



# 直流ケーブル用架橋ポリエチレン絶縁材料の開発

## Development of Cross-Linked Polyethylene Insulation Material for DC Cables

金谷 考洋\*<sup>1</sup>  
Takahiro Kanaya

富井 櫻子\*<sup>2</sup>  
Sakurako Tomii

茂森 直登\*<sup>2</sup>  
Naoto Shigemori

秋月 一能\*<sup>1</sup>  
Kazuyoshi Akizuki

鈴木 裕\*<sup>1</sup>  
Yutaka Suzuki

### 〈概要〉

当社は超高压直流ケーブルに適用可能な架橋ポリエチレン (= XLPE) を主成分とする絶縁材料を開発した。原材料の安定供給性とハンドリング性を最適化した上で構築したサプライチェーンを活用して、実際の直流電力ケーブルを製造した。そのケーブルについて各種の社内外評価を実施した結果、全ての要求特性を満たすことを確認できた。直流 525 kV 級ケーブルシステムの長期課通電試験も既に完了し、今後の再生可能エネルギーの普及などに対し大きく貢献できると考えている。

### 1. はじめに

直流送電技術は交流と比べ、通電路における電力損失が少ないこと、系統安定性が高いことから長距離・大容量送電を行う際に有用である。ただし交流から直流へ、直流から交流への変換機器のコストや用地面積は交流間の変圧機器と比べ大きいため、送電距離と送電容量が十分大きな案件が主な適用対象となる。

今後大いに普及が見込まれている太陽光や風力などの再生可能エネルギーは、大きな設備敷設面積を必要とする場合が多いため、電力の需要地である工業地帯や都市部では普及が見込めず、大規模に発電を行う場合は比較的人口密度の低い地域や海洋沖合での展開が主となっていくと考えられる。したがって、再生可能エネルギーの電源立地と需要地は長距離化が予想される。同時に各電力会社間や地域の送電網間の連系も今後ますます密にする必要があると考えられる。これらを実現するために、大容量の系統連系線の導入について検討が進められているところである。その結果として、長距離送電を得意とする直流送電技術の有用性は今後更に注目されていくと考えられる。

当社では以前より直流用の油浸絶縁 (OF) ケーブルなどを提供してきたが、対環境特性や技術伝承を含む事業継続性の観点から同事業の継続は社会環境的に困難になりつつあるため、新規 OF ケーブルの製造は数年前に撤退している状況である。その一方で、直流ケーブルとしては世界的に XLPE のような固体絶縁材料を使用するタイプが現在の主流となってきている背景

もあり、当社でも直流用 XLPE 絶縁ケーブルの開発を鋭意進めてきた。そしてこの度、直流用途で使用可能な固体絶縁材料について最終組成を決定し、サプライチェーンや製造設備・条件などを最適化し、確定させるに至った。その経緯と完成した直流ケーブルの性能等について以下に報告する。

### 2. XLPE の改良・改質の方針と手法

直流ケーブル向けの絶縁材料の開発に際し、以下の方針を規準とすることとした。

- ・従来の交流ケーブルで数々の実績を有している XLPE をベース材料とする
- ・ケーブル製造設備は従来、交流ケーブルを製造している設備を流用できる材料とする
- ・常時導体許容温度は 90℃ とする
- ・直流化のための改質には、ベース材料中への分散不良などのトラブルを回避するため、フィラーや低分子量成分の配合手法は使用せず、XLPE 自体を改質・変性させる
- ・具体的には、極性基を電荷のトラップサイトとして機能させるべく導入する
- ・サプライチェーンの安定性を意識し、原材料の入手性とハンドリング性を重視する

XLPE を改質・変性させる手法としては、ポリエチレンの極性基変性技術を検討することとした。最新の量子化学計算手法を用いて変性物の電気性能を予測しつつ、数多くの配合実験を行い、3 章以降で述べる直流絶縁材料としての要求特性などの材料評価試験を繰り返した結果、良好な直流ケーブル向け絶縁材料を得ることができた。以下にその評価結果を示す。

\*<sup>1</sup> 情報通信・エネルギー研究所 電力材料開発部

\*<sup>2</sup> 電力事業部門 技術開発部

### 3. 直流用絶縁材料に求められる電気特性とその評価結果

直流ケーブルにて使用される絶縁材料には、交流ケーブルとは異なる要求特性が求められる。特に直流ならではの特徴的な要求特性のひとつとしては空間電荷特性が挙げられる。本報ではこの空間電荷特性に特に着目し、2つの評価方法を紹介し、それぞれにおける開発品の性能について報告する。

#### 3.1 電流積分電荷 (= Q(t)) 法

絶縁体が電極間に挟まれて直流電界中に保持される場合、電極から電荷(電子, 正孔)が3次的に絶縁体内部へ注入される。この注入された電荷を空間電荷と呼ぶ。この空間電荷が課電時間とともに絶縁体内を動いたり蓄積が進行したりして、その分布や密度が変化すると、絶縁体内部の電界強度に局所的な変化が生じ、最悪の場合は異常に増幅された電界により絶縁破壊へと至る場合がある。よって、直流用絶縁材料にとっては、空間電荷を蓄積させないこと、時間とともに変化させないことが重要となってくる。

この空間電荷特性を測定する方法として本報では2つを紹介する。第一の方法がQ(t)法である。

図1はQ(t)測定の方法の概念図である。試料を挟んだ電極間に、図2に示すステップ状の直流電圧を印加し、時間とともに試料中へと注入する電荷量を計測するという簡便な測定手法である。

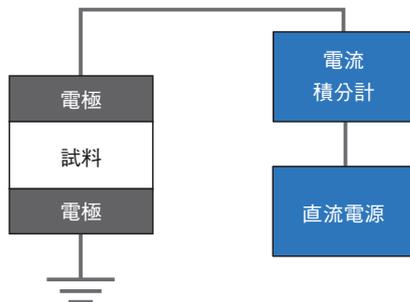


図1 Q(t)測定の方法の概念図  
Conceptual diagram of Q(t) measurement.

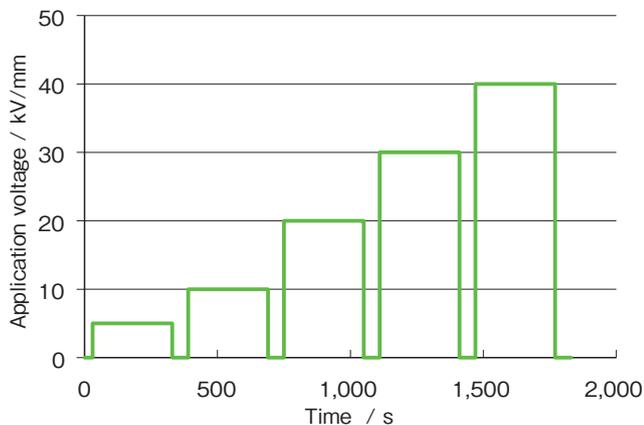


図2 試料への直流電界印加の仕方  
DC electric field applied to sample.

図3, 4に、当社が通常の交流ケーブルに使用しているXLPE (= AC-XLPE) と、開発した直流用XLPE (= DC-XLPE) の、シート状試料におけるケーブル最高使用温度90℃でのQ(t)測定結果を示す。課電時間が長くなるとともに、また課電電界強度が高まるとともに、縦軸の積分電荷 (= Integration charge) が大きくなるのが見て取れる。また、AC-XLPEの場合は電界20 kV/mmあたりから顕著な積分電荷の蓄積が見られている。それに対し、開発したDC-XLPEでは30 kV/mmでも顕著な積分電荷の蓄積は見られず、比較的良好な特性を示している。

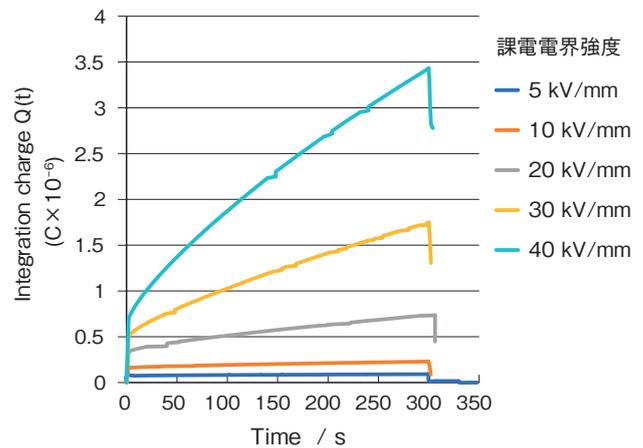


図3 AC-XLPEのQ(t)測定結果(90℃)  
Q(t) measurement results for AC-XLPE at 90°C.

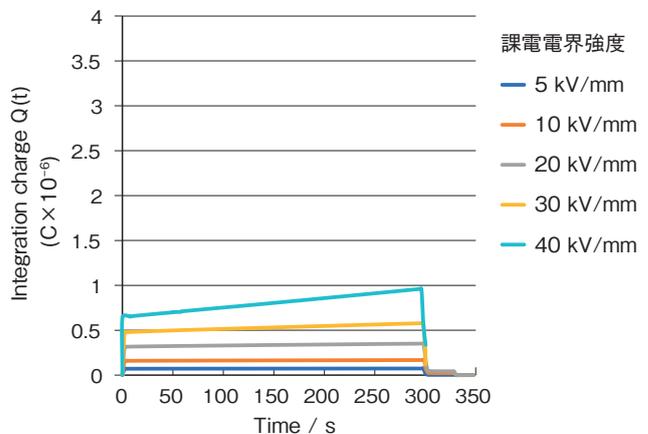


図4 DC-XLPEのQ(t)測定結果(90℃)  
Q(t) measurement results of DC-XLPE at 90°C.

この電荷蓄積のしやすさを表すために、課電直後と300秒の課電後の比を取り電荷量比 (= Electric Charge Ratio) とする。この電荷量比は小さいほど直流性能に優れると言える。

電荷量比と直流電界の関係をプロットしたのが図5である。開発したDC-XLPEは、AC-XLPEよりも全電界域において空間電荷が蓄積されにくい、すなわち開発品は直流特性が良い方向へと改良されているのが分かる。

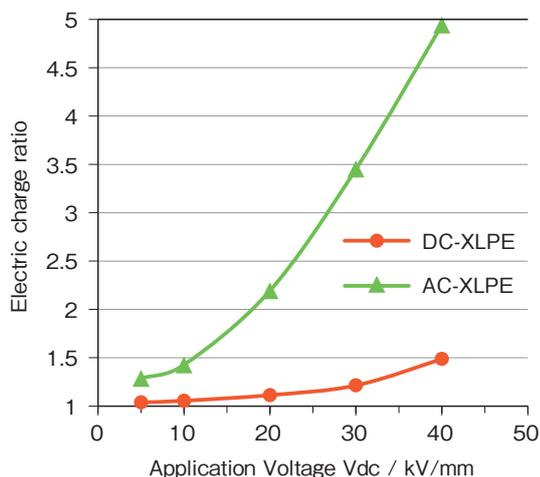


図5 直流電界と Electric Charge Ratio の関係 (90°C)  
Relationship between DC electric field and Electric Charge Ratio at 90°C.

### 3.2 パルス静電応力 (= Pulsed Electro-Acoustic = PEA) 法

#### 3.2.1 シート試料における測定結果

第2の空間電荷特性の評価法がPEA法である。こちらも電極間に挟んだ試料に直流電界を印加する点はQ(t)法と共通だが、更に電極間にパルス電圧を印加し、そのときに試料内部から発生する圧力波を検知する点が異なっている。試料中に空間電荷が蓄積すると、その箇所がパルス電界によって力を受け振動し圧力波が発生する。この圧力波を測定し、その遅延と大きさから、空間電荷の厚さ方向位置と蓄積量を把握することができる。Q(t)法と比較すると、試料厚さ方向の空間電荷の位置・量と試料中の電界分布について情報を得られる点が優れている手法である。

図6にPEA測定概念図を示す。

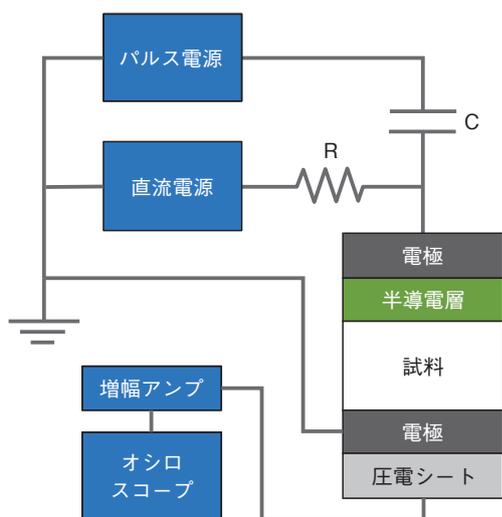


図6 PEA測定概念図  
Conceptual diagram of PEA measurement.

シート状の試料を用いて、下記の条件にてPEA測定を行った。

- ・試料: 0.1 ~ 0.5 mm厚に成形・架橋処理したシート
- ・温度: ヒーターにて加温 (90°C)
- ・課電電界: -30 kV/mm

その結果の一部として、開発品の使用最高温度である90°Cでの測定結果をここでは紹介する。なお、試料厚 (= Sample thickness) が0 mm%の位置に接地電極が、100 mm%の位置に高圧電極が存在する。

図7, 8にAC-XLPEシートのPEA測定結果を示す。図7からは、わずか7時間という短時間にもかかわらず、時間とともに電極付近にて正電荷の蓄積が徐々に進む様子が観測できる。この注入された正電荷が空間電荷であり、更に長時間の測定を継続すれば蓄積が進み、局所的な電界分布の乱れへと発展していくものと予想される (図8では測定時間が短すぎて、まだ電界分布はそれほど影響を受けていない)。

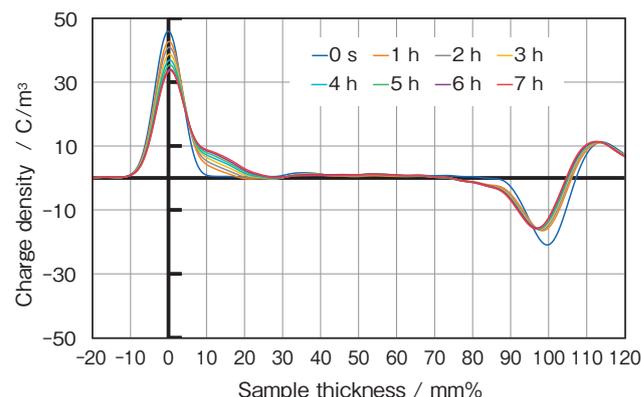


図7 AC-XLPEシートのPEA測定結果: 電荷密度の厚さ方向分布 (90°C)  
PEA measurement results of AC-XLPE sheets: Distribution of charge density along the thickness direction at 90°C.

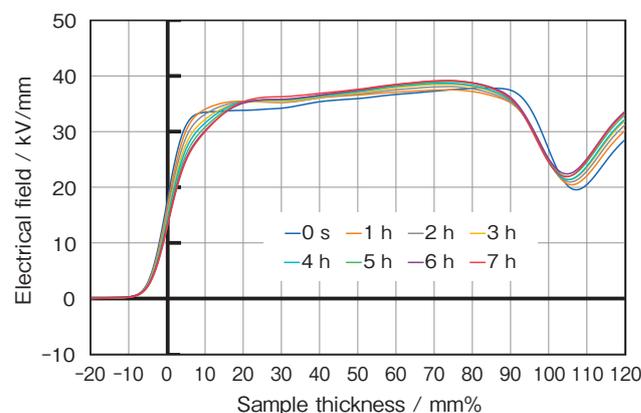


図8 AC-XLPEシートのPEA測定結果: 電界の厚さ方向分布 (90°C)  
PEA measurement results for AC-XLPE sheets: Distribution of electric field along the thickness direction at 90°C.

一方、図9のDC-XLPEシートの場合は、1時間から5時間までの間で変化はないようにみえる。

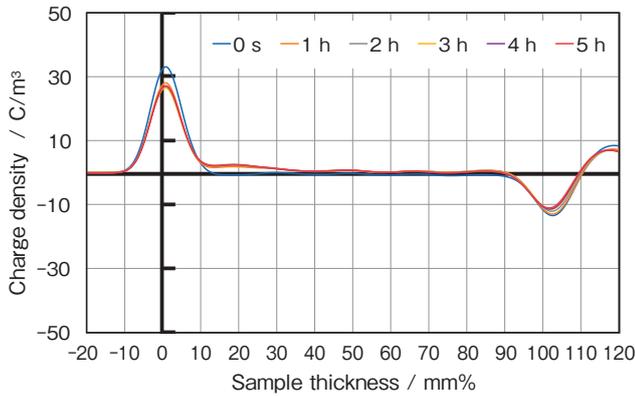


図9 DC-XLPEシートのPEA測定結果：電荷密度の厚さ方向分布(90℃, 短時間)  
PEA measurement results of DC-XLPE sheets:  
Distribution of charge density along the thickness direction at 90°C (short time).

そこで更に測定時間を更に延ばし、DC-XLPEシートへの空間電荷の蓄積量を長時間にわたり観察することにした。

図10, 11がその結果である。開発品は7日間にわたり直流課電を継続しても電荷密度分布には特筆すべき変化はなく、優れたDC特性について確認できたと考えている。

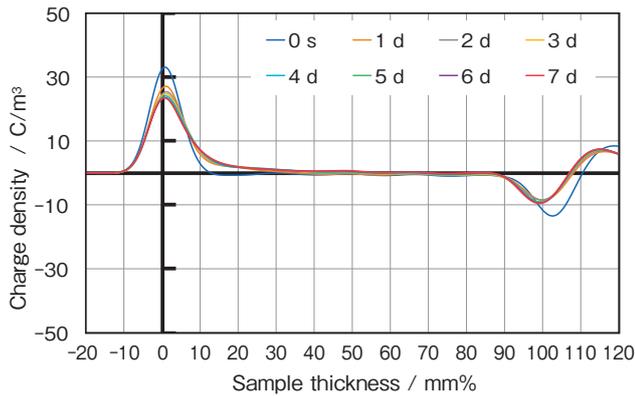


図10 DC-XLPEシートのPEA測定結果：電荷密度の厚さ方向分布(90℃, 長時間)  
PEA measurement results of DC-XLPE sheets:  
Distribution of charge density along the thickness direction at 90°C (long time).

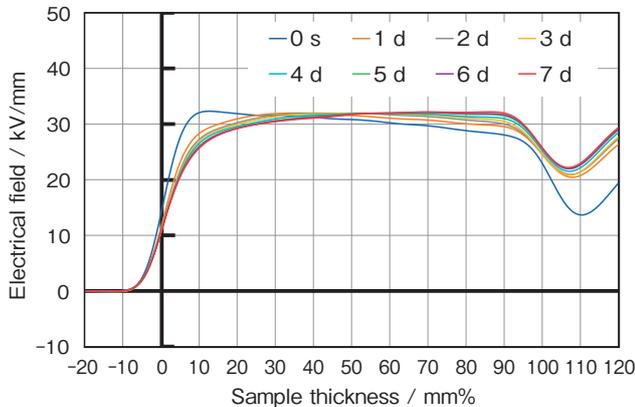


図11 DC-XLPEシートのPEA測定結果：電界の厚さ方向分布(90℃, 長時間)  
PEA measurement results for DC-XLPE sheets:  
Distribution of electric field along the thickness direction at 90°C (long time).

### 3.2.2 開発したDC-XLPEで製造したミニチュアケーブルにおける測定結果

次のステップとして、開発したDC-XLPEを絶縁層としてミニチュアケーブル(小型の試作ケーブル)を製造し、PEA測定を行うこととした(図12)。



図12 ミニチュアケーブルの断面(中心の撚り銅線は抜け落ちている)  
Cross section of miniature cable (center copper wire is missing).

試験条件：

- ・ケーブル外径：5～10 mm
- ・構造：撚り銅線/内部半導電層/絶縁層/外部半導電層
- ・絶縁層厚さ：約1 mm
- ・温度：導体通電とヒーター加温を併用(90℃)
- ・課電電圧：-27 kV(高圧側：内部半導電層, 接地側：外部半導電層)

図13, 14から、初期には接地電極付近に小さな負極性の電荷が蓄積するのが観察されたものの、時間とともに解消し、730時間(約1ヶ月)後には非常に整ったカーブへと落ち着いていくことが確認できた。

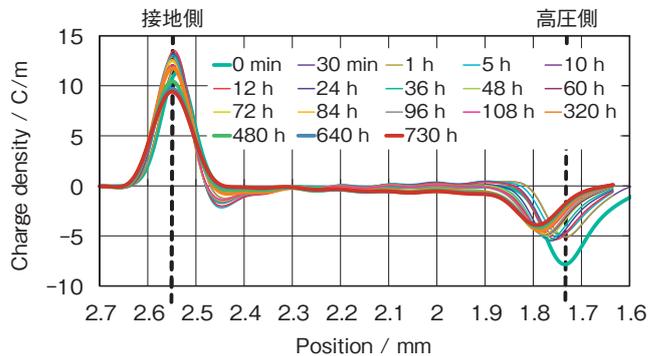


図13 DC-XLPE使用ミニチュアケーブルのPEA測定結果：電荷密度の厚さ方向分布(90℃)  
PEA measurement results of miniature cable using DC-XLPE:  
Distribution of charge density along the thickness direction at 90°C.

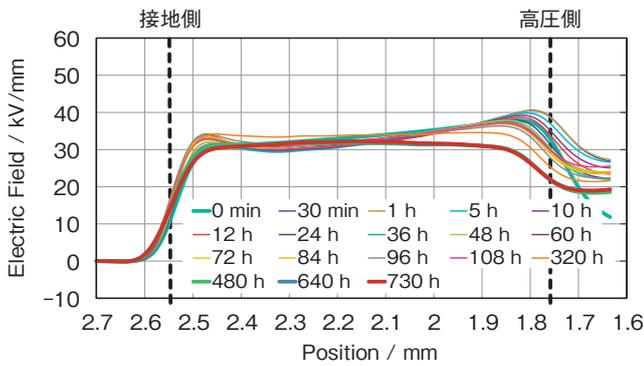


図14 DC-XLPE使用ミニチュアケーブルのPEA測定結果：電界の厚さ方向分布(90℃)  
PEA measurement results of miniature cable using DC-XLPE: Distribution of electric field along the thickness direction at 90℃.

下記の図15は、測定時間ごとに全厚さの中で最大となる局所的な電界を求め、初期の電界最大値で除した数値をプロットしたもので、この値は電界増倍率と呼ばれている。もし電界増倍率が1を超え、徐々に大きくなっていく場合は、使用とともにケーブル内部に初期よりも大きな電界ストレスのかかる位置が形成されることを意味するため、施工後の初期試験に耐久しても安心はできないケーブルであると言える。

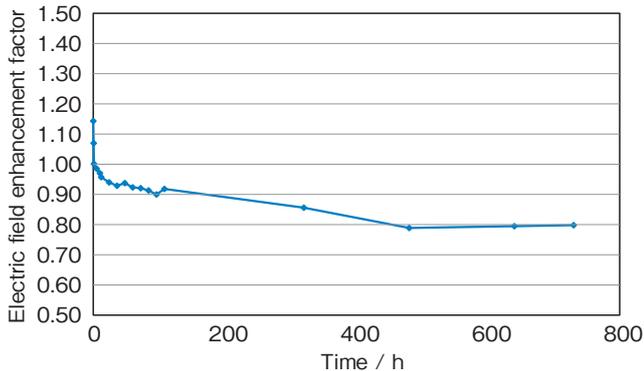


図15 DC-XLPE使用ミニチュアケーブルの電界増倍率の時間変化(90℃)  
Time variation of electric field enhancement factor of miniature cables using DC-XLPE at 90℃.

この図15を見ると、開発したDC-XLPEを使用したケーブルの電界増倍率は短時間で落ち着き、500時間以降ではほぼフラットに推移する様子がうかがえる。この結果から、今回開発したDC-XLPEは長期的に非常に優れた直流特性を有していることが確認できたと考えている。

#### 4. その他の重要な電気特性評価結果

この他にも、直流ケーブル向けとして特筆すべき材料単体での評価試験結果について、いくつか紹介しておく。

##### 4.1 体積抵抗率

高温における体積抵抗率の測定結果について以下に示す。測定条件は以下のとおりである。

- ・試料形態：絶縁厚約1 mmのミニチュアケーブル
- ・測定電界：-10 ~ -40 kV/mm
- ・測定温度：90℃(ヒーターで加温)

なおDC-XLPEとしては、電力ケーブル向け絶縁&半導電材料メーカーから市販されている既存品がいくつか存在する。比較検討のために、その中の3品種を入手し比較を行った(市販品1, 2, 3)。

その結果、当社のDC-XLPEは、当社AC-XLPEや市販DC-XLPEよりも全測定電界域で優れており、電力ケーブルとして実用的な電界設計範囲内で優れた体積抵抗率を有していることが確認できた(図16)。

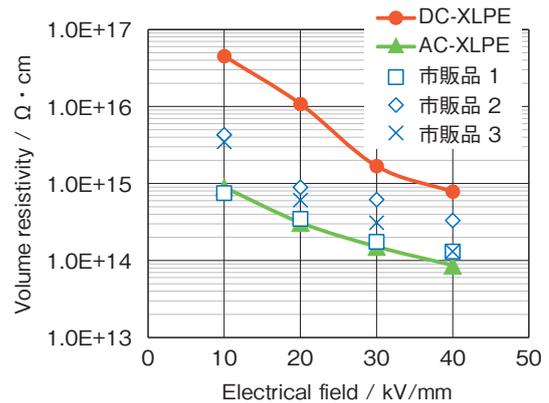


図16 開発したDC-XLPEと市販品の体積抵抗率比較  
Comparison of volume resistivity between developed DC-XLPE and commercial products.

##### 4.2 絶縁破壊特性

絶縁破壊特性についてはDCとインパルスの2条件で、開発品と他社製市販DC-XLPEとの性能比較を行った。その試験条件は以下のとおりである。

###### DC破壊試験：

- ・試料形態：絶縁厚約1 mmのミニチュアケーブル
- ・昇圧方法：-70 kV/分 → -5 kV/分ステップ昇圧
- ・測定温度：90℃

###### インパルス (Imp.) 破壊試験：

- ・試料形態：絶縁厚約1 mmのミニチュアケーブル
- ・昇圧方法：-100 kV × 3回 → -5 kV × 3回ずつステップ昇圧
- ・測定温度：90℃

測定値にはばらつきがあるため、優劣付けがたい結果ではあるが、当社の開発品は市販品と同等以上と考えられる。したがって当社開発品の十分な性能が確認できたと考えている(図17)。

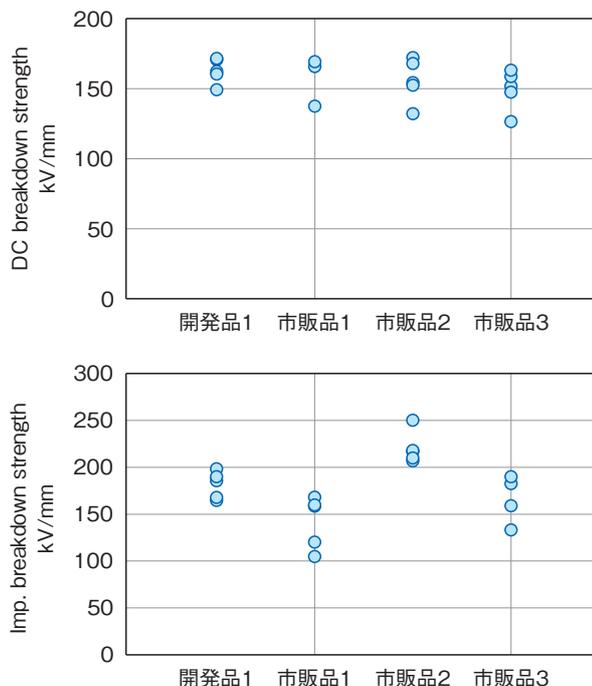


図17 上: DC破壊試験と, 下: インパルス破壊試験の結果まとめ  
Summary of results from the top: DC breakdown test and the bottom: impulse breakdown test.

### 4.3 機械強度～引張試験

ケーブルが硬すぎたりすると敷設性や接続作業性などに悪影響が出る。そこで機械特性の代表として、絶縁材料の引張試験結果についても開発したDC-XLPEと従来のAC-XLPEを比較しておく。試験条件は以下のとおりである。

- ・試料形態: 1 mm厚シートを成形しJIS3号ダンベル形状に打ち抜き処理
- ・引張速度: 200 mm/min.

以下のとおり、従来のAC-XLPEと開発したDC-XLPEの機械物性はほぼ同等であり、従来のACケーブルと同様なハンドリング性を得ることが可能である(図18)。

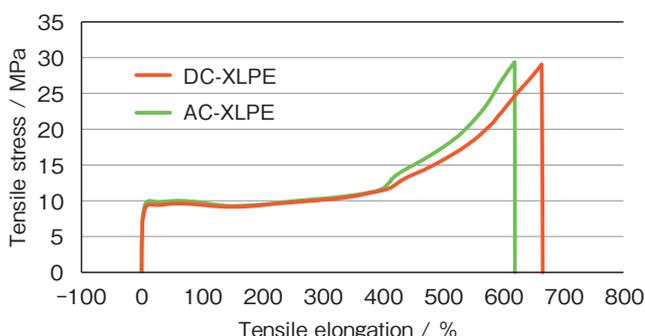


図18 SSカーブの比較(常温)  
Comparison of Stress-Strain curves at room temperature.

このほかにも様々な客先要求試験や社内試験、参考試験を経た上で、いずれの要求事項も満たす高性能な直流絶縁材料を仕上げる事ができた。

## 5. 直流525 kV級ケーブルシステムの長期課通電試験

2021年4月30日の当社からのニュースリリースと重複する内容となるが、あらためてこの場でも紹介しておく。

本報で紹介した直流絶縁材料開発品を用いて実際の電力ケーブルを製造し、接続部などの各種基本構成要素からなるケーブルシステムを含む試験線路を構築して以下の課通電試験に供試した。

超高压直流海底ケーブルとしては2015年度から2019年度にかけて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「次世代洋上直流送電システム開発事業」にて、陸上ケーブルについては第三者試験機関にて、CIGRE Technical Brochure No.496に基づく試験推奨法に則った直流525 kVケーブルシステムのPre-Qualification Testを実施し、いずれも問題なく完了させることができた。これらの成果により、当社の直流ケーブルシステムの高い信頼性が実証できたものと考えている(図19)<sup>2)</sup>。

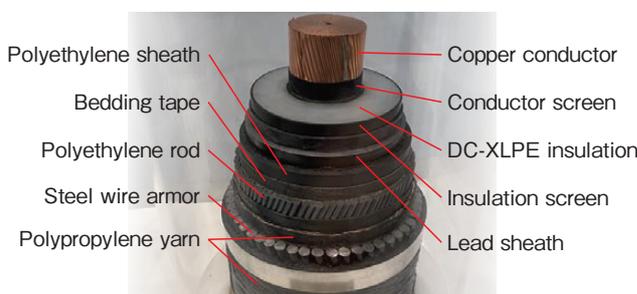


図19 長期課通電に供試したDC525kV 1800 mm<sup>2</sup>海底ケーブル  
525 kV DC 1800 mm<sup>2</sup> submarine cable tested for long term energization.

## 6. おわりに

以下のような、超高压直流ケーブルに適用可能な絶縁材料を開発した。

- ・直流特性に優れることを、二つの評価方法(Q(t)法, PEA法)にて確認できた
- ・開発品は市販されているDC-XLPEと比較すると、いずれの特性も同等以上で、特に体積抵抗率は優位であった
- ・原材料の入手性にも配慮が出来ており、安定的なサプライチェーンも確立済みである
- ・開発した絶縁材料を用いて電力ケーブルを製造し、直流525 kV級ケーブルシステムに対する長期課通電試験を実施したところ、無事試験を完了することが出来た。

### 参考文献

- 1) 丸山悟, 石井登, 島田道宏, 小島新治, 田中秀郎, 浅野光正, 山中鉄也, 川上真一: 500 kV級直流架橋ポリエチレンケーブルシステムの開発, 古河電工時報, 113 (2004), 43.
- 2) 桑原諒介, 丸山悟, 茂森直登, 大竹陽介, 松浦正樹, 越後雅邦, 末海竜: 海底電力ケーブルシステムの技術動向と開発課題および取り組み, 古河電工時報, 141 (2022), 38.