

審 査 の 結 果 の 要 旨

氏 名 錢 可 楨

本論文は「Development of Three-Dimensional Electromagnetic Analysis Method using Thin Plate Approximation for REBCO Superconducting Coils and its Application to Coupled Analysis with Heat Transfer (REBCO 超電導コイルを対象とする薄板近似を用いた三次元電磁界解析手法の開発及び伝熱との連成解析)」と題し、REBCO (RE: 希土類元素、BCO: BaCuO) 超電導線材のテープ形状という特徴を活かして、薄板近似と直交曲線座標系を適用した3次元電磁界解析法、および伝熱現象との連成解析ツールを開発し、さらに提案方法と開発した解析プログラムの検証といくつかのケーススタディを実施してその有用性を研究したものである。REBCO 線材は実用超電導機器への適用、応用拡大が最も期待されている高温超電導線材であり、REBCO 線材を使った機器の設計や特性解析、あるいは物理現象の詳細解析などに使用できる数値解析ツールの開発が強く期待されている。論文は6章から構成される。

第1章は「Introduction」であり、超電導体、特に REBCO テープ線材について説明した後、高温超電導体の電磁現象の解析手法とそのためのモデリング方法について整理した上で、本研究の目的と論文の構成について述べている。

第2章は「3D Electromagnetic Analysis Method」であり、REBCO テープ線材およびそれを使って巻かれたコイルを対象に、電流ベクトルポテンシャルを変数とした有限要素法に基づく3次元電磁解析法を提案している。テープ線材の超電導層が μm オーダであることを利用した薄板近似と、テープ線材の線材長手方向と幅方向およびテープ面に垂直方向に座標系をとった直交曲線座標系を適用することにより、3次元的な形状の REBCO 超電導コイルの電磁現象の解析においても電流ベクトルポテンシャルがスカラー量になり、計算負荷の削減と優れた収束性が達成されている。超電導体は、電界-電流密度特性の強い非線形性と温度依存性がモデル化されている。また、任意の3次元形状の REBCO 超電導コイルの電磁現象の解析が可能になっていることも特徴である。

第3章は「Verifications and Case Studies of 3D Electromagnetic Analysis」であり、提案した手法に基づいて開発した超電導体の電磁現象解析プログラム

の検証とケーススタディの結果を記述している。まず、理論式および市販のシミュレーションソフトウェアによる解析結果と比較することにより、提案手法と解析ツールの妥当性および正確性が検証された。ケーススタディとして、普通のソレノイド形状コイルと加速器などで使用される鞍形コイルの2つを対象に解析を行った。特に、REBCO テープ線材を使ったコイルで問題となる遮蔽電流について検討を行い、励磁方法と遮蔽電流との関係および遮蔽電流の抑制方法などについて考察を行っている。

第4章は「3D Heat Transfer Analysis Method」であり、電磁現象と熱伝達現象の連成問題を解析するために、3次元熱伝達解析方法および連成解析手順について記述している。REBCO コイルにおけるジュール発熱、熱伝導、熱伝達、および冷却特性の条件下で3次元温度分布の時間変化を解析するものであり、材料の各物理特性の温度依存性も考慮されている。

第5章は「Case Studies of Electromagnetic and Heat Transfer Coupled Analysis」であり、電磁現象と熱伝達現象が関わる2つ連成問題を対象にケーススタディを実施している。抵抗型超電導限流器の解析では、線材に臨界電流密度の局所的な低下があるときの過渡的な電磁的および熱的挙動および超電導ー常電導転移を解析、考察している。REBCO 超電導磁石を対象とした安定性の解析においては、クエンチ発生前後の電磁的および熱的挙動に対するコイルや励磁の諸条件の影響を分析している。

第6章は「Conclusion」であり、本研究の成果を総括している。

以上これを要するに、本論文は、今後の実用拡大が期待される REBCO 超電導テープ線材を使ったコイル等の電磁現象の解析のために、電流ベクトルポテンシャルを変数として薄板近似と直交曲線座標系を適用した3次元電磁界解析法を提案するとともに、伝熱現象との連成解析ツールを開発し、さらにそれを使用して四つのケーススタディを実施して提案手法と解析ツールの有用性を明らかにしたものであり、電気工学、特に超電導工学に貢献するところが少なくない。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。