

NEDO

再生可能エネルギー 技術白書

第2版

再生可能エネルギー普及拡大にむけて克服すべき課題と処方箋

独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 編
New Energy and Industrial Technology Development Organization

第1章 再生可能エネルギーの役割

第2章 太陽光発電

第3章 風力発電

第4章 バイオマスエネルギー

第5章 太陽熱発電・太陽熱利用

第6章 海洋エネルギー

第7章 地熱発電

第8章 中小水力発電

第9章 系統サポート技術

第10章 スマートコミュニティ



第9章 系統サポート技術

9.1	再生可能エネルギー導入に伴う系統課題と対策	4
9.1.1	再生可能エネルギー大量導入に伴う課題	4
	(1) 電力需給ギャップの発生	4
	(2) 周波数変動	6
	(3) 配電系統の電圧上昇	7
	(4) 再生可能エネルギー電源の単独運転と不要解列	8
	(5) 系統事故時の電力系統への影響	9
9.1.2	系統課題と対策技術	10
	(1) 電力需給ギャップの発生	10
	(2) 周波数変動	11
	(3) 配電系統の電圧上昇	11
	(4) 再生可能エネルギー電源の単独運転と不要解列	11
	(5) 系統事故時の電力系統の影響	11
9.2	系統サポート技術	11
9.2.1	要素技術	11
	(1) 在来型電源の出力調整	11
	(2) 変動電源の出力調整	15
	(3) FACTS (Flexible AC Transmission System)	23
	(4) 蓄エネルギー	25
	(2) 水素	38
9.2.2	システム制御技術	47
	(1) PCS 制御	47
	(2) 需給運用	50
	(3) 広域運用	51
	(4) 発電出力予測	55
	(5) スマートグリッド	61
9.3	各国の系統課題への対応状況	68
	(1) 系統対策技術の分類の視点	68
	(2) 系統対策技術の特徴	69
9.3.1	欧州における状況	69
9.3.2	米国における状況	71
9.3.3	日本における状況	73
	(1) 次世代送配電ネットワーク研究会	73
	(2) 電力系統利用協議会 (ESCJ) の「風力発電連系可能量確認ワーキンググループ」	75
	(3) 送電系統の熱容量制約への対応	81

9.4	今後に向けた課題と克服方策	82
(1)	電力系統サイドの柔軟性（Flexibility）向上	83
(2)	再生可能エネルギー電源の調整電源化	84
(3)	需要家サイドの対策.....	85
(4)	まとめ	85

9.1 再生可能エネルギー導入に伴う系統課題と対策

9.1.1 再生可能エネルギー大量導入に伴う課題

東日本大震災以降、再生可能エネルギーの導入拡大に向けて固定価格買取制度が施行され、導入が加速されているが、北海道では既に導入限界に達しつつあり、風力発電に関しては新規に系統連系が出来ない状況にある。一部の国民の間では、再生可能エネルギーは既存の原子力発電や火力発電のような基幹電源を100%代替できるとの期待もあるが、現実には電力系統に与える影響から、特に太陽光発電や風力発電などのような気象条件で出力が変動する電源（変動電源：Variable Generation または Variable Renewable Energy）については導入量が制限されるのが実態である。これは我が国だけの問題でなく、ドイツなど再生可能エネルギーの導入先進国でも同様である。ただ、同じ再生可能エネルギーでも水力発電や地熱発電などの出力が安定した電源に関しては別で、現にノルウェーのようにほぼ100%の需要を水力発電で賄っている国やアイスランドのように全需要を水力発電（約7割）と地熱発電（約3割）だけで賄っている国もある。このように導入量の制約を受けるのは、太陽光発電や風力発電のような変動電源であることに留意する必要がある。本章では、主に変動電源を大量導入する際になぜこのような制約があるのか、その制約緩和のための対策にはどんなものがあるのかについて詳述する。なお、本書においては再生可能エネルギーの導入に伴う電力系統への影響を緩和するための対策技術を総称して「系統サポート技術」と呼ぶことにする。また、「再生可能エネルギー電源」とは、主に変動電源を指すものとする。

一般に火力発電などの在来型電源のほとんどは出力を人為的に制御できるが、再生可能エネルギー電源、とりわけ太陽光発電や風力発電などの変動電源は、気象条件により出力が変動するため出力の制御が難しい。このような出力変動を伴う電源が電力系統に大量に導入されることにより、電力系統には以下に示すような影響が引き起こされると想定されている。

(1) 電力需給ギャップの発生

電力供給においては、**図9-1**に示すように、時々刻々と変化する電力需要（以降、需要という）に合わせて電力会社が各発電所の出力を制御し、常に需要と供給を一致させるよう運用されている。このような運用は、電気の物理的特性によるものであり、安定的な電力供給に必須である。しかし、出力制御が困難な再生可能エネルギー電源が増加すると、需要が少ない季節（春季及び秋季）や時間帯（夜間）に、需要から需給調整に最低限必要となる在来型電源の出力を除いた需要（正味需要）を再生可能エネルギー電源の出力が上回るなどの電力需給ギャップが発生する可能性がある。

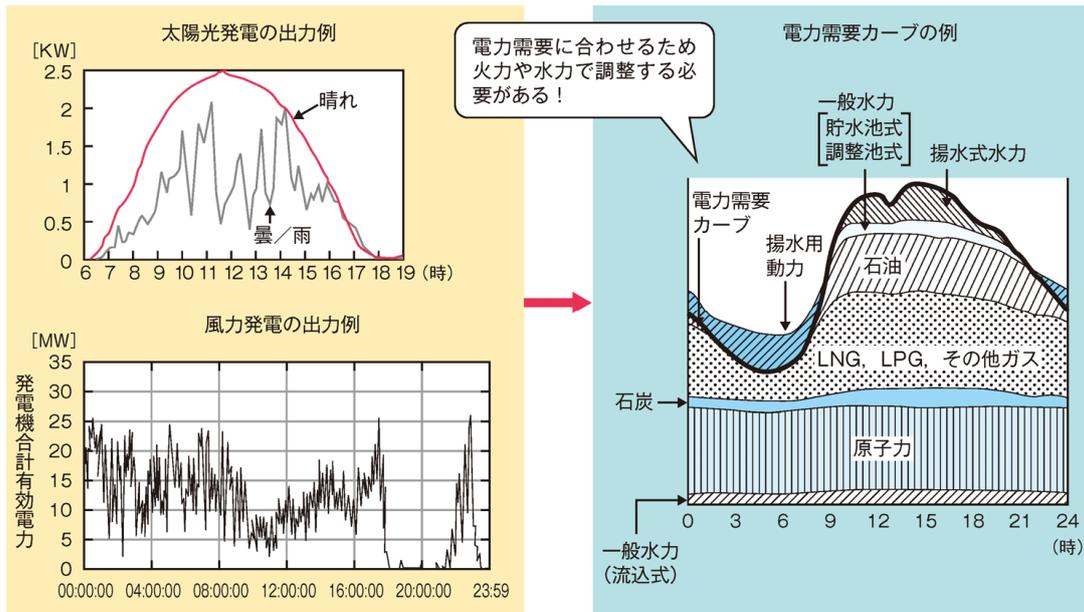


図 9-1 太陽光発電及び風力発電の出力カーブと電力需要カーブと電源構成の例

出典：「平成 24 年度 数表でみる東京電力」（2012，東京電力）より NEDO 作成

例えば、太陽光発電が大量に導入されると、需要が比較的少ない春や秋の週末の昼間に電気が余る、いわゆる余剰電力が発生する（図 9-2）。また、夏至近辺の頃は、需要が最も少なくなる時間帯（午前 4 時）に日の出となるため、需要が立ち上がる午前 7 時までの間に余剰が発生する可能性がある。固定価格買取制度導入後、大規模な太陽光発電の系統連系が進んでいる北海道は梅雨がないため、この時期の余剰電力は深刻な問題になりつつある。また、風力発電が大量導入された場合には、需要の少ない夜間に強い風が吹くと、同様に余剰電力が発生することが想定される。

このような事象は、太陽光発電や風力発電などの変動電源が需要に合わせて出力制御できないことから生じる問題である。

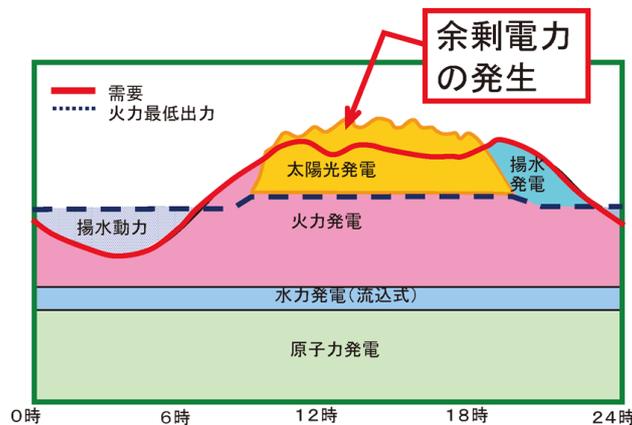


図 9-2 太陽光発電の大量導入時における余剰電力発生イメージ

出典：次世代送配電ネットワーク研究会 報告書（2010，資源エネルギー庁）

第9章 系統サポート技術

(2) 周波数変動

前項で説明したように、安定した電力供給のためには、時々刻々と変動する需要に対して各発電所の出力を制御し、常に需要と発電を一致させる必要があります。これによって周波数を一定に維持している。もし、このバランスが崩れると、周波数が変動し、需要家側の電気機器の運転に影響を与える可能性があるだけでなく、一定値以上に周波数が変動すると、発電機の保護機能が働き、系統から次々と発電機が解列（発電機が電力系統から切り離されること）することにより大停電を引き起こす。

周波数は図9-3に示すように、需要よりも発電が小さい場合には電気が不足して周波数が低下し、需要よりも発電が大きい場合には電気が余って周波数が上昇する。

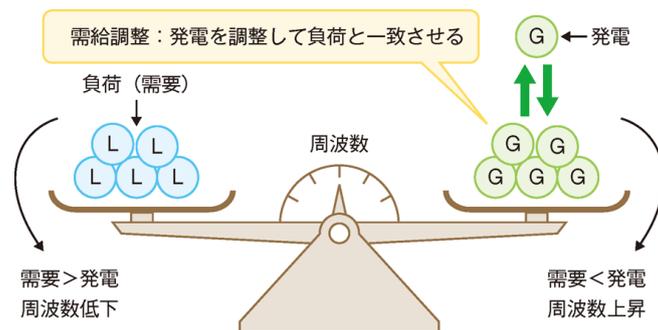


図 9-3 需要と発電の調整イメージ

このような電気的特性から、日本では周波数の変動幅をおおむね $\pm 0.2 \sim \pm 0.3 \text{ Hz}$ の範囲に抑制するよう電力会社が制御を行っている。なお、周波数は東日本が 50 Hz 、西日本が 60 Hz となっている。

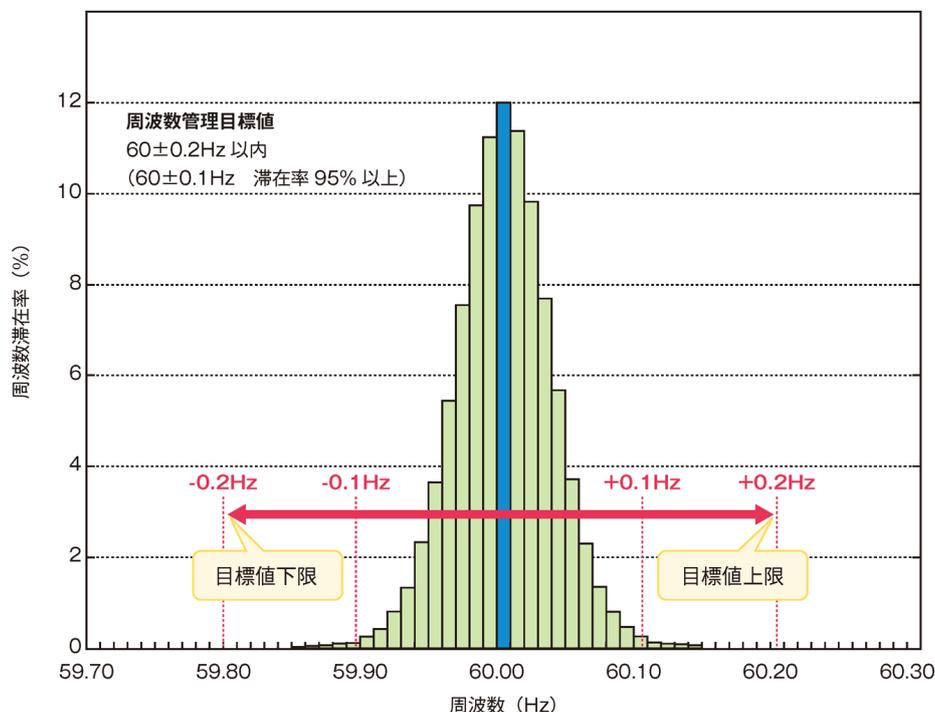


図 9-4 系統周波数の管理目標と実績（西日本エリア）

出典：電力協同研究 第56巻 第4号などより NEDO 作成

周波数調整のためには、瞬時に変動する需要に追従して、短時間で出力調整できる電源を確保しておく必要があり、主に火力発電機と水力発電機により調整を行う。しかし、その調整力は起動時間、出力変化率、出力変化幅の制約があり、再生可能エネルギー電源の出力変動の吸収にも限界がある。

つまり、再生可能エネルギー電源の導入量が増加すると、気象変動による出力変動幅が大きくなり、広域に分散設置した場合の合計出力の変動に関する平滑化効果を考慮しても、既存発電機による出力調整能力では対応できない大きさの変動となれば、需要と供給のバランスが崩れて周波数が適正値を超えて変動し、場合によっては大停電を引き起こすなど、電力供給に重大な影響を与える可能性がある。これが太陽光発電や風力発電などの変動電源が在来型電源を100%代替できない理由であり、導入可能量にはおのずと限界がある。

風力発電については、NEDOの過去の実証から、20～30分程度よりも短い周期の出力変動は風車間に相関はないので平滑化効果が期待できるが、前線通過などによる急激かつ大きな出力変動は平滑化効果が見込めないことがわかっている。このような変動はランプ(ramp)と呼ばれ、近年、変動電源の導入拡大に伴って世界的に問題となっている。例えば、風が強く吹き大きな出力が得られているときに、急な気象変化により短時間のうちに出力が大きく減少した場合(ランプダウン)、その出力減少分を賄う火力発電など他の発電機による出力調整が間に合わない可能性があり、電力供給に大きな支障を来すおそれがある。米国ハワイ州のマウイ島やハワイ島では、風力発電のランプダウンによる0.5Hz規模の周波数低下が頻繁に発生しており、ランプ対策が喫緊の課題となっている。

(3) 配電系統の電圧上昇

前項までの系統の安定性に与える影響とは別に、ローカルの影響として、配電系統(配電線)に連系される再生可能エネルギー電源、特に住宅などに設置される太陽光発電が増加すると、配電系統において電力が逆潮流することによって、連系点の電圧が電気事業法第26条に基づく適正値(101±6V)を逸脱する、いわゆる電圧上昇の問題も生じる。電圧を適正値に維持することは、需要家側の電気機器の正常使用や寿命等への影響、系統側の機器保護の観点から必要とされており、電圧が適正値を超えないよう太陽光発電を止めたり出力を抑制するなどの対策が求められる。その他の対策として太陽光発電用インバータで無効電力を供給して電圧を下げることも検討されているが、現状ではこの方式の採用の可否が国により異なっている。

加えて、配電系統に接続される再生可能エネルギー電源による逆潮流がさらに増加すると、配電用変電所においても逆潮流が発生する。これをバンク逆潮流といい、以前は電気設備の技術基準により禁止されていたが、2013年の法改正に伴って容認されることとなった。配電用変電所の既設の制御装置は、電力が電圧の高い方から低い方に流れることを前提に設計されており、バンク逆潮流を可能にするためには保護装置の追加設置や更新が必要となる。

第9章 系統サポート技術

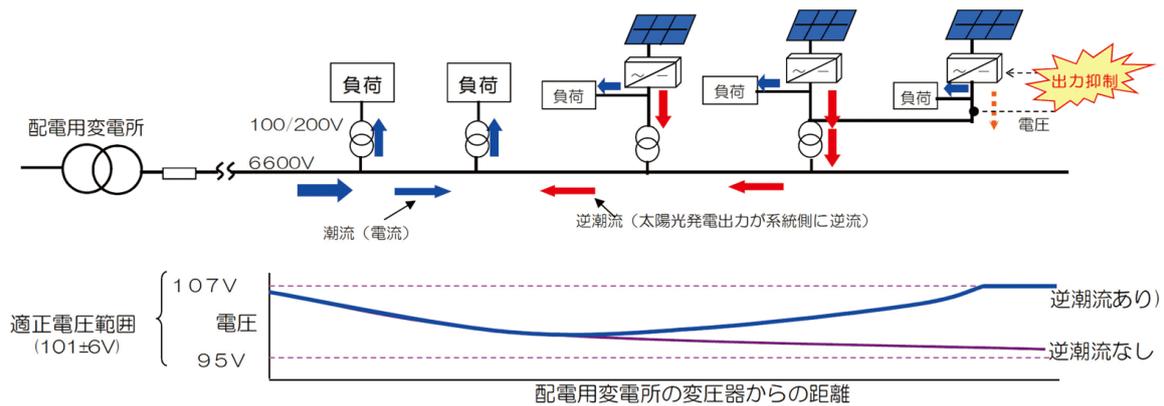


図 9-5 配電系統における電圧上昇のイメージ (1)

出典：第1回次世代送配電ネットワーク研究会，(2010，経済産業省) 資料

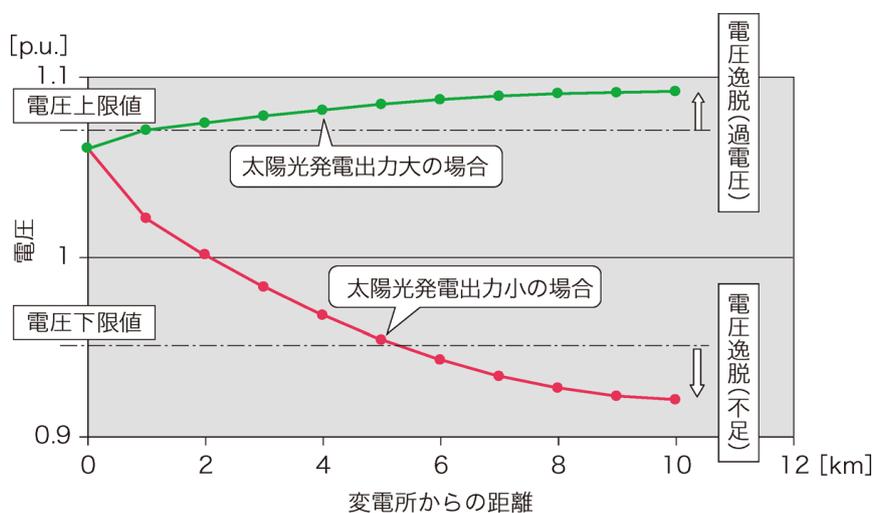


図 9-6 配電系統における電圧上昇のイメージ (2)

出典：「次世代の電力供給システム統合化技術に関する先導調査」，(2008，NEDO)

(4) 再生可能エネルギー電源の単独運転と不要解列

前項までの事象は平常時に懸念される問題であるが，緊急停止事故を含む系統事故時に想定されるものとして，再生可能エネルギー電源の単独運転と不要解列の問題がある。

- i) 単独運転：落雷等による電力系統の事故や工事など，本来，供給を停止し無電圧とすべき電力系統において，再生可能エネルギー電源を含む分散型電源が系統接続したまま運転を継続すること。この単独運転が継続されると，公衆や作業員の感電，機器損傷の発生，消防活動への影響などのおそれがあるため，電力系統から解列させる必要がある。そこで，系統連系する際は，単独運転の状況を即時に検知し解列するという単独運転防止装置の設置が，電気設備の技術基準の解釈¹に基づき義務づけられている。また，日本の配電系統では最短で 15 秒後には再送電される場合があり，解列していなければインバータの焼損などの機器故障リスクもある。

¹ 「電気設備の技術基準の解釈」(原子力安全・保安院 電力安全課通達) 第 276 条において，「発電設備等が単独運転となった自動的に発電設備等を電力系統から解列するための装置を施設すること。」と規定されている。

- ii) 不要解列：電力系統の周波数の動揺や電圧の変動が生じた際、本来、解列すべきでないにも関わらず、1. 動作する必要のない単独運転防止装置が動作する、2. 瞬時電圧低下の影響を受ける等により、再生可能エネルギー電源が解列すること。多数の再生可能エネルギー電源が広域にわたって一斉に解列すると、供給力の大幅な低下につながり、前述した需給バランス等が崩れ、電力供給に支障を来すおそれがある。日本での実例として、2007年の中越沖地震で東京電力の柏崎刈羽原子力発電所の停止により関東一円で周波数が0.9Hz低下したが、その際にNEDOが群馬県太田市で展開していた550台の太陽光発電のうち、一部メーカーのものが一斉に解列した例がある。この現象が広域で発生すると、大量の電源喪失となり系統崩壊の危険性が出てくる。

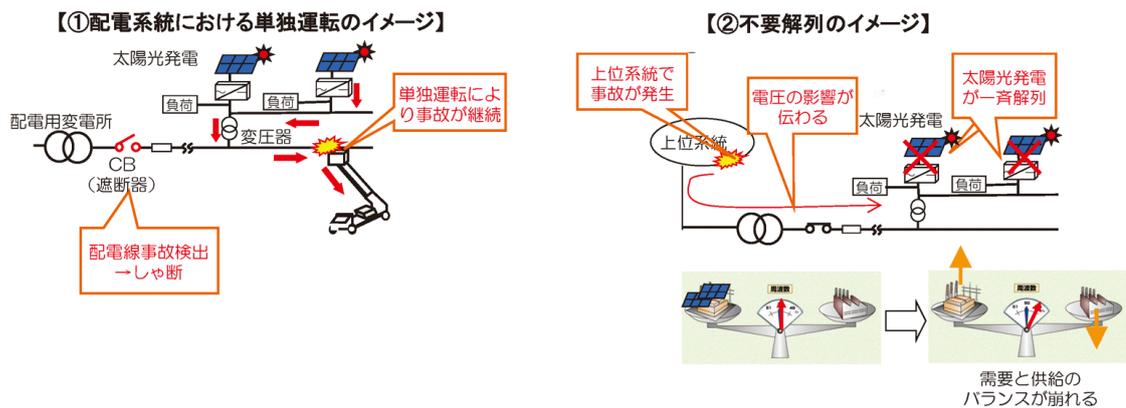


図9-7 配電系統における単独運転と不要解列の問題

出典：「第1回次世代送配電ネットワーク研究会」，（2009，経済産業省），事務局資料

(5) 系統事故時の電力系統への影響

再生可能エネルギー電源の大量導入時において、電力系統に事故があった場合、次に示すような影響が想定される。

- i) 前項記載の通り、系統事故に伴って再生可能エネルギー電源の不要解列が発生した場合、需給バランスが崩れ、電力系統の安定運用（周波数安定性、同期安定性、電圧安定性等）に支障を及ぼすおそれがある。欧州では、風力発電の大量解列の問題が既に顕在化している。
- ii) 火力発電や水力発電等には、同期発電機（回転機）が用いられることが一般的で、系統全体の同期した安定運転に貢献している。しかし、インバータを介して系統連系する太陽光発電等、同期化力を持たない電源が増加することにより、系統事故時に電力系統の周波数を維持する能力が低下するおそれがある。そこで、宮古島における「離島独立型系統新エネルギー導入実証事業」（経済産業省）では、インバータに周波数維持機能（ガバナーフリー機能）を付加し、擬似的に同期化力を持たせている。
- iii) 需要家側に太陽光発電等の再生可能エネルギー電源が設置されると、需要家内の需要の一部を再生可能エネルギー電源により賄うため、電力系統側からはその需要家の真の需要を把握できなくなる。そのため、系統事故により需要家側に設置された再生可能エネルギー

第9章 系統サポート技術

電源が解列した場合、復旧に必要な需要を正確に把握できず、事故復旧が遅れるなどの影響が生じるおそれがある。この対策として、需要家側に設置された再生可能エネルギー電源の発電出力を常時把握することが必要になる。

- iv) 系統事故時には、交流発電設備である同期発電機や誘導発電機、二次励磁発電機から短絡電流が供給されるとともに、インバータを介して系統連系する設備からも短絡電流が供給されるため（インバータ保護機能が動作している場合）、既設遮断器の定格遮断電流を超過するなどの短絡容量増加も問題となり、遮断器取替や短絡電流を制限する装置の設置等の対策が必要となる。

以上、再生可能エネルギー電源の大量導入が電力系統に与える影響として、主な4項目を説明した。いずれも電気の物理的な特性に起因する、電力系統の安定運用に関する課題であり、変動する再生可能エネルギー電源の増加に伴い、対策を講じる必要がある。

9.1.2 系統課題と対策技術

前述した再生可能エネルギー電源大量導入に伴う系統課題の対策技術を表9-1に整理し、以下に、その概略を記載する。出力変動する再生可能エネルギー電源、いわゆる変動電源の大量導入を実現するためには、電力系統あるいは再生可能エネルギー電源そのものに、太陽光発電や風力発電などの不安定な電源を受け入れるための柔軟性をいかに持たせるかがポイントとなる。つまり、導入可能限界は、需要家サイドも含めた電力ネットワーク全体の柔軟性の度合いにより決まる。なお、詳しくは9.2 系統サポート技術において解説する。

表 9-1 系統課題の対策技術

系統課題	対策技術（系統サポート技術）								
	要素技術				システム制御技術				
	在来型電源の出力調整	変動電源の出力調整	F A C T S	蓄エネルギー	P C S 制御	需給運用	広域運用	発電出力予測	スマートグリッド
(1) 電力需給ギャップの発生	○	○		○		○	○	○	○
(2) 周波数変動	○	○		○		○	○	○	○
(3) 電圧上昇			○		○				
(4) 単独運転と不要解列					○				
(5) 事故時電力系統影響						○			

(1) 電力需給ギャップの発生

- ・余剰電力発生時には、在来型電源の出力調整、再生可能エネルギー電源の出力抑制・調整（出力予測に基づくものも含む）、余剰電力の貯蔵、需要の創出などにより対応する。（9.2.1 (1) 在来型電源の出力調整、(2) 変動電源の出力調整、(4) 蓄エネルギー、9.2.2 (2) 需給運用、9.2.2 (4) 発電出力予測、9.2.2 (5) スマートグリッド）

(2) 周波数変動

- ・需要変動に対応可能な既存の調整電源（水力発電及び火力発電）による出力調整を行う。（9.2.1 (1) 在来型電源の出力調整）
- ・再生可能エネルギー電源側で出力抑制あるいは変動を抑制する運転制御を行う。（9.2.1 (2) 変動電源の出力調整）
- ・再生可能エネルギー電源側または電力系統側におけるエネルギー貯蔵技術の導入や、需要家側における需要制御により抑制する。（9.2.1 (4) 蓄エネルギー、9.2.1 (5) スマートグリッド）
- ・再生可能エネルギー電源の出力変動を予測し、需給運用により周波数変動を抑制する。（9.2.2 (2) 需給運用、9.2.2 (4) 発電出力予測）
- ・需給バランスを取るエリアを広域化することで、再生可能エネルギー電源の出力及び需要の変動を平滑化効果によって緩和する。（9.2.2 (3) 広域運用）

(3) 配電系統の電圧上昇

- ・配電系統における柱上変圧器の分割設置や電圧調整装置等を設置する。（9.2.1 (3) FACTS）
- ・再生可能エネルギー電源側に設置する PCS（パワーコンディショナ）による対策を実施する。（9.2.2 (1) PCS 制御）

(4) 再生可能エネルギー電源の単独運転と不要解列

- ・再生可能エネルギー電源に単独運転防止機能、不要解列防止機能を搭載する。（9.2.2 (1) PCS 制御）

(5) 系統事故時の電力系統の影響

- ・再生可能エネルギー電源の大量導入時における系統事故時の影響（電力系統の安定運用、周波数維持、需給運用、短絡容量など）を、評価ツール（シミュレータなど）で定量的に把握し、安定運用を確保する。（9.2.2 (2) 需給運用）

9.2 系統サポート技術

9.2.1 要素技術

(1) 在来型電源の出力調整

前述したとおり、電力供給にあたっては常に電力の需要と供給を一致させる必要があり、太陽光発電や風力発電のように気象条件で出力変動する再生可能エネルギー電源を大量導入するためには、その変動する出力と需要との間のギャップを火力発電や水力発電などの在来型電源の出力調整により吸収しなければならない。在来型電源による出力調整は、現在のように太陽光発電や風力発電の導入が進む以前から、需要と供給を合わせるために行われてきた。今後は、出力変動する大量の再生可能エネルギー電源を受け入れるために、電力システム全体の調整能力を大幅に向上させることが課題となる。

図 9-8 に、出力調整のための運転制御に関する現在の考え方を示す。需要変動は、微小変動分、短周期成分、長周期成分の 3 つの成分に分けることができ、それぞれガバナフリー（GF）、負荷

第9章 系統サポート技術

周波数制御（LFC）、経済負荷配分制御（EDC）により、主に火力発電と水力発電を用いて需要変動に対応した出力調整を行う。

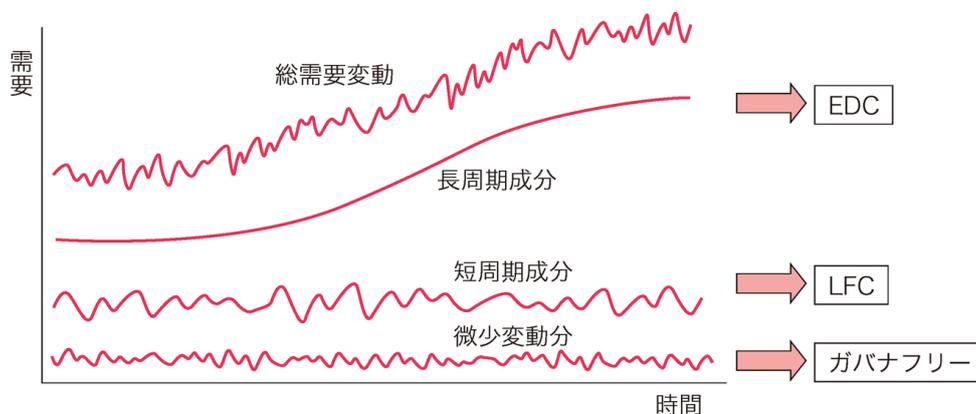


図 9-8 需要変動周期に応じた運転制御

出典：低炭素電力供給システムに関する研究会 報告書より NEDO 作成

表 9-2 運転制御の概要

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
EDC（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

出典：NEDO 作成資料

水力発電（流込式除く）は、貯めた水を流すことで起動できるので起動時間が数分程度と短く、また出力変化速度も大きいため、出力調整においては大きな役割を果たしている。

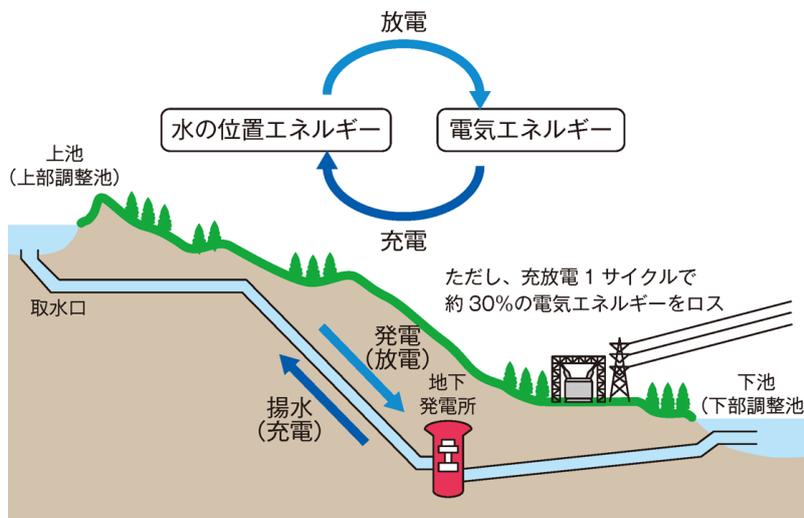


図 9-9 揚水式水力発電のしくみ

出典：九州電力ホームページ (http://www.kyuden.co.jp/power_usages_faq_yousui.html) より NEDO 作成

特に揚水式水力発電（揚水発電）は、上池と下池の間で水を上げ下げすることで、発電だけでなく、水の位置エネルギーとして蓄電することもできるため、再生可能エネルギー電源の余剰電力を吸収することも可能である（図9-9）。さらに、下池から上池に水を上げる揚水時に、ポンプ水車の回転を同期回転数から独立して制御できる可変速揚水発電については、揚水運転時に入力電力を調整できるため、需要が低く火力発電の調整力が不足する時間帯などにおける電力供給システムの柔軟性向上に大きく貢献しており、海外でも再生可能エネルギー電源の不安定出力の調整用として期待されている。

一般に再生可能エネルギー電源の導入先進国、または国際連系線でつながる近隣国には、水力発電所を多数保有しているケースが多く見られる。総発電電力量の95%程度が水力発電であるノルウェーが、総発電電力量の20%程度にも及ぶ大量の風力発電を導入したデンマークの需給調整の役割を果たしているのがその例である。つまり、出力変動する再生可能エネルギー電源の導入には、その変動を吸収するため、出力調整可能な電源が必須である。多数の河川はあるが総発電電力量の10%程度と水力発電の容量に限られる我が国においては、火力発電の調整力の活用も重要である。

表 9-3 水力発電所の出力調整幅、出力変化率、起動時間

概要	流込式	調整池式	貯水池式	揚水式		
	河川の自然流量をそのまま利用する発電方式	1日～1週間程度の負荷の変動に対応できる調整池を有し、ピーク時に発電する方式	季節的な河川の流量変化を大貯水池で調整し発電する方式	発電運転	揚水運転	
					可変速機	定速機
ガバナフリー運転	×	△	○	○	○	×
LFC 調整能力	×	△	○	○	○	×
出力調整能力	×	○	○	○	○	×
出力調整幅	—	50程度～100%			70程度～100%	—
出力変化	—	1分程度（出力調整幅内の出力変化）			—	
起動/停止	—	3～5分/1～2分			5～10分/1～2分	
主な役割	ベース供給力	ピーク供給力調整力	ピーク供給力調整力	ピーク供給力調整力予備力	揚水動力調整力	揚水動力

出典：経済産業省 資料より NEDO 作成

火力発電は、水力発電と比較すると、その出力調整機能がやや劣る。例えば、起動時間は表9-3に示すように、起動に汽力発電方式（蒸気タービンにより発電する方式）で3～10時間、最新のコンバインドサイクル発電方式（ガスタービンと蒸気タービンを組み合わせた高効率発電方式：GTCC）でもガスタービンの起動には1時間程度を要する。従って、短周期変動に対応するためには火力発電機を最低出力（発電機により異なるが定格出力の15～30%程度）以上で運転させておかなければならない。その上で、火力発電機の出力を1～10%/分（発電機により異なる）の制約以内の出力変化率で調整する必要がある。この出力変化率の制約は、タービンブレードの熱膨張によるストレス抑制などによるものである。

第9章 系統サポート技術

表 9-4 火力発電所の出力調整幅, 出力変化率, 起動時間

タイプ	汽力発電方式						コンバインド発電方式		
	ドラム (35 万 kW クラス)			貫流 (70 万 kW クラス)			1100°C級 (単軸 15 万 kW クラス)	1300°C級 (単軸 35 万 kW クラス)	
燃料種別	石油	LNG	石炭	石油	LNG	石炭	LNG	LNG	
ガバナフリー運転	○	○	○	○	○	○	○	○	
LFC 調整力	○	○	○	○	○	○	○	○	
出力調整力	○	○	○	○	○	○	単軸△ 系列○	単軸○ 系列○	
出力調整幅	30%~ 100%	20%~ 100%	30%~ 100%	15%~ 100%	15%~ 100%	30%~ 100%	単軸 80%~100% 系列 20%~100%	単軸 50%~100% 系列 20%~100%	
出力変化率	3%/分	3%/分	1%/分	5%/分	5%/分	3%/分	7%/分	10%/分	
起動時間 (時間)	WSS	20~30 時間			30~40 時間			12 時間	
	DSS	3~5 時間			5~10 時間			1 (並列 0.5) 時間	

出典：経済産業省 資料より NEDO 作成

火力発電では、出力変化率が大きく発電効率も高いコンバインドサイクル発電が、再生可能エネルギー電源の出力変動対応用として世界的に活用されている。特に複数のガスタービンに対して蒸気タービン 1 台を組み合わせた多軸型（系列）は最低出力が定格の 20%と、ガスタービン 1 台に対して蒸気タービン 1 台を組み合わせた単軸型よりも出力変動幅を広くとれる点で、出力調整用電源として優れている。現在、変動の大きな再生可能エネルギー電源と組み合わせることを想定し、より出力調整特性に優れたガスタービンの技術開発が進められている。

例えば GE（ゼネラルエレクトリック）社が 2012 年に発表した多軸型の新しいコンバインドサイクル発電機（Flex Efficiency 60）は、起動してから定格出力の 30%までに 7 分、66%までに 10 分、100%までに 30 分といった短い起動時間を実現している。また最低出力は定格の 14%まで下げることができ、離島などにおける風力発電の変動をこれまで以上に吸収することが可能になる。

その他の火力発電方式としてガスエンジンがあり、コンバインドサイクル発電よりも負荷追従性能に非常に優れ、数百 MW クラスでは発電出力を 10%から 90%に上げるのに僅か 1 分程度と短いため、欧米では風力発電の変動補償を目的として数百 MW クラスのガスエンジン発電設備が設置されてきている。フィンランドのバルチラ（Wärtsilä）社は、船用原動機での経験を活かした大型の高効率ガスエンジンを開発しており、米国では、これを用いた風力発電の変動補償用の発電所が建設されている。

なお、ガスエンジンとガスタービンの大きな違いは、ほとんどのガスエンジンではセルモーターでブラックスタート（停電状態からの立ち上げ）が可能である（小さなバッテリーで起動可能）が、ガスタービンは燃焼を開始する前に燃焼用空気を圧縮するためのコンプレッサが必要なため、ブラックスタートにはディーゼルエンジン発電機などの電源が別途必要となる。

以上のように火力発電では、出力変化率の大きさが出力調整における重要な要素となるが、その他にも出力調整幅の拡大すなわち最低出力の低減が、いわゆる「下げ代問題」への対応で重要になる。下げ代問題とは、気象条件が良く太陽光発電や風力発電の発電量が増えた時、その増分

に相当する火力発電機の出力を絞る必要があるが、各発電機は燃料、方式や機種の違いによって決まる最低出力以下に出力を絞ることはできず、需要が少ない休日、夜間などの軽負荷時に出力調整できない事態に陥ることである。この場合、現状では再生可能エネルギー電源側の出力を抑制するしかない。

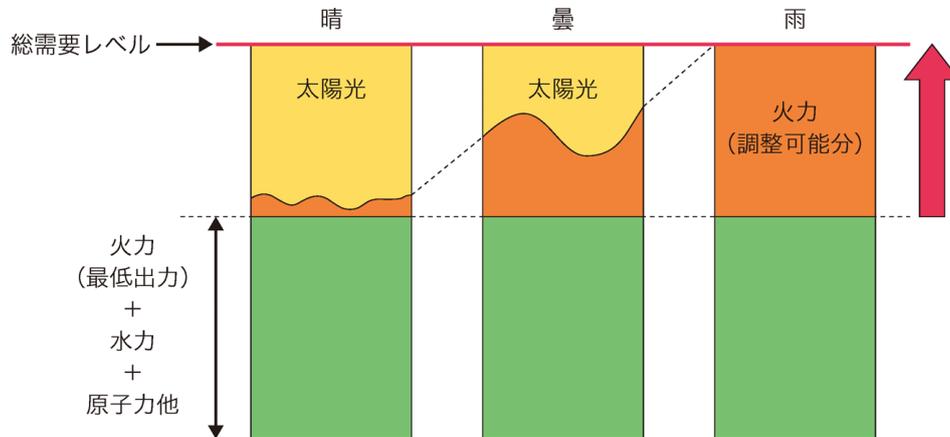


図 9-10 下げ代のイメージ

出典：低炭素電力供給システムに関する研究会 資料より NEDO 作成

このように火力発電については、出力を柔軟に調整できる発電機の開発が今後期待される。

(2) 変動電源の出力調整

再生可能エネルギー電源の出力変動に伴う系統課題の解決策の一つとして、再生可能エネルギー電源自身に出力調整機能を持たせることで、その出力変動を緩和することが挙げられる。我が国では経済産業省令により、電力会社は 500kW 以上の設備を保有する太陽光発電事業者および風力発電事業者に対し、需給運用に支障を及ぼす可能性がある場合には、年 30 日以内であれば金銭補償なしで出力抑制を要請できることとなっており（30 日ルール）、今後、導入が進むにつれ、これら電源の出力調整の必要性が高まると考えられる。

なお、出力調整の方法のうち、蓄エネルギー設備の活用によるものは後節に譲り、ここではその他の対策技術、主に風力発電の出力調整技術について説明する。

風力発電では、一般に単機の出力変動は大きいですが、多数機から構成されるウィンドファームや、広いエリアに分散した多数のウィンドファームの合計出力は、それぞれの地点での風況が異なることによる平滑化効果により、出力変動がある程度低減されることが知られている。しかし、表 9-5 に示すように出力変動の最大値をみると、例えばデンマークのように 300km 四方のエリアに 100 を超えるサイト数があっても、1 時間では最大 23%、4 時間では最大 62%もの出力変動がある。

第9章 系統サポート技術

表 9-5 風力発電の出力変動率の最大値

地域	エリアサイズ	サイト数	10~15分		1時間		4時間		12時間	
			最大低下	最大上昇	最大低下	最大上昇	最大低下	最大上昇	最大低下	最大上昇
デンマーク全土	300×300 km ²	> 100			-23 %	+20 %	-62 %	+53 %	-74 %	+79 %
デンマーク西部	200×200 km ²	> 100			-26 %	+20 %	-70 %	+57 %	-74 %	+84 %
デンマーク東部	200×200 km ²	> 100			-25 %	+36 %	-65 %	+72 %	-74 %	+72 %
アイルランド	280×480 km ²	11	-12 %	+12 %	-30 %	+30 %	-50 %	+50 %	-70 %	+70 %
ポルトガル	300×800 km ²	29	-12 %	+12 %	-16 %	+13 %	-34 %	+23 %	-52 %	+43 %
ドイツ	400×400 km ²	> 100	-6 %	+6 %	-17 %	+12 %	-40 %	+27 %		
フィンランド	400×900 km ²	30			-16 %	+16 %	-41 %	+40 %	-66 %	+59 %
スウェーデン	400×900 km ²	56			-17 %	+19 %	-40 %	+40 %		
米国ミッドウェスト	200×200 km ²	3	-34 %	+30 %	-39 %	+35 %	-58 %	+60 %	-78 %	+81 %
米国テキサス	490×490 km ²	3	-39 %	+39 %	-38 %	+36 %	-59 %	+55 %	-74 %	+76 %
米国ミッドウェスト+オクラホマ	200×1,200 km ²	4	-26 %	+27 %	-31 %	+28 %	-48 %	+52 %	-73 %	+75 %

出典：“Design and Operation of Power Systems with Large Amounts of Wind Power” より NEDO 作成

このような大きな出力変動は、急に無風から強風が吹いたり、その逆ということだけではなく、風力発電の出力特性に起因して発生することがある。図 9-11 に示すように、風力発電は強風時に一定の風速（カットアウト風速）以上になると安全上の理由から停止するよう設計されているため、低気圧などで強風が吹いている時にカットアウト風速に到達すると一気に定格出力から出力ゼロとなる（カットアウト）。もしこれが短時間に多数の風力発電で発生すると、非常に大きな出力ダウンとなる。

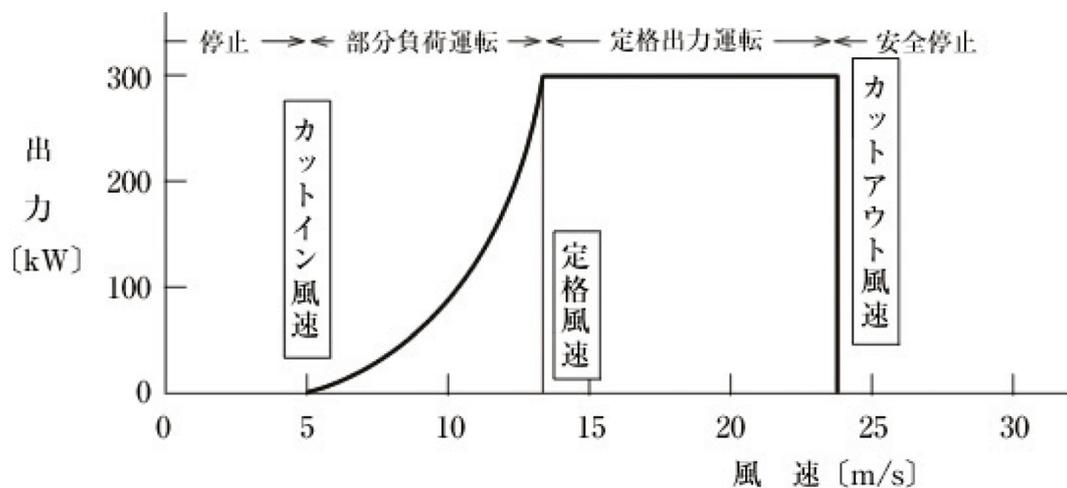


図 9-11 風力発電の出力特性（パワーカーブ）の例

風力発電による大きな出力変動は、発生頻度が低くても発生時に火力発電など従来型電源の出力調整が追いつかなければ大停電に繋がる。前述のとおり、火力発電でも汽力発電の場合には起動に3～10時間を要するため、風力発電の導入量の増加に従い、電力供給に支障を及ぼす可能性は高まると考えられる。特に我が国は国際連系線がなく、デンマーク、ドイツなど欧州の国々のように他国に出力調整を依頼することができないため、より深刻である。このような課題を克服するため、今後、風力発電の出力調整は極めて重要である。

現状、風力発電の短周期変動の対策としては、風車の翼のピッチ制御と可変速制御（DFIG方式、フルコンバータ方式）が既に導入され、実運用されている。

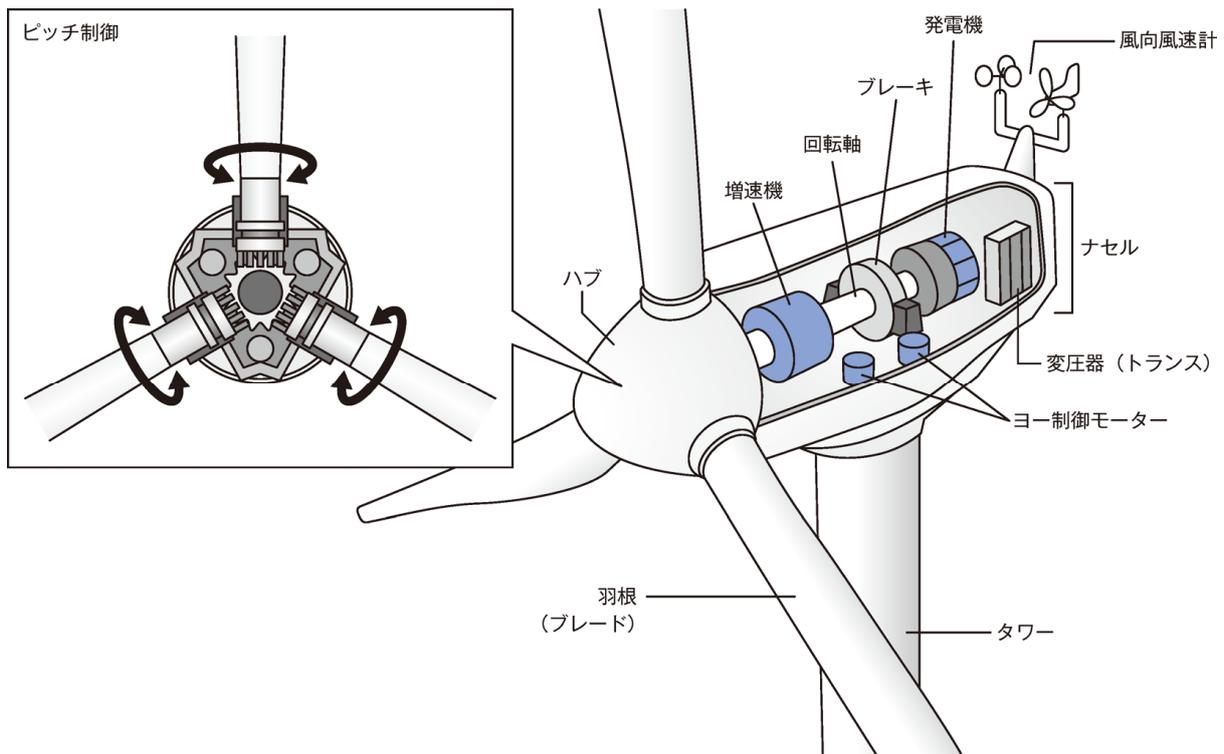


図9-12 風力発電のピッチ制御

出典：NEDO 作成資料

風車の翼は、図9-12のように、通常は風速に応じて最大の出力が得られるように翼のピッチ角を制御するが、出力調整が必要な時には、風を逃がすことで最大ではない所望の出力になるように翼の角度を制御する。

また、可変速制御では、風車の回転を可変速化することで出力調整を行う。具体的には、DFIG（Doubly-Fed Induction Generator）方式においては巻線形誘導発電機を用いるもので、近年導入される機種の大半がこの方式である。フルコンバータ方式では、同期発電機を用いており、増速機がないギアレス方式のため騒音も低減できるメリットがある（第3章参照）。

他方、長周期変動に対しては、蓄エネルギー設備の併設、または下げ代不足時における風力発電の出力抑制（または停止）以外に、これまでは有効な方法がなかったのが実態である。

しかし、近年になって下げ代不足時の出力抑制以外に、常時、風力発電の出力を最大出力以下に抑制して運転し、電力系統での発電量が不足する場合に風力発電の出力を増加させる方策が検

第9章 系統サポート技術

討されている。これにより、発電出力の抑制による下げ代不足対応という消極的な系統周波数安定化対策のみならず、風力発電が積極的に系統周波数の維持に貢献することが期待されている。ただし、この方策では、風況の良い時間帯において機会損失が発生することが課題として認識されており、今後、周波数維持への貢献による発電機会損失を制度的に補償する制度（たとえば、アンシラリー市場など）との組み合わせについても検討が必要である。

1) 風力発電の系統貢献

風力発電の系統連系では、夜間等の軽負荷期において風力発電の出力が増大すると、火力発電の出力を低下、あるいは火力発電機の運転台数を少なくせざるを得ないため、LFC（Load Frequency Control）調整力が不足したり、火力発電の下げ代が不足するといった需給調整面での課題があり、すでに、日本の多くの電力会社では風力発電の系統連系に制約を設けている。なお、LFC調整力はESCJルールにより系統容量の1~2%を確保することとなっている。

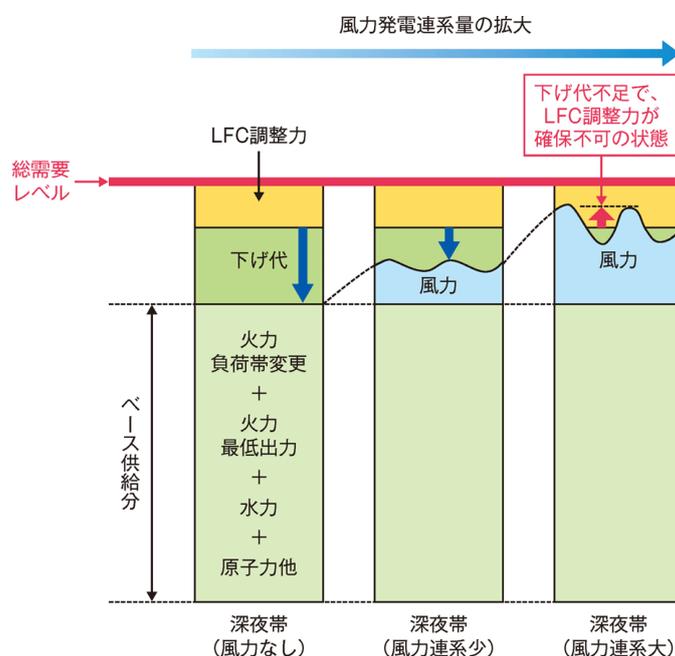


図 9-13 風力発電の拡大に伴う系統周波数面への影響

出典：「LFC調整力の拡大について」，(2004/6, 東北電力)，第4回風力発電系統連系対策小委員会資料より NEDO 作成

現在、LFC調整力不足に対しては連系可能量として制約することに加え、蓄電池併設による出力変動緩和制御型の風力発電設備により対応を行っている。また、下げ代不足時に対しては、例えば青森県の二又風力発電所のように、蓄電池併設による出力一定制御型の風力発電設備による対応も一部では見られるが、多くは風力発電を電力会社からの給電指令により解列または出力抑制するなどの対策が中心となっている。

今後、風力発電の導入が進んだ場合に備え、風力発電機に、より積極的な系統周波数制御の機能を担わせることも検討されている。例えば、現在は、系統周波数の面では下げ代不足が問題視されているが、上げ代（出力を増加させる方向）を持たせることにより、風力発電を積極的に活用することも検討されている。

風力発電では、通常、電流・電圧を最適化して最大電力を得る MPPT 制御（最大電力点追従制御）が行われている。この場合、風速が一定であっても、ピッチ制御により運転点を最大出力点からずらすことで発電出力を減らす方向に制御することができるが、発電出力を増やす方向に制御することはできない。しかし、通常の運転時に運転点を敢えて最大出力からずらして出力抑制して運転することで、抑制分の上げ代を活用することができる。具体例として、**図 9-14** に示すように、MPPT 制御に対し 90% の発電出力で運転していれば、残り 10% を上げ代として活用することができる。この場合、MPPT 制御を行う場合の 90% の発電出力となる運転点は、例えば風速 8m/s の場合、回転数の異なる A 点と C 点の 2 つの点が存在する。C 点は回転速度の上限に留意が必要であるが、回転子の回転エネルギーも併せて放出することにより B 点へ速やかに運転点を移動させ出力を増加させることができる。他方、A 点で運転している場合には、回転子の速度も上昇する方向に移動することから、回転エネルギーを蓄積する方向への移動であり、発電出力増加の応答性に劣る。

なお、このように定常的に MPPT 制御からずらした運転を行うことは、発電電力量の低下を意味する。しかし、将来、風力発電の導入量が増大し、安定的な需給調整の維持に積極的に貢献するためには、このような運用も、他の周波数対策（蓄電池等）との組み合わせにおいて有意な方策となりうると考えられる。

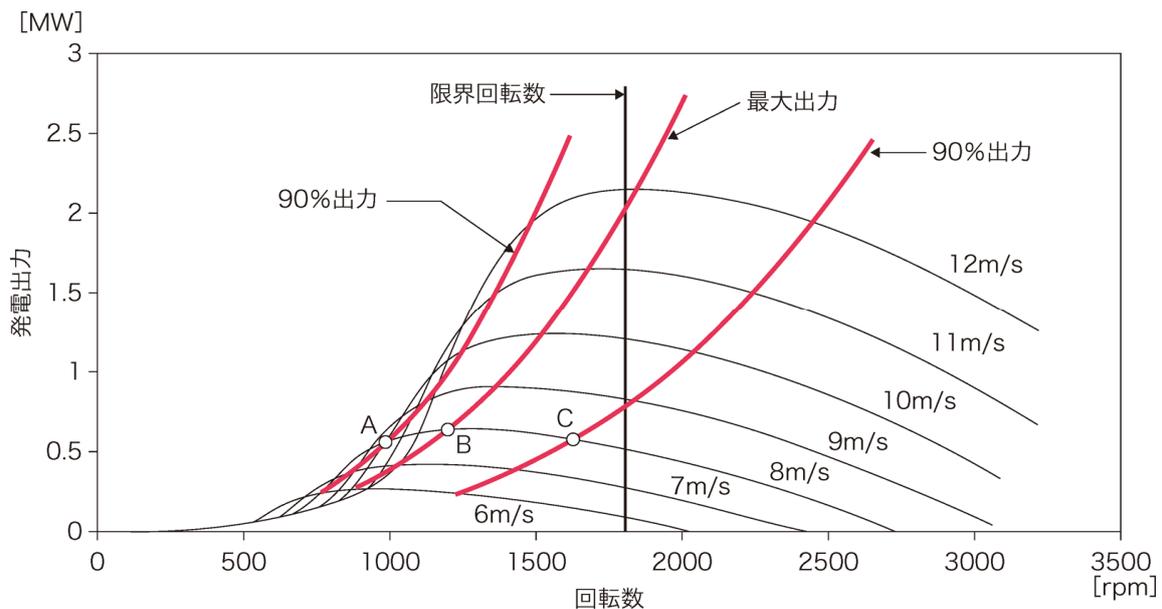


図 9-14 DFIG 方式風力発電機の発電出力回転数特性

出典: G. Ramtharan, J.B. Ekanayake and N. Jenkins: "Frequency support from doubly fed induction generator wind turbines", (2007), IET Renewable Power Generation, vol.1 より NEDO 作成

太陽光発電はインバータを介して系統連系し、風力発電は誘導発電機（直結あるいは巻線型誘導発電機の二次励磁）またはインバータを介して系統連系する。そのため、太陽光発電や風力発電が大量に連系され、同期発電機を用いている在来型電源（水力、火力、原子力発電）を代替する場合には、現在の交流電力システムの特徴が大きく変化することが考えられる。特に、同期発電機が持つ同期トルクおよびダンピングトルクの減少により、過渡安定度の様相が大きく変わる可能性がある。

第9章 系統サポート技術

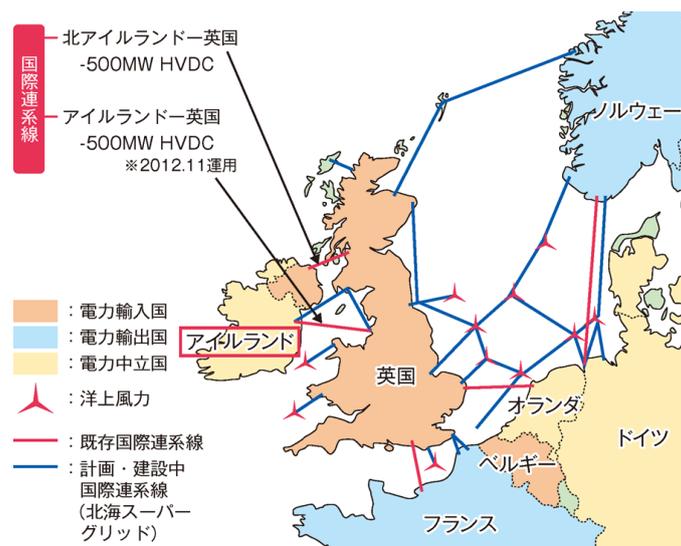


図 9-15 アイルランドと英国の系統連系の概要

出典：総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会第10回会合資料，(2013, 資源エネルギー庁) Daniel Joyce:” Ireland Wind Experience”, UVIG Workshop on Variable Generation Forecasting Applications to Power System Planning and Operations (February, 2013) より NEDO 作成

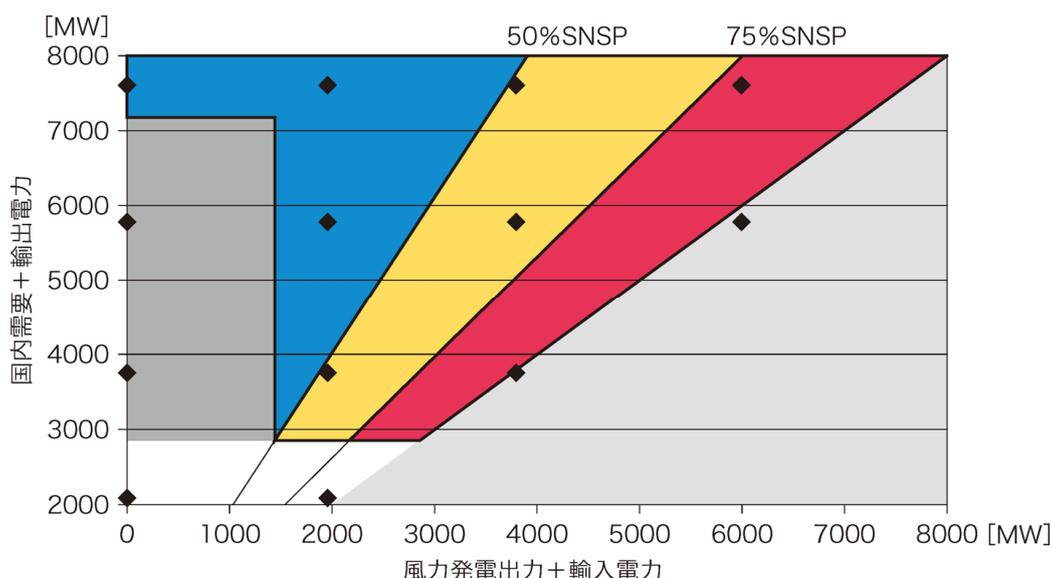


図 9-16 EirGrid 系統の SNSP による運転可能範囲

出典：” Ensuring a Secure Reliable and Efficient Power System in a Changing Environment”, EirGrid (June 2011) [http://www.eirgrid.com/media/Ensuring a Secure Reliable and Efficient Power System Report.pdf](http://www.eirgrid.com/media/Ensuring_a_Secure_Reliable_and_Efficient_Power_System_Report.pdf) より NEDO 作成

実際、アイルランドでは、2012年における最大需要 4589MW，最小需要 1614MW において、風力発電による最大発電電力 1506MW（設備容量は 1650MW）を記録しているが、電力系統は 2 ルートの直流送電（500MW×2）により英国と連系されているのみであるため、定常的な需給バランスのみならず、同期トルクと慣性の不足が健在化しており、TSO である EirGrid では、慣性を常時監視するシステムを導入している。このシステムでは、SNSP（System Non-Synchronous Penetration）と呼ぶ指標を導入し、これにより同期トルクと慣性の監視・評価を行い、SNSP が 50%未満であれば電力系統が安定であると判断する。数年後には、系統対策等の

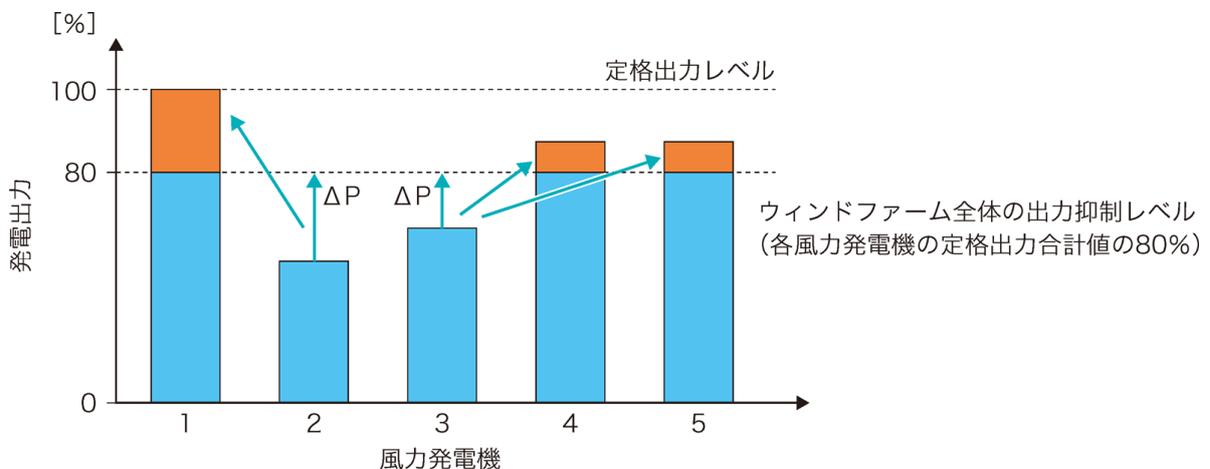
実施により、SNSP が 75%未満でも安定な運用が可能であるとの見通しも得ているが、SNSP が 75%以上では、通常対策では安定な運用は不可能であるとも結論付けている。

このような状況のもと、風力発電自体に、同期発電機を用いた在来型発電と同様の特性を持たせることが検討されている。例えば、現在、最も一般的に普及している DFIG (Doubly-Fed Induction Generator) 方式の風力発電に対して、風力発電機の自端の周波数および発電機のすべりを計測し、この情報に基づいて励磁制御系により同期化トルク及びダンピングトルクを発生させることが検討されている。

2) ウィンドファームの統合制御

風力発電は、通常では個別の風力発電単機で電圧制御及び出力制御を行っている。しかし、電力系統の安定運用を考えた場合、風車単体での制御ではなく、ウィンドファームの連系点において出力（無効電力および有効電力）制御を行うことが必要であり、また、ウィンドファーム単位で制御を行う方が発電電力量を最大化することができる。このような機能は、ウィンドファームコントローラあるいはパークコントローラと呼ばれる。

電力系統に連系する風力発電の発電出力が制限される場合を考える。図 9-17 のように、発電出力を定格出力合計の 80%に制限されたとすると、ウィンドファーム内の各発電機で出力に大きなばらつきがあるような場合、各発電機を一律に 80%に制限することで逸失する発電電力量が生じる。各発電機一律に出力制限するのではなく、ウィンドファームとして定格出力総計の 80%に制限することにより発電電力量の逸失を回避できる。



※：2, 3号機が出力制限を下回る分を他の号機へ振り分け、ウィンドファームの総出力を最大化する。

図 9-17 ウィンドファームでの出力制御

出典：Enercon：“Grid Integration and Wind Farm Management”

http://www.enercon.de/p/downloads/EN_Eng_TandS_0710.pdf より NEDO 作成

一方、ファームコントローラを適用することで長周期出力変動対策として機能させることが可能である。この場合、風速が制限値よりも大きい場合に適用可能となる。実機試験での事例を図 9-18 に示す。

この事例では、出力値を 2%→100%→2%と変化させているが、定格出力（10MW）が得られる 15m/s 前後の風速でも安定して低出力一定運転ができ、出力変化指令に対しても一定の変化率

第9章 系統サポート技術

で制御している。

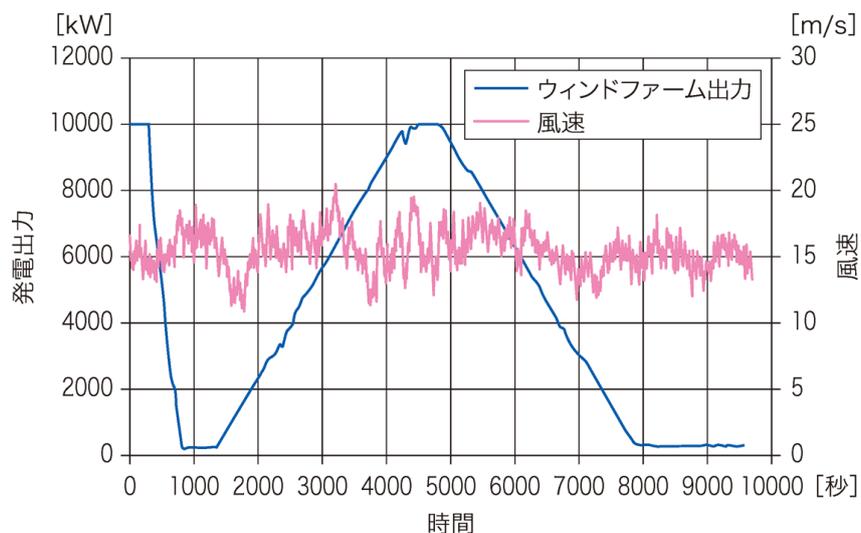


図 9-18 ウィンドファーム出力の制御事例

出典：齊藤哲夫「風力発電の系統連系可能量拡大策」，日本風力発電協会より NEDO 作成

また，LFC 制御対策として，ウィンドファームの出力上昇と低下について，変化率と変化幅の制約を設定することが考えられる。ただし，制御可能な出力値の範囲は，当然ながら風速に対応する本来の出力値以下となる。図 9-19 では，単機容量 2,300kW の風力発電機 6 基のウィンドファームにおいて，出力変化率を +4MW/分，-1MW/分とした場合，実機が緩やかに応動していることが示されている。

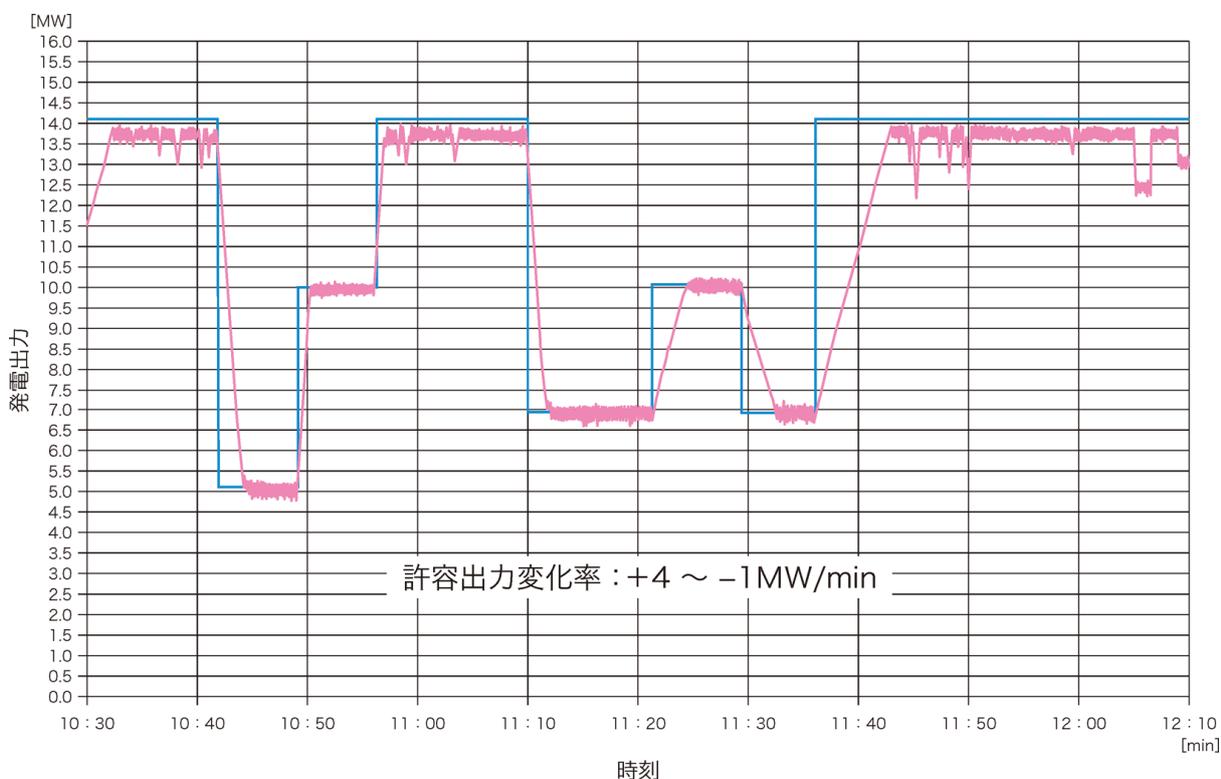


図 9-19 出力上昇率・低下率の制限運転（赤線：風力発電出力）

出典：“Close loop control and its implementation into utility control”，(Enercon) より NEDO 作成

(3) FACTS (Flexible AC Transmission System)

FACTS は、パワーエレクトロニクス技術を用いて、交流系統の制御性を高め、送電容量の増加を図るものである。この概念は、米国電力中央研究所 (EPRI) により提唱されたもので、既存の送電線を増設せずに送電容量を増加させるために考え出されたものである。

現在、電力システムへの適用が想定されている主要な FACTS 機器を表 9-6 に示す。これらは、パワーエレクトロニクス技術によって、外部電源により素子に流れる電流を ON/OFF する他励式変換器を用いたものと、自身に流れる電流を ON/OFF できる自励式変換器を用いたものに大別される。用途としては、無効電力を制御することで電圧の調整を行う他、送電線インピーダンスを変化させ、潮流を制御することで電力流通の最適化を図り、低損失な電力システム運用を行うことなどが挙げられる。

表 9-6 主要な FACTS 機器

	他励式変換器応用型	自励式変換器応用型
主に電圧制御等に用いられるもの	SVC (Static Var Compensator) など	STATCOM (Static Synchronous Compensator) など
主に潮流制御等に用いられるもの	TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor) など	UPFC (Unified Power Flow Controller) など

出典：NEDO 作成資料

FACTS 技術は、回路方式により、電力系統に並列に設置する（並列要素）と直列に設置するもの（直列要素）に分類できる。並列要素としては、SVC と STATCOM があり、主に電圧維持のために利用される。例えば、発電所の廃止により電力系統上の電圧源が失われるために電圧維持が困難になるような場合、SVC や STATCOM を導入して電圧維持を行うことがある。

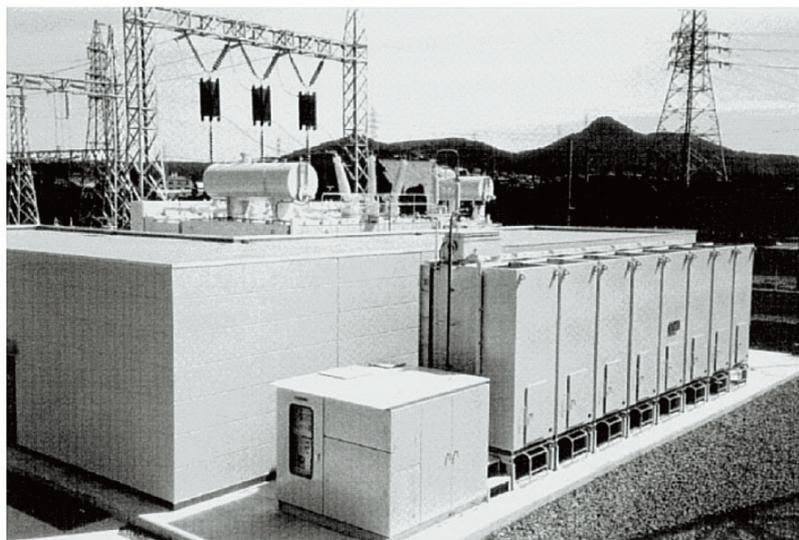


図 9-20 STATCOM の導入事例（犬山開閉所）

出典：竹田正俊「自励式無効電力補償装置 (STATCOM) の開発と製品化」電気学会論文誌 B, Vol. 129, No. 7

第9章 系統サポート技術

電圧維持以外の用途としては、系統安定度（過渡安定度，定態安定度）の向上が挙げられる。また後述する PMU（Phasor Measuring Unit）の情報を活用し、広域の電力動揺を抑制する事例がある。今後は、太陽光発電，風力発電の偏在的かつ集中的な導入により、電力動揺モードが大きく変化する可能性があり、そのためにも SVC あるいは STATCOM などを、PMU の情報を利用して制御し、電力動揺を抑制することが期待される。

SVC，STATCOM 等の並列要素は、既に我が国でも多数の実運用事例が存在し、例えば STATCOM は犬山開閉所，神崎変電所，新信濃変電所，手稲変電所などで導入されている。

また，SVC，STATCOM は、電力系統側での対策技術のみならず、再生可能エネルギー電源側において、原因者負担の原則に基づき、以下の目的で設置されることがある。

- ・出力変動に伴う電圧変動の抑制
- ・Fault Ride Through（誘導機を用いた風力発電へ復電後の早期起動のため無効電力を供給）
- ・洋上風力発電所で用いられる海底交流ケーブルの充電容量や突入電流等の補償

ただし、風力発電設備の場合、SVC の導入により初期コストが 2 割程度上昇するといわれ、費用面では大きな負担であることが課題である。

さらに、再生可能エネルギー電源の導入拡大が進む欧州においては、風力発電の発電電力が、メッシュ状の電力系統において複雑な電力潮流の変動を引き起こす事態が顕在化している。欧州送電系統運用者ネットワーク（ENTSO-E）では、2012 年 4 月 25 日に、再生可能エネルギー電源の増加により、ループフロー問題が顕著になっているとの懸念を表明した。

欧州では、電力系統がメッシュ状に連系されているため連系線の潮流管理が難しく、**図 9-21**に示すように、例えばドイツからフランスに送電する場合でも、フランスに直接送電されるもの以外に、一部は近隣国を迂回して送電されることがある。これをループフロー（迂回潮流）と呼んでおり、既にドイツでは再生可能エネルギー電源の出力変動のすべてを自国内で調整できず、その分が流出して近隣国の需給運用に影響を与え始めている。



図 9-21 ループフローのイメージ

実際、過去にドイツからベルギー風力発電の電力が流入して計画外の潮流が発生し、ベルギー国内の需給運用に影響を及ぼした。そのため、ベルギーでは予防策として4つの移相変圧器を導入し潮流制御を行うことで、計画外潮流の問題を回避している。移相変圧器の導入により、送電線の長さが変わったのと同じ効果が得られ、ループ潮流が流れ込みにくくなる。

近年では、中・東欧での計画外潮流も増加している。欧州エネルギー規制機関（ACER）と欧州エネルギー規制者評議会（CEER）の年次欧州電力・ガス市場監視報告書（2012年11月29日）によれば、再生可能エネルギーの大量導入と電力システムの増強の遅れにより、中・東欧地域（オーストリア、チェコ、ハンガリー、ポーランド、スロバキア、スロベキア）が計画外潮流により影響を受けているとしている。チェコ電力では既にドイツとの国際連系線に移相変圧器を設置済みであり、ポーランドでも移相変圧器を設置する予定である。

同様の潮流制御機能を持つ FACTS 機器として、表 9-6 に示すような TCSC (Thyristor-controlled series capacitor) や UPFC (Unified Power Flow Controller) 等が考案されているが、現状、実系統での利用は極めて小数に留まっている。

(4) 蓄エネルギー

蓄エネルギー技術は、一般的な電力・エネルギー貯蔵としての用途に加え、再生可能エネルギー電源の出力変動による諸課題の解決や、電力潮流安定化技術としての活用も期待されており、世界中で技術開発や実証研究が行われている。また、再生可能エネルギー電源の発電電力（再生可能電力）を水素として貯蔵し、燃料電池自動車などの用途に利用する動きもある。

代表的な蓄エネルギー技術には、在来型電源である揚水発電のほか、表 9-7 に示すように蓄電池や圧縮空気エネルギー貯蔵（CAES）、水素貯蔵がある。

これらの蓄エネルギー技術は、家庭等での小規模な利用から、揚水発電のように大規模なものまで、それぞれの特性に応じ、概ね図 9-22 に示すような用途に適用されている。

表 9-7 代表的な蓄エネルギー技術

蓄エネルギー技術	貯蔵の形態	方法	概要・特徴
蓄電池 (二次電池)	化学エネルギー	鉛蓄電池、ニッケル水素電池、リチウムイオン電池、NaS 電池	充放電が繰り返し可能な電池である。化学反応を利用して蓄電する。
圧縮空気エネルギー貯蔵 (CAES)	圧力エネルギー	夜間に空気を圧縮し、昼間にその圧縮空気を用いてガスタービンを回して発電を行う。	燃焼エネルギーが不要となるため、通常の高圧タービン発電と比較し効率が向上する。
水素貯蔵	化学エネルギー	水電解等により製造した水素を、燃料電池等に利用する。	燃料電池自動車など、比較的エネルギー放出時間の長い用途に向く。

出典：諸住哲「スマートグリッド」（2010、アスキー・メディアワークス）などより NEDO 作成

蓄エネルギーシステムの導入先

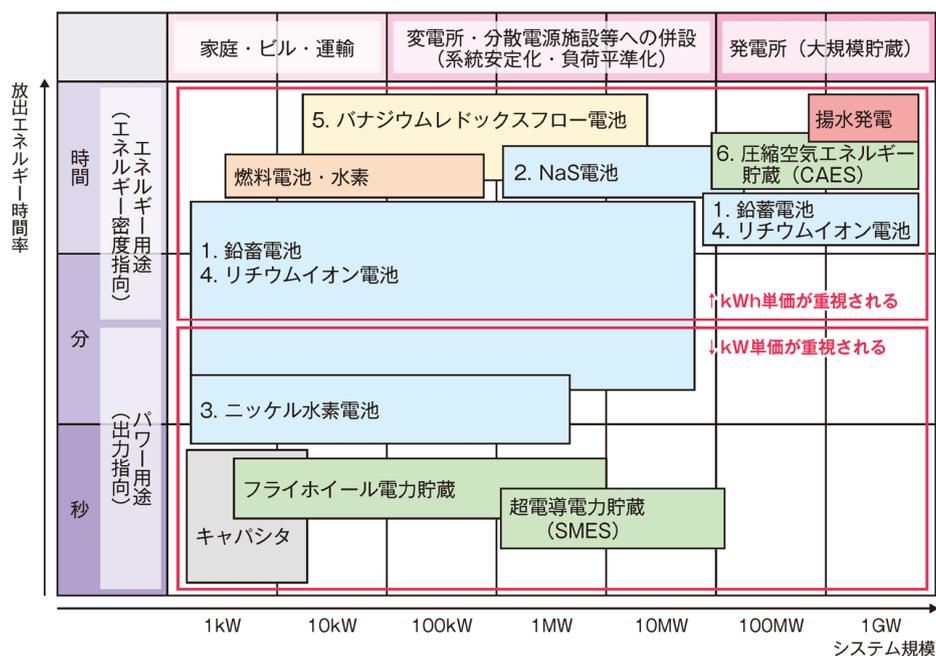


図 9-22 各蓄エネルギー技術のポジショニング

ここでは、これらの蓄エネルギー技術のうち、特に我が国において技術的優位を有している蓄電池および水素貯蔵について述べる。

1) 蓄電池

再生可能エネルギー電源の導入をサポートする蓄電池には、既に定置用蓄電池として商用化した NaS 電池や鉛蓄電池をはじめとして、リチウムイオン電池、ニッケル水素電池、レドックスフロー電池等がある。これらの蓄電池の用途は、利用場面別に以下の「電力系統への設置」「需要家への設置」「電動車両の活用」の3つに分類できる。

・電力系統への設置

主として電気事業者が電力系統に設置する蓄電池、発電事業者が太陽光発電や風力発電に併設する蓄電池を指す。

電力系統へ設置する蓄電池は、発電レベルでは周波数制御や供給予備力、需要の平滑化、送電レベルでは電力品質の維持や潮流調整（混雑管理）、変電・配電レベルではピークカットや電圧維持に関する役割を果たすことが期待される。電力系統側への蓄電池設置の必要性については、以降で詳しく整理する。

・需要家への設置

産業用として工場やオフィスビルなどの敷地内に設置される蓄電池、家庭用としてマンションや戸建て住宅などの敷地内に設置される蓄電池を指す。

産業用では NaS 電池、家庭用ではリチウムイオン電池が主な蓄電池となっている。現状ではピークカットなどを目的とした1日単位での運用を想定しているが、将来的にさらに大容量の蓄電池が導入されれば、例えば電力需要の少ない週末に太陽光発電の電力を貯蔵し、平日に放電するといった、週間での運用も想定される。

・ 電動車両の活用

電動車両（EV）を住宅や電力系統と連系させ、EV に搭載している蓄電池を分散型の蓄電池として利用することを指す。

住宅との連系は「V2H（Vehicle to Home）」と呼ばれ、停電や電力消費のピーク時に EV から住宅へ電力を供給することを想定している。電力系統との連系は「V2G（Vehicle to Grid）」と呼ばれ、再生可能エネルギー電源の出力が急激に落ち込んだ時などに、EV から電力を供給することを想定しており、反対に電力系統から EV への連系は「G2V（Grid to Vehicle）」と呼ばれ、風力発電等の出力変動に合わせて EV を充放電することを想定している。例えば、軽負荷時において余剰電力を発生させないような充電マネジメントが検討されている。

以上をまとめると、表 9-8 のように分類できるが、経済的な観点から複数の用途を一つの蓄電池で提供することも検討されている。また、蓄電池を電源として活用するための制度設計も同時に検討が進められている。

表 9-8 定置用大型蓄電池の主な用途

		パワー用途（低時間率）	エネルギー用途（高時間率）
系統への設置	系統運用サポート	I. アンシラリーサービス	II. 送配電の潮流調整 (投資抑制・混雑緩和) III. 揚水代替
	再生可能発電機への併設	IV. 出力変動の抑制 (短期：周波数制御)	V. 出力変動の抑制 (長期：タイムシフト, 出力平準化)
需要家への設置	産業用／家庭用	VI. 出力変動の抑制 (短期：配電線の電圧調整等)	VII. 出力変動の抑制 (長期：タイムシフト, 出力平準化)
電動車両の活用	系統との連系／住宅との連系	VIII. V2H (Vehicle to Home), V2G (Vehicle to Grid), G2V (Grid to Vehicle)	

電力系統への設置に関する用途 I～Vについては、以下に詳細説明する。

I. アンシラリーサービス (Ancillary Service)

- 再生可能エネルギーの導入等に伴う、秒～数十分レベルの出力変動や需要の変動に対応する予備力を供給するサービスである。具体的にはレギュレーション (Regulation)、スピニングリザーブ (Spinning Reserve) などが挙げられる。
- レギュレーションとは、時々刻々の電力システム全体の需要と供給のバランスを維持するために、エネルギー供給量の調整を行う秒～分オーダーのサービスを意味している。スピニングリザーブとは、事故等で急激に供給量が足りなくなった際に、バックアップとして即座にエネルギーを供給するサービスを意味している。
- 例えば米国カリフォルニア州では、風力発電の導入比率が現状 10%程度であるが、これが 20%になるとレギュレーションの必要量が 2 倍になるとしている。欧米ではアンシラリーサービスが市場化されており、蓄電池を活用する実証研究や制度設計を検討中である。

II. 送配電の潮流調整 (投資抑制・混雑緩和)

- 電力の経年的な需要増加、季節的なピーク需要などに対応するために、蓄電池を変電所等に導入し、送配電設備の増強等の回避を目的とする用途である。
- ウインドファーム等の発電出力を変電所等に設置した蓄電池を用いて潮流調整する用途も検討

第9章 系統サポート技術

されている。

- ・ピーク需要の出現率は低い（年に数日等）ため、蓄電池を移動体型にしたり、他の用途にも併用したりすることが検討されている。
- ・需要家サービスの向上（停電時間減少）を目指し、配電網（柱上・地上変圧器）に蓄電池を併設するコミュニティエネルギー貯蔵（Community Energy Storage: CES）も検討されている。

III. 揚水代替

- ・揚水発電の代替としての定置用大型蓄電池の活用は、求められる蓄電容量が数百 MW と巨大であること、揚水発電に匹敵する低廉な価格が求められることから、現時点ではあまり検討されていないが、米国では研究開発が進められている。

IV. 出力変動の抑制（短期：周波数制御）

- ・蓄電池を発電機に併設することで風力・太陽光発電の短時間の出力変動を抑制し、電力系統への悪影響を避ける目的で導入される。主に欧州や日本で検討が進められている。
- ・特に欧州では、離島でも再生可能エネルギー電源の導入率を高めようとしており、出力及び需要変動の調整電源としての用途が顕在化している。日本、イギリス、スペイン、フランス等で実証試験が実施されている。

V. 出力変動の抑制（長期：タイムシフト、出力平準化）

- ・蓄電池を発電機に併設することで風力・太陽光発電の一日単位の出力をコントロールし、市場価値を高くしてエネルギーを販売する目的で導入される。非ピーク時に蓄電しピーク時に放電するタイムシフト用途、出力予測や他電源も活用した計画発電用途が検討されている。

図 9-23 に、「電力系統への設置」「需要家への設置」のそれぞれの用途に関し、蓄電池に求められるシステム容量と放電時間率のマッピングを示す。

前述した用途に用いられる蓄電池及びその他の蓄エネルギー技術について、種類別にその構造・原理や性能等を述べる。表 9-9 に本節で取り上げる蓄電池の特性を比較する。

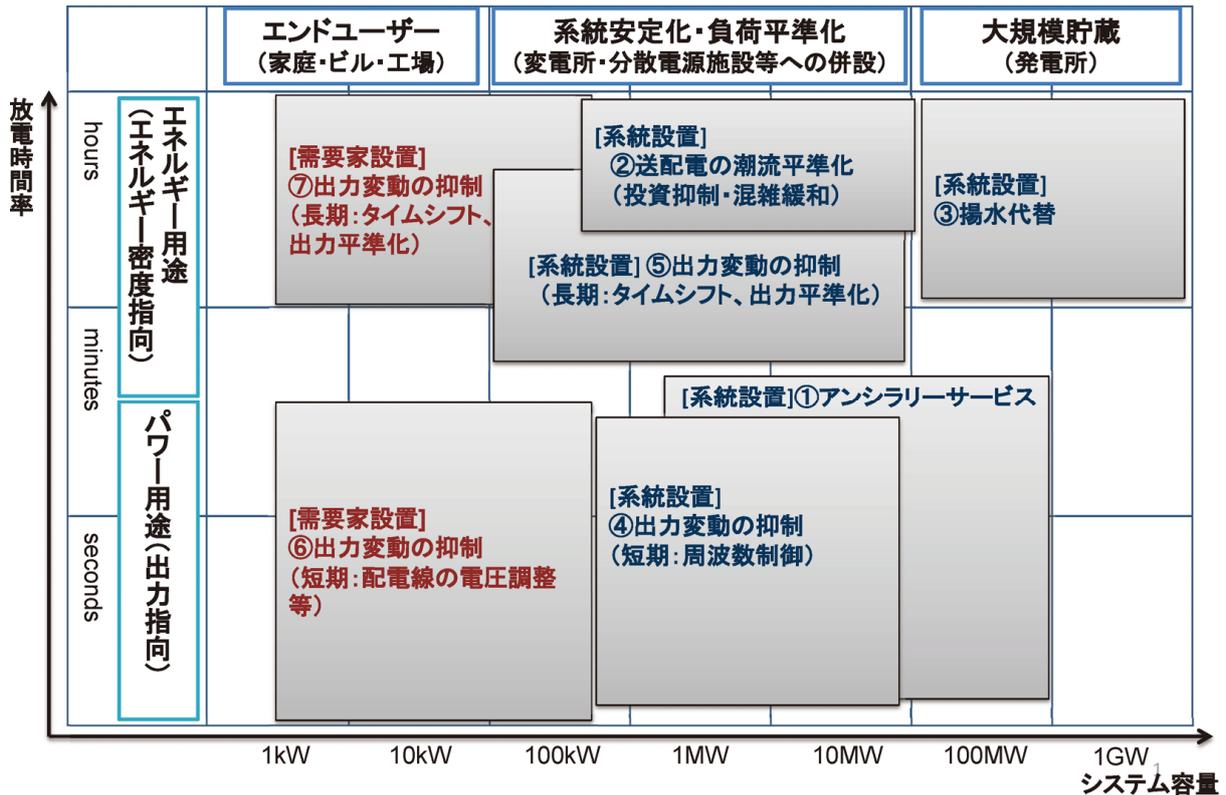


図 9-23 定置用蓄電池の用途別マッピング

表 9-9 各蓄エネルギー技術の比較

蓄電技術名	エネルギー密度 /出力密度	充放電 効率	サイクル 寿命	運用性	システム 価格
i) 鉛蓄電池	○/○	○	○	要均等化充電	◎
ii) NaS 電池	◎/△	◎	○	ヒータロス有	◎
iii) ニッケル水素電池	◎/○	○	◎	要均等化充電	○
iv) リチウムイオン電池	◎/○	◎	○	なし	△
v) パナジウムレドックス フロー電池	○/△	○	○	ポンプロス有	○
vi) 圧縮空気エネルギー貯蔵 (CAES)	◎/△	△	○	立地制約有	◎
vii) 揚水発電 (参考)	△/△	△	◎	立地制約有	◎

[凡例] ◎: 特に優れている ○: 優れている △: やや劣る

出典: NEDO 作成資料

i) 鉛蓄電池

a. 構造・原理

負極に鉛 (Pb)、正極に二酸化鉛 (PbO₂)、電解液に希硫酸 (H₂SO₄) を用いた電池である。過充電に強く、出力が高い点、常温で広い温度範囲 (5℃~50℃) において動作する点が特徴である。また、価格も比較的安価であり採用の実績が豊富、国内のリサイクル体制が確立している点も特徴として挙げられる。

一方で、充電状態 (State of Charge : SOC) が低い状態に置かれると電極の劣化が進行し、容量・出力が低下する点、充放電エネルギー効率が他の電池に比べて低く、75%~85%程度に留

第9章 系統サポート技術

まる点、蓄電システム内の電圧のばらつきを揃えるために商用電力による定期的な SOC リセット（均等化充電）が必要である点が課題となっている。

近年では、サイクル特性に優れた電力貯蔵用の長寿命制御弁式鉛蓄電池も実用化されている（**図 9-24**）。

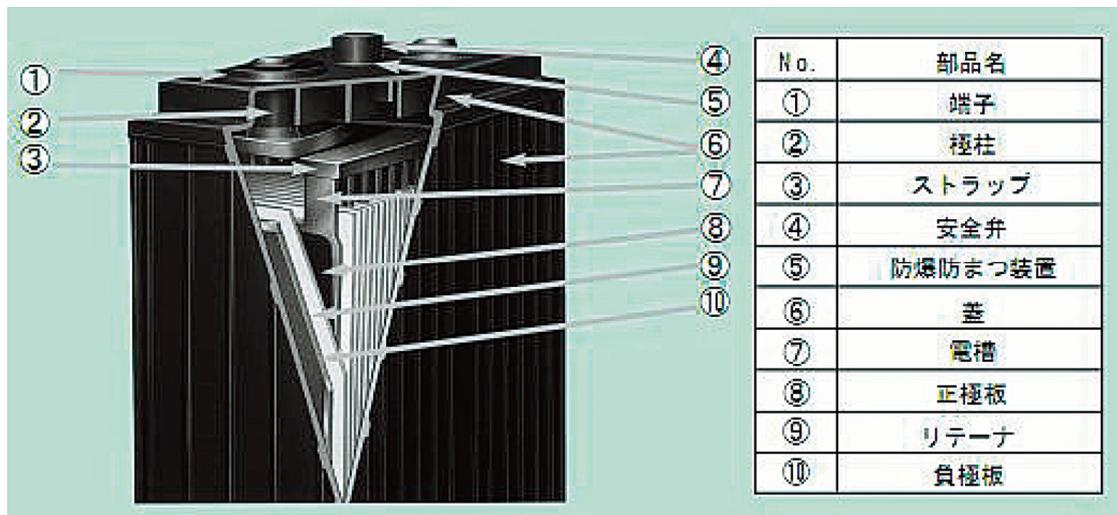


図 9-24 制御弁式据置鉛蓄電池

出典：新神戸電機 ホームページ

b. 参考性能

鉛蓄電池の参考性能を**表 9-10** に示す。

表 9-10 鉛蓄電池の参考性能

大容量化実績	1 MWh 級
レート特性	最大 1 C 程度
充放電効率	75~87 %程度
寿命	4500 サイクル程度（カレンダー寿命で約 15 年）
エネルギー密度	体積エネルギー密度：約 40~80 Wh/L 重量エネルギー密度（理論）：167 Wh/kg 重量エネルギー密度（実効）：約 35 Wh/kg
システム価格	現状：5 万円 /kWh 20 万円 /kW 2020 年：3~4 万円 /kWh
技術レベル	実用

出典：「低炭素社会実現のための次世代送配電ネットワークの構築に向けて」（2010, 次世代送配電ネットワーク研究会）をはじめとする各種公表値より NEDO 作成

c. 電力系統への設置例

新神戸電機では 2009 年に風力発電変電抑制用として期待寿命 17 年の制御弁式鉛蓄電池 LL-W を製品化し、これが青森県五所川原市にある市浦風力発電所（定格出力：約 15.44MW）に設置され（4.5MVA, 10.4MWh）、2010 年 2 月から商業運転を開始している。

従来からのサイクル寿命を大幅に改善しており、負荷平準化用途、太陽光発電・風力発電・マイクログリッドの電力貯蔵用途として幅広く使われている。



図 9-25 市浦風力発電所における鉛蓄電池バッテリー（10.4MWh）

出典：5th International Renewable Energy Storage Conference（2010, Berlin）

ii) NaS電池（ナトリウム硫黄電池）

a. 構造・原理

正極に硫黄，負極にナトリウムを用い，電解質として固体電解質ベータアルミナセラミックスを用いる。固体電解質ベータアルミナセラミックスのナトリウムイオン伝導を用いるため，作動温度を 300°C程度に保つ加熱が必要となる。

高いエネルギー密度を持ち，大容量化と省スペース化が可能である点，レアアースを使わないため量産化によりコストダウンが可能である点，自己放電がなく，利用 SOC 範囲が広く，充放電エネルギー効率も高い点が特徴である。

一方で，高温で動作する電池のため，運転開始時にはヒータによる加熱を行う。燃えやすい材料を使っているために，取り扱いや放熱の制御には注意が必要である点が課題である。

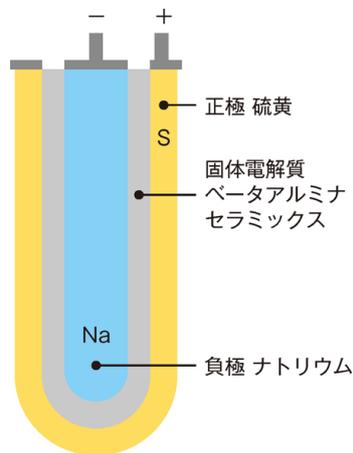


図 9-26 NaS 電池の構造

出典：日本ガイシホームページ

b. 参考性能

NaS 電池の参考性能を表 9-11 に示す。

表 9-11 NaS 電池の参考性能

大容量化実績	200 MWh 級
レート特性	0.2 C～最大 0.5 C 程度
充放電効率	90 %程度
寿命	4,500 サイクル程度 (カレンダー寿命で約 15 年)
エネルギー密度	体積エネルギー密度：約 140～170 Wh/L 重量エネルギー密度 (理論)：780 Wh/kg 重量エネルギー密度 (実効)：約 110 Wh/kg
システム価格	現状：4 万円 /kWh 20 万円 /kW 2020 年：3～4 万円 /kWh
技術レベル	実用

出典：「低炭素社会実現のための次世代送配電ネットワークの構築に向けて」(2010, 次世代送配電ネットワーク研究会)をはじめとする各種公表値より NEDO 作成

c. 電力系統への設置例

日本ガイシでは、東京電力と共同で NaS 電池 (ナトリウム硫黄電池) の開発を進め、世界で初めて量産規模での電力貯蔵用 NaS 電池を事業化した。これまでに青森県六ヶ所村の二又風力発電所 (図 9-27) や北海道稚内市の太陽光発電システムにおける併設蓄電池として、商業運転を行っている。

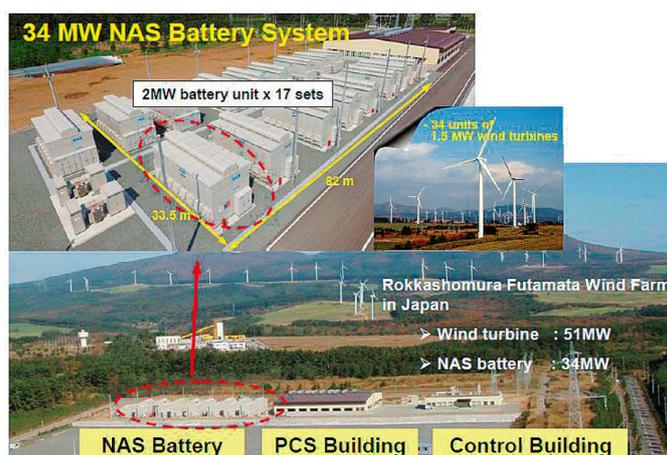


図 9-27 青森県六ヶ所村 二又風力発電所における 34MW NAS 電池 (2MW battery unit x 17 sets)

出典：5th International Renewable Energy Storage Conference (2010, Berlin)

iii) ニッケル水素電池

a. 構造・原理

負極活物質に金属水素化物 (MH)、正極活物質にニッケル酸化物 (オキシ水酸化ニッケル) を用い、電解液に水酸化カリウムを主体とするアルカリ水溶液を用いた二次電池である。

電極上での物質溶解や析出を伴わないので長寿命であり、高速充放電も可能である点が特徴である。危険物としての取り扱いが不要で、設置上の制約が少ない点、有害金属を用いておらず、環境にやさしくリサイクルが容易である点がメリットである。

一方で、自己放電が月あたり 30%と比較的大きい点、鉛蓄電池と同様に商用電力による定期的 (週 1 回程度) な SOC リセットが必要である点、発熱に伴う適切な温度管理が必要である点が課題である。価格については、金属水素化物が高価であることがネックとなっている。

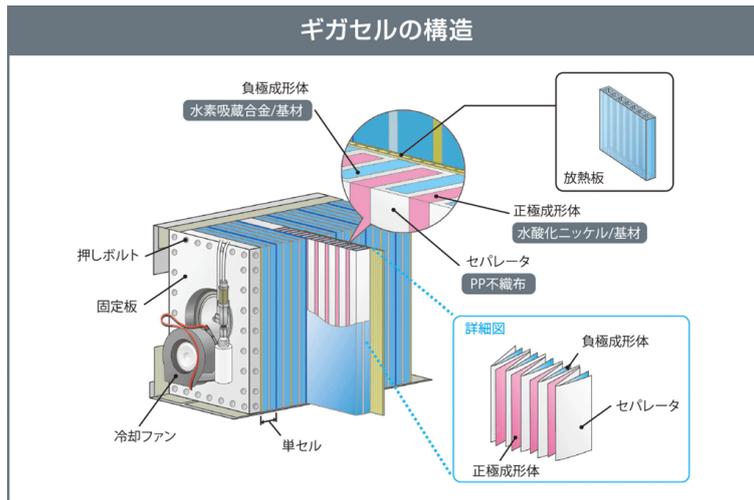


図 9-28 大容量ニッケル水素電池「ギガセル」の構造

出典：川崎重工業カタログ

b. 参考性能

ニッケル水素電池の参考性能を表 9-12 に示す。

表 9-12 ニッケル水素電池の参考性能

大容量化実績	数百 kWh 級
レート特性	1 C~最大 10 C 程度
充放電効率	80~90 %程度
寿命	6,000~8,000 サイクル程度 (カレンダー寿命で約 20 年)
エネルギー密度	体積エネルギー密度：約 40~100 Wh/L
	重量エネルギー密度 (理論)：275 Wh/kg
	重量エネルギー密度 (実効)：約 60 Wh/kg
システム価格	現状：30 万円 /kWh 10 万円 /kW 2020 年：4 万円 /kWh
技術レベル	実用

出典：「低炭素社会実現のための次世代送配電ネットワークの構築に向けて」(2010, 次世代送配電ネットワーク研究会)をはじめとする各種公表値より NEDO 作成

c. 電力系統への設置例

川崎重工業では定置用大容量ニッケル水素電池「ギガセル」を開発し、系統安定化等の用途として発売している。大阪府堺市と関西電力との共同事業で、2011年9月に営業運転を開始したメガソーラー「堺太陽光発電所」では、関西電力が「蓄電池を用いた電力需給システム」の研究を行っている。メガソーラーと連系している石津川変電所内に容量約 100kWh のニッケル水素電池モジュールを置き、2013年度まで検証を続ける。



図 9-29 関西電カメガソーラー「堺太陽光発電所」および連系する川崎重工業 100kWh ニッケル水素電池モジュール

出典：@IT MONOist ホームページ

iv) リチウムイオン電池

a. 構造・原理

正極材にリチウム含有金属酸化物（コバルト酸リチウム（近年はニッケル酸チウム，マンガ酸リチウム，鉄オリビン酸リチウムもあり）），負極材にカーボン系材料，電解液に有機電解液を用いた電池である。

エネルギー密度および充放電効率が高く，自己放電が小さい点，電極上での金属析出を伴わないので長寿命である点，高速充放電が可能である点等が特徴である。

一方で，有機電解液を用いており発火の危険性があるため，安全対策が講じられている。過放電・過充電に弱く，高い SOC や高温下では電池の劣化が早まる点が課題である。

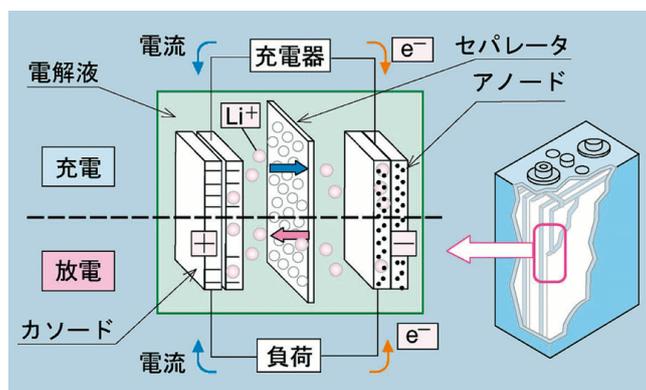


図 9-30 角形リチウム二次電池の構造

出典：三菱重工業カタログ

b. 参考性能

リチウムイオン電池の参考性能を表 9-13 に示す。

表 9-13 リチウムイオン電池の参考性能

大容量化実績	数百～数千 kWh 級
レート特性	最大 3C 程度
充放電効率	94～96 %程度
寿命	3,500 サイクル程度 (カレンダー寿命で約 10 年)
エネルギー密度	体積エネルギー密度：約 140～210 Wh/L 重量エネルギー密度 (理論)：360 Wh/kg 重量エネルギー密度 (実効)：約 120 Wh/kg
システム価格	現状：20 万円 /kWh 15 万円 /kW 2020 年：4 万円 /kWh
技術レベル	実用

出典：「低炭素社会実現のための次世代送配電ネットワークの構築に向けて」(2010, 次世代送配電ネットワーク研究会)をはじめとする各種公表値より NEDO 作成

c. 電力系統への設置例

三菱重工業では、1988 年より九州電力と共同でリチウムイオン電池を用いた家庭用／業務用電力貯蔵装置を開発している。2006 年からは NEDO が実施する「系統連系円滑化蓄電システム技術開発」を受託し、大型リチウムイオン電池を用いた系統連系円滑化蓄電システムを開発した。2009 年には長崎造船所内に年産 66MWh の実証工場を建設し、今後、数百 MWh 以上の規模の本格量産工場を建設する予定である。

また、2011 年にはリチウムイオン電池とパワーコンディショナを搭載した 1,000kW/408kWh コンテナ型大容量蓄電システム (Energy Storage System : ESS) を開発したことを発表した。実証試験機を同社長崎造船所内に設置し、商品化に向け工場内の電力負荷平準化実証試験を開始している。本製品は、再生可能エネルギー電源の短周期の変動抑制や電力需要変動に応じた負荷平準化、さらには送配電線の敷設が困難な地域で風力発電や太陽光発電による電力を蓄えて安定供給するマイクログリッドへの対応などを用途として想定している。



図 9-31 1,000kW/408kWh コンテナ型大容量蓄電システム

出典：三菱重工ニュース

v) バナジウムレドックスフロー電池

a. 構造・原理

不活性電極の表面で活物質である 2 種類のレドックス系の酸化と還元が生じる反応を利用する。レドックスフロー電池は、電池反応を行う流通型電解セル、活物質の溶液 (電解液) を貯蔵する正負極のタンク、電解液をタンクからセルへと循環するためのポンプ、配管などから構成される。

サイクル寿命が長く、不規則な充放電操作に左右されない点、セルとタンクを切り離した柔軟

第9章 系統サポート技術

な設置が可能な点、SOC を運転中に容易にモニタリングできる点が特徴である。また、ミリ秒オーダーの瞬時応答性があるため、瞬停対策にも利用可能である。

一方、タンク部の占める体積が大きいいため、エネルギー密度が比較的小さい。また電解液循環のためのポンプ動力が必要であり、電解液を通じて電流損失（シャントカレントロス）が生じる点が課題である。

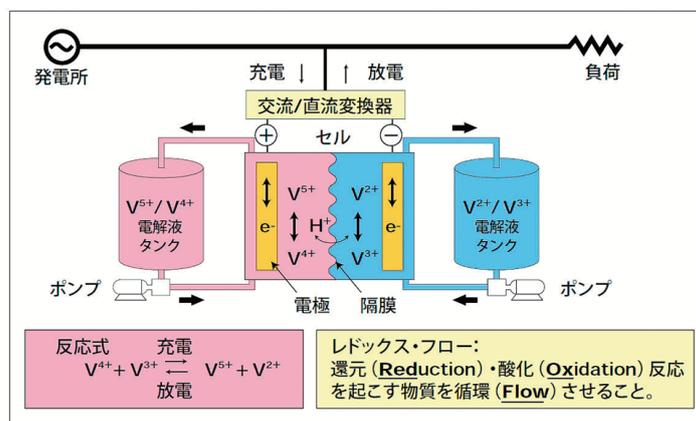


図 9-32 バナジウムレドックスフロー電池の構造

出典：スズデンテクニカルレポート

b. 参考性能

バナジウムレドックスフロー電池の参考性能を表 9-14 に示す。

表 9-14 バナジウムレドックスフロー電池の参考性能

大容量化実績	1,000 kWh 級
レート特性	最大 1 C 程度
充放電効率	80~90 %程度
寿命	3,000 サイクルとも言われるが、セパレータの寿命に依存して 5 年程度
エネルギー密度	体積エネルギー密度：－ 重量エネルギー密度（理論）：103 Wh/kg 重量エネルギー密度（実効）：約 6~20 Wh/kg
システム価格	現状：6 万円 /kWh 40 万円 /kWh
技術レベル	実用

c. 電力系統への設置例

住友電気工業では、1985 年から関西電力と共同で、電力負荷平準化を目的にバナジウムレドックスフロー電池の開発を進めてきた。レドックスフロー電池の高出力特性及び高速応答性を利用した瞬停対策システムを 2001 年に商用化した。

その後しばらく拡販が難しかったものの、2011 年に太陽光発電や風力発電と蓄電池を直流で連系させたシステム「マイクロスマートグリッド実証システム」において自社のレドックスフロー電池を利用した実証試験を行った。今後、再び数 MW もしくは数 MWh 級のシステムへの適用を目指すとしている。

vi) 圧縮空気エネルギー貯蔵 (Compressed Air Energy Storage: CAES)

圧縮空気エネルギー貯蔵では、夜間や休日の余剰電力で圧縮空気を作って岩盤内に貯蔵し、そ

の圧縮空気を昼間ピーク時に取り出してガスタービン発電に利用する。発電時の圧縮機動力が不要になるため、同量の燃料を使用した場合と比べて 2~3 倍の発電出力を得られる。揚水発電と比較して立地制約が小さく、需要地近接の電力貯蔵が可能であるが、高圧空気貯蔵空洞をいかに経済的に建設するかが課題となる。これを解決する方策として、米国では大型のタンクを多数使用して圧縮空気を貯蔵することも検討されている。

これまでに運転実績があるプラントの例を表 9-15 および図 9-33 に示す。

表 9-15 過去の CAES 導入実績例

国名	年	概要
ドイツ	1978	フントルフ発電所 (Nordwestdeutsche Kraftwerke, AG) にて出力 290 MW プラントが商用化。
米国	1991	マッキントッシュ発電所 (Alabama Electric Cooperative, Inc.) にて出力 110 MW の商用プラントが運転を開始。
日本	1990~2001	資源エネルギー庁「新型負荷平準化電源技術開発調査」として CAES プロジェクトを財団法人新エネルギー財団に委託。 北海道空知郡上砂川町の炭坑跡地に出力 2,000 kW のパイロットプラントを建設。

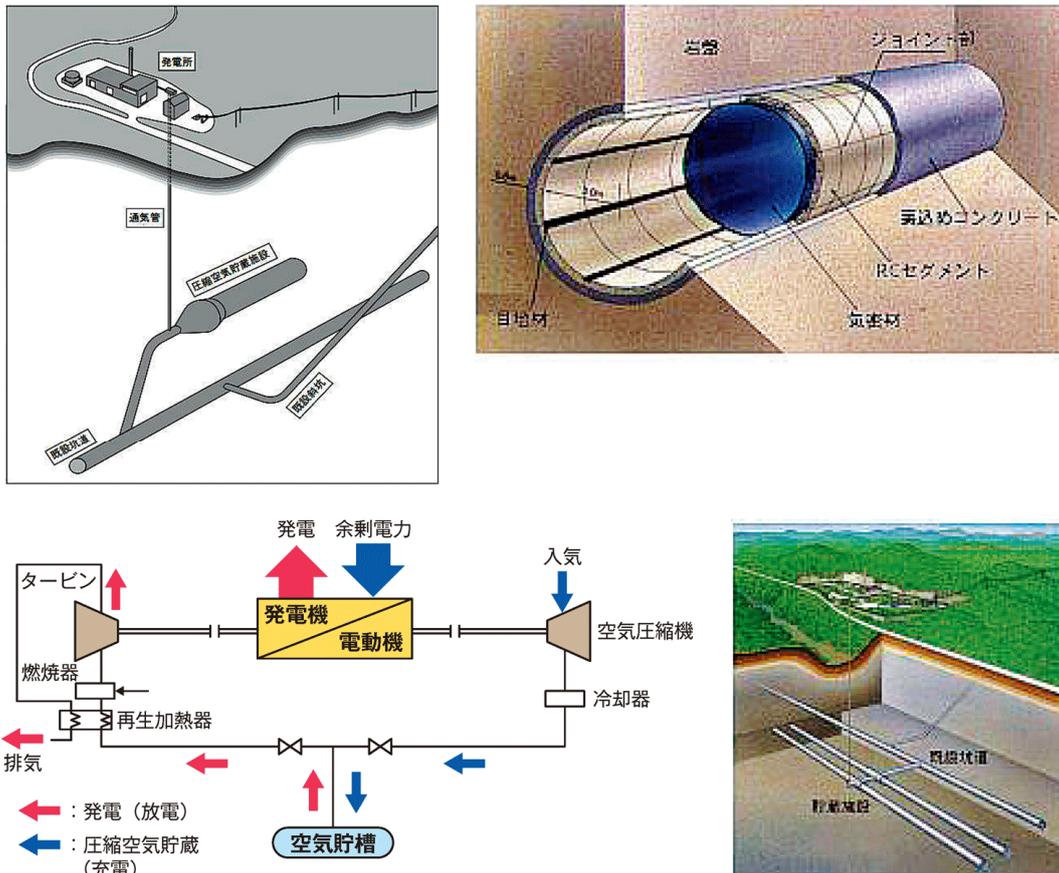


図 9-33 上砂川パイロットプラントの構成

出典：(左上) 土木学会, (左下) 電力中央研究所ホームページ
(右上) 大阪大学 舟木研究室ホームページ

第9章 系統サポート技術

(2) 水素

本節では、再生可能エネルギー電源の発電電力により水素を製造・貯蔵することでエネルギー貯蔵する技術を取り上げる。一般に、再生可能エネルギー電源の発電電力を水素にエネルギー変換することを「Power to Gas」と呼び、ドイツなど風力発電や太陽光発電のような変動電源が普及した国などで導入が検討されている。

i) 水素の特徴

水素は代表的な二次エネルギーの一つであり、水を電気分解することにより製造できる。また、長期間の貯蔵でもロスがなく、用途も発電はもちろん、天然ガスパイプラインへの導入や、産業用燃料としての利用など幅広い。

a. 優れたエネルギー貯蔵能力

水素は、**図 9-34** に示す通り、重量当たりのエネルギー密度は 120 MJ/kg を超えており、ガソリンなどの液体系燃料よりもはるかに大きい。一方で、体積あたりのエネルギー密度が低いことが課題である。しかし、水素を液体あるいは高圧の気体とすれば体積当たりのエネルギー密度を高めることができ、大規模な貯蔵も可能となる。また水素には、蓄電池の自己放電のような長期貯蔵によるロスがないという利点もある。

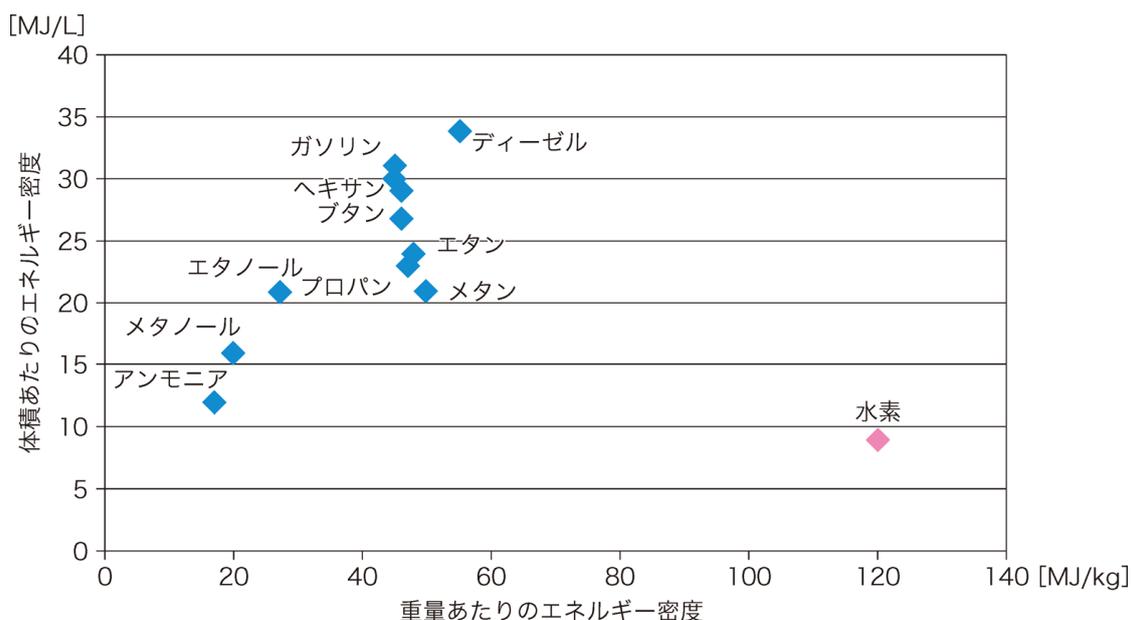


図 9-34 物質のエネルギー貯蔵密度

出典：“Hydrogen Storage Overview” (2003, Sandia National Laboratories) より NEDO 作成

このような特徴から、再生可能エネルギー資源が豊富な国において再生可能エネルギーから水素を製造し、大型の水素タンカー等で我が国などの大規模需要地に輸送して利用するというアイデアも検討されている。

b. 多様な用途

再生可能エネルギーから製造した水素は、**図 9-35** に示すように、燃料電池やその他の高効率発電などに用いるほか、産業用燃料としての利用、天然ガスとの混合利用など、他の蓄エネルギー手段に比べて幅広い用途が考えられる。

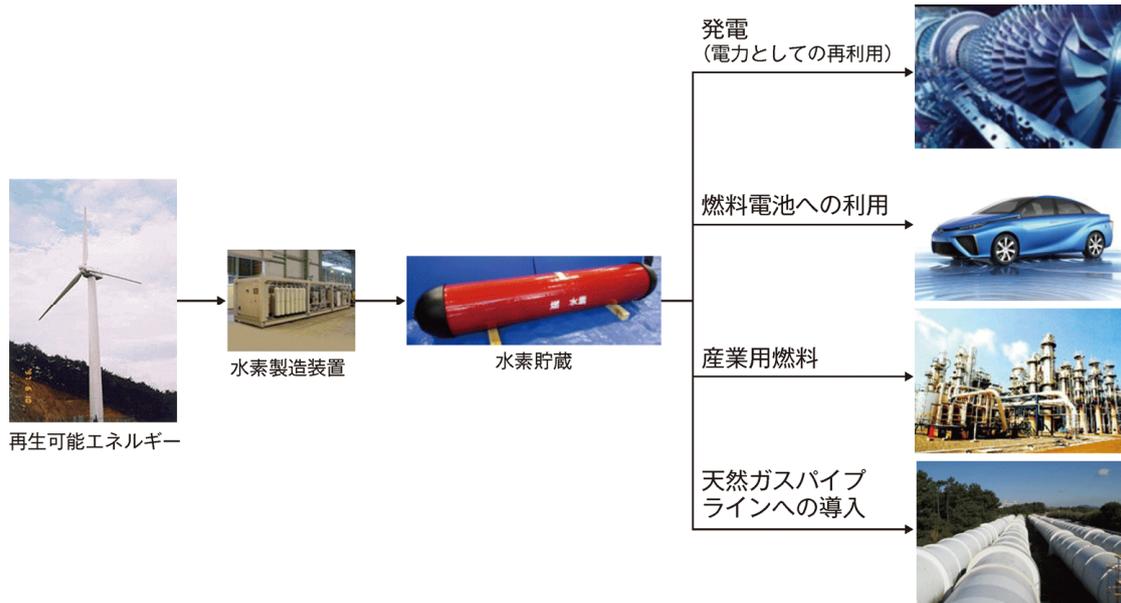


図 9-35 水素の利用用途

ii) 水素製造技術

現状、水素は主に天然ガス等の化石燃料を改質することによって製造されており、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギー電源から大規模に製造されている例はほとんど存在しない。しかし、世界的な再生可能エネルギー電源の導入拡大の流れに合わせて、各国が実用化を目指して研究開発や実証プロジェクトを進めている。

a. 太陽光発電からの水素製造

太陽エネルギーから水素を製造する方式としては、1. 太陽光発電と水電解を用いる方法、2. 太陽熱を利用する方法、3. 光触媒を用いる方法、4. 光合成による方法などが存在するが、太陽光発電と水電解の組み合わせは、太陽エネルギーを用いる水素製造方式として最も一般的である。

水電解は、アルカリ水電解方式と固体高分子型水電解方式に大別される。アルカリ水電解方式は、欧米を中心に工業用等で普及しており、我が国では JHFC 相模原水素ステーションにおいて 30Nm³/h 規模のアルカリ水電解装置が導入されている。固体高分子型水電解方式は、アルカリ水電解方式に比べて小型化が容易で、さらに水素製造の効率に優れるが、設備コストが高いこともあり、現状では実験用の小規模な用途での普及にとどまっている。我が国では、九州大学の伊都キャンパス内の水素ステーションに 10Nm³/h 規模の固体高分子型水電解装置が導入されている。

太陽光発電と水電解を組合せた水素製造システムの実証プラントは、NEDO の「太陽光発電等フィールドテスト事業」として、2007 年に栃木県那須塩原市に設置された。この実証プラントでは、太陽光発電の急峻な出力変動下においても最低限必要な電解電圧を確保するため、発電状況に応じて太陽光パネルの直列・並列回路を組み換えるシステムを採用し、水素製造効率を高める工夫がなされている。

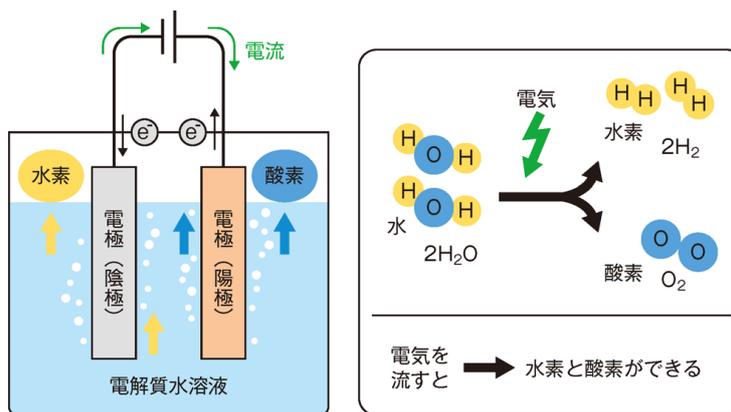


図 9-36 水電解の原理



設備構成	太陽光発電システム（出力 20kW） 水電解装置（水素製造能力 2.4Nm ³ /h） 水素ポンベ（水素貯蔵能力 8Nm ³ ） 水素吸蔵合金（水素貯蔵能力 20Nm ³ ）
------	---

図 9-37 太陽光発電からの水素製造実証実験の概要

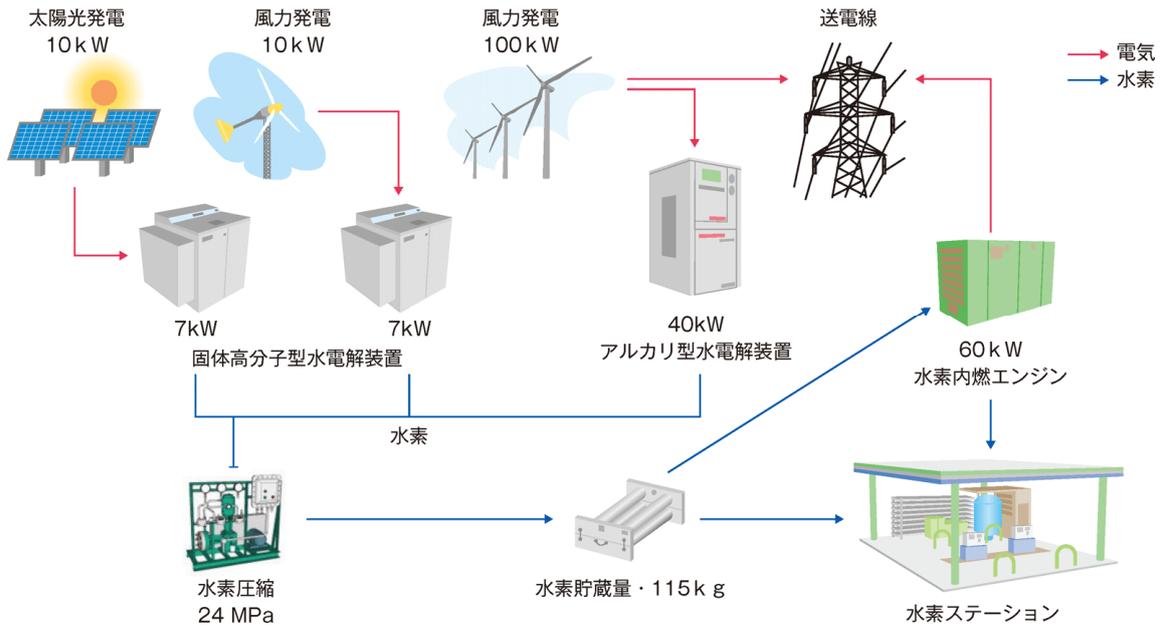
出典：バンテックホームページ (<http://www.vantec-ip.com/>) より NEDO 作成

b. 風力発電からの水素製造

風力発電についても、太陽光発電と同様、発電した電気により水電解を行うことで水素を製造することができる。

本方式の大規模な実証実験が、米国エネルギー省（Department of Energy : DOE）主導で、2006 年から 2010 年まで、コロラド州にある国立再生可能エネルギー研究所（National Renewable Energy Laboratory : NREL）の国立風力技術センター（National Wind Technology Center）に設置された設備を用いて実施された。

この設備では風力発電と太陽光発電で発電した電気により水電解装置を動かし、製造された水素はガスエンジンまたは燃料電池の燃料として利用している。DOE は本実証実験によって風力発電由来の水素を 5.83 ドル/kg で製造できる目途が立ったとしている。2017 年時点でのコスト目標 2.00 ドル/kg には到達していないが、今後の技術改良等による更なるコスト低減が期待される。



設備構成	風力発電システム（出力 10kW および 100kW） 太陽電池（出力 10kW） 固体高分子型水電解装置（入力 7kW, 2機） アルカリ型水電解装置（入力 40kW） 水素内燃エンジン（出力 60kW）
------	---

図 9-38 米国 DOE による Wind to Hydrogen プロジェクトの概要

出典：“The Wind to Hydrogen Project: Operational Experience, Performance Testing, and System Integration”（2009, DOE）より NEDO 作成

第9章 系統サポート技術

我が国では、1993年度から2002年度まで実施された水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術プロジェクト（通称WE-NET）以降、海外の豊富な風力エネルギー源を用いて水素を製造し、それを液化した上で、タンカーで日本へ輸送する構想が検討されてきた。

また、北海道稚内市では、環境省の「環境と経済の好循環のまちモデル事業」の一環として、市が保有する稚内公園の風力発電と水電解装置を組み合わせた蓄エネルギーシステムを導入している（図9-39）。稚内は日本でも有数の風況良好地帯であり、本実証プロジェクトのような蓄エネルギーシステムの導入すれば、風力発電の出力変動の影響を受けず、電力を安定的に利用できる可能性がある。

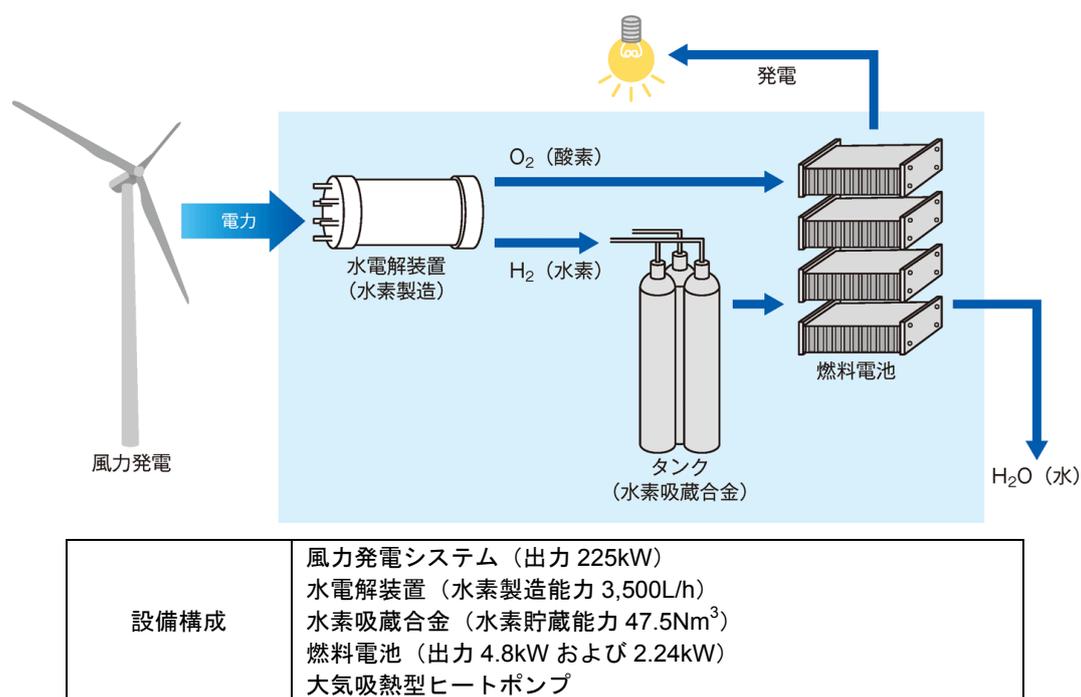


図9-39 稚内公園新エネルギーサテライトクリーンエネルギーシステムの概要

出典：稚内公園新エネルギーサテライト（稚内新エネルギー研究会）より NEDO 作成

iii) 水素貯蔵・輸送技術

再生可能エネルギーから製造された水素を貯蔵・輸送する方法には以下のようなものがある。現在のところ、これらの技術は燃料電池自動車用として開発されているものが多い。

a. 水素としての貯蔵

水素を加圧または液化することにより容積を低減し、貯蔵・輸送する方法で、現在最も一般的な水素貯蔵方式である。

・圧縮水素としての貯蔵

圧縮水素の貯蔵には、一般的に鋼製の蓄圧器が用いられているが、軽量化を目指した複合容器蓄圧器の開発も進められている。特に燃料電池自動車用としては軽量化が重要な課題であるため、複合容器蓄圧器の利用が一般的で、35MPaの容器と70MPaの容器が開発されている。また材料で区分すると、アルミ合金ライナーと熱可塑性樹脂ライナーに分けることができる。どちらも高強度材料である炭素繊維がライナー外面に巻かれている。35MPa容器コストの65%程度、70MPa

容器コストの80%程度が炭素繊維コストであり、炭素繊維使用量の低減や安価な材料の開発などが求められている。

・液体水素としての貯蔵

水素は液化すると体積が約1/800程度になるため、一充填で従来車並みに走行できる燃料電池自動車想定して、5kgの水素を搭載する場合、体積は80L程度となり既存のガソリン容器に近い体積となる。このコンパクトさが液体水素貯蔵の最大の利点である。ただし、水素は-252℃で気化するため、容器の保冷が不可欠であるが、自動車用のような小型の容器では断熱性能を高めることが容易ではなく、ボイルオフ（外部からの自然入熱による気化）を避けられない。水素を長期貯蔵するには、このボイルオフガスにどう対処するかが課題である。

我が国における液体水素の製造は、もともとロケット燃料用として小規模に行われていた。2006年以降は、天然ガスを改質して水素を大規模に製造するプラントが大阪府の堺市をはじめとして複数箇所に建設され、工業用として液体水素での輸送が増えてきている。

b. 水素貯蔵材料への貯蔵

水素貯蔵材料は、水素が様々な材料と化学的または物理的に結合することを利用して水素を固体または液体の内部に蓄えるもので、常温で安定的に貯蔵できるメリットがある。

代表的な材料としては、水素吸蔵合金と無機系水素貯蔵材料が挙げられる。水素吸蔵合金は水素を可逆的に吸蔵して金属水素化物を生成するもので、吸蔵量が3質量%以下程度の体心立方構造合金や、4質量%レベルのMg系合金がある。基礎研究レベルでは6質量%レベルの合金の開発も行われている。無機系水素貯蔵材料は、錯イオンが水素貯蔵能力を担い、アルカリ金属やアルカリ土類金属とともにイオン性結晶を形成しているもので、アラネート系（3~3.5質量%）、アミド・イミド系（4~9質量%）、ボロハイドライド系（5~13質量%）などがある。現在、貯蔵メカニズムの解明や計算科学を用いた新規材料の探索も進められており、金属有機構造体（Metal Organic Frameworks : MOF）、炭素系吸着材料、クラスレート、カーボンナノチューブなどが研究されている。

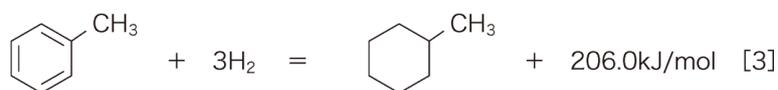
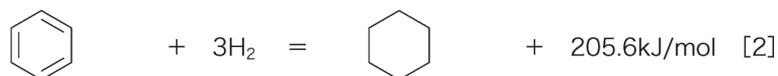
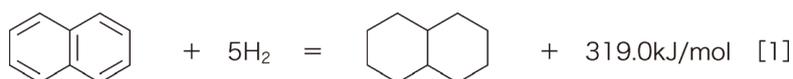
c. 化学化合物による貯蔵

水素をケミカルハイドライド（触媒反応を介して水素を可逆的に放出する有機化合物）やアンモニア（NH₃）といった常温で液化しやすい化合物にして変換し、それを輸送キャリアとして用いる方法が検討されている。

・ケミカルハイドライド

ケミカルハイドライドによる水素貯蔵では、貴金属触媒の存在下で不飽和炭化水素（原子と原子の間に二重結合をもつ炭化水素）の一種である芳香族化合物に水素を加えて、飽和炭化水素を製造する。逆の脱水素反応を行えば水素を放出して芳香族化合物に戻る。以下に代表的な系であるナフタレンーデカリン系（式 [1]）、ベンゼンーシクロヘキサン系（式 [2]）、トルエンーメチルシクロヘキサン系（式 [3]）の反応式を示す。

第9章 系統サポート技術



ケミカルハイドライドを利用する方式は我が国で実証プロジェクトが行われている。北海道別海エネルギー地域自立型実証研究施設における水素貯蔵・脱水素設備を図9-40に示す。本設備では、まずバイオガス（メタンガス）から水蒸気改質により水素を製造し、水素を貯蔵する際には水素添加反応器でベンゼンと反応させてシクロヘキサンとし、再生するには脱水素反応器と水素精製設備を使用してシクロヘキサンから水素を取り出す。



図9-40 北海道別海エネルギー地域自立型実証研究施設

出典：「北海道開発土木研究所月報」No.634（2006年3月）

また、日立製作所は、国立極地研究所より風力発電機利用水素発電システム一式を受注し、南極昭和基地での活用を視野に、水素貯蔵媒体としてメチルシクロヘキサン（Methyl Cyclo Hexane : MCH）の活用を検討している。2011年に秋田県において、図9-41に示すようなMCHを利用したエネルギー備蓄・回収システムの稼動実験を行った。風力発電の発電電力で水素を生成する「水素製造システム」、水素をトルエンと反応させMCHとして貯蔵する「備蓄システム」、MCHから水素を取り出し水素混合ディーゼル発電機に供給する「回収システム」から構成されている。

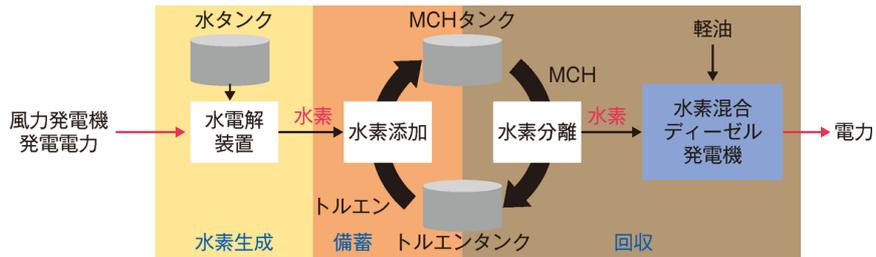


図 9-41 MCH を利用したエネルギー備蓄・回収システム概念図

出典：日立製作所ホームページ (<http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2011/11/1107.html>) より NEDO 作成

・アンモニア

アンモニア (NH_3) は、液体系化合物の中でも水素含有率が大きく、また貯蔵・輸送に係る取扱技術は既に実用化されている。そのため、水素を窒素と反応させてアンモニアを製造し、これを輸送して、水素の需要地でアンモニアを熱分解して水素を取り出して利用する方法も検討されている。過去には NEDO の WE-NET プロジェクトにて、アンモニアを水素キャリアとした場合の経済性検討が行われた。また、最近では水素を経由せず、水と窒素から直接アンモニアを合成する方法（触媒存在下での水と窒素からのアンモニア合成や、熔融塩電気化学プロセスによる常圧アンモニア合成）が考案されており、将来的にはクリーンで低環境負荷型のアンモニア製造方法としての発展が期待されている。

d. 地下水素貯蔵

地下水素貯蔵は、岩塩空洞や枯渇したガス田などの地下空間に水素を閉じ込めて保持するものであり、大量の水素を貯蔵できる。岩塩空洞の場合は岩塩が採掘された後の空間に、枯渇したガス田の場合は空隙が多数存在するポーラス状の地層に水素ガスを注入・貯蔵し、必要な時に取り出す。

英国では Teeside において、ICI 社による地下 400m の岩塩ドームを用いた約 70,000m³ の水素を 50bar で貯蔵可能な水素貯蔵設備が存在する。また、米国で ConocoPhillips 社と Praxair 社がテキサス州クレメンスの岩塩ドームで水素貯蔵を行っている。

iv) 水素利用技術

再生可能エネルギー電源で製造した水素は、燃料電池や直接燃焼により発電して電気に方法や、天然ガスパイプラインへ混入する方法が検討されている。

また、水素はエネルギー用途の利用だけでなく、アンモニアや塩酸といった工業製品の原料あるいは鉱石や金属の還元剤として、産業用の様々な用途に利用されており、再生可能エネルギー起源の水素を安定的に製造・供給し、そのコストが産業用水素ガス販売価格を下回ることができればビジネスとして成立する可能性もある。

a. 燃料電池による発電

燃料電池は水素と酸素の化学的反応から直接電気を発生させる発電装置であり、「高効率」「クリーン」「静粛」「コンパクト」という優れた特徴を持っている。燃料電池は、用いる電解質の種類によっていくつかの種類が存在するが、主要なものとして固体高分子形燃料電池 (PEFC) と固体酸化物形燃料電池 (SOFC) がある。

第9章 系統サポート技術

PEFCは固体高分子を電解質に用いるもので、70～80℃前後の低温で作動し、起動性等の操作性と小型軽量であることが主な特徴である。このことから燃料電池自動車や定置用（家庭用）コージェネレーションシステムに用いられ、前者はガソリン車と遜色ない商品性を実証し、後者は総合効率80%を実証してエネファームとして商品化されている。ただ、発電効率は30数%程度であるため、単なる発電機としての利用ではなく、排熱も活用できるような使い方が望ましい。

SOFCは固体酸化物（セラミックス）を電解質に用い、およそ700～1000℃の高温で作動するもので、40%以上の高い発電効率が得られることが最大の特徴である。このことから家庭用から発電事業用まで、高効率の発電システムとして期待されている。発電事業用の発電システムは、現在、信頼性・耐久性を含めた性能の開発・実証段階であるが、家庭用としては新型エネファームとして商品化されている。

b. 直接燃焼による発電

水素を直接燃料とする発電機関には、空気の水素を燃焼させるガスタービンやエンジンなどのオープンサイクルシステムの他、酸素で水素を燃焼させて、蒸気やアルゴンガスなどの作動媒体を加熱して発電するセミクローズドシステムがある。その他に、作動媒体を繰り返し利用し外部に排出しないクローズドシステムも存在するが、高温化が難しい等の理由によりオープンサイクルやセミクローズドシステムに比べて開発は進んでいない。

これまで日米欧では、水素燃焼タービンや水素燃焼エンジンに関する研究開発が進められてきた。とりわけ我が国では、WE-NETプロジェクトで、500MW級の水素燃焼タービンシステムや600kW級の水素ディーゼルエンジンの要素技術開発が行われた。水素燃焼タービンシステムでは、空気から酸素を分離・供給するステップでのエネルギーロスの低減、運転制御技術の確立などが技術的課題として挙げられている。また、水素ディーゼルエンジンでは、水素圧縮動力の低減、水素噴射系部品の信頼性向上、燃焼室の耐熱化などが課題とされている。

なお、通常ガスタービンなどで、天然ガスに水素を低比率で混ぜて燃焼させる、いわゆる混焼に関しては既に実用レベルであり、水素専焼技術が確立するまでのつなぎとして活用することも考えられる。

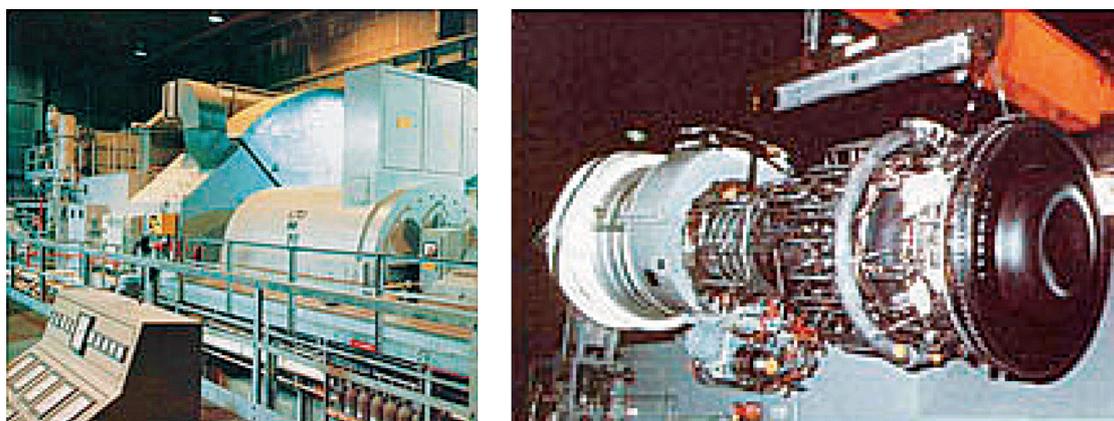


図 9-42 水素リッチガス燃焼ガスタービンの例

出典：IHI ホームページ (<http://www.ihl.co.jp/powersystems/technology/fuel.html>)

c. 天然ガスパイプラインへの導入

天然ガスパイプラインが十分に整備された欧米の国・地域などでは、水素を天然ガスに混合して需要側へ輸送することにより、水素普及のためのインフラコストを削減する方式が検討されている²。これまで国際エネルギー機関（International Energy Agency : IEA）における加盟国間実施協定や、EUの Naturally プロジェクトにおいて、混合輸送の経済性評価や技術的課題の抽出などが行われた。主要な検討結果や技術的課題は以下の通りである。

- ・水素の添加率が 5%以下であれば、インフラへの追加投資は殆ど発生しないが、多量に水素を添加する場合、輸送導管の脆化対応など、大幅な追加投資が必要になる可能性がある。
- ・水素の添加率が 3%を超える場合、ボイラやタービン、エンジンなどの需要側機器への影響が出る可能性がある。

なお、需要側で水素を分離して燃料電池等に利用する場合には、水素を高い純度で取り出す必要がある。

9.2.2 システム制御技術

(1) PCS制御

パワーコンディショナ（PCS）は、直流と交流を変換して、分散型電源を電力系統に連系するためのインバータ・コンバータ装置と、保護装置を有する機器である。今後、電力系統において太陽光発電、風力発電、コジェネレーション等の大量の分散型電源の導入が見込まれる、その多くが PCS により系統連系されることから、下記に示すような保護機能や、系統運用へ貢献する機能を有することの必要性がこれまで以上に高まっている。

- ・単独運転防止機能
- ・FRT（Fault Ride Through）
- ・出力（有効電力）制御
- ・無効電力制御

現状、我が国では、再生可能エネルギー電源を含む分散型電源には、電力系統の電力品質（電圧、周波数等）の維持に積極的に貢献することを求められておらず、むしろ、力率一定あるいは後述する単独運転防止機能のような消極的な貢献を求められてきた。しかし、近年、欧米においては分散型電源の連系容量の拡大に伴い、分散型電源に電力系統の電力品質維持または系統運用への貢献を求めるグリッドコード（系統連系要件）の整備が進められている。特に地中配電設備で住宅に電力を供給する欧州では、途中で電圧調整機能を持つ設備を設置しにくく、太陽光による電圧上昇問題の解決が難しいため、PCS から無効電力を注入して電圧を下げる対策を強く指向している。

米国の EPRI は、Sandia National Laboratories, the Solar Electric Power Association と共同して、DOE の援助の下、2009 年より Smart Inverter プロジェクトを進めている。日本の企業も、米国でのスマートグリッド実証試験への参画において、Smart Inverter 機能の実装を行っ

² 我が国では、天然ガスパイプラインに水素を導入した事例はない。ただし、過去には石炭を原料にした石炭ガスやナフサ等を改質したガスが供給されていた地域があり、そこでは供給ガスに水素も含まれていた。

第9章 系統サポート技術

ている。

この Smart Inverter では、太陽光発電または蓄電池の PCS に、電圧及び周波数に対する自律的な制御機能を持たせることを目指している。また、周波数制御、電圧制御の特性については、通信により外部からの設定値変更が可能な仕様が検討されており、系統運用者の判断により、季節的要因等による系統特性変化に柔軟に対応できることを特徴としている。しかし、このような分散配置の PCS の自律制御は、電圧制御などの面でハンチングを起こす可能性も指摘されており、Smart Inverter の仕様については結論が得られていない状況である。

1) 単独運転防止

再生可能エネルギー電源を含む分散型電源の単独運転の危険性は、世界で認識されており、その対策については日本が先行している。日本では、従前よりさまざまな単独運転防止機能が開発・適用され、方式の異なる単独運転状態の検出方式が混在していた。このような中、多数台連系では、単独運転検出信号が相互干渉する危険性が指摘されており、NEDO の「集中連系型太陽光発電システム実証研究」(2002～2007) (群馬県太田市での 550 台の太陽光発電システム連系実証) で開発した「ステップ注入付周波数フィードバック方式」が標準的な方法として日本電機工業会で規格化 (JEM 1498) された。



図 9-43 群馬県太田市「城西の杜」における「集中連系型太陽光発電システム実証研究」

これらの成果を踏まえ、現在の我が国の系統連系技術要件ガイドラインには、周波数上昇リレー (OFR)、周波数低下リレー (UFR)、逆電力リレー (RPR) といった保護機能を PCS に具備し、電力系統側の周波数や電圧の変化により単独運転を検出し、再生可能エネルギー電源などを電力系統から切り離すことなど、分散型電源側における単独運転防止に関する内容が規定されている。

一方、海外においては、分散型電源側で単独運転を検出する装置の必要性に対する認識は、日本ほど高くないものの、近年、米国の Sandia National Laboratory では、Sandia Frequency Shift と呼ばれる方式を提案している。本方式は、日本企業との共同研究において、日本の「ステップ注入付周波数フィードバック方式」をベースに開発されたものである。なお、Sandia National Laboratory では、多数台連系下における単独運転検出装置の相互干渉の試験を行うための設備を開発し、NEDO の米国ニューメキシコ州における「日米スマートグリッド実証」を通じて、電力中央研究所赤城試験センターの実験設備との互換性を検証し、試験方法を含めた日米方式のすり

合わせを行っている。

他方、ドイツなど欧州では、通信設備の拡充およびスマートグリッドの議論の進展に伴い、自律的な単独運転検出方式ではなく、通信（有線及び無線）を用いて、系統運用者から転送遮断を行う方式が検討されている。通信方式としては、一般通信事業者の通信網、PLC（Power Line Communication）、携帯電話網、放送用の電波などが提案されている。日本でも将来の方式として転送遮断は認識されており、PLC 転送遮断方式は NEDO の「日米スマートグリッド実証」におけるスマートハウスでも検証されている。

2) FRT（Fault Ride Through）

再生可能エネルギー電源を含む分散型電源は、主に、機器保護の観点から、電力系統の電圧または周波数が一定の範囲を逸脱した場合に、自身の保護装置により電力系統から解列する。しかし、電力系統の電圧または周波数が本来の運用範囲を逸脱した場合に、分散型電源が大量に脱落することにより、電力系統の電圧または周波数の本来の運用範囲からの逸脱を拡大させ、最終的には電力系統全体の崩壊を引き起こす可能性が懸念されている。

このような問題を防止するため、分散型電源も、電力系統の電圧または周波数が本来の運用範囲を逸脱した場合でも運転を継続し、事故除去後には速やかに発電出力を回復させることで電力系統の安定運用に寄与しようとする機能が FRT である。

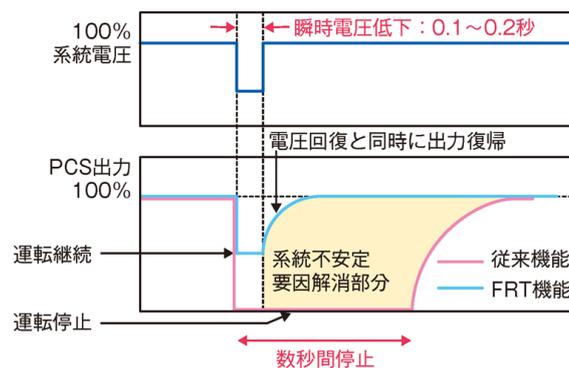


図 9-44 FRT 機能イメージ

米国では、NERC（North American Electric Reliability Corporation）において、電圧及び周波数に関する FRT 要件の標準化に関わる検討が行われている。一方、欧州では、各国ごとに FRT 要件が統一されておらず、風力事業者の団体である EPIA（European Photovoltaic Industry Association）や EWEC（European Wind Energy Association）などが統一に向けた活動を行ってきたが、欧州統一市場に向けた諸検討の一環として、ENTSO-E（欧州系統運用者の団体）が、EU 指令 714/2009/EC 及び欧州エネルギー規制庁（ACER）作成の枠組みガイドラインに基づき、EU 統一グリッドコードを作成中である。

日本においても、この FRT の要件化が、日本電気技術規格委員会（JESC）において検討されており、低圧連系の太陽光発電については、2011 年 12 月の系統連系規程 JEAC 9701-2010 改定に織り込まれた。また、すべての電圧連系における、太陽光発電及び風力発電等の分散型電源について、2013 年 2 月の系統連系規程 JEAC9701-2012 の改定で、FRT 要件に関する規定が追加された。

第9章 系統サポート技術

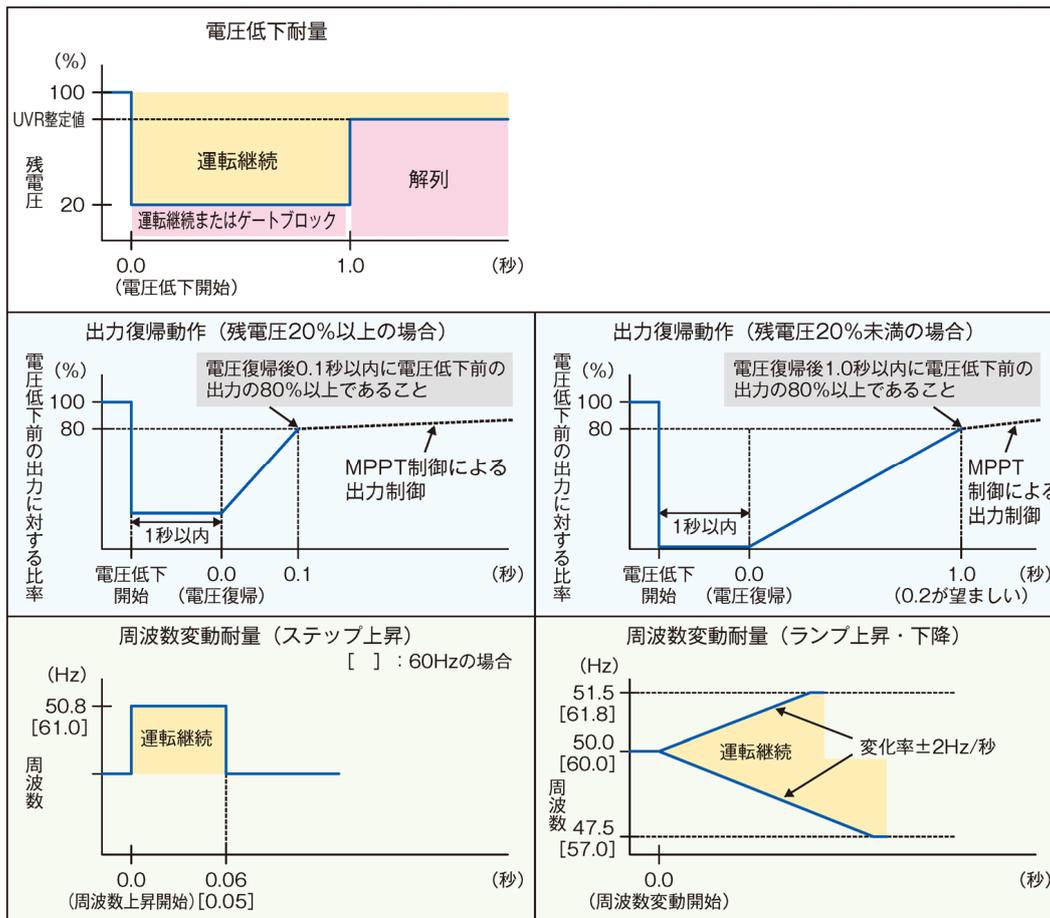


図 9-45 太陽光発電の FRT 要件

出典：系統連系規程（日本電気協会）より NEDO 作成

(2) 需給運用

電力系統側におけるエネルギーマネジメントシステム（EMS）は、需給運用システムなどと呼ばれる。各電力会社の中央給電指令所では、時々刻々変化する電力需要に合わせて、前述した在来型電源の出力調整を行い、周波数を一定にコントロールしている。今後、再生可能エネルギー電源がさらに導入され、電力系統の安定な需給運用を行うためには、再生可能エネルギー電源の発電状況を適切に把握し、火力発電や揚水発電といった調整電源をいかに適切に運用するのが大きな課題となる。揚水発電については、これまで以上の積極的な活用や、可変速化による揚水時の負荷調整力の確保も重要になる。

さらには、再生可能エネルギー電源が大量に脱落する場合を想定し、予め脱落量に対応する方策をとる、あるいは太陽光発電や風力発電の出力を予め抑制し、大量脱落の場合の影響を緩和するといった方策が必要となる。このような主に再生可能エネルギー電源を対象とした需給運用のシステムとして、スペインの REE 社による CECRE が有名である。

スペインでは風力発電の大量導入に伴い、スペイン唯一の TSO（Transmission System Operator）である REE 社が 2006 年 6 月より、10MW 以上の再生可能エネルギー電源（風力、太陽光、小水力、バイオマス等が対象）に対して、発電電力を管理・調整する再生可能エネルギー制御センター「CECRE（Control Centre for Renewable Energies）」をマドリッド北部近郊に設置した。スペインの電力系統は、系統安定度を確保し、フランスとの連系運用を維持する必要

がある。しかし、スペイン国内の風力発電が大量に脱落するような事象が発生した場合、フランスからスペインへの電力潮流が増大し、連系線が過負荷により遮断される可能性がある。CECREは、このような事態を回避することなどを目的に風力発電の発電出力等を常時監視し、必要に応じて風力発電の予防的な出力抑制を指令する。CECREはスペインの送電系統全体を制御する中央制御システム「CECOEL/CECORE」に組み込まれ、系統事故に伴う風力発電の停止量を予測計算することで、連系線の遮断が起こらないように、集中的に風力発電の出力を制限する機能を有している。また、REE社は、リアルタイムで再生可能エネルギーの発電電力を監視・制御ができる計算システム「GEMAS」を運用し、風力発電等の再生可能エネルギー電源の発電電力量を最大限に利用しながらも、電力系統の安定運用を行っている。最近、日本の電力会社が持つ系統安定化技術を基礎として、スペインのCECREのシステムよりも高度なシステムを開発することをNEDOは検討しており、欧米への適用の可能性を模索し始めている。

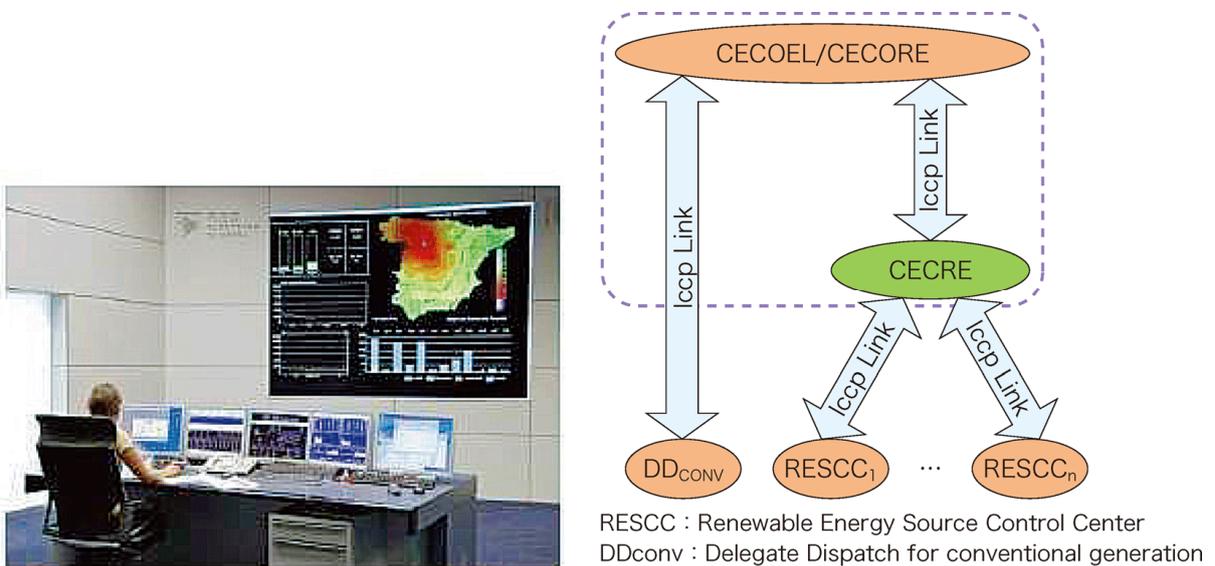


図 9-46 スペイン REE/CECRE

出典：Miguel de la Torre Rodriguez, “Impact on the Power System Control”, (2008 CIGRE Plenary session).

(3) 広域運用

会社間あるいは国間の連系を拡大して電力系統をより広域に運用することで、再生可能エネルギー電源の出力及び需要の変動を平滑化効果によって緩和し、あるいは正味の需要ピークを低減し、負荷率を改善し、必要な電源容量を減らすことができる。また、各電力系統間の相互融通や緊急時の応援融通により供給信頼度の向上も期待できる。

日本の場合は、図 9-47 のように電力会社間で連系しているが、国際連系線は保有していない。

第9章 系統サポート技術

- ・運用容量とは、当該地域間連系設備において安定的に送電できる上限であり、すでに送電している分が含まれるため、応援融通可能量ではない。
- ・運用容量は、当協議会ルールで定める平日昼間帯(8~22時)の値を示す。
- ・各エリア内数値は、平成24年度8月最大需要電力実績(H11)を表す。
- ・【 】内の数値は、地域間連系設備(全設備健全時)の熟容量を表す。

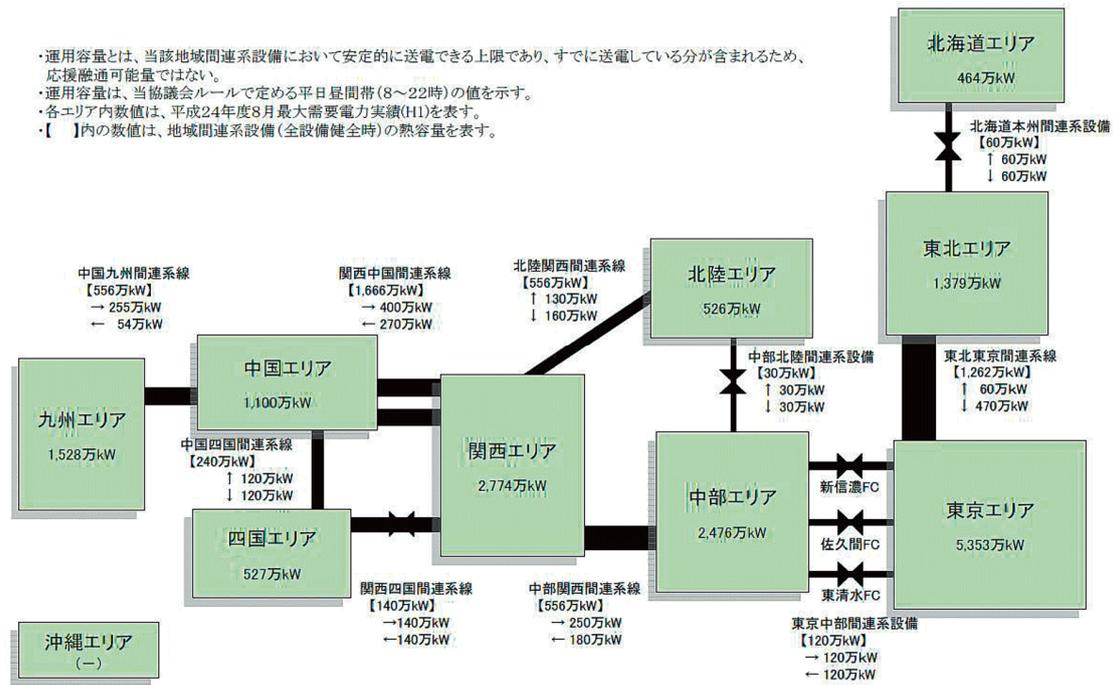


図 9-47 日本の電力系統

出典：電力系統利用協議会 資料

一方、欧米では日本と違い、近隣国との国際連系線も保有している。特に欧州では図に示すように国際連系ネットワークが構築されており、ドイツやデンマークなどにおいて、風力発電や太陽光発電のような再生可能エネルギー電源の大量導入を可能にしている要因の一つであると考えられる。欧州では、欧州統一市場を形成することを1987年にEUが提唱し、段階的に市場統合を図る動きが進められており、現時点では主として複数の国・地域の需給調整市場の統合などを進めるに至っている。この動きに関連して、再生可能エネルギー電源の大量導入に伴う系統課題の解決にも活用することを検討している。

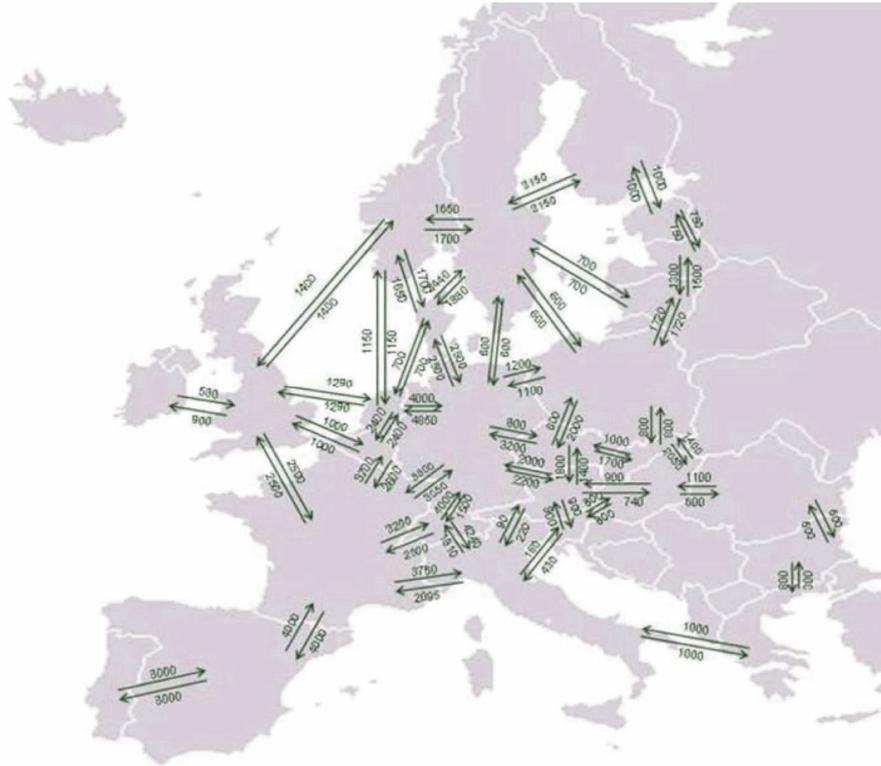


図 9-48 欧州の国際連系容量 [MW]

出典：“Nuclear energy and renewables” (Nuclear Energy Agency)

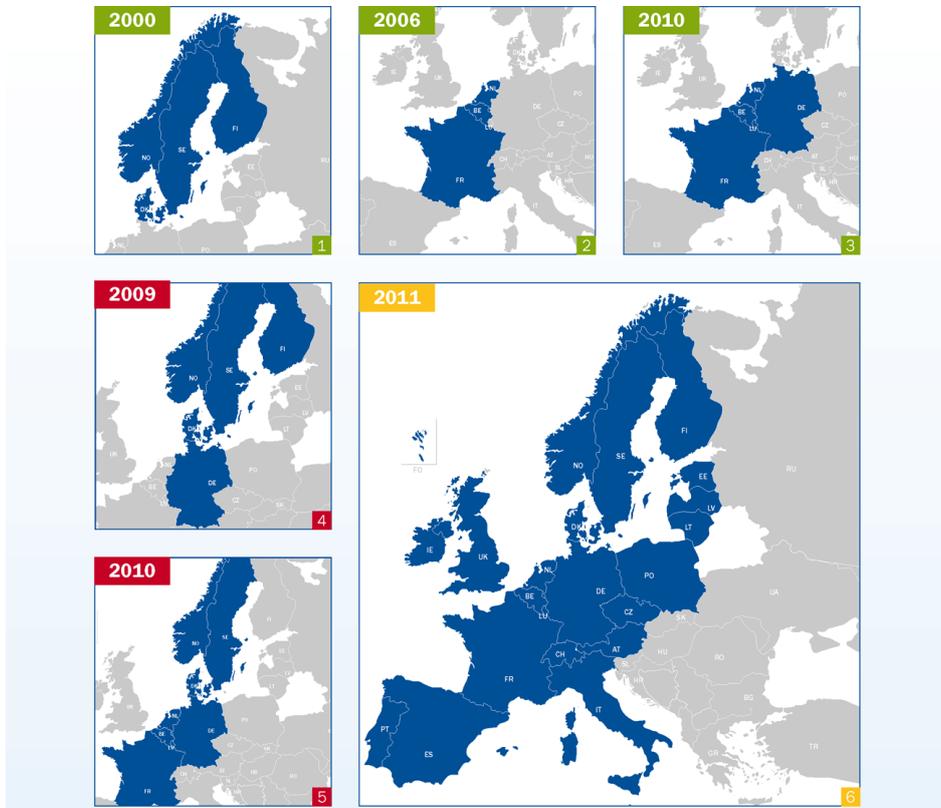


図 9-49 欧州の市場統合（需給調整市場の相互連携）の経緯

出典：“Creating the Internal Energy Market in Europe” (The European Wild Energy Association)

第9章 系統サポート技術

ところで、特定の需給調整を行うエリアにおける周波数制御には以下のようなものがあり、電力会社ごと、あるいは制御エリアごとに、下記のいずれかの方法が採用される。

- 1) 定周波数制御 (Flat Frequency Control : FFC)
- 2) 定連系線電力制御 (Flat Tie line Control : FTC)
- 3) 周波数バイアス連系線電力制御 (Tie line Bias Control : TBC)

日本では、供給エリアを 10 か所に分けて、それぞれの供給エリアの需給調整をそれぞれの電力会社が行っている。各供給エリアは連系されており、電力会社は安定供給の実現と発電設備の効率的運用のため、適宜、電力会社間で電力融通を行っている。また、電力不足が危惧される場合の応援など、タイムリーに電気を融通し合い、停電などのトラブルを未然に防止している。なお、各供給エリアにおける周波数制御には、北海道電力、東京電力、沖縄電力が FFC を、その他の電力会社は TBC を採用している。

一般的には、各電力会社が自社系統内の需給バランスの維持に責任を持つことが基本とされており、このことが再生可能エネルギー電源の連系量に制約を設ける理由である。この条件を緩和し、会社間連系線を通じて他社管内の調整力を活用することにより、定常的な需給調整力を増加させ、再生可能エネルギー電源の連系可能量を増やすことが期待されている。

日本においては、広域運用による再生可能エネルギー電源の導入量増加の可能性に関わる検討として、北海道電力、東北電力、東京電力の 50Hz 系統及び中部電力、北陸電力、関西電力、中国電力、四国電力、九州電力の 60Hz 系統において、会社間連系線を活用し、調整力が不足する地域の電力会社が調整力に余裕のある地域の電力会社の調整力を利用する実証試験が計画されている。図 9-50 に、北海道電力、東北電力、東京電力による実証試験の概要を示す。

一方で、広域化は必ずしもメリットだけでなく、欧州では、例えばフランスの大型の原子力発電所が脱落した場合、東欧の火力発電所が出力を上げてバックアップしようとするので、欧州全体に大きな潮流の変化をもたらすリスクがあり、広域化は系統擾乱時に電力系統の過渡的な不安定現象を増大させるリスクを抱えている。実際、カナダのハイドロケベックでは、安定度の問題から他の電力会社と連系されず、独立系統となっている。

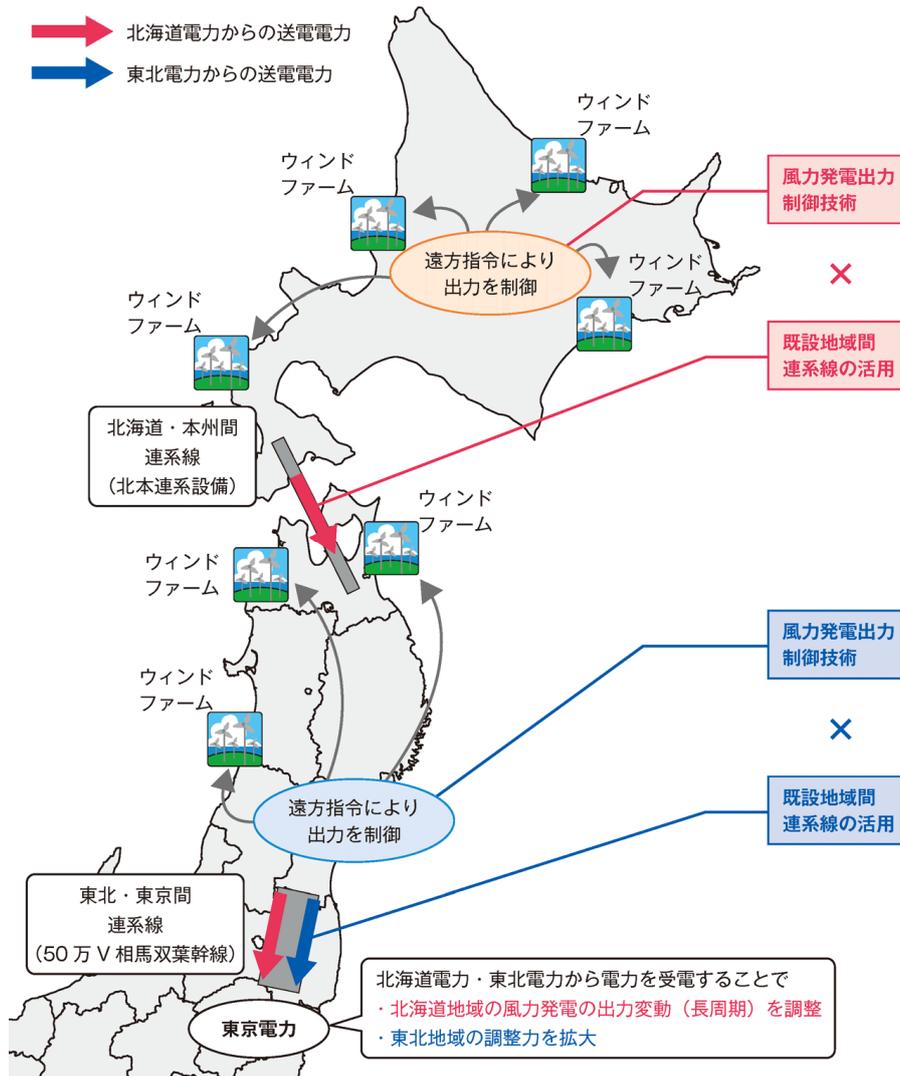


図 9-50 北海道電力、東北電力、東京電力による実証試験の概要

出典：北海道電力ホームページ <http://www.hepco.co.jp/info/2011/icsFiles/afiedfile/2011/09/30/110930a.pdf> より NEDO 作成

(4) 発電出力予測

太陽光発電や風力発電の出力変動は、大量に導入されるほど電力系統の電力品質面、特に周波数に大きな悪影響を与える。そこで、太陽光発電や風力発電の発電出力を事前に予測し、在来型電源の出力調整などの方法で出力変動を補償しようという取り組みが行われている。

風力発電の出力予測については、出力データと風況データの蓄積とその統計処理により、短時間予測の精度を徐々に向上させることが可能である一方、図 9-51 に示すようなランプ (Ramp) と呼ばれる急激かつ大規模な出力変動については、さまざまな気象要因により引き起こされるために予測が難しく、その予測技術の開発が海外でも重要なテーマになっている。例えば、米国テキサス州の大半の電力系統を運用する ERCOT (Electric Reliability Council of Texas) では、過去数年間で風力発電の導入が急速に進んだことで、地域全体のエネルギー供給の 10%弱 (発電容量では 10GW 超) を占めるまでになっており、周波数制御の観点から風力発電の出力予測が課題となっている。

第9章 系統サポート技術

また太陽光発電の出力予測は、雲の動きを可視化できるため比較的容易と考えられているが、主に気圧と風車のナセル高さにおける風速の関係を分析する風力発電と違い、低層から高層の雲の動きや気圧、気温、湿度など、考慮する独立変数が多いため、必ずしも容易ではない。

現状、翌日予測では風力発電で10～15%程度の誤差、太陽光発電で15%～20%程度の誤差があり、翌日の電力需要想定との誤差が2～3%であるのに対して誤差率が大きく、本格的な利用にはまだ課題があると見られている。

一方で、出力予測の精度が向上すれば、電力会社の需給運用に取り込むことによって、再生可能エネルギー電源の出力変動に対応する火力発電を最小の運用コストで運転計画できることが期待される。

出力予測には、独自の気象観測装置のデータで予想する方式と、気象専門機関から出される数値気象予報に基づいて予想する方式があり、前者は数時間先の短期予測、後者はそれより長い領域の予測に用いられる。電力会社の翌日の需給計画策定のためには、48時間程度前の出力予測が必要となるが、その予測精度は、気象専門機関から出される数値気象予報の精度に依存するため、精度向上は難しい課題となっている。

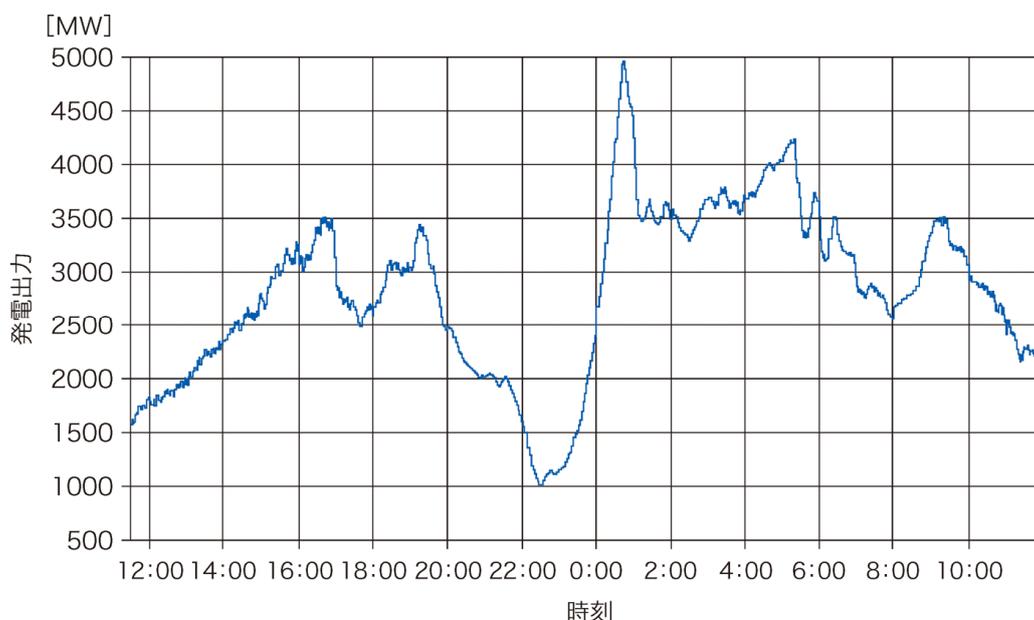


図 9-51 風力発電出力のランプ変動の例

出典：Flexibility Requirements and Metrics for Variable Generation (North American Electric Reliability Corporation) より NEDO 作成

1) 日本における風力発電出力予測システムの開発

日本の風力発電出力予測技術の取り組みは、NEDO の「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（出力変動抑制—風力発電量予測）」（2005～2007）において実施された。本事業で開発された風力発電量予測システムは、表 9-15 及び図 9-52、図 9-53 ような構成となっている。

また、図 9-54 に示す通り、東北電力では独自に風力発電の出力予測システムを開発し、同社の系統運用業務に活用している。本システムは、気象庁の予測データと東北電力管内の過去の発電出力データから予測誤差の補正を行い、予測精度の向上を図っている。

表 9-15 風力発電量予測のモデルおよびシステム (WF : ウィンドファーム)

システム	WF 発電出力予測システム	電力系統制御エリア 発電出力予測システム
モデル	WF 発電出力予測モデル	電力系統制御エリア 発電出力予測モデル
利用者	WF の所有者	系統運用者
利用目的	WF の運営管理	WF の利用
SCADA の取扱	詳細な SCADA データ	総出力のデータ
システムの 下位モデル	✓ 気象モデル ✓ 統計モデル ✓ 局所風況予測モデル	✓ 気象モデル ✓ 統計モデル

出典：「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」風力発電出力予測技術ガイドブックより NEDO 作成

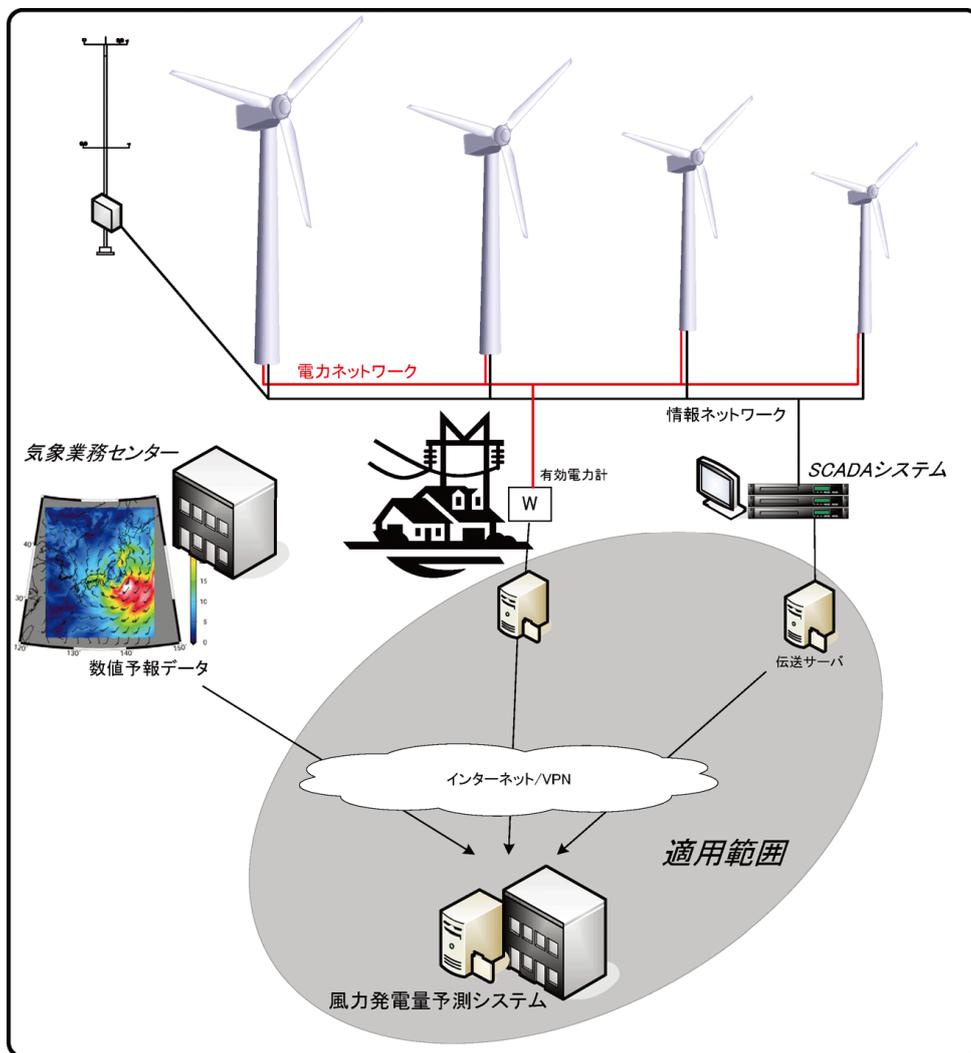


図 9-52 システム概要図

出典：「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」風力発電出力予測技術ガイドブック

第9章 系統サポート技術

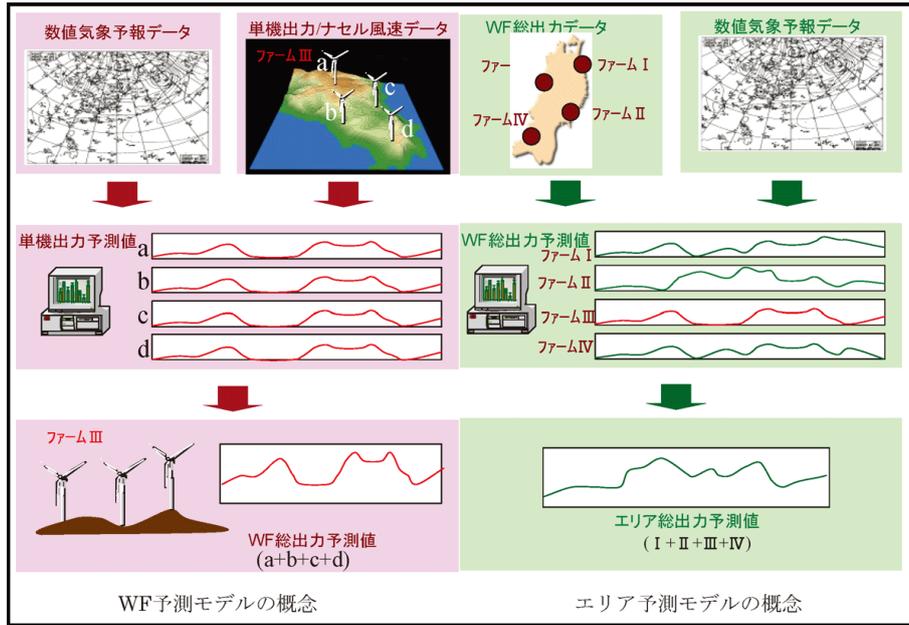


図 9-53 「WF 予測モデル」と「エリア予測モデル」の比較概要図

出典：「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」風力発電出力予測技術ガイドブック

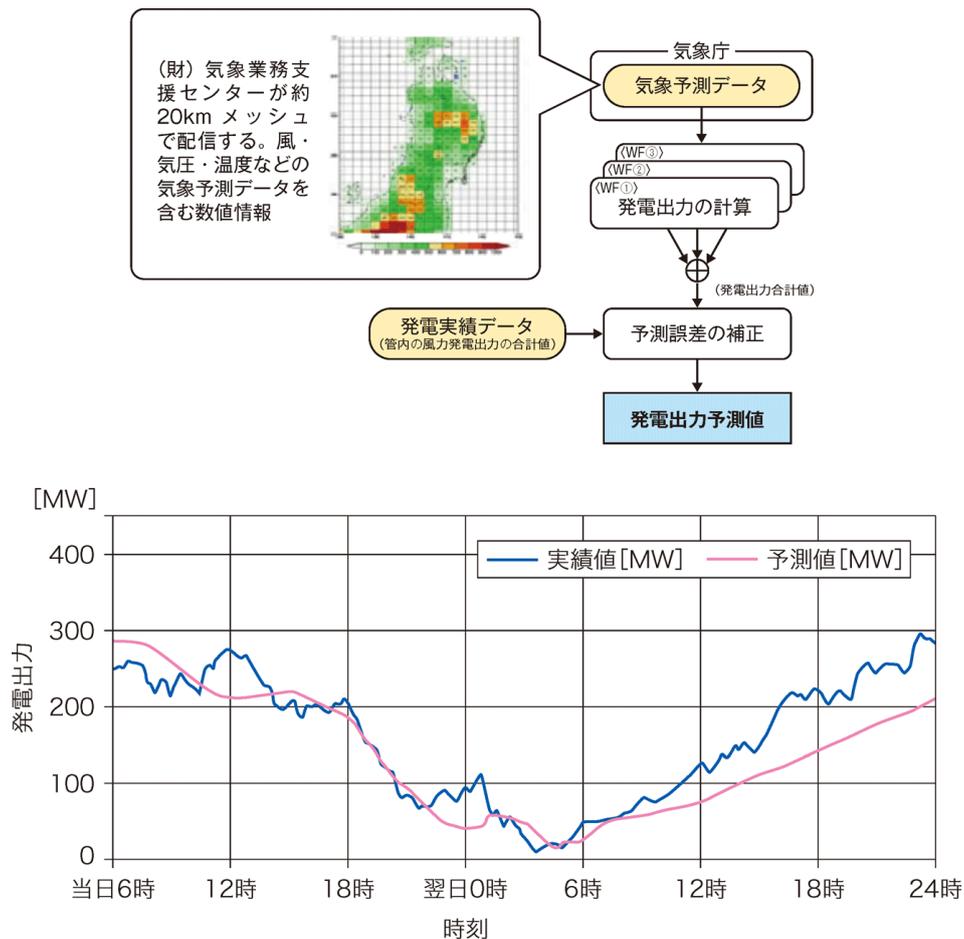


図 9-54 東北電力の風力発電出力予測システムと予測の例

出典：東北電力ホームページ (<http://www.tohoku-epco.co.jp/ICSFiles/afieldfile/2010/10/01/as1.pdf>)

2) 欧州における風力発電予測システムの開発

欧州では、1990年に風力発電で数値気象予測（Numerical Weather Prediction: NWP）が利用され始め、他にもいくつかのモデルが開発されてきた。しかし、過去15年間の出力予測研究を経てもなお10～20%の予測精度と不十分であり、特に前線付近における予測はずれや、カットオフ速度付近の風速における予測はずれの影響が大きい。

ANEMOS プロジェクト（2002～2006年）では、特に不確定性の定義を中心に、予測技術の進歩があった。しかし、これを利用する側の送電系統事業者は、不確定性情報に対する意思決定ルールを確立できていなかったため、ANEMOS.plus プロジェクト（2008～2011年）では、蓄電スケジュール、電力系統スケジュール、電力取引、余剰電力マネジメント等の意思決定支援ツール向けデータとして、確率論的予測の活用を試みた。

さらに、SafeWind プロジェクト（2008～2012）では、誤差増幅への対策として時空間相関を導入し、アップストリーム情報を活用し、予測技術の向上を図っている。

3) 米国における風力発電出力予測システムの開発

米国では、電力系統への影響が顕在化しはじめているテキサス州を検討フィールドとして、The Wind Forecasting Improvement Project（WFIP）（風況予測向上プロジェクト）が2011～2012年に実施されている。

WFIP プロジェクトは、テキサス州の電力系統エリアである ERCOT 地区の風況予測システムを、既存の ELRAS（ERCOT Large Ramp Alert System）より高精度化することを目的としている。ERCOT 地区は、さまざまな大気現象（下層ジェット、前線、対流流出境界）の影響により、風力発電出力の短期予測が難しいが、ここで得られる知見は米国の多くの地域で活用されるものと期待されている。

4) 日本における太陽光発電出力予測システムの開発

太陽光発電の出力予測の技術開発については、NEDOの「大規模電力供給用太陽光発電系統安定化等実証研究（稚内サイト）」（2006～2010）において、日射量予測をもとに行われた。図に示すように、太陽光発電所構内や周辺に設置された日射量計、気象衛星、数値予報などのデータから、翌日及び翌々日の予測を30分単位で行う日（前日）予測、6時間先までを30分単位で予測する時間予測、2時間先までを10分単位で予測する10分予測が行われた。

太陽光発電の予測については、これ以外にもさまざまな手法により各所で開発が実施されている。

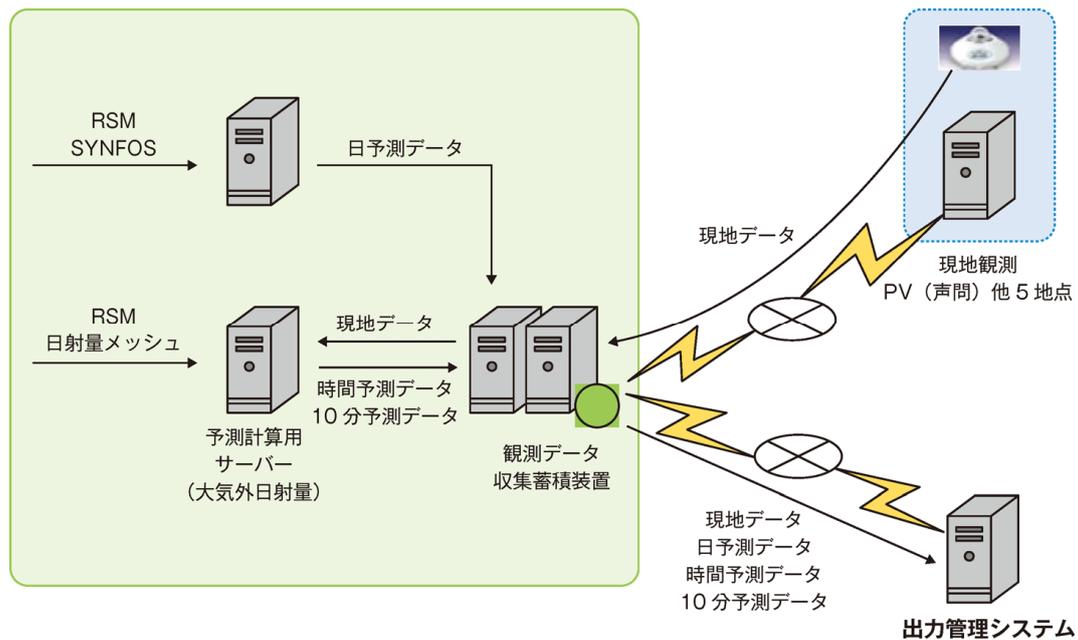


図 9-55 日射量予測システム

出典：「研究年報 第40巻」(北海道電力, 2009/10)より NEDO 作成

5) 米国における太陽光発電出力予測システムの開発

米国における Integrating PV into Utility Planning and Operation Tools では、SolarAnywhere の FleetView による太陽電池パネル群の発電量シミュレーションを行うことが可能にしている。SolarAnywhere は、ウェブからアクセスできる日照データ及び分析ツールであり、その構成は以下の通り。

i) 照射データ

- ・ 1998 年から 1 時間前までの衛星から得た時系列データ
- ・ 雲の運動ベクトル及び NWP (Numerical Weather Prediction, 数値気象予報) との組み合わせによる 7 日先までの予測

ii) 分析ツール

- ・ 太陽光発電システムモデリング (FleetView)
- ・ 太陽光発電ベンチマーキング (DataCheck)
- ・ 太陽光発電 fleet 変動性

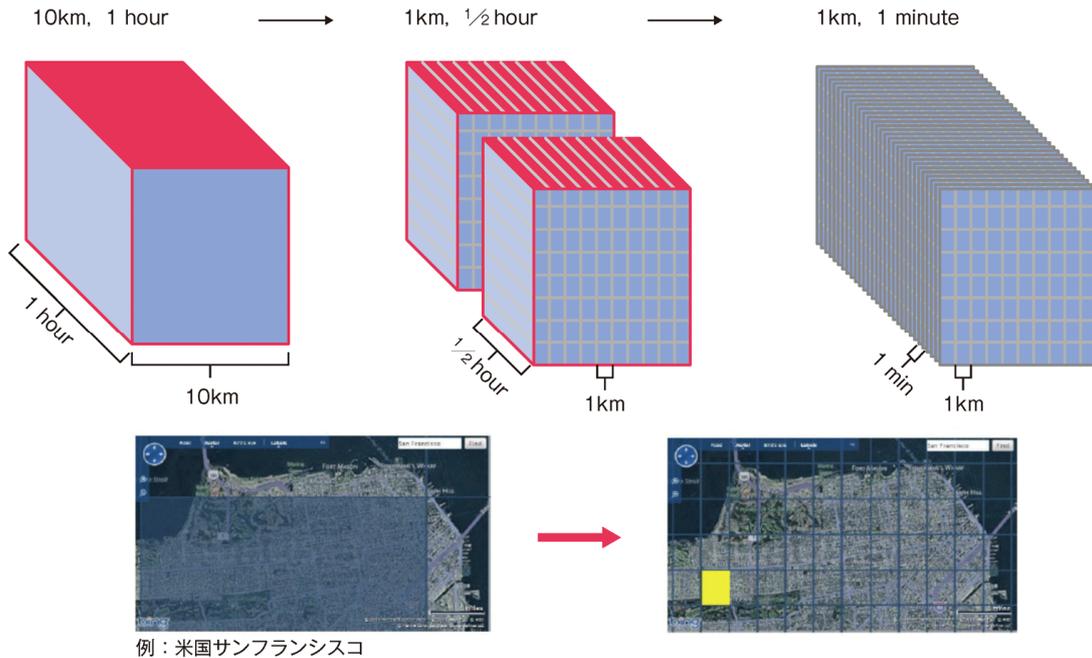


図 9-56 SolarAnywhere の解像度（上段左から標準解像，中解像，高解像）

出典：Forecasting Output for 130,000 PV Systems in California より NEDO 作成

（5）スマートグリッド

1) 技術の概要

スマートグリッドとは、電力供給システムの新しい概念を示すものである。従来の電力供給サイドの視点のみからでなく、ICT 技術を用いてエネルギー情報を見える化し、需要家サイドを巻き込んでエネルギー利用の合理化を図ろうというものである。

「米国のスマートグリッドは主にスマートメーター導入による市場安定化が目的」といわれることもあるが、「日本の送電線網は十分“賢い”からすでにスマートグリッドだ」といわれることもある。一方で「スマートグリッドは新規 IT 関連ビジネスのチャンス」「スマートグリッドで暮らしが変わる」などともいわれている。「スマートグリッド」の概念は、国により微妙に異なるためわかりにくいといわれているが、少なくとも「電気事業の視点に立った電力供給システムの ICT 技術による次世代化」という考え方についてはコンセンサスが得られている。

また、それぞれの立場によって、スマートグリッドが「政策そのもの」だったり、「技術」や「事業」、時には「製品」であったりすることがあるが、当初から、統一概念として、「電力供給側と需要家側の双方向性を持つ、電力と情報の新しいインフラ」という考え方は確立していた。「再生可能エネルギーの連系量増大・利用促進」、「送配電の効率化・信頼度向上」、「電気駆動のエコカー普及」、「スマートメーターと AMI (Advanced Metering Infrastructure) の普及」もこの概念の中に位置付けて考えれば、「スマートグリッドを構成する要素」と言える。

このスマートグリッドを構築する上で必要となる技術を整理すると、電力系統側からの対策と需要家側からの対策とに区分できる。電力系統側からの対策については、本章の前半で述べてきた通りであり、本節では需要家側からの対策について説明する。需要家側の対策とは、ICT 技術を用いて需要家サイドを巻き込んでエネルギーの合理的な利用を促すものである。これを実現する上でキーとなるのがデマンドレスポンスである。

第9章 系統サポート技術

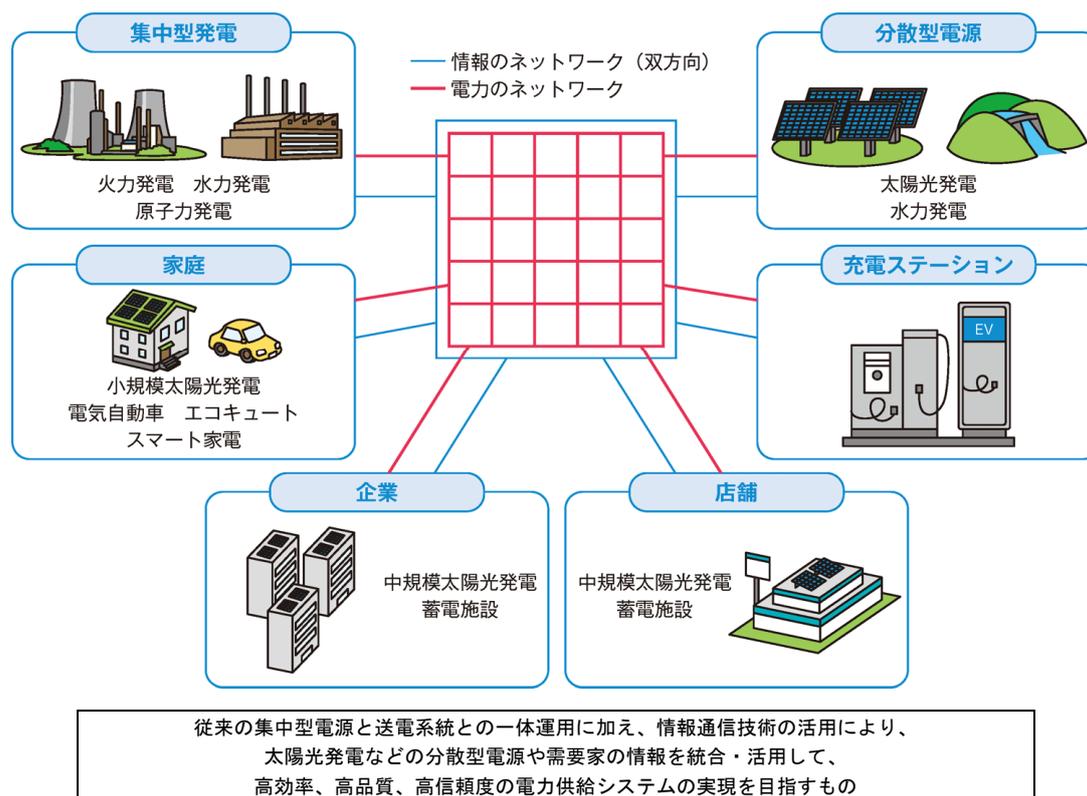


図 9-57 経済産業省による「スマートグリッドの概念」

出典：「低炭素電力供給システムに関する研究会」報告書（2009，資源エネルギー庁）より NEDO 作成

2) デマンドレスポンス

デマンドレスポンス (DR : Demand Response) とは、「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」を指す。

デマンドレスポンスには、人間が対応する通常のデマンドレスポンスと、人間系が介在せずに自動的に負荷制御を行う自動デマンドレスポンス (ADR) がある。

インセンティブの掛け方は、時間帯別料金 (TOU:Time of Use Pricing) をさらに極端にしたものである。ピーク時料金 (CPP:Critical Peak Pricing) などの方法の他、卸売り市場の価格変動をインデックスにして作るリアルタイム料金 (あるいはダイナミックプライシング) がある。

デマンドレスポンスにおける情報ルートは、料金信号は電力会社-AMI (スマートメーターの情報インフラ) 経由-スマートメーター (いわゆる A ルート) と、電力会社-公衆インターネット回線経由-家庭内端末 (いわゆる C ルート) がある。A ルートで料金信号を送る場合には B ルートと呼ばれるスマートメーター-宅内端末との情報ルートが必要であり、通常、料金情報を可視化するタブレット端末が用意される。なお、初期の国内の研究会ではスマートメーターと HEMS (Home Energy Management System), BEMS (Building Energy Management System) が B ルートで直結するシステムが検討されていた。しかし、世界の趨勢では、個人の課金情報が流れる AMI と一般公衆ネットワークと HEMS, BEMS がつながるのは、サイバーセキュリティ上問題があると考えられはじめており、B ルートによる HEMS などへの接続は慎重である。

なお、NEDO は米国ニューメキシコ州の「日米スマートグリッド実証」で 800 軒程度の家庭が

参加するデマンドレスポンス実証を 2013～2014 年度にかけて実施する予定である。



図 9-58 宅内端末の事例 (NEDO「日米スマートグリッド実証」)

再生可能エネルギー電源の大量導入に伴い、短時間の自動デマンドレスポンスも注目されている。自動デマンドレスポンスについては、HEMS などのマネジメントシステムを介して需要を調整する場合と、簡単な制御メカニズムで特定の負荷を高速制御する直接負荷制御がある。NEDO では、米国ニューメキシコ州においてスマートハウスとマイクロ EMS の間で前者のタイプの自動デマンドレスポンスを実証しているが、HEMS の最適化計算の更新などを考慮するとレスポンスには数分～10 分程度かかるのでアンシラリーサービスへの適用には向かず、あくまでもピーク対策のような需給対策向けの技術となる。一方、NEDO が行っている米国ハワイ州における「島嶼域スマートグリッド実証」や、イギリスにおけるヒートポンプを制御する実証では、EV やヒートポンプのような特定需要を制御することでアンシラリーサービス市場にも適用可能な高速性を確保しようとしている。

なお、住宅のような小口の需要をアンシラリーサービスに反映するには、需要制御の仕上がりを短いサイクルで計量するとともに、みなしの負荷形状で決済されている小口電力の市場決済を、スマートメーターのリアルタイム情報で決済する仕組みに変更する必要がある。

また、最近では 1 時間単位ないしそれより短い時間で料金を変化させるダイナミックプライシングも着目されているが、このような頻繁な料金の変化は人間では追従できないため、家庭内の制御機器に自動的に対応させる自動デマンドレスポンス (ADR) が注目されている。NEDO のニューメキシコ実証でもロスアラモス郡営電力の EMS とスマートハウスの HEMS が通信して ADR の実証を行っているが、欧米の最近のスマートグリッド実証では、米国のピーカンストリートプロジェクト、ドイツの MOMA プロジェクトなど、HEMS より簡易的な制御装置による ADR の実証が含まれている。NEDO が計画しているハワイやイギリスの実証は ADR の一種と定義される。ADR に関しては米国 DOE-ローレンスバークレーにより、openADR という標準規格が検討され、日本でもその実証が早稲田大学を中心に繰り広げられている。

こうしたデマンドレスポンスを実現するための技術の構成要素として代表的なものが、スマートメーター、エネルギーマネジメントシステム、V2G・V2H・G2V 等であり、以降それぞれの技術について概説する。

第9章 系統サポート技術

i) スマートメーター

スマートメーターは、双方向通信機能や遠隔開閉機能を有する電子式メーターのことである。もともとは自動検針を目的に、30年以上前から開発されていたものであるが、家庭内通信技術を使いタブレット端末を持ち込むと、エネルギー使用量及び電力料金情報の見える化が可能となるため、需要家の省エネ意識を向上させることによってエネルギーの効率的な利用を促進するツールとしても期待されている。特に、震災以降の電力需給の逼迫を背景として、ピーク需要の抑制を実現するデマンドレスポンスのツールとしての役割が期待されている。

従来のメーターは、単に電力会社の月単位に行う検針、料金収集業務に必要な機器であった。スマートメーターでは、それに通信機能などが追加されることにより、日々刻々変化する電力の使用量をリアルタイムに近い形で計測が可能になり、細かい時間帯別料金に対応できるようになった。スマートメーターは、その料金設定によりどのように需要が変化したかを公式に計測する唯一のツールになる。

なお、デマンドレスポンス用の料金情報は、ユーザーには必ずしもスマートメーター経由で知らせる必要はない。実際に、NEDOのニューメキシコ実証におけるデマンドレスポンスの実証では、その参加者の大多数はメールベースで翌日に料金情報を受け取っている。

また今後、本格的にデマンドレスポンスを電力市場に反映させるのであれば、小口の需要パターンを見なしで扱っていたプロファイリングをやめて実測ベースの決裁に転換する必要があるが、その際にはスマートメーターから来る大量のデータを高速に処理する技術が必要になる。

スマートメーターの通信方式は、屋外にメーターを設置する米国や日本はメッシュ無線方式の通信が主流である。一方、配電線が地中化され、メーターも屋内にある欧州では、配電線搬送(PLC)による通信が主流である。

日本の電力会社は表 9-16 に示すように、遠隔検針にスポットを当て、各社独自のメーター開発を行ってきたが、ここ最近では将来におけるデマンドレスポンス導入などを勘案して、海外のメーターも導入できる調達方式に変更することも考えられている。

表 9-16 国内電力会社のスマートメーター実証実験

電力会社	開始時期・特徴など
北海道電力	<ul style="list-style-type: none"> ・2011 年度から実証実験を開始、約 120 戸に導入済 ・2012 年度までに約 600 戸への導入を予定
東北電力	<ul style="list-style-type: none"> ・2010 年度下期から、約 2000 戸を対象に遠隔検針の実証実験を開始 ・実証実験は、山間部や都市部など検針環境の違いにより 3 つのパターンに分けて、2010 年度下期から 2012 年度末にかけて順次実施 ・使用する新型電子メーターは昼・夜の時間帯別の計量に加え、30 分単位での計量・記録、双方向通信や遠隔操作による開閉、停電の検知が可能
東京電力	<ul style="list-style-type: none"> ・2010 年 10 月から東京都の一部地域で試験導入に着手、約 1200 戸に導入済み ・東京都清瀬市・小平市などの住宅を中心にスマートメーターを 9 万台程度設置 ・大崎電気工業、東光東芝メーターシステムズ、富士電機、三菱電機が新型電子式メーターを開発 ・契約アンペアを超えた場合、ブレーカーが作動して電力を遮断する「S ブレーカー機能」を具備した開閉器を備えた点が特徴的 ・2018 年度までに約 1,700 万台のスマートメーターを家庭等に集中導入し、遅くとも 2023 年度までに全戸を対象に 2,700 万台の配備実現を目指す
中部電力	<ul style="list-style-type: none"> ・2011 年度から春日井市の約 1500 戸を対象に実証実験 ・メーターは関西電力と同型を採用
北陸電力	<ul style="list-style-type: none"> ・2011 年に約 500 戸を対象に実証実験を開始
関西電力	<ul style="list-style-type: none"> ・2009 年 4 月より実証実験を開始、2011 年 10 月までに約 96 万台を設置 ・2009 年 7 月より、希望する需要家にネットで「見える化」を実施（使用電力量、電気料金など） ・大崎電気工業が開発・製造している「ユニット式メーター」は、通信、開閉機能が分離していて、個別に交換可能である点が特徴
中国電力	<ul style="list-style-type: none"> ・2012 年度から最大で 1000 台程度の規模で通信試験を開始予定
四国電力	<ul style="list-style-type: none"> ・2012 年度をめぐりに約 1000 戸を対象に実証実験を開始予定
九州電力	<ul style="list-style-type: none"> ・2009 年 11 月から実証実験を開始、2011 年 10 月までに約 9 万戸に導入済み ・計量、通信、開閉機能が分離した大崎電気工業製の「ユニット式メーター」を採用

出典：電力会社各社ホームページ、経済産業省資料より NEDO 作成（2011 年 12 月現在）

ii) xEMS

エネルギーマネジメントシステムとは、電気、ガスなどのエネルギー使用状況を把握し、消費するエネルギーの流れを効率的に制御・管理するためのシステムである。制御・管理する対象が住宅の場合は HEMS（Home Energy Management System）、ビルは BEMS（Building Energy Management System）、工場は FEMS（Factory Energy Management System）、地域は CEMS（Community EMS または Cluster EMS）と呼ばれる。

HEMS 及び BEMS は、「通信ハードウェア、家庭内センサーネットワークといった技術の開発により、家庭・業務用ビル等における機器をネットワーク化して運転管理するシステムの確立を目指す」ものと、経済産業省の Cool Earth 計画（2009）で定義されている。

経済産業省「次世代エネルギー・社会システム実証（国内 4 地域実証）」の 4 実証とも、各メーカーの HEMS、BEMS、FEMS を実証する他、電気事業者、デマンドレスポンスアグリゲーター、自治体等がデマンドレスポンスの管理を中心とした CEMS を保有することを想定して、ス

第9章 系統サポート技術

スマートコミュニティのあり方を検証している。

NEDO のニューメキシコ実証におけるロスアラモスサイトにおいては、太陽光発電（1MW）及び蓄電池（1MW 強）などを設置し、太陽光発電の出力変動吸収を制御・管理する EMS（CEMS の一種、現地では μ -EMS と呼んでいる）の実証を行っている。また、スマートハウスの実証においては HEMS を導入し、太陽光発電の出力予測を踏まえ、住宅に設置する太陽光発電、蓄電池、蓄熱機器などの運転制御を行い、需要家内の需給バランスの制御、あるいは独立運転を実証している。また、フランスリヨンにおける NEDO 実証事業においては、消費する以上に電力を作り出して外部に供給するポジティブエナジービル（PEB）の実証実験を行っており、消費者の省エネ行動を促すタイプの HEMS を実証している。

以下に各 EMS の最近の動向を示す。

・HEMS

HEMS は、当初、HEMS という機器が家庭内に存在して、それをスマートメーターと連携することを考えていたが、小規模事業者向け BEMS と同様にクラウド化する方向にあり、HEMS のあり方、管理、機能についてはさまざまなバリエーションが想定されている。最近では ADR に着目した特定の家電機器の制御のみを管理する簡易な制御機器を検討する例が見られる。

・BEMS

BEMS は、大規模なビルにおいてエネルギー使用を合理化する手段として既に普及している。スマートコミュニティの世界では、如何に小規模なビルに適用させるかが課題であり、本格的なマネジメントセンターの設置が不要となる、クラウド型の BEMS の開発、普及を狙っている。また、東日本大震災、米国のハリケーン災害以降、停電時に電気を自立的に発電できる高信頼度供給が注目され、この機能を BEMS に付加する傾向も見られる。

・FEMS

FEMS は工場における需要制御の発展系で、30分同時同量の計測範囲で消費量（Wh）を抑えて、基本料金を抑える目的で使われてきた。多くの日本の工場において、多様なプロセスの中で調整可能な需要を判断することは難しく、人間系が介在してのマネジメントが主流であった。しかし、将来、ADR との組み合わせによるピークカットを実現するためには、ADR に対応できる自動的な FEMS の導入が望まれるものと考えられる。

・CEMS

CEMS はコミュニティ単位でのシステムで、電気事業者のような公益事業サイドが持つ場合と、自治体が持つ場合がある。米国の自治体電力会社やドイツの都市配電事業者のような事業者には CEMS の概念は明確で、地域の分散型電源と需要を管理し、エネルギーコストを最適化する強力なツールとなる。公益事業と自治体のエリアが乖離している場合には、自治体の持つ CEMS の機能については議論がある。NEDO のリヨンのプロジェクトでの CEMS は自治体の政策に反映できるエネルギー等のキーパフォーマンス評価のシステムとして設計されている。

iii) V2G, V2H, G2V

電気自動車（EV）等が普及したスマートコミュニティのアプリケーションの一つとして、EVが持つ蓄電池を有効活用する、V2G, G2V, V2H などの方法が考えられている。

経済産業省「次世代エネルギー・社会システム実証（国内4地域実証）」の愛知県豊田市のプロジェクトにおいても、V2Hが出来る住宅のデモンストレーションが展開されている他、国内・欧米でもV2Gのさまざまな実証が行われている。

- V2G (Vehicle to Grid)

電気自動車の蓄電池を系統連系し、電力系統運用に貢献するため、必要に応じて電気自動車の蓄電池を電力系統に逆潮流させる技術を指す。世界の各地で実証が行われているが、欧米各国ではHEMSがあまり発展していないため、V2HよりV2Gを行っているケースが多い。ただ、V2G関係者のヒアリングでは、一般の電気自動車ユーザーが電力会社のために電気を戻してくれることは想像できないとのコメントもあり、むしろV2Hの前段階としてV2Gを行っていると考えられる。

- V2H (Vehicle to Home)

需要家が電気を必要な際に、電気自動車の蓄電池から需要家に電気を戻すことであり、基本的にはHEMSにおいて行われる。災害時のバックアップ電源、安い夜間電気料金の活用、他所からの電気の輸送に活用可能である。ただし、現段階では、まだV2Hの標準規格が存在しないため、その確立など、制度的に議論を行う余地が残っている。

- G2V (Grid to Vehicle)

電力会社側の需給のアンバランスが起こる場合に、系統運用者などの指令によって電気自動車の充電を制御することを指す。特に風力発電は、ランプダウンと呼ばれる出力の急激な低下があり、島嶼のような閉鎖的で規模の小さい電力系統では周波数に大きく影響する。そのため、NEDOのハワイ実証では電気自動車の充電の一時停止などによる需給バランスの回復を実証する計画である。

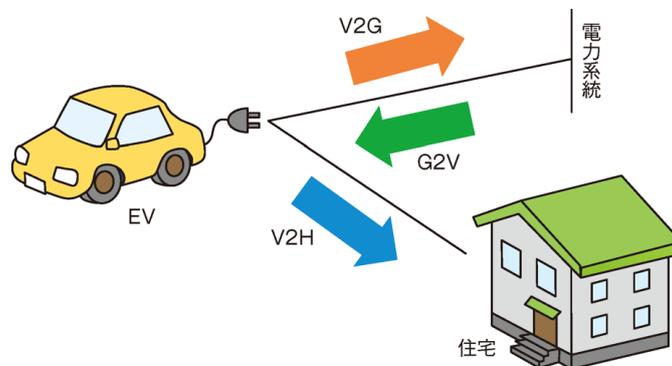


図 9-59 V2G, V2H, G2V

9.3 各国の系統課題への対応状況

本節では、再生可能エネルギー電源導入拡大に伴う系統課題解決のための対策技術と各国の系統課題への対応状況について述べる。

図9-60に示すとおり、対策技術とその導入場所の組み合わせによって4つの事象に分類する。

(1) 系統対策技術の分類の視点

1) 対策技術：

主要対策技術を「実現する際の主たる構成要素」の視点、ハードウェア、ソフトウェアに分類した。

- ・ハードウェア：機器・設備が主たる構成要素
- ・ソフトウェア：制御やソフトウェアなどに加えて、市場参加者の行動変化などを促す仕組み・制度が主たる構成要素

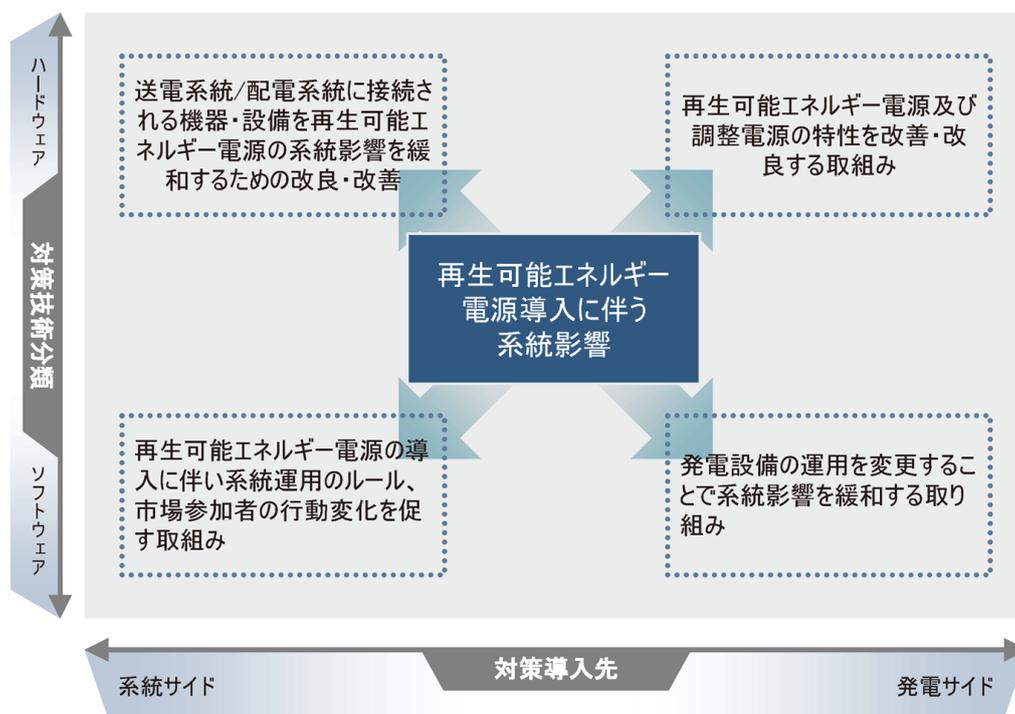


図9-60 再生可能エネルギー電源大量導入時の対策技術

2) 対策導入場所：

対策導入場所については、系統影響の原因となる再生可能エネルギー電源側（発電サイド）と、電力系統側（系統サイド）に分けて整理を行った。

- ・発電サイド：再生可能エネルギー電源の導入地点や、導入地点近傍での対策
- ・系統サイド：再生可能エネルギー電源が接続される電力系統側での対策

図9-61に、国内外で実施されている、再生可能エネルギー電源の大量導入に伴う課題を解決するために主要な対策技術分類のマッピングを示す。

(2) 系統対策技術の特徴

再生可能エネルギー電源の大量導入に伴う系統影響は、欧米などで徐々に顕在化しつつあり、近い将来に我が国でも大きな問題となる可能性がある。また、再生可能エネルギー電源受け入れのための大規模な投資を伴う系統対策技術の導入は図られていないが、今後系統運用の考え方を見直す時期が来ると考えられる。

現段階では、全く新しい技術コンセプトに基づくハードウェア技術は少なく、既存の系統接続機器に再生可能エネルギー電源がもたらす影響を緩和するための機能を付与するなど使い方の工夫で課題解決を図ろうとする技術群が主流である。

そのため、相対的にはソフトウェアの要素が強い技術群が多くなる傾向にあり、ハードウェアが成功するための鍵となる技術は必ずしも現段階では多くない。

また、後述するように各対策技術は、再生可能エネルギーの導入普及に関わる事業環境に加え、電気事業制度などの電力系統利用に関わる規制環境により、志向される技術群が異なることもある。



図 9-61 再生可能エネルギー電源大量導入に関わる対策技術の分類

9.3.1 欧州における状況

他の地域に先んじて、再生可能エネルギーの導入普及に注力してきた欧州では、再生可能エネルギー電源を域内のエネルギー自給率の向上と低炭素社会実現の主要な施策と位置づけ、将来的にも引き続き導入拡大を目指している。

電気事業体制については、欧州経済統合の一環で、電力の統一市場の実現を図るために、発電電分離を推進している。ただし、EUに参加している東欧諸国の一部は、まだモノポリーの国営電力会社の形態を維持しているため、EU内で連系していない。

再生可能エネルギー電源の出力変動は、一般的に地域間の出力変動や気象変動の不等時性により一定の平滑化効果が期待できる一方、連系線の潮流の予測は難しくなっている。そのため、前出の欧州統一市場化の流れとあわせて、周波数制御は広域で行う反面、送電線の混雑(過負荷)

第9章 系統サポート技術

の問題は深刻さを増している。

欧州各国では発送電分離等の事業制度改革が開始された当初は、さまざまな新規参加者が登場したが、その後、統一市場化の動きとも連動し、域内における電力会社の統廃合が進み、市場プレーヤが集約されている。なお、風力発電は洋上の開発が最近まで主流であったが、比較的コストで建設できるサイトが減ってきたこともあり、立地が陸上に回帰しつつあるといわれている。また、北アフリカの太陽光発電、太陽熱発電の電力を海底ケーブルで送電する構想も、北アフリカ諸国の政治的不安定性から計画が進んでいない。

またドイツでは、風力発電ポテンシャルが北部に偏在しているため、このエリアの需要規模を大きく超える風力発電が導入されているが、南部の大需要地に向かう送電容量が不足しており、北部の一部地域では発電制限が行われている。そこで、**図 9-62** に示すような超高压直流送電線などの新增設が計画されているが、景観破壊、電磁波の健康影響などの理由による地元住民の反対などから順調には進んでいない。今後、北海やバルト海における洋上風力の拡大が見込まれており、ドイツにおいて送電ネットワークの整備は喫緊の課題となっている。

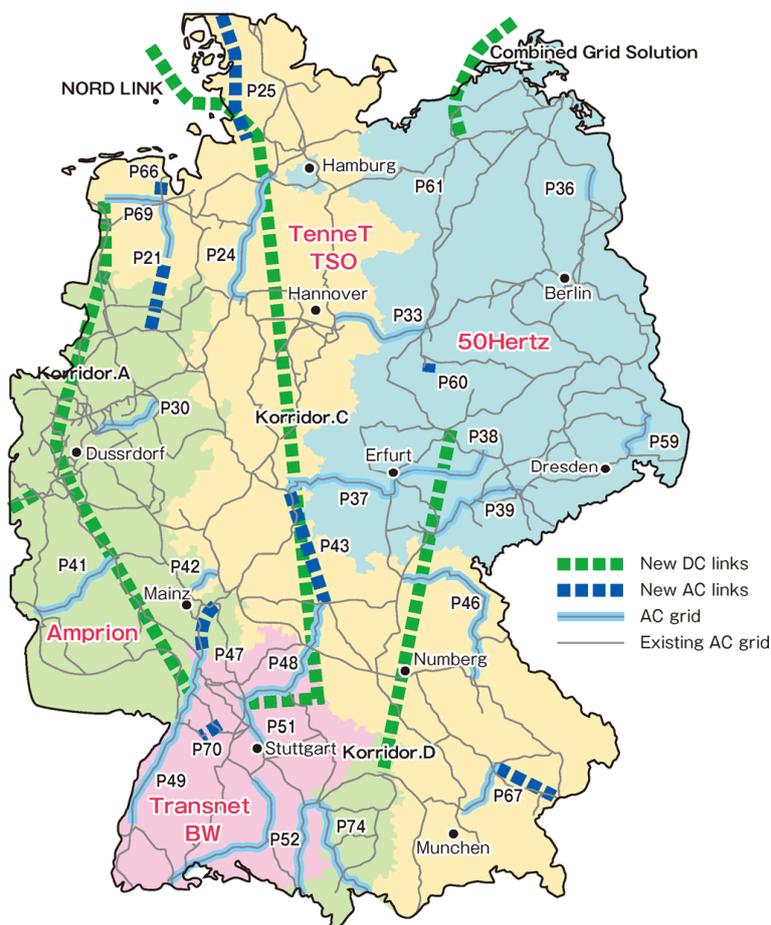
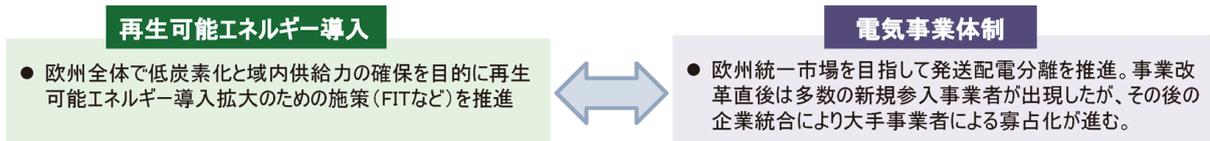


図 9-62 ドイツにおける送電線の新増設計画

出典：Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahn 資料より NEDO 作成

さらに、ドイツやイタリアなどでは、再生可能エネルギー電源の導入拡大が急速に進展したことで、既存の火力発電所の稼働率低下を招き、事業採算性が見込めなくなったことにより、発電所廃止の動きが出ている。しかし、太陽光発電や風力発電のような再生可能エネルギー電源には、その出力変動を補償するために出力調整可能な在来型電源は必須であり、各国では一定の発電容量の維持を義務づけ、発電しなくても事業者に報酬を払う制度を導入し始めている。

このような状況も踏まえ、欧州のスマートグリッドは、小規模分散型の再生可能エネルギーを地産地消する方向に向かうと考えられ、ドイツなどは政策的にこの方向に舵を切りつつある。



欧州における再生可能エネルギー導入拡大に伴う系統対策技術の概況

- 再生可能エネルギー導入に伴う需給ギャップは既に顕在化しており、広域運用による変動電源の平滑化効果を含めて、送電系統/国際連系線の強化、欧州統一市場創設などの施策を重視
- 将来的な調整電源の供給力不足を補う方策として、広域運用における系統側蓄エネルギー(大規模揚水発電所、圧縮空気貯蔵など)、需要サイドの需給調整機能付与(いわゆるデマンドレスポンス)などに関わる技術開発テーマが主体
- 電気事業制度改革に伴い電気事業者研究開発投資が縮減し、研究開発はEU大のフレームワークプロジェクト、各国のNational projectであり、大手電力会社が主体で開発が進められている

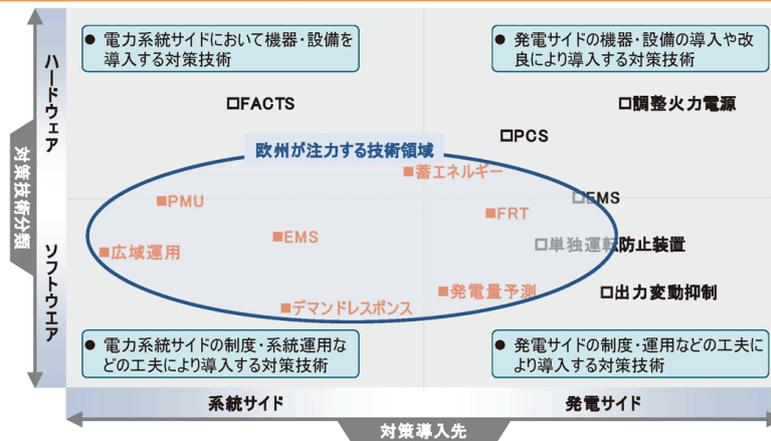


図 9-63 欧州における再生可能エネルギー導入に関わる系統対策

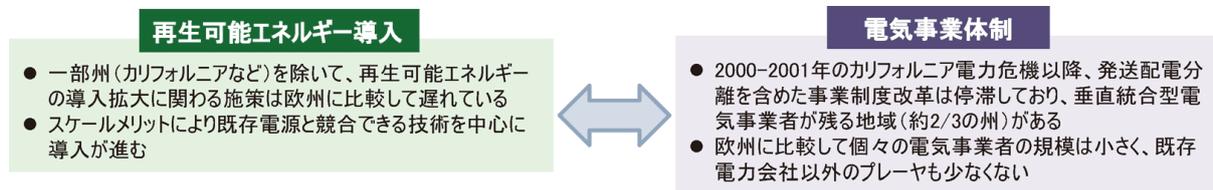
9.3.2 米国における状況

米国は、FERC の Order888 以降、卸売り電力は連邦全体で完全に自由化されたが、小売りの自由化は 2000 年のカリフォルニア電力危機により浸透が止まったこともあり、7 割近い配電系統は供給者を選べない独占的な配電系統になっている。

2009 年のオバマ政権の当初は、スマートメーターの普及に力点が置かれていた。これは、1999 年頃の電力市場のプライスパイク、2000 年のカリフォルニア電力危機の経験から、電力市場の価格弾性の不足による不安定性が指摘され、スマートメーターは価格信号を送り需要サイドの価格弾性を増加させるツールとして期待されたことが大きい。しかし、一部でスマートメーター導入の反対運動などが起きて導入にブレーキがかかり、第二期オバマ政権の時代に入ると、二度のハリケーン災害の教訓から、災害対応のマイクログリッド技術など、供給信頼度向上に注目が集

第9章 系統サポート技術

まり始めている。再生可能エネルギーの導入対策としてのスマートグリッドは、再生可能エネルギーの賦存量の多い中西部や西海岸でも見られるが、シェールガス普及の影響で最近のスマートグリッド技術は再生可能エネルギーにフォーカスされているわけではない。



米国における再生可能エネルギー導入拡大に伴う系統対策技術の概況

- 発送電分離が導入された地域では、再生可能エネルギー導入よりも、発電投資の停滞による供給力不足が顕在化しつつあり、同課題解決のための需要の供給力参加(Demand response Program)が実施されている
- 米国全体は4つの同期系統に分かれており、各系統の連系線は必ずしも十分ではないことから欧州のような広域運用ではなく、各同期系統内で完結した需給調整を可能とするための検討が進められている
- 需給ギャップを解決するために、将来的な調整電源の供給力不足を補う方策として、広域運用における系統側蓄エネルギー、需要サイドの需給調整機能付与などに関わる技術開発テーマが主体

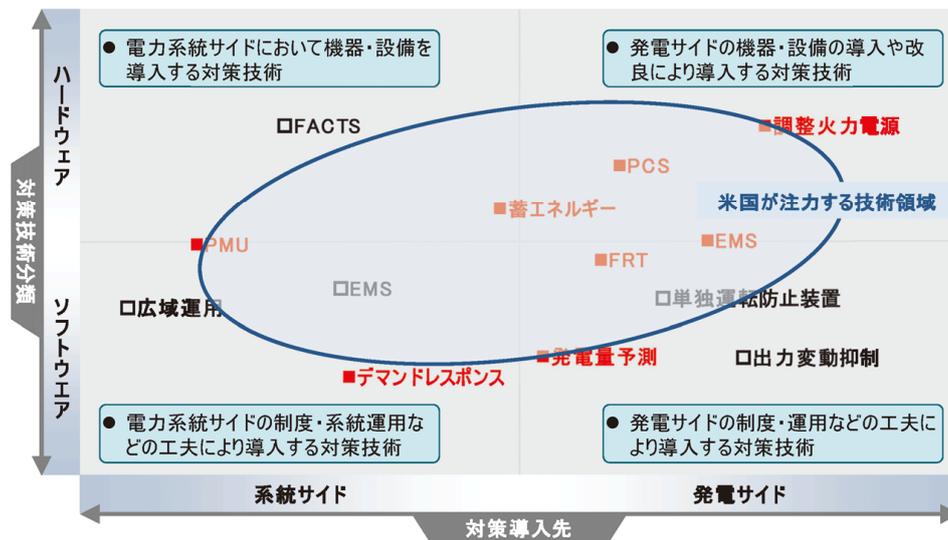


図 9-64 米国における再生可能エネルギー導入に関わる系統対策

なお、米国/カナダ全土で電力系統は完全に接続されてはおらず、テキサス州、ケベック州という州単位の独立系統と、東部、西部の巨大グリッドに分割される。一番巨大な東部同期系統では、ニューヨークパワープール、ニューイングランドパワープール、PJM プール、ミッドウエスト ISO 系統などの複数の需給バランス機関が存在している。原則、これらのバランシング機関内で需給、アンシラリーの調達が必要なため、電力貯蔵の利用にも注目が集まっている。

また夏季のピーク需要などは、米国はガスタービンなどのピーキングユニットで供給するケースが多いが、年間数十時間しか稼働しない電源を持つ不経済性に着目して、そのピーク電源のニーズを減らすための、需要サイドの取組み(例えば、デマンドレスポンスなど)が検討されている。いまはまだ極端なペナルティを課す CPP 料金を認める規制当局は少なく実証段階であるが、これまでの実証では十数%のピークカット効果が測定されており、実際の適用が期待され始めている。

9.3.3 日本における状況

欧米と比較して、日本における再生可能エネルギー電源の導入比率は小さいが、北海道では固定価格買取制度導入の効果もあり、太陽光発電や風力発電の導入が集中し、新規の導入が困難な状況になりつつある。

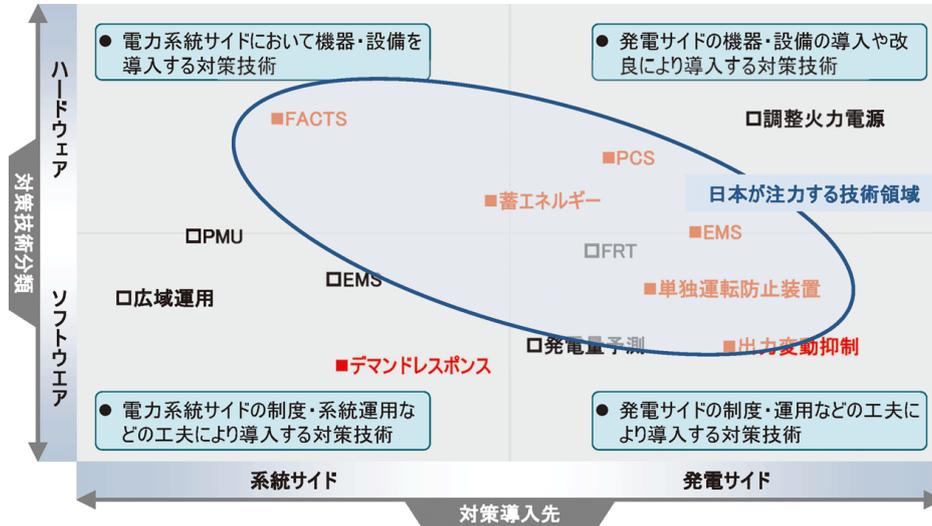


図 9-65 日本における再生可能エネルギー導入に関わる系統対策

このような中、後述するように次世代送配電ネットワーク研究会の検討結果なども受け、需給調整の長周期問題（余剰電力）と、局所的な再生可能エネルギー電源の集中導入に関わる問題（配電系統における影響）の対応が中心となっている。

また、次世代エネルギー・社会システム実証地域における、スマートコミュニティ構築（CEMS）に関わる技術開発も行われているが、震災以降、その出口が供給力不足に対応したデマンドレスポンスにシフトしている傾向がある。一方で当初の再生可能エネルギー導入拡大に関わる対策技術としての位置付けも引き続き検討を実施している。

ここでは、(1) 次世代送配電ネットワーク研究会、(2) 電力系統利用協議会（ESCJ）の「風力発電連系可能量確認ワーキンググループ」、(3) 送電系統の熱容量制約の事例を整理する。

(1) 次世代送配電ネットワーク研究会

2009年度に、低炭素社会実現に向けて再生可能エネルギー、とりわけ太陽光発電の大量導入時における電力系統影響の問題を解決するために必要とされる諸施策について「次世代送配電ネットワーク研究会」にて議論を行った。

本研究会では、2020年を目途とした次世代送配電ネットワークの構築に向けて、系統安定化対策に係る技術的課題の整理、次世代送配電ネットワークの構築に向けた工程表（ロードマップ）の策定、系統安定化対策コストの試算等について検討が行われた。報告書で示された太陽光発電等の大量導入に伴う電力系統上の課題及び対策として、以下のものが挙げられている。なお、ここで提示された対策は、至近において実施可能であることを前提としており、9.2において述べた系統サポート技術全てが含まれているわけではない。

第9章 系統サポート技術

1) 余剰電力の発生

- [対策] i. 電力系統における蓄電池の設置
- ii. 揚水発電（可変速を含む）の新增設
- iii. ゴールデンウィークや年末年始等における太陽光発電の出力抑制
- iv. 新規の電力需要の創出，需要動向や気象条件に対応した蓄エネルギー能力を有する機器（ヒートポンプ等）の活用

2) 出力の急激な変動に伴う周波数調整力の不足

- [対策] i. 揚水発電（可変速を含む）の新增設
- ii. 電力系統への蓄電池の設置
- iii. 電力系統に設置する蓄電池と火力・水力発電との協調制御

3) 配電系統における電圧上昇等

- [対策] i. 低圧系統（100V）における柱上変圧器の分割設置，太陽光発電のPCSによる無効電力の制御
- ii. 高圧系統（6600V）における電圧調整装置（SVC，SVR等）等やLPC（他配電線との電力融通装置）の設置

4) 単独運転と不要解列の防止

- [対策] i. 太陽光発電の大量導入に対応した単独運転防止機能の搭載に関するルール化
- ii. 太陽光発電の不要解列（一斉脱落）の防止機能の搭載に関するルール化

5) 系統事故時の電力系統の影響

- [対策] i. 電力系統シミュレータの構築

上記ロードマップに基づき、**図 9-66** に示すように、太陽光発電などの再生可能エネルギーの大量導入目標と系統安定化を両立するため、需要家内機器の最適制御方式や配電系統の系統電圧制御方式などの開発・実証を行う「次世代送配電系統最適制御技術実証事業」が、2010年度から開始された。

- 太陽光発電の大量導入に対応し、下記4つの技術開発課題（系統側，需要側）に取り組む
 - I 系統側：①配電系統の各種機器設置方式・制御方式（自律分散制御・集中制御）の開発
 - ②配電系統制御に用いる小型・軽量・低コスト・高性能な次世代機器の開発
 - II 需要側：③系統状況に応じた効果的な需要側機器制御方式の開発
 - ④需要側との協調を前提とした需給計画および運用制御方式の開発

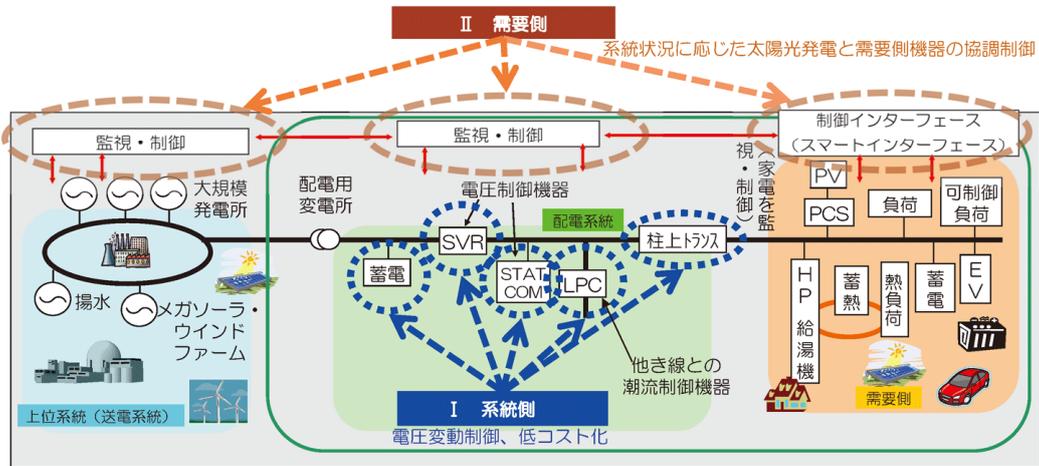


図 9-66 次世代送配電系統最適制御技術実証事業の概要

出典：東京電力プレスリリース，「次世代送配電系統最適制御技術実証事業」の実施について，（2010）

(2) 電力系統利用協議会（ESCJ）の「風力発電連系可能量確認ワーキンググループ」

1) 概要

我が国における再生可能エネルギー導入に伴う調整力に関する検討として，ESCJ（電力系統利用協議会）の「風力発電連系可能量確認ワーキンググループ」がある。本ワーキングは風力発電の連系可能量の根拠についてより透明性を高めるため，連系可能量を設定している北海道電力，東北電力，北陸電力，中国電力，四国電力，九州電力及び沖縄電力³が，風力発電の連系可能量の考え方や設定根拠を詳細に説明し，風力発電事業者などに対する理解を促進する場として，ESCJ内に設置されたワーキンググループであり，2011年11月より検討が開始，2012年10月に報告書が提出されている。

2) 算定方法

風力発電の連系可能量を設定している一般電気事業者7社においては，図9-67に示すように「総合資源エネルギー調査会 新エネルギー部会 風力発電系統連系対策小委員会」において提示された風力発電連系可能量算定フローに基づき風力発電の系統連系可能量を算定している。

風力発電の連系可能量は，短周期変動，長周期変動の二つに大別されて，表9-17に示す算定方法により検討が行われている。算定手法については，シミュレーション手法と，簡便で視覚的にわかりやすく諸データの関係を把握可能な代数的手法が用いられている。

3 東京電力，中部電力，関西電力においては，風力発電の連系可能量の制約は設けていない。

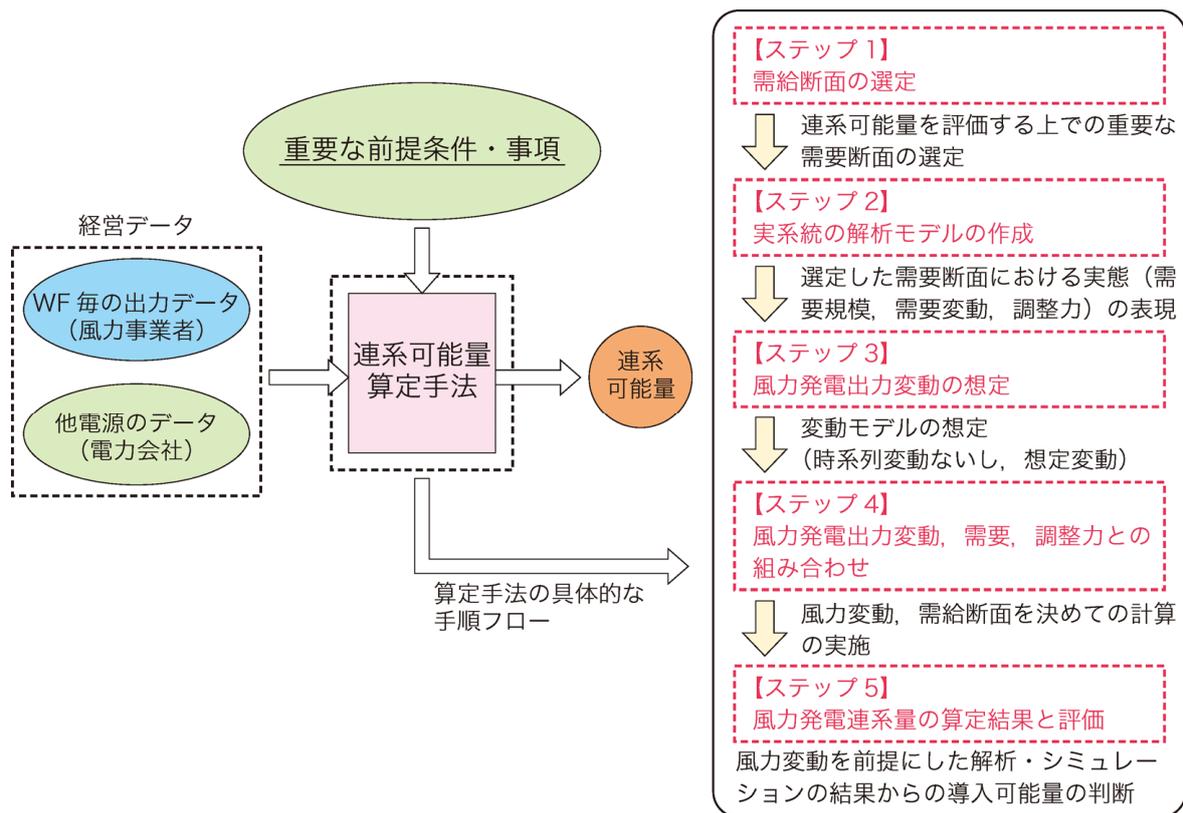


図 9-67 風力発電連系可能量算定フロー

出典：ESCJ，「風力発電連系可能量確認ワーキンググループ とりまとめ報告書」より NEDO 作成

表 9-17 我が国における風力発電連系可能量の算定方法

変動区分	算定方法		概要	採用している電力会社
短周期変動	代数的手法		電気学会技術報告第 869 号「電力系統における常時及び緊急時の負荷周波数制御」における負荷変動，調整容量，許容調整残の関係ベクトルに準じて算出	東北電力，北陸電力，中国電力，四国電力，九州電力，沖縄電力
	シミュレーション手法		風力発電変動想定（実績時系列ないし想定変動）および需要変動想定に基づくシミュレーションにて算出	北海道電力
長周期変動	下げ代面	軽負荷時間帯考慮	軽負荷時間帯における需給バランスを考慮し，下げ代を算定	東北電力，四国電力，九州電力
		軽負荷期 1 日考慮	軽負荷期 1 日の需給バランスを考慮し，下げ代を算定	中国電力
	調整力面	代数的手法	短周期の代数的手法に準じて算定．需要変動と風力発電出力変動の組合せ方や許容調整残の見込み方などに違いがある	北陸電力，四国電力
		シミュレーション	需給調整を模擬したシミュレーションによって，火力調整力が不足しないこと（調整幅・調整速度）を確認	北海道電力

出典：「風力発電連系可能量確認ワーキンググループ とりまとめ報告書，（2012，電力系統利用協議会）」より NEDO 作成

短周期変動の観点からの分析では、系統容量に対する LFC 容量比率が同等でも、LFC 調整力の絶対値が最小となる休日の深夜など、需要（系統容量）が最小レベルとなる断面で検討を行っている。ここで、短周期変動の LFC の調整力については、沖縄電力を除き各社が系統容量の 1～2%を設定している。これは ESCJ のルールである「平常時の周波数調整の基本的考え方」に基づくものであり、算定における各社の前提は表 9-18 に示す通り。

表 9-18 LFC 調整力の考え方と各社の設定値

電力会社	LFC 調整力の考え方	設定値
北海道電力	系統容量の 2 %	6 万 kW
東北電力	系統容量の 2 %	16 万 kW
北陸電力	系統容量の 1.5 %	3 万 kW
中国電力	系統容量の 2 %	10.5 万 kW
四国電力	系統容量の 1 %	3 万 kW
九州電力	系統容量の 1.5 %	12 万 kW
沖縄電力	石油火力発電機 1 機分の LFC 容量	0.7 万 kW

出典：ESCJ, 「風力発電連系可能量確認ワーキンググループ とりまとめ報告書」より NEDO 作成

3) 短周期変動に関する検討結果

前述した方法によって算定された短周期変動に関する算定条件及び制約事項・結果を表 9-19 に示す。北海道電力がシミュレーションによる手法を用いているのに対し、北海道電力以外は代数的手法を用いて算定を行っている。

需要断面の選定や評価時間は、ほぼ同じ考え方であるが、需要変動や風力発電変動の評価においては、北陸電力、中国電力、四国電力、九州電力の各社で違いが見られる。

第9章 系統サポート技術

表 9-19 各社の短周期変動の算定条件および制約事項・結果

		北海道	東北	北陸	中国	四国	九州	沖縄	
①算定方法		シミュレーション	代数的手法						
需給調整緒元	② 需要断面	平成 22 年度の風力発電変動率が通常レベル時期(5~8月以外)での軽負荷時間帯総需要 300 万 kW	平成 26 年 5 月休日深夜実績トレンドに基づいた将来断面 総需要 800 万 kW	平成 23 年 GW 深夜実績データをもとに想定 総需要 212 万 kW	平成 19 年 5 月休日 最小需要実績 総需要 525 万 kW	平成 24 年頃の 10 月休日深夜実績トレンドに基づいた将来断面 総需要 279 万 kW	平成 25 年 軽負荷期休日の深夜実績データをもとに想定 総需要 800 万 kW	平成 19 年度 休日深夜実績データをもとに想定 総需要 55 万 kW	
	③ 需要変動	実績データから 20 分以内変動成分を抽出し、需要規模で比例倍	実績データをもとに想定						
	④ LFC 調整力	系統容量の 2 % 6 万 kW	系統容量の 2 % 16 万 kW	系統容量の 1.5 % 3 万 kW	系統容量の 2 % 10.5 万 kW	系統容量の 1 % 3 万 kW	系統容量の 1.5 % 12 万 kW	石油火力発電機 1 機分の AFC 量 0.7 万 kW	
	⑤ 許容調整残	50 ± 0.3 Hz を判定基準として適用	50 ± 0.2 Hz 以内のうち ± 0.1 Hz 相当となる値	60 ± 0.1 Hz 以内の滞在率を 95 % (2σ) 以上とするために許容される値を適用				60 ± 0.3 Hz より算出	
			8 万 kW 系統容量の 1 %	8 万 kW 系統容量の 3.9 %	16.3 万 kW 系統容量の 3.1 %	11 万 kW 系統容量の 4 %	19 万 kW 系統容量の 2.4 %	1.2 万 kW 系統容量の 2.2 %	
⑥ 風力発電出力変動		20 分	20 分	20 分	20 分	20 分	20 分	10 分※	
統計処理方法		実績データから 20 分以内変動成分を抽出し、連系量で比例倍	評価時間窓中の変動量(最大-最小)から変動率を算出						
リスク考慮		-	年度のバラツキ(4.7%)を考慮	-	偏在リスクは個別値を適用	-	偏在リスク(3%)を考慮	(単機のデータを使用)	
評価結果		-	風力発電設備容量の 17.3 %	風力発電設備容量の 25 %	風力発電設備容量の 21.2 %	風力発電設備容量の 20 %	風力発電設備容量の 14 %	風力発電設備容量の 50 %	
算定結果		41 万 kW	88 万 kW	25 万 kW	80 万 kW 程度	45 万 kW	130 万 kW	2.5 万 kW	

※：小規模単独系統のため、本土系統の LFC 制御に比べ制御時間の短い LFC 制御を採用し応答の速い石油火力にて対応
 出典：「風力発電連系可能量確認ワーキンググループ」とりまとめ報告書」, (ESCJ) より NEDO 作成

4) 長周期変動(下げ代面)に関する検討結果

長周期変動の下げ代面についての結果を表 9-20 に示す。下げ代面での検討を実施しているのは、東北電力、中国電力、四国電力、九州電力の 4 社である。北海道電力、北陸電力については、後に示す調整力面での長周期変動の検討を実施しているが、沖縄電力については長周期変動に関する検討を行っていない。これは、沖縄電力が原子力発電のような出力一定の電源を持たず、火力発電のような調整電源が主体であるため下げ代や長周期変動の調整力に関する制約が少ないこと、また小規模・単独系統であるという特性上、短周期変動の制約が支配的であることが理由である。

表 9-20 各社の長周期変動の算定条件および制約事項・結果（下げ代面）

		北海道	東北	北陸	中国	四国	九州	沖縄	
①下げ代の算定方法		—	軽負荷時間帯におけるkW評価下げ代 65万kW	—	1日の需給バランスを考慮したkWh評価 揚水池容量制約による	軽負荷時間帯におけるkW評価下げ代 17万kW	軽負荷時間帯におけるkW評価下げ代 81万kW	—	
需給調整諸元	②需要断面	—	平成26年5月休日年間を通じて下げ代が少なくなる時期 RPS法義務量目標の最終年度総需要 800万kW	—	平成28年5月休日 平成20年供給計画における最も下げ代が厳しくなる断面 総需要 555万kW	平成24年頃の10月休日深夜実績トレンドに基づいた将来断面 総需要 279万kW	平成25年輕負荷期休日の深夜実績データをもとに想定 総需要 800万kW	—	
	③電源構成	火力	—	LFC調整力など需給運用上必要なユニット以外は全て停止(8ユニット)	—	LFC調整力など需給運用上必要なユニット以外は全て停止(6ユニット)	LFC調整力など需給運用上必要なユニット以外は全て停止(2ユニット)	LFC調整力など需給運用上必要なユニット以外は全て停止(6ユニット)	—
		水力	—	平水	—	平水	平水	平水	—
		原子力	—	全台運転	—	全台運転	全台運転	全台運転	—
		揚水	—	運転あり	—	運転あり (但しkWh収支を考慮)	運転あり	運転なし リスク対応を考慮(需要・豊水等)	—
④風力発電最大出力	統計処理方法	—	5月の1時間平均出力最大の5ヵ年平均	—	平成19年度実績の最大値	1時間平均値の日毎2σ値の最大値	1時間平均値の月間最大値	—	
	評価結果	—	風力発電設備容量の 75%程度	—	風力発電設備の日利用率61%	風力発電設備容量の 85%程度	風力発電設備容量の 78%	—	
算定結果		—	85万kW	—	62万kW	20万kW	100万kW	—	

出所：「風力発電連系可能量確認ワーキンググループ とりまとめ報告書」，(ESCJ) より NEDO 作成

5) 長周期変動（調整力面）に関する検討結果

長周期変動の調整力面からの検討については、表 9-21 に示すように、北海道電力、北陸電力、四国電力の3社が実施している。なお、東北電力については、シミュレーションの結果、長周期変動の調整力面については、連系可能量で問題ないことを確認している。北海道電力はシミュレーションによって火力調整力が不足しないこと（調整幅・調整速度）を確認する手法をとっており、北陸電力、四国電力は代数的手法による検討を実施している。

第9章 系統サポート技術

表 9-21 各社の長周期変動の算定条件および制約事項・結果（調整力面）

		北海道	東北	北陸	中国	四国	九州	沖縄	
①算定方法		シミュレーション	シミュレーション	代数的手法 需要変動と風力発電出力変動は無相関		代数的手法 需要変動と風力発電出力変動はほぼ同時に発生			
需給調整諸元	②需要断面	平成22年度の需給調整用火力運転台数が最低となる断面 総需要 300万kW	-	平成23年 春季休日深夜 実績データをもとに想定	-	平成24年頃の10月休日深夜 実績トレンドに基づいた将来断面 総需要 279万kW	-	-	
	③需要変動	実績データから1時間以内変動量を時間帯毎に最大のものを抽出	-	実績データをもとに算出 <u>11万kW</u>	-	実績データをもとに算出 <u>8万kW</u>	-	-	
	④発電機調整力	火力	調整用火力3台	-	並列火力2台時、1台負荷帯切替中の調整力 <u>6万kW</u>	-	並列火力3台時、1台負荷帯切替中の調整力 <u>6万kW</u>	-	-
		水力	水力の調整力を見込まない	-	調整池式水力の調整力を考慮 6万kW	-	水力の調整力を見込まない	-	-
	許容調整残	-	-	考慮しない	-	11万kW 系統容量の4%	-	-	
⑤風力発電出力変動	評価時間	時間帯ごとに調整力が確保できていることを確認するため 24時間	-	火力の負荷帯切替時間を考慮 <u>30分</u>	-	火力の負荷帯切替時間を考慮 <u>30分</u>	-	-	
	統計処理方法	実績データから1時間以内変動量が最大のものを抽出し、連系量で比例倍	-	評価時間窓中の変動量(最大-最小)から変動率を算出し、累積頻度95%(2σ相当)の変動率(%)を抽出	-	20分平均値を用い、評価時間窓中の変動量(開始時間値-終了時間値)から変動率を算出し、累積頻度99.7%(3σ相当)の変動率(%)を抽出	-	-	
				30分以内出力変動率の月別2σ値の最大値		30分間の出力変動率の日毎3σ値の最大値			
評価結果	-	-	風力発電設備容量の <u>30%</u>	-	風力発電設備容量の <u>35%</u>	-	-		
算定結果		31万kW	連系可能量で問題ないことを確認	15万kW	-	25万kW	-	-	

出典：「風力発電連系可能量確認ワーキンググループ とりまとめ報告書」，(2012，電力統制利用協議会)より NEDO 作成

6) 風力発電の連系可能量

以上の検討結果に基づく風力発電の各社の連系可能量を表 9-22 に示す。東京電力，中部電力，関西電力を除く電力会社 7 社の連系可能量の合計は，358.5 万 kW となっている。連系可能量のベースとなる制約量については，短周期変動，長周期変動（下げ代面），長周期変動（調整力面）の 3 つのうちの最も小さい値としている。この制約量に，解列枠を加え，風力発電の連系可能量が得られる。解列枠とは，調整力や下げ代が不足する時間帯に，風力発電を解列すること等を条件として系統連系される風力発電のことであり，北海道電力，東北電力，北陸電力，四国電力の 4 社が設定している 4。

4 北陸電力は地域間連系線を活用した風力発電導入拡大に係る取り組みの中で解列枠の募集を終了している。

表 9-22 確認対象とした連系可能量

		北海道	東北	北陸	中国	四国	九州	沖縄
制約量	短周期変動	41万kW	88万kW	25万kW	80万kW程度	45万kW	130万kW	2.5万kW
	長周期変動(下げ代面)	—	85万kW	—	62万kW	20万kW	100万kW	—
	長周期変動(調整力面)	31万kW	—	15万kW	—	25万kW	—	—
		31万kW	85万kW	15万kW	62万kW	20万kW	100万kW	2.5万kW
解列枠等		5万kW	33万kW	10万kW※	—	5万kW	—	—
連系可能量		36万kW	118万kW	15万kW	62万kW	25万kW	100万kW	2.5万kW

※：地域間連系線の活用に伴い平成24年6月に解列枠の募集を終了

出典：ESCJ, 「風力発電連系可能量確認ワーキンググループ とりまとめ報告書」より NEDO 作成

風力発電の各社の連系可能量は、沖縄電力を除き、長周期変動が支配的となっている。長周期変動の制約の中でも、比較的需要規模の小さい北海道電力、北陸電力、四国電力は調整用電源の運転台数に限りがあるため、概して調整力面での制約が支配的となっており、需要規模が中規模である東北電力、中国電力、九州電力は、下げ代面の制約が支配的となっていることがわかる。

なお、本検討において確認された風力発電の連系可能量は、2006～2008年度にかけて一般電気事業者が設定したものであり、将来の再生可能エネルギー導入目標に基づいて、追加的に必要となる調整力の算定を行っているものではなく、このような検討はまだなされていない。

(3) 送電系統の熱容量制約への対応

我が国における再生可能エネルギー電源の導入制約として、風力発電の連系可能量以外に送電線の問題がある。

各送電線は、送電可能な電力に上限があり、これを熱容量（送電容量）という。送電線には材質固有の抵抗成分により大きな電流が流れると過熱し、送電線が弛んで樹木などと接触したり、断線したりすることで送電線事故を引き起こす。これを回避するため、各送電線にはそれぞれ熱容量が決まっており、電力会社はその範囲で送電線の運用を行っている。

送電設備は、ネットワークコストとして電気料金に含まれるため、需要以上に過剰な設備を保有することは電気料金を高騰させることにつながる。そのため、電力会社はそれぞれの供給地域において、将来の需要に見合った規模の設備しか保有していない。

その一方で、風力発電に適した風況の良い地域や広大な敷地を必要とする太陽光発電の適地は、一般的に需要密度が小さく、送電設備の熱容量（送電容量）も小さいため、再生可能エネルギー電源の連系に制約が発生する。



図 9-68 送電線の熱容量による運用制約

出典：資源エネルギー庁資料

第9章 系統サポート技術

図9-69に示すように、従来、需要家の需要に相当する電力が流れていた送電線に、風力発電や太陽光発電が連系し、需要家の需要を上回る出力を発電すると、その送電線には逆潮流が流れることになる。そしてさらに風力発電などの連系が進むと、いずれは熱容量の制約により連系は不可能となる。連系可能量などの調整力不足の問題に加え、このような熱容量の問題から連系が困難になっている場所も多い。

現在、各電力会社では、これまでの検討結果から熱容量で制約が発生している電力系統を公表しており、風力発電や太陽光発電などの連系を検討する事業者に向けた情報公開に取り組んでいる。

一方で、熱容量制約を解消するためには、熱容量を増やす必要がある。具体的には、送電線のサイズを太くする、送電線の回線数を増やす、新たな送電線を建設するなどがある。

送電線の新設には、原因者負担による莫大なコスト（架空送電線の単価は電圧、亘長などにより大きく変わるが、220～500kVの場合の中央値で5～8億円/km程度必要となる）がかかるとともに、用地交渉なども含めたりードタイムは理想的なケースで7～8年、地権者との交渉が進まない場合などでは10年を大幅に超えるケースもある。事業者自らが費用を負担して熱容量制約を解消することは少ないため、現在、補助金で送電線を整備する実証事業が計画されている。

今後、再生可能エネルギー電源を大量導入するためには、ある程度の送電線の新設は必要となるが、再生可能エネルギー電源側での出力調整によって設備利用率を向上させ、限られた設備容量での連系拡大策についても検討する必要があると考えられる。

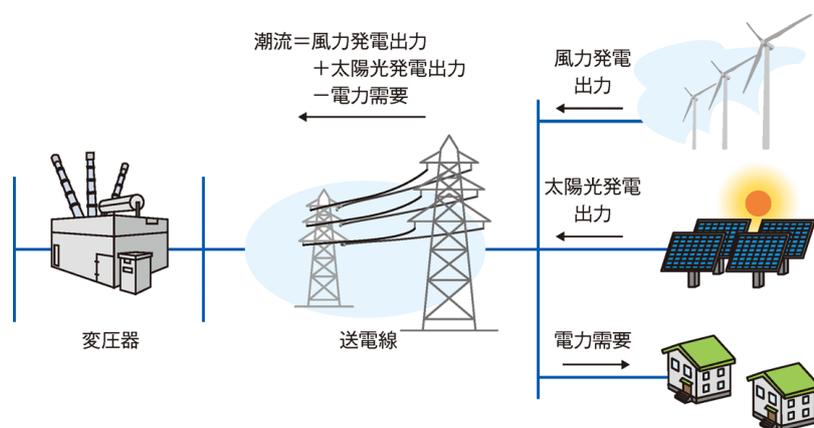


図9-69 再生可能エネルギー電源導入後における送電線の潮流

出典：北海道電力ホームページ (http://www.pref.hokkaido.lg.jp/kz/kke/HEPCO_2.pdf)

9.4 今後に向けた課題と克服方策

再生可能エネルギー電源の導入拡大における電力システム上の最大の課題は、気象変化に伴う出力変動である。これまで、時々刻々変動する需要に対して、火力発電など従来型電源の出力を細かく制御することで対応してきた。需要は、気温や景気動向などさまざまな要因によって変動するが、長年の運用実績の蓄積により相当程度の精度で予測が可能となっており、予測誤差や予測の対象外となる短周期変動については従来型電源の制御により吸収してきた。これに対して、太陽光発電や風力発電のような再生可能エネルギー電源の出力予測は難しく、稀頻度の大きな出

力変動の予測はさらに難易度が上がる。つまり、再生可能エネルギー電源の導入拡大は、需要変動よりも遙かに大きな変動（Variability）を電力システムにもたらすため、現状よりも遙かに柔軟性（Flexibility）に優れ、再生可能エネルギー電源の不確実性を吸収できる電力システムを構築しなければならない。

一方で、2012年7月からの固定価格買取制度の導入により、北海道ではほぼ導入限界に到達し、電力システムの柔軟性確保に向けた取り組みは待ったなしの状態になっているが、この状況は早晚、他地域にも波及すると考えられる。電気事業連合会によれば、全国で、風力発電では500万kW程度まで、太陽光発電については局所的な集中配置などの場合を除き、1000万kW程度までは、電力システムの安定性を損なうことなく連系可能であるとしているが、さらなる連系可能量の拡大には、本章に記載したさまざまな系統サポート技術を駆使しなければならない。

前節で紹介した電力系統利用協議会（ECSJ）の「風力発電連系可能量確認ワーキンググループ」では、電力会社や有識者などが集まり、風力発電の連系可能量拡大に向けた検討課題について議論されたが、その報告書にはまさに本章で述べてきたような以下の対策を明記している。

1. 風力発電側の対策

(1) 風力発電の出力抑制

個別風車やウィンドファーム全体の最大出力制御や出力上昇率制御のような出力抑制技術を活用できれば、長周期変動の下げ代不足や調整力不足の対策として有効である。

(2) 蓄電池併設による出力変動緩和制御

蓄電池併設による出力制御は、風力発電の解列時間を増やさずに連系可能量を増加できる効果がある。

2. 電力系統側の対策

(1) 風力発電出力予測技術の活用

出力予測により、予め適正な調整力の確保や風力発電の出力抑制などの対応策を準備することが可能である。

(2) 揚水発電の弾力的運用

長周期変動の下げ代分や、可変速揚水の活用による調整力向上に寄与する。

(3) 地域間連系線の活用策

連系可能量の制約が厳しいエリアから余裕のあるエリアへ地域間連系線の潮流を流すことで、双方エリアの調整力・下げ代を活用できる。

(4) 発電機運用による調整力拡大策

発電コストや発電効率よりも調整幅拡大を優先させた運用により、電力系統全体としてLFC調整力や長周期調整力を拡大できる。

以下、この内容も踏まえ、今後の課題克服の方策について整理する。

(1) 電力系統サイドの柔軟性（Flexibility）向上

電力システムの柔軟性向上のためには、まず電力系統側において効果的な対策を講じる必要があり、最も優先度が高い対策は、現在需給調整を担っている火力発電や水力発電など従来の電源

第9章 系統サポート技術

の需給調整力の最大活用である。火力発電に関しては、最低出力の低減、出力変動率の向上といった出力調整能力の向上、起動時間の短縮化が望まれる。近年の実績として、タービンの熱応力の高度な管理などにより、これらの改善を行った例もある。今後の新設の火力発電では、さらなる最適化により、これら特性の改善を図っていく必要があるが、その際は部分負荷運転時の効率低下や機器劣化防止など、経済性や保守性の視点も考慮に入れなければならない。

また、水力発電、特に揚水発電については、火力発電に比べて起動時間が短く、出力変化速度も速いため、需給調整力としての価値は大きい。これまで以上に積極的な活用を進め、可変速化による需要の上げ代の確保を図るなど、そのポテンシャルを十分活かすことが求められる。

次に広域運用、すなわち日本全体で再生可能エネルギー電源の出力変動を効率的に吸収することが重要となる。我が国は東日本と西日本で周波数がそれぞれ 50Hz, 60Hz と分かれているため、同一周波数エリア内での地域間連系線の活用を進める必要がある、これらの実証試験の実施に向けて現在検討が行われている。

さらに、電力系統サイドへの蓄エネルギー設備の設置や送電線の新規敷設も再生可能エネルギー電源の導入拡大には直接的効果がある。しかし、いずれも莫大なコストがかかり、また後者についてはパブリックアクセプタンスなどの問題からリードタイムの長期化も想定されるため、実際にはハードルの高い選択肢である。ただ、導入可能限界に達している北海道においては、好風況エリアでの電力系統の脆弱性、北海道と東北を結ぶ北本連系線の容量不足の改善策としてこれらの選択肢を選ばざるを得ない状況にあると考えられる。

(2) 再生可能エネルギー電源の調整電源化

電力系統サイドの柔軟性向上は最優先で取り組む課題であるが、これだけでは導入量に限界がある。我が国で再生可能エネルギー電源の導入拡大について議論する際、ドイツなど欧州の導入拡大が進んだ国々との比較において我が国における導入遅れが度々指摘されるが、欧州各国の電力系統は近隣国のそれと国際連系線により連系しており、自国の再生可能エネルギー電源の出力変動を必ずしも自国内で完結する必要がない点、我が国とは異なる。また、風力発電は北海道、東北エリアにポテンシャルが集中しているが、それらの地域には十分な需要がなく、さらに、北海道は海を隔てているのに加え、南北に細長い国土のため送電ルートが限られることなども導入拡大の難しさとして挙げられる。これは北部の低需要地に風力発電ポテンシャルが集中し、大需要地の南部に送電できないドイツの状況と酷似している。

このような事情から、電力系統サイドでの対策に加えて、再生可能エネルギー電源の調整電源化、つまり再生可能エネルギー電源の不安定出力を上手に制御して、在来型電源と同様に出力調整が可能な電源とすることが導入拡大の二つ目の鍵となる。

調整電源化には、単なる解列だけでなく、風力発電機の最大出力、最大出力変動率の設定など風力発電機の制御の高度化による手法、単独あるいは複数ウィンドファームでの風力発電機の協調制御、蓄エネルギー設備の併設などの手法がある。

これに加えて、経済性をなるべく低下させずに再生可能エネルギー電源を効果的に調整電源化する方法として、出力予測技術が挙げられる。出力予測により不確実性が低減され、在来型電源の出力調整により変動吸収が容易となる。特に、風力発電の場合には、広域での平滑化効果は期待できても比較的短時間での出力変動はある程度残り、導入の進展とともにその影響は拡大する。

需給運用上、出力予測技術の確立は非常に重要で、早急な開発が求められる。

(3) 需要家サイドの対策

再生可能エネルギー電源の出力変動の抑制対策として、需要サイドの需要家機器を制御することも一つの方策となる。スマートグリッドは、ICT 技術を活用してエネルギー情報を見える化し、需要家サイドを含めてエネルギー利用の合理化を図ろうとするもので、再生可能エネルギー電源の出力予測を含めた需給計画に沿って調整を行うことで、系統影響の緩和に寄与するものである。

スマートグリッドにはさまざまな要素があり、デマンドレスポンス、スマートメーター、xEMS、V2G/H、G2V などがあり、ピークカット、ピークシフトなど、時間軸でみた需要のシフト、需要そのものの抑制が期待できる。また V2G/H、G2V や蓄熱槽を有するヒートポンプ機器などは、需要家サイドにおける蓄エネルギー設備であることから、効果的に運用すれば電力系統サイドや再生可能エネルギー電源サイドへの蓄エネルギー設備の設置と同様の効果を得ることも可能である。この場合、電気料金の最小化が需要家の導入インセンティブとなる。

また、今後は、震災時への対応などの視点から、太陽光発電に蓄電池を併設するケースも増加すると想定され、この場合も適切な制御装置を付与すれば、出力変動抑制の効果は高い。

(4) まとめ

NEDO では、再生可能エネルギー電源の導入拡大に向けて、今後、クリティカルとなる系統影響の緩和を目指し、再生可能エネルギー電源サイドで可能な対策に取り組む。具体的には、再生可能エネルギー電源の出力予測技術の確立と再生可能エネルギー電源の調整電源化に重点を置く。

再生可能エネルギー電源の出力予測技術に関しては、風力発電における大規模な出力変動であるランプの発生メカニズムを解明し、予測技術の高度化につなげていく。ランプは、低気圧や前線の通過、地形要因によるものなどさまざまな要因があり、これらを実地計測から明らかにすることが第一歩となる。出力変動の不確定性を縮小することで電力系統への影響範囲を明確にし、導入拡大に貢献しようという取り組みである。

また、再生可能エネルギー電源の調整電源化についても主に風力発電を対象として取り組む。NEDO では過去に北海道において風力発電にレドックスフロー電池を併設して実証試験を行った実績もあり、その成果も踏まえ、さらに低コストで効果的な出力変動抑制の方策を検討する。これらの仕様検討は、ランプ特性を十分に把握した上で行うことが必要となる。調整電源化には、単独あるいは複数ウィンドファームの協調制御や蓄エネルギー設備の併設が検討対象である。

蓄エネルギーには、蓄電池の他、CAES、水素、蓄熱など多様なデバイスが存在するものの、それぞれの運用特性やコストには幅があり、抑制したい変動特性やビジネスモデルなどにより最適解は異なるため、総合的視点からシステム検討がなされるべきである。

このように、再生可能エネルギー電源の導入拡大に向けた系統サポート技術に関する取り組みにあたって、電気料金が高騰するドイツなどを教訓とし、社会コストのミニマム化を念頭に置く必要がある。今後は、費用対効果が高く、ビジネス面での持続可能性の確保も考慮して系統対策を推進することがなにより重要である。

第9章 参考文献

- (1) 平成24年度 数表でみる東京電力, (2012, 東京電力)
- (2) 次世代送配電ネットワーク研究会報告書, (2010, 資源エネルギー庁), www.enecho.meti.go.jp/info/committee/data/denki38th/sanko3.pdf
- (3) 電力協同研究, (2000, 電力協同研究会), 第56巻 第4号
- (4) 第1回次世代送配電ネットワーク研究会資料, (2009, 経済産業省)
- (5) 低炭素電力供給システムに関する研究会報告書 (2010, 資源エネルギー庁), <http://www.meti.go.jp/report/data/g90727ej.html>
- (6) 九州電力ホームページ, http://www.kyuden.co.jp/power_usages_faq_yousui.html
- (7) Design and Operation of Power Systems with Large Amounts of Wind Power, (2009, International Energy Agency)
- (8) 電気事業連合会ホームページ, http://www.fepc.or.jp/library/kaigai/kaigai_topics/1216468_4115.html
- (9) LFC 調整力の拡大について, (2004/6, 東北電力), 第4回風力発電系統連系対策小委員会資料
- (10) G. Ramtharan, J.B.Ekanayake and N. Jenkins, Frequency support from doubly fed induction generator wind turbines, IET Renewable Power Generation, vol.1 (2007, The Institution of Engineering and Technology)
- (11) 総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会合資料, (2013, 資源エネルギー庁), <http://www.enecho.meti.go.jp/info/committee/kihonseisaku/index.htm>
- (12) Daniel Joyce, Ireland Wind Experience, (2013/2, UVIG Workshop on Variable Generation Forecasting Applications to Power System Planning and Operations)
- (13) Ensuring a Secure Reliable and Efficient Power System in a Changing Environment (2011/7, EirGrid), http://www.eirgrid.com/media/Ensuring_a_Secure_Reliable_and_Efficient_Power_System_Report.pdf
- (14) Grid Integration and Wind Farm Management, (Enercon), http://www.enercon.de/p/downloads/EN_Eng_TandS_0710.pdf
- (15) 斉藤哲夫, 風力発電の系統連系可能量拡大策, JWPA (2012, 日本風力発電協会)
- (16) 電気事業連合会ホームページ, http://www.fepc.or.jp/library/kaigai/kaigai_topics/1223216_4115.html
- (17) 海外電力調査会ホームページ, <http://www.jepic.or.jp/news/pdf/2012.0302-0217-1.pdf>
- (18) 竹田正俊, 自励式無効電力補償装置 (STATCOM) の開発と製品化, (2009, 電気学会), 電気学会論文誌 B, Vol. 129, No. 7
- (19) 諸住哲, スマートグリッド, (2010, アスキー・メディアワークス)
- (20) 新神戸電機ホームページ, <http://www.shinkobe-denki.co.jp/index.html>
- (21) 5th International Renewable Energy Storage Conference 資料, (2010, Berlin)
- (22) 日本ガイシホームページ, <http://www.ngk.co.jp/product/nas/about/principle.html>
- (23) @IT MONOist ホームページ, <http://monoist.atmarkit.co.jp/mn/articles/1109/09/news013.html>
- (24) 三菱重工ニュース, <http://www.mhi.co.jp/news/story/1106165083.html>
- (25) Hydrogen Storage Overview, (2003, Sandia National Laboratories)
- (26) バンテック ホームページ, (<http://www.vantec-jp.com/>)
- (27) The Wind to Hydrogen Project: Operational Experience, Performance Testing, and System Integration, (2009, DOE)
- (28) 稚内公園新エネルギーサテライト (稚内新エネルギー研究会), http://www.rera-vie.jp/img/wind_power/satellite/satellite.pdf
- (29) 北海道開発土木研究所月報 No.634 (2006/3, 北海道開発土木研究所)
- (30) 日立製作所ホームページ, <http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2011/11/1107.html>
- (31) IHI ホームページ, <http://www.ihico.jp/powersystems/technology/fuel.html>
- (32) 系統連系規程, (2012, 日本電気協会)
- (33) Miguel de la Torre Rodriguez, Impact on the Power System Control, (2008, CIGRE Plenary session).
- (34) Nuclear energy and renewable, (2012, Nuclear Energy Agency)
- (35) Creating the Internal Energy Market in Europe, (2012, The European Wind Energy Association)
- (36) 北海道電力ホームページ, http://www.hepco.co.jp/info/2011/_icsFiles/afiedfile/2011/09-30/1109-30_3.pdf
- (37) Flexibility Requirements and Metrics for Variable Generation, (2010, North American Electric Reliability Corporation)
- (38) 東北電力ホームページ, <http://www.tohoku-epco.co.jp/ICSFiles/afiedfile/2010/10/01/as1.pdf>
- (39) 研究年報 第40巻, (2009/10, 北海道電力)
- (40) Forecasting Output for 130,000 PV Systems in California, (2013, Clean Power Research)
- (41) 低炭素電力供給システムに関する研究会報告書, (2009, 資源エネルギー庁), <http://www.meti.go.jp/report/data/g90727ej.html>

- (42) Assessment of Demand Response&Advanced Metering, (2011, FERC)
- (43) 次世代送配電系統最適制御技術実証事業の実施について(2010, 東京電力), http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu10_j/images/100521g.pdf
- (44) 風力発電連系可能量確認ワーキンググループとりまとめ報告書, (2012, 電力系統利用協議会)
- (45) 北海道電力ホームページ, http://www.pref.hokkaido.lg.jp/kz/kke/HEPCO_2.pdf