直流 CV ケーブルの開発に関する研究

正員 前川 雄一 (電源開発)

正員 山口 昭生 (電源開発)

正員 原 信 (日立電線)

正員 関井 康雄 (日立電線)

Research and Development of XLPE Insulated DC Cable

Yuichi Maekawa, Member, Akio Yamaguchi, Member (Electric Power Development), Makoto Hara, Member, Yasuo Sekii, Member (Hitachi Cable)

This paper describes the developmental research of DC XLPE cable. Through a series of material investigations, XLPE compound containing highly purified special filler was developed.

To check the DC insulation performance of the cable insulated with this new material, a prototype cable with 9 mm insulation thickness was manufactured. It was confirmed that the performance of the prototype cable was excellent. Based on the study of the prototype cable, a 250 kV DC cable with 20 mm insulation thickness was designed and manufactured. Through a series of voltage tests, excellent DC insulation performance of the developed cable was verified.

キーワード：直流ケーブル、架橋ポリエチレン、充填剤、空間電荷、熱刺激電流、絶縁抵抗、破壊

1. ま え が き

直流ケーブルは世界各国で海底ケーブルや陸上の長距離送電線路の担い手として重要な役割を果たしている⁽¹⁾。今日、実線路で使用されている直流ケーブルはいずれも油浸紙絶縁ケーブルで、架橋ポリエチレン(XLPE)を絶縁体とした CV ケーブルはまだ実用化されるに至っていない。これは過去の直流 CV ケーブルの開発研究において、信頼できる設計諸元や十分な長期信頼性が得られなかったことによる⁽²⁾。

しかし、CV ケーブルは軽量で優れた誘電特性を有し、給油が不要なため防災性、布設、保守管理の容易性といった多くの利点を有することから、交流用電力ケーブルとして広く使用され、今や 500 kV 級ケーブルとしても実用化されるに至っている⁽³⁾。特に、乾式絶縁ケーブルであるという利点は絶縁油の流失に伴う環境汚染の懸念を払拭できることと相まって、直流 CV ケーブルは将来の長距離大容量送電海底ケーブルとして大いに期待されている。このような背景の下、著者らは 1984 年から直流 CV ケーブルの開発研究を

進め、充填剤入 XLPE が直流ケーブル用絶縁体として有望であることを見いだすと共に、高純度の精製充填剤を用いた充填剤入 XLPE を開発し、これを適用したケーブルを開発した。本論文では、この直流 CV ケーブル用絶縁材料の研究とこれを用いたケーブルの開発研究の概要について述べる。

2. 直流 CV ケーブル用絶縁材料の検討

〈2・1〉 各種絶縁材料の絶縁特性 直流 CV ケーブルの最適な絶縁材料を模索するため、まず最初に 3 種の XLPE 絶縁体を用いたミニチュアケーブル(絶縁厚 3.5 mm、導体サイズ 60 mm²)の直流絶縁特性を調査した。取上げた絶縁体は次のとおりである。

- (i) XLPE(XP)
- (ii) 無機充填剤入 XLPE(XQ)
- (iii) 有極性ポリマブレンド XLPE(XR)

ここで XP は今日、超高压交流ケーブルに適用されている XLPE であり、XQ、XR は直流ケーブルで問題とされる空間電荷の影響を抑制する効果が期待される XLPE である⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

図 1 ミニチュアケーブルの直流破壊特性
Fig. 1. DC breakdown strength of miniature cables.

図 2 ミニチュアケーブルの直流・逆極性インパルス重畳破壊特性
Fig. 2. Impulse breakdown strength with and without superposing DC voltage.

図 1 は上記 3 種の絶縁材料を用いたミニチュアケーブルの直流破壊強度の温度特性である。XP, XR が高温になるにつれ破壊強度が大きく低下しているのに対し、XQ は 3 者の中で最も高い破壊強度を示し、温度による低下も小さい。図 2 は同じケーブルによる雷インパルスの破壊強度と逆極性の直流電圧を重畳した際の雷インパルス破壊強度を比較したものである。重畳した直流電圧の印加電界は 28.6 kV/mm である。インパルス単独の破壊強度は XP が最も高いが、逆極性の直流重畳時のインパルス破壊強度は、XQ が最も高くなっている。逆極性の直流課電によるインパルス破壊強度の低下は、空間電荷の影響によるものと解釈されており、低下度合の小さい XQ では空間電荷の影響が抑制されていることを示唆している。

〈2・2〉 直流絶縁に及ぼす無機充填剤の効果

前述したミニチュアケーブルの試験結果は、XLPE 絶縁体における空間電荷の影響をはじめとする直流絶

図 3 TSC 測定回路と測定方法
Fig. 3. Measurement method of TSC.

図 4 XLPE と充填剤入 XLPE の TSC
Fig. 4. TSC data of XLPE and XLPE containing mineral fillers.

縁上の問題を無機充填剤(以下、充填剤と略記)が解消していることを示唆している。そこで空間電荷という観点から充填剤の作用を調べるため、通常为非充填 XLPE と充填剤入 XLPE のシートサンプル(絶縁厚 0.1 mm)の熱刺激電流(TSC)を比較した。測定法を図 3 に示す。図中の V_c はコレクティングバイアス電圧であり、ここでは、その極性を変えて測定している。測定結果を図 4 に示す。図で明らかなように、充填剤の有無によって TSC のパターンが大きく異なっている。すなわち、通常の XLPE では TSC が V_c の極性に大きく依存し、 V_c が正の場合には正の TSC が、 V_c が負の場合には負の TSC が現れている。これは TSC の起源が絶縁体に注入、トラップされた蓄積電荷であることを示唆している。これに対して、充填剤入 XLPE の TSC は V_c の極性に全く依存せず、常に放電方向である正の TSC が観測される。これは、TSC の起源が有極性無機物(充填剤)の双極子配向のもどり、すなわち分極電荷であることを示している。充填剤が電荷注入そのものを抑制しているのか、あるいは電荷注入があっても圧倒的な分極電荷にマスクされているのかは定かではないが、充填剤入り

XLPE が示す (b) 図のような TSC の特性は直流ケーブル用絶縁体として適した材料を選択するうえで重要な指標である。

〈2・3〉 最適充填剤の探究 前節で述べた充填剤入 XLPE に用いた充填剤は、現在工業的に広く使用されている天然の無機充填剤である。著者らは、直流 CV ケーブルに使用する充填剤入 XLPE のいっそうの性能向上と高品質化を目指し、最適な充填剤の探索を行った。天然の無機充填剤は種々の酸化物からなる化合物であり、鉱物として産出されるため微量の不純物が含まれている。そこで、XLPE に充填した場合に、優れた空間電荷抑止効果と高い絶縁耐力を発揮しうる単独組成からなる、新たな充填剤を見出すこととした。

図 5 は単独組成からなる充填剤(酸化物) 4 種を添加した 0.1 mm のポリエチレンシートの TSC の測定結果である。バイアス電圧 V_b と同じ極性のコレクティングバイアス V_c を印加したときの TSC であり、TSC がプラス側(上側)に出ていれば、天然の充填剤入 XLPE と類似の特性といえる。図 5 より天然の充填剤入 XLPE の TSC パターンに最も類似している物質 A が空間電荷抑止に寄与しうるものと判断した。

図 5 各物質を添加したりポリエチレンシートの TSC 特性

Fig.5. TSC data of polyethylene plate containing inorganic substances.

図 6 はこの物質 A を対象に充填量の TSC 特性に及ぼす影響を調査したものである。充填量の増大と共に TSC のプラス側ピークが大きくなり、図 4 (b) に示した天然の充填剤入 XLPE の特性に近くなっている。また、充填量が 1 phr 以上で通常の XLPE の特徴である TSC のマイナス側のピークが消失している。図 7 は物質 A, B, C, D の耐電圧特性に及ぼす影響を調べるため、シートサンプルの雷インパルス破壊強度を調査した結果である。雷インパルス破壊強度は添加する物質によって大きく変わっており、物質 A を含む XLPE が最も高い破壊強度を示す。

この図 7 および図 5 の実験結果に基づいて、直流 CV ケーブル用充填剤として物質 A が最適と判断した。

図 6 TSC に及ぼす充填剤添加量の影響
Fig.6. Influence of filler content on TSC.

図 7 各物質を添加したポリエチレンシートの雷インパルス破壊特性

Fig.7. Impulse breakdown strength of polyethylene plate containing inorganic substances.

3. 試作ケーブルの直流絶縁性能

〈2・3〉節で述べた物質 A を充填剤として用いた新しい充填剤入 XLPE (S-XLPE) を絶縁体とする直流 CV ケーブルの絶縁特性を評価するため、導体サイズ 200 mm²、絶縁厚さ 9 mm のケーブルを試作し直流破壊特性をはじめとする電気絶縁特性を調査し、天然の無機充填剤入り XLPE ケーブル (N-XLPE) と比較した。

〈3・1〉 固有絶縁抵抗 図 8 に 2 種のケーブルの固有絶縁抵抗 (ρ) の温度および電界特性を示す。温度特性には通常の XLPE ケーブル (非充填) の特性も示した。S-XLPE は N-XLPE および通常の非充填 XLPE と比較して ρ が 1~2 桁高くなっており、温度上昇に伴う ρ の低下も小さい。特に、90°C の高温状態で 100 kV/mm を超える領域においても、高い ρ を維持していることが注目される。高温、高電界において、このように高い ρ を維持できることは直流ケーブルの熱破壊の恐れを解消するものであり、熱的安定性が求められる直流ケーブルにとって魅力のある特性といえる。

〈3・2〉 絶縁破壊強度 図 9 は 90°C における試作ケーブルの直流、雷インパルス破壊特性である。S-XLPE は従来品 (N-XLPE) に比べて、直流ならびに雷インパルス破壊強度が上昇しており、特に直流破壊特性の顕著な上昇が見られる。この優れた直流絶縁耐力は、前節で述べた ρ 特性と密接な関連があると思われる。

〈3・3〉 直流 $V-t$ 特性 試作ケーブルの直流課電時の長期信頼性を調べるため、高電界下での長時間課電試験を実施した。温度 90°C 一定で初期破壊電界

図 8 充填剤入 XLPE ケーブルの ρ 特性
Fig. 8. Resistivity (ρ) of prototype cable insulated with XLPE containing filler.

の 80, 90% となる電圧を、課電して破壊までの時間を求めた結果を $V-t$ 特性として整理し、図 10 に示す。これより、概略の寿命指数 n を見積もると $n=24$ が得られ、本ケーブルの $V-t$ 特性は比較的平坦であることが確かめられた。

〈3・4〉 繰返し雷インパルス、繰返し極性反転下の破壊特性 実際の直流ケーブル線路では、直流電圧のみならず極性反転や雷撃および系統内異常発生時に異常電圧の侵入が予想される。これらの異常電圧に対する信頼性を調べるため、雷インパルス電圧、直流極性反転電圧の繰返し課電特性を調べた。

結果を表 1 および表 2 に示す。いずれも 90°C の特性である。繰返し雷インパルス試験では初期破壊値の 60, 70, 80% の電圧を最大 2,000 回印加して破壊までの回数を求めたが、初期破壊値の 70% (58 kV/mm) 以下の電界では 2,000 回印加でも破壊しなかった。また繰返し極性反転試験においても印加電界 44 kV/mm で 200 回を課電し異常のないことを確認した。これらの実験に供したケーブルの残存破壊特性はいずれ

図 9 充填剤入 XLPE ケーブルの直流およびインパルス破壊特性
Fig. 9. DC and impulse breakdown strength of prototype cable

図 10 直流 $V-t$ 特性
Fig. 10. $V-t$ characteristics of XLPE cable containing filler under DC voltage.

表 1 繰返し雷インパルス課電特性
Table 1. Insulation performance under repeated impulse shots.

No	印加電界 (kV/mm)	初期値 との値	印加回数 (回)	残存電界 (kV/mm)
1	50.0	60%	2000 (no BD)	Imp. 88.9
2	58.3	70%	2000 (no BD)	Imp. 83.3
3	66.7	80%	281 (BD)	—

注)初期雷インパルス破壊電界: 83.3 kV/mm

表 2 繰返し極性反転課電特性
Table 2. Insulation performance under repeated DC polarity reversals.

No	反転電界 (kV/mm)	反転回数 (回)	残存電界 (kV/mm)
1	27.8	720 (no BD)	DC 127.8
2	44.4	200 (no BD)	Imp. 77.8
3	55.6	21 (BD)	—

も初期破壊レベルと同等であり、少なくとも表 1、表 2 に示した電界以下では繰返し課電による疲労劣化がないことがわかった。

〈3・5〉 長期課通電特性 〈3・1〉～〈3・4〉節で述べた絶縁性能の調査と並行して、試作ケーブルの長期信頼性を検証するため、全長 100 m の試験線路を構築して長期課通電試験を行った。試験は導体最高温度が 85℃となるヒートサイクルを加えながら、初期破壊電圧の約 40%に相当する 450 kV (50 kV/mm) を課電し、6 箇月間 (4,320 時間、ヒートサイクル数 180 回) 実施した。試験終了後の残存破壊電圧を調べた結果、直流 1,150 kV (128 kV/mm)、雷インパルス 750 kV (83 kV/mm) であった。この値は初期破壊電圧とほとんど同じ値であり、性能の低下はなかった。

4. ±250 kV 級 DC ケーブルの製作と電気特性の評価

〈4・1〉 ケーブルの製作と試験項目 絶縁厚 9 mm の試作ケーブルの性能評価に引続き、更に絶縁厚の厚いケーブルを製作し、その特性を評価した。

ここで製作したケーブルは導体サイズ 800 mm²、絶縁厚 20 mm の厚肉絶縁ケーブルである。このケーブルは、250 kV 級直流ケーブルとして設計したものである。ケーブルの製造に当たっては、今日超高圧 CV ケーブルの製造法として用いている 3 層同時押出し法、ガス架橋法を採用した。

直流ケーブルとしての絶縁性能を評価するため行った耐電圧破壊試験項目は次のとおりである。

表 3 ±250 kV ケーブルの絶縁破壊特性
Table 3. test results of ±250 kV DC cable.

試験項目	目標耐電圧値 (kV)	破壊電圧 (kV)
直流耐電圧特性	975/ 3 h	> 1,450
雷インパルス耐電圧特性	845/ 3 回	1,250～1,450
極性反転耐電圧特性	375/ 3 回	> 500
直流・逆極性インパルス 重畳耐電圧特性	580/10 回 (V _{ac} =250 kV)	1,150～1,400

(試験温度 85℃)

- (i) 直流破壊試験
- (ii) 直流極性反転試験
- (iii) 雷インパルス破壊試験
- (iv) 直流・逆極性雷インパルス重畳破壊試験

〈4・2〉 電気試験結果 試作ケーブルの各種耐電圧試験結果を表 3 に示す。なお、表 3 には今回設定した ±250 kV ケーブルに対する耐電圧値を併せて示した。

これらの耐電圧値のうち、直流耐電圧値 V_{DC} 、雷インパルス耐電圧値 V_{imp} は次の (1)、(2) 式を用いて算出した。

$$V_{DC} = V_0 K_1 K_2 K_3 \dots \dots \dots (1)$$

$$V_{imp} = M (V_p + K V_0) k_1 k_2 k_3 \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 V_0 : 系統最高電圧 (250 kV)、 V_p : アレスタ保護レベル (433 kV)、 M : インパルスレベルを規定する裕度 (1.1)、 K : バーダー係数 (0.8)、 $K_1 k_1$: 経年劣化係数 ($K_1 = 3.54$, $k_1 = 1.1$)、 $K_2 k_2$: 温度係数 (1.0)、 $K_3 k_3$: 不確定要素に対する裕度 (1.1)

表 3 で明らかなように、いずれの項目も耐電圧値を十分満足することが確かめられ、更に絶縁厚低減の可能性を示唆する結果を得た。

図 11 は改良充填剤入 XLPE ケーブル (S-XLPE) の直流破壊電圧と絶縁厚の関係を XLPE ケーブルおよび天然充填剤入 XLPE ケーブル (N-XLPE) と共に整理したものである。XLPE ケーブルは絶縁厚の増加と共に破壊電圧が飽和傾向を示すのに対して、充填剤入 XLPE ケーブルはいずれも絶縁厚の増加と共に破壊電圧が順当に上昇している。特に、今回新たに開発した充填剤 (物質 A) を用いた S-XLPE は高い直流破壊電圧を示している。

〈4・3〉 バーダー係数の評価 図 12 は直流・逆極性インパルス重畳破壊試験において、直流プリストレス E_{DC} を変化させたときの直流プリストレスとインパルス破壊電界 E_r の関係を示したものである。図中

図 11 直流破壊電圧の絶縁厚依存性
Fig. 11. DC breakdown voltage vs. insulation thickness of DC XLPE cables.

図 12 直流・逆極性インパルス重畳破壊特性
Fig. 12. Impulse breakdown strength of 250 kV DC cable under superposition of DC prestress of opposite polarity.

には絶縁厚 6.0 mm の XLPE ケーブル (非充填) のデータも示した。これより明らかなように、S-XLPE では直流プリストレスの影響は小さく、 $E_{DC}=25$ kV/mm ($V_{DC}=500$ kV に対応) においても、雷インパルス破壊電界の低下はたかだか E_{DC} の半分以下である。

ところで、インパルス破壊電圧に対する直流課電の影響を定量化するものとして次式で定義されるバーダー係数 K がある。

$$K = (E_{imp} - E_r) / E_{DC} \quad (3)$$

ここで、 E_{imp} ：インパルス単独の破壊電界 (kV/mm)、 E_r ：逆極性直流電圧へ重畳したときのインパルス破壊電界 (kV/mm)、 E_{DC} ：直流プリストレス (kV/mm)

図 13 直流プリストレスとバーダー係数
Fig. 13. Relationship between Bahrdter's coefficient and DC prestress.

バーダー係数は空間電荷の影響をマクロに評価する手段として有効であり、直流ケーブルにおける重要な設計諸元の一つとなるものである。

図 12 から、S-XLPE ケーブルおよび通常の XLPE のバーダー係数を求め図 13 に示す。直流プリストレスの増加と共に、 K が大きくなる傾向にあるが、その到達値は通常の XLPE ケーブルに対して S-XLPE ケーブルではその 1/2 以下である。李らの最近の研究⁽⁶⁾によれば、XLPE に直流電圧を印加した場合、残渣濃度が高い場合には電極近傍にヘテロ電荷が、低い場合にはホモ電荷が形成されることが明らかにされている。S-XLPE ケーブルのバーダー係数が通常の XLPE ケーブルに比べて小さいのは、このような空間電荷の形成が抑止されていることを示唆している。

5. 厚肉絶縁 CV ケーブルの直流絶縁特性に関する考察

絶縁厚 20 mm の試作ケーブルに関する一連の実験結果は、新しい充填剤 (物質 A) を用いた充填剤入り XLPE ケーブルが厚肉絶縁のケーブルにおいても ρ が高く良好な直流破壊特性を有することを示している。この理由について、充填剤の作用という観点から材料的考察を行う。

〈5・1〉 CV ケーブル中の架橋分解残渣と固有絶縁抵抗 まず、通常非充填 CV ケーブルにおいて絶縁体中に残存する架橋分解残渣が XLPE 絶縁体の固有絶縁抵抗 ρ にどのような形で影響を及ぼしているのかについて検討する。図 14 は絶縁厚 13 mm の通常の CV ケーブル絶縁体半径方向の ρ と分解残渣量の分布を示したものである。図から明らかなように、分解残渣量 β は絶縁体の中央部にピークを有する凸形の分布をしているが、 ρ の分布はこれとは逆に凹形である。すなわち、分解残渣が少ないうち、外層部は ρ が高く、分解残渣が多く残存している中層部は内、外層部に比べ 1 桁程度 ρ が小さくなっている。通常の非充填 CV ケーブルではこのように ρ の値は分解残

図 14 XLPE ケーブルの ρ と残渣量分布
Fig.14. Radial profile of volume resistivity and decomposition products content in the insulation of XLPE cable.

渣量に大きく依存し、分解残渣の不均一な分布が絶縁体中の ρ の分布を大きく変わいさせている。このため、直流課電時には ρ の高い部分での電圧分担が大きくなり、局所的な高電界を形成していると推察され、これが CV ケーブルにおける直流絶縁破壊強度の顕著な絶縁体厚さ依存性の一因と考えられる。

〈5・2〉 充填剤入 XLPE における充填剤の作用に関する考察 図 15 は今回試作した絶縁厚 20 mm の充填剤入り XLPE ケーブルについて、図 14 と同様に ρ と分解残渣量の径方向分布を測定したものである。図 14 に示した通常の CV ケーブルの分布と異なり、 ρ は残渣量の分布に依存せず、半径方向に均一な分布となっており、かつその絶対値が 2 桁程度高くなっている。

図 16 は充填剤の添加量を 1~40 phr の範囲で変えて作成した XLPE シート (0.1 mm) について、分解残渣が存在している状態 (未乾燥状態) で室温および 90°C の ρ を測定した結果である。室温、高温いずれの場合にも充填剤をわずか 1 phr 添加しただけで ρ は無添加の場合に比べ約 2 桁上昇している。添加量が 10 phr 近傍で ρ の値はピークを示し、更に添加量を多くすると逆に低下する傾向を示す。

図 15、図 16 の二つの実験データは充填剤 (物質 A) が架橋時の分解残渣を吸着捕捉する作用を有すると仮定すれば理解できる。図 17 は充填剤の分解残渣吸着モデルを示したものである。架橋反応によりケーブル絶縁体中に発生する分解残渣が充填剤に吸着されると考えると、図のように分解残渣は充填剤の粒子を核とした山形の濃度分布をもつと推察される。この場合、分解残渣の集まった粒子近傍で当然 ρ が低下することになるが、その分だけ粒子の間においては分解残

図 15 充填剤入 XLPE ケーブルの ρ と残渣量分布
Fig.15. Radial profile of volume resistivity and decomposition products content in the insulation of XLPE cable containing inorganic filler.

図 16 ρ に及ぼす充填剤添加量の影響
Fig.16. Relationship between volume resistivity and filler content.

図 17 充填剤の分解残渣吸着モデル
Fig.17. Physical model of adsorption of decomposition products onto the filler particle.

図 18 未乾燥材料と乾燥材料の TSC の比較
Fig. 18. Comparison of TSC data of samples with and without cross-linking decomposition products (normal XLPE and XLPE containing filler).

渣濃度が小さくなることから、 ρ の値が高くなり、 ρ の分布はちょうど分解残渣濃度分布の逆の形となる。従って、ケーブル絶縁体のバルクで測定される抵抗は ρ の高い部分が支配的となり、非充填の場合に比較し高い ρ 値を示すこととなると推察される。濃度拡散で決定される粒子の分解残渣吸着範囲はおのずと限定されることから、添加量が多く粒子間距離が小さすぎると、その効果が薄れる結果となるであろう。図 16 において、一定の添加量以上で ρ の値が低下の傾向を示すのはそのためと解釈される。加えて、充填剤は絶縁体中に均一に分散しているため、このような挙動は絶縁体の全領域で一様に起こり、図 15 に示したような均一な ρ 分布をもたらすものと推定される。

図 18 は充填剤(物質 A)入り XLPE(充填量 5 phr)と通常の XLPE のシートサンプルについて、未乾燥状態(分解残渣が残留)と 90°C、24 hr の真空乾燥処理

を行った後の TSC を比較した結果である[通常の XLPE のデータは文献(7)より抜粋]。通常の XLPE では(b)図に示したように、未乾燥サンプルと乾燥サンプルとで測定結果に明らかに差があるのに対し、充填剤(物質 A)入り XLPE では、未乾燥サンプルの TSC と乾燥サンプルの TSC がほとんど同じである。この結果は充填剤そのものの空間電荷形成抑止効果に加えて、充填剤が分解残渣を吸着しているため分解残渣への空間電荷形成が抑止されている効果が現れていると解釈すれば理解できる結果であり、この図 18 も間接的ではあるが、充填剤(物質 A)の分解残渣吸着作用を示唆する結果と考えている。

6. ま と め

直流 CV ケーブルの開発に関する研究の結果について述べた。主な内容を要約すると次のとおりである。

(1) 絶縁厚 3.5~9 mm のミニチュアケーブルとシートサンプルによる実験により、優れた直流絶縁性能の賦与効果が期待できる XLPE ケーブル用無機充填剤を見いだした。

(2) 前記充填剤を含有する XLPE 絶縁体を用いた直流 CV ケーブルは直流課電下の ρ が高く、かつ優れた絶縁性能を示すこと、この優れた絶縁性能は絶縁厚さ 20 mm という厚肉ケーブルでも発揮され得ることを確認した。

(3) 上記充填剤の作用機構について検討し、これを用いた絶縁体の優れた絶縁性能は、架橋時分解残渣の吸着効果とそれによってもたらされる均一な ρ の分布と空間電荷形成の抑制効果によるものと考察した。

(平成 4 年 2 月 28 日受付, 同 4 年 6 月 15 日再受付)

文 献

- (1) 「直流送電設備における直流ケーブルに関する調査」, 電気学会技報(II部), No.105 (昭55)
- (2) H. Fukagawa, et al.: "Insulation property of 250 kV DC XLPE cables", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, PAS-100 3175 (1981)
- (3) K. Ogawa, et al.: "The world's first use of 500 kV XLPE insulated aluminium sheathed power cable at the Simogo and Imaichi power station", *IEEE Trans. Power Delivery*, 5 26 (1990)
- (4) N. Ando, et al.: "Experimental investigation of space charge in XLPE cable using dust figure", *IEEE Trans. Elect. Insulation*, EI-14, No.1 (1976)
- (5) 金岡, 他: 「架橋ポリエチレンの直流絶縁特性における充填剤の効果」, 電気学会電力技術研資, PE-76-4 (昭51)
- (6) 李, 他: 「XLPE 架橋残渣が空間電荷分布形成に及ぼす影響」, 電学論 A, 112, 209 (平4-3)
- (7) T. Suzuki, et al.: "DC characteristics of cable insulating materials", *Proc. 3rd ICSD*, B-7 (1989)

前 川 雄 一 (正員)

昭和 27 年 8 月 21 日生。52 年 3 月同志社大学工学部電気工学科卒業。同年 4 月電源開発(株)入社。現在、工務部送電室課長代理。主として、送電線路の設計、建設業務に従事し、現在に至る。

原 信 (正員)

昭和 25 年 1 月 23 日生。43 年 3 月福島県立喜多方工業電気科卒業。同年 3 月日立電線(株)入社。45 年日立製作所日立茨城工業専門学院電気工学科卒業。現在、パワーシステム研究所に所属し、架橋ポリエチレンケーブルの接続部および直流ケーブルの開発研究に従事。

山 口 昭 生 (正員)

昭和 33 年 6 月 11 日生。56 年 3 月東京農工大学工学部電気工学科卒業。同年 4 月電源開発(株)入社。現在、工務部送電室課長代理。主として、送電線路の設計、建設業務に従事し、現在に至る。

関 井 康 雄 (正員)

昭和 11 年 9 月 8 日生。40 年 3 月東京大学大学院修士課程修了。同年 4 月日立電線(株)入社。現在、パワーシステム研究所第 1 部長。茨城大学共同研究開発センター客員教授。工学博士。主として、架橋ポリエチレンケーブルおよび接続部の開発研究に従事。42 年電気学会論文賞受賞。電子情報通信学会、IEEE 会員。