

洋上風力発電の展望

Offshore wind generation prospects

永尾 徹*

はじめに

洋上は風力発電にとって、広大な面積が確保しやすいこと、豊富な風資源が存在すること、設備の輸送、建設の自由度が高いこと、騒音や景観他の環境に対する調整が、陸上に較べて容易であること等の利点がある。そのため欧州をはじめとして急速に普及してきた。本稿では洋上風力発電の足跡、国内外の状況、将来の展望について紹介する。

1. 洋上風力発電の種類

洋上風力発電の種類は海底に風車基礎を設置する着床式と、洋上に浮かぶ構造体の上に風車を設置する浮体式に分類される。着床式は概ね50mより浅い海域で採用されるが、地盤の特性によって幾つかの基礎形式が使い分けられる。50mより深い海域では浮体式が使われ、水深、海域、建設方法によって幾つかの形式がある(図1)。

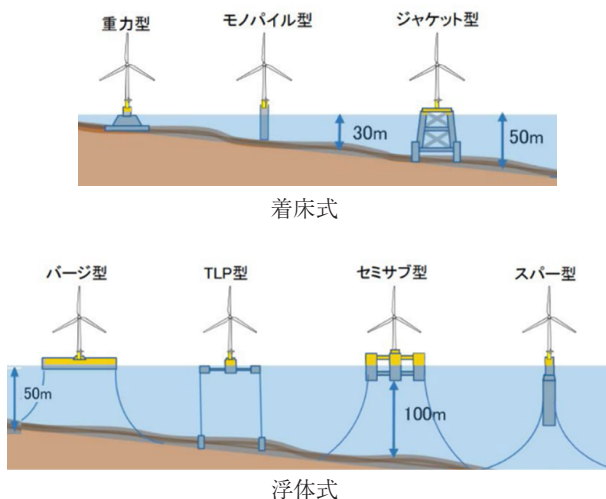
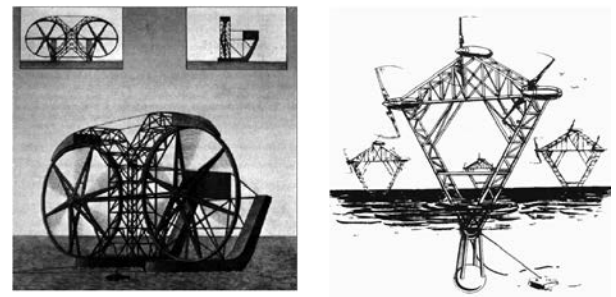


図1 洋上風力発電の種類 (NEDO)

2. 初期の洋上風力発電の構想

世界中を不況と政情不安定が覆った1930年代に、ドイツのヘルマン・ホネフは祖国を燃料危機から救うためとして、高さ450mのタワーにロータ直径160mの風車を3基持つ巨大な陸上用風力発電機の構想を発表した。続いて2基の巨大なロータをメガネ形に配置した洋上風力発電の提案を行った。これが世界最初の洋上風力発電の構想とされている(図2.a)。この時代の風力発電のサイズは、米国の農村に普及していた風力発電の出力は20W程度で、世界で最大の風力発電はソ連のロータ直径30m、出力100kW WIME D-30であったことを考えると、いかに巨大な風車であったかが分かる。時代が下って1970年代に、米国の退役海軍軍人でマサチューセッツ大学教授であったウィリアム・ヒロニマスは多列の風力船で発電や水素製造を行う案を提案している(図2.b)。

これら初期の構想は、両方とも浮体式であり、当時の技術レベルと大きく離れてはいるが、時代を先取りした洋上風力発電の構想であった。



a. ホネフ構想
b. ヒロニマス構想
図2 初期の洋上風力発電構想

* 足利大学 特任教授

3. 洋上風力発電の実用化と発展

最初に実用化された洋上風力発電は、1991年にデンマーク東部のヴィンデビの岸から2km離れた水深4mの海域に設置された、出力450kWの風車11基、合計5MWの着床式洋上ウィンドファームで、2017年まで25年間運転された(図3)。

その後、洋上風力発電は徐々に普及し始め、2022年末には、世界の洋上風力発電の累積容量は64.3GWに達し(図4)、大部分は着床式である。同時期の陸上、洋上を含んだ全体の累積設備容量は906GWで、洋上の割合は7%である。

4. 世界の洋上風力発電の状況

世界の洋上風力発電は中国が全体の半分を占め、その後を英国、ドイツなどの欧州勢が続いている。(図5)。

1) 中国

中国は世界の陸上風力発電の40%を占める風力大国であるが、洋上風力発電の設備容量も31.5GWで世界全体の49%に上る。洋上風力発電は、山東省、江蘇省、浙江省、広東省、福建省、広西省、海南省の東シナ海から南シナ海に面した沿岸に設置



図3 世界最初の洋上風力発電(1991年デンマーク)



図4 世界の洋上風力発電の累積容量(2022)
(GWEC Global Wind Report 2023を元に作成)

されており、総出力が1.7GWの大型ウィンドファーム(陽江沙扒洋上風力発電所)も擁している。浮体式洋上風力発電については、2021年に中国初の事業として、広東省陽江市の沖合28km、水深30mの海域に於て5.5MW風車を使った事業が開始された(図6)。既存の400MW着床式ウィンドファーム近くの、浮体式としては浅い海に設置され、実証的意味が強いと思われる。

中国の主要な事業者が発表した2025年までの洋上風力発電の導入目標の合計は78GWに上っているほか、地方政府や都市も導入目標を発表しており、その合計は、100GWに達している。中国では洋上風力発電の開発が可能で水深5~50m、高度70mの海域の風力エネルギー賦存量は500GWに達するとしており、内陸とは異なりエネルギー消費地帯に近い洋上風力発電に対する期待は大きい。

2) 欧州

欧州の洋上風力発電の例として英国とドイツの状況を紹介する。EUや各国からそれぞれ目標が発表されているが、北海の風力開発としては2022年9月EUの北海エネルギー協力(NSEC)の閣僚会議において、北海の洋上風力発電(着床式+浮体式)に関する目標を発表し、2030年までに60GW、2050年までに300GWを導入するとしている。

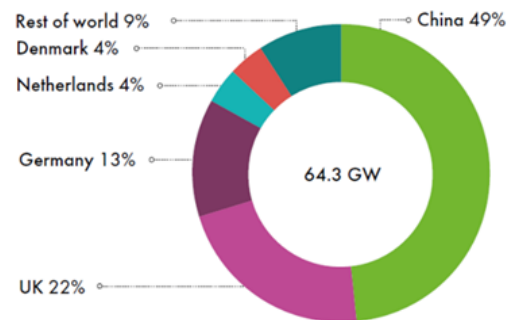


図5 洋上風力発電累積容量の国別割合(2022)
(GWEC, GLOBAL OFFSHORE WIND REPORT 2022)



図6 中国初の浮体式洋上発電(2021年)

① 英国：洋上風力発電は2023年3月時点で、44プロジェクト、合計13.4GWが稼働中で、プロジェクトの平均設備容量は305MWである。最近では2022年に北海のヨークシャー沖89kmの海域で、ホーンシー2洋上ウィンドファームが運転を開始した。165基の8MW風車165基、モノパイル着床式、総容量1.39GWのウィンドファームで、デンマークのオーステッドが50%を出資している（図7）。その前の2019年にはホーンシー1洋上ウィンドファーム（1.22GW）が運転を開始し、それに続くホーンシー3洋上ウィンドファーム（3GW）の開発も決定している。今後更にホーンシー4洋上ウィンドファーム（2.7GW）も計画されている。ホーンシー1、2には日立製作所が系統連系設備を供給したが、3については高圧直流送電システムが採用され、同じく日立製作所が担当する。

浮体式洋上風力としては、スコットランド沖でグリーンボルトプロジェクト（560MW）やセノスプロジェクト（1.35GW）といった巨大プロジェクトが、2028年から2030年にかけて運転を開始する計画が進んでいる。この事業は浮体式としては世界最大規模のものであり、東京電力が開発に参加している。

②ドイツ：ドイツの洋上風力発電は2022年時点で、設備容量は8.1GW、風車1基当たりの平均出力は5.3MWである。同時期の陸上風力の設備容量は58.3GWで、洋上風車は14%を占めている。

ドイツ最初の洋上風力発電は、2010年に運転を開始したアルファベントス洋上ウィンドファームである。ボルクム島の北45kmの水深30mの北海に設置され、出力5MWの風車12基、総容量は60MWである。基礎はトライポッド形式とジャケット形式の両方を使用している。この洋上ウィンドファームは、2012年に設備利用率55%の世界記録を達成したと言われている。ボークムリフグランド3洋上ウィンドファームは、900MWの洋上風力発電で、ドイツ北西沿岸から70km沖の海域に建設される。2025年の運開が予定されており、デンマークのオー



図7 ホーンシー2洋上風力発電

ステッドが50%を出資し、関西電力も参画している。ドイツ北部の港湾工業都市ブレーマーハーフェンから西北西140kmの北海に浮かぶ出力960MWのヘ・ドライヒト洋上風力発電所は、2025年末の運開が予定されている。

3) 米国

バイデン政権は、2023年3月に洋上風力発電開発に関する戦略を発表した。そこでは2030年までに洋上風力発電を30GWに拡大すること、浮体式洋上風力は2035年までに15GWとする目標を発表した。更に2050年までに洋上風力を110GWに拡大するという長期目標も含まれている。

5. 日本

1) 日本の洋上風力発電の始まりと現在

我が国最初の洋上風力発電は、山形県酒田港の護岸で囲まれた水路内に建設された5基の2MW風車で、2004年1月31日に運転が開始された。同年4月には、北海道瀬棚港の防波堤の内側に600kW風車が2基設置された。双方とも売電目的で、町営の後者は、運開後の最初の冬に59.1%という驚異的な月間設備利用率を記録している。2010年には茨城県神栖の岸から40m離れた外洋に面した海中に2MW風車7基が設置された。その後8基が追加され、2MW15基、総容量30MWの当時日本最大の洋上ウィンドファームとなった（図8）。

2023年8月時点の国内における運転中の洋上風力発電の累積設備容量は58基、187MWで9つの海域で運用されている。陸上と洋上を含む風車全体の累積設備容量は4.8GW（4,802MW）であり、洋上風力は全体の2.8%である。このうち運転中の浮体式洋上風力発電は、事業用は2MW1基、実証研究用3MW1基の合計2サイト、5MWである。詳細を表1に示す。図9は2023年1月に運開した最新の着床式洋上ウィンドファームを示す。



図8 神栖洋上ウィンドファーム

2) 拡大する洋上風力発電

洋上風力発電の導入拡大を目的として2019年4月に、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（再エネ海域利用法）が施行された。さらに政府は、2020年12月洋

上風力発電の導入目標を発表した。その内容は1GW程度の区域を10年間に渡り毎年指定すること。2030年までに10GW、2040年までに30GWから45GW（浮体式を含む）の案件を形成するという意欲的なものである。

これを受けて、経済産業省と国土交通省は洋上風力発電の促進区域を指定し、第一ステップ（ラウン

表1 日本における運転中の洋上風力発電
2023年8月時点

海域	種類	総容量 (MW)	単機容量 (MW)	基数	運転開始
酒田港	着床	10	2	5	2004年1月
瀬棚港	着床	1.2	0.6	2	2004年4月
神栖沖第1	着床	14	2	7	2010年7月
銚子沖	着床	2.4	2.4	1	2013年1月
神栖沖第2	着床	16	2	8	2013年3月
五島沖	浮体	2	2	1	2013年10月
北九州沖	浮体	3	3	1	2019年5月
秋田港	着床	54.6	4.2	13	2022年12月
能代港	着床	84	4.2	20	2023年1月
合計		187.2		58	

(筆者調べ)



図9 最新の洋上ウインドファーム (2023年能代港)



図10 促進区域、有望区域等
(2023年7月1日時点) (資源エネルギー庁)

ド1と呼ばれる)の4海域について公募を行った。その結果2021年12月に事業者が選定され、現在は建設に向けて準備が進んでいる。続いてラウンド2として新たな4海域について、2023年6月に応募が締め切られ、政府による選考結果が待たれている状況である。国の指定する促進区域、有望区域他を図10に示す。想定設備容量の合計は9.2GWに達している(表2)。

3) 日本における研究開発事業

日本では洋上風力発電の研究開発は、政府やNEDOの元で精力的に進められて来た。

環境省は、浮体式洋上風力発電実証事業として、長崎県五島市沖の海域を利用して、2012年に富士重工製100kWスケールダウン風車で試験を行った後、2014年に日立製作所の2MWダウンウインド実証機(図11①)に置き換えて運転を開始した。

NEDOは着床式洋上風力発電の技術研究として、千葉県銚子沖に洋上風況観測タワーと三菱重工製2.4MW風車(同②)を1基設置した。同じく福岡県北九州市沖に洋上観測タワーと日本製鋼所製2.0MW風車(同③)を1基設置し、2013年から研究事業を行った。

経済産業省資源エネルギー庁では、2012年から福島浮体式洋上ウインドファーム実証研究事業を開始した。この事業では福島県の20km沖、水深120mの海域に、日立製作所2MWダウンウインド風車(同④)、日立製作所5MWダウンウインド風車(同⑤)、当時洋上風車として世界最大の三菱重工業7MW風車(同⑥)および日立製作所製の洋上

変電所(同⑦)から構成される世界初の浮体式ウインドファームを構築して、実証研究を行った。

NEDOは2014年から浮体式洋上風力発電の実証研究として、浅海域に適したバージ型浮体の事業を開始した。風車はドイツのエロダイン社製3MW、2枚翼風車(同⑧)が用いられ、2019年に実証運転を開始した。これで、日本では実機を用いた洋上風力発電は、事業用と実証研究用を含めて風車出力は2MWから7MWまで、着床式として重力式基礎、ジャケット式基礎、モノパイル式基礎、浮体式では、バージ型、セミサブ型、スパーク型と、幅広い風車出力と基礎形式および浮体形式に関する実績を積んでいる。

経済産業省/NEDOはグリーンイノベーション基金事業(GI基金)として、2021年から、研究開発・実証から社会実装まで10年間、総額2兆円を投じる巨大な実証研究を開始した。風力発電については「洋上風力発電の低コスト化」として、浮体式洋上風力発電を中心にコスト低減を行うもので、事業規模400億円、支援総額1195億円が割り当てられている。2021年に始まった第一段階では、浮体、送電システム、O&M、風車内部品の4分野、18のテーマについて研究が行われている。2023年からはGI基金フェーズ2として浮体式洋上風力発電実証をテーマとして実施される。この中には洋上風力発電の主役である風力発電機自体の研究は含まれておらず、大型風力発電の開発製造から撤退した我が国の立ち位置が見える。

6. 洋上風力発電のトレンド

1) 大型化が進む。

風車単機容量の増加と共に、プロジェクトの大型化が進んでいる。2022年における風車全体の単機容量は4MWで、前年より15%増加した。そのうち陸上風車の平均出力は3.9MWであるが、洋上風車の平均出力は7.6MWと陸上風車の2倍であり、大型化の傾向が著しい。

日本の促進地域のラウンド1で決定した秋田、千葉の3サイトで使用する風車は、米国GE製HARIADE-Xで、単機出力は12.6MW、ロータ直径は220mで標準の高さは260mに達する。全体の合計は134基が建設される予定で、我が国でも巨大風車の時代が幕を開けることとなった。

各国では市場の期待に応じて、更に大型の風車開発が進められている。デンマークのバスタスは15MW風車を開発中で、2024年に同国のフレゼリ

表2 促進区域・有望区域詳細
(資源エネルギー庁資料から作成)

区分	海域	規模(MW)	合計
促進区域	長崎県五島市沖(浮体)	17	ラウンド1 事業者選定済 1.7GW
	秋田県能代・三種・男鹿市沖	478.8	
	秋田県由利本庄氏沖(北側・南側)	819	
	千葉県銚子市沖	390.6	
	秋田県八峰町・能代市沖	360	ラウンド2 1.8GW
	長崎県西海市江島沖	420	
	秋田県男鹿市・潟上市・秋田市沖	340	
新潟県村上市・胎内市沖	357		
有望区域	北海道石狩市沖	910・1,140	3.5GW (中央値 の合計)
	北海道岩宇・南後志地区沖	560・705	
	北海道牧島沖	440・555	
	北海道檜山沖	910・1,140	
	北海道松前沖	250・315	
	青森県沖日本海(北側)	300	2.2GW
	青森県沖日本海(南側)	600	
	山形県遊佐町沖	450	
	千葉県いすみ市沖	410	
千葉県九十九里浜沖	400		



図 11 日本の洋上風力発電の実証研究

クスハウオン洋上ウィンドファームでの運転開始を目指している。ドイツのシーメンスガメサは、出力 14MW の風車を開発し、2023 年 3 月に運転を開始した。この風車は台風風の風速 79.8m/s に耐える IEC Class T を取得している。米国 GE は 2023 年初頭に 17～18MW の風車を開発中で、2023 年中に出荷するとしている。

中国メーカーでは大型化の傾向は一層顕著である。明陽風電は 2023 年にロータ直径 252m の 16MW の運転を開始した。この風車は IEC Class T 認証を取得している。2023 年 6 月には金風科技がロータ直径 252m、出力 18MW の風車の建設を完了した。また中国船舶工業集団の関連会社の中国海装風力は、2023 年 1 月にロータ直径 260m、出力 18MW の風車の開発が成功したと発表した(図 12)。同社はロータ直径 300m、出力 25MW の風車開発も視野に入れているという。



図 12 世界最大の 18MW 風車 (中国海装風力)

2) 発電コストが低下する。

世界の洋上風力の均等化発電原価 (LCOE) は、2010 年 0.188 US\$/kWh であったが、2021 年には 0.075 と 60% と大幅に低下した (表 3)。欧州の新設プロジェクトの LCOE は、2020 年の 0.092 US\$/kWh から、2021 年には 0.065 US\$/kWh と 29% 低下した。LCOE 低下の背景には、風車の大型化で経済性が向上したこと、建設コストが 2011 年の 4.876 US\$/kW

から、2021年は2,858 US\$/kWと46%低下したこと、設備利用率が向上したこと等が挙げられている。なかでも、設備利用率が低めに推移している日本が高価であることが分かる。

表4は各国の洋上風力発電の公募に対する落札価格を示している。日本で2021年に行われたラウンド1の落札価格は、欧州の落札額に近づいて来ているがまだその差は大きい。

3) 離岸距離と水深が増加する。

欧州の洋上ウィンドファームは大陸棚に設置されており平均水深は27.2m、平均離岸距離は43.3kmであるが、最近では水深33mから50m、離岸距離は50kmから120kmの海域に設置される例が増加している。それに比して中国は浅海域、近距離のサイトが多い。

平均水深90mの北海に対し、日本は平均水深1,700m以上の日本海や、世界一深いマリアナ海溝などの深い海に囲まれている。日本の促進区域(着床式)の離岸距離は最少1kmで、最も遠いところでも4kmと、岸から風車が見える近い海域が選ばれている。欧州とは環境が大きく異なっており、深い海に適した浮体式が注目を浴びる所以となっている。

表3 洋上風力発電の LCOE

	LCOE(均等化発電原価)			
	2010年		2021年	
	US\$/kWh	円/kWh	US\$/kWh	円/kWh
中国	0.178	17.8	0.079	9.1
日本	0.187	18.7	0.196	22.5
韓国	—	—	0.18	20.7
ベルギー	0.226	22.6	0.083	9.5
デンマーク	0.108	10.8	0.041	4.7
ドイツ	0.179	17.9	0.081	9.3
オランダ	—	—	0.059	6.8
英国	0.21	21.0	0.054	6.2
平均	0.181	18.1	0.097	11.1
為替レート	100円/US\$		115円/US\$	

(IRENA, Renewable power generation cost in 2021)

表4 洋上風力発電の落札価格

国	年	プロジェクト	€/kWh	円/kWh
オランダ	2016	Borssele I-II	72.7	8.7
オランダ	2016	Borssele III-IV	54.5	6.54
ドイツ	2017	Gode Wind III	60	7.8
ドイツ	2018	Gode Wind IV	98.3	12.8
オランダ	2018	Kust Zuid 1+2	市場価格(補助金ゼロ)	
日本	2021	能代・三種・男鹿沖	—	13.26
		由利本庄沖	—	11.99
		銚子沖	—	16.49

(各種発表データより作成)

4) 導入が加速する。

IEAが発行した2022年版エネルギーアウトルックによると、3つの予測シナリオ中で最も高い導入量が予測される「2050年ゼロエミッションシナリオ(NZE)」によると、発電に占める再生可能エネルギーの割合は、2021年は28%、2030年には60%を超え、2050年には90%近くまで上昇するとしている。中でも太陽光発電と風力発電の成長が著しく、太陽光発電は2030年までに現在の4倍以上の650GWが追加され、風力発電については400GW以上が追加されて、その20%は洋上風力発電であるとしている(図13)。

NEDOが作成した陸上風力と洋上風力導入量の実績と、今後の見通しを図14に示す。これによると風力発電全体に洋上風力が占める割合は、現時点では7%であるが、陸上より高い伸び率に支えられて、2050年には16%まで増加するとしている。

世界風力エネルギー会議(GWEC)が発行した2022年版の世界風力エネルギー展望によると、世

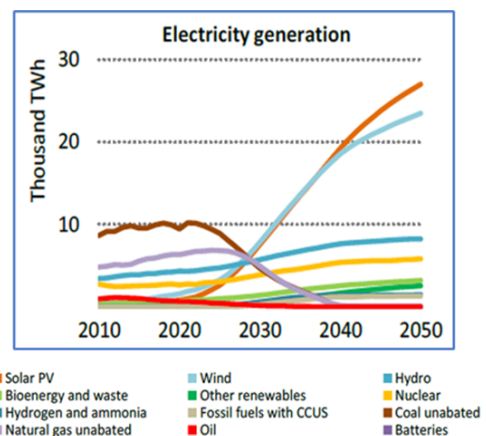


図13 世界の電源エネルギー予測(2022)
(IEA, World Energy Outlook 2022)

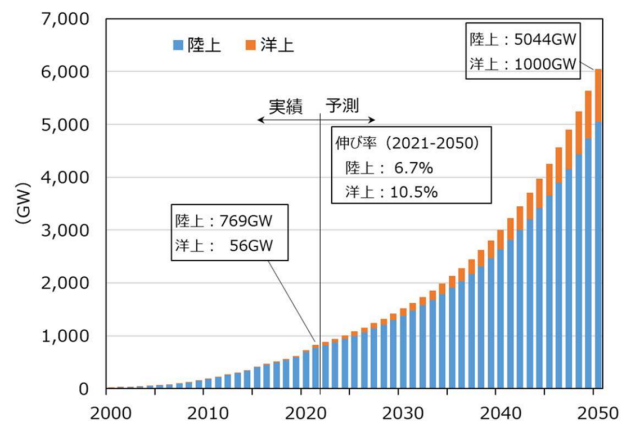


図14 世界の風力発電累積容量(実績と今後)
(NEDO, TSC Foresight 2023.04より引用)

世界の風力発電は2030年までに2,000GWに達し、世界の電力の最大17～19%を供給すること、2050年までには、世界の電力供給の25～30%を風力発電で賄うことができるとしている。世界の洋上風力の導入予測（単年の新規導入量）を図15に示す。

7. まとめ

洋上洋上風力発電について国内外の状況と、各機関が発表している今後の予想を紹介した。

まとめると、洋上風力発電は、

- 1) 現在は風力発電全体の7%を占めるに過ぎないが、陸上より高い率で成長している。
- 2) 風車の大型化が加速しており、単機容量10MWを越える風車は普通になり、18MW風車も完成した。
- 3) 日本の洋上風力発電は、挑戦的な目標を掲げた日本政府の後押しで、今後急速に増加する。
- 4) 日本の環境は浮体式洋上風力発電のポテンシャルが大きく、それに関連した研究開発が勢力的に行われている。一方で風車本体に直接関連する研究開発が欠落している。

日本の洋上風力発電は、風況、海況、地勢、社会環境など洋上先進国の欧州とは異なっている場合が多く、洋上風力発電が根付くためには、我が国独自の研究実証を進めること、さらに社会実装を通じて産業界を含む技術力の強化が必要である。このような状況を背景に、日本政府やNEDOは、GI事業をはじめとして、人材育成や研究に対して活発な助成、支援を行っている他、大学等による独自の事業も盛んになってきた。このような仕組みを上手に利用して活発な研究や事業の取り組みを期待したい。

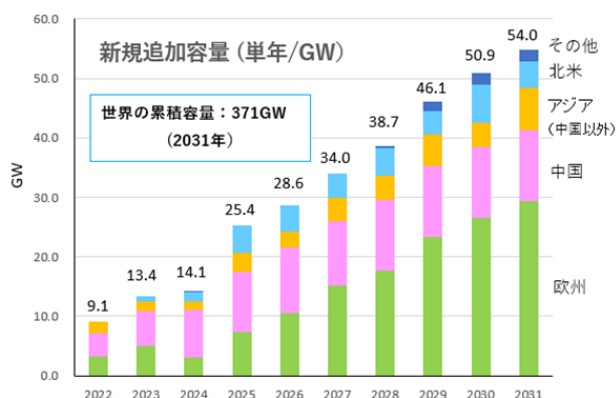


図15 世界の洋上風力発電導入見通し (GWEC Market Intelligence, June 2022 より作成)

参考文献

- 1) 牛山泉, 風力発電の歴史, オーム社 p113, 2012
- 2) 宇都宮智昭他, 環境省浮体式洋上風力発電事業について, 日本エネルギー学会誌97巻2号, 2018
- 3) 永尾徹, 再生可能エネルギーを利用した被災地の取り組み事例—洋上風力発電 (いわき市), 日本太陽エネルギー学会誌, 48巻1号, 2022
- 4) 日本風力発電協会ホームページ
- 5) 洋上風力スキルガイド第1版, 日本風力発電協会, 2022
- 6) NEDO 技術戦略センターレポート TSC Foresight Vol 111, 2023.04
- 7) Ulrich Hutter, Past development of large wind generators in Europe, University of Stuttgart,1973
- 8) Woody Stoddard, The life and work of Bill Heronemus, wind engineering pioneer, Wind Engineering, Vol26, No5,2002
- 9) Yuying Qian, China's Renewable Energy : Offshore Wind Takes Off, What Does the Future Hold?, 2022.05 (<https://www.integralnewenergy.com/?p=34818>)
- 10) Future of wind,IRENA,2019
- 11) Global offshore wind report 2022,GWEC
- 12) Global wind report 2023,GWEC
- 13) Market Intelligence, June 2022, GWEC
- 14) Renewable power generation cost in 2021,IRENA
- 15) World Energy Outlook 2020, IEA

著者略歴



永尾 徹 (ながお とおる)
 富士重工業 (株) (1972年～2007年),
 航空機及び風力発電の研究・開発
 新エネルギー財団 (2007年～2018年)
 再生可能エネルギー研究に関する国際
 協力事業
 足利大学 特任教授 (2016年～現在)

日本風力エネルギー学会理事
 福島浮体式洋上風力発電実証研究事業の関する第三者委員会 委員長 (元)