

早稲田大学大学院 先進理工学研究科

博士論文概要

論文題目

REBCO 高温超電導電力ケーブルの
過電流通電特性解析に関する研究

Study on Numerical Analyses of
Over-Current Characteristics of

REBCO High-Temperature Superconducting
Power Cables

申請者

王 旭東

Xudong Wang

電気・情報生命専攻 超電導応用研究

2010年 12月

REBCO($\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$)超電導体は高温超電導体で、電気抵抗ゼロに加えて、低温超電導体よりも高い臨界温度(約 90 K)と磁場中で高い臨界電流密度(10^6 A/cm²以上)を有しており、安価な液体窒素(77.3K)による冷却で使用可能である。そのため、REBCO超電導体を用いた応用機器の研究開発が国内外で盛んに行われている。その一つに高温超電導電力ケーブルが挙げられる。超電導電力ケーブルは、従来の送電ケーブルに比べて大容量、低損失を実現できる可能性があるため、次世代の電力輸送システムとして期待されている。海外では、米国、欧州、韓国、中国、ロシアなどが次々に高温超電導電力ケーブルの開発プロジェクトを立ち上げ、実システムでのフィールド試験も含めて実用化に向けた研究を行っている。日本では 2013 年以降の実用化を目指して、2008 年より REBCO 超電導体を用いた 66 kV 系統と 275 kV 系統の高温超電導電力ケーブルの開発プロジェクトが本格的に始まった。

REBCO 超電導電力ケーブルは、ケーブルコアの中心から同心軸上に銅フォーマ、超電導導体層、絶縁層、超電導シールド層、銅シールド層、保護絶縁層で構成されている。超電導導体層と超電導シールド層は、数十から数百本の REBCO 超電導テープ線材で構成されており、多層、スパイラル状にコア内に巻きつける構造をとる。超電導導体層は定常運転時に交流電流を送電し、超電導シールド層には超電導導体層から発生する交流磁界を遮蔽するように送電電流と逆位層の遮蔽電流が流れる。銅フォーマと銅シールド層は、それぞれ短絡事故等における過電流から超電導導体層と超電導シールド層を保護する役割を担っている。REBCO 超電導線材は、基板・中間層・REBCO 層・安定化保護層(銀層、銅層)からなる積層テープ構造であり、線材幅が 10 mm 程度に対して REBCO 層の厚さは 1 μm 程度である。日本で開発されている 66 kV 系統の REBCO 超電導電力ケーブルにおいて、定格電流 5 kA_{rms} に対して最大 31.5 kA_{rms}、2 秒間の事故電流の、そして 275 kV 系統では、定格電流 3 kA_{rms} に対して最大 63 kA_{rms}、0.6 秒間の事故電流を想定した耐過電流特性が求められている。よって REBCO 超電導電力ケーブルを高性能かつ低コストで実現するためには、超電導線材の保護層である安定化保護層・銅フォーマ・銅シールド層を適切に設計し、短絡事故による劣化や焼損からケーブルを保護する必要がある。しかしこれまでの研究・開発においては、試作モデルケーブルを用いた短絡試験を行い、特定のケーブル設計に対して劣化の有無を確認するまでに留まっており、統一的な保護層の設計最適化や裕度評価は行われてこなかった。

以上の背景のもとに、本研究では、REBCO 超電導電力ケーブルの短絡事故に対する保護設計の最適化に基づく耐過電流導体構成技術を確立することを目的とし、詳細な数値解析と評価実験の両面から検討を行ってきた。本論文はその成果をまとめたもので、6 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、研究の背景として、国内外における高温超電導電力ケーブルの開発状況を紹介し、本研究で対象とした REBCO 超電導線材の超電導特性および REBCO 超電導電力ケーブルの構造などについて概説している。次に、従来の研究とその問題点に言及し、本研究で開発した REBCO 超電導電力ケーブルの通電・伝熱特性を評価する解析手法の必要性を示し、本論文の意義と目的を明らかにして、最後に本論文の概要を述べている。

第 2 章「REBCO 超電導線材の過電流通電特性評価試験」

本章では、超電導電力ケーブルを構成する REBCO 超電導線材に対して過電流通電試験を行い、線材の臨界電流特性が劣化開始する電流と温度の限界値について評価した。過電流通電試験は、短絡事故電流を定性的に模擬したパルス状の過電流を徐々に大きくしながら REBCO 超電導線材に通電し、各過電流通電に対する線材の温度上昇および臨界電流値を測定して、過電流通電による臨界電流値の劣化特性を評価した。試験に用いた REBCO 超電導線材は、後章の REBCO 超電導電力ケーブルに用いるものと同等のものである。臨界電流特性は超電導体特有の性質で、臨界電流値に達するまで電気抵抗はゼロであるが、それ以上になると急激に抵抗が発生する。過電流通電試験の結果、REBCO 超電導線材の臨界電流特性が劣化開始する温度は 500 K 付近であることが観測され、線材安定化層を増やすことで劣化開始までの限界電流値も上昇することが本試験により明らかになった。本試験の結果は、過電流通電に対する超電導線材の劣化特性を知る上で重要であり、短絡事故による REBCO 超電導電力ケーブルの温度上昇の限界指標となる。

第 3 章「REBCO 超電導電力ケーブルの通電・伝熱特性評価手法の開発」

本章では、最初に REBCO 超電導電力ケーブルの通電・伝熱特性を評価する 3 次元解析手法の開発について述べ、次に REBCO 超電導モデルケーブルを用いた検証実験と解析との比較から 3 次元解析手法の妥当性を示した。本解析手法では、REBCO 高温超電導電力ケーブルの電流分布と温度分布を詳細に評価するため、3 次元有限要素法と回路方程式に基づく電流分布・熱伝導連成解析を行った。電流分布解析において、マクスウェル方程式より支配方程式を導出し、導体内を 3 次元有限要素法により定式化して場の解析を行った。ケーブル内のインダクタンス成分は集中定数として回路方程式でモデル化し、3 次元有限要素法と連成した。REBCO 超電導線材の非線形な臨界電流特性には、近似式としてよく用いられる n 値モデルを適用した。熱解析において、熱平衡方程式より支配方程式を導出し、3 次元有限要素法により定式化した。本解析手法は、REBCO 超電導線材の不均一な臨界電流特性を考慮できるため、REBCO 超電導電力ケーブルの各層の電流分

布・温度分布のみならず、層内の詳細分布も評価できるものである。解析手法の妥当性を確認するために行った検証実験から、解析結果は実験結果と非常によく一致した。よって、本解析手法は REBCO 超電導電力ケーブルの通電・伝熱特性を評価できると示された。

第 4 章「66 kV 系統 GdBCO 超電導電力ケーブルの過電流通電特性評価」

本章では、短絡事故に対する 66 kV 系統 GdBCO 超電導電力ケーブルの保護設計について、本研究で開発した解析手法によるモデルケーブルの設計とその検証実験の結果を述べ、設計したモデルケーブルの短絡事故に対する裕度を線材レベルで評価した。モデルケーブルの設計は、安定化保護層の厚みと銅シールド層の断面積をパラメータとして、短絡事故時の通電・伝熱特性を解析評価して行った。解析の結果、超電導層の温度上昇は安定化保護層の厚みの増減による影響が小さく、銅シールド層の断面積が超電導シールド層の温度上昇に対して支配的であることが明らかになった。解析結果から試設計したモデルケーブルを用いて短絡試験を行った結果、本解析手法による事前予測と非常によく一致し、66 kV 系統 GdBCO 高温超電導電力ケーブルに対する解析手法としての有効性が示された。

第 5 章「275 kV 系統 YBCO 超電導電力ケーブルの過電流通電特性評価」

本章では、短絡事故に対する 275 kV 系統 YBCO 超電導電力ケーブルの保護設計について、本研究で開発した解析手法による高電圧階級モデルケーブルの設計とその検証実験の結果を述べ、設計したモデルケーブルの短絡事故に対する裕度を線材レベルで評価した。275 kV 系統は 66 kV 系統よりも絶縁層が厚くなるため、モデルケーブル設計は定常時の誘電損失を考慮した伝熱特性評価を行ったのちに、安定化保護層の厚みと銅フォーマおよび銅シールド層の断面積をパラメータとして、短絡事故時の通電・伝熱特性を解析評価して行った。解析の結果、超電導層の温度上昇は定常時において極めて低く、短絡時において銅フォーマと銅シールド層の断面積に依存することが明らかになった。解析結果から試設計したモデルケーブルを用いて短絡試験を行った結果、本解析手法による事前予測と非常によく一致し、275 kV 系統 YBCO 超電導電力ケーブルに対する解析手法としての有効性が示された。

第 6 章「総括」

本章では、各章の総括と本論文で得られた成果をまとめ、今後の課題と展望について述べた。本研究で開発した REBCO 超電導電力ケーブルの通電・伝熱特性を評価する 3 次元解析手法は、短絡事故に対する保護設計において非常に有用であるだけでなく、他の REBCO 超電導電力機器への応用も期待できる。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 王 旭東 印

(2010年 11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 （掲載決定）	Over-current Characteristics of 66-kV RE123 HTS Power Cable	IEEE Trans. on Appl. Supercond. vol.21	2011	<u>X. Wang</u> , A. Ishiyama, M. Ohya, N. Fujiwara
論文 （掲載決定）	Current Margin Against the Fault Current in REBCO Coated Conductors	IEEE Trans. on Appl. Supercond. vol.21	2011	A. Ishiyama, H. Momotari, <u>X. Wang</u> , M. Arai, H. Ueda, M. Ohya, K. Ohmatsu, N. Fujiwara
論文 （掲載決定）	Over-current Characteristics of 275-kV Class YBCO Power Cable	IEEE Trans. on Appl. Supercond. vol.21	2011	A. Ishiyama, <u>X. Wang</u> , H. Ueda, T. Uryu, M. Yagi, N. Fujiwara
論文	Thermal Characteristics of 275 kV/3 kA Class YBCO Power Cable	IEEE Trans. on Appl. Supercond., vol.20, no.3, pp.1268-1271	2010	<u>X. Wang</u> , H. Ueda, A. Ishiyama, M. Yagi, T. Saitoh, Y. Aoki, N. Fujiwara
論文	Numerical Simulation on Fault Current Condition in 66 kV Class RE-123 Superconducting Cable	Physica C: Superconductivity, vol.470, no.20, pp.1580-1583	2010	<u>X. Wang</u> , H. Ueda, A. Ishiyama, M. Ohya, H. Yumura, N. Fujiwara
論文	Computer Simulation of Fault Current Characteristics in 275 kV Class YBCO Power Cable	Physica C: Superconductivity, vol.470, no.20, pp.1572-1575	2010	S. Sato, <u>X. Wang</u> , H. Ueda, A. Ishiyama, M. Yagi, S. Mukoyama, T. Saitoh, Y. Aoki, N. Fujiwara
論文	Degradation Characteristics of YBCO Coated Conductors due to Fault-Current in Power Cable	Physica C: Superconductivity, vol.470, no.20, pp.1334-1337	2010	H. Kono, <u>X. Wang</u> , H. Ueda, A. Ishiyama, T. Saitoh, Y. Aoki, M. Yagi, S. Mukoyama, N. Fujiwara
論文	Design and Evaluation of 66 kV Class RE-123 Superconducting Cable	Physica C: Superconductivity, vol.470, no.20, pp.1576-1579	2010	T. Minamino, M. Ohya, H. Yumura, T. Masuda, T. Nagaishi, Y. Shingai, <u>X. Wang</u> , H. Ueda, A. Ishiyama, N. Fujiwara
論文	Over-Current Characteristics of a 20-m-Long YBCO Model Cable	IEEE Trans. on Appl. Supercond., vol. 19, no. 2, pp. 1722-1726	2009	<u>X. Wang</u> , H. Ueda, A. Ishiyama, M. Yagi, S. Mukoyama, M. Ohya, T. Masuda, N. Kashima, S. Nagaya, Y. Shiohara
論文	Over-Current Characteristics of YBCO Superconducting Cable	Physica C: Superconductivity vol.469, no.20, pp.1717-1721	2009	<u>X. Wang</u> , H. Ueda, A. Ishiyama, M. Yagi, S. Mukoyama, N. Kashima, S. Nagaya, Y. Shiohara

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）
論文	Transient Stability Characteristics of a 1-m Single-Layer YBCO Cable	IEEE Trans. on Appl. Supercond., vol.18, no.2, pp.1228-1231	2008	A. Ishiyama, <u>X. Wang</u> , H. Ueda, M. Yagi, S. Mukoyama, N. Kashima, S. Nagaya, Y. Shiohara
論文	Over-Current Characteristics of Superconducting Model Cable Using YBCO Coated Conductors	Physica C: Superconductivity, vol.468, no.20, pp.2041-2045	2008	A. Ishiyama, <u>X. Wang</u> , H. Ueda, M. Yagi, S. Mukoyama, N. Kashima, S. Nagaya, Y. Shiohara
講演	Over-current characteristics of 275 kV class YBCO Model Cable	International Symposium on Superconductivity	2010年 11月	<u>X. Wang</u> , A. Ishiyama, M. Yagi, T. Ohkuma
講演	66kV系統REBCO超電導モデルケーブルの過電流通電特性	電気学会超電導応用電力機器研究会	2010年 6月	王旭東, 石山敦士, 大屋正義, 藤原昇
講演	YBCO超電導線材の交流過電流通電特性	電気学会超電導応用電力機器研究会	2010年 6月	王旭東, 百足弘史, 石山敦士, 大屋正義, 大松一也, 藤原昇
講演	66kV系統REBCO超電導モデルケーブルの過電流通電特性評価	2010年度春季低温工学・超電導学会	2010年 5月	王旭東, 植田浩史, 石山敦士, 大屋正義, 藤原昇
講演	YBCO超電導線材の過電流パルス通電による特性劣化試験	2010年度春季低温工学・超電導学会	2010年 5月	王旭東, 新井道生, 石山敦士, 斎藤隆, 青木裕治, 八木正史, 坂井直道, 藤原昇
講演	275 kV系統YBCO超電導ケーブルの過電流通電特性	電気学会超電導応用電力機器研究会	2010年 1月	王旭東, 植田浩史, 石山敦士, 八木正史, 藤原昇
講演	275kV系統YBCO超電導ケーブルの過電流通電特性解析	2009年度秋季低温工学・超電導学会	2009年 11月	王旭東, 植田浩史, 石山敦士, 八木正史, 藤原昇
講演	Numerical Simulation on Fault Condition in 66 kV YBCO Superconducting Power Cable	European Conference on Applied Superconductivity	2009年 9月	<u>X. Wang</u> , H. Ueda, A. Ishiyama, M. Ohya, H. Yumura, N. Fujiwara
講演	275kV級YBCO超電導電力ケーブルを想定した伝熱特性評価 絶縁層における誘電損失の影響	電気学会超電導応用電力機器研究会	2009年 6月	王旭東, 植田浩史, 石山敦士, 八木正史, 藤原昇
講演	66kV系統YBCO超電導ケーブルの過電流通電特性解析	2009年度春季低温工学・超電導学会	2009年 5月	王旭東, 植田浩史, 石山敦士, 大屋正義, 湯村洋康, 藤原昇

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）
講演	YBCO 超電導ケーブルの過電流通電特性	電気学会全国大会	2009年 3月	王旭東, 植田浩史, 石山敦士, 八木正史, 向山晋一, 鹿島直二, 長屋重夫, 塩原 融
講演	YBCO 超電導ケーブルの通電・伝熱特性評価用計算機シミュレータの開発	2008年度秋季低温工学・超電導学会	2008年 11月	王旭東, 佐藤俊祐, 植田浩史, 石山敦士, 八木正史, 向山晋一, 鹿島直二, 長屋重夫, 塩原 融
講演	10 m 級 YBCO 超電導ケーブルの過電流通電特性実験と解析	電気学会超電導応用電力機器研究会	2008年 6月	王旭東, 植田浩史, 石山敦士, 八木正史, 向山晋一, 鹿島直二, 長屋 重夫, 塩原融
講演	10m 級 YBCO 超電導ケーブルの過電流通電特性	2008年度春季低温工学・超電導学会	2008年 5月	王旭東, 植田浩史, 石山敦士, 八木正史, 向山晋一, 鹿島直二, 長屋重夫, 塩原 融
講演	YBCO 超電導ケーブル導体の過電流通電特性解析	電気学会超電導応用電力機器研究会	2008年 1月	石山敦士, 王旭東, 植田浩史, 西尾幸恭, 八木正史, 向山晋一, 鹿島直二, 長屋 重夫, 塩原融
講演	Degradation of YBCO Coated Conductors Caused by Over-current Pulses	European Conference on Applied Superconductivity	2007年 9月	X. Wang, H. Ueda, A. Ishiyama, Y. Iijima, T. Saitoh, N. Kashima, M. Mori, T. Watanabe, S. Nagaya, T. Katoh, T. Machi, Y. Shiohara
講演	Ic 分布を考慮した YBCO 超電導線材の常電導転移・伝播特性	2007年度春季低温工学・超電導学会	2007年 5月	王旭東, 土屋元計, 植田浩史, 石山敦士, 塩原 融
講演	YBCO 線材の過電流パルス通電による特性劣化について	電気学会超電導応用電力機器研究会	2006年 6月	石山敦士, 王旭東, 植田浩史, 飯島康裕, 斎藤隆, 鹿島直二, 森匡見, 渡部智則, 長屋重夫, 町敬人, 塩原融
講演	YBCO 線材の過電流パルス通電時の特性劣化について	電気学会全国大会	2006年 3月	王旭東, 鈴木公三, 中里翔平, 植田浩史, 石山敦士, 飯島康裕, 斎藤隆, 塩原融
他、講演 4 件				