

2. 再生可能エネルギー大量導入時の電力需給対策

太陽光発電や風力発電といった、出力変動のある再生可能エネルギーが大量に導入されたとき、電力システムに生じる課題やその対策を整理した。また、そうした状況に対し、米国の電力市場における対応状況について調査を行った。さらに、これらの対策について、評価モデルを用いて効果の定量評価を試算した。

2.1 再生可能エネルギー大量導入に伴う課題とその対策

2.1.1 再生可能エネルギーに起因する電力システム上の課題

(1) 再生可能エネルギーに起因する電力システム上の課題

現在我が国では、太陽光発電や風力発電といった再生可能エネルギーの導入拡大が進んでいる状況にあり、特に2012年7月の固定買取価格制度（FIT）の導入以降、太陽光発電を中心にその導入量は大きく伸びている。この再生可能エネルギーの導入拡大に合わせて、再生可能エネルギーの出力変動等に起因する電力システム上の諸課題が一層浮き彫りになり、早急の対応が必要となってきた。

再生可能エネルギーの導入拡大に伴って生じる電力システム上の課題を、表 2-1 に示す。いずれの課題も太陽光発電を始めとする再生可能エネルギーの FIT 制度による導入が拡大する以前より可能性が指摘されており、研究や実証試験が行われてきた。

表 2-1 再生可能エネルギーに起因する電力システム上の課題

区分		電力システム上の課題	概要
平常時	全系	需給の問題 (周波数変動を含む)	● 再生可能エネルギーの導入増加や急な出力変動により、電力システム全体の需要と供給のバランスが崩れる
		線路過負荷の課題	● 特定の送電線/配電線に多く電力潮流が流れてしまい、線路過負荷が生じる
	ローカル	電圧の課題	● 再生可能エネルギーの出力により、電圧変動が生じ、逆潮流などを招く
		高調波・フリッカ等の発生	● 非線形要素を含むPCSからの出力が、高調波・フリッカ等の電力品質上の悪影響をもたらす
事故時	全系	過渡安定度の問題	● PCS電源の増加に伴い、電力システム全体の同期特性(同期化力、慣性)が低下する恐れがある
		一斉解列の問題	● 再生可能エネルギーの不要解列により、波及的に解列が生じてしまう可能性がある
	ローカル	単独運転の問題	● 事故時において、意図していないにも関わらず、単独運転が発生する可能性がある
		短絡容量増加の問題	● 既設遮断器の定格遮断電流を超過するなど、短絡容量が増加する恐れがある

しかし、FIT の導入以降、特に社会的課題として浮き彫りになったのは、全系の需給の問題（特に太陽光発電の余剰電力）である。2014年9月には、九州電力を始めとする4つの電力会社が、当該課題からの制約により計算される接続可能量を上回る接続申込みを受けていることを理由に、10kW以上の再生可能エネルギーの接続申込みの回答を一時保留する

ことを公表した。その後、後述する再生可能エネルギーの出力制御に関するルールの整備により、現在では接続のための技術検討及び回答は再開されているものの、依然として需給の問題は解決されいない状況にある。

また、FIT 制度による導入拡大に伴い、上記の需給の問題の他に、線路過負荷等のローカルな問題が顕在化しつつある（図 2-1 エラー! 参照元が見つかりません。）。このような課題に対し、例えば東京電力は、群馬県北部で入札制度を試行的に実施するなどの対応を行ってきており、引き続き当該課題への対応を進めていく必要がある。

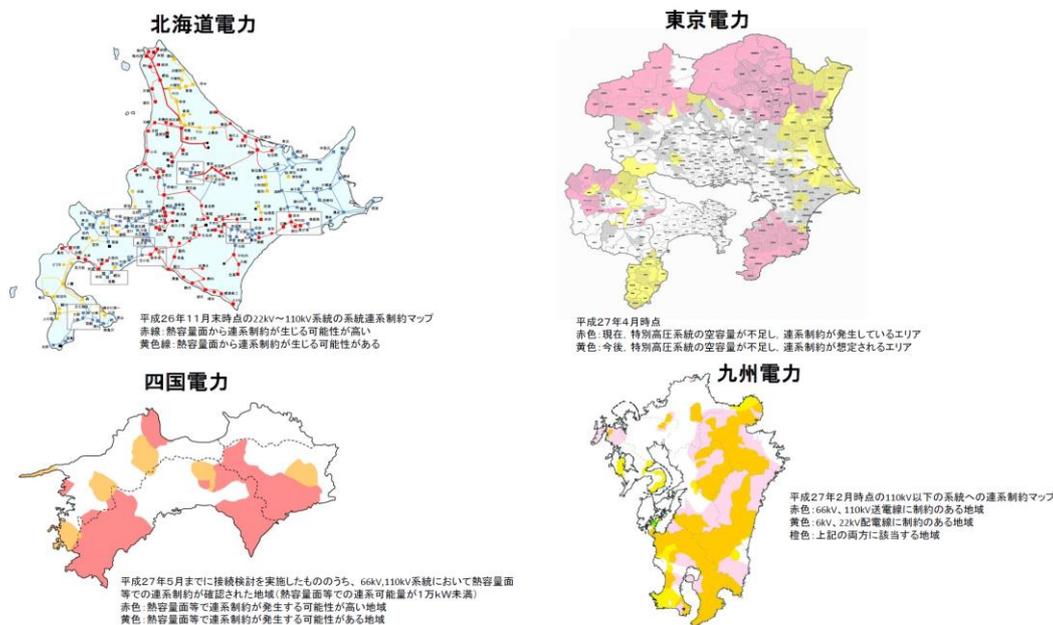


図 2-1 顕在化しているローカルな系統制約

出所) 資源エネルギー庁：「再生可能エネルギーの導入促進に向けた制度の現状と課題」
(第12回新エネルギー小委員会資料)

また、事故時の問題についても、単独運転や一斉解列については、それぞれ新型能動方式や FRT (Fault Ride Through)要件として、PCS の機能の一部として標準化されているに至っているが、新たな課題が顕在化しつつあるという点が様々な文献で指摘されている¹¹。

(2) 本調査で主に扱う電力システム上の課題

本調査では、ローカルな課題や事故時の課題が顕在化しており、再生可能エネルギーの中長期的な導入拡大の方策を検討する上ではこれらの課題を含めた包括的な検討の必要性を認識しつつも、現在もなお社会的な論点となっている需給の問題を中心に取り扱い、導入拡大に向けた方策の検討を行っている¹²。

電力の需給制御では、表 2-2 に示す 3 つの時間領域ごとに、それぞれ異なる発電機制御

¹¹ 例えば、NEDO の「再生可能エネルギー技術白書 第 2 版」などに当該課題が記載されている。

¹² 従って、本調査ではあくまで需給という一側面にスコープを置いた検討を行っているために、本報告書において示される結果が、電力システムにおける再生可能エネルギー対策の全てを十分に表現しているものではない点に留意する必要がある。

を行っており、それぞれの時間成分は「ガバナフリー領域」、「LFC 領域」、「ELD 領域」と呼ばれる。

表 2-2 電力システムの需給制御の区分

方式	対応する周期	概要
GF (ガバナフリー)	数分以内	発電機が回転数の変動を感知し、適正周波数のための回転数を維持するように自動的かつ瞬時の回転数を制御
LFC (負荷周波数制御)	数分～十数分	需給不均衡に起因する周波数変動を感知し、需給不均衡を解消するために給電システムからの自動的な発電機出力を制御
ELD (経済負荷配分制御)	十数分以上	周期の長い変動への対応は、その変動幅も大きいことから対応する発電機の経済性を考慮し負荷配分を制御

負荷変動については、一般的に、図 2-2 に示すように変動周期が大きくなるにつれて変動が大きくなるという特徴がある。再生可能エネルギーの出力変動特性については、負荷変動同様の特性ではないが、短い周期の変動量が小さく、長い周期の変動量が大いという傾向は同じである。この理由としては、短い周期の変動については、1 地点の変動が大きくても、複数地点の出力を合計すると相殺されるような「平滑化効果」より大きく働くことがあると言われている。本調査では、表 2-2 に示す時間領域のうち、LFC 領域及び ELD 領域を対象とした検討を行っている。

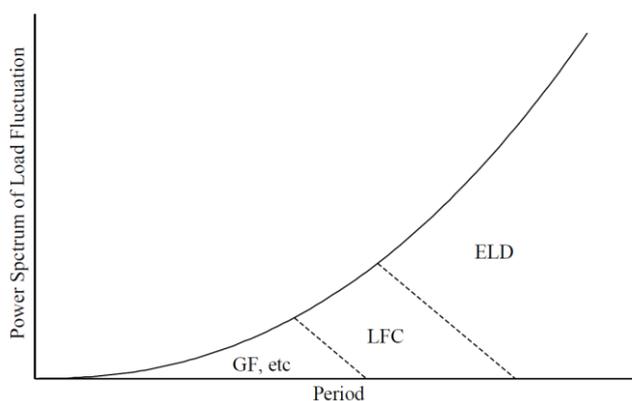


図 2-2 負荷変動の特性

また、カリフォルニアでは、将来にかけて、太陽光発電の大量普及等に伴い、電力システム内のネット需要が朝方から日中にかけて落ち込み、その後夕方から日没にかけて急増するという「ダックカーブ現象」(図 2-3 参照)の発生が懸念されている。このような急激かつ大きな変動を、「ランプ変動」と呼ぶが、急峻かつ大きな変動に対する追従性の検討も必要となってきた。

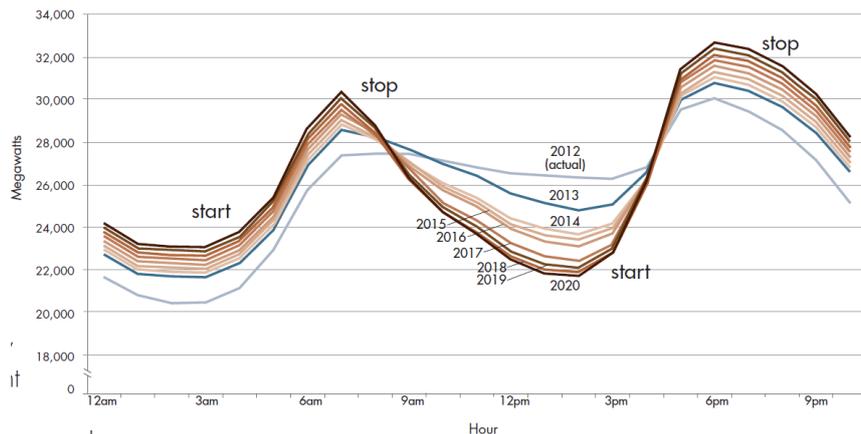


図 2-3 ランプの事例 (カリフォルニアの Duck Curve)

出所) CAISO: “What the duck curve tells us about managing a green grid”

2.1.2 再生可能エネルギーの電力需給対策オプション

前項において示される、再生可能エネルギーの電力需給上の課題に対する対策としては、以下の要素技術が考えられる (図 2-4 も参照)。本項では、これらの対策オプションそれぞれについて、その内容を概観するとともに、現在の取り組みや、オプションの統合に向けた課題等の整理を行っている。

<再生可能エネルギーの電力需給対策オプション>

- 電力システム側の取組
 - 再生可能エネルギー出力の予測技術
 - 広域運用による出力平滑化及び調整力融通
 - 従来電源の調整力の Flexibility 向上
 - 系統側エネルギー貯蔵の導入
 - 揚水発電の最大限の活用
- 再生可能エネルギーの出力制御
 - 太陽光発電の出力制御
 - 風力発電の出力制御
- 需要側の取組
 - 価格シグナルに基づくデマンドレスポンス
 - 自動制御によるデマンドレスポンス
 - 電動車両の充・放電制御活用
 - 需要家側エネルギー貯蔵 (蓄電池) の活用
 - 水素エネルギー貯蔵

なお、ここに示されるオプション以外にも、国内外では、例えばスマートグリッド/スマートコミュニティや HEMS (Home Energy Management System)/ BEMS (Building Energy Management System)、マイクログリッド、VPP (Virtual Power Plant) といった、いわゆる「システム技術」に関する検討が進められている。これらのシステム技術は、再生可能エネルギー

一への対処を始め、省エネルギー、コミュニティレベルでのエネルギー利用の高度化等、複数の目的を実現するために、様々なエネルギーソリューションを統合するシステムとなっている。しかし、本調査の検討スコープである「再生可能エネルギーの電力需給課題」という切り口で見れば、これまでに考えられてきたこれらのシステム技術は、上述の要素技術を組み合わせたソリューションとなっている。

いくつかのソリューションを組み合わせるためには、それらの技術を統合的・最適に運用していくシステム技術の検討が必要となる。そのために、このようなシステム技術の開発及び実証は依然として重要であるが、ここでは本調査の趣旨に鑑み、上述の要素技術を「再生可能エネルギーの電力需給対策オプション」として捉え、これに基づいた分類を行っており、必要に応じてこれらのシステム技術にも言及している。

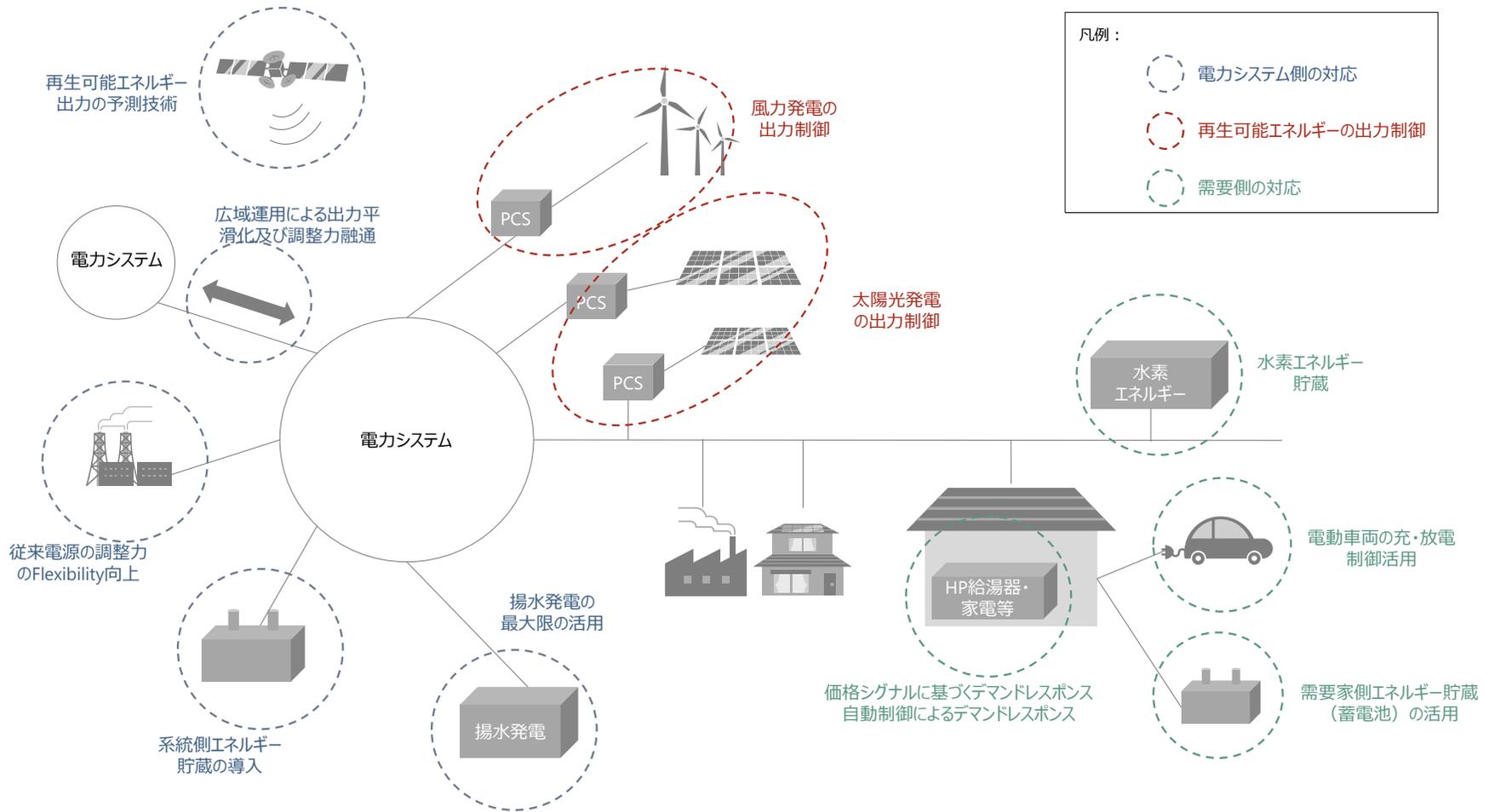


図 2-4 再生可能エネルギーの電力需給対策オプション

(1) 電力システム側の対応

1) 再生可能エネルギー出力の予測技術

a. 概要

太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーは、その出力が天候等の気象環境に大きく依存する。これらの再生可能エネルギーの出力を予め予測し、それに基づいて適切な運用を行うことで、出力変動が与える影響の緩和が見込める。そのため、再生可能エネルギーの出力予測を行うという技術は、再生可能エネルギーの電力需給対策の有効なオプションの一つである。

b. 対策活用の動向

出力予測技術の例として、東北電力の風力発電の出力予測システムを図 2-5 に示す。気象庁が発表している気象予測データをもとに、各風力発電の発電出力を予測し、過去の発電実績データ等をもとに、予測誤差を補正することで、発電出力の予測値を導出するシステムとなっている¹³。

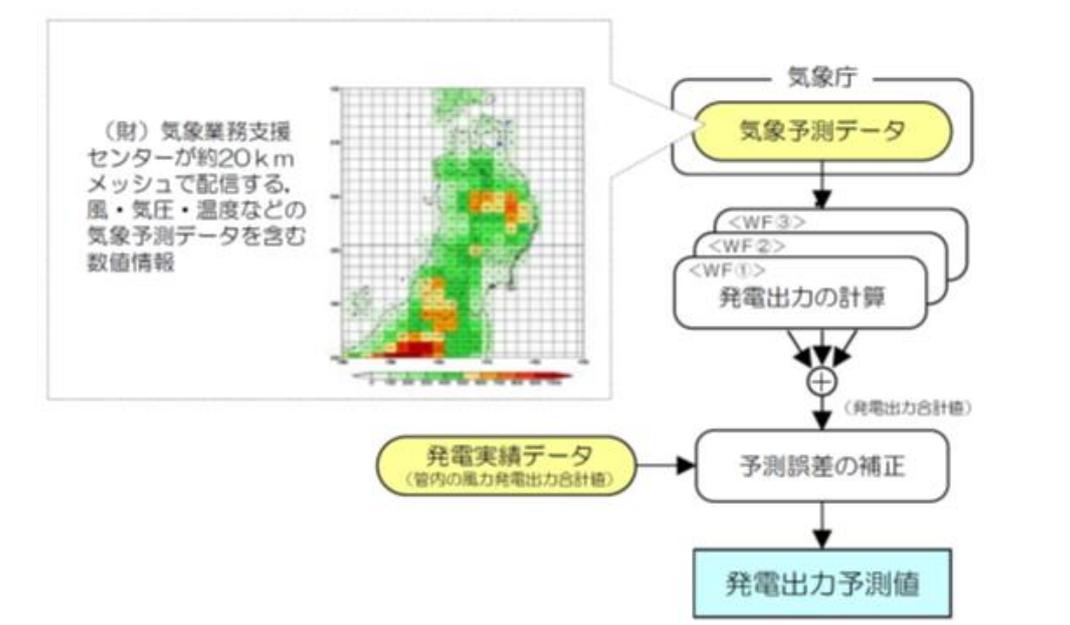


図 2-5 東北電力の風力発電出力予測システム

出所) 東北電力：「風力発電の出力予測技術の開発・導入について」

<http://www.tohoku-epco.co.jp/ICSFiles/afieldfile/2010/10/01/as1.pdf>

¹³ この他に、気象庁等の気象予測データを用いずに、過去の発電実績等から統計的に予測を行う「統計的予測モデル」などが考えられている。現在までに検討・利用されてきている出力予測技術の詳細については、以下の文献を参照のこと。

「再生可能エネルギーの出力変動特性と予測」電気学会技術報告、1316号

この他にも、我が国では出力予測に関する技術開発を多数進めてきている。太陽光発電についての国家プロジェクトとしては、2010年度から2014年度のNEDO「太陽エネルギー技術研究開発 太陽光発電システム次世代高性能技術の開発 発電量評価技術等の開発」、2011年度～2013年度の資源エネルギー庁事業「太陽光発電出力予測技術開発実証事業」などが挙げられる。前者では気象予報の向上、電力システム大とより狭いエリアを対象とした幅広い研究がなされ、後者では、太陽光発電大量導入時の安定的な電力システムの需給運用を速やかに確立するため、太陽光発電出力の現在把握と事前予測について、表 2-3 の内容の技術の高度化と実証が行われた。

表 2-3 太陽光発電出力予測技術開発実証事業で検討された太陽光発電出力予測技術

区分	テーマ	内容	実施主体
日射量の把握	気象衛星データや日射量観測データからの日射量推定	気象衛星データや日射量観測データからの日射量推定技術を用いて、全国規模の実況日射量分布推定モデルを開発	日本気象協会
	空間線形回帰法（クリギング）に基づく空間補間による日射量推定	リアルタイムの日射量マップの作成を目指し、地球統計学の空間線形回帰法（クリギング）に基づく日射の空間補間法を太陽光発電出力把握に適した手法に改良	電力中央研究所
	気象衛星データを用いた日射量推定	衛星データ等を用いて日射量分布の推定を行う手法を構築	伊藤忠テクノロジーソリューションズ
日射量の予測	時間スケールに応じた日射量予測	数値予報モデル（SYNFOS-3D）や実況日射量分布推定モデルなどを用いて週間・翌日・当日・数時間先などの時間スケールに応じた日射量予測手法を開発	日本気象協会
	気象モデルによる日射量の予測	気象予測・解析システム（NuWFAS）をベースとして、翌日・当日の気温・日射量を予測	電力中央研究所
	気象予測モデルおよび統計手法を用いた日射量の予測	数値予報（GPV）データを利用した統計的手法により日射量を予測するモデルを構築	伊藤忠テクノロジーソリューションズ
太陽光発電出力の推定	地域の太陽光発電導入状況に対応した太陽光発電出力推定	設置条件による補正手法を検証評価し、地域ごとの太陽光発電設置状況の違いに対応可能な太陽光発電出力推定手法を開発	電力中央研究所
	統計手法を用いた太陽光発電出力推定	日射量推定・予測値をもとに、過去の実測データによる学習および補正などを適用し太陽光発電出力を推定する手法を開発	伊藤忠テクノロジーソリューションズ
	日射量推定結果からの太陽光発電出力推定	設置地点、パネルの方位・角度・温度・種類やPCSの変換効率など、様々な要因が日射量から発電出力の推定に与える影響を整理	日立製作所
	各種統計モデルと配電線潮流を用いた配電-全体系統の太陽光発電出力推定	配電線レベルの広さの太陽光発電出力の推定を行う手法を開発	三菱電機
	統計処理による太陽光発電量推定 日射量の分析	簡易的な手法により、地域の日射強度から発電電力量を推定する手法を開発	ソーラーフロンティア
日射量の分析	日射量データ分析	新たな太陽光発電出力の予測手法の開発、変動特性の分析、用途・目的に応じて必要となる日射量や太陽光発電の発電量データの空間密度、計測サンプリングの仕様の検討	東京大学

出所) 資源エネルギー庁：「太陽光発電出力予測技術開発実証事業事後評価の概要について」より作成

風力発電については、NEDOが2005年度～2010年度で実施した開発事業「風力発電電力系統安定化等技術開発－気象予測に基づく風力発電量予測システムの開発」において作成

された「風力発電出力予測技術ガイドブック¹⁴」に示される通り、これまでに様々な出力予測技術が検討、利用されてきている。直近では、2014年度よりNEDOが開始した「電力系統出力変動対応技術研究開発事業」において、風力発電の出力予測技術の高度化が検討されている。本事業は、電力の需給運用に影響を与える風力発電の急激な出力変動（ランプ）に着目し、再生可能エネルギーの予測技術や出力の変動を抑制する出力制御技術を高度化させ、予測と出力制御を踏まえた需給運用の基本的な手法を確立することを目的に、ランプ予測技術の開発や予測技術系統運用シミュレーションといった研究開発を進めるという内容となっている。

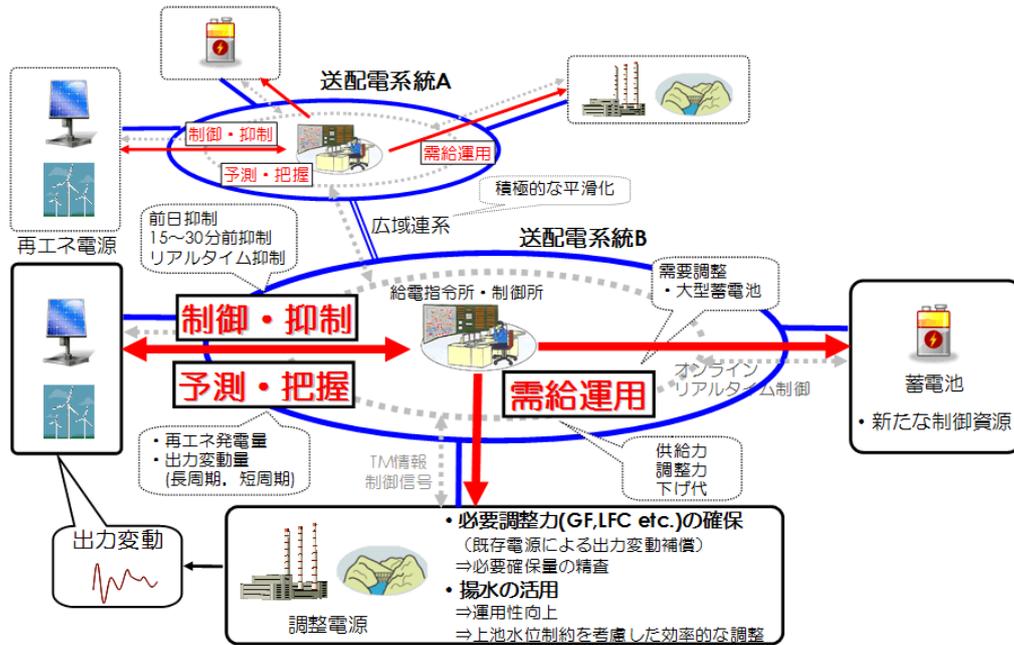


図 2-6 電力系統出力変動対応技術研究開発事業の概要

出所) NEDO 資料

c. 特徴と課題

以上のように、技術の高度化が進められてきた再生可能エネルギーの出力予測については、再生可能エネルギーの導入拡大に伴う電力システムへの影響の拡大に伴い、今後も予測精度の向上や、実際の運用と統合するためのアプリケーションの開発といった検討を引き続き行っていく必要がある。図 2-7 はドイツのドルトムント工科大学の研究報告書¹⁵に示されている検討結果である。これによれば、再生可能エネルギーの出力変動に伴って増加する系統の必要調整力は、予測精度の向上によって抑えられることが示されている。

¹⁴ <http://www.nedo.go.jp/content/100139524.pdf>

¹⁵ Stefan Kippelt, Thorsten Schlüter, “Impact of Future Renewable Energy Generation on Control Reserve Markets”

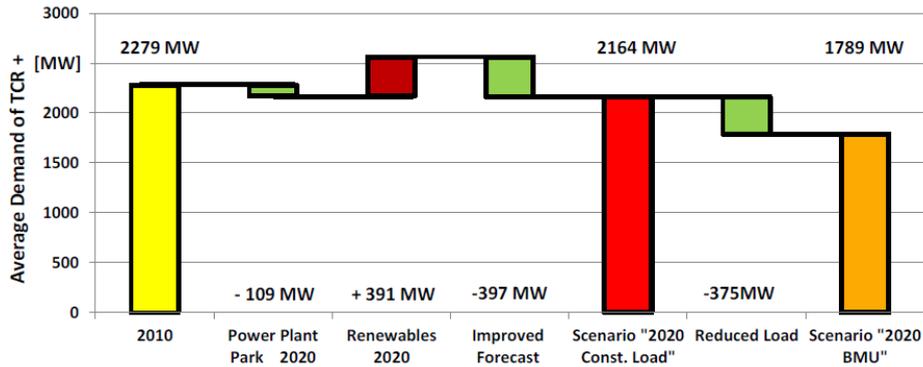


図 2-7 ドルトムント工科大学のシミュレーション結果

出所) Stefan Kippelt, Thorsten Schlüter, “Impact of Future Renewable Energy Generation on Control Reserve Markets”

このように、予測技術が将来的に更に向上していけば、再生可能エネルギー対策として電力システム側が用意しなくてはならない需給調整能力の低減につながることを期待される。出力予測技術の向上が必要であるもう一つの理由として、予測技術が、電力システム全体で必要となる需給調整能力の量を決めるということが挙げられる。電力システムの運用は、予測から得られる変動量（再生可能エネルギーの他、負荷変動なども対象である）をもとに、必要となる調整能力の量が決定される。予測技術が不完全である場合には、その不確実性に対応するために、より多くの調整能力を必要とするが、予測技術の向上により、予測誤差が小さくなればなるほど、不確実性のために必要となる調整能力は少なくなる。

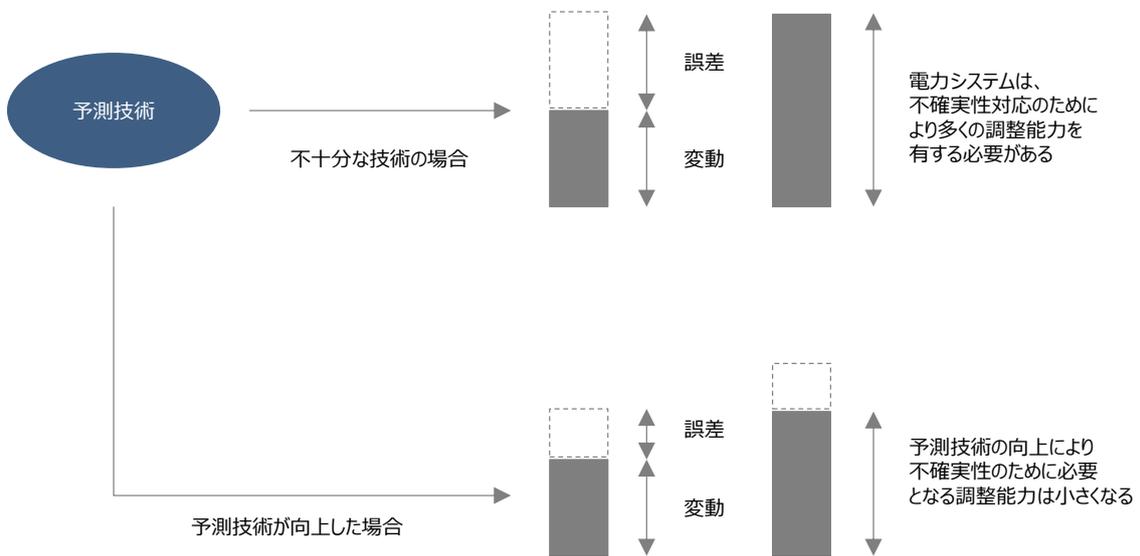


図 2-8 予測技術の重要性（技術向上がもたらす恩恵）

従って、予測精度の向上（予測誤差の低減）を始め、今後も予測技術の技術開発を継続的に行っていく必要がある。既存の予測技術は、前日予測といったソリューションが主である。予測誤差を少なくするための方策として、例えばより実時間に近い時点での予測手法の検

討、及びこれらの予測を電力システム運用に統合するアプリケーションの検討を深めていくことで、よりきめ細かい予測技術を確立することができる可能性がある。

また、予測誤差を最小化することで他の対策オプションの制御パフォーマンスを向上させるという位置づけにあり、実際に生じた変動量等に対する対策が別途必要となる点も留意が必要である。予測技術のこのような特性を十分に理解し、以降に示される他の再生可能エネルギー対策オプションと連携を図りながら、電力システム運用への応用を検討していく必要がある。

2) 広域運用による出力平滑化及び調整力融通

a. 概要

太陽光発電、風力発電等の再生可能エネルギー発電の出力変動は、個々で見ると激しく変動するが、その変動は必ずしも同一ではなく、複数の発電設備からの出力を重ねあわせると、図 2-9 に示すような平滑化効果（ならし効果）が生じてくる。この効果は特に短い周期の変動成分に対して効果が高く、かつエリアが広いほど大きい。

この平滑化効果により、電力システムとして対応しなくてはならない制御量が軽減されることが期待される。広域運用による出力平滑化は、この平滑化効果に着目し、再生可能エネルギーの出力変動を広域的に捉えることで影響を緩和するように、広域連系の拡大といった取り組みを行うものである。

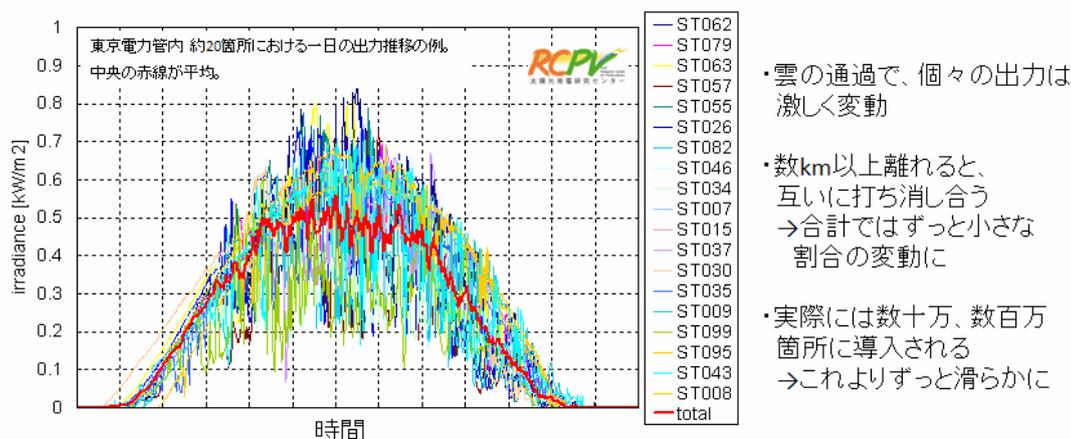


図 2-9 太陽光発電のならし効果のイメージ図

出所) 産業技術総合研究所：「出力変動と緩和策」

https://unit.aist.go.jp/rcpvt/ci/about_pv/output/fluctuation.html

また、広域運用という観点で現在検討されている再生可能エネルギーの対策オプションとして、電力システム間で調整力を融通するという方策が挙げられる。例えば図 2-10 のように、再生可能エネルギー電気の受入に余裕がない地域において再生可能エネルギーが余剰となり出力制御が必要となる場合には、地域間連系線を利用して余った電気を送電することで、再エネ電気の受入に余裕がある他地域において余剰電気を受け入れて活用することが可能となる。



図 2-10 広域運用の概念図

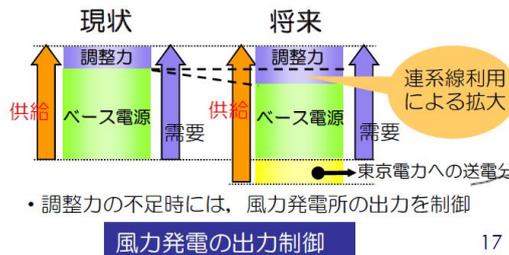
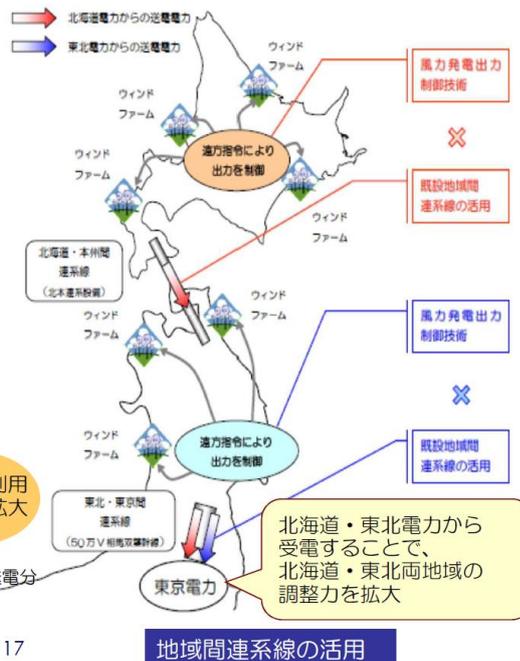
出所) 資源エネルギー庁：「再生可能エネルギー導入拡大に向けた広域的な系統利用システム・ルールの構築について」

b. 対策活用の動向

連系線運用の高度化の一つである調整力融通の取り組みの例として、東京電力と東北電力、東京電力と北海道電力の「連系線を活用した風力発電導入拡大実証試験」がある。北海道エリア、東北エリアは風力発電の適地が多いが、系統容量が小さく連系可能量に制約があるという特徴がある。一方で、東京エリアは、系統容量が大きいが風力発電の適地が少ないという特徴がある。当実証試験ではこの三つのエリアの特徴に応じて、3社間での協調した運用として、既設地域間連系線を活用し、以下の二つの方策を取るというものである。

- 風力発電出力予測に基づいて、風力発電の出力変動（長周期）に相当する電力（最大 20 万 kW）を北海道電力から東京電力へと送電することにより、東京電力の調整力を利用する
- 東北エリアで調整力（下げ代）に余裕がない時間帯（軽負荷の夜間）に、東北系統の火力発電出力を増加させ、下げ代に余裕がある東京電力に一定電力（最大 24 万 kW）を送電する

- 課題
- 北海道、東北：風力発電の適地が多いが、系統容量が小さく、連系可能量に制約
 - 東京電力：系統容量が大きい風力発電の適地が少ない
- 実証試験
- 地域間連系線を使用。系統規模の大きい東京の調整力を活用
- [出所]東京電力プレス(2011)



地域間連系線の活用

図 2-11 東日本での広域制御への取り組み

出所) 岡本：「再生可能エネルギーの統合拡大に向けた需給調整力（フレキシビリティ）確保への取り組みの方向性と課題」

https://www.energy.iis.u-tokyo.ac.jp/html_seminar/20150511/20150511_3.pdf

同様の取り組みは、中西日本でも実施されている。図 2-12 に示されるとおり、東日本同様、風力発電等が大量に連系されている北陸エリア・四国エリアから、中部エリア・関西エリアへ電力を送電することにより、北陸エリア・四国エリアの調整力を拡大し、同地域における風力発電の連系を拡大していくということが志向されている。

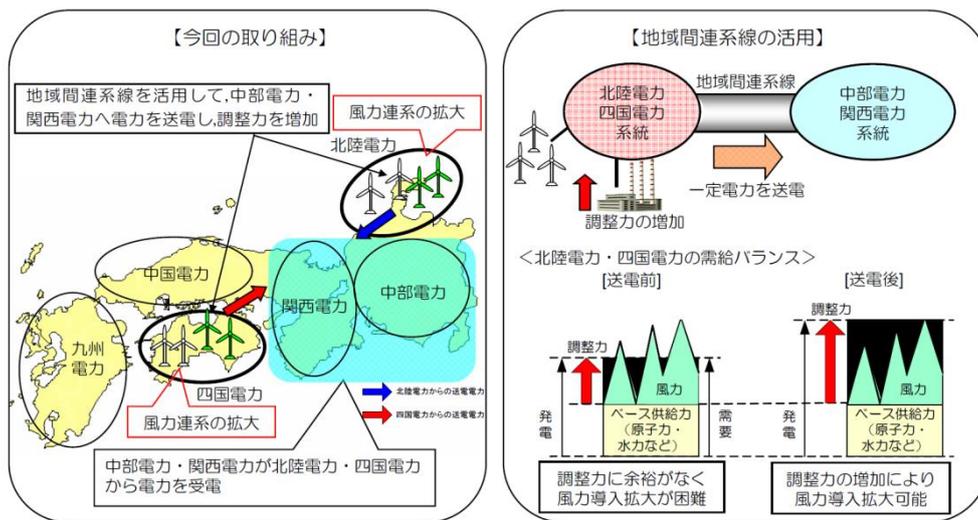


図 2-12 中西日本での広域制御への取り組み

出所) 関西電力：「中西日本における風力発電導入拡大に向けた取り組みの概要」

http://www.kepco.co.jp/corporate/pr/2012/pdf/0525_1j_01.pdf

c. 特徴と課題

以上のように、広域連系は、再生可能エネルギーの大規模導入時の電力システムへの影響を緩和する対策オプションとして有望であるが、ならし効果は短周期の変動に効果的であり、図 2-13 に示すように、太陽光発電、風力発電とも、長周期の変動においては過度には期待できないという課題が挙げられる。前項の予測と同様に、他の対策オプションと組み合わせる必要がある。

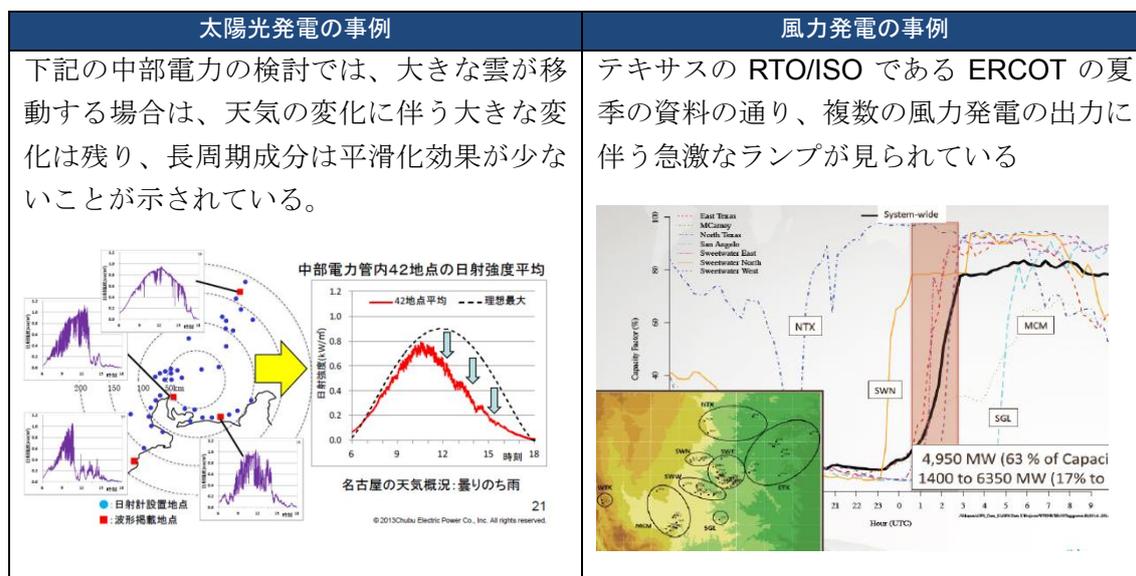


図 2-13 ならし効果の長周期上の課題

出所) 中部電力資料、及び ERCOT 資料より作成

調整力の融通についても、先に述べたような取り組みを引き続き検討する必要があるが、連系線のマージンの考え方の整理と制度化が、今後の技術開発と並行した課題として挙げられる。電力システムの連系線は、一般に、安定供給のために、運用容量を全て利用しているわけではなく、事故時のエリア間の相互救済の観点から、一定の空き容量（マージン）を確保している。このマージンを有効活用し、再生可能エネルギーの送電枠を拡大することは、電力システム全体の信頼性とトレードオフとなりうることもあるために、その利用にあたっては、今後信頼度維持の考え方も踏まえた検討が必要となる。また、連系線容量の計算として、電力システムの安定度計算等をリアルタイムで行い、利用可能な容量を拡大する可能性があるが、このような計算を含めた運用手法についても今後検討が必要となる¹⁶。このように、本対策オプションは、電力システム側の設備形成や運用と協調を取りながら進めていく必要がある。

3) 従来電源の調整力の柔軟性向上

従来電源、特に負荷追従能力の高い火力発電（ガスタービンやガスエンジンなども含まれる）や揚水発電は、多様な調整力を電力システムに提供してきた。近年、このような従来電

¹⁶ 海外では、これと似た考え方として、Dynamic Rating が採用されている例もある。

源による調整力をより柔軟なものにしていこうという考え方が生まれつつある。

この考え方については、現在 NEDO の「エネルギー・環境新技術先導プログラム」において、「再生可能エネルギー大量導入時代の系統安定化対応先進ガスタービン発電設備の研究開発」というテーマで当該領域の検討が進められている。本プロジェクトでは、始動性や負荷追従性を重視し、過渡応答性に優れ、繰返し負荷に耐えるガスタービン発電設備の実現に向けて、開発課題の明確化を行っている。以下のような課題が出されている。

<「再生可能エネルギー大量導入時代の系統安定化対応先進ガスタービン発電設備の研究開発」で抽出された検討テーマ>

- 急速負荷変動のガスタービンプラントへの影響検討・評価
- 負荷変動を吸収するもしくは負荷変動に対するマージンを拡大する技術
- 負荷変動に急速に追従する技術、急速起動を可能にする技術
- 負荷変動を予測して発電量を変化させる技術
- 過渡応答、繰返し負荷による材料劣化への対応技術

従来電源の調整力としての柔軟性が向上することにより、再生可能エネルギーへの対応の能力が上がるのが期待される。しかし、当然出力を上げ下げすれば、発電の効率は下がる。従来電源の発電を行うという本来の目的を考慮すれば、なるべく一定で運転を行うことが望ましく、当該オプションは、緊急時等の対策として位置付けることが望ましいのではないかと考えられる。

4) 系統側エネルギー貯蔵の導入

a. 概要

再生可能エネルギーの大量導入に係る対策オプションとして、次項で述べる従来の揚水発電に加え、蓄電池を始めとするエネルギー貯蔵の活用が検討されている¹⁷。本対策オプションは、太陽光発電や風力発電の出力が大きい場合にはエネルギー貯蔵に充電を行い、出力が少ない場合には放電を行うことで、需給バランスを維持するというものであるが、定常的な下げ代対策に加え、系統周波数制御、事故時周波数維持など様々な時間領域での活用が含まれることに注意が必要である。

表 2-4 に示すように、電力システム側で利用することが想定されているエネルギー貯蔵には、蓄電池、フライホイール、SMES（超電導電力貯蔵システム）、CAES（圧縮空気貯蔵ガスタービン発電）などの利用がこれまでに検討されている¹⁸。それぞれのエネルギー貯蔵

¹⁷ ここでは、電力システム側（送電系統・配電系統）に導入されるエネルギー貯蔵についての記述を行う。この他に需要側のエネルギー貯蔵を有効利用するという考え方が存在するが、それについては、別途「需要側の取組」において記述する。また、揚水発電は、再生可能エネルギーの導入される以前に電力システムにおいて利用されてきた技術であるため、この項とは別に次項において記述している。

¹⁸ この他、水素貯蔵なども検討されているが、この技術についても、「需要側の取組」において記述を行う。また、電気二重層キャパシタ（EDLC: Electrical Double Layer Capacitor / スーパーキャパシタ）などの利活用も検討されているが、ここでは割愛する。

の特性を図 2-14 に示すが、フライホイールや SMES などはコストの関係上、小エネルギー容量での設計事例が多く、無停電電源などのように極めて早い対応が求められる場合にその適用は限られる。CAES は、経済的な導入を行うためには地質など特殊な条件が成り立つ必要があり、適用性は限られる。

表 2-4 代表的なエネルギー貯蔵の種別

種別	概要
蓄電池	<ul style="list-style-type: none"> 繰り返し充放電が可能な蓄電池（二次電池）を利用し、化学反応を利用して蓄電する。蓄電池の種類としては、リチウムイオン電池、NaS 電池、レドックスフロー電池等が挙げられる。 用途に応じたシステム規模（容量）や放出エネルギー時間率（エネルギー用途／パワー用途）によって、最適な蓄電池の種類は異なる。近年、特にエネルギー密度および充放電効率が高く汎用的に適用出来るリチウムイオン二次電池が注目されている。
フライホイール	<ul style="list-style-type: none"> 電気エネルギーを回転するフライホイールの運動エネルギーに変換して貯蔵する装置。回転軸から遠い位置に適度な質量配置を持ったコマのような形状をした「はずみ車（フライホイール）」と、フライホイールを支えるための軸受や、電力を出し入れするための発電電動機などから構成される。 他のエネルギー貯蔵装置・化学電池よりも高い出力密度を供給できることが最大の利点。また構造が単純で保守が容易、温度変化による性能劣化がない、貯蔵エネルギー量の把握が容易、といった特徴もある。
SMES	<ul style="list-style-type: none"> 超電導体の電気抵抗がゼロであるという特性を利用し、電気を直接超電導コイルに磁気エネルギーとして貯蔵する。電気を直接貯蔵することで、高い貯蔵効率にて大電力を素早く供給することができる。 大電流を高速（20msec 以下）で出し入れできるとともに、繰り返し動作に強く貯蔵効率も 80～90%程度と高い。一方で、実用化に向けてはコスト面での課題が大きい。
CAES	<ul style="list-style-type: none"> ガスタービンに必要な高圧空気を夜間やオフピーク時の安価な電気で作成し、昼間等にその貯蔵した圧縮空気と燃料とでガスタービンを駆動し発電する技術。 大容量のエネルギー貯蔵が可能となるが、国内では空気を貯蔵するために適した岩塩層が少ないという事情がある。

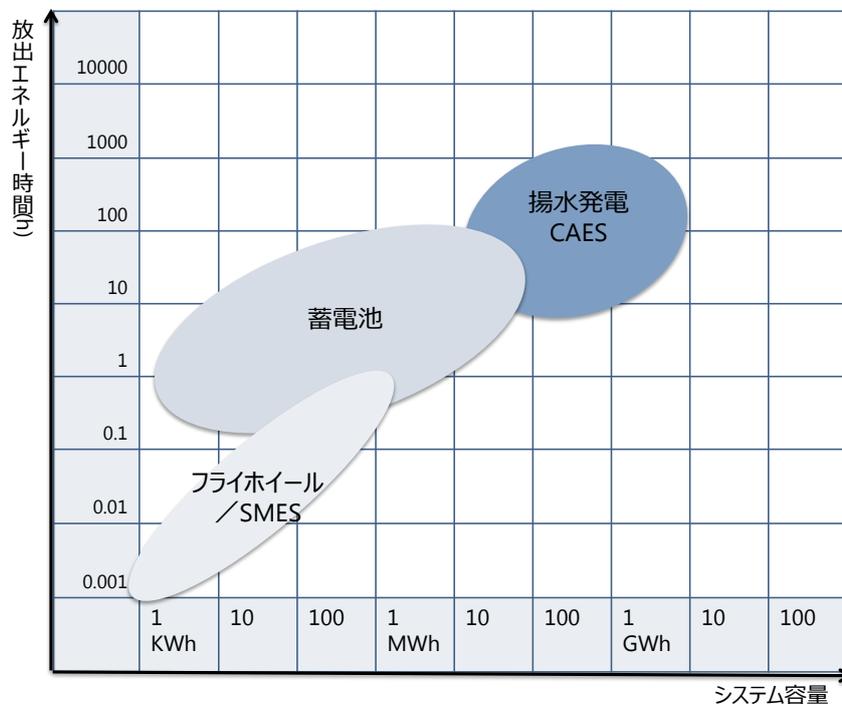


図 2-14 エネルギー貯蔵種別ごとの特徴

b. 対策活用の動向

エネルギー貯蔵の電力システム側での利用検討は、以前より様々な技術実証で進められてきた。近年の取り組みとしては、資源エネルギー庁の平成 24 年度「大型蓄電システム実証事業」が挙げられる(図 2-15)。本実証事業は、再生可能エネルギーの大量導入に対して、蓄電池を用いて系統制御能力を向上させることを目的に、北海道エリア、東北エリアにそれぞれレドックスフロー電池、リチウムイオン電池を導入するというものである。

北海道における取り組みは、北海道電力と住友電気工業が共同で 275kV 基幹系統の南早来変電所にレドックスフロー電池(15MW×4 時間容量)を設置し、再生可能エネルギーの出力変動に対する調整力としての性能実証および最適な制御技術を開発するというものである。

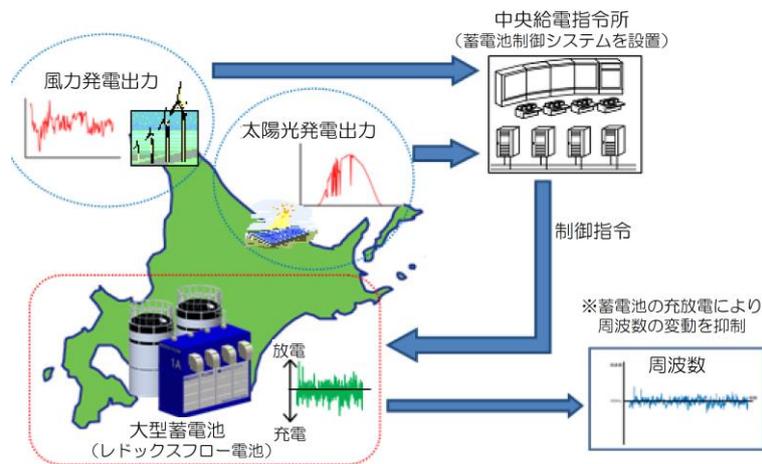


図 2-15 北海道電力の大型蓄電システム実証事業

出所) 北海道電力：「南早来変電所 大型蓄電システム実証事業について」

東北地方における取組は、風力発電や太陽光発電の導入拡大に伴い発生する周波数変動への対策として最大出力 40MW/容量 20MWh のリチウムイオン電池を導入するものであり、蓄電池システムと火力発電機を組み合わせた周波数制御ロジックの構築や実機による周波数調整力拡大の効果などが検証される(図 2-16 エラー! 参照元が見つかりません。)

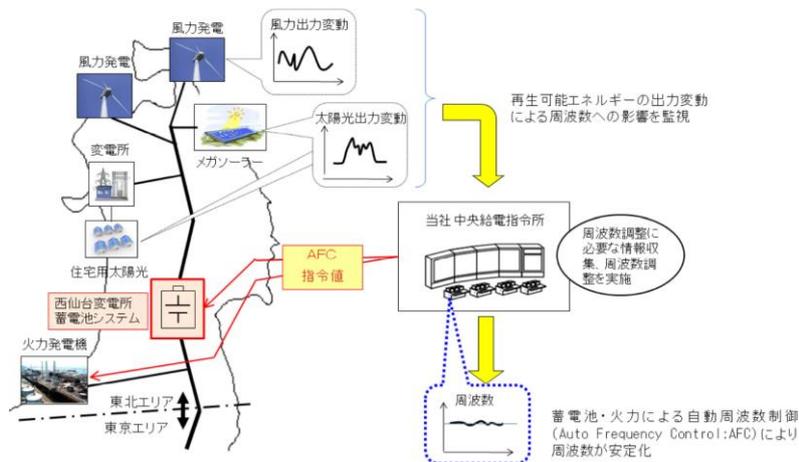


図 2-16 東北電力の大型蓄電システム実証事業

出所) 平成 24 年度大型蓄電システム緊急実証事業 進捗概要報告

また、資源エネルギー庁では、平成 26 年度の補正予算で、「大容量蓄電システム需給バランス改善実証事業」として、東北電力（南相馬変電所、出力 4 万 kW 程度、容量 4 万 kWh 程度の蓄電システム）と九州電力（豊前火力発電所、出力：5 万 kW、容量 30 万 kWh 程度）にそれぞれ実証試験設備を建設している。

我が国では、エネルギー貯蔵の中でも、蓄電池を用いた電力システム制御という事例が多いが、他のエネルギー貯蔵についても、図 2-17 に示すように、NEDO の「安全・低コスト大規模蓄電システム技術開発」において鉄道総合技術研究所等が開発したフライホイールや、先述の「電力系統出力変動対応技術研究開発事業」において神戸製作所等が開発している CAES などが挙げられる。

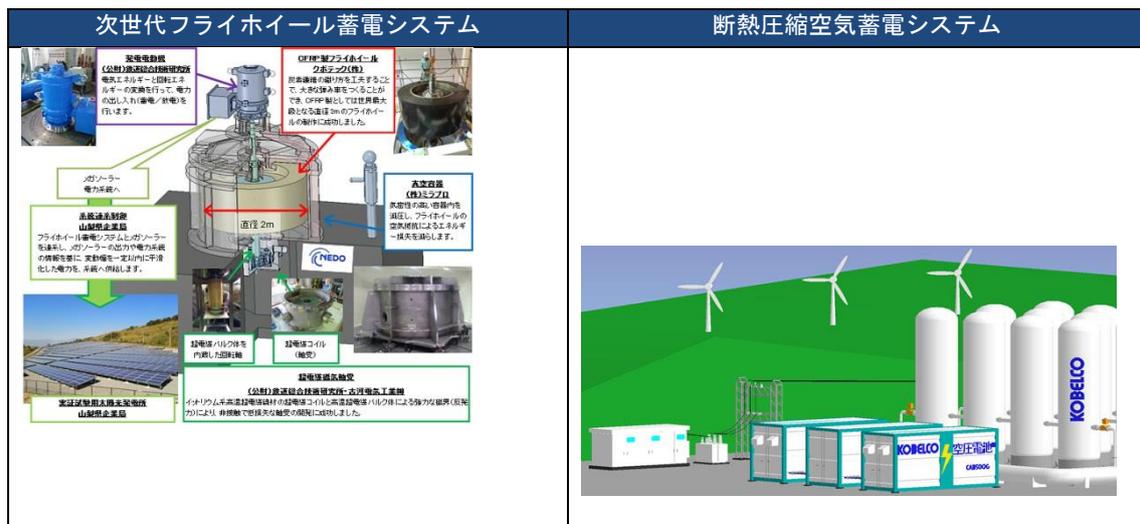


図 2-17 蓄電池以外のエネルギー貯蔵の開発事例

出所) NEDO ホームページ (http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100443.html)、及び神戸製作所ホームページ (http://www.kobelco.co.jp/releases/2015/1191385_14507.html)

c. 特徴と課題

エネルギー貯蔵の導入については、依然としてコストの課題がある。SMES やフライホイールといった技術は従来コストの高い対策であると言われており、蓄電池についても、NAS 電池で約 4 万円/kWh、鉛蓄電池が約 5 万円/kWh、ニッケル水素電池で約 10 万円/kWh、リチウムイオン電池で約 20 万円/kWh という水準にあり、更なるコスト低減に向けた取組が必要となっている。

エネルギー貯蔵では、充放電に伴う電力損失も課題として挙げられる。先に示した西仙台変電所に設置された蓄電池システムの総合効率は、最高で 86.2% であり、これ自体はエネルギー貯蔵としては極めて高い数字であるが、充放電で 14% 弱のエネルギーを逸失していることになる。

大型の蓄電池などの大規模システムを導入する適地があるかという課題も挙げられる。今後の再生可能エネルギー対策として有望視されているエネルギー貯蔵であるが、以上のような点に留意し、引き続き技術開発を行っていく必要がある。

内の周波数が低下した場合に、自動的に発電運転を開始し周波数調整を行う機能（緊急起動機能）や、需要が少ない際は電力系統の電圧調整を行う機能（調相運転機能）も付加しており、北海道系統の電力システム安定化に貢献する設計が行われている。



図 2-19 北海道電力の京極発電所

出所) 北海道電力ホームページ

http://www.hepco.co.jp/energy/water_power/kyogoku_ps/summary.html

c. 特徴と課題

再生可能エネルギーの変動対策としての揚水発電は、可変速とすることで、長周期から短周期まで幅広い需給変動に対応可能となることが期待できる。一方で、課題としては、揚水時の効率が低いため、ラウンドトリップ効率はおよそ70%であり、約30%のエネルギーロスが発生する点や、新規に建設するためには、調査から着工まで10年程度、着工から運転開始まで10年程度かかる点が課題として挙げられる。また、電力会社は現在ピークシフト対応を念頭に揚水発電を導入していることを考慮すれば、再生可能エネルギーの需給対応という新たな目的を入れた際の最適な運用方法を今後検討していくことが必要であろう。

(2) 再生可能エネルギーの発電出力制御

1) 太陽光発電の出力制御

a. 概要

再生可能エネルギーの出力制御は、本来可能な最大出力より少ない値に出力を制御することであり、発電電力が過剰となっている場合に、出力を抑制するという方策などで用いられる。一般に太陽光発電の出力制御の方法は、表 2-5 の方法に大別される。後に示すように、日本では余剰電力対策として、自律制御という点ではいわゆる「カレンダー方式」が検討されてきたが、再生可能エネルギーの導入量増加に伴い、現在は「次世代双方向通信出力制御緊急実証事業」において、通信制御を用いた手法が検討されている。

表 2-5 PCS による出力制御の方法

制御方法	概要
自律制御	<ul style="list-style-type: none">● 予め PCS に出力制御計画や方法等を内蔵しておく方法であり、スケジュールで決められた時間が来たら制御を行う。● 通信なしで行うことができるというメリットがあるが、制御のスケジュール等が固定的になってしまう。
通信制御	<ul style="list-style-type: none">● 電力会社等の再生可能エネルギー発電所の外部から制御信号等を送り、遠隔制御を行う方法。● 硬直的な自律制御の手法に比べて、予期しないイベントへの対応といったことが可能となる。● 各発電設備に個別の信号を送ることも可能であるが、制御サーバ側の処理に負荷がかかる。
インタラクティブ制御	<ul style="list-style-type: none">● 上記の二つを組み合わせた方法。例えば自律制御のファンクションを、外部からの通信により柔軟に変更していくなどの方策が考えられる。

b. 対策活用の動向

太陽光発電の出力抑制機能付き PCS の必要性は、資源エネルギー庁の 2009 年の検討「次世代送配電ネットワーク研究会」の中でも指摘され、その成果として、図 2-20 に示すカレンダー方式の出力抑制機能付き PCS の検討が行われ、その後資源エネルギー庁の「次世代型双方向通信出力制御実証事業（FY2011-2015）」に引き継がれた。

タイムに近い制御が可能になるという点で、短周期から長周期までの柔軟な制御が可能となるであろうと考えられる。

しかし、同時に出力制御は、太陽光発電からの発電量を減らすものであり、太陽光発電由来の電気を最大限有効利用するという観点からは、頻繁に出力抑制を発動する対策は、できるだけ避けた方がよい。従って、将来太陽光発電が大量導入された時点においても、この出力制御だけに頼ることなく、他の有効な需給対策オプションと組み合わせた方法を考えることが望ましい。

また、出力制御を実施するためには、予め出力制御に関わる個別システムの機能とインフラストラクチャを整備しておく必要がある。従来の PCS には、このような出力制御に関わる機能は具備されてこなかった経緯があり、出力制御機能を実施できない PCS がいったん広まってしまうと、後から当該機能を付与するにはコストが大きい。上記の「次世代双方向通信出力制御緊急実証事業」では、機能や通信に関する仕様が検討されているが、今後早急な対応が必要となる。

2) 風力発電の出力制御

a. 概要

太陽光発電同様、風力発電についても、出力制御を行うという方策がある。日本風力発電協会は、風力発電の出力制御方法を、下表の「ウィンドファーム側対策」として整理している。

表 2-6 風力発電の出力制御の方法

課 題	ウィンドファーム側対策	電力系統側対策
短周期調整力不足	<ul style="list-style-type: none"> 出力上昇率制限運転 出力変動緩和蓄電池の活用（グループ制御） 	<ul style="list-style-type: none"> 電力系統の広域運用 持ち替え運転（機種と台数） ⇒経済負荷配分運転が犠牲となる
長周期調整力不足 ランプ変動等対応	<ul style="list-style-type: none"> 最大出力抑制運転 出力上昇率制限運転 	<ul style="list-style-type: none"> 電力系統の広域運用 気象予測システムの活用
下げ代不足	<ul style="list-style-type: none"> 最大出力抑制運転 周波数上昇時の出力抑制運転 	<ul style="list-style-type: none"> 電力貯蔵設備（揚水発電所）の活用 変電所設置蓄電池システムの活用 火力機の最低運転可能領域の低減 火力機の出力調整速度と量の増加
送電線熱容量不足	<ul style="list-style-type: none"> 最大出力抑制運転 	<ul style="list-style-type: none"> 地域内送電線の新增設 地域間送電線の新增設

出所) 日本風力発電協会「風力発電の遠隔出力制御システム」

上表で赤字で示されているもののうち、「最大出力抑制運転」とは、風力発電の出力が過剰なケースにおいて、風力発電のブレードの取り付け角度（ピッチ角）を制御することにより、風をなまらせ、風力発電の出力を落とすという方法である（図 2-22）。この最大出力抑制運転が最大の出力を上限値として設定して制御を行うのに対し、出力上昇率制限運転

は、制御幅と出力変化率に関する上限値を設定して制御を行うものである。

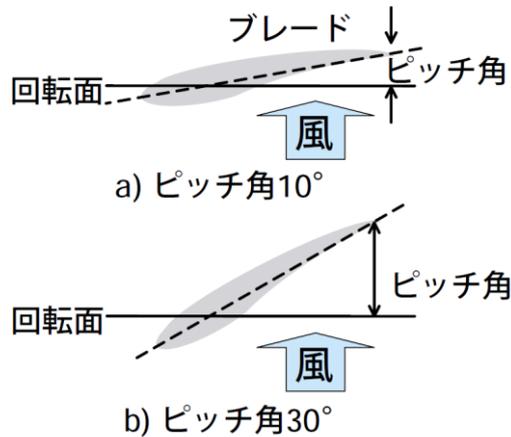


図 2-22 ピッチ角制御の概要

出所) エネルギア総合研究所「風力発電における運転制御方法 (ピッチ制御・ストール制御)」

一般に風力発電システムは、ウィンドファームとして、あるサイトにおいて複数台設置される。ウィンドファームにおける最大出力の制御では、抑制量を最小化するために、各風力発電機の出力を監視・制御し、各風力発電機の抑制量を調整することで、ウィンドファーム全体で必要となる出力抑制量を達成するという方法が考えられている (下図中の 75%抑制の場合を参照)。

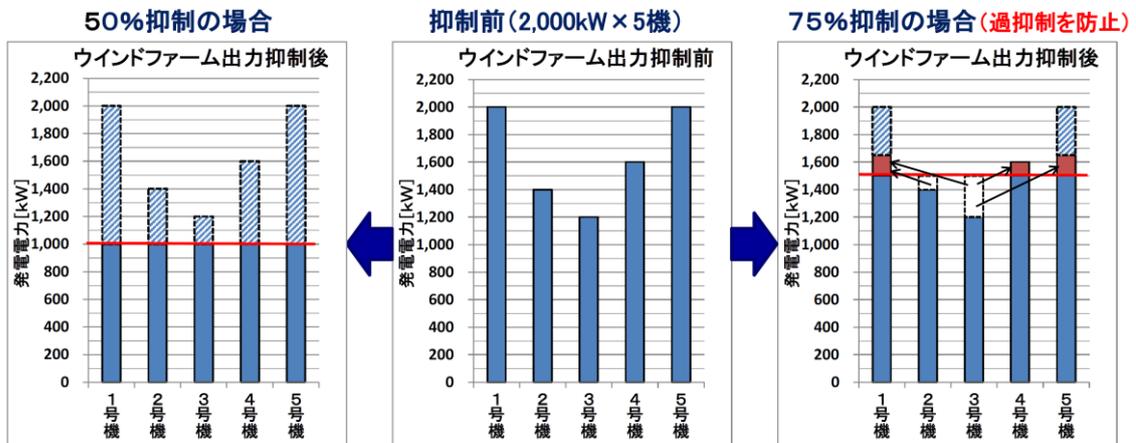


図 2-23 ウィンドファームの出力制御の考え方

出所) 日本風力発電協会「風力発電の遠隔出力制御システム」

以上の風力発電の出力制御を実装する方法として、下図に示す遠隔の出力抑制制御システムなどが考えられている。

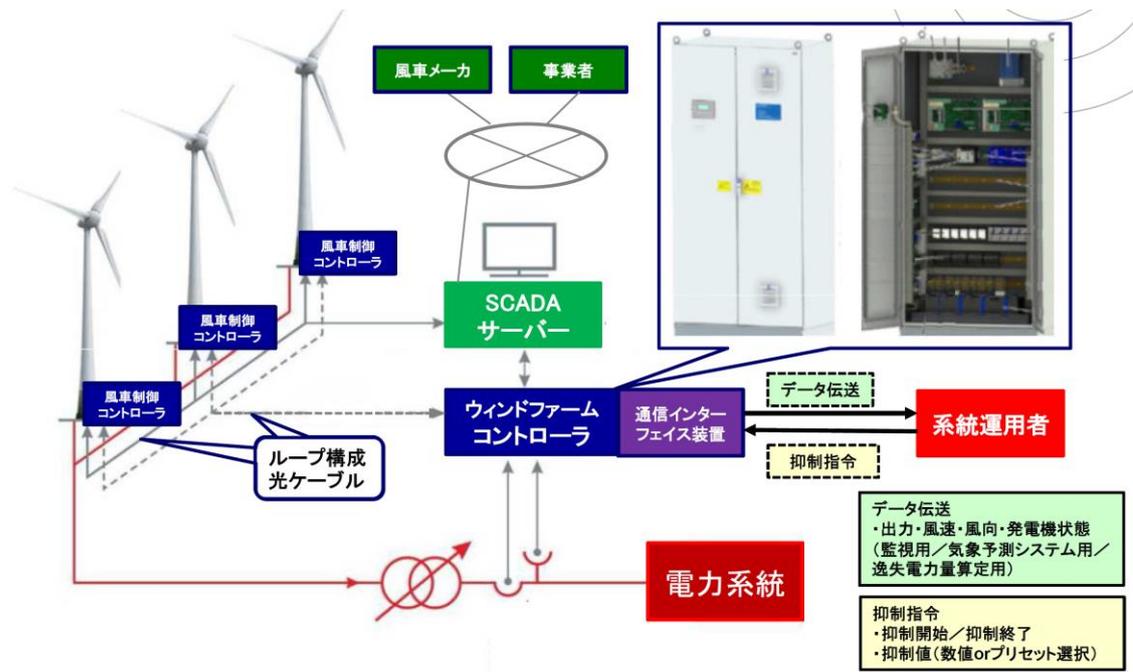


図 2-24 オンライン出力抑制制御システムのイメージ

出所) 日本風力発電協会「風力発電の遠隔出力制御システム」

b. 対策活用の動向

2015年10月に実施された資源エネルギー庁の「新エネルギー小委員会 第6回系統ワーキンググループ」では、風力発電の出力制御について、日本風力発電協会から実施方法に関する検討結果が出された²⁰が、実施方法の更なる検討を深めるために、現在我が国では当該技術に関する研究開発も進められている。先に示した NEDO の「電力系統出力変動対応技術研究開発事業」の研究開発項目 (I)「風力発電予測・制御高度化」の実施項目 (2) ランプ予測着技術の開発では、多数のウィンドファームの出力制御による系統周波数安定化技術の開発を、実施項目 (3) 出力変動制御技術の開発では、計画電源化に向け実用化コストを踏まえた風車制御と蓄エネルギー制御の最適な組合せの構築に向けて、予測技術を活用した風車制御技術と蓄エネルギー制御技術を開発することとなっており、その研究開発スコープにピッチ角制御の活用が掲げられている (図 2-25)。

風力発電の場合、メーカーによりタービン制御、ウィンドファーム制御などが階層的に標準化されており、新しく標準化するに値する機能あるいは標準化された機能を活用した制御などを意識した出力制御方式の検討が重要である²¹。

²⁰ 風力発電協会, “風力発電の出力制御の実施における対応方針”, 資源エネルギー庁 新エネルギー小委員会 第6回系統ワーキンググループ資料(2015)

²¹ 齊藤哲夫, 占部千由 “風力発電の最大出力抑制制御と出力上昇率制限制御.”JWEA 会誌 No.114 号 (2015)

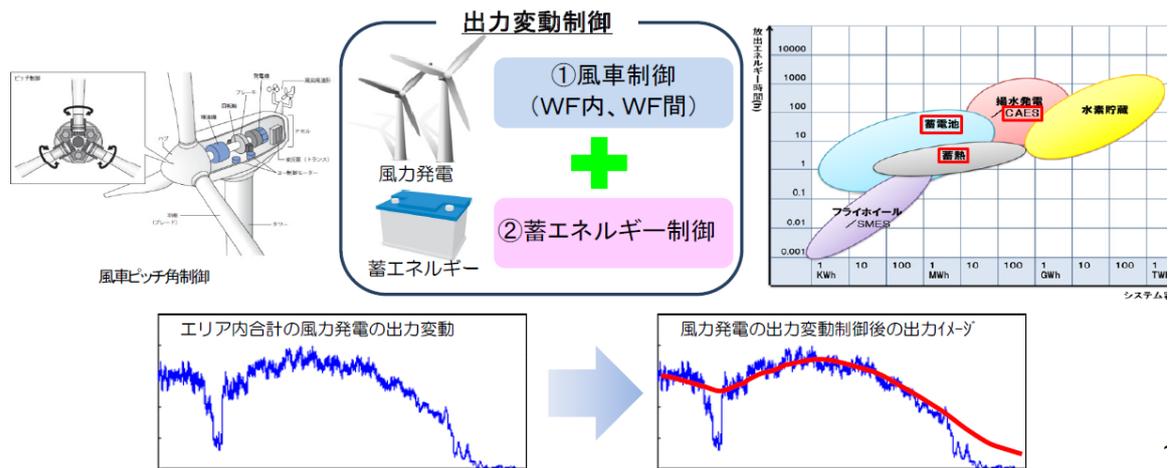


図 2-25 「電力系統出力変動対応技術研究開発事業」におけるピッチ角制御
 出所) 出力予測技術を使った変動電源の安定化対策
 ～電力系統出力変動対応技術研究開発事業について～

c. 特徴と課題

前項の太陽光発電の出力制御同様、電力需給という観点では制御性に優れるオプションであると言えるが、風力発電の発電機会逸失となる点が留意点として挙げられる。また、ピッチ角制御については、機械系の制御によって実現されるが、電力システムの状況に応じて頻繁に制御を行うと、故障に至るリスクなどが考えられ、風車の機械系へ影響が懸念される。

(3) 需要側での対応

1) 価格シグナルに基づくデマンドレスポンス

a. 概要

「デマンドレスポンス」は、米国において実用化が進められ、現在、欧州、日本などでも導入が進められている。デマンドレスポンスは、当初、火力を始めとする従来型発電の供給力の不足を回避するための仕組みとして導入が考えられ、米国においては、「卸市場価格の高騰時または系統信頼性の低下時において、電気料金価格の設定またはインセンティブの支払に応じて、需要家側が電力の使用を抑制するよう電力消費パターンを変化させること」と定義されている²²。

我が国においても、震災後の供給力不足の懸念のもと導入が模索されており、図 2-26 のように、①時間帯別料金等の電気料金ベースのものと、②需給調整契約等のインセンティブベース²³のものに大別される。

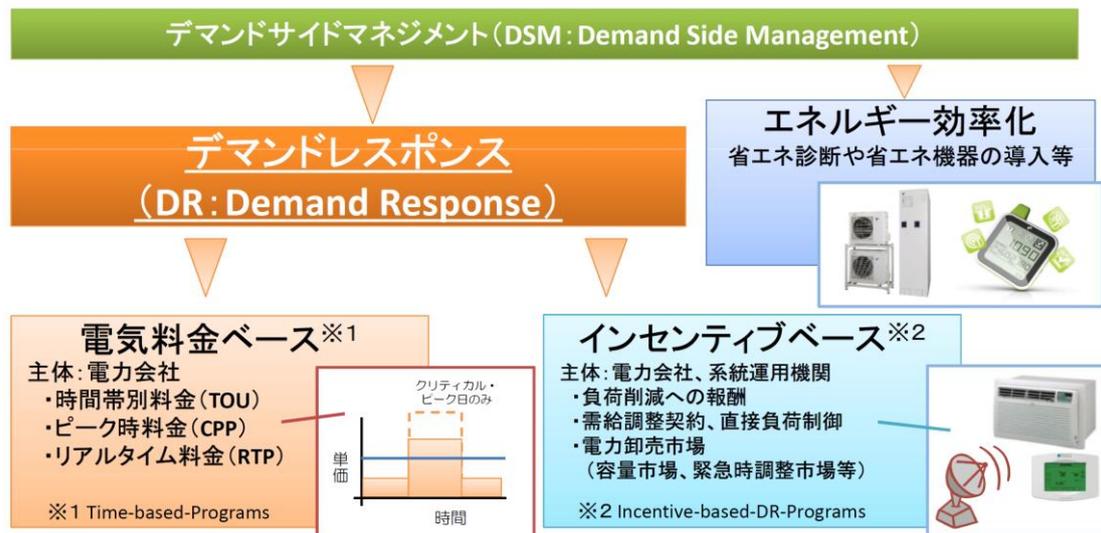


図 2-26 デマンドレスポンスの概要

出所) 資源エネルギー庁：「デマンドレスポンスについて」

(第2回電力システム改革専門委員会資料)

電気料金ベースのデマンドレスポンスは、電気事業者が時間帯（又は時間）別に料金を設定することで、需要家に自らの判断で、割高な料金が設定された高負荷時に需要抑制、割安な料金が設定された低負荷時に需要シフトを促す仕組みである。この電気料金ベースのデ

²² U.S. Department of Energy, Benefits of Demand Response in Electricity Markets and Recommendations for Achieving Them: A Report to the United States Congress Pursuant to Section 1252 of the Energy Policy Act of 2005, February, 2006

²³ インセンティブベースのデマンドレスポンスの一つの実装方法として、直接負荷制御が含まれる。直接負荷制御については、人がマニュアルで行動をするようなデマンドレスポンスと分けるという趣旨で、本報告書では、別のオプションとして記載を行っている。詳しくは次項を参照のこと。

マンドレスポンスで設定される料金メニューには、表 2-7 のようなものが挙げられる。

表 2-7 電気料金型デマンドレスポンスの種類と内容

名称	内容
時間帯別料金 (TOU: Time-of-use Pricing)	時間帯別の平均卸費用・託送費用を反映した電気料金
リアルタイム・プライシング (RTP: Real Time Pricing)	時間別に形成される卸電力市場価格(一日前市場ないしリアルタイム市場)を反映した電気料金
ピーク帯リベート (Peak Time Rebate)	特定の高需要日の特定時間においてベースラインからの電力消費削減に対し割引を適用する電気料金
系統ピーク応答型託送料金 (System Peak Response Transmission Tariff)	インターバルメータを付けて、料金を含む特定の条件の下で高需要期に電力需要を削減して託送料金を削減する方式
重要 (critical)ピーク・プライシング (CPP: Critical Peak Pricing)	平常時は時間帯別料金であるが、特定条件 (緊急時ないし卸電力価格高騰時)により高い単価が適用される電気料金
制御付き重要ピーク・プライシング (Critical Peak Pricing with Load Control)	平常時は時間帯別料金であるが、特定条件 (緊急時ないし卸電力価格高騰時)に直接制御が実施されつつ、より高い単価が適用される電気料金

出所) 日本エネルギー経済研究所: 「需要反応 (デマンドレスポンス) とは何か③ 電気料金型デマンドレスポンス」

また、インセンティブベースのデマンドレスポンスとは、プログラム設置者 (電気事業者、系統運用者) が需要家と契約を締結し、卸電力価格が高騰又は電力需給が逼迫した際に、負荷抑制・遮断を要請又は実施する枠組みである (図 2-27)。ネガワット取引と呼ばれる、需要家による需要削減量を供給量と見立て、市場等で取引する事業形態もあり、アメリカ等においては、複数の需要家の調整量をまとめて取引するアグリゲータが新たなサービスを提供している。

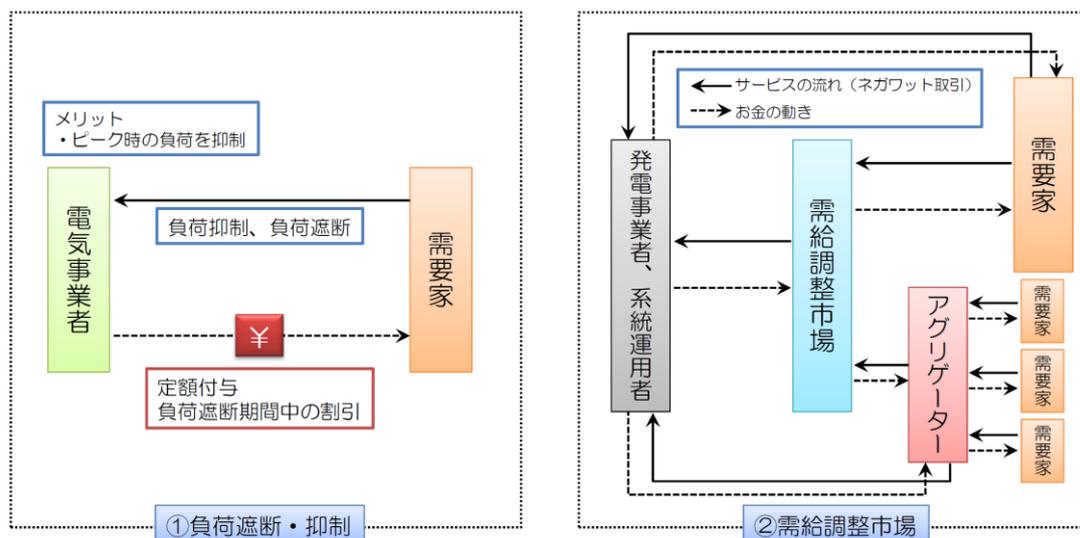


図 2-27 インセンティブベースのデマンドレスポンスの例

出所) 資源エネルギー庁: 「デマンドレスポンスについて」

(第2回電力システム改革専門委員会資料)

このインセンティブベースのデマンドレスポンスの種類は、表 2-8 に示すものが挙げられる。これらの取り組みは、基本的に電力システムのピーク時に需要を下げることが念頭に置かれたサービスとなっているのが一般的である。

表 2-8 インセンティブ型デマンドレスポンスの種類と内容

名称	内容
① 需要入札・買戻し (Demand Bidding and Buyback)	卸市場価格ないし特定価格で卸電力市場ないし小売市場で需要削減を可能とするプログラム
② 直接負荷制御 (Direct Load Control)	短い時間の通知でプログラム運用者が(例えばエアコン、温水器のような)需要家の電気機器を遠隔で止める又はサイクル化するプログラム。直接負荷制御プログラムは主として家庭又は商業用需要家に提供される。
③ 緊急時需要応答 (Emergency Demand Response)	緊急時において達成された負荷削減に対しインセンティブ支払を提供するプログラム
④ 遮断可能負荷 (Interruptible Load)	事前の取り決めに従って緊急時に負荷削減・遮断を行う契約。系統運用者が契約の規定に従って通知を行う。
⑤ 供給力負荷 (Load as Capacity Resource)	緊急時に事前に特定化された負荷削減を約束する需要側供給力
⑥ 運転予備力 (Non-Spinning Reserves)	通知後 10 分以上かかって需給インバランス解消のための需要削減等を提供できる需要側供給力
⑦ 周波数制御サービス (Regulation Service)	系統運用者の提供する周波数維持のためのリアルタイム・シグナルに従って需要を増減することが可能な需要応答サービス。
⑧ 瞬動予備力 (Spinning Reserves)	緊急事態発生後、数分で需給インバランス解消のための需要削減等を提供できる需要側供給力

出所) 日本エネルギー経済研究所：「需要反応 (デマンドレスポンス) とは何か④ インセンティブ型デマンドレスポンス」

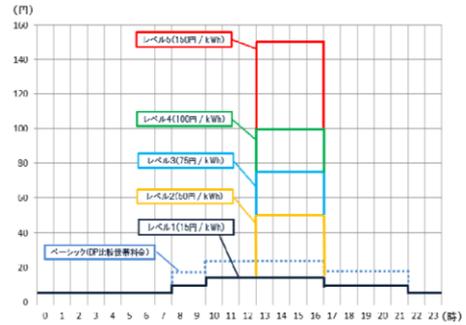
b. 対策活用の動向

我が国では、これまでにデマンドレスポンスが注目を集めた 2009 年頃以降、デマンドレスポンスに関する実証試験が多くなされてきた。大規模なデマンドレスポンスを展開した事例として、「次世代エネルギー・社会システム実証事業」が挙げられる。この事業では、デマンドレスポンス以外にも様々なエネルギーソリューションを組み合わせた「スマートコミュニティ」の検討がなされているが、北九州の実証試験 (北九州スマートコミュニティ創造事業) を例に挙げると、家庭部門、事業者部門の双方におけるデマンドレスポンスに関する実証試験が行われている。

家庭部門においては、夏季、冬季それぞれの期間について、図 2-28 のような料金設定 (ダイナミックプライシング) を設定して、温度条件が下記に示されるトリガーを超えた場合にダイナミックプライシングが発動されるという仕組みとなっている。

住民向け実証条件（夏期）

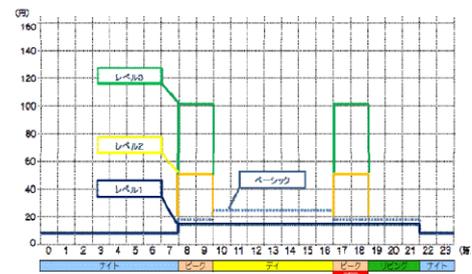
- 実施期間2013年6月～2013年9月
- 電力料金の変更は、**午後**
- 電力料金変更の通知は、**前日夕方**
- DRの発動は、**翌日最高気温予報が30℃以上の平日**
- DR発動日数は、合計45日



電力価格（夏季）

住民向け実証条件（冬期）

- 実施期間2013年12月～2014年2月
- 電力料金の変更は、**午前と夕方の2回**
- 電力料金変更の通知は、**前日夕方**
- ※2014年2月に当日昼通知のCPP実証実施
- DR発動は、**翌日最低気温予報が-1℃以上9℃以下の平日**
- DR発動日数は、合計38日（CPP発動6回）



電力価格（冬季）

図 2-28 北九州で実施された家庭需要家を対象としたデマンドレスポンスの概要
出所「北九州スマートコミュニティ創造事業の実証成果と今後の展開」

上記のプログラムを適用した結果、得られたピークカット効果を表 2-9 に示す。実証期間を通じて、20%前後のピークカット効果が得られていることがわかる。

表 2-9 北九州実証のデマンドレスポンスのピークカット効果

レベル (単価)	2012年度 (夏季)	2012年度 (冬季)	2013年度 (夏季)	2013年度 (冬季)
2 (50円)	-18.1%	-20.1%	-20.2%	-16.2%
3 (75円)	-18.7%	-19.8%	-19.2%	-
4 (100円)	-21.7%	-18.1%	-18.8%	-16.6%
5 (150円)	-22.2%	-21.1%	-19.2%	-
当日通知	-	-	-	-13.8%
発動回数	40回	42回	45回	38回

出所「北九州スマートコミュニティ創造事業の実証成果と今後の展開」