



技術戦略研究センターレポート

# TSC Foresight

2023年 4月

## 風力発電分野の技術戦略策定に向けて —カーボンニュートラル実現に向けた風力発電の導入拡大—

Vol. 111

はじめに .....	2
1章 解決すべき社会課題と実現したい将来像.....	4
1-1 社会課題と将来像.....	4
1-2 解決・実現のための方法.....	7
1-3 環境分析とベンチマーキング .....	8
2章 解決・実現手段の候補.....	27
2-1 実現のための課題.....	27
2-2 実現手段の候補 .....	29
2-3 技術開発の方向性.....	34
3章 おわりに .....	37

TSCとはTechnology Strategy Center（技術戦略研究センター）の略称です。

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構  
技術戦略研究センター（TSC）

## はじめに

風力発電には、図 1 に示すように陸上風力発電、洋上風力発電があり、洋上風力発電はその形式によって着床式と浮体式とに分類される。国内では陸上風力発電を中心にこれまで 4.8GW 程度の導入(2022 年 3 月)が進んでいるが<sup>1</sup>、海に囲まれた日本は洋上風力の大きなポテンシャルを有していることから、陸上風力に加えて洋上風力の検討が進められている。洋上風力では水深によって様々な形式が検討されており、実績のある着床式から導入が始まっているが、遠浅な海域が少ない日本では浮体式洋上風力発電への期待が大きい。

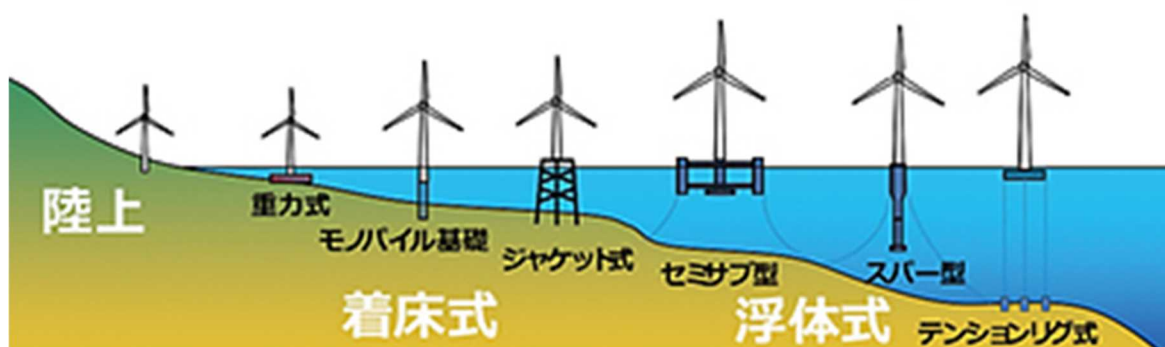


図 1 風力発電の種類

出典：Ocean Newsletter 第 421 号(上田、海洋政策研究所、2018)

NEDO は 1981 年より風力発電に関する技術開発に着手し、2008 年からは着床式洋上風力発電、2014 年からは浮体式洋上風力発電の研究開発を行ってきた。2018 年 7 月に発表した TSC Foresight vol.27「風力発電分野の技術戦略策定に向けて」<sup>2</sup>では、風力発電分野における課題として、発電コストの低減、産業競争力の強化、設置可能域の拡大の三つを挙げて対応の方向性を示した。また、政府においても 2016 年の港湾法改正に続いて、2019 年の再エネ海域利用法<sup>3</sup>の施行など、洋上風力導入を促進するための法整備が進められてきた。

そのような中でも、地球温暖化の問題は年々深刻度を増しており、世界的に脱炭素化に向けた動きが加速してきたことから、日本においても 2020 年 10 月、2050 年までにカーボンニュートラルを目指すことが宣言された。これを受け、2021 年に示された

<sup>1</sup> 第 78 回調達価格等算定委員会資料 1(経済産業省、2022)

<https://www.meti.go.jp/shingikai/santeii/078.html>

<sup>2</sup> <https://www.nedo.go.jp/content/100880815.pdf>

<sup>3</sup> 海洋再生可能エネルギー発電設備の整備に係る海域の利用の促進に関する法律

第 6 次エネルギー基本計画<sup>4</sup>では、2030 年における再生可能エネルギー（以下、再エネ）電源の比率を 36～38%としたが、その中でも洋上風力を再エネ主力電源化の切り札と位置づけ、風力発電の導入目標を 10GW から 23.6GW に引き上げるなど、風力発電の大量導入に向けて大きく舵が切られたところである。

洋上風力の産業競争力強化に向けた官民協議会が 2020 年 12 月に発表した洋上風力産業ビジョン（第 1 次）<sup>5</sup>では、政府が 2030 年までに 10GW、2040 年までに 30～45GW の案件形成の目標を掲げるとともに、案件形成の加速化のほか送電網や拠点港湾などのインフラの計画的整備を行うことが示された。同時に産業界においては、国内調達比率を 2040 年までに 60%にすることや、着床式の発電コストを 2030～2035 年までに 8～9 円/kWh にすることなどの目標が掲げられた。その一方で 2019 年には、国際競争の激化を受けて国内 2 社が風車製造から撤退を発表し、大型風車メーカーが国内からなくなるなど、風力発電を取り巻く環境は大きく変わっている。

このような状況の中、風力発電を主力電源の一つとする高い導入目標を実現するためには、技術開発、サプライチェーンの整備、人材育成等を含めた新たな戦略が必要となる。そこで、本レポートでは、国内外の風力発電の状況、技術の進展状況について俯瞰的に調査、分析して、日本の風力発電の導入目標達成のために重要となる技術課題やその解決の方向性について解説する。特に、導入拡大が期待される洋上風力、中でも浮体式洋上風力に焦点を当て、その技術課題の解決やサプライチェーンの整備、人材育成等の産業基盤整備を進めることにより、陸上風力を含めた風力発電全体に波及効果をもたらすことの重要性について解説する。

---

<sup>4</sup> 第 6 次エネルギー基本計画（経済産業省、2021）

<https://www.meti.go.jp/press/2021/10/20211022005/20211022005-1.pdf>

<sup>5</sup> 洋上風力産業ビジョン（第 1 次）（洋上風力の産業競争力強化に向けた官民協議会、2020）

[https://www.meti.go.jp/shingikai/energy\\_environment/yojo\\_furyoku/pdf/002\\_02\\_02\\_01.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/yojo_furyoku/pdf/002_02_02_01.pdf)

# 1 章 解決すべき社会課題と実現したい将来像

## 1-1 社会課題と将来像

世界の平均気温は18世紀後半に起こった産業革命以降、上昇を続けている。この主因は人為起源のGHG(Greenhouse Gas:温室効果ガス)である可能性が極めて高いことがIPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change:気候変動に関する政府間パネル)によって明らかにされている<sup>6</sup>。世界各地における大雨・熱波等の増加・長期化といった気温上昇による気候変動は深刻な影響をもたらしており、GHGの排出抑制は世界共通の喫緊の課題である。2019年の世界のCO<sub>2</sub>排出量は図2に示すように約357億トンであり、そのうち38%は電力部門からの排出となっている<sup>7</sup>。GHGの排出抑制のためには、この電力部門でのCO<sub>2</sub>排出削減が重要であり、再エネの大量導入が不可欠である。IEA(International Energy Agency:国際エネルギー機関)では複数のシナリオに基づいて2050年の姿を描いており、その中で風力発電は太陽光発電と並んで重要なポジションを占める(図3)<sup>8</sup>。

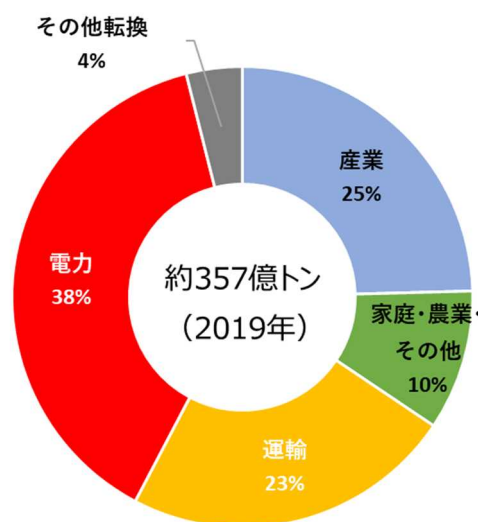


図2 世界の部門別CO<sub>2</sub>排出量(2019年)

出典:Energy Technology Perspectives 2020(IEA、2020)を基に  
NEDO 技術戦略研究センター作成(2021)

<sup>6</sup> IPCC 第5次評価報告書統合報告書政策決定者向け要約(文部科学省・経済産業省・気象庁・環境省、2016改訂) <https://www.env.go.jp/content/900442299.pdf>

<sup>7</sup> Energy Technology Perspectives 2020(IEA、2020) <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020>

<sup>8</sup> World Energy Outlook 2022(IEA、2022) <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>

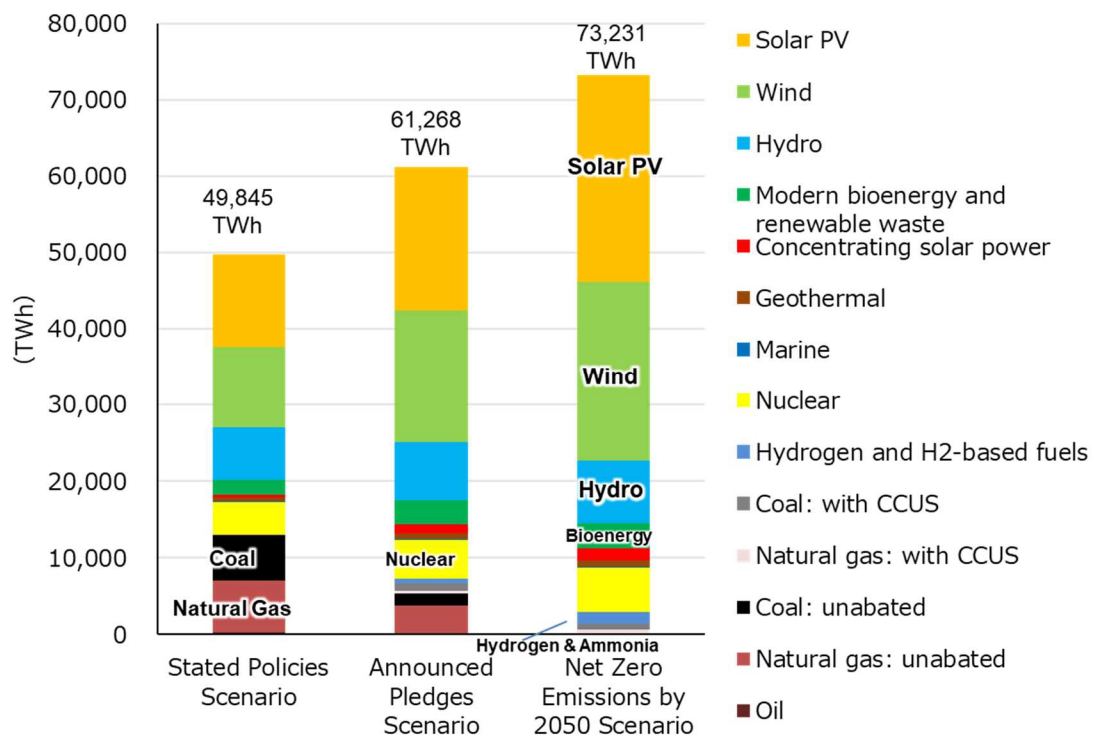


図3 2050年の電力部門の電源構成

出典: World Energy Outlook 2022 (IEA, 2022)を基に  
NEDO 技術戦略研究センター作成(2022)

日本は2020年時点で11.5億トンに上るGHGを排出しているが、そのうち91%がCO<sub>2</sub>であり(図4)<sup>9</sup>、中国、アメリカ等に続いて世界第5位のCO<sub>2</sub>排出国となっている<sup>10</sup>。2020年10月に日本政府は、2050年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする、カーボンニュートラルを目指すことを宣言し、より一層積極的にCO<sub>2</sub>排出削減に取り組むこととなった。これに伴って2021年10月に、これまでの計画を見直した第6次エネルギー基本計画が示された。この中で、2030年の日本における電源構成において、風力発電は陸上風力17.9GW、洋上風力5.7GWの計23.6GWを占め、発電量ではそれぞれ34TWh、17TWhの計51TWhとなって、全発電量934TWhのうちの約5%を担うとされている(図5)<sup>11</sup>。

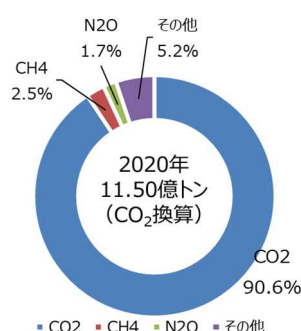


図4 国内のGHG排出量と内訳(2020年)

出典:日本国温室効果ガスインベントリ報告書(国立環境研究所、2022)を基にNEDO技術戦略研究センター作成

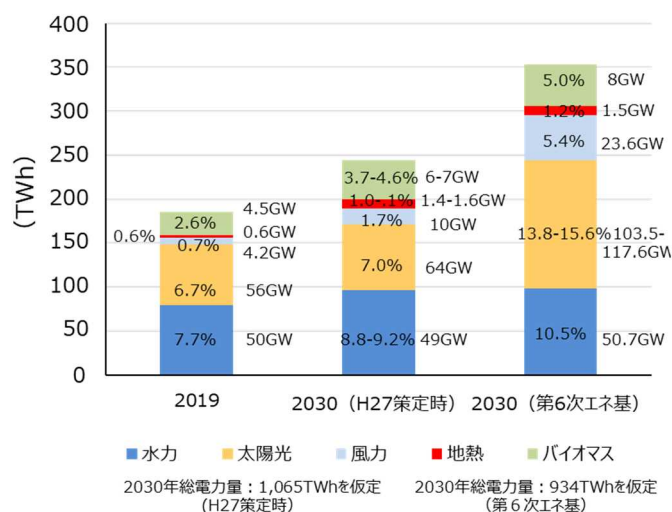


図5 2030年の日本における再生可能エネルギーの電源構成

出典:第6次エネルギー基本計画の概要(経済産業省、2021)を基にNEDO技術戦略研究センター作成

<sup>9</sup> 日本国温室効果ガスインベントリ報告書(国立環境研究所、2022)

[https://www.nies.go.jp/gio/archive/nir/qjm10000017uzyw-att/NIR-JPN-2022-v3.0\\_J\\_GIOweb.pdf](https://www.nies.go.jp/gio/archive/nir/qjm10000017uzyw-att/NIR-JPN-2022-v3.0_J_GIOweb.pdf)

<sup>10</sup> データで見る温室効果ガス排出量(世界)(全国地球温暖化防止活動推進センター)

<https://www.jccca.org/global-warming/knowledge04>

<sup>11</sup> 第6次エネルギー基本計画の概要(経済産業省、2021)

<https://www.meti.go.jp/press/2021/10/20211022005/20211022005-2.pdf>

また、2050年のカーボンニュートラルの想定においては、風力発電は、陸上風力41GW、洋上風力45GW、あわせて約90GWを占め、発電量にして約190TWhとなり、全発電量1,300～1,500TWhのうちの13～15%を担うとされている<sup>12</sup>。

持続可能なエネルギーシステム<sup>13</sup>の重要な要素として風力発電システムが大量に導入され、カーボンニュートラルに貢献することが日本の目指すべき将来像となっている。

## 1-2 解決・実現のための方法

カーボンニュートラルの実現には、風力発電技術の確立によって、高いCO<sub>2</sub>排出削減ポテンシャルを持つ風力発電が国内各地に大規模に導入されることが不可欠である。そのためには陸上風力、着床式洋上風力、浮体式洋上風力、全ての方式で積極的に導入を進める必要がある。導入拡大にあたっては、効率的な技術開発を行うことと同時に、サプライチェーンの整備、人材育成等の産業基盤整備を進めることも求められる。

また、確立すべき風力発電技術は大量導入を可能とするだけでなく持続可能である必要がある。そのため、風力発電設備の長寿命化や部品・部材のリユース、リサイクルを含めた省資源化・資源循環型の風力発電システムの確立も重要となる。加えて、変動性電源である風力発電の価値を高めるためには、水素等とのカップリングによる用途拡大など、電力以外も含めたエネルギーシステムとしての運用も今後ますます重要となってくる。

このように、風力発電システムの大量導入に向け、技術開発を通して日本に適した風力発電のエコシステムを確立することがカーボンニュートラル実現のための方法となる。

---

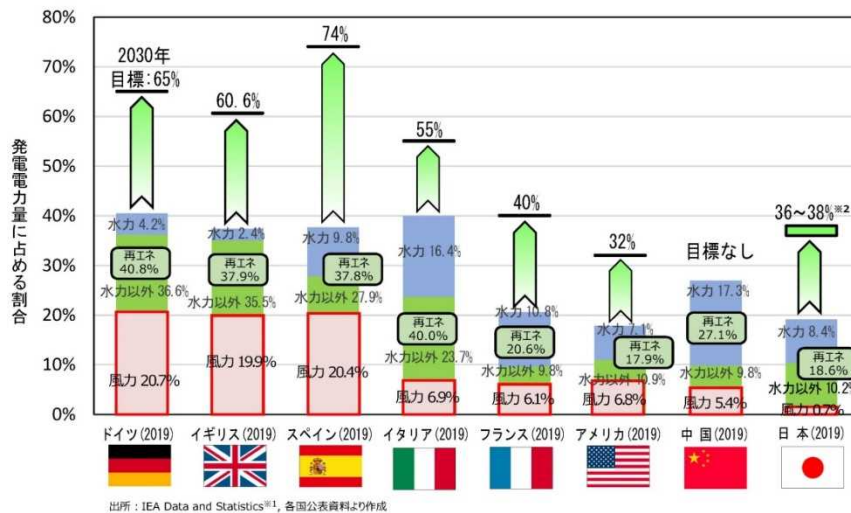
<sup>12</sup> 総合資源エネルギー調査会 第43回基本政策分科会資料1(経済産業省、2021)  
[https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic\\_policy\\_subcommittee/2021/043/](https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/2021/043/)

<sup>13</sup> TSC Foresight「持続可能な社会の実現に向けた技術開発総合指針2020」(NEDO、2020)  
<https://nedo.go.jp/content/100903678.pdf>

## 1-3 環境分析とベンチマーキング

### 1-3-1 政策動向

主要国での再エネ導入量の現状と2030年の導入目標を図6に示す。欧州ではドイツ、イギリス、スペインで再エネが現状において発電量の35%以上を占めるなど、再エネの導入が進んでいる。再エネ導入量の多いこれら3か国では風力発電の割合が発電量の20%を超えるような状況にある。



※1: Data and statistics (IEA, 2021)

※2: 第6次エネルギー基本計画 (経済産業省, 2021)

図6 各国の再エネ導入量の現状と2030年の目標

出典: 各種資料を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2021)



洋上風力発電に着目すると、表 1 に示すように欧米およびアジアの主な国では、高い導入目標を設定するとともに案件形成への関与や補助金交付などの施策を行っている。

EU(European Union:欧州連合)では 2020 年 11 月に、洋上風力の設備容量を 2030 年までに 60GW、2050 年までに 300GW まで引き上げると発表されている<sup>14</sup>。アメリカでは 2021 年 3 月にバイデン大統領が 2030 年までに 30GW の洋上風力を導入することを発表し<sup>15</sup>、更に 2022 年 9 月には浮体式洋上風力の 2035 年までの導入目標として 15GW を追加している<sup>16</sup>。

中国では 2060 年のネットゼロを目標とし、2020 年時点で約 10GW の洋上風力を導入している。韓国は 2050 年のネットゼロを目標とし、2030 年には 12GW の洋上風力の導入を目指している。台湾では 2010 年代半ばより洋上風力の導入を行っており、2025 年までに 5.5GW、2035 年までに更に 15GW の洋上風力の導入を目指している。

---

<sup>14</sup> Boosting Offshore Renewable Energy for a Climate Neutral Europe(European Commission, 2020)  
[https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_20\\_2096](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_20_2096)

<sup>15</sup> FACT SHEET: Biden Administration Jumpstarts Offshore Wind Energy Projects to Create Jobs  
(The White House, 2021)

[https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2021/03/29/fact-sheet-biden-administration-jumpstarts-offshore-wind-energy-projects-to-create-jobs/?utm\\_source=link](https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2021/03/29/fact-sheet-biden-administration-jumpstarts-offshore-wind-energy-projects-to-create-jobs/?utm_source=link)

<sup>16</sup> FACT SHEET: Biden-Harris Administration Announces New Actions to Expand U.S. Offshore Wind Energy(The White House, 2022)

<https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2022/09/15/fact-sheet-biden-harris-administration-announces-new-actions-to-expand-u-s-offshore-wind-energy/>

表 1 主な国と地域における洋上風力発電導入政策

イギリス	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 2019年に洋上風力セクターディールにて2030年までに最大30GWの導入を政府と産業界で合意。</li> <li>➢ 2022年4月発表のエネルギー安全保障戦略により、2030年の導入目標を40GWから50GWに拡大し、このうち浮体式洋上風力を5GWと設定。</li> <li>➢ 海域の占有については、クラウンエステートが環境影響情報を考慮して入札海域を選定。</li> <li>➢ 2015年よりCfD制度<sup>17</sup>を導入。</li> </ul>
オランダ	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 2020年の洋上風力エネルギーロードマップ2030で、2030年の導入目標を11.5GWと設定。</li> <li>➢ 海域指定から環境影響評価、利害関係者との調整等を国が行い、指定された海域ごとに自然エネルギー支援スキームへの入札を行って事業者を選定するセントラル方式がとられている。</li> <li>➢ 希望売電価格を競争入札。実質、SDE+制度(FIP制度<sup>18</sup>の一種)でのプレミアム額を決める方式。近年は補助金ゼロの事例も発生している。</li> </ul>
ドイツ	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 2022年7月に洋上風力エネルギー法の改正により、2030年の導入目標をこれまでの20GWから30GWに引き上げ、2045年の導入目標を70GWとすることを決定した。</li> <li>➢ 連邦海事水路庁が海域開発計画に基づき北海とバルト海の入札海域を指定。</li> <li>➢ 2012年より、FIT<sup>19</sup>からFIP制度に変更。</li> <li>➢ 2021年入札から、発電所建設、運用のみを考慮した売電価格を競争入札するセントラル方式に移行。</li> </ul>
デンマーク	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 2019年に2030年の導入目標を5.7GWと設定。電力需要の100%超を自然エネルギーとする目標を設定。</li> <li>➢ デンマークエネルギー庁(DEA)が主催する洋上計画委員会が海域を指定する。入札の主催や事業許可手続はDEAが担い、窓口のワンストップを実現。入札は、事業者の適格性をみる事前審査制度と自然エネルギー支援スキームの価格入札の2段階となっている。指定海域以外でも開発可能なオーブンドア制度がある。</li> <li>➢ 支援スキームはFITからFIP、そしてCfDと移行した。</li> </ul>
アメリカ	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 連邦エネルギー省(DOE)は2015年に洋上風力に関してWind Visionにて2030年までに22GW、2050年までに86GWの導入シナリオを検討。</li> <li>➢ 2021年3月、バイデン大統領が2030年までに30GWの洋上風力を導入することを発表、更に2022年9月には2035年までに浮体式洋上風力を15GW追加する目標を発表。</li> <li>➢ 各州の導入目標は、2035年にニューヨーク州が9GW、ニュージャージー州が7.5GW、マサチューセッツ州が3.2GW、2027年にバージニア州が2.5GW等、東海岸6州だけで合計25.4GWにのぼる。</li> <li>➢ 連邦海洋エネルギー管理局(BOEM)が、関係する連邦機関や州・地方政府との調整、情報収集や利害関係者との対話を進め、リース対象の海域を指定して競争入札を行い、海域のリース権を与える。</li> <li>➢ 全米に共通する支援スキームは生産税額控除(PTC:発電量について税額を控除する制度)と投資税額控除(ITC:設備導入にかかった投資額の一定割合を税金の支払いから控除できる制度)がある。</li> </ul>
中国	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 中国では2060年にネットゼロを掲げており、一次エネルギー消費における非化石燃料の割合を2030年までに約25%に削減するとしている。</li> <li>➢ 風力および太陽光発電の設備容量を2030年までに1,200GW以上とする目標を掲げる。</li> <li>➢ 第14次5カ年(2021~2025年)での風力発電新規導入容量は151GW。洋上風力分は不明。</li> <li>➢ 2022年から新規洋上風力発電事業への中央政府の補助金を廃止し、地方政府による補助金の支給を奨励。</li> </ul>
韓国	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 2050年のネットゼロを掲げ、2030年に20%、2040年には30~35%の再エネ導入を目指す。</li> <li>➢ 風力発電の導入目標は、2025年に9.2GW、2030年に17.7GW、このうち12GWが洋上風力発電である。政府主導の立地選定と許可の合理化で導入拡大を促進している。2040年に25GWの風力発電を含む77.8GWの再エネ導入を目指す。(2020年末での風力導入量は、陸上1,500MW、洋上145MW)</li> <li>➢ 再エネ導入スキームは、2002年から2011年まではFIT制度を導入していたが、2012年から再エネ利用基準制度(RPS:Renewable Portfolio Standard、電気事業者に対して発電電力量の一定比率を再エネ電源で賄うことを義務付けする制度)に変更。2022年までは両者が並列する。</li> </ul>
台湾	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 2019年、同年初めには風力全体で4.2GWであったところ、洋上風力のみで2025年までに5.5GW、2035年までに更に15GWの導入を目指すとした。</li> <li>➢ ポテンシャル海域の指定を政府が行う。風況、海底の各種調査、環境影響評価手続、地方自治体の許認可手続、地域の関係者との調整は事業者が行う。</li> <li>➢ FIT制度であるが、先行する5.5GWの事業では、ローカルコンテンツが重視される選定(3GW)と価格競争入札による選定(2.5GW)域に分けられた。</li> </ul>

出典:各種資料<sup>20</sup>を基にNEDO技術戦略研究センター作成(2021)

<sup>17</sup> CfD(Contract for Difference:差額決済契約)制度:基準価格と市場価格の差額を補助して買い取る制度。

<sup>18</sup> FIP(Feed-in-Premium)制度:市場価格に一定の差額プレミアムを上乗せした価格で買い取る制度。

<sup>19</sup> FIT(Feed-in-Tariff:固定価格買取)制度:市場価格に関わらず一定の価格で買い取る制度。

<sup>20</sup> 洋上風力発電に関する世界の動向第2版(自然エネルギー財団、2021)、洋上風力が日本のエネルギーを支える(自然エネルギー財団、2020)、World Energy Outlook 2019(IEA、2019)、Global Wind Report 2021(GWEC、2021)など。

図7は洋上風力発電の開発プロセスについて各国の取り組みを比較した図である。WF(Wind Farm:ウインドファーム)開発におけるゾーニング、海域選定、海域調査、許認可、建設の各プロセスや系統接続に係る申込・検討、工事について、開発事業者(図中赤で表示)が大部分を担う分散型方式と、政府機関(青で表示)や送電系統運用者(緑で表示)が多くを担うセントラル方式がある。一般的にオークション前の不確実性の高い段階において開発事業者が担うプロセスの少ないセントラル方式の方が開発事業者のリスクは低減される。洋上風力開発は投資規模が大きく、リードタイムも長いことから、オランダ、ドイツ、デンマークでは「セントラル方式」により、開発リスクを軽減して洋上風力の導入を促進している。



図7 欧州各国の洋上風力発電のプロセス比較

出典: Industry Position on how to Offshore Grid Should Develop (Wind Europe、2019)

日本では 2012 年より FIT 制度を導入したが、2016 年以降、風力発電の FIT 認定量が増加しており、2021 年度末には導入量で 4.8GW、総認定量は 15GW に達した(図 8)。これに対して 2030 年のエネルギーミックスでの風力発電の導入目標は 23.6GW となっている。

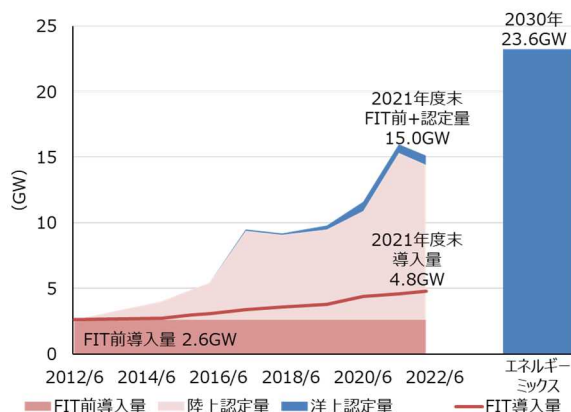


図 8 日本の風力発電の FIT 認定量と導入実績

出典: 調達価格等算定委員会の各年度の資料を基に NEDO 技術戦略研究センター作成(2022)

2050 年までの風力発電の導入目標等をまとめたものを図 9 に示す。2040 年には洋上風力で 30~45GW の案件形成を目指すとしている。また、2050 年にカーボンニュートラルを実現するためには、再エネ比率 5~6 割、風力発電全体で約 90GW(陸上風力 41GW、洋上風力 45GW)が必要とされている。

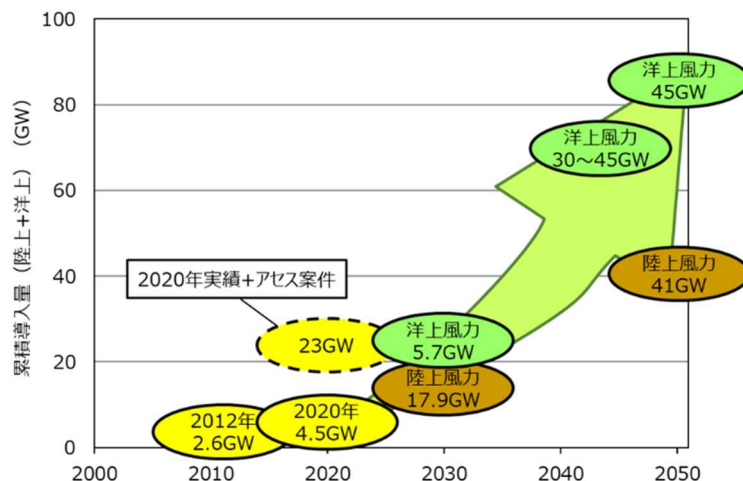


図 9 日本の風力発電の導入実績と目標の規模感

出典: 各種資料<sup>21</sup>を基に NEDO 技術戦略研究センター作成(2021)

<sup>21</sup> 目標値等は第 6 次エネルギー基本計画(2021)、洋上風力産業ビジョン(第 1 次)概要(2020)、総合資源エネルギー調査会基本政策分科会(第 43 回)資料(2021)を参照。実績等は調達価格等算定委員会の各年度資料を参照。

## 1-3-2 市場動向

2020年時点での世界の風力発電導入状況を図10に示す。導入量は表2に示すように778GWであり、そのうち35GWが洋上風力となっている。IRENA (International Renewable Energy Agency:国際再生可能エネルギー機関)によると、図11に示すように2050年での風力全体の導入予測量6,044GWのうち1,000GWが洋上風力で、陸上風力より高い伸びを見込んでいる。

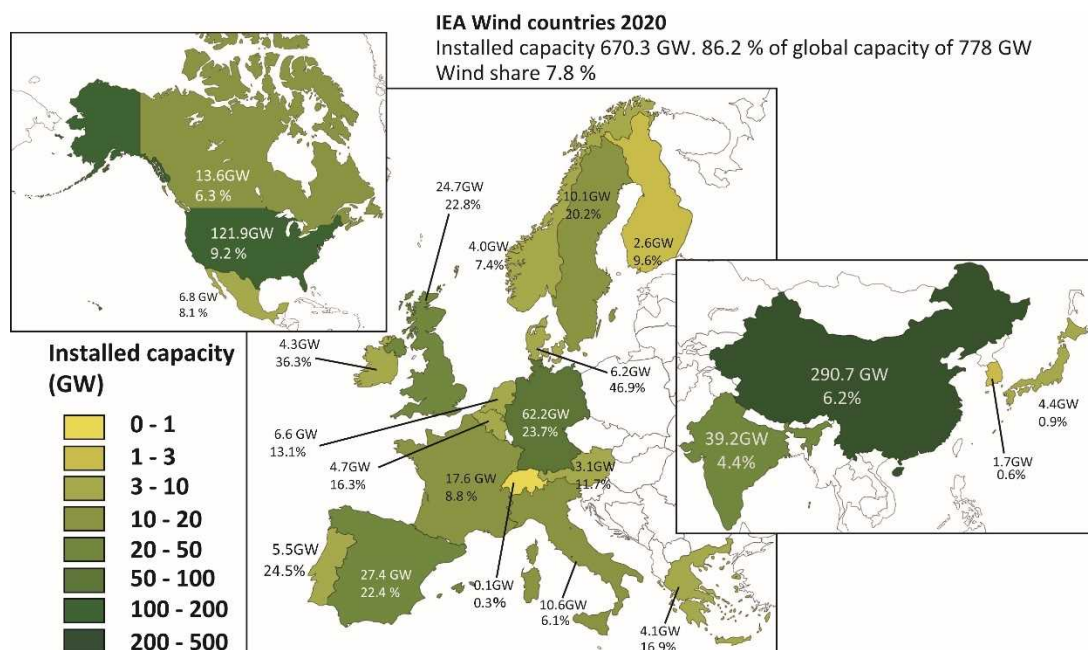


図10 IEA Wind 加盟国の風力発電導入量(2020年)

出典:IEA Wind TCP Annual Report 2020 (IEA Wind、2021)<sup>22</sup>を基に  
 NEDO 技術戦略研究センター作成(2021)

表2 世界の新規風力発電導入量(2020年)

	IEA Wind TCP 参加国	世界統計
全導入容量 (洋上および陸上風力)	631.1GW	778GW
全洋上風力導入容量	36.2GW	35GW
2020年新規導入容量	79.8GW	93GW

出典:IEA Wind TCP Annual Report 2020 (IEA Wind、2021)を基に  
 NEDO 技術戦略研究センター作成(2021)

<sup>22</sup> <https://usercontent.one/wp/iea-wind.org/wp-content/uploads/2021/12/IEA-WIND-AR2020.pdf>

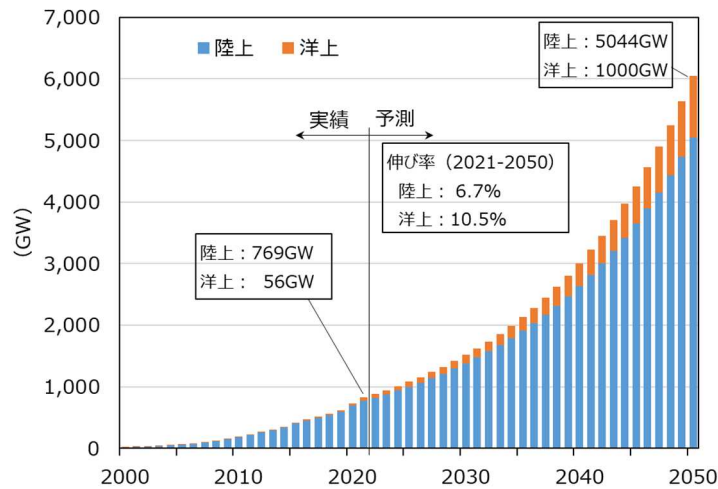
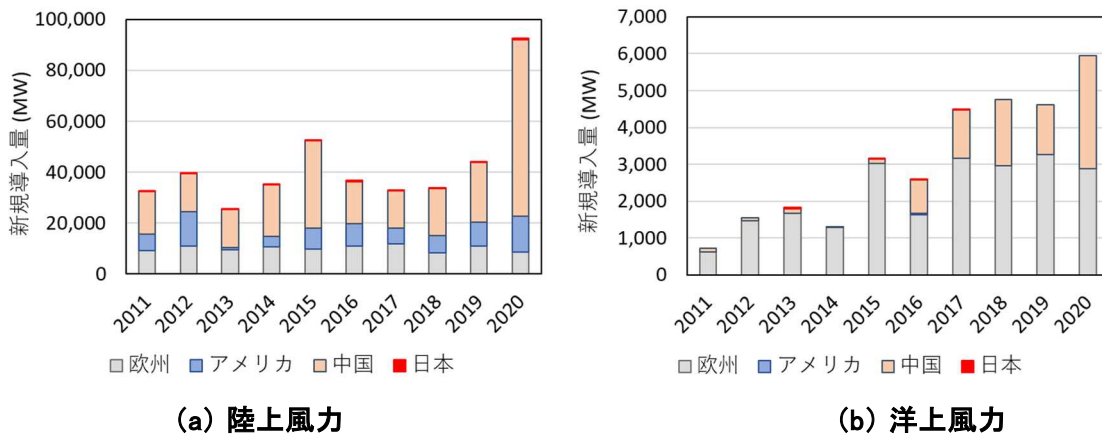


図 11 世界の風力発電累計導入量と今後の予測

出典: Renewable Energy Statistics 2022 (IRENA、2022)<sup>23</sup>、Future of Wind (IRENA、2019)<sup>24</sup>などを基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2022)

陸上風力に関しては図 12(a)に示すように、欧州では毎年 10GW 程度、アメリカでも 5~10GW のペースで新規導入が進んでいる。中国でも 10GW 規模での導入が行われている。日本でも導入が進んでいるものの、他国に比べ少ない量に留まっている。

洋上風力についてはこれまでは着床式がほとんどであり、図 12(b)に示すように欧州を中心に導入が着実に進んでおり、中国でも近年導入が拡大している。日本、アメリカでも先に述べたように大規模な導入が計画されている。



(a) 陸上風力

(b) 洋上風力

図 12 新規風力発電導入量

出典: Renewable Capacity Statistics 2021 (IRENA、2021)<sup>25</sup>を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2021)

<sup>23</sup> <https://www.irena.org/publications/2022/Jul/Renewable-Energy-Statistics-2022>

<sup>24</sup> <https://www.irena.org/publications/2019/Oct/Future-of-wind>

<sup>25</sup> <https://www.irena.org/publications/2021/March/Renewable-Capacity-Statistics-2021>



### 1-3-3 技術動向

#### (1)コスト

再エネの発電コストは図 13 に示すように年々低下しており、2020 年の風力発電コストは陸上風力で kWh あたり 4.3 円(0.039ドル、1ドル=110 円で換算、以下同じ)、(着床式)洋上風力で kWh あたり 9.2 円(0.084ドル)と、火力発電のコスト kWh あたり 5.5~18.7 円(0.05~0.17ドル)と同等となっている。

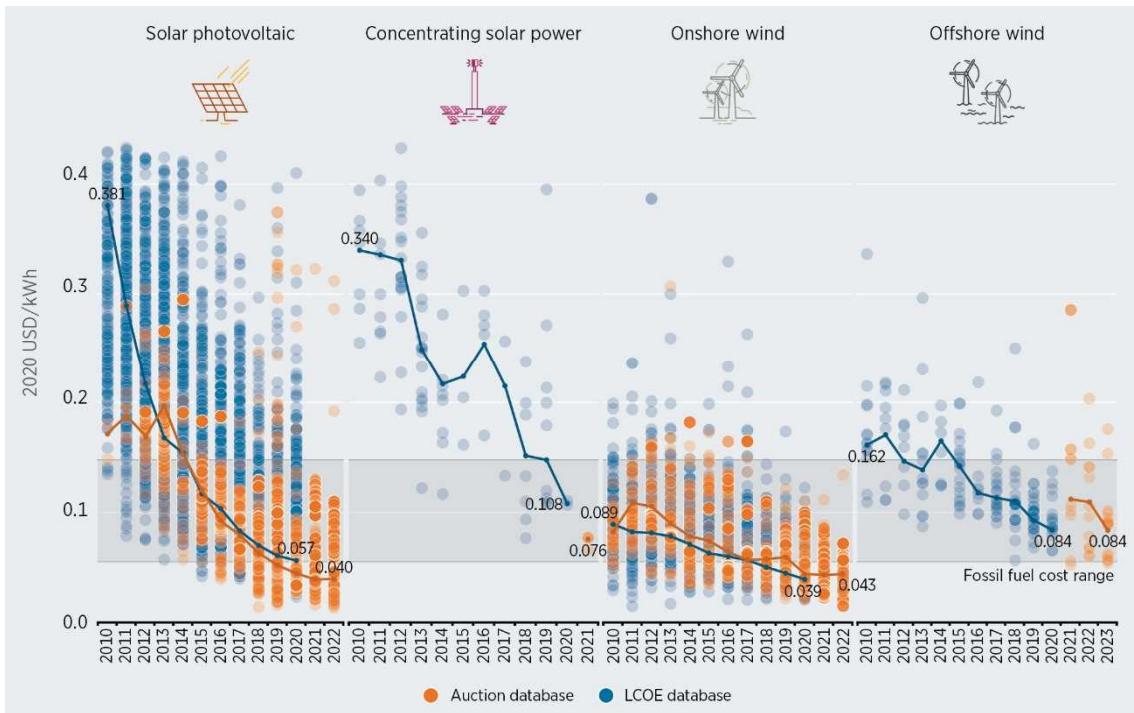


図 13 主な再エネの LCOE<sup>26</sup>と入札落札価格

出典: Renewable Power Generation Costs in 2020 (IRENA, 2021)

<sup>26</sup> Levelized Cost Of Electricity: 均等化発電原価。発電コストを評価する方法の一つ。調査・開発から廃棄、運用中の O&M など全てのコストを、生涯発電量で割った値。

図 14<sup>27</sup>に陸上風力における各国の買取価格を示す。日本でも買取価格は低下傾向にあるが、2021 年度実績の kWh あたり 15.6 円は海外と比べて高く、海外よりも発電コストが高いことを示している。日本では洋上風力の事例はまだ少ないため、入札上限価格も陸上風力より高く設定されているが<sup>28</sup>、2021 年に実施された洋上風力発電の促進区域(着床式)における入札結果では kWh あたり 11.99~16.49 円と陸上風力と同程度となっており<sup>29</sup>、国内の洋上風力についても今後低下していくことが期待される。

なお、国内では、洋上風力産業ビジョン(第 1 次)において、2030~2035 年に着床式洋上風力で kWh あたり 8~9 円というコスト目標が設定されている。

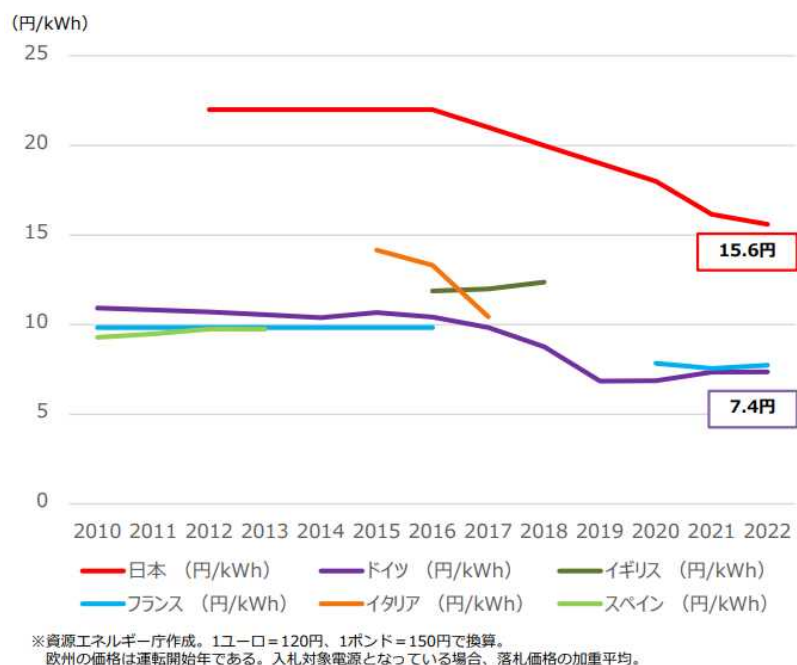


図 14 風力発電(20,000kW)の各国の買取価格

出典: 第 82 回 調達価格等算定委員会資料 2(経済産業省、2022)

<sup>27</sup> <https://www.meti.go.jp/shingikai/santeei/082.html>

<sup>28</sup> ニュースリリース「再生可能エネルギーの FIT 制度・FIP 制度における 2022 年度以降の買取価格・賦課金単価等を決定します」(経済産業省、2022)によると、2022 年の 1kW あたりの入札上限価格は、陸上風力が 16 円、洋上風力は着床式が 29 円、浮体式が 36 円となっている。

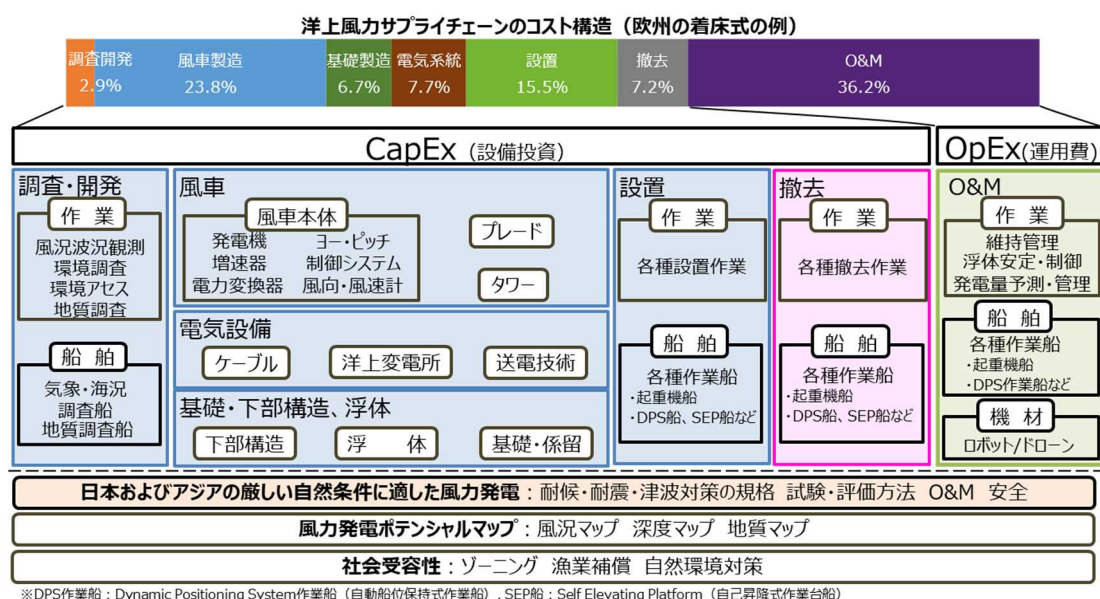
<https://www.meti.go.jp/press/2021/03/20220325006/20220325006.html>

<sup>29</sup> ニュースリリース「秋田県能代市、三種町及び男鹿市沖」、「秋田県由利本荘市沖」、「千葉県銚子市沖」における洋上風力発電事業者の選定について(経済産業省、2021)

<https://www.meti.go.jp/press/2021/12/20211224006/20211224006.html>



風力発電のコスト構造について、実績の多い欧州における着床式の例を図 15 に示す。調査開発や風車・基礎等の製造・設置に加え、電気設備や撤去のコストまでを含む CAPEX (Capital Expenditure: 資本的支出) と、O&M (Operation and Maintenance: 保守運用) のコストである OPEX (Operating Expense: 運用費) で構成されている。この例は着床式のものであるが、浮体式あるいは陸上であってもサプライチェーン全般にわたって様々な技術要素が存在し、そのコスト構造は大きくは変わらない。



**図 15 洋上風力発電のコスト構造と技術要素**

出典：第 1 回洋上風力の産業競争力強化に向けた官民協議会資料 3(経済産業省・国土交通省、2020)<sup>30</sup>、Guide to an Offshore Wind Farm(BVG associates、2019)を<sup>31</sup> 基に NEDO 技術戦略研究センター作成(2021)

<sup>30</sup> [https://www.meti.go.jp/shingikai/energy\\_environment/yojo\\_furyoku/001.html](https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/yojo_furyoku/001.html)

<sup>31</sup> <https://bvgassociates.com/cases/guide-offshore-wind-farm/>

次に欧州における風力発電コストの削減見通しを図 16 に示す。陸上風力と比較すると風車の大型化が進む洋上風力の方が CAPEX の削減余地が大きい。洋上風力の中でも浮体式については、浮体のコストが高いため着床式と比べて CAPEX の削減余地がかなり大きいことが分かる。また、O&M コストを中心とした OPEX の削減余地も浮体式の方が大きい。長く実績のある陸上も含めて各方式とも更なるコスト低減が進むことが想定されている。

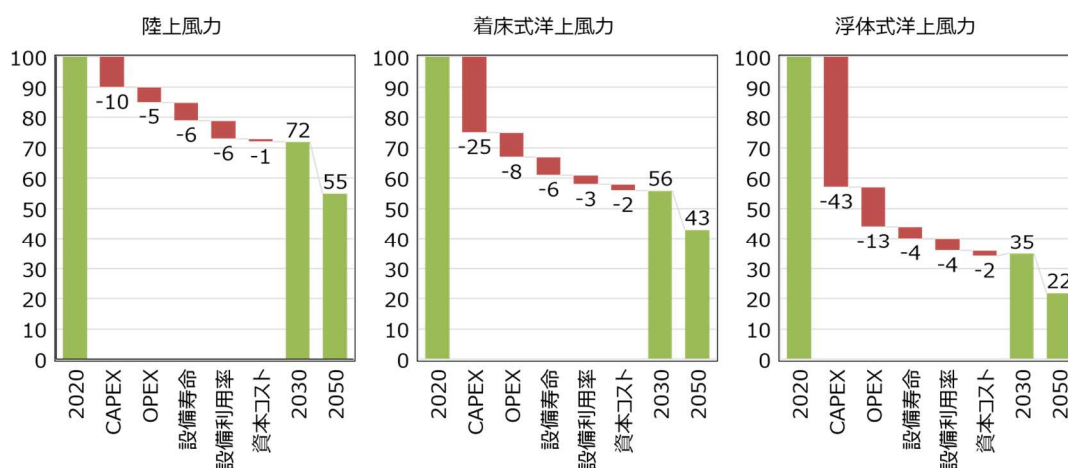


図 16 欧州における風力発電コストの削減見通し

出典: Getting fit for 55 and set for 2050 (ETIPWind and WindEurope、2021)<sup>32</sup>を基に  
NEDO 技術戦略研究センター作成(2021)

<sup>32</sup> <https://etipwind.eu/publications/getting-fit-for-55/>

## (2) 風力発電機、部材のシェア

かつては各国に多くの風力発電機メーカーが存在したが、2000年代以降、国際競争の激化を受けて撤退、買収が相次ぎ、現在は図17に示すようにGE(アメリカ)、Vestas(デンマーク)、Siemens Gamesa(スペイン)の欧米三大メーカーに、Goldwindなどの中国メーカーが食い込んでいる状態で、日系企業については2019年に大型風車製造から撤退している。洋上風力では更に寡占化が進んでいる。

日本には現在、大型風車メーカーはないが、図18に示すように軸受け(ベアリング)のほか、パワーコンディショナ、発電機、ブレードの素材となる炭素繊維など部材・機器に一定のシェアを有する企業が複数存在する。

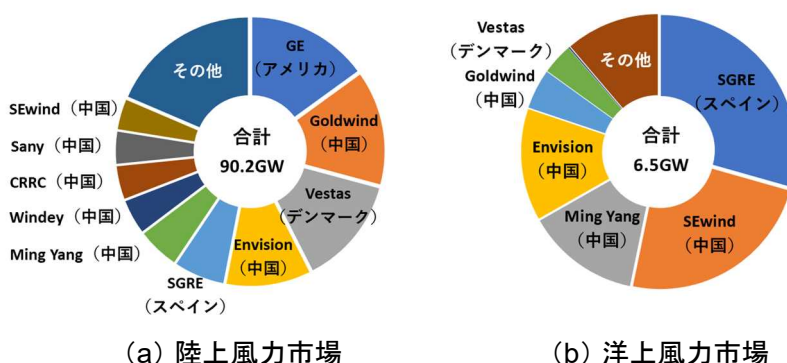


図17 2020年の風力発電機のシェア

出典: Bloomberg blog(BloombergNEF、2021.3.10)<sup>33</sup>を基に NEDO 技術戦略研究センター作成(2021)

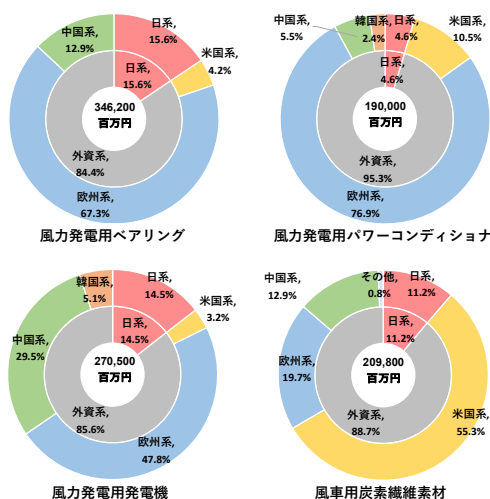


図18 風力部材・機器の日系企業のポジション(2019)

出典:2020年度 日系企業のITサービス、ソフトウェア及びモノの国際競争ポジションに関する情報収集(NEDO、2021)を基に NEDO 技術戦略研究センター作成(2021)

<sup>33</sup> <https://about.bnef.com/blog/global-wind-industry-had-a-record-near-100gw-year-as-goldwind-took-lead-from-vestas/>

### (3) 特許分析

図 19(a)に示すように風力発電分野での特許出願数では中国が半数以上を占めるが、特許が現在も有効で、かつ 2 か国以上の出願を行っているものを重要特許と定義すると、重要特許出願数では、図 19(b)のように中国は大幅に減少する。このような重要特許では欧州が大半を占め、次いでアメリカとなり、日本、韓国も出願人国籍・地域の上位に現れる。

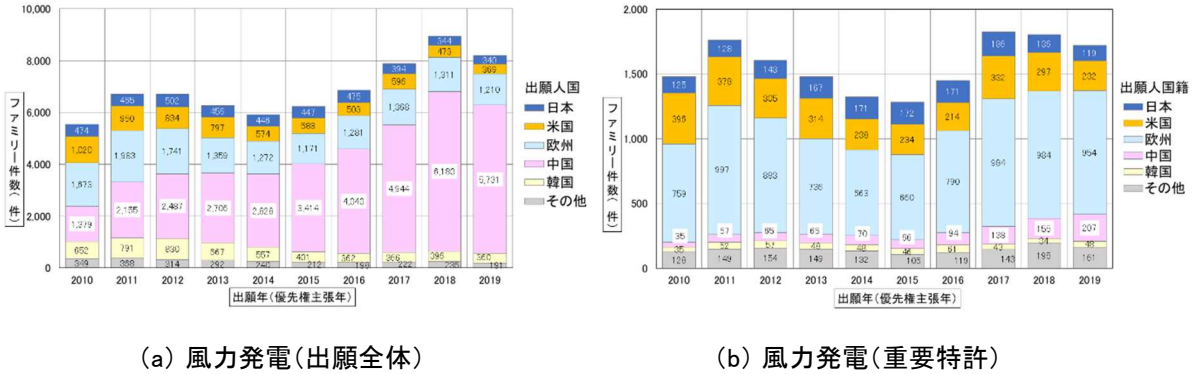


図 19 出願人国籍・地域別出願件数推移

(出願年(優先権主張年):2010~2019年)

出典:2021年度出願特許分析による俯瞰情報調査(NEDO、2022)を基に  
NEDO 技戦略研究センター作成(2022)

図 20 に示すように重要特許出願人の上位は三大風車メーカーである GE(アメリカ)、Siemens(ドイツ)、Vestas(デンマーク)となっており、これらの出願数が近年増加傾向にある。5 位以降に日系の三菱重工業、日立製作所が現れるが、三菱重工業は減少傾向、日立製作所はこの期間では横ばいとなっている。また、サムスングループ(韓国)は減少傾向にある。

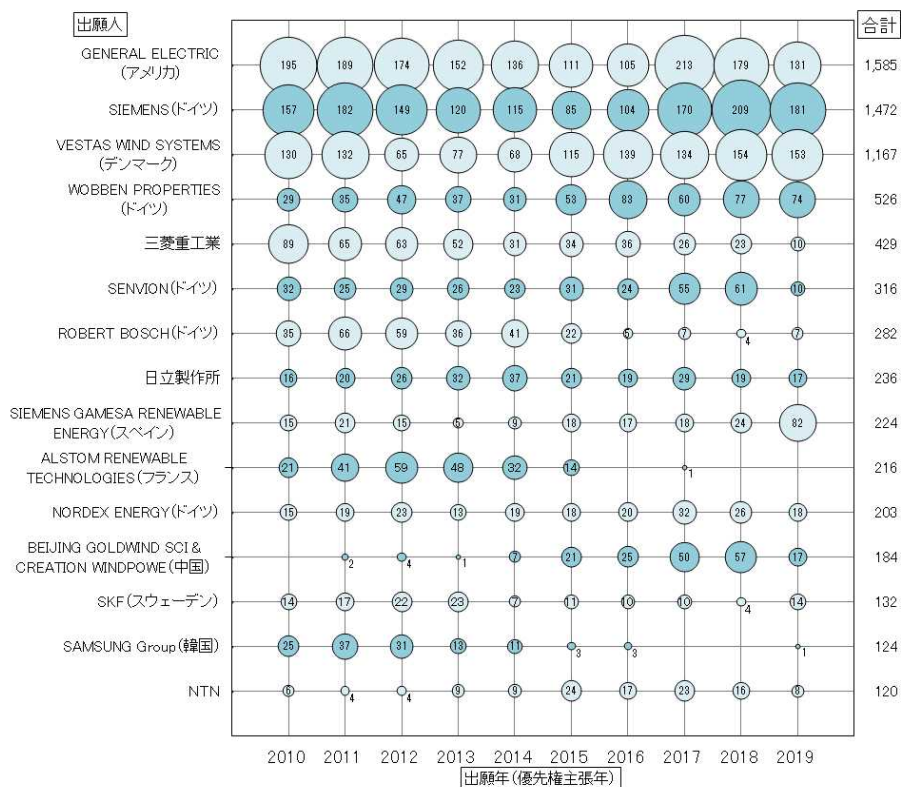


図 20 出願件数上位出願人の出願件数推移

(出願年(優先権主張年):2010~2019年)

出典:2021年度出願特許分析による俯瞰情報調査(NEDO、2022)を基に  
NEDO 技術戦略研究センター作成(2022)

#### (4) 論文分析

論文数は図 21(a)に示すように 2011 年から 2020 年まで一貫して増加傾向にある。国別では図 21(b)のように中国が 1/4 を占め、次いでアメリカ、欧州勢などが続く。これは風力発電の導入が進んでいる国の論文数が多い傾向にあることを示している。日本は合計で 724 件と世界で 14 位となっている。

風力発電設備を構成する機械要素ごとに論文数を見ると、図 22(a)に示すようにブレードや発電機に関連するものが多い傾向にある。ブレード、発電機、コンバータについては中国だけでなく、欧州各国、日本からの論文数も多い。

風力発電に関する技術要素ごとに論文数を見ると、図 22(b)に示すように機械要素に比べて国ごとの違いが少なく、風車制御、風況予測、発電量予測、O&M 等幅広い分野が研究開発の対象となっていることがわかる。AI (Artificial Intelligence)・機械学習についてはまだ論文数が少ないが、近年増加傾向にある。

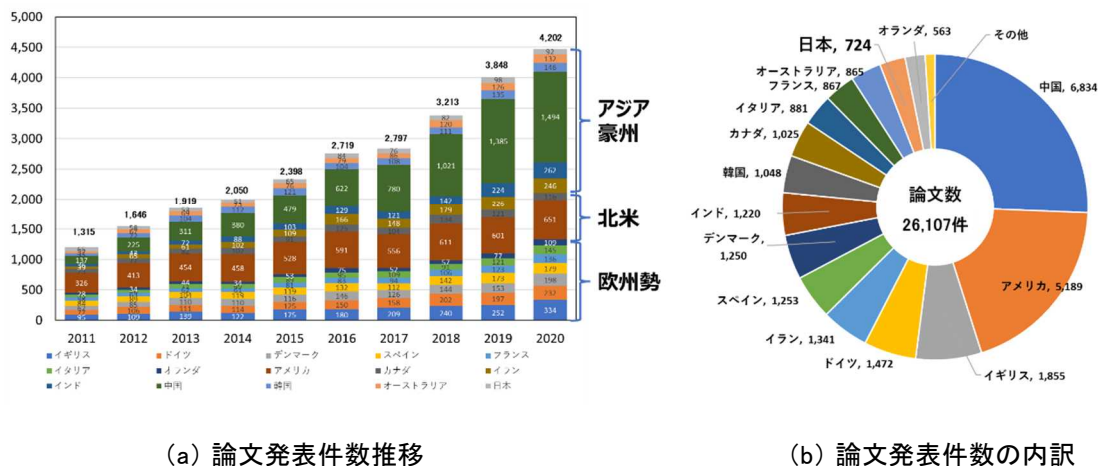


図 21 風力発電関連の論文件数推移(2011~2020 年)

出典: Web of Science™ を用いた検索結果を基に NEDO 技術戦略研究センター作成(2021)

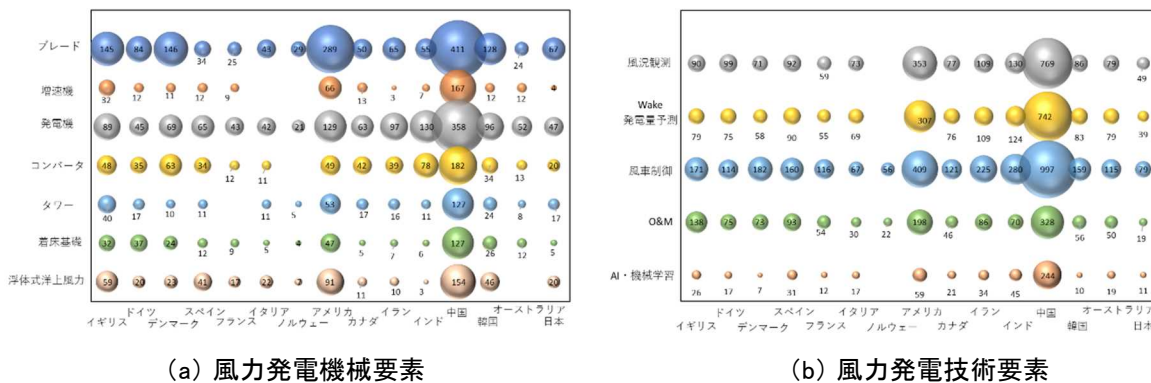


図 22 風力発電関連の国別論文発表件数推移(2011~2020 年)

出典: Web of Science™ を用いた検索結果を基に NEDO 技術戦略研究センター作成(2021)



### (5) 浮体式洋上風力の開発状況

日本は欧州などと比べて着床式に適した遠浅な海域が少なく、急峻な海底地形の海域が多い。このため、浮体式に適した海域が着床式の 5 倍程度存在する(図 23)。JWPA(Japan Wind Power Association: 日本風力発電協会)の見積もりによれば、陸上風力で 210GW<sup>34</sup>、着床式洋上風力で 128GW に対して、浮体式洋上風力で 424GW<sup>35</sup>と他に比較して非常に大きな風力発電ポテンシャルが存在することが示されており、浮体式洋上風力の開発が大きく期待されている。

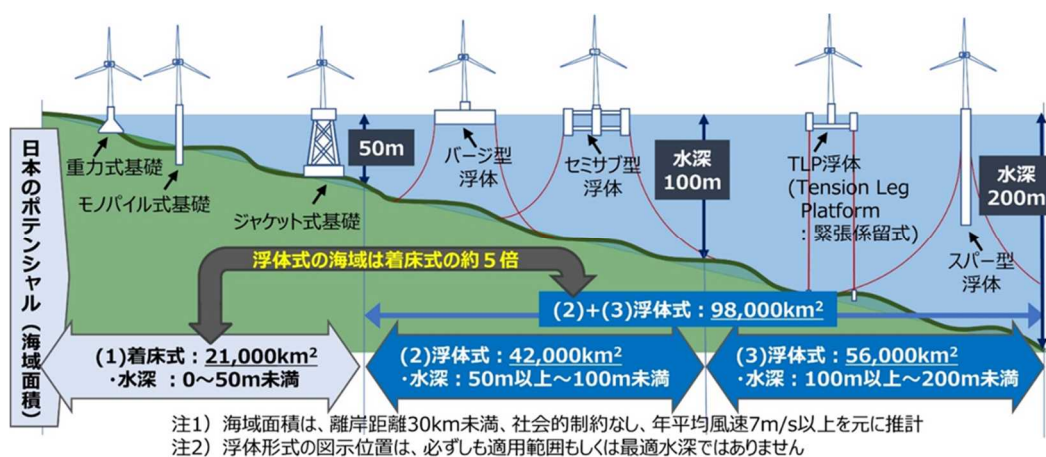


図 23 洋上風力の形式と日本におけるポテンシャル

出典: 各種資料を基に NEDO 新エネルギー部作成 (2021)

<sup>34</sup>風力発電導入ポテンシャルと 中長期導入目標 V4.3.(花岡 隆夫、風力エネルギー、JWPA、Vol.39 No.1, 2015)

<sup>35</sup>第 1 回 洋上風力の産業競争力強化に向けた官民協議会資料 4-1(JWPA、2020)  
[https://www.meti.go.jp/shingikai/energy\\_environment/yojo\\_furyoku/001.html](https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/yojo_furyoku/001.html)

浮体式洋上風力発電技術の開発状況について比較すると、図 24 に示すように欧州においてもまだ開発途上にある。日本で開発された複数の浮体については比較的早い段階で 10MW 未満の実機による実証が行われた。欧州では複数のプロジェクトが同時並行して進展している。世界では、表 3 に示すように 2021 年時点で 123MW の浮体式洋上風力発電設備が実証または運用されている。日本は 2019 年の時点で計 22MW の導入実証を行うとともに一部で設備撤去の実証まで行っており、技術的には競争状態にあると言える。

- 足下では水深の浅い海域で、欧州で技術が確立した着床式の導入が進むが、浮体式は、欧州においてもまだ開発途上。造船業を含む新たなプレーヤーの参入余地も期待される。
- 欧州では、複数のプロジェクトが同時並行して進展。1 基での実証の後、複数機による実証でプロジェクトを洗練させ、商用に至る計画が一般的。

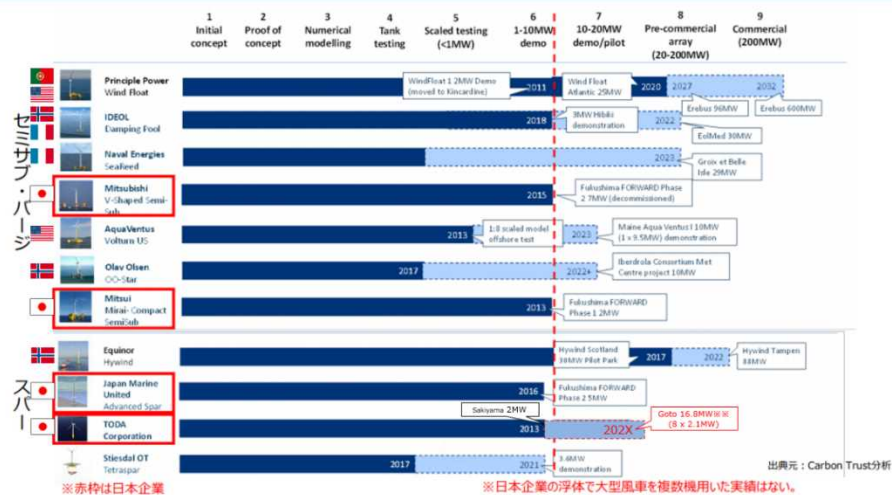


図 24 浮体式洋上風力発電技術の開発状況

出典：第 2 回グリーン電力の普及促進分野 WG 資料 5(経済産業省・資源エネルギー庁、2021)<sup>36</sup>  
を基に NEDO 技術戦略研究センターにて国籍などを追記(2021)

表 3 実証中または運用中の浮体式洋上風力発電の設備量 (MW)

	2019	2020	2021
China			5.5
France	2	2	2
Japan	22.06	19.006	5
Norway	2.9	2.3	5.9
Portugal	25	25	25
South Korea		0.75	
Spain	2.2		
Sweden	0.03	0.03	
United Kingdom	30	30	80
Total	84.19	79.086	123

出典：Offshore Wind Market Report 2022 Edition (DOE、2022)<sup>37</sup>等を基に NEDO 技術戦略研究センター作成

<sup>36</sup> [https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green\\_innovation/green\\_power/002.html](https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/green_power/002.html)

<sup>37</sup> <https://www.energy.gov/eere/wind/articles/offshore-wind-market-report-2022-edition>



#### 1-3-4 ベンチマーキングのまとめ

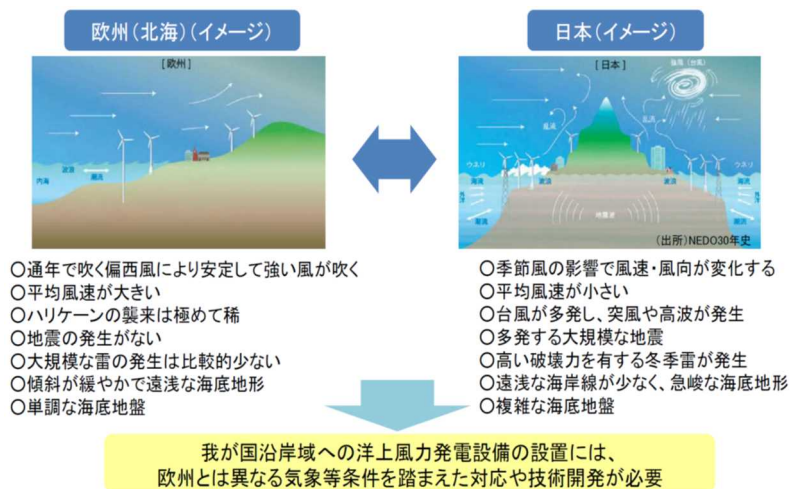
欧米、中国では多くの風力発電が導入され、発電容量の約 20%を占める国もある中で、日本は他国に比べ導入のスピードが遅い傾向にある。そのような状況の下、日本でも 2030 年までに洋上風力 10GW、2040 年までに 30～45GW の案件形成という意欲的な目標が示され、2030 年のエネルギーミックスでは 23.6GW を風力発電が担うとされるなど、風力発電の大量導入を着実に進めていくことが求められている。

風車市場は欧米の三大メーカーの寡占が進み、そこに中国メーカーが食い込んでいる状態である。日本企業が 2019 年に大型風車製造から撤退している一方で、風車部材・機器では一定のシェアを持つ日系企業が複数存在している。特許や論文の分析では技術的にも欧米が先行しているが、欧米などでの傾向を踏まえると、日本においても風力発電の導入が進めば研究開発も進み、特許や論文の数が増えていく期待はある。

風力発電の導入が先行する欧州における自然環境と比較すると、図 25 に示すように日本には雷、台風、地震、津波など、欧州にはない厳しい自然環境がある。そのため、これまでも自然事象による故障や事故が少なからず発生していた<sup>38</sup>。また、アジア各国でも強い台風が頻繁に発生するなど同様の厳しい自然環境にあることから、日本を含むアジアでの風力発電の導入拡大において、欧州で実績のある技術をそのまま適用することは難しい。日本には雷、台風、地震、津波等に関する観測データと、これらの厳しい自然環境に対応する豊富な経験や実証データに基づく各種の技術や知見があり、それらを活かすことで、日本を含むアジアの厳しい自然環境に対して耐性を持つ風力発電技術の確立に向けて貢献が期待される。

---

<sup>38</sup> NEDO 2021 年度新エネルギー成果報告会 風車運用高度化技術研究開発(風車故障事故に関する国内外の動向調査)(風力エネルギー研究所、2021)などによると、日本における風車故障・事故発生の要因として自然事象が最も多い傾向にある。



**図 25 欧州と日本の自然環境の違い**

出典: 第 1 回 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資料 3(国土交通省、2021)<sup>39</sup>

遠浅な海域が少ない日本において導入ポテンシャルの大きい浮体式洋上風力は、技術的に世界的な競争状態にあるが、日本はその経験や知見においてアドバンテージがある<sup>40</sup>。そのため日本において風力発電の導入を拡大していくには、浮体式洋上風力を中心として、浮体式基礎の製造、輸送・施工に加えて、電気システムや O&M、調査開発等の風力発電に共通の基盤技術の開発を行い、そこで得られた知見や技術を着床式洋上風力や陸上風力へ波及させていくことが方法として考えられる。洋上風力の普及拡大にはサプライチェーンや送電網、港湾といったインフラ等の環境整備も求められることから、浮体式を中心としてこれらの環境整備が進むことにより、技術開発の進展とあわせてそれぞれの分野における普及拡大の波及効果も期待できる。

以上のことから、導入拡大が期待される洋上風力、中でも浮体式洋上風力に焦点を当て、その技術課題の解決やサプライチェーンの整備、人材育成等の産業基盤整備を進めることにより、陸上風力を含めた風力発電全体に波及効果をもたらすことを目指す。

<sup>39</sup> [https://www.mlit.go.jp/kowan/kowan\\_tk6\\_000073.html](https://www.mlit.go.jp/kowan/kowan_tk6_000073.html)

<sup>40</sup> NEDO 浮体式洋上風力発電技術ガイドブック(NEDO、2018)  
[https://www.nedo.go.jp/library/fuuryoku\\_guidebook.html](https://www.nedo.go.jp/library/fuuryoku_guidebook.html)

## 2 章 解決・実現手段の候補

### 2-1 実現のための課題

1-3-3 項で述べたように、日本国内では海外に比べて風力発電のコストが高く、高い導入目標を達成するにはコスト低減が鍵となる。図 16 で示した欧州における風力発電コストの削減見通しを見ると、浮体式は CAPEX の削減余地が大きく、OPEX の削減も期待できる。一方で、図 15 で示したように CAPEX、OPEX とともに様々な技術要素が複合していることから、特定のボトルネックを見つけて解消することで全体のコスト低減が図れるわけではなく、サプライチェーン全般にわたりコスト低減を目指していくというアプローチが必要になる。すなわち、浮体単体の低コスト化だけでは十分ではなく、様々な技術課題の解決による浮体システム全体の低コスト化が求められるとともに、運転維持費の低コスト化も必須である。欧州の着床式では基礎の量産化に加え、港湾などのインフラの充実や強固なサプライチェーンを背景として大量施工を効率的に実現し、CAPEX を低減してきた。このことから、浮体式においても浮体の量産化に加え、効率的な大量施工を実現するための港湾などのインフラ整備、サプライチェーン強化を総合的に進めることで、一層のコスト低減が期待できる。

また、日本においては、風車故障・事故発生の要因として自然事象が最も多いことが報告されている<sup>41</sup>。加えて、図 26 に示すとおり、日本では同じ故障モード<sup>42</sup>でも欧州よりダウンタイムが長い傾向にある。そのため、自然事象による風車故障の多さと故障発生によるダウンタイムの長期化が設備利用率低下を招き、発電コストに大きな影響を及ぼしている。台風を考慮したクラス T<sup>43</sup>や乱流、雷などに対応する規格制定により、今後新たに開発する風力発電については自然事象に起因する故障・事故の発生が減少することが期待されるが、故障が発生した場合のダウンタイムが長い傾向は依然として課題として残る。

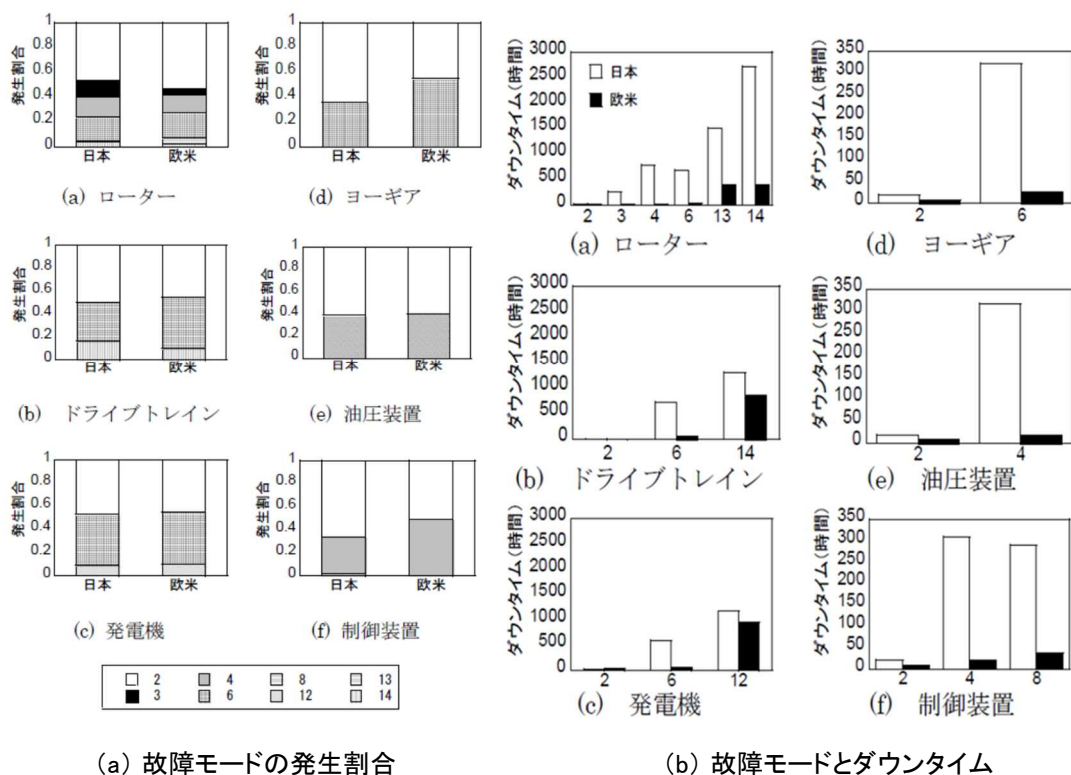


図 26 風力発電設備故障モードの分析

出典：風車の故障モード影響解析に基づく発電コストの評価と国際比較  
(菊地ら、第 42 回風力エネルギー利用シンポジウム予稿集、2020)

<sup>41</sup> NEDO 2021 年度新エネルギー成果報告会 風車運用高度化技術研究開発(風車故障事故に関する国内外の動向調査)(風力エネルギー研究所、2021)

<sup>42</sup> 故障モード(Fault Type Class: FTC):オランダ国立研究所が提案している故障分類の方法で、数字が大きいほど修理のための要員、時間が多くなる。

<sup>43</sup> 風車の設計条件を定める IEC 規格 IEC61400-1 において、台風を考慮した極値風速 57m/s に耐えることができる風車のカテゴリーを表す。

ダウンタイムが長くなる原因として、サプライチェーン上の問題がある。風力発電設備の修理を行う場合、風車メーカーやその製造拠点がなく日本では、大型部品は風車メーカーのある欧州、あるいは製造拠点となっている中国から輸送する必要がある。それに要する日数は、欧州からは50～60日程度、中国からは7～14日程度となる(図27)<sup>44</sup>。加えて部品ストックがない場合には、部品メーカーへの発注期間が追加で必要となる。さらに、大型部品の修理・交換には多数の技術者を要するため、技術者の手配にかかる時間も必要である。したがって、発電コストを低減するためには、設備費を削減するだけでなく、国内に強靱なサプライチェーンを構築することや、技術者を育成することが求められる。

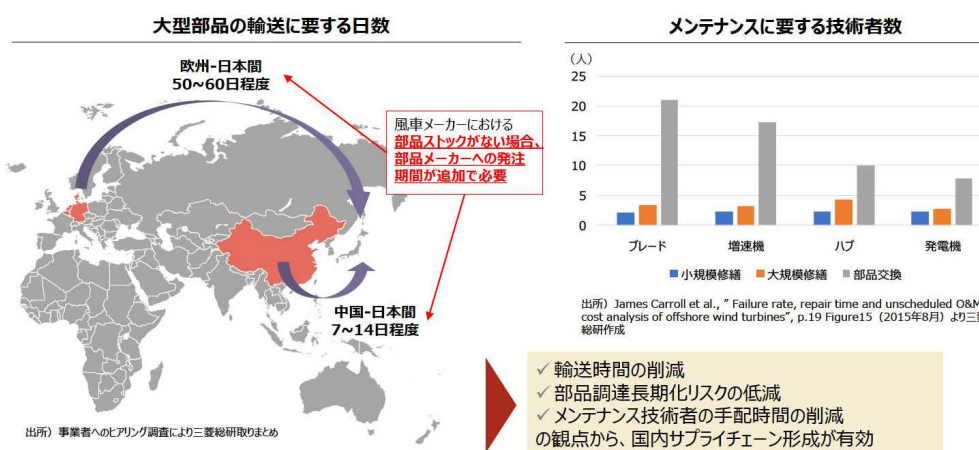


図 27 部品調達に要する日数とメンテナンスに必要な技術者

出典: 洋上風力に係る官民連携の在り方の検討(サプライチェーン形成に向けた仕組みの検討等)のための調査(三菱総合研究所、2020)

## 2-2 実現手段の候補

国内に大型風車メーカーが存在しない日本においては、海外の風車メーカーに頼らなければ風力発電の導入が進まない状況にある。海外風車メーカーは、低コスト化と安定調達の観点から風車プラットフォームの絞り込みとグローバルサプライチェーンの強化を戦略としているため、日本市場のみに特化した風車の開発やサプライチェーンの構築を望むことは現実的ではない。その一方で、風車の素材・部品だけではなく、他の産業における部材・機器技術など、日本が保有している高度な技術に対する期待がある。したがって、これらの国内メーカーが海外風車メーカーとの連携や協業を進めることができ、グローバルサプライチェーンの中で一定の役割を發揮することができるようになれば、日本の風力発電のコスト低減、導入量の拡大、国内調達比率

<sup>44</sup> [https://www.meti.go.jp/meti\\_lib/report/2019FY/000397.pdf](https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2019FY/000397.pdf)

向上につながることを期待できる。また、日本の厳しい自然環境に適用可能な遠隔保守技術の開発を O&M 企業によって開発することは、海外風車メーカーだけに依存しないメンテナンスの担い手の育成につながる期待があるが、技術開発に必要な風車の運転データ等の取得には風車メーカーとの連携が不可欠である。

このようなことから、国際的に競争状態にある浮体式洋上風力発電を中心として、雷、台風、地震、津波等に対する耐性を持ち、かつ低コストな風力発電を実現するための技術を海外風車メーカー等と連携・協業して開発していくことが、国内の導入目標を実現する手段であると考えられる。さらに、このような技術開発により日本と類似の厳しい気象条件となるアジアへの展開も期待できる。以上のことを実現するための技術開発の候補について、以下に例示する。

### (1) 浮体式洋上風力の低コスト化と導入拡大のための技術開発

遠浅な海域が少ない我が国においては浮体式洋上風力の導入拡大が重要である。浮体の技術については欧州でもまだ開発途上であり、技術的には競争状態にある中で、日本は、五島沖、福島沖、北九州沖などでの実証試験において厳しい自然環境への適応に成功した浮体技術を保有している。今後、低コスト化と導入拡大を図るためには、大規模な WF への展開を見据えて、浮体の量産化技術や浮体式風車の連続組立技術、効率的な施工を可能とする係留システム技術、電気システム技術などの開発を急ぐ必要がある(図 28 図 28)。

これらに加えて、洋上で施工を効率化するため、港湾や港湾後背地の整備などのロジスティックを含めたサプライチェーンの最適化も必要となる。

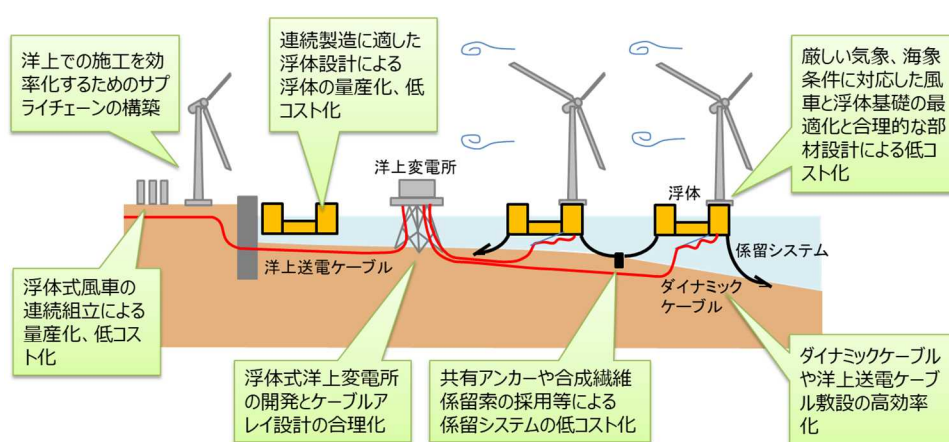


図 28 浮体式洋上風力の低コスト化に向けた主な技術課題

第 3 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(経済産業省、2021)<sup>45</sup>  
を参考に NEDO 技術戦略研究センター作成(2021)

<sup>45</sup> [https://www.meti.go.jp/shingikai/energy\\_environment/yojo\\_furyoku/sagyoku\\_bukai/003.html](https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/yojo_furyoku/sagyoku_bukai/003.html)



## (2) 日本を含むアジアの自然環境に適した風力発電技術の開発

日本を含むアジアの厳しい自然環境に対応するためには、台風を考慮したクラス T 規格(図 29)や強い乱流への対応、冬季雷など高い電荷への対応(図 30)のほか、地震や津波などへの対応が必要となる。日本はこれらを国際規格に盛り込むなど、IEC(International Electrotechnical Commission: 国際標準化会議)の活動にも積極的に参加してきた<sup>46</sup>。

日本には雷、台風、地震、津波等に対応する豊富な経験やデータに基づく各種の技術や知見があり、これまで風力以外の分野で培ってきたこれらの技術を風力発電技術の開発に活用していくことも期待できる。調査結果<sup>44</sup>によると、国内には幅広い分野で風力市場に既に参入あるいは参入希望を示している部材・機器メーカーが存在している。海外風車メーカーに新たに採用されるためには海外認証機関で認証を取得する必要があるなど、部材・機器メーカー単独ではハードルが高いが、一方で、海外風車メーカーは日本の持つ高度な生産技術等への期待が高く、ナセルの組み立て工場を日本に設置するなど、WF 開発と歩調を合わせる形で協業も進んでいる。このようなことから、開発事業者が中心となるなどして、海外風車メーカーが必要とする技術開発に国内の部材・機器メーカーも参画ができるような協業体制を構築することが求められる。それにより、国内部材・機器メーカーの開発した技術が大型風車に実装される可能性が高まるとともに、その技術開発に貢献したメーカーがグローバルサプライチェーンに参入を果たしていくことも期待できるようになる。

また、こうした技術開発の結果、部材・機器メーカーが数多く参入することができるようになれば、海外風車メーカーのグローバルサプライチェーンと国内拠点を中心とした国内サプライチェーンといった二重のサプライチェーンを構築でき、災害等で国内の部品生産が滞った場合にはグローバルサプライチェーンを活用するといったリスクヘッジにもなり得る。

<sup>46</sup> IEC 62400-1 Ed.4.0 風力発電システムー第 1 部: 設計要求事項、IEC 62400-24 Ed.2.0 風力発電システムー第 24 部: 避雷など。

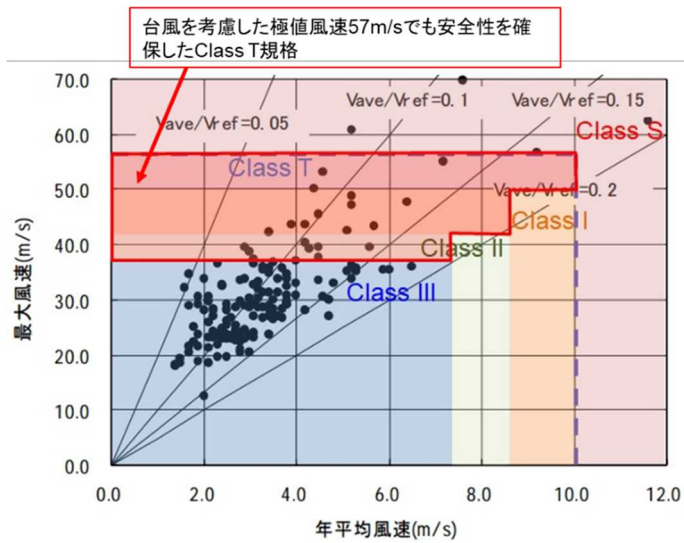


図 29 日本の平均風速・最大風速分布と IEC61400-1 の規格

出典：日本型風力発電ガイドライン 台風、乱流対策編(NEDO、2008)<sup>47</sup>を基に  
NEDO 技術戦略研究センターにて IEC61400-1 規格を追記(2021)

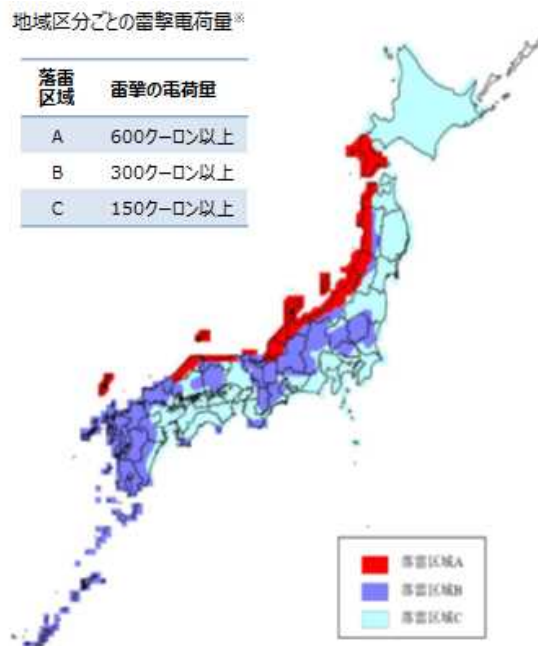


図 30 日本の風車設計で想定すべき雷撃電荷量

出典：風力発電のサイト適合性評価手法(JEMA、2015)<sup>48</sup>  
発電用風力設備の技術基準の解釈(経済産業省、2022)<sup>49</sup>を基に NEDO  
技術戦略研究センターにて各区域の想定雷撃電荷量を追記(2022))

<sup>47</sup> <https://www.nedo.go.jp/content/100107254.pdf>

<sup>48</sup> [https://jema-net.or.jp/Japanese/res/wind/images/site\\_conformity\\_assessment\\_method.pdf](https://jema-net.or.jp/Japanese/res/wind/images/site_conformity_assessment_method.pdf)

<sup>49</sup> [https://www.meti.go.jp/policy/safety\\_security/industrial\\_safety/law/files/20220624-1.pdf](https://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/law/files/20220624-1.pdf)



### (3) O&M 技術の強化

海外風車メーカーは、利益を出しにくい風車本体の販売から長期保守契約による利益確保に軸足を移し、風車の保守技術や運転データの大部分をクローズにする戦略を採っている。故障予測や予知保全の技術開発では、風車の運転データと BOP (Balance of Plant: 発電システムの風車以外の部分) を含めた状態監視データを、ビッグデータ解析などを用いて分析する必要があるが、このような一連のデータを O&M 企業が直接入手することは難しく、単独で技術開発を行うことは困難である。

一方で、開発事業者が風車メーカーとは別に独自の SCADA<sup>50</sup> や CMS<sup>51</sup> を設置する等、契約条件によっては必要なデータを取得することは可能である(図 31)。したがって、開発時点から開発事業者が独自にデータを取得する方針を決定しておく必要があるが、それによって取得したデータを開発事業者と O&M 企業が連携して有効に活用し、大型風車のメンテナンスについての知見を蓄積して技術力を向上できれば、風車メーカーだけに依存しないようになることが期待できる。このことは、国内事業者の競争力強化につながるとともに、風車メーカーの長期保守契約費用の高止まりを避け、O&M コストを低減するためにも有効である。これらのことから、開発事業者を通じた風車運転データの取得による国内での O&M 技術の強化は極めて重要である。

将来的には、風車の詳細なデータや運転、運用データを、開発事業者、風車メーカー、O&M 企業がオープンまたはクローズを明確にして有効に活用できるオープンプラットフォームを国内で構築し、適切に運用することを目指すことが望ましく、これができるれば日本の風力発電産業の競争力強化につながる。

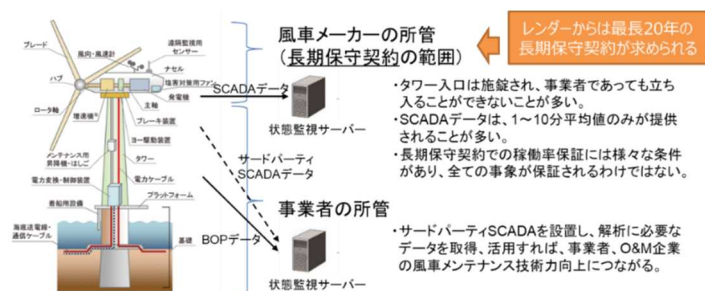


図 31 風車の保守における風車メーカーと事業者の所管区分

出典: NEDO 再生可能エネルギー技術白書第 2 版 (NEDO、2014)<sup>52</sup>を基に  
NEDO 技術戦略研究センターにてデータ取得について加筆 (2021)

<sup>50</sup> SCADA: Supervisory Control And Data Acquisition 機器や設備からデータを集めて管理したり、それを制御に使ったりするシステム。

<sup>51</sup> CMS: Condition Monitoring System 機器や設備に取り付けられたセンサーからのデータを集め、状態を監視するシステム。

<sup>52</sup> [https://www.nedo.go.jp/library/ne\\_hakusyo\\_index.html](https://www.nedo.go.jp/library/ne_hakusyo_index.html)

## 2-3 技術開発の方向性

前項までに述べた課題とその解決、実現手段の候補を踏まえて、技術開発の短中期的な方向性について示すとともに、中長期的な方向性についても述べる。

洋上風力の産業競争力強化に向けた官民協議会において、2021年4月に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が策定され、洋上風力に関する技術課題の整理が行われた。この技術課題に対して、浮体式洋上風力発電の早期の社会実装を目指し、グリーンイノベーション基金事業「洋上風力発電の低コスト化プロジェクト」<sup>53</sup>が着手されているが、2050年カーボンニュートラル実現に向けては浮体式に限らず、着床式、陸上風力の全ての方式で導入を加速することが欠かせない。こうした状況を踏まえ、風力発電分野全体を俯瞰して課題を抽出し、解決していく必要がある。

短中期的な方向性としては、前項で示した浮体式洋上風力を中心に置いた技術開発になる。グリーンイノベーション基金事業「洋上風力発電の低コスト化」プロジェクトにより、日本を含むアジアの厳しい環境に適した次世代風車技術や浮体式基礎製造・設置低コスト化技術、洋上風力関連電気システム技術、洋上風力運転保守高度化等の技術開発が2021年度から2030年度までの期間で実施されることになっている。国際競争力を強化する観点からは、本基金事業を基軸として、着床式や陸上風力への波及効果も考慮しながら技術課題を設定して取り組むことが望ましい。また、WF設置に向けた風況観測や地質調査等の調査開発は、風力発電に共通する技術課題であり、この技術開発も求められる。加えて、着床式や陸上風力の導入ポテンシャルを十分に生かすためには、着床式の基礎製造・設置や陸上風力に多い狭い山間地での建造・撤去技術など、それぞれに特有の技術開発も並行して行うことが求められる。

さらに、日本の風力発電の目指すべき将来像として、2050年までに主力電源としての競争力を確立し、カーボンニュートラルに大きく貢献している姿を描いたときに、技術開発の中長期的な方向性としては図32のようにまとめられる。

<sup>53</sup>ニュースリリース「洋上風力発電の低コスト化」プロジェクトに関する研究開発・社会実装計画を策定しました(経済産業省、2021) <https://www.meti.go.jp/press/2021/10/20211001011/20211001011.html>

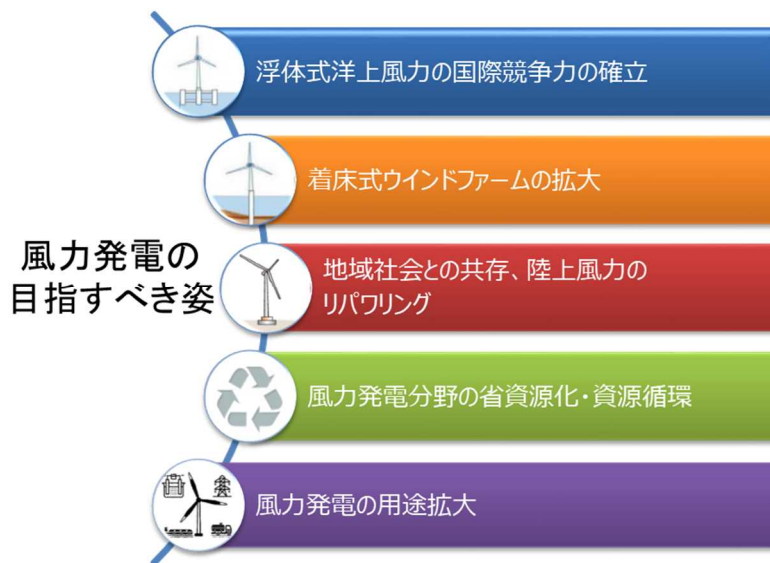


図 32 2050 年に向けた技術開発の方向性

出典：NEDO 技術戦略研究センター作成(2021)

まず、第一に浮体式洋上風力の国際競争力の確立である。すなわち、日本を含むアジアの厳しい自然環境に対応した上で、O&M 技術の強化も含めて洋上風力の低コスト化を実現する幅広い技術開発を行い、国際競争力を強化する。更に大容量化や設置可能域の拡大を実現する技術開発を行い、アジア市場への展開を図る。

第二に着床式ウインドファーム(WF)の拡大である。日本においても WF の更なる大型化、大規模化を進めていく必要があるため、それに伴う課題解決に向けた技術開発である。また、第三に地域社会との共存、陸上風力のリパワリングである。陸上については既に適地での導入が一定程度進んでいるが、一層の導入拡大に向けては、騒音、生物への影響に対する対策等による地域受容性の向上と、リパワリングによる導入ポテンシャルの更なる活用が求められる。加えて、陸上というアクセスしやすい立地を活かして風力発電の全般に関わる新技術の開発や人材のインキュベーション機能を強化していくことは、風力産業の強化において重要な意味を持つ。

次に、大量の風力発電が導入されていった場合を想定すると、第四に風力発電分野の省資源化・資源循環がある<sup>54</sup>。例えば、太陽光発電の導入が進んだ日本では既に太陽電池パネルの廃棄問題が顕在化し、その対策やリユース、リサイクルの検討が進められている。省資源化・資源循環は全産業における課題であり、日本の風力産業においても関連技術の確立は避けて通ることができない。風力発電の導入が進む欧米では風車ブレードのリサイクルに向けた取り組みなどが始まっている。加えて

<sup>54</sup> TSC Foresight 短信「海外トレンド：再生可能エネルギー時代における資源獲得競争」(NEDO、2022) [https://www.nedo.go.jp/library/ZZNA\\_100068.html](https://www.nedo.go.jp/library/ZZNA_100068.html)

設備の長寿命化は、資源循環のサイクルを緩やかなものにし、廃棄物削減や省資源化を可能にする。省資源化・資源循環は、持続可能な風力発電の実現には不可欠であり、大幅なコスト低減にも資する重要課題である。

最後に、第五として、風力発電の用途拡大である。風力発電分野の技術開発の結果、大量導入が実現した場合のCO<sub>2</sub>削減ポテンシャルは、世界全体で毎年78億トンと試算されている。風力発電の導入ポテンシャルを活かして大量導入を進めるためには、風力発電で得られる電力の用途拡大が必要である。解決策としては、大規模な洋上WFで得られるエネルギーを電力として直接利用するだけでなく、水素等の異なる形態で貯蔵し、輸送することなどが考えられる。水素とのカップリングはグリーン水素の普及にも貢献が期待でき、欧州でも検討が始まっている。しかし、国や地域によってエネルギーシステムの特徴が異なるため、日本に適した風力発電と水素とのカップリング技術の開発が求められる。風力発電で得られる電力の用途拡大は、強靱なエネルギーシステム構築の観点からも重要な課題である。

以上五つの技術開発の方向性のそれぞれについて、必要な技術開発項目の例も含めて整理したものを表4に示す。先に述べた短中期的な課題解決の過程においても、このような日本の風力発電の目指すべき姿を見据えて技術開発を進めていくことが求められる。

表4 日本が目指すべき風力発電の姿の実現に向けた技術開発項目

分野	重点項目	技術開発項目	中長期的な技術開発項目例	
浮体式洋上風力の国際競争力の確立	浮体式基礎製造 (浮体・係留索・アンカー)	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 一体設計</li> <li>■ 浮体基礎の最適化</li> <li>■ 浮体の重産化</li> <li>■ 係留システムの最適化</li> <li>■ ハイブリッド係留システム</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ メンテナンスフリー技術</li> <li>■ 浮体システムの計測技術</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 係留システムの長期的性能評価</li> <li>■ 深海域への対応</li> </ul>
	浮体式設置 (輸送・施工)	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 低コストの施工技術の開発</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 作業船と輸送システム</li> <li>■ 大規模修繕技術</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ スキルレス施工技術</li> </ul>
	風車	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 風車仕様最適化</li> <li>■ 風車の高品質大量生産技術</li> <li>■ 浮体搭載風車の最適設計</li> <li>■ 次世代風車要素技術開発</li> <li>■ 低風速域向けブレード</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 大型風車の開発</li> <li>■ タワーの高高度化と低コスト化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 次世代制御システム</li> <li>■ 先進的なローターの開発</li> <li>■ 新しい風車技術システムの開発</li> <li>■ 革新的設計の開発</li> <li>■ 風車の認証及び技術基準の開発</li> <li>■ 洋上風車および風車システムの高信頼性設計</li> <li>■ 風車性能に関する全国的なデータセットの作成・運用</li> </ul>
	電気システム (海底ケーブル・洋上変電所等)	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 高電圧ダイナミックケーブル</li> <li>■ 浮体式洋上変電所</li> <li>■ 次世代洋上直流送電技術</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 洋上送電ケーブル敷設の高効率化</li> <li>■ 発電需給の統合予測</li> <li>■ 系統安定化技術</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 複数の洋上PJからの電力を集約するシステムの開発・構築</li> <li>■ 分散型風力発電システム技術の向上</li> <li>■ ダイナミックケーブルの長期的性能評価</li> </ul>
	運転保守	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 運転保守及び修理技術の開発</li> <li>■ デジタル技術による予防保全・メンテナンス高度化</li> <li>■ 監視および点検技術の高度化</li> <li>■ 落雷故障自動判別システムの開発</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ リモートセンシングと予報技術による発電効率向上</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 風車運用に関する全国的なデータセットの作成・運用</li> </ul>
	調査開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 風況観測 (各種ライガーや低コスト風況観測タワー等)</li> <li>■ ウェイク及び発電量予測モデルの高度化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 洋上風力用の気象海象計測データ整備</li> <li>■ 地盤条件データベースの開発</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 長期変動 (地球温暖化等を含む) の影響予測</li> <li>■ 複雑なまたは特殊なサイトのための新しいサイト調査</li> </ul>
着床式ウインドファームの拡大	着床式基礎製造 (モノパイル・ジャケット等)	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 複雑な地質・厳しい気象海象条件に対応した基礎構造</li> <li>■ タワー・基礎接合技術の高度化</li> <li>■ 基礎構造物用鋼材の高強度化・低コスト化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 基礎溶接技術の高度化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 基礎の長期的性能評価</li> </ul>
	着床式設置 (輸送・施工)	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 低コスト施工技術の開発</li> <li>■ 洗掘防止工の高度化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ ロジスティクスの高度化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ スキルレス施工技術</li> </ul>
地域社会との共存、陸上風力のリパワリング	陸上基礎製造	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ タワー・基礎接合技術の高度化</li> <li>■ 基礎構造物用鋼材の高強度化・低コスト化</li> <li>■ 低コスト施工技術の開発</li> <li>■ 分割型ブレード</li> <li>■ 山間地等における既設風車部品修繕、交換</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 基礎溶接技術の高度化</li> <li>■ ロジスティクスの高度化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 社会受容性向上のための技術 (環境、生物保護)</li> </ul>
風力発電分野の省資源化・資源循環	陸上設置	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 山間地等における既設風車部品修繕、交換</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 洋上風車の長寿命化技術</li> <li>■ ブレード侵食防止技術</li> <li>■ ブレードリサイクル技術</li> <li>■ 撤去・リサイクル</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 浮体リユース技術</li> </ul>
風力発電の用途拡大	風車運転保守	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 既設風車寿命評価、延命</li> <li>■ 山間地等における低コスト解体技術の開発</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 水素や蓄電池等と組み合わせた強靱なエネルギーシステム</li> <li>■ グリーン水素の普及拡大</li> </ul>

出典: NEDO 技術戦略研究センター作成 (2021)

### 3章 おわりに

風力発電、とりわけ国内に大きなポテンシャルを有する洋上風力発電は、2050年のカーボンニュートラル実現に向けた再エネ主力電源化の切り札として位置づけられている。2030年に23.6GWという風力発電の導入目標や、2050年のカーボンニュートラル実現に必要とされる導入量約90GWを達成するためには、日本を含むアジアの厳しい自然環境に適合し、かつ経済性を満足する風力発電技術の確立が不可欠である。さらに、開発された技術の社会実装を進め、持続的な風力発電の運用を実現するためには、国内の風力発電産業全体の強化も不可欠となる。そのためにはWF基本設計や調査、製造、設置、O&M等の様々な工程において海外事業者と連携・協業しながら国際競争力を高めていく必要がある。

今後、日本に適した風力発電のエコシステムを確立していくためには、国内事業者が早期にWF基本設計技術を獲得して海外メーカーとの戦略的協業が可能なレベルにまで競争力を高める必要がある。また、WF基本設計や風車設計等について高い技術力を持った国内技術人材の裾野の拡大を図るなど、中長期にわたる息の長い人材育成の取り組みも必要である。国内技術人材の厚みを増していくことは、国内の事業者を含めた風力発電産業全体の強化につながるだけでなく、EPC<sup>55</sup>の各段階において適切なリスク評価とコスト評価を広範囲で行えるようになり、資金調達の際に必要な費用の低減も含めた、日本の風力発電の更なる低コスト化につながる波及効果も期待できる。加えて、風力発電の大量導入時代に向けては、低コスト化や信頼性向上だけでなく、風力発電分野における省資源化や資源循環、風力発電で得られる電力を活用した水素とのカップリング等による用途拡大など、風力発電を持続可能なエネルギー源として利活用していくための技術開発課題が存在することも指摘した。

本レポートでは、カーボンニュートラルを実現するための風力発電システムに関する技術課題を、短中期的なものを中心に、中長期的なものも含めてまとめた。特に、導入拡大が期待される洋上風力、中でも浮体式洋上風力に焦点を当て、その技術課題の解決やサプライチェーンの整備、人材育成等の産業基盤整備を進めることで、陸上風力を含めた風力発電全体に波及効果をもたらすことが重要であることを指摘した。日本の風力発電技術がアジア、ひいては世界のカーボンニュートラルに貢献する将来像の実現に向けては、技術的な側面だけではなく多面的な観点から総合的な戦略を策定し、取り組みを進めることが必要である。

---

<sup>55</sup> EPC: 設計(Engineering)・調達(Procurement)・工事(Construction)

技術戦略研究センターレポート

# TSC Foresight Vol.111

風力発電分野の技術戦略策定に向けて

2023年 4月28日発行

TSC Foresight Vol.111 風力発電分野 作成メンバー

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構  
技術戦略研究センター(TSC)

■センター長 岸本 喜久雄

■センター次長 飯村 亜紀子

■サステナブルエネルギーユニット

・ユニット長 仁木 栄

・フェロー 矢部 彰

・主任研究員 松田 好司

河野 孝昭 (2022年3月まで)

家村 正三 (2021年6月まで)

・研究員 西田 啓之 (2022年3月まで)

岡田 満利

菫蒲 一歩 (2022年6月まで)

柳瀬 公紀

・フェロー 太田 健一郎

国立大学法人 横浜国立大学 名誉教授

安井 至

一般財団法人 持続性推進機構 理事長 (非常勤)

植田 譲

東京理科大学 工学部 電気工学科 教授

小山 珠美

平田機工 (株) 社外取締役

■新エネルギー部

・統括研究員 佐々木 淳 (2022年3月まで)

・統括研究員 伊藤 正治 (2021年10月まで)

・主任研究員 大和田 千鶴

・主査 三枝 俊介

・主任 高原 亮策

・主任 山家 美歩

・職員 酒井 なつ美

●本書に関する問い合わせ先

電話 044-520-5150 (技術戦略研究センター)

●本書は以下 URL よりダウンロードできます。

<https://www.nedo.go.jp/library/foresight.html>

本資料は技術戦略研究センターの解釈によるものです。  
掲載されているコンテンツの無断複製、転送、改変、修正、追加などの行為を禁止します。  
引用を行う際は、必ず出典を明記願います。