

500 kV級直流架橋ポリエチレンケーブルシステムの開発

Development of DC 500 kV XLPE Cable System

丸山 悟*
Satoru Maruyama

石井 登*
Noboru Ishii

島田道宏*
Michihiro Shimada

小島新治*²
Shinji Kojima

田中秀郎*³
Hideo Tanaka

浅野光正*⁴
Mitsumasa Asano

山中鉄也*⁴
Tetsuya Yamanaka

川上真一*⁴
Shinichi Kawakami

概要 筆者らは、極性基をグラフトしたポリエチレンをケーブル絶縁体として用いることで、従来の架橋ポリエチレン (XLPE) ケーブルに比べて安定した電荷挙動を示し、直流電界下での絶縁性能が向上することを見出した。そこで、本絶縁材料を用いて、500 kV級直流XLPEケーブルを製造・評価し、十分な初期特性を有していることを確認した。さらに、長尺使用に必要な工場接続部の開発も行い、ケーブル同様、良好な電気特性を有していることも確認した。これら500 kV級直流XLPEケーブルシステムをCIGRE推奨案に基づくPre-Qualification試験(長期課通電試験他、以下、PQ試験と記す)に供試し、365日(約40年相当)の長期課通電およびその後の残存性能試験を完了し、世界で初めての直流XLPEケーブルのPQ試験合格の認定を受けることができた。よって、開発した500 kV級直流XLPEケーブルが十分に実用に耐えうるものであることが確認できたので、その開発に関して報告する。

1. はじめに

一般にケーブルを用いた交流送電では、系統安定度や充電電流の問題があり、長距離化が困難である。そこで、大陸間や離島間を結ぶ長距離送電には、直流ケーブルが適用されている。従来、直流送電ケーブルの絶縁体には、紙-油の複合系である油浸絶縁(OI)ケーブルや高粘度油含浸(MIND)ケーブルが用いられてきたが、送電距離や送電容量に制約がある。一方、交流送電に関してはメンテナンスの容易な固体絶縁体を用いたXLPEケーブルが、低電圧階級から超高電圧階級まで広く適用されており、その信頼性も年々高まっている¹⁾。直流送電においても、絶縁体に油を使用しない固体絶縁ケーブルの適用が期待されている。しかし、交流XLPEケーブルに使用されている絶縁材料は、絶縁体内部に空間電荷が蓄積するため直流耐電圧特性が低下することが知られており²⁾、直流電界下で使用できる絶縁材料が必要とされている。以前より、直流固体絶縁ケーブルとして、ある種の充填材をいれた絶縁材料を適用した研究・開発がなされてきているが、まだ実線路に適用されるには至っていない³⁾。

筆者らは、充填材の導入ではなく、ポリマー自体の改質による新規固体絶縁材料を導入し、超高圧直流ケーブルに適用する

ことを試みてきた⁴⁾~8)。この新規材料は、従来の交流XLPEケーブル材料と同様に扱えるため、既存設備と製造技術をそのまま適用できる利点がある。

今回、開発した500 kV級直流XLPEケーブルシステムをCIGRE推奨試験に準じたPQ試験に供試し合格したので、それらの開発経緯について報告する。

2. 直流固体絶縁ケーブル材料の基礎特性

固体絶縁ケーブルを直流電圧下で使用する場合、前述の通り空間電荷蓄積による絶縁特性の低下など、従来の交流XLPEケーブルとは異なる直流ケーブルとして特有な絶縁特性が要求される。したがって、直流電圧下での使用に耐えうる絶縁材料の開発が必要となる。

ケーブル絶縁材料は、破壊特性を支配する要因について特性を満足する必要がある。直流電圧下で特有なものとしては以下の点が考えられる。

- ・ 絶縁体中に流れる定常的な電流によるジュール熱発生に起因する発熱
- ・ 絶縁体内部に空間電荷が蓄積することによる、局所高電界の形成

したがって、これらの要求を満足するための絶縁材料の特性は、

- (1) 高い固有抵抗を有すること
- (2) 空間電荷による局所高電界の形成がないこと

である。筆者らは、そのような絶縁材料として、極性基を付与したポリエチレン材料を直流固体絶縁ケーブル用材料(以下、DC組成と記す)として選定した⁴⁾が、それは以下の作用が期

* 研究開発本部 環境・エネルギー研究所

*² 電力事業部 ケーブル製造部

*³ 株式会社ビスキャス

*⁴ 電源開発株式会社

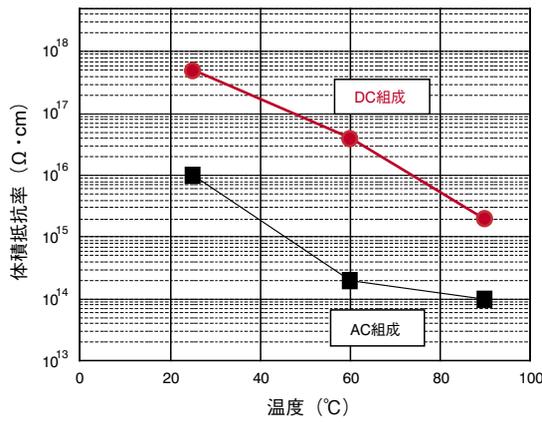


図1 AC組成, DC組成XLPEの絶縁抵抗率
Volume resistivity of XLPE materials

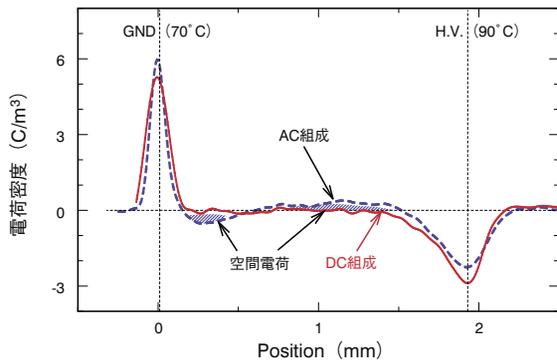


図2 AC組成・DC組成XLPEの空間電荷特性
(シート試料, 30 kV/mm)
Space charge characteristics of XLPE materials

待できるためである。

ポリエチレン材料に極性基を導入すると、極性基が電荷のトラップサイトとして働くことが知られている⁹⁾。トラップサイトは、絶縁体中の電荷移動度を小さくする働きがあるため、絶縁体の抵抗を高くすることができる。また、トラップサイトの存在は、空間電荷蓄積の偏在化を抑制する効果もあり、電荷挙動を安定させる作用が期待できる。また、本組成の化学的な性質は従来PE材料と同様であるため、既存の製造設備をそのまま適用することもできる。

図1, 2に、選定したDC組成の体積抵抗率と空間電荷蓄積特性について示した。図1より、採用したDC組成は、交流XLPEケーブルに広く使用されているXLPE材料(以下、AC組成と記す)に比べ、抵抗率が1桁以上高く、(1)の高抵抗特性を満たすことがわかる。また、図2における斜線部はAC組成で観察される蓄積空間電荷である。それに対して、DC組成では、ほとんど電荷の蓄積は観察されず、DC組成では(2)の電荷蓄積の抑制効果も満足していることがわかる。以上のことから、DC組成は直流XLPEケーブルに要求されると考えられる基礎的な電気特性を満たしていることが確認された。

3. モデルケーブルの電気特性

直流XLPEケーブルに適した高抵抗かつ空間電荷蓄積を抑制したDC組成材料を用いてモデルケーブルを試作し、その初期電気特性および長期特性について検討を行った結果について述べる。

3.1 モデルケーブルにおける初期破壊特性

各種電圧波形における初期破壊試験を以下通り実施した。

試料：導体200 mm², 絶縁厚9 mm

温度：導体90°C ($\Delta T=20^\circ\text{C}$, ここで ΔT は、ケーブル絶縁体の導体側と遮蔽側の温度差を表す。)

図3に、試験結果を示した(DC組成ケーブルの破壊値をAC組成ケーブルの破壊値に対する比率で示した)。図より、直流破壊特性および極性反転破壊特性に関しては、DC組成ケーブルの方がAC組成ケーブルよりも優れており、良好な特性を示していることがわかる。異常電圧特性は、AC組成ケーブルの特性とほぼ同等の特性を示している。これらのことから、DC組成ケーブルは、AC組成ケーブルに比べて、特に直流電圧に対して優れた初期破壊特性を有していることが確認された。

3.2 モデルケーブルの長期課通電特性

DC組成ケーブルは初期破壊特性に優れていることが確認できたが、実際にケーブルとして適用する場合には、長期的な特性を満たす必要がある。そこで、前述と同サイズのモデルケーブルを用い、長期課通電試験を実施した。課通電試験を2000時間以上行い、 $V-t$ 則による初期破壊特性から計算されるDC課電下における n 値が15以上であることを確認した。この n 値は、500kV級交流XLPEケーブルの設計に用いられる n 値と同等であり良好な結果といえる。このように、開発したDC組成材料を用いたモデルケーブルにおいては、前述の初期破壊特性に加えて長期課電特性についても良好な結果を得ることができた。

3.3 モデルケーブルの空間電荷蓄積特性

3.3.1 低電界—長時間の電荷挙動

ここでは、モデルケーブルを用い、想定される運転電界近傍の低電界領域における空間電荷特性について検討した結果を述べる。空間電荷測定は以下の条件で、PEA法¹⁰⁾を用いて測定し、測定された電荷分布から電界分布を求め評価した。

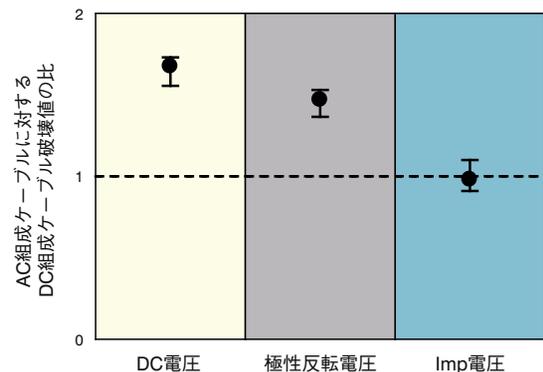


図3 モデルケーブルの初期破壊特性
Short term breakdown characteristics of model cable

試料：導体100 mm²、絶縁厚3 mm
 温度：導体通電90℃ ($\Delta T=20^\circ\text{C}$)
 課電電界：30 kV/mm
 課電時間：2160時間(3ヶ月)

図4, 5に、それぞれDC組成ケーブル、AC組成ケーブルにおける絶縁体内部の電界分布を示した。

図4より、DC組成ケーブルに関しては、次のことがわかる。課電開始直後はほとんど電荷の蓄積が見られず、静電容量で決まる電界分布となる。しかし、時間が経過すると内導側からの電荷注入により、負電荷が絶縁体内部にブロードに蓄積する傾向が見られ、電界分布は外導側が高く、内導側が低い電界分布となる。この分布は、OFケーブルのように抵抗率の分布によって決まる電界分布と良く似た結果である。

一方、図5よりAC組成ケーブルにおいては課電初期から数時間程度では、DC組成ケーブルと大きく変わらない分布を示すが、時間の経過と共に内導近傍に正の電荷(ヘテロ電荷)が蓄積するため、内導近傍の電界が局所的に強調される結果となっている。

以上のことから、DC組成ケーブル内部の電界挙動は、比較的長時間の連続課電においても安定していることがわかった。

3.3.2 高電界領域における空間電荷特性

破壊電界近傍(高電界領域)までの空間電荷測定を実施し、破壊特性と空間電荷による電界について検討した結果を述べ

る。空間電荷は、3.3.1項と同じサイズの試料を用い、導体通電90℃ ($\Delta T=20^\circ\text{C}$)で測定した。試験はステップアップ昇圧で行い、空間電荷測定は各々の電圧で30分課電後に実施した。図6, 7に、それぞれDC組成ケーブル、AC組成ケーブルにおける電界分布を示した。

DC組成ケーブルの電荷分布は、低電界領域から高電界領域のどの領域においても、外導側が高く内導側が低い分布となり、その分布形態は課電電圧によらず相似形であることがわかる。

一方、AC組成ケーブルにおいては、低電界領域ではDC組成と同様の傾向を示すものの、電界が高くなるにつれて、短時間でも内導近傍にヘテロ電荷が蓄積し、局所高電界が形成されることがわかる。すなわち、AC組成ケーブルでは、低電界と高電界で内部の電界分布が異なる様相を示すことがわかる。

これらの現象を破壊メカニズムに当てはめると、以下のようになる。AC組成ケーブルは、高電界になると内導近傍の電界が強調され、温度・電界に依存する体積抵抗率が低下すると考えられる。つまり、AC組成ケーブルは、高電界領域になると絶縁体ジュール発熱による熱的な破壊過程に移行し易くなるものと考えられる。一方、DC組成ケーブルでは、高電界領域においても、外導側が高く内導側が低い電界分布を示すことから、内導側の体積抵抗率の低下はAC組成より顕著では無いと考えられ、熱的破壊過程に移行しにくく、良好な破壊特性を示すものと考えられる。

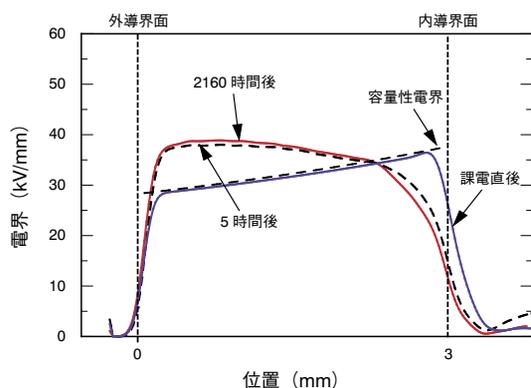


図4 DC組成ケーブルにおけるDC課電時の内部電界
Electric field distribution in DC XLPE cables under DC voltage

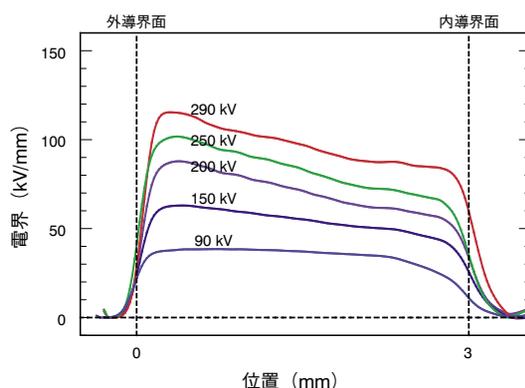


図6 DC組成ケーブルにおける内部電界の課電電圧依存性
Distribution of electric field in DC XLPE cables as a function of applied voltage

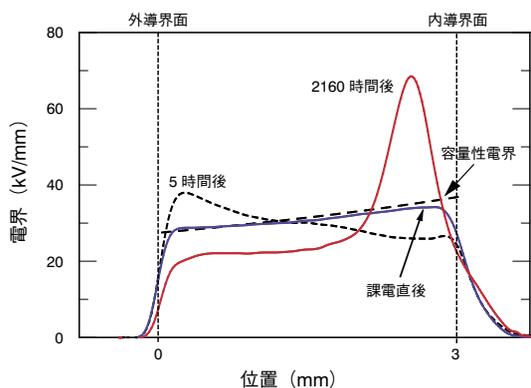


図5 AC組成ケーブルにおけるDC課電時の内部電界
Electric field distribution in AC XLPE cables under DC voltage

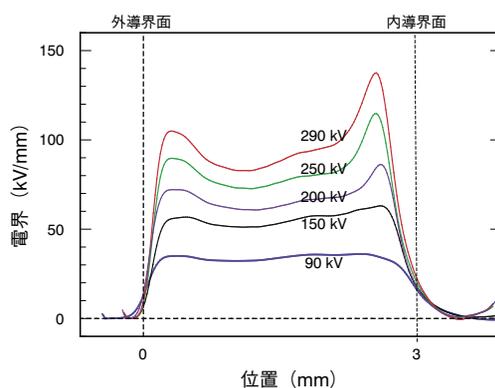


図7 AC組成ケーブルにおける内部電界の課電電圧依存性
Distribution of electric field in AC XLPE cables as a function of applied voltage

ところで、ケーブル実運転時の絶縁体は、ヒートサイクルによる温度変化、極性反転といった電荷蓄積挙動を複雑にする要因にさらされることになる。したがって、以下にそれらを考慮した空間電荷特性について、DC組成モデルケーブルを用いて検討した結果を述べる。供試料・温度条件は、3.3.1項と同様であるが、課電電界は25 kV/mmとした。また、ヒートサイクルに関しては、8時間通電ON（導体温度90℃）、16時間通電OFFとして試験を実施した。

3.3.3 極性反転下での電荷挙動

図8に、正極性課電後（5時間）、負極性に反転した後の電界分布変化を示した。正極性においても電荷が飽和した後の電界分布は、図4と同様であり外導側が高く内導側が低い電界分布となっている。また図より、極性を反転した直後では内導側電界が強調され、外導側電界が緩和された電界分布となることがわかる。これは、正極性電圧下で蓄積した内導近傍のホモ電荷が、負極性電圧ではヘテロ電荷として作用するためであり、ストレス寄与係数の考え方¹¹⁾と一致することがわかる。反転後は、時間の経過とともに正極性で観察された定常的な電界分布へと変化して行き、5時間後には電荷挙動が安定した状態となることがわかる。

このように、極性反転直後には反転前の蓄積電荷の影響により内導側の電界が強調されるが、その近傍で新たな電荷注入など、さらに電界強調を促進するような変化は生じないことが分かった。

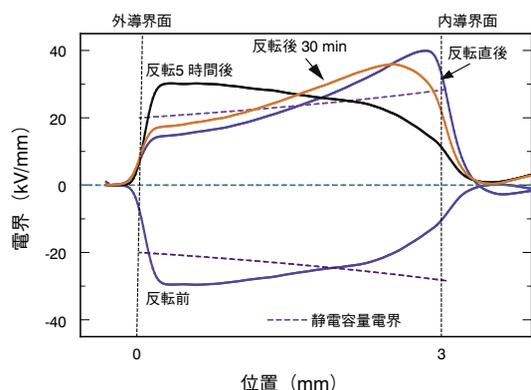


図8 極性反転時の電界分布変化
Variation of field distribution in polarity reversal

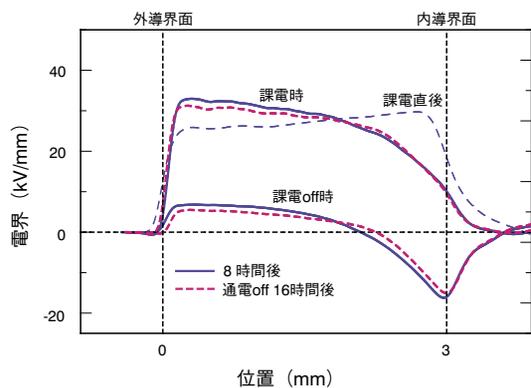


図9 ヒートサイクルにおける電界分布変化
Variation of field distribution under loading cycle

3.3.4 ヒートサイクル下での電荷挙動

図9は、ヒートサイクル下における電荷挙動を示した結果である。8時間後の電界分布は既に述べたとおり、外導側が高く内導側が低くなっている。一方、通電OFF後16時間経過しても、電界分布はほとんど変化せず、常温下では電荷蓄積が生じていないことがわかる。これは、常温においては、電荷移動度が小さく、また電荷注入も生じ難いためと考えられる。上述の特性は、30サイクル実施しても変化することなく、ヒートサイクル下のDC組成ケーブルにおける電荷蓄積特性は高温下での特性が支配的であることがわかった。

これらの結果より、DC組成ケーブルにおいては、温度・極性が複雑な変化をする場合においても、想定し得ない電界分布が形成されることはなく、電荷挙動が安定していることが確認された。

4. 500 kV 級直流 XLPE ケーブルシステム

4.1 ケーブル設計と初期評価

従来、油浸紙絶縁の直流ケーブルにおける絶縁設計は、最大電界で評価を行う手法が用いられている。また、交流XLPEケーブルにおいては、平均電界で評価を行う手法が用いられている。しかしながら、高分子材料など固体絶縁材料の直流ケーブルにおいてはその絶縁設計手法が十分確立されていなかった。これは、固体絶縁体内部には空間電荷が蓄積することにより電界が歪むため、正確な電界の評価が困難だったからである。しかし、直流電圧下の絶縁体内部電界を評価可能な空間電荷測定技術が進歩したことにより、新たな直流XLPEケーブルの絶縁設計手法が提案されている¹¹⁾。そこで、その設計手法を適用し、モデルケーブルの破壊特性と、空間電荷による電界を考慮した絶縁設計を実施すると、500 kV 級直流XLPEケーブルの所要絶縁厚さは23 mmとなった。そこで、大容量直流送電を目標とした導体サイズ3000 mm²、絶縁厚さ23 mmの500 kV 級直流XLPEケーブルを試作・評価を行い、本ケーブルが500 kV 級直流送電に要求される初期電気特性を満足することを確認した⁶⁾。

4.2 工場接続部の開発・評価

直流ケーブルは長尺で使用されることが多く、工場接続部の開発が必要である。工場接続部構造を選定するに当たっては、導体接続部および補強絶縁体の製造工法の検討が必要となる。直流ケーブルで多く用いられる海底ケーブル構造を考慮した場合、工場接続部の外径をケーブルとほぼ同径（準同径）にすることが必要である。したがって、導体接続には、接続時の導体露出長が短く、接続部全長を短くできる導体一括溶接法を適用した。また、補強絶縁体の製造工法としては、補強絶縁体厚さをケーブルと同等にできると考えられることから、超高電圧交流XLPEケーブルに使用されているEMJ工法¹²⁾を適用した。図10に工場接続部の概略を示した。

表1に、前述の500 kV 級直流XLPEケーブルを用いて工場接続部を製造し、それらの機械特性・初期電気特性に関する試験を実施した結果を示した。表より、今回製造したケーブルおよび工場接続部は500 kV 級直流ケーブルシステムに要求される性能を満足していることがわかる。

さらに、一重鉄線外装付きの500 kV 級直流XLPEケーブル

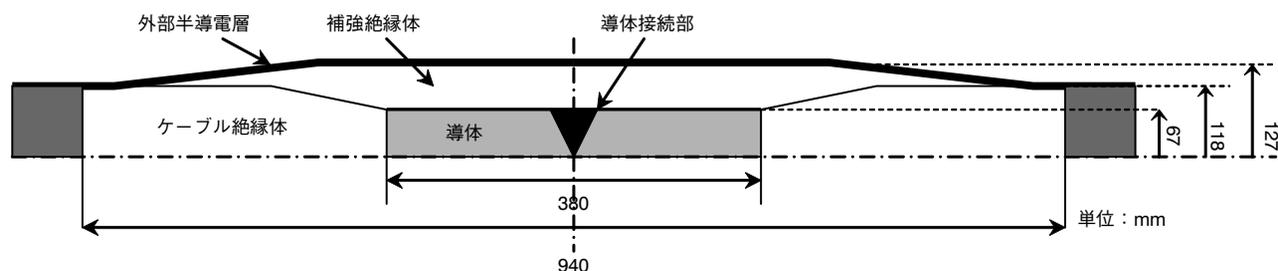


図10 工場接続部の構造
Construction of factory joint for 500 kV DC XLPE cable

表1 500 kV 直流 XLPE ケーブルおよび工場接続部の初期特性評価結果
Electrical and mechanical properties of 500 kV DC XLPE cable and factory joint

	ケーブル+工場接続部 (陸上ケーブル構造)	ケーブル+工場接続部 (海底ケーブル構造)	要求性能
機械試験履歴	曲げ試験：直径 4 m ねじり試験：7.2°/m	引っ張り曲げ試験 張力：245 kN 曲げ直径：8 m	—
直流耐電圧	良好	—	1200 kV / 3 h
極性反転耐電圧	良好	良好	± 750 kV / 3 cycles
雷インパルス耐電圧	良好	—	± 1250 kV / 3 times
直流重畳雷インパルス耐電圧	良好	良好	DC 500 kV + Imp 850 kV

および工場接続部を製造し、布設相当の機械履歴(引張り曲げ試験)を加えた試料の電気特性についても確認した。その結果を表1に合わせて示した。よって、開発した直流 XLPE ケーブルは、布設相当の機械履歴が加わった後も要求される電気絶縁性能を満足していることがわかった。

4.3 Pre-Qualification 試験

開発した500 kV 級直流 XLPE ケーブルシステムを商用線路に適用する場合、PQ 試験を実施していることが必要である。直流 XLPE ケーブルの PQ 試験に関しては、CIGRE により提案されている方法¹³⁾があるので。その試験条件に準じて長期課通電試験・残存性能試験を行った。

4.3.1 供試試料

供試試料は、500 kV 級直流固体絶縁ケーブルおよび工場接続部1個、GIS 端末とし、試験線路の全長は約50 m とした。ケーブル構造は、表2に示す通りであり、通電試験を行うため、ポリエチレン防食層が最外層とした。また、接続部構造は、図10に示した通りとした。

4.3.2 長期課通電試験

試験期間・電圧・温度条件については、表3に示す通りとした。また、試験レイアウトを図11に示した。

4.3.3 残存性能確認試験

長期課通電試験で絶縁破壊が生じなければ、供試試料を用いて残存性能試験を実施する。残存性能試験として、直流重畳逆極性雷インパルス耐電圧試験を以下の条件で実施することとした。

- 温度：導体通電により導体90℃
- DC 前課電時間：3時間
- DC + 500 kV 雷インパルス - 1000 kV / 10回
- DC - 500 kV 雷インパルス + 1000 kV / 10回

上記試験条件に基づき試験を実施した結果、長期課通電試験および残存性能試験を通して絶縁破壊を生じることなく試験を完了することができた。したがって、開発した500 kV 級直流

表2 PQ 試験ケーブル構造表
Dimension of cable for PQ test

項目	単位	数 値		
		ケーブル	工場接続部	
導 体	断面積	公称mm ²	3000	3000
	構成	—	5分割圧縮	Vカット溶接
	外径	mm	67	67
内部半導電層	約mm	2.5	3	
絶縁体	公称mm	23	26	
絶縁外径	約mm	118	125	
外部半導電層	約mm	1.0	1.5	
鉛被	mm	4.5	4.7	
防食層	PE mm	6.0	7.0	
標準外径	約mm	145	154	

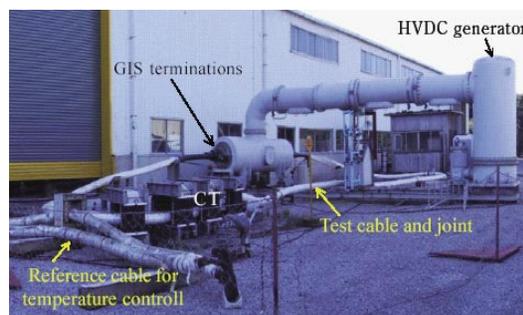


図11 長期課通電試験レイアウト
Layout of cable for long-term test

表3 500 kV直流XLPE ケーブルシステムの長期課通電試験条件
Long term test conditions for 500 kV DC XLPE cable system

試験項目		①負荷サイクル	②負荷一定	③無負荷	④負荷サイクル					
電圧条件		温度条件 導体 90℃/2h	導体90℃一定	常温	導体 90℃/2h					
		通電条件 8 h ON/16 h OFF	常時通電	通電なし	8 h ON/16 h OFF					
直流電圧 (計284日)	+750 kV	期間(日)	20	10	20	10	120	20	12	
	-750 kV	期間(日)		20	10	20		20	12	
極性反転 ^{*1} (計81日)	±700 kV	期間(日)				20			40	21
		回数(回)				60			120	63

※1：負極性反転は、8時間毎。

XLPEケーブルシステムは、HVDC送電線路に必要な特性を満たしていることが確認された。

5. おわりに

以上の点から、極性基を持つポリエチレンを絶縁材料は、交流送電ケーブルに使用されているXLPE材料に比べて直流下での電気特性や空間電荷特性に優れていることが明らかとなり、直流XLPEケーブル材料として適していることが確認された。

次に、その絶縁材料を用いて500 kV級直流XLPEケーブルおよび工場接続部を設計・製造・評価した結果、良好な初期電気特性を有していることを確認した。

最後に、500 kV級直流XLPEケーブルシステムに関するPQ試験を行った結果、絶縁破壊することなく完了したので、長期信頼性も満足することが確認できた。

以上のことから、開発した直流XLPEケーブルシステムはHVDC送電線路に適用し得る十分なパフォーマンスを持っているものと言える。

参考文献

- 1) Fukawa, Kawai, Okano, Sakuma, Asai, Kanaoka, and Yamanouchi: "Development of 500 kV XLPE Cables and Accessories for Long Distance Underground Transmission Line Part III, Electrical Properties of 500 kV Cables," IEEE PD, **11** (1996), No.2
- 2) 超高压電力研究所：高电压直流ケーブル試験研究委員会報告(1977)
- 3) 例えば、寺島、鈴木、原、渡辺：±250kV直流CVケーブルの開発、平成8年電気学会電力・エネルギー部門大会 I-41 (1996)
- 4) 寺島、川上、武藤、一柳：直流固体絶縁ケーブルの基礎開発、平成9年電気学会全国大会(1997), 1830.
- 5) 寺島、渡部、丸山、武藤：直流固体絶縁ケーブルの基礎開発(その2)、平成9年電気学会電力・エネルギー部門大会(1997), 468.
- 6) 寺島、渡部、丸山、武藤：直流固体絶縁ケーブルの基礎開発(その3)、平成10年電気学会電力・エネルギー部門大会(1998), 392.
- 7) 寺島、加藤、丸山、平野、田中、武藤：直流固体絶縁ケーブルの開発(その4)、平成11年電気学会全国大会(1999), 1759.
- 8) Terashima, Watanabe, Maruyama, Tanaka, and Muto: "Development of XLPE cable under DC voltage," Jicable '99 B7-3 (1999)
- 9) 例えば、天川、犬石：酸化および未酸化ポリエチレンの熱刺激電流、電学論A, **93** (1973), No.12
- 10) 例えば、Maeno, Takada, and C.M.Cooke: "Measurement of spatial charge distribution in thick dielectrics using pulsed electroacoustic method," IEEE Trans. EI-23 (1988)

- 11) 寺島、村田、武藤、魚住、吉田：直流CVケーブルの絶縁設計に関する一考察、電学論B, **119** (1999), No.2
- 12) Takeda, Izumi, Asari, Nakatani, Noda, Yamaguchi, and Tan: "Development of 500 kV XLPE Cables and Accessories for Long Distance Underground Transmission Line Part IV, Electrical Properties of 500 kV Extrusion Molded Joints," IEEE PD, **11** (1996), No.2
- 13) "TESTING DC EXTRUDED CABLE SYSTEMS," ELECTRA (2003), No.206