



## 超高圧 DC-XLPE ケーブルの開発

村田 義直\*・坂 巻 正 敏・阿 部 和 俊  
井上 喜之・眞 尾 晶 二・柏 山 誠 司  
西川 哲・水 津 亮・渡 辺 傑  
浅井 晋也・片 貝 昭 史

Development of High-Voltage DC-XLPE Cable — by Yoshinao Murata, Masatoshi Sakamaki, Kazutoshi Abe, Yoshiyuki Inoue, Shoji Mashio, Seiji Kashiyama, Satoshi Nishikawa, Makoto Suizu, Masaru Watanabe, Shinya Asai and Shoshi Katakai — We have developed a DC-XLPE (cross-linked polyethylene) insulating material that has excellent properties for DC voltage applications. Our high-voltage DC-XLPE cable and factory joints using this material showed positive results in a long-term test partly consisting of a polarity reversal test at a rated voltage of up to 500 kV. In addition, this cable passed 250 kV pre-qualification tests and type tests, which also include polarity reversal tests, in accordance with the test conditions specified by the CIGRE TB 219. All the tests were conducted at 90°C and the test results showed that our HVDC XLPE cable and fittings are capable of normal operation and polarity reversal operation at 90°C in actual HVDC link lines. J-Power Systems Corporation is now ready to supply this cable and related products to the market.

Keywords: HVDC, XLPE cable, type test, PQ test, CIGRE Technical Brochure

### 1. 緒 言

日本国内における直流送電線路としては、北海道と本州を結ぶ北本連系線、および四国と本州を結ぶ紀伊水道直流連系線がある。海外での直流送電は大陸間連系のような長距離送電への適用が主であったが、洋上風力発電への適用も近年は増加傾向にある。再生可能な自然エネルギーとして、特に欧州で盛んに導入が進んでいる洋上風力発電は、当初は陸に近い海域に風力発電設備が設置されていたが、導入が進むにつれてスペースの制約により沖合へと移っている。このため風力で発電した電力を陸地まで送電するための距離が長くなってきていることから、洋上風力電力の送電技術として、さらに直流送電技術に注目が集まっている。

直流送電には、従来は MI ケーブル (Mass Impregnated cable) や OF ケーブル (Oil-Filled cable) といった油浸絶縁ケーブルが適用されていたが、近年では環境保護の意識が高まり、漏油の恐れがない押出絶縁ケーブルが望まれるようになってきた。

しかしながら、現在の交流送電に広く適用されている CV ケーブル (Cross-Linked Polyethylene insulated Vinylchloride sheath cable) は、直流電圧を印加すると絶縁体である架橋ポリエチレン (Cross-Linked Polyethylene を XLPE と略す) に空間電荷の蓄積が顕著となり、直流絶縁上の多くの問題を有するものであった。そこで筆者らは、直流特性に優れた DC-XLPE 絶縁材料を開発し、更にこれを絶縁体として用いた DC-XLPE ケーブルを開発した。本報告では、直流用に開発した DC-XLPE 絶縁材料の優れた

直流特性および、実サイズケーブルとその付属品に関する CIGRE Technical Brochure に準拠した Type 試験と Per-qualification 試験 (PQ 試験) の実施状況を報告する。

### 2. 直流ケーブル技術の変遷と DC-XLPE ケーブル開発の歴史

本章では直流ケーブル技術の変遷の概略と DC-XLPE ケーブルの開発経緯を紹介する。

1954年、スウェーデン本土とゴットランド島との間に世界で初めて直流送電の運転が開始された<sup>(1)</sup>。この時のケーブルは、高粘度絶縁油を含浸した絶縁紙を絶縁体に用いる MI ケーブルであった。また、高圧化・大容量化には、低粘度絶縁油を含浸し、加圧状態とした絶縁紙を絶縁体に用いる OF ケーブルが採用された。以後、近年に至るまで、MI ケーブルか OF ケーブル、すなわち油浸絶縁ケーブルが直流送電ケーブルの主流である。油浸絶縁ケーブルの技術変遷は、高電圧化、大容量化 (大導体サイズ化)、並びに長尺化の傾向にある<sup>(1)</sup>。

一方、XLPE などを導体上に押出成形する押出絶縁ケーブルは、1999年に Gotland で直流 80kV 線路に初適用された<sup>(2)</sup>。ここでは、交直変換機として VSC (Voltage Source Converter) が使用されている。VSC では、電力を送る方向を反転する際、電圧の極性を反転させることが不要であるため、空間電荷蓄積による性能低下の影響を受けにくく、押出絶縁ケーブルの直流適用を容易にしている。以後、最

近では、環境保護の意味からもVSCとセットで押出絶縁ケーブルが直流送電に適用されるケースが増えてきている。最近では、Trans Bay Cableプロジェクトで直流200kV送電が実現されており<sup>(3)</sup>、本プロジェクト運開時点(2010年)で押出絶縁ケーブルの世界最高直流運転電圧であった。

表1に、筆者らが実施してきたDC-XLPEケーブル開発の歴史を示す。日本国内においては、1970年代に交流用のXLPEケーブルをそのまま直流用として適用すべく長期課通電試験が実施されたが、絶縁体中に蓄積する空間電荷などの影響で、直流絶縁上の問題が多いことが明らかとなった<sup>(1)</sup>。この結果を受け、1984年から直流用XLPE絶縁材料の基礎開発を開始した。その後、1988年から±250kV級DC-XLPEケーブルの研究開発、1993年から±500kV級DC-XLPEケーブルの研究開発を実施した。この一連の研究開発は、電源開発(株)殿との共同研究である。

直流用XLPEは、開発当初は汎用の無機充填剤を添加したものであったが、その後の高電圧化の中で、無機充填剤の微細化、高純度化、高分散化を進め、最終的には無機のナノ粒子を均一に分散させたナノコンポジット絶縁材料を完成した。当該材料の特性については、3章で詳しく述べる。

1995年に±250kV DC-XLPEケーブル並びに工場ジョイント(FJ)の長期実証試験<sup>(4)</sup>を、また、2001年には±500kV DC-XLPEケーブル並びにFJの長期実証試験<sup>(5)</sup>、<sup>(6)</sup>を実施し、実用性能の実証を完了した。さらに、押出絶縁ケーブルの直流試験法に関する推奨案CIGRE Technical Brochure 219<sup>(7)</sup>(以下、TB 219)が2003年に発行されたことを受け、TB 219に準拠したType試験とPQ試験を順次実施した。

一方、実線路に対しては製造ロットとして数kmものケーブルコアを製造する必要があることから、並行して長尺押出性など、DC-XLPE絶縁材料の大量生産技術の確立

を進めた。そして、2009年には電源開発(株)殿の北本直流連系線を受注したことから、最終的な生産技術の実証のため、同設備に向けた、直流250kV DC-XLPEケーブルと付属品を製造し、Type試験を2010年に、PQ試験を2011年にそれぞれ終了した。北本直流連系線向けDC-XLPEケーブルと付属品は、2012年夏に布設工事を完了し、2012年8月に、直流362.6kV(=1.45PU)×15分のCIGRE TB 219に準拠した布設後試験に合格した<sup>(8)</sup>。

現在は、さらなる高電圧化を目指し、DC400kV XLPEケーブルとFJ、並びに中間接続部、気中終端接続部のPQ試験を実施中である。

表1に示した長期実証試験、Type試験、並びにPQ試験の詳細については、4章で述べる。

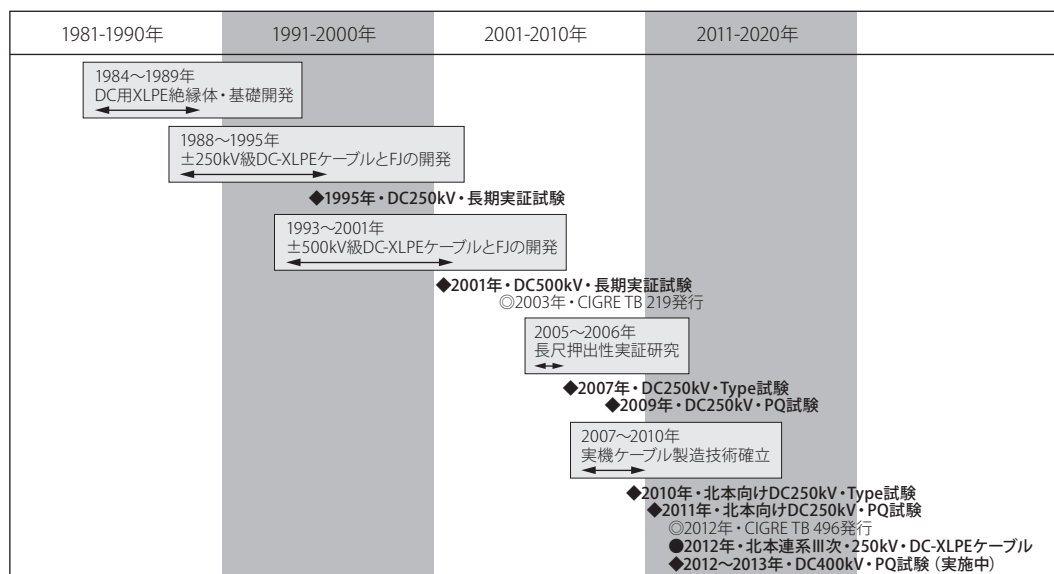
### 3. DC-XLPE絶縁材料の直流特性

交流送配電に広く適用されているCVケーブルは、架橋ポリエチレン(XLPE)を絶縁材料として用いている(以下、AC-XLPEと表記)。AC-XLPE絶縁材料は、交流電圧に対しては優れた絶縁性能を発揮するが、直流電圧に対しては、空間電荷蓄積などが原因で、十分な性能を発揮することができない。XLPE絶縁体中にナノサイズの無機フィラーを添加することで、優れた直流特性が得られる。ナノ粒子を添加した直流用XLPE絶縁材料(以下、DC-XLPE)は、AC-XLPEに比べて以下の特徴を有する。

- 体積抵抗率が高い(3-1項参照)
- 空間電荷蓄積が少ない(3-2項参照)
- 直流寿命が長い(3-3項参照)
- 直流破壊強度が高い(3-4項参照)

以下、これらのDC-XLPEの各種直流特性をAC-XLPEと比較しながら示す。

表1 DC-XLPEケーブル開発の歴史



**3-1 体積抵抗率** プレス加工により成型したシートサンプルを用いて、DC-XLPE並びにAC-XLPEの体積抵抗率を評価した。シート厚さは約150 $\mu\text{m}$ とした。体積抵抗率は、測定開始から10分後の直流もれ電流値から評価した。測定温度は、30、60並びに90 $^{\circ}\text{C}$ とした。測定電界は、40、60並びに80kV/mmとした。

体積抵抗率を図1、図2に示す。図1は体積抵抗率の電界依存性、図2は温度依存性を示したものである。図1、図2に示したとおり、測定した温度範囲、電界範囲において、DC-XLPEは、AC-XLPEの約100倍の体積抵抗率を有している。

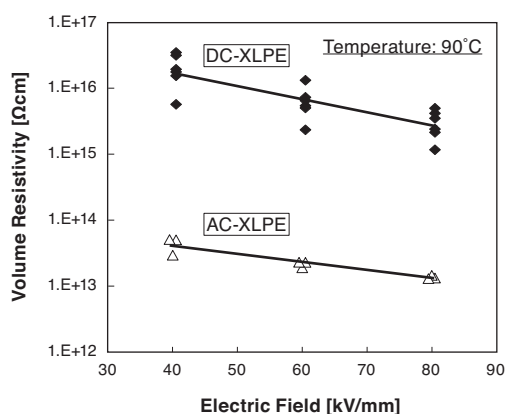


図1 DC-XLPEの体積抵抗率の電界依存性

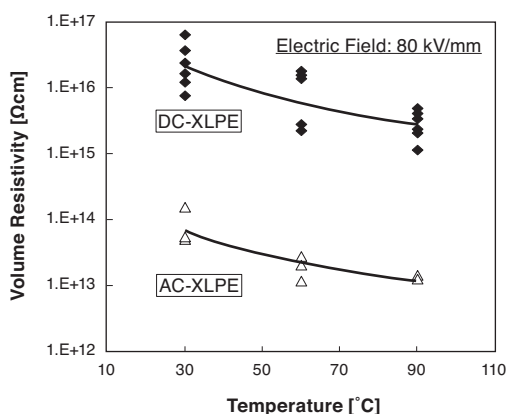


図2 DC-XLPEの体積抵抗率の温度依存性

**3-2 空間電荷特性** パルス静電応力法 (PEA法)を用いて、DC-XLPE並びにAC-XLPEの空間電荷分布を評価した。測定には、プレス加工により厚さ200~300 $\mu\text{m}$ に成型したシートサンプルを用いた。平均電界が20並びに50kV/mmとなる直流電圧を印加し、10秒間隔で空間電荷分布の経時変化を測定した。測定温度は30 $^{\circ}\text{C}$ とした。

図3にDC-XLPEの50kV/mm印加時の空間電荷分布および電界分布を示す。DC-XLPEでは試料内部に空間電荷が蓄積しておらず、時間経過によってもほとんど変化していない。また、電界分布においてもほぼ均一であることがわかる。これに対して、AC-XLPEの50kV/mm印加時の空間電荷分布および電界分布は図4のとおりであり、時間

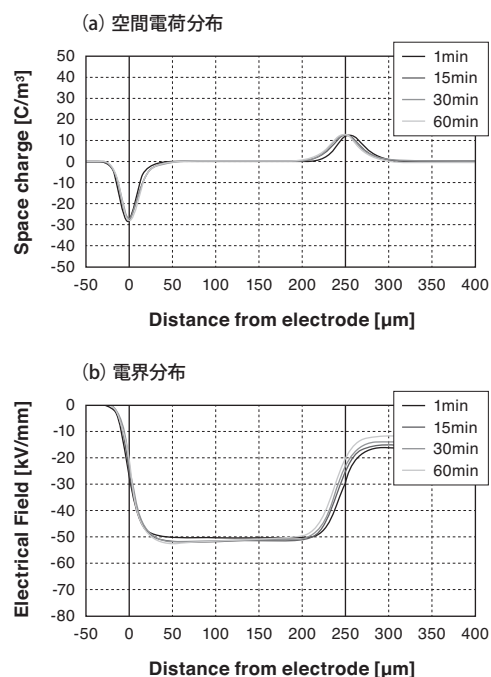


図3 DC-XLPEの空間電荷分布と電界分布

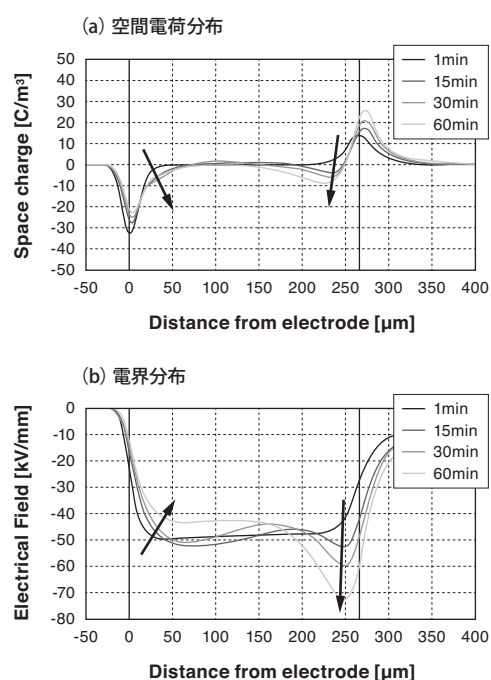


図4 AC-XLPEの空間電荷分布と電界分布

経過に伴い、空間電荷が蓄積され、電界分布が大きく歪んでいくことがわかる。特に陽極近傍では負電荷が蓄積することにより、大きな電界強調が発生している。

そこで、空間電荷による電界への影響を具体的に数値化するため、以下の(1)式により定義されるFEF (Field Enhancement Factor) を求め、その時間変化を評価した。

$$FEF = \frac{\text{試料内部の最大電界 [kV/mm]}}{\text{印加電圧 [kV]} / \text{試料厚さ [mm]}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

図5にDC-XLPEとAC-XLPEのFEFの経時変化を示す。図中には、直流電界20kV/mmと50kV/mmの場合の結果を併記した。測定開始から60分までの範囲では、DC-XLPEのFEFは1.1以下と小さく、なおかつ、時間経過に対してほとんど変化しないことがわかる。一方、AC-XLPEの場合は、FEFが時間経過とともに明らかに増加する傾向にある。更に、FEFの増加の割合は、20kV/mmに比べて50kV/mmの場合の方が大きかった。

DC-XLPEの空間電荷特性の経時変化について、さらに長時間に亘って評価した。図6は、直流50kV/mmにおけるDC-XLPEのFEF経時変化を数日オーダーで評価した結果である。図6から、DC-XLPEのFEFは、数日のオーダーまで1.1以下で安定していることがわかる。以上の結

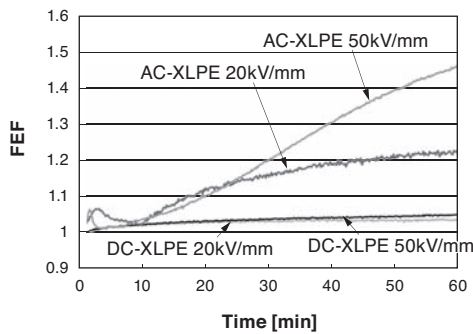


図5 DC-XLPEとAC-XLPEのFEFの経時変化

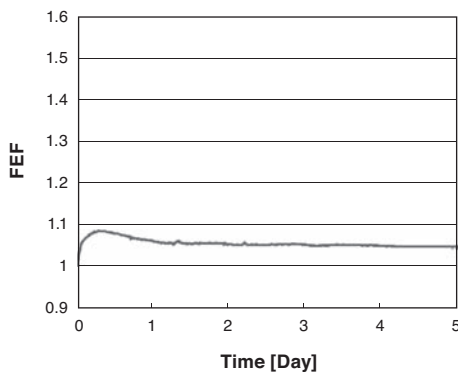


図6 DC-XLPEのFEFの経時変化 (50kV/mm, 30°C)

果は、DC-XLPEではナノ粒子の添加により、数10kV/mmオーダーの電界下において、AC-XLPEに比べ空間電荷蓄積量が少なく、試料内部における電界強調も極めて小さく抑止されることを示している。

3-3 直流V-t特性 プレス成型により、厚さ約200μmのDC-XLPEシート並びにAC-XLPEの試料を作製し、直流V-t特性を評価した。AC-XLPEにおいては、試料内に含まれている架橋剤分解残渣が前述3-2項の空間電荷特性に影響することが判っているので、架橋残渣を除去して長期課電中の影響を低減する目的で、シート試料に80°C・3日間の真空乾燥処理を施した。一方、DC-XLPEにおいては、このような特別な処理は実施していない。

電極の有効部直径は25mmとし、シート試料を高压電極と接地電極との間に設置してシリコン油中で直流電圧を印加し、絶縁破壊が生じるまでの時間を評価した。試験は90°Cで実施した。

図7にDC-XLPE、並びにAC-XLPEの直流V-t特性を示す。図7の縦軸は、試料に印加した電圧を試料厚さで除した平均電界E<sub>mean</sub>を示している。横軸は、試料に電圧を印加してから絶縁破壊が生じるまでの時間を示している。図7の結果から、DC-XLPE、AC-XLPEのいずれにおいても、直流破壊強度は経過時間に対して低下する特性を示しているが、DC-XLPEとAC-XLPEとを比較すると、DC-XLPEの方が絶縁破壊の絶対値が高く、寿命も長いことが判る。ここで、電界Eと破壊までの時間tの間に、(2)式の関係が成立すると仮定し、寿命指数nを評価した。

$$E^n \times t = const. \quad \dots\dots\dots (2)$$

その結果、DC-XLPEはn = 26、AC-XLPEはn = 13が導出された。本結果は、DC-XLPEではナノ粒子の添加によって、直流電圧下での寿命特性が向上することを示している。

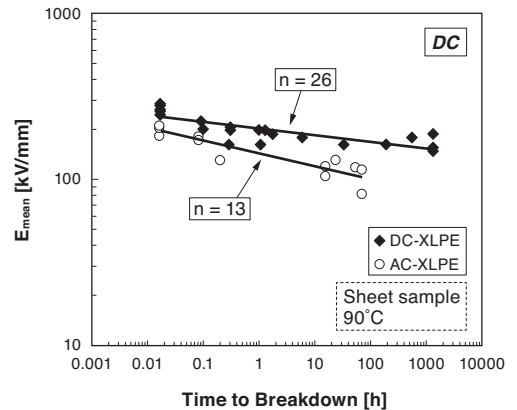


図7 DC-XLPEとAC-XLPEの直流V-t特性

**3-4 モデルケーブルの直流破壊特性** DC-XLPEを絶縁体とした絶縁厚さ9mmのモデルケーブルを製造した。導体サイズは200mm<sup>2</sup>とし90℃の直流破壊試験に供試した。

破壊試験結果<sup>(5)</sup>を、AC-XLPEケーブルの破壊試験結果<sup>(9)</sup>と対比させて図8に示す。図8から、DC-XLPEモデルケーブルの直流破壊強度は、AC-XLPEモデルケーブルの2倍以上であることがわかる。

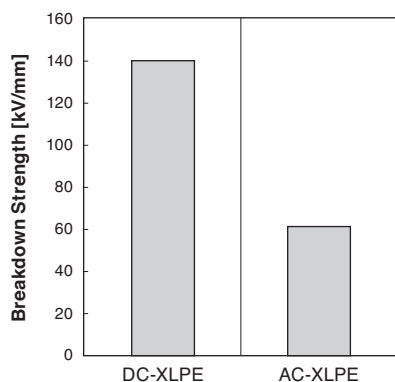


図8 モデルケーブルのDC破壊強度 (90℃)

**3-5 優れた直流特性発現のメカニズム** これまでに述べたように、DC-XLPEはAC-XLPEに比べて、直流初期破壊強度が高く、直流課電下での絶縁破壊までの寿命も長いとの良好な特性を示す。このような特性を示す理由として、以下の2つの機構が考えられる。

①DC-XLPEはAC-XLPEに比べて直流課電下での空間電荷蓄積量が少なく、絶縁体内での電界強調が極めて小さいため、初期破壊強度ないし一定電界下での破壊まで時間が長くなる。

②DC-XLPEはAC-XLPEに比べ体積抵抗率が高く、局所的なジュール発熱による局所熱破壊が発生しにくくなるため、初期破壊強度ないし一定電界下での破壊まで時間が長くなる。

実際には、これら2つの効果が相互に作用して、直流破壊強度の向上と長寿命化をもたらしているものと考えている。ナノ粒子に添加による体積抵抗率の向上や空間電荷蓄積の抑止といった効果は、ナノ粒子を添加した低密度ポリエチレンでも確認されている。また、このような効果は、他にも多く報告されている<sup>(10),(11)</sup>。

このような空間電荷の蓄積が少ない特性や体積抵抗が大きい特性は、どのような機構でもたらされているかについても種々の検討が行われている。例えば石本らは、ナノコンポジット材料の熱刺激電流を測定し、ナノ粒子が新たなトラップ準位を形成し、電荷を強く拘束していることを示しており<sup>(12)</sup>、また、Maezawaらは、ナノ粒子の周辺にポ

テンシャル井戸が形成されことで、ナノ粒子が深いトラップサイトとして作用するメカニズムを提案している<sup>(13)</sup>。このようなトラップサイトが絶縁体中に形成された場合、電気伝導の主体と考えられる内部キャリアが拘束され、ホッピング伝導を抑制し、結果として内部キャリアの移動度が小さくなる、すなわち体積抵抗率が高くなると考えられる。

次に、内部キャリアによる空間電荷形成について考える。内部キャリアは、印加電界によって徐々に対向電極へと移動し、絶縁体中に偏在することで空間電荷を形成すると考えられる。ナノ粒子を添加した場合、電荷を持って移動するキャリアは、絶縁体中に均一分散したナノ粒子にトラップされるため、結果としてキャリアは局在化することなく、顕著な空間電荷の濃淡は発生しない、すなわち空間電荷蓄積が抑止されるものと考えられる。

電極からの注入電荷については、次のように考えられる。電極から注入された電荷は電極近傍でナノ粒子が形成する深いトラップに拘束され、当該部分に留まる。このトラップされた電荷は、電極近傍の電界を緩和する方向に働くため、さらなる電荷注入が抑制される。このことにより、空間電荷の形成が制限されると考えられる。実際、ナノコンポジット材料では、電極前面にホモ電荷が形成されるケースが多く、図3に示したDC-XLPEの空間電荷分布では、僅かではあるが電極前面にホモ電荷が蓄積している様子が見られる。

以上に述べたように、DC-XLPE絶縁材料では、絶縁体中に均一分散したナノ粒子がトラップサイトとして作用し体積抵抗率の向上、空間電荷蓄積の抑止といった効果を発揮するものと考えられる。そして、このふたつの効果が相乗して作用し、結果として、直流破壊強度の向上と長寿命化といった、直流ケーブルとして良好な特性が発揮されるものと考えられる。

## 4. 実規模DC-XLPEケーブル並びに付属品の長期性能実証

2章で述べたように、DC-XLPEケーブルは、基礎開発の開始から実用化に至るまでの間に、幾つかの長期実証試験を段階的に実施してきた。表2は、DC-XLPEの長期実証試験の実績をまとめたものである。本章では、表2に示した長期試験のうちの幾つかについて、その詳細を述べる。

**4-1 500kV級ケーブル並びにFJの長期実証試験** 表1に示したように、DC-XLPEケーブルは1984年から基礎開発を開始し、±250kV級開発、±500kV級開発と順次ステップアップを図ってきた。そして、直流ケーブルとしての基本的な長期性能を実証する目的で、直流500kV級ケーブルと工場ジョイント(FJ)を製造し、その長期実証試験を実施した<sup>(5),(6)</sup>。ケーブル絶縁厚さは23mmとした。また、双極3000MWの送電容量を想定して、導体サイズは3000mm<sup>2</sup>とした。

表2 DC-XLPEケーブルと付属品の長期試験実績

試験終了年	運転電圧	CIGRE TB	試験種別	供試物
1995	250kV	—	長期試験	ケーブル、FJ
2001	500kV	—*1	長期試験	ケーブル、FJ
2007	250kV	219	Type 試験	ケーブル、FJ、気中終端接続箱
2009	250kV	219	PQ 試験	ケーブル、FJ、気中終端接続箱
2010	250kV	219	Type 試験	ケーブル、FJ、気中終端接続箱、なぎさジョイント*4
2011	250kV	219	PQ 試験	ケーブル、FJ、気中終端接続箱、なぎさジョイント*4
2011	320kV	219*2	課通電試験*2	ケーブル、FJ、気中終端接続箱、なぎさジョイント*4、陸上ジョイント
2013*3 (実施中)	400kV	496	PQ 試験	ケーブル、FJ、気中終端接続箱、なぎさジョイント*4、陸上ジョイント

1995年実施の長期試験は、導体最高温度85℃で実施。その他の試験は、導体最高温度90℃で実施した。  
 全ての試験は、極性反転試験を含む条件で実施した。

\*1：寿命指数n=15を用いた等価換算寿命40年に相当する試験条件とした。(V<sup>n</sup>×t=const.)

\*2：CIGRE Type 試験のロードサイクル試験を実施

\*3：2013年に試験終了する予定

\*4：海底ケーブルと陸上ケーブルを海岸近くの陸上（なぎさ）で接続するジョイント

この長期実証試験は、CIGRE TB 219が公表される前に実施したため、その試験条件はTB 219とは一致していないが、試験条件の考え方はTB 219と概ね同等であり、特に試験電圧と試験時間はV-t則に基づいて決定している。本試験での試験電圧と試験時間はV-t則を仮定し、寿命指数としてn=15を用いて、実運転40年と等価となる条件とした。試験温度は90℃とした。極性反転試験も含んでいる。

長期実証試験は、2001年に完了し、その後、ケーブルとFJは、インパルス破壊試験に供試した。残存Imp破壊電圧は1950kVであり、初期破壊電圧と同等であった。これらの結果から、製造したケーブルとFJは、十分な性能があることが確認され、極性反転を含む、運転温度90℃での実運転に適用可能であることが検証された。

4-2 北本直流連系線向け±250kV DC-XLPEケーブルと付属品のType試験並びにPQ試験 表2に示したように、250kV級Type試験とPQ試験は複数回実施している。本節では、2010年から2011年に実施した最新の250kV級試験結果について述べる。

電源開発(株)が所有する北本直流連系設備に向け、直流250kV DC-XLPEケーブルと付属品を製造し、PQ試験とType試験に供試した。本直流連系設備は、双極1回線で、送電容量は600MWである。海底ケーブル用として、工場ジョイント(FJ)も製造した。FJの補強絶縁層はテープ巻きモールド方式によって成形した。海底ケーブルと陸上ケーブルとを接続するなぎさジョイント(TJ)もType試験とPQ試験に供試した。油浸絶縁紙とコンデンサーコーンによって構成された気中終端接続箱(EBA)もType試験とPQ試験に供試した。

本試験は、CIGRE TB 219で推奨されているLCC

(Line Commutated Converter) 線路向けの、極性反転試験を含む試験条件に準拠した条件で試験を実施した。試験温度は90℃とした。

Type試験は2010年に無事に終了した。また、TB 219に準拠した250kV級PQ試験は、2011年に完了した。写真1にPQ試験の全景を示す。これらの結果から、HVDC XLPEケーブルと付属品は、実際の直流線路において、90℃の通常運転並びに極性反転運転に適用可能であることが検証された。

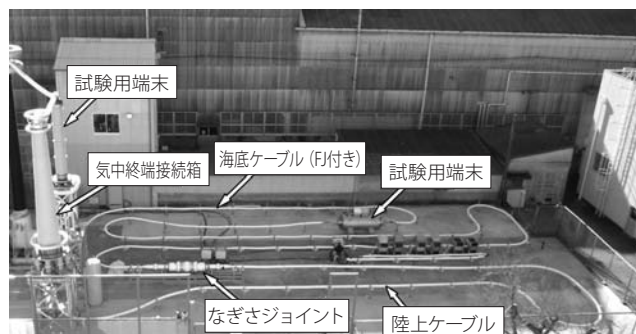


写真1 250kV級PQ試験

北本直流連系線向け海底ケーブルの外観を写真2に示す。ケーブル並びに付属品は、2012年夏に布設工事を完了し、2012年8月に直流362.6kV(=1.45PU)×15分のCIGRE TB 219に準拠した布設後試験に合格した<sup>(8)</sup>。

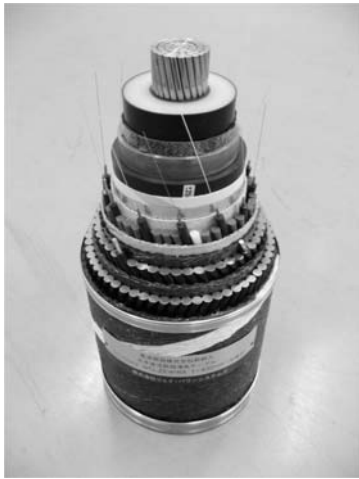


写真2 北本直流連系線向け±250kV DC-XLPE 海底ケーブルの外観

**4-3 400kV ケーブルと付属品の PQ 試験** 双極 1000MW を想定して、DC 400kV XLPE 海底ケーブル 1000mm<sup>2</sup> とその各種接続部を試験に供試した。ケーブルの外観を写真3に示す。

ケーブルとFJは、曲げ最小直径6mのコイル取り試験に供試した。コイル試験は3回実施した。次に、引っ張り曲げ試験を実施した。引っ張り曲げ試験は、直径8mのシーブを用いて、引っ張り張力134kNで実施した。試験は3回実施した。これらの機械試験を実施した後に、ケーブルとFJを試験線路に布設した。

陸上ジョイントとして、ワンピースゴムユニットで構成したプレモールドジョイント (RBJ) と 導体固定式のプレハブジョイント (PJ) を開発し、初期試験後にPQ試験に供試した。

2組の気中終端接続箱をPQ試験に供試した。ひとつは磁器碍管として、もうひとつはポリマー碍管とした。



写真3 400kV 級 DC-XLPE ケーブル

図9にPQ試験経路のレイアウトを、写真4に試験実施状況を示す。400kV PQ試験に先行して、LCCシステム向け320kV級のType試験条件に準拠した、ロードサイクル試験を実施した。本試験は既に完了しており、引き続き、CIGRE TB 496<sup>(14)</sup>で推奨されているLCC線路向けの、極性反転試験を含む試験条件に準拠した条件で400kV PQ試験を実施中である。試験温度は90℃である。このPQ試験は、2013年に終了する予定である。

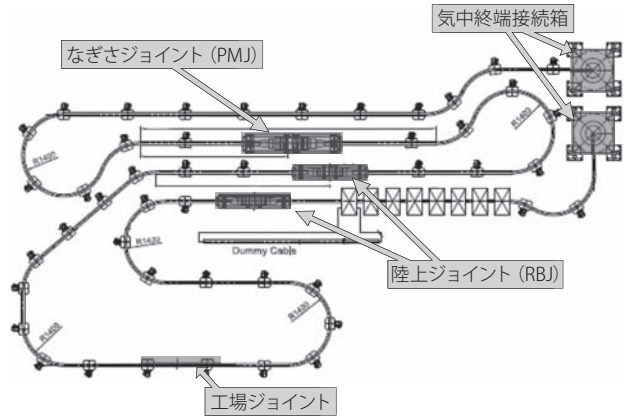


図9 400kV 級 PQ 試験の試験レイアウト



写真4 400kV 級 PQ 試験実施状況

## 5. 結 言

筆者らが開発したDC-XLPE絶縁材料は、DC課電下において非常に優れた特性を発揮するものであり、本材料を用いたDC-XLPEケーブルは、500kV級までの長期実証試験を既に完了している。また、最近では、CIGRE TB 219に準拠した試験条件での250kV級Type試験とPQ試験を完

了しており、継続して CIGRE TB 496 に準拠した 400kV 級 PQ 試験を実施中である。

これらの長期実証試験は、全て極性反転試験を含む、導体温度 90℃ の条件で実施した。以上の結果より、開発した DC-XLPE ケーブルと付属品は、実際の直流連系線において、90℃での通常運転、並びに極性反転運転に適用可能であることが確認できた。

直流送電技術は、従来からの大容量長距離送電への適用のみならず、今後は、洋上風力やメガソーラーといった自然エネルギー技術、あるいは、スマートグリッド技術などと相俟って、自然に優しく高効率な送電を担う技術として、その適用拡大が期待されている。以上に述べたように、筆者らが開発した DC-XLPE ケーブルは、このような時代の要求に十分に定める実用性を有しており、今後、世界中の直流インフラ整備に貢献していきたいと考える。

・本論文の著作権は、(株)ジェイ・パワーシステムズに帰属します。

## 参 考 文 献

- (1) 直流ケーブル技術動向調査専門委員会、「直流ケーブルの技術動向と今後の課題」、電気学会技術報告第 745 号 (1999)
- (2) S. Dodds, B. Railing, K. Akman, B. Jacobson, T. Worzyk, B. Nilsson, "HVDC VSC (HVDC light) transmission – operating experiences", CIGRE 2010, B4\_203\_2010 (2010)
- (3) M. Albertini, S. Franchi Bononi, N. Kelley, M. Marelli, G. Miramonti, A. Orini, G. Perego, G. Pozzati, "Innovation and applications for extruded HVDC cable systems", CIGRE San Francisco Colloquium, B1-2 (2012)
- (4) K. Terashima, H. Suzuki, M. Hara, K. Watanabe, "Research and Development of +/-250 kV DC XLPE Cables", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.13, No.1, pp.7-16 (1998)
- (5) 前川、渡部、浅野、村田、片貝、嶋田、「直流 500kV XLPE ケーブルの開発」、電学論 B、121 巻 3 号、pp.390-398 (2001)
- (6) 前川、山中、木村、村田、片貝、松永、「直流 500kV 海底 XLPE ケーブル」、日立電線 No.21、pp.65-72 (2002)
- (7) Working Group WG21-01 CIGRE, "Recommendation for testing DC extruded cable systems for power transmission at a rated voltage up to 250 kV", CIGRE Technical Brochure 219 (2003)
- (8) Shoshi Katakai, "Nano-Composhite ± 250kV DC-XLPE cable system as practical solution", CIGRE 2012 Contribution、Group Ref. B1、Pref. Subject 3、Question No.1、Registration No.919 (2012)
- (9) Y. Maekawa, A. Yamaguchi, Y. Sekii, M. Hara and M. Marumo, "Development of DC XLPE Cable for Extra-High Voltage Use", Trans. IEE of Japan, Vol.114-B, No.6, pp.633-641 (1994)
- (10) TF D1.16.03 CIGRE, "Emerging Nanocomposite Dielectric", ELECTRA No.226, pp.24-32 (2006)
- (11) M. Nagao, Y. Murakami, Y. Murata, Y. Tanaka, Y. Ohki, T. Tanaka, "Material Challenge of MgO/LDPE Nanocomposite for High Field Electrical Insulation", CIGRE 2008, D1-301 (2008)
- (12) 石本、田中、大木、関口、村田、「LDPE/MgO ナノコンポジットの熱刺激電流—良好な絶縁性能の原因について—」、電学論 A、129 巻 2 号、pp.97-102 (2009)

(13) T. Maezawa, J. Taima, Y. Hayase, Y. Tanaka, T. Takada, Y. Sekiguchi, Y. Murata, "Space Charge Formation in LDPE/MgO Nanocomposite under High Electric Field at High Temperature", 2007 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp.271-274 (2007)

(14) Working Group WGB1-32 CIGRE, "Recommendation for testing DC extruded cable systems for power transmission at a rated voltage up to 500 kV", CIGRE Technical Brochure 496 (2012)

## 執 筆 者

村田 義直\* : (株)ジェイ・パワーシステムズ  
研究開発センター マネージャ



坂巻 正敏 : (株)ジェイ・パワーシステムズ 研究開発センター  
スペシャリスト

阿部 和俊 : (株)ジェイ・パワーシステムズ 研究開発センター  
シニアスペシャリスト

井上 喜之 : (株)ジェイ・パワーシステムズ 研究開発センター 次長

眞尾 晶二 : (株)ジェイ・パワーシステムズ 海外エンジニアリング事業部  
マネージャ

柏山 誠司 : (株)ジェイ・パワーシステムズ 海外エンジニアリング事業部  
シニアスペシャリスト

西川 哲 : (株)ジェイ・パワーシステムズ 技術部 マネージャ

水津 亮 : (株)ジェイ・パワーシステムズ 技術部 スペシャリスト

渡辺 傑 : (株)ジェイ・パワーシステムズ 技術部長

浅井 晋也 : (株)ジェイ・パワーシステムズ 取締役  
海外エンジニアリング事業部長

片貝 昭史 : (株)ジェイ・パワーシステムズ 技術センター長

\*主執筆