

博士論文審査報告書

論文題目

核融合炉用ケーブル・イン・コンジット導体
の超電導特性に関する研究

Study on Superconducting Characteristics
of a Cable in Conduit Conductor
for Fusion Reactor

申請者

梶谷	秀樹
Hideki	KAJITANI

電気・情報生命専攻 超電導応用研究

2016年3月

核融合発電は、現行の原子力発電と同じく二酸化炭素を排出しない、核分裂反応のような連鎖反応がなく原理的に暴走する危険性が少ない、高レベルの放射性廃棄物が発生しない、燃料となる重水素が海水中に存在するため、燃料の枯渇、偏在の問題から解放される可能性があるなどから、究極のエネルギー源の一つとして期待されている。核融合反応を起こすためには、高温の燃料プラズマを、反応に必要な密度で一定時間保持しなければならない。高温プラズマを保持する方式として磁場を用いる「磁場閉じ込め方式」が有力視され、現在国際プロジェクトとして、日本・欧州連合・ロシア・アメリカ・中国・韓国・インドの7極により、国際熱核融合実験炉(ITER: International Thermonuclear Experimental Reactor)計画が進められている。そして、磁場発生のための大型超電導コイルシステムの開発が ITER 計画の最重要開発課題の一つとなっている。ITER 用コイルシステムは4種類の超電導コイルにより構成されており、その中で日本は、プラズマを磁場中に保持するために重要な役割を担うトロイダル磁場(TF: Toroidal Field)コイルの開発を行っている。TF コイルに用いられる導体には、ケーブル・イン・コンジット(CIC: Cable In Conduit)導体が採用されている。ITER-TF コイル用 CIC 導体は、直径 0.82mm の Nb₃Sn 超電導線(以下、素線という)を 1000 本以上撚り合わせてケーブルとし、これをステンレス製コンジットに格納した構造となっている。そして、実機導体の超電導性能評価試験(SULTAN 試験と呼ばれる)が、スイス・ローザンヌ工科大学プラズマ物理研究センターの大型導体試験装置を用いて行われてきた。その結果として、供試 CIC 導体の臨界電流値が、導体を構成する素線の臨界電流値の本数倍を下回っていることが判明した。その主たる原因の一つは、これまでの経験から、導体内部の素線が電磁力によって波状に曲げ変形を受け、その曲げ歪によって素線の性能が劣化したためと考えることができる。導体内部で素線は撚られており、幾何学的に複雑な構造となっているため、このような曲げ変形の大きさは素線ごとに異なる。さらに素線に含まれている銅及びブロンズは超電導層生成熟処理時に既に塑性変形している。従って、応力が超電導層に加わるため、曲げ変形が大きい場合、その性能が大きく損なわれる可能性もある。これまで、CIC 導体の性能を解析的に求めるための評価手法が提案されてきたが、このような曲げ歪分布を定性的かつ定量的に考慮可能な評価手法は確立されていなかった。

著者は以上のような背景のもと、CIC 導体内部の歪分布のモデル化と、それに基づいた新たな CIC 導体性能評価手法の確立を目的とし研究を行ってきた。本論文は、その成果をまとめたものであり、5 章から構成されている。以下に各章毎の概要を述べ評価を加える。

第1章「序論」では、まず核融合炉の原理や ITER 計画の現状について説明し、本研究の対象である核融合炉用超電導コイル及びそれに用いられる超電導導体の構造について概説している。次に本研究の位置づけと目的を明確にした上で、本論文全体の概要について記している。

第2章「素線の波状曲げ変形特性評価手法の開発」では、先行研究で行われた素線波状曲げ変形特性評価試験によって得られた振舞いを再現し、劣化メカニズムの解明に役立てるための計算手法について述べている。導体性能を評価するためには、CIC導体を構成する素線が波状の曲げ変形によってどの程度劣化するのかを明らかにする必要がある。そこで先行研究により素線波状曲げ変形特性評価試験が行われた。この試験では、電磁力によって生じる波状の曲げ変形を、周期的な曲げ変形を加えることのできる治具を用いて模擬し、電圧-電流特性を評価している。一方、素線の曲げ変形に対する劣化特性を再現するために、電気回路モデルに基づく数値解析的評価手法が国内外の研究者によって開発・提案されてきた。しかし、これらの回路モデルでは、非線形性の強い超電導特性を考慮する必要があるため、約1000本にも及ぶ素線の振舞いを同時に評価するには膨大な計算時間を要した。そこで著者は、高速に劣化特性を解析・評価することのできる計算手法の確立を目指した。まず、連続の波状曲げ変形を受けた時の素線内部の歪分布を定量的に計算することにより、素線内の超電導フィラメント間の電流転流が発生し難い状況にあることを見出し、これに基づいて、新たな回路モデルを構築した。そして本モデルにより、素線波状曲げ変形特性評価試験の結果をよく再現できることを示した。これによって、従来のような複雑な回路モデルを用いずとも、劣化特性を評価することが可能となり、計算負荷の大幅な削減に成功した。本提案手法は、評価精度が高いだけでなく、高速に計算可能であるため、将来の素線設計において有用な設計ツールとなるものと評価できる。

第3章「導体内部の物理現象モデルの構築」では、前章にて開発した素線の波状曲げ変形特性評価手法を用いて、CIC導体性能を高精度かつ高速に評価することのできる導体特性評価手法の開発について述べている。CIC導体内の各素線は互いに撓られているため、素線同士が密に接触している状態にある。このため、素線は曲げモーメントの大きさに応じて自由に撓むことができない。すなわち、撓み量が制限されることによって、電磁力による曲げモーメントは緩和される可能性がある。そこで著者は、このような現象が実際に発生しているのか否かを検証するため、まず導体内部の各素線に印加される曲げモーメントを計算し、各素線の撓み量を評価している。その結果、多くの素線が、電磁力を受けることによって、隣接する他の素線と接触し、その撓み量は制限されていることを見出した。そしてこのような物理現象を考慮するために、導体内の各素線に印加される曲げモーメントの計算において、緩和係数 α を導入した新たな物理モデルを構築・提案している。 α が1に近いほど、素線は隣接する他素線と密接に接触しており、撓み難くなっている状態を表す。逆に0に近いほど、波状曲げ変形試験のように、素線が自由に撓む状態にあることを表す。これまで実施されてきた実機導体性能試験（SULTAN試験）結果と一致する α 値を導入することで、導体内各素線の曲げ変形量を定量的に考慮できる導体の超電導性能評価手法を確立することが

できた。この成果は、これまで困難であった CIC 導体内部の複雑な電磁現象のモデル化を可能としたものであり、今後の導体性能解析や導体設計において、極めて有用な知見を与えるものと高く評価できる。

第 4 章「CIC 導体の超電導性能評価手法の開発」では、2 章と 3 章の成果を用いて、定量的な導体性能解析を可能とする評価手法について述べている。まず CIC 導体を回路モデル化し、導体内の電流分布を評価できる計算コードを開発している。すなわち、実機導体性能試験（SULTAN 試験）を対象とし、2 本の供試 CIC 導体同士を接続するジョイント部では、素線間の接触コンダクタンスが比較的高く電流転流し易いことから、分布定数回路モデルを適用している。一方、CIC 導体部では、素線間の接触コンダクタンスが十分低く転流し難いことから、集中定数回路モデルを適用している。そして、これらの回路モデルを同時に解くには、多くの計算時間を要することから、分布定数回路部と集中定数回路部を一つの回路モデルにまとめることによって、導体内部の電流分布を高速に計算することを可能とした。本モデルによって計算された CIC 導体の電流-電圧特性は、導体性能試験結果を良く再現しており、開発した評価手法の妥当性が確認された。さらに、導体温度や印加される磁場を変化させて導体性能を予測することで、核融合炉内の様々な条件における CIC 導体の超電導性能を定量的に評価することに成功している。以上により、本研究の目的とした CIC 導体性能評価手法を確立することができたものと評価する。

第 5 章「総括」では、本研究で得られた知見及び成果を総括し、今後に向けた課題を述べて、まとめとしている。

以上が本論文の要旨とその評価であるが、要するに本研究は、核融合炉用コイルに用いられる超電導導体の性能を精度良く予測することのできる評価手法の開発を目指し、導体を構成する超電導線材（素線）が電磁力を受けた時の振舞いを再現するための物理モデルの提案、導体内の電流分布を高速・高精度で計算することのできる回路モデルの構築等を行い、これらを統合することにより目的とする導体性能評価手法を確立したものである。これにより、核融合炉用導体の強磁場環境下における超電導特性劣化のメカニズムを把握することが可能となった。本研究の成果は、今後の核融合炉用超電導導体・コイル開発に向けて貴重な知見を与えており、超電導工学及び核融合工学分野の発展に多大な貢献をなすものと評価できる。よって、本論文は、博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。

2016 年 2 月

審査員	（主査）	早稲田大学教授	工学博士（早稲田大学）	石山敦士
		早稲田大学教授	工学博士（早稲田大学）	岩本伸一
		早稲田大学教授	博士（工学）早稲田大学	若尾真治
		早稲田大学教授	博士（工学）早稲田大学	林 泰弘