

■特集：風力発電と電力系統との融和

ドイツとスペインの系統運用について視察報告

—「風力発電のない系統運用なんて退屈さ！」と運用技術者の弁—

WWF ジャパン 気候変動・エネルギープロジェクトリーダー 小西 雅子

1. はじめに

日本においては、総発電電力量 (kWh) に占める大規模水力を除いた再生可能エネルギーの割合はまだ 2%以下に過ぎないが、北欧はもちろん、ドイツ、スペインなどではすでに 20% を越えている。日本では“天気まかせで不安定”と言われる再生可能エネルギーを、大量に導入しながらも系統を安定して運用しているのだ。

その鍵は、送電網の独立性を高め、公平性を確保した電力システムを前提として、①再生可能エネルギー発電設備が広域に数多く分散配置されること、②気象予測を使った出力予測システムを活用した中央制御の系統運用、③きめ細かな設計の電力取引所の活用にある。

2012 年と 13 年にかけてスペイン、ドイツを視察した際の報告をしながら、再生可能エネルギーの急速な普及が必要である日本への示唆としたい。なお本稿の議論は太陽光などにも適用されるが、主に風力発電に焦点をあてる。

2. ドイツの事例

2.1 ドイツの再生可能エネルギーの歩み

再生可能エネルギーの活用において、ドイツはあまりにも有名な先進地域であるが、ヨーロッパにまたがる系統の一部であり、島国である日本の電力事情とは異なるため参考にならないと言われてきた。しかし再生可能エネルギー普及に欠かせない送電会社の独立性を確保するに当たって、もともと発電・送電・配電を一括所有していた民間の大手電力会社が、徐々に発電分離を行い、最終的に送電会社が独立していった経緯など、今の日本にとって学べる点が多い。結果としてドイツにおいて、再生可能エネルギー事業者をはじめとする新規の発電事業者にとって、日本のような系統接続に関する問題はない。固定価格買取制度など他の再生可能エネルギー推進策とあいまって再生可能エネルギーの割合は急速に拡大し、2011 年には原子力を上回って年間発電電力量の約 20% を占めるまでに至った。風力発電に限ってみれば、1990 年から 2011 年までに約 530 倍に増大し、

2012 年末に 3,130 万 kW の規模に達している。さらに政府は再生可能エネルギー電源による電力量の供給シェアを 2020 年までに少なくとも 35% まで拡大することを計画している^①。

2.2 ドイツの電力体制と自由化の経緯

ドイツの電力体制は 1990 年代末までは、日本と同様に民間電力会社による発電電一体の地域独占型の電力システムであったが、1998 年から電力小売自由化が導入され、さらに発電と送電の会計分離が行われた。当初は託送料金が高止まりするなど公平な競争環境が生まれず、電力改革は進まなかった。そこで 2005 年に送電部門に監督権限を持つ連邦ネットワーク規制庁が創設され、託送料金を事前認可制に改め、強い規制で透明化を推進していった。法律上は法的分離や機能分離も認められているが、送電部門はネットワーク規制庁の厳しい規制下にあるため、大手電力会社は次第に送電部門を所有する必然性が低くなり、現在では 4 つの大手電力会社のうち、2 社は送電部門を完全に売却し、まだ一部所有しているもう 1 社も将来的に完全に売却する方針を発表し、所有権分離の体制へと移行している^②。現在では送電部門の完全な独立性が確保され、新規参入者にとって公平な競争原理が実現しており、自然エネルギー導入にも功を奏している。

2.3 ドイツの系統運用について

ドイツの面積はほぼ日本と同じで、人口は 8,200 万人、2011 年末における発電設備容量は約 1 億 4500 万 kW である。2011 年 12 月 31 日時点の再生可能エネルギーの設備容量は水力発電を除くと 5,350 万 kW、総発電電力量の 18.6% (風力発電 8.4%、太陽光発電 4.8%、バイオマス発電 5.3%) を占めている。水力発電を入れると 22.7% となる^③。GWEC によると 2012 年 12 月 31 日時点の風力発電の設備容量は 3,130 万 kW に達している^④。

2012 年 12 月にドイツ最大の送電会社 Amprion を視察した報告をもとに、20% に達し

たドイツの再生可能エネルギー発電電力量を制御する系統運用について紹介したい。



4つの送電会社（系統運用者）の担当エリア
出典：Amprion “The Strong Power Network”

ドイツは4大電力会社から送電会社が独立していった経緯から、送電会社(系統運用者)は4つの地域に分かれている。それぞれの送電会社が地域内の給電指令を行いながら、お互いに協力してドイツ全体の系統運用を行っている。変動する再生可能エネルギー電源の運用は、各地域内にある設備容量の割合で分けるのではなく、ドイツの総電力消費のピークロードに占めるそれぞれの地域の割合で分担して系統運用を行っている。私の訪問した Amprion は、ピークロードに占める割合である 35%分に対し、再生可能エネルギー発電電力量の運用に責任を負っていた。

ドイツでは 1991 年から再生可能エネルギーの買取制度を導入し、2000 年に固定価格化しているため、通常、再生可能エネルギー電力は、発電事業者からまず電力会社に売られる。しかし、近年は再生可能エネルギー発電事業者に固定価格買取制度からの卒業を促すために、政府は、発電事業者が直接電力市場におろす direct market を奨励している。これには management premier と呼ばれる補助金が支給されるので、事実上固定価格買取制度の買取価格がフロア価格となり、発電事業者は市場価格と買取価格の価格を比べてより高く売れる方を選択して

いる。2012 年には風力発電電力量にして 80%、太陽光発電電力量にして 3%の事業者がこの direct market を選択している。つまり Amprion が責任を持つのは、風力の残り 20%分と、太陽光の 97%分となる。これら多くの発電事業者が参加する系統の最終的な制御に責任を持つのが、Amprion をはじめとする 4 つの送電会社 (= 系統運用会社、以降 TSO と呼ぶ) の役割となっている。

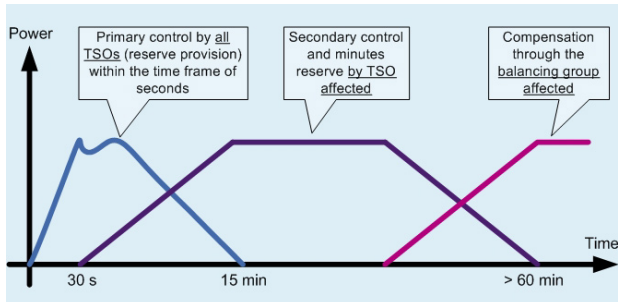
2.4 ドイツの電力取引について

4 つの TSO がドイツ全土の再生可能エネルギー発電電力量の自社分のシェアだけにそれぞれ責任を持つ運用というのは非常に複雑に思えるが、国境を越えた電力取引所の活用と、ドイツ国内の予備調整力市場 (Market for Control Reserve) の活用で高度にシステム化されて運用されている。

まずは 1 時間ごとの需給調整が電力取引所を通じて決定される。ドイツが活用する欧州電力取引所 EPEX (European Power Exchange) には、フランス、オーストリアとスイスも参加しており、前日市場 (day-ahead market) と当日市場 (intra-day market) がある。前日市場では、前日 10 時ごろに、需要予測と気象予測に基づいた再生可能エネルギーの出力予測などが分析されて、翌日 24 時間分の 1 時間ごとの潜在的約定価格が決められ、取引参加者に公開される^⑤。各発電事業者や取引事業者は、その価格をにらみ、価格と量を組み合わせて (現在ドイツには価格と量の組み合わせで 256 通りの時間取引がある) 入札し、公開オークションで決定される^⑥。そして当日市場は、市場参加者にとってできる限り実際の受給時の運用に近い計画値へと調整する最終の場であり、当日の最新の出力予測に基づき、必要となる電力が調整される。

最終的に瞬時、瞬時に需給を一致させる運用のために、上記の電力取引所とは別にドイツ国内にある予備調整力市場が活用される。変動する再生可能エネルギーが総発電電力量に占める割合が急増したドイツでは、調整力のための設備容量を確保する必要性に迫られ、各 TSO が個別に容量の確保を行っていた。それを 2007 年 11 月から 4 つの TSO が協力して、ドイツ国内で統一した予備調整力市場を創設したのである。これにより地域ごとにばらばらだった価格の統一がはかられ、コストパフォーマンスが上がっている。

この予備調整力市場の仕組みは、1次予備力（プライマリーコントロール）、2次予備力（セカンダリーコントロール）、3次予備力（ミニットコントロール）に分かれており、1次予備力は、瞬時に自動制御され、30秒以内に起動して15分までの調整力、2次予備力は、1次予備力による周波数調整後に残る周波数偏差を解消するための調整力で、5分以内に起動されて15分までに稼働する。3次予備力は、電話連絡か、事前のリクエストで15分後から15分ごとの枠で供給される調整力である。



短周期変動の調整力に対するイメージ図
出典：Regelleistung.net

これらの予備力の容量は、毎年4回定期的に容量分析が行われており、統計学的に決められる⁷⁾。2012年には1次予備力と2次予備力に必要な容量はドイツ全土で400万kWと決められ、1次予備力リザーブで200万kW、2次予備力リザーブで200万kWとされた。これらのリザーブ電源は6か月前の入札方式となっており、認定されれば、設備容量を持つこと自体に固定費が支払われ、さらに電力を供給した場合は供給量に応じて支払われる。この固定費は、Amprionを含む4つのTSOがピークロードに占める割合に応じて分担する形となっている。

つまりドイツでは、これら短周期変動に対応する調整力のための容量に対しては、すでに容量市場が実施されていることになる。

2.5 Amprionの系統運用について

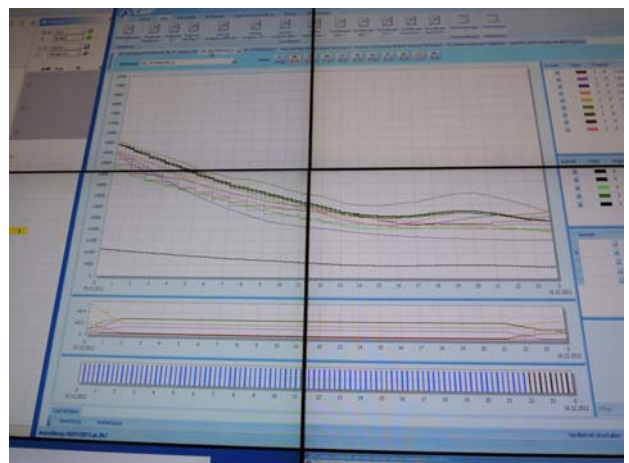
Amprionには、需給を運用する業務と、系統を安定的に運用する業務を行う二つの給電指令所がある。フロントオフィスと呼ばれるのが、需給運用業務を行う給電指令所で、EPEXの前日市場を活用して、翌日の電力が調達されていく。この時には、価格を優先して決められる。Amprionの下には、700のbalancingグループ（いくつかの発電事業者をまとめてインバランスを調整して、インバランスコストを低減することを目的としたグループ）があり、活発に

入札に参加している。そして当日7～8時間前に当日の出力予測を基に再度需給の分析が行われ、当日市場において、実際の受給時の運用にできるだけ近い計画値となるよう調整が行われる。以前は1時間単位の取引だったが、現在はより実需給に近づけるため15分単位となっている。すべての契約は受け渡し45分前まで取引が可能である。

最終的にコントロールセンターと呼ばれる系統安定運用を担う給電指令所で、実際の需給を一致させていく調整を行う。この際には上記の予備調整力市場が活用され、瞬時にはあらかじめ契約されている1次予備力で自動的に制御される。続いて2次予備力の起動によって調整される。ここまでは、価格よりも系統の安定が最優先となって運用される。さらに必要ならば3次予備力が手動によって稼働されていくが、ここからはメリットオーダーリストに従うため、価格が優先されて決められていく。

2.6 ドイツの系統運用のかなめである気象予測を使った出力予測システム

ドイツの系統運用のかなめとなっているのは、気象予測を使った出力予測システムである。ドイツでは民間の気象予測会社が、数多くの出力予測システムを競って開発して売り込んでいる。ちなみにAmprionでは、2012年12月時点で、11の気象会社と契約している。フロントオフィスとコントロールセンターのスクリーンには、11の出力予測システムからの予測が映し出されていた。



Amprionは11の出力予測を分析して活用している。撮影：小西雅子（2012年12月）

Amprionの話では、ドイツの場合は、特に難しい天候は、霧と雪解け時だそうだ。霧は少し

の予測のはずれで、太陽光発電の出力に大きな違いをもたらす。また雪解けのときも、雪の解け具合によって、同じく太陽光発電の出力に大きなはずれが生じるそうだ。そこで Amprion では、各気象会社の予測を比較して、霧に強い予測、雪解けに強い予測というように選んで、11 の出力予測から独自に出力予測を編み出している。ちなみに風力発電の出力予測の誤差は、需要予測の誤差と同じ程度（約 3%）まで低減しており、経済的な運用に大きく貢献しているとのことだ。前日の予測誤差、そして当日の 7～8 時間前の誤差が小さくなればなるほど、バックアップのための予備力を減らすことができるので、経済的になるという。

2.7 系統運用技術者の誇り「風力発電のない系統運用なんて退屈さ！」

Amprion の系統運用技術者 5 人に面談したが、「風力発電や太陽光発電が急増して、系統運用は過去 10 年、非常にチャレンジングだった」と全員が口を揃えて話していた。「失敗の連続だったので、もう一度やり直せるものならば、もっと良い方法があったのと思う。日本は我々の失敗から学ぶことができるから、よい立場にあるね。」しかし大変だったと話しながら、誰も再生可能エネルギーの大量導入の方向性には疑問を抱いていないことが印象的であった。「再生可能エネルギーの大量導入は国が決めたこと、将来のためには正しい選択だ。チャレンジングではあるが、むしろ我々技術者にとってはこの上ない腕の見せ所でもある。むしろ風力発電のない系統運用なんて退屈な限りさ！」と胸を張っていた。

2022 年までに原発の段階的な廃止を決めたドイツでは、再生可能エネルギーの導入加速というさらなるチャレンジが待ち受けている。北部の洋上風力発電の開発などが急ピッチで進められているが、大きな課題は、系統の強化だ。特に風力適地の北部から工業地帯で原発があった南部への基幹送電線敷設が必要だが、住民の反対や資金などの問題でなかなか進まないという。抵抗はあるが、国は 2020 年までに系統強化に 30 億ユーロ投じる予定だ。Amprion のコントロールセンター管理者のチーゼマン氏は「原発は嫌だ。風力発電は嫌だ。送電線敷設は嫌だと、全部に嫌だという選択肢はないので、考えなければならない。これからは系統強化が必須だ」と強調していた。



Amprion のコントロールセンターにて、
系統運用責任者と筆者
撮影：小西雅子（2012 年 12 月）

3. スペインの事例

3.1 スペインと日本の電力事情は似ている！

さて、ドイツにおいて再生可能エネルギーの大幅導入が可能なのは、ヨーロッパでは送電網がつながって国際連系されているからであり、島国である日本とは事情が違うと言われる。しかし実はスペインはヨーロッパ内ではあっても半島であるため、日本と同じように国際連系が弱い。ヨーロッパ全体の送電網とは、険しいピレネー山脈を越えてフランスを通じてつながるしかない。その他ポルトガル、モロッコとも電力を融通しているが、連系線の容量は小さく、2012 年度の電力の融通量は、2011 年に比べて 83% 増加したといっても年間の電力量の 3.9% にすぎない^⑧。また風力発電に適した強風の地域がスペイン東部や北西部地域に偏っているのに対し、電力の消費地はマドリードやバルセロナといったスペイン中央部と東部の大都市に集中しており、その間を長い送電線でつないでいる点も、東京において首都圏の電力消費のために、福島や新潟といった地域から電力を送っているのと似た構図である。したがって本来スペインは、日本の電力系統と同じように、再生可能エネルギーの大量導入には不利なはずだが、30% を超える再生可能エネルギーの導入に成功している。2012 年 3 月に行った視察を元に、スペインの系統運用を紹介したい。

3.2 再生可能エネルギーの発電電力量が 6 割を超えた日も

スペインの面積は日本の約 1.3 倍、人口は 4,412 万人で、2012 年末における発電設備容量

は1億182万kW、東京電力と中部電力の合計とほぼ同程度となる。風力発電は過去10年で10倍以上増加しており、2012年の設備容量は2011年よりもさらに156万kW追加して2280万kWとなった。実に日本の約9倍もの風力発電が導入されている。再生可能エネルギーは、年間の発電電力量の31.8%を供給しており、中でも風力発電は18.1%も占め、原子力発電所の22.1%、石炭火力発電所の19.3%について、3番目となる主要な電源となっている^⑧。2012年4月16日3時30分には風力発電の電力(kW)供給比率は、過去最高の60.46%にも達した^⑨。再生可能エネルギーをエネルギー供給の主演としながら、電力システムを大きなトラブルもなく運用している。

ちなみにCO₂排出量は再生可能エネルギーの導入量増加に伴って近年順調に減少していたが、2012年は石炭火力発電所が増加したため、再生可能エネルギーの導入効果が薄まり、2011年よりやや増加したということだ^⑩。

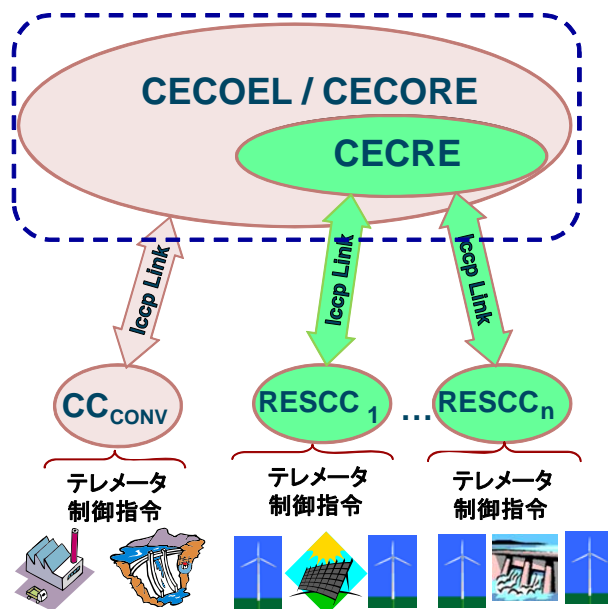
3.3 再生可能エネルギーのために特別な中央制御センターCECRE を創設

スペインでは、日本と同じく化石燃料資源に乏しいため、エネルギー自給率が低い。欧州連合の方針で地球温暖化対策をとる必要にも迫られ、2001年からエネルギーの安全保障とCO₂削減の目的のために、国策として再生可能エネルギー促進策をとってきた。電力市場の自由化、固定価格買取制度の導入などとともに、再生可能エネルギーの優先給電を可能とする系統運用に取り組んできたが、その大きな柱が再生可能エネルギー専門の制御センターCECRE の設立である。

スペインでは、送電網へのアクセスの公平性を確保し、集中的に中央で制御するために、系統運用会社はRed Eléctrica de España (以下REE) 一社とする体制がとられている。REEは2006年に再生可能エネルギー専門の中央制御センターControl Centre for Renewable Energies (以下CECRE)を立ち上げた^⑪。

CECREは、風力、太陽光、水力、バイオマスなどの再生可能エネルギーを対象としており、スペインの電力システム全体を制御する中央給電指令所の一部として運用されている。CECREは、中央給電指令所の中央指令室と同じ部屋にあり、コンピューターで自動制御され、中央指令室とあわせて2、3人の職員が監視しているだけだ。刻一刻とモニター画面は切り替わり、ス

イン全土の風力や太陽光の発電状況、電力需要、それにリアルタイムのCO₂の排出量状況まで映し出される。組織関係部署責任者のファティマ・ロジャス氏は「もともとの再生可能エネルギー導入の目的の1つが地球温暖化の抑制にあるのだから当然」と悠然と語っていた。



RESCC: Renewable Energy Source Control Center
CC_{CONV}: Control Center for conventional generation

CECRE (再生可能エネルギーコントロールセンター) の仕組み 出典: REE

CECOEL/CECORE: スペインの電力システム全体を監視・制御

CECRE: 再生可能エネルギー発電を監視・制御

RESCC: 中堅・大手発電事業者や電力Traderにより運営
現在33ヶ所ある。



再生可能エネルギーコントロールセンター
スクリーンにはCO₂排出量のリアルデータも映し出される(右下)

撮影: 小西雅子 (2012年3月)

2007年から、設備容量が1万kWを超えるすべての発電設備はCECREによって直接制御されることになり、CECREの下には、地域的に発電を管理する再生可能エネルギー地域制御センターが33箇所に設置された。地域センターからは再生可能エネルギーの発電電力量や、風速や気温などの情報が12秒ごとにCECREに伝えられる。CECREから発電電力量を抑制する指令が出されると、15分以内に各発電所にその指令を実行させる役割も負っている。ほぼリアルタイムでスペイン全土の風力発電を含む再生可能エネルギー出力と、気象データをリモートで把握し、コントロールできるシステムとなっている。

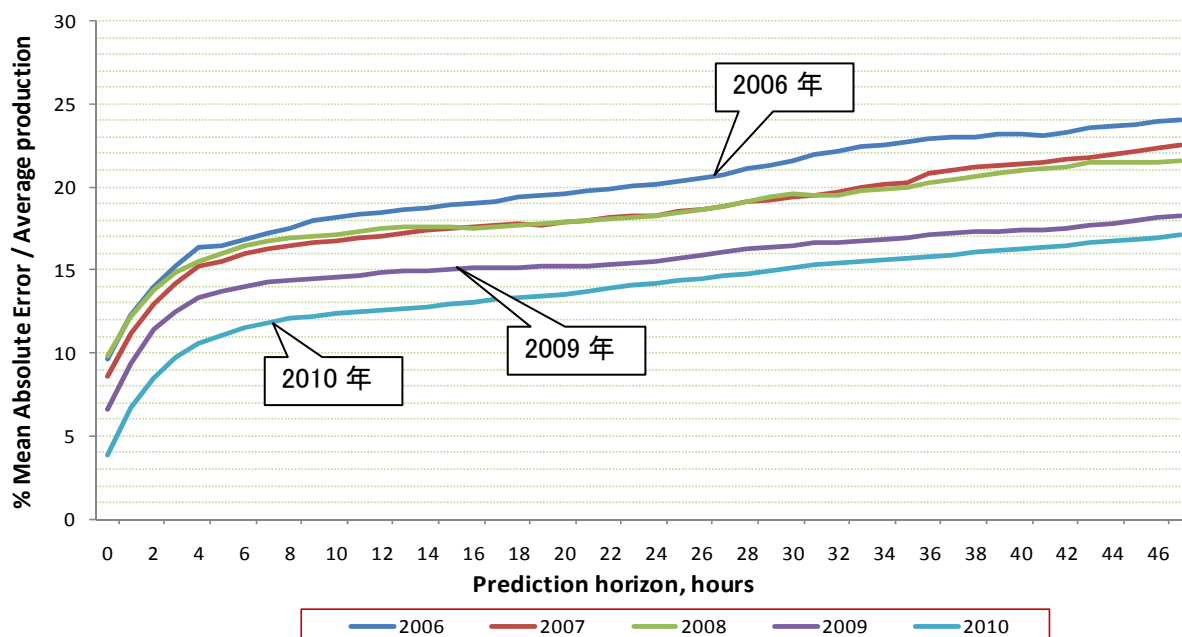
3.4 鍵となる気象予測を使った出力予測システムの活用

REEの使命は、再生可能エネルギーを優先しながらシステムを安定的に運用していくことにある。そのため再生可能エネルギー、火力発電所などのすべての発電所に指令を出す権利を持ち、各発電所はその指令に従う義務がある。REEは中央で気象予測システムを用いて、再生可能エネルギーの発電出力を予測しており、まず再生可能エネルギーを優先して給電し、残りを他の調整用の発電所（揚水式発電所やガスコンバインド火力発電所）に指令を出して、調整していく。

REEの風力出力予測モデルは、SIPREOLICOと呼ばれるもので、2001年からマドリードのカルロス3世大学とREEが共同で開発し、2002年から運用が開始された。スペイン全土を対象に出力予測をより正確に行い、調整に必要な発電所の分析を把握できるように開発され、現在も常時改良が加えられている。2002年以前は、各風力発電所が個別に出力予測を行っており、中央指令室がリアルタイムで情報を把握し中央制御を行うことは不可能であった。

SIPREOLICOは、スペイン気象局による数値予報データと各地の風力発電所のデータ収集システムを元に、風力発電電力量を1時間単位で48時間後まで予測し、15分ごとにその予測量を更新している。さらに10日後まで1時間ごとの予測を出しており、1時間ごとに更新している。32時間前から24時間前の予測が最も重要で、前日の予測が正確であればあるほど、予備力の準備量を減らすことができる。さらに5時間前の予測を元に、調整力としての発電所稼動に修正をかける。

SIPREOLICOは、過去5年で予測精度を向上させており、特に5時間前から32時間前までの予測精度が上がっている。24時間前の予測では、2006年には21%であった予測の誤差（平均出力によって無次元化された平均絶対誤差）は2010年には14%にまで下がった。これは電力系統安定化対策のコストを大幅に下げたという。



気象予測モデル SIPREOLICO の予測の誤差。年々誤差が少なくなっているのがわかる
出典：REE

3.5 変動する再生可能エネルギーを大量導入するためのもう一つのキは、広域分散化

風力発電や太陽光などの再生可能エネルギーは、設備数（≒設備容量）が増えれば増えるほど、発電電力は平滑化されるというメリットがある。たとえば個々の風力発電所で見ると、発電電力は大きく変動するが、同一時刻において、地域全体、さらにスペイン全土で見れば、風の強い地域もあれば、弱い地域もあるため、風力発電所の建設場所が広い地域に分散して、設備数が増えるほど、個々の発電電力の変動が相殺されて、結果として全体の発電電力は平滑化される。

しかも設備数が増加するにしたがって、変動幅が減少して系統運用がやりやすくなるだけでなく、出力予測に使う気象予測の精度も向上していく。というのは狭い範囲にある数少ない風力発電所の気象予測は、地形の影響も受け、はずれる可能性も大きい。風力発電所の数が増え、広域化するほど、気象予測の範囲も広がって中規模場の予測となり、予測精度が上がるからである。

SIPREOLICO の予測精度が急速に向上しているのは、気象予測ソフトウェアの改善もあるが、風力発電の設備数の増加による寄与も大きいという。気象予測精度が上がれば、さらに系統運用がしやすくなる。つまりスペインの例では、再生可能エネルギーが増えるほど、全体としての発電電力の変動が少なくなり、さらに気象予測の精度も上がって、より安定した系統運用が可能となるという好循環が生まれていることを示している。

4. 風力発電大量導入時の電力系統の運用

4.1 北アメリカの例

ドイツとスペインの例を見てきたが、北アメリカにおいても、広域化の寄与と気象予測を使った出力予測システムを活用した系統運用、それに電力市場の活用で、再生可能エネルギーの普及が進んでいる。アメリカの電力公益事業者やメーカー、開発事業者など170メンバーが所属するUWIG(Utility Wind Integration Group)によると、出力予測システムとバランシング市場（時々刻々と需給調整を行うリアルタイム市場）を使うことが、系統運用を安定化させる鍵であるという。

実際にUWIGの調査では、7年前には気象予測を活用した出力予測システムを使っている系統運用事業者はいなかったが、現在は全員が導

入している^⑩。前日の予測は経済性のために、そして1時間前予測は信頼性のために役立つという。

やはり地域的に分散していることと設備容量の増加が一番の安定運用の鍵となると報告しており、さらなる予測の向上が運用コストを下げるとしている。今後30%を目指す研究報告では、総発電電力量の20~30%の再生可能エネルギーを電力系統に組み込むことに技術的には根本的な問題はなく、むしろ社会的なシステムの問題と結論付けている^⑪。

4.2 大量の変動電源導入時の系統運用の3つのポイント

欧州風力エネルギー協会(EWEA)も、大規模電力系統では深刻な技術的・実務的問題が発生することなく、風力が電力需要の20%を占めることができるとみなしている。また20%までの風力発電の導入では、風力発電の導入に対する必要な予備力は、電力系統内の従来の発電所により賄えると報告している。新規の予備力は必要なく、すでに使われている予備力を利用する機会を増やし、従来の発電所の柔軟性を向上させ、部分負荷運転を行う発電所を増加させることだけが追加費用となるということだ^⑫。

スペインやドイツ、北アメリカの例が示唆することは、風力発電などの変動電源が大量に導入される系統運用のポイントは下記の3つにあると考えられる。

- ① 再生可能エネルギーの発電設備が広域に分散配置されること
- ② 気象予測を使った出力予測システムを中央制御で活用した系統運用。
- ③ 効率的な電力取引所の活用。電力系統の運用決定時間を実際に給電する時間に近づけることを可能とする市場の仕組みが必要。

① 再生可能エネルギーの発電設備が広域に分散配置されるほど、発電電力の変動が少なくなる！

風力や太陽光などの再生可能エネルギーは、発電所の建設される地域が広域化し、発電設備が増えるほど、全体としての出力の変動は少なくなる。たとえば風を起こす典型的な気圧配置である低気圧の範囲は1000kmレベルであるが、風力発電所が九州から北海道に建設されれば、3000kmにわたることになり、当然風の強弱も低気圧が日本列島を横断していくにつれて移り変わっていく。結果として1つの発電所では出

力が数時間で大きく変動することがあっても、広域化した場合には全体としてみれば、変動は小さくなり、出力はならされてくる。

ドイツの再生可能エネルギー研究機関 ISET によると、1 時間ごとに見ると 1 つの風力発電所だけでは 60% もの変動がありうるが、合計 35 万 kW 以上の風力設備容量になると、変動は 20% 以下にさがるという。さらに地域を広く見て北欧 4 か国でみると、北欧電力専門家協議会 (NORDEL) によれば再生可能エネルギーの出力変動は 10% 以下になる^④。

日本においても風力発電設備が早期に広域にわたって増加していくことが望まれる。

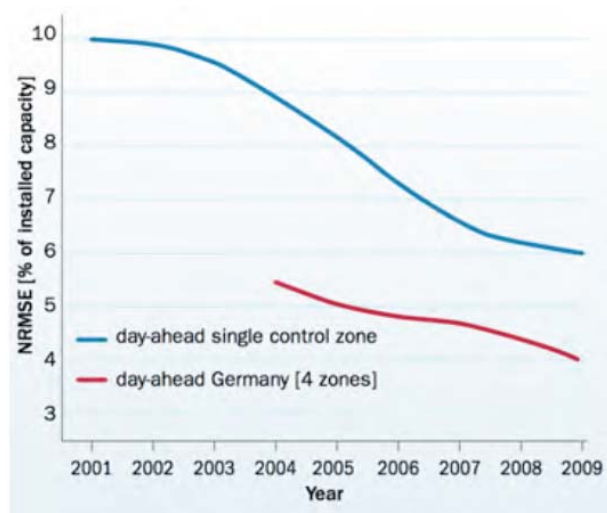
② 気象予測を使った出力予測システムについて

気象予測を使った出力予測システムを中央給電指令所で活用した系統運用は、変動する再生可能エネルギーを効率的かつ経済的に運用するためには欠かせない。

日本では NEDO (新エネルギー・産業技術総合開発機構) の委託研究で、東京大学と電力中央研究所、伊藤忠テクノソリューションズ、日本気象協会が協力して、2008 年に気象予測に基づく風力発電出力予測モデルが開発され、実証実験が行われた。その結果、ウィンドファームモデルにおいて、統計手法を組み合わせることによって、所定の精度で出力予測ができることが示されている。制御エリアモデルにおいて、対象地域の東北と九州地域で、所定の精度で出力予測ができることが示され、定格出力からの予測誤差を翌日予測で 20% 未満、当日予測で 15% 未満に抑えることがわかった^⑤ (NEDO 2008)。

予測誤差はスペインやドイツに比べるとまだ大きいですが、スペインに比べて、日本の風力発電の設備容量は 10 分の 1 以下であり、しかも東北 9 サイトと九州 3 サイトに絞った検証であるため、今後設備数および設備容量が増え、出力が平滑化されるにつれて、気象予測の誤差も低くなっていくだろう。

出力予測システムは、対象地域が広くなればなるほど、予測誤差が下がる。ドイツの例でみると、前日予測において、単一の地域だけを制御している場合と、ドイツ全域を対象とした場合の過去 9 年間の平均予測誤差を比較したもので、単一地域よりもドイツ全域のほうがはるかに予測精度が高くなって、2009 年には翌日の予測誤差(定格出力に対する誤差)は 4% にまで減少していることがわかる^⑥。



前日の平均予測誤差の変化：ドイツ全域と単一制御地域の過去 9 年間の比較

出典：EWEA2012

日本の気象庁の数値予報精度は世界に冠たるものであることには疑いなく、風力発電出力予測技術システムのさらなる開発・運用に取り組み、風力発電や太陽光発電の設備容量が増加していくにしたがって、より効果の高い出力予測システムは早期に実現できると考えられる。

③ 効率的な電力取引所の活用

再生可能エネルギーの先進国はほぼ例外なく、発達した電力取引所を持っている。再生可能エネルギーは従来の火力や原子力よりもはるかに分散型の指向があり、否応なく多くの発電事業者が参加する電力システムとなる。多くの参加者を得て運用していくには、効率的な電力取引所の存在が欠かせない。様々な電力市場の詳細設計はともかく、系統運用の経済性からここで強調しておきたいのは、気象予測は、当然だが直前になるほど、予測精度が上がることである。再生可能エネルギーの導入には、気象予測を使った出力予測システムは必須であるが、その予測が正確であるほど、系統運用に関する追加的費用を押し下げる効果があるからだ。まず前日の 24~32 時間前の予測は、経済的に翌日の発電電力計画を立てるのに役立つ。当日になると気象予測の精度は上がるため、必要となる予備力を減らすことができ、さらに費用を押し下げることができる。つまり電力システムの運用決定時間を、実際に給電する時間に近づければ近づけるほど、系統運用にかかる追加費用を減らすことができるのである。その意味において、電力取引も、前日市場と合わせて、当

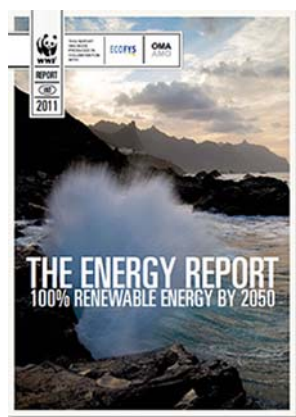
日市場、それもなるべく実際に給電する時間に近い取引を可能とすればするほど、経済的になる。電力取引市場の設計には、これらの気象予測の特性を活かす発想が大切だ。

4.3 日本への示唆

2012年7月から始まった再生可能エネルギーの固定価格買取制度で、事業者に経済的インセンティブが与えられ、投資が進んでいるが、合わせて系統への受け入れ態勢をすみやかに整えていくことが重要である。世界の先進的な国々の例を学びながら、公共性のある送電網を構築し、中央制御を行うことのできる統一した系統運用会社を早期に発足させることが望まれる。再生可能エネルギーを優先給電することを使命とし、技術的に可能なことはすべて行っていく権限を与え、原発のために使われてきた揚水発電を再生可能エネルギーの調整力として活用しながら、広域運用を進めていく。

待ったなしの温暖化対策のためにも、可能な限り早い時期から再生可能エネルギーの大幅導入を果たしていくことが必要だ。日本では温暖化対策には関心が薄れているのが残念だが、温暖化は深刻化する一方で、対策の手を緩めるわけにはいかない。いずれは2050年80%の削減を可能とするためには、長期的な視点で取り組む必要がある。

WWFでは、2011年11月に2050年に再生可能エネルギー100%の社会を可能とする省エネルギーと自然エネルギーシナリオを発表したが、2013年9月にはそれを可能とする系統シナリオを発表する予定である^⑯。大規模な省エネルギーとあわせて、純国産エネルギーである再生可能エネルギーの速やかな普及によって、エネルギーの安全保障と温暖化防止が両立される社会を実現する一助となることを心から願う。



WWF エネルギーレポート

参考文献

- ①海外電力事業調査会：ドイツの電気事業（2012）
 - ②JREF（(公)自然エネルギー財団）：ドイツ視察報告書
 - ③ENTSOe (European Network of Transmission System Operators for Electricity), Memo 2012 provisional values as of 30 April 2013
 - ④GWEC(Global Wind Report): Annual Market Update 2012(2013)
 - ⑤<http://www.epexspot.com/en/renewables>
 - ⑥日本エネルギー研究所：平成24年度商取引適正化・製品安全に係る事業（諸外国における電力市場の実態などの調査）
 - ⑦<https://www.regelleistung.net/>
 - ⑧REE: 2012 The Spanish Electricity System (2013)
 - ⑨REE: Wind produces more than 60% of the electricity consumed in Spain during the early hours of this morning, Press Release, (2012.4.16)
 - ⑩REE: Spanish TSO Operational Challenges and Solutions, ppt-file, (2011.3)
 - ⑪UWIG: Wind Power and Electricity Markets, A living summary of markets and market rules for wind energy and capacity in North America, (2011)
 - ⑫NREL (National Renewable Energy Laboratory) : Western Wind and Solar Integration Study, Debbie Lew, ppt-file, (2012.2.22)
 - ⑬EWEA: Powering Europe: wind energy and the electricity grid, 2010
 - ⑭EWEA: Large scale integration of wind and energy in the European Power supply, p57 (2005)
 - ⑮NEDO(独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構), 2008: 風力発電電力系統安定化等技術開発—気象予測システム—気象予測に基づく風力発電量予測システムの開発報告書 (2008)
 - ⑯WWF（公益財団法人世界自然保護基金）ジャパン, 2011: 脱炭素社会に向けたエネルギーシナリオ提案
 - 第1部省エネルギー編(2011年発表)
 - 第2部100%自然エネルギー(2011年発表)
 - 第3部費用算定編(2012年発表)
 - 第4部系統編(2013年9月発表予定)
- <http://www.wwf.or.jp/re100>