

超高電圧直流ケーブル気中終端接続部の開発

Development of Outdoor Termination for EHVDC (Extra High Voltage Direct Current) Cable System

富井 櫻子 *¹
Sakurako Tomii

茂森 直登 *²
Naoto Shigemori

森 大樹 *²
Hiroki Mori

大竹 陽介 *²
Yosuke Otake

吉田 敬祐 *³
Keisuke Yoshida

劉 勁 *⁴
Jin Liu

〈概要〉

従来、欧州を中心に長距離送電に適した高電圧直流送電（HVDC：High Voltage Direct Current）の普及が加速してきた。近年、日本国内においても、2050年カーボンニュートラル実現を見据えた広域系統長期方針に基づき、直流送電システムでの地域間連系線の増強が見込まれる。送電システムの信頼性を確立するためには、ケーブル本体だけでなく、付随する接続部についても、運用期間中に故障が生じないように、厳格な試験に合格する必要がある。本稿では、直流送電システムの構成要素の一つである高電圧直流ケーブルの気中終端接続部に着目し、その開発について述べる。

1. はじめに

HVDCケーブルには、OF（油浸）ケーブルやソリッド（鉛被ケーブルなど）ケーブルが用いられてきたが、近年では、主絶縁に架橋ポリエチレン（XLPE）を採用した固体絶縁ケーブルの適用が海底・陸上の両方で拡大している。

広域系統長期方針¹⁾では、地方の電力供給と首都圏の電力需要のアンバランスを解消するため、地域間を結ぶ長距離送電システムの需要が高まり、長距離送電に有利な直流送電網の構築が期待されている。更に、データセンターの普及に伴い、首都圏の電力需要は一層増加することから、これらの地域連系線の役割は今後ますます重要になると予想される。

このような送電システムは国のインフラを支える重要な要素であり、事故発生時の影響が大きい。製品の信頼性は極めて重要な指標となる。送電システムでは、ケーブル本体だけでなく、ケーブル同士を接続する中間接続部やケーブル端部に取り付け終端接続部についても、運用期間中に故障が発生しないよう、運用条件を想定した厳格な試験に合格する必要がある。これらを満たして初めて上市可能となる。

2. 直流送電システムにおける気中終端接続部の開発背景

これまで当社は、直流525 kVの海底ケーブル及び陸上ケーブルの開発^{2), 3)}に注力してきた。直流電圧印加時では、ケーブルや接続部の内部及び界面に空間電荷⁴⁾が蓄積する。この電荷の蓄積は特に高電圧下で顕著となり、経年劣化とは異なる直流特有の劣化現象を引き起こすため、構造が複雑な接続部の設計では、これらに耐え得る設計方法の確立が求められる。

本稿で述べる気中終端接続部の構造を図1に示す。気中終端接続部は、碍管がケーブル全体を覆う構成となっている。碍管表面の汚損度が高まり、交流課電時と比較して低い電圧でフラッシュオーバーが発生する可能性があるため⁵⁾、直流に適した碍管設計が求められる。更に、気中終端接続部は複数の部品や材料で構成されており、特にケーブルの絶縁層、ストレスリリーフコーンの絶縁層、オイル（碍管内に充てんされる絶縁媒体）が交わる三重点（トリプルジャンクション）では電界強調が発生する懸念がある⁶⁾。この電界強調を緩和させる設計が必要であるが、三重点の電界を抑制すると他の領域で電界強調が発生する可能性があるため、全体的な電界バランスの評価が重要である。

そこで本稿では、気中終端接続部の内部構造に着目し、電界シミュレーションを駆使しながら、直流の高電圧課電に適応する構造の再設計を行った。

新設計は、以下の項目の検討を行った。

- ① 直流向けの碍管の長さ
- ② ストレスリリーフコーンの構造改良
- ③ ストレスリリーフコーンの装着位置

上記を主な改良点として、新モデルの設計を行い、CIGRE TB 852⁷⁾に示された試験方法に基づき、タイプテストを実施した。

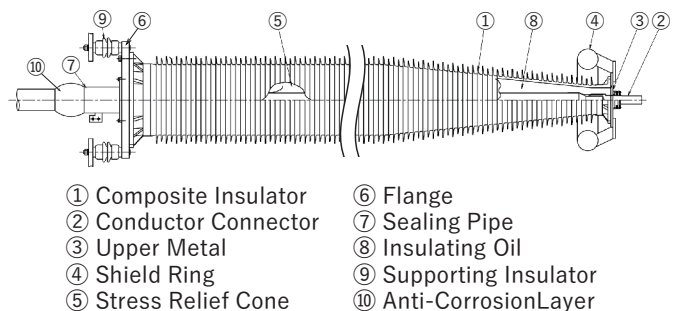


図1 気中終端接続部の構造
Structure of outdoor termination.

*¹ 電力事業部門 電力技術部

*² 電力事業部門 技術開発部

*³ 電力事業部門 機器製造部

*⁴ 電力事業部門 施工力増強チーム

部署名は2026年3月時点の所属を記載しています。

3. 電界計算

気中終端接続部の構成のうち、有限要素法 (FEM) 解析を用いて、ストレスリリーフコーン周辺の電界を評価した。直流解析では、各物性の抵抗率が重要なパラメータとなる。抵抗率は温度や電界条件により変化するため、解析条件として温度は25℃及び90℃、印加電圧はタイプテストの試験電圧に相当する $1.85 U_0$ ($U_0 = 525 \text{ kV}$) とし、定常状態で解析を実施した。

解析モデルは従来設計と新設計の2種類を用意した。以下に示すストレスリリーフコーン周辺の5部位を評価対象とし、従来設計と比較し、新設計の電界の増減を確認した。

- No. 1: オイルとストレスリリーフコーン界面
- No. 2-1: 三重点 (オイル側)
- No. 2-2: 三重点 (ケーブル側)
- No. 3: ストレスリリーフコーンとケーブル界面
- No. 4: ケーブル外部半導電層先端
- No. 5: ストレスリリーフコーン半導電層先端

表1に従来設計モデルと新設計モデルの電界増加率の比較結果を示す。従来設計モデルの各部位の電界を1とした場合、新設計では特に三重点周辺で電界の低減が確認され、オイル側では0.71 (25℃)、0.64 (90℃)、ケーブル側では0.81 (25℃)、0.72 (90℃) まで低減した。その他の部位では、従来設計と同等程度の電界に抑えられており、全体的な電界を低減可能な新設計を決定した。また、碍管表面の電界は従来設計と新設計で変化がなかったことを確認した。

表1 電界増加率の比較
Electric field change ratio in the new structure compared to the conventional structure.

No.	Parts	Electric field rate of new structure compared to conventional structure $V = 1.85 U_0$, $T = 25, 90^\circ\text{C}$	
		$T = 25^\circ\text{C}$ $T = 90^\circ\text{C}$	
1	Interface/Oil and Cone	1.0	1.0
2-1	Triple junction/Oil side	0.71	0.64
2-2	Triple junction/Cable side	0.81	0.72
3	Interface/Cable and Cone	1.0	1.0
4	Tip of semi-conductor in cable	1.0	1.0
5	Tip of semi-conductor in cone	0.96	1.0

4. ケーブルとストレスリリーフコーン間の界面圧力

気中終端接続部において、ストレスリリーフコーンのケーブル装着位置は第3章で述べた電界設計における重要な指標の1つである。ストレスリリーフコーンには、一般的にシリコンゴムやエチレンプロピレンゴムなどの弾性材料が用いられ、ケーブル装着時にゴムの自己収縮力により、位置を保持する。特に気中終端接続部では、ストレスリリーフコーンが垂直方向に設置されるので、界面圧力が不足すると自重により、滑落す

る懸念が考えられるため、界面圧力の評価を行った。

評価方法として、表面に面圧センサを埋め込んだパイプにストレスリリーフコーンを装着し、ひずみと応力の相関から面圧を測定した。面圧センサはストレスリリーフコーンの絶縁部に2か所 (センサ1及びセンサ2)、半導電層先端を想定した位置に1か所 (センサ3) の計3か所に配置した。

試料は100℃に設定した恒温槽内に、垂直方向に設置し、運用条件50℃とした場合に約39倍の加速条件となる加速劣化試験を実施し、国際的にケーブルの寿命とされる40年相当⁷⁾を目標に、界面圧力の低下を確認した。

実験結果を図2に示す。初期の界面圧力を1とした場合、40年相当での界面圧力減少率はセンサ1で0.7、センサ2で0.6、センサ3で0.9であった。絶縁部の界面圧力減少率が高くなったものの、一般的に20% (0.2) 以上の圧力保持が求められるため、一定の面圧は維持されており、自重によりストレスコーンの滑落懸念は解消された。

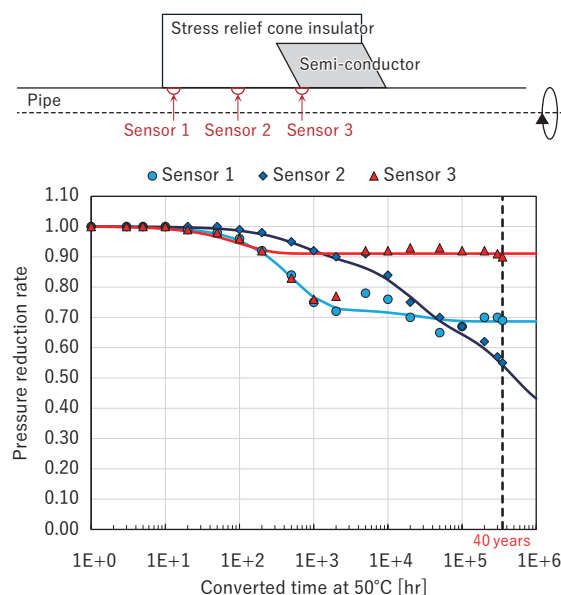


図2 加速劣化条件下でのケーブル及びストレスリリーフコーン間の界面圧力の減少率
Interface pressure reduction rate between cable and stress relief cone in the accelerated aging conditions.

5. 初期試験

5.1 初期試験条件下での電界過渡解析

新設計モデルでの気中終端接続部における電氣的性能を確認するため、直流耐電圧試験を実施した。ケーブルに直流電圧を印加した場合、定常状態に到達するまでには一定の時間を要する。CIGRE TB 852に記載されている直流重量インパルス試験では、インパルス電圧印加前に直流電圧を10時間印加する前課電時間を設けることが求められている。一方、CIGRE TB 842⁸⁾では主絶縁がガスであるGISの場合、前課電時間は2時間とされており、絶縁種類や構成により、定常状態に到達する飽和時間が異なることが知られている⁹⁾。本稿では、気中終端接続部に対して必要な飽和時間を過渡解析により検討し、その所定時間を直流耐電圧試験における電圧印加時間として設定した。

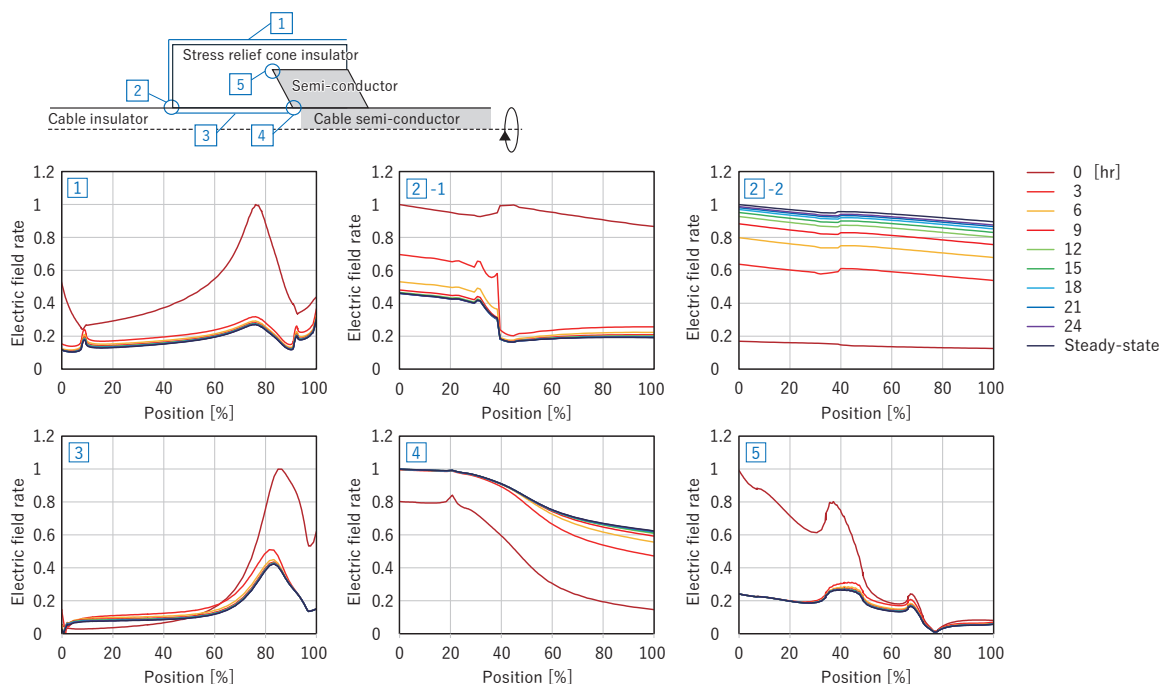


図3 ストレスリリーフコーン周りの電界分布の経時変化
Changes in the electric field distribution at each location over time.

図3に、5部位における経過時間ごとの電界分布の変化と定常状態の電界分布を示す。電圧印加直後の電界分布は交流電圧下で観測される電界分布(不図示)と一致した。ほとんどの部位では電圧印加3時間後に定常状態に近い電界分布に移行することが確認されたが、No. 2-2(三重点ケーブル側)の電界は飽和に到達するまでに最も時間を要した。特に三重点は定常状態に近づくほど、最大電界が増加するため、三重点ケーブル側の電界に着目し、最大電界の経時変化を評価した。

図4に、No. 2-2(三重点ケーブル側)の電界強度が定常状態に到達するまでの割合を示す。他の部位が定常状態と同程度の電界分布になる3時間では、定常状態の約64%にとどまり、最大電界を評価するためには不十分な時間と考えられた。また、定常状態の90%に到達するには約10時間、定常状態近傍に到達するには約20時間の連続印加が必要であることが示唆された。

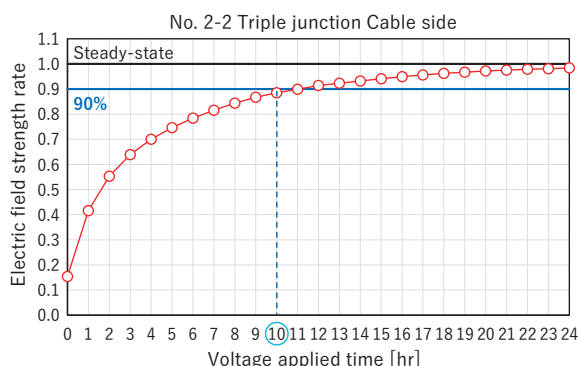


図4 三重点ケーブル側における電界強度割合
Electric field strength rate at No. 2-2; Triple junction of cable side.

初期試験では、試験効率も考慮し、CIGRE TB 852に示された10時間を目標として直流耐電圧試験を実施した。

5.2 試験結果

初期試験として実施した直流耐電圧試験の様子を図5、試験結果を表2に示す。過渡解析の結果に基づき、タイプテスト相当の試験電圧972 kVを両極性で連続10時間印加した。その結果、良好な試験成績が得られ、ストレスリリーフコーン周辺の電界を低減した新設計モデルが、直流高電圧に対して十分に耐え得る性能を有することが確認された。

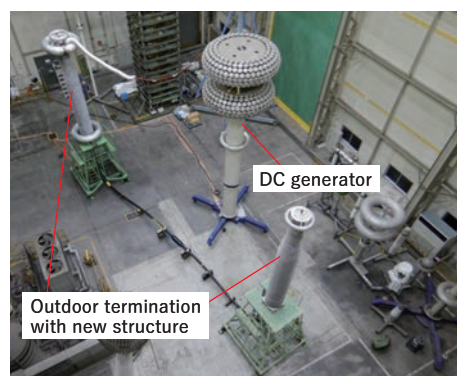


図5 初期試験
Initial test.

表2 初期試験条件及び結果
Initial test conditions and results.

No.	Voltage [kV]	Continuous time [hr]	Results
1	-972 kV	10	Good
2	+972 kV	10	Good

6. タイプテスト

初期試験で電氣的性能を確認した気中終端接続部を供試し、CIGRE TB 852の試験方法を参考に、直流525 kVのタイプテストを実施した。ケーブルは、直流架橋ポリエチレンケーブル

(導体サイズ: 2500 mm²) を供試した。ケーブル構造を図6に示す。表3にはタイプテストの試験条件、図7にはタイプテストの試験線路を示す。IEC62895¹⁰⁾ に準拠した曲げ試験を実施した後、図7に示す長期課通電試験線路を構築し、初期試験と

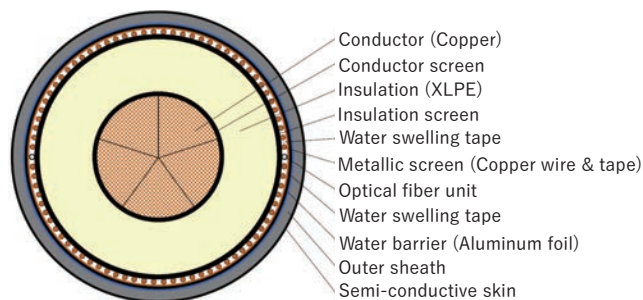


図6 ケーブル構造: DC525 kV 直流架橋ポリエチレンケーブル
Structure of 525 kV DC-XLPE (Cross-linked polyethylene) Cable.

表3 タイプテスト試験条件及び結果
Type test conditions and results.

No.	Conditions	Results
1	Bending test: 1.6 mR × 3 times	Good
2	Load Cycle 24 hr at -972 kV × 12 cycles	Good
3	Load Cycle 24 hr at +972 kV × 12 cycles	Good
4	Load Cycle 48 hr at +972 kV × 3 cycles	Good
5	U ₀ (+525 kV) & SWImp +1103 kV (10 shots)	Good
6	U ₀ (+525 kV) & SWImp -630 kV (10 shots)	Good
7	U ₀ (-525 kV) & SWImp -1103 kV (10 shots)	Good
8	U ₀ (-525 kV) & SWImp +630 kV (10 shots)	Good
9	U ₀ (+525 kV) & LIImp -1103 kV (10 shots)	Good
10	U ₀ (-525 kV) & LIImp +1103 kV (10 shots)	Good
11	DC -972 kV × 2 hr at RT	Good
12	Test of outer protection for PMJ	Good
	Water height: 1 m	
13	Examination (Cable, PMJ, Termination)	Good

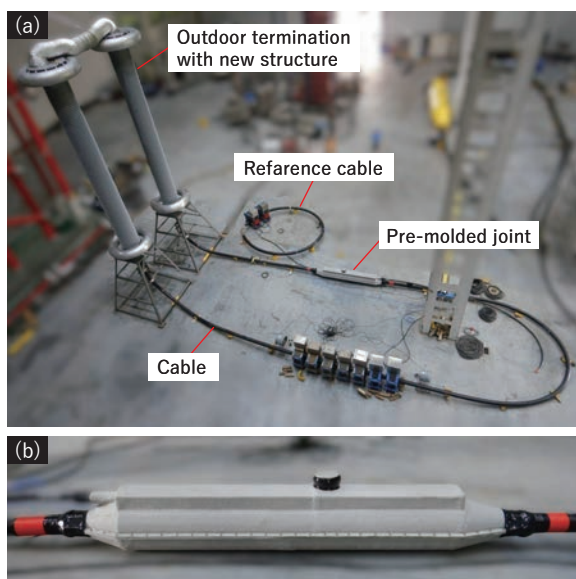


図7 タイプテスト長期課通電試験: (a) 全体図, (b) PMJ 構造
Load cycle of Type tests;
(a) General layout, (b) Structure of PMJ.

同等の 972 kV の電圧を印加した。長期課通電試験線路には、本開発品である気中終端接続部及び中間接続部として直接埋設仕様の PMJ (Pre-Molded Joint) を供試した。詳細な試験条件は表3の No. 2 ~ No. 4 に示す内容を行い、合計約 30 日間の長期課通電試験を実施した。その後、定格直流電圧 (U₀ = 525 kV) を印加した状態で直流重畳インパルス試験を行い、詳細条件は表3の No. 5 ~ No. 10 に示す内容に準じた。最後に直流耐電圧試験を実施し、いずれも良好な結果が得られた。

7. おわりに

直流用気中終端接続部の開発において、電界解析に基づき、特にストレスリリーフコーン周辺の電界を低減した新設計モデルを検討した。本モデルは初期試験を経て、CIGRE TB 852 の試験方法を参考にしたタイプテストを実施し、良好な結果が得られた。

本稿で開発した直流用気中終端接続部は、国内外の直流送電システムを構築するうえで、重要な要素である。今後、2050 年カーボンニュートラル達成に向けて、直流送電システムの需要は増加すると予想される。この需要に応えるべく、必要な要素技術の更なる検討を進めていく。

参考文献

- 1) 電力広域的運営推進機関 (OCCTO) > 新着情報 > 広域系統長期方針 (広域連系系統のマスタープラン) の策定について (参照日 2025 年 12 月 4 日)
https://www.occto.or.jp/news/kouikikeitou_chokihoushin_230329_choukihoushin_sakutei.html
- 2) N. Shigemori: "Development of 350 kV and 525 kV HVDC extruded cable system", Jicable' 19, A9-5, (2019).
- 3) 大竹陽介: DC525kV ケーブルシステムの開発, 令和7年電気学会全国大会, 7-089, (2025).
- 4) Y. Tanaka: "Space charge measurement techniques to evaluate insulating materials for HVDC cables", Jicable-HVDC' 21, 2-2, (2021).
- 5) R. Daniel: "Flashover mechanism of high voltage outdoor terminations with silicone rubber hollow core insulators", ETG-Symposium, VDE High Voltage Technology; 4 (2022).
- 6) I. S. Kwon: "Electric field characteristics of ending box-air (EB-A) type outdoor termination under switching impulse superimposed on DC voltage", IPST 2017, 17IPST0092 (2017).
- 7) CIGRE Working Group B1.62: "Recommendations for testing DC extruded cable systems for power transmission at a rated voltage up to and including 800 kV", CIGRE Technical Brochure No. 852 (2021).
- 8) CIGRE Working Group B3.57: "Dielectric testing of gas insulated HVDC systems", CIGRE Technical Brochure No. 842 (2021).
- 9) C. Plet, "Recommendations for dielectric testing of HVDC gas insulated cable connection assemblies", CIGRE 2024 Paris Session, 00520 (2024).
- 10) IEC 62895: "high voltage direct current (HVDC) power transmission - Cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages up to 320 kV for land applications - Test methods and requirements", (2017).