

超電導ケーブルのき電線への 適用可能性に関する調査・検討

上條 弘貴* 森田 岳** 小西 武史**

Investigation of Possibility to Apply a Superconducting Cable to a Feeder

Hiroki KAMIJO Gaku MORITA Takeshi KONISHI

A superconducting cable to be applicable for power system has been recently developed. For decreasing a voltage drop and loss in a feeder of electrical railway, we have studied to apply the superconducting cable to the feeder and in a return circuit. In this paper, we report the development status of the superconducting cable for the power system, and the result of examination of a constitution of the system and an effect of its introduction in the superconducting DC-feeder.

キーワード：超電導ケーブル，き電回路，直流，電圧降下，損失，電気鉄道

1. はじめに

著者らは，き電回路（き電線およびレール）における送電損失の低減，電圧降下の低減による効率向上，き電距離の延長，変電所削減などを目的として，電力用として開発が進む超電導ケーブルを直流電化区間のき電回路に適用することを提案し¹⁾，その可能性について検討してきた^{1) - 5)}。

本報告では，超電導ケーブル開発状況を紹介するとともに，主に直流電化区間のき電回路に超電導ケーブルを適用した場合を想定し，システム構成，導入効果などを検討したので紹介する。

2. 高温超電導ケーブル

2.1 開発現状

近年，電力用の超電導ケーブルの研究，開発が進み，日本や米国を中心として送電線の一部や変電所内の配線などの実系統における試験を含め，複数のプロジェクトが計画，実施されている⁶⁾。これらの研究，開発は，電力系統への適応が前提であり，主に三相交流を対象として，電圧が数十kV以上を開発目標にしているが，電流容量として，直流電気鉄道が要求する数千Aの大電流容量に近づきつつあり，全長も数百m長に達してきており，き電線への適用可能性が検討できる段階にきている。

本章では，米国，日本を始めとした各国における超電導ケーブルの開発状況を紹介する。

2.1.1 米国の開発状況

米国では，電力系統の増強を図る目的の一つとして，米国エネルギー省（DOE）が中心となって複数の超電導

ケーブルの研究，開発が進められている^{6), 7)}。

Southwire社を中心としたグループは，2000年から長さ30m，12.5kV，1.25kAの単芯三相型ビスマス系超電導ケーブルを開発し，自社工場内に敷設して，長期の運転を行っている⁶⁾。

2006年のほぼ同時期から敷設，試験が開始されたDOEによる3つの超電導ケーブル開発プロジェクトがある。

Superpower社が中心となり，ニューヨーク州のAlbany市内の2つの変電所間，約3kmの配電用実電線路の途中350mにビスマス系超電導ケーブル線路が敷設され，2006年7月から世界で初めて実用送電路に超電導ケーブルを接続した実証試験が行われた。この超電導ケーブルは，三芯一括型で，34.5kV，0.8kA，ケーブル長は全長350mで，320mと30mに分割されており中間接続部を有している。2007年には，30m部分を，イットリウム系超電導線に置き換え，2008年6月まで運転された^{6), 7)}。

ULTERA社が中心となり，オハイオ州ColumbusにあるAmerican Electric Power社のBixby変電所に，長さ200m，13.2kV，3kAの三相同軸型ビスマス超電導ケーブルを敷設し，2006年9月から運転を開始している⁶⁾。

American Superconductivity社が中心となり，ニューヨーク州Long Islandで増加する電力需要に対応するため，Long Island Power Authority社のHolbrook変電所に，長さ600m，138kV，2.4kAの単芯三相型ビスマス系超電導ケーブルを敷設し，2008年4月から運転している。このプロジェクトでは，実系統での適用性を検証する初期試験の後に，電力送電線路として恒久的な利用や，次世代線材であるイットリウム系超電導ケーブルによる延長も計画されている⁶⁾。

2.1.2 日本の開発状況

日本では，2001年から東京電力，住友電気工業による長

* 車両制御技術研究部

** 電力技術研究部（き電）

さ100m, 66kV, 1kAの三芯一括型ビスマス系超電導ケーブル, 2004年から新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の「交流超電導機器基盤技術研究開発プロジェクト」における,長さ500m, 77kV, 1kA級の単芯型ビスマス系超電導ケーブルの試作,試験などが行われてきた⁶⁾。

さらに,これまでの高温超電導ケーブル開発の成果や知見を用いて, NEDOの「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」として,超電導ケーブルを電力系統に接続した場合の運転方法,長期連系試験による信頼性・安定性などの検討,実証を目的に長さ200~300m, 66kV, 3kA, 200MVA級の計画が,2007年から6年計画で住友電気工業,東京電力,前川製作所により進められている。この計画では,三芯一括型ビスマス系超電導ケーブルを東京電力の旭変電所(横浜市,154kV/66kV)に導入し,日本初の実系統連系試験を12ヶ月以上の長期間行う計画である⁷⁾。

また,2008年より, NEDOの「イットリウム系超電導電力機器開発プロジェクト」の一環として,従来のビスマス系超電導線に代わり,イットリウム超電導線を用いた数十m級の66kV, 5kAの三芯一括型や275kV, 3kAの単芯型超電導ケーブルの開発も進められている⁸⁾。

2.1.3 その他の開発状況

米国,日本以外にも,欧州,中国,韓国などで,超電導ケーブルの研究,開発が進められている⁶⁾。

デンマークでは, NKT社が中心となり,長さ30m,36kV, 2kAの室温絶縁型超電導ケーブルをコペンハーゲン市内のAmagar変電所に設置して,2002年まで試験を行った。

中国では, Innopower社が中心となり,長さ33.5m, 35kV, 2kAの室温絶縁型の三相ビスマス系超電導ケーブルを2004年から雲南省Puji変電所内の電力系統に設置し,運転している。

韓国では,韓国電気研究所(KERI)が中心となり,2001年から2004年にかけての長さ30mの三相ビスマス系超電導線ケーブルの開発行い,第2期として2004年から長さ100m, 22.9 kV, 1.25 kAのシールド付き低温絶縁型三芯一括型ビスマス系超電導ケーブルをGochang試験所に敷設して,試験を行っている。また,韓国電力公社(KEPCO)を中心として,地下ケーブルを想定し,同規模のビスマス系超電導ケーブルを住友電気工業から購入し,超電導ケーブルの運転技術の開発として2005年から試験を行っている。

2.2 構造

開発が進められている電力用超電導ケーブルの構造例を,図1に示す。電力の送電では,通常三相交流が使用されているため,3本の超電導ケーブル導体を1つの冷却管内に収めた三芯一括型構造が多く採用されている。各超電導ケーブル導体は,芯となるフォーマに超電導線

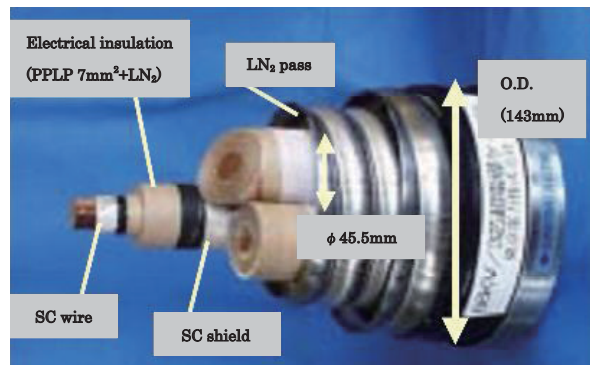


図1 超電導ケーブルの構造例⁸⁾

材を複数本並列にらせん状に巻きつけ,その上に絶縁層,シールド層となる超電導線材,保護層から構成されている。冷却管内部に液体窒素を循環させて超電導ケーブル導体を冷却し,超電導状態を維持する。

超電導線には,液体窒素温度以上で超電導状態となる高温超電導体が使用されており,現在はビスマス系超電導線材が主に使われているが,次世代線材と言われているイットリウム系超電導線材に置き換える研究,開発も進められている。

また,三芯一括型構造の他に,単相ごとに超電導導体を冷却管内に納めた単芯型構造や,フォーマを中心に三相分の超電導導体を同一軸上に絶縁層を挟んで巻き付けた三相同軸型構造なども検討されている。

3. 超電導き電回路

直流電気鉄道では,き電回路での電圧降下により変電所の最大間隔が制約される,電車線電流による電位差によりエアークッションなどでトロリ線に損傷を与える,帰線路として走行レールを使用するためこれに生じる電位が周辺の金属構造物に電食を引き起こすなどの問題がある。これらの問題は,有限抵抗の導体に電流を通電することによる電圧が原因であり,き電回路の導体に超電導線のような電気抵抗の無い材料を適用することにより解決が期待できる。また,交流で運用される電力用ケーブルに比べ,直流き電線への適用では,交流損失の発生がない,使用電圧が低いなど,超電導ケーブルの応用先として適していると考えられる。

そこで,著者らは,1990年代後半から2章で紹介した超電導線ケーブルを,直流電気鉄道のき電回路に適用することを提案し¹⁾,その可能性を検討してきた^{1) - 5)}。

3.1 構成

直流鉄道のき電回路に超電導ケーブルを適用したき電システムとして,超電導ケーブルの導入方法や構成には,何種類かのシステムが考えられ,目的,効果に応じて選択することができる。

3.1.1 き電回路の構成

き電回路に超電導ケーブルを導入する場合、超電導ケーブルを以下のように構成することが考えられる。

- (a) き電線（正）、帰線（負）の両方に適用（図2(a)）
導入の効果は最も高いが、設備・コストが大きくなる。
- (b) 帰線側のみに適用（図2(b)）
レール電位の低減が可能である。
- (c) き電線側のみに適用（図2(c)）
レール電位を相対的に押し上げ、短絡故障時にレール電位が電車線電位まで上昇するため安全上適用は難しい。

3.1.2 き電分岐間隔

超電導き電線とトロリ線、レールを接続するき電分岐を設置する間隔により以下の構成などが考えられる。

- (a) 現行と同程度の間隔でき電分岐を配置（図2(a)-(c)）
最も高い効果が期待できるが、反面き電ケーブルへの熱侵入、システム全体のコスト上昇にも繋がる。
- (b) 現行のき電線を併用（図3）
き電分岐間隔を長く（例えば、1kmあるいは現行の変電所間隔など）設定し、電圧降下は現行のき電線を併用することで補償する。導入効果は、制約されるが、熱侵入やコスト上昇を抑えることができる。

3.1.3 整流器の接続方法

整流器の接続方法によっても、以下のような分類が考えられる。(1) 現行システムと同様に、複数の整流器（変電所）で並列き電を行う形態

(2) 交流き電システムと同様に、整流器毎にき電区間を電氣的に区分し、境界をデッドセクション（あるいは

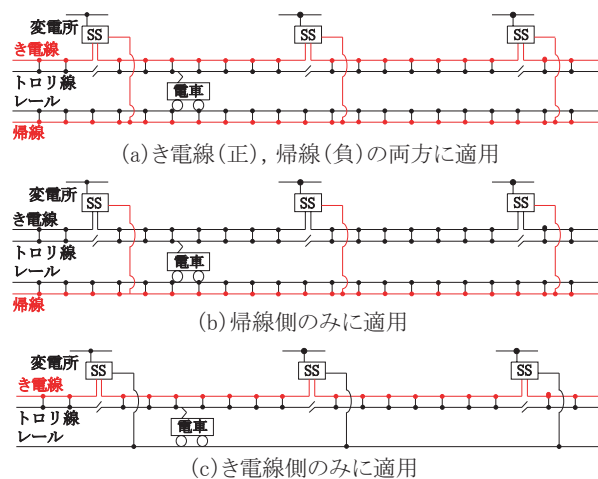


図2 超電導き電システムの構成例

(赤線：超電導ケーブル導入箇所)

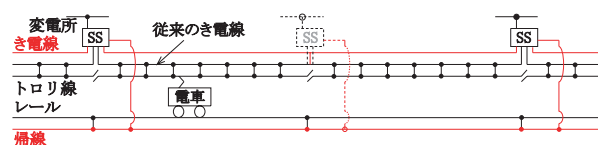


図3 き電分岐間隔を長くした構成例

(赤線：超電導ケーブル導入箇所)

切替セクション)として運用を行う形態

3.2 き電線の検討例

図2(a)のように、電車線と帰線の両方に超電導ケーブルを適用し、分岐間隔を現行設備と同程度に設置した直流き電システム(以下、超電導き電システムという)構成について検討した例を紹介する²⁾。

き電回路は、図4(a)のように超電導ケーブルのき電線(PF)と帰線(NF)、従来方式のトロリ線(T)とレール(R)によって構成される。変電所の送り出し回線はPFとNFに接続され、複数個所に置かれるき電分岐において、PFとT、NFとR(正確にはインピーダンスポンド中性点)がそれぞれ接続される。

超電導き電システムにおける電圧、電流分布を図4(b)に示す²⁾。電気車電流はこれを挟む二つのき電分岐間では、トロリ線とレールに流れるが、それ以外の箇所では超電導き電線に流れる。このため、電圧降下ならびにレール電位は電気車が存在するき電分岐間のみに限定され、超電導き電線部では電位差が殆ど生じない。

例えば、き電距離5km、き電分岐間隔250m、電気車電流4,000Aの場合について、現行と超電導き電システムに関して、数値計算した結果を表1に示す。その結果、超電導き電システムでは、電車線電圧降下で1/4程度、レール電位は1/20に低減され、き電損失は17%から3%に減少できる。

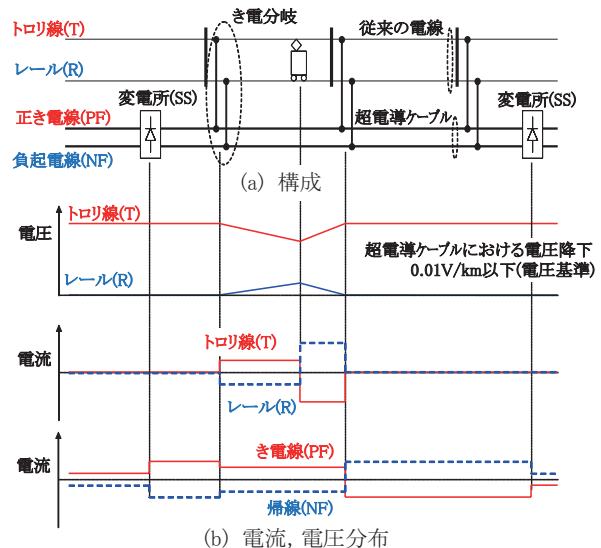


図4 超電導き電システムの電氣的特性例

3.3 導入効果

き電線に超電導ケーブルを適用した場合の導入効果は、導入方法、構成により異なるが、主に以下のような効果が考えられる。

- (a) 電圧降下の低減 き電回路における電圧降下の大幅な低減が期待できる。また、レール電位の大幅な低減により、電食対策にも有効である。
- (b) き電距離の延長 直流抵抗は変電所からの距離に

表1 最大電圧降下発生時の電力諸量の一例

システム	電車線電圧降下 (V)	レール電位 (V)	パンタ点電圧 (V)	き電損失 (%)
現行	155	100	1245	17.0
超電導	40	5	1455	3.0

[計算条件] 送り出し電圧：1500V，き電距離：5km（単線），き電分岐間隔：250m，電気車電流：4,000A，トロリ線：断面積110mm²，銅，レール：50kg，き電線：断面積510mm²×2条，アルミ（現行），臨界電流：4,000A以上（超電導）

依存しないため，き電距離に関する制約が大幅に緩和される。地形的制約が大きい線区など変電所建設上の制約で直流電化できない線区に対する，直流き電システム導入の有効な手段となる。

- (c) 回生電力の有効利用 現行では，近傍に力行車や電力吸収装置がない場合，回生電力を有効に利用できないが，超電導き電システムでは，き電分岐間隔を適切に設定することで，回生電力を遠方まで送ることができ有効に利用できる。
- (d) 整流器負荷の最適化 変電所を並列運転させた形態では，すべての整流器と電気車が同一の母線に接続された場合と電氣的に等価となり，電気車の位置に関わらずすべての整流器から負荷電流が供給されるため，整流器の負荷率を高め，システム全体の不等率の低減が期待でき，設備をより最適化，コンパクト化できる可能性がある。
- (e) 故障検出 き電ケーブルの絶縁劣化に伴う異常発熱などは，極低温システムのため発見しやすくなる。また，正負電流が同軸に流れる構成では，ケーブル外周に変流器を設置することで地絡故障（正負電流に差が生じる）の検出が容易になる。
- (f) 電磁環境の改善 超電導き電ケーブルでは正負を同軸に通電させるため，外部に磁界を漏洩させず，また外部から電磁的影響を受けにくく，電磁的両立性（EMC）が優れている。

3.4 課題

2章で紹介したように超電導ケーブルの研究，開発が進み，実用化の段階に近づきつつあるが，信頼性，寿命・寿命管理，コスト，過負荷・故障電流や雷撃に対する堅牢性などの実績はまだ充分とは言えない。さらに，冷却システム，電流リードなど周辺技術の成熟，限られた工事時間での施工への対応，初期冷却の時間などの施行性，き電ケーブルの温度，冷却システムの状態など監視すべき項目が増えるなど設備運用の面，工事，故障などにより停電時のバックアップなど，実際に超電導ケーブルを導入するためには，検討，解決すべき項目も多い。

また，超電導ケーブルの導入により極めて小さな電気抵

抗のき電システムとなり電氣的特性は現行と大きく異なってくるため，き電回路，設備はもとより，変電設備，保護方式などについても，十分な検討と技術開発が必要である。

4. おわりに

超電導ケーブルの開発状況を紹介するとともに，主に直流電気鉄道のき電回路に超電導ケーブルを適用した場合を想定し，システム構成，導入効果などを紹介して，その導入の可能性を示した。実用化に向けては，まだ検討，開発すべき課題も多いが，電圧降下の低減，き電距離の延長，電力の有効利用，電食防止などの効果が期待でき，電気鉄道の革新につながる可能性がある。最近では，省エネルギーに関する定量的な検討例⁹⁾や，き電線用とした超電導ケーブルの通電試験例も報告されており¹⁰⁾，今後のさらなる研究，開発が期待される。

文献

- 1) (財) 鉄道総合技術研究所：鉄道用超電導き電システム，特許第4080073号，2008.24.23
- 2) 森田岳，小西武史，上條弘貴，伊東利勝：直流電気鉄道のき電回路超電導化による設備影響低減の可能性検討，電気学会全国大会講演論文集（第5分冊），p.118，2008
- 3) 上條弘貴，森田岳，小西武史，伊東利勝：き電線への超電導ケーブルの適用可能性に関する検討，J-Rail2008講演論文集，p.369，2008
- 4) 上條弘貴，森田岳，小西武史，伊東利勝：超電導ケーブルのき電線への適用可能性に関する検討，第80回2009年度春季低温工学・超電導学会講演概要集，p.53，2009
- 5) 森田岳，小西武史，上條弘貴，長谷伸一：直流超電導き電システムの検討 ～電力技術の“Change”～，電気学会産業応用部門大会講演論文集，pp.III-119-124，2009
- 6) 超電導応用機器設計基礎技術調査専門委員会編：超電導応用機器設計基礎技術，電気学会技術報告，第1120号，pp.53-54，2008
- 7) 湯村洋康，芦辺祐一，大屋正義，渡部充彦，滝川裕史，増田考人，廣瀬正幸，八束健，伊藤秀樹，畑良輔：高温超電導ケーブルの実系統線路への適用，SEIテクニカルレビュー，Vol.174，pp.95-104，2009
- 8) 野口裕，鬼頭豊，三村智男，本庄昇一，渡部充彦，芦辺祐一，大屋正義，湯村洋康，増田考人：高温超電導ケーブル実証プロジェクトー開発状況ー，電気学会全国大会講演論文集（第5分冊），pp.175-176，2009
- 9) 大柴満春，高木亮：超電導ケーブルの導入による直流電鉄の省エネルギー化手法の検討，電気学会産業応用部門大会講演論文集，pp.III-173-178，2009
- 10) 富田優，福本祐介，鈴木賢次：鉄道応用に向けた高温超電導線材の特性向上，鉄道総研報告，Vol.23，No.6，pp.47-52，2009