

NEDO再生可能エネルギー分野成果報告会2025 プログラムNo.1-1

多用途多端子直流送電システムの基盤技術開発 /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

発表：2025年7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

再生可能エネルギー部 系統連系ユニット ユニット長 中尾 光洋

問い合わせ先 E-mail: [powergrid\[@\]nedo.go.jp](mailto:powergrid[@]nedo.go.jp)

～本日のプログラム～

【はじめに】

- “系統連系”ってなに？
- 現在NEDOで取り組んでいる系統連系における課題とは？

【個別プロジェクト報告】

<AM>

- 多用途多端子高圧直流（HVDC）技術開発
- 再生可能エネルギーの主力電源化に向けた次々世代電力ネットワーク安定化技術開発（STREAM）

<PM>

- 電力系統の混雑緩和のための分散型エネルギーリソース制御技術開発（FLEX DERプロジェクト）
- 電源の統合コスト低減に向けた電力システムの柔軟性確保・最適化のための技術開発事業（日本版コネクト&マネージ2.0）

本プレゼン範囲

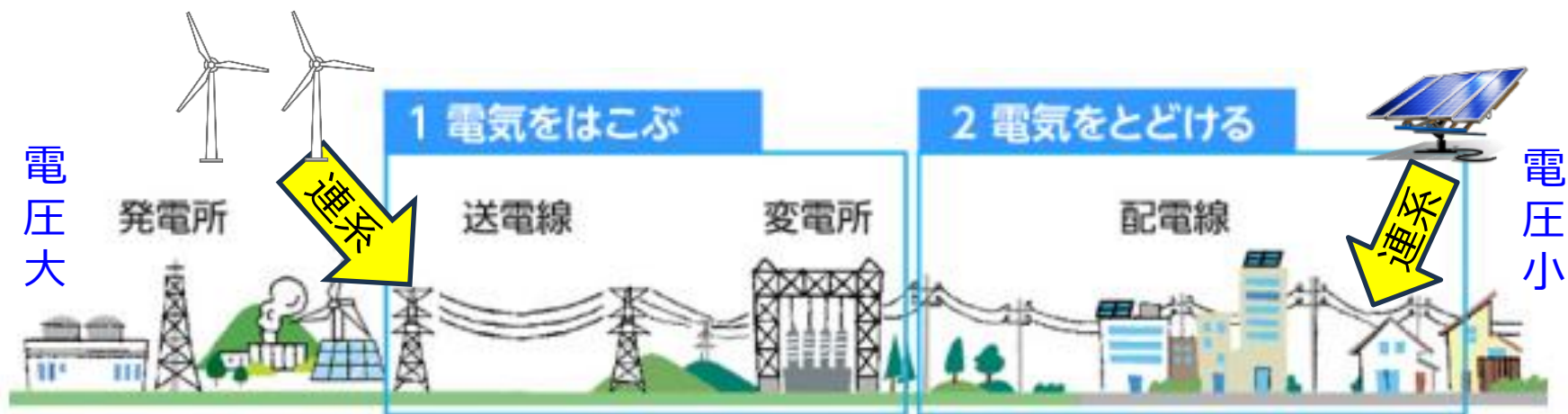
後ほど

系統連系ってなに？

「系統連系とは」とインターネットを検索してみると・・・

「電力系統に再生可能エネルギー等自家用発電設備を接続すること」

例) 住宅屋根上の太陽光パネル、沿岸や山上の風車などにより発電された電気は、電力系統と連系（接続）され、送配電事業者と電気の授受が行われています。

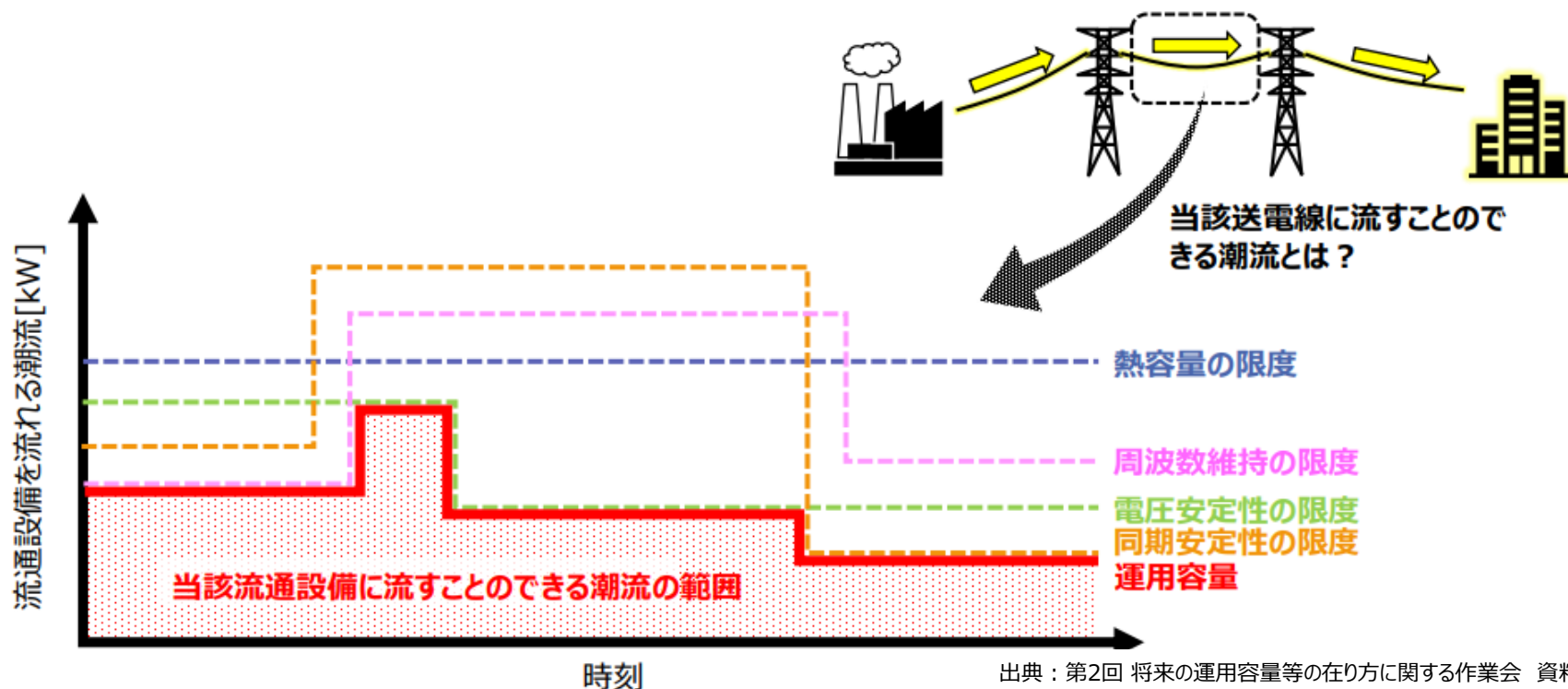


出典：九州電力送配電HP を一部NEDO加工
<https://www.kyuden.co.jp/td/supply/effort.html>

電力系統はこれまで各電力会社のエリア単位に大規模な発電所（左）から需要（右）まで効率的に流れるように構成していた。昨今の再生可能エネルギーなど点在する電源（分散型電源）の拡大局面において、いくつかの課題も出てきている

系統連系における課題とは？（１／３）

- 発電所等で発電された電力（以下、潮流）は、電力系統を介して、需要家（以下、負荷）へ送電される。
- 広域機関や一般送配電事業者では、**通常想定し得る故障**が発生した場合においても、電力系統を**安定的に運用する（設備故障時にも供給・発電支障や設備寿命への影響を最小限に留める）**ために、**熱容量**、**同期安定性**、**電圧安定性**、**周波数維持**それぞれの制約要因をすべて満たす限界潮流値を**運用容量**として定めている。



出典：第2回 将来の運用容量等の在り方に関する作業会 資料 5
https://www.occto.or.jp/iinkai/chouseiryoku/jukyuchousei/2024/files/unyouyouryousagyokai_2_05.pdf

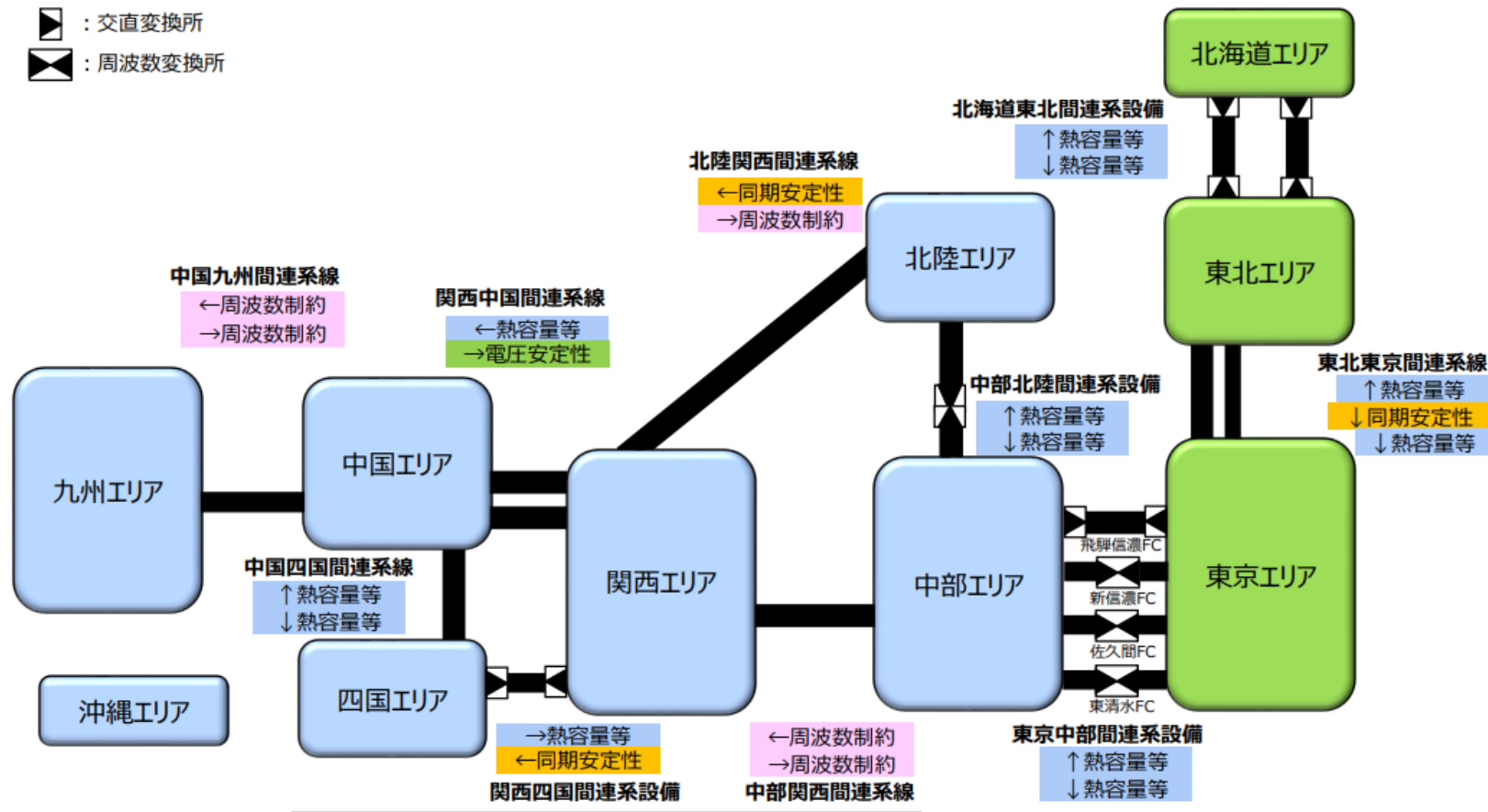
電力系統を適切に維持するには、熱容量、同期安定性、電圧安定性、周波数維持のそれぞれを満たしておく必要がある。分散型電源の拡大等によりこれらの制約が顕在化。需給バランス維持のための再生可能エネルギーの出力抑制は各地で発生している。

系統連系における課題とは？（２／３）

- 各地域間連系線の運用容量決定に関わる主な制約要因は下記の通りであり、全体の6割弱が熱容量等制約、また、交流1ルート連系箇所については周波数維持制約となっている箇所が多い。

◻ : 交直変換所

◼ : 周波数変換所

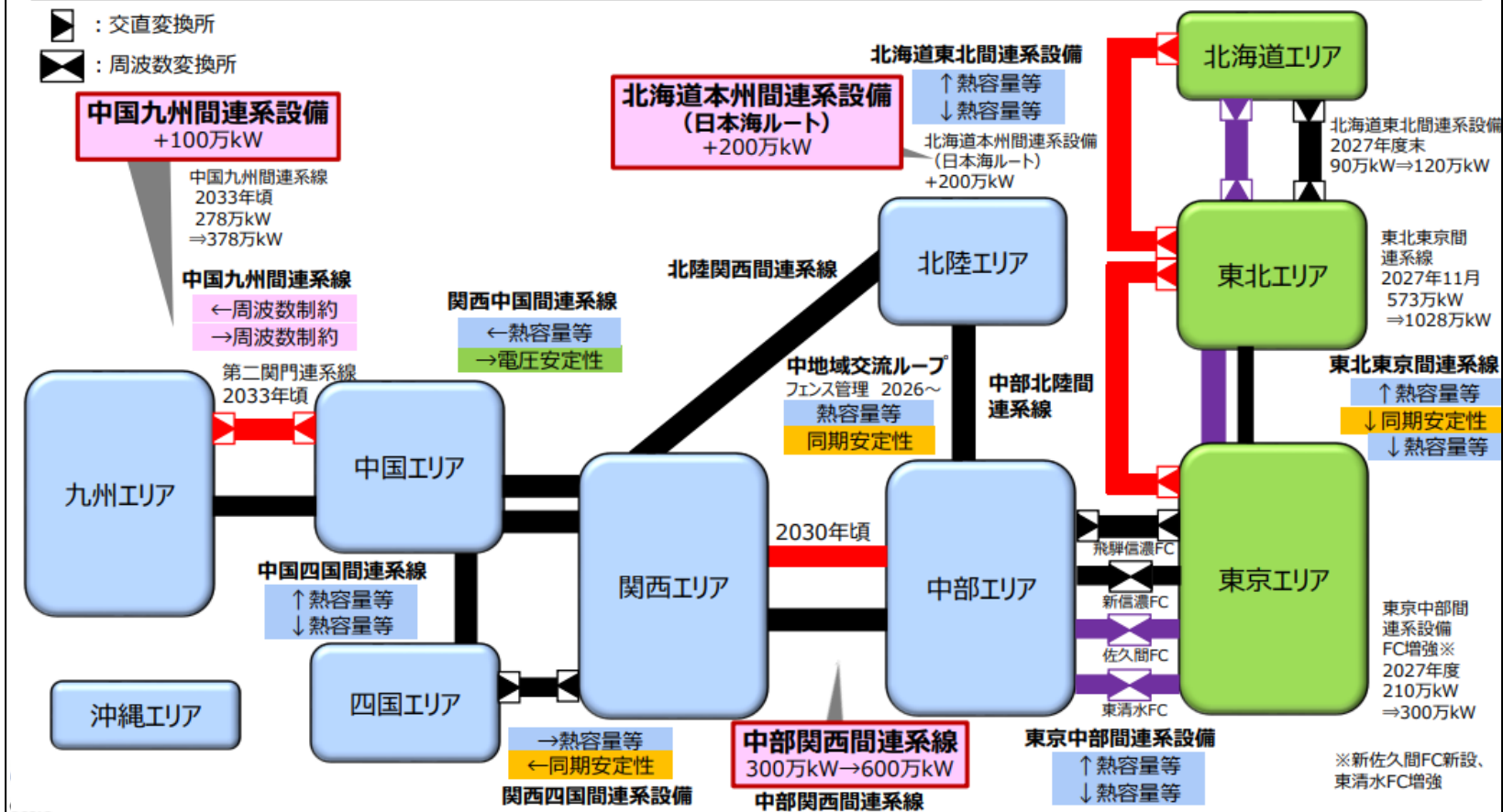


出典：第2回 将来の運用容量等の在り方に関する作業会 資料 5
https://www.occto.or.jp/iinkai/chouseiryoku/jukyuchousei/2024/files/unyouyouryousagyokai_2_05.pdf

国内の基幹電力系統における系統制約は上図のとおりであり、更に各エリア地内の送電・配電系統においても同様の系統制約は発生している。

系統連系における課題とは？（3 / 3）

- また、将来的な（設備増強後の）制約要因は下図の通りであり、交流1ルート連系箇所^①の減少により、**周波数維持制約**が決定要因となる箇所は中国九州間連系線のみとなる。



出典：第2回 将来の運用容量等の在り方に関する作業会 資料5
https://www.occto.or.jp/iinkai/chouseiryoku/jukyuchousei/2024/files/unyoyouryousagyoukai_2_05.pdf

系統制約に対し、設備の増強（基幹系統・エリア内系統）や、運用ルール変更など各種対策を講じており、N E D O事業でも対応する技術開発を行っている。

～本日のプログラム～

【はじめに】

- “系統連系”ってなに？
- 現在NEDOで取り組んでいる系統連系における課題とは？

【個別プロジェクト報告】

<AM>

- **多用途多端子高圧直流（HVDC）技術開発**
- 再生可能エネルギーの主力電源化に向けた次々世代電力ネットワーク安定化技術開発（STREAM）

<PM>

- 電力系統の混雑緩和のための分散型エネルギーリソース制御技術開発（FLEX DERプロジェクト）
- 電源の統合コスト低減に向けた電力システムの柔軟性確保・最適化のための技術開発事業（日本版コネクト＆マネージ2.0）

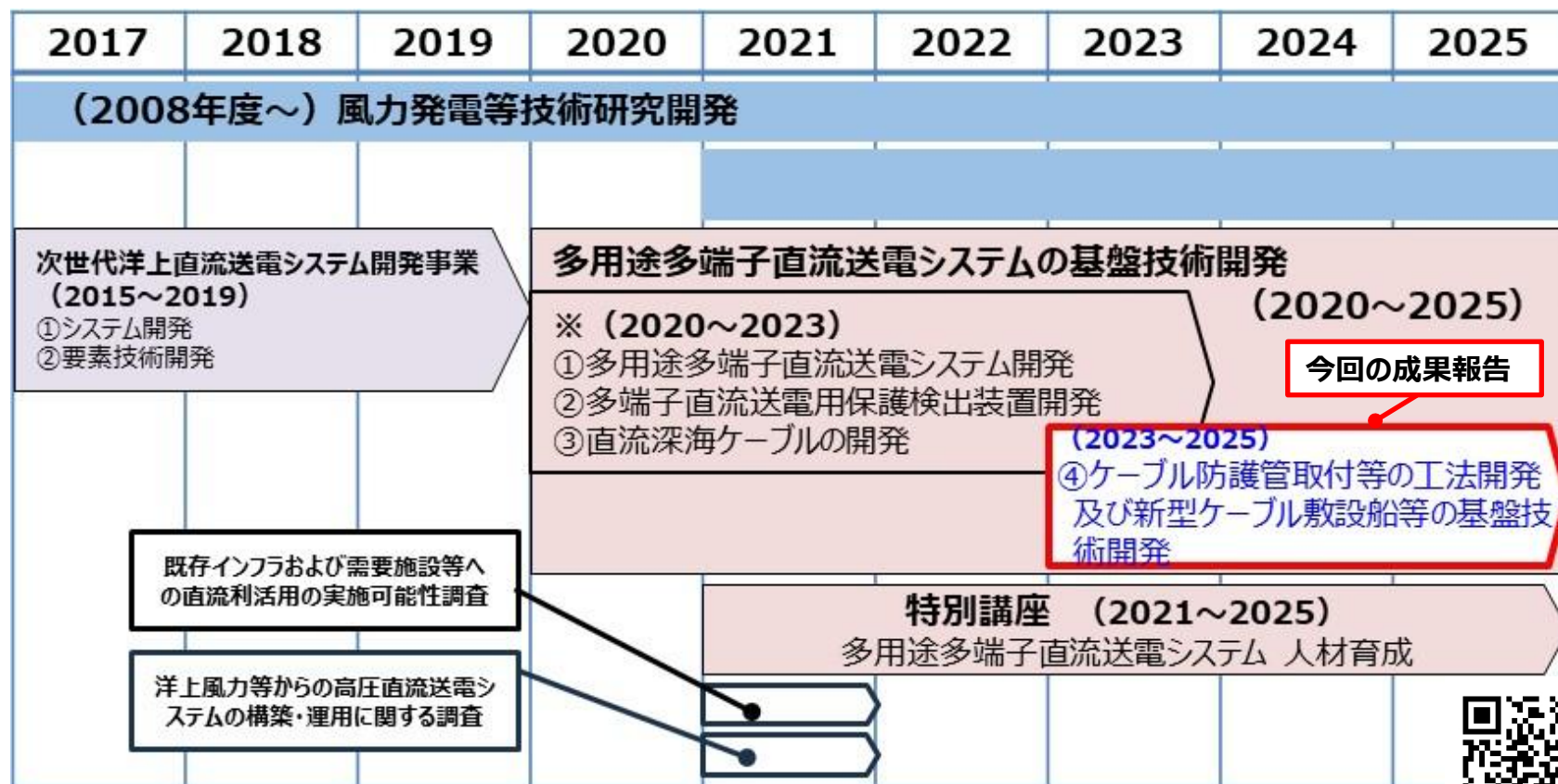
本プレゼン範囲

後ほど

事業概要

・プロジェクトの目的：

政府目標である2040年ごろ再生可能エネルギー 4 ～ 5 割導入に向け、**再エネ導入拡大**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）**の向上のため、**多用途多端子高圧直流（HVDC）技術**を開発する。



※'23年度終了分
成果はこちら→

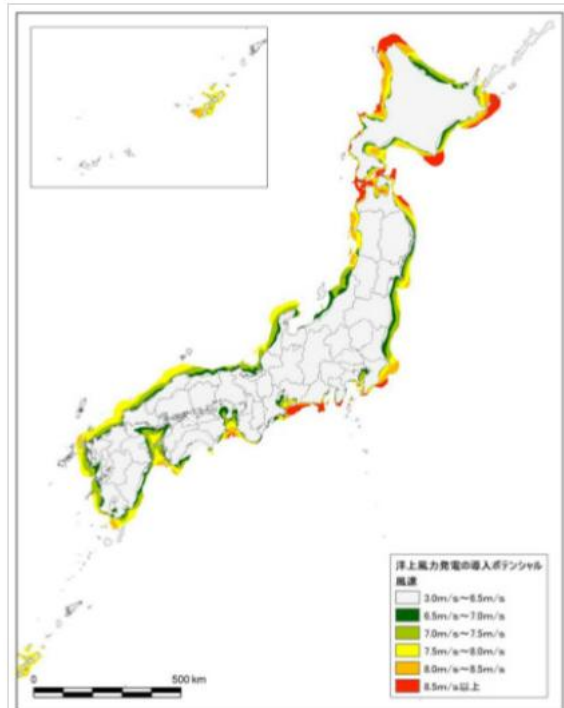


浮体式洋上風力普及に向けての課題

再生可能エネルギー主力電源化の「切り札」とされる浮体式洋上風力発電適地の特徴

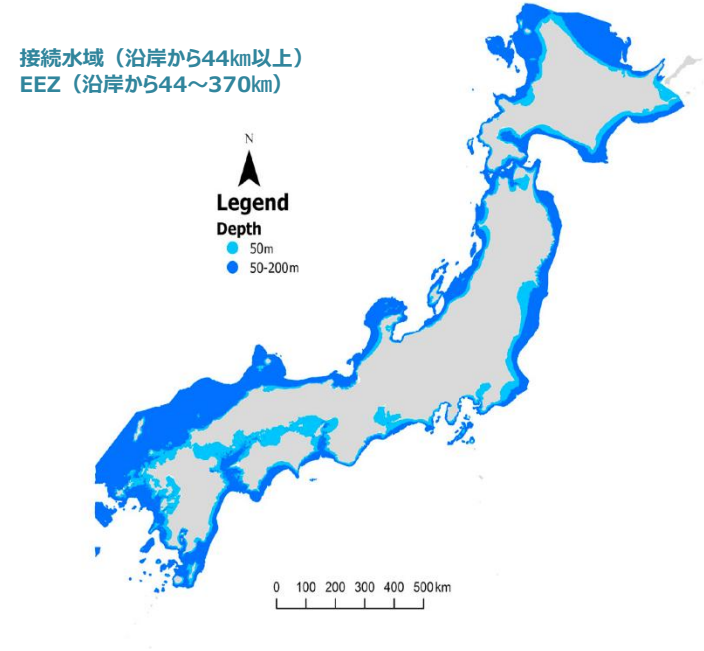
- ・接続水域やEEZに多く存在し、沿岸部からは距離があり水深も深い
 - ・電力の大消費地からは遠い
- 長距離海底送電が必要となる

① 洋上風力導入ポテンシャルの分布状況 沿岸から30km以内



出典：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

② 浮体式洋上風力導入ポテンシャルの分布状況 水深50~200m



出典：Bardenhagen, Y.; Nakata, T. Regional Spatial Analysis of the Offshore Wind Potential in Japan. *Energies* **2020**, *13*, 6303. <https://doi.org/10.3390/en13236303>

浮体式洋上風力発電向けのHVDC送電システムの必要性

第7次 エネルギー基本計画の再生可能エネルギー割合2040年 4 ～ 5 割程度の達成（洋上風力30～45 GW）のためには、ケーブル長（海底＋陸上）が概ね50km以上で直流が有利となる**HVDC送電システムが必要不可欠**

③直流送電方式のメリット

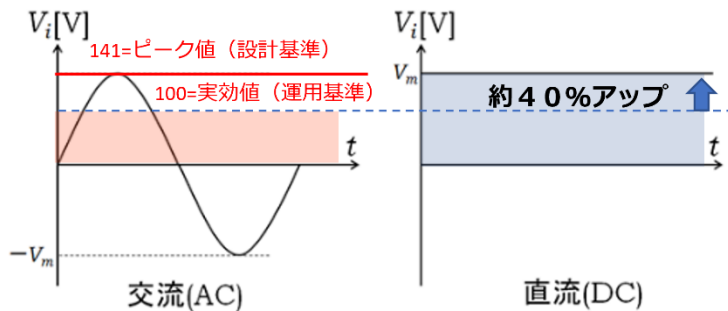
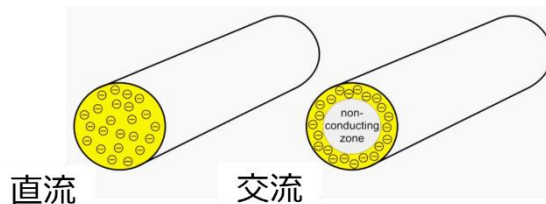
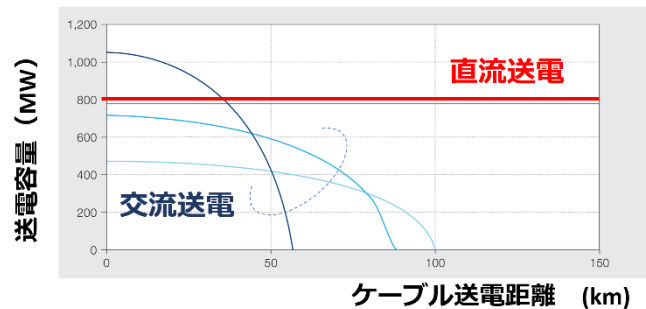
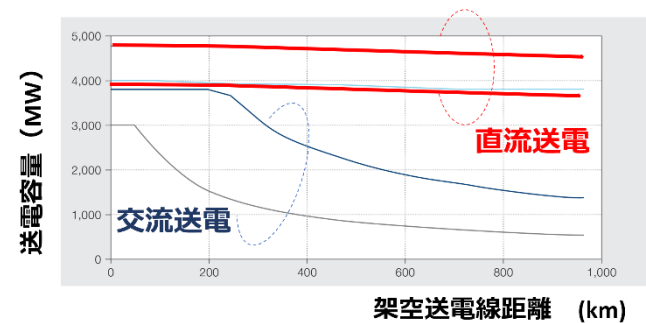


図 交流と直流の波形
同じ絶縁耐圧で40%容量をアップ可能



表皮効果により、交流ケーブル導体の直径は制限される。細いケーブルは太いケーブルよりも抵抗値が高くなり、その結果、表皮効果が電力輸送効率に悪影響を及ぼす。直流ケーブルは表皮効果の影響を受けない。

図 表皮効果

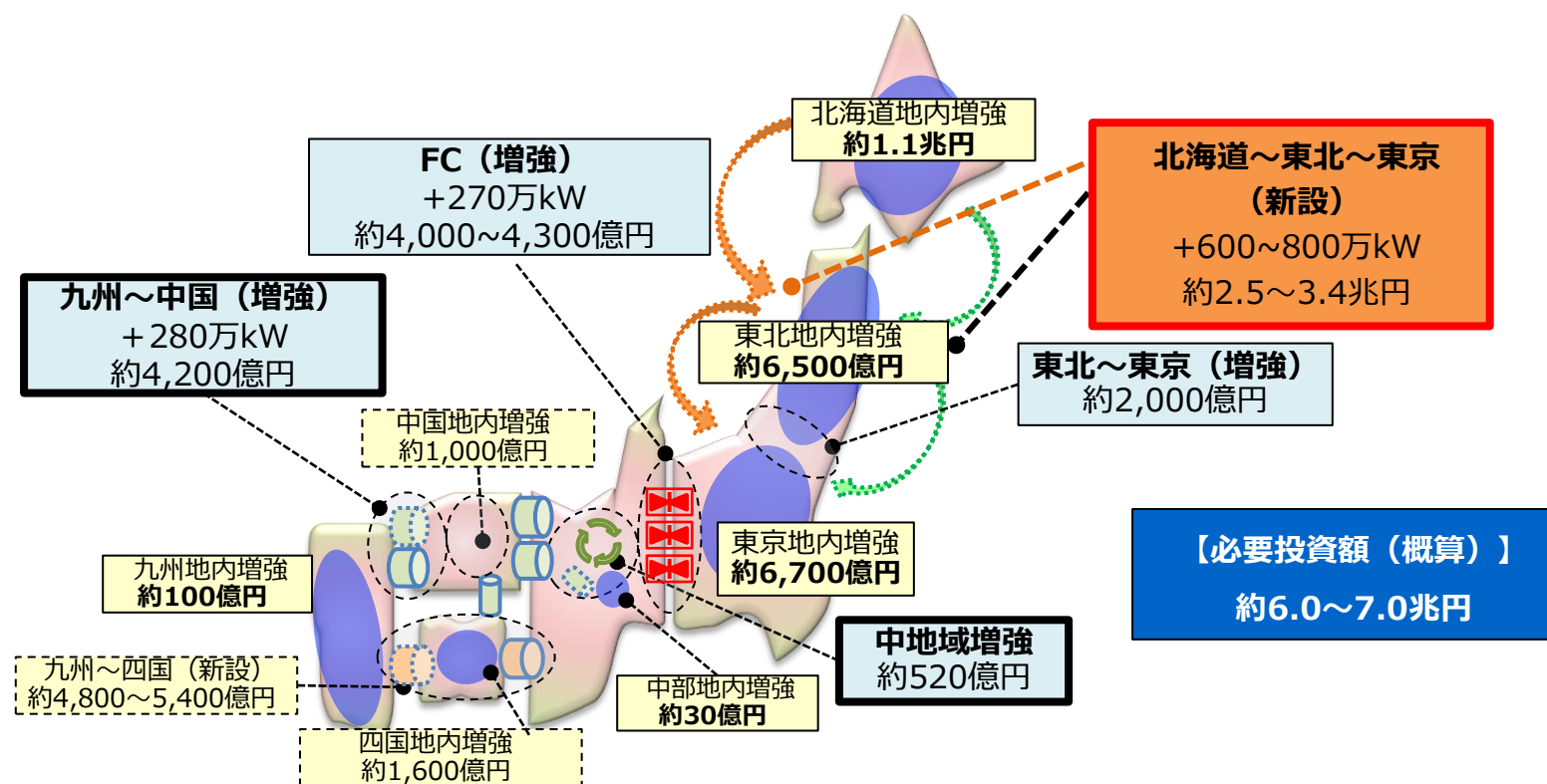


- 交流：架空ではインダクタンス（インピーダンス）により距離に反比例して送電容量が低下。ケーブルではキャパシタンスのため送電長の限界有。
- 直流：架空、ケーブルとも抵抗分の電圧降下（ジュール損）のみ。

出典：ABB Review, Special Report 60 years of HVDC, July 2014. ISSN: 1013-3119

地域間連系線の整備：「マスタープラン」の概要

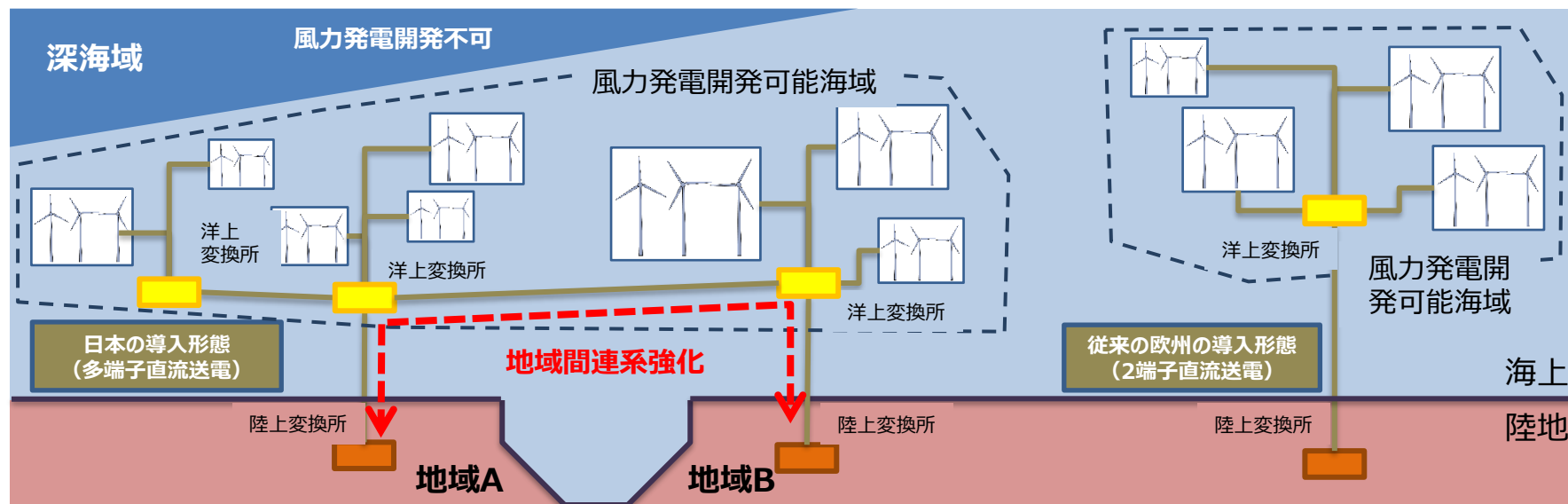
再エネ大量導入とレジリエンス強化のため、電力広域的運営推進機関において、2050年カーボンニュートラルも見据えた、広域連系系統のマスタープランを2023年3月29日に策定・公表



(出所) 広域系統長期方針 (広域連系系統のマスタープラン) (電力広域的運営推進機関2023年3月29日策定) のうちベースシナリオより作成

多用途多端子HVDC送電システムの導入形態例

- 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WFが順次導入されていくと想定【多端子化】
- 電力広域的運営推進機関の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、さらには離島供給のニーズもある【多用途化】
- 欧州においては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



参考 外部環境の状況（1）

類似する海外の研究イノベーション プロジェクト・事業化

【欧州】

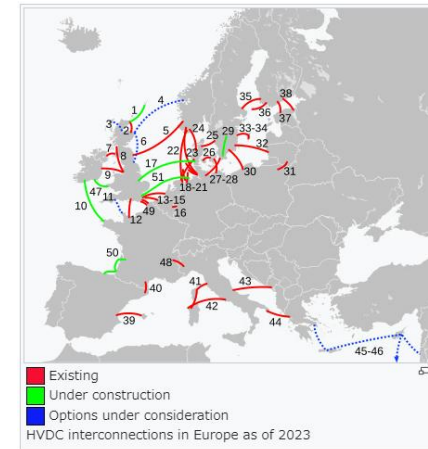
- ・洋上風力送電や地域間連系に2端子間のHVDCが導入進行中。
- ・洋上風力の更なる拡大に向けて多端子HVDCシステム、マルチベンダーによるインターオペラビリティを研究開発中。

多端子HVDC研究プロジェクト名			
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。

出典：BNEF “2018-3-6-North Sea Wind Hubs Would Save \$100B by 2050_ Q&A”

出典：
<https://www.tennet.eu/news/detail/three-tsos-sign-agreement-on-north-sea-wind-power-hub/>



https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_HVDC_projects

【中国】

- ・張北など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システムを開発、順次実用化。
- ・欧州に続き、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+/-400kV、容量1.1 GW、海底ケーブル長100kmの運用を開始、さらに射陽洋上風力発電（江蘇省 射陽県）公称電圧+/-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。

⇒ 近年、世界的に多端子直流送電技術の開発が活発

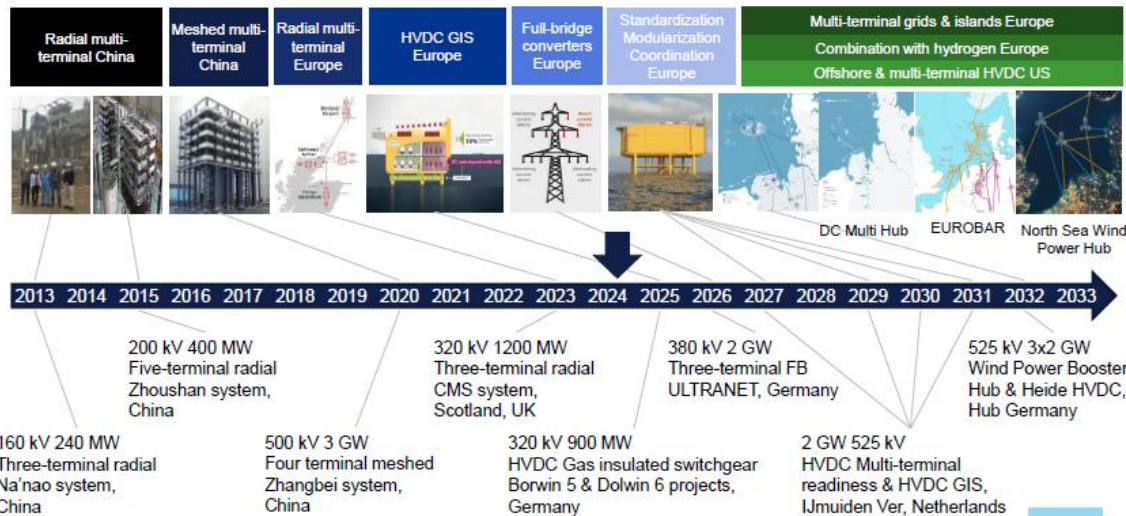
参考 外部環境の状況（2）

類似する海外の研究イノベーション プロジェクト・事業化

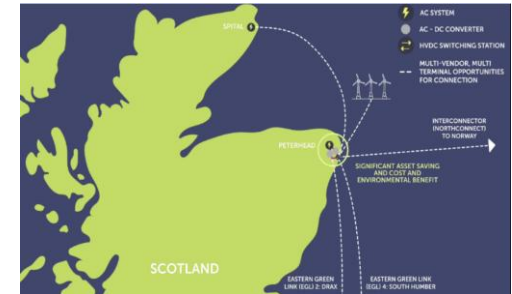
欧州の事業化動向

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、欧州を中心に多端子HVDCの導入が増えていく。

Future developments



出典：DNV, "Multi-terminal HVDC Grid: Current status and next steps", 01 May 2024.



Project Aquila (英国北部・北海におけるHVDC多端子化)

出典：The National HVDC Centre,
<https://www.hvdccentre.com/our-projects/aquila-interoperability-package/>



基幹系統へのHVDC適用

イタリア TSO Terna社系統整備計画

出典：2023 THE HYPERGRID PROJECT AND DEVELOPMENT REQUIREMENTS.

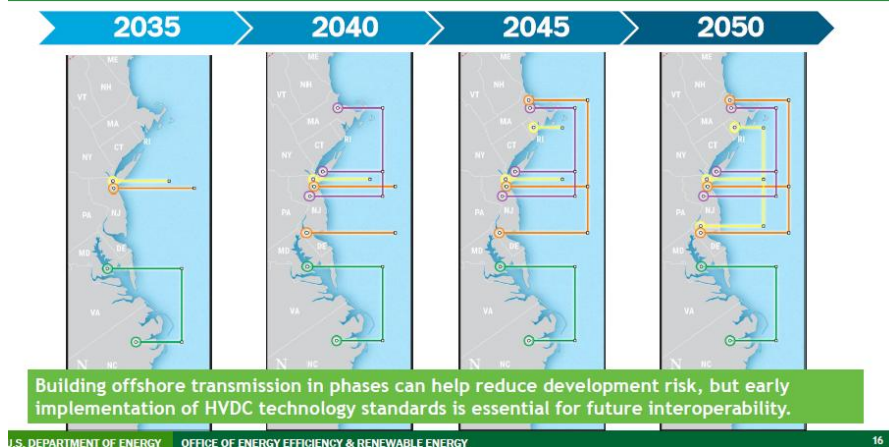
参考 外部環境の状況（3）

類似する海外の研究イノベーション プロジェクト・事業化

米国の事業化動向

米国においても、例えば、東海岸の洋上風力発電（2030年 30 GW, 2050年110 GW）の送電用として、2050年までに多端子HVDCの導入・拡張が計画されている。

Transition from Radial 2030 to Interregional 2050



出典：J. Fu, G. Brinkman, Wind Energy Technologies Office, DOE, Atlantic Offshore Wind Transmission Study, May 3, 2024.

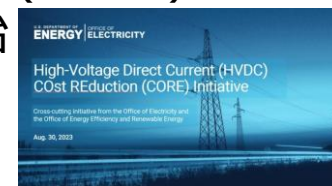
洋上風力の発電を放射状（ラジアル：2端子構成）に集電するよりもNW化（＝多端子化）した方が安価となる旨計算されている。試算された費用便益比（Cost-Benefit Ratio）は、 $B/C=2.0\sim 3.0$ 程度。



出典：J. Fu, G. Brinkman, Wind Energy Technologies Office, DOE, Atlantic Offshore Wind Transmission Study, May 3, 2024.

米国エネルギー省（DOE）は2035年までにHVDCシステムに係る費用を35%低減させる事業（High-Voltage Direct Current (HVDC) COSt REduction (CORE) Initiative）を2023年開始

出典：米国DOE 電化局 WEBサイト



プロジェクト実施の背景（日本と欧州との違い）

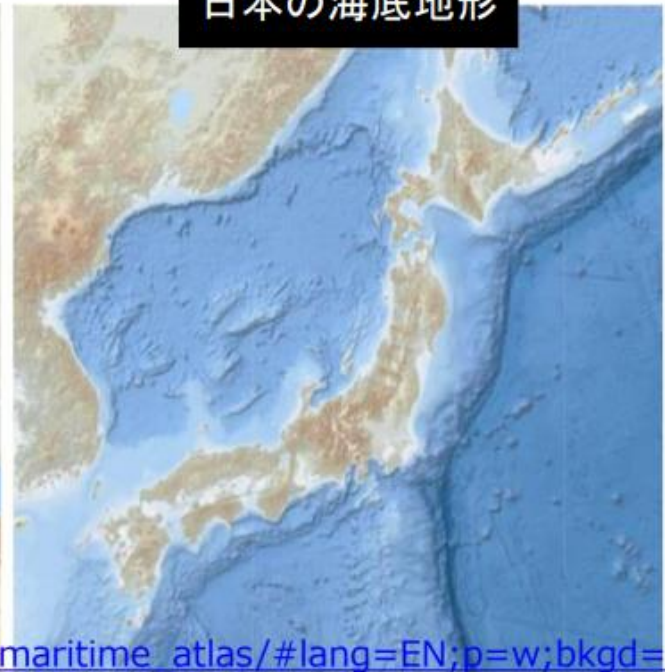
日本周辺の海底地形・堆積物の特徴

- 欧州では、海底地形の傾斜が緩やかで遠浅となっている一方で、日本においては遠浅な海岸線が少なく、急峻な海底地形が多い。
- また、複雑な地形に対応する形で、堆積物の分布も複雑。
- 加えて、地震などに伴い、堆積物の移動（イベント堆積物）も発生する。

欧州の海底地形



日本の海底地形



https://ec.europa.eu/maritimeaffairs/atlas/maritime_atlas/#lang=EN;p=w;bkgd=1;theme=;c=6111592.23916571,4474812.007486271;z=3

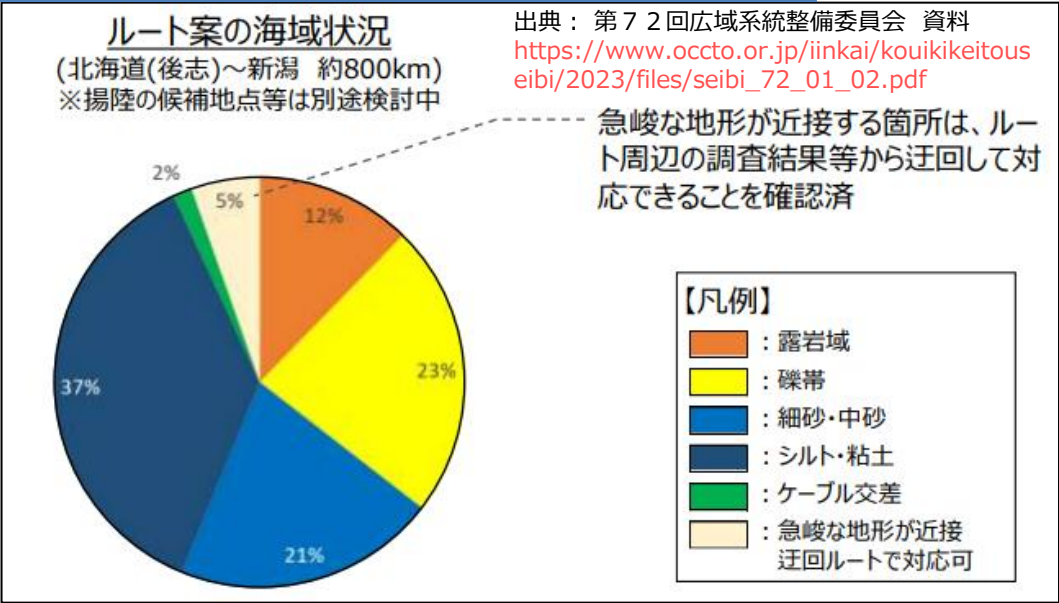
出典：産総研「日本周辺の海底地形・堆積物の特徴」
https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/chokoryi_kaitei/pdf/001_07_00.pdf

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概要

事業の目的・概要

- 本事業では、洋上や離島を活用した風力発電の導入拡大に向けて、多端子直流送電システムの開発に取り組んでいる。
- 北海道等から大需要地迄の海洋ルートには、ケーブル埋設が困難な岩盤域等での敷設も想定され、防護管取付けによる工期の長期化やコスト増加が予想されます。このため、ケーブル防護工法のコスト低減や、日本特有の海象・気象に対応できるケーブル敷設船、その艀装設備などの技術開発が不可欠です。

参考：マスタープラン案件の海底地質



事業テーマ・体制

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

技術開発状況 1 / 2 (ケーブル防護管取付等工法開発)

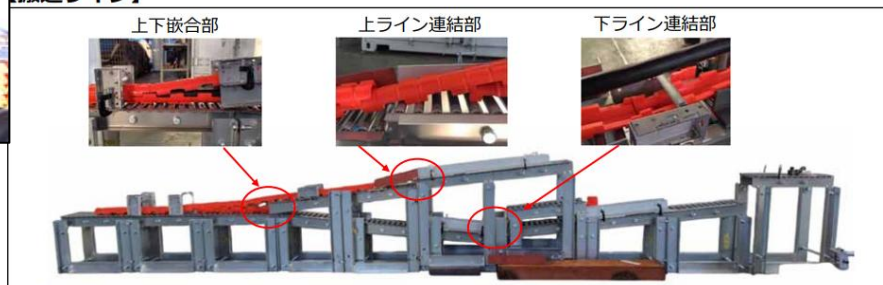
岩盤域での海底ケーブル敷設時のケーブル防護について、既存工法より低コストを可能とする工法を開発する。

【防護管】

- ・投錨や漁具等によるケーブル損傷防止のため、敷設済ケーブルを海底に埋設または防護が必要
- ・従来防護管は手作業で、多大な時間と労力が必要な作業。長距離の敷設には防護管高速取付など効率化・低コスト化に資する新工法が不可欠

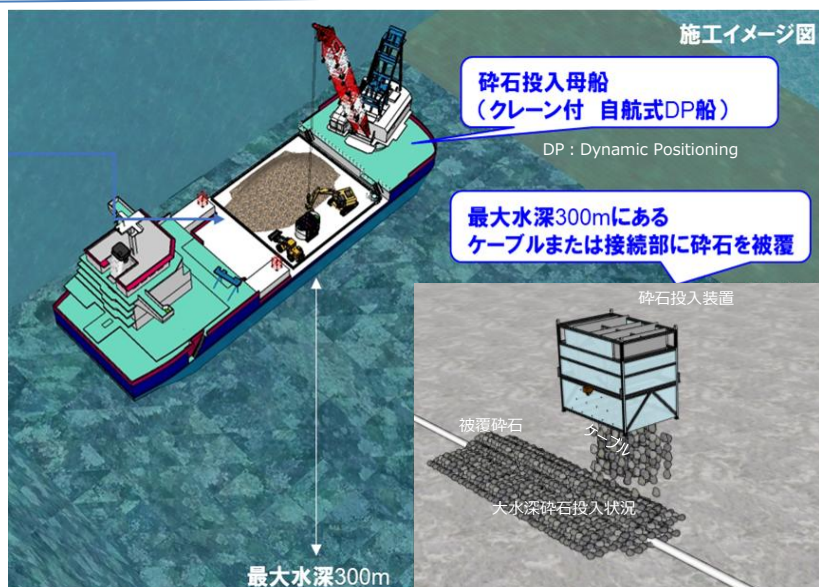


【搬送ライン】



1. ①従来の敷設船上でのケーブル防護管取付風景と開発中の防護管取付自動化・高速化装置イメージ

出典：住友電気工業株式会社



【碎石防護】

- ・投錨や漁具等によるケーブル損傷防止のため、敷設済ケーブルを海底に埋設または防護が必要
- ・とりわけケーブル同士の接続部については、埋設が難しく、また、機械的な衝撃に弱い部分でもあることから、碎石を積み上げる形での防護が必要
- ・船下の海底数百mの接続部に海流影響下でも的確に碎石投入を行う工法が不可欠

1. ①大水深碎石投入のイメージ 出典：古河電気工業株式会社
(本事業で洋上接続部などへの防護工法を開発予定)

技術開発状況 2 / 2 （ケーブル敷設等の基盤技術開発）

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。



2.①新型ケーブル敷設船のイメージ図 出典：日本郵船株式会社

【敷設船】

- ・海底に敷設する送電ケーブルは長距離に及び、一度に敷設できるケーブルの距離は限定される
- ・作業の効率化・高精度化には、長尺積載、定線保持、ケーブル自重を支える強力なブレーキ装置などを最適化された作業船が必要

【接続船】本事業における呼称

- ・海底に敷設する送電ケーブルは長距離に及び、分割敷設されるケーブル同士を不安定な洋上でも確実に接続する役割を果たす作業船が必要

【埋設船】本事業における呼称

- ・投錨や漁具によるケーブル損傷防止のため、敷設済ケーブルは海底に埋設または防護が必要
- ・効率的な埋設には日本の厳しい海域状況に対応可能なROV（※）を搭載し、海底に設置並びに引き揚げを担う作業船が必要 ※Remotely Operated Vehicle



ケーブル埋設船埋設線と搭載するROVのイメージ図

出典：商船三井株式会社

国内外への展開、今後の導入に向けた取り組み

現在、東地域及び中西地域の広域連系系統に係る計画策定プロセスが進行中。今後、洋上風力発電の普及拡大や、マスタープランに基づく系統増強の実現において、成果の活用が期待されている

浮体式洋上風力の連系線や島嶼地域での再エネ連系線が拡大していく局面において、効率的な設備形成として多端子直流送電が採用されるよう、関係各所への本事業成果の説明・P Rを実施していく

欧州では海底ケーブルの外傷事故も頻発しており、日本でも今後増加していく海底送電ケーブルの保守・点検・運用・復旧などの技術の高度化も必要になると考えられる

NEDOでは、2050 年のカーボンニュートラル実現に向けた洋上風力発電をはじめとした再生可能エネルギー拡大に貢献すべく、直流送電システムの社会実装に向けて取り組んでいく