

氏名	にしみず あきら 西水 亮
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成27年3月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程)機械システムデザイン専攻
学位論文題目	オーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金曲面に対する 渦電流探傷信号特性と亀裂評価法
指導教員	東北大学教授 高木 敏行
論文審査委員	主査 東北大学教授 高木 敏行 東北大学教授 坂 真澄 東北大学准教授 内一 哲哉 東北大学准教授 遊佐 訓孝

論文内容要旨

原子力発電プラントは、設備の健全性、安全性を保証するために、設計・製造から運転後まで厳格な品質保証体制が構築されている。維持規格において炉内構造物は国内のトラブル事例から経年変化事象として応力腐食割れが想定されることから、特定の経年劣化事象に対する評価を含めた検査が規定されている。検査には目視検査に代えて超音波探傷試験または渦電流探傷試験(ECT)の適用が認められている。ECTを導入する利点としては、目視検査のアクセスできない部分が発生した際の代替技術、カメラ画像から識別できない亀裂と模様との識別性がある。ECTの欠点としては、検査対象面とプローブ距離(リフトオフ)による検出感度低下、亀裂以外の要因による信号検出がある。そこで、これらの課題を解決し、ECTの導入による炉内構造物検査の高速・高効率化を目的として開発を進める。高速化には、雑形状部検査用プローブを提案する。また、遠隔操作によるECTプローブの検査対象物への設置に関しては、プローブが検査対象物に適切に設置できているか否かの確認方法を提案する。高効率化には、ECT信号評価技術として亀裂信号とノイズ信号の識別方法および亀裂長さの評価方法を提案し、実機部分模擬モックアップによる検証試験にてその有効性を確認する。具体的には、(1)複雑形状部検査用プローブの開発として、検査部の形状に追従する可撓性を有するプローブ構造の提案および亀裂検出の方向依存性の向上、(2)ECT信号を利用したリフトオフ評価方法として、リフトオフ信号の発生メカニズムの現象解明および曲面に対するリフトオフ評価方法の提案、(3)探傷信号の評価方法として、亀裂信号とノイズ信号の識別方法および亀裂長さの評価方法の提案、(4)検証試験として、シュラウド溶接継手モックアップによる検証試験と制御棒駆動機構スタブチューブモックアップによる検証試験を実施する。

第1章では、原子力発電プラント炉内構造物検査の背景と必要性を述べ、本研究の目的と開発課題を明確にした。本研究は、渦電流探傷による炉内構造物検査の高速・高効率化を目指し、非磁性体を対象としたプローブ及び簡便な信号処理技術を提案し、その有効性を検討することを目的とした。炉内構造物検査への適用のために、(1)複雑形状部検査用渦電流プローブ、(2)渦電流探傷信号を利用したリフトオフ評価方法、(3)探傷信号

の評価方法、(4) 検証試験を開発内容とした。

第2章では、1つ目の開発内容である複雑形状部検査用渦電流探傷プローブの開発を目的として、炉内構造物溶接部に適用するアレイ ECT プローブの要求性能を明確にし、試作及び基礎試験で性能を確認した。複雑形状部検査用 ECT プローブには、炉内構造物溶接部の最小曲率半径 10mm へ適用できる構造を考案すること、およびコイル配置を決定すること、走査方向の制限により、プローブはあらゆる方向の亀裂に対する感度確保が必要であること、探傷ピッチはコイル間隔で決定されることから、探傷ピッチの分解能を向上が必要となることを明確にした。開発した複雑形状部検査用 ECT プローブの構造は、相互誘導形アレイコイルを採用し、プリント配線シートを積層した可撓性基板上にコイルを2列に配置した構造である。基板は、保護用シートを最終面に設けることで耐久性を向上させた。これにより、曲率半径 10mm までコイルの物理的な干渉なく曲がるフレキシブルアレイ ECT プローブ(FA-ECT プローブ)を実現した。FA-ECT プローブの亀裂検出感度の指向性改善として、一つの励磁コイルに対して、異なる3つの検出コイルを利用し、指向性を改善した。高分解能化として、コイルを電氣的にスイッチするスキャンパターンを工夫して高分解能化を図った。基礎試験により、指向性改善効果、高分解能化の確認を行った。

第3章では、2つ目の開発内容である渦電流探傷信号を利用したリフトオフ評価方法の開発を目的として、リフトオフ信号の発生メカニズムと曲面に対するリフトオフ評価方法を提案した。FA-ECT プローブの構成要素である TR プローブを対象としたリフトオフ信号の発生メカニズムの検討では、数値計算により以下を明確にした。励磁コイルにより発生する渦電流は、リフトオフの増加により、ピーク位置が励磁コイルから離れる方向に移動しながら減衰する。励磁コイルから半径方向の B_z 成分の位相は、リフトオフ 0mm では急激に変化し、リフトオフ 7mm ではほぼ一定値を示す。その結果、リフトオフに伴う B_z 成分の位相変化は、励磁コイルからの距離に依存して変化し、この傾向は励磁コイルからの距離が大きくなると増大することを明確にした。また、TR プローブのリフトオフに伴う空間の磁束密度 B_z 成分の位相変化を定量化し、リフトオフ信号の位相を推定できる空間位相特性を示した。この特性より、TR プローブの励磁コイルと検出コイルの間隔が広がるとリフトオフ信号のリサージュ波形に屈曲点が現れることを明確にした。また、リフトオフ評価方法として、この屈曲点を利用した方法を提案した。リフトオフのリサージュ波形に発生する屈曲点により、リサージュ波形の y 成分にはピークを持つ波形が発生することが分かった。曲率半径 10mm から 40mm および平板を対象にした実験結果より、このピーク位置は、曲率に依存しない傾向を確認にした。そこで、このピーク電圧からの電圧変化を評価するリフトオフ評価方法を考案した。基礎実験により、本手法の評価精度としてリフトオフ 1mm 以下の範囲では、リフトオフ値を誤差 0.1mm で推定できることを確認した。

第4章では、3つ目の開発内容である検査の高効率化を実現する ECT 信号の評価方法の提案を目的として、亀裂信号とノイズ信号の識別方法、亀裂長さ評価を検討した。フレキシブルアレイ ECT プローブ (FA-ECT プローブ) の有する2種のスキャンパターン (V モードと H モード) の位相特性に関して、亀裂信号とその他の信号 (リフトオフ信号、グラインダのうねり信号、FA-ECT プローブの曲がり信号) を分析し、亀裂信号の特徴を明らかにした。V モードと H モードの位相関係を関連付けるために、横軸に V モード、縦軸に H モードの位相で整理した (VH 位相マップ)。その結果、亀裂信号とノイズ信号の分離する領域の存在を明確にした。そこで、この VH 位相マップを利用する亀裂信号とノイズ信号の識別方法を提案した。基礎試験として、放電加工スリット信号、リフトオフ信号を識別できることを確認した。亀裂長さ評価に関しては、デシベルドロップ法による評価を提案した。本手法は FA-ECT プローブによる亀裂波形は亀裂端部で大きくなる特徴に着目し、亀裂の両端部の信号に対して振幅値の-12dB 値を閾値として、この閾値による指示範囲を亀裂長さとする。基礎試験から、矩形と半楕円の放電加工スリットに対して、長さ評価精度は±3mm 以内であることを確認した。

第5章では、第2章から第4章で提案した技術を統合し、炉内構造物向け高速・高効率渦電流検査の具体的な検査シナリオの検討と検証を行った。検査シナリオは、以下に示す通りである。最初に遠隔操作でプローブの探傷面が炉内構造物に適切に設置されているか否か、また、検査領域に渡りプローブが適切に設置できているか否かの判断を第3章で提案したリフトオフ評価方法で確認する。また、検査領域に対するプローブ密着性は、探傷前にプローブ走査ライン上の複数ヶ所にプローブを押し当て、リフトオフ評価を実施することで確認する。データ収録後、分析を開始する。分析は第4章で提案した VH 位相マップを利用した識別方法を実施する。収録データの全てに対して、VH 位相マップと照合し、亀裂信号の抽出を自動で実施する。次に抽出した亀裂信号は、第4章で提案した 12dB ドロップ法を適用して、亀裂長さを定量化する。次に、提案手法による検証試験と考察を行った。炉内構造物であるシュラウド支持板溶接継手の部分模擬モックアップにより、亀裂信号とノイズ信号との識別方法を検証した。モックアップの溶接部には、五つの応力腐食割れを付与した。FA-ECT プローブの測定結果より、全ての応力腐食割れを検出できること、VH 位相マップとの照合により、応力腐食割れ信号のみを抽出できることを確認した。また、制御棒駆動機構 (CRD) スタブチューブと圧力容器の溶接部模擬モックアップにより、亀裂長さ評価方法を検証した。CRD スタブチューブ溶接部モックアップには、模擬亀裂として溶接凝固割れを、全周にわたり付与した。検証試験より、検出性としてすべての亀裂を検出できること、亀裂長さ評価として長さ 1mm から 40mm の範囲で±3mm 以内の精度で評価できることを確認した。

最後に第6章では、本論文の結論を示した。

論文審査結果の要旨

原子力発電プラントにおいては、設備の健全性と安全性を保証するために、設計・製造から運転後まで厳格な品質保証体制が構築されている。特に炉内構造物の溶接部は、維持規格において経年変化事象として応力腐食割れが想定されることから、通常の定期検査以外に個別検査が規定されている。一方で溶接部は曲率が変化する複雑な形状部であり、検査の難しい部位である。本研究は原子力発電プラント炉内構造物の曲面に対して、渦電流探傷試験(ECT)に基づく高速・高効率検査を実現するために、非磁性体を対象としたプローブ及び簡便な信号処理技術を提案し、その有効性を検討することを目的とする。研究内容は具体的に、(1)炉内構造物溶接部の最小曲率となる曲率半径 10mm から平板まで探傷できる複雑形状部検査用 ECT プローブの開発、(2)様々な曲率を持つ部位の探傷に利用できるプローブと検査面の距離(リフトオフ)の評価方法の提案、(3)探傷信号の評価方法として、信号位相に着目した亀裂信号とノイズ信号の識別方法及び亀裂長さ評価方法の提案である。本論文は、これらの研究成果をまとめたものであり、全編 6 章からなる。

第 1 章は緒論であり、本研究の背景、目的および構成を述べている。

第 2 章では、検査の高速化を実現する複雑形状部検査用 ECT プローブの開発を目的として、曲率半径 10mm から平板まで探傷できる可撓性を有するアレイ ECT プローブについて検討している。アレイコイルの励磁コイルと検出コイルの駆動パターンを工夫した亀裂検出の指向性改善、高分解能化の検討および試作プローブにより有用性を確認している。これは、本論文における検討の基盤となる有益な成果である。

第 3 章では、ECT 信号を利用したリフトオフ評価方法の開発を目的として、リフトオフ信号の発生メカニズムと曲面に対するリフトオフ評価方法を提案している。リフトオフ信号の発生メカニズムは数値解析を行い、空間の磁束密度の位相変化を定量化し、リフトオフ信号の位相を推定できる空間位相特性を示している。本結果より、特徴的な屈曲点の存在を明らかにし、曲面の曲率に依存しないリフトオフ評価方法を提案している。本内容は、実検査を実現するための重要な意味を持つ。

第 4 章では、検査の効率化を実現する ECT 信号の評価方法の提案を目的として、亀裂とノイズ信号の識別方法、亀裂長さ評価を提案している。亀裂信号とノイズ信号の識別方法は、開発した ECT プローブの 2 個の測定モードから得られる信号位相を分析し、亀裂信号とその他ノイズ要因による信号の特徴を明らかにしている。各々の測定モードの位相を表現できる特性分布を明らかにし、亀裂信号とノイズ信号が分離する領域の存在を明確にし、位相特性を利用した識別方法を提案している。亀裂長さ評価は、亀裂端部で信号が大きくなる特徴に着目して、デシベルドロップ法による評価を提案している。提案手法に関して基礎試験により、有効性及び精度を確認している。本手法は ECT 信号のみの分析で実現できる簡便手法であり、評価の迅速化を実現するための重要な知見である。

第 5 章では、提案した要素技術を統合し、炉内構造物向け高速・効率 ECT の実機適用の具体的な検査シナリオの提案、要素技術の検証試験を実施している。炉内構造物であるシュラウド溶接継手モックアップにて亀裂信号とノイズ信号との識別方法、制御棒駆動機構スタブチューブのモックアップにて亀裂長さ評価方法を検証し、その有効性を確認している。亀裂識別では溶接部の全ての応力腐食割れを評価できることを確認している。これは、本研究の炉内構造物検査としての高い有用性を示す重要な成果である。

第 6 章は結論であり、本論文を総括している。

以上要するに本論文は、原子力発電プラントの炉内構造物に対する ECT を高速・高効率に行う新しいプローブ及び簡便な信号処理技術を詳細に検討しており、複雑形状部向け ECT の高度化に大きく貢献するものであり、機械システムデザイン工学及び保全工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。