

500kV直流XLPEケーブルおよび同径接続部

電源開発株式会社 前川 雄一・浅野 光正・木村 武生
電力技術開発センタ 吉田 学・今 博之*1・渡辺 和夫*2
電力事業部 平澤 隆行*3・石川 虎一*4
材料技術研究所 高橋 享*5

DC500kV XLPE Cable and Associated Factory Joint

Y. Maekawa, M. Asano, T. Kimura
M. Yoshida, Dr. H. Kon, Dr. K. Watanabe, T. Hirasawa,
T. Ishikawa & Dr. T. Takahashi

直流XLPEケーブルは、長距離大容量送電の担い手として将来期待されており、当社では500kV級直流ケーブルの開発を進めている。この絶縁体としては、絶縁抵抗が高く、空間電荷の蓄積を抑制する効果がある無機充填材入りXLPEを用いている。

これまでに500kV級直流ケーブルおよび同径接続部について設計試作し、各種電気試験を行った結果、初期特性として十分な電気特性を有することを確認している。そして、開発の最終段階として長期課通電試験を実施したので、これらの結果について報告する。

DC XLPE cable shows promise as the long-distance, large-capacity transmission cable in the future. Then, we have developed 500 kV class DC XLPE cable insulated by an XLPE compound containing inorganic filler. It has higher resistivity than the conventional XLPE compound and is an effective means for suppressing the built-up of space charge.

Up to this time, the 500 kV DC XLPE cables and factory joints were manufactured and their initial electrical characteristics were evaluated. These results met the performance objectives in all respects. Therefore, a long-term aging test was carried out as the final of development. This paper reports these results.

1. ま え が き

直流送電は、安定度問題が無く大容量長距離送電に適している。一方、絶縁体としてXLPEを代表とする固体絶縁ケーブルは、給油設備を必要とせず、保守管理が容易であることから、固体絶縁ケーブルを直流送電に適用することは、海底ケーブルのような長距離、高落差線路に有利である。しかしながら、近年、一部小容量送電線路への適用が実用化しているものの、本格的な長距離大容量送電の実用化にはいたっていない。そこで、われわれは、無機充填材入りXLPE (XL-A) を絶縁材料として、絶縁厚20mmを有する250kV級直流XLPEケーブルおよびその同径接続部の開発を行ってきた¹⁾²⁾³⁾。これまでに、260日におよぶ長期課通電試験まで実施し、250kV級直流XLPEケーブルとして信頼性を有することを確認している³⁾。

さらに、高電圧大容量化をはかるべく、500kV直流XLPEケーブルおよび長距離海底ケーブルには不可欠である工場接続部 (FJ) の開発を進めてきた⁴⁾。今回、直流海底ケーブルとしての実用化に向け、長期信頼性を確認す

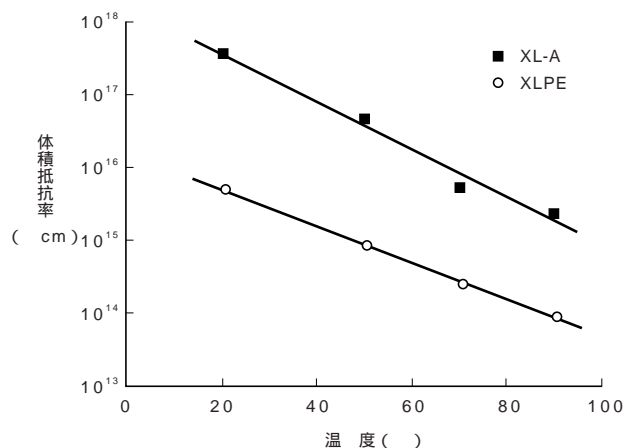


図1 体積抵抗率の比較
Volume resistivity of conventional XLPE and XL-A

*1 (工博)
*2 グループ長(工博)
*3 電力技術部
*4 富津製造部技術課主管部員
*5 化学材料開発部主席部員(工博)

る目的で長期性能試験を実施したので、ここに報告する。

2. 無機充填材入りXLPEの適用

われわれは、直流XLPE絶縁材料として、絶縁体中の空間電荷の蓄積を抑制するため、XLPEに導電性無機充填材を添加することが効果的であることを確認し、充填剤入りXLPE (XL-A) を絶縁体とした新規直流XLPEケーブルの開発を進めてきた¹⁾。この絶縁材料の体積抵抗率は、図1に示すように交流用に使われているXLPEの体積抵抗率に比較して、いずれの温度領域においても1桁程度大きくなっている。これは、XL-Aが無機充填材の吸着効果により空間電荷の源となるキャリアの発生を低減したものと考えられ、結果として、空間電荷の形成自体の抑制に寄与するものと期待される。

次に、このXL-Aを基に、さらなる電気特性の向上をはかる目的で、XL-Aの充填剤の分散性を向上させた絶縁材料 (SXL-A) によるモデルケーブルの空間電荷の評価を行ったので、その結果について以下にまとめる。

空間電荷の測定は、以下に示す条件にて実施した。

評価ケーブル：絶縁厚9mm，導体断面積200mm²

印加電圧：-225kV

温度条件：導体温度90

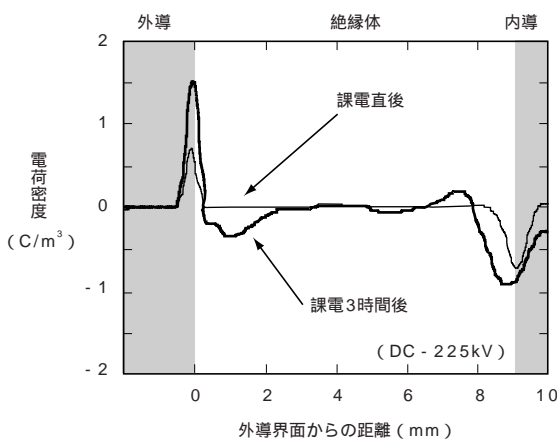


図2 直流下の空間電荷分布
Space charge distribution in model cable

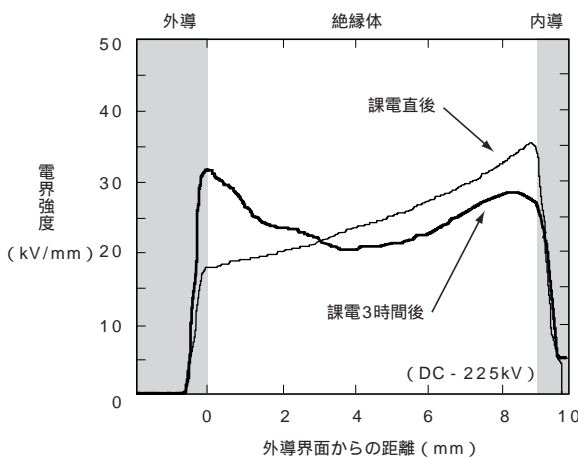


図3 空間電荷を考慮した電界分布
Electric stress distribution in model cable

(導体通電により絶縁体内外に20 の温度差を与えた.)
500kV直流XLPEケーブルの実線路において想定される平均ストレスと同程度のストレスとなる課電電圧 -225kV (平均ストレス25kV/mm) 時の空間電荷の分布を図2に示す。また、この空間電荷分布をもとにポアソンの式から絶縁体中のストレス分布の評価を行った結果を図3に示す。

課電直後の空間電荷の蓄積が無い場合は、絶縁体中のストレスは容量分担によるストレス分布を示すが、課電3時間後においては、内導近傍はホモ電荷の蓄積によりストレスは緩和される傾向にある。一方、外導界面近傍においては、ヘテロ電荷によりストレスが増大することになるが、この値は空間電荷蓄積前の内導直上の容量分担ストレスの最大値以上にはならない。この結果から、無機充填材入りXLPEを絶縁材料とする直流XLPEケーブルにおいて、直流電圧下で蓄積される空間電荷は、絶縁体中のストレスを平滑化するように形成されることがわかる。

これは、通常のXLPEケーブルにおいては、空間電荷により容量分担ストレスの2倍以上ストレスが強調される場合もある⁵⁾ことに比べ、直流XLPEケーブルは、安定した直流特性を裏づけるものと考えられる。

表1 500kV直流XLPEケーブルの開発目標
Performance objectives for 500kV DC XLPE cable

項目	仕様
系統電圧	±500kV
送電容量	3,000MW (双極1回線)
系統異常電圧	850kV (1.7PU)

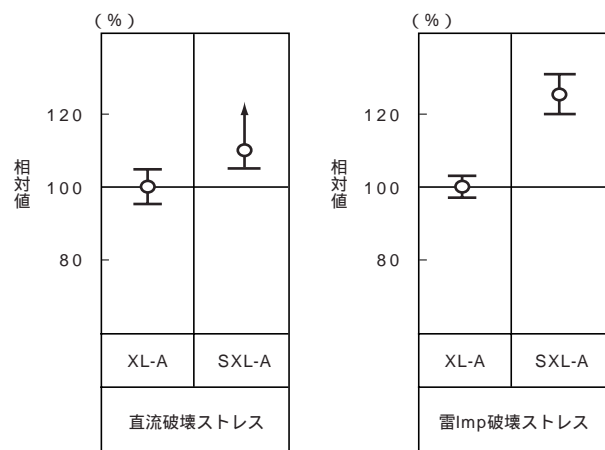


図4 充填材の改良による電気特性の比較
Elevation in breakdown characteristics due to filler improvement

表2 500kV直流XLPEケーブルの耐電圧特性
Required withstand voltage for 500kV DC XLPE cables

項目	電圧条件	温度条件
直流耐電圧	1,200kV/3h	導体温度90 (DC3,000A相当電流通電)
雷インパルス耐電圧	1,250kV/3回	90

3. 500kV直流XLPEケーブルの開発

次に、500kV直流XLPEケーブルの開発目標を表1に示す。

ここでは、250kV直流XLPEケーブルに比べ、許容設計ストレスの向上をはかり、より大容量でコンパクトなケーブルの開発を目指すために、500kV直流用絶縁材料(SXL-A)は、XL-Aの充填材の疎粒子を低減させる改良を行っている⁴⁾。その結果、図4に示すように、直流破壊ストレスで10%以上、雷インパルス破壊ストレスでは25%の特性の向上がはかられている。

このように、SXL-AはXL-Aに比べ電気特性を向上させることができた。そこで、500kV直流XLPEケーブルの設計にあたり、SXL-Aを絶縁体としたモデルケーブルの直流電圧および雷インパルス電圧における破壊特性から設計定数を算出し、表2に示される500kV直流XLPEケーブ

表3 500kV直流XLPEケーブルの構造
Construction of DC500kV XLPE cable

項目	単位	寸法	
導 体	公称断面積	mm ²	3,000
	形 状	-	分割圧縮円形
	外 径	mm	67.0
内部半導電層厚さ	約mm	2.5	
絶縁体 (無機充填材入りXLPE)	mm	23.0	
外部半導電層厚さ	約mm	1.0	
クッション層厚さ	約mm	3.0	
鉛被厚さ	mm	4.7	
PE防食層厚さ	mm	6.0	
座床層厚さ	mm	2	
鉄 線	線 径	mm	8
	本 数	約本	60
サービング層厚さ	mm	4.5	
外 径	約mm	177	
重 量	約kg/m	87	

表4 500kV直流XLPEケーブルの電気評価結果
Electrical characteristics of 500kV DC XLPE cables

項目	条 件	1	2	3
直 流 耐電圧(*)	1,200kV /3h	良好 (- 1,450kV /3h良好)	-	良好 (± 1,450kV /3h良好)
極性反転 耐電圧(*)	± 750kV /4h (3往復)	-	良好	-
雷Imp(**)	± 1,250kV /3回	良好 (- 2,000kV 破壊)	-	良好 (- 2,150kV 破壊)
DC+逆極性 雷Imp(*)	- 1,000kV /3回 (前課電 +500kV)	-	良好 (- 1,850kV 破壊)	-

* : 導体温度90 , DC3,000A相当電流通電
* * : 外部加熱90

ルとして要求される直流耐電圧および雷インパルス耐電圧を考慮した設計を行った⁴⁾⁶⁾。その結果、500kV直流ケーブルとして、絶縁厚23mmを採用した。この500kV直流XLPE海底ケーブルの構造を表3に示す。そして、今回、試作したケーブルについて、各種電気特性を評価したので、その結果を表4に示す。

電気試験は、直流耐電圧試験後、雷インパルス耐電圧破壊試験を実施した2試料と、極性反転耐電圧試験後、直流+逆極性雷インパルス耐電圧破壊試験を実施した1試料の計3試料に関するもので、いずれも、500kV直流ケーブルとしての要求特性も満足しており、直流500kV級として、十分な初期特性を有することを確認することができた。

4. 同径接続部の開発

直流500kVXLPEケーブルは十分な初期特性を有することを確認することができたので、次に長距離海底ケーブルには欠かせない工場内で製造する同径接続部(FJ)の開発を行った。まず、500kV直流XLPE海底ケーブル用FJを開発するにあたり、FJとして求められる機能に留意し、FJの工法および構造を決定した。DC500kV 3,000mm²XLPE(絶縁厚23mm)用FJの構造を図5に示す。

導体部は、可撓性を考慮し、セグメントごとに溶接することにより接続を行っている。また、補強絶縁体部は、ケーブルと同じ材料(SXL-A)を押し成型し、その後、ガス加圧下において加熱することにより架橋を行う。その絶縁厚はケーブル絶縁厚23mmに対して、モデルジョイントにおける電気特性のケーブルとの比較および偏肉率等を考慮し、平均絶縁厚26mmとしている。金属遮へい層は、挿入してある鉛管をケーブル部とほぼ同径にまでスウェーピングを行い、端部は溶接することによりケーブル部と接続する。防食層はPEをモールドすることにより成型する。

このような工法を採用して試作したDC500kV 3,000mm²XLPE用FJの初期電気特性の評価を行った。電気特性の評価を実施する前に製造工程時の機械履歴を想定した曲げ試験(4m×2往復)と捩り試験(7.6°/m×2往復)の機械試験、および海底布設時に想定される機械履歴として引張り曲げ試験を実施した。なお、引張り曲げ試験の条件は、シープ直径8mのターンテーブルを用いて、水深300m相当の引張り張力として276kNを試料

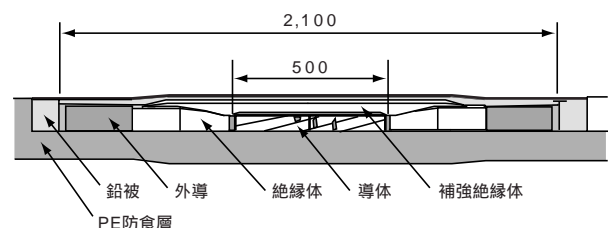


図5 DC500kV 3,000mm²XLPEケーブル同径接続部
DC500kV 3,000mm²XLPE factory joint

表5 同径接続部の電気試験結果
Electrical characteristics of 500kV DC factory joint

項目	条件	1	2	3
曲げ試験	4m × 2往復	○	○	-
振り試験	7.6° / m × 2 往復	○	○	-
引張曲げ 試験	張力276kN × 3回 (水深300m 想定)	-	-	○
直流 耐電圧(*)	±1,200kV /3h	良好 (±1,450kV /3h良好)	-	良好 (±1,450kV /3h良好)
極性反転 耐電圧(*)	±750kV /4h (3往復)	-	良好	-
雷Imp(**)	±1,250kV /3回	良好 (-2,000kV 破壊)	-	良好 (-1,950kV 破壊)
DC+逆極性 雷Imp(*)	-1,000kV /3回 (前課電 +500kV)	-	良好 (-1,900kV 破壊)	-

* : 导体温度90 , DC3,000A相当電流通電
** : 外部加熱90

に与えた⁶⁾。それぞれの機械試験を実施した後の電気試験結果は、表5に示すように、いずれの試験項目も要求特性を満足することができた。

以上の結果から、今回開発した500kV直流XLPEケーブル用FJの設計および施工条件が妥当であることから、直流500kV XLPE海底ケーブル用FJとして実用化の可能性を有することがわかった。そこで、次のステップとして、長期信頼性の確認を行うため、実使用を模擬した状況下における長期課通電試験を進めた。

5. 長期課通電性試験

5.1 機械試験(引張り曲げ試験)

長期課通電試験を実施する前に、海底ケーブルの布設を模擬した機械履歴に相当する引張り曲げ試験を実施した。試験条件としてはCIGRE推奨案⁷⁾に基づき、表6に示すように水深150m相当を模擬した試験を実施した。また、

表6 引張り曲げ試験の条件
Conditions of tensile bending test

項目	数値	備考
シープ径	8 m	駆動式
ケーブル張力	147kN (水深150m相当)	ケーブル水中重量 62.7kg/m = 614N/m
回数	3回	-

表7 課電条件
Applied voltage condition

課電電圧 Vt	等価年数 T0	課電日数 Tt	根拠
700 kV (1.4* V0)	30年	71日	V - t特性n = 15 Tt = T0 × (V0/Vt) ¹⁵
	43年	101日	

引張り曲げ試験を実施した後、試料の健全性確認のため直流耐電圧試験(-900kV /15分 常温)を行い、機械試験により試料に初期破壊を生じるような欠陥が生じていないことを確認している。

5.2 長期課通電試験

試験条件

a. 課電条件

長期課通電試験の課電電圧としては、運転電圧500 kVの1.4倍である700 kVと設定し、試験期間については、表7に示すようにV-t特性のn = 15⁸⁾に則り、設計寿命30年相当として71日、最終的には40年相当以上(43年)として101日におよぶ試験を実施した。

b. 温度条件

温度条件としては、表8に示すようにヒートサイクルと高温一定の2条件で実施し、また、長期課通電試験の最後に、実線路での事故時を想定して、定格電流以上の電流を通電しても異常が無いことを確認するために、運転電圧(+500 kV)において、規格電流の125%の電流を通電する過負荷試験を実施した。

試験結果

長期課通電試験線路のレイアウトを図6に示す。FJを含む有効長30mを有するケーブル試料に課通電を実施するため、ガス中終端接続部2組によりループ状に構成した。また、表8に示す温度条件を満足させるため、ケーブルシース上に外部ヒータを設けており、温度は、ダミーケーブルの导体温度を測定することにより制御を行った。

この試験線路を構築した後、線路の健全性を確認する目的で、長期課通電試験の前に直流耐電圧試験(+900kV/15分 常温)を実施し、線路に問題ないことを確認している。

表8 温度条件
Temperature conditions

試験項目	条件	備考
ヒート サイクル	通電電流: DC3,000A相当 8h 通電 - 16h 遮断	导体温度: 90
高温一定	通電電流: DC3,000A相当 連続通電	导体温度: 90
過負荷	DC3,000A相当電流 × 11.5h DC3,750A相当 電流 × 0.5h 10サイクル	課電電圧: +500 kV

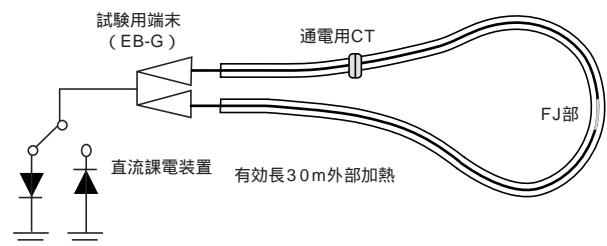


図6 長期試験の線路レイアウト
Layout of long-term aging test

6.むすび

表9 試験条件と結果
Test conditions and results

温度条件	課電電圧	課電日数	実施結果
ヒート サイクル (30日)	+700kV	10日	10日
	-700kV	10日	10日
	±700kV(*)	10日	10日
高温一定 (71日)	+700kV	30日	31日
	-700kV	31日	32日
	±700kV(*)	10日	11日
等価43年	-	101日	104日
過負荷試験	+500kV	10サイクル	10サイクル

*：極性反転のインターバルは8h

表10 残存試験結果
Test results of residual performance

試験項目	要求特性	結果
DC+逆極性Imp耐電圧	- / +1,000kV×3回 (前課電+/-500kV×3h)	良好
直流耐電圧	+ / -500kV×3h	良好
雷Imp耐電圧 破壊	+ / -1,250kV×3回 (破壊は負極性にて実施。 50kV×3回昇圧)	良好 (-1,900kV 破壊)

* 導体温度90℃，DC3,000A相当通電にて実施

長期試験における試験条件と各条件において実施した課電日数を表9に示す。いずれの条件においても問題無く、等価40年相当の試験を無事終了することができた。

5.3 残存試験

長期課通電試験の後に、異常電圧に対する特性を評価する目的で残存試験を実施している。残存試験については、表10に示すようにいずれの耐圧試験についても要求特性を満足し、雷Imp破壊値(-1,900kV)については、FJを含む試料の初期値³⁾(-1,950kV～-2,000kV)とほぼ同等なレベルであることから、長期性能試験後においても十分な性能を有することがわかった。また、破壊試験後の解体調査においても特に異常は認められていない。

500kV直流XLPEケーブルおよび同径接続部の開発にあたり、直流電圧下における空間電荷の特性を抑制する効果のある絶縁材料として、無機充填材を添加したXLPEを基に、さらに電気特性の向上をはかるべく、充填材の分散性を向上させた絶縁材料(SXL-A)を採用した。そして、絶縁厚23mmを有する実規模500kV直流XLPEケーブルおよびその同径接続部を試作し、それらの電気特性を評価したところ、初期特性として要求性能を十分満足することがわかった。さらに、長期信頼性を評価するために、海底ケーブルとしての布設を模擬した引張曲げ試験に供した後、長期課通電試験を実施した結果、等価40年相当の課電に耐え、その後の残存試験も初期値と同程度であることを確認することができた。

以上のように、開発を行った500kV直流XLPEケーブルおよび接続部は、海底ケーブルとして十分満足すべき特性を有することを確認することができた。今後、さらに実用化に向けた検討を進める予定である。

参考文献

- 1) Y. Maekawa, et al.: Development of DC ±250 kV XLPE cables and factory joints, JICABLE 1991 B.9.2
- 2) 藤井ほか：±250kV直流CVケーブルの開発 - 長期性能実証試験 - ，電線ケーブル研究会，EC-96-30，1996
- 3) K.Terashima, et al.: Research and Development of ±250kV DC XLPE Cables, IEEE 1997 PES Winter Meeting PE-597-PWRD-0-04-1997
- 4) 前川ほか：500kV直流XLPEケーブルおよび同径接続部の開発，電気学会論文誌，Vol.120-B，11月，2000
- 5) N.Hozumi, et al.: Space Charge Measurement in XLPE Cable with 9 mm Thickness Insulation, Proc.4th Int'l Conf. on Insulated Power Cable A.7.4, 1995
- 6) 前川ほか：500kV直流XLPEケーブルの開発 - 初期特性評価 - ，電線ケーブル研究会，EC-00-18，2000
- 7) CIGRE Electra, No.171, "Recommendations for Mechanical Tests on Sub-marine Cables", 1997
- 8) S.Ogata, et al.: Study on the Dielectric Characteristics of DC XLPE Cables, IEEE Winter Meeting, 90 WM 229-5, 1990