

洋上風力発電技術に関する 現状と動向調査 -概要版-

土木学会 エネルギー委員会
環境技術小委員会 洋上風力分科会

2026年2月

洋上風力分科会 委員

職名	氏名	所属	分担
主査	仲敷 憲和	(一財)電力中央研究所	1章、5章
副主査	藤田 岳	電源開発(株)	1章、5章
委員	松本 省吾	(株)大林組	3.2章
〃	宮本 久士	鹿島建設(株)	3.1章
〃	島谷 学	五洋建設(株)	3.5章
〃	田中 仁志	清水建設(株)	3.3章
〃	白枝 哲次	清水建設(株)	3.3章
〃	清水 正巳	大成建設(株)	3.4章
〃	佐藤 郁	五洋建設(株)	2.3章
〃	齋藤 寿秋	北海道電力(株)	4.1章
〃	岸部 大蔵	東北電力(株)	4.5章
〃	古川 俊也	東北電力(株)	4.5章
〃	松尾 敏	東京電力ホールディングス(株)	2.4章
〃	村口 英之	東京電力ホールディングス(株)	2.4章
〃	杉山 陽一	中部電力(株)	4.5章
〃	中村 孝之	北陸電力(株)	4.2章
〃	直江 裕之	北陸電力(株)	4.2章
〃	横田 克哉	関西電力(株)	4.4章
〃	原田 裕明	関西電力(株)	4.4章
〃	谷田 哲也	中国電力(株)	4.1章
〃	及川 隆仁	中国電力(株)	4.1章
〃	荻山 和樹	四国電力(株)	4.4章
〃	山下 太久	四国電力(株)	4.4章
〃	池田 博嗣	九州電力(株)	4.3章
〃	川崎 貴道	九州電力(株)	4.3章
〃	春口 雅寛	九州電力(株)	4.3章
〃	藤田 亮一	九州電力(株)	4.3章
〃	清水 良平	電源開発(株)	2.1章、2.2章
〃	田村 英寿	(一財)電力中央研究所	4.2章、4.3章
委員兼幹事	滝野 晶平	東京電力ホールディングス(株)	1章、5章
オブザーバー	石原 孟	東京大学大学院	
〃	清水 隆夫	元(一財)電力中央研究所	
〃	佐々木 淳	新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)	
〃	三枝 俊介	新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)	
〃	江草 弘章	新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)	
〃	木村 文昭	新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)	
〃	森下 和輝	新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)	
〃	村田 博一	新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)	
〃	山本 正嗣	新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)	
〃	大和田 千鶴	新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)	
〃	木原 直人	(一財)電力中央研究所	
〃	岩下 智也	(一財)日本海事協会	

目次

1. はじめに	5
2. これまでの建設事例と課題	11
2.1 洋上風力発電の意義と現状	12
2.2 響灘実証機 -風況観測を中心として-	14
2.3 五島市沖洋上風力発電 -波浪観測を中心として-	17
2.4 銚子沖洋上風力発電所 -環境アセスメントを中心として-	20
2.5 まとめ	27
3. 国内の洋上風力建設にかかわる現状 -建設技術を中心として	28
3.1 日本特有の設計手法 -地震・台風-	29
3.2 着床式:SEP船の規格・基準の整備、施工方法	39
3.3 浮体式:海底ケーブル・係留索の施工方法	43
3.4 浮体式:コンクリート製浮体式基礎(バージ式、セミサブ式)の課題と解決の方向性について ...	50
3.5 風車の大型化・大規模化(ウィンドファーム) -効率的な施工方法、コスト削減方法-	61

目次

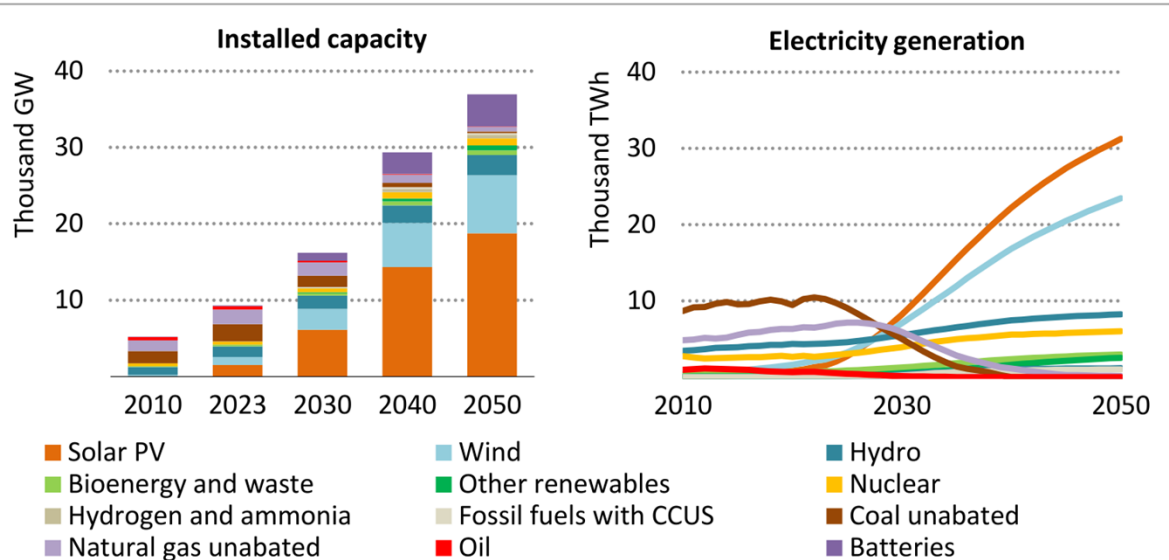
4. 国内での設置計画、運用にかかわる現状と課題	67
4.1 セントラル方式による推進項目の整理、系統確保の制度明確化	68
4.2 気象・海象・地質情報のDB構築例の調査	74
4.3 コーン貫入試験併用による認証に関する調査	83
4.4 設計・認証基準の実態調査	89
4.5 遠隔監視によるO&M省力化の調査	95
5. おわりに	104

1. はじめに

(1) 2050年カーボンニュートラルに向けた電源構成（世界）

- IEA（International Energy Agency）のNZE2050シナリオ（2050年までにエネルギー部門からの二酸化炭素排出量が実質ゼロになるシナリオ）では、2030年までに電源構成は太陽光発電と風力発電が電力部門の脱炭素化をリードし、原子力やその他の低排出電源で補完されることを想定している。

Figure 2.17 ▶ Total installed capacity and electricity generation by source in the NZE Scenario, 2010-2050



IEA. CC BY 4.0.

Solar PV and wind lead decarbonisation of the electricity sector, becoming the largest sources of electricity by 2030, complemented by nuclear and other low-emissions sources

出典: IEA: Net Zero Roadmap A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach 2023 Update

1. はじめに

(2) 2050年カーボンニュートラルに向けた電源構成（日本）

- 我が国においては、2030年度の温室効果ガス46%の削減に向け、再生可能エネルギーの導入が目指されている。
- 再生可能エネルギーの導入量は合計3,360～3,530億kWh程度であり、このうち洋上風力は170億kWhとなっている。

2030年度の再生可能エネルギー導入見込量

- 2030年度の再生可能エネルギー導入量は、足下の導入状況や認定状況を踏まえつつ、各省の施策強化による最大限の新規案件形成を見込むことにより、3,130億kWhの実現を目指す（政策対応強化ケース）。
- その上で、2030年度の温室効果ガス46%削減に向けては、もう一段の施策強化等に取り組むこととし、その施策強化等の効果が実現した場合の野心的なものとして、合計3,360～3,530億kWh程度（電源構成では36～38%）の再エネ導入を目指す。
- なお、この水準は、上限やキャップではなく、今後、現時点で想定できないような取組が進み、早期にこれらの水準に到達し、再生可能エネルギーの導入量が増える場合には、更なる高みを目指す。

GW(億kWh)	2030年度の野心的水準	H27策定時
太陽光	103.5～117.6GW (1,290～1,460)	64GW (749)
陸上風力	17.9GW (340)	9.2GW (161)
洋上風力	5.7GW (170)	0.8GW (22)
地熱	1.5GW (110)	1.4～1.6GW (102～113)
水力	50.7GW (980)	48.5～49.3GW (939～981)
バイオマス	8.0GW (470)	6～7GW (394～490)
発電電力量	3,360～3,530億kWh	2,366～2,515億kWh

※2030年度の野心的水準は概数であり、合計は四捨五入の関係で一致しない場合がある

※改訂ミックス水準における各電源の設備利用率は、「総合エネルギー統計」の発電量と再エネ導入量から、直近3年平均を試算したデータ等を利用
総合エネルギー調査会 再生可能エネルギー大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会（第31回）資料2参照

30

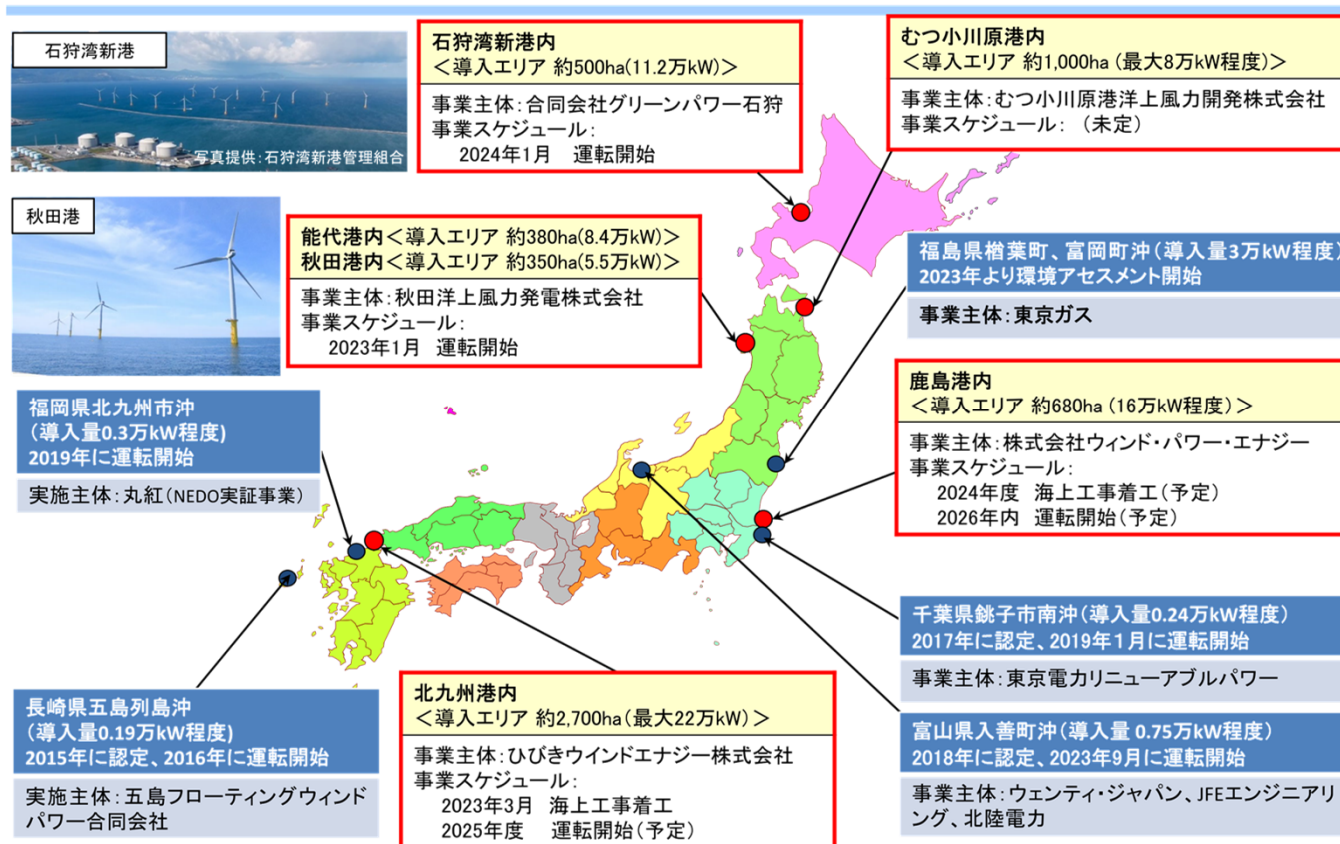
出典：経産省、「2030年度におけるエネルギー需給の見通し（関連資料）」

1. はじめに

(3) 都道府県条例・港湾法に基づく海域占用許可

- 条例や港湾法に基づき小規模な洋上風力発電の導入が進展している（条例5区域、港湾5区域）。

都道府県条例・港湾法に基づく海域占用許可



出典: 総合資源エネルギー調査会省エネルギー・新エネルギー分科会再生可能エネルギー大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会洋上風力促進ワーキンググループ 交通政策審議会港湾分科会環境部会洋上風力促進小委員会 合同会議 (第24回)「これまでの洋上風力政策の進捗」

1. はじめに

(4) 洋上風力の促進区域

- 2023年10月3日に新たに2区域（青森県沖日本海(南側)、山形県遊佐町沖）を促進区域に指定され、公募が開始された。

区域名	万kW※1	供給価格※2 (円/kWh)	運開年月	選定事業者構成員	
促進区域	①長崎県五島市沖(浮体)	1.7	36	2026.1	戸田建設、JRE、大阪瓦斯、関西電力、INPEX、中部電力
	②秋田県能代市・三種町・男鹿市沖	49.4	13.26	2028.12	三菱商事洋上風力、三菱商事、C-Tech
	③秋田県由利本荘市沖	84.5	11.99	2030.12	三菱商事洋上風力、三菱商事、C-Tech、ウェンティ ジャパン
	④千葉県銚子市沖	40.3	16.49	2028.9	三菱商事洋上風力、三菱商事、C-Tech
	⑤秋田県八峰町能代市沖	37.5	3	2029.6	JRE、イベルドローラ・リニューアブルズ・ジャパン、東北電力
	⑥秋田県男鹿市・湯上市・秋田市沖	31.5	3	2028.6	JERA、電源開発、伊藤忠商事、東北電力
	⑦新潟県村上市・胎内市沖	68.4	3	2029.6	三井物産、RWE Offshore Wind Japan 村上胎内、大阪瓦斯
	⑧長崎県西海市江島沖	42	22.18	2029.8	住友商事、東京電力リニューアブルパワー
	⑨青森県沖日本海(南側)	60			
	⑩山形県遊佐町沖	45			
有望区域	⑪北海道石狩市沖	91~114			
	⑫北海道岩手・南後志地区沖	56~71			
	⑬北海道島牧沖	44~56			
	⑭北海道檜山沖	91~114			
	⑮北海道松前沖	25~32			
	⑯青森県沖日本海(北側)	30			
	⑰山形県酒田市沖	50			
	⑱千葉県九十九里沖	40			
	⑲千葉県いすみ市沖	41			
	準備区域	⑳北海道岩手・南後志地区沖(浮体)			
㉑北海道島牧沖(浮体)					
㉒青森県陸奥湾					
㉓岩手県久慈市沖(浮体)					
㉔富山県東部沖(着床・浮体)					
㉕福井県あわら沖					
㉖福岡県響灘沖					
㉗佐賀県唐津市沖					
㉘長崎県五島市沖					
㉙愛知県田原市・豊橋市沖					

別紙1

<導入目標> [1]は全電源の電源構成における比率

現状：風力全体4.5GW [0.9%]
(うち洋上0.01GW)

2030年：風力全体23.6GW [5%]
(うち洋上5.7GW [1.8%])

<洋上風力案件形成目標>

2030年 10GW / 2040年 30-45GW

<洋上風力国内調達比率目標(産業界目標)>

2040年 60%

【凡例】

- 促進区域 (第1ラウンドは黒字)
- 有望区域
- 準備区域
- GI基金実証候補海域 (浮体式洋上風力)

※2 ①~④についてはFIT制度適用のため調達価格。
⑤~⑧はFIP制度適用のため基準価格。

GI基金実証候補海域

- ① 北海道石狩市浜益沖
- ② 北海道岩手・南後志地区沖
- ③ 秋田県南部沖
- ④ 愛知県田原市・豊橋市沖

出典：総合資源エネルギー調査会省エネルギー・新エネルギー分科会再生可能エネルギー大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会洋上風力促進ワーキンググループ 交通政策審議会港湾分科会環境部会洋上風力促進小委員会 合同会議(第24回)「これまでの洋上風力政策の進捗」

1. はじめに

(5) セントラル方式に向けた取り組み

- 「日本版セントラル方式」の一環として、エネルギー・金属鉱物資源機構（JOGMEC）が担い手となり、洋上風力発電事業の検討に必要な調査を実施している。事業者は、この調査結果を用いて事業計画の検討を行う。

令和6年度 調査対象区域



2

令和6年度の調査対象区域は、2023年10月3日に経済産業省が選定した以下の区域とする。

<令和5年度からの継続区域>

- ・北海道岩宇・南後志地区沖（着床）
- ・北海道島牧沖（着床）
- ・北海道檜山沖

<令和6年度からの新規区域>

- ・北海道岩宇・南後志地区沖（浮体）※1
- ・北海道島牧沖（浮体）
- ・山形県酒田市沖 ※2

※1 北海道岩宇・南後志地区沖（浮体）がGI基金フェーズ2の実証実施区域となった場合、実証に使用する海域の範囲は、セントラル調査対象の区域からは除くものとします。

※2 山形県酒田市沖は調査実施に向け最終調整中であり、準備が整い次第、別途調査計画(概要)を示す。

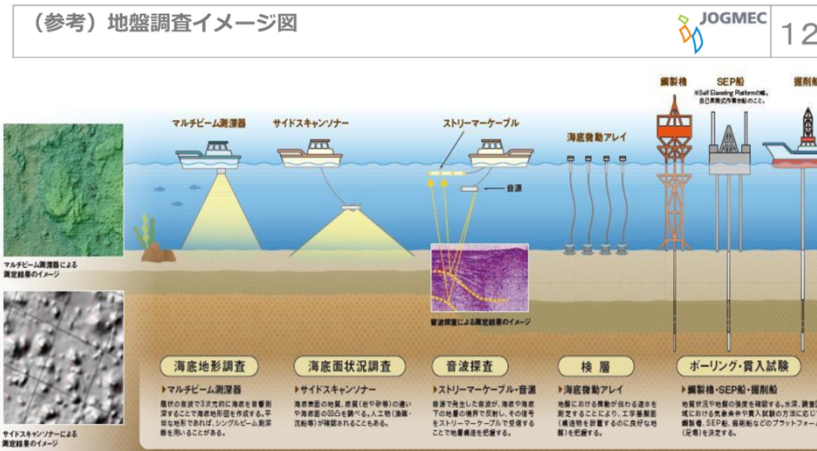
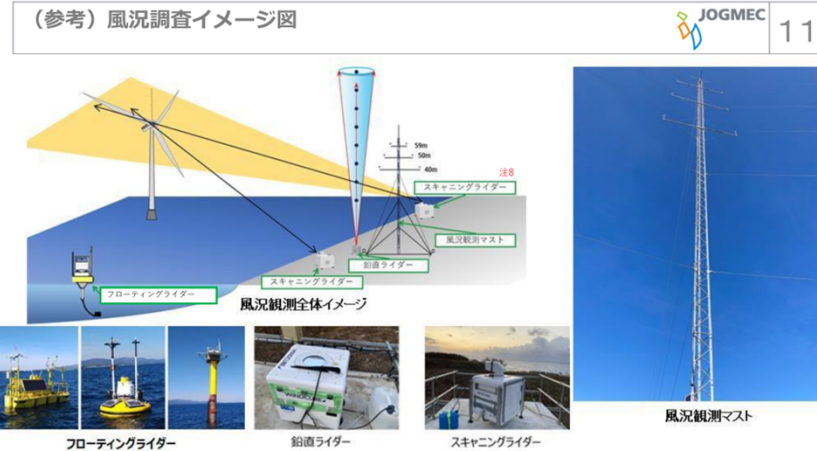


出典：エネルギー・金属鉱物資源機構 「令和6年度セントラル方式による調査計画(概要)」

1. はじめに

(5) セントラル方式に向けた取り組み -調査項目-

- 発電設備の基本設計に必要なとなる風況・海底地盤に関する調査データを取得するために、各種の観測機器を用いたサイト調査を実施している。



出典:エネルギー・金属鉱物資源機構 「令和6年度セントラル方式による調査計画(概要)」

2. これまでの建設事例と課題

2.1 洋上風力発電の意義と現状

2.2 響灘実証機 -風況観測を中心として-

2.3 五島市沖洋上風力発電 -波浪観測を中心として

2.4 銚子沖洋上風力発電所 -環境アセスメントを中心として

2.5 まとめ

2.1 洋上風力発電の意義と現状

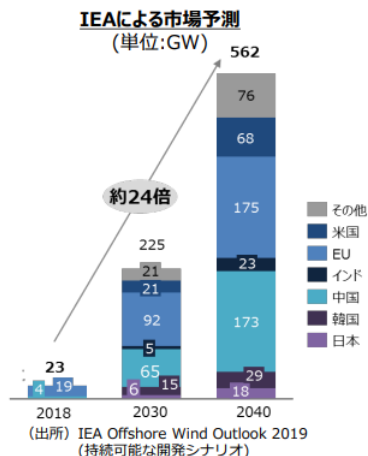
- 政府は洋上風力の産業競争力強化に向けた基本戦略として、2030年までに10GW、2040年までに30～45GWの意欲的な目標を設定した。
- 洋上風力産業ビジョン（第1次）に示された通り、洋上風力発電は、①大量導入、②コスト低減、③経済波及効果が期待される。
- 現在、洋上風力産業の多くが国外に立地しているが、日本にも潜在力のあるサプライヤーは存在している。

【参考】洋上風力発電導入の意義

- 洋上風力発電は、①大量導入、②コスト低減、③経済波及効果が期待されることから、再生可能エネルギーの主力電源化に向けた切り札。

①大量導入

- 欧州を中心に世界で導入が拡大
- アジア市場が急成長が見込まれる
- 四方を海に囲まれた日本でも、今後導入拡大が期待されている。



②コスト低減

- 先行する欧州では、落札額が10円/kWhを切る事例や市場価格(補助金ゼロ)の事例が生ずる等、風車の大型化等を通じて、コスト低減が進展。

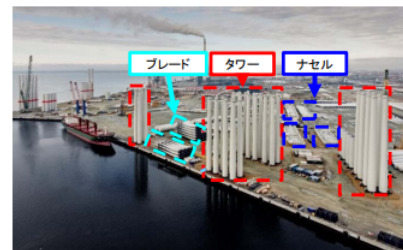
国	プロジェクト名	価格 (€=123.6円) ※2019年平均相場
オランダ	Hollande Kust Zuid 3 & 4	市場価格 (補助金ゼロ)
フランス	Dunkirk	44 EUR/MWh (5.4円/kWh)
イギリス	Sofia	44.99EUR/MWh (5.6円/kWh)
イギリス	Seagreen Phase 1 - Alpha	47.21EUR/MWh (5.8円/kWh)
イギリス	Forthwind	44.99EUR/MWh (5.6円/kWh)
イギリス	Doggerbank Teeside A	47.21EUR/MWh (5.8円/kWh)
イギリス	Doggerbank Creyke Beck A	44.99EUR/MWh (5.6円/kWh)
イギリス	Doggerbank Creyke Beck B	47.21EUR/MWh (5.8円/kWh)

③経済波及効果

- 洋上風力発電設備は、構成機器・部品点数が多く(数万点)、事業規模は数千億円。
- 日本に潜在的サプライヤーは存在するも、現状、関連産業は国外に立地。

欧州における港湾都市の事例（デンマーク・エスビアウ港）

- ・建設・運転・保守等の地域との結びつきの強い産業も多いため、地域活性化に寄与。
- ・エスビアウ市では、企業誘致にも成功し、約8,000人の雇用を創出。



3

出典: 国土交通省及び経済産業省、洋上風力の産業競争力強化に向けた官民協議会、洋上風力産業ビジョン(第1次)概要(令和2年12月15日)より

2.1 洋上風力発電の意義と現状

- 洋上風力発電事業の開発に関しては、個社の努力分野である競争領域と、それ以外の非競争領域に大別できる。本委員会では、非競争領域として風況観測、気象・海象観測および環境アセスメントに焦点を当て、これまでの建設事例から見た洋上風力発電事業の現状について整理した。

技術開発項目のロングリスト

- 欧米の技術開発項目や日本の環境等を踏まえ、有識者や産業界の意見を反映の上、項目をグループ化してリスト化。
- このリストのうち、「世界の動向」「日本の特性」「日本の強み」を踏まえ、重点技術開発項目を抽出（次ページ以降）。

区分	分野	技術開発項目案
共通	①調査開発 (風況観測・配置最適化等)	<ul style="list-style-type: none"> ●風況観測（各種ライダーや低コスト風況観測タワー等） ●ウェイク及び発電量予測モデルの高度化 ●洋上風力用の気象海象計測データ整備 ●地盤条件データベースの開発
	②風車 (風車設計・ブレード・ナセル部品・タワー等)	<ul style="list-style-type: none"> ●風車仕様の最適化 ●風車の高品質大量生産技術 ●浮体搭載風車の最適設計 ●次世代風車要素技術開発 ●低風速域向けブレード ●洋上風車の長寿命化技術 ●大型風車の開発 ●ブレード侵食防止技術 ●ブレードリサイクル技術 ●タワーの高高度化と低コスト化
着床	③着床式基礎製造 (モバイル・ジャケット等)	<ul style="list-style-type: none"> ●複雑な地質・厳しい気象海象条件に対応した基礎構造 ●タワー・基礎接合技術の高度化 ●基礎構造用鋼材の高強度化・低コスト化 ●基礎溶接技術の高度化
	④着床式設置 (輸送・施工等)	<ul style="list-style-type: none"> ●低コスト施工技術の開発 ●洗掘防止工の高度化 ●ロジスティクスの高度化 ●撤去
浮体	⑤浮体式基礎製造 (浮体・係留索・アンカー等)	<ul style="list-style-type: none"> ●一体設計 ●浮体基礎の最適化 ●係留システムの最適化 ●浮体の量産化 ●ハイブリッド係留システム ●メンテナンスフリー技術 ●浮体システムの計測技術
	⑥浮体式設置 (輸送・施工等)	<ul style="list-style-type: none"> ●低コスト施工技術の開発 ●作業船と輸送システム ●大規模修繕技術 ●撤去・リサイクル
共通	⑦電気システム (海底ケーブル・洋上変電所等)	<ul style="list-style-type: none"> ●高電圧ダイナミックケーブル ●浮体式洋上変電所 ●次世代洋上直流送電技術 ●洋上送電ケーブル敷設の高効率化 ●発電需給の統合予測 ●系統安定化技術
	⑧運転保守 (O&M)	<ul style="list-style-type: none"> ●運転保守及び修理技術の開発 ●デジタル技術による予防保全・メンテナンス高度化 ●監視及び点検技術の高度化 ●落雷故障自動判別システムの開発 ●リモートセンシングと予報技術による発電量向上
官民協議会等における検討と連携して推進する項目		<ul style="list-style-type: none"> ●人材育成 ●サプライチェーン ●ステークホルダーの合意（漁業協調、騒音低減等） ●ガイドライン・標準化 ●海底直流送電 ●水素変換とエネルギー貯蔵

出典：洋上風力の産業競争力強化に向けた官民協議会 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)、洋上風力の産業競争力強化に向けた技術開発ロードマップ(案) (2021年4月1日資料)より

2.2 響灘実証機 -風況観測を中心として-

(1) 響灘実証機の概要

- 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）の受託研究として、「洋上風況 観測システム実証研究（北九州市沖）」を電源開発（株）にて実施した。
- 響灘沖合の洋上にて、平均風速、風向、乱流強度、ウインドシア、風-波同時生起性、ウエイク、統合解析システムの開発を目的に洋上風況観測塔を設置した。



洋上風況観測塔（2012年6月設置）

- 水深 : 約14m
- 離岸距離約 : 1.4km
- 海面高さ : 85m
- 風車との距離 : 250m
- 構造 : 鋼管トラス構造
(支持構造物は重力・ジャケットハイブリット方式を採用)

観測計器は海面から15m～81.6mまでの8層に設置

- 風向,風速計（三杯型風速計・矢羽根式風向計）
- 鉛直ライダー
- 超音波式風速計
- 温度計、湿度計、気圧計
- 海象計

出典:新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)、平成21年度～平成28年度成果報告書 風力等自然エネルギー技術研究開発 洋上風力発電等技術研究開発 洋上風況観測システム実証研究(北九州市沖)(1/2)、2019000000055(2019年3月)より

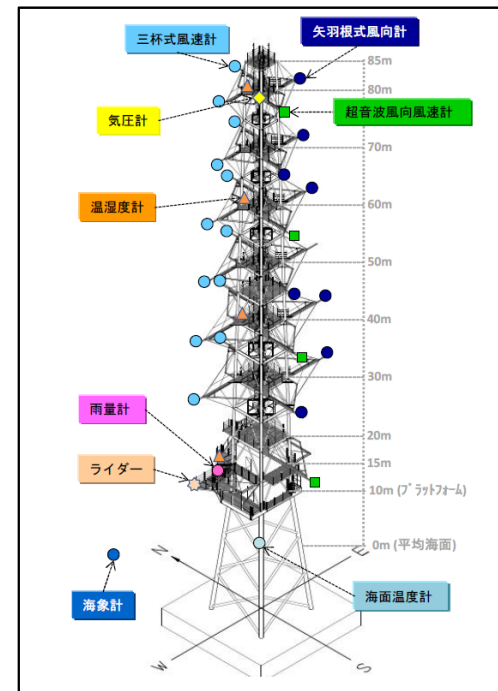
2.2 響灘実証機 -風況観測を中心として-

(2) 響灘実証機から見る観測塔建設に於ける課題・建設コスト

観測機器情報

No.	観測機器	観測要素	数量	サンプリング 周波数	設置階	観測高	備考
1	三杯式風速計	風速	12	4Hz	80,70,60,50,40,30m	設置階+1.6m	
2	矢羽根式風向計	風向	9	4Hz	80,70,60,50,40,30m	設置階+1.6m	
3	超音波風向風速計	風速・風向	4	20Hz	80,60,40,20m	設置階+1.6m	
4	ライダー	風速・風向	1	1Hz	15m	60~220mまでの20m 毎10高度+1.3m	
5	温度計	温度	4	4Hz	80,60,40,15m	設置階+1.0m	
6	湿度計	湿度	4	4Hz	80,60,40,15m	設置階+1.0m	
7	気圧計	気圧	1	4Hz	80m	80m	
8	雨量計	雨量	1	4Hz	15m	15m	0.5mmカウント
9	海面温度計	海面温度	3	4Hz	-1m	-1m	
10	海象計	波高・周期・波 向・流れ・潮位	1	2Hz	-14m	-14m	観測塔から北西方向の 海底に設置

風況観測塔導入コスト：15億円
(建設費、維持管理費、研究費を含む実証研究受託額)



観測塔建設の課題

- 観測塔の設置コストが高い。
- 建築基準法に基づく性能評価、大臣認定、工作物確認が必要である。
- 基礎構造物の地盤調査が工期、コスト増加につながる。
- 大規模洋上ウインドファームの場合、沖合に多数の観測塔を設置することとなり、コスト増加につながる。

費用面

- 設置箇所の地質条件によるが、岩盤削孔に膨大な費用と工期(実証機10ヶ月)がかかる。
- 海上での工事は波浪の影響により工事時期が限られ、工期が長期化し、コスト増加につながる。
- 調査地点の気象・海象条件の調査にも費用と工期がかかる。

技術面

- 荷重の種類に応じて各部位の許容値を満足する様に設計が必要である。
- 観測塔の共用年数は20年とされる。

法制度ほか

- ウインドファーム認証ではタワー高さの2/3以上の計測が必要であるが、風車大型化に伴い、ハードルが上がる。(下回る場合は複数高度より推定)
- 風況データを最低でも1年以上の風況観測が一般的、長期観測は事業者の負担増となる。

出典:新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)、平成21年度~平成28年度成果報告書 風力等自然エネルギー技術研究開発 洋上風力発電等技術研究開発 洋上風況観測システム実証研究(北九州市沖)(1/2)、2019000000055(2019年3月)より

2.2 響灘実証機 -風況観測を中心として-

(3) デュアルスキャニングライダー

- デュアルスキャニングライダーの構成として、むつ小川原サイトで校正されたスキャニングライダー2基に加え、鉛直ライダー1基、陸上気象マスト1基にて計測される。
- 風況観測塔の代わりにデュアルスキャニングライダーを採用することで、風況観測の導入コストを15億円から数億円（1/5~1/10程度）とすることが可能であり、洋上風力発電の低コスト化に繋がる。



図 4.1 DSL による洋上風況観測点の例 (むつ小川原港)

出典: 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)、洋上風力観測ガイドブック(2023年3月)より

- 2019年~2022年9月の期間において、スキャニングライダーの精度調査を実施中
- 2021年11月19日 第43回風力エネルギー利用シンポジウム「むつ小川原サイトにおけるスキャニングライダー実験」にてデュアルスキャニングライダーの計測精度について報告（途中経過）された。
- 長期検証においてシステムの運転状況および気象条件によりデータ取得率が変動するが、10分平均風速及び風向の計測精度については基準を満足していた。乱流強度もデータ取得率の違いを考慮した場合でもマストデータと大差ないことが報告された。

デュアルスキャニングライダー	
スキャニングライダー	数億円
気象マスト	数千万円
鉛直ライダー	数千万円
合計	数億円

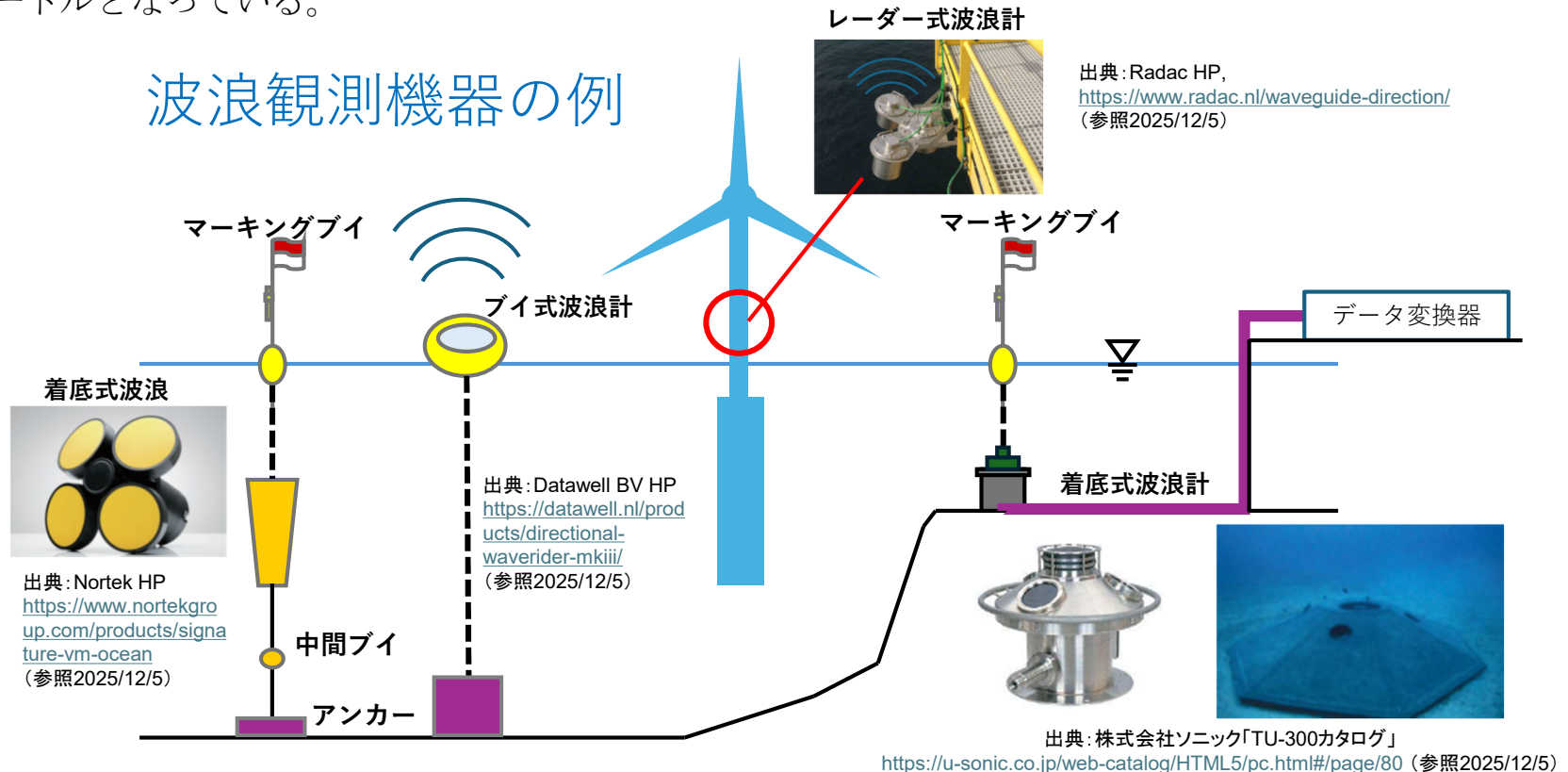
風況観測塔	
風況観測塔（建設費、維持管理費、研究費含む実証研究受託額）	15億円
合計	15億円

2.3 五島市沖洋上風力発電 -波浪観測を中心として-

(1) 波浪観測: 波浪計(ブイ式、着底式、レーダー式)

- ブイ式: リアルタイムでの計測が可能。電池寿命1年程度であることに加え、海上に浮遊しているため、破損の可能性がある。コストは買い取り価格で1,000万円程度である。
- 着底式: 50m以深では精度が低下するため、リアルタイムでの計測は困難である。コストは1,300万円程度である。
- レーダー式: 戸田建設にて試験中。波高は0~60mを1cmの精度で測定可能であり、波向きや形が測定できる点が大きな利点である。コストは800万円程度。ただし、電波法により届出と免許が必要であり、導入のハードルとなっている。

波浪観測機器の例



2.3 五島市沖洋上風力発電 -波浪観測を中心として-

(2) 波浪計の特徴(ブイ式、着底式、レーダー式)

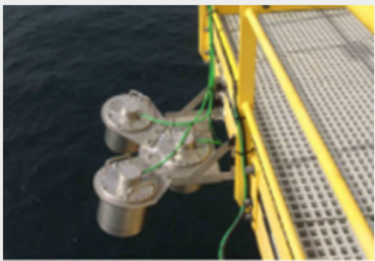



(a) レーダー式採用の目的

- リアルタイムの波高測定値を船の運航判断に利用できないか検討中である。今後の浮体洋上におけるO&Mではリアルタイム測定が可能なレーダー式が必要と思案した。

	ブイ式	着底式	レーダー式
特徴	<ul style="list-style-type: none"> リアルタイムにデータを取得可能 電源は内臓バッテリー、太陽電池 水深の制限なし 	<ul style="list-style-type: none"> 流況を計測可能 電源は外部電源、内臓バッテリー 	<ul style="list-style-type: none"> 設置や計測に水中作業は不要 ブイや着底式と比較して軽量 リアルタイムにデータを取得可能 電源は外部電源 水深に制限なし
データ処理	<ul style="list-style-type: none"> ネットワーク メモリー 	<ul style="list-style-type: none"> 通信ケーブル メモリー ネットワーク 	<ul style="list-style-type: none"> ネットワーク メモリー
課題	<ul style="list-style-type: none"> 船舶衝突による破損の可能性あり 荒天時にリアルタイムデータの取得が困難 	<ul style="list-style-type: none"> 水深に制限あり リアルタイムデータ取得に空中までの配線が必要 	<ul style="list-style-type: none"> 日本の電波法に適合していない

2.3 五島市沖洋上風力発電 - 波浪観測を中心として -

(3) 波浪計(レーダー式)

	レーダー式		レーダー式		
名称	WG5-HT-CP (オランダ)		LX-80 (アメリカ)	US-500 (日本)	SM-140 (ノルウェー)
参照元	https://www.radac.nl/waveguide-direction/ (参照 2025/12/5)		https://www.geolux-radars.com/product/lx-80/ (参照2025/12/5)	https://www.u-sonic.co.jp/product/category/detail/sid:9a6192c5-cd94-11e9-b11b-9ca3ba0232db/pid:a631aad2-050a-11ea-bcc9-ae9f117a2f7b (参照2025/12/5)	https://www.ipros.com/product/detail/2000586740/ (参照2025/12/5)
外観					
データ取得	ネットワーク	デジタル信号	メモリー	アナログ信号：電圧または温度、デジタル信号	メモリー、オンライン
サンプリングレート	10 Hz		10Hz	8 Hz	50 Hz
波高測定	0~60 m 精度±1 cm		0.1~30m	0~10m	0~92m (精度：1cm)
波周期測定	1~100秒 精度50ミリ秒		カタログ等記載無し	カタログ等記載無し	0.5~128秒 (精度：0.1秒)
波向き	360 deg 精度±2 deg		カタログ等記載無し	カタログ等記載無し	カタログ等記載無し
流況	×		カタログ等記載無し	カタログ等記載無し	カタログ等記載無し
電源	レーダー部8 W/基+コントローラ4.8 W		9-27 VDC 標準消費電力1.8W	AC100V、DC12V	DV24 V 消費電力7W未満
対応水深	制限なし		制限なし	制限なし	制限なし
機器寸法、重量	直径265mm高さ245mm、12.5kg		幅65mm高さ55mm奥行65mm、0.5kg	直径250mm高さ278mm	幅500mm高さ136mm奥行400mm、11kg
費用	850万円		カタログ等記載無し	カタログ等記載無し	カタログ等記載無し
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・空中線電力が1mWと低い。(電波法による設置の際に届け出を必要とする空中戦電力は10W) ・小型かつ軽量である。 ・メンテナンスを必要としない。 		<ul style="list-style-type: none"> ・設置や計測に水中作業を必要としない。 ・消費電力が低い。 	<ul style="list-style-type: none"> ・設置や計測に水中作業を必要としない。 	<ul style="list-style-type: none"> ・メンテナンスコストが低い。 ・Webディスプレイなどクラウドサービスが多い。
課題	<ul style="list-style-type: none"> ・周波数帯が広く、日本の電波法に適合していないため、免許が必要 (5年毎更新) 			<ul style="list-style-type: none"> ・送受波器設置点より11mより下は測定不可 	

2.4 銚子沖洋上風力発電所 -環境アセスメントを中心として-

(1) 銚子沖実証事業での 調査項目および調査時期

調査項目

1. 海底地形
2. 流向・流速
3. 水中騒音
4. 鳥類
5. 底生生物
6. 魚介類（漁業生物）
7. 海棲哺乳類
8. 藻場（海藻藻類）
9. 景観
10. 電波障害

出典：新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）、
着床式洋上風力発電の環境影響評価手法に関する
基礎資料（最終版）、2018 より

表4.1.1-1 銚子沖サイトにおける各調査項目の調査時期・調査測点・調査方法等

調査項目	調査時期			調査測点等	調査方法
	事前	工事中	供用時		
1 海底地形	○		○	実証機等設置点周辺(80m×80m)	マルチナロービーム測深器による海底地形測深
2 流向・流速	○		○	実証海域周辺3点	自記式流向流速計(電磁流速計)による流向・流速測定
3 水中騒音			○	実証海域周辺3点	水中・マイクロホンによる連続観測(7日間)
4 鳥類(船舶トランセクト調査)	○		○	実証海域周辺(4側線)	船舶における目視調査
5 鳥類(定点調査)	○			陸上2地点、実証海域周辺4地点	陸上及び海上上の定点における目視調査
6 鳥類(レーダー調査)	○		○	陸上1点(事前)/観測塔1点(事後)	レーダーによる24時間連続調査
7 鳥類(衝突感知システム)			○	実証機1点	衝突感知システムによる衝突監視
8 底生生物	○		○	実証海域周辺3点	採泥器によるベントス採取
9 魚介類(漁業生物)※	○		○	実証海域周辺3点	機船船びき網による採捕調査
10 海棲哺乳類	○	○	○	実証海域周辺(6側線)	船舶における目視調査(トランセクトライン調査)
11 藻場(海草藻類)	○			海底ケーブルルート上9点	潜水士による目視観察・定量採取等
12 景観	△		○	陸上3点(主要眺望点)	フォトモンタージュ等による景観調査及びアンケート調査
13 電波障害(漁業無線)	○		○	南東～西北2km×北東～南西11kmの範囲内の32点	銚子漁協無線の受信状況・電界強度調査
14 観測タワー基礎などへ増集する魚類等の確認			○	実証機基礎周辺	潜水士による目視調査・付着生物定量調査
15 振動			○	実証機基礎周辺	振動計による調査
16 底質・地質			○	実証海域周辺3点	採泥器による調査
17 水質・動植物プランクトン			○	実証海域周辺5点	採水法・プランクトンネット等による採取調査
18 計量魚探			○	実証海域周辺3点及び4測線	計量魚探による魚類調査
19 魚介類(漁業生物)※ 【底刺網】			○	実証海域周辺3点	底刺網による魚類調査

注1) △: 景観は本実証研究FSIにて事前調査済。

注2) No15～19: 2015(平成27)年度以降の追加調査内容。

注3) ※魚介類(漁業生物): 当初は地元漁協の意向により、当該海域で刺網調査の許可が得られなかったが(2010(平成22)年7月～2016(平成28)年1月(事前・供用時)は機船船びき網調査実施)、2016(平成28)年3月以降は底刺網調査の許可が得られたため、両手法による魚介類調査を実施。

2.4 銚子沖洋上風力発電所 -環境アセスメントを中心として-

表4.1.2-7 海棲哺乳類（スナメリ）への影響予測・評価の検証（概要）

項目	作業概要	時期	対象海区	海棲哺乳類（スナメリ）の調査・予測・評価結果
事前調査	スナメリ調査（船上から目視観察して出現個体数を確認）	H22年7月・8月・9月・10月・11月・12月・H23年2月	事業実施区域及び周辺海域（トランセクトライン6本）	<ul style="list-style-type: none"> ◆スナメリは7月に12頭、8月に435頭、9月に4頭、10月に14頭、11月に12頭、12月に7頭、2月に1頭出現し、特に8月に多く出現した。 ◆スナメリは主に水深10m前後の海域で確認され、特に大吠埼南側で多く出現していた。
予測・評価	既往調査事例等を基に、風車の基礎掘削工事時及び風車稼働時の水中騒音によるスナメリへの影響を予測・評価	工事中（掘削工事） 供用時（稼働時）	開発区（事業実施区域）	<p>【工事中】</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆既往の掘削工事時の水中騒音距離減衰値を基に、スナメリを含む海棲哺乳類の一般的な水中騒音反応閾値レベル120dB re 1μPa を照らし合せ、工事点付近から距離900m程度までは反応閾値レベルを超過するもの、それ以上では当該レベル以下になると予測。 ◆工事点付近から距離900mの範囲内では工事騒音によってスナメリが回避反応を起こす可能性が考えられるが、工事期間は一時的であり、実証予定地点周辺900m以上については反応閾値レベル以下であることから、工事による本種の生息環境への影響は小さいと評価される。 <p>【風車供用時（稼働時）】</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆【供用時の2MW洋上風車水中騒音（推定値）】=ピーク周波数25Hzの音圧音圧レベル(119dB re 1μPa @1m) ※魚類(カタチイワシ)同様 ◆【スナメリと同科のネズミイルカ(Harbour Porpoise)の聴覚閾値(推定値)】=周波数25Hzの聴覚閾値155dB re 1μPa ◆上記推定値と比較した結果、2MW洋上風車供用時の風車直近1mの水中騒音は、ピーク(25Hz)で119dB re 1μPaとなるが、ネズミイルカの25Hzの聴覚閾値は155dB re 1μPaであるため、風車直近1mの水中騒音はネズミイルカの聴覚閾値以下となることが予測された。よって、供用時（稼働時）における水中騒音による本種の生息環境への影響は小さいと評価された。
事後調査	スナメリ調査（事前調査と同様）	工事中（H24年6月・7月・8月・9月・10月・12月） 稼働時（H25年2月・6月・7月・8月・9月・10月・12月・H26年2月）	事業実施区域及び周辺海域（トランセクトライン6本）	<ul style="list-style-type: none"> ◆工事中期間中、スナメリはH24年6月に10頭、7月に47頭、8月に4頭、9月に10頭、10月に5頭、12月に5頭確認され、特に7月に多く出現した。 ◆スナメリは調査範囲の概ね全体に出現していた。 ◆稼働期間中、スナメリはH25年6月に58頭、7月に125頭、8月に35頭、9月に4頭、10月に46頭、12月に31頭・H26年2月は10頭で、特に6・7月に多く出現した。 ◆スナメリは調査範囲の概ね全体に出現しており、特に大吠埼南側で多く出現していた。
検証	①工事中の水中騒音の予測・評価 ◆工事時（掘削工事）の水中騒音予測については、工事中に水中騒音を実測されていないため検証できない。			
	②供用時の水中騒音の予測・評価 ◆既往文獻値による水中騒音予測値と実証機の供用時調査結果を基にした水中騒音の予測値について比較・検討した。 ◆文獻値と実測値を基にした音圧音圧レベルを比較すると、文獻値を基にした予測値(119 dB re 1 μ Pa @1m)に対して、実測値を基にした予測値(113dB re 1 μ Pa @1m)であり、オーダーレベルに大きな相違が無く、当該既往文獻値を基にした水中騒音の予測は概ね妥当と考えられた。			
留意点	③工事中のスナメリの予測・評価 ◆工事中のスナメリ調査結果を見ると、工事地点付近で数回確認されているが、事前調査時よりやや分散している傾向にあった。 ◆別途実施したスナメリの鳴音調査（受動的音響探知機調査）結果によれば、工事中の鳴音数は、開発区では事前比べて大幅に減少しているが、対照区では開発区のような大きな低減は無く、事前時に近い状況であった。また、事後には開発区の鳴音数は対照区レベルに増加していた。 ◆開発区におけるスナメリは工事中は一旦少なくなるが、3km離れた対照区では工事中にスナメリ鳴音が確認されていることから、当該予測・評価は妥当と考えられる。			
	④供用時のスナメリの予測・評価 ◆既往のスナメリは、工事中調査(71個体)から241個体まで増え、それらの分布域は事前調査時と同様に大吠埼側の海岸に多く出現する傾向が確認されている。 ◆別途実施したスナメリ鳴音調査でも事前比に比べ、工事中は一旦減少するが、稼働時には事前と同レベルまで回復することが確認されている。 ◆以上から供用時の水中騒音によるスナメリへの影響はほとんどないと考えられるため、当該予測・評価は妥当と考えられる。			
留意点	<ul style="list-style-type: none"> ◆洋上風車稼働時の水中騒音データは基礎種類・規模・気象条件等によって異なるため、予測・評価時には対象風車の諸条件に併せた既往事例の収集が必要。 ◆評価対象となる海棲哺乳類によって聴覚閾値が異なるため、予測・評価時には各種あるいは近縁種の聴覚閾値知見の収集が必要。 			

(2) 調査時の留意点： 海棲哺乳類（スナメリ）、景観

表4.1.2-8 景観への影響予測・評価の検証（概要）

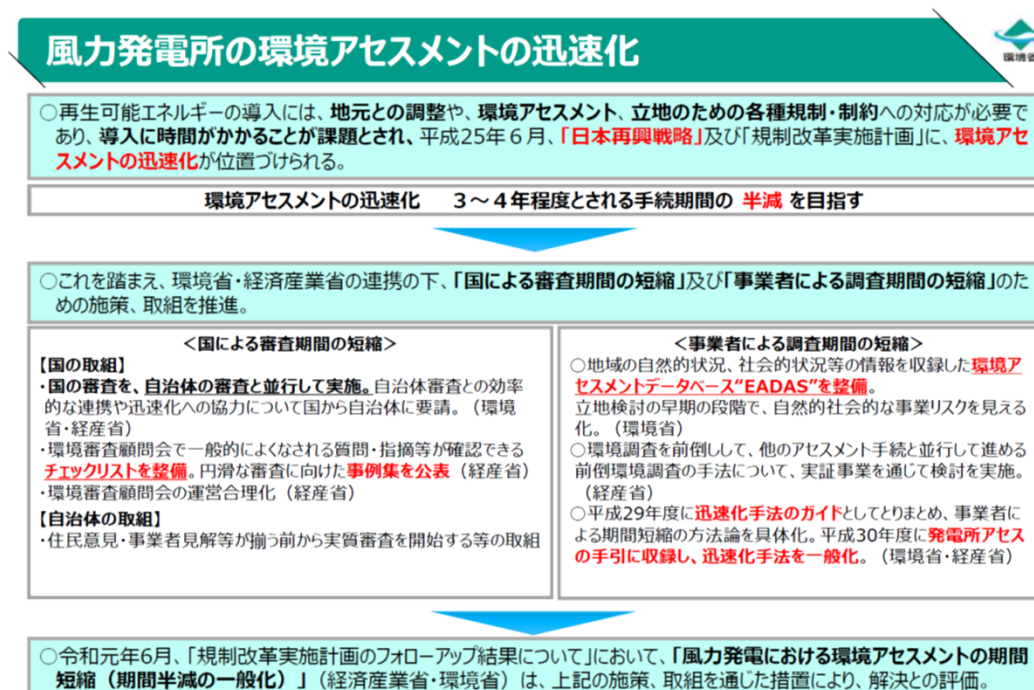
項目	時期	対象海区	景観の調査・予測・評価結果
事前調査	H20年	事業実施区域	主要な眺望地点として「地球の丸く見える丘展望館」、「外川漁港」および「飯岡刑部岬展望館」の3地点を選定し、現況写真を撮影した。
予測・評価	風車供用時	事業実施区域	<ul style="list-style-type: none"> ◎3点の写真を基にフォトモンタージュを作成した結果、3眺望点からいずれも視認されるが、視距離は3km以上離れており、遠景域に分類される。 ◎視覚占有率(閾値1.5%以下)、見込角度(眺望の主対象角度:15度、人間の識別可能な角度:1~2度)で評価した結果、いずれも極めて影響は小さいと予測された。
事後調査	風車供用時（H27年2月）	事業実施区域	<ul style="list-style-type: none"> ◎地球の丸く見える丘展望館において、再度写真撮影を実施し、フォトモンタージュと比較した結果、概ね同様の景観となっているとされている。 ◎銚子沖洋上風力現場見学者の来館者に対するアンケート調査(景観に係る項目)の結果、洋上風車の大きさについては全体の52%が「どちらともいえない」、全体の32%が「大きい・少し大きい」と回答された。風車までの距離については全体の55%が「どちらともいえない」、全体の20%が「遠い・少し遠い」と回答された。風車の色については全体の78%が違和感ないと回答されていた。
検証	<ul style="list-style-type: none"> ◎フォトモンタージュ写真・事後調査写真を比較すると概ね同様の景観状態で、背景に溶け込んでおり、景観的にはほとんど気にならないことから予測・評価は妥当と考えられた。 ◎ただし、事前と事後写真の撮影時期・天候・時間等できるだけ同一条件で撮影して、景観を比較することが望ましいと考えられた。 ◎景観に係るアンケートは、地球の丸く見える丘展望館以外に、外川漁港等主要眺望点の訪問者等を対象に実施し、影響評価の検証を行うことが望ましい。 		
留意点	◎地球の丸く見える丘展望館以外に、外川漁港等主要眺望点にて予測・評価した視覚占有率・視距離等に対する事後調査結果が無いことから、今後の留意点と考えられる。		

出典：新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）、着床式洋上風力発電の環境影響評価手法に関する基礎資料（最終版）、2018 より

2.4 銚子沖洋上風力発電所 -環境アセスメントを中心として-

(3) 風力発電所の環境アセスメントの迅速化

- 再エネ海域利用法では、改正温対法に見られる配慮書手続の省略といったアセス法の特例措置は規定されていない。
- 事業者は公募で選定された後、アセス法による環境アセスメントの実施を求められるが、事業者が公募選定後を見越して公募選定前の早い段階から配慮書手続を実施しているのが実態であり、環境アセスメントの手続が再エネ海域利用法の手続とは別に進められるため、複数の事業者が同じ海域で同時に環境影響評価手続を行うなど類似・重複の常態化による非効率性等が指摘されている。これを踏まえ、環境省・経済産業省の下、環境アセスメントの迅速化検討が進められる。



出典：環境影響評価の対象となる風力発電所の規模の検討の経緯について ～風力発電所の環境アセスメント～
第1回 再生可能エネルギーの適正な導入に向けた環境影響評価のあり方に関する検討会(2021年1月21日、環境省)より

6

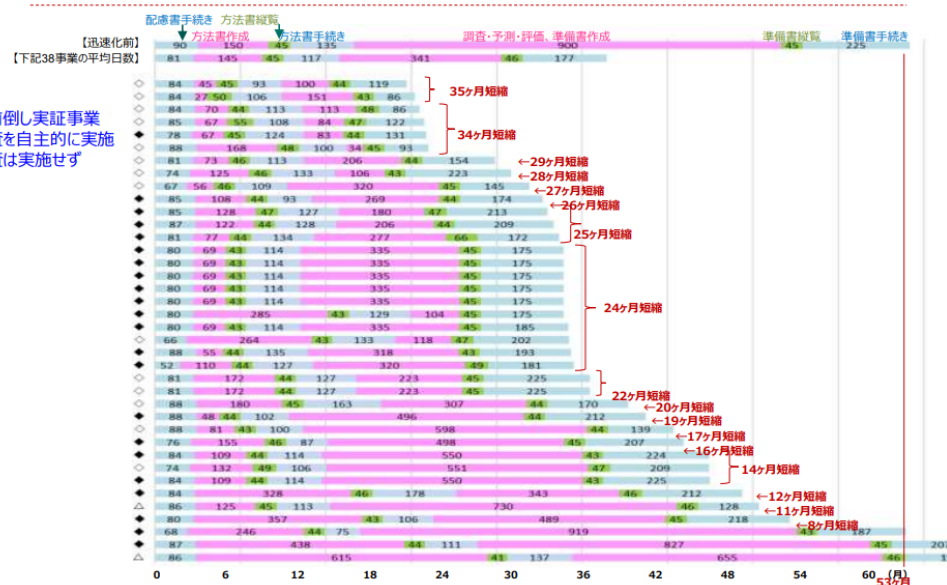
2.4 銚子沖洋上風力発電所 -環境アセスメントを中心として-

(4) 環境アセスメントの期間短縮の実例

- 環境調査を前倒して、他のアセスメント手続きと並行して進める前倒環境調査の手法など、平成29年度に迅速化手法のガイドがまとめられ、事業者による期間短縮の方法論を具体化。平均して3~4年程度とされた環境アセスメントが平均で約30ヶ月に短縮された。

環境アセスメントの期間（配慮書～準備書）の事例の実績

- 迅速化の取組を開始して以降、手続（配慮書～準備書）が終了した38事例のほとんどでアセス期間が短縮（※前倒し調査を実施した36事例のうち35事例で短縮化）

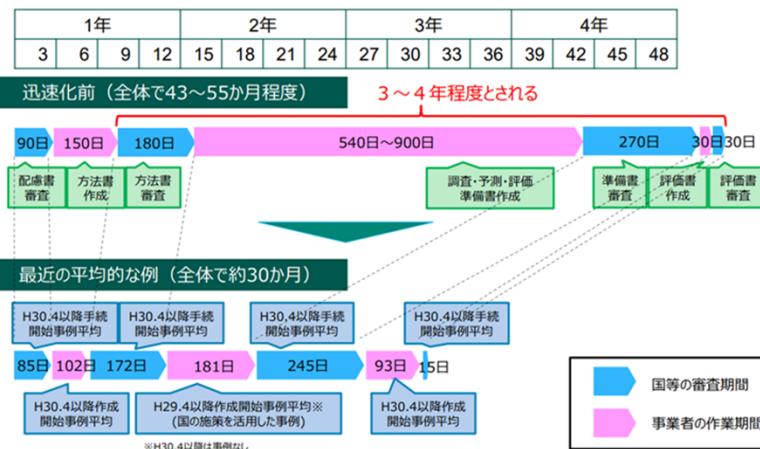


環境アセスメント迅速化手法のガイド
—前倒環境調査の方法論を中心に—

風力発電所 総論

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構
New Energy and Industrial Technology Development Organization

環境アセスメントの迅速化の達成状況（平均的な例）

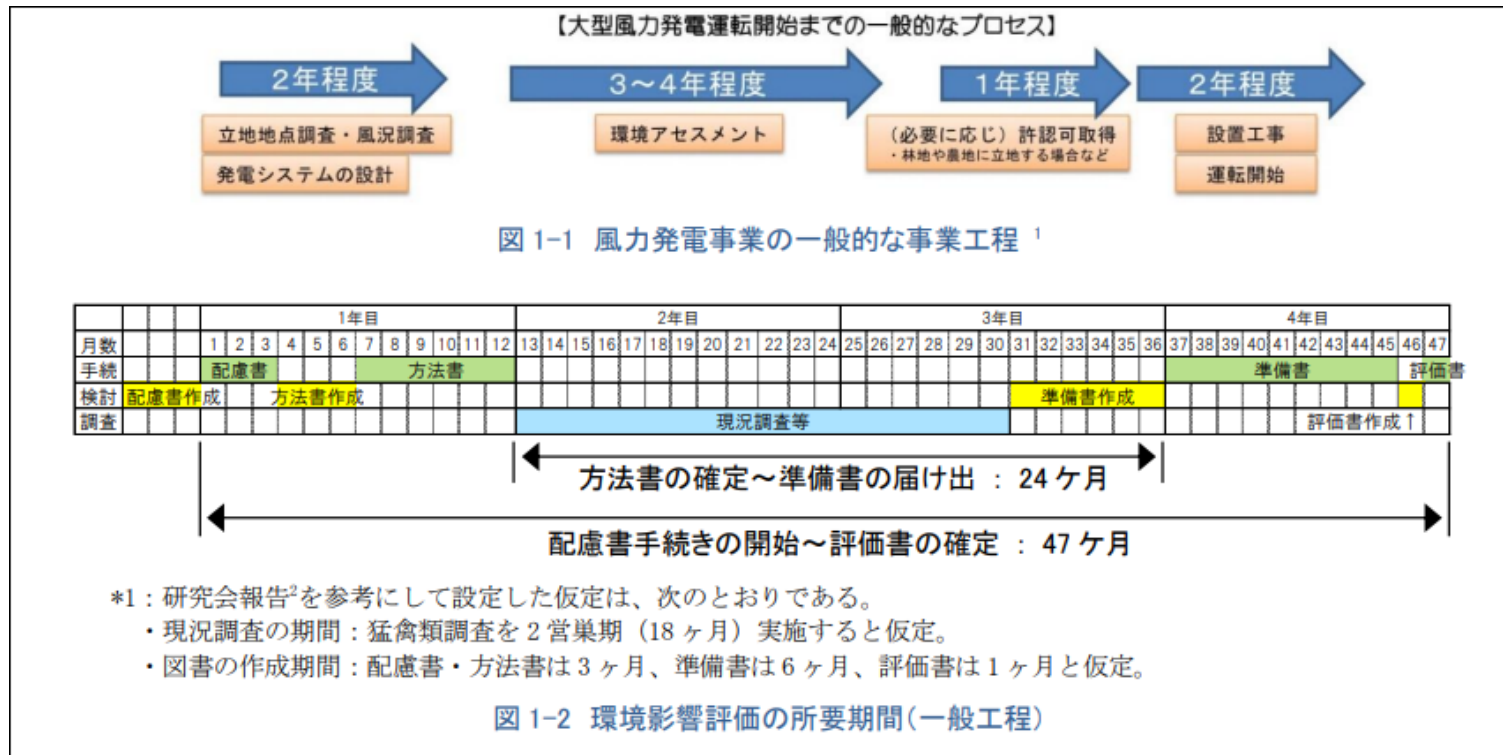


出典：環境影響評価の対象となる風力発電所の規模の検討の経緯について～風力発電所の環境アセスメント～
第1回 再生可能エネルギーの適正な導入に向けた環境影響評価のあり方に関する検討会（2021年1月21日、環境省）より

2.4 銚子沖洋上風力発電所 -環境アセスメントを中心として-

(5) 再エネ海域利用法と環境アセスメント

- 洋上風力発電事業の適地となる促進区域を指定、公募による事業者選定を行う再エネ海域利用法と環境影響評価法は独立しており、選定された事業者は法に基づき環境アセスメントを実施する必要がある。
- 事業者は洋上風力発電事業の迅速化に向けて、事業者選定前までに配慮書・方法書まで実施する傾向にある。
- 現況調査については、期間・費用が高額（数億円程度）であることもあり、事業者選定後に実施される。
- 洋上風力発電事業に於いて、環境アセスメントをどこまで短縮できるかが今後の課題となる。

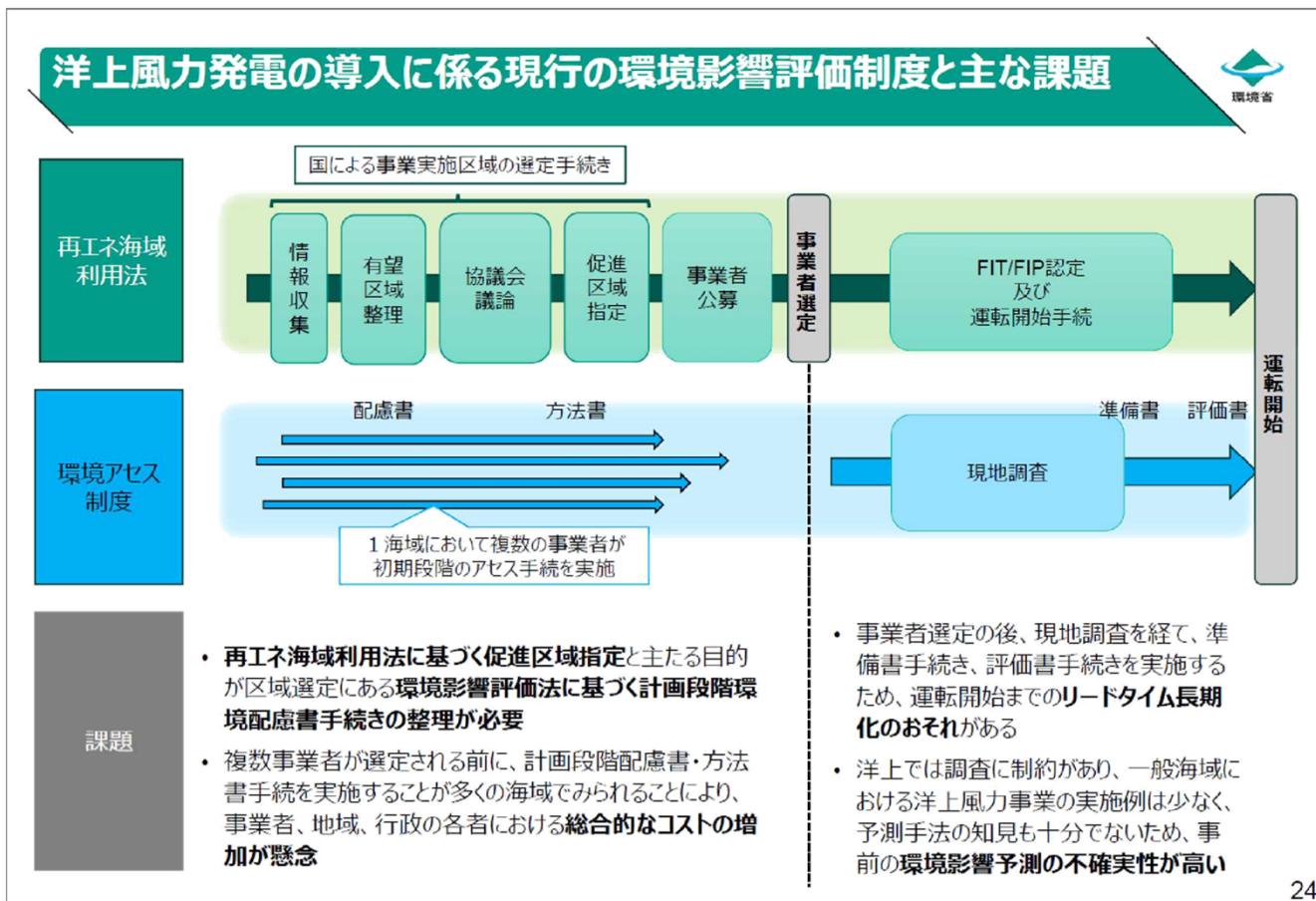


出典：新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)、環境アセスメント迅速化手法のガイド より

2.4 銚子沖洋上風力発電所 -環境アセスメントを中心として-

(6) 洋上風力発電の環境影響評価制度の最適な在り方に関する検討会(2021.7~)

- 関係省庁および大学機関にて環境影響評価制度に関する最適な在り方について協議が行われている。
- 複数事業者による同一海域での環境影響評価の回避と迅速化が望まれる。

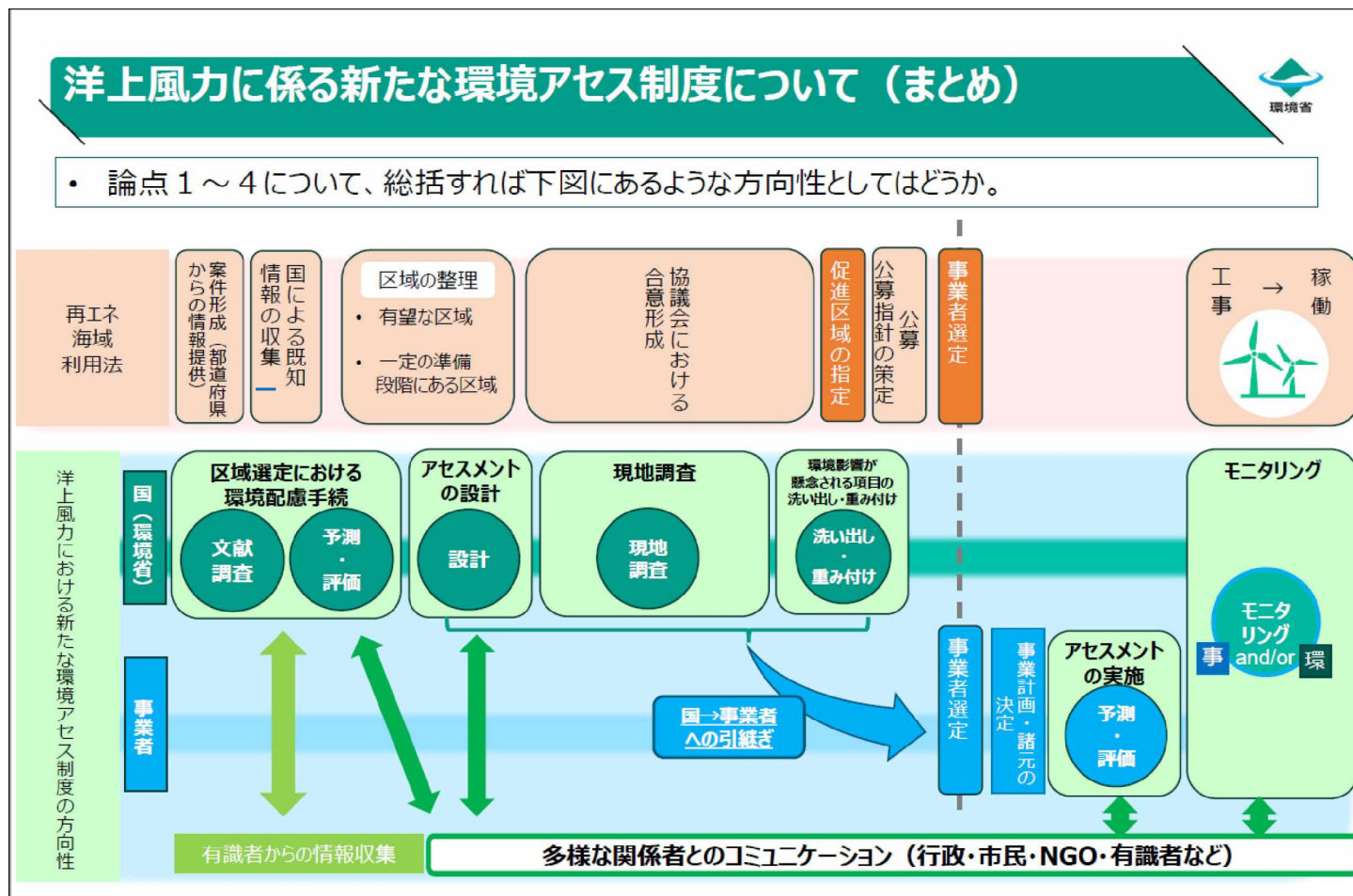


出典: 洋上風力発電の環境影響評価制度の最適な在り方に関する検討会、参考資料5、
令和4年度洋上風力発電の環境評価制度の諸課題に関する検討会取りまとめ(概要)、令和5年7月31日

2.4 銚子沖洋上風力発電所 -環境アセスメントを中心として-

(6) 洋上風力発電の環境影響評価制度の最適な在り方に関する検討会(2021.7~)

- 洋上風力発電の環境アセスメントの方向性として、環境省による新たな制度案が検討されている。



出典: 洋上風力発電の環境影響評価制度の最適な在り方に関する検討会、参考資料5、
令和4年度洋上風力発電の環境評価制度の諸課題に関する検討会取りまとめ(概要)、令和5年7月31日

2.5 まとめ

- 風況、波浪観測の低コスト化、高効率化や環境アセスメント期間の短縮は洋上風力の導入を促進し、更なる大量導入、コスト低減、経済波及効果に寄与するものと考えられる。
- 現在は、実証機導入時期と比較すると、技術面、制度・法の設備が進み、政府による導入目標である2040年までに30~45GWの案件形成に向けて状況が加速している。
- 一方で、政府の導入目標達成にはサプライチェーン形成、港湾インフラの整備、系統インフラの整備、EEZ（排他的経済水域）への拡大、浮体式導入、低コスト化、次世代技術開発など課題も多い。
- 政府が掲げる導入目標を達成するには、先行する海外での取組を参考としつつ、風況観測や気象海象、環境アセスメントに代表される非競争領域において洋上風力市場全体による協力が不可欠であると考えられる。

- ・デュアルスキヤニングライダーの活用
- ・レーダー式波浪計の導入による、O&M効率化
- ・環境アセスメント期間の短縮



大量導入

コスト低減

経済波及効果

3. 国内の洋上風力建設にかかわる現状 -建設技術を中心として-

3.1 日本特有の設計手法 -地震・台風-

3.2 着床式：SEP 船の規格・基準の整備、施工方法

3.3 浮体式：海底ケーブル・係留索の施工方法

3.4 浮体式：コンクリート製浮体式基礎（バージ式、セミサブ式）の課題と解決の方向性について

3.5 風車の大型化・大規模化（ウィンドファーム）-効率的な施工方法、コスト削減方法-

3.1 日本特有の設計手法 -地震・台風-

(1) 波浪荷重、津波荷重条件の設定 -波浪-

(a) 風波とうねりの混合波浪のスペクトルモデルに関する研究 (種本ら、2016)

- 洋上風車の設計においては、有義波と有義波周期から得られる波浪スペクトルモデルによる波の時系列を入力値として、時刻歴応答解析を実施し、風車及びその基礎に作用する荷重を評価する。
- 風と波の結合確率分布の平均値の関係をを用いて 風波とうねりを考慮した混合スペクトルモデルが提案されている。
- 福島沖浮体式洋上風力発電実証研究サイトにて、実測スペクトルとの検証が行われている。
- 我が国の洋上風力施設設計において、太平洋側で用いるスペクトルとして標準的なものになると考えられる。

(b) 風と波の結合確率論分布モデルに関する研究 (種本ら、2015)

- 10年分の波浪シミュレーションによる予測値を分析し、風速の関数として有義波高と有義波周期の平均、標準偏差、出現頻度及び有義波高と有義波周期の相関をモデル化することにより、風速、波高及び波周期の結合確率分布モデルを提案が提案されている。
- NEDO銚子沖洋上風力発電設備における1年間の風速、有義波高及び有義波周期の観測値と比較検証が行われている。

(c) 日本海側の洋上風車に対応した風と波の長期結合確率分布モデル (田中ら、2019)

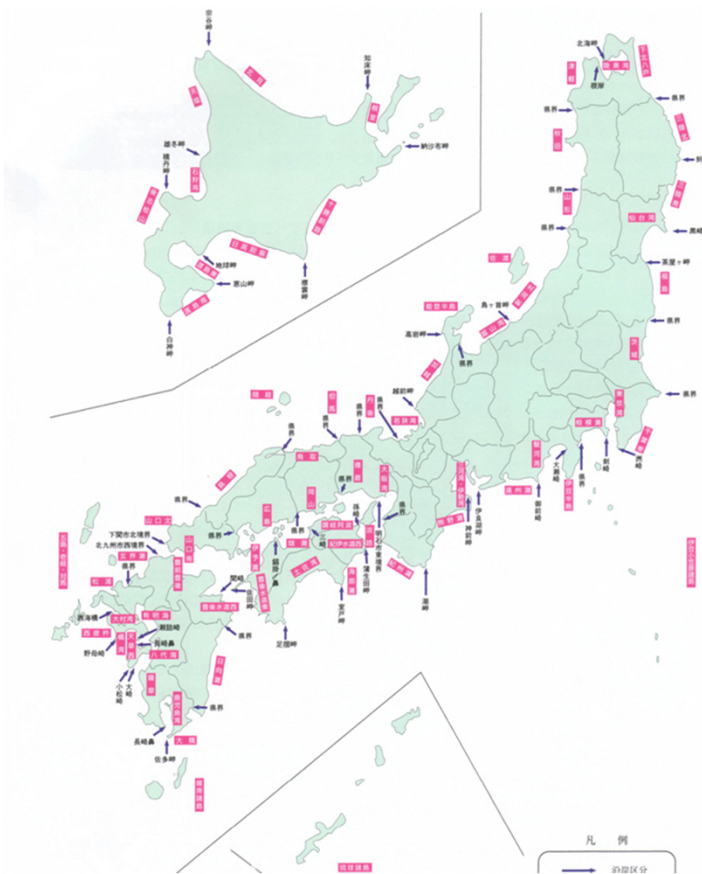
- (b)で示した種本・石原の風と波を考慮した長期結合確率分布モデル(風波とうねりを考慮)について、日本海側の響灘で適用する際のパラメータ設定とモデルの改良について記したものである。
- 種本・石原モデルを、さらに他の海域に用いる際にも参考となると思われる。

3.1 日本特有の設計手法 -地震・台風-

(1) 波浪荷重、津波荷重条件の設定 -津波-

(d) 海岸保全基本計画 (都道府県が策定する)

- 全国91の沿岸に対して「海岸保全基本計画」が策定されており、都道府県によってはこの「海岸保全基本計画」に設計津波水位を記載している。



設計津波水位の記載例

地域海岸名 ※1	対象地震	地区名	設計津波 の水位 (T.P.+m)	高潮・波浪 防護高 (T.P.+m)	津波、高潮 のチェック	計画 天端高 (T.P.+m)
八森地域海岸	庄内沖地震(1833)	八森地域海岸	4.7	5.5	高潮	5.5
能代地域海岸	北海道南西沖地震(1993)	能代地域海岸	4.1	5.5	高潮	5.5~6.8※2
男鹿地域海岸	庄内沖地震(1833)	北浦~島漁港	3.0	5.5	高潮	5.5
		戸賀	4.0	4.0	高潮	4.0
		加茂青砂~台島	4.8	5.5	高潮	5.5
秋田・船川港地域海岸	庄内沖地震(1833)	船川港	5.7	3.5	津波	4.5~6.0
		脇本漁港~脇本船越	4.7	5.5	高潮	5.5
		天王~秋田港(北)	5.4	5.5~6.0	高潮	5.5~6.0
新屋・下浜地域海岸	日本海中部地震(1983)	秋田港(南)	6.0	6.0	高潮	6.0
		新屋・下浜	5.3	5.5	高潮	5.5
由利地域海岸	日本海中部地震(1983)	由利地域海岸	4.5	5.5	高潮	5.5
鳥海地域海岸	日本海中部地震(1983)	鳥海地域海岸	4.0	5.5	高潮	5.5

出典:「秋田沿岸海岸保全計画(秋田県)」から抜粋

出典:国土交通省、海岸保全基本方針・海岸保全基本計画

3.1 日本特有の設計手法 -地震・台風-

(2) 地盤条件及びその他条件の設定 -地盤(工学的基盤)-

(a) 洋上風力発電設備建設に係る地盤リスク低減を考慮した地盤調査に関する一考察 (野口ら、2021)

- 洋上風力発電事業の企画立案に際しては、既往資料を基に対象エリアの海底面状況・海底面下の土層構成を推定し、エリア全体の地盤特性を把握する。その後、当該エリアでの事業性が見込まれた後、海底面状況を把握する1次調査、詳細な土層構成・工学的基盤面を把握する2次調査、風車建設地点における詳細な3次調査を行う流れとなる。

(b) 洋上風力発電設備に係る海底地盤の調査及び評価の手引き (沿岸技術研究センター、海洋調査協会、2022)

- 工学的基盤面を把握するための現地調査項目として手法とその手法によって得られる情報が以下のように示されている。
 - ・ボーリング調査による標準貫入試験、PS検層 → 土層構成、工学的基盤面、 V_s 深度分布
 - ・CPT調査によるPS検層 → 土層構成、工学的基盤面、 V_s 深度分布
 - ・海底微動アレイ探査 → 工学的基盤面、 V_s 深度分布
- 洋上風力発電設備に係る海底地盤調査において実施する主要な照査項目、調査フロー、設計で必要となる地盤定数とその地盤定数を入手するための試験方法が示されている。

(c) 令和5年度セントラル方式による調査計画(概要) (エネルギー・金属鉱物資源機構、2023)

- [岩宇・南後志地区沖 調査概要] の中で、既に実施されているNEDO地盤調査結果に基づき、
 - ・工学的基盤面を確認するためのボーリング調査
 - ・貫入試験 (SPT/CPT) ※ボーリング本数は複数孔を予定
 - ・音波探査を海域の一部で実施と示されており、SPTとCPTの相関および音波探査(微動アレイ?)などを行うことが示されている。
- 海底地盤調査の実施項目と取り纏めについて一覧が示されている。

3.1 日本特有の設計手法 -地震・台風-

(2) 地盤条件及びその他条件の設定 -地盤(調査)-

(d) 風力発電と地形・地質(その1:概要および洋上風力発電) (環境地質研究部会、2021)

- 洋上風力発電施設の海底地形・地質調査の内容については、着床式の技術指針4)、6)で推奨内容が示されている。また、港湾の施設の技術上の基準・同解説(日本港湾協会、2018)を参考とすることができる。とされている。

(e) 着床式洋上風力発電導入ガイドブック(最終版) (NEDO、2018)

- 調査地点、調査間隔および地盤調査の深度は、設置予定点の推定される地盤状況および風車規模、支持構造物の種類に応じて決定する。地質柱状図の既往調査資料がない場合には、ボーリング調査(図III.3.3-3; SEP船からコアサンプラーを垂下して行う)を実施する。地盤の状況に応じて原位置試験(標準貫入試験、透水試験等)、室内試験(土粒子の密度試験、圧縮試験等)、貫入試験を行い、支持力・沈下特性ならびに基礎工事の施工に必要な地盤の性質を求める。
- また、改正建築基準法の施行に伴い、孔内水平載荷試験、PS検層等時刻歴応答解析を行うための調査も行う。海底土質調査に関してIEC61400-3の12.15では、調査にあたっては1箇所以上のボーリング調査と室内土質試験の実施が必要で、基礎ごとの土質調査が望まれるとしている。
- 日本ではN値による設計法が一般的であるが、欧州ではCPT(Cone Penetration Test)等の比較的経済的な土質調査法が普及している。したがって、CPTとバイブロコアにより収集した試料の室内土質試験と併用し、1箇所のボーリング試験とのキャリブレーションを実施検証する。

3.1 日本特有の設計手法 -地震・台風-

(2) 地盤条件及びその他条件の設定 -液状化-

(a) 埋立地の液状化対策ハンドブック (沿岸開発技術研究センター、1997)

- 液状化予測法の分類が示されている。
- 「粒度とN値による予測・判定」については、港湾の施設の技術上の基準・同解説と概ね同内容。「繰返し三軸試験結果による予測・判定」については、石原らが不規則波を用いて行った実験に基づく方法を示している。なお、その他の手法として、Seedらの方法、岩崎らの方法、累積損傷度理論を用いた方法についての解説と、これらの主な相違点（補正係数の考え方の違い）について示している。

表 各種液状化予測法の分類

番号	地盤の液状化強度の推定方法	地震動レベルなどの推定方法	予測法の例
①	—————	マグニチュード・震央距離	栗林・龍岡ら ¹⁾ 、若松 ²⁾
②	微地形	—————	古藤田・若松ら ³⁾
③	粒度・N値	—————	危険物の規制に関する規則 ⁴⁾
④		地表の最大加速度	道路橋示方書・同解説 ⁵⁾
⑤		地表の最大加速度・マグニチュード	建築基礎構造設計指針 ⁶⁾
⑥		全応力モデル	港湾の施設の技術上の基準・同解説 ⁷⁾
⑦	繰返し三軸試験等	全応力モデル	Seed and Idriss ⁸⁾ 、石原 ⁹⁾
⑧		有効応力モデル	Finn et al. ¹⁰⁾ 、井合ら ¹¹⁾

(b) 港湾の施設の技術上の基準・同解説 (日本港湾協会、2018)

- 液状化の予測・判断手法として、「液状化の基本的予測・判定手順」に示す、「粒度とN値による予測・判定」及び「繰返し三軸試験による予測・判定」の手法が示されている。

3.1 日本特有の設計手法 -地震・台風-

(2) 地盤条件及びその他条件の設定 -液状化-

(c) 建築基礎構造設計指針 (日本建築学会、2019)

- 液状化の予測・判断手法として、「粒度と N 値による予測・判定」を示している。液状化の影響を考慮して地盤剛性を低下させる手法についても以下の通り示されている。

■ 地盤剛性低下

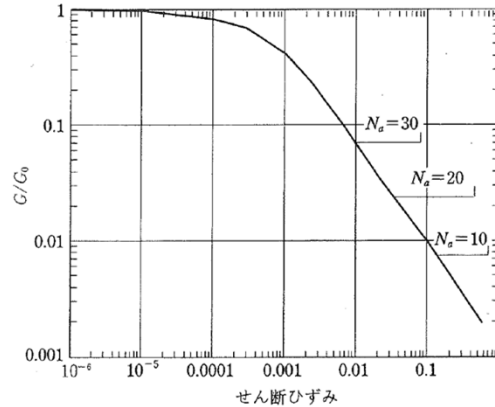


図 3.2.10 補正 N 値と剛性低下率の関係

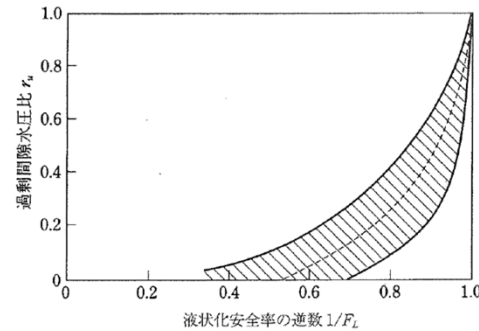


図 3.2.11 安全率と水圧上昇の関係^{3.2.10)}

■ 水平地盤反力係数の低減

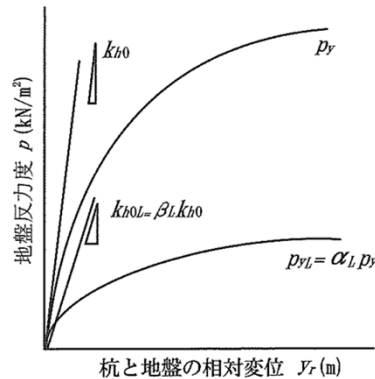


図 3.2.12 杭の水平地盤反力-変位関係のモデル化

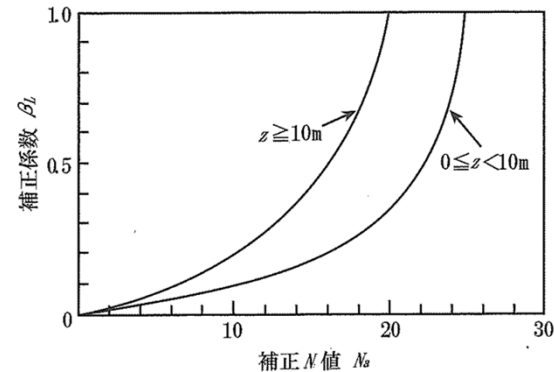


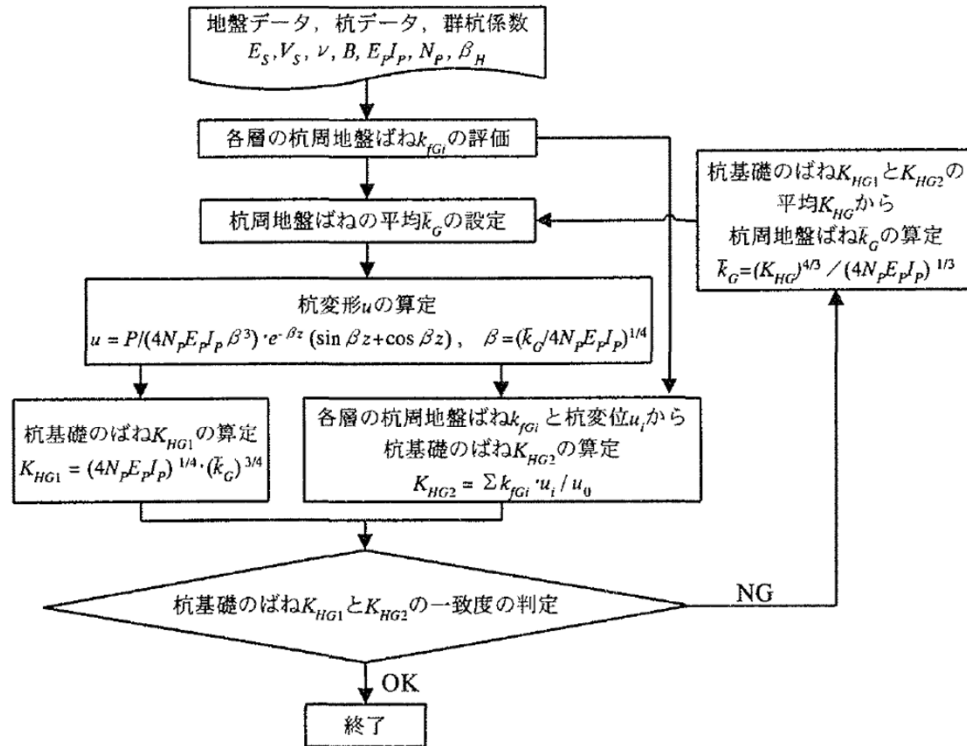
図 3.2.13 地盤反力係数の低減率^{3.2.20)を修正}

3.1 日本特有の設計手法 -地震・台風-

(3) 構造解析 -耐震設計-

(a) 風力発電設備支持物構造設計指針・同解説 (土木学会、2010)

- 地震時の地盤ばね設定手法として、Francisの式及びGazetasらによる方法を示している。水平地盤ばねのばね定数 K_{HG} は、下図フローに従い、 K_{HG1} と K_{HG2} が等しくなるように、 \bar{k}_G が収斂するまで繰り返し計算することにより求めるとされている。



図解 5.16 弾性支承梁の理論解を利用した地盤ばねの評価フロー³⁾

3.1 日本特有の設計手法 -地震・台風-

(3) 構造解析 -耐震設計-

(b) 液状化地盤におけるモノパイル式洋上風力発電設備を対象とした風と地震の連成解析の基礎検討

(大矢、2022)

- 統一的解説による地震時の荷重評価としては、地震波を対象とした時刻歴応答解析結果と、地震時に組み合わせる波・風の荷重効果を時刻歴により別に求めて、これらの最大値を足し合わせる分離解法が示されている。
- しかし分離解法は、風を受ける洋上風力発電設備の地震時挙動を精緻に評価できず、経済面で不利な設計となっている可能性がある。このことから、風・波と地震の連成解析が可能な解析コードを開発し、モノパイル地震時挙動を検討した結果について示した文献である。

(c) 洋上風力発電モノパイル基礎の地震時の地盤減衰評価

(その1: 逸散減衰効果の検討) (山本ら、2023)

- 風車の大型化に伴って地震解析における減衰の設定の重要性が高まっている。従来の土木学会指針に示されている地盤の逸散減衰の設定法（ウィンクラーばね+ダッシュポット）では減衰が小さく評価され、安全側の設定となっていた。
- 吉岡らの提案する逸散減衰をレーリー減衰として設定する方法をモノパイル基礎の風車に適用して従来法と比較検証した結果を示している。従来の減衰設定法の2次モードに対応するようにレーリー減衰の2次モードを増加させることで、合理的な地震応答を再現することができるとされている。

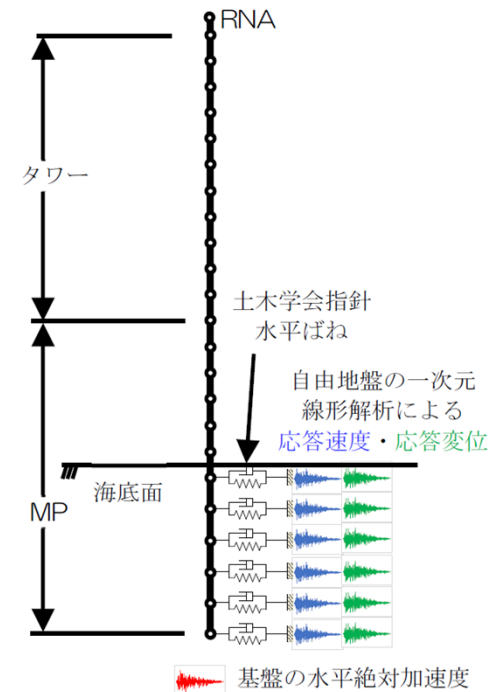


図 検証に用いた解析モデル

3.1 日本特有の設計手法 -地震・台風-

(3) 構造解析 -耐震設計-

(d) 洋上風力発電モノパイル基礎の地震時の地盤減衰評価(その2:薄層法及びFEMの適用) (田中ら、2023)

- その1(c)で提案した方法は薄層法により逸散減衰を設定したモデルの応答とほぼ結果が一致しており、手法の妥当性を確認している。
- 3次元FEMによる解析結果とも比較しているが、3次元FEMによる応答の方が小さくなる傾向が見られた。これは1次元モデルでは3次元効果が考慮されていないためと主張しており、今後の課題としている。

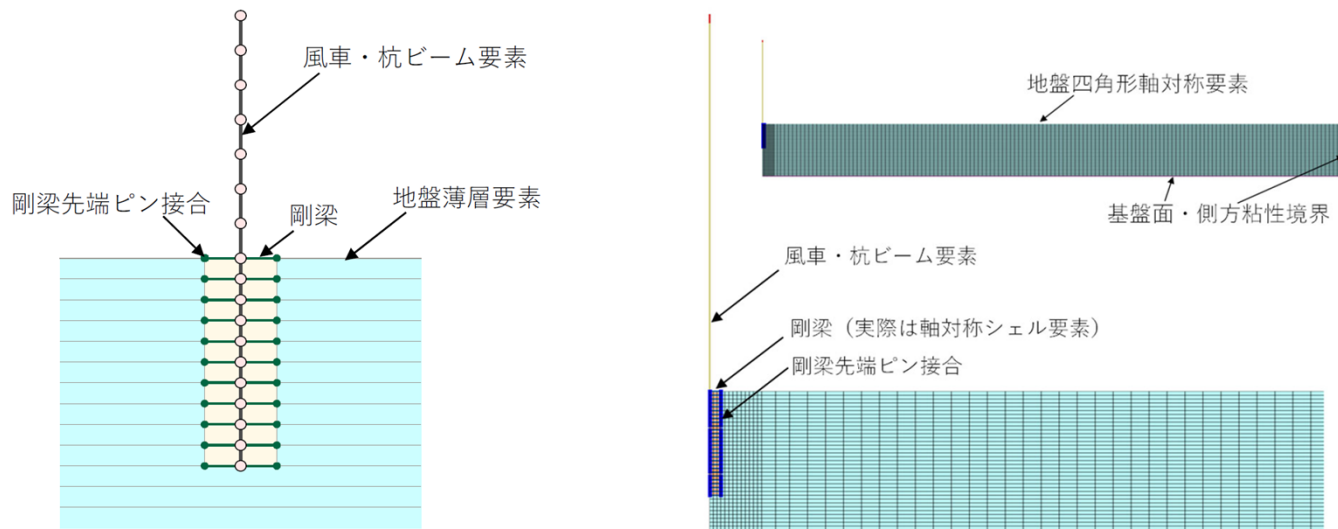


図 検証に用いた解析モデル
(左：薄層法一体モデル、右：軸対称FEM一体モデル)

3.1 日本特有の設計手法 -地震・台風-

参考文献

(2) 地盤条件及びその他条件の設定 -液状化-

- 1) 石原研而：土質動力学の基礎, 鹿島出版会, 1976.
- 2) Seed, H. B. : Soil Liquefaction and Cyclic Mobility Evaluation for Level Ground during Earthquakes, J.GED, ASCE, 1979, Vol.105, No.GT2, pp.201~205
- 3) 岩崎敏男, 龍岡文夫, 常田賢一, 安田進：砂質地盤の地震時流動化の簡易判定法と適用例, 第5回日本地震工学シンポジウム講演集, 1978, pp.641~648.
- 4) Annaki M. and Lee, K. L : Equivalent Uniform Cycle Concept for Soil Dynamics, J. GED., ASCE, 1977, Vol.103, No.GT6, pp.549~564.

(3) 構造解析 -耐震設計-

- 3) 日本建築学会, 建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計, 2006

3.2 着床式:SEP船の規格・基準の整備、施工方法

(1) 各社におけるSEP船の仕様

- 国内では10MW/基未満の中型風車が設置できるSEP船の建造から始まり、大型風車に対応可能な2,500トン超の吊り能力を持つSEP船の建造が行われたが、新たに同クラスの新造船の計画はない。
- 大型風車を採用する動向に応じて海外では2,500トン超の吊能力を持つ新造船が2023年～2026年にかけて就航する予定である。

日本船籍 SEP船 (※日本船籍化の予定を含む)

No	1	2	3	4	5	6
SEP船	1300 t級		1600 t級			2500 t級
所有会社	大林/東亜	戸田/熊谷/西松/若築/岩田地崎/吉田組	Van Oord	五洋/鹿島/奇神	五洋/DEME (JOMO)	清水建設
船名	柏鶴	JWFC Sunrise	Aeolus	CP-16001	Sea Challenger	Blue Wind
吊上げ能力 (t)	1,250	1,300	1,600	1,600	900 (1,600改造予定)	2,500
積載重量 (t)	4,800		11,990		6,000	10,000
デッキ長さ (m)	88.0	112.0	139.4	123.0	132.4	142.8
デッキ幅 (m)	40.0	50.0	44.5	45.0	39.0	50.0
喫水 (最大) (m)	4.6		8.6	5.6	5.8	6.2
最大作業水深 (m)	29.0	60.0 (レグ長130m)	45.0	50.0	55.0	45 - 65
自航/非自航	非自航	非自航船	自航	非自航	自航	自航
建造引渡し年	2023	2014	2014	2023/09	2014	2023/1

海外船籍 SEP船

No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
SEP船	1200 t級		1600 t級							2500 t級	
所有会社	Hyundai Engineering	Jan De Nul	Cadeler	DEME	DEME USA	Cadeler	Cadeler	Fred Olsen	Fred Olsen	Seaway7	
船名	Hyundai Frontier	Vole Au Vent	Wind Scylla	Innovation	Sea Installer	Wind Orca	Wind Osprey	Bold Tern	Brave Tern	Ventus	
吊上げ能力 (t)	1,200	1,500	1,500	1,500	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	2,500	
積載重量 (t)		8,000	8,000	8,000	8,000			9,000	9,000	10,931	
デッキ長さ (m)	85.0	140.4	139.0	147.5	132.4	155.6	155.6	132.0	132.0	142.0	
デッキ幅 (m)	41.0	41.0	50.0	42.0	46.0	49.0	49.0	45.0	45.0	50.0	
喫水 (最大) (m)		6.3	6.0	7.3	5.8	6.0	6.0	5.8	5.8	9.4	
最大作業水深 (m)		50.0	65.0	65.0	55.0			60.0	60.0	65.0	
自航/非自航	非自航船	自航	自航	自航	自航	自航	自航	自航	自航	自航	
建造引渡し年	2023	2013	2015	2015	2012	2012	2012	2013	2013	2023/12	

No	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
SEP船	2500 t級					3000 t級				
所有会社	Cadeler	Cadeler	Cadeler	Cadeler	Cadeler	Van Oord	Jan De Nul	Havfram Wind	Havfram Wind	Cadeler
船名	Wind Peak	Wind Pace	Wind Ally	Nessie	Siren	Boreas	Voltaire	NG-20000X	NG-20000X-HF	Wind Ace
吊上げ能力 (t)	2,500	2,500	2,500	2,600	2,600	3,000	3,200	3,250	3,250	3,000クラス
積載重量 (t)							21,500	16,100	16,100	
デッキ長さ (m)	151.1	151.1	151.1	148	148	175	169.3	151.1	151.1	
デッキ幅 (m)	58.0	58.0	58.0	56	56	63	60	58	58	
喫水 (最大) (m)				6.35	6.35	8.5	7.5			
最大作業水深 (m)	70.0	70.0	70.0	65.0	65.0	70	80	70	70	
自航/非自航	自航	自航	自航	自航	自航	自航	自航	自航	自航	自航
建造引渡し年	2024Q3予定	2025Q2予定	2025Q3予定	2024予定	2024予定	2024予定	2022	2024予定	2025Q4予定	2026Q3

3.2 着床式:SEP船の規格・基準の整備、施工方法

(2) 風車大型化に伴う施工時の課題

(a) 風車の大型化に適したSEP船調達

- 2025年～2028年頃に建設が予定されている洋上プロジェクトでは12MW～15MWクラスの風車が予定される。12～15MW機のモノパイルの杭径は8～12m、杭重量は約2,000t、風車ローター高は海面から160～190mにもなる。
- これに対応するSEP船は風車施工で1,600t級、基礎施工には2,500t級と想定される。
- 2,500t吊以上の大型SEP船は国内では1社に限られており、計画段階で調達を確約できないケースが多い。また、外国船の調達も欧州での案件が優先される傾向にあり選定の自由度が極端に低い。

(b) 外国船調達に伴う留意点

- カボタージュ規制に関連し、60日に1回の海外寄港が必要である。最寄りの寄港地としては韓国の釜山港が有力となる。回航の所要日数は東北地方日本海側からは往復10日/回程度の日数が必要とあなる。
- カボタージュ規制に関しては、例外的に外国籍船の国内輸送も可能とする国土交通大臣の特別許可（船舶法第3条但し書に規定）がある。その後明確な発表はなく不明確なままであり、現段階で特例措置が認められるという前提で傭船契約を進めるのはリスクを伴う。
- 外国船籍を日本船籍に変更するには、設備機器の日本仕様への変更を伴う上、船舶法に基づき船舶検査、測度（トン数の算定）、登録手続きが必要となり、計画から完了までの標準的な処理期間はSEP船等の特殊船で1年以上かかる。
- 外国船を日本籍船に船籍変更して日本領海内で作業を行う場合、日本法人が外国の船社へ貸渡し、外国籍船員の配乗権を得て使用する方式（マルシップ方式）が適用される。この条件として外国人船員とは別に、操船作業ができる日本人船員チーム（8名程度）が乗船する必要がある。

3.2 着床式:SEP船の規格・基準の整備、施工方法

(2) 風車大型化に伴う施工時の課題

(c) 軟弱な海底地盤での施工(支持力の比較的高い砂質層下に軟弱粘土層を挟んでいる互層も対象)

- 洋上ウィンドファーム建設のためのMWSガイドラインではSite Specific Assessmentの要求事項の一つに地盤調査結果に基づくレグ貫入量の検討 (Leg Penetration Analysis, LPA) がある。海底地盤の支持力が不足し、レグの地盤貫入量が過大になることで下記のリスクが生じる可能性は、大型船での施工に伴い増大する傾向にある。
- ジャッキアップ後、船体が上昇状態での作業中、海底地盤の支持力不足のためレグが突き抜けてしまうパンチスルーが発生し危険な状況になるリスクがある。
- 海底地盤の支持力不足のためレグが過大に沈下し、レグの貫入及び引き抜きに想定以上の時間がかかるリスクがある。

(d) 基地港での護岸整備の問題

- 基地港には、重量物である基礎部材や風車部材の移動運搬に耐えられるヤードの地耐力と、岸壁護岸際に設置する組立ヤードや岸壁前面で係留するSEP船のレグ支圧荷重に対して岸壁が安定していることが求められる。
- 日本の岸壁の多くが設計地耐力の低い ($\sim 2\text{t/m}^2$) ケーソン岸壁のため、水切りや浜出し作業時にケーソン後背地から部材を揚重できるだけのブーム長が必要となる。
- 岸壁前面でSEP船のジャッキアップを行うため、支圧荷重が岸壁に及ぼす影響 (沈下等の変位やひび割れ等) を事前に解析し、影響を及ぼすリスクがある場合には、ジャッキアップ位置を受動崩壊面の外側まで離すなどの措置も必要なケースがありSEP船の揚重能力を十分活かすきれない (石狩湾新港) 。
- 杭や風車部材の大型化に伴い、岸壁および野積地の地耐力の確保のため地盤改良を行う場合、港湾管理局から原状復旧して返却することが要求されることが多く撤去についてのコストアップに留意する必要がある。

3.2 着床式：SEP船の規格・基準の整備、施工方法

(2) 風車大型化に伴う施工時の課題

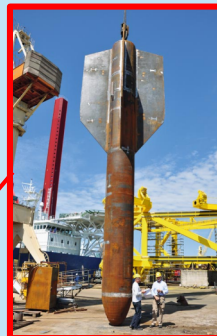
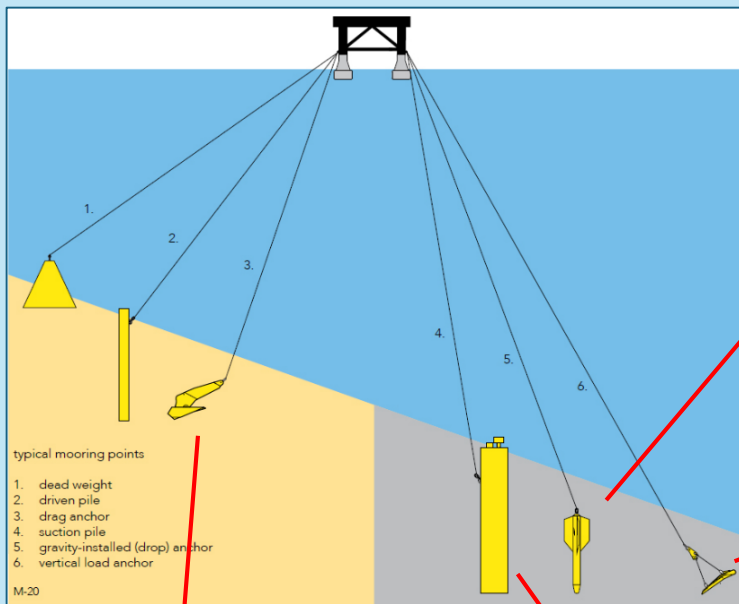
(e) 太平洋側でのリスク上昇の問題

- 工事实績のある日本海側の春～秋施工と比較して、太平洋側での気象海象条件は台風の通過も含め、一年を通じて悪い。
- 波浪の影響を直接受ける着床式モノパイル基礎の施工精度の確保のためにバイブロハンマー併用を選択した場合、機器一式分の重量や容積をSEP船の積載可能重量から減じるため、基礎部材の積込可能基数が減り、稼働率が低下するケースもある。
- カボタージュ規制が適用される場合、最も近い寄港地として選択される韓国への回航でも、海象条件が悪く上に長距離となり日本海側に比べ更に日数増が見込まれる。

3.3 浮体式：海底ケーブル・係留索の施工方法

(1) アンカーの種類

- 係留索や係留チェーンを保持するアンカーについては、以下のものの使用が想定される。



出典：
<https://norwegianscitechnews.com/2009/12/new-approach-to-offshore-anchors/> (参照2025/12/25)



出典：<https://norwegianscitechnews.com/2009/12/new-approach-to-offshore-anchors/> (参照2025/12/25)

出典：Vryhof Manual, the guide to anchoring,
https://www.plaisance-pratique.com/IMG/pdf/Vryhof_Anchor_Manual2015.pdf (参照2025/12/25)



出典：<https://www.nauticexpo.com/prod/vryhof/product-68605-504985.html> (参照2025/12/25)



出典：<https://semar.no/oil-and-gas/> (参照2025/12/25)

		Dead weight	Drag embed	Pile	Vertical load
地盤の種類	粘土層 (軟)	○	○	○	○
	粘土層 (中)	○	○	○	○
	粘土層 (硬)	○	○	△	△
	砂質土層	○	○	○ (suction 以外)	△
	礫層	○	△	△	△
支持力	全方向	○	△	○	○
	水平方向	○	○	○	○
Ultimate Holding Capacity(UHC値)		△	○	△	○
施工費用		安い	非常に安い	高い	高い

出典：Tecnico, Design optimization of the mooring system for a floating offshore wind turbine foundation,
https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/281870113704214/Master%20Thesis%20Daniel%20Toledo_Final.pdf より和訳 (参照2025/12/25)

3.3 浮体式：海底ケーブル・係留索の施工方法

(2) 係留方法と係留索の種類

- 浮体の係留において、位置保持に用いられている方法を以下に示す。

係留方法	特徴	メリット	デメリット
緩係留 (Catenary)  <p>出典: Design of a 10MW Wind Turbine Rotor Blade for Testing of a Scaled-down Floating Offshore Support Structure, TUDelft, Oct.25, 2017</p>	<p>海底のアンカーと浮体をカテナリー状に接続する。主として、鋼製チェーンで接続する方法。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・国内でも実績が豊富にある。 ・多様な水深に対応可能。 	<ul style="list-style-type: none"> ・浅水深においては、係留設計が困難になる。 ・チェーン本数が増えると、浮体重量や設置コスト増大につながる。
トート係留 (Taut)  <p>出典: https://www.tensiontech.cn/services/mooring (参照2025/12/25)</p>	<p>初期張力を調整して索の伸びにより係留力を得て接続する方法。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・係留索の重量がチェーンよりも軽くなり、大水深に適用しやすい。 ・係留展開面積をカテナリー係留よりも小さくできる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・把駐力として、アンカーは水平と鉛直方向が拮抗しなければならない。 ・設置コストが高い。
緊張係留 (Tension Leg Platform)  <p>出典: Design of a 10MW Wind Turbine Rotor Blade for Testing of a Scaled-down Floating Offshore Support Structure, TUDelft, Oct.25, 2017</p>	<p>浮体と海底基礎を接続し、浮体構造が強制的に沈めて得られる浮力により接続する方法。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・浮体の運動を小さくすることができる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・設置コストが高い。

3.3 浮体式：海底ケーブル・係留索の施工方法

(2) 係留方法と係留索の種類

- 浮体の係留において、係留索の種類を以下に示す。

	チェーン		ワイヤーロープ	合繊ロープ		
	スタッドレス	スタッドリンク	亜鉛メッキワイヤー	ポリプロピレン・ナイロン	ポリエステル	アラミド・HMPE
線径密度	高い	非常に高い	やや低い	低い	低い	低い
摩擦/紫外線/マリングロウスの耐性	高い	高い	高い	低い	普通	やや高い
疲労破壊耐性	普通	やや高い	高い	低い	高い	非常に高い
弾性	小さい	小さい	やや小さい	高い	普通	小さい
施工性	簡単	非常に簡単	普通	困難	困難	困難
補修のしやすさ	簡単 (部分補修可)	簡単 (部分補修可)	困難 (すべて取替必要)	困難 (すべて取替必要)	困難 (すべて取替必要)	困難 (すべて取替必要)
コスト	非常に安い	安い	普通	安い	普通	高い

出典：Tecnico, Design optimization of the mooring system for a floating offshore wind turbine foundation,
https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/281870113704214/Master%20Thesis%20Daniel%20Toledo_Final.pdf より和訳（参照2025/12/25）

3.3 浮体式：海底ケーブル・係留索の施工方法

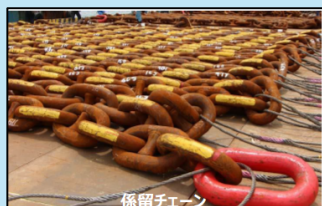
(3) 国内の施工実績

- 福島浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業における施工例を以下に示す。

1. 係留工事

実証で用いた係留チェーンは、係留チェーン径が132mm でR3S の規格。我が国の厳しい気象・海象条件に適している。

係留アンカーについては、ドラッグアンカー方式（オランダにあるVryhof 製のStevshark）を採用。



係留チェーン



係留アンカー

実証研究実施海域にコンパクトセミサブ浮体及びサブステーションを係留する係留アンカー及び係留チェーンの設置を行う。



係留チェーン敷設

係留チェーンと係留アンカーの敷設の後、設計上のチェーンの把駐力を得るために引張試験を実施する。

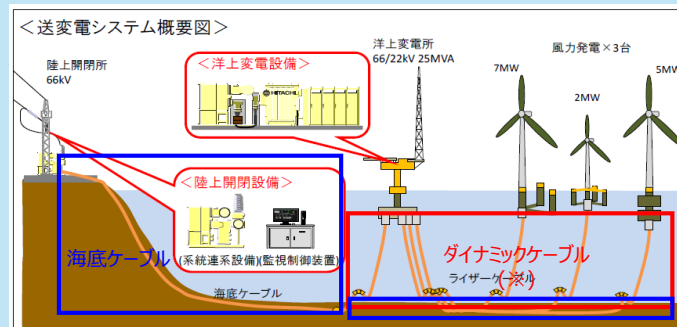


引張試験

出典：浮体式洋上風力発電導入マニュアル、福島洋上風力コンソーシアム(2019年3月)より

2. 電気工事

本実証事業における送变电システムの概要図を以下に示す。
設置する3基の風力発電設備にて発電された電気は、一度洋上変電所を集められ、66kV まで昇圧し、海底ケーブルをととして、陸上の開閉所につながっている。



出典：海底電力ケーブルシステムの技術動向と開発課題および取り組み，古河工時報第141号（令和4年4月）より

(※)浮体の波浪動揺や潮流による流体力によって曲率変動や張力変動などのダイナミック挙動を繰り返し受けることで、ケーブルには張力や曲げに対する耐久性が求められる。

送变电システムの概要図

陸上開閉所のある広野海岸にて沖合いの作業船から海底ケーブルの引き込みを海岸まで実施した後、作業船は実証海域まで海底ケーブルを敷設した。




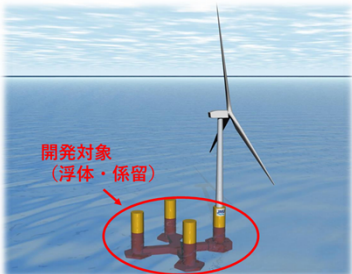
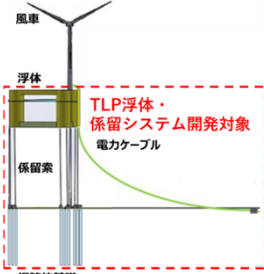



海底ケーブル敷設（陸から）

3.3 浮体式：海底ケーブル・係留索の施工方法

(4) 国内プロジェクト

- 国内プロジェクトの実績を以下に示す。グリーンイノベーション基金事業（以下、GI基金事業）の次世代技術開発としても係留システムや海底ケーブル布設技術はテーマに取り上げられている。

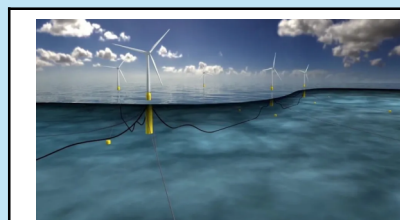
<p>崎山沖2MW浮体式洋上風力発電所「はえんかぜ」 長崎県崎山沖（2010～）</p>	<p>福島浮体式洋上ウインドファーム実証研究事業 福島県沖（2011～2021）</p>	<p>次世代浮体式洋上風力発電システム実証研究 （バージ型）「びびき」 北九州沖（2014～2021）</p>
 <p>出典：自然エネルギー財団，浮体式の洋上風力発電で日本初の商用運転—長崎県・五島市で漁業との共生を目指す—，2018 https://www.renewable-ei.org/activities/column/20180111.html （参照2025/12/25）</p>	 <p>出典：福島洋上風力コンソーシアム https://www.fukushima-forward.jp/gaiyou/index.html （参照2025/12/25）</p>	 <p>出典：NEDO，次世代浮体式洋上風力発電システム実証研究 https://www.nedo.go.jp/floating/（参照2025/12/25）</p>
<p>セミサブ型浮体・ハイブリッド係留システムに係る 技術開発及び施工技術開発 （GI基金事業ph.1）</p>	<p>低コストと優れた社会受容性を実現するTLP方式による 浮体式洋上発電設備の開発 （GI基金事業ph.1）</p>	<p>海底ケーブル布設専用船（Cable Laying Vessel : CLV）開発プロジェクト （GI基金事業ph.1）</p>
 <p>開発対象 （浮体・係留）</p> <p>出典：NEDO，事業戦略ビジョン，セミサブ型浮体・ハイブリッド係留システムに係る 技術開発及び施工技術開発 https://green-innovation.nedo.go.jp/resources/pdf/offshore-wind-power-generation/item-001-2/vision-nsyc-003.pdf を加筆修正して転載 （参照2025/12/25）</p>	 <p>風車 浮体 係留索 鋼管杭基礎</p> <p>TLP浮体・ 係留システム開発対象 電カケーブル</p> <p>出典：NEDO，事業戦略ビジョン，低コストと優れた社会受容性を実現するTLP方式による浮体式洋上発電設備の開発 https://green-innovation.nedo.go.jp/resources/pdf/offshore-wind-power-generation/item-001-2/vision-furukawa-003.pdf を加筆修正して転載（参照2025/12/25）</p>	 <p>出典：NEDO，事業戦略ビジョン，海底ケーブル布設専用船（Cable Laying Vessel : CLV）開発プロジェクト https://green-innovation.nedo.go.jp/resources/pdf/offshore-wind-power-generation/item-001-4/vision-furukawa-003.pdf（参照2025/12/25）</p>

3.3 浮体式：海底ケーブル・係留索の施工方法

(5) 海外プロジェクト

- 海外の係留索の施工実績を以下に示す。使用アンカーはドラッグアンカー、係留方式はカタナリー方式が多く採用されている。

	プロジェクト名	国名	施工年	使用アンカー	係留方式	備考
①	Hywind Scotland	イギリス	2007	サクシオン式	カタナリー方式	チェーン3本
②	Kincardine	イギリス	2021	ドラッグアンカー	カタナリー方式	チェーン4本
③	Dolphyn Hydrogen	イギリス	2024-	ドラッグアンカー	カタナリー方式	チェーン3本
④	Pentland Floating WindFarm	イギリス	2026-	TBD	TBD	
⑤	AFLOWT Hexafloat	アイルランド	2022	ドラッグアンカー	カタナリー方式	合繊ロープ3-6本
⑥	FloatGen	フランス	2016-2017	ドラッグアンカー	カタナリー方式	合繊ロープ6本
⑦	EolMed	フランス	2022-2023	ドラッグアンカー	カタナリー方式	合繊ロープ6本
⑧	EFGL Leucate	フランス	2024-	ドラッグアンカー	カタナリー方式	チェーン3-4本
⑨	Groix & Belle Ile	フランス	Cancel	ドラッグアンカー	カタナリー方式	チェーン5本
⑩	Provence Grand Large	フランス	2021	サクシオン式	トート方式	ダブルチェーン3本
⑪	Eolink	フランス	2024-	複数使用	カタナリー方式	1点係留方式
⑫	Unitech Zephyros	ノルウェー	2009	サクシオン式	カタナリー方式	チェーン3本
⑬	TetraSpar Demo	ノルウェー	2021	ドラッグアンカー	カタナリー方式	チェーン3本
⑭	FLAGSHIP	ノルウェー	2030	ドラッグアンカー	カタナリー方式	
⑮	HYWIND Tampen	ノルウェー	2020-2023	サクシオン式	カタナリー方式	チェーン3本
⑯	SeaTwirl S2	ノルウェー	TBD	ドラッグアンカー	カタナリー方式	
⑰	Sonnevindar	ノルウェー	2027-	TBD	TBD	
⑱	DemoSATH	スペイン	2022	ドラッグアンカー	カタナリー方式	ハイブリッド チェーンとポリエステルロープ
⑲	CanArray	スペイン	2023-	ドラッグアンカー	カタナリー方式	ハイブリッド チェーンとナイロンロープ
⑳	WindFloat Atlantic	ポルトガル	2018-2020	ドラッグアンカー	カタナリー方式	
㉑	7 Seas Med	イタリア	2025-	TBD	TBD	
㉒	New England Aqua Ventus I	アメリカ	2023		カタナリー方式	チェーン3本
㉓	CADEMO(VAB)	アメリカ	2023	複数使用	カタナリー方式	ハイブリッド チェーンとポリエステルロープ



浮体形状(②Kincardine Project)
出典: <https://www.bbc.com/news/uk-scotland-north-east-orkney-shetland-40947146>
(参照2025/12/25)



サクシオン式アンカー(⑧ HYWIND Tampen)
出典: <https://semar.no/wp-content/uploads/2022/05/Suction-anchors-Installation.pdf>
(参照2025/12/25)

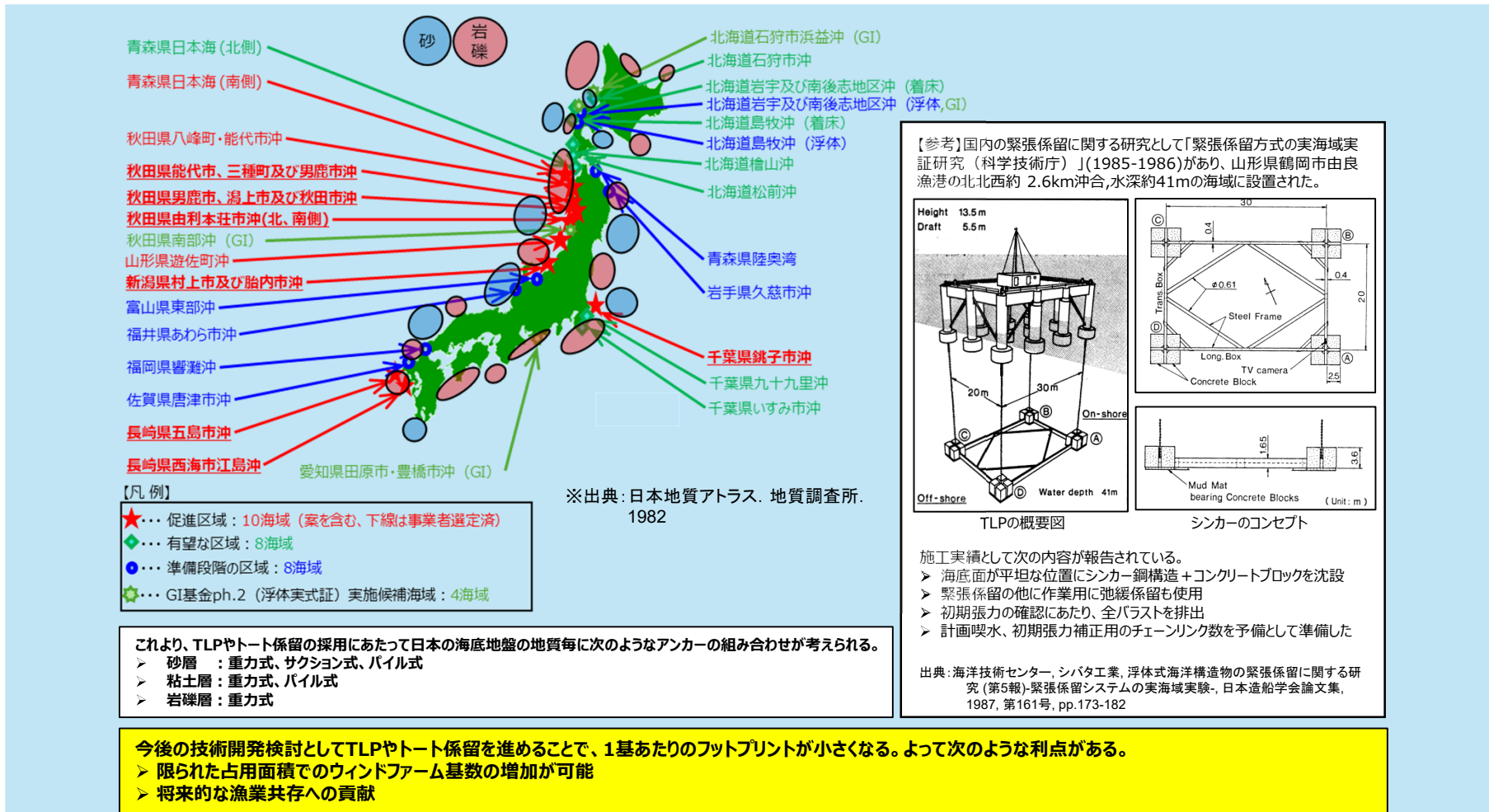


1点係留方式(⑪Eolink)
出典: <https://www.eolink.fr/en/article-p5mw-en>
(参照2025/12/25)

3.3 浮体式：海底ケーブル・係留索の施工方法

(6) 日本の海底地盤への適用

- 将来的なTLPやトート係留の採用にあたってはアンカーと地盤の関係が重要である。日本の海底地盤の地質マップ（概要）※を取りまとめた。



3.4 浮体式：コンクリート製浮体式基礎（バージ式、セミサブ式）の課題と解決の方向性について

(1) 設計

(a) コンクリート材料特性としての疲労耐久性

- 波浪の繰返し作用下では、タワー基部での鋼材との接合部や発生応力が大きい部位からコンクリートの局所的なひび割れが徐々に進展し、破壊モードに影響を及ぼすことから、接合部の疲労耐久性に配慮した設計の重要性が認識されている。
- また、コンクリートが水中あるいは湿潤状態にあるときは、コンクリート自体の疲労強度が低下するだけでなく、繰返し作用によってコンクリート内部の微小細孔構造の飽和水に生じる水圧、あるいはマクロひび割れに生じる水圧によって、損傷が加速される場合がある。

これらに対し、以下の解決策が考えられる。

- ① 荷重履歴によるコンクリートの疲労損傷を再現可能な構成モデルを有する非線形有限要素解析の洋上風力発電施設設計への適用
- ② プレストレスト・コンクリートとして、コンクリートに建造時に圧縮力を与えるなど、引張力による構造的なひび割れが生じ、それが進展しないような設計



図-3.4.1 コンクリート製浮体施設損傷疲労損傷のイメージ

(左図 首都高速道路株式会社, 首都高速道路構造物の損傷状況より転載, 右図 東北インフラマネジメントセンター, コンクリート構造物損傷写真集より転載)

3.4 浮体式:コンクリート製浮体式基礎(バージ式、セミサブ式)の課題と解決の方向性について

(1) 設計

(b)コンクリートの水密性、化学的作用に対する抵抗性

- コンクリート製浮体施設は、海中、飛沫帯および海上大気中で供用され、波浪や海水飛沫の影響を受けるため、供用期間中にコンクリート自体の劣化や鋼材の腐食等によって、その機能が損なわれやすい環境にある。
- そのため、繰返し作用下における高流動・高強度コンクリートを用いたプレストレスト・コンクリートを用いることを主とし、供用期間中は可能な限り「メンテナンスフリー」となるように、水結合材比、単位セメント量、最小かぶりの確保に留意する必要がある。

(c)鉄筋等鋼材の腐食およびコンクリートの塩害

- コンクリート製浮体施設は、鉄筋のかぶりが不足すると水の浸透や塩化物イオンの侵入に伴う鉄筋腐食により、設計耐用期間中に構造物の耐力が低下し、破壊に至る可能性があり、打継ぎやプレキャスト部材の接合が不完全な場合、水や塩化物イオンなどの劣化因子の侵入経路となり、鉄筋腐食や水密性が低下する恐れがある。



図-3.4.2 コンクリート製浮体施設損傷 漏水事例のイメージ

日本コンクリート工学会HP, 施工中の不具合例より転載



図-3.4.3 コンクリート製浮体施設損傷 塩害による損傷のイメージ

日本コンクリート工学会, 月間コンクリート技術2019年7月号より転載

- これに対する解決策として、混和材の使用やFRPの使用、電気防食の適用、が挙げられる。

3.4 浮体式:コンクリート製浮体式基礎(バージ式、セミサブ式)の課題と解決の方向性について

(1) 設計

(d) 船級取得の基準

- 国内の研究論文(小松怜史 他、2023年)では、コンクリート製浮体の船級取得に関する基準について、

日本海事協会において「浮体式洋上風力発電設備に関するガイドライン(2021年12月)」が整理されているものの、鋼船規則を参照したものであり、コンクリート製浮体を対象とした基準は整備されていない。コンクリート製の浮体については、国内外の類似基準を準用し、日本海事協会に承認を得たうえで適用することになる。

と現状の問題点を挙げている。

- また、国土交通省において「コンクリート製浮体式洋上風力発電施設の設計施工ガイドライン(2023年3月)」が発行され、コンクリート製浮体式基礎を対象とした、設計手法が整理されているが、船級取得のための設計基準として位置付けられているものではない。

以上から、コンクリート製浮体式基礎の船級取得のための設計基準の明確化が課題である。

- 解決策の方向性としては、コンクリート製浮体式基礎の船級取得のための設計基準を、国内外の関連基準を基に体系的に整備することが必要となる。

3.4 浮体式:コンクリート製浮体式基礎(バージ式、セミサブ式)の課題と解決の方向性について

(2) 施工

(a)労働力の確保

- コンクリート製浮体式基礎の現地製造は、鋼製浮体式基礎の製造に比べるとより多くの雇用を提供できるという特徴がある。一方で、わが国の建設業においては就業者の高齢化が進んでおり、今後、高齢就業者の大量退職が見込まれることから、将来の担い手不足が懸念されている。
- 国土交通省ではi-Constructionを推進しており、その中で、①ICT技術の活用や、②プレハブ化/プレキャスト化は生産性の向上が図れるため、省力化への寄与が期待される。

① ICT技術の活用

左官や鉄筋組立など、ロボット等による代替が可能な作業の機械化・自動化等が進み、省人化や無人化による生産性の向上を図る。

② プレハブ化・プレキャスト化

鉄筋のプレハブ化やプレキャストの埋設型枠、コンクリート部材の工場製作などにより、現地作業の生産性向上を図る。



図-3.4.4 i-Construction(コンクリート工)が目指す建設現場のイメージ

(左 左官ロボット 大成建設HPから転載, 中 鉄筋組立ロボット 三井住友建設HPから転載, 右 プレキャストコンクリート ピーエス三菱HPから転載)

3.4 浮体式:コンクリート製浮体式基礎(バージ式、セミサブ式)の課題と解決の方向性について

(2) 施工

(b) 施工方法の合理化(例)

- コンクリート構造物は天候の影響やコンクリート打設後の養生期間を工程で見込む必要がある。
⇒プレキャスト工法を採用、天候の影響や養生期間分の工程短縮が可能となる。

(c) 品質管理の合理化

- 高い水密性を求められるコンクリート製浮体式基礎は高度な品質管理が求められる。
⇒施工だけでなく検査も自動化・ロボット化により合理化されることが期待されている。

(例) 鉄筋をプレハブ化、プレキャストの埋設型枠により、現場作業の一部の工場化や型枠撤去作業等をなくす施工 **ハーフプレキャスト工法**など

鉄筋、型枠の高所作業なし → クレーンで設置 → 脱型不要 → 中詰めコン打設

(例) 流動性を高めた現場打ちコンクリート活用
スランプ値8cm→12cm
スランプ値
生コンクリート

(例) 各部材の**規格(サイズ)を標準化**し、定型部材を組み合わせて施工
ラーメン構造の高架橋の例

クォリティの向上
AIによる検査による自動化
点検・計測による品質管理

(例) 画像解析やAIを活用した品質管理

(例) 材料、施工、品質等のデータを**クラウド化**し、関係者間の情報を一元管理
出荷伝票 → 計測データの記録 → クラウドシステム → 品質データの電子化

材料・品質等データの記録 → 計測データの記録 → クラウドシステム → 品質データの電子化 → (例) 点群データを活用した出来形管理

図-3.4.5 i-Construction(コンクリート工)が目指す建設現場のイメージ

出典:コンクリート生産性向上検討協議会(第12回・令和5年2月)資料1, p.7 より転載

3.4 浮体式:コンクリート製浮体式基礎(バージ式、セミサブ式)の課題と解決の方向性について

(2) 施工

(d)大型化、大規模化に向けた課題

- コンクリート浮体式基礎は鋼製浮体式基礎と比較すると「浮体寸法」「浮体重量」が大きくなる傾向にある。
- 国交省等においても大型化、大規模化を見据えた港湾の役割について検討されており、浮体式基礎の製造に用いる際の課題として、

1. 基地港湾内の地耐力や製作ヤードの確保
2. 完成した浮体式基礎の保管水域の確保

等が挙げられている。

(右図は基地港湾内で浮体式基礎の製造を検討したレイアウト)

- しかし、浮体式洋上風力発電に関しては、世界的に基礎の型式・製造方法、輸送・設置の方法がまだ確立しておらず、技術開発の余地が大きい。

1. 連続製造に適した浮体の設計
2. 浮体製造のパネル化やブロック化、分割施工
3. ドックに依存しない浮体の大量製造

等、新しい技術の確立が求められている。

(e)解体技術

- 一般的に発電終了後のコンクリート構造物の撤去、解体に関しては、ワイヤーソーによる切断やブレーカーによる解体が用いられるが、大型コンクリート製浮体式基礎の解体には、多大な労力が必要になるため、解体しやすい構造・工法の技術開発が課題になる。

基地港湾内において浮体式基礎を製作するケース

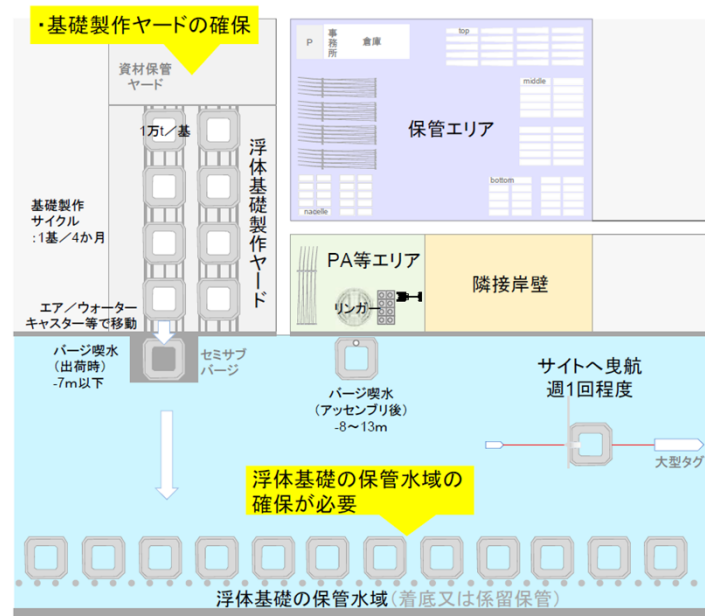


図-3.4.6 浮体式洋上風力発電所に対応した基地港湾の最適な規模について

出典:国土交通省 港湾局、“2050年カーボンニュートラル実現のための基地港湾のあり方に関する検討会(概要)”, 令和4年2月資料、より転載

3.4 浮体式:コンクリート製浮体式基礎(バージ式、セミサブ式)の課題と解決の方向性について

(3) その他

(a) サプライチェーン

- 現地に既存の鉄鋼製造サプライチェーンがない場合、新しいコンクリート製浮体式基礎の製造設備は、少ない投資で設立が可能である。コンクリート製浮体式基礎製造の現地化は鋼製浮体式基礎の製造ヤードに比べ、より多くの雇用機会を生み出す。
- コンクリート製浮体式基礎は鋼製浮体式基礎より重量が大きいため、ロードアウトと曳航に課題があり、より大きな港湾施設の地耐力が必要である。また、喫水が大きいため水路深さを大きくする必要がある。

<港湾施設に関する課題>

- ① 適切な港湾施設の選定
- ② 必要な港湾機能と施設規模の確保
- ③ 浮体式基礎専用建設ヤード

<材料供給に関する課題>

セミサブ・バージ等浮体型式によってコンクリートの品質、強度、耐久性の要求性能が異なり、コンクリート材料の仕様が異なる。

<地域産業への波及効>

コンクリート製浮体は、材料・労務の地産地消が可能であり、地元産業を活用できることが利点。

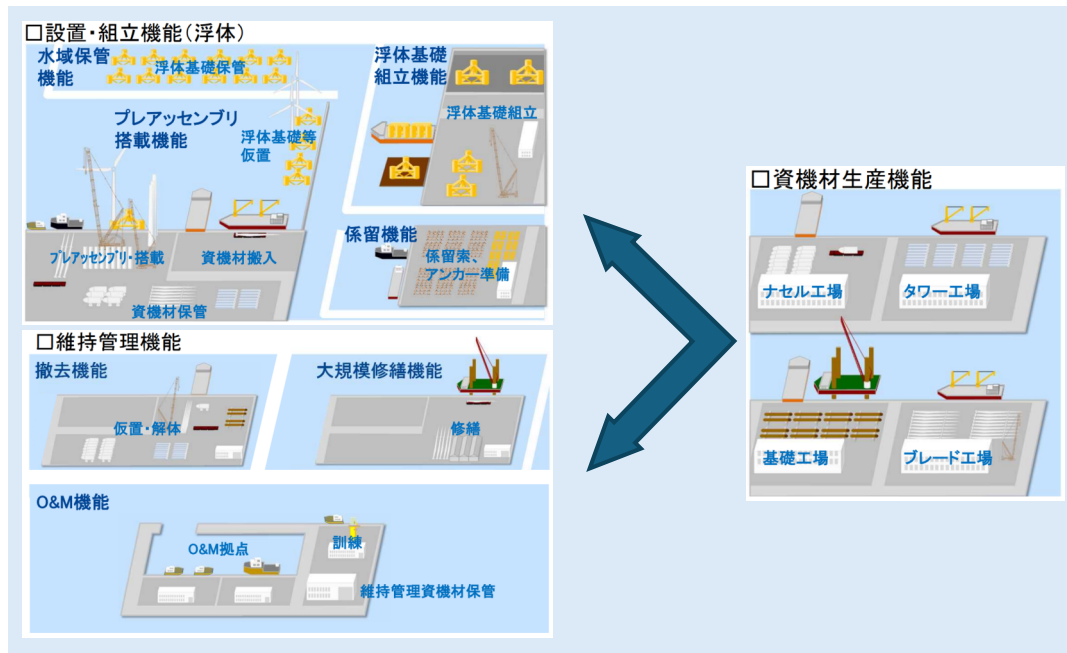


図-3.4.7 洋上風力発電で必要となる港湾の機能

出典:国土交通省 港湾局、“洋上風力発電の導入促進に向けた港湾のあり方に関する検討会(第1回)資料”、令和5年5月、を加筆修正して転載

3.4 浮体式:コンクリート製浮体式基礎(バージ式、セミサブ式)の課題と解決の方向性について

(3) その他

(b)コスト削減

- コンクリート製セミサブ浮体式基礎と鋼製セミサブ浮体式基礎の製造コスト比較を行った欧州の研究(DNV、2022年)では、鋼製の方がコンクリート製と比べて69%高い結果となった。

※このコスト比較研究では、鋼製の浮体式基礎をアジアで製造してヨーロッパまで輸送する輸送費が含まれている点と、アジアとヨーロッパでの製造コスト差が含まれている点に留意が必要である。

- 風車と浮体構造のインターフェースの最適化、浮体構造の標準化と量産化等によって、今後、低コスト化に取り組む必要がある。
- また、コンクリートの長期耐久性の特性を生かし、風車の耐用年数以後も引続き基礎を供用することができれば、将来的に売電価の削減も期待できる。



図-3.4.8 コンクリート製と鋼製のセミサブ浮体式基礎の製造コスト比較

出典:DNV, Comparative study of concrete and steel substructures for FOWT 2022年2月4日より転載

※このコスト比較研究では、鋼製の浮体式基礎をアジアで製造してヨーロッパまで輸送する輸送費が含まれている
※アジアとヨーロッパでの製造コスト差が含まれている

3.4 浮体式:コンクリート製浮体式基礎(バージ式、セミサブ式)の課題と解決の方向性について

(3) その他

(c)コンクリート製浮体の実証

- 海外ではコンクリート製浮体式基礎の実証試験及び商用化事業が行われているが、国内ではスパー式以外の実績はない。
- 国内で実証を行うことによってコンクリート製浮体の品質および安全性を確認し、標準化することで、コンクリート製浮体を普及させることが、今後必要と思われる。

(d)カーボンフットプリント

- DNVの調査(2022年)ではコンクリート製浮体と鋼製浮体の基礎製造におけるライフサイクル全体での二酸化炭素排出量を比較している。コンクリート製と鋼製のセミサブ式浮体を比較した調査結果では、コンクリート製が鋼製の二酸化炭素排出量より、約2.5~3倍低いと評価されている。

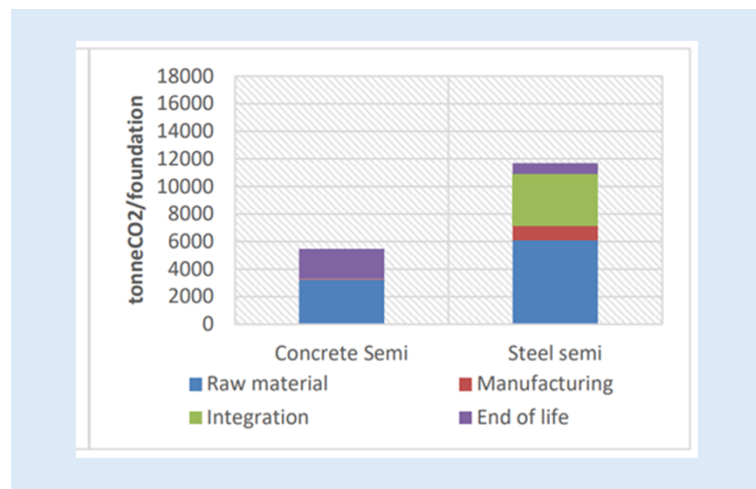


図-3.4.9 コンクリート製と鋼製のセミサブ浮体式基礎のライフサイクル全体での二酸化炭素排出量比較

出典: DNV, Comparative study of concrete and steel substructures for FOWT 2022年2月4日より転載

※鋼製浮体の原材料をアジアからヨーロッパまで海上輸送しているため二酸化炭素排出量が多くなっている

3.4 浮体式：コンクリート製浮体式基礎（バージ式、セミサブ式）の課題と解決の方向性について

参考文献

(1) 設計－(a)コンクリート材料特性としての疲労耐久性

- 図-3.4.1 左図 首都高速道路株式会社：首都高速道路構造物の損傷状況－RC床版に亀甲状のひび割れが発生している状況，
<https://www.shutoko.co.jp/company/enterprise/road/plan/251225/damage/>（参照2025/12/25）
右図 東北大学インフラマネジメント研究センター：コンクリート構造物損傷写真集，
<https://jsce.or.jp/branch/tohoku/csdp/csdp009.html>（参照2025/12/25）

(1) 設計－(b)コンクリートの水密性、化学的作用に対する抵抗性、(c)鉄筋等鋼材の腐食およびコンクリートの塩害

- 図-3.4.2 日本コンクリート工学会：施工中の不具合例(7)漏水，<https://www.jci-net.or.jp/j/concrete/concreting/example7.html>
（参照2025/12/25）
図-3.4.3 日本コンクリート工学会：コンクリート製浮体施設損傷－塩害による損傷のイメージ，
https://www.jci-net.or.jp/j/concrete/technology/201907_article_1.html（参照2025/12/25）

(2) 施工－(a)労働力の確保

- 図-3.4.4 左図 大成建設株式会社：左官ロボットのイメージ，https://www.taisei.co.jp/about_us/wn/2017/171027_3459.html
（参照2025/12/25）
中図 三井住友建設株式会社：鉄筋組立ロボットのイメージ，<https://www.smcon.co.jp/service/robotaras/>
（参照2025/12/25）
右図 株式会社ピーエス三菱：プレキャストコンクリートのイメージ，
https://www.psmic.co.jp/technology/architec_eng/pc_material.html（参照2025/12/25）

(2) 施工－(b)施工方法の合理化(例)、(c)品質管理の合理化

- 図-3.4.5 国土交通省：i-Construction(コンクリート工)が目指す建設現場のイメージ，コンクリート生産性向上検討協議会(第12回・令和5年2月9日)資料1, p.7

3.4 浮体式：コンクリート製浮体式基礎（バージ式、セミサブ式）の課題と解決の方向性について

参考文献

(2) 施工－(d) 大型化、大規模化に向けた課題

図-3.4.6 国土交通省港湾局：浮体式洋上風力発電所に対応した基地港湾の最適な規模について，2050年カーボンニュートラル実現のための基地港湾のあり方に関する検討会，令和4年2月，同(概要)資料

(3) その他－(a) サプライチェーン

図-3.4.7 国土交通省港湾局：洋上風力発電で必要となる港湾の機能，洋上風力発電の導入促進に向けた港湾のあり方に関する検討会(第1回)，令和5年5月31日，資料

(3) その他－(b) コスト削減

図-3.4.8 DNV：Comparative study of concrete and steel substructures for FOWT，報告書，2022年2月4日

(3) その他－(d) カーボンフットプリント

図-3.4.9 DNV：Comparative study of concrete and steel substructures for FOWT，報告書，2022年2月4日

3.5 風車の大型化・大規模化(ウィンドファーム) -効率的な施工方法、コスト削減方法-

(1) 洋上風力発電に関する国内動向

(a) 風車の大型化

- 導入が先行する欧州などの海外では、発電効率を高める目的で風車の大型化が近年続いている。一方、国内では洋上風力向けの風車メーカーが存在せず、国内の発電事業者は海外の大型風車を採用せざるを得ない状況にある。
- 再エネ海域利用法に基づく事業者公募の結果によれば、選定された各発電事業者は出力15~18MWの風車機種を採用する計画となっている。
- 例えば15MW機の場合、ハブ高さで約150m、タワー重量で約1,000t、モノパイル重量で約1,200tという規模感になっている。また、水深や気象・海象といったサイト条件によっては更に大きな諸元になることも考えられる。

2. 基地港湾を取り巻く状況

(4) 洋上風力発電設備の寸法、重量

国土交通省

- 洋上風力発電設備について公表されている情報を基に、将来導入が想定される15、20MW機の寸法・重量を想定し、本検討での評価の前提とした。

	10MW機	15MW機	20MW機
洋上風力発電設備の寸法概要			
ナセル	約450t±50	約650t±100	約850t±100
ブレード	約125t±10(3枚)	約180t±10(3枚)	約250t±10(3枚)
タワー	約550t±100	約950t±100	約1400t±100
重量			
小計	約1,100t前後	約1,800t前後	約2,500t前後
モノパイル基礎	約900t±300	約1200t±300	約1500t±300
計	約2,100t前後	約3,100t前後	約4,200t前後
参考機種	SG10.0-193DD、V164-10MW	SG14.0-236DD、V236-15MW、Haliade-X	無し

(出所) 各種資料より作成

10

出典: 国土交通省 港湾局: 「2050年カーボンニュートラル実現のための基地港湾のあり方検討会 ~基地港湾の配置及び規模~」

<https://www.mlit.go.jp/kowan/content/001464703.pdf> (参照2025/12/25)

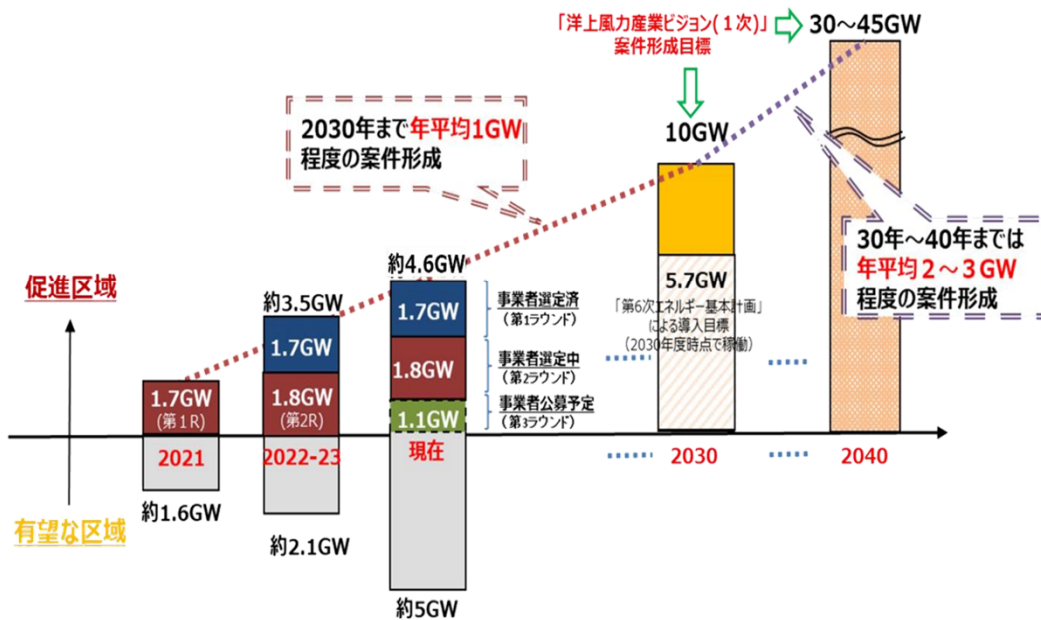
3.5 風車の大型化・大規模化(ウィンドファーム) - 効率的な施工方法、コスト削減方法 -

(1) 洋上風力発電に関する国内動向

(b) ウィンドファームの大規模化

- 政府の導入目標を達成しようとする場合には、2030年までは年平均で1GW程度、さらに2030年～2040年までは年平均で2～3GW程度の案件形成が必要となる。
- 国内において大規模なウィンドファームを大量導入するためには、設置海域は港湾区域からより沖合への展開も必要になり、一般海域やEEZ（排他的経済水域）での設置が必要である。

(参考) 目標達成に向けた案件形成状況について



出典: 資源エネルギー庁: 「洋上風力発電に関する国内外の動向等について」

https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/green_power/pdf/008_04_00.pdf (参照2025/12/25)

3.5 風車の大型化・大規模化(ウィンドファーム) -効率的な施工方法、コスト削減方法-

(2) 国内動向に伴う施工時の問題

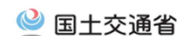
(a) 風車大型化の問題

- 風車や基礎構造の諸元は大型化によって、揚程や吊り能力といった施工時のクレーン作業の制限が生じる。またSEP船であれば施工水深の制限など、既存の作業船では施工上の問題が生じる。

(b) 基地港湾の仕様

- 洋上風力発電の導入が先行する欧州の基地港湾は、広大な面積の確保、大型重機の稼働やタワーの仮組立などを想定した地耐力強化、大型船舶の接岸を想定した水深の確保、場合によっては岸壁前面でのSEP船のジャッキアップを想定した海底地盤改良など、洋上風力の施工に適した機能を有している。
- 国内においても、港湾法に基づく基地港湾（海洋再生可能エネルギー発電設備等拠点港湾）として、能代港、秋田港、鹿島港、北九州港、新潟港の計5港が指定され、整備が進められている。
- その他に、現在公募中の案件においては、青森港や酒田港が促進区域と一体的に利用できる港湾としての指定を目指している。

海洋再生可能エネルギー発電設備等拠点港湾(基地港湾)の概要



出典: 国土交通省「海洋再生可能エネルギー発電設備等拠点港湾(基地港湾)の概要」
<https://www.mlit.go.jp/kowan/content/001459708.pdf>
 (参照2025/12/25)

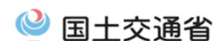
3.5 風車の大型化・大規模化(ウィンドファーム) -効率的な施工方法、コスト削減方法-

(3) 大型化への解決方法

(a) 施工に適した作業船の調達

- 国内においても大型風車の建設に対応したSEP船が建造され、既に稼働している。また海外では、SEP船の吊り能力では施工できないモノパイルなどの施工のために、大型基礎施工船も稼働している。

2. 基地港湾を取り巻く状況



(5) 風車大型化に伴うSEP船等作業船の大型化

- 大型風車を設置できる第四世代2,500トン超の吊り能力を持つSEP船の建造や、基礎の大型化に対応した基礎設置船の建造が始まっている。

世代別にみたSEP船諸元の変遷

Generation:	1 st	2 nd	3 rd	4 th
供用開始	2005	2010	2015	2022
概要	First heavy lift jack-ups in offshore wind	New designs primarily for offshore wind	Scaled-up designs for larger turbines	Next generation for future 15MW turbines
クレーン能力	500 ton	900 ton	1,400 ton	2.5 - 3,500 ton
積載能力	2,000 ton	5,000 ton	8,500 ton	10 - 16,000 ton
対象風車サイズ	3 MW	6 MW	9 MW	15 MW
事例				

(出所) Ulstein Design & Solutions

大型基礎設置船の例



- ・全長218m、全幅56m
- ・DWT51,087^t
- ・* 2,000^t MP、400^t TP各11基積込可
- ・クレーン吊り能力3,000^t
- ・速度14.3kn

(出所) Seaway7社

国内SEP船の諸元と稼働時期

会社名	SeaJacks (Zaratan)	五洋	大林、東亜	五洋、鹿島、寄神	五洋、DEME	NYK、VanOord	清水
吊り能力	800 t	800 t	1,250 t	1,600 t	1,600 t	1,600 t	2,500t
自航、非自航	自航	非自航	非自航	非自航	—	自航	自航
稼働時期	稼働中	稼働中	2023. 4	2023. 3	2025春	—	2022. 10

(出所) 各社HP等より作成

11

出典: 国土交通省 港湾局「2050年カーボンニュートラル実現のための基地港湾のあり方検討会 ~基地港湾の配置及び規模~」

<https://www.mlit.go.jp/kowan/content/001464703.pdf> (参照2025/12/25)

3.5 風車の大型化・大規模化(ウィンドファーム) -効率的な施工方法、コスト削減方法-

(3) 大型化への解決方法

(b) 部材重量の軽量化

- 将来、20MW超の風車など更なる大型化も考えられるが、それに応じた作業船の新造を行った場合には、建設費の増大に繋がる懸念がある。そこで、既存の作業船舶機械によって、大型風車の施工が可能となるように、部材の分割施工などの工夫が期待される。
- 風車タワーの場合、通常は基地港湾で一体化されたタワーをSEP船に積み込み現地にて設置する方法が一般的となっているが、吊り重量を低減するために分割されたタワーをSEP船に積み込み現地で組み立てるという方法も提案されている。

(c) 基地港湾の仕様

- 洋上風力発電の導入が先行する欧州の基地港湾は、広大な面積の確保、大型重機の稼働やタワーの仮組立などを想定した地耐力強化、大型船舶の接岸を想定した水深の確保、場合によっては岸壁前面でのSEP船のジャッキアップを想定した海底地盤改良など、洋上風力の施工に適した機能を有している。
- 国内においても、港湾法に基づく基地港湾（海洋再生可能エネルギー発電設備等拠点港湾）として、能代港、秋田港、鹿島港、北九州港、新潟港の計5港が指定され、整備が進められている。

3.5 風車の大型化・大規模化(ウィンドファーム) -効率的な施工方法、コスト削減方法-

(4) 大規模化への解決方法

(a) 施工効率化に向けた新技術の活用

- 着床式の基礎構造ではモノパイル式が採用されることが多いが、一般的にはモノパイルと風車との間にトランジションピース (TP) と呼ばれる部材が設置される。最近では、この部材を無くしてTPレスモノパイルを採用して、施工の合理化を図る工法も提案されている。
- 大規模化の点で将来導入が見込まれる浮体式の場合、NEDOにおいて、資本費の20%低減する施工技術を確立すべく実証研究が行われている。浮体形式、係留システム、アンカー等の最適化がテーマとなっており、早期の技術確立が期待される。

(b) 効率的な工程計画の立案

- 効率的な工程計画の立案は、建設費低減のための重要な要素となる。例えば、最適な施工サイクルのための基地港湾の利用方法、精度の高い気象・海象予測に基づく適切な施工時期の選定、風車や基礎構造などの部材の搬入、保管、搬出といった基地港湾での作業の効率化は必須となる。

フェーズ1-②：浮体式基礎製造・設置低コスト化技術開発事業

- 世界の動向：世界各国で**バージ、セミサブ、スパー、TLP等の多様な浮体形式**を様々なメーカーが開発。各種技術間で競争してる状況。
- 日本の特性：**水深、海底地形、海象などが多様**であり、一つの浮体形式に絞り込まず、複数方式間での競争を喚起することが重要。(例：**太平洋側は大きなつねりがあり、日本海側は波傾斜が大きくなる傾向**)
- 日本の強み：**日本には造船技術の基盤あり**。その技術基盤やドック等のインフラを活用しながら、**浮体の大量生産技術を世界に先駆けて確立**する。

<ハイブリッド係留システム>



係留システムの一部をチェーンから合成繊維に置き換えることで、施工性が向上し、係留コストの低減が可能となる。複雑な地質の日本周辺海域の実情に適した合成繊維索からなる係留システムを開発する必要がある。

項目	技術開発の例
浮体基礎の最適化	風車の大型化および日本固有の気象・海象条件に対応した浮体基礎の最適化および材料削減によるコスト低減。
浮体の量産化	連続製造に適した浮体を設計し、浮体製造のパネル化やブロック化、分割施工、ドックに依存しない浮体の大量製造等の技術を確立。
係留システムの最適化	共有アンカー、衝撃荷重、マリングロス等を考慮した係留システムの最適化、大水深又は浅海域における係留システムの低コスト化技術の提案、並びに漁業協調に貢献する海中占有面積の小さいTLP係留システムの開発。
ハイブリッド係留システム	軽量化可能な合成繊維係留索の特性を生かし、合成繊維係留索と鋼製係留索からなるハイブリッド係留システムの設計・製造技術を開発し、係留システムの低コスト化。
低コスト施工技術の開発	浮体製作場所に対応した浮体基礎の浜出し・曳航方法、クレーン付き台船やジャッキアップ型作業構台を活用した大型風車の据え付け方法、ハイブリッド係留システムおよび共有アンカーの施工技術の開発による低コスト化。

出典：資源エネルギー庁「洋上風力発電の低コスト化」プロジェクトの研究開発・社会実装計画(案)の概要」

https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/green_power/pdf/001_04_00.pdf (参照2025/12/25)

4. 国内での設置計画、運用にかかわる現状と課題

- 4.1 セントラル方式による推進項目の整理、系統確保の制度
明確化
- 4.2 気象・海象・地質情報のDB構築例の調査
- 4.3 コーン貫入試験併用による認証に関する調査
- 4.4 設計・認証基準の実態調査
- 4.5 遠隔監視によるO&M省力化の調査

4.1 セントラル方式による推進項目の整理、系統確保の制度明確化

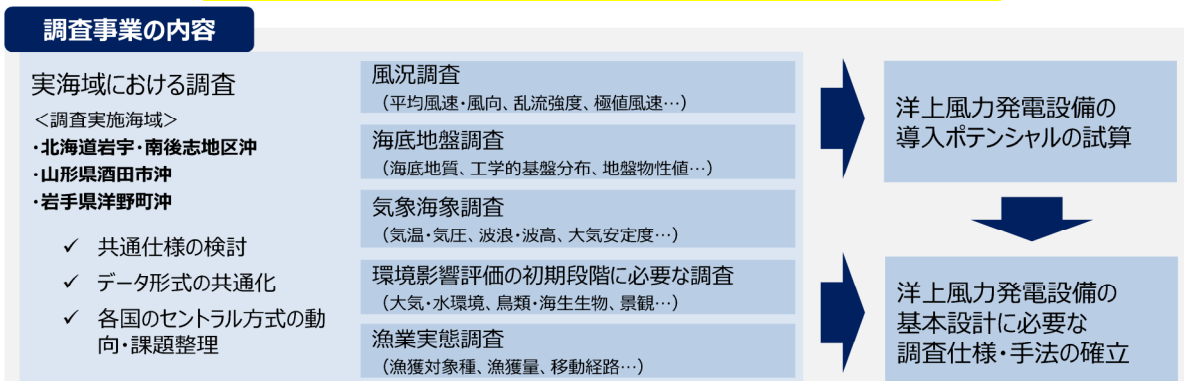
(はじめに)

- 「洋上風力産業ビジョン（第1次）概要」（第2回 洋上風力の産業競争力強化に向けた官民協議会（2020年12月15日））では、2030年までに1,000万kW、2040年までに3,000～4,500万kWの洋上風力発電の案件形成が政府目標として明示されている。この導入目標の実現に向けて、継続的な案件形成が不可欠であるが、現状では複数の事業者が同一海域で類似した現地調査を実施しており、非効率な状況が生じている。
- 案件形成を加速化させるため、案件形成の初期段階から政府が主導的に関与し、より迅速・効率的に風況等の調査、適時に系統確保等を行う仕組みである「日本版セントラル方式」の確立に向けた制度設計が進められている。

4.1 セントラル方式による推進項目の整理、系統確保の制度明確化

(1) 日本版セントラル方式の制度設計に関する調査（文献No. 1～8）

日本版セントラル方式の確立に向けた実証事業(NEDO)



出典：経済産業省資源エネルギー庁・国土交通省港湾局：「日本版セントラル方式」の検討に向けた論点について」

日本版セントラル方式における案件形成プロセスのイメージ



出典：経済産業省資源エネルギー庁・国土交通省港湾局：「日本版セントラル方式」における調査対象区域の選定の考え方

4.1 セントラル方式による推進項目の整理、系統確保の制度明確化

(2) 海外の海域指定に係る政策と系統整備の状況に関する調査（文献No. 13～22）

(a) ドイツ

- 2020年以前の入札では、国のゾーニングに基づき発電事業者が海域を選んで開発を実施。2021年以降の入札が実施される海域は連邦海事水路庁が海域開発計画を策定する。
- 2021年～2025年に入札が実施されるプロジェクト（2026年～2030年運転開始）は、セントラル方式の採用により、政府が区域を決めるだけではなく、国が戦略的環境アセスメント、予備調査、系統接続等に必要な許認可の取得、漁業関係者との調整等を済ませている。
- 各風車から洋上変電所までは発電事業者が、洋上変電所から陸上の変電所までは送電事業者が建設・所有・運用を担当する。
- 洋上風力発電の落札事業者は、入札の受理により、洋上風力エネルギー法に基づき、系統アクセス権および接続容量を得る。

(b) オランダ

- セントラル方式を採用し、国が開発のリスクと開発コストの削減を目標に、政府主導でエリア区分及びサイト認定を実施。発電事業者は政府によって概説された仕様（Project and Site Description (PSD)）に従った競争入札を行う。
- 陸上部分の系統整備のみではなく、洋上についても、海域ゾーン内の接続点までは送電事業者であるTenneTが用意する。

(c) デンマーク

- 海域の指定は、デンマークエネルギー庁が主催する洋上計画委員会が行う。
- ワンストップ・ショップ方式により、エネルギー庁が洋上ウィンドファームに必要な許認可を一括して管理し交付する。
- 陸上の系統増強は送電事業者（Energinet.dk）が行う。系統増強計画（ルートや完成時期）は、入札手続の中で具体的に明らかにされる。

4.1 セントラル方式による推進項目の整理、系統確保の制度明確化

(2) 海外の海域指定に係る政策と系統整備の状況に関する調査（文献No. 13～22）

(d) フランス

- 2018年7月に洋上風力発電の導入を加速するための新たな法案を可決した。
- 入札で選定された事業者に対して国が公的な海域を占有するための許可を付与する。
- 国が予備的な環境影響評価を実施するとともに、大陸棚・排他的経済水域での活動に関連した許認可を入札前に取得し、事業者に公開する。
- 系統接続は、送電事業者（RTE: France's Transmission System Operator）が実施、運営する。
- RTEは、発電所の接続と海底ケーブルのエンジニアリングを担当し、RTEは、エネルギー規制委員会（CRE: French Energy Regulatory Commission）が承認したテンプレートに基づき、発電事業者との間で、発電所の運転開始前に接続契約を締結する。

(e) イギリス

- 風車から洋上変電所までの区間および洋上変電所から陸上変電所までの区間の電力系統は、発電事業者が建設する。このうち後者の区間は、後日入札を通じて別の事業者売却され、売却先の事業者によって所有・運営される。

(f) アメリカ

- 自然エネルギー導入促進政策は州によって異なるが、ニューヨーク州の場合、NYSERDA（New York State Energy Research and Development Authority）が定める変電所までは、発電事業者がルートを選定し接続する。陸上の増強費用についてはNYISO（New York Independent System Operator）が託送料金により回収する。

(g) 台湾

- 洋上風力発電所から陸揚げ地点までの洋上送電施設は、発電事業者が建設・運用するが、陸上系統の増強は、送電事業者（台湾電力公司）が行う。陸上系統の増強スケジュールは入札の際に示され、事業の予見可能性を確保している。

4.1 セントラル方式による推進項目の整理、系統確保の制度明確化

(3) 各自治体・地元協議会他における共同調査等に関する調査（文献No. 23～25）

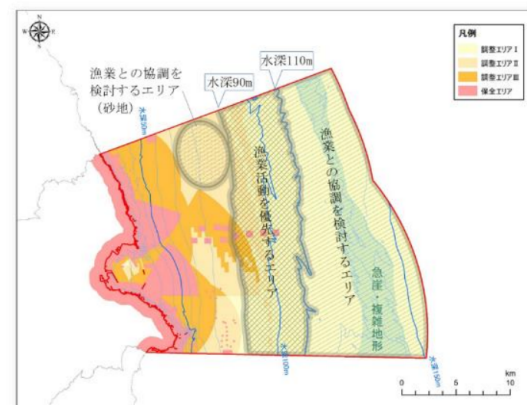
久慈市沖浮体式洋上風力発電検討委員会

事業者向け調査データ提供

- 基礎調査（鳥類調査、魚類調査）
- 海底調査（海底地層調査(音波調査)、海底底質調査（底質分析）、海底地形調査（深淺測量）
- 海象調査（流況・波浪調査）

共同調査

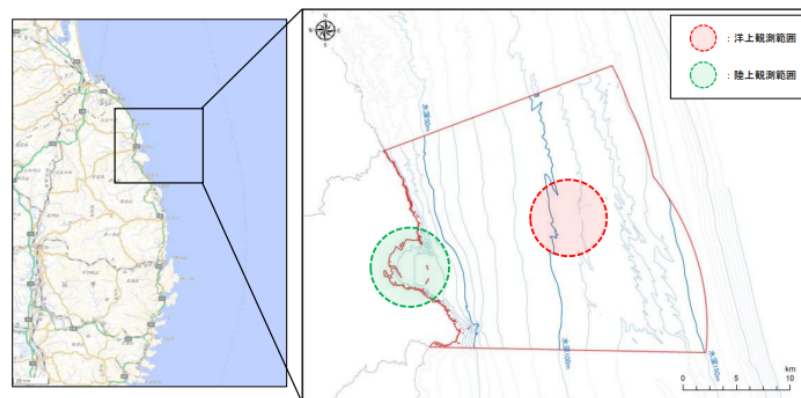
- 浮体式の洋上風力発電事業を検討するための洋上及び陸上の風況調査について、発電事業者一同で行う共同調査を企画した。2022年度より実施中。



- 水深110m以上のほか水深70～90m付近の砂地のエリアを「漁業との協調を検討するエリア」とする。
- 水深100m付近の平坦な海域は操業が多いため、「漁業活動を優先するエリア」とする。
- 今後風況や海底地形・底質に関する詳細な情報を収集し、引き続き風力発電事業の導入可能性について意見交換を図っていく。

ゾーニングマップ

出典：久慈市HP, https://www.city.kuji.lg.jp/material/files/group/30/zo_houkokusyo.pdf（参照2026/1/22）



共同調査地点範囲

出典：久慈市HP, https://www.city.kuji.lg.jp/material/files/group/30/05_youjouhatsuden_iinkai_3rd_shiryou4.pdf（参照2026/1/22）

4.1 セントラル方式による推進項目の整理、系統確保の制度明確化

(まとめ)

- 「総合資源エネルギー調査会省エネルギー・新エネルギー分科会再生可能エネルギー大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会洋上風力促進ワーキンググループ 交通政策審議会港湾分科会環境部会洋上風力促進小委員会 合同会議（第18回）」において、これまでの議論結果が「洋上風力発電に係るセントラル方式の運用方針〔骨子〕（案）」として取り纏められているが、依然として、以下の課題が残っている。

(課題)

国の役割がデータの収集や提供にとどまっている。

事業者にとってハードルの高い以下の項目について、依然として課題が残っていると考える。

- ① 開発初期段階の地域調整での国の関与の必要性
- ② 地域・漁業との共生についての国の役割の必要性
- ③ 系統確保についての国の役割が不明確（検討中）

4.2 気象・海象・地質情報のDB構築例の調査

(はじめに)

- 洋上風力発電事業において、適地の選定や施設の設計に必要な気象・海象・地質等の調査では、データベース（以降DB）が活用されることも多い。本項目では以下の(1)、(2)を調査した。
 - (1) DB構築に求められる情報の調査（文献 No. 1～No.19）

電気事業法、港湾法および再エネ海域利用法の各法令に基づき、洋上風力発電設備等が適合すべき基準について、各法令の統一的な考え方を解説している「洋上風力発電設備に関する技術基準の統一的解説（令和2年3月版）」および本書が参照している文献について調査した。
 - (2) 構築されているDBの調査（文献 No. 20～31）

ここでは、「洋上風力発電事業の適地選定（事業性評価）に資するデータや情報（単発的なものではなく集約・整理されたもの）」をDBと称することとし、国内外の各種DBについて、作成の経緯、特徴、得られる情報、データ作成方法などを調査した。

4.2 気象・海象・地質情報のDB構築例の調査

(1) DB構築に求められる情報の調査（文献No. 1～19）

(a) 洋上風力発電設備に関する技術基準の統一的解説(令和2年3月版)（洋上風力発電施設検討委員会、2020）

- 電気事業法、港湾法及び再エネ海域利用法に基づき、洋上風力発電設備等が適合すべき基準について、各法の統一的な考え方を解説している。
- 令和2年3月時点での関係法令や国内外関連規格、設計技術等を踏まえて策定された。

(b) JIS C 1400-1 風力発電システム—第1部:設計要件（日本規格協会、2017）

- 国際規格IEC 61400-1（Design requirements：設計要件）のEd.3（2005年）及びAmendment1（追補）（2010年）を基とした日本工業規格（現、日本産業規格）である。
- 風力タービンの構造的安全性を確保するために不可欠な設計要件を取りまとめたものであり、制御及び保護機能、電気系統、機械システム、支持構造等について整理されている。

(c) JIS C 1400-3 風車—第3部:洋上風車の設計要件(日本規格協会、2014)

- 国際規格IEC 61400-3（Design requirements for fixed offshore wind turbines：着床式洋上風力タービンの設計要求事項）のEd.1（2009年）を基とした日本工業規格（現、日本産業規格）である。
- JIS C 1400-1の要求事項に加え、洋上風車サイトの外部条件の評価に関する追加要求事項を規定するとともに、洋上風車の工学的健全性を達成するための基本的な設計要求事項について規定している。

(d) IEC TS 61400-3-2（International Electrotechnical Commission、2019）

- 着床式を対象としたIEC61400-3-1をもとにしたもので、浮体式を対象としている。IEC61400-3-1は国際規格（IS）であるが、IEC TS 61400-3-2は現時点で技術仕様書（TS）（技術開発途上等の理由によりISとして合意されていない段階）であり、国際規格化が進められている。

4.2 気象・海象・地質情報のDB構築例の調査

(1) DB構築に求められる情報の調査（文献No. 1～19）

(e) JIS C 1400-12-1 風車—第12—1部: 発電用風車の性能(日本規格協会、2010)

- 国際規格IEC 61400-12-1 (Power performance measurements of electricity producing wind turbines : 発電用風車の性能試験方法) を基とした日本工業規格 (現、日本産業規格) である。「単一の風車の出力性能特性を計測する手順を規定し、かつ、電力系統に接続されるすべての形式及び規模の風車の試験に適用する」もので、気象観測マストの設置方法 (障害物や地形の考慮など)、使用する試験装置、取得・除外する計測データ、データの整理方法、報告形式等が記載されている。

(f) JIS C 1400-24 風車—第24部: 雷保護(日本規格協会、2014)

- 国際規格IEC 61400-24 (Lightning protection : 雷保護) を基とした日本工業規格 (現、日本産業規格) で、風力発電装置及び風力発電システムの雷保護について規定したものである。
- 我が国の設置環境を考慮して国際規格から変更されている技術的内容として、雷電荷量の大きな雷 (冬季雷) を定義し、冬季雷地域で推奨する雷パラメータ (最大電荷量600C) を設定し、JIS C 1400-24 Ed.1.0 (2014年) の附属書に記載している点が挙げられる。その後、この冬季雷現象が国際的にも認知され、最大電荷量600CがIEC 61400-24 のEd.2.0 (2019年) に記述された。

(g) DNV-ST-0126 (欧州船級協会: DNV、2021)

- DNV-ST-0126は風力タービン支持構造の構造設計に関する一般原則とガイドラインを指定している。IEC, ISO, JIS などとともに設備の要求性能の基準に用いられる。技術基準の統一的解説においては、波・流れ・津波による洗堀や局所洗堀の評価や、風車基礎のグラウト接合部の設計方法が参照されている。

(h) MEASNET Procedures: Evaluation of Site-specific Wind Conditions (MEASNET、2009)

- 風力エネルギーに係る計測基準の統一を目的とした研究機関のネットワーク (International Network of Wind Energy Measurement Institutes, MEASNET) が作成したものである。国際規格 (IEC-61400シリーズ、ISOなど) に基づいて風況観測に必要とされる要件が整理されている。

4.2 気象・海象・地質情報のDB構築例の調査

(1) DB構築に求められる情報の調査（文献No. 1～19）

(i) 風力発電設備支持物構造設計指針・同解説（土木学会、2010）

- 2007年6月20日に建築基準法が改正され、風力発電設備支持構造物の確認申請の手続きが変更となり、高さが60mを超える風力発電設備は支持構造の安全性を確認するために指定性能評価機関による評価および大臣認定を受けることが必要となったことから、国内外における風力発電設備支持物構造設計の最新研究成果ならびに建築基準法改正後における性能評価手法が含まれた風力発電設備支持物構造設計における指針となっている。

(j) 浮体式洋上風力発電施設技術基準、浮体式洋上風力発電施設技術基準安全ガイドライン（国土交通省海事局安全政策課、2020）

- 「技術基準」は「浮体式洋上風力発電施設の建造・設置等のコスト低減を通じてその導入拡大に資するため、浮体式洋上風力発電施設の安全性を確保するための設計要件等を規定」するもので、最新版は2020年に発行されている。「安全ガイドライン」は「実設計者が実務的に適用できる技術的解決策を体系的に提供する」もので、最新版は2023年に発行されている。
- 安全ガイドラインには外力条件となる風況・波浪に関して、必要な変量を推定するための方法としてDBや風況マップ等の活用が挙げられており、国内の事業に活用可能なDBが「観測」「推算」「その他」別に表形式で整理され掲載されている。

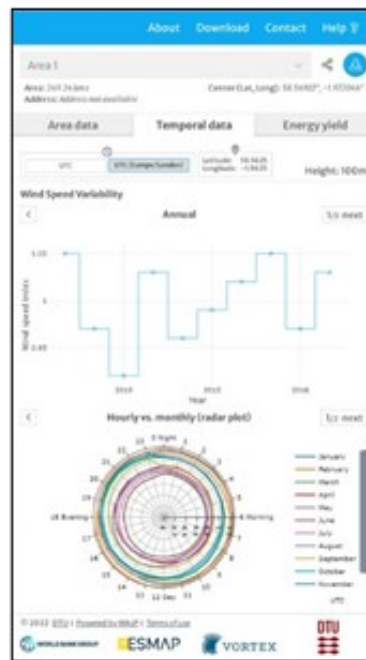
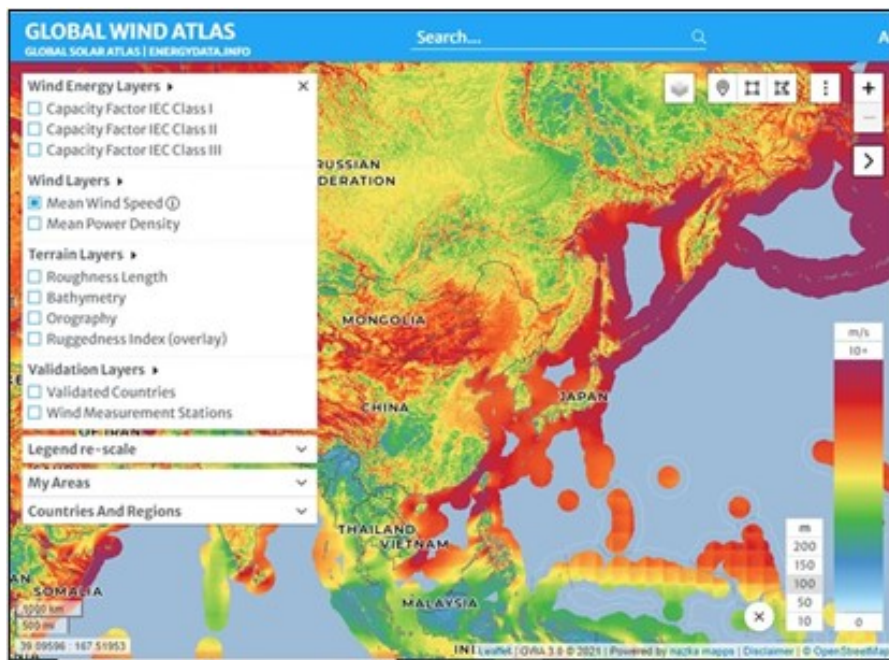
4.2 気象・海象・地質情報のDB構築例の調査

(2) 構築されているDBの調査 (文献No. 20~31)

(a) Global Wind Atlas (World Bank Group, 2015)

- 全世界を対象とした地図DBである。同機関からは他にも、太陽光発電に係るGlobal Solar Atlasなどが公開されている。
- 風力発電に関しては、陸上と洋上（海岸線から200kmまで）における高度10, 50, 100, 150, 200mの風速・風力エネルギー密度・風車クラス (I, II, III) 別の設備利用率 (0~1) が、水平格子解像度250mでマップ表示される。

※ (補足) 気象場の計算は、2008年~2017年の気象再解析データERA5 (水平格子解像度約30km) をベースとして、領域気象モデルWRF (5km)、デンマーク工科大学 (Technical University of Denmark, DTU) のマイクロスケールモデル (250m) による力学的ダウンスケーリングを用いて実施している。



左図：高度100mの風速分布をマップ表示した例

右図：指定したエリア内の年別・月別・時刻別の平均風速を表示した例

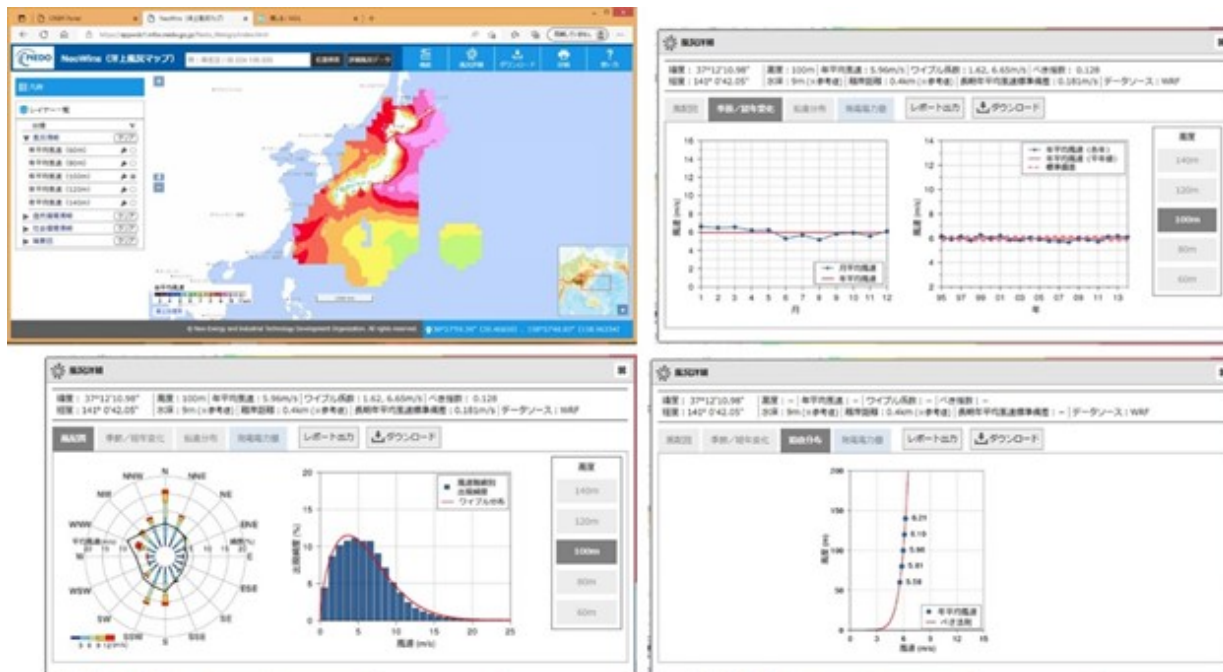
4.2 気象・海象・地質情報のDB構築例の調査

(2) 構築されているDBの調査（文献No. 20～31）

(a) NeoWins(洋上風況マップ) (NEDO、2017)

- 洋上風力開発の適地選定に必要な情報を一元化した洋上風況マップを構築することを目的として作成されたものであり、適地選定等の検討に必要な項目が多く含まれている。
- 風況に関しては高い水平格子解像度（離岸距離30km以内は500m）、多層（60, 80, 100, 120, 140mの5高度）のマップや地点別の統計データが表示される。

※（補足）離岸距離30km以内の風況は1995年～2014年の20年間（10km解像度）、2009, 2012, 2014年（500m解像度）について気象モデルWRF（Weather Research and Forecasting Model）で計算している。それ以外遠の外洋はマイクロ波散乱計ASCATによる海上風速の観測値を使用している。



図：風速分布表示（左上）と地点情報の表示

4.2 気象・海象・地質情報のDB構築例の調査

(2) 構築されているDBの調査 (文献No. 20~31)

(c) EADAS(環境アセスメントデータベース) (環境省、2014)

- 再生可能エネルギーを含め環境アセスメントにおいて地域特性を把握するために必要となる自然環境や社会環境に関する情報を整備したものの。
- 自然・社会・観測・再エネ設備など多岐にわたる項目がDB化されており、特に環境・生物に係る項目が充実している。



図：画面表示例 (海生哺乳類や爬虫類の分布)

4.2 気象・海象・地質情報のDB構築例の調査

(2) 構築されているDBの調査 (文献No. 20~31)

(d) 海洋状況表示システム(愛称:海しる) (海上保安庁、2019)

- 海洋関係機関が収集・保有している海洋情報を集約し、衛星情報や海上気象の情報などを地図上で重ね合わせて表示できる情報サービスである。
- 過去の統計情報のほか、半日から1日程度先の予測(風況・波浪)、リアルタイムの情報(雷・雨)が得られる。
- 海象関連の表示項目数が多い。特徴的なものとして津波シミュレーションの情報がある。

水温 <ul style="list-style-type: none">◆海面水温(実況) [気象庁]◆海面水温(予想) [気象庁]◆海面水温(年平均差(実況)) [気象庁]◆海面水温(全球) [NOAA]◆海面水温(全球) [JAXA]◆表層水温(実況) 50m深◆表層水温(実況) 100m深◆表層水温(実況) 200m深◆表層水温(実況) 400m深◆表層水温(予想) 100m深◆水温 [リンク]◆水温 (統計) - 等値線◆水温 (統計)◆海面水温 (全球、SGLI、昇交軌道)◆海面水温 (全球、SGLI、降交軌道)◆海面水温 (ひまわり)◆海面水温(日本周辺、SGLI、昇交軌道)◆海面水温(日本周辺、SGLI、降交軌道)	潮流 <ul style="list-style-type: none">◆潮流推算(東京湾)◆潮流推算(伊勢湾)◆潮流推算(瀬戸内海)◆潮流シミュレーション(慶良間諸島)◆潮流推算 [リンク] 潮汐 <ul style="list-style-type: none">◆潮汐推算 [リンク]◆潮汐 [リンク] 波 <ul style="list-style-type: none">◆有義波高(実況・予想)◆有義波高 (統計)◆波浪 (統計)◆周期波向 塩分 <ul style="list-style-type: none">◆塩分 (統計) - 等値線◆塩分 (統計) 海水 <ul style="list-style-type: none">◆海水密度度 (北極域) 気象・海象観測情報 [AOV]
海流 <ul style="list-style-type: none">◆海流 - 流況(東部津軽海峡)◆表層海流(予想)◆流向(実況・予想) 50m深◆流速(実況・予想) 50m深◆海流 (統計)◆海洋速報 (海流図)	

左表：海象に関する表示情報

右図：マップ表示の例 (上：リアルタイムの落雷情報、
下：四国沖～紀伊半島沖の津波シミュレーションの結果)



4.2 気象・海象・地質情報のDB構築例の調査

(まとめ)

- 規格や基準類に関する例としては、DBに含まれている観測データに関して、JIS C 1400-12-1やMEASNETへの適合性に関する情報が実務でのDBの活用において重要と考えられる。
- 学術論文や研究資料に関する例としては、DBにおける重要な情報である風（風速や風向）と波（波高や波周期）との関連性に着目した研究が行われており、より質の高い風や波のDB構築に資する研究成果が得られている。
- 日本国内が対象範囲に含まれるDB（NeoWins、EADAS、海洋状況表示システム、Global Wind Atlas）は、力点を置いている表示情報がそれぞれ異なるため、各DBの情報を相互補完的に得ながら実務に活用することが有用と考えられる。
- 風況の情報に関しては、DB毎に作成方法や時空間解像度・高度が異なることに加えて、統計期間もDB毎に異なるため、各データの諸元や特徴を把握した上で情報を活用することが有用と考えられる。
- 国外のDBでは、「風車クラス別の設備利用率」、「着氷を考慮した月別の発電ロス率の分布」、「ケーブル上陸地点から系統接続地点までの距離の分布」、「海底の砂の移動方向」が提供されており、これらの情報は、今後の国内のDB構築への参考になると考えられる。

4.3 コーン試験併用による認証に関する調査

(はじめに)

- 地盤物性値の調査では、国内のこれまでの構造物・耐震設計基準の観点から、ボーリングコアによる室内試験が基本となっている。不攪乱試料の採取が困難な場合には標準貫入試験（SPT）が行われ、SPTによってN値を得るサウンディング調査は古くから行われており、膨大なデータと実績がある。
- コーン貫入試験（CPT）は、試験方法によっては適用可能な地盤の種類や深さが制限されるが、試料を採取しないため、貫入体の上げ下げが不要であり、標準貫入試験よりも簡便な試験方法である。
- また、深度方向に連続的に調査が可能であり、標準貫入試験では得られない周面摩擦抵抗や間隙水圧などの情報も得られる。これらの情報を活用し、地盤材料や地盤特性の推定が試みられている。
- 設計に必要となる地盤強度の評価では「内部摩擦角 ϕ や非排水せん断強さ C_u 」を知ることが基本であるが、試料の採取が困難な場合には「標準貫入試験によって得られたN値」から ϕ や C_u を推定している。
- CPTでは主にコーン貫入先端抵抗 q_t からN値を推定しており、そのN値から ϕ や C_u を推定することになるため、原理的に精度の高い ϕ や C_u の推定が困難であるが、精度向上の試みが行われている。
- そこで、CPTを活用して地盤調査や地盤定数の評価を行うにあたり参照すべき基準や文献等について調査を行うとともに、実務上の課題について、整理を行った。

4.3 コーン試験併用による認証に関する調査

(1) CPT(コーン貫入試験)結果を基にした地盤特性の推定 (文献No. 1~17)

(a) 洋上風力発電設備に関する技術基準の統一的解説(令和2年3月版) (洋上風力発電施設検討委員会、2020)

- 地盤調査(ボーリング)では、サウンディング(SPTやCPT)の併用が認められているものの、SPTとCPTのデータの突合せを実施する必要がある。
- N 値(SPT)と換算 N 値(CPT)ではデータのばらつきが予想されることから、複数位置でデータの突合せを行うことが望ましい。

(b)(a)の付属書2 コーン貫入試験(CPT)による地盤評価 (洋上風力発電施設検討委員会、2020)

- CPTでは貫入抵抗、周面摩擦、間隙水圧を計測し、これらの多様な地盤情報からより信頼性の高い地層構成を得ることができるが、試料採取を行わない場合の土質分類にはデータを解釈する技術者の力量に大きく依存する。
- 地層構成の評価にはロバートソンの土質分類チャートを参考にできるが、対象としている地盤と同じ性状を示すとは限らない。
- →調査エリアにおける地盤特性の地域性を十分考慮して結果を解析・修正することが望ましい。

(c) コーン貫入試験結果と標準貫入試験結果から得られた地盤特性との関係 (鈴木ほか、2003)

【 N 値】

- せん断波速度測定を併用したCPTを114地点で実施。調査地点は北海道から鹿児島までを網羅し、調査地盤は粘性土から砂質土までをカバーしている。
- ロバートソンが提案した土質分類手法(I_c の式)を用いることで、 N 値- q_t の関係から N_c 値(コーン貫入試験から換算した N 値)の算出が可能である。
⇒ 実際、 N_c 値と実測 N 値を比較すると良く対応している。

4.3 コーン試験併用による認証に関する調査

(1) CPT結果を基にした地盤特性の推定（文献No. 1～17）

(d) Manual on estimating soil properties for foundation design (F. H. Kulhawy and P. W. Mayne, 1990)

【内部摩擦角】

- CPTより先端抵抗 (q_c) から内部摩擦角 (φ) を算出可能である。
- CPTより間隙水圧 (u) と先端抵抗 (q_c) から内部摩擦角 (φ) の推定が可能である。

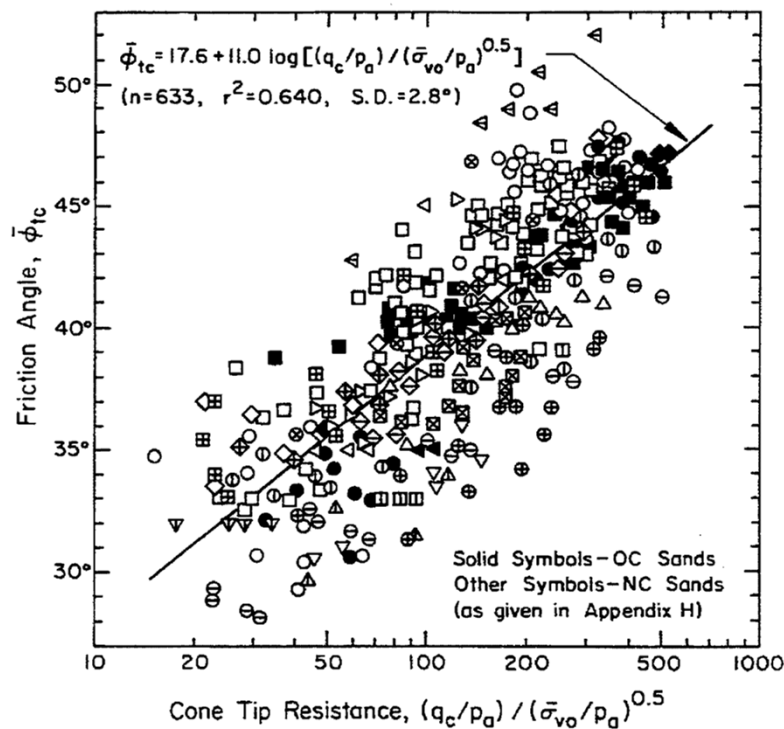


Figure 4-17. Trend of $\bar{\phi}_{tc}$ with Normalized q_c

内部摩擦角 φ と先端抵抗の関係

4.3 コーン試験併用による認証に関する調査

(1) CPT結果を基にした地盤特性の推定（文献No. 1～17）

(e) 洋上風力発電の地域一体的開発に向けた調査研究事業

各調査項目における調査手法・仕様の一般化に向けた中間とりまとめ（NEDO、2022）

【着床式】

- 調査地点数が数箇所に絞られる基本設計段階の調査(*)では、ボーリング及びSPTによる調査を基本とする。調査地点数は少なくとも2地点以上を基本とし、調査海域の広さ及び形状に応じて設定する。
⇒ 地盤の液状化に関する特性と耐震設計に必要な工学的基盤の状況をより正確に把握するため。
- 詳細設計段階の調査(*)では、風車設置箇所の全地点において調査を実施するが、その際にはCPTの活用・併用も候補となり得る。

地盤物性値【着床式】	
調査目的	・いずれの着床式基礎形式が採用されても基本設計ができるよう原位置試験、試料のサンプリング及び室内試験を行って、調査海域の地層構成の把握及び、地盤の工学的特性を把握することを目的とする。
調査期間	—
調査地点数等	<p>・ボーリング及び標準貫入試験（SPT）：調査地点数は少なくとも2地点以上を基本としたうえで、調査海域の広さ及び形状に応じて設定する。</p> <p>- PS検層、密度検層、キャリパー（孔径）検層</p> <p>- 孔内載荷試験、乱れの少ない試料採取：1式</p> <p>- 室内土質試験：1式</p> <p>・海底微動アレイ探査：調査地点数は3地点以上とし、調査海域の広さに応じて設定する。なお、ボーリング調査のPS検層においてGL-100mを超えてもS波速度(Vs)が400m/s以上を満足しないなど、結果的にボーリング調査により工学的基盤が把握できなかった場合は、直近で海底微動アレイ探査を実施して工学的基盤の深度を推定する。</p>
調査手法・仕様	<p>・国内のこれまでの構造物・耐震設計基準の観点から、ボーリング及び標準貫入試験による調査を基本とする。</p> <p>※基本設計段階での調査地点数は区域の代表点となる数箇所に絞られることを踏まえ、地盤の液状化に関する特性と耐震設計に必要な工学的基盤の状況をなるべく正確に把握するため、ボーリング及び標準貫入試験を第一案として検討する。なお、詳細設計段階での調査では、風車設置箇所の全地点において調査を実施するが、その際にはコーン貫入試験（CPT）の活用（併用）も候補となり得る。</p> <p>・調査事項は以下による。</p> <p>ボーリング調査、標準貫入試験(JIS A 1219)、孔内載荷試験 (JGS 1531、JGS 3531)、サンプリング（シンウォールサンプリング)JGS-1221、ロータリー式二重管サンプリャーによる試料採取JGS-1222、ロータリー式スリーブ内蔵二重管サンプリャーによる試料採取JGS-1224、ロータリー式三重管サンプリャーによる試料採取JGS-1223)、PS検層(JGS-1122)、密度検層、キャリパー（孔径）検層、海底微動アレイ探査、室内土質試験、室内岩石試験。</p> <p>・ボーリングの最低掘進長は40mを目途とする。掘り止め基準は工学的基盤（Vs ≧400m/s）を5m以上確認とする。</p> <p>・調査方法は「海洋調査技術マニュアル-海洋地質調査編-、（一社）海洋調査協会」及び地盤工学会基準に準拠する。</p> <p>・標準的な室内土質試験の項目と試験方法は、JIS A1202、JIS A1203、JIS A1204、JIS A1205、JIS A1225、JIS A1217、JIS A1216、JGS 0521、JGS 0522、JGS 0523、JGS 0524、JGS 0541、JGS 0542とする。</p> <p>・標準的な室内岩石試験の項目と試験方法はJGS 2132、JGS 2521、JGS 2531、JGS 2532、JGS 2533、JGS 2534、JGS 2563、JGS 2564とする。</p>
調査成果	<p>・ボーリング調査により地層構成及び、地盤の工学的特性を把握する。</p> <p>・標準貫入試験によりN値、孔内載荷試験により変形係数E、室内土質試験により物理特性、力学特性（粘着力c、せん断抵抗角φ）、変形係数E、変形特性、液状化特性を把握する。</p> <p>・PS検層(JGS-1122)により、各層のS波速度（Vs）Pは速度（Vp）及び、海底微動アレイ探査により深度方向のVs分布及び、工学的基盤（Vs ≧400m/s）を把握する。また密度検層により、各地層の密度分布を把握する。</p>

(*) 基本設計段階および詳細設計段階の調査は、それぞれ3.1(2)(a)の2次調査、3次調査に該当する。

4.3 コーン試験併用による認証に関する調査

(1) CPT結果を基にした地盤特性の推定（文献No. 1～17）

(e) 洋上風力発電の地域一体的開発に向けた調査研究事業

各調査項目における調査手法・仕様の一般化に向けた中間とりまとめ（NEDO、2022）（続き）

【浮体式】

- 水深が50m以上となる浮体式の海域では、ボーリングによる調査が困難であるため、CPTと基本とし、深度方向に連続して計測する。
- CPTは少なくとも2地点以上を基本とし、調査海域の広さ及び形状に応じて設定する。
- CPTでは貫入時の先端抵抗 (q_c)、周面摩擦 (f_s)、間隙水圧 (u) を計測し、地層構成及び、地盤の工学的特性を把握する。
- CPTの調査手法や仕様は、地盤工学会基準 JGS-1435（電気式コーン貫入試験方法）による。

地盤物性値【浮体式】	
調査目的	・いずれの浮体式が採用されても基本設計ができるよう原位置試験、試料のサンプリング及び室内試験を行って、調査海域の地層構成の把握及び、地盤の工学的特性を把握することを目的とする。
調査期間	—
調査地点数等	・コーン貫入試験（CPT）及び、PS検層：調査地点数は少なくとも2地点以上を基本としたうえで、調査海域の広さ及び形状に応じて設定す ・必要に応じて別孔で乱れの少ない試料採取、PS検層、密度検層、キャリパー（孔径）検層：1式 ・室内土質試験：1式
調査手法・仕様	・水深が50mを超える浮体式の海域では、ボーリングによる調査が困難であるため、CPTを基本とし、深度方向に連続して計測する。 ・CPT(JGS-1435)、PS検層(JGS-1122)、密度検層、キャリパー（孔径）検層、サンプリング、室内土質試験（砂質土などCPTにおいて乱れの少ない試料採取が困難な地層は再構成試料で試験を実施する。試験内容はボーリング調査の内容に同じ。） ・CPTは連続してコーン貫入時の先端抵抗 (q_c)、周面摩擦 (f_s)、間隙水圧 (u) を計測する。 ・CPTの技術的な基準については、ISSMGE (1999)、ASTM (2012)、ISO (2012)、ISO (2014)、JGS等に準拠する。 ・基礎形式がセミサブ形式、スパー型形式の場合、ドラッグアンカー等による係留が可能であり、深い地盤の調査は不要となるため、海底着座型のCPTにより浅層のみを調査する場合もある。
調査成果	・CPTにより地層構成及び、地盤の工学的特性を把握する。またCPT結果から各種地盤定数を算定する経験式（Robertsonの式等）は、「洋上風力発電設備に関する技術基準の統一解説、令和2年3月版、付属書2 コーン貫入試験（CPT）による地盤評価」などを参考に整理する。 ・室内土質試験により物理特性、力学特性（粘着力 c 、せん断抵抗角 ϕ ）、変形係数 E 、変形特性、液化化特性を把握する。 ・PS検層(JGS-1122)により、各層のS波速度 (V_s) Pは速度 (V_p) 及び、工学的基盤 ($V_s \geq 400\text{m/s}$) を把握する。また密度検層により、各地層の密度分布を把握する。

4.3 コーン試験併用による認証に関する調査

(まとめ)

- 欧州ではCPTによる地盤調査が既に主流となっている。CPTを活用した設計に必要な地盤特性値の推定にあたっては、これまで調査した文献等を参考に、国内地盤においてもその推定が可能とされている。既存の文献によるCPTの結果を用いた地盤特性の関係式は、限られたデータや特定の地盤条件下で導かれたものであり、個々の開発エリア及び風車地点での活用においては、SPTや室内試験等との比較により、その適用妥当性を確認する必要がある。
- 調査対象地点の水深によっては、ボーリング台船（固定櫓）の設置が困難な場合もあり、調査船からのCPTしか実施できない状況が想定しうる。調査用資機材の確保や工期短縮等の経済性、調査の安全性といった観点からは、調査船を使用したCPTやサンプリングによって地盤特性を把握することが有効である。ただし、調査船を使用した場合の動揺対策やサンプリング時における管理基準等は明確でない。
- 今後、様々な海域を対象に、多様な地質、地盤条件下での調査、設計が増えてくることが想定されるため、より柔軟かつ高度な調査、設計手法を整理していく事は、開発促進はもとより、事業の経済合理性や競争力を高めることにも繋がると想定される。多様な調査、試験方法によって得られた地盤特性を設計に反映させるための研究や実証を行い、知見を蓄積し、学会レベルでの基準策定やガイドライン等を整理していく事は意義があると考えられる。

4.4 設計・認証基準の実態調査

(はじめに)

- 日本における設計、認証基準としては、「洋上風力発電設備に関する技術基準の統一的解説（令和 2 年 3 月版，洋上風力発電施設検討委員会）」（以下、統一的解説）が上位基準としての位置付けにある。しかし、「統一的解説」においては、すべての設計項目について詳細が記載されているわけではなく、引用する国内外基準に具体的な設計内容が記載されている場合もある。
- 実態調査に当たっては、まず「統一的解説」に引用されている国内外の基準類を下表のとおり整理した。次に、設計項目ごとに各基準における記載内容を確認した。例として、「地震荷重に対する設計」、「疲労荷重に対する設計」、「洗掘防止」に関する文献および記載内容を紹介する。

4.4 設計・認証基準の実態調査

(1) 設計項目「地震荷重に対する設計」の調査（文献No. 1～5）

(a) 洋上風力発電設備に関する技術基準の統一的解説（洋上風力発電施設検討委員会、2020）

- 構造解析におけるモデルは、支持構造物の動的特性及び海洋環境条件が風車の構造的健全性に影響をおよぼす可能性があるため、基礎、下部構造、タワー及び風車からなる構造をモデル化することを基本とする。
- 地震時の荷重評価では、時刻歴応答解析の荷重効果に、年平均の波・風の荷重効果を足し合わせる解法により求めることが示されている。（解析モデル、pp.139-142）

(b) 風力発電設備支持物構造設計指針・同解説（土木学会、2010）

- 第5章に地震時の荷重評価について示されており、地盤の影響を考慮した時刻歴応答解析手法を用いることが説明されている。入力地震動は目標スペクトルに適合させた模擬地震動、観測地震波、サイト波となる。

(c) 港湾の施設の技術上の基準・同解説（日本港湾協会、2018）

- 第6章に地震について示されており、サイト特性、時刻歴波形など条件設定に関することが説明されている。入力地震動はレベル1、レベル2地震動となる。

(d) 浮体式洋上風力発電施設技術基準（国土交通省海事局安全政策課、2020）

- 4-1に説明があり、地震は過去発生した最大レベルを考慮し、同時に通常状態の風、波等の環境荷重を考慮することが記載されている。

(e) Offshore Wind Turbine Foundation Design, DTU Wind Energy (Patrik Passon, et al., 2015)

- 3章に地震動の荷重評価について記載されており、荷重評価は、基礎設計者と風車メーカーが一緒になり、個々のステップを逐次計算によってシミュレーションすることとなっており、その行程は3ステップから成る。

4.4 設計・認証基準の実態調査

(2) 設計項目「疲労荷重に対する設計」の調査（文献No. 1～6）

(a) 洋上風力発電設備に関する技術基準の統一的解説（洋上風力発電施設検討委員会、2020）

- 4.4タワーの設計において疲労照査が解説されており、設計耐力はISOの海洋構造物設計規格又はそのほかの一般に認知された海洋構造物設計規格を基本とし、JIS C 1400-3に記載されたガイドラインが紹介されている。

(b) Rules and guidelines, IV Industrial Services, 1 Guideline for the certificate of offshore wind (Germanischer Lloyd, 2012)

- 材料特性に部分安全係数を考慮することとなっており、疲労解析の場合は、コンクリートで1.5と示されている。（部分安全係数、pp.5-19）

(c) ISO 19902 Petroleum and natural gas industries – Fixed steel offshore structures (ISO, 2007)

- 16章に鋼製海洋構造物について疲労限界状態を満足することを検証する方法が示されている。

(d) DNVGL-RP-C203 Fatigue design of offshore steel structures (DNV, 2016)

- 疲労解析は、検討した溶接部の疲労試験および線形損傷仮定により求めた S-Nデータに基づいて行う必要があり、大規模構造物の正確な調査や破壊力学的解析を実施することも検討すべきである。
- 長期的な応力範囲の分布は、決定論的解析またはスペクトル解析により求めることができる。動的な影響は応力範囲履歴を長期的に検討するとともに、そのうち、最も疲労に大きく寄与する部分の損害は最も慎重に評価されるべきである。
- なお、ワイブル分布の形状パラメータは、疲労損傷予測に与える影響が大きいため、安全側に設定する必要がある。

4.4 設計・認証基準の実態調査

(2) 設計項目「疲労荷重に対する設計」の調査（文献No. 1～6）

(e) DNV-OS-J101 Design of Offshore Wind Turbine Structures (DNVGL, 2014)

- 7.10に疲労限界状態に対する設計の要求事項として、S-Nカーブ、応力範囲分布、特性累積ダメージおよび設計累積ダメージ、設計疲労度係数が示されている。

(f) JIS C1400-1: 風力発電システム－第1部: 設計要件（日本規格協会、2017）

- 疲労破壊について、適切な疲労破壊計算を用いて予測することが記載されており、疲労解析の定式化の例として Miner 則が示されている。
- 疲労破壊について、設計耐力は ISOの海洋構造物設計規格又はその他の一般に認知された海洋設計規格に従って求めなければならないとあり、タワーの設計耐力についてはJIS C 1400-1:2010の7.6.3によって求められてもよいとなっている。

4.4 設計・認証基準の実態調査

(3) 設計項目「洗掘防止」の調査（文献No. 1～3）

(a) 洋上風力発電設備に関する技術基準の統一的解説（洋上風力発電施設検討委員会、2020）

- 3.6 に洗掘に適切に考慮することが記載されており、解説で現象として局所洗掘、広域洗掘が説明されている。また、洗掘範囲や深さを推定する参考方法として、DNVGL-ST-0126や港湾における洋上風力発電施設等の技術ガイドラインが挙げられている。

(b) 港湾における洋上風力発電施設等の技術ガイドライン(案)（日本規格協会、2015）

- 洗掘防止対策についての記載はなく、洗掘発生の有無や洗掘量推定式について記述がある。

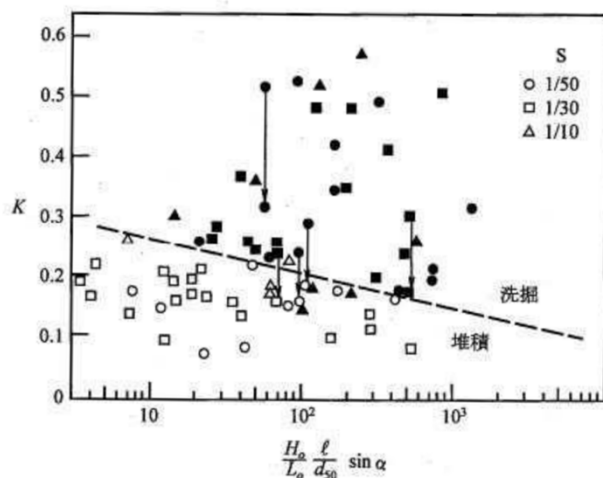


図. 参. 1 護岸堤脚部の洗掘・堆積の判定条件

出典：「港湾技術基準 平成 19 年版」、p259

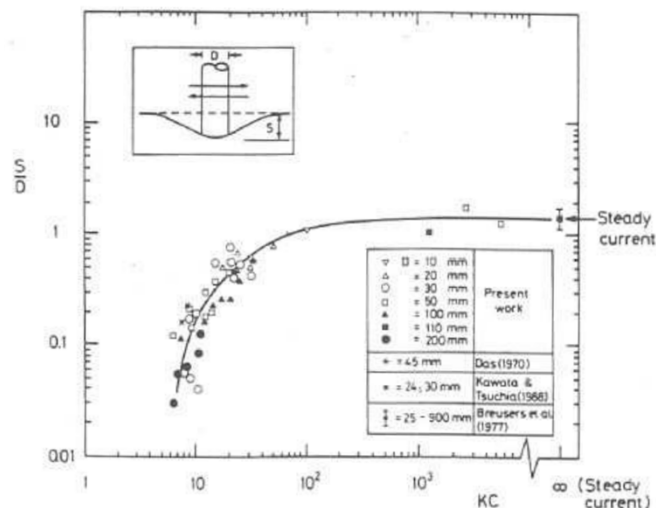


図. 参. 2 波による円柱基礎まわりの洗掘深さの推定式と実験値

出典：“Scour and Scour Protection-Design of Maritime Structures”, US Army Corps of Engineers

(b) DNVGL-ST- 0126 Support structures for wind turbines（DNVGL, 2016）

- 垂直杭における洗掘は、 KC 数（Keulegan-Carpenter number）に支配される。洗掘深度の推定式に加え、海底での潮流や波浪の流速、せん断応力が示されている。また、洗掘の進展時間の推定式も示されている。

4.4 設計・認証基準の実態調査

(まとめ)

- 洋上風力の設計基準に関しては、国内外の他の法令等に準拠する事例が多いが、海外の基準を取り入れた事例では、必ずしも国内のものと同じではなく、統一的な考えのもとに導入されたものとはなっていない。その他、IEC 基準を元に設定されているものについては、必ずしも十分でない分野（地震等）も散見される。
- 実際の審査では、明確な審査基準が整備されておらず、例えば、基礎設計では、海外基準をベースに国内建築基準や港湾基準を、適宜取り入れているような形で進められているのが実態である。
- 土木学会、建築学会、DNV、IECなど多岐に渡る基準から、最も保守側となるパラメータや設計値を検討するといった対応が求められることがあるが、近年の風車大型化に伴い、風車支持構造物（タワー及び基礎）の構造成立性（特に極稀地震時）が厳しくなっており設計自体が困難といった事例もある。
- 構造解析のモデルの妥当性検証や耐力側評価に用いる基準の選定など、精緻かつ高度に専門的な検討が必要となり、コストと許認可を得るまでの時間的な見通しを立てることが困難な場合もある。
- 以上の実態を踏まえ、統一的でかつ合理的な設計基準の策定はもとより、事業者の負担を軽減する意味でも、審査基準の明確化が特に重要であると考えられる。

4.5 遠隔監視によるO&M 省力化の調査

(はじめに)

- 洋上風力発電所は海洋の中に建設されるものであり、陸上風力に比べると発電所に近づくことは容易ではない。このため、運転・保守を確実に実施するためには遠隔監視技術の高度な利用が求められている。国のガイドブックや指針類にもその重要性は述べられているが、その一方で、国内での洋上風力発電所の運用実績は少なく、また同技術は関係企業が現在進行形で開発を進めていることもあり、公開された文献数は限られている。
- 今回の文献調査では、まずは、経済産業省、国土交通省、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）の発行しているガイドブックや指針類を対象に、運転・保守に関する内容を調査した。次に、日本風力エネルギー学会の至近年の論文の中で、運転・保守に関係したものとして発表数が多かった「風車機器の異常検知技術」、「風車設備の損傷点検技術」、「落雷検出技術」に関する論文を収集・整理した。調査した論文の多くは洋上風力に対象を限定したものではなく、むしろ陸上風車用に開発された技術であったため、NEDOの成果報告書の中から、洋上風力にこだわらず参考となると考えられるものを追加で調査した。

4.5 遠隔監視によるO&M 省力化の調査

(1) 国の指針・ガイドブック等の調査（文献No. 1～4）

(a) 着床式洋上風力発電導入ガイドブック 別冊 北九州市沖洋上風力発電実証研究施設導入事例 (NEDO、2018)

- 洋上風車および支持構造物には、モニタリング装置を取り付け、実証研究施設には、CMS（状態監視システム）を導入し、運転パラメータの遠隔モニタリングを実施した。
- また、SCADA（監視制御システム）により風車設備の運転状況（出力、温度、回転数他）や異常の有無を遠隔にて監視・記録するとともに、Webカメラを活用した視覚データ収集等によって故障発生情報を事前に把握し、予防措置を効率的に実施するシステムを構築し運用した。
- 水中部点検では、主に海水面以下の支持物や海底ケーブルの状況確認を行った。調査はサイドスキャンソナーを用いて、1回/半年の頻度で行った。
- 水中部の基礎・支持物を安全かつ効率的に管理する手法として、水中メンテナンスロボットを開発した。根固めブロックの高さ計測では設計値とロボットによる計測結果は一致し、潜水土の活動に制限がかかる水深での適用が期待される。

(b) 着床式洋上風力発電導入ガイドブック 別冊 銚子沖洋上風力発電実証研究施設導入事例 (NEDO、2018)

- 洋上風車および支持構造物に各種モニタリング装置を取り付けた。現地設備は常時無人、運転監視は遠隔で24時間体制、設備異常警報などが発生した場合、監視箇所に警報内容が通報される体制で実施した。銚子沖実証研究施設には、CMS（状態監視システム）を導入し、遠隔モニタリングを実施した。
- 台風と南岸低気圧の接近により電力ケーブルの可とう保護管の損傷、固定架台の損傷などが生じて電力ケーブルの破断に至る事故が発生した。水深10m程度で砕波が発生する場所に設置した洋上構造物では、設計波力に近い砕波波力を様々な方向から頻繁に受けることにより、繰り返し応力が発生した。

4.5 遠隔監視によるO&M 省力化の調査

(1) 国の指針・ガイドブック等の調査（文献No. 1～4）

(c) 浮体式洋上風力発電導入マニュアル（福島洋上風力コンソーシアム、2019）

1 運転保守段階における関係法令の整理 pp.35-38

- 浮体式洋上風力発電の運転保守の段階で関連のある法令を、「着床式洋上風力発電導入ガイドブック（NEDO）」及び「一般海域における利用調整に関するガイド（経済産業省）」における記述をもとに、関係条項、法令内容、許可・届出、あて先について整理した。

2 運転保守の流れ pp.116-121

①メンテナンス計画の策定

- メンテナンス計画の策定は、発電事業を効率的かつ効果的に行うため、メンテナンスにおける契約、保険、実施体制等を含むメンテナンス計画を、電気事業法及び船舶安全法上の手続きを策定するとし、風車・浮体の具体的なマニュアル記載項目、実施体制、保険などの詳細について纏めてある。

(d) 港湾における洋上風力発電設備の施工に関する審査の指針

（国土交通省：港湾における洋上風力発電設備検討委員会、2018）

1 適切な維持管理の実施

- 施工完了後も、設備等の維持管理を実施できる体制を構築すること。特に、落雷等の突発的な災害時に、ブレード等の大型資機材を直ちに修繕できる体制を構築することが望ましいとある。
- 関連する内容の文献として、「洋上風力発電設備の維持管理に関する統一的解説（令和2年3月版）：洋上風力発電施設検討委員会」がある。
- 一般的に洋上風力発電設備等は陸上に設置される風力発電設備と異なり厳しい海洋環境下にあるため、構造物の安全性の観点から、鋼材の腐食や基礎地盤の変化への配慮が必要で、専門的知識及び技術または知能を有する者の下で維持管理が行われる必要とされている。

4.5 遠隔監視によるO&M 省力化の調査

(2) 「風車機器の異常検知技術」(文献No. 5~8)、「風車設備の損傷点検技術」(文献No. 9~12)、「落雷検出技術」(文献No. 13~16)、に関する調査

(a) 風車異常検知の効率的運用に向けた正常状態の特徴表現学習 (長谷川ら、2021)

- 多数の類似機種で観測された正常データから自己符号化器 (Autoencoder, AE) を構築し、これにより機器や気象条件、運転状況の違いに起因する情報が圧縮され、正常稼働状態を表す本質的な特徴量を抽出する。さらにこの特徴量を用いて混合ガウスモデル (Gaussian Mixture Model, GMM) を照合器として正常状態モデルを構築することで、監視対象機器ごとの長期間にわたるデータ収集を待たずに異常検知システムの性能向上が期待できる。論文では風車主軸受の加速度振動データを用いてAE/GMMタンデム接続型異常検知システムの検証を実施した。

(b) Fatigue life prediction of wind turbine main bearing considering internal clearances and pounding forces (Takeshi Ishihara, et al., 2019)

- 主軸受のパウンディングシミュレーションのための数値モデルを作成した。パウンディングによる荷重係数を主軸受の疲労寿命予測に用いることを提案した。
- 寿命比と荷重係数をパラメータとして主軸受の疲労寿命を予測した。予測された定格寿命L10は現場の記録とよく一致したが、ISO 281の公式による寿命は大幅に過大評価されることが分かった。

(c) 洋上風力点検へのドローン技術活用の検討 (藤本ら、2019)

- リアルタイム物体検出技術の一つであるSSD (Single Shot MultiBox Detector) を活用しサーモグラフィー観測で使用したブレード模型を対象に、落雷痕のある箇所/ない箇所の画像データを作成し、ブレード、落雷痕、レセプタの検出について学習を行った。
- 風車ブレード自体の検出や落雷痕およびレセプタの検出が可能であることが確認された。
- 一方で、光の反射の影響で一部落雷痕が検出できない箇所もあり、今後の改善が必要である。

4.5 遠隔監視によるO&M 省力化の調査

(2) 「風車機器の異常検知技術」(文献No. 5~8)、「風車設備の損傷点検技術」(文献No. 9~12)、「落雷検出技術」(文献No. 13~16)、に関する調査

(d) 風車用落雷検出装置が満たすべき性能とその試験方法 (山本ら、2020)

- 新JIS C 1400-2の落雷検出装置に関する部分と、その性能評価試験方法が規定されている新しいJEM規格の内容が紹介されている。
- 新JIS C 1400-24では、地域ごとの最適な落雷検出装置のスペックが規定される予定である。その内容は表1と図1に示す通りで、図1で示される冬季雷地域には表1にあるクラスIの周波数帯域を有する落雷検出装置のみ設置可能となる。

表1 落雷検出装置のクラス分類と周波数帯域

クラス	設置可能地域	電荷量検出機能の有無	周波数帯域
I	日本全国	有	0.1 Hz~100 kHz
II-1	夏季雷地域	有	10 Hz~100 kHz
II-2	夏季雷地域	無	1 kHz~100 kHz

注) クラスIは、クラスIIの地域にも適用できる。



図1 冬季雷地域と夏季雷地域

太い実線内とその周辺の海域を冬季雷地域、上記以外を夏季雷地域と呼ぶ。

4.5 遠隔監視によるO&M 省力化の調査

(2) 「風車機器の異常検知技術」(文献No. 5~8)、「風車設備の損傷点検技術」(文献No. 9~12)、「落雷検出技術」(文献No. 13~16)、に関する調査

(e) あわら北潟風力発電所の落雷実績からみたIEC61400-24の課題 (本庄ら、2022)

- IEC61400-24には、風車が耐えられなければならない雷電流のパラメータが定められている。代表的なものとして、雷が放電する電荷の量(放電電荷)、放電電流のピーク値、雷が 1Ω の抵抗を介して放電した場合のエネルギー(比エネルギー)などがある。また定性的な内容として、ブレード内部で放電してはいけない、受雷部(レセプタ)は人工雷発生装置を用いた試験で、100%放電を捕捉しなければならないことが定められている。
- 冬季雷の特徴である、放電電荷量が多い、落雷回数が多い、落雷の時間間隔が短い、レセプタを外す落雷があるという点については、規定の内容が不十分であり、IEC61400-24に準拠したブレードであっても、冬季雷に十分対応できないことが推測される。

表-1 あらわ風力落雷実績集計結果

	あわら風力	NEDO 次世代事業 25 地点
総放電電荷量	2,999C	52,124C
平均放電電荷量	71.4C	77.6C
平均比エネルギー量	91.8kJ/ Ω	192.2kJ/ Ω
平均電流波高値	8.79kA	8.7kA

4.5 遠隔監視によるO&M 省力化の調査

(3) NEDO成果報告書に関する文献調査（文献No.17～19）

(a) 平成25年度～平成29年度成果報告書 風力等自然エネルギー技術研究開発 風力発電高度実用化研究開発 スマートメンテナンス技術研究開発(分析)(疲労予測等) (NEDO、2019)

- 第2章及び第3章では、故障・事故調査及び実際の事業者等へのヒアリングやメンテナンスに係るアンケートを通じて、我が国の故障・事故の傾向並びにメンテナンスに係る実態及び課題が整理されている。
- 第4章では、風車の状態監視に係る技術として、既存のCMSに係る研究開発状況やタワーの異常検知、ドライブトレインの損傷検知について示されている。
- 第5章では、疲労寿命予測手法として、タワートップボルトと主軸軸受けについては、検討されている。
- 第6章では、CMSに基づくメンテナンス手法の評価が記載されており、日本における故障率の分布は日欧でほぼ同じであること、予備品の保有、状態基準保全の実施、さらには天気予報利用等を用いて定期点検時期を細かく設定することで、欧州並みの設備利用率を実現することが可能であることが示されている。
- 第7章はCMSの認証に係る事例等が紹介されている。
- 第8章CMSの技術資料とされ、本章だけで独立して活用できるように取りまとめられている。

(b) 2013年度～2017年度成果報告書 風力等自然エネルギー技術研究開発/風力発電高度実用化研究開発/ スマートメンテナンス技術研究開発(分析)(リスク解析等) (NEDO、2020)

- 第2章から第4章には、国内外の陸上風車におけるO&M実態やトラブル事例の調査やスマートメンテナンス導入による好事例の紹介、将来に向けた展望が述べられている。
- 第5章では計測技術の具体例、すなわちSCADAやCMSの詳細、オイルリークモニタ、各種センサ、無線通信システムなどについて解説されている。
- 第6章から第10章では風車の部位損傷検技術や異常検出技術の実例と実機に適用した場合の効果検証などについて記載されている。

4.5 遠隔監視によるO&M 省力化の調査

(3) NEDO成果報告書に関する文献調査（文献No.17～19）

(c) 2020年度～2021年度成果報告書 次世代浮体式洋上風力発電システム実証研究/洋上風力発電等技術研究開発/次世代浮体式洋上風力発電システム実証研究(浮体式洋上風力発電低コスト化技術開発)/浮体式洋上風力発電低コスト化技術開発に関する調査（NEDO、2022）

- 世界の動向：コストの 35%程度を占めるメンテナンスの高度化は世界的にも課題。洋上風力発電所の運転中に得られたデータを分析・管理するためのプラットフォームの開発や、高度な分析による洋上風力のデジタル化、試験方法及び設備、厳しい海況下での人員輸送ソリューション、運転保守戦略及びツールの開発が行われている。
- 日本の特性：台風やうねりなどに対応した運転保守技術の開発が必要である。また世界的な潮流であるデジタル技術の導入を進める必要がある。
- 日本の強み：陸上風力においてスマートメンテナンス技術が開発されており、洋上風力への活用が期待できる。特に落雷対策技術に関しての開発が継続的に行われている。また、デジタル技術やデータプラットフォームなどの他産業で開発されている技術の導入も期待できる。

4.5 遠隔監視によるO&M 省力化の調査

(まとめ)

- 国の指針・ガイドブック等については、過去に実施された着床式、浮体式の実証研究事業の経験を踏まえ、運転・保守として実施すべき項目が洗い出されており、関連する法令の解説がなされていた。一方で、運転・保守に関する個々の技術について言及されているものはなかった。
- 至近の論文については、主に、風車機器の異常検知技術、風車設備の損傷点検技術、落雷検出技術を扱ったものが多かった。異常検知技術についてはAIによる高度な学習を取り入れた検知技術を扱ったもの、損傷点検技術についてはドローンを使った撮影技術や撮影した画像の判定にAI技術を活用したものなどが見られた。
- 落雷検出技術については、従来の大口径ロゴスキーコイルを利用したものとは別に、音響を使ったものや監視カメラを使ったものなど新しい取り組みが発表されていた
- 主に陸上風力を対象とした運転・保守に関するNEDOの成果報告書には、風車の各部位の損傷や、機器の異常の実績について詳細に調査されており、運転・保守の低コスト化に資する要素技術を網羅的に調査されており、洋上風力を対象とした場合にも参考になると考えられる。

5. おわりに

各章の調査内容の要約

(a) 2. これまでの建設事例と課題

- 風車の設計に伴う気象・海象調査では、観測塔などの現状の手法では費用は大きく、デュアルスキャニングライダーによる風況の観測やレーダー式波高計の活用によるコスト削減が期待されている。
- 環境アセスメントについては実施例が示されており、洋上風力の導入の促進にはアセスメント期間の短縮や、促進区域区域でのアセスメント制度（国と事業者のかかわり）などの制度の整備が重要と考えられる。
- 政府の目標である2040年までに30~45GWの洋上風力発電の導入を達成するにはサプライチェーン形成、港湾インフラの整備、地域間送電網の整備、EEZへの拡大、海域先行利用者との協調、浮体式の導入など多方面に関わる課題が存在する。洋上風力発電事業を加速化させるためには、国内における現状と課題を整理し、官民学一体となった協力が不可欠である。

(b) 3. 国内の洋上風力建設にかかわる現状 -建設技術を中心として-

- 日本特有の設計手法としては地震や台風があり、波浪荷重、津波荷重、地盤の液状化・沈下や地震時の荷重評価、などの関連する基本的な文献について調査・収集を行った。
- SEP船は風車施工で1,600トン級、基礎施工には2,500トン級と想定され、国内では1社に限られている。外国船の調達も欧州での案件が優先される傾向にあり選定の自由度が極端に低い。
- 外国船の調達には、カボタージュ規制に関連し、60日に1回の海外寄港が必要である。外国船籍を日本船籍に変更するには、SEP船等の特殊船で1年以上かかる、などの課題もある。
- 基地港に求められるのは基礎部材や風車部材の移動運搬に耐えられるヤードの地耐力と、組立ヤードや岸壁前面で係留するSEP船のレグ支圧荷重に対して岸壁が安定していることであるが、岸壁の整備はウィンドファーム案件に較べて遅延している。

5. おわりに

各章の調査内容の要約

(b) 3. 国内の洋上風力建設にかかわる現状 -建設技術を中心として- (続き)

- 海底ケーブルおよび係留索の施工方法について、TLP (Tension Leg Platform) やトート係留を進めることで、1基あたりのフットプリントが小さくなり、①限られた占有面積でのウィンドファーム基数の増加が可能、②将来的な漁業共存への貢献、などの利点がある。
- コンクリート製浮体式基礎については、供用期間中は可能な限り「メンテナンスフリー」となるように、水結合材比、単位セメント量、最小かぶりの確保に留意する。
- コンクリート製浮体式基礎については、国土交通省において設計手法が整理されているが、船級取得のための設計基準として位置付けられているものではなく、船級取得のための設計基準を国内外の関連基準を基に体系的に整備することが必要である。
- コンクリート浮体式基礎は鋼製浮体式基礎と比較すると「浮体寸法」「浮体重量」が大きくなる傾向にあり浮体式基礎の製造に用いる際の課題として、①基地港湾内の地耐力や製作ヤードの確保、②完成した浮体式基礎の保管水域の確保、などが挙げられている。
- 浮体式洋上風力発電に関しては、世界的に基礎の型式・製造方法、輸送・設置の方法がまだ確立しておらず、①連続製造に適した浮体の設計、②浮体製造のパネル化やブロック化、分割施工、③ドックに依存しない浮体の大量製造、など新しい技術の確立が求められている。
- 風車の大型化あるいはウィンドファームの大規模化にともない、出力15~18MW の風車機種を採用する場合、SEP船やクローラクレーンなどの作業船舶機械には、吊り能力や揚程といったクレーン作業に関する制限があるため、揚重作業が可能な部材諸元 (特に重量) には限界がある。既存の作業船舶機械によって、大型風車の施工が可能となるように、部材の分割施工などの工夫が期待される。
- 着床式の基礎構造ではモノパイル式が採用されることが多いが、一般的にはモノパイルと風車との間にトランジションピース (TP) と呼ばれる部材が設置される。最近では、この部材を無くしてTPレスモノパイルを採用して、施工の合理化を図る工法も提案されている。
- 将来導入が見込まれる浮体式では、浮体形式、係留システム、アンカーなどの最適化、など早期の技術確立が期待される。

5. おわりに

各章の調査内容の要約

(c) 4. 国内での設置計画、運用にかかわる現状と課題

- 日本版セントラル方式の制度設計に関しては、これまでの議論結果が「洋上風力発電に係るセントラル方式の運用方針〔骨子〕（案）」として取り纏められているが、項目によっては国の役割や関与（またはその必要性）が不明確であるなどの課題が残っている。
- 国外のデータベースに関しては、風車クラス別の設備利用率や着氷を考慮した月別の発電ロス率など、特徴的な情報が提供されており、こうした事例は今後の国内のDB構築への参考になる可能性がある。
- コーン試験併用による認証に関しては、今後、多様な地質・地盤条件下の調査、設計が増えることが想定されるため、調査・試験で得られた多様な地盤特性を設計に反映させるための知見を蓄積し、学会レベルでの基準策定やガイドライン等を整理していく事は意義があると考えられる。
- 設計基準に関しては、例えば、基礎設計では海外基準をベースに国内基準を適宜取り入れているような形で審査が進められているなどの実態から、事業者の負担を軽減する意味でも、審査基準の明確化が特に重要であると考えられる。
- 主に陸上風力を対象とした運転・保守に関するNEDOの成果報告書には、風車の各部位の損傷や、機器の異常の実績など、運転・保守の低コスト化に資する要素技術が網羅的に調査されており、洋上風力でも参考になると考えられる。

以上