テーマ解説

NEDO「イットリウム系超電導電力機器技術開発」プロジェクト における超電導ケーブルの開発

大熊 武^{*1,†}, 大屋 正義^{*2}, 八木 正史^{*3}

Development of REBCO HTS Power Cables in “Materials & Power Applications of Coated Conductors Project”

Takeshi OHKUMA^{*1,†}, Masayoshi OHYA^{*2} and Masashi YAGI^{*3}

Synopsis: There are expectations for high-temperature superconducting (HTS) power cables as compact cables with large capacity and low-loss power transmission. Recently, the stable manufacture of many long REBCO (RE = rare-earth element) tapes has been achieved. REBCO tapes have a high critical-current density, and the AC loss resulting from the parallel magnetic field is extremely small because of the thin-film structure of the superconducting layer. The basis of the Materials & Power Applications of Coated Conductors (M-PACC) project is to develop a process technology for fabricating REBCO tapes and promote development aiming toward the commercialization of superconducting cables using REBCO tapes. Two types of HTS cables are being developing as part of this project. These cables have superior transmission efficiency, lower loss and larger capacity than existing power cables. One is a 66 kV/5 kA_{rms} three-core large-current cable and the other is a 275 kV/3 kA_{rms} single-core high-voltage cable. There are several development targets. We examined factors such as AC loss, thermal characteristics of the cables under overcurrent and the optimum cable design. The cable systems of the above mentioned two kinds of cables were developed by combining the above elemental technologies and verifying the performance. This paper provides an overview of the project and describes its results.

Keywords: high-temperature superconductors, coated conductors, power cable, AC loss, overcurrent

1. はじめに

2008 年度より経済産業省から(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)を通じて、「イットリウム系超電導電力機器技術開発」プロジェクトにおいて、超電導電力ケーブルに関する研究開発¹⁾を実施し、2013 年 2 月末に完了した。

本稿では、このプロジェクトで実施した研究開発の概要を紹介する。

2. 超電導電力ケーブルの開発

超電導電力ケーブルは、コンパクトな形状で大容量送電を可能にし、既存の電力ケーブルに比べて送電損失を低減することが可能であることから、省エネルギー、地球温暖化対策に貢献できることも期待されており、国内外において様々な検討・開発が行われている。特にイットリウム系超電導線材(以下 Y 系線材)は、近年、長尺化・高特性化等の性能向上が著しく、高電流密度・低損失などの特性を有し、コンパクトで更なる大容量・低損失送電を可能とする超電導電力ケーブルとして期待されている。

2.1 プロジェクトの概要

本プロジェクトでは、66 kV/5 kA_{rms} 級大電流ケーブルと 275 kV/3 kA_{rms} 級高電圧ケーブルの 2 種類のケーブル開発を行うとともに実用化に重要な要素技術の開発を行った。本プロジェクト前半 3 ヶ年においては、超電導電力ケーブルの「大電流・低交流損失ケーブル化技術」「高電圧絶縁・低誘電損失ケーブル化技術」「超電導電力ケーブルの

Received August 20, 2013

^{*1} 国際超電導産業技術研究センター
〒113-0062 東京都江東区東雲 1-10-13
International Superconductivity Technology Center (ISEC),
1-10-13 Shinonome, Koto-ku, Tokyo 135-0062, Japan

^{*2} 住友電気工業株式会社
〒554-0024 大阪府大阪市此花区島屋 1-1-3
Sumitomo Electric Industries, Ltd.
1-1-3, Shimaya, Konohana-ku, Osaka 554-0024, Japan

^{*3} 古河電気工業株式会社
〒290-8555 千葉県市原市八幡海岸通 6 番地
Furukawa Electric Co., Ltd.
6, Yawata-kaigandori, Ichihara, Chiba 290-8555, Japan

[†] E-mail: ohkuma.takeshi@tepco.co.jp

Table 1 Target specifications of the HTS power cable

Voltage/Current	66 kV/5 kA _{rms} (570 MVA)	275 kV/3 kA _{rms} (1,420 MVA)
Structure	Three cores in one pipe 15 m in length with terminal	One core in one pipe 30 m in length with terminal
Cable loss	2.1 W/m-phase @ 5 kA _{rms}	0.8 W/m-phase @ 3 kA _{rms}
Cable outer diameter	< 150 mm ϕ duct	< 150 mm ϕ
Withstanding overcurrent	31.5 kA _{rms} , 2 sec	63 kA _{rms} , 0.6 sec

熱収支に関する評価」および「Y 系線材の安定製造・加工技術」などの要素技術に関する研究開発を行うとともに「ケーブルシステム検証」に必要なシステム設計、試験条件の検討を行った。また、後半 2 カ年においては、これらの成果をもとに各ケーブルシステムの製造およびシステム検証試験において課通電特性や送電損失など、ケーブルシステムとしての実用性を検証した。**Table 1** に各ケーブルの開発目標を示す。

3. 66 kV/5 kA 級大電流ケーブル

大電流ケーブルの開発のスケジュールを **Fig. 2** に示す。Y 系線材を用いた 66 kV 級の三心一括型ケーブル (**Fig. 1** 参照) について、最初の 3 年間 (2008~2010 年度) で大電流導体化技術、低損失化技術、短絡電流保護技術等の要素技術開発を行った¹⁾。後半 2 年間 (2011~2012 年度) で 15 m ケーブル製造およびシステム建設を行い、ケーブルシステムの定格性能を検証するとともに、30 年間運用に相当する加速試験条件にて課通電試験を行い、長期性能の検証を行った。

3.1 要素技術開発 (低損失化)

Y 系線材は超電導層厚が数 μm と薄いため、平行磁場に対する交流損失が非常に小さく、ケーブル化した場合の損失は主に線材間ギャップに発生する垂直磁場によって発生

Fig. 1 Structure of the REBCO wire and three-in-one HTS cable.

Fig. 2 Schedule of the 66 kV cable development.

する。このため、細幅にスリットした線材を用いて超電導導体層を構成することにより、層断面を真円に近づけ、線材間ギャップの垂直磁場を低減することが低損失化の基本方針となる²⁾。本プロジェクトでは、30 mm 幅で成膜した Y 系線材を 2~4 mm 幅にスリットして超電導導体層を構成し、損失特性を検証した。

ケーブル構造を決定するにあたり、**Table 2** に諸元を示す 3 種類 (スリット方法も含めると 4 種類) の線材を用いて、**Table 3** に諸元を示す 5 種類の超電導導体サンプルを試作した。Clad 基板³⁾が磁性を有しているのに対して、IBAD 基板は非磁性である。線材は 2 mm あるいは 4 mm 幅にスリットした後に、全周に銅メッキを施した。試作したケーブル導体の諸元を **Table 3** に示す。全ての導体が 4 層構造であり、その外径寸法等は同じである。各層のスパイラルピッチは、交流電流が均等に分流するように調整を行っており、サンプルの有効長は約 1.5 m である。なお、77 K における導体の臨界電流値 (I_c) は **Table 3** に示すとおりであり、Clad 線材と IBAD 線材の特性差により、導体 E のみが高い I_c を有している。

各導体の交流損失測定結果を **Fig. 3** に示す。導体 I_c を近づけるため、導体 A~D は 74 K、導体 E は 77 K における測定結果を比較して示している。

- ・Clad 線材導体 (A~D) : 最外層に 2 mm 幅線材を、さらに全層に 2 mm 幅線材を用いることで低損失化が可能。
- ・スリット方法 (B、C) : 機械スリットよりも端部 I_c 低下の小さいレーザスリットの採用により低損失化が可能。

Table 2 Specifications of the HTS wires

	Clad (4 mm ^w)	Clad (2 mm ^w)	IBAD (2 mm ^w)
Substrate	Textured metal	Textured metal	Hastelloy [®]
Buffer layer	CeO ₂ /YSZ /CeO ₂	CeO ₂ /YSZ /CeO ₂	GZO/MgO /LMO/CeO ₂
HTS layer	GdBCO	GdBCO	GdBCO
Stabilizing layer	Ag, Cu	Ag, Cu	Ag, Cu
Thickness	170 μm	170 μm	150 μm
I_c @ 77 K	125~165 A	60~90 A	110~130 A

Table 3 Specifications of the HTS conductors

	A	B	C	D	E
Former	FRP pipe (21 mm ϕ)				
1 st layer	Clad, 4 mm ^w , MS	Clad, 4 mm ^w , MS	Clad, 4 mm ^w , MS	Clad, 2 mm ^w , LS	IBAD, 2 mm ^w , LS
2 nd layer	Clad, 4 mm ^w , MS	Clad, 4 mm ^w , MS	Clad, 4 mm ^w , MS	Clad, 2 mm ^w , LS	IBAD, 2 mm ^w , LS
3 rd layer	Clad, 4 mm ^w , MS	Clad, 4 mm ^w , MS	Clad, 4 mm ^w , MS	Clad, 2 mm ^w , LS	IBAD, 2 mm ^w , LS
4 th layer	Clad, 4 mm ^w , MS	Clad, 2 mm ^w , MS	Clad, 2 mm ^w , LS	Clad, 2 mm ^w , LS	IBAD, 2 mm ^w , LS
O. D.	24 mm				
I_c @ 77 K	8.3 kA	8.2 kA	8.3 kA	8.4 kA	12.4 kA

* MS: Mechanical slit; LS: Laser slit

Fig. 3 Measured AC loss of the HTS conductors.

Fig. 4 Normalized AC loss of the HTS conductors.

- ・2 mm 幅線材導体 (D、E) : IBAD 線材を用いた導体 E よりも Clad 線材を用いた導体 D の損失が低い。

各通電電流ピーク値 (I_{peak}) に対する磁場分布と線材の I_c - B 特性を用いて計算した導体 I_c で損失を規格化した結果を Fig. 4 に示す。なお、同図中に京都大学の数値シミュレーション結果⁴⁾も合わせて示す。

- ・Clad 線材導体 : 4 mm 幅および 2 mm 幅線材を用いた導体 (A、D) とともに、解析結果より損失が小さい。

- ・IBAD 線材導体 : 2 mm 幅線材を用いた導体 (E) は、高負荷領域で解析結果とほぼ一致する。

本結果は、磁性基板の高透磁率特性により、内層の線材間ギャップに起因する磁場の乱れが平滑化され、外層線材に印可される垂直磁場が低減することで導体損失が低下する可能性を示唆している⁵⁾。

3.2 検証ケーブル製造とシステム建設

上記 4 層導体の試作検証結果を反映して決定した 15 m ケーブルの設計を Table 4 に示す。銅撚り線フォーマの外側に、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状に巻き付けてケーブルコアを形成し、3 本のケーブルコアを撚り合わせて 1 本の断熱管内に挿入することで三心一括型ケーブルを製造する。

- ・2 mm 幅線材を用いた低損失化効果は大きいですが、スリット加工の品質管理や歩留り等を考慮し、発生磁場が最も大きい導体最外層のみに 2 mm 幅線材を用いるハイブ

リッド構造を採用した。なお、4 mm 幅線材には機械スリット、2 mm 幅線材にはレーザスリットを採用した。本設計で短尺サンプルを作製して交流損失 1.5 W/m-phase@5 kA_{rms} (71 K) を検証、損失目標 (2 W/m-phase 以下) を達成するとともに、5 kA_{rms} の連続通電試験に成功した。

- ・銅フォーマと銅シールド層に短絡電流 (最大 31.5 kA_{rms}、2 秒) を分流させ超電導層の温度上昇を抑制する構造を採用した。早稲田大学の数値シミュレーション⁶⁾により銅層の必要最小断面積を決定し、サンプル試験において温度上昇が想定範囲内であることを確認した¹⁾。
- ・電気絶縁層は、PPLP[®] (Polypropylene laminated paper) に液体窒素を含浸させた複合構造であり、絶縁厚 6 mm のサンプル試験で要求仕様を満たすことを確認した。
- ・ケーブル小径化のため、冷却時に発生する 0.3% の熱収縮を吸収する三心コア緩み⁷⁾は設けず、発生する約 3 ton の張力は大地に固定した両端末で把持する設計とした。

総長 7 km 長の Y 系線材を用いて製造した検証ケーブルは Table 5 に示す出荷試験に合格し、試験サイトに向けて出荷した。なお、検証ケーブルの端部から切り出したサンプルの交流損失測定結果 (71 K) を Fig. 5 に示す。

製造したケーブルを用いて課通電試験向けケーブルシステムを建設した。システムの構成を Fig. 6 に示す。ケーブル両端には終端接続部 (A 端末、B 端末) をそれぞれ設けたが、B 端末では三相の導体層を容器内部で短絡し、A 端末ではそれぞれ電流リードを介して常温部に引き出す構成とした。なお、シールド層は両端末内部で三相短絡処理を実施した。完成後のシステム外観を Fig. 7 に示す。

Table 4 Specifications of the 15-m cable

Layer	Specification	Diameter (mm)
Former	Stranded Cu wires with insulation (140 mm ²)	21
HTS conductor	4 layers, REBCO wires (4/4/4/2 mm ^m)	23
Electric insulation	PPLP [®] (6 mm ^l)	37
HTS shield	2 layers, REBCO wires (4/4 mm ^m)	38
Cu shield	Cu tapes (100 mm ²)	42
Protection	Kraft papers, nonwoven tapes	44
3 cores	Tight 3-cores stranding	96
Cryostat	Double-corrugated SUS pipes, multilayer vacuum insulation	133
Sheath	PVC	140

Table 5 Shipping test results of the 15-m cable.

Item	Results	Comments
I_c measurement at 77 K	Conductor: 8.6 kA Shield: 7.2 kA	As designed
AC loss measurement at 5 kA _{rms} , 71 K	1.5 W/m-phase	As designed
Structural examination	Pass	As designed

Fig. 5 Measured AC loss of the cable sample.

Fig. 8 I_c measurement result of the 15-m cable system.

Fig. 6 Schematic view of the 15-m HTS cable system.

Fig. 9 AC loading test result.

Fig. 7 15-m HTS cable system.

3.3 システム課通電試験

ケーブルシステムを液体窒素温度まで冷却した後、循環冷却システムと接続して検証試験を実施した。

(1) 臨界電流測定

本試験では、長尺線路を想定した「2 コア往復通電方式」^{8,9)}を採用した。ケーブル平均温度 77 K において測定した電流電圧特性を Fig. 8 に示す。1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ 定義の I_c 値は 8 kA であり、往復通電時に発生する漏れ磁場による低下率を考慮した予想値と一致し、超電導特性の健全性が確認された。

(2) 交流通電試験

臨界電流測定後、ケーブルシステムを交流通電装置に接続し、Fig. 9 に示すように段階的に 5 kA_{rms} まで通電電流を上昇させた結果、液温も安定した状態を維持し、最終的に 5 $\text{kA}_{\text{rms}} \times 8$ 時間の通電試験を良好に完了した。なお、このときの想定 I_c は、導体層が 14 kA、シールド層が 12 kA である。5 kA_{rms} 通電時にケーブル部両端に発生する液体窒素

Fig. 10 Transport and shield current.

の温度差から算出した交流損失値は 1.8 W/m-phase であり、目標値以下であることを確認した。なお、5 kA_{rms} 通電時の通電電流およびシールド電流波形を Fig. 10 に示す。シールド電流の誘導率は 91%であり、これまでの実績と同等の値が確認された。

(3) 長期課通電試験

ケーブルシステムを一旦昇温した後、再度冷却して臨界電流特性を確認したが、ヒートサイクルによる特性劣化は確認されなかった。さらに定格電圧を課電して部分放電が発生しないことを確認した後、30 日間の長期課通電試験を実施した。電圧は 30 年間運用に相当する加速試験条件¹⁰⁾として対地間電圧 51 kV を連続で課電し、同時に定格電流

Fig. 11 Status of the long-term operation test.

5 kA_{rms}を8時間オン、16時間オフする通電サイクル試験を行った。なお、冷却システムの運転条件は、ケーブルシステム出口圧力を0.2 MPaG以上、ケーブルシステム出口温度を68 K以下、液体窒素流量を40 L/minとした。長期課通電試験の結果をFig. 11に示す。試験期間中にケーブルシステムの温度に異常な変化もなく、30日間の試験を良好に完了した。

この後の課電試験において部分放電は観測されず、臨界電流特性にも変化がないことを確認し、システム検証試験を良好に完了した。

(4) 残存性能試験

システム検証試験完了後、ケーブルシステムの解体調査を行うとともに、切り出したケーブルサンプルの臨界電流測定、交流損失測定、耐電圧試験（AC90 kV×3時間、AC100 kV×10分、Imp±385 kV×3回）¹⁰⁾および構造調査を実施して、良好な結果を得た。

今後、Y系線材の高性能化・低損失化、冷却システムの高効率化・低コスト化等の課題が残っており、実システムにおいてケーブルシステムの長期信頼性の実証を行っていく必要はあるが、本プロジェクトを通じて、大電流・低損失ケーブルの特性評価に目処をつけた。

4. 275 kV/3 kA級高電圧ケーブル

高電圧ケーブル開発においては、本プロジェクト前半3ヵ年の成果を生かしつつ、さらなる設計の最適化を検討し、50 m長のケーブル作製に生かした。全長50 mから、20 mを抜き取り、特性性能検証によって設計どおりに作られているかを確認し、残りの30 mについては中間接続部、終端接続部を組み立てた後に、長期課通電試験を行い、実用性を検証した。

4.1 開発目標

単相275 kV、3 kA_{rms}の電流を通電可能とする単心ケーブル終端接続部と中間接続部を開発し、30 m長ケーブルシステムにて検証試験を行う。

目標として、1相あたりのケーブル損失は、0.8 W/m・@3

kA_{rms}/275 kV（相電圧）以下とする。ケーブル外径は、φ150 mm以下とし、275 kV級の電力システムで事故等が生じた場合の過電流に耐え得る構造とする。

4.2 耐過電流特性の向上

前半3ヵ年で検討した超電導ケーブルは銅撚り線325 mm²の丸撚り導体、超電導シールドには銅編組線310 mm²を使って、事故電流による過電流保護とした。その結果、275 kVシステムで最悪の事故ケース63 kA_{rms}-0.6 secの過電流に対しても耐性を示したものの、導体の温度は最大で150 Kと約70 Kの温度上昇が観測された¹⁾。上昇した後の、温度の復帰は外側からのLN₂による冷却であるため、2 mの単尺ケーブルにもかかわらず、2時間の時間を要した。そこで、温度上昇を抑え復帰時間を早くするために、中空銅フォーマ400 mm²を採用し、通電・伝熱特性を解析し¹¹⁾、試験結果と比較した。その結果、0.1 secまでは超電導特性の臨界温度以下（90 K）であり、瞬時復帰が可能である。また、0.6 secの温度上昇は実験で20 K、解析で導体27 K、シールド32 Kであり、丸撚り導体の325 mm²の70 Kと比較しても低く抑えることができ、さらに復帰特性も2時間から10分以内に改善された。

4.3 交流損失および誘電損失の最適化

4.2における耐過電流特性の向上は、交流損失、誘電損失およびケーブル外径に影響を及ぼす。交流損失において、巻きつける外径が大きくなり、使用する線材が増える。試作した超電導導体の仕様および前半3ヵ年の導体（2010(3-C)）との比較をTable 6およびFig. 12に示す。

交流損失は、同じ I_c を持っていたとしても明らかな低減が見られる。これは、超電導線材の本数が増えることで、線材1本あたりの電流分担量が低減したためと考えられる。3 kAでの交流損失は0.124 W/mであり、前半3ヵ年の成果の約半分になっている。さらに、測定結果は、数値解析結果¹²⁾と良い一致を示している。この数値解析では、線材幅方向の両端で、レーザによる熱影響を受けた部分を考慮に入れて計算している。数値解析では、シールド付きの超電導ケーブルの損失値も導出した。今までの実績から、シールドの交流損失は導体の1/3~1/4と見積もれるが、

Table 6 Specifications of the two-layer HTS conductors

	HTS conductor at 2011	HTS conductor at 2010 (3-C ^[1])
YBCO tape width	3 mm (after laser slitting)	3 mm (after laser slitting)
HTS conductor	2-layer, 61 tapes	2-layer, 46 tapes
Outer diameter	35.4 mm	25.5 mm
I_c of the conductor	6,270 A (77.3 K)	4,700 A (77.3 K)
AC loss at 3 kA	0.124 W/m (73.7 K) (I_{op}/I_c : 0.47)	0.297 W/m (70.0 K) (I_{op}/I_c : 0.50) 0.235 W/m (68.7 K) (I_{op}/I_c : 0.46)

Fig. 12 AC loss characteristics of the new conductor and 3-C made in 2010.

シールドで使用している線材の幅方向の端部特性がレーザで切断したものに比べて良くないので、シールドの損失は高めになり、数値解析の結果では、ちょうど 0.2 W/m と見積もっている。

一方、ケーブル外径については、導体が大きくなることで、φ150 を超えてしまう可能性を懸念した。絶縁ストレスが最も高くなるのは、導体直上であるが、外径が太くなることで、電界ストレスは下がり、絶縁厚を薄くできる。その結果、ケーブル外径はφ150 以内におさまる設計となった。一方、絶縁厚を薄くすることで、静電容量は増加するので、誘電損失は増加する。見積もられた誘電損失は 0.6 W/m であり、前半 3 ヶ年の 0.5 W/m よりも大きくなっている。つまり、交流損失の低減分が誘電損失に転化しており、交流損失 0.2 W/m 、誘電損失 0.6 W/m の配分で、目標を達成できる設計とした。

4.4 ケーブルの作製と単尺サンプルの試験結果

製作後の仕様を **Table 7** に、出来上がったサンプルを **Fig. 13** に示す。超電導体の線材の本数が 61 本から 1 本減らしている。線材の長手方向に線材幅のうねりがあり、試作の結果、安全をみて 60 本とした。50 m の超電導ケーブル製作に使用した超電導線は単長で 50 m 以上である。

全ての超電導線に対して、全長 I_c を測定しており、超電導体層用の 3 mm 幅の超電導線では 80 A 以上（平均 97 A）、超電導シールド層用の 5 mm 幅の超電導線では 100 A 以上（平均 117 A）の超電導線を使用した。**Table 7** で示した仕様で 50 m の超電導コアを作製し、約 20 m 分の試験サンプルを取り出して、抜き取りサンプルとして、 I_c 、耐電圧試験、過電流試験、解体試験等に供試した。**Fig. 14(a)** にデモンストレーション用の 30 m の超電導コアを示す。**Fig. 14(b)** には 30 m 分の超電導コアに断熱管を取付けた様子を示す。

この超電導コアによる試験結果を **Table 8** に示す。いず

Table 7 Specifications of the 275 kV-3 kA_{rms} HTS cable

Structure	Specification	Diameter(mm)
Former	400 mm ² hollow copper stranded conductor	
HTS conductor	2-layer, 60 tapes with 3 mm wide and copper plated.	35.4
Insulation	Thickness: 22 mm	79.4
HTS shield	1-layer, 43 tapes with 5 mm wide and copper plated	81.0
Shield protection	210 mm ² copper tape (2-layer)	
Protection	Insulation paper	90.0
Cryostat pipe	Double-corrugated pipe with super insulation and PE sheath	150

Fig. 13 Structure of the 275 kV-3 kA_{rms} HTS cable.

Fig. 14 (a) Fabrication of the HTS core and (b) the HTS core with cryostat pipe.

Table 8 Test results of the sample tests

Test item	Test results	Judgment
I_c	Conductor: 6,440 A/ Shield: 5,800 A at 77.3 K	Good
Partial discharge	PD free at voltage of 310 kV for 10 minutes	Good
Lighting impulse test	No breakdown at voltage of $\pm 1,155$ kV 3 times	Good
Withstand voltage	No breakdown at voltage of 400 kV for 30 minutes	Good
Overcurrent test	No I_c degradation after 63 kA for 0.6 seconds	Good
Bending test	No damage after bending diameter of 3 meters	Good

れも設計どおりの性能を確認した。

I_c については大気圧の液体窒素浸漬条件で、導体側が 6440 A、シールド側が 5880 A と使用した線材の平均値に本数をかけた期待値 5820 A と 5031 A をそれぞれ上回っており、製造を通しての劣化はない。耐電圧試験条件は IEC 62063、JEC-3408 などの国際規格や日本の規格やその他の超電導ケーブル試験を参考にして定めた。部分放電 (PD) の試験条件は、負荷遮断時や一線地絡時の異常電圧を想定した。このときの電圧上昇倍率は $1.79/\sqrt{3}$ であり、275 kV システムの最大電圧 300 kV に乗じることで、310 kV を導出した。また、雷インパルス電圧は 275 kV システムの耐電圧値 1050 kV に 1.1 倍の裕度をみて、1155 kV とした。なお、耐電圧試験は参考試験として、IEC の定めている 400 kV とした。

4.5 試験線路の構築と試験結果

30 m の全長試験は中国遼寧省の瀋陽市にある瀋陽古河電纜有限公司において実施した。超電導技術は、エネルギー需要が急速に立ち上がる東アジアにおいても注目されている技術であり、その中で中国での試験の実施は、日本の技術の国際的な発信として、さらには、超電導技術の国際化の進展に役立つものと考えて計画した。

30 m ケーブルのレイアウトを Fig. 15 に示す。超電導ケーブルは U ベンドされており、片側の終端接続部では 3 本の CV ケーブルと接続し、回路を形成している。これは、今回の超電導ケーブルが CV ケーブルの 3 倍の電流輸送ができることを示している。また、レイアウト中には中間接続部も含まれている。

課電条件は 275 kV システムの線間最大電圧 300 kV を対地電圧に換算して ($300 \text{ kV}/\sqrt{3}$)、さらに 30 年の劣化を考慮した加速試験として 200 kV-1 ヶ月に設定した。この試験条件には、まず式(1)の長期特性試験 (V-t 試験と呼ぶ) による寿命指数 n を導出する。

$$V^n \cdot t = \text{const.} \quad (1)$$

ここで、 V は課電電圧、 t は時間となる。V-t 試験用の絶縁サンプルは 1 mm の絶縁厚で 0.3 MPa(abs.)の圧力をかけた状態で 77 K を維持したサブクール状態の液体窒素に浸漬された状態とした。その結果を Fig. 16 に示す。PDIE とは部分放電 (PD) の開始電圧 (ストレス) を示しており、設定電圧で初めて PD が観測された時間をプロットした。プロットした結果、寿命指数 n は 80 という結果が得られた。Fig. 17 に示すように PDIE の V-t 試験後と初期状態のを比較したところ、50%の発生確率 (PDIE₅₀) が初期状態で 26.0 kV/mm に対して、試験後は 27.3 kV/mm と良くなる傾向を見せており、劣化は無かった。これは、液体窒素の含浸状況の改善とも考えられるが、性能向上は 5%であり、PD の測定感度とも考えられる。

Fig. 15 Layout of the 275 kV-3 kA HTS cable.

ここで、 V は課電電圧、 t は時間となる。V-t 試験用の絶縁サンプルは 1 mm の絶縁厚で 0.3 MPa(abs.)の圧力をかけた状態で 77 K を維持したサブクール状態の液体窒素に浸漬された状態とした。その結果を Fig. 16 に示す。PDIE とは部分放電 (PD) の開始電圧 (ストレス) を示しており、設定電圧で初めて PD が観測された時間をプロットした。プロットした結果、寿命指数 n は 80 という結果が得られた。Fig. 17 に示すように PDIE の V-t 試験後と初期状態のを比較したところ、50%の発生確率 (PDIE₅₀) が初期状態で 26.0 kV/mm に対して、試験後は 27.3 kV/mm と良くなる傾向を見せており、劣化は無かった。これは、液体窒素の含浸状況の改善とも考えられるが、性能向上は 5%であり、PD の測定感度とも考えられる。

Fig. 16 V-t of PDIE for model cable (solid line), and V-t of breakdown (dashed line and circle).

Fig. 17 Weibull plots of PDIE after the V-t tests. The insulation degradation was not observed after the V-t of PDIE, but observed after the V-t of BD.

そこで電圧を上げて、破壊（BD）の V-t 試験に移行した。42.3 kV/mm の 65 h で破壊したサンプルがあったが、生き残ったサンプルの PDIE₅₀ は 22.8 kV/mm と低下しており、その後 102 時間まで試験を継続し、破壊はなかったものの PDIE₅₀ は 19.8 kV/mm と明確な劣化が認められた。このときの寿命指数 n は 50 となった。超電導ケーブルでは、運転電圧に置いて、部分放電を発生させない設計としているが、ここでは、安全を考え、寿命指数 n を 50 とした。長期課通電の試験電圧 V_{typeAC} は式(2)から導出した。

$$V_{typeAC} = \left(\frac{U_m}{\sqrt{3}} \right) \cdot \left(\frac{30 \text{ years} \cdot 365 \text{ days}}{30 \text{ days}} \right)^{1/n} \quad (2)$$

ここで、 U_m は 275 kV システムの線間最大電圧で 300 kV であり、1 ヶ月（30 days）の試験期間では、試験電圧 200 kV が得られる。

定常運転試験では、本システムでの安定的な運転条件となる平均液体窒素温度 73 K、液体窒素流量 30 L/min の冷却条件で、対地間電圧 200 kV の課通電条件で 30 日間連続運転を行った。通電は、3 kA_{rms} の通電を日中 8 時間、夜間 16 時間をゼロとした負荷変動を与えて実施した。試験は、液体窒素を循環させて常時冷却した状態で行い、2012 年 12 月に、1 ヶ月の長期課通電試験を無事完了した。さらに、長期課通電後に商用周波耐電圧試験電圧である 310 kV を課電したところ、部分放電フリーであることを確認して、30 年の運転後も初期性能を持ち続けていることを確認して試験を完了した。試験結果を Table 9 に示す。

長期課通電試験終了後、終端容器を開放して超電導を目視観察したところ異常なく、再度、冷却して I_c が正常であることを確認した。ヒートサイクルに伴う、ケーブルの熱収縮機構も設計どおりに機能している。

Table 9 Test results of the 30 m cable

Test item	Test results	Judgment
I_c	Conductor: 6,800 A/ Shield: 7,000 A at 77.3 K	Good
Long-term tests	200 kV for 30 days, current load (3 kA for 8 hours and 0 kA for 16 hours)	Good
Partial discharge	PD free at voltage of 310 kV for 10 minutes	Good
AC loss	0.22 W/m at 3 kA	Good
Dielectric loss	0.44 W/m at 160 kV (U_0)	Good

今後、さらに 1 年間の継続試験を予定しており、交流損失、誘電損失を再確認する。Table 9 では、3 kA_{rms} 交流損失が 0.22 W/m、誘電損失は 0.44 W/m であり、目標の 0.8 W/m 以下を達成した。交流損失については、設計の 0.2 W/m わずかに上回る結果であり、継続試験時に液体窒素温度との相関も含めて、再度確認する。一方、誘電損失は設計の 0.6 W/m よりも低くなっているが、液体窒素のサブクール状態が強くなることで誘電損失も低くなったと推定しているが、継続試験時に液体窒素温度との相関も含めて、確認していく。継続試験終了後に、残存試験として、雷インパルス試験、耐電圧試験を実施する。

5. まとめ

Y 系線材を用いた超電導電力ケーブルの開発に取組み、66 kV 級大電流ケーブルおよび 275 kV 級高電圧ケーブルの開発を行い、システム検証試験を行った結果、ケーブルシステムとしての健全性が確認できた。今後は、電力機器として求められる高い信頼性の検証を行っていくことが重要である。

本研究は、経済産業省の「イットリウム系超電導電力機器技術開発」プロジェクトの一環として、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）からの受託により実施したものである。

参考文献

- 1) T. Ohkuma, "Recent progress in the development of YBCO HTS power cables," TEION KOGAKU **46** (2001) 335-341 (in Japanese)
大熊 武: 「イットリウム系超電導電力ケーブルの開発状況」、低温工学 **46** (2001) 335-341
- 2) N. Amemiya, et al.: "AC loss reduction of superconducting power transmission cables composed of coated conductors," IEEE Trans. Appl. Supercond. **17** (2007) 1712-1717
- 3) Y. Shingai, et al.: "Development of superconducting tape on textured low-magnetic-loss metal substrate," SEI Technical Review **174** (2009) 105-110 (in Japanese)
新海優樹ら: 「低磁性配向金属基板を用いた薄膜超電導線材の開発」、SEI テクニカルレビュー **174** (2009) 105-110
- 4) N. Amemiya, et al.: "AC loss reduction of multilayer superconducting power transmission cables by using narrow

- coated conductors,” Supercond. Sci. Technol. **24** (2011) 065013 1-10
- 5) N. Amemiya, et al.: “AC losses in two-layer superconducting power transmission cables consisting of coated conductors with a magnetic substrate,” Supercond. Sci. Technol. **23** (2010) 014022 1-8
 - 6) X. Wang, et al.: “Numerical simulation on fault current condition in 66 kV class RE-123 superconducting cable,” Physica C **470** (2010) 1580-1583
 - 7) M. Watanabe, et al.: “Thermo-mechanical properties of a 66 kV superconducting power cable system”, IEEE Trans. Appl. Supercond. **13** (2003) 1956-1959
 - 8) M. Ohya, et al.: “Critical current measurement of long-length 3-in-One superconducting cables (1) -Numerical analysis-,” IEEJ Trans. B, publication of Power and Energy Society (2011) 317
 - 9) M. Ohya, et al.: “Critical current measurement of long-length 3-in-one superconducting cables (2) -Experimental results-,” IEEJ Trans. B, publication of Power and Energy Society (2011) 318
 - 10) JEC-3401-2006、OF ケーブルの高電圧試験法、電気学会電気規格調査会
 - 11) X. Wang, et al.: “Overcurrent characteristics of 275 kV class YBCO power cable with hollow former”, Abstracts of CSJ Conference **87** (2013) 23 (in Japanese)
王 旭東ら：「中空フォーマを用いた 275 kV 級 YBCO 超電導ケーブルの過電流試験特性評価」、第 87 回 2013 年春季低温工学・超電導学会講演概要集 (2013) 23
 - 12) N. Amemiya, et al.: “Effects of lateral-tailoring of coated conductor for AC loss reduction of superconducting power transmission cables”, IEEE Trans. Appl. Supercond. **21** (2011) 943-946

大 熊 武

1963 年 4 月 18 日生。1988 年東京電機大学大学院電気工学専攻修士課程修了。同年東京電力(株)入社。1991 年より超電導電力機器の応用技術に関する研究に従事。2010 年より(公財)国際超電導産業技術研究センター派遣。2013 年より東京電力(株)技術統括部プロジェクト推進グループ勤務。低温工学・超電導学会、電気学会会員。工学博士。

大 屋 正 義

1977 年 5 月 3 日生。2006 年京都大学エネルギー科学研究科博士課程修了。同年 4 月住友電気工業株式会社入社。高温超電導ケーブルの開発に従事。低温工学・超電導学会、電気学会会員。エネルギー科学博士。

八 木 正 史

1968 年 11 月 27 日生。1994 年北海道大学工学研究科応用物理学学科修士課程修了。同年、古河電気工業株式会社に入社。入社時より 275, 500 kV 電力ケーブルの施工および品質管理に従事した。2001 年より超電導ケーブルの開発に従事しており、現在、パワー&システム研究所超電導応用開発部の伝送技術グループマネージャ。低温工学・超電導学会、電気学会会員。工学博士。