

洋上風力発電調査

2011年度JSC特別調査事業-01

2012年3月

日本船舶輸出組合
ジャパン・シップ・センター
財団法人 日本船舶技術研究協会

はじめに

世界のエネルギーは主として石油や天然ガスなどいわゆる化石燃料に依存しているが、近年、原油価格の高騰や温室効果ガスの排出抑制の観点から、資源の枯渇が無く、環境にやさしい再生可能エネルギーの利用に対する期待が高まっている。

我が国においても、従来より再生可能エネルギーの利用を図ってきている中、2011年8月26日には「電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法」が成立し、2012年7月から施行されることとなった。同法では、再生可能エネルギーにより発電した電力をすべて、発電側に有利な価格で電力会社が買い取ることを義務付ける「固定価格買い取り制度」を柱として、再生可能エネルギーの一層の普及を図ることとしている。

一方、欧州では2008年12月、2020年までに一次エネルギーに占める再生可能エネルギーの割合を20%にするという包括的な温暖化対策法案を可決し、域内各国において各種再生可能エネルギー利用関連産業への投資、研究開発、実用化が積極的に進められており、中でも風力発電についてはクリーンエネルギーとしての期待が高く、近年、発電設備容量が急増している。また、米国においても2008年5月、エネルギー省が2030年までに総需要の20%を風力発電で供給可能とする見通しを発表するなど、風力発電への期待が高まり、設備投資が進んでいる。

中でも洋上風力発電については、陸上に比べて膨大な賦存量や設置場所の自由度の観点から世界で注目を集めており、浅水域のみならず、大水深まで含めた洋上風力発電設備の研究、試験、実用化が行われてきている。この洋上風力発電分野については、設備の設置やメンテナンス、あるいは支持構造物や浮体式プラットフォームの建造など、造船事業者が有する船舶や海象に関する専門的な知識・経験が必要とされている。

本調査は、世界における洋上風力発電市場への取り組み方策の現状と今後の見込みを明らかにすることにより、新しい事業分野開拓を目指す我が国造船業の今後の経営戦略立案の一助とするものである。

ジャパン・シップ・センター

目 次

1. 洋上風車市場の成長要因.....	1
1.1 風力エネルギーに共通した市場成長要因	1
1.2 豊富な洋上風力資源	6
1.3 大水深の洋上風力資源を開拓する利点	8
2. 洋上風車設計.....	11
2.1 風車の進化	11
2.2 洋上風車と陸上風車	12
2.3 洋上風車支持構造物の種類	13
2.4 風力発電タービン機械の設計	21
2.5 洋上風車の典型的な構成部品	23
3. 既存及び計画されている洋上風車プロジェクト.....	27
3.1 欧州	27
3.2 米国	32
4. 大水深風車需要の展望.....	39
4.1 大水深風車発注に影響を与える問題点	39
4.2 浮体式風車発注の展望	51
5. 市場勢力図.....	54
5.1 洋上風車機械	54
5.2 洋上風車支持構造物と浮体式プラットフォーム	61
5.3 浮体式風車プラットフォーム	66
5.4 浮体式風力発電用変電プラットフォーム	71
5.5 風車設置、保守作業船	72
6. 購入意思決定要因.....	83
6.1 誰が調達先を決定するか	83
6.2 調達先の選択に影響を及ぼす要因	83
6.3 システムサプライヤー間の既存の関係の影響	84
6.4 洋上風車に適用される業界基準	85
7. 日本の造船事業者及び機器メーカーにとっての参入機会.....	87
7.1 大水深市場における将来の参入機会	87
7.2 市場参入への障壁	88
7.3 洋上風車市場に参入、サプライヤーとなるための選択肢	88

1. 洋上風車市場の成長要因

洋上風車の需要は、陸上、浅水深、中水深及び大水深に設置される風車に共通する、複数の成長要因に影響を受ける。また、大水深風力発電には、特有の市場成長要因が存在する。これらの成長要因について以下に論じる。

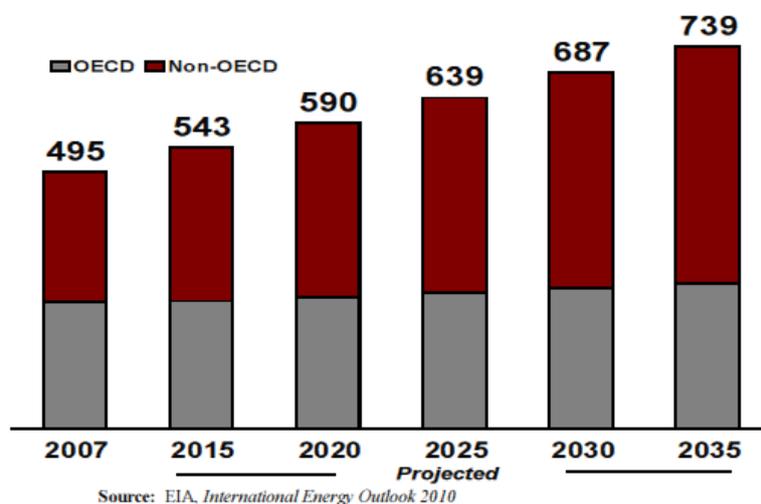
1.1 風力エネルギーに共通した市場成長要因

風力エネルギーは (1)世界のエネルギー消費量増大に対応する必要性、(2)エネルギー生産が環境に与える影響を最小化する必要性、(3)枯渇する化石燃料への依存低減の必要性、が成長要因となり、資源開発が進んでいる、

増加する世界のエネルギー需要

米国エネルギー情報局(EIA)の予測によれば、世界のエネルギー需要は2007年から2020年の間に19%増加し、2020年から2035年の間にさらに25%増加する見込みである。EIAは、世界のエネルギー需要が、2007年の495千兆英熱量(BTU)から2035年には740千兆英熱量(BTU)に達すると予測している。図表 1.1 は2007年から2035年のエネルギー需要成長予測を示したものである。

図表 1.1 世界のエネルギー需要の推移 (単位：千兆英熱量)



この予測は世界の人口が増加し、開発途上国の産業化が進んでいることを反映したものである。過去20年間に世界の人口は16億人増加し、世界の実質所得は87%増加した。今後20

年間に世界の人口はさらに 14 億人増加し、実質所得は倍増すると予測されており¹、これによりエネルギー需要はさらに拡大する。

EIA は、欧米のエネルギー消費量が 2035 年までに年間平均 0.5%増大すると推定している。増大率は地域によりばらつきがあり、米国のエネルギー消費量は年間 0.6%、欧州（OECD 加盟）で年間 0.2%、OECD 非加盟欧州/ユーラシアで年間 0.6%成長すると推測される。

今後もエネルギーの大部分は化石燃料で賄われると考えられる。EIA は基本シナリオにおいて、2035 年には欧米の推定消費量 294.7 千兆英熱量(BTU)のうち 226.5 千兆英熱量(BTU)が化石燃料により賄われると予測している。しかし、将来のエネルギー供給に風力を含む代替エネルギー源が占める割合は漸増すると考えられる。EIA は、代替エネルギー源がエネルギー供給量全体に占める割合は、2007 年の 8.8%から 2015 年には 11.2%、2035 年には 13.4%に達すると予測している。

今後、風力発電が電力供給量に占める割合は増加すると考えられている。国際エネルギー機関(IEA)によれば、現在風力発電が世界の発電量に占める割合は約 3%である。IEA の基本シナリオでは、風力発電が総発電量に占める割合は 2050 年には約 12%に増加し、再生可能エネルギー利用率を高く設定したシナリオでは、総発電量の 23%に達すると予測している。

将来のエネルギー源として風力を活用するために、欧米諸国政府は陸上及び洋上風力発電プロジェクトへの投資を促してきた。風力発電プロジェクトの実現を促進するために様々な経済的奨励策や研究支援が提供されている。大水深風力発電の研究及び実証試験に対する支援も行われている。

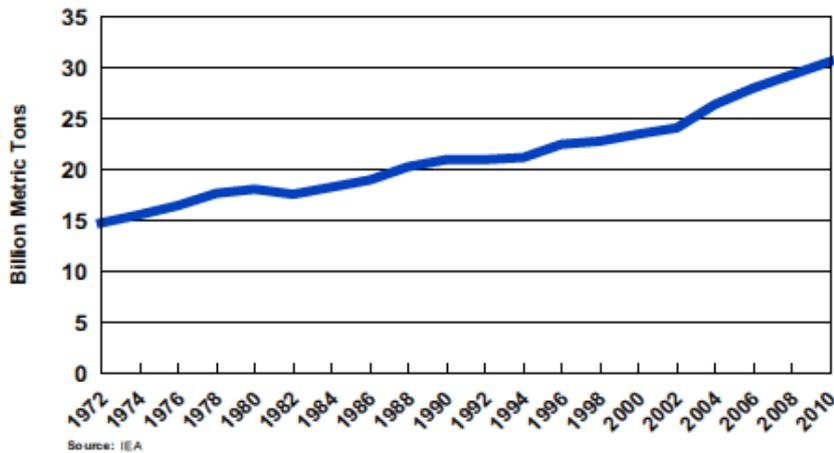
クリーンなエネルギー源

風力はクリーンなエネルギー源と考えられており、世界の CO₂ 排出量削減を目的として陸上及び洋上の風力資源を活用するというアイデアは広く支持されている。

図表 1.2 に示すように、燃料燃焼による世界の CO₂ 排出量は著しく増加している。IEA によれば、2010 年の世界の燃料燃焼による CO₂ 排出量は 30.6 ギガトン(ギガトン=10 億トン)という記録的な水準に達した。これは前回の最高記録である 2008 年の排出量を 5%上回り、1970 年代始めの世界の CO₂ 排出量の 2 倍を超える。

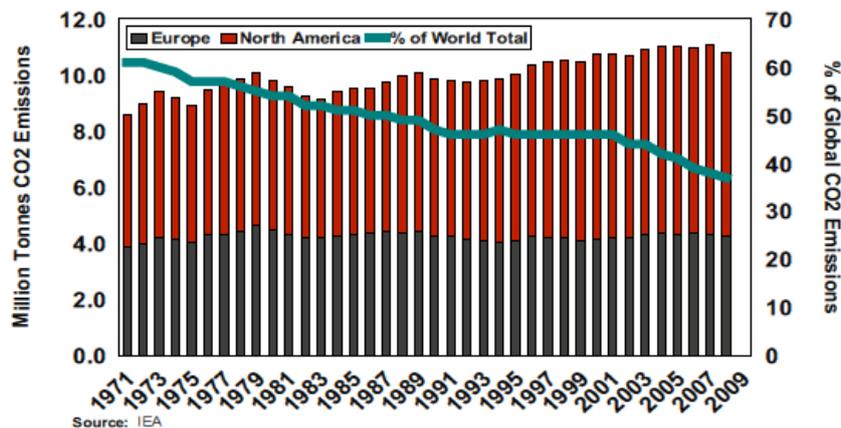
¹ BP, *Energy Outlook 2030*.

図表 1.2 世界の燃料燃焼からの CO₂ 排出量の推移



欧米における燃料燃焼による CO₂ 排出量は、世界における燃料燃焼による CO₂ 排出量の相当部分を占めている。IEA の推定によれば、2008 年の欧米における燃料燃焼による CO₂ 排出量は合計 1,080 万トンであり、世界の燃料燃焼による CO₂ 排出量の 37% を占めた。1971 年の欧米の燃料燃焼による CO₂ 排出量は 860 万トンであり、2008 年には 26% 増加したことになる。欧米における燃料燃焼による CO₂ 排出量の推移を図表 1.3 に示す。

図表 1.3 欧米における燃料燃焼による CO₂ 排出量の推移



CO₂ が環境に与える悪影響については数多の研究が行われている。例えば、米国科学学会 (National Academy of Science) は、米国において運輸及びエネルギー生産のための化石燃料の燃焼は健康に害を及し、ネガティブな影響を与えることにより究極的に米国に年間 1,200 億ドルの経済的損失を及ぼしていると推定している。「気候変動に関する政府間パ

ネル」(IPCC)は、世界のCO₂濃度を550ppmに安定化するために提言された措置が講じられたとしても、2050年には地球の温度が2~4°C上昇すると予測している。550ppmは現行レベルの80%減に相当する。

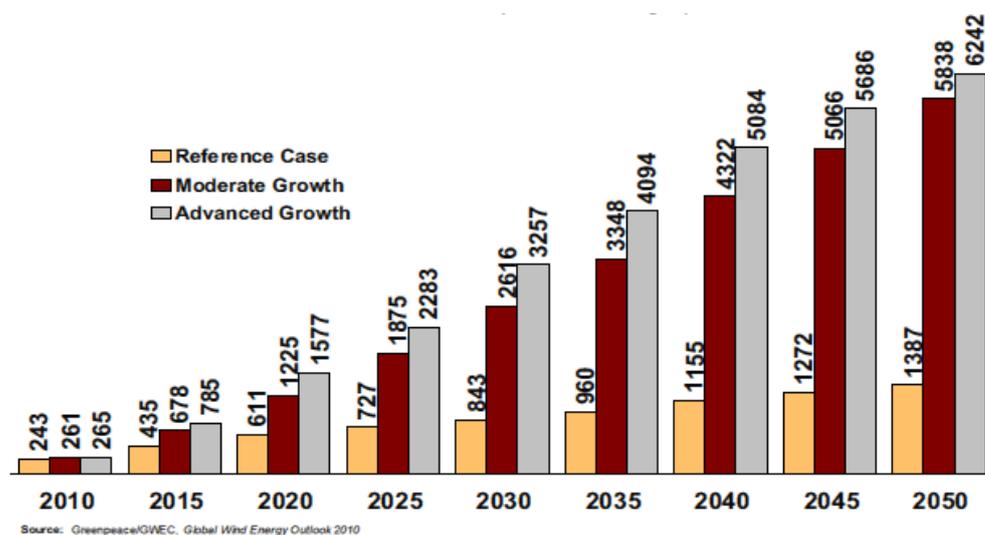
こうした中、代替エネルギー源としての風力発電を開発することにより、大気中へのCO₂の排出量を削減することができる。風力発電タービンの製造・設置・保守に関連してCO₂が発生するが、風力発電タービンの運転自体からはCO₂は発生しない。

Global Wind Energy Council とグリーンピース・インターナショナルは、最近発表した研究において風力発電によるCO₂排出量の純削減量(net saving)を試算している。GWEC/グリーンピースは、「基本シナリオにおいて、風力エネルギーによるCO₂の年間削減量は2010年に2億4,300万トン、2015年から2020年の間に5億トンを超え、その後漸増し、2030年の年間CO₂削減量は8億4,300万トンと推定される」²としている。2050年にはCO₂の年間削減量は14億トンに達すると予測されている。

基本シナリオは風力発電が緩やかに成長すると想定したものである。風力発電が急成長すると想定したシナリオでは、年間削減量は2020年に12~16億トン、2030年には26~33億トン、2050年には58~62億トンとなる可能性があるとされている。同研究では、すべてのシナリオにおいて、化石燃料発電を風力発電で代替することによるCO₂削減量は平均600kg/MWhと想定されている。図表 1.4 に複数シナリオの下でのCO₂削減量予測を示す。

² GWEC/Greenpeace, *Global Wind Energy Outlook 2010*.

図表 1.4 風力発電による CO₂年間削減量予測（単位：CO₂年間排出量 100 万トン）



CO₂排出量削減のかけ声のもと、陸上及び洋上風力発電プロジェクトは世論や政府の支援を受けている。先に引用した GWEC/Greenpeace の研究のように、化石燃料から風力に切り替えることが CO₂排出量削減につながることを示した文献には事欠かない。

再生可能資源としての風力

石油及びガス資源は限りある資源であり、石油及び天然ガス埋蔵層の多くは政情不安定な地域に所在する。このため、これら資源は供給の乱れや価格高騰の危険性をはらんでいる。エネルギー供給不安の影響を最小限に抑えるため、代替エネルギー源、特に再生可能及び/又は国産の代替エネルギー源開発が奨励されている。風力エネルギーは、限りある石油・ガス資源への依存度を低減するための代替エネルギー源のひとつである。新エネルギーの導入により将来の供給支障リスク及びコスト上昇のリスクが分散される。

BP によれば、2010 年末の世界の石油埋蔵量は 1 兆 3,800 億バレルであった。現在の生産率を前提とすると、石油を生産し続けられる年数は 46.2 年である。同じく BP によれば、2010 年末の世界の天然ガス埋蔵量は 187.1Tcf（兆立方フィート）であった。現在の生産率を前提とすると、天然ガスを生産し続けられる年数は 58.6 年である。ただし、これらの推定には将来発見される埋蔵量は含まれていない。

前述のとおり、これら石油や天然ガスの多くは政情が不安定で貿易相手として信頼できない地域に存在している。2010 年末現在で石油埋蔵量の 54.4%、天然ガス埋蔵量の 40.5%が中東に存在している。

したがって、主要エネルギー源として化石燃料への高い依存度が継続すれば、エネルギーサプライチェーンが不安定となり、エネルギー供給が乱れる危険性がある。化石燃料依存はエネルギー価格の乱高下やサプライチェーンの混乱を招き、世界経済に甚大な影響を与えかねない。

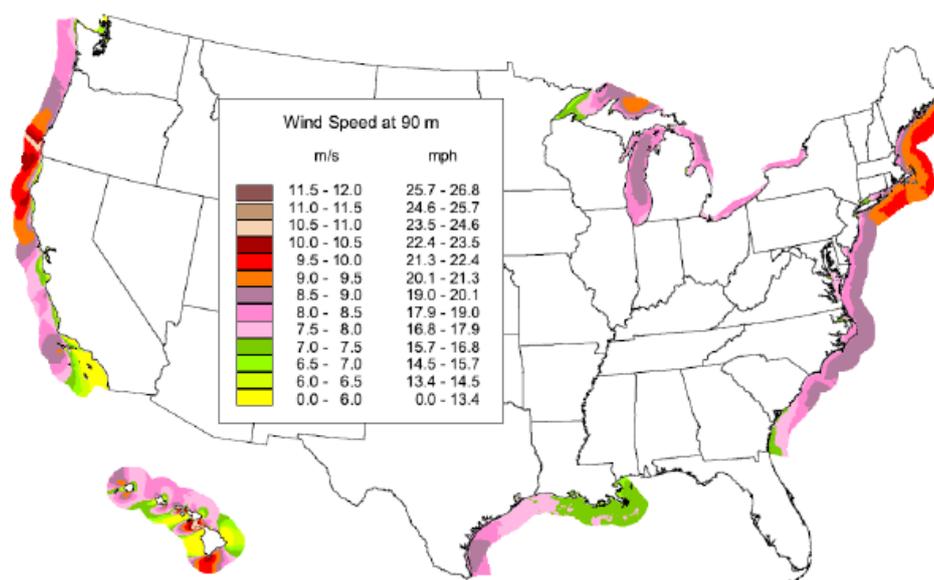
オバマ大統領はアイオワ州の風車製造施設を視察した際、風力発電がエネルギー安全保障に果たす役割に関して次のように述べた。「風力発電は特効薬ではない。風力発電が米国のエネルギー問題をすべて解決するわけではない。単一のエネルギー源が解決策となることはない。重要なのはこれが主要な要素であることを理解することだ。化石燃料だけで動いている経済から、国産燃料とクリーンエネルギーへの依存率を高める経済へと米国が移行するための包括的戦略の重要な要素なのだ。」

1.2 豊富な洋上風力資源

膨大な賦存量を有する洋上風力資源のほとんどが活用されておらず、風力エネルギーを有効利用する洋上風力発電への期待が高まっている。海上風は風速が大きく、風の乱れが少ないことから、一般に陸上風力発電よりも安定した電力供給が期待できる。エネルギー生産量も陸上風力より予測しやすい。

図表 1.5 は洋上風況マップであり、海面上空 90 メートルにおける風速が示されている。米国エネルギー省は、米国の離岸距離 50 海里以内の海域における風力により総出力 4,150 ギガワットのエネルギー供給が可能としている。これは米国の電力システムの発電能力の約 4 倍にあたる。

図表 1.5 米国の海面上空 90 メートルにおける推定風速



Source: U.S. Department of Energy, *A National Offshore Wind Strategy*, February 2011

西欧でも洋上風力資源は大型エネルギー源となる潜在的可能性がある。デンマークの Risø National Laboratory は、欧州沖の風力資源の潜在的エネルギー供給能力を 139 ギガワットと推定している。これは発電量にして年間 312~567TWh (テラワット時) に相当し、欧州の現在の電力需要年間 320TWh を賄える規模である。同研究所は、潜在的電力供給量が年間 3,000TWh に達すると推定する研究者も存在するという。図表 1.6 に Risø による国別の欧州風力資源の推定量を示す。

図表 1.6 欧州諸国の風力資源賦存量

	Resource Estimate			Resource Estimate	
	MW	TWh/y		MW	TWh/y
Belgium	1200	4	Italy	3000	10
Denmark	8000	26	Netherlands	10000	33
Finland	6000	20	Poland	600	2-3
France	13000	44	Portugal	600	2
Germany	13000	45	Spain	2000	7
Greece	1500	5	Sweden	7000	22.5
Ireland	3300	11	U.K.	70000	80-334

Source: RISO National Laboratory for Sustainable Energy, *Offshore Wind Potential in Europe*, 2003

洋上風力には賦存量以外にも利点がある。例えば、沿岸のエネルギー消費地の近くに洋上風力発電所を設置することにより、長い送電線を敷設する必要がなくなる。陸上に風力発電所を設置した場合、周辺の土地の生産活動利用が制限されるが、洋上では問題とならない。また、地域住民による反対の問題も少ない。

洋上風力発電の潜在的可能性を活用するために、米国、欧州共に今後数十年間にわたる洋上風力資源開拓の野心的な目標を掲げている。欧州では、EU と業界団体である欧州風力エネルギー協会 (European Wind Energy Association : EWEA) が 2020 年までに総発電容量 40 ギガワットの洋上風力発電施設を設置し、2030 年にまでにはこれを 150 ギガワットまで拡大することを目標としている。米国では、様々な公共団体や民間企業が連邦政府及び州管轄海域内に総発電容量 5 ギガワットの風力発電設備を設置することを提案している。米国エネルギー省は、長期的には「送電能力、化石燃料供給、サプライチェーンの可用性に関して控えめに想定しても、2030 年までに米国で 54 ギガワットの洋上風力発電施設の設置が実現可能」³としている。

1.3 大水深の洋上風力資源を開拓する利点

大水深には、風車の設置サイトとして陸上や浅水域よりも有利な点がある。

離岸距離の大きい大水深海域に風車を設置する最大のメリットは、膨大な風力エネルギー賦存量である。図表 1.7 に示すように米国沖合の水深 60 メートルを超える海域における風力エネルギー賦存量は 2,451 ギガワット (1 ギガワット=1,000 メガワット) であり、洋上風力エネルギー賦存量全体の 59% を占める。これに対し水深 30 メートル以下の海域では、風力エネルギー賦存量は 1,071 ギガワット、水深 30~60 メートルの海域では 628 ギガワットと推定されている。

³ NREL, *Large-Scale Offshore Wind Power in the United States*, September 2010.

図表 1.7 米国沖の風力賦存量（単位：ギガワット）

Region	Water Depth			Total
	0-30m	30-60m	>60m	
New England	100.2	136.2	250.4	486.8
Mid-Atlantic	298.1	179.1	92.5	569.7
South Atlantic Bight	134.1	48.8	7.7	190.7
California	4.4	10.5	573.0	587.8
Pacific Northwest	15.1	21.3	305.3	341.7
Great Lakes	176.7	106.4	459.4	742.5
Gulf of Mexico	340.3	120.1	133.3	593.7
Hawaii	2.3	5.5	629.6	637.4
Total	1071.2	628.0	2451.1	4150.3

Note: Gigawatts of wind potential for areas up to 50 nautical miles from shore with average wind speeds of 7 m/s or greater at 90 meters elevation

Source: U.S. Department of Energy, *A National Offshore Wind Strategy*, February 2011

これと関連するメリットとして、洋上風力は陸から遠ければ遠いほど風力が強くなる傾向にある。また、陸からの距離が大きくなるほど風の乱れが少なくなる傾向にある⁴。その結果、同じ規模の風車を設置した場合、陸上や沿海に比べて大水深の沖合の方が大きなエネルギーを得られる可能性がある。

膨大な風力エネルギー賦存量の他にも大水深風力エネルギー開発への関心を誘うメリットがある。

風車を陸から離れた沖合に設置することにより景観の問題が解消される。21 海里沖に設置されたハブ 90 メートルの風車は視認できない。ハブ 155 メートルの風車は 28 海里沖で視認できなくなる⁵。大水深海域に風車を設置することにより景観問題に起因する風力発電施設建設に対する反対を緩和することが可能となる。

住宅地域や商業地域の近傍に風車を設置する場合、ブレードによる騒音を抑えるための設計上の配慮が必要であるが、大水深風力発電においてはタービンとロータの効率と出力を最適化した設計とすることが可能である。陸上や人口集中地域の近くに設置される風車の回転速度は騒音規制を受け、ブレード先端の速力を秒速 170 メートルに抑える必要があり、騒音

⁴ Renewable Energy, *A Buoyant Future for Floating Wind Turbines*, May 2011.

⁵ Paul Sclavounos, *Floating Wind Turbines*, MIT Department of Mechanical Engineering.

緩和のために発電効率が犠牲となっている。洋上に風車設置することにより回転速度の制約が取り除かれれば、エネルギー生産を最大化し、極限荷重を最小化するように風車を最適化することが可能となる⁶。3枚翼よりも高速の2枚翼の風車を採用する可能性も出てくる。

(陸上では、騒音の問題から2枚翼風車は利用されていない⁷。)

セミサブマーシブルまたはTLP(テンションレグプラットフォーム)上に風車を搭載する場合、陸上で一体的に組立て、試運転を行い、洋上の設置場所まで曳航することができる。浅水域で風車を設置する場合は海底に基礎を打ち込み高コストの設置作業船を使って洋上でタービン/ロータを支持構造物上に搭載するが、浮体式プラットフォームを採用することにより洋上作業が減り、コスト削減の可能性がある。しかし、浮体式プラットフォームでは係留システムを設置する必要があることから、設置場所における係留システムの連結コストが発生し、洋上作業の削減によるコスト削減メリットが相殺される。また、スパー搭載の風車の場合、ユニットを陸上で完成させることはできず、大水深までスパーを曳航し、バラスト投入により起立状態で浮かばせた後、タービン/ロータを搭載する必要がある。

浮体式風車は海底に固定されておらず、理論的には移動が可能である。石油・ガスの浮体式生産設備と同様に、当初の設置場所で必要が無くなれば新しい設置場所に移動することができる。浮体式風車を係留索から切り離し、新しい場所に曳航し、そこで係留システムと海底送電ケーブルに再接続することが可能である。この柔軟性は風力発電を一時的なエネルギー源として利用する場合に魅力的である。大規模な修理やアップグレードを必要とする場合、洋上作業に代えて陸側施設までユニットを曳航することも可能である。だが、石油・ガス浮体式生産設備の場合と同様に、浮体式風車についても、この再配置の可能性が誇張されているきらいがある。特定の場所での使用に合わせて設計・係留されている大型浮体式プラットフォームを移動するのは非常に困難であり、なおかつ莫大な費用がかかる。

資金調達の点では着底式ユニットよりも浮体式風車の方が優位であることも考えられる。浮体式風車の場合、風力発電プロジェクトが破綻した場合に貸し手が差し押さえることが可能である。この点は風力発電プロジェクトに対する出資者のリスクに対する嫌気を緩和し、融資条件に影響を与えることもありえる。

⁶ W. Musial, et al, *Feasibility of Floating Platform Systems for Wind Turbines*, ASME Symposium, 2004.

⁷ Peter Fairley, *Wind Power that Floats*, MIT Technology Review, April 2008.

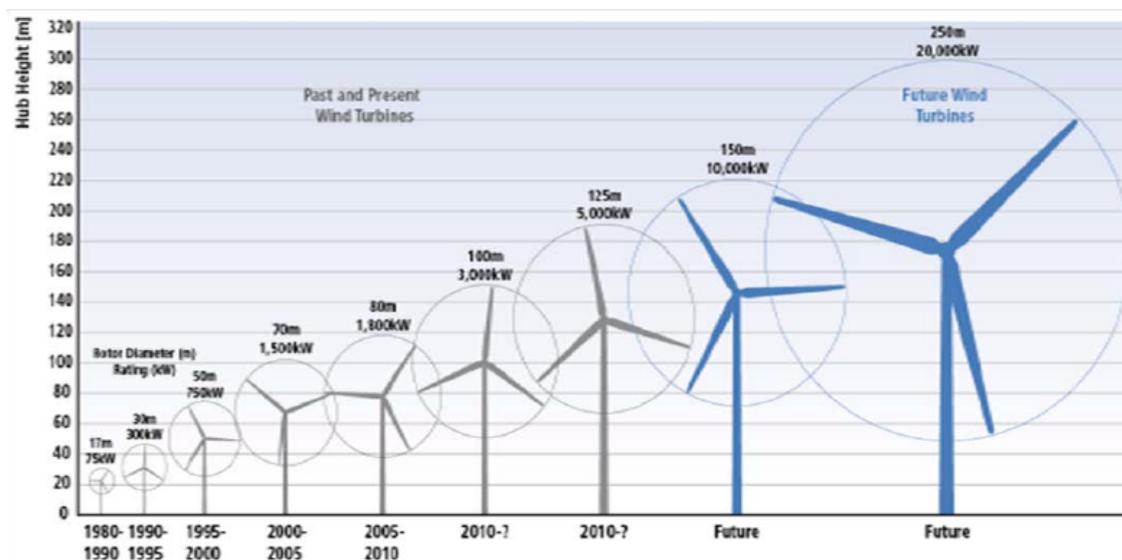
2. 洋上風車設計

本章では、風車技術の進化、陸上風車と洋上風車の違い、浅水深及び中水深洋上風力発電に採用されている又は採用を検討されている支持構造物の種類、風車機器の設計及び、洋上風車に使用される典型的な機器について概説する。

2.1 風車の進化

過去 30 年間に風車の規模及び発電能力は著しく拡大した。図表 2.1 に示すように 1980～1990 年の風車はハブ高さ（風車ロータ中心の高さ）が 20～25 メートルであり、出力は 75 キロワットであった。現在の風車はハブ高さが 120 メートルを超えるものもある。出力は 5 メガワットを超えており、出力 10～20 メガワットのタービンの設計も開発されている。現在欧州洋上で稼働している最大型の風車はハブ高さ 135 メートル、ブレードスウィープ直径は 127 メートルである。

図表 2.1 洋上風車の規模の進化



Source: Intergovernmental Panel on Climate Change, *Special Report Renewable Energy Sources*, May 2011

加えて、風車に使用されるコンポーネントやシステムにも多くの改良があった。タービンの効率向上、増速機の改良、低速発電機への直結ドライブ、新型ブレード設計、軽量化と強度増のための複合素材、出力分配システムの向上、風向や風速を計測するための精巧なセンサー等である。設置技術やシステムの信頼性を高めるための状態監視システムも向上した。

2.2 洋上風車と陸上風車

洋上風車は陸上風車に利用されている技術から進化したが、洋上で利用されている技術と陸上で利用されている技術には大きな違いがある。

現在洋上で使用されている風車は通常 3 枚翼であり、ヨー制御された風車ロータの直径は 80～130 メートルである。洋上風車はコンポーネントの運搬や設置に制限が少ないため、典型的な陸上風車より大型である。

陸上よりも厳しい海洋環境に対処するために、洋上風車は波によるさらなる負荷に耐える構造となっており、ドライブトレインや電気系統を波飛沫による腐食から守るために加圧されたナセル、保守作業員のアクセス用プラットフォーム、水面との接触面の浸食を防止するシステムが装着され、外側のコンポーネントには高グレードのマリンコーティングが施される。

洋上風車は海岸線から遠く離れた場所に設置されるため、一般に騒音に配慮する必要性が低く、ブレード先端の速力は陸上風力発電タービンよりも高い。

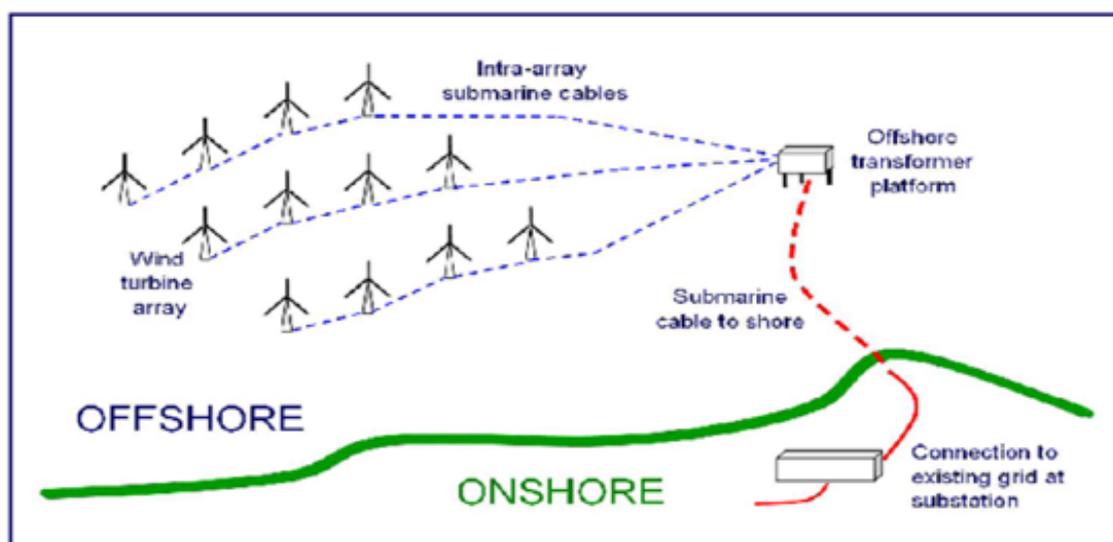
ウィンドシアアは洋上の方が低く、風車ロータの高度が陸上ほど重要ではないため、一般に洋上風車のタワーは同出力の陸上のタワーよりも低い。

洋上風車には陸上風力発電タービン標準システムを遥かに超える監視・制御装置が使用されている。これらの装置にはコンディショニング監視装置、オイル温度調節装置、軸受潤滑油自動注入装置が含まれる。

陸上風車と異なり、洋上風車の支持構造物の設置には専用作業船が必要である。

洋上風力発電施設の陸上電力系統への連系はさらに複雑である。図表 2.2 に示すように、大規模な洋上ウインドファームでは各タービンから集められた電力は海底ケーブルで洋上変電所に送られ、送電用にフェーズ・昇圧される。集積された電力は洋上変電所から陸上変電所に送られ、陸上送電網（グリッド）に連系される。

図表 2.2 洋上ウインドファームのレイアウト

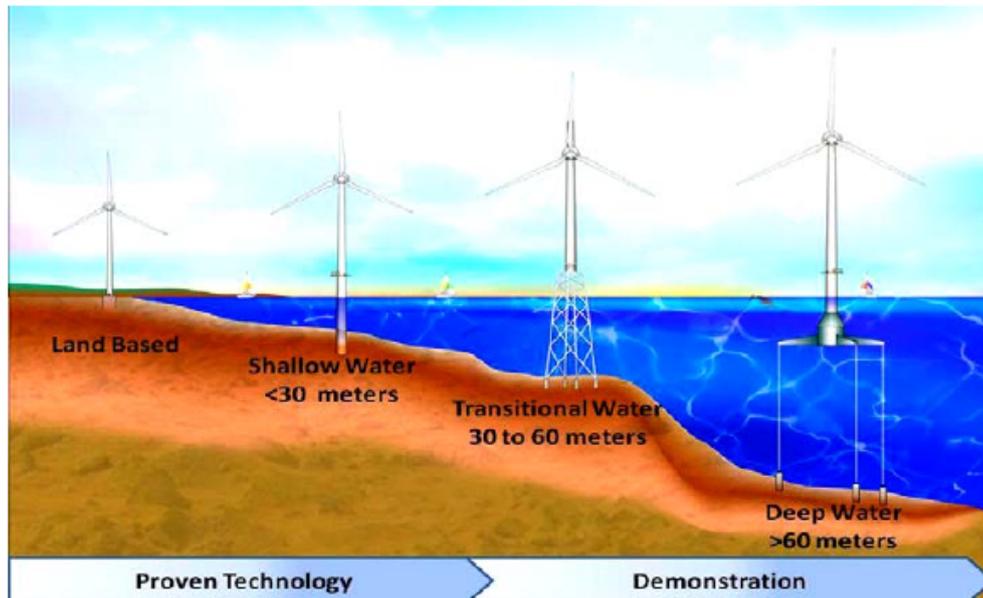


Source: Bluewater Wind

2.3 洋上風車支持構造物の種類

洋上風力発電タービンにはタービン設置海域の水深に応じて様々な種類の支持構造が使用されている。図表 2.3 に示すように、水深 30 メートル未満の浅水深に設置される洋上風車の場合、海底に基礎を打ち込んだ着底式が典型的である。水深 30 メートルから 60 メートルでは支持構造としてトラス、ジャケット、ガイド・タワー(guyed tower)が一般に使用される。水深 60 メートルを超える海域では風車を支えるために浮体式構造物が必要とされる。

図表 2.3 洋上風車支持構造物



Source: NREL, *Large-Scale Offshore Wind Power in the United States*, September 2010

浅水深における支持構造方式

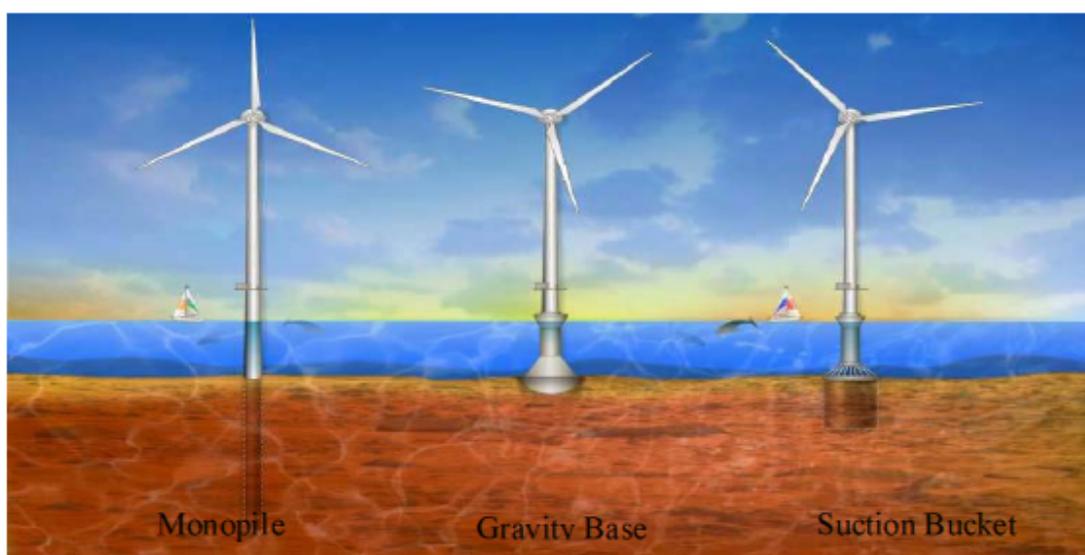
水深 30 メートル未満の海域に設置される洋上風車支持構造物は基本的にモノパイル式 (monopile)、重力着底式、サクシオンバケット (suction bucket) 式の 3 種類である。

- モノパイルチューブ式支持構造物は洋上風車の基礎として最も一般的である。モノパイル式は海底に単純な円筒型の構造物を打ち込んだものであり、海底の設置面積 (フットプリント) も比較的小さい。モノパイル式は水深 30~40 メートルの海域でも風車の支持構造として利用可能と考えられているが、水深に応じて直径と厚みを大きくする必要がある。デンマーク沖の「Horns Rev 1」風力ファームの風車にはモノパイル式が採用されている。
- 重力着底式支持構造物は水深の浅い海域で海底が岩盤である場合、または環境上の配慮からパイルを打ち込むことができない場合にしばしば利用される。重力着底式支持構造物は重量物クレーンによって吊り下げられ、設置された後、構造物を安定させるためにバラスト水が注入される。この種の支持構造物はデンマークの Samsø 風力ファームで採用されている。
- チューブタワー用のサクシオンバケット式支持構造物は水深の浅い海域における支持構造として検討されている新しい方式である。この技術は、海洋油田における浮

体式生産部門において専ら FPSO の係留に利用されてきた。サクシオンバケットは真空吸着効果を利用してバケットを海底に打ち込み、海底に強力に固定するものである。

図表 2.4 は、現在使用されている又は採用を検討されている浅水深用支持構造物を示したものである。

図表 2.4 浅水深用支持構造物



Source: NREL, *Large-Scale Offshore Wind Power in the United States*, September 2010

中水深における支持構造方式

水深 30～60 メートルの海域に設置される風力発電タービンを支える支持構造物には、トリポッドチューブ(tripod tube)方式、ガイドチューブ(guyed tube)方式、ジャケット/チューブ(jacket/tube)方式がある。

- トリポッドチューブタワー式支持構造は海底に設置された 3 脚の支持構造物でチューブ状のタワーを支えるものである。脚の広がりや海床に着底したトリポッドにより安定性が得られる。ドイツ沖の Alpha Ventus 風力発電ファームに設置されている風力発電タービンの半数はトリポッドチューブ方式が使用されている。
- ガイドチューブタワー(guyed tube tower)式支持構造はガイワイヤー (guy wire)により安定性を保ち、筒状のタワーを支えるものである。ガイドチューブ式支持構造は利用に向けた検討段階であり、実用化には至っていない。

- ジャケット/チューブ式支持構造は海洋石油ガス開発部門で生産プラットフォームを支えるために使用されているものと同様の構造である。フルジャケット式の風車支持構造物としての経済性は実証されていない。しかし、ジャケットとチューブタワーを組み合わせたコンセプトがドイツ沖の Alpha Ventus プロジェクトにおける風車の半数で利用されている。

図表 2.5 に、中水深に設置される風車の支持構造物として使用されている又は使用を検討されている支持構造方式を示す。

図表 2.5 中水深向けに使用されている又は検討されている支持構造



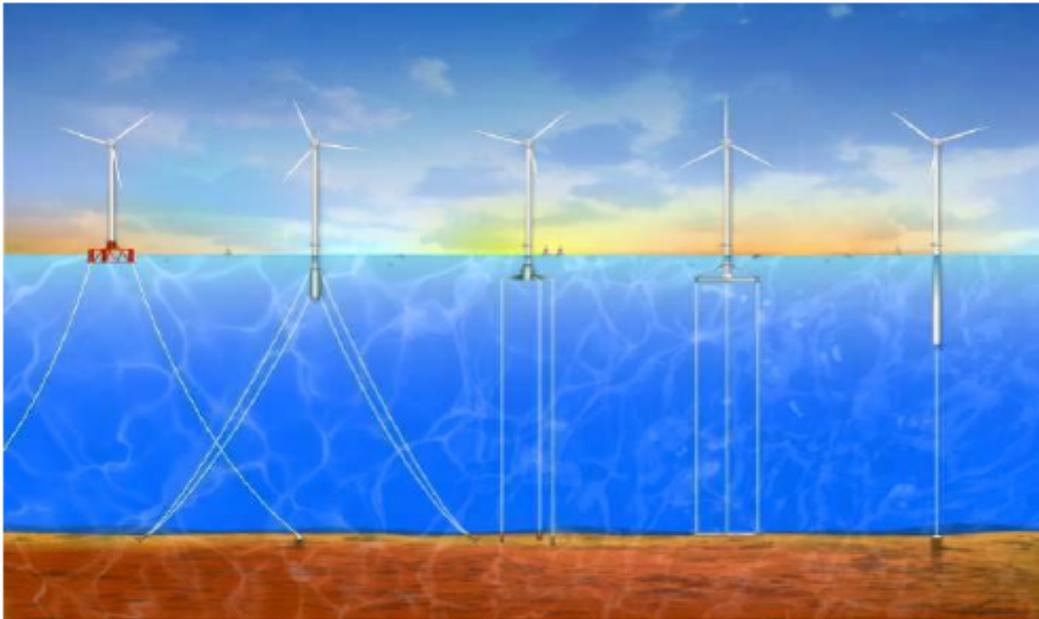
Source: NREL, *Large-Scale Offshore Wind Power in the United States*, September 2010

大水深における支持構造方式

大水深海域に設置される風車向けに、浮体式プラットフォーム上に単一の風車または複数の風車を搭載する設計が提案されている。単一の発電タービンを支える支持構造としてはスパー式、セミサブマーシブル式、テンションレグ式プラットフォームが挙げられる。これらの浮体設計は現在石油ガス開発部門で浮体式生産システムのプラットフォームとして利用されているものである。

図表 2.6 に大水深向けに検討されている各種浮体設計を示す。

図表 2.6 浮体式風車プラットフォーム概念



Source: NREL, *Large-Scale Offshore Wind Power in the United States*, September 2010

後述するように、スパー式以外はすべて研究段階であり、建造も運転環境における試験もまだ実施されていない。

スパー式

スパーは缶状の直立した構造物であり、バラスト水の注入により浮体の大部分は海面下に沈んでいる。スパーは本質的に安定しており、比較的動揺が少なく、大重量のトップサイドを支えることができる。ノルウェー沖で実証試験が行われている Statoil Hywind の風車コンセプトはスパー式の浮体をベースとしている。図表 2.7 に示すスパー式ユニットは発電能力 2.3 メガワットの Siemens 製風車を搭載している。Statoil は約 4 億 NOK（ノルウェークローネ）を当該風車コンセプトの設計、建造、試験に投じている。Hywind については後に詳説する。

図表 2.7 Statoil Hywind 風車



セミサブマーシブル式

セミサブマーシブル式浮体はオフショアリグや石油生産プラットフォームとして広く利用されてきた。本方式は水面の動揺による影響が比較的小さく、大重量のトップサイドを支えることができる。セミサブマーシブル式浮体が風車のプラットフォームとして使用された実績はないが、複数のセミサブマーシブル式風力発電浮体が設計段階にある。図表 2.8 に示すオランダの3脚セミサブマーシブルコンセプトは、直径8メートル、高さ24メートルの縦長浮力タンクを一辺64メートルの正三角形に配列し、6つのサクシオンパイルアンカーにカテナリー係留システムで固定する構想である。

図表 2.8 オランダの Tri-Floater 概念

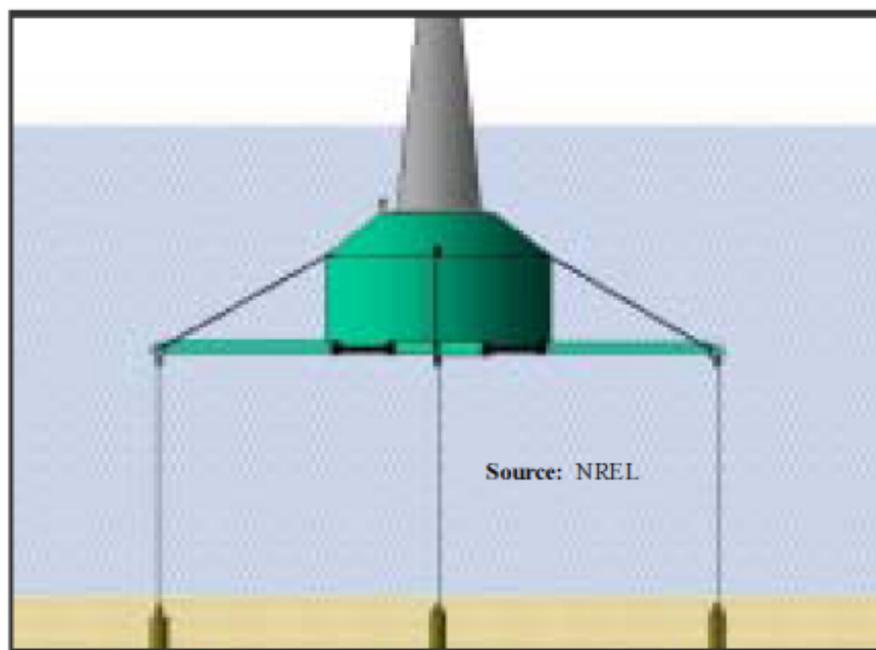


もうひとつのセミサブマーシブル設計は Principle Power が開発した WindFloat である。WindFloat も三脚の浮体上に単体の風車を搭載するものであるが、オランダの設計と異なり、風車は浮体の中央ではなく 3 脚のうちの 1 脚の上に据付けられる。Principle Power 設計の浮体は喫水 20 メートルであり、ハブ高さ 80~90 メートル、最大重量 630 トンの風車を支えることができる。

TLP

テンションレグ式プラットフォーム (TLP) もオフショア石油ガス開発用のプラットフォームとして広く利用されてきた。浮体は海底にテンドンで固定され、海底の挙動に比較的影響されない。洋上風力発電では TLP 設計はまだ使用されていないが、米国再生可能エネルギー研究所 (NREL) はモノコラム TLP 設計の評価を実施している。図表 2.9 に示すユニットは直径 16 メートル、高さ 10 メートルのシリンダー状浮力タンクに 22 メートルのアーム 3 本を 120 度間隔で取り付け、海底に緊張係留したものである。浮体タンクは張力付与後に海面下 15 メートルに沈んで安定したプラットフォームとなり、その上にタワーが据付けられる。

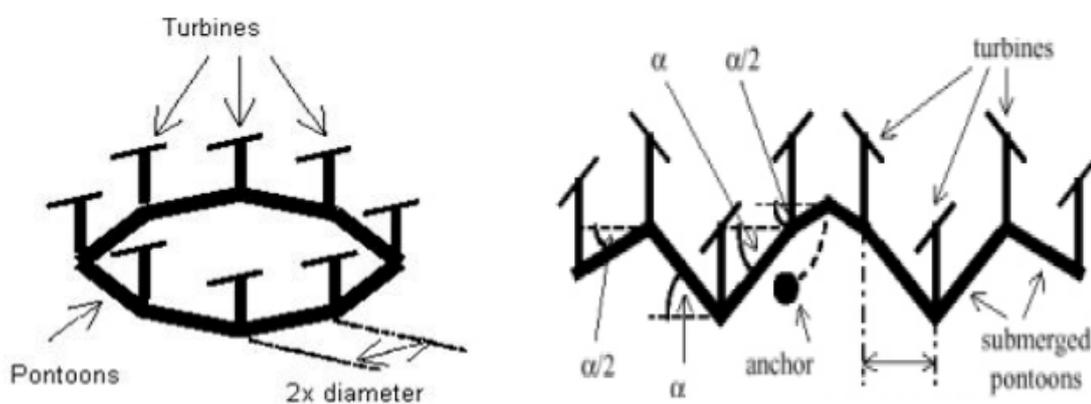
図表 2.9 NREL TLP 概念



複数基搭載プラットフォーム

複数の風車を搭載するプラットフォーム設計も提案されている。8基の風力発電を支えることのできる8角形のサブマーシブル・ポンツーン、8基の風力発電タービンを支えるように設計されたジグザグ型のポンツーン設計が提案されている。図表 2.10 はこれらの設計を図解したものである。

図表 2.10 複数風車搭載プラットフォーム



Source: Offshore Moorings

ノルウェーの風力発電ファーム開発事業者である WindSea も複数タービン搭載プラットフォームを提案している。WindSea の設計は3柱 (Tri-column) セミサブマーシブルを基にしており、各柱上にそれぞれ風車が設置される。ロータ直径は 104 メートル、タービン出力は 3.6 メガワットとされている。

図表 2.11 Tri-column 風車浮体概念



これらの複数風車搭載プラットフォーム設計は、いずれも概念設計の域を出ていない。

複数の風車を搭載するメリットは係留装置の要件が最小化されることである。しかし、共通のプラットフォームに複数の風車を搭載することには不利な点もある。好ましくない動揺の影響を避け、風車の効率を最適化し、発電効率を最大化するためには、風車の設置間隔を風車ロータ直径の7倍とする必要があることから、複数の風車を搭載するためには巨大なプラットフォームが必要となる。洋上に係留されたこのような大型構造物が波浪荷重に耐えるかどうかという問題もある。3番目の問題点は、エネルギー生産効率を最大化するように浮体式構造物の位置を制御する複雑なヨー制御装置が必要となることである。

特定の企業の浮体式プラットフォーム設計については5.3章で詳説する。

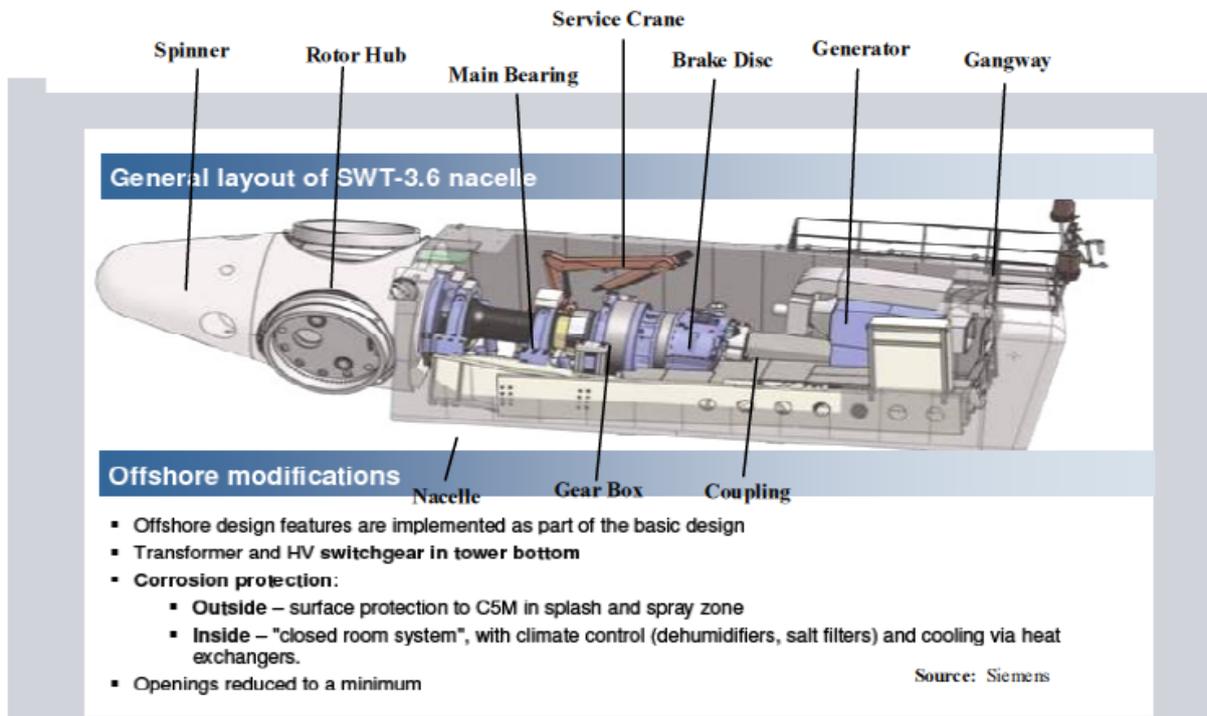
2.4 風力発電タービン機械の設計

風力発電タービンのナセル（機械室部分）には、風力をエネルギーに転換する発電装置と風力を最大限に捉えるための装置が収納されている。ナセルはタワーの上に設置され、ロータはナセルの前部に配置される。

図表 2.12 は Siemens 製の大型ナセルを図解したものである。このナセルは洋上風車用に設計されている。当該ナセルの外表面は腐食防止塗料でコーティングされており、内部環境制御装置が搭載されている。同ユニットは全長 58.5 メートルのブレード用に設計されており、ロータ直径は 120 メートル、受風面積は 11,300 m²、年間発電量は風速 9 メートル下で 16,793 メガワット時である。ヨードライブには 6 基の電動ギアモーターが使われており、カットイン風速は秒速 3~5 メートル、カットアウト風速は秒速 25 メートルで、ナセルの重量は 125 トン、ロータの重量は 100 トンである。

Siemens は洋上風力発電用に 600 機以上のナセルを受注している。120 メートルのロータを使用した風車の最初の洋上設置は北海の Outer Thames Estuary の London Array ウインドファームであり、175 基の風車が設置される予定である。

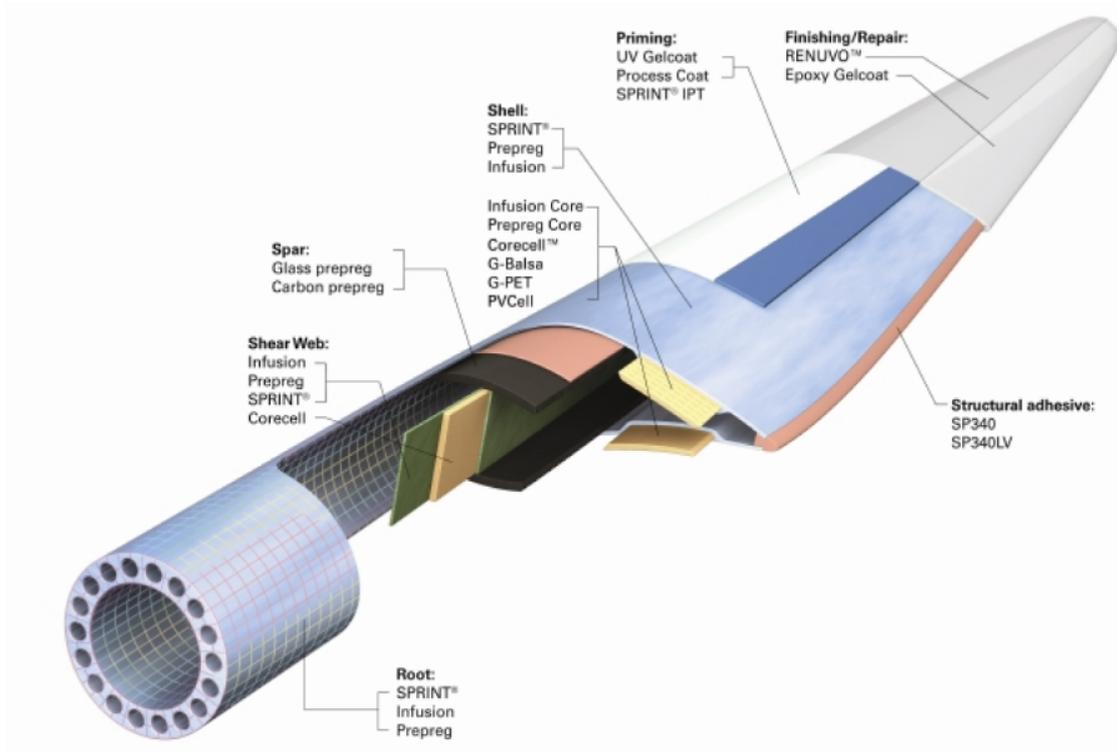
図表 2.12 大型風車ナセル図解



図表 2.13 は典型的な複合素材風車ブレードを図解したものである。ブレードはロータハブでピッチ軸受上に取り付けられ、運転停止時にはフェザリングが可能である。現在大量生産されているブレードの最大型は長さ 61.5 メートルであるが、全長 90 メートル以上のブレードも検討されている。

ブレードのシェルとスパーの接合部分の接着には一般に構造用接着剤が使用されるが、Siemens はシェルとスパーの接合部分に接着剤を用いない一体型ブレードを開発してマーケティングしている。Siemens のブレードは同社が特許を所有するクローズドモールドプロセスにより 1 回の成形で製造される。

図表 2.13 風車のブレード設計



洋上風車には陸上風車では必要とされない多くの技術が必要となる。風荷重と波荷重の相互作用に耐えるためにタワーを強化し、海風からナセルのコンポーネント保護し、保守作業のための作業員アクセス用プラットフォームを設置する必要がある。腐食防止や内部環境制御、高グレードの外表面塗装、据付けのサービスクレーンも必要となる。保守作業の必要性を最小限とするため、洋上風車には軸受やブレードに潤滑油を自動的に注入するシステムや、ギア油の温度を非常に狭い温度範囲に保つための温度調節装置を使用することも考えられる⁸。

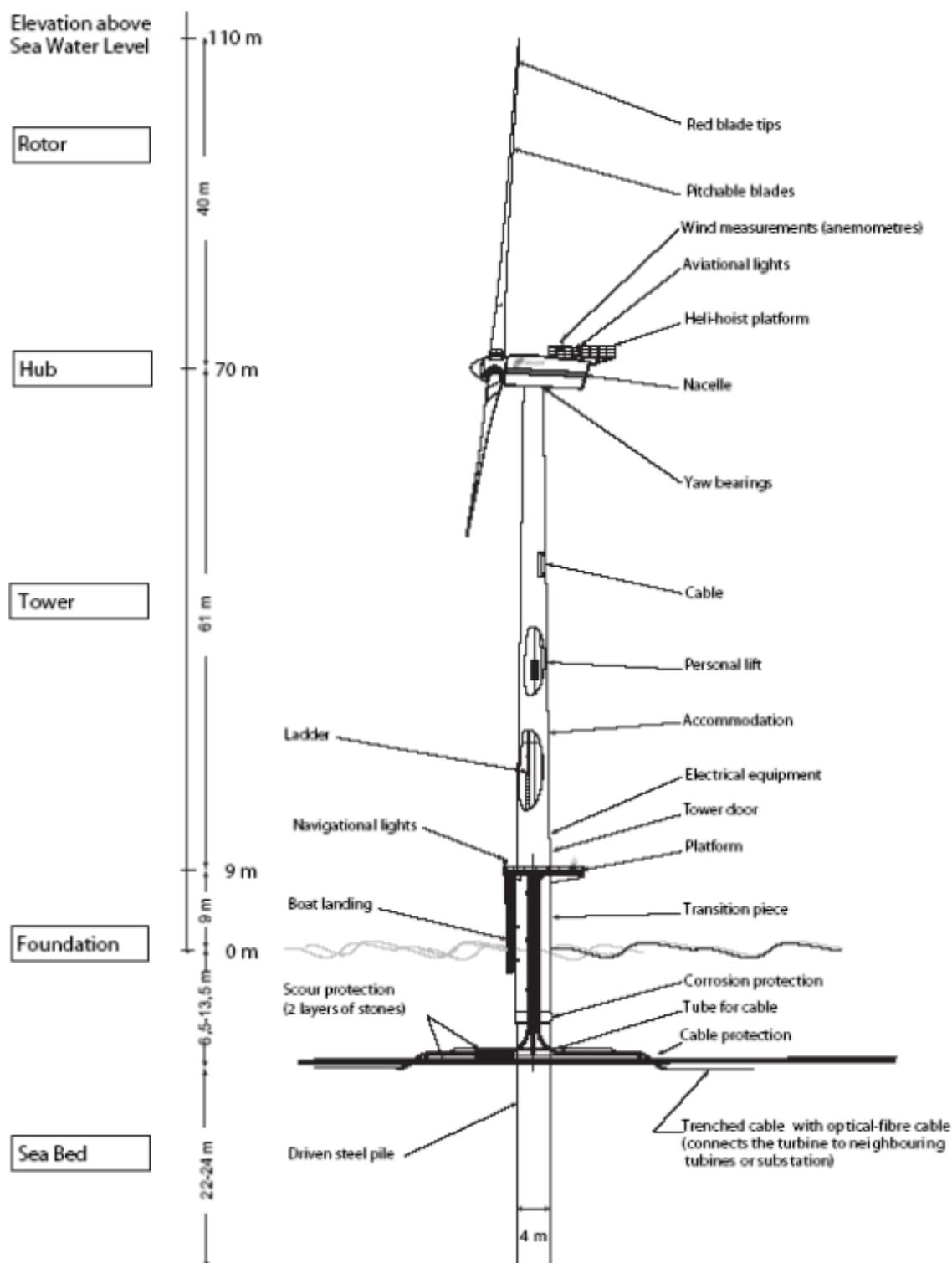
2.5 洋上風車の典型的な構成部品

洋上風車には様々な構造用部品、機械設備、電気システムが必要である。すべての洋上風車に共通のものもあれば、設置海域の水深（浅水深、中水深、大水深）により要件が異なるものもある。

⁸ NREL, *Technology White Paper on Wind Energy Potential on the U.S Outer Continental Shelf*, 2006.

図表 2.14 に典型的な浅水深風車に使用される構造物と構成部品の概略を示す。この図はデンマーク沖の Horns Rev 風力発電プロジェクト向けの風車に基づくものである。

図表 2.14 洋上風力発電タービンの構成部品



Source: P. D. Sclavounos, *Floating Wind Turbines*, undated presentation

タワーの上には発電装置のコンポーネントである発電機、増速機、ブレーキ、軸受等の機械設備及び電気系統部品を収納したナセルが設備されている。ナセルの前方にはロータハブとスピナが設置され、ブレードがロータハブに接続されている。タワーとナセルの連結部にはナセルを回転させるためのヨー制御用軸受が設置されている。タワー内のケーブルを通して発電機からの電力が送り出される。タワーの下部には保守点検作業時にナセルにアクセスするためのボートランディング（船着場）、プラットフォーム、梯子が設置されている。タワー内には作業員用のエレベーターが設置されている。安全のため、タワーには航海灯が設置されている。

中水深風車にも同様の構成部品が使用されている。大きな違いは、中水深風車ではタワーを支持する海底の基礎の堅牢度が高く、タワーを支えるために複数のコラムを3脚状に配置することが多いことである。

大水深風車でも浅水深風車と同様の構成部品が使用される、着底式支持構造に代えて浮体式構造が使用されるため、浮体、係留システム、海洋との界面におけるその他のコンポーネントが必要となる。

現在稼働している唯一の浮体式風車である Hywind の例から、大水深風車に必要とされる構成部品を概説する。Hywind はスパー式浮体を採用し、従来型のドラッグアンカーにより海底に固定された3本の係留索により位置保持されている。スパーから海底までの送電線を特定の配置に保ためにシタクチックフォーム製分散浮力モジュール (Distributed Buoyancy Modules: DBM) が使用されている。Hywind に設備、機器を納入したサプライヤーを以下に挙げる。

- Siemens が風車パッケージとロータを供給
- テクニップがスパーを Pori 施設で建造
- バイキングムアリングズが係留装置を供給
- Trelleborg Offshore が Distributed Buoyancy Modules を供給
- Nexans が海底ケーブルを供給
- Global Maritime がスパー浮体と係留装置を曳航し設置
- Tideland Signal がユニットの航行灯を供給

浅水深と大水深風車のもうひとつの違いは、陸上までの送電に必要なケーブル長である。大水深ユニットは離岸距離が大きいため、長距離のケーブルが必要となる。たとえば、ノルウェーの沖合 10km に設置されている Hywind では、13.6 キロメートルにわたり 24kV の海底絶縁ケーブルを敷設する必要があった。

3. 既存及び計画されている洋上風車プロジェクト

欧州と米国で現在運転中、建設中、又は計画中の洋上風車プロジェクトを以下に概説する。

3.1 欧州

欧州は明らかに洋上風力発電開発のリーダーであり、欧州沖で稼働する風力発電プロジェクトの数と総発電容量は過去 10 年間に著しく拡大した。

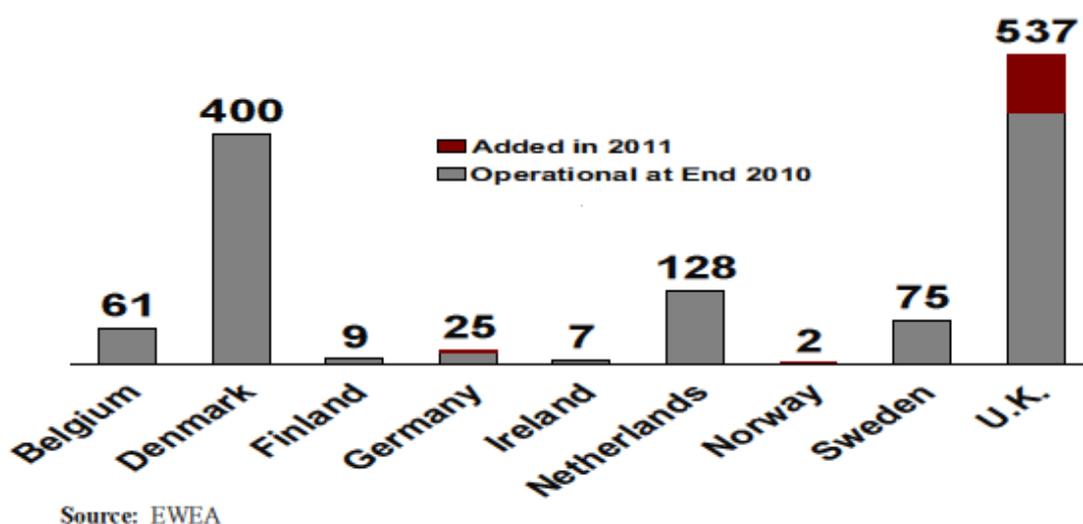
欧州の風力発電プロジェクト

EWEA によれば、2011 年年央時点で欧州には 49 の洋上風力発電ファームが存在し、系統連系されている風車は 1,244 基、総設備容量は 3,294 メガワットであった。この数字には、2011 年上半期に欧州の洋上に新たに設置された風車 108 基により追加された 348 メガワットが含まれている。

ノルウェーの Hywind を除き、欧州沖で稼働している風車はすべて浅水域または中水域に設置されており、着底式支持構造を利用している。英国が洋上風車設置数では群を抜いており、デンマーク、オランダ、スウェーデン、ベルギー、ドイツがこれに続いている。

図表 3.1 は 2011 年年央の欧州における洋上風車設置数を国別にまとめたものである。灰色の部分は 2011 年年頭に稼働していた風車数を示し、茶色の部分は 2011 年上半期に新たに設置された洋上風車数を示す。

図表 3.1 欧州に設置されている洋上風車数



図表 3.2 は 2010 年末時点で欧州沖に設置されていたウインドファームのリストであり、設置場所、出力、風車基数、水深、離岸距離、運転開始、支持構造物の種類を示している。

図表 3.2 欧州で稼働している洋上ウインドファーム (2010 年末)

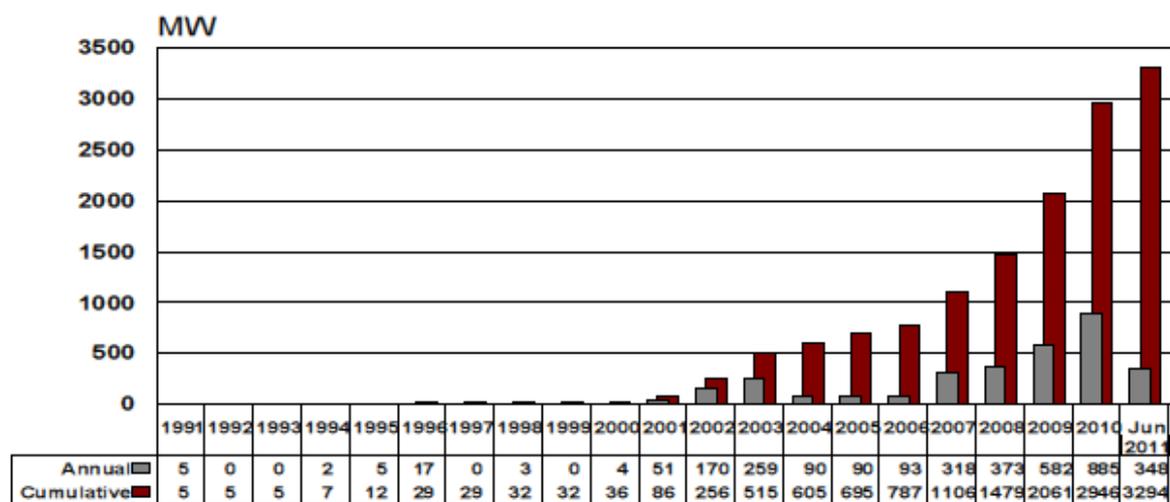
<u>Project Name</u>	<u>Location</u>	<u>Capacity</u> (MW)	<u>No. of Turbines</u>	<u>Water Depth</u> (meters)	<u>Distance to Shore</u> (km)	<u>Start Date</u>	<u>Foundation Type</u>
<u>Belgium</u>							
Thomton Bank 1	Off Zeebrugge	30	6	12-27	27-30	2008	Gravity
Belwind 1	Off Zeebrugge	165	55	15-37	46-51	2010	Monopile
<u>Denmark</u>							
Vindeby	NW of Vindeby	4.95	11	2.5-5	2.5	1991	Gravity
Tunø Knob	Off Aarhus	5	10	0.8-4	6	1995	Gravity
Middlegrundten	Oresund	40	20	2-6	2	2001	Gravity
Homs Rev 1	NW of Esbjerg	160	80	6-14	14	2002	Jacket
Nysted/Rødsand 1	Off Rødsand	165.6	72	6-10	6-10	2003	Gravity
Samsø	S of Samsø	23	10	11-18	3.5	2003	Monopile
Rederikshavn	Frederikshavn	10.6	4	3	0.8	2003	
Homs Rev 2	Blavandshuk	209.3	91	9-17	30	2009	Monopile
Storbaelt/Sprogø	N of Sprogø	21	7	6-16	2	2009	Gravity
Avedøre Holme	Avedøre	7.2	2	0.5	.001	2009	Gravity
Poseidon Wind&Ware	Vindeby	0.033	3	7	3	2010	Floating
Nysted II/Rødsand II	Rødsand	207	90	6-12	23	2010	Gravity
<u>Finland</u>							
Kemi Ajos	Ajos	24	8	3	<1	2008	Gravity
Pori 1	Pori	2.3	1	9	2	2010	Gravity
<u>Germany</u>							
Enova	Emden	4.5	1	2	<1	2004	
Breitling	Rostock	2.5	1	2	1	2006	
Hooksiel	Hooksiel	5	1	2-8	0.4	2008	Triple
Alpha Ventus	Borkum	60	12	30	43	2010	Tripod, Jacket
Bard 1	West North Sea	20	4	40	100	2010	Triple
<u>Ireland</u>							
Aridow Bank	Arklow	25.2	7	2.5-5	10	2004	Monopile
<u>Netherlands</u>							
Lely	Medernblkk	2	4	7.5	0.75	1994	Monopile
Irewe Vorrink	Dronten	16.8	28	2	0.03	1996	Monopile
Egmond aan Zee	Egmond an Zee	108	36	19-22	8-12	2007	Monopile
Prinses Amalia	Ijmuiden	120	60	19-24	23	2008	Monopile
<u>Norway</u>							
Floating Hywind	Karmoy	2.3	1	220	12	2009	Floating
<u>Sweden</u>							
Bockstigen	Gotland	2.75	5	6-8	3	1998	Monopile

<u>Project Name</u>	<u>Location</u>	<u>Capacity</u> (MW)	<u>No. of Turbines</u>	<u>Water Depth</u> (meters)	<u>Distance to Shore</u> (km)	<u>Start Date</u>	<u>Foundation Type</u>
Utgrunden 1	Kalmarsund	10.5	7	4-10	7	2001	Monopile
Yttre Stengrund	Kalmarsund	10	5	8-12	4	2002	Monopile
Lillgrund	Oresund	110.4	48	2.5-9	10	2007	Gravity
Gasslingegrund	Varnen	30	10	4-10	4	2009	Gravity
<u>United Kingdom</u>							
Blyth	Blyth	4	2	6	1	2000	Monopile
North Hoyle	Prestatyn&Rhyl	60	30	5-12	3-10	2003	Monopile
Acroby Sands	NE of Yarmouth	60	30	2-10	2.5	2004	Monopile
Kentish Flats	Whitstable	90	30	5	8.5	2005	Monopile
Barrow	Walney Island	90	30	21-23	7	2006	Monopile
Beatrice	Beatrice Oil Field	10	2	40	25	2007	Jacket
Burbo Bank	Crosby	90	25	10	5.2	2007	Monopile
Inner Dowsing	Ingoldmells	97.2	27	10	5	2008	Monopile
Lynn	Ingoldmells	97.2	27	10	5.2	2008	Monopile
Rhyl Flats	Off Rhyl	90	25	4-15	8	2009	Monopile
Robin Rigg	Maryport	180	60	>5	9.5	2010	Monopile
Gunfleet Sands	Clacton-on-Sea	172.8	48	2-15	7	2010	Monopile
Thanet	Margate	300	100	20-25	7-8.5	2010	Monopile
Total		2,946.2	1,136				

Source: EWEA

欧州の洋上風力発電は過去 10 年間に著しい成長を遂げた。総設備容量の動向を図表 3.3 に示す。2000 年には総設備容量は 36 メガワットにすぎなかったが、2011 年年央には 3,294 メガワットに達している。

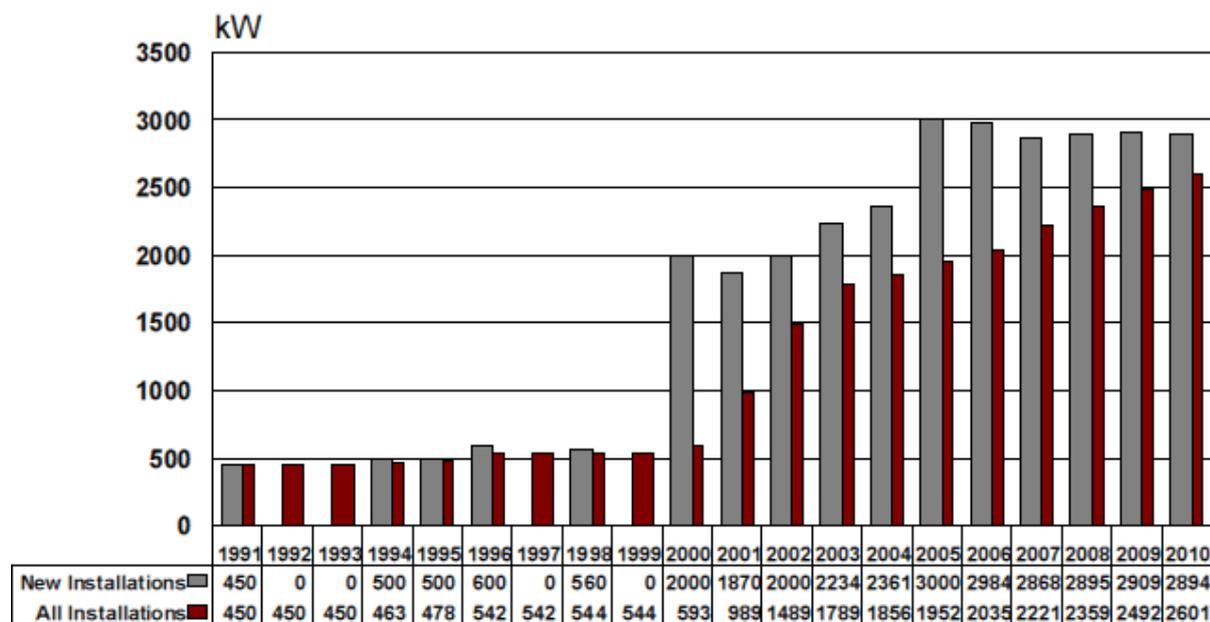
図表 3.3 欧州の洋上風力発電の設備容量の推移



Source: EWEA

欧州の洋上風車の出力も過去 10 年間に著しく大型化した。2000 年以降に設置された新しい風車の出力は 1990 年代に設置されたものよりも著しく大型化している。図表 3.4 に 1991 年以降の平均出力の推移を示す。

図表 3.4 欧州洋上風車の平均出力



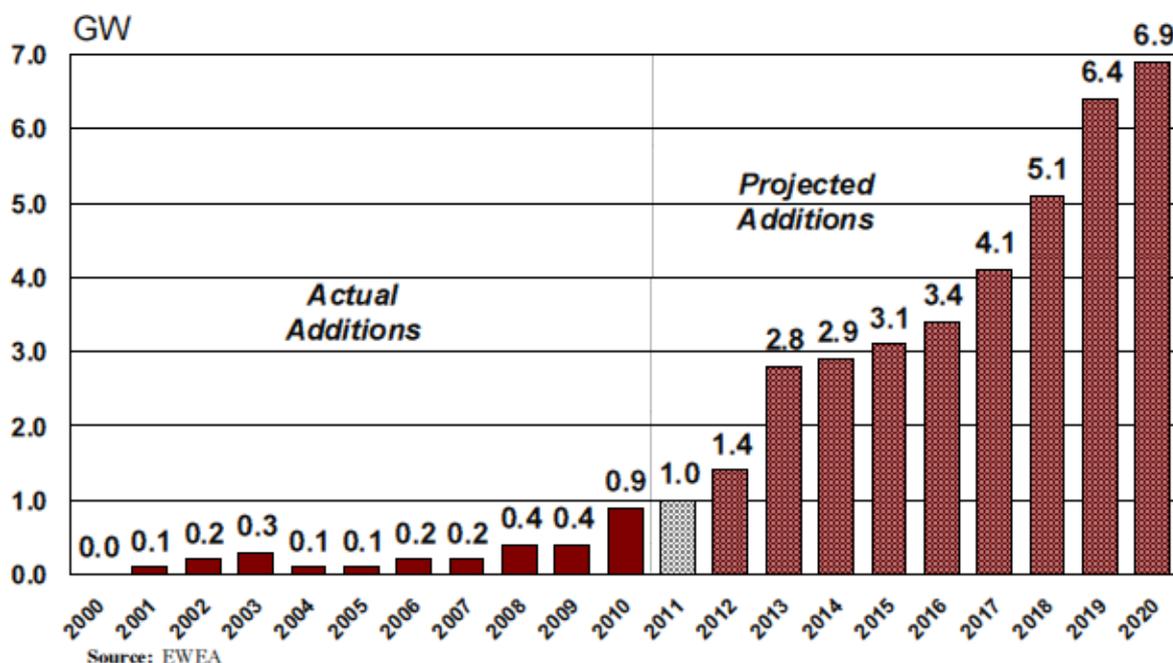
Source: EWEA

欧州の洋上ウインドファームは大規模化し、より深く、より遠い海域に設置される傾向にある。EWEA によれば、欧州の洋上ウインドファームの平均設備能力は 2009 年の 72.1 メガワットから著しく大型化し、2010 年末には 155.3 メガワットとなった。欧州の洋上ウインドファームの平均水深は 2009 年には 12.2 メートルであったが、2010 年末には 17.4 メートルとなっている。平均離岸距離は 2009 年から 12.7 キロメートル増加し、2010 年末には 27.1 キロメートルとなった。2010 年末に建設中のプロジェクトの離岸距離は平均 35.7 キロメートルであった。

発電容量予測

EWEA は今後 10 年間にわたり欧州で導入される洋上風力発電設備容量が著しく拡大すると予測している。EWEA による EU 諸国の洋上風力発電設備容量の年間導入量予測を図表 3.5 に示す。EWEA は 2011 年には 1 ギガワット、2020 年には 7 ギガワット近くの設備容量が新たに導入されると予測している。

図表 3.5 2020 年までの EU 諸国における洋上風力発電設備容量の年間導入量予測



今後の投資という点では、EWEA は欧州洋上風力発電への年間投資が 2010 年の 26 億ユーロから 2020 年には 104 億ユーロと 4 倍に増加すると予測している。また EWEA は、新しい洋上風車への投資が 2020 年の欧州の風力発電プロジェクト投資全体の 39%を占めると予測している。

大水深風力発電プロジェクト

欧州の洋上風力発電の成長は目覚ましいが、大水深における風力発電にはほとんど進展が見られない。唯一稼働している浮体式風力発電ユニットは、ノルウェー沖に 2009 年 9 月に設置された Hywind である。Hywind プロジェクトは浮体式風車の挙動と性能に関するデータ取得を目的として Statoil が出資した 2 年間の実証試験プロジェクトである。Statoil 社は Hywind 実証試験プロジェクトに 4 億ノルウェークローネを投じている。

同社は次のように述べている。

Hywind 概念は、既存の技術を全く新しい環境で組み合わせ、大水深環境で風力エネルギーを捕捉する可能性を開くものである。浮体式構造物は水と岩石のバラストを注入した鋼製シリンダーで構成されている。浮体は水面下 100 メートルに達し、3 点係留されている。タービン本体は Siemens 製である。テクニップ社が浮体建造と海

上設置を担当し、Nexans Norway 社が海底送電線を敷設した。送電線は、Karmoy 南端の Skudeneshavn 近くにおいて、地元の送電事業者である Haugaland Kraft 社の受電設備に接続されている。

Hywind の主たる目的は、生産された電力から収入を得ることではなく、風と波が構造物に与える影響を試すことである。その答えが得られれば、Statoil 社は本コンセプトの商用化に取りかかることができる。目標は、コストを低減し、浮体式風力発電にエネルギー市場における競争力を持たせることである。

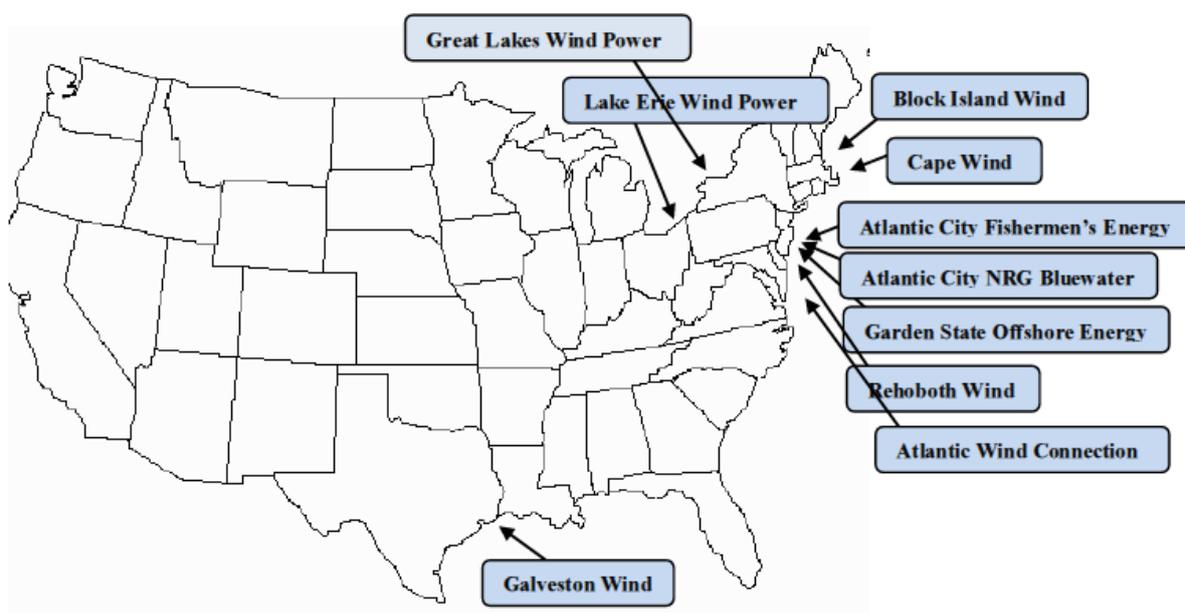
Hywind 実証試験の結果は公表されていない。しかし、プロジェクト責任者が「結果は有望」であり、「Hywind は発電量と安定性という点で好結果を出した」と述べたと報道されている。

3.2 米国

米国は世界一の陸上風力発電国であるが、現在のところ、米国で稼働している洋上風力発電設備は存在しない。しかし、複数の米国洋上風力発電プロジェクトが計画及び開発段階にある。

図表 3.6 に比較的進んだ段階にあるプロジェクトを示す。すべて着底式を採用するものである。

図表 3.6 比較的進んだ段階にある米国の洋上風力発電プロジェクト



Cape Wind

ケープウィンド・プロジェクトはマサチューセッツ沖のナンタケット海峡に 130 基の風車を設置する計画である。この風力発電ファームは距岸 5.2～13.8 マイルの連邦政府管轄水域に設置を計画されており、定格容量(nameplate capacity)は 468 メガワットを予定されている。総コスト 10 億ドルの本プロジェクト許認可プロセスは 2001 年に開始されたが、地元の激しい反対運動により難航し、10 年後の 2011 年 4 月ようやく内務省により建設・運転を承認された。しかし、建設開始までには、風車がアメリカ現住民族に文化的な意味を持つ場所を乱すことのないように海底調査を実施する必要があるなど、さらに複数のハードルを乗り越える必要がある。連邦予算の逼迫から、プロジェクトを進めるために必要な連邦政府からの融資保証が棚上げになっており、資金調達面の問題もある。

Atlantic City Fishermen's Energy

ニュージャージー州アトランティックシティ沖にタービン 66 基の風力発電ファームの建設が提案されている。当該風力発電ファームは 2 段階で導入されることになっている。第 1 段階では 20 メガワットが州管轄海域内に設置され、第 2 段階では 350 メガワットが連邦政府管轄海域に設置される予定である。デベロッパーはニュージャージー州の漁業事業者が主体となっている。同プロジェクトは 2011 年 5 月にニュージャージー州海域内にタービン 6 基を設置する試験プロジェクトの許可を取得した。2011 年 8 月にニュージャージー州知事は、ニュージャージー洋上風力発電経済開発法に基づいてアトランティックシティ沖にウインドファームの融資及び建設を支援する権限を州公益事業委員会に与える法案に署名した。フィッシャーマンズ・エナジーの風力発電試験ファームは 2012 年 9 月に運転開始を予定されているが、現時点で本プロジェクトが予定通りに進行するかどうか定かではない。

Atlantic City NRG Bluewater

Atlantic City NRG Bluewater はニュージャージー州アトランティックシティ沖に設置を提案されている 2 件目の風力発電ファーム案件である。風力発電デベロッパーの NRG Bluewater Wind はフォーチュン誌全米上位 500 企業である NRG エナジー社の子会社である。同プロジェクトは離岸距離 15～18 マイルの連邦政府管轄海域に総

設備容量 350 メガワットの風車（設置基数未定）の設置を構想している。フィッシャーマンズエネジー・プロジェクトと同様、NRG のアトランティックシティ・プロジェクトは州の洋上風力発電開発奨励政策による支援を受けている。NRG Bluewater Wind は、州公益事業委員会から風速と波況を計測するための洋上気象観測タワーの設置に 400 万ドルの補助金を受給している。

Garden State Offshore Energy (GSOE)

GSOE はニュージャージー沖 16 マイルの地点に 350 メガワットのウインドファーム建設を提案している。当該ウインドファームには 69 基の風車の設置が計画されている。先の 2 件のプロジェクトと同様、デベロッパーの GSOE は州の風力発電奨励政策の恩恵を受けることを期待している。GSOE は PSEG Global 社と Deepwater Wind の合弁事業で、PSEG Global 社はフォーチュン誌米国上位 500 社の電力・ガス会社、Deepwater Wind は米国内数カ所に風力発電を計画している風力発電デベロッパーである。GSOE は設置提案場所の波況と風況の計測に同社が特許を保有する 100 フィート気象ブイ SeaZephIR を投入する。2009 年 6 月に GSOE は BOEMRE（米国海洋エネルギー管理規制執行局）から設置場所について暫定的限定リース権を取得している。

Rehoboth Wind

NRG Bluewater Wind は大西洋岸沖デラウェア州 Rehoboth Beach 近くで風車プロジェクトを計画している。ウインドファーム開発予定地は離岸距離 13 マイルの地点で、60 基から 200 基の風車を設置し、定格発電容量 450MW の導入が計画されている。地元電力会社である Delmarva 電力との間で電力買取契約 (PPA) が締結されている。デラウェア州は 2018 年までに Delmarva 電力供給量の 10% を再生可能エネルギーで賄うことを義務づけており、合意では、NRG Bluewater Wind が 25 年間にわたり 200 メガワットの電力を供給することになっている。2009 年に NRG Bluewater Wind は、気象観測タワーを設置し地球物理学調査を開始するための暫定的限定リース権を取得した。現在、同プロジェクトの環境影響評価が進行中である。

Galveston Wind

Coastal Point Energy はテキサス州ガルベトン沖メキシコ湾に設備容量 300 メガワット、設置風車数 63 基のウインドファーム建設を提案している。同社は気象観測タワーを設置して風力及び気象データを収集・分析するとともに、ガルベトン

沖の建設予定地のリース権をテキサス州から取得し、米国陸軍工兵隊からプロジェクト第1号の風車建設許可を取得している。プロジェクトを完成するためには7億2,000万ドルの投資が必要と推定されており、デベロッパーは資金調達を支援するための連邦政府による融資保証を求めている。

Lake Erie Wind Power

クリーブランドを拠点とする非営団体である Lake Erie Energy Development Corporation (LEEDCo) は、オハイオ州沖エリー湖における水上風力発電実証プロジェクトを提案している。同プロジェクトは離岸距離3海里の地点に総設備容量20メガワットの3~7基の風車を設置するものである。GEがLEEDCoコンソーシアムにパートナーとして参加しており、新設計の4メガワットダイレクトドライブ風車の使用を計画している。同コンソーシアムは、長期的には2020年までにエリー湖に最大1ギガワットの風力発電容量を導入することを計画している。実証プロジェクトは、2012年末に完成が予定されている。

Block Island Wind Power

Deepwater Windは1ギガワットの洋上風力発電ファームをロードアイランド州とマサチューセッツ州の間、ブロックアイランド沖のロードアイランド海峡に建設することを提案している。同グループは、2008年に両州により、5~6基のタービンからなる20メガワットの実証プロジェクトを実施するための優先デベロッパーに選ばれたのである。しかし、同プロジェクトは、Deepwater Windと州公益事業会社であるナショナルグリッドとの間の電力買取契約(PPA)に伴う電力コストに反発した消費者の反対に合った。反対派は、「同州の消費者は現在0.097ドル/kWhで電力を供給されており、風力発電ファームから0.244ドル/kWhで電力を買い取るのは商業的にフィージブルでない」と異議を唱えた。しかし、2011年7月にロードアイランド最高裁判所は、Deepwater Windとナショナルグリッドの間の20年間のPPAを支持する判断を下した。Deepwater Windは2012年末の建設開始、2013年の商業運転開始を計画しているが、建設開始にはさらに米国陸軍工兵隊と州の沿岸海域資源管理委員会の許認可が必要とされている。

Atlantic Wind Connection

本プロジェクトは米国の大西洋岸中部に6ギガワットの風車ネットワークを連結する送電網を建設するものである。プロジェクト総コストは50億ドルと推定されている。2013年末に建設開始が計画されており、第1段階開発は2016年に完成、第2段階は2020年に運転開始が予定されている。送電システムの建設には連邦エネルギー規制委員会の承認が必要であり、連邦政府管轄の海底のケーブル敷設には内務省から敷設権認可を取得する必要がある。デベロッパーは再生可能エネルギー会社として創設されたAtlantic Grid Developmentである。AGDによれば、グーグル、丸紅、及びベルギーの送電事業者であるEliaがプロジェクトに参加している。

地域レベルでは、2011年4月に連邦政府と東海岸10州が米国沖合大陸棚上の風力資源の、効率的で秩序とある責任のある開発を促進するために、大西洋洋上風力エネルギーコンソーシアム(AOWEC)を結成する合意覚書(MOU)に署名している。エネルギー省はAOWECイニシアティブを次のように説明している。

米国では大西洋沖合大陸棚で複数の風力エネルギープロジェクトが提案されている。係る資源の開発は製造、建設、運転に何千人もの雇用を創出し、旧式で効率の悪い化石燃料発電所を代替し、気候変動対策を大いに支援する可能性がある。

合意覚書にはサラザー内務長官、メイン州、ニューハンプシャー州、マサチューセッツ州、ロードアイランド州、ニューヨーク州、ニュージャージー州、デラウェア州、メリーランド州、バージニア州、ノースカロライナ州の知事が署名した。内務省と大西洋沿岸州知事は、本合意を持って、相互利益となる案件における協調的努力を通して、大西洋沖合大陸棚の商業風力エネルギー開発について連邦政府と州政府の協力を円滑化するものである。コンソーシアムは、本覚書の下で優先順位、目標、具体的な提言、本合意で示された目標を達成するためのステップを示す。

内務省に新しく組織された海洋エネルギー管理局(BOEM)が沖合大陸棚上の風力をはじめとする再生可能エネルギー資源の開発を監督する。内務省は沿岸州知事との協力に加えて、連邦-州政府合同タスクフォースを通じて洋上再生可能エネルギー開発の商業リースプロセスを円滑化するために、地元、州、アメリカ原住民族、連邦政府の関係者との協力を継続する。

タスクフォースはロードアイランド、マサチューセッツ、ニュージャージー、バージニア、デラウェア、メリーランド州との間で正式に設置されており、ニューヨーク、サウスカロライナ、フロリダ州との間で設置の過程にある。

洋上風力発電の目標

米国のエネルギー政策は 2030 年までに 54 ギガワットの洋上風力発電能力を導入し、平均 \$0.07/kWh でエネルギーを提供することを目標としている。米国は暫定的な目標として 10 ギガワットの洋上風力発電を導入し、平均 0.10 ドル/kWh で提供することとしている。この目標を達成するため、米国エネルギー省は洋上風力エネルギーに関連する数々の研究及び実証事業に資金を提供している。

2009 年の米国再投資復興法により、洋上風力研究と試験施設に 9,340 万ドルが提供された。同プログラムの下で資金提供を受けた事業には最大 15 メガワットのドライブトレインの試験が可能な Clemson 大学の大型ドライブトレイン試験施設、最大 90 メートルのブレードの試験が可能なマサチューセッツ州クリーンエネルギーセンターのブレード試験施設が含まれている。

しかしながら、洋上風力発電が軌道に乗っている欧州と異なり、米国の洋上風力発電開発の見通しは不透明である。連邦政府予算逼迫が続いていることから、洋上風車研究開発への連邦予算が大きく増えることは考えにくい。また、米国における洋上風力発電プロジェクトには今後も地域住民からの反対があると考えられる。

米国の洋上風力発電プロジェクトが置かれている微妙な立場を示す例として、最近ニューヨーク電力管理委員会 (NYPA)により中止の決定が下された Great Lakes Wind Power プロジェクトが挙げられる。ニューヨーク電力公社 (NYPA)はエリー湖またはオンタリオ湖に洋上(湖上)ウインドファームを建設する構想を打ち出し、40 基から 166 基のタービンを設置し、総定格設備容量を 120~500 メガワットとすることを計画していた。NYPA は 2009 年に 5 社から風力発電プロジェクトの技術研究実施提案を受け取った。建設は 2013~2015 年の間に実施される予定であった。しかし、「提案の評価によりプロジェクトが技術的には実現可能であることが示されたが、提案されている 120~500 メガワットの発電プロジェクトでは、陸上ベースの風力発電コストの 2 倍から 4 倍」となり、経済性が低いことから、本プロジェクトは 2011 年 9 月に中止された。

また、Mesa Power がテキサス州沖に建設を計画していた大規模な風力発電プロジェクトの結末も指摘する価値がある。同プロジェクトは、2007年に資産家の T. Boone Pickens 氏が立ち上げたものであり、総設備容量 4,000 メガワットの洋上ウインドファームを建設する構想であった。同ウインドファーム構想は風車 2,000 基を設置するものであり、プロジェクト投資額は 60 億ドルとされていた。2010年に建設開始が予定されていたが、2008年に同プロジェクトはキャンセルされた。中止の理由は、離岸距離の大きい沖合で発電・送電することが経済的に成り立たないというものであった。しかし、プロジェクト中止決定の背景には、2008年に石油価格が下落したため、風力発電の魅力が大幅に低下したことがある。同プロジェクトは、米国における洋上風力発電プロジェクトの綱渡り的な性質を顕著に示している。

4. 大水深風車需要の展望

本章では、今後の大水深風車プロジェクトに影響を与える問題点とそれらの問題点を前提とした今後5年～10年間の大水深風車発注の展望を論じる。

4.1 大水深風車発注に影響を与える問題点

将来の大水深風車需要に影響を与える問題点は工学上及び設計上の制約、プロジェクトの経済性、競合する他のエネルギー源の価格、の3点に分類することができる。

工学上及び設計上の制約

浮体式風車プラットフォームの上には、重量250～350トンのナセル/タービンと水平軸上で回転する80～120メートルのロータを支える高さ65～90メートルのタワーが搭載されるため、様々な海況及び風況下においてピッチ、ヒープ、ロール、ヨー、サージ、スウェイによる動揺を許容範囲内に抑える必要がある。これは従来のマリン設計よりも複雑な要件であり、石油ガス浮体式生産設備の設計よりも困難な要件である。浮体式生産設備の場合、上部構造物の高さは比較的コンパクトであり、上部構造物は回転しない。

最近の米国機械工学会に掲載された論文は、浮体式タービンの工学設計評価のために利用できる設計知識と設計技術の現状を物語っている。この論文は第2章で言及したWindFloat浮体式風車を開発したエンジニアが執筆したものである。以下に関連部分を引用する。

浮体式洋上風車のエンジニアリング要求は広範である。風車設計ツールは風力力学モデル（翼周りの流れを予測するため）と構造コードで構成されている。着底式タービンで使用される空力弾性モデルはタービンスラストから発電、ブレードとタワーのたわみに至るまで、必要なすべての荷重パラメーターを解析するものである。デンマーク技術大学のStig Øyeが開発したFLEX 5、Garrad Hassan & Partners Ltd.社のBLADED、そしてMSCソフトウェア社のADAMSが一般的なモデリングソフトウェアである。

浮体式構造物の設計には、波浪中の船舶とプラットフォームの挙動を解析するための流体力学ツールであるWAMIT社のソフトウェアやPrincipia社のソフトウェアであるDIODROEを、タイムドメインシミュレーションにおける核(kernel)として使用される負荷質量、減衰（ダンピング）、波浪外力のような流体力学上の値を予測するために使用する。

係留装置や粘性による影響を含む外力の解析には Orcina Ltd. 社の Orca-Flex や Marine Innovation & Technology 社が開発した TimeFloat のようなコードが必要である。これらは流体力学値に従った周波数のフーリエ変換を行う。浮体式タービンの場合、下部構造物への波浪荷重と風車のスラスト力によるタワーとタービンへの動的荷重の干渉を無視することができないため、タービンと基礎の個別解析は適切ではない。

現段階では、一体化した浮体式風車と下部構造物の完全な応答を解析することのできる商用の数値設計ツールは存在しない。米国再生可能エネルギー研究所 (NREL) は 2007 年から様々な R&D ツールを比較するベンチマーキング事業を主導している。今年の欧州風力エネルギー会議で発表された論文によれば、この事業で期待できる結果が出ているが改良を必要とする点もいくつかある。特に、モリソン式が適用できない非スパー式浮体の回折と放射の計算において改善が必要である。

海洋プロジェクトでは、設計ツールは通常、造波水槽、造波ドックで縮尺模型試験により実証する必要がある。縮尺模型を使った実証試験はしばしば実施されており、縮尺法則が明確に定義されている。オフショア構造物の場合、流体の慣性力と重力の比を表すフルード数が有力であり、フルード数を用いたスケーリングが利用される。これは、研究室において縮尺模型から取得された結果を実際のフィールドにおける現寸モデルに外挿するためには、数値規則のセットを厳密に適用する必要があることを意味する。例えば、 λ がスケーリング要素であれば、波高は λ に依存し、波周期は $\sqrt{\lambda}$ に依存する。

残念ながら浮体式風車の場合、タービンに対する風力荷重はフルードの法則に則らないため、縮尺模型の結果を現寸モデルに当てはめるのは困難である。風車のモデリングは可能であるが、解析ツールの使用は縮尺模型に限定すべきである。

一方、風車の縮尺模型に代えて大型ディスクを利用するアプローチが存在する。ディスク面積は特定の風速で課されたスラスト力が現寸と一致するように計算されている。Principle Power 社 がカリフォルニア大学バークレー校の水槽で WindFloat の試験を実施した際にこのアプローチを採用した。

解析ツールの正確性、モデルスケール試験実施過程、スケーリングの法則の数学的存在により、現寸以下のプロトタイプを洋上に設置しても、技術開発や設計には

あまり意味がない。風況及び波況を適切に計測することが困難なため、設置現場で計測された運動を数値モデルに関係づけることは難しい。加えて、設置及び試運転の観点から、現寸以下の模型試験から意義のあるデータは得られない。試験に使用される装置は、規模と複雑さの点で少なくとも 10 分の 1 以下の小さいものである⁹。

Hywind の実証試験は運転状態の海況における風車の応答に対する工学上及び設計上のフィードバックを取得する試みである。Statoil 社によれば、同実証試験はいくつかの鍵となる疑問に答えることを意図したものである。

Hywind プロジェクトの発足以来、同プロジェクトにはいくつかの基本的な疑問が投げかけられてきた。Hywind は浮かぶだろうか？水平ピッチが構造物の安定性を損なう可能性はないだろうか？風力、波力が強すぎて他の構造物よりも疲労が早いのではないだろうか？¹⁰

これらは極めて基本的な疑問であり、浮体式風車の応答予測に関する設計知識の未熟さを反映している。今までのところ、Statoil は試験結果について次のように表明している。

2009 年 9 月初旬に Hywind が設置されて以来、同構造物はオペレーショナルシステムと挙動を追跡するために注意深く監視されている。最初の試験期間には風速に相当な幅があった。寒波と波浪を伴う秒速 12 メートルから 19 メートルの風を受け、最大風速は秒速 25 メートルにまで達することもあった。

Hywind 構造物は今までのところ順調である。堅実な成果を出しており、Hywind プロジェクトチームは元旦を挟んだ 2 週間に監視なしの独立モードで運転する決断を下した。この期間の風の状況はピッチ挙動の点で最も厳しいものであった。この期間に水平ピッチは静的モデル及び動的モデルで計算したよりも低かった。結果は研究所の水槽試験で得られたものと同様であることが証明された¹¹。

大水深風車における水平ピッチを低減するために研究されているアプローチの一つとして、水平軸ロータに代えた垂直軸ロータの利用がある。Technip と Nenuphar は垂直軸ブレードの採用を検討しており、Vertiwind と呼ばれる設計概念を開発した。従来型の水平軸ブレード

⁹ D. Roddeier and J. Weinstein, *Floating Wind Turbines*, ASME Mechanical Engineering, April 2010.

¹⁰ V. Moe, *Floating Wind Turbine Captures Wind Energy in Deep-Water Environment*, Welding Journal, May 2010.

¹¹ 同上.

ドでは、波の挙動に反応する浮体式プラットフォーム上に搭載された水平軸で回転する 80 メートルから 120 メートルのロータについて水平ピッチの問題が発生するため、これを軽減することを目標としている。

Vertiwind 設計は 100 メートルの垂直軸 4 枚翼ロータを浮体式プラットフォームに搭載するもので、出力は 2 メガワットである。しかしながら、この設計には様々な問題があり、ロータの回転による遠心力によるブレードの屈曲や支柱にかかる大きな荷重が懸念材料となっている。しかし、さらに重要なのは何が起きるかが完全に理解されていない点である。現時点の性能期待値は出力 35 キロワットの試験機の試験結果に基づいている。Nenuphar の CEO は、インタビューにおいて出力 2 メガワットの設計では新たな課題が発生する可能性を認め、「縮小模型で適切に実施できても、非常に大きなスケールでは困難なこともある」¹²と述べた。

米国エネルギー省も浮体式風車に関する設計上の課題の理解を高める必要性を認識している。同省は 2011 年 9 月、「技術革新を加速し、コストを低減し、洋上風力エネルギーシステム展開のタイムラインを短縮する」目的で各種団体に 4,300 万ドルの資金を提供した。補助金を受給したプロジェクトには浮体式風車設計の評価テクニックの向上を目的としたものが含まれている。例えば、Alliance for Sustainable Energy に対しては浮体式風車設計を評価するための工学ツール改良研究プロジェクトに 150 万ドルの補助金が、Nautica Windpower に対しては保守作業時のアクセスを容易にするために最適化した浮体式洋上タービンプラットフォームの開発に 50 万ドルの補助金が、Golsten Associates に対しては浮体式基礎構造物と風車を接合するための具体的な技術要素を研究するために 40 万ドルの補助金が給付された。

大水深風車の経済性

大水深風力発電は浅水深、中水深風力発電よりもコストがかかり、エネルギー供給源として高価である。さらに、浅水深、中水深風力発電は陸上設置の風力発電よりも高価である。

NREL の研究によれば、洋上風車のライフサイクルコストはキロワット時あたり 0.10～0.16 ドルであり、同 0.05～0.08 ドルの陸上風車の約 2 倍である。

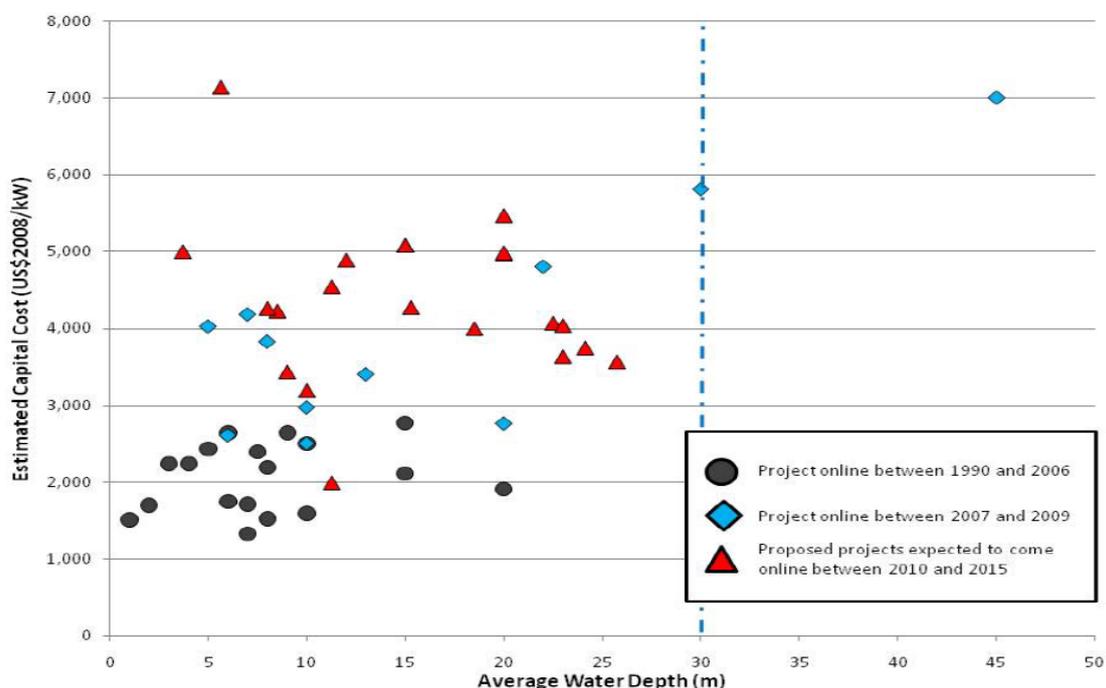
NREL の 2010 年報告書に示された、運転中または計画中の洋上風力発電プロジェクトの設備投資額からは、水深が大きくなるに従って資本投資額が大幅に上昇することが明らかに見

¹² P. McKenna, *A New Twist on Floating Wind Power*, MIT Technology Review, Feb 2011.

で取れる¹³。図表 4.1 と 4.2 は NREL が作成したものであり、コスト/水深、コスト/離岸距離の関係が示されている。

これらのコスト関係は浅水域または中水域の着底式タワー上に設置された風車についてのデータを反映したものである。着底式では水深が増すにつれて洋上風車の下部構造物のコストは著しく増加する。NREL 報告書から引用した図表 4.3 は着底式と浮体式風車の下部構造物コストと水深の関係を示したものである。

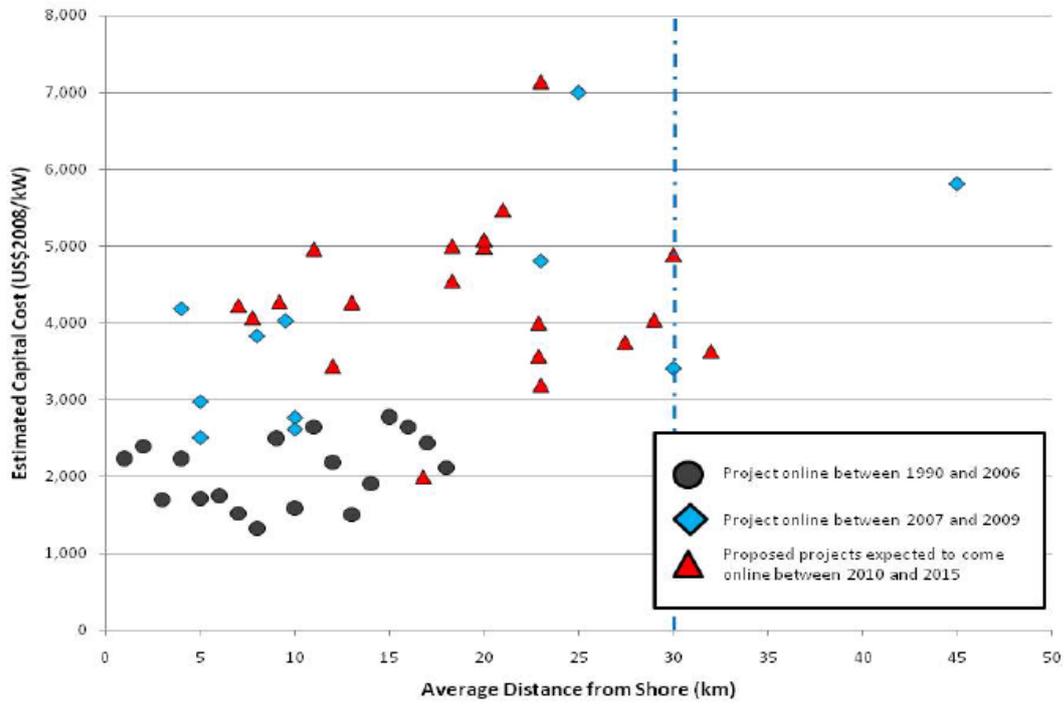
図表 4.1 風車のキロワット当たりの資本コストに対する水深の影響



Source: NREL, *Large-Scale Offshore Wind Power in the United States*, September 2010

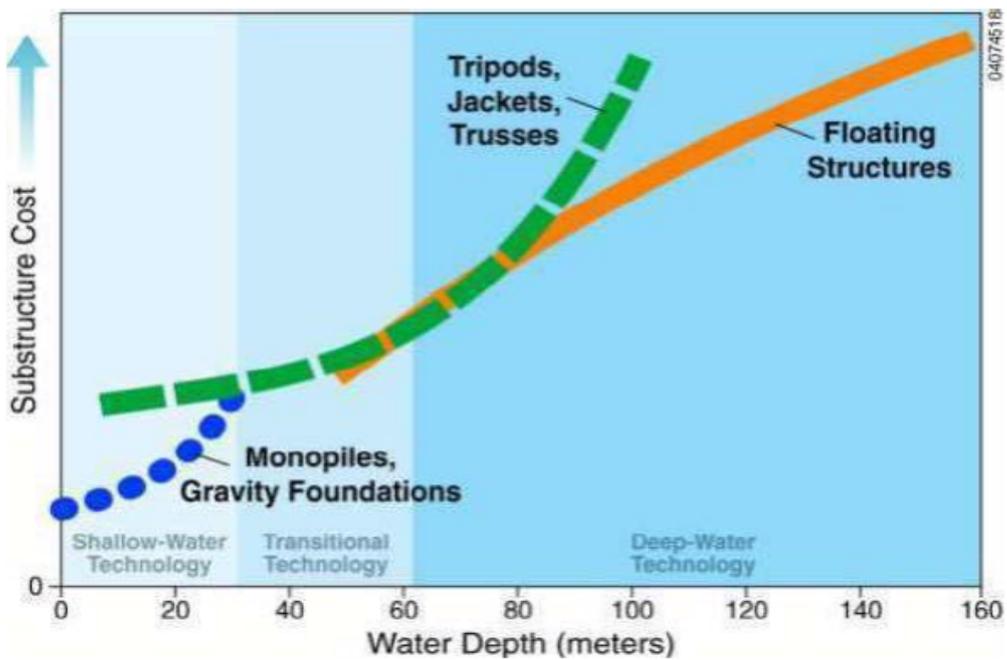
¹³ NREL, *Large-Scale Offshore Wind Power in the United States*, September 2010.

図表 4.2 風車のキロワット当たりの資本コストに対する離岸距離の影響



Source: NREL, *Large-Scale Offshore Wind Power in the United States*, September 2010

図表 4.3 着底式及び浮体式風車の下部構造コスト



Source: NREL, *Large-Scale Offshore Wind Power in the United States*, September 2010

浮体式風車の運転実績はほとんどなく、現時点で予測されているキロワットあたりのコストは概して推測であり、ばらつきが著しい。唯一稼働している浮体式風車は出力 2.3 メガワットの Hywind であるが、この実証試験プロジェクトのコストは 7,370 万ドルに達する見込みであり、メガワット当たり 3,180 万ドルとなる。

概念設計段階にあるオランダの 3 脚フローター構想、NREL の TLP 構想、WindSea 構想についても、ユニット投資コストが巨額となる可能性を示唆している。

オランダの 3 脚フローターと NREL の TLP 構想は、1 つの浮体式プラットフォームに出力 5 メガワットの単基搭載を想定している。オランダの 3 脚フローターのユニットあたりの投資コストは 710 万ドル（メガワット当たり 140 万ドル）、NREL TLP プラットフォームと係留装置は 650 万ドル（メガワット当たり 130 万ドル）と推定されている。図表 4.4 はそれぞれのユニットの推定コストの内訳を示したものである。

WindSea 概念は、出力 3.6 メガワットの風車 3 基を共通のセミサブ式プラットフォームに搭載して総出力 10.8 メガワットを供給するものである。ユニットの建造、設置、試運転にかかる総コストは約 3,450 万ドル、メガワットあたり 320 万ドルと推定されている。プラットフォームに出力 5 メガワットの風車 3 基を搭載した、さらに大型のプラットフォームのコストは 4,050 万ドルと推定されており、メガワットあたり 270 万ドルとなる。コスト推定の内訳については図表 4.5 を参照されたい。

図表 4.4 2 種類の浮体式風車プラットフォーム概念のコスト比較

<u>Item</u>	<u>Dutch Tri-Floater</u>			<u>NREL TLP</u>		
	<u>Weight</u> (1000 lbs)	<u>Specific Cost</u> (US\$/lb)	<u>Cost</u> (mil US\$)	<u>Weight</u> (1000 lbs)	<u>Specific Cost</u> (US\$/lb)	<u>Cost</u> (mil US\$)
<u>Floating Structure</u>						
Buoyant tanks	1068.5	1.14	1.22	394.7	2.0	.79
Braces	866.9	1.46	1.27	115.9	2.0	.23
Upper hull deck	345.0	1.37	0.47			
Support column	179.2	1.6	0.29			
Upper tank/turbine connection				100.0	2.0	0.2
Arms				103.3	2.0	.21
Subtotal			3.24			1.43
<u>Mooring System</u>						
Mooring chain	1120.0	0.91	1.02			
Mooring wire	302.4	0.91	0.28			
Anchors	448.0	1.37	0.61			1.80
Vertical tendons (600 ft depth)				360.0	2.0	.72
Suction anchor/platform install			0.61			1.2
Subtotal			2.52			3.72
<u>Ancillary Items</u>						
Mooring reinforcement	112.0	1.37	0.15			0.15
Paint	56.0	11.41	0.64			0.64
Cathodic protection	56.0	4.56	0.26			0.26
Miscellaneous	112.0	1.83	0.2			0.2
Installation of wind turbine			0.1			0.1
Subtotal			1.35			1.35
Total Cost			7.11			6.50

Note: According to the NREL study, value engineering, multiple series production and platform/turbine system optimization can lower the total cost of the Tri-Floater to \$4.26 million and the total cost of the NREL TLP to \$2.88 million.

Source: NREL, *Feasibility of Floating Platform Systems for Wind Turbines*, January 2004

図表 4.5 WindSea 複数基搭載セミサブ式プラットフォームのコスト

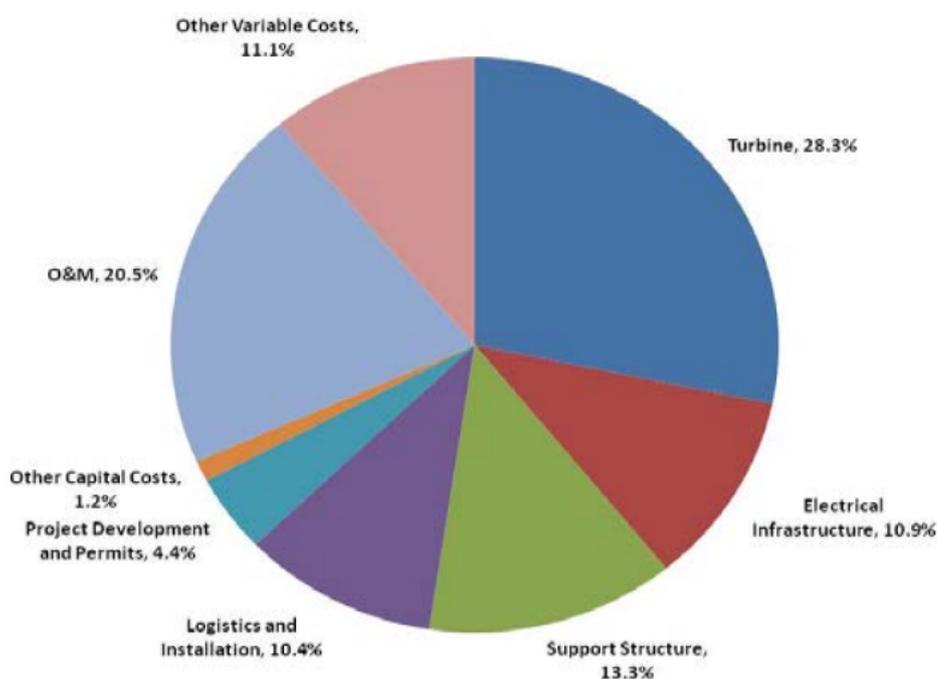
<u>Item</u>	<u>Capex</u> (millions of \$)
Platform fabrication and engineering	11.1
Turbines incl installation – 3 x 3.6MW upwind	11.9
Electric equipment, turret, helideck, cranes, pumps, control system, etc.	4.6
Other	1.1
Anchoring and mooring incl. installation	3.6
Transport	1.5
Offshore commissioning	0.8
Total – 3 x 3.6MW	34.5

Note: A unit with 3 x 5MW wind turbines is estimated to cost \$40.5 million

Source: WindSea

図表 4.6 はベースラインにおける洋上タービンのライフサイクルコストの内訳を推定したものである。この内訳は 2003 年～2009 年に実施されたウインドファームについての様々な分析を基にしたものである。同図に示されるように、ライフサイクルコストのうち風車の資本コストが 28.3%、支持構造物が 13.3%、電力用インフラが 10.9%、ロジスティクス及び設置コストが 10.4%、その他の資本コストが 1.2%、プロジェクト開発/許認可取得コストが約 4.4 パーセントを占めている。残りのコストは運転・保守コストであり、これが 20.5%を占め、その他の変動費が 11.1%を占める。

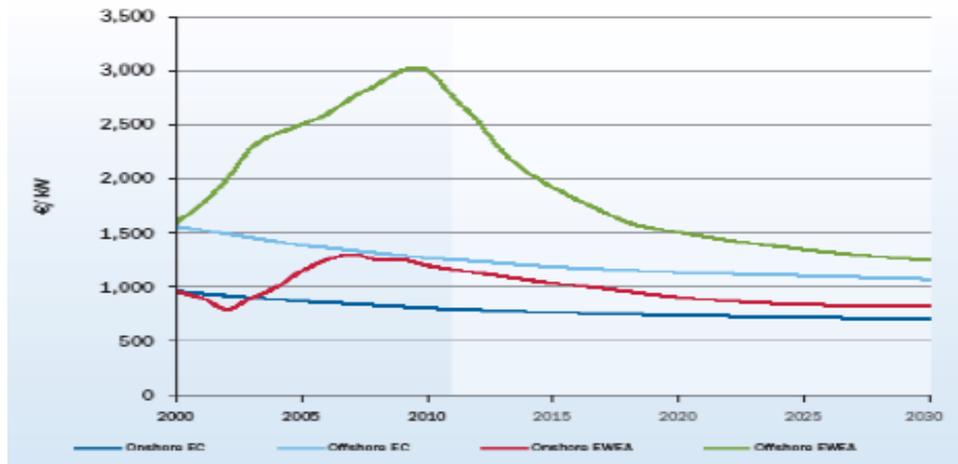
図表 4.6 洋上風車の予測ライフサイクルコストの内訳



Source: NREL, *Large-Scale Offshore Wind Power in the United States*, September 2010

洋上風車のコストの長期的展望は明るいとは言えない。図表 4.7 は 2011 年の EWEA の研究による長期的コスト予測を示したものである。2000 年～2010 年の欧州の陸上及び洋上風力プロジェクトの実際の資本コストと目標コスト、さらに 2030 年までの目標コストと予測コストが示されている。風力発電プロジェクトの目標ユニットコストは EU が設定したものであり、実際コスト及び予測コストは EWEA によるものである。

図表 4.7 陸上と洋上の風力発電の資本コスト



Source: EWEA, *Pure Power: Wind Energy Targets for 2020 and 2030*

グラフから見て取れるように、EWEAは陸上、洋上ともにユニットコストが今後20年間にわたり低減する傾向にあると予測している。技術の習得、量産効果、洋上風車メーカー数とモデル数の急速な増加により風力発電プロジェクトのコストは低減すると考えられるが、洋上風力発電プロジェクトのユニットコストは陸上風力発電プロジェクトよりも高いレベルで推移する。EWEAの予測によれば、2030年の洋上風力発電のコストは陸上風力プロジェクトよりも依然として約50%割高となる。

2011年の米国エネルギー省による風力発電戦略研究は今後20年にわたる「洋上風力エネルギーのコスト削減への道」の潜在的可能性を想定している。DOEの研究は2010年の陸上と洋上の風力発電コストを比較し、2030年までに実現可能な洋上風力発電コスト削減への将来的な道を示している。図表4.8に示すように、DOEの研究では、洋上風力エネルギーコスト（経常ドル）は2010年のキロワットあたり0.12ドルから、2020年には0.08ドル、2030年には0.07ドルに低減しうるとし、実質的には2020年以降の洋上風力エネルギーコストは現在の陸上風力エネルギーコストとほぼ同等となるとしている。

図表 4.8 クラス 6 風力における洋上風力エネルギーコスト低減予測 (2009 年経常ドル)

<u>Component</u>	<u>Land</u>	<u>Offshore</u>		
	<u>2010</u>	<u>2010</u>	<u>2020</u>	<u>2030</u>
Installed Capital Cost (\$/kW)	\$2,120	\$4,259	\$2,900	\$2,600
Discount Rate Factor (DRF) *	12%	20%	14%	8%
Turbine Rating (MW)	1.5	3.6	8.0	10.0
Rotor Diameter (m)	77	107	156	175
Annual Energy Production / Turbine (MWh)	4,684	12,276	31,040	39,381
Capacity Factor	36%	39%	44%	45%
Array Losses	15%	10%	7%	7%
Availability	98%	95%	97%	97%
Rotor Coefficient of Power	.47	0.45	0.49	0.49
Drivetrain Efficiency	0.9	0.9	0.95	0.95
Rated Windspeed (m/s)	10.97	12.03	12.03	12.03
Average Wind Speed at Hub Heights (m/s)	7.75	8.8	9.09	9.17
Wind Shear	.143	0.1	0.1	0.1
Hub Height (m)	80	80	110	120
Cost of Energy (\$/kWh)	0.09	0.27	0.10	0.07
Cost of Energy (\$/kWh) at constant 7% DR	0.08	0.12	0.08	0.07

Note: Discount Rate Factor calculation is based on a significant financial risk premium for u.s. offshore wind technology in 2010; this financial risk premium is assumed to decrease over time.

Source: US DOE, *A National Offshore Wind Strategy*, February 2011

DOE のコスト予測は洋上風車プロジェクトの将来の資本コスト低減、運転効率及び信頼性の向上、融資コストの低減を前提としている。

第 1 に、システムの大型化、革新的なコンポーネント、完全統合システム設計を通じてシステム効率を向上し、資本コストを低減することにより、エネルギーコストを低減することが可能である。このシナリオでは、建設コスト (Installed capital cost) はキロワットあたり 4,259 ドルから 2,600 ドルと 39%低減し、平均タービン定格出力は 3.6 メガワットから 10.0 メガワットに大型化し、設備利用率 (タービン・キャパシティー・ファクター) は 39%から 45%に向上する。第 2 に、運転費用及び補充費用を低減することにより総コストを下げる事が可能である。陸上風力

発電施設と競争するためには、洋上風車の運転費用が継続的に低減し、海上輸送費用と部品を取り替える費用を含む補充総費用も、信頼性の向上及び維持に手のかからない革新的な設計を通して低減される必要がある。最後に、モデルとした米国市場における洋上風力エネルギー費用のおよそ半分を融資コストが占めるが、プロジェクト・リスクを下げることでより融資コストを低減することが可能である。このシナリオでは、投資家が認識するリスクを低減することにより、割引率 (discount rate factor) が現在推定される 20% から目標水準の 8% に下がる。DOE はプロジェクト出力を正確に予測する有効なタービン性能モデルを開発し、タービンの信頼性と生存性の確保を助ける設計コード及び基準開発に参加し、認識される技術リスクを軽減するための米国水域における風力発電技術の実証で提携することにより、これらの認識されるリスク軽減を支援する。予測可能かつ時期を得た規制上の許認可は融資コスト低減を促す。また、設置・建設コスト、システム性能、保全代替要件が安定し予測可能になることも、融資コスト低減を助ける¹⁴。

しかしながら、長期的に見て洋上風力発電コストが低減するという DOE の予測も AWEA の予測も裏付けはほとんどなく、いずれも予想というよりは目標にすぎない。

他のエネルギー源との競争力

設置水深に関わらず、洋上風力発電は他のエネルギー供給源と競合する。その結果、洋上風力発電プロジェクトの商業的フィージビリティは競合するエネルギー源と比較したプロジェクトの経済性にかかっているが、現時点で洋上風力発電は劣勢である。

2007 年の Pace Global Energy Services による研究では、144 メガワットの洋上ウインドファームと、同等出力の複合サイクルガスタービン発電所とのライクサイクルコストの評価が行われた。同調査によれば、複合サイクルガスタービン発電所との競争力を持つためには、洋上ウインドファームの建設コストは設備容量キロワットあたり 3,000 ドルである必要がある。しかし、洋上ウインドファームのプロジェクトコストはキロワットあたり 5,231 ドルと推定されており、さらにキロワットあたり 400 ドルが海底ケーブル敷設と変電所のアップグ

¹⁴ US DOE, *A National Offshore Wind Strategy*, February 2011.

レードにかかる。つまり、洋上ウインドファームの資本投資額は複合サイクルガスタービン発電所と競争力を持つために必要な金額のおよそ2倍となる¹⁵。

同研究は複合サイクルガスタービン発電所のライフサイクルを通じた天然ガス価格を100万Btuあたり9ドルから15ドルと想定していることから、この研究結果はさらに大きな意味を持つ。米国の天然ガス価格は現在100万Btuあたり3ドルから3.5ドルであり、EIAの天然ガス価格予測の基本シナリオでは、今後20年間に天然ガス価格は徐々に上昇し100万Btuあたり7ドルに達するとしている。100万Btuあたり9～15ドルの想定で洋上風力発電所が複合サイクルガスタービン発電所に対する競争力を持たないならば、現在及び予想される天然ガス価格では、米国では洋上ウインドファームに競争力がないことは確実である。

洋上風力発電の競争力は、特に米国では、技術革新によりシェールガスの生産量が飛躍的に拡大したことで打撃を受けた。EIAによれば、「米国では、水平掘削と水圧破碎技術によりシェールガス生産の経済性が高まり、2006年-2010年の同ガス生産平均年間成長率は48%に達した」。EIAは、シェールガスの生産が今後25年間堅実に成長を続け、2009年から2035年の間に生産量はおよそ4倍に達すると予測している¹⁶。天然ガスの供給増により、米国のあらゆる種類の代替エネルギープロジェクトは目に見える打撃を受ける。米国の天然ガス生産量が増加したことにより、米国のLNG輸入を促進する計画も断念されている。実際のところ、LNG輸入用に建設された米国のターミナルをLNG輸出用に利用することも提案されている。

欧州の洋上風力プロジェクトは比較的シェールガス発見の影響を受けておらず、欧州の天然ガス価格は米国よりも割高のまま推移している。しかし、LNG貿易の成長により世界の天然ガス市場はグローバル化しており、これまで米国市場向けであった中東、ベネズエラ、トリニダード産のLNGを今は欧州及びその他の消費国が利用できるようになっている。これは、究極的には欧州の天然ガス価格を押し下げる圧力となり、天然ガス発電プラントに対する洋上風力エネルギーの価格競争力を低下させている。

4.2 浮体式風車発注の展望

¹⁵ P. Sclavounos, et al., *Floating Offshore Wind Turbines: Responses in a Seastate Pareto Optimal Designs and Economic Assessment*, MIT 2007.

¹⁶ EIA, *Annual Energy Outlook 2011*.

大水深風力資源の活用には相当な関心が寄せられている。しかし、浮体式風車については未解決の工学、設計上の数々の問題点が存在する。大水深ウインドファームは経済性に劣り、天然ガスの過剰供給が天然ガス価格を押し下げており、天然ガス発電プラントに代わる選択肢としての洋上風力発電の魅力を低下させている。

係る状況を考慮すると、(1)浮体式風車の運転上のフィージビリティの十分な理解と運転実績のある設計、(2)大水深風力開発の経済性向上につながる技術革新、(3)大水深風力発電が魅力的なエネルギー源となる水準まで天然ガス価格が上昇すること、がない限り、商用大水深風力プロジェクトが積極的に推し進められるとは考えにくい。これらは大きな課題である。

しかし、大水深風力エネルギーの膨大な賦存量は魅力的であり、エネルギー源としてこれらの資源を生かす試みは捨てがたいことから、政府レベルでの大水深風力活用の支援が継続する公算が強い。しかし、米国と欧州では、政府レベルでの大水深風力発電推進に取り組む度合いは異なると考えられる。

欧州では、今後5年から10年の間に実証及び試験用に少数の浮体式風車が建造されることが考えられる。北欧沖及び地中海に代替エネルギー源として大水深ウインドファームを建設する取り組みも考えうる。しかし、これらのプロジェクトは大掛かりな政府の財政支援を必要とし、結局のところ、大水深ウインドファームの数及び必要な浮体式風車の数は、欧州諸国の政府が大水深風力プロジェクトにどの程度の財政支援を提供する意思があるか、又はその財源があるかに左右される。現時点で欧州債務危機を鑑みると、今後の大水深風力プロジェクトに対する政府の財政支援は極めて限られると考えられる。

米国では、政府が出資する実証プロジェクトにおいて少数の異なる種類の浮体式風車が発注される可能性があり、その件数はエネルギー省予算に左右されるが、同省の予算は既に逼迫しており、今後2、3年にわたり予算カットの圧力が強まる兆候が見られる。代替エネルギーのR&Dが米国政府による今後の予算カットの犠牲となる可能性が高い。特に、エネルギー省から巨額の融資保証を受けた代替エネルギー会社である、ソーラーパネルメーカーのソリンドラ社の破産に関連したスキャンダルが連邦政府による支援の逆風となることが懸念される¹⁷。浮体式風車を使用した大水深ウインドファームを建設する大掛かりな商業事業が行

¹⁷ R Rampton and N. Groom, *House Republicans Step Up Probe Into Energy Loans*, Reuters News, 21 September 2011.

われるとは考えにくい。ひとことで言って、米国においては大水深風力発電は在来型エネルギーとの競争力を持たない。

一方、大水深風力発電部門の展望について楽観的な見方もある。最近、デンマークのリサーチグループである MEC Intelligence は、洋上風力発電支持構造物市場の売上は 2010 年の 7 億ドルから 2020 年には年間 200 億ドルに成長すると推定した報告書を発表した¹⁸。水深の大きい海域に風車を設置する必要性が高まるのが浮体式風力プラットフォームの需要を牽引すると予測している。MEC はさらに、「洋上風力発電支持構造物市場の飛躍的な成長が多数のプレーヤーと投資家を惹き付けるのは必至である。サプライチェーンの企業は、市場を形成し、地域的及び技術的に最も関心ある機会に足並みを合わせるため早期参入を必要とする」としている。

欧州で洋上風力発電産業が建設ラッシュとなっていることから、エンロンのような企業が生まれる危険性が高いと警告する声が上がっていることを指摘する必要がある。世界の風力発電容量の 20% 以上に保険を提供している保険業者である GCube のシニア・エグゼクティブによれば、「洋上風力発電は筋肉増強剤を使用した石油ガス産業のようなものである。洋上風力発電はより大きく、より大胆になろうとし、そして常に限界に挑んでいる。そして残念ながら、経済性を正当化するためにはそうならざるを得ない」。同氏は「そうでないことを願うが、大規模な連続障害が発生したり、船隊が動かなくなったりする事象が発生するのは時間の問題と考える。そして、それは一流のサプライヤーまたは下請業者において発生するだろう。」¹⁹と警鐘を発している。

¹⁸ MEC Intelligence, *Offshore Wind Foundation Types, Market Forecasts and Key Industry Players*, October 2011.

¹⁹ Recharge, *Warning of Offshore Wind Enron Amid Build-Out Frenzy*, 28 November 2011.

5. 市場勢力図

本章では、洋上風車の主要サプライヤー、風車支持構造物及び浮体式プラットフォームの主要建造事業者、タービン設置船の主要建造事業者について、現在の事業活動内容と進行中の技術開発を概説する。

5.1 洋上風車機械

洋上風力発電プロジェクトに風車の納入実績を持つメーカーは十数社ある。図表 5.1 は洋上風車納入実績のある企業と、各企業が 2010 年までに風車を納入したプロジェクトを示したものである。すべてのプロジェクトは欧州におけるものであり、現在のところ米国における洋上風力発電プロジェクトの受注実績はない。

図表 5.1 洋上風車サプライヤー別プロジェクト実績

<u>Project Name</u>	<u>Location</u>	<u>Capacity (MW)</u>	<u>No. of Turbines</u>	<u>Foundation Type</u>	<u>Project Owner</u>	<u>Start Date</u>
<u>Areva</u>						
Alpha Ventus	Germany	60	12	Tripod, Jacket	DOTI	2010
<u>Bard</u>						
Hooksiel	Germany	5	1	Triple	Bard	2008
Bard 1	Germany	20	4	Triple	Bard	2010
<u>Enercon</u>						
Enova	Germany	4.5	1		Enova	2004
<u>Gaia Wind</u>						
Poseidon Wind&Ware	Denmark	0.033	3	Floating	Floating Power Plant	2010
<u>GE</u>						
Arklow Bank	Ireland	25.2	7	Monopile	GE	2004
Utgrunden 1	Sweden	10.5	7	Monopile	Vlattenfall	2001
<u>Nedvind</u>						
Lely	Netherlands	2	4	Monopile	Nuon	1994
<u>NEG-Micon</u>						
Bockstigen	Sweden	2.75	5	Monopile		1998
Yttre Stengrund	Sweden	10	5	Monopile	Vlattenfall	2002
<u>Nordex</u>						
Breitling	Germany	2.5	1		Nordex	2006
<u>NordTank</u>						
Irewe Vorrink	Netherlands	16.8	28	Monopile	Nuon	1996
<u>REpower</u>						
Thomton Bank 1	Belgium	30	6	Gravity	C-power	2008
Beatrice	U.K.	10	2	Jacket	SSE	2007

<u>Project Name</u>	<u>Location</u>	<u>Capacity (MW)</u>	<u>No. of Turbines</u>	<u>Foundation Type</u>	<u>Project Owner</u>	<u>Start Date</u>
<u>Siemens</u>						
Avedøre Holme	Denmark	7.2	2	Gravity	Dong Energy	2009
Burbo Bank	U.K.	90	25	Monopile	Dong Energy	2007
Floating Hywind	Norway	2.3	1	Spar Buoy	Statoil	2009
Gunfleet Sands	U.K.	172.8	48	Monopile	Dong/ Marubeni <i>(see note)</i>	2010
Homs Rev 2	Denmark	209.3	91	Monopile	Dong Energy	2009
Inner Dowsing	U.K.	97.2	27	Monopile	Centrica	2008
Lillgrund	Sweden	110.4	48	Gravity	Hochtief Vlattenfall	2007
Lynn	U.K.	97.2	27	Monopile	Centrica	2008
Middlegrunden	Denmark	40	20	Gravity	Dong Energy	2001
Nysted II/Rodsand II	Denmark	207	90	Gravity	E.On	2010
Nysted/Rodsand I	Denmark	165.6	72	Gravity	Dong Energy	2003
Pori I	Finland	2.3	1	Gravity	Suomen	2010
Rhyl Flats	U.K.	90	25	Monopile	Npower	2009
Samsø	Denmark	23	10	Monopile	Samsø	2003
Vindeby	Denmark	4.95	11	Gravity	Dong Energy	1991
<u>Vestas</u>						
Belwind I	Belgium	165	55	Monopile	Colruyt	2010
Tunø Knob	Denmark	5	10	Gravity	Dong Energy	1995
Homs Rev I	Denmark	160	80	Jacket	Vattenfall	2002
Federikshavn	Denmark	10.6	4		Dong Energy	2003
Storbaelt/Sprogø	Denmark	21	7	Gravity	Sund&Baelt	2009
Egmond aan Zee	Netherlands	108	36	Monopile	NordZee	2007
Prinses Amalia	Netherlands	120	60	Monopile	Econcern	2008
Blyth	U.K.	4	2	Monopile	E.On	2000
North Hoyle	U.K.	60	30	Monopile	Npower	2003
Scroby Sands	U.K.	60	30	Monopile	E.On	2004
Kentish Flats	U.K.	90	30	Monopile	Vlattenfall	2005
Barrow	U.K.	90	30	Monopile	Dong Energy	2006
Robin Rigg	U.K.	180	60	Monopile	E.On	2010
Thanet	U.K.	300	100	Monopile	Warwick	2010

<u>Project Name</u>	<u>Location</u>	<u>Capacity</u> (MW)	<u>No. of Turbines</u>	<u>Foundation Type</u>	<u>Project Owner</u>	<u>Start Date</u>
<u>WinWind</u>						
Kemi Ajos	Finland	24	8	Gravity	Pohjolan	2008
Gasslingegrund	Sweden	30	10	Gravity	Vindpark	2009

Note: Marubeni in Sept 2011 acquired 49.9% interest in the Gunfleet Sands offshore wind farm.
Source: EWEA

上に示したプロジェクトリストに示されるように、現在のところ、Siemens とヴェスタスが洋上風車の主要サプライヤーとして群を抜いている。両社を合わせて洋上風力発電プロジェクトの 62%、洋上風車数の 91%、設置発電容量の 91%を占めている。これらの 2 社を始めとして本部門で実績のある企業を以下に概説する。

Siemens

1990 年代以来、Siemens が供給した洋上風車は総容量 1,300 メガワットを超える。納入プロジェクトにはデンマーク沖に 1991 年に建設された世界初の洋上風力発電ファームである Vindeby 風力発電ファームが含まれている。この草分け的プロジェクトで設置された 11 基のタービンは現在も稼働している。欧州における Siemens の風力発電プロジェクトの約半数はデンマーク沖、3 分の 1 が英国沖に設置されている。

Siemens の洋上風車は 3.6 メガワットユニットを主力としている。Siemens によれば、同ユニットは「洋上プロジェクトの事実上の標準」と考えられている。また、同社は 2.3 メガワットの小型ユニットも提供しており、6 メガワットを超える大型タービンの開発も進めている。Siemens は 2011 年半ばに 6 メガワット、ロータ直径 120 メートルの風車の試作品をデンマーク沖に設置した。

Siemens は洋上風車プロジェクト向けの一貫したサプライチェーン能力を保有している。同社は風車用機器、ロータ/ブレード、制御装置にわたる広範な製品を製造しており、設置現場までの輸送、同社が提供する設置船を使った風車据付け、試運転、長期サービスと保守も提供している。

Siemens は洋上プロジェクト用風車の大きな受注残を抱えている。同社によれば、2011 年第 1 四半期に総出力 3.7 ギガワット、総数 1,030 基の洋上風車の受注残があった。図表 5.2 に示すように、これらの風車は英国とデンマーク沖プロジェクト向けである。

図表 5.2 Siemens の洋上風車受注残 (2011 年第 1 四半期)

<u>Project Name</u>	<u>Location</u>	<u>Capacity</u> (MW)	<u>No. of Turbines</u>
Greater Gabbard	U.K.	504	140
Sheringham Shoal	U.K.	317	88
London Array	U.K.	630	170
Walney	U.K.	367	102
Lincs	U.K.	248	69
Gwynt Y Mor	U.K.	576	160
Anholt	Denmark	400	111
Baltic 2	Denmark	288	80
Borkum Riffgat	Denmark	108	30
Dan-Tysk	Denmark	288	80
Total		3726	1030

Source: Siemens

Siemens は中国の洋上風車市場にも足場を築いている。同社は 2010 年末に上海にブレード製造工場を、2011 年始めには同じく上海にナセル工場を開設した。2011 年 6 月には中国の江蘇 (Jiangsu) 省の洋上風力発電プロジェクト向けに出力 2.3 メガワットの風車 21 基の供給契約を受注している。

また、Siemens は最近、風車事業本部をデンマークの Brande からドイツのハンブルグに移転することを決定した。現在、同社はハンブルグ本社に 170 人の風力発電スタッフを抱えている。風力発電事業本部の移転は、風力発電事業を太陽光、水力、海洋エネルギー事業から分離して独立した事業分野として運営する Siemens の経営戦略の一環である。

Vestas

オランダ企業であるヴェスタスは 1980 年代始めから風車部門で事業を行っている。同社は 2004 年に、同じくオランダの風車製造事業者である NEG Micon と合併した。創設以来、ヴェスタスは洋上向けに 580 基、総発電容量 1.4 ギガワットの風車を供給した。初めて洋上に設置された同社の風車はデンマーク沖 Tunø Knob ウインドファームの 10 基であった。1995 年に建設された Tunø Knob ウインドファームの総発電容量は 5 メガワットである。

ヴェスタス製風車の約半数は英国沖プロジェクトに供給されおり、40%がデンマーク及びオランダ沖のプロジェクトに供給されている。つまり、ヴェスタスのプロジェクト実績のほとんどすべては欧州におけるものであるが、2 基の風車が日本の洋上風力発電向けに供給されている。

ヴェスタスは2011年3月に新設計のロータブレード長80メートル、出力7メガワットの増速機付き洋上風車を発表した。同社は2011年5月、新設計の出力7メガワット洋上風車を英国で製造、設置するための生産プラント建設用地を確保したことを発表した。同プラントは Sheerness 港の内の70ヘクタールの敷地に建設される。図表5.3は同プラントのレイアウトで、出力7メガワット風車の製造は2014年第1四半期に開始される予定である。

図表 5.3 英国の Kent に建設予定の Vestas 洋上風車製造施設



GE

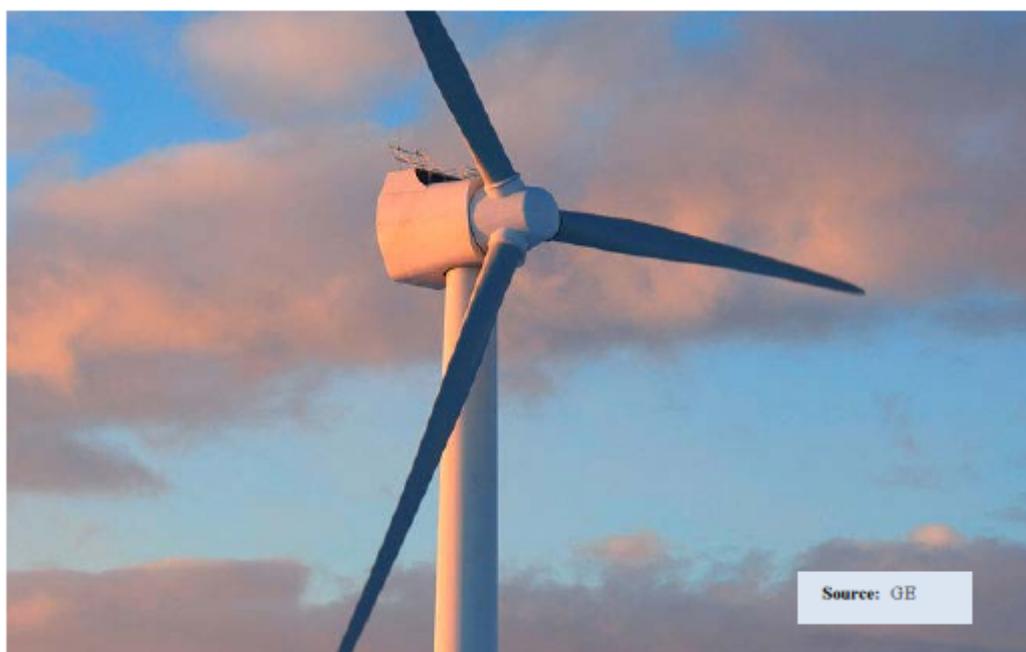
GEは大手風車サプライヤーの一つである。同社は現在、1.5メガワットから4.1メガワットの風車を提供しており、大型風車向けダイレクトドライブの先駆者である。GEはアイルランドの Arklow Bank、スウェーデンの Utgrunden 1をはじめとする複数のプロジェクトで納入実績を持つ。

GEは2010年3月に洋上風車製造プラントを英国に新設する計画を発表した。同社は今後10年間に欧州の風力エネルギー産業に3億4000万ユーロを投資する計画であり、風車製造プラント建設はその一環であるとしている。投資計画にはノルウェー、スウェーデン、ドイツ、英国での風力発電開発センターの建設が含まれている。

GEは Lake Erie Energy Development Corporation (LEEDCo) にパートナーとして参画している。同パートナーシップの下でGEは、出力4メガワットのダイレクトドライブ式風車を

米国オハイオ州沖五大湖における LEEDCo の風力プロジェクトに供給することになっている。同プロジェクトは第 1 段階として 2012 年末完成予定で 20 メガワットの風力発電導入を計画しており、最終的にはオハイオ沖に 1,000 メガワットの風力発電を導入することを目標としている。

図表 5.4 GE の出力 4.1MW ダイレクトドライブ風車



2011 年 8 月、GE は最大出力 15 メガワットのダイレクトドライブ式風車の設計作業に着手したことを発表した。超伝導磁石を利用した新型タービンは洋上ウインドファームでの利用をターゲットとしている。米国エネルギー省が同プロジェクトに 300 万ドルの資金を提供し、米オークリッジ国立研究所 (Oakridge National Laboratory) が GE と共にプロジェクトに参加している。

REpower Systems

ハンブルグを拠点とする REpower Systems は陸上及び洋上風車の主要サプライヤーのひとつである。REpower はロータ直径 82 メートル、出力 2 メガワットのユニットからロータ直径 126 メートル、出力 6 メガワットのユニットまで提供している。同社は約 2,500 人を雇用し、ドイツ、ポルトガル、中国に生産プラントを保有している。

REpower は世界で 3,500 基を超える風車の納入実績を有する。納入実績のあるプロジェクトにはベルギーの Thornton Bank 1 洋上ウインドファーム、英国の Beatrice 洋上ウインドファーム、英国の Ormonde 洋上ウインドファームを始めとする複数の大型洋上ウインドファームプロジェクトが含まれる。最初の 2 件のプロジェクトは 2007/2008 年に完成した。REpower が 5 メガワット風車 30 基を供給した Ormonde プロジェクトは 2011 年 8 月に完成している。

この他に出力 6 メガワットの REpower 製風車を使用する風力発電プロジェクト 2 件（ベルギー沖の Thornton Bank 2 及び 3、ドイツ沖の Eastern North Sea）が 2012 年に運転開始を予定している。

Bard

ドイツの Bard は洋上ウインドファームの開発、建設、所有、運転事業を行っている。同グループはグループ内に洋上風力プロジェクト開発、エンジニアリング、設置及び運転のターンキー（一括受注）能力を保有している。Bard は自社プロジェクト用に使用する設置作業船及び保守作業船を保有しており、ドイツの Emden と Cuxhaven に生産施設を保有している。

Bard の洋上風車製品ラインにはトリパイルに搭載のロータ直径 122 メートル、出力 5 メガワットの風車が含まれる。同ユニットは北海の厳しい海況向けに特別設計されたものである。Bard は現在、出力 6.5 メガワットの風車を開発中であり、プロトタイプの試験が Emden 近郊で実施されており、2013 年に同ユニットのシリーズ製造が開始される予定である。

Bard の洋上風車納入実績にはオランダ沖 Hooksiel 沿岸のウインドファーム、ドイツ沖の バード 1 ウインドファームが含まれる。同社は現在、出力 5 メガワットの風車 80 基を設置するドイツ沖北海の Veja Mate ウインドファームプロジェクトやオランダの洋上ウインドファーム 3 カ所などを始めとする複数の洋上ウインドファームプロジェクトを開発している。Bard によれば、さらにドイツで同社のタービンを使った 7 件の洋上風力発電プロジェクトが申請されている。

2011 年 9 月、Bard は会社売却を目的として投資会社を雇ったことを発表した。現在、アジア企業及び欧州企業と交渉中であり、2012 年春の売却完了を予定している。大宇海洋造船（DSME）が Bard 買収に関心を表明している。

Iberdrola

スペインの Iberdrola 社は世界をリードする風力発事業者を自称しており、23 カ国で 13,000 メガワットを設置した実績を持つ。同社の洋上部門はスコットランドに本部を置いている。

現在まで Iberdrola 社が設置した風車はすべて陸上ベースである。しかし、2011 年 8 月、同社は総発電容量 400 メガワットの Winkinger 洋上風力ファームをドイツ沖バルト海に建設するための事前許可を申請した。同プロジェクトでは出力 5 メガワットの着底式風車が採用され、2016 年の運転開始が予定されている。水深 39 メートルの同プロジェクトでは、当初浮体式風車の利用が検討されていたが、最終的に着底式が選択された。また、Iberdrola 社は 389 メガワットの風力発電ファームを英国の West of Duddon Sands に建設するプロジェクトを進めているほか、総発電容量 10 ギガワットの洋上発電プロジェクトを欧州で開発中であるとしている。

5.2 洋上風車支持構造物と浮体式プラットフォーム

世界において、少なくとも十数社が洋上風車支持構造物の建造実績を持っている。2010 年末までに洋上風車プロジェクトに納入実績を有している企業を図表 5.5 に示した、

図表 5.5 着底式洋上風車支持構造物のサプライヤー別プロジェクト実績(2010 年末)

<u>Project Name</u>	<u>Location</u>	<u>No. of Turbines</u>	<u>Foundation Type</u>	<u>WT Supplier</u>	<u>Project Owner</u>	<u>Start Date</u>
<u>Aker Kvaerner</u>						
Alpha Ventus	Germany	12	Tripod, Jacket	Areva/REpower	DOTI	2010
<u>Bard</u>						
Bard 1	Germany	4	Tripile	Bard	Bard	2010
Hooksiel	Germany	1	Tripile	Bard	Bard	2008
<u>BiFab</u>						
Beatrice	U.K.	2	Jacket	REpower	SSE	2007
<u>Bladt</u>						
Samsø	Denmark	10	Monopile	Siemens	Samsø	2003
Homs Rev 2	Denmark	91	Monopile	Siemens	Dong Energy	2009
Egmond aan Zee	Netherlands	36	Monopile	Vestas	NordZee	2007
<u>Cambrian</u>						
Scroby Sands	U.K.	30	Monopile	Vestas	E.On	2004
<u>GeoSea</u>						
Thornton Bank 1	Belgium	6	Gravity	REpower	C-power	2008
<u>MT Hojgaard</u>						
Middlegrunden	Denmark	20	Gravity	Siemens	Dong Energy	2001
Burbo Bank	U.K.	25	Monopile	Siemens	Dong Energy	2007
Inner Dowsing	U.K.	27	Monopile	Siemens	Centrica	2008
Lynn	U.K.	27	Monopile	Siemens	Centrica	2008
Rhyl Flats	U.K.	25	Monopile	Siemens	Npower	2009
Gunfleet Sands	U.K.	48	Monopile	Siemens	Dong Energy	2010
Homs Rev 1	Denmark	80	Jacket	Vestas	Vattenfall	2002
Robin Rigg	U.K.	60	Monopile	Vestas	E.On	2010
<u>PEAB</u>						
Gasslingegrund	Sweden	10	Gravity	WinWind	Vindpark	2009
<u>Per Aarsleff</u>						
Nysted/Rødsand I	Denmark	72	Gravity	Siemens	Dong Energy	2003
Nysted II/Rødsand II	Denmark	90	Gravity	Siemens	E.On	2010
Storbaelt/Sprogø	Denmark	7	Gravity	Vestas	Sund&Baelt	2009

<u>Project Name</u>	<u>Location</u>	<u>No. of Turbines</u>	<u>Foundation Type</u>	<u>WT Supplier</u>	<u>Project Owner</u>	<u>Start Date</u>
<u>Smulders</u>						
Arklow Bank	Ireland	7	Monopile	GE	GE	2004
Prinses Amalia	Netherlands	60	Monopile	Vestas	Econcern	2008
North Hoyle	U.K.	30	Monopile	Vestas	Npower	2003
Kentish Flats	U.K.	30	Monopile	Vestas	Vlattenfall	2005
Barrow	U.K.	30	Monopile	Vestas	Dong Energy	2006
Thanet	U.K.	100	Monopile	Vestas	Warwick	2010
<u>Technip</u>						
Pori 1	Finland	1	Gravity	Siemens	Suomen	2010
<u>Van Oord</u>						
Belwind 1	Belgium	55	Monopile	Vestas	Colruyt	2010

Source: EWEA

着底式洋上風車の支持構造物の主要サプライヤーである欧州 5 社と、本部門に参入を図っている米国企業を以下に概説する。

MT Hogaard

オランダの建設請負事業者である MT Hogaard は、2001 年にコペンハーゲン港の入り口近くに 20 基の洋上風車用支持構造物を設置して洋上風車事業に参入した。以来 Hogaard は英国沖 6 件、さらにデンマーク沖 2 件の洋上風力発電プロジェクトで支持構造物を供給した。同社はモノパイル式及びコンクリート式の支持構造物を提供しているが、浮体式風車プラットフォーム開発は手がけていない。

Smulders

オランダの Smulders は 1990 年代初めに陸上風力発電プロジェクト向けに鋼製タワーの製造を開始した。同社の最初の洋上鋼製タワーは 2003 年に納入された。同社の洋上鋼製タワーはすべてモノパイル型である。同社はベルギー、デンマーク、ポーランド、英国に生産施設を保有しており、年間 200 基以上の支持構造物を建造する能力を有している。同社は、知られている限りでは浮体式支持構造物に関心を持っていないが、需要があれば浮体式市場に参入しうる。

Bladt

デンマークのBladtは再生可能エネルギー部門向けの複雑な鋼製構造物の建造を専門にしており、製品には風車向けモノパイル鋼製タワーや潮波力エネルギー開発向け構造物が含まれる。同社はデンマークのAalborgとドイツのLubminに生産施設を保有している。Aalborg施設（図表5.6）は敷地面積30万平方メートルであり、70m x 30m x 15mのモノパイルを屋内で製造することができる。同社は浮体式タービン構造物を手がけていないが、既存施設を利用して浮体式市場に参入することは可能である。

図表 5.6 デンマークのAalborgのBladtモノパイル製造施設



Per Aarsleff

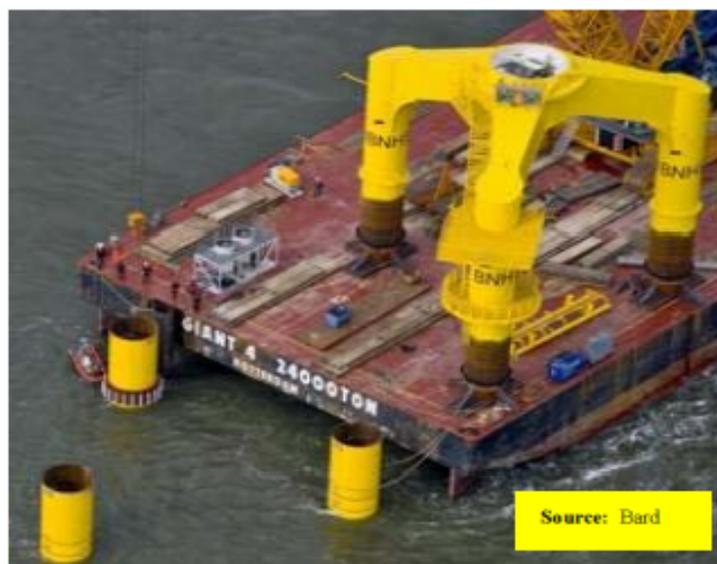
デンマーク企業であるPer Aarsleff社は、2002年にデンマークのRodsandでNysted洋上ウインドファーム向けに支持構造物の設置を開始して以来、コンクリート製と鋼製の洋上風力発電支持構造物を350基以上供給してきた。Per Aarsleffによれば、同社は2012年納入予定の約300基の洋上風車支持構造物を受注している。同社は浮体式風車プロジェクトに関与していないが、2004年からドイツの海洋建設請負事業者であるBilfinger Bergerと協力しており、同グループが浮体式風車支持構造物に事業を拡大することも考えうる。

Bard

前述したようにBardは風車のターンキー（一括）供給事業者であり、統合サプライチェーン能力を保有しており、グループ内に支持構造物の建造能力も有している。同社は水深25～40メートルに適したトリパイル式支持構造物を開発した。この支持構造物は、同社が

手がける2件の北海洋上風力発電プロジェクトで採用されている。同社は会社の売却を予定しており、浮体式風車用プラットフォーム事業への参画の計画は不明である。

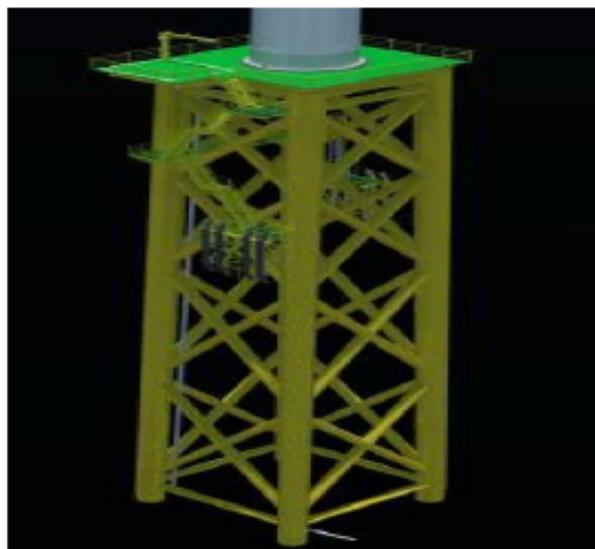
図表 5.7 Bard のトリパイル式風車支持構造物



Signal International

アラバマ州モービルに本社を置くシグナルインターナショナル社はオフショア石油ガス生産施設の建造を手がける米国企業で、米国メキシコ湾岸に5つの建造施設を保有し、延べ面積は100万平方メートルに達する。同社は現時点では図表5.8に示すような着底式支持構造物市場に焦点を当てているが、浮体式風車構造物に事業を拡大するための建造能力と実績を保有しており、同社の経営陣は米国沖風車支持構造物向けの供給を今後のターゲットとしている。

図表 5.8 Signal International の洋上風車支持構造物



Source: Signal International

5.3 浮体式風車プラットフォーム

世界において、これまで少なくとも十数社が浮体式風車プラットフォームの設計開発を手がけている。主要なプレーヤーを以下に概説する。

Technip

Technip は実用可能な浮体式風車構造物を建造した実績のある唯一の企業である。同社はノルウェー沖 Hywind 実証プロジェクト向けの浮体式構造物として使用されたスパー式浮体を建造した。このスパー式浮体は喫水 100 メートル、海面下の直径が 8.3 メートル、排水量は 5,300 立方メートルである。係留には 3 本のラインが使用されており、浮体は 138 トンの 2.3 メガワットタービンを支えている。図表 5.9 に Hywind を示す。

図表 5.9 Hywind Spar 浮体式構造物

● WTG:	2,3 MW
● Turbine weight:	138 tonnes
● Turbine height	65 m
● Rotor diameter:	82,4 m
● Draft hull:	100 m
● Displacement:	5300 m ³
● Diameter at water line:	6 m
● Diam. submerged body:	8,3 m
● Water depths:	120-700 metres
● Mooring:	3 lines

Source: Statoil



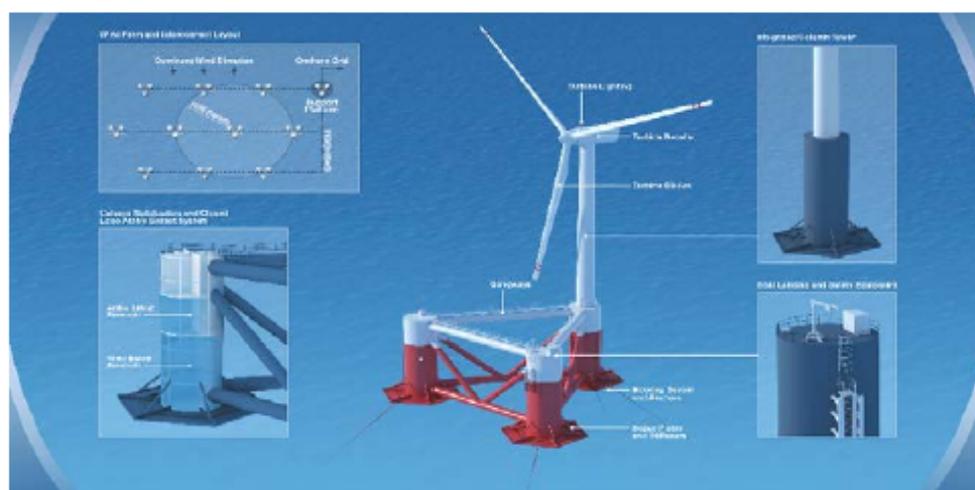
Technip はスパー式浮体をフィンランドの Pori の製造施設で建造した。同施設はオフショア石油ガス生産向けスパーの浮体建造に使用されたものである。浮体式風車市場が発展すれば、スパー式浮体建造に実績を持つ Technip は有利な立場になる。

後述するように、テクニップはさらに Nepuphar と協力して垂直軸浮体式風車を開発している。

Principle Power

Principle Power は洋上風力エネルギー市場開発を目的として創設されたシアトルを拠点とする米国企業である。同社は浮体式風車プラットフォームとしての利用を目的としたセミサブ式設計である WindFloat を開発し、特許を保有している。図表 5.10 に示す WindFloat は出力 3.6~10 メガワット、ロータ直径 120~150 メートルの風車を支えることができるとされている。同設計は限界油田生産用に Marine Innovation and Technology (MI&T) が開発した小型生産セミサブ設計を基にしたものであり、最近 Principle Power は MI&T から当該設計に係る知的所有権を購入した。

図表 5.10 Principle Power の WindFloat 支持構造物



Hull weight	1080-1630 tonnes	Power rating range	3.6-10MW
Displacement	<5500 tonnes	Rotor diameter range	120-150m
Hull draft	<20m	Hub height	80-90m
Operational depth	>50m	Nacelle weight	225-315 tonnes
Mooring	4-6 lines	Tower weight	180-315 tonnes

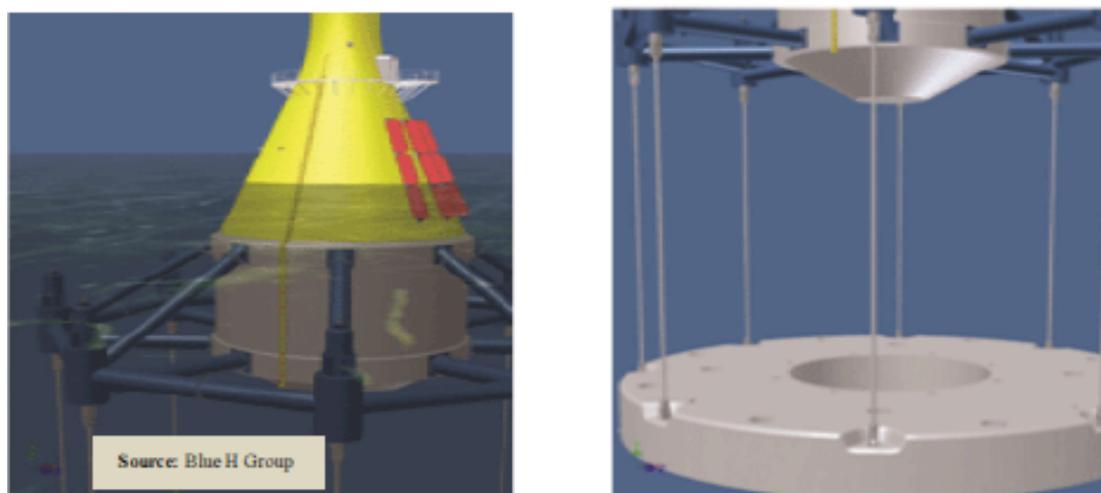
Source: Principle Power

Principle Power は 2011 年 11 月にポルトガル沖に WindFloat のプロトタイプを設置した。同プロトタイプの出力は 2 メガワットあり、Vestas が風車を供給した。この 1,200 トンの WindFloat は Lisnave で試運転され、一体に組み立てた形で一括してポルトガルの Agucadoura 沖約 3 キロの設置場所まで 350 キロメートルを曳航された。世界第 3 位の風力発電開発事業者である電力会社 EDP がジョイントベンチャーのパートナーとして参加するとともに、オフショア石油・ガス部門で事業を行っている米エンジニアリング会社である Houston Offshore Engineering 社が WindFloat プロトタイプの FEED（基本設計業務）を提供した。本実証プロジェクトのコストは 2,000 万ドルと推定されている。

Blue H Technologies

Blue H Technologies はオランダに事業拠点を置く英国籍の新規企業である。同社はオフショア石油ガス生産に使用される TLP 技術に基づいた浮体式支持構造物の開発に焦点を当てており、海底に係留された浮力室を利用した没水式大水深プラットフォームの設計を開発し、特許を保有している。図表 5.11 に概念設計を示す。同設計ではタービンタワーは浮力室上に搭載される。しかし、同設計はまだ建造されておらず、運転環境での試験も行われていない。

図表 5.11 Blue H の浮体式プラットフォーム



HiPRWind

HiPRWind は EU が出資する洋上風力発電 R&D プロジェクトであり、ドイツの Fraunhofer Institute for Wind Energy and Energy System Technology が率いるコンソーシアムにテクニップ、ABB、Vicinity 等の大手企業が参加して 2010 年 11 月に発足した。プロジェクトの目標は 5 年間のプロジェクト期間内に完全に機能する浮体式風車を欧州海域の試験サイトに設置することであるが、同ユニットは実用システムの 10 分の 1 の縮小モデルである。

Nass & Wind

Nass & Wind は再生可能エネルギーを専門とする 2001 年に設立された仏企業である。同社の洋上ウインドファーム事業は 2008 年に GDF-Suez に買収され、その後、同社は新たな風力資源プロジェクトの開発に焦点を当てている。同社の事業には Winflow と呼ばれるマルチメガワット浮体式洋上風車の開発が含まれている。これは水深 50 メートルを超えるすべてのタイプの海底での使用に適した革新的な固着装置とされるものを搭載したセミサブ設計である。同社は Winflow の現寸実証試験を 2012 年及び 2013 年に実施し、2015 年以降に実用化に向けてのマーケティングを開始することを計画している。同社はフランスの Lorient 近くに所在し、従業員は約 50 人である。

Nenuphar

Nenuphar も陸上及び洋上風車コンセプトの開発に積極的な仏企業である。同社は Technip と協力して Vertiwind と呼ばれる垂直軸風車を開発している。Vertiwind は浮体式プラット

フォーム上での使用を意図しており、同ユニットはスパイラル状に鉛直に配列された3枚の疑似螺旋形状のブレードを浮体式プラットフォーム上に搭載するものである。同設計はトルク変動を最小化し、高風速におけるダイナミックストール（動的失速）を抑制することを目的としている。Technip が浮体式プラットフォーム、係留装置、電気接続ケーブル、タービンのインテグレーション及び設置を担当し、Nenuphar が垂直軸風車の設計を担当している。Vertiwind プロジェクトはフランスの環境管理局が出資する Grand Emprunt プログラムから資金提供を受けている。

WindSea

WindSea はノルウェー企業であり、3基の風車を搭載する浮体式プラットフォームの設計を開発している。同社の設計は3柱 (Tri-column) セミサブマーシブルを基にしており、各柱上にそれぞれ風車が設置される。同設計の特徴は係留装置で、係留索はセミサブの中央でタレットに連結されており、回転することにより、風向きに対して最適な方向にロータの向きを変えることができる。同設計開発は2010年の第1四半期に開始されており、プロジェクト初期にはコンセプトの妥当性検証が実施され、その後出力3.6MWのタービン3基を搭載した現寸試作品の建造、設置、運転が行われる予定で、プロトタイプの設置は2012年とされている。同プロジェクトにはノルウェーのエンジニアリング・製作会社である NLI とオランダのリサーチ技術会社である Force Technology が協力している。

Sway

ノルウェー企業である Sway も浮体式風車の開発に取り組んでいる。同社は1本のパイプとサクションアンカーを使って海底に固定されるスパー式の風車設計を開発した。2011年に6分の1の縮小模型試験が Bergen 沖の Hjeltfjorden で実施されたが、荒天に見舞われて11月に沈没したため、海底から同ユニットを引き上げて修理する必要がある。同プロジェクトには Statoil、Shell、Statkraft、Lyse、ノルウェー研究会議 (Research Council of Norway)、Inocean が参加しており、同プロジェクトはノルウェー研究会議による資金支援を受けている。当初の予定では2013年に出力5メガワットのタービンの試験がノルウェー沖で実施されることになっていたが、プロトタイプが沈没したことによりスケジュールが繰り延べとなる公算が高い。

Ehrnberg Solutions

Ehrnberg Solutions はスウェーデン西海岸沖で 50 分の 1 の縮小模型試験が実施された浮体式風車の開発者である。SeaTwirl と呼ばれるこの設計は風力エネルギーを捕捉するために垂直軸風車を採用し、エネルギー保存のためにトーラスリングを採用している。Ehrnberg によれば、同設計で必要とされる可動部品はわずか 2 つであり、タービン回転の軸受としては基本的に海水が使用される。同設計のプロトタイプはスウェーデン西海岸の Halmstad 沖で 2011 年に試験された。Ehrnberg は同設計の特許を申請中であり、知的所有権を確保している。

Ideol

仏企業である Ideol は大型洋上風車向け浮体式支持構造を開発し、特許を保有している。同社は支持構造物の建造・設置コストをメガワットあたり 1,000 ユーロとしているが、おそらく知的所有権に関する配慮から設計の詳細は公開されていない。同社によれば、2013 年に 5~6 メガワットのプロトタイプ第 1 号の洋上運転を開始し、2015 年に 50 メガワットシリーズのウインドファームに着手すべく業界パートナーと協力している。

Hexacon

スウェーデン企業である Hexacon は最大 6~7 基、総出力 40 メガワットの風車を支えることのできる浮体式プラットフォーム概念を開発している。同社はメガワットあたりの資本支出額が浅水域用に建設される従来型のウインドファームと同等のレベルとなるとし、また、複数風車を搭載する浮体式プラットフォームは「保守の必要性が低く」、50 年~60 年の継続運転が可能としているが、同社の設計についての詳細は公表されていない。

Nautica Wind Power

米オハイオ州 Olmsted Falls に所在する Nautica Wind Power は軽量の浮体式風車の概念設計を開発中である。2011 年 9 月に米国エネルギー省が同開発事業を支援するために 50 万ドルを出資している。同設計の詳細は公表されていないが、基本的に海底のカウンターウェイトによりタワーを直立状態に保つものである。同社によれば、浮力タワーは水平状態で運搬され、クレーンなしで起立され、保守の際には高さを低くすることが可能であるとのこと。同設備の設計者は、エネルギー省の風車プロジェクトに関与していた元 NASA エンジニアである。

5.4 浮体式風力発電用変電プラットフォーム

2.2章で述べたように、大型洋上ウインドファームには風車から電力を受け取り、電力をまとめ、電圧を上げ、陸上に送電するための変電プラットフォームが必要とされる。このプラットフォームには、これまで着底式プラットフォームが使用され、海底に固定されていた。

2011年8月に Aibel Norway は ABB からドイツ沖の Dolwin ウィンドファーム向けのセミサブ式プラットフォームの設計・建設契約を受注した。同ユニットは合計 200 基以上の風車を持つ3つのウインドファームから集電するものである。契約価格は 17 億ノルウェークローネとされ、セミサブ式浮体の建造ヤードは公表されていないが、最終的組立はノルウェーの Haugesund で実施される。2012年に建造開始され、2014年夏に運転が開始される予定である。図表 5.12 に新プラットフォームの設計を示す。

図表 5.12 Aibel の浮体式変電施設プラットフォーム



受注発表の際、Aibel は「今後 10 年間にドイツ及び英国でこの種の変電施設プラットフォーム 20 基以上を受注することを期待している。弊社にとって、新しいエキサイティングなビジネス分野の始まりとなりえる」と述べている。

5.5 風車設置、保守作業船

多くの企業が洋上風車設置・保守作業船を運航または発注しているほか、設計計画がかなり進行した段階にある企業もある。この分野で積極的な企業と、それらの企業が開発した、又は提案している設計を以下に概説する。実質的にすべての設計は浅水域及び中水域に設置される着底式風車の設置及び保守作業用に設計されている。

Fred Olsen Windcarrier

ノルウェー企業である Fred Olsen は全長 131 メートルの洋上ウインドファーム向け設置作業船 2 隻の建造を発注している。14,000dwt の設置作業船は長期用船契約を確保しないまま建造されている。各船には DP（自動船位保持）、高速昇降システム、80 トンクレーン、航行速力 12 ノットの Voith Schneider プロペラ推進装置が搭載される。宿泊設備の収容定員は 80 人であり、うち 57 人は作業員向けである。図表 5.13 に同船舶の概念設計を示す。

図表 5.13 Fred Olsen Windcarrier 設置作業船の概念設計



報道記事によれば、同船は 3 億 2,000 万ドルで Lamprell に発注されており、同社の Jebel Ali 施設で建造され、引渡しは 2012 年第 2、第 3 四半期に予定されている。さらに 2 隻の建造のオプション契約が結ばれており、行使期限は第 1 船引き渡し 12 ヶ月後及び 18 ヶ月後とされている。

A2SEA 設置作業船

デンマークの A2SEA は 4 隻の洋上風車設置専用ジャッキアップクレーン船を保有、運用している。A2SEA によれば、同社は「業界で最も歴史が長く、キャパシティが大きく、経験豊かな知識ベースを有するトップ企業」である。

同社が運用する最大型の船舶は全長 91 メートルの自航ジャッキアップ Sea Jack であり、クレーン能力 800 トン、積載重量は 1,500～2,500 トンである。風車の大型化に対応するために設置作業船も大型化しており、図表 5.14 に示す新型船は全長 132 メートルの自航ジャッキアップで、800 トンクレーンと 6 基の 3020kW エンジンを搭載し、積載能力は 5,000 トン、作業員 35 人の宿泊施設を備えている。

図表 5.14 A2SEA 風車設置作業船



2011 年 6 月、A2SEA は大手北海シャトルタンカーオペレーターである Teekay と事業協力契約を締結した。A2SEA は事業協力の目的を「業界の今後の需要に備え、より水深の大きい、より困難な場所で作業が可能であり、将来の洋上風力発電に使用が予期されるトリポッドやジャケットのような、新たな概念の支持構造物を扱うことのできる浮体式輸送・設置作業船を設計、引渡、運用する」こととしている。また、A2SEA は「両社共に 2014 年までに革新的な船舶を市場に導入するべく、技術研究を通じて共同で浮体式設計を開発することを計画している」としている。

Wartsila/Aker Solutions 設置作業船

2011 年 3 月、Wartsila と Aker Solutions は高性能ジャッキアップ式ウインドファーム設置作業船の設計、建造、マーケティングにおいて協力することで合意した。図表 5.15 に示す船舶は全長 110m で、水深 50m において自己昇降能力を有し、有義波高 2.5 メートルで作業可能である。同船には 1,000 トンクレーンが搭載されるとともに、主機、補機の動力として LNG 使用が可能な Wartsila 製二元燃料エンジン 5 基が搭載される。

Wartsila は船舶設計と推進/動力装置エンジニアリングを担当し、Aker Solutions はトラス脚油圧自己昇降装置の開発を担当する。

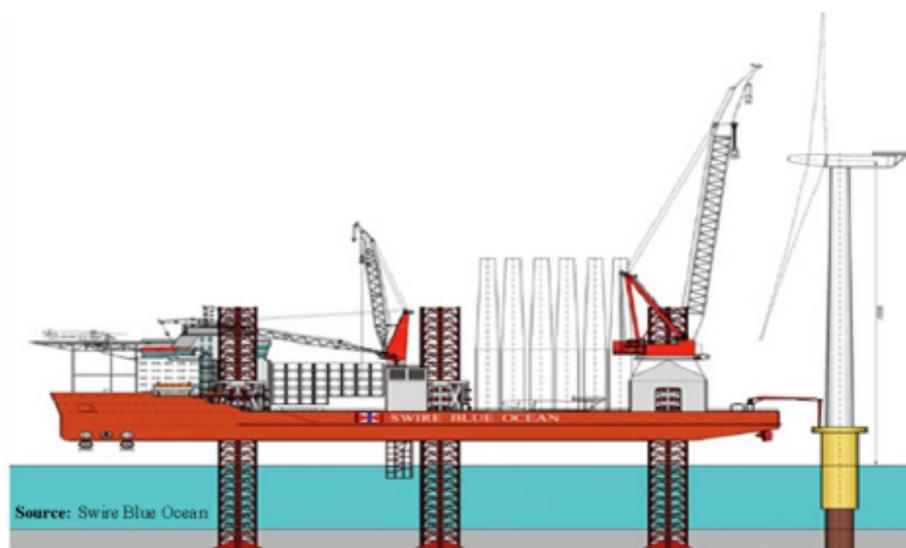
図表 5.15 Wartsila/Aker Solutions 洋上ウインドファーム設置作業船



Swire Blue Ocean

Swire Pacific Offshore Operation の一部である Swire Blue Ocean 社はサムソンに大型設置作業船を発注した。当該設置作業船はこれまでに建造された中で最大型であり、最大の能力を有する設置作業船となる。全長 161 メートル、最大運転水深 75 メートル、甲板面積 4,300 平方メートル、積載能力 8,400 トン、宿泊施設はシングルキャビンで 111 人を収容することができる。ホイスト能力は 1,200 トン、航行速度は 13 ノットで、3.4MW の船尾スラスト 4 基、2.2MW のリトラクタブルバウスラスタ 2 基、2.2MW のバウトネルスラスタ 2 基が、推進と DP2 ダイナミックポジショニングに使用される。

図表 5. 16 Swire Blue Ocean ウインドファーム設置作業船



新造中の設置作業船 Pacific Orca は、ドイツのエネルギー会社である Vattenfall から受注した、Dan Tysk 洋上ウインドファームにおける風車 80 基の設置作業に投入されることになっている。同船の引渡は 2012 年に予定されおり、当初の契約では 2 隻目の引渡は 2013 年とされているが、建造契約の条件は公表されていない。

RWE イノジー設置作業船

RWE イノジーはドイツのエネルギー会社 RWE の再生可能エネルギー部門であり、全長 100 メートルの洋上風車設置作業船 2 隻を発注した。設計積載能力(ペイロード)は各 4,200 トンであり、出力 5 メガワットの風車 4 セットを運搬する能力を有し、最大水深 45 メートルにおける風車設置が可能である。各船に DP2 が搭載されており、推進と位置保持には 1.6MW のリトラクタブルスラストが使われている。航行速度は最大 7.5 ノット、主クレーンの吊り上げ能力は 800 トン、シングルキャビンに 60 人収容可能な宿泊設備を有する。図表 5. 17 に建造中の第 1 船を示す。

図表 5.17 RWE イノジー 洋上ウィンドファーム設置作業船



大宇は、Wartsila/IMS が提供した基本設計を利用して、Geoje 造船所において同 2 隻を建造する契約を受注した。第 1 船の Victoria Mathias は 2011 年 3 月に、第 2 船の Friedrich Ernestine は 2011 年 4 月にそれぞれ進水しており、建造開始から進水までは 7 ヶ月間であった。2011 年第 4 四半期に運航が開始され、北海におけるドイツと英国のウィンドファームでの作業に投入される予定で、1 隻あたりのコストは約 1 億ユーロとされている。

Beluga Hochtief 洋上設置作業船

Beluga Shipping と Hochtief Construction の合弁事業である Beluga Hochtief は引渡し予定 2012 年の大型風車設置作業船を発注した。図表 5.18 に示す当該船舶は最大水深 50 メートルで高さ 120 メートルを超える洋上風車及びその他の構造物の設置、保守能力を有する。最大積載量は 8,000 トンで、1,500 トンクレーンを搭載し、航行速力は 12 ノットである。

図表 5.18 Beluga Hochtief 洋上ウインドファーム設置作業船



同船はポーランドの Crist 造船所で建造されているが、建造契約の条件に関する詳細な情報は公表されていない。同様の設計の作業船の追加建造も計画されているが、既存契約のオプションとなっているかどうかは定かではない。

現在、Beluga は洋上プロジェクト用船舶と起重機船を運用している。Hochtief は北海における風力発電ステーションの設計、施工、支持構造物設置を含む建設及び土木工学プロジェクトを手がけている。

Sea-Wind 保守作業船

英国の船舶設計会社である Offshore Ship Designers は船尾からアクセス可能な大型可浸ドックを搭載したサブマーシブルドック船の設計を開発した。最大有義波高 2.5 メートルの海況下で 1 日に最大 45 基の風車に保守作業を提供する能力を有する。同船は全長 187 メートルであり、船位保持システムとして DP2 を搭載し、作業員 200 人分の居住スペースを備え、倉庫面積、作業区域面積も広いものとなる。ターゲットとする市場は作業が困難な、離岸距離の大きいウインドファームにおける保守作業である。同船は母船として使用され、同船と風車の間の作業員の輸送には特別設計のカタマラン作業船が使用される。当該設計を図表 5.19 に示す。

図表 5.19 OSD Sea-Wind 洋上保守作業船

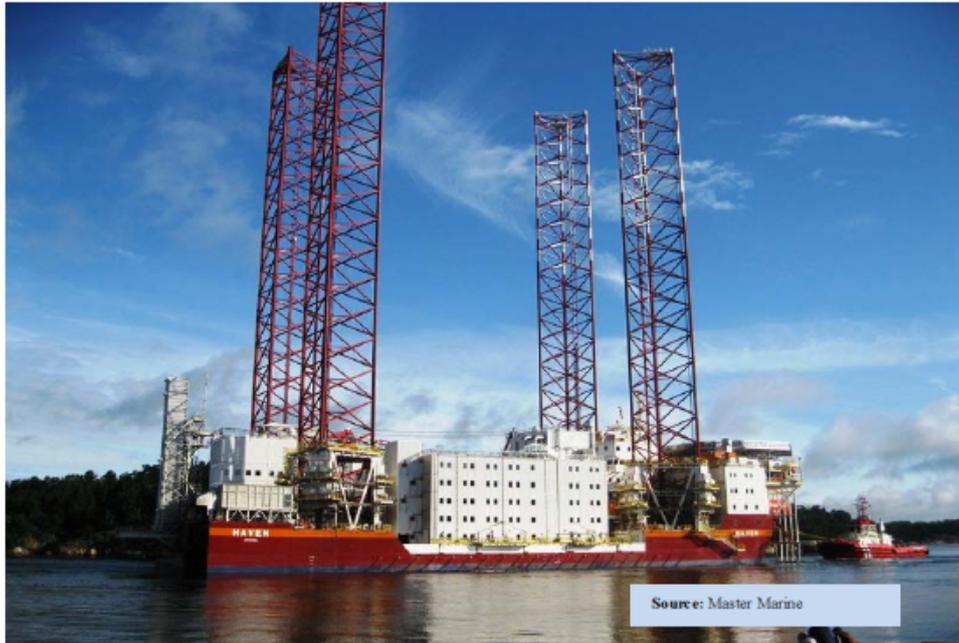


同社は「現在大手ウインドファーム開発事業者と話し合いを行っており、船舶建造の入札者を募集している」としている。

Master Marine

ノルウェーのオペレーターである Master Marine は、最大 7,200 トンの構造物の設置能力を有する、2 隻のオフショアジャッキアップ多目的船を発注した。同船は、もともと風車の運搬と設置を目的としていたが、第 1 船は北海の Ecofisk 石油/ガス田プロジェクト向けの洋上宿泊設備ユニットとして利用するために設計変更された。図表 5.20 にジャッキアップ宿泊設備ユニットとして建造された第 1 船を示す。第 2 船は英国沖の Sheringham Shoal ウインドファームの風車 88 基の設置作業契約向けに艤装されることになっていた。

図表 5.20 Master Marine ジャッキアップ多目的設置作業船

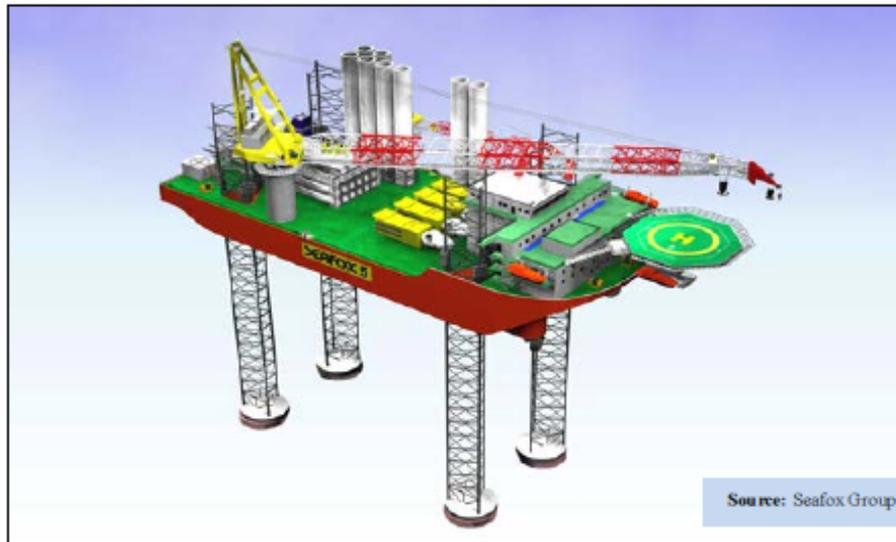


しかし、第1船、第2船ともに建造中に問題が発生した。建造契約はLabroy Offshoreに発注され、2隻はインドネシアのバタムのDubai World Graha造船所で建設されることとなっていたが、同造船所で暴動が発生し第1船の建造が遅れたため、同船はノルウェーのNymo造船所に移して完成させる必要が生じた。第2船も造船所における暴動により建造が遅れ、引渡しを受けることができなかつたため、風車設置作業契約がキャンセルされる事態となった。その後、Master MarineはLabroy Offshoreとの第2船建造契約もキャンセルし、払戻保証に従った支払いを求めた。

Seafox

北海における洋上宿泊・保守ジャッキアップのサプライヤーであるSeafox Groupは、Keppel Felsで洋上風力発電及び石油/ガス部門における設置及び支援サービス向けに設計された多目的船を建造中である。全長151メートルのSeafox 5のフリーデッキ面積は3,750平方メートルであり、変動甲板荷重7,000トンの積載能力を有する。同船の最大運転可能水深は65メートルとされ、3MWのスラスト4基を使用したKongsberg DP2システムが搭載されることになっている。船上には1,200トンクレーン1基が搭載され、1,500人を収容可能な宿泊設備を備えており、2012年半ばに引渡予定となっている。図表5.21に同船の概念設計を示す。

図表 5.21 Seafox ジャッキアップ風車設置作業船



Keppel Fels は同船の建造者であると同時に共同所有者として出資もしている。Keppel Fels と Seafox は共同所有を目的として出資比率 75/25 の合弁企業を設立した。同船はドイツ北海の発電容量 288 メガワットの Dan Tysk ウインドファームで支持構造物を設置する契約を受注しており、同契約額は 3,500 万ユーロを超える。

Bard SWATH テンダー

Bard は全長 27 メートルの SWATH 船をウインドファーム保守サービス契約で補給船（テンダー）として使用するために購入した。新造船である Natalia Becker は乗員 3 名に加え最大 12 名の作業員の輸送能力、さらに 4 トンの貨物の積載能力を有する。同船はドイツの Abeking & Rasmussen 造船所で建造され、2010 年に引き渡された。作業員は波高 2.5 メートルの海況でも同船から風車タワーに移動することができるとされている。Abeking & Rasmussen は同設計の船舶約 10 隻を SWATH パイロットボートとして建造した実績を持つ。

図表 5.22 Bard SWATH 洋上ウインドファーム補給船



Austal Wind Express

Austal は、洋上ウインドファームへの支援サービス向けの高速作業員運搬船として設計された、全長 21 メートルのカタマランを開発した。同船は最大航行速度 30 ノット、最大有義波高 2 メートルにおける凌波性を目標として設計されている。2011 年に英国の洋上支援サービス請負事業者である Turbine Transfers が同船 3 隻を発注した。3 隻の建造は Austal の Henderson 造船所で行われ、2012 年 5 月に第 1 船の引渡しが予定されている。さらに Austal は、ウインドファーム支援サービス用にシーステート 6 まで運転可能とされる SWATH 設計を開発した。

図表 5.23 Austal Wind Express ウインドファーム支援船



6. 購入意思決定要因

本章では、洋上風車市場における購入の意思決定につながる要因を概説する。これらの意思決定要因は運転実績のある浅水域及び中水域プロジェクトにおける実績に基づくものであるが、大水深風力発電プロジェクトが開発される場合、多分に同様の要因が働くと考えられる。

6.1 誰が調達先を決定するか

風車サプライヤー、支持構造物サプライヤー、ウインドファーム建設事業者、その他のウインドファームプロジェクト請負業者が調達先を決定するプロセスは、プロジェクトの構成と開発事業者により左右される。

例えば、エリー湖/オンタリオ湖に建設が提案されている風力発電プロジェクトでは、プロジェクトパートナー（ニューヨーク電力公社、Con Edison、ロングアイランド電力公社）が民間開発事業者から競争入札により提案を募集し、Apex Wind、Great Winds、NRG Bluewater Wind、Pattern Renewables、RES Americas Developments の5つの開発事業者が入札提案を提出した。プロジェクトパートナーがこれらの提案を検討し、各提案の利点と費用に基づいて意思決定が下された。結局いずれの提案も受け入れられなかったが、この競争提案プロセスは大型水上風力プロジェクトで一般的に採用される選考プロセスを示す好例である。

洋上（湖上）ウインドファーム開発の入札募集に応じた Apex Wind、Great Winds、NRG Bluewater 等の開発業者は、洋上風力発電機器の製造も設置も行わないのが一般的であるが、主要なプロジェクト契約について購入決定権を握っている。

しかし、ドイツのウインドファーム開発事業者である Bard は例外である。同社は洋上ウインドファームを社内のエンジニアリング事業及び設置能力を利用して建設している。前述したように、同社は自社プロジェクトに使用する設置作業船及び保守作業船を所有しているうえ、ドイツの Emden と Cuxhaven に生産施設を保有している。

6.2 調達先の選択に影響を及ぼす要因

洋上風車のサプライヤー選択に大きな影響を与えるのは、認知される信頼性、品質、サプライヤーとしての実績である。タービンの運転環境は極度に厳しく、洋上に設置されることにより保守修理が大きな課題となる。将来の問題の発生回避を望むプロジェクト開発事業者/所有者は、設置後にウインドファームの運転に支障が発生することをできる限り避けるために、割高であっても品質の高いタービンを選ぶと考えられる。

Siemens は信頼性、経験、品質を風車事業部門における市場戦略の柱としている。同社は洋上風車の厳しい運転環境要求に応えるために、高い製品要件を満たす能力を売り物にしている。Siemens によれば、「設置、運転、保守中の環境が厳しいこともあり、製品要求は高度である。安定した長期的な洋上パートナーシップを提供するためには、選りすぐりのサプライヤーが要求される。洋上風力発電に関して言えば、経験と信頼性の点で Siemens に匹敵するサプライヤーは存在しない」。つまり、Siemens 社は低価格を売り物にしていない。

現地調達率と国策もサプライヤーの選択に大きな影響を及ぼす。例えば、ノルウェーの政府出資プロジェクトの大部分はノルウェー企業に留保されると考えられる。米国における設置設備の調達についても同様である。米国ではジョーンズ・アクトにより、米国沖のウインドファーム建設、供給、及び/又は保守作業船は米国建造、米国所有、米国籍運航であることが義務付けられる可能性がある。外国籍船の使用の可否は、米国内の 2 地点間の運航と見なされるかどうかにかかわらず左右される。現時点ではこの点は曖昧であり、外国籍設置/保守作業船の使用の可否については、プロジェクトごとに米国税関局の判断が要求される。

6.3 システムサプライヤー間の既存の関係の影響

風車サプライヤーの中には一見、下請事業者と長期的ビジネス関係を築いているものもある。前述のように、Siemens は将来のタービン支持構造物供給に関して MT Hogaard と長期的な契約関係にあると思われる。Vestas もまた、支持構造物の外注先に Smulders を優先しているが、Van Oord や Per Aarleff のような Smulders 以外の企業にも発注している。

風車機器サプライヤーが、自社能力または下請け事業者との長期的関係を通じてプロジェクトの一貫サプライ能力を有している場合もある。例えば、Siemens は洋上風車プロジェクト向けの完全に統合されたサプライチェーンを保有している。前述したように、同社は各種風車機器、ブレード、制御システムを製造している。また、同社は業務範囲として、設置場所までの運搬、風車の設置、ウインドファームの長期的サービスと保守も提供している。し

かし、Siemens は自社でタービン支持構造物を建造しておらず、主として MT Hogaard に外注している。また、Siemens は顧客が設置作業船を提供し、同社が作業を行う請負業務範囲の狭い契約も選択肢として提供している。

風車サプライヤーがプロジェクト開発コンソーシアムに参加している場合もある。Siemens FinancialService の事業部門である Siemens Project Ventures は、デベロッパーと共に大型ウインドファームの資金調達と開発に参加した。例えば、英国沖の Hornsea 海域にウインドファームを開発している Smart Wind コンソーシアムは Siemens Project Ventures と Mainstream Renewable Power で構成されている。同プロジェクトは 32 ギガバットの総設備容量を計画しており、同コンソーシアムは総額 1 億 1,100 ユーロに達するとされる投資に向けての大型インフラ融資を提供すると同時に、プロジェクトの開発、許認可取得、建設、運転を行う。

6.4 洋上風車に適用される業界基準

洋上風車設置及び運転に関する基準を定めた様々な規則や設計指針も調達先の決定に影響を与える。

洋上風車構造物の荷重及び設計要件の指針は国際電気標準会議 (IEC) の 61400-3 規格で定められている。IEC は当該規格を次のように説明している。

IEC 61400-3 : 2009 は、洋上風車設置場所における外部条件の評価に関する追加事項を特定し、洋上風車の工学的健全性を確保するための基本的な設計要件を定めることを目的とする。この規格の目的は計画されている耐用年数を通してあらゆる障害による損傷の適切な防御レベルを示すことである。本規格は洋上風車の構造コンポーネントの工学的健全性に焦点を当てているが、制御及び防御メカニズム、内部電気システム、機械システムにもついても触れている。適切な IEC 及び ISO 基準、特に IEC61400-1 と併せて用いること。

複数の船級協会が IEC 基準をさらに拡充した洋上風車の詳細な指針を策定している。

- Germanischer Lloyd (GL) : Guideline for the Certification of Offshore Wind Turbines, Ed. 2005 (洋上風車認証ガイドライン)
- Det Norske Veritas (DNV) : DNV-OS-J101 Design of Offshore Wind Turbine Structures, June 2004 (洋上風車構造物設計)

- American Bureau of Shipping(ABS): Guide for Building and Classing Offshore Wind Turbine Installations, 2010 (洋上風車設置に係る建造及び船級検査ガイド)

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie は洋上ウインドファーム向けのガイドラインを作成しており、これは Design of Offshore Wind Turbines, December 27, 2007(洋上風車の設計)に含まれている。

洋上ウインドファームにおける作業員の安全を保護するための措置は、欧州電気標準委員会の Wind Turbines: Protective Measures: Requirement for Design, Operation and Maintenance, DIN (EN 50308)2004年7月版(作業員のための安全基準)に盛り込まれている。同基準には、安全で迅速な運転、検査、保守を提供するためのプラットフォーム、梯子、照明等の設備に関する具体的な要件が特定されている。

ウインドファームの作業員の安全についてのさらなる指針は、英国風力エネルギー協会の Guidelines for Health and Safety in the Marine Energy Industry, October 2008 (海洋エネルギー産業における健康と安全のためのガイドライン)に定められている。

風車の防火基準に関しては、ドイツの独立防火試験機関である VDS の Wind Turbines Fire Protection Guideline VDS3523EV 2008年7月版(風車防火ガイドライン)に定められている。

7. 日本の造船事業者及び機器メーカーにとっての参入機会

本章では、洋上風車市場における日本企業にとっての潜在的機会、特に浮体式構造物を利用した大水深ウインドファームの将来の市場に関連したビジネス機会について論じる。

7.1 大水深市場における将来の参入機会

大水深風力発電部門は初期段階にある。本報告書で取り上げた浮体式風車設計のいずれも商業化の段階に達していない。プロトタイプの実用試験段階に達した浮体式風車プロジェクトは1件(Hywind)にすぎず、その他のプロジェクトは研究及び概念設計の段階にある。すべてのプロジェクトは政府の支援を受けており、政府の支援なしには成り立たない。

大水深浮体式風車の設計および建造は日本の造船事業者と機器メーカーのターゲット市場となりえる。海洋構造物の設計と建造の豊かな経験を基にして、日本企業は大水深風車を支持する経済性の高い浮体式プラットフォームの設計を開発する潜在的な能力を有している。設計はサブマーシブル式浮体、スパー式浮体、TLP、大型バージ形状の浮体、その他の浮体に基づいたものでありえる。浮体には単体または複数の風車を搭載することが可能である。

具体的には、日本で開発されたメガフロートを大水深風車用プラットフォームとして使用することも考えうる。メガフロートを単体で、または複数をつなげて洋上に設置し、複数の風車と最適化された出力制御/出力分配システムを搭載することが可能である。メガフロートには水深制限がなく、広いデッキ面積は風車の据付けに適している。また、メガフロートは移動可能である。メガフロートに風車を搭載する技術的なフィージビリティの評価と、メガフロートを洋上風力資源からエネルギーを生成するために使用することが商業的に成り立つかどうかについては、さらなる研究が必要であろう。

本市場での成功への鍵は、厳しい海況で稼働し、他のエネルギー源と競争力のある価格で陸上の送電網（グリッド）にエネルギーを送ることができる、比較的安価な浮体式プラットフォームを開発することにある。当然のことながら、これは大きな課題である。

現時点で浮体式風車が商業的に成り立つかどうかは不明である。克服すべき問題を考慮すれば、見込みは薄い。商業的に実行可能かどうかは、比較的安価な浮体プラットフォームと効率的な陸上までの送電システムを開発できるかどうかにかかっている。

日本の造船事業者及び機器メーカーにとってのもうひとつの潜在的な機会は、大水深のサイトで風車を設置・保守するための専用作業船の建造である。係る作業には大型で高性能の設

置作業船が必要とされる。現時点では、新造大型設置作業船の設計は水深 50～75 メートルで作業能力を有するジャッキアップ式に焦点が当てられている。さらに沖合での作業には、ジャッキアップ式以外の船舶設計が必要とされる。

水深 75～100 メートルの海域で作業を行う将来の大水深風車設置作業には、セミサブ式浮体が採用される確立が高い。係るユニットの設計及び建造は新たな市場機会となりえる。

7.2 市場参入への障壁

ジョーンズ・アクトにより、米国沖のウインドファームの建設及び保守市場への外国建造船の参入が阻まれる可能性がある。米国内航に米国建造、米国所有、米国籍運航船の使用を義務づけるジョーンズ・アクト要件が、洋上タービン設置・保守事業に影響を及ぼす可能性がある。風車設置作業に非米国籍船の使用が認められるかどうかは、設置作業船が米国外洋大陸棚上の 2 地点間を移動するかどうかについての解釈にかかっている。タワーのみの設置は輸送にあらず、おそらく非米国籍／建造船の使用が可能かもしれない。しかし、船舶が陸から洋上の設置場所に補給品を輸送する場合は内航とみなされるだろう。

ジョーンズ・アクト要件は非常に複雑であり、非米国籍船を特定の状況下で洋上プロジェクトに利用できるかどうかについては、米国税関局の判断が必要となるであろう。米国外の造船所で船舶を建造する機会があるかどうかは、米国税関局の判断に左右される。

欧州では外国建造船の使用を禁止する正式の規則は存在しないが、自国の造船所を優先する国策が存在する。たとえば、ノルウェー沖のウインドファームで使用される設置作業船の建造にはノルウェーの造船所が優先される可能性が高い。

7.3 洋上風車市場に参入、サプライヤーとなるための選択肢

米国大水深ウインドファーム向け設置・保守作業船の建造市場が米国造船事業者に制限されることを前提とした場合、米国造船事業者とジョイントベンチャーを形成して船舶設計と建造で協力する機会がある。複数の米国造船所が石油及びガス部門向けに浮体式構造物を建造、改造した豊かな経験を保有している。メキシコ湾に所在する GIFI (Gulf Island Fabrication, Inc) とシグナルインターナショナルがその例である。

特にシグナルは、浮体式風車設計の共同開発のパートナーとしてのポテンシャルがある。シグナルはメキシコ湾岸 5 カ所に工場を保有し、洋上風車支持構造物の建造市場に参入することに関心を表明している。しかし、同社は着底式風車向けのジャケット建造市場に焦点を置いている。シグナルの経営陣が浮体式構造物の設計・建造に実績のある日本企業との提携に関心を示す可能性がある。

欧州でも現在洋上風車部門で事業を行っている地元企業と合弁事業を形成することが考えうる。主要企業の多くは本報告書の第 5 章に記載されている。特に、浮体式プラットフォームの設計開発を手がけているが開発を推し進めるだけの技術的資源に欠けている小規模な 1 社の企業もしくは複数の企業との関係を構築する、または買収することは、興味深い選択肢となりうる。



この報告書はボートレースの交付金による日本財団の助成金を受けて作成しました。

洋 上 風 力 発 電 調 査

2011 年度 JSC 特別調査事業-01

2012 年（平成 24 年）3 月発行

発行 日本船舶輸出組合

〒105-0001 東京都港区虎ノ門 3-2-2 虎ノ門 30 森ビル

TEL 03-5425-9673 FAX 03-5425-9674

JAPAN SHIP CENTRE (JETRO)

2nd Floor, 6 Lloyd's Avenue,

London EC3N 3AX, United Kingdom

財団法人 日本船舶技術研究協会

〒107-0052 東京都港区赤坂 2-10-9 ラウンドクロス赤坂

TEL 03-5575-6426 FAX 03-5114-8941

本書の無断転載、複写、複製を禁じます。