



技術戦略研究センターレポート

TSC Foresight

Vol. **27**

風力発電分野の 技術戦略策定に向けて

2018年7月

1 章	風力発電技術の概要	2
1-1	風力発電の歴史	2
1-2	風力発電の原理	3
1-3	風力発電機の構成要素と設置場所	3
2 章	風力発電技術の置かれた状況	5
2-1	風力発電の市場動向	5
2-2	プレイヤー動向	10
2-3	発電コスト動向	12
2-4	特許・論文・標準化の動向	15
2-5	各国の研究開発政策の動向	19
3 章	風力発電分野の技術課題	22
3-1	風力発電技術の共通課題	22
3-2	日本の風力発電の課題	23
4 章	おわりに	24

TSCとはTechnology Strategy Center(技術戦略研究センター)の略称です。

1章 風力発電技術の概要

1-1 風力発電の歴史

風力発電は、風の運動エネルギー（以下、風力エネルギー）を風車により機械的な回転力に変換し、その回転力で発電機を回して発電する技術であり、再生可能かつ低炭素であるという特徴から、近年急速に導入が拡大している。

人類の風力エネルギー利用の歴史は古く、欧州諸国では700年以上前から、粉挽きや揚水など多くの用途に風車の機械的な回転力が使われてきた。風力エネルギーを電力に変える風力発電の開発が始まったのは19世紀末とされており、デンマークのP・ラケールがその技術の基礎を築いたとされる。20世紀に入ると風力発電は、米国の農村部などの電力網の届かない地域や、デンマークの農村部で独立電源としての利用が始まった^{*1}。

その後、1970年代の石油危機を経て、再生可能エネルギー開発が本格化し、1970年代後半から1990年代末にかけて、風力発電の経済性向上に向けた様々な技術開発が進展し、数kW程度だった発電出力は数百kW程度まで上昇した。2000年代に入るとさらに大出力化が進み、MW級の出力のものが登場した。このころから、欧州をはじめとする風の吹き方（以後、風況）の良い地域では商業化が進展し、発電技術として本格的な普及段階に進んだ。

日本でも石油危機を経て風力発電の開発が始められ、1980年代からは海外と同様に風力発電機の大型化に向けた取組が行われた。その後、2MWクラスの風車が開発・実用化され、2000年代からは日本国内においても

風力発電の導入が進められた。2011年の東日本大震災を経て、再生可能エネルギーの導入拡大機運が高まり、2015年に発表された長期エネルギー需給見通しでは、2030年までに約10GW（現在の導入量の約3倍）の導入が見込まれている。

*1 出所：牛山泉『トコトンやさしい風力発電の本』日刊工業新聞社、2010、p.14

風力発電分野の技術戦略策定に向けて

1-2 風力発電の原理

風力発電では、風力エネルギーを風車で機械的な回転力に変え、この回転力で発電機を回して発電する。風車を受ける風力エネルギー量は風速の3乗に比例し、また受風面積に比例する(図1)。そのため、より風の強い場所に設置すること及び大きい翼で効率良く風を受けることが重要である。



ローター: ブレードで受けた風の力を発電機に伝えるもの



$$P = \frac{1}{2} m V^2 = \frac{1}{2} (\rho A V) V^2 = \frac{1}{2} \rho A V^3$$

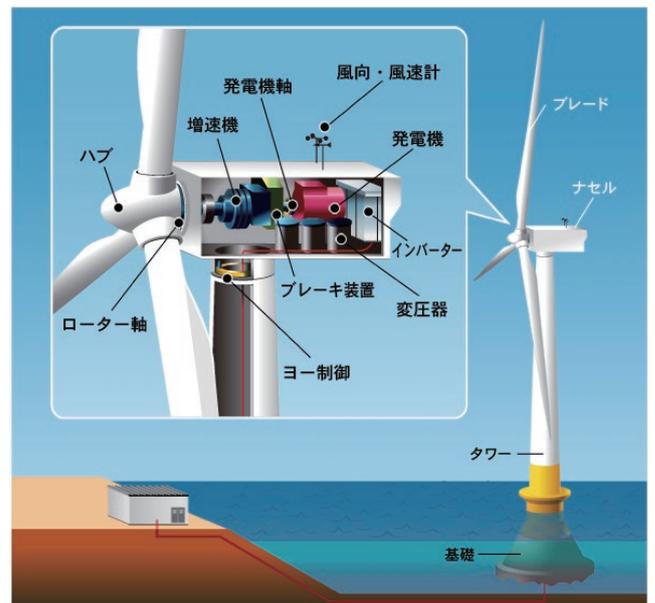
P: 風力エネルギー (w)
 m: 質量 (kg)
 ρ: 空気密度 (kg/m³)
 A: 受風面積 (m²)
 V: 風速 (m/s)

図1 風力発電の原理と、風力エネルギーと風速の関係

出所: 各種資料を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2017)

1-3 風力発電機の構成要素と設置場所

風力発電機は約1~2万点の多岐にわたる部品から構成されており、その部品点数は自動車や家電製品並みと言われている。プロペラ式風力発電機の主な構成部品とその役割を示す(図2)。



構成要素	概要	
ローター系	ブレード	回転羽根、翼
	ローター軸	ブレードの回転軸
	ハブ	ブレードの付け根をローター軸に連結する部分
伝達系	発電機軸	ローターの回転を発電機に伝達する
	増速機	ローター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
	インバーター	発電機の出力周波数を調整し、系統周波数に合わせる
	変圧器	発電機の出力電圧を昇圧し、系統電圧に合わせる
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	ローターの向きを風向きに追従させる
	ブレーキ装置	台風時、点検時などにローターを停止させる
	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
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	ローター、ナセルを支える部分
	基礎	タワーを支える基礎部分

図2 風車の構成要素と概要

出所: NEDO ホームページ (<http://www.nedo.go.jp/fuusha/kouzou.html>)

風力発電分野の技術戦略策定に向けて

風力発電の設置場所は、陸上と洋上の2か所に大別され、その適地としては、年間を通して安定した風が吹く、建設時に風車輸送に伴う大規模な造成工事を要しない等が条件となる。日本では山岳地に設置されてきたが、適地は徐々に減少している。

洋上風力発電は、陸上風力発電よりも年間を通して受ける平均風速が速く年間発電量が多い。また、港湾の地耐力等の課題はあるものの、輸送上の制約も陸上

風力発電より少ない。そのため近年では、洋上風力発電設置に関する取組も盛んに行われている。そして、一般的に経済性の観点から、水深が50m以下の海域では、着床式洋上風力発電に優位性があり、水深が50m以上では、浮体式洋上風力発電が優れていると言われている。着床式、浮体式ともに様々な基礎の種類があり、代表的なものを図3に示す。基礎は海底の状況等により選択される。

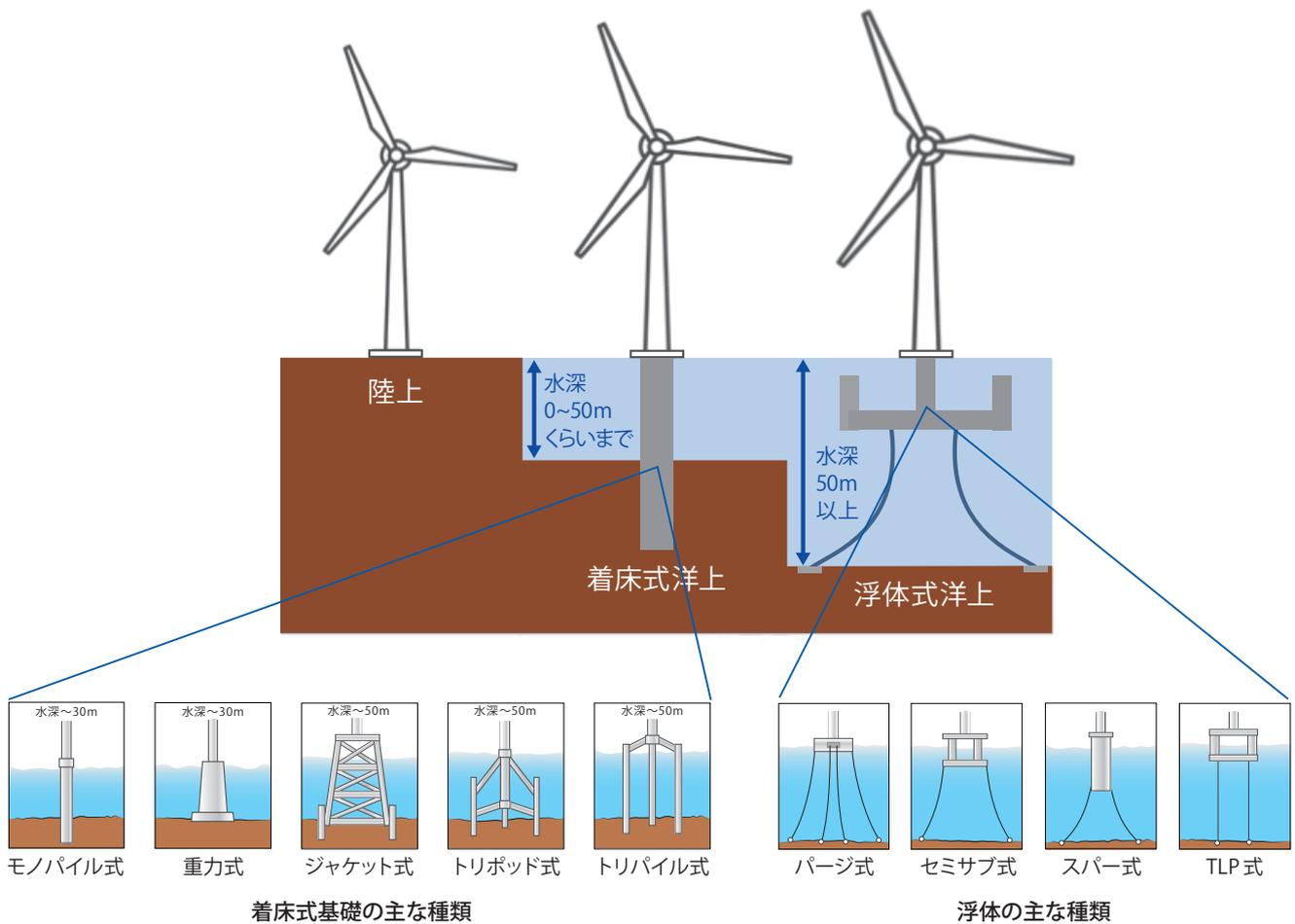


図3 風車の設置場所と基礎の種類

出所：「洋上風力の調達価格に係る研究会取りまとめ報告書」参考資料（経済産業省，2014）

及びFloating Offshore Wind Vision Statement (Wind Europe, 2017) を基にNEDO技術戦略研究センター作成(2018)

風力発電分野の技術戦略策定に向けて

2章

風力発電技術の置かれた状況

2-1

風力発電の市場動向

(1) 世界市場

世界の風力発電導入量は、2017年末時点の累積で約539GW、年間導入量で約52GWに達している(図4)。

風力発電の市場は、1980年代に、欧州(スペイン、ドイツ、デンマーク、オランダ等)で先行して導入が始まり、1990年代後半から米国が合流し、世界の風力発電市場をけん引してきた。2000年代以降は中国の導入拡大が著しい。現在、市場をけん引する3つの地域としては、欧州、北米、そして中国を主とするアジアが挙げられる(図5)。

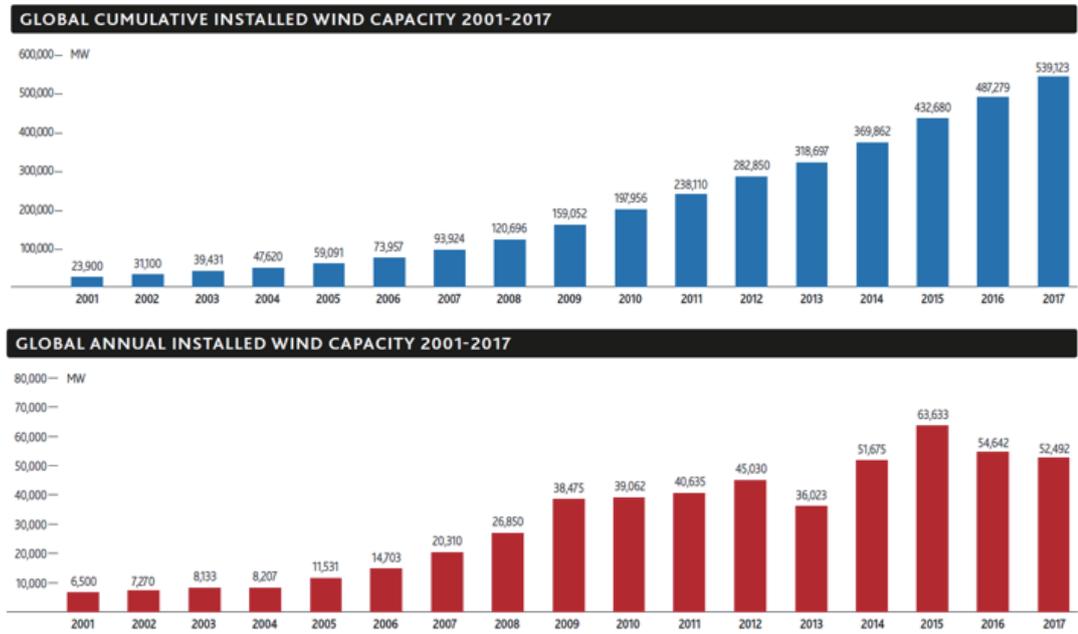


図4 世界の風力発電導入量の推移(上:累積導入量、下:新規導入量)

出所: GLOBAL WIND REPORT 2017 (GWEC※2, 2018)

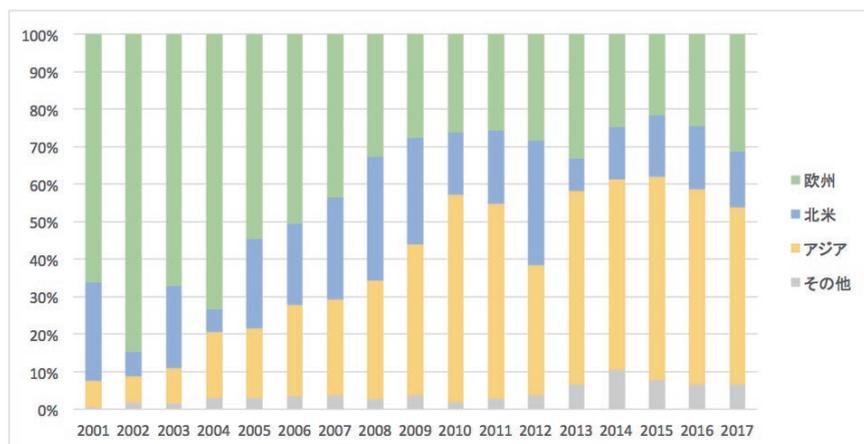


図5 地域別新規導入量シェアの推移(設備容量ベース)

出所: GLOBAL WIND REPORT 2006~2017 (GWEC)を基に
技術戦略研究センター作成(2018)

※2 Global Wind Energy Council (<http://www.gwec.net/>)

風力発電分野の技術戦略策定に向けて

2017年の導入量を国別で見ると中国（約20GW）が37%超を占め、米国（約7.0GW）、ドイツ（約6.5GW）、英国（約4.2GW）、インド（約4.1GW）と続いている（図6）。陸上大型風車は、IEC規格IEC61400-1（2005）によ

り、設計に用いた基準風速^{※3}を元にI～IIIの風車クラスに分けられ、年平均風速は基準風速の0.2倍として換算される。また、これらの標準的なクラスに入らないものをクラスSとしている（表1）。

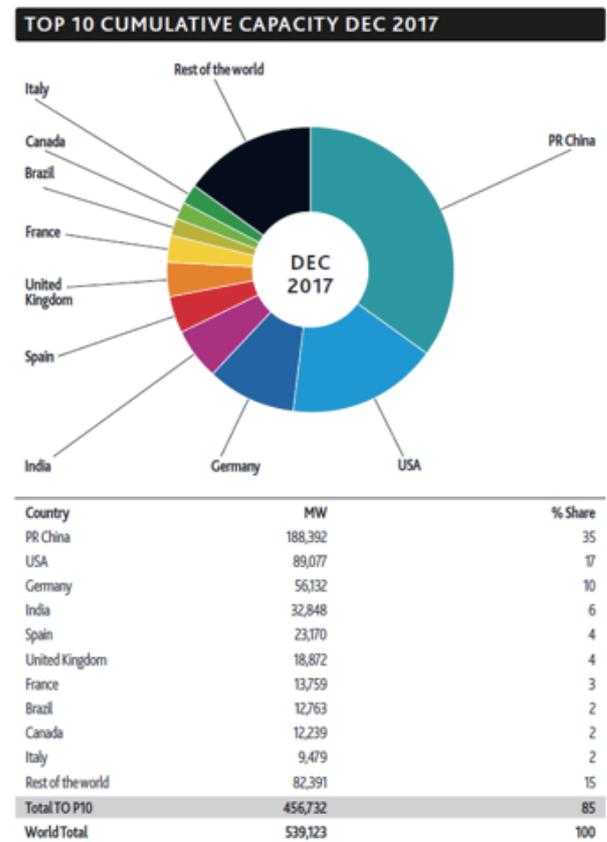
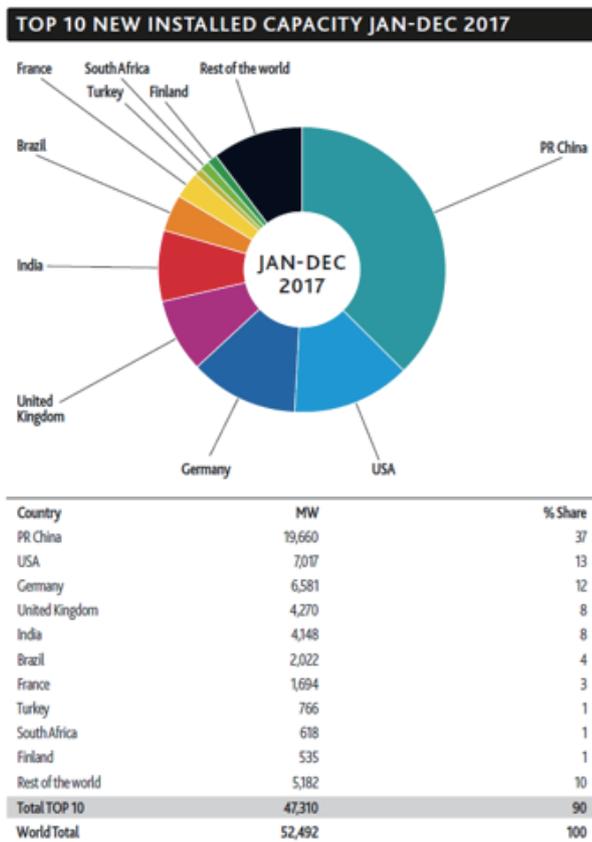


図6 2017年の国別導入量（設備容量ベース）

出所：GLOBAL WIND REPORT 2017（GWEC, 2018）

表1 IEC規格による風車クラスと風速

風車クラス (m/s)	I	II	III	S
基準風速	50	42.5	37.5	設計者が規定する数値
年平均風速	10	8.5	7.5	

出所：NEDO 技術戦略研究センター作成（2018）

※3 10分間平均の再現期間50年の極値

風力発電分野の技術戦略策定に向けて

図7に主要な4地域でのIECクラス別風車の導入割合を示す。いずれの地域の風車も基準風速すなわち設計時の年平均風速の低いものが増加していることが分かる。

洋上風力発電導入量の推移を図8に示す。洋上風力発電の導入は、ヨーロッパが先行し、中国、ベトナム、日本等のアジア地域でも導入が始まりつつある。2017年時点で累積導入量は約19GWであり、風力発電全体（2017年時点で約539GW）の約3%程度と小さいが、

近年の伸び率は陸上風力発電と比較すると大きい。洋上風力発電の導入量が多い上位5か国は、英国（38%）、ドイツ（29%）、中国（15%）、デンマーク（7%）、オランダ（6%）で、ヨーロッパが大半を占めており、特に英国の導入量が多い。

なお、2017年時点で商用化している洋上風力発電は着床式のみであり、浮体式については実証段階にとどまっている。

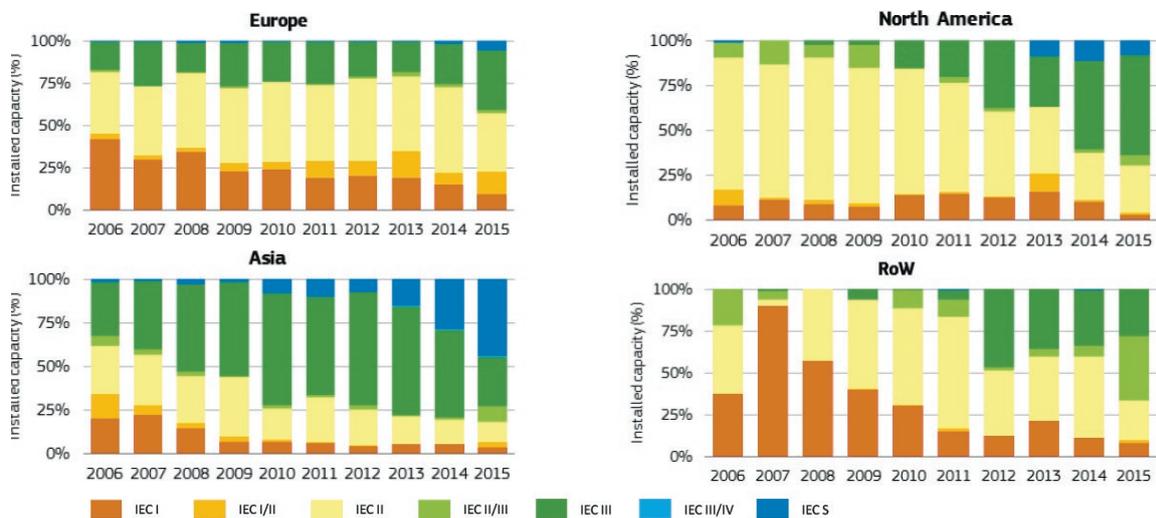


図7 地域別のIECクラス別風車の導入割合
出所：JRC Wind Energy Status Report 2016 Edition (2017)

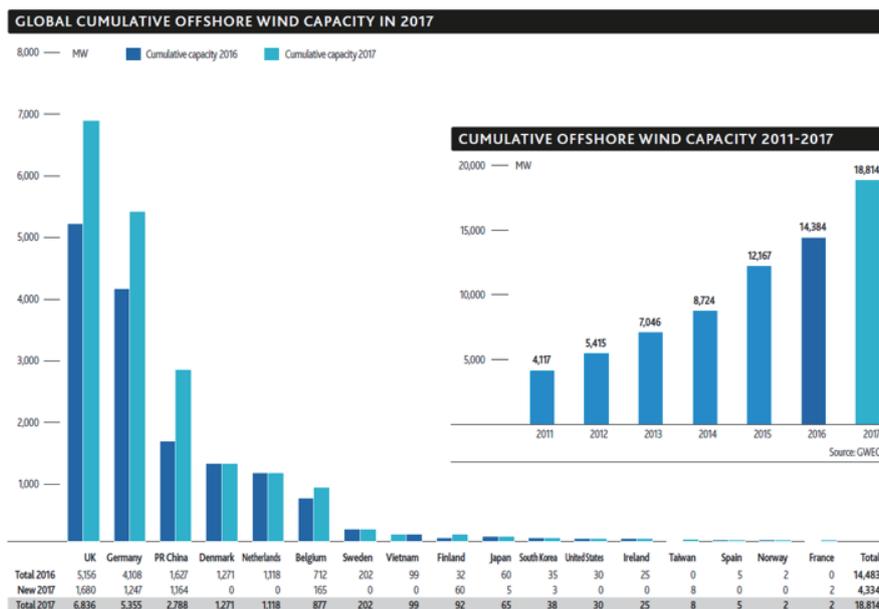


図8 洋上風力発電導入量の推移
出所：GLOBAL WIND REPORT 2017 (GWEC, 2018)

風力発電分野の技術戦略策定に向けて

(2) 国内市場

日本での風力発電の導入は、2003年から開始されたRPS制度 (Renewables Portfolio Standard)、2012年から導入された固定価格買取制度 (FIT: Feed-in Tariff) 等を通じて着実に進められてきた (図9)。しかしながら、欧州や米国と比較するとその導入量は少なく、日本の風力発電導入量は、2017年末時点で累積約3.5GW、年間導入量は約0.2GWにとどまっている。

欧米に比べて日本の導入量が少ない主な理由や要因として、①年平均風速が欧州等に比べて低く、風況の良い地域に限られること、②地元調整、農林地開発等に伴

う土地利用規制対応、系統制約への対応等の課題、③風力発電が立地可能な平地が少ないこと等に伴う高額な建設費用、④FIT制度の開始とともに風力発電が環境影響評価法の対象となったこと等の課題、などが挙げられている*4。

なお、2012年のFIT導入後は多くの案件が事業化に向けて動いているが、前述した開発に伴う課題等により、開発サイクルが長期化しているとの指摘もある。また、2020年度前後から更新時期を迎える風力発電所が増加していくことが見込まれている。

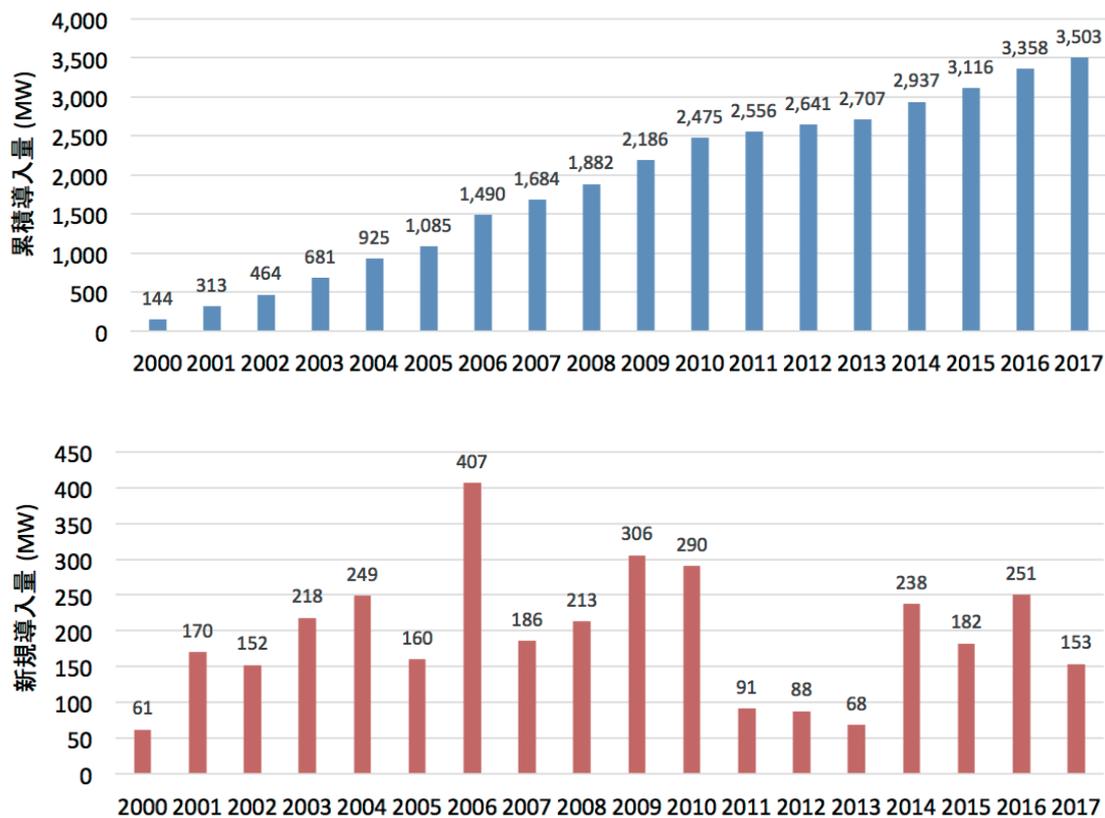


図9 日本の風力発電導入量 (上: 累積導入量、下: 新規導入量) の推移

出所: 「日本における風力発電設備・導入実績」(NEDO, 2017) を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2018)

*4 出所: 「風力発電競争力強化研究会報告書」(経済産業省, 2016)

風力発電分野の技術戦略策定に向けて

日本の洋上風力発電の導入量は約50MWであり、日本の風力発電の全累積導入量に占める割合は約1.5%である。ただしこのうち商業ベースで運用されているプラントのほとんどは沿岸部のプラントであり、沿岸部から離れて沖合に設置された着床式と浮体式洋

上風力発電はともに実証研究事業として設置されたものである。

2015年、FITに洋上風力発電が加えられたことから、現在複数の洋上風力発電事業の開発が進められている(図10)。

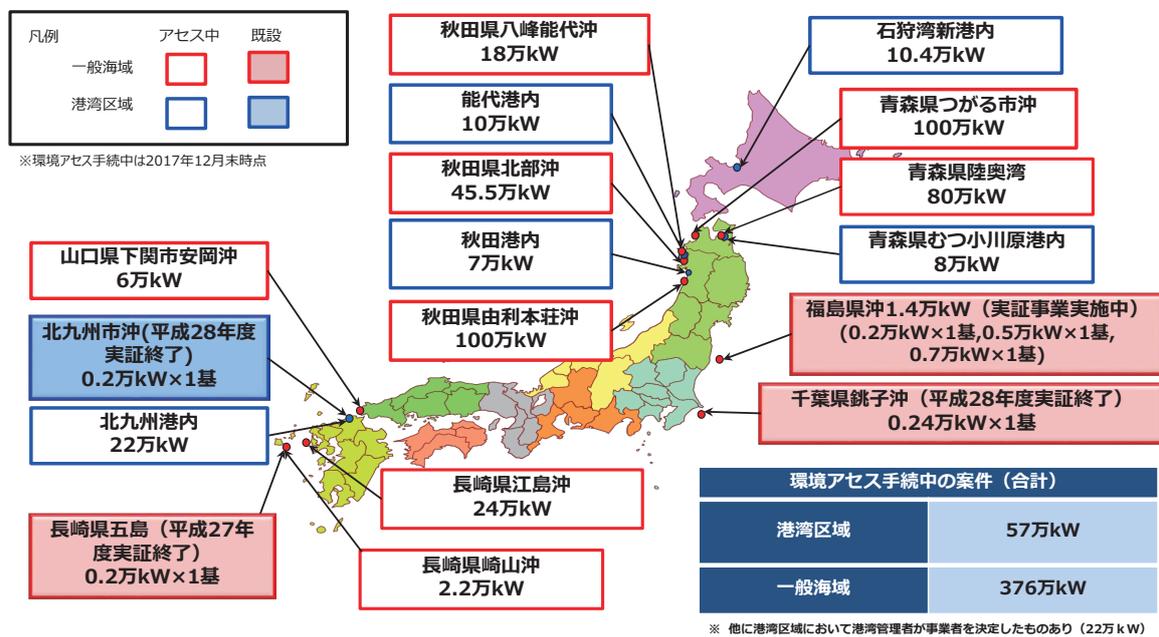


図10 日本の洋上風力発電導入計画

出所：「再生可能エネルギー大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会 第3回配布資料」(経済産業省, 2018)

風力発電分野の技術戦略策定に向けて

2-2 プレイヤー動向

風力発電産業のバリューチェーンは、部素材、風車本体・組立、発電所建設、運転開始後のオペレーション・メンテナンス（O&M：Operation & Maintenance）等で構成され、それぞれ、部素材メーカー、風車メーカー、施工業者、電力事業者、O&Mサービスプロバイダー等が主なプレイヤーとなっている。

また、風力発電機は約1～2万点の多岐にわたる部品から構成され、国内でも多くの関連企業が、風力発電機の開発にかかわっており、産業のすそ野は広い。

(1) 部素材メーカー

国内には風力発電に関連する部素材を提供する企業が多数存在している。そのうち、軸受や炭素繊維などで

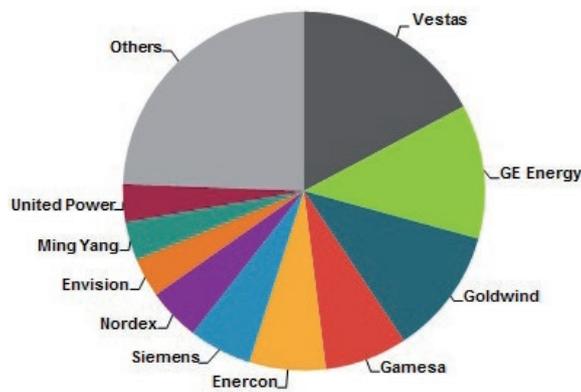


図11 風車メーカー別シェアの推移^{※6}（世界）
出所：Navigant Research ホームページ^{※7}（2017）

※5 軸受メーカーのNTN、日本精工、ジェイテクトは自動車用等のベアリング技術を基に高いシェアを有している。また、コンバータ等の電気設備では日立製作所等が、炭素繊維では東レ、三菱レーヨン等が世界市場でも活躍している。
出所：「World Wide 陸上／洋上風力発電市場の現状と将来展望2017」（富士経済、2016）

は高い世界シェアを獲得（10～20%前後）している国内メーカーもあり、風車分野以外の他分野で培った競争力を武器に世界市場に食い込んでいる^{※5}。

(2) 風車メーカー

図11に、2016年の世界市場における風車メーカーのシェアを示す。風力発電の商業化をけん引した欧州勢、米国のグローバルメーカーが高いシェアを有していたが、近年中国市場の拡大に伴い中国メーカーのシェアの伸びが大きい。その中で、日本のシェアは1%に満たない。

図12に、国内市場における海外機と国産機の割合を示す。2017年度までの累積導入量で約30%が国産機である。これらの国内主要メーカーは、日立製作所、三菱重工、日本製鋼所、駒井ハルテック等である。

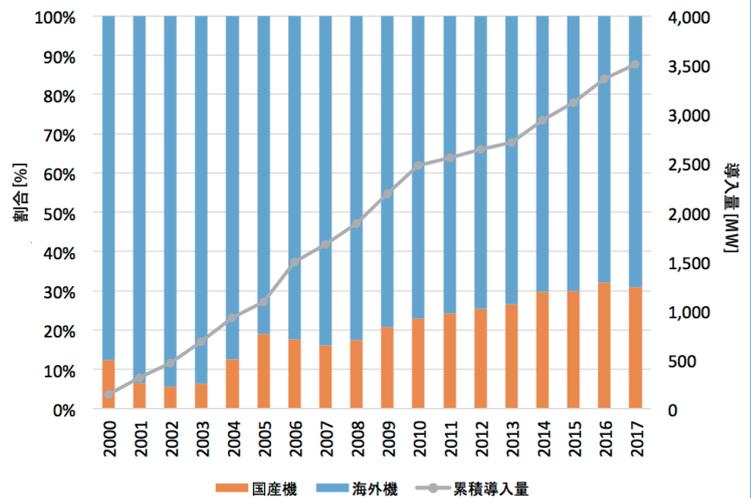


図12 国内における海外機と国産機の割合（累積導入量ベース）

出所：NEDO データベース/ツールを基に NEDO 技術戦略研究センター作成（2018）

※6 年度ごとの導入量の上位10メーカーを示し、10位以下はその他として計上。
※7 <https://www.navigantresearch.com/blog/2016-reshuffles-the-top-10-global-wind-turbine-manufacturers>

風力発電分野の技術戦略策定に向けて

(3) O&M サービスプロバイダー

O & Mは、風力発電所の常時運転監視及び各種保守、メンテナンスを指し、発電所の常時監視から定期点検（目視点検、ボルト等の確認、オイル潤滑剤補給等、定期点検）と補修（不定期に発生した故障・障害等の原因調査と復旧業務）等を行う。O & Mは、主に①発電事業者自らが実施する場合、②風車メーカーが実施する場合及び、③独立系O & Mサービスプロバイダーが実施する場合などがあり、またこれらを組み合わせて実施される場合もある。

通常、風力発電機には初期不良対応のために設置後2年程度のメーカーの保証期間がつくことが多い。保証期間後は、発電事業者がO&Mを自ら実施するか、独立系O&Mサービスプロバイダーに外注するか、もしくはメーカーのO&Mサービスを受ける（O&Mサービスを提供していないメーカーもある）こととなる。

近年、風車メーカーのO&Mサービスの拡張が図られており、風車メーカーが自身でO&Mを実施（稼働率/発電量保証も顧客に提供する場合が多い）することで、顧客のビッグデータを蓄積し、そのビッグデータを活用した新技術・サービスの開発（風車トラブルの事前予測、故障事故対策、風車の高度制御等）に活かすビジネスモデルが拡大しつつある。さらには、保証した稼働率を上回った場合、稼働率保証を越えるアップサイドの収益部分については、メーカーがインセンティブとして得る契約もある。

独立系O&Mサービスプロバイダーでは、欧米で大規模な事業展開を行う事業者が複数存在しているが、我が国においては数社にとどまっており、またその管理風車数も比較的小規模である。

欧米市場と日本市場を比較すると（図13）、稼働率の低さやサービスの多様さ等、O&Mに関するサービス品質には大きな差がある。

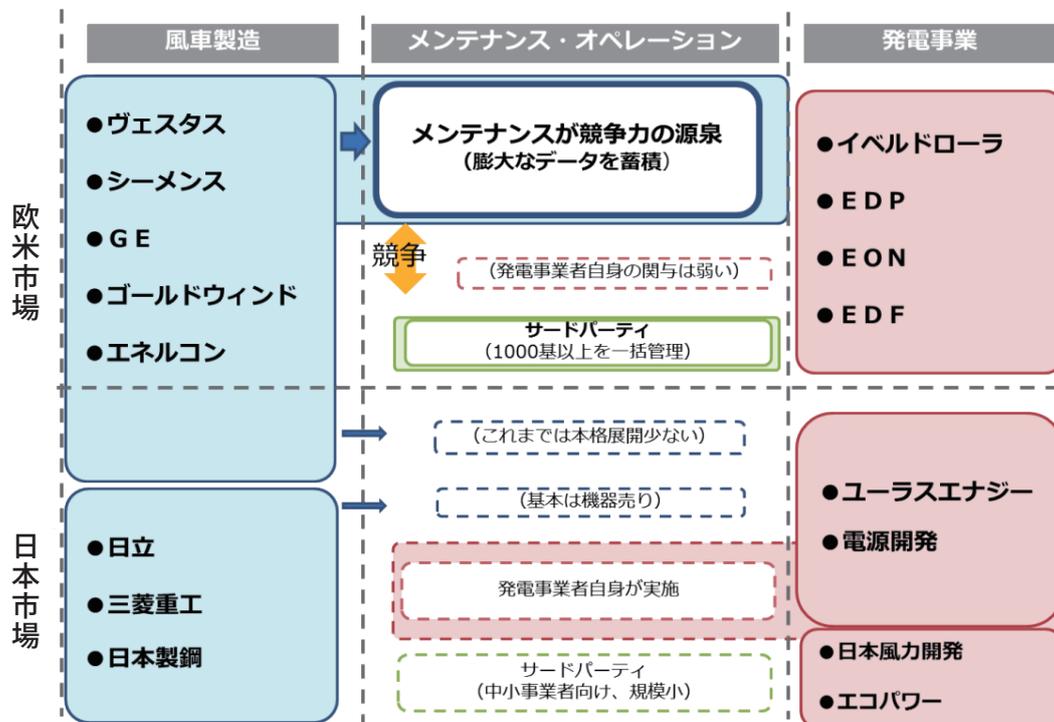


図13 国内外のO & Mサービスの業界構造比較

出所：「風力発電競争力研究会報告書」（経済産業省，2016）

風力発電分野の技術戦略策定に向けて

2-3 発電コスト動向

風車技術の大幅な進展（ローター直径は30年間で約6倍に大型化）及び市場の拡大に伴うコスト削減効果（量産効果、サプライチェーンの最適化・効率化等）により、発電コストは世界的に大幅に低減している（図14）。

2000年から2009年頃までは、一時、風車価格の上昇等により発電コストの低減は鈍化^{※8}したが、2010年頃からは、競争の激化、さらなる大型化、風力新興国での

コスト低減などにより、発電コスト（世界平均）は再度低減傾向にある。

日本においても、これまでコスト低減は図られてきているが、2016年時点の発電コストで比較すると、日本の風力発電（陸上）の発電コストは、世界平均の約1.6倍の水準となっている。

発電コストは、主に資本費、運転維持費及び風車の年間発電電力量により決まる。国内と海外の資本費、運転維持費の違いを図15、図16に、年間発電電力量に大きな影響をおよぼす設備利用率の違いを図17に示す。

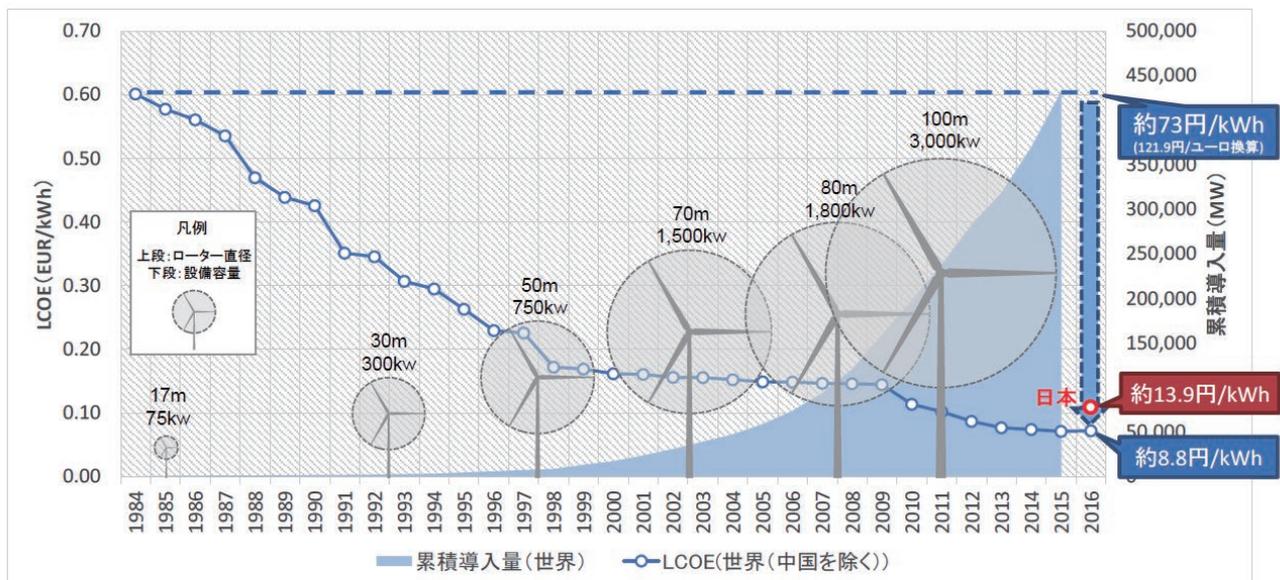


図14 世界と日本の風力発電コストの差異

出所：The future cost of onshore wind (Bloomberg New Energy Finance, 2015)、

IEA Wind Task 26 “The Past and Future Cost of Wind Energy (IEA, 2012) を基にNEDO技術戦略研究センター作成 (2016)

※8 技術の成熟による技術進展の鈍化のほか、世界的な導入量の急拡大に伴う一時的な供給不足による市場競争の停滞（売り手市場化）、鋼材価格の上昇及び設置場所がより不利な場所に移行していったことによるものと考えられる。

風力発電分野の技術戦略策定に向けて

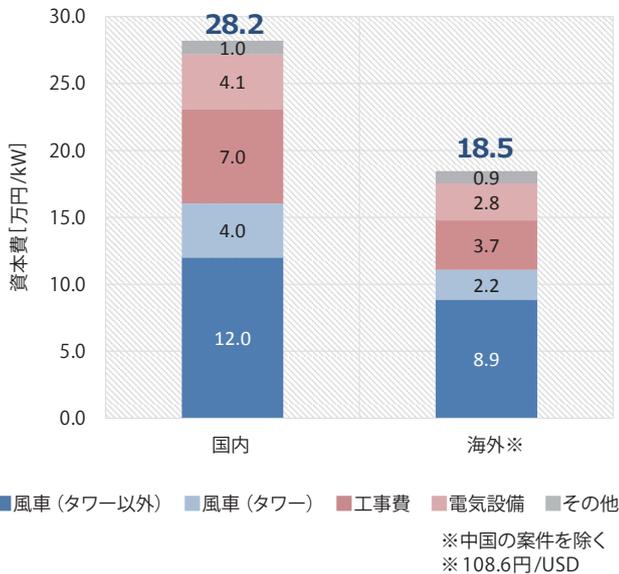


図15 国内及び海外の資本費内訳

出所：H1 2016 Wind LCOE OUTLOOK (Bloomberg New Energy Finance 2016) 及びFIT年報データを基にNEDO技術戦略研究センター作成(2016)

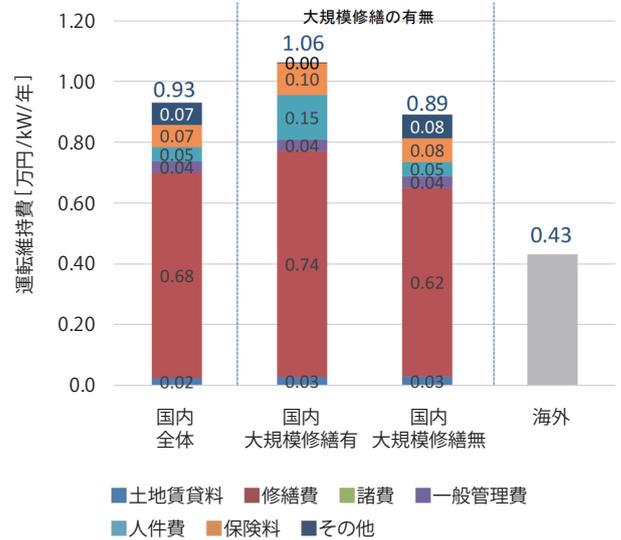


図16 国内(7,500kW以上中央値)及び海外の運転維持費内訳

出所：H1 2016 Wind LCOE OUTLOOK (Bloomberg New Energy Finance 2016) 及びFIT年報データを基にNEDO技術戦略研究センター作成(2016)

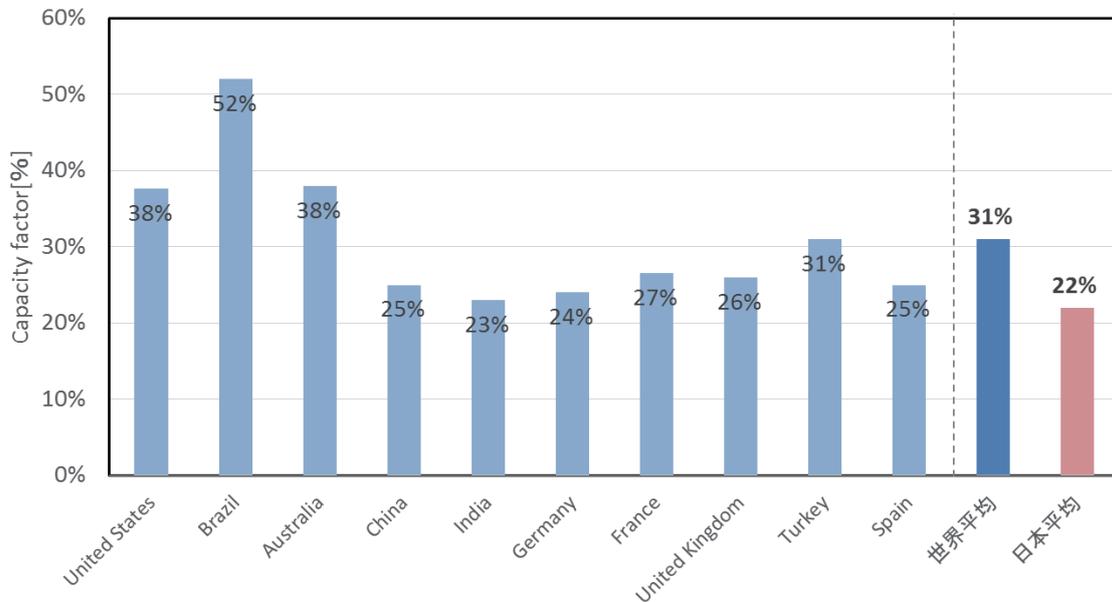


図17 国内及び海外の設備利用率比較

出所：Bloomberg New Finance 資料を基にNEDO技術戦略研究センター作成(2016)

風力発電分野の技術戦略策定に向けて

海外と比較して、資本費の主要な構成要素である風車価格は約1.4倍、工事費・電気設備費等は約1.6倍となっている。運転維持費の修繕費には定常的なものと、故障・事故等による突発的な支出が含まれるが、国内の運転維持費は、大規模修繕が発生していない場合でも、2倍近い水準にある。また、日本の設備利用率は、海外と比べて低

い水準にある。これらの違いにより国内発電コストが高くなる主な要因を表2に示す。

なお、調達価格等算定委員会では20kW以上の陸上風力発電について、設備利用率の調査結果を公表している。2011年以降設置された風車の設備利用率の中央値(3つの調査期間を平均した値)を25.6%としている。

表2 国内の発電コストが高い要因

発電コスト	概要
資本費	<p><風車></p> <ul style="list-style-type: none"> ● 日本への導入量が少なく、国内の風車メーカーが量産効果を発揮するに至っていない ● 海外メーカーからの調達において、FIT価格が設定されていることから、十分な価格交渉力(バーゲニングパワー)を発揮できていない <p><工事費・電気設備費></p> <ul style="list-style-type: none"> ● 平均的なウインドファーム(Wind Farm)の規模が小さく、欧州や米国と比べて近隣地での集積が生じていない ● 山岳設置が多いことによる土地造成・建設費用の増大、僻地への設置によるアクセス道路の工事費の増大、系統接続の費用の増大 ● 国内の工事費が諸外国よりも総じて高い
運転維持費	<ul style="list-style-type: none"> ● 風力発電設備の運用管理と保守メンテナンスに関する産業基盤が整っていない ● メンテナンス人材の不足 ● 国内での部品供給・ストック体制の未整備 ● 保険制度を通じた適切なインセンティブ付与不足
設備利用率	<ul style="list-style-type: none"> ● 風況の違いとともに、日本では稼働率が低い

出所:「風力発電競争力強化研究会報告書」(経済産業省,2016)を基にNEDO技術戦略研究センター作成(2018)

風力発電分野の技術戦略策定に向けて

2-4 特許・論文・標準化の動向

(1) 特許

① 全体傾向

世界全体の出願件数の推移をみると、2005年までは穏やかな増加で推移していたが、2006年に顕著な増加に転じ、その後2011年まで急伸している。しかし、



図18 世界全体の特許出願件数の経年推移^{※9}

出所：「平成27年度 出願特許における日本のポジションに関する情報収集」(NEDO、2016)

2012～2013年はそれまでの急激な増加から減少に転じている(図18)。2000年以降の風力発電に関する累積出願数を出願人国籍別に見ると、日本は、中国、米国、韓国、ドイツに次いで5位となっている(図19)。

出願人国籍別の出願件数の経年推移をみると、2005年までは日本が世界トップとなっているが、2006年以降は他国の出願件数の増加に伴い、順位を落とす傾向にある(図20)。

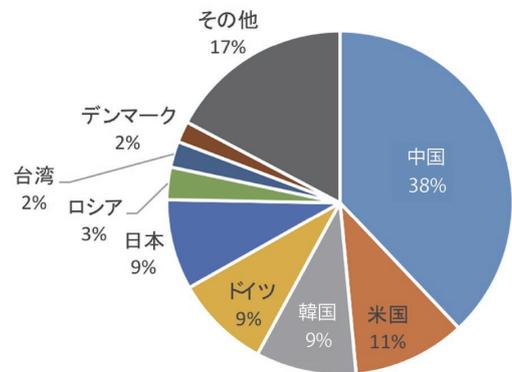


図19 出願人国籍別累積出願件数の割合^{※10}

出所：「平成27年度 出願特許における日本のポジションに関する情報収集」(NEDO、2016)

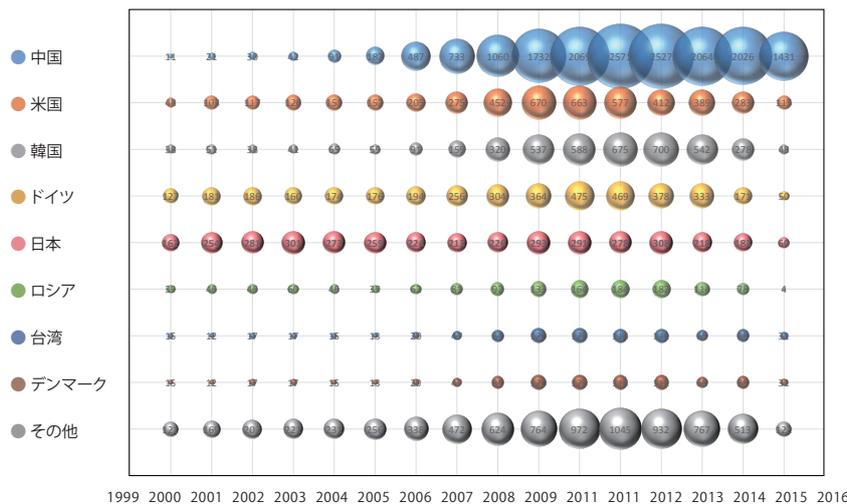


図20 出願人国籍別特許出願件数の経年推移

出所：「平成27年度 出願特許における日本のポジションに関する情報収集」(NEDO、2016)

※9 ファミリのベーシックレコードの出願年で分析、2014年、15年は検索月の段階でデータベースに反映されていない未公開部分の特許を含むため、実際の出願件数とは異なることから、参考値扱いとする。

※10 出願人国籍は、ファミリー内の全公報の中から、最先の優先権主張国のデータを取り出し、それを出願人の国籍とみなして分析。検索前条件は参考資料に明記。

風力発電分野の技術戦略策定に向けて

②構成要素別傾向

図21に風力発電機を構成する構成要素別出願件数を示す。どの構成要素についても図20と同様に、2011年前後をピークとして減少に転じている。出願件数が多い構成要素としては軸受、発電機、ブレードが挙げられる。

図22に出願人国籍別で分類した出願件数を示す。中国国籍は大部分の構成要素で最多数を出願しており、特に発電機、軸受では突出して多い。ただし、コンバータについては米国国籍が一番多くなっている。ブレード、軸受（特に増速機用）では、中国国籍に次いで日本国籍が多い。

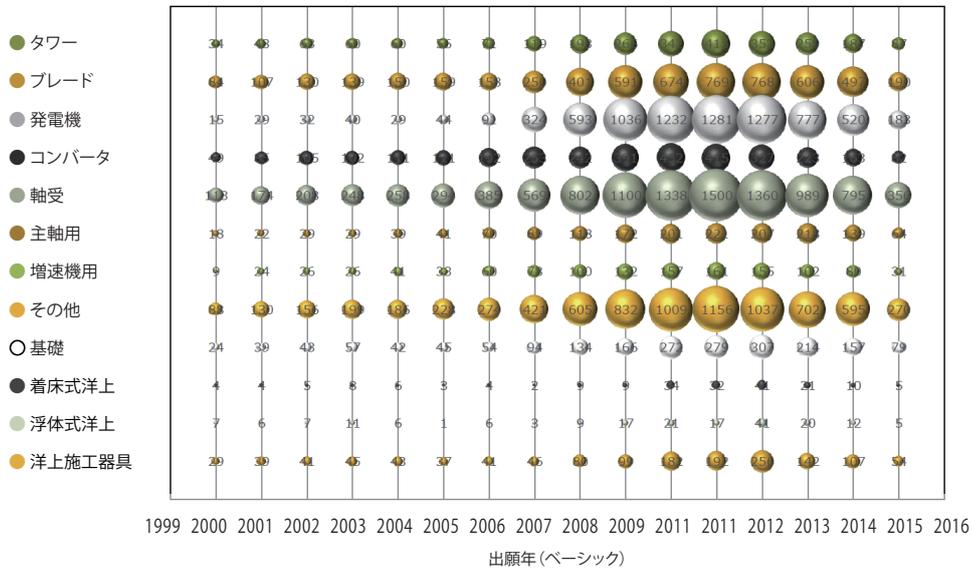


図21 構成要素別特許出願件数の経年推移

出所：「平成27年度出願特許における日本のポジションに関する情報収集」(NEDO, 2016)

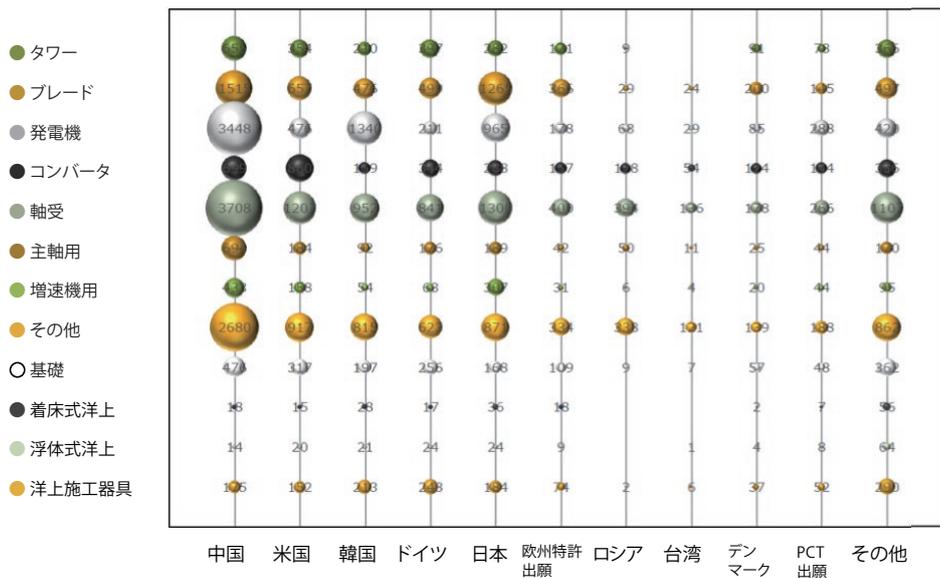


図22 出願人国籍別特許出願件数の国別比較

出所：「平成27年度出願特許における日本のポジションに関する情報収集」(NEDO, 2016)

風力発電分野の技術戦略策定に向けて

(2) 論文

① 全体傾向

2000年以降の、風力発電に関する単年度論文件数を図23に示す。論文数は年々増加し2016年には約

3,500件となった。国別の論文件数ではアメリカ、中国、イギリスの順に多く、日本は約600件で12番目となっている(図24)。

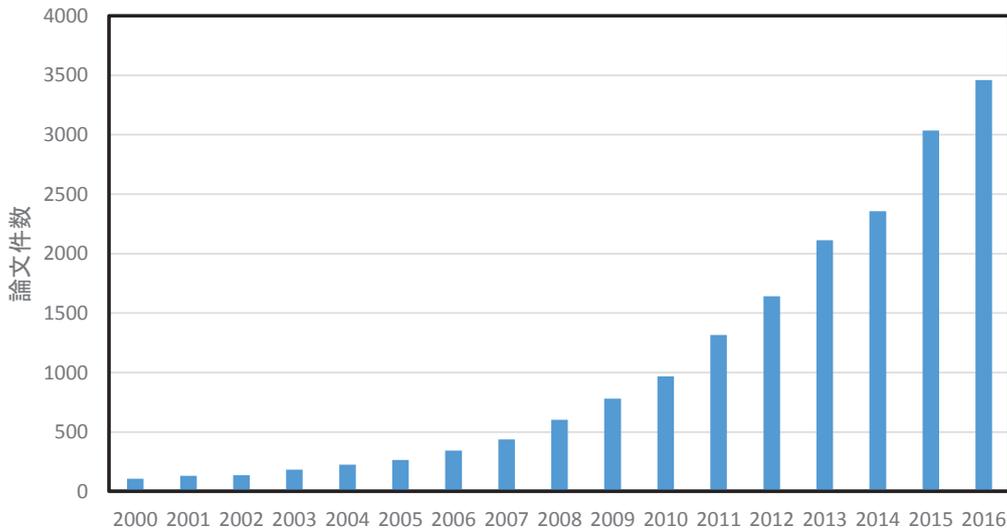


図23 論文件数の推移 (2000～2016年) ※11

出所：Web of Science™の検索結果を基にNEDO技術戦略研究センター作成 (2016)

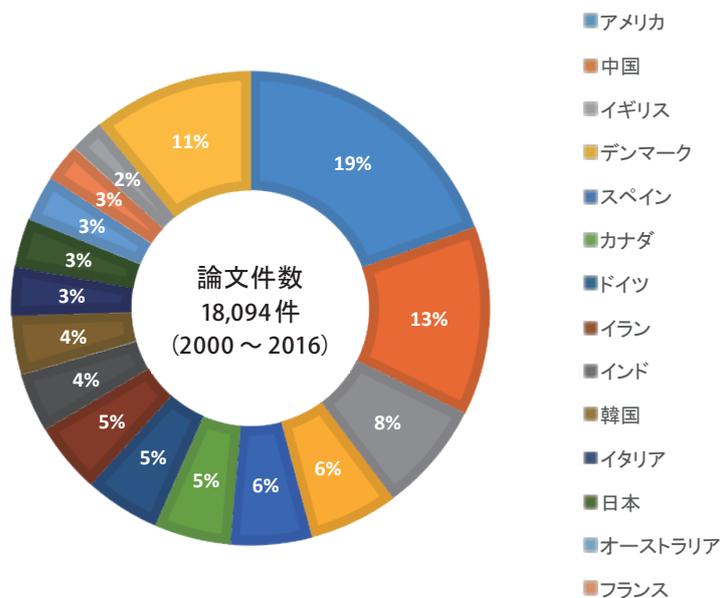


図24 国別論文件数の割合 (2000～2016年)

出所：Web of Science™の検索結果を基にNEDO技術戦略研究センター作成 (2016)

※11 ((wind power generation) OR (wind turbine*)) の検索式で実施した結果である。

風力発電分野の技術戦略策定に向けて

②構成要素別・課題別傾向

論文件数を構成要素別に分類したものを図25に、課題別に分類したものを図26に示す。いずれの要素技術でもアメリカ、中国の論文件数が多く、日本はプレー

ド、タワー、発電機で10位以内となっている。また、課題別では、信頼性、低コスト、発電効率、予測が多く挙げられ、各国がこれらの課題に注力していることが伺える。

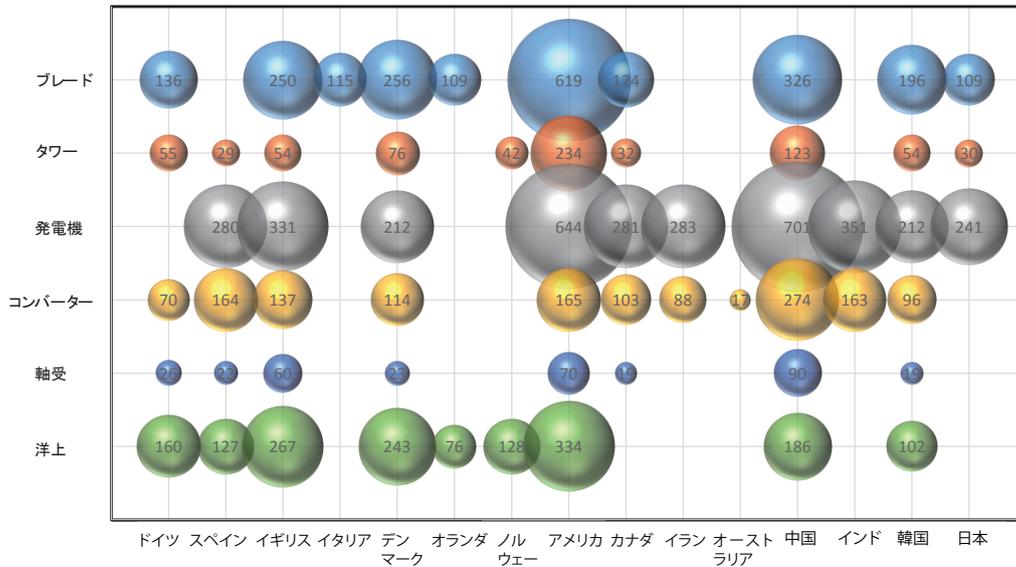


図25 構成要素別論文件数の推移 (2000～2016年)

出所：Web of Science™の検索結果を基にNEDO技術戦略研究センター作成 (2016)

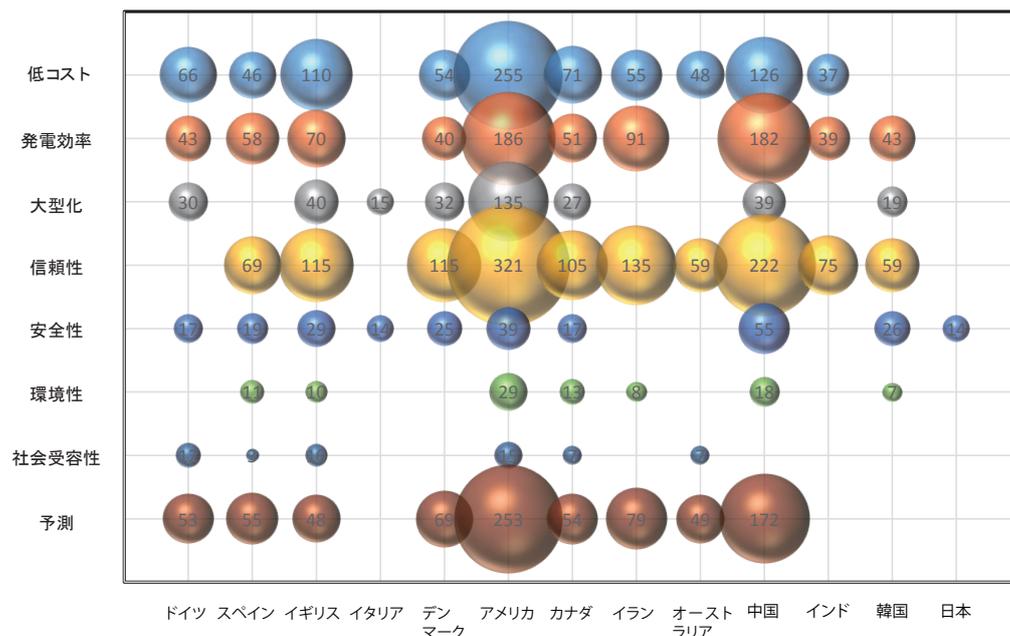


図26 課題別論文件数の推移 (2000～2016年)

出所：Web of Science™の検索結果を基にNEDO技術戦略研究センター作成 (2016)

風力発電分野の技術戦略策定に向けて

(3) 標準化

風力発電技術の標準化は1980年代後半からIEC（国際電気標準会議）で進められており、陸上風力発電システムをはじめ、商用化されている技術は概ねIEC61400シリーズの中で規定されている。議論はTechnical Committee 88 (TC88) の中で進められており、2017年11月時点では、Pメンバー^{※12}として29か国、Oメンバー^{※13}として10か国が参加しており、日本はPメンバーとして議論に参加している^{※14}。

現在、IEC/TC88の国内審議団体は、一般社団法人日本電機工業会（JEMA）が担っており、国際規格案審議への参画や国内規格（JIS）の原案の作成などを行っている。風力発電システムの標準化では、風車本体の設計基準、部品の設計基準、性能評価基準などの規格化が図られており、2018年3月時点で20件程度が国際規格（IS）化され、3件の技術仕様書（TS）が発行されている^{※15}。

日本では国土の約7割が山岳地帯であり、季節風や台風、雷など、国内設置環境を考慮した新たな設計基準が必要との考えの下、日本はこれに合わせたIECへの提案やJISの策定を行っている。具体的には、大型風車設計に関わる台風、乱流、地震、雷の基準及び評価方法の標準化、風速推定方法の標準化、ナセル風速計を用いた性能評価法のJIS制定などが挙げられる。また、前述した表1の風車クラスに加え、年平均風速はクラスI～IIIと同様とするが、基準風速は台風などの強風に対応するクラス（基準風速57m/s）の設定などが日本提案により検討されている（2018年3月7日時点）。

※12 議論を進める主な加盟国

※13 オブザーバーとしての参加している加盟国

※14 http://www.econ.kyoto-u.ac.jp/renewable_energy/wp-content/uploads/2017/12/20171121-doc.pdf

※15 JEMA ホームページ https://www.jema-net.or.jp/Japanese/res/wind/kikaku.html#kikaku_list

2-5 各国の研究開発政策の動向

(1) 欧州

欧州では、FP7^{※16}の後継であるHorizon2020、NER300等のプログラムの中で、様々な風力発電プロジェクトが進行中である。研究テーマは、新風車、材料・部品、系統接続、空間計画、社会受容性、風車寿命、メンテナンス、CMS（Condition Monitoring System）、洋上風力技術、その他（空中風車、教育訓練、小型風車）等、多岐にわたる。

(2) 英国

英国では、風力発電の累積導入量約18GW（2017年末時点）のうち、洋上風力発電が約7GW程度を占めており、洋上風力発電の開発、推進に力を入れている。Innovate UKをはじめとした各種政府間からの各種RD&D予算に加えて、Offshore Wind Acceleratorなどの官民共同でコスト削減に向けた取組が進められている。

その他、戦略的なRD&Dを進めるための仕組みとして、カタパルトプログラムという拠点整備事業が進められており、洋上風力に関連しては、洋上再生可能エネルギーカタパルトが英国グラスゴーに設置されている。同カタパルトでは、大量かつ安価な洋上風力、波力、潮力利用発電技術の実用化を目指した取組を推進しており、応用研究を自ら実施するほか、試験サイトでの試験（設備を所有）、プロジェクトへの助言、プログラム構築等のサービスを提供している。

(3) 米国

米国エネルギー省（DOE）から2015年に公表された「Wind Vision」では、2050年までの風力発電の見通しが記され、電力需給に対する風力発電の割合のベンチ

※16 研究開発・イノベーションに関する複数年プログラムで、現在まで約30年の歴史がある。始まりは1984年から1987年までの3年間をカバーする第1次フレームワークプログラム（FP1）である。

風力発電分野の技術戦略策定に向けて

マークとして、2020年までに10%、2030年までに20%、2050年までに35%を掲げている。この目標達成のため、洋上風力発電、風力発電所の設計・配置・運転の最適化、陸上及び洋上の風力ポテンシャルを精緻に測定・予測等の開発が取り組まれている。

(4) 中国

2012年3月に、中国の科学技術部 (Ministry of Science and Technology of the Peoples Republic of China) は、風力発電技術に関する「風力発電科学技術発展十二五特別計画」を発表した。この計画では、従来から重視されている開発課題である、風力発電の高効率化、大型化、ブレード設計技術などとともに、量から質への転換の方針を反映し、信頼性・安全性の改善、あるいはモニタリング技術、センシング技術を利用したメンテナンス技術の開発、設備の長寿命化なども取り上げられている。また、洋上風力発電技術の強化も重視され、それに伴う防食技術、塩害対策技術、環境影響なども研究

課題としてリストアップされている。

(5) 日本

日本では、これまで主にNEDOが風力発電技術の開発を先導してきた。NEDOが行っている陸上風力発電分野、洋上風力発電分野に関する取組を表3に、その概要を図27に示す。

陸上、洋上共通の取組としては、メンテナンス技術を高度化することにより、故障率の低減を図り、設備利用率の向上に資する研究開発や、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関わる開発、10MW以上の超大型風車のシステム等に係る課題を抽出し、実現可能性の評価などを行っている。

洋上風力発電に関しては、着床式洋上風力発電の実用化を加速するために必要な情報の収集及び支援を行うとともに、洋上進出を見据えた超大型風力発電システム技術研究開発 (7MW) などを行っている。

表3 NEDOの風力発電技術開発 (上:陸洋上共通、下:洋上)

年度	1990年代まで	2000~07	2008	~	2013	2014	2015	2016	2017	2018	
調査	全国風況調査										
	全国風況マップ、局所風況マップ										
	風力発電ガイドブック										
	日本型風力発電ガイドライン										
導入拡大	風力発電フィールドテスト事業					環境アセスメント調査早期実施実証事業					
	地域新エネ促進事業、新エネ事業者支援										
	系統連系対策助成事業										
技術開発	系統連系円滑化蓄電システム技術開発					電力系統出力変動対応技術研究開発					
	次世代風力発電技術研究開発					風車部品高度実用化					
						スマートメンテナンス技術研究開発				風車運用高度化技術研究開発	
						10MW超級風車の調査研究					
年度	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
調査	FS調査										
実証研究			洋上風況観測システム実証研究(鏡子・北九州)								
			洋上風況観測システム実証研究(鏡子・北九州、2MW級)								
研究開発							次世代浮体式洋上風力発電システム実証研究				
導入支援				超大型風力発電システム技術研究開発(7MW)							
				洋上ウインドファームFS			着床式洋上ウインドファーム開発支援事業				
周辺技術						地域共存型洋上ウインドファーム基礎調査					
						洋上風況観測技術研究開発					

出所：NEDO技術戦略研究センター作成 (2018)

風力発電分野の技術戦略策定に向けて

洋上風力発電に関しては、NEDO 以外の実証事業として、環境省による浮体式洋上風力発電実証事業が2010～2015年度まで長崎県五島で、また経済産業省による福

島復興・浮体式洋上ウインドファーム実証研究が2011年より福島県沖合で実施されている。

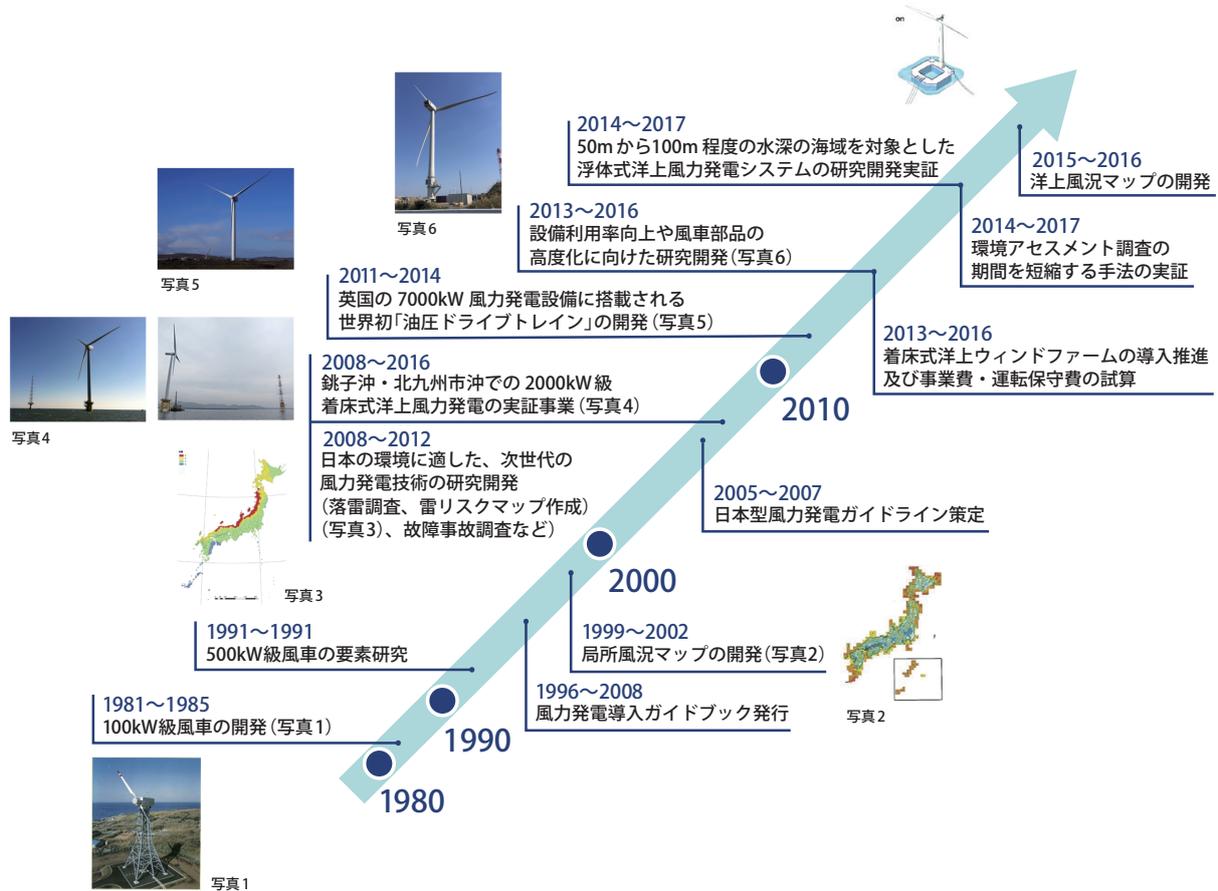


図 27 NEDO の風力発電技術開発の取組概要

出所：「平成28年度 NEDO 新エネルギー部成果報告会」発表資料 (NEDO, 2016)

3章 風力発電分野の技術課題

3-1 風力発電技術の共通課題

風力発電技術は、現在、主に3つの方向性で進められている。

(1) 風車の大型化

風力発電の発電量を増やすためには、より年平均風速の高い場所に風車（ローター）を設置することが効果的である。風速は、地表・海面から鉛直方向に離れば離れるほど早くなるため、同じ場所に設置する場合でも、より高い場所に設置した方が、多くの発電量を得ることができる。また、ハブ高さ（ローターの中心部分の高さ）を上げた場合、より受風面積を大きくすることでより多くの発電量が得られる。

このため、風車の高高度化及びローター面積の増大に向けた技術開発が長年にわたって続けられ、ハブ高さは20～30m程度（1980年代）から100m程度まで向上しローター直径も10m台から100mを超えるほどの大きさまで進展した。

大型化に伴い、ブレードも長翼化し、海外では剛性を高めるために炭素繊維を利用したブレードの開発や、耐エロージョン硬質塗装^{※17}、性能向上・低騒音化を図る技術の開発等が進められている。また、山岳部の輸送制約を解決できる分割方式ブレード等の開発も進められている。

タワーについては依然として鋼管を使用した従来のタワーが主流だが、ハブ高さ延伸等の観点から、コンクリート製タワーや、コンクリートに鋼管を継ぎ足すハイブリッドタ

ワー、分割タワー^{※18}等の検討が進められている。

なお、風速の上昇率は上空に行けばいくほど小さくなることに加えて、同じ年平均風速であれば風車の大型化はコスト上不利^{※19}になることや運搬上の制約^{※20}から、陸上風力発電では、大型化の傾向は鈍化しつつある。一方、着床式洋上風力発電については、一基当たりの施工費及び基礎費用が陸上に比べて大きいことや、輸送上の制約が小さいことなどから、依然として大型化の傾向にある。

(2) O & M の高度化

これまでの風力発電所でも、風力発電機の遠隔監視装置（SCADA：Supervisory Control And Data Acquisition）は導入されてきたが、近年は単なる監視のみならず、簡単な点検業務を遠隔で実施できるようなシステムの導入や、各種センサーで取得した振動データ等を基にした故障診断技術などの導入が始まっている。

運転制御においては、ライダー^{※21}技術を用いた風車の風上側の風況を検知することによるフィードフォワード制御や、SCADAで収集した過去の風況と運転の情報（ビッグデータ）をAI・IoT技術を活用して解析することで、個々の立地先に応じた最適制御を実現する技術の開発などが進められており、一部商品化された事例もあるが、本格的な導入拡大には至っていない。

※17 洋上風力発電では、塗料の塗り替えが難しく、塩害による腐食も問題となるため、耐候性の高いフッ素系塗料やシリコン系塗料が検討されている。

※18 スペイン企業であるESTEYCO等が開発を行っている。

※19 大型化により、受風面積は長さの2乗に比例して増加するのに対し、体積は3乗に比例して増大し、より強固な構造が求められるため、受風面積当たりの材料費が増大する。

※20 道路等の耐荷重の問題や、タワー直径の制約（運搬時は輪切り状に切断したタワーを運搬するため、底辺部の直径が運搬時に道路の高さ制限を受ける）など

※21 Light Detection and Ranging (LIDAR) の略。レーザ光によって風向・風速を計測する装置

風力発電分野の技術戦略策定に向けて

(3) 洋上進出

陸上風車の適地減少等により、欧州では洋上風力発電の開発が進められている。着床式洋上風力発電と陸上風力発電の技術的な差異は、塩害対策の実施の有無や洋上施工技術などが主に挙げられるが、現状陸上風車よりも高コストとなりやすいため、そのコスト低減に向けた取組が進められている。

具体的には、風況観測の低コスト化に向けた浮遊ブイ式ドップラーライダーを用いた風況計測技術の開発や、新型基礎、大型の自航式の建設専用船（SEP/Jack up ship）の開発、タワー一体輸送据付による建設スピードアップ等の取組である。

浮体式洋上風力発電の実用化は世界的にも課題を残しており、その克服に向け、研究開発や実証研究が行われている。欧州実海域の浮体式実証は、風車単機からスタートしており、現在では数基にわたる数10MW規模の実証が計画されている。また、試験・実験レベルでの浮体コンセプトも存在^{*22}している。

3-2 日本の風力発電の課題

FIT制度の開始を受け、多くの案件が事業化に向けて動いているが、地元調整、農林地開発等に伴う土地利用規制対応、系統連系制約への対応、FIT制度開始後に環境影響評価法の対象となったことなど、開発に伴う課題等が開発サイクルを長期化し、コスト高にながっている。表4に、開発に伴う課題を関連する制度ごとにまとめて示す。

ところで前章までに、世界に比べて、日本では発電コストが高いこと、年平均風速などの風況が劣ること、市場規模が小さく風力発電機産業、O&M産業ともに十分に育っているとは言い難いことを示した。すなわち、日本の風力発電市場はFIT導入による価格インセンティブなくして成り立たない状況である。

FITから自立した風力発電市場の構築に向けては、発電コストを低減すること、産業基盤・国際競争力を強

表4 風力発電制度面の課題

制度	課題
環境影響評価法	● 開発期間長期化リスク、それに伴うコスト増
建築基準法	● 支持構造物の審査が厳しい ● 電気事業法とのダブルスタンダード ● 特殊仕様の風車・タワーによることで初期費用が高くなる恐れ
系統連系制約	● 接続容量の問題 ● 接続に際してのコスト問題 ● 接続に時間がかかるという予見可能性の問題
電力保安規制	● 電気事業法改正により定期検査が義務化される管理体制充実化により風車事故件数は減る可能性があるが、一方でそれに伴う人件費増の可能性
土地利用規制	● 農地法、自然公園法、森林法、緑の回廊等による利用地の規制
保険制度	● 保険制度に適切なインセンティブが働いていない ● 保険事故が儲かるビジネス化
港湾・一般海域利用調整	● 権利関係の調整が複雑

出所：NEDO 技術戦略研究センター作成（2018）

*22 NAUTILUS（スペイン）、SATH（スペイン）、WINDCRETE（スペイン）、TETRASPAN（アメリカ）等がある。

風力発電分野の技術戦略策定に向けて

化すること、及び立地制約を克服して市場を拡大することが重要である。

最後に、これらを課題とし、課題解決に向けた対応の方向性を図28に示す。これら3つの課題は相互に結びついており、同時に達成していくことが必要である。

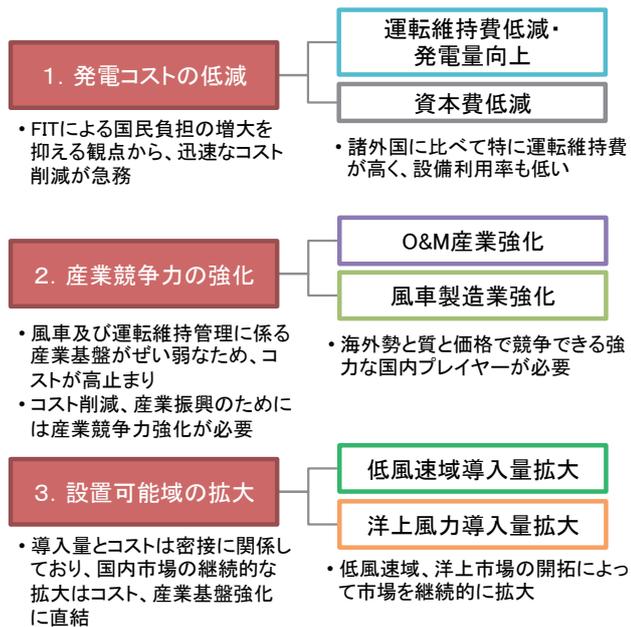


図28 日本の風力発電分野における課題と対応の方向性

出所：NEDO 技術戦略研究センター作成（2018）

4章 おわりに

風力発電は純国産エネルギーの1つであり、安価な再生可能エネルギーの1つとして、太陽光発電とともに今後も導入拡大可能性が大きいと見込まれている。国内において風力発電の導入を進めることは、日本のエネルギー政策上の3E+S^{*23}の点から極めて重要である。

しかしながら、風況など日本特有の要因や風力発電産業の基盤が整っていないなどの背景により、海外と比較して発電コストが高く、導入の障害となっている。O&Mの効率化、洋上風力の商用化などの技術開発は、発電コストの低減、風力発電導入の促進、ひいては、市場規模の拡大、大規模普及を支える産業基盤の強化に大いに寄与できると考えられる。

また、技術開発だけでなく、制度やインフラの整備を並行して行っていくことも重要である。

*23 エネルギー政策の基本的な視点となる3つの「E」（安定供給、経済効率性の向上、環境への適合）と1つの「S」（安全性）

技術戦略研究センターレポート

TSC Foresight Vol.27

風力発電分野の技術戦略策定に向けて

2018年7月13日発行

TSC Foresight Vol.27 風力発電分野 作成メンバー

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構
技術戦略研究センター(TSC)

■ センター長 川合 知二

■ センター次長 矢島 秀浩

■ 再生可能エネルギーユニット

・ユニット長 矢部 彰

・統括研究員 板倉 賢司 (2018年3月まで)

・研究員 森 則之

吉田 卓生 (2018年3月まで)

米倉 秀徳 (2017年8月まで)

中村 茉央 (2016年4月まで)

江川 光

上野 伸子

・フェロー 黒沢 厚志 一般財団法人エネルギー総合工学研究所
プロジェクト試験研究部 部長

● 本書に関する問い合わせ先
電話 044-520-5150 (技術戦略研究センター)

● 本書は以下URLよりダウンロードできます。
<http://www.nedo.go.jp/library/foresight.html>

本資料は技術戦略研究センターの解釈によるものです。
掲載されているコンテンツの無断複製、転送、改変、修正、追加などの行為を禁止します。
引用を行う際は、必ず出典を明記願います。