

世界最高電圧の275 kV-3 kA 高温超電導ケーブルの開発

Development of 275 kV-3 kA YBCO High-Tc Superconducting Power Cable

| | | | |
|--------------|-------------------|---------------------|-------------------|
| 八木正史* | 向山晋一* | 三觜隆治* | 滕軍* |
| Masashi Yagi | Shinichi Mukoyama | Takaharu Mitsuhashi | Ten Jung |
| 劉勁* | 鈴木光男* | 平田平雄* | 野村朋哉* |
| Liu Jin | Mitsuo Suzuki | Hirao Hirata | Tomoya Nomura |
| 中山亮* | 前里昇* | 大熊武* ² | 丸山修* ² |
| Ryo Nakayama | Noboru Maesato | Takeshi Ohkuma | Osamu Maruyama |

概要 高まる電力需給に 대응して、古河電工では、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 殿の委託試験として、2008年より275 kV-3 kA 高温超電導ケーブルの開発を実施してきた。このケーブルは1回線で1.5 GWという火力発電所1基分の大容量を低損失で送電することが出来、将来の電力基幹線としての実用化が期待されている。

設計に必要な基礎技術は、交流損失試験、耐電圧試験、部分放電試験、過電流試験などで蓄積され、その技術に基づいて、長期課通電試験用の30 m超電導ケーブルは設計・製造された。ケーブル絶縁厚については、試験で得た絶縁体の設計ストレスとIEC, JEC, 他の超電導ケーブル試験に基づいた試験条件で決定した。また、63 kA-0.6 secの過電流に耐え、送電に伴う誘電損失と交流損失が275 kV-3 kAで0.8 W/m以下になるように設計した。これらの設計に基づいて、30 m超電導ケーブルを作製し、作製時の製造余長について特性を評価し、設計どおりの性能を確認した。

古河電工では、30 m超電導ケーブルと終端接続部、中間接続部を瀋陽古河電纜で建設し、200 KV-1 ヶ月の長期課通電試験を無事終了した。

1. はじめに

超電導材料は、電気抵抗ゼロ、高い電流密度をもつという特長がある。前者の特性を使えば効率的な電気機器を得ることができ、後者の特性を使えば強力な磁場を起こすことが出来る。後者の特性については、MRIなどの医療機器、核融合、高エネルギー物理研究用加速器など、古河電工の金属超電導技術が大きな功績を残している。一方、前者の特性を生かすには超電導の冷却にかかるコスト低減が必要であり、金属超電導の冷却に使用する液体ヘリウム温度(-269℃)では経済的にならない。そこで、高温の液体窒素温度(-196℃)で実現できる高温超電導を使用することで、効率的かつ軽量・コンパクトで省エネ化を図ることが出来ると期待されている。

古河電工グループは金属超電導トップメーカーであり、さらに高温超電導の分野でも研究を進めており、電力送電線の蓄積技術を生かして高温超電導ケーブルの開発を進めている。従来の電力送電線は電力容量増加のため高電圧化を進めており、特に都市では地中化が進み地中の洞道や管路に布設されている。こ

のような洞道はすでに満杯になっており、年次の経っているものは引き換えが必要になってきている。狭い洞道の空きスペースや使用していない管路に、従来の送電線よりも大容量でかつ低損失な超電導ケーブルを布設できれば経済的なメリットが出てくる。

古河電工では、2008年よりNEDO(独立行政法人新エネルギー・産業技術開発機構)殿の受託事業で開発している275 kV超高压の超電導ケーブルの中で、従来の275 kVケーブルと比較して3倍以上の大容量であり、低損失な超電導ケーブルの開発を進めている。この超電導ケーブルは275 kVの超高压で3 kA級の電流容量を持たせることで、1回線送電で1.5 GW(275 kV / $\sqrt{3} \times 3$ 相 \times 3.15 kA)の火力発電1基分の送電容量をまかなうことが出来る。さらに、本ケーブルは、コストパフォーマンスに優れかつさまざまな電力機器への応用が期待されているイットリウム系超電導線材(Y系超電導線)を用いたもので、交流損失を著しく低減し、超電導の冷却にかかる損失を考えても従来のケーブルの損失の1/4から1/5に小さくすることが出来る。

表1は本開発の目標値であり、目標達成により従来のケーブルよりもはるかに大きなメリットを提供できる。

* 研究開発本部 高温超電導事業化チーム 超電導応用開発部 伝送技術グループ

*² 国際超電導産業技術研究センター (ISTEC SRL)

表1 275 kV-3 kA超電導ケーブルの目標と特長
Targets and merits of 275 kV-3 kA HTS cable.

| 項目 | 目標 | 特長 |
|------|----------------------|--|
| 損失 | 交流電損失と誘電損失で0.8 W/m以下 | 超電導の冷却にかかる損失を入れても従来の1/4～1/5 |
| 電気絶縁 | ケーブル、中間接続部、終端接続部の開発 | 設計は従来のケーブルと同様 |
| 耐過電流 | 63 kA-0.6秒 | 最悪のケースで壊れない |
| 外径 | 150 mm | 従来ケーブル275 kV-2500 mm ² の外径と同等 |
| その他 | 超電導シールドによるEMIフリー | 高電流送電でも漏れ磁場ゼロ |

2. 交流損失低減に関する開発

超電導の直流通電では抵抗ゼロになっても、交流電では交流損失が生じる。これは、交流電による変動磁場が超電導の内部で仕事をすることによって生じる損失で、超電導ケーブルを冷却する冷凍機の負荷となるため取り除くことが重要である。超電導体内に侵入する磁場はテープ状の超電導線材端部から侵入するため、端部の特性が特に重要である。端部の超電導性能が悪いと交流損失は10倍も大きくなるため、端部を熱影響の少ないレーザーで切断することで端部性能の改善を図った。

図1では、レーザーでY系超電導線材端部を切断し、切断面を含んだ全体に銅による電気めっきを施してある。

図2(a)では、 I_c (臨界電流)で規格化した交流損失を表している。5-Cは5 mm幅の超電導線材で端部性能が悪いものを集合化した超電導導体であり、一方3-Cは両端の1 mmを取り除いて3 mm幅の超電導線材を集合化したものである。使用率(I_t / I_c)が低いところでは交流損失の差が顕著で、5-Cは3-Cと比較して5-10倍の大きさになっている。一方、3-Cは3 kAで0.235 W/mの低損失を確認した。図2(b)では、更に使用する超電導線材を増やし線材1本あたりにかかる磁場を減らすことで損失低減が進み、3 kAで0.124 W/mとなっており世界最小の損失を達成した。

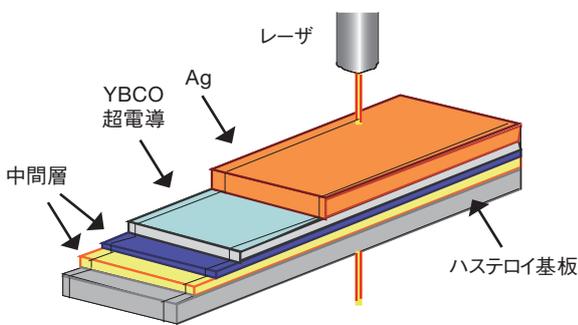


図1 超電導線材のレーザー切断
Laser cutting of both edges of YBCO wires.

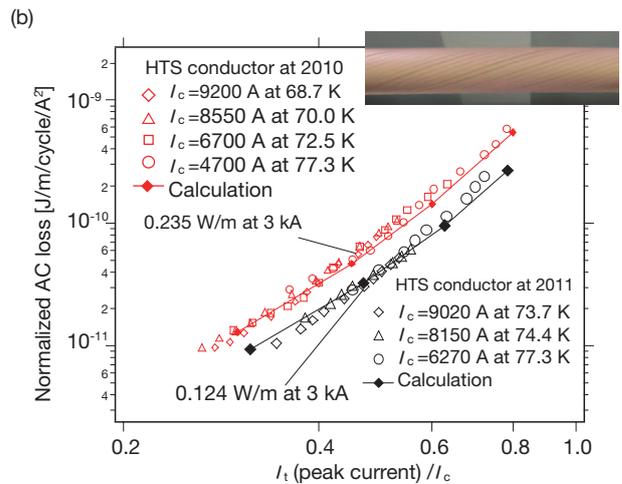
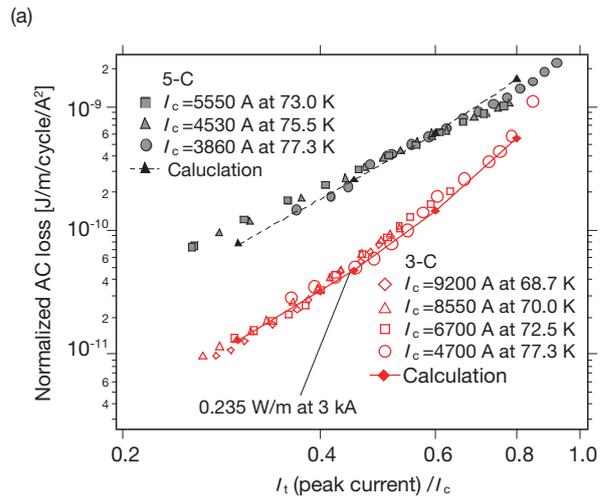


図2 超電導導体の交流損失 (a) 5-Cと3-Cの損失比較。3-Cにはレーザープロセスした超電導線材を使用した。(b) 導体径を調整することで更なる損失低減を達成した。
AC loss measurements of HTS conductors, (a) Comparison between 5-C and 3-C using the laser-processed YBCO wires, (b) Further reduction of losses by adjusting the radius of the conductor.

3. 過電流対策に関する開発

短絡事故の発生時には定格電流の数10倍の過電流が超電導ケーブルに入るため、系統で超電導ケーブルを使用するにはこの過電流に耐える必要がある。275 kVシステムの耐過電流条件はユーザ仕様により決定されるが、交流遮断器の規格JEC2350¹⁾を参考に63 kAを選定した。継続時間は電気学会の技術報告²⁾から最悪のケースとして0.6秒とした。63 kAは開発中の超電導ケーブルの定格3 kAの20倍以上である。この過電流は保護導体に分流させることで超電導線材を保護する。図3に示すように、超電導導体側では銅より線フォーマが保護導体の役割をしており、超電導シールド側では銅編組線がその役割をしている。定常運転時は超電導導体と超電導シールドに電流が流れるが、過電流時には超電導から銅に転流が起きて超電導を保護できる。保護に用いる銅の断面積については後述する。保護導体の断面積が大きいほど過電流時の温度上昇を小さく出来るが、コンパクト性は失われてしまうためその断面積の最適化が必要である。

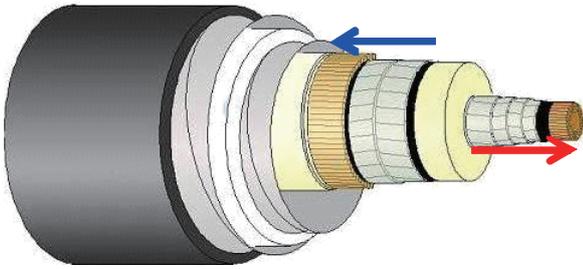


図3 超電導ケーブルの構造，導体電流が赤色の矢印方向に流れたとき，シールド電流は青色の矢印の方向に流れる。
Structure of HTS cable; When the conductor current flows along the red arrow, the shield current flows along the blue arrow.

過電流試験では図4のように2本の超電導ケーブルを並べて超電導導体側と発電機を接続し，超電導シールドにも電流が誘導されるようにシールドの回路を作っている。

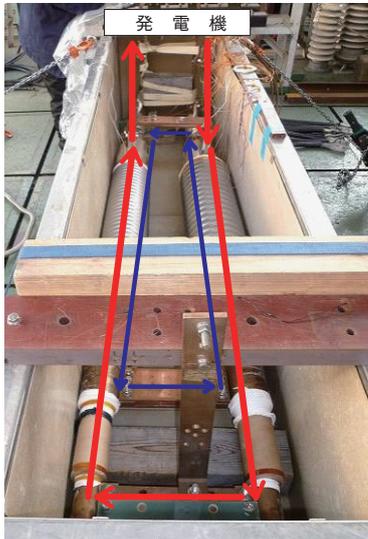


図4 過電流試験の試験回路
Closed circuit for the over-current test.

図4の右側は中間接続部を含んでおり，中間接続部の耐性も合わせて確認している。図5は接続部の状態を示しており，導体側は接続用の超電導線材を短冊状に並べて超電導線を接続している。シールド側の接続は補強絶縁上で行われているが，接続方法は導体側と同様である。



図5 過電流試験に供試した超電導接続部
HTS joints for the over-current test.

図6に63 kAの波形を示す。1波目のピークは直流成分を考慮して2.5倍の158 kAに設定した。一方，シールド電流は導体側の80%の振幅になっている。中間接続部を含まない試験では同じ試験系で90%以上の振幅が確認されているが，この違いは接続部によるものでこの部位での磁気的な結合に起因している。接続部では補強絶縁上に超電導シールドを設けているため，導体とシールド間の距離が大きくなり磁気的な結合力が弱くなる。更に，試験回路が短いことから端子の抵抗も無視できないため80%の振幅は妥当な値である。実際の接続部が数100 mに一つであることを考えれば，シールド電流は導体電流とほぼ同等の100%の振幅を得られる。

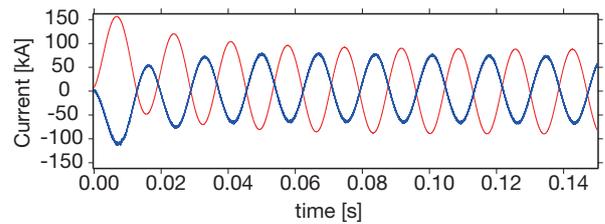


図6 過電流試験時の波形
Waveforms of over-current of 63 kA.

63 kAの過電流の継続時間をパラメータにして，温度上昇と初期状態への復帰時間を確認した。0.05秒(3サイクル)では温度上昇は5 K未満，0.1秒(7サイクル)では温度上昇は8 K未満であった。初期状態への復帰はどちらも3秒以内であり，事故後の復帰も問題なく行われると考えている。0.6秒(36サイクル)では温度上昇は約20 Kで，復帰時間は10分，復帰後の I_c に劣化はなく十分な耐性を示した。

4. 275 kV絶縁に関する開発

4.1 275 kV超電導ケーブル絶縁

超電導ケーブルの絶縁は，図7に示すように絶縁紙と液体窒素の複合絶縁系としている。この絶縁形態は絶縁紙と油となっているOFケーブルの絶縁と類似しており，設計の考え方も同様である。導体の直上がもっとも電界が高く，この電界が設計ストレス以下になるように絶縁厚が決定される。図7で使用する絶縁紙はポリプロピレンフィルム(PPフィルム)を両側からクラフト紙で熱融着した半合成紙である。275 kV系統では半合成紙の誘電体損失が無視できず，66 kVで使用していた半合成紙をそのまま使うと0.8 W/mの誘電損失になり，表1で述べた目標を満足できない。そこで，誘電性能の悪いクラフト紙の割合を減らし，PPフィルムの割合を40%から60%にした半合成紙の適用を考えた。

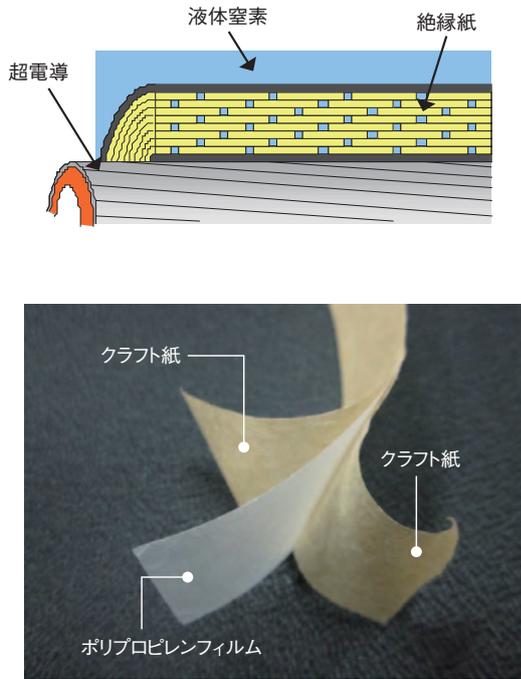


図7 超電導絶縁の構造
Structure of the electrical insulation.

設計に当たっては、運転中に異常電圧が生じても部分放電が発生せず(部分放電フリー)、かつ、雷による電圧(雷インパルス)にも耐える構造とした。上記の試験電圧は、国際規格であるIEC62067³⁾や日本の電力規格であるJEC3408⁴⁾、更には他の超電導試験を参考にして決定した。本決定については、NEDOプロジェクトの中で、大学教授、電力関係者を交えて委員会の中で行われた。設計に使用する試験電圧は、事故電圧を考慮した310 kVで部分放電フリーとした。これは、系統275 kVシステムで2導体間での線間最高電圧300 kVに負荷遮断時の電圧上昇倍率(1.79/√3)を考慮した値である。

更に、雷インパルス電圧で1155 kVに耐える設計とした。これは、275 kV機器の耐電圧値1050 kVに1.1倍の裕度を持たせた値である。

半合成紙の絶縁厚を1 mm、10 mm、20 mmとした絶縁モデルケーブルを作製して電圧試験を行い設計電界ストレスを決定した。

図8に部分放電試験の結果を示す。絶対圧で0.3 MPaの加圧液体窒素に含浸した状態で電圧を上げて、部分放電が初めて検出されたときの値をプロットした。絶縁厚1 mmの結果と10 mmの結果はほぼ同等である。一方、絶縁厚20 mmの結果では、300 kV (25.4 kV/mm)、310 kV (26.2 kV/mm)でも部分放電は発生しなかった。この結果から、部分放電の開始電圧は絶縁厚の厚み依存性はなく、絶縁厚1 mmの結果を使用すればよい。0.1%の発生確率だと22 kV/mmとなり、この値を設計値として採用した。

図9には雷インパルスの結果を示す。絶縁厚1 mmと10 mmの結果から厚さ依存性が見られ、絶縁厚10 mmの場合も1 mmと同様のバラつきがあると仮定して83 kV/mmを設計値として採用した。話は前後するが、275 kVで設計されたケーブル

は導体外径を35.4 mmとしたとき絶縁厚は22 mmとなり、目標耐電圧1155 kVを確認した。

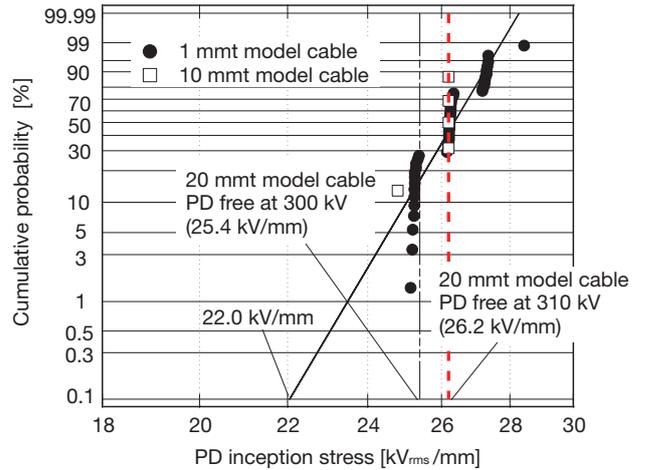


図8 部分放電開始電圧のワイブルプロット、0.1%の発生確率として、22 kV/mmを設計ストレスとした。Weibull plot of partial discharge inception stress (PDIE), the design stress of PDIE free was 22 kV/mm.

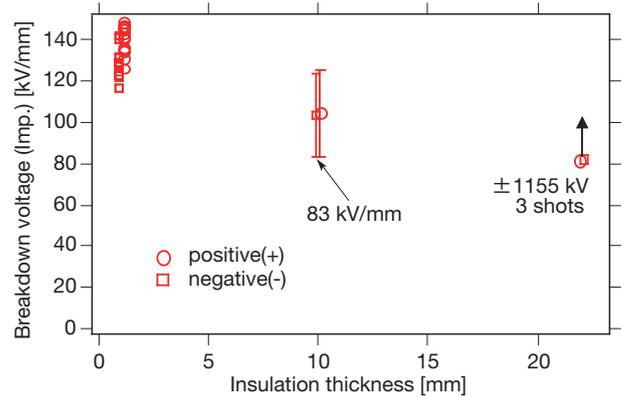


図9 絶縁厚1 mm、10 mm、22 mmの雷インパルスデータ、83 kV/mmを設計データとした。Impulse withstand voltage of the model cable whose thickness was 1, 10, and 22 mm. Design stress of Impulse free was 83 kV/mm.

4.2 275 kV超電導終端部・中間接続部

超電導ケーブルの終端接続部では、電界緩和のためのストレスリリーフコーンを設計開発し、更に、外気温から液体窒素温度までの常伝導部には電界ストレス緩和機能をもたせたコンデンサーコーンを設計開発した。コンデンサーコーンの外側には複合碍管を採用した。複合碍管は、エポキシ系のFRP円筒にシリコンゴムの外被・笠を被覆し、円筒の両端に金具を装着したものである。コンデンサーコーン及び複合碍管の組み合わせによる電界解析を行い、目標電圧を持たせる設計にした。この結果、磁器碍管を用いた終端部と比較して、長さで80%、重量で20%の軽量・コンパクト化を実現した。更に、ケーブルが座屈しない熱伸縮対策を施し、冷却昇温時に超電導線材が痛まな

のように工夫している。図10にその気中終端部を示す。

超電導の中間接続部では、径方向の電界ストレス及び沿層方向の電界ストレスを実機に近い絶縁モデルで破壊ストレスを実測し、安全率をみて絶縁設計した。更に、フォーマ及び超電導線材の接続では図5で示した接続を行い、低抵抗かつ過電流に耐える構造としている。

これらの終端接続部、中間接続部の絶縁部は、交流課電400 kV及び雷インパルス1155 kVで耐える設計とし、通電部は定常電流3 kA及び過電流63 kA-0.6秒に耐える設計とした。



図10 課電用の終端接続部
Termination for 275 kV HTS cable.

5. 275 kV-3 kA超電導ケーブルの設計と製造

5.1 275 kV-3 kA超電導ケーブルの設計

2章から4章までの結果から、275 kV-3 kAの超電導ケーブルを設計した。表2にその設計を示す。

表2 275 kV-3 kA超電導ケーブルの設計
Design of 275 kV-3 kA HTS cable.

| 構造 | 仕様 | 外径 |
|------------|--|---------|
| フォーマ | 中空銅より線 400 mm ² | 35.4 mm |
| 超電導導体 | 2層超電導, 3 mm幅60本 交流損失0.124 W/m at 3 kA | |
| 絶縁体 | 半合成紙22 mm厚 誘電損失0.6 W/m | 79.4 mm |
| 超電導シールド | 1層超電導, 5 mm幅43本 交流損失0.076 W/m at 3 kA | 81 mm |
| Cuシールド | 210 mm ² 銅編組 | 90 mm |
| 保護層 | 半合成紙 | |
| 2重断熱管外部シース | ステンレス2重管, 真空断熱層, PEシース | 150 mm |

フォーマとして中空銅より線400 mm²を使用している。これにより過電流63 kA-0.6秒に耐え、超電導を保護し事故時の温度上昇を下げる事が出来る。事故時の温度上昇を更に下げることがある場合は断面積をさらに大きくすればよい。

超電導導体には線材幅方向の J_c (臨界電流密度)が一定な3 mm幅を使用し、3 kA時の交流損失は0.124 W/mとなる。

絶縁体はPPフィルムの使用率を多くしたクラフト紙との半合成紙を使用し、絶縁厚は22 mmとした。絶縁厚は、超電導導体上に巻いた内部半導電層の直上電界が設計ストレスより小さくなるように設定されている。そのため、導体が太くなれば絶縁厚は薄くなり、それに伴い静電容量は大きくなり誘電損失は増える。一方、導体が細くなれば絶縁厚は太くなり誘電損失は減る。今回の絶縁設計では誘電損失は0.6 W/mになる。

超電導シールド層は1層であるが、巻きつけ時の外径が太いため超電導線材の使用量は導体よりも多い。超電導シールドは導体からの磁場の誘導で導体と逆位相の電流が流れ、磁場を封じ込めている。超電導シールドが経験する磁場は導体から距離があるため乱れは小さく、超電導シールドの交流損失は導体よりも小さいと予想され、今までの実績では1/3～1/4である。しかし、超電導シールドに使用する線材は端部 J_c の悪い5 mm幅の線材であり、解析によると導体の損失の60%程度になる。

以上より、3 kA交流損失は0.2 W/mとなり、誘導損失0.6 W/mと合わせて0.8 W/mの損失となる。

更に、ステンレスの断熱内管と真空断熱材料であるスーパーインシュレーション(SI)を巻き、断熱外管に寒冷地用のポリエチレン被覆を施し、外径は目標の150 mmとした。

5.2 275 kV-3 kA超電導ケーブルの製造

表2の設計に基づき超電導ケーブルを製造した。図11に出来上がりの構造を示す。



図11 作製した275 kV-3 kA高温超電導ケーブルの外観
Structure of 275 kV-3 kA HTS cable.

使用した超電導線は単長で50 m以上のものを使用した。全ての超電導線材に対して全長 I_c を測定しており、導体用の3 mm幅の超電導線材では80 A以上(平均97 A)、シールド用の5 mm幅の超電導線材では100 A以上(平均117 A)の超電導線材を使用した。50 m弱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、曲げ試験、構造検査、耐電圧試験、過電流試験、交流損失試験に供試した。図12(a)では、デモンストレーション用の30 mの超電導コアを示しており、図12(b)では30 m分の超電導コアに断熱管を取付けた様子を示している。

約20 mの試験サンプルの結果については以下のとおりである。曲げ試験による絶縁体の切れやシワはなく、構造試験では設計どおりの製作を確認した。耐電圧試験では設計どおりの耐電圧特性を確認している。なお、耐電圧試験は、大気圧窒素浸漬という液体窒素圧力浸漬より厳しい条件で行われた。

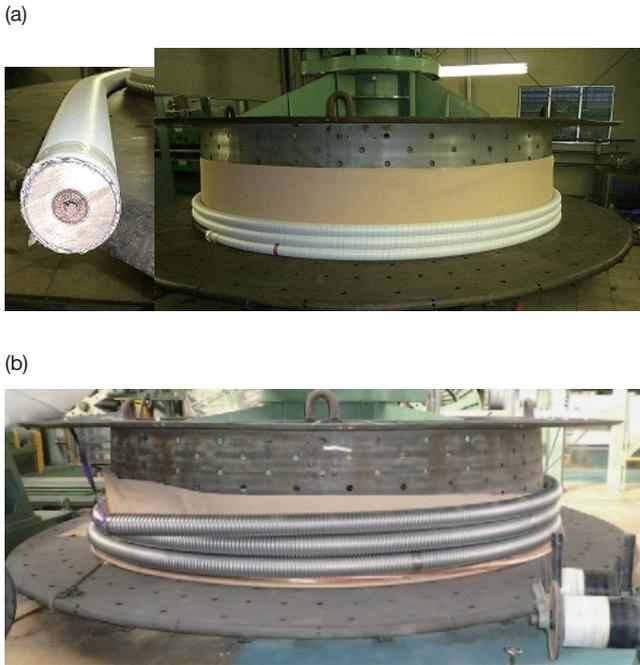


図12 超電導ケーブルの作製 (a)超電導コアの作製, (b)断熱管の取付
Fabrication of the HTS cable; (a) HTS core, (b) HTS core with cryostat pipe.

I_c についてはその結果を図13に示す。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5920 Aであり、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。シールド側の方は、超電導からノーマル(常電導)状態への転移がゆっくりと行われているが、これは、超電導線材の長手方向に I_c の局所劣化が含まれていることを示唆しており、製作前の超電導線材の I_c 長手方向分布でもその結果を示唆している。

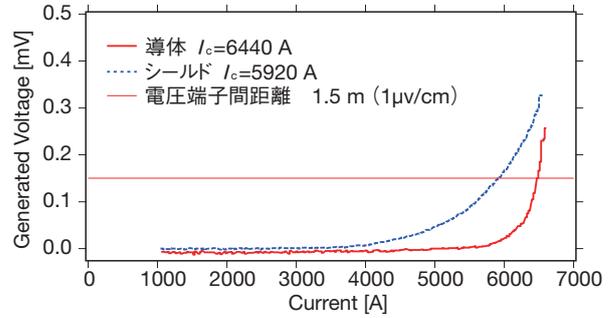


図13 抜き取りサンプルの超電導V-I特性
V-I characteristics of the HTS cable sample.

6. 275 kV-3 kAの長期課通電試験

6.1 中間接続部の組立とケーブル輸送

30 mの超電導ケーブルは中間接続部を予め作製しておき、更に終端部では超電導導体と超電導シールドの端子付けを行い、ストレスリリーフコーンを取り付けて、図14の架台にケーブルを取り付けて試験場所へ出荷した。試験場所は中国遼寧省の瀋陽市にある瀋陽古河電纜とした。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、更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。

輸送経路は千葉から横浜まで陸送し、横浜港から中国の大連港まで船便を使用し、大連から瀋陽まで陸送した。輸送中は架台に加速度計をつけて管理したが、3Gを超えることはなく輸送後の外観は正常であった。



図14 中間接続部付超電導ケーブルの輸送
Transportation of the HTS cable with the intermediate joint.

6.2 瀋陽古河電纜でのデモンストレーションシステム構築

試験場所を整備後、電圧を課電するのに用いるACトランス、3 kAの通電で使用する2500 mm²のCVケーブルを予め布設した。次に、超電導終端容器を設置して運搬した超電導ケーブル

を接続した。

冷却システムも設置され、そのフロー図を図15に示す。超電導ケーブルを冷却する液体窒素は閉ループを構成し、サブクーラの熱交換器を通して冷やされる。この冷却能力は3 kW以上である。サブクーラ内の液体窒素は排気ポンプで減圧され、飽和蒸気圧が下がることで冷却される。サブクーラの液体窒素は排気ポンプで吸い出されることになるので消費され、消費分は液体窒素タンク (CE: Cold Evaporator) から補給される。

液体窒素浸漬による冷却後、導体とシールドの I_c を中間接続部込みで測定した。その結果、導体は6800 A、シールドは7000 Aであり、輸送後および組立後にも性能低下は生じていない。図16に30 mケーブルのレイアウトを示す。超電導ケーブルはUバンドされており、片側の終端接続部では3本のCVケーブルと接続している。これは、今回の超電導ケーブルが3倍の電流輸送が出来ることを示している。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 kV/ $\sqrt{3}$)、さらに30年の加速劣化を考慮して200 kV-1ヶ月に設定した。2012年11月より長期課通電試験を開始しており、12月に終了した。長期課通電後に設計電圧である310 kVを課電したところ部分放電フリーであり、30年の加速劣化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。今後、さらに1年間の継続試験を予定している。

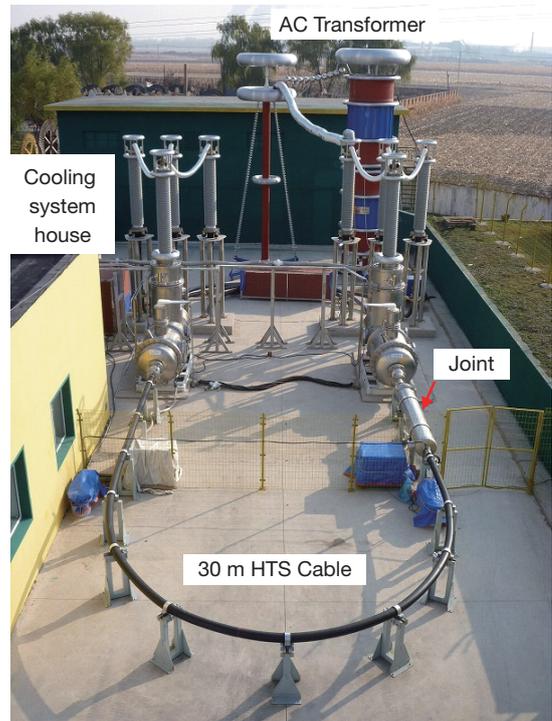


図16 275 kV-3 kA超電導ケーブルのレイアウト
Layout of demonstration of 275 kV-3 kA HTS cable.

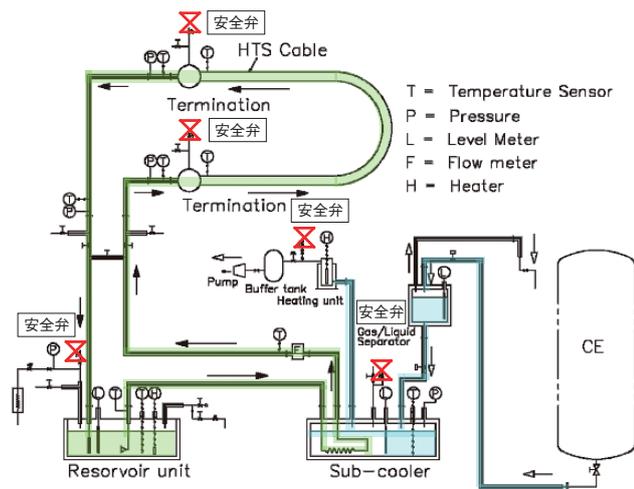


図15 冷却システムのフロー図
Flow diagram of cooling system.

謝辞

本研究は、NEDO殿の委託により実施したもので、NEDO関係者並びに研究遂行及び超電導線材の供給でのISTEC-SRL殿のご協力に感謝します。また、京大兩宮研究室殿では交流損失の解析、早大石山研究室殿では過電流試験の解析、名大早川研究室殿では絶縁部の部分放電データの支援を受けました。なお、今回のケーブルに使用した主な超電導線材は、フジクラ殿の基板に昭和電線ケーブルシステム殿のYBCO成膜した線材を用いており、謝意を表します。

超電導ケーブルの製造においては、ビスキャス殿の佐藤部長のご協力により良品を完成することが出来ました。更に、瀋陽古河電纜での試験では、植竹本部長のバックアップとともに、CVケーブルの組立、課電装置の動作とPD測定など、品質保証部の李部長を始め多くの方々から支援を受けました。ここに謝意を表します。

引用文献

- 1) JEC-2300-2010 交流遮断器
- 2) 電気学会技術報告 (II部) 第216号「ガス絶縁開閉装置試験法」
- 3) IEC62067-2006-03 Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 150 kV ($U_m=170$ kV) up to 500 kV ($U_m=550$ kV)-Test methods and requirements
- 4) JEC-3408 特別高圧 (11 kV-275 kV) 架橋ポリエチレンケーブルおよび接続部の高電圧試験法