

II. 着床式洋上風力発電の基本的事項

洋上風力発電の導入促進に期待が寄せられている理由の一つに、陸上と洋上の風の特徴に違いのあることがあげられる。本章に入る前に、これら洋上における風の特徴について紹介する。

✓風が強勢である。

風速の頻度分布の表記法であるワイブル分布関数の定数に尺度係数 (C) と形状係数 (k) があるが、陸上の k は 1.75、洋上のそれは 2.2 とされ (Kühn,2001)、強風域寄りに発生頻度が高い。洋上では気温の日周変化が陸上よりも小さいことから、k の大きい分布 (裾野が狭い形状) となる (Twidell and Gaudiosi,2009)。風速が強勢であることにより、発電電力量の増加が見込まれる。

✓乱れ強度が小さい。

海面の粗度 (表面の粗さ) が小さいことから、風の乱れ強度が小さい。風速 15m/s における乱れ強度 (I_{15}) は洋上で 0.08、陸上で 0.15 とされ (Frandsen and Christensen,1994)、それ故、洋上では風車やブレードに与える機械的な疲労が小さくなり、結果的には風力発電施設の寿命が延びることとなる (Kühn,2001)。

ただし、沿岸域における陸風 (陸から海に向かって吹く風) の場合には、乱れ強度が比較的大きく、風速の時間変化もあることに留意する必要がある。

✓風速の鉛直シアが小さい。

海面の粗度長 (表面の粗さを表す指標) が小さいことから (一般的な海況で 0.001、時化の荒れた海況で 0.04 (DS472 Danish Standard,1992)、陸上では 0.03-1.0)、陸上に比較して海上では高度による風速の変化が少ない。これは洋上風力発電では陸上風力発電のようにタワーを高くして高風速を得る必要がないことを示唆するもので、経済的に有利となる。ただし、沿岸域における陸風 (陸から海に向かって吹く風) の場合には、洋上といえども鉛直シアは比較的大きい。

✓風速が安定している。

洋上では風速の時間変化が少なく、洋上風力発電の設備利用率を上げる要因となる (Krohn,1998)。

上記のように、洋上では基本的には風力発電に適した強い風が安定的に吹くため、陸上風力発電よりも高い設備利用率が見込まれることに加え、後述するようにポテンシャルも大きい。このため、洋上風力発電は再生可能エネルギーの大規模導入を可能にする有望な電源となり得る。

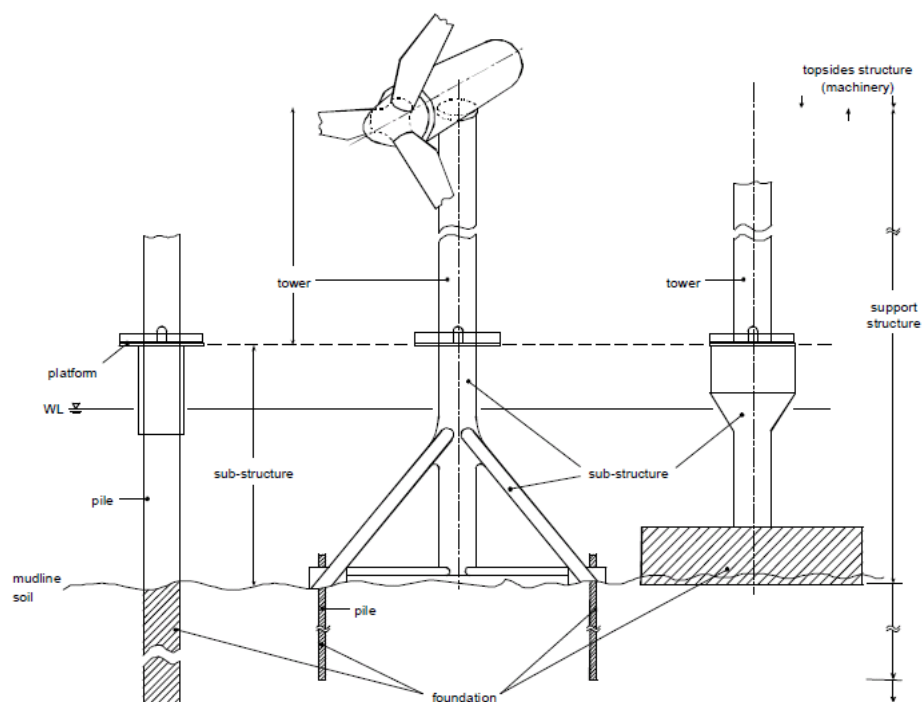
1 着床式洋上風力発電の定義と種類

1.1 着床式洋上風力発電の定義

着床式洋上風力発電の定義として、以下の2例をあげることができる。

- 支持構造物が流体力荷重にさらされる風車。

「風車－第3部 洋上風車の設計要件 (JIS C1400-3)」(図Ⅱ.1.1-1)



図Ⅱ.1.1-1 着床式洋上風力発電施設の概念図 (IEC 61400-3 Ed. 1.0)

- 海上、湖沼、河川等の水域を利用して、直接、風力発電装置、制御・監視装置を設置し発電するシステムであり、港湾域の防波堤上に建てられている風力発電設備 (semi-offshore) は洋上風力発電には属さない。

(NEDO と千代田デイムス・アンド・ムーア,1999)

【豆知識Ⅱ.1.1-1】

● 浮体式洋上風力発電の定義

- ✓ 流体力荷重、構造物の浮力による垂直保持力および波・流れ・風等に誘発される水平力を受け、位置保持設備で支持された浮体構造物を有する風車。

Wind turbine with a floating sub-structure which is subject to hydrodynamic loading, vertically supported by the buoyancy of the structure itself and the horizontal forces induced by wave, current, wind, etc. are supported by the station-keeping facilities. [Wind Turbines-Part3 Design requirements for floating offshore wind turbines (IEC TS61400-3-2, 2009)]

1.2 支持構造物の種類

洋上風力発電は、着床式、浮体式およびセイリング式の3種類に分類される。着床式は、コストの面から一般的に水深 50-60m より浅い海域に適用されるもので、風力発電機を海底に設置した支持構造物（基礎）に固定して発電する形式である。

代表的な支持構造形式の例を図 II.1.2-1 に示す。このうち、モノパイル（左図）、ジャケット（中央図）および重力（右図）は3つの基本形と呼ばれるものであり、その他、本図には載っていない基本形式の発展形であるトリパイル、PC 重力、小型ジャケット、Twisted Jacket (Inward Battered Guide Structure) 等があげられる（表 II.1.2-1）。

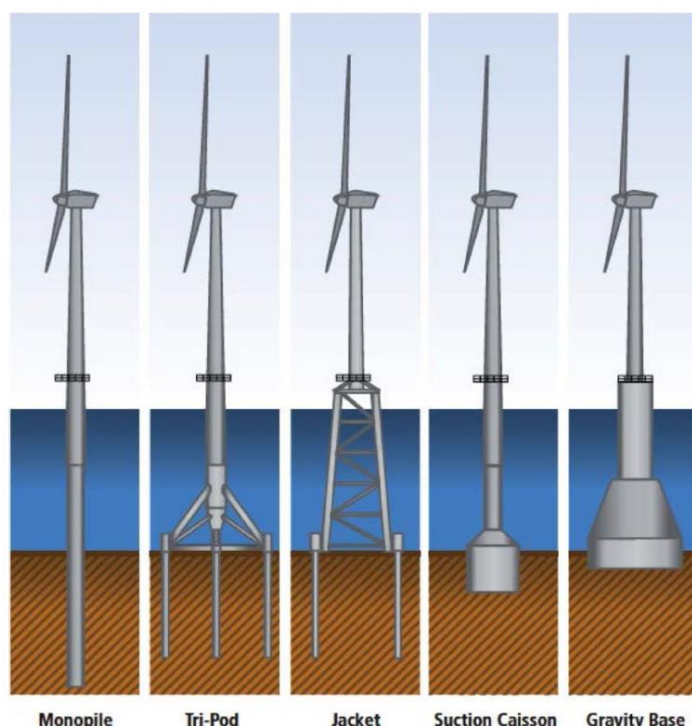


図 II.1.2-1 支持構造形式の代表例 (Navigant, 2013)

表 II.1.2-1 着床式洋上風力発電設備支持構造物の分類 (石原, 2010 を一部改変)

基本形	モノパイル	重力	ジャケット
発展形	トリパイル	PC重力	小型ジャケット
	ドルフィン		Twisted Jacket
ハイブリッド形	トリポッド(モノパイル-ジャケット)		
	ハイブリッド重力1 (重力-ジャケット)		
	ハイブリッド重力2 (重力-モノパイル)		
	ハイブリッドサクシオン (重力-モノパイル-サクシオン)		

前述の通り、着床式はコストの面から水深 50-60m より浅い海域に適用される。図 II.1.2-2 はこのことを端的に表している。着床式、浮体式ともに水深が深くなればコストは高くなるが、水深 60m を超えると着床式のコストが浮体式のコストよりも高くなる。なお、石原 (2011)

と鈴木（2011）は、水深 100-200m 位までの浮体式のコストは水深に依存しないことを指摘している（図 II.1.2-2 の赤書きの線）。本図から、モノパイルおよび重力は水深 30m 以下の海域、ジャケット、トリポッドおよびトリパイルは水深 30-60m の海域への適用が妥当と言える。なお、着床式洋上風力発電の場合、陸上風力発電と比較して建設費に占める支持構造物の費用の割合が多いことから、海底地盤、水深、自然環境等の諸条件に適した支持構造物が開発され、洋上風力発電のコスト低減に寄与している（石原,2010：石原,2013）。

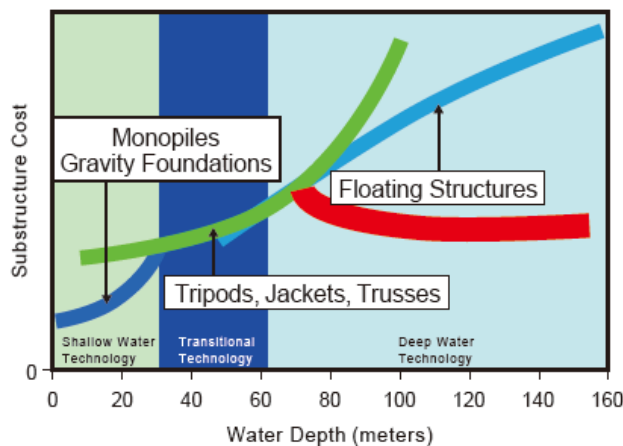


図 II.1.2-2 構造物コストの水深による変化（Dolan, 2004 を一部改変；石原, 2011）

参考として、図 II.1.2-3 に 2000 年から 2020 年までの洋上風力発電設備の支持構造物形式の導入推移を示す。支持構造物の選定は、単にコストや水深のみならず、海底地盤、海底傾斜等の諸条件に依存するものの、既往施設の支持構造物は 2010 年頃までモノパイルと重力の 2 形式に集約される。2010 年以降、モノパイルの設置数が増加する傾向は変わらないものの、重力以外にジャケット、マルチパイル（トリパイル、トリポッド）、High-Rise Pile Cap（ドルフィン）の形式が徐々に増加する傾向が認められる。なお、ドルフィンは我が国の瀬棚港や酒田港の洋上風力発電施設で採用されており、中国の洋上風力発電施設でも多数の設置例がある。

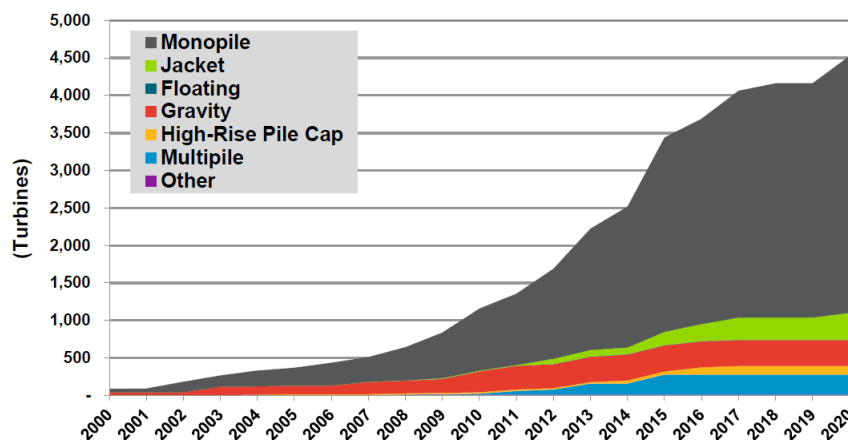


図 II.1.2-3 洋上風力発電設備の支持構造物形式の設置割合（2000-2020 年）
（NAVIGANT, 2016）

2 洋上風力発電のポテンシャル

世界の海上風（エネルギー密度）の分布図から、エネルギー密度が高い海域として、南半球の冬期ではインド洋の中部と北部、南氷洋等、北半球の冬期では太平洋と大西洋の北部があげられる。巨視的に見れば、南氷洋は周年を通じて風況の強勢な海域として位置づけられる（図 II.2-1）。

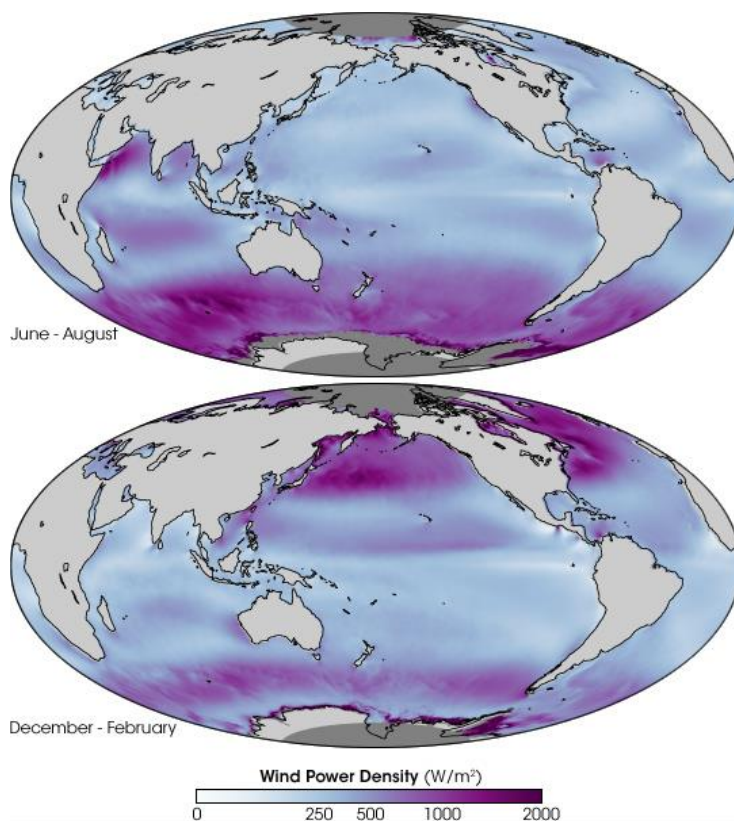


図 II. 2-1 世界の海上風（海面上 10m）の平均風力エネルギー密度の分布図

上図：6-8 月、下図：12-2 月

(NASA HP : https://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=8916&eocn=related_to&oci=related_image)

風の資源量を表現する語句として、「賦存量（潜在量）」、「ポテンシャル（期待可採量）」および「導入可能量」が使用される。

- ◆賦存量（潜在量）：ある地域・海域において理論的に存在する風力エネルギー量で、種々の制約要因は考慮されない資源量。
- ◆ポテンシャル（期待可採量）：賦存量のうち、エネルギーとして取り出すことを考えた場合に利用可能性がある風力エネルギー量で、年平均風速、水深、離岸距離、公園指定海域等の一定条件を付与して求めた資源量。
- ◆導入可能量：ポテンシャルの算出結果から、経済面等の設定条件を満たす海域を対象として求めた、事業化の可能性のある資源量。

2.1 海外のポテンシャル

ヨーロッパとアメリカを中心に、着床式洋上風力発電のポテンシャルについて取りまとめる。

(1) ヨーロッパ

Petersen (1992) により、ヨーロッパの周辺海域における年平均風速と風力エネルギー密度のマップが作成されている (図 II.2.1-1)。風速あるいは風力エネルギー密度の強勢な海域は、イギリス中北部からアイルランド周辺、地中海の南仏沖、大西洋のビスケー湾から北海・バルチック海、地中海のエーゲ海東部・南部等に認められる。

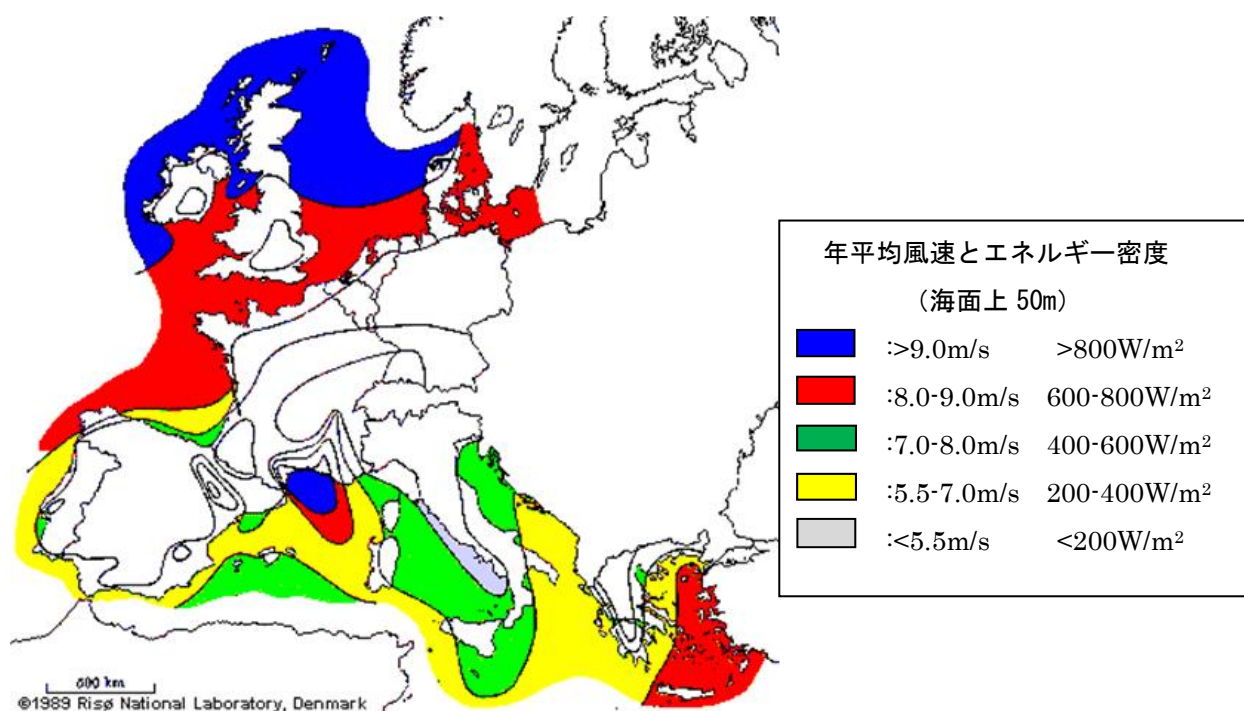


図 II.2.1-1 ヨーロッパ周辺海域の年平均風速と風力エネルギー密度のマップ (Petersen, 1992)

Matthies *et al.* (1995) は、ヨーロッパにおける当時の EC (ヨーロッパ共同体) 諸国の洋上風力発電賦存量から発電施設の設計に至るまでの総合的な調査を行っている。ここでは彼らの資料を基に、対象とする海域を海面上 60m 高の年平均風速 7.0m/s 以上、水深 0-30m、離岸距離 0-30km と設定するとともに、6MW 機の風車を 1km² 当たり 1 基設置するものとして、EC 諸国のポテンシャルを求めた。表 II.2.1-1 に洋上風力発電に係る国別ポテンシャルを示す。ポテンシャルの大きい国として、大西洋に面した北海、バルト海、ビスケー湾等の偏西風の影響域に位置し領海面積が相対的に大きい国であるイギリス、デンマーク、フランス、ドイツ、アイルランド、オランダ等があげられる。

表Ⅱ.2.1-1 EC諸国の洋上風力発電ポテンシャル (Matthies *et al.*, 1995 より作成)

国名	ポテンシャル (億kW)	国名	ポテンシャル (億kW)
イギリス	3.23	スペイン	0.20
デンマーク	2.06	ギリシャ	0.16
フランス	1.55	ベルギー	0.10
ドイツ	0.89	ポルトガル	0.08
アイルランド	0.64	イタリア	0.00
オランダ	0.52	合計	9.44

*年平均風速： $\geq 7.0\text{m/s}$ (海面上60m)

*対象海域：水深 $\leq 30\text{m}$ 、離岸距離 $\leq 30\text{km}$

*風車設置密度：1平方km当たり6MW

EC諸国の洋上風力発電の離岸距離別設置可能面積とともに、参考までにNEDOら(2009)および長井ら(2010)から日本のそれについても、表Ⅱ.2.1-2に併せて示す。ここでのEC諸国の設置可能面積は、自然公園、航路帯等の社会的条件を勘案しそれらに該当する海域を除いた算定結果となっているが、我が国における設置可能面積は社会的条件を考慮していない。同表に示すように、日本では離岸距離30kmまでの設置可能面積が約7,200km²であり、社会的条件の設定に関する相違を無視すれば、その面積はオランダに次いで7位にランクされる。EC諸国の設置可能面積の大きい国はイギリス、デンマーク、フランス、ドイツ、アイルランド、オランダ等で、前述のようにこれらの国はポテンシャルの大きい国である(参考までに、ヨーロッパの浮体式洋上風力発電のポテンシャルを豆知識Ⅱ.2.1-1に示す)。

表Ⅱ.2.1-2 日本とEC諸国の洋上風力発電設置可能面積の比較
(年平均風速：7m/s以上(海面上60m高)、水深帯：0-30m)

国名	離岸距離			
	0-10km	10-20km	20-30km	0-30km
イギリス	38,068	11,327	4,441	53,838
デンマーク	18,822	9,862	5,654	34,335
フランス	16,232	7,262	2,348	25,868
ドイツ	6,782	5,464	2,709	14,955
アイルランド	9,588	1,005	113	10,705
オランダ	4,934	2,308	807	8,715
スペイン	2,558	697	65	3,319
ギリシャ	2,508	111	10	2,628
ベルギー	573	565	498	1,635
ポルトガル	1,278	5	0	1,283
イタリア	56	0	0	56
日本	5,636	1,349	186	7,171

注) 欧州の出典：Matthies *et al.* (1995)

日本の出典：NEDOら(2009)及び長井ら(2010)

ここで興味深いことは、日本における設置可能面積のうち、約80%は離岸距離10km未満の海域であり(離岸距離が20-30km圏の海域面積は全体の約3%)、離岸距離が20-30km圏の海

域においても 8-30%の設置可能な海域面積を有するベルギー、ドイツ、デンマーク、オランダ、イギリス等とは異なることである。ヨーロッパのこれらの国々は海底地形の傾斜が緩やかで遠浅となっていることから、着床式洋上風力発電に適した海域が多い。

なお、日本と同様に海底地形が急深となっている国としてポルトガル、イタリア、ギリシャ、アイルランド、スペインがあげられる。

【豆知識Ⅱ.2.1-1】

●ヨーロッパの浮体式洋上風力発電のポテンシャル

浮体式洋上風力発電のポテンシャルの大きい国はノルウェーとイギリスで、両国合わせて 270GW (2.7 億 kW) となっている。その他、スペインの 80GW (0.8 億 kW)、大西洋と地中海のポテンシャルを合わせたフランスの 50GW (0.5 億 kW)、また地中海のイタリアとギリシャの 2 か国のポテンシャルの合計 100GW (1 億 kW) があげられる。

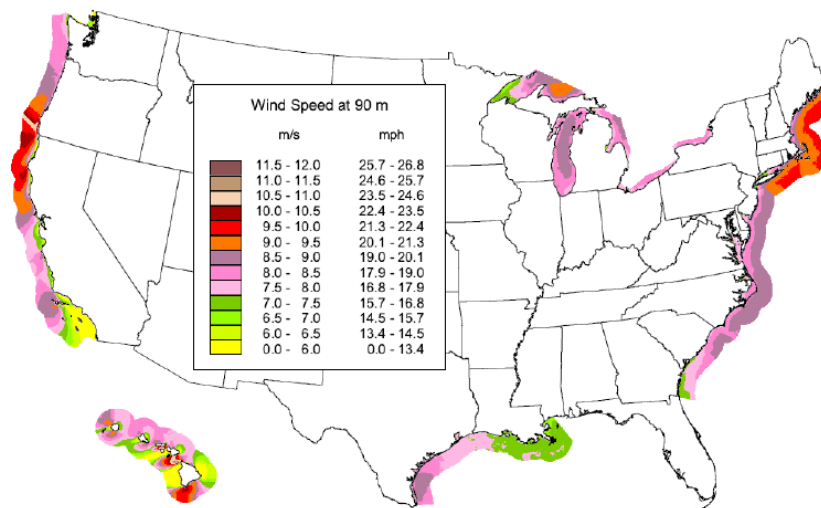
現在、ヨーロッパにおいて浮体式洋上風力発電の実証研究を行っている国は、ノルウェーとポルトガルである。両国ともに海底地形の勾配が急で、浮体式洋上風力発電に適した海域となっている。

国名	ポテンシャル (GW)	主な浮体方式	ポテンシャルの設定条件
イギリス	130	TLP	・離岸距離40km以内、航路・自然環境・低風速域・観光名所等を考慮 (利用可能割合：25%) ・浮体構造形式 TLP:適用水深50-300m、Spar:適用水深150-500m
アイルランド	40	TLP	
ノルウェー	140	TLP/Spar	
スウェーデン	45	TLP	
フィンランド・デンマーク	7	TLP	
フランス(大西洋/地中海)	50	TLP/Spar	
スペイン	80	TLP/Spar	
ポルトガル	20	TLP/Spar	
イタリア・ギリシャ	100	TLP/Spar	

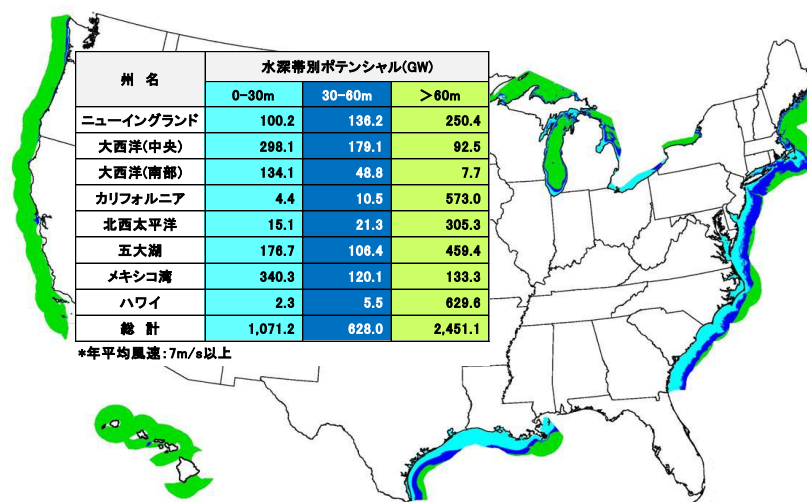
出典) Henderson, *et al.* (2009)

(2) アメリカ

Schwartz *et al.* (2010) は、アメリカ合衆国（アラスカ、フロリダ、アラバマ、ミシシッピの4州を除く）の海上風マップ（図Ⅱ.2.1-2：海面上90m）を基に年平均風速7m/s超、水深帯0-30m,30-60m,60m超の3層、離岸距離50海里（約92.6km）未満および風車設置密度5MW/km²の設定条件を設けて、洋上風力発電のポテンシャルを試算している（図Ⅱ.2.1-3；図中の表の色付けはマップの3つの水深帯の彩色に合わせている）。本図から、着床式洋上風力発電に適する太平洋での水深60m以浅の海域は、大西洋に比較して非常に少ないことが明らかである。大西洋側のニューイングランドから南部までの水深60m以浅のポテンシャルが896.5GW（約9億kW）であるのに対して、太平洋側（北西太平洋とカリフォルニア）のポテンシャルは51.3GW（約0.5億kW）で、17分の1程度となっている。なお、ここで取り上げた海域の水深帯0-30mのポテンシャルが同30-60mのポテンシャルよりも1.7倍多く、また浮体式の適用海域である水深60m超の海域のポテンシャルは約2,450GW（24.5億kW）となっており、水深帯0-30mと30-60mの両海域を合わせたポテンシャルよりも約1.4倍多い結果となっている。



図Ⅱ.2.1-2 アメリカ合衆国の海上風マップ（海面上90m）（Schwartz *et al.*, 2010）



図Ⅱ.2.1-3 アメリカ合衆国の洋上風力発電ポテンシャル（Schwartz *et al.*, 2010 より作成）

アメリカにおける最新の洋上風力発電のポテンシャルに関して、Musial *et al.* (2016) は年平均風速 7m/s 以上、水深 0-1,000m 以上（含む、最新技術による利用可能な結氷海域）、風車設置密度 3MW/km²、風車ハブ高 100m、離岸距離 200 海里までを算定条件とした推計値を示している。その結果、Gross Resource Potential として 10,800GW (44,378TWh/yr) を掲げ、その中で技術面・環境面での課題を満たす Technical Resource Potential は 2,058GW (7,203TWh/yr) と算定している。これらの推計値は、前述の Schwartz *et al.* (2010) と算定条件が異なるために、単純な比較はできない。海域別に見ると Gross Resource Potential は太平洋側が最も多く次いで大西洋側となっており、Schwartz *et al.* (2010) の結果とは異なる。しかし Technical Resource Potential では、大西洋側が最もポテンシャルが多く、次いでメキシコ湾、太平洋側、五大湖の順となっており、Schwartz *et al.* (2010) の結果と同様の傾向となっている（図 II.2.1-4）。なお、参考までに図 II.2.1-5 に Technical Resource Potential に対する設備利用率の分布図を示す。

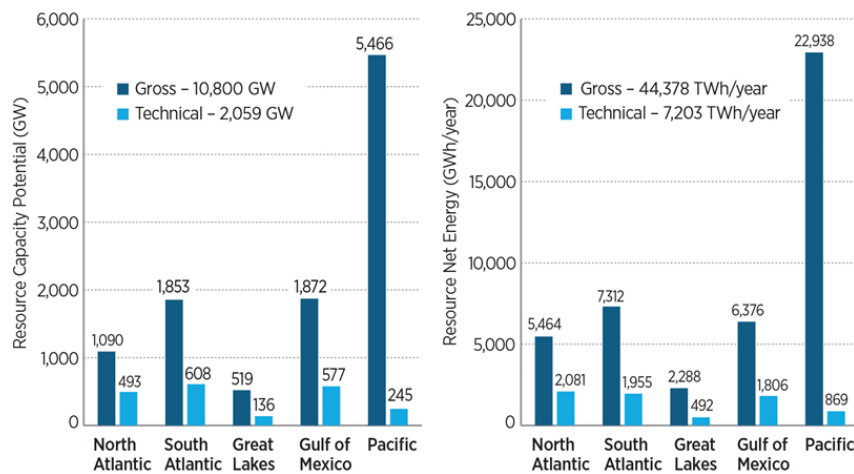


図 II.2.1-4 アメリカの海域別洋上風力発電ポテンシャルと発電電力量 (Musial *et al.*, 2016)

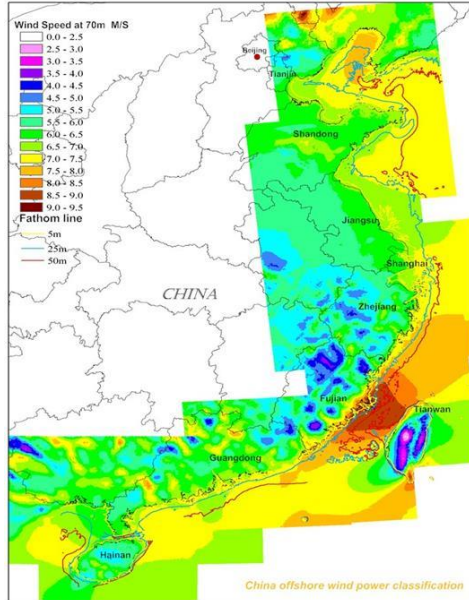


図 II.2.1-5 アメリカにおける洋上風力発電の設備利用率分布図 (Musial *et al.*, 2016)

【豆知識Ⅱ.2.1-2】

●中国の洋上風力発電のポテンシャル

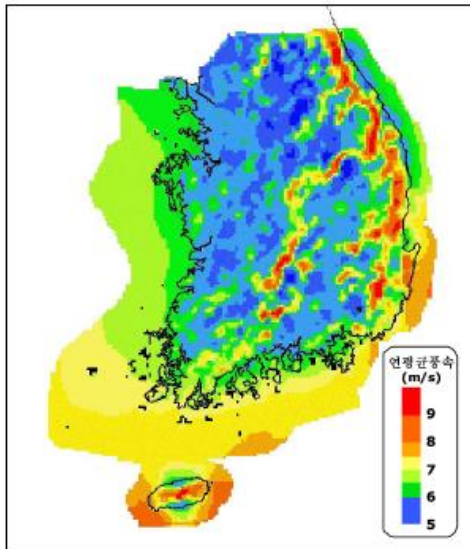
- ・着床式：750GW（7.5 億 kW）（Chan,2007）
- ・浮体式：45GW（0.45 億 kW）（Henderson *et al.*, 2009）



年平均風速マップ（70m 高）
出典：BTM Consult（2010）

●韓国の洋上風力発電のポテンシャル

- ・着床式：7.9GW（790 万 kW）（Kim,2009）
- ・浮体式：25GW（0.25 億 kW）（Henderson *et al.*, 2009）



平均風速マップ（80m 高）
出典：Kim（2009）

2.2 日本のポテンシャル

我が国は、風の資源量が少なく、風力発電に向いていないと考えられていた。しかし、NEDO が 1993 年度に発表した「全国風況マップ」の結果から、我が国においても風力発電の適地が存在し、導入が期待できることが明らかになった。当時は陸上風力発電が対象とされ、洋上風力発電については検討されていなかった。しかし我が国は排他的経済水域の面積、海岸線全長ともに世界第 6 位に位置する海洋国家であるため、洋上風力発電のポテンシャルは非常に大きいと考えられる。

洋上風力資源に関して、これまで NEDO と千代田デイムス・アンド・ムーア (1999)、千代田デイムス・アンド・ムーア (2000a;2000b)、NEDO (2003)、長井ら (2010)、環境省地球環境局地球温暖化対策課 (2010)、伊藤忠テクノソリューションズ (2011)、エックス都市研究所ら (2011)、日本風力発電協会 (2013) 等の機関により、海上風マップの作成や洋上風力発電のポテンシャルの算定が行われてきた。そして 2017 年 3 月には、NEDO より NeoWins (洋上風況マップ) が公開された。NeoWins とは NEDO Offshore Wind Information System のことであり、当マップは風況情報に加え自然環境情報や社会環境情報、有義波高の情報等を表示させることができる。例として海面上 80m での年平均風速の情報を図 II.2.2-1 に示す。

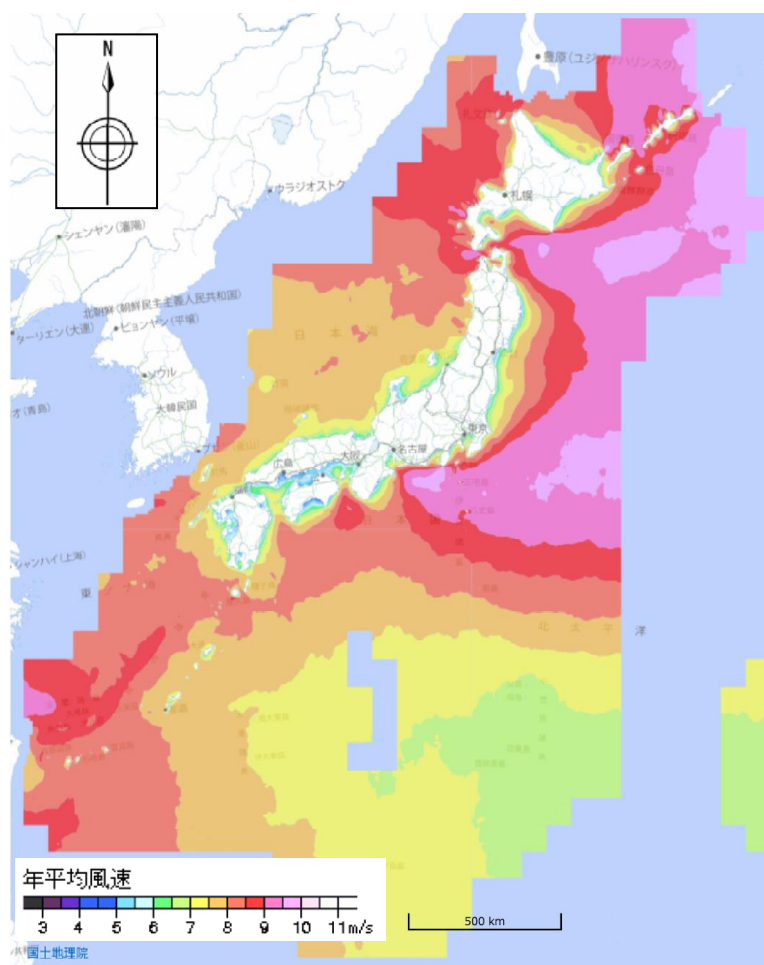


図 II.2.2-1 洋上風況マップ (年平均風速、海面上 80m 高)

(NeoWins (洋上風況マップ) HP : http://app10.infoc.nedo.go.jp/Nedo_Webgis/top.html)

図Ⅱ.2.2-1の洋上風況マップから、洋上風力発電に好適な風況（年平均風速（海面上80m）：7.0m/s以上）を有する海域は日本沿岸に広く分布しているが、北海道、東北、房総半島、遠州灘、南西諸島等の沿岸の風況が相対的に良い傾向にあることが分かる。また、主な既往調査資料からの我が国における洋上風力発電に関する風の資源量（賦存量、ポテンシャルおよび導入可能量）を、表Ⅱ.2.2-1に示す。同表に示すように、洋上風力発電の風資源量は資料によって大きな相違（着床式のケース：4,000万-2億1,000万kW）が見られるが、これは算出条件が異なることが大きな理由である。

表Ⅱ.2.2-1 既往調査資料による我が国における洋上風力発電に関する風資源量の一覧

番号	賦存量 (万kW)	ポテンシャル (万kW)	導入可能量 (万kW)	算出条件			出典
				賦存量	ポテンシャル	導入可能量	
1	—	4,039 (着床式)	—	<ul style="list-style-type: none"> 年平均風速: ≥ 7.0 m/s (海面上: 60m) 設備容量: 1,650 kW (ロータ直径(D)=66m) 風車の設置間隔: 5D×10D 	<ul style="list-style-type: none"> 水深: 0-30m 自然公園区域は開発不可 港湾域・河口域は水深10mまでの面積の内、利用可能面積はその85% 	—	千代田ディムス・アンド・ムーア(2000b): 新エネルギー等導入促進基礎調査 (我が国の諸条件を考慮した風力エネルギー利用可能性に関する調査) 報告書
2	—	120,085 着床式: 21,313 浮体式: 98,772	—	<ul style="list-style-type: none"> 年平均風速: ≥ 7.0 m/s (海面上: 80m) 設備容量: 1万kW/km² 	<ul style="list-style-type: none"> 水深: 0-50m(着床式), 60-200m(浮体式) 離岸距離: 0-30km 自然公園区域は開発不可 	—	NEDOら(2009): 洋上風力発電実証研究F/S評価報告書 長井 浩ら(2010): わが国沿岸海域における洋上風力発電の期待可採量
3	571,571	61,332 着床式: 9,383 浮体式: 51,949	—	<ul style="list-style-type: none"> 年平均風速: ≥ 7.5 m/s (海面上: 80m) 設備容量: 1万kW/km² 	同上	—	環境省地球環境局地地球温暖化対策課(2010): 平成21年度 再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査
4	100,921	80,860 着床式: 12,309 浮体式: 68,551	6,598 着床式: 4,461 浮体式: 2,137	同上	同上	<ul style="list-style-type: none"> 売電価格20円/kWh 期間: 20年 税引前PIRR: $\geq 8\%$ 発電原価16.8円/kWh 	伊藤忠テクノソリューションズ(2011): 新エネルギー等導入基礎調査事業(風力エネルギーの導入可能性に関する調査) 調査報告書
5	—	60,784 着床式: 9,974 浮体式: 51,811	300	同上	同上	<ul style="list-style-type: none"> 売電価格20円/kWh 期間: 20年 税引前PIRR: $\geq 8\%$ 年平均風速: ≥ 8.0 m/s 建設コスト/維持管理費等の設定 	エックス都市研究所ら(2011): 平成22年度再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査
6	278,503	141,277 着床式: 33,151 浮体式: 108,126	11,396 着床式: 8,203 浮体式: 3,192	<ul style="list-style-type: none"> 年平均風速: ≥ 5.5 m/s (海面上: 90m) 設備容量: 1万kW/km² 	<ul style="list-style-type: none"> 年平均風速: ≥ 6.5 m/s (海面上: 90m) 水深: 0-50m(着床式), 60-200m(浮体式) 離岸距離: 0-30km 自然公園区域は開発不可 	<ul style="list-style-type: none"> 売電価格36円/kWh 期間: 20年 税引前PIRR: $\geq 10\%$ 建設コスト/維持管理費等の設定 ※売電価格のシナリオは他にもあり 	環境省地球環境局地地球温暖化対策課(2016): 平成27年度再生可能エネルギーに関するソーシング基礎情報整備調査

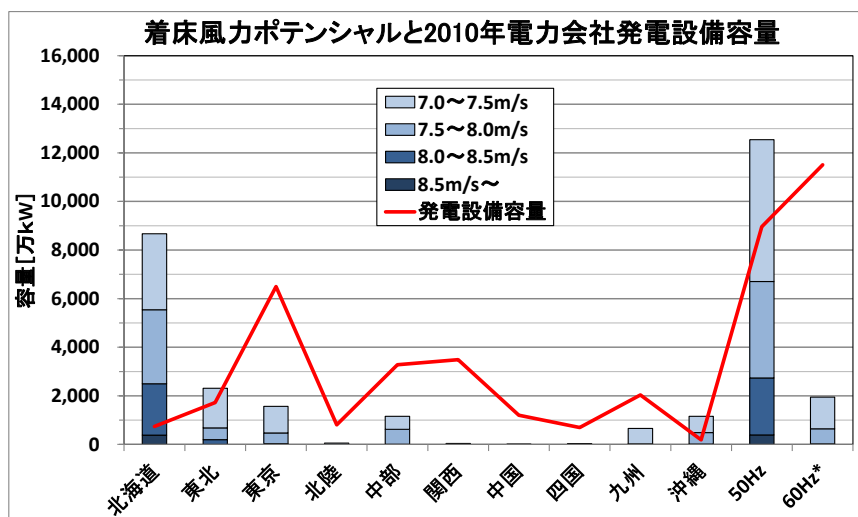
表Ⅱ.2.2-1における番号2に示した既往調査資料では、水深帯別にポテンシャルが取りまとめられている。その推計結果の一部を表Ⅱ.2.2-2に示す。水深200m（陸棚縁辺近傍の水深）、離岸距離30kmまでのポテンシャルは約120万MW（約12億kW）となっており、そのうち水深0-50mに適用される着床式洋上風力発電のそれは約21万MW（約2.1億kW）で、全体の約18%にすぎない（水深50-200mの浮体式では約99万MW（約9.9億kW）で、全体の82%程度）。このことから、我が国の周辺海域では、浮体式の方が着床式よりも約4.6倍のポテンシャルを有していることが明らかとなった。なお、我が国の急深な海底地形の特徴から推察されるように、着床式（水深50m以浅）の離岸距離10-30kmでのポテンシャル面積は、着床式全体のポテンシャル面積の約20%を占めているにすぎない。

表Ⅱ.2.2-2 水深帯別・離岸距離別洋上風力発電のポテンシャル (NEDOら, 2009;長井ら, 2010)

水深帯 (m)	離岸距離												全体に対する割合 (%)
	0-10km			10-20km			20-30km			30-40km			
	面積 (km ²)	設置基数	設備容量 (MW)	面積 (km ²)	設置基数	設備容量 (MW)	面積 (km ²)	設置基数	設備容量 (MW)	面積 (km ²)	設置基数	設備容量 (MW)	
0-20	6,114	12,228	61,140	713	1,426	7,130	82	164	820	6,909	13,818	69,090	5.8
20-30	3,214	6,428	32,140	807	1,614	8,070	104	208	1,040	4,126	8,252	41,260	3.4
30-50	7,420	14,840	74,200	2,236	4,472	22,360	622	1,244	6,220	10,278	20,556	102,780	8.6
0-50	16,748	33,496	167,480	3,756	7,512	37,560	808	1,616	8,080	21,313	42,626	213,130	17.7
50-100	17,714	35,428	177,140	18,247	36,494	182,470	6,306	12,612	63,060	42,267	84,534	422,670	35.2
100-200	12,878	25,756	128,780	21,076	42,152	210,760	22,552	45,104	225,520	56,505	113,010	565,050	47.1
50-200	30,592	61,184	305,920	39,323	78,646	393,230	28,858	57,716	288,580	98,772	197,544	987,720	82.3
0-200	47,340	94,680	473,400	43,079	86,158	430,790	29,666	59,332	296,660	120,085	240,170	1,200,850	100.0

注) ・年平均風速: 7.0m/s (海面上80m)、風車: 5MW (2基/km²)を基に推計
 ・水深0-50m: 着床式の適用範囲、水深50-200m: 浮体式の適用範囲とそれぞれ設定

また、表Ⅱ.2.2-1における番号5の既往調査資料では、電力会社管内別に着床式と浮体式の洋上風力発電の導入ポテンシャルが集計されている。図Ⅱ.2.2-2に各電力会社管内における洋上風力発電ポテンシャルと電力会社の設備容量を併記して示す。本図からポテンシャルは風況の良い北海道、東北および沖縄で電力会社の設備容量を上回り、ポテンシャルと設備容量の間にミスマッチが認められ、システムの容量不足が大きな課題となっている。



(年平均風速: 7.0m/s以上 (海面上80m), 水深50m未満, 離岸距離: 30km)

図Ⅱ.2.2-2 着床式洋上風力発電のポテンシャルと電力会社発電設備容量 (日本風力発電協会, 2014)

3 洋上風力発電の現状と動向

3.1 世界の洋上風力発電

(1) 導入量の現状

世界初の洋上風力発電所はスウェーデンの Nogersund 洋上風力発電所で、220kW の風車 1 基を水深 5m、離岸距離 1,000m の地点に設置して 1990 年に実証試験が行われた（現在、撤去されている）。その後、デンマークでは 1991 年に Vindeby (450kW×11 基)、1994 年に Tunø Konob (500kW×10 基)、オランダでは 1994 年に IJssel 湖に Lely (500kW×4 基) 等と、各国で導入が始まったが、これらは実証試験が主目的であった。2000 年頃からデンマークを中心として事業化を目指した洋上ウィンドファームの建設が始まり、2000 年代半ば頃からはイギリス、ベルギー、ドイツ等の参入が見られた。設置海域は、初期には波浪の静穏な閉鎖性海域（バルチック海、デンマーク国内の諸島間の内海、アイリッシュ海）であったが、2002 年以降は比較的波浪の厳しい半閉鎖性海域（北海）へと、設置海域が拡大している。図 II.3.1-1 に 2015 年末までに設置された洋上ウィンドファームの配置を示す。設置海域の拡大に伴い、近年、水深が深く、離岸距離が遠い海域に洋上風力発電施設が設置される傾向が図からも認められる（図 II.3.1-2）。本ガイドブック II.3.1(2)「今後の展開」で述べているが、このような傾向は、イギリスの Round3 やドイツの排他的経済水域（EEZ）において計画されていることに起因する。

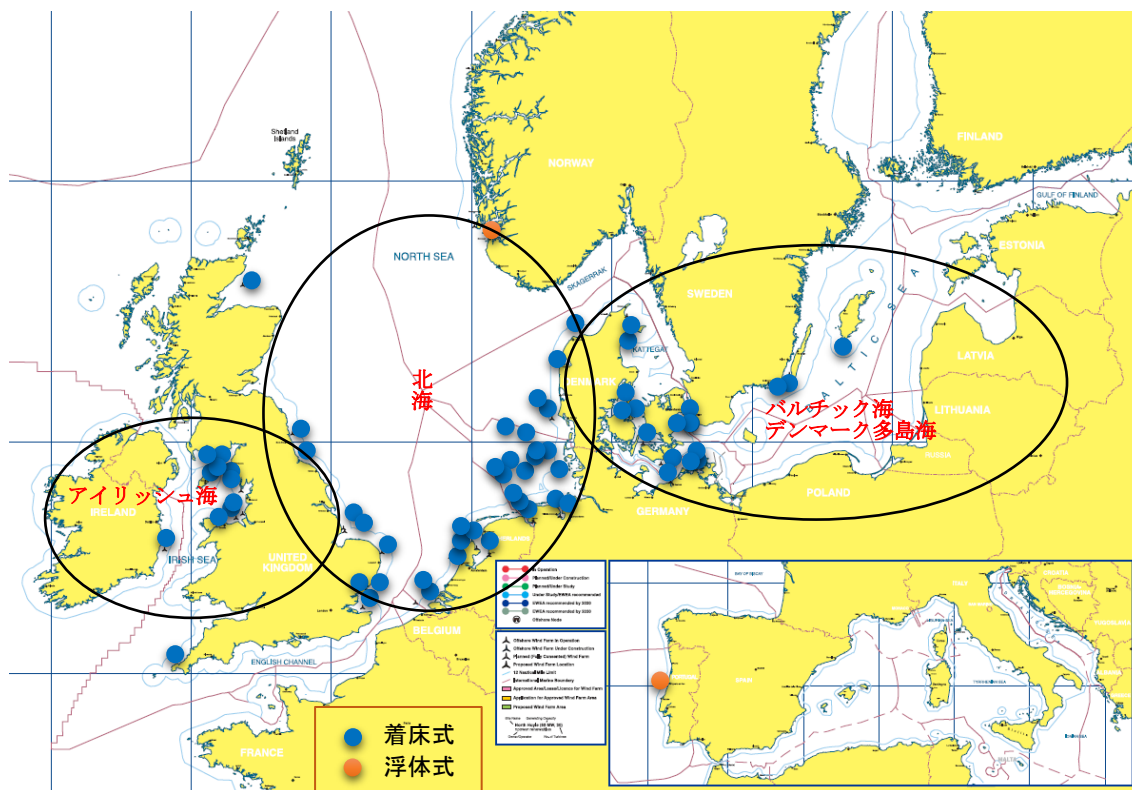
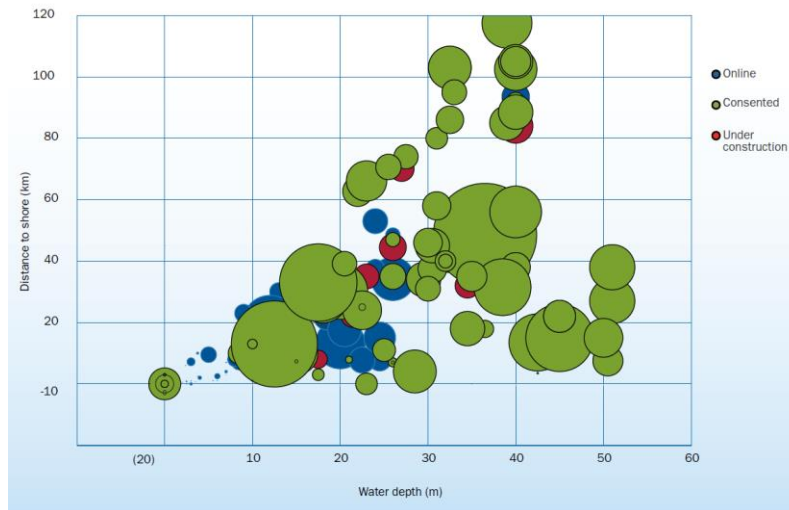


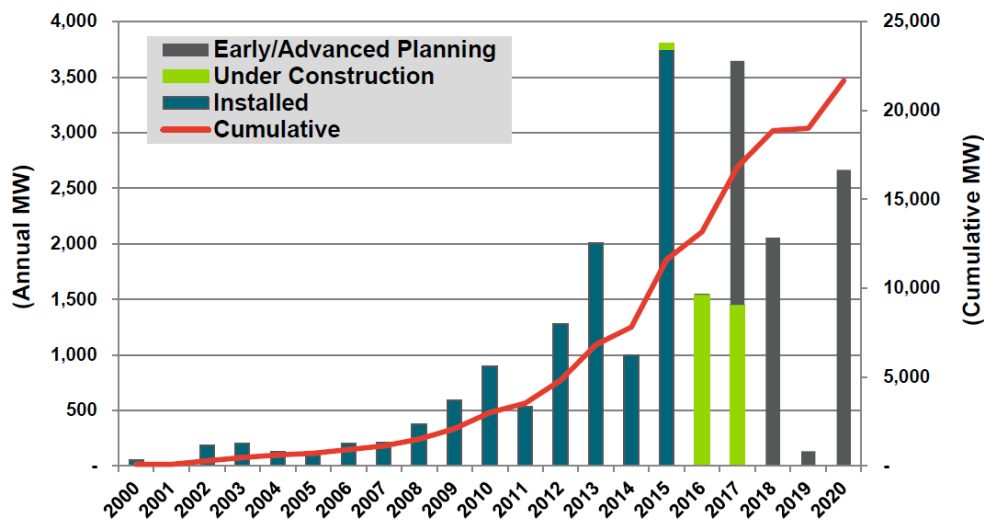
図 II. 3. 1-1 ヨーロッパにおける洋上風力発電所の配置図（2015 年末時点）
（地図は EWEA, 2009 を使用）



図Ⅱ.3.1-2 ヨーロッパにおける洋上風力発電施設の設置水深および設置海域離岸距離の推移 (EWEA, 2015)

また、洋上風力発電の導入はヨーロッパだけではなく東アジア諸国にも広がり、日本や中国等も参入し、2015年末の世界の洋上風力発電累積導入量は11,617MWに達した(図Ⅱ.3.1-3: 国別洋上風力発電の導入リストは付属資料Ⅰを参照)。これは風力発電全体(2015年末: 432,883MW)の約3%にすぎないが、図示されているように2020年末の世界の洋上風力発電累積導入量は現在のほぼ倍の22,500MWと予測されている。なお、2015年はドイツの単年導入量が2,467MWと大きな伸びを見せたこともあり、世界の単年導入量は3,755MWと著しく増えている。

洋上風力発電の導入量が多い上位5位の国は、イギリス(全体の44%)、ドイツ(28%)、デンマーク(11%)、ベルギー(6%)、中国(5%)となっており、ヨーロッパ諸国が大半を占めている。アジアでは、上記のように中国が上位の5位にランクされ、日本は5.2万kW(0.5%)で8位となっている(図Ⅱ.3.1-4)。



図Ⅱ.3.1-3 世界の洋上風力発電導入量の推移 (NAVIGANT, 2016)

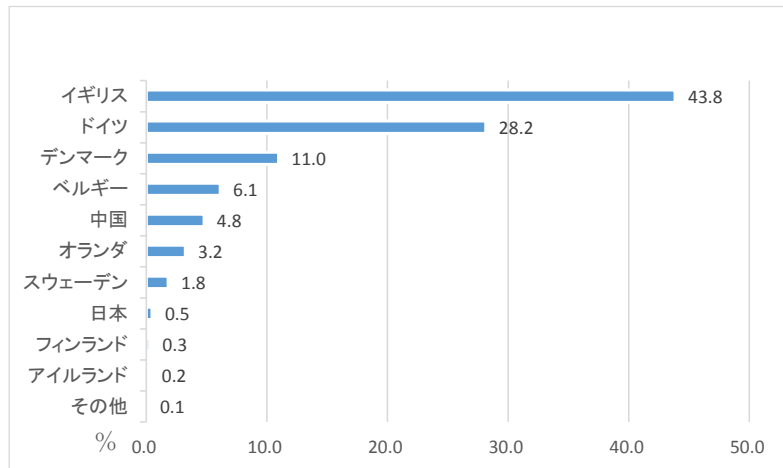


図 II. 3. 1-4 国別洋上風力発電導入量の割合 (NAVIGANT (2016) より作成)

このような導入量の増加は、風力発電機の大型化と施設の大規模化によっている。図 II.3.1-5 に、年別の 1 基当たりの平均出力と最大出力を示す。風力発電機の定格出力の推移を見ると、1990 年代は平均出力、最大出力ともに 0.5MW 程度であったが、2000 年から 2005 年頃までは平均出力で概ね 2MW 程度（最大で 4.5MW）と、急速に大型化が進んでいる。その後、2005 年から 2010 年頃までは平均出力で 3MW 程度（最大で 5MW）、そして、それ以降 2015 年までは平均出力で約 4MW（最大で 7MW）と、20 数年で最大出力が約 14 倍となっている（風車の大型化については、付属資料 II を参照）。

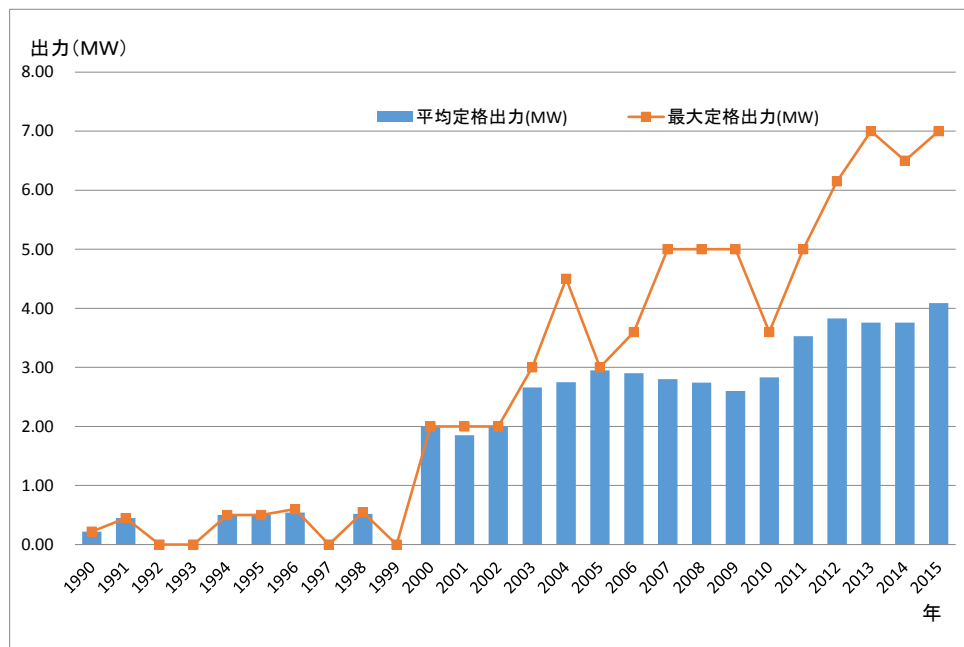


図 II. 3. 1-5 洋上風力発電機の年別定格出力（1 基当たりの平均と最大）の推移

出典：EWEA (The European offshore wind industry-key trends and statistics 2011-2016) ,GWEC (Global Wind Report 2009-2016) ,4C Offshore Wind Data Base (<http://www.4coffshore.com/windfarms/>) を基に作成

ちなみに、洋上風力発電所に設置されている風車メーカーの導入割合は、1991年から2015年末までの導入実績から Siemens が 62% (約 7,029MW)、Vestas が 18% (約 2,077MW)、Senvion が 7% (約 811MW)、Adwen が 6% (約 630MW)、Bard が 4% (約 405MW)、Sinovel が 1% (約 161MW) 等となっている (図 II.3.1-6)。このように洋上風力発電機では、Siemens 社の風車の導入量が過半数を超えており、次いで Vestas 社が全体の 1/5 程度を占めていることが分かる。

なお、Siemens は 2004 年にデンマークの Bonus を買収した。REpower は 2007 年にインドの Suzlon に買収されたものの、旧社名の REpower で風車を販売していたが、2014 年に社名を Senvion に変更している。また、三菱重工業は Vestas と洋上風力発電設備事業の新しい合弁会社 MHI Vestas OffshoreWind を 2013 年に設立している。さらに、フランスの重工業メーカー AREVA とスペインの風車メーカー GAMESA の合弁会社であった Adwen は洋上風車を専門に製造していたが、2016 年 9 月に AREVA が Adwen の全保有株を GAMESA に売却している (GAMESA は 2016 年 6 月に Siemens との間で風力発電事業を統合することに合意している)。このように、近年風車メーカーの再編が活発化している。

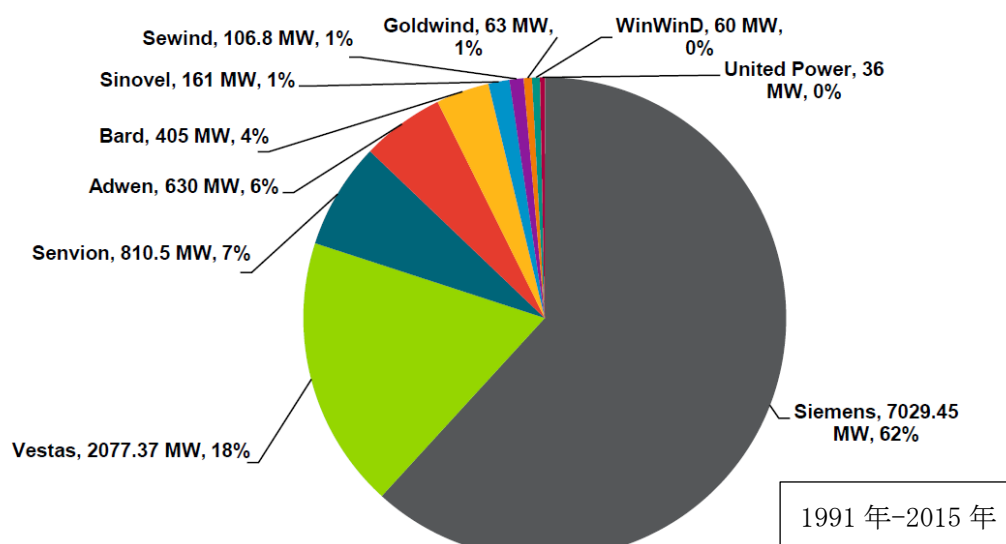


図 II.3.1-6 風車メーカー別の導入割合 (NAVIGANT, 2016)

また、風力発電施設の規模について、1 施設当たりの平均設備容量と最大設備容量の推移を図 II.3.1-7 に示す。平均設備容量の推移を見ると、年により増減があるものの、1990 年代は平均設備容量、最大設備容量ともに 1 桁の 5MW 未満であったが、2000 年から 2009 年頃までは平均設備容量が 100MW 以下 (最大で 165MW)、2010 年以降は平均設備容量 300MW 超の年も見られ、最大設備容量は 630MW となっている。このように、最大設備容量は 20 数年で 300 倍以上の規模となっている。

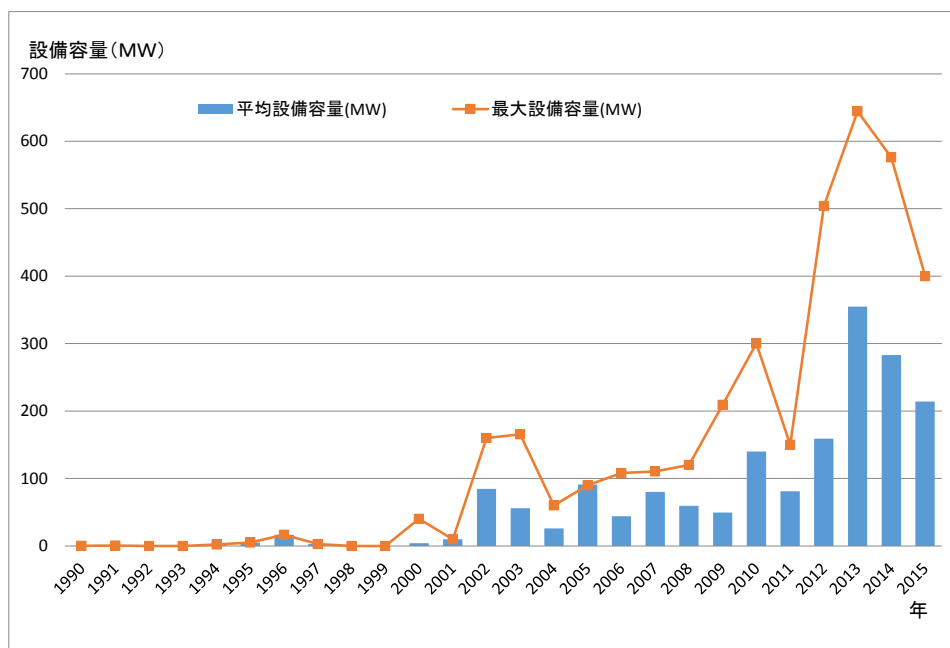


図 II. 3.1-7 洋上風力発電機の年別設備容量 (1 施設当たりの平均と最大) の推移
 出典：EWEA (The European offshore wind industry-key trends and statistics 2011-2016) ,
 GWEC (Global Wind Report 2009-2016) ,4C Offshore Wind Data Base
 (<http://www.4coffshore.com/windfarms/>) を基に作成

世界の大規模洋上風力発電所で上位 10 位までの施設を、表 II.3.1-1 に示す。表に示すように、ベスト 10 に入る洋上風力発電施設の大半が 2013 年以降に稼働したものである。現時点で最大の施設は London Array Phase I の 630MW で、Phase II を含めると、本発電施設は原子力発電所並みの 1,000MW (1GW) となる計画となっている。

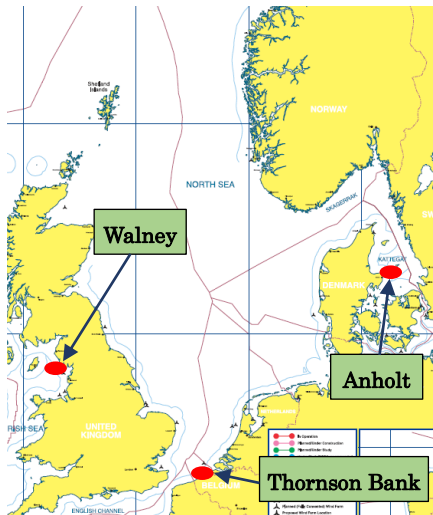
参考までに、本項の末尾にデンマーク (Anholt)、イギリス (Walney) およびベルギー (Thomton Bank) の主要な着床式洋上風力発電施設の導入事例を示す。

表 II. 3.1-1 上位 10 位までの大規模洋上風力発電施設 (2015 年末現在)

順位	国名	洋上風力発電所名	総出力 (MW)	風車定格出力×設置基数	稼働年	備考
1	イギリス	London Array Phase I	630.0	3.6×175	2012/2013	phase II を含めて1000MWの計画
2	イギリス	Gwynt y Môr (2)	576.0	3.6×160	2014	
3	イギリス	Greater Gabbard	504.0	3.6×150	2012	
4	ドイツ	BARD Offshore 1	400.0	5.0×80	2012/2013	phase I～IV
4	ドイツ	Borkum	400.0	5.0×80	2014	phase I
4	ドイツ	Blobal Tech 1	400.0	5.0×80	2015	
7	デンマーク	Anholt	399.6	3.6×111	2013	
8	イギリス	West of Duddon Sands	388.8	3.6×108	2014	
9	イギリス	Walney	367.2	3.6×102	2010/2012	phase I, phase II
10	ベルギー	Thornton Bank	325.2	5.0×6, 6.0×30, 6.15×18	2008/2012/2013	phase I, phase II, phase III

【デンマーク : Anholt】

国名	デンマーク
施設名	Anholt
施設設備容量(MW)	399.6
風車単機容量(MW)	SWT-3.6-120(Siemens) 3.6
風車設置基数	111
ハブ高(m)	81.6
ロータ直径(m)	120
水深(m)	14-19
離岸距離(km)	15
支持構造	モノパイル



地図は EWEA, 2009 を使用



上図 Siemens HP : <http://www.siemens.com/press/en/feature/2013/energy/2013-09-anholt.hp#ii143>

下図 Siemens HP : <http://www.siemens.com/press/en/feature/2013/energy/2013-09-anholt.hp#ii142>

【イギリス：Walney】

国名	イギリス		
	Walney phase1	Walney phase2	Walney phase1, 2
施設設備容量 (MW)	183.6	183.6	367.2
風車単機容量 (MW)	SWT-3.6-107 (Siemens) 3.6	SWT-3.6-120 (Siemens) 3.6	—
風車設置基数	51	51	102
ハブ高 (m)	83.5	90.15	—
ロータ直径 (m)	107	120	—
水深 (m)	19-28	14-19	—
離岸距離 (km)	14	15	—
支持構造	モノパイル	モノパイル	—



The Crown Estate HP : <https://www.thecrownestate.co.uk/news-and-media/news/2014/crown-estate-welcomes-consent-for-walney-offshore-wind-extension/>

【ベルギー：Thornton Bank】

国名	ベルギー			
施設名	Thornton Bank phase I	Thornton Bank phase II	Thornton Bank phase III	Thornton Bank phase I, II, III
施設設備容量(MW)	30	184.5	110.7	325.2
風車単機容量(MW)	5M (REpower) 5.075	6M (REpower) 6.15	6M (REpower) 6.15	—
風車設置基数	6	30	18	54
ハブ高(m)	94	95	95	—
ロータ直径(m)	126	126	126	—
水深(m)	12-28	6-28	11-28	—
離岸距離(km)	27	27	26	—
支持構造	重力	ジャケット	ジャケット	—



ABB HP : <http://www.abb.com/cawp/seitp202/8a3f23f5ee2b0939c1257be90038bc92.aspx>

(2) 今後の展開

世界風力会議（GWEC：Global Wind Energy Council）によれば、2030年までに世界の風力発電導入量は約21.1億kW（2,110GW）と2015年末の導入量の約5倍に達し、風力のみで石炭、石油、LNG等による総発電量の最大20%を占める可能性があるとし、これは世界全体で33億t以上の二酸化炭素排出削減量に匹敵するものと予測している（GWEC,2016a）。

風力発電の中でも洋上風力発電は、ポテンシャルが膨大であることから注目されている再生可能エネルギーである。しかし、その導入拡大に係る課題の一つが「コスト」である。これまで洋上風力発電では、コスト低減が導入普及の鍵とされてきた。2015年に欧州連合（EU）全体で新たに導入された設備容量は約3,000MWで、これは単年度導入量では過去最大の導入となっているが、Wind Europeによれば2016年には2015年を上回る約3,700MWの導入が予測されている（Schwägerl,2016）。Schwägerl（2016）が指摘しているように、欧州の洋上風力発電にブームが認められるのは、二酸化炭素排出削減目標の一環として政府からの補助金や有利なインセンティブの付与により風力発電プロジェクトが支援されてきただけでなく、風力の発電原価がガス・石油等のそれと比較して遜色のないことによることもあげられる（ガス・石油等：約65-70€/MWh（7.5-8.1円/kWh）、陸上風力：約50-96€/MWh（5.8-11.0円/kWh）、洋上風力：約73-140€/MWh（8.4-16.1円/kWh）、レート115円/€）。さらに風力発電は、環境コストを考慮すればさらに有利なエネルギー源である。

報道（<http://www.telegraph.co.uk/business/2016/09/14/new-record-for-cheapest-offshore-wind-farm/>）によれば、Vattenfallは2016年9月にデンマーク近海の洋上風力発電施設（Vesterhav Syd and Vesterhav Nord）を60€/MWh（6.9円/kWh、115円/€）の史上最安値で落札した。この価格は、約2ヶ月前まで洋上風力発電の最安値であったDong Energy（現Ørsted）のオランダのBorssele 1&2（700MW）の72.7€/MWh（8.4円/kWh、115円/€）を凌ぐものである（8MW級風車の導入が必須：<http://www.ewchargenews.com/wind/1437866/analysis-field-open-for-8mw-giants-as-dong-mulls-borssele-options>）。これらの安価な価格に関してPrichard（2016）は、北海の石油ガスの試掘が低迷しており洋上風力発電所の建設に破格の値段で作業船やクルーを使用できること、ゼロ金利の世界にあって国際的な金融機関が金利を抑え込んでいること、鉄鋼の値下がり等を要因としてあげている一方で、安価な価格に懐疑的な意見（利幅が少なすぎるにより様々なリスク対応が不可能となる）もあることを紹介している。

世界各国において、洋上風力発電の導入目標を掲げている事例を表Ⅱ.3.1-2に示す。表で示しているように、導入目標の対象年は2020年以外の事例もあり、国が国策として定めている目標値の他、民間組織による目標値も含まれている。2020年をターゲットとした最大の目標値は中国の30GW（3,000万kW）で、次いでイギリスの13GW（1,300万kW）、ドイツの7.7GW（770万kW）となっている。各国とも意欲的な導入目標を掲げているように、洋上風力発電の開発促進の戦略として、技術競争力の確立を通じた産業の育成と雇用対策をあげることができる。なお、アメリカは2050年に86GW（8,600万kW）の導入目標を掲げているが、2016年12月に洋上風力発電として初の商業プロジェクト（Block Island Wind Farm（大西洋沿岸ロング・アイランド湾近傍：30MW（6MW×5基））が稼働した。

以下、洋上風力発電の導入が進んでいるヨーロッパのイギリスとドイツ、そして中国、アメリカを取り上げて、近年の動向を取りまとめた。

表Ⅱ.3.1-2 世界各国における洋上風力発電に係る導入目標

国名	洋上風力発電の導入目標(2020年) (GW)	備考
イギリス	13.0	再生可能エネルギー導入計画 National Renewable Energy Action Plan, UK, 30 (June, 2010)
フランス	3.0	IEA Wind Annual Report 2015
デンマーク	1.5	エネルギー戦略ビジョン2050 (2011.2) 風力発電比率を現状の約2倍に相当する40%程度まで増加
オランダ	4.45 (2023年)	IEA Wind Annual Report 2015
ドイツ	7.7 (2025年:11GW、2030年:15GW)	IEA Wind Annual Report 2015、GWEC2015
ベルギー	2.70	IEA Wind Annual Report 2015
スペイン	0.75	IEA Wind Annual Report 2015
ポルトガル	0.027	IEA Wind Annual Report 2015
イタリア	0.7	IEA Wind Annual Report 2015
スウェーデン	10TWh (0.4)	IEA Wind Annual Report 2015
アメリカ	3.0 (2030年:22GW、2050年:86GW)	Wind Vision (エネルギー省, 2015.3.12)
中国	30 (2015年:5GW)	新興エネルギー産業発展計画(国家エネルギー局, 2011)
韓国	2.5 (2019年)	洋上風力発電推進ロードマップ(知識経済部, 2011.10)
台湾	0.6 (2030年:3.0GW)	経済省(2013)

* GW : 10⁶kW(100万kW)

* スウェーデンの導入目標(0.4GW)は、設備利用率30%として算出。

1) イギリス

2008年気候変動法 (Climate Change Act 2008 (c. 27)) は、2050年までにイギリスにおける温室効果ガス排出量を1990年比で80%削減することを最終目標とした法律である。気候変動法を確実に推進する対策として、最初に3期の割当期間 (2008-2012年、2013-2017年および2018-2022年) を設け、最後の期間における削減目標を最低でも26%としている。再生可能エネルギー導入計画では、2020年までに年間電力消費量の30%を再生可能エネルギーにより賄う計画となっている。気候変動委員会は温室効果ガスの排出量削減に風力発電が重要な役割を担うことを認めており、2020年の洋上風力発電の導入目標は13GWとされている (表Ⅱ.3.1-2、参照)。

イギリスの洋上風力発電の導入量は、2008年にデンマークを抜いて世界一になった (同国の最初の洋上風力発電施設は2000年に建設された Blyth (4MW:2MW×2) である)。これは、洋上開発に直接利害を有する The Crown Estate (政府系の王室の不動産財産の管理機関) が推進役となっていることもあるが、イギリス政府がエネルギー・気候問題等の上位の政策目標

と整合する形で許認可手続きや利害調整を円滑に進めるための枠組みを構築したことによっている（伊藤,2013）。前述の Blyth プロジェクトの完工と併せて、The Crown Estate により開発海域（ゾーニング）が特定化され、洋上風力発電事業者を公募入札する制度が構築された。図 II.3.1-8 に Round1、Round2 および Round3 の公募海域を示すとともに、以下にそれぞれの海域の概要を記す。

- Round1：開発海域は領海内、水深 4-21m、離岸距離 2-13km
- Round2：開発海域は領海内、水深 6.5-29m、離岸距離 7-30km
- Round3：開発海域は排他的経済水域（EEZ）、水深 35-53m、離岸距離 20-160km

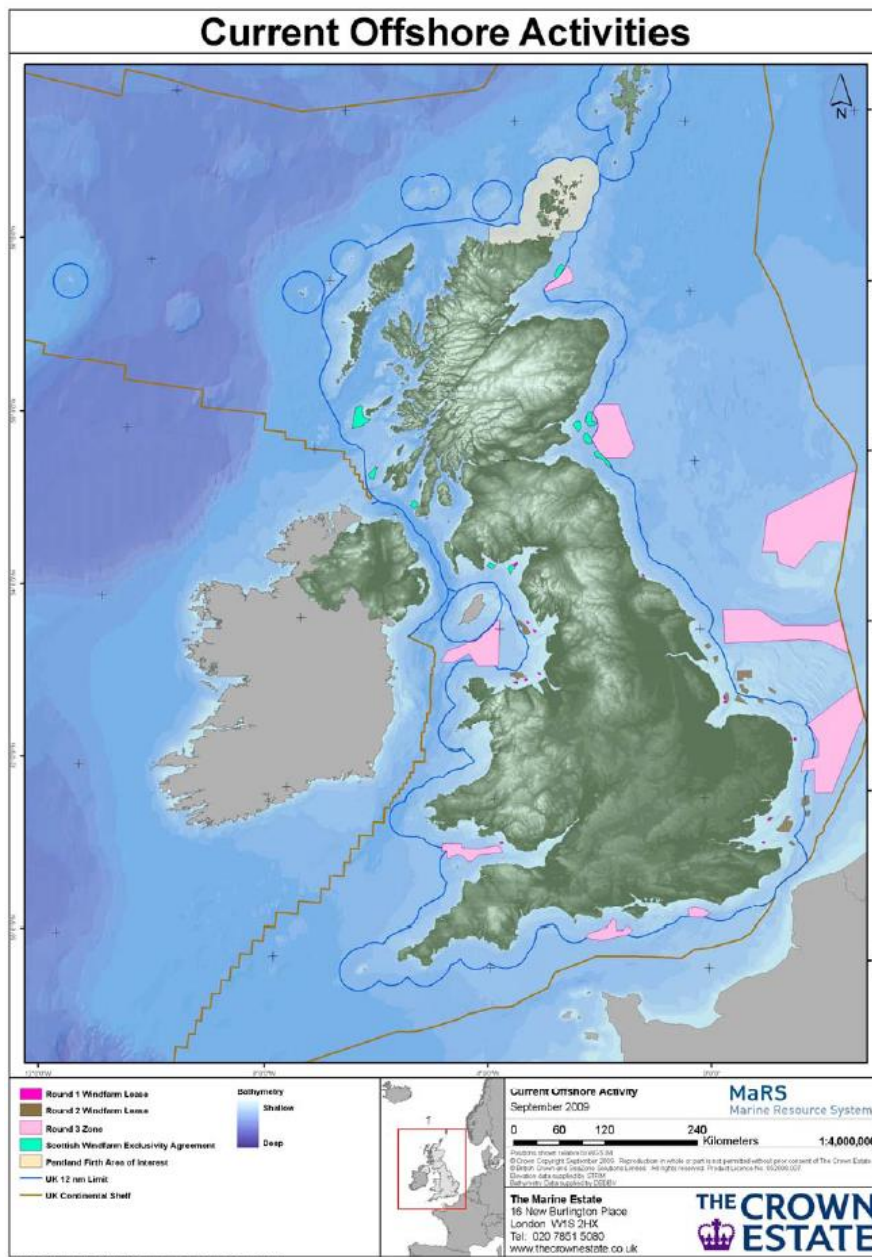


図 II.3.1-8 洋上風力発電の公募海域（Langston, 2010）

2001年に公表された Round1 (平均設備容量：100MW)、2002年に公表された Round2 (平均設備容量：400MW) では、一部の認可済みあるいは撤退のプロジェクトを除いて、ほとんどのプロジェクトが運開している。また、2010年に公表された Round3 (平均設備容量：1,000MW) については、代表的な公募海域において The Crown Estate と Scottish Power Renewables、Vattenfall および DONG Energy (現 Ørsted) の間で、それぞれ基本的な合意形成がなされている段階にある。

2015年における陸上を含めた風力発電累積導入量は 13,603MW で、このうち洋上風力発電累積導入量は 5,066.5MW (約 5GW) と、全体の約 37%を占めている (GWEC,2016b)。2008年以降イギリスの洋上風力発電累積導入量は世界一の座にあるものの、2015年の単年の洋上風力発電導入量は約 570MW で、これはドイツの単年導入量の 1/4 程度であった (図 II.3.1-9)。しかし、現在 ROUND2 の海域を中心に 400MW を超える洋上ウィンドファーム (Race Bank, Dudgeon, Pampion 等) が建設中であり、その建設以降は ROUND3 の海域における 1,000MW 超のウィンドファームの導入が計画されている。このような導入計画に基づけば、2020年には 10GW の導入が期待されている (GWEC,2016b)。

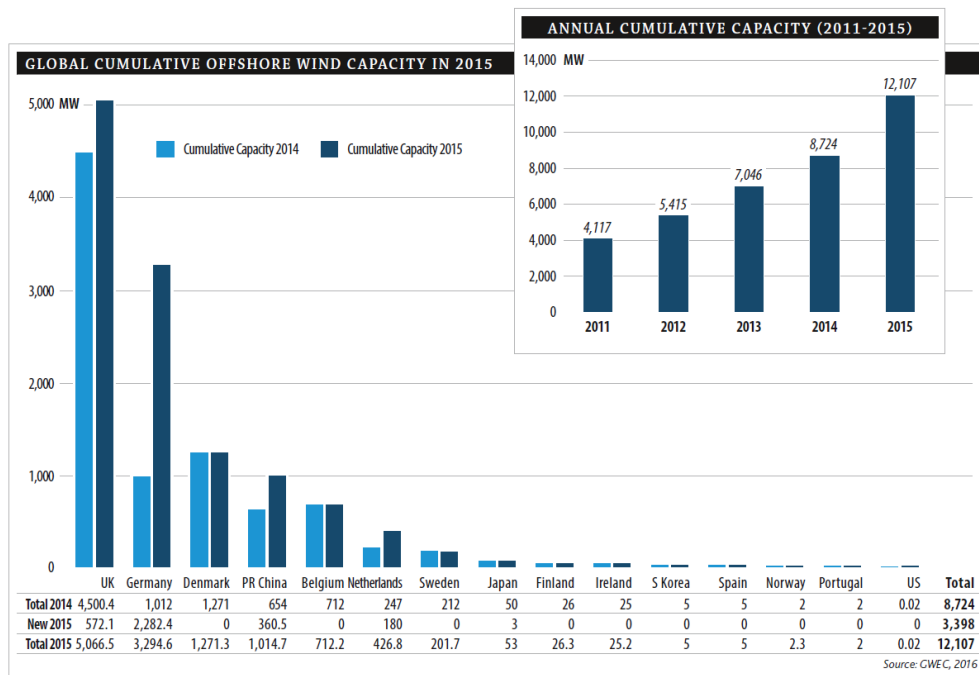


図 II.3.1-9 世界全体および主要国別洋上風力発電導入量 (GWEC, 2016b)

イギリスにおける風力発電による電力の買取制度では、これまで ROCS (Renewable Obligation Certificate System : 再生可能エネルギー使用義務認証システム ; 日本の RPS と同様のシステム) が採用され、洋上風力発電のクレジット価値は陸上風力発電を含む他の再生可能エネルギー発電の 1ROC/MWh よりも 5 割多い 1.5ROC/MWh (2009-2012 年度) と設定されていた。これは、国の支援が必要な重要技術として、洋上風力発電の導入普及に力が入られてきたからに他ならない (2013-2014 年度は 2ROC/MWh、2015 年度は 1.9ROC/MWh、2016 年度は 1.8ROC/MWh の計画)。2011年に ROCS 制度の廃止が発表され、ROCS 制度に代わり FiT-Cfd (差額支払契約付固定価格買取制度) に移行することになり、新たな FiT-Cfd は 2013

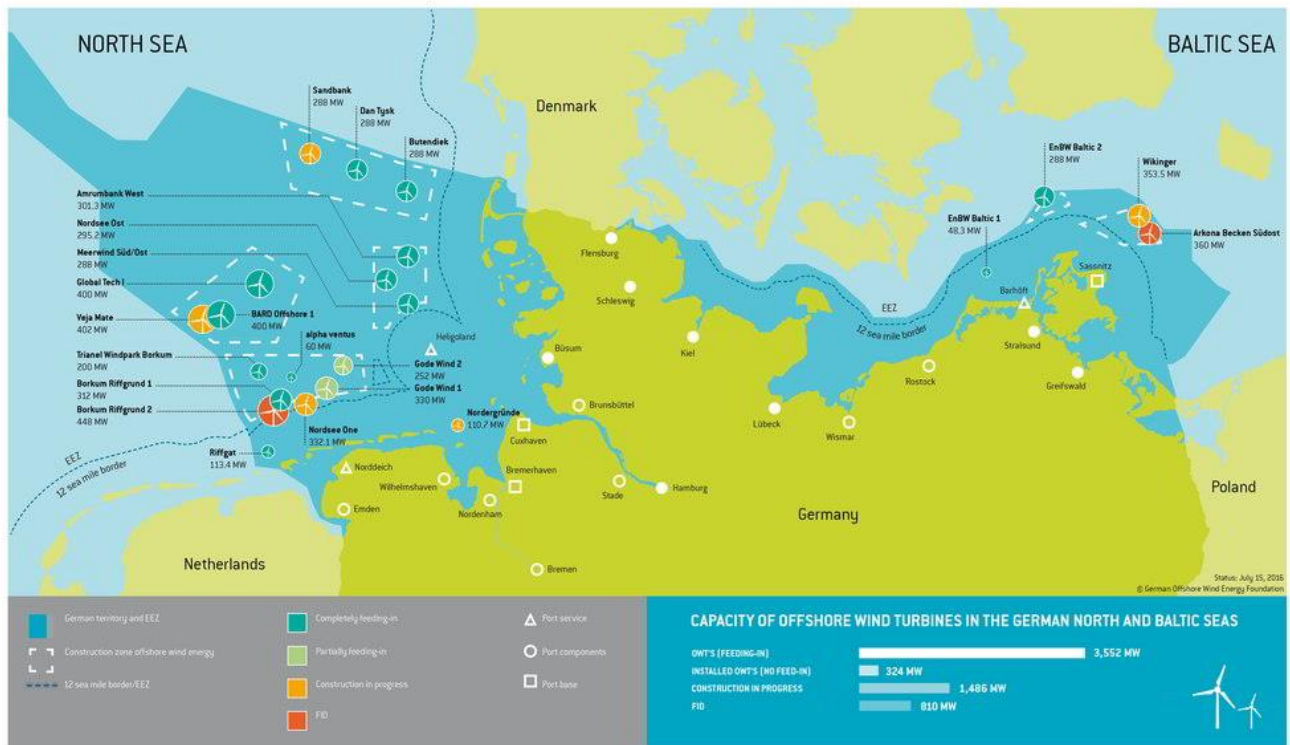
年末に施行された。FiT-CfD は、「再生可能エネルギーだけではなく、原子力や二酸化炭素を回収・貯留する CCS (Carbon Dioxide Capture and Storage) 火力発電等の低炭素技術も対象としているため、洋上風力発電に効果的、かつ経済的なインセンティブを与えるか不明瞭なこと」や、「洋上風力発電の固定価格は 150 ￡/MWh (19.5 円/kWh, 130 円/￡) に設定されたけれども、前述のように国の方針として発電コストを 100 ￡/MWh (13 円/kWh, 130 円/￡) まで削減する目標が決められていること」等から、洋上風力発電の開発規模を縮小 (Triton Knoll : 12,000MW, Round2) あるいは延期 (Argyll Array : 18,000MW, Round3) する事業者もある。一方、FiT-CfD は売電価格が 15 年間保証されていることから、計画の見直しの事例はあるものの今後とも大規模開発は進むとの意見もあり、今後の動向が注目される。

洋上風力発電の入札において、デンマーク近海の洋上風力発電施設 (Vesterhav Syd and Vesterhav Nord) では 60€/MWh (6.9 円/kWh, 115 円/€)、オランダの Borssele 1&2 (700MW) では 72.7€/MWh (8.4 円/kWh, 115 円/€) と、洋上風力発電の経済性は、超大型風車の開発、量産効果等により驚異的な速さで改善している。

2) ドイツ

ドイツ政府 (ドイツ連邦経済エネルギー省:BMWi) は、2014 年に「エネルギー構想 (Energiekonzept)」を策定し、その中で総電力消費量に占める再生可能エネルギーの割合を 2025 年までに 40-45%、2035 年までに 55-60%、2050 年までに 80%以上にまで拡大することを示した。2022 年までに全ての原子力発電所を閉鎖することが決められた状況下において、上記の目標を達成するために、ドイツでは再生可能エネルギーの中でも洋上風力発電の導入に重点を置いた政策を掲げている (豆知識Ⅱ.3.1-1、参照)。2010 年の時点で、洋上風力発電の導入目標は 2020 年までに 10GW、2030 年までに 25GW、2050 年までに 39.3GW とされていた。しかし、固定価格買取制度の導入により賦課金が上昇し、家庭の負担が大きくなったことから、洋上風力発電の導入目標が見直された。その結果、2020 年までに 7.7GW、2030 年までに 15GW と目標が下方修正されている。しかしドイツ政府は、国内の安定的な風力産業の市場を築くために 2016 年に再生可能エネルギー法 (EEG) を改訂し、洋上風力発電の 2025 年の中間導入目標として、新たに 11GW を設けている (GWEC,2016b)。これは、洋上風力発電の導入量が 2025 年までに年間導入ベースで約 700MW/年という規模に匹敵する。一方風力関連業界では、さらなるコスト低減を図るには適切な経済規模と長期にわたる確実な投資が必要であり、そのための年間市場として少なくとも 900MW/年の導入ベースを求めている (GWEC,2016b)。

ドイツの開発海域は、北海とバルチック海に分けられる。図Ⅱ.3.1-10 に示すように、沿岸から 12 海里までの領海内 (図中の 1 点鎖線の陸地側) よりも排他的経済水域 (EEZ) の方が、洋上風力発電の数多くの開発海域がある。これは、領海には自然保護海域が存在することや船舶の輻輳する重要な航路があること等によっているが、EEZ は沖合の水深の深い海域であるため、建設コストの増加につながる (開発海域の平均離岸距離 52.6km ; GWEC,2016b)。



図Ⅱ.3.1-10 ドイツにおける洋上風力発電プロジェクトの配置図 (Deutsche WindGuard, 2016)

【豆知識Ⅱ.3.1-1】

●ドイツにおける洋上風力発電の導入支援策

原子力発電の代替電源として、再生可能エネルギーが従来の火力発電とともに重要となっているが、政府は供給力確保のために風力、特に洋上風力発電の導入を明確に支援することとし、以下の2つの施策を講じている。

- ① 復興金融公庫 (KfW) による洋上風力発電所建設のための融資プログラムの開始 (2011年9月以降)。
- ② 固定価格制度による洋上風力発電の買取価格
 - ・買取価格は最初の12年間 (初期タリフ) と残りの8年間 (基本タリフ) で異なる。
 - ・施設の設置水深、離岸距離により初期タリフが異なる。初期買取期間は、水深が20m以上であれば1.7ヶ月/m、離岸距離が22km以上 (EEZ) であれば0.5ヶ月/海里 (約1.9km)、それぞれ延伸される (基本タリフの期間は短縮)。
 - ・買取価格は通常モデル (初期:1-12年間, 基本:13-20年間) と早期回収モデル (初期:1-8年間, 基本:9-20年間) があり、選択できる (両モデルとも基本タリフは同一)。
 - ・2018年以降の買取価格は最低でも7%/年の低減を図る。

改正再生可能エネルギー法 (EEG: Erneuerbare-Energien-Gesetz, 2014)

初期タリフ: 通常モデル 15.4 c€/kWh (17.7 円/kWh)
 早期回収モデル 19.4 c€/kWh (22.3 円/kWh)
 基本タリフ: 3.9 c€/kWh (4.5 円/kWh)
 ※100c€=1€, 115 円/€

ドイツでは、2004年から2008年にかけて風車メーカー（Enercon, Nordex, Bard）による洋上風力発電の実証試験が行われていたが、本格的な洋上ウィンドファームは2009年に北海の排他的経済水域（水深29m、離岸距離43km）に設置されたAlpha Ventus（60MW:5MW×12基；風車メーカー Senvion（旧 REpower）/AREVA（旧 Multibrid）で各6基）である。ここでは各風車6基のうち、各社1基ずつ実証試験に供されているが、ドイツ初の洋上風力発電事業と言える。その後、ドイツの洋上風力発電の導入は進み、2015年までの累積導入量（3,294.6MW）はイギリスに次いで世界2位となっている（GWEC,2016b）。2015年の単年度の導入量は約2,300MWで、これはイギリス（約570MW）の約4倍で、この年の導入量の世界一であった。なお、2015年の洋上風力発電による発電電力量は8TWh（80億kWh）で、その年の200万軒以上の家庭の電力消費量、あるいはドイツの総電力量の1.4%を十分に賄えるものであった（GWEC,2016b）。なお、陸上を含めたドイツの2015年までの風力発電累積導入量は44,947MWで、上記の通りこのうち洋上風力発電の導入量のシェアは約7%となっている（GWEC,2016b）。

洋上風力発電のコストに関して、洋上風力エネルギー基金に所属する関連会社により、10年後の洋上風力発電原価（均等化発電原価、LCOE：Levelized Cost of energy）の低減策が検討されている。彼らは現行（2013年）の13-15c€/kWh（15.0-17.3円/kWh,115円/€）を、支持構造物等の技術革新以外に、建設に伴う不測事態の軽減により2023年までに最大約3%、また今後建設が増え経験を積むことにより融資調達コストは最大約10%、総じて32-39%の低減（4.8-6.7円/kWh）が可能と報告している（Hobohm, *et al.*,2013）。

ドイツでは、洋上風力発電所の計画が認可されて建設が開始されるまでの期限として、2.5年が定められている。しかし、長江（2013）によれば、近年、送電系統運用者による海底ケーブル敷設工事の遅延により洋上風力発電の導入が円滑に進まないことから、投資家による投資の手控えが懸念され、実際、損害賠償請求の訴訟も起こっているという。ドイツでは、送電系統運用者が洋上変電所の建設とそこから陸上変電所までの送電線建設の義務（エネルギー事業法:EnWG）を負っているが、その費用が高額なことも前述の遅延問題の要因となっている。政府は洋上風力変電事業への投資が滞ることを防ぐためにエネルギー事業法を改正し、送電系統運用者の洋上連系線建設遅延に対する損害賠償制度を設けた。その甲斐あってか、今やドイツの洋上風力発電に与えられる系統容量（北海/バルチック海）は3.29GWに達し、ヨーロッパにおける洋上風力の全系統容量の30%程度を占めている（BINE Informationsdienst, Siegfried Heier,2016）。

3) 中国

中国国家エネルギー局は2011年の全国洋上風力発電工作座談会において、「第12次五カ年計画」の期間中に、洋上風力発電の導入量は2015年に5GW、2020年に30GWに達するとの見込み（目標値）を示している。この見込み値は、同年発表の国家エネルギー局による「新興エネルギー産業発展計画」においても提示されている。

中国沿岸部の風況マップに見られるように（豆知識Ⅱ.2.1-2）、台湾海峡を中心に南北に年平均風速7.0-7.5m/sの風速域が広がり、陸上風力発電と異なり洋上風力発電には電力消費地近傍にポテンシャルが存在するという利点がある。洋上風力発電は、2007年に渤海でGoldwind

製の 1,500kW 機 1 基が設置され実証試験が行われて以降、上海東海大橋に中国初の大規模な洋上風力発電所（102MW：3MW 機×34 基）が設置され、2010 年 7 月に稼働した。その後、洋上風力発電の導入は上海北方の江蘇州（Jiangsu）沿岸域で進んでいる（図 II.3.1-11）。2015 年末までの洋上風力発電の累積導入量は約 1,015MW に達し、これはデンマークに次いで世界第三位であるが、中国の陸上風力発電を含めた総風力発電導入量（145,362MW；世界一の導入量）の 0.7%に過ぎない（GWEC,2016b）。

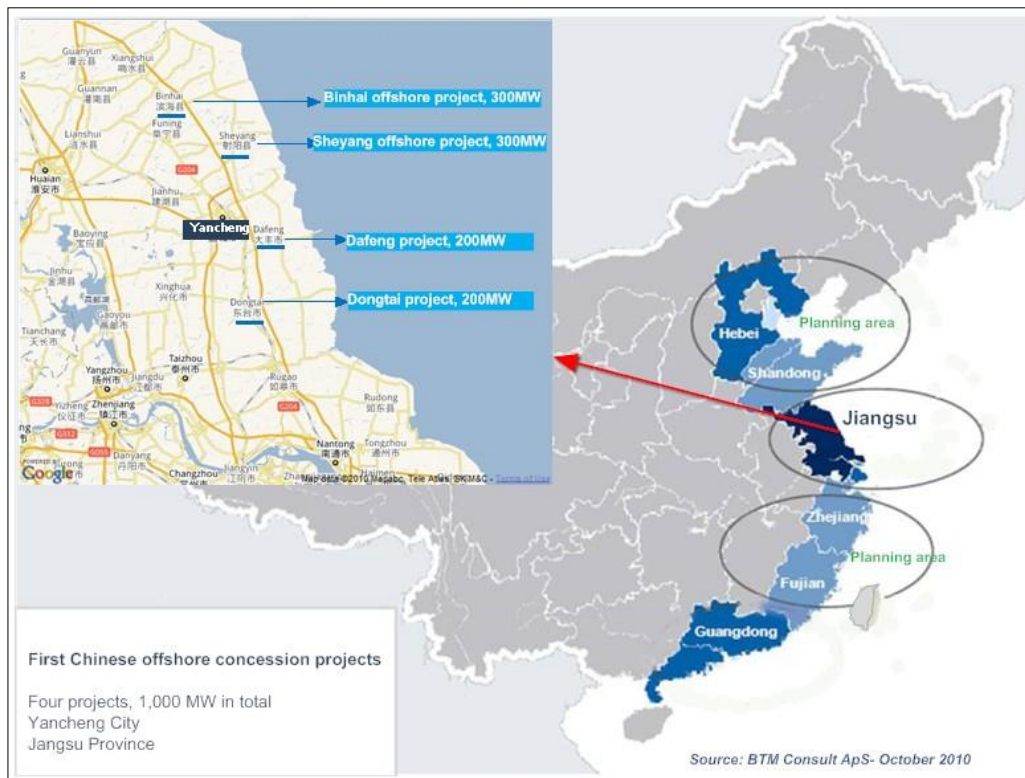


図 II.3.1-11 中国における洋上風力発電所候補海域 (BTM Consult, 2010)

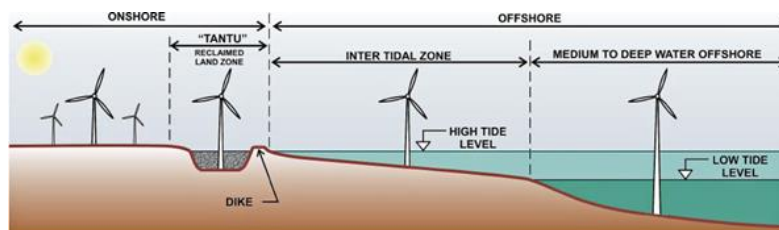
参考までに、中国の固定価格買取制度による洋上風力発電の買取価格を豆知識 II.3.1-2 に示す。ただし、洋上風力発電の買取価格は固定価格買取制度ではなく、洋上風力開発プロジェクトの実施者を入札によって選定し、その落札価格を参考にして決められているため、洋上風力発電の事業化を難しくしている。なお、陸上風力発電は 2009 年に固定価格買取制度に改められたが、2018 年の時点から建設等の認可が下りている風力発電施設に対して買取価格を 5.2-6.8%削減する方針が打ち出されている。

(<http://www.scmp.com/business/companies/article/2038694/chinas-wind-power-industry-faces-slowdown-tariff-cuts-loom>)。

【豆知識Ⅱ.3.1-2】

●中国の固定価格買取制度による洋上風力発電の買取価格（データ：中国国家能源局,2014）

- ・買取価格は、設置海域が潮間帯ゾーンと最低低潮位より沖合ゾーンで異なる。
- ・潮間帯ゾーンの買取価格は 0.75 元/kWh（約 11.4 円/kWh:15.25 円/元）
- ・沖合ゾーンの買取価格は 0.85 元/kWh（約 13.0 円/kWh）
- ・買取期間は不明。
- ・陸上風力発電の買取価格は、4つの風力資源地域に分けて設定されている。
0.51 元/kWh（約 7.8 円/kWh）、0.54 元/kWh（約 8.2 円/kWh）、0.58 元/kWh（約 8.8 円/kWh）、
0.61 元/kWh（約 9.3 円/kWh）



出典:BTM Consult (2012)

4) アメリカ

アメリカは、2017年1月に大統領が代わって政策が変更される可能性があるが、2014年6月2日に気候変動に対する歴史的な発表を行っている。それは、環境保護庁（EPA: Environmental Protection Agency）による「クリーンパワー計画」において、国内の電力分野からのCO₂排出量を2030年までに30%削減（2005年比）することを目標に掲げたことである。州ごとに目標値を定め、その目標の達成のため、省エネルギー、原子力発電所や再生可能エネルギー施設の新設、石炭火力発電の天然ガス発電への変換、排出量取引の活用等があげられている。

米国エネルギー省（DOE）は2015年3月12日に発表したWind Visionにおいて、風力発電に関して雇用対策、技術競争力の確立等を目指した戦略を立て、2020年に113GW（111-115GW）、2030年に224GW（213-235GW）および2050年に404GW（382-459GW）の導入目標を掲げている。II.2.1項に示しているように、そのうち洋上風力発電は、Technical Resource Potentialの推計結果を基に2020年に3GW、2030年に22GWおよび2050年に86GWという目標となっている（表II.3.1-2、参照）。2050年の86GWは洋上風力発電の開発に必要な目標値とされ、これはTechnical Resource Potential（2,058GW）の約4%、全米の電力消費量の約7%に相当する。

2016年現在、大西洋側にはBOEM（Bureau of Ocean Energy Management：海洋エネルギー管理局）によって授与された11箇所の商業用洋上風力発電に係る租借地（WEAs: Wind Energy Areas）があり、そのポテンシャルは約14.6GW（風車設置密度：3MW/km²）である。図II.3.1-12はBOEMによる海域の他、連邦政府による洋上風力発電開発海域等を含めて図示したもので、特に大西洋側に計画海域が集中している（U.S. Department of Energy and U.S. Department of Interior, 2016）。

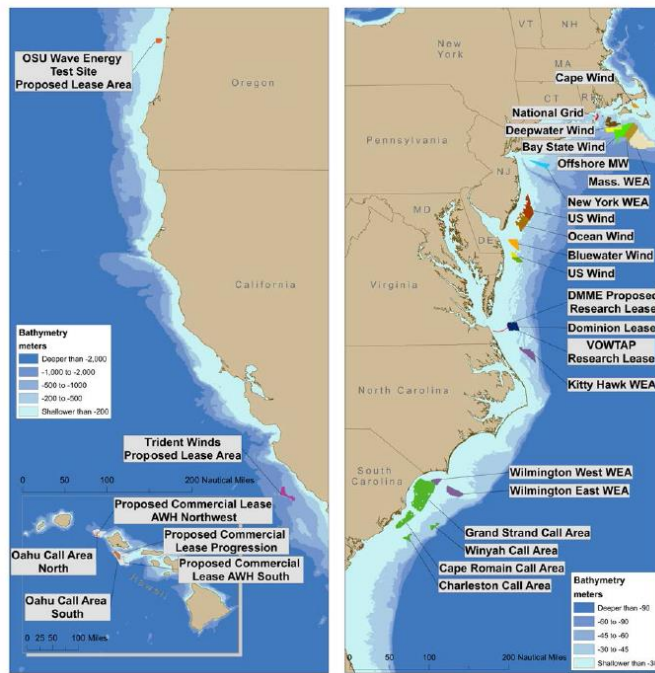
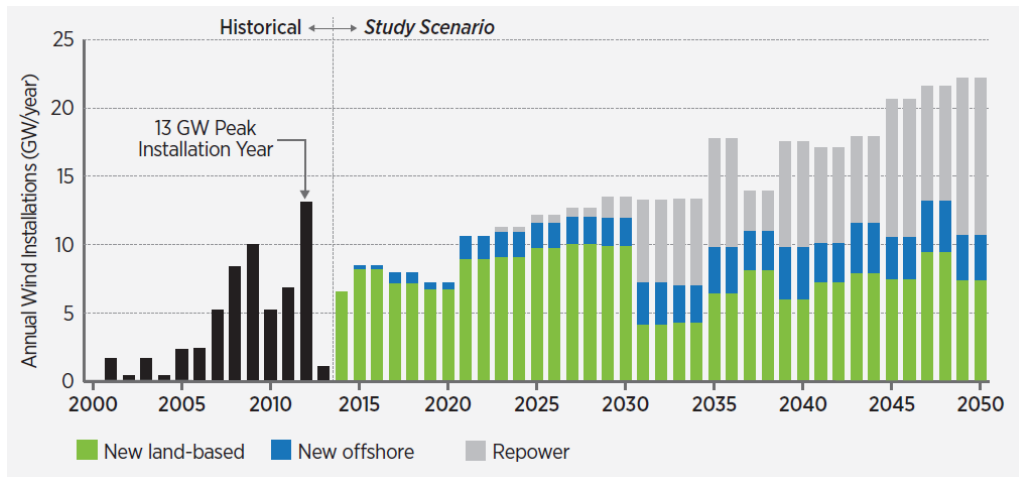


図 II. 3. 1-12 2016年8月における洋上風力発電計画海域
(U. S. Department of Energy and U. S. Department of Interior, 2016)

米国エネルギー省は、風力発電の導入シナリオとして、2014年から2050年までを3段階（2014-2020年；2021-2030年；2031-2050年）に分けて検討を行っている（U.S.Department of Energy,2015）。3種類の年間導入規模のうち平均（Central Study）のシナリオを取り上げて示すと、2014-2020年は7.7GW/年、2021-2030年は12.1GW/年、2031-2050年は17.5GW/年の導入規模でそれぞれ進行し、そのうち洋上風力発電は、2014-2020年に0.4GW/年、2021-2030年は1.9GW/年、2031-2050年は3.3GW/年と想定されている。導入主体は2030年までは陸上風力発電であり、2031年以降ではリプレースが増加する（図Ⅱ.3.1-13）。



図Ⅱ.3.1-13 風力発電の平均導入シナリオ（U. S. Department of Energy, 2015）

【豆知識Ⅱ.3.1-3】

●アメリカ初の商業洋上風力発電の導入：Block Island Wind Farm

- ・所有者：GE Energy/Citi Group/Deepwater Wind, LLC/National Grid US（Transmission）
- ・設置海域：Rhode Island の南東 5km（平均水深 26m）
- ・施設設備容量：30MW（6MW×5基）
- ・風車：GE Energy（Haliade-150-6MW）
- ・風車の仕様：6MW（ギアレス同期型）、100m（ハブ高）、150m（ロータ径）
- ・支持構造：ジャケット
- ・建設：2015年7月（開始）、2016年12月（運転開始）



Block Island Wind Farm の建設状況（Smith *et al.*,2015）

3.2 日本の洋上風力発電

(1) 導入量の現状

2016年現在、我が国において中型機（50kW以上：NEDO,2008）以上の風車を製作しているメーカーは、三菱重工業、日本製鋼所、日立製作所、東芝（ユニソン：U93,2MW）、駒井ハルテックの5社である。このうち洋上風車として設置されているあるいは設置が計画されている風車のメーカーは、三菱重工業、日本製鋼所および日立製作所である（表Ⅱ.3.2-1）（三菱重工業、日立製作所の風車：付属資料Ⅲ、参照）。

表Ⅱ.3.2-1 我が国における風車メーカーの洋上風車

メーカー	三菱重工業			日本製鋼所	日立製作所		
	型式	V164-8.0MW*1	MWT167H/7.0	MWT92/2.4	J82-2.0	HWT5.0-126	HWT5.2-127
定格出力(MW)	8	7	2.4	2	5	5.2	2
発電方式	ギアボックス+同期 (永久磁石)	油圧式	誘導(二次巻線型)	同期(永久磁石)	ギアボックス+同期 (永久磁石)	ギアボックス+同期 (永久磁石)	誘導(二次巻線型)
制御方式	ピッチ	ピッチ	ピッチ	ピッチ	ピッチ	ピッチ	ピッチ
ロータ直径(m)	164.0	167.0	92.0	83.0	126.0	127.0	80.0
ブレード全長(m)	80.0	82.0	44.7	40.0	62.0	62.0	39.0
ハブ高さ(m)	105	105(海面上)	80(海面上)	80(海面上)	86(海面上)	90(海面上)	65(海面上)
備考	・Burbo Bank Extension (イギリス) DONG Energy (現Ørsted) 32基設置 (2016)	・福島復興浮体式 洋上ウインドファーム 実証研究事業 (ふくしま新風)	・NEDO洋上風力発電 実証研究 (銚子沖)	・NEDO洋上風力発電 実証研究 (北九州市沖)	・福島復興浮体式 洋上ウインドファーム 実証研究事業 (ふくしま新風)	・実証試験機 (ロータ径が136mの HWT5.2-136もあり)	・ウインドパワーかみ す第1/第2洋上発電所 (計15基) (2010/2013) ・福島復興浮体式洋上 ウインドファーム 実証研究事業 (ふくしま未来)

*1:V164-8.0MWは、MHI-VESTAS製

2015年度末の国内の風力発電導入量(風車の定格出力:10kW以上)は約311.7万kWであったが、このうち洋上風力発電の導入量は約5.7万kWで、これは全体の1.8%程度である。我が国における既設の洋上風力発電施設の一覧を表Ⅱ.3.2-2に示す(同表には浮体式の導入事例も併記している)。着床式洋上風力発電の施設は、一般海域に設置された千葉県銚子沖を除いて、北海道瀬棚港、山形県酒田港、茨城県鹿島港および福岡県北九州市沖(NEDO実証研究)のいずれも港湾区域に導入されている。風車の最大定格出力は銚子沖の2,400kWであるが、2,000kW風車の設置数が多い。また、最大規模の施設は2013年に設置されたウインド・パワーかみす第2洋上風力発電所の16MW(1.6万kW:2,000kW×8基)で、同じ鹿島港内では同じ系列会社の洋上風力発電施設も含めて、計30MW(3万kW:2,000kW×15基)の導入容量となっている。図Ⅱ.3.2-1~図Ⅱ.3.2-4に、港湾域に設置された主な洋上風力発電施設を示す。

表Ⅱ.3.2-2 我が国における既設の洋上風力発電施設（2017年2月現在）

形式	設置海域	施設の名称	設置年度	施設規模 (MW)	風力発電機メーカー	定格出力 (MW) × 基数	ロータ径 (m)	ハブ高 (m)	水深 (m)	離岸距離 (km)	支持物構造、浮体構造
着床式	北海道瀬棚港	風海鳥	2004	1.2	Vestas	0.6×2	47	40	13	0.7	ドルフィン
	山形県酒田港	JRE酒田風力発電所	2004	10.0	Vestas	2.0×5	80	60	4-5	0.02	ドルフィン
	茨城県鹿島港	ウインド・パワーかみす第1洋上風力発電所	2010	14.0	富士重工業	2.0×7	80	60	3.6	0.04	モノパイル
	茨城県鹿島港	ウインド・パワーかみす第2洋上風力発電所	2013	16.0	日立製作所	2.0×8	80	60	3-3.5	0.04-0.05	モノパイル
	千葉県銚子沖	銚子沖洋上風力発電実証研究施設	2012	2.4	三菱重工業	2.4×1	92	80	12	3.1	重力
	福岡県北九州市沖	北九州市沖洋上風力発電実証研究施設	2012	2.0	日本製鋼所	2.0×1	83	80	14	1.4	重力・ジャケット (ハイブリッド)
浮体式	長崎県五島市崎山沖	崎山2MW浮体式洋上風力発電所「はえんかぜ」	杵島沖：2013～ 崎山沖：2016～	2.0	日立製作所	2.0×1	80	56		5	ハイブリッドスパー
	福島県沖	浮体式洋上ウインドファーム実証研究施設「ふくしま未来」	2013	2.0	日立製作所 富士重工業	2.0×1	80	65	120	20	コンパクトセミサブ
		浮体式洋上ウインドファーム実証研究施設「ふくしま新風」	2015	7.0	三菱重工業	7.0×1	167	105	120	20	V字型セミサブ
		浮体式洋上ウインドファーム実証研究施設「ふくしま浜風」	2016	5.0	日立製作所	5.0×1	126	86	120	20	アドバンストスパー

港湾は、次の要因により、洋上風力発電設備の導入適地として有望視されている。

- ・港湾は、「海陸の境界という立地特性」を活用して、様々な産業が数多く立地している空間であり、高い電力需要が見込まれるため、電気設備が充実している。
- ・洋上風力発電設備の建設や維持管理に利用される港湾インフラが近接している。
- ・港湾法に基づく港湾管理者が存在し、関係者間の合意形成や占用許可に関する一定の手続き等が整備されていることなどから、海域の管理や利用調整の仕組みが最も整備されている空間と言える。

一方、一般海域では、長期の占用を実現するための統一的なルールが存在しない。風況や面積等を考慮すれば、一般海域のポテンシャルは非常に大きい。一般海域での事業化を促進するため、一般海域の利用ルールの整備について現在関係省庁で対応が検討されている。

【豆知識Ⅱ.3.2-1a】

●港湾における洋上風力発電に係る国土交通省港湾局の動向

**1.港湾における風力発電について－港湾の管理運営との共生のためのマニュアル－ver.1
(国土交通省港湾局・環境省地球環境局,2012年6月)**

【目的】

- ・港湾の管理運営と整合性のとれた風力発電の導入の円滑化を図り、もって温室効果ガスの排出削減に資すること。そのため、港湾の管理運営と共生を図る導入プロセス等を整理し、全国の港湾を対象とした標準的な手続きとして提示する。

【マニュアルの利用対象】

- ・利用者は、港湾管理者および風力発電事業者を想定
- ・港湾区域（水域）における着床式洋上風力発電を主眼に置いているが、港湾管理者の権限が及ぶ陸域の風力発電にも活用可能。
- ・対象事業規模は、複数の風力発電施設による総出力1万kW以上が目安。

【主な内容】

- ・風力発電の導入手順
- ・導入検討協議会の役割（適地設定に関する検討支援、公募要件・審査基準の検討支援、選定の際の支援、許認可手続きの円滑化、事業化支援・フォローアップ）
- ・風力発電の適地選定（留意事項例：港湾施設の機能/安全な船舶航行に関する配慮事項、背後地域の経済活動/生活環境/自然環境/景観等への配慮事項、地元水産業との調整事項）
- ・適地の港湾計画等への位置付け（再生可能エネルギー源を利活用する区域：簡易な変更/一部変更/改訂）
- ・風力発電事業の企画提案の公募と選定（総出力1万kW以上の事業規模で長期間占用するケース、選定は港湾の管理運営に必要な条件と地域活性化への貢献提案等により評価）

【豆知識Ⅱ.3.2-1b】

2.港湾における洋上風力発電施設等の技術ガイドライン【案】(国土交通省港湾局, 2015年3月) 国土交通省 HP (<http://www.mlit.go.jp/common/001084179.pdf>)

【目的】

✓技術ガイドラインは、港湾管理者による導入適地の設定、適地の港湾計画への位置付け、公募手続きによる事業者の決定、港湾区域の占用許可等の手続きにおいて、洋上風力発電施設等の導入が港湾の開発・利用・保全に支障を与えないように検討・審査を行う際の技術的な判断基準となるよう策定したものである。

【主な内容】

✓総則

ガイドラインの目的、適用範囲、用語の定義

✓港湾計画への位置付け及び占用許可申請の審査事項

- ・港湾計画への位置付け
- ・占用許可申請の審査事項

✓洋上風力発電施設等の計画及び設計

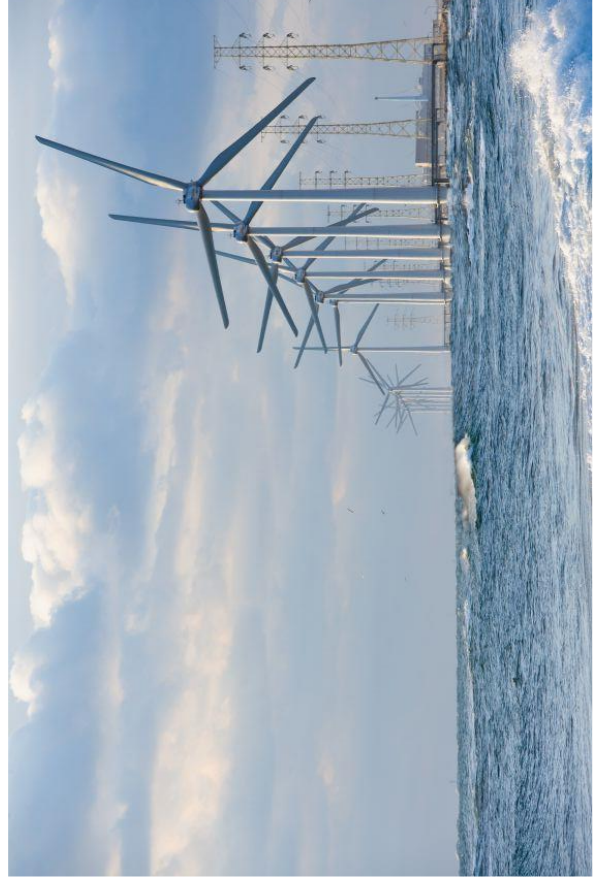
- ・一般：基本的な考え方
- ・調査：調査項目
- ・計画：洋上風力発電施設の配置、船舶交通への配慮
- ・設計：設計手法、船舶交通に配慮した設計にかかわる事項、構造安定に配慮した設計にかかわる事項、海底送電線・通信ケーブル敷設時の留意事項

✓維持管理計画

- ・維持管理計画の策定：維持管理計画書の作成、維持管理結果の報告
- ・維持管理計画の概要：維持管理体制、維持管理項目

✓緊急時対応計画

- ・緊急時対応計画の策定：緊急時対応計画書の作成、緊急時対応結果の報告
- ・緊急時対応計画の概要：関係機関への連絡体制、緊急時における対応手段、緊急時対応訓練の実施



図Ⅱ.3.2-1 風海島（上左図）

北海道瀬棚港（1.2MW;600kW×2基）（瀬棚町HP：

<http://www.town.setana.lg.jp/archive/setana/kazamidori/kazamidori.htm>）

図Ⅱ.3.2-2 JRE 酒田風力発電所（旧サミットウインドパワー酒田発電所（上中図）

山形県酒田港（10MW;2,000kW×5基、8基中5基が洋上）

（酒田港HP：

http://www.mlit.go.jp/kowan/kaihatuka/wind_hp/jirei-jpn/sakat.html）

図Ⅱ.3.2-3 ウィンド・パワーかみす第1洋上風力発電所（上右図）

茨城県鹿島港（14MW;2,000kW×7基）

図Ⅱ.3.2-4 ウィンド・パワーかみす第2洋上風力発電所（下図）

茨城県鹿島港（16MW;2,000kW×8基）

（ウィンド・パワー資料：

<http://www.komatsuzaki.co.jp/windpower/kamisu2.php>）

本格的な沖合海域における着床式洋上風力発電は、NEDO が 2009 年度から開始した「洋上風況観測システム実証研究」と 2010 年度から開始した「洋上風力発電システム実証研究」で千葉県銚子沖と福岡県北九州市沖に設置した実証研究施設をあげることができる。本実証研究は、洋上風力発電に係る技術開発（設計、施工、維持・管理）、気象・海象特性の解明、環境影響評価手法の確立等を目的として取り組まれており、銚子沖では 2012 年 8 月に観測タワー（海面上 95m；重力式）、同年 10 月に洋上風力発電施設（2,400kW 機；重力式）、北九州市沖では 2012 年 6 月に観測タワー（海面上 85m；ハイブリッド重力式）、2013 年 3 月に洋上風力発電施設（2,000kW 機；ハイブリッド重力式）をそれぞれ設置した（表Ⅱ.3.2-3、図Ⅱ.3.2-5、表Ⅱ.3.2-4、図Ⅱ.3.2-6）。

表Ⅱ.3.2-3 NEDO 洋上風力発電実証研究（銚子沖）の基本情報

項目	銚子沖	
	洋上風況観測タワー	洋上風車
気象・海象特性	台風・うねり	
体制	東京電力	東京電力
	東京大学	
水深	12m	12m
離岸距離	3.1km	3.1km
高さ	100m（タワートップ）	80m（ハブ高さ）
支持物構造物	重力式	重力式
各種性能	三杯風速計：22基	定格出力：2.4MW
	矢羽根風向計：23基	ローター直径：92m
	超音波風向風速計：3基	ギア式風車
	ドップラーライダ：1基 （最大200m上空まで観測可能）	（三菱重工業製） 塩害対策や遠隔監視システム等、 洋上風車仕様
設置年月	2012.8	2012.10
観測・発電開始年月	2013.1	2013.1

注） センサの基数は設置基数を表す。



図Ⅱ.3.2-5 着床式洋上風力発電実証研究施設（銚子沖）

表Ⅱ.3.2-4 NEDO 洋上風力発電実証研究（北九州市沖）の基本情報

項目	北九州市沖	
	洋上風況観測タワー	洋上風車
気象・海象特性	冬期の低気圧（季節変動大）	
体制	電源開発 伊藤忠テクノソリューションズ 港湾空港技術研究所	電源開発
水深	14m	14m
離岸距離	1.4km	1.4km
高さ	85m（タワートップ）	80m（ハブ高さ）
支持物構造物	重力・ジャケットハイブリット式	重力・ジャケットハイブリット式
各種性能	三杯風速計：12基	定格出力：2.0MW
	矢羽根風向計：9基	ローター直径：83m
	超音波風向風速計：4基	ギアレス式風車
	ドップラーライダ：1基 （最大200m上空まで観測可能）	（日本製鋼所製） 塩害対策や遠隔監視システム等、洋上風車仕様
設置年月	2012.6	2013.3
観測・発電開始年月	2012.10	2013.6

注) センサの基数は設置基数を表す。



図Ⅱ.3.2-6 着床式洋上風力発電実証研究施設（北九州市沖）

(2) 今後の展開

着床式洋上風力発電に関しては、民間事業者による港湾を中心とした数多くの導入計画が見られる（表Ⅱ.3.2-5；浮体式の導入計画も併記）。参考までに、日本における主要な既設および計画段階の洋上風力発電施設の配置を図Ⅱ.3.2-7に示す。

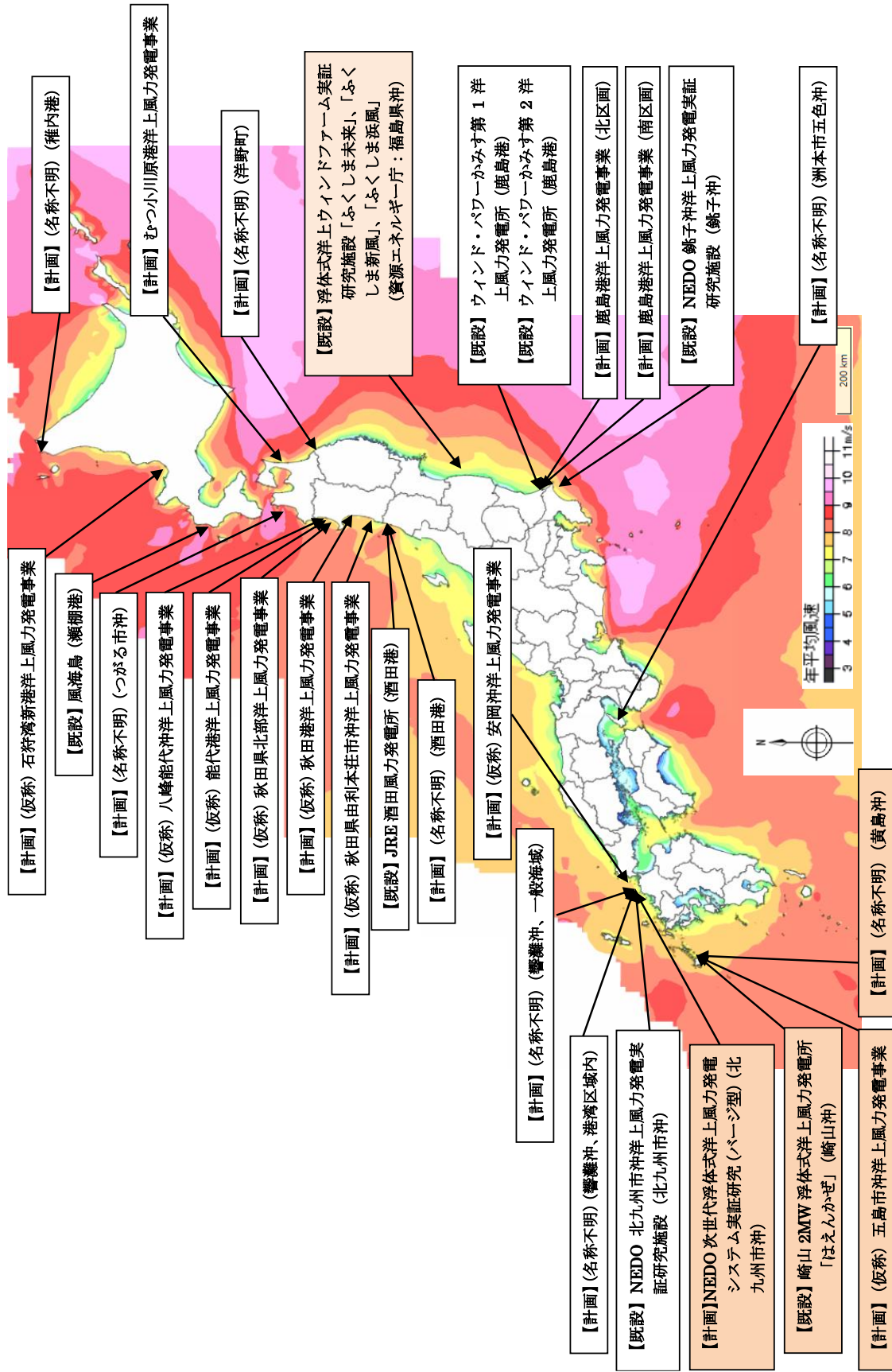
我が国では着床式洋上風力発電施設の建設は緒についたばかりで海外に大きく遅れをとっている。導入促進のためには次項に掲げた導入課題以外に、系統連系、法的根拠・所轄官庁の許認可等に係る規制緩和に取り組む必要がある。なお、日本の民間企業による海外の洋上風力発電への取組みとして、「洋上風力発電事業」、「洋上風力発電施設の建設事業」、「洋上風力発電施

設の運搬・設置事業」および「海底送電事業」の事例を豆知識Ⅱ.3.2-2に示す。

表Ⅱ.3.2-5 我が国における主要な洋上風力発電施設計画の一覧

形式	計画海域	事業名称	施設規模(MW)	定格出力(MW)×基数	ロータ径(m)	ハブ高(m)	水深(m)	離岸距離(km)	支持物構造、浮体構造
着床式	北海道稚内港	—	10	5×2	—	—	20	—	—
	北海道石狩湾新港	(仮称)石狩湾新港洋上風力発電事業	最大104	4×最大26	130	約100	15-22	—	ジャケット式
	青森県むつ小川原港	むつ小川原港洋上風力発電事業	80	2×40	86	78	5-30	0.45-0.65	ケーソン式、ドルフィン式
	青森県つがる市沖	—	7.47	2.49×3	—	—	10-15	1	—
	岩手県洋野町沖	—	200	5×40	—	—	—	—	—
	秋田県八峰能代沖	(仮称)八峰能代沖洋上風力発電事業	最大約180	4~8×最大45	117-150	80-120	30m以浅	1-3	モノパイル式、ジャケット式または重力式
	秋田県能代港	(仮称)能代港洋上風力発電事業	最大88.2	4.2×21	117	89.5	9-19	—	モノパイル式
	秋田県北部	(仮称)秋田県北部洋上風力発電事業	1案:最大396 2案:最大414 3案:最大364 4案:最大455	1案:3.3×最大120 2案:3.45×最大120 3案:4×最大91 4案:5×最大91	1案:112 2案:117 3案:130 4案:127	1案:80-85 2案:80-85 3案:85-95 4案:85-95	7-30	—	—
	秋田県秋田港	(仮称)秋田港洋上風力発電事業	最大54.6	4.2×13	117	89.5	9-30	—	モノパイル式
	秋田県由利本荘市沖	(仮称)秋田県由利本荘市沖洋上風力発電事業	最大1,000	最大9.5×最大140	最大180	最大115	10-40	1	モノパイル式、ジャケット式または重力式
	山形県酒田港	—	15	5×3	—	—	20	—	—
	茨城県鹿島港	鹿島港洋上風力発電事業(北区画)	100	5×20	126	90	10-18	1.2	モノパイル式
	茨城県鹿島港	鹿島港洋上風力発電事業(南区画)	125	5×25	126	90	10-18	1.2	モノパイル式
	兵庫県洲本市五色沖	—	50~100	5×10~20	—	—	—	—	—
	山口県下関市安岡沖	(仮称)安岡沖洋上風力発電事業	最大60	4×最大15	130	87.6	10-23	—	重力式
	浮体式	福岡県北九州市響灘沖(港湾区域内)	—	200	5×40	—	—	30	—
福岡県北九州市響灘沖(一般海域)		—	500	5×100	—	—	—	—	—
福岡県北九州市沖		NEDO 次世代浮体式洋上風力発電システム実証研究(パージ型)	最大7.45	3×1	100	72	56	—	パージ型
		5×1		130	92	—		パージ型	
長崎県五島市沖		(仮称)五島市沖洋上風力発電事業	22	2.1×8	80	56	100-150	—	ハイブリッドスパー型
		5.2×1		127	89.9				
長崎県五島市黄島沖	—	500	5×100	—	—	—	—	—	

注)情報は、発電事業者、自治体等のHPに公開されている施設計画を抽出した。



図Ⅱ.3.2-7 着床式と浮体式洋上風力発電施設の配置図 (既設と計画)

(地図は Neo Wins (洋上風況マップ) を使用 HP : http://app10.infoc.nedo.go.jp/Nedo_Webgis/top.html)

着床式洋上風力発電設備は世界で既に 3,000 基以上建設されているが、浮体式洋上風力発電はこれからの技術であり、日本および諸外国で実証試験が行われている。日本では環境省が長崎県杵島沖で 2010 年度に、経済産業省が委託事業によって福島沖で 2011 年度に実証事業を開始した。

環境省では、長崎県杵島沖に 2MW の浮体式洋上風力発電設備を設置し、2015 年度以降の早期の実用化（民間ベースでの浮体式洋上風力発電の事業化）に向けた実証事業を行った。実証事業は 2015 年度に終了し、発電設備は長崎県杵島沖から五島市崎山沖に移設され、2016 年 4 月より五島市と五島フローティングウィンドパワー合同会社が共同で発電設備の運転を継続している（<http://www.toda.co.jp/news/2016/20160415.html>）。

経済産業省の委託事業では、福島沖で浮体式洋上風力発電設備が 3 基（2MW、5MW、7MW）、浮体サブステーションが 1 基設置されている。世界で初めてとなる浮体式洋上ウィンドファームのノウハウを蓄積し、浮体式洋上風力発電のビジネスモデルの確立を目指した実証研究が行われている（<http://www.fukushima-forward.jp/>）。

また NEDO では、水深 50-100m を対象に、浮体式洋上風力発電システムの低コスト化を実現するため、2014 年度より「次世代浮体式洋上風力発電システム実証研究」を開始した。低コスト次世代浮体式洋上風力発電設備および施工方法の開発・検証、水深 50-100m に適した係留システムの検討、保守管理技術の確立等を目指している。また実証研究の知見や技術動向の調査結果等を反映させた「浮体式洋上風力発電技術ガイドブック（案）」を作成する予定になっている。

日本は海底地形が急深であることから、水深 50m より深い海域面積が広大で、浮体式洋上風力発電のポテンシャルが大きい。これらの実証事業が成果を挙げ、世界に先駆けて浮体式洋上風力発電が商用化に向かうことが期待される。

【豆知識Ⅱ.3.2-2】

●日本の企業による海外の洋上風力発電への取り組み

①洋上風力発電事業

- ✓丸紅は、2011年に Dong Energy 社(現 Ørsted) (デンマーク)が 100%出資する Gunfleet Sands 洋上風力発電 (英国) の権益 49.9%を取得し、日本企業として初めて海外の洋上風力発電事業に参入した。
- ✓住友商事は、2013年に Parkwind 社 (ベルギー) とベルギー沖洋上風力発電事業に参画することで合意し、2014年9月30日付で Belwind と Northwind の洋上風力発電事業の株式を取得した。また同社等と共同開発中の Nobeleind (165MW) のプロジェクトファイナンス組成を 2015年10月21日に完了し、洋上風力発電所の建設を開始した。
- ✓住友商事は、オーストラリア大手金融機関 Macquarie との間で、イギリスの洋上風力発電事業会社 (Gallop Wind Farm Limited) の株式を間接的に取得する契約を締結し、Gallop Wind Farm 事業に参画することを決定した。

②洋上風力発電所の建設事業

- ✓丸紅は、洋上風力発電所の設計・建設に関して 2014年にプラント大手の Technip 社 (フランス) と提携し、洋上風力発電所の建設事業に参入した (アイルランドの風力発電開発会社がイギリス北部沖の洋上風力発電所の設計・建設の独占交渉権を取得)。

③洋上風力発電施設の運搬・設置事業

- ✓丸紅は、2012年3月に産業革新機構と共同で、イギリスの運搬・設置事業者である Seajacks International 社を買収し、洋上風力発電の特殊船による据付事業に日本企業として本格的に参入した。また 2013年には日本法人「シージャックス・ジャパン」を設立し、アジア市場のマーケティングを開始した。

④海底送電事業

- ✓三菱商事は、2011年11月に豪州系投資銀行 Macquarie Capital 社の英国現地法人が保有する洋上風力発電のイギリスウオルニー1海底送電資産の事業権を取得したのを皮切りに、2013年までにイギリスとドイツの計8箇所の資産を得た。今後、北アメリカ、アジアの海底送電事業も視野に送電系統安定化のための事業展開を図ることとしている。
 - ・英国のインフラ投資会社である Barclays Infrastructure Funds Management 社と共同で、海底送電資産 London Array の事業権を取得した。
 - ・オランダの国営送電事業者 (TenneT Holding 社) が保有するドイツ海底送電資産の事業権のうち、49%を取得することを、TenneT と基本合意した。
 - ・Dong Energy 社 (現 Ørsted) (デンマーク) より、イギリスの洋上風力発電所の海底送電事業を購入した。
 - ・欧州地域における送電資産の更なる効率的な運営を目指し、英国に当社 100%子会社である Diamond Transmission Corporation 社を設立し、同社を欧州送電事業の統括会社と位置付け、欧州地域送電資産を集約することとしている。

3.3 洋上風力発電の導入に係る課題

我が国において洋上風力発電の導入拡大を図るための主要な5つの課題を、以下に示す。

- a. 設置海域：国による洋上風力発電占有海域（ゾーニング）の確保が困難なこと。
- b. コスト：発電原価（建設費/運転保守費）が高額、助成制度（補助金/債務保証等）が未整備なこと。
- c. 社会基盤：港湾/建設専用船/系統連系等のインフラが未整備なこと。
- d. 環境影響評価：環境影響評価手法が一部未確立なこと。
- e. 社会受容性：ステークホルダー（利害関係者）との調整が困難なこと。

上記のaについて、イギリス、デンマーク等では、国（イギリスではThe Crown Estate）が洋上風力発電所の設置海域を指定し、民間事業者を公募により募集して決定する施策が講じられている。日本では、港湾法の改正により、港湾区域内等での占用公募制度が創設された。しかし一般海域では、長期の占用を実現するための統一的なルールが存在しない。

bは、再生可能エネルギー全般に共通する課題である。再生可能エネルギーの中でも陸上風力発電の発電原価は比較的安価であるものの、洋上風力発電のそれは陸上風力発電と比較して高額であることから、一層のコスト低減が求められている。なお、再生可能エネルギーの普及のためには市場原理を補う強力な仕組みが必要との考えから、固定価格買取制度（2012.7）が設けられたことは周知のことである。しかし、我が国において洋上風力発電の導入を促進させるには、買取制度と併せて助成制度や船舶・港湾等の社会的資産利用に係る緩和が必要である。

cについては、bにも関連するが、日本ではヨーロッパの国々と異なり、大型クレーン船、自己昇降式作業台船（SEP船）、洋上風力発電所建設のための港湾（埠頭）等、海上作業に係る付帯設備の整備は十分ではなく、価格の高騰を招く一因となっている。また、風況の良好な電力会社管内では空き容量が少ないこと等により、当面、会社間連系線の活用や基幹送電線の新增設が必要である。

dについては、洋上風力発電の導入に伴い、主に水中音、動植物・生態系、景観等への影響が懸念されることから、事前に環境への影響を予測評価し、環境保全措置等を検討する必要がある。2011年11月に環境影響評価法施行令が改正され、2012年10月から風力発電所の設置等の事業が環境影響評価法の対象となった。これに先立ち、2011年6月にとりまとめられた「風力発電施設に係る環境影響評価の基本的考え方に関する検討会報告書」（環境省総合環境政策局）においては、今後の課題として沖合に設置した場合を含む洋上風力発電の取扱いについて適切な対応を検討すべきとされており、環境省において2017年3月に「洋上風力発電所等に係る環境影響評価の基本的な考え方に関する検討会報告書」を公表し、洋上風力発電所等に係る環境影響評価の項目選定に係る考え方を示している。環境省において、今後必要な技術手法に係る情報収集や必要に応じた技術開発が進められることとなっており、その成果を活用することなどが考えられる。

eは、dにも関連する事項で、発電事業者や自治体等が主体となって協議会を設立するなどして、その中でステークホルダーの意見を吸い上げていくことが必要である。

ここでは、上述した課題からコスト低減と環境影響評価に係る課題を取り上げて、その概要

を取りまとめる。

(1) コストの低減

洋上風力発電に係る事業費は、建設費（CAPEX：Capital Expenditure）、運転保守費（OPEX：Operating Expense）および撤去・解体費（CAPEX に含むケースがある）に大別され、それぞれいくつかの構成要素から成っている（表Ⅱ.3.3-1）。

- ・ 事業費：建設＋運転保守＋撤去・解体の総費用
- ・ 建設費：計画＋設備＋設置工事＋その他の総費用
- ・ 運転保守費：維持管理＋保険等

表Ⅱ.3.3-1 事業の構成要素

大分類		構成要素
建設費	計画	調査計画(海底地盤等)/許認可
		設計
		環境影響調査
	設備	風力発電機
		支持構造(基礎)
		電気設備
		洋上変電所
	設置工事	運搬・設置
		電気工事
	その他	保険等
運転保守費		維持管理
		保険等
撤去・解体費		

1) 建設費の検討

Energy Research Group, LLC (2010) は、ヨーロッパにおける 2000-2010 年までに設置された 34 箇所の洋上風力発電所の建設費について整理している。それによれば、平均建設費およびその幅は 360 万 \$ /MW (36 万円/kW; レート 100 円/\$) および 190-920 万 \$ /MW (19-92 万円/kW) となっている。なお、日本では陸上風力発電所 (20kW 以上) の建設費 (資本費) の平均が 34.2 万円/kW (調達価格等算定委員会, 2016) とされているので、平均値から見ればヨーロッパの洋上風力発電と日本の陸上風力発電所の建設費に大差は認められない。このようにヨーロッパにおける洋上風力発電所の建設費が比較的安価な理由は、導入初期の導入海域が閉鎖性海域で静穏な海域が多いこと、水深が比較的浅く広大な面積を有していること、海洋油田開発等で培われた技術力を有し建設のためにインフラ設備が整っていること等があげられる。また日本の陸上風力発電所の建設費が高いのは、導入地域が山岳部のケースが多いことによっているものと考えられる。

一方、日本における洋上風力発電所の建設費は、洋上風力発電所の調達価格の検討資料に使

用された 2012 年度の NEDO 洋上ウィンドファーム FS (フィージビリティ・スタディ) で行った 4 海域での検討結果および風力発電事業者へのヒアリングの結果から、表 II.3.3-2 のように整理されている。同表には O&M 費も併記している。建設費は風車の定格出力、設置基数、水深や離岸距離、支持構造等によって変動するが、ここで扱われた建設費は 45-79 万円/kW と、陸上風力発電所 (34.2 万円/kW) の 1.3-2.3 倍のコストとなっており、海外の洋上風力発電所の平均建設コストの 1.3-2.2 倍となっている。なお、NEDO 洋上ウィンドファーム FS で行った 4 海域での試算結果は表 II.3.3-3 の通りであり、建設費は 53.5-59 万円/kW となっている。

表 II.3.3-2 洋上風力発電に係る事業費の一覧

ケース	事業費		備考
	建設費 (万円/kW)	O&M費 (万円/kW/年)	
1	45	2.1	事業検討段階にある一部事業者の報告 風車：5MW 平均水深：15m 離岸距離：1-2km 支持構造：モノパイル式
2	54-59	1.5-3.0	比較的条件の良い海域 (NEDO OWF_FS) 風車：2MW 平均水深：13-26m 離岸距離：2-5.5km 支持構造：モノパイル式
3	75、79	2.1、2.3	沖合海域を想定した事業者の報告 風車：3-7MW 平均水深：~20m 離岸距離：~10km 支持構造：重力式、ジャケット式

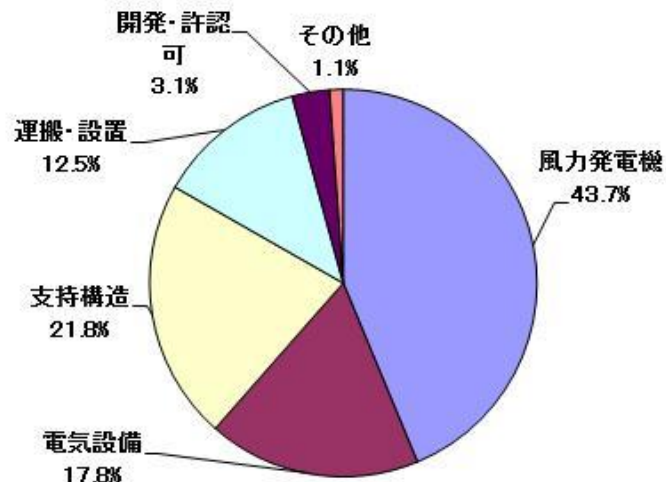
注) 資源エネルギー庁 省エネルギー・新エネルギー部 (2014a) より作成

表 II.3.3-3 NEDO 洋上ウィンドファーム FS で試算した事業費

サイト名	事業費		備考
	建設費 (万円/kW)	O&M費 (万円/kW/年)	
茨城県鹿島灘沖	53.5	1.7	設備容量：30MW (2MW×15基) 平均離岸距離：2km 平均水深：18m
秋田県秋田市沖	59.3	1.5	設備容量：40MW (2MW×20基) 平均離岸距離：2km 平均水深：16m
岩手県洋野町沖	58	1.6	設備容量：82MW (2MW×41基) 平均離岸距離：2km 平均水深：26m
千葉県旭市沖	59	3.0	設備容量：100MW (2MW×50基) 平均離岸距離：5.5km 平均水深：13m

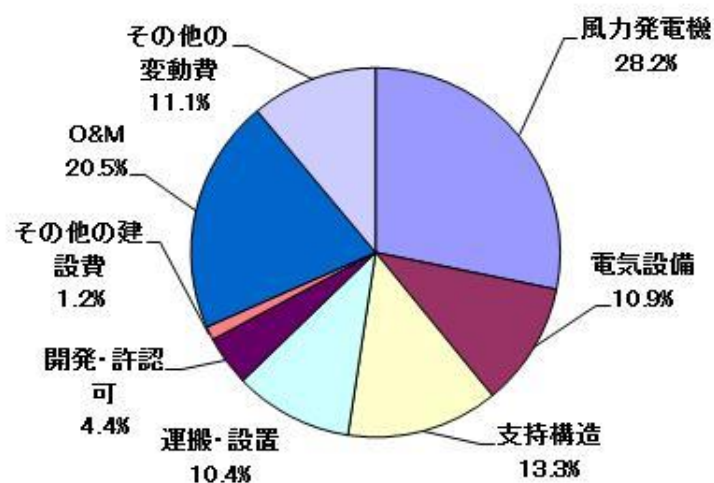
注) 資源エネルギー庁 省エネルギー・新エネルギー部 (2014b) より作成

海外における洋上風力発電所の建設費の構成比に係るデータ (Musial and Ram,2010) の平均を図Ⅱ.3.3-1 に示す。図示しているように、建設費を構成する主たる要素として、「風力発電機」、「電気設備 (海底ケーブル)」、「支持構造」、「運搬・設置」の各費用があげられる。



図Ⅱ.3.3-1 着床式洋上風力発電施設の建設費の平均構成比 (Musial and Ram, 2010 より作成)

次に、同様に発電原価 (LPC : Levelized Production Cost、LCC : Life Cycle Cost、LCOE : Levelized Cost of Energy) の構成割合に係るデータ (Musial and Ram,2010) の平均を図Ⅱ.3.3-2 に示す。図示しているように、発電原価を構成する主たる要素として「風力発電機」、「電気設備 (海底ケーブル)」、「支持構造」、「運搬・設置」および「O&M (運転保守)」の各費用があげられ、これらの要素について重点的にコストの低減を図る必要がある。Duwind (2001) が陸上風力発電と洋上風力発電の発電原価の構成比を比較した結果からも、同様のことが指摘されている。



図Ⅱ.3.3-2 着床式洋上風力発電施設の発電原価の平均構成比 (Musial and Ram, 2010 より作成)

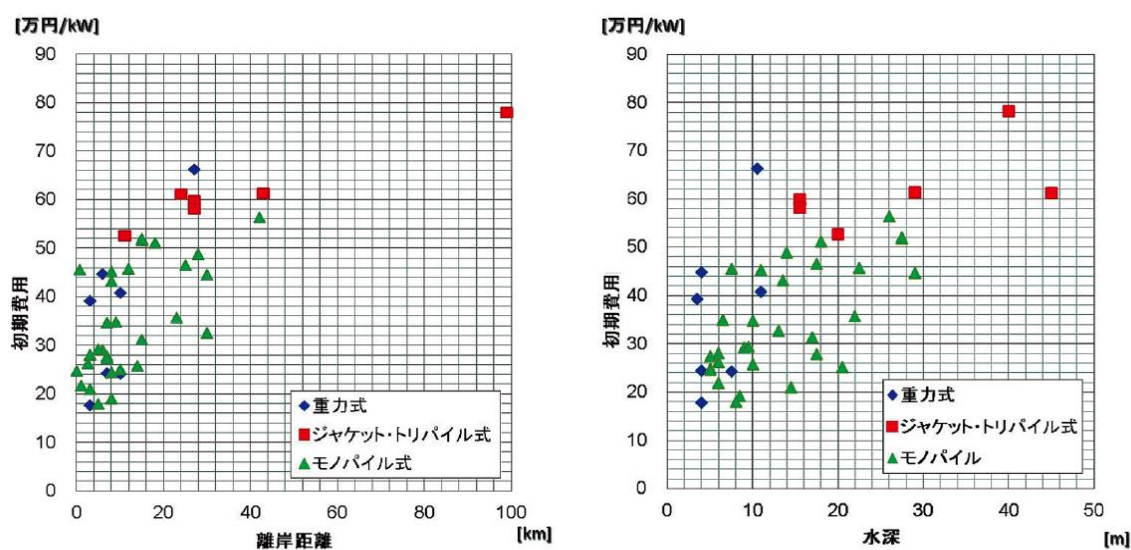
発電原価に関係する主要な構成要素に関して、そのコスト低減が重要であることは前述の通りである。そのうち、例えば「運搬・設置」と「O&M」について、日本では、ヨーロッパに比較して洋上風力発電設備のストックヤード、積み出し等を行う港湾の整備が遅れていることや、大型 SEP、アクセス船等の専用船が不十分である等、インフラ整備が完備されていないことから、高コストになることは否めない。社会基盤の整備が待たれるところである。

図Ⅱ.3.3-3 は、ヨーロッパの洋上風力発電所の建設コスト（初期費用）と離岸距離あるいは水深の関係を表したものである。建設コストは、風力開発サイトが沿岸から離れ水深の深い海域になるとコスト高になる傾向が見られるが、一方で岸から離れることにより好風況が期待できることから、発電原価の低減につながる可能性もある。

イギリスの Round3 の海域、またドイツの主たる洋上風力開発サイトである排他的経済水域（EEZ）は、水深の深い沖合海域に設定されているので、コストの上昇が見込まれる。そのため、Ⅱ.3.1 項の「世界の洋上風力発電」の「(2)今後の展開」で記しているように、イギリス政府は「再生可能エネルギーロードマップ（2011年）」で洋上風力発電所の発電原価を 2020 年までに 100 円/kWh（13 円/kWh, 130 円/円）に下げる必要があるとした。その対策として、「技術革新の加速」と「サプライチェーンを構築し、供給のボトルネックを解消するとともに競争の推進」を掲げている。

日本の海底地形には勾配が急であるという特徴があるため、洋上風力発電施設は水深の深い海域に計画されるケースも多いと考えられ、その場合、建設コストが高くなることも十分に推察される。

また、菊地・石原（2014）は、エンジニアリングモデルを用いた着床式洋上ウインドファームの事業性の評価結果から、港湾や建造船の整備とともに、風車の大型化、支持構造物の最適化、維持管理費の低減等のコスト削減が必要であることを指摘している。



図Ⅱ.3.3-3 ヨーロッパにおける洋上風力の初期費用と離岸距離の関係（左図）および初期費用と水深の関係（右図）（NEDO 編, 2014）

2) 運転保守費の検討

運転保守費（O&M 費）について、Rademakers *et al.* (2009) は風車の故障発生確率に基づくモンテカルロ法により推定している。このようなシミュレーションによる推計や実績から、着床式洋上風力発電所の O&M 費は LPC、LCC、LCOE 等の 20-30% に達すると言われ (Perkins and Everett, 2011)、図 II.3.3-2 に示した O&M 費の割合はその下限値に相当する割合になっている。海外における O&M 費に関する実績データは、Faulstich *et al.* (2011) により取りまとめられている (表 II.3.3-4)。表に示しているように、O&M 費と施設の規模、水深、離岸距離との明確な関連性は認められない。ここで記載されている全データの平均値 (76.5€/kW/年) と幅 (34.2-147.4€/kW/年) を直近 (2016 年 11 月上旬) の為替レート (115 円/€) で日本円に換算すると、約 8,800 円/kW/年 (約 3,930-16,950 円/kW/年) となる。

表 II.3.3-4 主要な着床式洋上風力発電のコストの一覧 (Faulstich, *et al.*, 2011 より作成)

国名	ウィンドファーム名	設置年	総出力 (MW)	水深 (m)	離岸距離 (km)	投資金額		O&M費
						(百万€)	(€/kW)	(€/kW・年)
イギリス	North Hoyle	2003	60	5-12	3-10	120	1,992	64.7
	Scoroby Sand	2004	60	2-10	2.5	107	1,783	34.2
	Kentish Flats	2005	90	5	8.5	156	1,733	36.4
	Barrow	2006	90	21-23	7	181	2,011	63.5
デンマーク	Middelgrunden	2001	40	2-6	2	49.2	1,230	38.6
	Rødsand II	2010	207	6-12	23	390	1,883	91.2
	Generic	—	—	—	—	—	2,850	77.5
オランダ	Prinses Amalia	2008	120	19-24	23	398	3,315	147.4
	Generic	—	—	—	—	—	3,000	90.1
ドイツ	Alpha Ventus	2010	60	30	43	194	3,230	122.1
平均			90.9	12.6	13.6	199.4	2,303	76.5

一方、前述の表 II.3.3-2 に示しているように、日本での O&M 費は 22,000 円/kW/年 (15,000-30,000 円/kW/年) と推定されており、海外の O&M 費と比べて割高になっている。実際、我が国では洋上風力発電の O&M に関する実績がほとんどないことに加えて、オランダで開発されたアンペルマンのような特殊な O&M 用の作業員搬送システムも保有していないこと等からも、O&M 費が高くなることは想定できる。

3) まとめ

以上、日本では着床式洋上風力発電所の建設費が陸上風力発電所と比較して 1.5-2.6 倍となっていることから分かるように、洋上風力発電の導入普及を推進するためには、特に「風力発電機」、「電気設備 (海底ケーブル)」、「支持構造」、「運搬・設置」および「O&M」のコストの低減が重要である。それには建設専用船・港湾等のインフラ整備も含めて具体的な対策を検討する必要がある。

Carbon Trust (2018) は、コスト削減には政策と技術革新の両方が必要であり、「有効な政策

が実施されれば、市場は官民両セクターの研究開発と技術最適化のための投資に刺激を与え、サプライチェーンの能力と規模が拡大し、金融機関（貸し手と保険業者）と投資家（通常は事業開発業者）にとってのリスクが低減されることで、技術の進歩を促すことができる。」と述べている。

コスト削減のために技術革新が進むには、研究開発が必要である。研究開発には技術プッシュ型（研究者が主導、研究中心型）と市場プル型（事業者が主導、商業化ベース）がある。新技術の初期段階では技術プッシュ型アプローチが好まれ、やがて市場プル型アプローチに移行する。日本で市場プル型の研究開発にインセンティブを与えるため、Carbon Trust（2018）は将来の研究開発の舵取りに当たって事業開発業者と金融機関を関与させるべきであると述べている。

日本で技術プッシュ型の研究開発を行っていく上で、イギリスで行われている洋上風力発電推進プロジェクト（Offshore Wind Accelerator : OWA）が参考になる。OWAはCarbon Trustとイギリス政府エネルギー・気候変動省により発足した100億円規模のプロジェクトである。9社の洋上風力発電事業者が参加しており、資金は事業者が2/3、気候変動省とスコットランド政府が1/3を拠出している。5つの技術ワーキンググループ（アクセス装置、ケーブル敷設、電気システム、基礎、風況およびウエイクの影響）から成り、商用化間近の技術の研究開発を資金面で支援する。事業者が資金を提供しているため、支援は事業者のニーズに合致したコスト削減に資する技術に行われている。このプロジェクトにより浮体式ライダや高い有義波高でも洋上風力発電所にアクセスできるアクセス船、着床式向けのフリーハンギングのケーブルなどが開発されており、既に15%の平均発電コストの削減が見込まれている。このように事業者の視点から研究開発を行うことで、技術プッシュ型の研究開発が実現できる。なお、OWAの詳細は、Carbon TrustのHP（<https://www.carbontrust.com/our-clients/o/offshore-wind-accelerator/>）に記載されている。

【豆知識Ⅱ.3.3-1】

●日本における洋上風力発電のコスト増の要因

（資源エネルギー庁 省エネルギー・新エネルギー部 洋上風力の調達価格に係る研究会 取りまとめ報告書（2014年））

- ・ 事前調査段階：洋上の占有に係る利害関係者（漁業や航行関係者等）との調整、各種手続き（環境アセスメント等）
- ・ 設計段階から設置段階：大型洋上風車や基礎の製作・施工における港湾インフラや船舶、重機の利用限界
- ・ 設置段階：完工保証、遅延リスク
- ・ 設置段階から運転保守段階：保険、金融
- ・ 運転保守段階：ウエイク影響、保守点検（メンテナンス船の確保等）
- ・ 建替えや撤去段階：撤去費用

(2) 環境影響評価手法の確立

2011年11月に環境影響評価法施行令が改正され、2012年10月から風力発電所の設置等の事業が環境影響評価法の対象となった。環境と調和した円滑な洋上風力発電の導入促進を図るため、環境省において2017年3月に「洋上風力発電所等に係る環境影響評価の基本的な考え方に関する検討会報告書」を公表し、洋上風力発電所等に係る環境影響評価の項目選定に係る考え方を示している。また、今後環境省において必要な技術手法に係る情報収集や必要に応じた技術開発が進められることとなっており、その成果を活用することなどが考えられる。また、NEDOにおいては、環境影響評価手法の確立のための基礎資料づくりが、2009年度から「洋上風況観測システム実証研究」の研究テーマの一環として行われている。

発電所アセス省令の別表五等で取り上げられている参考項目を表Ⅱ.3.3-5に示す。環境影響評価法に基づく基本的事項に示すように、環境影響評価の項目および手法の選定にあたっては、参考項目を勘案しつつ、事業特性および地域特性を踏まえ、簡略化や重点化を図ることが重要である。

表Ⅱ.3.3-5 環境影響評価に係る参考項目の一覧

環境要素の区分			影響要因の区分		環境影響評価法(風力発電)				
					工事の実施			土地又は工作物の存在及び供用	
					工所用資材等の運搬出入	建設機械の稼働	造成等施工等による一時的な影響	地形改変及び施設の存在	施設の稼働
を環境の自然構成要素の良好な状態を保持する	大気環境	大気質	窒素酸化物	*	*				
			粉じん等	*	*				
		騒音・超低周波音	騒音	*	*			*	
			超低周波音	*	*			*	
	水環境	振動	振動	*	*				
		水質	水の濁り		*	*			
	その他の環境	底質	有害物質		*				
		地形及び地質	重要な地形及び地質				*		
	その他	その他	風車の影					*	
		動物	重要な種及び注目すべき生息地(海域に生息するものを除く。)			*		*	
生態系	植物	海域に生息する動物			*	*			
		重要な種及び重要な群落(海域に生育するものを除く。)			*	*			
	生態系	海域に生育する植物			*	*			
		地域を特徴づける生態系			*		*		
景観	景観	主要な眺望点及び観光資源並びに主要な眺望景観				*			
	人と自然との触れ合いの活動の場	主要な人と自然との触れ合いの活動の場	*			*			
産業廃棄物等	産業廃棄物等	産業廃棄物			*				
		残土			*				
放射線の量	放射線の量	放射線の量			*				

注) *: 発電所アセス省令の別表五等で取り上げられている参考項目と影響要因の区分付け

【豆知識Ⅱ.3.3-2】

●洋上風力発電所等に係る環境影響評価の項目に係る考え方の概要

- ✓ 沖合に設置される場合を含む洋上風力発電の取扱いについて、環境省では、2015年度から洋上風力発電所に特有の特性に着目して、環境影響評価の項目に係る選定の考え方等についての検討を行った。
- ✓ 洋上風力発電所の環境影響評価において、その事業特性や地域特性に応じた評価項目の選定がなされる必要があるため、陸上風力発電所と洋上風力発電所の事業特性等の違い等を踏まえて、洋上風力発電所に関して評価項目の選定を行う際の参考となるよう、その考え方を整理した（表1参照）。
- ✓ なお、洋上風力発電所の評価項目の選定の考え方を整理するに当たって、一般的な事業内容も併せて整理を行っており、事業内容がこれらと異なる場合には、個別事業の状況に応じた検討が必要であることに留意が必要である。
- ✓ また、陸域で行われる工事や資材等の搬入等に伴う環境影響や「産業廃棄物」、「残土」、「放射性物質」などについては、陸域で設置される風力発電所等と同様に取り扱うことが可能であると考えられるため、今回の整理の対象とはしていない。

表1 洋上風力発電所（沿岸・沖合）における評価項目の選定の考え方（着床式の場合）※
（洋上風力発電所等に係る環境影響評価の基本的な考え方に関する検討会, 2017）

環境要素の区分			影響要因の区分						土地又は工作物の存在及び供用			
			工事用資材等の搬出入		建設機械の稼働		造成等の施工による一時的な影響		地形改変及び施設の存在		施設の稼働	
			沿岸	沖合	沿岸	沖合	沿岸	沖合	沿岸	沖合	沿岸	沖合
大気環境	大気質	窒素酸化物	◆	◆	★	◆						
		粉じん等	—	—	—	—						
	騒音及び超低周波音	◆	◆	★	◆					◇	◆	
	振動	—	—	★	◆							
水環境	水質	水の濁り			注	注	◇	◆				
	底質	有害物質			◇	◆						
	その他	流向・流速							◇	◆		
	水中音			◇	◇					◇	◇	
その他の環境	地形及び地質	重要な地形及び地質							★	★		
	その他	風車の影									★	◆
動物	重要な種及び注目すべき生息地（海域に生息するものを除く）											
	重要な種及び注目すべき生息地、海域に生息する動物		表2参照									
植物	重要な種及び重要な群落、海域に生育する植物											
生態系	地域を特徴づける生態系											
景観	主要な眺望点及び景観資源並びに主要な眺望景観								◇	★		
人と自然との触れ合いの活動の場	主要な人と自然との触れ合いの活動の場		★	◆					★	◆	★	
廃棄物等	産業廃棄物 ※											
	残土 ※											
一般環境中の放射性物質	放射線の量 ※											

■：発電所アセス省令における参考項目。なお、参考項目となっていないが、本検討会における議論を踏まえて、評価項目の選定に係る考え方の整理の対象とした項目がある。

◆：表10、11にまとめた洋上風力発電所の設置等に係る一般的な事業内容と同様の場合、選定しないことが考えられる評価項目

★：表10、11にまとめた洋上風力発電所の設置等に係る一般的な事業内容と同様の場合、一定の条件が満たされた場合は選定しないことが考えられる評価項目

◇：表10、11にまとめた洋上風力発電所の設置等に係る一般的な事業内容と同様の場合、選定することが考えられる項目

—：洋上風力発電所の設置等の事業において、そもそも生じることが想定されない項目

注：「発電所に係る環境影響評価の手引き」においては、浚渫作業に伴う環境影響は「建設機械の稼働」、掘削作業に伴う水の濁りの発生は「造成等の施工に伴う一時的な影響」とされているが、いずれの工種においても造成等の施工に伴って生じる環境影響と考え、ここでは工事に伴う種々の影響について「造成等の施工による一時的な影響」として整理した。

※：陸域で行われる工事や資材等の搬入等に伴う環境影響や「廃棄物等」及び「一般環境中の放射性物質」に関しては、陸域で設置される風力発電所や従来の臨海部の事業の場合と同様に取り扱うことが可能であることから本報告書における整理の対象とはしていない。

【豆知識Ⅱ. 3. 3-2 続き】

表2 動物・植物・生態系の細区分ごとの評価項目の選定の考え方（着床式の場合）
（洋上風力発電所等に係る環境影響評価の基本的な考え方に関する検討会, 2017）

環境要素の区分		影響要因の区分		工事の実施				土地又は工作物の存在及び供用					
				工事中の搬出入		建設機械の稼働*		造成等の施工による一時的な影響		地形変化及び施設の存在		施設の稼働	
				沿岸	沖合	沿岸	沖合	沿岸	沖合	沿岸	沖合	沿岸	沖合
動物	重要な種及び注目すべき生息地（海域に生息するものを除く）	コウモリ類						—	—	◇	◇	◇	◇
		鳥類						★	★	◇	◇	◇	◇
	海域に生息する動物	海生哺乳類、海生爬虫類（ウミガメ類）						◇	◇	◇	◇	◇	◇
		魚等の遊泳動物						◇	◇	◇	◇	◇	◇
		底生生物						◇	◇	◇	◇		
		魚卵・稚仔、動物プランクトン						★	★	★	★		
		潮間帯生物						◇	◆	◇	◆		
		藻場、干潟、サンゴ群集						◇	◆	◇	◆		
植物	海域に生育する植物	海藻草類						◇	◆	◇	◆		
		植物プランクトン						★	★	★	★		
		潮間帯生物						◇	◆	◇	◆		
		藻場、干潟、サンゴ群集						◇	◆	◇	◆		
生態系	地域を特徴づける生態系												

- ：発電所アセス省令における参考項目。なお、参考項目となっていないが、本検討会における議論を踏まえて、評価項目の選定に係る考え方の整理の対象とした項目がある。
- ◆：表10、11にまとめた洋上風力発電所の設置等に係る一般的な事業内容と同様の場合、選定しないでよいと考えられる評価項目
- ★：表10、11にまとめた洋上風力発電所の設置等に係る一般的な事業内容と同様の場合、一定の条件が満たされた場合は選定しないでよいと考えられる評価項目
- ◇：表10、11にまとめた洋上風力発電所の設置等に係る一般的な事業内容と同様の場合、選定することが適当と考えられる項目
- ：洋上風力発電所の設置等の事業において、そもそも生じることが想定されない項目
- *：「発電所に係る環境影響評価の手引き」においては、浚渫作業に伴う環境影響は「建設機械の稼働」、掘削作業に伴う水の濁りの発生は「造成等の施工に伴う一時的な影響」とされているが、いずれの工種においても造成等の施工に伴って生じる環境影響と考え、ここでは工事に伴う種々の影響について「造成等の施工による一時的な影響」として整理した。
- 注：海域の生態系は、基礎的な知見や調査、予測・評価手法の知見が限られているため、引き続き国内外の事例等の情報収集や知見の蓄積を進める必要がある。

洋上風力発電に関する環境影響評価については、海外で数多くの事例がある。ここで国別に環境影響評価に係る参考項目を比較してみると（表Ⅱ.3.3-6）、各国共通の主要な参考項目は、生物では「底生生物」、「魚介類」、「海棲哺乳類」、「鳥類」、「海草・海藻」となっており、社会環境では「景観」となっている。もっともこれらの項目の重要度は、地域により変わり得るものである。なお、環境影響評価以外にも合意形成の観点からは、海外の洋上風力発電の計画時においても見られる、いわゆる NIMBY (Not-In-My-Backyard) 問題があるが、より直接的な問題として漁業者、海運業者等のステークホルダー（利害関係者）と呼ばれる人達への対応がある。風力発電事業者には、これら自然環境、社会環境への影響を予測・評価するとともに、地域とのコミュニケーションを図り、積極的に社会貢献を果たすことが求められている。

表Ⅱ.3.3-6 洋上風力発電の環境影響評価に係る国別参考項目の比較表

国名		ドイツ	フランス	イギリス	デンマーク	オランダ	アメリカ	カナダ	中国		
自然環境	物理・化学	大気質	○	○	—	○		○	○	○	
		騒音(陸域)	—	○	○	—		○	—	○	
		海潮流	○	○	○	○	○	○	○	○	
		波浪	—	—	—	—	○	—	○	—	
		水質	○	○	△	○	○	○	○	○	
		海底地形・地質	○	○	○	○		○	○	○	
	生物	動物	電磁波	—	—	○	○	○	○	—	
			動物プランクトン	—	○*	—*	—	—	—*	—*	—
			底生生物	○	○	○	○	○	○	○	○
			魚介類	○	○	○	○	○	○	○	○
			海棲哺乳類	○	○	△	○	○	△	○	○
		鳥類	○	○	○	○	○	○	○	○	
		植物	植物プランクトン	—	○*	—*	—	—	—*	—*	—
			海草・海藻	—	○	○	○	○	○	○	○
社会環境	生態系	○	—	○	—	—	—	○	○		
	漁業	—	○	○	○		○	○	○		
	景観	○	○	○	○	○	○	○	○		
	観光・レクリエーション資源	○	○	○	○		○	○	—		
	社会受容	—	○	○	○		○	○	—		
	海上交通	—	○	○	○		○	○	○		
	電波障害	—	—	○	—		○	○	○		
廃棄物	—	—	○	—		—	—	○			

凡例 ○：調査項目（参考項目）、△：洋上風力発電の個々の環境影響評価（プロジェクト）によって実施・未実施のある調査項目、—：未実施項目、○*：プランクトン調査は特に重要と思われる理由があれば実施する（フランス）、—*：プランクトン調査は文献（データ）による（イギリス、アメリカ、カナダ）、無印：不明

出典 【洋上風力発電の参考項目】

■ドイツ：Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie(2008) Offshore Windenergy in tjr German EEZ-the authority's perspective、BHS(2007)Standard Investigation of the impacts of offshore wind turbines on the marine environment(STUK3)

■フランス：Ministere de l'Ecologie, de l'Ecologie, du Developpement durable et de la Mer(2010) Guide de l'etude d'impact sur l'environnement des parcs eoliens

■イギリス：Centre for Environment, Fisheries and Aquaculture Science(CEFAS) on behalf of the Marine Consents and Environment Unit(MCEU)(2004) Offshore Wind Farms/Guidance Note for Environmental Impact Assessment in Respect of FEPA and CPA Requirements、London Array Limited(2005) Environmental Statement Vol.2 Onshore/Works Non-Technical Summary、Centrica energy(2009) Race Bank Offshore Wind Farm Environmental Statement Non-Technical Summary

■デンマーク：Dong Energy(2006) Horns Rev2 Offshore Wind Farm Environmental Impact Assessment summary of the EIA-Report、Marine Management Organisation(2012) Evidence summary Installation and operation of Dudgeon Offshore Wind Farm 34480/090612

■オランダ：NoordzeeWind(2008) Offshore Windfarm Egmond aan Zee General report OWEZ_R_141_20080215、NoordzeeWind(2006) Baseline data on harbour seals, Phocavitulina, in relation to the intended wind farm site OWEZ, in the Netherlands、Bureau Waardenburg bv(2009) Development of underwater flora- and fauna communities on hard substrates of the offshore wind farm Egmond aan Zee(OWEZ)

■アメリカ：Minerals Management Service(2009) Cape Wind Energy Project. Final Environmental Impact Statements. Herndon, VA

■カナダ：NaiKun Wind Development Inc(2010) NaiKun Offshore Wind Energy Project Environmental Assessment Certificate #E09-04

■中国：HK Offshore Wind Limited(2006) Hong Kong Offshore Wind Farm in Southeastern Waters Project Profile

【豆知識Ⅱ.3.3-3a】

●イギリスにおける洋上風力開発と漁業対策（奈良（2012）より作成）

洋上風力開発に係る漁業補償のあり方に関するガイドライン（案）が策定された。

✓イギリスの漁業の実態

- ・漁業従事者 12,729 人、漁船数 6,763 隻、漁獲量 60 万 t、水揚高 6.5 億 £（845 億円、130 円/£）で、ヨーロッパではノルウェー（漁獲量 2.33 万 t）、アイスランド（同 131 万 t）、スペイン（同 92 万 t）、デンマーク（同 69 万 t）に次いで漁業の盛んな国である（2007 年の統計値）。
- ・主な漁獲魚種はサバ類（16 万 t）、タラ類（7 万 t）、ニシン（6.7 万 t）、ホタテガイ（4.5 万 t）、エビ類（3.9 万 t）、カニ類（2.9 万 t）、イワシ類（2.3 万 t）、アジ類（1.7 万 t）等である。
- ・大型船（船長 10m 以上の主にトロール漁船）の操業海域は 6 海里以遠、条件によっては 12 海里以遠に定められ、操業域に関する小型漁船（漁船の 8 割の数）の制限はない。

✓洋上風力が漁業に与える影響

- ・立ち入り禁止：法令により施設の周囲 50m 内への立ち入りが禁止されているが（風車間の距離は初期のウィンドファームで 350-400m、最近では大型化を反映して 500-800m）、潮の流れや風の影響、特に強風時には風車ブレードの回転速度上昇に伴う危険域の拡大、漁船の風下側への漂流等により、実際には漁ができない状況が発生する。
- ・迂回：遠洋漁業に出航する大型船舶の場合、風車タワー周囲の立ち入り規制により迂回をする必要がある。
- ・底曳網の利用制限：海底ケーブル、ジョイントケーブルの敷設により底曳網の曳網が制限される。
- ・海底掘削や海底ケーブル敷設で魚類の移動や魚種の交代が起こる可能性がある。
- ・海底掘削等の地形変化により漁業者の知識（知的所有権）が侵害される可能性がある。
- ・風力サイト内での操業規制により漁獲可能海域に漁船が集中し、これまで利用していた漁業者の漁獲量が減少する可能性がある。また、サイト内での操業規制により小型船の漁業者にとって沿岸の定置網の漁獲が増大する等のプラス面のケースの報告がある。

✓漁業対策費用

- ・イギリスにおいて貝類の養殖域は、国の認可する排他的漁業権が存在するが（ただし、5-10 年で消滅する時限的な権利）、一般には船の規模や網の種類によって規制はあるものの、基本的には場所を問わず漁業が可能である。そのため、これまで漁業補償や漁業対策は大きな問題とならず、当事者間の話し合いで決められていた。
- ・漁業補償には金銭補償と影響緩和措置があるが、ガイドラインでは補償のあり方は影響緩和措置（特定の措置を講じて影響を最小化・相殺する措置を言う）を推奨している。

✓漁業対策（影響緩和措置）

- ・26 種類の対策が取り上げられ、「洋上風力開発の設計段階での措置」、「魚類の繁殖サポート」、「漁業活動のサポート」および「新たな事業の構築」に分類される。
- ・ガイドライン（案）では対策の実効可能性について、研究機関や関係者との協議等を通してさらに評価することが必要としている。

影響緩和措置の具体例

- ・海洋生物保護区域の風力開発サイトとしての利用
- ・風車配置の最適化
- ・魚礁機能を持たせた支持構造物の検討
- ・魚介類の増養殖
- ・海洋調査の実施と漁業者への情報提供
- ・迂回が必要な船舶への燃料代補助
- ・魚類廃棄物の再資源化（バイオ燃料工場の建設）
- ・市場開拓等の情報提供 等

【豆知識Ⅱ.3.3-3b】

●フランスの漁業者に対する取組み

・洋上風力発電事業者に対する税金（12,879€/MW/年;約 148 万円/MW/年）を配分。

35%：影響を被った漁業者への支払い（4,507€/MW/年;約 52 万円/MW/年）

50%：市町村（海岸から洋上風力発電施設が視認できる地域）への支払い
（6,440€/MW/年;約 74 万円/MW/年）

15%：地方自治体への支払い（1,932€/MW/年;約 22 万円/MW/年）

※115 円/€

4 参考文献

- BINE Informationsdienst, Siegfried Heier (2016) : Nutzung der Windenergie, 7. überarbeitete Auflage.
- Broehl, J. (2010) : Wave of offshore hope fights against the odds. Wind Power Monthly, Dec., 2010, 58-60.
- BSH (Federal Maritime and Hydrographic Agency) HP
http://www.bsh.de/en/Marine_uses/Industry/Wind_farms/index.jsp, アクセス 2017 年 2 月 27 日.
- BTM Consult (2010) : International Wind Energy Development, Offshore Report 2010.
- BTM Consult (2012) : International Wind Energy Development, Offshore Report 2013.
- Burger, A. (2014) : DOE 54-GWs of Untapped Offshore Wind Power, TriplePundit.
<http://www.triplepundit.com/2014/10/doe-54-gws-offshore-wind-power-waiting-tapped/>, アクセス 2014 年 12 月 30 日.
- Carbon Trust (2018) : Offshore Wind Cost Reduction in Japan Learnings from Europe to deliver cost reduction (日本の洋上風力発電コスト削減 欧州の事例に学ぶコスト削減達成策).
- 千代田デイムス・アンド・ムーア (2000a) : 平成 11 年度 ニューサンシャイン計画 離島用風力発電システム等技術開発 (離島地域等における洋上風力発電新技術開発に係る予備的検討調査) 報告書. NEDO 委託調査.
- 千代田デイムス・アンド・ムーア (2000b) : 平成 11 年度 新エネルギー等導入促進基礎調査 (我が国の諸条件を考慮した風力エネルギー利用可能性に関する調査) 報告書. 資源エネルギー庁 委託調査.
- 調達価格等算定委員会 (2012) : 平成 24 年度調達価格及び調達期間に関する意見. 平成 24 年 4 月 27 日, http://www.meti.go.jp/committee/chotatsu_kakaku/pdf/report_001_01_00.pdf, アクセス 2014 年 12 月 30 日.
- 調達価格等算定委員会 (2014) : 平成 26 年度調達価格及び調達期間に関する意見. 平成 26 年 3 月 7 日, http://www.meti.go.jp/committee/chotatsu_kakaku/pdf/report_003_01_00.pdf, アクセス 2014 年 12 月 30 日.
- 調達価格等算定委員会 (2016) : 平成 29 年度以降の調達価格等に関する意見. 平成 28 年 12 月 13 日, http://www.meti.go.jp/report/whitepaper/data/pdf/20161219002_01.pdf, アクセス 2017 年 2 月 7 日.
- Deutsche WindGuard (2016) : Status of Offshore Wind Energy Development in Germany, 2015. http://www.windguard.com/_Resources/Persistent/7dd86b6ac530485cccd621808d0736378d6b601b/Factsheet-Status-Offshore-Wind-Energy-Development-in-Germany-Year-2015.pdf, アクセス 2017 年 2 月 7 日.
- Dolan, D. (2004) : MMI Eng. At Deepwater Wind Energy Workshop, Washington D.C., PPT.
- DS472 Danish Standard (1992) : DS472-Loads and Safety of Wind Turbine Construction, 1st edition May 1992, English translated by NEL.

- Duwind (2001) : Offshore Wind Energy Ready to Power a Suitable Europe Final report.NNE5-1999-562.
- Energy Research Group, LLC (2010) : Offshore Wind Energy Installation and Decommissioning Cost Estimation in the U.S. Outer Continental Shelf. BOEMRE (The Bureau of Ocean Energy Management, Regulation and Enforcement) .
- EWEA (2009) : Europe Offshore Wind Farm Projects.
- EWEA (2014) : Wind energy scenarios for 2020.
<http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/reports/EWEA-Wind-energy-scenarios-2020.pdf>,アクセス 2014 年 12 月 21 日.
http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Wind_2013_Roadmap.pdf, アクセス 2014 年 12 月 21 日.
- EWEA (2015) : The European offshore wind industry-key trends and statistics 2014
<https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/statistics/EWEA-European-Offshore-Statistics-2014.pdf>,アクセス 2017 年 2 月 21 日.
- Faulstich, S., P. Kuhn, P. Lyding and S. Pfaffel (2011) : Offshore Wind Energy Deployment. It's the cost that counts.PO47, EWEA Offshore 2011.
- Frandsen, S. and C. J. Christensen (1994) : Vindeby offshore wind farm-fatigue loads. Contributions from the Department of Meteorology and Wind Energy to the EWEC94 Conference in Thessaloniki, Greece. Larsen Gunner C. (ed.) , Risoe National Laboratory, Roskilde, Denmark,107-111.
- GWEC (2016a) : Wind Power to dominate power sector growth. Global Wind Energy Outlook 2016. <http://www.gwec.net/publications/global-wind-energy-outlook/global-wind-energy-outlook-2016/>,アクセス 2016 年 10 月 28 日.
- GWEC (2016b) : Global Wind Report Annual Market Update 2015. http://www.gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC-Global-Wind-2015-Report_April-2016_22_04.pdf, アクセス 2016 年 10 月 30 日.
- Henderson A. R., D. Witcher and C. A. Morgan (2009) : Floating Support Structures Enabling New Markets for Offshore Wind Energy. European Wind Energy Conference 2009, Marseille, France.1-12.
- Hoboham, J., L.Krampe, F. Peter, A. Gerken, P. Heinrich and M. Richer (2013) : Cost Reduction Potentials of Offshore Wind Power. FICHTNER/PROGNOS.
- IEC 61400-3 Ed.1.0, Wind Turbines – Part 3 : Design Requirements for Offshore Wind Turbines, to be published in 2009-02.
- IEC 88/379/NP : Standard for Floating Offshore Wind turbines, to be published in 2009-02.
- 伊藤葉子 (2013) : 洋上風力発電の促進に向けた政策基盤整備 : 英国の取組と今後の課題.IEEJ,2013.5,1-39. eneken.ieej.or.jp/data/4885.pdf,アクセス 2015 年 1 月 1 日.
- 石原孟 (2010) : 洋上風力発電の現状とその技術開発. 洋上風力発電技術の現状と将来展望.土木学会 平成 22 年度全国大会,研究討論会 研-08 資料,3-10.
- 石原孟 (2011) : 浮体式洋上風力発電の歴史、現状と将来展望.洋上風力発電ワークショップ 2,

一般財団法人日本海事協会.2-2.3.

- ・石原孟（2013）：洋上風力発電の新しい展開.OHM（2013.1）,21-25.
- ・伊藤忠テクノソリューションズ（2011）：平成22年度新エネルギー等導入促進基礎調査（風力エネルギーの導入可能量に関する調査）報告書.資源エネルギー庁委託調査.
- ・伊藤葉子（2013）：洋上風力発電の促進に向けた政策基盤整備：英国の取組と今後の課題.日本経済エネルギー研究所（IEEJ）HP,<http://eneken.ieej.or.jp/data/4885.pdf>,アクセス2016年10月29日.
- ・鎌田智、高橋大祐（2016）：洋上風力発電の海域占用・合意形成における法的課題とその克服に向けた取組み.環境管理,2016年6月号,26-32.
- ・環境省地球環境局地球温暖化対策課（2010）：平成21年度再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査報告書.
- ・環境省地球環境局地球温暖化対策課（2016）：平成27年度再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報整備調査報告書.
- ・環境省総合環境政策局（2011）：風力発電施設に係る環境影響評価の基本的考え方に関する検討会報告書. 附属資料.
- ・菊地由佳、石原 孟（2014）：エンジニアリングモデルを用いた着床式洋上ウィンドファーム建設費の評価と実データによる検証.日本風力エネルギー学会論文集,38（2）,36-43.
- ・Kim, HG.（2009）：Onshore/Offshore Wind Resource Potential of South Korea. Proceedings. ewea.org/ewec2009/allfiles2.30_EWEC2009.
- ・国土交通省港湾局（2016）：港湾における洋上風力発電の占用公募制度の運用指針 Ver.1.
- ・KPMG（2010）：Offshore Wind in Europe 2010 Market Report.
- ・Krohn, S.（1998）：Offshore wind energy. Full speed ahead. Danish Wind Turbine Manufactures Association HP.
- ・Kühn, M.（2001）：Dynamics and Design Optimisation of Offshore Wind Energy Conversion Systems. ISBN 90-76468-07-9,DUWIND Delft University Wind Energy Research Institute, Report 2001.002.
- ・Langston, L. H. W.（2010）：Offshore wind farms and birds : Round3 zones, extensions to Round1 & Round2 sites& Scottish Territorial Waters. RSPB Research Report No.39. http://www.rspb.org.uk/Images/langston_2010_tcm9-203501.pdf,アクセス2015年1月1日.
- ・Matthies, H. G., C. Nath, T.E.Schellin, A. D. Garrad, M. A. Wastling, D. C. Quarton, J.Wei, M. Scherweit and T. Siebers（1995）：Study of Offshore Wind Energy in the EC. JOULE I（JOUR 0072） Verlag Natürliche Energie, Brekendorf.
- ・Musial,W. and B.Ram（2010）：Large-Scale Offshore Wind Power in the United States. Assessment of Opportunities and Barriers. NREL/TP-500-40745.
- ・Musial,W., D. Heimiller, P. Beiter, G. Scott and C. Draxl（2016）：2016 Offshore Wind Energy Resource Assessment for the United States. NREL（National Renewable Energy Laboratory）,TP-5000-66599. <http://www.nrel.gov/docs/fy16osti/66599.pdf>,アクセス2016年11月13日.
- ・長江翼（2013）：ドイツ北海沖、洋上風力発電所建設促進のための賠償制度導入とその課題.海

- 外電力,2013.6,10-17.
- 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,34 (1) ,通巻 93,103-112.
 - 奈良長寿 (2012) : 洋上風力開発と漁業対策 (英国) .海外電力,2012.7.32.39.
 - Navigant (2013) : Offshore Wind Market and Economic Analysis. Annual Market
Assessment, Prepared for : U.S.Department of Energy Report.
 - Navigant (2014) : World Market Update 2013. A BTM Report.
 - Navigant (2016) : Offshore Wind Market Update. Global and Country-Level Market Analyses
and Forecasts, Wind Turbine Vendor Market Shares, and Turbine Technology Trends.
RESEARCH REPORT.
 - 日本風力発電協会 (2014) : 風力発電導入ポテンシャルと中長期目標 V4.3,
<http://jwpa.jp/pdf/2014-06dounyuuumokuhyou.pdf>,アクセス 2017 年 2 月 7 日.
 - Perkins and Everett (Eds.)(2011) : Offshore wind power. Challenges, Economics and Benefits.
Mova Science Publishers, Inc.New York.
 - Petersen, E.L. (1992) : Wind resources of Europe (the offshore and coastal resources) . In
Proceedings of Conference” The Potential of Windfarms”, Herning,8-10.
 - Pritchard, A.E. (2016) : Cut-throat competition is slashing offshore wind costs to unthinkable
levels. The Telegraph, Business.
<http://www.telegraph.co.uk/business/2016/10/02/cut-throat-competition-is-slashing-offshore-wind-costs-to-unthin/>,アクセス 2016 年 10 月 29 日.
 - Rademakers L.W.M.M., Braam H., Obdam T.S., Frohbose P., Kruse N. (2009) : Operation
and Maintenance Costs Estimator (OMCE) . Final Report, ECN-E-09-037.
 - Schwartz, M. D. Heimiller, S. Haymes and W. Musial (2010) : Assessment of Offshore Wind
Energy Resources for the United States. *Technical Report* NREL/TP-500-45889 June 2010.
 - Schwägerl,C. (2016) : For European Wind Industry, Offshore Projects Are Booming.
environment360, Reporting, Analysis, Opinion & Debate.
http://e360.yale.edu/feature/european_offshore_wind_industry_booming/3046/, アクセス
2016 年 10 月 29 日.
 - 資源エネルギー庁 省エネルギー・新エネルギー部 (2014a) : 最近の再生可能エネルギー市場の
動向について.2014 年 1 月 10 日,第 12 回調達価格等算定委員会資料,
http://www.meti.go.jp/committee/chotatsu_kakaku/pdf/012_02_00.pdf,アクセス 2015 年 1
月 1 日.
 - 資源エネルギー庁 省エネルギー・新エネルギー部 (2014b) 洋上風力の調達価格に係る研究会
取りまとめ報告書.
http://www.meti.go.jp/committee/chotatsu_kakaku/pdf/012_03_00.pdf,アクセス 2014 年 12
月 31 日.
 - 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) ,千代田デイムス・アンド・ムーア (1999) :
日本における洋上風力発電の導入可能性調査.
 - 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) (2003) : 局所風況マップ.

<http://app8.infoc.nedo.go.jp/nedo/>,アクセス 2017 年 3 月 2 日.

- ・新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) (2008) : 風力発電導入ガイドブック (改訂第 9 版) .
- ・新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) ,イー・アンド・イー ソリューションズ,風力エネルギー研究所,ネクストエナジー (2008) : 平成 19 年度 洋上風力発電実証研究 F/S に係る先行調査報告書.
- ・新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) ,イー・アンド・イー ソリューションズ,風力エネルギー研究所,ネクストエナジー (2009) : 平成 20 年度 洋上風力発電実証研究 F/S 評価成果報告書.
- ・新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) (2014) : NEDO 再生可能エネルギー技術白書 第 2 版. 第 3 章風力発電,129-206.
- ・城田佳宏 (2013) : 米国初となる洋上風力開発領域リース販売オークションが実施される.海外電力,2013.10,52-53.
- ・Smith, A., T. Stehly and W.Musial (2015) : 2014-2015 Offshore Wind Technologies Market Report. NREL (National Renewable Energy Laboratory) ,Task No.WE14.CG02,pp.112. <http://www.nrel.gov/docs/fy15osti/64283.pdf>, アクセス 2016 年 11 月 13 日.
- ・鈴木英之 (2011) : 浮体構造の最適化と浮体式洋上風力発電施設の安全性.洋上風力発電ワークショップ 2,一般財団法人日本海事協会,26-50.
- ・Twidell, J. and G. Gaudiosi (ed.) (2009) : Offshore Wind Power. ISBN 978-0906522-639, Multi-Science Publishing Co. Ltd.
Twidell, J. and G.Gaudiosi (編著) /一般社団法人日本風力エネルギー学会 (監訳) (2011) : 洋上風力発電.鹿島出版会.
- ・U.S. Department of Energy (2015) : Wind Vision : A New Era for Wind Power in the United States.pp.286.http://www.energy.gov/sites/prod/files/WindVision_Report_final.pdf, アクセス 2016 年 11 月 12 日.
- ・U.S. Department of ENERGY and U.S. Department of INTERIOR (2016) : National Offshore Wind Strategy : Facilitating the Development of the Offshore Wind Industry in the United States.
<http://energy.gov/sites/prod/files/2016/09/f33/National-Offshore-Wind-Strategy-report-9082016.pdf>,アクセス 2016 年 11 月 12 日.
- ・U.S. Energy Information Administration (2013) : International Energy Outlook 2013. <http://www.eia.gov/forecasts/ieo/>,アクセス 2014 年 12 月 1 日.
- ・UK Energy Research Center (UKERC) (2010) : Great Expectations : The cost of offshore wind in UK waters-understanding the past and projecting the future. Sept., 2010.
- ・洋上風力発電所等に係る環境影響評価の基本的な考え方に関する検討会 (2017) : 洋上風力発電所等に係る環境影響評価の基本的な考え方に関する検討会報告書.
- ・渡辺遥、萬木勝敏 (2011) : 中国の電力・エネルギーの最新動向.海外力,2011.3,4-28.
- ・エックス都市研究所ら (2011) : 平成 22 年度再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査報告書.