

6 kV 3000 A 三相同軸超電導ケーブル用中間接続部の 開発および実証試験（その2）

Development of Cable Joint for 6 kV 3000 A Tri-Axial Superconducting Cable System and Actual Test (Part2)

足立和久*
Kazuhisa ADACHI

中西達尚
Tatsuhisa NAKANISHI

塩原 敬
Kei SHIOHARA

三堂信博
Nobuhiro MIDO

青木裕治
Yuji AOKI

2020年から2021年の約1年間に亘りBASFジャパン株式会社殿戸塚工場において6 kV 3000 A 三相同軸超電導ケーブルを用いた実証試験を実施した。

試験中には冷却装置の年次点検や地上高6 mのケーブル内の冷媒の有無を確認するためのX線検査、最終耐電圧試験等も実施した。

また、監視システムを用いて各ケーブルの電圧、電流、電力、超電導ケーブルの温度、圧力、冷却装置の流量等を記録した。実証試験の結果、通電の際には超電導と常電導ケーブルで電流が分流していることや、圧損検討、入出口の温度差と冷媒流量から熱侵入量計算を行い、試験前の検討値とほぼ一致していることが確認できた。

An actual verification test with 6 kV 3000A tri-axial superconducting cable was conducted at the Totsuka Site of BASF Japan Ltd. for about one year from 2020 to 2021.

During the test, as an annual inspection of the cooling system, X-ray inspection was carried out to confirm the presence of refrigerant in the cable mounted on 6 m above the ground, and the finally withstand voltage test was also conducted.

In addition, the voltage, current, electric power, temperature and pressure of the superconducting cable, the flow rate of the cooling device, etc. were recorded using the monitoring system. From the verification test, it was clear that a part of current have flowed through the normal conducting cable beside the superconducting cable. The pressure loss and heat entering have been calculated from the difference of pressure or temperature of the input / output port. As a result, it was confirmed that the examined value and the estimated value before the test were almost same.

1. はじめに

私たちは高温超電導線材の第2世代と呼ばれる $YBa_2Cu_3O_y$ (YBCO) 線材をMetal Organic Deposition (MOD) 法で開発、製造している^{1), 2)}。更にこの線材を使用したアプリケーションとして35 kV 600 A 超電導ケーブルを開発し、KEMAの認証試験に合格した^{3), 4)}。その後、三相同軸ケーブルの開発に着手、22 kV および11 kV 3000 A 三相同軸超電導ケーブルとその終端接続部、中間接続部を開発し、CIGRE TB538に規定されたtype testに準じる試験を行い、信頼性を確認した^{5), 6)}。

三相同軸超電導ケーブルは内部流路のコルゲート管の上に三相の超電導導体と銅条の遮へい層を同心軸上に配置し、その外側を真空断熱コルゲート管で覆った構造である(図1)なお、各導体間には絶縁紙による絶縁層を施している。

三相同軸超電導ケーブルは以下の特長を有している。

1. 冷媒の液体窒素は内側流路を通過して、外側流路を通過して戻る。これにより液体窒素のリターン管が不要になる。
2. 三相が打ち消しあうことで遮へい層への誘導電流がほとんどないことから遮へいの超電導線が不要となる。
3. 上記により低コストで非常にコンパクトなケーブル構造となることから熱侵入量も小さい。

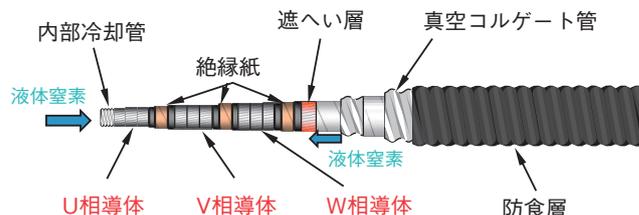
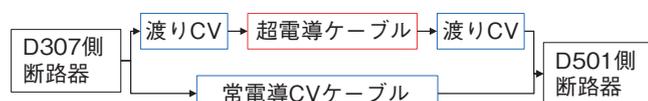


図1 三相同軸超電導ケーブルの模式図

私たちは2019年からBASF ジャパン株式会社殿にご協力を頂き、同社戸塚工場において三相同軸超電導ケーブル200 m、中間接続部、気中終端接続部、株式会社エア・ウォーター殿製サブクール方式冷却装置、監視システムを設置し、実際に電力を送電する実証試験を開始した⁷⁾。この実証試験を戸塚プロジェクトと呼称する。実証試験は2020年秋から2021年秋にかけて約1年間実施した。本レビューでは実証試験の内容を報告する。

2. 戸塚プロジェクト システム構成

戸塚プロジェクトでは給電側（D307）から受電側（D501）に約200 mに亘って超電導ケーブルを敷設している。プラント内であるため、輸送/作業車両等に干渉しない様に地上高6 mにトラフを配置し、超電導ケーブルを敷設した。ケーブルの中央部には地上高6 mに2つの中間接続部を配置した。



出典：国土地理院

図2 戸塚プロジェクトケーブル回路

また、短絡時のバイパスケーブルとして常電導 CV ケーブル（6 kV CVT 3X 60 mm²）を超電導ケーブルと並列に接続した。モデルケーブルによる短絡試験により、短絡時には超電導ケーブルに臨界電流（I_c）以上の電流が流れることにより超電導線材がフラックスフロー状態になり抵抗が発生し、CV ケーブルに電流が移行することを既に実験で確認している⁸⁾。

冷却はエア・ウォーター株式会社製のサブクール方式の冷却装置を使用した。サブクール装置はサブクーラー内を真空ポンプで負圧にすることで、内部の液体窒素の温度を下げている。超電導ケーブル内に循環する液体窒素はサブクール内の熱交換器を通ることで68 Kまで冷却している。

監視システムにより超電導ケーブル、常電導ケーブルの電圧、電流、電力および超電導ケーブル各部の圧力、温度、液面レベル、真空度および冷却装置の流量等を常時監視記録し、万一管理レベルを超える場合は自動的に超電導ケーブルを系統から切り離し、関係者に電子メールが配信される仕様とした。



図3 戸塚プロジェクトの各設備

3. 通電開始—常電導ケーブルとの分流確認

超電導ケーブルと常電導ケーブルを並列に接続して通電を開始した。1日の電圧変化、電流変化を図4に示す。通電前には超電導ケーブルは抵抗が0のため、全て超電導ケーブルに電流が流れると予想していたが、監視システムで観測したところ、常電導ケーブルにも全体の20%程度通電されていることが確認された。

常電導ケーブルのインピーダンスをJCS168E⁹⁾に基づき計算した。管路内敷設とし導体温度25℃とすると、計算の結果、導体抵抗は0.311 (Ω/km)となった。また、導体外径9.3 mm、導体中心間隔23 mmとするとインダクタンスは0.37 mH/km、インピーダンスは200 mで0.0665 Ωと計算された。

この計算結果と分流比率から考えると超電導ケーブルのインピーダンスは0.0133 Ωとなる。超電導ケーブルと常電導ケーブルの間は渡りのCVケーブル（両端合計30 m）およびジャンパー線3 mで接続されており、この部分のインピーダンス0.0109 Ωを差し引くと、今回の超電導ケーブルシステムのインピーダンスは(1)式から0.0024 Ωと計算された。電流リードの抵抗分やジャンパー線、電流リード、超電導ケーブル間の接続抵抗を考慮すると妥当な値であると考えられる。

$$0.0665 \Omega \times 0.2 (\text{分流比}) - 0.0109 = 0.0024 \Omega \quad (1)$$



図4 送電量の日時変化

4. 冷却装置の年次点検

超電導ケーブルシステムを敷設後、世界的な新型コロナウイルス（COVID-19）の蔓延により政府から緊急事態宣言が発令されたので、すぐに通電できず、冷却装置設置後1年を超えても実証試験を継続することとなった。本システムは電気事業法に準拠したが、冷却設備は高圧ガス保安法に準拠して年次点検を実施した。

年次点検のためには冷却装置を停止する必要がある。そこで、以下の方法で年次点検を実施した。

- ①超電導ケーブルを電力系統から切り離して、常電導ケーブルのみで通電した。
- ②初期冷却と同様にコールドエバポレーター（CE）から初期冷却装置を介して超電導ケーブルに直接液体窒素を流し、超電導ケーブルの冷却を継続した。
- ③冷却装置の点検終了後、再度冷却装置と超電導ケーブルを接続して、循環冷却を再開した。

従来、他のプロジェクトでは点検のために冷却装置を2台にしてバックアップ運転をしていたが、この方式によりより低コストで冷却装置の点検が可能であることが確認できた。冷却装置の点検状況を図5に示す。

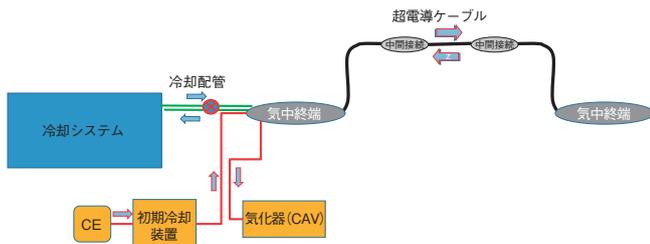


図5 冷却装置の点検状況

5. X線撮影による地上高6mの液体窒素量確認

地上高6mに設置したケーブルに液体窒素が充填しているか確認するために超電導ケーブルのX線撮影を試みた。

撮影箇所は地上高6mのケーブルおよび参考のために地上高1mのケーブルと終端接続部として行った。

撮影位置を図6に示す。撮影したX線写真を図7に示す。X線写真では超電導線材の撚り状態まできれいに撮影できているが、液体窒素と窒素ガス界面の界面は視認できなかった。このことにより地上高6mの超電導ケーブル内部も液体窒素が充填していることが確認できた。



図6 X線撮影位置および撮影状況

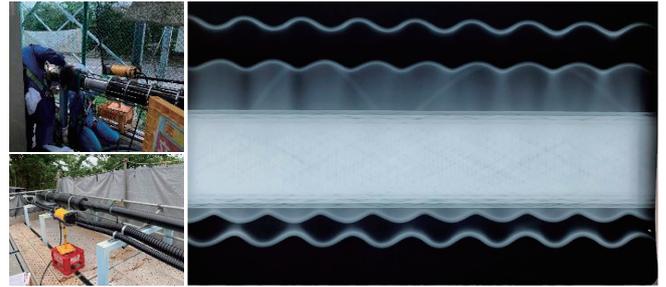


図7 撮影時の状況写真と撮影結果

6. 圧力差の測定と検討

監視システムにより超電導ケーブルの入口出口の圧力と温度を測定した。測定結果を図8～図10に示す。なお、図中の中央部付近の圧力低下、温度上昇している箇所は冷却装置の年次点検の際にCEからの冷却に変更したことによるものである。

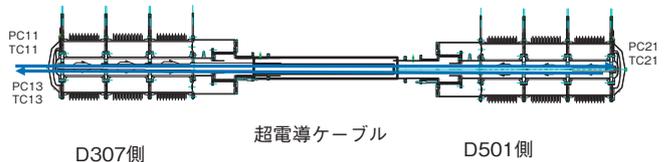


図8 超電導ケーブルの内部圧力、温度測定箇所

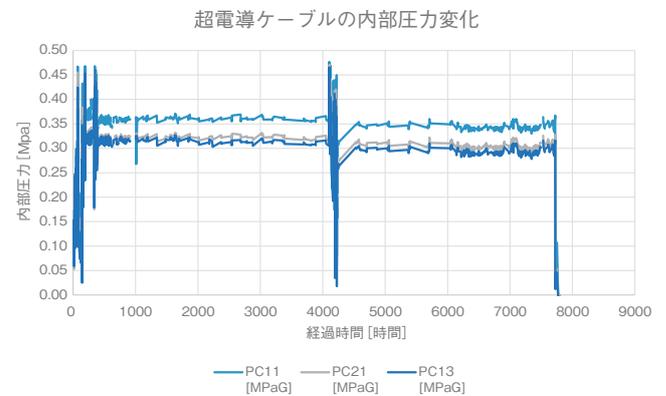


図9 実証試験中の圧力変化

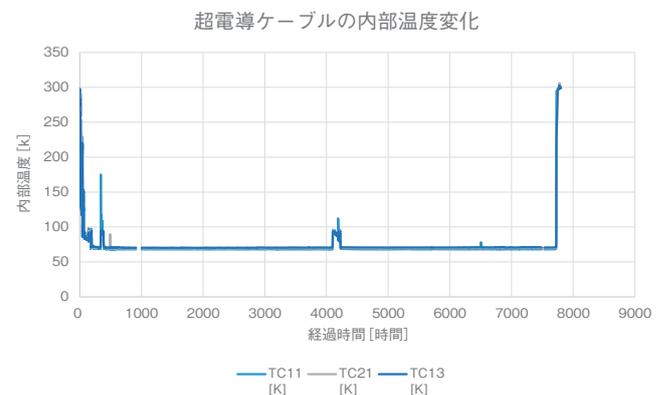


図10 実証試験中の温度変化

表 1 各部の温度、圧力測定結果

測定箇所	No.	圧力 (kPa)	圧力差 (kPa)	No.	温度 (K)	温度差 (K)
冷却側ケーブル (内側流路入口)	PC11	338	0	TC11	68	0
逆側終端 端部 (内側流路出口 外側流路入口)	PC21	300	38	TC21	69.3	1.3
冷却側終端出口 (外側流路出口)	PC13	286	52	TC13	70.3	2.3

測定結果から入口～出口の圧力差 ΔP は約 52 kPa であった。エア・ウォーター製液体窒素 (LN₂) ポンプの最大差圧 P は 200 kPa であるので、(2) 式から LN₂ ポンプ 1 台で 769 m のケーブルに対応可能である。

$$L_s = \frac{P}{\Delta P} \times l = \frac{200 \text{ (kPa)}}{52 \text{ (kPa)}} \times 200 \text{ (m)} = 769 \text{ (m)} \quad (2)$$

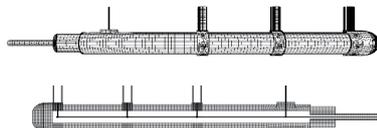
7. 温度差の測定～熱侵入量計算

監視システムの測定データから超電導ケーブル入口出口の温度差 ΔT は 2.3 K であった。また流量 W は 21.3 kg/min (26.4 L/min) = 0.355 kg/s であった。ここから (3) 式により熱侵入量を計算した。ここで、液体窒素の比熱は C=2042 J/kg・K とした。

計算した熱侵入量は 1667 W であり、事前に計算したシミュレーションの値 1400 W と大きな違いは見られなかった。

$$Q = c \times \Delta T \times W = 2042 \text{ (J/kg} \cdot \text{K)} \times 2.3 \text{ (K)} \times 0.355 \text{ (kg/s)} = 1667 \text{ (W)} \quad (3)$$

解析ソフト
メッシュ作成 GAMBIT
熱流体解析 FLUENT



熱損失

	損失分	個数/長さ	計
終端部 熱侵入分	200 W	2 組	400 W
電流リード発熱分	100 W	6 本	600 W
超電導ケーブル交流損失	0.5 W/m	200 m	100 W
ケーブル部 熱侵入分	1.5 W/m	200 m	300 W
合計			1400 W

液体窒素圧力損失
0.52 MPa (ケーブル長 200 m、流量 25 L/min)

図 11 熱侵入量シミュレーション結果

8. 省エネルギー効果検討～脱炭素量検討

今回の実証試験では大電流を流すことはなかったが、仮に 30 MW の電力システムに本三相同軸超電導ケーブルを適用した場合の送電損失から脱炭素量を計算した。

従来ケーブルを 6600 V 1000 mm² 3 条引きとすると JCS 168 E により 1 条のインピーダンス Z は 0.0889 (Ω/km) となる。

なお、1000 sq の定数は以下を使用した。

Ro : 20℃ 直流最大抵抗 (1000 sq) 0.0187 Ω/km

T1 : 導体許容最高温度 (℃) 90℃

d1 : 導体外径 38 mm

s : 導体中心間隔 56 mm (俵積)

K_{sl} : CV ケーブル分割導体 0.6

30 MW の電力システムの場合、通電電流は (4) 式によりトータルで 2624 A、3 条引きなので、1 条当たり 875 A となる。

$$30 \text{ MW} / 6600 \text{ V} \times \sqrt{3} = 2624 \text{ A} \quad (4)$$

875 A を通電した際の 1 km 当たりのジュール発熱による送電損失量は (5) 式により 612 kW/km となる。

$$I^2 R = 875 \text{ (A)}^2 \times 0.0889 \text{ (}\Omega/\text{km)} \times 3 \text{ 条} \times 3 \text{ 相} = 612 \text{ kW/km} \quad (5)$$

一方、超電導ケーブル 1 km の熱損失は (3) 式で計算した 200 m 分の熱侵入量 1667 W にケーブルの熱侵入量 (1.7 W/m)¹⁰⁾ 800 m 分と JCS168E を元に計算した誘電損失分 0.027 W/m、交流損失分 0.38 W/m、電流リードの熱損失量 W_{lead} 40 W/相 6 相分、冷却装置の損失分 1120 W を加えて、(6) 式により計算できる。

$$\begin{aligned} W_{\text{totsuka@200m}} + q_{\text{cable}} \times 800 \text{ m} + W_{\text{d}} + W_{\text{ACloss}} \times \\ 1000 \text{ m} + W_{\text{lead}} \times n + W_{\text{cool}} = \\ 1667 + 1.7 \times 800 + 27 + 0.38 \times 1000 + 40 \times 6 + \\ 1120 = 4.79 \text{ kW/km} \quad (6) \end{aligned}$$

(6) 式の超電導ケーブルの発熱分を冷凍機で冷却すると冷凍機の成績係数 COP を COP=0.1 とすると冷却に要する電力は (7) 式で計算できる。

$$\frac{4.79 \text{ kW/km}}{0.1} = 47.9 \text{ kW/km} \quad (7)$$

冷却装置をサブクールシステムで検討すると、今回の試験では約 200 m の線路であるが、今回使用したサブクールシステムは実測値で 6 kW 以上の冷却能力があるので、(6) 式で求めた 1 km 分の発熱量を冷却することができる。

本実証試験のシステムでは (6) 式の超電導ケーブルの発熱分を液体窒素により冷却するが、この熱によって気化した液体窒素を全て工場内で使用すると仮定した場合、超電導ケーブルの発熱分は無視できることになり、サブクールシステムの使用電力量のみが消費される。今回の実証試験結果からサブクーラーと LN₂ ポンプの電力使用量は (8) 式となる。

$$\sqrt{3} \times 200 \text{ V} \times 83 \text{ A} = 28.8 \text{ kW} \quad (8)$$

すなわち (5) 式と (8) 式の差

$$612 \text{ kW} - 28.8 \text{ kW} = 583.2 \text{ kW} \quad (9)$$

95%以上の電力低減が期待できる。

環境省の温室効果ガス総排出量算定方法ガイドライン¹¹⁾により1年間分の二酸化炭素排出低減量を計算すると、

$$583.2 \text{ (kW)} \times 24 \text{ (hours)} \times 365 \text{ (days)} \times 0.468 \text{ (kg-CO}_2\text{/kWh)} = 2391 \times 10^3 \text{ (kg-CO}_2\text{/year)} \quad (10)$$

1 km 当たり1年間で2000 t以上の二酸化炭素が削減可能となる。

*東京電力エナジーパートナー(株)の基礎排出係数

9. 試験終了から撤収

2021年9月に約1年間の実証試験を終了した。終了後に系統から切り離して電気設備技術基準の6 kVの竣工試験である10350 V 10分間の耐電圧試験を実施し、耐えることを確認した。これにより長時間運転においても問題なく稼働することを確認した。

10. まとめ

BASF ジャパン株式会社殿戸塚工場において三相軸超電導ケーブルの実証試験を実施した。約1年間の実証試験を無事に終え、超電導ケーブルの実フィールド信頼性を確認した。

実証試験の結果、通電の際には超電導と常電導ケーブルで電流が分流していることや、圧損検討、入出力口の温度差と冷媒流量から熱侵入量計算を行い、試験前の検討値とほぼ一致していることが確認できた。

超電導ケーブルと常電導ケーブルを並列で通電することで約20%が常電導ケーブルに通電されることが確認された。これは超電導ケーブルの両端に渡りCVケーブルがあり、そのインピーダンスの影響が大きい。常電導への分流分を少なくするためには渡りケーブルを短くする(インピーダンスを下げる)ことが有効で、これにより更なる電力損失の低減が期待できる。

- 実証試験中に冷却装置の年次点検やX線撮影による地上高6 mでの液体窒素充填の確認ができた。
- 圧力差から液体窒素ポンプ1台で769 mのケーブルに対応できることが確認できた。
- 温度差と流量から計算した熱侵入量は当初の計算結果と大きな差が見られなかった。
- 本実証試験により高低差のあるプラントにも超電導ケーブルが適用できること、圧損、熱侵入量が設計どおりであることが確認できた。
- 本ケーブルは30 MW以上のプラントに適用することにより95%以上の電力低減および1 km 当たり年間2000 t以上の二酸化炭素排出量低減が期待できる。今後はプラントへの適用を検討している。

謝 辞

この論文作成に当たり、冷却システム技術について各種ご教授頂いたエア・ウォーター株式会社の方々、試験場所を提供いただき、多大なるご支援を頂いているBASFジャパン株式会社戸塚工場の方々に心から感謝いたします。

この成果の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成金事業として得られたものです。

参考文献

- 1) 中西達尚, 他: 昭和電線レビュー, Vol. 58, No. 1, P12-16 (2008)
- 2) 木村一成, 他: 昭和電線レビュー, Vol. 60, P20-24 (2014)
- 3) 足立和久, 他: 昭和電線レビュー, Vol. 61, P15-19 (2015)
- 4) 菅根秀夫, 他: 昭和電線レビュー, Vol. 62, P5-8 (2016)
- 5) K.Adachi, et, al: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 26, 4, Article number 5400604, 2016. 06.
- 6) K.Adachi, et, al: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 27, 4, Article number 5401105, 2017. 06.
- 7) 足立和久, 他: 昭和電線レビュー, Vol.66, P10-15 (2020)
- 8) K.Adachi, et,al: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 28, 4, DOI: 10.1109/TASC.2018.2798058
- 9) JCS 168 E 電力ケーブルの許容電流(その1): 電線工業会規格(1995)
- 10) 北村祐, 他: 昭和電線レビュー, Vol.63, P18-23 (2017)
- 11) 温室効果ガス排出量算定方法ガイドライン Ver1.0
: 平成29年3月 環境省 総合環境政策局 環境計画課発行

昭和電線ケーブルシステム(株)
足立 和久（あだち かずひさ）
技術開発センター 超電導応用製品課
博士（工学）
超電導ケーブルシステムの研究・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)
中西 達尚（なかにし たつひさ）
技術開発センター 超電導応用製品課
超電導ケーブルシステムの研究・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)
塩原 敬（しおはら けい）
技術開発センター 超電導応用製品課
博士（工学）
超電導ケーブルシステムの研究・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)
三堂 信博（みどう のぶひろ）
技術開発センター 超電導応用製品課
超電導ケーブルシステムの研究・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)
青木 裕治（あおき ゆうじ）
技術開発センター 超電導応用製品課
課長
超電導ケーブルシステムの研究・開発に従事