



イットリウム系大電流・低損失超電導電力ケーブル

Large Current and Low AC Loss High Temperature Superconducting Power Cable Using REBCO Wires

山口 高史*
Takashi Yamaguchi

大屋 正義
Masayoshi Ohya

新海 優樹
Yuki Shingai

芦辺 祐一
Yuichi Ashibe

小西 昌也
Masaya Konishi

湯村 洋康
Hiroyasu Yumura

高温超電導線材を用いた電力ケーブルやモータ等の電力・産業機器は、コンパクトな形状で大容量送電や大出力・高トルクを可能にし、既存の電力ケーブルや産業機器に比べて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することが期待されている。当社は、2008年4月から2013年2月にかけて実施された国家プロジェクトに参画し、イットリウム系薄膜超電導線材*1を用いた66 kV/5 kA級の三心一括構造を有する超電導電力ケーブルの開発を行った。まず、短尺ケーブルの試作により超電導電力ケーブルに必要な線材特性を決定し、要求性能を満たす線材を開発した。その後、線材を総長6 km作製し、既設の150 mm管路に収納可能な世界最大の送電密度を有する三心一括型超電導電力ケーブルシステムを構築した。冷却効率を考慮した上で送電損失が従来の電力ケーブルの1/3以下の低損失であることを検証し、長期課通電試験によりその実用性を確認した。

High temperature superconducting (HTS) products, such as power cables and motors, have higher transmission capabilities and lower AC loss, and are more compact than conventional counterparts. With these advantages, HTS products are expected to contribute to energy saving and global warming prevention. Sumitomo Electric Industries, Ltd. had take part in a national joint R&D project from 2008 to 2012 in order to develop HTS coated conductors and build a 15 m long 66 kV/5 kA class “3-in-One” HTS cable system. We first conducted a short cable sample tests to identify the requirements for the HTS wire and developed an appropriate conductor. Then, we produced a total of 6 km of HTS coated conductors, and built a cable system to be installed into the existing underground conduits of 150 mm in inner diameter. The measured AC loss of our new cable was less than one-third that of a conventional cable after considering cooling system efficiency. The cable system performance was verified the usefulness in a long-term operation test.

キーワード：イットリウム系超電導線材、高温超電導電力ケーブル、交流損失

1. 緒言

超電導とは、電気抵抗が0になる現象である。この特性を有する超電導材料を線材にし、例えば電力ケーブルとして使用すると、既存の同じ径の電力ケーブルと比べて3倍以上の電力を低損失で送電することが可能となる。また、コイルに適用した場合、電流密度が大きくなるため、従来よりもコンパクトで強力なマグネットを作製することが可能となる。この様に、超電導線材を用いた電力ケーブルやモータなどの電力・産業機器は、コンパクトな形状で大容量送電や大出力を可能にし、既存の電力ケーブルや産業機器に比べて損失を低減することが可能であることから、省エネルギーや地球温暖化対策に貢献することが期待されている。当社では、長尺化・高特性化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、コンパクトで大容量送電を可能とするイットリウム系薄膜高温超電導線材（以下Y系線材と略記）およびそれを用いた超電導電力ケーブルの研究開発を新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）から受託した「イットリウム系超電導電力機器

技術開発」プロジェクト（以下Y系プロジェクトと略記）において実施した⁽¹⁾。

本稿では、Y系プロジェクトを通じて得られた成果について報告する。

2. Y系プロジェクトの概要

Y系プロジェクトでは、当社は66 kV/5 kA級大電流・低損失ケーブルとそれに適用するY系線材の開発を行った。線材開発では、Y系線材の高性能化や長尺安定製造技術など実用化に重要な要素技術の研究開発を進め、システム検証に必要となる15 m長ケーブル作製用長尺線材の製造を行った。大電流・低損失ケーブル開発では、66 kV、5 kAの送電を通電可能とする三心一括型超電導ケーブルシステムを構築してケーブルの損失や耐久性を検証した。

表1にY系プロジェクトにおける大電流・低損失ケーブルの開発目標を示す。送電容量は、典型的な275 kV電力

ケーブルと同等の容量 (570 MVA) とした。ケーブル総損失は冷却に必要な電力消費を加味しても既存の電力ケーブルの損失の1/3以下となる2.1 W/m/相@5 kA以下、ケーブル外径は布設コスト低減のため既存のケーブル用管路に収納可能なサイズと定めた。また、系統事故によって流れる過電流に対して耐え得ることを要求仕様とした。

表1 大電流・低損失ケーブルの開発目標

送電容量	570 MVA (5 kA, 66 kV)
損失	2.1 W/m /phase @5 kA 以下
サイズ	150 mmφ管路に収納可能

3. ケーブル用線材の開発・製造

3-1 高I_c Y系線材の長尺作製技術の開発

Y系線材開発では、大電流ケーブルへの適用を目指し、配向金属基板とPLD法を用いたY系線材を安定に作製可能な技術確立を目指した。大電流・低損失ケーブルに使用するY系線材の構造を図1に、Y系線材の各層の諸元を表2に

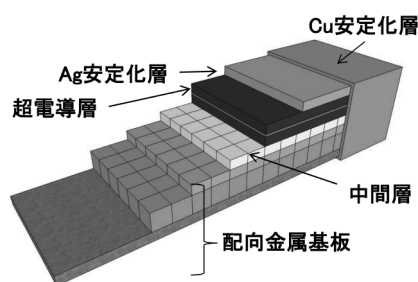


図1 Y系線材の構造

表2 Y系線材の諸元

	材料	膜厚 (μm)	成膜方法	役割
安定化層	Cu	20	電界めっき	超電導層の損傷防止
	Ag	2~8	DCスパッタ	
超電導層	GdBCO	1~4	PLD法	電流輸送
中間層	CeO ₂	0.1	RFスパッタ	超電導層との格子整合層
	YSZ	0.2~0.4		拡散防止層
	CeO ₂	0.1~0.2		シード層
配向金属基板	Ni	3	めっき	酸化防止層
	Cu	20~50	圧延・クラッド加工	配向層
	SUS	100		支持基材

示す。Y系線材は、配向金属基板、中間層、超電導層、Ag安定化層、Cu安定化層から構成される。配向金属基板は、表面に結晶配向層をもつ長尺金属テープで、この上に中間層・超電導層が結晶配向性を保って形成される。この超電導層の結晶配向性が、Y系線材の特性にとって重要である。当社では、配向金属基板には、機械強度が強く低損失化に必要な低磁性の基板として、高強度の非磁性金属であるSUSと、熱処理により配向化が可能なCu箔とを張り合わせ、Cu箔の酸化防止のためのNi層をめっきにより作製したクラッドタイプの配向金属基板を用いた⁽²⁾。中間層は、30 mm幅クラッドタイプ配向金属基板上にRFスパッタリング法でCeO₂/YSZ/CeO₂の3層を成膜した。この中間層上に、パルスレーザー蒸着 (PLD) 法で超電導層GdBa₂Cu₃O_yを成膜し、Ag安定化層をDCスパッタリング法で成膜した。次に、酸素アニールを行なった後、線材を30 mm幅から4 mm幅6本または2 mm幅12本に切断して、電気めっき法により厚さ20 μmのCu安定化層を周囲に形成した⁽³⁾。

まず、大電流ケーブルへ適用するために必要な高臨界電流 (以下I_cと表記) *²線材作製技術開発を行った。その後、長尺線材作製プロセスの開発によりスループットの向上を図った。これらを合わせることで、高いI_cを持つ大電流ケーブル用線材の安定製造プロセスを確立した。

長尺Y系線材の製造には、中間層均一性の向上が求められる。中間層形成条件の安定化は成膜時のプラズマ、雰囲気、温度等の最適化と長時間成膜プロセスの安定性向上により行った。その結果、30mm幅の配向クラッド基板上に成膜したCeO₂格子整合層の[100]配向度合を示すX線回折ピーク強度比I(200)/[I(200)+I(111)] (以下、配向率と表記) の評価から、線材幅30 mm、約170 mの全長に亘って95%以上の配向率を維持し、均一な結晶配向が得られていることが示された (図2)。

PLD法による超電導層形成に関しては、成膜条件 (基板温度、ガス圧、プルーム形状等) の最適化を図ることで幅方向の特性均一化を実現すると共に、従来の1.5倍(200 W → 300 W) の高出力を有するPLD用エキシマレーザーの導入に

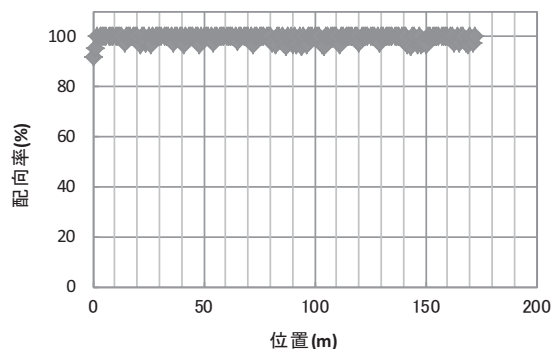


図2 中間層CeO₂/YSZ/CeO₂の長手方向の結晶配向率分布

より I_c 特性の向上と製造能力の向上を図った。この結果、30 mm線材の全領域で200 A/cm-w以上の I_c 値、中央部で最大500 A/cm級の I_c を得た⁽⁴⁾。

さらに、超電導層形成工程における長尺均一化のため、成膜条件の変動因子（レーザー光強度、ターゲット表面状態等）の安定化条件を検討し、線速を150 m~200 m長の成膜に最適化した。

170 m長3 cm幅中間層上にGdBa₂Cu₃O_xを作製し、長手方向の I_c を評価した。その結果を図3に示す。170 mほぼ全長に渡り、400~450 A/cmの I_c 値を得、大電流・低損失ケーブル用Y系線材の長尺線材作製技術を確立した。本試作によって得られた知見は、次節におけるケーブル用線材の安定製造にフィードバックした。

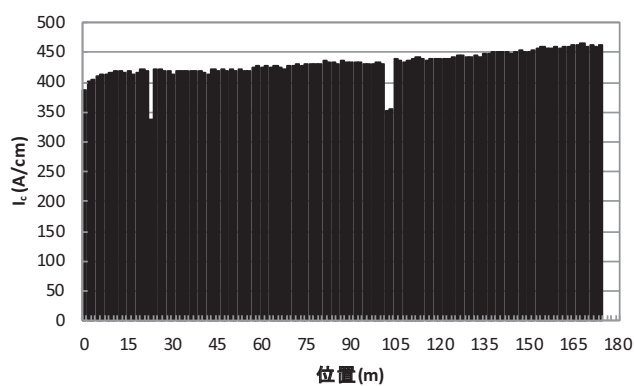


図3 170 m長超電導線材の長手方向 I_c 分布

3-2 ケーブル用線材の安定製造

平成23年度から平成24年度にかけて、ケーブル設計用及び66 kV大電流・低損失ケーブルシステム検証に適用するY系線材を製造した。線材仕様として、① I_c はケーブルを構成する各層について表3の値以上とすること、②特性の均一性の指標となるn値は20以上を目標として15以下の線材は使用しないこと、③線材全長の I_c 検査は1.5 m毎の通電測定とすること、④線材外観（特にエッジ部）に異常の認められるものは使用しないこと、⑤安定化層厚みは表裏とも20 μm厚とすること、などを決めた。さらに、通電法

表3 大電流・低損失ケーブル用Y系線材の仕様

使用位置	幅 (mm)	単長 (m)	本数 (一心分)	I_c (A)	I_c (A/cm)	
導体	1層	4	18	15	132	330
	2層	4	18	15	139	345
	3層	4	19	15	146	365
	4層	2	21	27	74	370
シールド	1層	4	19	24	132	330
	2層	4	19	26	114	285

I_c 検査では識別が難しい微小な欠陥を検出するために、誘導法による I_c 測定を実施した。

大電流・低損失ケーブルに適用される線材には最高で370 A/cm以上の高い I_c が要求される。高 I_c 線材を効率よく製造するため、工程途中で特性検査による良品/不良品の選別を実施した。その後、出荷検査として次の検査①~⑤を行った。①通電法 I_c 測定（n値測定を含む。1.5 m間隔で全長を検査）、②外観検査（全長検査）、③誘導法 I_c 測定（全長検査。特に微小な I_c 低下領域をチェック）、④幅・厚み測定（線材両端検査）、⑤安定化層厚み測定（線材片端検査）、である。これらの検査で仕様を満たした線材を、検査データと共に、大電流・低損失ケーブルの製造工程へ投入した。

図4に、ケーブル設計試験用及び大電流ケーブル用に作製し出荷検査工程まで進んだ総長6 km（1 cm幅換算）のY系線材の、大電流ケーブル用線材の I_c 度数分布を製造年度別に示す。製造時期前半となる平成23年度は、長尺線材製造における中間層成膜装置のプラズマ安定化、超電導層成膜装置のレーザー状態安定化、スリット条件調整による外観不良の低減を同時に行っていたため、200~400 A/cmの I_c 値を持つ線材が多く、低 I_c の線材は主にケーブル試作に適用された。製造時期後半となる平成24年度では、上記安定化に関する改善を行うことにより、300~450 A/cmの I_c 値を持つ線材が80%以上となった。これらの中から良品を選別し、2 mm幅線材1.7 km、4 mm幅線材5.2 kmを大電流・低損失ケーブル作製用として適用した。

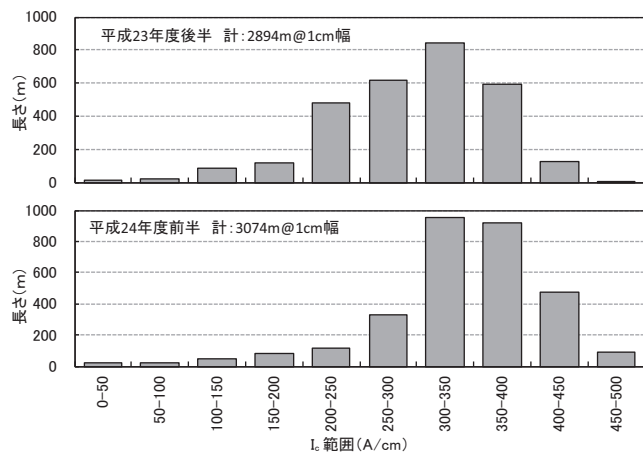


図4 製造年度別モデルケーブル用線材の I_c 度数分布

4. 大電流・低損失ケーブルの要素技術開発

大電流・低損失ケーブルの構造を図5に示す。ケーブルは、三心一括型（三相のコアを一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

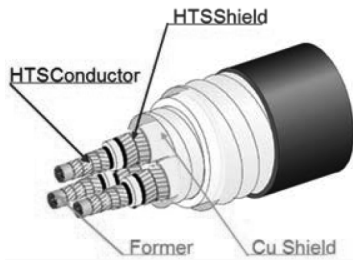


図5 大電流ケーブルの構造

超電導ケーブル・3条と比較して、布設スペースの削減や、外部からの侵入熱の低減が可能である。

ケーブルコアは、銅撚線フォーマの上に、超電導導体層、電気絶縁層、超電導シールド層、銅シールド層を同軸上に巻きつけた構造となっている。通常時は超電導導体層に送電電流が流れる。その際、超電導シールド層には送電電流と逆位相でほぼ同じ大きさの電流が電磁誘導により流れるため、外部への磁気遮蔽が実現される。また、銅フォーマ及び銅シールド層により、超電導導体層及びシールド層を事故電流から保護している。

ケーブルの要素技術開発において、最初にプロジェクトの目標である、大電流・低損失・コンパクトなケーブル設計を確立するため、ケーブルの構造検討を行った。5 kAへの大電流化と150 mmφ管路に収納可能なコンパクト化を両立するため、ケーブルコア構造に「超電導導体4層、超電導シールド2層」を採用した。

次に、Y系線材を用いて短尺ケーブルコアを試作して通電試験を行い、得られたデータより大電流ケーブル用線材に必要な特性と線材量を決定した。具体的な数値は、表3に示したとおりである。各層の線材 I_c は、内層が発生する磁場による線材 I_c への影響を考慮し、外層になるほど要求特性を高く設定した。また、図6に示すとおり、使用線材幅を4 mm幅から2 mm幅に細線化することが交流損失^{*3}低減に有効であることも確認した⁽⁵⁾。そのため、損失の大き

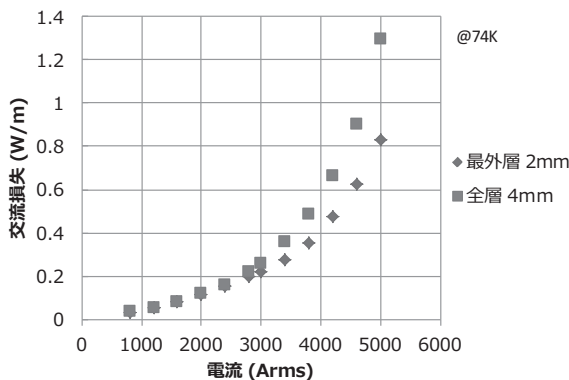


図6 4層導体交流損失特性の線材幅依存性

い導体最外層には2 mm幅線材を採用した。要求単長については、必要線材の低減のため、各層の巻径、ピッチを考慮した上で各層の必要長さを決定した。

5. 大電流・低損失ケーブルシステム検証試験

図7に、15 m長超電導ケーブル検証システムの構成を示す。超電導ケーブルは、3本の超電導コアを一つの断熱間に収納した三心一括型である。今回の検証試験では、3本のコアのうち2本のみに通電する「2コア往復通電方式」を採用した⁽⁶⁾。ただし、課電は3本すべてに実施した。A端末はブッシング及び電流リード3本を有する終端接続部であり、B端末はシステムの熱負荷を軽減するために内部(液体窒素中)で三相コアを短絡するため、ブッシング及び電流リードを有さない容器である。

まず、66 kV大電流ケーブル実用化時の耐久性を評価するために試験条件を検討した。試験項目は、製造ケーブルの端部から切り出したサンプルを用いて健全性を確認するサンプル試験、15 mケーブルシステムを用いて行う検証試験、検証試験後にケーブル特性が劣化していないか確認する残存試験に分けて決定した。15 mケーブルシステムを用いて検証すべき主要試験項目は、①ケーブル損失(交流損失2.0 W/m/ph+誘電損失0.1 W/m/ph) 2.1 W/m/ph@5 kA, 66 kVの確認、②定格課電特性の確認、③30年間運用に相当する加速試験条件における課通電試験である。以下に、主要試験項目を中心に検証試験の結果について述べる。

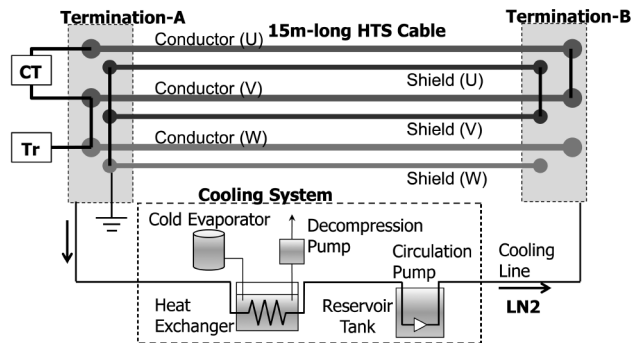


図7 15 m長超電導ケーブル検証システムの構成

5-1 サンプル試験

2 mm幅線材1.7 km、4 mm幅線材5.2 kmを用いて19 m長のケーブルを製造した。端部から切り出したサンプルの I_c 測定結果及び交流損失測定結果を、図8、9に示す。測定されたサンプルの I_c はU相、V相共に線材の I_c の合算値と通電時の磁場の影響から予想した値よりも5~10%大きく、製造プロセスにおける劣化がないことが確認された。

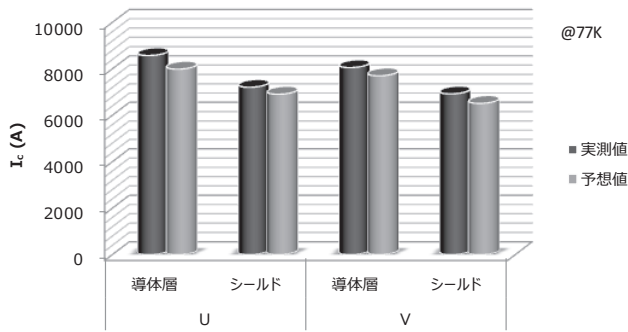


図8 15mケーブルサンプルのIc測定結果

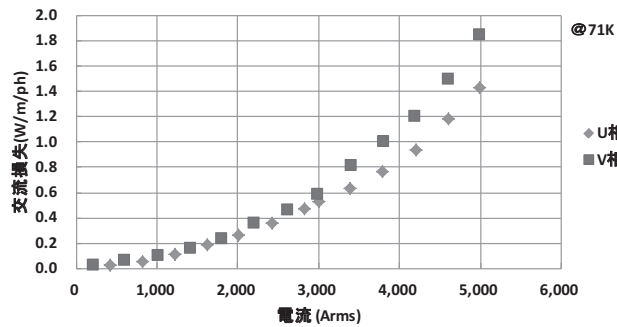


図9 15mケーブルサンプルの交流損失測定結果

5-2 15mシステム検証試験

ケーブルシステムの初期冷却完了後、各種試験を実施した。

図10に、5kA通電時の電流及びケーブル入口、出口の温度変化を示す。ケーブル入口および出口に取り付けた温度センサーを用いて液体窒素の温度差を測定し、熱損失に換算するカロリメトリック法を用いて交流損失測定を行った。結果、交流損失は1.8 W/m/ph (5 kA通電時)であった。ケーブルの誘電損失計算値は、0.076 W/m/phであるため、5 kA通電時の交流損失測定値に誘電損失を加えても1.9 W/m/ph以下となり、課通電時の熱損失目標 (2.1 W/m/ph以下) を達成した。

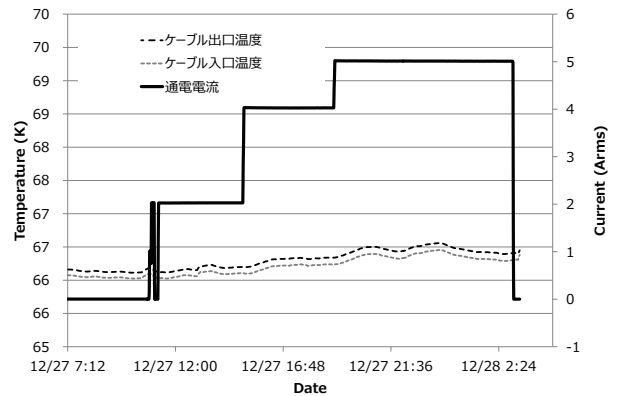


図10 5kA通電時の電流及び温度変化

また、交流損失は5kA通電時においてU相が1.5 W/m/ph、V相が1.8 W/m/phであり、共に目標値以下であった。

ケーブルの健全性が確認されたため、住友電工ファインポリマー(株)内の超電導ケーブル試験場に15mケーブルシステムを構築し、冷却システム及び計測監視システムと組み合わせて検証試験を行った。写真1に建設後の検証試験ケーブルシステムの写真を示す。

超電導ケーブルシステムの30年に亘る定格課通電を模擬した長期課通電試験を実施した。本試験は試験期間を1ヶ月とし、30年運用に相当する加速試験条件として試験電圧を51kVに設定した⁽⁷⁾。なお、通電は実線路における負荷変動を考慮して8時間ON、16時間OFFのサイクル試験とした。

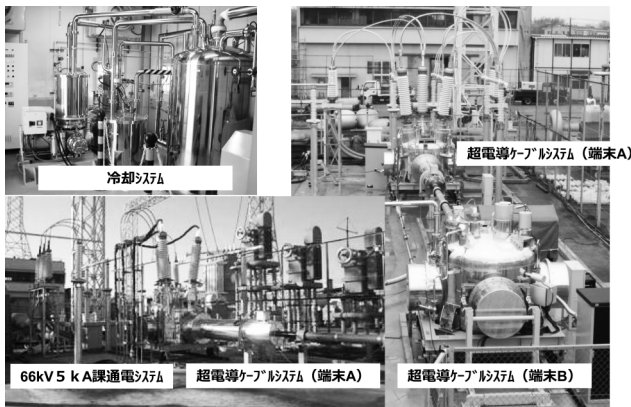


写真1 15m長検証試験ケーブルシステム写真

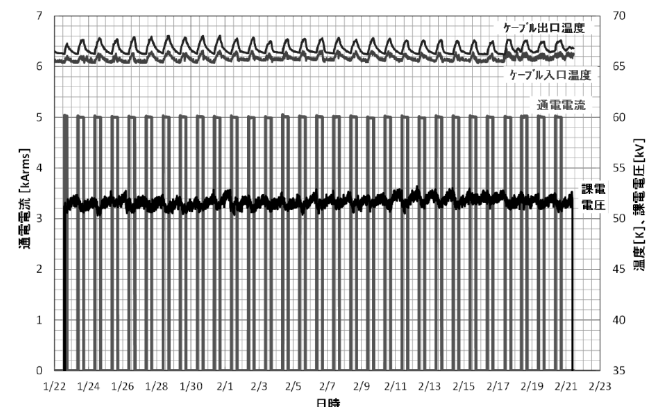


図11 長期課通電試験結果

冷却システムの運転条件は、液体窒素流量を40 L/min、圧力を0.2~0.4 MPaGとした。

図11に1ヶ月に亘る長期課通電試験の結果を示す。試験期間中、通電時のケーブル出口温度は68 K以下で安定しており、試験経過に伴い到達温度が上昇する傾向が見られないことを確認し、試験を完了した。

5-3 残存試験

システム検証試験完了後、ケーブルを解体して異常がないか調査を行った。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)⁽⁷⁾の結果は良好であり、長期課通電試験によるケーブル特性の劣化がないことを確認した。

表4に、前述の試験項目を含めた検証試験項目と試験結果をまとめる。全ての試験項目に対して仕様を満足する結果が得られ、大電流・低損失超電導ケーブルシステムの実用性を確認した。

表4 検証試験項目と試験結果まとめ

No.	項目	300V試験	15m検証試験	残存試験
1	商用周波長時間耐電圧試験 (90kV, 3h)	-	-	良好
2	商用周波耐電圧試験 (100kV, 10min)	-	-	良好
3	部分放電試験	-	PD発生なし (感度50 pC)	PD発生なし
4	雷インパルス耐電圧試験 (±385kV)	-	-	良好
5	長期課通電試験 (1ヶ月)	-	良好	-
6	外観検査	異常なし	異常なし	異常なし
7	静電容量試験	-	設計通り (11.8 nF)	設計通り (11.7 nF)
8	誘電正接試験	-	良好 (0.059%)	変化なし (0.080%)
9	絶縁抵抗試験	異常なし	異常なし	-
10	導体抵抗試験 (フォーマ)	設計通り (0.14 mΩ /m@20℃)	-	-
11	構造試験	以上無し	-	異常なし
12	I _c 測定	設計通り (8200 A @77.3K)	設計通り (8040 A @77.3K)	劣化なし (8090 A @77.3K)
13	シールド電流測定	-	異常なし (91%)	異常なし (91%)
14	交流損失測定 (@5kA)	1.5 W/m/ph	1.8 W/m/ph	変化なし
15	断熱管侵入熱測定	-	1.7 W/m	-
16	気密試験	異常なし	異常なし	-
17	真空リーク試験	リークなし	リークなし	-
18	圧力損失測定	-	約2 kPa (@40 L/min)	-
19	インダクタンス測定	0.1 μH (計算通り)	-	-

7. 結 言

Y系プロジェクトに参画し、Y系線材の開発からケーブルシステム検証まで行った。

Y系線材開発では、低磁性クラッドタイプ配向金属基板とPLD法を用いたY系線材の高性能化及び製造技術開発を実施した。ケーブル作製に必要な性能および製造速度を満足する要素技術を基に、高I_cかつ長手方向に均一な特性を有する長尺Y系線材の安定製造プロセスを確立し、大電流・低損失超電導電力ケーブルシステム検証に必要となる2 mm幅線材1.7 km、4 mm幅線材5.2 kmを約1年間で製造

した。Y系線材の実用化の課題として、局所的な低I_c部の撲滅、1 kmを超える長尺化、低コストでの安定製造技術の確立がある。今回の成果を踏まえて上記課題を早急に解決し、Y系線材をニーズに応じて提供できるよう努力したい。

ケーブル開発では、超電導線材を多層導体化したケーブルの交流損失特性を含む電気的特性及び機械的特性の基礎データを集集し、コンパクトで低損失なケーブル設計を確立した。当社Y系線材を用いて15 m長の大電流・低損失超電導電力ケーブルシステムを構築し、ケーブル送電損失は冷却に必要な電力消費を加味しても既存の電力ケーブルの1/3以下となる2.1 W/m/ph@5 kA以下を達成した。30年間の運用に相当する加速条件のもとで長期課通電試験を実施し、システムの健全性を実証した。Y系ケーブルの実用化のためには、実システムでの長期信頼性・安定性の検証が必要であり、先行しているビスマス系超電導ケーブルの成果も活用して実用化に向けた開発を進めたい。

本研究は、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。

用語集

※1 Y系超電導線材

超電導層の状態が薄膜であるため、薄膜超電導とも呼ばれる。超電導材料の臨界電流値は磁場中で大きく減少するが、Y系超電導体はその減少幅が小さく、磁場応用に有利である。

※2 臨界電流値 (I_c)

超電導状態を保ちつつ流すことができる電流の最大値。通常、1 μV/cmの電圧の発生した電流値を指す。一般に、超電導物質の温度が低いと高くなり、磁場の印可により低くなる。

※3 交流損失

超電導線材・導体に発生するエネルギー損失。直流電流・磁界に対してエネルギー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、結合損失、渦電流損失などが発生する。これらのエネルギー損失をまとめて交流損失と呼ぶ。この損失は、超電導層の厚みが薄く、幅が狭い方が小さくなる。また、I_cに対して実際に流す電流 (I_{op}) の割合が小さいほど小さくなる。

参 考 文 献 -----

- (1) N. Fujiwara, et al. "Development of YBCO power devices in Japan", Physica C 470 (2010) 980-985
- (2) 大木康太郎、永石竜起、「クラッドタイプ配向金属基板による高温超電導材料の配向性制御」、セラミックス第47号 (2012年)
- (3) T. Nagaishi, et al. "Development of REBCO coated conductors on textured metallic substrates", Physica C 469 (2009) 1311-1315
- (4) 大松一也 ほか、「PLD 法によるイットリウム系薄膜高温超電導線材の開発」、SEIテクニカルレビュー第179号 (2011年7月)
- (5) Q. Li, et al. "AC loss reduction of outer-diameter-fixed superconducting power transmission cables using narrow coated conductors", Physica C 484 (2013) 217-222
- (6) 大屋正義 ほか、「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)」、SEIテクニカルレビュー第176号 (2010年1月)
- (7) 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

執 筆 者 -----

山口 高史* : パワーシステム研究開発センター



新海 優樹 : 研究統轄部 主査 工学博士



小西 昌也 : パワーシステム研究開発センター
主席



大屋 正義 : 超電導製品開発部 主査
エネルギー科学博士



芦辺 祐一 : 超電導製品開発部 主席



湯村 洋康 : 超電導製品開発部 主席



*主執筆者