

博士論文審査報告書

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

2011年 2月

持続可能な社会・経済の基盤となる高安定・高効率の電力供給システムを確立するため、超電導技術を活用した電力機器の研究開発が各所で進められている。希土類系酸化物超電導：REBCO ($\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ；REは希土類元素を指す)線材は、高温領域(液体窒素温度領域)での優れた超電導特性と、高い機械的強度を有していることから、電力貯蔵用コイルや電力ケーブル用線材として有望視されている。本研究の対象である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、銅シールド保護層、保護絶縁層から成る。そして銅フォーマと銅シールド保護層は、短絡事故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おり、これらを適切に設計することによって、短絡事故による超電導線材の特性劣化や焼損を防ぐ必要がある。しかし従来の研究・開発においては、試作モデルケーブルを用いた過電流通電に対する超電導特性の劣化の有無の確認試験が行われてきただけで、保護層の設計最適化や過電流に対する定量的な裕度評価は行われてこなかった。

以上のような背景のもと、筆者は、REBCO線材を用いた電力ケーブルの実現に向けて、66kV系統大電流・低交流損失超電導ケーブルと275kV系統高電圧超電導ケーブルの2つを具体的な開発対象として、実用上極めて重要となる短絡事故における過電流流入時の通電・伝熱特性を実験と数値解析により明らかにし、耐過電流ケーブル導体の設計最適化を行うことを目指して研究を行ってきた。本論文はその成果をまとめたものであり、6章から構成されている。以下各章ごとに概要を述べ、評価を加える。

第1章「序論」では、まず国内外における超電導電力ケーブルの開発状況、本研究で対象としたREBCO超電導電力ケーブルの構造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、本研究の意義・目的を述べるとともに、本論文の概要をまとめている。

第2章「REBCO超電導線材の過電流通電特性評価試験」では、REBCO超電導線材の短線試料に対して過電流パルス通電試験を行い、臨界電流特性が劣化をはじめめる温度を指標として評価するとともに、劣化の要因を解明するため、MO観察(Magneto Optics Imaging)と熱応力・ひずみ解析を行った結果について述べている。複数の試料線材を用いた過電流通電試験の結果、REBCO超電導線材の過電流パルス通電に対する上昇温度の限界値が400 K以上であることを明らかにしている。そして、劣化を引き起こす要因の一つとして考えられる局所的な温度上昇に伴う熱応力・ひずみについて、有限要素法解析により評価している。その結果、MOで観測された劣化箇所において0.4%以上のひずみが発生する可能性があることを示している。これは不可逆的な臨界電流の劣化が0.3-0.7%のひずみで発生するという先行研究の結果と一致するものである。本章の成果は、過電流通電に対するREBCO超電導線

材の劣化特性を知る上で貴重なデータを提供するものであり、第 4 章、第 5 章の 66kV および 275kV 系統 REBCO 超電導電力ケーブルの耐過電流導体設計のための指標・基準を与えたものと位置づけることができる。

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」では、REBCO 超電導電力ケーブルの通電・伝熱特性を評価するために新たに開発した数値解析手法について詳述している。短絡事故時には、定格電流の 5～20 倍に及ぶ電流が流れる可能性があり、これに耐え得る導体構造設計を行うためには、過電流通電時の導体内の電流分布や温度分布を正確に解析・予測する必要がある。そこでここでは、超電導線材の電流-電圧特性や、銅フォーマや銅シールド保護層などの電気抵抗・熱特性の温度依存性を考慮した 3 次元有限要素法と回路方程式に基づく数値解析プログラムを開発している。そして、銅フォーマ、超電導層、絶縁層から成る 1m 長のモデルケーブルの過電流試験を行い、開発した解析手法がケーブル内の電流分布、温度分布を正確に再現できることを検証している。そこで実ケーブル導体構成(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、絶縁保護層)を有する 20 m 級モデルケーブルを設計・試作し、過電流通電実験を行っている。解析結果は実験結果と良く一致し、設計どおり過電流による劣化も観測されなかった。ここで開発された数値解析手法・プログラムは、超電導ケーブル内の複雑な電流・温度分布を綿密に精度よく再現・予測することが可能であり、目的とする耐過電流導体設計のために極めて有用であると評価できる。

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」では、第 3 章の解析手法を用いた 66 kV 系統 GdBCO 超電導電力ケーブルの設計に基づく耐過電流導体構成の提案と、試作モデルケーブルによる実証試験の結果について述べている。REBCO 超電導電力ケーブルはコンパクトで大容量の送電ができ、既設管路を有効活用した送電容量の増大が実現できる可能性を持つことから、都市部の電力需要増大への対応や老朽化した設備のリプレース対策として地中ケーブルへの適用が期待されている。そこでここでは、既設管路直径 150mm の中に 3 相ケーブルを収めた 3 芯一括構造の 66 kV 級超電導電力ケーブルを対象として、寸法制約のもとでの耐過電流導体設計を試みている。まず、短絡事故時の通電・伝熱特性の数値解析により導体構成要素の断面積等の影響を詳細に評価して行った結果、超電導層の温度上昇に対する安定化保護層の厚みの影響は極めて小さいこと、銅シールド保護層の断面積を増やすことで超電導シールド層の温度上昇を著しく抑えることが可能であることなどを明らかにしている。そしてこれらの評価に基づいて、2 章で得られた REBCO 超電導線材の過電流に対する許容温度と管路直径 150 mm という制約のもとに、最適化した耐過電流導体構成の提案を行っている。

そしてモデルケーブルを試作して 66kV 系統の短絡事故電流 ($31.5\text{kA}_{\text{rms}} \cdot 2$ 秒) を模擬した過電流通電試験を行い、本研究で開発した数値解析手法により目的とする 66 kV 系統 GdBCO 超電導電力ケーブルの耐過電流導体設計が可能であることを実証している。

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」では、275 kV 級高電圧超電導電力ケーブルの導体設計を、本研究で開発した数値解析手法により行った結果について述べている。275 kV 級ケーブルは 66 kV 級ケーブルよりも絶縁層が厚くなる。そこで絶縁層における誘電損失を考慮した通電・伝熱特性解析に基づいて、安定化保護層の厚み、銅フォーマおよび銅シールド保護層の断面積をパラメータとして、定常時と短絡事故時の通電・伝熱特性を解析評価している。その結果、誘電損失による定常時の温度上昇は許容範囲内であること、短絡時において銅フォーマと銅シールド保護層の断面積が温度上昇に大きな影響を与えることなどを明らかにしている。そしてこれらの検討結果に基づいて 275 kV 系統 YBCO 超電導電力ケーブルの耐過電流導体構成の提案を行い、モデルケーブルを試作し 275 kV 系統を模擬した短絡試験 ($61.3\text{kA}_{\text{rms}}, 0.6$ 秒) を実施している。実験結果は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の耐過電流導体設計に対しても開発解析手法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、REBCO 超電導電力ケーブルの耐過電流導体構成技術の確立を目指し、ケーブル内の電氣的・熱的振舞を正確に再現する数値解析手法を開発・提案し、試作ケーブルによる実験によりその妥当性を検証するとともに、66kV・275kV 系統用ケーブルの設計に応用し、目的とする耐過電流特性を有するケーブルを実現できることを実験により実証したものである。その成果は、今後の電力ケーブルをはじめとする超電導電力機器の実用化に向けて貴重な知見を与えており、超電導材料および超電導応用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。

2011 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	工学博士(早稲田大学)	大木義路
	早稲田大学教授	博士(工学)早稲田大学	若尾真治