

# REBCO 線材の過電流試験特性

## Overcurrent Conduction Characteristics of REBCO Coated Conductors

竹村 賢人                      中西 達尚                      足立 和久  
Kento TAKEMURA    Tatsuhisa NAKANISHI    Kazuhisa ADACHI

塩原 敬                      三堂 信博                      青木 裕治  
Kei SHIOHARA        Nobuhiro MIDOU        Yuji AOKI

超電導ケーブルを導入する送電・配電網では、現行の電力ケーブルと同様に短絡電流（過電流）がケーブルに侵入する可能性がある。そのため、超電導ケーブルの設計では、過電流への耐性を確保することが不可欠である。しかし、超電導ケーブルに使用される REBCO ( $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ) 線材に劣化を与える過電流の条件は不明瞭な点がある。本研究では、長尺超電導ケーブルに対する短絡試験を簡略化して、REBCO 線材を液体窒素に浸漬し、交流通電における過電流試験を実施した。その結果、金属箔を貼り合わせた REBCO 線材が過電流に対して優位になることを確認した。これは、金属の存在により過電流が分流し、超電導層の発熱が抑えられたと考えられる。本研究により、超電導ケーブル設計の安全性・信頼性向上に寄与することが示された。

The integration of superconducting cables into transmission and distribution networks introduces challenges related to short-circuit currents (overcurrents), similar to conventional power cables. Ensuring the resistance of superconducting cables to overcurrents is critical for their reliable operation. However, the conditions under which overcurrents cause degradation in REBCO ( $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ) coated conductors used in superconducting cables remain unclear. This study simplified short-circuit testing for long superconducting cables by immersing REBCO coated conductors in liquid nitrogen. Subsequently, overcurrent characteristic tests were conducted under alternating current conditions. The results confirmed that REBCO coated conductors stacked with metal foil exhibit superior resistance to overcurrent. This is thought to occur because the presence of metal causes overcurrent to branch, suppressing heating in the superconducting layer. This research demonstrates a contribution to enhancing the safety and reliability of superconducting cable design.

### 1. はじめに

当社が過去 BASF 戸塚工場で実証試験を行った三相同軸超電導ケーブルは既設の CV ケーブル (Crosslinked polyethylene insulated PVC sheathed cable) と平行して敷設していた。導入当時のコンセプトは工場 CV ケーブルが既に敷設されており、落雷などによる過電流印加時には CV ケーブルに過電流の分流が起きることを想定して設計していた<sup>1,2)</sup>。しかしながら、お客様が新規に超電導ケーブルを導入する際には、CV ケーブルが敷設されていない箇所にも新設で超電導ケーブルのみを敷設する可能性もある。そのため、超電導ケーブル単体での過電流に耐えられる設計を行う必要がある。

超電導ケーブルに使用される REBCO 線材が発熱による不可逆的な劣化が生じる過電流の条件は不明瞭な点がある。また、長尺の超電導ケーブルを異なる条件にて複数回の過電流試験を実施することは、毎回超電導ケーブルを製

造する必要があり、多大なコストおよび労力が発生する。本研究では、REBCO 線材単体とケーブル形態に近づけたサンプルを液体窒素に浸漬し、交流通電における過電流試験を実施し、REBCO 線材の過電流による劣化特性を検討した。

### 2. 目的

長尺超電導ケーブルに対する短絡試験を簡略化して、REBCO 線材を液体窒素に浸漬し、交流過電流試験を実施し、分流の効果および冷却条件の影響を評価した。

供試材は REBCO 線材に種類、厚さを変更した金属箔を平行に重ねることで、過電流の分流が起きたことによる影響を確認した。また、REBCO 線材に絶縁紙の有無による冷却状況の違いを把握した。これらは過電流試験の前後で直流臨界電流 ( $I_c$ ) 特性の変化を見ることで、REBCO 線材の劣化特性を把握し、超電導ケーブルの設計における基

礎資料を提供する。

### 3. 実験方法

試験回路の概略図を図1に示す。交流電源から入力された電流は貫通型変圧器により40倍に増幅され、電磁誘導で供試回路に流れる。フレキシブルケーブルで組まれた閉回路には、同軸分流器と供試材が直列に接続し、貫通型電流プローブが途中に設置してある。同軸分流器と貫通型電流プローブにより、それぞれ回路に流れる電圧波形と電流波形が取得でき、いずれもデータアキュイジションに接続して記録をした。また、供試材の電圧端子を51 Hzに設定したデジタルロックインアンプにDCアンプを介して接続することで、供試材の電圧を読み取った。

使用したREBCO線材の概略図を図2に示す。REBCO線材はいずれも幅4.5 mmであり、基板と超電導層の周りに安定化層として、銀と銅のめっきが施されている線材Aと、線材Aの状態に対して超電導層側にさらに150 μm厚の真鍮をはんだで接続した線材Bを使用した。線材Aと線材Bを長さ約200 mm切り出して供試材とした。

実際の超電導ケーブルはREBCO線材の上下に絶縁紙が巻かれており、素線を液体窒素に浸漬させた状態とは大きく異なる。この冷却の差異による過電流試験への影響を確認するために、図3のような紙巻きサンプルを作製した。これは外径15 mm、内径12 mm、長さ300 mmのGFRP (Glass Fiber Reinforced Plastics)管にPPLP (Polypropylene laminated paper)を厚さ2 mm巻きし、長さ400 mmのREBCO線材をGFRP管の長手方向と平行に置き、さらにPPLPを厚さ2 mm巻いた。PPLPはクラフト紙にPP (Polypropylene)をラミネートした紙であり、超電導ケーブルの絶縁紙として用いられる。REBCO線材の長手方向中心位置における線材表面にはT型熱電対を設置した。さらに、線材Bにおける真鍮よりも電気抵抗の低い、銅による影響を確認するために、紙巻きサンプルにおけるREBCO線材の基板側に厚さ500 μm、幅4.5 mmの銅条1枚または2枚を平行に重ねたサンプルも作製した。

いずれの供試材もREBCO線材表面にリード線をはんだ付けし、電圧端子とした。供試材は発泡スチロール製のオープンバスに入れ、試験中は常に供試材は液体窒素に浸漬させた。試料と過電流の条件を表1に示す。

過電流試験は図4に示すようなフロー図で実施した。直流 $I_c$ 測定では供試材の電圧端子から直流四端子法にて、 $I-V$ 特性を取得した。この時の通電は、30 A/sec.で増加させた。臨界電流 ( $I_c$ : Critical Current) は電界基準1 μV/cmで定義した。これにより供試材の $I_c$ を決定する。

次に、電源電圧と通電電流の線形性を確認する。交流通電により印加電圧を0.1 ~ 1.0 Vまで0.1 Vずつ上昇させて回路上に流れている電流値である通電電流を算出した。これにより、電圧制御である交流電源で目標とする電流値(目標電流)を設定することができる。その後、交流における

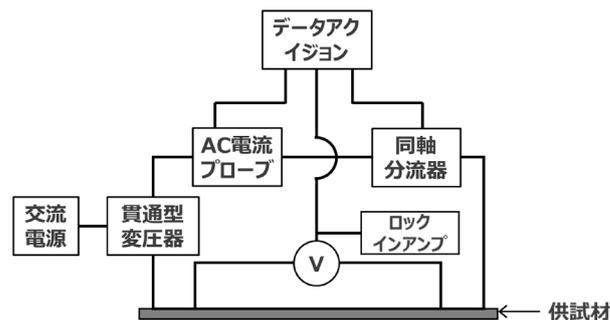


図1 交流通電時試験回路概略図

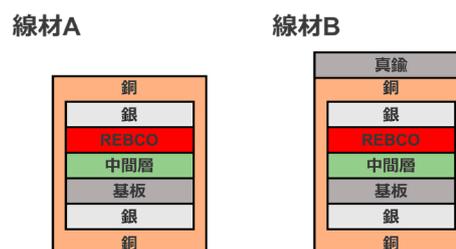


図2 REBCO線材の概略図

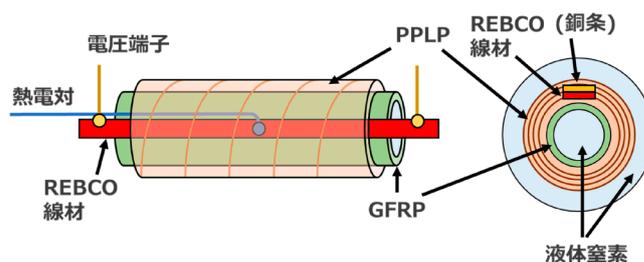


図3 紙巻きサンプルの模式図

表1 サンプル名と過電流条件

サンプル名	金属箔種類	印加時間 [s]
線材A_1.0s	なし	1.0
線材A_2.0s	なし	2.0
線材B_1.0s	真鍮150 μm	1.0
線材B_2.0s	真鍮150 μm	2.0
線材B 紙巻き_1.0s	真鍮150 μm	1.0
線材B 紙巻き_2.0s	真鍮150 μm	2.0
線材B 銅条1枚_1.0s	真鍮150 μm+銅500 μm	1.0
線材B 銅条2枚_1.0s	真鍮150 μm+銅500 μm×2	1.0

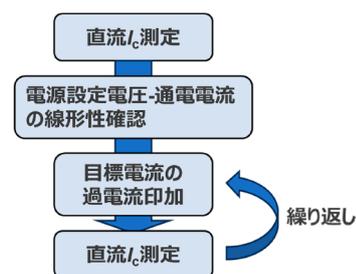


図4 過電流試験のフロー図

目標電流の過電流の印加を行う。過電流の印加中における電流波形、電圧波形はデータアキュイジションで取得した。再度、直流の  $I$ - $V$  特性から  $I_c$  を取得することで、過電流の印加前後で REBCO 線材の劣化を判断する。

#### 4. 結果考察

図5に各サンプルにおける最大通電電流を示す。ここで、最大通電電流とは各サンプルに通電した最大の過電流における印加直後、1, 2 sec. 後の通電電流を示す。この時、印加直後の通電電流は過電流印加直後の1周期目の波高値、1, 2 sec. の通電電流は過電流印加後それぞれ1, 2 sec. 後の波高値を示す。線材B 銅条2枚\_1.0sは通電電流3800 Aを印加した際に電源の限界を迎え、それ以上の電流を印加することができなかった。ここから、最大通電電流は線材A < 線材B < 線材B 紙巻き < 線材B 銅条であり、線材A\_1.0sと線材A\_2.0sのように過電流の印加時間が長い条件では最大通電電流が低下する傾向が確認できる。

図6に線材B 紙巻き\_1.0sの最大通電電流における電流波形、電圧波形を示す。(a) 電流波形からREBCO線材に流れた電流は印加直後では-906 Aだが、すぐに減衰し、1.0 sec. では-222 Aまで減少している。(b) 電圧波形から印加直後ではほとんどない電圧が、0.1 sec. 付近から急激に増加し、その後は横ばいに推移していることが分かる。

図7に線材B 銅条2枚\_1.0sの最大通電電流における電流波形、電圧波形を示す。(a) 電流波形からREBCO線材に流れた電流は印加直後では-3842 Aだが、徐々に減衰し、1.0 sec. では-1478 Aまで減少している。(b) 電圧波形では印加直後から1.0 sec. まで電圧が徐々に増加していることが分かる。

ここで、過電流印加中の電流の動きとしては、通電電流がREBCO線材の  $I_c$  を超えたことで、超過した電流はREBCO線材の周りにある金属に分流したと考えられる。また、いずれのサンプルでも時間変化により通電電流が低下し、電圧が増加していることから、分流した電流により、金属が加熱されて抵抗値が上昇したと考えられる。

図6, 7の結果から抵抗値を算出すると、線材B 紙巻き\_1.0sの最大通電電流における抵抗値は印加直後では3.7 m $\Omega$ 、1.0 sec. では46 m $\Omega$ となる。線材B 銅条2枚\_1.0sの最大通電電流における抵抗値は印加直後では0.22 m $\Omega$ 、1.0 sec. では3.4 m $\Omega$ となる。これらの結果から線材B 銅条2枚\_1.0sは線材B 紙巻き\_1.0sより抵抗値が1/10以下となっている。また、図6に示した線材B 紙巻き\_1.0sの最大通電電流を印加後の  $I_c$  は0 Aであり、REBCO線材表面が全体的に変色していた。対して線材B 銅条2枚\_1.0sの  $I_c$  は最大通電電流を印加後も過電流試験前と同等であり、超電導特性の劣化が見られなかった。これは、線材Bにおける真鍮と追加した銅条二枚による影響だと考えられる。77 Kにおける電気抵抗率は銅が  $1.82 \times 10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$ 、真鍮が  $2.50 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$ <sup>3)</sup> であることから、両材料が平行

と同じ長さ存在すると、過電流は抵抗が低い銅条に多く流れたと考えられる。そのため、銅条を追加したことで非常に高い過電流まで印加することができた。同様に線材Aは線材Bと異なり、真鍮が存在しないことから最大通電電流が線材Bよりも低くなったと考えられる。

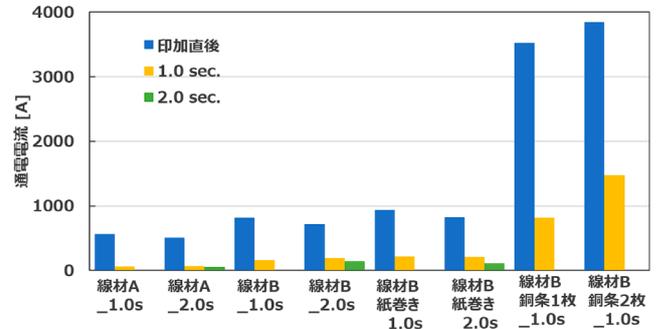


図5 各サンプルにおける最大通電電流

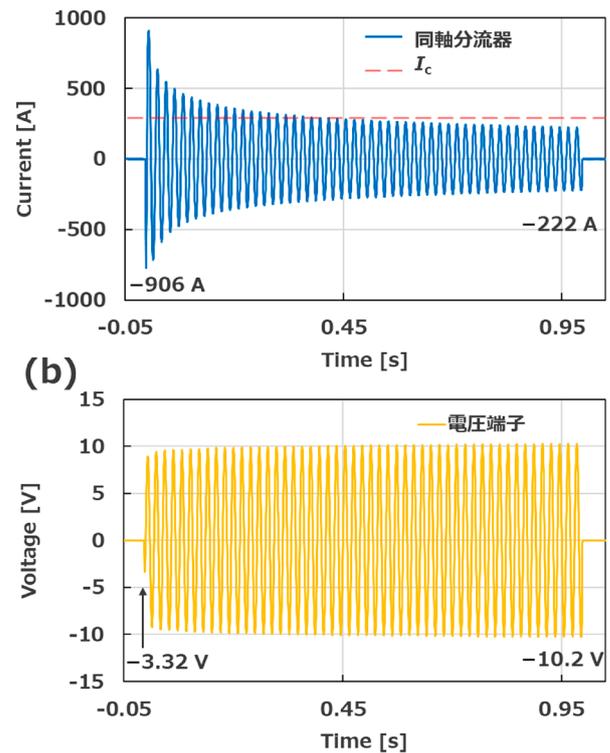


図6 線材B 紙巻き\_1.0sの最大通電電流における (a) 電流波形 (b) 電圧波形

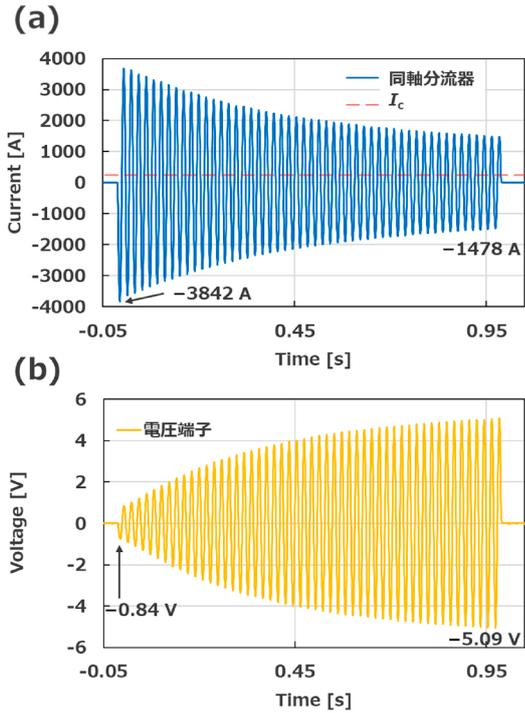


図7 線材 B 銅条 2 枚 \_1.0s の最大通電電流における (a) 電流波形 (b) 電圧波形

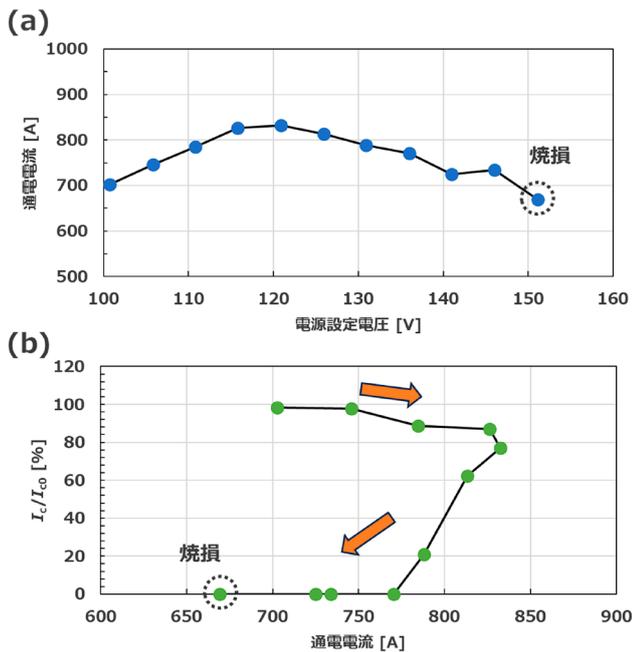


図8 (a) 線材 B\_1.0s の電源電圧と通電電流の変化 (b) 線材 B\_1.0s の通電電流に対する  $I_c/I_{c0}$  の変化



図9 最大通電電流通電をした線材 B 紙巻き \_1.0s サンプルの解体写真

図8に線材 B\_1.0s における電源電圧と通電電流の変化と線材 B\_1.0s の通電電流に対する  $I_c/I_{c0}$  の変化を示す。図8 (a) から過電流印加の際に設定した電源電圧を上昇していくと、通電電流は上昇していくが、ある値から減少する。これは過電流を REBCO 線材に印加したことで REBCO 線材が加熱されて、超電導層の酸素が脱離していくことにより、 $I_c$  が低下したためだと考えられる。REBCO 線材の  $I_c$  が低下すると電源電圧を上昇させても十分な通電電流が流れず、このような挙動を示した。

図8 (b) における  $I_{c0}$  は過電流試験前の  $I_c$  であり、 $I_c/I_{c0}$  は過電流試験により、どの程度超電導特性が低下したかの指標となる。図8 (b) から目標電流の増加に伴い、ある点から急激に  $I_c/I_{c0}$  が低下していくのが確認できる。この点は図8 (a) の通電電流が低下する点と一致した。また、 $I_c/I_{c0}$  が0になってからも、通電は可能であり、電源電圧を増加していくと最終的には REBCO 線材の溶断に至り、通電が不可能になった。 $I_c/I_{c0}$  が0になったのは REBCO 線材の超電導が完全に破壊されたことを示し、その後は線材 B の基板と真鍮に電流が流れていると考えられる。

図9に最大通電電流まで通電した後の線材 B 紙巻き \_1.0s を解体した写真を示す。REBCO 線材の上下の PPLP が焦げており、PPLP 内における PP が上下 3 枚まで熔融していた。PP の融点は約  $160^{\circ}\text{C}$ 、REBCO 線材の熱による超電導層の酸素が脱離の発生が約  $200^{\circ}\text{C}$ 、REBCO 線材の基板の融点が約  $1400^{\circ}\text{C}$  となっている。ここから、目標電流の増加に伴い、PPLP の PP 熔融 < REBCO 線材  $I_c$  の低下 < REBCO 線材溶断となると考えられる。そのため、過電流試験により REBCO 線材の超電導特性劣化よりも前に PPLP の PP が熔融している。超電導ケーブルとしての絶縁性能を考えると、PPLP が安定的に使用できる温度内に留める必要があり、PPLP の存在が過電流に対して不利に働く。ここで、図5では線材 B 紙巻き \_1.0s は線材 B \_1.0s より最大通電電流が高い。これは過電流試験時に発熱した REBCO 線材の冷却効率の差異によるものだと考えられる。液体窒素下で発熱した REBCO 線材の周囲は気体窒素で覆われる膜沸騰の状態になると考えられる。この時、冷媒となる液体窒素の供給が止まることから、REBCO 線材の熱を十分に取り除くことが出来ない。しかし、PPLP があることにより、PPLP の細孔内に液体窒素が含浸されて、冷媒の供給が行われやすい状態になっていると考えられる。結果的に REBCO 線材に PPLP を巻き付けることで、最大通電電流が高くなる。そのため、超電導

ケーブルとしては絶縁紙の絶縁能力だけでなく、耐熱性能と冷却効率の両立が求められる。

## 5. 結 論

長尺超電導ケーブルに対する短絡試験を簡略化して、REBCO 線材の交流通電における過電流試験を実施した。その結果、電気抵抗の低い金属を REBCO 線材と平行に設置することで、過電流試験に対して優位に働くことが確認できた。また、通電電流の増加により、 $I_c$  特性が急激に低下することを確認し、PPLP の溶融や焦げが発生する傾向を発見できた。ここから、過電流に耐えることができる超電導ケーブルの設計には十分な量の金属の存在が必要であり、冷却効率と絶縁材料の耐熱性能の両立が求められることが示唆された。今後は、超電導ケーブルとしての過電流に対する耐久性の定量的な閾値を精査していく。

## 参 考 文 献

- 1) 北村祐, 他: 昭和電線レビュー, Vol.63, No.1, p.18 (2017).
- 2) 足立和久, 他: 昭和電線レビュー, Vol.66, No.1, p.10 (2020).
- 3) “分散型熱物性データベース”, <https://tpds.db.aist.go.jp/index.html>, (accessed Oct. 2025).

SWCC (株)

竹村 賢人 (たけむら けんと)  
新領域開発センター 超電導システムグループ  
博士 (工学)  
超電導ケーブルシステムの研究・開発に従事

SWCC (株)

中西 達尚 (なかにし たつひさ)  
新領域開発センター 超電導システムグループ  
超電導ケーブルシステムの研究・開発に従事

SWCC (株)

足立 和久 (あだち かずひさ)  
新領域開発センター 超電導システムグループ  
グループ長 博士 (工学)  
超電導ケーブルシステムの研究・開発に従事

SWCC (株)

塩原 敬 (しおはら けい)  
新領域開発センター 超電導システムグループ  
博士 (工学)  
超電導ケーブルシステムの研究・開発に従事

SWCC (株)

三堂 信博 (みどう のぶひろ)  
新領域開発センター 超電導システムグループ  
超電導ケーブルシステムの研究・開発に従事

SWCC (株)

青木 裕治 (あおき ゆうじ)  
新領域開発センター 超電導システムグループ  
超電導ケーブルシステムの研究・開発に従事