

高温超電導ケーブルの実系統線路への適用 (米国 ALBANY プロジェクト)

湯村 洋康*・芦辺 祐一・大屋 正義
 渡部 充彦・滝川 裕史・増田 孝人
 廣瀬 正幸・八束 健・伊藤 秀樹
 畑 良輔

In-grid Demonstration of Long-length “3-in-One™” HTS Cable (Albany Project) — by Hiroyasu Yumura, Yuichi Ashibe, Masayoshi Ohya, Michihiko Watanabe, Hiroshi Takigawa, Takato Masuda, Masayuki Hirose, Ken Yatsuka, Hideki Itoh and Ryosuke Hata — High-temperature superconducting (HTS) cable, characterized by its high current density and low transmission loss, is a promising compact power cable with large transmission capacity, and has a variety of environmental advantages such as energy saving, resource conservation and EMI-free. Due to these advantages, HTS cable demonstration projects are being promoted around the world. Since the discovery of HTS materials, Sumitomo Electric has been conducting the development of HTS BSCCO wires and three-cores-in-one-cryostat-type HTS cables. Recently, Sumitomo Electric greatly improved the performance of BSCCO wires and developed a new wire named DI-BSCCO®. This improvement is accelerating the development of HTS applications, especially HTS cables.

The Albany Project is one of the demonstration projects for HTS cable in the United States funded by the Department of Energy. In Phase I of this project that took place between July 2006 and May 2007, an HTS cable system using the “3-in-One™” HTS cable manufactured by Sumitomo Electric operated successfully over a practically used underground power grid in unattended conditions for the first time in the world. In Phase II that had started in January 2008, after the world’s first replacement of HTS cable to 2G (YBCO) cable, the HTS cable system was re-energized and restarted operating in a live utility network. In the Albany Project, the HTS cable system demonstrated more than 12 months of reliable operation on a live grid during Phases I and II. This paper describes the details of the in-grid demonstration results of the HTS cable system in the Albany Project.

1. 緒 言

超電導ケーブルは、大容量・低損失送電をコンパクトな形状で実現でき、経済性のみならず省エネ・省資源・EMI (Electromagnetic Interference ; 電磁波障害) フリー等、環境面でのメリットも期待される⁽¹⁾ことから、国内外で実用化のための検討および実証試験が進められている。

当社は、高温超電導材料が発見された1986年より高温超電導線材そのものを、1991年よりその応用である3心一括型高温超電導ケーブルの開発を継続して進め^{(2),(3)}、2003年に「加圧焼成炉」を完成させ、第1世代 (1-G) ビスマス系高温超電導線材の電氣的・機械的性能が飛躍的に向上した後直ちに、その高性能1-G ビスマス系高温超電導線材 (DI-BSCCO®)⁽⁴⁾をケーブルを中心とした超電導応用製品に適用し、それぞれ実用化を目指している⁽⁵⁾。そして、当社の3心一括型高温超電導ケーブルは、米国エネルギー省の高温超電導ケーブル実証試験プロジェクトの1つでニューヨーク州の州都で建設されたALBANYプロジェクトの第Iフェーズにおいて、2006年7月20日、世界で初め

て実用地中送電路による送電に成功した⁽⁶⁾。その後、現地無人運転にて運用を継続し、2007年5月にかけて約9ヶ月にわたる長期送電試験を良好に完了した。

続く本プロジェクトの第IIフェーズでは、第2世代 (2-G) YBCO 薄膜超電導線を用いた3心一括型超電導ケーブルにより、世界で初めて超電導ケーブルの引き替え工事を完了し、実用実線路における送電試験を再開、第I & IIフェーズ合わせてトータル1年以上の長期送電試験を成功裡に完了することができた。

本稿では、ALBANYプロジェクトにおける超電導ケーブルによる長期実線路送電試験結果をとりまとめ報告する。

2. 米国ALBANYプロジェクトの概要

米国では、2003年8月のNY大停電の要因として指摘されたように、電力系統の脆弱性が問題視されており、その強化が急務とされている。これに対し、2005年8月に制定

されたエネルギー法において、送電網の近代化が国家政策として位置づけられ、その対策の一つとして、2030年には全米に強固な超電導ケーブル送電網を構築する計画（Grid-2030）が示されている⁽⁷⁾。その一環として、米国エネルギー省（DOE：Department of Energy）が資金提供する実系統での超電導ケーブル実証試験プロジェクトが進められており、当社が参画したALBANYプロジェクトはその1つである。本プロジェクトは、NY州の州都ALBANY市のNational Grid電力会社の2変電所（Menands / Riverside）間約3kmの実線路において、350m区間に超電導ケーブルを適用する実証プロジェクトである⁽⁸⁾。

2-1 システム仕様・構成 本線路の仕様およびシステム構成図を表1、図1に示す。定格電圧、電流、容量はそれぞれ、34.5kV、800A、48MVAである。350mの内径6インチ（152mm）地中埋設管路に30m長および320m長の3心一括型超電導ケーブルを布設し、マンホール内において世界初の中間接続（ジョイント）を設け、ケーブル両端の気中端末部にて架空送電線と接続される。なお、本プロジェクトに供するケーブル、ジョイント、端末は、それぞれAEIC規格C55-94、IEEE規格404、IEEE規格48に準じた。

表1 超電導ケーブル線路の仕様

項目	仕様
ケーブル構造	3心一括型
電圧・電流	34.5kV, 800Arms
長さ	350m (320m + 30m)
付属品	気中端末（両側） 中間接続部（マンホール内組立て） LN2リターン管（350m）
布設条件	地中管路（管路サイズ6inch）
最大短絡電流条件	23kA, 38cycle

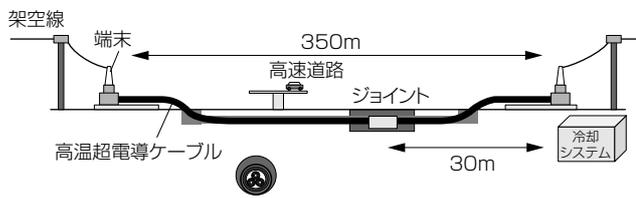


図1 超電導ケーブルシステム構成図

2-2 プロジェクト体制 本プロジェクトでは、メインコントラクター SuperPower 社のもと、National Grid 社、Linde（旧 BOC）社および当社がパートナーとして参画し、National Grid 社がホスト電力会社として線路提供を行い、

Linde 社が冷却およびモニタリングシステムを、当社が超電導ケーブルシステムの製造、建設、運転を担当した。

2-3 スケジュール 本プロジェクトのスケジュールを表2に示す。第Iフェーズでは、ビスマス系線材を用いた超電導ケーブルにより現地システムを建設し、実線路にて送電試験を実施する。続く第IIフェーズでは、30m区間を SuperPower 社が開発する YBCO 薄膜超電導線材を用いたケーブルに入れ替え、再度送電試験を実施する。なお、本プロジェクトでは、第Iフェーズおよび第IIフェーズにて、トータル1年間の超電導ケーブルによる長期送電試験が計画された。

表2 ALBANYプロジェクトのスケジュール

2002	2003	2004	2005	2006	2007
	設計	Bi系線材・ケーブル（350m）製造		現地施工	長期運転
				YBCO線材・30mケーブル製造	30m区間入れ替え

3. ALBANYプロジェクト第Iフェーズ

3-1 3心一括型DI-BSCCO®ケーブル⁽⁶⁾ 本プロジェクトでは、3心一括型超電導ケーブルにより現地ケーブルシステムを建設した。3心一括型超電導ケーブルの構造を写真1に示す。3心のケーブルコアを1つの断熱管内に収納する構造であり、それぞれのコアに断熱管を必要とする単心型超電導ケーブル×3条と比較して、ケーブル布設スペースや侵入熱が小さくなるメリットを有している。さらに、超電導ケーブルの課題である冷却時のコアの熱収縮を吸収する構造を3心一括型で実現している。

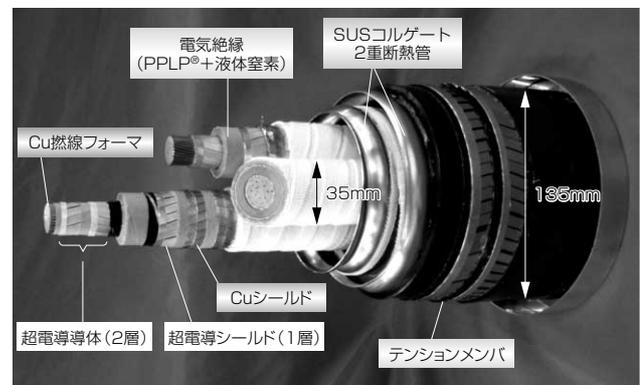


写真1 3心一括型超電導ケーブルの構造

表3 DI-BSCCO®ケーブルの諸元

項目	諸元
フォーマー	絶縁付き銅撚り線
超電導導体	2層、DI-BSCCO®線材
電気絶縁	PPLP®、厚み4.5mm
超電導シールド	1層、DI-BSCCO®線材
銅シールド	銅テープ
3心撚り	弛ませた3心撚り
熱絶縁層	2重ステンレスコルゲート管+真空多層断熱方式
防食層	PE/SUSテープテンションメンバー
ケーブル外径	135mm

第Iフェーズに適用したDI-BSCCO®ケーブルの諸元を表3にまとめる。本ケーブルには、加圧焼成技術により飛躍的に臨界電流特性、機械特性、量産性（長尺均一性）が向上し、かつ耐バルーニング性も優れたDI-BSCCO®線材⁽⁹⁾を適用した。電気絶縁は、低温での絶縁強度と低誘電損失等からPPLP®（Polypropylene Laminated Paper）を使用し、冷媒である液体窒素を含浸させた複合絶縁方式を採用した。絶縁層の上に超電導線を用いてシールド層を構成し、両端末部で3心のシールド層を短絡することにより、導体電流とはほぼ同じ電流を誘導により逆位相で流すことができ、各コアそれぞれにおいて完全な磁気遮蔽が実現できる。勿論、ケーブルの外部に対してEMIフリーとなる。交流電力系統では、短絡事故時に短時間であるが過大電流（短絡電流）が流れる。この対策として、導体の心材（フォーマー）に銅撚線を適用、シールドに誘導される電流に対しては超電導シールドの外側に銅テープ層を適用することにより、瞬間的な短絡電流を超電導線と銅撚線または銅テープ線に分流させ、温度上昇を許容レベル以下に抑制する構造を適用した。また、3心コアを弛ませる「3心弛み構造」を採用することで、常温から液体窒素温度（約-200℃）に冷却する際の温度変化により生じるコアの熱収縮（0.3%）の吸収を可能とした。ケーブル外部温度と内部の液体窒素温度との間の熱絶縁のため、2重ステンレスコルゲート管構造の間に多層断熱層を設け、かつ2重管内を高真空に維持することにより、高い断熱性能（低熱侵入性能）を得ている。本構造は、350m級断熱管を用いた長期特性評価結果より、真空封じり後10万時間以上経過した後も、低熱侵入性能を保つ真空度を維持できると評価されていることから、本ケーブル断熱管の真空処理はケーブル製造時に行い、真空を封じ切った状態で出荷した。また、本ケーブルは「3心弛み構造」を採用していることから、現地布設ではコアそのものを引っ張らず、断熱管の外側にステンステープによるテンションメンバを付加し、引き込み張力を分担させる構造を採用した。なお、ケーブル外径は6インチ（152mm）管路への布設可能な135mmとした。

これらケーブル構造により超電導ケーブルの特長である低損失、EMIフリー、現地線路の仕様に対応する通電・課電特性、短絡電流ならびに現地布設張力等に対応する諸特性を備えている^{(10),(11)}。

ケーブル製造完了後の各種出荷試験結果を表4にまとめる。試験の結果、本ケーブルが設計通りの性能を有し、所定の仕様を満足していることを確認し、米国へケーブルを出荷した。

表4 DI-BSCCO®ケーブル出荷試験結果（サンプル試験）

試験項目	試験条件および判定値	試験結果
臨界電流測定 (導体、シールド)	設計値 1.8kA (at 77K, 1 μ V/cm 定義)	良好 (1.8kA)
交流損失測定	設計値 0.7W/m/相 (at 800A, 60Hz)	良好 (0.7W/m/相)
ケーブル曲げ試験 (18D, D:ケーブル外径)	曲げ試験後の臨界電流値 曲げ試験後の解体構造検査	異常なし 異常なし
課電試験 (AEIC準拠)	AC: 69kV, 10分間 Imp: \pm 200kV, 各10回 DC: 100kV, 5分間	良好 良好 良好

3-2 ケーブル線路建設（第Iフェーズ）⁽⁶⁾ 現地ケーブル線路には、半径12mの90°曲がりが存在し、最大約5mの管路高低差が存在する⁽⁶⁾。ケーブルの布設状況を写真2に示す。本ケーブルの布設方法は、ケーブルドラムをアンダーローラに乗せ、ウインチによりケーブル先端を引張り管路内に引き込む、従来ケーブルと同じ一般的な工法を採用した。ケーブル布設は極めてスムーズで、最大張力は約2tonと予め管路摩擦係数0.25で計算した結果と同等な張力で布設を完了した⁽⁶⁾。さらに、布設完了後、超電導ケーブルに異常な伸びや外傷がないこと、ケーブル断熱管の真空度にリーク等を示す異常がないことを確認しており、超電導ケーブルが従来ケーブルと同様の手法で布設可能であることを実証した。

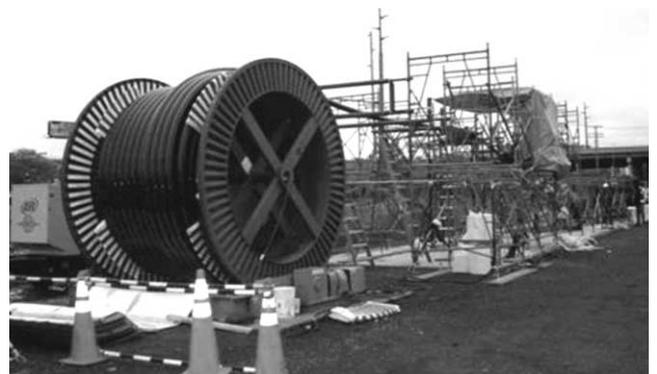


写真2 超電導ケーブルの布設状況

ケーブル布設完了後、マンホール内でのジョイント組立施工(写真3)、両端末部における端末接続部の組立施工(写真4)を実施し、ケーブルシステム建設を完了した⁽⁶⁾。

ケーブルシステム建設と並行して冷却システム建設、モニタリングシステムの構築がLinde社により実施された。現地冷却システム⁽¹²⁾は、機器故障時や停電時においてもケーブル運転を継続させるのに十分なバックアップモードを有し、実用運転時の信頼性確保が図られている。また、現地の超電導ケーブルシステム運転状況は、24時間遠隔監視され、かつ冷却システムの温度、圧力等の微調整も遠隔操作で行うことも可能である。なお、インターネットを介して全世界でリアルタイムに運転状況をモニタすることが可能であり、日本でも逐時モニタできる環境を構築した。本システムにより、超電導ケーブルシステムの無人運転が実現した。



写真3 地下マンホール内のジョイント



写真4 ケーブル端末容器

3-3 第Iフェーズ竣工試験⁽⁶⁾ ケーブル線路建設完了後、本超電導ケーブルシステムの運用に向けて実施した確認事項とその試験結果を表5にまとめる。

表5 超電導ケーブルシステム竣工試験結果(第Iフェーズ)

項目	試験結果
システム耐圧力試験(ASME規格準拠)	0.61MPaG:良好
初期冷却試験	コア最大張力:約800kg 各部真空度:良好 ジョイント内コア挙動:異常なし
臨界電流測定(DC, 1 μ V/cm定義)	2.3kA(73K)、2.8kA(69K)
熱損失測定(無負荷時)	350mケーブル部(ジョイント含む):1.0kW ケーブルシステム Total:3.1kW
圧力損失測定(流量50L/min)	350mケーブル部(ジョイント含む):0.075MPa
DC課電試験(AEIC準拠)	100kV、5分間、各相:良好

米国の圧力容器規格であるASME(American Society of Mechanical Engineer)規格に準拠し実施したシステム耐圧力試験(システムに付属する安全弁の設定圧力0.55MPaGの1.1倍にあたる0.61MPaG)は良好であった。

初期冷却試験では、ケーブル張力は熱収縮対策がない場合(約5ton)に比較して極めて小さく、本ケーブルが有する「3心コア弛み構造」の効果を再確認した。また、各部真空度、ジョイント内のコア挙動に異常は無く良好であった。

ケーブル平均温度73Kおよび69Kの条件で実施した超電導体部の臨界電流(I_c)測定結果を図2に示す。I_c(1 μ V/cm定義)は三相共に2.3kA(73K)、2.8kA(69K)であり、図3に示すように3-1項で示した77KでのサンプルI_c試験結果(1.8kA)をもとにDI-BSCCO[®]線材のI_c-温度特性から推定される値とよく一致することを確認した。この結果、長尺ケーブル製造、輸送、現地布設、組立施工および冷却工程を通じて、ケーブルの超電導体体に異常や劣化のないことが確認された。

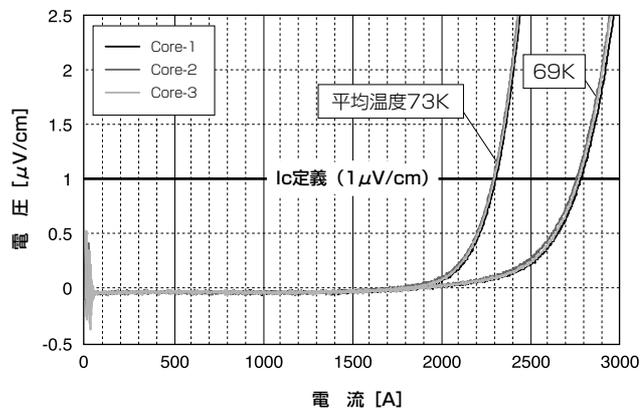


図2 超電導体の臨界電流測定結果(第Iフェーズ)

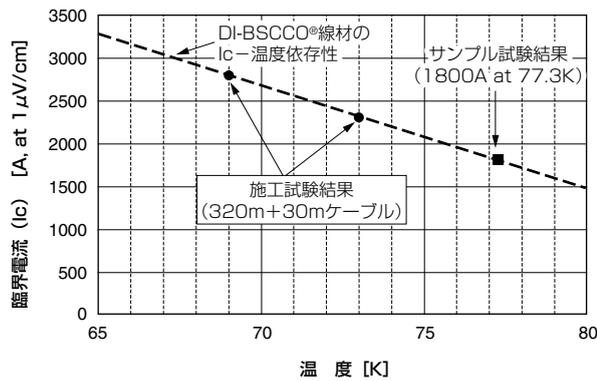


図3 臨界電流測定結果と計算値との比較

また、熱損失測定、圧力損失測定においては設計通りの結果を得た。各種試験の最後に、AEIC規格に準拠し、34.5kV級ケーブルの現地布設後耐電圧試験にあたるDC課電試験(100kV)を行い、良好な結果が得られ、無事竣工試験に合格した。

3-4 第Iフェーズ実線路運転 3-3項に示す各種竣工試験に良好であったことから、本ケーブルシステムが異常なく建設され、良好な性能を有し、仕様を満足することが確認できた。この結果を受けて、National Grid社による実系統実線路への接続が、現地時間2006年7月20日に行われた。世界で初めて長尺超電導ケーブル線路として実系統送電が開始された歴史的な瞬間である。実線路と超電導ケーブルの接続状況を写真5に示す。

本ケーブルシステムでは、現地運転状況の遠隔モニタおよび遠隔運転制御が可能であり、約2週間後より現地無人運転に移行、遠隔監視を行いながら実系統線路での運用を継続し、その後2007年5月1日にかけて約9ヵ月間にわたる長期送電試験を実施した。第Iフェーズにおける長期送



写真5 超電導ケーブルシステムと架空線との接続状況

表6 超電導ケーブルの実系統運転結果まとめ(第Iフェーズ)

項目	結果	備考
最大電流	約500Arms	—
平均電流	~200Arms	—
連続送電時間	~2,700時間	—
トータル送電時間	~6,700時間	—
送電停止回数	1回	短絡電流(最大7kA, 8cycles)通過により遮断
メンテナンス	冷凍機メンテ	メーカー推奨年次メンテナンス実施(バックアップ運転によりケーブル送電継続)

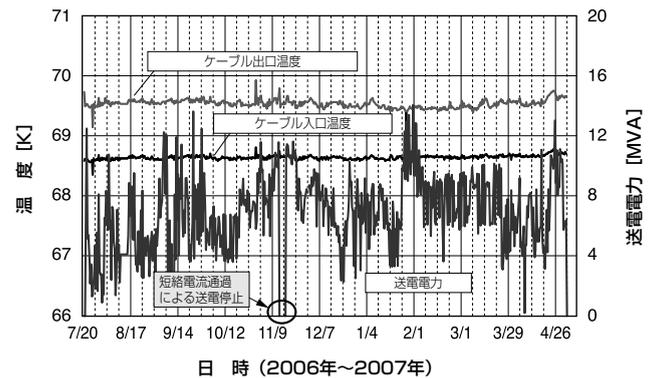


図4 超電導ケーブルの実系統運転状況(第Iフェーズ)

電試験結果を表6にまとめる。また、実線路送電中におけるケーブル部温度と送電電力の変化を図4に示す。

本試験期間中、超電導ケーブルから離れた近隣の変電所で生じた短絡事故により過大な短絡電流が線路に流れたことから、線路保護システムが作動し送電が停止した。超電導ケーブルシステムに流れた短絡電流波形を図5に示す。最大電流は7kA、第1保護シーケンスの動作設定通り短絡電流通過後8cycleで遮断された。本短絡電流通過によるケーブル部の温度上昇は殆どなく(設計では0.5K以下)、冷却システムは短絡事故に伴う停電時においてもバックアップ電源(UPS、自家発電機)が自動的に稼働し、ケーブル温度が維持された。その後、予め決められた対処方法によりケーブルシステムの健全性が確認された後、直ちに送電試験が再開された。

また、本試験期間中、冷却システムにおいては、バックアップモードを用いることにより、送電を止めることなく、冷凍機等の定期メンテナンスが行われた。

本長期送電試験期間中、ケーブル温度や圧力等の運転条件は安定に維持され、超電導ケーブルシステムおよび冷却システムに起因する問題による送電停止はなく、最大送電電流約500A、平均約200Aの電力を延べ約6,800時間にわたり良好に送電することに成功し、本プロジェクトの第Iフェーズを良好に完了した。

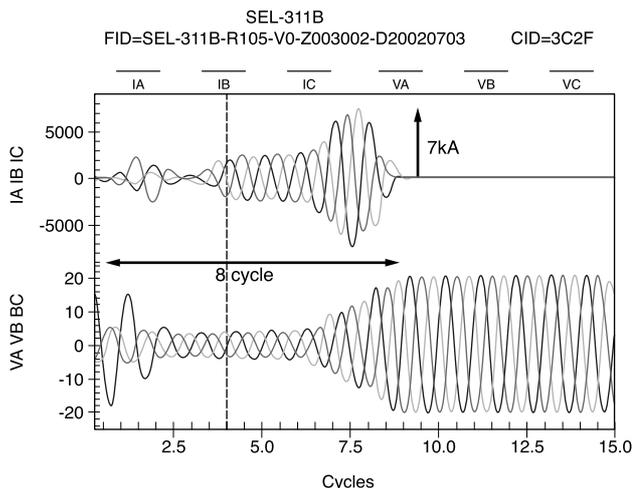


図5 超電導ケーブルに流れた短絡電流

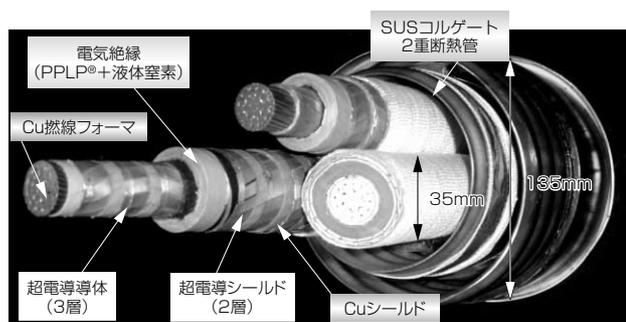


写真6 YBCOケーブルの構造

テープ層でコアを構成する。Cu撚線フォーマ、主絶縁の厚さ、Cuテープ層、コア外径はDI-BSCCO®コアと同一である。なお、DI-BSCCO®コアと同様に良好な電気性能、機械特性および耐過電流特性が確認されている⁽¹⁴⁾。本コアを3心撚りし、DI-BSCCO®ケーブルと同設計の断熱管内に収納し3心一括型ケーブルとした。

(2) YBCOケーブル製造および出荷検査

第IフェーズのDI-BSCCO®ケーブルと同様の製造条件にてYBCO超電導線を用いた30m長ケーブル製造を行った。ケーブル製造完了後の各種出荷試験結果を表7に示す。YBCOケーブルは使用線材のIcがDI-BSCCO®線材よりも低いことから、DI-BSCCO®ケーブルに対して、超電導体およびシールドの層数がそれぞれ2層から3層、1層から2層へと増加している。この結果、YBCOコアは、DI-BSCCO®コアよりも高いIcで設計されている。試験の結果、本ケーブルが設計通りの性能を有し、所定の仕様を満足していることを確認し、米国に向け出荷した。

4. ALBANYプロジェクト第IIフェーズ

4-1 30m長3心一括型YBCOケーブル

(1) ケーブル構造

第IIフェーズで計画された現地30m区間の引き替え用ケーブルは、本プロジェクトのパートナーであるSuper Power社が製造したYBCO超電導線⁽¹³⁾を用いて、当社が製造した。YBCO超電導線の構造を図6に示す。線材は Hastelloy基板上の多層中間層、その上に約1μmのYBCO超電導膜、保護層としてAg蒸着層およびCuメッキ層で構成されている。線材サイズは4mm幅、0.1mm厚であり、使用総量9.6kmの平均臨界電流(Ic)は約70Aである。

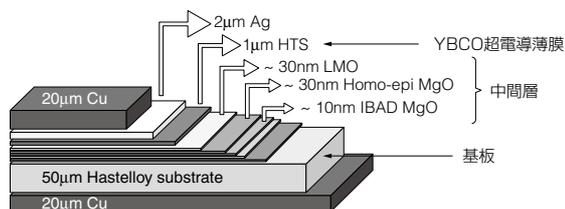


図6 YBCO薄膜超電導線の構造

YBCOケーブルの構造を写真6に示す。YBCOケーブルは、DI-BSCCO®ケーブルと同様にコンパクトな3心一括型構造を有する。銅撚線フォーマ上にYBCO超電導線を3層巻きした導体層、PPLP®を主絶縁とする絶縁層、YBCO超電導線を2層巻きしたシールド層、短絡電流対策用のCu

表7 YBCOケーブル出荷試験結果 (サンプル試験)

試験項目	試験条件および判定値	試験結果
臨界電流測定 (導体、シールド)	設計値：導体2.7～2.8kA シールド2.4～2.5kA (at 77K, 1μV/cm定義)	良好 (導体：2.7kA, 2.8kA, 2.7kA) (シールド：2.4kA, 2.4kA, 2.5kA)
交流損失測定	設計値 (試作結果) 0.4W/m/相 (at 800A, 60Hz)	良好 (0.34W/m/相)
ケーブル曲げ試験 (18D, D：ケーブル外径)	曲げ試験後の臨界電流値 曲げ試験後の解体構造検査	異常なし 異常なし
課電試験 (AEIC準拠)	AC：69kV, 10分間 Imp：±200kV, 各10回 DC：100kV, 5分間	良好 良好 良好

4-2 現地30mケーブル引き替え工事

(1) ケーブルシステム昇温

第Iフェーズでの長期送電試験が完了した後、Ic測定および絶縁チェック等によりケーブル特性が送電開始前と変化なく、健全性が維持されていることを確認した。その後、30m長YBCOケーブルの輸送期間を用いて、現地ケーブルシステムの昇温を実施した。まずはケーブルシステム内の液体窒素をCEタンクに回収した後、自然昇温により約3週間でシステム全長が常温に達した。なお、昇温によるヒートサイクルで各部真空槽部にリーク等の異常は見られず良好であった。

(2) ケーブル引き替え工事

ケーブルシステム昇温完了後、ジョイントおよび片端末部の解体作業を行い、30m区間のDI-BSCCO®ケーブルを管路より引き抜き、YBCOケーブルを新たに布設した。その後、第Iフェーズでの現地組立施工とほぼ同等の施工方法にて、地下マンホール内で既存の320m長DI-BSCCO®ケーブルと新たに布設したYBCOケーブルのジョイント組立を行う共に、片端末部の再組立を行った。その後、再組立部分につき真空引きした後に真空槽を封じ切り、30m区間のケーブル引き替え工事を完了した。

4-3 第IIフェーズ竣工試験 30mケーブル引き替え工事完了後、ケーブルシステムの再運用に向けて実施した竣工試験の結果を表8にまとめて示す。

表8 超電導ケーブルシステム竣工試験結果 (第IIフェーズ)

項目	試験結果
システム耐圧力試験 (ASME規格準拠)	0.61MPaG : 良好
初期冷却試験	コア最大張力 : 約1,000kg 各部真空度 : 良好 ジョイント内コア鼓動 : 異常なし
臨界電流測定 (DC, 1μV/cm定義)	2.3kA (73K)、2.8kA (69K)
熱損失測定 (無負荷時)	350mケーブル部 (ジョイント含む) : 1.0kW ケーブルシステム Total : 3.4kW
DC課電試験 (AEIC準拠)	100kV、5分間、各相 : 良好

(1) システム耐圧力試験

30mケーブル引き替え工事完了後、再度、冷却システムと組み合わせ、ASME規格に準拠したシステム全体の耐圧力試験を実施し、本システムが当該試験において良好であることを確認した。

(2) 初期冷却試験

第Iフェーズと同じく、ケーブル長手方向の温度、各部真空度、ケーブル張力等を管理しながら、初期冷却を行った。ケーブル内に備えた光ファイバにより測定した初期冷却過程のケーブル全長温度プロフィールを図7に示す。

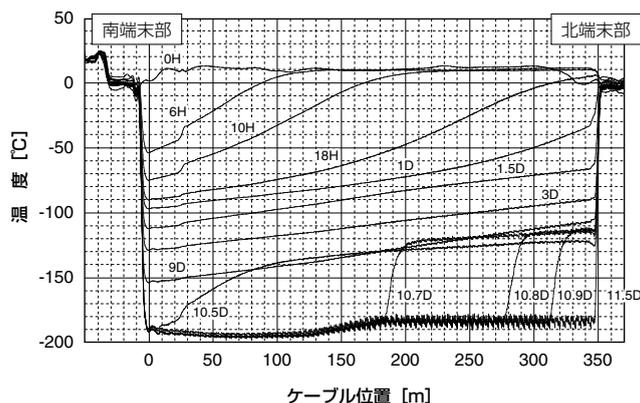


図7 初期冷却時のケーブル部温度分布 (第IIフェーズ)

ケーブルの急激な温度変化を抑制するために、まずは-100°Cの窒素ガスにて全長を徐々に冷却した後、ケーブルに流入する窒素ガスの温度を徐々に下げることで、段階的にケーブル全長を冷却、ケーブル入口温度が-150°Cとなり、ケーブル全長の温度勾配が十分小さくなった時点で、液体窒素をケーブルに注入し、第Iフェーズとほぼ同等の冷却開始後約12日間でケーブル全長が液体窒素温度(約-200°C)に冷却され、良好に循環冷却に移行した。

初期冷却過程において、両端末部に発生した最大張力は3心で約1tonであり、第Iフェーズと同じく、熱収縮の吸収代が無い場合に発生する張力(約5ton)と比較して極めて小さく、ケーブル引き替え工事後もケーブルが「3心コア弛み構造」を維持できていることを確認した。また、ケーブル、接続部を含め各部真空度は良好であり、ジョイント内のコア挙動も異常のないことを確認した。

(3) 臨界電流測定

初期冷却完了後、第Iフェーズと同条件のケーブル平均温度73K、69Kで各相の超電導導体部の臨界電流(Ic)測定を実施した。測定結果を図8に示す。本線路では、引き替えた30mYBCOケーブルコアのIcが320mDI-BSCCO®

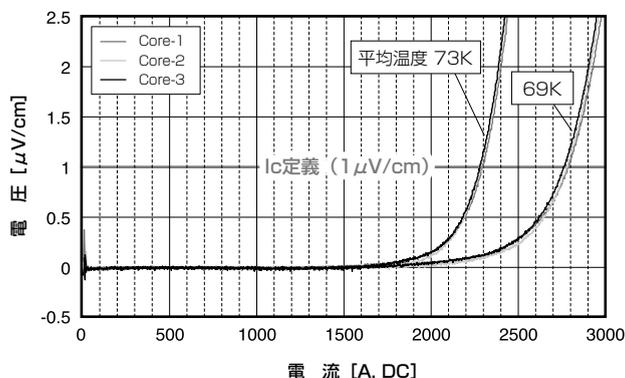


図8 超電導導体の臨界電流 (Ic) 測定結果 (第IIフェーズ)

ケーブルコアよりも大きいことから、測定される導体Icは、320m長DI-BSCCO®ケーブルの特性で決定される、すなわち第Iフェーズと変化しないことが予想される。測定の結果、Icは3相とも2.3kA(73K)、2.8kA(69K)であり、予想通りフェーズIと同じ結果が得られた。この結果、引き替えた30mYBCOケーブルコアに大きな異常や劣化がないこと、またDI-BSCCO®ケーブルについては引き替え工事や昇温・再冷却のヒートサイクルにより超電導体に異常や劣化の無いことが確認された。

(4) 熱損失測定

無負荷時におけるケーブルシステムの侵入熱を測定した。ジョイント部を含めた350mHTSケーブル部の熱損失は1.0kWと第Iフェーズと同じくほぼ設計通りの結果が得られた。ケーブル断熱管は、ケーブル製造時の真空処理以降、再真空引き等のメンテナンスは実施していないことから、ヒートサイクルを含む約3年間の長期間において、良好な真空特性が維持できていることが確認された。

また、端末部、リターン管および冷却システムとの接続管を含めたケーブルシステム全体の熱損失は第Iフェーズと同等の3.4kWであり、ほぼ設計通りの結果が得られた。

(5) DC課電試験

第Iフェーズと同じく、各種試験の最終試験としてDC課電試験(100kV)を実施し、良好な結果が得られた。本試験により無事竣工試験に合格することができ、世界初の超電導ケーブルの引き替え工事を完了することができた。

4-4 第IIフェーズ実線路送電 4-3項の各種竣工試験に良好であったことから、30mケーブル引き替え工事を終えた本ケーブルシステムが異常なく再建設され、良好な性能を有し、仕様を満足することが再度確認できた。こ

の結果を受けて、National Grid社による実系統実線路への再接続が、現地時間2008年1月8日に行われ、超電導ケーブルによる実線路送電を再開した。

その後、第Iフェーズと同様に現地無人運転により実系統実線路での運用を継続した。図9にケーブル部温度と送電電力の変化を示す。ケーブル部温度および圧力等の運転条件は非常に安定しており、システムに異常なく、当初予定通り2008年4月末をもって、良好に長期送電試験を完了した。

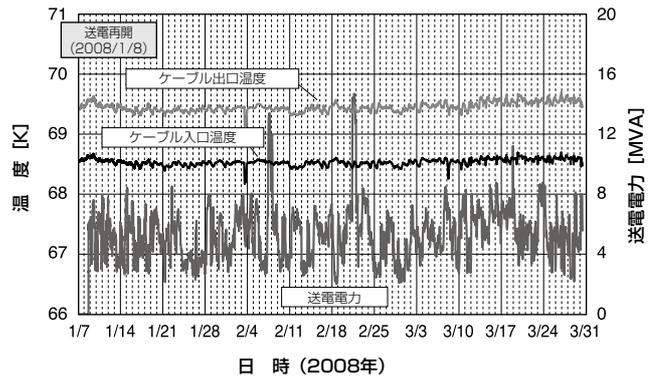


図9 超電導ケーブルの実系統運転状況(第IIフェーズ)

5. ALBANYプロジェクトまとめ

本プロジェクトの検証項目および検証結果を表9にまとめる。

表9 ALBANYプロジェクトまとめ

検証項目		結果まとめ
ケーブル設計	実線路要求仕様へ対応	・現地仕様(電流、電圧、管路サイズ、布設レイアウト、短絡電流他)に対応したケーブル設計および設計の事前検証
ケーブル製造	長尺ケーブル製造	・現地仕様を満足する350m長の3心一括型ケーブル製造に成功
機器設計・製造	現地仕様対応	・米国規格に準拠した機器の設計、製造
出荷・輸送	長距離輸送	・日本から米国への長距離輸送(海上&陸上)を実証
実用線路建設	実用地中管路への布設実証	・従来ケーブルと同等の手法で布設可能であることを実証(引き込み張力約2ton)
	ケーブル中間接続実証	・世界初の超電導ケーブルのジョイントをマンホール内で組立実証
	現地システム建設	・超電導ケーブルにダメージなく、スケジュール通り現地システム建設を完了
	ケーブル引き替え実証	・世界初の超電導ケーブルの引き替え工事を良好に完了
実線路送電実証	竣工試験	・現地規格に準拠した試験に合格、超電導ケーブルが実線路に接続可能との認定を獲得
	運転実証	・現地無人運転にてトータル1年以上の実線路送電に成功
	信頼性	・超電導ケーブルおよび冷却システムのトラブルによる送電停止なし ・定格電流を超える過大な短絡電流に対応、ケーブルに異常なし。また、冷却も維持。 ・長期運転およびヒートサイクルによりケーブル臨界電流値に変化なし ・ケーブル断熱管の長期寿命(ノーメンテナンス)を実証
	メンテナンス	・送電(運転)を維持した状態で冷凍機他のメンテナンス実施

- ① 実線路の要求仕様に対応するケーブル設計を完了した後、本仕様に対応する長尺3心一括型超電導ケーブル製造に成功した。
- ② また、機器については米国規格に準じて設計し、製造を実施した。
- ③ 日本から米国への海上および陸送を含む長距離輸送を行い、ケーブル・機器等へのダメージがないことを確認した。
- ④ 実用地中管路へ従来ケーブルと同様の方法で布設可能であることを実証した。
- ⑤ 長尺ケーブル線路構築には不可欠となるケーブルの中間接続（ジョイント）を世界で初めて超電導ケーブルで実現した。
- ⑥ 超電導ケーブルにダメージなく、スケジュール通り長尺実用線路でケーブルシステム建設を完了した。
- ⑦ 将来必要となるケーブル引き替え工事についても、本プロジェクトで世界に先駆けて検証した。
- ⑧ 現地規格に準拠した現地竣工試験に良好にパスし、超電導ケーブルシステムが実用線路に接続できる認定を獲得した。
- ⑨ 実線路運転においては、トータル1年以上にわたる送電試験に現地無人運転にて成功した。
- ⑩ 本プロジェクトの長期送電試験期間において、超電導ケーブルおよび冷却システムに起因するトラブルによる送電停止はなく、その信頼性が確認できた。
- ⑪ 定格を超える過大な短絡電流に対応、ケーブルシステムに異常はなく、事故時においてもケーブル冷却を維持することができた。
- ⑫ 図10に示すように、長期送電およびヒートサイクルにより超電導特性（臨界電流）に変化がないことが確認できた。

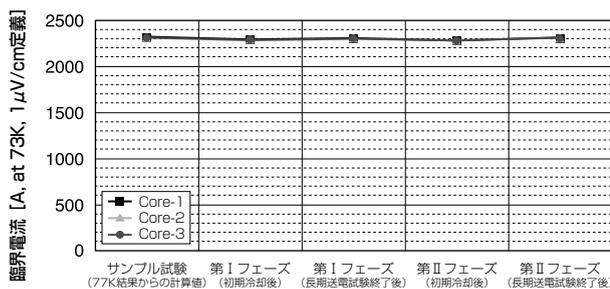


図10 超電導導体の臨界電流値の変化（第I & IIフェーズ）

- ⑬ 図11、12に示すように、第Iおよび第IIフェーズを通した長期間およびヒートサイクルにより、ケーブル断熱管の熱侵入を表すケーブル両端の温度差に大きな変化はなく、ケーブル断熱管が長寿命であり、長期間にわたりメンテナンスが不要であることが実証できた。

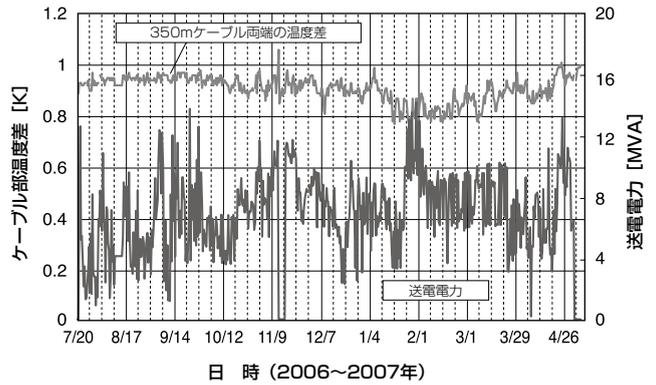


図11 ケーブル送電電力とケーブル両端の温度差（第Iフェーズ）

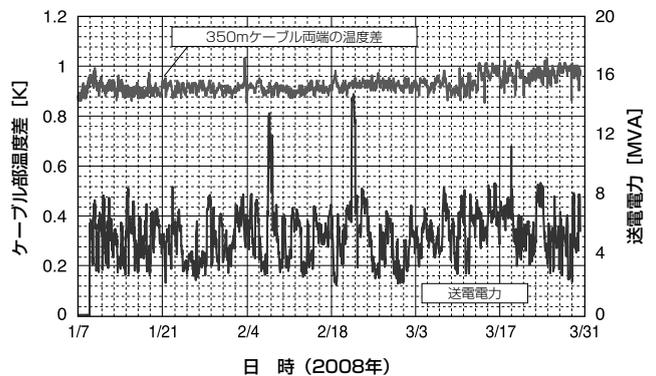


図12 ケーブル送電電力とケーブル両端の温度差（第IIフェーズ）

- ⑭ 冷却システムにおいては、バックアップ運転等を用いることにより、冷凍機等のメンテナンスをケーブルがオンライン状態で実施できることを実証した。

本プロジェクトの長期実線路送電試験に対して、ホスト電力会社 National Grid 社の地域担当重役 William Flaherty 氏は以下のように総括した。

「National Grid 社にとって重要なことは、このプロジェクトが超電導技術の信頼性を実証したことにある。超電導ケーブルの実線路組み込み時に何ら困難もなかったし、全体システム設置も顧客に完全に理解されている。この超電導ケーブルシステムは、過酷な電力会社の基準にも適合しており、我々は高温超電導技術のさらなる発展に期待している。」

また、DOE の Patricia Hoffman 氏は以下のように述べた。

「このようなプロジェクトは、高温超電導技術が電力基盤の近代化や電力の安定かつ経済的供給を確実にする上で重要な役割を担う可能性があることを実証している。超電導技術をはじめとする先進的なエネルギー技術の開発や展

開・導入は、ブッシュ行政の進めている我が国の送電系統の高効率・高信頼化、全エネルギーの安全確保を高める上で有効である。」

以上、本プロジェクトにおける世界初の実用実線路における長期送電試験により、超電導ケーブルが実用実線路に適用可能であること、超電導ケーブルシステムの信頼性を実証することができたと考える。

6. 結 言

当社が参画する米国 ALBANY プロジェクトにおける超電導ケーブルによる実用地中線路での延べ1年以上にわたる長期送電試験の成功によって、超電導ケーブルならびにそのシステムの信頼性を実証することができた。また、本プロジェクトに引き続き、米国では Ohio プロジェクト (2006/9～)、LIPA プロジェクト (2008/4～) においても、超電導ケーブルによる実線路送電試験が開始されている。さらに、日本においても、2007年度より実線路において超電導ケーブルを運用する実証プロジェクトが開始された⁽¹⁵⁾。まさに、長年の弛まぬ実用化開発により、ようやく超電導ケーブル等の高温超電導技術が、実フィールドでの検証試験を通して、夢の技術から実用できる技術へと着々と進展している。超電導ケーブルの本格実用化のためには、更なる超電導線材の高性能化、低コスト化、超電導ケーブルシステムの大容量化、低損失化、さらには現地工事の短工期化等が必要となるものと考えられる。「エネルギー、資源、環境の21世紀」には高温超電導技術の実用化が必要不可欠と確信し、早期実用化に向けて一層努力していきたい。

参 考 文 献

- (1) 廣瀬等、「高温超電導の実製品化検討」、SEIテクニカルレビュー、第168号 (2006年3月)
- (2) 増田等、「高温超電導ケーブルの技術とその開発動向」、SEIテクニカルレビュー、第165号 (2004年9月)
- (3) 増田等、「3心一括型超電導ケーブルの実用性検証試験結果 (1) (2)」、2003年電気学会全国大会、7-094、7-095
- (4) 加藤等、「革新的ビスマス系高温超電導線 (DI-BSCCO) の開発」、SEIテクニカルレビュー、第168号 (2006年3月)
- (5) 山田等、「高温超電導の応用製品開発事例と今後の展望」、SEIテクニカルレビュー、第171号 (2007年7月)
- (6) 湯村等、「長尺3心一括型高温超電導ケーブルによる世界初の実線路建設と商用運転 (米国 ALBANY プロジェクト)」、SEIテクニカルレビュー、第170号 (2007年1月)
- (7) "Grid 2030, A National Vision for Electricity's Second 100 years", DOE (2003)
- (8) C. Weber, et.al., "Overview of The Underground 34.5kV HTS Power Cable Program in Albany, NY", IEEE Transaction on Applied Superconductivity Vol.15, No.2, pp1793-1797 (2005)
- (9) 綾井等、「臨界電流200A級高温超電導線材の開発」、SEIテクニカルレビュー、第169号 (2006年7月)

- (10) 芦辺他、「Albanyプロジェクト向け超電導ケーブルの開発 (2)」、平成17年電気学会全国大会
- (11) 増田等、「Albanyプロジェクト向け超電導ケーブルの開発」、電学論B、126巻8号 (2006)
- (12) R. Lee, et.al., "Performance Testing of a Cryogenic Refrigeration System for HTS Cables", Advances in Cryogenic Engineering Trans. of the Cryogenic Engineering Conference, Vol 51, pp773-781 (2006)
- (13) V. Selvamanickam, et.al., "Progress in Scale-up of 2G Wire at SuperPower", 2007 U. S. DOE Peer Review, Superconductivity for Electric Systems, August 7-9, 2007, Arlington, VA
- (14) M. Ohya, et.al., "Design and Evaluation of YBCO Cable for the Albany Cable Project", Advances in Cryogenic Engineering Trans. Of the Cryogenic Conference, Vol 53B, pp1059-1066 (2008)
- (15) 三村等、「高温超電導ケーブル実証プロジェクトの概要」、平成20年電気学会全国大会

執 筆 者

湯村 洋康* : 超電導・エネルギー技術開発部 主席
超電導ケーブルの開発に従事



芦辺 祐一 : 超電導・エネルギー技術開発部 主査
大屋 正義 : 超電導・エネルギー技術開発部 博士 (エネルギー科学)
渡部 充彦 : 超電導・エネルギー技術開発部 主査
滝川 裕史 : 超電導・エネルギー技術開発部 主査
増田 孝人 : 超電導・エネルギー技術開発部 グループ長
廣瀬 正幸 : 超電導・エネルギー技術開発部 主幹
八束 健 : 超電導・エネルギー技術開発部 主幹
伊藤 秀樹 : (株)ジェイ・パワーシステムズ 電力機器事業部
シニアスタッフ
畑 良輔 : 電線・機材・エネルギー事業本部
バクーンプロジェクト開発部 技師長 博士 (工学)

*主執筆者