

外 98-8

早稲田大学大学院理工学研究科

博士論文概要

論文題目

超電導応用機器の超合金溶接部
の強度特性に関する研究

申請者

鈴木 信久

Nobuhisa Suzuki

1998年 7月
(西暦)

超電導現象の利点を生かして超電導マグネットを利用した超電導応用機器は、大電流（高電流密度）を流して高磁界を発生する超電導マグネットの電磁気学的な成立性だけでは実用化に至るものではなく、副次的に発生する強大な電磁力を支持できるだけの高強度・高韌性材料から成る構造部材に支えられて、初めて実用に耐え得るものとなる。しかもこれらの構造材料は、一般に渦電流の発生による温度上昇を抑えるための高電気抵抗率や、非磁性といった物理的性質も満足しなければならない。本論文では、こうした背景のもと、以上に述べた機械的・物理的性質を満足する優れた構造材料として脚光を浴び、超電導発電機や核融合炉への適用が進められている析出硬化型の超合金に着目し、構造物を製作する上で欠かせない溶接性や大型鋼塊製造性の改善・解決を行った上で、これらの溶接部の強度特性に関する一連の研究を実施した。

本論文の研究目的は、超電導発電機の中でもこれまでに例のない一層厳しい材料特性が要求される超速応励磁型機の回転子の開発に資するため、従来の研究を踏まえた上で、析出硬化型超合金を用いた健全な溶接部を得るために条件を解明し、広義の意味での母材並びにその溶接部の強度特性を明らかにすることである。

本論文の構成は7章から成る。第1章では本研究の基幹を成す構想を序論として述べ、第2章と第3章で超合金とその溶接部の基本特性について、さらに第4章、第5章、および第6章では基本特性を踏まえた上で、超合金とその溶接部の応用特性について明らかにした。第7章では、以上から得られた知見を結論として総括した。以下に各章の内容を概述する。

第1章では超電導応用産業を基盤とした研究の背景、本研究の対象である超電導発電機の回転子の構造、回転子構造材料に適用する析出硬化型超合金、およびその溶接部に関する従来の研究、超電導発電機の中でも一層厳しい材料特性が要求される超速応励磁型機用回転子の開発へ反映するための本研究の目的、そして本研究の研究目的と論文の構成について述べた。

第2章では超電導発電機のロータに要求される材料特性、すなわち0.2%耐力、電気抵抗率、およびシャルピー吸収エネルギーへの厳しい要求値の観点から、Ni基超合金のインコネル718を選定し、これを従来の薄板材や小型部品を対象とした理想的な条件にて製作した材料の範疇を超えて、大型ロータを製作する立場、すなわち実用化の段階へ発展させる観点から検討した。そのために上記材料を溶接性、および大型鋼塊製造性の改善の観点から、要求特性値を満足する範囲で析出硬化元素を低減する方針のもとに化学成分系について検討し、要求強度を満足しつつ溶接割れが生じない成分範囲を明らかにした。また上記検討の結果を反映した改良材で一対の薄肉リングを試作し、これらをガスタンクスティングステンアーク溶接（以下GTAW）を用いて溶接し、本研究で考案した溶接部の強度を引き出すための溶接前後の熱処理を行った。本溶接部が健全であることをミクロ組織の観点から検証した後、本改良材母材とその溶接部の室温から液体ヘリウム温度

（以下4K）にかけての基本的な各種材料特性評価を行い、要求特性を満足することを検証した。また4ステップの段階を経て鋼塊を大型化し、従来の製造実績を大きく上回る14Tonまで鋼塊を大型化しても偏析の無い健全なロータが製作可能で、しかも初期の要求特性値を満足するものであることを検証し、化学成分の検討が妥当なものであることを実証した。また溶接性についても、GTAWにて約200mmもの厚肉狭間先溶接が可能であり、しかも溶接部が要求強度を満足することから、厚肉のロータ胴部中央への溶接が適用可能であることを実証した。最後に、以上の薄肉円筒溶接と厚肉狭間先溶接を適用して、ロータを製作する際の指針を示した。

第3章では、超電導発電機の多重円筒に要求される材料特性から鉄基超合金A286を選定し、熱影響部が狭いことから塑性拘束の効果が期待され、変形が少ないとからコンポーネントの製作上有利な電子ビーム溶接の適用に関する検討を行った。本章では室温から4Kにかけての母材と溶接金属の基本的な強度特性を明らかにすることに加えて、As weld溶接を実機円筒構造へ適用するために2つの特性を明らかにした。1つは溶接金属を含めた軟化域幅と溶接ビード幅の関係であり、もう一つは溶接部が軟化したAs weldの継手でも、塑性拘束の影響により強度上昇が期待される継手形状範囲である。その結果、前者については軟化域幅は実測が可能な溶接ビード幅の約2倍であることを明らかにし、後者については軟化域幅と試験片直径の比で定義される相対厚さが0.8以下にて、いずれの温度域においても塑性拘束による強度上昇が得られることを明らかにした。また塑性拘束の効果は温度が低い程、小さくなることを明らかにした。最後に以上の知見を反映した、電子ビーム溶接を実機円筒構造へ適用するための指針として、実測が可能な溶接ビード幅を用いて、塑性拘束による強度上昇が得られる板厚設定範囲を明示した。また上記指針の基に、A286の実機円筒へ電子ビーム溶接を適用し、その実用性を検証した。

第4章では超合金溶接部の第1の応用研究として、真空気密性が要求されるシール溶接部を取り上げた。初めに1パスのGTAWにて気密性を保持し、フレキシビリティを持たせる機能に適した継手形状を考案し分類を行った。そして考案した継手に対して溶接条件を明らかにし、割れの無い健全な溶接部が得られることを検証した。なお、本継手の溶接には母材として、Ni基超合金インコネル718の他にも鉄基超合金A286を検討した。本章の後半ではこれら新しい継手の室温から4Kにかけての疲労試験を行い、未溶着部を有する本継手に対して破壊力学的手法を用い、統一的な疲労強度評価手法の適用を行った。その結果、全てのシール溶接部に対して、継手間の相対開口変位を用いることにより、温度のみに依存した統一的な疲労き裂発生寿命評価が可能であることを明らかにした。また、継手間の相対開口変位と応力拡大係数範囲の等価性を示した。最後に以上の知見を反映したシール溶接部の疲労設計法として、回転子の軸方向中央での二

次元問題としての円筒の弾性変形量から継手間の開口変位を求め、これと疲労寿命線図を対応させる指針を示した。

第5章では超合金溶接部の第2の応用研究として、異材円筒接合部を取り上げた。本章では母材に鉄基超合金A286と銅合金Cu-Crを用い、三層円筒から成る異材円筒界面の接合には、融接ではなく固相接合を適用した。本章の前半では接合方法の選定を行い、Cu-Cr母材の引張強さ以上の接合界面強度を有し、かつ溶接を想定した加熱に対する接合界面強度の劣化が生じない拡散接合を選定した。また上記異材継手の引張強さに優れた拡散接合条件を選定し、さらに拡散接合を熱履歴の一部として捕らえ、その後の時効処理条件を検討した。その結果、本研究で選定した時効処理条件にて、JIS規格で規定された値以上の母材強度が得られることを明らかにした。最後に三層円筒を軸方向に長尺化することを想定して、一対の三層円筒を界面接合した後、これらを突合させて三層溶接を適用した。上記時効処理を実施した後の三層溶接部の強度は各層母材と同等であり、拡散接合界面強度の劣化も無いことを検証し、十分実用に耐え得る強度を有することを明らかにした。最後に三層円筒構造が適用される超電導発電機のコンポーネントである常温ダンパーの製作に関する指針として、HIP炉の寸法上の制約により一体では製作できない場合は、一対の三層円筒を拡散接合を用いて別々に製作し、その後これらに三層溶接を適用して接合することとした。また三層溶接を適用する際には、溶接完了後に時効処理を行うこととした。

第6章では、第5章で述べた異材円筒接合部の構造健全性評価の一環として、異材の拡散接合界面に不着部や剥離部が生じた場合を想定し、損傷許容設計に資することを目的とした界面の疲労き裂伝ば特性に関する検討を行った。初めに界面き裂の破壊力学パラメータに関する検討を行い、設計上簡便な線形弾性解析に基づく均質材として求めた応力拡大係数を用いて表示した疲労き裂伝ば特性を損傷許容設計に適用できるか否かの検討を行った。その結果、線形弾性解析と弾塑性解析から求めた ΔJ を用いて整理した疲労き裂伝ば特性の比較から、実際の挙動に則したCu-Crの大きな塑性変形を伴う弾塑性解析結果を用いて整理した場合の疲労き裂伝ば速度は、線形弾性解析結果を用いて整理した場合の疲労き裂伝ば速度よりもかなり遅いことがわかった。従って、線形破壊力学に基づく応力拡大係数で表わしたパリス則を用いて疲労き裂伝ば解析を行うことにより、裕度を含んだ安全側の寿命評価が可能であることが明らかとなった。また弾塑性解析から求めた ΔJ の線形弾性解析から求めた ΔJ に対する裕度は3以上であり、疲労き裂伝ば速度が速い領域ほど、寿命に対する裕度は大きくなることを明らかにした。最後に常温ダンパーの損傷許容設計法として、線形弾性解析から求めた ΔJ に対する3の裕度を反映した、接合界面のき裂伝ばに基づくパリス則と、Cu-Crのき裂伝ばに基づくパリス則を用いる指針を示した。

第7章では、以上に述べた基本特性と、応用特性から得られた結論を総括した。