



日本における変動性再生可能エネルギー（VRE） 導入拡大にあたっての課題

～洋上風力発電と系統制約問題を中心に～

株式会社H&Sエナジー・コンサルタンツ パートナー

石丸 美奈

目次

- 拡大を続ける世界の太陽光・風力発電
- VRE発電のコスト
- 日本の現状

- 洋上風力発電と「セントラル方式」
- 系統制約問題
- おわりに

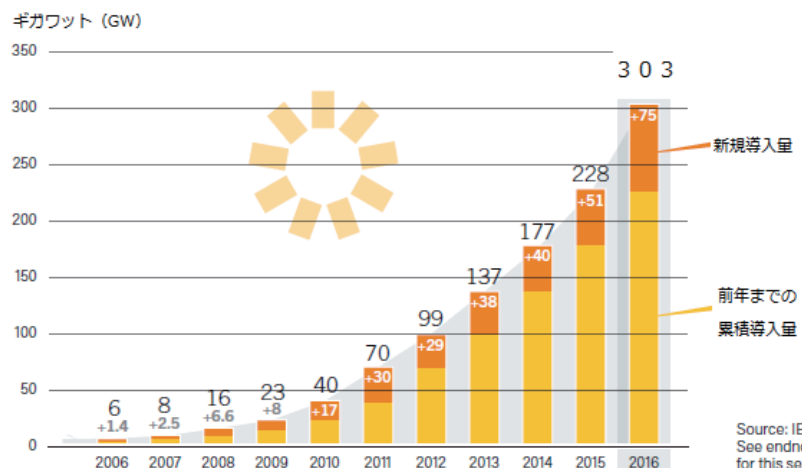
■ 拡大を続ける世界の太陽光・風力発電

再生可能エネルギー（RE）の普及促進を目指す国際的な政策ネットワークであるREN21が本年6月9日に公開した「自然エネルギー世界白書2017年（Renewables 2017 Global Status Report）」によると、2016年に世界で新設された発電設備容量のおよそ62%がREとなった¹。RE発電設備の新規導入量は161GW（1GW=100万kW）で、累積の容量は2015年末から約9%増加し、2,017GWとなっている。このうち最も大きな伸びを見せたのは太陽光発電で、新規導入量の約47%（75GW。累積導入量は303GW）を占め、続く風力発電の34%（55GW。累積導入量は487GW）と合わせて、気象条件により発電量が変化する変動性のRE電

源（Variable Renewable Energy、VRE）²が8割を超えた。

設備容量が増加を続ける一方で、2016年のRE関連への投資総額は前年比23%減の約2,420億米ドル（US\$1=114円、27兆5,880億円）と落ち込んだ。各国での政策的な要

世界の太陽光発電設備新規導入量と累積導入量の推移（2006～2016年）



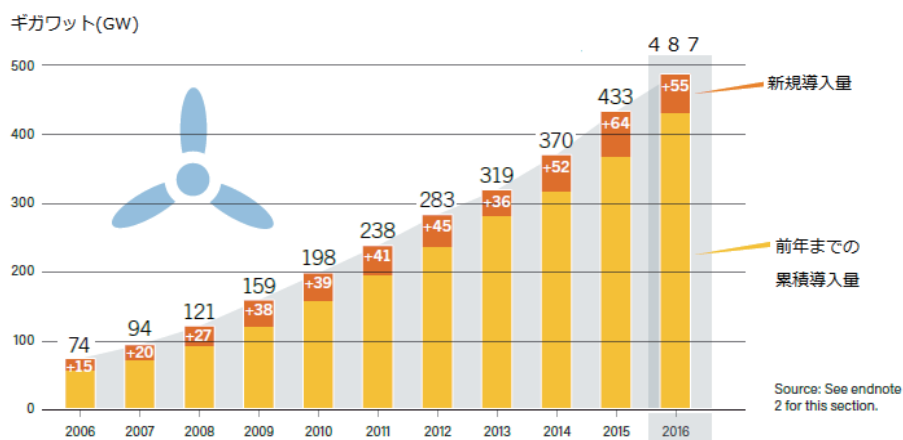
（出所）REN21「自然エネルギー世界白書2017年（Renewables 2017 Global Status Report）」2017年6月9日に筆者加筆

1 新規の総導入量260.43GWのうち、原子力と化石燃料による発電設備容量が99.3GW、REがおよそ161.1GWとの推定に基づく。

2 風量や日射量の変化により発電量が変動する電源である太陽光と風力を指す。

因³もあるが、とりわけVRE発電のコストが技術革新と大量導入により低下したことが大きい。2,420億米ドルの内訳を見ても、太陽光へ1,137億米ドル(約47%)、風力へ1,125億米ドル(約46.5%)と、世界の資金は圧倒的に太陽光発電と風力発電へ向かっていることが分かる。

世界の風力発電設備新規導入量と累積導入量の推移 (2006年～2016年)



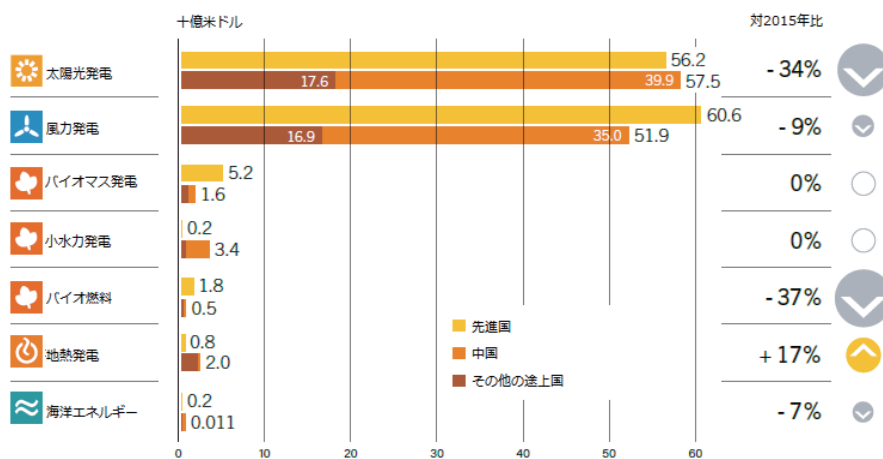
(出所) REN21「自然エネルギー世界白書2017年 (Renewables 2017 Global Status Report)」2017年6月9日に筆者加筆

■VRE発電のコスト

世界の太陽光発電による電力の売電価格は米ドルベース8～10セント/kWh(約9～11円)程度で、欧州ではすでに火力発電のコストを下回っている。ちなみに、丸紅がアラブ首長国連邦(UAE)で手掛ける大規模太陽光発電事業⁴は落札価格が米ドルベースで2.42セント/kWhと3円を切る水準にまでなった。また、風力発電のコストも世界平均で8.8円/kWh⁵まで低下している。

とりわけ2016年は欧州の洋上風力発電による電力価格が劇的に下落した記録的な年となり、前年までは10ユーロセント(€1=132円、

世界のRE電源別投資額 (2016年)



(出所) REN21「自然エネルギー世界白書2017年 (Renewables 2017 Global Status Report)」2017年6月9日に筆者加筆

13.2円) を超えていたkWhあたりのコストが、2016年には4.99ユーロセント(約6.6円)にまで低下した⁶。2017年に入ると4月のドイツでの入札ではプレミアム(補助金)なしの市場

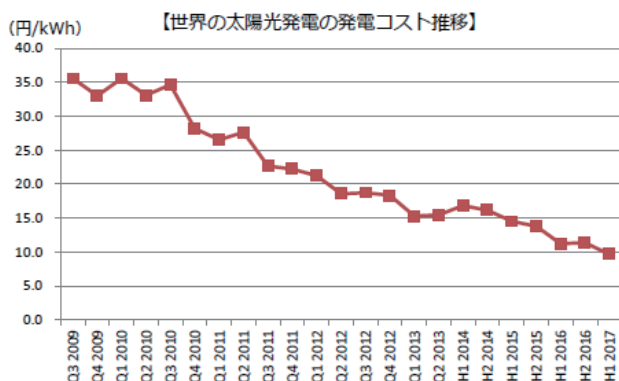
3 特に日本や中国、その他の新興国での電力系統への接続制限やRE導入政策の条件が厳しいものに変更されたことなどによる。

4 このスワイハン・プロジェクトの設備容量は1.18GWで、7.9平方キロメートルの敷地に太陽光パネル約300万枚を敷きつめる。

5 経済産業省・資源エネルギー庁「エネルギー白書2017」2017年6月2日

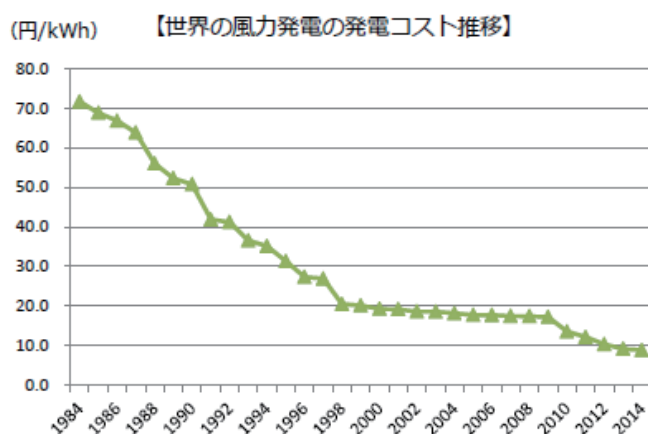
6 デンマークKriegers Flak、出力600MW、事業者Vattenfall(独)、2016年11月。

世界の太陽光発電の発電コスト推移
(US\$ 1 = 113円で換算)



(出所) 経済産業省・資源エネルギー庁、省エネルギー・新エネルギー部「再生可能エネルギーの大量導入時代における政策課題」2017年5月25日。データソースはBNEF

世界の風力発電の発電コスト推移
(US\$ 1 = 113円で換算)



(出所) 経済産業省・資源エネルギー庁、省エネルギー・新エネルギー部「再生可能エネルギーの大量導入時代における政策課題」2017年5月25日。データソースはBNEF

価格で落札するケース⁷が出ており、9月に発表された英国の第2回目のCFD制度⁸下の入札結果でも、2015年2月の第1回目は平均で117.14ポンド/MWh (1ポンド = 150円、約17.6円/kWh)であった価格が、今回の最安値の案件では57.5ポンド/MWh (約8.6円/kWh)、平均でも63.25ポンド/MWh (約9.5円/kWh)にまで低下した⁹。洋上風力での発電コスト低下は穏やかに進み、2020年までにはkWhあたり10ユーロセント(13.2円)になるであろうというのが大方の予測であったため、これほどの大幅な下落は世界中で驚きを持って受け取られている。

このような新展開を織り込んだ将来予測¹⁰によると、世界の新規発電所への投資総額は2040年までに10兆2,000億米ドル(1,152兆6,000億円)に達するが、うち72%をVRE発電が占め、その結果、世界のVRE発電の設備容量は現在の12%から2040年までに48%へ、また発電量は同5%から34%にまで拡大するとされている。また、太陽光による発電コストは2040年までに66%、陸上風力は47%、そして洋上風力は76%も下落すると見られている(すべてLCOEベース¹¹)。

7 ドイツでは再生可能エネルギー法 (EEG) が度々改正され、固定価格買取制度 (FIT) から、電力市場の価格に連動して価格が決まるFeed-in-Premium (FIP) 制度への移行が進んでいる。事業者は市場価格と固定のプレミアム価格を受け取るが、2017年1月からは太陽光発電、陸上風力発電、洋上風力発電、およびバイオマス発電のプレミアム水準も入札により決定されている。

8 差額決済契約 (Contract for Difference, CFD) は従来のRE支援制度 (Renewables Obligation, RO) に代わるもので、入札の結果決まる基準価格 (ストライクプライス) と電力市場での平均卸価格による指標価格 (レファレンスプライス) との差額を補助として15年間受け取れる。ドイツのFIP制度と同様に、コスト競争力のあるRE電力の導入を促進することにより、技術の進歩と国民負担の軽減を同時にめざす制度。

9 原則として、英国では陸上の電力システムへの接続費用までが発電事業者持ちとなるのに対して、ドイツ、オランダ、デンマークなどでは洋上の変電所までの送電線の費用が発電事業者負担となるため、後者では落札価格に加えて2円/kWh程度の接続費用が加わる。

10 Bloomberg New Energy Finance (BNEF) “New Energy Outlook2017”, 15 Jun. 2017

11 均等化発電原価 (Levelized Cost of Electricity, LCOE) は建設費、運転維持費、燃料費など発電に必要なコストと利潤などを合計して、運転期間中の想定発電量をもとに算出する標準的な指標。

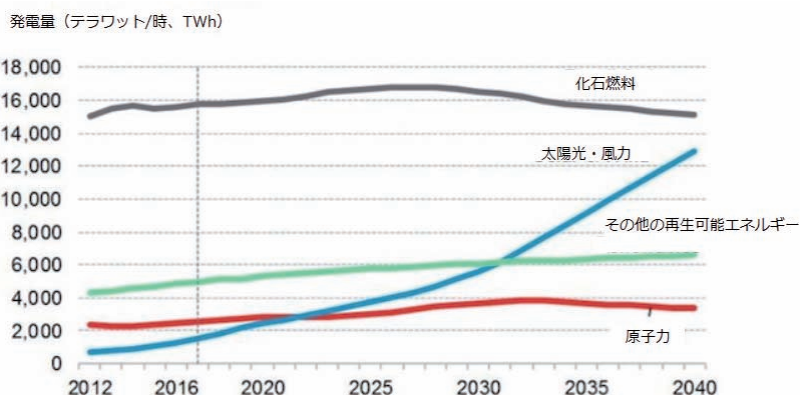
■日本の現状

日本は2016年末現在、累積でのRE発電設備容量が世界第4位（水力を除く）となっているが、トップ6か国（中国、米国、ドイツ、日本、インド、イタリア）の電源の内訳を比較してみると、圧倒的な太陽光偏重で風力の割合が極めて低い。

太陽光発電設備の累積導入量は2016年末で中国（78GW、IEA, “Snapshot of Global Photovoltaic Markets 2016” 2017年）に続く世界2位（42.8GW、同）で世界の約14%を占めるが、非住宅用の資本費（導入費）はkWあたり約30万円で欧州のおよそ2倍¹²に上る。2016年度のメガソーラーの固定価格買取制度（FIT）による買取価格も24円/kWh（税別）¹³で、海外売電価格の倍を超える水準だ。

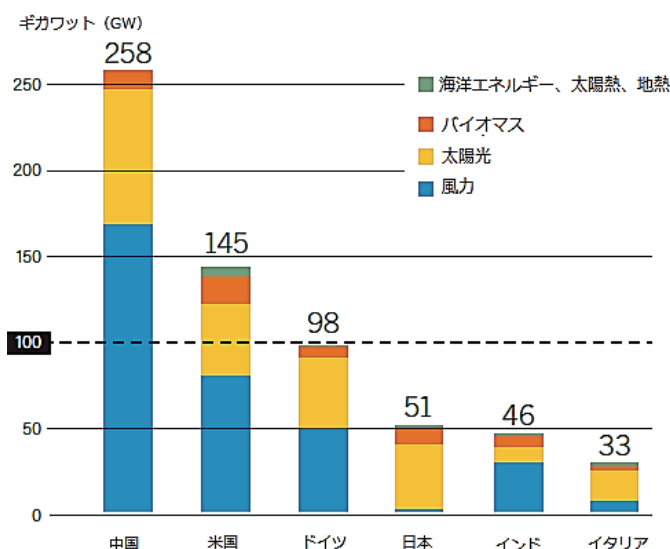
一方、低迷の感が強い風力発電設備の導入容量は2016年末の累積で3,234MW（1MW=1,000kW）となっており¹⁴、容量は世界の0.7%にも満たない¹⁵。資本費はkWあたり約28.2万円で、世界平均の1.5倍程度、発電コストは13.9円/kWhで8.8円の世界平均のおよそ1.6倍になっている¹⁶。なお2016年度の日本での陸上風力の買取価格

世界の発電量と電源構成の推移の予測



(出所) Bloomberg New Energy Finance (BNEF) “New Energy Outlook 2017” 15 Jun. 2017に筆者加筆

トップ6か国の再生可能エネルギー発電施設容量の内訳 (2016年末現在)



(出所) REN21 「自然エネルギー世界白書2017年 (Renewables 2017 Global Status Report)」 2017年6月9日に筆者加筆

は22円/kWh¹⁷だが、これは世界平均の発電コストの2.5倍の水準で、洋上風力（20kW以上）

12 経済産業省・資源エネルギー庁「エネルギー白書2017」2017年6月2日
 13 出力10kW以上、20年間。なお、出力2,000kW以上のメガソーラーは2017年度より入札制に移行しており、上限価格を21円（税別）とする第1回が10月27日～11月10日に実施された（募集容量500MW、買取期間20年間）。2017～19年度の間合計3回の入札が予定されており総募集容量は1,500MW。
 14 GWEC “Global Wind Report Annual Market Update 2016” Mar. 2017
 15 日本の洋上風力発電の累積導入容量は59.6MW（5万9,600kW）で世界の累積容量（14,384MW）の約0.4%（2016年）、前掲書。
 16 経済産業省・資源エネルギー庁「エネルギー白書2017」2017年6月2日
 17 陸上風力20kW以上、20年間。2017年度は新設の場合10月から21円となり、2018年度は20円、2019年度は19円に低下することが決まっている（いずれも税別）。

の買取価格に至っては36円/kWh¹⁸で4倍となっている。

2017年4月のFIT法改正では、とりわけ太陽光発電で問題となっている、高い買取価格で認定を受けたまま長期間未稼働な大量の案件について、認定から一定期間を過ぎた案件を排除するルールが導入された。また、買取価格自体の引き下げ、今後の価格低減の目標を示す複数年度の価格設定¹⁹も行われた。さらに出力2,000kW以上のメガソーラーについては入札制度を導入し事業者間の競争を促すなど、コスト低減に向けての取り組みが続いている。しかし、ポテンシャルを生かせていない風力発電については、開発の促進が重要となる。

■洋上風力発電と「セントラル方式」

本年5月から7月にかけて経済産業省により5回にわたり開催された「再生可能エネルギーの大量導入時代における政策課題についての研究会」では、REを推進する上での今後の日本の課題と方向性が討議されたが、とりわけ導入の遅れが顕著な風力発電拡大の可能性の観点から、欧州の洋上風力発電の状況に注目が集まった。

近年、欧州で洋上風力発電コスト低下が加速した主たる要因のひとつに「セントラル方式」と呼ばれるオークションの導入による競争の激化がある。この方式では、行政が長期的で大規模な洋上風力導入目標とスケジュール²⁰を明示した上で、地元コミュニティーや利

害関係者との調整などを行って開発サイトを定め（ゾーニング）、環境アセスメントを含む必要となる許認可、電力系統接続などの手続きを済ませる。洋上風力発電でとりわけ障害となる立地や制度上の課題をクリアにし、大規模な開発事業のリスクのほとんどを行政側が取った上でプロジェクトを提供して、公平な競争入札²¹で事業者を決定する。そのため民間事業者の参入と民間資金の流入が促進され、技術面での開発や工法の効率化、発電所の運営・管理の効率化などが目覚ましく進んだ。

洋上風力産業は（従来の内燃式の）自動車産業に匹敵する裾野が広いサプライチェーンの構築を必要とし、地域経済や雇用への波及効果が大きい。風況のよい海域を有する欧州各国は、CO₂削減やエネルギー自給と安全保障の観点に加えて、将来の成長産業のひとつとして20年以上にわたりその育成を支援してきた。こうした試行錯誤による技術、経験、ノウハウの蓄積が新方式²²の導入により一気に結実したと言える。

日本は、欧米や中国などのように陸上で風力発電に向けた平地が少なく、適地があっても人口密度が高い。山岳地域には風況のよい場所もあるが、設置や大規模開発が難しい。その上、地震や台風などへの備えも必須で建設コストがかさむ。一方、洋上風力に関しては、領海を含む排他的経済水域の広さが世界第6位の海洋大国でポテンシャルは大きいも

18 この価格は19年度まで変わらない。

19 中長期的価格目標の設定には、太陽光以外のリードタイムの長い風力、地熱などのREの事業リスクを軽減する狙いもある。

20 オランダの目標は2015～19年の5年間に毎年700MW（350MW×2サイト）の合計3.5GW、10サイトの入札実施。

21 落札価格と市場価格の差は政府が一定期間（例えばオランダは15年間、デンマークは確定出力の50,000時間分など）補填する。

22 当初はデンマークで開発された手法だが、REの導入で遅れ気味であったオランダで2010年以降、産官学の連携の下に検討が進んだ。

の、欧州のような遠浅の海域が少ないため、風況がよく、海底に風車の基礎を設置する着床式に適したサイトに限られる。水深が50m程度を超える海域で発電施設を建設するためには浮体式の基礎を海底にアンカーで固定し、その上に巨大風車を設置しなければならない。また洋上変電所も浮体式となる。開発途上の技術で世界初の浮体式洋上風力発電所²³は英国のスコットランド沖合で10月18日に操業を開始したばかりだ。まだ、コストは高くリスクも大きい。

こうした自然条件の違いや欧州と同様の立地や制度的な制約により、これまで開発へのインセンティブが欠けていた洋上風力だが、この分野に特有なハードルを乗り越えるために「セントラル方式」は大いに参考となろう。制度上の制約克服の一步として、遅ればせながら日本でも、2016年7月から改正港湾法が施行され、地方自治体の管理する港湾区域で洋上風力発電導入を推進する「占用公募制度」が創設された。公募で選出された事業者には、従来の原則10年を超える長期間にわたり発電所の水域占用が認められるため、事業の採算性が見込め、資金調達も容易になる。競争が促進され技術革新やコスト低減につながる効果が期待されている。

■ 系統制約問題

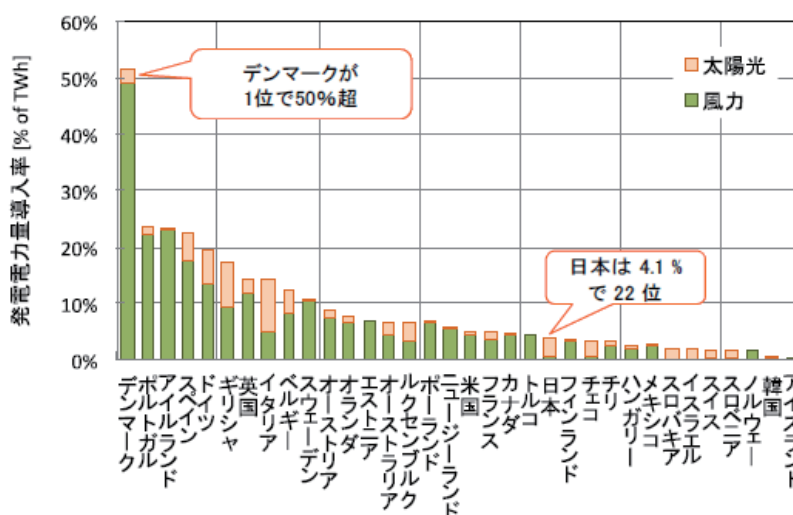
しかし、日本で今後VREの導入を加速するためには系統制約解消への取り組みが急務

となる。

発電や送電そして変電や配電のための電力設備システムの全体を電力系統と呼ぶが、この系統の中では常に電力の需要と供給がバランスしていなければならない。均衡が崩れると周波数や電圧が乱れ、発電所の発電機や需要家の機器に悪影響が及び、最悪の場合は大規模な停電も起こり得る。各地域の電力会社は基本的にはエリア（地内系統）ごとにバランス調整を行っている。電力会社間の地域間連系線に流せる電力量は限られているため、現在のところ広域での大規模な電力の融通は難しい。

天候により出力が変動するため、系統の安定等に悪影響を与える可能性が高いVREだが、日本での発電電力導入割合は4.1%（2015年）と、20%を超える欧州のRE先進各国との比較ではまだまだ小さい。それでも、系統

変動性再生可能エネルギー（VRE）発電電力量の導入比較（2015年）



出所: IEA Electricity Information 2016

(出所) 永山浩章「再生可能エネルギー急増に伴う欧州の対応と日本への教訓」
2017年6月7日

23 Hywind Scotland、出力30MW (Siemes製6MWタービン5基)、事業者Statoil (ノルウェー)

への接続制約は、2014年9月に太陽光発電の認定が集中した九州電力に端を発した「接続保留問題」以降、RE拡大の大きな阻害要因の一つとして表面化した。

通常、各電力会社はエリア内の送電線に空き容量がある限り、先着順でRE電源の新規接続を受け入れる。しかし、REのポテンシャルが大きい地域は往々にして人口密度が低く、もともとの送電線の容量が小さいため、その多くで既にRE電力を受け入れる余力がないとされている。電力会社から空きがないとされた場合、その場所では系統増強が行われるまで接続できない。また、すでに接続が認められている設備でも混雑時には出力を制御しなければならないルールが導入されているが、FIT認定された時期やエリアにより、制御に上限がある設備と、無制限・無保証の制御を求められる設備があり、公平性に欠ける。系統接続にあたっては、電力会社からの要請による工事に伴い、発電事業者に多額の費用負担が発生する場合も多い。系統アクセスに関する情報開示が極めて乏しいのが現状だ。

公開情報に基づく最近の京都大学の試算では、空き容量0とされている東北電力の14の基幹送電線における実際の利用率は20%未満、北海道電力の11基幹送電線でも最大15%程度との結果²⁴が出て大きな反響を呼んだ。同大学が提起する問題点は利用率の大小ではなく、現行の系統運用ルールが「透明性・公平性・非差別性・効率性」の観点から著しく不

理²⁵なことにある。

電力自由化先進地域である欧州各国では1990年代後半から欧州単一エネルギー市場の構築、競争と効率化の促進、エネルギー供給保障の増大を目標として、改革を推進してきた。その大きな柱の一つが公共インフラ的な性格を有する送電部門の分離と電力系統（グリッド）の公平、中立、透明性の高い運用及び広域化である²⁶。この電力システム改革は、地球温暖化防止のためのCO₂排出削減への動きが本格化し²⁷、ドイツにおけるFIT制度導入（2000年）など、各国でRE支援が拡大するのと一体で進んだ。

飛躍的に増大する数²⁸の大小様々な参加者を、透明なルールのもとで差別なく受け入れ、大量のVREを最大限受容しながらもグリッドの安定を保つため、情報通信技術（ICT）がフル活用されており、精度の高いVREの出力予測、制御の可能な水力や火力発電、揚水による電力貯蔵、連系線を通じての広域融通、需要家側の出力をコントロールするデマンドリスポンス（DR）などを駆使した柔軟な運用を可能とするシステム設計がなされている。

日本でも2020年に実施が予定されている発送電分離に向けて、欧州をはじめとする先進地域の経験から学ぶ点は多い。経済産業省の研究会では、系統制約問題に対する短期的な対応策として英国の「コネクト&マネージ（Connect & Manage）」に倣った仕組みの具体化に関しても討議が及んだ。英国では

24 京都大学大学院 経済学研究科 再生可能エネルギー経済学講座 コラム連載2017年10月2、5、19、26日 (http://www.econ.kyoto-u.ac.jp/renewable_energy/)

25 同上、安田陽「送電線に『空容量』は本当はないのか？」2017年10月2日

26 もう一つの柱は「発電と小売部門の競争を促進するための卸電力取引市場の整備」であるが本稿では扱わない。

27 1997年12月には第3回気候変動枠組条約締約国会議（地球温暖化防止京都議定書、COP3）で京都議定書が採択されている。

28 ドイツでは1995年には約800であった発電所が、2016年には小規模な太陽光発電設備も含むと150万以上に増加している。

2010年から、エリアでの系統増強に先立ち、混雑時には出力制御を行うなどの一定の条件の下で公平に連系を認めており、新たな増強は連系後の実際の発電実績を基に行われる。既存の送電インフラを最大限に活用する現実的なアプローチ²⁹で、日本でも社会的コストを抑えつつVREの導入を増やしてゆくこうした取り組みが今後ますます重要となる。

このような観点からは、広域的なレベルでの「コネクト&マネージ」といえる「間接オークション³⁰」（2018年度下期に導入）に期待がかかる。これまで地域間連系線の利用には先着優先というルールがあり、2日先から10年先までの予約が可能で、余った容量が電力のスポット（前日）市場で売買されてきた。しかし、電力を取り巻く環境が変化した結果、先着優先のルールは前もって利用の計画ができる従来型電源への優遇となり、VRE発電事業者や新規参入者は空き容量の確保が難しかった。新たな入札制度の導入により公平な競争が促進され、低コストの電源順に連系線が利用できることになるため、既存設備の利用がより効率化されると考えられる。

■おわりに

制度面や立地上の制約でリードタイムの長いRE電源の開発を促進するには、政策的な決断により明確な指針を示したうえで、公正な競争が行える事業環境を整える行政のリーダーシップが必要となる。他方、電力系統の整備にあたっては、従来通りの個別対応の積み重ねによる系統増強では非効率であり時間もコストもかかる。REによるエネルギー転換、電気自動車（EV）の普及、ICTの飛躍的発展などによりもたらされるであろうこれ

からの分散型社会において、送電インフラはどのようなものであるべきか、2020年の発電分離を前に、広くステークホルダーを巻き込んだオープンな議論が望まれる。

29 2010年8月に開始され、翌年2月から本格運用。

30 卸電力市場でのオークションの結果に基づいて連系線の使用权が与えられるため「間接」と称される。