

# ■ ウィンドウズ オブ Wind (風の窓) 風力発電の次世代技術開発

株式会社風力エネルギー研究所 今村 博  
 株式会社風力エネルギー研究所 鈴木 章弘  
 イー・アンド・イー ソリューションズ株式会社 中尾 徹  
 イー・アンド・イー ソリューションズ株式会社 梶原 史洋  
 社団法人日本電機工業会 小川 晋  
 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 弓取 修二  
 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 千葉 康司

## 1. はじめに

本稿は平成 19 年度 NEDO 事業「風力発電の次世代技術課題調査」(委託先: 風力エネルギー研究所, イー・アンド・イー ソリューションズ, 日本電機工業会)の成果<sup>(1)</sup>の一部の報告であり, 第 29 回風力エネルギー利用シンポジウムの予稿集に掲載された内容に加筆したものである。

風力本調査は, これまで, 国や民間で実施されてきた風力発電技術および今後の技術開発課題について技術ロードマップを作成するとともに, 特に従来と異なるタイプの風力発電技術に焦点を当て, 技術開発課題を実地に検証する等を行って, 今後注力すべき風力発電技術開発課題について整理することを目的とするものである。本報では, 風力発電の次世代技術課題の抽出および技術ロードマップ作成の経緯について報告する。

## 2. 風力発電に関する技術ロードマップの作成

図 1 に本調査における風力発電の技術ロードマップ作成のフローを示す。

地球温暖化問題, エネルギー供給などエネルギーを取り巻く情勢から, 新エネルギー導入や省エネルギー技術の普及について国内外で議論されている。また, 新エネルギーを産業として捉え, 産業政策的な視点から競争力のある自立したものとなるよう普及導入を図ることによって, エネルギー源の多様化, 環境保全への貢献のみならず, 経済効果や新たな雇用創出という側面で貢献が大いに期待されている<sup>(2)</sup>。このような状況の中, 日本における風力発電に係る技術ロードマップ作成の目的は,

- 1) 地球温暖化対策およびエネルギーセキュリティ対策に資する導入促進
  - 2) 国内メーカーの育成およびサプライチェーンの拡大に資する産業育成
- の 2 点にある。

風力発電は, 新エネルギーの中でも経済性, 効率性および環境性に優れており, 比較的発電コスト/建設コストが安価等の優位性から, 欧米, アジアあるいは中南米での導入が進み, 世界の風力産業の成長率は年 15~20%を達成しており, 今後も拡大傾向が続くものと予想される<sup>(3)</sup>。

技術ロードマップの作成に当たり, 図 1 に示すように, 国内外における過去の風力発電に係る技術開発の経緯およびその成果の調査により,

- 1) 技術開発・実証試験
- 2) 調査事業
- 3) 支援・助成等
- 4) 国の導入施策、民間の普及活動等

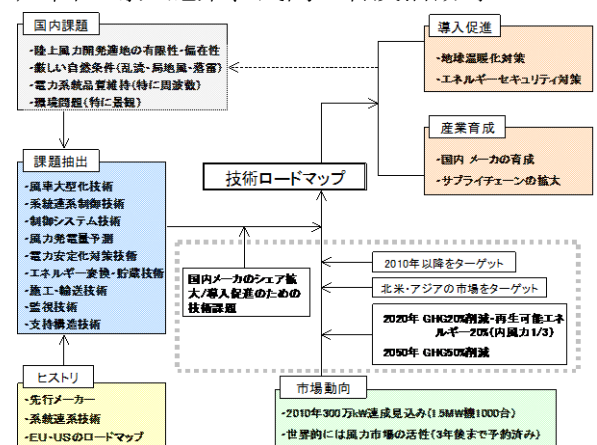


図 1 風力発電の技術ロードマップ作成のフロー

等の分類に分け、風車サイズやコストも併せた変遷図を作成し、現在、国内外で実施されている技術開発の取り組み状況の調査により、将来取り組むべき技術課題について整理を行った。

さらに、市場・技術の要求事項、国外における風力発電の技術開発やロードマップに係る状況を踏まえ、わが国が将来取り組むべき技術的課題の抽出を行うとともに、ロードマップを作成した。

技術課題の評価・検討を行うに際し、以下の項目(要素)等に重点を置くこととした。

- 1) 風車サイズの大型化を可能とする技術課題
- 2) 系統連系に係る技術課題
- 3) 制御方法に係る技術課題
- 4) 風特性に係る知見の推移
- 5) 風況予測方法に係る技術課題
- 6) コスト

以下、風力発電に係る儀技術課題の抽出および次世代に取り組むべき技術ロードマップについて報告する。

### 3. 風力発電の技術課題

商用風力発電機の出力は年々大型化しており、2007年時点では洋上用風車のプロトタイプとして6MW機(ENERCON E112)が試験されている。

大型化に伴い風車の重量は増加するが、風車の重量はロータ直径 $D$ の3乗に比例するのに対して、取得エネルギーは $D$ の2乗に比例することから、風車に係るコスト(COE: Cost of Energy)は直径の $3/2$ 乗に比例して増加する、いわゆるCOEの $3/2$ 乗則がある。このため、風車のCOEを低減するためには、取得エネルギーを増加させるための高効率化(べき指数 $n > 2$ に相当)、重量を低減させるための軽量化(べき指数 $n < 3$ に相当)に係る技術が重要となり、これに信頼性等の向上や系統連系に係る電力安定化のための技術等が必要となる。

図2は、REpower社製5MW(Single-Stage drive train, ロータ径100m, タワー高さ100m, 部品点数8,000)の各コンポーネントのコスト割合を示している<sup>(4)</sup>。

図2から分かるように、大型風車のコンポーネントでは、タワー、ブレードおよびパワートレインに係るコストが高く、このうち、ロータブレード+パワートレインが47%となっており、風車のコストを下げるにはこれらのコンポーネントの軽量化、高効率化および高信頼性化等が風車本体の技術課題として重点項目となる

ことが分かる。このため、風車本体に関連する技術課題であるパワートレイン、系統連系技術およびブレードを中心に述べる。

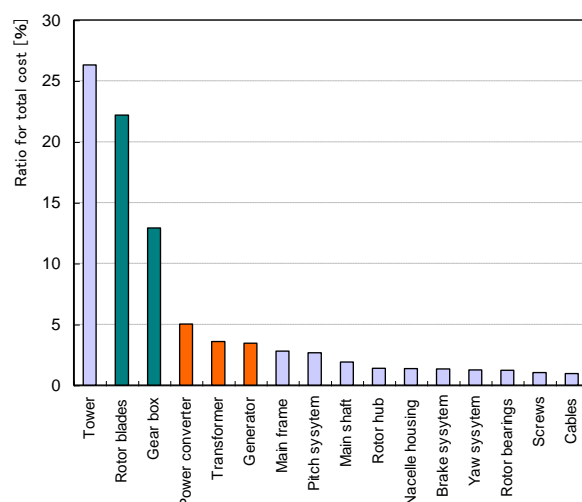


図2 風車コンポーネントのコスト割合<sup>(4)</sup>

#### 3.1 ブレード

ブレード構造(Structure)と形状(profileとairfoil)は、当初は出力当たりのブレード価格を指標とし、より高性能な、揚力係数 $C_L$ の大きい翼型が好まれたが、現在は出力がロータ径の2乗に比例するのに対して、重量とコストは2.3乗まで変化<sup>(5)</sup>しており、単純スケールアップでの3乗比例を如何に小さくするかが今後の大型化の鍵である。

重量に関してはカーボン繊維の使用が軽量化のための直接的な対策であるが、経済性を満足させながら有効な対策を打つことが非常に重要である。翼型で言えば、 $C_L$ を多少犠牲にしても構造上の剛性を優先させる(翼厚を大きくする)事が必要となる。すなわち、ブレード構造・翼素開発は、単位発電量当たりのコストを最小にすることが最適化の指標となっている。

大型化に伴う荷重の低減や信頼性の向上のため、プリレントブレード(運転中に働く荷重による変形を考慮した翼)にコンディションモニタリングシステムを導入し、ブレードのインテリジェント化を進めることにより、効率向上、荷重低減およびライフサイクルコストの最小化等の効果が期待される。

#### 3.2 パワートレイン

パワートレインは、現在の可変速運転による二次巻線型誘導発電機+部分容量インバータ(TypeC)または多極式同期発電機+全量インバータ(TypeD)が主流となっている<sup>(6)</sup>。系統側から

は電圧低下時の運転継続 (Fault Ride Through ; FRT) 対応等に優れた形式が求められているが、その観点からは TypeD が理論的には有望である。しかし、コストの面からは TypeC が有望であり、ウィンドファーム内の各種形式のベストミックスを探りコストダウンを目指すことが技術課題と考えられる。

同期発電機に Multibrid M5000 のように 1 段ギアボックスを介した形式も 5MW クラスで採用されており、今後注目される形式である。

大型化の進む風車であるが、パワートレインの最適な形式<sup>(7)</sup>は定まっておらず、超大型化に向けたパワートレインの最適な形式について今後も検討する必要がある。

### 3.3 系統連系

電力安定化の対策は、各国の Grid Code 等の系統運用の方式により異なる<sup>(8)</sup>ため、それぞれの方式に適した方法の開発が不可欠である。また、典型的なフロー型エネルギーである風力の出力を管理、ハンドリングの容易なストック型エネルギーに変換する技術を用いて、kWh 価値ばかりでなく、kW 価値を創出する技術が求められている。

風力発電の導入量拡大を促進するための系統

安定化対策として、風車側において考えられる時間的・空間的スケールから見た制御方法を検討する必要がある。系統安定化に対して各スケールに適した制御方法が選択されると考えられ、例えば、短期・単機のスケールでは、風車単体における制御方法として、ブレードのピッチコントロールの他に電気二重層キャパシタ等を用いた制御方法の併用が考えられ、また、WF 内、WF 間等のスケールアップに伴い、発電量予測、モニタリングシステム(例えば高度な SCADA システム)等を用いた制御方法が必要となる。

我が国においては、LFC(Load Frequency Control) 領域での制御が特に問題となっている<sup>(8)</sup>ため、蓄電池による制御方法に係る研究<sup>(9)</sup>が行われているが、欧州では既に問題が顕在化しているように、風力発電の導入割合が増加した場合の影響については、今後、コストの問題も含めて更に検討を行い、制御に不可欠な予測モデルの精度の更なる向上を目指し、実証による確認が不可欠であると考えられる。

### 4. 次世代技術開発の技術ロードマップ

前節までに概観したように、日本における風

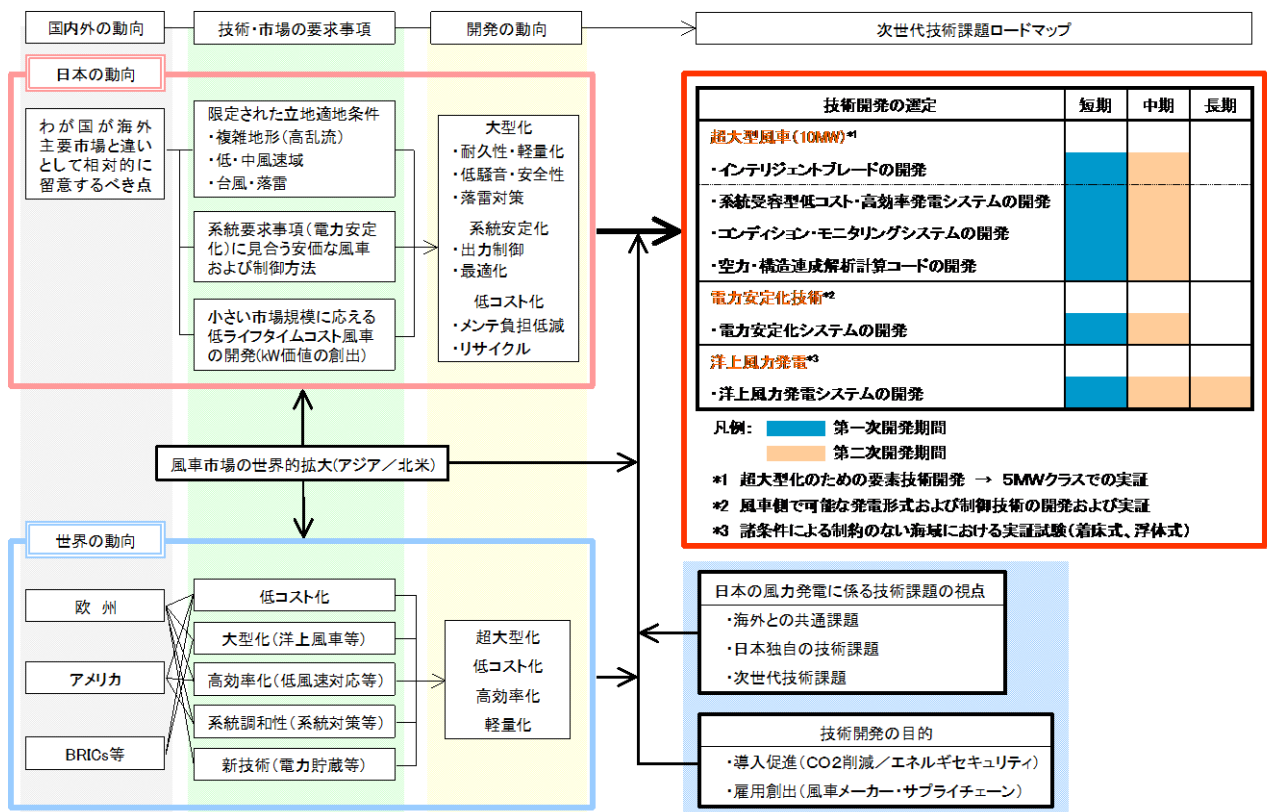


図2 風力発電に係る次世代技術課題の抽出

力発電技術開発の方向として、「大型化」、「系統安定化」および「低コスト化」がキーワードとして挙げられる。風車の大型化は、風力発電の適地が少なくなっていることや建設コストの漸増傾向を背景として、導入に際して1箇所当たり、単機当たりの発電量の最大化が意図されているもので、同時にわが国においても将来、期待されている洋上風力発電には大型風車の導入が不可欠であると考えられる。洋上風力発電の場合は、運搬上の問題もないことから最も大きな設備容量の風車(超大型風車)を設置することでコストを最小化することができる。

ここでは、わが国における風力発電の技術開発に関する開発期間として、短期(2010年まで)、中期(2015年まで)および長期(2020年以降)を想定し、特に注力して進める技術開発に対して平易度、先進性による重要度および緊急度の観点から開発項目を整理・選定した。開発項目選

定までのフロー共に図2に示す。

以下に風力発電に係る次世代技術課題の検討結果から選定された個々の技術開発項目について表1～3に示し、その概要を述べる。

#### 4.1 超大型風車

風車のサイズは大型化を指向しており、欧州FP6におけるUpwindプロジェクト<sup>(10)</sup>では10MW～20MWクラスの風車の開発を目指している。大型風車の開発は、これまで市場に10年程先駆けて先進的・戦略的・革新的な技術に対して開発・実証されていることが過去の歴史から明確であり、2010年以降の世界の市場動向を考えると、日本においても超大型化の開発は必須であると言える。欧州のFP6開発プログラムのように、10MWクラスの風車の開発は、技術的および経済的困難さが予想されるため、産官学のコンソーシアムによるプロジェクトの立ち上げが必要と考えられる。

表1 超大型風車に係る技術開発課題

技術開発の選定	現況	課題	開発項目	期待される効果
超大型風車(10MW)	3MW(陸上商用機) 6MW(試験機) 10MW計画(Upwind)	建設・輸送コスト、ライフタイムコスト、信頼性の向上、疲労・荷重予測	要素技術の開発 →5MWクラスによる実証試験	産業育成 導入促進
①インテリジェントブレードの開発	GFRP+カーボン、プリベント、落雷保護	高効率化、重量低減、荷重低減、コスト低減、信頼性の向上、落雷対策	GFRP 多用による軽量化、製造技術、自己診断による荷重低減方法等	経済性・信頼性の向上
②系統受容型低コスト・高効率発電システムの開発	二次巻線式発電機(主流)または同期式発電機の可変速運転	超大型風車のベスト(コスト、荷重低減等)な形式は不明	風車による系統受容制御可能な高効率かつ低コストなパワートレインの開発	導入促進、経済性の向上
③コンディション・モニタリングシステムの開発	開発途上、オプション	コストの低減、信頼性の向上	風況、発電量、ブレードおよびパワートレインのマルチコンディションモニタリング技術	経済性・信頼性の向上
④空力・構造連成解析計算コードの開発	Bladed, FAST等(BEMがベース)	空力・構造の連成解析による精度向上、風況データの精度向上	空力・構造連成解析計算コード、風車の疲労寿命予測技術	信頼性の向上、新設計法の確立

表2 電力安定化に係る技術開発課題

技術開発の選定	現況	課題	開発項目	期待される効果
電力安定化技術	発電量予測、WF出力制御(スペイン)、蓄電池(日本)、圧縮空気による貯蔵(EU)	風力発電導入割合の高い電力管内における電力安定化、LFC領域における風力発電の制御、周波数制御	系統受容型風力発電システム、時間・空間スケール毎の制御方式の開発、システムの実証試験	導入促進
①系統受容型風力発電システムの開発	二次巻線式誘導発電機、全量コンバータ、FRT	周波数変動対策、コストの低減	WF内/WF間の風力発電システムの最適化	経済性の向上
②時間・空間スケール毎の制御方式の開発	蓄電池システム+気象予測システム	周波数変動対策、コストの低減	電力貯蔵装置+気象予測システム+会社間連系線活用による制御方式	経済性/信頼性の向上

表3 洋上風力発電に係る技術開発課題

技術開発の選定	現況	課題	開発項目	期待される効果
洋上風力発電	欧州先行、日本における実績はほとんどない	経済性の向上(低ライフサイクルコスト)、信頼性向上、疲労・荷重予測、維持管理、設置場所、系統連系、(漁業協調)	実証試験を通じたデータ収集と要素技術の検証	導入促進
①海上風観測/予測システムの開発	日本における海上風の特徴が不明確	海上風、波浪等の実測データの不足	海上、波浪(波高/周期)、海潮流などの実測データ、海上風および波浪の予測	経済性/信頼性の向上
②連成振動予測技術/疲労照査技術の開発	開発途上	荷重予測、疲労予測	着床式/浮体式モデルの構築および検証	経済性/信頼性の向上
③設計・施工技術の開発	開発途上(水深100mまでの着床式および浮体式)	経済性/信頼性の向上	設計・施工技術の開発および検証	経済性/信頼性の向上
④環境影響評価技術の開発	日本における洋上風力発電のための環境影響評価手法は未開発	評価法は未開発	生態系(鳥類、海生生物等)の影響評価、景観解析手法、漁業協調の調査	導入促進

開発スケジュールとして、10MW クラス風車の要素を開発し、5MW クラスで実証試験を行うことを提案する。10MW クラス風車で必要とされる技術が開発されれば、日本固有な条件に適した風車のみならず、今後更なる拡大が見込まれる海外市場に対して競争力の高い風車の製造も可能になるものと考えられ、風車メーカーおよびその関連企業のサプライチェーンの拡大、産業の育成および導入促進が期待される。

超大型風車の開発において特に注力すべき課題として、ブレード、系統受容型発電システムおよび空力・構造連成解析設計コードの開発が挙げられる。

#### 4.2 電力安定化技術

典型的なフロー型エネルギーである風力の出力を管理、ハンドリングの容易なストック型エネルギーに変換する技術を用いて、kWh 価値ばかりでなく、kW 価値を創出する技術が求められており、特に系統が要求する事項に対して風車側すべき技術として、系統受容型風力発電システムの開発および時間・空間スケール毎の制御方式の開発、の2つのテーマを挙げた。

風力発電の導入量拡大における電力安定化対策として、風車側において考えられる時間的・空間的スケールから見た最適な制御方法が示唆され、各スケールに適した制御方法が選択されると考えられるが、電力安定化技術の開発は、時間・空間スケールに対して最適な制御方法に関する多次元方程式の解を求めることに例えられ、実証試験の積み重ねによって最適化が図られると考えられるため、その際、例えば会社間連系線活用等の系統側の協力も不可欠と言える。

#### 4.3 洋上風力発電

既にデンマーク、イギリスなどでは洋上風力発電の積極的な導入が認められることや、ドイツ、スペイン、フランス、ベルギー、アメリカ、中国などでも、近々、実証試験を実施する計画があるなど、世界の風力発電は洋上風力発電の導入拡大が潮流となっている。

わが国においても2010年度300万kW達成後は、洋上風力発電の導入を図ることが不可欠と考えられるため、洋上風力発電に関するシーズ研究や革新技術に関する基礎研究を着実に進めるとともに、着床式洋上風力発電に係る実証試験に早期に取り組むことが重要で、そのためには技術開発テーマの適切な選択と集中による速攻型推進戦略を立てる必要がある<sup>(11)</sup>。また、日本は欧州と比較して、風況の良い海域におけ

る水深が深いことから、浮体式洋上風力発電も選択肢の一つである。

NEDOでは本年度、日本における洋上風力発電実証研究の可能性調査を進めており、将来の本格的な導入を期待したい。

#### 5. おわりに

NEDO事業「風力発電の次世代技術課題調査」のうち、風力発電の技術課題についてその概要を報告した。詳しくは今後公開される調査報告書<sup>(1)</sup>を参照されたい。

最後に本事業調査において、風力発電の次世代技術課題に対して貴重なコメントをいただいた風力発電次世代技術課題調査検討委員会および技術ロードマップ検討分科会委員の委員各位、また、技術課題の抽出・検討にご協力いただいた関係各位に感謝致します。

#### <参考文献>

- (1) NEDO 技術開発機構他，平成 19 報告書 風力発電の次世代技術課題の調査，2007(to be published)
- (2) 経済産業省，新エネルギー産業ビジョン，<http://www.meti.go.jp/press/0005361/index.htm>，2004.
- (3) BTM Consult Aps, World Market Update 2006.
- (4) Wind Directions, Jan./Feb., 2007.
- (5) Griffin, D.A, Cost / Performance Tradeoffs for Carbon Fiber in Wind Turbine Blades, Sandia Blade Technology Workshop, 2004.
- (6) Hansen, A.D. and Hansen, L.H, Market Penetration of Wind Turbine Concepts over the Years, Proc. of EWEC 2007(Milan), 6p.
- (7) Bywaters, G., *et al.*, Northern Power Systems WindPACT Drive Train Alternative Design Study Report, NREL/SR-500-35524, 2005.
- (8) 松枝，福田，ETSO が欧州風力発電連系研究(EWIS)の報告書を発表，海外電力5，2007，pp.73-89.
- (9) 谷川他2名，蓄電池等併設型風力発電システムでの出力一定制御方法における風力発電出力予測方法の検討，第29回風力エネルギー利用シンポジウム予稿集，2007，4p.
- (10) Upwind, <http://www.upwind.eu/>
- (11) NEDO 技術開発機構他，平成 18 年度報告書 洋上風力発電導入のための技術的課題に関する調査，100009780，2007.