

氏名(本籍)	平澤 泰治 (日本)
専攻	知能機械システム工学専攻
学位の種類	博士 (工学)
学位記番号	博甲第 98 号
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当者
学位授与の年月日	平成 26 年 9 月 30 日
学位論文題目	ニッケル基合金溶接部に対する高精度超音波深傷技術に関する研究
論文審査委員	(主査)石井 明 (副査)平田 英之 (副査)山口 順一

論文内容の要旨

近年、各種産業用プラントでは、長期運転や使用環境の苛酷化に伴い、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。原子力発電プラントの炉内構造物、配管等では、長期運転や使用環境などによって応力腐食割れ (SCC) によるき裂の発生が報告された。これらの構造物は、超音波探傷試験 (UT) により測定されたき裂深さを基に、日本機械学会規格の維持規格に従って健全性を評価し、その後の運用 (補修、交換、継続使用) を決めている。このため UT による高精度なき裂深さ測定は、構造物の健全性確保にとって極めて重要である。

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に使用されているニッケル基合金溶接部は、超音波異方性材料であるため、従来から超音波難探傷材と言われている。また、近年、国内外の原子力発電プラントのニッケル基合金溶接部において、SCC き裂の発生が報告され、特に、原子炉容器管台セーフエンド溶接部では、従来法の UT により SCC き裂の深さ測定が困難な事例が報告された。その原因としては、検出されたき裂は、従来から知られているき裂形態とは異なり、アスペクト比 (き裂深さと表面き裂長さの比) が大きく、き裂先端の形状が複雑 (先端が細長く、ギザギザした形状) であったため、UT において、き裂先端部からの端部エコーが溶接金属組織部からのノイズ信号に埋もれ、その結果 SN 比が低下し、端部エコーが検出できなかつたとされている。このような背景から、ニッケル基合金溶接部に発生する SCC き裂に対して、UT による高精度な深さ測定法の開発が必須となった。

フェーズドアレイ UT 法は、探傷条件の最適化、探傷データの画像化などの特徴を有する技術として、近年、国内外で注目され、ステンレス鋼およびニッケル基合金溶接部等を対象に研究・開発が行われ、また実機への適用例も報告されている。しかしながら、実機適用例では、対象とした溶接部の厚さは 30mm 程度であるのに対して、本研究で対象とする

溶接部の厚さは 80mm 程度と厚いため、超音波散乱・減衰が大きく、き裂先端からの超音波信号（端部エコー）の検出性が低下し、その結果、適正なき裂深さ測定が困難となることが想定される。

本研究では、ニッケル基合金溶接部（板厚 80mm 程度）に発生する SCC き裂を対象に、浅いき裂から深いき裂に対して、高精度なき裂深さ測定を可能とするフェーズドアレイ UT 法の開発を目的とする。初めに、フェーズドアレイ UT 法による探傷画像から、き裂形態の把握およびき裂の大小判別を可能とした「欠陥深さ測定要領」を作成した。次に、実機形状模擬の SCC き裂に対して、き裂深さ測定精度の評価を行い、その結果から、フェーズドアレイ UT 法なき裂深さ測定に対する有効性を明らかにした。さらに、SCC き裂の深さ測定に及ぼす誤差要因分析から、測定精度の更なる向上策を示した。

本論文は、全 6 章で構成されており、各章の概要は以下の通りである。

第 1 章「緒論」では、本研究の背景について述べ、従来の研究に対する課題を挙げ、本研究の目的を設定した。また、構成について示した。

第 2 章では、フェーズドアレイ UT 法に用いるアレイ探触子を選定し、各種探傷条件の最適化を図るとともに、ニッケル基合金溶接部に放電加工（EDM）ノッチを付与した試験体を用いて、き裂深さ測定に対するフェーズドアレイ UT 法の適用性を明らかにした。

第 3 章では、対象とするき裂深さを板厚の 1/2 程度（約 40mm）までとし、き裂先端部からの端部エコーの検出性向上のために選定した高パワー型アレイ探触子等により得られた探傷画像から、き裂の表面位置、長さおよび形状等の把握およびき裂の大小判別を可能とし、き裂の誤認識あるいはき裂の見逃しを低減することに特徴を有する「フェーズドアレイ UT 法による欠陥深さ測定要領」を作成した。次に、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、EDM ノッチの深さが良好な精度で評価されたことから、欠陥深さ測定に対する本手法の有効性を明らかにした。

第 4 章では、初めに、実機で発生した形状を模擬した SCC き裂のニッケル基合金溶接部への付与方法について検討し、試作した試験体の破壊調査から、実機形状を模擬した SCC き裂の実現性を明らかにした。次に、上記方法で作製した 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、き裂深さを高精度で測定できることを示した。その結果、SCC き裂の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。

第 5 章では、フェーズドアレイ UT 法による SCC き裂の深さ測定において、想定される主要な誤差要因の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改善策として示した。

第 6 章「結論」では、本研究で得られた知見を総括し、今後の展望について述べた。

審査結果の要旨

原子力プラントの炉内構造物・配管等では検出されたき裂深さを基に維持規格（日本機械学会 発電用原子力設備規格 維持規格）により健全性を評価し、補修、交換、継続使用を決めている。このため非破壊検査によりき裂深さを高精度に測定することは構造物の健全性確保にとって極めて重要である。本論文では従来の超音波探傷法（UT法）では困難とされていた、ニッケル基合金溶接部に発生する応力腐食割れによるき裂（SCCき裂）の深さ測定に対して、フェーズドアレイ UT法による高精度なき裂深さ測定手法を研究したものである。

本論文は全6章で構成されており、各章の概要は以下の通りである。

第1章「緒論」では本研究の背景について述べ、従来の研究における課題を挙げ、本研究の目的と構成を示している。

第2章では適用技術としてフェーズドアレイ UT法を適用し、き裂開口面側からの探傷における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、ニッケル基合金溶接部に EDM ノッチを付与した試験体を用いてき裂深さ測定に対する適用性を明らかにしている。

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）までのき裂を対象に各種検討結果から「欠陥深さ測定要領」を提案している。そして、ニッケル基合金溶接部に深さの異なる EDM ノッチを付与した試験体に適用し EDM ノッチの深さ評価を行い、「欠陥深さ測定要領」の有効性を明らかにしている。

第4章では本手法の実機への適用を考慮し、ニッケル基合金溶接部に対して実機形状を模擬した SCC き裂の付与方法について検討している。初めに、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方法について検討し、その実現性を試験体の破壊調査から明らかにしている。次に、上記方法で製作した 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法によるき裂深さ測定を行った結果、世界最高水準の測定精度（ASME の性能実証試験時の合格基準以内の精度）で評価できることを示し、提案した「欠陥深さ測定要領」の SCC き裂に対する有効性を示している。

第5章ではき裂が発生したニッケル基合金溶接部に対してき裂深さ測定精度の更なる向上を目的に SCC き裂深さ測定に及ぼす誤差要因を分析し、深さ測定誤差を低減させるための方法を検討し、改善策として纏めている。

第6章「結論」では本研究で得られた知見を総括し、今後の展望について述べている。

本研究成果は、特に高い信頼性が要求される原子力プラントの炉内構造物、配管等の健全性を評価する検査手法として有用である。審査申請者はこれらの研究成果に関わる研究成果を3編の主論文としてまとめ、国際学術誌1編、学術雑誌2編に発表している（全編筆頭著者）。これらの3編は全て平成24年10月に社会人学生として本工学研究科博士後期課程に入学後の業績である。

以上の結果、当該審査に関わる本学位論文は、香川大学大学院工学研究科博士後期課程修了の学位に相応しい内容と判断する。

最終試験の結果の要旨

公聴会および最終試験（口述試験）を、平成 26 年 7 月 30 日 15:00 から実施した。まず、申請者は、学位論文内容に関する発表を行い、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成果を簡潔かつ明瞭に説明した（1 時間）。最終試験（1 時間）では、いずれの質問に対しても適切な応答がなされた。質疑応答の一部を以下に示す。

○フェーズドアレイ UT において、探傷結果を画像表示しているが、画像処理はどのような方法で行っているか。

回答：画像処理で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（各セルには反射波の振幅データが埋め込まれている）を作成する。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。例えば、D スキャン画像であれば、アレイ探触子の後方から見たときの断面画像（1 断面あるいは複数断面の重ね合わせ画像）を表示する。

○本研究で作製した SCC き裂は UT を実施するにあたって、検出が難しいき裂か。

回答：本研究で作製したき裂はき裂先端部が尖っているため端部エコーの検出性が低く従来の UT 法では検出が難しいき裂である。

○本研究で開発したフェーズドアレイ UT 法は他の部位にそのまま適用できるか。

回答：対象部位（材料、板厚、形状、溶接部の材料および開先形状等）が変わったら対象部位に合わせて探傷方法を作成し、その方法に基づいてき裂深さ測定を行うため類似の形状を有する部位を除いて一般に他の部位にそのまま適用することはできない。探傷方法の有効性を確認してから適用することになる。

○フェーズドアレイ UT 法はき裂深さ測定精度が極めて良い方法と理解したが、世の中の技術レベルとの比較結果はあるか。

回答：原子力プラントを保有している日本を初めとする世界の国々では米国の ASME 規格（PD 試験）をお手本としており、Ni 基合金溶接部の UT に対する PD 試験ではき裂深さ測定の合格基準は RMS 誤差 3.2mm 以内となっている。しかし、本対象材料に対しては近年、PD 試験の受験者がこの合格基準をクリアできておらず、また、合格基準の見直しなどの検討が進められていることを考えると、本研究のフェーズドアレイ UT 法の適用による RMS 誤差 2.93mm の達成は世界最高の技術レベルであるといえる。

以上より審査委員の一致した結論として最終試験を合格と判定した。