

審査の結果の要旨

氏名 高屋 茂

近年、商業発電用原子力炉の高経年劣化対策が重要な課題となっている。特に炉内構造物に関しては、応力腐食割れ（以下、SCC）の発生がシュラウド溶接部近傍や再循環系配管溶接継手部などにおいて多数報告されており、その発生・進展をより確実に予測および防止できるようになることが望まれる。本論文では、特に SCC の初期劣化現象に注目して、材料劣化による磁気特性変化により、SCC の主発生原因のひとつである鋭敏化を簡便に高精度で推定する手法と初期 SCC き裂の検出手法を新しく提案している。具体的には、（１）磁気力顕微鏡（以下 MFM）による鋭敏化評価手法、（２）磁束密度測定による初期劣化検出手法、（３）ニューラルネットワークや遺伝的アルゴリズムに基づく磁化領域逆解析手法の開発が行われている。

第 1 章では、まず最近の原子炉内における SCC 発生事例を紹介している。次に SCC の主原因のひとつである鋭敏化に関して行われたいくつかの研究を紹介している。ここで、SCC の発生予測に関して、結晶粒界におけるクロム濃度と、鋭敏化した結晶粒界の分布（割合）を知ることが重要であることが示される。さらに、鋭敏化とマクロな磁気特性の相関関係を示すいくつかの研究を紹介している。常磁性体であるオーステナイト系ステンレス鋼やインコネル 600 合金に関して、クロム濃度が減少するに従って磁化率や残留磁化などが上昇することが示される。最後に、強磁性体、常磁性体の劣化診断手法を概説している。

第 2 章では、今回ミクロな磁化観察に用いた MFM に関して、その原理など基礎的な物理を概観している。さらにニューラルネットワークや遺伝的アルゴリズムなどの逆解析手法や、主成分分析などの信号処理手法の概説を行っている。

第 3 章では、MFM による鋭敏化評価について述べられている。まず MFM の探針-試料表面間距離（リフトオフ）の最適化のために、ハードディスクや鋭敏化インコネル 600 合金の MFM 観察を行い、その結果リフトオフを 100nm に決定している。次に鋭敏化条件の異なるそれぞれ 5 片のインコネル 600 合金および SUS304 ステンレス鋼の MFM 観察を行っている。溶体化材に関しては特に注意すべき磁化を認めることは出来なかったが、鋭敏化材に関してはクロム濃度が減少していると思われる結晶粒界近傍において磁化している様子が示された。このことから、クロム濃度変化によるマクロな磁気特性変化は結晶粒界近傍における磁化が原因であることが MFM 程度の精度で初めて示された。また鋭敏化時間による MFM 観察結果の変化が、結晶粒界近傍におけるクロム挙動から予想されるものと一致していることが明らかにされている。これより、MFM を用いて SCC 発生予測に関して、最も重要な結晶粒界におけるクロム濃度と、鋭敏化した結晶粒界の分布を同時かつ簡便に、また精度良く測定可能であることが示された。MFM は大気中、液中での動作も可能で、原理的には実機

への適用も可能であることが述べられている。さらに SUS304 ステンレス鋼に関しては、鋭敏化による磁化の原因を明らかにするため、EBSP 法による相分布観察を行っている。その結果、磁化が局所的な組成成分の変化によるマルテンサイト変態によるものであることが示された。

第 4 章では、磁束密度測定による初期 SCC き裂の検出に関する記述に当てられている。まず、SCC き裂が導入されたインコネル 600 合金の磁束密度を、着磁後測定することにより、SCC き裂近傍で磁束密度が変化していることが示されている。MFM による SCC き裂近傍の磁化分布観察の結果、この磁束密度の変化がき裂近傍での磁化の減少によることが明らかにされる。強磁性体に関して、塑性変形により残留磁化が減少することが報告されている。この場合も、き裂導入時に磁区の細分化が起これ、残留磁化が減少した結果であろうと推測している。さらに遺伝的アルゴリズムに基づき磁束密度測定結果から磁化分布を逆解析する手法を開発し、本測定結果に適用している。逆解析された磁化は SCC き裂を中心に減少しており、本逆解析手法により初期 SCC き裂の検出が可能であることが示された。次に SUS304 ステンレス鋼に関して、腐食液中 3 点曲げ試験および腐食液なしでの 3 点曲げ試験を行い、試験中その場磁束密度観測を行っている。その結果、腐食液中試験時のみ、磁束密度が試験開始直後から増加し始めることが示されている。一方、SCC き裂は約 2.5 時間後に検出されていることから、SUS304 ステンレス鋼に関しても、磁束密度測定により初期 SCC き裂の検出が可能であることが示された。さらに SCC き裂縁の MFM 観察を行い、SCC き裂導入中の磁場変化は、応力誘起マルテンサイト変態によるものであることが示された。

第 5 章では、測定された磁束密度分布から、劣化領域に対応する磁化領域を求めるためにニューラルネットワークに基づき開発された逆解析手法に関して述べられている。ここでの対象は疲労試験片である。ただし、SCC き裂に関しても磁化変化が起こることが第 4 章で示されており、本逆解析手法を SCC に適用することも可能である。まず、疲労試験片の磁化領域逆解析を行い、疲労き裂近傍の磁化領域の推定を行っている。さらに、より定量的な劣化診断を行うために、磁化率分布の逆解析を提案し、シミュレーションデータに関して、精度良く逆解析可能であることを示している。

以上のように、本論文における研究成果は、高い独創性を有しており、応力腐食割れの初期劣化評価手法の研究分野では非常に有用なものである。また、システム量子工学の発展に寄与するところが大きいと判断される。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。