

# 再生エネルギー普及に向けた 直流 XLPE ケーブルの高電圧化と適用拡大

Expansion of HVDC XLPE Cable Application in Response to Growing Demand for Renewable Energy Transmission

西川 哲\*  
Satoshi Nishikawa

清水 俊雄  
Toshio Shimizu

中嶋 慎諭  
Noritsugu Nakajima

斉藤 修  
Osamu Saito

佐藤 立樹  
Tatsuki Sato

富岡 聡  
Satoshi Tomioka

近年、再生エネルギーの導入拡大に伴い、直流送電線の建設や計画が増加している。直流ケーブルには、MIケーブルやOFケーブルといった油浸紙絶縁ケーブルが用いられてきたが、交流ケーブルと同様に環境面への配慮から、XLPEケーブルの採用が拡大している。当社は長年に亘って直流XLPEケーブルの研究開発を行い、優れた特性の直流XLPEを実用化、電源開発(株)に納入した直流250kV XLPEケーブルが2012年に運転を開始した。これは直流XLPEケーブル線路としては世界最高電圧（当時）であり、かつ極性反転を行う線路への納入は世界初であった。その後、NEMO Link Limited社の直流400kV連系線（直流XLPEケーブルの世界最高電圧を更新）や北海道電力(株)の直流250kV連系線等を完工、現在も新たなプロジェクトに取り組んでいる。当社の直流XLPEケーブルは、常時導体許容温度が交流用と同じ90℃で、かつ極性反転が可能といった特長を有しており、今後の再生エネルギーの普及に伴い、ますます増えていくであろう直流送電線のさまざまなニーズに応えることができるものと考えている。

The cross-linked polyethylene (XLPE) cable has been used for alternating current (AC) transmission lines since 1960s. We started developing the direct current (DC) XLPE cable in 1980s, and proved its quality and reliability through the research and development process. In 2012, we delivered the cable to Electric Power Development Co., Ltd. for its 250 kV DC transmission project, making it the world's highest voltage DC XLPE cable at that time and the first one to be applied to a line commute converter system. Following the project, we successfully completed two new projects: the 250 kV transmission project of Hokkaido Electric Power Co., Inc. and the 400 kV transmission project of NEMO Link Ltd. Our DC XLPE cable has an allowable continuous conductor temperature of 90 degrees Celsius, which is equivalent to that of the conventional AC XLPE cable, and withstands polarity reversal of voltage. This cable will meet the various needs of DC transmission that are expected to increase in the future.

キーワード：直流連系線、XLPEケーブル、PQテスト、タイプテスト、極性反転

## 1. 緒 言

直流（DC）送電の歴史は古く、油浸紙絶縁ケーブルを用いた送電線が運用されてきたが、近年では、環境意識の高まりと共に、漏油の懸念がない架橋ポリエチレン<sup>\*1</sup>（XLPE）絶縁ケーブルの需要が増えてきている。欧州では、洋上風力の沖合展開や大規模化に伴いDC海底ケーブルを用いて陸地と接続する案件や、その電力を国家間で融通するための国家間DC連系線が多数建設、計画されており、DC-XLPEケーブルの需要はますます高まっていくものと考えられる。

XLPEケーブルは、交流（AC）送配電用として1960年代に実用化されて以降、広く用いられてきたが、DCに対しては、空間電荷<sup>\*2</sup>の蓄積などに起因する性能低下を起こすことが課題であった。筆者らは、DC用XLPEを電源開発(株)と共同で開発<sup>(1)</sup>、電源開発(株)が所有する北本直流幹線の増設工事で初めて実用化、2012年に運転を開始した<sup>(2),(3)</sup>。

本報告では、以降に当社が受注したDC-XLPEケーブルのプロジェクトを紹介したうえで、再生エネルギー適用拡大に伴う今後のDC-XLPEケーブルの動向について述べる。

## 2. 英国／ベルギー直流連系プロジェクト

増加する再生エネルギーによる電力を融通するため、英国National Grid社とベルギーELIA社は合弁会社NEMO Link Limited社を設立、両国間を結ぶ初の直流連系線の建設を決定、当社はDC400kVの送電ケーブルシステム（NEMO Link）建設工事を同社から受注した<sup>(4)</sup>。

### 2-1 プロジェクトの概要

NEMO Linkは、英国南東部Kent州とベルギーのゼーブルージュに建設される交直変換所を結ぶDC送電線であり、HVDC分野で主流になりつつある自励式（VSC<sup>\*3</sup>）システムが採用された。本線路のルート概要を図1に示す。ルート長は約141km、うち海底区間が約130km、英国側陸上区間が2km、ベルギー側陸上区間が約9kmの構成となっている。また、水深は図2に示すとおり、大半の区間が水深20～40mで、最大水深は55mである。

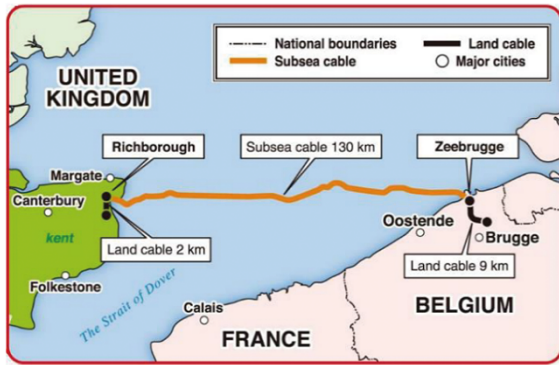


図1 NEMO Linkのルート概要

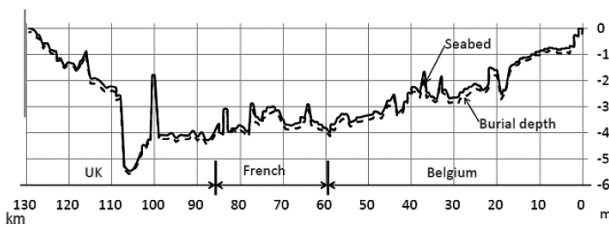


図2 NEMO Linkの水深プロフィール

2-2 線路構成と納入品の概要

NEMO Linkは、正極と負極のケーブルで構成され、両端の交直変換所には気中終端接続部、陸上ケーブルを経て渚部で海底ケーブルと接続、海底区間の途中には洋上接続を設けた。表1に主要納入品目と数量を示す。

表1 NEMO Link 主要納入品目と数量

品目	数量
海底ケーブル	約59km/約71km×各2条
陸上ケーブル	約22km (38条)
終端接続部	4相
陸上中間接続部	34相
渚接続部	4相
洋上接続部	2相

(1) 海底ケーブル

海底ケーブルの構造を図3に示す。導体は長手方向の走水防止機能をもった1100mm<sup>2</sup>、絶縁厚は19mm、光ファイバを鉄線外装の内部に複合した構造となっている。

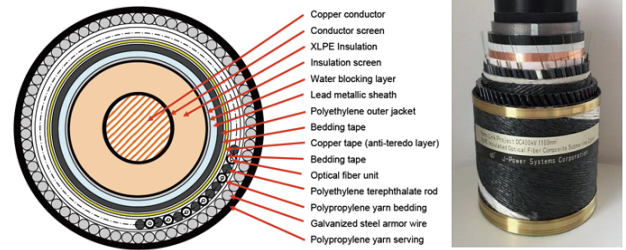


図3 NEMO Link向け海底ケーブル構造

(2) 陸上ケーブル

ケーブル構造を図4に示す。導体は1600mm<sup>2</sup>、絶縁厚は海底に同じ19mm、光ファイバを銅ワイヤ層に複合する構造である。

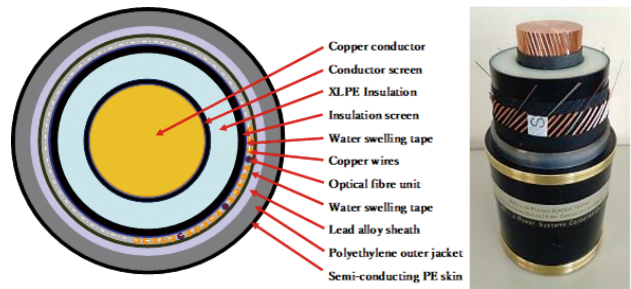


図4 NEMO Link向け陸上ケーブル構造

(3) 接続部

陸上区間の中間接続部、および洋上接続部として、国内外で交流400kVまで用いられているゴムブロック式 (RBJ)、海底ケーブルと陸上ケーブルを接続する渚接続部にはプレモールド式 (PMJ) を採用した。また、終端にはポリマー碍管、内部にゴムブロック絶縁体を用いた気中終端接続部 (EB-A) を採用した。各接続部の構造を図5、図6、図7に示す。

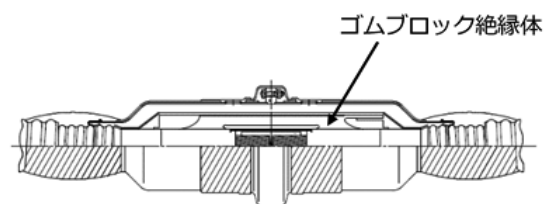


図5 ゴムブロック式中間接続部 (RBJ) の構造

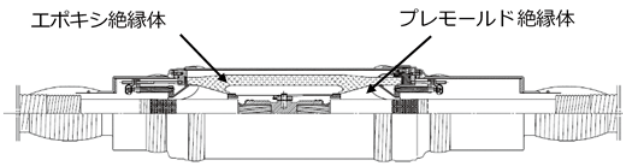


図6 プレモールド式中間接続部 (PMJ) の構造

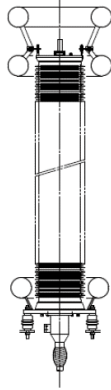


図7 気中終端接続部 (EB-A) の構造

表2 タイプテスト電気試験条件

試験項目	試験条件
24h ヒートサイクル	± 740 kV (1.85U <sub>0</sub> ) 各8日 (計16回) 導体温度: 常温⇄90℃ 通電: 8hON/16hOFF
極性反転	+/-580kV (1.45U <sub>0</sub> ) × 8日 導体温度: 常温⇄90℃ 通電: 8hON/16hOFF
48h ヒートサイクル	+ 740kV (1.85U <sub>0</sub> ) × 3回 (6日) 導体温度: 90℃ 通電: 24hON/24hOFF
DC重畳 開閉インパルス*1	DC+400kV/Imp+840kV (2.1U <sub>0</sub> ) 10回 DC-400kV/Imp-840kV (2.1U <sub>0</sub> ) 10回 DC+450kV/Imp-480kV (1.2U <sub>0</sub> ) 10回 DC-450kV/Imp+480kV (1.2U <sub>0</sub> ) 10回 導体温度90℃
DC重畳 雷インパルス*2	DC+400kV/Imp-840kV (2.1U <sub>0</sub> ) 10回 DC-400kV/Imp+840kV (2.1U <sub>0</sub> ) 10回 導体温度90℃
DC耐圧*3	-740kV × 2時間 (常温)
追加試験 24h ヒートサイクル	± 740 kV (1.85U <sub>0</sub> ) 各45日 (計90回) 導体温度: 常温⇄90℃ (±各42回) 常温⇄105℃ (±各3回) 通電: 8hON/16hOFF
追加試験	*1、*2、*3に同じ

2-3 タイプテスト

製品納入に先立ち、性能検証のためのタイプテストを実施、表1に示す納入品目全てを供試した。海底ケーブルや洋上接続部は実際の水深に裕度を見込んだ水深100m相当の引張力等、陸上ケーブルには曲げ等の機械履歴を事前印加した。電気試験条件はCIGRE TB 496に準拠を基本としたが、より厳しい検証とするため、極性反転試験を伴う他励式 (LCC<sup>\*4</sup>) の条件を採用、さらに24hヒートサイクルを90回追加、うち6回は105℃まで導体温度を上げる条件とし、ヒートサイクル後のDC重畳インパルス試験は2回繰り返した。試験は問題なく終了し、納入品目の十分な信頼性を確認することができた。図8にタイプテスト回路図、表2にタイプテスト電気試験条件を示す。

2-4 ケーブル製造と出荷

ケーブルは、事前に定めた品質管理計画に基づき製造を行い、全ロットでAC耐圧を行った。

海底ケーブル製造においては、1ロット当たりの絶縁体加工長に制限があるため、工場接続部 (FJ) によりケーブルを接続している。FJもケーブル同様に品質管理計画に基づく施工を行い、X線による内部異物検査やAC耐圧および部分放電測定により品質を担保した。

ケーブル完成時には、出荷試験としてCIGRE TB 496に規定されたDC耐圧 (-740kV・1h) を実施した。

海底ケーブルは、59km2条と71km2条の2回に分けて出荷した。出荷に当たっては、33,000トンの貨物船が当社工場の埠頭に接岸、同船の貨物室内に1条ずつ巻き込みを行い、欧州に向けて輸送した。写真1に貨物船内に巻き込んだ海底ケーブルを示す。

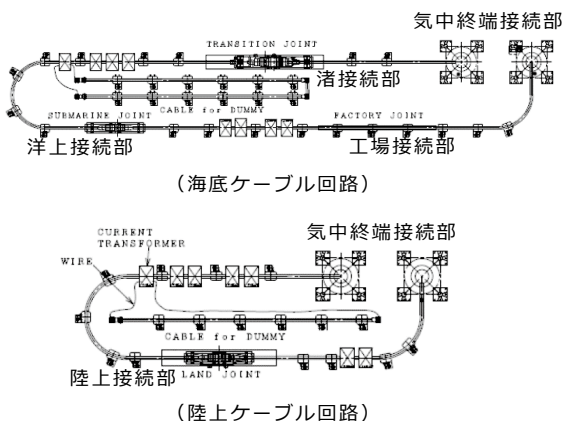


図8 タイプテスト回路図

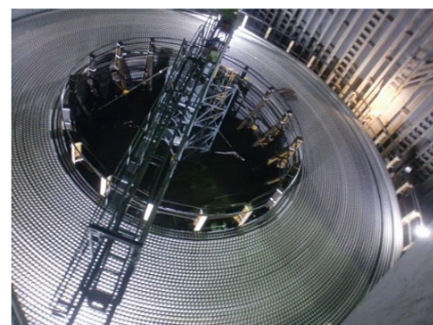


写真1 貨物船内のケーブル巻き込み状況

## 2-5 ケーブル布設工事と竣工試験

貨物船により輸送された海底ケーブルは、英国で工事会社の布設船上のターンテーブルに巻き替えを行った。欧州では、DC海底ケーブルの場合、正極と負極のケーブル2条を束ねて同時に布設する方式が一般的に採用されており、この布設船のターンテーブルも2条を同時に巻き取り、送り出し可能な仕様となっている。

海底ケーブルは2区間に分れており、先に59km×2条の布設、埋設を実施し、先端部は海中に沈設した。その後、71km×2条の到着と共に、先端部を海上に引き揚げ、洋上接続を行ったうえで再び海中に沈設、埋設はできないため、コンクリートマット養生を行った。

陸上区間も含む布設工事が完了した後、CIGRE TB 496に基づく竣工試験としてDC-740kV・2hの耐压を行い、予定より1日早く2019年1月31日に商用運転を開始、世界最高電圧のDC-XLPEケーブルとして問題なく運転を続け現在に至っている。写真2にケーブル布設の状況を示す。



写真2 渚部に布設されたケーブルと布設船

## 3. 北海道－本州間海底トンネル DC250kV XLPEケーブルプロジェクト

北海道と本州は、当社が納入したDC250kV海底XLPEケーブルを含む電源開発(株)の既設線路により連系されていたが、北海道エリアの安定供給をより強化するため、北海道電力(株)が新たなルートによる送電容量300MWのDC250kV北斗今別直流幹線（以下、新北本連系設備）の建設を決定、当社は地中送電区間への納入を行った。

### 3-1 プロジェクトの概要

本送電システムには、自励式（VSC）が国内で初採用された。また、架空送電線（98km）と地中送電線（24km）が混在するVSC式HVDC線路は世界的にまだ少ない事例である。地中送電線ルートには、津軽海峡を横断する既存の鉄道用海底トンネル（青函トンネル）が採用され、直流ケーブル1条と中性線1条を布設した。本設備が運転を開始した時点では、海峡トンネルへの超高压ケーブルとしては世界最長の事例である。図9にルート概要を示す。



図9 新北本連系設備のルート概要

### 3-2 納入品の概要

ケーブルの導体サイズは、常時許容温度を90℃として設計、布設区間の環境に応じて800mm<sup>2</sup>、1000mm<sup>2</sup>、1500mm<sup>2</sup>を選定した。写真3にケーブル構造を示す。また、中間接続部には同径接続用にRBJ、異径接続のみPMJを採用した。各接続部の基本構造は図5、図6に同じである。



写真3 新北本ケーブル構造

### 3-3 タイプテスト

ケーブルや接続部の現地納入に先立ち、製品性能検証のためのタイプテストを実施した。図10にタイプテスト線路の概要、表3に試験項目と条件を示す。試験条件は、CIGRE TB 496で推奨されているVSCシステム向けを採用した。

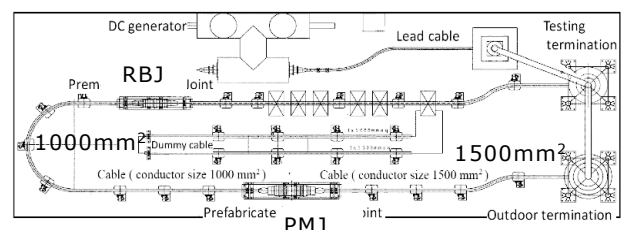


図10 タイプテスト線路の概要

但し、本試験の中で要求される DC 重畳雷インパルス耐電圧値は、実線路のアレスタ保護レベルを考慮して720kV ( $2.9U_0$ ) とし、CIGRE TB 496の推奨値 $2.1U_0$ より厳しい値を採用した。

表3 タイプテスト項目と試験条件

試験項目	試験条件
24h ヒートサイクル	± 481kV ( $1.85U_0 \times 1.04^*$ ) 各12回 導体温度90℃ 通電8hON/16hOFF
48h ヒートサイクル	+ 481kV ( $1.85U_0 \times 1.04^*$ ) 3回 導体温度90℃ 通電24hON/24hOFF
DC重畳 開閉インパルス	DC+250kV/Imp-345kV ( $1.4U_0$ ) 10回 DC-250kV/Imp-550kV ( $2.2U_0$ ) 10回 DC-250kV/Imp+345kV ( $1.4U_0$ ) 10回 DC+250kV/Imp+550kV ( $2.2U_0$ ) 10回 導体温度90℃
DC重畳 雷インパルス	DC+250kV/Imp-720kV ( $2.9U_0$ ) 10回 DC-250kV/Imp+720kV ( $2.9U_0$ ) 10回 導体温度90℃
DC耐圧	-481kV×2時間(常温) -600kV×3時間(90℃)

\* 供試した1000mm<sup>2</sup>で1500mm<sup>2</sup>の電界を包含するため1.04倍した。

### 3-4 ケーブル布設工事と竣工試験

海底トンネルの場合、途中に搬入孔がないため、北海道側と青森側のケーブル斜坑からケーブルを送り込む工法を採用した。

工事は2018年夏に完了し、2019年3月から運転を開始、現在まで問題なく運転している。写真4にトンネル内に布設されたケーブルの状況を示す。

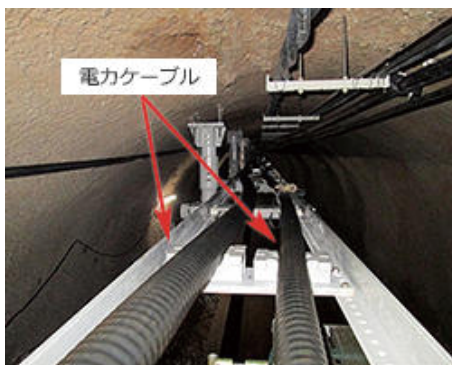


写真4 ケーブル布設状況

## 4. その他直流ケーブルプロジェクト

当社では、上記以外にも DC ケーブルプロジェクトを実施しており、その概要を以下に示す。

### 4-1 インド陸上DCケーブルプロジェクト

インド南部の電力供給不足の解消、および送電システムの安定化を目的に、地中ケーブル区間約27kmと架空線区間約187kmからなるDC320kV、2,000MWの送電システムが計画された。本プロジェクトのルート概要を図11に示す。

XLPEケーブルと架空送電線の混成線路においては、架空線区間への雷撃等により、極性反転を伴う過電圧が発生し得るため、XLPEには高い性能が要求される。また、本線路では、ケーブル1条当たり1,600A近い大電流を流す必要があり、常時許容温度として90℃が求められた。当社のDC-XLPEはこれらの条件を満たすことから受注に至り、DCケーブル約108kmを納入、2021年3月に商用運転を開始した。



図11 インドDCケーブルプロジェクトのルート概要

### 4-2 ドイツーデンマーク連系線一部更新プロジェクト

両国間には、DC400kVのLCC送電システムが構築されている。ドイツ陸上区間のOFケーブルは老朽化が激しく、更新されることが決定、極性反転を伴うLCC用のDC-XLPE技術を所有する当社が受注した。400kVのLCC送電にDC-XLPEケーブルが適用されるのは世界初であり、2023年の完工に向け製造を行っている。

### 4-3 英国ーアイルランド直流連系線プロジェクト

このプロジェクトも再生エネルギーを中心とした電力融通を目的に計画されたもので、2021年9月に当社の受注が決定した。VSC方式により500MWをDC320kVで送電するルート長190km(うち海底160km、陸上30km)の線路を2022年から2024年にかけて建設予定である。本プロジェクトのルート概要を図12に示す。

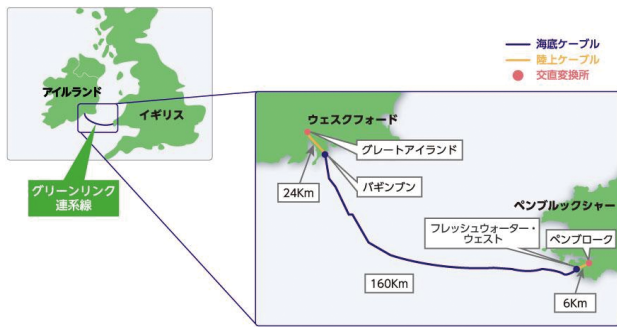


図12 英国-アイルランド連系線の概要

#### 4-4 ドイツDC525kV長距離地中送電プロジェクト

ドイツでは、再生可能エネルギー普及政策の一環として北海の同国経済水域における洋上風力電源の開発が急速に進む一方、南部の電力需要地への送電網強化が急務となっており、ルート長数百km以上の地中（陸上）送電線路が複数計画されている。当社は、ドイツの送電事業4社が主催する525kVDC-XLPEケーブルのPre-qualification (PQ) テストにアジアのメーカーとして唯一参画し、1年以上に亘る性能実証試験に合格した。その結果、当社の極性反転に耐える特性を有するDC-XLPEの特性が高く評価され、ドイツの送電事業社 Amprion が計画する架空線と地中線の混在する線路の地中区間長約320kmの建設工事を受注、履行に向けた準備を行っている。

## 5. 結 言

現在、欧州を中心に、洋上風力や国家間連系線の建設、計画が活発に行われ、DC-XLPEケーブルの適用が拡大している。今後は、この動向が世界的なものになり、DC-XLPEケーブルのさらなる適用拡大、高電圧化が進むものと考えられる。

現在運転されているDC-XLPEケーブルでは、当社が納入したNEMO Linkの400kVが世界最高電圧であるが、既にドイツでは陸上用として525kVのDC-XLPEケーブル適用が決定している。さらに、海底ケーブル案件でも長距離化や大容量化に伴い、525kVが必須になるものと考えられる。

当社は、2012年に運転を開始した電源開発(株)北本直流幹線を皮切りに、DC-XLPEケーブルのプロジェクトを進め、技術力を高めてきている。上記のようなニーズに対し、当社の持つ高いDC-XLPE技術が貢献できると考えられ、今後もいっそうの性能向上、コスト低減などに取り組んでいく。

## 用語集

### ※1 架橋ポリエチレン

Cross-Linked Polyethylene：架橋反応によりポリエチレンの分子間結合を高め、ポリエチレンの欠点であった耐熱性（高温時の機械特性）を改善した絶縁材料。交流用には1960年代から使用されている。

### ※2 空間電荷

固体絶縁体に直流電圧を印加した時に、絶縁体中に蓄積される電荷。空間電荷の存在により、電界が歪められる。

### ※3 VSCシステム

Voltage Sourced Converter：自励式の電圧源コンバータを用いた直流送電システム。送電方向を変える場合は、電圧の極性を反転させる必要がなく、電流の方向を変化させる。

### ※4 LCCシステム

Line Commute Converter：サイリスタを用いた交直変換器による直流送電システム。送電方向を変える場合には、電圧の極性を反転させる。

## 参 考 文 献

- (1) 前川雄一、渡部知津夫、浅野光正、村田義直、片貝昭史、嶋田光正、「直流 500 kV XLPE ケーブルの開発」、電学論 B, Vol.121, No.3, pp.390-398 (2001)
- (2) 渡部知津夫、伊藤康雄、佐々木英隆、村田義直、水津亮、坂巻正敏、渡辺傑、片貝昭史、「+/-250 kV DC-XLPE ケーブルの北海道・本州間電力連系設備への適用」、電学論 B, Vol.134, No.1, pp.64-75 (2014)
- (3) 西川哲、佐々木賢一、秋田浩二、坂巻正敏、風間達也、鈴木公三、「直流連系線用XLPEケーブル」、SEIテクニカルレビュー第190号 (2017)
- (4) T. Igi, S. Asai, S. Mashio, S. Nishikawa, S. Tomioka, T. Miyazaki, T. Kazama, "Qualification, installation and commissioning of world's first DC 400kV XLPE cable system," Jicable 2019 A6-1

執 筆 者

西川 哲\* : 電力プロジェクト事業部 部長補佐



清水 俊雄 : 電力プロジェクト事業部 主幹



中嶋 慎諭 : 電力機器事業部 グループ長



斉藤 修 : 電力プロジェクト事業部 主席



佐藤 立樹 : 電力事業部 主査



富岡 聡 : 電力プロジェクト事業部 主査



\*主執筆者