

次世代超高圧直流ケーブルの開発と実証試験

Development and Demonstration Testing of Next Generation Ultra-High-Voltage DC XLPE Cables with a New Insulation Material

田中 未来*
Miku Tanaka

松生 愛
Ai Matsuike

鈴木 笙眞
Shoma Suzuki

松原 貴幸
Takayuki Matsubara

当社の直流XLPE絶縁材料は導体許容温度90℃かつ極性反転に対応する世界で唯一の直流XLPE材料であり既に複数の納入実績がある。しかし、当社は更なる品質向上、性能向上を目指し、新たな無機充填剤入り絶縁配合の直流XLPEケーブルを開発した。この直流XLPEケーブルは電力業界最大規模の国際会議の一つであるCIGREが推奨する、極性反転ありの形式試験及び追加の過酷試験に合格しただけでなく、これら長期試験前後で絶縁体内の空間電荷蓄積がいずれも小さくことをPEA法の空間電荷測定により明らかにし、長期的にも良好な直流特性を持つことを示した。

Our Direct Current Cross-Linked Polyethylene (DC XLPE) insulation material is the only compound in the world qualified for use with Line-Commutated Converter (LCC) systems with polarity reversal capability, allowing for a maximum conductor temperature of 90°C, and has already been supplied for multiple commercial projects. However, to further improve the quality and performance of our cables, we developed new DC XLPE cables that incorporate an insulation formulation containing new inorganic fillers. This cable not only passed type tests, including polarity reversal, recommended by Conseil International des Grands Réseaux Électriques (CIGRE), one of the largest international conferences in the power industry, but also additional tests under severe electrical conditions. Moreover, Space-charge measurements of the cable insulation were conducted using Piezoelectric Effect Acoustic (PEA) methods before and after these long-term tests, revealing that the amount of space charge was low and remained nearly unchanged between the values before and after the tests. These results demonstrate that the new DC XLPE cables have favorable long-term DC characteristics.

キーワード：HVDC、直流ケーブル、空間電荷、形式試験、CIGRE

1. 緒言

再生可能エネルギーの世界的な導入拡大に伴い地域間および国家間を連系する送電線建設計画が欧州を中心に全世界に広がりを見せている。これら送電網向けに大容量かつ長距離送電に最適な超高圧直流ケーブルの需要が世界的に高まっている。

当社直流ケーブルの絶縁体材料は無機充填剤を添加した架橋ポリエチレン^{*1} (Cross-Linked PolyethyleneをXLPEと略す) であり、導体許容温度90℃、かつ直流特性を悪化させる空間電荷蓄積^{*2}が極めて小さく極性反転^{*3}にも対応可能という、世界唯一の特性を持つ直流XLPEケーブルである。2012年に北海道本州間連系設備にて世界初の直流250kV XLPEケーブルとして運転開始して以降、2019年にはNEMO Link (英国ベルギー間連系線) にてXLPEケーブルとしては世界最高電圧となる直流400kV XLPEケーブルの運転が開始されるなど、当社直流XLPEケーブルは既に国内外で複数の納入実績を持っている^{(1),(2)}。また、電力業界最大規模の国際会議CIGREが推奨する試験条件 Technical Brochure (以下、CIGRE TB) に準拠した直流525kV XLPEケーブルの認証試験に合格しており、ドイツの地域間連系線プロジェクト向けに直流525kVのケーブル

製造、出荷を開始している。

しかしながら当社は、今後の直流XLPEケーブルの需要拡大に対応するため、新たな直流XLPE材料およびケーブルを開発した。新たな直流XLPE材料は、導体許容温度90℃、極性反転可能という特徴的な直流特性を保持したまま、更なる製造性向上および性能向上を実現するものである。

本報告では新たな直流XLPE材料を用いた直流400kV級のケーブル製造と、CIGRE TB 852に準拠した形式試験および追加で実施した独自の過酷試験の結果について報告する。さらに、長期課電履歴がケーブル絶縁体内の空間電荷特性に及ぼす影響についてパルス静電応力法 (PEA法) にて評価した結果についても併せて報告する。

2. 長期課通電試験用ケーブルの設計・製造

長期課通電試験および空間電荷測定に供試するケーブルとして、絶縁厚さ19.0mm、導体サイズ1300mm²のケーブルを製造した。また、海底ケーブルへの適用も見据え同ケーブルで工場接続部も製造した。図1にケーブルの断面構造を示す。

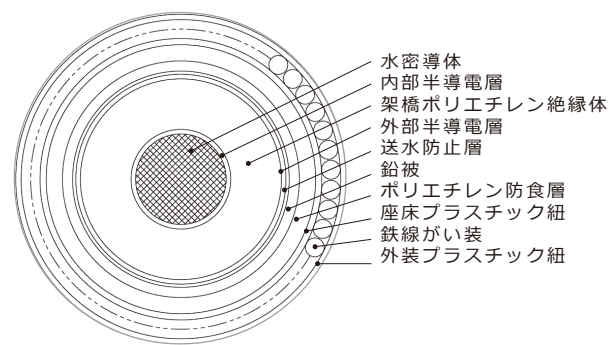


図1 長期課通電試験用 直流XLPEケーブルの断面図

ケーブルおよび工場接続部の絶縁体には自社で製造した新たな直流XLPE材料を用いた。新たな直流XLPE材料の無機充填剤は従来材料の無機充填剤よりも微細化されている。これにより直流XLPE材料の製造工程、およびケーブルの絶縁体押出工程において、従来材料よりも細密なメッシュを適用した異物のフィルタリングを可能とし、材料およびケーブル絶縁体への異物混入リスクの更なる低減を実現した。

また、無機充填剤が微細化された効果もあり高温時に材料が透明化するため、直流XLPEケーブルの絶縁体透過試験も可能とし、ケーブルの内部半導電層、外部半導電層の不正や絶縁体への異物混入の検出確率を高めることに繋がっている。

3. 長期課通電試験

3-1 形式試験

当社茨城製作所にて直流525kV電界ストレス相当の形式試験を実施した。図2に示す通り、形式試験の電気試験線路はガス中終端接続箱を組み入れた線路1と気中終端接

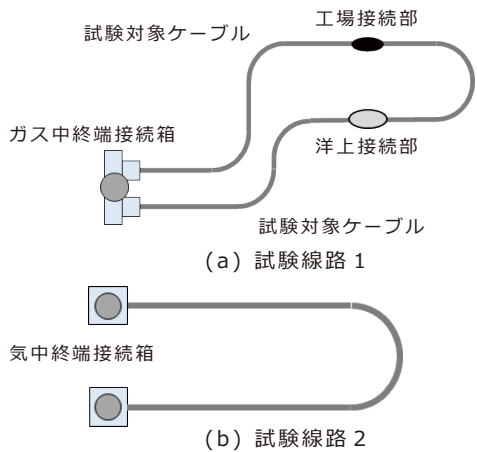


図2 形式試験線路のレイアウト図

続箱を組み入れた線路2の二線路に分けた。これにより、新たな直流XLPEケーブルとそれぞれの終端接続箱との組合せにおける長期性能検証を可能とした。また、線路1には工場接続部と洋上接続部としてプレモールドジョイントも組入れた。

電気試験線路に供試されるケーブルは線路組み入れ前に、実際のケーブル製造およびケーブル布設工事で想定される機械履歴を加えるため、表1に示すコイル取り試験および引張曲げ試験に供試された。また、機械試験後のケーブルは鉄線鎧装およびプラスチック紐が除去され、防食層が最外層となる状態で試験線路に組み入れた。これにより、電気試験時の交流電流による通電加熱時に鉄線への誘導電流による発熱の発生を防いだ。

表1 形式試験における機械試験条件

試験項目	試験条件
コイル取り試験	直径12m コイル取り×3回 (工場出荷時、輸送船積込、布設船積込の3回のコイル巻を想定して実施)
引張曲げ試験	シーブ径3m 引張張力21ton 側圧 21ton÷3m=7.0ton/m (ケーブル布設時にケーブルに印加される張力及び側圧を模擬して実施)

電気試験はCIGRE TB 852に規定される形式試験 (Type test) 条件に準拠して実施した。表2に試験条件を示す。

試験条件は近年の直流送電システムとして多いVSC方式の条件を基本にしているが、直流XLPE絶縁体の実力値を検証するため、絶縁体にとってより厳しい条件であるLCC

表2 形式試験条件 (U₀=405kV)

試験項目	試験内容
① ロードサイクル 試験 (CIGRE TB852) VSC条件 +極性反転	導体最高温度：90℃ 絶縁体温度勾配：16℃ -750 kV (-1.85U ₀) : 8 h ON, 16 h OFF×12回 +750 kV (+1.85U ₀) : 8 h ON, 16 h OFF×12回 ±588 kV (1.45U ₀) 極性反転 : 8 h ON, 16 h OFF×8回 +750kV (+1.85U ₀) : 24 h ON, 24 h OFF×3回
② DC重畳 開閉インパルス 試験 (CIGRE TB852) VSC条件	導体最高温度：90℃ 絶縁体温度勾配：16℃ +405 kV _{dc} (+U ₀) , -486 kVImp (-1.2U ₀)×10 回 +405 kV _{dc} (+U ₀) , +851 kVImp (+2.1U ₀)×10 回 -405 kV _{dc} (-U ₀) , +486 kVImp (+1.2U ₀)×10 回 -405 kV _{dc} (-U ₀) , -851 kVImp (-2.1U ₀)×10 回
③ DC重畳 雷インパルス 試験 (CIGRE TB852)	導体最高温度：90℃ 絶縁体温度勾配：16℃ +405 kV _{dc} (+U ₀) , -851 kV (-2.1U ₀)×10回 -405 kV _{dc} (-U ₀) , +851 kV (+2.1U ₀)×10 回
④ 残存試験 (CIGRE TB852)	常温実施 -750kV (-1.85U ₀) × 2 h

方式の極性反転試験を追加した。更に、耐雷性についても評価するため、直流重畳電インパルス試験も追加した。

ロードサイクル試験および重畳試験におけるケーブル導体の最高温度は90℃以上、絶縁体の温度勾配 (ΔT_{\max}) は16℃以上に設定した。

また、表2に示す試験電圧は直流525kVケーブルの形式試験時に絶縁体に印加される電界ストレスと同等になるよう設定した。表3に示す通り $U_0=405$ kV、ロードサイクル試験電圧 $1.85U_0=750$ kV に設定することで、内導直上の最大電界において、試験ケーブル絶縁体の電界ストレスが直流525kV形式試験時の電界ストレスと同等以上となる。

表3 形式試験時の内導直上の最大電界の比較

	試験対象ケーブル	525kVケーブル
ケーブル構造	絶縁厚 19.0 mm 導体 1300 mm ²	絶縁厚 25.0 mm 導体 2500 mm ²
基本電圧下の内導直上電界	$U_0=405$ kV 29.2 kV/mm	$U_0=525$ kV 28.4 kV/mm
ロードサイクル電圧下の内導直上電界	$1.85U_0=750$ kV 54.1 kV/mm	$1.85U_0=972$ kV 52.6 kV/mm

3-2 追加過酷試験

表2の形式試験完了後、表4に示す追加過酷試験を実施した。過酷試験ではまず、より高電界での絶縁耐力を検証すべく直流電圧を800 kVに昇圧、導体温度90℃にてCIGRE TB 852のVSC方式のロードサイクル試験を実施した。このとき、内導直上の最大電界は57.7 kV/mmであり、表3に示す525 kVの形式ロードサイクル試験時の電界ストレスよりも約10%高いレベルであった。更に、線路1にてケーブル絶縁体内の空間電荷蓄積量とそれに応じた電界変歪が更に大きくなる条件下でも検証すべく、導体最高温度を100℃に上昇させた条件で直流電圧800 kVの各極性にて3サイクルずつのロードサイクル試験を実施した。

表4 追加過酷試験条件

試験項目	試験内容
⑥ 高電圧条件 ロードサイクル 試験	導体最高温度：90℃ 絶縁体温度勾配：16℃ -800 kV _{dc} ：8 h ON, 16 h OFF × 12回 +800 kV _{dc} ：8 h ON, 16 h OFF × 12回 +800 kV _{dc} ：24 h ON, 24 h OFF × 3回
⑦ 高温+高電圧条件 ロードサイクル 試験	導体最高温度：100℃ 絶縁体温度勾配：16℃ -800 kV _{dc} ：8 h ON, 16 h OFF × 3回 +800 kV _{dc} ：8 h ON, 16 h OFF × 3回

新たな直流XLPEケーブルは、CIGRE 準拠の形式試験および追加過酷試験において、すべてのメニューで破壊すること無く合格し、DC525kV電界ストレス相当以上の絶縁耐力を持つことが示された。

4. 空間電荷測定

新たな直流XLPEケーブル絶縁体の空間電荷特性について、課電および通電が与える影響を評価するため、課通電履歴のないケーブルサンプルAと、長期課通電試験後のケーブルサンプルBのそれぞれで空間電荷測定を実施し比較した。いずれのケーブルサンプルも、一連長で製造した同一ロットのケーブルから採取した。

空間電荷測定はパルス静電応力法 (PEA法)⁽³⁾を用いて実施した。図3にPEA法による空間電荷測定回路を示す。課通電履歴の無いケーブルサンプルAは図3 (a) に示す試験用ループを構成し測定を実施した。

一方、長期課通電試験後のケーブルサンプルBにおいては、図3 (b) に示す通り長期課通電試験線路にPEA測定装置を組み込み空間電荷測定を実施した。

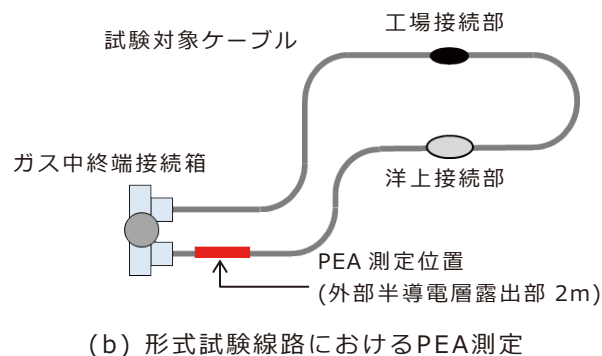
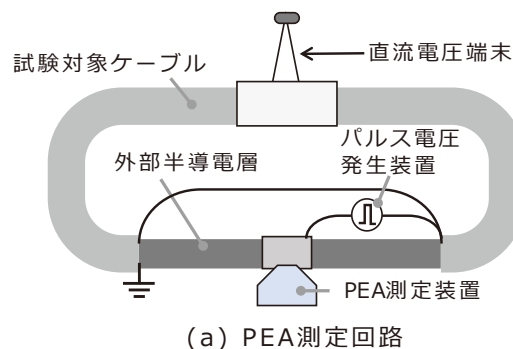


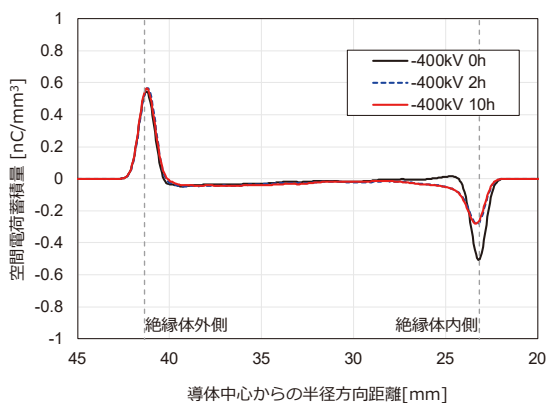
図3 PEA法を用いた空間電荷測定方法

表5に各サンプルにおける空間電荷の測定条件を示す。直流電圧について、サンプルAは-400 kV、サンプルBは長期課通電試験の $U_0=405$ kV に合わせて ± 405 kV にて実施した。この電圧差は、サンプルA試験時に U_0 が決定していなかったために生じた。また測定時間は、CIGRE TB 852にて重畳インパルス試験の前課電時間として推奨される10時間を適用し、ケーブルサンプルAにおいては0時間から10時間までの空間電荷分布の時間変化を測定した。

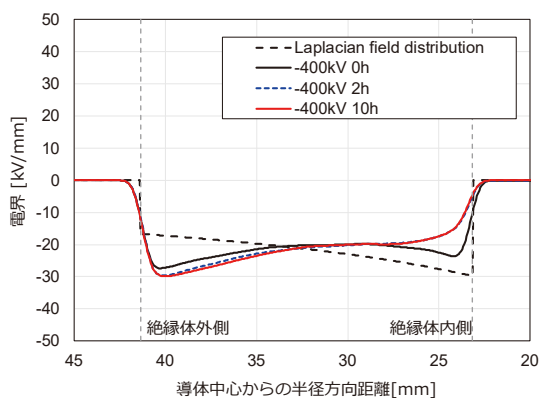
表5 空間電荷測定条件

	サンプルA (課通電履歴なし)	サンプルB (課通電履歴あり)
直流電圧	-400 kV	±405 kV
導体温度	90-95℃	90-95℃
絶縁体温度勾配	16℃以上	16℃以上
測定時間	10時間	10時間

図4に課通電履歴のないケーブルサンプルAの空間電荷測定結果を示す。図4 (a)において、絶縁体の内側に負極性の電荷が僅かに蓄積しているのが確認され、この空間電荷蓄積により図4 (b)に示す通り絶縁体内側の電界が緩和されている。また、測定開始から2時間時点と10時間時点で空間電荷蓄積および電界分布に大きな差は見られず、空間電荷蓄積および電界変歪は直流電圧印加後10時間でほぼ飽和していると言える。



(a) サンプル A の空間電荷分布

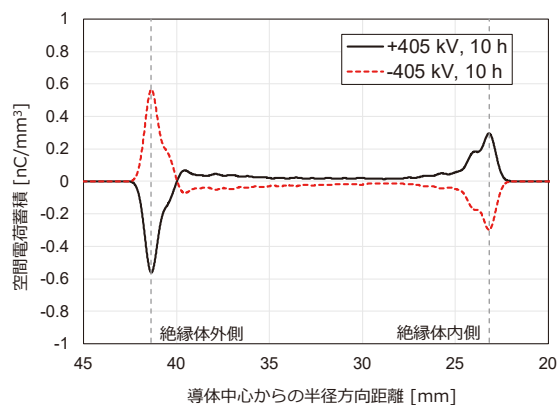


(b) サンプル A の電界分布

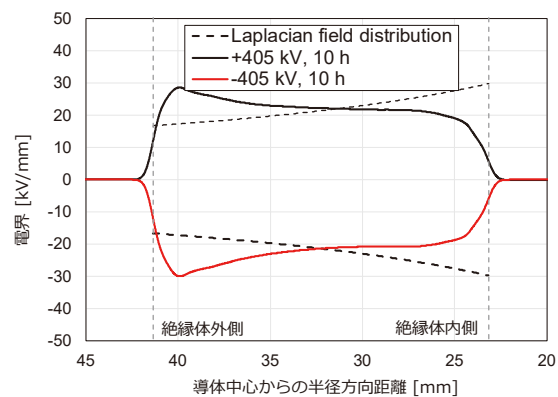
図4 サンプルAの空間電荷測定結果

次に、図5に長期課通電試験後のケーブルサンプルBの空間電荷測定結果を示す。図5 (a)に示す-405 kV、10時間後の空間電荷分布は、図4 (a)に示すケーブルサンプル

Aの-400 kV、10時間後の空間電荷分布と類似している。また図5の通り、直流電圧の極性は空間電荷分布、電界分布の極性を逆転させるのみで、分布傾向には影響しない。



(a) サンプルBの空間電荷分布



(b) サンプルBの電界分布

図5 サンプルBの空間電荷測定結果

これらの測定結果およびサンプルBが長期課通電試験を合格したサンプルであることから、新たな直流XLPE材料の絶縁体には直流特性を悪化させる空間電荷蓄積は発生せず、更に長期課通電が絶縁体の空間電荷特性を劣化させる影響もないことが明らかとなった。

5. 結 言

新たな直流XLPE材料のケーブル性能評価のため、CIGRE TB852に準拠した形式試験と当社独自の過酷試験を実施した。これにより、直流525kV電界相当の電圧下において、導体許容温度90℃、極性反転運転にも適用可能な絶縁材料であることを確認した。また、長期課通電試験前後において空間電荷測定を実施し、課通電履歴が絶縁体の空間電荷特性にほとんど影響を与えず、良好な電気特性を維持していることを確認した。

現在当社は、新たな直流 XLPE 材料のケーブルにて CIGRE TB 852 準拠の DC525kV 開発試験 (PQ Test) および形式試験 (Type Test) を計画中である。新たな直流材料は直流性能だけでなく、製造性、品質にも優れており、試験合格後には国内外で拡大する直流送電線建設プロジェクトへの適用を目指すものである。

用語集

※1 架橋ポリエチレン (XLPE)

現在の送電ケーブルの絶縁体材料として最も主流の樹脂材料。架橋反応によりポリエチレンの分子間を結合し耐熱性を向上することにより、ケーブル通電時の温度上昇にも耐える。

※2 空間電荷

絶縁体の内部に蓄積される正極性、または負極性に偏って存在する電荷のこと。絶縁体内部の空間電荷が局所的な電界歪みを発生させる。

※3 極性反転

直流ケーブルに印加されている電圧が正極から負極に、或いは負極から正極に反転すること。他励式 (LCC) の直流送電システムにおいて、潮流の方向を逆転させる際に直流電圧の極性を反転させる。

参考文献

- (1) C.Watanabe, T.Ito, H.Sakai, S.Katakai, M.Watanabe, Y.Murata, "Practical Application of + / - 250kV DC-XLPE Cable for Hokkaido-Honshu HVDC Link," CIGRE2014, B1-110
- (2) T.Igi, S.Assai, S.Mashio, S.Nishikawa, A.Tomioka, T.Miyazaki, T.Kazama " Qualification, installation and commissioning of world' s first DC 400kV XLPE cable system," Jicable '19, A6-1
- (3) S.Morita. et al., 2021, "Space charge measurement of full-size 23-mm-thick XLPE cables in load cycle condition," presented at the Jicable HVDC' 21 Conference

執筆者

田中 未来* : 電力プロジェクト事業部 主査



松生 愛 : 電力プロジェクト事業部



鈴木 笙真 : 電力事業部



松原 貴幸 : 電力事業部



*主執筆者