶接部への適用例⁽⁷⁾によると、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 法を適用し、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、上記の溶接部は、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（RV 管台セーフエンド溶接部）の板厚は 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、端部エコーと材料ノイズエコーとの識別性が低下し、き裂の誤検出あるいはき裂の見逃しの可能性も懸念される。

そこで、本章では、き裂深さ測定が困難であった RV 管台セーフエンド溶接部の実機損傷事例⁽²⁾をもとに、き裂開口面側からのフェーズドアレイ UT 法の適用性を検討する。ここでは、初めにフェーズドアレイ UT 法の探傷条件の最適化について検討し、次に、その条件をもとに、深さ 20mm までの EDM ノッチを付与したニッケル基合金溶接部についてフェーズドアレイ UT 法を適用し、欠陥深さ測定精度の評価から、フェーズドアレイ UT 法の有効性を検討する。

2.2 探傷条件の選定

2.2.1 試験体

対象とするニッケル基合金溶接部は、実機プラントの損傷事例を参考に、板厚 80mm の RV 管台セーフエンド溶接部とした。また、実機の RV 管台セーフエンド溶接部に発生した SCC き裂は、深さが約 20.3mm であったこと⁽⁴⁾から、本章では、深さ 20mm までのき裂を測定することとし、これらの条件をもとに、フェーズドアレイ UT 法の探傷条件の選定を行うこととした。

ニッケル基合金溶接部に対するフェーズドアレイ UT 法を適用するに当たり、標準横穴試験片を用いて探傷条件の選定を行った。図 2.1 に、標準横穴試験片の形状・寸法を示す。試験片は、SUS316L 鋼の母材であり、ニッケル基合金の母材部と超音波音響特性が同等であることを確認している。また、標準横穴試験片には、板厚方向の深さ Z=5, 10, 15, 20mm の位置に、直径 3.2mm の横穴が付与されている。

2.2.2 試験方法

フェーズドアレイ UT 法のニッケル基合金溶接部への適用にあたっては、実機プラントへの適用例^{(7),(9)}、各種研究成果^{(10),(11)}等をもとに、アレイ探触子の選定（適用周波数、振動子寸法、同時駆動振動子数等）を行い、各種アレイ探触子を用いた探傷条件の選定（アレイ探触子の開口寸法、超音波ビームの集束条件、超音波ビーム走査等）を行った。

試験に用いた探傷装置は、フェーズドアレイ UT 法の専用装置（Tomoscan III : Zetec 社製）である。

用いたアレイ探触子は 2 種類で、仕様および適用対象を表 2.1 に示す。表より、1 番目の探触子（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、深さの浅い欠陥（深さ 10mm 程度）を対象として選定した。また 2 番目の探触子（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、深さの深い欠陥（深さ 20mm 程度）を対象に選定した。

標準横穴試験片に対する探傷は、図 2.2 に示すように、アレイ探触子を試験片の探傷面に設置し、X-Y スキャナを用いて所定のピッチで走査（自動探傷）し、各横穴からの反射エコーのデータ（探触子位置に対する振幅および超音波ビーム路程）を収録して行った。データ解析では、探傷条件ごとに、各横穴からの反射エコーを測定し、アレイ探触子位置に対する振幅分布（反射エコー高さ分布）を測定した。

2.2.3 試験結果

(1) アレイ探触子 2L(10)

アレイ探触子 2L(10)を用いて、アレイ探触子の開口寸法（超音波ビームを同時駆動するための使用 ch 数）の影響について調べた。その結果を、図 2.3 に示す。図は、開口寸法を、(a)10mm×6.4mm (8ch) および(b)10mm×12.8mm (16ch) の 2 種類設定して探傷したときの結果である。図 2.3(上段)は、探傷屈折角 45°、集束位置 F=10mm、探傷感度 42dB で探傷したときの探傷断面画像であり、図 2.3(下段)は、横穴からの反射エコー高さ分布である。図より、深さ位置 Z=5~20mm の横穴については、いずれも、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ることがわかる。この結果から、開口寸法として 10mm×12.8mm を選定した。

次に、アレイ探触子 2L(10)の集束位置の影響について調べた。その結果を、図 2.4 に示す。図は、開口寸法を 10mm×12.8mm に固定し、集束位置を F=5、10、20mm と設定して、探傷屈折角 45°、探傷感度 42dB で探傷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。深さ位置 Z=5~20mm の横穴については、いずれの集束位置でも超音波ビームの広がりが小さく、エコー高さ分布に大きな差異は認められなかった。ここで、アレイ探触子 2L(10)は、浅い欠陥(深さ 10mm)の深さ測定用として選定したことから、集束位置は、適用目的と同じ F=10mm を選定した。

以上より、アレイ探触子 2L(10)の探傷条件は、開口寸法 10mm×12.8mm、集束位置 F=10mm とした。

(2) アレイ探触子 2L(20)

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 (32ch) とし、そのときの集束位置の影響について調べた。図 2.5 に、集束位置を F=10、20、30mm と設定したときの探傷結果を示す。図は、探傷屈折角 45°、探傷感度 34dB 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。反射エコー高さ分布（図の下段）より、集束位置 F が F=10mm から F=30mm と大きくなるに従い、浅い位置の横穴 (Z=5, 10mm) からの反射エコー高さは、徐々に小さくなり、概略 3~4dB 程度低くなっている。一方、集束位置 F の大きさに依らず、深い位置の横穴 (Z=15, 20mm) からの反射エコー高さ分布に大きな差異は認められなかった。この結果から、集束位置は、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=20mm を選定した。

以上より、アレイ探触子 2L(20)の探傷条件は、開口寸法 20mm×19.2mm、集束位置 F=20mm とした。

2.3 ニッケル基合金溶接部への適用

2.3.1 試験体

試験体は、実機 RV 管台セーフエンド溶接部を模擬したニッケル基合金溶接部（異種金属溶接部：炭素鋼-ニッケル基合金-ステンレス鋼）の板厚 80mm の平板試験体である。試験体は 2 種類あり、1 種類目は、放電加工（EDM）ノッチを突合せ溶接部の溶接線に対して直交方向に付与した試験体であり、その外観および試験体形状・寸法を、図 2.6 および図 2.7 に示す。また、2 種類目は、EDM ノッチをバタリング部に付与した試験体であり、その形状・寸法を、図 2.8 に示す。突合せ溶接部およびバタリング部には、各々、深さ 2, 5, 10, 20mm の 4 種類の EDM ノッチが付与されており、すべての EDM ノッチは、長さ 10mm、形状は半楕円である。これらの EDM ノッチの付与条件を、表 2.2 に示す。

ニッケル基合金溶接部試験体の溶接金属部のマクロ組織観察を行った結果を、図 2.9 に示す。図 2.9(左)は、結晶組織の写真であり、図 2.9(右)には、結晶の成長方向を矢印で模式的に示してある。図より、結晶の成長方向は明瞭に観察でき、突合せ溶接部では、中央に向かって成長し、バタリング部では、水平方向に成長していることがわかる。この結果は、通常の異種金属溶接部の組織と類似の様相を示している。

2.3.2 試験方法

(1) 試験機材

試験に用いたアレイ探触子およびフェーズドアレイ UT 装置は、前記、2.2 節で用いたものと同一である。

(2) 試験方法

前記、2.2 節で選定した探傷条件をもとに、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 法を適用した。そのときの探傷条件を表 2.3 に示す。探傷方法は、直接接触法とし、探傷面は EDM ノッチの開口面側、探傷方向は EDM ノッチに対して両側とし、超音波ビームの EDM ノッチに対する入射方向は、EDM ノッチの長さ方向に対して直交方向である。

探傷時の超音波ビーム走査方式は、セクタ走査とし、探傷屈折角範囲は、 30° ～ 80° （走査ピッチ： 1° ）とした。アレイ探触子は、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（X 方向）は $X=80\text{mm}$ 以上、溶接線直交方向（Y 方向）は EDM ノッチがその中央になるように $Y=30\text{mm}$ （ $\pm 15\text{mm}$ ）とし、走査ピッチは、X 方向 0.5mm 、Y 方向 1mm とした。

データ解析は、セクタ走査で収録した探傷データからリニア走査のデータを抽出して行った。基本となる探傷屈折角は、 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、端部エコー法にて行った。

2.3.3 欠陥深さ評価

(1) 突合せ溶接部への適用

EDM ノッチを突合せ溶接部に付与した試験体(試験体名:EDM-1)に対して、フェーズドアレイ UT 法を適用した。探傷結果の一例を、図 2.10 に示す。図は、各 EDM ノッチ深さに対する探傷断面画像である。図より、EDM ノッチの開口部からの開口部エコーおよび EDM ノッチの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 2.10 (a)は、深さ $d=2\text{mm}$ の探傷断面画像であり、アレイ探触子 2L(10)を用いて、探傷屈折角 60° 、集束位置 $F=10\text{mm}$ 、探傷方向 R (EDM ノッチに対して右方向からの探傷)の結果である。図より、開口部エコーが明瞭に観察されたが、端部エコーは認められなかった。これは、EDM ノッチの深さが 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ものと考えられる。

図 2.10 (b)~(d) は、EDM ノッチ深さ $d=5, 10, 20\text{mm}$ の探傷断面画像であり、いずれの画像にも開口部エコーと端部エコーが明瞭に観察されている。ここで、深さ $d=5\text{mm}$ および 10mm は、アレイ探触子 2L(10)を用いた時の探傷屈折角 45° 、集束位置 $F=10\text{mm}$ の結果である。また、深さ $d=20\text{mm}$ は、アレイ探触子 2L(20)で、探傷屈折角 45° 、集束位置 $F=20\text{mm}$ の結果である。

これらの探傷データから、端部エコーが得られたデータ(EDM ノッチ深さ $d=5, 10, 20\text{mm}$)を用いて、端部エコー法による深さ測定を行った。その結果を、表 2.4 に示す。表より、EDM ノッチ深さ $5\sim 20\text{mm}$ において、深さは誤差 3mm 以内で評価された。

(2) 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)に対して、フェーズドアレイ UT 法を適用した。得られた探傷断面画像の一例を、図 2.11 に示す。図 2.11 は、図 2.10 と同様、EDM ノッチ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。図より、深さ $d=2, 5, 10, 20\text{mm}$ のすべての EDM ノッチにおいて、開口部エコーが認められている。また、端部エコーは、深さ $d=5, 10, 20\text{mm}$ の EDM ノッチで認められた。端部エコーが得られたデータを用いて、端部エコー法による深さ測定を行った。その結果を表 2.5 に示す。表より、EDM ノッチ深さ $5\sim 20\text{mm}$ において、深さは誤差 $\pm 2\text{mm}$ 以内で評価された。

(3) EDM ノッチに対する深さ評価

突合せ溶接部およびバタリング部に EDM ノッチを付与したニッケル基合金溶接部試験体に対する深さ測定結果を、図 2.12 に示す。図より、深さ測定のデータ数は 6 点と少ないが、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。ここで、深さ測定誤差である RMS 誤差 1.58mm は、ASME Code Sec.XI App.VIII⁽¹²⁾の UT の PD (Performance Demonstration, 技量認証) 試験時の合格基準である RMS 誤差 3.2mm 以内と比べると、極めて良好な精度で評価されたと言える。

上記結果から、フェーズドアレイ UT 法は、ニッケル基合金溶接部 (突合せ溶接部およびバタリング部) 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。

2.4 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、ニッケル基合金溶接部の溶接金属組織 (柱状晶組織) が組織不均質で、超音波異方性が非常に強い材料であるため、この部位に発生する SCC き裂は、デンドライト組織からなる柱状晶に沿って進展し、分岐、傾斜など複雑な進展挙動を示し、き裂先端では櫛歯状の様相を呈することが知られている。溶接金属部の探傷では、入射された超音波ビームが複雑な超音波伝搬挙動や反射特性を示すため、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、一方、欠陥先端からの端部エコーは微弱な信号となり、前記材料ノイズエコーとの識別性が低下し、その結果、端部エコーの検出性が低下するためである。

そこで、端部エコーの検出性を低下させるもととなる、突合せ溶接部およびバタリング部における材料ノイズエコーの発生状況について調べた。図 2.13 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断面画像を並べて示す。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比較的小さく、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ている。一方、図 2.14 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ためには、SN 比を向上させ、材料ノイズエコーと識別させることが重要となる。

前記 2.3 節の試験結果では、フェーズドアレイ UT 法の探傷条件を最適化することで、EDM ノッチからの端部エコーの検出が可能であった。しかしながら、SCC き裂を対象とした探傷では、溶接金属部へ超音波入射したときに、金属組織（柱状晶組織）の影響を受けて、複雑な超音波伝搬挙動を示し、材料ノイズエコーが大きな信号となること、また、SCC き裂の端部エコーは微弱な信号となり、端部エコーと材料ノイズエコーの SN 比が低下し、その結果、端部エコーの検出性の低下が懸念される。そこで、端部エコーの検出性をさらに向上させるために、き裂先端部に強力な超音波を入射させる方法、端部エコーの識別性を向上させる方法等の検討が必要となる。

2.5 結言

ニッケル基合金溶接部に発生する SCC き裂に対して、フェーズドアレイ UT 法による高精度な深さ測定技術を開発するため、その第一段階として、標準横穴試験片を用いてフェーズドアレイ UT 法の探傷条件の最適化を図り、その条件をもとに、突合せ溶接部およびバタリングに 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適用した結果、良好な精度で深さ評価できた。さらに、溶接部の金属組織エコーの発生状況について調査した。それらの結果を以下にまとめる。

- (1) 欠陥深さ測定用として選定した 2 種類のアレイ探触子について、標準横穴試験片を用いた探傷データから、それぞれのアレイ探触子の開口寸法、集束位置等の探傷条件の最適化を図った。
- (2) ニッケル基合金溶接部の突合せ溶接部およびバタリング部に EDM ノッチを付与した試験体に対して、欠陥開口面側からフェーズドアレイ UT 法を適用し、端部エコーが検出された EDM ノッチ深さ 5mm~20mm に対して深さ測定を行った結果、EDM ノッチの深さは、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を明らかにした。
- (4) ニッケル基合金溶接部の突合せ溶接部およびバタリング部では、金属組織エコーとしてのノイズエコー（材料ノイズエコー）が発生し、SCC き裂の端部エコーの検出性の低下が懸念されるため、SCC き裂深さ測定では、端部エコーの SN 比の向上に関する検討が必要であることを示唆した。

参考文献

- (1) 関西電力ホームページ：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）
http://www.kepco.co.jp/corporate/pr/2008/_icsFiles/afieldfile/2008/09/26/1_0926_3j_01.pdf
- (2) 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
- (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，（2005），pp.48-49
- (4) （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報告書，09 原高報-0006，（2009）
- (5) K. Leupoldt, M. Durst, B. Irzik and W. Meister : “OPUS – A New System for the Inspection of Austenitic and Dissimilar Welds”, Proceedings of the 8th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurised Components, (2012), pp.562-570
- (6) AD Cinson, SL Crawford, PJ MacFarlan, BD Hanson and RA Mathews:”Comparison of an Ultrasonic Phased Array Evaluation with Destructive Analysis of a Documented Leak Path in a Nozzle Removed from Service, Proceedings of the 9th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurised Components, (2012), pp.562-570
- (7) T. Hirasawa, K. Naruse, I. Komura, S. Yamamoto, Y. Yuguchi, T. Ohtsubo, T. Matsunaga, M. Torii : “Phased Array Applications for Hamaoka unit-1 CRD Housing Stub-tube Inconel Welds”, 3rd EPRI Phased Array Seminar on Phased Array Ultrasonic Examination, Seattle, Washington, USA, 2003-06, EPRI,Paper24
- (8) （社）日本電気協会：「軽水型原子力発電所用機器の供用期間中検査における超音波探傷試験規程（2008 年版）JEAC 4207-2008」，（2008）
- (9) Y. Yuguchi and T. Hirasawa : Phased Array Application for Boiling Water Reactor In-Vessel Inspection, 2006 ASME Pressure Vessls and Piping Division Conference, PVP2006-ICPVT11-93358, (2006), pp.165-171.
- (10) 平澤泰治，長井敏，古村一郎，村上功治，高林順一，櫻井善茂：鋼溶接部探傷用 256ch フェイズドアレイ UT 装置の開発，日本非破壊検査協会 平成 9 年度秋季講演大会，（1997），pp.21-24.
- (11) T. Hirasawa and H. Fukutomi : Application of Phased Array UT

Technique for Crack Depth Sizing in Nickel Based Alloy Weld, Proceedings of the 8th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurised Components, (2010), pp.812-818.

- (12) ASME : Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components, ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. XI Appendix VIII, (2006).

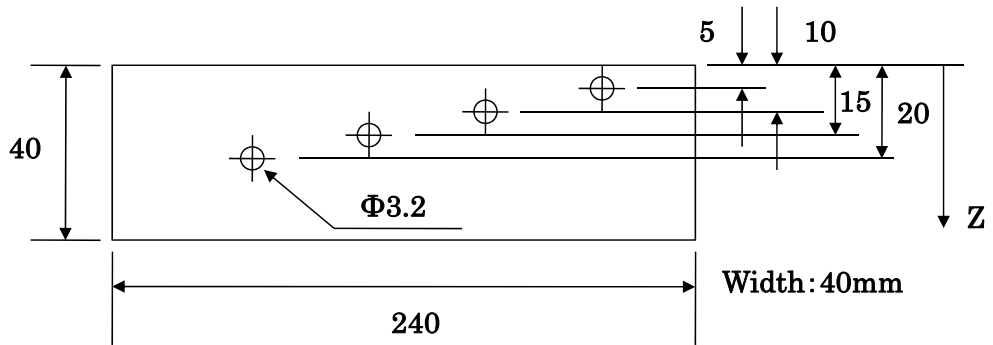


図2.1 標準横穴試験片の形状・寸法

表 2.1 アレイ探触子の仕様

	Probe	Specification	Target
①	2L(10)	Type : Linear Frequency : 2MHz Mode : Longitudinal Element size : 10 x 0.8mm No. of channels : 64ch	for shallow crack
②	2L(20)	Type : Linear Frequency : 2MHz Mode : Longitudinal Element size : 20 x 0.6mm No. of channels : 64ch	for deep crack

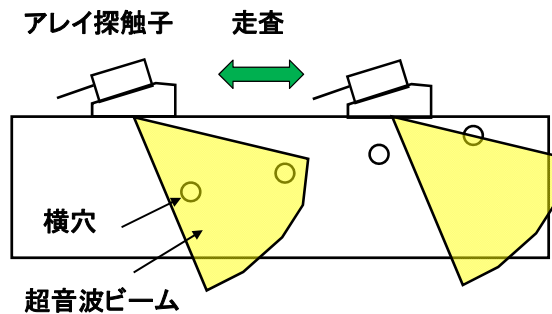


図 2.2 フェーズドアレイ UT 法による探傷模式図

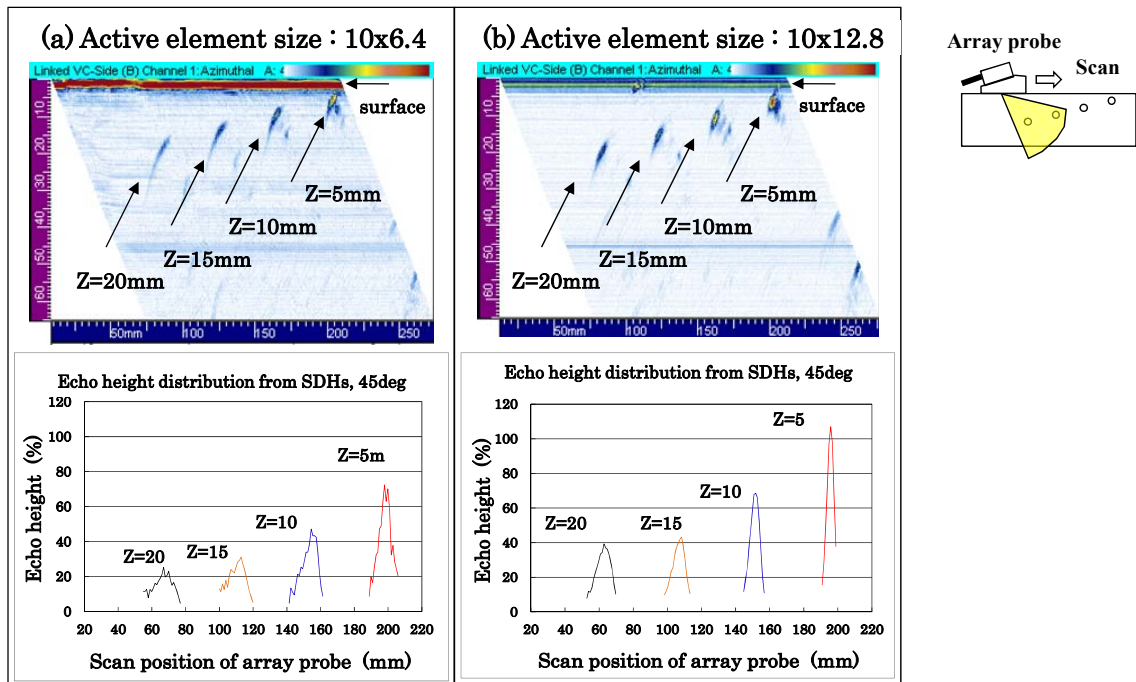


図 2.3 アレイ探触子 2L(10)の開口寸法の影響

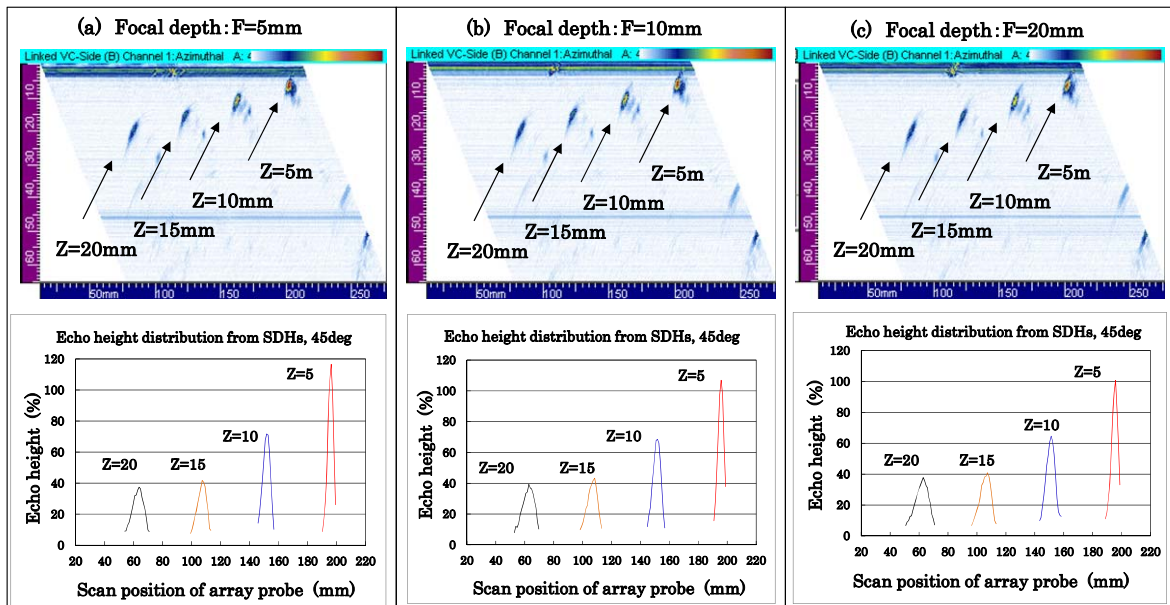


図 2.4 アレイ探触子 2L(10)の超音波ビーム集束の影響

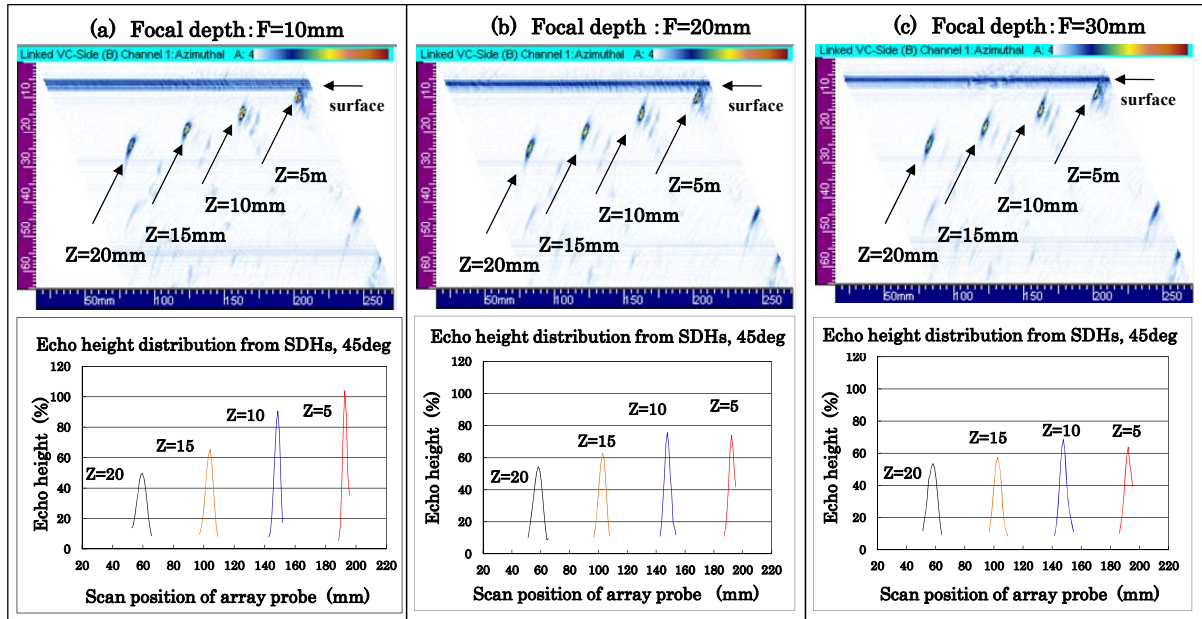


図 2.5 アレイ探触子 2L(20)の超音波ビーム集束の影響

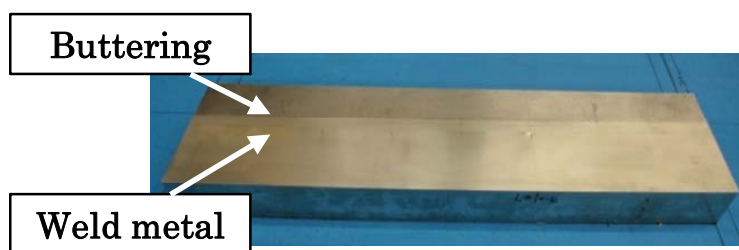


図 2.6 EDM ノッチを付与したニッケル基合金溶接部試験体の外観
(EDM ノッチ付与位置：突合せ溶接部)

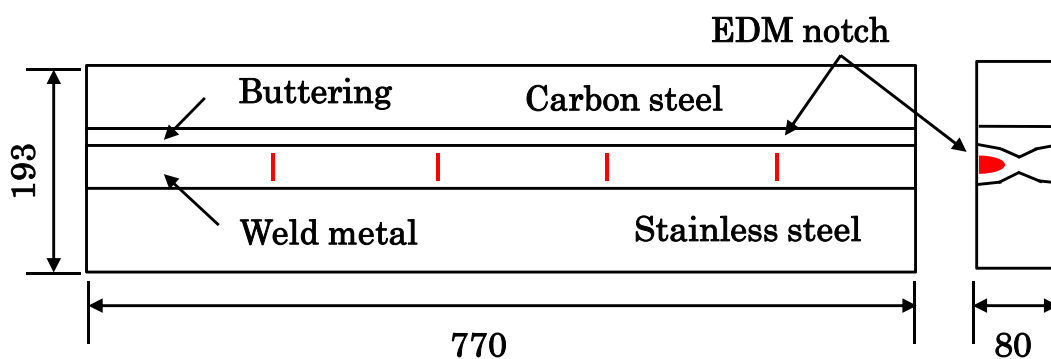


図 2.7 EDM ノッチを付与したニッケル基合金溶接部試験体の形状・寸法
(EDM ノッチ付与位置：突合せ溶接部)

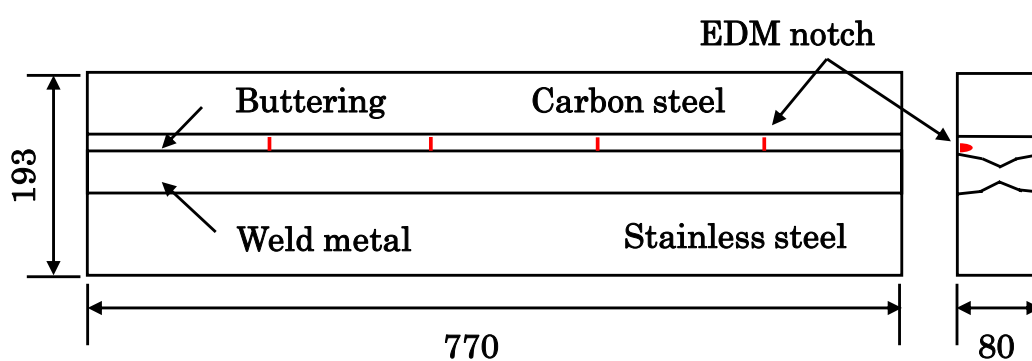


図 2.8 EDM ノッチを付与したニッケル基合金溶接部試験体の形状・寸法
(EDM ノッチ付与位置：バタリング部)

表 2.2 ニッケル基合金溶接部試験体への EDM ノッチ付与条件

Specimen	Area	Direction	Flaw 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		

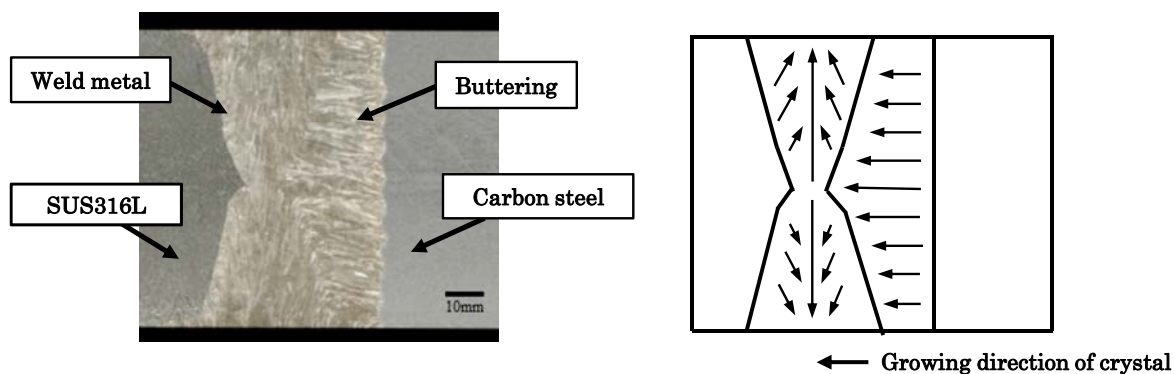


図 2.9 ニッケル基合金溶接部の金属組織写真

表 2.3 フェーズドアレイ UT 法の探傷条件

Items	contents
Technique	Contact (Small gap technique)
Inspection surface	Near surface
Inspection direction	Right / Left side
Refraction angle	30-80deg (1deg pitch)
Active aperture / Focal depth	2L(10) : 10x12.8mm, F=10 2L(20) : 20x19.2mm, F=20
Couplant	Water
Scan	Rathter scan (Automatic scan)
Scan range	Scan : 80mm ~ (pitch : 0.5mm) Index : 30mm (pitch : 1mm)

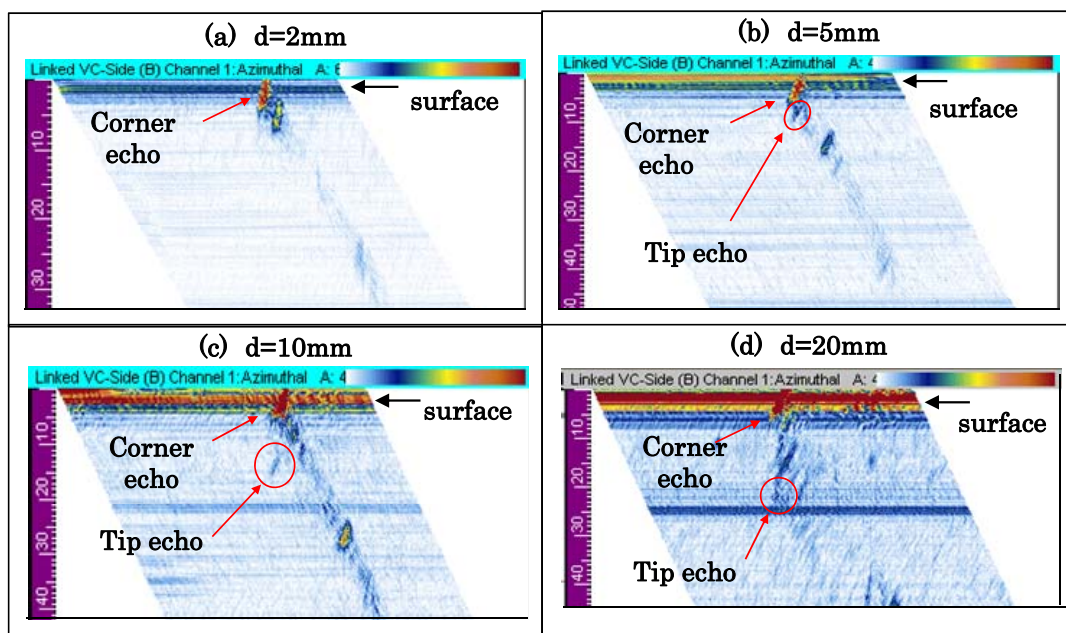


図 2.10 フェーズドアレイ UT 法による Ni 基合金溶接部試験体の探傷断面画像
(EDM ノッチ付与位置：突合せ溶接部)

表 2.4 フェーズドアレイ UT 法による EDM ノッチの深さ測定結果
(突合せ溶接部)

EDM notch depth (mm)	5	10	20
Measured depth by UT (mm)	6.6	12.7	21.1

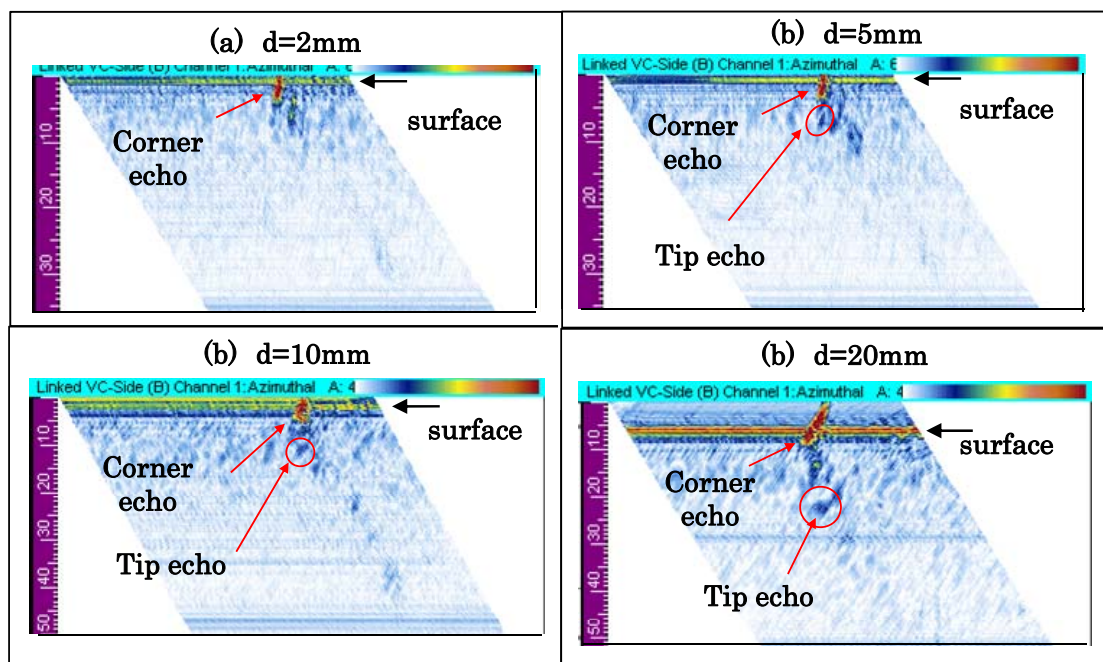


図 2.11—フェーズドアレイ UT 法による Ni 基合金溶接部試験体の探傷断面画像 (EDM ノッチ付与位置：バッテリー部)

表 2.5 フェーズドアレイ UT 法による EDM ノッチの深さ測定結果 (バッテリー部)

EDM notch depth (mm)	5	10	20
Measured depth by UT (mm)	6.5	9.9	18.7

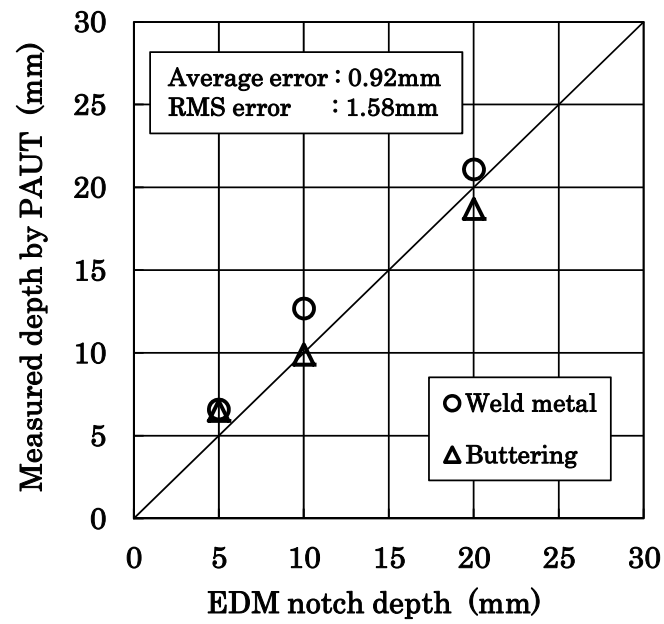


図 2.12 フェーズドアレイ UT 法による EDM ノッチに対する深さ測定精度
(ニッケル基合金溶接部, ○ : 突合せ溶接部, △ : バタリング部)

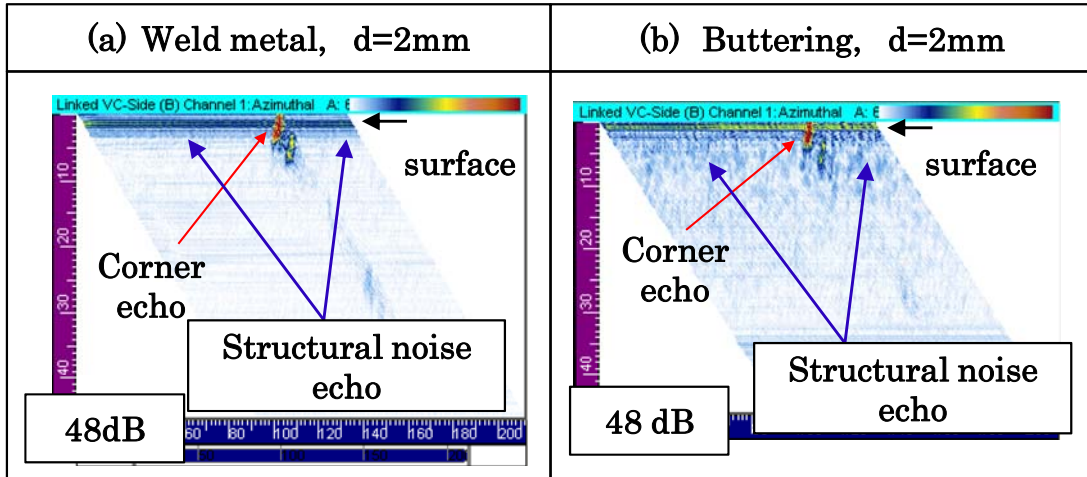


図 2.13 ニッケル基合金溶接部の材料ノイズエコー
 (アレイ探触子：2L(10)，EDM ノッチ深さ：2mm)

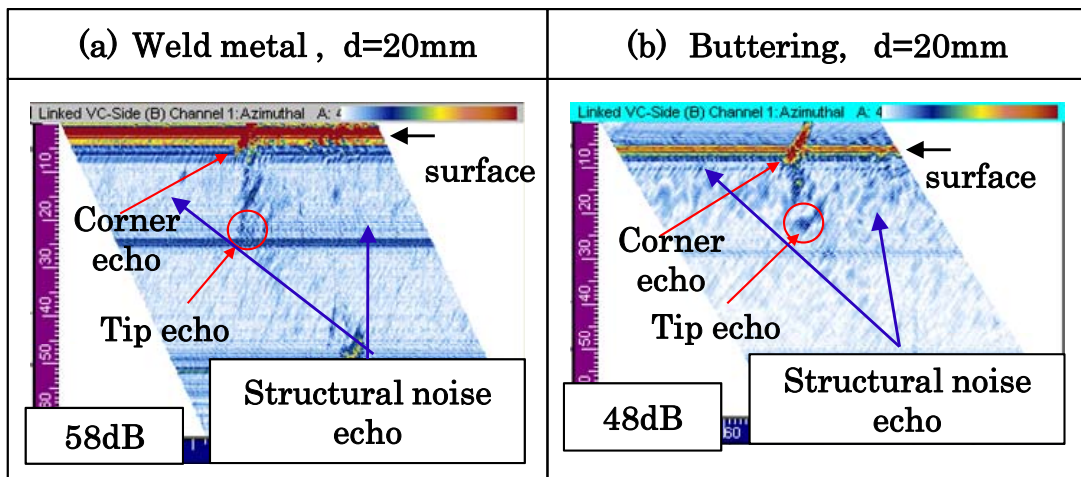


図 2.14 ニッケル基合金溶接部の材料ノイズエコー
 (アレイ探触子：2L(20)，EDM ノッチ深さ：20mm)

第3章 欠陥深さ測定要領の開発

第3章 欠陥深さ測定要領の開発

3.1 緒言

第2章では、ニッケル基合金溶接部に対して、フェーズドアレイ UT 法による高精度なき裂深さ測定法を開発するための第一段階として、EDM ノッチに対するフェーズドアレイ UT 法による欠陥深さ測定の評価を行った。即ち、PWR 発電プラントの RV 管台セーフエンド溶接部の損傷事例^{(1), (2)}で、き裂深さ 20.3mm が測定困難であったことから、深さ 5~20mm の EDM ノッチを付与したニッケル基合金溶接部試験体（RV 管台セーフエンド溶接部を模擬）にフェーズドアレイ UT 法を適用した結果、EDM ノッチ深さは、測定誤差 1mm 程度と良好な精度で評価されたことから、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であることを示した。

しかしながら、上記の損傷事例⁽¹⁾によると、対象部位の板厚は約 74.6mm であり、第2章でフェーズドアレイ UT 法の適用性を評価した欠陥深さ 20mm は、対象部位の板厚に対して 1/4 程度であり、この溶接部を対象とした場合には、少なくとも板厚の 1/2 程度のき裂深さを測定することが必要である。

そこで、対象とするき裂深さは、RV 管台セーフエンド溶接部の板厚の 1/2 程度（約 40mm）を目標とした。これは、実機で発生したき裂よりも 2 倍程度深いき裂であり、これらのき裂に対する適用性について検討する。

き裂深さ測定に当たっては、き裂先端部からの端部エコーを適正に検出することが重要である。対象とするき裂深さを 20mm から 40mm に大きくすると、き裂先端までの超音波の伝搬経路が長くなって溶接金属組織による影響が一層大きくなり、その結果、き裂深さ測定への影響が大きくなることが想定される。即ち、溶接部に入射された超音波は、溶接金属組織での散乱・減衰あるいは屈曲などの複雑な超音波伝搬挙動を示すため、端部エコーは微弱な信号となる。また、溶接金属組織で反射された材料ノイズエコーは、より大きな信号となり、端部エコーとノイズエコーの SN 比が低下し、その結果、端部エコーと材料ノイズエコーの識別性が低下する。このとき、材料ノイズエコーを端部エコーと誤認識した場合には、き裂深さを過大評価し、端部エコーを材料ノイズエコーと認識してき裂先端部を見逃した場合には、最も深いき裂の端部エコーを見逃すことになり、き裂深さを過小評価することになる。

このように、ニッケル基合金溶接部に発生するき裂に対して、フェーズドアレイ UT 法による高精度な深さ測定を行うためには、端部エコーの検出性の向上を図り、き裂の誤認識あるいはき裂の見逃しの低減を図ることが極めて重要となる。さらに、き裂深さ測定において、探傷条件、探傷方法等を探傷要領として整備することは、UT 検査員による測定誤差の影響を抑える点から重要である。

これらのことから、ニッケル基合金溶接部に対して、高精度なき裂深さ測定法を開発するため、新たに下記の目標を設定した。

- ① き裂深さ測定範囲を板厚の 1/2 程度（約 40mm）。
- ② 端部エコーの検出性向上。
- ③ き裂（端部エコー）の誤検出、見逃しの低減。

そこで、本章では、上記目標を達成するため、欠陥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、き裂深さ測定範囲を板厚の 1/2 程度（概略 40mm）とし、端部エコーの検出性の向上およびき裂の誤認識あるいはき裂の見逃しの低減を図る方法を検討する。さらに、これらの検討結果をもとに、フェーズドアレイ UT 法による欠陥深さ測定要領について検討する。

次に、異なる深さの EDM ノッチ（～40mm）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 法を適用し、欠陥深さ測定精度の評価結果から、ニッケル基合金溶接部に対するフェーズドアレイ UT 法の有効性について検討する。

3.2 欠陥深さ測定要領の概念

ニッケル基合金溶接部に発生するき裂の深さ測定における課題としては、実機での損傷事例の調査結果および従来の UT による知見から、以下のことがあげられる。

- ① 深いき裂の深さ測定が困難である。
- 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 比が低下する。
- ③ 端部エコーと材料ノイズエコーの識別性が低下し、き裂の誤検出あるいはき裂の見逃しが生じる。

ここでは、上記課題を解決し、高精度なき裂深さ測定を可能とする探傷要領を検討し、作成することとした。

上記、課題①について、本研究の対象であるニッケル基合金溶接部は、板厚が 80mm 程度と厚く、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、深さが板厚の 1/2 程度（40mm 程度）までのき裂を対象とすることとした。

また、課題①および②については、過去の実機適用例あるいは研究事例をもとに検討することとした。ニッケル基合金溶接部の適用例としては、複雑な形状である CRD ハウジング／スタブチューブ下部溶接部に発生した SCC き裂に対して、き裂開口面側からフェーズドアレイ UT 法を適用し、き裂深さを高精度に測定できたこと⁽³⁾、また、SN 比の高い端部エコーを検出するために、マトリクスアレイ探触子の適用が有効であること⁽⁴⁾等を参考とした。

本研究では、探傷領域を板厚方向に領域分けし、それぞれの領域に適したアレイ探触子を選定し、各々のアレイ探触子の探傷性能を明らかにする。第2章で述べたように、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、これらの探触子を選定する。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マトリクスアレイ探触子とし、対象表面の不感帯を低減する目的として、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。選定したアレイ探触子は、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最適化を図ることとした。

次に、課題③については、過去の研究成果および実機適用事例を参考に検討した。過去の研究成果^{(5)・(8)}では、オーステナイト系ステンレス鋼あるいはニッケル基合金の溶接部にフェーズドアレイ UT 法を適用し、得られた各種探傷画像（断面画像、平面画像等）から、き裂の位置、長さおよび形状（き裂プロファイル）等のき裂情報を評価できることが示された。また、実機適用事例⁽⁹⁾では、オーステナイト系ステンレス鋼配管（BWR 発電プラントの PLR 配管）の内面に発生した SCC き裂を配管外面から探傷する場合、き裂の概略深さ測定が有効であり、その結果が、原子力発電設備の UT の適用規格⁽¹⁰⁾に反映されたことなどが示された。

そこで、本研究では、これらの知見を参考に、フェーズドアレイ UT 法の適用により、対象部位の表面き裂情報（き裂の発生位置、長さ、形状等）および内部のき裂情報（き裂形状）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方法について検討する。また、複数のアレイ探触子で得られた探傷データ（探傷画像）から、き裂の大小判別を行う方法について検討する。これらの方法を活用することで、き裂の誤認識あるいはき裂の見逃しの低減を図ることの可能性を検討する。さらに、これらの検討結果をき裂深さ測定要領として整備し、フローとしてまとめることとする。

3.3 探傷条件の最適化

3.3.1 試験体および試験方法

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。本装置は、第 2 章で用いた装置と異なり、最大 256ch のアレイ探触子を用いた高パワーの探傷が可能となる。

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 3.1 に示す。表より、1 番目の探触子 (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 (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 (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 2 分割型探触子であり、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。

上記で選定したアレイ探触子の探傷性能について調べた。用いた試験体は、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L の性能確認用標準横穴試験体 (標準横穴試験体) であり、図 3.1 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、横穴の中心深さ位置 Z は、Z=3, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40mm である。

探傷は、図 3.2 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標準横穴試験体上に設置し、図の左右方向に走査して行った。探傷条件は、振動モードは縦波、屈折角 θ は、 $\theta=30\sim 80^\circ$ (1° ピッチ) とし、ギャップ法 (ギャップ寸法 : 0.2mm) にて行った。ここで、一般的な探傷法である直接接触法 (ギャップ寸法 : 0mm) でアレイ探触子を走査すると、アレイ探触子の寸法が大きいため試験体面との摩擦が大きくなり、不安定な走査になって適正な探傷データの収録することが困難になるため、アレイ探触子と試験体の間隙に微小なギャップを設けたギャップ法にて探傷することとした。

探傷データの収録は、アレイ探触子を X-Y スキャナで矩形走査した自動探傷で行い、横穴からの反射エコーのエコー高さを測定し、反射エコー強度に及ぼす集束位置の影響について調べた。

3.3.2 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 3.1 に示す標準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 (目標深さ : ~10mm) として選定した探触子で

ある。一般に、開口寸法（アレイ探触子の振動子数）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（探傷できない領域）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。なお、この条件は、第 2 章で行った探傷条件と同一である。

探傷性能試験では、アレイ探触子の開口寸法を前記寸法 10mm×12.8mm に固定し、集束位置を F=10、20、30mm に設定して行った。

探傷結果の代表例を、図 3.3 に示す。図には、探傷屈折角 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、横穴の中心深さ位置 Z=3mm の横穴からが最も大きく、横穴の深さ位置が深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、横穴の中心深さ位置 Z との関係性を調べた。その結果を図 3.4 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、ここでは探傷条件の比較評価用とした。図 3.4 より、横穴からの反射エコー高さは、集束位置 F に依らず、横穴の中心深さ位置 Z が大きくなるに従い減少する傾向を示す。ここで、集束位置 F=10、20、30mm 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、集束位置を F=10mm に選定した。

3.3.3 アレイ探触子 2L(20)の探傷性能

アレイ探触子 2L(20)の探傷性能を、図 3.1 に示す標準横穴試験体を用いて調べた。アレイ探触子 2L(20) は、中程度の深さ測定用（目標深さ：～20mm）として選定した探触子であり、開口寸法は、第 2 章の結果をもとに 20mm×19.2mm（32ch）に固定し、集束位置を F=10、20、30mm に設定して、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 3.5 に示す。図には、アレイ探触子 2L(10)の結果と同様、探傷屈折角 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、横穴の中心深さ位置 Z が大きくなるに従い減少する傾向を示した。また、すべての横穴（横穴中心の深さ位置 Z=3～40mm）から反射エコーが認められており、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、横穴の中心深さ位置 Z との関係性を調べた。測定結果の代表例を、図 3.6 に示す。図は、探傷屈折角 45° の結果であり、横穴からの反射エコー高さは、集束位置 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(目標深さ： $\sim 20\text{mm}$)の探触子であることも考慮して、探傷条件は、開口寸法 $20\text{mm}\times 19.2\text{mm}$ 、集束位置 $F=20\text{mm}$ を選定した。

3.3.4 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き裂先端部に入射させることを目的として選定したアレイ探触子である。アレイ探触子から強い超音波ビームを入射させるためには、開口寸法を大きくすることが必要であり、ここでは、マトリクスアレイ探触子の全振動子 (72ch) を用いたピッチキャッチ法(送信 ch 数：72ch, 受信 ch 数：72ch)にて行った。図 3.1 に示す標準横穴試験体を用いた探傷では、送信時および受信時の探触子の開口寸法を $37.2\text{mm}\times 18.6\text{mm}$ (72ch) に固定し、集束位置を $F=10, 20, 30, 40\text{mm}$ に設定して、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 3.7 に示す。図は、探傷屈折角 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、集束位置 $F=10\sim 40\text{mm}$ の範囲では、横穴からの反射エコーは、 F と同じ横穴の中心深さ位置 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。

ここで、簡易的な超音波ビームシミュレーション(フェーズドアレイ UT 装置の機能を使用)を行い、上記試験結果の妥当性について検討した。使用したアレイ探触子は、上記と同一のアレイ探触子 2MPC で、ピッチキャッチ法による超音波ビームシミュレーションによる解析を行った。その結果を図 3.8 に示す。図は、探傷屈折角 45° で、集束位置を $F=10, 20, 30, 40\text{mm}$ と変えた結果であり、超音波ビームの集束位置は、解析条件として設定した集束位置とほぼ同じ位置に集束しており、この結果から、上記の探傷結果が妥当であることが示された。

次に、各横穴からの反射エコーの最大振幅を測定し、 Z との関係で調べた。代表的な測定結果を、図 3.9 に示す。図は、探傷屈折角 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%)のラインである。図 3.9 より、集束位置 $F=20, 30, 40\text{mm}$ 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、欠陥の端部エコー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 の探傷条件としては、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 3.9 より、横穴の中心深さ位置 $Z=3\text{mm}$ および 5mm では、反射エコーが検出

されず、この探傷条件(探傷屈折角 $\theta=45^\circ$, 集束深さ $F=10\text{mm}$)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て表 3.2 に示す。

3.4 欠陥情報の把握

フェーズドアレイ UT 法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、き裂(端部エコー)かあるいはノイズエコーかを判断できれば、き裂の誤認識あるいはき裂の見逃しを低減することが可能となる。また、き裂の大小判別は、き裂深さを概略測定できるため端部エコーの検出性が向上し、き裂深さの測定誤差を小さくすることができる。また、探傷画像からき裂の形状を把握できれば、概略のき裂深さを測定することができ、詳細なき裂深さ測定において極めて有効なデータとなり、その結果、測定誤差の低減を図ることができる。

以上のことから、これらなき裂情報を的確に活用することができれば、高精度な欠陥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、検討した結果を以下に述べる。

3.4.1 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 $\theta=30\sim 80^\circ$ (1° ピッチ) に設定したセクタ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、探傷屈折角 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 3.2 に示す条件で探傷したときに得られた探傷屈折角 70° の探傷画像を、図 3.10 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、EDM 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断面画像(D スコープ)では、半楕円形状を表す指示(図中に点線でプロファイルに記載)が認められ、EDM ノッチ形状と類似のプロファイルが得られ、欠陥形状の推定が可能となる。

このように、アレイ探触子 2L(10)の探傷データから、探傷屈折角 70° の探傷画像(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形状(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これらの

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、欠陥の誤認識あるいは欠陥の見逃しの低減を図ることができる。

3.4.2 欠陥形状の推定

上記 3.4.1 項では、欠陥形状の推定方法について述べた。ここでは、2 分割型マトリクスアレイ探触子を用いた探傷画像から、欠陥形状を推定する方法について述べる。

2 分割型マトリクスアレイ探触子 2MPC を用いて、SCC き裂を付与したニッケル基合金溶接部試験体に適用した結果の代表例を、図 3.11 に示す。図は、探傷屈折角 θ を $\theta=1^\circ\sim 89^\circ$ (1° ピッチ) とし、探傷面に垂直な方向に集束条件を設定したときの探傷データを合成したときの探傷画像 (B、C、D-scan) である。図より、断面画像 (B-scan) には、SCC き裂の指示が認められ、この画像からき裂位置 (紙面に水平方向の位置) および概略の深さが把握できる。また、平面画像 (C-scan) から、SCC き裂の位置および概略長さが把握できる。さらに、D-scan 画像から、き裂形状のプロファイル (図中の点線) が把握できる。この SCC き裂は、フェーズドアレイ UT 法の適用後、破面解放試験にてき裂形状の調査を行った。その結果をフェーズドアレイ UT 法による探傷画像 (D-scan) とともに、図 3.12 に示す。図より、フェーズドアレイ UT 法による探傷画像から得られたき裂形状 (プロファイル) は、実際の SCC き裂の形状と類似の形状を呈していることがわかる。

このように、フェーズドアレイ UT 法による探傷条件を適切に設定して探傷することで、得られた探傷画像 (D-scan) から SCC き裂の形状推定が可能となる。

3.4.3 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、その溶接金属部が超音波異方性材料であるため、複雑な超音波伝搬挙動を示し、探傷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ことが想定される。このような場合、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効となり、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法として、アレイ探触子 2L(10)と 2MPC の探傷データを用いる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 を用いて探傷を行った。代表的な探傷断面画像を、図 3.13 に示す。図には、アレイ探触子 2L(10)では探傷屈折角 70° の画像を、またアレイ探触子 2MPC では探傷屈折角 45° の画像を示してある。図より、深さ 5mm の EDM ノッチに対して 2 つ

のアレイ探触子の探傷断面画像を見ると、アレイ探触子 2L(10)では、EDM ノッチの開口部エコーが認められているのに対して、アレイ探触子 2MPC では、EDM ノッチの指示が認められなかった（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、図 3.9 の結果から不感帯が 10mm 程度以下であることがわかっており、アレイ探触子 2MPC の探傷画像で EDM ノッチの指示が認められなかったことは、EDM ノッチの深さは、10mm 程度以下であると判断できる。

一方、深さが 20mm の EDM ノッチの断面画像をみると、アレイ探触子 2L(10)では、断面画像に EDM 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 EDM 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、かつアレイ探触子 2MPC で指示が認められなかった場合は、欠陥深さは 10mm 程度以下と判断する。また、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 程度以上と判断する。このような方法を適用することで、対象欠陥の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述べる。ここでは、フェーズドアレイ UT 法を EDM ノッチ深さ 20mm に対して適用した例である。図 3.14 には、アレイ探触子 2MPC を用い、集束位置を F=10mm、20mm、30mm に設定して探傷した時の結果を示す。図は、探傷屈折角 45° における探傷断面画像であり、いずれの集束位置条件においても、EDM ノッチの端部エコーが概略深さ 20mm の位置に認められた。このような場合は、集束位置 F=10~30mm の 3 つの探傷データについて、き裂深さ測定を行い、測定されたき裂深さに最も近い集束位置条件のデータを採用する。この方法を採用すると、図 3.14 の場合は、集束位置 F=20mm の探傷データが採用され、EDM ノッチ深さは 21.0mm となり、実際の EDM ノッチ深さ 20mm と比べ、良好な精度で評価でき、高精度な深さ測定が可能となる。

上記で述べた方法により、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。

3.5 欠陥深さ測定要領の構築

前記、3.4 節では、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 法による探傷結果から、各々のアレイ探触子の適用範囲を明らかにし、探傷画像データから、欠陥の位置および長さの把握、欠陥形状（プロファイル）の推定方法および欠陥深さの大小判別方法について述べた。

これらの結果をもとに、ニッケル基合金溶接部の欠陥深さ測定に対して、欠陥開口面側からのフェーズドアレイ UT 法による欠陥深さ測定要領について検討し、フローとしてまとめた。欠陥深さ測定要領のフローを、図 3.15 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 法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。また、UT データの収録は、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) および探傷画像 (B、C、D スコープ) から結果深さ測定のための解析、評価を行うこととする。なお、探傷データが膨大であるため、基本探傷屈折角を決めて、解析を行うこととする。

図 3.15 に示す欠陥深さ測定フローについて、ステップごとにその要点を以下に述べる。

・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、探傷データの収録を行う。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、アレイ探触子 2MPC では、超音波ビームの集束条件として探傷面に垂直な方向の探傷も行うこととする。さらに、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形状 (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探傷画像 (UT 指示) と照合し、両者の指示が試験体表面から内部に進展した同一の欠陥であるか否かを判断する。

また、③2 分割型マトリクスアレイ探触子を用い、探傷面に垂直な方向に集束条件を設定したときの探傷データを合成して得られた探傷画像 (B、C、D スコープ) から、き裂の位置、長さ、形状および概略深さを把握する。

・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。

初めに、小型アレイ探触子①の探傷屈折角 70° の画像 (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、探傷屈折角 45° の画像から、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、探傷屈折角 45° の画像から、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、予め評価用の基本の探傷屈折角を設定して解析を行う。評価用の探傷屈折角は、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、端部エコーと材料ノイズエコーの識別を行い、端部エコー法にて深さ測定を行う。

ステップ3において、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において、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。

3.6 欠陥深さ測定要領の検証

3.6.1 試験体および試験方法

用いた試験体は、突合せ溶接部（溶接金属部）の溶接線直交方向に EDM ノッチを付与したニッケル基合金溶接部試験体である。試験体形状の一例、図 3.16 に示す。また表 3 に、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 EDM ノッチの形状は、半楕円形状である。

試験装置は、前記 3.3 節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、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。

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 3.15 に示す深さ測定要領に従って探傷、解析を行い、欠陥深さ測定を行った。

3.6.2 欠陥深さ評価

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、得られた探傷画像の一例を、図 3.17 に示す。図は、各 EDM 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、すべての断面画像には、開口部エコーが認められたことから、深さ 2mm～40mm の EDM ノッチをすべて検出することができた。また、深さ 5mm～40mm の EDM ノッチで端部エコーが認められた。ここで、深さ 2mm～15mm の EDM ノッチは、小型アレイ探触子 2L(10)の結果であり、深さ測定に用いた探傷屈折角は、深さ 2mm では 60°、深さ 5mm 以上は 45° である。また、深さ 20mm～40mm の EDM ノッチは、2 分割マトリクスアレイ探触子 2MPC の探傷屈折角 45° での画像である。

端部エコーが検出された深さ 5mm～40mm の EDM ノッチに対して、端部エ

コー法により深さ測定を行った。その結果を EDM ノッチ深さとの関係で、図 3.18 に示す。ここで、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 ⁽¹¹⁾ の PD 試験時の合格基準である RMS 誤差 3.2mm 以内と比べ、極めて良好な精度で評価されたといえる。

上記結果から、EDM ノッチ深さが良好な測定精度で評価されたことから、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方法であることを明らかにした。

3.7 結言

ニッケル基合金溶接部に発生する SCC き裂に対して、欠陥開口面側からのフェーズドアレイ UT 法による高精度なき裂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 法による欠陥深さ測定要領を検討し、フローとしてまとめた。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対して、フェーズドアレイ UT 法を適用し、欠陥深さ測定精度を評価した結果、欠陥深さ測定に対するフェーズドアレイ UT 法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) までのき裂深さ測定用として選定した 3 種類のアレイ探触子について標準横穴試験体を用いた探傷データから、各々のアレイ探触子における板厚方向の適用範囲を明らかにし、探傷条件の最適化を図った。
- (2) 適用したアレイ探触子の各種探傷画像 (断面画像、平面画像等) から、欠陥情報 (欠陥位置および概略欠陥長さ) の把握、欠陥形状 (プロファイル) 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作成し、フローとしてまとめた。
- (3) 深さの異なる複数の 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、フェーズドアレイ UT 法を適用し、欠陥深さ測定要領に従って探傷、解析、評価した結果、EDM ノッチ深さ 5mm~40mm の範囲で端部エコーを検出し、EDM ノッチ深さは、誤差平均 0.91mm、RMS 誤差 1.03mm であった。深さ測定誤差である RMS 誤差 1.03mm は、ASME Code Sec. XI App. VIII の PD 試験における合格基準である RMS 誤差 3.2mm 以内と比べると、極めて良好な精度で評価されたと言える。
- (4) 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方法であることを明らかにした。

参考文献

- (1) 関西電力ホームページ：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） .
http://www.kepco.co.jp/corporate/pr/2008/_icsFiles/afieldfile/2008/09/26/1_0926_3j_01.pdf.
- (2) 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.
- (3) T. Hirasawa, K. Naruse, I. Komura, S. Yamamoto, Y.Yuguchi, T. Ohtsubo, T. Matsunaga, M. Torii : “Phased Array Applications for Hamaoka unit-1 CRD Housing Stub-tube Inconel Welds”, 3rd EPRI Phased Array Seminar on Phased Array Ultrasonic Examination, Seattle, Washington, USA, 2003-06, EPRI,Paper24
- (4) 平澤泰治，長井敏，川原田義幸，村上功治，湯口康弘：原子炉内構造物への超音波探傷技術の適用，日本保全学会 第 3 回学術講演会 要旨集，（2006）， pp.365-368.
- (5) 平澤泰治，湯口康弘，村上功治，千星淳，大坪徹，成瀬克彦：フェーズドアレイ UT による炉内配管への適用，日本保全学会 第 5 回学術講演会 要旨集，（2008）， pp.147-151.
- (6) T. Hirasawa, Y. Yuguchi, J. Senboshi, K. Murakami, T. Ootsubo and K. Naruse : Application of Immersion Phased Array UT Technique on Austenitic Stainless Steel and Nickel Based Alloy Welds, Proceedings of the 7th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurised Components, (2009), pp.782-788.
- (7) 平澤泰治，福富広幸，秀耕一郎：異種金属溶接部の平行欠陥に対する UT 深さ測定法の検討，日本保全学会 第 10 回学術講演会 要旨集，（2013）， pp.531-536.
- (8) 平澤泰治，秀耕一郎：異種金属溶接部の付与欠陥に対する超音波探傷性能の検討，日本保全学会 第 11 回学術講演会 要旨集，（2014）， pp.25-28.
- (9) 総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 第 8 回原子力発電設備の健全性評価等に関する小委員会資料，（2003）
- (10) (社) 日本電気協会：軽水型原子力発電所用機器の供用期間中検査における超音波探傷試験規程（2008 年版）JEAC4207-2008，（2008）
- (11) ASME: Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components, ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. XI Appendix VIII, (2006)

表 3.1 アレイ探触子の仕様

	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

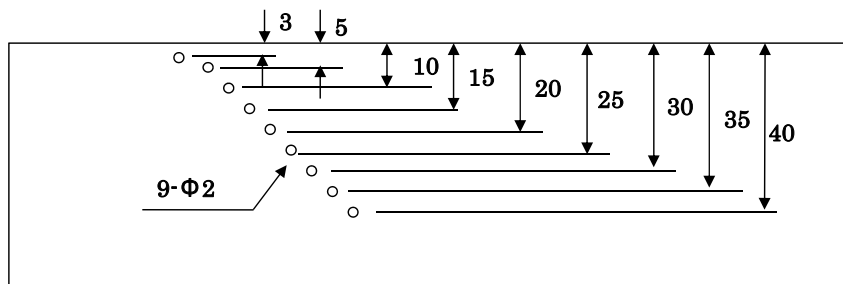


図 3.1 探傷性能確認用の標準横穴試験体

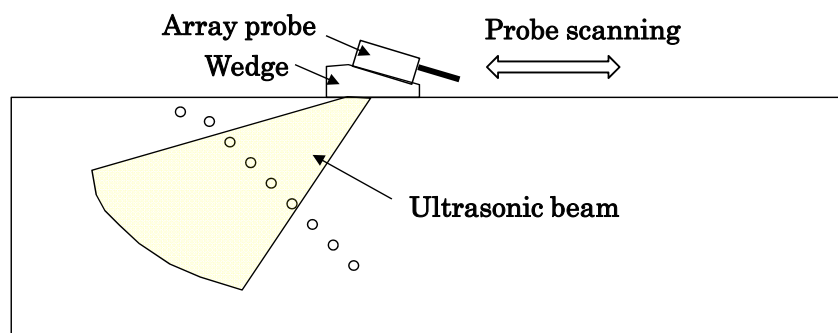


図 3.2 フェーズドアレイ UT 法の探傷模式図

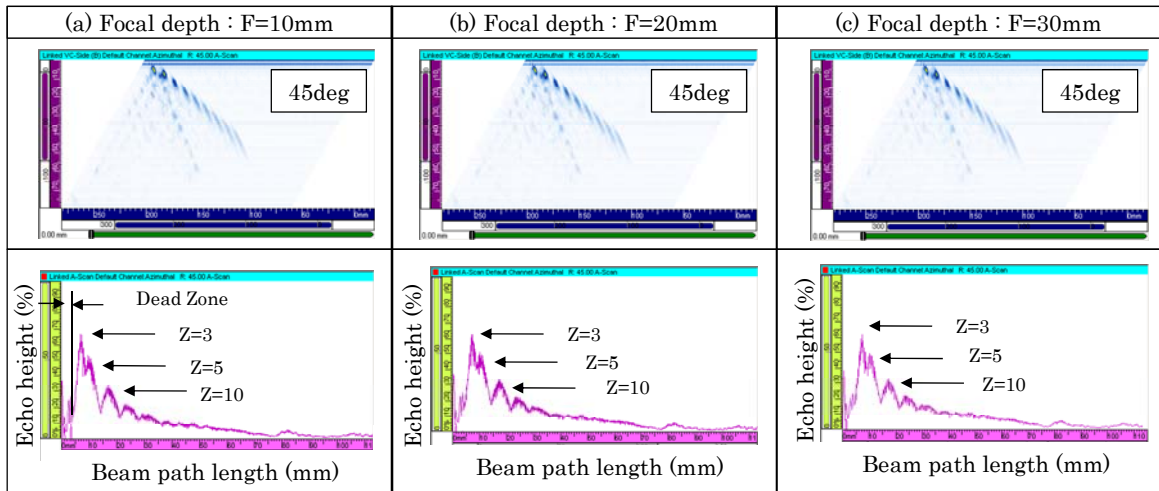


図 3.3 アレイ探触子 2L(10)の超音波ビーム集束の影響

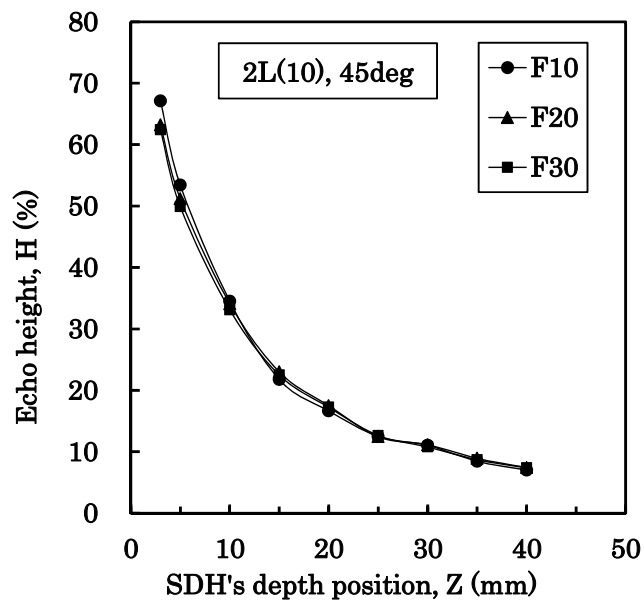


図 3.4 アレイ探触子 2L(10)の距離振幅特性

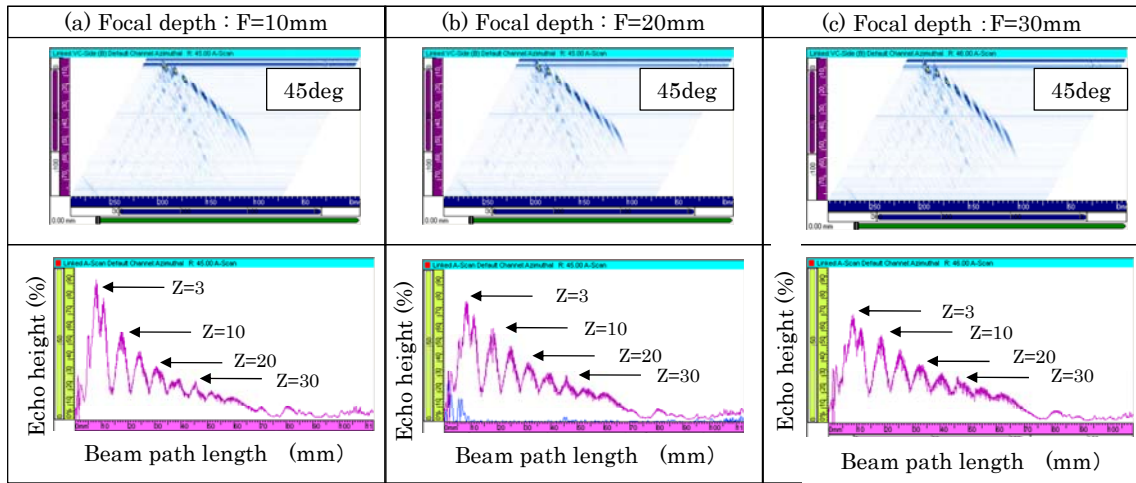


図 3.5 アレイ探触子 2L(20)の超音波ビーム集束の影響

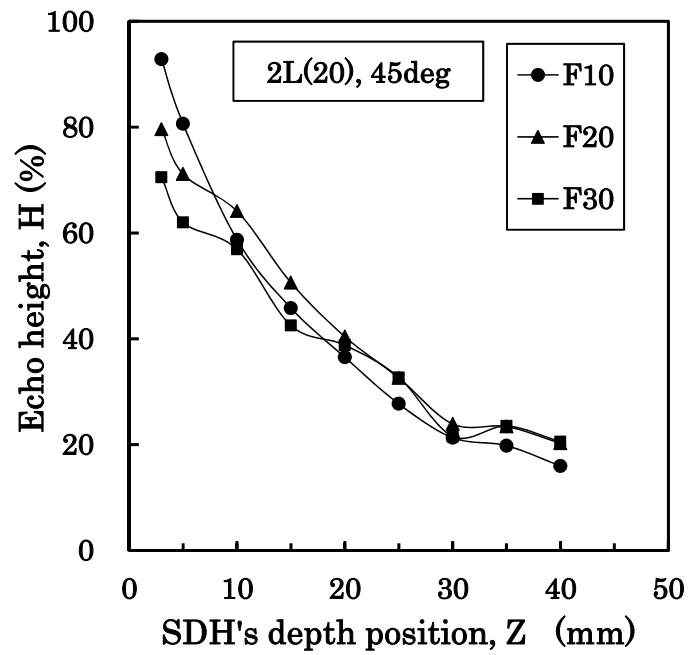


図 3.6 アレイ探触子 2L(20)の距離振幅特性

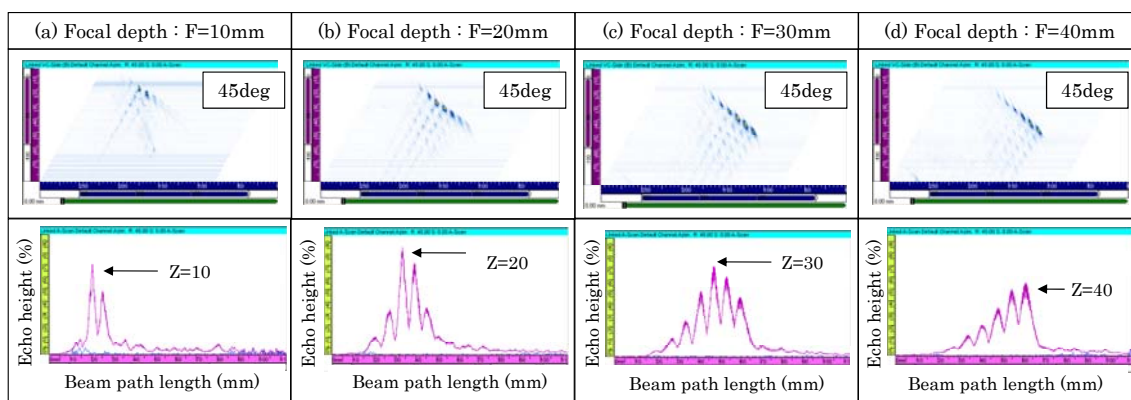


図 3.7 アレイ探触子 2MPC の超音波ビーム集束の影響

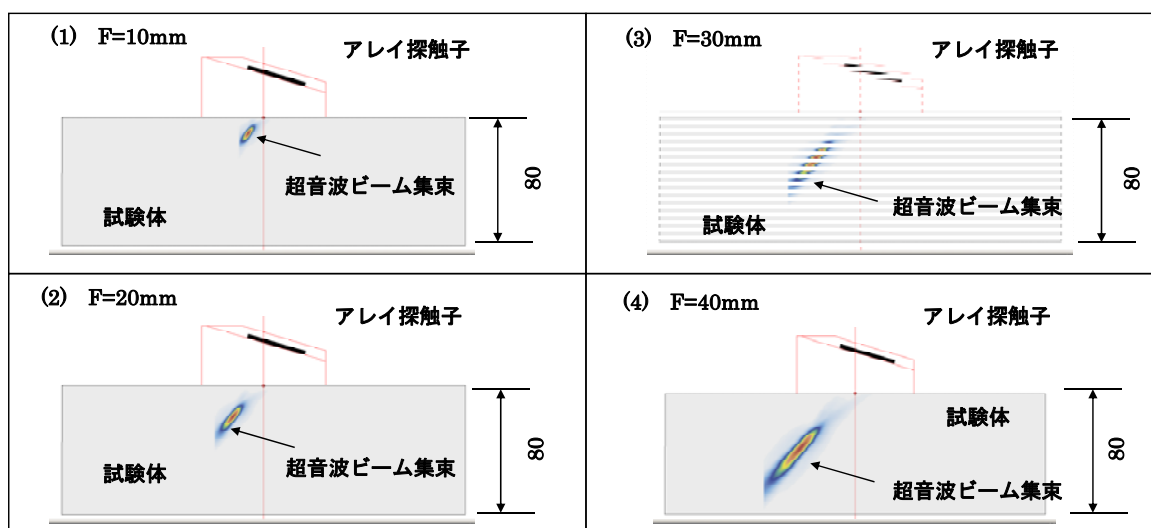


図 3.8 超音波ビームシミュレーションによる集束効果
(アレイ探触子 2MPC, 屈折角 : 45°)

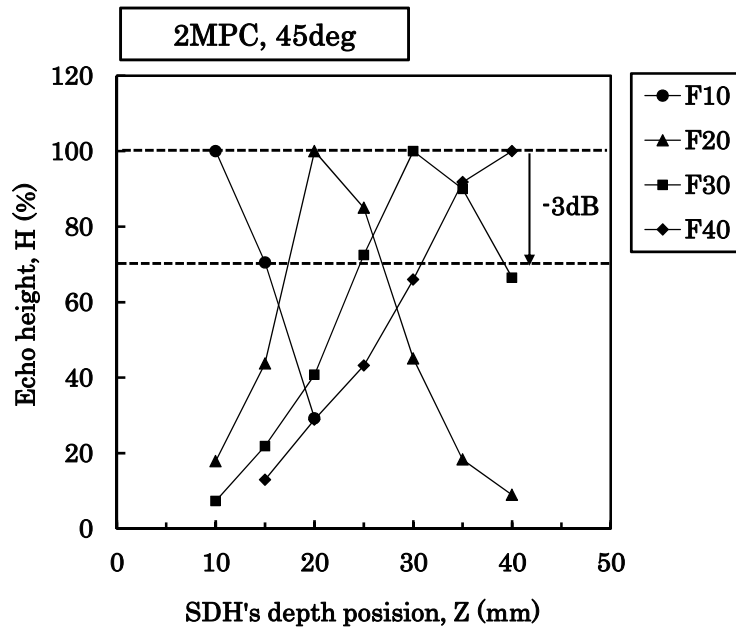


図 3.9 アレイ探触子 2MPC の距離振幅特性

表 3.2 フェーズドアレイ UT 法における探傷条件

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

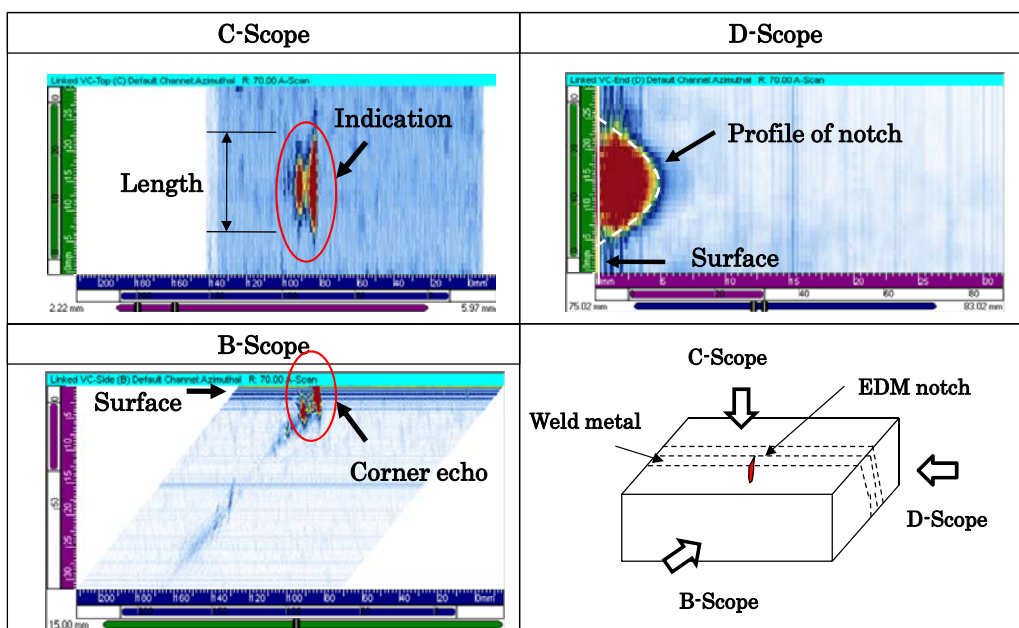


図 3.10 アレイ探触子 2L(10)における探傷画像
(EDM ノッチ : $d=2\text{mm}$)

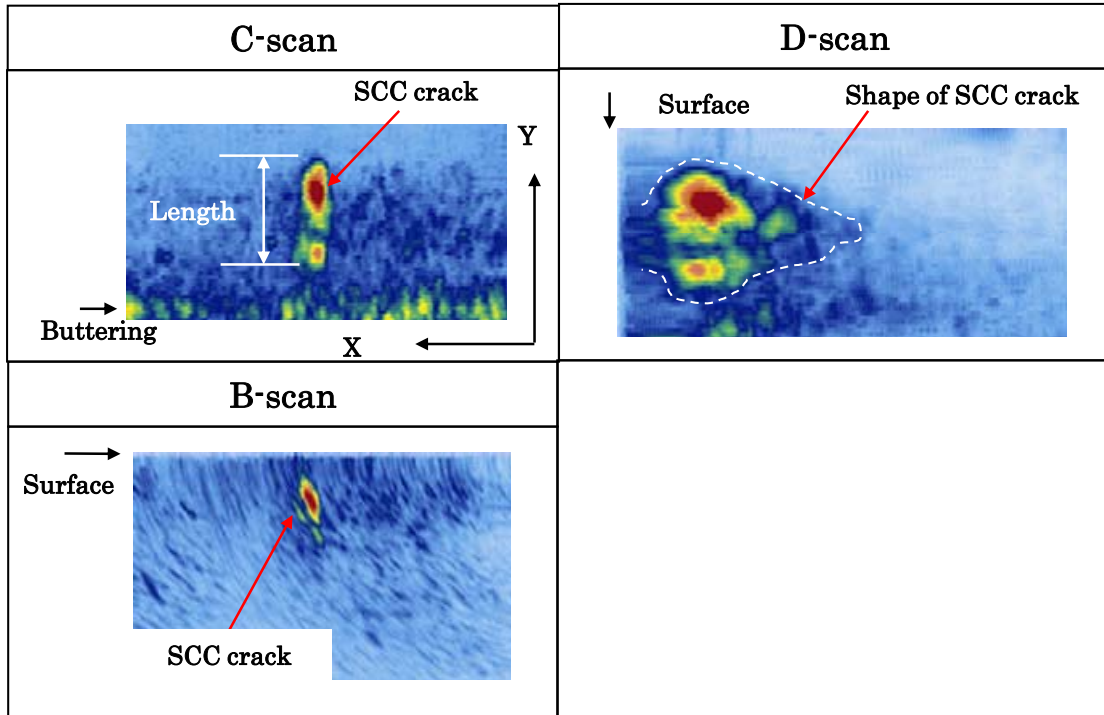


図 3.11 フェーズドアレイ UT 法による SCC き裂の探傷画像
(2 分割型マトリクスアレイ探触子 2MPC)

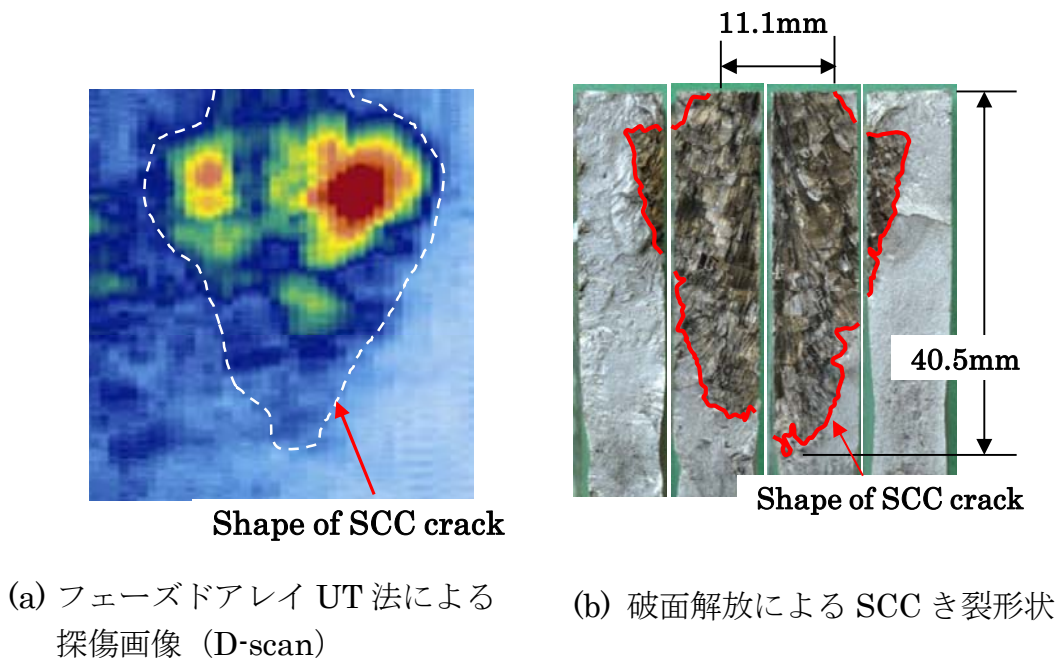


図 3.12 SCC き裂の形状

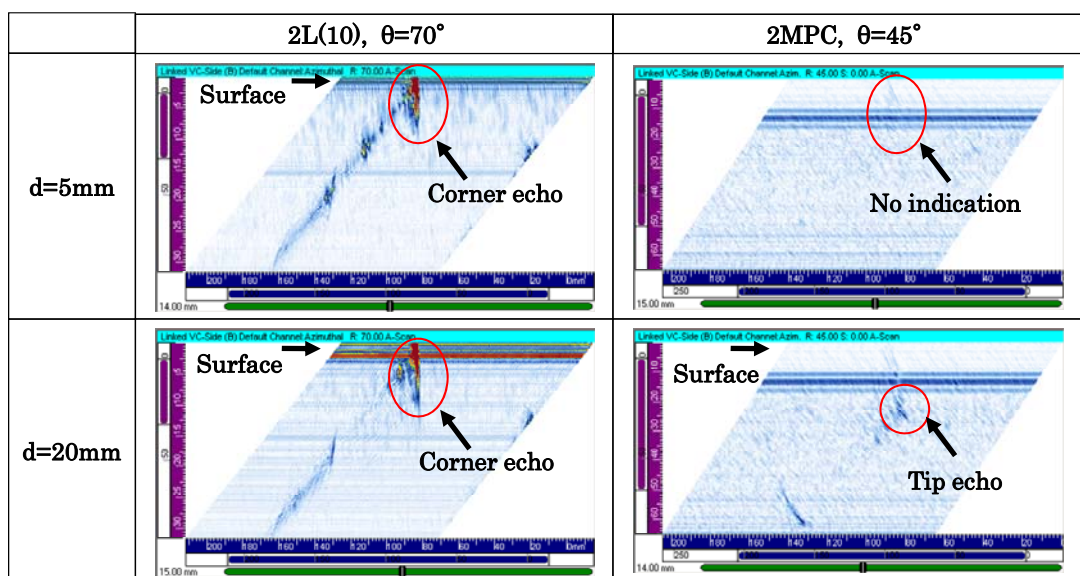


図 3.13 フェーズドアレイ UT 法による EDM ノッチに対する探傷断面画像
(アレイ探触子：2L(10)，2MPC，EDM ノッチ： $d=5,20\text{mm}$)

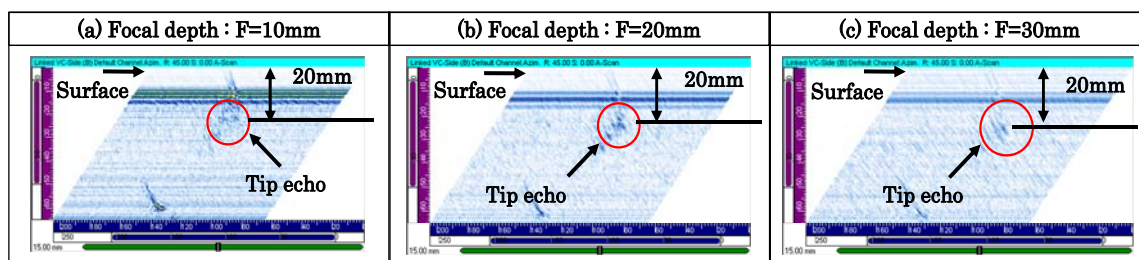


図 3.14 フェーズドアレイ UT 法による EDM ノッチに対する探傷断面画像
(アレイ探触子：2MPC，屈折角： 45° ，集束位置： $F=10,20,30\text{mm}$)

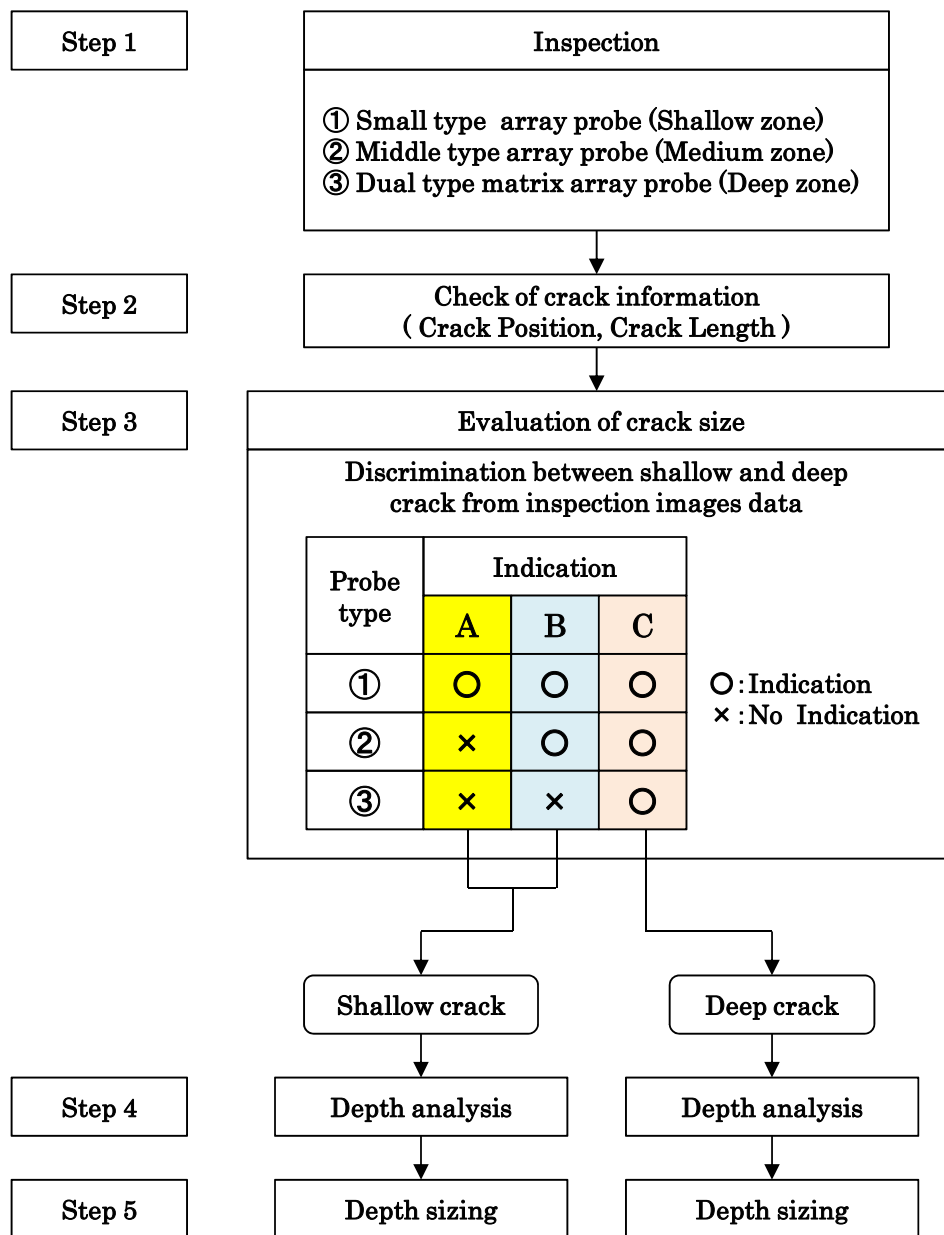


図 3.15 フェーズドアレイ UT 法による欠陥深さ測定要領のフローチャート

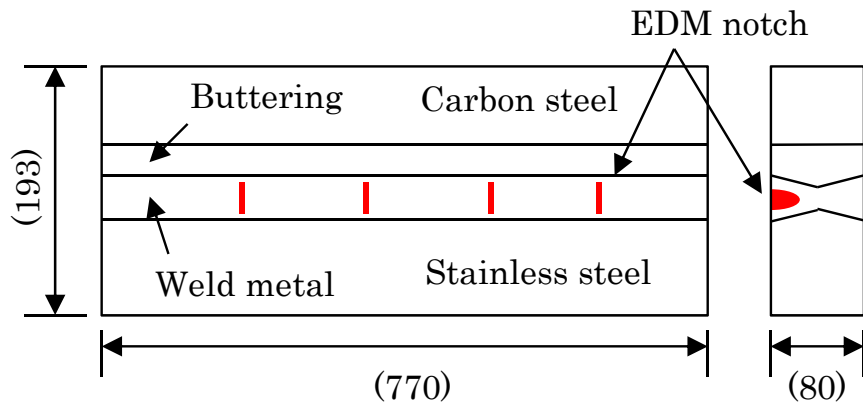


図 3.16 EDM ノッチを付与したニッケル基合金溶接部試験体
(EDM ノッチ付与位置：突合せ溶接部)

表 3.3 ニッケル基合金溶接部試験体の EDM ノッチ付与条件

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

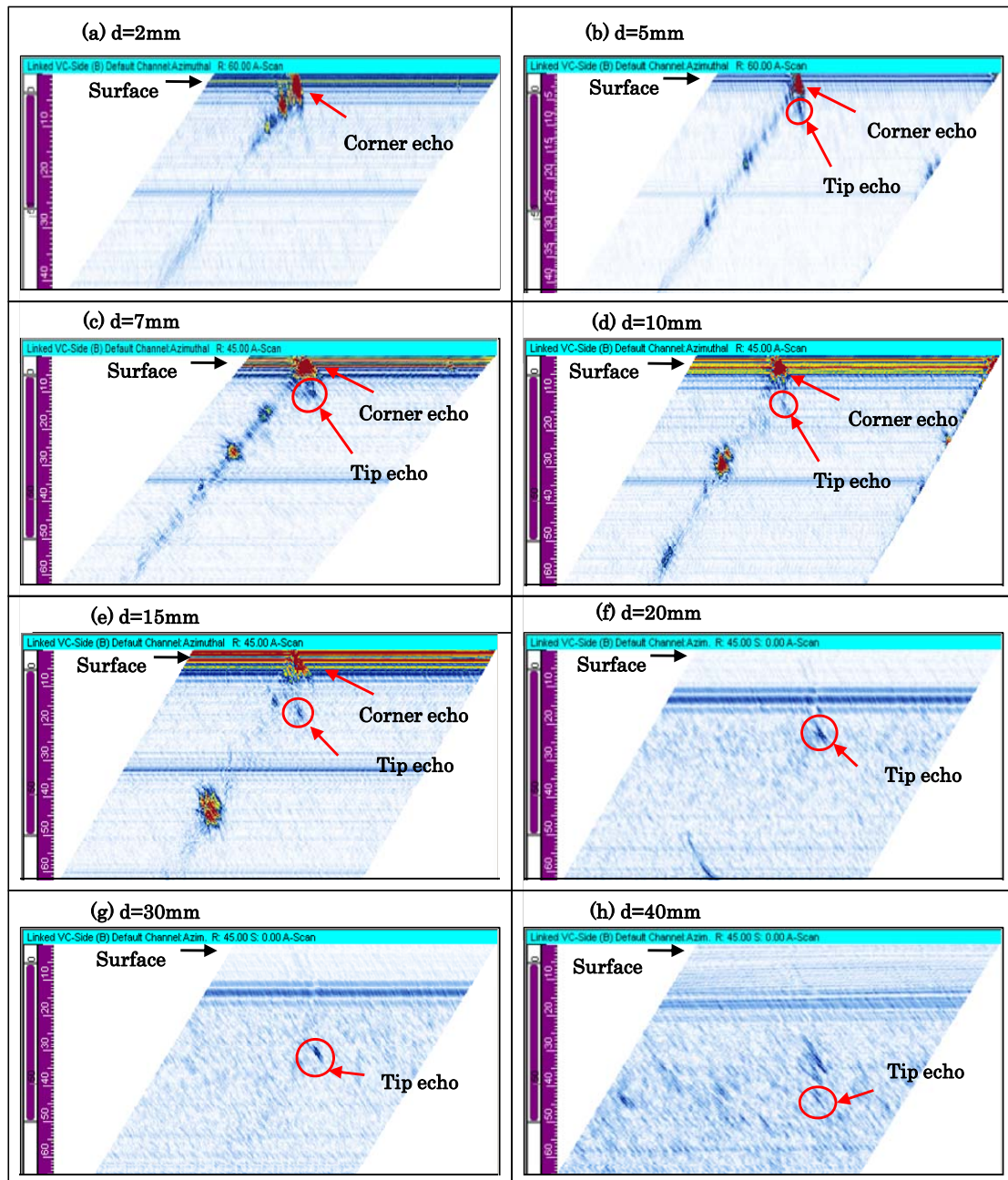


図 3.17 フェーズドアレイ UT 法によるニッケル基合金溶接部試験体の探傷画像

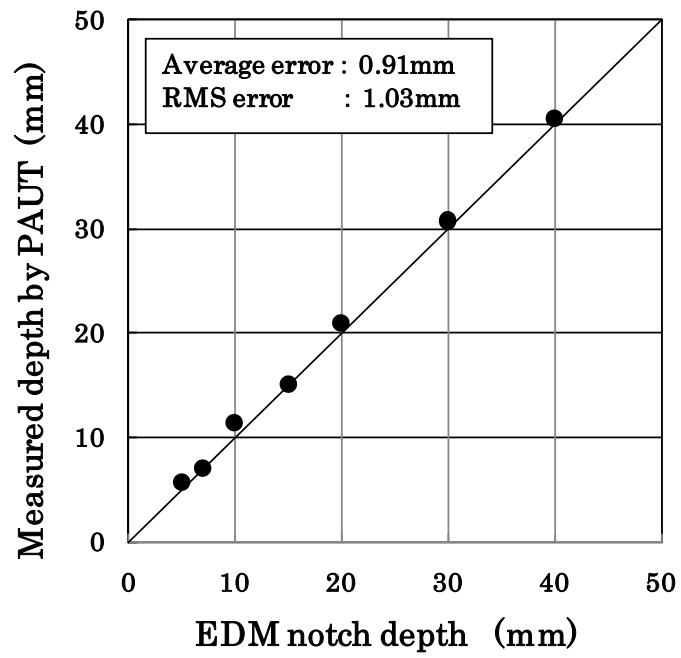


図 3.18 フェーズドアレイ UT 法によるニッケル基合金溶接部試験体の EDM ノッチに対する欠陥深さサイジング精度

第4章 SCC き裂に対するき裂深さ 測定法の評価

第4章 SCC き裂に対するき裂深さ測定法の評価

4.1 緒言

第3章では、ニッケル基合金溶接部に発生する SCC き裂に対して、フェーズドアレイ UT 法による高精度な欠陥深さ測定法を開発することを目的に、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法として、板厚の 1/2 程度（深さ 40mm）の深さまでの広い範囲を対象に、き裂情報およびき裂の大小判別から、き裂の誤認識あるいはき裂の見逃しの低減を図ることを可能とした欠陥深さ測定要領を作成した。さらに、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 法を適用した結果、欠陥深さの測定誤差は RMS 誤差 1mm 程度と良好な精度で評価できたことを示し、その結果、フェーズドアレイ UT 法の欠陥深さ測定に対する有効性を明らかにした。

しかしながら、き裂の種別や形状の違いが UT 性能（欠陥検出性および欠陥寸法測定）に影響を及ぼすことが知られており、また、実機 PWR 発電プラントの RV 管台セーフエンド溶接部で発生したき裂は、アスペクト比（き裂深さとき裂長さの比率）が大きく、かつき裂先端が櫛歯状の様相を呈する複雑なき裂であったこと⁽¹⁾、および従来の UT（固定角斜角探傷法）の適用では、深さ測定が困難であったこと⁽²⁾ などから、実機で発生したき裂と類似な形状を有する SCC き裂に対して、フェーズドアレイ UT 法によるき裂深さ測定の有効性を検討する必要がある。

一方、ニッケル基合金溶接部試験体への SCC き裂付与については、従来の一般的な方法^{(3),(4)} としては、SCC き裂付与部に薬液を充填させた小型のカプセル状の槽を設置した状態で機械的な曲げ応力を負荷する方法が挙げられるが、この方法では、SCC き裂は、アスペクト比が小さくかつ半楕円状の形状となり、実機で発生した SCC き裂の形状を模擬することが難しい。そのため、新たに SCC き裂の付与方法について検討する必要がある。

そこで、本章では、初めに、ニッケル基合金溶接部試験体への SCC き裂付与として、試験環境、応力付与方法、き裂形状制御方法の観点から、実機で発生したき裂形状（アスペクト比が大きく、巾着状）を模擬した SCC き裂の付与方法について検討する。

次に、上記方法で製作した、SCC き裂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 法を適用し、き裂深さ測定精度を評価し、これらの結果からフェーズドアレイ UT 法の有効性を検討する。

4.2 SCC き裂付与技術

4.2.1 SCC き裂付与条件の設定

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、フェーズドアレイ UT 法の適用性を評価するためには、実機で発生したき裂の形状を模擬した SCC き裂を付与した試験体を用いる必要がある。原子力発電プラントの損傷事例^①をみると、実機で発生したき裂は、突合せ溶接部の溶接線に対して直交方向に進展するき裂であり、対象部位の表面ではき裂開口幅が狭く、板厚方向では、アスペクト比が大きく、巾着状でかつき裂先端が尖った複雑な形状を有していることが示された。そこで、本研究では、実機形状に類似の SCC き裂を付与するために、以下の項目を目標に行うこととした。

- ① き裂付与位置は、溶接部の溶接線に直交方向とする。
- ② 表面き裂の開口部を狭くする。
- ③ 深いき裂はアスペクト比を大きくする（目標アスペクト比：2程度）。
- ④ き裂形状は、巾着状（き裂長さが表面よりも内部で大きい部分を有する）とする。

本研究で対象とするニッケル基合金溶接部試験体は、RV 管台セーフエンド溶接部を模擬した試験体であり、試験体の形状の模式図を、図 4.1 に示す。試験体は、平板試験体とし、SCC き裂は、試験体の中央部の溶接金属部およびバタリング部に付与することとした。なお、実機の RV 管台セーフエンド溶接部には、耐食性の観点から低合金鋼（ここでは炭素鋼を採用）に SUS クラッド施工を行っているが、ここでは、SUS クラッド面からの探傷を行わないため、試験体製作時のコスト面から SUS クラッドを施工していない。

SCC き裂付与は、試験環境、応力付与方法、溶接材料の選定およびき裂形状模擬の観点から、以下のように試験条件を検討した。

(1) 試験環境

試験環境としては、実機環境を模擬した高温純水中のループの一部に試験体を設置して SCC き裂を付与する方法^③と薬液に浸漬して付与する方法^④がある。前者は、ステンレス鋼配管溶接部に SCC き裂を付与する場合に適用される場合が多く、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、欠点としては、実機環境を模擬した設備は大掛りになること、き裂進展量測定時の試験体の取付け、取外し等のハンドリングが複雑になること、SCC き裂の付与時間が長時間必要となることがあげられる。一方、後者は、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ことで、薬液の補充、き裂進展量の測定時の小型の槽の取付け、取外し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き裂の進展挙動、形状等が、実機の形態と異なる可能性があることである。

そこで、経済性と製作時間を考慮して、薬液を充填したカプセル状の小型の槽をき裂付与位置に設置する方法を採用することとした。なお、薬液はポリチオン酸水溶液を用いることとした。

(2) 応力付与方法

応力付与方法としては、溶接残留応力を利用する方法^③と機械的な曲げ応力を利用する方法^④がある。溶接残留応力による方法では、溶接残留応力は機械的な応力付与に比べて、き裂付与部に大きな応力負荷を与えることが難しく、その結果、深いき裂の付与が困難となることが予想される。一方、機械的な曲げ応力を利用する方法としては、3点曲げあるいは4点曲げ試験にて試験体に曲げ荷重を負荷する方法がある。しかし、この方法では曲げ荷重によって試験体に大きな曲げ変形が生じ、表面き裂の開口幅が大きくなり、実機で発生したき裂と異なる様相を呈することが懸念される。また、き裂の開口幅を狭くするためには、試験体を機械的に曲げ戻し施工する方法があるが、き裂面の擦れ、潰れ等が生じ、き裂面の形態が実機の形態と異なることも懸念される。

そこで、過去の調査^⑤を参考に、引張応力を利用する方法を検討した。図 4.2 に引張応力付与方法に関する模式図を示す。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る。水平方向に応力が負荷されるため、曲げ応力の負荷に比べて、表面き裂の開口幅を狭くすることができる。なお、板厚の 1/2 程度 (40mm) の深いき裂を短時間で付与するときには、図 4.2 に示すように、試験体中央部に若干の曲げ応力を負荷する方法を採用することとした。

(3) 溶接材料およびき裂形状

付与する SCC き裂の形状を、実機と類似の形状 (アスペクト比が大きくかつ巾着状) に作製するため、以下の方法を採用した。アロイ 600 系ニッケル基合金の溶接材料は、炭素量の少ない溶接材 (低 C 量溶接材) であるため、SCC 感受性が低く短時間での SCC き裂付与が困難である。そこで、き裂を発生、進展させる領域には SCC 感受性が高い炭素量の多い溶接材 (高 C 量溶接材) を施工し、き裂進展を遅らせる領域には、低 C 量溶接材を施工することで、き裂形状を作製する方法である。

図 4.3 は、突合せ溶接部に SCC き裂を付与する場合の模式図である。SCC 感受性の低い溶接材を用いて溶接施工した突合せ溶接部に対して、目標き裂付与位置に、高 C 量溶接材を用いて部分溶接 (図中の部分溶接部 A) を行う。その後、当初の突合せ溶接部と部分溶接部 A との境界部に、SCC 感受性の低い低 C 量溶

接材を用いて部分溶接（部分溶接部 B）を行う。この結果、試験体表面で溶接線直交方向に進展するき裂は、SCC 感受性の低い部分溶接部 B に達して停留する。また、深さ方向に進展するき裂は、溶接線直交方向（き裂の長さ方向）では、SCC 感受性の低い部分溶接部 B および当初の突合せ溶接部に達して停留し、深さ方向では、SCC 感受性の高い部分溶接部 A に沿って進展すると考えられる。このように SCC き裂を進展させることができれば、図 4.3 に示すような、アスペクト比が大きく、かつ巾着状のき裂が付与されることになる。さらに、部分溶接部 B の施工位置を変えることで、試験体表面の SCC き裂長さ L を制御することが可能となり、部分溶接部の形状を変えることで、き裂の形状を制御することが可能となり、巾着状のき裂形状を模擬することができる。

以上の検討結果をもとに、以下に示す SCC き裂付与条件を設定した。

- ・環境：ポリチオン酸水溶液による浸漬
- ・応力：引張応力負荷（深いき裂は、曲げ応力も負荷）
- ・形状：高 C 量溶接材と低 C 量溶接材の組合せ

SCC き裂の付与位置を決めるため、およびき裂を短期間に発生させるために、試験体中央部に微小な余盛を施工し、その位置に長さ 10mm、深さ 0.5 mm、幅 0.3mm の放電加工（EDM）ノッチを加工して、SCC き裂発生の起点とした。また、き裂深さは、薬液の浸漬時間を目安に、き裂付与試験を適宜途中止めてフェーズドアレイ UT 法を適用し、そのときのき裂深さ測定結果で管理することとした。

次に、バタリング部への SCC き裂付与方法を検討した。SCC き裂の付与イメージを図 4.4 に示す。バタリング部のき裂付与領域に高 C 量溶接材を用いて部分溶接（部分溶接 C）を施工し、試験環境、応力付与方法は、突合せ溶接部の場合と同様な方法で行うことで SCC き裂を付与することが可能となる。なお、き裂長さ L は、部分溶接 C の大きさを設定することで制御することが可能となる。

4.2.2 SCC き裂付与試験体の試作・評価

試験体は、図 4.5 に示すように、RV 管台セーフエンド溶接部を模擬したニッケル基合金溶接部試験体であり、上記で設定した SCC き裂付与条件をもとにき裂付与を行った。

製作した試験体は、破壊調査（切断試験および破面解放試験の併用）により、付与した SCC き裂の形状、寸法を調査した。

突合せ溶接部に付与した SCC き裂を、破面解放試験にて調査した結果の一例を、図 4.6 に示す。図は、き裂の最深部近傍を 5mm 幅でスライス切断し、各小型試験片を破面解放したときの破面写真である。図には、赤線でき裂の形状（プロフィール）を示しており、このき裂は、巾着状でかつき裂の先端が尖った形状

を呈していることがわかる。さらに、このき裂の寸法測定結果から、アスペクト比 2.3（深さ 19.4mm、表面長さ 8.3mm）であり、目標き裂（深さ：20mm、長さ：10mm、アスペクト比：2.0）が概ね達成できた。また、図 4.6 のき裂の形態は、実機の RV 管台セーフエンド溶接部に発生した SCC き裂⁽¹⁾と比較すると、概ね類似の形状を示しており、実機の形状と類似の SCC き裂を付与することができたと言える。この結果から、上記で設定したき裂付与条件が適正な条件であることが明らかとなった。

ここで、試験体の破壊調査前に実施したフェーズドアレイ UT 法の探傷画像の一例を図 4.7 に示す。図は、超音波入射方向から見た断面画像（D スコープ）であり、き裂面からの指示が明瞭に認められた。また、この指示から、き裂形状として描いたプロファイル（図中の点線）は、図 4.6 に示した破面解放試験の SCC き裂の形状と類似の形状を示しており、探傷画像（D スコープ）から、き裂形状（プロファイル）を推定できることが確認できた。

4.3 き裂深さ測定精度評価およびき裂深さ測定法の検証

4.3.1 試験体および試験方法

（1）試験体

試験体は、前記 4.2 節で述べた SCC き裂付与方法で製作したニッケル基合金溶接部試験体である。試験体の形状、寸法の一列を図 4.5 に示す。また、表 4.1 に SCC き裂付与条件を示す。SCC き裂の付与方向は、突合せ溶接部およびバタリング部の溶接線直交方向とし、目標き裂深さは、3～40mm とした。

（2）試験方法

用いた装置は、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 4.2 に示す。

これらは、第 3 章で用いた試験機材と同一の型式のものである。また、探傷方法の模式図を、図 4.8 に示す。探傷は、ギャップ法（ギャップ寸法：0.2mm）で、探傷面は SCC き裂の開口面側とし、探傷方向はき裂に対して両方向からとした。図より、超音波ビームがき裂に対して直交方向に入射するように設定し、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。また、探傷データは、自動探傷により超音波波形データを収録した。ここで、走査ピッチは、X 方向は 0.5mm、Y 方向は 1mm とした。

フェーズドアレイ UT 法によるデータ収録、解析は、図 4.9 に示す「欠陥深さ測定要領」に従って実施した。また、詳細な解析による SCC き裂の深さ測定は、過去の知見^{(6),(7)}を参考に、端部エコー法にて行った。

4.3.2 き裂深さ測定精度およびき裂深さ測定法の検証

4.3.2.1 き裂深さ測定要領

第3章では、ニッケル基合金溶接部の高精度な欠陥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 法による欠陥深さ測定要領」を作成した。欠陥深さ測定要領のフローを図 4.9 に示す。欠陥深さ測定の手順の詳細は、第3章に述べており、ここでは、概略手の順について以下に述べる。

ステップ1では、深さ測定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、ステップ1で収録したアレイ探触子①の探傷データをもとに、探傷画像（C スコープおよび D スコープ）から欠陥情報（欠陥位置、長さ、形状等）を把握する。ステップ3では、3種類のアレイ探触子の探傷画像から、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う。ステップ5では、ステップ4の結果からき裂深さを求める。

4.3.2.2 き裂深さ測定結果

SCC き裂を付与したニッケル基合金溶接部試験体を用い、図 4.9 に示す欠陥深さ測定要領に従って、探傷、解析および評価を行い、き裂深さを測定した。

SCC き裂の深さ測定の代表例として、き裂が浅い場合およびき裂が深い場合の解析例を以下に述べ、次に、すべてのき裂を対象に、き裂深さ測定を行った結果について述べる。

(1) 浅いき裂の解析例

浅い SCC き裂の探傷画像の例を、図 4.10 に示す。欠陥深さ測定要領のステップ2における①小型アレイ探触子 2L (10) の探傷画像を、図 4.10 (a) に示す。図の 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把握できた。

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断面画像を、図 4.10 (b) に示す。図より、①2L (10) および②中型アレイ探触子 2L (20) の断面画像では、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 の断面画像では、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およびステップ5では、ステップ3で浅いき裂と評価したことから、①2L (10) の探傷データから、き裂深さ測定を行った。その結果、き裂深さは深さ 8.6mm と評価し、破壊調査で求めたき裂深さは 6.2mm と比べ、若干過大評価（誤差+2.4mm）ではあるが、良好な結果であったと言える。

(2) 深いき裂の解析例

深い SCC き裂の探傷結果を、図 4.11 に示す。図 4.11 (a)は、ステップ 2 におけるアレイ探触子①2L (10) の探傷画像である。浅いき裂の場合と同様、き裂位置およびき裂形状が把握できる。なお、D スコープ表示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 における 3 種類のアレイ探触子の断面画像から、き裂の大小判別を行った結果を、図 4.11 (b) に示す。図の断面画像から、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、き裂深さ測定は、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 2MPC の探傷データを用いて行った。その結果、き裂深さは、18.3mm と評価され、破壊調査から求めた実際のき裂深さ 19.4mm と比較すると、若干過小評価（誤差-1.1mm）ではあるが、極めて良好な結果であったと言える。

(3) き裂深さ測定結果

対象としたすべての SCC き裂は、前記同様、図 4.9 に示す欠陥深さ測定要領に従って、深さ評価を行った。各き裂の探傷画像の代表例を図 4.12 に示す。図は、各き裂に対して左右両方向からの探傷データの中から、最終的に深さ評価を行った条件で得られた断面画像である。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。ここで、欠陥番号 A、C、E、F、G、H は、2 分割型マトリクスアレイ探触子 2MPC の探傷画像（探傷屈折角 45°）、欠陥番号 B、D は、小型アレイ探触子 2L (10) の画像（探傷屈折角 45°）である。また、欠陥番号 I、J は、小型アレイ探触子 2L (10) の画像（探傷屈折角 60°）である。

次に、フェーズドアレイ UT 法による SCC き裂の深さ測定精度は、破壊調査から求めた実き裂深さとの比較で評価した。その結果を図 4.13 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 であった。

ここで、深さ測定誤差である RMS 誤差 2.93mm は、ASME Code Sec. XI App. VIII (ASME, 2006) の PD 試験時の合格基準である RMS 誤差 3.2mm 以内と比較して、良好な精度で評価されたと言える。

ニッケル基合金溶接部の SCC き裂深さ測定誤差は、一般に RMS 誤差 5mm 程度と言われており、それに比べて、高精度な SCC き裂の深さ測定が実現できた。これは、フェーズドアレイ UT 法による探傷画像をもとに、多くのき裂情報（位置、形状等）の把握、き裂の大小判別等を行い、その結果、き裂の誤検出、見逃しが低減されたことから、き裂深さを的確に測定できたものと考えられる。

以上の結果から、フェーズドアレイ UT 法は、ニッケル基合金溶接部の SCC き裂深さ測定に対して、有効かつ高精度なき裂深さ測定法であることが明らかとなった。

4.4 結言

ニッケルニッケル基合金溶接部に発生する SCC き裂に対して、き裂開口面側からフェーズドアレイ UT 法による高精度なき裂深さ測定法を開発することを目的として、初めに、ニッケル基合金溶接部に実機と類似の SCC き裂を付与する方法を検討し、次に、上記方法で製作したニッケル基合金溶接部に SCC き裂を付与した試験体に対して、フェーズドアレイ UT 法を適用し、SCC き裂に対する深さ測定精度を評価した結果、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 法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) ニッケル基合金溶接部に実機で発生したき裂の形状を模擬した SCC き裂を付与するための方法について、試験環境、応力付与方法、溶接材料およびき裂形状の観点から検討し、試験条件の最適化を図った。この試験条件でニッケル基合金溶接部に付与した SCC き裂は、破壊調査結果から、実機形状を模擬した、巾着状でアスペクト比（き裂深さと表面き裂長さの比）の大きなき裂を再現することができ、SCC き裂付与方法の有効性が確認できた。
- (2) 上記条件をもとに、ニッケル基合金溶接部に SCC き裂を付与した試験体に対して、フェーズドアレイ UT 法を適用し、作成した欠陥深さ測定要領に従って探傷・解析・評価した結果、SCC き裂深さは、誤差平均 1.78mm、RMS 誤差 2.93mm であり、深さ測定誤差である RMS 誤差 2.93mm は、ASME Code Sec. XI App. VIII の PD 試験における合格基準である RMS 誤差 3.2mm 以内と比べると、極めて良好な精度で評価されたと言える。
- (3) 上記の結果から、本研究で開発したフェーズドアレイ UT 法は、ニッケル基合金溶接部の SCC き裂深さ測定に対して、有効かつ高精度なき裂深さ測定法であることが明らかとなった。

参考文献

- (1) 関西電力ホームページ：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），
http://www.kepco.co.jp/corporate/pr/2008/_icsFiles/afieldfile/2008/09/26/1_0926_3j_01.pdf.
- (2) S. Kawanami, T. Matsuura, J. Nishida, M. Ideo, M. Kurokawa, T. Sera and S. Hirano : Development advanced defect sizing technique using ultrasonic testing for nozzle welding, Proceeding of the 7th International conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, (2009), pp.417-423.
- (3) (独) 原子力安全基盤機構：「平成 16 年度原子力発電施設検査技術実証事業に関する報告書（超音波探傷試験における欠陥検出性及びサイジング精度の確認に関するもの）[総括版]」，05 基材報-0001(2/2)，(2005.4)
- (4) (独) 原子力安全基盤機構：「平成 19 年度ニッケル基合金溶接部の非破壊検査技術実証に関する事業報告書」，08 基材報-0006，(2009.2)
- (5) (一財) 発電設備技術検査協会：平成 15 年度炉内構造物等特殊材料溶接部検査技術調査に関する事業報告書（添付資料：BWR もちより共同研究開示資料），(2003)
- (6) 平澤泰治，長井敏，村上功治，湯口康弘，大坪徹，成瀬克彦：ニッケル基合金溶接部に対する水浸フェーズドアレイ UT の適用，日本保全学会 第 4 回学術講演会 要旨集，(2007)，pp.67-71.
- (7) Y. Yuguchi, T. Hirasawa, K. Murakami, S. Nagai, T. Ootsubo and K. Naruse : Phased Array UT Application for Boiling Water Reactor Vessel Bottom Head, 15th International conference on Nuclear Engineering, ICONE15-10818, (2007).

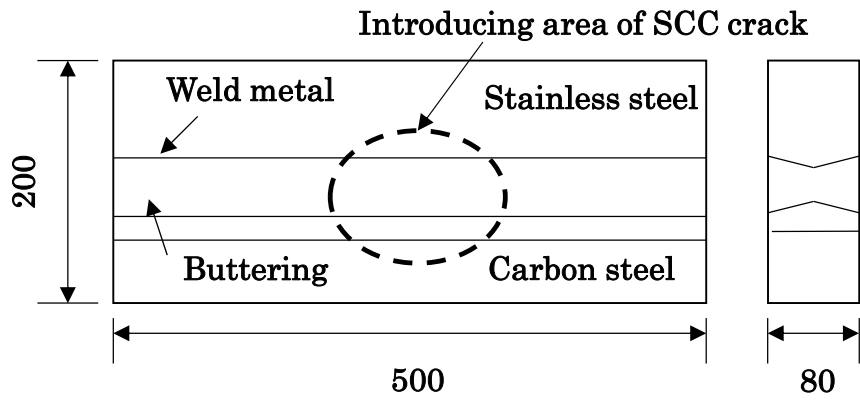


図 4.1 SCC き裂付与用のニッケル基合金溶接部試験体の模式図
(点線：SCC き裂の付与領域)

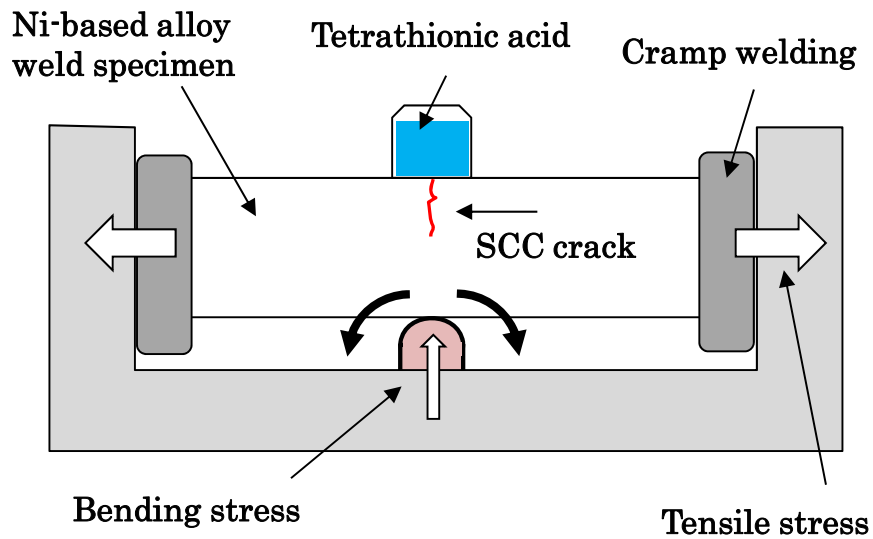


図 4.2 ニッケル基合金溶接部への SCC き裂付与方法の模式図

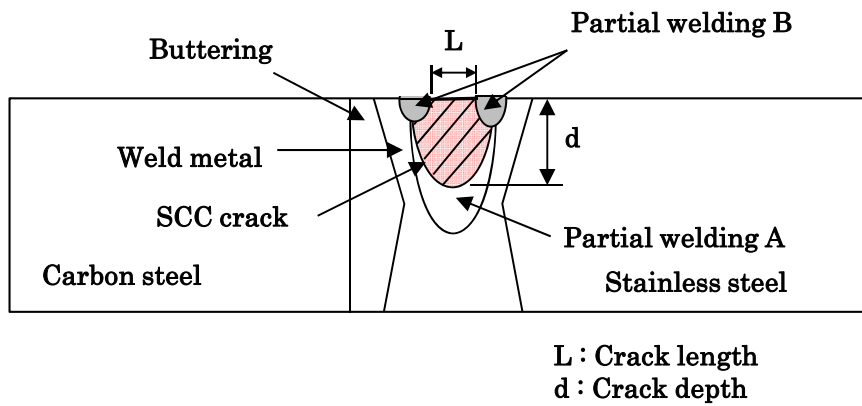


図 4.3 突合せ溶接部における SCC き裂形状の制御方法の模式図

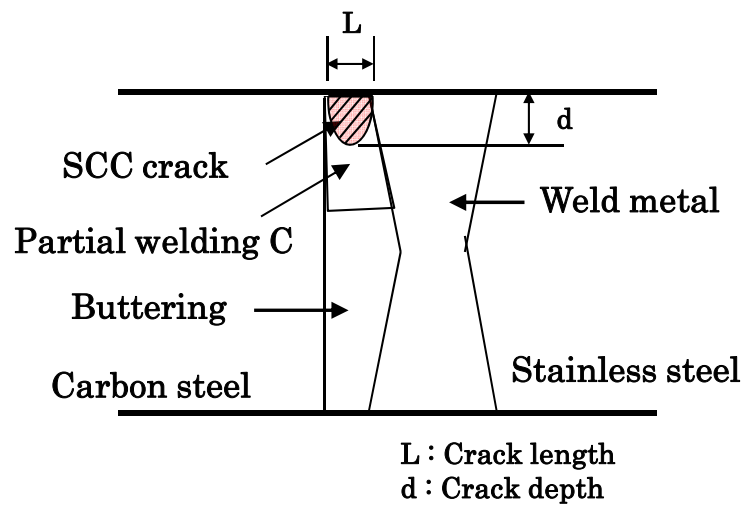
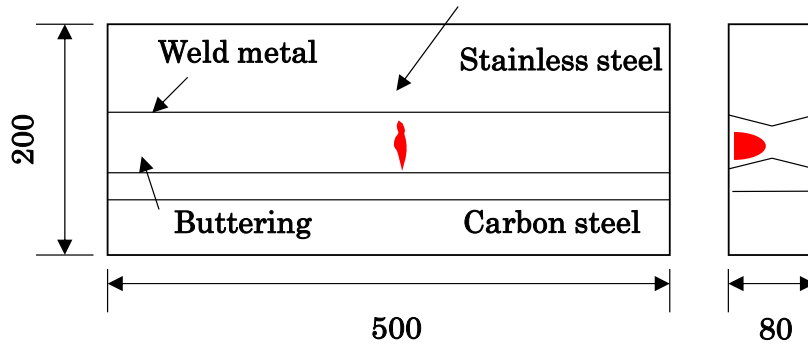


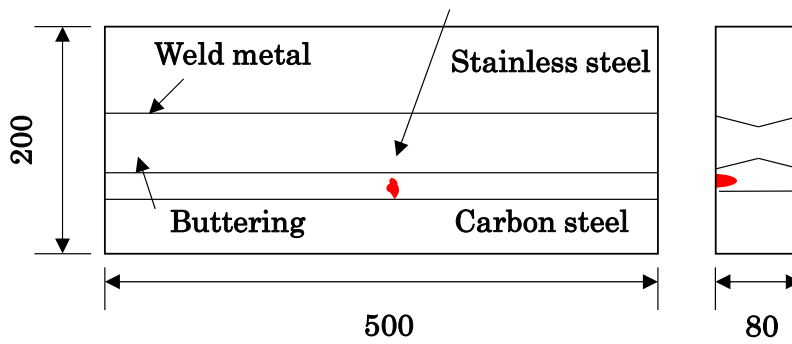
図 4.4 バタリング部における SCC き裂形状の制御方法の模式図

Introducing SCC crack in weld metal

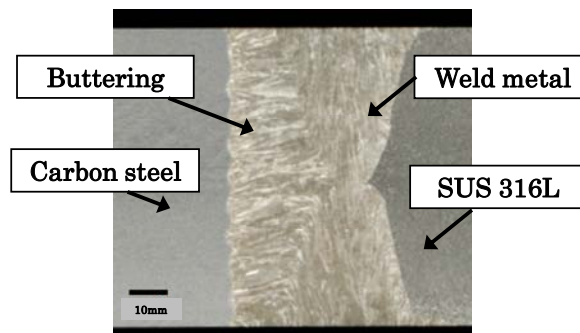


(a) 溶接金属部への SCC き裂付与

Introducing SCC crack in buttering



(b) バタリング部への SCC き裂付与



(c) 溶接部のマクロ組織

図 4.5 SCC き裂付与用のニッケル基合金溶接部試験体

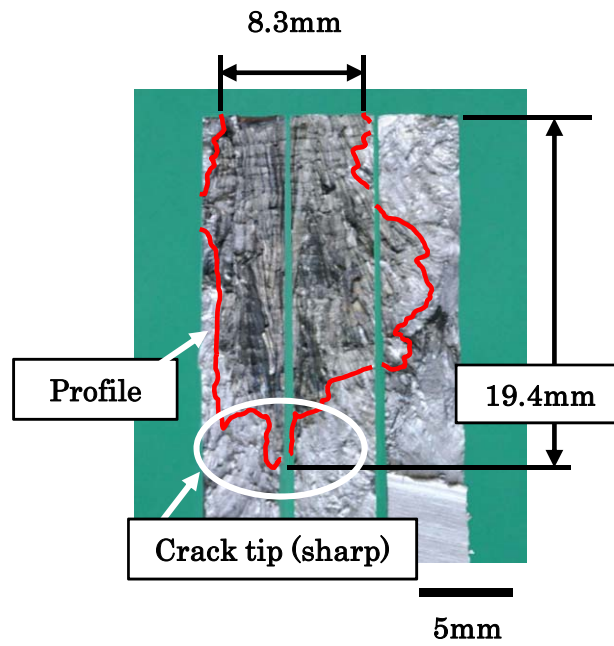


図 4.6 破面解放による SCC き裂形状

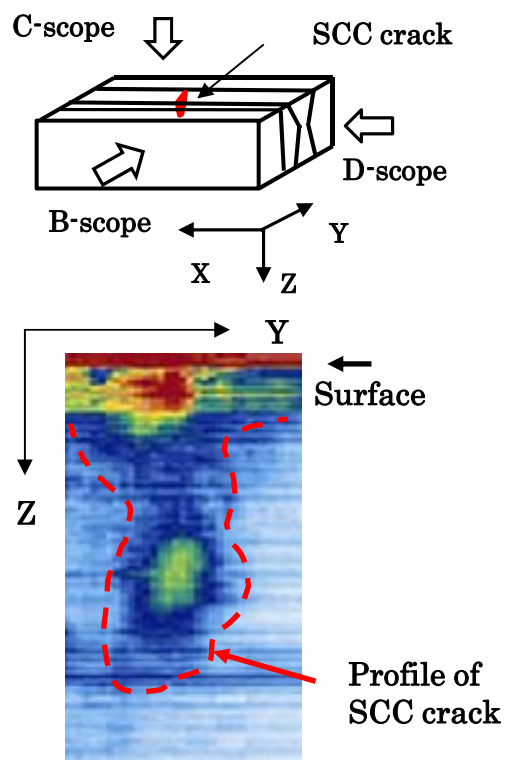


図 4.7 フェーズドアレイ UT 法による探傷画像 (D スコープ表示)

表 4.1 ニッケル基合金溶接部試験体への SCC き裂付与条件

Area	Direction	Depth (mm)	Length (mm)	Number of cracks
Weld metal	Axial	d=3~40	10~15	8
Buttering	Axial	d=3~10	10~15	2

表 4.2 アレイ探触子の仕様

	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

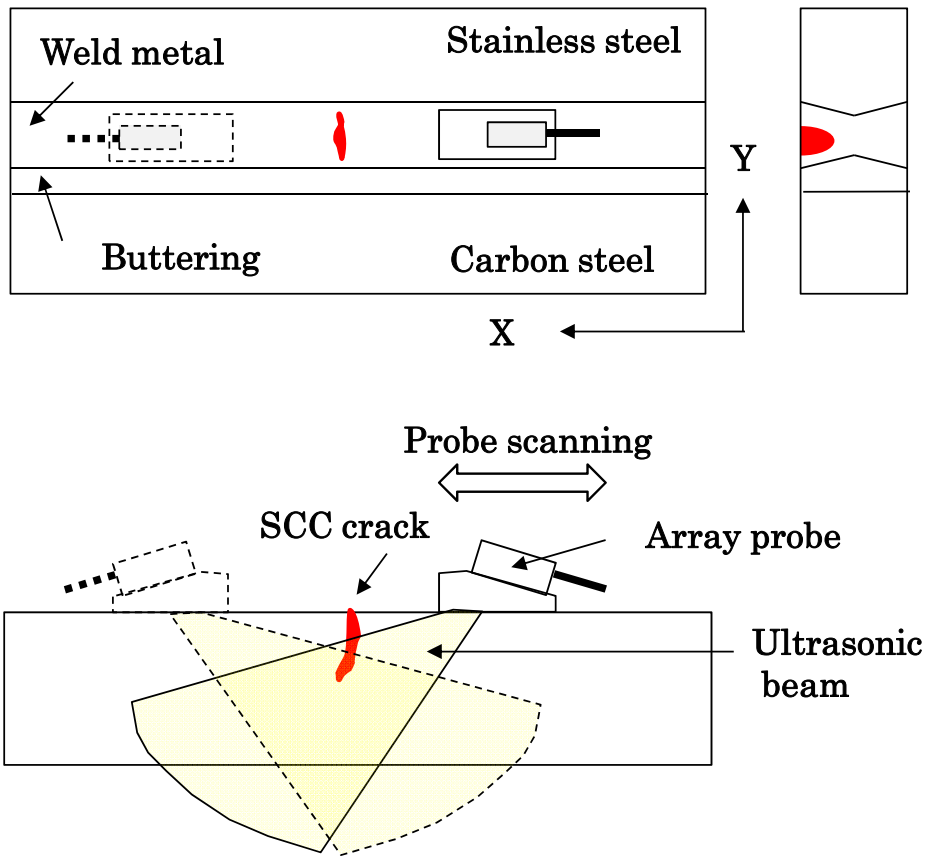


図 4.8 フェーズドアレイ UT 法による探傷イメージ

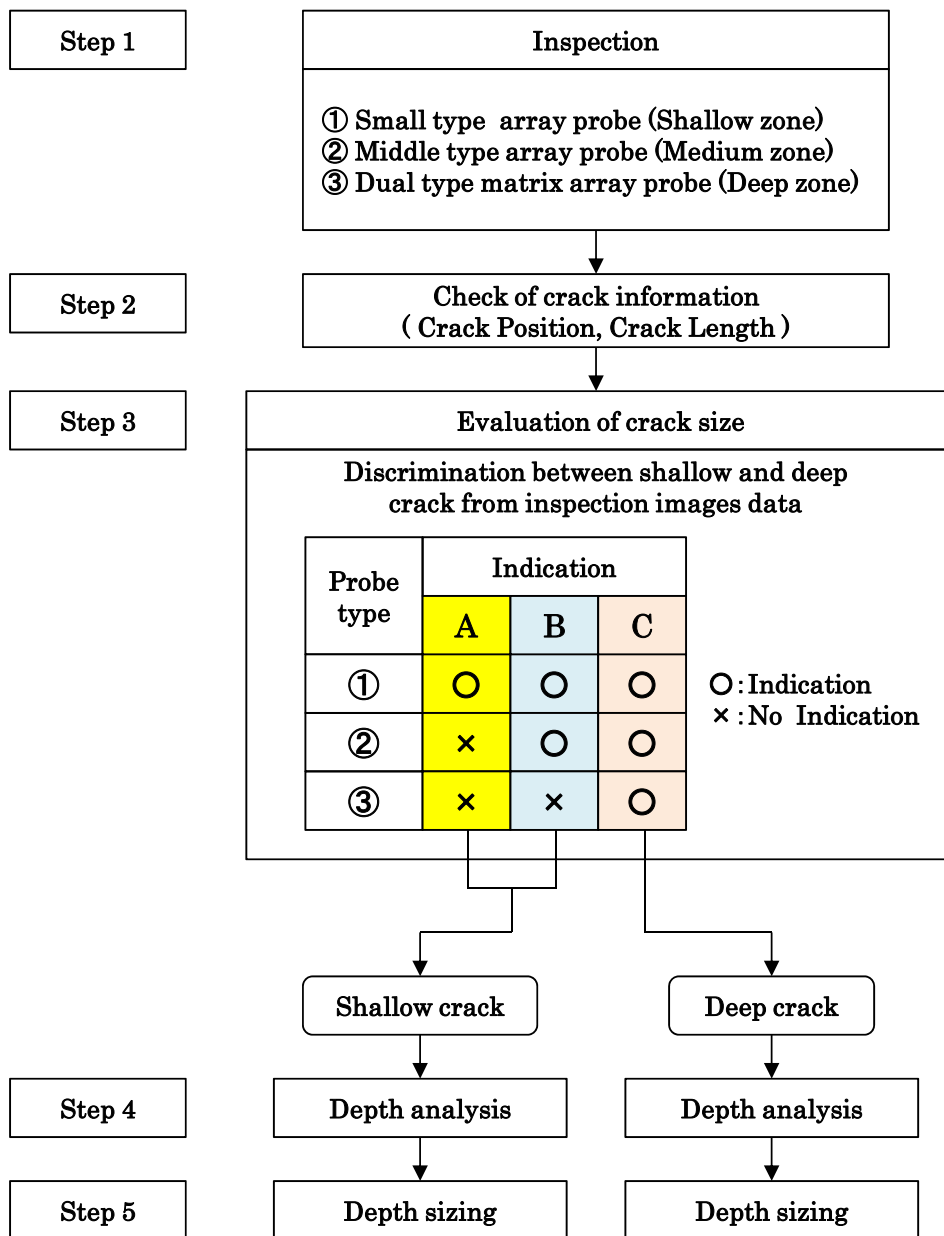
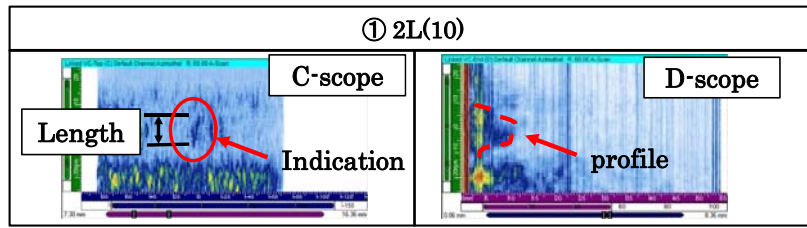


図 4.9 フェーズドアレイ UT 法による欠陥深さ測定要領のフロー

(a) Step 2



(b) Step 3

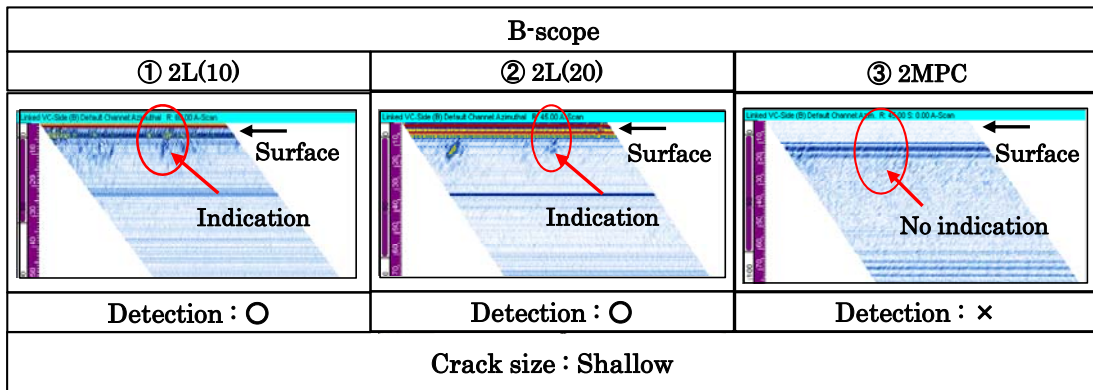
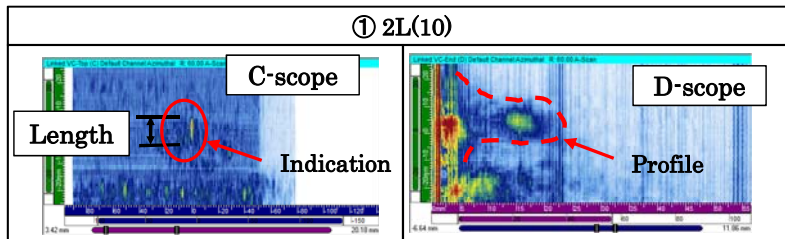


図 4.10 フェーズドアレイ UT 法による SCC き裂の深さ測定例(浅いき裂の場合)

(a) Step 2



(b) Step 3

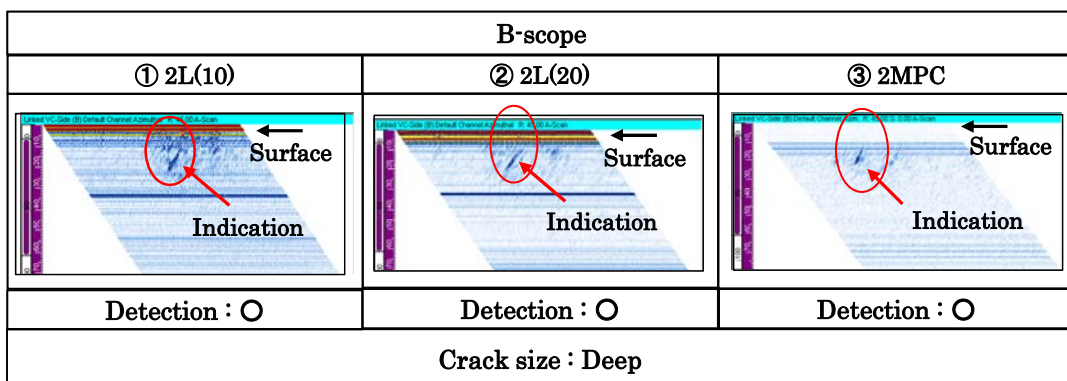


図 4.11 フェーズドアレイ UT 法による SCC き裂の深さ測定例(深いき裂の場合)

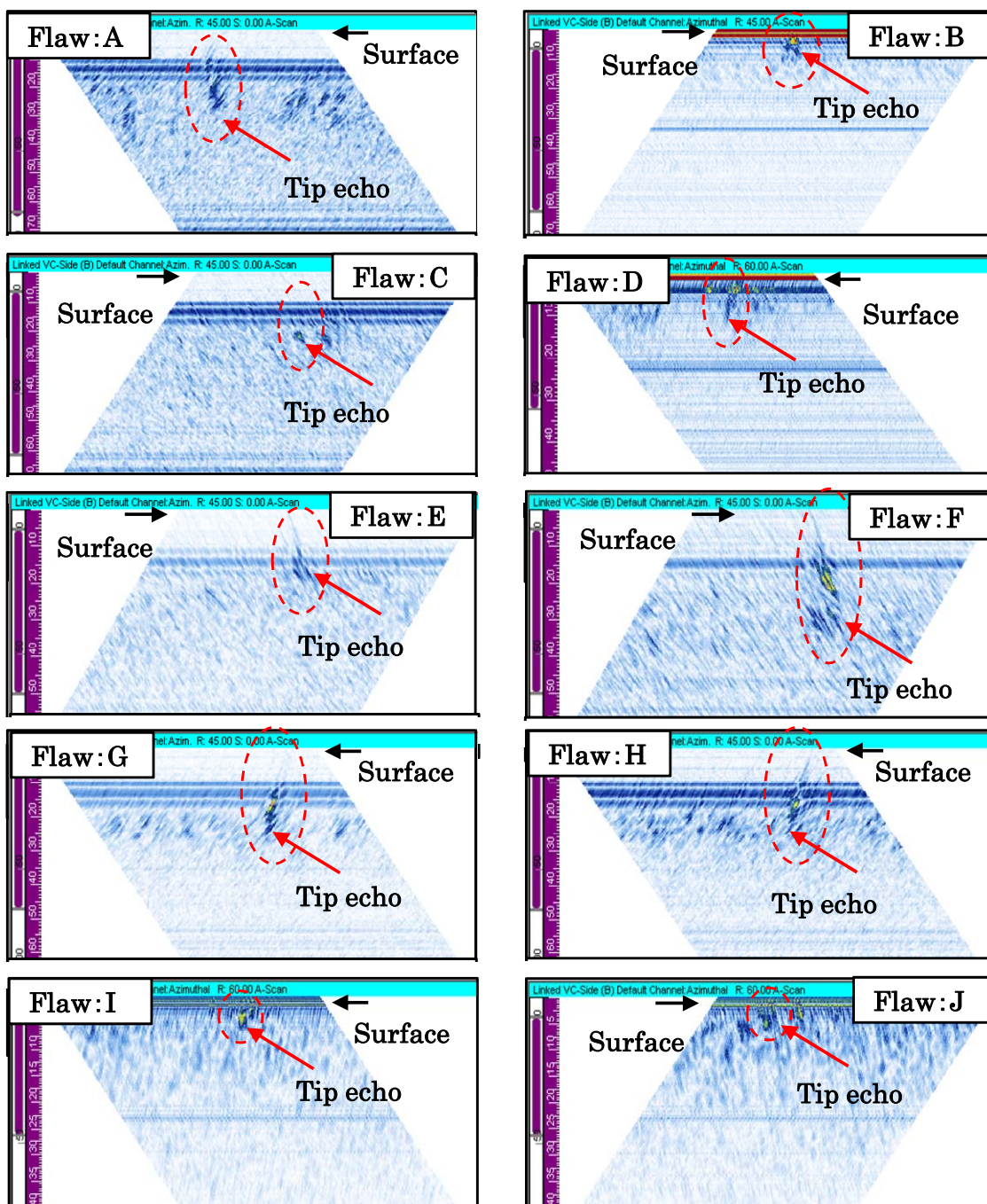


図 4.12 フェーズドアレイ UT 法による SCC き裂の探傷画像
(A~H : 突合せ溶接部, I,J : バタリング部)

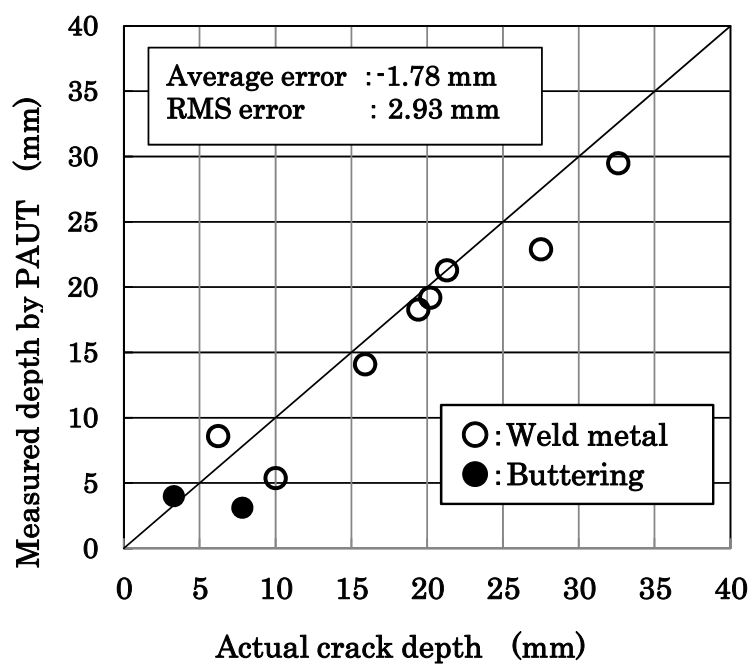


図 4.13 フェーズドアレイ UT 法による SCC き裂の深さ測定精度

第5章 き裂深さ測定における誤差要因 分析および測定精度の改善策

第5章 き裂深さ測定誤差要因分析および測定精度の改善

5.1 緒言

第3章では、対象とする溶接部の板厚の1/2程度(40mm)の深さまでの広い範囲を対象に、き裂情報(表面き裂の位置および長さ、深さ方向のき裂形状等)の把握およびき裂の大小判別を可能とし、その結果、き裂の誤認識あるいはき裂の見逃しの低減を図ることが可能である「フェーズドアレイ UT法による欠陥深さ測定要領」を作成し、EDMノッチを付与した試験体に適用した結果、EDMノッチ深さは、良好な測定精度で評価できることを示した。

また、第4章では、実機のRV管台セーフエンド溶接部に発生したき裂形状と類似のSCCき裂を付与したニッケル基合金溶接部試験体を製作し、これらの試験体に対して、フェーズドアレイ UT法を適用した結果、き裂深さを高精度に測定できることを示し、その結果、フェーズドアレイ UT法は、ニッケル基合金溶接部のSCCき裂深さ測定手法に対する有効性を明らかにした。

しかしながら、フェーズドアレイ UT法によるき裂深さ測定においては、溶接金属組織の不均質性(柱状晶組織)、き裂の複雑な進展挙動(特に先端部)等による測定誤差が生じることが想定される。また、探傷要領の不備、UT検査員の技量不足(経験不足)等による測定誤差が生じることがも想定される。

ニッケル基合金溶接部に対して適正な健全性評価、プラントの効率的な運用を図るためには、なお一層のき裂深さ測定精度の向上が必要である。

そこで、本章では、フェーズドアレイ UT法によるニッケル基合金溶接部のSCCき裂深さ測定において、想定される主要な誤差要因を分析し、き裂深さ測定に及ぼす影響について検討する。さらに、これらの誤差要因に対する改善方法についても検討する。

5.2 き裂深さ測定の誤差要因分析

ニッケル基合金溶接部に発生するSCCき裂に対して、フェーズドアレイ UT法により高精度なき裂深さ測定を実現するためには、き裂深さ測定における主要な誤差要因を分析し、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法における従来の知見、本研究で適用したフェーズドアレイ UT法の適用結果などから、想定される主要な誤差要因を抽出し、き裂深さ測定に及ぼす影響等について検討した。その結果を表5.1に示し、以下に、これらの検討結果を述べる。

5.2.1 溶接金属組織の影響

(1) 端部エコーの検出性の低下

フェーズドアレイ UT 法による SCC き裂深さ測定は、き裂先端部からの端部エコーを検出し、端部エコー法を用いて深さ測定を行うため、端部エコーを高感度で検出することが重要である。

ニッケル基合金溶接部の溶接金属部に入射された超音波は、溶接金属組織（柱状晶組織）で散乱・減衰するため、き裂先端からの端部エコーは微弱な信号となることが知られている⁽¹⁾。また、入射された超音波は、溶接金属組織で反射され、金属組織エコー（ノイズエコー）として検出されるため、端部エコーとノイズエコーの SN 比が低下し、端部エコーの検出性が低下する。その結果、端部エコーとノイズエコーの識別性が低下する。このような場合、ノイズエコーを端部エコーと誤認識しき裂深さを過大評価することが想定される。また、端部エコーをノイズエコーと誤認識しき裂を見逃して、結果として、き裂深さを過小評価することが想定される。

ここで、端部エコーの誤認識あるいは端部エコーの見逃しに関する事例を、図 5.1 を用いて述べる。図 5.1(a) は、ノイズエコーを端部エコーと誤認識する場合の事例である。図は、アレイ探触子 2L(10)の探傷断面画像であり、指示 A と指示 B が検出され、指示 A が端部エコーで、指示 B がノイズエコーの場合を考える。これらのデータ解析において、指示 A は、信号強度が大きく、SN 比の観点からも明らかにき裂からの指示と評価できるが、指示 B は、指示 A の下側に位置し、指示 A と離れて表示されていること、SCC き裂の端部エコーは、一般に微弱な信号であること等から、指示 B を端部エコーとして評価すると、ノイズエコーである指示 B を端部エコーと誤認識することになる。その結果、き裂深さは、 d_A と評価すべきところを d_B ($d_A < d_B$) と評価し、き裂深さを過大評価することになる。

次に、端部エコーを見逃す場合の事例を述べる。図 5.1(b) は、図 5.1(a) と同一の探傷断面画像であり、指示 C と指示 D がともにき裂からのエコーである場合を考える。図より、指示 D は、指示 C に比べて微弱な信号であることからノイズエコーとして評価すると、最深のき裂先端からの端部エコーである指示 D を見逃すことになる。その結果、き裂深さは、 d_D と評価すべきところを d_C ($d_C < d_D$) と評価し、き裂深さを過小評価することになる。

このように、検出された微弱な信号については、端部エコーをノイズエコーと誤認識する場合、あるいは端部エコーを見逃してしまう場合があり、いずれの場合もき裂深さ測定の誤差要因となり、き裂深さ測定への影響は極めて大きい。

これら端部エコーの誤認識、あるいは端部エコーの見逃しによるき裂深さの測定誤差を低減する方法としては、複数のアレイ探触子でのた探傷データ、複数の

探傷屈折角（45°、60°、・・・）での探傷データ等、多くの探傷データからき裂か否かを判断することが必要である。

しかしながら、端部エコーかノイズエコーかの判別が難しい場合も多く、探傷データと破壊調査結果を比較し、端部エコーとノイズエコーの超音波伝搬挙動を把握し、探傷波形および探傷画像データの見方を習熟すること、また、端部エコーを的確に検出するための探傷条件の設定等を適正に行うことが重要である。さらに、実際に検査を行う UT 検査員に対して、上記内容に関する教育・訓練を通して、端部エコーとノイズエコーを識別するための習熟度を向上させることも重要となる。

（2）超音波音響異方性の影響

ニッケル基合金溶接部の溶接金属部組織（柱状晶組織）は、超音波異方性材料であるため、柱状晶組織への超音波入射角度によって、材料中の超音波音速が変化することが知られている⁽²⁾。き裂深さ測定では、一般に、図 5.2 に示すように、検出された端部エコーの超音波ビーム路程 W と探傷屈折角 θ から端部エコー法を用いて、き裂深さ d を次式により求めている。

$$d=W\cos\theta \quad (5-1)$$

しかしながら、対象部位は超音波異方性材料であるため、超音波の伝搬方向や伝搬経路によっては、探傷装置で設定する材料の音速と実際の溶接金属部の音速に差異が生じ、その結果、き裂先端部の評価位置に差異が生じるため、き裂深さに誤差が生じることになる。

ここで、超音波音速異方性による測定誤差の事例を、図 5.3 を用いて述べる。一般に、図 5.3 (a) に示すように、対象部位に対して、アレイ探触子から屈折角 θ で超音波を入射し、き裂先端部 T からの端部エコーを検出して、き裂先端までの超音波ビーム路程 W_T と探傷屈折角 θ からき裂深さを測定する。しかしながら、対象部位は音速異方性材料であるため、探傷装置で設定した材料の音速と実際の溶接金属部の音速に差異が生じる場合がある。対象部位の音速 (V_m) が、探傷装置で設定した音速 (V_o) に比べて大きい場合 ($V_m > V_o$) は、図 5.3 (b) に示すように、端部エコーは、超音波ビーム路程 W_A が測定されて位置 A に表示される。その結果、実際のき裂先端部は、位置 T と異なる位置 A に表示され、き裂深さは d_T とすべきところを d_A ($d_A < d_T$) と評価し、き裂深さを過大評価することになる。また、対象部位の音速 (V_m) が、探傷装置で設定する音速 (V_o) に比べて小さい場合 ($V_m < V_o$) は、上記と反対に、き裂深さを過小評価することになる。いずれの場合も、き裂深さ測定の誤差要因となる。

これらの誤差の低減方法としては、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（対比欠陥片）を製作し、探傷屈折角と超音波音速との関係を求める方法がある。この方法で求めた関係から、き裂深さ測定のための補正量を求め、深さ補正を行うことで、誤差の低減を図ることができる。

（3）超音波ビームの屈曲の影響

ニッケル基合金溶接部の溶接金属部組織（柱状晶組織）は、超音波異方性材料であるため、柱状晶組織への超音波入射角度によって、材料中で超音波ビームが屈曲するなど、複雑な超音波伝搬挙動を示すことが知られている⁽¹⁾。

ここで、超音波屈曲による測定誤差の事例を、図 5.4 を用いて述べる。対象部位に対してアレイ探触子から探傷屈折角 θ で超音波を入射すると、図 5.4 (a) に示すように、超音波ビームは、柱状晶組織の成長方向に影響を受けて屈曲しながら伝搬し、き裂先端部 T からの端部エコーを検出する。き裂深さ d_T は、検出された端部エコーの超音波ビーム路程 W_T と探傷屈折角 θ から端部エコー法を用いて、次式により求める。

$$d_T = W_T \cos\theta \quad (5-2)$$

しかしながら、測定したき裂深さ d_T は、超音波ビームの屈曲による伝搬挙動を考慮せず、超音波ビームが直進したものと仮定して測定されたき裂深さであり、図 5.4 (b) に示すように、端部エコーは、超音波ビーム路程 W_A が測定されて位置 A に表示される。その結果、実際のき裂先端位置 T と異なる位置 A に表示され、き裂深さは d_T とすべきところを d_A ($d_A > d_T$) として評価され、き裂深さを過大評価することになる。この場合も、き裂深さ測定の誤差要因となる。

これらのき裂深さ測定誤差を低減方法としては、前記同様、対象部位である溶接金属部と同等の確認用試験片（対比欠陥片）を製作し、探傷屈折角と超音波音速との関係からき裂深さ測定のための補正量を求め、深さ補正を行う方法があげられる。これにより、き裂深さの測定誤差を低減することができる。

5.2.2 き裂形状の影響

（1）き裂先端部の形状

過去の調査調査⁽³⁾によれば、PWR 発電プラントの RV 管台セーフエンド溶接部に発生したき裂は、アスペクト比（き裂深さと表面き裂長さの比）が大きく、巾着状でかつき裂先端が尖った複雑な形状を有していたとされている。従来、ニッケル基合金溶接部に発生するき裂は、デンドライト境界を進展し、き裂形状が複雑な様相を呈することも知られている⁽⁴⁾。ここでは、き裂形状に起因する誤差

要因について検討する。

本研究で製作したニッケル基合金溶接部試験体に付与した SCC き裂について、き裂形状を把握するために破面解放試験を行った結果の一例を、図 5.5(a) に示す。図より、き裂寸法の測定結果から、き裂のアスペクト比は、2 程度(長さ 14.6mm、深さ 27.5mm) であり、かつ巾着状の様相を呈し、さらにき裂先端が櫛歯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 程度までは概ね円弧状であり、その先端部が櫛歯状に尖った形状を呈している。

このようなき裂に対して、フェーズドアレイ UT 法によるき裂深さ測定を行った事例を述べる。き裂の破面解放試験前に実施したフェーズドアレイ UT 法による探傷画像の一例を、図 5.5(b) に示す。図は、2 分割型マトリクスアレイ探触子 2MPC を適用した時の断面画像の一例である。図 5.5(b) (上段)は、集束位置 $F=20\text{mm}$ の探傷断面画像であり、き裂指示が明瞭に認められた。この指示のき裂深さは、22.7mm と評価され、き裂破面による実き裂深さ 27.5mm と比べて 4.8mm 過小評価した。ここで、この指示は、図 5.5(a) のき裂破面の円弧状のき裂深さ (23mm 程度) 位置と概ね一致しており、この部分からの指示と考えられる。

次に、図 5.5(b) (下段) は、上記と同じアレイ探触子 2MPC を用い、集束位置を $F=30\text{mm}$ と設定して探傷した時の探傷断面画像の一例であり、上記同様、き裂指示が明瞭に認められた。この指示のき裂深さ評価を行った結果、き裂深さは 25.4mm と評価され、実き裂深さ 27.5mm に比べて 2.1mm 過小評価した。この指示は、図 5.5(a) のき裂破面において、き裂先端近傍からのエコーと推定される。

これらの結果から、集束位置 $F=30\text{mm}$ の方が、集束位置 $F=20\text{mm}$ に比べて良好な探傷条件であり、き裂先端への超音波入射強度が大きく、き裂先端近傍からのエコーを検出できたものと考えられる。

このように、き裂先端が櫛歯状の形状を有しているような場合は、探傷条件によって深さ評価に差異が生じ、結果として深さ測定誤差に影響を及ぼすことになる。

このように、微弱な信号である端部エコーを検出するためには、適正な探傷条件の選定が重要である。さらに、本研究で用いた 2 分割型マトリクスアレイ探触子のような高パワー探触子を適用し、適切な探傷条件でき裂先端に高パワーの超音波信号を入射させ、端部エコーを高感度で検出することが重要となる。

(2) き裂先端部の傾き、開口幅および複数き裂の影響

き裂形状に起因する誤差要因として、前記(1)では、き裂先端部の形状について検討したが、それ以外の誤差要因としては、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

き裂が存在する場合等が考えられる。これらの事例について以下に述べる。

き裂先端部が傾きを有している場合の事例を、図 5.6(a) に示す。図は、き裂先端が左側に傾いているき裂に対して、右側から探傷したときの模式図である。図より、アレイ探触子を位置 P_1 , P_2 , P_3 , \dots と走査させて探傷した場合、探触子位置 P_1 および P_2 では、き裂からのエコーが検出されるが、位置 P_3 では、き裂先端からのエコーが検出されず、き裂深さは、位置 P_2 のデータから、 d_T とすべきところを d_A ($d_A < d_T$) として評価し、き裂深さを過小評価することになる。なお、き裂に対して両側からの探傷が一般に行われており、き裂に対して反対側（紙面の左側）から探傷すると、き裂先端部 T からの端部エコーを検出することが可能となり、き裂深さを適正に評価することができる。しかしながら、対象部位の形状から左側から探傷できない場合は、上記で示した測定誤差となる。

次に、き裂先端部の開口幅が狭くて超音波が透過する場合の事例を、図 5.6(b) に示す。図は、先端部が閉じたき裂に対する探傷模式図である。き裂開口幅が狭いき裂に超音波を入射させた場合、一般に、き裂開口幅が数 μm 以下ではき裂面からの超音波反射率が低下し、超音波が透過すると言われている⁵⁾。図 5.6(b) に示すように、き裂先端部の開口幅が狭い場合は、超音波がき裂先端部 T を透過し、き裂開口幅が比較的広い位置 A からの信号を端部エコーとして検出することになる。この場合、き裂の深さは、深さ d_T とすべきところを d_A ($d_A < d_T$) と評価し、き裂深さは過小評価することになる。

さらに、複数のき裂が存在する場合の事例を、図 5.6(c) に示す。図は、複数き裂の中央部に最深き裂が存在する場合の探傷模式図である。図より、アレイ探触子を位置 P_1 , P_2 , P_3 , \dots と走査させて探傷しても、最深き裂の先端部 T からの端部エコーが検出されず、最深き裂の手前側に存在するき裂の先端部 A からの信号を端部エコーとして検出することになる。このときのき裂深さは、 d_T とすべきところを d_A ($d_A < d_T$) と評価し、き裂深さを過小評価することになる。なお、き裂に対して反対側（紙面の左側）から探傷した場合でも、最深き裂の先端部 T からの端部エコーが検出されない場合は、上記で述べたことと同様、き裂深さを過小評価することになる。

上記で述べた 3 つの事例については、これらの誤差要因を解決することは困難であり、UT の限界でもある。

5.2.3 測定要領および検査員に係わる誤差要因

欠陥深さ測定要領に係る誤差要因としては、探傷条件が適正でない場合があげられる。例えば、本研究の対象であるニッケル基合金溶接部の溶接金属部は、超音波異方性材料で、超音波散乱・減衰が大きいいため、高パワーのアレイ探触子の適用が必須であるにも拘らず、比較的パワーの小さいアレイ探触子を適用した場合には、強い超音波をき裂先端に入射させることができず、端部エコーは微弱な

信号となって、ノイズエコーとの識別が困難となる。その結果、端部エコーが検出できず、最深き裂の深さを測定できないということが生じる。

また、き裂深さ測定における UT 検査員の技量不足も考えられる。本研究の対象であるニッケル基合金溶接部は、従来、超音波異方性材料であり超音波ビームの散乱・減衰あるいは超音波ビームの屈曲等が生じることから、超音波難探傷部位と言われている。ニッケル基合金溶接部に発生する SCC き裂に対して、技量、知識および経験が不足している UT 検査員が、き裂深さ測定を行う場合、複雑な超音波伝搬挙動あるいは端部エコーの発生挙動を理解できず、端部エコーの誤検出あるいはき裂の見逃しが生じ、的確なき裂深さ測定が困難となることが想定される。

5.3 き裂深さ測定精度の改善

前記 5.2 節では、ニッケル基合金溶接部の SCC き裂に対する深さ測定における主要な誤差要因として、溶接金属組織、き裂形状、測定要領および UT 検査員に関する項目を抽出し、き裂深さ測定に及ぼす影響について分析、評価した。

ここでは、これらの主要な誤差要因について、き裂深さ測定精度を向上させるための改善策について検討し、その結果を表 5.2 にまとめた。

以下に、これらの内容について述べる。

(1) き裂先端部エコーの検出性向上

ニッケル基合金溶接部に対して UT を適用した場合、溶接金属組織での超音波散乱・減衰、金属組織エコー（ノイズエコー）の発生等により、端部エコーが微弱な信号となる。き裂深さを測定するためには、き裂先端の端部エコーの検出性を向上させる必要がある。

端部エコーを高い SN 比で検出するためには、高パワー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げられる。その対応としてハードウェア面とソフトウェア面の観点からのその対応について検討する。

ハードウェア面の対応としては、高パワー探傷が可能なアレイ探触子およびフェーズドアレイ UT 装置の適用が挙げられる。アレイ探触子としては、多数の振動子が格子状に配列し、かつ振動子の開口寸法が大きいマトリクスアレイ探触子を適用することで、超音波ビームが点状に集束（ポイントフォーカス）する集束効果の高い探傷が可能となり、SCC き裂の先端部に強い超音波を入射させることができる。その結果、SN 比の高い端部エコーを検出することができる。また、フェーズドアレイ UT 装置は、前記マトリクスアレイ探触子で探傷できる装置であることが必要である。

次に、ソフトウェア面の対応としては、最適な探傷条件の設定による探傷があげられる。図 5.7 は、2 分割型マトリクスアレイ探触子 2MC の距離振幅特性の測定結果である。この図は、測定範囲を深さ 20mm～40mm と設定したときに、超音波集束位置 F を F=20、30、40mm と設定して探傷したときに、測定範囲（深さ 20mm～40mm）を 3dB 以内の感度で探傷できることを示している。この条件で探傷すると、深さが 20mm 以上のき裂に対して測定範囲にわたって集束効果が高くかつ一定の感度で探傷でき、その結果、広い範囲で SN 比の高い端部エコーを検出することが可能となる。

（2）き裂とノイズの識別性向上

前記で述べたように、ニッケル基合金溶接部の UT の適用において、端部エコーが微弱な信号となるため、ノイズエコーとの識別性が低下する。端部エコーとノイズエコーを識別するためには、複数条件の探傷により多くの探傷データを収集し、総合的に評価することが必要となる。

本研究で作成した「フェーズドアレイ UT 法による欠陥深さ測定要領」では、ステップ 2 において、複数のアレイ探触子による探傷画像あるいは 2 分割型マトリクスアレイ探触子の探傷画像から、き裂の表面位置、形状（プロファイル）等の重要なき裂情報が得られ、それらのデータをもとに解析、評価することで、ノイズエコーを端部エコーと誤認識すること、あるいは端部エコーの見逃しを低減させることができることを述べた。このように、複数の探傷条件で得られた探傷データを解析・評価することで、端部エコーとノイズエコーの識別性の向上に極めて有効となる。

（3）欠陥深さ測定要領の改善

上記(1)および(2)で述べたように、き裂深さ測定精度の向上のための新たな探傷方法あるいは解析方法等が開発され、その有効性が確認された場合には、それらの方法を「欠陥深さ測定要領」に反映することが重要である。さらに、探傷データ拡充に伴う新たな知見が得られた場合にも測定要領に反映し、改善を図ることが重要となる。

（4）UT 検査員への教育・訓練

き裂深さを高精度に測定するため、ハードウェア面（高パワー探触子、探傷装置の開発および活用等）およびソフトウェア面（探傷条件の改善、探傷要領の整備等）については、上記で述べたが、実際の検査に当たっては、UT 検査員の技量あるいは経験不足を補うために、以下の項目に関する教育・訓練が重要となる。

- ① 対象部位の材料および SCC き裂形態の把握
- ② UT の習熟訓練

対象部位については、対象材料の溶接部金属組織、き裂の発生・進展形態、溶接部の施工状況などを把握し、探傷データの解析、評価に活用できるようにすることが重要である。

また、UT 検査員への習熟訓練では、SCC き裂に対する超音波伝搬挙動、端部エコーの発生挙動を把握するとともに、端部エコーとノイズエコーの識別方法等を習熟し、き裂深さを的確に評価できるようにすることである。超音波伝搬シミュレーションを活用することも必要である。これらの教育・訓練は、定期的を実施し、UT 検査員の技術レベルを維持し向上させることが重要となる。

5.4 結言

ニッケル基合金溶接部に発生する SCC き裂に対して、き裂開口面側からのフェーズドアレイ UT 法による高精度なき裂深さ測定技術を開発するために、SCC き裂に対してフェーズドアレイ UT 法を適用し、SCC き裂の深さ測定に対する有効性を明らかにした。

しかしながら、き裂深さ測定において、ニッケル基合金溶接部の溶接金属の不均質性（柱状晶組織）、き裂の複雑な進展形態（き裂形状、特に先端部）による誤差要因が想定され、さらに、探傷要領の不備、UT 検査員の経験不足等による誤差要因も想定される。そこで、これら主要な測定誤差要因を抽出し、き裂深さ測定に及ぼす影響について評価した。さらに、これらの測定誤差要因を改善するための方法についても検討した。これらの知見を以下にまとめる。

- (1) ニッケル基合金溶接部に発生する SCC き裂のフェーズドアレイ UT 法によるき裂深さ測定において、溶接金属組織、SCC き裂の形状、き裂深さ測定要領および UT 検査員に係る主要な誤差要因を抽出し、き裂深さ測定に及ぼす影響について分析し、それらの結果をまとめた。
- (2) 上記、き裂深さ測定誤差要因の分析結果をもとに、き裂深さ測定精度向上のための改善方法として、き裂先端部エコーの検出性の向上、き裂エコーとノイズエコーの識別性向上、欠陥深さ測定要領の更なる改善および UT 検査員への教育・訓練の重要性を示唆した。

参考文献

- (1) (独) 原子力安全基盤機構：平成 16 年度 炉内構造物等特殊溶接部検査技術調査に関する報告書, 05 基材報-0011, (2005.12)
- (2) (財) 発電設備技術検査協会：平成 15 年度 炉内構造物等特殊溶接部検査技術調査に関する報告書, (2003, 9)
- (3) S. Kawanami, T. Matsuura, J. Nishida, M. Ideo, M. Kurokawa, T. Sera and S. Hirano : Development advanced defect sizing technique using ultrasonic testing for nozzle welding, Proceeding of the 7th International conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, (2009), pp.417-423
- (4) 福村卓也, 戸塚信夫：原子炉容器上蓋管台部の 1 次冷却材漏洩経路等調査, INSS JOURNAL, Vol.15, (2008), pp.113-123
- (5) (独) 原子力安全基盤機構：「平成 16 年度原子力発電施設検査技術実証事業に関する報告書（超音波探傷試験における欠陥検出性及びサイジング精度の確認に関するもの）[総括版]」, 05 基材報-0001(2/2), (2005.4)

表 5.1 主なき裂深さ測定誤差要因

	Items	Evaluation of crack depth sizing	
1	Influence of weld metal microstructure	<ul style="list-style-type: none"> - Decrease of detection capability of crack tip echo - Decrease of distinction between tip echo and noise echo - Ultrasonic anisotropic materials - Change of ultrasonic propagation phenomena such as ultrasonic velocity, winding of ultrasonic beam, and so on 	<ul style="list-style-type: none"> - False call - Miss-call
2	Shape of crack tip (Comb-like)	<ul style="list-style-type: none"> - Decrease of crack tip echo amplitude 	<ul style="list-style-type: none"> - Under estimate
3	UT procedure and personnel	<ul style="list-style-type: none"> - Incomplete UT procedure - Lack of knowledge and experience in personnel 	<ul style="list-style-type: none"> - Over/under estimate

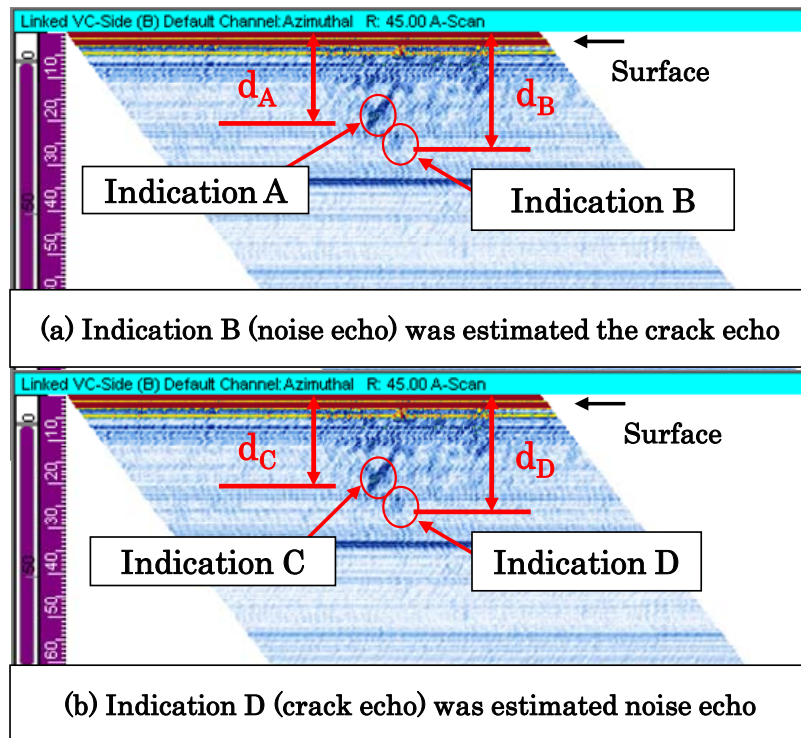


図 5.1 端部エコーの誤検出あるいはき裂の見逃しを説明するための探傷断面画像例

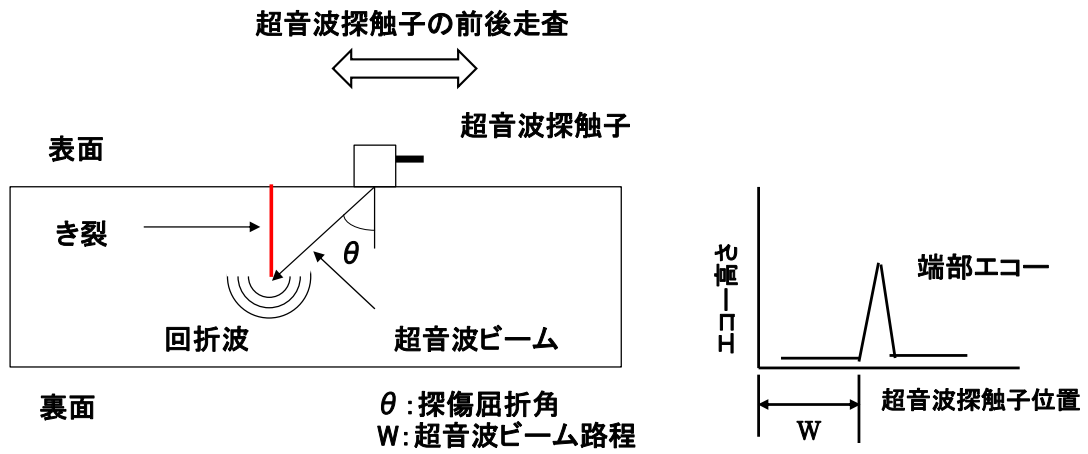


図 5.2 端部エコー法の説明図 (表面開口き裂の場合)

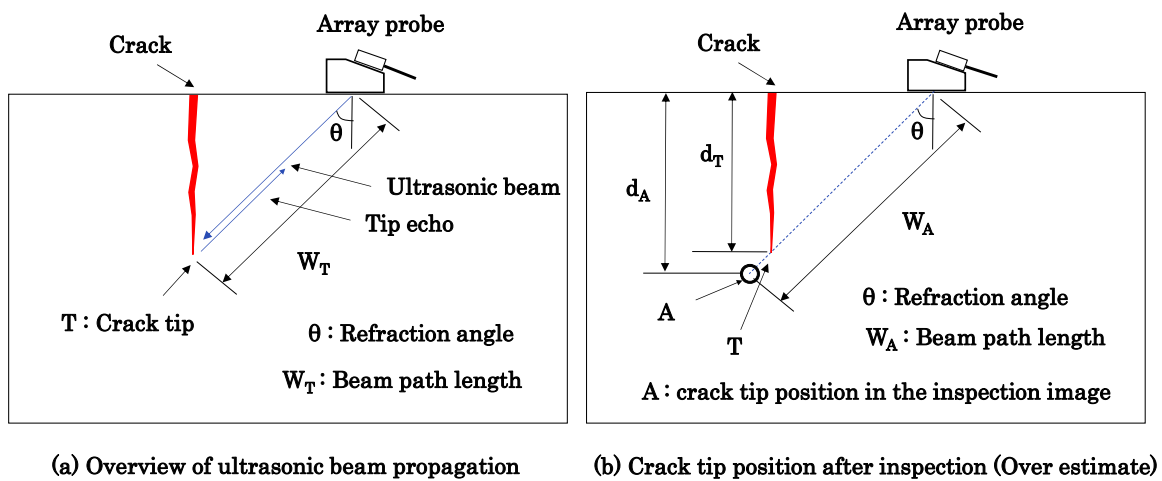


図 5.3 溶接金属組織における超音波音速異方性の影響

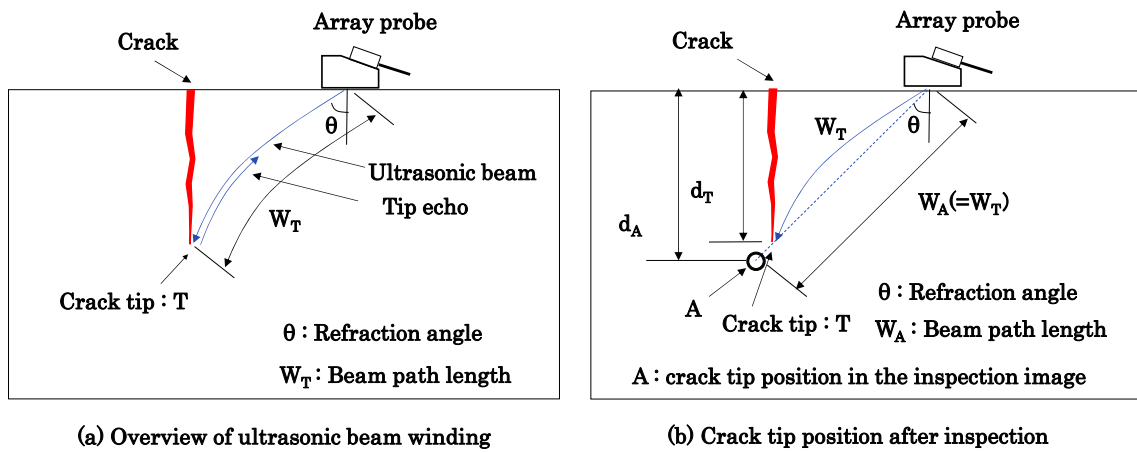


図 5.4 溶接金属組織における超音波ビームの屈曲の影響

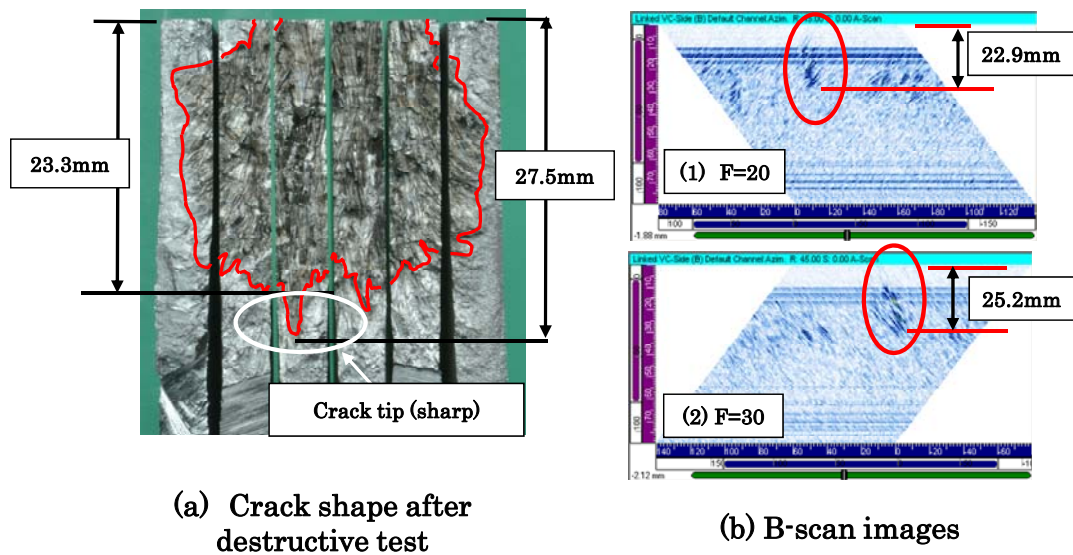
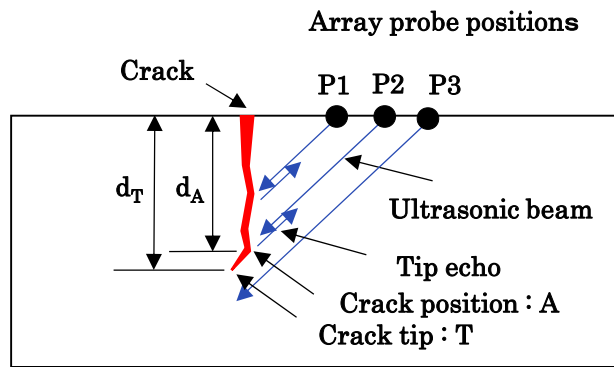
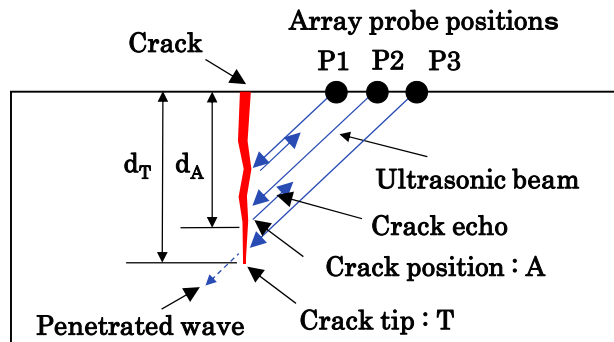


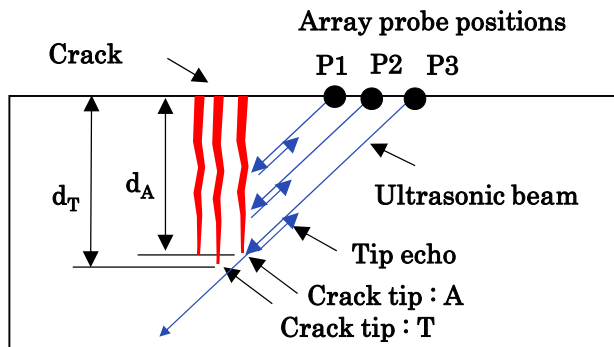
図 5.5 き裂形状の影響
 ((a)SCC き裂破面, (b)UT による探傷断面画像)



(a) Example of crack tip inclination



(b) Example of penetrating wave at crack tip area



(c) Example of inspection of multi-crack

図 5.6 き裂形状の影響

((a)き裂の傾き, (b)き裂先端部での超音波透過, (c)複数き裂)

表 5.2 き裂深さ測定精度の改善策

	Items	Countermeasure
1	Improvement of detection capability of crack tip echo	- Application of high power UT tools (equipment & probes) - Optimization of UT conditions
2	Improvement of decline between crack tip echo and noise echo	- Overall evaluation of several analysis results
3	Development of advanced UT procedure	- Reflection to advance technique
4	UT Personnel	- Training and education

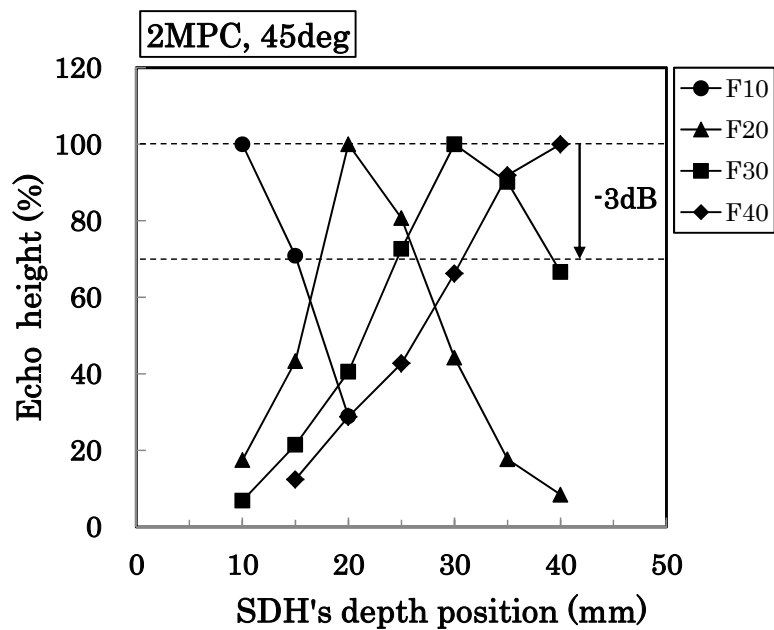


図 5.7 アレイ探触子 2MPC の距離振幅特性

第 6 章 結 論

第6章 結 論

本研究では、ニッケル基合金溶接部に発生する SCC き裂に対して、フェーズドアレイ UT 法による高精度な欠陥深さ測定技術を開発することを目的に、適用したアレイ探触子の各種探傷画像から、き裂情報（き裂位置、長さ、形状、概略深さ）の把握およびき裂の大小判別が可能な「フェーズドアレイ UT 法による欠陥深さ測定要領」を作成し、さらに、SCC き裂に対する深さ測定精度の評価結果から、き裂深さ測定に対するフェーズドアレイ UT 法の有効性について検討した。得られた結果については、各章の結言に示したが、ここではそれらを総括して述べる。

1. 対象部位の板厚の 1/2 程度（約 40mm）のき裂の深さ測定に適用するため、選定した 3 種類のアレイ探触子について、標準横穴試験片体を用いて探傷条件の最適化を図り、板厚方向の適用範囲を明らかにした。
2. 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、各種探傷画像から、き裂位置、長さ、形状、深さ等の把握およびき裂の大小判別が可能であり、その結果、き裂の誤認識あるいはき裂の見逃しの低減を図ることを可能とした、フェーズドアレイ UT 法による欠陥深さ測定要領を作成し、フローとしてまとめた。
3. ニッケル基合金溶接部に EDM ノッチを付与した試験体に対して、フェーズドアレイ UT 法を適用し、上記で作成した欠陥深さ測定要領に従って探傷・解析・評価した結果、EDM ノッチ深さ 5mm～40mm の範囲で EDM ノッチの深さ測定が可能であり、EDM ノッチ深さは、誤差平均 0.91mm、RMS 誤差 1.03mm と良好な精度で評価でき、フェーズドアレイ UT 法の欠陥深さ測定に対する有効性を明らかにした。
4. 実機で発生したき裂の形状を模擬した SCC き裂を、ニッケル基合金溶接部へ付与する方法について、試験環境、応力付与方法、溶接材料およびき裂形状の観点から検討し、試験条件の最適化を図った。この試験条件でニッケル基合金溶接部に付与した SCC き裂は、破壊調査結果から、実機形状を模擬した、巾着状でアスペクト比（き裂深さと表面き裂長さの比）の大きなき裂を再現することができ、SCC き裂付与方法の有効性が確認できた。
5. 上記条件をもとに、ニッケル基合金溶接部に SCC き裂を付与した試験体に

対して、フェーズドアレイ UT 法を適用し、作成した欠陥深さ測定要領に従って探傷・解析・評価した結果、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。ここで、深さ測定誤差である RMS 誤差 2.93mm は、ASME Code Sec.XI App.VIII の PD 試験の合格基準である RMS 誤差 3.2mm 以内であり、極めて良好な精度で評価された。この結果から、本研究で開発したフェーズドアレイ UT 法は、ニッケル基合金溶接部の SCC き裂深さ測定に対して、有効かつ高精度なき裂深さ測定法であることが明らかとなった。

6. ニッケル基合金溶接部に発生する SCC き裂に対するフェーズドアレイ UT 法によるき裂深さ測定において、想定される主要な誤差要因を、溶接部組織、き裂形態、き裂深さ測定要領および UT 検査員の観点から抽出し、き裂深さ測定に及ぼす影響について分析・評価した。さらに、き裂深さ測定精度を向上させるための方法について検討した結果、その改善策として、き裂先端部エコーの検出性の向上、き裂エコーとノイズエコーの識別性向上、欠陥深さ測定要領の更なる改善および UT 検査員への教育・訓練の重要性を示唆した。

本研究では、探傷画像から多くのき裂情報（き裂の位置、長さ、形状等）を把握し、き裂の誤認識あるいは見逃しを低減させる方法に特徴のあるフェーズドアレイ UT 法を開発し、従来から超音波難探傷材と言われているニッケル基合金溶接部に対して、フェーズドアレイ UT 法の適用により、SCC き裂深さを高精度に測定できることを明らかにした。

これらの成果は、ニッケル基合金溶接部あるいは異種金属溶接部（DMW：低合金鋼－ニッケル基合金溶接金属－ステンレス鋼）の SCC き裂深さ測定に対して、有益な知見を与えるとともに、さらに、DMW の PD 試験制度構築に大きく寄与するものであり、工学的意義は大きい。

原子力発電プラントには、ステンレス鋳鋼に代表される高減衰材料、鞍型形状のような複雑形状、厚肉材料等の探傷およびき裂寸法測定（特に、き裂深さ測定）に対する課題があり、例えば、フェーズドアレイ UT 法の最適探傷法を構築するなど、探傷およびき裂寸法測定の高度化および高精度化を図る必要がある。

各章構成論文リスト

各章構成論文リスト

第1章 緒論

参照論文

- [1] T. Hirasawa, K. Naruse, I. Komura, S. Yamamoto, Y. Yuguchi, T. Ohtsubo, T. Matsunaga, M. Torii : “Phased Array Applications for Hamaoka unit-1 CRD Housing Stub-tube Inconel Welds”, 3rd EPRI Phased Array Seminar on Phased Array Ultrasonic Examination, Seattle, Washington, USA, 2003-06, EPRI, Paper24
- [2] 平澤泰治, 長井敏, 川原田義幸, 村上功治, 湯口康弘 : 原子炉内構造物への超音波探傷技術の適用, 日本保全学会 第3回学術講演会 要旨集, (2006), pp.365-368.
- [3] Y. Kawaharada, T. Hirasawa, S. Nagai, O. Iwai, K. Naruse : Application of the Phased Array UT Technique for the Inspection of BWR Internals, Proceedings of the 5th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurised Components, (2006)

第2章 基礎試験体による探傷性能評価

主論文

- [1] T. Hirasawa, H. Fukutomi, A. Ishii : Basic Study on the Phased Array UT Technique for Crack Depth Sizing in Ni-Based Alloy Weld, E-Journal of Advanced Maintenance, Vol.5, No.2, (2013), pp.146-154

参照論文

- [1] 平澤泰治, 長井敏, 古村一朗, 村上功治, 高林順一, 櫻井善茂 : 鋼溶接部探傷用 256ch フェイズドアレイ UT 装置の開発, 日本非破壊検査協会 平成9年度秋季講演大会, (1997), pp.21-24.
- [2] Y. Yuguchi and T. Hirasawa : Phased Array Application for Boiling Water Reactor In-Vessel Inspection, 2006 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, PVP2006-ICPVT11-93358, (2006), pp.165-171.
- [3] T. Hirasawa and H. Fukutomi : Application of Phased Array UT Technique for Crack Depth Sizing in Nickel Based Alloy Weld, Proceedings of the 8th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurised Components, (2010), pp.812-818.

第3章 欠陥深さ測定要領の開発

主論文

- [1] 平澤 泰治, 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要領の検討, 日本機械学会論文集 (A編), Vol.79, No.804, (2013), pp.1278-1290

参照論文

- [1] 平澤泰治, 湯口康弘, 村上功治, 千星淳, 大坪徹, 成瀬克彦: フェーズドアレイ UT による炉内配管への適用, 日本保全学会 第5回学術講演会 要旨集, (2008), pp.147-151.
- [2] T. Hirasawa, Y. Yuguchi, J. Senboshi, K. Murakami, T. Ootsubo and K. Naruse: Application of Immersion Phased Array UT Technique on Austenitic Stainless Steel and Nickel Based Alloy Welds, Proceedings of the 7th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurised Components, (2009), pp.782-788.
- [3] 平澤泰治, 福富広幸, 秀耕一郎: 異種金属溶接部の平行欠陥に対する UT 深さ測定法の検討, 日本保全学会 第10回学術講演会 要旨集, (2013), pp.531-536.
- [4] 平澤泰治, 東海林一, 秀耕一郎: 異種金属溶接部の付与欠陥に対する超音波探傷性の検討, 日本保全学会 第11回学術講演会 要旨集, (2014), pp.25-28.

第4章 SCC き裂に対する欠陥深さ測定法の評価

主論文

- [1] 平澤 泰治, 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 SCC き裂深さ測定要領の開発, 日本機械学会論文集, Vol.80, No.813,(2014), pp.1-17.

参照論文

- [1] 平澤泰治, 長井敏, 村上功治, 湯口康弘, 大坪徹, 成瀬克彦: ニッケル基合金溶接部に対する水浸フェーズドアレイ UT の適用, 日本保全学会 第4回学術講演会 要旨集, (2007), pp.67-71.
- [2] Y. Yuguchi, T. Hirasawa, K. Murakami, S. Nagai, T. Ootsubo and K. Naruse: Phased Array UT Application for Boiling Water Reactor Vessel Bottom Head, 15th International conference on Nuclear Engineering, ICONE15-10818, (2007).

第5章 き裂深さ測定における誤差要因分析および測定精度の改善策

主論文

- [1] 平澤 泰治, 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 SCC き裂深さ測定要領の開発, 日本機械学会論文集, Vol.80, No.813, (2014), pp.1-17.

第6章 結論

謝 辭

謝 辞

本論文の作成に当たり、懇切なる御指導と御鞭撻を賜りました香川大学 工学部 石井明教授に対し、深甚なる謝意を表します。

また、本研究の内容について、詳細な御討議と御助言を賜りました香川大学 工学部 平田英之教授、並びに、山口順一教授に対し、心から感謝の意を表します。

本研究の実施に当たっては、一般財団法人電力中央研究所 秋田調理事、同材料科学研究所 黛正己研究参事、曾根田直樹所長、秀耕一郎上席研究員には、終始多大なる御援助と御指導をいただき、厚く感謝申し上げます。

さらに、研究の遂行にあたり御協力いただきました材料科学研究所 構造材料領域 福富広幸上席研究員、岡田久雄客員研究員（現、(株)検査技術研究所）に深く感謝申し上げるとともに、材料科学研究所の御協力いただきました皆様方に厚く御礼申し上げます。

最後に、私事ではあるが、長年にわたって終始暖かく見守ってくれた最良の理解者である妻 敏子に心よりの感謝を表します。