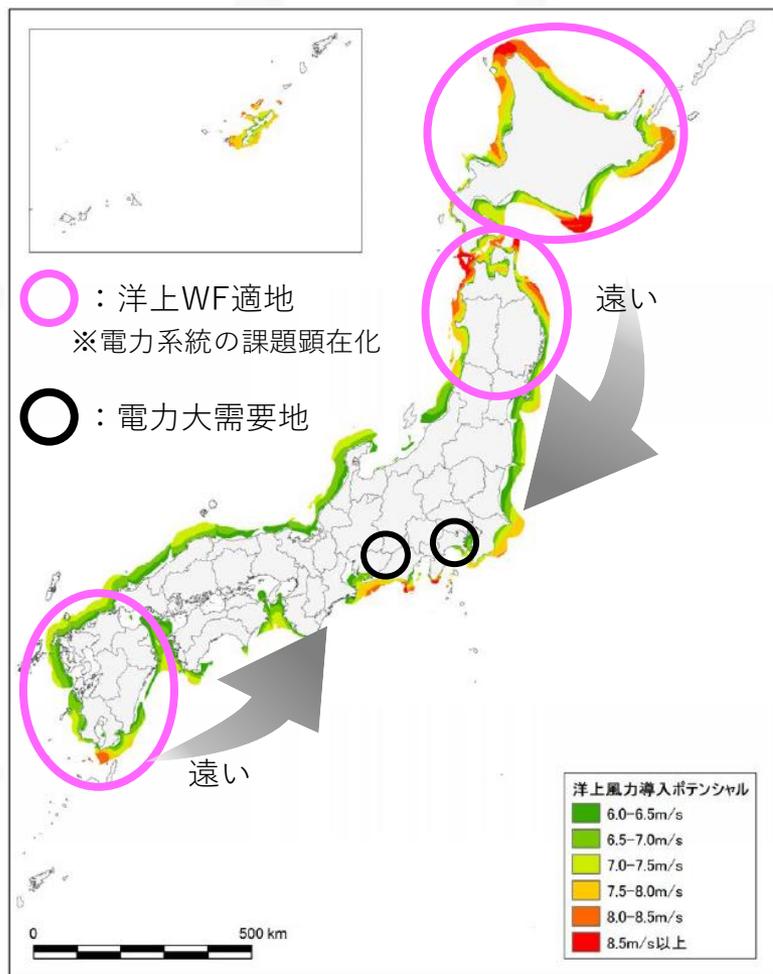


直流送電に関する技術動向

2021年 3月15日

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

NEDO 「次世代洋上直流送電技術開発事業」 (2015～2019) ～日本の洋上風力の特徴～



- 開発不可条件を控除した洋上風力のポテンシャルは約1,380百万kWと推計
- 離岸距離が大きくなると水深が大きくなるため沿岸に帯状に分布
- 電力大需要地から遠方に多くのポテンシャルが存在（北海道・東北・九州で全体の70%）

ポテンシャル推計における開発不可条件

区分	項目	開発不可条件
自然条件	風速区分	6.5m/s未満
	離岸距離	陸地から30km以上
	水深	200m以上

出典：「平成25年度 再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報整備報告書」（環境省、2014年8月）にNEDO追記

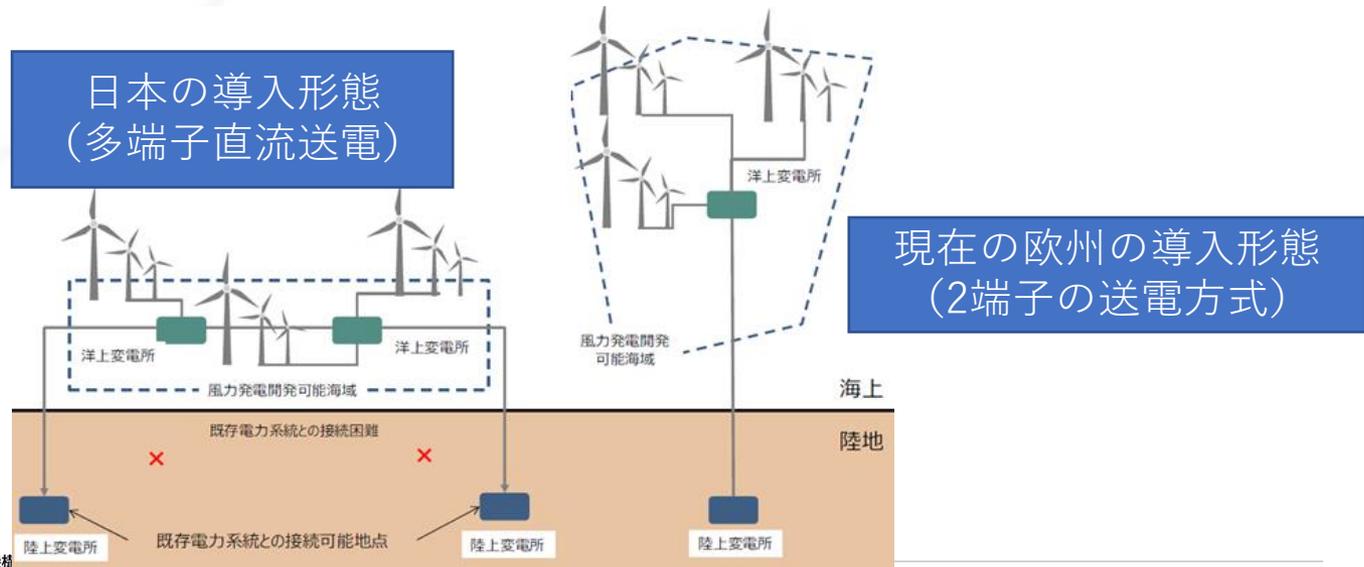
NEDO 「次世代洋上直流送電技術開発事業」(2015～2019) ～多端子直流送電システムの必要性～



- 良好なポテンシャルを持つ北海道、東北、九州において系統の空き容量不足および周波数変動の課題が顕在化し、その課題解消が必要
- 大規模洋上WFを設置する場合、現在の欧州のように遠浅な海域に面的に、かつ遠方に拡大する形態ではなく、沿岸に帯状に洋上WFが順次導入されていくと想定



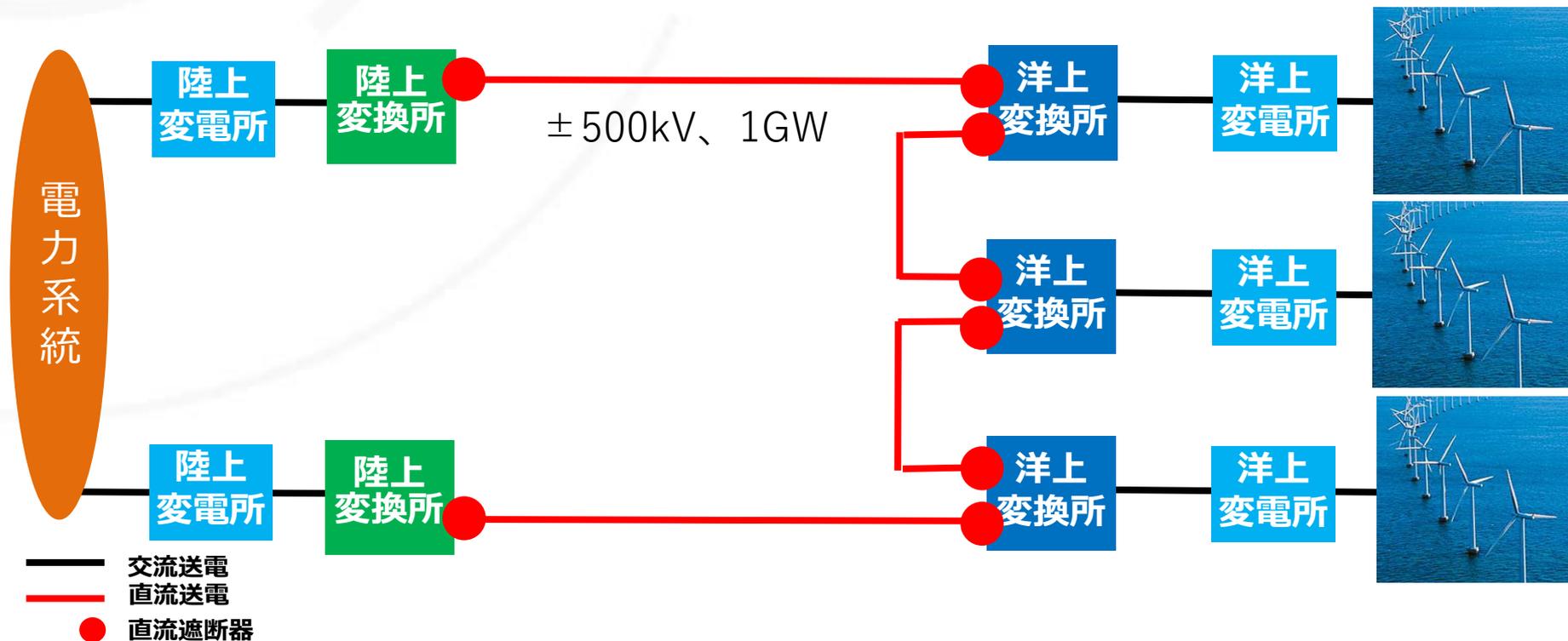
- 複数の洋上WFと既存の比較的大きな電力系統や需要地とを多端子で接続し、効率的に送電することが可能な多端子洋上直流送電システムの開発が必要
- 多端子洋上直流送電システムの導入形態は、順次拡張しながら導入すると想定。従って、複数のメーカーが参入してシステム構築する可能性が高く、マルチベンダ化に向けた取組みが必要



NEDO 「次世代洋上直流送電技術開発事業」 (2015～2019) ～事業目的～



- 高い信頼性を備え、かつ低コストで実現する世界トップクラスの送電容量（電圧 $\pm 500\text{kV}$ 、容量 1GW ）を有し、マルチベンダ化にも対応した多端子直流送電システムと必要な要素技術を開発
- 今後の大規模洋上風力の連系拡大・導入拡大・加速に向けた基盤技術の確立が目的



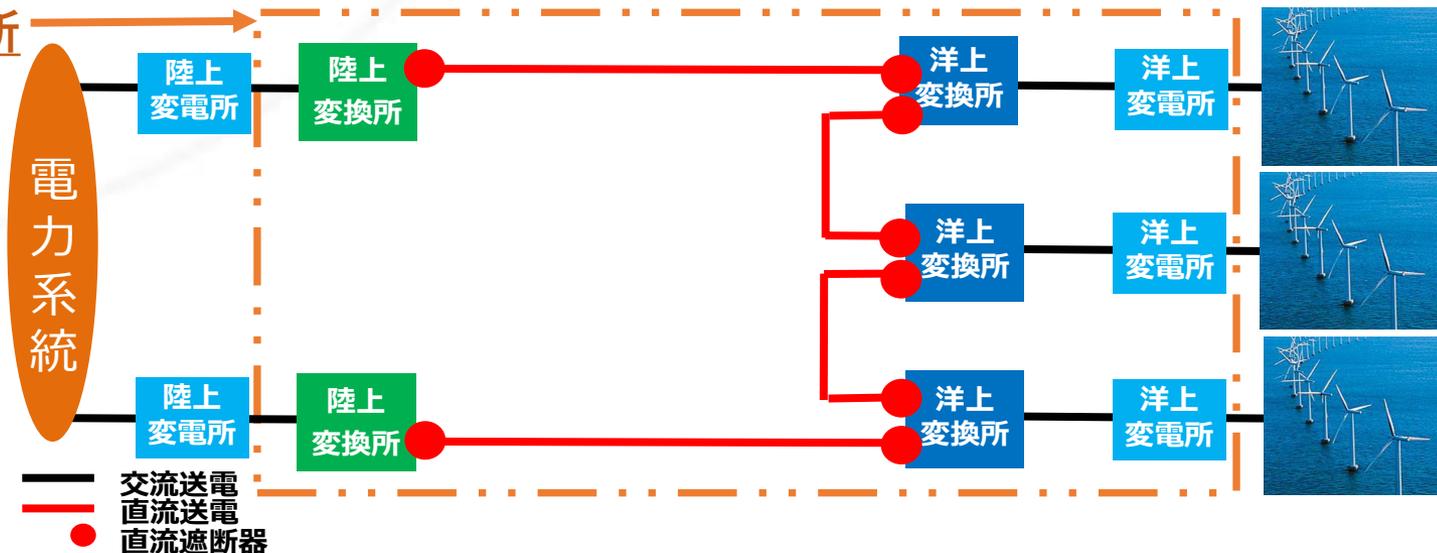
NEDO 「次世代洋上直流送電技術開発事業」 (2015～2019) ～研究開発項目と実施内容～



研究開発項目 I : システム開発

- 多端子直流送電システムの解析モデルを開発し、自励式直流送電システムの制御・保護方式などの確立に向けたモデル解析。
- マルチベンダー化に向けて、多端子直流送電システムの制御において特に重要となる、自励式交直変換器の異メーカーでの相互連携を可能とする標準仕様書の検討。

対象箇所



NEDO「次世代洋上直流送電技術開発事業」(2015～2019) ～システム開発の成果～



- 将来の国内ウインドファーム導入を前提としつつ、5端子直流送電システムの解析モデルを開発。開発した解析モデルでシミュレーションを実施し、電力品質に問題ないことを確認。
- 本事業の実施企業である、日立製作所、東芝エネルギーシステムズにより、異社間の接続を検証した結果をまとめ、洋上直流送電における保護制御の標準仕様書案を作成。
現在、国際電気標準会議 (IEC) と協議中。

標準仕様書 (イメージ)

目次

- 1 目的
- 2 多端子HVDCシステムの構成要素と主な機能
 - 2.1 システム全体
 - 2.2 洋上ウインドファーム、洋上変電所、集電系統
 - 2.3 変換所(端子)
 - 2.4 交直変換器(極)
 - 2.5 上位制御系
- 3 定常状態における制御の案
 - 3.1 多端子HVDCシステムの制御の基本的な考え方
 - 3.2 MMCの制御ブロック線図の概略
 - 3.3 直流系統側のローカル制御特性(PDC-VDC特性)
 - 3.4 各変換所の協調
 - 3.5 上位制御系
- 4 多端子HVDCシステムの運転状態とシーケンス
 - 4.1 回線休止状態
 - 4.2 停止状態
 - 4.3 陸上変換所・直流系統立ち上げ状態
 - 4.4 洋上変換所・洋上ウインドファーム立ち上げ状態
 - 4.5 通常運転状態
 - 4.6 洋上変換所・洋上ウインドファーム立ち下げ状態
 - 4.7 陸上変換所・直流系統立ち下げ状態

- 1 Purpose
- 2 Components and Main Functions of Multi-terminal HVDC System
 - 2.1 Entire System
 - 2.2 Offshore Wind Farm, Offshore Substation, and Power Collection System
 - 2.3 Converter Station (Terminal)
 - 2.4 AC-DC Converter (Pole)
 - 2.5 High-order Control System
- 3 Stationary-state Control Plan
 - 3.1 Basic Principle of Multi-terminal HVDC System Control
 - 3.2 MMC Control Block Diagram
 - 3.3 DC System Local Control Characteristic (PDC-VDC Characteristic)
 - 3.4 Collaboration of Converter Stations
 - 3.5 High-order Control System

研究開発項目Ⅱ：要素技術開発

- 低コストで高信頼性を兼ね備えた多端子洋上直流送電システムを実現する上で必要となる①直流遮断器、そして、マルチベンダに対応できる②ケーブルジョイントや、従来技術よりコスト低減が見込める③敷設工法、④洋上プラットフォーム基礎などの新技術を開発する。

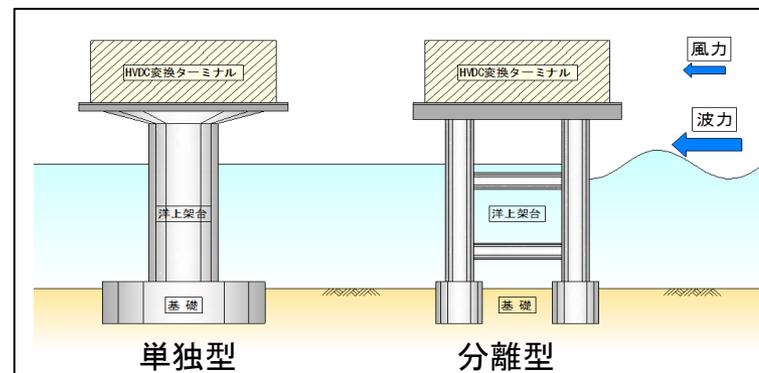
成 果

①直流遮断器：常時発生する損失を最小限とすることとともに、世界最高レベルの遮断速度（3m秒）を達成。

②、③ケーブル関係：異社間ジョイン及び低コスト化工法として多条同時敷設工法や防護管自動取り付け工法等を開発。

④洋上プラットフォーム基礎：

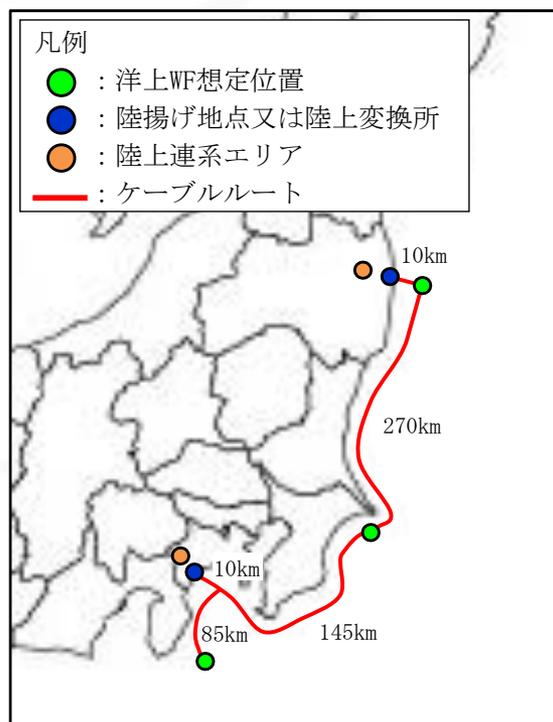
日本の特徴である地震や波浪による影響を評価の上、各種基礎構造の比較を行いサクシオン形状（分離型）のコスト・性能面の優位性を確認



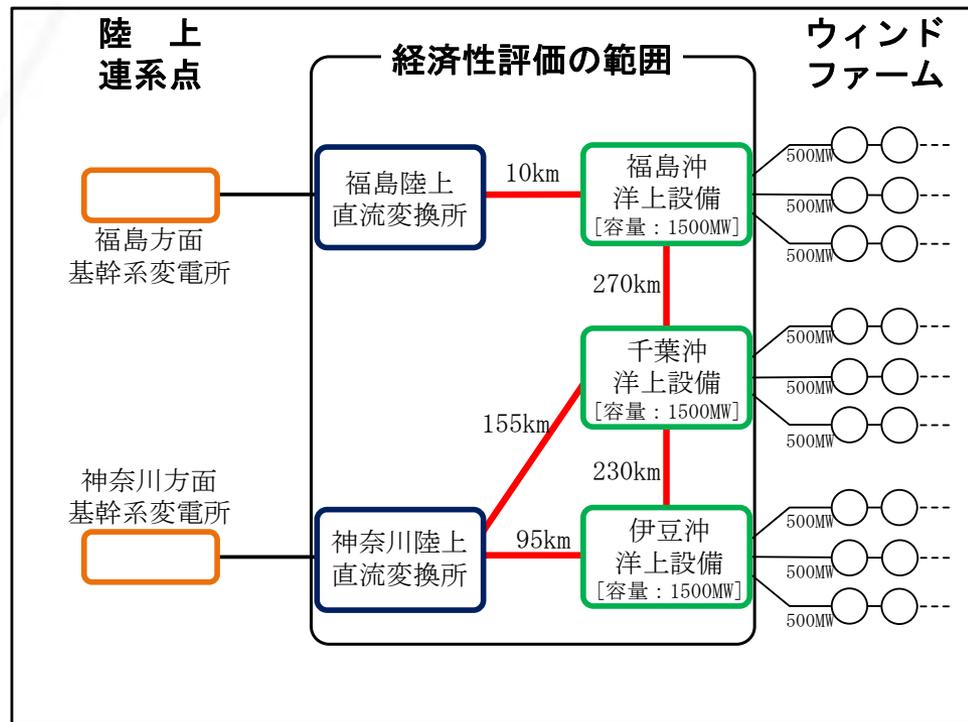
NEDO 「次世代洋上直流送電技術開発事業」 (2015～2019) ～全体の成果～



- 要素技術開発の成果及び、システム開発で検討した洋上ウインドファームの設置個所や送電ルート等を用いて作成したモデルの経済性評価を実施。
- 交流送電で構築した場合に比べコスト削減割合は29%。



想定した洋上系統のイメージ図

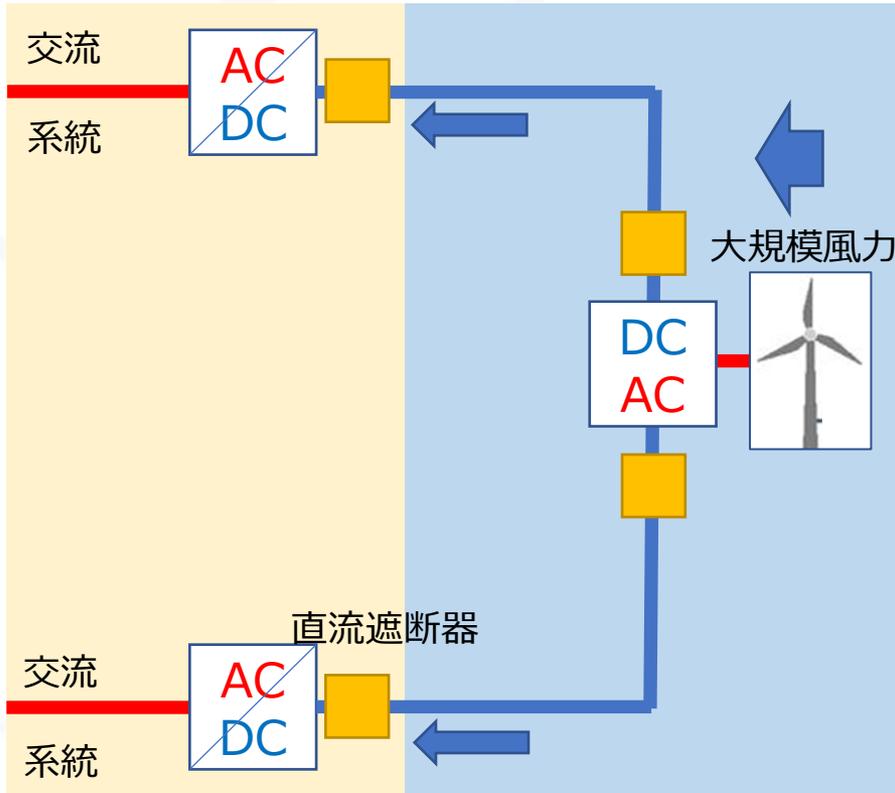


経済評価の範囲

NEDO 「多用途多端子直流送電システムの基盤技術開発」 (2020~2023) ~多用途イメージ~

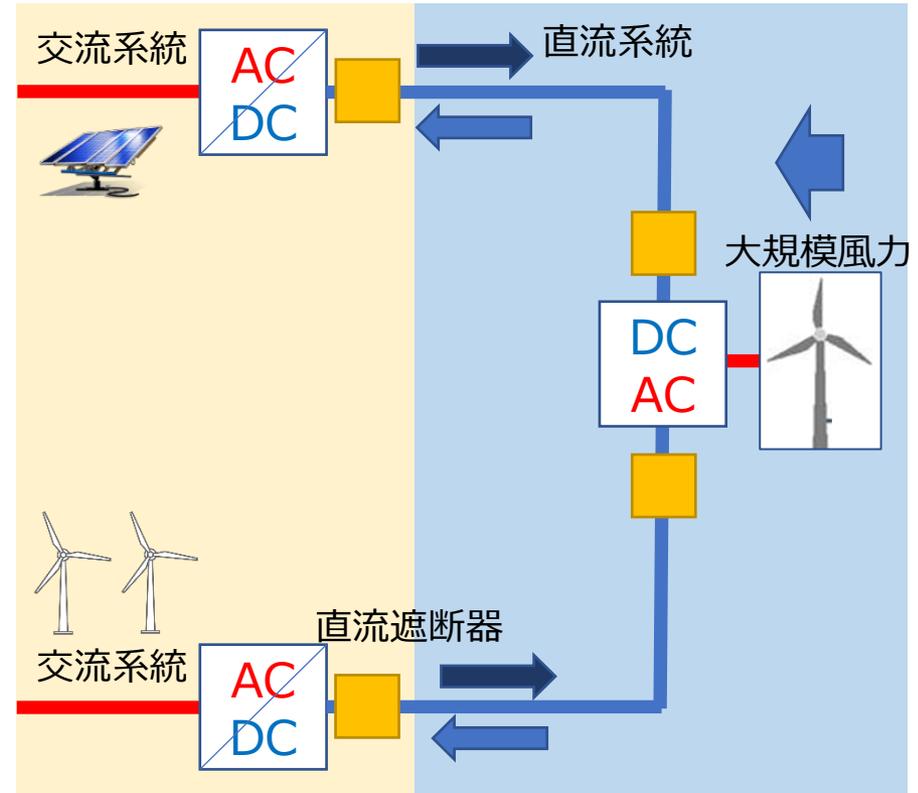


過去事業の多端子HVDC



- ・大規模洋上風力発電のための長距離多端子送電

多用途多端子HVDC



- ・大規模洋上風力発電のための長距離多端子送電
- ・遠隔交流系統の連系
→平常時、非常時の電力融通(再エネ増、レジリエンス強化)

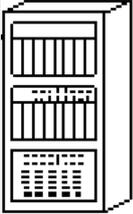
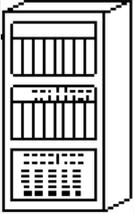
NEDO 「多用途多端子直流送電システムの基盤技術開発」 (2020～2023) ～HILシミュレーションイメージ～



実証は高額（1000億円規模）⇒機能毎に小型の実機を開発し、デジタルシミュレーションだけでは再現できない挙動を確認

Hardware in the loop(HIL)シミュレーション：主に制御部を実機で開発・検証。

コスト高だが挙動が精密→

	デジタルシミュレーション	HILシミュレーション	実証(参考)
	開発対象：制御＋動作	開発対象：制御	全体
実機器	計算機のみ デジタルシミュレータ 	計算機＋実機（制御部） デジタルシミュレータ  <div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">変換器 制御ユニット</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">事故 検出装置</div> </div>	実機主体（制御部＋動作部） 変換器本体 直流遮断器   <div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">変換器 制御ユニット</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">事故 検出装置</div> <div style="background-color: #4CAF50; color: white; padding: 5px; margin-top: 5px;">システムモデル</div> </div>
	仮想空間 <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-right: 10px;">変換器 制御ユニット</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-right: 10px;">事故 検出装置</div> </div>   <div style="background-color: #4CAF50; color: white; padding: 5px; margin-top: 10px; width: fit-content;">システムモデル</div>	変換器本体 直流遮断器   <div style="background-color: #4CAF50; color: white; padding: 5px; margin-top: 10px; width: fit-content;">システムモデル</div>	
	過去事業	本事業で実施	今後

NEDO「多用途多端子直流送電システムの基盤技術開発」 (2020～2023) ～各開発の最終目標～



研究開発要素	目標値
多用途多端子直流送電システム 一部実機を用いた風力送電なら びに地域間連系に貢献可能な 多端子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、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。
多端子直流送電用保護装置 (事故検出装置) 高速遮断可能な実機の開発	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。
直流深海ケーブル 低コストで安全な深海ケーブル及 びその敷設工法等の開発	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。

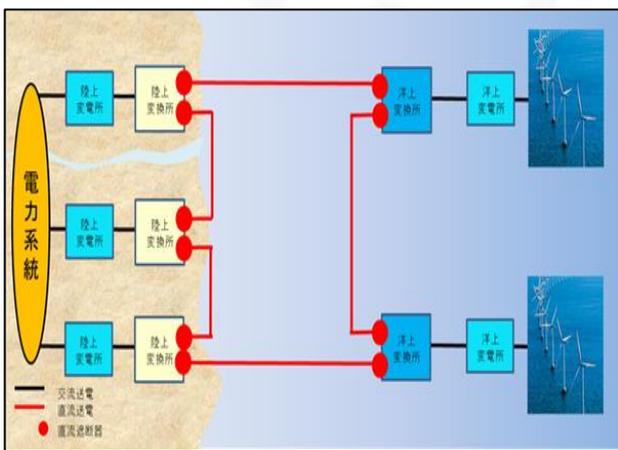
海外の動向①

※比較表の赤字は共通項目

次世代洋上直流送電システム開発事業 (多端子洋上直流システムの開発)

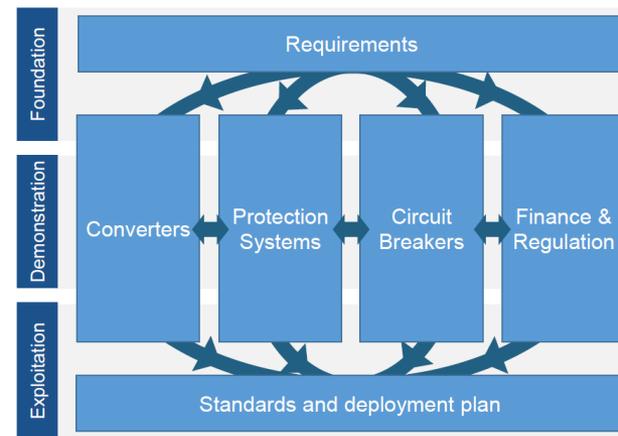
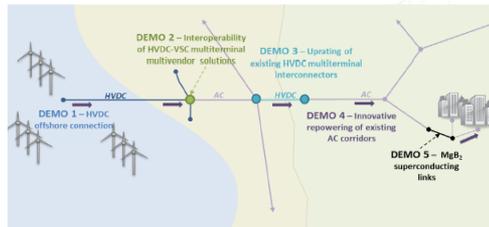
Best Paths (洋上風力から陸上への送電システム開発)

PROMOTiON (メッシュ洋上システムのシステム開発)



LARGE SCALE DEMONSTRATIONS

1. HVDC in offshore wind farms and offshore interconnections
2. HVDC-VSC multivendor interoperability
3. Upgrading multiterminal HVDC links
4. Innovative repowering of AC corridors
5. DC Superconducting cable

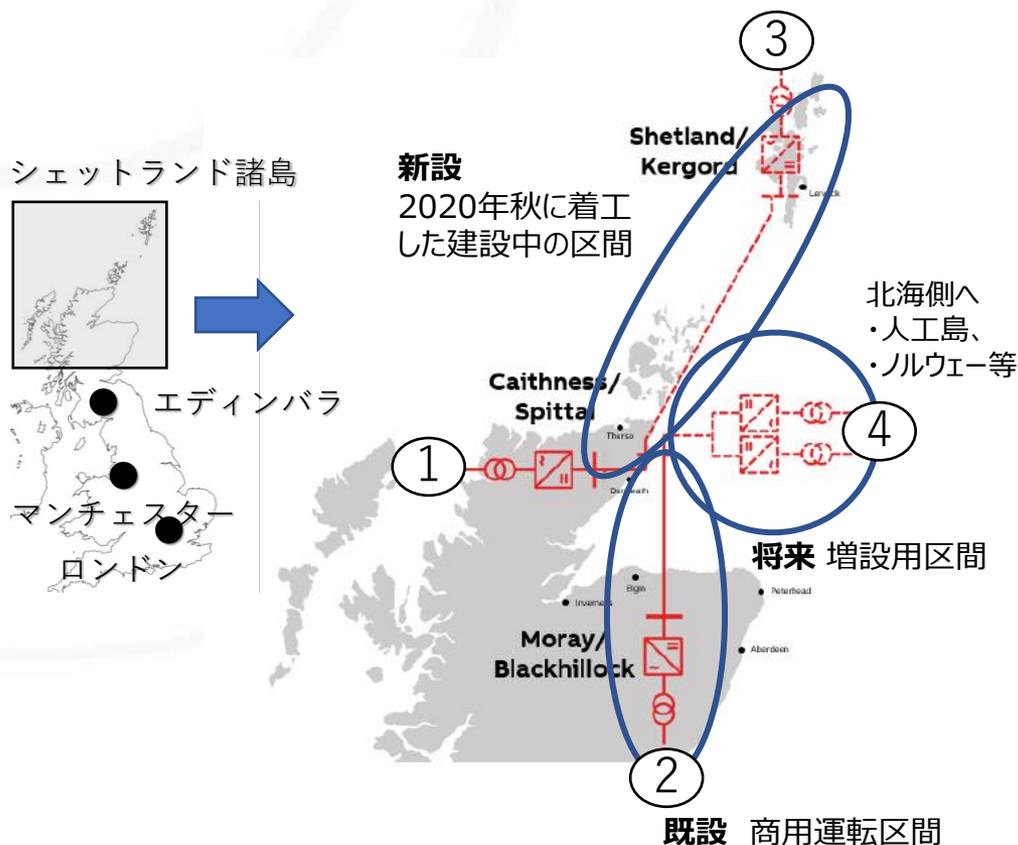


- マルチベンダ化を可能とするシステム制御手法、保護方式の開発、事故検出方法の検討
- マルチベンダ化に向けた自励式交直変換器のインターフェイスの開発。
- 直流遮断器の開発。
- DC525kVに対応した海底ケーブルに関する中間ジョイント、異径ジョイント、異社間連系分岐ジョイントの開発
- 海底ケーブル敷設工法の高速度開発
- 大水深に適用可能な洋上PF基礎（スカートサクシオン工法）の開発

- 洋上WF接続したマルチベンダ、多端子HVDCシステムにおける潮流制御などをHIL用いて検討。
- マルチベンダHVDC-VSCシステムにおける相互運用に向けた取組。
- 革新的なAC変換技術の開発
- DC超電導ケーブルの開発。

- メッシュ洋上システムのシステム要求事項の検討
- 直流システムの保護手法の開発（異メーカ連系、直流遮断器含む）
- 直流遮断器、試験方法の開発
- 国際連系、洋上送電系統
- HVDCシステム、HVDCシステムが接続された洋上風力発電設備の標準化
- 将来の欧州の洋上システムの配備計画の立案

日立ABBによる最大5端子となる多端子HVDC送電システム



■ HVDCシステムの主な仕様

- ・変換器方式：自励式 (VSC)
- ・回線方式：対称双極 (公称電圧DC320kV)

■ 既設：Caithness～Moray連系線

- ・Caithness Moray 送電路：
海底ケーブル2#113km +
地下XLPEケーブル2×20 km+ 2×28 km
- ・Spittal 変換所：風力発電の供給
800 MW Rectifier /
720 MW Inverter 263 Mvar
- ・Blackhillock 変換所：需要地供給センター

■ 新設：シットランド島～

スコットランド北部間連系

- ・Shetland HVDC 送電路：
地下・海底ケーブル (257km) 総長約270 km
- ・Kergord 変換所，風力発電の供給：
600 MW Rectifier /
540 MW Inverter 197 Mvar
- ・直流連系・切替所：
2入力，1出力，将来拡張用 (1回線 2端子)

(参考) 中国の動向

中国製造2025では、10の重点分野が定められ、そのうちの 하나가電力設備（発電設備、送配電設備など）となっている。中国製造2025の重点分野ロードマップによると、超高压送変電技術では2020年までに世界レベル、2025年までに世界先進レベルにすることを目標としている。

中国製造2025重点分野ロードマップにおける送配電分野の主要な目標

	2020年	2025年
送変電産業の生産高 設備の基幹部品の自主化率 送変電プラントの輸出割合 超高压送変電技術	2.2兆元（33兆円）に達する 80%以上に達する 20%を超える 世界をリードし、世界強国の仲間入り	3兆元（45兆円）に達する 95%以上に達する 25%を超える 国際先進水準に達する

フレキシブル直流送変電機器として、

「±800kV/5,000MW超超高压フレキシブル直流送電の交直変換バルブ」

「500kV/≤25kA、800kV/≤25kA高压直流遮断器」

「±100～±800kV直流変圧器」

「直流送電網及び多端子直流送電の制御・保護」

「±500kV直流送電ケーブル及び付属部品」などのロードマップが示されている。