

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

超電導き電システムを利用して 鉄道に電力を供給する

電気抵抗ゼロで送電できる超電導き電ケーブルを鉄道き電線へ適用することを想定し、高温超電導線材のケーブル化技術や冷却技術などの開発を進めています。しかし、実際に鉄道システムへ適用するには、鉄道の安定輸送を確保するため、超電導き電システムを導入した際のき電回路のあり方や、鉄道システムからの要求仕様などの検討が必要になります。ここでは、超電導き電システムの営業線への導入に向けた技術開発に対する取り組みについて紹介します。

はじめに

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ため、高い安全性、信頼性が求められます。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ります。また、何らかの故障が生じた場合には、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ます。

鉄道総研では、新たなき電線として、

超電導き電ケーブルの開発を進めていますが、これを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ります。ここでは、鉄道システムへの導入に向けた、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ならびに鉄道の故障を想定した試験について紹介します。



福本 祐介
Yusuke Fukumoto
材料技術研究部
超電導応用研究室
主任研究員



小林 祐介
Yusuke Kobayashi
材料技術研究部
超電導応用研究室
研究員



荒井 有気
Yuuki Arai
材料技術研究部
超電導応用研究室
副主任研究員



富田 優
Masaru Tomita
材料技術研究部
超電導応用研究室長

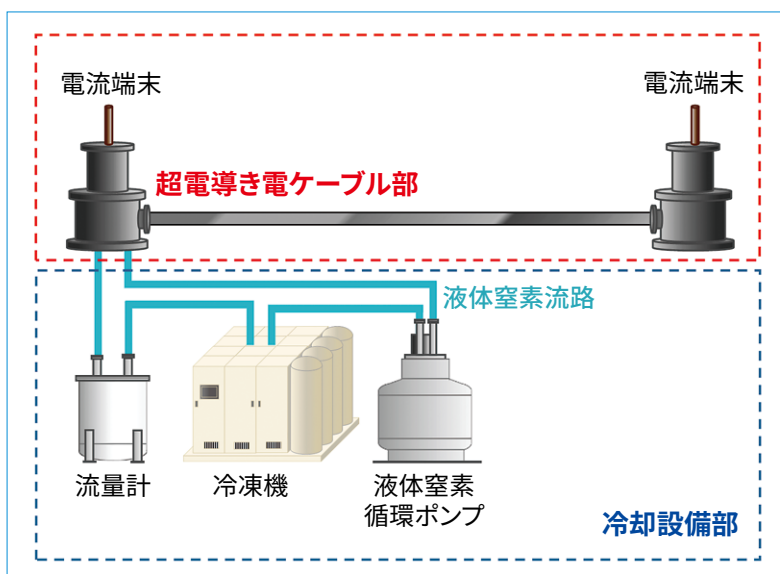


図1 超電導き電システムの基本構成

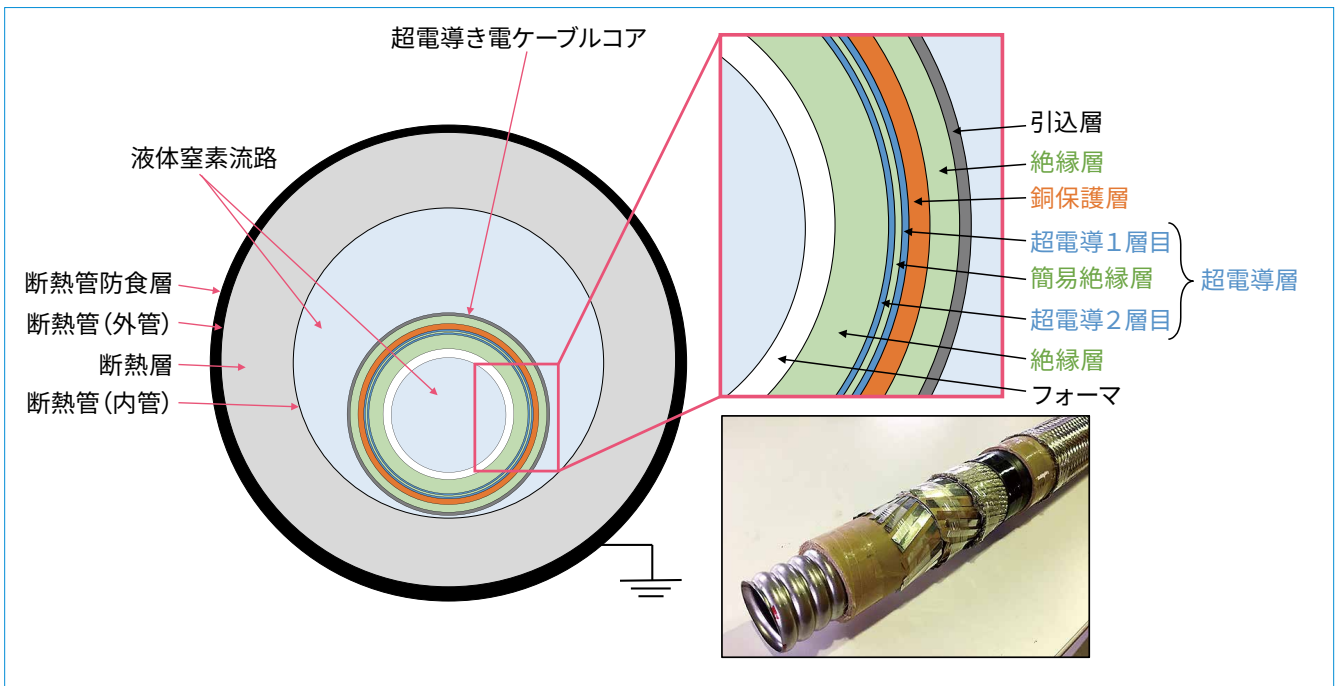


図2 超電導き電ケーブル部の構造図

超電導き電システムの保護回路

超電導き電システムの基本構成を図1に示します。超電導き電システムは送電を目的とした超電導き電ケーブル部と、その冷却を目的とした冷却設備部から構成されています。超電導き電ケーブル部の構造図を図2に示します。超電導き電ケーブルコアは断熱管の中に収納し、通常時に電気を送る超電導層と、故障時に電流を分流する銅保護層、高電圧の電気を絶縁する絶縁層を有しています。冷媒として液体窒素を使用し、ケーブルコアのフォーム内、およびケーブルコアと断熱管の間を流路としています。液体窒素は冷凍機で冷却され、液体窒素循環ポンプで圧送、循環することで超電導き電ケーブルを冷却します。

図3に直流電気鉄道の基本的なき電設備の例を示します。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、直流母線には各方面へ電気を送る回線が並列に接続されています。さらに回線ごとにき電回路を保護するため

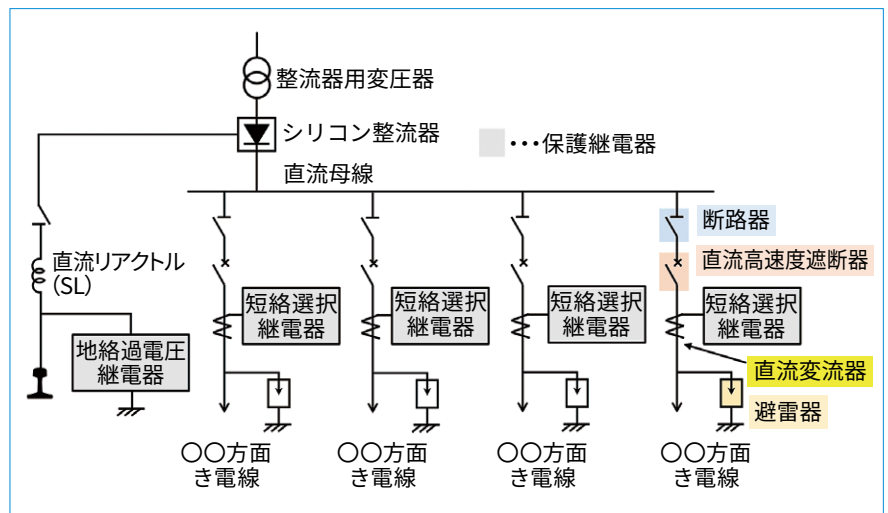


図3 き電設備の一例

の設備が組み込まれています。

断路器は、き電回路の直流母線との接続、切り離しを行う役割もっています。直流高速遮断器はき電回路の開閉、およびき電回路の短絡故障電流を遮断する役割もっています。直流変流器は直流負荷電流を計測するもので、保護継電器に適した電流に変換する役割もっています。

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、地絡過電圧継電器などがあります。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ます。地絡過電圧継電器は、レール電位と変電所の接地電位を比較することで、変電所構

内における地絡故障（☞参照）を検出します。これら保護継電器により異常が検出された場合は、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、き電設備や電車を保護します。

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ります。例として、実証試験のために日野土木実験所に敷設した400m級超電導き電システム¹⁾の保護回路を図4に示します。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ほとんどの電

流が流れます。超電導き電システム内で故障が発生した場合に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ます。

図3に示した設備とほぼ同じ構成ですが、通常的地絡故障検出がレールと変電所内の接地との電位差を監視し検出するのに対し、日野土木実験所構内には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ました。このほか、超電導き電システム特有の保護として、冷却保護連動装置を開発しました。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直流高速度遮断器を開放するようにし、また、片側の保護回路が働いた際には、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、連絡遮断線を設けて構成しました。これら保護回路の構築後には、鉄道事業者のしゅん功検査に準じた内容の確認

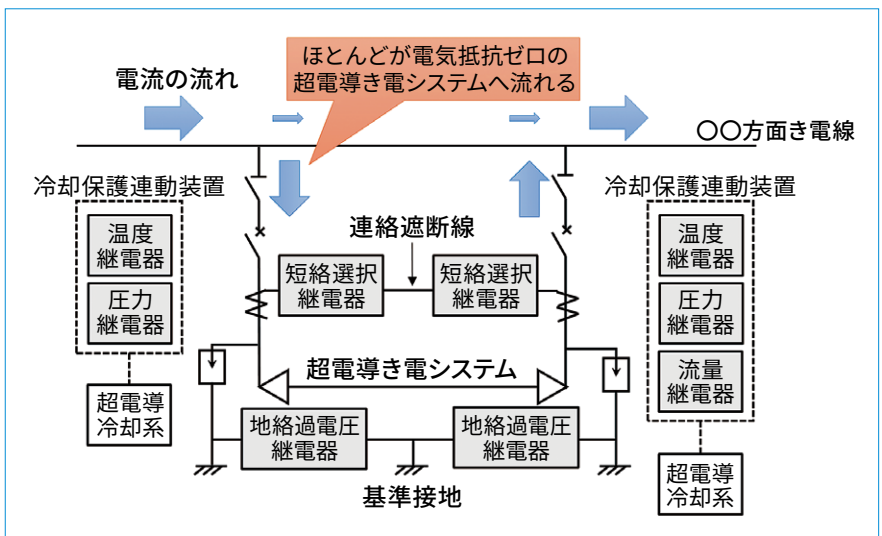


図4 日野土木実験所に敷設した超電導き電システムの保護回路

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	超電導状態(-196°C)における仕様
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	
耐電圧	: 使用電圧に対する絶縁耐力
雷インパルス耐電圧	: 雷などによる衝撃電圧に対する絶縁耐力
耐加熱性	: 加熱による引張強さと伸びの変化
耐加熱変形性	: 加熱による厚さの減少率

試験を実施し、機能の正常動作を確認しました。

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、所要の性能をもっていることが必要です。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ます。しかしながら、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はどのような項目に対してどのような性能が必

要か整理されていません。そこで、既存設備の仕様を参考にし、仕様書に規定すべき項目、性能を整理しました。

整理した項目を表1に示します。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ますが、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に項目として、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ました。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

☞ 地絡故障

電線路において導電部の一部が大地と電氣的に接続される故障です。大地電位が上昇し、弱電線路へ大きな被害を与える場合があります。

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の項目に該当します。また、超電導状態で送電するためには冷却が必要になるため、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ました。

すべての項目について、既存のJIS規格などを適用し、JIS規格のない一部の試験については、高圧ガス保安法ならびに一般高圧ガス保安規則関係例示基準を適用した試験を実施し、その性能を有することを確認しました。

鉄道の故障を想定した確認試験

前述の保護回路により、故障が生じた場合には超電導き電システムは瞬時に主回路から切り離されますが、雷などによる過電圧や短絡故障による過電流が多少なりとも印加される可能性があります。これにより絶縁破壊や焼損、性能劣化が生じないように、絶縁や銅保護層を設計しています。その効果を確認するために、超電導き電ケーブルの短尺サンプルを製作し、人工的に発生させた過電圧（インパルス電圧）を印加する耐インパルス試験および短絡故障を想定した短絡電流通電試験を実施しました。

電力設備や車両の高圧機器は、定格電圧に耐えることはもちろんのこと、ある程度の過電圧にも耐える必要があります。鉄道の過電圧には、雷による雷サージ電圧のほか、スイッチ開閉時の過渡的な開閉サージ電圧などがあり、これらに対して機器の耐電圧性能や避雷器の設置などにより効率的な絶縁設計をしています²⁾。超電導き電システムは変電所同等の絶縁性能とし、インパルス電圧20kVに耐えることを目標として試験を実施しました。試験風景を図5に示します。液体窒素により冷却した状態で超電導層と接地間にインパルス電圧20kVを印加しました。印

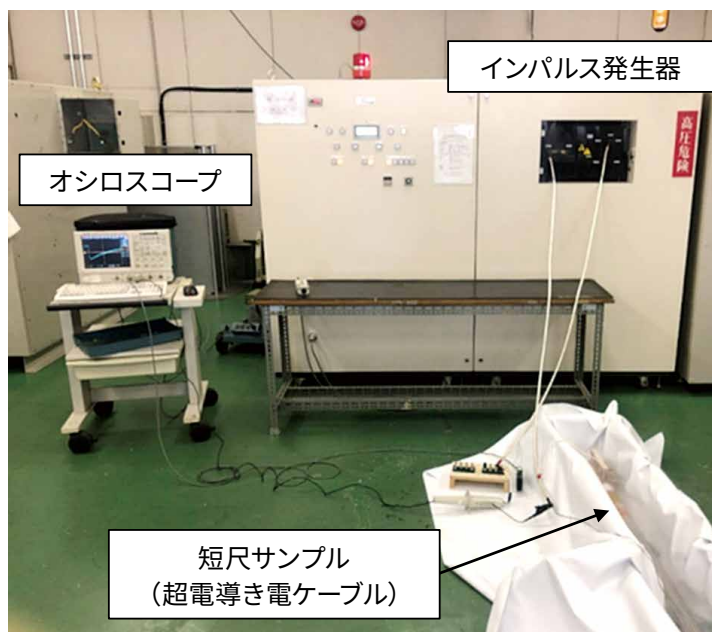


図5 耐インパルス試験の試験風景

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が確認できました。

直流高速度遮断器の性能は、遮断が完了するまでに流れる実遮断電流値は25kA、単位時間における電流の増加量である突進率は 3×10^6 A/sと定められています。超電導き電システムはこれを介して既設設備と接続するため、短絡故障が生じた場合にはこの電流が超電導き電ケーブルへ通電されることになります。よって、電流値25kA以上、突進率 3×10^6 A/s以上の通電を目標とし、液体窒素により冷却した状態で短絡電流通電試験を実施しました。その結果、最大電流値27.94kA、突進率 11.5×10^6 A/sの短絡電流を通電し、その前後で超電導き電ケーブルの臨界電流値（☞参照）が等しいこと、絶縁

抵抗に変化のないことが確認できました。このことから、短絡電流による性能の低下がないことがわかりました。

おわりに

超電導き電システムの実用化に向けた取り組みとして、鉄道システムへ接続する際の保護回路について検討するとともに、鉄道システムからの要求仕様の整理、性能確認を行いました。また、鉄道の故障に対して超電導き電ケーブルが健全であることを確認しました。

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ります。さまざまな状況に対応できるよう、今後も技術開発を進めていきます。[RRR]

文献

- 1) 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
- 2) 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

☞ 超電導の臨界電流値

超電導はゼロ抵抗で送電できますが、流せる電流値は決まっています。一般的には電界基準（ $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ ）に達したときの電流値とされ、高温超電導線材1本あたり200A程度になります。