

# 再生可能エネルギーの最大導入に向けて

## The Maximum Deployment of the Renewable Energy

3.11の東日本大震災とそれに伴う福島第一原子力発電所の事故により、日本のエネルギー政策は大きな影響を受け、日本の将来における再生可能エネルギーへの期待が高まっている。本稿では、再生可能エネルギーの特徴や特性、最大導入に向けた課題と解決方法、電力システム全体のベストミックス、今後の取り組みの方針について述べる。

The nuclear accident on March 11, 2011 has seriously affected the energy policy of Japan. The renewable energy is expected to be a major energy source for Japan in the future. This paper, targeting the maximum deployment of renewable energy, discuss their features and characteristics, issue to be resolved and countermeasures, the best energy mix of a total system, and the strategic approaches.

### 1. 再生可能エネルギー

#### 1.1 再生可能エネルギーとは

再生可能エネルギーとは、化石資源など利用すればなくなってしまうエネルギーと異なり、太陽や地球のエネルギーを起源とする、人間の時間スケールにおいて持続可能なエネルギー源である。水力発電、太陽光発電、太陽熱発電、太陽熱集熱器、風力発電、地熱やバイオマスによる発電と熱供給などはすでに大規模な利用が行われている。他方、潮汐発電、潮流発電、海洋温度差発電などの海洋エネルギーの初期段階での導入、技術開発、新たな導入検討が行われているなど、今後展開が期待される分野も多い。

再生可能エネルギーの定義は様々である。2009年8月に施行した「エネルギー供給構造高度化法」の施行令では、法令によって再生可能エネルギーを国内で初めて定義した。この定義では太陽光や風力と並び、ヒートポンプが利用する空気熱、地中熱、水熱（海水熱や河川水熱など）が再生可能エネルギー源と定義された。欧州連合（EU）でも2009年6月施行の「再生可能エネルギー推進に関する指令」でヒートポンプが利用する空気熱、地中熱、水熱を「自然界に存在する永続的に使用可能なエネル

ギー」として再生可能エネルギーと定義している。一口で再生可能エネルギーといっても、様々な定義があることには注意が必要である。

中緯度に位置し、一定の湿度や降雨量がある日本においては、住宅など建物を利用した太陽光発電が、全国的に偏在性が少ないエネルギー源として導入が進められ、メガソーラー、風力、中小水力、地熱などは、それぞれのエネルギー賦存量や土地利用の条件により成立すると考えられる。再生可能エネルギーの導入は、日本ばかりではなく、国際的な流れである。EUは2020年までの温暖化ガス削減の中期目標の中で、域内のエネルギー消費に占める再生可能エネルギーの割合を現在の約2倍に当たる20%に高める計画を発表している。米国は、連邦政府レベルで様々な研究開発を含めた導入促進政策を進めるとともに、州政府を中心に再生可能エネルギーの導入促進施策が実施している。既に太陽光、太陽熱、地熱、バイオマス発電の導入量で全米1位のカリフォルニア州は、2016年までに州全体で300万kWの太陽光発電の導入を目指している。多国間の取り組みとしては、国際エネルギー機関（IEA）に加え国際再生可能エネルギー機関（IRENA）などが活動するとともに、「気候変動に関する政府間パネル（IPCC）」は、「再生可能エネルギー特別報告書（SRREN）」を2011年5月に発表した。

日本では、太陽光発電を始め、様々な再生可能エ

荻本 和彦

東京大学 生産技術研究所 特任教授

OGIMOTO, Kazuhiko

Project Professor,

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

エネルギーに関する技術開発が、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）を始めとする様々な機関によるプロジェクト、産官学の協力、各企業の活動など様々な形態で行われている。また再生可能エネルギー導入のための調査や政策検討は、環境省、資源エネルギー庁を始めとする機関において行われている。特に、環境省により設置された「地球温暖化対策に係る中長期ロードマップ検討会」、「中長期ロードマップ小委員会（2010.4～2011.3）」、2013年以降の「対策・施策に関する検討小委員会（2011.4～）」においては、「我が国における中長期の温室効果ガス削減目標を実現するための対策・施策の具体的な姿（中長期ロードマップ）」の検討を目的とし、再生可能エネルギーの導入・普及について、資源量、導入可能性、導入施策などの体系的な検討が行われた。この検討は、2013年以降の「対策・施策に関する検討小委員会（2011.8～）」により継続されている。

2010年6月に資源エネルギー庁が発表した現行のエネルギー基本計画では、2030年における一般水力を含めた再生可能エネルギーによる発電を現状の約800億kWh（全発電電力量の8%）から、2140億kWh（同約20%）に増やす計画である。環境省の中長期ロードマップ小委員会の中間整理では、2020年に一次エネルギー消費の10%を再生可能エネルギーで供給するという、さらに野心的な計画が発表されている。

海外での太陽光発電や風力発電の導入状況と、国内の原子力発電に関する信頼低下のため、国内における再生可能エネルギーに対する期待はこれまで以上に高まっている。しかし、再生可能エネルギーにより、現在日本が必要とする極めて多量のエネルギー需要の一定部分を賄うことは容易なことではない。太陽エネルギー、風力エネルギーなどは再生可能ではあっても密度が低く、発電量が変動するエネルギーである。そのため、再生可能エネルギーの利用の拡大に向けては、今後の技術開発の成果を適用しても、経済性をはじめとして、立地制約、土地利用、地元の理解、送配電網の整備など、解決すべき課題は多い。

## 1.2 太陽光発電

2010年の世界の太陽電池生産量は、2009年の1000万kW超から大幅に増加し2400万kWとなった。世界の太陽電池需要は、各国の政策的な支援のもとで、ドイツ、イタリア、チェコを中心とするヨーロッパ各国での導入に加え、日本、中国、オーストラリア、北米にも広がっている。しかし、欧州の固定価格買取制度（FIT）の変更、景気の低迷による設備

投資の減少などにより、2010年の実需要は生産量よりかなり少なく、大幅な在庫増の傾向は2011年も継続したと考えられる。この影響もあり、太陽電池のモジュール価格は大きく下落し、1\$/Wを下回る価格の実績も出てきている。このような短期的な下落要因もあるが、太陽光発電の設備コストは数年で大きく下がったと言える。

太陽光発電は、震災後注目されているメガソーラーといった集中設置と、小規模の分散設置として、住宅や業務用建物の屋根や壁面などにも設置できるので、国土が狭い日本にとって導入の可能性が高い再生可能エネルギーである。2009年度の国内出荷量の大半を住宅用が占めており、2009年の日本の太陽光発電の累積導入量は262万kWである。

太陽光発電は、発電パネル（モジュール）価格の低下と、近年FITなどの国・自治体などによる政策的な支援の下、欧州を中心に急激に市場が拡大した。この中で日本は、1997年から継続してきた累積導入量世界一の座を2005年にドイツに抜かれ、2008年にはスペインにも追い抜かれ、2011年における累積導入量は360万kWである。世界での導入量は、2009年に700万～800万kWが新設され、累積導入量は2000万kWを超える水準である。

太陽光発電の技術開発は、NEDOが2009年に策定した「太陽光発電ロードマップ（PV2030+）」に述べられているように、コスト低減のため、今後、原理、製造方法など、様々な革新的な開発が必要とされている。現在、NEDOにおいては、2010年より開始された太陽光発電システム次世代高性能技術開発と、2008年に開始された革新的太陽光発電技術研究開発が並行して進められている。次世代高性能技術開発においては、太陽光発電の導入を抜本的に加速し、2020年頃に現状の20倍程度まで拡大するために不可欠なコスト低減と高効率化の技術開発として、各種太陽電池の要素技術、横断的材料開発及び周辺システム技術の開発が進められている。革新的太陽光発電技術研究開発では、2050年CO<sub>2</sub>排出量半減を実現するための画期的な太陽光発電技術の開発が進められている。

また、太陽光発電システムにおいては、系統に連系するためのインバータがシステムの起動停止や運転量の調整を行う。インバータについては、様々な国や地域の電力システムに連携するための「系統連系要件」を満足するために、Fault Ride Through機能（電力システムの広域の電圧低下などによる運転停止を回避する）や単独運転防止機能（電力システムの停電を検知してPVシステムの運転を停止する機能）、さらに配電網の電力品質向上のための有効/無効電力の調整機能など、高度な機能を備えたイン

バータの技術開発が国内外で行われている。かつて世界最先端のパワーエレクトロニクス技術を誇った日本として、太陽光発電のシステムとしての要(かなめ)となる系統連系用インバータの技術開発に改めて取り組む必要があると考えられる。

### 1.3 風力発電

風力発電は、世界では、2010年に3580万kWが導入され、累積導入量は約2億kWとなり、米国、中国、ドイツ、スペインの上位4カ国で全体の3分の2を占める。日本国内では、2011年は17万kWが導入され、累積導入量は250万kWとなった。

風力発電では、風況が基本的な経済性を決定し、開発のカギとなる。日本風力発電協会の検討によれば、日本の陸上風力の資源量(賦存量)は、標高、自然公園の除外、居住地からの距離、土地利用区分などを考慮して算出すると平均風速6.5m/sec以上で約14000万kW、風速7.5m/sec以上で約4800万kWとされている。洋上は陸上に比べて風が強く、乱れも少ないなどの好条件のもと、平均風速7.5m/sec以上で約6億kW、同8.5m/sec以上で6000万kW程度の資源量があるとされている。

日本風力発電協会の「風力発電導入ロードマップ」では、2020年に1100万kW、2030年に2700万kWの洋上風力を含めた風力発電の導入を目指している。しかし、実際の導入にあたっては、日本は立地制約や冬季雷や台風などの気象条件が欧州に比べて厳しい。また、よい風況の得やすい洋上風力は、欧州では北海など経済性に優れる着底式に適した水深数十メートルの海の面積が広いのに対し、日本は風況の良い浅い海は少ない。また、水深が深い場所に適用する浮体式は技術的に難度が高く送電線を含め建設コストも割高となるなど、開発量確保に向けての克服すべき課題は多い。

日本の風力発電の2010年での累積導入量は、世界13位であり、世界の市場で設計・製造・利用の各種技術で海外の技術に先んじるにはかなりの努力を要する。しかし、風力発電市場は、世界で6兆円とも言われ、成長率も高い。風車は約2万点の部品で構成され、歯車、大型軸受、主軸、ブレーキなどの機械、発電機、変圧器、電力変換装置などの電気、大型ブレード用のガラス繊維強化プラスチック、炭素繊維などの化学など、様々な製造技術の集大成で付加価値も大きいことから、産業としての発展も大切な目標となる。

風力発電の技術開発動向としては、資源エネルギー庁が2008年3月に発表した「クールアースエネルギー革新技術計画(資源エネルギー庁、2008.3)」には、風力発電の技術開発は含まれていない。当時

の検討では、「風力発電は成熟した技術であり、2030年以降導入拡大に貢献する“革新的”な技術開発要素がない」と考えられたためである。しかし、今後は、直近の開発に向け経済性向上のためのこれまでの大型化路線を含めた機器技術に加え、大量導入に向けて必要となる出力制御(抑制)、気象予測と組み合わせた発電予測と電力システムとの協調運用などの新たなシステム技術が重要になる。また、多数の風車を安定して運用するために、モニタリング技術、疲労を低減する運用技術、更には大型風車建設のための重機、設置船など新たな分野の技術開発ニーズも考えられ、着床式や浮体式といった風車本体の技術開発と並行した取り組みが必要となる。

風力発電の大規模導入に向けては、風力発電は風の強く需要から遠い場所に立地することが多く、送電網の整備も重要な課題である。現在主流の大型風車は1基当たり2000~3000kWでそれらが集まってウィンドファームを形成する。このような風力発電の送電には、少なくとも66kVの送電線、場合によってはより高い電圧で送電する必要がある。送電線は数多くのウィンドファームに共通の設備として建設することでコスト負担を低減できる。しかし、地域で最初のウィンドファームの場合、どう計画を立て、どうコスト負担をするかは確立された考え方はなく、実務上難しい問題となる。逆に、当面のウィンドファームの送電のみに対応する送電線を建設すると、その次の風力開発にも同じコストがかかり、それどころか将来必要となる送電線を建設するルートが確保できないという深刻な問題も発生する。経済性や運用性を確保しつつ大規模の風力発電を導入するためには、長期の導入を見据えた送電網の整備が課題になる。

### 1.4 中小水力発電、地熱発電、バイオマス発電

環境省による2009年度および2010年度の再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査<sup>(1)</sup>(以下、「導入ポテンシャル調査」と呼ぶ)では、太陽光発電、風力発電に加え、中小水力発電、地熱発電の導入ポテンシャル調査が行われた。

水力発電は、国産のエネルギー源として明治時代から開発が継続され、規模が大きく経済性の高い地点の開発はほぼ終り、今後有望な地点は、経済性は落ちるが、水力特有の環境影響も小さいと考えられる中小水力とされている。(導入ポテンシャル調査では、経済産業省による中小水力発電開発費補助事業の対象事業を踏まえ、出力3万kW以下の水力発電を中小水力発電とした)。推計は、国土地理院による水路線形データ(標高データを含む)、国土交通省及び都道府県による集水路流量データ及び分配水

路取水量の全国のデータを319の流域ブロックに分割して行った。ブロックごとに維持水量及び取水流量を考慮して使用可能水量を、また、ブロック内集水路の河川合流点等(計18万ヶ所)に水力発電所の設置を想定して年間発電量を推計し、この年間発電量と水平導水距離、落差から発電所の建設費を推計した。推計にあたっては、道路からの距離、最大傾斜角20度未満、自然公園についての開発制約のもとで、GIS上で重ね合わせて設置可能な地点を抽出した。

この結果、中小水力発電の導入ポテンシャルは河川部で1400万kW、農業用水路で30万kWと算出された。算出された中小水力発電の導入ポテンシャルは、地域偏在性が極めて強く、北陸、東京、中部及び東北の各電力の供給エリアにポテンシャルが集中する結果となった。

地熱発電も、すでに実用化されている再生可能エネルギーによる発電方式である。ポテンシャル調査では、資源(賦存)量は、150以上、120~150、53~120の地熱資源量密度分布図を基に推計された。地熱資源量密度分布図は、地熱資源量を単位km<sup>2</sup>当たりの設備容量により表現するもので、独立行政法人産業技術総合研究所の村岡らが作成した資源量分布図から技術的に利用可能であると考えられる密度を持つ地域を抽出し、それらの資源量密度を集計して資源量を算定した。

導入ポテンシャルの推計では、上記で作成した温度区別の資源(賦存)量マップに対して、各種社会条件を重ね合わせ、地熱発電施設が設置可能な面積を求めて推計が行われた。重ね合わせる社会条件としては、120以上の地熱資源に対しては「法規制等区分」、「土地利用区分」、「居住地からの距離」、「都市計画区分」を、53~120の地熱資源に対しては「法規制等区分」と「土地利用区分」が設定された。

この結果、地熱発電の導入ポテンシャルは150以上では110~220万kW、120~150は0.8~21万kW、53~120は740万kW以下となった。資源量密度は発電コストと相関が高く、今回のポテンシャル調査の結果から、発電コストに応じた導入ポテンシャルの推定も可能となる。

また、150以上の地熱発電の導入ポテンシャルについては、地域偏在性が極めて強く、ポテンシャルの1/3が北海道にある一方、関西、中国、四国及び沖縄電力の各供給エリアでは、地熱発電のポテンシャルはほとんどないと推計された。これとは別に、既に開発された温泉および自然に湧出している温泉を対象とした温泉発電の導入が考えられる。そのポテンシャルは30kW/箇所以上のものとして、

72万kWと推計されている。しかしこの方式は、150以上の場合と比べて経済性の面で課題がより大きく、低コスト化が不可欠である。

## 2. 再生可能エネルギー最大導入への課題

### 2.1 再生可能エネルギーの変動特性

再生可能エネルギーの利用で日本において大きな導入量が期待される太陽光発電と風力発電は、いずれも電力の形でエネルギーを得る。その発電の特性は、日射や風速の変化に伴い、発電出力が大きく変動することである。

太陽光発電と風力発電は、どちらも発電出力が天候によって大きく変動するが、エネルギー源が異なることから、変動特性は異なる。太陽光発電は、天候に加えて、時間帯や季節で明らかに変動特性が変化する。一方、風力は時間帯で規則的に変わることは少ないが、季節ごとの天候の変化と地形の影響により風の吹き方が複雑に変化し、発電出力は不規則に大きく変動する。

これらの大きな発電出力の変動は、再生可能エネルギーによる発電を利用する際に、電力システムにおいて不可欠な需給バランスの調整を困難にすることから、その対策は再生可能エネルギー導入の究極かつ最大の課題となる。電力システムでは電力の需要と供給が毎時、毎分、毎秒バランスしていることが求められる。需要バランスが崩れると、供給が必要より多ければ周波数(日本の場合50Hz、あるいは60Hz)が増加し、少なければ減少する。これは自転車で坂を上る時に、力を入れてこくと車輪の回転数が上がり、力を抜けばその逆が起こることに似ている。周波数が本来の値である50Hzや60Hzから外れてくると、発電機やモーターが安定した運転を続けることができず、大きな停電を引き起こす原因となる。

電力システムでは、このような現象を抑え安定した運転を続けるために、火力発電、水力発電を中心に、ガバナーフリー、負荷周波数制御、経済負荷配分などの複数の発電量の調整機能が備わっている。しかし、再生可能エネルギーの導入量が増加すると、それによる発電量の変動の増加と、同時に起こる既存の発電所の運転量の低下による調整力の減少という2つの理由により、電力システムの需要調整が困難になる。さらに再生可能エネルギーの導入量が増加すると、より長い周期の需給バランスも問題になる。昼と夜、季節といった変動、さらには年によるムラ(水力の場合の渇水年と豊水年など)による需給バランスの問題が顕在化してゆく。

再生可能エネルギーによる発電でも、変動が小さいものもある。地熱発電は年中一定の出力がえられる。バイオマス発電は、燃料とする廃棄物を貯蔵することができ、一定出力を含め発電量を調節することができる。また、潮汐発電、潮流発電、海洋温度差発電などは変動がゆっくりであり、比較的安定した発電出力が期待される。このように、再生可能エネルギーは「変動が大きいもの」だけでなく、「あまり変動しないもの」があり、変動する場合でも変動パターンは相互に異なる。

## 2.2 変動対策と「抑制」の重要性

太陽光発電や風力発電による発電量の変動が大きいことは、電力システムの安定な運用を行うためにどのような対策を必要とするか考えてみよう。

発電量が変動する分、再生可能エネルギーにより一定の発電量を確保するためには、発電設備としては必要とする電力以上の容量の発電設備を設置することが必要になる。その結果、日射が強いあるいは風が強い時間帯は、発電量が消費電力を上回することは分かりやすい課題である。しかし、それ以前の段階で、先に述べた再生可能エネルギーの発電量の変動の増加と、調整側の既存の発電所の運転量の低下により電力システム全体の需給調整力が不足するが、発電量の変動する太陽光発電や風力発電の大量導入時の最初の課題となる。この問題を緩和するために、従来の電力システムで需給調整のための負荷周波数制御を担っている既存あるいは今後建設される水力、火力などの発電所の発電量の調整力を引き上げることや、揚水発電の増設、さらには揚水時にその入力を調整可能とする可変速方式を採用することなどがまず考えられる。既に風力の大量導入が進み需給調整力の不足に「現実に」悩んでいる欧州では、Flexible Generation<sup>(2)</sup>などのキーワードのもとで発電所の仕様、設計に関する具体的な検討が行われている。

最終的に電気が余る場合の対応としては、既設の揚水発電所の貯水量には限りがあり、バッテリーはまだ高価なため、余った電気を経済的に貯蔵することは現状困難で、余剰分は「うまく捨てる（抑制する）」ことが経済的で、必要となる。実際、梅雨期や台風の到来などによる流量の大幅な増加の際にはダムに貯水することができず、我が国の水力発電では年間発電量の数%に相当する水が利用できず放水される。エネルギーを捨てるのは「もったいない」という声も聞くが、水力の場合にダムからあふれる水と同様、太陽光発電や風力発電の電気が余ることはそれ自体が危険である。

再生可能エネルギーによる変動する発電の割合が

大きくなった電力システムの運用は、常に気象の変動に起因する発電量の変動に対応すべく、発電量の予測とそれに基づく運用計画の策定、そして新しい予測に基づく修正を繰り返すことが必要である。そして、河川の場合、洪水時にはダムを守るために計画的な放水が不可欠であることは明らかであるように、それでも変動する再生可能エネルギーを100%利用することは不可能である。変動する電源をうまく使いこなすためには、先に述べた発電を抑制するという選択が重要となる。（あるものは何でも使えると思うのは、人間の傲慢であり、私たちは自然に向ってより素直な態度が必要ということではないか。）

また、抑制することにより、発電出力の上振れの一部がなくなり、発電量の変動を効果的に低減することができ、最大出力の一部が利用できないとしても、抑制により大半のエネルギーを安定に利用できるという効果がある。今後、抑制される電力量を最小にして、電力システムに与える変動影響を最小化するような抑制方式の研究、技術開発が重要と考えられる。

なお、太陽光発電や風力発電で、「捨てる」ということは、どのように実現するのか。太陽光発電の場合は、太陽電池から電気を取り出すインバータの制御で電気出力を絞ったり停止することができる。風力発電の場合は、羽の角度を変えて風の一部を逃がすことで出力を抑制する。

## 2.3 ならし効果と発電予測技術

需給変動を避けるために再生可能エネルギーの発電量の抑制を最小限にするためには、数時間から数日先までの発電量を予測することが重要となる。将来日本において大きな供給量を期待できる太陽光発電や風力発電は、日射や風という変動する天気により発電出力が変動する。したがって、従来の火力、水力といった発電方式が出力を調整し、電力システムの需給バランスの調整に貢献出来るのに対し、太陽光発電と風力発電では、前節で述べた抑制以外は発電量を調整することができない。しかし、天気の変化とその結果である発電量を高い精度で予測できれば、電力システムにおける運用計画をより効果的に策定し、再生可能エネルギーによる発電をより多く、安定に利用することができる。発電量を天気予報と組み合わせて予測する発電予測技術および発電予測を取り入れた電力システムの運用技術は、太陽光発電や風力発電の共通の重要な技術課題である。気象、発電の予測データや実績データを蓄積・分析することで、天気の数値予報<sup>(3)</sup>をより再生可能エネルギーの発電予測に適したものに改善しつつ、

様々な予測範囲での高精度の発電予測が可能になる。再生可能エネルギーの発電予測については、現在電気学会の調査専門委員会<sup>(4)</sup>での調査が行われている。

発電予測に必要な精度は、電力システムが備えている火力・水力発電所を中心にした需給バランスの調整力と、太陽光発電や風力発電の導入量の増加による新たな変動の増加、火力・水力発電の運転量などの関係で決まる。個別のウィンドファームや太陽光発電システムについて、発電予測の精度を上げることは難しい。しかし、電力システム全体の需給バランスが問題になる場合、太陽光発電ならば家1軒の発電量の予測ではなく電力システムにおいて需要調整を行う単位（例えば各電力システム全体）の合計の発電量を予測することが本質的である。このため、先に述べた「ならし効果」を最大限活用して変動の大きさと速さが相対的に小さくなった発電量を予測することで、予測精度を上げることができる。同様に、需要調整問題に関しては、風力発電の場合は、風車1基ごと、またはウィンドファーム1カ所ごとに発電量を予測する必要はなく、各電力会社システム全体での風力発電量の予測が必要である。

発電予測技術の開発は、発電などの実績のデータを蓄積して分析することから始まる。水力発電は河川の特性を把握するために、数十年にわたり流量データを蓄積している。太陽光発電や風力発電の場合は水力の洪水設計ほどの安全性は求められないので、データ収集・蓄積の期間は水力の場合より短くてもよいと考えられるが、2010年の猛暑のように電力システムの運用に影響する異常な現象の分析も必要であり、多数の観測点において最低10年のデータの蓄積が必要と考えられる。現在、電力会社で300余地点での日射量、太陽光発電量などのデータ蓄積と解析が進められており、これらに基づき2011～2013年度の予定で新たに資源エネルギー庁による太陽光発電の発電予測技術開発が開始された。

再生可能エネルギーの普及が拡大すれば、今後は気象予測（予報）の役割も変わると考えられる。電力システムの安定運用に貢献できる気象予測が求められるようになり、今後の気象予測技術の発展が期待される。

### 3. 再生可能エネルギーの最大導入とベストミックス

#### 3.1 資源量

再生可能エネルギーの導入を考えるに当たっては、賦存量、導入ポテンシャル、導入可能量を順に

考える必要がある。賦存量は、設置可能面積、平均風速、河川流入量などから理論的に算出されるエネルギー量である。導入ポテンシャルは、標高や土地の傾斜などの自然要因、自然公園、保安林などの法規制による開発不可能分を除いて算出したエネルギー量、そして導入可能量は、経済性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である。これらの調査の例としては、環境省による平成22年度再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査を始めとして、経産省、農水省などによる諸調査がある。

これらの調査をもとにした最近の集計によれば、太陽光発電は戸建て住宅、集合住宅の屋根・屋上、公共施設や工場などの大きな屋根への設置で9100万kW、930億kWh、風力は国有林内、自然公園（第2・3種特別地域及び普通地域）を含め、2億8000万kW、5100億kWhで、このうち、国有林外・自然公園外などの比較的条件が良いと考えられる場所は15000万kW、2700億kWhの導入ポテンシャルを持つ。これらの外数として、太陽光発電は工場などの中規模の屋根、工場やマンションなどの壁面、耕作放棄地などがあり、風力には洋上風力（着底式、浮体式）などがある。これらの数字から、太陽光発電と風力発電は、我が国の総発電量に匹敵する発電ポテンシャルを持つと言える。これに対し、地熱発電の導入ポテンシャルは430万kW、250億kWh（特別保護地区、特別地域を除く、150以上の熱水資源）中小水力の導入ポテンシャルは1400万kW～2000万kW、1000億kWh弱、林地残材などによるバイオマス発電は数十万kW、数十億kWhとされるが、経済性の厳しい地点が多く、導入可能量は我が国の総発電量に対し1%オーダーとなる。

（賦存量、導入ポテンシャルの詳細は、コスト等検証委員会報告書<sup>(5)</sup>など参照）

#### 3.2 導入可能量

再生可能エネルギーの導入・普及は、立地制約、運用性、経済性、安定性などに最終的には外部性を含め、総合的な経済性に基づき導入可能量が明らかとなる。日本では「再生可能エネルギー全量固定価格買い取り制度（FIT）に関する特別措置法」が2011年9月に成立し、現在、買い取りの価格と期間に関する検討が進められている。現状、再生可能エネルギーで資源量が豊富で、コストで最も優位にあると考えられる風力発電でも、20円/kWh前後の買い取り価格が議論されており、燃料費と設備費を合わせて10円程度の石炭火力発電や天然ガス複合発電<sup>(5)</sup>より、経済性でははるかに劣る状況である。

しかし、発電設備の寿命は数十年と長い。将来の

燃料価格の高騰や二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)の排出の費用などのもとでは、再生可能エネルギー発電の方が火力発電より経済性が優れる場合もあり得る。今後、世界のエネルギー消費量の増加による化石燃料の枯渇や価格の高騰、再生可能エネルギーの技術開発や設置や建設の環境整備、制度整備による経済性の向上などを見据え、国産のエネルギーであり再生可能エネルギーの導入・普及は、着実に進めることが必要と考えられる。

ここでは、再生可能エネルギー利用拡大の期待がかかる太陽光発電と風力発電の導入可能量について、技術開発、政策支援などにより経済性の制約が緩和すると想定し、電力システムの需給調整の観点から、どこまで導入できるかを考えてみよう。日本の電力需要は季節によって異なる。1日の電力需要のピークは、需要がピークとなる夏季は1億6000万kW程度だが、春・秋の中間期には1億2000万kW程度である。したがって、太陽光発電や風力発電から1億2000万kW以上の発電があると、需給バランス上は使い切れなくなる。

1億2000万kWのうち、原子力発電、中小水力を含む流れ込み式水力、地熱発電などのベース電源を5000万kW、需給バランスの調整に必要な火力や水力を2000万kWとすると、残りは約5000万kWとなる。先に述べた「抑制」が行われない場合は、太陽光発電や風力発電など発電量が大きく変動する再生可能エネルギー発電の導入量は、5000万kW程度となる。しかし、太陽光発電の設置の方位や傾斜角の条件などから、合計発電量の最大値は設備容量の合計より少ない。また、全国が快晴で風が強い日はめったにないことから、先に述べた「抑制」は、実際の抑制量はわずかの量にとどめて電力システムの安定な運用を確保できると考えられる。このように考えると太陽光発電と風力発電の合計で1億kW、水力発電と合わせて現状の発電電力量の20%程度は、系統電源の最大活用、需要の能動化、再生可能エネルギー発電の発電抑制を組み合わせることにより、導入可能ではないか。

再生可能エネルギーの最大導入を目指して、その発電量の変動を克服するために、二次電池やその他のエネルギー貯蔵技術が注目されており、経済性が優れた技術が開発できれば、先に述べた20%の壁を乗り越えることができる。しかし、再生可能エネルギーを使いこなすためには、再生可能エネルギーの利用において避けられない発電量の変動パターンが異なるものを導入することも重要である。そのためには、ある場所に同種の再生可能エネルギー発電を集中して導入することを避ける必要がある。そして、もう一つの視点は、これまで活用してこなかつ

た需要側を発電の変動に合わせるように調整する新たな技術である「需要の能動化<sup>(6)</sup>」を導入してゆることが重要と考えられる。需要の能動化は、いわゆるスマートグリッドのコアの技術と考えられる。

前節でみた資源賦存量、導入ポテンシャルなどの状況によれば、太陽光発電と風力発電については、全国レベルでの導入戦略による導入を図る一方、中小水力、地熱、バイオマス発電は、地球特性に即した個別の導入促進が重要と考えられる。

また、資源制約や環境制約といった避けられない事態に備え、潮汐、波力、潮力などの海洋エネルギー、洋上浮体式風力発電、宇宙太陽光発電など、現時点では実現性が未知数な新たな再生可能エネルギー技術を含め、将来のベストミックスのためのエネルギー供給技術を準備しておくことも必要である。

#### 4. 再生可能エネルギーの導入・普及に向けて

火力発電や原子力発電は、電気を作る工場と言える。原料である燃料を投入することで、高い密度で、必要な量の安定的な出力を得ることができる。他方、わが国で水力発電を100年以上開発し続けても、総発電電力量に占める割合が8%にとどまる理由は、エネルギー密度が低く、経済的に利用できる量に限りがあるためである。風力発電機は1機当たり数千kW(～0.1kW/m<sup>2</sup>、利用率20～40%)、太陽光発電は、家庭向け屋根置き用は数kW(0.1～0.2kW/m<sup>2</sup>、利用率は～12%)であり、一定規模の発電には、それなりに広い土地が必要になる。土地利用の観点から、日射や風速が十分あっても、発電に利用できない場合も少なくない。このため、再生可能エネルギーの導入・普及にあたっては、他の土地利用との間に競合が起こる。太陽光発電や燃料作物利用のバイオマス発電は食料用の耕作地と、地熱発電は温泉利用と競合する。なお、風力は、広い土地に分散的に設置されるが、牧畜や畑作と共存できる余地がある。

このような事情から、再生可能エネルギーを含めたエネルギー需給のベストミックスは、国や地域によって異なるものとなる。その意味では、再生可能エネルギーは、その土地の特性とニーズを活かして生産する点で、農業によく似ている。このため、再生可能エネルギーにはどの地域にも共通に適用できる一般論はなく、その地域で利用できる再生可能エネルギーのポートフォリオは地域レベルで考える必要がある。

2030年やさらなる将来に向けて、再生可能エネルギー導入とそれに必要なインフラは「最大限」の取

り組みを行う必要があり、それだけの価値があると考える。しかし「最大限」の意味は、経済性、電力システムの安定性を含め、エネルギー需給のそれぞれの時点のベストミックスとして十分議論し、合意をとったものとして進める必要があるということである。再生可能エネルギー発電の導入初期は、電力システムへの影響は限定的である。しかし、対策の準備が遅れれば、問題が顕在化した段階で、再生可能エネルギーの導入は止まってしまう。導入と並行して発電量の変動データを収集・蓄積し、分析し、また発電量の抑制、発電量予測、需要の能動化などの技術開発、インフラ整備、電力システム運用の改善など準備しておく必要がある。数十年にわたる河川の流量データの蓄積・利用が、日本における水力発電の開発の基礎となり、またかつての「水主火従」時代の柔軟な電力システムの運用を実現できていたことは、これからの再生可能エネルギー導入に当たり、大きな参考になると考えられる。

最後に、再生可能エネルギーというと「地産地消」とともに語られることが多い。しかし再生可能エネルギーを利用する多くの場合が発電であり、電気は送配電線を通してわずかの損失で瞬時に送ることができ、これにより太陽光発電や風力発電では不可避の発電量の変動を先に述べた「ならし効果」により効果的、対策費無しで抑えることができる。逆に地産地消しようとする、専用の発電設備やエネルギー貯蔵設備が必要となり、必要なコストは大幅に増加する。また、風の強い場所には需要がないため、風力発電を利用するためには需要地まで送電するという事例に示されるように、何等か、時にはかなり長距離の送電をする必要がある。これらの事情

から、再生可能エネルギーによる電力は地産地消すべきものではない。また、電気エネルギーは送電線や配電線により瞬時に運んでそれぞれの場所で利用可能であるという特性を利用することで、より広い範囲で、より多くの選択肢を組み合わせる「エネルギーシステムインテグレーション」の考え方をより徹底し、エネルギー需給の最適化を図ることができる。天然ガスやバイオマスの熱併給発電が先行して導入されたヨーロッパでは、一時マイクログリッドという表現で自立的な方向を模索した時代もあったが、内陸、沿岸、洋上に大量の風力発電を導入している現在は、そのような考え方は皆無と言える。ただし、現実には、送電線や配電線に制約があれば、地産地消が必要となる場合もある。また、遠くまで運ぶことが難しい熱の場合は、地産地消はより重要となる。エネルギーの特性、地域のエネルギー資源、エネルギー需給状況から、持続可能なエネルギー需給を実現することが重要であろう。

#### 《参考文献》

- (1) 平成21年度 <http://www.env.go.jp/earth/report/h22-02/index.html>  
平成22年度 <http://www.env.go.jp/earth/report/h23-03/>
- (2) Eurelectiric ホームページ : <http://eurelectiric.org/RESAP/Genetation.asp>
- (3) 気象庁ホームページ : <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/whitep/1-3-1.html>
- (4) 電気学会 再生可能エネルギー出力予測調査委員会 : <http://www.ieej-rfc.iis.u-tokyo.ac.jp/>
- (5) コスト等検証委員会報告書 <http://www.npu.go.jp/policy/policy09/archive02.html>
- (6) 荻本和彦、岩船由美子、片岡和人、池上貴志、八木田克英 : 電力需給調整力向上に向けた集中・分散エネルギーマネジメントの協調モデル、電気学会B部門大会, 8-16 (2011)