

NEDO

再生可能エネルギー 技術白書

第2版

再生可能エネルギー普及拡大にむけて克服すべき課題と処方箋

独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 編
New Energy and Industrial Technology Development Organization

第1章 再生可能エネルギーの役割

第2章 太陽光発電

第3章 風力発電

第4章 バイオマスエネルギー

第5章 太陽熱発電・太陽熱利用

第6章 海洋エネルギー

第7章 地熱発電

第8章 中小水力発電

第9章 系統サポート技術

第10章 スマートコミュニティ



第3章 風力発電

3.1	技術の概要.....	4
3.1.1	技術の俯瞰.....	4
	(1) 風力発電の原理.....	4
	(2) 風力発電機の形式.....	5
	(3) 陸上・洋上ウィンドファーム ³ の主要構成要素.....	6
	(4) 風力発電システムの主要構成要素.....	7
3.1.2	システム価格, 発電コスト.....	9
	(1) システム価格.....	9
	(2) 発電コスト.....	10
	(3) 風力発電のコスト構造.....	12
3.2	導入ポテンシャル, 導入目標, 導入実績.....	16
3.2.1	導入ポテンシャル.....	16
	(1) 世界.....	16
	(2) 日本.....	18
	(3) 欧州.....	23
	(4) 米国.....	24
	(5) 中国.....	25
	(6) インド.....	26
3.2.2	導入目標.....	27
	(1) 日本.....	28
	(2) 欧州.....	28
	(3) 米国.....	30
	(4) 中国.....	31
	(5) インド.....	31
3.2.3	導入実績.....	32
	(1) 世界.....	32
	(2) 日本.....	35
3.3	世界の市場動向.....	36
3.3.1	市場の現状および将来見通し.....	36
3.3.2	風力発電機メーカーの合併・新規参入の歴史.....	38
3.3.3	国別・企業別市場シェア.....	40
	(1) 世界市場.....	40
	(2) 日本市場.....	41
3.3.4	洋上風力のサプライチェーン.....	42
	(1) 洋上風力におけるサプライチェーン.....	42

(2) 洋上風力市場における開発事業者の動向.....	44
3.4 各国の技術開発動向	45
3.4.1 技術開発の歴史と近年の動向.....	45
(1) 技術開発動向の概観.....	45
(2) 単機容量およびウィンドファームサイズの大型化	47
(3) ドライブトレイン・発電機の動向	48
(4) 系統連系・制御に係る技術開発.....	50
3.4.2 主要国の技術開発動向.....	52
(1) 日本の技術開発動向.....	52
(2) 日本メーカーのビジネス動向	54
(3) 欧州の技術開発動向.....	56
(4) 米国の技術開発動向.....	58
(5) 欧米メーカーのビジネス動向	60
(6) その他新興国などの動向.....	63
(7) 新興国メーカーのビジネス動向.....	65
3.4.3 洋上風車に係る技術開発動向.....	67
(1) 風車タービンに係る技術開発動向	67
(2) 基礎に係る技術開発動向.....	72
(3) 系統連系に係る技術開発動向	74
3.5 今後に向けた課題と克服方策	75
3.5.1 発電コストの低減.....	76
3.5.2 設置可能地域の拡大	77
3.5.3 洋上風力発電の技術開発の推進	77
3.5.4 系統連系対策.....	78
3.5.5 環境調和と地域協調	78
3.5.6 まとめ.....	79

第3章 風力発電

3.1 技術の概要

3.1.1 技術の俯瞰

(1) 風力発電の原理

風力発電は、風の運動エネルギーを風車（風力タービン）によって回転エネルギーに変え、その回転を直接、または増速機を経た後に発電機に伝送し、電気エネルギーに変換する発電システムである。

風が持つ運動エネルギーは風を受ける面積に比例し、風速の3乗に比例して増大する性質を持っており、理論的には風速が2倍になると風力エネルギーは8倍になる。したがって、より風の強い場所に設置すること、大きい翼で効率良く風を受けることが重要となる。

また、風力発電は風の運動エネルギーの最大30～40%程度を電気エネルギーに変換できるなど、効率の高いことが特徴に挙げられる。ただし、風のエネルギーを風車の回転エネルギーに変換する効率（パワー係数）は風車の形式によって異なる。また、効率は、風速と翼の先端の速度の比（周速比）によって異なることから、風速に適した回転速度であることも重要になる。



図 3-1 陸上ウィンドファーム
（新出雲風力発電所）

出典：ユーラスエナジーホームページ



図 3-2 洋上ウィンドファーム
（London Array）

出典：London Array ホームページ

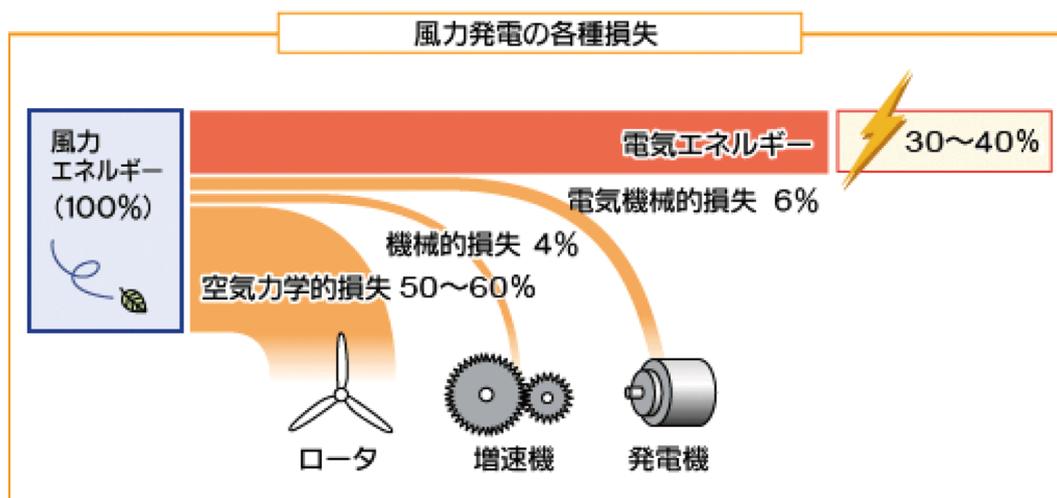


図 3-3 風力発電の各種損失と効率

出典：NEDO ホームページ

NEDO「風力発電導入ガイドブック（2008年2月改訂第9版）」では、表3-1に示すような定格出力別の呼称が挙げられている。本白書では表3-1に示す定義を用いることとし、主に中型風車、大型風車について取り上げる。

表3-1 定格出力からみた風車の分類基準

分類	定格出力	
マイクロ風車	1 kW 未満	
小型風車	1 kW～50 kW 未満	
中型風車	I	50 kW～500 kW 未満
	II	500 kW～1,000 kW 未満
大型風車	1,000 kW 以上	

注：風車の分類は便宜的にわけたものである。

出典：「風力発電導入ガイドブック 2008」（2008, NEDO）

(2) 風力発電機の形式

風力発電機の形式は、回転軸の方向によって「水平軸」と「垂直軸」に大きく分けられる。さらに作動原理によって、翼の揚力を利用して高速回転を得る「揚力形」と、風が押す力で低速回転する「抗力形」に分けられる。中型・大型風車は、水平軸風車の3枚翼プロペラ式図3-4が主流である。

プロペラ式の中には、アップウィンド方式とダウンウィンド方式がある（図3-6）。アップウィンド方式は、ロータの回転面が風上側に位置しており、ブレードがタワーによる風の乱れの影響を受けにくい。大型の風車において主流となっている。一方、ダウンウィンド方式は、回転面がタワーの風下側に位置するため、ブレードを風向きに合わせるヨー駆動装置が不要であり、小型風車への適用例が多いが、大型機でのダウンウィンド方式の風車も近年、開発されている¹。

垂直軸風車図3-5については、回転軸が風向きに対して垂直であり、風向きに対する依存性がない。また、発電機などの重量物を地上付近に設置できることや、ブレードの製造がプロペラ式と比較して容易であるなどの利点がある。一方、自己起動が困難である²他、回転数制御が難しいこと、水平軸風車と比較して効率が劣るために装置が大型化する傾向があること、などの欠点がある。



(2.4 MW 機)

図3-4 水平軸風車の例

出典：三菱重工業ホームページ



(1.0 kW 機)

図3-5 垂直軸風車の例

出典：日本小形風力発電協会ホームページ

- 富士重工業製のSUBARU80/20（2.0MW機）はヨー制御付きのダウンウィンド方式の風車である。なお、富士重工業の風車部門は、2012年7月に日立製作所に譲渡された。
- 起動時に大きなトルクが必要。トルクは、回転軸を中心にはたらく回転軸回りの力のモーメント（力の大きさと回転軸からの距離の積）。

第3章 風力発電

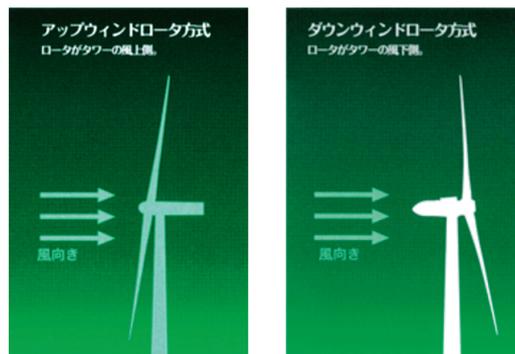


図 3-6 アップウインド方式とダウンウインド方式のロータ位置の違い

出典：NEDO ホームページ

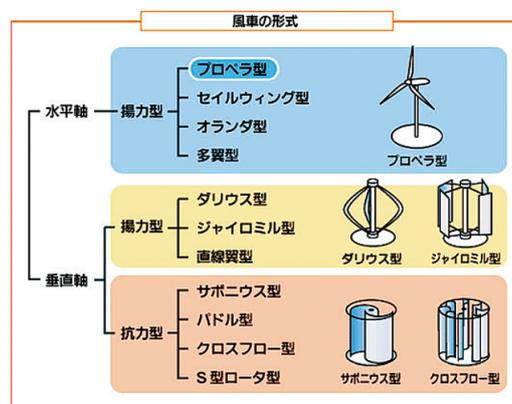


図 3-7 風車の形式

出典：NEDO ホームページ

(3) 陸上・洋上ウィンドファーム³の主要構成要素

陸上ウィンドファームと洋上ウィンドファームの主要構成要素を図 3-8 に示す。

陸上ウィンドファームは、風力発電機、風力発電機の運転/停止・監視・記録を行う運転監視施設、変電所、電力を送る送電ケーブルなどによって構成される。風力発電機によって発電された電力は、陸上変電所を経て電力系統に送られる。

運転監視施設では、各風力発電機のリアルタイムのデータ収集によって、風力発電機の運転状況の把握や異常の検知などを行い、風力発電機の運転/停止を制御している。変電所には、系統に送る電気や系統からの電気の電圧を変換する変圧器や、風力発電システムの異常、系統事故時に設備を系統から切り離す系統保護装置などが設置されている。

洋上ウィンドファームは、風力発電機、運転監視施設、陸上変電所、送電ケーブルに加え、海底送電ケーブル、港湾施設、洋上変電所などが必要となる。

洋上ウィンドファームの建設や運転・保守に当たっては、作業船の出航・停泊や関連設備を運送・保管する港湾施設が必要となる。また、海底送電線のコスト削減などを目的として、洋上変電所が建設される場合もある。

3 ここでは、風力発電システムを複数基配置（ファーム化）した発電所を「ウィンドファーム」と定義する。

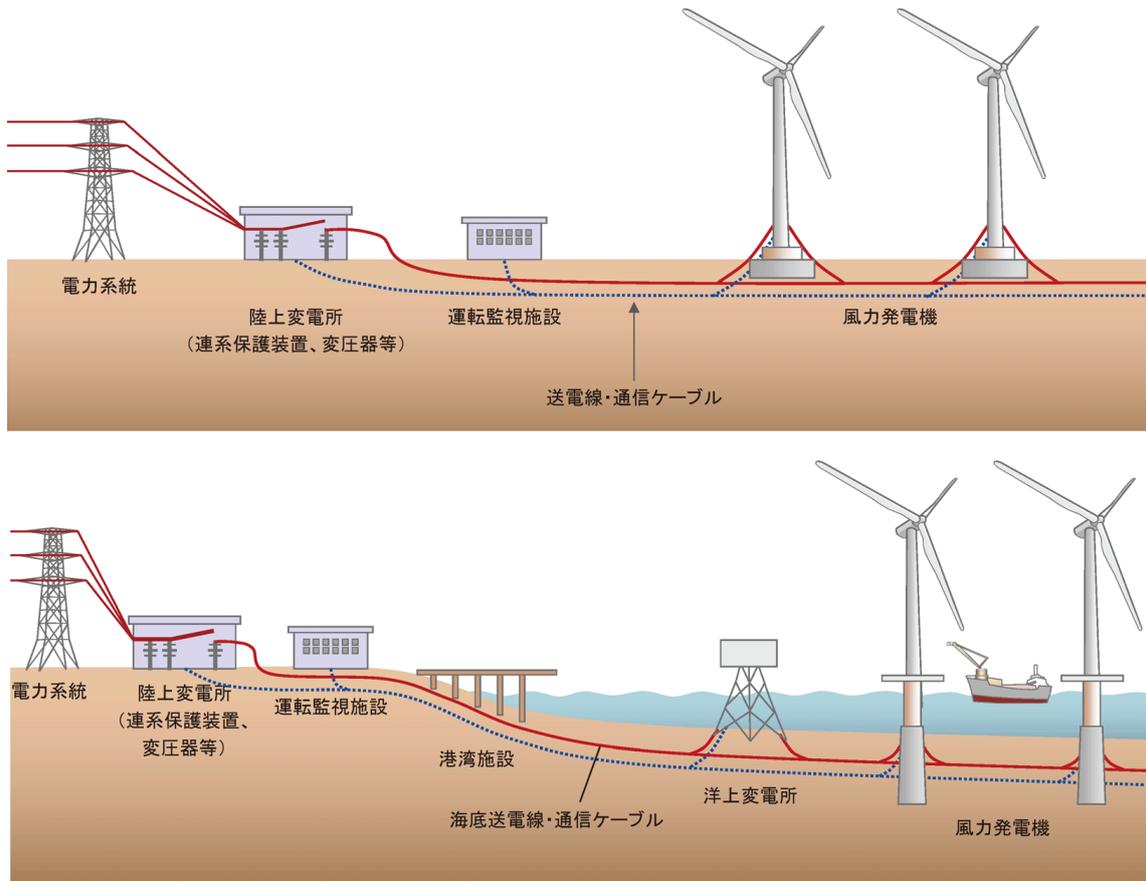


図 3-8 ウィンドファームの主要構成要素（上：陸上 下：洋上）

(4) 風力発電システムの主要構成要素

代表的な陸上および洋上風力発電機の構成を図 3-9 に示す。

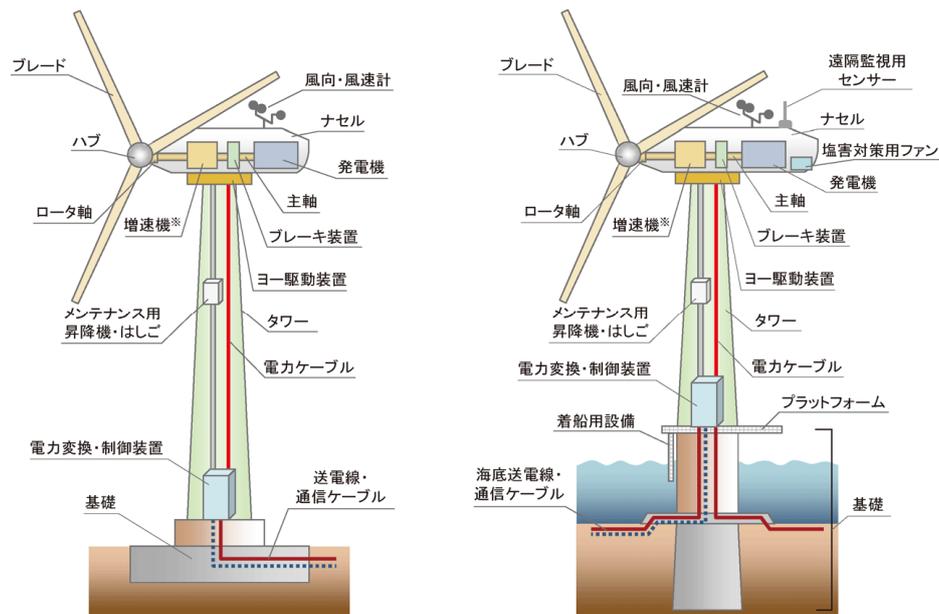


図 3-9 風力発電機の主要な構成要素（左：陸上風力 右：洋上風力）

出典：風力発電導入ガイドブック（2008, NEDO）

第3章 風力発電

表 3-2 陸上および洋上風力発電システムの主要な構成要素

構成要素	概要	
ロータ系	ブレード	回転羽根, 翼
	ロータ軸	ブレードの回転軸
	ハブ	ブレードの付け根をロータ軸に連結する部分
伝達系	主軸	ロータの回転を発電機に伝達する
	増速機	ロータの回転数を発電機に必要な回転数に増速する歯車(ギア)装置(増速機のない直結ドライブもある)
電気系	発電機	回転エネルギーを電気エネルギーに変換する
	送電ケーブル	発電機からの電力を送電する
	電力変換・制御装置	直流, 交流を変換する装置(インバータ, コンバータ)等
	変圧器	系統からの電気, 系統への電気の電圧を変換する装置
	系統保護装置	風力発電システムの異常, 系統事故時等に設備を系統から切り離し, 系統側の損傷を防ぐ保護装置
運転・制御系	出力制御	風車出力を制御するピッチ制御あるいはストール制御
	ヨー制御	ロータの向きを風向に追従させる
	ブレーキ装置	台風時, 点検時等にロータを停止させる
	風向・風速計	出力制御, ヨー制御に使用されナセル上に設置される
	運転監視装置	風車の運転/停止・監視・記録を行う
支持・構造系	ナセル	伝達軸, 増速機, 発電機等を収納する部分
	タワー	ロータ, ナセルを支える部分
	基礎	タワーを支える基礎部分

出典:「風力発電導入ガイドブック 2008」(2008, NEDO)

1) 陸上風力発電システム

陸上風力発電システムは、基礎工事が行われた上にタワーが設置され、タワー上にナセルとブレードが組み上げられている。ナセルの中には増速機や発電機、ブレーキ装置、ロータ軸、主軸が格納されており、ブレードはハブによってロータ軸に連結されている。タワー内には、電力ケーブルおよびメンテナンス用の昇降機・はしごなどが設置されている。

ブレードは1枚～複数枚の例があるが、一般に方位制御時に振動が起きにくく安定性が良いことから3枚ブレードが現在の主流になっている。ロータの回転数は毎分数十回転程度であり、風力発電で広く用いられている誘導発電機の回転数は一般に毎分1,500回転(50Hz用)または1,800回転(60Hz用)であるため、歯車(ギア)を用いて増速させる。一方、同期発電機の場合は増速機のない直結駆動が多い。

風はエネルギー密度が小さいだけでなく、風向や風速が絶えず変動するため、その風をエネルギー源とする風力発電機は安定した発電出力を得にくい。そこで、アップウィンド方式の風力発電システムには、常に羽根の回転面を風上に向けるためのヨー駆動装置や出力を制御するピッチ駆動装置の機能などが備わっており、より多くの安定した出力が得られるように工夫されている。また、低風速でも効率の良い発電が可能となるように発電機の極数を増やしたり、大小2つの発電機を備えて風速に合わせて発電機を切替えたりするなど、幅広い風速領域で効率良く発電できる風力発電システムもある。

2) 洋上風力発電システム

最近では、陸上における適地が減少していることや、陸上と比較して洋上は風況が安定していることから、洋上風力発電システムが注目されており、欧州を中心に大規模な洋上ウィンドファームの建設が始まっている。洋上風力発電は、海底に直接基礎を設置する着床式と、浮体を基礎として係留などで固定する浮体式に分類されるが、浮体式は技術開発の段階で、実証試験用を除き、

現在導入されている洋上風力はすべて着床式である。現在、さまざまなタイプの基礎構造が考案・使用されている。

ナセルおよびブレード部の構成要素は、陸上風力発電機とほぼ同様であるが、洋上風力では特に厳しい海洋環境に対応するため、浸水対策や塩害対策用フィルタなどが必要となる。また、陸上風力と比較して、洋上風力はウィンドファームまでのアクセスやメンテナンス作業が困難かつ高コストであることから、適切な運用・管理による風車の故障の防止や、メンテナンスコストの削減が採算性確保のために重要となる。風車の故障防止に当たっては、日常的な監視による風車の運転状況の適時把握、異常の検知などのため、遠隔監視制御システムの搭載が重要となるだけでなく、メンテナンス用のプラットフォーム、着船用設備が必要となる。

3.1.2 システム価格、発電コスト

(1) システム価格

近年の陸上風力のシステム価格⁴は、世界平均で約 11～26 万円/kW の水準にある。地域別に見ると、欧州の約 17 万円/kW や北米の約 16 万円/kW と比較して、日本は 20～35 万円/kW と高い水準にある。また、中国のシステム価格は 11 万円/kW と比較的低い。

風力発電のシステム価格は 1980 年代以降の量産化によって大きく低下したが、2004 年から上昇傾向に転じた。これは主に、タービンやギアボックス、ブレード、ベアリングなどの供給不足や、鋼材価格の上昇が原因とされている。タービン価格の推移を図 3-10 に示す。しかし、2009 年以降にはシステム価格が再び下落傾向に転じた。これは、鋼材価格が下がったこと、供給不足が解消され始めたこと、製造業者間の競争が激しくなったことなどが原因と考えられている。

洋上風力のシステム価格は、世界平均で約 36～56 万円/kW と、陸上風力の約 2 倍から 3 倍の水準にある。一般に、洋上風力のシステム価格は、基礎工事や係留コストが約半分を占めており、これは陸からの距離や水深によって異なる。初期に設置された洋上風力のシステムは比較的浅い海に設置されていたものの、2010 年以降には水深が 20m を超える海域に設置されるようになっていたため、それに伴ってシステム価格が上昇傾向にある。

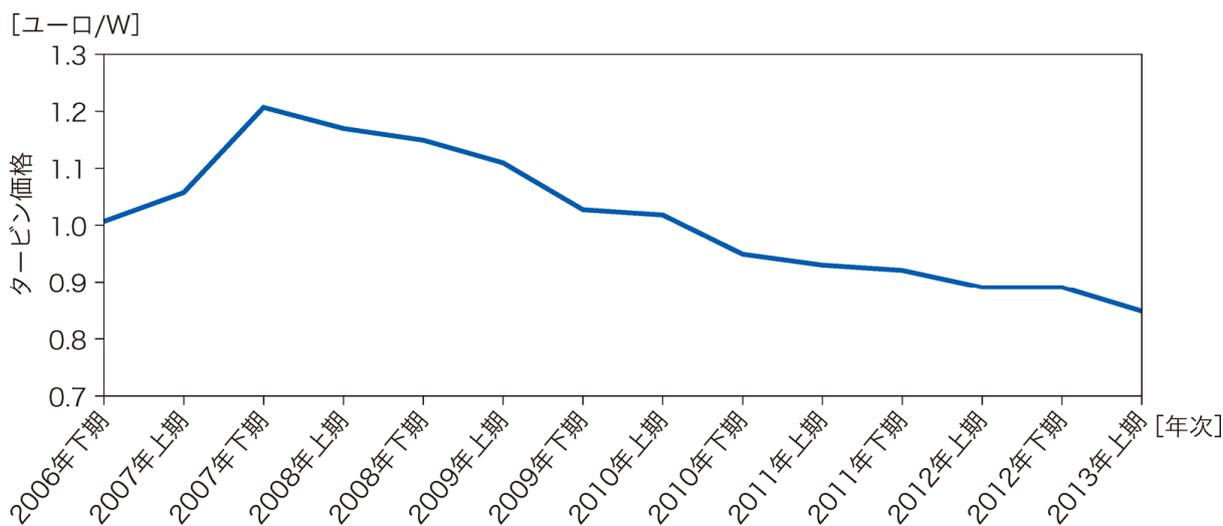
⁴ 設備費（風力発電装置に掛かる費用）、設置に掛かる諸経費（施工、系統連系などに掛かる費用）の合計をシステム価格と定義する。

第3章 風力発電

表 3-3 世界の風力発電のシステム価格

	国・地域	システム価格[万円 /kW]*	出典など
陸上風力	世界	11~26 (1,100~2,600 ドル /kW)	Technology Roadmaps Wind energy (2013, IEA)
	欧州	17 前後 (1,700/kW)	
	北米	16 前後 (1,600 ドル /kW)	
	中国	11 前後 (1,100 ドル /kW 前後)	
	日本	20~35	「コスト等検証委員会報告書」(2011, エネルギー・環境会議 コスト等 検証委員会)
洋上風力	世界	36~56 (3,600~5,600 ドル /kW)	Technology Roadmaps Wind energy (2013, IEA)
	英国	31 前後 (3,100 ドル /kW)	Technology Roadmaps Wind energy (2009, IEA)
	ドイツ	47 前後	
	オランダ	(4,700 ドル /kW)	
	日本	28.3~70	「コスト等検証委員会報告書」(2011, エネルギー・環境会議 コスト等 検証委員会)

*: 換算レートは、1 ドル=100 円を使用。日本における洋上風力のシステム価格のみモデルプラントにおける試算値、他は実績値。



注：アジア製の原動機のデータは含まない

図 3-10 陸上風力発電のタービン価格の推移

出典：Technology Roadmaps Wind energy (2013, IEA) より NEDO 作成

(2) 発電コスト

表 3-4, 図 3-11 に世界および日本の風力発電の発電コストを示す。

世界の陸上風力の発電コストは、おおむね 10 円/kWh 前後であり、従来型電源に対してコスト競争力を持つ水準にある。風況が良く(稼働率 40%程度)、システム価格が安い場合には、5 円/kWh 前後の発電コストを実現する場合もある。洋上風力のシステム価格は陸上風力の約 2 倍であるが、陸上よりも風況が良く、約 50%程度多い発電量を得られるため、陸上風力とほぼ同水準の発電コスト(約 8~15 円/kWh 程度)が実現可能とされている。なお、この値は水深が 50m 未満の遠浅

海域に広く導入が進んでいる欧州の着床式洋上風力を前提としたものであり、浮体式洋上風力の発電コストが同水準の発電コストを達成可能かは留意が必要である。

日本の風力発電の発電コストについては、国家戦略室のコスト等検証委員会で検討が進められており、陸上風力は好条件が揃った場合で約 10 円/kWh と、火力（石炭、LNG）と同程度の発電コストになり得るという試算結果が示されている。洋上風力については、9.4～23.1 円/kWh と、陸上風力よりも高めの発電コストになると試算されている。同委員会の報告書では、洋上風力について、送電線の敷設コストが陸上より高価になることが指摘されている。

表 3-4 風力発電の発電コスト

	場所	発電コスト [円/kWh]*1	出典等
陸上風力	世界	3.2～12.8*2 (0.04～0.16 ドル/kWh)	Deploying Renewables - Best and Future Policy Practice (2011, IEA)
		5.6～10.4 (0.07～0.13 ドル/kWh)	Technology Roadmaps Wind energy (2009, IEA)
	日本	9.9～17.3*3	「コスト等検証委員会報告書」(2011, エネルギー・環境会議 コスト等 検証委員会)
洋上風力	世界	8.0～15.2 (0.1～0.19 ドル/kWh)	Deploying Renewables - Best and Future Policy Practice (2011, IEA)
		8.8～10.5 (0.11～0.131 ドル/kWh)	※ 2005～2008 年の価格 Technology Roadmaps Wind energy (2009, IEA)
	日本	9.4～23.1*2	「コスト等検証委員会報告書」(2011, エネルギー・環境会議 コスト等 検証委員会)

※1：換算レートはドル＝80 円を使用。

※2：建設費 1,400～2,500 ドル/kW, O&M コスト 建設費の 2.5%, 全負荷時間 1,800～3,500 時間/年, 加重平均資本コスト 6.5%, 稼働年数 20～25 年と仮定。

※3：建設費 20～35 万円/kW, 設備の廃棄費用 建設費の 5%, O&M コスト 人件費・修繕費（建設費の 1.4%）諸費（建設費の 0.6%）業務分担費（直接費の 14%）の和, 設備利用率 陸上風力 20%・洋上風力 30%, 稼働年数 20 年, 割引率 3%と仮定。

出典：NEDO 作成資料

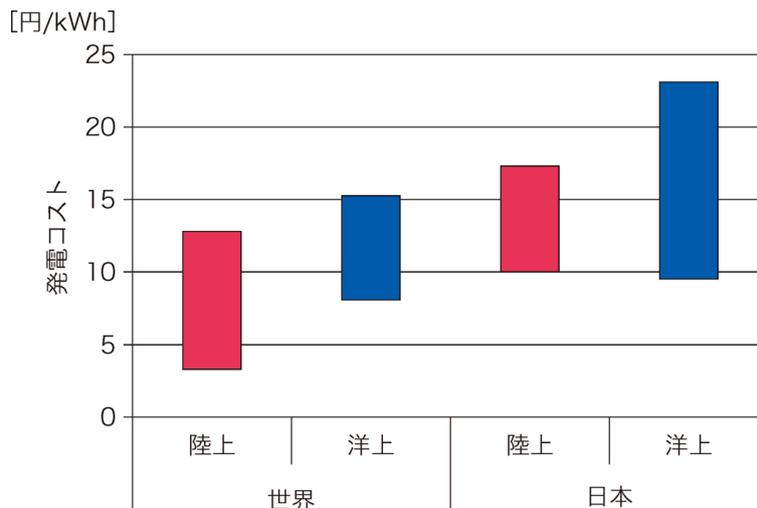


図 3-11 世界と日本の風力発電の発電コスト比較

出典：表 3-4 より NEDO 作成

第3章 風力発電

(3) 風力発電のコスト構造

陸上風力と洋上風力のシステム価格の内訳例を図 3-12 に示す。なお、ここで紹介する数値は一例であり、プロジェクトごとにコスト構造が異なることに留意が必要である。

陸上風力と洋上風力を比較すると、陸上風力はシステム価格に占める構造体（タービン・電気設備、基礎など）の比率が約 8 割を占めており、風力発電機のコスト削減が市場競争力に直結する。一方、洋上風力は、構造体以外の基礎、系統連系や設置に掛かるコストが半分近くを占めており、構造体以外の各構成要素において、コスト削減余地が多く残されている。

また、実運用に当たっては、運転・保守費の削減が重要となる。実際の価格は国や地域によって大きく異なるが、陸上風力についてはライフサイクルコストの 20～25% を占めるとするデータがある。運転・保守費は毎年一定ではなく、設置・運用から年を経るにつれ、各種不具合などの発生によって増加する傾向がある。米国における運転・保守費の経年劣化を図 3-13 に示す。

図 3-14 に洋上風力の発電コストの内訳を示す。洋上風力の運転・保守費は、現状では非常に高く、年間 122,400～178,000 ドル/MW（約 980～1,420 万円/MW）近くになるとの報告もある。運転・保守費削減のため、故障の防止や効率的なメンテナンスの実施などが重要課題となっている。欧州を中心に導入が進んでいる洋上風力は、1990 年以降、初期の実証研究段階を経て、2000 年以降、導入が進められてきた。2010 年以降は 200～700MW 級の洋上ウィンドファームが導入され始めた。洋上ウィンドファームの導入に際して必要となるコストを示す初期費用については、初期の実証研究を除き、2010 年以降は概ね 20～40 万円/kW であったのに対し、2010 年以降は概ね 40～80 万円/kW へとコスト高の傾向にある（図 3-15）。その背景として、洋上ウィンドファームの設置海域を示す離岸距離や水深が広がり、洋上風車を支持する基礎が水深に対応するために大型化すると共に、遠方で施工を行う船舶の傭船費用等が増加することに起因している（図 3-16）。初期費用が増加する一方、離岸距離が広がることにより、沿岸部に比べ好風況な海域での発電が可能となり、設備利用率が向上し、発電コストを低減する等のメリットを享受することが可能になる。

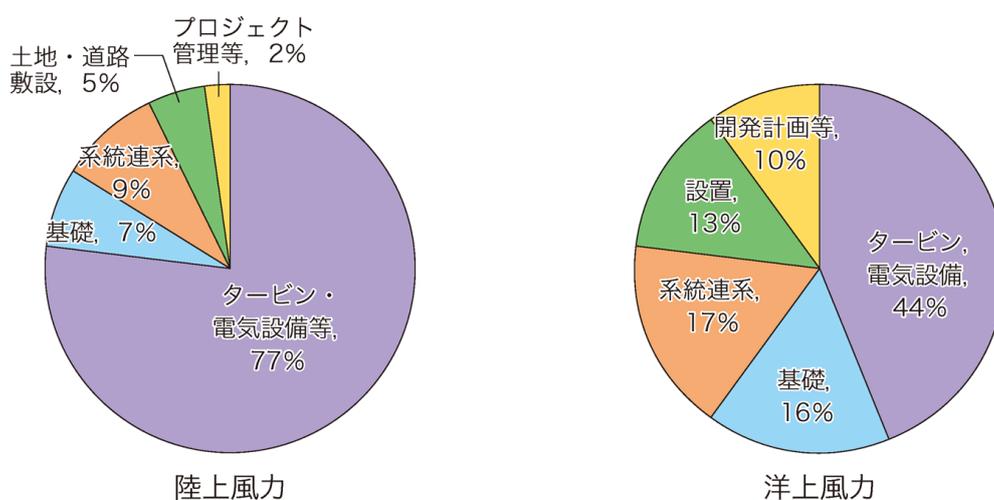


図 3-12 システム価格の内訳

注：上記はシステム価格であり、実運用に当たってはシステム価格に加え、運転・保守費が必要となる
 出典：“The Economics of Wind Energy”（2009, EWEA），“Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series Wind Power”（2012, IRENA）より NEDO 作成

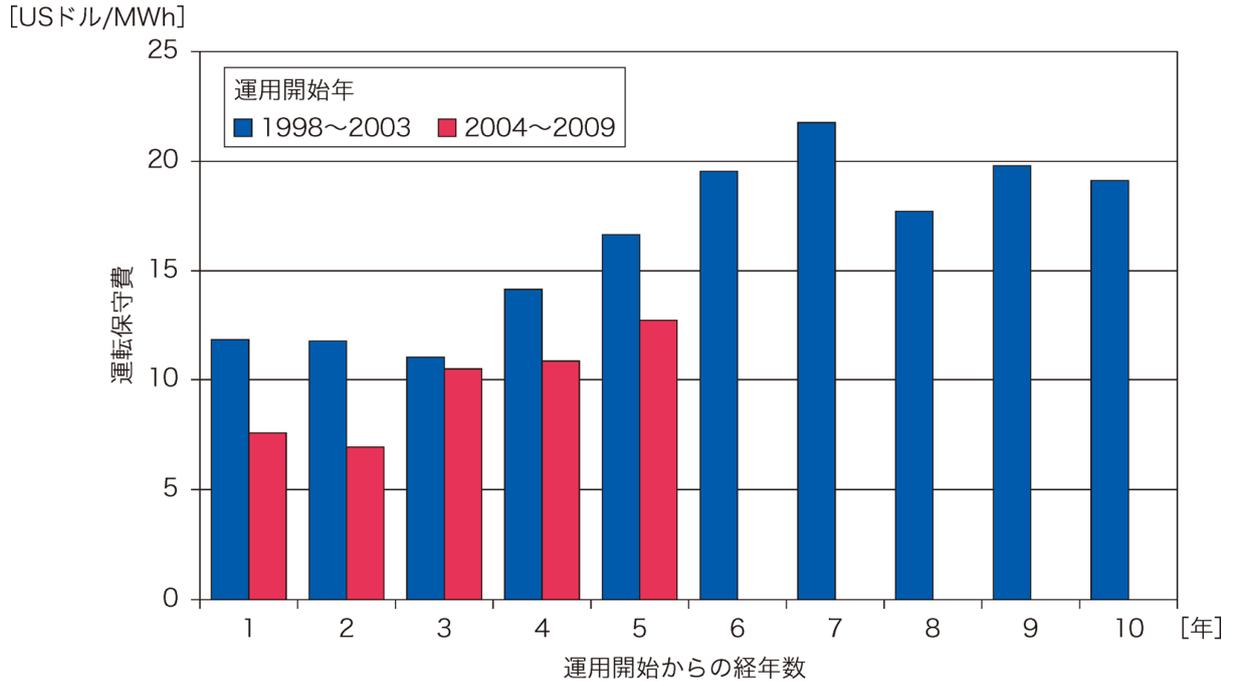


図 3-13 米国における運転・保守費の経年変化 (陸上風力)

注：緑は 1998~2003 年に運用開始，赤は 2004~2009 年に運用開始

出典：“Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series Wind Power” (2012, IRENA) より NEDO 作成

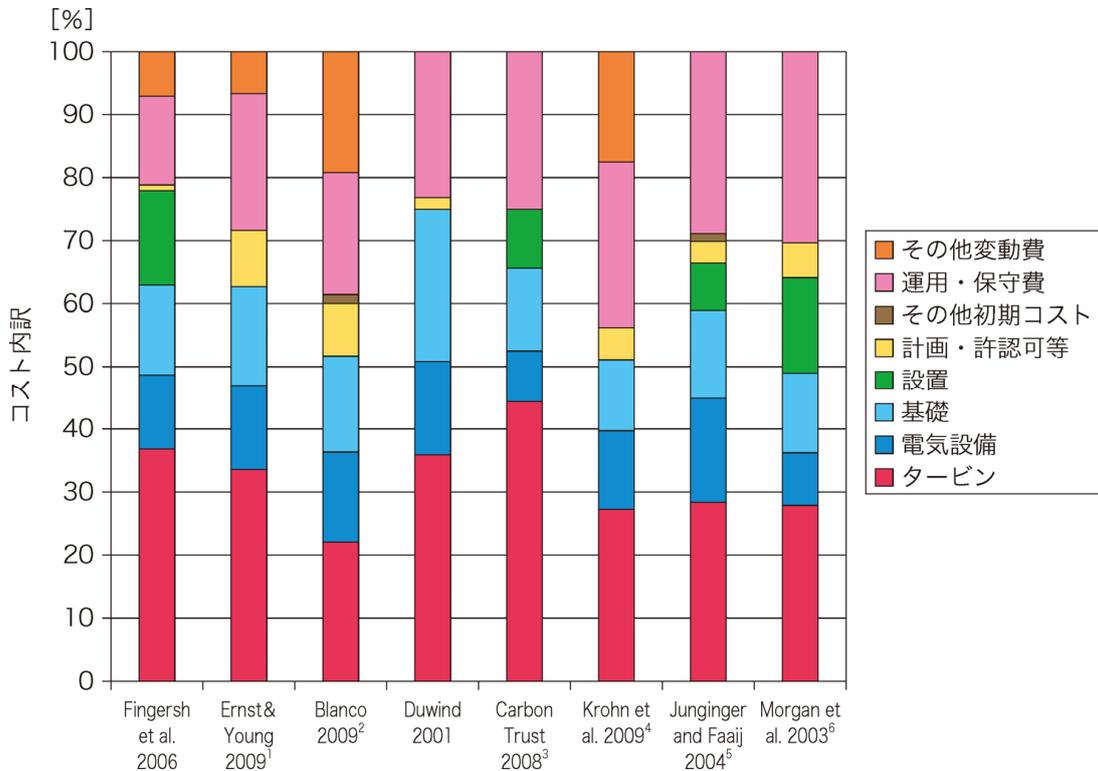


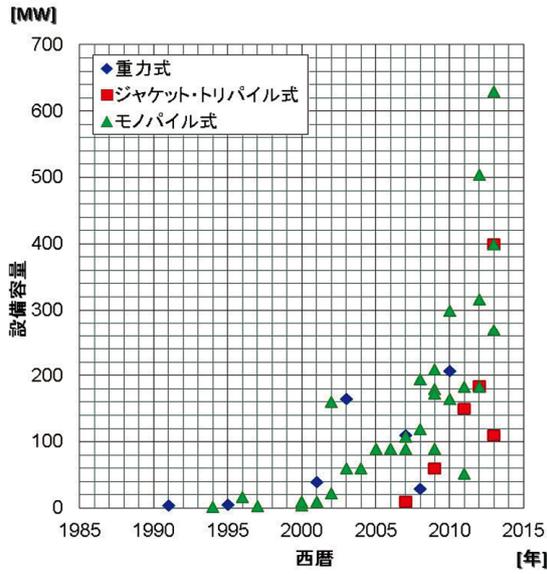
図 3-14 洋上風力 (着床式) の発電コストの内訳

注 1：赤が運転・保守費を示す

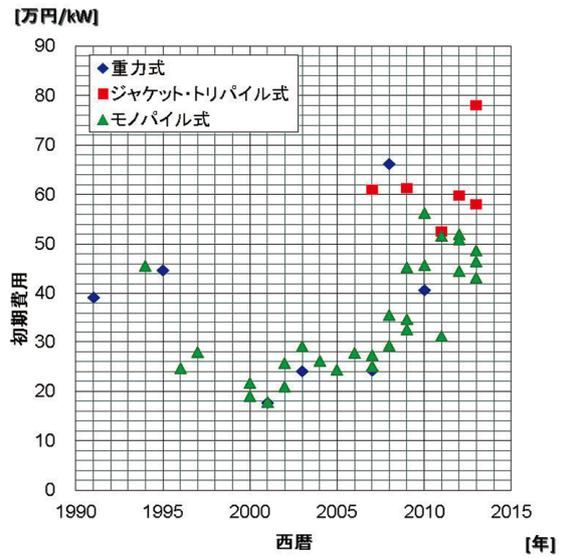
注 2：各種文献，事例によって内訳は大きく異なる

出典：“Large - Scale Offshore Wind Energy for the United States” (2010, NREL) より NEDO 作成

第3章 風力発電



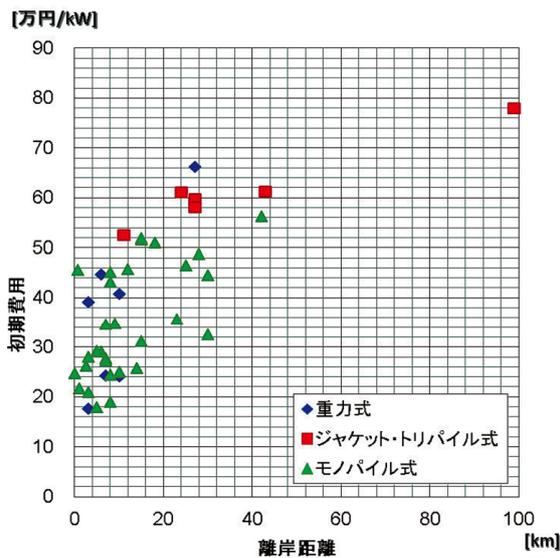
設備容量の推移



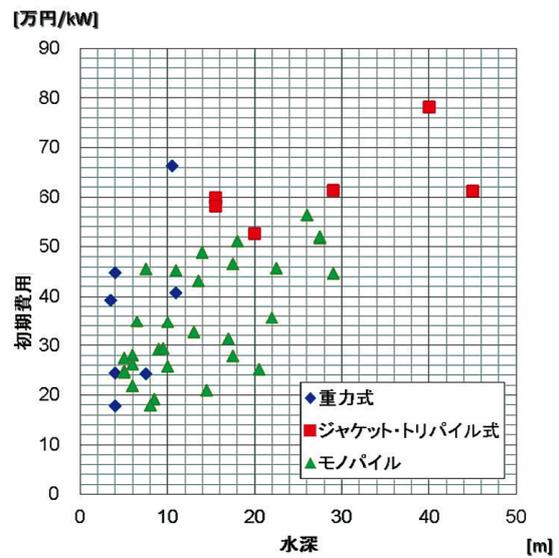
初期費用の推移

図 3-15 欧州における洋上風力の設備容量と初期費用の推移

出典：“Review of Offshore Wind Energy Markets”（2013, GL Garrad Hassan）



初期費用と離岸距離の関係



初期費用と水深の関係

図 3-16 欧州における洋上風力の初期費用と離岸距離及び水深の関係

出典：“Review of Offshore Wind Energy Markets”（2013, GL Garrad Hassan）

(参考) 発電コストの算出式

発電コストは一般的に、年間経常費を年間発電量で除算することによって算出される。年間経常費は、イニシャルコストと運転・保守費などのランニングコストからなる。イニシャルコストの算出方法には、資本回収法によるものと、減価償却費および平均金利などの和として求める方法がある。ここでは資本回収法による算出方法について述べる。

資本回収法では、イニシャルコストはシステム価格と年経費率の積で表され、発電コストは次の式で計算される（税金は考慮していない）。

$$\text{発電コスト (円/kWh)} = \frac{\text{建設コスト} \times \text{年経費率} + \text{年間運転・保守費}}{\text{正味年間発電量}}$$

$$\text{年経費率} = \frac{r}{1 - (1+r)^{-n}}$$

r: 金利, n: 耐用年数

年間発電量は風車の出力曲線と設置場所の風速から計算する。しかし、風力発電の事業化を検討する際は正味年間発電量の推定が重要で、年間発電量に対し、例えば次に示すような影響による発電量の損失があり、利用可能率や出力補正係数とともに考慮することが望ましい。

- * 複雑地形の影響
- * 複数風車設置の場合の風車間の干渉
- * 風速の経年変動
- * ハブの高さの風速への換算誤差

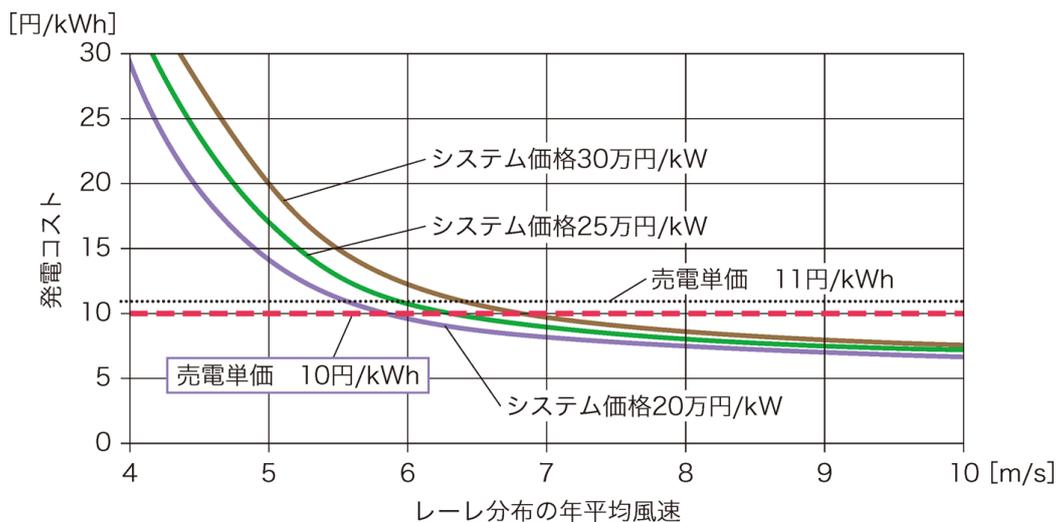


図 3-17 年平均風速と発電単価の関係 (例)

出典：風力発電導入ガイドブック（2008, NEDO）より作成

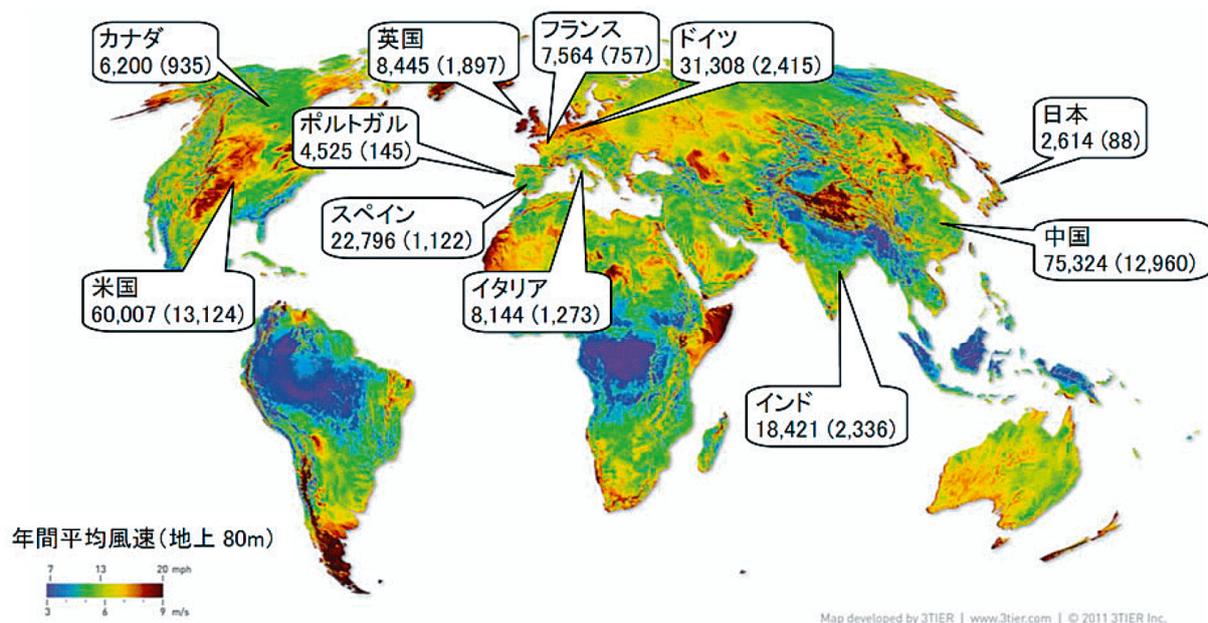
3.2 導入ポテンシャル, 導入目標, 導入実績

3.2.1 導入ポテンシャル

(1) 世界

風力エネルギーは風速の3乗に比例して増大するため、経済性の向上には風況の良い場所の選定が必須であり、その目安は年間平均風速 7m/s 以上とされている。世界の陸上の年間平均風速の分布図を図 3-18 に示す。世界の分布図では、特に米国中央部や中国西部、英国、アルゼンチン南部などが風況に恵まれていることが分かる。

一般に、洋上では陸上よりも良い風況が得られる。世界の洋上の年間平均風力エネルギー密度の分布図を図 3-19 に示す。北半球冬期は、特に米国東岸や英国・ノルウェー沖の北海、日本沿岸域などの風況が良い。また、豪州沿岸、南アフリカ、アルゼンチン南部などは1年を通して風況に恵まれている。



※2012 年末累積導入量 (括弧内は 2012 年単年導入量)

図 3-18 世界の年間平均風速分布 [MW]

出典: 3TIER ホームページ及び “Global Wind Report Annual Market Update2012” (2013, GWEC) より NEDO 作成

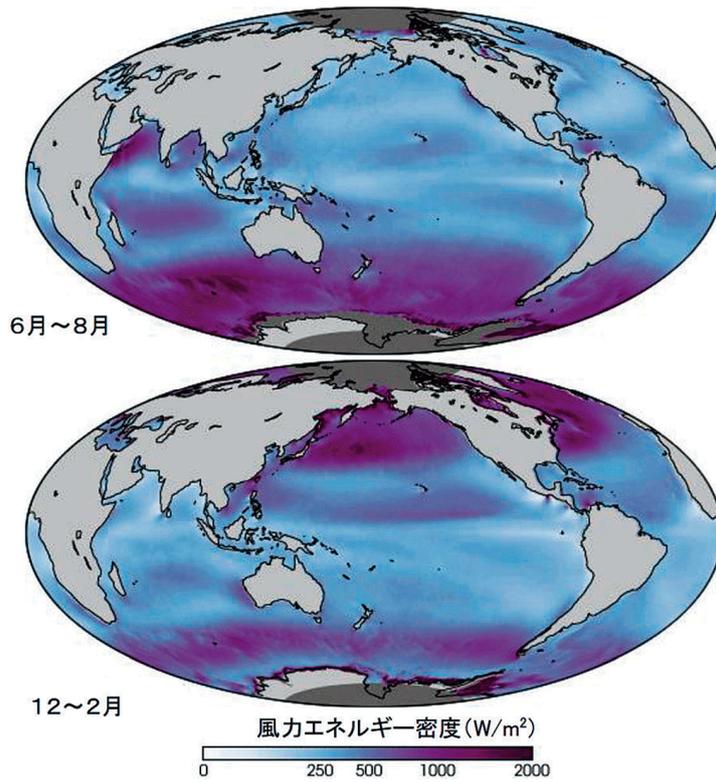


図 3-19 世界の風力エネルギー密度分布（洋上）
（上：6月～8月 下：12月～2月）

※海上風（高度 10m）の平均風力エネルギー密度
出典：NASA ホームページ

第3章 風力発電

(2) 日本

日本の陸上および洋上の風力ポテンシャルマップを図 3-20, 図 3-21 に示す。各国と比較して、陸上において 7m/s 以上の風況を得られる地域（下図のオレンジや赤い部分）は少ないが、北海道や北東北、関東、九州などを中心に、洋上の風況に恵まれている。

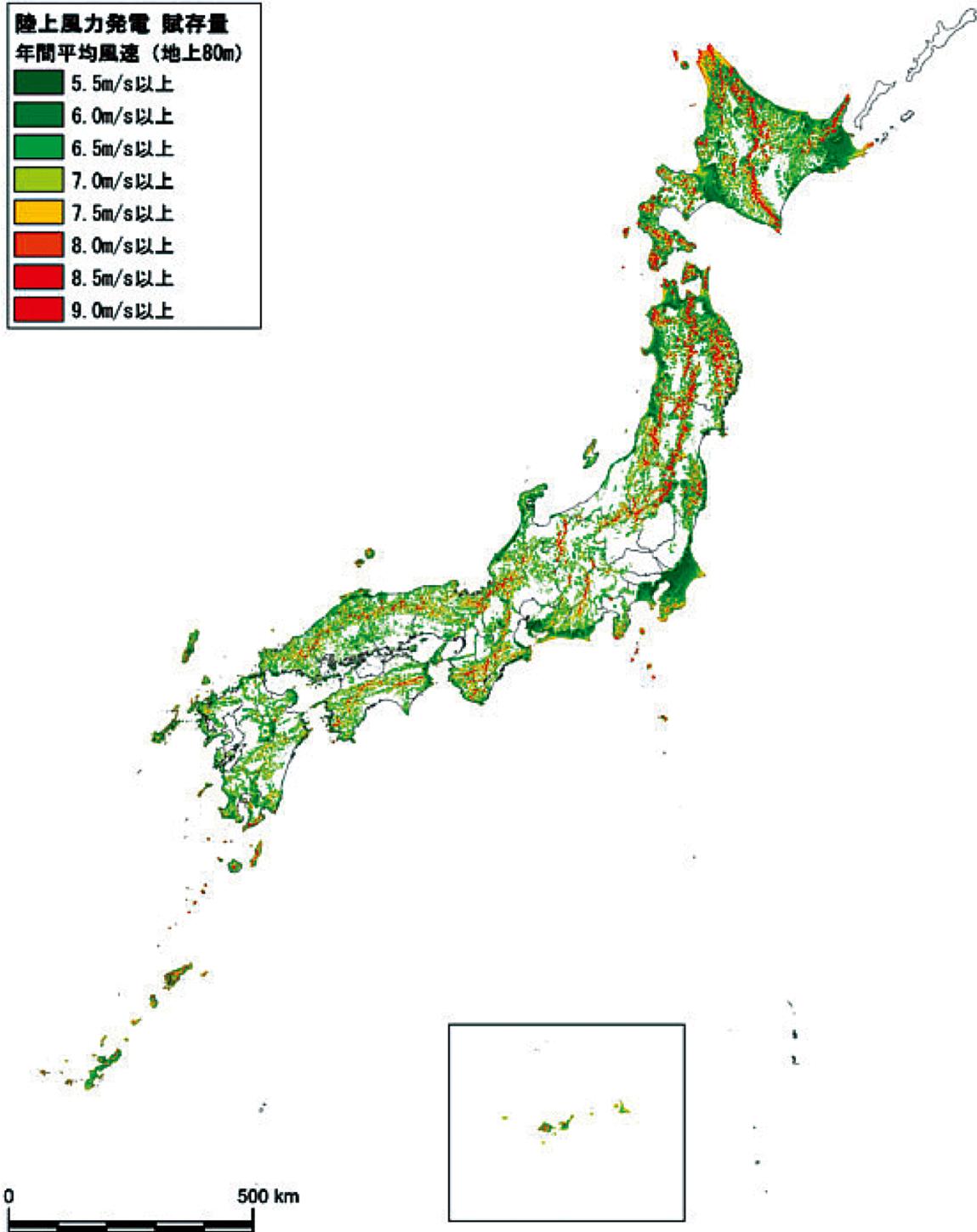


図 3-20 日本の風力ポテンシャルマップ（陸上）

出典：「平成 22 年度新エネルギー等導入促進基礎調査事業（風力エネルギーの導入可能性に関する調査）」（2011, 資源エネルギー庁）

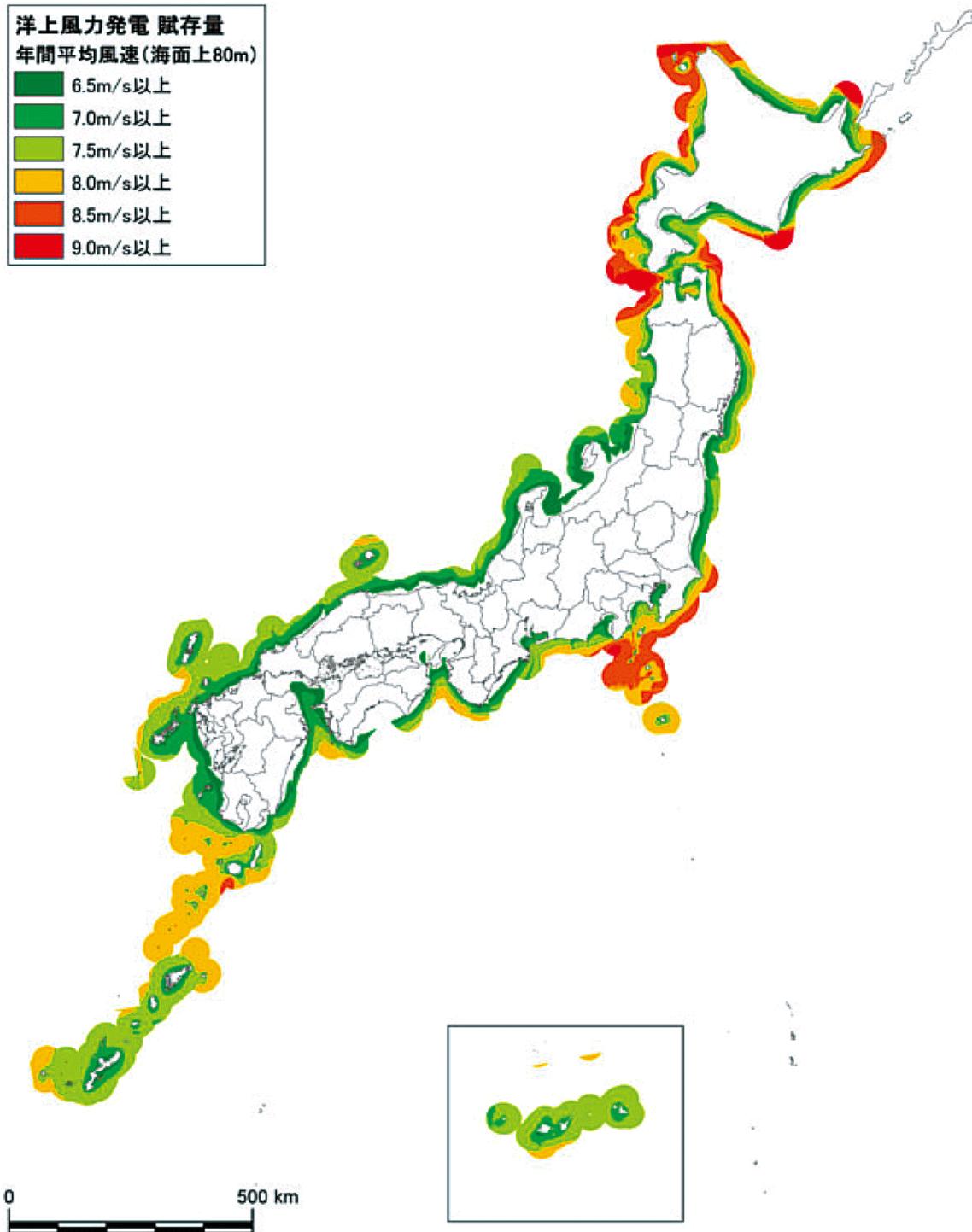


図 3-21 日本の風力ポテンシャルマップ（洋上）

出典：「平成 22 年度新エネルギー等導入促進基礎調査事業（風力エネルギーの導入可能性に関する調査）」（2011，資源エネルギー庁）

日本における風力発電の導入ポテンシャルおよび導入可能量については，経済産業省および環境省が詳細な試算を行っている。ここで，導入ポテンシャルとは「自然要因（標高，傾斜など），法規制（自然公園，保安林など）などの開発不可能地を除いて算出したエネルギー量」，導入可能量とは「経済性（固定価格買取制度，収益率など）を考慮して，導入ポテンシャルから絞り込んだエネルギー量」と定義されている（図 3-22）。

第3章 風力発電

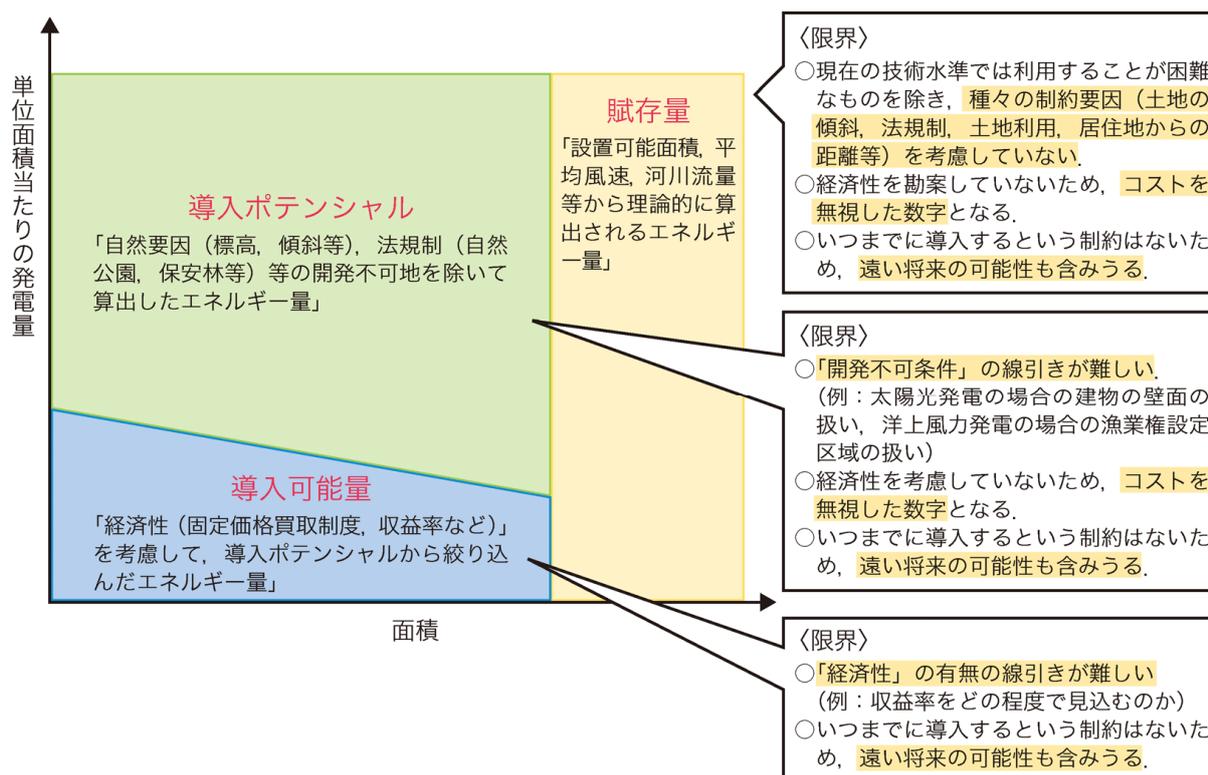


図 3-22 ポテンシャルに係る用語の定義と限界

出典：コスト等検証委員会報告書 参考資料 3（2011、エネルギー・環境会議コスト等検証委員会）より NEDO 作成

陸上風力の導入ポテンシャルについては、経済産業省は 2 億 9000 万 kW、環境省は 2 億 8000 万 kW と、同等の試算結果を出している（表 3-5）。また、導入可能量については、固定買取価格制度（FIT）の買取価格・買取年別に試算値が出されており、20 円/kWh で 15 年買い取りの場合は約 1 億 kW、20 円/kWh で 20 年買い取りの場合は 1 億 1000 万 kW（経済産業省）～1 億 4000 万 kW（環境省）と試算されている。

電力供給エリア別の導入ポテンシャル分布状況を見ると、最も賦存量が多いのは北海道エリアで、全体の約 30%を占めている。次いで東北エリアが 23%、九州エリアが 11%となっている（図 3-23）。

洋上風力の導入ポテンシャルについては、経済産業省は 15 億 kW、環境省は 16 億 kW と、同等の試算結果を出している（表 3-6）。導入可能量については、試算値に大きな差があり、20 円/kWh で 15 年買い取りの場合、経産省は 4500 万 kW、環境省は 17 万 kW と試算している。これは前提条件として建設コストの想定に差がある（例えば水深 50m で見ると、環境省調査では 59 万円/kWh、経産省調査では 46 万円/kWh と想定）ことが要因となっている。電力供給エリア別の導入ポテンシャル分布状況を見ると、九州エリアが最も大きく、全体の 29%を占めており、北海道エリアが 26%、東北エリア 14%でそれに続いている。九州地域の中でも、風速 7.0～7.5m/s および 7.5～8.0m/s の導入ポテンシャルが特に大きく、それぞれ全国のポテンシャル全体の 12%、9%を占める。（図 3-24）。

表 3-5 導入ポテンシャル及び導入可能量試算例（陸上風力）

		経済産業省 ^{※1}		環境省 ^{※2}
		開発不可能地 ^{※3} を除く	自然公園第2種・3種 特別地域及び普通地域 並びに国有林も開発不 可とした場合	開発不可能地 ^{※3} を除く
導入ポテンシャル		2億9,000万kW (7,000億kWh)	1億5,000万kW (3,500億kWh)	2億8,000万kW (5,900億kWh)
導入 可能量 ^{※4}	FIT シナリオ 20円×15年	9,900万kW	5,800万kW	1億kW (2,100億kWh)
	上記に自治体の導入意 欲係数(52%)、社会 的受容性係数(75%) を乗じた場合	3,900万kW	2,300万kW	/
	FIT シナリオ 20円×20年	1億1,000万kW	6,300万kW	1億4,000万kW (2,900億kWh)
	上記に自治体の導入意 欲係数(52%)、社会 的受容性係数(75%) を乗じた場合	4,200万kW	2,500万kW	/

※1：平成22年度新エネルギー等導入促進基礎調査事業（風力エネルギーの導入可能量に関する調査）（2011年8月，資源エネルギー庁）

※2：平成22年度再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査（2011年4月，環境省）

※3：開発不可能地自然条件（風速5.5m/s未満，標高1000m以上，最大傾斜角20度以上），法規制（自然公園（特別保護地区，第1種特別地域），原生自然環境保全地域，自然環境保全地域，鳥獣保護区のうち特別保護地区，世界自然遺産地域，保安林）土地利用等（市街化区域，田，建物用地，幹線交通用地，その他用地，河川・湖沼，海岸域，ゴルフ場，居住地から500m未満，経産省調査では送電線から40km以上）

※4：事業収支シナリオとして，環境省調査では，設備利用率24%（風速6.5m/sの場合，風速によって異なる．），面積当たり出力1万kW/km²，風車システム装置・工事費25万/kW，道路設備費85百万円/km（直線距離×2を想定），送電線敷設費（55百万円/km），調査・設計費等470百万円を想定．経産省調査では，建設コストは「新エネルギー等事業者支援対策事業」から「標高」「傾斜」「道路からの距離」「送電線からの距離」のパラメータでモデル化したもの，運転保守費6,000円/kW，金利4%，原価償却期間17年，正味年間発電量（kWh）は年平均風速からレーレ分布と仮定して算出，プロジェクトIRRは税引前8%に加え，税引後3.3%も想定．

出典：コスト等検証委員会報告書 参考資料3（2011，エネルギー・環境会議 コスト等 検証委員会）より NEDO 作成

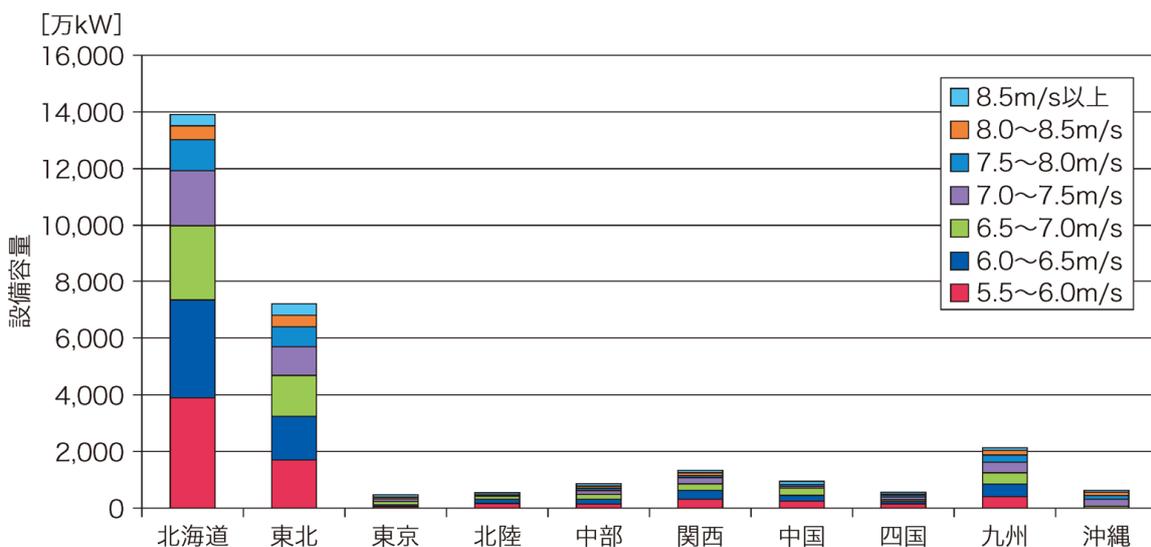


図 3-23 陸上風力の電力供給エリア別の導入ポテンシャル分布状況

出典：平成22年度再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査（2011，環境省）より NEDO 作成

第3章 風力発電

表 3-6 導入ポテンシャル及び導入可能量試算例（洋上風力）

		経済産業省 ^{※1}		環境省 ^{※2}
		開発不可能地 ^{※3} を除く	漁業権が設定されてい ない区域も開発不可と した場合	開発不可能地 ^{※3} を除く
導入ポテンシャル		15 億 kW (4 兆 4,000 億 kWh)	4 億 kW (1 兆 2,000 億 kWh)	16 億 kW (4 兆 3,000 億 kWh)
導入 可能量 ^{※4}	FIT シナリオ 20 円×15 年	4,500 万 kW	2,000 万 kW	17 万 kW (4 億 6,000 万 kWh)
	上記に自治体の導入意 欲係数 (52 %), 社会 的受容性係数 (75 %) を乗じた場合	1,300 万 kW	600 万 kW	/
	FIT シナリオ 20 円×20 年	6,600 万 kW	3,600 万 kW	300 万 kW
	上記に自治体の導入意 欲係数 (52 %), 社会 的受容性係数 (75 %) を乗じた場合	2,000 万 kW	1,100 万 kW	/

※1：平成 22 年度新エネルギー等導入促進基礎調査事業（風力エネルギーの導入可能量に関する調査）（2011 年 8 月）

※2：平成 22 年度再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査（2011 年 4 月）

※3：開発不可能地：自然条件（風速 6.5m/s 未満，陸上から 30km 以上，水深 200m 以上），法規制（経産省調査では，自然公園（特別保護地区，第 1 種特別地域，海中公園地区），原生自然環境保全地域，自然環境保全地域，鳥獣保護区のうち特別保護地区，世界自然地域，区画漁業権区域．環境省調査では，国立・国定公園（海域公園））水域利用等（経産省調査では送電線から 40km 以上）

※4：事業収支シナリオとして，設備利用率 31%（風速 7.5m/s の場合．風速によって異なる．），面積当たり出力 1 万 kW/km²，風車システム装置・工事費・送電線敷設費等を含んだ建設コストは，水深 50m 未満（着床式を想定）は水深に応じて増加，50m 以上（浮体式を想定）は水深にかかわらず一定と想定．

出典：「コスト等検証委員会報告書」（2011，エネルギー・環境会議 コスト等検証委員会）より NEDO 作成

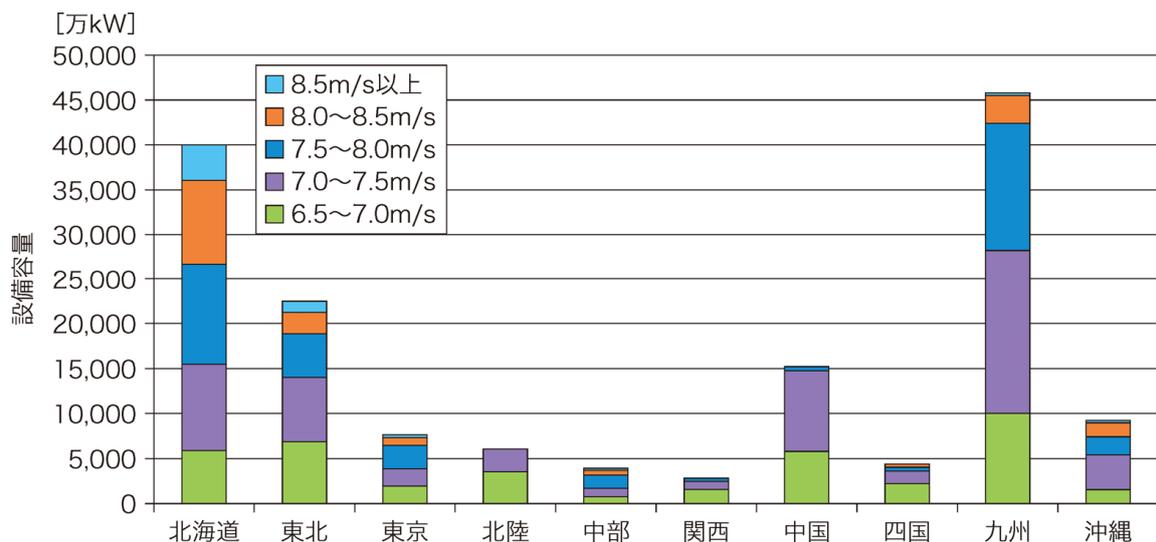


図 3-24 洋上風力の電力供給エリア別の導入ポテンシャル分布状況

出典：平成 22 年度再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査（2011，環境省）より NEDO 作成

(3) 欧州

欧州の風況マップを図 3-25 に示す。陸上風力は、北に向かうほど風況が良い。また洋上風力は、北海周辺の風況に恵まれている。

風力発電の導入可能量について、欧州環境庁（European Environment Agency : EEA）は表 3-7 のように試算している。風力発電の経済性を考慮した、最も制約条件の厳しいシナリオにおいても、陸上と洋上含めて、2030 年時点で 30,400TWh が導入可能と試算しており、これは同時点の欧州の電力需要の約 7 倍に相当する量と推算される。

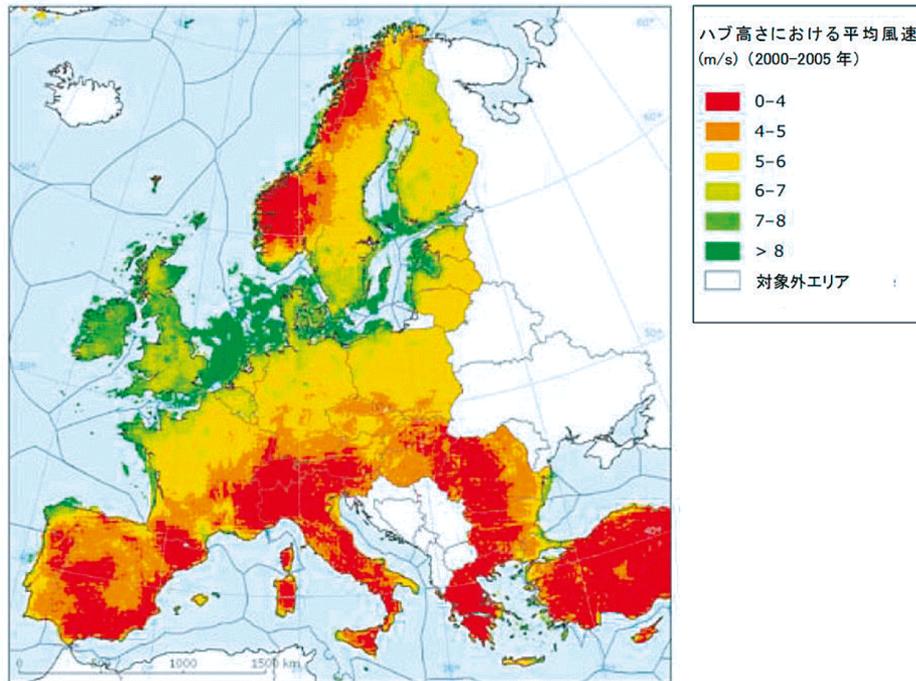


図 3-25 欧州の風況マップ（陸上 80m 高さ、洋上 120m 高さ）

出典：“Europe’s Onshore and Offshore Wind Energy Potential”（2009, EEA）

表 3-7 欧州における風力発電導入可能量

シナリオ	導入可能量		需要比
最大限導入するシナリオ (Technical potential)	2020 年	70,000 TWh (陸上：45,000 TWh, 洋上：25,000 TWh)	17~20 倍
	2030 年	75,000 TWh (陸上：45,000 TWh, 洋上：30,000 TWh)	17~18 倍
環境的・社会的制約条件を考慮した シナリオ (Constrained potential)	2020 年	41,800 TWh (陸上：39,000 TWh, 洋上：2,800 TWh)	10~12 倍
	2030 年	42,500 TWh (陸上：39,000 TWh, 洋上：3,500 TWh)	10 倍
経済的競争力を考慮した シナリオ (Economically competitive potential)	2020 年	12,200 TWh (陸上：9,600 TWh, 洋上：2,600 TWh)	3 倍
	2030 年	30,400 TWh (陸上：27,000 TWh, 洋上：3,400 TWh)	7 倍

出典：“Europe’s Onshore and Offshore Wind Energy Potential”（2009, EEA）より NEDO 作成

第3章 風力発電

(4) 米国

米国の風況マップを図 3-26 に示す。

陸上については、大陸中心部の風況に恵まれている。しかし、大陸中央部は比較的、電力需要が小さく、大きな需要地から離れているため、これらの風力エネルギーを沿岸部の需要地まで送電するためには、送電線の建設が重要となる。

米国は海岸線が長く、沿岸部の風況も良いため、洋上風力のポテンシャルも大きい (図 3-27)。

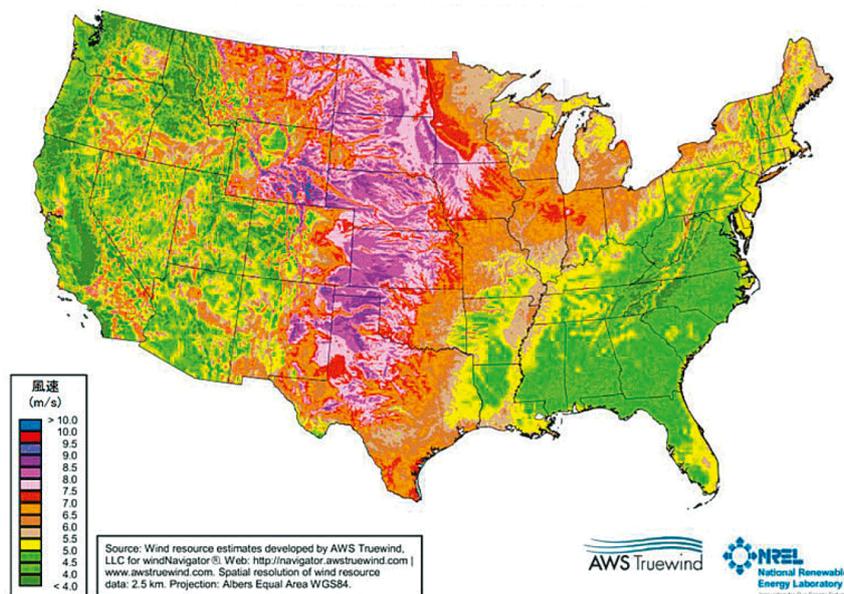


図 3-26 米国の風況マップ (陸上 80m 高さ)

出典：NREL 資料

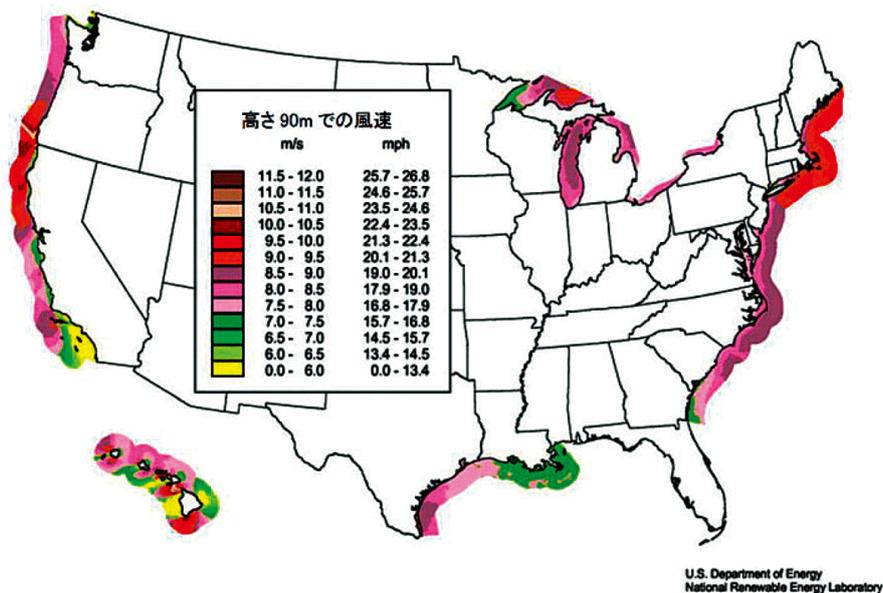


図 3-27 米国の風況マップ (洋上 90m 高さ)

出典：“A National Offshore Wind Strategy” (2011, DOE EERE)

米国における風力発電導入可能量の試算例を表 3-8 に示す。陸上域では、8.5 セント/kWh (約 9 円/kWh) 以下の発電コストで、7,834GW の風力発電が導入可能と試算されている。これは 2007 年時点の米国全体の発電容量 (1,039GW) の約 7.5 倍に相当する大きさに相当し、一定の競争力を持った価格帯におけるポテンシャルの大きさが確認されている。洋上風力発電については、陸上と比較して発電コストが高くなるが、浅水域において 10~13 セント/kWh (約 10~13 円/kWh) 程度の発電コストで 1,261GW、深水域においては 13~17 セント/kWh (約 13~17 円/kWh) 程度のコストで 3,177GW が導入可能と試算されている。

表 3-8 米国における風力発電導入可能量

導入可能量		備考
陸上風力	7,834 GW	・米国全体の発電容量の約 7.5 倍 ・発電コスト：8.5 セント /kWh 以下
洋上 (浅水域)	1,261 GW	・発電コスト：10~13 セント /kWh 程度
洋上 (深水域)	3,177 GW	・発電コスト：13~17 セント /kWh 程度

出典：“20 PERCENT WIND ENERGY PENETRATION IN THE UNITED STATES” (2007, Black & Veatch) より NEDO 作成

(5) 中国

中国気象庁によって、地上 10m の高さにおける中国の風力エネルギー賦存量は 3,226GW~4,350GW、このうち技術的に取得可能な発電ポテンシャルは 253GW~297GW と試算されている。また、国連による調査では、地上 50m の高さにおける技術的に取得可能な発電ポテンシャルは 1,400GW に達すると試算され、北西部を中心とした内陸部の風況に恵まれている (図 3-28)。

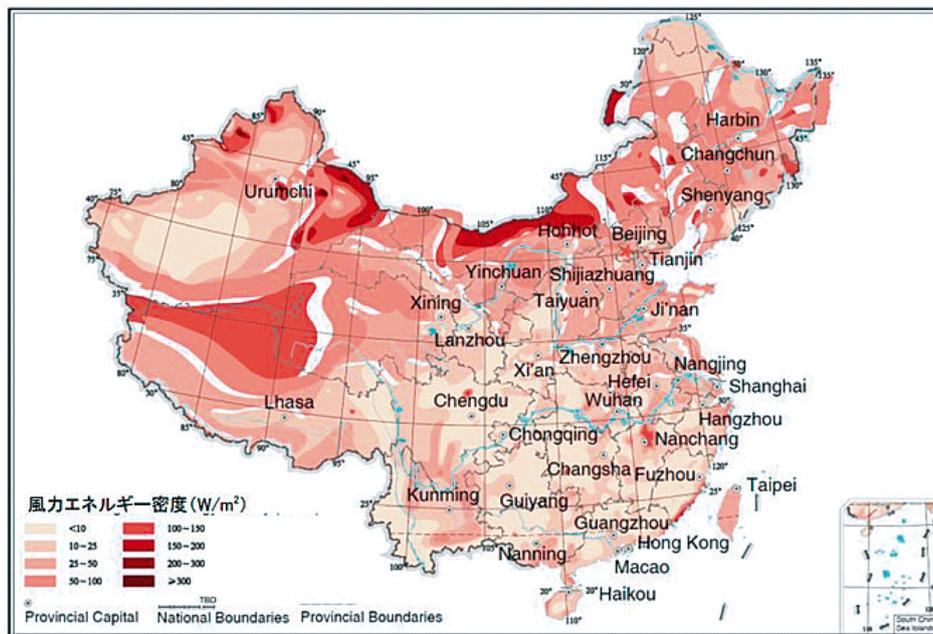


図 3-28 中国の風力エネルギー密度マップ (陸上 10m 高さ)

出典：“China Wind Power Outlook 2010” (2010, GWEC)

第3章 風力発電

(6) インド

インド風力エネルギー研究所 (C-WET) によると、インドにおける導入ポテンシャルは、土地の利用可能率を 2%⁵とした場合、491.3GW と試算されている。国土全体にわたり、エネルギー密度が 200W/m²以上の好風況に恵まれている (図 3-29)。

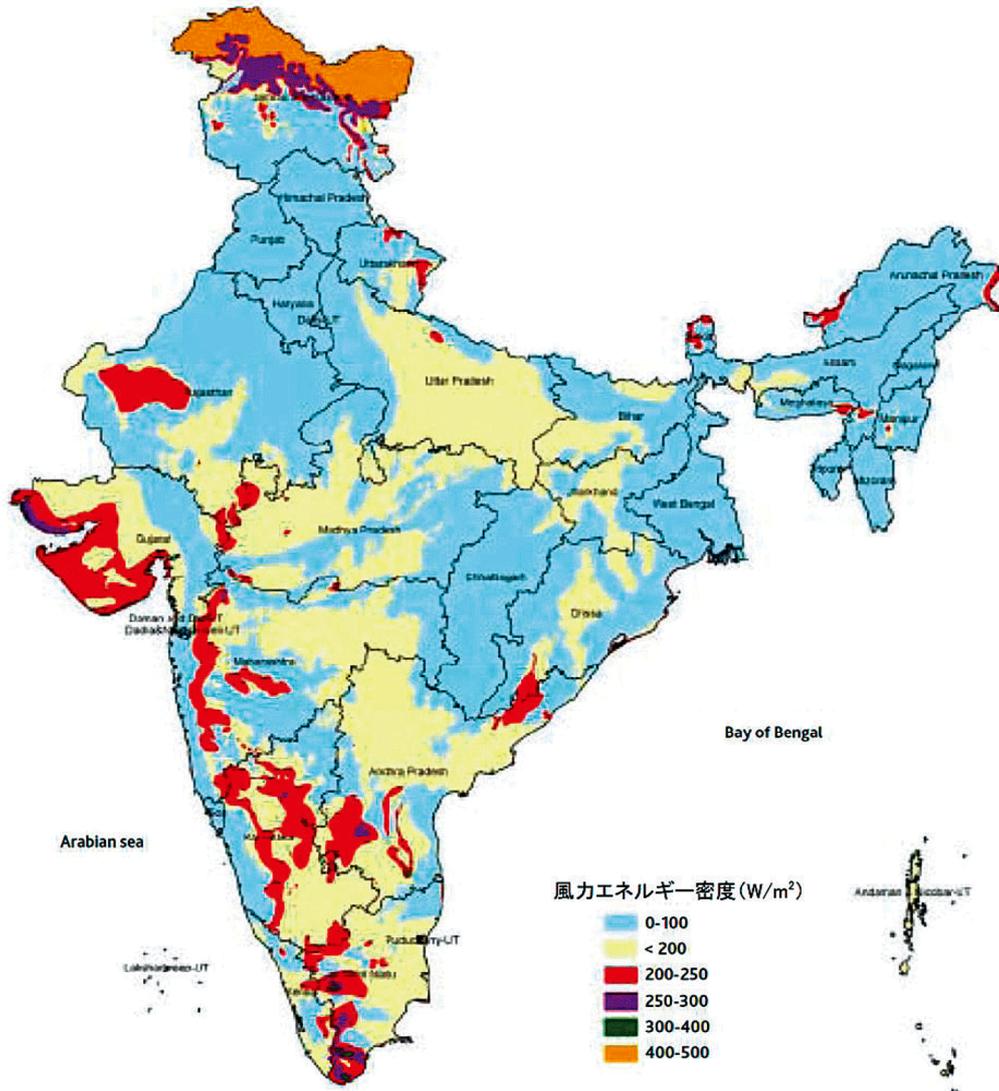


図 3-29 インドの風力エネルギー密度マップ (陸上 50m 高さ)

出典：“Indian Wind Power Outlook 2011” (2011, GWEC)

⁵ “Indian Wind Power Outlook 2011” (2011,GWEC)では、この想定は非常に保守的であると指摘されている。

3.2.2 導入目標

欧州，米国，日本における再生可能エネルギーおよび風力発電の導入目標例を表 3-9 に示す。

表 3-9 欧米諸国における再生可能エネルギー・風力発電の導入目標例

	導入目標等	
	再生可能エネルギー全体	風力発電
日本	<ul style="list-style-type: none"> 「2030年のエネルギー需給展望」（総合資源エネルギー調査会 需給部会，2005）において，2010年の再生可能エネルギーの対一次エネルギー供給比を，3.0%に引き上げる目標を設置。 	<ul style="list-style-type: none"> 国としての導入目標は掲げられていない。 環境省の「再生可能エネルギーの飛躍的導入に向けたイニシアティブ」の中で，洋上風力の導入シナリオとして，2030年までに5,860 MWを提示。 日本風力発電協会は，同協会のロードマップにおいて，2020年に8~12 GW，2030年に13~28 GWの導入目標を提案。
EU	<ul style="list-style-type: none"> 2007年に，EU全体の最終エネルギー消費量に占める再生可能エネルギーの割合を2020年までに20%とする戦略を決定。 2009年の「再生可能エネルギー導入促進に関する欧州指令」で，上記目標達成のための国別目標値を設定。 	<ul style="list-style-type: none"> 欧州再生可能エネルギー評議会は，左記指令の目標を達成するために必要な風力発電導入量を，2010年に176 TWh，2020年には477 TWhと試算。 欧州エネルギー技術戦略計画（SET-Plan）において，2020年までにEUの電力消費量の20%を風力発電でまかなう目標を設定。
米国	<ul style="list-style-type: none"> 多くの州で，電力部門における再生可能エネルギー利用義務制度（RPS）を策定。オバマ大統領は，2025年までに25%導入という連邦RPS制度を提案。 オバマ大統領は「New Energy for America」で再生可能エネルギー由来の電力量割合を，2012年に12%，2025年に25%とする目標を発表。 	<ul style="list-style-type: none"> 国としての導入目標は掲げられていない。 2030年までに米国の全電力需要の20%を風力エネルギーでまかなう技術的可能性を検討。2030年時点の風力発電の設置容量および発電電力量をそれぞれ304.8 GW，1200 TWhとするシナリオを提示。
中国	<ul style="list-style-type: none"> 「再生可能エネルギー中長期発展計画」（2007年9月），「再生可能エネルギー発展第11次5ヵ年計画」（2008年3月）において，エネルギー消費総量に占める再生可能エネルギー消費量の割合を，2010年までに10%に，2020年に15%に引き上げる目標を設定。 第12次5ヵ年計画において，2015年までに非化石エネルギーを標準炭換算4.8億トン開発するという目標を設定。 	<ul style="list-style-type: none"> 左記「中長期発展計画」において，2020年までに風力発電の設備容量を30 GWに引き上げる目標を設定。 第12次5ヵ年計画において，2015年までの風力発電の目標を設備容量100 GW，年間発電量190 TWhと設定。このうち洋上風力については，2015年までに5 GW，2020年までに30 GWと目標を設定。
インド	<ul style="list-style-type: none"> 各州において，RPS制度を実施。 “National Action Plan for Climate Change (NAPCC)”において，再生可能エネルギー由来の電力購入義務を2020年に15%と設定。 	<ul style="list-style-type: none"> 2011~2017年の6年間で13.4 GWを追加的に導入。

出典：“Technology Roadmap Wind energy”（2009, IEA），Directive 2009/28/EC on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC，“Renewable Energy Technology Roadmap 20% by 2020”（2008, EREC），DSIRE ホームページ，“New Energy for America”（2009, Barack Obama and Joe Biden）より NEDO 作成

第3章 風力発電

(1) 日本

日本においては、国としての風力発電導入目標量は掲げられていない。

環境省は、2012年8月31日に「グリーン成長の実現」と「再生可能エネルギーの飛躍的導入」に向けたイニシアティブを発表した。その中で、今後、特に導入戦略が必要と考えられる再生可能エネルギーの一つに洋上風力を挙げ、各種施策を実施することによって、2020年までに400MW、2030年までに5,860MWを導入するシナリオを提示している。

日本風力発電協会（JWPA）は、2010年1月15日に、「風力発電の賦存量とポテンシャルおよびこれに基づく長期導入目標とロードマップの算定（Ver1.1）」を、2010年6月30日に、殆ど全ての社会的制約条件を考慮したVer2.1を公表したが、2010年、2011年に環境省で実施した「再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査」また、2011年に経済産業省で実施した「風力エネルギーの導入可能量調査」により、解析精度の向上とポテンシャル算出のための制約条件の精緻化が図られた事に加えて、最近の洋上風力技術開発動向や実証試験計画などをフォローした「風力発電導入ポテンシャルと中長期導入目標（Ver3.2）」を2012年に公表した（表3-10）。

目標値に対して、プラスに「働く」要因、マイナスに「働く」要因があることに言及した上で、目標達成は可能との見解を示している。プラスの要因としては、年間平均風速が高い地点を重点的に選定すること、洋上風力については陸上風力以上に好風況地域へ建設することによる設備利用率の向上などを挙げている。マイナスの要因としては、電力系統運用面から必要となる風力発電所の最大出力制限運転や出力上昇率制限運転によって実質的な設備利用率が低下すること、電力系統運用面から必要となる蓄電設備（揚水発電所、蓄電池など）による電力損失が発生することなどを挙げている。

表3-10 日本風力発電協会の導入ロードマップ

出典	導入目標量 [GW]	
	2020年	2030年
風力発電導入ポテンシャルと中長期導入目標V 3.2 (2012)	11.3	28.8

出典：風力発電導入ポテンシャルと中長期導入目標V3.2（2012, JWPA）より NEDO 作成

(2) 欧州

欧州における風力発電の導入目標量例を表3-11に示す。

2007年3月、欧州理事会は、EUの地球温暖化対策として、2020年までにEU全体のエネルギー消費全体に占める再生可能エネルギーの比率を20%に引き上げることで合意した。これを受けて「再生可能電力推進に関する指令」⁶と「バイオ燃料促進に関する指令」⁷を修正、廃止する新たな指令である「再生可能な資源からのエネルギー使用の推進に関する指令」が策定され、本指令において加盟各国に法的拘束力のある数値目標が設定された。

欧州再生可能エネルギー評議会（European Renewable Energy Council：EREC）は、この目

⁶ EUの全電力供給量に占める再生可能電力の割合を2010年までにEU全体で21%にするという目標を掲げ、加盟各国に目標（法的拘束力なし）を設定した指令。（Directive 2001/77/EC on the promotion of the electricity produced from renewable energy source in the internal electricity market）

⁷ 2010年までにガソリン、ディーゼル油の5.75%をバイオ燃料で代替する目標（法的拘束力なし）を設定した指令。（Directive 2003/30/EC on the promotion of the use of biofuels and other renewable fuels for transport）

標を達成するために必要な再生可能エネルギーの種類ごとの寄与度（発電量）を試算しており、2020年には477TWhが風力発電によって供給されると予測している（表3-12）。これは2020年時点の欧州の電力需要予測（3,914TWh）の約12%に相当する。なお、実績との比較において、現状ではEREC試算値を下回っている。

また、低炭素化社会実現に向けた技術開発戦略である「欧州エネルギー技術戦略計画（SET-Plan）」⁸において、2020年までにEUの電力消費量の20%を風力発電で賄う目標が掲げられている。

欧州主要国における導入目標を表3-13に示す。洋上風力発電の導入を推進している英国は、先に述べた再生可能エネルギーに係るEU指令で設定された導入目標（2020年までに15%）を達成するため、“UK Renewable Energy Roadmap”を策定し、その中で2020年までに陸上風力10～13GW、洋上風力11～18GWの導入が見込めると分析している。

また、環境先進国であるドイツでは、EU指令における導入目標を上回る、2020年までに35%という野心的な目標を掲げている。風力発電については、2020年までに陸上風力35.75GW、洋上風力10GWの導入見通しを示している。デンマークやスペインも野心的な導入目標を掲げており、デンマークは2020年までに電力需要の50%を風力発電によって賄うことを目指している。

表3-11 欧州における導入目標量例

出典	2020年
再生可能な資源からのエネルギー使用の推進に関する指令	EU全体の最終エネルギー消費量に占める再生可能エネルギーの割合を20%に引き上げる。
Renewable Energy Technology Roadmap 20% by 2020 (EREC)	477 TWh ※上記指令を達成するために必要な風力発電量
欧州エネルギー技術戦略計画 (SET-Plan)	EUの電力消費量の20%を風力発電でまかなう。

出典：“Directive 2009/28/EC”（2009, EC）, “Renewable Energy Technology Roadmap 20% by 2020”（2008, EREC）, “SET-Plan Technology Roadmap”（2009, EC）より NEDO 作成

表3-12 目標達成に必要なとなる風力発電による発電量予測

	2006年	2010年	2020年
発電量 [TWh]	82	176	477
(実績)	(105 [*])	(148)	

※：2007年実績値

出典：“Renewable Energy Technology Roadmap 20% by 2020”（2008, EREC）, “Renewables Information 2011”（2011, IEA）より NEDO 作成

⁸ 低炭素化社会の早期実現に向けて、EU全体で共同し、低炭素化技術の研究開発および普及を加速させることを目的としたEUの技術開発戦略。欧州産業イニシアティブ（European Industrial Initiatives：EII）として、低炭素化に資する6つの有望技術（風力発電、太陽光・太陽熱発電、バイオエネルギー、CCS、電力系統、持続可能な核分裂）に関するイニシアティブが設置されている。2009年7月にはそれぞれの技術について技術ロードマップが提示され、2010年3月に欧州理事会によって承認された。

第3章 風力発電

表 3-13 欧州主要国における導入目標（2020年）

国	導入目標	
	再生可能エネルギー全体	風力発電
英国	最終エネルギー消費量の 15 %	(※導入見通し) 陸上風力：10～13 GW 洋上風力：11～18 GW
ドイツ	最終エネルギー消費量の 35 %	(※導入見通し) 陸上風力：35.75 GW 洋上風力：10 GW
スペイン	最終エネルギー消費量の 30 %	陸上風力：35 GW 洋上風力：750 MW
デンマーク	最終エネルギー消費量の 20 %	電力需要の 50 %を風力発電より供給

出典：“Global Wind 2011 Report”（2012, GWEC），“UK Renewable Energy Roadmap”（2011, 英国政府），“National Renewable Energy Action Plan”（2010, ドイツ政府），“ACCELERATING GREEN ENERGY TOWARDS 2020”（2012, デンマーク政府），“National Renewable Energy Plan”（2010, スペイン政府）より NEDO 作成

(3) 米国

米国における風力発電の導入目標量例を表 3-14 に示す。

表 3-14 米国における導入目標量例

出典	2020年	2030年
RPS法	州別 RPS 法により規定	
New Energy for America (オバマ大統領)	(2012年) 再生可能エネルギー由来の電力量 割合：12 %	(2025年) 再生可能エネルギー由来の電力量 割合：25 %
(※導入見通し) 20 % Wind Energy by 2030	—	発電容量：304.8 GW 発電量：1,200 TWh ※ 2030年までに米国の全電力需要の 20 %を風力でまかなう場合の必要量
(※導入見通し) A National Offshore Wind Strategy	10 GW (洋上風力)	54 GW (洋上風力)

出典：DSIRE ホームページ，“New Energy for America”（2009, Barack Obama and Joe Biden），“20% Wind Energy by 2030”（2008, DOE）より NEDO 作成

米国においては国全体としての導入目標値は掲げられていないが、29 の州政府とワシントン DC 政府⁹において、電気事業者に対して供給電力の一定割合を再生可能エネルギーで賄うことを義務付ける RPS 制度を導入しており（第 1 章 1.7.2 節参照）、目標達成に向けて、風力をはじめとする再生可能エネルギーの導入が進んでいる。

また、オバマ大統領が掲げる「New Energy for America」計画では、電力消費量に占める再生可能エネルギー由来の電力量の割合を、2012年までに 10%、2025年までに 25%に引き上げる目標が掲げられている。

米国エネルギー省 (Department of Energy: DOE) は、2030年までに米国の全電力需要の 20%

⁹ 2010年3月時点

を風力エネルギーで賄う技術的可能性を検討した報告書（20% Wind Energy by 2030）を発表している。本報告書では、2030年時点の風力発電の設置容量が304.8GW、発電電力量が1,200TWhとするシナリオが示されており、このうち、洋上風力は54GW（18%）になるとされている（図3-30）。

2011年2月には、洋上風力発電の技術開発ロードマップとなる“A National Offshore Wind Strategy”がDOEによって策定された。この技術開発ロードマップでは、2020年までに10GW、2030年までに54GWの洋上風力発電を導入するシナリオを描き、2020年段階で0.10ドル/kWh、2030年段階で0.07ドル/kWhを達成するための必要施策を取りまとめている。

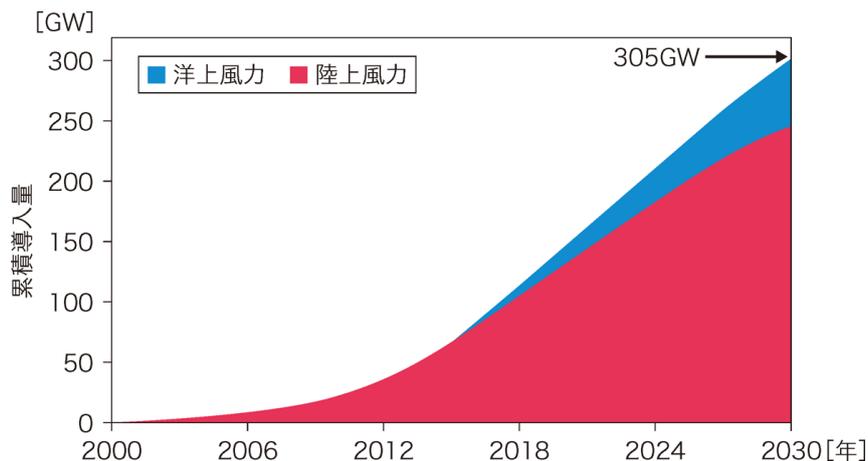


図3-30 20% Wind Energy by 2030における導入シナリオ（累積）

出典：“20% Wind Energy by 2030”（2008, DOE）より NEDO 作成

(4) 中国

中国は「再生可能エネルギー中長期発展計画」（2007年9月）、「再生可能エネルギー発展第11次5ヵ年計画」（2008年3月）において、エネルギー消費総量に占める再生可能エネルギー消費量の割合を、2010年までに10%に、2020年に15%に引き上げる目標を設定している。また、第12次5ヵ年計画において、2015年までに非化石エネルギーを標準炭換算4.8億トン開発するという目標を設定している。

風力発電については「再生可能エネルギー中長期発展計画」で2010年までに5GW、2020年までに30GWとする目標値が掲げられていた。しかし、中国の風力発電設備容量は2007年に5GWを超えており、2010年の目標を前倒しで達成している。その後、目標は大幅に引き上げられ、第12次5ヵ年計画においては、2015年までの導入目標は設備容量100GW、年間発電量190TWhに設定された。このうち、洋上風力発電の導入目標については、2015年までに5GW、2020年までに30GWに設定されている。

(5) インド

インドは、2011年～2017年の6年間において、毎年2.2GW～2.4GW導入し、2017年に累積導入量27.3GWに達する目標を掲げている。

第3章 風力発電

表 3-15 インドの再生可能エネルギー導入目標 [GW]

	2011-12	2012-13	2013-14	2014-15	2015-16	2016-17	合計 (累積)
風力	2.4	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	27.3

出典：“STRATEGIC PLAN FOR NEW AND RENEWABLE ENERGY SECTOR FOR THE PERIOD 2011-17” (2011, MNRE) より NEDO 作成

3.2.3 導入実績

(1) 世界

世界の風力発電累積導入量の推移を図 3-31 に示す。過去 10 年間で、堅調な伸びを見せており、世界風力エネルギー会議（Global Wind Energy Council : GWEC）の発表では、2012 年末までの累積導入量は 282.6GW に達している。

風力発電市場は、デンマーク、ドイツ、スペイン、英国などの欧州諸国および米国が牽引してきた。スペインでは、2012 年の発電電力量の約 18% を風力が占めており、基幹エネルギーの一つに成長している。米国では 2005 年以降、風力発電が全電源の新設容量に占めるシェアは、天然ガスに次いで 2 番目に大きい（図 3-32）。しかし、陸域における適地の減少や、近年の経済不況、シェールガス¹⁰生産量の増大による天然ガス価格の低下などのさまざまな要因によって、先進国における成長率は近年、鈍化しつつある（図 3-33）。

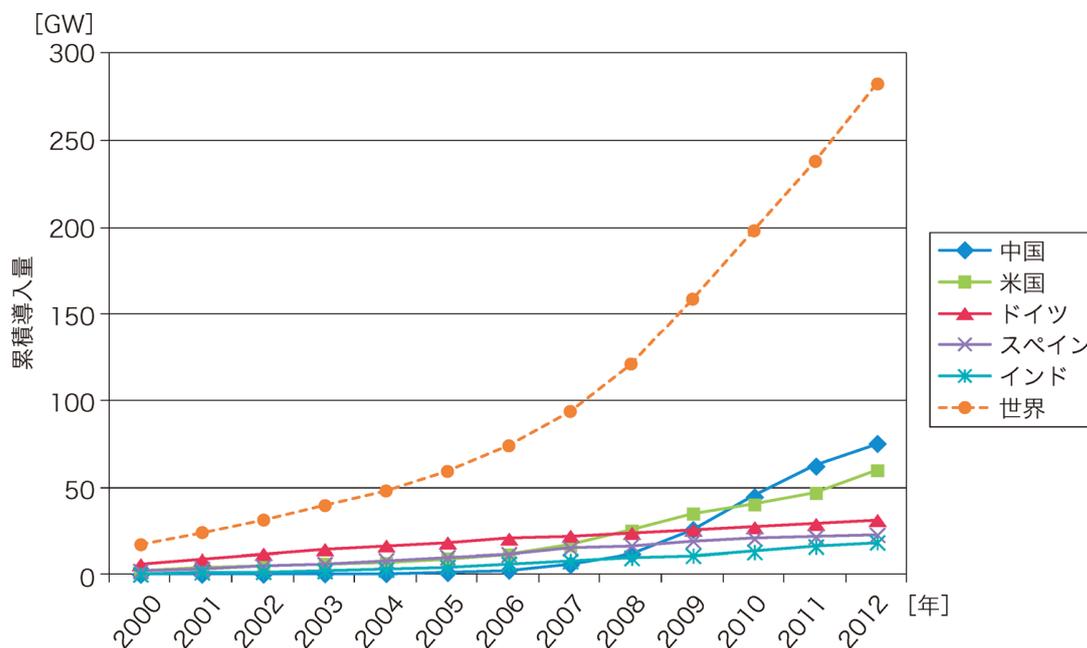


図 3-31 世界および主要国における風力発電累積導入量の推移

出典：“Global Wind Report 2012” (2013, GWEC) より NEDO 作成

¹⁰ 泥土が堆積して固まった頁岩（シェール）層に含まれる天然ガスで近年、米国において活発に生産されている。

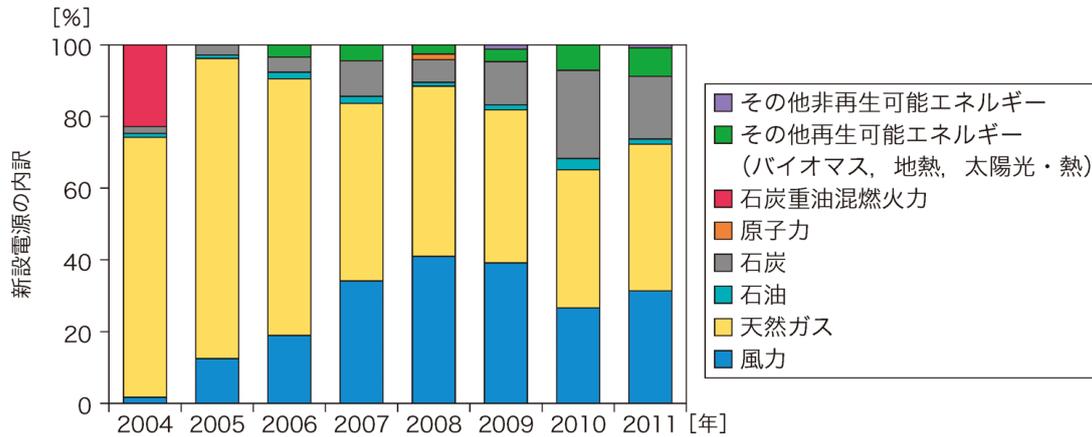


図 3-32 米国における新設電源の内訳推移

出典：“U.S. Wind Industry Annual Market Report Year Ending 2010” (2011, AWEA) より NEDO 作成

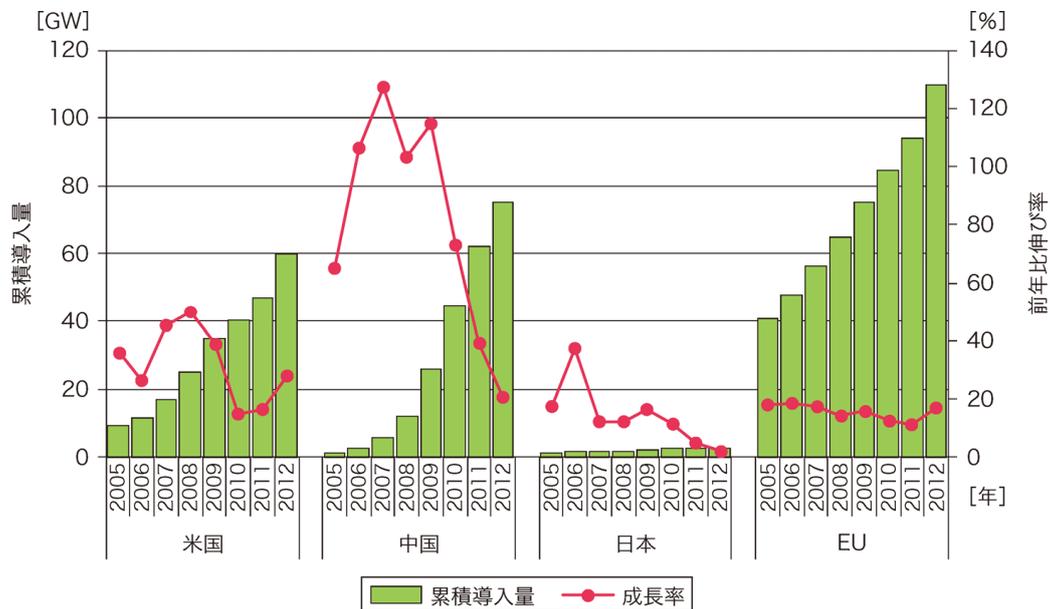


図 3-33 日本と主要国の風力発電導入推移（累積）

出典：“Global Wind Report 2011” (2012, GWEC), NEDO 資料より作成

近年、顕著となっているのは、中国の台頭である。2012 年の世界全体の新設容量 44.8GW のうち、28.9% (13.0GW) を中国が占める結果となった。これは、米国の 29.3% (13.1GW) に次ぐ値であった。中国の累積導入量は 2006 年以降、飛躍的に伸びており、2009 年にはドイツを抜き世界 2 位に、2010 年には米国を抜き世界第 1 位に躍進した。しかし、短期間で急激な導入量拡大によって、送電容量の不足などの問題が顕在化し始めていること、また導入量に占める系統連系量の割合などが不明であることなどに留意が必要である。

現在、導入量世界第 2 位である米国は、連邦政府の支援策である PTC (Renewable Energy Production Tax Credit: 生産税控除) によって、風力発電導入量が大きく左右される (図 3-34)。PTC は、再生可能エネルギー由来の電力の生産税を控除する制度で、条件を満たした新施設で生産された電力に対して、稼動開始から最初の 10 年間、1kWh ごとに適用される。風力の控除額は、2.2 セント/kWh である。これまで、PTC は期限切れと延長を繰り返しているが、米国経済

第3章 風力発電

再生法¹¹によって、風力発電の控除期間については2012年末まで延長された。2013年以降の米国市場を見通すに当たっては、PTCの延長の有無が鍵であり、今後の動向が注視される。

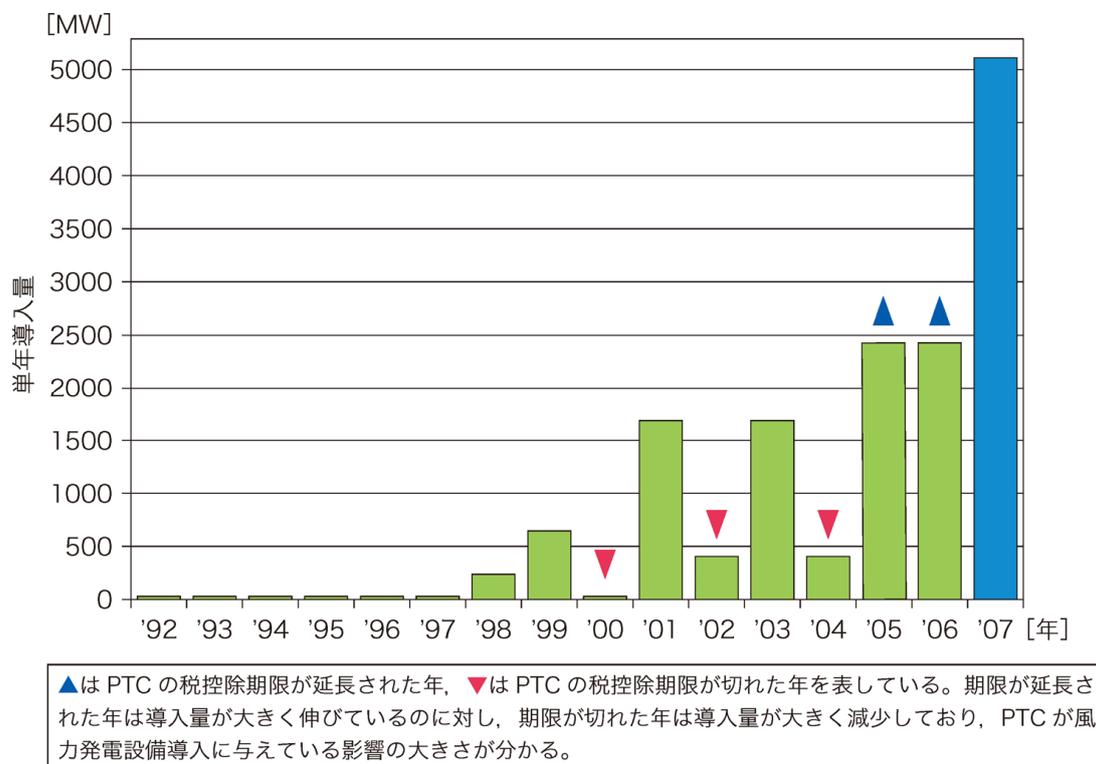


図 3-34 PTC の延長と風力発電の発電容量（新規増設分）の経年変化

出典：“Wind Power Outlook 2008”（2008, AWEA）より NEDO 作成

また、陸上の適地減少に伴い、欧州を中心に洋上風力発電の導入量が増加している。図 3-35 に世界における洋上風力発電累積導入量を示す。2000 年代初頭から導入が始まった後、2005 年以降に導入が加速しており、近年は成長率約 40% で推移している。2010 年の累積導入量は約 3GW であり、さらに 2012 年末には約 5.4GW に達している。ドイツでは、2009 年よりフィードインタリフにおける洋上風力発電の買取価格が約 9 ユーロセント/kWh から 15 ユーロセント/kWh に大幅に引き上げられており、政府による支援策の拡充も、洋上風力発電市場の成長を後押ししていると考えられる。

現状では、風力発電市場全体に占める洋上風力の割合は小さいが、今後、導入量が増加し、欧州では 2020 年までに累積容量約 40GW に達するとの見通しも示されている。現在は英国、デンマーク、ベルギー、ドイツ、フィンランドなどの欧州市場が中心だが、今後は米国や中国、その他新興国においても導入が進むと予想されている（図 3-36）。

¹¹ American Recovery and Reinvestment Act, 2008 年末の金融危機対策として 2009 年 2 月に成立。各種経済刺激策に加え、科学技術、環境保護、各種インフラへの投資、州や地方政府の財政安定化策などが盛り込まれている。

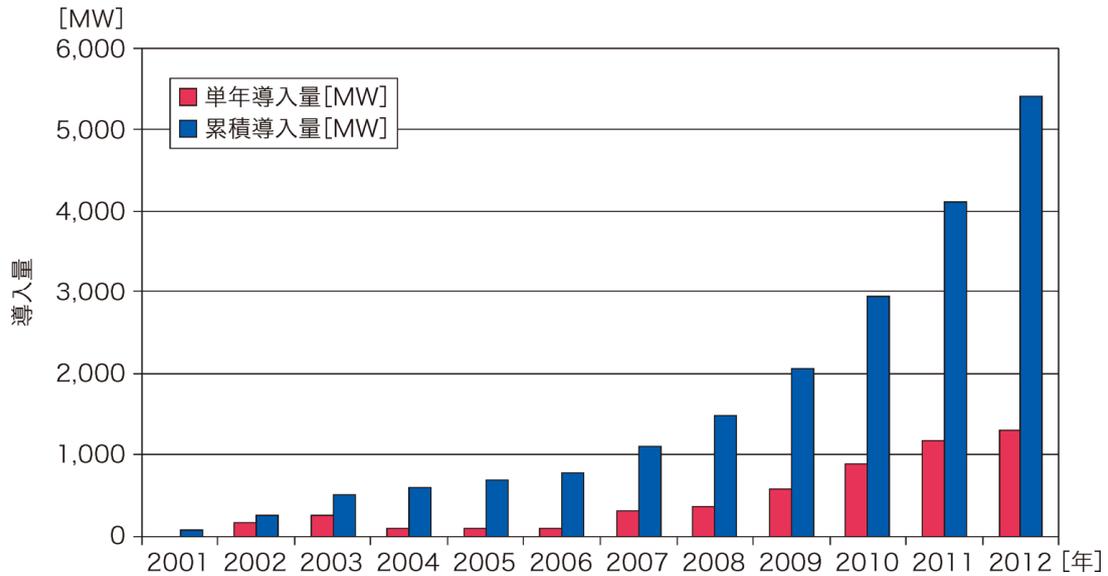


図 3-35 洋上風力発電累積導入量

出典：“Global Wind Report 2012”（2013, GWEC），“Global Wind Report 2011”（2012, GWEC）より NEDO 作成

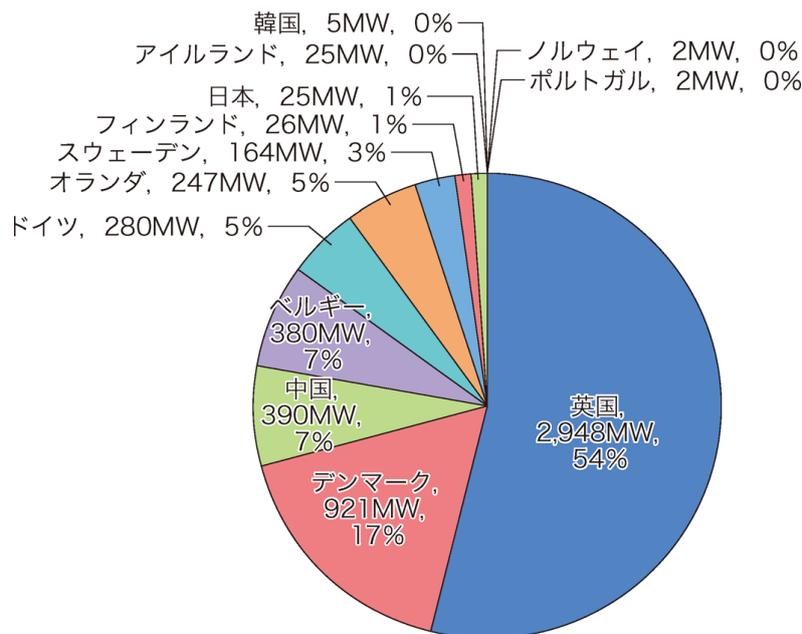


図 3-36 欧州における洋上風力発電累積導入量の国別内訳

注：2012 年末時点

出典：“Global Wind Report 2012”（2013, GWEC）より NEDO 作成

(2) 日本

日本の風力発電累積導入量の推移を図 3-37 に示す。日本における風力発電は 1990 年代後半から急速に導入が進み、2012 年度で累積容量 2,614MW に達しているが、世界第 13 位（発電容量 0.9%）にとどまる。世界市場を牽引している米国、中国市場と比較して、ここ数年の日本の伸び率は 10%前後と非常に小さい（図 3-33）。

第3章 風力発電

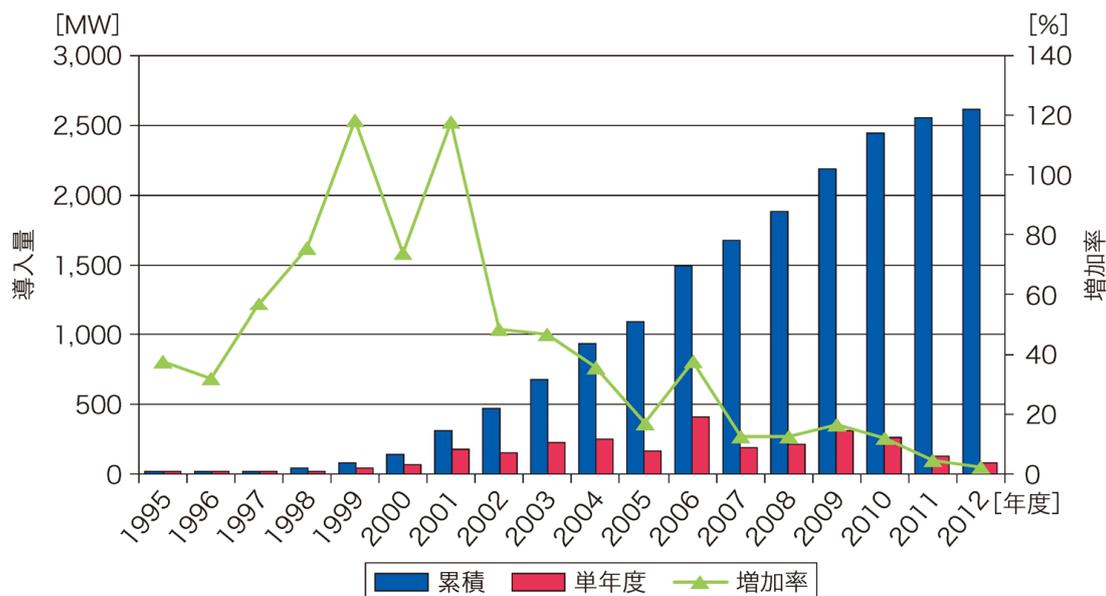


図 3-37 日本における風力発電の導入推移（累積・単年）

出典：NEDO 資料より作成

しかし、2011年8月26日、第177回通常国会において、日本版フィードインタリフ制度となる「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」が成立した。買取価格および期間は、20kW以上のシステムは23.1円/kWhで20年間、20kW未満のシステムは57.75円/kWhで20年間に決定され、2012年7月から制度運用が開始されている。本制度の開始によって、風力発電をはじめとする再生可能エネルギー導入促進が期待される（制度の詳細は第1章1.2.2節参照）。

3.3 世界の市場動向

3.3.1 市場の現状および将来見通し

3.2.3で示したとおり、世界の風力発電市場は年々拡大しており、これまで市場を牽引してきた欧米市場に加え、近年は中国をはじめとする新興国市場が急成長している。

図 3-38 に IEA（国際エネルギー機関）と、GWEC（世界風力エネルギー会議）による将来の導入量見通しを示す。2030年の世界の累積導入量は、IEAの見通しでは960GW、GWECの見通しでは1,778GWに達すると試算されている。地域別に見ると、両機関とも欧州が引き続き市場を牽引するのに加え、中国が欧州に次ぐ大規模市場に成長すると見通している。

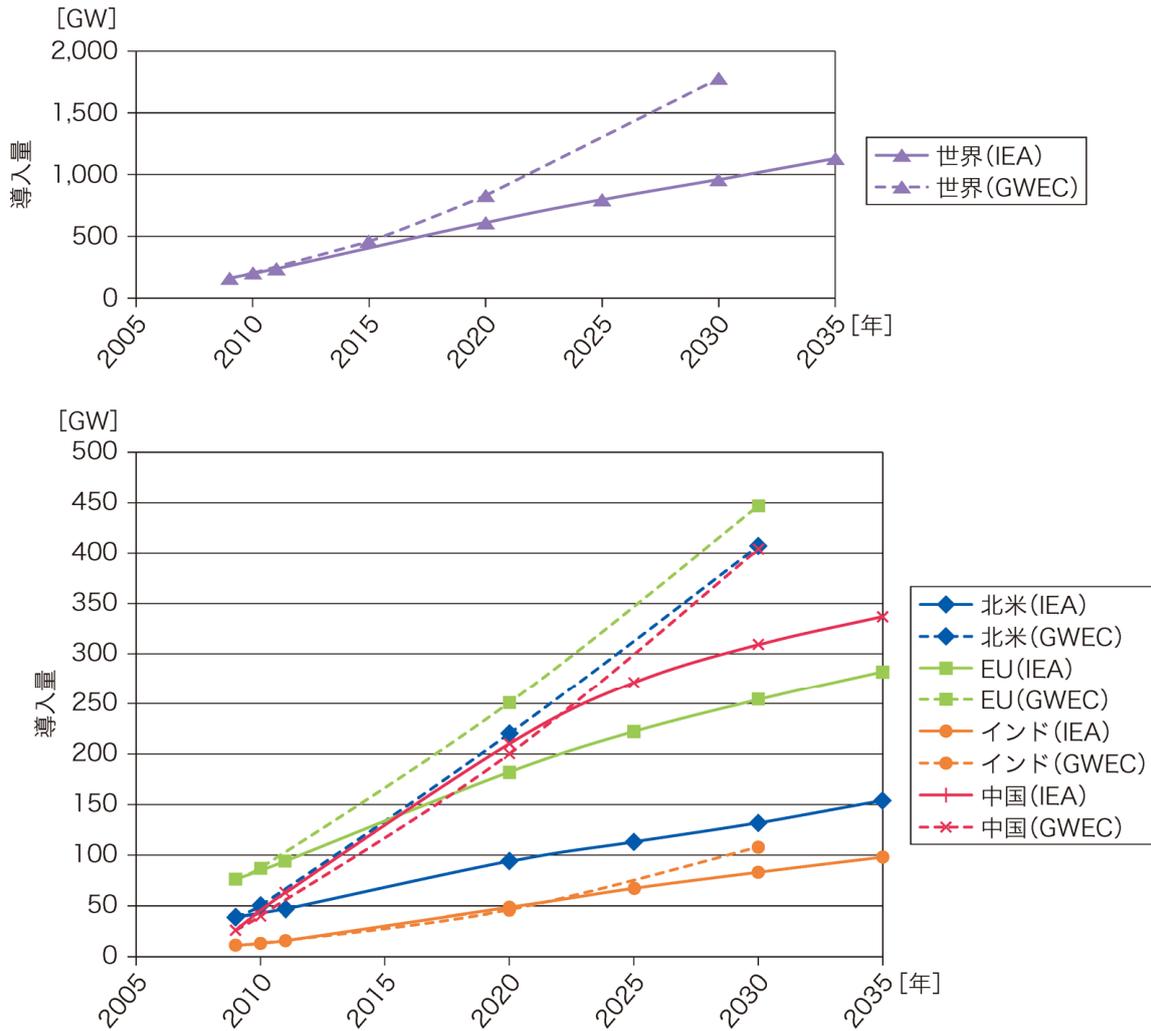


図 3-38 各機関による風力発電導入量の将来見通し（上：世界，下：主要国・地域）

注：それぞれ以下のレポート・シナリオの値。いずれも現状より政策的支援を強化したシナリオである。

IEA：World Energy Outlook (New Policies Scenario)

GWEC：Global Wind Energy Outlook (Moderate scenario)

出典：“World Energy Outlook 2013” (2013, IEA), “Global Wind Energy Outlook 2010” (2010, GWEC) より NEDO 作成

第3章 風力発電

3.3.2 風力発電機メーカーの合併・新規参入の歴史

表 3-16 および図 3-39 に風力発電機メーカーの M&A 動向, 合併・新規参入の歴史を示す。1990 年代は, 風力発電市場を牽引してきた先進国の風力発電機専門メーカーの合併による市場プレーヤーの淘汰が進められた。2000 年代に入ると, 資金力や販売網に強みを持つ重電メーカーや, 先進国からの技術供与を受けた新興国メーカーが同市場に参入するとともに, 供給力の確保の観点から, 部材メーカーなどの買収によって, サプライチェーンの垂直統合が進められた。

近年になり, 超大型風車や洋上風力分野の技術開発の進展に伴い, 風車デザインや製造技術に関する知的財産の保護などの観点から, サプライチェーンの垂直統合がより重要性を増している。また, 洋上風力発電市場への参入を目指し, 洋上風力発電機のコア技術を保有する企業との提携や買収の動きも活発化している。

表 3-16 風力発電メーカー各社の主要な M&A 動向

風車メーカー	買収動向
GE Energy	<ul style="list-style-type: none"> ・2011年に Convertteam (仏) を買収し, 同社のドライブトレインと発電機技術を取得。 ・2009年に ScanWind (ノルウェー) (ギアボックスと上位互換する先進的ドライブトレイン技術を保有するメーカー) を買収。
Siemens	<ul style="list-style-type: none"> ・2005年に Winergy (ギアボックスの世界大手メーカー) を買収。
Gold Wind	<ul style="list-style-type: none"> ・2008年に風車専門メーカーである Vensys (独) を買収。
Repower	<ul style="list-style-type: none"> ・2012年に PowerBlades (独) (ローターブレード開発メーカー) の株式を 100%取得。
Suzlon	<ul style="list-style-type: none"> ・2006年に, 増速機メーカー Hansen (独) を買収したが, 2011年10月に ZF Friedrichshafen (自動車関連装置・部材メーカー) に売却。 ・2009年に, ドイツの風力メーカー REPower を買収し, 洋上風力分野へ進出。
三菱重工	<ul style="list-style-type: none"> ・2010年, 英国の開発エンジニアリング企業である Artemis Intelligent Power の全株式を取得。洋上風力市場への参入において必要となる, 同社が保有する油圧ドライブ技術を確保。

出典：各社ホームページより NEDO 作成

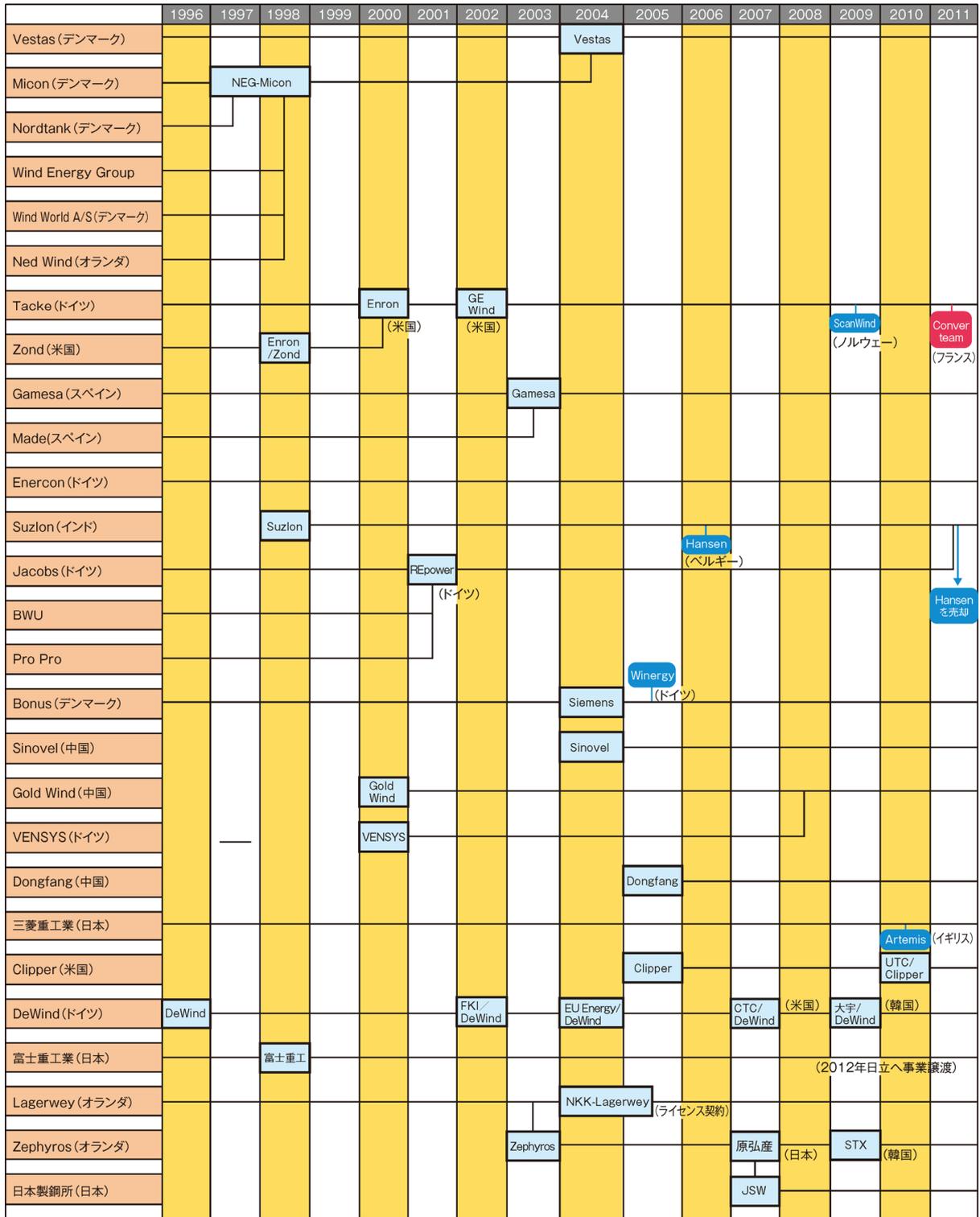


図 3-39 風力発電機メーカーの新規参入・再編の歴史

出典：日本風力発電協会資料および各社ホームページより NEDO 作成

第3章 風力発電

3.3.3 国別・企業別市場シェア

(1) 世界市場

図3-40に風力発電機の世界市場シェアの推移を示す。2010年には欧米メーカーがシェアを落とし、中国メーカー4社が上位に進出した（Sinovel第2位、Goldwind第4位、Dongfang第7位、United Power第10位）。中国メーカー各社は、欧米メーカーから技術供与を受け、低コストな製品を量産している。中国国内市場の立ち上がりによって生産量を大きく伸ばし、生産技術の習熟、サプライチェーンの拡大を進めている。生産能力の拡大によって、近年は国内市場に加え、海外市場への進出も進んでいる。また、独自の技術開発を積極的に進めており、陸上風力に加えて、洋上風力発電市場の獲得に向けた動きを加速させている。

しかし、ここ数年で上位企業は大きく様変わりし、2012年は中国メーカーがシェアを落とす一方で、欧米メーカーがシェアを取り戻している（GE Energy第1位、Vestas第2位、Siemens第3位、Enercon第4位）。欧州メーカーは陸上風力に加えて、洋上風力発電市場の獲得に向けた動きを加速させており、特にSiemensはシェアを伸ばしている。

日本メーカーについては、世界市場における存在感は小さいのが現状である。

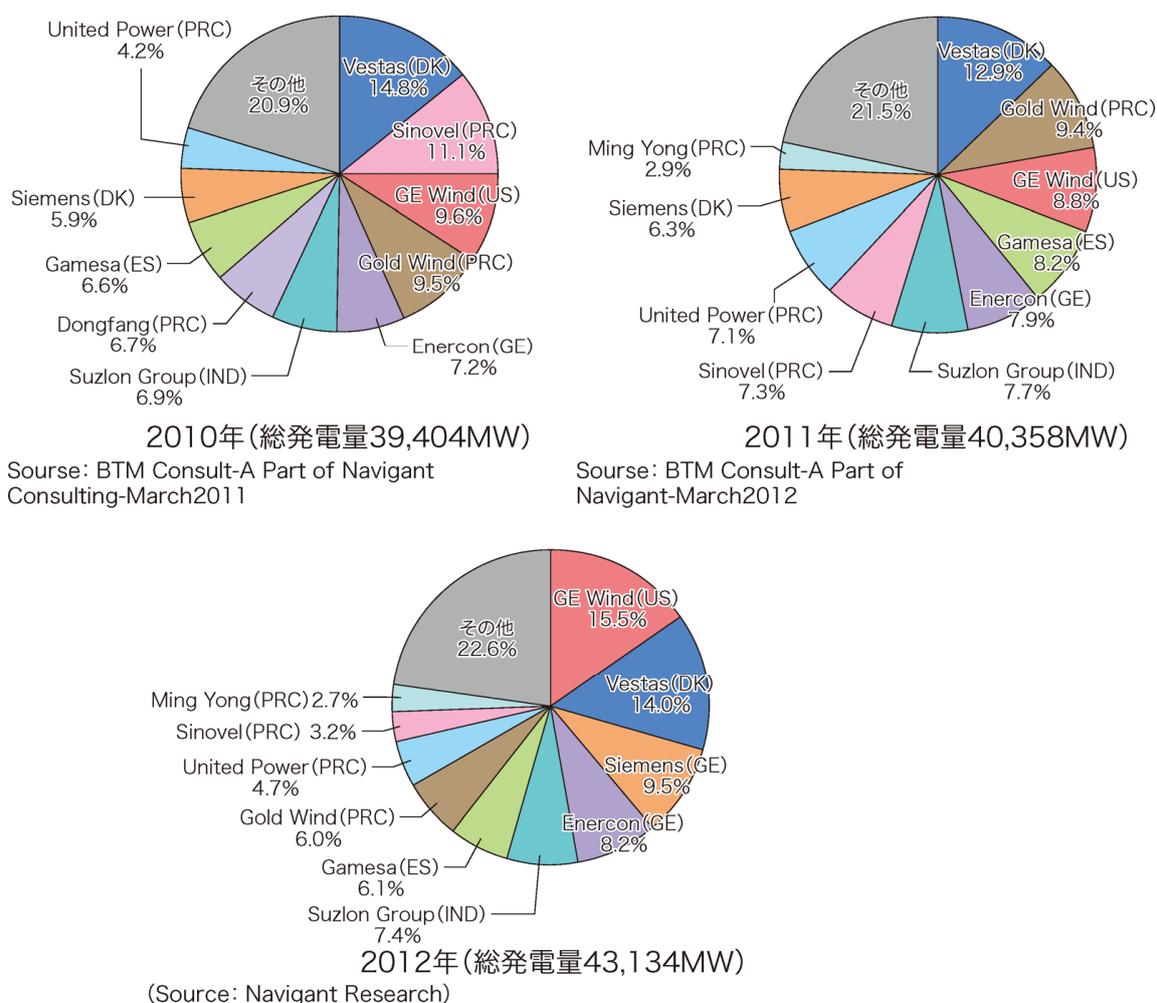


図3-40 風力発電機の世界市場シェア (2008年～2010年)

出典：Emerging Energy Research 資料， BTM Consult ApS 資料より NEDO 作成

洋上風力市場においては現在、Siemens と Vestas の寡占状態にあり、その他 Repower や Winwind, BARD, GE, Areva などが少量を供給している。しかし、Doosan, Gamesa, Alstom, Nordex, 三菱重工なども洋上風力市場参入への動きを見せており、陸上風力市場と同様、洋上風力市場においてもメーカー間競争が激しくなることが予想される (図 3-41)。

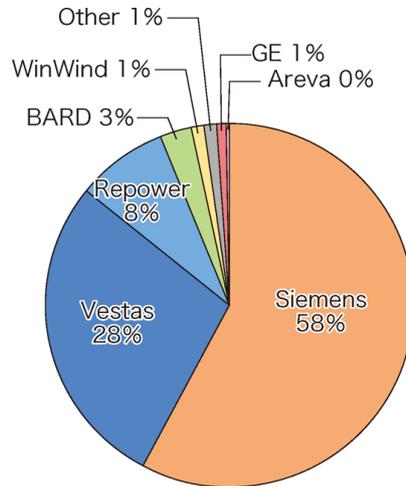


図 3-41 欧州の洋上風力発電機の市場シェア (2012 年時点)

出典：“The European offshore wind industry-key trends and statistics 2012” (2013, EWEA) より NEDO 作成

(2) 日本市場

日本国内の風力発電機は、現状では大半が欧米製である (図 3-42)。日本メーカーの市場シェアが小さい要因の一つとして、国内市場の未成熟が挙げられる。世界市場シェア上位のメーカーは、いずれも拡大する自国市場において技術・実績を確立し、世界展開している企業である。一方、日本の風力市場は海外と比較して小さく、海外市場で競争力を発揮できる日本メーカーを育成する環境が整っていなかった。しかし、国産機の導入割合は 2002 年から、少しずつ増加しており、国内市場における存在感は増しつつある (図 3-43)。

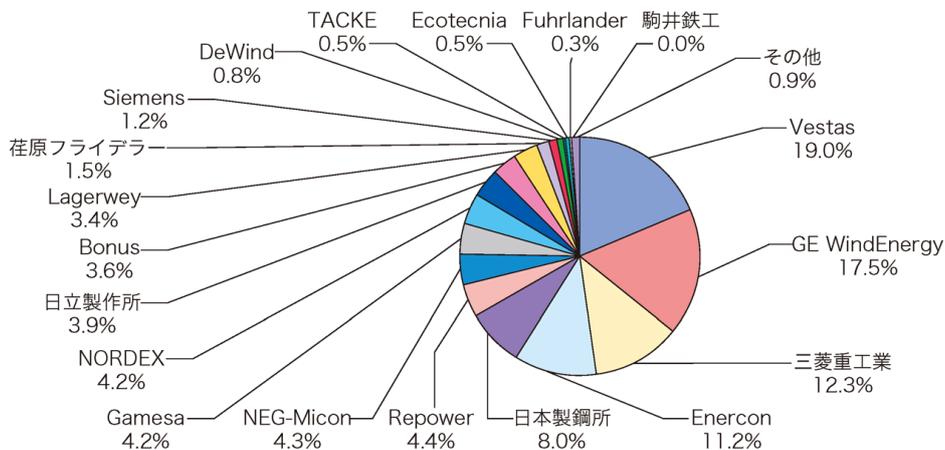


図 3-42 風力発電機の日本市場シェア (2008 年)

出典：NEDO 資料より作成

第3章 風力発電

海外機・国産機の導入量の推移(累積)

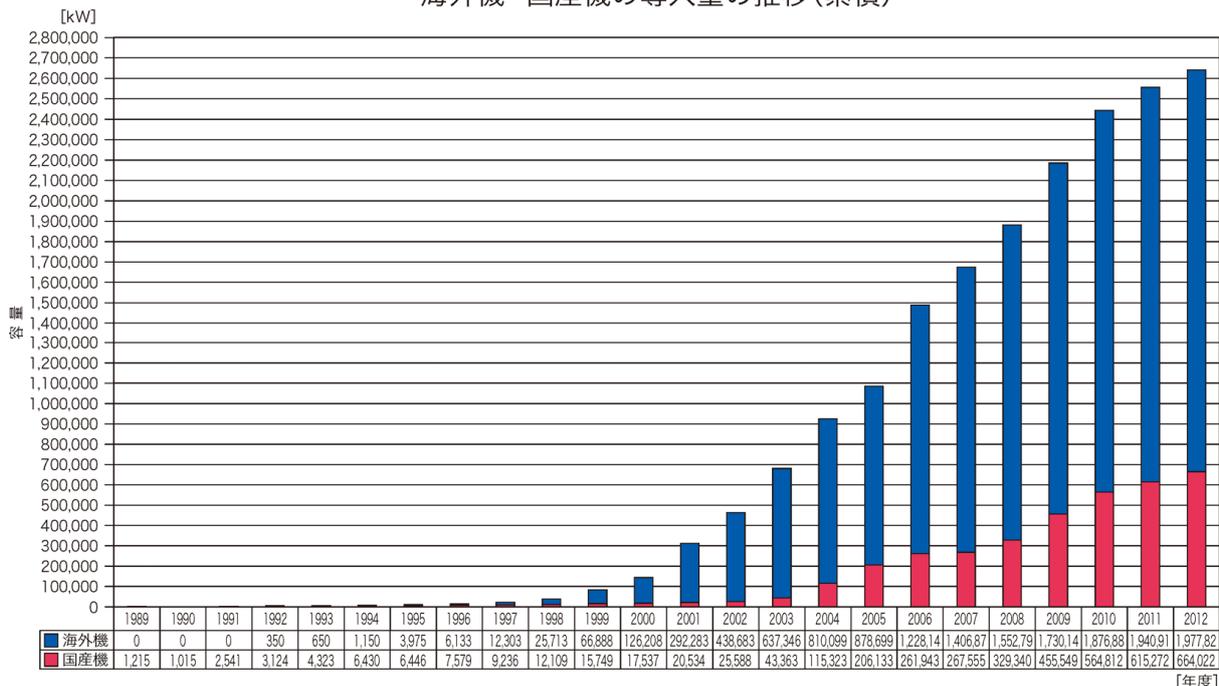


図 3-43 国内における海外機・国産機別導入割合（累積基数）の推移

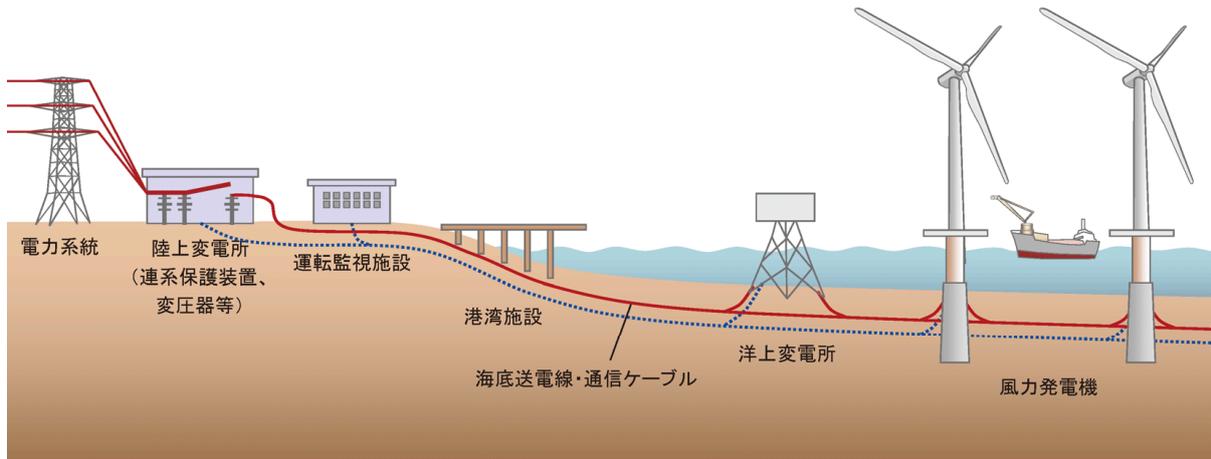
出典：NEDO 資料より作成

3.3.4 洋上風力のサプライチェーン

(1) 洋上風力におけるサプライチェーン

3.2.3 にて示したとおり、陸上の適地減少に伴い、欧州を中心に洋上風力発電の導入量が増加しており、市場の拡大に伴い、図 3-44 に示すサプライチェーンが構築されつつある。

図 3-45 に、欧州における洋上風力発電市場の主要プレーヤーの位置関係を示す。デンマークとドイツは、かねてから風力発電機の主要サプライヤーとしての役割を果たしてきた。また、オランダ、ベルギー、英国は、北海の石油・ガス開発のノウハウを生かし、海洋土木工事の分野で重要な役割を果たしている。関連電気設備や海底ケーブルのサプライヤーは、ノルウェーやスウェーデン、ドイツ、イタリアなど、各国に分散している。近年、洋上風力市場を牽引している英国は、洋上風力産業に積極的に投資しており、北海における国内外市場への展開を見据え、同国東海岸に関連設備を増強している。このように、欧州は洋上風力市場を支えるサプライチェーンの拡充が進んでおり、同市場の成長を支える基礎となっている。



	港湾管理	海底ケーブル (製造)	海底ケーブル (敷設)	海洋土木	電気設備	基礎	風力発電機
主要企業	—	Nexans, Prysmian, ABB NKT, Scanrope	Technip, CT Offshore, Global Marine, Vesser&Smit	A2Sea, MPI, SHL, Geosea	ABB, Siemens Energy, Alstom Grid	SIF, Smulders, Bladt, EEW, Weserwind, BiFAB, Aker	Siemens, Vestas, Repower, Areva
新規参入企業	—	DRAKA, JDR	Beluga	Fred Olsen, Beluga, Inwind, GOAH, Sea Jacks	C&G	H&W, TAG, Tata, Hereema, ZPMC, Shinan, Fabricom	BARD, GE, Doosan, Gamesa, Alstom, Nordex, 三菱重工

図 3-44 洋上ウィンドファームの主要構成要素（再掲）とサプライチェーン

出典：“Wind in our Sails”（2011, EWEA）より NEDO 作成

第3章 風力発電

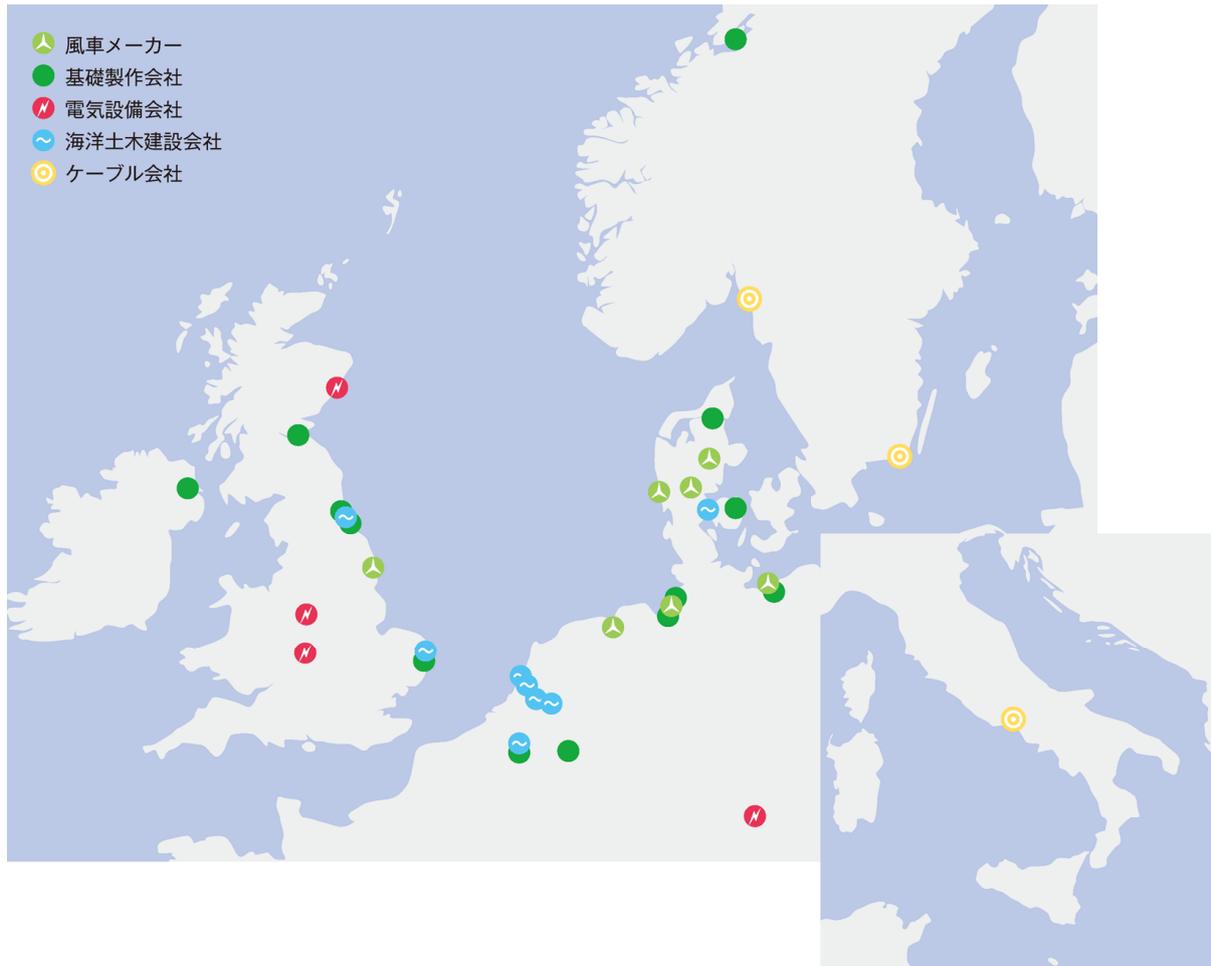


図 3-45 欧州における洋上風力発電市場の主要プレイヤーの位置関係

出典：“Wind in our Sails”（2011, EWEA）より NEDO 作成

(2) 洋上風力市場における開発事業者の動向

図 3-46 に、欧州の洋上風力市場における、開発事業者別の市場シェアを示す。洋上風力市場は北海を中心に拡大しており、北海周辺国（デンマーク、ドイツ、英国、スウェーデンなど）の大手発電事業者が中心となり、開発が進められてきた。今後も、大手発電事業者が開発の中心的存在になると考えられるが、Statoil などの海洋土木の技術を持つ石油・ガスの大手企業や、丸紅などの商社、Belwind や BARD などの風力開発事業者など、参入企業の業種・国は多様化している。

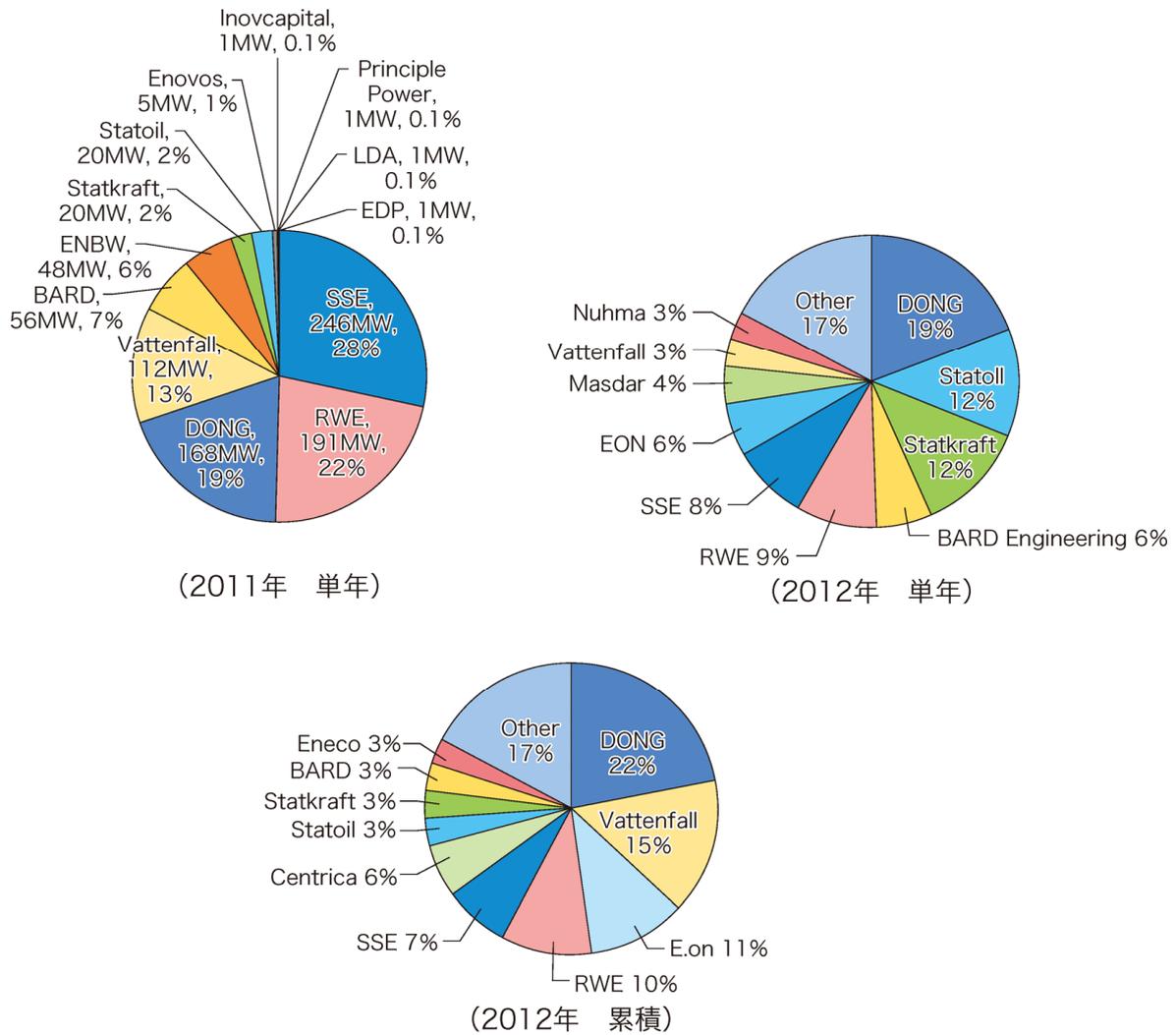


図 3-46 開発事業者別市場シェア（上段：単年度 下段：累積）

出典：“The European offshore wind industry key 2011 trends and statistics” (2012, EWEA), “The European offshore wind industry key trends and statistics 2011” (2013, EWEA) より NEDO 作成

3.4 各国の技術開発動向

3.4.1 技術開発の歴史と近年の動向

(1) 技術開発動向の概観

陸上風力の技術開発は、1970年代のオイルショック以降、欧米にて本格的に開始され、やや遅れて日本もスタートした。風車の形式としては、水平軸と垂直軸それぞれについて研究開発が行われてきたが、1990年代以降、現在に至るまで、大型風車は3枚翼の水平軸プロペラ式風車が主流となっている。また、風力エネルギー密度は風速8m/sで約0.3kW/m²と低く、単機出力を増大させるためには風車サイズを大きくせざるを得ないことから、大型化に係る技術開発が重要課題となってきた。世界の風車の平均サイズは国によっても異なるが、陸上風力の平均サイズは2MW前後まで大型化してきている。各種技術開発によって、現在、陸上風力の発電コストは10円/kWh前後¹²にまで下がっており、火力などの従来電源や他の再生可能エネルギーとコスト競

¹² 3.1.2 (2) 発電コスト節参照。

第3章 風力発電

争力を持つ水準となったことから、世界的に導入量が大きく拡大している。このように、陸上風力については技術が成熟期を迎えており、風力発電機の改良（信頼性・耐久性の向上やブレードを長くした低風速風車など）に加えて、風況予測の高精度化や系統連系・制御システム開発などの周辺技術へと、技術開発ステージが進んでいる。

また、近年になり、先進国を中心に陸上における適地が減少していることから、さらなる導入拡大を目指して、洋上風力の技術開発が活発化している。洋上風力は陸上風力と比較して、設置、係留、系統連系、運転・保守に掛かるコストが大きいことから、採算性を確保するためには1基当たりの発電量の増加が重要であること、また船があればどこへでも機材の運搬は可能なことから、さらなる大型化に向けた技術開発が推進されている。洋上風力発電の平均単機容量は年々拡大しており、現在導入されているものは2~3MW機が主流であるが、5~10MW以上の超大型風力発電機の技術開発競争が始まっている（図3-47）。また、各海洋条件に適した基礎構造の技術開発や、メンテナンスコスト削減を目的としたダイレクトドライブ（ギアレス）風車、発電機の軽量化・大容量化を目指した超電導風力発電機などの次世代ドライブトレインなどの開発が行われている。加えて、深水域への設置を可能とする浮体式洋上風力の開発も進められている。

このように、洋上風力については多くの技術開発課題が残されており、各国において洋上風力に係る技術開発が中心となりつつある。

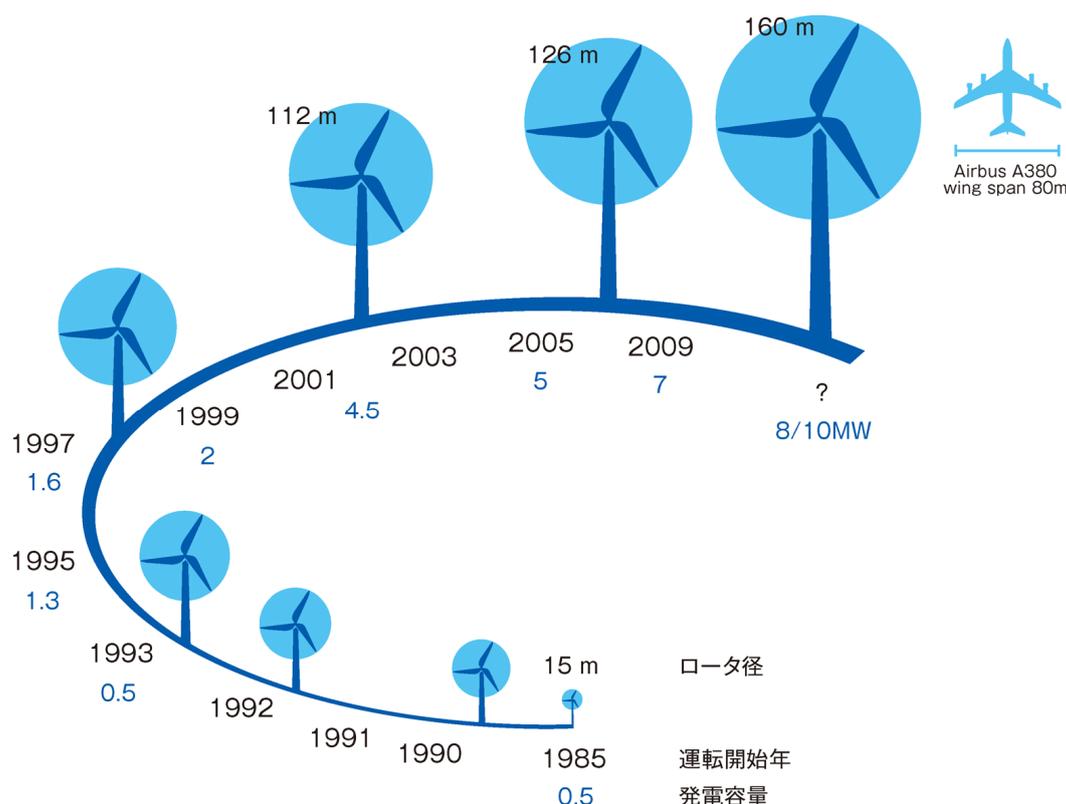


図 3-47 世界の風車の大型化の推移

出典：“Wind Energy Factsheets 2010” (2011, EWEA) より NEDO 作成

表 3-17 陸上・洋上風力の主要な技術開発課題

種類	主要な技術開発課題
陸上風力	<ul style="list-style-type: none"> ・風況予測の高精度化 ・系統連系・制御システム開発 ・低風速風車
洋上風力	<ul style="list-style-type: none"> ・超大型風車 ・基礎構造の最適化 ・次世代ドライブトレインの開発 ・浮体式洋上風力

出典：NEDO 作成資料

(2) 単機容量およびウィンドファームサイズの大型化

一般に、風は地上から上空に向かうほど強くなるため、風車の高さ（ハブ高さ）はできるだけ高くしたほうが取得エネルギーは増大し、発電量は増加する。また、風車の取得エネルギーは風車の羽根（ブレード）の回転面の受風面積に比例するため、ブレードを長く（風車ロータ直径を大きく）することでも取得エネルギーは増大する。風車の大型化によって1機当たりの発電出力を増大させるとともに、複数機配置によってウィンドファーム全体の出力を増大させることで、発電コストを低減することが可能であることから、ウィンドファームの大規模化が進んできた。

図 3-48 に平均単機容量の推移を、図 3-49 に平均ウィンドファーム規模の推移を示す。国によっても異なるが、陸上風力の平均単機容量は 2MW 前後にまで大型化してきている。プロペラ式風車の大きさは、定格出力が 600kW の場合、タワーの高さは 40～50m、ロータ直径は 45～50m で、1～2MW の場合、タワーの高さは 60～80m、ロータ直径は 60～90m が一般的である。なお、風車の大型化については、風車の重量がロータ直径の 3 乗に比例するのに対して、取得エネルギーはロータ直径の 2 乗に比例することから、風車に掛かるコストは直径の 3/2 乗に比例して増加する。したがって、構成機器の強度を向上させる、あるいは風車にはたらく空力荷重を低減させるなどの技術的ブレークスルーがなければ、大型化はかえってマイナスとなる。また、山間地は機器設置の観点から大型風車に適さず、今後は各国の自然条件に応じたシステムサイズに分化していくものと推察される。

第3章 風力発電

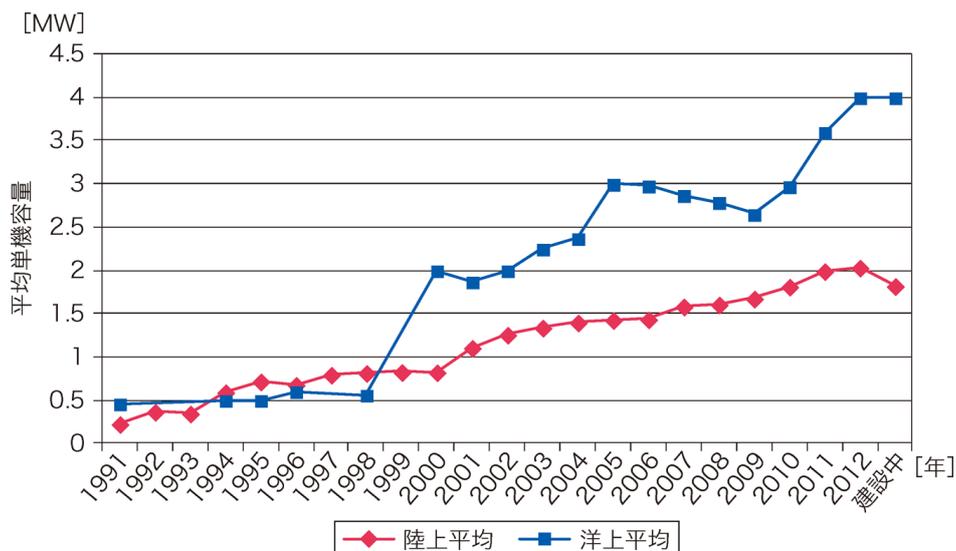


図 3-48 風車の平均単機容量の推移

出典：陸上：The Wind Power ホームページより NEDO 作成，
 洋上：“The European offshore wind industry key trends and statistics 2012” (2013, EWEA) より NEDO 作成

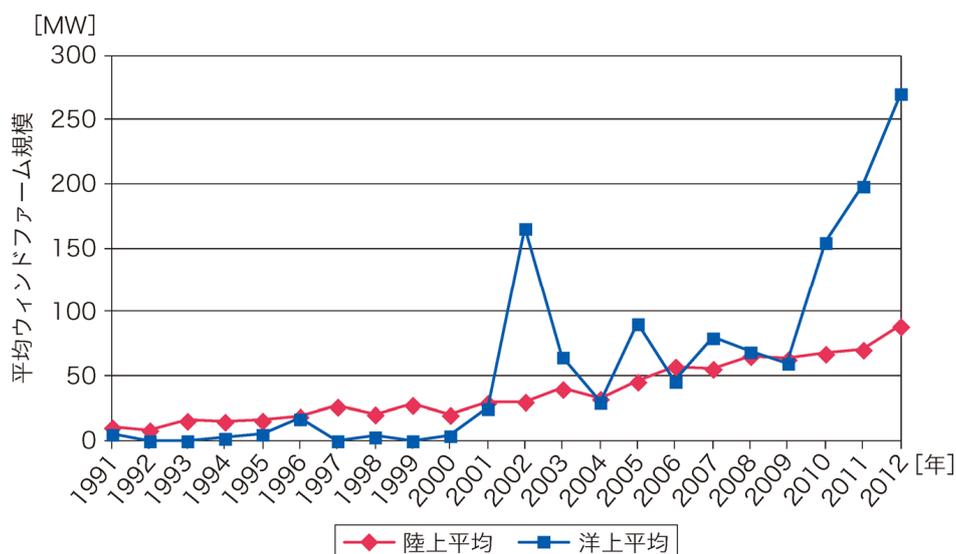


図 3-49 平均ウィンドファーム規模の推移

出典：陸上：The Wind Power ホームページより NEDO 作成，
 洋上：“The European offshore wind industry key trends and statistics 2012” (2013, EWEA) より NEDO 作成

洋上風力は、陸上風力と比較して設置コストが掛かることから、単機当たりの発電量の増大がより重要であり、平均単機容量のさらなる大型化が進んでいる。現在、5～10MW の超大型風車の技術開発が進められており（詳細な技術開発動向は 3.4.3 を参照）、例えば Vestas 社の 7MW 機のロータ径は 164m の設計である。また、ウィンドファーム規模も陸上風力より大規模化する傾向にある。

(3) ドライブトレイン・発電機の動向

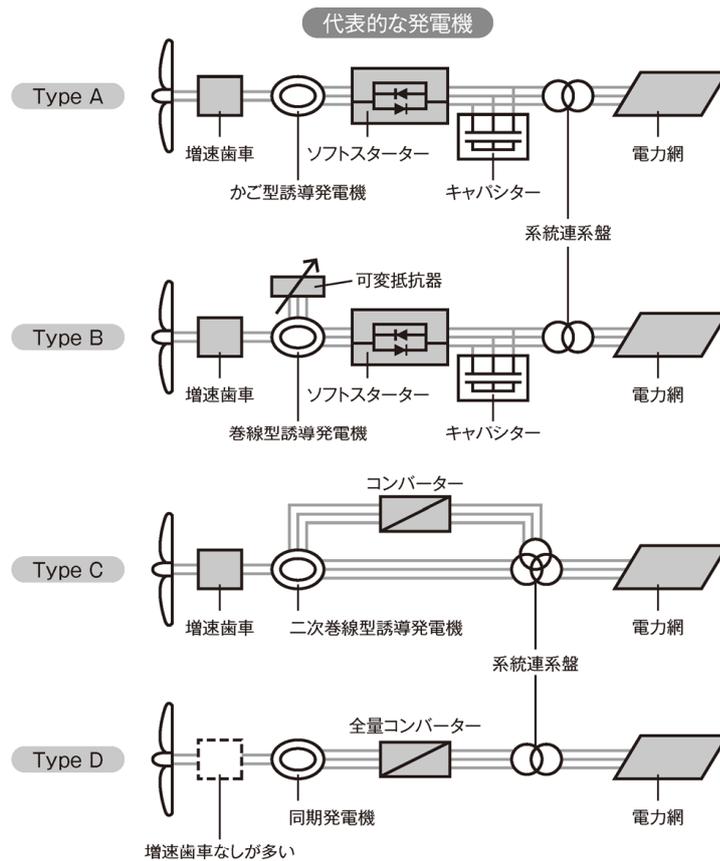
ドライブトレインとは、風力発電機に採用されている動力伝達システムのことであり、風力発

電機は、変速システムや発電機の種類の違いによって、**図 3-50** のように分類される。変速システムは、増速機を用いて回転数を上げてから発電機に伝達する増速機方式と、風車の回転をそのまま発電機に伝達するダイレクトドライブ方式（ギアレス）に分類される。

陸上風力においては、増速機方式の風車が一般的であるが、歯車とベアリングの複雑な相互作用で動く従来の増速機は、定期的なメンテナンスを必要とし、特に高速状態では不具合が起りやすい。陸上風力においては、タービンへのアクセスが容易なため、増速機のメンテナンスはあまり問題にはならないが、洋上風力においては、作業船のレンタル料や故障機器の修理、メンテナンススタッフの動員などによって高コストとなる。そのため、求められる発電容量に応じて、ブレードや発電機を改良しながら増速機のギア比を最適化することで、コストや総重量を抑えることが検討されている。また、増速機を用いないダイレクトドライブ方式が採用される傾向が強まっている。ダイレクトドライブ方式は、増速機を用いない分、低速で発電することができる極数の多い発電機を用いるため、従来の増速機方式に比べて生産コストが高いなどの欠点はあるが、先に述べた増速機の故障リスクの回避やメンテナンスコストの削減に加え、増速機による伝達ロス削減、重量削減などの利点も有している。さらに、新しいドライブトレインの方式として、油圧を用いる方式が検討されている。この方式では、翼が受けた風力エネルギーを油圧ポンプ内で高圧の油圧エネルギーに変換する。さらに、この高圧の油圧エネルギーを用いて油圧モータを駆動し、デジタル制御によって電力系統の周波数に合う一定の回転数へ昇速して発電機を電力系統につなぎ、稼働させている。油圧を用いるこの方式を採用すると、油圧ポンプとモータを個々に制御できるだけでなく、従来は必要とされた歯車や周波数変換装置が不要となる。発電機については、誘導発電機、または同期発電機のいずれかの交流発電機が用いられている。誘導発電機は増速機方式の風力発電機に採用されており、回転子の形状や系統連系方式の違いによって、かご型誘導発電機、巻線型誘導発電機、二次巻線型誘導発電機などに分類される。以前はかご型誘導発電機および巻線型誘導発電機が発電機の主流であったが、大型化が進むにつれ、出力変動抑制などへの対応から、二次巻線型誘導発電機が主流になりつつある。

ダイレクトドライブ方式に用いられる同期発電機について、近年は小型化・軽量化を目的として、永久磁石発電機の技術開発が推進されている。巻線型誘導発電機は、発電時に回転子に駆動電力を供給する必要があるが、単独運転はできないが、永久磁石発電機は回転子への電力供給が不要であることに加え、発電機の径は大きくなるものの、大幅重量低減、ナセル容量の削減が可能とされている。また、高効率化と軽量化を目的とした超電導技術の開発も行われている。

第3章 風力発電



Type	変速システム		発電機	長所	短所
A	低速	増速機方式	かご型誘導発電機	安価, 構造がシンプル, 頑丈	フリッカ電圧, 電力調整不可, 抵抗率
B	可変速	増速機方式	巻線型誘導発電機	最適な出力調整可	コンバータサイズ, 高価
C	可変速	増速機方式	二次巻線型誘導発電機	最適な出力調整可, コンバータがコンパクト	速度範囲の制限, 高価
D	可変速	ダイレクトドライブ方式 (ギアレス) が多い	同期発電機	電圧および出力調整可, ギアレス, 高効率, 頑丈, 自己励磁	全量コンバータが必要, 発電機構成が複雑, 非常に高価

図 3-50 代表的な発電方式

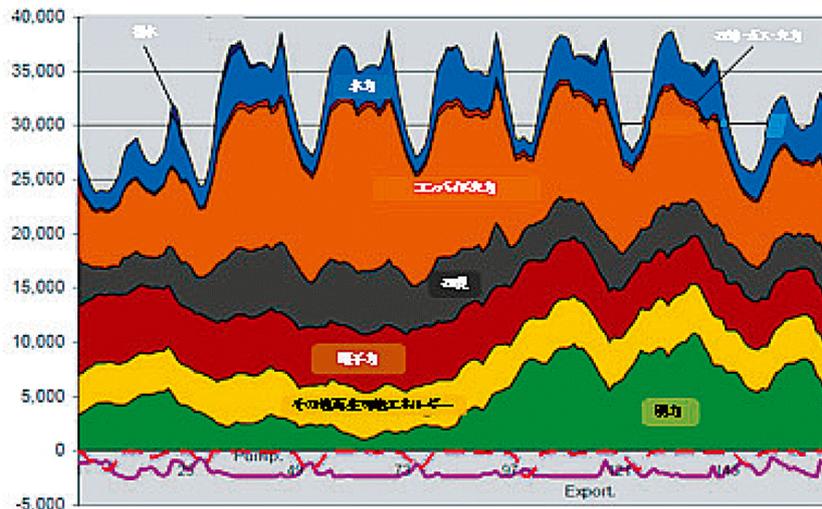
出典：日本風力発電協会資料より NEDO 作成

(4) 系統連系・制御に係る技術開発

風力をはじめとする再生可能エネルギーは、気象によって出力が大きく変動することから、大量に導入された場合、発電出力変動の増大に対応すべき周波数調整能力が不足し、周波数変動が拡大する可能性がある。FP7 では現在、TWENTIES プロジェクトにおいて、風力発電の大量導入時の系統連系制御に係る技術開発が進められている。本プロジェクトは、送電系統運用者 6 社、発電事業者 2 社、風力メーカー 5 社および研究機関が参画しており、大規模実証プロジェクトを通して、系統連系制御に係る技術の利点と効果を検証することを目的としている。現在 6 つの実証プロジェクトを通して、出力変動制御に有用な技術、洋上風力発電導入に必要な系統連系技術などについて検討が進められている。

この課題に対し、風力先進国の一つであるスペインは、供給電力に占める風力発電の比率が年間平均で 10%、最大で 40%に達しながらも、大きなトラブルもなく電力系統の運用・維持を可能とし、注目されている（図 3-51）。スペインの系統運用会社である Red Electrica de Espana 社は、再生可能エネルギーによる電力安定供給の確保を目的として、CECRE（再生可能エネルギーコントロールセンター）を立ち上げている。CECRE は、スペインの電力系統全体を制御する CECOEL/CECORE に組み込まれており、制御・監視システム GEMAS を用いて、リアルタイムで監視・制御することによって、風力発電の発電電力を最大限に活用し、火力、水力、原子力の制御と合わせて、他国との電力のやり取りを最小化している。本制御システムによって、スペインの全発電設備の年間発電電力量に占める風力の割合は 10%を超えているが、2008 年 3 月には 40%を超える比率を記録している。

また、発電量予測に当たっては、風況予測技術の高精度化が重要となる。モデル予測精度の向上は、欧州の FP7 においても重点開発項目の一つに挙げられており、複雑な風況における発電量予測ツールの精度向上を目的とした SAFEWIND プロジェクトが実施されている。



※マイナス側に表示されている線は揚水（ポンプ運転）と国際送電電力

図 3-51 風力発電電力が多かった日の供給電力構成（2008 年 4 月 13 日～4 月 19 日）
 出典：“Integration of largescale wind in the grid-The Spanish Experience”（2008, RED ELECTRICA）

第3章 風力発電

3.4.2 主要国の技術開発動向

(1) 日本の技術開発動向

日本ではこれまで、NEDOによって、100kW級パイロットプラントの開発（1981～1986年）、500kW級風車の開発・運転研究（1985～1998年）などが実施され、その後、風力発電機大手メーカー各社が立て続けに2MWクラスの風車を開発・実用化し、国内外における実績を積んできた。現在は、NEDOにおいて表3-18に示す技術開発プロジェクトが進行している。

表3-18 洋上風力発電等技術研究開発を修正

事業・プロジェクト名	概要
洋上風力発電等技術研究開発	<ul style="list-style-type: none"> 我が国特有の海上風特性や気象・海象条件を把握し、洋上環境影響評価手法を確立するとともに、実際に洋上に風力発電機を設置して性能評価などを行う。 革新的な超大型風力発電システムに係る技術開発を行う。 洋上ウィンドファームの開発に係る風況精査、海域調査、環境影響評価や、風車、基礎、海底ケーブル、変電所等の設計、施工等の検討を行う。 洋上風況を安価でかつ精度よく観測可能な風況観測システムを開発する。 港湾や航行、漁業等の利害関係者や地域住民等と合意形成を図るために必要となる手段、仕組み、方法等について検討を行う。
風力発電高度実用化研究開発	<ul style="list-style-type: none"> 先進的な次世代風車に適用可能な発電機や主要コンポーネントなどの性能向上に係る実用化開発を素材レベルから一体的に実施する 設備利用率の向上を目的として、高効率なメンテナンス手法を開発するとともに、実際に既設風車による実証試験を実施する。 10MW以上の超大型風車の調査研究を行い、発電機等を含むシステム全体の実現可能性を評価する。

出典：NEDO 作成資料

洋上風力については、1990年代後半から洋上風力発電に関する調査・研究開発が開始され、「日本における洋上風力発電の導入可能性調査」（1998）、「離島地域等における洋上風力発電システム技術開発課題および今後の方向性に関する調査」（2000）、「洋上風力発電導入のための技術的課題に関する調査」（2006）などが実施されてきた。現在、北海道久遠郡せたな町、山形県酒田市、茨城県神栖市の3ヵ所で着床式洋上風力発電が設置されているが、実績では欧州に遅れを取っている。

NEDOは「洋上風力発電等技術研究開発事業」を平成20～28年度に実施している。平成20年度は全国6海域での実施可能性調査を実施しており、平成21年度からはそのうちの2海域（千葉県銚子沖、福岡県北九州市沖）で洋上風況観測システムの実証研究を開始した（表3-19）。

また、平成22年度からは国内初の沖合での洋上風力発電システム実証研究を開始している。日本の自然環境に適した洋上風力発電設備の開発、洋上風力発電設備の運転保守方法の確立、環境影響調査、洋上風力発電設備の設計指針案の作成などを予定しており、成果が期待されている。

表 3-19 NEDO 洋上風力発電システム実証研究の概要

共同研究先	項目	概要
東京電力株式会社	設置場所（洋上）	千葉県銚子市南沖合約 3 km（水深約 12 m） ※洋上風況観測システム実証研究の実施海域
	ロータ直径	約 92 m（2.4 MW）
	研究期間	2010 年 5 月～2015 年 2 月
	事業費	約 35 億円（内、NEDO 負担額は総事業費の 2/3）
	実証機	 <p>洋上風況観測設備（左） 洋上風力発電設備（右）</p>
電源開発株式会社	設置場所（洋上）	福岡県北九州市沖合約 1.4 km（水深約 14 m） ※洋上風況観測システム実証研究の実施海域
	ロータ直径	83 m（2 MW）
	研究期間	2011 年 8 月～2015 年 2 月
	事業費	約 35 億円（内、NEDO 負担額は総事業費の 2/3）
	実証機	 <p>洋上風況観測設備（左） 洋上風力発電設備（右）</p>

出典：NEDO 作成資料

浮体式洋上風力発電の研究については、2001 年度から複数の機関で実施されてきた（表 3-20）。2009 年、京都大学・佐世保重工などが 2MW クラスの風車をスパー型の浮体に搭載する想定で、10 分の 1 モデルの浮体を海上に浮かべる実験を実施し、2010 年度からは環境省が、2016 年度の浮体式洋上風力発電の実用化を目指し、「100kW 級浮体式洋上風力発電実証事業」を開始した。2010 年度は、環境影響評価方法の検討、地域受容性評価、基本設計などを実施し、2011 年度の準備期間を経て、2012 年 6 月には洋上設置に成功し（図 3-52）、2013 年 10 月には 2MW の風車を導入して運転を開始した。

第3章 風力発電

表 3-20 日本における浮体式洋上風力発電の研究開発の状況

年度	機関	概要
2001	日本海洋開発産業協会	海洋資源・エネルギーを複合的に活用する沖合洋上風力発電等システムの開発調査研究
2002	日本海洋開発産業協会	浮遊式風力発電基地の自然エネルギーの最適輸送技術に関する調査研究
2003～2005	海上技術安全研究所	浮体式洋上風力発電による輸送用代替燃料創出に資する研究
2003～2007	国立環境研究所	洋上風力発電を利用した水素製造技術開発（セイリング式 ¹³ ）
2005～2006	東京電力・東京大学	フロート式洋上風力発電に関する研究
2009～2010	京都大学・佐世保重工等	浮体式洋上風力発電に関する研究
2011	NEDO	浮体式洋上風力発電に係る基礎調査
2011～	環境省	浮体式洋上風力発電実証事業（長崎県沖）
2012～	経済産業省	浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業

出典：NEDO 作成資料



発電設備（ふくしま未来）



発電設備（ふくしま絆）

図 3-52 浮体式洋上風力発電施設の形状寸法

出典：浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業ホームページ

NEDO においては、2011 年度に「浮体式洋上風力発電に係る基礎調査」を実施した。また、2012 年度からは経済産業省において「浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業」を開始し、福島県沖で事業を推進しており、その第一歩として、2MW クラスの浮体式洋上風車を 2013 年 11 月に運転を開始した。

浮体式に関しては、ノルウェーにおける Siemens 社やポルトガルにおける PrinciplePower 社の実証試験が先行している（次節にて紹介）。また、2010 年 3 月、IEC（International Electrotechnical Commission）の国際会議において、韓国から浮体式風車の標準化の提案が行われており、世界的にも浮体式風車の実用化に向けて開発競争の時代に入りつつある。

（2）日本メーカーのビジネス動向

1) 三菱重工業

三菱重工業は日本を代表する重工業メーカーであり、国内最大手風車メーカーである。同社は 1980 年から風車の製造を開始し、現在は 1MW 機および 2.4MW 機を製造している。同社は、国内市場とともに米国市場を中心にビジネス展開をしており、2010 年には米国アーカンソー州に風力発電設備組み立て工場の建設を開始した。

¹³ セイルを擁する非係留大型浮体上に風車を搭載して発電する方式。

2010年に、洋上風力発電市場への参入に向けて、英国政府からの補助金によって7MW機の開発実証に着手した。英国の開発ベンチャーであるアルテミス社を買収し、NEDOの助成を受けて同社の保有する油圧トランスミッション技術を用いた洋上風車用油圧ドライブトレインの開発に取り組むとともに、ブレードを含めた新型設備を開発している¹⁴。2012年に国内検証し、2013年に英国において実証試験を行い、2015年から商用量産を予定している。

表 3-21 三菱重工の製品ラインアップ

機種	設置場所	発電容量 [MW]
MWT-1000 A	陸上	1
MWT92/2.4	陸上	2.4

出典：三菱重工業ホームページより NEDO 作成

2) 日立製作所

日立製作所は、日本の複雑地形特有の吹上風への対応に有利となる、2MWのダウンウィンドロータ方式の風車を2003年に富士重工業と共同開発し、現在国内において約30基の同社製風車が設置されている。日立製作所は、発電機や電力制御部分の設計・製造、および風力システムの販売と据付を担当、富士重工業は風車本体のナセル、ブレード、タワーの設計・製造を担当し、事業を展開してきた。2012年7月に富士重工業から日立製作所へ風力発電システム事業が譲渡されている。

ダウンウィンドロータ方式は洋上設置に適しているといわれている。タワーの風下側にロータが位置しており、ロータ回転軸が風上に向かって下を向いているため、風向とロータ軸との間の角度誤差はアップウィンド型の風車に比べて少ないことから、アップウィンド型に比べて発電量を多く獲得できるとされている（図 3-53）。

表 3-22 日立製作所の製品ラインアップ

機種	設置場所	発電容量 [MW]
HTW2.0-80	陸上	2
HTW2.0-86	陸上	2

出典：日立製作所ホームページより NEDO 作成

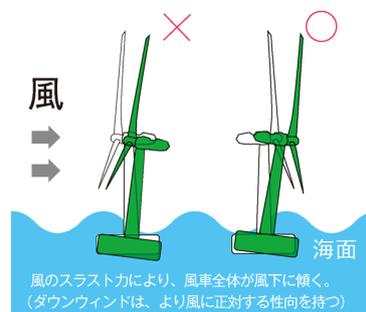


図 3-53 浮体式洋上風車でのダウンウィンド方式の優位性

出典：NEDO ホームページ

¹⁴ 風力等自然エネルギー技術研究開発／洋上風力発電等技術研究開発／超大型風力発電システム技術研究開発（2010年～2014年）

第3章 風力発電

同社は2012年7月、ダウンウィンド方式の特徴を生かした世界初の5MW級ダウンウィンド洋上風力発電システム開発への着手を発表した。2014年度から実証試験を開始し、2015年の販売開始を目指すとしている。

3) 日本製鋼所

日本製鋼所は、ダイレクトドライブ方式風力発電機を製造している。発電機は、永久磁石同期型発電機を使用しており、一般的な風力発電機にある増速機、主軸がないため、損失が少なく、高い発電効率を実現している。また、潤滑が必要な部品が少なく、部品点数も少ないことから、保守が容易で、保守コストの大幅な低減を可能とした。フルコンバータを使用しており、系統への影響もほとんどないため、系統の弱い地域にも対応可能である。ブレードは主に国内で製造し、J82は国内で105基の実績がある。新型機のJ100は平成25年に初号機の運転が開始される。

表 3-23 日本製鋼所の製品ラインアップ

機種	設置場所	発電容量 [MW]
JSW J82	陸上	2
JSW J100	陸上	3

出典：日本製鋼所ホームページより NEDO 作成

4) 東芝

東芝は2011年5月、韓国の風力発電機器メーカーのユニスン社と、風力発電機器の共同開発や販売などにおける業務提携に合意し、風力発電システム事業に参入している。

表 3-24 東芝の製品ラインアップ

機種	設置場所	発電容量 [MW]
U50/U54/U57	陸上	0.75
U88/U93	陸上	2

出典：東芝ホームページより NEDO 作成

(3) 欧州の技術開発動向

欧州では、加盟各国共同で研究活動を行うための支援計画として、欧州フレームワーク計画 (FP)¹⁵を定め、科学分野の各種テーマについて、国家横断的な技術開発が行われている。

風車設計に係る基礎研究は、FP1 (1984～1988年) から開始されており、風車後流 (ウエイク) や乱流に関する調査・研究およびモデリング、空力弾性計算・風車音計算・風車設計応答計算コードの研究・開発、フィールド試験や数値流体力学をはじめとするシミュレーション技術、風洞試験などの研究開発プロジェクトが実施されてきた。また、風車の導入適地の選定に重要となる風況観測や風況予測技術の開発、風況マップの整備などについても、早期から研究されてきた。

FP6 (2002～2006年) および FP7 (2007～2013年) における主要な技術開発プログラムを表 3-25 に示す。陸上・洋上風力双方に関連する技術開発として、風車の大型化に加え、発電量予測モデルの高精度化や系統連系制御、次世代ドライブトレインなどの技術開発が実施されている。

また、FP6 および FP7 では、洋上風力に係る技術開発プロジェクトが多数実施されている。

¹⁵ 欧州フレームワーク計画 (FP) とは、欧州連合 (EU) における科学分野の研究開発への財政的支援制度。1984年のFP1から始まり、現在はFP7 (2007～2013年) が実施されている。

欧州では、FP2（1988～1992年）から洋上風力に係る基礎調査が開始され、FP4（1994～1998年）から技術開発が本格化し、FP4からFP5（1998～2002年）にかけて、風車形状、ポテンシャル予測手法、低コスト化、高耐久化、運用・管理手法などに関する技術開発、および実機を用いた実証試験が行われた。FP6（2002～2006年）、FP7（2007～2013年）では、超大型風車や、主要構成機器の故障防止・メンテナンス費削減を目的とした設計最適化手法や高性能モニタリングシステム、ウィンドファームの最適設計手法および浮体式洋上風力などの研究開発が実施されている。

表 3-25 FP6・FP7における主要な風力関連プロジェクト

プロジェクト名	概要	期間
DOWNVIND	深水沿岸地域における洋上ウィンドファームの環境影響、設計、費用対効果、運営・管理手法等の実証	2004/9/14～ 2009/9/14
POW'WOW	マルチメガワット級の洋上発電設備導入のための出力評価・予測	2005/10/1～ 2008/9/30
UPWIND	陸上・洋上双方における8～10MWの超大型風力発電機の開発、洋上風力発電機の基礎部分・支持構造の開発	2006/3/1～ 2011/2/28
PROTEST	風力発電機構成機器の連結部分における設計荷重を規定するための試験・計測手順の開発	2008/3/1～ 2010/8/31
RELIA WIND	洋上風力のメンテナンス費の削減、信頼性の向上を目的とした風力発電機のデザインの最適化に係る研究開発	2008/3/15～ 2011/3/14
SAFEWIND	複雑な風況における高精度発電量予測ツールの開発	2008/5/1～ 2012/4/30
NORSEWIND	バルト海、アイルランド海、北海周辺の風力資源マップの作成	2008/8/1～ 2012/7/31
WINGY-PRO	風力発電機の大容量化・軽量化を目的とした横方向磁束超電導発電機の開発	2009/11/1～ 2013/10/31
NIMO	風力発電機主要構成機器・部材の高性能モニタリングシステムの開発	2009/10/1～ 2012/9/30
MARINA PLATFORM	洋上風力発電のコスト競争力の向上を目的とした海洋エネルギー利用技術（波力発電等）との複合利用に係る研究開発	2010/1/1～ 2014/6/30
TWENTIES	風力発電の大量導入時の系統連系制御に係る技術開発	2010/4/1～ 2013/3/31
DEEP WIND	垂直軸浮体式洋上風力発電に係る研究開発	2010/10/1～ 2014/9/30
HIPRWIND	高出力・高信頼性の浮体式洋上風力に係る研究開発	2010/11/1～ 2015/10/31
EERA-DTOC	洋上ウィンドファーム単体およびウィンドファーム群の最適設計手法にかかる研究開発	2012/1/1～ 2015/6/30
CLUSTERDESIGN	洋上ウィンドファーム群の最適設計手法にかかる研究開発	2011/12/01～ 2016/5/31

出典：EC ホームページ (http://cordis.europa.eu/fp7/projects_en.html) より NEDO 作成

民間ベースでは、ノルウェーの StatoilHydro 社とドイツの Siemens 社が、浮体式洋上風力発電（2.3MW機）の実証（Hywind プロジェクト）を 2009 年からノルウェーのカルモイ沖 12km で実施している（図 3-54）。これは世界初の 2MW 級浮体式洋上風力のフルスケール実証試験である。最初の 2 年間で設計コンセプトや性能の確認を行っており、次フェーズではより大型化・軽量化した風車で大規模な実証ウィンドファームを建設することによって、コスト競争力のある浮体式洋上風力の早期の実現を目指している。2015 年頃までにスコットランドなど 2 ヶ所に建

第3章 風力発電

設する構想である。また、PrinciplePower 社、ポルトガル電力公社などは 2011 年 11 月、ポルトガルの Aguadoura 沿岸に Vestas 2MW 風車を用いた浮体式洋上風力発電を設置、実証研究を開始している（図 3-55）。



図 3-54 Hywind プロジェクト
出典：Siemens ホームページ



図 3-55 WindFloat プロジェクト
出典：Principle Power ホームページ

(4) 米国の技術開発動向

米国では、DOE の Wind Program において、主に次の目標達成に向けた各種技術開発が進められている。同プログラムにおける技術開発予算は近年、大幅に増額されており、同国における風力発電技術の重要性が増している（図 3-56）。

《Wind Program における主要な技術開発目標》

- ・大型風力：2012 年までに、7.0m/s～7.5 m/s の風速域における大型風車の発電コストを、陸域において、5.5 セント/kWh（2002 年におけるベースライン）から 3.6 セント/kWh まで削減する。
- ・洋上風力：2014 年までに、8.0m/s～8.8 m/s の風速域における大型風車の発電コストを、洋上（浅水域）において、現状の 9.5 セント/kWh（2005 年におけるベースライン）から 7 セント/kWh まで削減する。

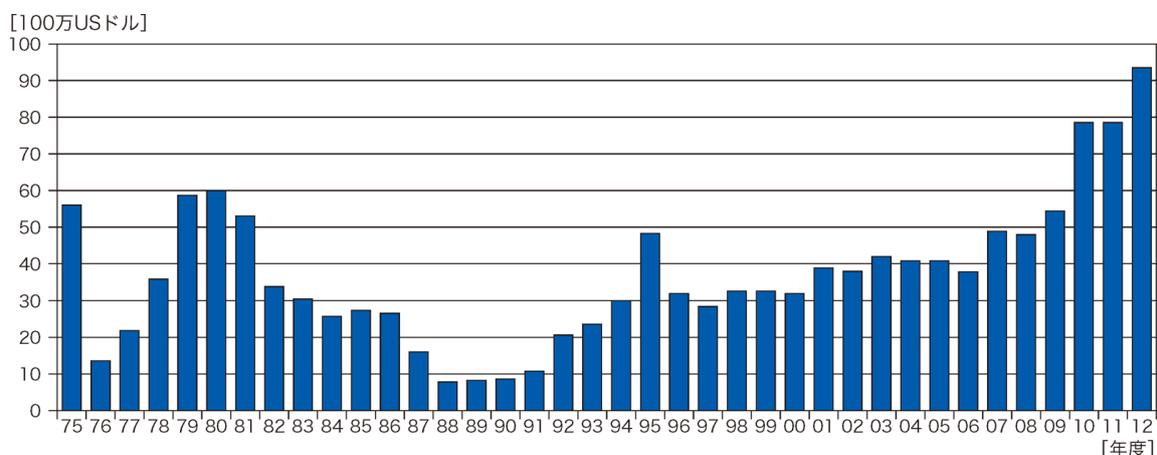


図 3-56 Wind Program の予算推移

出典：DOE EERE Wind Program ホームページより NEDO 作成

- ・系統連系：2012年までに、電力市場に係る規定、系統連系に係る諸影響、運用戦略、システムプランニングに係る検討を実施する。

同プログラムでは、超大型風車および洋上風力に係る技術開発を推進しており、DOEは、洋上展開を見据えた10MW規模の超大型風車を実現する次世代ドライブトレインの開発を目指した6件のプロジェクトに対して、750万ドルの資金提供を発表している（表3-26）。同プロジェクトにおいては、永久磁石や超電導技術を用いたダイレクトドライブ発電機の開発に力を入れている。

また、世界最大規模レベルの90mクラスのブレードの試験設備を持つWind Technology Testing Center (WTTC)をマサチューセッツ州に完成させた（図3-57）。2011年10月に初の商用機向けの静的試験を完了させている。

表 3-26 次世代ドライブトレイン技術開発の採択案件

採択事業者	概要
Advanced Magnet Lab 社	巨大風力タービンに適用される超電導ダイレクトドライブ発電機の開発、ドライブトレインのコイル配置に関する新技術を採用。
Boulder Wind Power 社	永久磁石ベースのダイレクトドライブ発電機の、実用大型機における性能や信頼性を実証。
Clipper Windpower 社	従来の増速機の信頼性を向上し、超大型風車へのスケールアップが可能な独自のドライブトレイン技術の開発。
Eaton Corporation 社	油圧トランスミッションを用いたダイレクトドライブ技術の開発。
GE Global Research 社	低温の超電導技術を用いた10MWのダイレクトドライブ発電機の構成部品のテストを実施。
国立再生可能エネルギー研究所	ダイレクトドライブ方式と増速機方式を組み合わせた発電機の開発。

出典：DOE EERE プレスリリース（2011/6/28）より NEDO 作成



図 3-57 WTTC に設置された Clipper Windpower 社の C96 (46.7m) ブレード

出典：DOE EERE ホームページ

米国においては、まだ洋上風力発電機は建設されていないが、東海岸を中心に複数の洋上風力プロジェクトが提案されており、プロジェクト実現に向けた政府支援も徐々に進みつつある。

2010年4月には、米国で初めてとなる洋上風力開発プロジェクト（Cape Wind project）が、内務省によって認可された。総出力は468MW（3.6MW風車130基）で、2012年中には系統に連系される計画となっていたが、地元自治体や住民との調整に難航しており、計画は遅延している。他にも、五大湖の一つエリー湖で淡水湖の洋上風力発電所開発の動きがある（図3-58）。

2011年2月には、洋上風力発電の技術開発ロードマップとなる“A National Offshore Wind

第3章 風力発電

Strategy”が DOE によって策定された。この技術開発ロードマップでは、2020 年までに 10GW、2030 年までに 54GW の洋上風力発電を導入するシナリオを描き、2020 年段階で 0.10 ドル/kWh、2030 年段階で 0.07 ドル/kWh を達成するための必要方策として「技術開発」「市場障壁の除去」「先進技術実証試験」を挙げている。技術開発については、計算ツールの開発、革新的タービンの開発、海洋システム工学技術の 3 つの分野が重点課題に挙げられている。

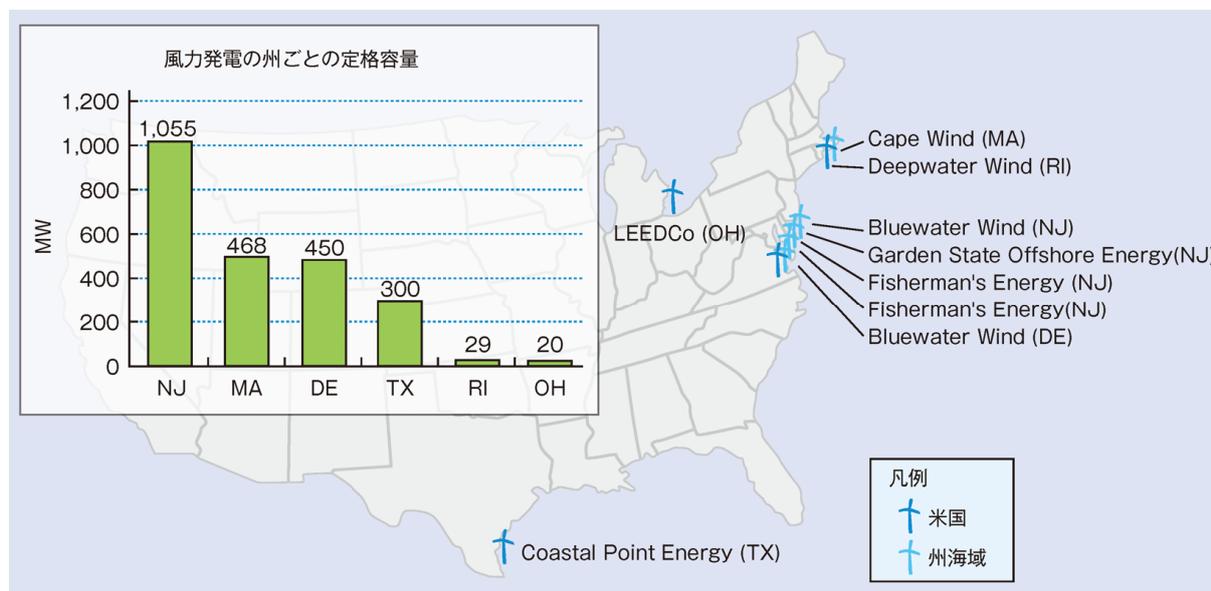


図 3-58 米国で計画中の洋上風力発電プロジェクト

データ元：US Department of Energy's "2010 Wind Technologies Market Report"
 出典：“Wind in our Sails” (2011, EWEA) より NEDO 作成

(5) 欧米メーカーのビジネス動向

1) Vestas (デンマーク)

Vestas は、世界最大の風力発電専門メーカーであり、1979 年から風車の販売を開始し、累積導入量は世界第 1 位である。サイト開発から製造、販売、メンテナンスまで一貫したサービスを提供している。しかし、近年は、海外メーカーから技術供与を受けた中国メーカーや、GE などの重電メーカーの追い上げによって、世界シェアを落としている状況にあり、経営再建に向け、コスト削減や従業員数削減策を講じている。

Vestas 社の戦略として、幅広い製品を幅広い市場に販売するビジネスモデルが特徴の一つに挙げられる。表 3-27 に、Vestas の風車ラインアップと、機種別販売実績を示す。発電容量は 850kW ~ 3.0MW と幅広く、対応風速も低速、中速、高速別に製品展開している。現在は 2.0~3.0MW 機が主力製品である。また、陸上用に加え、洋上風力発電機も販売しており、3.0MW 機を展開している。販売先は世界全域にわたっており、欧州、北米、南米、アジア、南アフリカ、豪州など、65 カ国以上においてビジネスを展開している。近年は、中国市場における動きを活発化させており、受注数を増加させている。

近年は、洋上風力市場への進出も積極的に行っており、2011 年 3 月に洋上専用の 7.0MW 機 (V164-7.0 MW) を発表した。2013 年よりデンマークエネルギー大手の DONG Energy の実証サイトにて実証試験を実施予定である。

表 3-27 Vestas の製品ラインアップと販売実績（陸上）

機種	発電容量 [MW]	2010 年度導入量		累積導入量	
		[基数]	[MW]	[基数]	[MW]
V52-850 kW	0.85	340	289	3,764	3,199
V60-850 kW	0.85	15	13	15	13
V80-1.8 MW	1.8	0	0	1,016	1,829
V80-2.0 MW	2.0	267	534	2,981	5,962
V82-1.5 MW	1.5	0	0	213	320
V82-1.65 MW	1.65	273	450	2,883	4,757
V90-1.8 MW	1.8	269	484	572	1,029
V90-2.0 MW	2.0	763	1,527	3,286	6,544
V90-3.0 MW	3.0	834	2,502	2,170	6,510
V100-1.8 MW	1.8	20	36	20	36
V112-3.0 MW	3.0	2	6	2	6
Other		1	1	26,511	13,909

出典：Vestas Annual Report 2010 より NEDO 作成

表 3-28 Vestas の洋上風力発電機ラインナップ

機種	発電容量 [MW]
V90-3.0 MW Offshore	3.0
V112-3.0 MW Offshore	3.0
V164-7.0 MW	7.0
V164-8.0 MW (開発中)	8.0

出典：Vestas ホームページより NEDO 作成

2) GE Energy (米国)

GE Energy は、2002 年に Enron Wind 社の風力発電部門を買収し、風力発電市場に参入した。以来、豊富な資金力や販売網を生かし、サプライチェーンの水平・垂直統合によって風力発電事業を拡大している。表 3-29 に製品ラインアップを示す。陸上用に 1.5MW～2.5MW 機を、洋上用に 4.1MW 機を展開している。

2009 年 11 月にダイレクトドライブ方式で優れた技術を持つ Scan Wind 社を買収し、洋上風力発電市場参入に向けた動きを開始した。洋上風力用の 15.0MW 機の開発計画も発表している。

表 3-29 GE Energy の製品ラインアップ

機種	設置場所	発電容量 [MW]
1.5-77 Wind turbine	陸上	1.5
1.6-100 Wind turbine	陸上	1.5
1.6-82.5 Wind Turbine	陸上	1.5
2.5-100 Wind Turbine	陸上	2.5
2.75-100 Wind turbine	陸上	2.5
2.75-103 Wind turbine	陸上	2.5
4.1-113 Wind turbine	洋上	4.1

出典：GE Energy ホームページより NEDO 作成

近年は、中国やブラジルなどの新興国の市場開拓に向けた動きを加速している。2010 年末には、中国の発電設備大手であるハルビン動力設備有限公司とジョイントベンチャーを設立し、陸上、洋上向けに、3.5MW 風車の製造、販売することを発表している。同社は Scan Wind 社のダイレ

第3章 風力発電

クトドライブ方式を採用している。また、ブラジル市場においては、800MWの導入実績を有し、2011年末にも約380MWのプロジェクトを受注している。

3) Gamesa (スペイン)

Gamesaは、スペインに本社を置く風力発電機メーカーで、ナセル、ブレード、ギアボックス、発電機、パワーエレクトロニクス機器、タワー、それぞれをスペイン、中国、米国、インドの工場生産し、自社生産率の向上を進めている。2008年時点では、Vestas、GEに続き世界シェア第3位であったが、2012年時点では、第6位に後退している。

2010年にインド市場に参入してから、同国におけるビジネスを拡大している。これまでは、インドメーカーのSuzlonや、Enercon、Vestasの寡占状態であったが、Gamesaのインド市場のシェアは10%に拡大している。

洋上風力市場参入にも意欲的であり、Azimuthプロジェクト(11社のスペイン企業と22の研究機関が参画)にて15.0MWの超大型風力発電機の研究開発を実施している。2010年から始まったAzimuthプロジェクトは、100%スペインの技術を用いた大型洋上風車を開発するために必要なノウハウを得ることを目的としており、AlstomやAcciona、Iberdrolaなどが参画し、Gamesaが取りまとめ役となっている。このプロジェクトはスペイン政府・産業技術開発センター(CDTI)の承認を受け、4年間で2,500万ユーロが投資される予定である。2013年までに技術基盤を確立した後、2020年頃までに15MWの大型洋上風車を開発して、洋上風力の技術的・経済的障壁を克服することを目指している。

表 3-30 Gamesa の製品ラインアップ

機種	設置場所	発電容量 [MW]
G5X-850 kW	陸上	0.85
G9X-2.0 MW	陸上	2.0
G10X-4.5 MW	陸上	4.5

出典：Gamesa ホームページより NEDO 作成

4) Enercon (ドイツ)

Enerconは1984年から風力発電市場に参入し、高品質、高信頼性の製品販売をビジネス戦略の柱としている。同社の製品はダイレクトドライブ方式を採用しており、保守費と故障リスクを低減している。また、低風速でのカットイン、高い耐落雷性能などが特徴である。

表 3-31 Enercon の製品ラインアップ

機種	設置場所	発電容量 [MW]
E-33 (※)	陸上	0.33
E-48	陸上	0.8
E-53	陸上	0.8
E-44	陸上	0.9
E-70	陸上	2.3
E-82	陸上	2/2.3/3
E-101	陸上	3
E-126	陸上	7.5

※：2012年末で製造中止

出典：Enercon ホームページより NEDO 作成

近年、商用機では世界最大となる 7.5MW 機（陸上用、ダイレクトドライブ方式）を開発し、2011 年 1 月にドイツ国内のウィンドファームに設置している。

5) Siemens（ドイツ）

Siemens は、1979 年から風車を販売していたデンマークの Bonus Energy 社を 2004 年に買収し、風力発電市場に参入した。同社の風車は、厳しい風況にも耐え得る高い耐久性を特徴としている。

Siemens は洋上風力発電のパイオニアであり、1991 年に世界初の洋上風力発電プラントをデンマークに建設して以来、洋上風力市場において高いシェアを誇っている。洋上向け発電機である SWT-3.6-120 (3.6MW) は、最もスタンダードな洋上風力発電機の一つである。大型機の開発も進めており、2011 年 5 月からデンマークで 6.0MW プロトタイプ機の実証試験を実施中である。また、浮体式洋上風力の技術開発も進めており、現在ノルウェーのカルモイ沖で実施されている、世界初の 2MW 級浮体式洋上風力発電 (2.3MW 機) の実証試験には、同社の風力発電機が使用されている。

表 3-32 Siemens の製品ラインアップ

機種	設置場所	発電容量 [MW]
SWT-2.3-82, SWT-2.3-93, SWT-2.3-101, SWT-2.3-113	陸上	2.3
SWT-3.6-107	陸上	3.6
SWT-3.0-101	陸上/洋上	3.0
SWT-3.6-120	洋上	3.6
SWT-6.0-154	洋上	6.0

出典：Siemens ホームページより NEDO 作成

(6) その他新興国などの動向

1) 中国

中国は近年、陸上風力に加えて洋上風力の開発を推進している。これまでは風力資源が豊富な北部および西部を中心に陸上風力の開発に注力してきたが、主要な電力消費地は東部およびその他沿岸地域にあり、両地域を結ぶ送電線の整備が追い付かず、系統容量の不足が顕在化している。洋上風力は、電力消費地と近く、系統連系しやすいメリットがあることから、近年になって洋上風力の開発が重要課題となっている。

2007 年にアジアで初となる海上風力発電モデルプロジェクト「東海大橋洋上風力発電プロジェクト」の入札を実施し、2010 年 2 月には全発電機の組み立てが完了、同年 6 月に運転を開始している（図 3-59）。本プロジェクトでは、Sinovel 製の 3MW 機が 34 基設置されており、総発電容量は 102MW である。また、その他にも水深が 5m 以下の沿岸域において、Rudong (30 MW)、Jiangsu Xiangshui (6 MW)、Shandong Rongcheng (6 MW) など、複数の洋上風力発電所が建設されている。

第3章 風力発電



図 3-59 東海大橋洋上ウィンドファーム (中国・上海)

出典：Anhui Hummer Dynamo Co., Ltd.ホームページ

2) 韓国

韓国も洋上風力発電の技術開発を推進しており、主に次に示す技術開発プロジェクトが実施されている (図 3-60, 図 3-61)。

- ・韓国電力公社 (KEPCO) による中規模サイズの洋上風力発電フィージビリティ調査
- ・南西海域における 2.5GW 洋上風力開発プロジェクト
- ・大型風車の開発
- ・高性能ヨー制御システムの開発
- ・浅水域用・深水域用基礎の開発
- ・浮体式洋上風力の基礎に係る要素開発
- ・洋上風力用テストサイト (5MW) の開発

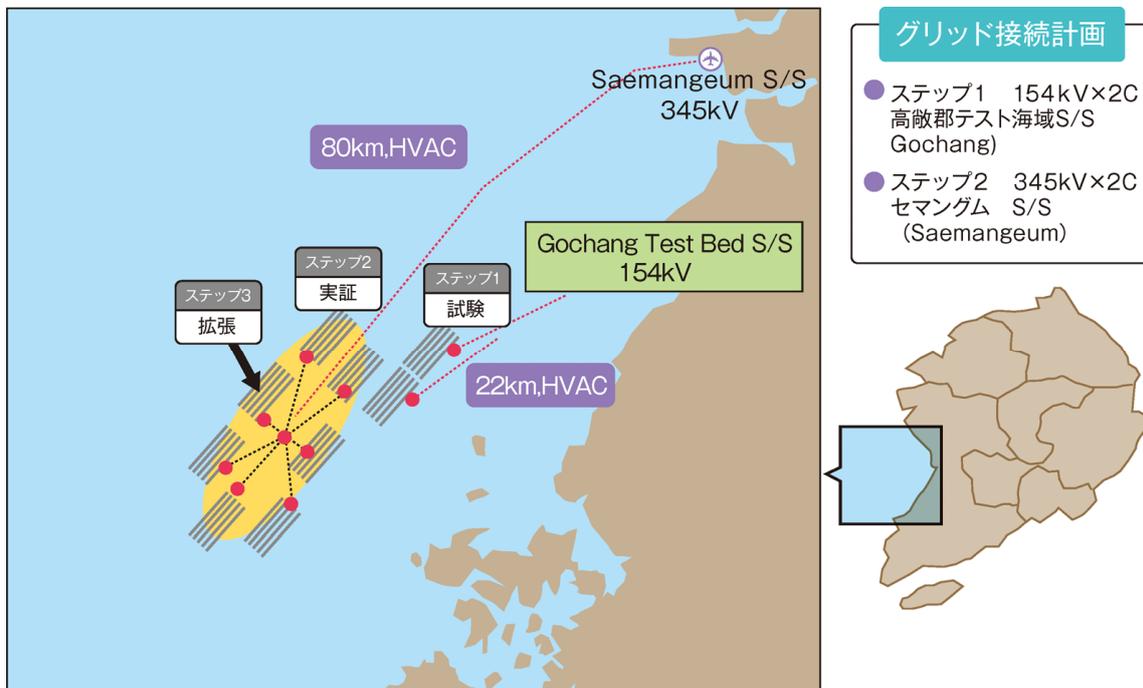


図 3-60 南西海域における 2.5GW 洋上風力開発プロジェクト

出典：“Korea Strategy on Offshore Wind & Marine Energy” (2012/6, Renewable UK 2012 KWEA 韓国風力発電協会発表資料) より NEDO 作成



KERI (STX 2.0 MW)



DOOSAN (3 MW)

図 3-61 洋上風力用テストサイト (5MW)

出典：“Korea Strategy on Offshore Wind & Marine Energy” (2012/6, Renewable UK 2012 KWEA 韓国風力発電協会発表資料)

(7) 新興国メーカーのビジネス動向

1) Sinovel (中国)

Sinovel は中国最大の風車メーカーで、中国大手重電メーカーである Dalian Heavy Industries & Crane 社の出資を受けている。2004 年にドイツの Fuhrlander 社から技術供与を受け、1.5MW 機を生産・販売してきた。2010 年には、世界市場シェア (単年) 第 2 位に躍進したが 2012 年のシェア (単年) は 9 位となっている。

同社は洋上風力発電に関する技術開発を積極的に進めている。2009 年から、陸上と洋上の双方に対応した 3MW 機の量産を開始し、中国初の洋上ウィンドファームとなる、Shanghai Donghai Bridge 洋上ウィンドファームに、34 基を納入した。また、3MW 機に続き、5MW 機、6MW 機を開発しており、10MW 機の開発計画も発表している。

現在、洋上風力発電機の研究開発拠点 (National Energy Offshore Wind Power Technology and Equipment R&D Center) を建設中で、洋上風力発電の技術開発に力を注いでいる。

表 3-33 Sinovel の製品ラインアップ

機種	設置場所	発電容量 [MW]
SL1500 Series	陸上	1.5
SL3000 Series	陸上/洋上	3.0
SL5000 Series	洋上	5.0
SL6000 Series	洋上	6.0

出典：GE Energy ホームページより NEDO 作成

2) Gold Wind (中国)

Gold Wind は、1998 年に設立された中国の風車メーカーである。ドイツの REPower 社から技術供与を受け、ダイレクトドライブ方式を採用した 1.5MW 機および 2.5MW 機を製造・販売している。2012 年には、世界市場シェア第 7 位 (単年) に躍進した。

2010 年に初めて国外市場に進出し、米国ミネソタ州の Uilk ウィンドファーム向けに 1.5MW 機を 3 基納入した。米国市場に加え、チリやエクアドルにおいても、それぞれ 34.5MW、15MW の契約を結んでいる。

第3章 風力発電

洋上風力市場への参入意欲も高く、10MW 機の開発計画を発表している。

表 3-34 Gold Wind の製品ラインアップ

機種	設置場所	発電容量 [MW]
1.5 MW PMDD	陸上	1.5
2.5 MW PMDD	陸上	2.5

出典：Gold Wind ホームページより NEDO 作成

3) Suzlon (インド)

Suzlon は、サプライチェーンの垂直統合によって競争力を高め、市場シェアを拡大している。Suzlon はほぼ全部材において自社供給できる体制を整備しており、適地のアセスメントから設備導入、運用保守まで一貫したサービスを提供することで、国内シェアは約 45%を確保している(図 3-62)。海外市場でもシェアを伸ばしており、2012 年時点で第 5 位の位置につけている。

同社は 2009 年、ドイツの風力メーカー REPower 社を買収したことによって、洋上風力分野への進出を果たした。REPower 社は、洋上風力向けに 5MW 機および 6.15MW 機を開発しており、RWE Innogy の洋上ウィンドファーム (295MW, 2013 運開予定) 向けに 6.15MW 機を 48 基納入する予定である。

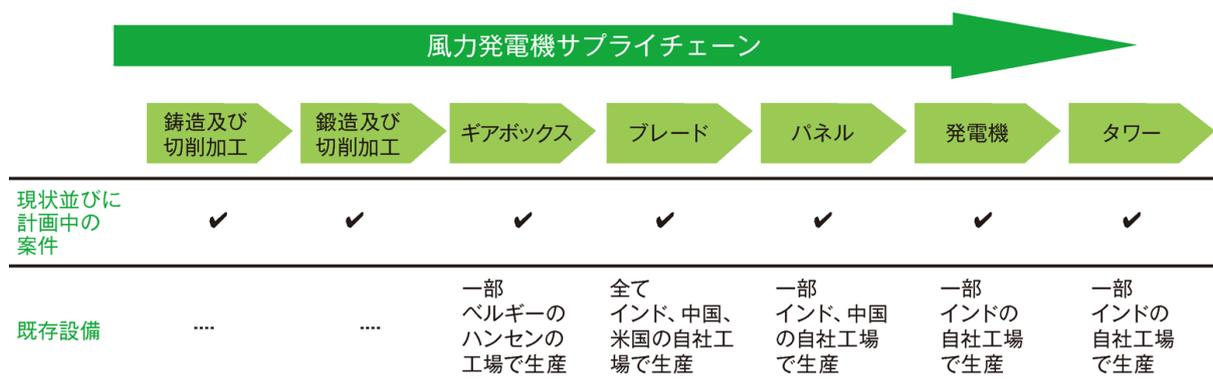


図 3-62 Suzlon のバリューチェーン

出典：Suzlon 資料 (2008) より NEDO 作成

表 3-35 Suzlon の製品ラインアップ

機種	設置場所	発電容量 [MW]
S9X Suite	陸上	2.1
S88	陸上	2.1
S88 Mark II DFIG	陸上	2.25
S82	陸上	1.5
S66	陸上	1.25
S64	陸上	1.25
S52	陸上	0.6

出典：Suzlon ホームページより NEDO 作成

3.4.3 洋上風車に係る技術開発動向

(1) 風車タービンに係る技術開発動向

1) 超大型風車の開発

3.4.1 で示したとおり、洋上風力は、陸上風力と比較して設置コストが掛かることから、単機当たりの発電量の増大がより重要であり、平均単機容量およびロータ直径の大型化が進んでいる(図 3-63)。

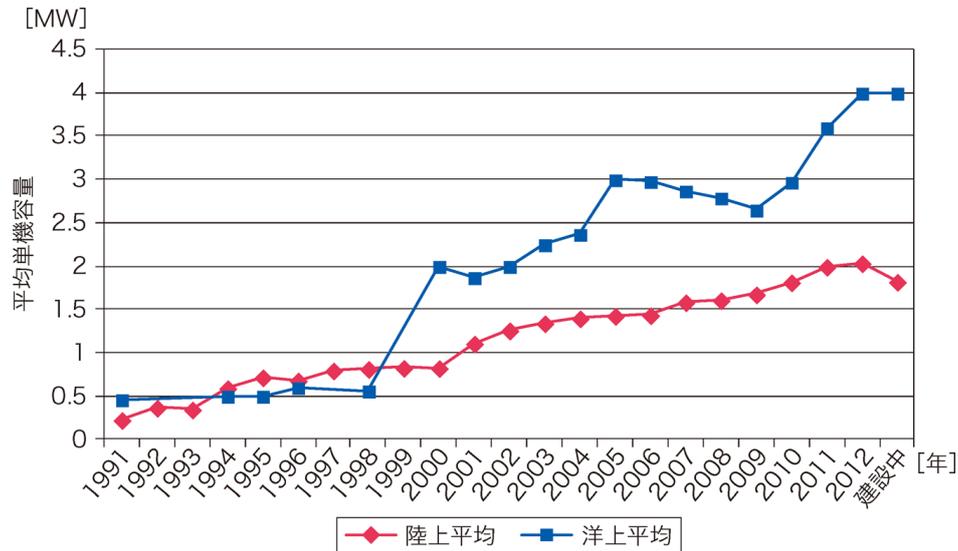


図 3-63 風車の平均単機容量の推移 (再掲)

出典：陸上：The Wind Power ホームページより NEDO 作成

洋上：“The European offshore wind industry key trends and statistics 2012” (2013, EWEA) より NEDO 作成

図 3-64 および表 3-36 に、各国メーカーによる大型風力発電機の開発動向を示す。ここ数年間で、欧州メーカーに加え、米国、日本、中国、韓国メーカーなど、40 を超えるメーカーが、50 以上の新モデル機の開発意向を発表しており、陸上で実績のある 2~3MW 機に加え、多くの企業が 5~10MW 以上の洋上風力専用モデル機の開発を計画している¹⁶。発表された新モデル機のうち、半数は欧州メーカー、次いで 3 割を中国メーカーが占めており、陸上風力シェアを伸ばす中国メーカーが、洋上市場においても今後、存在感を増すことが予想される。

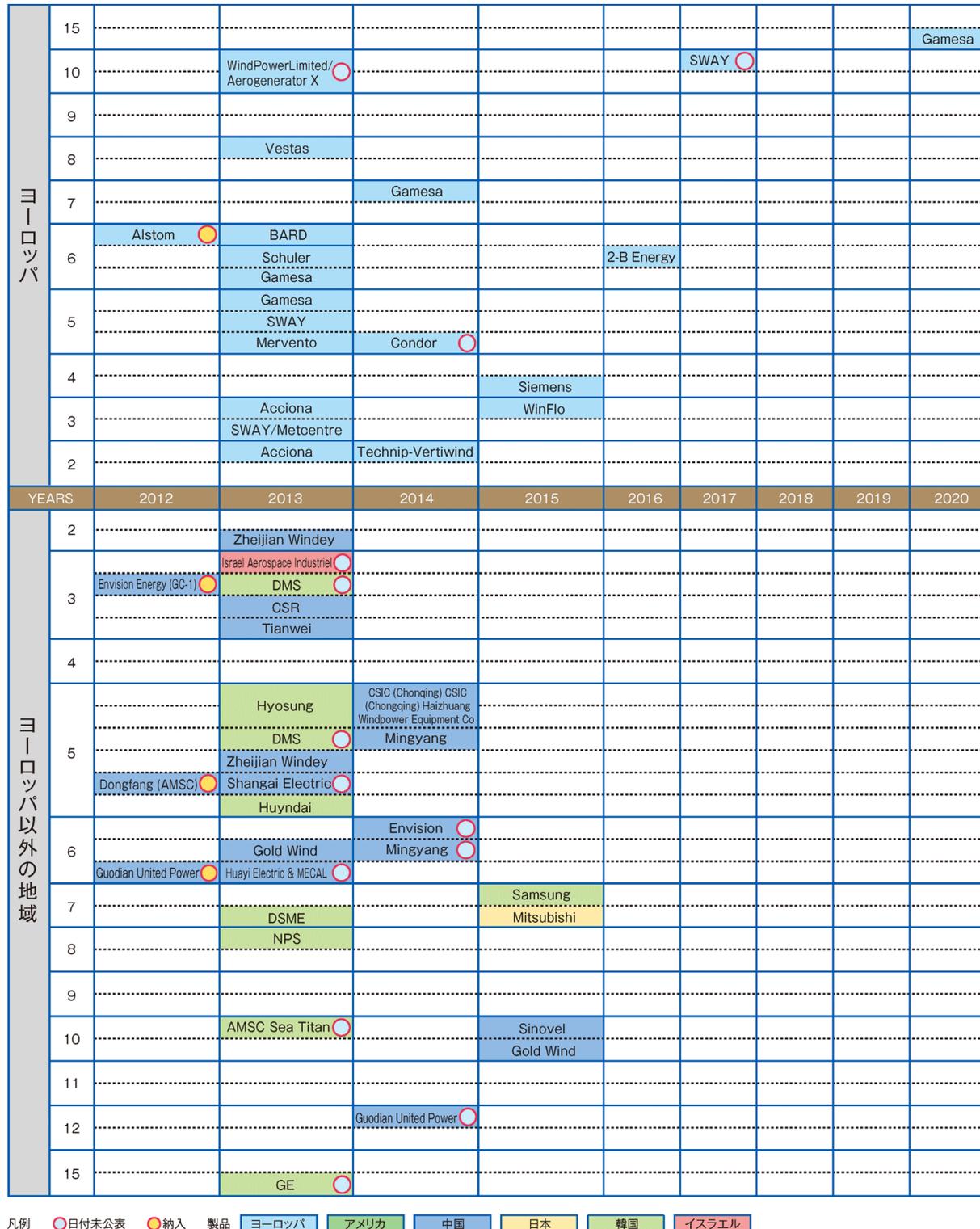
ここでは特に、世界の洋上風車市場のシェアの大半を占めている Siemens 及び Vestas と共に、我が国で大型洋上風車の開発に取り組んでいる三菱重工業の取組動向について紹介する。

Siemens については、2011 年 5 月にデンマークの陸上サイトにて、ロータ直径 120m の 6MW プロトタイプ機による実証研究を開始した。Siemens は従来のギア式のドライブトレインシステムではなく、同期発電機によるダイレクトドライブ方式を採用しており、部品点数の低減によってナセル重量や故障リスクの軽減を図り、収益性を向上している。そして、2013 年 2 月から Dong Energy と共同で英国 Gunfleets Sands III (離岸距離約 8.5km) において、ロータ直径 120m の 6MW 洋上風車 2 基 (モノパイル式基礎構造) の実証研究を開始した。建設にあたっては、A2SEA 社の洋上風車を建設する専用船が用いられ、約 3,350m² の甲板があり、クレーン 1 基で最大 800

¹⁶ 各メーカーの主要機種については表 3-36 に紹介する

第3章 風力発電

トンの吊上げ能力 (Siemens の 6MW 洋上風車のナセル重量は約 350 トン) を有する。更に、2013 年 10 月に英国 Hunterston の Scottish and Southern Energy (SSE) の陸上サイトにおいて、ロータ直径 154m の 6MW プロトタイプ機の建設を完了している (図 3-65)。今後、陸上における実証研究を実施し、英国の Round3 に向けた各種検討が行われる予定である。



凡例 ○日付未公表 ●納入 製品 ヨーロッパ アメリカ 中国 日本 韓国 イスラエル

図 3-64 各国メーカーによる洋上風力発電機の開発動向

出典：“The European offshore wind industry key trends and statistics 2012” (2013, EWEA) より NEDO 作成

表 3-36 主要メーカーにおける大型洋上風力発電機の開発動向

企業名	単機容量	概要
Siemens (ドイツ)	6 MW	2011年5月からデンマークで6.0 MW プロトタイプ機を実証試験中。2013年2月より、洋上実証中。
Alstom (フランス)	6 MW	6.0 MW 機を開発中。2012年中にプロトタイプ機の洋上実証試験を終え、2014年には商用量産を開始する予定。
Repower (ドイツ) [*]	6.15 MW	陸上・洋上両用の6.15 MW 機を開発。今後、洋上実証実施予定。
三菱重工業 (日本)	7 MW	NEDO 及び英国政府の支援を受けて7 MW 機の開発を実施中。2013年1月から日本国内において2.4 MW による陸上試験を開始し、2014年以降、英国 Hunterston において、7 MW プロトタイプ機による実証試験を実施予定。
Vestas (デンマーク)	8 MW	2011年3月に洋上専用の7.0 MW 機 (V164-7.0 MW) を発表。その後、7 MW から8 MW (V164-8.0 MW) へ拡張し、2014年からデンマークの陸上試験所で8 MW によるプロトタイプ試験を開始する予定。
Sinovel (中国)	10 MW	10 MW 機の開発計画を発表。
Gold Wind (中国)	10 MW	10 MW 機の開発計画を発表。
GE Energy (米国)	15 MW	15.0 MW 機の開発計画を発表。
Gamesa (スペイン)	15 MW	Azimuth プロジェクト (11社のスペイン企業と22の研究機関が参画) にて15 MW の超大型風力発電機の研究開発を実施。

^{*} : Suzlon (インド) の子会社

出典：“The European offshore wind industry key 2011 trends and statistics” (2012, EWEA), 各社ホームページ・プレスリリースより NEDO 作成

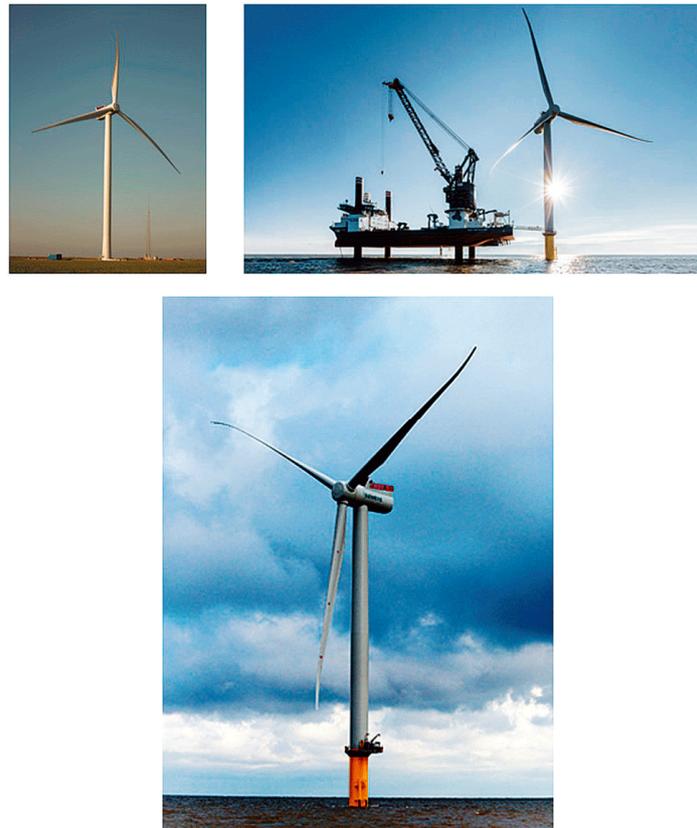


図 3-65 プロトタイプ陸上試験機 (左上), プロトタイプ洋上試験機の施工風景 (右上)
施工終了後のプロトタイプ洋上試験機 (下)

第3章 風力発電

Vestas は、2013 年 12 月に 8MW ナセルのプロトタイプ機が完成したと発表した (図 3-66)。そして、陸上試験を実施する、デンマークの試験所へナセル等を搬送し、2014 年以降、ロータ直径 164m のプロトタイプ機 (V164-8.0MW) による陸上試験を実施する予定である。2013 年 9 月、Vestas と三菱重工業は、洋上風力発電設備専門の新しい合弁会社を設立することで合意した。この合意では、2014 年 3 月末までに事業開始を予定しており、洋上風力発電分野で既に多くの実績を持つ Vestas と三菱重工業で、洋上風力発電設備の開発・設計・調達・製造・販売・アフターサービスを手掛けることを予定している。そして、本合弁会社は、Vestas の商用機である 3MW 機はもちろんのこと、V164-8.0MW 及び新型油圧ドライブトレイン (DDT¹⁷) を搭載した風力発電設備も、V164 のプラットフォームを活かして早期に市場投入をはかる予定である。

三菱重工業では、従来のギア式や同期式を採用した洋上風車ではなく、油圧 DDT による 7MW 洋上風車の開発を行っている¹⁸ (図 3-67)。油圧 DDT では、風車の回転をいったん油圧ポンプで油の流れに変え、それを油圧モータに伝えることで、発電機を回す仕組みである。2013 年 1 月から三菱重工業の横浜製作所において、2.4MW 級風車による世界初の油圧 DDT を採用した大型風力発電設備による試験運転を開始した。そして、2014 年以降、英国 Hunterston において、ロータ直径 167m の 7MW 陸上プロトタイプ機による実証試験の実施を予定している。7MW 洋上風車のブレードは 1 翼でも 80m を超えるため、風によるたわみも大きくなり、通常の風車に使用している GFRP (ガラス繊維強化プラスチック) では、強度的に耐えられないため、軽量で高強度なブレード材料として CFRP (炭素繊維強化プラスチック) を適しているが、一般的に CFRP は GFRP の 10 倍の価格であるため大量に使用することが困難であり、ブレードの一部に CFRP を使用する等の工夫を施している。



図 3-66 上試験所へ出荷を行う 8MW プロトタイプ機のナセル

¹⁷ Digital Displacement Transmission (DDT) : デジタル制御可変容積式動力伝達機構

¹⁸ 平成 23~26 年度「超大型風力発電システム技術研究開発」NEDO 助成事業



図 3-67 2.4MW 級陸上試験機のナセル（左上），7MW 陸上試験機のナセル（右上）
7MW 洋上風車のイメージ図（下）

2) ドライブトレインの動向

洋上風力においては、事業採算性確保のために、作業船のレンタル料や、故障機器の修理およびメンテナンススタッフ動員などによるコストの削減が重要である。3.4.1 で述べたとおり、歯車とベアリングの複雑な相互作用で動く従来の増速機は、定期的なメンテナンスを必要とし、特に高速状態では不具合が起りやすいことから、増速機を用いないダイレクトドライブ方式を採用するメーカーが増加している。

図 3-68 に近年の洋上風力におけるドライブトレインの動向を示す。2010 年までにかけては、増速機を用いた機種がほとんどであったが、2010 年以降、ダイレクトドライブ方式を用いた機種が増加している。また、ダイレクトドライブ方式と増速機方式を組み合わせたハイブリッド方式も開発されている。一方で、増速機方式を採用し、増速機の信頼性向上を志向するメーカーも存在しており、ダイレクトドライブ方式と増速機方式のいずれを採用するかは、メーカー各社の戦略によって異なっている。

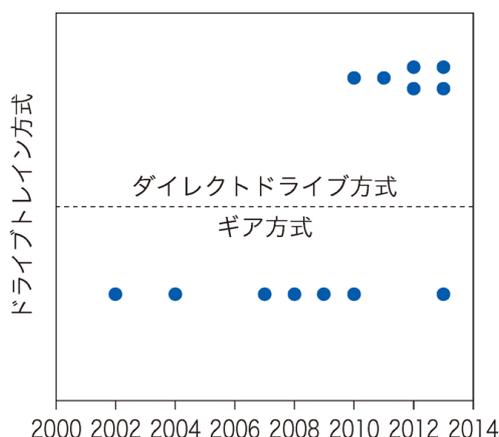


図 3-68 ドライブトレインの近年の動向

出典：“Wind in our Sails”（2011, EWEA）より NEDO 作成

(2) 基礎に係る技術開発動向

図 3-69 に洋上風力発電の形態と水深の関係を示す。洋上風力は、海底に直接基礎を設置する着床式と、浮体を基礎として係留などで固定する浮体式に分類される。

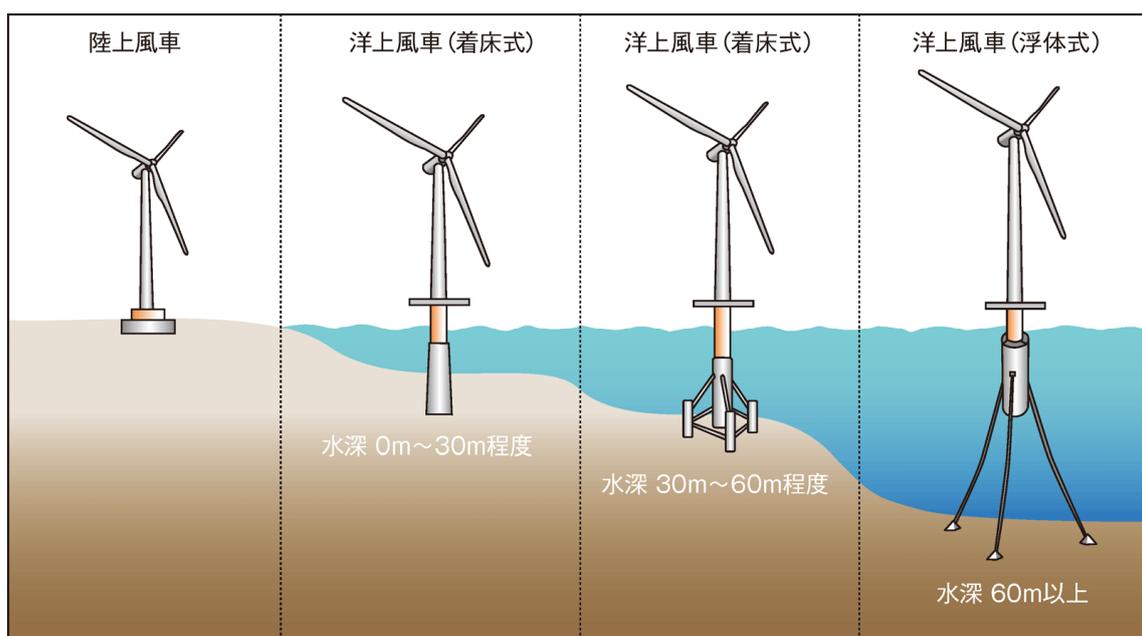


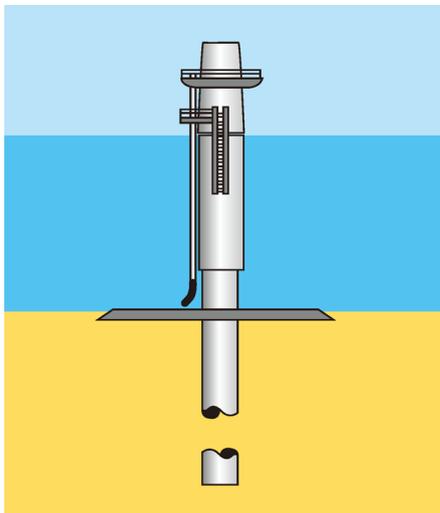
図 3-69 洋上風力発電の形態と水深の関係

出典：“Dynamics Modeling and Loads Analysis of an Offshore Floating Wind Turbine”（2007, NREL）より NEDO 作成

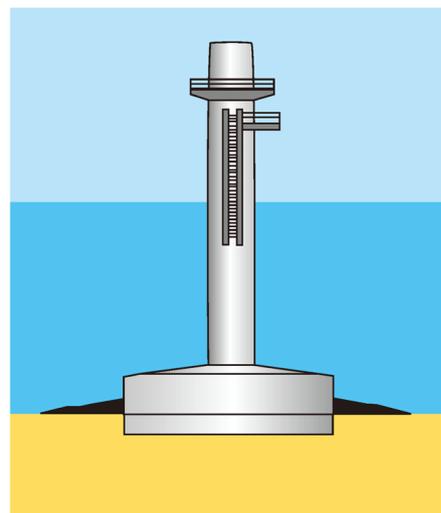
着床式の一般的な支持構造を図 3-70 に示す。欧州で導入されている洋上風力発電システムは、ほとんどが 30m 以下の浅海域に設置されている着床式である。基礎構造は、海底に 1 本の杭を打ち込むモノパイル式や、コンクリートのケーソンを基礎とする重力式が主に用いられている。これらの方式は、水深 20~30m までの海域が設置の目安となるが、それより深くなると、深さに応じてコスト高となることに加え、広く採用されているモノパイル式の場合には、強度の維持が取りにくくなり、施工自体も難しくなる。代わりにトライポッドと呼ばれる三脚式、あるいは

格子梁（ジャケット式）などの立体骨組構造が有利となる。例として，スコットランド近くの北海にあるベアトリスウィンドファーム実証プロジェクトでは，水深 45m において 2 基の 5MW 風車がジャケット構造物の上に設置されている。しかし，水深が 50m 程度にまで達すると，浮体式の支持構造のほうがより経済的とされている。

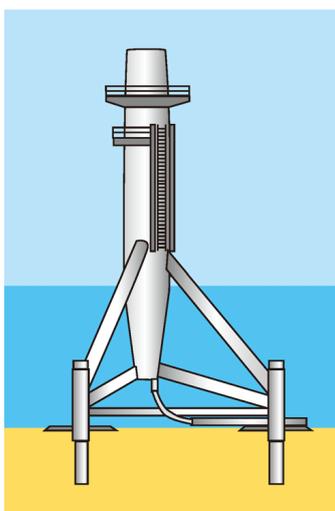
浮体式は，係留システムやタンク，バラストによってさまざまな支持構造が考えられる。浮体式で提案されている主要な支持形式を図 3-71 に示す。スパー式は，浮力体の大部分を水没させる型式である。また，張力脚式（tension leg platform：TLP）は，強制的に半潜水させた浮力体と海底を緊張係留ラインで結び，強制浮力によって生じる緊張力を利用して係留される形式で，セミサブ式は甲板，コラム，フーティング等から構成され，所定の喫水まで沈めて半潜水状態となる形式のもの。現在はスパー式とセミサブ式のみがフルスケール機で採用されている。



モノパイル式 (Monopile)



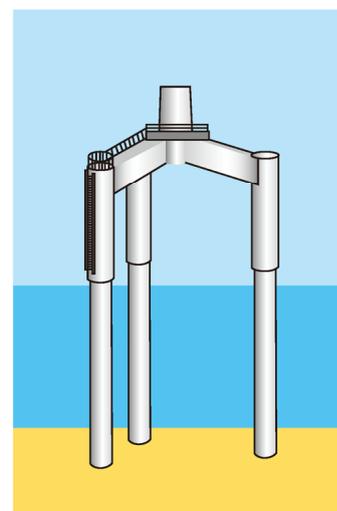
重力式 (Gravity-based Structure:GBS)



トライポッド式 (Tripod)



ジャケット式 (Jacket)



トリパイル式 (Tri-pile)

図 3-70 着床式洋上風力の一般的な支持構造

出典：“Wind in our Sails”（2011, EWEA）より NEDO 作成

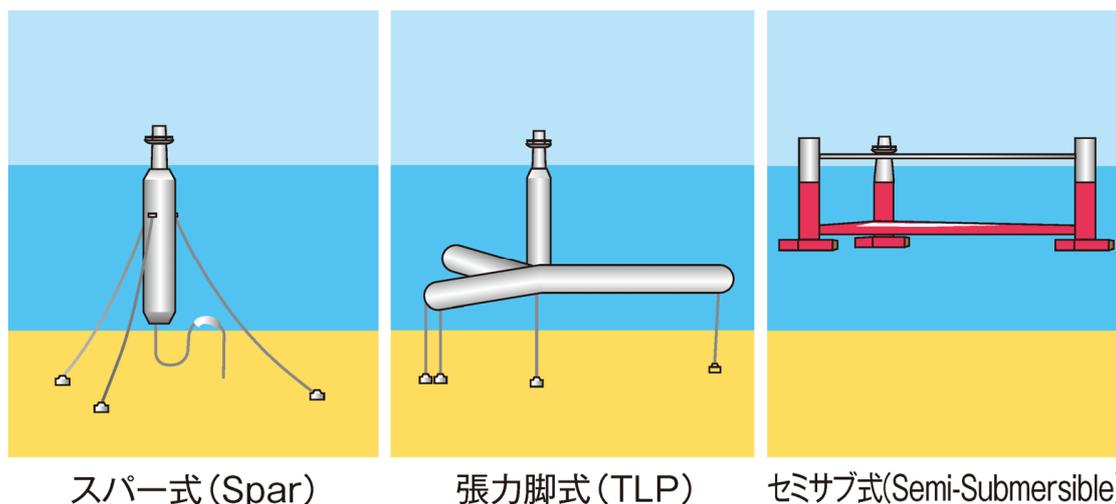


図 3-71 浮体式洋上風力の支持構造

出典：“Wind in our Sails” (2011, EWEA) より NEDO 作成

(3) 系統連系に係る技術開発動向

洋上風力の系統連系に当たっては、海底ケーブルに加え、洋上変電所（図 3-72）や、高圧直流送電（HVDC）の導入が重要となる。

洋上風力のコスト構造の中で、ケーブルおよび敷設に掛かるコストの割合は大きく、量産化による海底ケーブル自体の低コスト化や、低コスト敷設技術が必要とされている。また、洋上ウィンドファームの不具合の原因は海底ケーブルの損傷などに起因するものが多いため、海底ケーブルの保護も含め、適切な敷設工事を実施する必要がある。

また、大規模かつ遠距離に位置するウィンドファームは、高圧ケーブル（120～150kV）の使用による海底ケーブル本数の削減がコスト的に有利であることから、洋上変電所を建設する事例が増えている。ただし、洋上変電所設備の不具合による送電停止のリスクがあるため、変圧器および陸上への送電線を2セット装備するのが一般的となっている。洋上変電所の建設は、風車よりも大型かつ高価な作業船を要するため、上部をモジュール化するなどの試みが進められている。



図 3-72 洋上変電所

出典：London Array 社ホームページ

送電方法についても、大規模かつ遠距離に位置するウィンドファームについては、送電損失の少ない高圧直流送電（HVDC）が有利であり、ドイツなどの複数の洋上ウィンドファームで使用されている。目安として、ウィンドファームの容量が 500MW 以上、ケーブルの長さが 100km 以上の場合に、コスト的に有利とされている。HVDC を利用する場合、風力発電機からの交流電流を洋上変電所で昇圧した後、直流に変換して陸上に送電し、陸上の変電所で交流に戻して送電システムに接続する。したがって、洋上変電所内に AC/DC 変換器を具備する必要がある。HVDC の採用事例はあまり多くないものの、洋上ウィンドファーム間のネットワーク化や、風車の直流発電機の採用などを可能にする技術であり、今後の利用拡大が期待される。

3.5 今後に向けた課題と克服方策

世界の風力市場が拡大し、陸上から洋上までそのビジネスチャンスが広がる中、日本企業の世界市場シェアを拡大するためには、海外企業に勝る性能およびコスト競争力を持つ風力発電機の開発が必要となる。

我が国においては、山岳地形や複雑な風況が導入障壁となっているが、日本の厳しい環境下で故障なく運転可能な風力発電機や運用技術は、陸域における適地が減少している世界市場においても競争力を持ち得るものと考えられる。そのため、風力発電を取りまくさまざまな立地制約を克服する技術的対策を推進し、国内導入量を拡大することによって、国内企業の技術をより高め、実績と信頼を積み上げることが不可欠である。

我が国において、今後、陸上適地の減少が想定されるとともに、洋上風力発電の新たな開発を展開する上で、特に重要となる発電所の候補サイトや海域の周辺地域の方々、利害関係者に当たる産業関係者との協力・協調を醸成する必要がある。そのため、開発初期段階から着手する配慮書や方法書などの環境影響評価に係る手続きを適切に進めるとともに、それらの事例を積み重ね、円滑な手続きを進めることが風力発電のさらなる導入拡大に寄与する。我が国での風力発電所の開発プロセスを **図 3-73** に示す。

さらに、国内市場で技術力を培うとともに、国際市場の獲得や国際標準への貢献などが期待される。特に、各国で大型風車の研究開発、実証研究が進められており、塩害や波浪などの厳しい環境に耐え得る高性能・高信頼性が求められる洋上風力発電市場は、技術競争力を持つ我が国企業にとって大きな市場ポテンシャルを秘めており、洋上風車、洋上風況観測システム、洋上変電設備、海底ケーブル、施工や運転保守に利用する船舶などへの市場展開を国内外で進めるとともに、我が国における洋上風力発電の導入普及に向けて、国や自治体の政策、地域協調などを総合的に推進し、洋上風力発電市場を創出することが求められている。

第3章 風力発電

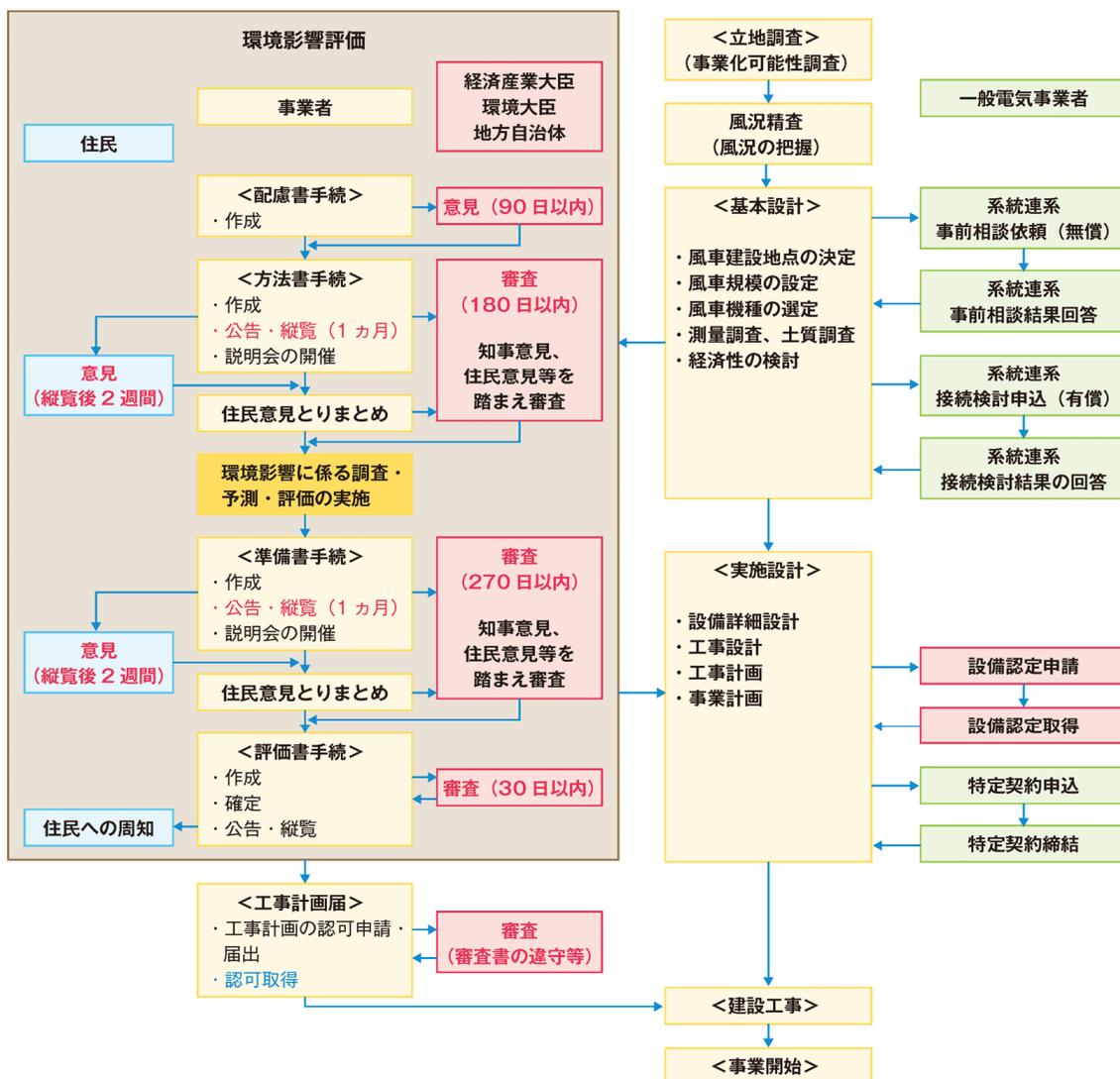


図 3-73 風力発電所の開発プロセスの概略

出典：日本風力発電協会資料より NEDO 作成

3.5.1 発電コストの低減

風力発電は、再生可能エネルギーの中でも成熟した技術体系と豊富な実績を持ち、発電コストが比較的低いことから、世界的に導入普及が進んでおり、風車部品などについてはグローバルなサプライチェーンネットワークが構築されている。近年になり、世界の風車市場シェアは大きく様変わりし、これまで市場を寡占してきた欧米メーカーが相対的にシェアを落とし、中国メーカーが上位に進出している。背景には、中国国内での活発な風力発電所の建設があるが、今後、日本を含む他国の開発案件においても、コスト競争力を有する中国製の風車が採用される可能性がある。

風力発電は今後も比較的、設置しやすい平野部を中心に展開されることが予想されるが、このような適地の減少に伴い、山間部へ、あるいは、洋上へと進出していくことが考えられる。このような場所への展開は発電コストの上昇につながる恐れがあるため、システム価格や運転保守費のさらなる低コスト化が欠かせない。発電コストの低減には、開発費および運転保守などに掛かるコストを低減することと、稼働率や設備利用率を上げ、十分な発電量を得ることが重要である。

これまで風車は数 kW から数百 kW，そして陸上では 3MW 級の風車まで開発されており，大規模なウィンドファームの建設が世界中で進み，他の再生可能エネルギーと比較して十分，競争力を持つ発電コストを実現している．一方，山岳部や我が国特有の複雑地形を有する地域では，建設に掛かるコストや運転保守に掛かるコストが相対的に高いのも事実である．また，そのような地形の影響を受けやすい地域では，乱流などの影響を考慮した風車の設計や運転保守を行う必要がある．さらに，風車の事故故障が発生した場合には，代替部品や補修の際に必要な機材などのコスト，風車停止による稼働率や設備利用率の低下が発生する．そのため，性能や信頼性が高く，事故故障のリスクの低い部品やコンポーネントを選定し，風車に搭載するとともに，適切な運転保守の実施，さらに，それら風車部品やコンポーネント，運転保守技術の高度化が不可欠である．

また，洋上風力発電については，風車を大型化することによって，基礎構造物や建設に掛かるコストを相対的に低減する取り組みが進められている．陸上風力における最大級の風車である 3MW と比較し，洋上では既に 3～5MW の洋上風車が建設されており，今後さらなる大型化として 6～7MW，先行研究では 10～20MW の洋上風車などが検討されている．洋上における運転保守は，陸上と異なり，作業員の交通船や作業船などが必要で，これらは陸上に比べ発電コストを押し上げる要因になっている．そのため，欧州で活発な開発が進められている，洋上風車の物流や風車基礎の製作などに必要となる港湾や船舶などのインフラの整備，船舶から洋上風車への作業員の安全な乗り降りを可能とする交通船や作業船などを手配できる環境整備が今後，ますます重要になってくる．さらに，洋上風車の状態を遠隔で監視するシステムなどを風車に組み込み，風車の各パーツの健全性を確認するとともに，定期的な点検や計画的な補修を推進し，運転保守に掛かる費用を抑制する取り組みが求められている．

3.5.2 設置可能地域の拡大

陸上風力の導入量拡大に向けては，山間部や洋上，あるいはこれまで風況が悪いことから立地を見送っていた弱風地域への展開，さらには，これまで小型風力発電が導入されていた地域・分野への設置が必要となる．そのためには複雑な風況，台風，洋上の環境に対応した風力発電機の開発によって，設置可能域を拡大することが重要となる．このような地域への設置には，山間部や複雑地形の影響による乱流特性や，台風による強風の影響など，地域・場所特有の自然条件への対応が求められる．また，設置可能域の事業性を評価するためには，複雑地形における高精度な風況予測モデルの確立，台風予測の高度化なども必要となる．そして，洋上風力発電については，着床式洋上風力発電を着実に推進するとともに，さらに深い水深の海域にも対応可能な浮体式洋上風力発電に係る技術の確立も不可欠である．

海外においても，陸上の適地が減少するなど，厳しい環境下に対応可能な風力発電機へのニーズが高まる可能性が高く，これまで我が国の風力発電の発展の阻害と考えられてきた自然条件を克服して，我が国固有の技術力を高め，海外に展開することが設置可能地域の拡大に寄与するとともに，我が国企業の国際競争力の強化にもつながる．

3.5.3 洋上風力発電の技術開発の推進

広大な排他的経済水域を有する我が国にとって，沖合で展開できる洋上風力発電は，再生可能

第3章 風力発電

エネルギーの中でも際立って大きな可能性を有している。着床式洋上風力発電については、既に欧州で導入が進んでいる。浮体式洋上風力発電については、世界的に実証研究の段階であり、造船技術の応用など、我が国の技術優位性を発揮できる可能性を有している。

洋上風力発電は近年、世界的に水深が深く、離岸距離の遠い海域に建設される傾向にあり、事業採算性の確保に向けて、風車の大型化が進められている。我が国においても世界最大級の7MW級の大型風車の開発を進めており、ドライブトレイン、長翼ブレードなど、風車の重要コンポーネントの性能や信頼性の試験を工場内で実施するとともに、フルスケール機による発電試験や遠隔監視技術の確認などを予定している。さらに、洋上風力発電は水深や海底地質などに対応するために、風車の基礎構造物を十分、検討する必要がある。設計、製作、施工、運転保守、撤去などを総合的に考慮する必要がある。また、洋上風力発電は投資額が大きいため、洋上に風況観測タワーを設置し、長期間の風況を観測した上で、風車の選定や事業性の評価を行っているが、我が国のように比較的、急峻な海底地形を有する海域においては、洋上風況観測タワーの建設費用が高くなるため、比較的安価で、精度良く風況観測可能な洋上風況観測技術の確立が望まれている。

また、2012年7月から、風力発電を含む再生可能エネルギーの固定価格買取制度が開始されたものの、洋上風力発電については、まだ国内における十分な実績がないことなどから、諸外国のように洋上風力発電に対する買取価格は設定されていない。そのため、銚子沖や北九州市沖で推進している実証研究などから得られる洋上風況や発電、運転保守に係るデータなどを基に、洋上風力発電の買取価格設定に向けた根拠となるデータの整備が求められている。

3.5.4 系統連系対策

風力発電は文字どおり、風をエネルギー変換して発電するシステムである。風は必ずしも一様ではなく、変動するため、風力発電による電力は出力、周波数ともに不安定であるのは事実である。そのため、風力発電をはじめとする再生可能エネルギーの普及が進展するにつれ、系統における電圧、周波数などの電力品質に与える影響が懸念されている。

系統連系対策として電力を安定させるアプローチには、系統側で行うものと、発電側で行うものがあり、両者が連携して対策を実施することが重要である。3.4.1(4)で紹介したとおり、スペインのように高度な制御システムを用いて、発電量に占める風力発電の比率を最大40%まで高めている例もある。変動対策として蓄電池の活用がオプションの一つに挙げられるが、現状では蓄電池の価格は高く、さらなるコスト低減などが必要である。そのため、風力発電をはじめとする再生可能エネルギーのさらなる導入に向けて、発電量予測の高度化や系統の整備・強化、さらには出力・周波数変動対策を発電所内または系統側で実施するなど、狭域・広域による制御を検討する必要がある。

3.5.5 環境調和と地域協調

2011年3月の環境影響評価法の改正によって、計画段階における環境配慮書手続きや環境保全措置等の結果の公表等の手続きなどが新設され、2013年4月1日には「発電所の設置又は変更の工事に係る計画段階配慮事項の選定並びに当該環境影響評価の項目並びに当該項目に係る調査、予測及び評価を合理的に行うための手法を選定するための指針並びに、環境の保全のた

めの措置に関する指針等を定める省令（平成10年通商産業省令第54号）」が施行された。これまで、風力発電の環境影響評価は、地方自治体の条例や事業者による自主アセスなどが進められてきたが、発電所建設後には、騒音・低周波音、景観、土地改変、バードストライクなどに関する諸課題を有する発電所も少なからず存在していた。そのため、今後、風力発電所に係る環境影響評価を適切に実施することが、風力発電の健全な導入普及に望まれる。さらに、洋上風力発電の導入に当たっては、その地域や海域の状況に応じた総合的な観点から協議するとともに、港湾や航行、漁業など他の海域利用者との協調を醸成することが必要である。

3.5.6 まとめ

風力発電は世界的に導入普及が進み、2012年末には全世界で約282GW導入された。洋上風力発電については、欧州を中心に約5.4GW導入されており、風力発電は再生可能エネルギーの中心的な役割を占めている。そして、我が国においては、陸上風力発電を中心に、2012年末には約2.6GW導入されており、現在、NEDOによる着床式洋上風力発電に関する実証研究、環境省や経済産業省による浮体式洋上風力発電に関する実証研究が進められている。そのため、従来の陸上風力発電のみならず、今後、我が国においても洋上風力発電の導入普及が期待されている。

陸上風力発電は、成熟した技術体系と豊富な実績を有しており、他の再生可能エネルギーと比較し、発電コストが低い利点がある。一方、陸上の適地の減少など諸問題を有しており、世界的にも山岳部や複雑地形など、開発が比較的、困難な地域における陸上風力発電の導入が予想される。そのため、我が国特有の複雑地形におけるこれまでの導入実績を世界的に展開できる可能性を有しているともいえる。

我が国の風力発電の開発は、台風や地震、複雑地形の影響を受けた風による乱流など、風車の設計、運転保守などにおいて、十分な検証や適切な対応が求められる。そのため、我が国の風力発電の平均的な設備利用率は20%弱と、諸外国と比較してそれほど高いものではない。したがって、今後さらなる導入拡大を進めるためには、より一層の発電コストの低減が重要である。特に、風車の事故故障による風車の停止時間の低減に向けて、風車の部品やコンポーネントの性能・信頼性の高度化による事故故障リスクの低減とともに、風車の稼動状態のモニタリングなどによって、部品やコンポーネントの疲労や寿命を予測し、風車の事故故障を未然に防ぎ、適切な運転保守を行う技術の確立などが求められている。今後、NEDOでは、これらの技術開発に取り組み、陸上風力発電の発電コストを低減し、再生可能エネルギーの導入に伴う電力料金の国民負担を低減するとともに、さらなる再生可能エネルギーの導入普及を推進する。

次に、我が国の洋上風力発電の開発については、これまで港湾や海岸線沿いに洋上風力発電所が建設された実績はあるものの、欧州を中心に展開されている沖合における洋上風力発電はまだ事業化されていない。我が国初の沖合における本格的な洋上風力発電として、NEDOの洋上風力発電システム実証研究において、2012年度、千葉県銚子沖に2.4MWの洋上風車の建設を完了し、実証研究を開始したとともに、福岡県北九州市沖に2.0MWの洋上風車の建設を完了した。NEDOでは2013～2014年度、発電量評価や運転保守技術を検討するとともに、洋上風車に隣接して建設した、洋上風況観測タワーによる洋上風況観測や海象計測などを実施し、太平洋側および日本海側における風況特性の違いなどを明らかにする。また、洋上風車や洋上風況観測タワーの設置前後における環境調査などの定量的なデータを踏まえ、環境影響評価を行い、周辺環境に与える

第3章 風力発電

影響などを検証する。さらに、欧州を中心に洋上風車の大型化が顕著であるため、現在 NEDO が支援する世界最大級の 7MW 超大型洋上風車の開発を着実に推進し、国内外に展開することで、我が国企業の国際競争力を強化する。

浮体式風力発電については、環境省の洋上風力発電実証事業において、2012 年度、100kW 級の浮体式洋上風車が長崎県五島市杵島沖に建設され、2013 年 10 月には 2MW クラスの浮体式洋上風車も運転を開始し、各種データが蓄積されており、2013～2015 年度には 2MW 級の浮体式洋上風車の実証研究が予定されている。また、経済産業省の浮体式洋上ウインドファーム実証研究事業においては、2013 年度に 2MW 級の洋上風車の実証研究を開始した。今後、2015 年度までに世界最大級の 7MW 級の洋上風車の実証研究を行う予定である。今後、NEDO では、千葉県銚子市沖や福岡県北九州市沖の実証研究から得られるデータや知見をガイドラインなどに取りまとめ、洋上風力発電を目指す事業者などの産業界、関係省庁や地方自治体などに成果を普及し、洋上風力発電の基盤を構築する。そのために、我が国特有の気象・海象条件などを踏まえ、洋上風車や洋上風況観測タワーの設計・施工や運転保守など、技術的な検証を十分に行うとともに、発電コストを検証し、洋上風力発電の固定価格買取制度の買取価格などの検討に資する基礎データなどを取りまとめる。さらに、我が国における洋上ウインドファームの実現に向けて、簡易に洋上風況を観測することができる技術の開発や洋上ウインドファームの開発支援、海域を利用する関係者や地域の方々との協調などを総合的に実施する。

第3章 参考文献

- (1) 風力発電導入ガイドブック 2008, (2008, NEDO)
- (2) Renewable Energy Essentials: Wind, (2008, IEA)
- (3) Technology Roadmaps Wind energy, (2013, IEA)
- (4) Technology Roadmaps Wind energy, (2009, IEA)
- (5) The Economics of Wind Energy, (2009, EWEA)
- (6) Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series Wind Power, (2012, IRENA)
- (7) Deploying Renewables - Best and Future Policy Practice, (2011, IEA)
- (8) Large-Scale Offshore Wind Energy for the United States, (2010, NREL)
- (9) Review of Offshore Wind Energy Markets, (2013, GL Garrad Hassan)
- (10) Renewable Energy Essentials: Wind, (2008, IEA)
- (11) 20 PERCENT WIND ENERGY PENETRATION IN THE UNITED STATES, (2007, Black & Veatch)
- (12) Global Wind Report Annual Market Update 2012, (2013, GWEC)
- (13) NASA ホームページ, <http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=8916>
- (14) 平成 22 年度新エネルギー等導入促進基礎調査事業(風力エネルギーの導入可能量に関する調査), (2011, 資源エネルギー庁)
- (15) コスト等検証委員会報告書, (2011, エネルギー・環境会議 コスト等検証委員会), <http://www.enecho.meti.go.jp/info/committee/kihonmondai/8th/8-3.pdf>
- (16) 平成 22 年度再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査, (2011/4, 環境省)
- (17) Europe's Onshore and Offshore Wind Energy Potential, (2009, EEA)
- (18) A National Offshore Wind Strategy, (2011, DOE EERE)
- (19) China Wind Power Outlook 2010, (2010, GWEC)
- (20) Indian Wind Power Outlook 2011, (2011, GWEC)
- (21) Technology Roadmap Wind energy, (2009, IEA)
- (22) Directive 2009/28/EC on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC, Renewable Energy Technology Roadmap 20% by 2020, (2008, EREC)
- (23) Renewable Energy Technology Roadmap 20% by 2020, (2008, EREC)
- (24) Renewables Information 2011, (2011, IEA)
- (25) DSIRE ホームページ, New Energy for America, (2009, Barack Obama and Joe Biden), http://energy.gov/sites/prod/files/edg/media/Obama_New_Energy_0804.pdf
- (26) 20% Wind Energy by 2030, (2008, DOE)
- (27) 風力発電導入ポテンシャルと中長期導入目標 V3.2, (2012, JWPA)
- (28) World Energy Outlook 2009, (2009, IEA)
- (29) World Energy Outlook 2013, (2013, IEA)
- (30) 環境省ホームページ (<http://www.env.go.jp/annai/kaiken/h24/s0831.html>)
- (31) UK Renewable Energy Roadmap, (2011, 英国政府)
- (32) National Renewable Energy Action Plan in accordance with Directive 2009/28/EC on the promotion of the use of energy from renewable sources, (2010, ドイツ政府)
- (33) ACCELERATING GREEN ENERGY TOWARDS 2020, (2012, デンマーク政府)
- (34) National Renewable Energy Plan, (2010, スペイン政府)
- (35) Global Market Report 2011, (2012, GWEC)
- (36) 2009 EEG Payment Provisions, (2008, BMU)
- (37) Wind in our Sails, (2011, EWEA)
- (38) 20% Wind Energy by 2030, (2008, DOE)
- (39) Global Wind Report 2011, (2012, GWEC)
- (40) Global Wind Report 2012, (2013, GWEC)
- (41) U.S. Wind Industry Annual Market Report Year Ending 2010, (2011, AWEA)
- (42) Wind Power Outlook 2008, (2008, AWEA)
- (43) Global Wind Energy Outlook 2010, (2010, GWEC)
- (44) The European offshore wind industry - key trends and statistics 2012, (2013, EWEA)
- (45) The European offshore wind industry key 2011 trends and statistics, (2012, EWEA)
- (46) Wind Energy Factsheets 2010, (2011, EWEA)
- (47) The Wind Power ホームページ, http://www.thewindpower.net/windfarms_list_en.php
- (48) Integration of largescale wind in the grid-The Spanish Experience, (2008, RED ELECTRICA)
- (49) 三菱重工プレスリリース, (2011/11/28, 三菱重工), <http://www.mhi.co.jp/news/story/1111285136.html>

第3章 風力発電

- (50) 富士重工業プレスリリース, (2012/3/30, 三菱重工業), http://www.fhi.co.jp/news/12_01_03/12_03_30.html
- (51) 日立製作所プレスリリース, (2012/7/12, 三菱重工業), <http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2012/07/0712.html>
- (52) 京都大学プレスリリース, (2012/6/12, 三菱重工業), http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/news_data/h/h1/news6/2012/120612_2.htm
- (53) DOE ホームページ, Wind Program, <http://www1.eere.energy.gov/wind/index.html>
- (54) DOE ホームページ, Wind Program Newsletter, <http://apps1.eere.energy.gov/wind/newsletter/detail.cfm/articleId=32>
- (55) Korea Strategy on Offshore Wind & Marine Energy, (2012/6, KWEA (韓国風力発電協会)), Renewable UK 2012 発表資料
- (56) 三菱重工業プレスリリース, (2013/9/27, 三菱重工業), <http://www.mhi.co.jp/news/story/1309275427.html>
- (57) Dynamics Modeling and Loads Analysis of an Offshore Floating Wind Turbine, (2007, NREL)
- (58) EC ホームページ, http://cordis.europa.eu/fp7/projects_en.html