

日本における浮体式洋上風力導入の課題と展望 (2)

産業政策としての浮体式洋上風力

一般財団法人日本エネルギー経済研究所

關 思超・中村 博子・永田 敬博・柴田 善朗

はじめに

国土が狭隘で再生可能エネルギー(以下、「再エネ」)の適地が限られる日本にとって、洋上風力発電は再エネの導入拡大において有望な技術である。しかし、日本周辺の海域は、技術が成熟している着床式洋上風力発電に適する水深 50~60m の水域が限られており、浮体式洋上風力発電が必要となる。また、世界有数の面積を有する排他的経済水域(EEZ)を活用した洋上風力発電の開発を進めることが喫緊の課題となっている。

日本政府も「GX 実現に向けた専門家ワーキンググループ」において、今後の方向性として「浮体式に特化した導入目標の策定により、事業者の予見性を確保し国内外の投資を促進」を掲げているが、浮体式洋上風力を核とした具体的な産業戦略を描くことの重要性が増している。

実証事業は技術の確立に向けて必要であるが、グリーンイノベーション基金フェーズ 2(浮体式実証)を含め、現在進められている浮体式洋上風力の実証事業は小規模であり、300~500MW 以上のプロジェクトを中心に開発する国外風力タービンブレードメーカーにとっては魅力的な案件形成にはつながらない。浮体式洋上風力の進展を日本で図っていくためには、技術実証と同時に、既に確立されている技術をベースにした大規模実プロジェクトを立ち上げることで、日本が巨大で魅力的な市場を有することを国外の風力タービンブレードメーカーに向けて明確に示すことも重要である。

本レポートは、日本における浮体式洋上風力発電導入の課題と展望について「EEZ における風力発電の導入について」「産業政策としての浮体式洋上風力」「日本の浮体式洋上風力の導入拡大に向けて」の3回のシリーズの第2回である。

1 洋上風力発電の大規模導入の技術的課題とソリューション

日本は国土が狭隘で、山岳部の割合が大きいため、陸上でのウィンドファームの設置は制約があるが、海に囲まれているため、洋上風力は大規模展開が期待できる。特に、日本の領海と排他的経済水域(EEZ)を合わせた面積は世界で6番目に大きく、EEZ を含めると、日本の洋上風力のポテンシャルが 500~900GW に達するという調査結果もある^{1,2}。ただし、海岸線から 10km 以内の水域であっても日本の領海は着床式洋上風力発電に適する水深 50~60m を超えているところが多く³、EEZ はさらに深くなるため、浮体を係留により位置保持する浮体式洋上風力の技術を適用せざるを得ない。

¹ 自然エネルギー財団(2023),「[分析レポート]日本の洋上風力発電ポテンシャル領海と排他的経済水域」,
https://www.renewable-ei.org/pdfdownload/activities/REI_Analysis_JapanOSWPotential.pdf

² 株式会社エックス都市研究所、アジア航測株式会社(2020)「令和元年度再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報等の整備・公開等に関する委託業務報告書」, 環境省, <https://www.renewable-energy-potential.env.go.jp/RenewableEnergy/report/r01.html>

³ 長井浩, 池ヶ谷辰哉, 伊藤正治, 中尾徹(2010),「わが国沿岸海域における洋上風力発電の期待可採量」『風力エネルギー』Vol.34, No.1, https://www.jstage.jst.go.jp/article/jwea/34/1/34_103/_pdf

浮体式洋上風力発電は、欧州などでは既に商用化段階に入っているが、陸上風力や着床式洋上風力に比べて導入実績が少なく、技術面のみならず、関連インフラや設置に係るエンジニアリング、コストなどの課題が存在する。

1.1 洋上風力の技術的課題

浮体式ウィンドファームは、風力タービン、浮体構造物、係留索・アンカー、電力ケーブル、変電所などで構成される。以下では主要な構成要素について、課題や期待されるソリューションを整理する。

1.1.1 浮体構造物と風力タービン

現在主流となっている浮体式洋上風力は、浮体構造物に水平軸型風力タービンが搭載される構造である。浮体式の風力タービンには波浪動揺を踏まえた設計が求められるが、陸上風力や着床式洋上風力で広く実績があることから、水平軸型風力タービンが採用される場合が多い。

浮体式洋上風力の開発は、英国などで活発に進められてきた。水深、海底の形状、環境条件、漁業などの社会的条件、地震や津波の有無など、海域による違いを考慮して最適な浮体構造物の種類を決めていく必要がある。

陸上、洋上全体の風力タービンの2021年の市場シェアはVestas(ノルウェー、17.7%)、Goldwind(中国、11.8%)、Siemens Gamesa(スペイン、9.7%)、Envision(中国、8.6%)、GE Renewable Energy(米国、8.5%)の上位5社で世界市場の半分強を占めた⁴。このように、風力タービンを供給できるメーカーは限定されていることもあり、洋上風力の建設においては、風力タービンと浮体構造物を個別に手掛ける場合が多い。例えば、2017年に世界初の浮体式洋上風力の商用運転を開始したスコットランド沖合のHywind Scotland浮体式洋上風力サイトでは、主たる運営主体はEquinor社(当時のStatoil)であるが、風力タービンの供給はSiemens Gamesa社が行い、基礎、タワー、係留システムのエンジニアリングおよび調達支援はAibel社が、浮体構造物製作はNavantia-Windar社が手掛けている⁵。

現在、日本には、大型風力タービンメーカーがないため、日本で洋上風力の開発を行うには、風力タービンは海外メーカーに頼らざるを得ない。風力タービンは国際競争が激しく、今後の国内産業の育成が厳しいとしても、浮体構造物に関しては、造船竣工量が世界3位の日本には造船技術の基盤があり、品質管理も優れているため⁶、この分野に特化した国内企業を育てることで、国内外の市場にビジネスを展開していくという戦略が考えられる。ただし、浮体構造物の分野においても、例えば、Gazelle Wind Power社⁷は風や波の影響による風力タービンの揺れを最小化する動的係留システムを備えた浮体構造物の開発を進めるなど、国外では新たな技術開発が進められており、今後、競争が激しくなることが予想される。

1.1.2 係留

係留については、現在、鉄製アンカーチェーンが主流である。しかし、EEZを含む日本の周辺海域では水深が深いため、係留索の重量が非常に大きくなり、製造や運搬が課題になる。この課題に対応するため

⁴ GWEC (2022), "Global Wind Development Market Supply Side Data 2021", <https://gwec.net/wind-turbine-suppliers-see-record-year-for-deliveries-despite-supply-chain-and-market-pressures/>

⁵ 日本貿易振興機構(ジェトロ)調査部・ロンドン事務所(2023年6月),「英国における洋上風力サプライチェーン動向に関する調査～第1部 総論:サプライチェーン～」, https://www.jetro.go.jp/ext_images/_Reports/01/80a7a99f692a5876/20230010_02.pdf

⁶ 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)(2021年4月1日),「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」, https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/yojo_furyoku/dl/roadmap/roadmap20210401.pdf

⁷ Gazelle Wind Power ウェブサイト, <https://gazellewindpower.com/what-we-do/technology/>

に、合成繊維索の可能性も検討されている⁸。合成繊維索は軽量でかつリール状態(巻き状態)で保管可能なことから、作業船の小型化、荷役スペースの縮小化を図ることができる。合成繊維は材料によって耐水性、伸び、強度などの特性が異なり、利用状況に応じた選定が必要になる。なお、英国の浮体式洋上風力の係留索として日本メーカーの合成繊維が採用される事例も見られるほか⁹、国内では秋田沖で鋼製チェーンと合成繊維ロープを併用した「ハイブリッド係留」の試験に取り組んでいる¹⁰。

浮体式洋上風力発電では、深海における海底への係留コストも大きくなる。そのため、素材の開発だけでなく、係留システムの工夫も検討されている。複数の研究^{11,12}で、係留索やアンカーを複数の風力タービンで共有する共有係留システムの導入によって、必要な部品数を減らすだけでなく設置コストを節約できるため、係留コストの低減につながると結論づけている。Equinor 社の Hywind Tampen(ノルウェー)では、アンカーを共有するデザインが採用されており、11 基の風力タービンの係留に 19 個のアンカーを用いるが、5 基の風力タービンに 15 個のアンカーを用いる従来型設計の Hywind Scotland に比べても大きく削減されている。

1.1.3 送電線

浮体式洋上風力では、着床式の場合に比べ離岸距離が長くなることから、送電方法も課題となる。交流(AC)ケーブルの場合は距離による送電ロスが大きく、230kV クラスでは 30~50 km までの送電距離が限界と言われている。直流(DC)ケーブルにすると、長距離でもロスが少なくケーブルの太さも AC の場合に比べて細くできる一方で、変電所が大型化し高コストになるというデメリットがある。

浮体式洋上風力の送電線の大きな技術的課題は、大水深での敷設と動揺への対応である。従来の海底電力ケーブルの実績に基づくと水深 300m 程度までは問題ないとされており、現在、より大水深となる浮体式向けに 1,500m 級の深海に敷設可能なケーブルの開発¹³、波浪動揺や潮流による動的挙動への耐性を有するダイナミックケーブルの開発が進められている¹⁴。また、製造性、コスト、施工性の改善などの取組みも見られる¹⁵。

直流海底ケーブルについては、日本企業¹⁶が独自の材料開発を行っており、この分野における日本の優位性が期待できる。

⁸ 中條俊樹(2021),「浮体式洋上風力発電の合成繊維索を用いた係留系の設計について」(海上・港湾・航空技術研究所 研究発表会), https://www.mpat.go.jp/pdf/202112_2.pdf

⁹ Wind Journal (2023 年 3 月 6 日),「世界初! TLP 方式の浮体式洋上風力発電に合成繊維製ケーブル採用。軽量化でコスト低減」, <https://windjournal.jp/115617/>

¹⁰ ジャパンマリンユナイテッド株式会社(2022 年 8 月 30 日プレスリリース),「GI 基金事業「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」に係るハイブリッド係留の実海域試験の実施について」, https://www.jmuc.co.jp/news/assets/windfarm_scalemodel_20220830.pdf

¹¹ Hang Xu et al (2024), “Shared mooring systems for offshore floating wind farms: A review,” *Energy Reviews* Volume 3, Issue 1, March 2024, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772970223000500>

¹² NREL (2022), “Shared Mooring Systems for Deep-Water Floating Wind Farms: Final Report” prepared for National Offshore Wind Research and Development Consortium, https://nationaloffshorewind.org/wp-content/uploads/142869_Final-Report.pdf

¹³ 桑原諒介他(2022),「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〜 SDGs 達成への貢献〜」『古河電工時報』第 141 号, 2022 年 4 月, https://www.furukawa.co.jp/rd/review/fj141/fj141_08.pdf

¹⁴ 谷之木良太他 (2017),「浮体式洋上風力発電用ダイナミックケーブル」『SEI テクニカルレビュー』第 190 号, 2017 年 1 月, <https://sei.co.jp/technology/tr/bn190/pdf/190-09.pdf>

¹⁵ 伊田維斗他 (2022),「洋上風力発電向け非遮水海底ケーブルの水トリー特性」『住友電工テクニカルレビュー』第 200 号, 2022 年 1 月, https://sumitomoelectric.com/jp/sites/japan/files/2022-01/download_documents/J200-07.pdf

¹⁶ 住友電工株式会社ウェブサイト「直流海底ケーブル」, <https://sumitomoelectric.com/jp/products/submarine-cable>

1.1.4 新興テクノロジー

様々な技術的な課題を克服するため、スタートアップ企業を中心に新しいタイプの風力発電の開発が見られる。

World Wide Wind 社の「2重反転垂直軸型タービン(Counter-Rotating Vertical Axis Turbine, CRVT)」は、柱の上部と下部に付いたタービンがそれぞれ逆方向に回ることで、出力が増加する。また、風力タービン後流の乱流(ウェイク)の発生抑制効果によって下流に位置する他の風力タービンへの影響を軽減できる。そのため、タービン同士の距離は半分まで近づけられるため、同じ面積の中により多くのタービンを配置できる。

17

アルバトロス・テクノロジーの「浮遊軸型風車(Floating Axis Wind Turbine, FAWT)」は、ブレードが同一断面形状で長さ方向に分割製造が可能のため、自動化した連続製造プロセスによる大量生産の可能性がある。また、大規模な製造工場が不要で輸送容易という利点もあることから、土地・道路の制約によって製造ヤードの確保や輸送が困難な日本でも、国内での製造・輸送を行うことができる。¹⁸また、同社は2023年5月にJパワー、東電HD、中部電力、川崎汽船と共同研究契約を締結しており、日本政策投資銀行は、設置時のコスト低減、風力タービンの国内製造、ブレード材料などの国内調達を予定していることを評価し、2023年に12月に投資している¹⁹。

これらの技術はまだ技術開発段階にあり²⁰、実証を通じて大型化・商用化に向けた多様な課題の解決が求められる。一方、2009年に創立された浮体式洋上風力に特化したHexicon Power社²¹は、TwinHub(英国)²²などのプロジェクトを、独自のTwinWindという、2基の風力タービンを乗せられる浮体構造物で勝ち取るなど²³、新興企業によるプロジェクト参入も見られる。新技術に対しても、失敗を恐れない迅速な取り組みや、それらを支える基盤を整備していくことが重要だろう。

1.2 産業戦略としての位置付け

浮体式洋上風力の開発においては、陸上風力や着床式洋上風力に比べてより多くの構成要素があり、非常に多くのステークホルダーの関与が必要になる。これらに関連する企業は国内に数多く存在する。陸上風力や着床式洋上風力と共通の要素の関連産業には、タービンブレードの炭素繊維プラスチック(CFRP)製造業者、発電機メーカー、鋼製タワー向けの鉄鋼業などがある。浮体構造物では造船業や建設業、係留索では鉄鋼業や合成繊維などの化学品製造業、海底ケーブルでは電線製造業、組み立て・設置では造船業、建設業、海洋土木工事業などが日本の強みである。

現在、日本には大型風力タービンメーカーがないものの、それ以外の日本の強みが発揮できる業種を基盤として、浮体式洋上風力を核とした産業振興の可能性はある。例えば、造船業や建設業、係留索では鉄鋼業や合成繊維などの化学品製造業、海底ケーブルでは電線製造業、組み立て・設置では造船業、建設

¹⁷ World Wide Wind ウェブサイト, <https://worldwidewind.no/pages/technology>

¹⁸ 株式会社アルバトロス・テクノロジーウェブサイト, <https://www.albatross-technology.com/>

¹⁹ 日本政策投資銀行(2023年12月6日プレスリリース)、「(株)アルバトロス・テクノロジーに対する投資についてー浮体式洋上風車の新たな選択肢となる「浮遊軸型風車」開発を支援ー」, https://www.dbj.jp/topics/dbj_news/2023/html/20231206_204574.html

²⁰ これらの浮体式洋上風力は小型であり、タワーは鉄製でなくアルミニウム、浮体構造物は木材を利用する概念もある。アルミニウムは強度の問題はあるが鉄よりもリサイクルしやすい。木材は国産材を使うことで、国内サプライチェーンの構築に寄与できる可能性がある(3章参照)。

²¹ Hexicon Power ウェブサイト, <https://hexiconpower.com>

²² TwinHub ウェブサイト, <https://www.twinhub.co.uk>

²³ Searade Maritime News (July 8, 2022), “Hexicon wins 15-year package for Celtic Sea floating wind project”, <https://www.seatrade-maritime.com/offshore/hexicon-wins-15-year-package-celtic-sea-floating-wind-project>

業、海洋土木工事業などである。また、新しい発想で技術開発を進めるスタートアップも少なくない。風車メーカーが存在しないオランダ、スペイン、台湾においては、洋上風力の基地港湾整備、周辺産業の育成や振興などを通じて、自国の洋上風力の推進と併せて世界市場シェアの獲得を目指すなどの戦略を打ち立てている事例²⁴があり、今後、日本が浮体式洋上風力を進めるにあたっての参考となるだろう。

日本政府も「GX 実現に向けた専門家ワーキンググループ」²⁵において、今後の方向性として「浮体式に特化した導入目標の策定により、事業者の予見性を確保し国内外の投資を促進」を掲げているが、浮体式洋上風力を核とした具体的な産業戦略を描くことが求められる。

実証事業は技術の確立に向けて必要であるが、グリーンイノベーション基金フェーズ 2(浮体式実証)²⁶含め、現在進められている浮体式洋上風力の実証事業は小規模であり、300～500MW 以上のプロジェクトを中心に開発する国外風力タービンブレードメーカーにとっては魅力的な案件形成にはつながらない²⁷。浮体式洋上風力の進展を日本で図っていくためには、技術実証と同時に、既に確立されている技術をベースにした大規模実プロジェクトを立ち上げることで、日本が巨大で魅力的な市場を有することを国外の風力タービンブレードメーカーに向けて明確に示すことが肝要である。実際、国外では浮体式洋上風力は technology-push の段階を終え、既に market-pull の段階に入っているとされている。

国内生産による国内関連産業の振興を通じた日本の経済への裨益、つまり雇用の創出や経済成長への貢献も同時に考えていくべきである。また、世界的な洋上風力の需要増に伴う供給不足の影響も抑えることができる。この点で、日本政府としては、エネルギー政策として洋上風力のコスト削減のみを目指すのではなく、経済・産業政策の重要な柱として洋上風力を位置付け、具体的な産業戦略を策定すべきである。

2 サプライチェーンの課題とソリューション

2.1 セキュリティの問題

ロシアによるウクライナ侵攻を契機に、改めてエネルギー・経済の安全保障の重要性が認識されている。現行の世界の風力タービンの生産シェアでは中国が全世界の半分以上を占めており²⁸、経済性重視で洋上風力の開発を進める場合は、安価な中国製の風力発電が選択されやすい。しかしながら、製品の特定国への過度な依存は、サプライチェーン遮断時の安定供給に対するリスクが懸念される。洋上風力の導入に当たっては、経済性が重要なファクターではあるものの、上述の課題を踏まえると、エネルギー・経済の安全保障の視点も忘れてはならない。

安全保障上の課題は他にもある。太陽光発電については、パネル製造業者以外の第三者がメンテナンスを行うことができるが、風力発電は風力タービンメーカーにメンテナンスやその他のサービスを依存していることが多い²⁹。特定の風力タービンメーカーやメンテナンス会社に依存している場合は、サイバー攻撃による

²⁴ 永田哲朗 (2019),「風車メーカーが無い国の戦略」, 京都大学大学院 経済学研究科 再生可能エネルギー経済講座 No.139, https://www.econ.kyoto-u.ac.jp/renewable_energy/stage2/contents/column0139.html

²⁵ 内閣官房 GX 実行推進室(2023),「分野別投資戦略等について⑤」,GX 実現に向けた専門家ワーキンググループ第 5 回会合 (2023 年 12 月 7 日開催) 配布資料, https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/gx_jikkou_kai/senmonka_wg/dai5/siryou.pdf

²⁶ 経済産業省(2023 年 10 月 3 日プレスリリース), *op. cit.*

²⁷ 国内の風力発電関連事業者へのヒアリングに基づく。プロジェクトの規模に関わらず、調査や設計に係るエンジニアリングコストや人員は変わらないため、小規模のプロジェクトはコスト効率が悪く受注されにくい。

²⁸ GWEC (2022) *op. cit.*

²⁹ 戸内邦彦・宝川祥子 (2021),「日本における洋上風力発電事業～欧州との違いを踏まえた留意点～」『損保ジャパン RM レポート 221』(2021 年 11 月 22 日), <https://image.sompo-rc.co.jp/reports/r221.pdf>

遠隔監視システムの停止やそれによる稼働停止が起こるリスクがある³⁰。また、他国の風力タービンメーカーによって遠隔管理される場合は、戦争などの有事の際には、同国で管理されている風力タービンが運転を停止され、復旧が困難な大規模停電につながるリスクがある。特に、大規模洋上ウインドファームの場合の影響は重大になると考えられ、運転管理を他国に託すことの大リスクの大きさを重要視すべきである。その他に、国外メーカーに風力タービンの設置を依頼すると、日本の海底地形調査の機会を与えてしまう可能性もあり、防衛上の問題を引き起こすことも懸念される。

全て国産品から構成されるサプライチェーンの構築は現状では難しいが、安全保障の課題に対応するために、可能な限り国産比率を増加することが求められる。米国は中国の太陽光発電の輸入制限をかけ、「インフレ抑制法 (Inflation Reduction Act, IRA) の税制優遇措置によって内製化の促進を図る³¹。日本においては、洋上風力産業界が 2040 年までに 60% の国内調達比率を目指しており³²、着床式洋上風力の基礎やナセル、更には建設や運転管理に必要な船舶の建造も進められている³³。日本政府も、GX サプライチェーン構築支援事業³⁴を通じて国内製造サプライチェーンの構築を目指す。

国内製造に不可欠な人材の育成・確保も重要である。日本では、洋上風力関連のエンジニアや専門作業員の育成に向けたカリキュラム作成やトレーニング施設整備に対する支援も実施している³⁵。現在エンジニアは着床式に集中していることから、今後は浮体式の人材育成も求められる。このような人材育成事業は、今後の脱炭素に向けて衰退の可能性の高い既存他産業からのリスクリングにも貢献する。

2.2 国内サプライチェーンの構築: 素材とリサイクル

浮体式洋上風力のサプライチェーンは調査・設計、港湾の整備、風車・浮体構造物・周辺設備の製造、機材の船での搬送、洋上プラットフォームの建設、送電線(海底ケーブル)の敷設を含む組立・設置、運転・管理、撤去など、多岐にわたる。日本は、欧州各国が強みとするオフショア石油・天然ガス開発の経験はなく、風力ブレードの生産については世界に後れを取っているが、サプライチェーン上の個別の要素技術を有する企業は数多く存在する。

これらの要素技術については、現在の技術の改良とコストダウンを進めていくと共に、機材の製造や運搬における土地制約などの日本固有の事情から生じる課題を解決できるような新たな技術も模索しつつ、サプライチェーンの大部分を自国で賄えるようにすることが、経済・エネルギー安全保障の観点から肝要である。制度的には、国内製造・国内調達を促すために、日本国内での工場やサプライチェーンの構築に対してより強力なインセンティブを提供することが求められる。

国産品比重の増加や国内サプライチェーンの強化に向けては、廃棄部品・部材のリサイクル・リユースも重要な要素となる。従前から、太陽光発電や風力発電の将来的な大量廃棄問題は懸念されており、産業廃棄

³⁰ 例えば欧州では、大手風力タービンメーカー Enercon 社や Nordex 社、メンテナンス会社 Deutsche Windtechnik AG 社などがサイバー攻撃を受けている。(WSJ Pro (April 25, 2022), "European Wind-Energy Sector Hit in Wave of Hacks", <https://www.wsj.com/articles/european-wind-energy-sector-hit-in-wave-of-hacks-11650879000>)

³¹ JETRO (2023 年 4 月 3 日), 「中国製品に対する輸入規制が向かい風に 米国太陽光発電需給逼迫(後編)」『JETRO 地域・分析レポート』, <https://www.jetro.go.jp/biz/areareports/2023/f21b8789fbc9baa0.html>

³² 洋上風力の産業競争力強化に向けた官民協議会 (2020), *op.cit.*

³³ 資源エネルギー庁 (2023 年 9 月 8 日), 「再生可能エネルギーに関する次世代技術について」, 総合エネルギー調査会 省エネルギー・新エネルギー分科会/電力・ガス事業分科会 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 (第 54 回) 資料 1, https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/pdf/054_01_00.pdf

³⁴ 経済産業省 (2023 年 9 月 4 日), 「GX サプライチェーン構築支援事業」(令和 6 年度経済産業省概算要求の PR 資料一覧: GX 支援対策費), https://www.meti.go.jp/main/yosangaisan/fy2024/pr/gx/keisan_gx_01.pdf

³⁵ 資源エネルギー庁 (2023 年 9 月 8 日), *op.cit.*

物の適正処分の観点からリサイクル・リユースの必要性については指摘されている^{36,37}。国内でのリサイクル・リユースを強化したサプライチェーンは、産業廃棄物負荷の軽減を通じた循環型経済の発展や持続可能性の向上だけでなく、安全保障にも貢献できる。リサイクルやリユースについては、これらによってサプライチェーン上の全ての課題を解決できるわけではないものの、経済安全保障の観点からは、取り組みの強化が必須となる。技術開発、経済的支援策や規制のみならず、リサイクルを中心とした静脈産業が国内産業振興・経済への裨益となる絵姿を描くことも大事だろう。

今後、日本において浮体式洋上風力の開発を進め、その中で国内プレーヤーの関与の割合を高めるためには、日本の浮体式洋上風力市場が魅力的であるということ、国外企業向けのみならず、国内企業にもより強力に示さなければならない。そのためには、政府が産業振興策の大きな柱として浮体式洋上風力を確実に推進するという明確な意思表示が必要だろう。

2.2.1 タービンブレード

タービンブレードはこれまで、ガラス繊維強化プラスチック(Glass Fiber Reinforced Plastics, GFRP)が使われてきたが、ブレードの大型化に伴い、風によるたわみによってブレードがタワーに衝突し破損する危険性を避けるために、現在は、剛性の高い炭素繊維強化プラスチック(Carbon Fiber Reinforced Plastics, CFRP)が主流となっている³⁸。CFRPは航空機、自動車、産業機器、日用品でも多用されており、使用後は、多くは産業廃棄物として埋め立て処分されているが、日本ではリサイクルに関する取り組みも見られる^{39,40,41}。CFRPのリサイクル方法は多様であるが、主に、熱分解や化学分解によって樹脂を取り除き炭素繊維のみを回収する。その前工程でCFRPを切断するため元の長さには戻せないことや、リサイクルCFRPは未使用材と比較して力学特性のバラツキが大きいことから、元の用途に再利用することは難しい。したがって、現在は、リサイクルCFRPはコンクリート補強材若しくは射出成形品やプレス成型品に利用されている状況である。

国外では、急速に普及拡大している風力発電の今後のリプレイスによる廃棄物排出対策として、風力タービンブレードのリサイクルに特化した動きが数多く見られる⁴²。材料によっては”blade to blade”のリサイクルは現状では難しいものの、このように、技術開発を含め多様な取り組みが強化されており、今後のリサイクル関連動向は注視すべきである。

2.2.2 タワー

タワーは鋼鉄製なので、使用後はスクラップとして電炉へ投入して新たな製品を製造することはできるが、塗料などの不純物の問題によって、洋上風力タワーに要求される品質水準を満たす製品への生まれ変わり

³⁶ MRI(2015),「平成26年度使用済再生可能エネルギー設備のリサイクル等促進実証調査委託業務 報告書」(平成26年度環境省委託業務), <https://www.env.go.jp/content/900535821.pdf>

³⁷ 資源エネルギー庁(2018年7月24日),「2040年、太陽光パネルのゴミが大量に出てくる?再エネの廃棄物問題」, <https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/taiyoukouhaiki.html>

³⁸ なお、CFRPはタービンブレードの桁材に使われているが、ブレード表面にはGFRPも使われている。

³⁹ 加茂徹(2018),「炭素繊維強化プラスチック(CFRP)のリサイクルの現状と課題」『廃棄物資源循環学会誌』Vol. 29, No. 2, pp. 133-141, https://www.jstage.jst.go.jp/article/mcwmmr/29/2/29_133/_pdf

⁴⁰ 航空機国際共同開発促進基金(2022),「リサイクル炭素繊維のリユース技術」,((公財)航空機国際共同開発促進基金【解説概要 2022-4】), <http://www.iadf.or.jp/document/pdf/2022-4.pdf>

⁴¹ 東レ株式会社ウェブサイト「リサイクル」, <https://www.cf-composites.toray/ja/aboutus/sustainability/recycling.html>

⁴² Wind Europe (February 12, 2020), “Circular Economy: Blade recycling is a top priority for the wind industry”, <https://windeurope.org/newsroom/news/blade-recycling-a-top-priority-for-the-wind-industry/>

は困難と言われている。一方、近年、電炉においても高級鋼を製造する取り組み^{43,44}が見られ、将来的な技術開発によって品質を確保できれば、洋上風力タワーへの再利用の可能性も出てくる。そうなれば、洋上風力基地を核とした鉄鋼の地域内循環が形成されることになり、材料の安定供給・安全保障の強化に貢献できる。

2.2.3 希少金属

風力発電の発電機には永久磁石としてネオジム磁石が用いられていることが多い。希少金属であるネオジム及びネオジム磁石の生産は中国への依存度が非常に高い。経済産業省「永久磁石に係る安定供給確保を図るための取組方針」⁴⁵では、ネオジム磁石の日本国内製造設備増強やリサイクル設備増強などが挙げられている。製造については、2030年時点に見込まれる国内需要量を満たすための生産能力の確保、リサイクルにおいては、2030年までにリサイクル能力を2020年比で倍増、という目標が掲げられている。また、ネオジム代替磁石やネオジム使用量を半減させることが可能なネオジム磁石開発を今後5年程度で行うことも目標としている。国内では、様々な希少金属の回収技術の開発が、アイ‘エムセップ⁴⁶、シーエムシー技術開発⁴⁷、鈴木商会⁴⁸などによって行われている。

2.2.4 風力タービンのリサイクルとリユースにおける課題

たとえ“風力発電 to 風力発電”のリサイクルが困難だとしても、他の用途向けにリサイクルを行うことは、マクロ的な視点で安全保障に貢献する。

リサイクルを促進させるためには、リサイクルの容易さを踏まえた環境配慮設計を導入したり、洋上風力発電プロジェクトの事業者選定における評価ポイントにリサイクルの取り組みを含めることによって、リサイクルやリユースの促進に寄与しうる。また、リサイクルの視点から見ると、浮体式洋上風力の構造変化が必要になるかもしれない。製造、利用、廃棄、運搬、リサイクルという流れを国内に構築することを目的とすると、現在の主流である風力タービンの大型化のみを目指すのではなく、小型化・分割製造(2.1.4 参照)をベースとした大量生産やリサイクル可能性を追求した方向性が日本にとってのソリューションになる可能性も否定できない。

リサイクルを、経済安全保障と併せて、日本の産業や経済への貢献の機会と捉えることも大事である。そのためには、動脈産業のみならず、リサイクルをベースとした静脈産業による産業振興政策の具体的な戦略を立案することが求められる。例えば、ネオジム磁石については、経済性の観点から、使用済みの発電機やモーターをタイに輸出してリサイクルが行われているが、これを国内で循環させる仕組みを構築することで、国内産業の育成を目指す戦略も求められる。

⁴³ 電気新聞(2019年10月4日)、「電炉の技術革新でCO2フリー化が視野に入った製鉄業。実現すれば再エネの大型調整力にも」(脱炭素社会実現の鍵を握る産業の電化 第2回), <https://www.denkishimbun.com/sp/45183>

⁴⁴ 産業新聞(2022年5月30日)、「JFEスチール、電炉で高級鋼 仙台に設備投資、量産体制」, <https://www.japanmetal.com/news-t20220530118316.html>

⁴⁵ 経済産業省(2023年1月19日)、「永久磁石に係る安定供給確保を図るための取組方針」, https://www.meti.go.jp/policy/economy/economic_security/magnet/magnet_hoshin.pdf

⁴⁶ 従来の1000℃以上の高温前処理や酸・アルカリの大量消費を回避する技術を有する。(アイ‘エムセップ株式会社ウェブサイト)、「レアメタル・レアアース リサイクル」 http://www.imsep.co.jp/recycle_rare_earth_element/

⁴⁷ シーエムシー技術開発株式会社ウェブサイト, <http://www.cmctd.co.jp/>

⁴⁸ 鈴木商会は、タイにおいて、AIによる画像解析により使用済みモーターを分類し、最適なプロセスによってネオジムなどの希少金属を回収し再利用可能な品位に再生することを目指す。(鉄鋼新聞(2023年11月6日)、「北海道の金属リサイクル業大手・鈴木商会／ネオジム回収の技術開発に着手／AI利用で合理的製造プロセス確立へ／NEDOの国際実証事業に採択」, <https://news.yahoo.co.jp/articles/88e2fbaea06964a5064d1a0e91c5f2689accf4a0>)

2.3 インフラの課題

浮体式洋上風力開発に必要なインフラとして、まず、海洋プラットフォームが挙げられる。欧米石油メジャーは、これまでの石油・天然ガス田の洋上での掘削において得られた海洋プラットフォーム関連技術やノウハウを浮体式洋上風力や変電所の開発に活かすことができる。更には、新たな浮体式洋上風力プラットフォームの開発の動きも見られる⁴⁹。日本は海洋プラットフォーム関連技術に欠如しているが、造船技術やエンジニアリング技術などプラットフォーム技術の基盤となる技術は有しているため、これらを活用してこの分野で技術力を早急に高めていく必要がある。

浮体式洋上風力建設のための自己昇降式作業台船(Self Elevating Platform(SEP)船)については、国外の船を使う場合には備船の需給バランスの問題があり、安定的な確保が困難になる。したがって、国産を進めることが肝要であり、清水建設とジャパンマリンユナイテッドにより世界最大級のSEP船の製造が行われたことは意義が大きい⁵⁰。

洋上風力の基地港湾の整備に関しては、国外ではバルト海の洋上風力発電の拠点としてデンマークのエスビアウ港などが有名である。エスビアウ港では洋上風力の建設・運転・保守などにおいて産業誘致を行い約8000人の雇用を創出しており、地域活性化に貢献していると言われている⁵¹。スコットランドにおいても、政府による委託調査で立地条件やコストなどに基づき5港を洋上風力の基地港湾として有望視しており、Port of Inverness and Cromarty Firth⁵²を浮体式洋上風力発電施設に注力するGreen Freeport⁵³に指定している⁵⁴。

米NRELの調査でも、2030年に30GWの洋上風力を導入する目標の達成に必要な年間4~6GWのプロジェクトを供給できる国内サプライチェーンの重要性に注目し、現在計画されている米国の洋上風力発電プロジェクトの半分は、港湾と船舶のインフラが限られているため、2030年以降に遅れるリスクがあるとしている⁵⁵。

日本では、輸入グリーン水素・アンモニアの受け入れを通じて港湾や近隣地域の脱炭素化を図るカーボンニュートラルポート(CNP)の整備計画が全国で進められている。一方、洋上風力を促進するために指定されている「再エネ海域利用法に基づく促進区域」内にあるCNP計画港湾には、改正港湾法の下で基地港湾に指定されている港湾であっても、洋上風力関連の具体的なインフラ計画が公表されていない。また、今後の基地港湾の指定については洋上風力発電の案件形成の状況などを踏まえ、指定済みの基地港湾を最大限活用しつつ、基地港湾の指定の必要性が高まった段階で指定の判断を行うとされているが、港湾整備

⁴⁹ 例えば、Gazelle Wind Power社(先述)と道路輸送可能な浮体式ドライドックを開発するTugdock社は、大幅なコスト削減と大量生産に向けてモジュール式洋上風力組立システムの共同開発に関する覚書を締結した。(Gazelle Wind Power(December 21, 2023, press release), “Gazelle Wind Power And Tugdock Work Together to Reduce Cost of Floating Offshore Wind Platform”, <https://gazellewindpower.com/2023/12/gazelle-wind-power-and-tugdock-work-together-to-reduce-cost-of-floating-offshore-wind-platform/>)

⁵⁰ 清水建設株式会社(2022年10月6日),「世界最大級のSEP船「BLUE WIND」が完成」, <https://www.shimz.co.jp/company/about/news-release/2022/2022046.html>

⁵¹ 洋上風力の産業競争力強化に向けた官民協議会(2020), *op. cit.*

⁵² Inverness and Cromarty Firth Green Freeport ウェブサイト, <https://greenfreeport.scot/about/>

⁵³ 雇用創出、脱炭素化とネットゼロ経済へ公正な移行、グローバルな貿易と投資のハブ機能、革新的な環境の育成を図り、立地した企業は税制やその他の優遇措置の恩恵が受けられる港湾を含む広範囲に及ぶ経済特区。2024年1月現在2港が指定されている。

⁵⁴ Ironside Farrar (2021), “Port Enhancements for Offshore Wind: An Assessment of Current and Future Marshalling and Assembly Capacity in Scottish ports”, Scottish Enterprise, Highlands & Islands Enterprise, Crown Estate Scotland, <https://www.evaluationsonline.org.uk/evaluations/Documents.do?action=download&id=987&ui=basic>

⁵⁵ NREL (2023), *A Supply Chain Road Map for Offshore Wind Energy in the United States*, <https://www.nrel.gov/docs/fy23osti/84710.pdf>

には5年かかると指摘されており、洋上風力プロジェクトのタイムラインに遅れることが懸念される。CNP整備計画と洋上風力基地港湾整備計画を連携させることで、新たなエネルギー・産業インフラ構築の効率化について具体的に検討する価値はある。

2.4 運転管理

着床式洋上風力のサプライチェーン全体のコストのうち、運転・管理費が30～40%占めると言われている⁵⁶。当然のことながら運転・管理費の削減が求められるが、同時に、国内事業者が運転・管理を実施することができれば、国内産業振興に貢献する。日本政府は、3.1で示した通り、洋上風力の建設やメンテナンスを行う専門作業員の育成を支援しており、補助事業において、例えば日本郵船は、メンテナンスを担う作業員輸送船(crew transport vessel, CTV)などの営業体制強化や人材育成のため、専門作業員向けの教育プログラムを実施したり、訓練設備の整備を行ったりしている⁵⁷。また、多くの民間企業が洋上風力の運転・管理サービスに取り組む動きが見られる^{58,59,60}。

なお、地域経済への貢献という観点からは、洋上風力事業関係者の海上移動のために地元漁業者を雇用するアイデアや⁶¹、CTVの国内造船を積極的に発注し、洋上風力関連で国内造船業と舶用工業の活性化を狙う動きも見られる⁶²。

3 地域産業ハブの開発

3.1 洋上風力の系統接続

ウインドファームの系統接続は、洋上風力発電の導入拡大において重要な課題のひとつである。日本では、新規の再エネ発電所が接続できる系統の空き容量がますます限られてきている。東京電力管内を除くすべての地域で、再エネの出力抑制が行われている。短期的には、洋上風力発電の開発を促進するために、新しい洋上風力発電プロジェクトは、いわゆる「系統確保スキーム」の下で系統に接続することができるが、スキームの詳細設計は現在議論中である⁶³。系統確保スキームでは、事業者はノンファーム型接続を前提に、新規の洋上風力発電プロジェクトを系統に接続することができる。ノンファーム型接続適用電源は、系統の混雑時には無補償で出力制御が行われることを条件に、系統に空き容量がない場合も系統に接続することができる。ノンファーム型接続適用電源が出力制御を受ける頻度や量は予測が困難であるため、ノン

⁵⁶ 中條俊樹 (2021), *op.cit.*

⁵⁷ 資源エネルギー庁(2023年9月8日), *op.cit.*

⁵⁸ JFEエンジニアリング株式会社ウェブサイト「O&M(運転・維持管理)サービス」, <https://www.jfe-eng.co.jp/products/life/owp03.html>

⁵⁹ 日鉄エンジニアリング株式会社(2023年1月18日プレスリリース)、「深田サルベージ建設との洋上風力発電施設向けO&Mサービス実施体制の構築について」, <https://www.eng.nipponsteel.com/news/2023/20230118.html>

⁶⁰ 三菱HCキャピタル株式会社、ホライズン・オーシャン・マネジメント株式会社(2023年9月8日プレスリリース)、「国内洋上風力発電事業におけるO&M(保守・点検・修繕)業務の安定化・効率化に向けて三菱HCキャピタルとホライズン・オーシャン・マネジメントが業務提携に合意」, <https://www.mitsubishi-hc-capital.com/investors/library/pressrelease/pdf/2023090801.pdf>

⁶¹ 資源エネルギー庁(2022)、「洋上風力発電による地域・漁業振興事例集」、第2回秋田県男鹿市、潟上市及び秋田市沖における協議会(2022年5月10日開催)資料
https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/yojo_furyoku/dl/kyougi/akita_oga/02_docs06.pdf

⁶² 日本郵船株式会社(2024年2月20日プレスリリース)、「洋上風力発電向け作業員輸送船を国内造船所に初発注 持続可能エネルギー普及と造船業界活性化に貢献」, <https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000085.000120868.html>

⁶³ 資源エネルギー庁・国土交通省港湾局(2023年6月)「系統確保スキームの見直しについて」、第19回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(2024年6月16日開催)、資料1
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/yojo_furyoku/pdf/019_01_00.pdf

ファーム型接続適用電源のバンクビリティを損なう可能性がある。送電容量確保の順番を接続契約申込み順とする「先着優先ルール」から発電所の炭素原単位と発電コストに基づくルールに変更することで、洋上風力発電だけでなく、すべての新規再エネ電源のバンクビリティ改善に資する。

長期的には、系統容量の拡大、特に地域間連系線の増強が必要である。電力広域的運営推進機関(OCCTO)は、将来の系統のマスタープランを発表した⁶⁴。マスタープランの策定にあたっては、将来の洋上風力の導入見込みも考慮されている。しかし、現在建設中または計画中の将来の地域間連系線は10GW程度で(図5-1)、長期的には今後開発されるすべての洋上風力発電プロジェクトが接続するには不十分だろう。地域間連系線の増強に加え、洋上風力資源を、水素など形を変えて輸送したり、エネルギー需要を洋上風力のポテンシャルが豊富な場所に移転したりすることも、系統容量の制約に対する解決策となりうる。

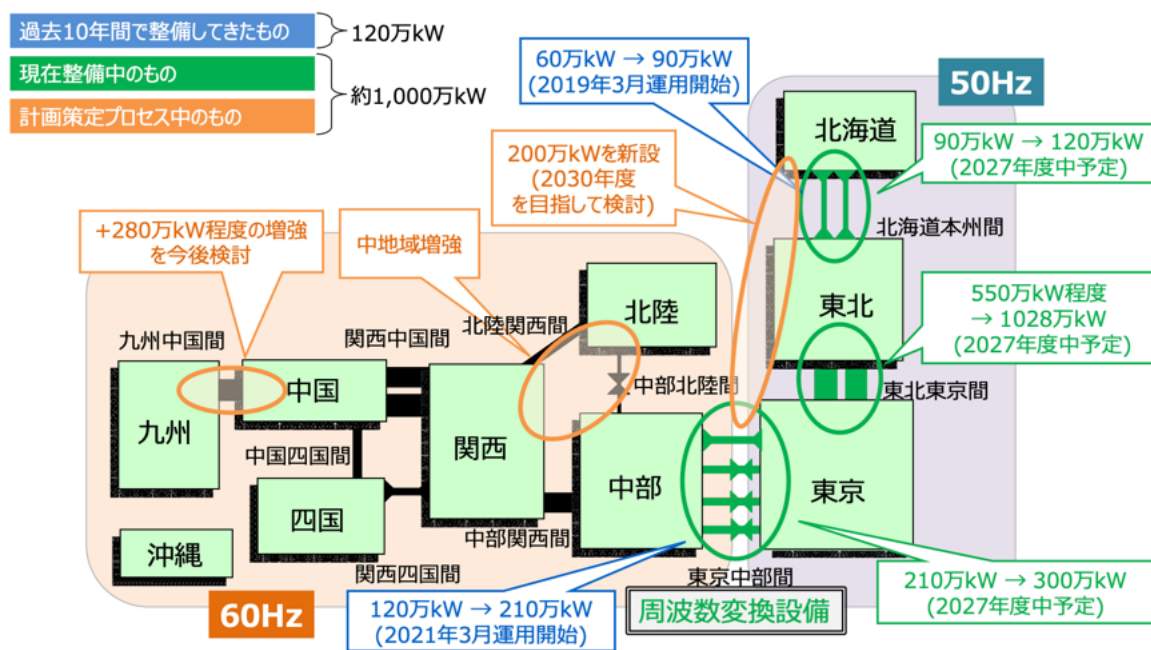


図 5-1 将来の送電網増強計画

出所:経済産業省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49回会合(資料3)⁶⁵

3.2 他のエネルギーキャリアに変換しての利用

洋上風力のポテンシャルと系統の制約を勘案すると、洋上風力のエネルギーを最大限に利用するための方法として、水素などのエネルギーキャリアに形を変えて利用することが挙げられる。将来、洋上風力の発電コストが十分に下がれば、沿岸部でのグリーン水素製造に洋上風力由来の電力を利用することによって送配電コストを回避することができ、系統電力を利用するよりも経済的である。また、洋上風力の発電コストが低ければ、地域で製造した洋上風力由来のグリーン水素は、水素キャリアの変換・再変換コスト、水素の長距離輸送とそれに伴う貯蔵コストを伴わないため、輸入グリーン水素に対して競争力を持つことができるかもしれない。ただし、洋上の水素製造サイトから沿岸部へのパイプライン輸送は、水素の供給コストに追加される。

⁶⁴ 電力広域的運営推進機関(2023年3月)、「広域系統長期方針(広域連系系統のマスタープラン)」、https://www.occto.or.jp/kouikikeitou/chokihoushin/files/chokihoushin_23_01_01.pdf

⁶⁵ 経済産業省(2023年2月)、「電力ネットワークの次世代化」(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49回会合 資料3)、https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/saisei_kano/pdf/049_03_00.pdf

洋上風力由来の電力を利用した水素製造は、洋上風力の開発が先行している欧州を中心に推進されている。例えば、ドイツの Westküste 100⁶⁶プロジェクトでは、洋上風力と太陽光発電由来の電力を利用してグリーン水素を製造し、近隣のセメント工場から回収した CO₂ を利用してグリーン水素から合成燃料を製造している。同プロジェクトでは、沿岸部への送電線が既に敷設されている既存のウィンドファームでグリーン水素を製造し、沿岸部にある水素製造施設で水素を製造する⁶⁷。

水素製造に特化した洋上風力プロジェクトも開発されている。例えば、英国では、Deepwater Offshore Local Production of Hydrogen (DOLPHYN)プロジェクトでは、専用の浮体式洋上風力による水素製造を計画している。同プロジェクトでは、浮体式洋上風力と水電解システム的设计についていくつかのパターンが検討された。コスト分析の結果、水素の総供給コスト(含、製造コストと沿岸部への輸送コスト)が最も低い、セミサブ式の浮体構造物と沿岸部への水素輸送パイプラインの組み合わせが採用された。この場合、水素製造設備(淡水化設備及び水電解装置)は、各浮体構造物に搭載される。

また、北海周辺各国では、民間企業によって、北海地域において洋上風力発電と水素製造を組み合わせた North Sea Wind Power Hub (NSWPH) などの計画も進められている。NSWPH プロジェクトは、北海に複数の洋上風力供給ハブを建設し、同地域の各国に電力と水素の両方を供給することを目的としている。NSWPH コンソーシアムには、Gasunie 社、Energinet 社、TenneT 社などの電力会社が参加している。コンソーシアムでは、洋上風力をエネルギーシステムに統合し、最も効率的に電力と水素を供給するための最適なシステム設計を検討している。検討の結果、洋上風力由来の電力をすべて洋上水素製造に充てたり、電力を全量陸上の系統に送電したりするよりも、グリッド統合型 PtG(Power to Gas)システムのようなハイブリッド型システムで水素などを製造する方が、洋上風力のエネルギーを最大限に活用できることがわかった⁶⁸。グリッド統合型ハイブリッド PtG システムでは、陸上の系統に送電し、系統で吸収しきれなかった余剰電力を洋上水素製造に使用する。水素は水素パイプラインを通じて沿岸域に輸送される。

3.3 インフラ整備

洋上風力由来の電力や水素を需要家に届けるためには、送電線と水素輸送手段が重要である。送電・輸送インフラは、洋上風力由来のエネルギーを洋上施設から陸上へ輸送するための洋上の送電・輸送インフラと、陸上の送電・輸送ネットワークから成る。

3.3.1 洋上の送電及び配送インフラ

海底ケーブルや石油・ガスパイプラインの技術は成熟しており、既に多くのプロジェクトで使用されている(表 5-1)。現行プロジェクトでは、海底送電ケーブルの深さは最大 1,600m にも及ぶ。

海底水素パイプラインはまだ存在しないが、陸上水素パイプラインの技術や石油・ガス海底パイプラインの経験を海底水素パイプラインに活かすことができる。現在、石油・ガスの海底パイプラインは、主に米国メキシコ湾、西アフリカ、ブラジル、北欧に敷設されている。Mark J. Kaiser & Siddhartha Narra (2019)⁶⁹ によると、米国メキシコ湾地域は石油ガス業界で最も進んでいる地域の一つで、約 21,872 マイル(35,200km)の稼働

⁶⁶Westküste 100 ウェブサイト, <https://www.westkueste100.de/>

⁶⁷ERM (2019), Dolphyn Hydrogen Phase-1 Final Report (Submitted to Department for Business, Energy & Industrial Strategy, United Kingdom), https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5e4ab9be40f0b677c1344ec8/Phase_1_-_ERM_-_Dolphyn.pdf

⁶⁸NSWPH (2022), “Grid-integrated Offshore Power-to-Gas Discussion Paper #1”, <https://northseawindpowerhub.eu/knowledge/nswph-discussion-paper-on-grid-integrated-offshore-power-to-gas>

⁶⁹Mark J. Kaiser & Siddhartha Narra (2019), “U.S. Gulf of Mexico pipeline activity statistics, trends and correlations”, *Ships and Offshore Structures*, 14:1, 1-22, <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17445302.2018.1472517>

中の石油・ガスパイプラインのうち約 9,462 マイル(15,228km)が 400 フィート(122m)以上の水中にある。ガスパイプラインの中には、水深 2,000m を超えるものもある⁷⁰。

⁷⁰ TechnipFMC (August 23, 2013, press release), “Technip to lay the world’s deepest gas pipeline, for Shell in the Gulf of Mexico”, <https://www.technipfmc.com/en/investors/archives/technip/press-releases/technip-to-lay-the-world-s-deepest-gas-pipeline-for-shell-in-the-gulf-of-mexico/>

表 5-1 海底送電ケーブルの導入例

送電ケーブル	電圧	全長	最大水深	稼働年
NorNed (ノルウェー-オランダ)	±450kV (DC)	580km	410m *1	2008
ノ NordLink (ノルウェー-ドイツ)	±525kV (DC)	623km *2	410m	2021
SA.PE.I (イタリア本土-サルディニア)	±500kV (DC)	435km	1,640m	-
ELMED (イタリア-チュニジア)	500kV (DC)	220km *3	800m	2028年までに完成予定 *4
北本連系設備 (北海道-本州)	±250kV (DC)	167km (海底ケーブル:42km)	300m	直近のケーブル拡張: 2014年
Maritime Link (カナダ)	±200kV (DC)	170km	470m	2017

出所: Jan-Erik Skog et al.⁷¹, T&D World (2008)⁷², Magnus Callavik and Ola Hansson (2015)⁷³, KfW⁷⁴, Terna Diving Energy⁷⁵, ELMEDProject⁷⁶, J-Power (2021)⁷⁷, Nexans (2018)⁷⁸, 日立エネルギー⁷⁹

注

*1: 浅い水域(50m以下)にケーブル420km、水深410m以下の水域にケーブル160km

*2: 海底ケーブル516km

*3: 海底ケーブル200km

*4: 2023年より調達フェーズ。2023年に世界銀行によるチュニジアへの融資が承認され、EUの補助金も調印された。

3.3.2 陸上の送電及び輸送インフラ

クリーンな電力や水素を需要家に届けるためには、陸上の送電・輸送インフラも重要である。前述の通り、日本は既に長期的な系統の増強に向けたマスタープランを策定しており、将来的な洋上風力による電力供給も考慮されている。水素供給インフラについては、欧州では既に欧州全域をカバーする水素パイプライン網の整備計画があり、その大部分は天然ガスパイプラインを再利用する予定である。一方、日本にはまだそのような計画はなく、現在、主な水素供給手段は、高圧水素ガストレーラーと液化水素タンクローリーである。これらの手段は、市場拡大の初期段階において、水素補給ステーションのような消費量の少ない分散型の水素需要家への輸送に有効である。しかし、大規模需要家への輸送には、水素を大量に運べるパイプライン

⁷¹ Jan-Erik Skog, Kees Koreman, Bo Pääjärvi, & Thomas Andersröd (2006), “The Norned HVDC cable link-A power transmission highway between Norway and The Netherlands,” ENERGEX 2006, <https://library.e.abb.com/public/f3a6c2afe601d185c125718e002e3823/THE%20NORNED%20HVDC%20CABLE%20LINK.pdf>

⁷² T&D World (May 9, 2008), “NorNed, the Longest Electricity Cable in the World, is Operational”, <https://www.tdworld.com/overhead-transmission/article/20956052/norned-the-longest-electricity-cable-in-the-world-is-operational>

⁷³ Magnus Callavik and Ola Hansson (2015), “NORLINK Pioneering VSC-HVDC interconnector between Norway and Germany”, <https://library.e.abb.com/public/aaa99cf7067cd258c1257e0d002c9a7b/Nordlink%20White%20Paper%20from%20ABB.pdf>

⁷⁴ KfW website, “Green electricity from Norway”, <https://www.kfw.de/stories/environment/renewable-energy/nordlink/>

⁷⁵ Terna Diving Energy website, “SA.PE.I”, <https://www.terna.it/en/projects/sapei>

⁷⁶ ELMEDProject website,

<https://elmedproject.com/#:~:text=The%20power%20line%20will%20run,along%20the%20Strait%20of%20Sicily>

⁷⁷ J-Power 送変電 (2021),「長距離海底直流送電の整備に向けた検討会 国内の海底直流送電による地域間連系」(第1回 長距離海底直流送電の整備に向けた検討会 資料6)

https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/chokyorikaitei/pdf/001_06_00.pdf

⁷⁸ Nexans (February 18, 2018, press release), “Nexans Delivered North America’s Longest Submarine Cable to Provide Cleaner Energy to Eastern Canada”, <https://www.nexans.com/en/newsroom/news/details/2018/01/Nexans-Delivered-North-America-Longest-Submarine-Cable-to-Provide-Cleaner-Energy-to-Eastern-Canada.html>

⁷⁹ Hitachi Energy website, “Maritime Link”, <https://www.hitachienergy.com/about-us/customer-success-stories/maritime-link>

ンがより効率的である。長期的には水素市場の発展に伴い、水素需要の大きい地域での水素パイプライン・ネットワーク構築の検討価値はある。

3.4 地域水素ハブとの相乗効果

国内の水素・アンモニア市場の創出・拡大に向けて、日本政府は国内に複数の水素・アンモニア拠点を建設することを検討している。拠点整備費用の一部は政府が支援する。拠点の建設地の選定にあたっては、水素・アンモニアの潜在的需要が評価基準のひとつとなる。水素・アンモニア拠点には、水素・アンモニア発電所、製油所、大規模な産業用需要家など、水素・アンモニアの大規模需要家が複数存在することが想定される。このような拠点には、水素輸送のための水素パイプラインや、水素・アンモニア輸入設備を備えた港が必要である。将来的には、洋上風力による水素製造拠点が水素・アンモニア拠点への水素供給拠点となるよう有機的に計画することができれば、その相乗効果によって、インフラ整備の総コストを削減することができる(図 5-3)。

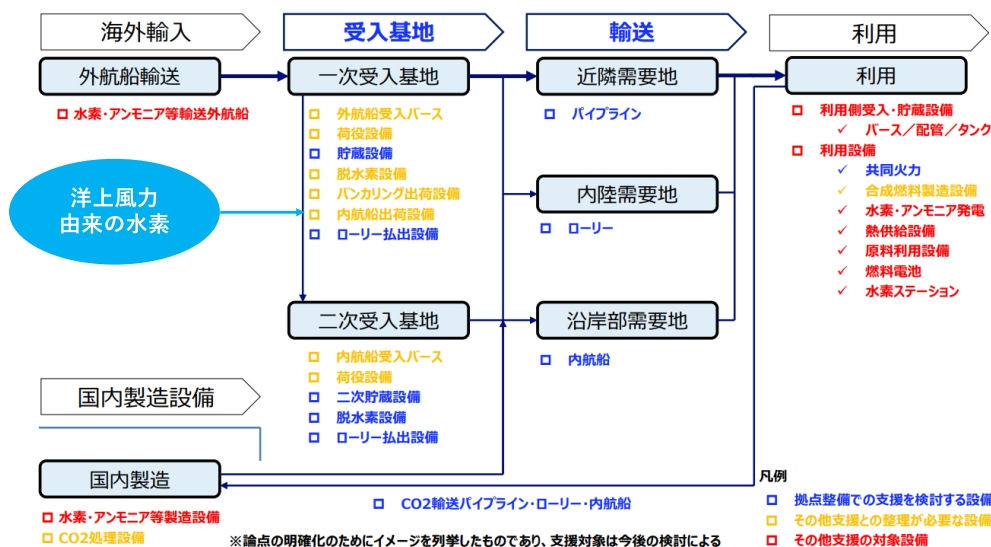


図 5-2 日本で議論されている水素・アンモニア拠点への洋上風力の統合イメージ

出所:資源エネルギー庁「水素政策小委員会/アンモニア等脱炭素燃料政策小委員会合同会議 中間整理(案)」より著者作成⁸⁰

3.5 エネルギー需要地の移転による地域の産業ハブの形成

長期的には、洋上風力のポテンシャルを最大限に活用するために、エネルギー供給面だけでなく、需要面での対策も検討する必要がある。グリーン製品の需要拡大や、製品のカーボンフットプリントに関する規制の厳格化などに伴い、低コストのクリーンエネルギーのニーズが産業界で高まっている。長期的に洋上風力発電の発電コストが低減された場合でも、送電コスト、水素への変化の場合は水素の輸送コストを加味する必要があり、エネルギーの輸送距離を短くすることが理想的である。北海道など洋上風力ポテンシャルの大きい地域にエネルギー需要家を移し、地域のエネルギー需要を拡大させることによって、遠隔地への送電

⁸⁰ 資源エネルギー庁 (2023年12月), 「水素政策小委員会/アンモニア等脱炭素燃料政策小委員会 合同会議 中間整理(案)」(総合資源エネルギー調査会 第7回 省エネルギー・新エネルギー分科会 水素政策小委員会/資源・燃料分科会 アンモニア等脱炭素燃料政策小委員会 合同会議 (2022年12月13日開催)資料2)
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/suiso_seisaku/pdf/007_02_00.pdf

線や水素パイプラインのような新たなエネルギーインフラに対する投資を回避し、エネルギー需給システムの最適化を図ることも検討課題だろう。

洋上風力ポテンシャルが大きい地域における潜在的なエネルギー需要家には、風力タービン製造、機器の供給、組み立て、リサイクルなど、洋上風力のサプライチェーンに関連する産業が含まれる。さらに、大量の電力を消費するデータセンターや、高温帯の熱を大量に消費する製鉄所など、低コストのクリーン電力やクリーン水素を大量に必要とする産業も、地域の新たなエネルギー需要を生み出す可能性がある。

デジタル化のさらなる進展に伴い、データセンターは主要な電力消費者のひとつになるだろう。データセンターを所有する大手IT企業は、再エネを中心としたクリーンなエネルギー源からの電力調達に切り替えている。データセンターには無停電電源装置(UPS)が必要なため、停電に備えてバックアップ電源が必要である。Microsoft社は、データセンターのバックアップ電源として水素燃料電池を使用する実証を行っている⁸¹。将来的に、洋上風力発電システムは、クリーン電力とバックアップ発電機用のクリーン燃料(グリーン水素)の両方をデータセンターに供給することができる。

鉄鋼業は、いわゆる Hard-to-Abate(電化による脱炭素化が難しい)部門のひとつである。脱炭素ソリューションのひとつに、還元剤や高温帯の熱の燃料として水素を使用する直接還元鉄(DRI)が挙げられる。DRIプロセスで1トンの粗鋼を生産するには、45~55kgの水素が必要であり、⁸²年間400万トンの粗鋼を生産する典型的な製鉄所の場合、年間の水素需要量は18万~22万トンとなる。IEA(2019)⁸³によると、10GWの洋上風力によって年間約100万トンの水素を生産できることから、年間400万トンの粗鋼生産の製鉄所にグリーン水素を供給するには1.8~2.2GWの洋上風力が必要となる。洋上のウインドファームから、電炉を使用する鉄鋼メーカーにも電力を供給することができる。電炉は、陸上・洋上問わず、風力発電設備から回収された鉄スクラップを処理することができ、地域における資源循環にも寄与する。

データセンターや産業用大規模水素需要家は、電力や水素を地域の洋上風力発電事業者から直接調達することもできる。実際、洋上風力入札のラウンド2(2023年12月)では、フィード・イン・プレミアム(Feed-in-Premium, FIP)制度が採用されているが⁸⁴、洋上風力発電事業者は需要家との電力購入契約(PPA)を選択している。

産業やエネルギーシステム全体の脱炭素化に向かう中、低コストで豊富なクリーンエネルギー資源を有する地域は産業界にとって魅力的な事業地となりうる。長期的には日本でも、洋上風力発電のコストが大幅に削減されれば、洋上風力発電のポテンシャルは大きい系統容量が限られている地域に、既存のエネルギー需要を移転させたり、新たな産業用エネルギー需要を創出したりすることは、より効率的なエネルギー利用をもたらすソリューションとなりうる。労働者とその家族を伴う産業移転は、地域経済の活性化にもつながる。エネルギー需要の移転は、長期的かつ多様な観点求められるが、エネルギー転換の黎明期である今、エネルギー、地域経済、産業のあり方について総合的なビジョンから、議論すべきテーマだろう。

お問い合わせ: report@tky.ieej.or.jp

⁸¹ Microsoft (July 28, 2022, press release), “Hydrogen fuel cells could provide emission free backup power at datacenters, Microsoft says”, <https://news.microsoft.com/source/features/sustainability/hydrogen-fuel-cells-could-provide-emission-free-backup-power-at-datacenters-microsoft-says/>

⁸² Hydrogen Europe (2020), *Green Hydrogen Investment and Support Report*, p. 19 https://h2fc.org/system/files/cafcp_members/2%20Hydrogen-Europe_Green-Hydrogen-Recovery-Report_final.pdf, (cited from Hybrit, Fossil free Steel, summary of findings from HYBRIT pre-feasibility study 2016–2017 Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking, Valentin Vogl, Max Åhman, Lars J. Nilsson *Journal of Cleaner Production* 203 (2018) 736–745)

⁸³ IEA (2019), “Offshore Wind Outlook 2019”, page 56, https://iea.blob.core.windows.net/assets/495ab264-4ddf-4b68-b9c0-514295ff40a7/Offshore_Wind_Outlook_2019.pdf

⁸⁴ 資源エネルギー庁(2023年11月),「再エネ海域利用法に基づく公募占用指針について」(第89回調達価格等算定委員会(2023年11月14日開催)資料1), https://www.meti.go.jp/shingikai/santeii/pdf/089_01_00.pdf