



日本初の超電導ケーブルによる実線路実証プロジェクト (高温超電導ケーブル実証プロジェクト)

大 屋 正 義*・湯 村 洋 康・渡 部 充 彦
 芦 辺 祐 一・滝 川 裕 史・伊 藤 秀 樹
 南 野 忠 彦・西 村 崇・増 田 孝 人
 本 庄 昇 一・三 村 智 男・鬼 頭 豊
 野 口 裕

The Japan's First In-Grid Demonstration of Superconducting Cable (High-Temperature Superconducting Cable Demonstration Project) — by Masayoshi Ohya, Hiroyasu Yumura, Michihiko Watanabe, Yuichi Ashibe, Hiroshi Takigawa, Hideki Ito, Tadahiko Minamino, Takashi Nishimura, Takato Masuda, Shoichi Honjo, Tomoo Mimura, Yutaka Kito and Yu Noguchi — The high-temperature superconducting (HTS) cable demonstration project has taken place since 2007, aiming to verify the reliability and operation stability of a 66-kV, 200-MVA HTS cable in the actual power grid. An HTS cable, termination and joint have been finalized for this demonstration project, and installed into Sumitomo Electric's facility as a 30-meter HTS cable system before the actual demonstration in Tokyo Electric Power Company's Asahi Substation in Yokohama. This verification test consists of three steps (three cooling tests) and currently the 1st cooling test has been completed to confirm the good properties of the system. A long-term operation test for 30 days has also shown positive results. Subsequently, a heat-cycle test and tolerance confirmation test will be conducted as the 2nd and 3rd cooling with this 30-meter HTS cable system.

Keywords: high-temperature superconductors, superconducting cables, power cable installation

1. 緒 言

地球温暖化対策としてのCO₂排出量の削減は、電力事業においても喫緊の課題であるが、現在5%前後で推移している送配電ロスを低減できる有効な対策がないのが実状である。また、老朽化した大容量のPOFケーブル^{*1}の取替が2016年頃から本格化すると想定されているが、容量が小さいCVケーブル^{*2}を用いる場合には増回線が必要であり、都市部においては新たな洞道^{*3}を建設することが困難である。

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る⁽¹⁾ことから、上記の課題を解決できる革新的な技術として期待されており、次世代電力送電網の構築においても重要な技術として位置づけられ、国内外で開発及び実証試験が活発に実施されている。

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三心一括型高温超電導ケーブル(商標“3-in-One”)の開発を継続して進めている^{(2),(3)}。2006年には、米国ALBANYプロジェクトにおいて、世界で初めて実線路における送電に成功した⁽⁴⁾。その後、現地無人運転にて運用を継続し、約9ヶ月にわたる長期送電試験を良好に完了した⁽⁵⁾。

米国では実系統における超電導ケーブルの実証試験が複数行われているものの、日本の電力系統における超電導

ケーブルの適用に対しては、国内実系統における実用規模での実証試験が必要である。このため、2007年度から、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)による、国内初の超電導ケーブル実線路運転を実施する「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」が開始された。当社は本プロジェクトに参画し、日本の電力系統において超電導ケーブルシステムの信頼性を実証することで、実用化に結びつけるべく取り組んでいる。

本稿では、「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」を通じた超電導ケーブルの開発状況、及び実証試験に先立って実施している検証試験の結果について報告する。

2. 開発ターゲット

具体的な超電導ケーブルの適用例の一つとして、現在275kVの地中送電ケーブルで構成される基幹系の電力送電網への導入が挙げられる。老朽化した275kVのPOFケーブルの取替策として、CVケーブルでの代替が検討されているが、CVケーブルはPOFケーブルに比べて送電容量が小さいため、CVケーブルを用いる場合には回線数の増加が必要である。この場合、新たに洞道の建設が必要である

が、特に都内においては地下空間に公共インフラが集中しており、新規建設が非常に困難な状況である。一方、大容量かつコンパクトな超電導ケーブルを適用すると、既存の275kVケーブルと同容量の電力を、内径150mmの既設管路^{*4}に収容可能な66kV超電導ケーブルで送電可能であり、建設コストを大幅に低減することができる。

具体的には、1500MVA級の送電ルートを考えて場合、従来ケーブルでは275kV単心CVケーブルが3回線9条必要であり、ケーブルサイズにもよるが、CVケーブルの送電損失は100W/m/回線となる。一方、66kV三心一括型超電導ケーブルが3回線3条の場合、交流損失^{*5}1W/m/ph@3kA、断熱管侵入熱1W/m、冷却システム効率0.1を達成できると、損失は $(1 \times 3 + 1) / 0.1 = 40\text{W/m/回線}$ となり、CVケーブルの損失の半分以下に低減することができる。

一方で、実系統線路においては、定格電流以上の事故電流と呼ばれる大電流が流れる場合がある。特に短絡事故^{*6}時に発生する電流は大きく、66kV系統での最大短絡電流条件は31.5kA、2秒と規定されている。超電導ケーブルの実用化のためには、このような事故電流が流れてもケーブルの健全性が保たれることが要求される。

以上の検討結果より定めた超電導ケーブルの開発ターゲットを表1にまとめる。

表1 実用化に向けた超電導ケーブルの開発ターゲット

	目 標	プロジェクト開始段階 (2007年)
大容量化	66kV/3kA	66kV/1kA
交流損失	1W/m/ph@3kA	0.7W/m/ph@1kA
耐短絡電流特性	31.5kA、2秒	23kA、0.67秒
断熱管侵入熱	1W/m	2.5W/m
冷凍機効率	0.1	0.06
ケーブル外径	150mm管路対応	150mm管路対応

3. 「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」の概要

超電導ケーブルの実用化のためには、上記の技術的な目標を達成するとともに、実系統における実証試験が必要である。このため、当社は2007年度より開始されたNEDOの「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」に参画し、東京電力(株)管内の旭変電所(神奈川県横浜市)に超電導ケーブルシステムを構築して国内初の実線路運用を実施することで、超電導ケーブル単体だけではなく、線路建設、運転及び保守を含めたトータルシステムの信頼性を実証するべく取り組んでいる。

具体的な内容としては、将来の送電システムを想定した、66kV、200MVA級の超電導ケーブルシステムの開発を行

い、実系統に適用し得る所定の性能、機能を有することをサンプル試験並びに検証システムによって確認する。その後、中間接続部(ジョイント)を有する三心一括型超電導ケーブルを、冷却システムや保護装置などの付帯設備とともに実系統に接続し、長期連系試験を行う。

(1) 実証線路と要求仕様

実証試験が実施される旭変電所の定格電圧、電流、容量はそれぞれ、66kV、1.75kA(過負荷対応時2.25kA)、200MVAである。ケーブルシステムの概要は図1に示す通りであり、内径150mmの管路内に超電導ケーブルを布設し、中間にジョイントを設けるとともに、ケーブル両端末にて変電設備と接続される。

実用化に向けた目標である1W/m/ph@3kAの達成には、超電導線材の性能向上が不可欠である。本目標はプロジェクト最終年度の2012年度までに達成することとし、旭変電所に導入する実証試験向け超電導ケーブルの要求仕様は、実証線路の定格電流が1.75kAであることから1W/m/ph@2kAとした。ただし、過負荷対応時には最大2.25kAの電流が流れるため、3kA通電が可能であることを要求仕様とした。

また、東京電力(株)にて、系統事故時に超電導ケーブルに流れる短絡電流解析を行った結果、10kA、2秒以下のもらい事故^{*7}電流通過時には、事故点切り離し直後に再送電が行われることが判明した。このため、10kA、2秒の事故電流通過直後に、定格送電が可能とも要求仕様に加えた。表2に実証試験向け超電導ケーブルの開発ターゲットをまとめる。

表2 実証試験向け超電導ケーブルの開発ターゲット

	目 標
定格電圧・電流	66kV、2kA
最大電流	3kA
交流損失	1W/m/ph@2kA
耐短絡電流特性	31.5kA、2秒(再送電無し):ダメージなし 10kA、2秒(再送電有り):即時再送電可能
ケーブル外径	150mm管路対応

(2) プロジェクト体制

本プロジェクトでは、当社がNEDOからの委託を受け、東京電力(株)及び(株)前川製作所と共に開発を進めている。本体制において、東京電力(株)が実証試験線路の提供とシステムの運用・保守技術の検討を行い、(株)前川製作所が冷却システムの設計・製造を行い、当社が超電導ケーブルシステムの開発・製造・建設・運用を担当している。

(3) スケジュール

本プロジェクトのスケジュールを表3に示す。当初2年間は、ケーブルの低損失化、短絡電流対応といった要素開

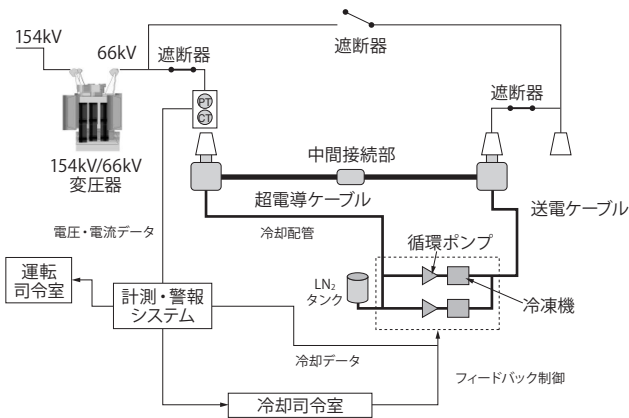


図1 実証試験ケーブルシステムの概要

表3 実証プロジェクトのスケジュール

	FY2007	FY2008	FY2009	FY2010	FY2011	FY2012
Cablesystem development	Design Cable, Joint, Termination Preliminary tests AC loss, Fault current test, Mechanical test, etc.		Pre-performance testwith 30m system			
Field test	Analysis of the grid condition		Cable manufacturing Coolingsystem manufacturing	Install	Long term test	

発を行う。3年目に検証用30mケーブルシステムの建設・評価を行い、開発したケーブルシステムが要求仕様を満足することを確認する。この後に、実証用ケーブルシステムの製造を行い、旭変電所においてケーブルシステムを建設、実系統に連系した長期検証試験を行う。

4. 超電導ケーブルシステム要素技術の開発

4-1 超電導ケーブルの開発 三心一括型超電導ケーブルの構造を写真1に示す。三本のコアを1つの断熱管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、ケーブルの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。

ケーブルコアは、銅撚り線フォーマの上に、超電導導体層、絶縁層、超電導シールド層、銅シールド層を同軸上に巻付けた構造となっている。定常時は超電導導体層に送電電流が流れる。この際、両端末で三心コアのシールド層を短絡接続することにより、超電導シールド層には電磁誘導によって導体電流とほぼ同じ大きさの電流を逆位相で流すことができる。本構造により、磁気遮蔽が実現でき、ケーブルの外部に対してEMI (Electromagnetic Interference; 電磁波障害) フリーとなる。なお、短絡事故時において、

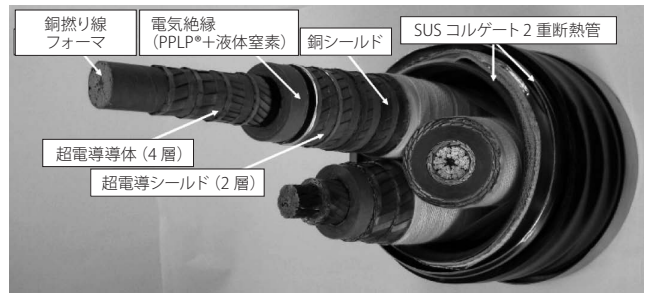


写真1 三心一括型超電導ケーブルの構造

定格電流の数十倍の大電流を超電導線のみで流すように設計すると非経済的である。よって、超電導導体層に対しては銅フォーマを、超電導シールド層に対しては銅シールド層を設けることにより、事故電流をこれらの保護層に分流させ、温度上昇を抑制する構造を採用している。

ケーブルコアを収納する二重ステンレスコルゲート管の間には多層断熱層を設けるとともに、高真空に維持することにより、高い断熱性能を得ている。本構造は、350m級断熱管を用いた長期特性評価試験⁽⁸⁾において、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ことが確認されている。このことから、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。

(1) 大電流化・低損失化

当社の標準線材であるDI-BSCCO® TypeHT線材を用いて構成した超電導ケーブルの交流損失は2W/m/ph@2kAと計算される。開発目標値である1W/m/ph@2kAを達成するためには、超電導線材の大幅な低損失化が不可欠であった。このため、当社で交流機器用途として開発した、低損失型TypeACT線材を超電導ケーブル用線材として採用した。TypeACT線材は、写真2に示すように、超電導フィラメントにツイストを施しており、平行磁場中における交流損失を線材レベルで1/3に低減することに成功している。

一方で、全ての線材にTypeACT線材を用いて構成した超電導ケーブルにおいては、大電流化のため、線材臨界電流(Ic)特性の向上が必要であった。従って、大電流化の観点から、TypeACT線材とTypeHT線材を適材適所で使用するハイブリッド超電導導体の設計を実施した。

さらに、超電導線材の低損失化だけでなく、フォーマ内に発生する渦電流損失を0.1W/m/ph@3kA以下に低減するため、直径0.8mmの素線絶縁銅線を用いた低損失型分割集合フォーマを開発した。

これらの低損失型分割集合フォーマ、TypeACT及びTypeHT線材を使用したハイブリッド超電導ケーブルを試作し、交流損失特性を評価した結果、図2に示すように、2kArms通電時の損失は0.8W/m/phであり、要求仕様

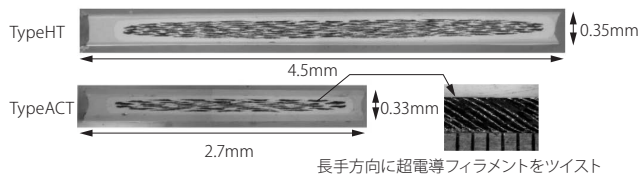


写真2 DI-BSCCO®の写真 (TypeHTとTypeACT)

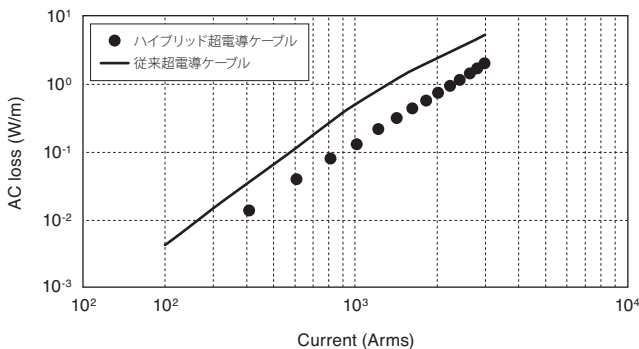


図2 ハイブリッド超電導ケーブルの交流損失

1W/m/ph以下の低損失化を達成した。さらに、高Ic型のTypeHT線材を組み合わせたハイブリッド設計により、要求仕様である3kArmsの大電流通電にも成功した。

(2) 耐短絡電流対応

短絡電流が流れた際のケーブルコアの温度上昇を、健全性が保てる範囲内に抑えるため、短絡電流を分流させる常電導保護層の設計をケーブル外径制約下で検討した。過渡温度上昇シミュレーションを実施した結果から、フォーマとして140mm²の銅撚り線導体を採用し、シールド部には合計80mm²の断面積を有する銅シールド層を設けた。

本設計をもとに、ケーブルサンプルを作製して、最大

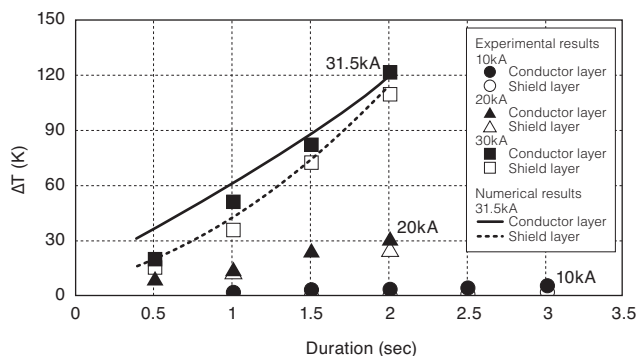


図3 短絡電流試験時のケーブル温度上昇

31.5kA、2秒の短絡電流試験を実施した結果、超電導導体層及び超電導シールド層の温度上昇 ΔT はそれぞれ120K及び110Kであり、図3に示すように、シミュレーション結果とほぼ一致することを確認した。また、試験前後でサンプルの臨界電流特性に変化はなく、要求される耐過電流特性を有することを確認した。

さらに、もらい事故模擬試験を実施した結果、10kA、2秒の短絡電流通過直後に、現地定格である1.75kAの通電、及び対地38kVの課電が可能であることを検証し、実証試験が実施される旭変電所線路で要求される仕様を満足することを確認した。

(3) 電気絶縁特性

これまで開発した超電導ケーブルでは、電気絶縁層にPPLP® (Polypropylene laminated paper) を用い、液体窒素を含浸させた構造を採用している。本構造は、多数の良好な課電実績を有している。また、冷却及び昇温といったヒートサイクルに対しても良好な特性を有し、かつ低温における誘電損失が非常に小さい特性を有している。これらの実績より、本プロジェクトにおいてもPPLP®を絶縁材料として採用した。

電気絶縁性能を確認するため、絶縁厚6mmのケーブルサンプルを作成し、JEC-3401に準じて課電試験を行った結果を表4にまとめる。試験結果は良好であり、要求仕様を満足することを確認した。

表4 ケーブル課電試験結果

項目	要求仕様	試験結果
AC課電試験	AC90kV/3h	良好 (PD発生なし)
Imp課電試験	±385kV/3回	良好

(4) 熱機械特性

ケーブルは室温から液体窒素温度(約-200℃)に冷却すると、約0.3%の熱収縮が発生する。これまでは、三心コアを弛ませることで、冷却時の熱収縮を吸収する構造が検討されてきた。しかしながら、本プロジェクトでは、大容量化と短絡電流に対応し、かつ内径150mm管路に適用可能なケーブル開発を目指しており、ケーブルのコンパクト化が求められている。設計検討の結果、従来のように三心コアに弛みを持たせる構造では、内径150mm管路に適用することが難しく、三心コアに弛みを持たせないことを前提にケーブル設計を行った。

三心に弛みを持たせず、また両端末を固定した状態において、ケーブルを室温から冷却すると、ケーブルコアには熱収縮による引張力が印加される。また、ケーブルを冷却状態から室温まで温度を上昇させる際には、ケーブルが伸びることによる圧縮力が発生する。これらの引張力、圧縮

力をモデルケーブルにより実測した結果、冷却時には約3tの引張力が、昇温時の弛み形成には約0.5tの圧縮力が発生することを確認した。さらに、これらの応力が印加されてもケーブルコアにダメージがないことを確認した。本試験結果より、本プロジェクトにおいては熱収縮吸収のための三心コア弛みを有しない構造を採用した。

4-2 中間接続部及び終端接続部の開発 中間接続部は長尺のケーブルシステムには必要不可欠なものであり、通常はケーブル同士をマンホール内にて接続して送電線路が形成されている。終端接続部は、超電導ケーブルと実系統とを接続する箇所であり、熱的には液体窒素温度部と常温部との接続部でもある。旭変電所の要求仕様ならびにJEC-3401に準じて、66kV級の中間接続部及び終端接続部に要求される仕様を取りまとめた結果を表5に示す。

表5 中間接続部及び終端接続部の必要特性

	中間接続部	終端接続部
機械力	引張：3000kgf/3相、圧縮：500kgf/3相	
電流容量	3kA連続通電	
短絡電流	31.5kA、2秒でダメージなきこと 10kA、2秒で再送電可能なこと	
接続抵抗	1 $\mu\Omega$ /箇所@3kA以下	—
耐電圧	AC : 90kV/3h Imp : \pm 385kV/3回 DC : 152kV/10min	
耐内圧設計	0.6MPa・G	
耐震設計	—	水平: 0.3G、垂直: 0.15G
防食設計	従来ケーブルと同等	

(1) 中間接続部（ジョイント）の開発

図4に中間接続部の概略構造図を示す。66kV級地中送電ケーブルの標準マンホールの大きさは約7mであり、本スペース内でのジョイント施工を実現するため、コンパクトな三心一括型構造を採用した。フォーマは従来ケーブルと同様に銅製のスリーブを用いて接続し、超電導導体は半田を用いて電気的な接続を行う。電気絶縁層として補強紙を巻き付け、超電導シールドは導体と同様に半田を用いて接続する。銅シールド層は編組銅線を用いて圧着接続を行い、最後に保護層を巻き付ける。三心のケーブルコアをそ

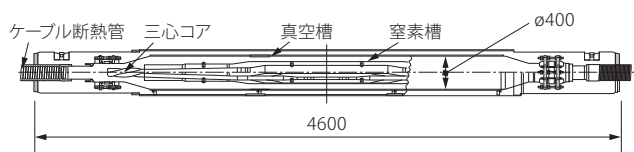


図4 中間接続部概略構造図

れぞれ接続した後に、窒素槽及び真空槽を組み立てる構造である。なお、ケーブルコアは容器と固定せず、ケーブルの熱収縮に対応できるように、容器内にて長手方向に可動代を設けている。

ジョイントモデルサンプルを作製して検証した結果、導体接続部は6.7n Ω /相@3kA、シールド接続部は2.5n Ω /相@3kAの接続抵抗であり、目標である1 $\mu\Omega$ /箇所@3kA以下の接続抵抗を達成した。また、各種試験でも良好な結果が得られ、設計検討した構造において、表5に示す要求仕様を満足することを確認した。

(2) 終端接続部（端末）の開発

図5に終端接続部の概略構造図を示す。三心ケーブルコアの端末処理部及び3相のブッシングを1つの容器に収容した三心一括型端末構造とした。各ケーブルコアに銅製の導体接続金具を取り付けた後、ケーブルの熱収縮による引張力を引き止めるために、本金具をFRP製の引き止め治具を介して容器本体に接続する。常電導機器への電流の取り出しは、ブッシング内の電流リードを介して常温部に引き出す。また、シールド層は誘導電流が流れるように三相短絡処理を実施する。組立施工終了後に、端末容器は大地に固定される。

端末についても、モデルサンプルを作製して各種試験を実施し、設計検討した構造において、表5に示す要求仕様を満足することを確認した。

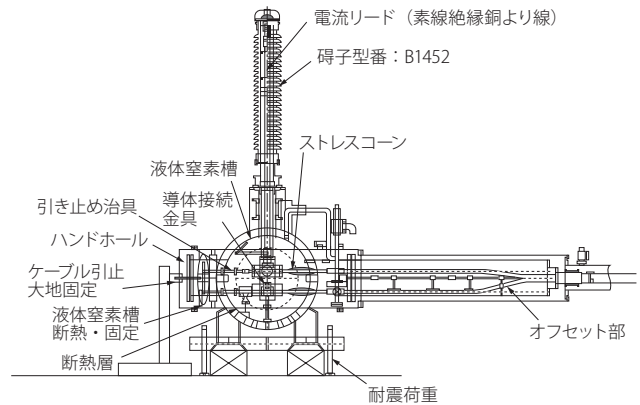


図5 終端接続部構造図

5. 30m ケーブルシステム検証試験

超電導ケーブル、ジョイント及び端末の各コンポーネントについて、設計検討ならびに要素試験を実施し、それぞれが要求仕様を満足することを確認した。次のステップとして、最終形態である、ケーブルと各機器を組み合わせたケーブルシステムとして特性評価及び検証を行うため、30m長の検証用ケーブルシステムを構築した。

5-1 ケーブル製造・出荷試験 要素試験結果をもとに決定した検証用ケーブルの仕様を表6にまとめる。ケーブルコアは、TypeHT線とTypeACT線を組み合わせた、導体4層、シールド2層のハイブリッド構造である。なお、ケーブルコア3心のうち、2心は超電導線を用いた構造であるが、残り1心はダミー線を用いており、それぞれを超電導コア、ダミーコアと称す。主絶縁については、要素試験において、6mm厚のPPLP®においても要求仕様を満足することを確認したが、過去の長期試験の実績を考慮し、7mm厚のPPLP®を採用した。

30mケーブル製造完了後の出荷試験結果を表7に示す。試験の結果、本ケーブルが設計通りの性能を有し、所定の仕様を満足することを確認した。

表6 超電導ケーブルの設計

項目	諸元
フォーマ	140mm ² 分割集合撚り線導体
超電導導体	4層：TypeHT、TypeACT
絶縁層	PPLP®, 厚さ7mm
超電導シールド	2層：TypeHT
銅シールド	3層、80mm ²
三心撚り	緩みなし三心撚り
断熱層	2重ステンレスコルゲート管 真空多層断熱方式
防食層	PVC

表7 超電導ケーブル出荷試験結果

試験項目	目標仕様・試験条件	試験結果
臨界電流測定	導体設計値：6kA シールド設計値：7kA	良好 (6.1kA, 7.1kA)
交流損失測定	1W/m/ph@2kA以下	良好 (0.8W/m/ph)
曲げ試験	18D、D：ケーブル外径	異常なし
課電試験	AC：90kV/3h Imp：±385kV/3回	良好
構造検査	設計との対比	異常なし

5-2 システム建設 図6に検証システムの構成を示す。ケーブル長さは約30mであり、途中に半径5mの90度曲がりを受け、両端に終端接続部（A端末、B端末）、中間に中間接続部（ジョイント）を設けている。本ケーブルシステムを冷却システムに接続し、液体窒素を循環させることでケーブルシステムの運用を行う。冷却システムは、1kW級冷凍機2台、液体窒素循環ポンプ、リザーバタンク等で構成されている。

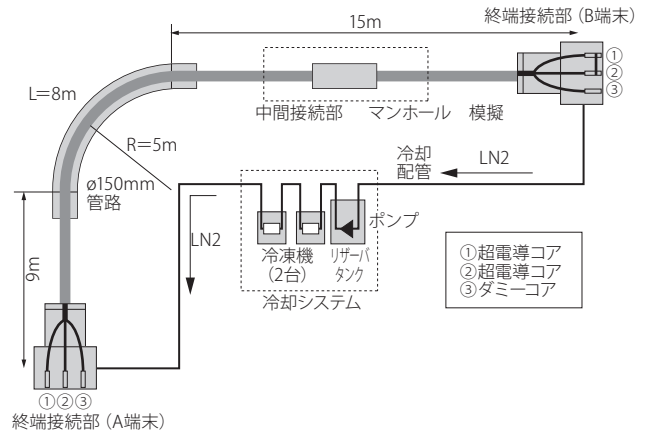


図6 検証用ケーブルシステム構成図

(1) 中間接続部及び終端接続部組立

ケーブル布設完了後に、中間接続部及び終端接続部の組立施工を行った。中間接続部の組立施工は、開発目標である7mマンホールを模擬したスペースにて実施した。施工完了後の中間接続部を写真3に示す。また、施工完了後の終端接続部を写真4に、検証システムの全景を写真5に示す。

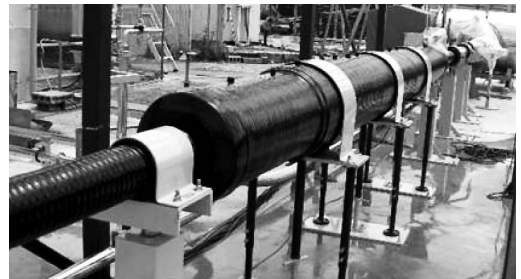


写真3 中間接続部（ジョイント）



写真4 終端接続部（端末）



写真5 30m ケーブル検証システム

(2) 冷却システム

検証用冷却システムで採用した冷却方式は、冷凍機側と超電導ケーブル側の液体窒素パスが同一であり、冷凍機で冷却された液体窒素が直接超電導ケーブルシステムに送られる直接冷却方式である。冷却システムの仕様を表8に、製作した冷却システムを写真6に示す。

表8 冷却システムの仕様

項目	緒元
運転温度	66～77K
運転圧力	0.2～0.5MPa・G
流量	最大 40L/min
冷却容量	2kW@77K、1.6kW@67K
法規対応	高圧ガス保安法 冷凍保安規則



写真6 冷却システム

(3) 計測システム

超電導ケーブルシステムの運転を行う際、温度、圧力、流量等の各種運転パラメータは計測システムにより測定され、異常が認められた際には速やかに警報を発信する体制を構築した。監視機能はネットワーク対応とし、遠隔データ監視、警報受信が行える体制とした。

5-3 検証試験（第一クール） 構築した30m検証用システムを冷却し、電気試験、機械試験及び熱損失測定

等の各種試験を実施中である。表9に検証試験での試験内容を示す。現時点（2009/9/30）では、第一クール（定格確認試験）が終了したところであり、本報では、第一クールの試験結果について報告する。

表9 検証試験計画

試験名	予定	試験項目・内容	
① 定格確認試験	H21/7 ～9	電気特性試験	Ic測定（導体部） シールド誘導電流計測 C・tan δ 特性確認 定格課通電（対地 40kV, 2kA）
		機械特性試験	冷却時の張力測定 中間接続部のコア移動量確認（X線）
		熱的特性試験	ACロス測定（2kA） 断熱管侵入熱測定
		長期課通電試験	対地課電 51kV-連続 通電 2kA-8hON/16hOFF、 1ヶ月
② ヒートサイクル試験	H21/9 ～10	ヒートサイクル試験	一旦昇温し、再度冷却を行い、上記電氣的、機械的、熱的特性に変化がないことを確認する。
③ 限界性能確認試験	H21/11 ～H22/1	ヒートサイクル試験	一旦昇温し、再度冷却を行い、上記電氣的、機械的、熱的特性に変化がないことを確認する。
		限界性能試験	短絡電流模擬試験（～10kA）、 過電流通電試験（～3kA）、 冷凍機故障模擬試験

(1) 初期冷却

ケーブル長手方向の温度分布やケーブル張力等を管理しながら初期冷却を実施した。ケーブル内に備えた光ファイバーにより測定した初期冷却過程の温度プロファイルを図7に示す。冷却はケーブルシステムA端末側から行った。冷

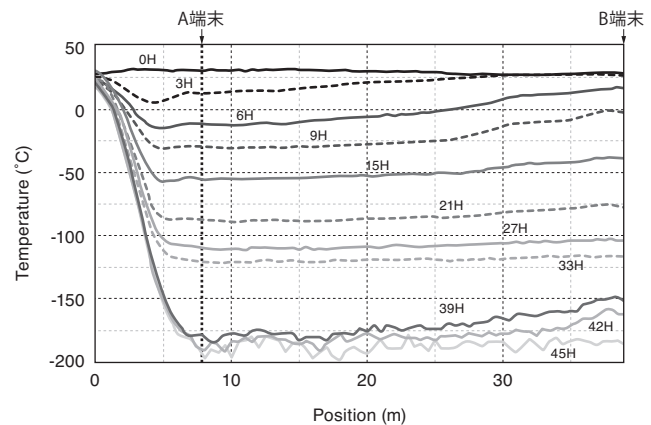


図7 初期冷却時のケーブル部温度分布

却時の温度変化による急激な挙動を抑制するため、 -100°C の窒素ガスにより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した。ケーブル入り口温度が -120°C となり、ケーブル全体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、最終的にケーブル全長を液体窒素温度（約 -200°C ）に冷却した。なお、初期冷却に要した時間は約45時間である。

冷却過程において、両端端末部に発生した最大張力は三心で約2500kgfであり、要素試験にて測定した冷却時の発生張力から想定される値とほぼ一致する結果が得られた。

(2) 臨界電流測定

初期冷却終了後に、超電導導体の健全性を確認するため、全長の臨界電流 (I_c) 測定を実施した。 I_c 測定は、超電導コア2本の超電導導体に往復通電することにより実施した。ケーブル出口温度77.4Kにおいて、超電導導体の I_c を測定した結果を図8に示す。測定された I_c は5.4kA ($1\mu\text{V}/\text{cm}$ 定義)であり、出荷試験結果(6.1kA)及び2コアの超電導導体に往復通電する際に発生する磁場の影響による I_c 低下率から推定される値とよく一致した。本結果より、ケーブル製造、輸送、現地布設、組立施工及び冷却工程を通じて、超電導導体に異常や劣化がないことが確認された。

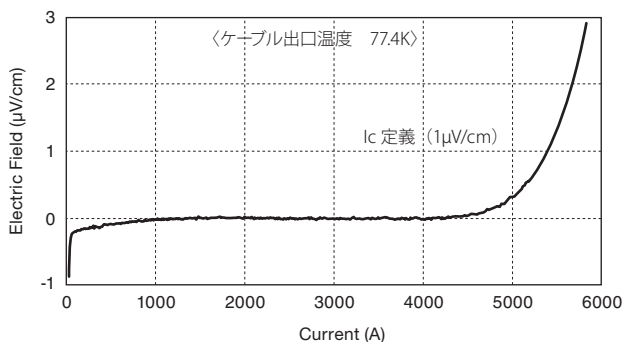


図8 超電導導体の臨界電流測定結果 (I_c)

(3) 交流通電試験

超電導シールドの健全性を確認するため、導体層に2kAの交流通電を行い、シールド層に誘導する電流を測定した。図9に示すように、シールド層には導体電流と逆位相の電流が誘起しており、誘導率は約92%である。本結果はこれまでの実績と同等であり、超電導シールドに大きな異常がないことが確認された。

(4) 課電試験

最終試験として、66kV級の電力ケーブルに要求される耐電圧試験を実施した。実証試験現地システムの竣工耐電

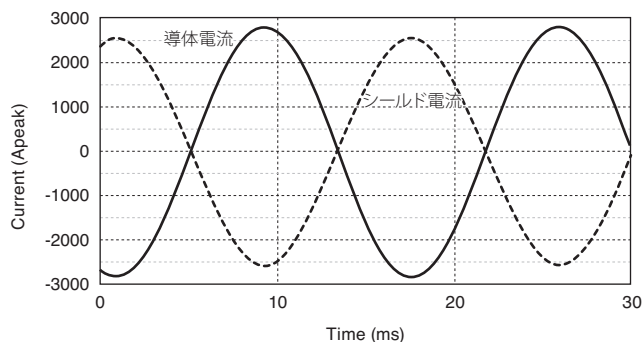


図9 2kA通電時の導体及びシールド電流波形

圧試験であるAC76kV/10分間、系統最大電圧相当の電圧試験であるAC42kV/8時間の課電を実施し、良好な結果が得られた。以上の結果から、検証用30mケーブルの健全性が確認された。

(5) 長期課通電試験

超電導ケーブルシステムが、30年にわたる定格課通電を行うことが可能か検証するため、長期課通電試験を実施した。試験期間を30日間とし、30年間運用に相当する加速試験条件として、対地間電圧51kVを連続で課電し、同時に定格電流2kAを8時間オン、16時間オフする通電サイクル試験を実施した。なお、冷却システムの運転条件は、ケーブル部最低圧力を0.2MPaG、ケーブル部出口温度を約77K、液体窒素流量を40L/minとした。

試験期間中にケーブル温度等に大きな変化もなく、30日間の長期課通電試験を良好に完了した。試験結果を図10に示す。また、長期課通電試験後に実施した部分放電測定においても部分放電は検出されず、良好な結果が得られ、第一クールを終了した。

今後、第二クール及び第三クールを通じて、ヒートサイクル試験や限界性能試験を実施していく。

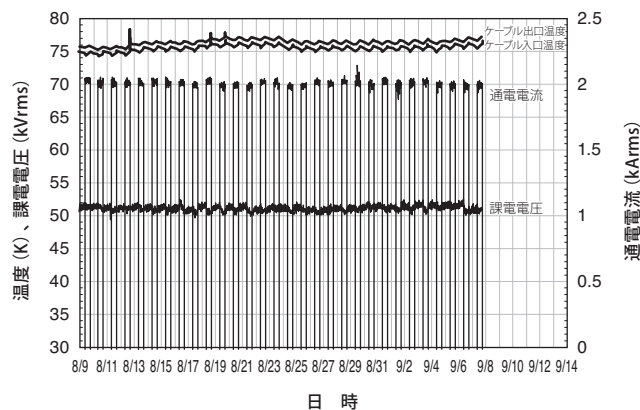


図10 長期課通電試験の結果

7. 結 言

地球温暖化問題の解決や、電力ケーブルの大容量代替を実現できる革新的な技術として期待されている超電導ケーブルの実用化を加速させるため、日本初の実線路実証試験を実施すべく開発を行っている。これまでに、実系統に適応し得る性能を有する重要要素（ケーブル、中間・終端接続部、冷却システム等）技術の開発を進め、その性能を最終形態であるケーブルシステムとして検証中である。今後、実系統に接続した長期連系試験を行うことにより、超電導ケーブルシステムの信頼性・安定性を実証するとともに、実系統における運転方法やメンテナンス方法を検討し、実用化に向けた課題抽出を行っていく。

本技術は国内だけでなく海外への転用も可能である。米国では、送電システムの老朽化に伴うエネルギーセキュリティの観点から基幹送電系の強化（GRID2030）が計画されており、超電導ケーブルはその重要技術として取り上げられている。中国でも、国内経済の急成長に伴って、送電線の増設に対する需要が高まっており、海外における超電導ケーブルの需要は、国内需要の数十倍から数百倍になると推定されている。なにより、地球規模の環境対策として、CO₂排出量削減は持続可能な社会を切り拓くための喫緊の課題であり、本課題を解決しうる超電導ケーブルの事業化は、まさに社会インフラを支えてきた当社の成すべき使命と考え、早期実用化を実現すべく一層努力していく所存である。

用語集

※1 POFケーブル

パイプタイプOFケーブル。一般的に鋼管などのパイプにOFケーブルを引き込み、絶縁油を充填、循環させる電力ケーブル。

※2 CVケーブル

Cross linked polyethylene Vinyl cable。架橋ポリエチレンを絶縁体とし、外側に遮蔽層と防食層を設けた乾式ケーブル。

※3 洞道

地中に構築する暗きょ（トンネル）。床上あるいは柵上にケーブルを布設する。

※4 管路

主に地中に埋設されて活用される、ケーブルを收容するための管状の部材。ケーブルの引き入れや引き抜きを容易にし、布設後は外傷防止の役目を果たす。

※5 交流損失

超電導線材・導体に発生する損失。直流電流・磁界に対して損失は発生しないが、交流電流・磁界に対しては、ヒステリシス損失、渦電流損失、結合損失などの損失が発生する。これらの損失をまとめて交流損失と呼ぶ。

※6 短絡事故

送電ケーブルの相間が導通して起こる事故。

※7 もらい事故

保護リレーによる保護区間外で短絡事故が起きた場合で、短絡事故電流が流れた直後も課通電のある場合の系統事故。

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、「三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) 湯村等、「長尺三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）
- (5) 湯村等、「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）」、SEIテクニカルレビュー、第174号（2009年1月）
- (6) 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）

執 筆 者

大屋 正義*：超電導・エネルギー技術開発部
エネルギー科学博士
超電導ケーブルの開発に従事



湯村 洋康：超電導・エネルギー技術開発部 グループ長
渡部 充彦：超電導・エネルギー技術開発部 主席
芦辺 祐一：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
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
南野 忠彦：超電導・エネルギー技術開発部
西村 崇：超電導・エネルギー技術開発部
増田 孝人：超電導・エネルギー技術開発部 主幹
本庄 昇一：東京電力(株) 技術開発研究所 超電導技術グループ
グループマネージャー
三村 智男：東京電力(株) 技術開発研究所 超電導技術グループ
主任研究員
鬼頭 豊：東京電力(株) 技術開発研究所 超電導技術グループ
主任研究員
野口 裕：東京電力(株) 技術開発研究所 超電導技術グループ 主任

*主執筆者