

## スマートエネルギー Week : WIND EXPO2014

未来技術フォーラム神戸 板山克廣

2014年2月26日から3日間にわたり東京ビッグサイトで開催された「スマートエネルギー Week2014」のなかで、昨年に続き第二回 Wind Expo 専門技術セミナーに参加した。2012年のFIT買取制度のスタートで、太陽光発電(PV)とともに期待された風力発電であるが、その普及状況、直面する課題ならびに今後の見通しについて情報収集を行ったので、以下に報告する。

なお、我が国における風力発電の位置づけ、海外での風力発電大量導入に伴う問題の克服事例については、先の報告(テクノモタリグ Vol.103:2013年6月)を参照願いたい。

### 1. 風力発電の導入状況

#### 1-1. 世界の動き

世界の風力発電市場の最新動向と見通しについて Bloomberg New Energy Finance の Wu 氏から紹介があった。世界の再生可能エネルギー(RE)関連投資は2000年代の急成長により2011年には\$318bnに達したが、その後減速し2013年は\$254bnに留まった。これは中国、米国での風力ブームの鎮静化とEUでのFIT見直しによるRE向け投資減速、これに加えてREシステム価格の低下が原因となっている。今後は、導入先進国の市場が一定規模に落ち着き、またシステム価格の下げ止まりに加えて日本に代表される新興市場の立ち上がりで成長軌道への復帰が予想されている。因みに、2013年の日本の投資額は\$35.4bnとドイツを抑え中国の\$61.3bn、米国の\$48.4bnに次ぐ世界3位となっている。

RE投資の内訳をみると、2009年頃までは風力主体で投資額の80%前後を占めていたが、その後PVがシェア50%以上に急伸し、風力を抜いた。これは近年のPVシステム価格急落(=発電コスト低減)と風力の主要市場であるEU、中・米における風力適地の枯渇化による停滞が原因とみられている。それでも2012年までの世界全体の風力の累積導入量は280GWとPVの100GWを大きく上回り、**2013年には300GW、発電量では総電力使用量の4%を占めている**。このように海外では電力のRE化が風力を主役として進められてきたと言える。

2020年の電力需要の30%RE化(水力を含む)という高い目標を掲げるEUでは、PVに比して高い稼働率が得られる風力の導入が今後も15GW/年規模で継続されると見られている。好風況域が少なくなった現在、より高い稼働率(Capacity Factor: CF)を求めて**風車の大規模化、ウインドファームの大規模化、洋上への展開**が図られている。例えば陸上ウインドファームではタービンが現状の2~3MWから3~4MW機へ、そして規模は100MW越えが主流となりつつある。システム設置コストの節減が強く求められる洋上風力では7~10MW機の実用化が進められ、英国では32GW、投資総額£100BのRound3計画が2020年完成を目指して始まっている。このように製品・サービスの差別化とプロジェクトの大規模化が進む中で、風力タービンメーカーも技術と資本力を有する欧米大手メーカーが中国メーカーからシェアを奪回し、特に洋上ではSiemensとVestasの2強が80%以上を独占している。今後、**EUは洋上風力への移行を図ろうとしており、National Renewable Energy Action Planで国別ターゲットを定め、2020年までに40GW導入を目指している**。しかしながら洋上風力の急速な立上げにはリスク要因も多くまたサプライチェーン上の問題もあるとして、Wu氏は目標達成に疑問を呈していた。洋上風力は先進国EUにとってもこれからの課題のようである。

#### 1-2. 国内の現状と今後の見通し

国内の風力発電普及状況が経産省村上氏、三菱総研寺澤氏より紹介された。前政権下で出されたエネルギー基本計画での2030年再生可能エネルギー比率30%(水力を含む)達成のために

は、PVに加えて少なくとも20~30GW程度の風力の導入が必要とされている。嘗て2010年3GWの目標を掲げて導入推進を図ってきたが、近年は100MW/年に満たない導入レベルで、**2013年末の累積設置量は2.7GW**に留まっている。また2012年のFIT買取制度スタート後の設備認可状況を見ると、2013年10月までに合計26.2GWの設備認定が行われたが、その94%が太陽電池を軸とするPVで**風力は1GWに満たない**。10MW以上の風力の場合は環境アセスメントだけで3~4年必要なため（現在、その半減短縮策が検討されているが）、2020年までの導入がほぼ読め、Bloombergは今後の3年間累積で1.4GW程度の新規導入量を予想している。

このように海外と異なり**風力導入が進まない現状の課題とその打開策**について、今回のセミナーでは多くの講演で論じられた。まず、原因としては**発電コストの高さとグリッド接続に対する制約**が挙げられる。発電コストはシステム設置・保守費用と稼働率で決まるが、いずれも海外に比べると条件が悪い。Bloomberg試算では海外の6~12\$/kWhに対して18\$/kWhであり、経産省のコスト等検討委員会のデータでも¥10~17/kWhと海外の2倍近い発電コストとなっている。タービン価格自体も40%高いが、これは市場成長で国際価格に収斂していくと期待される。問題は据付工事、グリッド接続に高い費用が掛かり、また稼働率が海外よりも低い点にある。

これら弱点の全ては我が国における風力発電適地の地理的条件に関係している。平野部での**好風況域は北海道、東北と一部九州に集中**しているが、これら地域では後述するグリッド接続制約があり、設置可能量が限定されている。そこで本州の山岳・尾根地域へと追いやられることとなり、搬入などの制約から大容量タービンを多数台設置する大型ウィンドファームの建設は困難となる。この結果、全事業所数516の80%が5基以下の小規模なものとなっており、能力当たりのシステム設置コスト、グリッドへの接続コストが嵩むと同時に、乱流・落雷影響を大きく受け稼働率も上がらない。日本風力発電協会(JWPA)の纏めによると、国内の**稼働率は年々改善されてはいるものの全国平均で20.7%**となっており、EU北部の30~40%に比べるとかなり低いレベルとなっている。この問題の克服に日本の風力発電の将来性が懸っていると云える。

## 2. 風力発電の大量導入に向けた課題と対応

上記の問題の解決策としては、乱流、台風あるいは落雷といった日本特有の気象条件にも耐える風車の設計と、好風況域での大規模ウィンドファーム建設を可能にするグリッド運用システムの改善が挙げられる。以下にこれらの問題についての論議を紹介する。

### 2-1. 稼働率アップ

稼働率に大きな影響を与える**タービン故障**についてその原因を三菱総研寺澤氏が紹介。NEDO 風力発電故障・事故調査委員会の報告によると、直接的な気象条件によるものが34.5%、設計・施工・機器不良によるものが26.5%、原因不明が34.6%となっている。停電や風向風速計の破損などの自然現象が間接的な原因となるものを含めれば、**気象条件起因は50%を超える**とされる。IECの耐風速基準を超えるようなケースが確認され、また日本海側での冬季落雷の頻発などの特殊性から、風力発電導入がトータルで落雷対策、台風・乱流対策が追加されているが、あくまでもガイドラインで強制力はない。最近も大きな事故が続いており、一例として2013年の太鼓山風力発電所での乱流によるタービン落下事故が紹介された。

これらの厳しい気象条件を克服する新型機が開発されている。日立製作所はダウウィンド型風車を上市し累積受注137基、そして三菱重工、海外メカなどを抑えて2012年国内シェアNo.1となった。同機は風速風向計を風上に配することで受風効率と吹上風対応を改善し、

さらに暴風停止対策、耐雷性強化、コンバータ・トランスの地上配置によるメンテナンス改善などの工夫を行っている。また日本再上陸を発表した GE は、新型 2.85-103 タービンを PR。独自の制御・解析技術により乱流制御性、台風対応能力を向上させ、稼働率 50%以上、発電量 5%アップが可能としている。

事故発生頻度に加えて稼働率に大きく影響するのが**事故対応時の停止時間**である。前出の調査委員会によると、発生頻度の高いブレード、ハブなどの修理には 1,500hr/回前後掛かる。ドイツにおける調査では、どのようなケースでも停止時間は 1 週間以内と一桁短い。この理由として部品調達に必要な時間の差が挙げられており、国内でのサプライチェーン構築、メンテナンス体制の強化が重要とされている。日本の場合、この他にグリッドによる出力抑制要請が稼働率低下の一因とされるが、この問題を次に紹介する。

## 2-2. グリッド連系容量

風力発電導入における当面の最大の問題は、導入好適地である**北海道、東北のグリッド連系可能量が既に限界となっている**ことである。2011 年時点で両地域で既に PV も合わせて 5.9GW の接続申し込みがあるが、早大・横山氏の系統連系対策小委員会調査結果の紹介によると、残り連系可能量は北海道で 0.27GW、東北で 1.46GW とのこと。この連系量の制約は送電能力と風力の出力変動を補償する調整能力の大きさで決まる。そもそも両地域の電力需要は北海道が 5.35GW、東北が 14.7GW と少なく、両能力ともそれに見合ったもので小さい。

そこでまず昨年、経産省は両地域の風力最適地を特定風力整備地区に指定し、総額 250 億円の支援プログラムをスタートさせた。グリッドへの接続は発電事業者の責任となるが、繋ぎ込みの費用の 1/2 を補助する仕組みで、昨年度は北海道で 3 件、そして今年度は東北での認定を予定している。しかしながら前述の申し込み量 5.9GW をカバーするためには、この**地域内グリッド強化**に北海道で 2,000 億円、東北で 700 億円程度必要と算定されている。

一方、出力変動に対応するための**調整能力の不足**も深刻である。変動電源の大量導入により電力システムは電圧、周波数が不安定となる。風力の場合は発電機側の STATCOM(無効電力調整装置)やグリッドへの接続ポイントでの SVR(自動電圧調整器)の設置により電圧調整が可能のため(グリッドイン化されているが設備コストの上昇に繋がっている)、残る**周波数影響が問題**とされる。同期発電機で構成される電力システムでは、需要と発電量がずれると周波数が変わる。50/60±0.2Hz に制御するために需要に応じた出力調整が主にガス火力や石油火力により行われるが、電力需要の少ない両地域ではこの調整能力に限りがある。PV に比較すると、風力の短・長周期な出力変動はより大きく、また発電機規模も大きいいため電力システムへの影響は深刻となる

横山氏によると、**系統制御をより広域化**することで分単位の変動はかなり平準化される。更に系統間の連系を活用(例えば北電⇄東電)すれば調整能力も大きく変わる。また、変動電源が増えることにより火力の運用が困難となる所謂「**下げ代**」問題を考えるに当たってもこの**地域間連携は不可欠**となる。その例として「2030 年頃に PV2.5GW、風力 2.5GW を北海道に導入するケース」の試算が紹介された。2010 年 5 月の負荷曲線と気象条件で需給バランスを計算すると、変動電力以外の火力・水力が賄うべき残余需要が 1GW 以下となる日が月に 5 回発生する。軽負荷時の余剰電力は通常揚水発電で吸収されるが、北海道(約 1GW)、東北(約 0.5GW)ともその能力は小さく、水力、石炭火力などによる電力の経済運営が大きく損なわれるとともに、調整能力の確保も難しくなる。政府も電力システム開発を進めるに当たりこの問題を重視し、昨年 4 月に広域系統運用機関の設置と地域間連系線増強の方針を

閣議決定。先の 5.9GW 問題への対応に限ってもそのための地域間連系だけで 9,000 億円の投資が必要と試算されている。

### 2-3. 発電サイト側でのグリッドシステム安定対策

環境省エネルギー WG の報告によると、仮に東日本(北海道を除く)、西日本(九州、沖縄を除く)の単位で連系能力制約なく一体運用できれば、全国合計で PV100GW、風力 33GW を導入しても、揚水、電気自動車、ヒートポンプなどの電力・エネルギー貯蔵も一定程度活用することで余剰・調整電力問題が生じない。このように広域連系強化は風力発電導入促進のための最も有効な手段の一つだが、ドイツの例が示すように抜本的なグリッド増強には 10 年単位での時間と莫大の投資が必要となる。緊急課題とされる 50/60Hz 連系の 0.9→2.1GW 能力増強でさえ、東電は 2020 年の運用開始としている。グリッド増強と並行して風力導入を進めるためには、風力発電サイトでも出力平準化、あるいは余剰電力対策を何らかの形で行わざるを得ない。

最も単純な方法はグリッド側の判断で**出力抑制あるいは解列の指令を出す**ことで、日本では「30 日ルール」の名のもとに現在認められているが、当然、稼働率を下げることに繋がり、好適地北海道でも平均稼働率が 25%と低い原因となっている。北海道では現在でも出力抑制、解列を条件とした新規接続はできるが、新規参入の魅力に乏しい。風力先進国のドイツでは、原則受電を拒否できないが、グリッド整備ができるまでの暫定措置として、グリッド緊急事態に限定した介入をグリッドコードで規定した(但し、補償される)。一般に出力調整はブレードピッチ角の電動制御で行われるが、横山氏が 5 台の風車を一体制御することで一定風速のもとでも定格の 0~100%で出力をリアーに制御する例を紹介した。

よりスマートに出力の平滑化を達成できるのは**蓄電池の活用**である。しかしながら蓄電池コストが極めて高く経済ベースに乗らないのが現状である。そこで経産省は 2 つの開発関連事業を立ち上げている。一つは**変電所に大型電池を設置する緊急実証事業**(296 億円)で、北海道南早来変電所(6 万 kWh)と東北西仙台変電所(2 万 kWh)で実施。二つ目は揚水発電並みのコスト(2.3 万円/kWh)達成を目標とした**余剰電力対策技術高度化事業**(27 億円)である。一方、風力開発(株)から連系順番待ち 10 社が組んだ「**上北送電線構想協議会**」が紹介された。現在、東北電力は蓄電機能を持ったシステムのみ新規接続を認めているが、既に環境省モデル事業で六ヶ所村に備えた蓄電池を活用し、先に紹介した経産省の地域内送電網整備補助金を狙うというもの。また、システム企業側のアプローチとして日立製作所と GE Renewable Energy から、契約出力を守るグリッドに優しい蓄電池組込みシステムの紹介があった。

以上のような出力制御に加えてグリッドの周波数制御の要望に応え得るシステムを独トプの風車メーカー Enercon が紹介。カナダの Hydro-Quebec Trans Energie は周辺との系統連系を避け独立グリッド運営を行っており、10MW 以上の発電業事業者に緊急時周波数制御を義務化している。Enercon のシステムは、同期発電機とインバータを組合わせたもので、グリッド情報をモニターして周波数上昇時(需要不足)の有効電力制御、下降時は火力を模擬した慣性モーメント利用による出力の 10%アップ(15 秒間)を行うことができる。更に、系統事故時の Fault Ride Through 機能、そして強風時の一斉解列を防ぐためのスーム制御機能も具備している。将来、導入量が増大して**風力にも火力並みのグリッド安定化責任が求められる**際に必要となる技術と言える。

### 3. 洋上風力発電への取り組み状況

これまで述べてきたように、風力好適地である北海道・東北地域にはグリッド制約が多く、この障壁の解消には莫大なコストと時間が必要となる。そこで近年注目を浴びているのが洋上

風力である。風速 6.5m/s 以上の強風域の**導入ポテンシャル**を比較すると、**洋上風力は陸上の 10 倍程度**となり、特に大消費地の**東電、中部電力管内でそれぞれ 7,000 万 kW、4,000 万 kW 程度のポテンシャル**が期待される点が重要である。これら地域では、原発を支えてきた強力な送電網、豊富な調整力・揚水能力などにより連系制約の大幅緩和が期待される。一方で Bloomberg によると欧州のシステム設置価格は陸上の€1.5 万/kWh に対し€4 万/kWh と高く、その差は施工費用とのこと。Vestas は、洋上風力にはリスクも多くまずは陸上で経験を積むのが順序と警告するが、逆に施工コストを大きく下げられれば、関連インフラ整備コストも含めて考えると、陸上を通り越して一気に洋上へと動く可能性もある。このような背景から、我が国においても既に 3 箇所で洋上ウィンドファームが稼働し、さらに 4 件の実証試験が進行中であり、今回のセミナーでは 5 件の紹介があった。

商用稼働中の**茨城県鹿島港のかすみ発電所**の紹介が日立製作所よりあった。同発電所は沖合 40~50m にモノパイル着床式で建設され、現在ダウンウィンド型 2MW 機 15 基が稼働している。第 1 発電所の 7 基は東日本大震災で震度 6 強、5m の津波にも機能を維持して耐え抜いた。将来的には沖合に 100 基程度の増設を計画しているとのこと。

同じ着床式で高さ 100m の風況観測タワーとφ92m の三菱重工製 2.4MW タービンからなる**洋上システムの実証試験を NEDO・東電が銚子沖で実施している**。このプロジェクトで据え付け工事を担当した鹿島建設より、工事概要とそこで抽出された課題の紹介があった。基地港で製造した重力式ケツ(5300t)を激しいうねりの中 60km 輸送し、水深 20m 沖合 3.1km の岩盤海底に設置。国内最大の全旋回式起重機船の吊り能力不足、水深などの制約からケツの構造・材料に多くの工夫が加えられている。課題として浚渫・均し作業の大幅な効率化が必要としている。風車据付には 2 隻の自己昇降式作業台船(SEP)を用いたがレンタル費用が極めて高い(20 百万円/日)。極力海上作業を減らし、複数基分の部材の積載、昼夜連続作業環境などの工夫も必要。将来は 5MW 以上の大型タービンが主流となることから、自前の大型自航式の SEP の建造が必要としている。更に施工ツールの改善、アクセス(メンテナンス)船の重要性も指摘。

環境省の**五島沖浮体式洋上風力実証事業**について京大・宇都宮氏が報告。まずは 2012 年に 100kW 小規模試験機を設置・運転し、その成果を持って 2013 年から実証機による事業性評価を行う。実証機はφ80m の日立製ダウンウィンド型 2MW 機でスパー(鋼/コンクリートのハイブリッド構造)を 3 本のチェーンで係留する方式をとっている。スパーの制作は戸田建設が担当し、松浦市から五島市まで曳航してタワー、セル、ロータを組立てたのち、さらに椏島南海域(水深 100m)まで曳航して据付けた。小規模機は秋の台風 16 号通過(最大風速 36.8m/s)を経験しており、最大級の台風にも耐えうることを示すとともに、各種実測データから設計諸元の妥当性も実証された。

注目を集める経産省の**福島復興浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業**については、東大・石原氏より紹介された。第 1 期のサブステーション(絆)とφ90m のダウンウィンド型 2MW 機(未来)の建設・据付は終了し、第二期の 7MW 機 2 台の建設に入っている。サブステーションはアドバンストスパー方式を採用。製作を担当した JMU 磯子にて日立製の変電設備、各種計測装置を取り付けたのち東京湾を抜け福島沖に曳航。風車はコンパクトセミサブ方式を採用し、担当の三井造船千葉で風車組立を行い現地へ曳航。水深の関係で喫水を上げて曳航したが、この不安定な状況で台風に遭遇したとのこと。風車と 66kV 変電設備の接続は 10 月に完了し発電を開始した。今回は 22/66kV ライザーケーブル、巨大チェーン(300t×6 本)の敷設・係留工事の状況と苦勞も紹介された。

#### 4. 最後に

再生可能エネルギー導入促進が言われる中、その柱となるべき風力発電が何故我が国では伸びないのか、今回のセミナーで追ってみた。確かに日本特有の事情はあるが、似たような問題を抱えるスペインやデンマークでは風力発電比率をそれぞれ 17%、20%にまで高めることができている。これら海外の例をみると解決の道は様々あるが、今回の報告から国内においても既に多くの検討が行われていることは知ることができた。しかし彼我の現状を比較すると、我が国の対策は大きく後れを取っていると言わざるを得ない。やむを得ぬ面があることを認めつつも、導入推進よりも既存のグリッドの事情の方を優先しすぎている、というのは言い過ぎであろうか？ドイツなどは、導入量増大に伴う様々なシステム上の問題の噴出、電気料金高騰への反発、などの厳しい状況に直面しつつも導入推進の手を緩めようとはしていない。エネルギーを巡る世界情勢が急速に激化する中、現状のエネルギー自給率 4%からの脱却は焦眉の急の筈で、強い政策誘導が求められる。電力システム改革はまさにそこに踏み込むべきものであり、その行方に期待したい。

以上