

## 「多用途多端子直流送電システムの基盤技術開発」

研究開発項目 1 多用途多端子直流送電システムの開発

研究開発項目 2 多端子直流送電用保護装置の開発

研究開発項目 3 直流深海ケーブルの開発

### 事業原簿【公開版】

担当部	国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 再生可能エネルギー部
-----	---

# 目次

概 要 .....	1
プロジェクト用語集 .....	1
<b>1. 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋 .....</b>	<b>1-1</b>
1.1. 事業の背景・目的・将来像 .....	1-1
1.1.1. 事業の背景 .....	1-1
1.1.2. 事業の目的 .....	1-1
1.1.3. 事業の将来像 .....	1-1
1.2. 政策・施策における位置づけ .....	1-2
1.3. 技術戦略上の位置づけ .....	1-3
1.4. 外部環境の状況 .....	1-4
1.5. 他事業との関係 .....	1-8
1.6. アウトカム達成までの道筋 .....	1-9
1.7. 知的財産・標準化：オープン・クローズ戦略 .....	1-11
1.8. 知的財産管理 .....	1-12
<b>2. 目標及び達成状況 .....</b>	<b>2-1</b>
2.1. アウトカム目標及び達成見込み .....	2-2
2.1.1 実用化・事業化の考え方とアウトカム目標の設定及び根拠 .....	2-2
2.1.2 アウトカム目標の達成見込み .....	2-3
2.2. アウトプット目標及び達成状況 .....	2-5
2.2.1 本事業における研究開発項目の位置づけ .....	2-5
2.2.2 アウトプット目標の設定及び根拠 .....	2-6
2.2.3 アウトプット目標の達成状況 .....	2-6
2.2.4 特許出願及び論文発表 .....	2-9
<b>3. マネジメント .....</b>	<b>3-1</b>
3.1 NEDO が実施する意義 .....	3-1
3.2 実施体制 .....	3-1
3.3 個別事業の採択プロセス .....	3-2
3.4 目標達成に必要な要素技術 .....	3-3
3.5 研究開発のスケジュール .....	3-4
3.6 進捗管理 .....	3-6
3.6.1 進捗管理：前身事業評価結果への対応 .....	3-6
3.6.2 進捗管理：動向・情勢変化への対応 .....	3-7
3.6.3 進捗管理：成果普及への取り組み .....	3-8
(1) 多端子 HVDC システムの制御・保護検討に関するガイドラインの発行 .....	3-8
(2) 国際標準化の情報提供と業界関係者への啓発活動 .....	3-8
(3) 学会（シンポジウム・座談会）、学会誌への寄稿等 .....	3-9
(4) 人材育成 .....	3-9

<b>4. 目標及び達成状況の詳細等</b> .....	<b>4-1</b>
4.1. 研究開発項目Ⅰ、Ⅱ 多用途多端子直流送電システムの開発、多端子高圧直流送電保護検出装置の開発（東電 HD、東電 PG、三菱電機、東芝 ESS、日立製作所） .....	4-1
4.1.1 概要.....	4-1
4.1.2. 研究開発の目標と根拠 .....	4-1
4.1.3. 研究開発のスケジュール、実施体制.....	4-2
(1) 研究開発のスケジュールと事業費は下表のとおり .....	4-2
(2) 研究開発の実施体制は以下の通り .....	4-3
①研究開発項目Ⅰ 多用途多端子直流送電システムの開発.....	4-3
②研究開発項目Ⅱ 多端子直流送電用保護検出装置の開発.....	4-3
4.1.4. テーマごとの目標達成状況と成果の内容 .....	4-4
(1) 研究開発項目Ⅰ 多用途多端子直流送電システムの開発 .....	4-4
①多用途多端子直流送電システムの開発.....	4-4
②上位制御装置と変換器制御装置の開発（制御・機器の設計、実機製作） .....	4-5
③多用途多端子直流送電システムの機能検証.....	4-5
④直流送電システムと洋上システムとのシミュレーションによる協調検証.....	4-8
⑤島嶼ユースケースの策定・機能検証 .....	4-9
(2) 研究開発項目Ⅱ 多端子直流送電用保護検出装置の開発 .....	4-9
①保護検出装置の開発（制御・機器の設計、実機製作） .....	4-9
② 保護検出装置の機能検証.....	4-10
③ 多端子 HVDC の制御・保護の検討ガイドラインの作成.....	4-10
4.1.5. アウトカム達成に向けた戦略と具体的な取組.....	4-11
4.2. 研究開発項目Ⅲ 直流深海ケーブルの開発 単芯水深 1500M 級（古河電気工業） .....	4-12
4.2.1. 研究開発の概要 .....	4-12
4.2.2. 研究開発の目標と根拠 .....	4-13
4.2.3. 研究開発のスケジュール、実施体制 .....	4-14
4.2.4. テーマごとの目標達成状況と成果の内容 .....	4-15
(1) 動向調査 .....	4-15
(2) 導体構造および材料の検討 .....	4-17
(3) がい装構造および材料の検討.....	4-18
(4) ケーブル特性評価.....	4-19
①ケーブル試作 .....	4-19
②機械特性評価、電気特性評価 .....	4-20
a.引張試験 .....	4-21
b.圧縮試験 .....	4-24
c.外水圧試験.....	4-25
d.引張曲げ試験 .....	4-26
e.長期課通電試験.....	4-28
f.残存試験 .....	4-30
g.解体調査 .....	4-31
(5) 敷設検討 .....	4-31
①敷設検討 .....	4-31

②艀装検討 .....	4-34
③コスト評価 .....	4-35
4.2.5. アウトカム達成に向けた戦略と具体的な取組 .....	4-39
4.3. 研究開発項目Ⅲ 直流深海ケーブルの開発 三芯水深500M級（住友電気工業） .....	4-40
4.3.1. 研究開発の概要 .....	4-40
4.3.2. 研究開発の目標と根拠 .....	4-40
(1) 深海ケーブルの要素技術開発と試作 .....	4-40
①深海ケーブルの構造検討 .....	4-40
②三芯仕様深海ケーブルの構造設計と試作 .....	4-40
(2) 深海ケーブル試験装置導入と性能実証試験 .....	4-41
①深海ケーブル試験装置導入 .....	4-41
②深海ケーブルの性能実証試験 .....	4-41
(3) 深海ケーブル関連技術開発 .....	4-41
4.3.3. 研究開発のスケジュール、実施体制 .....	4-42
4.3.4. テーマごとの目標達成状況と成果の内容 .....	4-44
(1) 深海ケーブルの要素技術開発と試作 .....	4-44
①深海ケーブル構造の検討 .....	4-44
②設計 .....	4-46
③構造解析 .....	4-50
(2) 深海ケーブルの試験装置導入と性能実証試験 .....	4-54
①機械試験（コイリング試験） .....	4-54
②機械試験（引張曲げ試験） .....	4-55
③電気試験 .....	4-56
(3) 深海ケーブル関連技術開発 .....	4-59
①敷設ルート設計ソフト改良 .....	4-59
②敷設船の仕様概略検討 .....	4-61
a.概念設計仕様 .....	4-61
b.設計思想 .....	4-62
4.3.5. アウトカム達成に向けた戦略と具体的な取組 .....	4-62
4.3.6. 費用対効果の考え方 .....	4-64

<b>添付資料</b> .....	<b>1</b>
●プロジェクト基本計画： .....	1
●プロジェクト開始時関連資料（事前評価結果、パブリックコメント募集の結果） .....	9
●特許論文等リスト .....	11

# 概要

		最終更新日	2024年11月11日
プロジェクト名	NEDO プロジェクト名 多用途多端子直流送電システムの基盤技術開発 METI 予算要求名称 再生可能エネルギーの大量導入に向けた次世代型の電力 制御技術開発事業	プロジェクト番号	P20001
担当推進部/ PMgrまたは担当者 及び METI 担当課	<p>(担当推進部) 2020年6月～2024年3月：スマートコミュニティ・エネルギーシステム部 2024年7月～現在：再生可能エネルギー部</p> <p>(プロジェクトマネージャー：PMgr) 加藤 寛 (2020年6月～2022年6月) 西林 秀修 (2022年7月～2024年7月) 中尾 光洋 (2024年7月～現在)</p> <p>(担当者) 前野 武史 (サブPMgr、2020年6月～2023年3月) 廣瀬 圭一 (サブPMgr、2023年4月～現在) 飯原 瑛梨 (2020年6月～2023年3月) 下里 明日香 (2023年4月～現在) 今野 直喜 (2022年3月～現在) 小河原 竜一 (2023年4月～2024年7月) 藤田 悟 (2023年4月～2024年9月) 小笠原 有香 (2024年3月～2024年3月) 山本 航介 (2023年4月～2024年3月) 村上 真一 (2024年4月～現在)</p> <p>(METI 担当課) 省エネルギー・新エネルギー部 新エネルギーシステム課</p>		
0. 事業の概要	<p>今後のエネルギー政策として、2018年7月に閣議決定された「第5次エネルギー基本計画」には、風力発電をはじめとする再生可能エネルギー（再エネ）については導入を最大限加速・推進していくとともに、系統強化、規制の合理化、低コスト化等の研究開発を着実に進めることが記載されている。更に2019年4月の海洋再生可能エネルギー発電設備の整備に係る海域の利用の促進に関する法律（再エネ海域利用法）の施行にともない、各地で急速に洋上風力発電の計画が立ち上がることが見込まれる。こうした中、僻地にあることが多い洋上風力発電と電力系統を効率的に繋ぐ技術開発は重要性が高い。さらに、2021年10月の「第6次エネルギー基本計画」において、2030年の再エネ電源構成比率が36～38%程度に引き上げられ、この実現に向けた取組みが急務となっている。</p> <p>本事業では風力の直流送電線を多端子化して適切に保護制御・潮流制御を行うことで、信頼性が高く効率的な風力送電を可能とする高圧直流（HVDC）技術を開発する。また、これらの直流送電線を地域間への電力供給などの用途に利用できる制御技術を開発し、風力の導入普及のみならず、地域の需給バランス維持、再エネ抑制の回避、レジリエンスの強化などに貢献するための技術要件をまとめる。併せて、世界中で進展している直流送配電技術について、国内外の技術や政策の動向を踏まえて、速やかに実用化を実現するための課題の整理及び抽出を行う。</p>		

	<p><b>研究開発項目 1：多用途多端子直流送電システムの開発</b></p> <p>多端子化した直流線を用いた、風力発電による電力を効果的に分配送電する潮流制御技術、ある交流系統から別の交流系統へ直流線を介して送電する潮流制御技術、一部の直流線に事故が生じた際に影響を最小限にするように適切な区間で電流遮断する保護制御技術を開発する。また、これらの制御を実現するための上位制御ユニットを開発する。なお、この開発には、シミュレーションだけでなく一部実機を用いることでシミュレーションだけでは再現できない挙動なども検証する。</p> <p><b>研究開発項目 2：多端子直流送電用保護装置の開発</b></p> <p>多用途多端子直流送電システム実現のための要素技術として、多端子直流送電用保護装置について、高速に遮断できる仕様をシミュレーションなどで整理した上で実機の開発を行う。</p> <p><b>研究開発項目 3：直流深海ケーブルの開発</b></p> <p>多用途多端子直流送電システム実現のための要素技術として、水深が深い地域を安価で安全に敷設することが出来る直流深海ケーブル及びその敷設工法等の開発を行う。</p>
<p>1. 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋</p>	
<p>1.1 本事業の位置付け・意義</p>	<p>本事業では洋上風力発電の連系線に、適切に保護・潮流制御を行うことができる高圧直流（HVDC）技術を活用することにより、信頼性が高く効率的な風力送電を可能とする。また、洋上風力発電の導入普及のみならず、地域の需給バランス維持、再エネ出力制御の回避、レジリエンスの強化などに貢献する。</p> <p>2021年10月の「第6次エネルギー基本計画」における2030年の系統増強等を通じた洋上風力発電の導入目標60億kWhの実現に向けて、本事業で開発した基盤技術等を活用し、再生可能エネルギーの拡大に貢献していく。その場合、CO<sub>2</sub>削減効果は約270万トン/年（排出原単位0.453kg-CO<sub>2</sub>/kWhで算出）となる。</p>
<p>1.2 アウトカム達成までの道筋</p>	<p>本事業の成果を洋上風力発電に活用していくには、国内において、大規模洋上風力発電が多数計画されることが必要なため、洋上風力発電の案件化に向けて、広域連系システムの長期方針や整備計画の策定などに携わる広域機関等に対して広く成果を発信し、再生可能エネルギー導入拡大における多端子直流送電システムの重要性・有効性の認知へつなげる。さらに、ユーザーとなりうる一般送配電事業者や発電事業者に対しても広く成果を発信することで、再生可能エネルギーの導入拡大のための多端子直流送電システムによる設備形成の利点等について説明し、案件化に向けた働きかけを行う。</p> <p>本事業の成果として、マルチベンダによる多端子HVDCの制御・保護のガイドライン（仮称）を作成したので、このガイドラインに基づき、実案件でのシステム構築を実施できるよう、ガイドラインを公開し、多端子HVDCの構築にて活用されるように取り組んでいく。また、本事業の成果を海外でのHVDC案件へ適用することを目指し、具体的な案件の検討やさらなる技術向上に取り組んでいく。</p>
<p>1.3 知的財産・標準化戦略</p>	<p>本事業の目的は政府の方針である再生可能エネルギーの導入拡大に対する基盤技術の普及であり、成果に関しては公開を基本とする。その中で、事業者はNEDOと協力し積極的に“成果の普及”や“標準化施策等”を進める。研究開発項目1においては、多端子HVDCの制御・保護のガイドライン（仮称）を作成し、公開する。</p> <p>また、公開領域においても利権化を進めるために、可能なものは特許取得する。本事業で得た知見の一部は、メーカーのコア技術や取引に係る競争領域のため、内部で蓄積し、国内外の市場獲得時に優位性を発揮するためのノウハウとして活用する。</p>

2. 目標及び達成状況	
2.1 アウトカム目標及び達成見込み	<p>多端子 HVDC 送電システムの主な電源として期待されている浮体式洋上風力発電は、NEDO グリーンイノベーション事業にて研究開発、および実証が予定されている。実機相当による実証は 2027～2030 年頃での検証が予定されており、実証を経て事業化が進むと期待されている。2030 年頃には着床式、浮体式を含め 10GW 相当の風力発電設備の導入が計画されており、これらの電力輸送用の一部に、多端子 HVDC 送電システムが適用され、風力発電の設備利用率が 35%とした場合、設備容量 2.0 GW 相当の風力発電にて年間 60 億 kWh の再生可能エネルギーを輸送することができる。年間 60 億 kWh の再生可能エネルギーの CO<sub>2</sub> 削減効果は、約 270 万トン/年（排出原単位 0.453kg-CO<sub>2</sub>/kWh で算出）となり、アウトカム目標となる。</p> <p>2030 年以降は、電力広域的運営推進機関（OCCTO）が計画している北海道～本州間直流送電システムに設置が予定されている定格 2 GW の自励式 HVDC 変換設備、および海底直流ケーブルの敷設 定格 2 GW（ケーブル長 約 700 km）の導入も見込める。</p> <p>さらに、国内においても洋上風力発電の立地が、従来の海域から接続水域、また一部 EEZ のエリアへ拡大することで、水深 50～200m の海域における浮体式洋上風力発電の利用が拡大し、その容量は年間 1～2 GW 程度と計画されている。浮体式洋上風力発電は、沿岸からの距離が長く、海底ケーブルに加え、陸上の変換所まで陸上ケーブルを含めると 50km 以上となり、直流送電が有利な条件となる。2030～2040 年まで平均して 1.5GW の洋上風力が導入される場合、合計 15GW の設備容量分が追加導入となる見込みであり、そのうち約 30%に多端子 HVDC 送電システムが採用される場合、4.5GW 相当のアウトカムが見込める。</p> <p>さらに、2030 年以降は、欧米において本格的な浮体式洋上風力発電の導入が進むと予測されており、2040 年には、300GW 相当の事業化が見込める。国内における実績を踏まえ、かつ国内企業の海外工場新增設、企業提携などにもより、グローバル市場の 10%程度のシェア獲得を目指す。</p>
2.2 アウトプット目標及び達成状況	<p>研究開発項目 1：多用途多端子直流送電システムの開発  目標：上位制御を含めた HIL/ミニモデルシステムの開発・検証を行い、実機の挙動を踏まえた多端子高圧直流システムの要求仕様および異社間インターフェイスの指針を作成する。  達成状況：洋上 WF の電力送電だけでなく、陸上端子間の電力融通も可能な異メーカ接続による対称単極方式 5 端子と双極方式 3 端子直流送電システムを開発し、シミュレーション（オフライン、リアルタイム、HIL）によりシステムの実運用に問題がないことを確認した。マルチベンダ化に向けた異社間インターフェイスの指針などは、評価結果、知見を整理し、標準仕様書（ガイドライン）を作成した。</p> <p>研究開発項目 2：多端子直流送電用保護装置の開発  目標：多端子直流送電用事故検出装置の試作し、直流ケーブルの事故電流が 10pu (15kA)以内に直流遮断器が動作することを確認する。  達成状況：HIL 試験にて直流ケーブル事故の各ケースにおいて、保護検出装置が機能して、直流ケーブルのいずれの事故も当初設定した事故電流が 10pu(15kA)以内に収まるまでに直流遮断器が動作し、当初設定時間内に保護でき、本装置の保護制御機能が十分であることを確認した。</p> <p>研究開発項目 3：直流深海ケーブルの開発  目標①：大容量深海ケーブルを試作し、水深 1500m 級に対応し、従来の海底ケーブル（水深 300m 級）とほぼ同じコストで生産及び敷設が可能を示す。  達成状況①：単芯 電圧 500 kV, 1 GW 級のケーブルを設計、試作、評価し水深 1500m 級に耐えうることを確認した。コスト評価について、大水深部はアルミ導体 2 重鉄線仕様、非大水深部はアルミ導体 1 重鉄線仕様の組合せの敷設条件にて、従来の海底ケーブル（深海部を迂回・回避）と同等のコストとなることを確認した。</p> <p>目標②：水深 500m 級の深海域対応の三芯直流海底ケーブルについて、試作ケーブルの仕様を決定、設計・試作を行う、</p>

	達成状況②：日本沿岸の広域の海底線直流連系を想定した場合、水深500mに敷設可能な三芯ケーブルを開発・評価し、機械・電気試験を満足した。また、三芯ケーブルの導入により敷設コスト低減や工期短縮を図ることができることを確認した。					
3. マネジメント						
3.1 実施体制	経産省担当原課	経済産業省資源エネルギー庁 省エネルギー・新エネルギー部 新エネルギーシステム課				
	プロジェクトリーダー	・プロジェクトリーダー： 中島 達人 東京都市大学 理工学部 電気電子通信工学科 教授 ・サブプロジェクトリーダー： 曾我 学 株式会社ニュージェック 電力部門 送配電グループ 統括				
	プロジェクトマネージャー	再生可能エネルギー部 ユニット長 中尾 光洋				
	委託先	<b>研究開発項目 1</b> 東京電力ホールディングス株式会社、東京電力パワーグリッド株式会社、三菱電機株式会社、東芝エネルギーシステムズ株式会社、株式会社日立製作所 <b>研究開発項目 2</b> 東京電力ホールディングス株式会社、三菱電機株式会社、株式会社日立製作所 <b>研究開発項目 3</b> 古河電気工業株式会社、住友電気工業株式会社				
3.2 受益者負担の考え方	端子直流送電システムはコストが高く、数千億規模であるため、1社でのシステム全体の構成はリスクが高い。また、各社間で通信方式、制御ロジック、必要な入出力内容等が異なり、民間が自主的にインターフェイスの調整や規格化が困難であり、国やNEDO等の中立的な機関が主体となった研究開発体制が必要である。					
	主な実施事項	2020fy	2021fy	2022fy	2023fy	
	研究開発項目 1	委託	委託	委託	委託	
	研究開発項目 2	委託	委託	委託	委託	
	研究開発項目 3	委託	委託	委託	委託	
3.3 研究開発計画						
事業費推移	主な実施事項	2020fy	2021fy	2022fy	2023fy	総額

[単位:百万円]	研究開発項目 1	398.9	375.7	831.6	259.1	1865.3
	研究開発項目 2					
	研究開発項目 3	169.8	595.7	337.7	24.1	1127.4
	会計（特別）	567.8	971.4	1169.3	283.2	2992.7
	総 NEDO 負担額	567.8	971.4	1169.3	283.2	2992.7
情勢変化への対応	<p>資源エネルギー庁により開催された「長距離海底直流送電の整備案に向けた検討会（2021年3月15日 第1回～2022年4月22日 第6回）」での検討内容を受け、開発項目を実証期間中に追加した。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・多端子 HVDC システムを構築する場合、対称単極に加えて双極システムの検討</li> <li>・敷設船や製造能力の早期確保、先行利用者との調整</li> <li>・日本の海底地質を踏まえたケーブルの防護方法に関する検討</li> <li>・大水深への敷設を行う場合、アルミケーブル等の開発に加え、洋上接続や防護方法などの技術開発</li> </ul>					
中間評価結果への対応	—					
評価に関する事項	事前評価	2019 年度実施 担当部 スマートコミュニティ・エネルギーシステム部				
	中間評価	—				
	終了時評価	2024 年度実施 担当部 再生可能エネルギー部				
別添						
研究発表、公報、論文	「査読付き」1 件、「その他」3 件					
その他外部発表（プレス発表など）	「学会発表・講演」25 件、「新聞・雑誌等への掲載」6 件、その他 10 件					
基本計画に関する事項	作成時期	2020 年 2 月 策定				
	変更履歴	2023 年 3 月 改訂（研究開発項目追加と実施期間延長による）				

# プロジェクト用語集

## 研究開発項目 I、II

用語	説明
HIL 試験	Hardware In the Loop 試験。本事業では、RTDS と実装置（実機制御盤・実機保護装置等）を接続しての試験を示す。
HVDC	高圧直流送電。High Voltage Direct Current transmission
IEC	International Electrotechnical Commission の略。 電気工学、電子工学、及び関連した技術を扱う国際的な標準化団体。
RTDS	RTDS テクノロジーズ社製のリアルタイム（実時間）でシミュレーション計算する全デジタルの電力系統解析用シミュレータ。Real Time Digital Simulator
WF	ウインドファーム。複数の風力発電を集中的に設置した風力発電所。（Wind farm）
異メーカー接続	直流送電システムにおいてお互いに接続される変換器が異なるメーカー製であることをいう。マルチベンダ（Multi-vendor）とも言う。
変換器 （交直変換器）	交流（AC）電力と直流（DC）電力の間の交直交換を行う装置。動作においては、AC⇒DC に変換する場合はコンバータ、DC⇒AC に変換する場合はインバータと呼ぶ
上位制御装置	直流送電システムにおいて、定められた各潮流の計画値により算出した端子指令値に基づき変換器制御盤へ制御信号を送信する。または、事故などにより、変換器又は直流母線の一部が突如停止し、送電線潮流又は端子電力が当該設備容量を超過した場合、当該設備容量を制限して超過しないよう洋上 WF を強制的に停止させる制御を送信する装置
シーケンス	予め定められた順序または手続きに従って制御の各段階を逐次進めていく制御
双極方式	直流送電のうち、本線が＋極、－極の 2 極で構成される
対称単極方式	単極構成の直流送電のうち、本線が正電位と負電位で構成され、その大きさが等しい方式
潮流制御	電力の流れ（潮流）の制御。自励式交直変換器であれば、逆潮流（風力等の分散電源から電力系統へ向かう流れ）を含めて、きめ細やかに制御可能
直流遮断器	直流電流を遮断する機器。事故区間の切離しや系統保護のために高速遮断が要求される
地絡	本来大地から絶縁されている電気回路が、絶縁を失い大地と電氣的に接続される状態
電力広域的運営推進機関	電気事業法に定められた、電気事業の遂行に当たっての広域的運営することを目的とした団体。Organization for Cross-regional Coordination of Transmission Operators, JAPAN (OCCTO)
転送遮断（洋上 WF）	直流送電システムにおいて、事故などにより、変換器又は直流母線の一部が突如停止し、送電線潮流又は端子電力が当該設備容量を超過した場合、上位制御装置が当該設備容量を制限して超過しないよう洋上 WF を強制的に停止させる。
変換所（端子）	直流を交流、または交流を直流へ変換する電気所
保護検出装置	直流ケーブルに地絡事故が発生し、異常電圧や異常電流が流れた場合、あらかじめ定められた整定値を超過等により事故を検出し、当該の直流遮断器へトリップ信号を送ることで事故点を切り離す。
ユースケース	システムやアプリケーションがどのような状況でどのように機能するかを示すテストケースのこと

### 研究開発項目Ⅲ（古河電気工業）

用語	説明
IEC	International Electrotechnical Commission の略。 電気工学、電子工学、及び関連した技術を扱う国際的な標準化団体。
HVDC	High Voltage Direct Current の略
がい装	機械的にケーブルを外傷から守り、張力に耐えるように、鋼帯や鉄線などを巻き付けた保護層のこと
洋上風力発電	海洋上における風力発電のこと
洋上ウインドファーム	海洋上に多数の風力タービンを設置し発電する施設のこと
電力系統	発電設備、送電設備、変電設備、配電設備、需要家設備といった電力の生産から消費までを行う設備全体のこと
北本連系線	北海道と本州の間を結ぶ一連の直流電力供給設備
再エネ	再生可能エネルギーの略
送電ロス	発電所で発電された電気が需要家に供給されるまでの間に失われる電力量のこと
側圧	物体の側面から作用する圧力のこと
引張曲げ試験	CIGRE TB623 5.2 記載の、Tensile Bending Test のことであり、ケーブルを敷設する際のシース側圧を模擬した試験のこと
敷設船	海底ケーブルの敷設・修理・回収を行うための船のこと
自航船	自船の推進器により航行するもの船のこと
MI ケーブル	導体上に絶縁紙を多層巻きし、高粘度絶縁油を含浸させた絶縁体を有するケーブルのこと
テンショナー	ケーブルをクランプで挟み込み、力を加えて張力を発生または維持する装置のこと
キャプスタン	ケーブルをドラムに巻き付けることで、張力を発生または維持する装置のこと
台船	推進力はなく、クレーンや発電機などの土台としたり、重量物の運搬に使用する船のこと
ターンテーブル	テーブルが回転することにより、海底ケーブルの巻取り、送り出しができる設備のこと。
表皮効果	交流電流が導体を流れるとき、電流密度が導体の表面で高く、表面から離れると低くなる現象のこと
架橋ポリエチレン	ポリエチレンに架橋剤の添加などの処理を施すことにより、高分子の分子鎖を立体網目状構造に分子間結合を行わせる反応を行わせたポリエチレン材料のこと
XLPE	Cross-linked Polyethylene の略であり、架橋ポリエチレンのこと
PP ヤーン	繊維状のポリプロピレンフィラメントのこと
CIGRE TB623	CIGRE（電力システムに関する世界的なコミュニティ）の発行する Technical Brochure（技術資料）の No.623（RECOMMENDATIONS FOR MECHANICAL TESTING OF SUBMARINE CABLES）。海底ケーブルの機械的な試験に関する推奨案である。
CIGRE TB496	CIGRE の発行する Technical Brochure（技術資料）の No. 496（Recommendations for testing DC extruded cable systems for power transmission at a rated voltage up to 500 kV）。直流ケーブルの試験に関する推奨案である。
シース	海底ケーブルを敷設船から海へ入れる際に、ケーブルを通過させる滑車のこと
ヤング率	フックの法則が成立する弾性範囲における同軸方向のひずみと応力の比例定数のこと
軸剛性	物体の軸方向に関する、変形のしにくさを表す
キンク	物体にループ状のねじれ(よれ、よじれ)が発生すること
バードケーシング	らせん状の巻かれたアーマー層にねじりおよび圧縮力が加わることで、鳥籠のようにアーマー層

(Bird caging)	が外側に広がる現象のこと
ロードセル	力(質量、トルク)を検出するセンサーのこと
ダミーケーブル	IEC62067:2022 Annex A 記載の reference cable と同義で、電圧を加えず、試験対象ケーブルと同じ値の電流を流し、導体温度を測定するためのケーブルのこと
逆極性雷インパルス	ケーブルに直流電圧を印加した状態で、直流電圧と逆極性の雷インパルス電圧を重畳すること
波頭長	電圧がピーク値に達するまでの時間のこと
波尾長	ピーク値の 50%まで減衰する時間のこと
IEC60060-1:2010	電気・電子に関する国際規格であり、60060-1 は High-voltage test techniques - Part 1
solid 要素	3次元の立体形状をした要素のこと
ポアソン比	物体に弾性限界内で荷重をかけた際に生じる縦方向と横方向のひずみの比のこと
FEM	有限要素法解析 (Finite Element Method) のこと
サービング	ケーブルの最外層保護層のこと。PP ヤーンが多いが、押出成形樹脂を用いることもある。
OrcaFlex	Orcina Ltd が提供する海洋分野・汎用浮体等の解析ソフトウェアパッケージのこと
艀装	敷船におけるケーブル施工のための装備や設備のこと

### 研究開発項目Ⅲ (住友電気工業)

用語	説明
IEC	International Electrotechnical Commission の略。 電気工学、電子工学、及び関連した技術を扱う国際的な標準化団体。
CIGRE	Conseil International des Grands Réseaux Électriques の略。 国際大電力システム会議。送変電に関する技術問題を討議する国際的な会議。

# 1. 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋

## 1.1. 事業の背景・目的・将来像

### 1.1.1. 事業の背景

- 国内の状況：次のように洋上風力発電の利用促進が必要とされている。

2017年(平成29年)に環境省が発行した「再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報等の整備・公開に関する委託業務報告書」において、開発不可条件を控除した我が国の洋上風力のポテンシャルは約14億kWと推計され、立地制約が比較的少なく風況が良い洋上や離島周辺の活用は、再エネの導入拡大に重要であり、海洋再生可能エネルギー発電設備の整備に係る海域の利用の促進に関する法律の施行もあり、急速に洋上風力発電の計画が立ち上がることが見込まれる。洋上風力発電の適地は、北海道・東北・九州などで大消費地から距離が離れており、かつ、離岸距離が大きくなると水深が深くなるため、沿岸に帯状に分布している。大規模な洋上windファーム（WF）を設置する場合には、欧州の導入形態とは異なり、沿岸に沿って洋上WFが順次導入されていくことが想定される。よって、複数の洋上WFと電力系統や需要地とを多端子で接続し、長距離で送電可能な直流送電システムは洋上風力の導入拡大に極めて有効である。なお、水深が深い海域は送電ケーブルの敷設ルート等に制限が生ずる。

さらに、我が国の陸上における送電容量には、限界があることから、再エネ導入量が制限されてしまう。離島に直流送電用変換所を直接建設できれば建設コストを抑えることが出来、メンテナンス面でも有効であるが、一方で系統が小さい地域では需給バランスの調整が困難となることや内燃力発電を利用する必要が生じるため、CO<sub>2</sub>の削減が難しいなどの課題もある。

- 海外の状況：例えば、次のように、近年、世界的に直流送配電技術の開発は盛んである。

欧州：北海などの洋上風力活用のため、多端子直流送電システムの研究開発、および実用化・国際規格化が進んでいる。

中国：内陸の大規模再エネ発電を海岸部の大消費地に送る長距離大容量多端子直流送電を開発、実用化がなされ、その技術は洋上風力発電にも適用・拡大されている。

これらの海外動向より、電源送電と地域間連系強化を両立する多端子直流送電システムへの期待も高まっており、我が国において、その技術開発・実証を先行することは、国内のカーボンニュートラル達成だけでなく国際的な競争力確保においても極めて重要である。

### 1.1.2. 事業の目的

我が国の海象・海域の特性/特質を考慮した洋上風力発電と電力系統を効率的に繋ぐ技術開発は重要性が高く、風力発電をはじめとする再生可能エネルギー（再エネ）の導入を最大限加速・推進させるため、系統強化、規制の合理化、低コスト化等に資する研究開発を着実に進めることが必要となる。研究開発事業においては、世界中で進展している直流送配電技術について、国内外の技術や政策の動向を踏まえて、速やかに実用化を実現するための課題を整理及び抽出し、多用途多端子直流送電システムの基盤技術を確立し、再エネ導入拡大や系統強化及び産業技術力の向上を図る。

### 1.1.3. 事業の将来像

沿岸に帯状に分布する風力発電の直流送電線を多端子化して適切に保護制御・潮流制御を行うことで、信頼性が高く効率的な風力送電を可能とする高圧直流（HVDC）技術を社会実装し、地域間への電力供給などの用途にも利用できる制御技術を活用することで、風力（再エネ）の導入普及のみならず、地域の電力需給バランス維持、再エネ抑制回避、レジリエンス強化などに貢献する。

## 1.2. 政策・施策における位置づけ

今後のエネルギー政策として、2018年7月に閣議決定された「第5次エネルギー基本計画」には、風力発電をはじめとする再生可能エネルギー（再エネ）については導入を最大限加速・推進していくとともに、系統強化、規制の合理化、低コスト化等の研究開発を着実に進めることが記載されている。更に2019年4月の海洋再生可能エネルギー発電設備の整備に係る海域の利用の促進に関する法律（再エネ海域利用法）の施行にともない、各地で急速に洋上風力発電の計画が立ち上がることが見込まれる。こうした中、僻地にあることが多い洋上風力発電と電力系統を効率的に繋ぐ技術開発は重要性が高い。さらに、2021年10月の「第6次エネルギー基本計画」において、2030年の再エネ電源構成比率が36～38%程度に引き上げられ、この実現に向けた取組みが急務となっている。（図1-1-1）

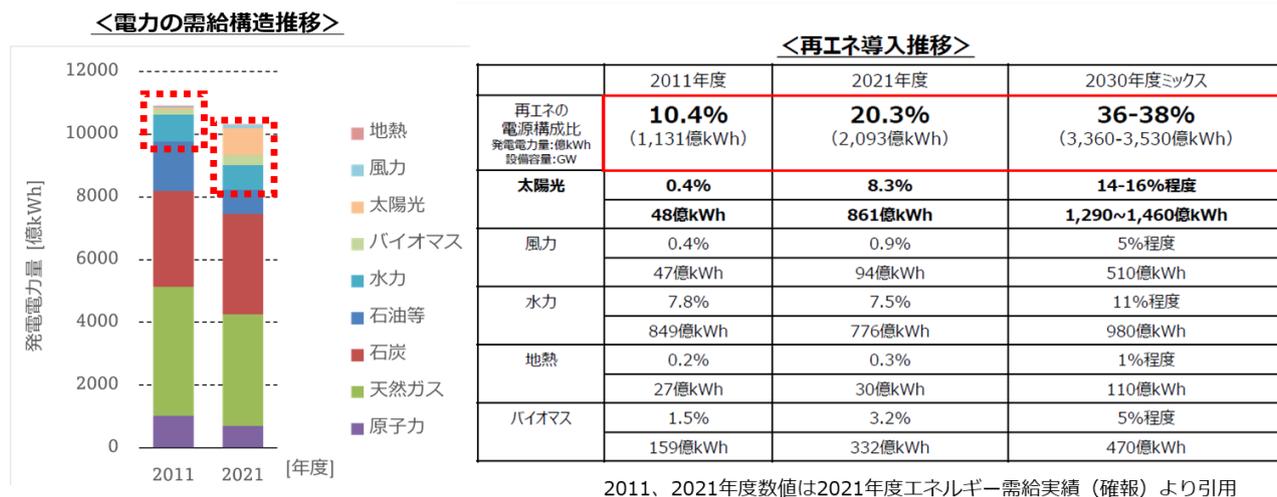


図 1-2-1 第6次エネルギー基本計画における2030年の再エネ電源構成比

「第6次エネルギー基本計画」における洋上風力の位置づけは、大量導入やコスト低減が可能であるとともに、経済波及効果が大きいことから、再生可能エネルギー主力電源化の切り札として推進していくことが必要である。

また、系統制約の克服に向けた取組の一環として、直流送電の位置づけについて次のように言及されている。連系線等の基幹系統の増強に向けては、全国の再生可能エネルギーのポテンシャルを踏まえつつ、電力融通の円滑化によるレジリエンス向上に向けて、全国大での広域連系系統の形成を計画的に進めるためのマスタープランを策定する。その際には、将来の連系を検討している電源も含めて、各電源のポテンシャルの着実な把握を通じて、効率的かつ計画的な系統増強を行う。また、洋上風力を始めとする再生可能エネルギーのポテンシャルの大きい北海道等から、大消費地まで送電するための直流送電システムを計画的・効率的に整備すべく検討を加速する。その際、経済効果の大きさや経済安全保障の視点等も踏まえつつ、国内設備投資の促進策等についても検討していく。

また、エネルギー基本計画以外に、本事業に関する政策・施策については、次のようなものがある。

- 「洋上風力産業ビジョン（第1次）」及び「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」

日本における洋上風力の導入拡大と産業競争力強化の好循環を達成するため、「洋上風力産業ビジョン（第1次）」及び「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」において、「まずは魅力的な国内市場の創出に政府としてコミットすることで、国内外からの投資の呼び水とし、事業環境整備等を通じて投資を促進することにより、競争力があり強靱な国内サプライチェーンを構築する。

- 再生可能エネルギー海域利用法の改正（EEZ利用のための閣議決定）

2024年3月12日、洋上風力発電の設置場所を現行の領海内から排他的経済水域（EEZ）に拡大する再生可能エネルギー海域利用法の改正案を閣議決定した。領海は、海岸線（基線）から海側へ12海里（約22km）以内であるが、接続水域（24海里：約44km）～EEZ（200海里：約370km）の海域に洋上風力発電が設置されることになれば、海底直流送電は唯一の電力輸送手段となり、その必要性から導入拡大が期待できる。

- OCCTOのマスタープラン策定（2023年3月29日）

再エネ適地から大消費地まで、大容量の電力を長距離送電する観点から直流送電の検討も視野に入れており、地域間連系線の増強に向けて、最新の技術動向や経済性などを踏まえながら直流か交流かを選択していく方向性が示されている。

- GX推進法成立（2023年5月）

「我が国のグリーン転換の実現に向けて（令和5年8月23日）」では、GX推進戦略に定められた取組の中から、民間のみでは投資判断が真に困難な事業であって、排出削減と産業競争力強化・経済成長の実現に貢献する分野への投資に優先順位をつけて、資金使途の対象としてとされており、具体的な資金使用の例として、電力・ガス市場の整備として、「海底直流送電等の整備」が言及されている。

### 1.3. 技術戦略上の位置づけ

NEDO技術戦略センター（TSC：2024年7月の機構の組織再編に伴い、イノベーション戦略センターと改名）は、洋上風力のように海域に偏在、若しくは太陽光発電のように需要家付近に遍在する再生可能エネルギーが、主力電源となった場合でも、電力系統や需要家システムを効率的に運用しかつ需給バランスを最適に保つべく技術開発の方向性の一つとして、「超分散エネルギーシステム分野（直流技術）の技術戦略策定に向けて」と題した技術戦略を2023年9月に発行した。この技術戦略においては、直流送電に関して、次の2点について言及している。

- HVDC送電システムは、再エネ主力電源化の切り札とされる洋上風力発電の導入拡大を支える重要な解決・実現手段であり、洋上風力発電をより効率的かつ柔軟に送電網に接続することを可能とする多端子直流送電システム技術を確立することにより、我が国における再エネ大量導入を実現するだけでなく、海外市場への展開を通じて世界の再エネ大量導入にも貢献することが可能となる。
- 一方で、このような大規模な社会インフラは技術開発だけでなく、実際に設備を構築するにあたっての利害関係者の理解獲得等の様々な環境整備が必要であり、それに時間を要することも多い。再エネ海域利用法に基づく洋上風力発電の開発が開始され、直流送電を含めた広域連系システムの議論が進んできているが、技術開発の進展と歩調をあわせて社会実装に向けた環境整備が着実に進み、我が国における風力発電の大量導入を支える、HVDC送電システムが早期に構築されることが期待される。

また、この技術戦略において、HVDC送電システムに関する技術開発の方向性について（図1-1-2）、HVDC送電システムの実証を通じた性能検証や日本特有の条件への適用の必要性について述べている。

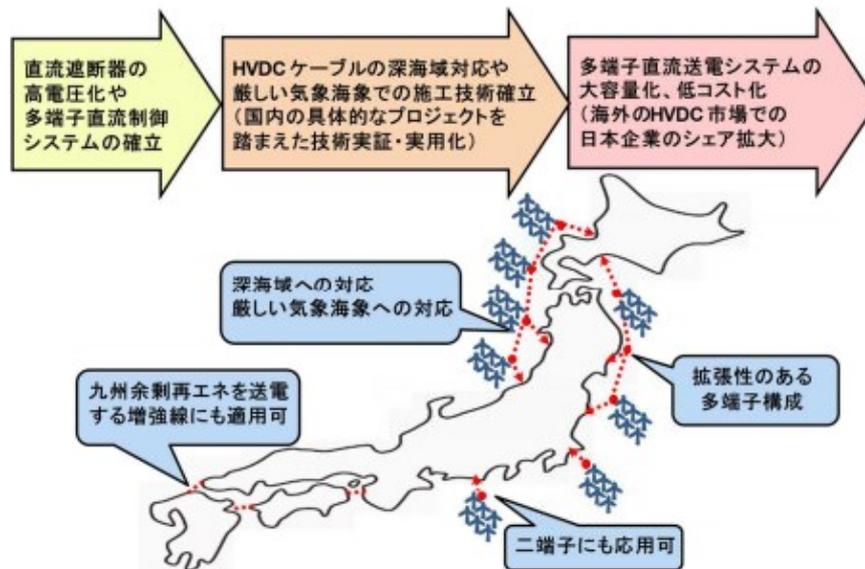


図1-3-2 NEDO TSC技術戦略 HVDC送電システムの技術開発の方向性

#### 1.4. 外部環境の状況

2050年のカーボンニュートラルの達成については、世界各国が類似の政策を掲げ、同時に必要となる研究、技術開発、実証を通してエネルギーシステムの脱炭素化を目指している。世界的に電力システムの標準である交流送電は、送電容量や距離の制約、異周波数の系統を直接連系できないなどいくつかの制限があるが、高圧直流送電システムは、これらの課題を克服するのに役立つ。従来のHVDCシステムは一对の送電端と受電端による2端子の構成であったが、複数の送電・受電端を有する多端子HVDCシステムが導入されつつある。多端子HVDCシステムは電力システムの構成をメッシュ化でき、経済性・柔軟性・信頼性で利点をもたらすことができ、各国で研究、技術開発および実証が盛んである。

以下に、直流送電および関連技術に関する各国の取組状況を示す。

##### 1.4.1 欧州の動向

欧州は、2050年までの気候中立（温室効果ガスの排出実質ゼロ）を実現すべく欧州グリーン・ディールを2019年10月14日に公表、「2050年までに排出実質ゼロを達成する世界初の大陸になる」という野心的な目標を掲げた。この政策実現の中心的役割を担う再エネは、需要地である欧州大陸から離れた北海域の洋上風力や各地に点在する太陽光発電などであり、地理的に偏在・遍在し、および気象条件に大きく依存する。再エネ出力の間欠性や不安定さの解消と需給バランスを維持するための仕組みが欧州域全体で必要となる。

ENTSO-E（欧州電力送電システム運用者ネットワーク）は、欧州の送電システム運用者（TSO：Transmission System Operator）相互の協力のための団体であり、36か国を代表する40のTSOが加盟しており、世界最大の相互連系された電力網である欧州電力システムの安全で協調的な運用に責任を負っている。技術協力における中核的な歴史的役割に加えて、ENTSO-Eは、各国TSOの共通の意見・計画を定期的に公表している。

例えば、TYNDP（Ten-Year Network Development Plan）2022（4）のポートフォリオには、43,000 kmを超えるケーブルと架空線を含む事業が計画されている。その計画のうち18,000 km（42%）がACで、25,000 km（58%）がDCである。欧州では、1980年代以降、長距離送電や地域間連系のため、半導体電力変換装置を用いた2端子HVDCの導入が多数、進行しているが、直流技術の急速な進歩により普及が進み、近年、幹線系統建設計画における直流の割合が拡大している。特に洋上風力用の事業には海底直流送電ケーブルへの投資増加が必須になると予想されている。

このようなニーズもあり、近年は、洋上風力の更なる拡大に向けて多端子 HVDC システム、マルチベンダによるインターオペラビリティの実現化に向け、欧州委員会が支援する研究イノベーション事業である Framework Program として、大規模な技術事業が 2014 年より継続して実施されている（図 1-4-3 参照）。

Best Paths（再エネ大量導入向け多端子 HVDC 等送電網の近代化）や PROMOTioN（洋上風力導入向けメッシュ状 HVDC 送電ネットワークの検討）などの成果や知見は、READY4DC（マルチベンダ、多端子直流技術への準備・課題抽出と整理の事業：2022～2023 年）で活用された。

HVDC システムをマルチベンダで多端子構成する場合、多くの規定やルール作りが必要となるが、2023 年 1 月に始まった InterOPERA は、多端子・マルチベンダ HVDC システムの社会実装に向けた実証・検証事業であり、2027 年 4 月まで実施され、予算も規模の大きい事業である（図 1-4-4 参照）。この事業では、HVDC システムを構成する設備類の異メーカー間の設計・運用時の互換を可能にする条件・条項を整理し、共通の機能仕様と標準インターフェイスの確立を目指しており、NEDO 本事業と目的・方向性が近い内容である。

多端子HVDC研究プロジェクト名	Best Paths TRANSFORMATION FOR SUSTAINABILITY	PROMOTioN PROGRESS ON MESHED HVDC OFFSHORE TRANSMISSION NETWORKS	Inter OPERA Enabling multi-vendor HVDC grids
資金提供	FP7	Horizon 2020	Horizon Europe
予算総額	約35.5M€≒約56億円	約34.5M€ ≒約55億円	約50.7M€ ≒約81億円
事業期間	2014.10～2018.9	2016.1～2019.12	2023.1～2027.4

出典：欧州委員会 CORDIS - EU research results WEBサイトを参考にNEDO作成。

図 1-4-3 欧州委員会が支援する研究イノベーション事業 Framework Program の例

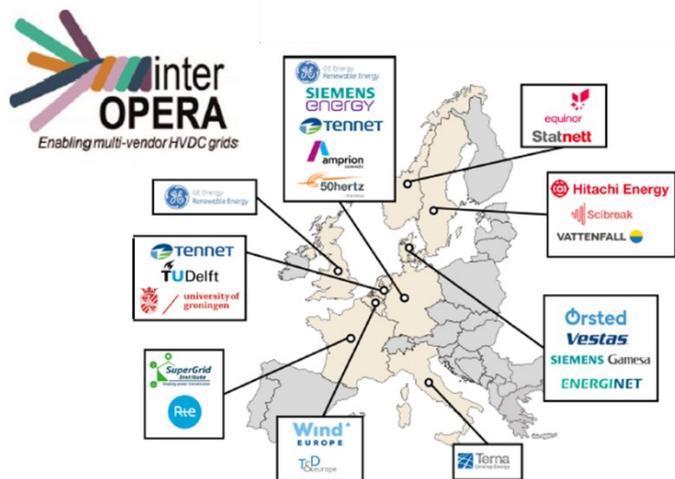


図 1-4-4 InterOPERA 参画機関

これらのような研究開発や技術実証等の成果により、HVDC 送電システムの多端子かつマルチベンダー化が現実味を帯びている（図 1-4-5）。

多端子直流送電システムの実証や運用は、2010 年代に中国にてスタートしているが、2020 年代から欧州でも本格的な事業が開始される見込みである。特に、北海の洋上風力発電の導入拡大（例：North Sea Wind Power Hub プロジェクト 2030 年 65 GW, 2050 年 150 GW）、および多国間連系や基幹系統整備のため、2025 年以降、多数の多端子 HVDC の導入が計画されている。オランダ・ドイツの TSO のひとつである TenneT では北海の浅瀬（ドガーバンク）において人工島を建設し、直流送電の HUB ポイントを建設することを提案しているが、高調波共振や振動等の計算機では模擬できない要因による事故が発生しており、技術的な懸念を解消する必要もある。

Project Aquila は、2022 年 6 月、英国政府（ビジネス・エネルギー・産業戦略省：BEIS）により支援が公表された「洋上電力系統の高度化事業」である「Pathfinder」プロジェクトの一つである。HVDC-HUB の構築により、洋上ウィンドファーム、国際連系、海底送電線等に必要となる複数の HVDC 変系統を統合（連系）でき、HVDC 変換所の重複回避（用地の節約やコスト削減）が可能となる。この事業では、2017 年に設立された National HVDC Centre にて多端子・マルチベンダ構成における各種技術検証、シミュレーションによる評価がなされる予定である。

多端子 HVDC 切替所の検討については、Ofgem SIF（英国ガス・電力市場局による戦略イノベーション基金）の Discovery project のひとつとして Network-DC 9（事業期間：2023～2027 年）が、Aquila プロジェクトに付随し、直流遮断器（DCCB）と直流切替所（DCSS）の検討、HIL（Hardware In the Loop）評価試験等を実施する。この事業には、英国の電気事業者、研究機関、大学らに加え、仏より SuperGrid Institute も参画しており、国際連携による知見が蓄積されることになる。

イタリアの TSO である Terna 社は、2030 年に向けた幹線整備計画を発表した。この計画によれば、長距離を低損失で大容量輸送でき、既存系統への柔軟性を有する HVDC 送電（海底 HVDC 送電、陸上 HVDC への置換）がイタリア国内の幹線および隣国の国際連系の主力となっていく予定である。HVDC 幹線は、複数の経路の潮流を柔軟とする多端子化が計画されている。この幹線整備計画では、陸上、海底の HVDC 送電ルート新設のみならず、既存の高圧交流（HVAC）を HVDC へ置換するプランもある（理由：新規送電ルートの用地確保困難、かつ送電容量を UP させる必要があるため）。

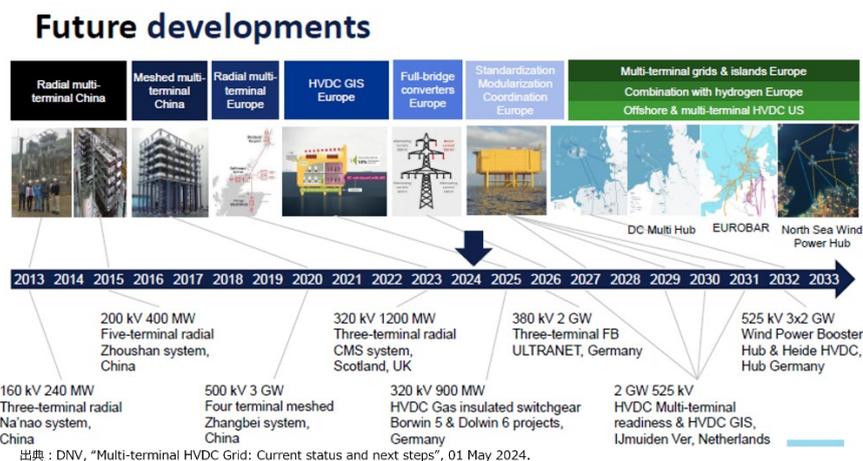


図 1-4-5 HVDC 送電システムの多端子化の進展状況

#### 1.4.2 中国の動向

1989 年、中国で最初の HVDC 送電システム（±500 kV, 1046 km, 1200 MW）が湖北省葛洲～上海で稼働した。これは、世界初の商用 HVDC（Gotland～スウェーデン本土）から 30 年以上も遅れてのことであった。しかし、中国の HVDC 送電は、政府の後押しもあり、その後急速に拡大し、送電容量・回線数とも大幅に増大している。

2007 年には、中国初の国産実証プロジェクトとなる±500kV 貴州～広東間の HVDC 送電が開始され、中国独自による HVDC の設計運用技術を確認させた。2009 年には世界初の UHVDC（超高压直流）送電となる±800kV の雲南～広東間のプロジェクトが開始され、UHVDC 時代の新しいフェーズへの参入を果たしている。

2013 年には世界初となる広東～南澳島の多端子・柔軟 HVDC プロジェクトを開始、更に 2014 年には 5 端子柔軟直流送電システム（±200 kV）を浙江省の舟山島嶼に導入している。また、張北フレキシブル DC 系統実証事業があり、大規模な風力発電、太陽光発電、エネルギー貯蔵（揚水ダム）などのエネルギーを収集し輸送する 4 端子フレキシブル HVDC 系統を構築する（図 1-4-6）。このシステムの公称電圧は 500 kV, 648.2 km の全で架空送電線を使用す

る。この4端子HVDC送電システムは、2022年冬季オリンピックの開催時、北京周辺の会場にクリーンな電力を輸送した。また、将来には2端子を加え、6端子HVDC送電システムとして運用する計画もある。



図 1-4-6 張北4端子フレキシブルHVDC送電システム

近年は中国国内の電力需要の伸びの鈍化により、HVDC分野について建設投資を優先する経済面や実運用時の送電利用に空きが多い等の指摘や課題もあるが、中国における直流送電分野の運用実績・技術ともに世界トップレベルにあると言える。中国は、2022年から同国初となる如東洋上風力発電（江蘇省 如東県）公称電圧 $\pm 400$  kV、容量1.1 GW、海底ケーブル長100 kmの運用を開始、さらに瀋陽洋上風力発電（江蘇省 射陽県）公称電圧 $\pm 250$  kV、容量1.1 GW、海底ケーブル長83 kmを追加するなど、架空直流送電で得た知見を海底ケーブル送電へ展開している。

中国内で高まる直流技術の更なる研究開発推進のため、2015年、清華大学にDC研究センターが設立された。DC送配電の主要な技術（遮断・保護、制御、パワエレ、システム）と関連する機器の研究開発を中心に、高電圧（HV）のみならず、中電圧（MV）および低電圧（LV）の全ての直流電圧階級に焦点を当て、3つ電圧レベルのデバイス、機器、システムの理論研究からエンジニアリングまでの体系的な構築を行う。また、直流システムの理論構築、コア技術者、標準化や規格とアプリケーション実務者の養成など、エネルギー産業の基盤全般の構築に寄与することが期待されている。

#### 1.4.3 米国の動向

米国には電力システムに関して、政府、民間、大学研究機関などにより多くの議論があるが、DOEの省エネ局、再エネ局が、全米の基幹送電システムの増強についての検討を実施し報告書 National Transmission Needs Study (2023.9) としてまとめている。この報告書によれば、米国の電力システムの根幹となる信頼性と回復力を維持に適した強靱な送電網の在り方は、3系統間（東、西、テキサス）の電力融通の促進することであり、混雑緩和、地域差・時間差（地域間値差）を考慮し経済性を追求した系統整備計画が必要となる。

具体的なHVDCシステムの導入計画は、各ISO（Independent System Operator：独立送電システム運用者）にて検討されるが、必要とされる領域としては「東海岸や西海岸の洋上風力発電電力の都市部への送電」、「山間部・中間帯で発電される陸上風力の長距離輸送」、および「東西テキサスの3大系統間の連系強化」などが有望である。有望なHVDCシステム導入領域のうちDOEは、大西洋で得られる洋上風力電力を需要地に海底直流送電で輸送する

ための検討を Atlantic Offshore Wind Transmission Study Final Report (2024.3) としてまとめた。この報告書では、2050 年までに米東海岸の洋上風力発電 (2030 年 30 GW, 2050 年 110 GW) を稼働させるため、多端子・マルチベンダの HVDC システムの導入が必要と述べている。洋上風力の発電を放射状 (ラジアル: 2 端子構成) に集電するよりも NW 化 (=多端子化) した方が安価となる旨計算されている。試算された費用便益比 (Cost-Benefit Ratio は、B/C=2.0~3.0 程度である。

この計画の実現のため、2025 年までに大西洋岸地域協力団体を設立し、信頼性基準策定、洋上送電・陸上送電網計画の明確化する。2025~2030 年頃には洋上送電網の計画立案、HVDC 技術要件の標準化を行うとともに、英国の事例を参考とし、2030~2040 年までに米国立 HVDC 試験・認証センター設立を構想している。

長距離やケーブル送電の場合、優位となる HVDC システムであるが、既存の交流システムと比較して市場規模が小さく、設備費用の割高感があることは 2024 年時点で否めない。このため、DOE は 2023 年秋から、直流送電システム構成の最適化、仕様の標準化制定、施工方法の検討などによるコストダウンのため High-Voltage Direct Current (HVDC) COst REDuction (CORE) Initiative と称する事業を開始した。この事業の定量的な目標は、米国の産学官連携により HVDC システム (変換所、ケーブル・電路、保護、制御) などのコストダウン、および長寿命化、また必要となる標準化に取り組むための研究開発により、2035 年までに 35% (35×35) の費用抑制が目標である。

また、DOE は、直流送電分野の中小企業の育成や大学からの新たなアイデア創出のため、高圧直流賞 (High Voltage Direct Current Prize) という HVDC システムの性能・能力向上、ソリューション等、各種アイデアの懸賞型公募も実施しており、業界の裾野拡大を図っている。

以上のように、欧米、および中国など主要国は、再生可能エネルギーである洋上風力を最大限活用すべく、フレキシブルな潮流制御が可能であり、大容量の電力を効率的に輸送するための技術として多端子直流送電システムの導入に意欲的である。多端子直流送電システムは、技術・産業の幅が広く、国内以外の海外へ展開することも可能であり、我が国の産業技術力向上のためにも、NEDO 研究開発事業は必要である。

### 1.5. 他事業との関係

本事業「多用途多端子直流送電システムの基盤技術開発」は、2015~2019 年度に実施された前身事業である「次世代洋上直流送電システム開発事業」の後継事業に該当し、図 1-5-7 に示す通り、2020~2023 年度までの 4 か年に開発項目①、②、③を実施し、2023~2025 年まで実施する開発項目④を加え、直流送電に関するシステム、要素技術、検証評価手法、海底送電ケーブルの開発、およびその施工技術に関する技術全体を網羅する研究開発事業である。前身事業との差分について、図 1-5-8 に示す。

また、これらの事業の成果が社会実装される際、実事業に携わるコア要員や人的リソースの確保など人材育成のための事業である「NEDO 特別講座」を併設して開設、運用している。

また、国内外の直流事業や技術動向に関する情報収集、および海底直流送電の構築や運用に必要な条件や情報の整理のための調査事業とも合わせ、本事業の成果を最大化、かつ、より有益となるよう運営している。

本事業は、電力の輸送・運用に関する技術開発であり、海底ケーブルが敷設される場面が、成果の主たる利活用先となる。このため、NEDO においても、2008 年度~「風力発電等技術開発」や 2021 年度~実施されているグリーンイノベーション基金事業/洋上風力発電の低コスト化の実証成果、およびその社会実装となる浮体式洋上風力事業化の動向に合わせて、多端子直流送電システムを滞りなく構築し、運用するための取組が必須となる。

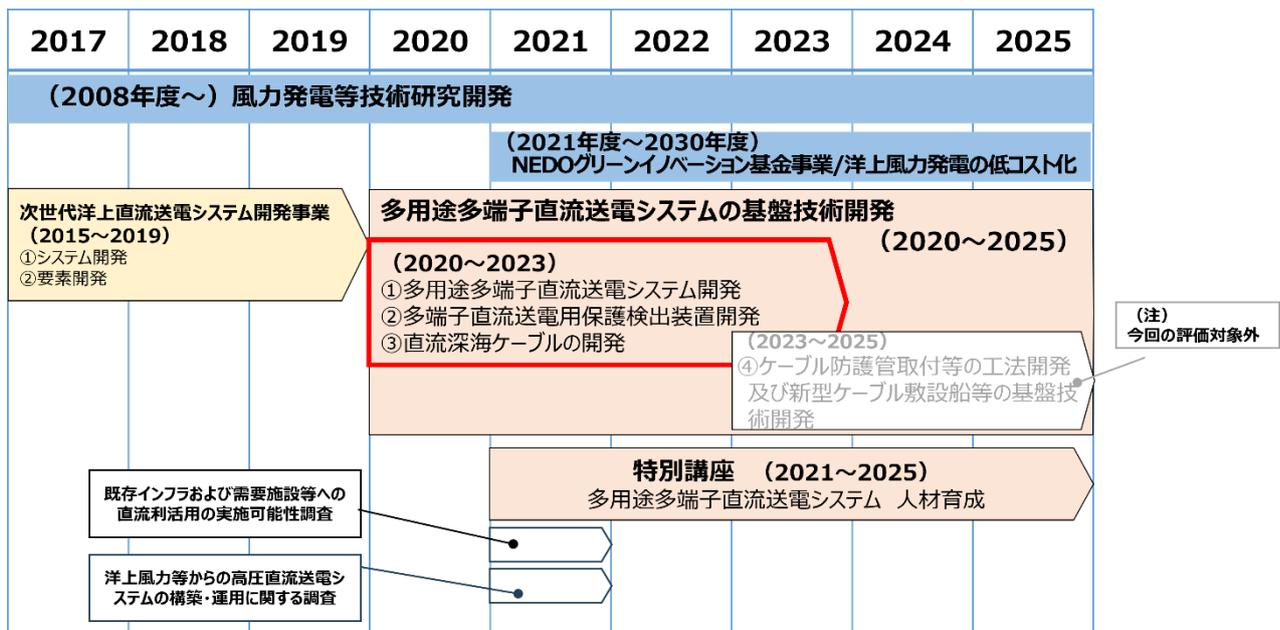


図 1-5-7 他事業との関係

	次世代洋上直流送電システム開発事業 (2015～2019)	多用途多端子直流送電システムの 基盤技術開発事業 (2020～2023)
開発目的	・ 洋上風力向けの高信頼性、低コストの多端子直流送電システムを開発	・ 洋上風力、地域間連系や離島連系なども含めた <b>多用途多端子直流送電システムを開発</b>
開発内容	・ システムはデジタルシミュレーション、各要素は実機（試作・ミニモデル）で開発。	・ システムについて、HIL試験を実施 (システムとして組み合わせた時の実機の挙動を考慮した開発) ・ <b>対称単極に加え、双極のシステム構成で検証</b>
想定モデル	・ 洋上風力発電から陸上交流系統への一方向の送電制御がメイン。	・ 風力送電、地域間連系、離島連系も含めた <b>多方向の送配電制御</b>
保護制御	・ シミュレーションで構築（実機開発せず）	・ <b>多端子直流送電用保護検出装置の開発、および上位制御装置の製作</b>
ケーブル	・ 500kV用の低コスト化の技術開発、水深200mまでを想定。深海域を迂回し、ケーブル長、コスト、および敷設期間が増加することの回避について検討	・ <b>直流深海ケーブルの開発 (単芯1500m, 三芯 500m)</b>

図 1-5-8 前身事業との差分

### 1.6. アウトカム達成までの道筋

本事業では、2030年度 系統増強等を通じた洋上風力発電の導入拡大による、CO<sub>2</sub>削減効果 2.7 百万トン/年をアウトカム目標としており、風力の直流送電線を多端子で接続して適切な保護制御装・潮流制御を行うことで安全かつ効率的な風力送電を可能とする HVDC 技術開発は必要不可欠である。そこで、研究開発項目 I～IIIとして以下の通りアウトプット目標を据えている。

#### 研究開発項目 1 多用途多端子直流送電システムの開発

- ・ 上位制御ユニットと変換器制御ユニットと保護装置の実機をデジタルシミュレーション内で構築した多端子高圧直流送電システムに接続し、実機の挙動（通信等）を踏まえたシステムを構築して検証を行う。また、異社間インターフェイスの指針を整理する。

- ・ 実機の挙動（通信 等）を踏まえ、具体的なモデルケースを想定し、適切に異社間で潮流制御が可能となる上位制御の要求仕様をまとめる。

### 研究開発項目 2 多端子高圧直流送電保護装置の開発

- ・ 実機の挙動（通信 等）を踏まえ、具体的なモデルケースを想定し、必要な時間内（事故電流が直流遮断器の遮断可能電流に収まるように）に遮断できる保護装置を開発し、その要求仕様をまとめる。

### 研究開発項目 3 直流深海ケーブルの開発

- ・ モデルケースにおいて従来の海底ケーブル（水深 300m 級）とほぼ同じコストで生産及び敷設可能な深海ケーブル（水深 500～1500m 級）を開発する。

本事業を通じて、これらの HVDC 送電システムの実証を通じた性能検証を終え、2023～2025 年で HVDC 深海ケーブルおよび敷設工法の開発により HVDC 送電システムの日本特有の条件への適用に取り組むとともに、社会受容性の向上として本事業成果の PR や人材育成事業を通じて、多端子直流送電システムの大容量化、低コスト化を実現していく。

また、アウトカム達成には HVDC 技術のみならず、洋上風力発電の導入拡大も必要不可欠であり、「海洋再生可能エネルギー発電設備の整備に係る海域の利用の促進に関する法律（再エネ海域利用法）」等と歩調を合わせる。再エネ海域利用法に伴う環境アセスメント（4～5 年程度）後の風力設備建設作業に本事業の成果を盛り込むことで、洋上風力導入を促し、第 6 次エネルギー基本計画の目標（2030 年に風力発電 23.6GW、うち、洋上風力 5.7GW）達成を目指す

アウトカム達成までの道筋を図 1-5-8 に示す。開発項目 I、II、III の成果をもとに、事業者にて実業ための体制整備やエンジニアリングツール、ファイナンス評価手法の確立を実施する。また製造業者は、直流遮断器や直流開閉所、および深海用直流ケーブル等の詳細や制作仕様を検討し、製造までの体制を整える。2030 年頃には、国内における浮体式洋上風力の実証事業が完了し、本格的な事業化の準備が進む。また、1.4 項の外部動向で示した通り、海外の洋上風力も導入が進むことで、国内企業の海外への展開の機会が高まる。海外市場にて一定のシェアを獲得することで、製造の平準化およびコストダウンが図れ、国内における多端子直流送電システムの導入判断のハードルを避けること寄与することが期待できる。

NEDO 事業の成果、および国内外での導入実績を積むことで、更なる普及拡大が期待できるが、国際標準化はこれらをサポートするための効果的なツールとなる。事業終了後も、設計ガイドラインを IEC 等の国際標準や規格類との整合をはかるための、情報発信・共有、調整の継続した作業が必要となる。また、直流送電システムは、設備容量・規模が大きく、かつ既存の交流系統に与える影響が大きいため、系統連系規程もしくは HVDC 版の Gird code などの整備も平行して必要となる。これらの標準や規格、規程類が整うことで、より安定し信頼性の高い HVDC システムの導入が拡大し、経済的かつ合理的な運用が実現できる。

洋上風力発電の以外にも、陸上側でも風力発電や太陽光をはじめとした様々な種類の再エネ導入拡大が進むと予測されており、この結果、慣性力不足や系統の不安定化、電力品質悪化、レジリエンス低下などの多くの課題が顕在化すると考えられている。自励式 HVDC 変換装置は、STATCOM の機能を兼ね合わせており、大規模洋上風力からの電源送電ニーズのみならず、電力品質・レジリエンス向上を目的とした系統間連系強化ニーズなどの社会的要請にもこたえることができる。自励式変換器の機能を活用し、GFM、電圧・周波数制御などによる交流系統の安定化・信頼化に寄与が可能である。これらにより、本事業のアウトカムとして、再エネ大量導入による 2050 年カーボンニュートラル達成に貢献しつつ、系統間連系の強化による電力取引の活性化、周波数や過渡安定度等の電力品質・レジリエンスの向上にも寄与する道筋を立てることが可能となる。

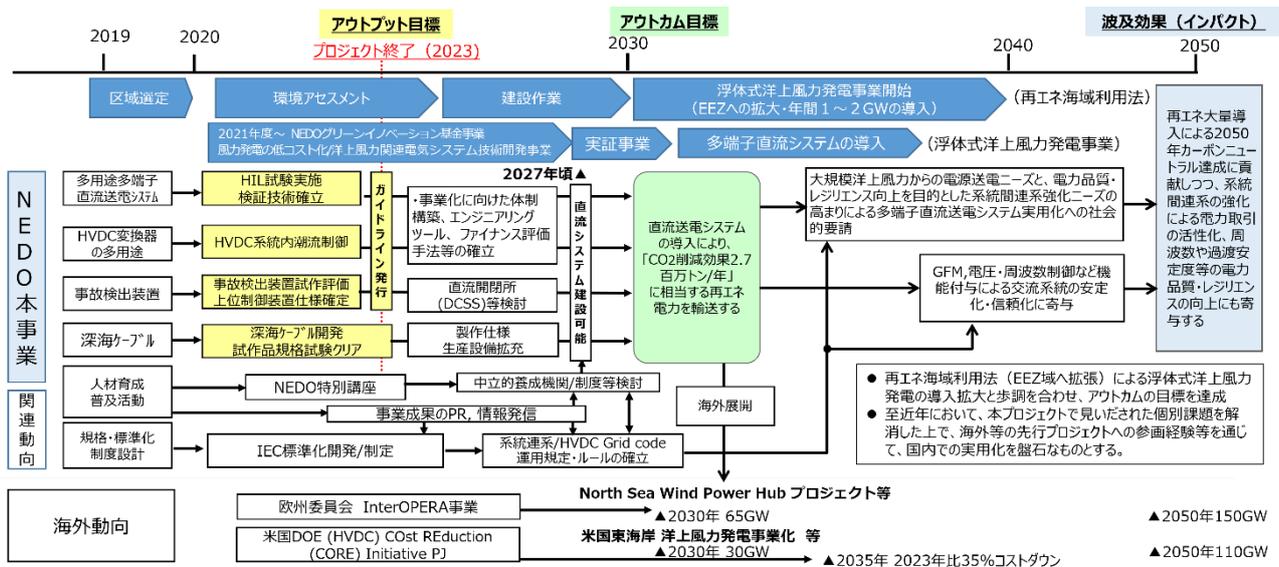


図 1-6-1 アウトカム達成の道筋

※系統増強等を通じた洋上風力発電の2030年度導入見込量 60 億 kWh 注 1) を導入した時の CO<sub>2</sub> 排出量削減量は、排出原単位実績 (R2 年度 : 0.000453 t-CO<sub>2</sub>/kWh 注 2) より約 2.7 百万 t-CO<sub>2</sub>となる。

注 1) 2030 年度におけるエネルギー需給の見通し (関連資料) -R3.10 経済産業省

注 2) 電気事業者別排出係数 (特定排出者の温暖効果ガス排出量算定用) -R2 年度実績- R4.1.7 環境省・経済産業省公表、R4.2.17 一部修正、R4.7.14 一部追加・更新

### 1.7. 知的財産・標準化：オープン・クローズ戦略

本事業での成果について、公開・非公開は以下の図 1-7-9 のとおりとした。システム開発は、競争領域として、権利化を進め、多端子マルチベンダ直流送電システムの権利化を図る。要素技術開発 (電力変換器、直流遮断器、直流ケーブル等) についても、競争域として、各回路の詳細設計など各社ノウハウになる部分は秘匿し、公開できる技術は積極的に特許化を推し進める。一方で、システム運用・制御、および評価手順に関する詳細な技術、および要素技術・構成装置・設備の設計、製造/生産・品質管理等については、競争力の源泉であり、ノウハウと秘匿する。

IEC 国際標準化分野等への積極的な参画・実証成果の規格化提案、およびマルチベンダ化に必要な開示条件については、標準化を推進する。

- ・TC115 HVDC システム
- ・SC22F 半導体電力変換器
- ・TC20 電力ケーブル 等

および国内審議団体や JEC (電気学会 電気規格調査会) との協調した活動と連携。

	非競争域	競争域	
公開	<ul style="list-style-type: none"> <li>・多端子直流送電システムの計画・設計・ガイドライン共通事項・用語、マルチベンダ開示範囲</li> <li>・システム要件・、基本構成、運用条件/環境</li> <li>・変換器、遮断器 仕様・特性</li> <li>・ケーブル試験規格</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・直流送電システム（運転制御、事故検出、システム構成、監視・通信等）</li> <li>・電力変換器（回路構成、構造等）</li> <li>・直流遮断器（構成・構造等）</li> <li>・直流ケーブル（絶縁物・高分子組成、ケーブル構造、接続（工法・端末処理）、試験・試験設備等）</li> </ul>	<p>→ 積極的に 権利化</p>
非公開		<ul style="list-style-type: none"> <li>・システム全体制御（シーケンス・プログラム・詳細処理フロー等）</li> <li>・電力変換回路・制御</li> <li>・直流遮断器機械・半導体回路詳細設計、制御・機構</li> <li>・構造設計/解析技術、材料組成構成</li> <li>・製造・生産技術、品質管理</li> </ul>	<p>→ ノウハウとして 秘匿</p>
			<p>→ 標準化を推進</p>

図 1-7-1 オープン・クローズ戦略

### 1.8. 知的財産管理

本事業における知的財産管理は、以下（１）～（３）の通り実施した。

#### （１）知的財産権の帰属、管理等取扱い

研究開発成果に関わる知的財産権については、「国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 新エネルギー・産業技術業務方法書」第 25 条の規定等に基づき、原則として、全て委託先に帰属させることとする。なお、開発段階から、事業化を見据えた 4 戦略を構築し、適切な知財管理を実施する。

#### （２）知財マネジメントに係る運用

本プロジェクトは、「NEDOプロジェクトにおける知財マネジメント基本方針」を適用する。

#### （３）データマネジメントに係る運用

本プロジェクトは、「NEDOプロジェクトにおけるデータマネジメント基本方針（委託者指定データを指定しない場合）」を適用する。

## 2. 目標及び達成状況

第2章では、アウトカムおよびアウトプット各々の目標及び達成状況について報告するが、その前に、本事業の技術基盤の軸となる効率的な電力輸送に適用される直流送電の必要性について説明する。

従来から洋上風力発電の導入が進められてきたが、それらの事業の多くは沿岸から近い領海（12海里：約22km以内）に導入されていた。図2-0-1（左）は、環境省 令和元年度再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報等の整備・公開等に関する委託業務報告書で示されている洋上風力導入ポテンシャルの分布状況を図示しているが、沿岸から30km以内のみに限定されている。これらの海域で導入実績のある風力発電は着床式であり水深が50m以下であり、風況が良好なエリアは限定される。第6次 エネルギー基本計画で示された再生可能エネルギー割合 2040年36～38%程度の達成のため、風力発電のエリアを沿岸60km程度の接続水域やEEZを含む海域まで広げた場合、さらに良好な風況となり、より多くの発電ポテンシャルが期待できる。しかし、それらの水深の多くは、図2-0-1（中）に示す50m～200mの海域であり、浮体式風力発電が必要となると同時に、発電地点から陸上の電力系統への連系地点までの電路巨長（海底＋陸上のケーブル長）で効率的かつ経済的となる送電方式を選定する必要がある。

送電や配電等の電力輸送だけを考えた場合、絶縁設計が有利で設備や装置が小型化・省スペースとなり、かつインダクタンスやキャパシタンスの影響を受けない直流方式が優れている。また、交流は表皮効果のため、太い導体を適用することが困難であるが、直流は表皮効果が無く、導体断面積を大きくでき、大容量送電が可能となる。鉄塔による架空送電では、直流は抵抗分による電圧降下の影響を受けるのみであるが、交流はインダクタンス（インピーダンス）の影響を受け、距離に反比例して輸送量が減少してしまう。洋上風力発電の送電には、電力ケーブルが適用されるが、ケーブルのキャパシタンスへの充電電流のため、交流では距離ともに送電可能な有効電力が低下するため、送電側、受電側に調相設備が必要となる。このため、ケーブルを用いた送電の場合、概ね50km以上であれば直流が有利とされている（図2-0-1（右）参照）。

以上のことから、浮体式洋上風力発電向けには直流送電が必要不可欠となり、本研究開発事業の成果を適用することで、我が国の再生可能エネルギー割合を高めることに寄与できる。

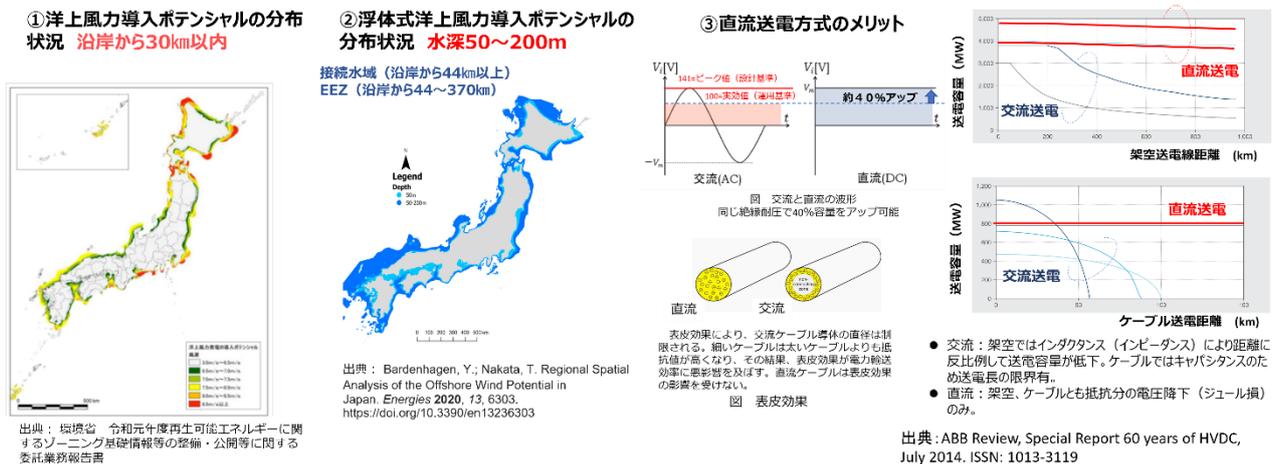


図 2-0-1 浮体式洋上風力発電向けの HVDC 送電システムの必要性

本事業の成果である多用途多端子 HVDC 送電システムの導入形態の一例を図 2-0-2 に示す。欧州を中心に洋上風力発電用の直流送電システムの導入事例は多数あるが、同図右のように、2 端子構成である。日本の周辺海域は海岸から離れると水深が急に深くなる地形が多いことから、沿岸に帯状に洋上ウインドファーム（WF）が順次導入・拡張されていくと想定される。このような導入形態には、同図左に示す多端子 HVDC 送電システムが適している。また、電力広域的運営

推進機関（OCCTO）マスタープラン等踏まえれば、沿岸部においては地域間連系強化のニーズもあり、多端子 HVDC 送電システムは、地域間連系と風力発電の電力輸送とを兼ねた電力インフラとして活用することができる。

近年、欧州においても、電源送電と地域間連系強化を両立する多端子直流送電システムへの期待も高まっており、国内においてその技術開発・実証を先行することは、国内のカーボンニュートラル達成だけでなく国際的な競争力確保においても極めて重要になる。さらに自励式変換器（VSC: Voltage Source Converter）の特徴を活かした多用途多端子 HVDC送電システムは、大電力・長距離送電の主たる用途のみならず、多用途の機能が、電力システムの安定化やレジリエンスや電力品質の向上のために発揮可能である。欧米においては、多端子（Multi-terminal）化による設備の重複投資や利用率向上が、もたらす割引要因（コストダウン）に加え、多用途（Multi-propose）の便益を費用便益分析（Cost-benefit analysis）に付加する検討も進んでいる。今後、事業化が進むと、具体的な事例や有用性等の報告がなされると期待できる。

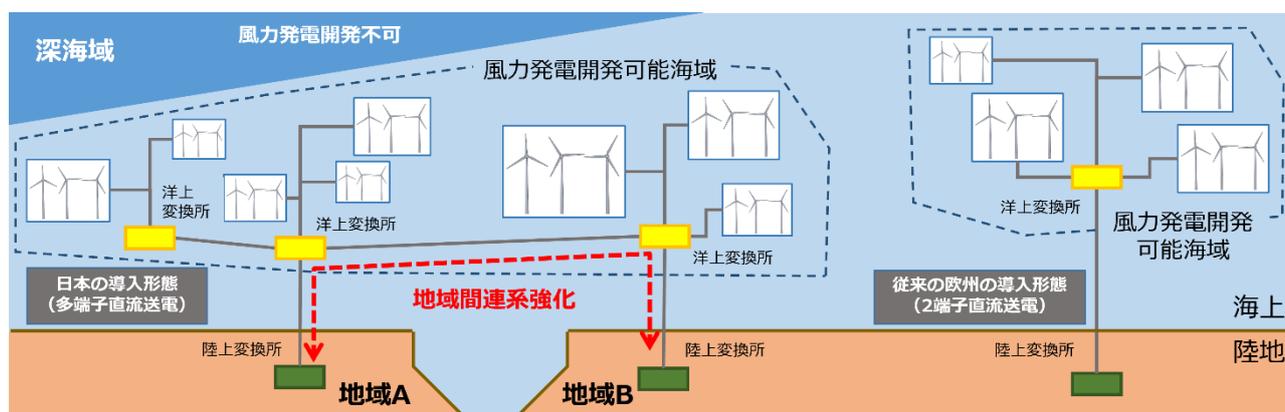


図 2-0-2 多用途多端子 HVDC 送電システムの導入形態例

## 2.1. アウトカム目標及び達成見込み

### 2.1.1 実用化・事業化の考え方とアウトカム目標の設定及び根拠

#### (1) 実用化・事業化の考え方

本研究開発事業では、研究開発内容をシステム開発と要素技術に区分することができるが、「実用化・事業化」の考え方は次のとおりである。

- システム開発：多用途多端子直流送電システムの計画・設計・運用等の検討に必要な項目/条件、標準仕様、システム制御、およびその解析手法等について一般化を行い、「ガイドライン」としてまとめ、発行することで、広く利用可能な汎用的な技術として確立させること。また、出口戦略として2027年頃に直流システムの建設が可能となるよう、本事業終了後も体制整備や必要となる検討や整理を進める。
- 要素技術：多用途多端子直流送電システムを構成する装置・設備（上位制御装置、直流送電用保護装置、深海ケーブル等）等が、関連する業界や企業等で活用可能、または企業活動（売上等）に貢献可能であること。

また、システム開発では、成果を広く発信し、我が国での実案件化へ繋がるのが重要との考えから、研究開発成果は広く公表されるべきとの考えに基づき、ユーザーとして想定される一般電気事業者や、学会・シンポジウムなどの集会や専門誌への寄稿を活用した積極的な情報発信を実施していくことを念頭に置き、本事業を推進した。一方、要素技術開発では、開発したコンポーネント類は、実用化すれば既存技術と組合せて、海外含めたプロジェクトへ早期に参入することが可能となることから、開発成果が企業の売上・収益化、およびシェア拡大へ貢献することを念頭に置き、情報収集と成果のPRに努めた。

(2) アウトカム目標の設定及び根拠

本事業の開始にあたり設定したアウトカム目標は、2021年10月の「第6次エネルギー基本計画」における2030年の系統増強等を通じた洋上風力発電の導入目標である電力量60億kWhに相当するCO<sub>2</sub>排出量270万トン/年の削減である。このCO<sub>2</sub>排出量を排出原単位0.453kg-CO<sub>2</sub>/kWh、および再エネ電源である洋上風力発電の設備利用率が35%であるとして換算すると、設備容量2GWに相当となり、本事業のアウトカム目標として設定する。

また、アウトカム目標の根拠として、電力広域的運営推進機関（OCCTO）が計画している北海道～本州間直流送電システム（後志・秋田・新潟エリア）向けに設置が予定されている自励式HVDC変換設備があり、システム定格は、2GW（双極（1GW+1GW）を計4式 総容量8GW）であり、海底直流ケーブルの敷設についても、定格2GW（ケーブル長 約700km）が計画されている。

2.1.2 アウトカム目標の達成見込み

本事業のアウトカム目標達成見込みの時系列を図2-1-3に示す。前項で述べた通り、アウトカム目標である、2030年の系統増強等を通じた洋上風力発電電力量60億kWhに相当するシステム定格2GWの直流送電システム、および海底直流ケーブルは、北海道本州間連系設備（日本海ルート）により導入の計画があり、加えて2011年の東日本大震災の教訓を踏まえた東西系統の電力融通強化のため、HVDC変換器を用いる周波数変換所の増強が予定されている。これらの実事業の実績、知見・ノウハウとともに、本研究開発事業の成果を活用し、以後、国内の浮体式洋上風力送電用途や海外の洋上風力や連系用途等へ展開・拡大を図る。

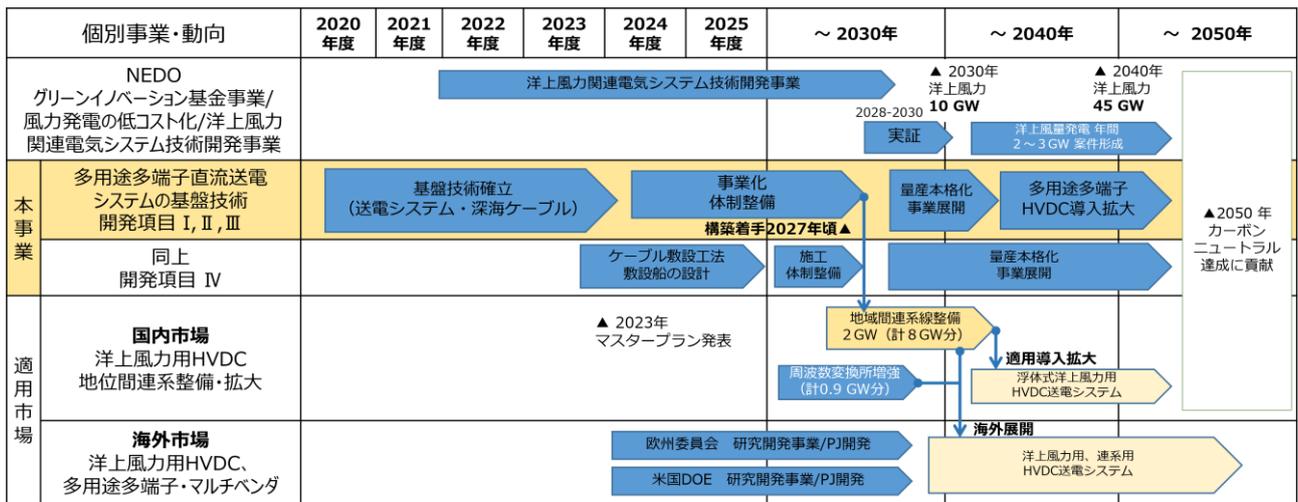


図2-1-1 アウトカム目標達成見込み

2050年のカーボンニュートラルの達成に向け、第6次エネルギー基本計画に掲げられた目標以上の高い再エネ導入量が必要になる。HVDC送電システムは、浮体式洋上風力発電の送電用、および長距離大容量の電力輸送用に適用でき、我が国以外でも欧米アジア等でこれらの案件が多数計画されている。本研究開発事業の成果、および国内の導入実績をベースに海外へ展開することで、インフラ設備のコストダウンも図ることが可能となる。国内の製造事業者も海外工場の新増設、海外企業との提携や協業に動き出しており、世界市場の一定のシェアを国内企業で獲得することができれば、量産化や製造期間の平準化、および仕様の見直し等によりコストが期待できる。インフラ設備のコストダウンは、洋上風力発電やHVDC送電システムの社会受容性を高めることになり、再エネ導入の更なる高い目標達成のために大きく貢献するものと期待される。

次に、本事業の(1) 効果の考え方、(2) 費用対効果について述べる。

#### (1) 効果の考え方

NEDO 研究開発事業の成果も活用し 2030 年頃までにアウトカム目標を達成すると、地域間連系の新設と周波数変換所の増強を合わせ電力変換器約 9 GW の導入実績が得られる見込みである。これらの事績を以降、更なる多用途多端子 HVDC 送電システムの事業化・市場導入すべく、設備・機器の製造、販売、施工、運用などの体制を維持拡大させ、

- ・ (国内市場) 2030 年～以降 : 0.5 GW/年
- ・ (海外市場) 2040 年～以降 : 0.4 GW/年

国内外市場で年間当たり 0.9 GW 程度の自励式 HVDC システム (洋上風力、多用途多端子送電用途) 導入を目指す。

#### (2) 費用対効果

本事業に投入した額相当 (プロジェクト費用総額) は、30 億円である。効果として、2030～2040 年度までの 10 年間の市場規模を想定すると、3340～5040 億円程度となる。費用対効果を、効果 (市場規模) ÷ 費用で求めた場合、111～168 となる。なお、想定額の内訳、および適用単価は以下の通りである。

- ・HVDC 変換器\* : 234～324 億円/年
- ・直流ケーブル\* : 100～180 億円/年
- ・HVDC 送電システム (上記の和×10 年) : 3340～5040 億円

##### ●国内市場

- ・洋上風力案件形成 2～3 GW/年とし、50%が浮体式洋上風力であれば、導入量 1.5 GW/年
- ・浮体式洋上風力の 1/3 が、直流送電を適用と仮定し、  
 $1.5 \text{ GW/年} \times 1/3 = 0.5 \text{ GW/年}$  の直流送電システムが導入できると想定

##### ●海外市場

- ・2030 年以降の 10 年間で 130 GW 相当の自励式 HVDC が導入\*\*され、3%のシェアを獲得できると仮定
- ・ $13 \text{ GW/年} \times 3\% = 0.4 \text{ GW/年}$  の直流送電システムが導入できると想定

##### ●直流ケーブル

- ・洋上風力発電や地域間連系に新規導入される HVDC システム用のケーブルとして国内外で 100km/年 と想定

\*: 適用単価

出典 : 広域連系長期方針 (広域連系マスタープラン) 2023 年 3 月、OCCTO

HVDC 変換器 : 2.6～3.6 万円/kW・両端、ケーブル (XLPE):1.0～1.8 億円/km・条

\*\* : 資料“THE OPERATIONAL AND MARKET BENEFITS OF HVDC TO SYSTEM OPERATORS, Brattle DNV September 2023”を参考に、NEDO にて洋上風力および多用途多端子送電用の自励式 HVDC 変換装置の導入量を試算。

## 2.2. アウトプット目標及び達成状況

### 2.2.1 本事業における研究開発項目の位置づけ

本事業における研究開発項目の位置づけを図 2-2-4 に示す。国内の風力発電の状況は、本章の冒頭で述べた通り、風力適地と消費地が離れており、風力適地が沿岸に帯状に分布し、かつ沿岸から近い海域に深海域が存在するなど我が国特有の制約がある。また、国内の電力系統に関しても、陸上送電容量に制約があり、かつ、陸上に長距離・大容量の送電ルートを確保することが困難である。加えて、風力発電など出力が不安定な再生エネルギーが増えるにつれ、電力系統の信頼性維持や潮流の制御が困難となり、課題として顕在化している。

これらの問題・課題に対して、以下①、②、③の理由で、多用途多端子直流送電システムが解決のためのソリューションとなりうる。

- ① 大容量長距離送電に直流送電は効率的、多地点を接続する多端子化技術は需給バランス維持や柔軟な電力潮流制御を容易とし、かつ多用途機能は系統安定化や電力品質向上に寄与
- ② 故障・事故時でも、多端子化構成により迂回送電ができれば、高信頼なシステム運用が可能
- ③ 日本沿岸部の深海域に敷設可能なケーブルにより、建設コスト低減および工期の短縮が可能

①、②、③の便益を得るためには、多用途多端子直流送電システムの研究開発が必要となり、図 2-2-4 に示す通り事業における研究開発項目の位置づけを整理した。

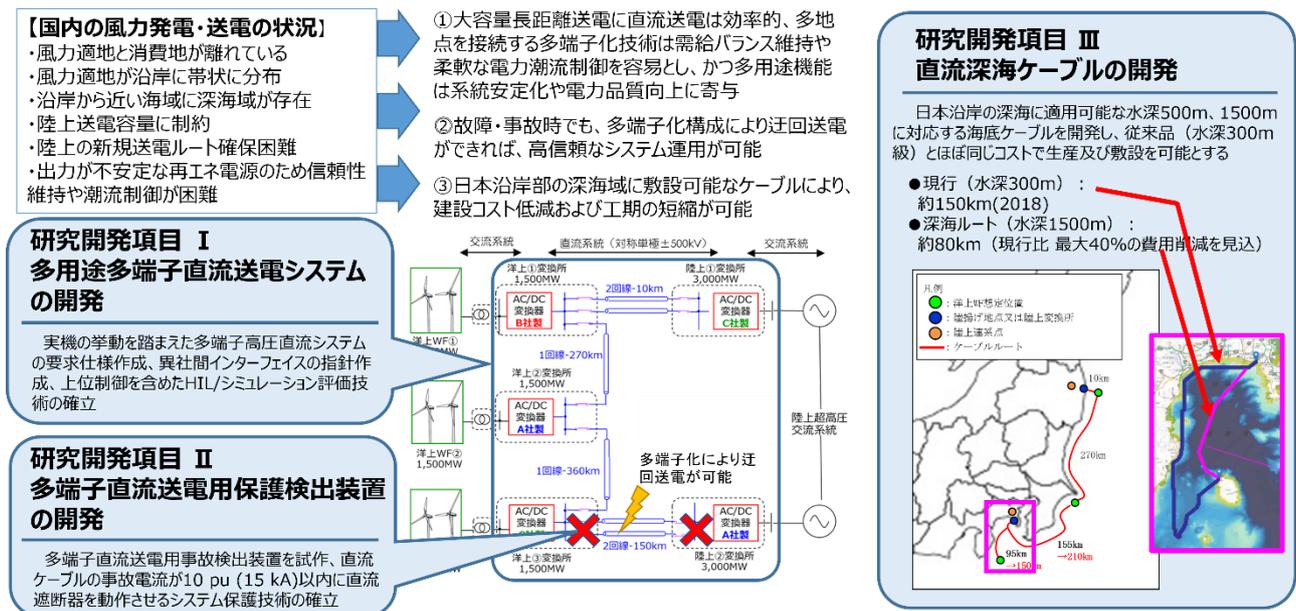


図 2-2-1 本事業における研究開発項目の位置づけ

## 2.2.2 アウトプット目標の設定及び根拠

本事業の研究開発項目 I、II、IIIのアウトプット目標の設定及び根拠を表 2-2-1 に示す。

表 2-2-1 アウトプット目標の設定及び根拠

研究開発要素	目標	根拠
I 多用途多端子直流送電システム	上位制御ユニットと変換器制御ユニットと保護装置の実機をデジタルシミュレーション内で構築した多端子高圧直流送電システムに接続し、実機の挙動（通信等）を踏まえたシステムを構築して検証を行う。また、異社間インターフェースの指針を整理する。	前身事業では、ソフトウェア（オフライン、リアルタイム）による評価にとどまっていた。システムの挙動は、実機の制御部の処理や通信に影響を受けるため、より精度の高い評価のためにはHardware In the Loop (HIL) による検証が必要であり、その検証のための設備構築と被制御対象となる機器間のインターフェース条件の策定が必要不可欠となる。
	実機の挙動（通信等）を踏まえ、モデルケースにおいて適切に異社間で潮流制御が可能となる上位制御の要求仕様をまとめる。	電力変換装置をマルチベンダー化することにより、設備構築時や拡張時における設計自由度やシステムの信頼性や運用性を高めるための仕様が必須である。
II 多端子直流送電用保護装置（事故検出装置）	実機の挙動（通信等）を踏まえ、モデルケースにおいて必要な時間内（事故電流が直流遮断器の遮断可能電流に収まるような時間内）に遮断できる保護装置を開発し、その要求仕様をまとめる。	多端子直流送電システムは、事故が生じる地点や事故モードにより、事故電流の発生時の挙動が異なり、事故状況に応じた複数の直流遮断器、および電力変換装置の適切な挙動動作は、システム信頼性維持のため重要であり、試験検証に基づく要求仕様が必須である。
III 直流深海ケーブル	モデルケースにおいて従来の海底ケーブル（水深300m級）とほぼ同じコストで生産及び敷設可能な深海ケーブル（水深500～1500m級）を開発する。	日本沿岸の広域の海底線直流連系を想定した場合、水深が深くなることが多く、大水深へ敷設可能なケーブル開発により、ルートのショートカット、送電ロスの低減や工期短縮を図ることができる。

## 2.2.3 アウトプット目標の達成状況

研究開発項目 I：多用途多端子直流送電システムの開発（東電 HD、東電 PG、三菱電機、東芝 ESS、日立製作所）のアウトプット目標の達成状況を表 2-2-2 に示す。研究開発項目 I の主たる成果は、洋上 WF の送電用と陸上端子間の電力融通を可能とする 5 端子対称単極方式と 3 端子双極方式の直流送電システムを策定し、シミュレーションモデルと HIL 試験用モデル（5 端子対称単極方式のみ）を構築し、解析・評価体系化したことである。得た成果は、「ガイドライン」にまとめ、発行した。3 端子双極方式の直流送電システムのモデル化、シミュレーションによる解析は、事業開始時の検討テーマには含まれておらず、事業期間の途中で追加された。よって達成度合いは、想定よりも大きく◎の評価となる。その他の項目については、設定した通りの成果を達成できた。

表 2-2-2 アウトプット目標の達成状況 研究開発項目 I

研究開発要素	項目	目標	成果	達成度合	達成の根拠
I 多用途多端子直流送電システム	1-1 多用途多端子直流送電システムの異社間接続による制御保護のシミュレーション検証	<ul style="list-style-type: none"> <li>国内外の直流送電システムの調査</li> <li>RTDSによるシミュレーション実施</li> <li>一部実機を用いたHIL試験実施</li> <li>標準仕様書（ガイドライン）作成</li> </ul>	本システムは洋上WFの電力送電だけではなく、陸上端子間の電力融通も可能な異メーカ接続による対称単極方式 5 端子と双極方式 3 端子直流送電システムを開発した。	◎	事業開始時の対称単極（5端子）に加え双極（3端子）を追加検証
	1-2 多用途多端子直流送電システムのシミュレーションおよび実機検証の環境構築	<ul style="list-style-type: none"> <li>シミュレーション（ソフトウェア）環境整備</li> <li>HIL試験設備の構築</li> </ul>	デジタルシミュレーション・HIL試験の洋上WFの出力急変試験を含めた定時の各ケースにおいて、潮流制御が機能して、設定したシーケンスとおりに運転できたことを確認した。	○	目標通り達成のため
	1-3 島嶼ユースケースでの多用途多端子直流送電システムのシミュレーション検証	<ul style="list-style-type: none"> <li>ユースケース（本土～島嶼部間）の策定</li> <li>設備設計・現場調査と取りまとめ</li> <li>シミュレーション実施と評価の実施</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>WF(2箇所)から本土までの間に島嶼(5島)を経由する直流多端子（6端子）システムを策定</li> <li>定常・事故時及び、島嶼発電機を停止したケースでも直流送電システムの制御により島嶼系統が安定的に運転できることを確認した。</li> </ul>	○	目標通り達成のため
	1-4 多用途多端子直流送電システムの制御保護の開発（三菱電機）	<ul style="list-style-type: none"> <li>ソフトウェアに適用する実機装置のモデル作成</li> <li>変換器制御装置・上位制御装置の製作</li> <li>RTDSと実機によるHIL試験実施</li> </ul>	洋上WFの送電と陸上端子間の電力融通を可能とする潮流制御に対応した上位制御装置と変換器制御装置の制御・機器の設計・実機製作した。	○	目標通り達成のため
	1-5 多用途多端子直流送電システムの制御保護の開発（東芝ESS）	<ul style="list-style-type: none"> <li>直流保護制御システム検証</li> <li>HVDCシステムと洋上システム（WF）との協調検証</li> <li>上記のHIL試験評価</li> </ul>	洋上システムのモデル構築、および直流送電システムとの協調制御保護方法を開発し、協調シーケンスにより適切に送電・保護ができることを確認した。	○	目標通り達成のため
	1-6 多用途多端子直流送電システムの制御保護の開発（日立製作所）	<ul style="list-style-type: none"> <li>上位制御装置の計算アルゴリズム検討</li> <li>オフライン解析による直流送電用保護装置仕様検討</li> <li>RTDSモデルによりシミュレーション検討</li> </ul>	本システムは洋上WFの電力送電だけではなく、陸上端子間の電力融通も可能な異メーカ接続による対称単極方式 5 端子と双極方式 3 端子直流送電システムを開発した。	○	目標通り達成のため

◎ 大きく上回って達成、○達成、△一部未達、×未達

研究開発項目Ⅱ：多端子高圧直流送電保護装置の開発（東電HD、三菱電機、日立製作所）のアウトプット目標の達成状況を表2-2-3に示す。直流ケーブルの保護範囲と事故を検出する直流電流・電圧を設定し、これらの情報から事故を判別する保護制御を設計、実際のハードウェアを適用した保護検出装置を設計・実機製作し、HIL試験を実施した。直流ケーブル事故の各ケースにおいて、保護検出装置が設計通り機能し、直流ケーブルのいずれの地点における事故に対しても事故電流10pu（15 kA）以内に収まるまでに直流遮断器が動作した結果をもって、本装置の保護制御機能が十分であることを確認した。その他、すべての項目については表の記載にしたとおり、予定通りの成果を達成できた。

表 2-2-3 アウトプット目標の達成状況 研究開発項目Ⅱ

研究開発要素	項目	目標	成果	達成度合	達成の根拠
Ⅱ 多端子直流送電用保護装置（事故検出装置）	2-1 多用途多端子直流送電システムの異社間接続による保護装置シミュレーション検証	<ul style="list-style-type: none"> <li>RTDSと実機を用いたHIL試験実施</li> <li>標準仕様書（ガイドライン）の作成</li> </ul>	<p>HIL試験の直流ケーブル事故の各ケースにおいて、保護検出装置が機能して、直流ケーブルのいずれの事故も当初設定した事故電流が10pu(15kA)以内に収まるまでに直流遮断器が動作し、当初設定時間内に保護でき、本装置の保護制御機能が十分であることを確認した。</p> <p>上位制御装置、変換器制御装置、保護検出装置の設計、製作及びデジタルシミュレーション、HIL試験結果から得られた知見をガイドラインに反映させた。更に、対称単極と双極方式毎の各項目ごとに記載するとともに、将来のマルチベンダー化へ向けてのシミュレーションの前提条件・準備を追記した。</p>	○	目標通り達成のため
	2-2 多端子直流送電用保護検出装置の開発（三菱電機株）	<ul style="list-style-type: none"> <li>保護検出装置の検討、RTDS用モデル作成</li> <li>保護検出装置の実機製作</li> <li>RTDSと実機を用いたHIL試験実施</li> </ul>	直流ケーブルの保護範囲と事故を検出する直流電流・電圧を設定し、これらの情報から事故を判別する保護制御を設計し、実際のハードウェアを適用した保護検出装置を設計・実機製作した。	○	目標通り達成のため
	2-3 多端子直流送電用保護検出装置の開発（日立製作所）	<ul style="list-style-type: none"> <li>直流送電用保護装置の設計・製作</li> <li>RTDSと実機を用いたHIL試験実施</li> </ul>	直流ケーブルの自端電流・電圧を基にケーブル事故を検出する保護検出装置を設計・実機製作した。	○	目標通り達成のため

◎ 大きく上回って達成、○達成、△一部未達、×未達

研究開発項目Ⅲ-1：直流深海ケーブルの開発(単芯水深1500m級) (古河電気工業) のアウトプット目標の達成状況を表2-2-4に示す。直流深海ケーブルの導体およびがい装の構造・材料の検討、設計、試作した。機械試験、電気試験を実施し、解析とほぼ同じ結果が得られたとともに、該当するケーブル規格をクリアできた。敷設時の解析も行い、がい装構造ごとにどのような張力、曲率についてどの程度かかるのかを検討した。今回検討した構造ではいずれも許容値内（大水深での敷設が可能）の結果が得られた。

また、コスト評価も実施し、大水深対応となるため、ケーブル原価は高くなるが、大水深でのケーブル敷設が可能となればルート長が従来よりも短くなるため、全体として大水深を含めたルート長の方がコスト的に安価となることが確認できた。

以上、すべての項目については表の通り、当初の想定どおりの成果を達成できた。

表 2-2-4 アウトプット目標の達成状況 研究開発項目Ⅲ-1

研究開発要素	項目	目標	成果	達成度合	達成の根拠
Ⅲ 直流深海ケーブル (単芯水深1500m級)	①動向調査	達成根拠：下記の調査完了 ・直流単芯ケーブル（欧州件名）調査 ・海外有識者インタビュー ・敷設機材（艦装）調査	・ 深海へ敷設した、直流単芯ケーブルの欧州件名を調査。他、海外有識者に深海ケーブルに関する技術動向等をヒアリング・整理。	○	目標通り達成のため
	②導体構造および材料の検討	達成根拠：以下の評価完了 ・導体材料検討（アルミ、銅） ・導体構造検討（キーストーン）	・ 導体材料、構造を比較した結果、低敷設張力となる“アルミキーストーン導体”を試作ケーブルに適用	○	目標通り達成のため
	③がい装構造および材料の検討	達成根拠：以下の検討完了 ・がい装材料 ・がい装構造	・ 試作ケーブル導体は軟アルミを採用した場合のがい装条件を変えて検討。CIGRE TB623より、各がい装構造における敷設張力を推定。 ・ 硬アルミの許容張力を検討し、引張試験より十分な安全率があることを確認した。	○	目標通り達成のため
	④ケーブル特性の検証	達成根拠：以下の実施 ・ケーブル試作 ・機械試験 ・電気試験	・ アルミキーストーン導体1x1200sq、DC500kV二重鉄線がい層ケーブルを試作 ・ 大水深用途で確認すべき機械性能（張力・側圧・外水圧・引張曲げ）、電気性能（長期課通電・耐Imp）評価を実施 ・ ケーブル構造解析を行い、試験結果との整合性を確認	○	達成の根拠
	⑤布設検討	達成根拠：以下の実施 ・敷設解析 ・コスト評価	・ 敷設時の海象条件とケーブル張力について解析実施し、試作ケーブルの仕様で問題ないことを確認。 ・ コスト評価について、大水深部はアルミ導体2重鉄線仕様、非大水深部はアルミ導体1重鉄線仕様の組合せの敷設条件にて、従来の海底ケーブル（深海部を迂回・回避）と同等のコストとなることを確認。	○	目標通り達成のため

◎ 大きく上回って達成、○達成、△一部未達、×未達

研究開発項目Ⅲ-2：直流深海ケーブルの開発(三芯水深500m級) (住友電気工業) アウトプット目標の達成状況を表2-2-5に示す。水深500mへの敷設張力の計算や構造解析を行い、1重鉄線鎧装構造の軽量化400kV三芯海底ケーブルを設計し、試作を完了した。敷設張力相当の張力を印加できる引張曲げ試験装置を導入し、三芯海底ケーブルの機械試験を行い機械性能に問題がないことを確認し、その機械履歴を加えた三芯海底ケーブルで電気試験を行い、高張力負荷による劣化等がないことを確認した。

日本海域の水深2000mまでの既設海底ケーブル、底曳網、海底障害物等の海洋情報データベースを構築し、敷設ルート設計ソフトの改良が完了した。また、深海でのケーブル敷設や修理工事に必要な敷設張力を算定し、深海ケーブルに対応可能なテンショナーやキャプスタン、船尾シーブ等の選定および仕様の目途付けを完了した。さらに、敷設設備の最適配置を検討し、発電機や推進器等の全体のシステム設計および敷設設備を搭載可能な船形の検討を行った。

以上、すべての項目については表の通り、当初の想定どおりの成果を達成できた。

表 2-2-5 アウトプット目標の達成状況 研究開発項目Ⅲ-2

研究開発要素	項目	目標	成果	達成度合	達成の根拠
直流深海ケーブル (三芯水深500m級)	I. 深海ケーブルの要素技術開発と試作	水深500m 級の深海域対応の三芯直流海底ケーブルについて、試作ケーブルの仕様を決定、設計・試作を行う。	一重鉄線鎧装のケーブル設計、試作完了のため達成と評価。コンパクト(軽量)化を図った三芯直流海底ケーブルを設計、試作した。	○	目標通り達成のため
	II. 深海ケーブル試験装置導入と性能実証試験	水深500m に海底ケーブルを敷設する際にかかる張力を模擬するため、最大張力100 t の引張曲げ試験装置の設計、導入を行う。また、試作したケーブルの機械・電気試験を行う。	水深500mに適用可能なケーブル試作品を評価。導入した試験装置により、機械試験 (CIGRE TB623 )、および電気試験 (CIGRE TB496 for VSC) をクリアした。	○	目標通り達成のため
	III. 深海ケーブル関連技術開発	関連技術開発として、敷設設計ソフト導入検討、および敷設船/ブレイキ装置概略検討を実施する。	ケーブル敷設ルート設計ソフトへ海洋情報を追加。海底地形や地質等の海洋情報を基に最短敷設ルートを設計可能とした。敷設船の敷設設備の最適配置検討に加え、全体のシステム設計、船形の検討を行い、設計仕様を満足することを確認。	○	目標通り達成のため

◎ 大きく上回って達成、○達成、△一部未達、×未達

#### 2.2.4 特許出願及び論文発表

本事業を通して得られた成果や知見については、国際会議や学会発表等で、特許の想定や機密性の高い情報の取り扱い等を考慮しつつ、成果普及の観点から情報発信を表 2-2-6 に示すとおり、精力的に実施した。本事業は、2023 年度末で終了したが、出口戦略である 2027 年頃の直流送電システム建設へ着手、アウトカム目標となる 2030 年度での直流送電システムの導入 (見込み)、また以後 2040 年を経て 2050 年のカーボンニュートラル実現のために、2024 年度以降も成果の P R 等に努めている。具体的な活動例は、後述する 3.6.3 進捗管理：成果普及への取り組みに示している。

表 2-2-6 特許出願及び論文発表

	2020年度	2021年度	2022年度	2023年度	2024年度以降 (参考)	計
学会発表、論文 (査読付)			1	5	8	14
寄稿・特集記事		1	1		2	4
講演、その他		1	3	5	2	11
ニュースリリース 新聞・メディア記事	4	1	1	5	1	12

以下に、主な論文・講演等のリストを示す。

- “Standard Specifications and Simulation Analysis on Control and Protection Scheme for Multivendor Offshore Multi-Terminal HVDC System”, 2022 年 CIGRE パリ大会, SC-B4  
東京電力ホールディングス株式会社 他 5 組織.
- 多用途多端子直流送電システムの基盤技術開発, APET 第 37 回イブニングセミナー『洋上風力の周辺技術』, 東京電力ホールディングス株式会社
- 直流送電に関する NEDO 事業の概要について, 第 23 回 若手教員／研究者支援活 (Power Academy) , 東京電力ホールディングス株式会社

## 3. マネジメント

### 3.1 NEDO が実施する意義

本事業を NEDO が実施する意義は、以下のとおり、国費で実施する明確な必要性があり、NEDO の関与が十分に効果的である。

前述したとおり、第 6 次エネルギー基本計画の目標達成には、浮体式洋上風力普及は不可欠で多端子直流送電は重要であるが、事業開始時において 2 端子直流送電システムはコストが高く、数千億円規模となり、1 社でのシステム全体の構成を担うことは、リスクは極めて高い。

このため、多端子化して複数社が分担してシステム全体を構築することで、リスク分散、競争入札による低コスト化、複数社で同時製造に伴う工期短縮等が期待できる。しかしながら、各企業間では、通信方式、制御ロジック、必要な入出力内容等が異なるため、異社間で必要なインターフェイスの調整や規格化が困難であり、競合企業を取りまとめるには国や NEDO 等の中立的な機関が主体となった開発体制が必要となる。

### 3.2 実施体制

本事業の実施体制を図3-2-1に示す。「多用途多端子直流送電システムの基盤技術開発」の基本計画においてシステム開発として「研究開発項目Ⅰ 多用途多端子直流送電システムの開発」、要素開発として「研究開発項目Ⅱ 多端子直流送電用保護検出装置の開発」、「研究開発項目Ⅲ 直流深海ケーブルの開発」を研究開発課題と設定し、後述するとおり2020年度に公募を実施して実施者（委託先）を決定した。

本事業に求められる技術的成果及び政策的効果を最大化させるため、NEDO再生可能エネルギー部ユニット長 中尾光洋（加藤 寛：2020年6月～2022年6月、西林 秀修：2022年7月～2024年6月）をプロジェクトマネージャーに任命し、プロジェクトの進行全体を企画・管理し、東京都市大学 教授 中島 達人氏をプロジェクトリーダー、株式会社ニュージェック 曾我 学 氏をサブプロジェクトリーダーとして、実施者を主導していただきつつ研究開発を推進した。資源エネルギー庁等とも緊密に連携し、最新の政策及び技術動向を確認しながら、機動的なマネジメントを実施してきた。

研究開発項目Ⅰ、Ⅱでは、開発した上位制御装置、変換器制御装置、保護検出装置をデジタルシミュレーション内で構築した多端子高圧直流送電システムに接続し、実機の挙動を踏まえたシステムで検証を行っており、幹事会社である東京電力ホールディングスの統括の下、各実施者が分担かつ連携しながら検討を進めた。

また、本事業を効率的かつ効果的に推進するにあたっては、外部有識者で構成される検討委員会を設置し、半年に1回程度事業全体の進捗状況と今後の計画について報告し、助言を得てプロジェクトを進めている。

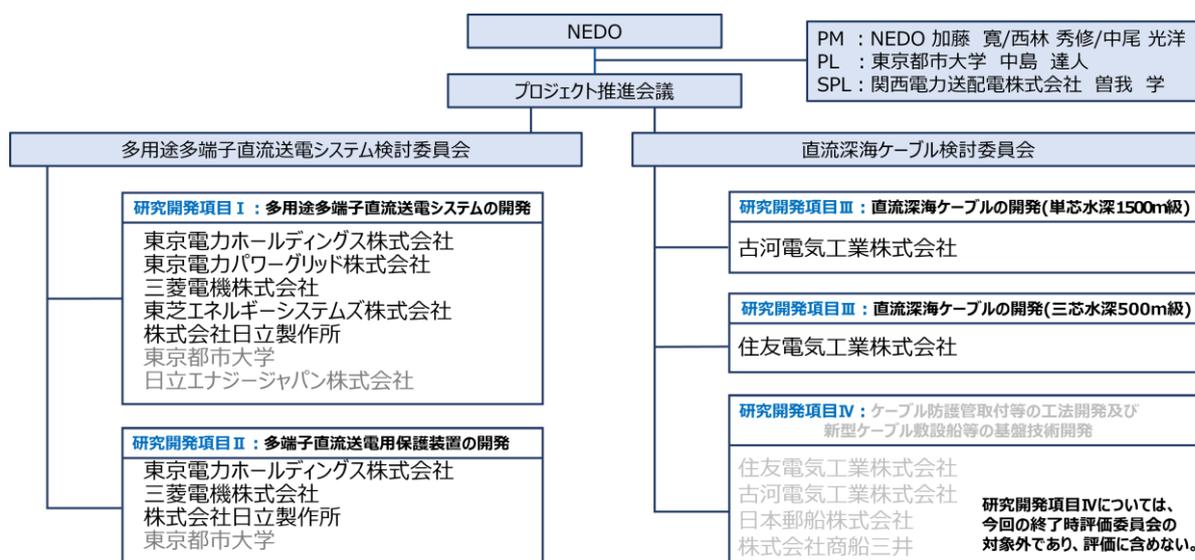


図 3-2-1 本事業の実施体制

### 3.3 個別事業の採択プロセス

本事業は、以下の通り（１）パブリックコメント、（２）公募、（３）採択（外部有識者による委員会）をへて採択が行われた。

#### （１）パブリックコメント

多用途多端子直流送電システムの基盤技術開発 基本計画（案）を公開し、期間 2019年12月27日～2020年1月10日 で募集したが、意見は無かった。

#### （２）公募

公募の予告（2020年2月）を経て、公募（2020年3月26日）し 〆切を4月30日としたが、複数の応募がなかったため、公募〆切を2020年5月11日 まで延長した。

#### （３）採択

採択審査委員会を2020年6月12日（金）に開催した。

採択審査委員会では、以下を採択審査基準として実施し、本事業の開発項目Ⅰ、Ⅱ、Ⅲの実施体制が3.1で述べたとおり、採択された。

【提案内容の妥当性】提案内容が目的、目標に合致していること。

【新規性】提案内容が技術的に優れていること。

【実現可能性】提案内容、計画は実現可能であること（技術的可能性、計画、目標、予算規模の妥当性等）。

【実施体制】事業を遂行するための高い能力を有すること、共同提案の場合、各共同提案者が相互補完的であること。

【成果の事業化】事業を行うことにより、成果の実用化・事業化により、国民生活や経済社会への波及効果が見込まれること。

なお、本事業に要したプロジェクト費用を表3-3-1に示す。また、本事業を委託とした理由は、事業化のために長期間（研究開発事業の開始から事業化まで10年以上）を要し、かつ開発成果の収益性が予測不可能であり事業性が予測できないためである。

表 3-3-1 プロジェクト費用（単位：百万円）

研究開発項目		2020年度	2021年度	2022年度	2023年度	合計
研究開発項目Ⅰ：多用途多端子直流送電システムの開発 研究開発項目Ⅱ：多端子直流送電用保護装置の開発	委託*	398.9	375.7	831.6	259.1	1865.3
研究開発項目Ⅲ：直流深海ケーブルの開発	委託*	169.8	595.7	337.7	24.1	1127.4
合計		568.7	971.4	1169.3	283.2	2992.7

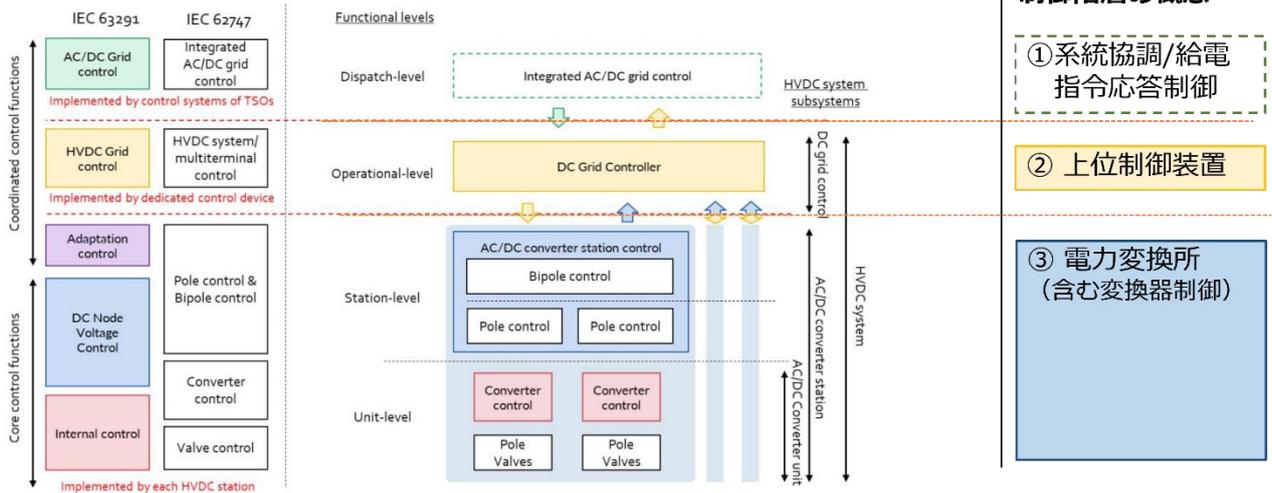
### 3.4 目標達成に必要な要素技術

本事業は、多用途多端子 HVDC 送電システムの技術開発であり、目標達成に必要な技術は、システム化、システムの制御とシミュレーションに関する技術、およびシステムを構成するための装置・設備類、装置の制御などの要素技術の二つに分けられる。本事業に関するシステム技術、要素技術の内容と開発項目の関係を表 3-4-1 示す。表 3-4-1 内で、①、②、③と記した項目は、システム全体の制御の階層を示している。参考として欧州 InterOPERA 事業によって検討されている多端子 HVDC 送電システムの制御構成との対比を図 3-4-1 に示す。本事業のシステム制御に関する概念、基本構成は InterOPERA 事業と同様であり、システムの仕様、給電指令・上位制御、および HVDC 変換所の制御、および保護に関する機能等については、成果物である「多端子 HVDC システムシステム制御・保護検討に関するガイドライン」を作成した。

表 3-4-1 多用途多端子 HVDC 送電システムの技術要件の区分

区分	技術分野	技術の概要	NEDO研究開発項目			記事
			項目Ⅰ	項目Ⅱ	項目Ⅲ	
システム技術	モデリング	多用途多端子HVDCシステムの構成要素（設備・機能）について、シミュレーション用に要件整理し、モデル化する。	○	○		
	オフライン/リアルタイムシミュレーション評価	個社毎の構成要素モデルを用いた多用途多端子HVDCシステムについて、異社間の協調や安定性等も含め計算機にてシミュレーション（オフラインおよびリアルタイム）評価する。	○	○		
	HIL（Hardware In the Loop）評価	システム構成要素の一部（個社別の設備機器の制御部）実機を用い、計算機シミュレーションモデルと結合し、定常時、過渡・異常時の特性を評価する。	○	○		
	① 系統協調/給電指令応答制御	多用途多端子HVDCシステムと既存系統、ウインドファーム（WF）との協調、給電指令および連系する系統に最適となる電力潮流・運用を行う。	○			
	システム設計/エンジニアリング	実事業を想定したユースケースにより多用途多端子HVDCシステムの運用シミュレーション評価、設備構築の基本建設（現場調査含む）を行う。	○			
要素技術	② 上位制御装置	多用途多端子HVDCシステムの直流系統内、また交流系統やWFからの状態信号を受け、正常時、および過渡・事故時を想定した適切な運用のための制御・処理・指令を実施する。	○	○		
	③ 電力変換所（含む自端制御）	交流⇄直流の電力変換を行い、上位制御装置の指令により最適な電力潮流用の電源として運用するとともに、自動式のSTATCOM機能を用い、交流系統の安定化・品質向上させる。	○			
	保護・検出装置	事故・異常が発生した場合の電圧・電流を検知し、上位制御装置にその状態を転送する。		○		
	遮断器（直流系統用）	短絡や過電流が発生した場合、所要時間内に回路を開放する。				
	電力ケーブル	深海へ敷設可能な直流送電用ケーブルの構造・材料を設計し、試作品の機械・電気試験により評価する。			○	※前身事業にて開発

## 多端子HVDC送電システム全体の制御構成



出典：Horizon Europe InterOPERA, DELIVERABLE 2.1 functional-requirements-for-HVDC-grid-systems-and-subsystems, JUNE 2024.

図 3-4-1 多端子直流送電システムの制御階層の概念

### 3.5 研究開発のスケジュール

研究開発項目 I 多用途多端子直流送電システムの開発は、図 3-5-1 に示す通り、シミュレーションのための要件整理したうえでモデルを作成し、オフラインおよびリアルタイムシミュレーションでの検証を実施した。同時に HIL 試験に必要な研究開発項目 II は、図 3-5-2 の通り、研究開発を進め、多端子直流送電用保護装置の仕様検討を経て、実機を制作した。これらを組み合わせ、対称単極 5 端子の HVDC 送電システムの HIL 試験を実施し、定常時、過渡・事故等様々な条件の挙動の確認、およびシステムが規定した通りの運用となるかなど、検証を実施した。なお、2022 年度後半からは、双極 3 端子 HVDC 送電システムについてのシミュレーションも検討項目に加えた。

研究開発要素	項目	2020年度	2021年度	2022年度	2023年度	
多用途多端子直流送電システム	1-1 多用途多端子直流送電システムの異社間接続による制御保護のシミュレーション検証	システムに関する調査				
			システム要件検討			
			PSCAD, RTDSによる検証		HIL試験 評価	
				標準仕様書の作成		
	1-2 多用途多端子直流送電システムのシミュレーションおよび実機検証の環境構築	RTDS導入		HIL試験環境整備		
	1-3 島嶼ユースケースでの多用途多端子直流送電システムのシミュレーション検証	ユースケース策定 設備設計 現地調査		シミュレーション実施	評価	
1-4 多用途多端子直流送電システムの制御保護の開発 (三菱電機)	モデル作成	実機設計	実機製造	HIL試験		
1-5 多用途多端子直流送電システムの制御保護の開発 (東芝ESS)	仕様検討	対象モデル構築	シミュレーション評価	HIL試験		
1-6 多用途多端子直流送電システムの制御保護の開発 (日立製作所)	上位制御装置アルゴリズム検討	上位制御装置のRTDSモデル シミュレーション検証		双極検証		

図 3-5-1 「研究開発項目 I 多用途多端子直流送電システムの開発」の計画

研究開発要素	項目	2020年度	2021年度	2022年度	2023年度
多端子直流送電用保護装置 (事故検出装置)	2-1 多用途多端子直流送電システムの異社間接続による保護装置シミュレーション検証			標準仕様書の作成	HIL試験
	2-2 多端子直流送電用保護検出装置の開発 (三菱電機株式会社)	保護検出装置の検討		保護検出装置製作	HIL試験
	2-3 多端子直流送電用保護検出装置の開発 (株式会社日立製作所)		直流送電用保護装置の設計・製作	標準仕様書の作成	実機試験

図 3-5-2 「研究開発項目Ⅱ 多端子直流送電用保護装置の開発」の計画

深海用ケーブルについては、単芯 深海 1500m と三芯 深海 500m の 2 種類の仕様について研究開発を図 3-5-3 のとおり進めた。いずれも、ケーブルの構造・材料の検討を経てケーブルを試作し、試作したケーブルの機械・電気試験より特性を確認した。両仕様とも目標を満足する結果が得られた。

研究開発要素	項目	2020年度	2021年度	2022年度	2023年度	
直流深海ケーブル (単芯水深1500m級)	① 動向調査		動向調査			
	② 導体構造および材料の検討	円圧導体検討				
		キーストン導体検討				
	③ がい装構造および材料の検討	導体試作			△ 導体決定	
		材料検討				
④ ケーブル特性の検証	分担効力、構造解析					
⑤ 布設検討	試験設備検討					
	試験設備構築 (機械試験)					
	試験設備構築 (電気試験)					

研究開発要素	項目	2020年度	2021年度	2022年度	2023年度
直流深海ケーブル (三芯水深500m級)	① 深海ケーブルの要素技術開発と試作	動向調査	動向調査	動向調査	
	② 深海ケーブル試験装置導入と性能実証試験			試験装置導入	
				機械試験	電気試験
③ 深海ケーブル関連技術開発		敷設計画ソフト導入検討			
				敷設船/プレーキ装置健津	

図 3-5-3 「研究開発項目Ⅲ 直流深海ケーブルの開発」の計画  
(上：単芯 深海 1500m 仕様、下：三芯 深海 500m仕様)

### 3.6 進捗管理

本事業の進捗管理は、次の3つの会議体を通して実施され、開発項目ごとのスケジュール管理の他、各種課題・成果に関する討議、事業に必要となる情報共有等の場とした。本事業期間中に開催した会議・委員会の実績は、表3-6-1に示す通りである。

#### (1) プロジェクト推進会議

“多用途多端子直流送電システムの基盤技術開発”のプロジェクトに関わる、PMgr,PL,SPL,実施者他、関係者を一堂に会し、事業進捗・情報共有の場とする。プロジェクト終了後の実用化を見据え、研究開発段階より、システム・保護装置開発と深海ケーブル開発の各々課題点や要求仕様等を共有・議論し、プロジェクト全体として研究開発の方向性を共有認識とする。

#### (2) 多用途多端子直流送電システム検討委員会

開発項目ⅠおよびⅡに関する事業進捗・情報共有の場とする。

#### (3) 直流深海ケーブル検討委員会

開発項目Ⅲに関する事業進捗・情報共有の場とする。

表 3-6-1 進捗管理（会議・委員会開催）の実績

技術委員会等	2020年度	2021年度	2022年度	2023年度	合計回数
プロジェクト推進会議		1	1	1	3
多用途多端子直流送電システム検討委員会	2	3	3	3	11
直流深海ケーブル検討委員会			2	2	4

#### 3.6.1 進捗管理：前身事業評価結果への対応

前身事業 2020年「次世代洋上直流送電システム開発事業」の事後評価委員会（2020年9月3日）において、以下のような意見・指摘があった。これらの意見を整理し、次項に示す通り、後継事業である「多用途多端子直流送電システムの基盤技術開発」の事業に反映した。

具体的な指摘事項は以下の通り

- 今後は、時間の経過とともに技術動向や欧州等の取り組み動向も変化することが想定されるため、変化を確認しつつ、国際競争力を確保する研究開発や知財開発を更に強化していくこと、また、実際の発電事業を推進する事業者からの意見も取り入れることができるような実施体制の構築についても検討いただきたい。
- 現実的かつ具体的なルートを想定した費用対効果や技術の実現可能性など、出口戦略を意識した継続した議論も期待したい。
- 今回の成果は、限定されたシステム構成での検討に限られていることから、今後は、将来の拡張にも対応が可能となるシステム開発、要素技術開発を目指すとともに、複数のモデルケースでの検討を期待したい。
- 成果の普及に関しても、これまで以上に幅広い事業者に向けた情報発信を積極的、継続的に行うことによって普及拡大を効率的に進める活動をお願いしたい。
- 本事業で研究開発を行うHVDCはそれ単体で使用するものではないため、陸上AC系統と海洋DC系統の協調安定性を事前検討されることを期待する。

- 本事業の成果は、大規模化された場合に特に効果を持つと予想されるため、海外での事業展開とともに、国内での事業展開が大規模に図れるように、国や自治体、ユーザーに対してさらにスピード感を持って積極的に働きかける戦略を練っていくことが望まれる。
- 世界市場をにらんだ仕様標準化への取組や、成果を広く社会に周知する情報発信などを積極的に推進することが期待され、海外で事業を獲得するためにも、本事業の研究開発成果を実用化・事業化する取組をさらに加速することが望まれる。
- 技術的な信頼性を高めていくためには、まだ検討の余地がある部分も洗い出されてきており、各項目で信頼性を裏付けるデータの取得が求められる。後継事業の場において実機シミュレーションを通して、さらに拡張性のある技術開発を進めていただきたい。

これら評価・指摘内容を4つのポイントに整理し、本事業期間中に対処した。整理した指摘内容、対処方針、および具体的な活動例を図3-6-1に示す。

1. 海外市場や事業への展開のための研究・技術開発や国際標準化等への取組
2. ・事業者・関係者への有益な情報と議論の継続  
・成果の周知・展開などの推進
3. ・費用対効果や技術の実現可能性の追求  
・国内への大規模事業展開  
・出口戦略を意識した継続議論
4. シミュレーションや拡張性のある技術開発の推進・展開

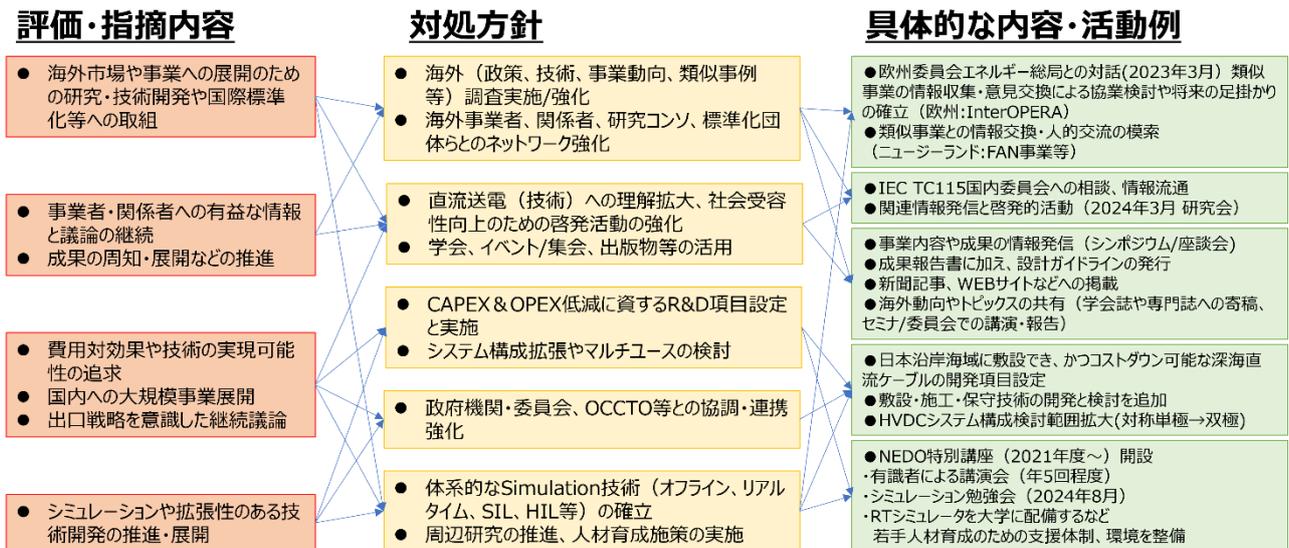


図 3-6-1 前身事業評価委員会の指摘事項反映内容

### 3.6.2 進捗管理：動向・情勢変化への対応

本事業の実施期間中、国内外の動向や情勢の変化に合わせ、より充実した成果が得られるよう次のような対応を行った。政策動向への対応として、資源エネルギー庁により開催された「長距離海底直流送電の整備案に向けた検討会（2021年3月15日 第1回～2022年4月22日 第6回）」での検討内容を受け、以下のような開発項目を実証期間中に追加することとした。

- ・ 多端子 HVDC システムを構築する場合、対称単極に加えて双極システムの検討
- ・ 敷設船や製造能力の早期確保、先行利用者との調整
- ・ 日本の海底地質を踏まえたケーブルの防護方法に関する検討

- ・ 大水深への敷設を行う場合、アルミケーブル等の開発に加え、洋上接続や防護方法などの技術開発

これら追加検討項目は、「開発項目Ⅰ 多用途多端子直流送電システムの開発」に双極システムのシミュレーションを追加、また「開発項目Ⅳ 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（2023～2025年度）」について、公募を経て追加し、海底ケーブル敷設に関する技術開発内容の充実化を図った。

1章の外部環境の状況にて、海外の動向を述べたが、多端子 HVDC 送電システムは、海外でも注目されており、技術動向のみならず各国政府の政策や研究開発事業に関する情報収集を行い、NEDO 事業内容と外部動向との比較分析を行い、必要に応じ整合させておくことは、成果が国内に社会実装されること以外にも、海外展開を想定した場合重要となる。特に、HVDC 送電システムの規格や標準化への整合は、海外展開の際に必要な不可欠である。技術動向に関する活動の一例として国際会議 ACDC2023（2023年3月、英国グラスゴー開催）に参加し、欧州を中心とした HVDC システムの計画、導入、技術動向、また政府や TSO の事業展望等を調査した。知りえた情報については、学会・セミナー等で事業者や国内関係者へ情報共有を図った。

また、欧州連合（EU）の政策執行機関であり、我が国の経済産業省 資源エネルギー庁に相当する欧州委員会 エネルギー総局（ベルギー・ブリュッセル）へ訪問ヒアリングを 2023年3月に実施した。この訪問では、欧州の研究・イノベーション事業における直流分野の最新動向、実施事業についての情報収集、NEDO 事業成果と欧州事業との整合化を図るべく、類似事業についての意見交換を実施し Horizon Europe InterOPERA へ Stakeholders committee の一員として参画（2024年3月～2027年末）することになった。これら最新情報については、関連学会の集会、学会誌、記事等を通して国内関係者へ共有している。

### 3.6.3 進捗管理：成果普及への取り組み

本事業の成果普及への取り組みとして、以下に示すような様々な取り組みを実施してきた。

#### （1）多端子 HVDC システムの制御・保護検討に関するガイドラインの発行

成果報告書に加え、異メーカー間接続が可能な多用途多端子直流送電システムの開発・検証を念頭に置き、「ガイドライン」としてまとめた。多用途多端子直流送電システムの上位制御系（各端子の電力配分の考え方、インターフェイス、保護制御系（事故検出～直流遮断器動作、インターフェイス等）、常時・事故時の各機器の応動やシーケンスなどを検討・実証し、その結果をベースに整理した。加えて、オフライン、リアルタイム、HIL 試験によるシミュレーション評価の概要、手順を本ガイドラインにて解説している。本ガイドラインは、多用途多端子直流送電システムの導入、および拡張が検討される場合、初期の計画段階から、基本設計、仕様の確定、特性評価や性能試験、また据え付け工事、から実運用に至るまで、関連する事業者、製造業者らの検討の参考になる。

#### （2）国際標準化の情報提供と業界関係者への啓発活動

本事業の成果を国内のならず海外に展開する場合、システムや機器類を国際標準化に整合させることは必要不可欠である。また、国内で研究開発された技術を国際標準化として開発・発行することが理想である。しかしながら、国際標準の提案～発行までには長い活動期間と十分な要員リソースが必要となる。そのためにも、現状と課題などの情報を提供しつつ、国際標準化の重要性、必要性について啓発し、関係者の理解を促すことが、先ずは重要である。前述した InterOPERA 事業で検討されている技術仕様や標準化への取組状況、また IEC SC22F（半導体変換器）TC115（直流送電システム）、および CIGRE, IEEE など議論されている内容について、事業期間中、研究開発活動と並行して収集、学会や集会など機会に関係者の共有を図ってきた。例えば、2024年3月に開催された、電気学会電力技術/電力系統技術/半導体電力変換 合同研究会にて「直流分野の国際標準化動向と展望」として、本分野の動向を整理し文書化し関係者への周知を図った。

### (3) 学会（シンポジウム・座談会）、学会誌への寄稿等

国内外の学会等への論文投稿・発表（電気学会全国大会・部門大会等）や講演会・セミナーでの講演等も積極的にいき、成果をPRしている。特に、R6年 電気学会電力・エネルギー部門大会で実施した募集型座談会・オーガナイズドセッション直流送電技術・事業の最新動向として、本事業の成果のみならず、国の政策動向、各企業の取り組み、人材育成の3部構成とし、直流分野全体が把握できるようなプログラムを企画した。総合討議では、活発な議論が行われ電気新聞でも当日の内容と後追い取材があり関連技術、アウトカムへ向けたPRしている。

また、学会誌・専門誌への積極的な寄稿により、本事業内容や成果、内外の関連動向などについて、積極的な情報発信に努めている。

### (4) 人材育成

従来より、ものづくり（ハード、ソフト）、ことづくり（事業化、プロジェクト開発）のためにも、ひとつづくり（人材育成）の重要性が議論されてきた。本事業においても、「NEDO プロジェクトを核とした人材育成、産学連携等の総合的展開」の枠組みを活用しNEDO 特別講座／多用途多端子直流送電システムを2021年に開設し、2025年度までの計画で実施している。NEDO 特別講座は、3大学（東京都市大学、徳島大学、東京科学大学（旧：東京工業大学））に委託し、産学間・研究室間で組織を横断して直流送電技術や電力系統用パワーエレクトロニクス技術の研究教育拠点形成を目指している（図3-6-2参照）。このNEDO 特別講座では、「産学間、研究室間での合同セミナーによる人材育成」、「分科会（専門知識勉強会、企業との座談会）による人的交流」、「直流送電、電力系統パワーエレクトロニクス関連の研究の実施と情報交換」、および「研究室の相互訪問や設備見学会によるふれあいづくり」などの活動を通して、今後の直流送電システムや電力システムに関する事業で活躍できるコア人材の育成を実施している。

本特別講座の活動の例を図3-6-3に示す。拠点の地理的制約のため、オンラインの産学合同セミナーを2か月毎に開催しているほか、オンサイトのイベント（セミナー、発表会、施設見学等）により、学生や企業若手技術者とのリアルな人的交流も図っている。また、webサイト、SNSや動画も活用し、本分野の技術の習得意欲や関心ある方々にも情報提供できる仕組みを構築し、人材育成の活動を推進させている。

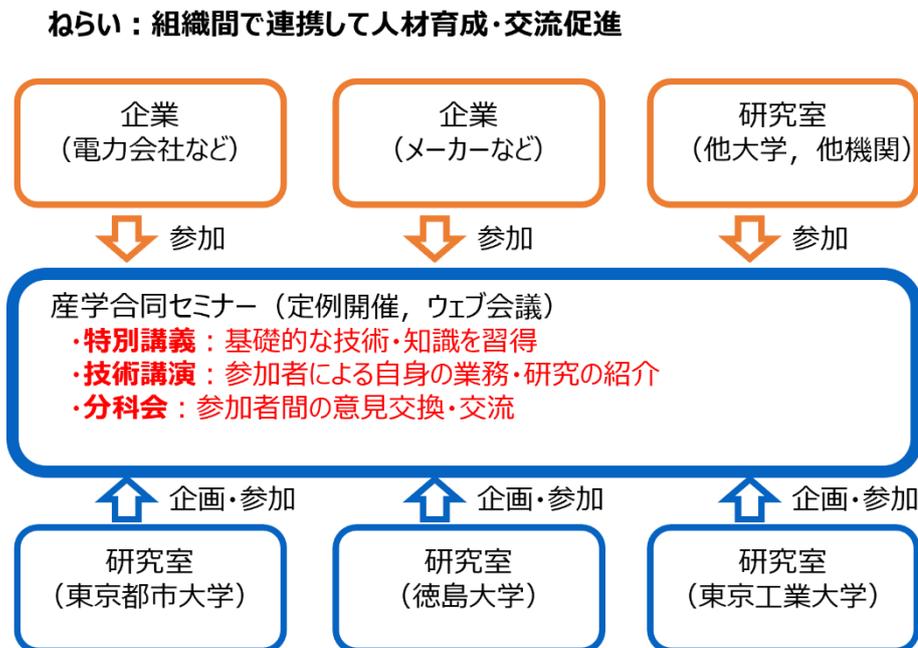


図 3-6-2 NEDO 特別講座の体制・概要



図 3-6-3 NEDO 特別講座の活動例

## 4. 目標及び達成状況の詳細等

### 4.1. 研究開発項目 I、II 多用途多端子直流送電システムの開発、多端子高圧直流送電保護検出装置の開発 (東電 HD、東電 PG、三菱電機、東芝 ESS、日立製作所)

#### 4.1.1 概要

本事業では、洋上での風力発電所が発電した電力の送電だけではなく、地域間の電力融通が可能であること、また島嶼負荷に対して電力供給できる多用途の直流送電システムを実現するため、多端子で接続して適切な潮流制御を行う上位制御装置及び直流ケーブルを保護する保護検出装置を開発するとともに、システムの潮流・保護に関する要求仕様を取り纏めた。なお、本直流送電システムはメーカ 3 社による異メーカ接続（マルチベンダ）としており、5 端子対称単極方式、6 端子対称単極方式（島嶼ユースケース）、および 3 端子双極方式の 3 つの直流送電システムを検討・策定した。

各直流送電システムの潮流制御機能を確認するため、起動・停止試験の他に洋上 WF の出力急変試験や陸上端子の受電電力量を変更する試験等の試験項目を定め、RTDS によるデジタルシミュレーションとメーカが製作した上位制御装置や変換器制御装置の実機とを組合せた HIL 試験による性能確認を実施した。

更に、保護制御機能を確認するため、直流系統及び周辺の交流系統にて、地絡事故、極間短絡事故の試験項目を定め、RTDS によるデジタルシミュレーションとメーカが製作した保護検出装置（直流ケーブル保護用）の実機とを組合せた HIL 試験を実施した。

更に、これらの技術開発と試験結果を踏まえた「多端子 HVDC システムの制御・保護検討に関するガイドライン」を作成した。

#### 4.1.2. 研究開発の目標と根拠

研究開発項目 I「多用途多端子直流送電システムの開発」

##### (1) 目標

- ①多用途として洋上 WF にて発電した電力の送電だけではなく、陸上端子間の電力融通が可能であること、また島嶼負荷に対して電力供給（島嶼ユースケースの策定・機能検証のみの機能）できる以下の 3 つの多用途の洋上 WF 及び洋上系統を含めた直流送電システムを策定し、モデルを構築すること。
  - a. 5 端子対称単極方式（構成：洋上 3 端子、陸上 2 端子、洋上系統付き）（用途：洋上 WF の電力送電、陸上端子間の電力融通）
  - b. 3 端子双極方式（構成：洋上 1 端子、陸上 2 端子）（用途：洋上 WF の電力送電、陸上端子間の電力融通）
  - c. 6 端子対称単極方式（構成：洋上 WF 用 2 端子、島嶼供給用 2 端子、陸上（本土）用 2 端子）（用途：洋上 WF の電力送電、島嶼負荷への電力供給）
- ②上記にて策定した各直流送電システムの潮流・保護制御機能を検証するため、デジタルシミュレーションでの定時や事故時と HIL 試験の定時の各ケースにおいて、本システムの潮流制御が機能し設定したシーケンスどおりに運転できていることを確認する。

##### (2) 根拠

上記（1）－①の目標に対する根拠

- ・上記 a～c 用のデジタルシミュレーション用モデルの提出
- ・上記 a 用の上位制御装置と変換器制御装置の完成品の搬入

上記（1）－②の目標に対する根拠

- ・上記 a～c 用の定時と事故時のデジタルシミュレーションの結果（c は PSCAD による解析結果を含む）
- ・上記 a 用の定時の HIL 試験の結果

研究開発項目Ⅱ「多用途多端子直流送電システムの開発」

(1) 目標

・研究開発項目Ⅰにて策定した5端子対称単極方式直流送電システムにおいて、保護制御機能をより実機に近い条件にて確認するため、直流ケーブル保護用の保護検出装置の実機を製作したものをデジタルシミュレーションモデルに組み込んだHIL試験による各事故ケースにおいて、事故が発生してから事故電流の遮断まで、直流遮断器の遮断可能電流（10pu = 15kA）に収まるような時間内に行われること。また、設定した各試験内容に準じたシーケンス及び想定事故と構成機器の事故時応動の通りに各機器が動作していることを確認する。

(2) 根拠

- ・保護検出装置の完成品の納入
- ・a 用の事故のHIL試験の結果

4.1.3. 研究開発のスケジュール、実施体制

(1) 研究開発のスケジュールと事業費は下表のとおり

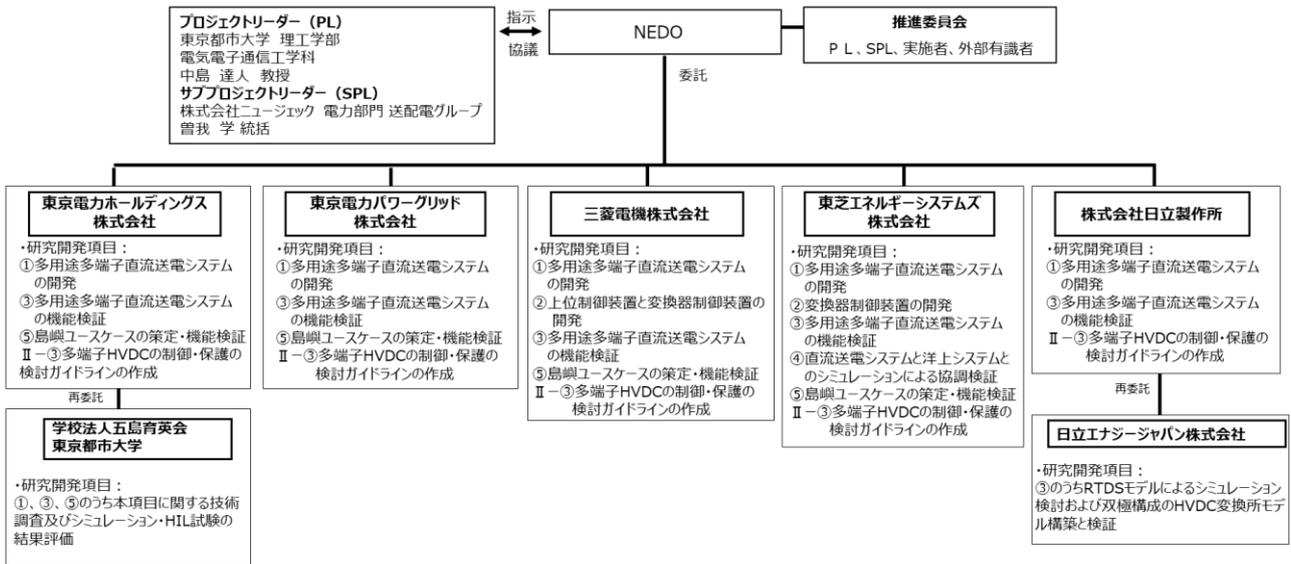
研究開発サブテーマ	2020	2021	2022	2023	2024
1-① 多用途多端子直流送電システムの開発			3端子双極	5端子単極	
1-② 上位制御装置と変換器制御装置の開発（制御・機器の設計、実機製作）		設計	製作		
1-③ 多用途多端子直流送電システムの機能検証			5端子単極シミュレーション 3端子双極シミュレーション	5端子単極HIL試験	
1-④ 直流送電システムと洋上システムとのシミュレーションによる協調検証			5端子単極シミュレーション	5端子単極HIL試験	
1-⑤ 島嶼ユースケースの策定・機能検証			CIGREモデルシミュレーション	メーカモデルシミュレーション	
2-① 保護検出装置の開発（制御・機器の設計、実機製作）		設計	製作		
2-② 保護検出装置の機能検証				5端子単極HIL試験	
2-③ 多端子HVDCの制御・保護の検討ガイドラインの作成（研究開発項目ⅠとⅡ共通）					
事業費 （単位：百万円）	398.9	375.7	831.6	259.1	合計 1865.3

終了時評価

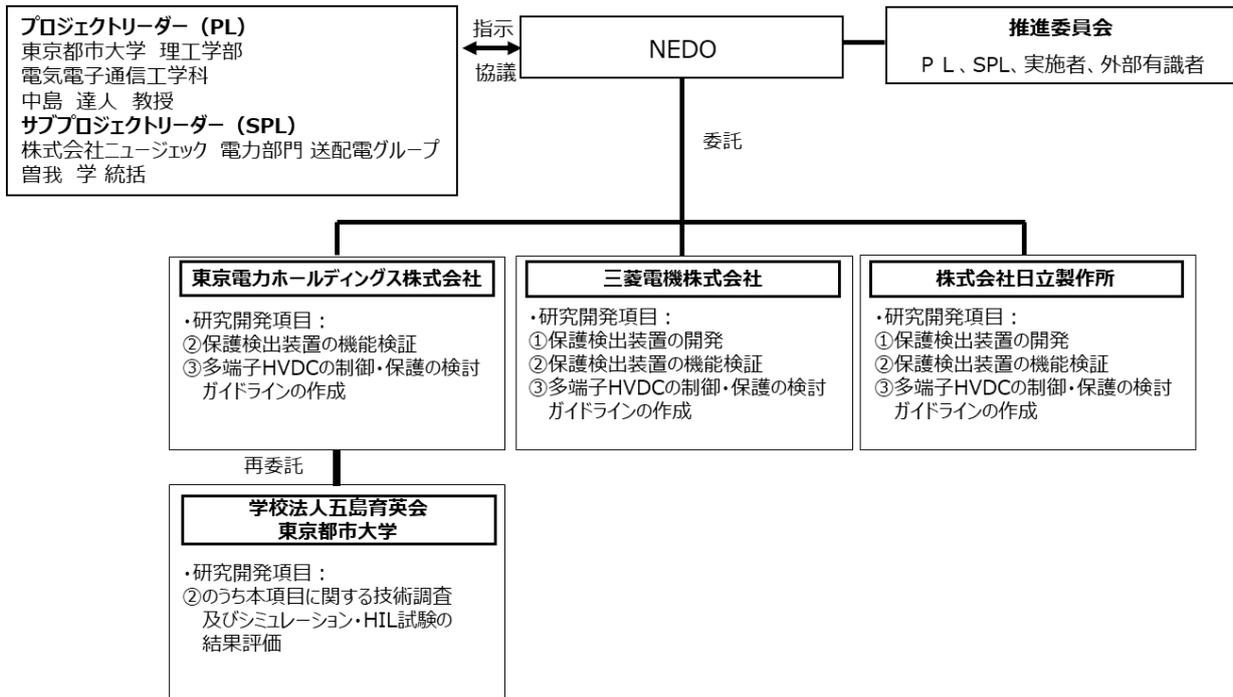
表 4-1-1

## (2) 研究開発の実施体制は以下の通り

### ① 研究開発項目 I 多用途多端子直流送電システムの開発



### ② 研究開発項目 II 多端子直流送電用保護検出装置の開発



#### 4.1.4. テーマごとの目標達成状況と成果の内容

##### (1) 研究開発項目 I 多用途多端子直流送電システムの開発

###### ① 多用途多端子直流送電システムの開発

以下の直流送電システムを開発し、デジタルシミュレーションモデルとして完成させた。

形態：5 端子対称単極方式（洋上 3 端子、陸上 2 端子）（図 4-1-1 参照）と 3 端子双極方式（洋上 1 端子、陸上 2 端子（図 4-1-2 参照））

用途：洋上 WF 用の電力送電と陸上端子間の電力融通

メーカー：変換器（制御装置を含む）や保護検出装置は端子単位でメーカーが異なる（マルチベンダ接続）

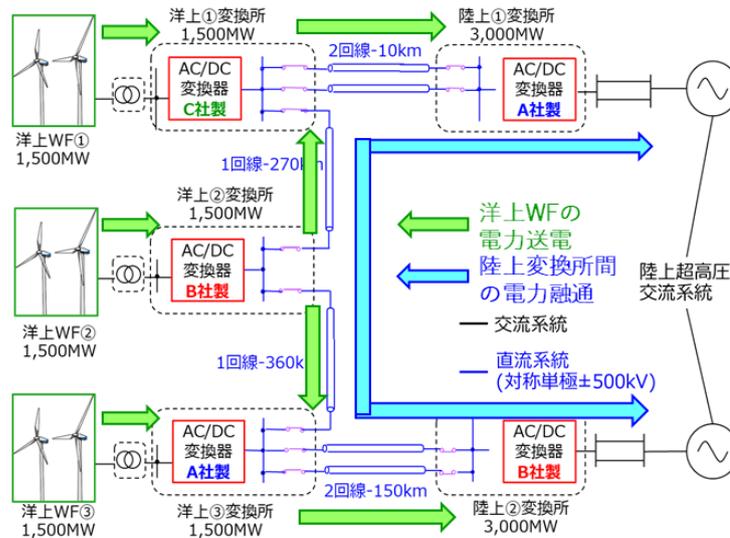


図 4-1-1 5 端子対称単極方式の直流送電の主回路図

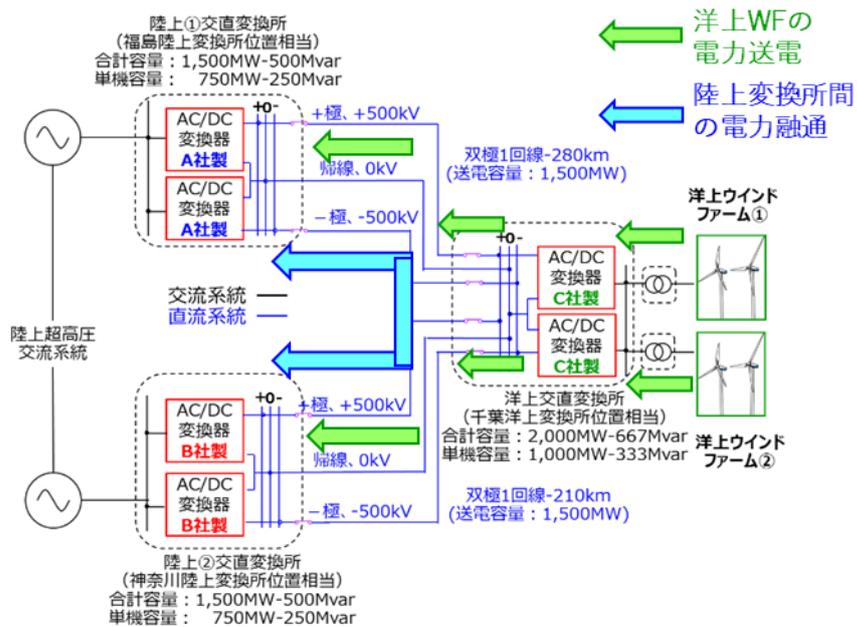


図 4-1-2 3 端子双極方式の直流送電の主回路図

## ②上位制御装置と変換器制御装置の開発（制御・機器の設計、実機製作）

5 端子対称単極方式直流送電システムにおいて、潮流・保護制御機能を検証するため RTDS によるデジタルシミュレーションだけではなく、より実機試験に近い HIL 試験も実施するため、上位制御装置（1 台）（図 4-1-3 を参照）と変換器制御装置（陸上端子用 1 台、洋上端子用 1 台）（図 4-1-3 と 4-1-4 を参照）の実機を設計・製作した。



図 4-1-3

陸上端子用変換器制御装置（青枠）と  
上位制御装置（赤枠）（三菱電機製）



図 4-1-4

洋上端子用変換器制御装置（東芝 ESS 製）

## ③多用途多端子直流送電システムの機能検証

以下の通り各直流送電システムの潮流・保護制御を検証するため、RTDS によるデジタルシミュレーション及び HIL 試験にて確認し、事前に設定した定時・事故時の各試験の基準と結果を照らした結果、いずれの試験結果も基準内にあり、想定される事象において各制御が機能し、問題なく運転できていることを確認した。

### a. 5 端子対称単極方式

#### i) 定時のデジタルシミュレーション、HIL 試験

- ・シミュレーション、HIL 試験の内容：起動・停止（デジタルシミュレーションのみ）、洋上 WF の出力急変、陸上端子の出力配分、洋上 WF の転送遮断
- ・シミュレーション基準：設定した各試験内容に準じたシーケンス通りに各機器が動作していること。
- ・シミュレーション結果：いずれの試験結果も基準内

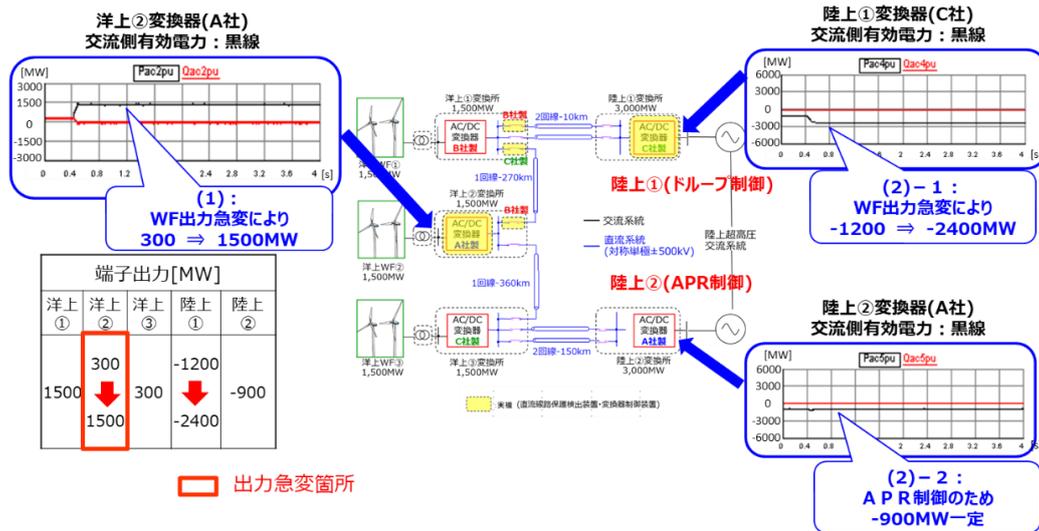


図 4-1-5 5 端子対称単極方式の洋上 WF の出力急変 (HIL 試験) 結果の一例

## ii) 事故時のデジタルシミュレーション

- ・シミュレーションの内容：直流ケーブル事故（正極、負極地絡事故）、直流母線事故（正極、負極地絡事故）、超高圧交流系統（陸上端子至近端）の地絡事故、洋上 WF の集電系統の高圧、中圧の地絡事故、洋上発電所の内部事故（図 4-1-6 を参照）

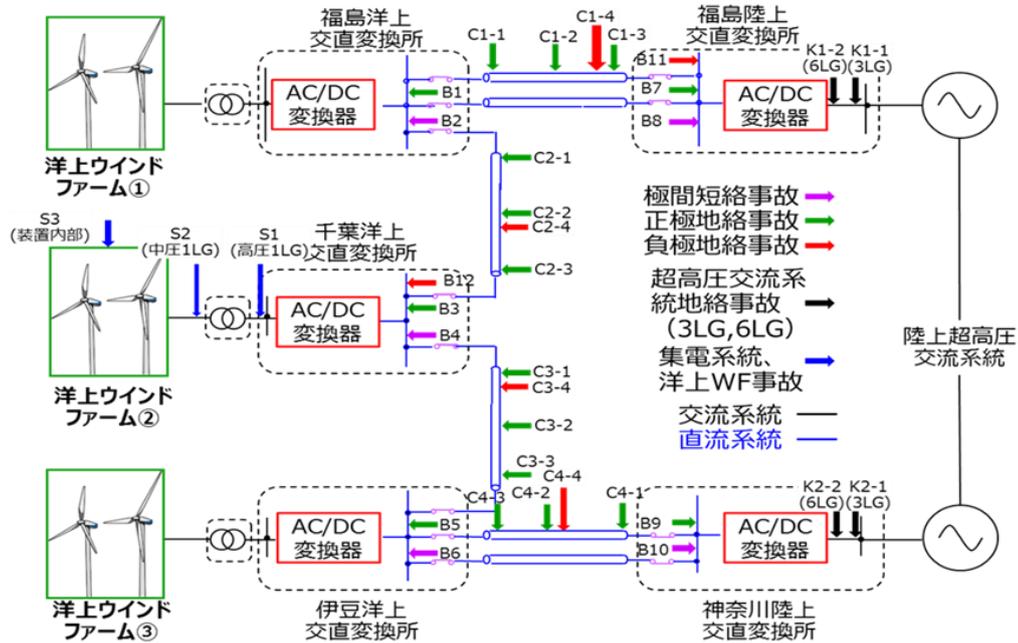


図 4-1-6 5 端子対称単極方式の事故種別と位置図

- ・シミュレーション基準：

- 設定した各試験内容に準じたシーケンス及び想定事故と構成機器の事故時応動の通りに各機器が動作していること。
- 事故が発生してから事故電流の遮断まで、直流遮断器の遮断可能電流（10pu = 15kA）に収まるような時間内に行われること。

- ・シミュレーション結果：いずれの試験結果も基準内

### iii) 通信遅れを考慮した HIL 試験による洋上 WF 転送遮断試験

- ・試験内容：洋上 WF の転送遮断(上位制御装置と各変換所間の通信遅れによる影響がある試験のみ)が発生する以下の各事故を実施
  - ・陸上端子の直流母線事故（正極地絡事故、極間短絡事故）
  - ・超高压交流系統事故（各陸上端子至近、2 回線地絡事故）
- ・試験条件：上位制御装置が東京都内と福島にあることを前提に（図 4-1-7 を参照）、上位制御装置と各端子間でマイクロ波又は光ケーブルを介して通信する条件で、各距離に応じて通信遅延時間を算出した（算出結果は表 4-1-2 を参照）。通信遅延時間は試験モデル内に、デレイロジックを実装し、通信時間を考慮する

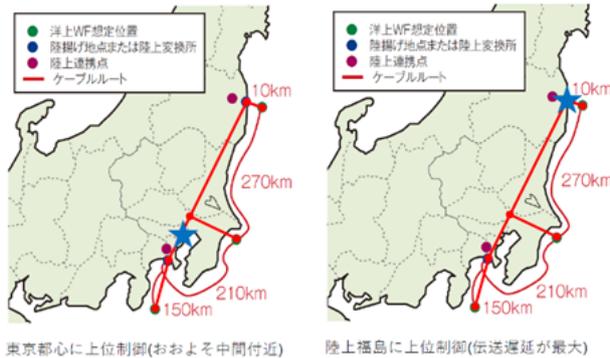


図 4-1-7 上位制御装置の配置との各端子間の距離

表 4-1-2 上位制御装置と各端子間の通信遅延模擬時間

端子	通信遅延模擬時間[ms]	
	上位制御 @東京	上位制御 @福島
福島洋上	20	2
千葉洋上	10	20
伊豆洋上	12	32
福島陸上	18	0
神奈川陸上	6	24

- ・試験基準：設定したシーケンス及び想定事故と構成機器の事故時応動どおりに各機器が動作すること
- ・影響評価基準：通信遅延時間の影響に関して、以下の 3 つの内容を確認する
  - ・各端子の変換器の運転状態
  - ・各洋上 WF の運転状態
  - ・ブレーキングチョッパ動作有無
- ・試験結果：いずれの試験結果も基準内
- ・影響結果：通信遅延時間のない HIL 試験と比較した結果、通信遅延時間がある直流母線事故において、洋上 WF の転送遮断が遅れて、当該端子の変換器を保護するためのブレーキングチョッパが動作していた。しかしながら、ブレーキングチョッパが動作した端子の変換器自体は停止しておらず、試験基準を満たしており問題ないことを確認した。

#### ④ 直流送電システムと洋上システムとのシミュレーションによる協調検証

5端子対称単極方式の直流送電システムと洋上システムの相互連携を可能とする上位制御装置、各端子（変換器）、洋上システムのインターフェイス信号と協調シーケンスを定めた（図 4-1-8）。



図 4-1-8 直流送電システムと洋上システムの協調シーケンス（システム起動の例）

洋上 WF の集電システムをモデリングした洋上システムモデルを作成、5端子対称単極方式の直流送電システムの洋上端子 1 つに接続し、システム起動停止、洋上集電システム事故等を検証し、協調シーケンスが正しく動作することを確認した（図 4-1-9）。

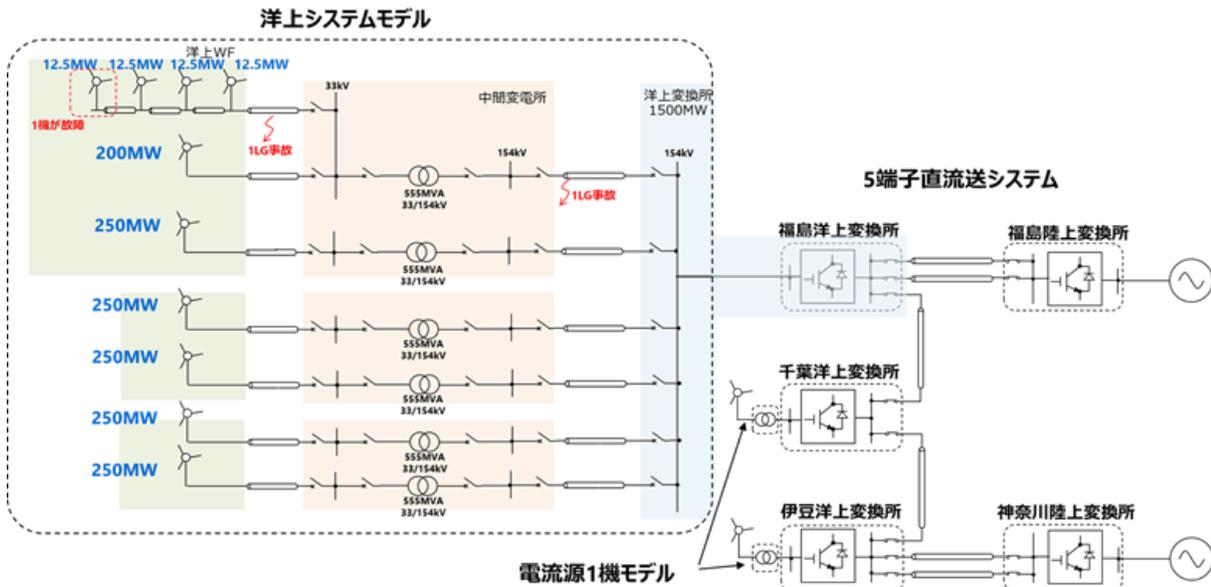


図 4-1-9 洋上風力の集電システムをモデリングした洋上システムモデル

### ⑤ 島嶼ユースケースの策定・機能検証

洋上 WF から島嶼を経由し、本土に供給する 6 端子対称単極方式（構成：洋上 WF 用 2 端子、島嶼供給用 2 端子、陸上（本土）用 2 端子）の直流送電システムのユースケースを策定した（図 4-1-10 左）。定常状態のみならず送電線事故(直流、交流)および母線事故(直流)で島嶼システムが安定運用できるか検証した。その結果、島嶼発電機を停止しても直流送電システムの制御により島嶼システムを安定的に運転継続できる可能性があることが確認できた(解析例：図 4-1-10 右)。

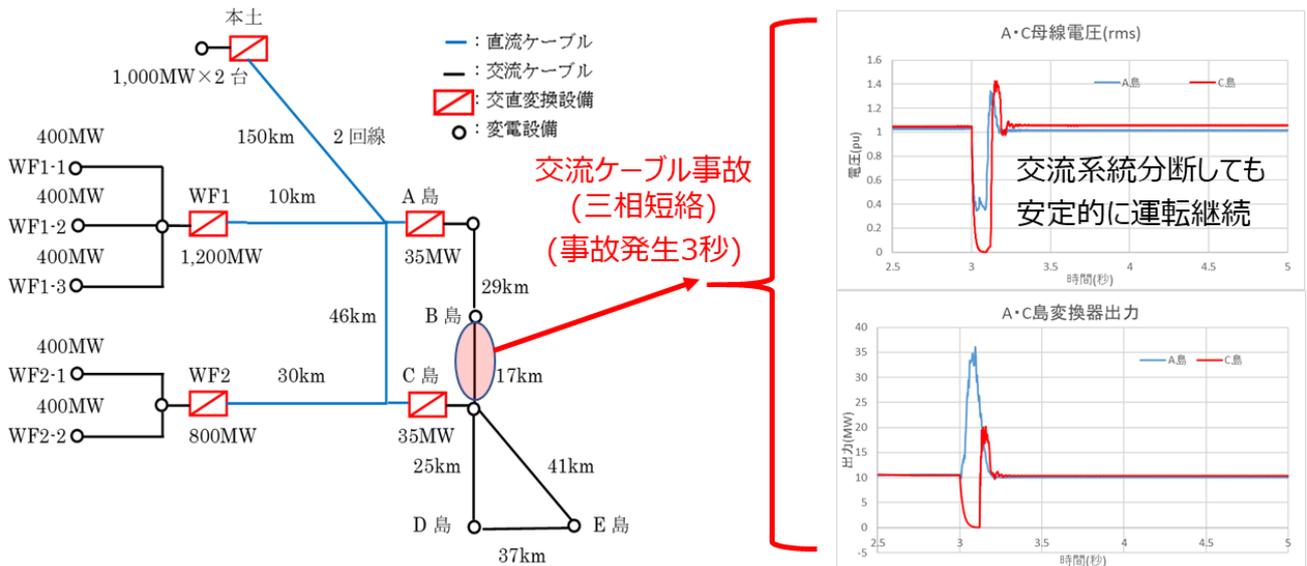


図 4-1-10 島嶼ユースケース（左）と解析例（右）

## (2) 研究開発項目Ⅱ 多端子直流送電用保護検出装置の開発

### ① 保護検出装置の開発（制御・機器の設計、実機製作）

5 端子対称単極方式直流送電システムにおいて、より実機に近い、保護制御機能を確認するため RTDS による HIL 試験用に、メーカ 2 社による直流送電線 3 回線分 1 台（図 4-1-11）と 1 回線分 2 台（図 4-1-12）の直流ケーブル保護用の保護検出装置の実機を設計・製作した。



図 4-1-11 保護検出装置（三菱電機製、3 回線分× 1 台）



図 4-1-12 保護検出装置（日立製作所製、1 回線分× 2 台）

## ② 保護検出装置の機能検証

5端子対称単極方式の直流送電システムの事故時の保護制御機能を検証するため、以下の通り RTDS による HIL 試験を実施し、事前に設定した事故時の各試験の基準と結果を照らした結果、いずれの試験結果も基準内にあり、想定される事象において、問題なく運転できていることを確認した。(図 4-1-13)

- ・ シミュレーションの内容：直流ケーブル事故（正極、負極地絡事故）、直流母線事故（正極、負極地絡事故）、超高圧交流系統（陸上端子至近端）の地絡事故、洋上 WF の集電系統の高圧、中圧の地絡事故、洋上発電所の内部事故（図 4-1-6 を参照）

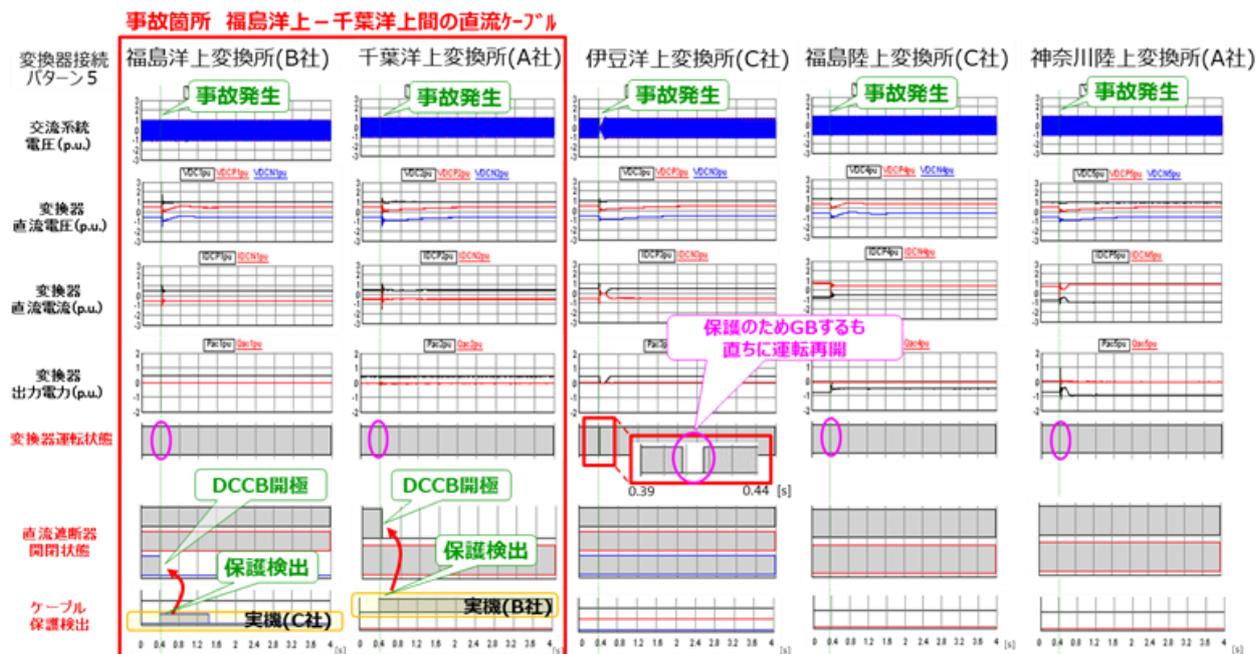


図 4-1-13 5端子対称単極方式の HIL 試験結果(直流ケーブル地絡事故)

## ③ 多端子 HVDC の制御・保護の検討ガイドラインの作成

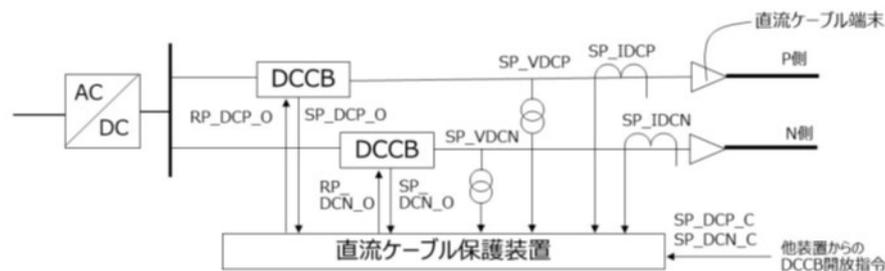
本事業での検討・シミュレーション・試験の知見を基に、システムの仕様検討や各種シミュレーション・試験のガイドとなる「多端子 HVDC システムの制御・保護検討に関するガイドライン」を追加・修正した。

<追加した主な内容以下の通り>

- ・ 双極方式の各項目を記載（図 4-1-14 参照）
- ・ 保護制御系（図 4-1-15 参照）
- ・ シミュレーションの目的と概要（将来のマルチベンダ化へ向けてのシミュレーションの前提条件・準備を含む）

III 双極方式	93
1 多端子HVDCシステムの構成要素と主な機能	93
1.1 システム全体	93
1.2 上位制御系	96
1.3 変換所（端子）	96
1.4 交直変換器（極）	98
1.5 直流母線	99
1.6 洋上WF・洋上系統・集電系統	100
1.7 接地	104
2 上位制御系	105
2.1 上位制御系の電力配分機能の基本的な考え方	105
2.2 上位制御系の電力配分機能のフローチャート	107
2.3 上位制御系による洋上WF転送遮断	108

図 4-1-14 ガイドラインの双極方式の各項目（一部抜粋）



番号	信号名	信号From	信号To	信号属性	説明
1	SP_IDCP	主回路	直流ケーブル保護	アナログ	P側線路電流
2	SP_IDCN	主回路	直流ケーブル保護	アナログ	N側線路電流
3	SP_VDCP	主回路	直流ケーブル保護	アナログ	P側対地電位
4	SP_VDCN	主回路	直流ケーブル保護	アナログ	N側対地電位

図 4-1-15 (上) 直流ケーブル保護装置のインターフェースの例

(下) 直流ケーブル保護装置の通信信号の例

#### 4.1.5. アウトカム達成に向けた戦略と具体的な取組

本事業の研究開発を取り組んだ、最終目標としては、「2040年までに、本事業に参加した事業社が国内外の多端子直流送電システムの実事業に関与することで、同システムの実開発・実運用技術を確立し、再生可能エネルギー大量導入によるカーボンニュートラル社会の実現に寄与すること」と設定した。（表 4-1-3）

アウトカム達成に向けた戦略と具体的な取組として

(1) 2030年までは以下の①～④を取組むことで、多端子直流送電の実事業関与へ向けての課題・問題点の解決、建設や実試験の経験による知見の積み重ねを実施。

- ① 直流送電関係の建設・試験の経験の蓄積として、国内の新規周波数変換設備（新佐久間変換所新設（三菱電機受注 300MW、2028年3月運開予定）、新北本連系設備第2極増設（東芝 ESS 受注 300MW、2028年3月末運開予定）、東清水変電所周波数変換所増設（日立製作所受注、600MW、2027年度末運

開予定)), の案件があり、シミュレーションや HIL 試験はもとより、変換器を含めた変換所の設計・建設及び実機試験を経験する。

- ② 本事業の残課題として、多端子及び多機能を含めた直流送電全般の課題である運転・運用・技術情報取扱い等を抽出・整理後、ガイドライン化へ向けて検討する。
- ③ 直流送電システムの更なる付加価値の創造ということで、コストや実用化を見据えた各機器の開発を進める。
- ④ CIGRE や IEEE、IEC の各委員会に積極参加し、国内外の技術動向調査や国際規格化することで、特に②の運転・運用や③の各機器の開発の後押しをする。

(2) 2030 年までの①～④の取組みにより、「2040 年までに本事業に参加した事業者が新規の国内外の直流送電システムの建設・運転の受注を含め関連事業に関与する」ことを目標設定した。

(3) 2040 年前から、国内外において洋上 WF の送電や陸上端子間の電力融通の効率化の観点から直流送電システムの多端子化が進み、新規や改良案件が多数出ると想定しており、最終目標として「2040 年以降、本事業に参加した事業者が国内外の多端子直流送電システムの実事業に関与する」と設定した。

表 4-1-3 アウトカム達成に向けた具体的な取組スケジュール

		2025 年度	2026 年度	2027 年度	2028 年度	2029 年度	2030年度～2040年度 洋上風力10GW案件形成	2040年度～2050年度 洋上風力30～45GW案件形成	2050年度～
多端子を含めた直流送電 (双極, 対称単極) 建設・運転		新佐久間変換所新設、300MW 三菱電機受注、2027年末運開予定 東清水変電所周波数変換所増設、600MW 日立製作所受注、2027年末運開予定 新北本連系設備第2極増設、300MW 東芝ESS受注、2027年度末運開予定					国内・海外のHVDC システム建設・運転 (新規)		国内・海外の多端子 HVDCシステム建設・運 転(新規又は既設2端 子間接続)
	残課題の検討と ガイドライン化・	直流送電全般の運転・運用・技術情報 取扱い等の国内ガイドライン化							
技術動向調査・ 国際規格化		CIGRE、IEC委員会への参画(技術動向 調査、国際規格化)							
		多端子直流送電システムに関する講演を実施							
更なる 付加価 値の創造	潮流制御系(上 位制御装置、変換 器制御装置)	変換器・制御盤の大容量化・高電圧化(500 kV、2GW級)に向けて製品化の開発					海外への直流送電システム の保護制御技術関係への提案		最終 目標
	保護制御系 (直流遮断器、 保護検出装 置)	直流遮断器(DCCB)の高電圧化 (500kV級)の製品化に向けた技術開発 多端子直流送電システムの製品化の開発 海外への直流送電システム の保護制御技術関係への提案							

## 4.2. 研究開発項目Ⅲ 直流深海ケーブルの開発 単芯水深 1500m 級 (古河電気工業)

### 4.2.1. 研究開発の概要

多用途多端子高圧直流(HVDC)のシステム実現のための要素技術として、「直流深海ケーブルの開発」を行った。本事業では1GW級の送電容量を有する、水深1500m級の深海に敷設可能なDC500kV単芯ケーブルを対象として、従来ケーブル(水深300m級)と同等のコストで安全に敷設することが出来る深海ケーブル及びその敷設工法等を開発することを目的とした。

動向調査では、直流単芯ケーブルの欧州の件名と敷設船について調査を行った。

導体構造および材料の検討では、アルミ導体による軽量化と、キーストーン導体構造の適用を行った。

がい装構造と材料の検討では、丸線と、占積率を向上できる平角線について検討した。試作ケーブルでは、φ8二重鉄線構造を適用し、特性評価を行った。

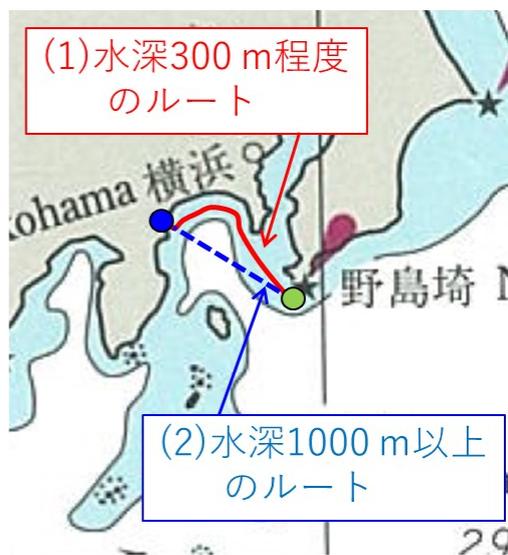
試作ケーブルに対して、機械特性評価、電気特性評価を行った。機械応力評価では、張力・側圧・外水圧の影響評価を行った。検討した試作ケーブルで大水深（1500 m 級）を想定した環境に耐えられることが判明した。また電気特性評価では、長期課通電試験・耐インパルス試験を実施し、機械履歴を与えたあとでも、電氣的に問題がないことを確認した。ケーブル構造解析では構造解析と導体の応力検証を行った。まず構造解析の前に行った解析条件検討では、試作ケーブルの特性評価データを元に、接触パラメータの P 係数倍率と摩擦係数のフィッティングを行った。構造解析結果では、各層の軸剛性の結果を得た。また敷設時の応力推定を行い、実験値と解析結果が整合していることも確認した。アルミ導体の応力検証では、海底ケーブルであることを考慮すると、硬アルミ導体ならば、大水深への適用が可能であることを確認した。ケーブル敷設検討では、OrcaFlex による挙動解析を行った結果、上下動揺が大きい程最大張力と最大曲率が大きくなる傾向があった。

系統モデルを用いたコスト評価では、従来水深ルートと比較して、大水深ルートの方が、建設費が安価となることを確認した。

#### 4.2.2. 研究開発の目標と根拠

2019 年海洋再生可能エネルギー発電設備の整備に係る海域の利用の促進に関する法律の施行に伴い、各地で洋上風力発電の設置に向けて複数の案件が急速に立ち上がっている。特に風況が良い等の条件によって案件の多い地域としては、北海道・東北・九州などが挙げられる。これらの地域で大規模な洋上ウインドファーム(WF)を設置する場合、沿岸に沿って順次導入する事が想定されるが、大消費地までの送電距離が長い事や送電容量の制約等が大きな課題となっている。そのため、複数の洋上 WF と電力系統や需要地とを多端子で接続する方式として、長距離の送電効率に優れる直流送電システムを導入する事は、洋上風力発電を拡大する上でも有効な手段となる。直流送電は、北本連系線などの地域間連系線での利用実績もあるが、再エネ導入に適した離島に直流変電所を設置する事によって低コスト化への貢献も可能となる。なお、経済性を考慮すると回線あたり GW 級の送電容量が想定され、ケーブルは単芯海底線が必要となる。

図 4-2-1 に直流連系で想定される海底ケーブル敷設ルートの一例を示す。図 4-2-1 の左側の図は、「次世代洋上直流送電システム開発事業」（中間評価）で公開されたプロジェクト試算検討の一例である。福島沖や千葉沖で発電された電力を神奈川県に陸揚げ、連系するプロジェクトプランとなっている。この場合、千葉沖から神奈川までの敷設ルートを検討すると、従来技術である水深 300 m までのルートであれば約 90 km となるが、水深 1000 m 以上のルートを選定できると約 65 km となる。広域の海底線直流連系を考えた際は、水深が深くなる事が多く、大水深可能なケーブルの開発により、大幅なルートショートカットが可能となり、送電ロスの低減や工期短縮を図ることができる。



「次世代洋上直流送電システム開発事業」（中間評価）プロジェクトの概要より

図 4-2-1 直流連系の想定概要

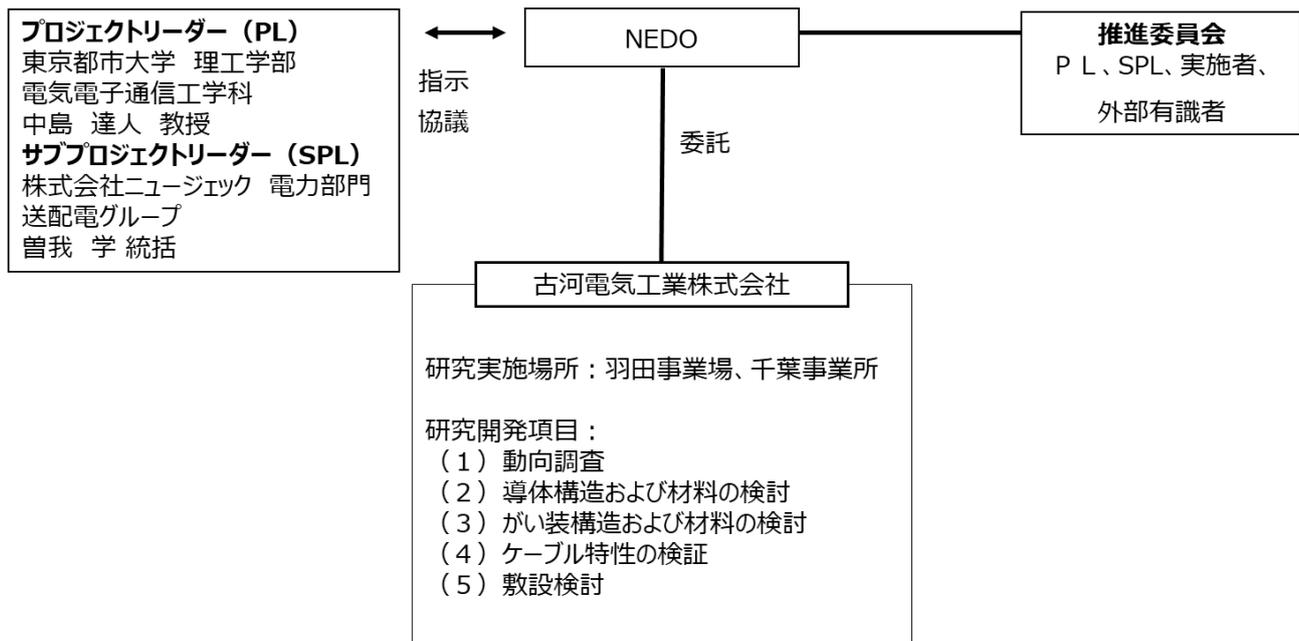
本事業では、多用途多端子高圧直流（HVDC）のシステム実現のための要素技術として、「直流深海ケーブルの開発」を行う。「次世代洋上直流送電システム開発事業」（成果報告書）にて公開されたプロジェクト試算に基づき、1 GW 級の送電容量を有する、水深 1500 m 級の深海に敷設可能な DC500 kV 単芯ケーブルであり、従来ケーブル(水深 300 m 級)と同等のコストで安全に敷設することが出来る深海ケーブル及びその敷設工法等を開発することを目的とする。

#### 4.2.3. 研究開発のスケジュール、実施体制

下図に本研究開発の実施体制を示す。

No.	研究開発の内容	2020年度	2021年度	2022年度	2023年度
1	動向調査 ・ 直流単芯・深海ケーブル件名 ・ 敷設船		→ →		
2	導体構造および材料の検討 ・ 材料の検討 ・ キーストーン導体の検討	→ →	→		
3	がい装構造および材料の検討 ・ 材料の検討 ・ 構造の検討		→ →	→	
4	ケーブル特性評価 ・ ケーブル試作 ・ 評価設備検討&構築 ・ 機械試験 ・ 電気試験		→ →	→ →	→
5	敷設検討 ・ 敷設解析 ・ コスト評価		→ →	→ →	→ →

下図に本研究開発の実施体制を示す。



#### 4.2.4. テーマごとの目標達成状況と成果の内容

##### (1) 動向調査

導体、がい装を含めたケーブル設計や、試験条件の検討のために、深海へ敷設した、直流単芯ケーブルの欧州件名と敷設船について調査した。調査件名を表 4-2-1 に示す。

深海敷設にあたってはケーブルの軽量化や耐久性の向上が重要であり、どの件名においてもがい装は二重平角線構造であり、MI ケーブルであった。

敷設船に関して表 4-2-2 に調査した海外ケーブル敷設船を、表 4-2-3 に国内ケーブル敷設船を示す。海外敷設船は自航船多く、近年製造された海外敷設船は積載量が 10000 t クラスとなっており、ケーブルの長尺敷設を可能としている。一方で、国内敷設船は最大の積載量でも 5000 t であり、かつ台船のため波浪耐候性・回航速度に劣り、長距離敷設対応として年間を通しての工事は難しい。例えば、広域連系線の短期間工事対応を可能とするためには、大型自航船が必須と考える。また、大水深敷設は敷設張力が大きくなるため、対応するテンショナーが必要となる。過大な張力に対応するために、テンショナーではなく、キャプスタンを備えている海外敷設船もある。

表 4-2-1 欧州直流単芯ケーブル 4 件名

件名	運転開始年	最大水深 [m]	導体材質面積 [mm <sup>2</sup> ]	絶縁体	がい装	外径 [mm]	気中重量 [kg/m]
GR-ITA DC400 kV	2001	1000	銅 1250	MI	高強度亜鉛メッキ鋼 平角二層	120	44
SA-PEI DC500 kV	2011	1640	アルミ 1150	MI	高張力鋼 平角二層	119	37
Cometa DC250 kV	2011	1485	銅 750	MI	平角二層	88	29
ITA- Monte DC500 kV	2019	1200	アルミ 1900	MI	平角二層	130	45

※MI：高粘度絶縁油

表 4-2-2 海外ケーブル敷設船

敷設船	建造年	ターンテーブル寸法	ターンテーブル最大積載重量	シーブ直径	テンショナー性能	敷設速度
Giulio Verne	1983	外径:25 m 内径:6 m	7000 t	6 m	55 t	-
Leonardo da Vinci	2021	外径:28 m 内径:6 m	10000 t	6 m	100 t (Capstan)	35 m/min
		外径:25 m 内径:6 m	7000 t			
Skagerrak	1976	外径:29 m 内径:12 m	7000 t	10 m	50 t	50 m/min
Aurora	2021	-	10000 t	-	-	20 m/min

※“-”：情報なし

表 4-2-3 国内ケーブル敷設船

No.	敷設船	仕様	ケーブル積載量
1	HOKUTO	台船・ターンテーブル非搭載	約 5000 t
2	開洋	台船・ターンテーブル搭載	約 2500 t
3	正国	台船・ターンテーブル搭載	約 1000 t
4	あわじ	台船・ターンテーブル搭載	約 1500 t
5	あさひ	台船・ターンテーブル搭載	約 1200 t
6	第 2 芳洋	台船・ターンテーブル搭載	約 1000 t
7	INFINITY	自航船・ターンテーブル搭載	約 2000 t

## (2) 導体構造および材料の検討

水深 1500 m 級の深海にケーブルを敷設する場合、1500 m 分のケーブル自重が常に敷設船上のケーブルに加わる。そのため、直流深海ケーブルの開発にはケーブルを軽量化することが不可欠である。陸上と海底を問わず、一般的に送電用電力ケーブルに使用されている導体の材料は銅である。しかし、銅は比重が重くケーブル自重が問題になると考えられるため、より比重が軽い金属であるアルミを導体に適用し、ケーブルの軽量化を図る検討を行った。

アルミ導体は銅導体と同等の送電容量を確保するためには、大サイズ化する必要がある。材料の変化と大サイズ化に伴う、導体の機械的な特性や、送電時における熱特性についても確認が必要であり、後述するケーブル特性評価において、機械試験および電気試験にて評価した。コストについても、近年の地金価格から考えると、銅よりもアルミの方が安く、大サイズ化する分を加味しても、材料費はアルミの方が安い。

導体構造について、交流送電においては、導電の表面だけを電流が流れようとする表皮効果が生じるため、大電流を流すためには、導体径を小さくし、素線を絶縁するが、被膜もあり小径化や軽量化を実現することが難しい。一方、直流は表皮効果がないので素線径を太くできる。丸素線の場合、擦っても空隙が生まれるので、ブロック状の素線を擦り合わせて、占積率を向上させたキーストーン導体を適用した。

丸素線のアルミを用いた円圧導体を図 4-2-2 に、キーストーン構造素線の導体を図 4-2-3 に示す。表 4-2-4 では、1 GW 級の送電容量を想定したキーストーンミ/銅と円圧/キーストーン導体の比較を示す。表 4-2-2 より、円圧銅導体と比較して、アルミキーストーン導体は、導体径が大きくなり、がい装まで含めたケーブル外径が大きくなるが、ケーブル重量比(がい装付き)では約 4 %の軽量化が可能である。本検討では外径よりも重量が重視されるため、アルミキーストーン導体が適していることが判明した。

なお、コスト的にはキーストーン導体の場合、素線成形の加工が必要となるため、丸素線よりも素線単価は高くなるが、素線本数はキーストーン導体よりも円圧導体の方が多いことや、導体径のコンパクト化によりその他材料使用量が低減されるため、ケーブルとしてのコスト差は大きくない。

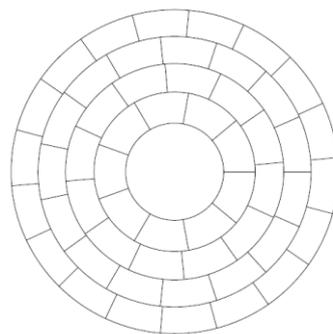
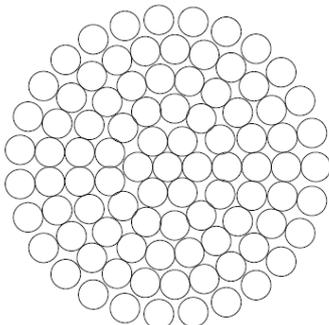


図 4-2-2 円圧構造例

図 4-2-3 キーストーン構造例

表 4-2-4 導体材料と構造の比較

		アルミ キーストーン 1200 mm <sup>2</sup>	アルミ円圧 1200 mm <sup>2</sup>	銅キーストーン 800 mm <sup>2</sup>	銅円圧 800 mm <sup>2</sup>
導体	外径[mm]	40.0	41.7	32.7	34.5
	気中重量[kg/m]	3.4	3.7	7.5	8.3
電力コア (PE シースまで)	外径[mm]	121.2	122.9	113.9	115.7
	気中重量[kg/m]	26.5	27.2	28.8	30.1
がい装付き (Φ8 二重鉄線 がい装)	外径[mm]	169	171	162	164
	気中重量[kg/m]	73	76	74	76
	水中重量[kg/m]	51	52	53	54

### (3) がい装構造および材料の検討

敷設時にケーブルに加わる張力については主にがい装が分担する事となるが、水深 1500 m に対し DC500kV で 1GW 級のケーブル(アルミキーストーン導体 1200 mm<sup>2</sup>)で試算すると自重だけで約 800 kN となる。さらに敷設時には波浪による動揺等の影響も考慮した敷設張力に耐えられる事が重要となるため、がい装はトルクバランスを考慮した交互撚りの二層構造が適している。

がい装の材料としては、機械的な特性や価格面を考慮して鉄系材料を選定した。また構造としては占積率の向上を図るために、丸線構造及び平角構造を対象とし、また導体と同様に形状、本数、構成等について検討した。

一般的な海底ケーブルに適用されるφ8 丸線構造(Case1)と、占積率を向上できる平角構造 3 種類(Case2、3、4)について比較した(表 4-2-5)。内層の電力コア(PE シースまで)は共通とした。ケーブル重量だけで比較すると、がい装の断面積の小くなる Case4 が有利だが、実際にはがい装と導体の張力分担を考慮した設計が必要である。

試作ケーブルについては、一般的ながい装構造であるφ8 丸鉄線の Case1 を適用して特性評価を行いつつ、構造解析にて他がい装構造の検討を行った。

表 4-2-5 がい装構造比較

No.	Case1	Case2	Case3	Case4
がい装	鉄 φ8 丸線	鉄 平角 v1 H6.1×W10	鉄 平角 v2 H4×W16	鉄 平角 v3 H3×W10
ケーブル外径 [mm]	169	162	153	149
ケーブル気中重量 [N/m]	721	709	573	503

ケーブル水中重量 [N/m]	495	503	388	328
がい装 選定理由	一般的ながい装構造	Case1 とほぼ同等のがい装断面積	Case1 とほぼ同断面積を有しつつ、縦横比を1:4 に調整	CIGRE TB623 記載 SAPEI 件名を参考

#### (4) ケーブル特性評価

##### ① ケーブル試作

ケーブル特性評価のため、これまでの検討結果に基づき、アルミキーストーン導体 1C×1200 mm<sup>2</sup>、DC500 kV 二重鉄線がい装ケーブルを試作した。表 4-2-6 に試作ケーブルの諸元を示す。また、図 4-2-4 に試作ケーブルの断面を示す。図 4-2-5 に試作ケーブルの写真を示す。

表 4-2-6 試作ケーブル諸元

項目	内容
ケーブル外径	Φ169mm
ケーブル気中重量	73 kg/m
ケーブル水中重量	51 kg/m
導体	アルミキーストーン導体 1200 mm <sup>2</sup> ※
絶縁体	架橋ポリエチレン(XLPE)
遮水層	鉛
防食層	ポリエチレン
がい装	Φ8 mm 丸鉄線 (二層交互撚り)

※調達の都合上、軟アルミを使用

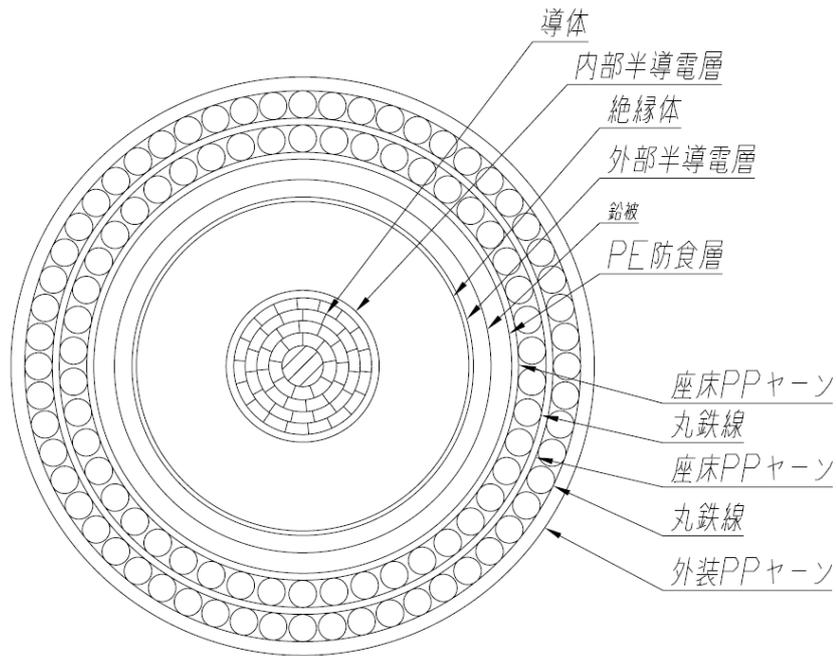


図 4-2-4 試作ケーブル断面



図 4-2-5 試作ケーブル

## ②機械特性評価、電気特性評価

大水深用途で確認すべき機械応力（張力・側圧・外水圧）について評価し、一部は電気性能（長期課通電・耐Imp）評価を行った。表 4-2-7 に評価項目と想定する要求特性を示す。試験の結果、いずれも要求特性を満たした。

表 4-2-7 ケーブル特性評価

項目	想定する要求特性
引張試験	988.9 kN
側圧試験 (平板・クランプ・R 部付き形状)	平板 : 215 kN/m
軸圧縮試験	
外水圧試験	~15 MPa
引張曲げ試験	989 kN × φ10 m
長期課通試験	DC925 kV×30 日
耐インパルス試験	±1550 kV ×10 回

### a. 引張試験

敷設時、ケーブルには自重による静的張力と波浪等による動的張力が加わり、特に水深 1500 m 級の深海への敷設の際、ケーブルに加わる張力は非常に大きくなる。そこで、引張試験を行い、試作ケーブルの性能を検証した。試験張力 T については、CIGRE TB623 を参考に、以下の通り算出した。

$$T = 1.1 \cdot T_s + 1.3 \cdot T_D \quad \dots \text{式①}$$

ここでは、

$T_s$ : 静的張力

$T_D$ : 動的張力

$$T_s = w \cdot d + H \quad \dots \text{式②}$$

$$T_D = D \quad \dots \text{式③}$$

ここでは、

w: 1 m あたりのケーブル重量 [N/m]

d: 最大敷設水深 [m]

H: 敷設中に予想される最大底張力。ここでは  $H = 40 \cdot w$  [N]

D: 動的張力 [N]

$$D = \sqrt{D_I^2 + D_B^2} \quad \dots \text{式④}$$

ここでは、

$D_I$ : ケーブル慣性力

$D_B$ : ケーブル抗力

$$D_I = 1.1 \cdot \frac{1}{2} \cdot b_h \cdot m \cdot L_0 \cdot \omega^2 \quad \dots \text{式⑤}$$

ここでは、

$b_h$ : 敷設シーブの最大垂直移動量 [m]

$L_0$ : ケーブルのカテナリー長さ

m: 敷設中のケーブル内部の海水の質量を含むケーブル 1 m の質量 [kg/m]

$\omega$ : 敷設シーブの移動の円周周波数 [1/s]

$$\omega = \frac{2\pi}{t} \quad \dots \text{式⑥}$$

t: 敷設シーブの移動周期 [s]

$$L_0 = d \sqrt{1 + 2 \frac{H}{w \cdot d}} \dots \text{式⑦}$$

$$D_D = 500 \cdot OD \cdot R^{0.9} \cdot (b_h \cdot \omega)^{1.8} \dots \text{式⑧}$$

ここでは、

OD:ケーブル外径[m]

R:タッチダウンポイントの曲げ半径[m]

$$R = \frac{H}{w} \dots \text{式⑨}$$

使用した計算パラメータを表 4-2-8 に示す。水深 500 m を超える場合、張力はケーブル質量と水深から求まる静的張力に加え、敷設船の動きに基づく動的張力(D)を考慮する必要がある。しかし、そのためには敷設海域や敷設船の情報が必要であり、ここでは CIGRE TB623 で紹介されている SAPEI 件名の値(シーブ垂直動揺  $b_h = 3$  m、周期  $t = 8$  sec)を適用することとし、得られた張力約 1000 kN にて試験を実施した。

表 4-2-9 に試験条件を、また、図 4-2-6 に試験の様子を示す。試験ではケーブル全体の張力、導体に加わる張力をそれぞれ測定した。

図 4-2-7 に張力に対する導体分担を示す。導体分担とは、ケーブル全体に加わった張力のうち、導体に加わっている張力の割合である。試験の結果、導体分担は 8~12 %の間を推移した。表 4-2-10 に導体分担の計算値を示す。計算では 8.0 %となり、試験結果は計算値よりも導体分担が大きいことがわかった。実際のケーブルはがい装がらせん状に巻かれていることや、試験ではケーブル自重による弛みなどが影響したため、計算値よりも導体分担が大きくなったものと考えられる。また、張力に対して、導体分担はほぼ一定の値で推移しており、その値も計算値から大きく外れるものではなく、妥当であると考ええる。

試験後のサンプルについて、解体調査を行った。試作ケーブルの外観や、がい装に異常はなく、内層の電力コアにも変形や異常は確認されなかった。

表 4-2-8 引張試験 試験張力 (CIGRE TB623)

項目	記号	数値	備考
敷設水深	d	1500 m	
ケーブル重量	w	720.8 N/m	
ケーブル外径	OD	0.1692 m	
シーブ垂直動揺	$b_h$	3 m	CIGRE TB 623 記載 SAPEI 件名より
シーブ垂直動揺周期	t	8 sec	CIGRE TB 623 記載 SAPEI 件名より
試験張力	T	988.9 kN	

表 4-2-9 引張試験条件

項目	内容	備考
サンプル数	2本 (No.1、No.2)	
サンプル有効長	5 m	
張力	100 kN ステップ×3 サイクル 最大 1000 kN	ステップは 100 kN×3 サイクル →200 kN×3 サイクル→...

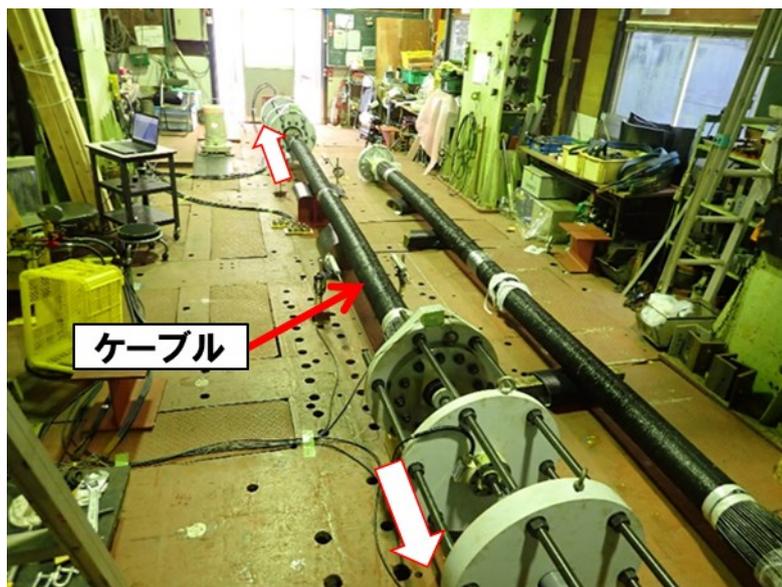


図 4-2-6 引張試験

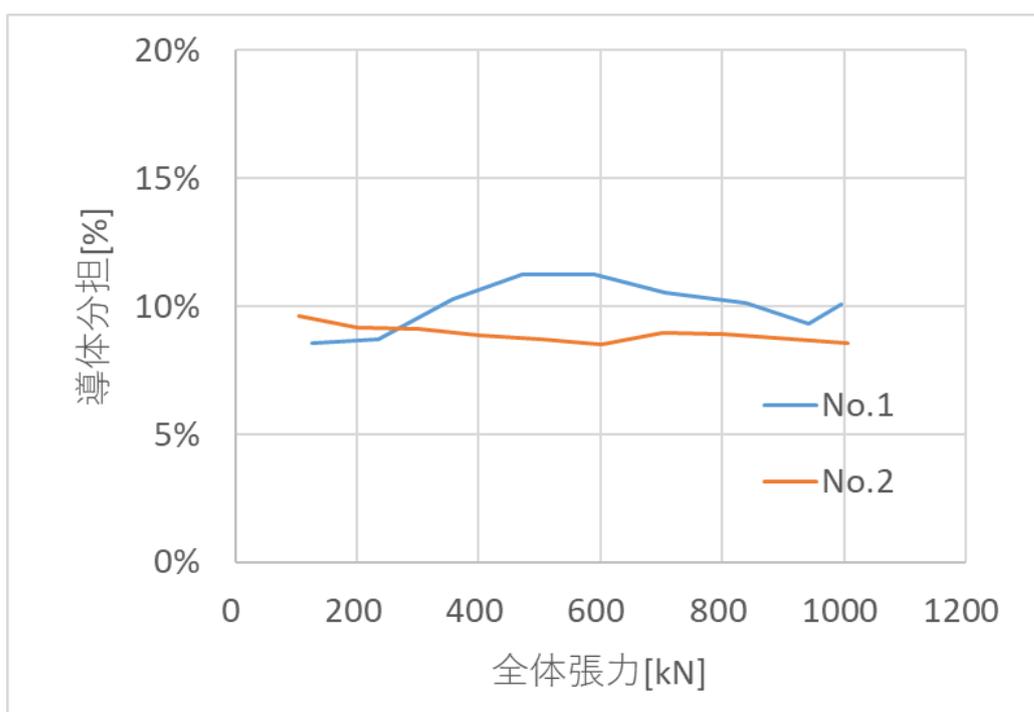


図 4-2-7 全体張力 vs 導体分担

表 4-2-10 導体分担 計算

項目	記号	単位	数値	備考
導体-断面積	$A_C$	$\text{mm}^2$	1200	
アルミ導体-ヤング率	$E_{AL}$	MPa	70000	
鉄線-断面積	$A_A$	$\text{mm}^2$	5275	
鉄線-ヤング率	$E_{AR}$	MPa	200000	
導体分担(計算値)	K	%	8.0	$K = A_C \cdot E_{AL} / (A_A \cdot E_{AR})$

## b. 圧縮試験

### i) 側圧試験

深海敷設では、敷設時のケーブル張力は非常に大きく、ケーブルを引き留めるブレーキ装置(テンショナー)による側圧も大きい(敷設船によってはケーブル敷設に使用するキャプスタンが備えられている)。ある敷設船のテンショナーの例として、ケーブルに加わる最大側圧は 215 kN/m とある。このようなテンショナーによる側圧が問題ないか評価するため、側圧試験を実施した。試作ケーブルであるがい装付きと、がい装なしのサンプルを供試した。ケーブルと接触するクランプ形状について、平板/4点接触クランプ/R部付きを用意した。試験条件を表 4-2-11 に示す。

がい装付き/なしを比較すると、同じ側圧条件において、がい装付きの方が内部へのダメージは小さかった。また、がい装付きについては、どのクランプ形状でも、最も高い荷重水準(1600 kN/m 以上)で、内部に異常が生じた。一方で、400 kN/m 以下では、内部に異常はなかった。従って、がい装付きでは、想定するテンショナー 215 kN/m の約 2 倍の側圧の大きさまで耐えられる強度を有していることを確認した。

表 4-2-11 側圧試験 試験条件

項目	内容	備考
サンプル	がい装付き	
	がい装なし(シースまで)	レファレンス(がい装の効果を確認するため)
サンプル長	500 mm	
有効長(押し幅)	平板、R部付き：250 mm 4点接触クランプ：100 mm	
クランプ形状	平板	敷設時シーブ側圧を模擬
	4点接触クランプ	キャタピラ側圧を模擬
	R部付き	ケーブルの段積みを模擬
試験機による圧縮方向の力	最大 400 kN	がい装付きケーブルの側圧による破壊様相の検証のため、十分に大きい荷重を与えた

## ii) 軸圧縮試験

ケーブルは、原則的に残留張力が生じるように敷設される。これはケーブルの軸方向に圧縮力が加わるとキンクやバードケーシングが生じるおそれがあるためである。一方で、敷設時のトラブルや、敷設後の地震、潮流、波浪、また漁具などによって、ケーブルに圧縮力が加わってしまうケースがある。そこで、ケーブルの軸方向に力を加える、軸圧縮試験を実施し、軸方向の圧縮力に耐えられる強度を検証した。

試験条件を表 4-2-12 に示す。サンプルについて、試作ケーブルを用いて試験を行った。試験結果について、がい装付きサンプルについては、目視した限り、どのサンプルにおいてもバードケーシングやキンクは生じることなく、解体調査においても内部の電力コアに異常は確認されなかった。一方、がい装なしサンプルについては、100 kN 以上加えたサンプルの解体調査において、サンプル中央の断面にて導体の乱れが確認され、がい装による影響を確認することができた。

以上より、がい装付き試作ケーブルは軸圧縮力 600 kN に耐えられる強度を有していることを確認した。

表 4-2-12 軸圧縮試験 試験条件

項目	内容	備考
サンプル	がい装付き	
	がい装なし(シースまで)	レファレンス(がい装の効果を確認するため)
サンプル長	600 mm	
荷重	最大 600 kN	

## c. 外水圧試験

敷設時、ケーブルには水深に応じた水圧が加わる。国内においてはこれまで、水深 300 m 程度の海域へのケーブル敷設実績はあるものの、深海などの高水圧下の挙動については知見がない。そこで、ケーブルの外水圧試験を実施した。試験条件を表 4-2-13 に示す。試験サンプルについて、試作ケーブルを用いた。

外水圧試験結果を表 4-2-14 に示す。どのサンプルにおいても、水圧下の外観、試験後のサンプル外観、解体調査においても異常は確認されず、試作ケーブルは想定される水深 1500 m における水圧に対して、十分な裕度を持っていることを確認した。

表 4-2-13 外水圧試験条件

項目	内容	備考
サンプル	シースまで	
	鉛被まで	PE シース影響の確認と遮水層表面の観察のため
サンプル長	1200 mm	
水圧	最大 25 MPa	水深 1500 m(約 15 MPa)が本テーマの想定

表 4-2-14 外水圧試験結果

No.	サンプル	水圧条件	結果
1	シース付き	5 MPa×1 h 保持	外観、内部の電力コアともに異常なし
2	シース付き	15 MPa×1 h 保持	外観、内部の電力コアともに異常なし
3	シース付き	25 MPa×1 h 保持	外観、内部の電力コアともに異常なし
4	シースなし (鉛被剥き出し)	1 MPa 刻み×5 min 保持 ステップ, 上限 25 MPa	外観、内部の電力コアともに異常なし

#### d. 引張曲げ試験

ケーブルを海底へ敷設する時の、ケーブルの自重による張力や、敷設船のシーブにより加わる側圧を模擬した力を与える、引張曲げ試験を実施した。試験方法は CIGRE TB623 に則った。試験の概略図を図 4-2-8 に示す。サンプルは試作ケーブルを用いた。ケーブルに対して、各試料 3 回のしごきを与えた。表 4-2-15 に CIGRE TB 623 に従った試験条件を、表 4-2-16 に実施した試験条件を示す。側圧については要求性能以上を与えることはできたが、試験張力は設備制約から水深 1100 m として設定した。要求性能との比較は後述する。シーブ径は側圧による影響を評価するため、2 条件(φ8 m、φ5 m)行った。図 4-2-9 試験の様子を示す。

試験は合計 3 本のケーブルで実施した。表 4-2-17 に結果を示す。各試験後のケーブルに外観異常はなく、鉄線および内層の電力コアに扁平や変形は確認されなかった。No.3 試料については試験後、長期課通電試験に供試した。

実施した引張曲げ試験と CIGRE TB623 要求性能に対して、張力については別途実施し、引張試験にて 1000 kN まで問題ないことを確認できている。ただし、実施した引張曲げ試験においては設備制約から試験張力は不足しており、要求性能に対して実施した試験条件は十分に厳しい条件となっているか、妥当性の検討を行った。構造解析から算出した Strain factor<sup>※</sup>を元に、張力によるひずみ、曲げによるひずみをそれぞれ算出して、試験条件および CIGRE 要求性能のひずみを算出した。

ケーブルに含まれる各金属層(導体、鉛被、内側がい装、外側がい装)について、試験条件、要求性能の張力によるひずみと、曲げによるひずみを合算し、比較した結果、実施した試験条件が、CIGRE 要求性能よりも厳しいことを確認した。

※Strain Factor(以下 SF)について

- ・ 引張 SF：応力-ひずみ特性であり、特定の層における、応力[MPa]に対して、生じるひずみ[ε]が線形であると仮定して、以下の式より引張によって生じるひずみを算出する。

$$(\text{引張ひずみ}) = (\text{引張 SF}) \times (\text{張力})$$

- ・ 曲げ SF：曲率-ひずみ特性であり、特定の層における、曲率[1/m]に対して、生じるひずみ[ε]が線形であると仮定して、以下の式より曲げによって生じるひずみを算出する。

$$(\text{曲げひずみ}) = (\text{曲げ SF}) \times (\text{曲率})$$

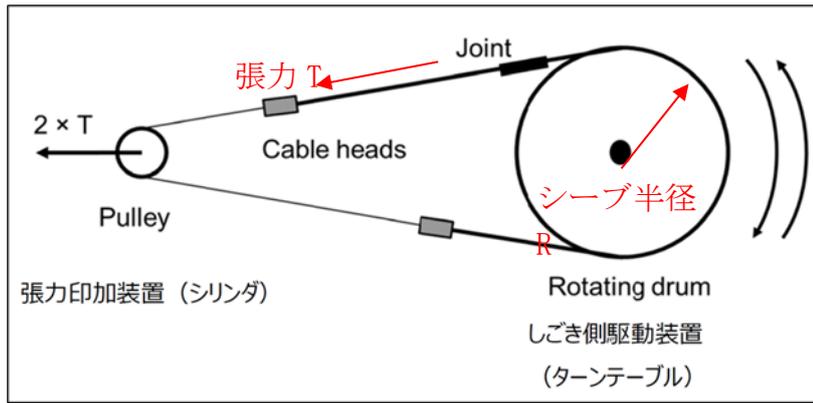


図 4-2-8 引張曲げ試験 概略図

表 4-2-15 引張曲げ試験 CIGRE TB623

項目	記号	数値	備考
敷設水深	d	1500 m	
シーブ垂直動揺	$b_h$	3 m	CIGRE TB 623 記載 SAPEI 件名参考
シーブ垂直動揺周期	t	8 sec	CIGRE TB 623 記載 SAPEI 件名参考
試験張力	T	988.9 kN	
シーブ半径	R	5 m	想定する敷設船のシーブ直径=10m
側圧	P	197.8 kN/m	$P=T_E/R$

表 4-2-16 引張曲げ試験 実施条件

項目	記号	数値	備考
敷設水深	d	1100 m	
シーブ垂直動揺	$b_h$	3 m	CIGRE TB 623 記載 SAPEI 件名参考
シーブ垂直動揺周期	t	8 sec	CIGRE TB 623 記載 SAPEI 件名参考
試験張力	T	732 kN	設備制約より
シーブ半径	R	4 m / 2.5 m	
側圧	P	183 / 292.8 kN/m	$P=T_E/R$

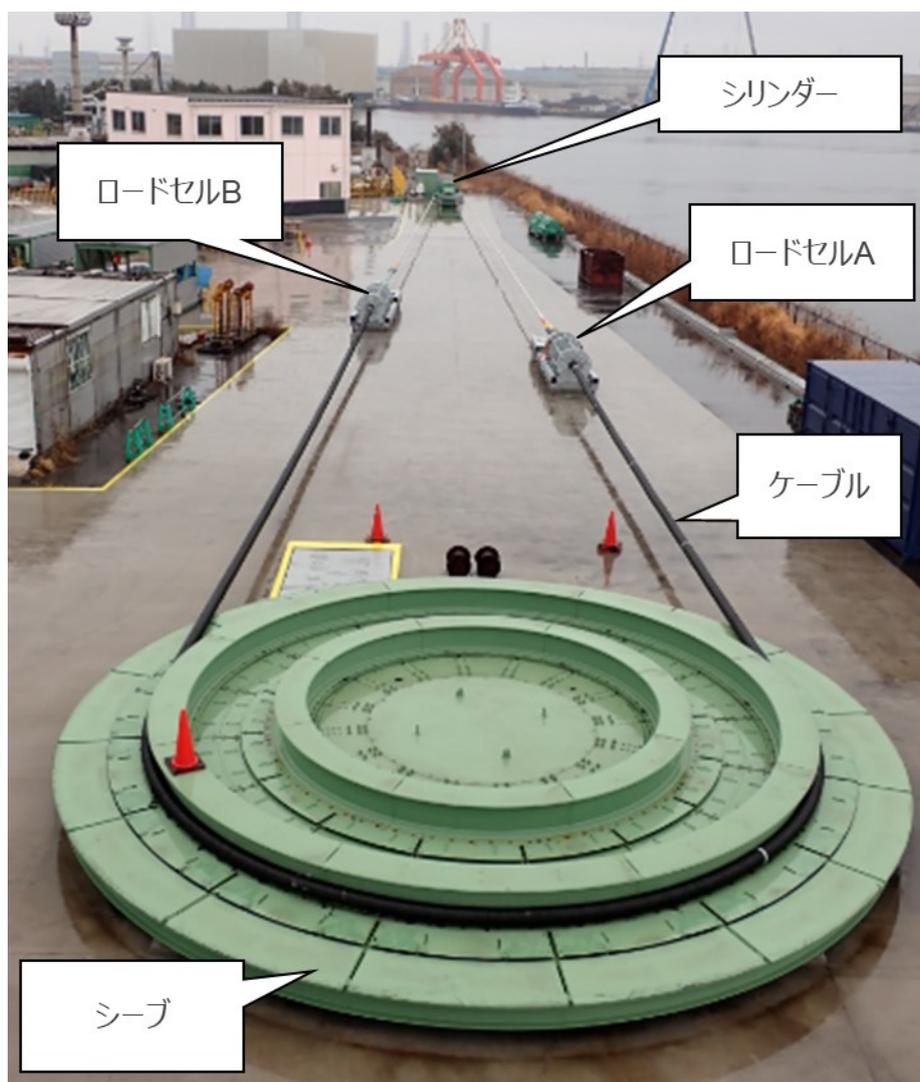


図 4-2-9 引張曲げ試験

表 4-2-17 引張曲げ試験 結果

No.	条件	ケーブル長	結果
1	φ8 m シーブ	約 60 m	良
2	φ5 m シーブ	約 60 m	良
3	φ5 m シーブ (電気試験に供試)	約 60 m	良

#### e. 長期課通電試験

引張曲げ試験サンプル No.3 ケーブル(1 本)の鉄線がい装を除去して、長期課通電試験を実施した。長期課通電試験条件は CIGRE TB496 を参考とした(表 4-2-18)。図 4-2-10 試験状況を、図 4-2-11 概略図を示す。ヒートサイクルにおける条件は以下とした。

- ・常時許容導体温度： $T_{\text{cond,max}} = 90 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- ・絶縁内側と絶縁外側との最大温度差： $\Delta T_{\text{max}} = 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$

24 時間のヒートサイクルは、8 時間の加熱と、16 時間の自然冷却とした。また、加熱時には導体温度が  $T_{\text{cond,max}}$  以上、かつ、絶縁内側と絶縁外側との最大温度差が  $\Delta T_{\text{max}}$  の状態を 2 時間以上保持するものとした。48 時間のヒ-

トサイクルは、24 時間の加熱と、24 時間の自然冷却とした。また、加熱時には導体温度が  $T_{\text{cond,max}}$  以上、かつ、絶縁内側と絶縁外側との最大温度差が  $\Delta T_{\text{max}}$  の状態を 2 時間以上保持するものとした。

試験電圧に耐え、異常がない場合に長期課通電試験を合格とした。表 4-2-20 に示す試験条件にて課通電を合計 30 日間実施し、供試ケーブルは絶縁破壊することなく、クリアした。

表 4-2-18 長期課通電試験 試験条件

( $U_0=500 \text{ kV}$ 、 $T_{\text{cond}}=90 \text{ }^\circ\text{C}$ 、絶縁体温度勾配 $\Delta T=15 \text{ }^\circ\text{C}$ )

試験名	電圧[kV]	サイクル	試験条件	試験結果
SQ1	-925	12 サイクル	90 $^\circ\text{C}$ ×24 hr/cycle	良
SQ2		24 h 以上	接地	良
SQ3	+925	12 サイクル	90 $^\circ\text{C}$ ×24 hr/cycle	良
SQ4	+925	3 サイクル	90 $^\circ\text{C}$ ×48 hr/cycle	良

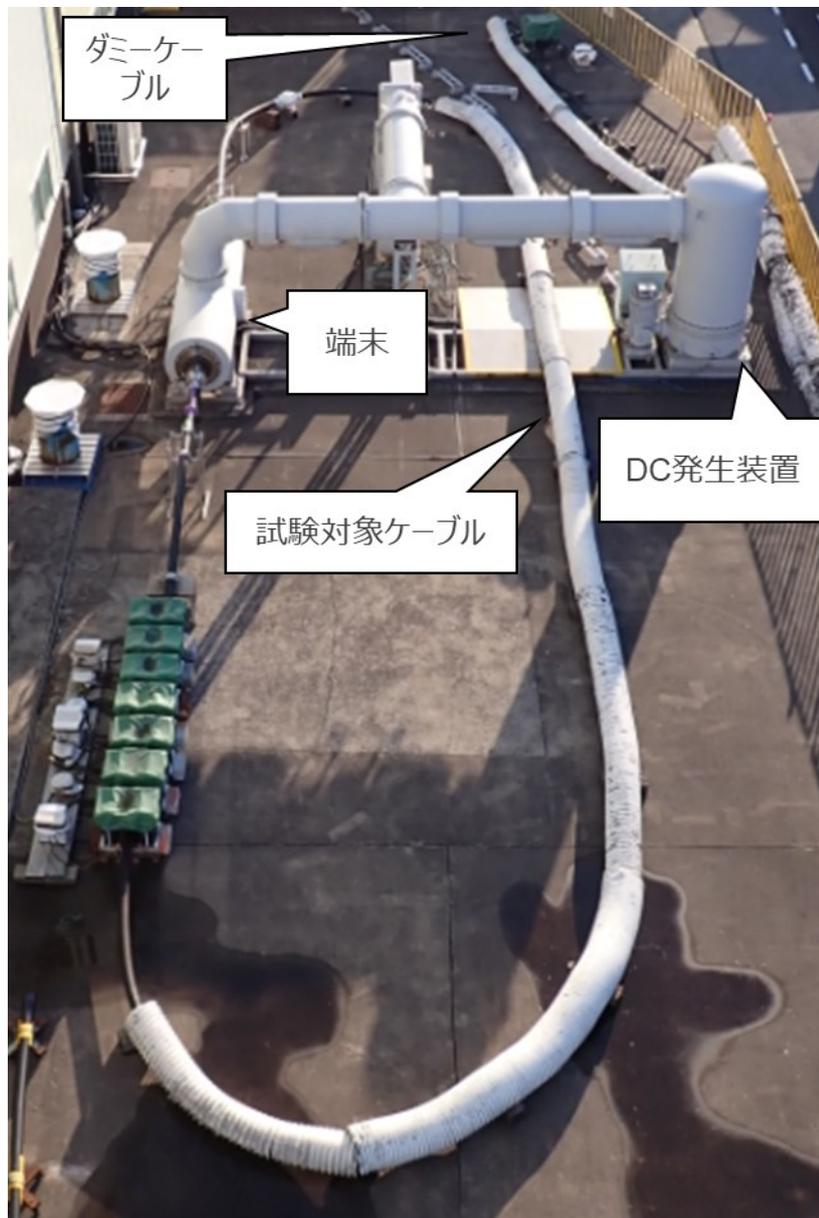


図 4-2-10 長期課通電試験

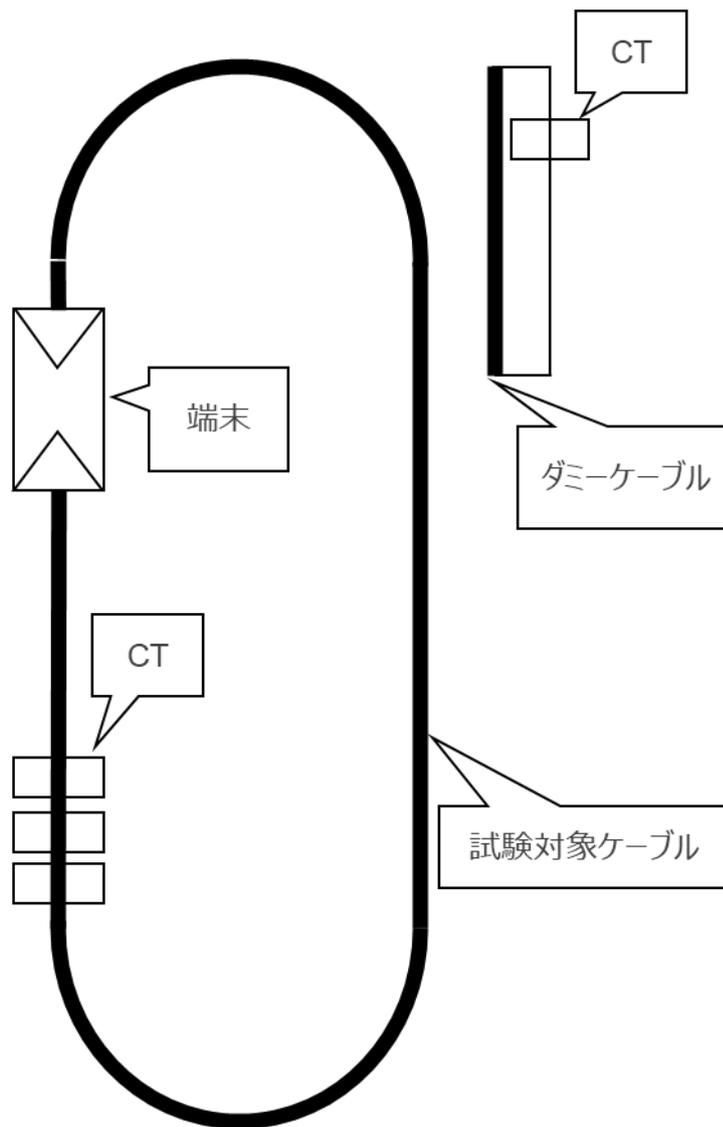


図 4-2-11 長期課通電試験 概略図

CT : Current inducing transformers

#### f. 残存試験

長期課通電試験後に残存性能を評価するため、耐インパルス試験を実施した。耐圧レベルについて、ストレスが最も高くなる逆極性雷インパルス想定、バードー係数  $K=1^*$  として設定した。表 4-2-19 に試験条件を示す。供試ケーブルは長期課通電試験に供試したケーブルから採取した。温度条件は、導体温度が  $T_{cond,max}$  以上、かつ、絶縁内側と絶縁外側との最大温度差が  $\Delta T_{max}$  以上の状態とした。試験電圧に耐え、異常がない場合に残存試験を合格とした。設定した試験条件にて耐インパルス試験を実施し、供試ケーブルに異常はなかった。これにより、想定した系統異常電圧に耐える性能を有していることが確認された。

表 4-2-19 耐インパルス試験 試験条件 ( $U_0=500$  kV、 $U_{p1}=2.1U_0$ )

電圧[kV]	回数	試験条件	試結果
-1550	10 回	導体 90 °C以上	良
+1550	10 回	導体 90 °C以上	良

※インパルス試験電圧については、CIGRE TB219 の Appendix C Equivalent Lightning impulse test に基づいている。バーダー係数  $K$  は、インパルス電圧破壊値と DC 重畳インパルス電圧破壊値の差を DC 電圧で除した値であり、DC 重畳インパルス電圧印加時の DC 電圧の寄与率を表している。 $K=1$  のときが DC 寄与率最大となるため、ここでは厳しい評価としてその値を採用した。

## g. 解体調査

残存試験後に試作ケーブル有効部の解体調査を行った。調査範囲は  $1\text{ m} \times 1$  本とした。導体を含む、内層の電力コアに異常は見られなかった。図 4-2-12 にケーブル解体の状況を示す。



図 4-2-12 ケーブル解体調査

以上の評価により、試作ケーブルが水深 1500m 級の直流深海ケーブルとして、機械的、電氣的に十分な性能を有していることを確認した。

## (5) 敷設検討

### ① 敷設検討

ケーブル構造の検討に際して、敷設時の海象条件がケーブルに与える影響を考慮する事は重要である。方向性としてはケーブル重量に伴う敷設時の張力と、ケーブル剛性に伴う敷設時の曲率とのバランスを考慮する必要がある。ここでは水深 1500 m へのケーブル敷設を想定し、図 4-2-13 に敷設船のシーブ近傍から着底部近傍のケーブルをモデル化した。表 4-2-23 に解析条件を示す。表 4-2-20 に解析対象のケーブル諸元を示す。解析ソフトは OrcaFlex を用いた。図 4-2-14 に敷設モデルを示す。

まず、試作ケーブル(Case1)の CIGRE 敷設張力と OrcaFlex による敷設解析の最大張力について、シーブの上下動揺を考慮しない条件(static)と上下動揺を考慮する条件(dynamic)を比較した。結果を図 4-2-15 に示す。CIGRE 敷設張力(static)の算出は式②の  $T_s$ 、CIGRE 敷設張力(dynamic)は式④の  $T_E$  とした。CIGRE と OrcaFlex の static 条件について、OrcaFlex の方が、張力が大きくなった。これは主に OrcaFlex で考慮した潮流による差と考えられる。CIGRE と OrcaFlex の dynamic 条件について、周期を 8 sec に固定したケースでは、static 条件にて確認された張力の差が、そのまま dynamic 条件に反映され、CIGRE よりも OrcaFlex の方が張力が大きくなっ

た。振幅を 1.5 m に固定したケースでは、周期が小さい場合において、static 条件にて確認された張力の差よりも、dynamic 条件では大きな差が生じた。入力パラメータ次第では、解析の方が厳しくなることから、CIGRE TB623 に従った最大敷設張力  $T_E$  に安全係数を含めた、試験張力  $T$  での確認は必要である。

次に、各がい装構造の解析結果を図 4-2-16 に示す。各構造いずれも上下動揺が大きい程、また動揺周期が短い程、敷設時にケーブルに加わる最大張力は大きくなるとともに、着底部付近の最大曲率も大きくなる傾向となった。曲率についてはいずれの構造においても、想定する敷設船のシーブの曲率(曲率 0.2 /m もしくは曲率半径 5 m)未満であり、ケーブル許容曲率<sup>※</sup>以下であることを確認した。許容曲率について、試作ケーブル(Case1)における引張曲げ試験において、許容曲率以上の曲げを与えており、その後の電気試験で十分な性能を有していることから、許容曲率の設定は妥当と考える。

※ 各設計における許容曲率(1/m)はケーブル外径×20 倍

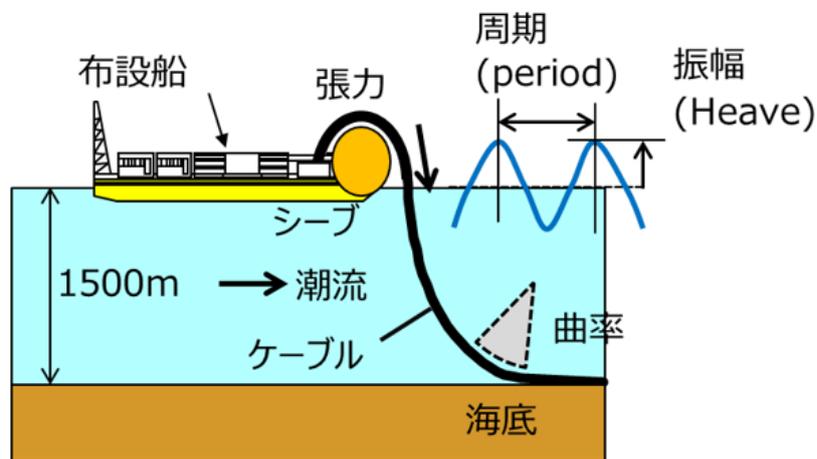


図 4-2-13 敷設解析モデル

表 4-2-20 敷設解析条件

項目	数値	備考
潮流[m/s]	1	今回は約 2 ノットと仮定
上下動揺振幅[m]	1、1.5、2 (基本条件:1.5 m)	CIGRE TB 623 記載 SAPEI 件名 参考
周期[sec]	6、8、10 (基本条件:8 sec)	CIGRE TB 623 記載 SAPEI 件名 参考

表 4-2-21 対象ケーブル諸元

No.	Case1	Case2	Case3	Case4
がい装	鉄 φ8 丸線	鉄 平角 v1 H6.1×W10	鉄 平角 v2 H4×W16	鉄 平角 v3 H3×W10
ケーブル外径 [mm]	169	162	153	149
ケーブル気中重量 [N/m]	721	709	573	503
ケーブル水中重量 [N/m]	495	503	388	328
ケーブル軸剛性 [kN]	$7.71 \times 10^5$	$8.701 \times 10^5$	$5.962 \times 10^5$	$4.827 \times 10^5$
ケーブル曲げ剛性 [ $\text{kN} \cdot \text{m}^2$ ]	14.7	17.67	19.582	12.3943

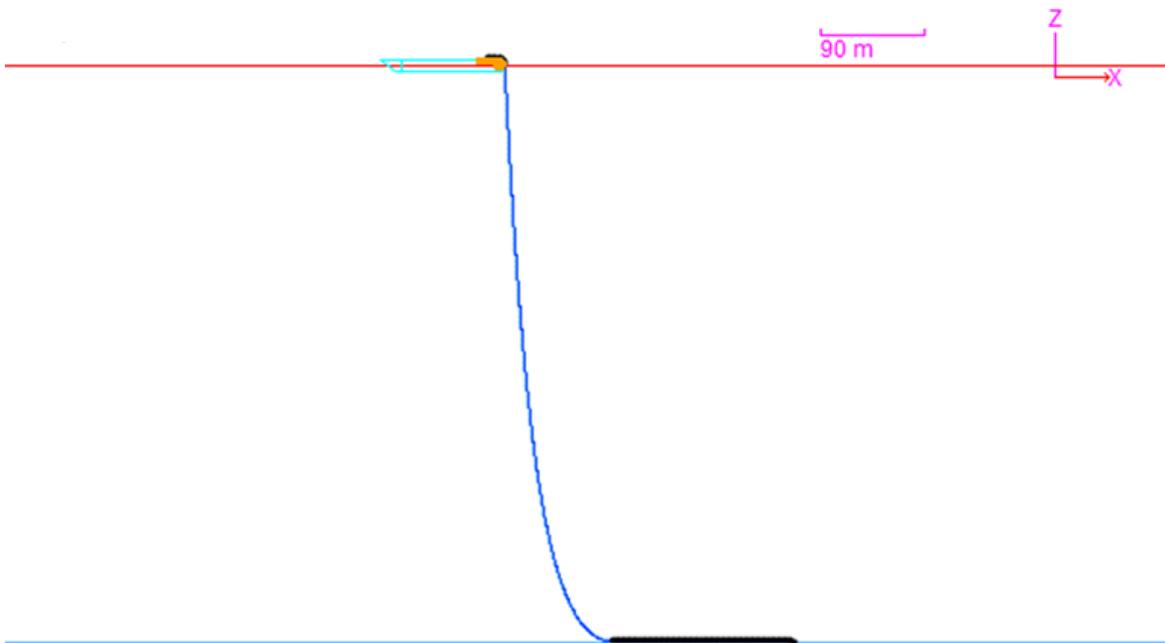


図 4-2-14 解析ソフト 敷設モデル

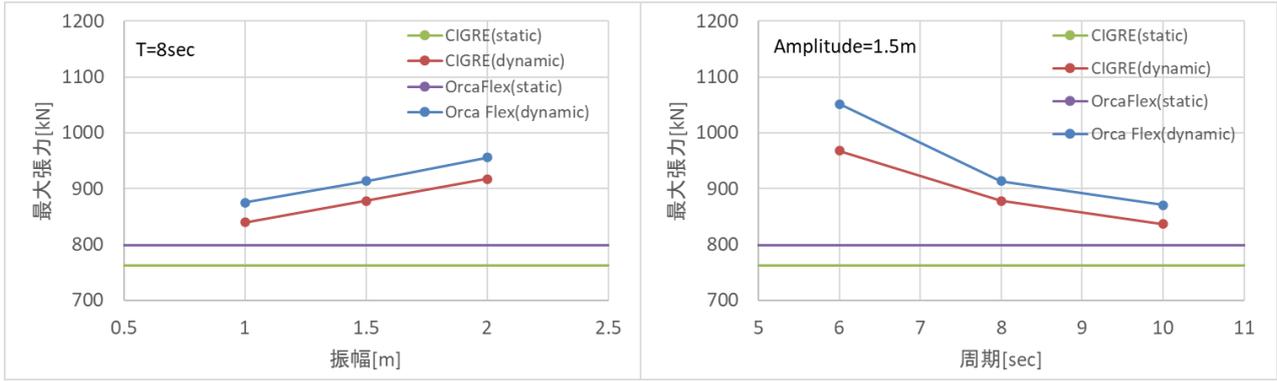


図 4-2-15 φ8 丸鉄線がい装 CIGREと敷設解析比較

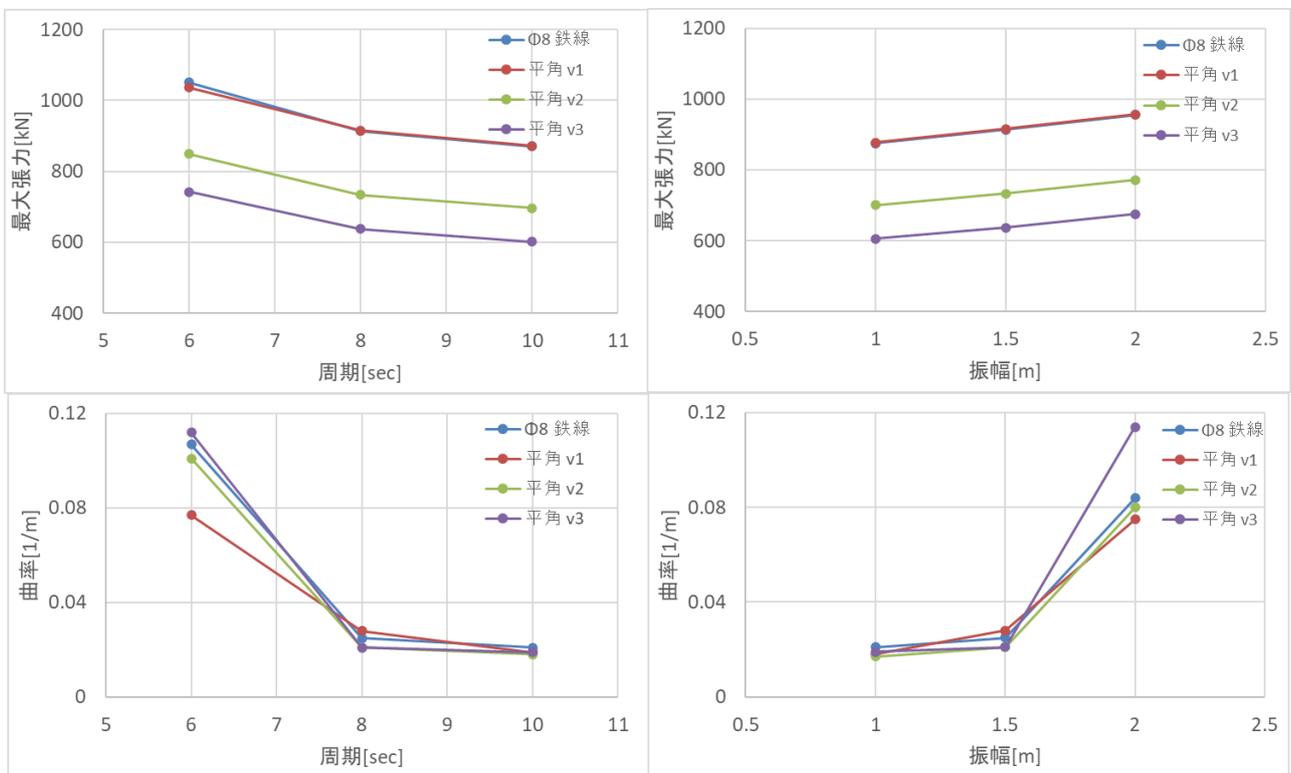


図 4-2-16 がい装構造 敷設解析比較

## ② 艀装検討

国内の従来実績レベルである水深 300 m と、水深 1500 m では、必要となる敷設船の艀装が異なることが予想される。従って、水深 1500 m にケーブルを敷設する際に必要な艀装について検討した。ケーブルは試作ケーブル、最大敷設水深 1500 m、1 スパンでの敷設長 65 km と仮定した。また、敷設に伴うシーブ垂直動揺  $b_h$  と周期  $t$  について、CIGRE TB623 記載の SAPEI 件名を参考にし、 $b_h = 3 \text{ m}$ 、 $t = 8 \text{ sec}$  とした。

水深 1500 m へのケーブル敷設に必要な艀装について、表 4-2-22 に示す。ターンテーブル最大積載量はケーブル重量と、想定する敷設長から算出した。テンショナーもしくはキャプスタンの必要仕様について、CIGRE TB623 の試験張力  $T$  を参考とした。敷設船のシーブ直径について、試作ケーブルでの想定と同様、φ10 m とした。

ターンテーブル最大積載量、テンショナーのどちらについても、ケーブル重量の影響は大きく、艀装コストを低減させるためには、ケーブルのさらなる軽量化の検討が必要と考える。具体的には、本検討における、がい装構造を変更することの他に、

ケーブルの鉛被、PE シースなどの薄肉化、がい装材料の軽量化(高強度繊維や FRP など)、がい装材料に高強度材料を使用することによるがい装断面積の低減などがあげられる。また、敷設張力の低減については、敷設時のケーブルにブイを取り付けることで、低減を図ることもできる。

表 4-2-22 艀装の必要仕様

項目	必要仕様	備考
ターンテーブル最大積載量	5000 t	試作ケーブル重量から算出
テンショナー (もしくはキャプスタン)	1000 kN	CIGRE TB 623 参考
シーブ直径	φ10 m	試作ケーブル要求特性参照

### ③コスト評価

本事業で開発した直流ケーブルのコスト評価について、前事業の次世代洋上直流送電システム開発事業で検討された系統モデルを使用し、検討を実施した。

図 4-2-17 に前事業で検討された首都圏へ送電する洋上系統の例を示す。b で示される経済性評価範囲は広いが、その中で大水深（1000 m 以上）の区間はほとんどない。ルート中では東京湾、相模湾横断が大水深部になるので、千葉洋上～小田原・伊豆沖ルート部をコスト評価の対象とした。図 4-2-18 に想定されるケーブルルート例を示す。この場合、千葉沖から神奈川までの敷設ルートを検討すると、従来技術である水深 300 m までのルートであれば約 90 km となるが、水深 1000 m 以上のルートを選定できると約 65 km となる。

ケーブル仕様に関して、大水深部はアルミ導体 2 重鉄線仕様、非大水深部はアルミ導体 1 重鉄線仕様とし、300 m 以浅で接続することを条件とした（図 4-2-19）。千葉洋上・伊豆沖側は、浮体への接続になるため、浮体接続側は対象外とする。また、直流送電システムとして、±500 kV 双極中性線無し の 2 線式を想定した。

敷設船に関して、大水深を視野に入れた場合、艀装は割高になる。大水深部を含めた工事では、従来水深部での艀装も割高のまま計算した。また艀装費用は大水深のケースは従来ケースに対し、105%として試算した。これは近年の電力ケーブル敷設船のマーケット情報、国内造船所での実績（通信ケーブル敷設船）、為替、鋼材価格等を鑑みて、1 条敷設、後埋設、浅水深のケーブル敷設船を従来のケースとして、大水深用敷設船の総船価の比較を行った結果である。

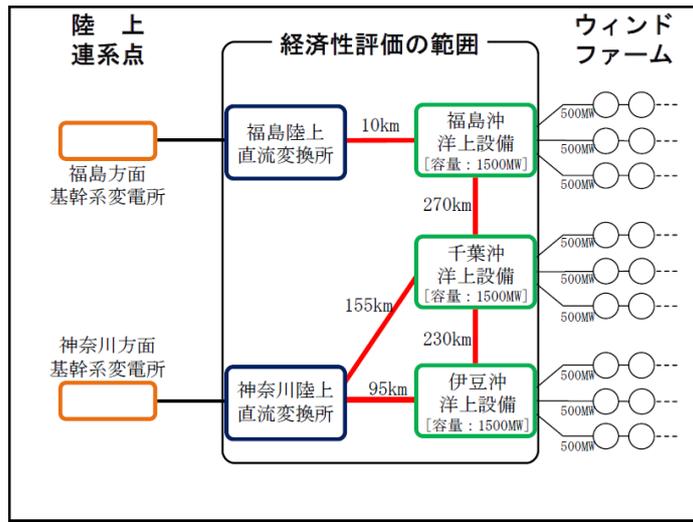
図 4-2-20 に検討ケース 1 のルート、コスト試算結果を示す。ルート 1 は千葉洋上～小田原変換所、ルート 2 は伊豆洋上～小田原変換所へのルートとなる。大水深部を通るケース、非大水深部を通るケースについてコストを試算したところ、相対的な比較として、従来水深ルートを 100 とすると、大水深ルートは 96.6 となり、コスト低減を見込める。

図 4-2-21 に検討ケース 2 のルート、コスト試算結果を示す。ルート 3 は千葉洋上～伊豆洋上を接続するルートとなる。大水深部を通るケース、非大水深部を通るケースについてコストを試算したところ、従来水深ルートを 126.8 とすると、大水深ルートは 103.4 となり、こちらもコスト低減を見込める。

コスト評価のまとめを表 4-2-23 に示す。図 4-2-22 に項目別コスト比較を示す。2 ケース検討した結果、従来水深ルートと比較して、大水深ルートの方が、建設費が安価となることを確認した。



a. 洋上系統の概念図



b. 経済性評価の範囲(直流連系)

図 4-2-17 洋上系統例

「次世代洋上直流送電システム開発事業」(中間評価)より抜粋

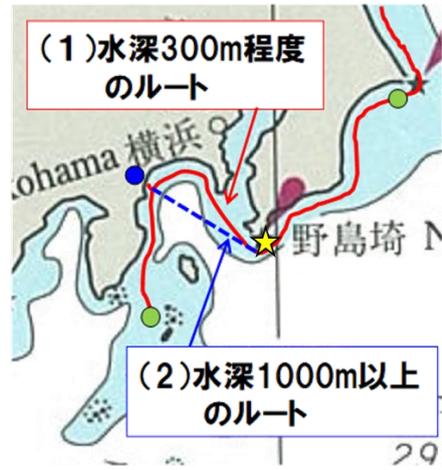
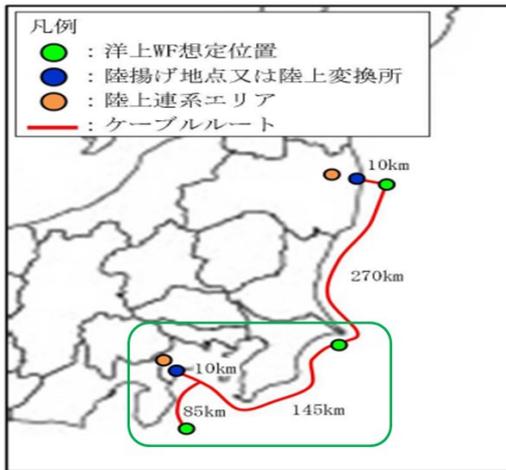


図 4-2-18 想定されるケーブルルート例

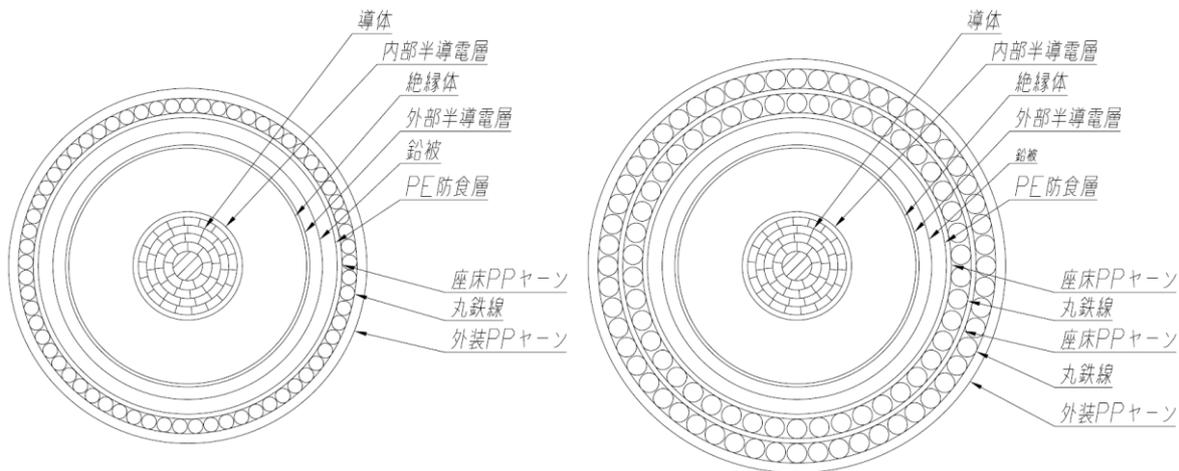


図 4-2-19 コスト評価に用いたケーブル  
 左：非大水深部、アルミ導体 1 重鉄線仕様  
 右：大水深部、アルミ導体 2 重鉄線仕様



図 4-2-20 検討ケース 1  
 国土地理院 地理院地図より

大水深ルート = 95.6

ルート		仕様	スパン長	洋上接続
1	小田原 野島崎沖	2重	65km	2カ所
	野島崎 銚子沖	1重	90km	
			65km	
2	小田原 伊豆沖	1重	90km	
		1重	490km	
		2重	130km	
総計			620km	2カ所

従来水深ルート = 100

ルート		仕様	スパン長	洋上接続
1	小田原 野島崎沖	1重	90km	2カ所
	野島崎 銚子沖	1重	90km	
			65km	
2	小田原 伊豆沖	1重	90km	
総計		1重	670km	2カ所



図 4-2-21 検討ケース 2  
国土地理院 地理院地図より

大水深ルート = 81.5

ルート		仕様	スパン長	洋上接続
2	小田原 伊豆沖	1重	90km	
3	伊豆沖 野島崎沖	2重	90km	2カ所
	野島崎沖 銚子沖	1重	90km	
			65km	
		1重	490km	
		2重	180km	
総計			670km	2カ所

従来水深ルート = 100

ルート		仕様	スパン長	洋上接続
2	小田原 伊豆沖	1重	90km	
3	伊豆沖 小田原沖	1重	90km	3カ所
	小田原沖 野島崎沖	1重	90km	
	野島崎沖 銚子沖	1重	90km	
			65km	
総計		1重	850km	3カ所

表 4-2-23 コスト評価まとめ

		ケーブル長[km]		コスト
		2重鉄線仕様	1重鉄線仕様	
検討ケース 1	従来水深ルート	0	670	100.0
	大水深ルート	130	490	95.6
検討ケース 2	従来水深ルート	0	850	100.0
	大水深ルート	180	490	81.5

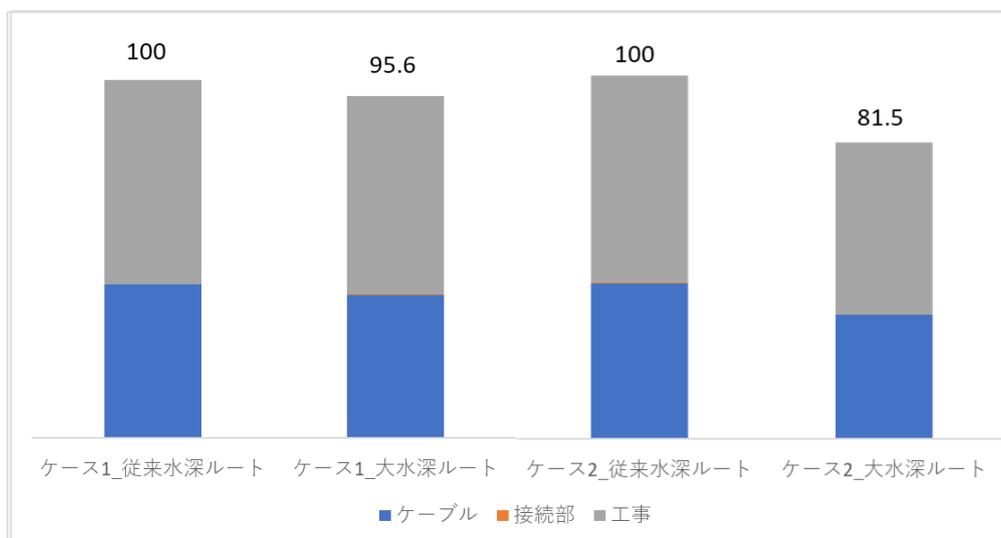


図 4-2-22 項目別コスト比較

これらの結果を元に、従来水深ルートと大水深ルートのコスト差に関して、簡略化を試みた。上記の結果を従来水深ルートのケーブル製造費用を1とすると、大水深用ケーブル費用、従来水深敷設費用、大水深用敷設費用のそれぞれ

単位距離当たりの比率は、表 4-2-27 のとおりと評価される。なお、本来は船に乗せることが出来るケーブルの長さ、ケーブルの接続作業などにより必ずしもコストは距離に比例しないが、今回は従来水深ルートと大水深ルートのコスト目安としてこれらの影響は無視した。

表 4-2-24 単位長さあたりのコスト比較

仕 様		コスト	
来水深ルート	1 重鉄線海底ケーブル	1.000	2.330
	敷設費用	1.330	
大水深ルート	2 重鉄線海底ケーブル	1.045	2.442
	大水深敷設費用	1.396	

表 4-2-27 より、従来水深ルートの単位長さあたりのコストは 2.330、大水深ルートの単位長さあたりのコストは 2.442 と表すことが出来る。これらの関係より、従来水深ルートと大水深ルートのコストが等しくなるルート長は、

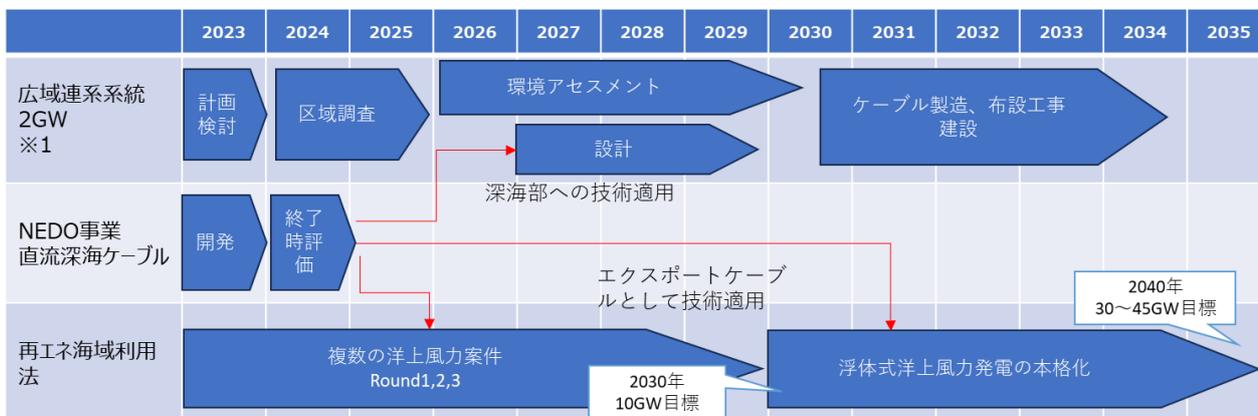
$$\text{従来水深ルート} : \text{大水深ルート} = 100 : 95.4$$

となる。したがって、大水深ルートを採用することにより、従来ルートと比較して 5%以上ルート長を減らすことが可能な場合は、大水深仕様の方がコストは低減できる結果となる。なお、実際の検討では、全体ルートの中で従来水深部と大水深部が混在することになるが、この場合は、全体工事の中で大水深敷設用の敷設船が必要となるなど、表 4-2-24 に記載した値の組み合わせを考慮する必要がある。

#### 4.2.5. アウトカム達成に向けた戦略と具体的な取組

広域連系システムの検討がなされており、北海道～東北～東京を結ぶ 2GW の HVDC(海底ケーブルルート)が基本プランと考えられている。想定される工事費用 1.5～1.8 兆円規模で、ルート上の推進の深い箇所に、本開発成果を活用できると考えている。

洋上風力事業の実用化に向けて、2019 年 4 月に「海洋再生可能エネルギー発電設備の整備に係る海域の利用の促進に関する法律（再エネ海域利用法）」が施行される等、制度面の整備が進んでいる。促進地域は段階的に選定、事業者の公募が進んでおり、現在 Round1～3 が進められている。洋上 WF から陸上へ送電する際のエクスポートケーブルとして、直流深海ケーブル開発技術は活用できると考えている。（図 4-2-23）



※1 第75回広域系統整備委員会資料 1-3 東地域の広域連系システムに係る計画策定プロセス

図 4-2-23

### 4.3. 研究開発項目Ⅲ 直流深海ケーブルの開発 三芯水深 500m 級（住友電気工業）

#### 4.3.1. 研究開発の概要

資源エネルギー庁の第 6 次エネルギー基本計画において、再生可能エネルギーの主力電源化を目指し、2030 年度電源比率目標 36～38 %程度とすることが示されており、これに応じ国内の再生可能エネルギー事業は急速に拡大しつつある。また海洋再生可能エネルギー発電設備の整備に係る海域の利用の促進に関する法律（再生可能エネルギー海域利用法）の施行により、再生可能エネルギーの主力電源と目される大規模洋上風力発電の導入計画も進んでいる。しかしながら今後のさらなる拡大に向けては、国内の架空送電による基幹系統の容量制約が課題となる虞がある。

既に大量の再生可能エネルギー導入を実現している欧州では、直流海底ケーブルによる広域連系および国家間連系網を構築して系統問題の解決に向けて取り組みを進めている。我が国においても、2015 年度から NEDO「次世代洋上直流送電システム開発事業」が 5 年かけて進められ、海底送電の分野でも世界トップレベルの直流 500 kV 海底ケーブルを用いた送電システムの基本開発を完了している。

しかしながら欧州の浅い北海の環境と異なり周囲を深い海に囲まれた我が国では、海岸線に沿って深海域が広がっている場所が多く、国内において再生可能エネルギーの電力を需要地に届けるための長距離直流海底送電を実現するには、新たに深海ケーブルの技術開発が必要不可欠である。現状では北海道-本州の直流海底ケーブルの深度 300 m が最深であるが、日本固有の漁業権や漁場を回避する可能性を考慮すると、500 m～1500 m 級の深海ケーブルを開発することが望まれる。

現状の国内再生可能エネルギー導入量を考慮すると今後の深海域の海底送電線需要は、浮体式洋上風力発電の事業化により拡大が予想される沖合の洋上風力発電用の電源線や、再生可能エネルギーポテンシャルの高い島嶼と本土を繋ぐ送電線等の水深 500 m 級、数百 MW 容量のケーブル需要がまず拡大し、続いて水深 1500 m 級の海域に対応する数 GW 級の大容量連系線の需要増加が想定される。このため本開発事業においては、直近の市場ニーズが高いと想定される水深 500 m 級の海底ケーブルを優先して開発した。

#### 4.3.2. 研究開発の目標と根拠

##### （1）深海ケーブルの要素技術開発と試作

###### ①深海ケーブルの構造検討

水深 500m 級の深海域対応の三芯直流海底ケーブルについて、過去の納入/受注実績から今後の需要を予測し、本事業で開発すべきケーブルサイズや送電容量を明確にする。水深 500m への敷設時にケーブルにかかる張力を試算しケーブルの構成部材についてサイズや重量を試算し、軽量化の要否を判断して試作ケーブルの仕様を決定する。

###### ②三芯仕様深海ケーブルの構造設計と試作

試作する水深 500m 級三芯海底ケーブル（400 kV、600MW 級）については CIGRE TB623 および CIGRE TB496 に適う性能を有するケーブル設計を行う。

深海ケーブルでは、深海敷設する際の高張力や外傷に耐えうる鎧装層の設計が重要となるため、過去の知見に加え解析を組み合わせて最適なケーブル構造を検討する。

さらに、再生可能エネルギーにおいて初期の小容量電源では交流送電、電源の大規模化に伴い直流送電がコスト優位になることから、直流ケーブルの交流ケーブルとしての適用可能性も検討する。

また、設計したケーブルの試作を行い、機械試験および電気試験に供試する。

## **(2) 深海ケーブル試験装置導入と性能実証試験**

### **① 深海ケーブル試験装置導入**

水深 500 m に深海ケーブルを敷設する際にかかる張力を模擬するため、最大張力 100 トンの引張曲げ試験装置の設計、導入を行う。引張曲げ試験装置の能力は主にシーブ径、シリンダの引張張力、ストローク長の 3 要素の組み合わせにより決定する。導入コスト、試験能力、設置スペース等の各種制約、トレードオフを考慮して最適な試験装置仕様を決定し、導入を完了する。

### **② 深海ケーブルの性能実証試験**

試作した深海ケーブルを用い、新規導入する引張曲げ試験装置で CIGRE TB623 を踏まえて性能評価を行い、水深 500 m で利用可能であることを検証する。さらに、機械試験後の深海ケーブルに対して CIGRE TB496 を踏まえ、直流特性の裕度確認のため電気試験を行い、400 kV で運用できることを検証する。

## **(3) 深海ケーブル関連技術開発**

深海域に対応する海底ケーブルルート設計手法や水深 500 m 級の海域に三芯ケーブルを敷設可能な敷設船の最適仕様検討を行う。また、敷設船上でケーブルを把持する高張力対応のブレーキ装置、海面にケーブルを下す際の側圧を低減させる深海ケーブル敷設専用のシーブ等について最適仕様の検討を行う。



下図に本研究開発の実施体制を示す。



図 4-3-1 実施体制

#### 4.3.4. テーマごとの目標達成状況と成果の内容

##### (1) 深海ケーブルの要素技術開発と試作

###### ① 深海ケーブル構造の検討

電力用の海底ケーブルには、単芯仕様と三芯仕様の2種類がある。導体帰路方式の直流送電の場合、単芯仕様ケーブル2本（正極／負極）の構成となり、敷設時の経済性の観点から欧州の北海では、2条を同時敷設するバンドル設敷が標準となっており、当社が納入した NEMO プロジェクト（英国-ベルギー間連系線、直流 400 kV）でも採用されている。国内における直流海底 XLPE ケーブルは、案件実績が少なく、1条毎の敷設ではあるが、今後はバンドル敷設の機会が増えてくると推測する。ただし、この工法は水深 100 m 以下での実績がほとんどであり、さらに水深が深くなると潮流の影響により海底ケーブル張力が変動し、キック等の問題が発生しやすく、バンドル敷設の例はほとんどない。

当社の納入及び受注実績を下図に示す。近年では、国家間の連系線などで、高電圧/大送電容量化が進んでいる。本件では、本土～離島間の送電や洋上風力のエクスポートなどの数百 MW 級の中規模送電を想定し、ケーブル構造の検討を行った。これまでの実績では、送電容量が数百 MW 級の場合、運転電圧は 320 kV クラスとなるが、深海敷設におけるケーブルサイズのコンパクト化を考慮し、同一送電容量で導体サイズを小さく出来る 400 kV クラスを採用とすることとした。

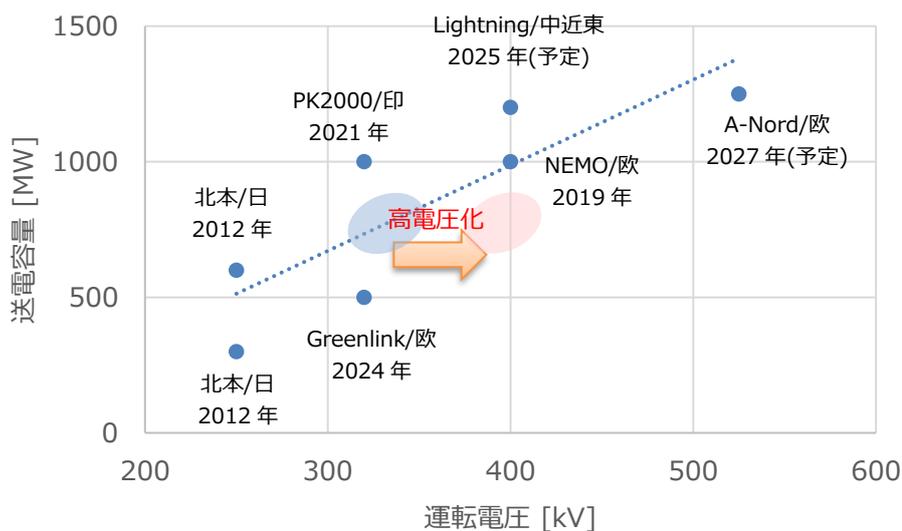


図 4-3-2 当社の納入/受注実績

国内においては佐渡島、大島、沖縄等に 300 m～500 m を超える水深の離島が存在しており、特に中規模の直流送電（600 MW）を想定した場合、敷設の難易度を下げつつ、かつ予め工場で一体化した複合型海底ケーブルが望ましい。2 条同時敷設で一般的に採用される自励式の Symmetrical Monopole (SMP) は、下図および下表に示すようにコンバータの構成上、有効な接地がないため片極で事故が発生するとシステム全体が停止するため冗長性がなく、このため雷撃等による一線地絡事故を前提とした架空線と海底ケーブルが直接連結される場合は片極事故時でも運転継続が可能ないように、中性線を含む Bipole System が望ましい。我が国では辺境の半島部や島嶼部の一部において架空線も使われることを想定し、台風等の天災や機器のメンテナンスで一部を停電する場合に Monopole 運転が可能な中性線を含む Bipole System を容易に実現可能とする三芯仕様が最適と判断した。

三芯仕様は、交流送電に使用されている構造である。三本の電力コアを撚り合わせる為、ケーブル外径や重量が大きくなり、本来、深海向けには適さないが、本開発においては、高電圧化することでケーブルサイズのコンパクト化を図った。また磁界漏洩防止の観点からも、相間距離が数 m～数十 m になる単芯ケーブルに比較して、相間距離を考慮不要の三芯ケーブルでは環境への影響を軽減できるメリットもある。

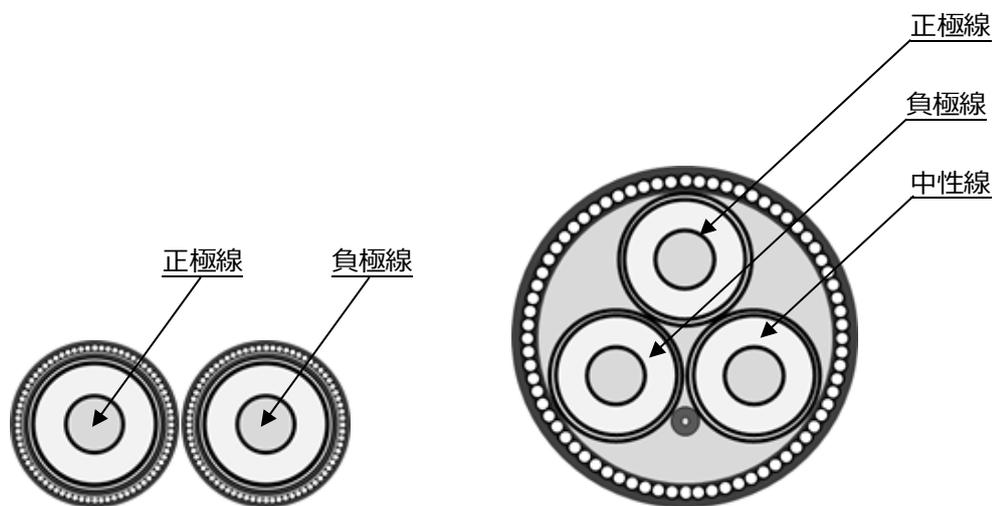


図 4-3-3 直流海底ケーブルの構成

表 4-3-2 送電システムの比較

方式	対称単極方式 Symmetric Monopole	双極方式 Bipole system
概略図		
片極運転	不可	可
ケーブル構成	直流ケーブル 2条	直流ケーブル 2条 中性線 1条

## ②設計

下図に三芯仕様の海底ケーブル断面図を示す。三芯仕様は単芯仕様と比べて構造が複雑であり、電力コアは直流 400 kV（正極線／負極線）が 2 本、中性線が 1 本の計 3 本で構成する。電力コア 3 本に加えて光ケーブルも複合する。

光ケーブルは光ファイバをステンレス管に収容し、ポリエチレン被覆をした構造とする。この光ケーブルは端極間の情報通信を可能とし、さらに電力ケーブルの監視システムにも適用することができる。

鎧装層には数百 kN の敷設張力に耐え、かつ敷設後の外傷を防止するため鉄線を採用した。水深 500 m のような深海敷設の場合、海中部のケーブル自重張力が大きくなりケーブルが鉄線鎧装層の撚方向に捻じれて回転する。この回転力が大きくなるとケーブルキックが発生する場合もある。このため、従来は数百 m クラスの水深になると鉄線を二重化し、かつ鉄線の撚方向を交互撚とすることで捻じれ力を最小化するケーブル構造としていた。一方、この二重鉄線交互撚鎧装構造はケーブル外径および重量の増加を招き、敷設設備の大型化、コイル取りが出来ないことによるターンテーブルを用いたケーブル保管及び輸送、ケーブルコストの増加等経済性の観点からは好ましくない。このため、一般的に浅海域では一重、深海部は二重鉄線交互撚鎧装構造としている。

そこで、本開発においては敷設時の張力を導体にも分担させる前提とし、最適な鉄線および電力コアの撚り合わせピッチを選定することで、コイル取り可能な一重鉄線鎧装構造を水深 500 m 級にも適用可能とし、輸送貨物船や敷設船の設備制約のひとつであるターンテーブル不要の構造設計として深海ケーブルの試作を行う方針とした。

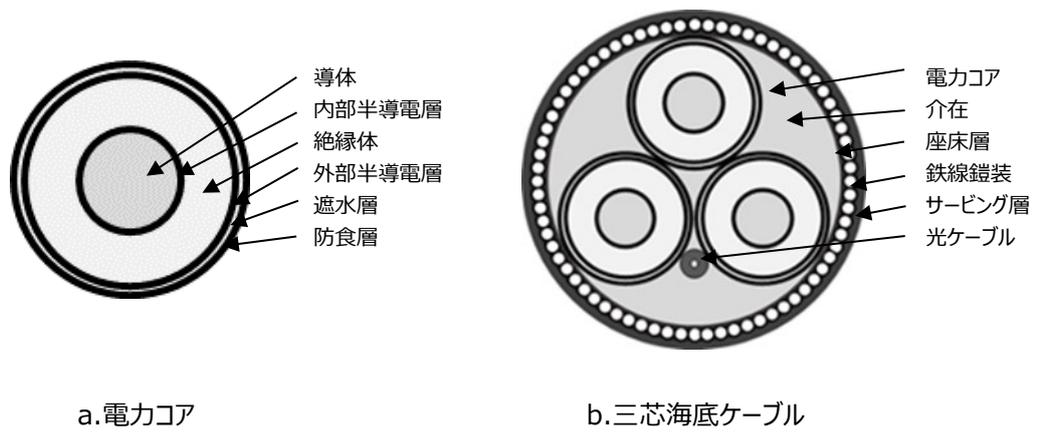


図 4-3-4 三芯仕様海底ケーブルの断面図

水深数百 m にケーブルを敷設する場合、自重張力（ケーブル水中単位重量×水深）が数百 kN にも達する。これにより、敷設船のケーブル繰り出し設備を大型化する必要があり、敷設工事のコスト増大を招く。このため、深海ケーブルには軽量化が不可欠である。

ケーブルの軽量化には、銅導体の代わりに比重の軽いアルミ導体を採用する方法がある。しかしながら同一断面積における直流電気抵抗は、アルミは銅の約 1.6 倍あり、同じ送電容量を確保するには銅 600 mm<sup>2</sup> に対してアルミ 1,000 mm<sup>2</sup> 相当が必要となる。アルミ導体と銅導体の構造を比較したものを下表に示す。

表 4-3-3 アルミ導体および銅導体の構造比較

	導体材料		比率 (アルミ/銅)
	アルミ	銅	
導体			
断面積[mm <sup>2</sup> ]	1000	600	167 %
外径[mm]	39	30	133 %
重量[kg/m]	2.8	5.3	53 %
電力コア(単芯)			
外径[mm]	104	95	105 %
重量[kg/m]	18.5	19.2	96 %
三芯深海ケーブル			
外径[mm]	260	240	108 %
重量[kg/m]	101.4	99.2	102 %

導体重量だけを比較するとアルミ導体の方が軽くなるが、導体外径が大きくなったことで他の構造部位の外径及び重量が大きくなり、三芯深海ケーブルでは両者に有意差が見られない。アルミ導体でも銅導体でも、外径 250 mm、重量 100 kg/m 程度となる。当社のこれまでの製造実績並びに下表に記載の輸送貨物船や敷設船の能力を踏まえると、ケーブル重量で 5000 トン程度（ケーブル長 50 km 相当）が一度の出荷数量の目安となる。

表 4-3-4 代表的な敷設船および輸送貨物船の積載重量

	輸送貨物船			敷設船		
	A	B	C	D	E	F
積載量 [トン]	5,400	7,000	10,000	5,000	7,000	7,500

敷設ルート長がこれより長い場合には、50 km 単長で製造、敷設していき敷設船上で洋上ジョイントにより接続し、所要長まで長くすることも可能である。

50 km 単長を製造するにあたり、工場の設備制約により一連続で製造するのは困難となる場合がある。その場合、十数 km 単位で電力コアを製造し、工場ジョイント（FJ）で電力コアを接続し、出荷長まで一連続にする。この FJ は、導体部分を数十 cm 剥きだして溶接した後、絶縁体、鉛被及び防食層を再被覆し、電力コアとほぼ同径で仕上げる。当社では、アルミ導体と銅導体の両方で FJ 技術を有しているが、銅導体の溶接の方がアルミ導体の 4 倍ほど単位面積当たりの破断強度が高いことがわかっている。つまり、アルミ導体 1000 mm<sup>2</sup> と銅導体 600 mm<sup>2</sup> との破断強度の比較において、銅導体の方が 2.4 倍ほど優れていることになる。

上記により、本開発においては銅導体を優先することにした。尚、材料コストの観点で言えば、アルミ導体の方が銅導体より経済性が高く、今後、案件毎の適用水深次第ではアルミ導体も選択肢として残る。

本開発で試作するケーブルの材料と構成、各寸法を下表に、基本構造の断面図を下図に示す。尚、導体サイズの選定において、送電容量や定格電圧に加えて、ケーブル埋設深さ、土壌熱抵抗、土壌温度も要素となってくるが、それらは案件都度で異なるため、典型的なモデルとして導体サイズ 600 mm<sup>2</sup> とした。

表 4-3-5 試作ケーブルの材料と構成

No.	構成	構成材料	備考
1	導体	円形圧縮銅導体	素線間及び導体外層に水防止のため吸水テープを巻く
2	内部半導電層	半導電性混和物	絶縁体と同時押し出し加工
3	絶縁体	架橋ポリエチレン混和物	直流用絶縁体被覆(2本) 中性線用絶縁体被覆(1本)
4	外部半導電層	半導電性混和物	絶縁体と同時押し出し加工
5	吸水層	吸水導電テープ	縦添え
6	遮水層	銅テルル鉛合金	-
7	防食層	ポリエチレン	絶縁性シース
8	介在	ポリプロピレンファイラ	円形に撚り合わせた3芯電力コア及び光ケーブルの隙間部を充填する。
9	座床層	ポリプロピレンヤーン	-
10	一重鉄線鎧装	亜鉛メッキ鉄線	-
11	サービング層	ポリプロピレンヤーン	-
12	光ケーブル	光ファイバ ジェリーコンパウンド 金属(ステンレス)管 ポリエチレンシース	金属管に光ファイバ(96芯)を収容し、走水防止としてジェリーコンパウンドを充填し、金属管を絶縁性シースで被覆する。

表 4-3-6 試作ケーブル構造表

構成	構造	単位	数値
導体	断面積	mm <sup>2</sup>	600
電力コア	外径(約)	mm	95
	重量(約)	kg/m	20
三芯海底ケーブル	外径(約)	mm	240
	気中重量(約)	kg/m	100
	水中重量(約)	kg/m	58

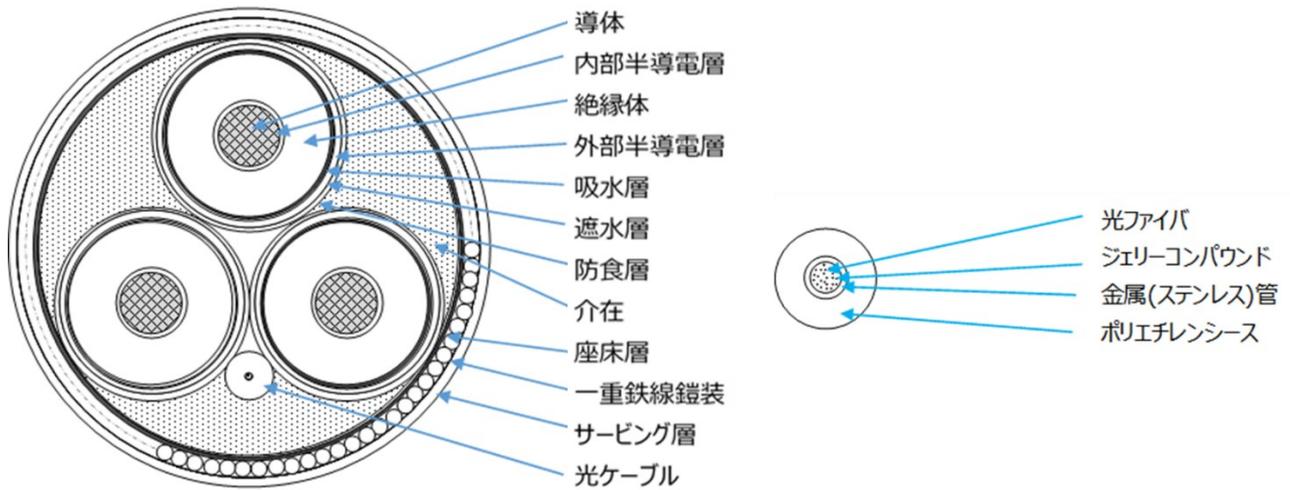


図 4-3-5 試作ケーブルの基本構造

### ③構造解析

水深数百 m にケーブルを敷設する場合、敷設張力（ケーブル水中単位重量×水深）が数百 kN にも達する。張力はケーブルを構成する金属部で分担し、今回の構造では鎧装層（鉄線）と導体（銅線）で分担する。張力分担について、従来は断面積とヤング率だけで計算していたが、高張力下では個々の構成材料に与える影響が大きいため、より高い精度での検証が必要となる。

敷設時の線形解析が可能な市販ソフトもあり適用を検討したが、三芯ケーブルのような複雑な構造において、個々の構成材料の機械特性を考慮した解析はできず、構成部位毎の張力分担を解析することができなかった。三芯ケーブルのように複雑な構造の構成部位毎の張力分担を求めたい場合には、構成要素を一つずつ検討する方が有用と判断した。

そこで、鉄線と銅線がそれぞれどの程度張力を分担するか解析するため、試作する三芯ケーブル構造を下図に示すように解析モデル化し各材料の許容応力を確認した。

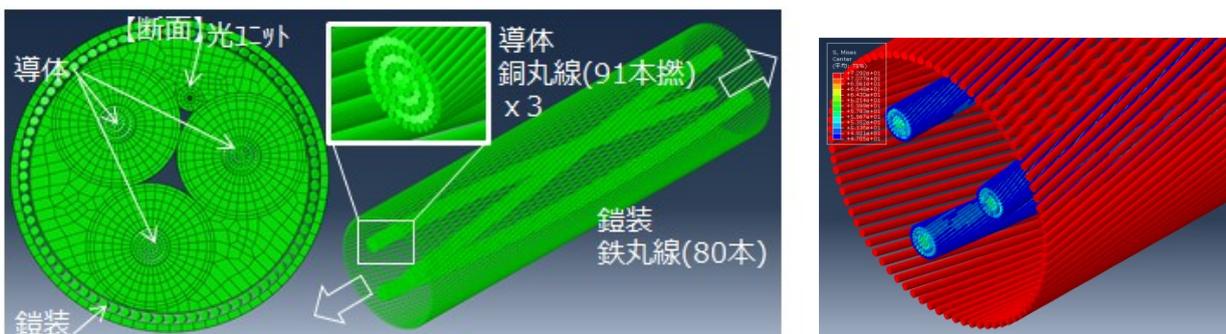


図 4-3-6 張力分担の解析モデル

解析の結果を下表に示す。鉄線鎧装層で 73 %、銅導体で 21 %、その他 6 %で張力を分担していることがわかった。CIGRE TB623 に基づく水深 500 m 級における本設計での想定敷設張力は 395 kN で、各々材料許容応力に対して裕度を持っていることを確認した。

表 4-3-7 敷設時のケーブル張力分担

	分担割合 [%]	分担張力 [kN]	分担応力 [kN/mm <sup>2</sup> ]	材料許容応力 (安全率含) [kN/mm <sup>2</sup> ]
鎧装	73	284	0.07	0.09
導体	21	82	0.05	0.07
その他	6	23	-	-

CIGRE で定める敷設時の張力試験（水深 0-500 m）は以下の通り。\*

$$T = 1.3 \times w \times d + 40 \times w$$

1.3 : 安全率を含む Dynamic Force(動的力)

w : ケーブル水中重量(N/m)

d : 水深(m)

40 × w : 海底部からの引張張力

(\*) 計算式の妥当性については、水深 300 m の案件で、計算値 200 kN に対して実測 150 kN の実績有したがって、CIGRE TB 623（水深 0-500 m）では、本件仕様における水深 500 m の想定敷設張力は約 400 kN に達する。

$$T = 1.3 \times 573 \text{ N/m} \times 500 \text{ m} + 40 \times 573 \text{ N/m} = 395 \text{ kN}$$

この深海ケーブルを構成する材料の中で、耐張力性で最も懸念されるのは光ケーブルである。下図に光ケーブル仕様を示す。光ファイバは直径 250 μm の石英ガラスであり、数十 N 程度の張力で容易に破断する。これを敷設時の海底ケーブルに掛かる数百 kN の張力でも破断させない設計が必要となる。これには、光ケーブルの耐張力性（許容張力）を大きくし、光ケーブルが伸びにくくすること、光ファイバをケーブル長に対し僅かに長くする（緩みを持たせる）ことで、光ファイバの破断を防ぐ。他方、過渡な緩み(余長)を持たせるとステンレス管内の光ファイバの小曲が増えて光損失の増加を招くので、適切な仕様設計が重要となる。

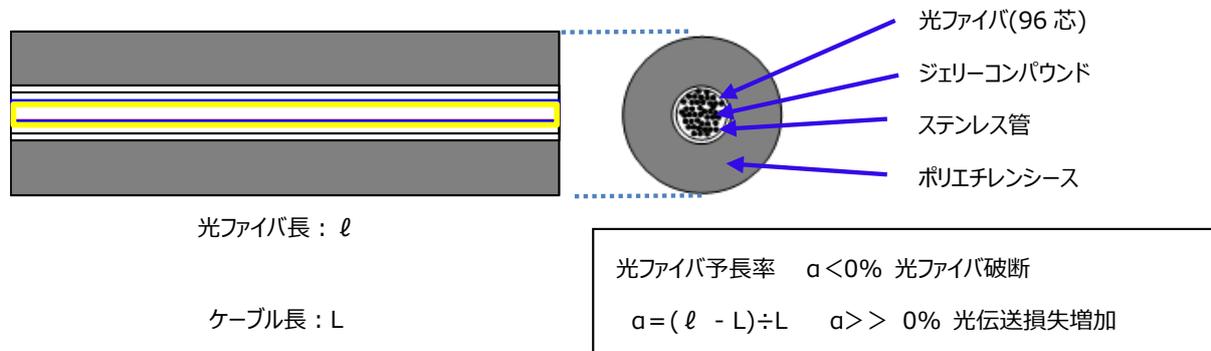


図 4-3-7

解析の結果、395 kN の張力が加わったときの光ケーブルへの分担張力は 0.4 kN 程度であることが判った。光ケーブルに張力が掛かると、ケーブルは伸び、その分、光ファイバの予長は減少する。このため、光ケーブルが伸びにくい様、張力の大半を分担するステンレス管のサイズの最適化を検討した。異なる伸び率の光ケーブル A、B の 2 タイプについて、敷設張力下でのファイバ余長率を下図に示す。光ケーブルの余長率裕度を鑑み、余長率 0.12% の B タイプを選定することとした。

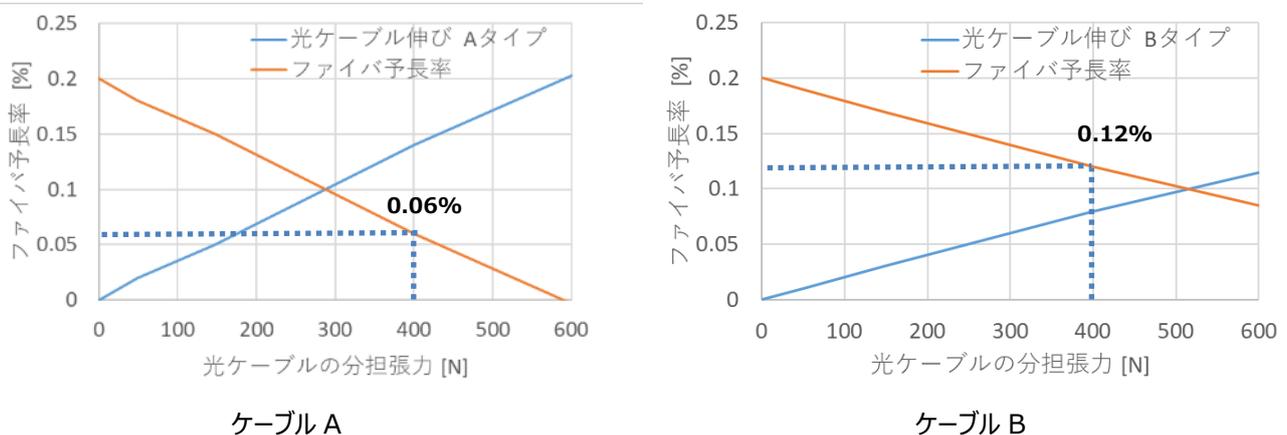


図 4-3-8 光ケーブルに掛かる張力とファイバ余長率

敷設時には、ブレーキ装置でケーブルを把持しながら海中に送り出す。この際、ケーブルに加わる側圧について下図に示す。本件では、約 400 kN の敷設張力を想定しており、ブレーキ装置のケーブル把持部が 4 m とした場合、約 100 kN/m の側圧が掛かることになる。この側圧によるケーブルの偏平（潰れ）についても解析を行い、150 kN/m の側圧でも偏平は 2 mm 程度と僅かであり、機械的性能に問題がないことを確認した。



図 4-3-9 側圧の解析モデル

以上の検討より、水深 500m に敷設可能な三芯海底ケーブルの構造設計を完了した。この設計をもとに試作した三芯海底ケーブルを次項の機械試験および電気試験へ供試し、本研究開発項目の目標を達成した。

## (2) 深海ケーブルの試験装置導入と性能実証試験

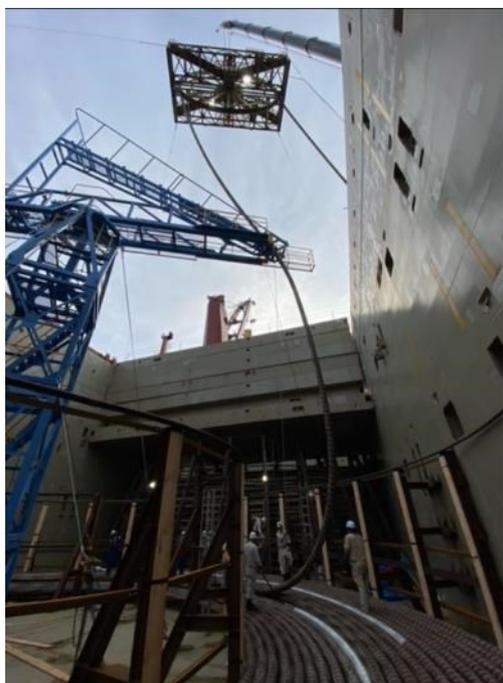
電力ケーブルの性能評価は CIGRE で推奨される試験方法で行うことが標準となっている。下表に性能実証試験の一覧を示す。深海ケーブルにおいては、敷設までを模擬する機械試験、その機械履歴を加えたケーブルを供試して実施する電気試験を行う。

表 4-3-8 性能実証試験一覧

試験項目		規格	目的	判定項目
機械試験	コイリング試験	CIGRE TB623 5.1 項	ケーブル製造・保管・輸送等を 模擬	ケーブル 外観に異常なきこと
	引張曲げ試験	CIGRE TB623 5.2 項	ケーブルがシーブを介して 敷設されることを模擬	ケーブル 外観に異常なきこと
電気試験	型式試験	CIGRE TB496 4 項	VSC*-HVDC 送電を想定 *)VSC : 電圧源コンバータ	ケーブルに劣化 (腐食等)なきこと

### ① 機械試験 (コイリング試験)

下図にコイリング試験の様子を示す。コイリング試験は、保管や輸送でケーブルをコイル取り (1 周で 360 度の捻じれが加わる) を行う際の模擬試験である。保管や輸送を模擬した高さ 25 m、コイル取直径 12 m で試験を実施し、コイル取り後にケーブル外観 (鉄線のワライや座屈の有無) や複合する光ファイバの光損失特性 (OTDR によるファイバ断線有無) に異常がないことを確認した。



輸送船への巻き取り作業 (実例)



コイリング試験

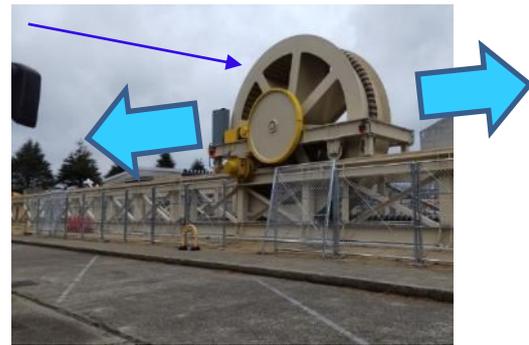
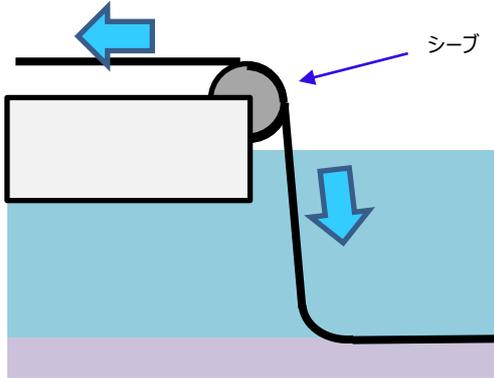
図 4-3-10 コイリング試験

## ②機械試験（引張曲げ試験）

下図に引張曲げ試験の概要を示す。引張曲げ試験は、ケーブルがシーブを介して敷設されることを模擬する試験である。直線引張とは異なり、ケーブルが曲げられた状態で高い張力が加わるので機械性能として重要な評価項目となる。

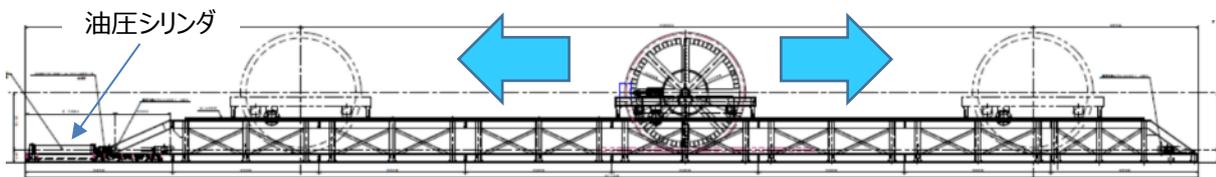
本試験では、ケーブル両端を固定し水深 500 m の敷設張力相当（約 400 kN）を印加した状態でケーブルを巻いたシーブが前後に動くことで張力曲げ履歴を加える。試験後に解体調査の結果を図 12 に示す。ケーブル外観（鉄線のワライや座屈の有無）や複合する光ファイバの光損失特性（OTDR によるファイバ断線有無）に異常がないことを確認した。

尚当社では既設の引張曲げ機械試験装置を有していたが、深海用敷設を模擬するための高い張力を与えることが出来なかった。このため本開発において、最大張力 1000 kN、シーブ直径 6 m、設備長さ約 60 m の試験設備を新規に導入し今後更なる深海用ケーブル開発を可能とした。



敷設船からのケーブル繰り出し

引張曲げ試験



引張端



固定端

図 4-3-11 引張曲げ試験

加えて、走水試験について検討を行った。海底ケーブルはケーブル損傷時のケーブル内部への浸水を最小限に抑えることが求められるためケーブル内への走水性の評価を要求される場合がある。

500 m 水深での評価を行うには、低水圧下での試験結果を元に推定すると 100 m 程度の試験管路長が必要となる。このため、高水圧での試験設備を導入するには設置場所や安全の確保、費用面でも課題が多い。そこで、低水圧での試験結果で高水圧での走水距離を計算できる方法について文献等の調査を行った。

その結果、深海敷設の実績がある光海底ケーブルでは、水圧と時間及び固有の係数から任意の走水距離を計算で算出していることが判った。これを用いると、試験実施が容易な低水圧下での試験結果を用いて高水圧下での送水距離を算出できる可能性がある。

今後、試験データを蓄積していき、固有係数を算出し、高水圧下での走水距離を算出できるよう検討を進める。

### ③電気試験

機械試験によって敷設までの機械履歴を加えたケーブルを用い、下図に示すような試験線路を組み立て、下表に示す電気試験を実施した。



図 4-3-12 電気試験線路

表 4-3-9 電気試験項目

試験項目	試験内容
ロードサイクル試験 (CIGRE TB496 4.4.2.3 項)	-740 kV <sub>dc</sub> (1.85 U <sub>0</sub> ) (8 時間 ON, 16 時間 OFF) ×12 回 +740 kV <sub>dc</sub> (1.85 U <sub>0</sub> ) (8 時間 ON, 16 時間 OFF) ×12 回 +740 kV <sub>dc</sub> (1.85 U <sub>0</sub> ) (24 時間 ON, 24 時 OFF) ×3 回
DC 重畳雷インパルス試験 (CIGRE TB496 4.4.3.4 項)	+400 kV <sub>dc</sub> (U <sub>0</sub> ) -840 kV <sub>imp</sub> (2.1 U <sub>0</sub> )×10 回 -400 kV <sub>dc</sub> (U <sub>0</sub> ) +840 kV <sub>imp</sub> (2.1 U <sub>0</sub> )×10 回
残存試験 (CIGRE TB496 4.4.3.5 項)	-740 kV <sub>dc</sub> (1.85U <sub>0</sub> )×2 時間

下図に、8 時間の通電による加熱( 導体温度 85℃以上)と 16 時間の自然冷却を繰り返すロードサイクル試験結果を示す。

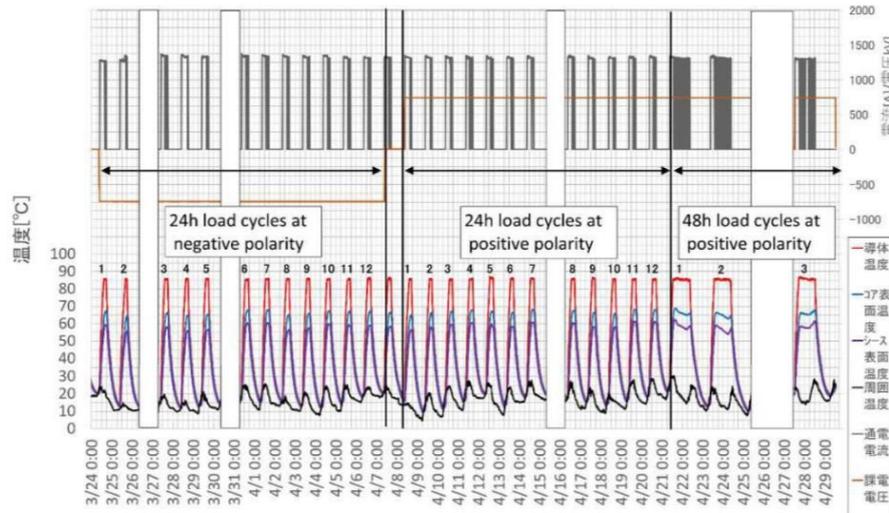


図 4-3-13 ロードサイクル試験データ

下図に、落雷を模擬した DC 重畳雷インパルス試験の結果を示す。

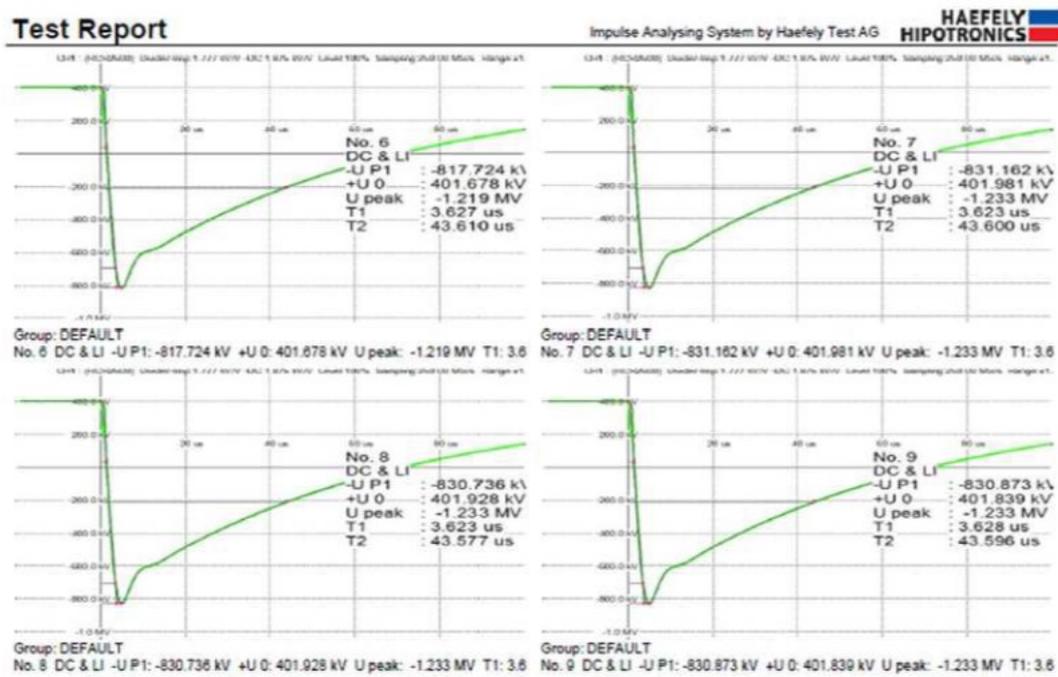


図 4-3-14 DC 重畳雷インパルス試験データ (抜粋)

下図に上記の高負荷試験後のケーブル健全性を確認した残存試験結果を示す。

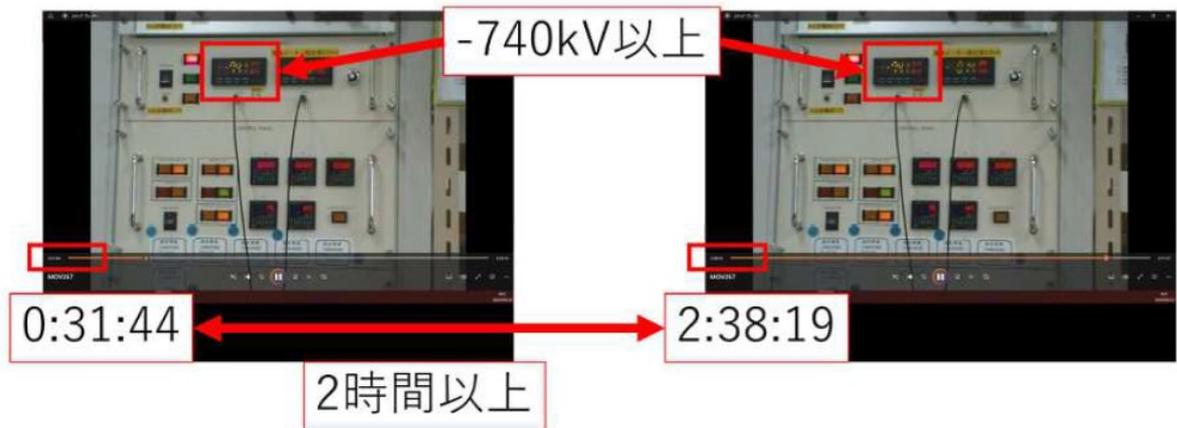


図 4-3-15 残存試験

いずれの試験においても、開発した深海ケーブルは絶縁破壊することなく、電気試験に耐えられることを確認した。試験後には解体調査を行い、電気試験後においても外観異常もなく、電氣的性能に問題がないことを確認できた。機械試験、電気試験ともに目標とする性能を達成したことを確認できた。

尚、DC 重畳雷インパルス試験で実施した電圧 840 kV は、交流 154 kV と 220 kV で実施しているレベルの間である。本開発にて検討した直流 400 kV と交流 154 kV の絶縁厚さは同等で、その他のケーブル仕様設計も類似していることから、長期試験で適切な運転電圧などの検証ができれば、直流ケーブルの交流ケーブルとして適用も期待される。

### (3) 深海ケーブル関連技術開発

#### ① 敷設ルート設計ソフト改良

海底ケーブルの建設コストはルート上の海洋環境に大きく影響を受け、その最適設計には高度なノウハウと煩雑かつ長期間の検討が必要である。本委託事業の前身である次世代洋上直流送電システム開発事業<sup>\*1)</sup>では、各種海洋条件がルート設計に及ぼす影響を定量的に評価し、コスト最小となる敷設ルート設計ソフトを完成させている。

このソフトでは、敷設ルート設計のアルゴリズムには最短経路探索手法を応用し、始点と終点を繋ぐ複数ルートのうち、最小コストになる敷設ルートを探査することが可能である。

また、データベース及びアルゴリズムをクラウド上に組み込み、実用性の高い敷設ルート設計ソフトを構築している。地図上で任意の2地点を入力することで、コスト最小となる最適敷設ルートを数秒で算出し、地図上にルートを表示し、同時にケーブル長、最大水深、コストも算出される。本ソフト・手法により、極めて短期間かつ低コストに最適敷設ルートを算出でき、初期の事業検討段階における事業性評価に大きく貢献することができる。

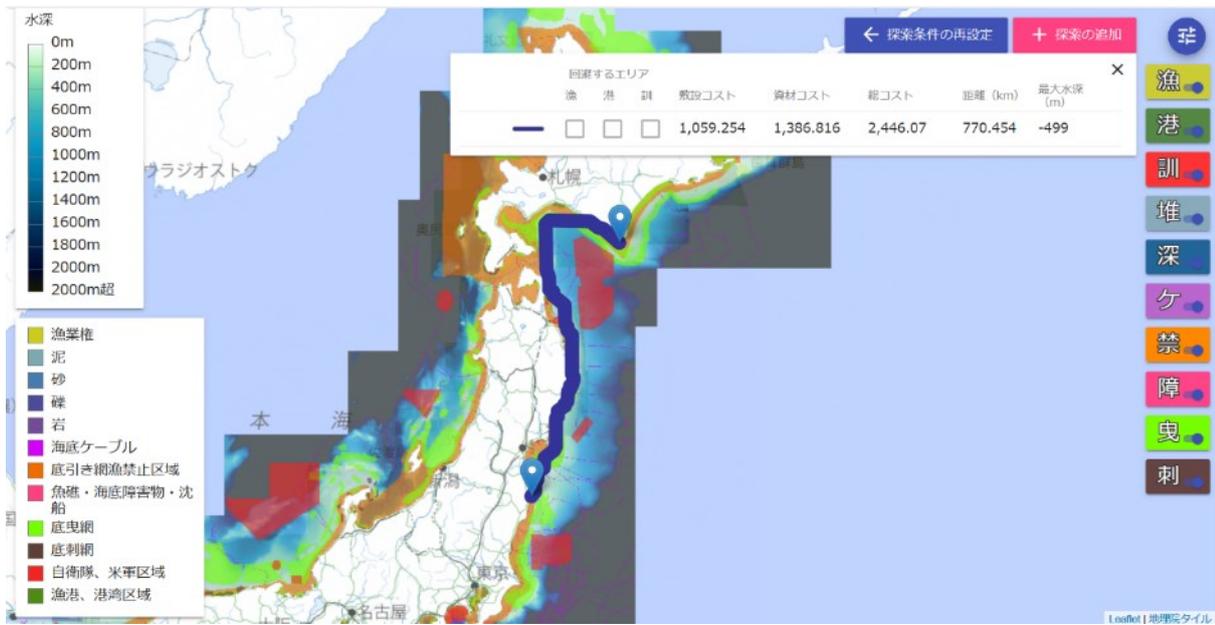
本開発では、上記ソフトに深海域の海洋情報を追加することで、深海ケーブルも対応可能なソフトになるよう改良を行った。下図に実際の敷設設計ソフトのサンプル画面を示す。

日本海域の水深 2,000 m までの既設海底ケーブル、底曳網、底刺網、海底障害物等の海洋情報を追加し、各データを約 500 m 四方の正方形となるようにメッシュ化し、深海ケーブルも対応可能な海洋情報データベースを構築した。

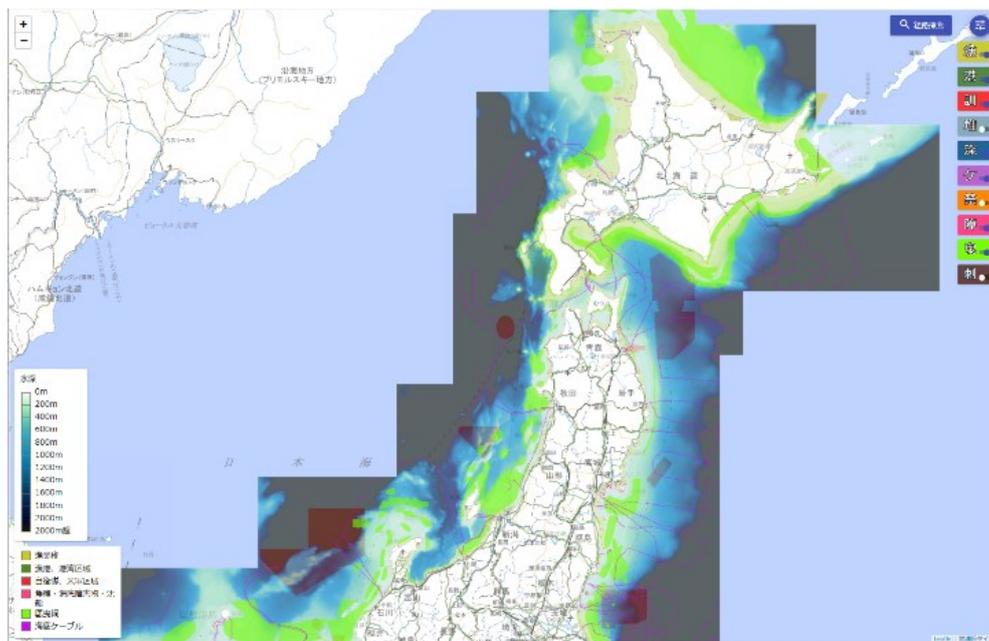
各データには海洋状況に応じたケーブル資材コスト、敷設コスト等の情報を紐づけている。

また、洋上風力発電では複数の風車を海底ケーブルで接続し陸上へ集電するが、このケーブル配策は風車基数が増大するほど最適な配策設計が困難となる。本委託事業の前身である次世代洋上直流送電システム開発事業<sup>\*</sup>)で完成させた、定量的にコスト最小となる配策設計を算出可能なケーブル集電配策設計システムに関して、将来的な風車およびウインドファームの大容量化に備えて適用ケーブルサイズを従来の 80 mm<sup>2</sup>~500 mm<sup>2</sup> から 1000 mm<sup>2</sup> まで拡大した。

\*1)住友電気工業株式会社 他, 次世代洋上直流送電システム開発事業 2015 年度~2019 年度成果報告書, 2020



a.改良後 (2000m対応 海洋情報追加)



b.改良前

図 4-3-16 敷設ルート設計ソフト

## ②敷設船の仕様概略検討

水深 500 m 級の三芯海底ケーブルに加え、水深 300 m 級の単芯海底ケーブル敷設への対応や、水深 500 m ～1,500 m 級単芯海底ケーブルへの対応を想定した敷設船およびブレーキ装置等の艤装の仕様検討を行った。

### a.概念設計仕様

以下の条件を基に概念設計仕様を検討した。

- 積載条件：ケーブル仕様は長距離直流連系線仕様をベースとし工場のターンテーブル容量 7,000 トン以上を積載可能なものとする。またケーブル防護管の重量および保管スペースも考慮する。
- 接岸条件：既存のケーブル工場および寄港予定の港に入出港・接岸可能な船の大きさとする。
- 環境・運用条件：深海海域での耐候性および積載ケーブル敷設に必要な期間に問題無く運航できること。
- 搭載機材：深海へのケーブル敷設や修理工事に必要な敷設張力を算定し深海ケーブル設計（許容張力、許容側圧）に対応できるテンショナーやキャブスタン、船尾シーブ等を配置すること。

検討結果を下表に示す。

表 4-3-10 敷設船の設計仕様

項目		概念設計仕様	仕様根拠	
積載条件	ケーブル	送電容量	1GW/本	
		電圧	DC525kV	一重および二重鉄線
		導体サイズ	1800mm <sup>2</sup>	揚陸部のみ2,500mm <sup>2</sup>
		重量	90.8kg/m	二重鉄線
	最大スパン長		70km	
	ケーブル積載量		7,000ton	70km(7,000ton)以上
	防護管積載量		(本設計で検討)	
光ファイバー		将来案件想定し搭載	48芯、250ton(70km)積載	
接岸条件	最大積載量(DW)		15,000ton <small>(ケーブル7,000ton+防護管+燃料他)</small>	各社工場接岸条件より
	船長さ		150m以下	
	喫水		6.8m以下	
環境条件	耐有義波高		2.5m	工期短縮で対応波高値UP
	連続航海日数		50日	70km敷設、燃料/水/食料の搭載量にて制約
運用条件	船速	回航時	13knot	工期短縮と裕度を考慮 船速13knot(400m/分)以内
		布設時	12km/日(砂地部) 1.2～3.6km/日(露岩部)	
	搭乗員数		100名	船員、作業員、他
搭載機材	ブレーキ装置	キャピラ	25ton <small>(水深300m対応)</small>	主機1、予備1
		キャブスタン	50ton <small>(水深500～1,000m対応)</small>	深海対応
	定点保持クラス等級		DP3	海外新造布設船同等

## b.設計思想

本検討において重要となる基本的な設計思想を以下に示す。

### ■ 入出港予定の国内各港の入出港条件を満たす

現在国内で候補となる船積み港や寄港予定の港の入出港条件を満たし、ケーブル積載量を最大化する目途付けをした。

### ■ 深海対応のケーブル敷設船とする

深海へのケーブル敷設や修理工事に必要な敷設張力を算定し深海ケーブル設計（許容張力、許容側圧）に対応できるテンショナーやキャプスタン、船尾シーブ等の敷設設備の選定および仕様を目途付けした。

### ■ ケーブル防護管の取り付け及び保管スペースの確保

日本近海は埋設不可能な岩盤部も多く存在することから深海では敷設船上で防護管を取付けることが想定される。この作業や防護管の保管に必要なスペース確保の目途付けした。上述の検討仕様に基づき概念設計を行い、敷設設備の最適配置検討に加え、発電機や推進器の選定といった全体のシステム設計を行うとともにそれら設備を搭載できる船形の検討を実施した。具体的には、検討仕様を満たすためのスラスタの構成と船形のバランス、敷設設備の能力・計上と配置のパターン、修理作業を考慮した場合の機器配置、防護管搭載時の荷役などを検討した。

検討の結果、深海敷設に必要な 50 トン級のテンショナー、キャプスタン、防護管敷設に必要な Wheel を搭載しても 10,000 トン相当のカレーセルを配置することが可能となり、港の制約条件等の制約条件下においても設計仕様を満足できることを確認した。

主な艀装仕様を下表に示す。

表 4-3-11 主な艀装仕様例

No	Equipment	Specification
1	Carousel	10,000 ton
2	Capstan	50 ton
3	Tensioner	50 ton x2sets
4	Wheel	2sets

以上より、深海ケーブル関連技術開発について目標を達成する成果をあげることができた。

### 4.3.5. アウトカム達成に向けた戦略と具体的な取組

開発項目Ⅲのアウトカムについて 2023 年 3 月に電力広域的運営推進機関が広域系統長期方針（広域連系系統のマスタープラン）を策定し、総額 7 兆円規模の送電網強化に関する計画が示された。再エネ導入拡大に伴う送電系統の容量不足が課題となっており、当社では北海道-新潟間を繋ぐ約 900km、2 回線、400 万 kW の直流海底送電への技術適用を検討している。

1 回線、200 万 kW の直流海底送電が稼働した場合、洋上風力発電導入による CO<sub>2</sub> 削減効果は約 270 万トン/年。

今後も「多用途多端子直流送電システム【研究開発項目 4】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」にて深海域でのケーブル敷設に関する研究開発を継続し、広域連系系統のマスタープランと連動し、開発成果の適宜展開を想定している。

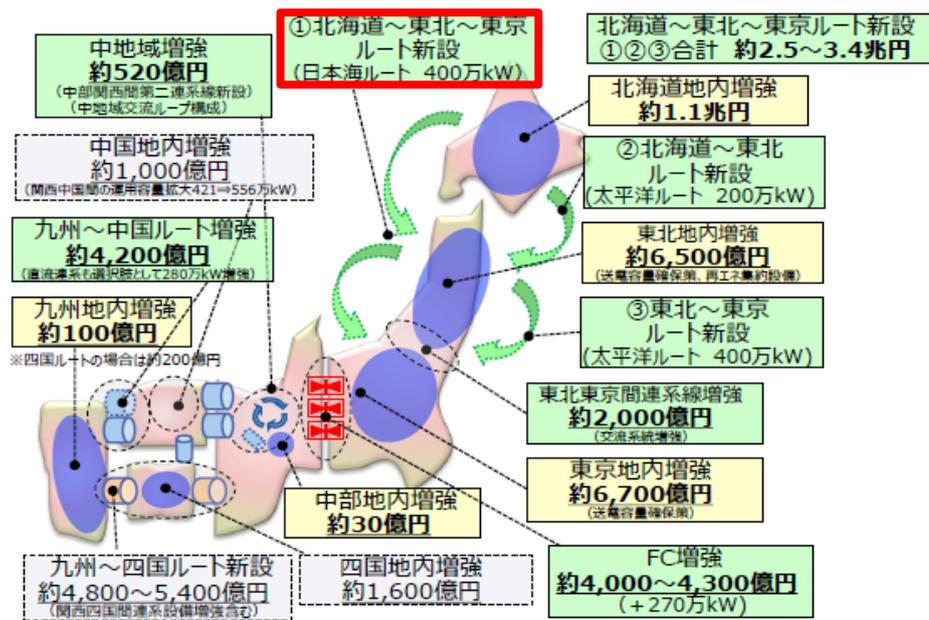


図 4-3-17 広域連系系統のマスタープラン<sup>\*2)</sup>

\*2)広域系統長期方針（広域連系系統のマスタープラン）電力広域体運営推進機関 2023年3月29日策定よりベースシナリオ抜粋

表 4-3-12 直流海底送電実現に向けたスケジュール

年度	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	~2040
<b>広域整備計画 *3)</b>									
国や電力広域機関の審議会等	基本要件の基となる増強方策の検討	基本要件の検討・策定	事業実施主体・実施案の募集・評価・決定	整備計画の策定					
	国による実地調査								
	資金調達スキームの構築	資金調達の環境整備の具体化							
事業実施主体となりうる候補	事業実施案の検討								
<b>研究計画 *4)</b>									
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	基本検討	詳細検討	技術						
<b>実用化・事業化計画</b>									
各船建造									
製造 施工	1回線								
	2回線								

本事業開発では 2020 年度から 2023 年度の 4 年間で総額 6 億円の事業費用をかけて、直流深海ケーブル（三芯水深 500m 級）の開発を完了させた。本成果による 2030 年までの売り上げ予測は、広域連系系統の北海道-新潟間の 1 回線のみで約 4000 億円を見込んでおり、今後の洋上風力発電導入拡大によりさらに増加する可能性を含む。加えて、約 270 万トン/年の CO<sub>2</sub> 削減効果が期待できることから、本事業の費用対効果は妥当であったと判断する。

# 添付資料

## ●プロジェクト基本計画：

P20001

### 「多用途多端子直流送電システムの基盤技術開発」基本計画

スマートコミュニティ・エネルギーシステム部

#### 1. 研究開発の目的・目標・内容

##### (1) 研究開発の目的

###### ①政策的重要性

今後のエネルギー政策として、2018年7月に閣議決定された「第5次エネルギー基本計画」には、風力発電をはじめとする再生可能エネルギー（再エネ）については導入を最大限加速・推進していくとともに、系統強化、規制の合理化、低コスト化等の研究開発を着実に進めることが記載されている。更に2019年4月の海洋再生可能エネルギー発電設備の整備に係る海域の利用の促進に関する法律（再エネ海域利用法）の施行にともない、各地で急速に洋上風力発電の計画が立ち上がることが見込まれる。こうした中、僻地にあることが多い洋上風力発電と電力系統を効率的に繋ぐ技術開発は重要性が高い。さらに、2021年10月の「第6次エネルギー基本計画」において、2030年の再エネ電源構成比率が36～38%程度に引き上げられ、この実現に向けた取組みが急務となっている。

###### ②我が国の状況

我が国の風力発電のポテンシャルは大きく、2017年(平成29年)に環境省が発行した「再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報等の整備・公開に関する委託業務報告書」において、開発不可条件を控除した我が国の洋上風力のポテンシャルは約14億kWと推計されている。このため、立地制約が比較的少なく風況が良い洋上や離島周辺の活用は再エネの導入拡大に重要である。しかしながら、その適地は北海道・東北・九州などで、大消費地から距離が離れており、離岸距離が大きくなると水深が深くなるため、沿岸に帯状に分布している。加えて、我が国では、送電容量に限界があることから、再エネ導入量が制限されてしまう。こうした状況から、我が国へ大規模な洋上ウインドファーム（WF）を設置する場合には沿岸に沿って洋上WFが順次導入されていくことが想定されており、複数の洋上WFと電力系統や需要地とを多端子で接続し、長距離で送電可能な直流送電システムは洋上風力の導入拡大に極めて有効である。また、直流送電は北本連系線のように、大容量長距離送電の特徴を活かして地域間連系線などにも利用されている。さらに、地域間連系線の増強計画であるマスタープランの策定に向けた検討が進められており、北海道等から大需要地への送電については海底ケーブルを用いた長距離海底直流送電が有望な案として検討されている。しかし、海底ケーブル敷設は岩盤域での敷設も多くなると推定されているため、工期短縮に向けてケーブル防護方法の検討が必要である。離島周辺は風力を中心とした再エネの導入に適した環境も多く、離島に直流送電用変換所を直接建設できれば洋上に変換所を建設する場合に比べてコストを抑えることが出来、メンテナンス面でも有効である。一方で系統が小さい地域では需給バランスの調整が困難であり、また、水深が深い海域は送電ケーブルの敷設ルート等に制限がある。そのため、離島などは外部との電力需給が難しく、調整力確保に内燃力発電を利用する必要が生じるため、CO<sub>2</sub>の削減が難しい状況である。

###### ③世界の取組状況

洋上風力発電の導入が進んでいる欧州では、「PROMOTioN」プロジェクトなど洋上風力のグリッド化のための多端子直流送電システムの研究開発が進んでおり、実用化・国際規格化を目指している。また、中国では南澳(Nanao)や張北

(Zhangbei) をはじめとして内陸の大規模再エネ発電を海岸部の大消費地に送る長距離大容量多端子直流送電開発し、順次実用化している。このように近年、世界的に直流送配電技術の開発は盛んになっており、欧州の TSO(Transmission System Operator:送電系統運用者)のひとつである TenneT では北海の浅瀬 (ドガーバンク) において人工島を建設し、直流送電の HUB ポイントを建設することを提案している。一方で欧州では、高調波共振や振動等の計算機では模擬できない要因による事故が発生しており、技術的な懸念もまだ存在している。

#### ④ 本事業のねらい

本事業では風力の直流送電線を多端子化して適切に保護制御・潮流制御を行うことで、信頼性が高く効率的な風力送電を可能とする高圧直流 (HVDC) 技術を開発する。また、これらの直流送電線を地域間への電力供給などの用途に利用できる制御技術を開発し、風力の導入普及のみならず、地域の需給バランス維持、再エネ抑制の回避、レジリエンスの強化などに貢献するための技術要件をまとめる。

併せて、世界中で進展している直流送配電技術について、国内外の技術や政策の動向を踏まえて、速やかに実用化を実現するための課題の整理及び抽出を行う。

さらに、北海道等から大需要地まで効率的な直流送電システムの整備に向けた検討の加速化に伴い、その整備に必要な技術開発を行う。

### (2) 研究開発の目標

#### ① アウトプット目標

##### (研究開発項目 1)

- ・上位制御ユニットと変換器制御ユニットと保護装置の実機をデジタルシミュレーション内で構築した多端子高圧直流送電システムに接続し、実機の挙動 (通信 等) を踏まえたシステムを構築して検証を行う。また、異社間インターフェイスの指針を整理する。
- ・実機の挙動 (通信 等) を踏まえ、具体的なモデルケースを想定し、適切に異社間で潮流制御が可能となる上位制御の要求仕様をまとめる。

##### (研究開発項目 2)

- ・実機の挙動 (通信 等) を踏まえ、具体的なモデルケースを想定し、必要な時間内 (事故電流が直流遮断器の遮断可能電流に収まるように) に遮断できる保護装置を開発し、その要求仕様をまとめる。

##### (研究開発項目 3)

- ・モデルケースにおいて従来の海底ケーブル (水深 300m 級) とほぼ同じコストで生産及び敷設可能な深海ケーブル (水深 500~1500m 級) を開発する。

##### (研究開発項目 4)

- ・岩盤域での海底ケーブル敷設時のケーブル防護について、既存工法より低コスト (20%低減) を可能とする工法を開発する。
- ・日本特有の海象・気象や必要となるケーブル敷設 (防護、接続、敷設制御等) 方法に対応し、複数社のケーブルを取り扱い敷設可能な新型ケーブル敷設船等 (艀装設備含む) の基本的な設計を行うとともに、その共通仕様を確立する。

#### ② アウトカム目標

2030 年度 系統増強等を通じた洋上風力発電の導入拡大による、CO<sub>2</sub> 削減効果 2.7 百万トン/年。

※系統増強等を通じた洋上風力発電の 2030 年度導入見込量 60 億 kWh 注 1) を導入した時の CO<sub>2</sub> 排出量削減量は、排出原単位実績 (R2 年度 : 0.000453 t-CO<sub>2</sub>/kWh 注 2) より約 2.7 百万 t-CO<sub>2</sub>となる。

注 1) 2030 年度におけるエネルギー需給の見通し (関連資料) -R3.10 経済産業省

注 2) 電気事業者別排出係数（特定排出者の温暖効果ガス排出量算定用）-R2 年度実績- R4.1.7 環境省・経済産業省公表、R4.2.17 一部修正、R4.7.14 一部追加・更新

### ③ アウトカム目標達成に向けての取組

「海洋再生可能エネルギー発電設備の整備に係る海域の利用の促進に関する法律（再エネ海域利用法）」等と歩調を合わせる。再エネ海域利用法に伴う環境アセスメント（4～5年程度）後の風力設備建設作業に本事業の成果を盛り込むことで、洋上風力導入を促し、第6次エネルギー基本計画の目標（2030年に風力発電23.6GW、うち、洋上風力5.7GW）達成を目指す。

#### （3）研究開発の内容 研究開発項目（詳細を別紙1、2に記載）、実施形態

多用途多端子高圧直流（HVDC）技術は、一部実機を用いた手法による「研究開発項目1：多用途多端子直流送電システムの開発」、「研究開発項目2：多端子直流送電用保護装置の開発」、「研究開発項目3：直流深海ケーブルの開発」及び「研究開発項目4：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」を行う。

## 2. 研究開発の実施方式

### （1）研究開発の実施体制 研究開発体制、研究開発場所の構想

プロジェクトマネージャーに NEDO スマートコミュニティ・エネルギーシステム部 主任研究員 西林秀修を任命して、プロジェクトの進行全体を企画・管理や、そのプロジェクトに求められる技術的成果及び政策的効果を最大化させる。なお、各実施者の研究開発能力を最大限に活用し、効率的かつ効果的に研究開発を推進する観点から、NEDO は研究開発責任者（プロジェクトリーダー）として、東京都市大学 教授 中島達人氏を選定し、各実施者はプロジェクトリーダーの下で研究開発を実施する。また、専門的見地からプロジェクトリーダーを補佐するサブプロジェクトリーダーとして、関西電力送配電株式会社 電力システム技術センター 副所長 曾我学氏を選定する。

NEDO は公募により研究開発実施者を選定する。

研究開発実施者は、企業や大学等の研究機関等（以下、「団体」という。）のうち、原則として日本国内に研究開発拠点を有するものを対象とし、単独又は複数で研究開発に参加するものとする。ただし、国外の団体の特別の研究開発能力や研究施設等の活用又は国際標準獲得の観点から必要な場合は、当該の研究開発等に限り国外の団体と連携して実施することができるものとする。

### （2）研究開発の運営管理 運営管理の方針、方法

NEDO は、研究開発全体の管理、執行に責任を負い、研究開発の進捗のほか、外部環境の変化等を適時に把握し、必要な措置を講じるものとする。運営管理は、効率的かつ効果的な方法を取り入れることとし、次に掲げる事項を実施する。

#### ① 研究開発の進捗把握・管理

NEDO は、主としてプロジェクトリーダーをとおして研究開発実施者と緊密に連携し、研究開発の進捗状況を把握する。また、必要に応じて外部有識者で構成する技術委員会を組織し、定期的に技術的評価を受け、目標達成の見通しを常に把握することに努める。

#### ② 技術分野における動向の把握・分析

NEDO は、プロジェクトで取り組む技術分野について、内外の技術開発動向、政策動向、市場動向等について必要に応じて調査し、技術の普及方策を分析、検討する。なお、調査等を効率的に実施する観点から委託事業として実施する。

## 3. 研究開発の実施期間

2020 年度から 2025 年度までの 6 年間とする。

#### 4. 評価に関する事項

NEDO は技術評価実施規程に基づき、技術的及び政策的観点から研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等について、プロジェクト評価を実施する。

評価の時期は、「研究開発項目 1：多用途多端子直流送電システムの開発」、「研究開発項目 2：多端子直流送電用保護装置の開発」及び「研究開発項目 3：直流深海ケーブルの開発」の事後評価を 2024 年度、また「研究開発項目 4：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」の事後評価を 2026 年度とし、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況等に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。また、必要に応じて研究開発の加速・縮小・中止等の見直しを迅速に行う。

#### 5. その他重要事項

##### (1) 研究開発成果の取扱い

###### ①成果の普及

研究開発実施者は、研究開発成果を広範に普及するよう努めるものとする。NEDO は研究開発実施者による研究開発成果の広範の普及を促進する。

###### ②知的基盤整備事業又は標準化等との連携

次世代洋上直流送電システム開発の成果を含めて、本事業の目的である多端子直流送電技術の実用化に合致する国際標準化活動を行う。

###### ③知的財産権の帰属、管理等取扱いについての方針

研究開発成果に関わる知的財産権については、「国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 新エネルギー・産業技術業務方法書」第 2 5 条の規定等に基づき、原則として、全て委託先に帰属させることとする。なお、開発段階から、事業化を見据えた知財戦略を構築し、適切な知財管理を実施する。

###### ④ 知財マネジメントに係る運用

本プロジェクトは、「NEDO プロジェクトにおける知財マネジメント基本方針」を適用する。

###### ⑤ データマネジメントに関わる運用

本プロジェクトは、「NEDO プロジェクトにおけるデータマネジメント基本方針」を適用する。

##### (2) 基本計画の変更 基本計画の変更についての方針

NEDO は、当該研究開発の進捗状況及びその評価結果、社会・経済的状況、国内外の研究開発動向、政策動向、研究開発費の確保状況等、プロジェクト内外の情勢変化を総合的に勘案し、必要に応じて目標達成に向けた改善策を検討し、達成目標、実施期間、実施体制等、プロジェクト基本計画を見直す等の対応を行う。

##### (3) 根拠法

本プロジェクトは、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第 15 条第 1 項第 1 号イ及び第 9 号に基づき実施する。

#### 6. 基本計画の改訂履歴

2020年2月 策定

2023年3月 改定（研究開発項目追加と実施期間延長による）

## （別紙 1）研究開発計画

### 【多用途多端子高圧直流（HVDC）技術】

#### 1. 研究開発の必要性

我が国の風力発電のポテンシャルは大きく、特に立地制約が比較的少ない風況が良い洋上や離島周辺の活用は再エネの導入拡大に重要である。しかしながら、その適地は北海道・東北・九州などで、大消費地から距離が離れており、離岸距離が大きくなると水深が深くなるため、沿岸に帯状に分布している。加えて、我が国では、送電容量に限界があることから、再エネ導入量が制限されてしまう。こうした状況から、我が国へ大規模な洋上ウインドファーム（WF）を設置する場合には沿岸に沿って洋上 WF が順次導入されていくことが想定されており、複数の洋上 WF と電力系統や需要地とを多端子で接続し、長距離で送電可能な直流送電システムは洋上風力の導入拡大に極めて有効である。また、直流送電は北本連系線のように、大容量長距離送電の特徴を活かして地域間連系線などにも利用されている。離島周辺は風力を中心とした再エネの導入に適した環境も多く、離島に直流送電用変換所を直接建設できれば洋上に変換所を建設する場合に比べてコストを抑えることが出来、メンテナンス面でも有効である。一方で系統が小さい地域では需給バランスの調整が困難であり、また、水深が深い海域は送電ケーブルの敷設ルート等に制限がある。そのため、離島などは外部との電力需給が難しく、調整力確保に内燃力発電を利用する必要が生じるため、CO<sub>2</sub>の削減が難しい状況である。

このため、風力の直流送電線を水深に依らず多端子で接続して適切な保護制御・潮流制御を行うことで、安全かつ効率的な風力送電を可能とする HVDC 技術は再エネ導入拡大に重要である。また、風力発電用の直流送電を既存の系統間に連系し地域間や小規模系統の電力供給など多用途で利用する技術は、再生可能エネルギーの利用及びエネルギーの安定供給を確保できる強靱性（レジリエンス）の向上に貢献できるため、本研究開発は必要となる。

また、2021 年 10 月に策定された「第 6 次エネルギー基本計画」において、S + 3 E を大前提に再エネ最優先の原則で取り組む方針が示され、その実現には、洋上風力の推進と電力系統の制約解消の加速化が重要であり、特に北海道等から大需要地まで効率的に送電するための直流送電システムの整備が期待されている。しかし、これまでの調査等によって、北海道等から大需要地のルートについては岩盤域を回避できない海域があることが示されており、また岩盤部でのケーブル防護は手動による防護管取付けが中心であることから、これが工期の長期化と敷設費用増大の原因になっている。これらの課題を解決し、世界的に類例の乏しい大規模な直流送電システムを計画的・効率的に整備するため、ケーブル敷設方法の技術開発を行い、国内事業の円滑な整備、海外の整備事業への進出に貢献する。なお、長距離海底ケーブルの保守・管理手法についても新たな技術が期待されている。

#### 2. 具体的研究内容

多用途多端子高圧直流（HVDC）技術は、一部実機を用いた手法による「研究開発項目 1：多用途多端子直流送電システムの開発」を行う。多端子化した直流線を用いた、風力を効果的に分配送電する潮流制御技術、ある交流系統から別の交流系統へ直流線を介して送電する潮流制御技術、一部の直流線に事故が生じた際に影響を最小限にするように適切な区間で電流遮断する保護制御技術を開発する。また、これらの制御を実現するための上位制御ユニットを開発する。なお、この開発には、シミュレーションだけでなく一部実機を用いることでシミュレーションだけでは再現できない挙動なども検証する。

また、システム実現のための要素技術として、「研究開発項目 2：多端子直流送電用保護装置の開発」及び「研究開発項目 3：直流深海ケーブルの開発」を行う。多端子直流送電用保護装置の開発は、高速に遮断できる仕様をシミュレーションなどで整理した上で実機の開発を行う。また直流深海ケーブルでは水深が深い地域を安価で安全に敷設することが出来る深海ケーブル及びその敷設工法等を開発する。

さらに、「研究開発項目 4：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」を行う。特に、岩盤部で課題となっているケーブル防護について、より低コストを可能とする防護管取付等の工法を開発する。また、日本特有の海象・気象や必要となるケーブル敷設（防護、接続、敷設制御等）方法に対応し、複数社のケーブルを取り

扱い可能な新型ケーブル敷設船等（艀装設備含む）について、基本的な設計を通じて取り込むべき技術を洗い出した上で、その仕様を確立する。

### 3. 達成目標

#### 【最終目標】

##### （研究開発項目 1）

- ・多端子高圧直流システムの開発：上位制御ユニットと変換器制御ユニットと保護装置の実機をデジタルシミュレーション内で構築した多端子高圧直流送電系統に接続し、実機の挙動（通信等）を踏まえたシステムを構築して検証を行う。また、異社間インターフェイスの指針を整理する。
- ・多端子高圧直流システムの開発：実機の挙動（通信等）を踏まえ、具体的なモデルケースを想定し、適切に異社間で潮流制御が可能となる上位制御の要求仕様をまとめる。

##### （研究開発項目 2）

- ・多端子直流送電用保護装置の開発：実機の挙動（通信等）を踏まえ、具体的なモデルケースを想定し、必要な時間内（事故電流が直流遮断器の遮断可能電流に収まるような時間内）に遮断できる保護装置を開発し、その要求仕様をまとめる。

##### （研究開発項目 3）

- ・直流深海ケーブルの開発：モデルケースにおいて従来の海底ケーブル（水深 300m 級）とほぼ同じコストで生産及び敷設可能な深海ケーブル（水深 500～1500m 級）を開発する。

##### （研究開発項目 4）

- ・防護管取付等の工法開発：岩盤域での海底ケーブル敷設時のケーブル防護について、既存工法より低コスト（20%低減）を可能とする工法を開発する。
- ・新型ケーブル敷設船等の基盤技術開発：日本特有の海象・気象や必要となるケーブル敷設（防護、接続、敷設制御等）方法に対応し、複数社のケーブルを取り扱い可能な新型ケーブル敷設船等（艀装設備含む）の基本的な設計を行うとともに、その共通仕様を確立する。

(別紙2) 研究開発スケジュール

研究開発項目	2020年度	2021年度	2022年度	2023年度	2024年度	2025年度	2026年度
1 多用途多端子直流送電システムの開発	多用途多端子直流送電システムの開発 (委託)				事後評価		
2 多端子直流送電用保護装置の開発	多端子直流送電用保護装置の開発 (委託)						
3 直流深海ケーブルの開発	直流深海ケーブルの開発 (委託)						
4 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				防護管工法開発及び敷設船の基盤技術開発 (委託)			事後評価

●プロジェクト開始時関連資料（事前評価結果、パブリックコメント募集の結果）

事前評価結果

2019 年度 新規案件に係る事前評価結果について

案件名	多用途多端子直流送電システムの基盤技術開発
推進部署	スマートコミュニティ部
総合コメント	<p>信頼性の高い再生可能エネルギーの導入促進及びエネルギーの安定供給を確保するためのレジリエンスの向上を目的として、直流送電線の多用途多端子化、直流マイクログリッドの開発を国が支援することは必要である。また、直流送配電システムの社会実装には、送配電事業者の他、複数の事業主体との調整やエリア間の連携も重要であることから、NEDO が実施する意義がある。一方で、日本の電力供給ネットワークにおける本プロジェクトの位置づけについて再度整理し、わかりやすく示すとともに、アウトプット目標で達成されるシステム及び製品開発がアウトカム目標に結びつくまでの道筋の明確化が望まれる。また、開発体制、費用対効果、将来の海外展開の可能性についても再考が望まれる。</p>

## 「多用途多端子直流送電システムの基盤技術開発 基本計画（案）」に対するパブリックコメント募集の結果について

2020年3月4日  
NEDO  
スマートコミュニティ部

NEDO POSTにおいて標記基本計画（案）に対するパブリックコメントの募集を行いました結果をご報告いたします。

### 1. パブリックコメント募集期間

2019年12月27日～2020年1月10日

### 2. パブリックコメント投稿数〈有効のもの〉

計0件

以上

●特許論文等リスト

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名 ページ番号	査読	発表年月日
1	大竹 陽介 岸田 寛 尹栄 徳 榑原 広幸	古河電気工業 株式会社	直流深海ケーブルの開発 (単芯水深 1500m 級) その 2	電気学会	有	2024 年 9 月
2	西林 秀修 廣瀬 圭一 藤田 悟	NEDO	多用途多端子直流送電 システムの基盤技術開発 概要	電気設備学会誌 Vol44 No.9	無	2024 年 9 月
3	廣瀬 圭一	NEDO	海外における直流利活用の動向 (その 2)	電気設備学会誌 Vol44 No.9	無	2024 年 9 月
4	廣瀬 圭一	NEDO	Status and challenges of energy efficiency & conservation using DC power technologies in Japan	ICRERA 2024	無	2024 年 11 月

【外部発表】

(a) 学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月日
1	本庄 昇一	東京電力ホール ディングス株式 会社	再エネ主電源化に向けた系統 対策と技術開発	スマートコミュニティサミット 2021	2021 年 9 月 22 日
2	太田 文彦	東京電力ホール ディングス株式 会社	多用途多端子直流送電シス テムの基盤技術開発	APET 第 37 回イブニングセミナー 『洋上風力の周辺技術』	2022 年 10 月 12 日
3	太田 文彦	東京電力ホール ディングス株式 会社	直流送電に関する NEDO 事 業の概要について	第 2 3 回 若手教員／研究者支 援活動 (Power Academy)	2022 年 3 月

4	中島 達人	東京電力 ホールディング ス株式会社 他 5 組織	Standard Specifications and Simulation Analysis on Control and Protection Scheme for Multivendor Offshore Multi-Terminal HVDC System	2022 年 CIGRE パリ大会 SC-B4	2022 年 8 月
5	飯原 絵里	NEDO	NEDO 多用途多端子直流送電シ ステムの基盤技術開発 (RIGHT プロジェクト) の概要	令和 5 年電気学会全国大会シ ンポジウム	2023 年 3 月
6	太田 文彦	東京電力 ホールディング ス株式会社 他 6 組織	多用途多端子直流送電システムの シミュレーション検証	令和 5 年電気学会全国大会シ ンポジウム	2023 年 3 月
7	吉原 徹	株式会社日 立製作所他 6 組織	多用途多端子直流送電システムの 潮流・保護制御の開発	令和 5 年電気学会全国大会シ ンポジウム H2	2023 年 3 月
8	佐藤 彰	住友電気工 業株式会社	直流深海ケーブルの開発 (三芯 水深 500m 級)	令和 5 年電気学会全国大会シ ンポジウム講演 H2	2023 年 3 月
9	岸田 寛	古河電気工 業株式会社	直流深海ケーブルの開発 (単芯 水深 1500m 級)	令和 5 年電気学会全国大会シ ンポジウム講演 H2	2023 年 3 月
10	中島 達人	東京都市 大学	再エネ導入拡大に伴う系統安定 性・品質に関する課題と対応	APNet 令和 5 年度シンポジウム 「2050 年を見据えた将来の電 力需給の課題と展望」	2023 年 12 月 19 日
11	下里 明日香	NEDO	NEDO 多用途多端子直流送電 システムの基盤技術開発 (RIGHT プロジェクト)	令和 6 年電気学会全国大会 一般公演	2024 年 3 月
12	工藤 悠生	東芝エネ ルギーシ ステムズ 株式会 社他 6 組織	多用途多端子直流送電システムの 基盤技術開発 その 1 - 双極方 式 of 多端子直流送電システムのシ ミュレーション	令和 6 年電気学会全国大会 一般公演	2024 年 3 月
13	山田 剛史	東興電力パ ワーグリ ッド株 式会社 他 6 組織	多用途多端子直流送電システムの 基盤技術開発 その 2 - 対称単 極方式の島嶼負荷を追加した多 端子直流送電システムのシミュレ ーション	令和 6 年電気学会全国大会 一般公演	2024 年 3 月
14	富永 真志	三菱電機株 式会社 他 6 組織	多用途多端子直流送電システムの 基盤技術開発 その 3 - 対称単極方式 of 多端子直流送 電システムにおける HIL 試験シ ステムの構築	令和 6 年電気学会全国大会 一般公演	2024 年 3 月

15	春日 衛	東京電力ホールディングス株式会社他6組織	多用途多端子直流送電システムの基盤技術開発 その4-対称単極方式の多端子直流送電システムのHIL試験結果-	令和6年電気学会全国大会 一般公演	2024年3月
16	吉原 徹	株式会社日立製作所他6組織	多用途多端子直流送電システムの基盤技術開発 その5-多端子直流送電システムの標準仕様書の策定-	令和6年電気学会全国大会 一般公演	2024年3月
17	下里 明日香	NEDO	第1部 国の政策と取組み 演目2 NEDO 事業の概要と成果 (1)HVDC 関連事業の概要・成果の要旨 ~多用途多端子直流送電システムの基盤技術開発~	令和6年電気学会電力・エネルギー部門大会 オーガナイズドセッション (座談会)	2024年 9月6日
18	太田 文彦	東京電力ホールディングス株式会社	第1部 国の政策と取組み 演目2 NEDO 事業の概要と成果 (2)多用途多端子直流送電システム	令和6年電気学会電力・エネルギー部門大会 オーガナイズドセッション (座談会)	2024年 9月6日
19	山田 剛史	東京電力パワーグリッド株式会社	第1部 国の政策と取組み 演目2 NEDO 事業の概要と成果 (3)ユースケース、検討結果	令和6年電気学会電力・エネルギー部門大会 オーガナイズドセッション (座談会)	2024年 9月6日
20	西岡 淳	日立エナジー	第2部メーカーの取組み 演目3 HVDC システムにおける各社の取組み、トピックス(1)日立製作所/日立エナジーの取組み	令和6年電気学会電力・エネルギー部門大会 オーガナイズドセッション (座談会)	2024年 9月6日
21	直井 伸也	東芝エネルギーシステムズ株式会社	第2部メーカーの取組み 演目3 HVDC システムにおける各社の取組み、トピックス(2)東芝ESSの取組み	令和6年電気学会電力・エネルギー部門大会 オーガナイズドセッション (座談会)	2024年 9月6日
22	真山 修二	住友電気工業株式会社	第2部メーカーの取組み 演目4 ケーブルにおける各社の取組み、トピックス(1)住友電工の取組み	令和6年電気学会電力・エネルギー部門大会 オーガナイズドセッション (座談会)	2024年 9月6日
23	榊原 広幸	古河電気工業株式会社	第2部メーカーの取組み 演目4 ケーブルにおける各社の取組み、トピックス(2)古河電工の取組み	令和6年電気学会電力・エネルギー部門大会 オーガナイズドセッション (座談会)	2024年 9月6日
24	西岡 淳	日立エナジー	第3部海外動向と将来に向けた人材育成 演目5 海外の動向(1)HVDC 事業の海外動向	令和6年電気学会電力・エネルギー部門大会 オーガナイズドセッション (座談会)	2024年 9月6日

25	廣瀬 圭一	NEDO	第3部海外動向と将来に向けた 人材育成 演目5(2)欧州の研究開発実証 および国際標準化の動向	令和6年電気学会電力・エネルギー部門大会 オルガナイズド セッション (座談会)	2024年 9月6日
----	-------	------	--	---	---------------

(b)新聞・雑誌等への掲載

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月日
1	NEDO、東京電力ホールディングス株式会社	東電 HD 洋上風力と系統接続 直流送電 基盤技術を開発へ	電気新聞	2020年 7月15日
2	NEDO	「多用途多端子直流送電システムの基 盤技術開発 (RIGHT project)」	スマートグリッド誌	2022年1月
3	NEDO 他	交流→直流へ送電大転換 日立や NTT、再エネ普及へ構築	日本経済新聞	2022年 2月7日
4	NEDO	北海道の洋上風力、蓄電池船で運搬 送電網不足補えるかー北のゼロカーボン 都市 強風 をチカラに	日本経済新聞電子版	2023年 8月3日
5	東京電力ホールディングス 株式会社他	電気学会電力・エネルギー部門 高圧直流送電をテーマ 大阪で座談会	電気新聞朝刊 2面	2024年 9月10日
6	東京電力ホールディングス 株式会社、NEDO、他	-	電気新聞	直近に記事になる予定

(c)その他

番号	所属	タイトル	発表先等	発表年月日
1	東京電力ホールディングス 株式会社 東京電力パワーグリッド株 式会社	「多用途多端子直流送電システムの基 盤技術開発事業」の実施について	Web	2020年 7月14日
2	住友電気工業株式会社	「多用途多端子直流送電システムの基 盤技術開発」の採択について	Web	2020年 7月15日
3	NEDO	高圧直流送電システムの研究開発	スマートグリッド EXPO2022 秋	2022年 9月2日
4	東京電力ホールディングス 株式会社 (太田 文彦)	多用途多端子直流送電システムの実用 化開発に関するシミュレーション検証	RTDS 日本ユーザーズ グループミーティング	2023年 9月20日

5	NEDO (廣瀬 圭一)	直流配電システム尾開発背景・実用化状況と今後の展望	JEMIMA 一般社団法人日本電気計測工業会 2023 年度第 2 回電子測定器委員会講演会	2024 年 2 月 21 日
6	NEDO (西林 秀修)	「高圧直流送電システムに関する研究開発の概要」	名古屋大学未来材料・システム研究所エネルギーシステム (中部電力) 寄附研究部門 第 4 回エネルギーシステムシンポジウム	2024 年 3 月 22 日
7	NEDO (西林 秀修)	「NEDO 多用途多端子直流送電システムの基盤技術開発 (RIGHT プロジェクト)」	NEDO プロジェクトを核とした人材育成、産学連携等の総合的展開 (NEDO 特別講座) / 多用途多端子直流送電システム 2024 年度第 1 回産学合同セミナー	2024 年 4 月 26 日
8	東京電力ホールディングス株式会社 (松田 洋)	「多用途多端子直流送電システムのリアルタイムシミュレーション検証」	NEDO プロジェクトを核とした人材育成、産学連携等の総合的展開 (NEDO 特別講座) / 多用途多端子直流送電システム 2024 年度第 1 回産学合同セミナー	2024 年 4 月 26 日
9	東京電力パワーグリッド株式会社 (山田 剛史)	「NEDO 多用途多端子直流送電システム基盤技術開発事業の紹介 ~ 島嶼多端子直流送電のシミュレーション検証 ~」	NEDO プロジェクトを核とした人材育成、産学連携等の総合的展開 (NEDO 特別講座) / 多用途多端子直流送電システム 2024 年度第 2 回産学合同セミナー	2024 年 6 月 17 日
10	NEDO (中尾 光洋)	NEDO 事業 (多用途多端子直流送電システムの基盤技術開発) について ・直流送電の基礎、 NEDO 事業の概要と成果、事業化の動向 等	長崎大学オープンイノベーション拠点 OICN オープンセミナー	2024 年 10 月 25 日