

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

2021年4月1日

洋上風力の産業競争力強化に向けた官民協議会

**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)**

「技術開発ロードマップ」の位置づけと考え方

- 「洋上風力産業ビジョン（第1次）」において、政府は導入目標、産業界は国内調達・コスト削減目標を掲げ、再エネの導入拡大と産業競争力強化の好循環を目指すこととした。
- 特に、サプライチェーンの形成等を通じて競争力を高めつつ、今後のアジア展開を見据えて、浮体式の商用化を含め、技術開発を加速化し、世界で戦える競争力を培っていく必要があり、「洋上風力産業の競争力強化に向けて必要となる要素技術を特定・整理し、「技術開発ロードマップ」を今年度内に策定する」こととした。
- そこで、サプライチェーン全体を8つの分野に区分した上で、各分野の諸外国の動向と日本の特性に鑑み、産業競争力強化と低コスト化の観点から特定された要素技術開発を進める。更に、サプライチェーン構築に不可欠な風車や、中・長期的に拡大の見込まれる浮体式等についての要素技術開発を加速化し、風車・浮体・ケーブル等の一体設計を行った実海域での実証を2025年前後に行うことにより、商用化に繋げる。

洋上風力サプライチェーンのコスト構造（欧州の着床式の例(※)）



①調査開発

（風況観測・配置最適化等）

日本の気象・海象に対応した風況観測手法や、風車配置最適化手法の確立等で発電量予測を高度化する。

②風車

（風車設計・ブレード・ナセル部品・タワー等）

グローバルメーカーと協働しつつ、日本・アジア市場向けの洋上風車要素技術（次世代発電機、台風・落雷対応、低風速域向けブレード等）を開発し、設備利用率の向上及び大量生産技術の確立によりコストを低減する。

③着床式基礎製造（モノパイル・ジャケット等）

④着床式設置（輸送・施工等）

足下で導入が進む着床式のコスト低減は急務。欧州で確立した基礎構造を、日本・アジアの地質・気候・施工環境等に最適化し、高信頼性と低コスト化を実現する。

⑤浮体式基礎製造（浮体・係留索・アンカー等）

⑥浮体式設置（輸送・施工等）

浮体は国内外で開発が進んでいるが、商用化を加速するためには風車・浮体・係留システム等の大量生産技術によるコスト低減や、一体設計が重要。
そこで、基礎・係留索・ダイナミックケーブル等の要素技術開発を進め、2025年前後に実海域での実証を行う。

⑦電気システム

（海底ケーブル・洋上変電所等）

日本の技術の強みを活かした高電圧送電ケーブルや、浮体式で必要となるダイナミックケーブル・施工方法等の開発によりコストを低減する。

⑧運転保守（O&M）

コストの35%程度を占めるメンテナンスをデジタル技術等により高度化しコストを低減する。

※第1回 洋上風力の産業競争力強化に向けた官民協議会作業部会、資料3、2020年9月17日

「技術開発ロードマップ」の策定プロセス

1. 技術開発項目のロングリストを作成

- 欧米における技術開発項目（欧米のロードマップ（※）、Carbon Trustによる分析等）を抽出、重複を排除するためグループ化。
- 日本の自然条件（台風、地震、落雷、低風速、急深な地形、複雑な地質）、施工環境、国内サプライチェーンの状況等を加味し、日本（アジア市場）への最適化が必要な項目を抽出。
（欧米で先行して開発されている技術を日本に導入する際にカスタマイズが必要な技術要素を含む。）
- 産業界（官民協議会作業部会及びその技術開発サブWG の参加企業）へのヒアリング及びNEDO洋上風力低コスト技術開発ロードマップ検討委員会の意見を反映。

2. 日本における重点技術開発項目の絞り込み

- 有識者へのヒアリング、産業界へのアンケート等により、「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絞り込み。

3. 技術成熟度に基づき、技術開発ロードマップとする

- 技術成熟度（TRL）に基づく整理を行い、低コスト化のマイルストーンである2030年頃までに実施する技術開発ロードマップを作成。



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

- なお、技術開発ロードマップは、技術開発の進展やサプライチェーンの形成状況等に鑑みて、適切なタイミングで見直していく。

（※）【英国】Floating Wind JIP : <https://www.carbontrust.com/our-projects/floating-wind-joint-industry-project>
【EU】ETIP (European Technology & Innovation Platform) Wind : <https://etipwind.eu/files/reports/ETIPWind-roadmap-graph-2020.pdf>
【米国】NOWRDC (National Offshore Wind Research & Development Consortium) プログラム : <https://www.nyserda.ny.gov/>

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)	●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)	●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 (モノパイル・ジャケット等)	●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 ●基礎溶接技術の高度化
	④着床式設置 (輸送・施工等)	●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)	●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)	●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)	●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)	●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		●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

分野①：調査開発（風況観測・配置最適化等）

- 世界の動向：洋上風況観測の低コスト化と信頼性向上のための研究開発が進められている。また、気象条件、ウェイク特性及び発電量への影響に関して多くの研究が行われている。
- 日本の特性：日本・アジアの地形、自然環境に適した洋上風況観測手法の確立が課題。事業性のみならず、許認可制度（洋上ウインドファーム認証、特に乱流強度の計測等）の要件を満たす必要がある。また、ウェイクモデルの検証により、ウインドファームの効率的な発電を目指す必要あり。
- 日本の強み：日本は欧州に比べて離岸距離が近い着床式ウインドファームが多いため、スキャニングライダーの観測手法に関する研究開発が進んでいる。また、浮体式ライダーの開発や動揺特性に対する研究も実施しており、研究・コンサルティング分野での強みがある。

項目	技術開発の例
風況観測（各種ライダーや低コスト風況観測タワー等）	乱流強度の強い日本においても信頼度の高い、各種ライダーおよび低コスト風況観測タワーの開発等により、日本における風況観測手法を確立。
ウェイク及び発電量予測モデルの高度化	洋上ウインドファームにおける発電量及びレイアウトを評価するために、より高度なウェイクおよび発電量予測モデルを開発。
洋上風力用の気象海象計測データ整備	広いエリアをカバーする洋上風力用の気象海象計測データの整備。
地盤条件データベースの開発	海底地盤調査の低コスト調査方法の開発。コストを削減するために、専用船を用いない方法や合理的な地質調査要件に関する推奨事項の作成。

凡例：

技術開発項目

うち重点項目

分野②：風車（風車設計・ブレード・ナセル部品・タワー等）

- 世界の動向：欧州において、大型化による稼働率向上・コスト低減が進んでいる。風車は2030年までに定格出力が15MW超～20MWクラスまで大型化し、ロータの直径は最大250mになると予測されている。
- 日本の特性：日本・アジアの自然条件（台風、地震、落雷、低風速等）に鑑みると、現在欧州で使用されている風車設計のまま単にサイズを大きくするだけでは、日本にとって最適な設計にはならない可能性がある。台風や地震への対応は、クラスT風車が台湾に導入され実績ができてつつあるが、日本は欧州や台湾より年平均風速が低く、冬季雷落雷等への対応が必要。また、発電機等を軽量化することで地震荷重等が低減するため、風車・基礎等のコストを低減する効果がある。開発にあたってはグローバルメーカーとの協働も必要。
- 日本の強み：発電機、増速機、ベアリング、ブレード用炭素繊維素材、永久磁石等の陸上風力の経験等から技術力を有する部品メーカーの潜在力や国内ものづくり基盤がある。また、日本は生産技術・品質管理や、工場の自動化等のロボティクスにも強みがあり、風車全体のバリューチェーンの効率化・最適化を確立する下地がある。

項目	技術開発の例
風車仕様の最適化	グローバルメーカーと協働し、日本の自然条件である台風、地震、落雷、低風速等に対応した風車仕様の最適化。
風車の高品質大量生産技術	日本の生産技術やロボティクス技術を活かし、グローバルメーカーにより設計された大型風車の国内における高効率生産を実現。
浮体搭載風車の最適設計	風車・浮体・係留・制御の一体設計を行うことにより、浮体動揺を考慮した風車発電量を最適化。
次世代風車要素技術開発	発電機、電力変換装置、増速器及び周辺機器等のナセル部品の高性能、高信頼性、低コスト化技術開発。
低風速域向けブレード	長尺化等のブレード開発により、日本・アジアの年間平均風速の低い地域における設備利用率の向上。
洋上風車の長寿命化技術	洋上風力発電システム（基礎を含む）の長期運用を可能とする技術開発及び設計方法の確立。
大型風車の開発	部品、試験装置、輸送・設置、インフラ等への影響を考慮した風車の大型化による風力発電コストの低減を実現。
ブレード侵食防止技術	塩分の高い洋上環境におけるブレードの侵食の防止や、交換頻度の予測を行う技術開発。
ブレードリサイクル技術	風車ブレードのリサイクルの実証、ブレード材料の再利用の実証。
タワーの高高度化と低コスト化	ラテスタワー・コンクリートタワーの開発による風車タワーの高高度化と低コスト化を実現。

分野③：着床式基礎製造（モノパイル・ジャケット等）

- 世界の動向：着床式基礎は、地層が均一な欧州で実用化が進み、特にモノパイル基礎は欧州でほぼ確立された技術であるが、設計方法の高度化・高効率化（英国PISAプロジェクト等）でさらなるコスト低減が行われている。米国では欧州との地質の違い、厳しい気象条件、施工環境や国内サプライチェーンの成熟度に適した基礎構造が研究されている。
- 日本の特性：日本の海底地質構造、気象海象条件等に最適化した、信頼性向上と低コスト化が必要。過去のNEDO実証においては、銚子は重力式、北九州は重力式・ジャケットのハイブリッドを使用。更に、現在、サクションバケットの実証を実施中。
- 日本の強み：日本は建設技術の基盤があり、品質管理も優れており、例えば高品質の鋼材に強みがある。岸壁栈橋製造の経験から、ジャケットは国内メーカーも組立可能である。

項目	技術開発の例
複雑な地質・厳しい気象海象条件に対応した基礎構造	わが国における多様な海底地質構造に対応した地盤バネ・減衰の合理的評価方法の開発および台風・地震・津波等といった厳しい自然環境に対応する基礎構造の高度化によるコスト低減。
タワー・基礎接合技術の高度化	地震荷重対応のグラウト接合、大型モノパイル対応のボルト接合（トランジションピースレス接合）、グラウト接合に代わるスリップジョイント等の接合方法の開発等により、タワー・基礎の大型化にも対応した接合方法の高度化を実現。
基礎構造用鋼材の高強度化	大単重鋼板の製造技術の確立および高比強度の鋼材の採用によるタワー、モノパイル基礎等の低コスト化。
基礎溶接技術の高度化	溶接方法の最適化、疲労モニタリング方法の最適化等。

分野④：着床式設置（輸送・施工等）

- 世界の動向：欧州では、比較的均質な地盤条件に対して欧州で開発されたSEPによる施工技術はほぼ確立している。一方、風車の大型化が進む中で、風車部品の輸送性が課題となっている。
- 日本の特性：太平洋側は大きなうねり、日本海側は波傾斜が大きくなる場合があり、洋上作業が難しい。実績の豊富な欧州においてSEP船の使用が必須と考えられている状況下で、より環境条件が厳しい日本において専用船のニーズは高い。特に地盤条件は、硬質・軟弱地盤への対応技術が求められる。
- 日本の強み：日本では着床式用に大型SEP船の開発が進み、欧州レベルの施工技術は急速に整いつつある。日本は造船、建設技術の基盤があり、効率的な着床式洋上風車の輸送・施工技術を確立する下地がある。

項目	技術開発の例
低コスト施工技術の開発	油圧ハンマーのみによるモノパイル設置困難な硬質地盤や互層した硬軟地盤での施工技術の開発および直径8mを超えるような大口径のドリリング技術の開発を行い、低コスト施工技術を確立。
洗掘防止工の高度化	洗掘防止工の種類、設置範囲等の設計方法の研究開発等。
ロジスティクスの高度化	基礎の多数化・大規模化に対応した岸壁上及び岸壁からSEP船への運搬方法、海上輸送方法および海上での基礎保管方法の開発。
撤去	低コストの撤去技術の開発。

分野⑤：浮体式基礎製造（浮体・係留索・アンカー等）

- 世界の動向：バージ、セミサブ、スパー、TLP等の多様な浮体形式が出ており、各国で実証が開始されている。様々なメーカーやコンソーシアムが技術開発しており、技術成熟度（TRL）に幅がある状況にある。浮体の量産技術の確立や、風車・浮体、係留システム、ダイナミックケーブルの一体設計により、信頼性の向上と低コスト化が必要。
- 日本の特性：日本の海底地形は一樣ではなく、太平洋と日本海、北と南で環境条件に差があるため、特定の浮体式基礎が全ての地域に適しているとは限らない。
- 日本の強み：日本は造船技術の基盤があり、品質管理も優れているため、造船所間で連携する等して浮体の大量生産技術を確立する下地がある。日本の地域性を活用した浮体の大量生産技術を世界に先駆けて確立することにより、この分野における競争力強化を実現する。

項目	技術開発の例
一体設計	風車、浮体、係留システム、ダイナミックケーブルの挙動・性能・施工性・コストを考慮した一体設計技術の確立。
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。
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。
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。
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。
メンテナンスフリー技術	腐食・摩耗などの影響を考慮した係留システム、並びに生物付着量・ケーブル重量の経年変化を考慮したダイナミックケーブルの設計技術の開発によるコスト低減。
浮体システムの計測技術	浮体・係留・ダイナミックケーブルに作用する各種荷重・応力に関する新しい計測方法の開発。

分野⑥：浮体式設置（輸送・施工等）

- 世界の動向：米国では、浮体式洋上ウインドファームの製作、組立、施工及び管理に関する開発、英国では洋上でのベビーリフト作業に関する現在の最新手法の評価と将来の技術開発ニーズの特定が行われている。**風車の大型化が進む中で、風車部品の輸送性が課題**となっており、大型で重量のある部品の新しい輸送方法が検討されている。
- 日本の特性：**太平洋側は大きなうねりがあり、日本海側は波傾斜が大きくなる場合があります**、洋上作業が難しい。スパー型やTLP型等は輸送・施工技術の開発の余地がある。
- 日本の強み：日本では、**浮体式洋上風力実証研究の実績**があり、また、**日本は造船、建設技術の基盤があり**、効率的な浮体式洋上風車の輸送・施工技術を確立する下地がある。

項目	技術開発の例
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用アンカーの施工技術の開発による低コスト化。
作業船と輸送システム	スパー型やTLP型浮体に対応した革新的で費用対効果の高い作業船と輸送システムの開発。
大規模修繕技術	より高い作業限界条件および建設・修繕に対応できるクレーン付き台船やジャッキアップ型作業構台の開発。
撤去・リサイクル	ヘビーリフトクレーンを必要としない洋上風車撤去技術の開発、リサイクル可能な素材を用いた浮体の開発。

分野⑦：電気システム（海底ケーブル・洋上変電所等）

- 世界の動向：66kVを超える高電圧/送電ケーブルに関する技術開発が進む。特に、英国Floating Wind JIPでは、浮体に特化した新しい設計を開発するために、ケーブル会社数社を支援したプロジェクトの第一段階が2020年に完了、次のフェーズに進んでいる。また、欧州ではケーブル敷設時の事故の割合が多く、ケーブルの損傷は洋上風力プロジェクトの主要なリスク。更に、浮体式洋上ウインドファームは、ダイナミックアレイケーブル及び送電ケーブルが必要とされている。
- 日本の特性：日本は欧州に比べて比較的離岸距離が近いものの、地形勾配が急であり水深が急激に深くなる特徴がある。日本の着床式は近海であるため、陸揚点を想定した施工技術開発や、日本の海象条件や海域利用状況を踏まえたケーブル敷設に関するガイドラインが必要である。離岸距離が遠く、大水深におけるプロジェクトには浮体式洋上変電所が必要となる可能性がある。
- 日本の強み：国内ケーブルメーカーは世界シェアが高く、英国における技術開発コンペに参画するなど、強みを有する。

項目	技術開発の例
高電圧ダイナミックケーブル	風車の大型化に対応できる66kV超えの高圧アレイと送電用のダイナミックケーブルを開発し、洋上送電を低コスト化。
浮体式洋上変電所	大規模浮体式洋上ウインドファームに向けた高効率・高密度な電力変換技術並びに電気機器やケーブルの疲労荷重を抑制した浮体式洋上変電所の開発。
次世代洋上直流送電技術	大規模洋上ウインドファームの送電ならびに地域間連系に貢献可能な多端子次世代洋上直流送電技術の開発。
洋上送電ケーブル敷設の高効率化	ケーブル敷設専用船を必要としない送電ケーブルの代替敷設方法や大水深に適用可能なダイナミックケーブル敷設技術を確立すると共に、ケーブル敷設およびモニタリングに関するガイドラインを策定する。また、万が一のケーブル破断事故による逸失電力損失を低減するケーブル配置最適化方法を確立。
発電需給の統合予測	洋上風力発電所の出力変動を予測し、再エネ発電量の最大化を目指した電力システムのバランス維持のための技術を確立。
系統安定化技術	洋上風力大量導入のための系統安定化技術の高度化。

分野⑧：運転保守（O&M）

- 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。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。

項目	技術開発の例
運転保守及び修理技術の開発	洋上環境に適した修理技術や塗装管理技術の開発、浮体式風車を曳航せず現地で大規模修理を行う技術の開発、係留索の張力調整技術、ダイナミックケーブルの脱着技術、高稼働率の作業船や作業員輸送船の開発。
デジタル技術による予防保全・メンテナンス高度化	風車運転保守データおよびCMSデータ収集システムの高度化、デジタルツインによる予防保全技術、AI技術を活用した部品寿命予測の高精度化。
監視及び点検技術の高度化	低コストの監視及び点検技術（遠隔モニタリングと状態監視メンテナンスのための新たなセンサーとアルゴリズム、空中・水中ドローン、点検ロボット、通信技術等）の開発。
落雷故障自動判別システムの開発	センサー・CMS・運転データを利用した雷による損傷を自動的に判別するシステムの確立。
リモートセンシングと予報技術による発電量向上	リモートセンシングと予報技術による発電量の向上と風車ダウンタイムの低減。

技術開発項目TRLの整理

- 分野毎に絞り込んだ重点技術開発項目を技術成熟度（TRL）で整理。
- TRLに応じて開発スケジュールを設定し、技術開発ロードマップとする。

区分	分野	TRL 1	2	3	4	5	6	7	8	9																						
共通	①調査開発 （風況観測・配置最適化等）							● 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																								
	②風車 （風車設計・ブレード・ナセル部品・タワー等）	● 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																														
着床	③着床式基礎製造 （モノパイル・ジャケット等）							● 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																								
	④着床式設置 （輸送・施工等）							● 低コスト施工技術の開発 ● 洗掘防止工の高度化																								
浮体	⑤浮体式基礎製造 （浮体・係留索・アンカー等）	● 一体設計 ● 浮体基礎の最適化 ● 浮体の量産化 ● 係留システムの最適化 ● ハイブリッド係留システム						<table><tr><th colspan="2">技術成熟度（TRL）の定義</th></tr><tr><th>レベル</th><th>定義</th></tr><tr><td>1</td><td>基本原理を確認しているレベル</td></tr><tr><td>2</td><td>技術概念・その適用性を確認しているレベル</td></tr><tr><td>3</td><td>解析や実験によって、概念の重要な機能・特性を証明しているレベル</td></tr><tr><td>4</td><td>実験室環境で、機器・サブシステムを検証しているレベル</td></tr><tr><td>5</td><td>実験室規模で、同様なシステムを、現実的な環境において検証しているレベル</td></tr><tr><td>6</td><td>工学規模で、同様な（原型的な）システムを現実的な環境において検証しているレベル</td></tr><tr><td>7</td><td>フルスケールで、同様な（原型的な）システムを現実的な環境において実証しているレベル</td></tr><tr><td>8</td><td>試験と実証を通じて完成し性能確認された実システム</td></tr><tr><td>9</td><td>想定される全ての条件で運転された実システム</td></tr></table>			技術成熟度（TRL）の定義		レベル	定義	1	基本原理を確認しているレベル	2	技術概念・その適用性を確認しているレベル	3	解析や実験によって、概念の重要な機能・特性を証明しているレベル	4	実験室環境で、機器・サブシステムを検証しているレベル	5	実験室規模で、同様なシステムを、現実的な環境において検証しているレベル	6	工学規模で、同様な（原型的な）システムを現実的な環境において検証しているレベル	7	フルスケールで、同様な（原型的な）システムを現実的な環境において実証しているレベル	8	試験と実証を通じて完成し性能確認された実システム	9	想定される全ての条件で運転された実システム
	技術成熟度（TRL）の定義																															
レベル	定義																															
1	基本原理を確認しているレベル																															
2	技術概念・その適用性を確認しているレベル																															
3	解析や実験によって、概念の重要な機能・特性を証明しているレベル																															
4	実験室環境で、機器・サブシステムを検証しているレベル																															
5	実験室規模で、同様なシステムを、現実的な環境において検証しているレベル																															
6	工学規模で、同様な（原型的な）システムを現実的な環境において検証しているレベル																															
7	フルスケールで、同様な（原型的な）システムを現実的な環境において実証しているレベル																															
8	試験と実証を通じて完成し性能確認された実システム																															
9	想定される全ての条件で運転された実システム																															
	⑥浮体式設置 （輸送・施工等）	● 低コスト施工技術の開発																														
共通	⑦電気システム （海底ケーブル・洋上変電所等）	● 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																														
	⑧運転保守 （O&M）	● 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																														

12

技術開発ロードマップ（～2030年）

- 技術成熟度が比較的高い調査開発・着床式基礎製造・設置の技術開発は短期集中的に実施し、早期の低コスト化を目指す。
- 技術成熟度が比較的低いが、サプライチェーン構築に不可欠な風車や、中・長期的に拡大の見込まれる浮体式等についての要素技術開発を加速化。風車・浮体・ケーブル等の一体設計を行った実海域での実証を2025年前後に行うことにより、商用化に繋げる。

区分	分野	短期（2025年前後を目標）	中・長期（2030年前後を目標）
共通	①調査開発 （風況観測・配置最適化等）	日本の気象・海象に対応した風況観測手法やウェイク及び発電量予測モデルの高度化等で発電量予測を高度化する。	
	②風車 （風車設計・ブレード・ナセル部品・タワー等）	グローバルメーカーと協働しつつ、日本・アジア市場向けの洋上風車要素技術（風車仕様の最適化、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等）を開発し、設備利用率の向上及び風車の高品質大量生産技術の確立によりコストを低減する。	
着床	③着床式基礎製造 （モノパイル・ジャケット等）	欧州で確立した基礎構造を、日本・アジアの地質・気候・施工環境等に最適化し、信頼性と低コスト化を実現する。（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、低コスト施工技術の開発、洗掘防止工の高度化等）	
	④着床式設置 （輸送・施工等）		
浮体	⑤浮体式基礎製造 （浮体・係留索・アンカー等）	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等の要素技術開発を進め、風車・ケーブル等との一体設計を行う。	
	⑥浮体式設置 （輸送・施工等）	設置についても低コスト施工技術の開発等により低コスト化を図る。	
共通	⑦電気システム （海底ケーブル、洋上変電所等）	日本の技術の強みを活かした高電圧送電ケーブルや、浮体式で必要となる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等の開発によりコストを低減する。	
	⑧運転保守 （O&M）	コストの35%程度を占めるメンテナンスを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等によりコストを低減する。	

参考資料

用語

用語	説明
アレイケーブル、送電ケーブル	洋上ウインドファーム内の風力発電機数基を接続する電力ケーブルをアレイケーブル、洋上ウインドファームから陸上側（連系変電所）に向かう電力ケーブルを送電（エクスポート）ケーブルという。
ウェイク	風車後流。風車下流に広がる乱れた流れの事で、下流側にある風車の発電量が低下する。
技術成熟度	Technology Readiness Level（TRL）。新技術の開発のレベルを評価するために使用する基準。
グラウト接合	2つの径の異なる鋼管を同心に重ね合わせた空間にグラウト材を充填し接合する構造的結合。
スマートメンテナンス	IoT（モノとインターネットの相互情報交換）、センサー技術、ビッグデータ解析技術、AI（人工知能）といった分野の技術を利用した高精度、省力化した運転保守方式。
スリップジョイント	グラウト材を用いなくて、円錐状のモノパイル接合部際に両鋼管の間にできるにトランジションピースをかぶせて接合する方法。
ダイナミックケーブル	浮体構築物の動きに合わせて海中で浮遊することのできるケーブルのこと。
着床式基礎	海底面に設置又は海底面下に打ち込んだ構造物により風車を支える基礎形式で、主に次の種類がある。モノパイル：1本の大口径杭を支持地盤に打ち込み、風車を支える形式の基礎、ジャケット：鋼管トラス構造による風車を支える形式の基礎、重力式：コンクリートの自重によって風車を支える形式の基礎、サクシオンバケット：円筒形の構造物（サクシオンバケット）の内部を排水することで静水圧以下の状態にし海底面下に貫入する形式の基礎。
デジタルツイン	IoTやAI、AR（拡張現実）などの技術を用いて仮想空間と物理空間を同時に取り扱うシミュレーション技術。
トランジションピース	主にモノパイル基礎とタワーを接続する部材。モノパイル打設後の鉛直度に対し、タワーに要求される鉛直精度を満たすため、タワーの傾きを調整する役割も果たしている。
浮体式基礎	浮体構造物により風車を支える基礎形式で、チェーン等と海底に固定したアンカーで係留する。主に次の種類がある。スパー形：細長い円筒形状の浮体構造、セミサブ（バージ）形：半潜水浮体構造、TLP（Tension Leg Platform）形：半潜水浮体構造に係留索を海底に固定し張力をかけることで復原性を保つ形式。
マリングロス	海中生物付着。海中部の部材に貝などの海中生物が付着した表面被覆。
リモートセンシング	離れた位置から物理量を計測する技術。洋上風力ではドップラーレーザを用いたライダーが主に使用される。
CMS	状態監視システム（Condition Monitoring System）。長期間にわたり設備の損傷を検出するシステムで、早期発見による損傷拡大の防止や、交換部品の先行手配などによる風力発電所の稼働率向上を目的としている。
PISAプロジェクト	欧州で実施されたPile Soil Analysisプロジェクト。モノパイルの設計法を高度化により、従来設計法と比べてモノパイル重量が最大30%低減する。
SEP船	自己昇降式作業台船（SEP：Self-Elevating Platform）のこと。自己昇降設備を装備した船舶。船体に装備したレグにより、海面上に自らの船体を上下できる作業用台船。

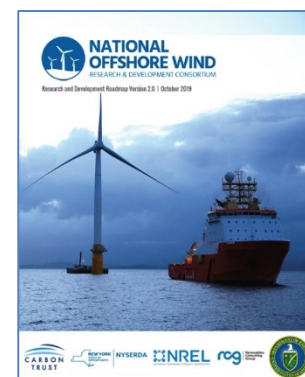
(参考) 米国のNOWRDCのR&Dロードマップ

● 研究開発ロードマップ

- 米国における革新的な洋上風力技術開発のための長期的なビジョンを提供するために策定。
- 2018年10月発行、2019年10月更新
 - ロードマップで特定された優先事項は、今後4年間の一連の競争入札を通じて資金を分配するための基盤として使用される。
 - ロードマップでは三つの「柱(Pillar)」を特定。



ロードマップ2018年版



ロードマップ2019年版

NOWRDCのロードマップにおける研究開発項目 (2019年版)

	Pillar 1 : 洋上風力プラント技術高度化	Pillar 2 : 洋上風力電力リソースと物理的サイト特性評価	Pillar 3 : 設置、運転保守、サプライチェーン
ロードマップ (2019)	1.1 着床式風力技術 ● 米国市場に適した低コスト風車支持構造 ● 大型風車の実現 ● ウィンドファームの性能と制御の最適化 1.2 浮体式風力技術 ● 浮体式基礎用の係留コンセプト ● 浅い海域での係留コンセプト ● 深い海域での係留コンセプト ● 浮体式基礎のスケールアップ ● 大規模浮体式洋上ウィンドファームの制御 1.3 着床式及び浮体式風力共通技術 ● ハリケーンに強い風力発電システム ● 五大湖における浮体式及び着床式ウィンドファーム ● 電力システム設計及び革新 ● エネルギー貯蔵	2.1 気象海象研究 ● 総合的な風力資源アセスメント ● 体系的な気象海象計測 ● 気象・海象リファレンスサイトの開発 2.2 サイト特性の物理的評価 ● 海底調査方法、地盤データベース	3.1 設置 ● サイト開発の競合解消のための技術 ● 大型風車設置戦略 3.2 運転保守 ● 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 3.3 サプライチェーン ● 米国サプライチェーン構築促進のための技術ソリューション ● 系統接続、信頼性、拡張及び送電システムの更新 ● 港湾の詳細検討 ● 許認可 - レーダー干渉

注) 赤字 : 2020年公募のテーマ、緑字 : 2021年公募のテーマ

(参考) 英国のFloating Wind JIPにおける検討内容

● 風車の最適化

浮体によるピッチ動揺及び加速度に対して、風車の発電量の最大化や変動の最小化及び構造の運動を抑制するコントロールシステムの高度化。

● 一体設計

風車、浮体、係留システム及びダイナミックケーブルの動的挙動及び性能を一体連成解析するツールの開発。

● 浮体の最適化

コストを低減するために、鋼材、コンクリートを減らすことで、シリアル製造に適した浮体の設計方法の開発。

● 環境及び社会的影響

浮体式洋上風車は、施工時に洋上におけるパイル打設などの作業がないため、環境に対する影響が少ない。しかし、浮体式洋上風車のウインドファームの環境影響を定量的に評価し、他の海面利用者との競合を軽減する必要がある。

● ウェイク及び乱流

大規模浮体式洋上ウインドファームにおける浮体の運動による発電量及びウェイク乱流を評価するために、より高度なウェイク影響評価モデルを開発し、風車レイアウトの最適化が必要である。

● ロジスティクス

浮体式洋上ウインドファームの製作、組立、施工及び管理は着床式洋上ウインドファームと比べて新しい開発要素がある。大規模な浮体式洋上ウインドファームは、プロジェクトを計画通り進めるためのシリアル製造技術の開発が必要である。

● ダイナミックケーブル及び接続

浮体式洋上ウインドファームは、ダイナミックアレイケーブル及び送電ケーブルが必要である。ケーブル損傷を防ぐために疲労を低減する必要がある。浮体をケーブルから脱着するケーブルコネクタは、浮体をサイトから港へ輸送する際に必要となる。

● 係留システム

大規模浮体式洋上ウインドファームは、100～200本の係留索及びアンカーで構成されるため、コスト及びリスクを低減する最適な係留索設置方法の開発が必要となる。

● 浮体式洋上変電所

大水深におけるプロジェクトには浮体式洋上変電所が必要となる。電気機器やケーブルの疲労を抑制するために、浮体動揺による加速度等を抑制する浮体の設計が必要となる。

● 監視及び点検

かなりの数の部品点数で構成される大規模浮体式洋上ウインドファームは、それらの健全性を確保するために、プロジェクトライフサイクルにおいて監視点検が必要であり、低コストの監視及び点検技術が必要である。

● 維持管理及び修理

リモートによる監視及び管理が望ましいが、サイトにおける維持管理及び修理は生じるため、特にサイトから港に曳航して大規模修理する場合の技術開発が必要である。



(参考) EUのETIP (European Technology & Innovation Platform)Windロードマップ^o

**研究・技術開発
優先度**

2020-2027

技術ロードマップ^o

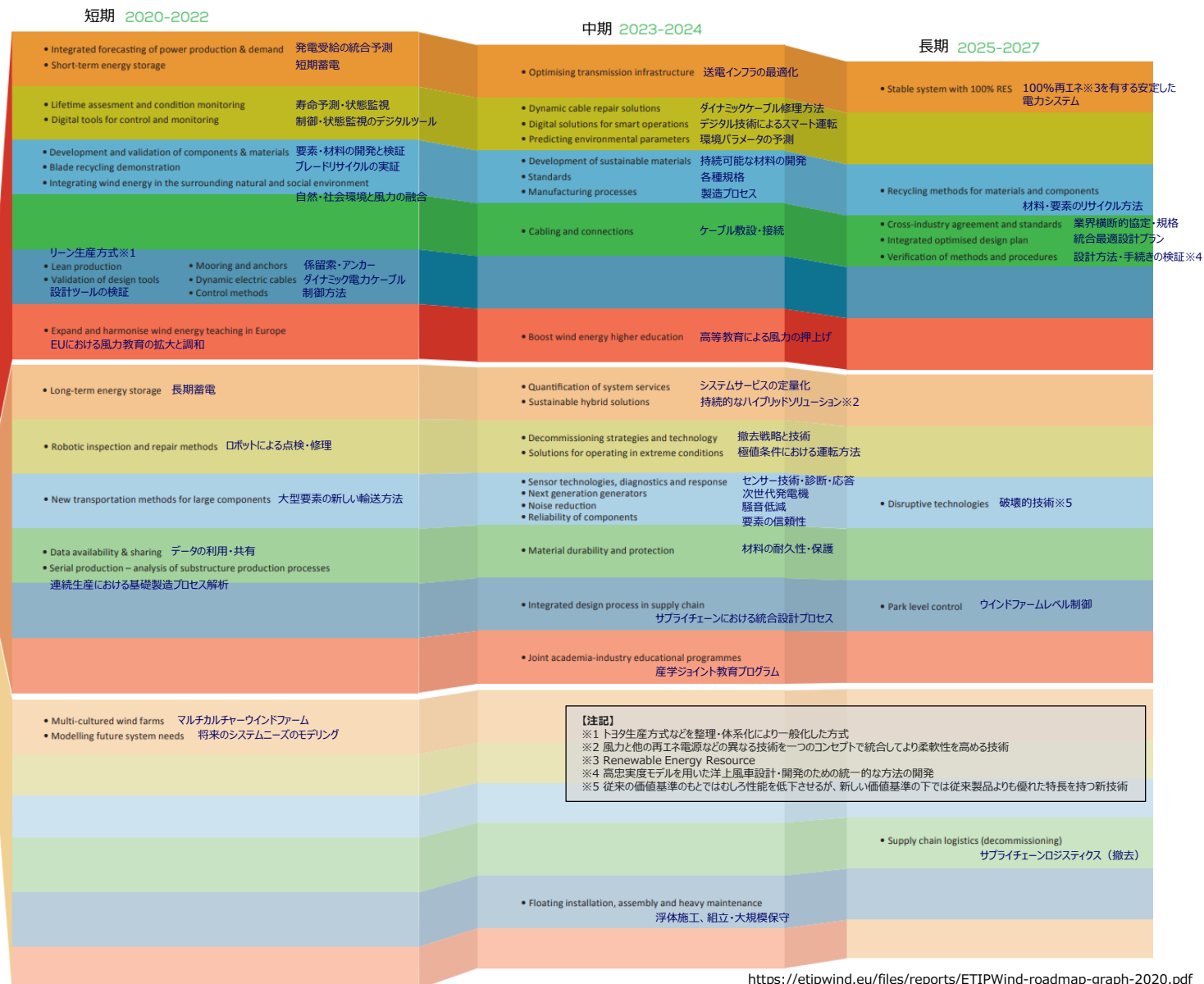


優先度高

優先度中

優先度低

- 系統システム
- 運転保守
- 次世代技術
- 洋上BOP
- 浮体式洋上風力
- 経験・人材リソース



(参考) 日本の技術開発に関する項目出し

- 有識者、産業界へのヒアリング、Carbon Trust分析等により技術開発に関する項目及び技術研究開発案をリスト化。

分野	項目	技術研究開発案
共通	リソースアセスメント	日本の環境で信頼できるLIDARシステムの開発と実証 日本向けの低コストの風況観測塔の研究 周囲条件の乱流を考慮した、日本向けの着床式及び浮体式洋上風車の配列に関するウェイクモデルの開発 台風によるウェイクの影響と日本の海域におけるタービンへの影響の調査 ウインドファーム最適化モデルの開発 日本向け浮体式洋上風車のアレイのウェイク効果モデルの開発 日本水域における台風のウェイクへの影響に関する調査 風車配列最適化モデル開発 運転中の風力発電所でのウェイクモデル検証試験
	浮体式LIDARの検証	日本の条件下で信頼性の高い浮体式LIDARシステムの開発と実証 日本海域におけるスキャンングLIDARの風力賦存量・ウェイクモデル検証のための有効性と有用性の検討
	新しい形式の洋上風況観測塔	移設式プラットフォームやTLP式プラットフォームを用いた洋上風況観測塔
	風力資源と洋上風況観測	海生生物のデータ収集などと組み合わせて、沿岸から離れた地域での洋上風況観測（及び海洋観測）の実施
	海底地盤調査方法、地球物理学及び地質工学データベース	海底地盤調査の低コスト調査方法の研究、非専門船による調査 コストを削減するために、より合理的な地質調査要件に関する推奨事項の策定 アンカー把持力に直接的に影響する海底地盤の強度に関する研究／物理学的・地盤工学的調査に専用船以外の船舶を使用する可能性の研究 リスクを低く抑えながらコストを最小限に抑えるために、浮体式洋上風車に必要な地盤工学的調査のための推奨基準の開発
	風車	日本市場向けのタービンの詳細な開発ロードマップの策定 日本固有の条件に最適なタービンブレード（低コストラスタ対応ブレード）の開発 日本・アジア市場向けの風車の開発 ブレードのエロージョンと予想される交換頻度を予測するためのシミュレーション
		日本市場向け浮体式洋上風車の設計・開発の実現 動揺する浮体で成立する風車の設計・製造手法の確立 風車・浮体及び係留を含む構造全体の挙動を解析するモデリングツールと数値コードを開発し検証して設計を改善する。一併設計手法の確立
		サイトの条件に最適な基礎形式を決定するためのコストモデルの開発 基礎形式を選択するための推奨方法 洗掘防止口の種類、置範囲などの計法の研究開発
		モノパイル基礎の根入れ長さの最適化。これにより、モノパイルの打ち込み長さの削減、モノパイルの重量削減による施工船舶の用船費用の削減 英国のPISAプロジェクトと同様のプロジェクトを日本で実施し、日本の条件におけるモノパイル設計の最適化（低コスト化） グラウテンング技術の高度化。あるいはグラウト接合に代わる接合方法（スラップジョイントなど）の実証 大口径モノパイル式基礎に適用可能なグラウト接合部の設計手法の開発・実証 硬質にモノパイル基礎の適用を可能とするドリリング技術の開発
	基礎設計	重力式基礎の撤去方法に関する推奨基準を検討し、海底にコンクリート基礎を残置することによる長期的な影響の研究 重力式基礎のコンクリート構造の標準の提案 日本に適した重力式基礎設計に関する研究 様々な基礎に対する地盤条件の試験/モデリング 基礎腐食の監視技術の向上及び低コスト化技術の開発
		モノパイル式基礎
	着床式基礎	重力式基礎
		ジャケット式基礎
	その他の基礎形式	日本に適したジャケット式基礎の研究 日本に適したジャケット式基礎の開発 日本に適したサクショ式ジャケット式基礎（モノパイル又はジャケット式）の開発 その他、日本の地盤条件に適した新しい基礎形式の開発（ハイブリッド方式など） 日本における洋上風力用の専用船の技術ニーズの評価
		船舶及び輸送システム（ロジスティクス）
	着床式輸送・施工	専用船を必要としない設置方法のレビューと実現可能性調査 革新的で費用対効果の高い船舶設計の開発 基礎の多数化・大規模化に対応した岸壁上及び岸壁・SEP船間での運搬方法の開発、海上運搬方法の開発（基礎の浮体曳航等）、施工法、海上・海中での基礎保管方法の検討等
		撤去

分野	項目	技術研究開発案
浮体式基礎	浮体式基礎	浮体式基礎のライフサイクル全体とローカルコンテンツの考慮を考慮した、日本の地域特性に対応する特定の浮体形式の研究（コンパクト化など） 台風に近い浮体形式の要件のモデル化（例えば、日本固有の海・気象条件に適した姿勢・動揺制御技術の確立） 日本の海域特性を考慮した寿命予測及び腐食と防食方法に関する研究 コンクリート製浮体（TLP/セミサブ/バージなど）の設計・製造技術の確立
		係留システムへの荷重・応力の照査に対する日本固有のモデルの生成（例えば、係留展開技術の開発） メンテナンスフリーの耐食性係留装置の設計の競争 日本の土壌に対するアンカー選択方法 合成繊維索の設計法の開発と実証 液状化現象が各種アンカーに与える影響に関する研究 新規アンカー量産法の開発競争 アンカーへの地震の影響と液状化のリスクに関する研究 浅海用係留システムの開発
	施工	専門のケーブル敷設船を必要としない代替ケーブル敷設方法のフィージビリティスタディ 日本の浮体式洋上風力発電所を例にした異なる敷設方法のモデリング（例えば、洋上作業技術の開発） 低コスト化に向けたコンクリート製浮体の製造、曳航、係手法の開発 アンカー設置や係索と浮体の接続など洋上口技術の合理化 日本における洋上風力発電用特殊船の技術ニーズ評価 従来の特殊船を必要としない設置方法の検討とフィージビリティスタディ 革新的で費用対効果の高い船舶設計のための開発 大型風車設置のための重量物運搬船の要件 日本における船舶普及率の評価
		船舶と搬送システム（ロジスティクス）
	撤去	浮体製作場所に応じた浮体基礎の引出し・海上運搬方法の開発、クレーン付き台船を活用した設置方法、特殊船を必要としない方法の開発 日本の実績等を参考にした撤去ガイドラインの提言の策定 撤去の要件と難易度の観点から、浮体式基礎の種類ごとの相対的な利点の比較検討
		高電圧送電システム
	電気システム	高電圧及びダイナミックケーブル
		浮体式変電所
		電力ケーブル施工
		水素・エネルギー貯蔵
運転保守	運転保守	浮体式洋上風車のアレイ間ケーブルの最適配置に関する研究 日本のダイナミックアレイ間/送電ケーブルにおける海生付着生物の影響に関する研究 低コストトレンドステファナーと着底保護のための技術革新の競争 日本における66kWを超える高圧ダイナミックアレイ間/送電ケーブルの試験 直流送電技術の開発 石油・ガス業界からの現在の浮体式又は水中変電所設計のレビュー 日本における浮体式変電所設計の競争 専門のケーブル敷設船を必要としない代替ケーブル設置方法の実現可能性調査 日本の環境における最適なケーブル埋設深さに関する業界ガイドラインの開発 海底形及び海象条件が厳しい環境下におけるケーブル安定性・最適防護・維持管理手法の研究開発 水素をエネルギーベクトル（エネルギーの輸送および/または貯蔵を可能にするツール）として使用するための実現可能性調査研究、及び従来の送電システムに対する費用便益分析研究 洋上風力発電所でのバッテリー貯蔵の統合に関する研究開発 日本のアンショラサービス市場への洋上風力の参入のための調査研究 他の産業から移管可能で革新的な洋上風力ソリューションのための開発 厳しい海象条件に対応したカスタマイズの輸送/アクセスシステムの設計の競争 予防的運転保守/スマート運転保守の技術開発 デジタルツインによる予防保全技術 寿命予測の高精度化 港湾域における浮体式風車の運転保守方法の開発 遠隔監視による水中維持管理システムの開発 大規模修繕技術の開発（係留索・ダイナミックケーブルの脱着技術/撤去技術） 浮体式洋上風車の寿命延長とバウリングの可能性と主な課題に関する研究 高波高状態の条件に合わせた専用の移動/アクセスシステムを設計するための開発 高波高用の新しい乗組員輸送船（CTV）の開発 予防的な運転維持法/スマートメンテナンス技術の開発 雷故障自動判別システムの開発
		ステークホルダーの合意
	その他	ガイドライン、標準化
		人材育成
		サプライチェーン

(参考) 日本の産業界へのアンケート整理結果

● 回答分野別・抽出条件なしで整理

ー 評価した項目数が分野毎に異なる。

