

趣旨説明

—再生可能エネルギー導入を含む電力システムの進化—

2015年3月27日

荻本 和彦

東京大学 生産技術研究所 エネルギー工学連携研究センター

FIT制度の状況

RES導入および「認定」状況と系統WG

- 2012年7月の固定価格買取制度開始後、2014年6月時点で、新たに運転を開始した設備は約11093MW（制度開始前と比較して約5割増）。
- 制度開始後、認定された容量のうち、運転開始済量の割合は約15%で、導入量、認定量ともに太陽光発電が9割以上を占める。
- 電力会社によるRESの接続の回答保留を契機として2014年10月に系統WGが設置され、12月に接続可能量とその拡大策の検討結果が示された。

再生可能エネルギー発電設備の種類	設備導入量（運転を開始したもの）				認定容量
	固定価格買取制度導入前	固定価格買取制度導入後			固定価格買取制度導入後
	平成24年6月末までの累積導入量	平成24年度の導入量（7月～3月末）	平成25年度の導入量	平成26年度の導入量（4月～6月末）	平成24年7月～平成26年6月末
太陽光（住宅）	約470万kW	96.9万kW	130.7万kW	12.4万kW	292万kW
太陽光（非住宅）	約90万kW	70.4万kW	573.5万kW	204.5万kW	6,604万kW
風力	約260万kW	6.3万kW	4.7万kW	0.2万kW	121万kW
地熱	約50万kW	0.1万kW	0万kW	0万kW	1万kW
中小水力	約960万kW	0.2万kW	0.4万kW	0.7万kW	32万kW
バイオマス	約230万kW	2.1万kW	4.5万kW	1.8万kW	128万kW
合計	約2,060万kW	175.8万kW	713.9万kW	219.6万kW	7,178万kW (1,315,806件)
		1109.3万kW（714,303件）			

総合資源エネルギー調査会省エネルギー・新エネルギー分科会新エネルギー小委員会第1回資料3(2014)

■ 各社が公表している風力発電の接続可能量を前提として算定した太陽光発電の接続可能量

	北海道	東北	北陸	中国	四国	九州	沖縄
風力接続可能量：(a) (万kW)	56 ※1	200 ※1	45 ※1	100	60 ※1	100	2.5
太陽光接続可能量：(b) (万kW)	117	552	70	558	219	817	35.6
太陽光・風力接続可能量 (a)+(b)	173	752	115	658	279	917	38.1
合成2σ出力(万kW)	105.6	547	62	463	171.5	622	28.8
合成最大出力(万kW)	106.7	549	64	490	190.3	629	30.1
昼間最低負荷：(c)※2 (万kW)	308.4 (5月26日 12時)	791 (5月12日 13時)	252 (5月12日 13時)	554 (5月12日 13時)	264.5 (5月12日 12時)	788 (5月12日 13時)	68.0 (4月7日 14時)
(a)／(c) (%)	18.2%	25.3%	17.9%	18.1%	22.7%	12.7%	3.7%
(b)／(c) (%)	37.9%	69.8%	27.8%	100.7%	82.8%	103.7%	52.4%
8760時間断面における需要実績に基づいた分析(2013年度)							
再エネ出力抑制量 (万kWh/年) (抑制率 (%))	4,943 (2.9%)	52,102 (4.6%)	4,400 (3.3%)	11,236 (1.3%)	16,400 (4.5%)	46,446 (4.2%)	-

※1 風力接続可能量は、地域間連系線活用による実証分を踏まえたもの(北海道:20万kW 東北:40万kW 北陸:30万kW 四国:20万kW)。

但し、北海道電力では、地域間連系線を用いて、風力発電の出力に相当する電気を東京電力に送電することから、北海道電力の需給バランスに影響しないため、合成出力には含んでいない。

※2 昼間最低負荷については、4月又は5月のGWを除く晴れた休日昼間の太陽光発電の出力が大きい時間帯の需要に、余剰買取による太陽光発電の自家消費分を加算している。

総合資源エネルギー調査会省エネルギー・新エネルギー分科会新エネルギー小委員会第8回資料1(2014)

3

導入拡大に向けた技術オプション

系統WG:接続可能量の拡大方策

■ 再エネの接続可能量の拡大方策としては以下のものが考えられる。これらの方策について、可能な限り定量的な評価を行う。なお、評価にあたっては、kWベースでの導入量のみならず、再エネの最大導入との観点からは、kWhベースでの導入量の評価を行うことが適当ではないか。

- ① 出力抑制ルールの見直し（時間単位の出力抑制）
- ② 出力抑制ルールの見直し（出力抑制日数の拡大、対象範囲の拡大等）
- ③ 蓄電池の設置・運用システムの開発
- ④ 地域間連系線の活用・増設

■ 上記以外の方法としては以下のような方策もあり、今後とも検討を行っていく必要がある。

- ① 出力抑制の代わりに、再エネ電力の価格を下げることや、売電価格に一定のプレミアムを付与して、再エネ事業者に市場で直接売電させることによる売り先の確保。
- ② 料金メニューや需要機器（EVやヒートポンプ、給湯器等）の普及による需要創出。また、再エネ電源の出力が高い時間帯に電力需要をシフトする自動化されたシステムの開発、導入。
- ③ 火力発電などの、運用改善や設備対応による、最低運転電力、負荷変化速度、起動時間などの運転特性の向上。

総合資源エネルギー調査会省エネルギー・新エネルギー分科会新エネルギー小委員会系統WG第2回資料1(2014)より作成

- 2011年度、2012年度、2013年度の需要実績と、太陽光発電と風力発電の発電実績を元に、今回算定した接続可能量まで再生可能エネルギーが導入された際、各年度において出力抑制を行う必要があった日数、その場合の抑制量を試算。
- なお、下記の数値は、あくまで事後的な試算であり、接続可能量まで再生可能エネルギーを導入した場合の出力抑制日数が、当該年度に30日以内に収まっていたことを示すが、接続可能量に余裕があることを示すものではないことに留意。

	北海道	東北	北陸	中国	四国	九州	沖縄	
2011年度	日数	1日	29日	23日	10日	11日	8日	1日
	抑制量 (万kWh)	173	69,207	5,800	5,156	10,600	25,631	12.1
	抑制率	0.1%	6.0%	4.4%	0.7%	3.0%	2.5%	0.03%
2012年度	日数	7日	17日	28日	14日	10日	10日	0日
	抑制量 (万kWh)	1,072	42,556	5,400	7,755	8,900	28,771	-
	抑制率	0.6%	3.6%	4.2%	0.9%	2.5%	2.7%	-
2013年度	日数	26日	20日	23日	17日	19日	16日	0日
	抑制量 (万kWh)	4,943	52,102	4,400	11,236	16,400	46,446	-
	抑制率	2.9%	4.6%	3.3%	1.3%	4.5%	4.2%	-

総合資源エネルギー調査会省エネルギー・新エネルギー分科会新エネルギー小委員会第8回資料1(2014)

5

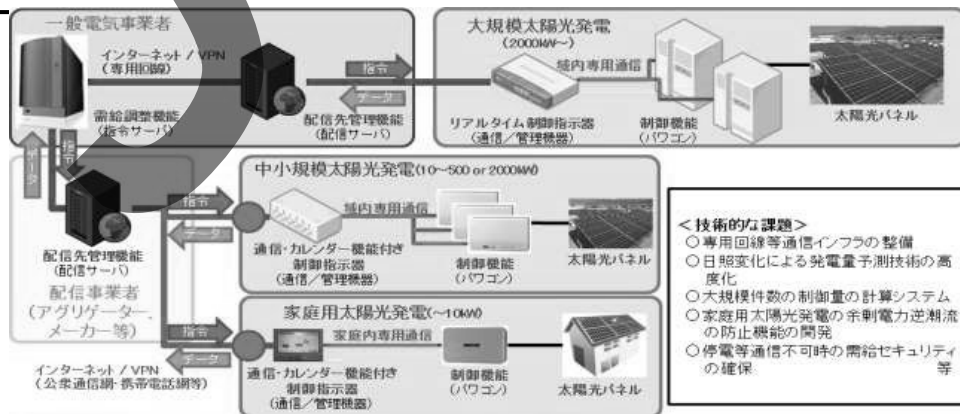
出力制御ルールの見直し：(2)遠隔出力制御システムの導入義務付け

【対応策】

- 太陽光発電設備について、時間単位でのきめ細かな出力制御を実施する場合に必要な設備(リアルタイム制御指示器、パワコンなど)の設置を再生可能エネルギー発電事業者に求める。

【考え方】

- 遠隔出力制御システムの構築には、一定の時間を要する見込み。このため、当分の間は「制御に必要な設備の設置や費用負担を行うこと」を予め約した上で、カレンダー方式や電話・メール等での連絡による運用を可能とする。なお、費用の中には、再エネ事業者が負担すべきではないものも含まれ得ることから、費用負担のあり方については別途検討する。
- なお、今後リアルタイム制御を目指していくことを踏まえ、現在、原則前日までに実施しなければならないとされている制御の指示を、より柔軟に行えるように見直す(当分の間は現在と同様に扱う。)



- <技術的な課題>
- 専用回線等通信インフラの整備
 - 日照変化による発電量予測技術の高度化
 - 大規模件数の制御量の計算システム
 - 家庭用太陽光発電の余剰電力逆流の防止機能の開発
 - 停電等通信不可時の需給セキュリティの確保

太陽光発電	一台当たり追加費用	製品開発期間	備考
10kW未満向け	5,000円*	10~12ヶ月	*IS等の標準化の検討が必要。
10-500kW向け	5~10万円	9~11ヶ月	*遠隔出力制御システムの導入のために必要なガイドライン等の改定が必要。
500kW以上向け	70~100万円	10~18ヶ月	*メーカー各社の製品開発費用(数千円程度)も必要となる。

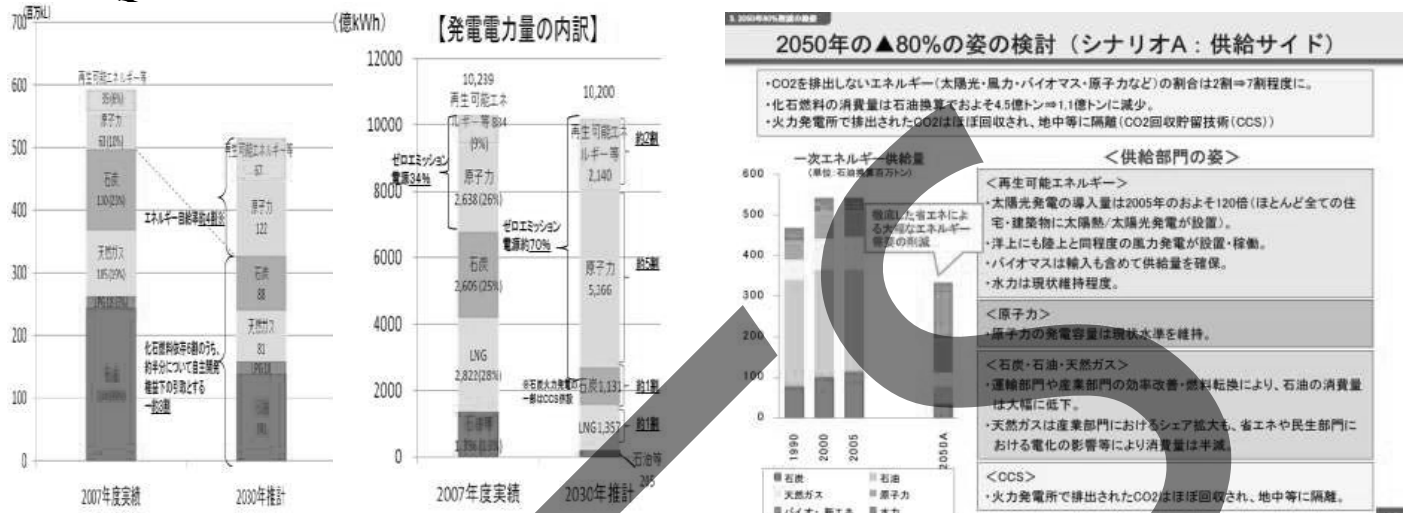
*PCSの機能や通信インターフェースは既に導入が始まっており、この場合は通信機能及びソフトウェア面の対応で遠隔制御が可能。

(出典)事業者団体によるメーカーへのアンケート結果を元に資源エネルギー庁作成

1. シナリオ選択のインパクト

長期のエネルギー需給:ビジョンと計画

- ✓ 10年、20年後を考えるためには、より長期を見通すことが必要。
- ✓ 持続可能性のもと、資源制約、環境制約、国際的な社会経済活動、産業競争力など、広範な視点に基づく方針決定が重要
- ✓ 計画策定と実施にあたっては、エネルギー基本計画などブレない方針が重要



資源エネルギー庁
エネルギー基本計画試算(2010)

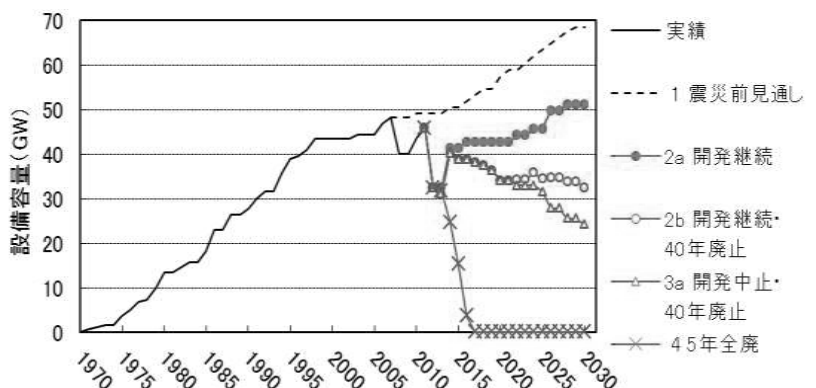
環境省
2050年のCO2▲80%の姿の検討例(2012)

1. 2030年の電力需給の姿

シナリオ設定

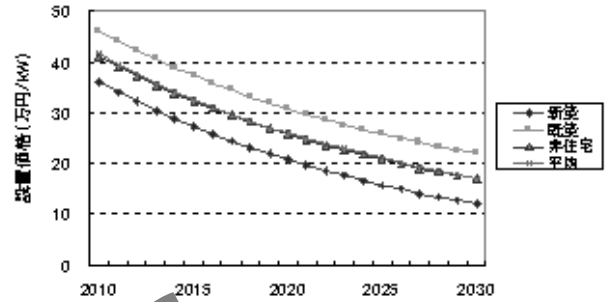
- 検討シナリオとしては以下の表に示す通り、「震災以前の見通し」に対し原子力発電の扱いにより4シナリオを設定した。
- 太陽光発電と風力発電については、導入促進として、2020年において震災前見通しの28GW、6GWに対し風力のみ10.6GW、2030年においては震災前見通しの53GW、10GWに対し、PVは同量、風力は28GW(地域導入量は、資源量ベース)を仮定した。
- 需給バランスは、シナリオ3aで各10電力システムにおいて予備力10%程度を目安とし、2a, 2b, 4aはほぼそれを踏襲した。
- 上記とは別に新規火力制約シナリオを設定した。

No.	シナリオ名	内容
1	震災前見通し	2010年エネルギー基本計画の再現 PV53GW、風力 10GW
2a	原子力開発継続 60年廃止	原子力の開発は一定量を見込む。福島を除く原子力は60年廃止 火力の一定増強, PV53GW, 風力 28GW
2b	原子力開発継続 40年廃止	原子力の開発は一定量を見込む。福島を除く原子力は40年廃止 火力の一定増強, PV53GW, 風力 28GW
3a	原子力開発中止 40年廃止	原子力の開発は工事中2基のみ。原子力は運開後40年で廃止。火力の一定増強, PV53GW, 風力 28GW
4a	原子力5年内廃止	原子力を5年で全廃 火力の一定増強, PV53GW, 風力 28GW



PVと風力導入シナリオ

- 太陽光発電の導入については、既設/新設住宅、住宅以外の業務用ビル、産業、メガソーラーの一括の3分野について想定し、新築・既築住宅、非住宅の分野でのコストと導入量を想定した。
- コストについては、2030年において新築住宅は建材一体型で増分工事費なし、既築は設置資材、工事費で10万円/kW増、その他は規模のメリットがありその中間とした。
- 風力は15万円/kWを一定とした。
- 地域別導入量は、PVはピーク需要比例、風力は、陸上は賦存量ベース、洋上は立地の自由度が上がり、需要地により近い地点の開発が可能と想定した。



太陽光発電の導入コスト（新築/既築住宅、非住宅）

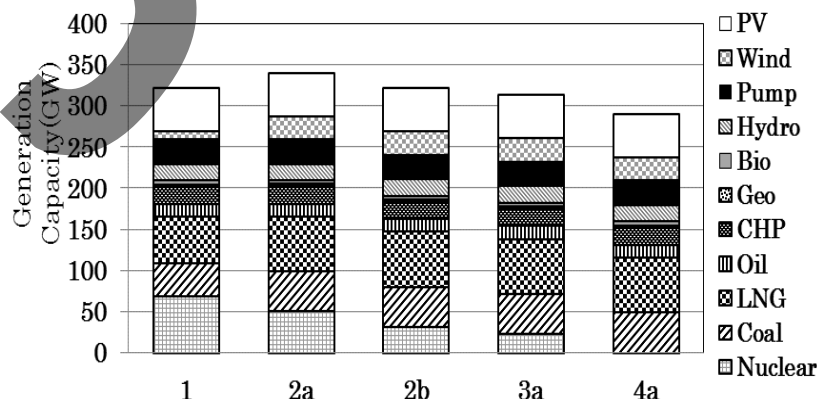
系統	風力		PV
	1	2a-4a	1-4a
北海道	0.6	1.8	2.1
東北	3.2	9.1	5.1
東京	0.4	1.0	17.5
中部	0.4	1.0	7.9
北陸	0.7	2.0	1.9
関西	1.2	3.3	8.9
中国	0.8	2.3	3.5
四国	0.5	1.3	0.9
九州	2.1	5.8	4.8
沖縄	0.2	0.5	0.4
全国計	10	28	53

表2 PV, 風力発電のシステム別導入量

荻本,片岡,池上,宇田川,赤井:我が国の長期電力需給ベストミックスの検討(3),エネルギー資源学会第30回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス,1-1 (2014)

1. 2030年の電力需給の姿 シナリオ設定：設備容量

- 火力は50年の寿命を基本とし、2014年以降の石炭火力3.7GW,天然ガス火力28.8GW、石油火力24.0GWの廃止を想定した。
- コージェネの800億kWhは家庭用,業務用,産業用の導入量を想定し,それぞれを都道府県別の一般世帯比率の世帯人員比率,業務用建物の床面積,産業付加価値額の比率で配分した。
- バイオマスの300億kWhは需要比例の導入,水力の900億kWhと地熱の170億kWhは資源量ベースの導入（累積）を想定した。



2030の電源設備容量

荻本,片岡,池上,宇田川,赤井:我が国の長期電力需給ベストミックスの検討(3),エネルギー資源学会第30回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス,1-1 (2014)

解析結果：発電電力量

- シナリオ2a~4aにおける原子力の発電量の減少は一部再生可能エネルギーの導入により補われるが、主として新規開発を含む石炭火力、天然ガス火力稼働増加と、本来低稼働率の石油火力によって補われる。
- PV(PV),風力発電(Wind),地熱(GEOT),バイオマス(Bio)の導入量は各シナリオ共通に想定した発電を行う条件としているため、各シナリオで同じ発電電力量になっている。

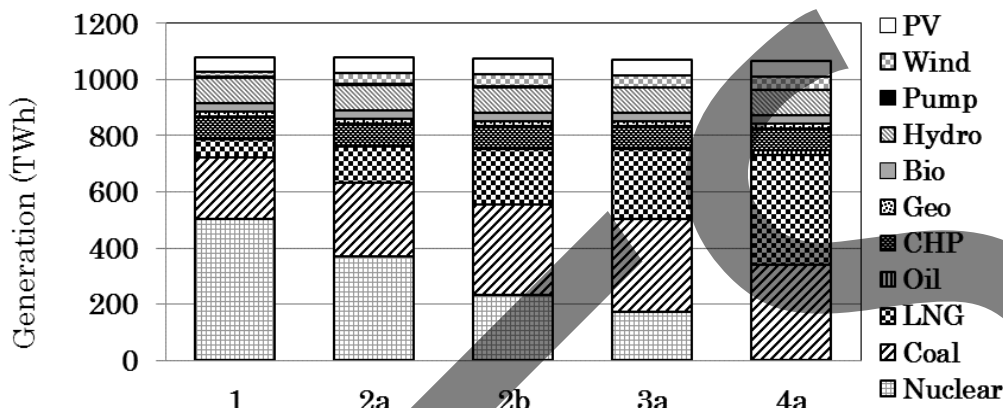


図4 2030年の発電電力量の比較

荻本,片岡,池上,宇田川,赤井:我が国の長期電力需給ベストミックスの検討(3),エネルギー資源学会第30回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス,1-1 (2014)

検討結果：燃料費

- 火力発電の燃料費は、原子力の発電量の減少を補うために、シナリオ1に対し、4aで最大2.7兆円と大幅に増加する。
- 原子力の発電量の低下は、一定程度の石炭火力と天然ガス火力の増強の想定の下でも、天然ガス、石油の燃料費の大幅な増加につながる。

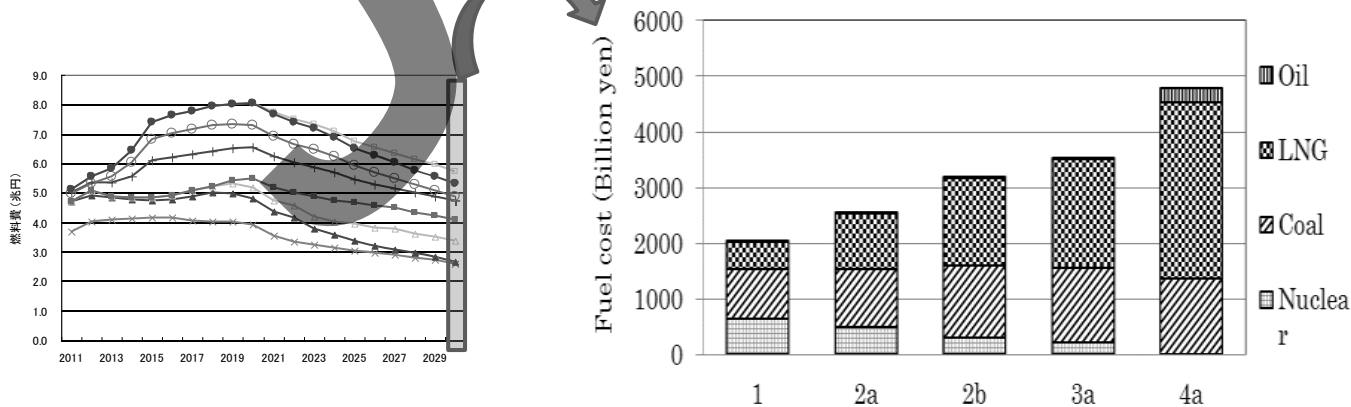
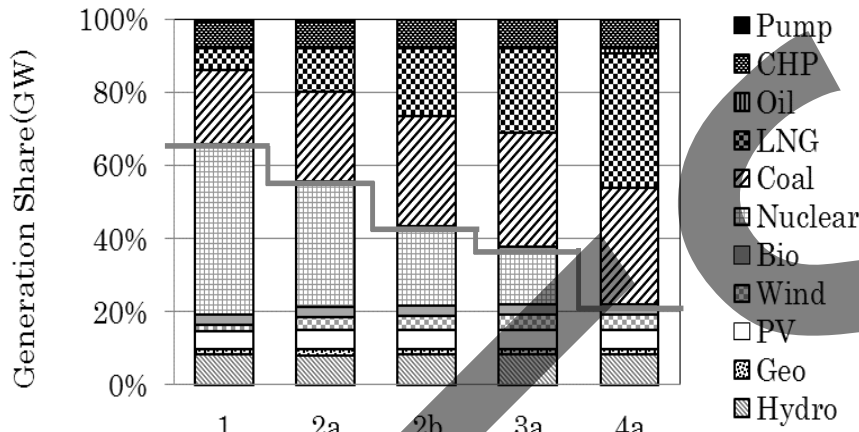


図4 2030年の年間の燃料費

荻本,片岡,池上,宇田川,赤井:我が国の長期電力需給ベストミックスの検討(3),エネルギー資源学会第30回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス,1-1 (2014)

検討結果：安定供給に向けた自給率

- エネルギー需給に電力需給の占める割合は着実に増加するため、電力需給のエネルギー自給率を見ることには一定の意義がある。
- 電源の自給率は、再生可能エネルギーの最大限の導入を仮定しても、原子力の発電量の低下する場合、大幅に低下する。
- 石油、天然ガス、石炭は、発電所には1ヶ月分そこそこの貯蔵しかないことを認識する必要がある。



原子力の発電量の低下により、自給率が大幅に低下する。

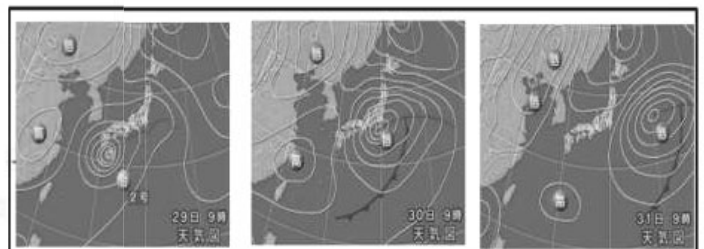
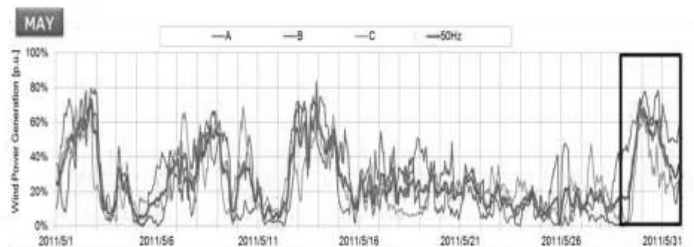
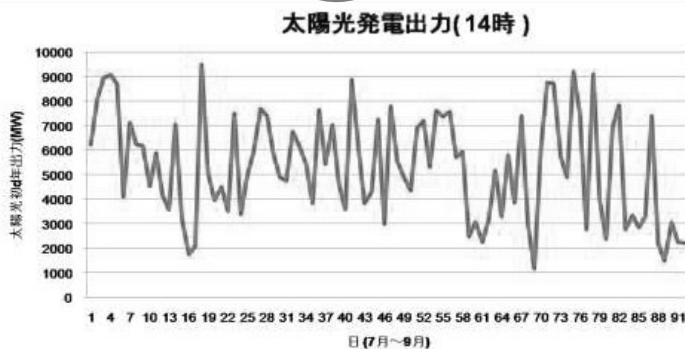
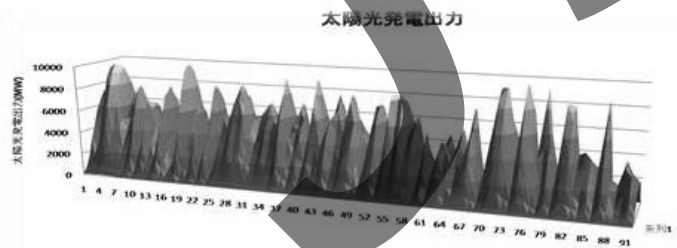
図4 電力部門のエネルギー自給率

荻本,片岡,池上,宇田川,赤井:我が国の長期電力需給ベストミックスの検討(3),エネルギー資源学会第30回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス,1-1 (2014)

2. Variability: 需給調整力不足の課題

再生可能エネルギーの出力変動 (Variability)

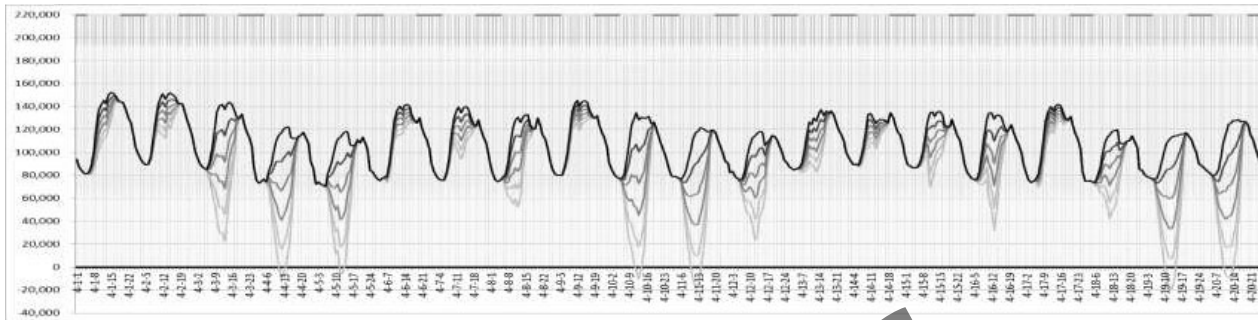
- 再生可能エネルギーをエネルギー源として導入するためには、水力の場合と同様、出力変動特性を分析・把握し、きめ細かな運用と設備形成が必要。
- 太陽光発電、風力発電など、ならし効果による変動性の緩和は期待できるが、それでも残る出力変動は大きい。



50Hzの電力会社管内別、合計の風力発電電力(2011)

2. Variability: 需給調整力不足の課題

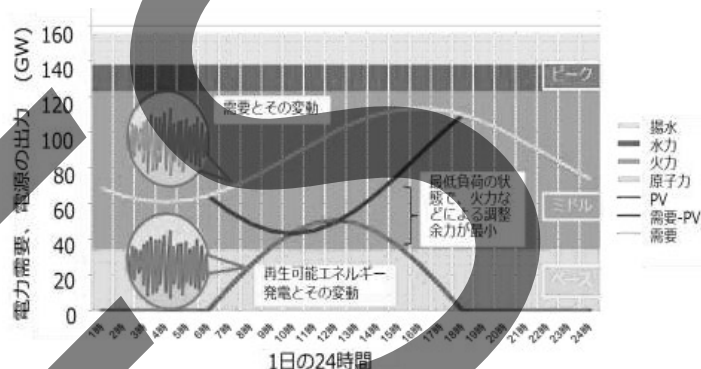
RE導入の課題：需給調整力不足の2つの要素



2030年において総発電量におけるPV発電の割合20%まで増加した場合の残余需要

再生可能エネルギーの導入量の増加により、電力システム全体の需給調整問題が発生する理由は、

- 再生可能エネルギーの発電量の変動による、変動要素の増加
- 火力など従来システムの需給調整を担う発電方式の運用量の減少



荻本和彦,片岡和人,池上貴志,野中俊介,東仁,福留 潔: 将来の電力システムの需給調整力の解析手法,電気学会論文誌C, Vol.132 No.8, pp1376-1383 (2012)

2. Variability: 需給調整力不足の課題

需給調整は共通の課題

- 原子力や、石炭火力、天然ガス火力などの大規模系統電源は、経済性、環境性などの優れた特性を有するが、その特性を最大限に発揮するためには、ベース電源として一定出力の運転を行うことが望ましい。
- そもそも、低炭素化、化石資源の制約は、出力調整の容易な火力発電の利用の低減を意味し、電力システムの供給側の需給調整力の低下は世界共通の課題。
- 電力システムにおけるニーズに応じて、調整力の価値は、大きさ、速さ、継続時間、確実性で決まる。



先進的原子力発電



IGCC, IGFC



高効率天然ガス複合発電



図の出典：CoolEarthエネルギー革新技术計画報告書

柔軟性向上と変動性低減：

足元の現状から、将来のニーズと可能性を見通して、設備と運用の双方による段階的対応が必要かつ有効

- 新しいニーズの反映による、従来電源の需給調整力の最大活用：
 - 火力発電の最低運転電力低減、負荷調整能力の向上、起動時間短縮
 - 揚水の積極運用、可変速化による揚水運転時の調整力向上
 - 水力の運用の高度化
- 新たに導入されるRESの発電の調整力の積極的活用
 - 風力のピッチ角制御などによる出力抑制、発電制御
 - PVのインバータ制御の高度化
- 民生・業務の建物、PHEV/EVの充電需要に分散型の電力貯蔵を含む需要の能動化(自動デマンドレスポンス)
- 送電線、系統連系の拡充によるならし効果と電力システムの柔軟性資源の最大活用の環境整備
- PV、風力など出力の変動する再生可能エネルギー発電の出力把握・予測を含めた運用の高度化と最適設備形成による電力システムの進化

現在新たに検討が進められているスマートグリッド的対応策

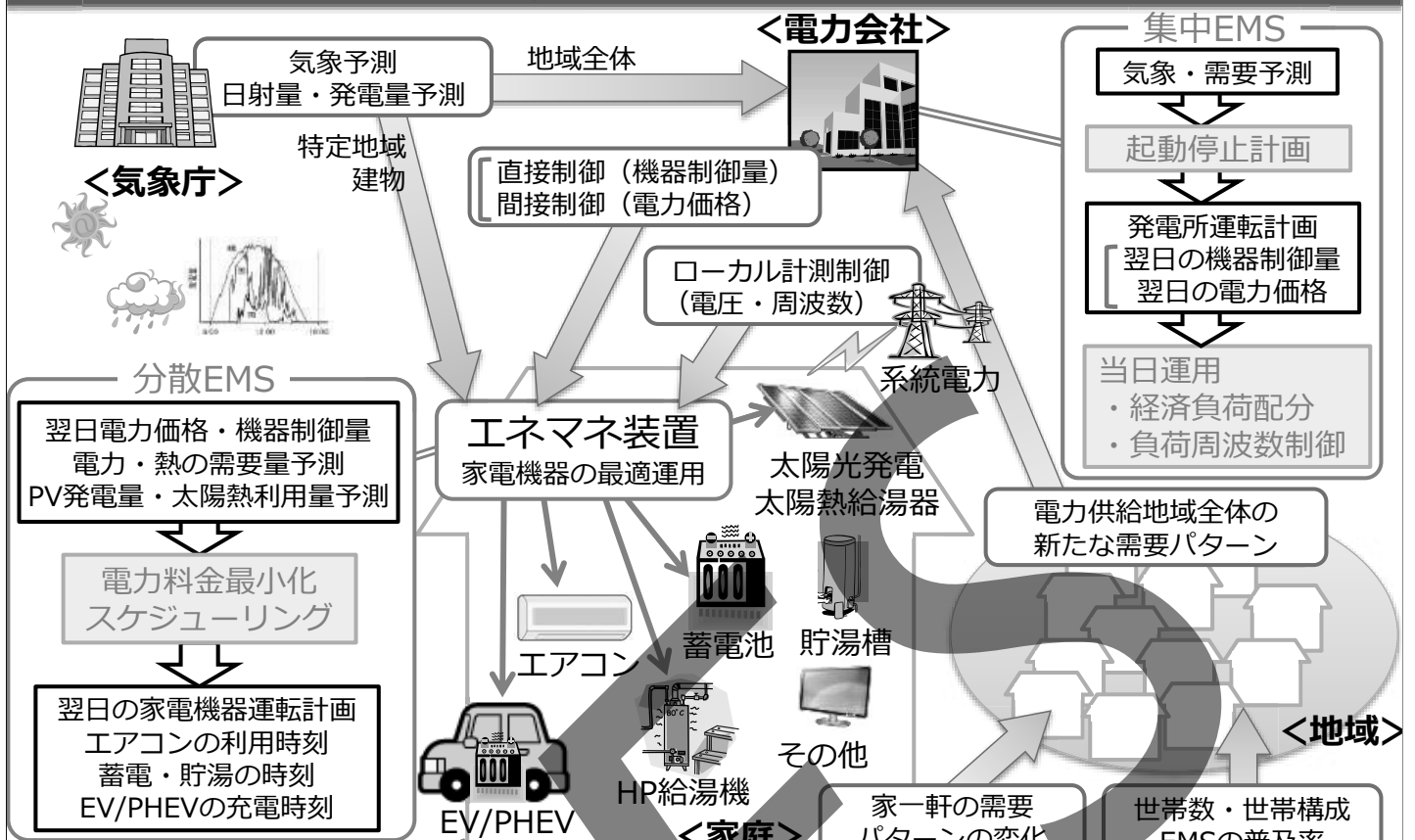
需給運用における柔軟性向上の体系

3.分散エネルギーマネジメントと需要の能動化



3. Flexibility: 需給調整力向上への挑戦

需要の能動化：集中/分散エネルギーマネジメントの協調

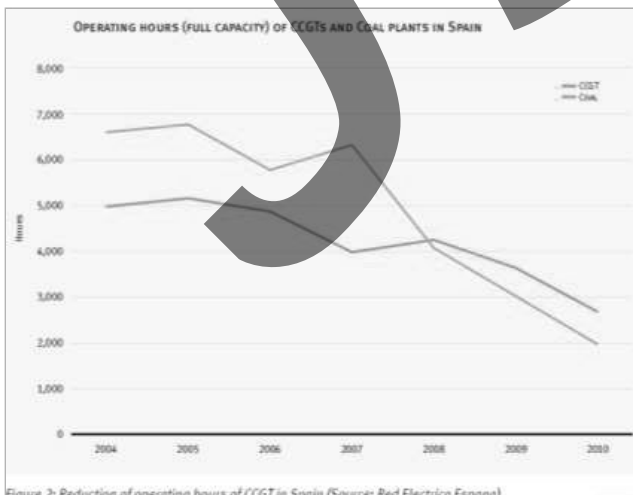


荻本和彦, 岩船由美子, 片岡和人, 池上貴志, 八木田克英: 電力需給調整力向上に向けた集中・分散エネマネの協調モデル, IEEJ電力・エネルギー部門大会講演論文集, 16, 08, 7-12 (2011)

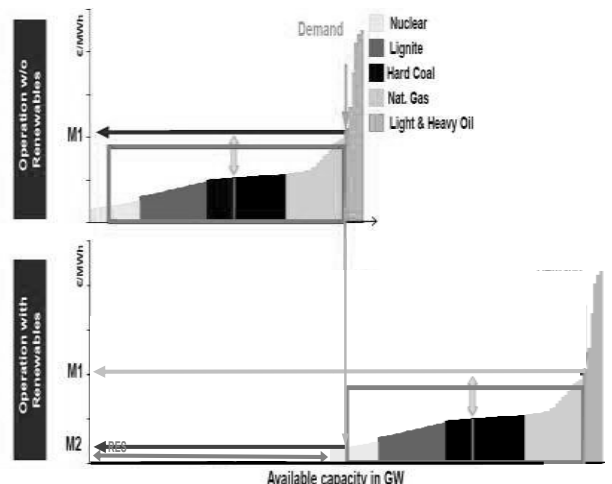
4. 電力市場の課題と取り組み

火力の稼働率と市場価格の低下

- 再生可能エネルギーの大量導入と優先給電により、既設の火力の稼働率は大きく減少するとともに、市場決定価格も大きく落ち込んだ。
- ヨーロッパでは、“Large Combustion Plant Directive : 2015年までの低効率の火発の廃止”や“Industrial Emissions Directive : 環境負荷への規制強化”などにより火力発電の存続、新設が困難になる。



スペインのガス/石炭火力の運転時間の低下

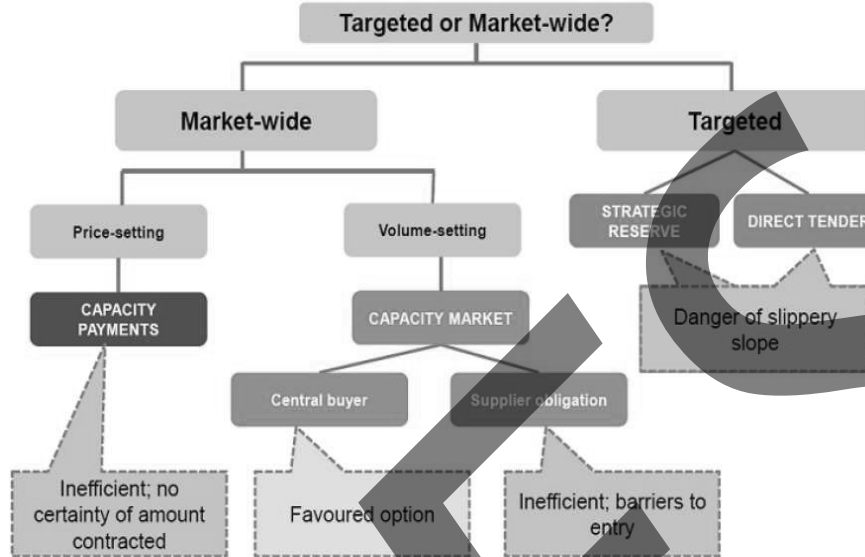


V-RES大量導入途による市場価格への影響

Euelectric, “RES Integration and Market Design: are Capacity Remuneration Mechanisms needed to ensure generation adequacy?” (2011)

EnBW, Siemens Energy, “Economic Operation of Fossil Fuelled Power Plants to ensure security of supply”, VGB Congress (2011)

- 変動性の再生可能エネルギーの導入の拡大に伴い、residual loadの最大/最小の差は拡大し、「V-RES補完供給力」は増加する。
- ドイツでは、2012年、補助金の給付を条件に事業者が廃止を希望する発電所の廃止を認めないという制度を開始した。
- 英国をはじめとして、2014.11初市場取り引きに向けた準備が進んでいる。



Adequacy維持のための供給力確保方法

Development of a Capacity Mechanism in Great Britain Edmund Hosker, Director Energy, EU and Energy Security, DECC (2013)

米国 FERCの電力市場の取り組み (2013.9)

2013年9月、米国の連邦エネルギー規制機関であるFERC(FEDERAL ENERGY REGULATORY COMMISSION)は、容量市場に関する技術会議を開催し、今後の容量市場のあり方を議論し、12月までのパブコメを実施した。

会議では、再生可能エネルギー大量導入のもとでの、新たな柔軟性の活用を含めた電力システムの運用、市場、についての以下の論点についての議論が行われた。

1. 既存の、アデカシーを経済的に確保するという集中容量市場の目的の達成状況
2. 集中容量市場に対して必要な全般、あるいは個別の改善点
3. 集中容量市場は、設計要素の相互間、エネルギー・アンシラリー市場と影響しあう。この影響に関する、集中容量市場やエネルギー市場の改善点
4. 地域の容量市場も相互関係する。容量市場設計の地域差からの示唆
5. 集中容量市場に対する送電網の増強の影響は何か。送電計画を集中容量市場の設計要素とより効果的に統合あるいは関係させる方法は？



<http://www.ferc.gov/EventCalendar/EventDetails.aspx?ID=6944&CalType=>

エネルギーシステム全体の最適化

- 震災後の日本の整然とした対応は世界の賞賛を受けた。
- 固定価格買取制度での太陽光発電の認定申し込み殺到は、日本人そして日本社会のダイナミズムを証明したともいえる。

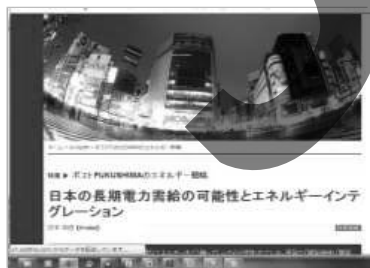
その我々はエネルギー/電力の需給で何を指すか？

- 目指すものは？
3E+S：安定供給、経済性、環境性、安全性
→化石燃料の不安定な価格、供給量はどのように対処するか？
→生活、国内産業を支えるためにどのような価格が必要か？
→世界の環境問題の高まりにどう対応するか
→安全な社会の確保はもとよりの必須条件
- 市場を含め、電力・エネルギー分野には世界的に未解決の大きな課題がある。
- 難しいのは、時間軸上にできることを展開すること
- 希望は、様々な人たちの努力と工夫で実現することが必要

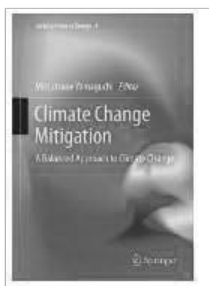
ご清聴ありがとうございました

東京大学 生産技術研究所 エネルギー工学連携研究センター
荻本研究室ホームページ

<http://www.ogimotolab.iis.u-tokyo.ac.jp/>



Nipponn.comで「日本の長期電力需給の可能性とエネルギーインテグレーション」を日英で公開中です。
<http://nipponn.com/ja/in-depth/a00302/>



「シナリオ選択のインパクト」を、2012.7Springer発刊のLecture Notes in Energy "Climate Change Mitigation"とその和訳である2013.4丸善発刊の「実現可能な気候変動対策」に掲載しました。



「出力が変動する再生可能エネルギー発電の大量導入と電力システムの進化(1)~(3)」を、原子力学会誌ATOMOS 2014年1,2,4月号に連載中です。