

博士論文概要

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1月

核融合炉の実現を目指して、日本・欧州連合・ロシア・アメリカ・中国・韓国・インドの7極は、国際協力の下で国際熱核融合実験炉（ITER：International Thermonuclear Experimental Reactor）計画を進めている。核融合反応は、燃料となる元素を超高温のプラズマ状態にすることで実現するが、そのプラズマを制御するためには、炉内に巨大な磁場環境を構築しなければならない。そのためには、大電流を長時間通電できる超電導コイルが必要となる。ITERには、主に4種類の超電導コイルが用いられるが、その中で日本は、プラズマを磁場中に閉じ込める意味において最も重要であるトロイダル磁場(TF)コイルの開発を担っている。TFコイルに用いられる導体は、ケーブル・イン・コンジット(CIC)導体と呼ばれる、直径0.82mmの超電導線(以下、素線という)を1000本以上撚り合わせケーブルとし、それをステンレス製コンジットに格納した構造のものである。この導体の超電導性能を評価するために、スイス・ローザンヌ工科大学プラズマ物理研究センターが所有する大型導体試験装置を用いて、実機導体性能評価試験が実施されている。これまでの導体開発の経験から、このような構造のCIC導体の超電導性能は、電磁力を受けることによって劣化することがわかっている。これは、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、素線の性能が劣化するためである。導体内部の素線は撚られており、複雑な幾何学的構造となっているため、このような曲げ変形の大きさは、素線ごとに異なることが考えられる。さらに、曲げ変形が大きい場合、素線は銅及びブロンズを含んでいるため、塑性変形して曲げ歪が増大することによって、その性能は大きく劣化する可能性もある。これまで、多くの研究者によって、CIC導体性能を解析的に求めるための評価手法が考案されてきたが、このような曲げ歪分布を定量的に考慮した評価手法は確立されていなかった。そこで、本研究では、定量的に導体内部各素線の曲げ歪を予測し、その結果から、導体性能を評価することのできる新たな計算手法の確立を目的とした。すなわち、新たな計算手法を開発・確立することにより、炉内の様々な条件下におけるCIC導体の性能予測と、さらには次世代の核融合炉用導体の定量的な設計を可能とすることを目指してきた。

以上の背景のもと、本論文では、まず、素線の波状曲げ変形に対する臨界電流特性を評価することのできる評価手法を考案・提案した。臨界電流とは、超電導状態で流すことのできる限界の電流値のことを言う。ここでは、導体内1000本以上の各素線に対して計算を行うために、高速に定量的評価を可能とする評価手法の開発を行った。次に、導体内素線の複雑な幾何学的構造を考慮した曲げモーメント計算モデルを構築し、それを用いて、各素線に印加される曲げ歪を計算・予測した。そして、その曲げ歪量に対する臨界電流特性を上述の評価手法を用いて計算し、その結果から、構築した回路モデルを用いて導体性能を評価した。本論文は、以上の成果を纏めたものであり、5章から構成されている。以下に各章の概要を記す。

第 1 章「序論」

本章では、研究背景として、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。そして、本研究の位置づけ・意義と目的を明確にした上で、本論文の概要をまとめている。

第 2 章「素線の波状曲げ変形特性評価手法の開発」

本章では、素線波状曲げ変形特性評価試験の概要及び試験で得られた振舞・特性を再現するための計算手法の開発について説明している。

導体性能を評価するためには、CIC 導体内の素線がどの程度、波状の曲げ変形によって劣化するのかを把握しなければならない。そのため、このような素線の劣化特性を評価することを目的として、素線波状曲げ変形特性評価試験が実施された。この試験では、導体内の電磁力による波状曲げ変形を模擬して、素線に周期的な曲げ変形を人工的に加えた状態で電圧電流特性を測定し、その時の臨界電流値を評価している。曲げ変形を徐々に大きくしていき、その都度、臨界電流値を測定することで、素線の波状曲げ変形特性を得る。この試験に対して、劣化特性の評価及びシミュレーションを行うために、素線に回路モデルを適用して、素線内部の電流分布を評価する等の数値解析的手法が、これまで国内外の研究者によって提案されてきた。一方、本研究では、CIC 導体性能を評価することを目的としたため、導体内にある 1000 本以上の各素線に対して、素線の波状曲げ変形特性を評価する必要がある。これに対し、従来のような回路モデルを解く等の数値解析的手法では、計算負荷が膨大になってしまうという問題があった。そこで、ここでは、曲げ歪に対する素線の臨界電流特性を、簡易的に求めることのできる高抵抗モデル (HTRM) と呼ばれる計算モデルを応用して、素線の波状曲げ変形特性を高速に計算できる新たな評価手法を提案している。これによって、素線に印加される最大曲げ歪さえ決定すれば、一意的に臨界電流を求めることができるようになるため、上述のような数値解析は不要となる。これにより、計算負荷の削減を実現することができ、従来の手法に比べて、高速に素線の波状曲げ変形特性を評価することが可能となった。さらに、曲げ歪を計算する過程では、素線を構成する銅及びブロンズ部の塑性変形を考慮することで、より定量的な曲げ歪の評価を実現している。このように、本研究で開発した評価手法は、計算負荷の低減及び正確性の観点から、従来の手法に比べて、より汎用性及び信頼性の高いものになっており、素線設計作業において、非常に有効な計算ツールとなる。

第 3 章「導体内部の物理現象モデルの構築」

本章では、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 導体性能を高速かつ定量的に評価することのできる評価手法の開発について説明している。CIC 導体内の各素線は撚られている構造のため、素線同士が密に接触している状態にある。そのため、素線は、波状曲げ変形試験のように、曲げモー

メントの大きさに応じて、自由に撓むとは限らない。つまり、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。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に、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、隣接する他素線と接触し、その撓み量は制限されていることがわかった。しかし、導体内部の各素線は、複雑な幾何学的構造となっているため、各素線の撓み制限量を個々に評価することは困難である。そこで、このような物理現象をマクロ的に表現することを考え、曲げモーメント計算において、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導体性能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した新たな導体の超電導性能評価手法の確立を実現している。

第 4 章「CIC 導体の超電導性能評価手法の開発」

2 章にて素線の波状曲げ変形特性の高速かつ定量的な評価手法を開発し、3 章にて、CIC 導体内の曲げ歪分布を定量的に評価することのできる物理モデルを構築した。本章では、これらの成果を統合して、統一的に導体性能を評価することのできる CIC 導体性能評価手法について説明している。

CIC 導体性能を統一的に評価するために、導体を回路モデル化し、導体内部の電流分布を評価できる計算コードを開発している。導体性能試験の場合、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は比較的高く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、導体本体部では、ジョイント部に比べて、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。集中定数回路モデルを用いることによって、計算時間の大幅な短縮を実現している。導体内各素線の電流電圧特性には、超電導特有の非線形性をよく近似する n 値モデルを適用している。 n 値モデルの計算過程において、2 章及び 3 章で確立した評価手法を用いて、素線毎の臨界電流値を定量的に計算している。本モデルによって計算された導体の電圧特性と、導体性能試験で得られたそれは、比較的良く一致したことから、本評価法の妥当性を確認することができた。さらに、温度や磁場をパラメータとし、導体性能を評価することで、核融合炉内の様々な条件における TF 導体の超電導性能を定量的に評価することに成功した。

第 5 章「総括」

本章では、本研究で得られた知見及び成果を総括し、本論文のまとめとした。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 梶谷 秀樹 印

(2016 年 1 月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
○ 論文	梶谷 秀樹, 石山 敦士, 我妻 洸, 村上 陽之, 辺見 努, 小泉 徳潔、核融合炉用 CIC 導体の超伝導特性評価手法の開発、低温工学（掲載決定）。
○ 論文	梶谷 秀樹, 石山 敦士, 我妻 洸, 村上 陽之, 辺見 努, 小泉 徳潔、波状曲げ変形を受けた Nb ₃ Sn 素線の臨界電流特性評価手法の開発、低温工学、Vol. 50、2015 年 12 月。
○ 論文	H. Kajitani, T. Hemmi, T. Mizutani, K. Kunihiro, M. Yamane, T. Obana, S. Takada, S. Shinji, K. Takahata, S. Imagawa and N. Koizumi、Evaluation of ITER TF Coil Joint Performance、IEEE Transactions on Applied Superconductivity、Vol. 25、August 2014.
○ 論文	H. Kajitani, T. Hemmi, H. Murakami and N. Koizumi、Analytical Study of Degradation of CIC Conductor Performance due to Strand Bending and Buckling、IEEE Transactions on Applied Superconductivity、Vol. 23、October 2012.
○ 論文	H. Kajitani, H. Murakami, A. Ishiyama, N. Koizumi and H Nakajima、Numerical Simulation of Current Distribution in Cable-in-Conduit Conductor for ITER TF Coil、IEEE Transactions on Applied Superconductivity、Vol. 21、August 2010.
講演	梶谷 秀樹, 辺見 努, 水谷 拓海, 高野 克敏, 安藤 真次, 松井 邦浩, 小泉 徳潔、TF コイル巻線の実規模試作の進捗、第 90 回低温工学・超電導学会、1B-p07、2014 年 11 月
講演	梶谷 秀樹, 辺見 努, 水谷 拓海, 松井 邦浩, 今川 新作, 尾花 哲浩, 小泉 徳潔、ITER TF コイルジョイント部の性能評価、第 88 回低温工学・超電導学会、1C-p10、2013 年 12 月
講演	梶谷 秀樹, 辺見 努, 村上 陽之, 小泉 徳潔、ITER 超伝導コイル用ケーブルインコンジット導体の性能評価、第 85 回低温工学・超電導学会、1C-a02、2011 年 11 月
講演	梶谷 秀樹, 村上 陽之, 植田 浩史, 石山 敦士, 小泉 徳潔, 奥野 清、数値シミュレーションによる TF コイル用 CIC 導体内の電流分布解析、第 81 回低温工学・超電導学会、1C-a02、2009 年 11 月
講演	梶谷 秀樹, 村上 陽之, 植田 浩史, 石山 敦士, 小泉 徳潔, 奥野 清、断面構造の異なる Nb ₃ Sn 素線の CIC 導体内における超電導特性の評価、第 80 回低温工学・超電導学会、1C-a02、2009 年 5 月
講演	梶谷 秀樹, 新井 道生, 西尾 幸恭, 植田 浩史, 石山 敦士、YBCO 超電導線材の過電流パルス通電試験前後における層間接触評価、電気学会 全国大会、S0653A、2009 年 3 月

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
その他 （論文）	渡部 一晃, 森村 俊也, 宮城 大輔, 津田 理, 濱島 高太郎, 谷貝 剛, 高畑 一也, 尾花 哲浩, 布谷 嘉彦, <u>梶谷 秀樹</u> , 小泉 徳潔、CIC 導体の撚りピッチがラップジョイント内の超電導素線-銅スリーブ間接触状況に及ぼす影響、電気学会 超伝導機器研究会、2014年9月
その他 （論文）	Pyon S, Y. Tsuchiya, H. Inoue, T. Tamegai, S. Awaji, K. Watanabe, <u>H. Kajitani</u> , N. Koizumi、Enhancement of critical current densities by high-pressure sintering in (Sr,K) Fe ₂ As ₂ PIT wires、Superconductor Science and Technology、April 2014.
その他 （論文）	T. Tamegai, Pyon S, Q. Ding, Y. Tsuchiya, H. Inoue, Y. Sun, <u>H. Kajitani</u> , N. Koizumi、Comparison of J _c characteristics in PIT wires based on BaFe ₂ As ₂ with different substitutions、European Conference on Applied Superconductivity、October 2013
その他 （論文）	Pyon S, Y. Tsuchiya, F. Otake, T. Taen, H. Akiyama, <u>H. Kajitani</u> , N. Koizumi, S. Okayasu、Enhancement of critical current densities in (Ba,K)Fe ₂ As ₂ by 320 MeV Au irradiation in single crystals and by high-pressure sintering in PIT wires、Applied Physics Express、July 2013
その他 （講演）	山根 実, 松井 邦浩, 辺見 努, <u>梶谷 秀樹</u> , 高野 克敏, 安藤 真次, 小泉 徳潔、ITER TF コイル実規模試作及び実機製作、第 89 回低温工学・超電導学会、1C-a02、2014年5月
その他 （講演）	水谷 拓海, 松井 邦浩, 辺見 努, <u>梶谷 秀樹</u> , 高野 克敏, 安藤 真次, 小泉 徳潔、ITER TF コイル巻線の試作結果及び製作進捗、第 89 回低温工学・超電導学会、1C-a03、2014年5月
その他 （講演）	名原 啓博, 諏訪 友音, 辺見 努, <u>梶谷 秀樹</u> , 尾関 秀将, 松井 邦浩, 布谷 嘉彦, 小泉 徳潔、ITER 用超伝導導体の導体性能試験、第 88 回低温工学・超電導学会、1C-p03、2013年12月
その他 （講演）	小泉 徳潔, 中平 昌隆, 松井 邦浩, 辺見 努, 山根 実, <u>梶谷 秀樹</u> , 櫻井 武尊, 高野 克敏, 安藤 真次、ITER TF コイルの調達進捗、第 88 回低温工学・超電導学会、1C-p04、2013年12月
その他 （講演）	松井 邦浩, 辺見 努, 山根 実, <u>梶谷 秀樹</u> , 高野 克敏, 安藤 真次, 小泉 徳潔、ITER TF コイル巻線の試作結果、第 88 回低温工学・超電導学会、1C-p05、2013年12月
その他 （講演）	山根 実, 松井 邦浩, 辺見 努, 山根 実, <u>梶谷 秀樹</u> , 高野 克敏, 安藤 真次, 小泉 徳潔、ITER TF コイル熱処理試作結果、第 88 回低温工学・超電導学会、1C-p06、2013年12月
その他 （講演）	辺見 努, 松井 邦浩, 山根 実, 松井 邦浩, <u>梶谷 秀樹</u> , 高野 克敏, 安藤 真次, 小泉 徳潔、ITER TF コイル冷媒入口試作、第 88 回低温工学・超電導学会、1C-p09、2013年12月

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
その他 （講演）	佐浦 啓介, 尾花 哲浩, 高田 卓, 夏目 恭平, 濱口 真司, 高畑 一也, 力石 浩孝, 梶谷 秀樹, 辺見 努, 松井 邦浩, 今川 新作, 小泉 徳潔、ITER-TF 導体接続抵抗測定試験における高温超伝導ブスバー追加による銅ブスバーの発熱低減、第 88 回低温工学・超電導学会、1C-p11、2013 年 12 月
その他 （講演）	名原 啓博, 諏訪 友音, 辺見 努, 梶谷 秀樹, 尾関 秀将, 松井 邦浩, 布谷 嘉彦, 小泉 徳潔、ITER 中心ソレノイド用超伝導導体の導体性能評価、第 87 回低温工学・超電導学会、3C-p01、2013 年 5 月
その他 （講演）	小泉 徳潔, 松井 邦浩, 辺見 努, 梶谷 秀樹, 山根 実, 井口 将秀, 高野 克敏, 澤 直樹, 山本 暁男, 久野 和雄、ITER TF コイルの調達進捗、第 87 回低温工学・超電導学会、3C-p04、2013 年 5 月
その他 （講演）	松井 邦浩, 辺見 努, 井口 将秀, 梶谷 秀樹, 西 宏, 千田 豊, 森本 将明, 小泉 徳潔、ITER TF コイルの調達進捗、第 86 回低温工学・超電導学会、3C-a07、2012 年 11 月
その他 （講演）	辺見 努, ハルヨ ステファヌス, 梶谷 秀樹, 布谷 嘉彦, 相澤 一也, 小泉 徳潔, 町屋 修太郎, 長村 光造、中性子回折を用いた ITER CS 導体試験サンプルの劣化位置の評価、第 86 回低温工学・超電導学会、3C-a11、2012 年 11 月