

国内直流海底送電網の構築に向けた ケーブル施工・監視等の技術開発と展望

Technical Development of Cable Installation and Monitoring for the Construction of Japan's High Voltage Direct Current (HVDC) Submarine Transmission Networks

真山 修二*
Shuji Mayama

長谷川 衛
Mamoru Hasegawa

東 大介
Daisuke Azuma

山本 誠司
Seiji Yamamoto

近年のグローバルなカーボンニュートラル化の潮流に伴い、大規模な再生可能エネルギーの開発が進むとともに、その電力を需要地に届けるための長距離送電網の構築が急速に進められている。我が国においても、北日本から首都圏に直流海底送電を行うなど、長期・大規模な送電網構築のマスタープランが示されている。この潮流を見越し、NEDO（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）では2015年度から直流海底送電に関する技術開発が継続して行われ当社も参画してきた。国内での直流海底送電計画が具体化した現在、これまでの開発の経緯と意義を振り返るとともに、今後の実プロジェクト適用や将来に向けた開発の展望について考察する。

As global carbon neutrality and large-scale renewable energy development progress, the establishment of long-distance transmission networks to transmit electricity to remote demand areas is rapidly advancing. In Japan, plans for a long-term and large-scale HVDC submarine transmission network from northern Japan to the Tokyo metropolitan area have been outlined. Anticipating this trend, the New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) has been continuously engaged in the development of HVDC submarine technology since the fiscal year 2015, and our company has also participated in this effort. Now that the plans for direct current submarine transmission have become more concrete, this paper reviews the development history and considers the prospects for applications in future practical projects and further developments.

キーワード：直流海底ケーブル、防護工法、敷設船、海底ルート設計

1. 緒 言

近年のグローバルなカーボンニュートラル化の潮流に伴い、大規模な再生可能エネルギーの開発が進み、その電力を需要地に届けるための長距離送電網構築が急速に進められている。我が国においても、風況の良い北日本から首都圏への長距離直流海底送電など、電力広域的運営推進機関から「広域連系システムのマスタープラン」として、送電網構築の将来像が示されている。

このグローバルな潮流と国内での直流海底送電の社会実装を鑑み、「国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下NEDO）」では2016年度から直流海底送電に関する技術開発が行われ、当社は一貫して参画している。そして国内での直流海底送電計画が具体化した現在、これまでの開発の経緯と意義を振り返るとともに、現在進行中のケーブル防護工法や自航式ケーブル敷設船開発などの状況を報告し、今後の実プロジェクトへの社会実装や将来展望について考察する。

2. NEDO 直流技術開発

2-1 これまでの開発内容

2015年度からこれまでの約10年間の、NEDOにおける

表1 NEDOでの当社の直流技術開発の経緯

項目	次世代洋上直流	多用途多端子	
		深海ケーブル	防護工法／作業船
	2015-2019年度	2020-2023年度	2023-2025年度
ケーブル	・525kVケーブル試作 ・工場接続 ・異社間接続（端末）	・深海ケーブル開発（3芯、水深500m） ・機械試験装置（引張曲げ）	—
工法	・防護管高速取付（モデル）	・敷設船 概念設計	・耐外傷試験／選定 ・防護管高速取付（実機） ・敷設線形制御 ・（敷設船 設計、日本郵船殿）
システム	ルート設計 ・海底データベース ・最適ルートアルゴリズム（東大馬場教授共研）	・海底データベース拡張	・海底データベース拡張 ・統合情報システム化（ルート設計、施工、保守）
	長距離監視	—	・光長距離監視（200km、温度・歪み）

当社の直流技術開発の経歴を表1に示す。当初は国内での直流海底送電計画は未だ具体化していなかったものの、グローバルの潮流から予見した近い将来の国内適用に資するべく、2015年度より5カ年で「NEDO次世代洋上直流海底送電システム開発事業」が始まった。また2020年、その後継開発事業として新たに国内固有の課題としてクローズ

アップされた深海への対応策として、「多用途多端子直流送電システムの基盤技術開発」の中で「深海ケーブル開発」が行われてきた。さらに2021年度に国の施策として北海道～首都圏への直流海底送電計画が具体化すると、「洋上風力等からの高圧直流送電システムの構築・運用に関する調査」として、北海道～首都圏への直流海底送電のフィージビリティスタディー（FS）が実施された。またその後の2023年度より国内固有の技術課題に対応するため、「ケーブル防護管取付等の工法開発及び新型ケーブル敷設船等の基盤技術開発（以下、防護工法・敷設船等の開発）」が立ち上がり、現在開発が体系的かつ精力的に進められている。

2-2 新規開発の必要性

これまでの海洋調査の中で、国内は欧州の北海とは異なり、水深が深いだけでなく海底に露岩部が多く、露岩部の防護には長期間および多大なコストがかかることが明らかになった。このために防護を高速／低コストで行う工法開発が各方面から強く求められた。さらに国内ではこれまで、数百kmに及び長距離の海底送電は存在せず、その敷設が可能な自航式の大型ケーブル敷設船が存在しないことも、プロジェクト組成において大きな課題と位置付けられた。

上記の課題を解決すべく、「多用途多端子直流送電システムの基盤技術開発」の中で新たに23年度から3カ年の防護工法・敷設船等の開発が開始された。ケーブル敷設船上で防護管をケーブルに高速で取り付ける工法などを開発し既存工法に比べて20%のコスト低減と工期短縮を目指すとともに、大容量の長距離海底直流送電ケーブル敷設に必要となる自航式ケーブル敷設船等の設計を通じて、共通仕様を確立する計画である。

本開発には幹事社である当社、古河電気工業(株)、日本郵船(株)、(株)商船三井の4社が採択され、ケーブル施工のノウハウを保有する大手ケーブルメーカーと、船舶の設計・運用ノウハウを保有する大手海運会社で業界横断的に連携と分担して開発を進めることとなった。各社の開発分担を表2に示す。

表2 各社の開発テーマ分担

テーマ案		担当
1. ケーブル防護管取付等工法開発	①防護工法開発	防護管工法の開発 住友電工
		大水砕石投入装置開発 古河電工
	②長距離ケーブル監視技術開発	住友電工
	③海洋技術検証	住友電工 古河電工
2. ケーブル敷設船等の基盤技術開発	①敷設船開発	日本郵船 住友電工
	②接続船／埋設船開発	商船三井 古河電工
3. 共通基盤技術調査等	①試験方法検討	古河電工 住友電工
	②海外調査	住友電工

3. 防護工法／敷設船等の開発

当社は、船上でのケーブル防護管を高速に取付する工法開発、海洋技術検証、海運会社と連携した自航式大型ケーブル敷設船開発、長距離ケーブル監視と海底ケーブル情報統合システム開発等を担当している。本章では各開発の背景および取り組みと成果について報告する。

3-1 防護管高速取付工法開発

海底調査の結果、国内の海底地質は特に日本海側北部において埋設可能な砂地が少なく、露岩部が中心となっていることが明らかになっている。露岩部では埋設ができないため、ケーブル上に砕石を長距離にわたり設置する工法があるが、数百kmという非常に長距離の防護にはコスト・工期・調達の観点から課題も多い。また砕石防護より低コスト・短納期な工法として、船上にて半割れ防護管をケーブルに連続的に装着する防護管工法も採用されている。しかしこの簡便な防護管工法でも、従来は半割れ防護管をボルト止めや金属バンド結束を船上で人力にて行う必要があり、その都度敷設を止めるため敷設線速が遅く、工期が長く高コストとなっていた。

このため船上で高速に防護管取付ができるよう、防護管そのものに簡便なスナップ固定機構を持たせ自動嵌合できるようにするとともに、防護管を半自動装填しローラーで



写真1 防護管高速取付1/5モデル



写真2 防護管高速取付 実機モデル

圧着自動嵌合できる船上機装を開発した。本開発にあたっては事前に1/5モデル（写真1）で国内外5種類の樹脂製防護管を評価し、陸上にて実規模モデル（写真2）での検証試験を行った。その結果、防護管を装着しても連続作業を可能とし、砂地と同じ10m／分程度の敷設線速を実現する目処を得ることができた。

さらに海底ケーブルは船舶のアンカーによる外傷や漁業活動での漁具による外傷も想定される。このため、防護管がどの程度のアンカー衝撃に耐えられるのか評価するアンカー落下試験を実施し、防護管の耐外傷性能を評価した。漁具に対しては、日本国内の各海域の漁法漁具を調査しリスク評価を実施して、海底ケーブルへのリスク要因となり得る漁法漁具を「底引網」「桁網」と抽出し、それぞれの漁具の実物を用い地上にてケーブル乗り越えと外傷有無の試験評価を実施した。基本的に漁具はケーブルを乗り越えることで大きな外傷や引っかかりは生じないことを確認したが、今後更なる評価を検討中である（写真3）。

これら防護工法開発の成果は、実プロジェクトにおける各海域での防護方法の判断に資することが期待される。



写真3 アンカー／底引き漁具によるケーブル外傷試験

3-2 海洋技術検証

従来のケーブル敷設は、船上での入水角センサー等の情報を用いた張力管理で、キンク等の欠陥が生じないように実施されてきた。しかし近年、海外では潮流・海流によりケーブルが流されることまで考慮し、各種センサー・海洋情報を統合しリアルタイムで線形計算をすることで敷設機材を制御、所定の位置に高精度にケーブルを敷設する敷設管理システムが実用化されている。

今後、露岩部等で精密なケーブル敷設の位置決めが求められることを想定し、淡路島沖で既存のケーブル敷設台船と、最新の敷設管理システムを用いて敷設精度検証を行う海洋技術検証を実施した（図1）。本検証を通じ、海底面の敷設位置精度が数m以内で可能であることを確認するとともに、実プロジェクトへの適用について目処を得ることができた。

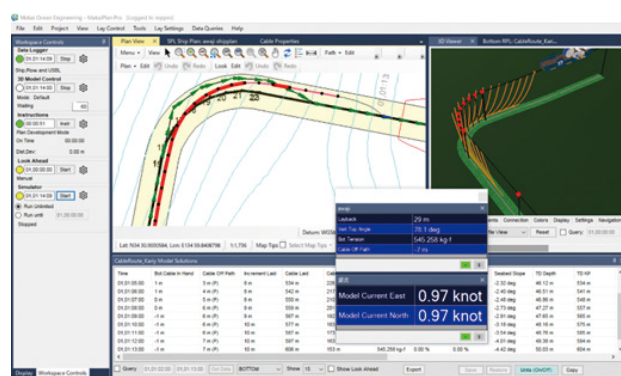


図1 海洋技術検証での敷設管理システム

3-3 自航式大型ケーブル敷設船開発

国内で存在しない自航式大型ケーブル敷設船は、設計から運用開始まで5～6年が見込まれる。しかし実プロジェクトの受注後からの設計開始では、実際の敷設に間に合わないことが想定される。また国内固有の水深・海底条件（防護）・港湾条件などに最適化した専用設計を行うことが望まれる。しかしながら当社単独では、従来のタグボートで牽引するバージ型敷設船の設計・運用実績はあるものの、自航船の複雑な設計・運用・法規に関する知見がないため、それら知見と実績を有する日本郵船（株）と連携して開発にあたる体制を構築した。

まず22年度、当社にて基本仕様を定め日本郵船（株）に概念設計を委託した。欧州で最新式の自航式ケーブル敷設船の設計・建造実績のある造船所の協力を得ながら概念設計を進め、23年度からは日本郵船を主査として当社が支援する開発体制とし、24年度には概念設計を完了、日本海事協会からAIP認証を取得した。現在、次の基本設計が進行中であり、25年度中に完了予定である。本敷設船は、国内の各海底ケーブル工場の水深等の制約に合わせた最大サイズとし、海底ケーブル7,000トン／約80kmを一連長で積載と敷設ができ、かつ国内で想定される長距離かつ大量の防護管を積載できる構造としている。また、船底の各種スラスタとGPSにより定点保持を行うダイナミックポジションシステムや、最新の高度に自動化・省人化された敷設機装を搭載する。加えて敷設のみでなく、洋上接続・修理や洋

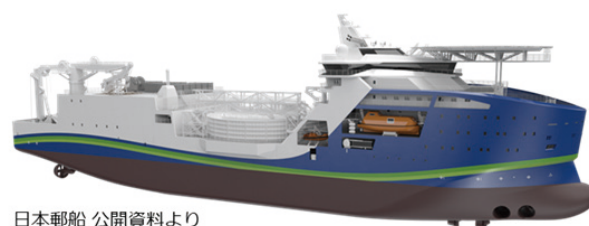


図2 自航式大型ケーブル敷設船の概念設計図例

上風力まで想定した多用途船として設計がされており、船の稼働率の向上による収益性確保と導入容易化が計られている。

加えて長距離海底送電では、工期短縮のため「敷設」「接続」「埋設」の各機能を専用船で分担することが想定され、4社の分担に応じ並行して各船の開発が進められている。

3-4 長距離監視技術と海底ケーブル統合情報システム開発

北海道～新潟までの約800kmに及ぶルート長、また正極・負極・中性線の3本で総長2,400kmにも及ぶ長距離の海底ケーブルの保守監視は、基幹電力インフラとなる長距離海底送電で重要な開発項目である。

従来、海底電力ケーブルには光ファイバーが複合されており、通信だけでなくパルスレーザー光入射の散乱光による温度分布（DTS）や外傷による歪み（OTDR）の監視が行われてきた。また近年では光ファイバーによる音響分散センシングDAS（Distributed Acoustic Sensing）も実用化され、より高精度・高機能な計測も可能となっている。しかしながら光ファイバー内でのパルスレーザー光の減衰により、従来の最大測長は約100kmが限界であった。しかし現在想定されている日本海ルートでは、最も長い北海道～秋田のスパンで約500kmと、両端100kmからでは中央付近に約300km以上の検知不可能な区間が生じてしまう。

この課題を克服し測定距離の伸長を図るには、大陸間の光海底通信ケーブルで用いられる中継器を設置することが考えられる。しかし中継器には別途電力を供給する電源ケーブルを併設する必要がある、直流ケーブルで外傷等による万一の絶縁破壊が生じた場合には、破壊に伴い発生する高

電圧のサージが中継器の電源ケーブルに影響し中継器が過電圧で破損する可能性が高い。この課題解決のため、中継器には計測に使う光ファイバーとは別の光ファイバーから光エネルギーを注入し、中継器の電力を得る光励起の手法を開発した。

本開発により測長が300km程度まで延長できることを、ダミーの長距離光ファイバーを用いた机上試験、および一部は実ケーブルを用いた海洋技術検証により確認した。これにより北海道～秋田の、全長での光ファイバー監視実現の目処を得た。

また当社では2018年に東京大学の馬場教授と、初期ルートFSで必要不可欠な海底ケーブルルート設計を高速かつ簡便に実現するための、水深・海底地質や海底設置物などの海洋情報、および漁業情報など社会活動情報を集約した10層の海底データベースと、最適化アルゴリズムでルートを自動計算する海底ケーブルルート最適計算システムを共同開発している。一方で近年の北海道～新潟のルートFS、資源エネルギー庁にて実施した海洋調査データ、それらを用いた精緻なルート検討がなされる中で、更なる情報の追加やメッシュ高精度化が望まれることが判明した。加えてルート設計のみに止まらず、建設や保守に向け施工や保守監視までの必要となる情報を統合してゆくことも望まれる。

このため従来の海底ケーブルルート最適計算システムをベースに、海底ケーブル統合情報システムを開発することとした。これは海底混濁流や活断層といったハザード情報、ケーブル敷設可否判断に必要な海底傾斜角情報、外傷リスク評価に必要な航路情報などをデータベースに加え約20層に拡張するとともに、一旦敷設を開始すると悪天候による中断が困難なため、敷設開始判断にあたって必要となる最大10日先までの最新の海象気象予測の統合、船舶の走錨等

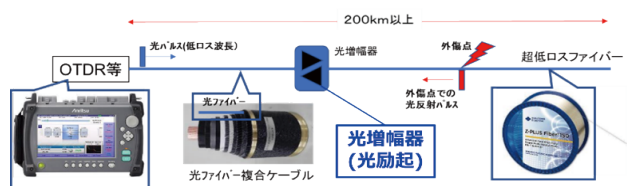


図3 光ファイバー長距離監視システム

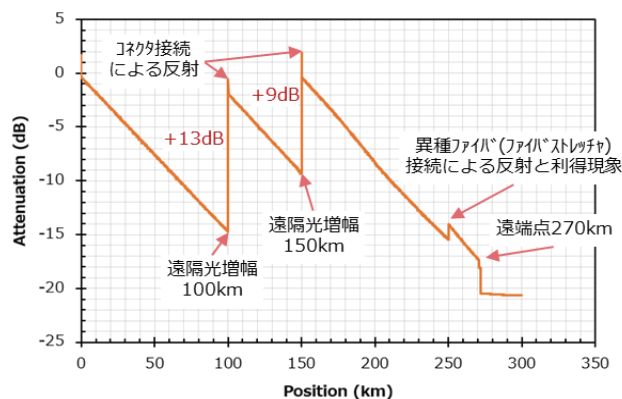


図4 計測結果例 (0-270km)

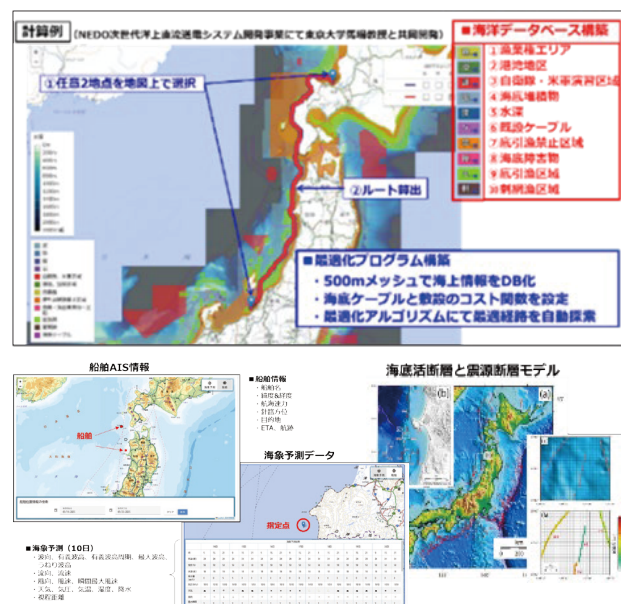


図5 海底ケーブル統合情報システム

による外傷が生じた際に船舶を特定する AIS 情報の統合、前述の光ファイバー監視情報の統合を行うものである。

3-5 今後の開発展望

これまで施工面の開発を主体に進めてきたが、今後は建設後に向けた保守運用の高度化に関する技術開発が求められると想定される。例えば計画中の800km×3本の2,400kmにもおよぶ海底ケーブルの高信頼度運用に向けて、如何に確実な保守監視を実施してゆくべきか。

近年では水中ドローンである AUV (Autonomous Underwater Vehicle) の海底インフラへの適用も開始されており、高速・低コストでの全長監視を可能とする巡航型 AUV の点検適用に向けた海底ケーブル自動トラッキングシステムの調査検討も進めている。また近年海外では AIS を切った船舶の走錨による海底ケーブルの損傷事故が相次いで報告される中、リスク管理と抑止の観点から、人工衛星の光学画像や合成開口レーダー画像、水中音響等を用いた AI による船舶監視特定のシステムの実現可能性も調査中である。

このように海底ケーブルは、単に送電を行うだけでなく、高信頼度の運用保守に向け各種センシングを融合した、高度なネットワークシステムへと変貌しつつある。

4. 結 言

これまで約10年間の NEDO における開発は、当社の技術開発計画に組み込まれ、着実に成果を積み上げてきた。加えてこれら開発成果は、現在計画が進行中の国内における直流海底送電計画にタイムリーに組み込まれることで、具体的な計画立案と組成に所定の役割を果たすことができたと考えている。また各 NEDO 開発における業界横断、産官学連携の取り組みは、現在進められている国内での直流海底送電計画の組成にあたり重要なバックグラウンドになったと考えられる。今後、国内の直流海底送電計画の着実な実現に向けて更なる技術開発を進めるとともに、アジア圏などグローバルへの展開を期待するものである。

(本成果は、NEDO (国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構) の委託業務の結果得られたものです。)

参 考 文 献

- (1) 太田、真山、田中、「再生可能エネルギー大量導入に向けた電力ケーブル系統設計技術」、住友電工テクニカルレビュー第199号、pp.31-37 (2021年7月)
- (2) 高橋、青柳 他、「海底直流送電の敷設ルート選定のための海底地盤ハザードの整理とデータベース化」、電力中央研究所 報告書 (2024年4月)
- (3) 日本郵船プレスリリース、「長距離海底ケーブル敷設船の概念設計承認を取得」(2024年12月)
<https://www.nyk.com/news/2024/20241204.html>
- (4) 資源エネルギー庁、長距離海底直流送電の整備に向けた検討会資料
https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/chokuyori_kaitei/index.html
- (5) NEDOスマートコミュニティ部、「[次世代洋上直流送電システム開発事業] (事後評価) (2015年度～2019年度 5年間) プロジェクトの概要」(2022年9月)
<https://www.nedo.go.jp/content/100926009.pdf>

執 筆 者

真山 修二* : 電力プロジェクト事業部 技師長



長谷川 衛 : 電力プロジェクト事業部
グループ長



東 大介 : 電力プロジェクト事業部 主席



山本 誠司 : 電力プロジェクト事業部 主席



*主執筆者