

鉄道一般

車両

軌道

構造物

防災

電力

信号通信
情報

材料

環境

人間科学

浮上式鉄道

鉄道用超電導き電ケーブル

鉄道総研では、直流電気鉄道に应用可能な超電導ケーブルの開発を進めています。超電導ケーブルを現在の直流き電システムへ適用することによって、変電所の削減や電食の問題を解決することができます。現在、電気鉄道に適用可能な超電導ケーブルの試作機を製作し各種評価試験を行っています。き電の実用レベルの目安である10kAを越える通電試験などを含め、超電導ケーブル開発の取り組みについて紹介します。



富田 優
Masaru Tomita
材料技術研究部
超電導応用研究室
室長
[専門分野] 超電導工学



福本 祐介
Yusuke Fukumoto
材料技術研究部
超電導応用研究室
副主任研究員
[専門分野] 超電導工学



鈴木 賢次
Kenji Suzuki
材料技術研究部
超電導応用研究室
副主任研究員
[専門分野] 超電導工学



石原 篤
Atsushi Ishihara
材料技術研究部
超電導応用研究室
研究員
[専門分野] 超電導材料



ミリアラ ムラリダ
Miryala Muralidhar
材料技術研究部
超電導応用研究室
主任研究員
[専門分野] 超電導工学

はじめに

直流電気鉄道における変電所間隔は、き電方式、線路条件、電気車出力、運転条件、電源事情などによって異なります。車両に電気を送り届けるためのき電線は電気抵抗を有するため、送り届ける電流に応じて電圧が低下（電圧降下）します。「鉄道に関する技術上の基準を定める省令」において、「電車線の電圧は、列車の適正な運行を確保するため十分な値に保たなければならない」と規定されているため、電車線の電圧降下は許容し得る範囲内（直流1500Vき電方式では、例えば最低電圧1000V）でなければなりません。このため、変電所間隔は、都市間を結ぶような路線で10～15km、都市圏の路線で3～5km程度であり、路線に多くの変電所が設置されています。

図1と同じ大きさの超電導線材と銅材を液体窒素で冷却し、通電した結果を示します。銅材には電気抵抗に応じて通電電流値に比例した電圧が発生していますが、超電導線材には電圧が発生していないため、電気抵抗がゼロであることが分かります。この特性を生かして、超電導ケーブルを鉄道のき電

線へ応用すると、損失なく電気を遠くまで運ぶことができるため、変電所間の負荷平準化や電圧降下の低減による変電所数の削減、回生効率の向上が期待できます（図2）。また、レールに流れる帰線電流を超電導ケーブルに流すことで大地への漏れ電流もなくなり、電食の問題も解決できます。

高温超電導線材

高温超電導線材には金属元素であるビスマス（Bi）系超電導線材と、イットリウム（Y）系線材に代表される希土類（RE：Rare Earth）系超電導線材の2種類があります。ここでは、主にBi系超電導線材について紹介します。

Bi系超電導線材（図3）は、銀パイプに粉末をつめ、複数本束ねながら圧延加工することによって線材として製造されます。Bi系超電導材は線材化することが容易なため、1986年の銅酸化物高温超電導体の発見当初より線材としての開発が進められてきました。最近では、二次圧延として加圧焼成法の導入などにより、線材の通電特性の指標である臨界電流値が大幅に向上しています。

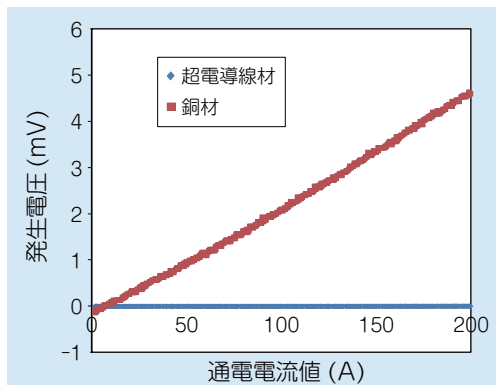


図1 超電導線材と銅材の通電試験

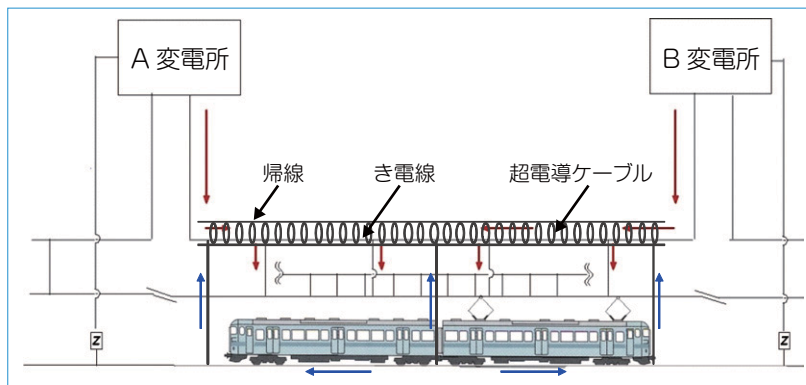


図2 超電導ケーブルの導入例(変電所間の負荷平準化)



図3 Bi系超電導線材の外観

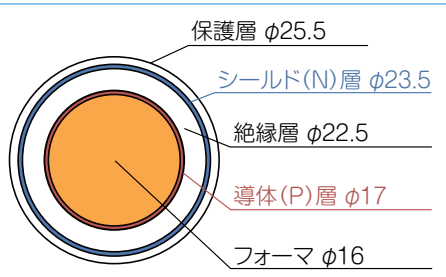
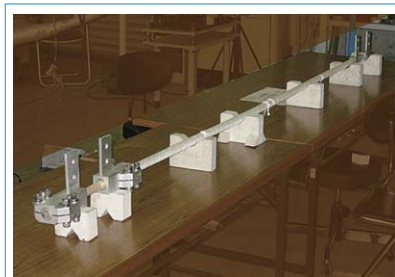


図5 試作した超電導ケーブルの外観(左)と断面図(右)

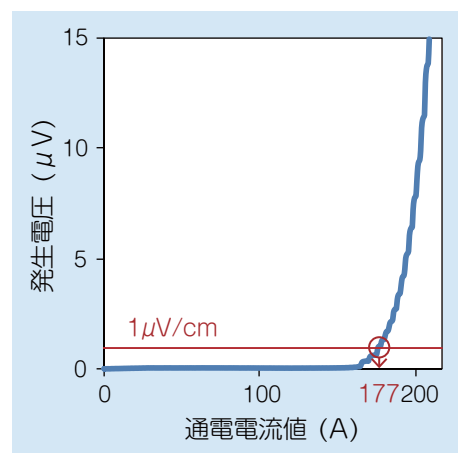


図4 Bi系超電導線材の通電特性

Bi系超電導線材の通電特性を図4に示します。超電導線材では一般に発生電圧が $1\mu\text{V}/\text{cm}$ ($1\mu\text{V} = 10^{-6}\text{V}$)の基準に達する電流値を臨界電流値 (I_c) と呼び、通電可能な電流値としています。つまり、この測定に用いたBi系超電導線材では $1\mu\text{V}/\text{cm}$ に達する177Aが通電可能であることが示されています。このように、超電導線材は電気抵抗がゼロといっても通電可能な電流値は決まっているため、大電流を運ぶためには必要な本数を束ねてケーブルにする必要があります。

1.5kA級超電導ケーブルの試作

直流電気鉄道の電圧降下の低減、変電所削減を目的とし、超電導線材を用いた鉄道用超電導ケーブルの製作を進めています。プロトタイプとして、2m長の1.5kA級超電導ケーブルを試

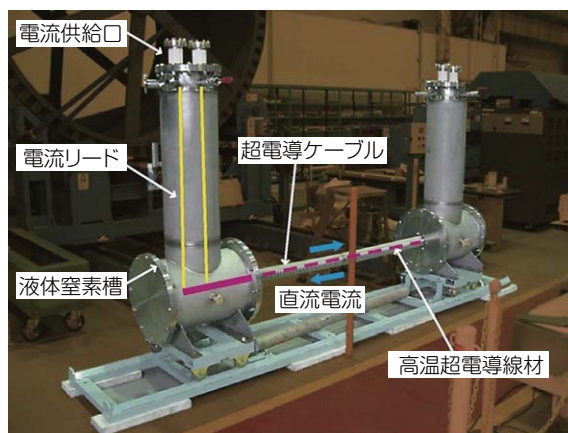


図6 超電導ケーブル冷却試験装置

作しました(図5)。フォーマと呼ばれる銅の撚り線を芯材とし、その周りに導体層としてBi系超電導線材を10本巻線し、絶縁層を挟んで、外側にシールド層として、Bi系超電導線材を14本巻線しています。

図6に示す超電導ケーブル冷却試験装置を用いて通電試験を行った結

果、導体層で1.72kA、シールド層で2.2kAの臨界電流値が得られました¹⁾。また、冷却試験装置内を減圧することにより、液体窒素を過冷却状態として温度を下げて通電試験を行ったところ、図7に示すように臨界電流値の向上が見られました。このように、超電導材は冷却温度が低いほど高い特性を示す

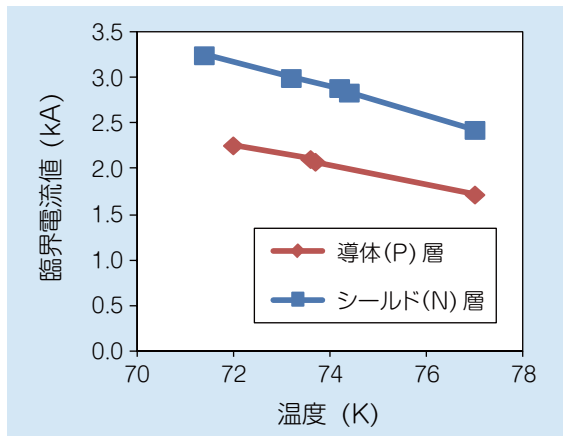


図7 温度による臨界電流値の向上

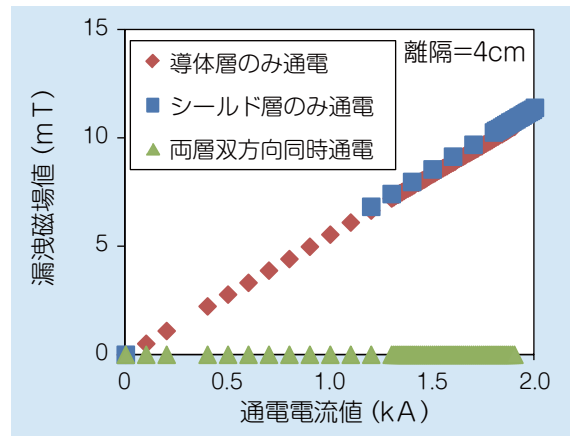


図8 超電導ケーブルの漏洩磁場の測定

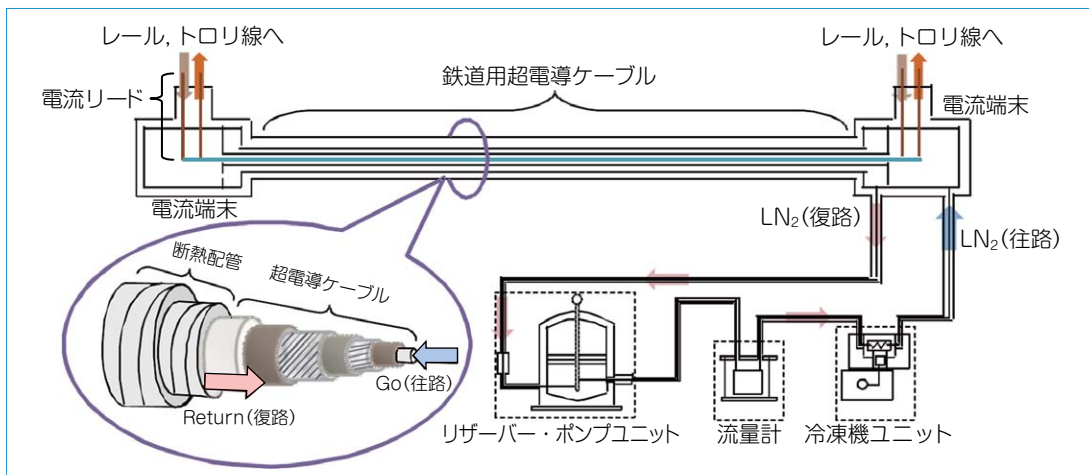


図9 Go-Return方式対応8kA級鉄道用超電導ケーブルの外観(左)と断面図(右)

ため、運転温度の決定は非常に重要なパラメータとなります。

超電導ケーブルによって、大きな送電容量が期待されますが、電流が大きくなると沿線環境への漏洩磁場の影響も考慮する必要があります。そこで、超電導ケーブルへ通電し、漏洩磁場の測定を行いました(図8)。導体層のみ、シールド層のみの通電時には、通電電流値に応じた漏洩磁場が発生していますが、両層に双方向に通電した場合には、漏洩磁場が打ち消し合っていることが分かります。鉄道用のき電線に应用する場合、導体層にき電線の電流(P側)を、シールド層にレールからの帰線電流(N側)を流すと、それぞれ反対方向に電流が流れることになり、漏洩磁場を低減することができます²⁾。

超電導ケーブル冷却システム

超電導ケーブルは低損失で大電流を送電することができますが、液体窒素温度(-196℃)付近まで冷却しなければなりません。そのため、超電導ケーブルは外気と真空断熱されている低温容器内部に配置する必要があります。電流端末部には、超電導ケーブルへの電流の供給、取り出しを行う電流リードが設置されています。この電流リードは、電気抵抗が小さい銅材で作られていますが、同時に熱伝導度も高い材料であるため、電流リードからの熱侵入が支配的となります。そこで、トロリ線へと分岐する取り出し口では、電車が通過するときのみ電流が流れる間欠運転であることを考慮し、許容範囲を見極め、電流リードを定格より細

くするなど熱侵入を抑える工夫が必要となります。また、超電導ケーブルが配置される断熱配管からも外気と真空断熱されてはいるものの、多少の熱侵入があるため液体窒素を溜めるだけではすぐに温度が上がってしまい送電できなくなります。そこで、冷却ステーションを要所に設け、冷却した液体窒素を循環させる必要があります。国内外の電力用超電導ケーブルプロジェクトの多くではループ状に超電導ケーブルを配置し、液体窒素を循環させて試験が行われています。しかし、鉄道への応用においては必ずしもループ状に敷設できるわけではないため、液体窒素の戻し配管を設ける必要があります。その戻し配管からの熱侵入や敷設コストの増大が懸念されています。そこ

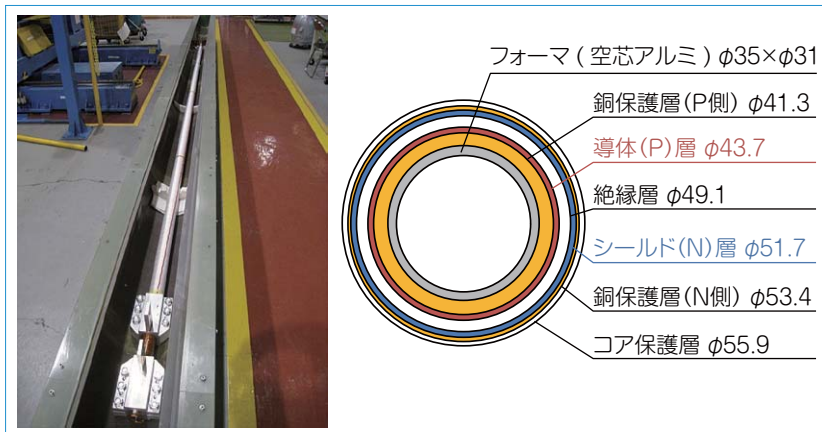


図10 Go-Return方式対応8kA級鉄道用超電導ケーブルの外観(左)と断面図(右)

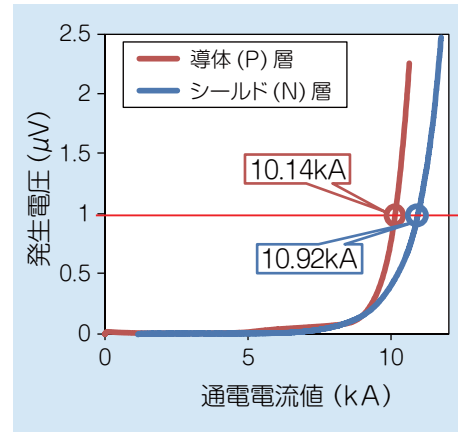


図11 超電導ケーブルの通電試験結果

で、鉄道総研では、超電導ケーブルのフォーマを空芯とし、冷媒経路とすることで見かけ上1本の配管で冷媒の行き帰りを行うGo-Return方式の検討を進めています。

Go-Return方式の冷却システム概略図を図9に示します。冷却システムは、液体窒素の増減を吸収するリザーバーと液体窒素を送り出すポンプを一体化したリザーバーポンプユニット、液体窒素を冷却する冷凍機ユニットから構成されます。ポンプにより送り出された液体窒素は冷凍機で冷却され、片方の電流端末よりフォーマ内部へ送られます。その後、フォーマ内部を通り逆側の電流端末で超電導ケーブルの外側に配置されている真空断熱管に送られ、リザーバーへ戻り再びポンプで送り出されます。この循環の過程において超電導ケーブルを冷却することができます。

大容量8kA級超電導ケーブルの製作

現在の電気鉄道に適用可能な超電導ケーブルとして、表1に示す8kA以上の臨界電流値をもつ5m長の超電導ケーブルを製作しました(図10)。Go-Return方式を適用するため、フォー

表1 8kA級超電導ケーブルの設計仕様

使用線材	ビスマス系 (Bi-2223) 超電導線材
外径	56mm
長さ	5m
ケーブル臨界電流値	DC8kA 以上
荷電特性	1500V

マをφ31の内径をもつ空芯のアルミ材としました。また、導体層およびシールド層は電流容量を確保するために2層構造とし、導体層で53本、シールド層で61本もの超電導線材が巻線されています。短絡電流などの過電流から超電導層を守るための保護層として銅テープ材を両層に設けています。

液体窒素に浸漬冷却した通電試験の結果、導体層で10.14kA、シールド層で10.92kAの臨界電流値を得ました(図11)。10kAを超える臨界電流値をもつ超電導ケーブルは世界トップクラスとなります。この臨界電流値は、現状の在来線のほとんどの仕様を満足しますが、当初の目的である変電所の削減を実現するには更なる高電流容量化が必要となり、最低でも12kA以上の電流容量を達成する必要があります。

おわりに

鉄道総研では鉄道の将来に向けた研究開発として、世界に先駆けて超電導

材料を使用した鉄道用ケーブルの開発を進めています。現在、ケーブルに使用する素材と構造を選定しながら、鉄道仕様に適したケーブル設計と試作を進めています。今後は、鉄道車両を使用した実証試験に向け、実用化を目指した各要素技術の適合試験を行い、高電流容量化の実証や長尺化に向けた鉄道用超電導ケーブルの製作に取り組んでいきます。

なお、本研究の一部は、国土交通省から補助金を受けて実施しています。

RRR

文献

- 1) 富田 優, 他: 低温工学・超電導学会概要集, Vol.80, p.181, 2009
- 2) M. Tomita et.al.: JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 109, 063909, 2011