

## 論文の内容の要旨

論文題目 「Enhancement of eddy current inversion techniques for nuclear industries」

(和訳：原子力における渦電流欠陥サイジング技術の高度化に関する研究)

氏 名 遊佐 訓孝

従来、日本の原子力発電所に対しては、設計基準が運転開始後の機器に対しても適用されてきており、運転開始後も常に機器が使用開始時の状態、すなわち欠陥が存在しない状態に保たれていることが要求されてきた。そのため、日本国内の原子力発電所の検査においてある機器に欠陥が発見された場合、その影響の大小に係わらず機器の補修もしくは交換が行われ、過剰な補修によるコスト高、および時として非合理的な保全につながるものとして問題となってきた。一方、米国等の諸外国、および航空機や船舶等の他産業においては、使用中の機器の機能についての基準である維持基準が積極的に導入されてきており、検査により機器に欠陥等が発見された場合、機器の安全性に対する欠陥の影響が破壊力学等を用いて評価され、その結果に基づいて適切な保全、すなわち継続運転の可否、機器を補修・交換するか必要があるか否かが決定されてきた。維持基準を導入することは、コスト削減をもたらすのみならず、保全計画が合理化されることでより高い構造物の安全性にもつながるものであるということが、これまでの経験により明らかとなっており、長年にわたる議論の結果、日本国内の原子力安全規制においても、平成15年10月の法改正により維持基準が導入された。これにより、今後日本国内の原子力プラントにおいても、欠陥の発見後直ちに機器の補修や交換を行うのではなく、欠陥の影響評価に基づく保全が行われることになる。そのため、発見された欠陥の形状を正確に把握することが非常に重要

となり、よって非破壊検査が原子力プラントの保全において果たす役割もこれまで以上に大きくなる。本研究は以上のような背景により実施されたものであり、渦電流探傷法による欠陥サイジング技術の高度化により、構造物、より具体的には原子力プラントの信頼性の向上に資することを目的としたものである。

原子力プラントを構成する数多くの構造物には多種多様なものがあるが、構造上重要である、もしくは近年問題となっている等の理由により、本研究においては特に（１）軽水炉蒸気発生器伝熱管に代表される極薄肉材構造物、（２）これまで渦電流探傷法の適用が表面検査に限られてきた厚肉オーステナイト系ステンレス材および表面に肉盛を有するインコネル溶接部、そして（３）磁性体製配管、の３種類の構造物を対象とすることとした。それぞれの具体的な研究内容および得られた結果を以下にまとめる。

軽水炉蒸気発生器の伝熱管は、その非破壊検査に渦電流探傷法が用いられている数少ない原子炉重要機器の一つであり、そのような背景から、近年の渦電流探傷信号逆解析アルゴリズムの開発のための研究の多くは、軽水炉蒸気発生器伝熱管を対象として行われてきた。渦電流探傷信号から複雑な断面形状を有する欠陥の形状を再構成に成功したという例は既にいくつか報告されているが、従来の研究のほぼ全ては人工ノッチを対象としてきており、実環境で問題となる応力腐食割れを取り扱ったものは皆無に近い。人工ノッチと比較すると、応力腐食割れははるかに複雑な３次元形状を有しており、実際渦電流探傷の数値解析においては両者を同様に扱うことは出来ないとの報告が数多くなされている。よって、渦電流探傷逆解析技術の実機適用に際しての検証は未だ不十分であると言わざるを得ない。人工ノッチと応力腐食割れを渦電流探傷法の観点から比較した場合、最も大きな差異は、人工ノッチの場合は渦電流が完全にノッチを迂回するように流れるのに対し、応力腐食割れの場合は破面の部分的な接触により、割れを横切って流れる電流が存在するという点である。そのため、数値解析においては、応力腐食割れはある導電率を有する領域としてモデル化する必要がある。これまで人工ノッチを対象とした渦電流逆問題にておいては勾配法に基づく逆解析アルゴリズムが主として適用され大きな成功をおさめてきたが、このようなアルゴリズムを導電率を有する欠陥モデルに対して適用した場合は収束が急速に悪化することが報告されている。よって本研究においては、いくつかの新しいアルゴリズムを開発し、その有効性を確認した後、最終的に軽水炉蒸気発生器伝熱管に発生した応力腐食割れの形状推定を行った。得られた推定形状は真の形状とほぼ一致したものであった。さらに、応力腐食割れを数値解析にて取り扱う際のモデル化についての検討を行い、微細な構造までを考慮する必要は無いが、ある導電率を有する領域としてモデル化する必要があり、従来の手法のように導電率を考慮しないモデルを用いた場合、推定結果が真の形状と大きくずれてしまう可能性があるということを明らかとした。

第２の研究対象は原子力プラントの定期検査においてより積極的に渦電流探傷法を用いることが可能であることを示すものである。従来は渦電流探傷法は極薄肉材以外に対してはあくまで表面検査のための手法として用いられてきており、欠陥のサイジングは主とし

て超音波探傷法を用いて行われていた。しかしながら、超音波探傷法を用いた検査には、要する時間が長く、表面の微細な割れに対しては感度が低いなどの問題がある。よって、極薄肉材以外の部位に対して渦電流探傷法を欠陥サイジングのための手法として用いることが可能であるのならば、原子力プラントの検査の効率化に対する寄与は大きい。その検証のため、本研究では厚肉オーステナイト系ステンレス配管外表面に発生した塩化物誘起応力腐食割れ、およびインコネル溶接金属部に加工した人工ノッチの渦電流探傷信号からのサイジングを試みた。前者においては、8.7mmという試験体の厚みを考慮して20kHzという低い励磁周波数を適用した。破壊試験によって明らかとなった真の形状がほぼ矩形であるのに対して、推定された形状は半楕円形に近い形状ではあったが、低周波にもかかわらず長さと最大深さについてはほぼ正しく推定でき、よって、渦電流探傷法は、適切な逆解析アルゴリズムを用いることで、蒸気発生器伝熱管のような極薄肉以外にも、欠陥形状推定のための非破壊検査手法として適用することが可能であるということが示された。続いて、インコネル溶接金属に発生した割れに対する渦電流探傷法の適用性について評価した。まず、インコネル溶接部の探傷に適した渦電流探傷プローブを選定するために、8種類の渦電流プローブを用いて探傷実験を行い、得られた結果に基づき、一様渦電流プローブをインコネル溶接部探傷用の渦電流探傷プローブとして選定し、探傷信号からのノッチサイジングを行った。サイジングにあたっては溶接部表面の凹凸および内部での電磁気的特性の分布を厳密に考慮することは現実的には不可能であるため、ここでは試験体を平板として模擬し、溶接線を横切る時の信号はプローブのリフトオフ変化として近似的に取り扱った。非常に単純化した解析モデルにもかかわらず、良好な形状推定結果を得ることが出来た。さらに同一試験体に対するフェーズドアレイ渦電流探傷試験も併せて行い、インコネル溶接部の探傷試験において、渦電流探傷法は特に超音波探傷法が有効性を発揮することが出来ないような微小表面欠陥に対して特に有効であるということが明らかとなった。

磁性体製配管に対しては、通常の渦電流探傷法は表皮効果のために渦電流がごく表層に集中してしまうため、その適用は原理的に表面検査に限られてしまう。そのため、ここでは渦電流探傷法の亜種とも言える、リモートフィールド渦電流探傷法の高度化を行うことを試みた。リモートフィールド渦電流探傷法は、通常の渦電流探傷法と異なり、非磁性体のみならず磁性体にも適用が可能な検査手法であり、石油やガスのパイプラインの検査のために広く用いられている。その基本原理は試験体の外面側を回り込むように伝播する磁束を検出することであり、そのために検出コイルは励磁コイルよりかなり離れた箇所に配置する必要がある。しかしながら、この検出コイルと励磁コイルを離れて配置する必要があるということは、検出信号の微弱化、プローブの長大化による操作性低下などの弊害にもつながっている。このような問題を解決するために、これまで銅等の金属シールドを検出コイルと励磁コイルの間に配置することが行われてきた。しかしながら、リモートフィールド渦電流探傷法は低周波で駆動する必要があるため、金属シールドは必ずしも有効と

は言えないものであった。本研究では、超伝導体の有する完全反磁性という特徴に注目し、超伝導体をリモートフィールドプローブのシールドとして用いることを提唱した。数値解析の結果、超伝導体を用いたシールドは、特に100Hz以下でプローブを駆動させた場合に金属シールドと比べての有効性が大きいものであることが判明したため、続いて実際に超伝導シールドを有するリモートフィールドプローブを製作し、探傷試験による検証を行った。探傷試験では、低炭素鋼製の配管外面に加工した全周30%および40%管壁厚み深さの人工減肉を管内面から探傷した時の信号に対する、超伝導シールドの有無およびコイル間距離の影響を評価した。その結果、超伝導シールドを用いることでコイル間隔を短縮することができ、また探傷信号も明瞭なものとなることが判明した。