

# 環境に配慮した直流用非架橋材料の研究

Research on Environmentally Friendly Non-Crosslinked Materials for Direct Current Applications

泉 直毅\*

Naoki Izumi

山崎 智

Satoshi Yamasaki

坂口 恭生

Yasuo Sakaguchi

松原 貴幸

Takayuki Matsubara

秋田 浩二

Koji Akita

田中 祥博

Yoshihiro Tanaka

近年の環境志向の高まりを受け、欧州を中心に再生エネルギー導入が進み、直流ケーブルの需要が増加している。当社では、架橋工程を省略することで製造時の省エネ化を達成でき、乾燥工程も不要となりリードタイムを短縮できることから、従来DC-XLPEより環境に優しい直流用非架橋材料の開発に取り組んだ。これまでの研究により、各種機械特性、および電気特性は従来DC-XLPEと同等の性能を有し、直流寿命も十分な直流用非架橋材料の開発に成功した。モデルケーブルを作製し、ケーブルにおける基礎特性も問題無いことが確認できた。更に、架橋剤分解残渣が存在しないため、ケーブル作製直後から厚み方向で体積抵抗率が安定しており、架橋剤分解残渣量によって体積抵抗率が変動し得る従来DC-XLPEよりも品質が安定するメリットがある。今後、更なるケーブル試作、評価を進め、従来DC-XLPEと同様の高信頼性のケーブルを開発する。

In response to the increasing trend of environmental sustainability, the demand for DC cables has been increasing, particularly in Europe, where the implementation of renewable energy sources has advanced. Our company has achieved energy efficiency during production by eliminating both the crosslinking and drying processes while developing environmentally friendly non-crosslinked materials for DC applications. Our research confirms the successful development of the non-crosslinked material for DC applications. The mechanical and electrical properties are on par with those of conventional DC-XLPE, and the material has a satisfactory DC lifespan. We produced model cables and confirmed that their fundamental characteristics are satisfactory. The absence of residues from the crosslinking agent leads to stability in volume resistivity in the thickness direction soon after production. This consistency in quality contrasts with conventional DC-XLPE, which may experience variations due to crosslinking byproducts. In the future, we aim to advance the prototyping and evaluation of high-reliability cables comparable to conventional DC-XLPE.

キーワード：直流ケーブル、非架橋材料、体積抵抗率、空間電荷

## 1. 緒言

世界的な温室効果ガスの削減に関する取り組みが活発化しており、例えば、欧州委員会では2030年までに温室効果ガスを1990年比で55%削減を目標としている。また、日本でも2050年までに温室効果ガス排出をゼロにする「2050年カーボンニュートラル」が宣言されている<sup>(1)</sup>。このような背景から、洋上風力発電や太陽光発電を始めとする再生可能エネルギーの普及に伴い、発電された電力を送る送電網の整備が進められている。特に、長距離かつ高電圧の送電では、交流よりも直流に優位性があるため、直流ケーブルの需要が増加している。

その中で、現在電力ケーブルの絶縁体には架橋ポリエチレン<sup>\*1</sup> (XLPE) が主流となっている。XLPEは絶縁性、耐熱性に優れているが、架橋されているためマテリアルリサイクルができない。また、製造時に架橋・乾燥工程<sup>\*2</sup>が必須となるため、製造時の消費電力が増え、リードタイムも伸びる課題がある。一方、非架橋材料は架橋が不要なため、これらの課題を解決でき、より環境に優しいケーブルを製造できる<sup>(2)</sup>。

以上の背景から、当社では直流特性に優れ、環境に優しい直流用非架橋材料の開発を進めてきたので、報告する。

## 2. 直流用非架橋材料の基礎特性

超高圧の直流送電では電力ロスを抑えるためにケーブル絶縁体の体積抵抗率が非常に重要となる。例えば、3条平積気中暗渠布設DC500kV2500mm<sup>2</sup>を双極導体帰路方式、導体温度90℃での送電電流2000A（送電電力約2000MW）の場合、体積抵抗率（ $\rho$ ）による送電電力変化を図1に示す。

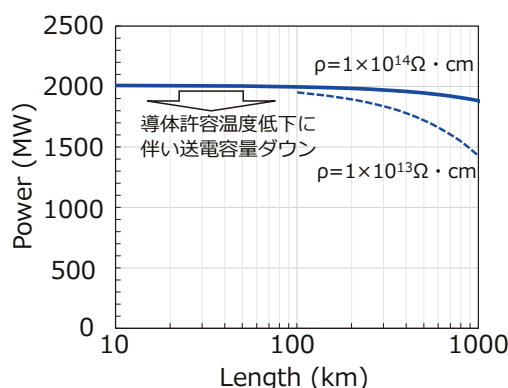


図1 直流ケーブルの送電距離と送電電力の関係

絶縁体の体積抵抗率が $1 \times 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$ の場合、1000kmでも大きなロスなく送電が可能となる。直流ケーブルでは体積抵抗率が高いほど有利となるため、当社の従来の直流用XLPE (DC-XLPE)<sup>(3)</sup>は90℃でも高い体積抵抗率を有し、超高压直流ケーブルの高信頼性を実現してきた。このため、直流用非架橋材料においても、従来DC-XLPEと同等の体積抵抗率を開発目標とした。

体積抵抗率以外にも直流ケーブルに求められる特性は複数存在し、例えば機械特性が挙げられる。非架橋材料に関する特性評価の推奨案として、CIGRE TB852に規定されている引張破断強度、伸び、熱老化特性、加熱変形などの項目が存在する。これらの項目を全て満たした直流用非架橋材料を評価した。また、直流ケーブルでは空間電荷<sup>(\*)3</sup>の蓄積も避けられないため、蓄積挙動についても評価することとした。本項では、直流に関する電気的基礎特性に関して、筆者らが開発した直流用非架橋材料を報告する。

## 2-1 体積抵抗率

前項で設定した体積抵抗率の目標を達成するため、改良を重ね、従来DC-XLPEと同等の体積抵抗率を有する直流用非架橋材料を開発した。90℃における従来の交流用XLPE (AC-XLPE) およびDC-XLPEと体積抵抗率を比較した結果を図2に示す。

図2の従来の各種XLPE材料と比較すると、従来AC-XLPEより明らかに高く、従来DC-XLPEと同等の性能を有し、設定した体積抵抗率の目標を達成した。

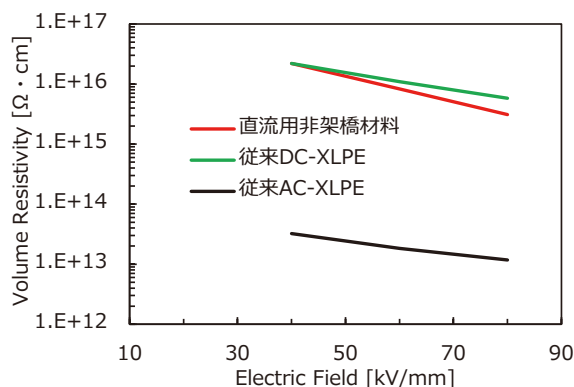


図2 直流用非架橋材料と従来XLPEの体積抵抗率(90℃)

## 2-2 空間電荷特性

空間電荷の蓄積傾向を調べるため、パルス静電応力(PEA)法<sup>(\*)4</sup>を用い、本材料のプレスシートを評価した結果を図3に示す。時間経過に伴う空間電荷の蓄積は見られなかった。空間電荷が蓄積しやすい材料では、60minまでに空間電荷の蓄積が始まるため、本材料では空間電荷が蓄積しにくい材料と言える。

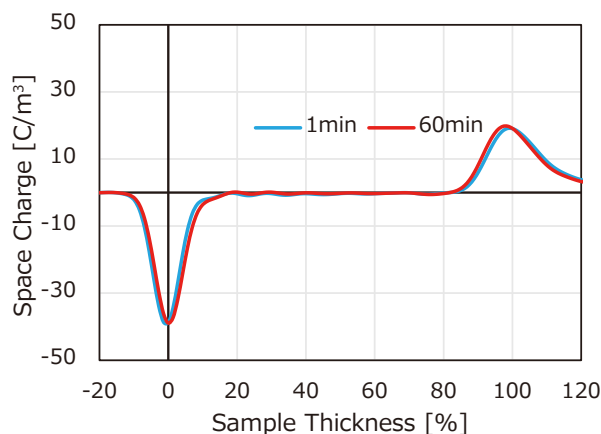


図3 直流用非架橋材料のPEA測定結果(30℃)

## 2-3 直流V-t特性

本材料のシートサンプルを作製し、直流V-t特性を評価した。図4に直流V-t特性を示す。縦軸にサンプルに印加した平均電界を、横軸に絶縁破壊が生じるまでの時間を示している。本材料の直流に対する寿命を評価するため、電界Eと絶縁破壊に至るまでの時間tの間に式(1)の関係が成立すると仮定し、寿命指数nを算出することとした。

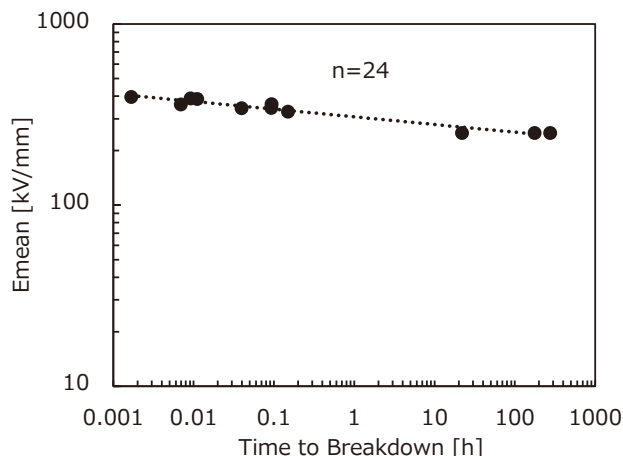


図4 直流用非架橋材料の直流V-t特性(90℃)

$$E^n \times t = \text{const.} \quad \dots\dots\dots (1)$$

その結果、本材料では $n=24$ が得られた。寿命指数nは従来DC-XLPEと同等の値であり、直流に対する寿命は十分なものと考えられる。また、初期の絶縁破壊電界の絶対値が約300kV/mmと高い点が特徴的である。

### 3. モデルケーブル評価

#### 3-1 成形性

本材料のシートサンプルを用いた評価では、直流ケーブルとして従来DC-XLPEと同等の性能を示すことを確認できた。次に、本材料を絶縁体に適用した絶縁厚9mmのモデルケーブルを試作し、評価した。

試作したモデルケーブルの成形性に関しては、非架橋でも問題なく成形できた。ケーブルの取り回しも問題なく、従来DC-XLPEと同様の扱いが可能であった。表1に示す電気試験を実施したが、いずれも良好であった。

表1 モデルケーブルの電気試験結果

試験項目	試験条件	結果
DC耐圧	±400kV×1時間(90℃)	良好
Imp耐圧	+900kV×3回(90℃)	良好
DC重畳Imp耐圧	-200kV×10時間電圧印加 ⇒Imp+800kV×3回(90℃)	良好

#### 3-2 体積抵抗率（厚み方向の分布）

押出直後のモデルケーブルを用いて絶縁体をシート化し、厚み方向の体積抵抗率を評価した。その結果を図5に示す。

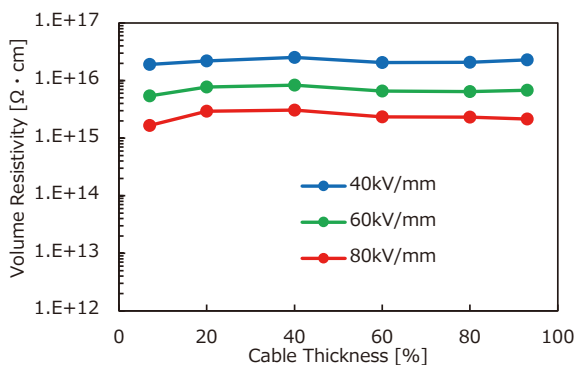


図5 モデルケーブルの厚み方向の体積抵抗率（90℃）

モデルケーブルの絶縁体の内導側から外導側までを比較したところ、体積抵抗率に差は見られなかった。従来DC-XLPEでは、架橋剤分解残渣を除去するため乾燥工程が必須であるが、乾燥時間や温度によりケーブルの内導側と外導側では架橋剤分解残渣量に差が見られ、体積抵抗率に差が見られることがあった。しかし、本材料では架橋剤を使用しておらず、押出直後から厚み方向で体積抵抗率が安定しており、また、高電圧でケーブルの絶縁層が厚くなる程、この点は更に有利に働くと考えられる。

#### 3-3 空間電荷（モデルケーブル30℃、90℃）

次に空間電荷の蓄積を調査した。モデルケーブルのPEA測定結果を図6および図7に示す。なお、試料厚（Sample Thickness）はモデルケーブル絶縁体の外側を0%としている。

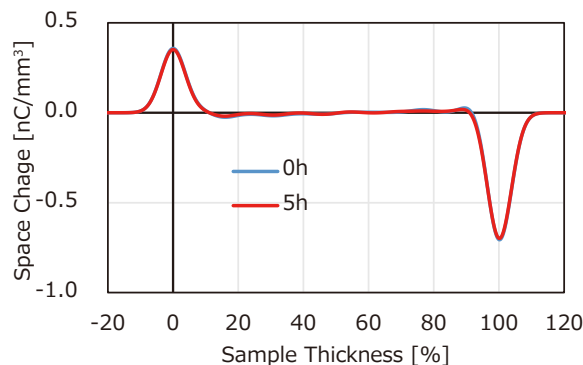


図6 モデルケーブルのPEA測定結果（30℃）

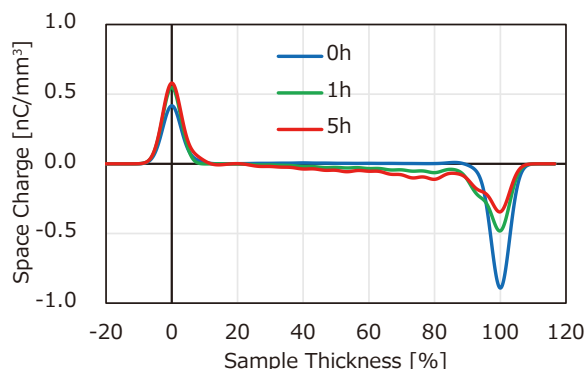


図7 モデルケーブルのPEA測定結果（90℃）

30℃、-180kVで直流電圧印加した図6については、5hの時間経過でも電荷蓄積状態に変化は見られず、電荷はほぼ蓄積していないと判断できる。一方、90℃、-180kVで直流電圧印加した図7については、電圧印加初期と5h電圧印加後で変化が見られている。この変化は1h電圧印加後で既にみられており、比較的早くから電荷蓄積が進んでいると考えられる。また、蓄積している電荷は負電荷であり、導体印加電圧と同極性のため、課電により注入された電荷が近傍に蓄積したと推測される。90℃課電時の電界を図8に示す。

空間電荷が蓄積するにつれ、電圧印加初期から電界が変化する様子が見られる。5h課電後では、内導側に導体印加電圧と同極性の電荷が蓄積しているため、電界緩和が起きている。電圧印加初期と比べて極端な電界強調は見られないため、ケーブルの直流特性には問題ないと考えられる。

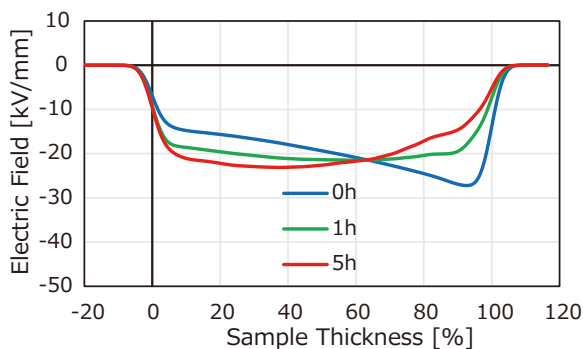


図8 モデルケーブルのPEA測定時の電界分布 (90℃)

## 4. 結 言

当社は体積抵抗率が高い従来DC-XLPEにより、電力ロスを抑えられる高信頼性の直流ケーブルを提供してきた。その中で、近年の環境志向の高まりに対応した、製造時の温室効果ガス排出量を減らし、マテリアルリサイクルが可能となる直流用非架橋材料を新たに開発した。体積抵抗率は従来DC-XLPEと同等で、引き続き高信頼性の直流ケーブルを提供可能であり、ますます需要を増す直流ケーブルの市場ニーズに対応できるものと考えている。今後は速やかな上市に向け、さらなるケーブルの試作、評価を進めていき、並行してマテリアルリサイクル性の検証も進めていく。

## 用語集

### ※1 架橋ポリエチレン

Cross-Linked Polyethylene：架橋反応によりポリエチレンの分子鎖同士を化学結合させ、耐熱性を向上させた絶縁材料。

### ※2 架橋・乾燥工程

架橋反応を起こすには、有機過酸化物が分解する温度まで加熱する必要がある。その加熱する工程が架橋工程。また、架橋反応後は有機過酸化物の分解残渣が残り、これが絶縁材料の特性を悪化させるため、架橋剤分解残渣を取り除く工程が乾燥工程。

### ※3 空間電荷

固体絶縁体中に蓄積される電荷。直流電圧が印加された場合、電界の変歪を引き起こす。

### ※4 パルス静電応力 (PEA) 法

絶縁体中に蓄積された電荷の分布を測定する方法。試料にパルスを加え、それによる空間電荷の振動を使って分布情報を得られる。

## 参 考 文 献

- (1) 内閣官房、「成長戦略会議 (第6回) 配布資料1: 2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」、pp.1-19  
<https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/seicho/seichosenryakukaigi/dai6/index.html>
- (2) 「環境にやさしい非架橋絶縁電力ケーブル」、住友電工テクニカルレビュー 第201号 (2022)
- (3) 西川哲、佐々木健一、秋田浩二、坂巻正敏、風間達也、鈴木公三、「直流連系線用XLPEケーブル」、SEIテクニカルレビュー第190号 (2017)

## 執 筆 者

泉 直毅\*：エネルギー・電子材料研究所



山崎 智：エネルギー・電子材料研究所  
グループ長



坂口 恭生：エネルギー・電子材料研究所  
部長



松原 貴幸：電力事業部



秋田 浩二：電力事業部 部長



田中 祥博：電力プロジェクト事業部 次長



\*主執筆者