

# 超電導き電ケーブルの電気特性評価

福本 祐介\* 赤坂 友幸\* 荒井 有気\*\* 富田 優\*\*\*

## Evaluation of Electrical Characteristics of Superconducting Feeder Cables

Yusuke FUKUMOTO Tomoyuki AKASAKA Yuuki ARAI Masaru TOMITA

DC electric railway systems are widely used in Japan. However, they have some problems, such as voltage drops, limited use of regenerative brakes and energy transmission losses. We have been developing superconducting feeder cables for DC feeder systems as a next-generation railway system without transmission losses solving these problems. In order to apply this to railway systems, it is necessary to develop the method of connecting a superconducting feeder cable to a feeder circuit, and to meet the required specifications from railway systems. In this paper, we introduce R&D for the application of superconducting feeder systems to commercial lines.

キーワード：超電導き電システム，電圧降下，省エネ，回生エネルギー，送電損失

### 1. はじめに

直流電気鉄道では、数 MW の運転電力を 3000V, 1500V, 750V, 600V といった電圧で電送するため、電流は数千 A と大きく、都市圏の過密線区では特にその傾向が顕著である。そのため、き電回路を構成するき電線（銅やアルミ）や帰線（レール）などの電気抵抗に起因する電圧降下や、これに伴う送電損失が発生するなどの課題がある。特に架線電圧の降下が大い場合は安定運行の妨げになるため、これを確保するために狭い間隔で変電所が設置されている。これら課題の解決に向け、電気抵抗ゼロで送電が可能な超電導き電システムの開発に取り組んでいる<sup>1)</sup>。

超電導き電システムは、液体窒素温度で動作する高温超電導材料とこれを冷却する冷媒流路を一本のケーブルとして構成した超電導き電ケーブルと、冷媒である液体窒素の循環ポンプと冷凍機などで構成した冷却設備で構成される（図 1）。超電導き電ケーブルを図 2 のように変電所から鉄道路線沿いに敷設し従来のき電線と接続した場合、ほとんどの電流が電気抵抗ゼロである超電導き電ケーブルに流れることから、変電所の送り出し電圧を維持し、接続点を疑似的な変電所と見なすことができる。これにより架線電圧の変動を抑制し、安定運行に寄与する。また、き電回路の長さが見かけ上短くなることから、その分だけ送電損失を低減できるとともに、近接車両との電氣的距離が短くなるため、回生電力の融通を効率よく行うことができるといった省エネルギー効果も期待できる。さらに、導入を進めることで変電所の集約化や、

変電所新設の代替手段としても期待されている。

鉄道は、人々の移動手段や貨物の輸送手段として日常的に利用される公共交通機関であることから、高い安全性、信頼性が求められる。そのため、鉄道システムに組み込まれる設備、機器は各鉄道事業者が規定する実施基準、性能を満足する必要がある。また、何らかの故障が

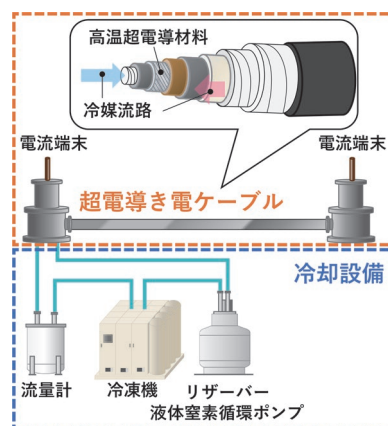


図 1 超電導き電システムの構成

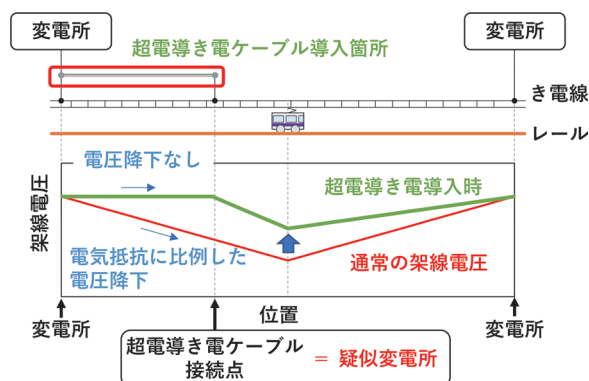


図 2 超電導き電ケーブルによる架線電圧の安定化

\* 浮上式鉄道技術研究部 超電導・低温研究室  
 \*\* 浮上式鉄道技術研究部 電磁気研究室  
 \*\*\* 浮上式鉄道技術研究部

生じた場合には、その影響範囲を限定的とするための処置が講じられている。超電導き電システムもまた、鉄道システムに適用するためには、異常時に設備を保護するための保護回路を構築するとともに、鉄道システムからの要求仕様を満足し、鉄道の故障に耐える性能を有する必要がある。本報告では、高密度線区における実使用を想定して開発した400m級の超電導き電システム<sup>2)</sup>を対象に、鉄道システムへの導入に向け、超電導き電システムの保護回路と鉄道システムからの要求仕様並びに鉄道における過電圧や過電流を想定した試験について報告する。

## 2. 超電導き電システムの保護回路

直流電気鉄道の基本的なき電回路の例を図3に示す。整流器用変圧器により降圧された交流1200Vをシリコン整流器により直流1500Vへ変換し、直流母線と接続されている。直流母線には各方面へ電気を送る回線が並列に接続され、回線ごとにき電回路を保護するための設備が組み込まれている。特に保護継電器は、異常や故障が発生した場合に電圧や電流などの異常状態を検出し、その部分を速やかに系統から切り離す指令を出す役割を担う装置で、短絡選択継電器や地絡過電圧継電器などがある。短絡選択継電器は、直流変流器により変換された計測用電流の時間変化を監視することでき電回路の短絡故障を検出し、地絡

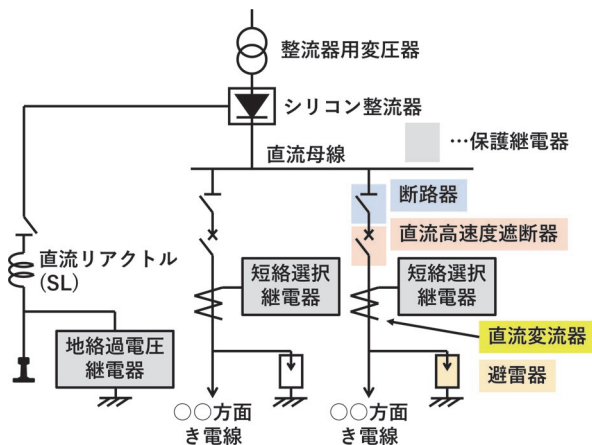


図3 き電回路の一例

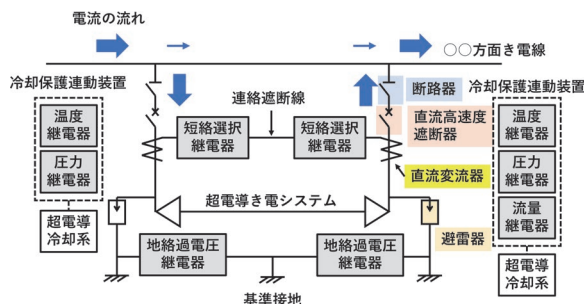


図4 400m級超電導き電システムの保護回路

過電圧継電器は、レール電位と変電所の接地電位を比較することで、変電所の構内における地絡故障を検出する。これら保護継電器により異常を検出した場合は、直流高速度遮断器へ信号を送りき電回路を開放することで、設備や電車を保護する。

超電導き電システムを鉄道システムへ適用する場合も、同様の保護回路が必要となる。例として、実証試験に向けて構築した400m級超電導き電システムの保護回路を図4に示す。既設のき電線と並列に超電導き電システムを接続しており、通常時には電気抵抗ゼロの超電導き電システム側にはほとんどの電流が流れる。超電導き電システム内で故障が発生した場合は速やかに切り離すこと、および既設き電線側の短絡故障時の過電流から超電導き電システムを保護することを目的としている。図3で示した設備とほぼ同じ構成であるが、通常の地絡故障検出がレールと変電所の接地との電位差を監視し検出するのに対し、400m級超電導き電システムは近くに本線レールがないため基準接地を設け、それと両端に設けた接地の電位差を監視した。このほか特有の保護として、冷却保護運動装置を開発した。超電導き電ケーブルを冷却する冷媒の温度、圧力、流量といったパラメーターの正常範囲を設定し、それから逸脱した場合には直流高速度遮断器を開放する。また、片側の保護回路が動作した際には、完全に本線と切り離すため逆側の直流高速度遮断器も開放する連絡遮断を設けて構成した。これら保護回路の構築後は、鉄道事業者のしゅん功検査に準じた内容の確認試験を実施し、機能の正常動作を確認した。

## 3. 鉄道システムからの要求仕様

鉄道システムを構成する各機器は、所要の性能を持っていることが必要である。例えば、電力ケーブルでは、導体抵抗、絶縁抵抗、耐電圧などの項目があり、確認試験の方法までが仕様書に定められている。しかし、超電導き電システムは新しい技術であるため、鉄道へ導入するためにどのような項目に対してどのような性能が必要であるか整理されていない。そこで既存設備の仕様を参考に、仕様書に規定すべき項目、性能について検討を行っ

表1 超電導き電システムの仕様書に規定すべき項目

○ 送電ケーブルに関する項目
電圧降下*, 臨界電流値*
雷インパルス耐電圧*, 耐電圧*, 絶縁抵抗*
断熱管防食層: 常温(引張強さ, 伸び),
耐加熱性(引張強さ, 伸び), 耐加熱変形性
○ 冷却に関する項目
圧力範囲, 液体窒素流量, 温度範囲

\*超電導状態(77.3K)における仕様

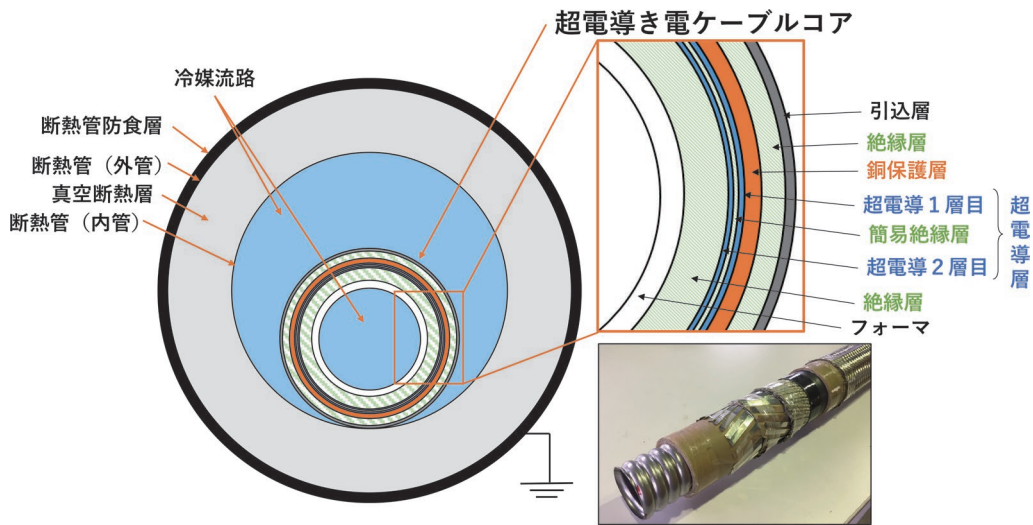


図5 超電導き電ケーブルの構造図

た。整理した項目を表1に示す。通常のケーブルであれば通電性能として電気抵抗が規定されるが、超電導状態では電気抵抗がないため、通電性能を示す代わりの項目として、超電導状態における電圧降下と臨界電流値について規定した。断熱管防食層の項目は、超電導き電ケーブル内で絶縁破壊が生じ断熱管が課電された場合、人体が接触し感電する可能性があることから、通常のケーブルに絶縁として使用されているポリエチレンなどと同等の項目とした。また、超電導状態で送電するためには冷却が必要になることから、冷却に関する項目として冷媒の圧力、温度、流量について規定した。これらの項目については、既存のJIS規格などがあるものはそれを適用し、JIS規格のない一部の試験については、高压ガス保安法ならびに一般高压ガス保安規則関係例示基準を適用した確認試験を実施し、すべての項目について、その性能を有することを示した。

### 3.1 400m級超電導き電ケーブルの通電性能

400m級超電導き電ケーブルの構造を図5に示す。超電導き電ケーブルコアは、フォームにSUSコルゲート管を用い、その外周に絶縁層（半合成紙）と超電導層（高温超電導線材）、銅保護層（銅編素線）を巻き付け、冷却のため真空断熱層を有する断熱管に内包する構造である。常規電流を通電するのは超電導層であり、短絡電流などの故障電流から超電導層を保護する目的で、銅保護層を設けている。

常規電流の通電を担う超電導層は、路線状況に合わせた電流容量とする必要がある。高温超電導材料は電気抵抗ゼロで流せる電流容量が決まっており（臨界電流値）、その基準として電界基準  $1\mu\text{V}/\text{cm}$  が定められている。都市圏路線の導入に必要な電流容量から臨界電流値は8000A以上として設計・製作した。現在の超電導線材1

本あたりの臨界電流値が180A程度であることから、超電導層を2層構造とし、1層目に22本、2層目に23本の超電導線材を巻線した。なお通電評価に向け、層間には簡易絶縁を設けている。

製作した超電導き電ケーブル切り取ったテストピースに対して、JIS H 7305<sup>3)</sup>を準用した下記手順による通電試験を実施した。

- (1) テストピースに電流導入端子と電圧タップを取り付ける。
- (2) 電流導入端子を直流電源に接続する。
- (3) テストピースを液体窒素容器（解放容器）に入れ、大気圧液体窒素（77.3K）を充填する。
- (4) テストピースが十分に冷却されたことを確認し、通電を開始する。
- (5) 電圧タップ間の電圧が電界基準  $1\mu\text{V}/\text{cm}$  を超えたら通電を止め、電界基準時の電流値を臨界電流値とする。

図6に2層同時通電時の結果と、参考として各層毎の通電試験結果を示す。各層の臨界電流値の和は9315A、2層同時通電時の臨界電流値は8740Aであり、設計値である8000Aを越える臨界電流値を確認した。双方の

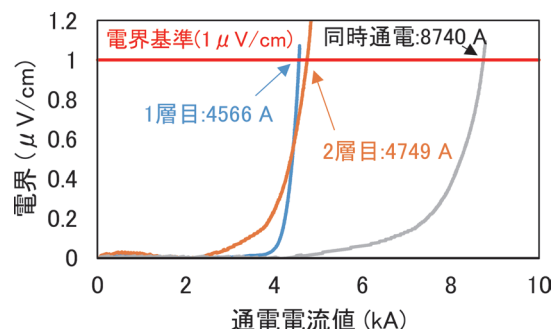


図6 通電試験結果（77.3K）

差については、2層同時通電時には構成する超電導線材に印加される磁場が大きくなることや、各層の電極と超電導層の接続抵抗の差が影響していると考えられる。

一方、営業設備への導入を想定した場合、長期間にわたって大きな負荷電流が通電し続けられることになる。そこで、400m級超電導き電システムに負荷電流を模擬した直流電源を接続し、1ヶ月程度の連続通電試験を実施した。試験回路を図7に示す。片側の末端では、簡易絶縁層を挟んで2層構造となっている超電導層のそれぞれに対し引き出し線（電流リード）を取り付け、もう片側の末端において1層目と2層目を1つの電極で短絡することで、電流は1層目を通り逆側で2層目へ移って戻る回路を構成した。これにより、1本の超電導き電ケーブルに対して、直流電源出力の2倍の電流に相当する熱的・機械的なストレスを与えた。今回の試験では、5000A相当の電流値を通電（直流電源出力で2500A）した。1ヶ月にわたる通電波形及び電流リード間電圧の測定結果を図8に示す。通電電流値は一定とし、電流リードの抵抗により0.08V程度の抵抗が発生しているが安定しており、継続的な通電による電気抵抗の上昇等はなく、連続的な負荷電流に対しても正常であることを確認した。

### 3.2 400m級超電導き電ケーブルの耐電圧性能

超電導き電ケーブルを鉄道システムへ適用するために

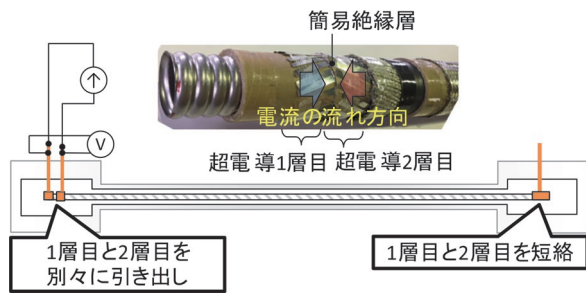


図7 連続通電試験の電気回路

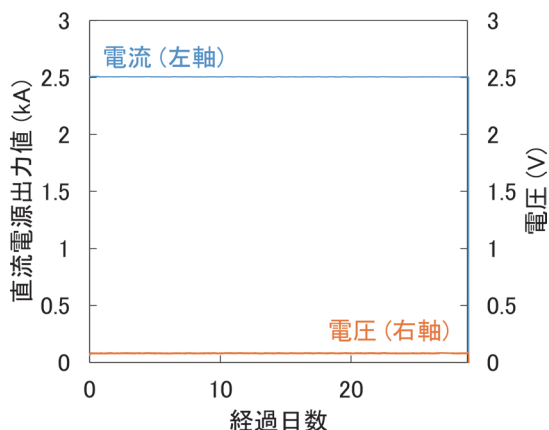


図8 直流電源の出力値および電流リード間電圧

は、既存の1.5kV電力ケーブルと同等の耐電圧性能として、周波数耐電圧5.5kV、インパルス耐電圧20kVを満足する必要がある。周波数耐電圧に対しては部分放電フリー、インパルス耐電圧に対しては破壊しない設計とした場合、使用している絶縁紙の性能（部分放電フリーに対する設計ストレス22kV/mm<sup>4)</sup>、インパルス電圧に対する設計ストレス83kV/mm<sup>5)</sup>）から、必要な絶縁厚は0.3mm以下となり、これは絶縁紙3枚分の厚みとなる。これに対し、絶縁層は巻線工程における平滑層としての役割や、冷媒の往路と復路の熱交換を妨げる熱絶縁としての役割を担うことから、内側の絶縁層（フォーマと超電導層間）で4mm、外側の絶縁層（超電導層と引込層間）で2mmの厚さとしているため、鉄道の要求仕様に対して十分な耐電圧性能を有していることになる。システム組み立て後には実際に耐電圧試験を実施し、異常のないことを確認した。

## 4. 過電圧や過電流への対応

超電導き電ケーブルを直流電気鉄道へ適用した際には、雷などによる過電圧や短絡故障などによる過電流が印加される可能性がある。日常的に生じるこれらの現象により絶縁破壊や焼損、性能低下が生じてはならないため、絶縁や銅材による保護を設計している。しかしながら、実際に超電導き電ケーブルを用いた確認試験はこれまでに実施されていないため、400m級超電導き電システムから切り出した短尺サンプルを製作し、雷インパルス耐電圧試験および短絡電流通電試験を実施した。

### 4.1 雷インパルス耐電圧試験

電力設備や車両の高圧機器は、常規使用電圧に耐えることはもちろんであるが、ある程度のサージ電圧にも耐える必要がある。電気鉄道における過電圧は、雷によるもの（雷サージ電圧）のほか、スイッチ開閉時の過渡的な過電圧（開閉サージ電圧）などがあり、それらに対して機器の耐電圧性能や避雷器の設置など絶縁協調が図られている<sup>6)</sup>。超電導き電システムは変電所同等の絶縁協調と見なし、インパルス耐電圧20kVを目標とし、試験を実施した。

試験回路を図9に示す。直線状のテストピースに対して、液体窒素浸漬冷却下において導体層（超電導層と銅保護層）と金属遮へい層との間に、インパルス発生器により20kVの雷インパルス耐電圧を印加し、これに耐えるかどうか調べた。なお、JIS C 3005<sup>7)</sup>を適用し、波形の裕度は、波頭長において0.5μs以上5μs以下、波尾長において40μs以上60μs以下の範囲を許容するものとした。また、特に規定がない限り導体側を負極性とし、電圧印加回数を3回とした。

試験結果を表2に、インパルス波形を図10に示す。すべての印加電圧は20kV以上で規定範囲内の波形で

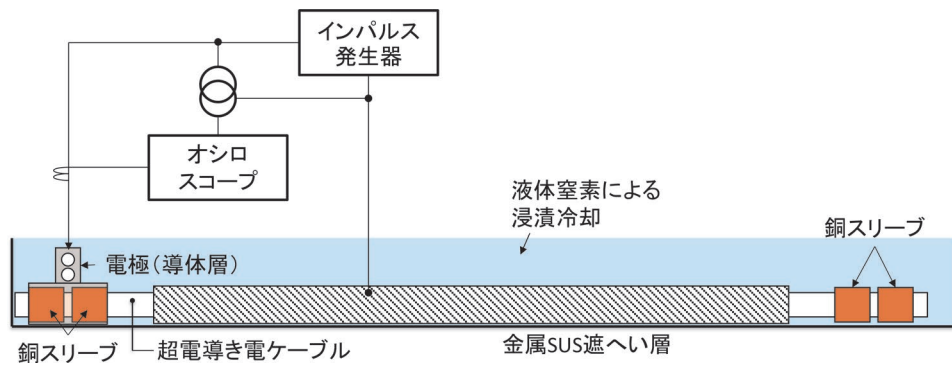


図9 雷インパルス耐電圧試験回路

表2 雷インパルス耐電圧試験結果

試験番号	充電電圧 (kV)	印加電圧 (kV)	波頭長 (μs)	波尾長 (μs)	試験結果
1-1	-22.0	-20.1	1.7	54.9	良
1-2	-22.0	-20.3	1.8	54.7	良
1-3	-22.0	-20.3	1.7	54.3	良

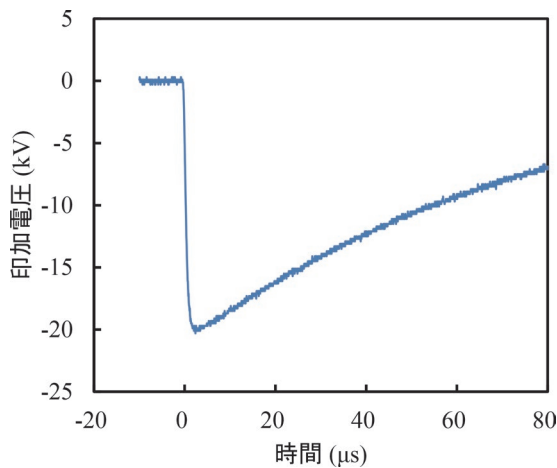


図10 インパルス波形

あった。印加後に絶縁破壊が確認されなかったことから、十分な耐電圧性能を有することを確認した。

#### 4.2 短絡電流通電試験

超電導き電システムと既設設備との接続には保護のため直流高速度遮断器を介する。遮断器の性能上、直流遮断の限度は推定短絡電流：50kA、実遮断電流：25kA、突進率： $3 \times 10^6$ A/sと定められている。よって、実遮断電流25kA以上で超電導および絶縁の性能を維持することを目標とし、超電導き電ケーブルの短絡電流通電試験を実施した。

短絡電流通電試験回路を図11に示す。整流器で直流1500Vに整流した電力を、抵抗および空芯リアクトルを介して液体窒素により浸漬した超電導き電ケーブルに

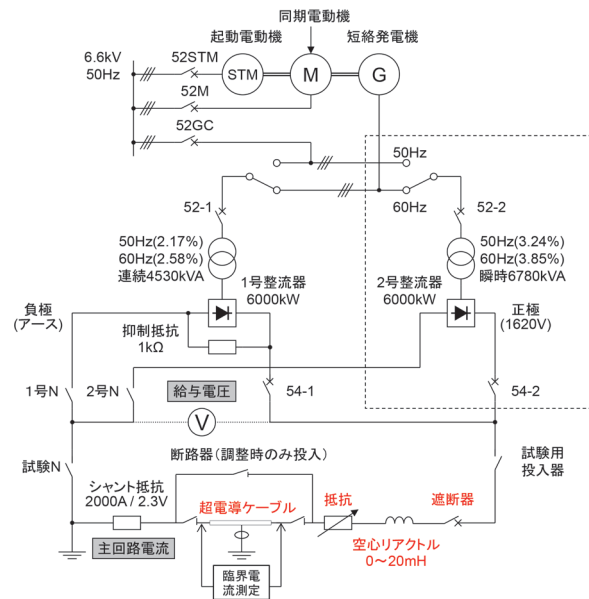


図11 短絡電流通電試験回路

表3 短絡電流通電試験条件

試番	推定短絡電流値 (目標)	リアクトル (L)	備考
1	10 kA	あり	—
2	20 kA	あり	—
4	30 kA	あり	—
3	30 kA	なし	高突進率

通電した。抵抗 $R$ とリアクトル $L$ を調整し、推定短絡電流値および突進率を調整した。なお、短絡電流は直流高速度遮断器により遮断した。

表3に試験条件を示す。短絡電流通電中は、実通電電流値を測定し、短絡電流通電後に超電導き電ケーブルの絶縁抵抗測定(メガーチェック)および臨界電流測定を実施した。なお、推定短絡電流値は30kAを上限とし、段階的に調整した。

通電した短絡電流の波形を図12に示す。超電導き電

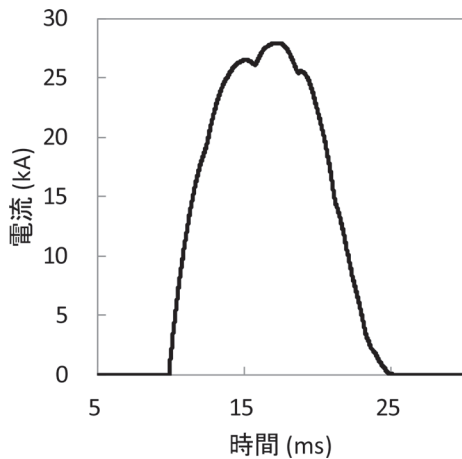


図 12 短絡電流波形（試番 4）

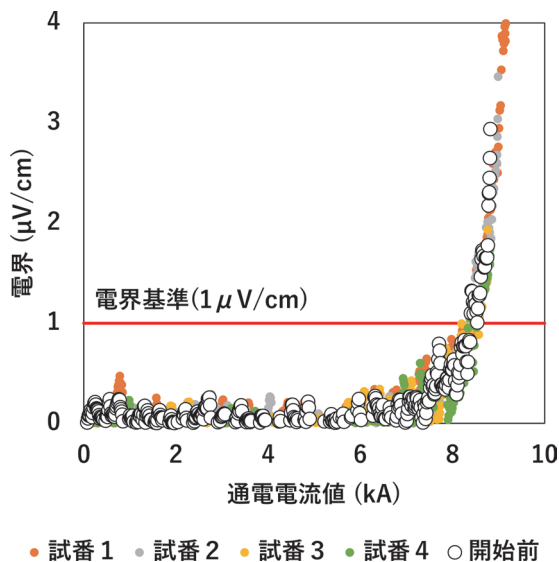


図 13 短絡電流印加前後の電流－電圧特性

ケーブルに通電された最大電流値は 27.94kA、最大突進率は  $11.5 \times 10^6 \text{A/s}$  であった。短絡電流通電前後で超電導き電ケーブルの絶縁抵抗および臨界電流値に変化がない（図 13）ことから、短絡電流通電による発熱、およびそれに伴う電磁力による性能の低下はないといえる。

## 5. まとめ

超電導き電ケーブルは、従来の電気抵抗に起因する課題を解決できる技術として期待されているが、これまで

にない新しい技術であるため、その特性が鉄道システムへ適合することを示す必要がある。本報告では実用化に向けた取り組みの一例として、超電導き電ケーブルの電気特性について検討、評価試験を実施し、以下の知見を得た。

- (1) 鉄道システムへの接続に必要な超電導き電システムの保護回路について、従来の保護継電器などを用いて構築し、正常に動作することを確認した。
- (2) 超電導き電ケーブルに必要な仕様について整理し、確認試験により電気的性能を満たすことを確認した。また、営業運転を想定し、直流電源による 5kA 相当の通電試験を約 1ヶ月間、連続的に実施し、連続運転に対する安定性を確認した。
- (3) インパルスによる過電圧や短絡故障による過電流を想定した試験を実施し、絶縁抵抗や超電導特性の低下がなかったことから、想定される異常状態に耐えられる見通しを得た。

なお、保護や仕様の考え方は鉄道事業者により異なるため、導入箇所に応じて検討する必要がある。様々な状況に対応できるよう、今後も技術開発を進める。

本研究の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

## 文 献

- 1) Masaru Tomita, et al., "Energy-saving railway systems based on superconducting power transmission," Energy, 122, pp.579-587, 2017.
- 2) 鉄道総合技術研究所：超電導き電システムの電気鉄道（直流 1500V）への適用試験を実施しました, News Release 2019年 8月 6日
- 3) JIS H 7305 : 2010 : 超電導—臨界電流の試験方法— 銀シースビスマス 2212 及びビスマス 2223 酸化物超電導線の直流臨界電流
- 4) M. Yagi, et al., "Design and Evaluation of 275 kV - 3 kA HTS Power cable," Physics Procedia, Vol.45, pp.277-280, 2013.
- 5) 露木和彦, 他：超電導直流ケーブルの電気絶縁に関する研究, 低温工学, 35 巻 7号, pp.350-356, 2000
- 6) 電気鉄道ハンドブック編集委員会：電気鉄道ハンドブック, コロナ社, p.568, 2007
- 7) JIS C 3005 : 2014 : ゴム・プラスチック絶縁電線試験方法