



Title	超電導ケーブル実証プロジェクトの開発状況
Author(s)	斎藤, 高廣; 増田, 孝人
Citation	電気材料技術雑誌. 2013, 22, p. 21-25
Version Type	VoR
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/76899">https://hdl.handle.net/11094/76899</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

## 超電導ケーブル実証プロジェクトの開発状況

齋藤高廣, 増田孝人

住友電気工業株式会社 超電導製品開発部 大阪市此花区島屋 1-1-3

## Present Status of a Superconducting Cable Demonstration Project

Takahiro Saitou and Takato Masuda

Superconductivity Technology Division Sumitomo Electric Industries, Ltd.

1-1-3, Shimaya, Konohana-ku, Osaka, 554-0024 Japan

High Tc Superconducting (HTS) Cables are expected as a new technology to transmit large electricity in a compact size with lower loss. There are a lot of projects to demonstrate its performance and reliability in the grid around the world. In Japan, HTS cable demonstration project was started in 2007 to demonstrate a 66 kV HTS cable system in the grid. The cable has a 200 MVA capacity with 240 m length located at Asahi substation in Yokohama. The system construction was completed and the grid operation was stated in October, 2012. The system is under operation and transmitting electricity to the residence for more than 9 months. This report describes the outline of the demonstration project and some results of system construction and operation.

Key words : 超電導ケーブル、超電導線材、冷却システム、液体窒素

## 1. はじめに

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<sup>1)</sup>ことから、次世代の大容量送電技術として期待されている。例えば、老朽化した大容量の POF ケーブルの取替時期にきていると言われているが、容量が小さい CV ケーブルを用いる場合には増回線が必要であり、新たな洞道や管路を建設することが必要となってくるが、都市部の地下の状況を考えると、建設が困難であったり、コストが非常に高価になると予想される。一方、超電導ケーブルを使えば、新規の洞道、管路を建設することなく、既設のスペースで布設することが可能である。

現在、超電導ケーブルの開発は、国内外で活発に実施されている。表 1 に世界各国における超電導ケーブルプロジェクトについて記すが、いくつかのプロジェクトで実系統に接続した検証試験が行われている。

住友電工では、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の開発を継続して進めている<sup>2) 3)</sup>。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<sup>4)</sup>。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<sup>5)</sup>。

超電導ケーブルの実証試験は海外で複数行われているものの、日本の電力系統においては、まだ超電導ケーブルが接続されて運転される実績はなかったが、平成 19 年度より「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」が始まり、日本で初めて超電導ケーブルを実系統運転することを目的に開発が進められてきた<sup>6)</sup>。

本稿では、そのプロジェクトで開発したケーブルや、システム建設について報告し、その後行われた、実系統接続の状況についても報告する。

表 1 各国の超電導ケーブルプロジェクト

Table 1 Superconducting cable project in the world

地域	プロジェクト	電圧 kV	電流 kA	長さ m	場所	状況
日本	実証プロ	66	2	240	変電所	運転中
	中部大学	20	2.0	200	大学構内	評価中
米国	Albany	34.5	0.8	350	送電線	終了
	OHIO	13.2	3.0	200	変電所	終了
	LIPA	138	2.4	600	送電線	運転中
	Hydra	13.8	4.0	200	未定	計画
欧州	Amsterdam	50	3.0	6000	送電線	計画
	VNIKP	20	1.4	200	工場試験	終了
中国	雲南	35	2.0	33.5	変電所	運転中
	蘭州	10.5	1.5	75	工場内	終了
	電工所	1.5	10.0	380	アルミ精錬工場	運転中
韓国	DAPAS (1)	22.9	1.25	100	試験所	終了
	DAPAS (2)	154	3.75	30	試験所	終了
	GENI	22.9	1.25	500	変電所	終了

## 2. 高温超電導ケーブル実証プロジェクト概要

本プロジェクトは、独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構新 (NEDO) からの委託を受け、東京電力株式会社、住友電気工業株式会社、株式会社前川製作所が開発を行っているもので、日本で初めてとなる超電導ケーブルの実系統運転を目標としている。具体的には、東京電力管内の旭変電所（神奈川県横浜市）に 66kV 級超電導ケーブルシステムを構築し実線路運用を実施することである。このプロジェクトを通じて、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検証することになっている。開発スケジュールを図 1 に示す。プロジェクトは平成 19 年度にスタートし、要素開発、30m 級ケーブルを用いた工場試験を経て、平成 22 年度から、旭変電所での工事に入り、平成 24 年 10 月から実系統運転を開始している<sup>7)</sup>。

項目	H19年度	H20年度	H21年度	H22年度	H23年度	H24年度	H25年度
要素技術	低損失線材開発 交流損失評価 短絡電流対策 大容量接続部 開発	30m級試験 試験 (工場試験)	ケーブル 機器製造	ケーブル・機器 冷却システム 設置		事前 検証 試験	実証 運転
現地試験	実証場所 選定 系統への影響評価 法令対応						

図 1 実証プロジェクト開発スケジュール

Fig.1 Development Schedule of the demonstration project

### 2.1 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 2 に示す通りであり、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遮断器、断路器を介して、変電設備と接続される。超電導ケーブルは併設される冷却システムにて、液体窒素を循環して冷却される。

尚、超電導ケーブルのメンテナンス等で運転を停止する場合に備えて、バイパス回路が設けられている。

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 通電が可能なことを要求仕様とした。

また、東京電力にて、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、定格送電が可能なこ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。

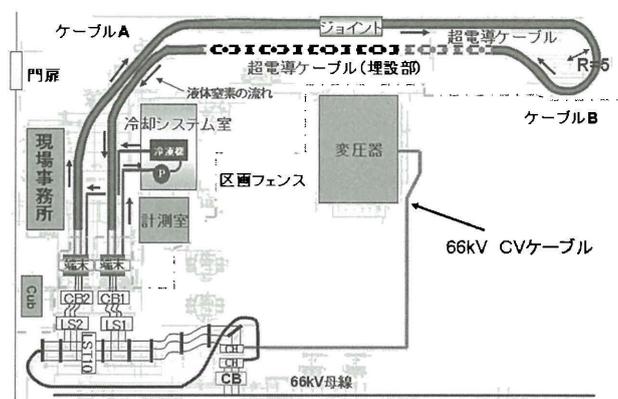


図 2 超電導ケーブルシステムレイアウト  
 Fig.2 Layout of the HTS cable system

表 2 超電導ケーブル要求仕様  
 Table 2 Requirement specifications of HTS cable

項目	諸元
定格電圧・電流	66kV・1.75kA
最大電流	3kA
交流損失	1W/m/ph @ 2kA
耐短絡電流特性	31.5 kA, 2sec : ケーブルにダメージなし 10kA, 2sec : 即時再送電可能

### 3. 超電導ケーブル仕様<sup>8)</sup>

開発した超電導ケーブルの構造を写真 1、諸元を表 3 に示す。超電導ケーブルは三心一括型で、ビスマス系高温超電導線材を使用している。導体は、交流損失を目標値の 1W/m/ph@2kA 以下に抑えるために、従来のビスマス線材 (Type HT) と低交流損失タイプのビスマス線材 (Type ACT) を使用している。電気絶縁層には、PPLP® (polypropylene laminated paper) を用いている。また、超電導シールドにはビスマス線材 (Type HT) を用い、導体と逆方向の電流を流し磁場が漏れないようにしている。短絡電流対策のために、銅撚り線フォーマや銅シールドを設けており、超電導部分で流しきれない電流をこの銅部分に分流させ、温度上昇を抑制する構造になっている。

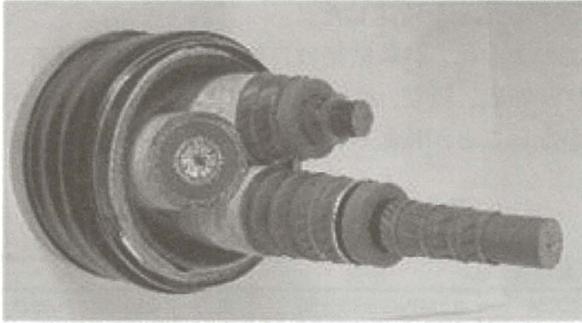


写真1 超電導ケーブル構造  
Photo 1 3-cores HTS cable

表3 超電導ケーブル構造  
Table 3 Specifications of the HTS cable

項目	諸元	
ケーブルコア	フォーマ	Cu 撚線 (140mm <sup>2</sup> )
	超電導導体	4層構造 (HT/HT/ACT/ACT)*
	電気絶縁	PPLP <sup>®</sup> 7mm <sup>l</sup>
	超電導シールド	2層構造 (HT/HT)*
	Cuシールド	Cuテープ (77mm <sup>2</sup> )
断熱管	ステンレス製2重コルゲート管 +多層真空断熱層	
外部保護層	PVC+ステンレステープ	

\*HT：ビスマス系標準線、ACT：ビスマス系低交流損失線

#### 4. 出荷試験

表4に出荷試験の試験項目と結果を示す<sup>9)</sup>。断熱管内管の耐圧力試験は、室温にて全長で行い、冷却が必要なものは、製造ケーブルから短尺サンプルを切り出して実施した。

表4 出荷試験結果  
Table 4 Shipping test results

試験項目	対象	結果	判定	備考
臨界電流測定 @77K	サンプル	導体: 6.9 kA シールド: 7.3 kA	良好	素線Ic ×本数
交流損失測定 @77K	サンプル	0.9 W/m/phase at 2kA, 50Hz	良好	
曲げ試験 <sup>t</sup>	サンプル	曲げ直径 2.7 m×2往復に低下なし	良好	
耐電圧試験	サンプル	AC 90 kV, 3時間 AC100kV, 10分間 雷 Imp ±385 kV, 3回 いずれも課電できることを確認	良好	JEC 3401参照
耐圧力試験	全長	0.75MPaG@30分間で漏れなし (設計0.5+0.1)×1.25	良好	高圧ガス保安法参照

耐電圧試験については、PPLP<sup>®</sup>+液体窒素の絶縁構造が従来のOFケーブルの絶縁構造と類似していること、その長時間特性を示すn値が50近くと大きいこ

とから<sup>10)</sup>、OFケーブルの試験を規定している、JEC3401を参考に、試験条件を決定した。尚、表3に示すように、試験結果は良好であった。

#### 5. システム建設

##### 5.1 ケーブル布設

ケーブルは、通常ケーブルと同じくドラムに巻かれ、トレーラにて大阪から横浜へ輸送された。図2に示したレイアウトから、ケーブルは2本に分かれており、それぞれのケーブルは、中間接続部の位置から、A 端末側および B 端末側の管路に引き込まれた。ケーブル長が長く、曲がり部が多い B 端末側ケーブル布設時の張力変化を図3に示す。最大張力は設計値 2ton に対して 1.3ton であり、ケーブルの許容値以内であった<sup>11)</sup>。

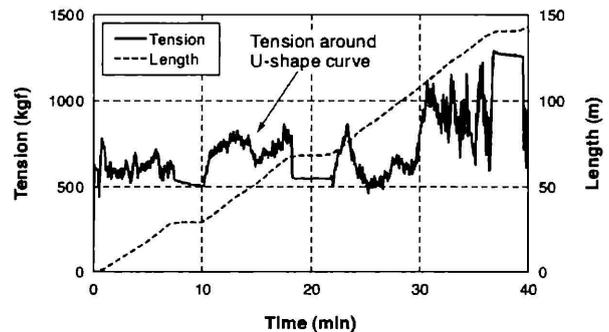


図3 管路引込み時の布設張力  
Fig.3 Tension of HTS cable pulled into the duct

##### 5.2 中間接続部・終端接続部組立

従来の電力ケーブルと同様に、ケーブルは現地で長さ調節(切断)して機器を組立てた。断熱管真空層は、機器の組立期間において再度再真空引きを行った。中間接続部の完成状況を写真2に、終端接続部の完成状況を写真3に示す



写真2 ジョイント外観  
Photo 2 Joint over view

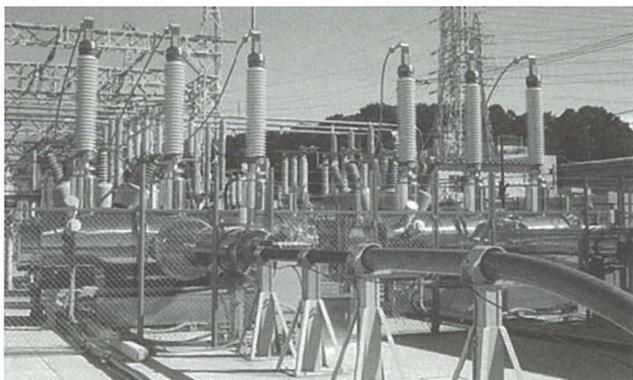


写真3 端末外観  
 Photo 3 Termination over view

### 5.3 冷却システム

冷却システムの概要を図4に示す。システムは冷凍機、循環ポンプ、リザーバタンク等から構成され、冷凍機は1kW級スターリング冷凍機6台を2台×3並列で配置し、ポンプ2台も並列に配置した<sup>12)</sup>。本方式では、それぞれ機器に冗長性を持たせており、冷却を継続状態で、冷凍機とポンプのメンテナンスあるいは故障時の対応が可能となっている。

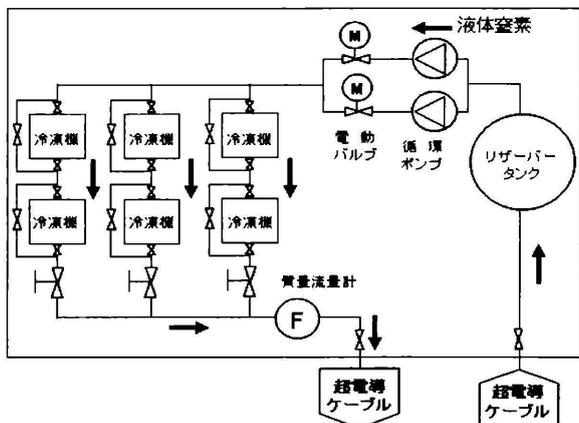


図4 冷却システム構成  
 Fig.4 Configuration of the cooling system

### 6. 系統接続前検証試験

ケーブルシステムが完成後、ケーブルを冷却し、実系統接続前に試験を実施している。主な試験の項目と結果を表5に示す<sup>10)</sup>。

臨界電流(Ic)測定は、導体部分での全長測定を実施した。電圧タップは室温部の碍子上部の金具に設けたため、測定電圧には常電導部の抵抗が加算されるため、その抵抗分を差し引いて Ic を決定する必要がある。電流と超電導部分の電圧の測定結果を図5に示す。測定された導体 Ic は6.4kA@77Kであり、出荷試験の値よりもやや低い、磁場の影響を考慮した Ic とよく

一致することを確認した。

このように、試験結果は良好で、現地における、ケーブル布設、組立、冷却において、ケーブルにダメージがないことが検証された。

表5 系統接続前検証試験結果  
 Table 5 Test results before connecting to the grid

試験項目	結果	判定	備考
気密試験	0.5MPaG@30分間 漏れなし	良好	高圧ガス保安法参照
臨界電流測定@77K	導体: 6.4 kA	良好	往復通電による磁場の影響考慮
無負荷時熱損失測定	2.4 kW	良好	ケーブル+端末
耐電圧試験	DC 151.8 kV, 10分間 課電できることを確認	良好	電気設備基準参照

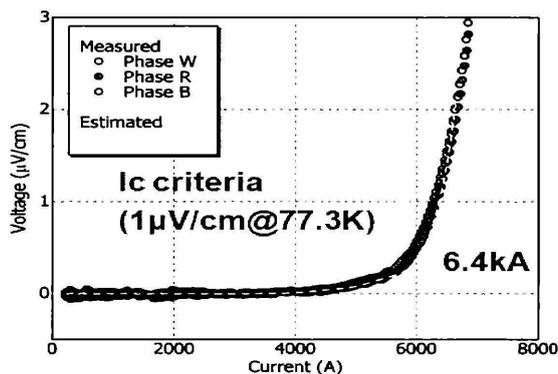


図5 臨界電流測定結果  
 Fig.5 Results of Critical current measurement

上記試験のあと、端末の片側のみ系統に接続し、系統電圧を印加し、部分放電 (PD) の測定を行った。測定は、両端末のブッシングの接地線にセンサーを取り付け、ケーブル及びブッシングで PD が発生すれば感知できるシステムを組み上げ、測定を行った。尚、測定感度は50pCであった。10分間の測定で、超電導ケーブル内で上記感度以上の PD 信号は観測されず、良好であると判断された。

### 7. 実系統運転

本ケーブルシステムの運用前確認試験の結果は良好であり、仕様を満たすことが確認された。本結果を受けて、2012年10月29日に、国内で初めて超電導ケーブルシステムが実系統線路へ接続された。

本ケーブルシステムでは、現地運転状況の遠隔モニタが可能であり、現地無人運転体制に移行後、遠隔監視を行いながら実系統線路での運用を継続している。

系統接続後の電圧、電流とケーブル入口温度、リザーバタンク圧力、循環流量、の推移を図6に示す<sup>13)</sup>。

ケーブル入口温度は、冷凍機 4⇔5 台運転にて温度 69 ±1K で安定的に制御されている。リザーバタンク圧力は 0.2MPaG、循環流量 40L/min で維持されている。

- 12) 池内 他、「超電導ケーブル用冷却システムの構築」、2010 年度春期低温工学・超電導学会講演概要集、pp.100
- 13) 下田等、「高温超電導ケーブルの実系統運転特性評価（5）」、平成 25 年電気学会全国大会 5-146

(2013 年 8 月 13 日受理)

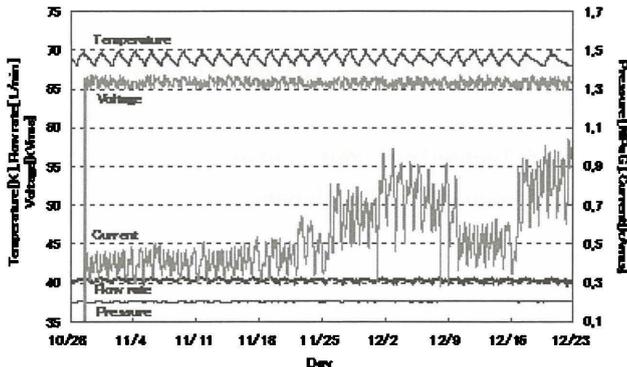


図 6 実証運転時の電流、温度、圧力等の推移  
Fig.6 Transition of operation current, LN2 temperature and pressure during the grid operation

## 8 おわりに

以上報告したように、検証試験の結果は良好で、系統に接続した実証試験を開始した。試験は平成 26 年 2 月まで実施する予定で、冷却システムを含んだ超電導ケーブルシステムの実系統運転における安定性、信頼性を検証していく予定である。

斎藤 高広



1970 年 7 月 21 日 1995 年 京都大学工学研究科修士課程終了（機械工学専攻）、1995 年住友電気工業入社 切削工具の開発に従事した後、超電導ケーブルの開発に従事、現在に至る。

増田 孝人



1962 年 1 月 23 日生。1985 年大阪府立大学工学部電子工学科卒業。1987 年同大学院工学研究科博士前期課程（電子情報工学専攻）修了。1987 年住友電気工業入社。主に超電導ケーブル開発に従事。低温工学・超電導学会会員、電気学会会員

(本論文は平成 24 年度電気材料技術優秀論文の受賞内容をまとめたものである)

## 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) S.Honjo, et.al., "Status of superconducting cable demonstration project in Japan," IEEE transactions on Applied Superconductivity, vol.21, pp.967-971, 2011
- 7) 三村等、「高温超電導ケーブルの実系統運転特性評価 (1)」、平成 25 年電気学会全国大会 5-142
- 8) 大屋等、「三心一括型超電導ケーブルによる国内初の実系統送電 (高温超電導ケーブル実証プロジェクト)」、SEI テクニカルレビュー-182 号 (2013)
- 9) 増田等、「高温超電導ケーブルの実系統運転特性評価 (3)」、平成 25 年電気学会全国大会 5-144
- 10) 鈴木寛等、「低温絶縁超電導ケーブルの絶縁設計とその実証」、電学論 B、126 巻 4 号 (2006)
- 11) 稲垣 他、「高温超電導ケーブル実証プロジェクトの進捗状況」、電気学会超電導応用電力機器研究会資料、ASC-12-003 (2012)