

IEA Hydro Workshop

エネルギーシステムインテグレーション

- 将来のエネルギーシステムのための水力価値の実現 -

2019年2月4日

荻本和彦

東京大学

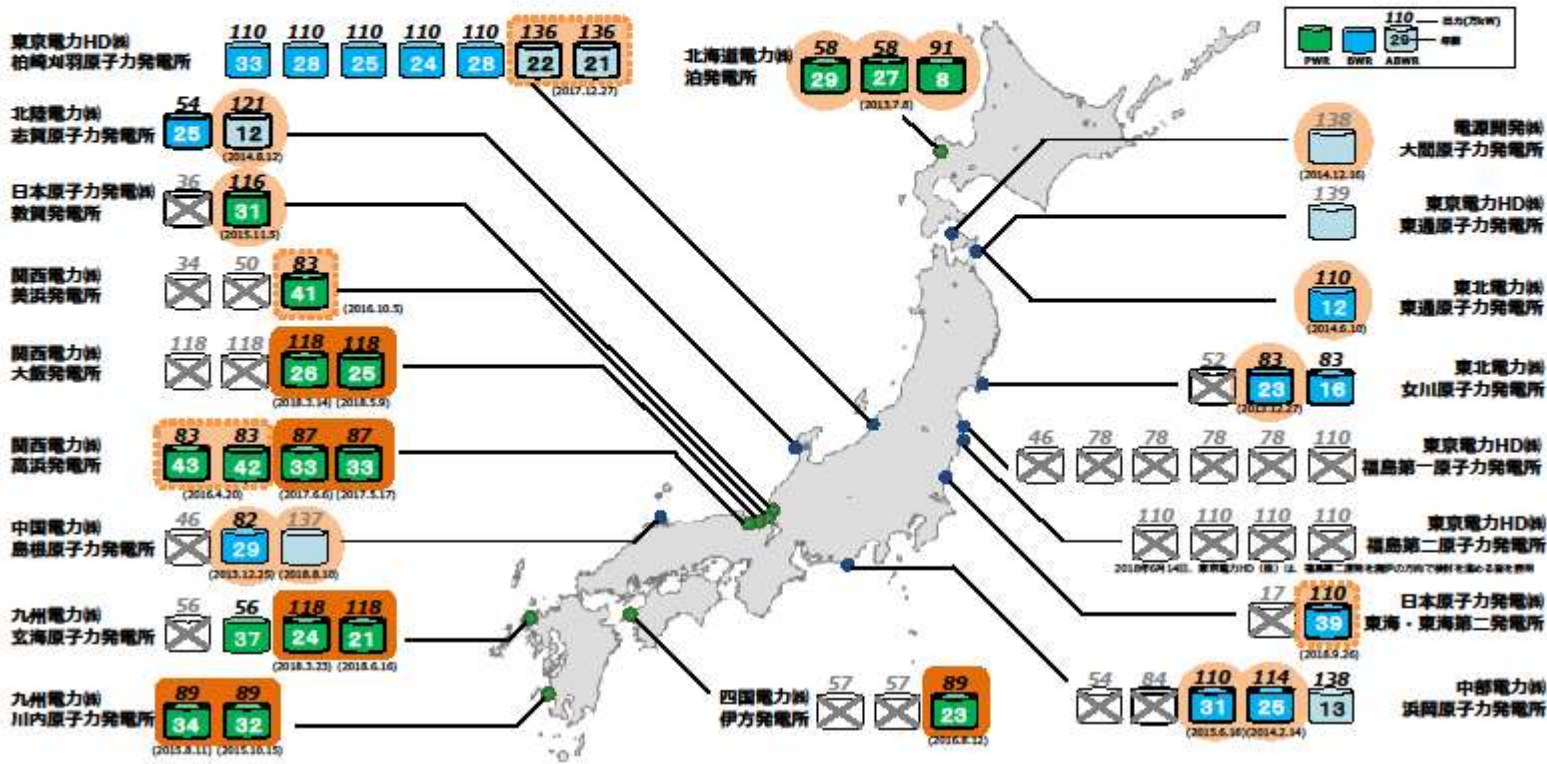
生産技術研究所

エネルギーシステムインテグレーション社会連携研究部門

東日本大震災後の原子力の再稼働の状況

原子力発電所の現状

2018年11月7日時点



出典：経済産業省 http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/001/pdf/001_02_001.pdf

固定価格買取制度 (FIT) における買い取り料金の変遷

	FY2012	FY2013	FY2014	FY2015	FY2016	FY2017	FY2018	FY2019	FY2020	Price targets for 2030
Solar (commercial) (10 kW or more)	¥40	¥36	¥32	¥29 ¥27*	¥24	¥21 (10 kW or but under 2 MW)	¥18 (10 kW or more but under 2 MW)			¥7
Solar (residential) (Under 10 kW)	¥42	¥38	¥37	¥33 ¥35**	¥31 ¥33**	¥28 ¥30**	¥26 ¥28**	¥24 ¥26**		Market price (Target for 2020 and beyond)
Wind	¥22 (20 kW or more)				****	21 **** (20 kW or more)	¥20	¥19	¥18	¥8-9
	¥55 (under 20 kW)				***		****	****		
	¥36 (offshore wind)						¥36(fixed)	****		¥8-9
Geothermal							¥36(floating)		¥36 (floating) (floating)	
	¥26 (15 MW or more)							****	¥26	
Hydro	¥40 (under 15 MW)							****	¥40	
	¥24 (1 MW or more but under 30 MW)				****	¥24	¥20 (5 MW or more but under 30 MW)		¥20	
						¥27 (1 MW or more but under 5 MW)		****	¥27	
	¥29 (200 kW or more but 1 MW)							****	¥29	
Biomass	¥34 (under 200 kW)							****	¥34	
	¥39 (fermented methane gas)								¥39	
	¥32 (wood biomass derived from thinned wood)			¥40 (under 2 MW)					¥40	
				¥32 (2 MW or more)					¥32	
	¥24 (general wood biomass)				¥24 (20 MW or more)	¥21 (10 MW or more)	Shift to the auction system (10 MW or more)			
					¥24 (Under 20 MW)		¥24 (Under 10 MW)			
	¥24 (biomass liquid fuel)				¥24 (20 MW or more)	¥21 (10 MW or more)	Shift to the auction system			
				¥24 (Under 20 MW)						
¥13 (building material waste)								¥13		
¥17 (municipal waste; other biomass)								¥17		

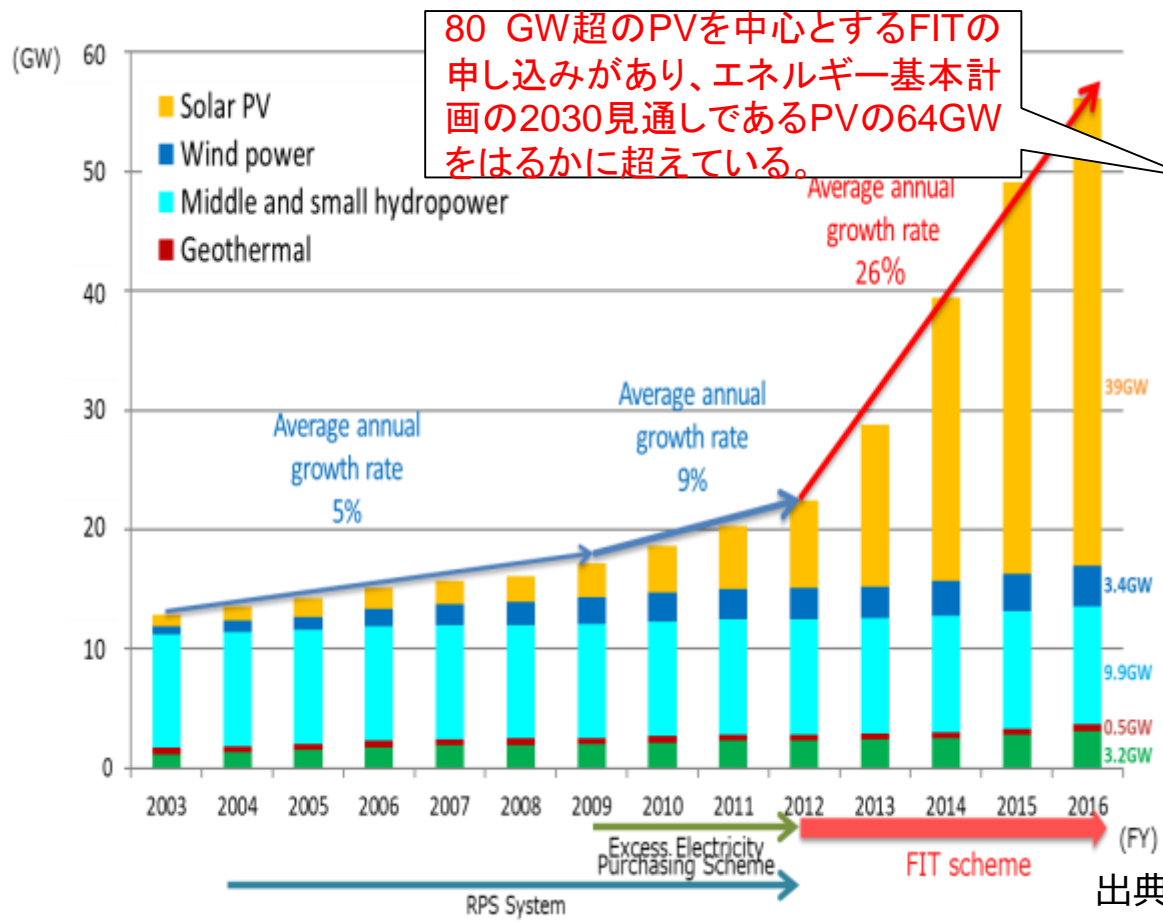
Aiming for independence from the FIT system over a mid- to long term

By courtesy of METI

*** A transitional measure is applied only to wind power projects that are truly being developed. **** Replaced equipment for wind, geothermal and hydro power generation are subject to a tariff lower than that for newly-approved equipment. ***** The conditions for applying the rules on the use of general sea areas are will be to the auction system when the rules come in force.

固定価格買取制度開始後の再エネ導入状況

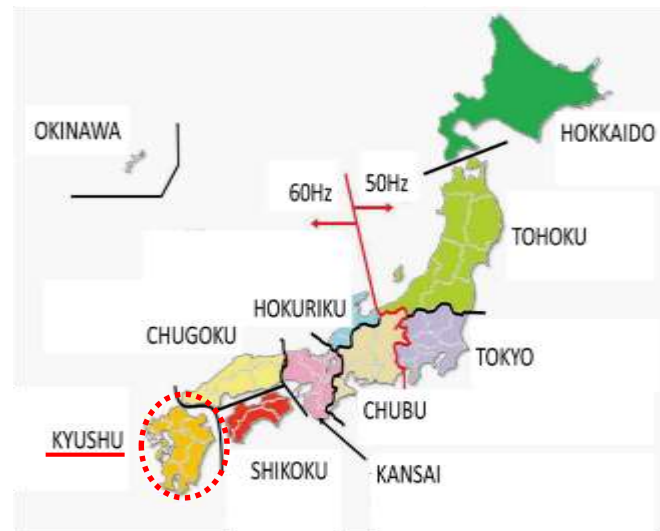
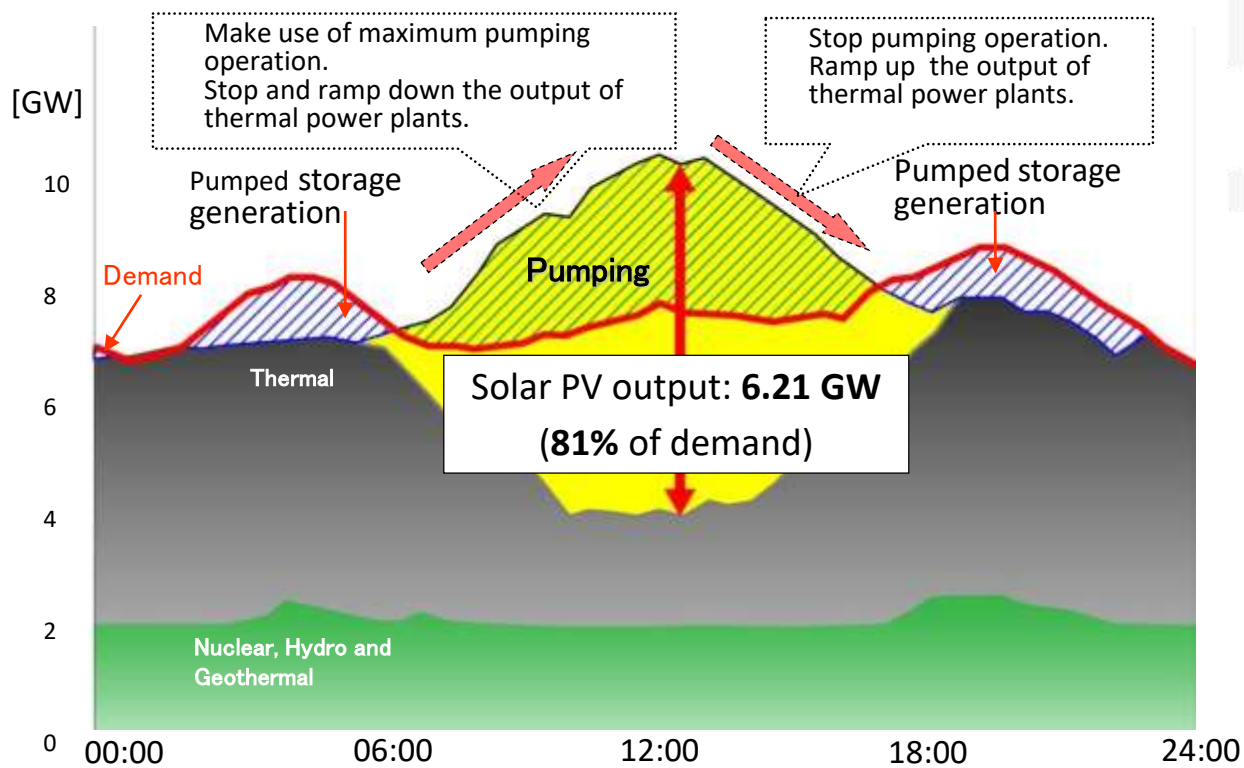
- 日本における再エネ電力の固定価格買取制度は、東日本大震災の翌年2012年7月に開始された。2011.
- 有利な買取料金のもと、再エネに対する投資は活発化し、計画から建設までの期間が短いPVの申し込みはと実際の導入は驚くべき速度で進展した。



	Authorized (up to the end of 2014FY)	Already installed before 2014FY
PV (residential)	3.79GW	3.1GW
PV (non-residential)	78.84GW	15.01GW
Wind	2.29GW	0.33GW
Hydraulic	0.66GW	0.09GW
Geothermal	0.07GW	0.01GW
Biomass	2.03GW	0.22GW
Total	87.68GW	18.76GW

出典：経済産業省

九州における需給運用例 (2018年5月3日)



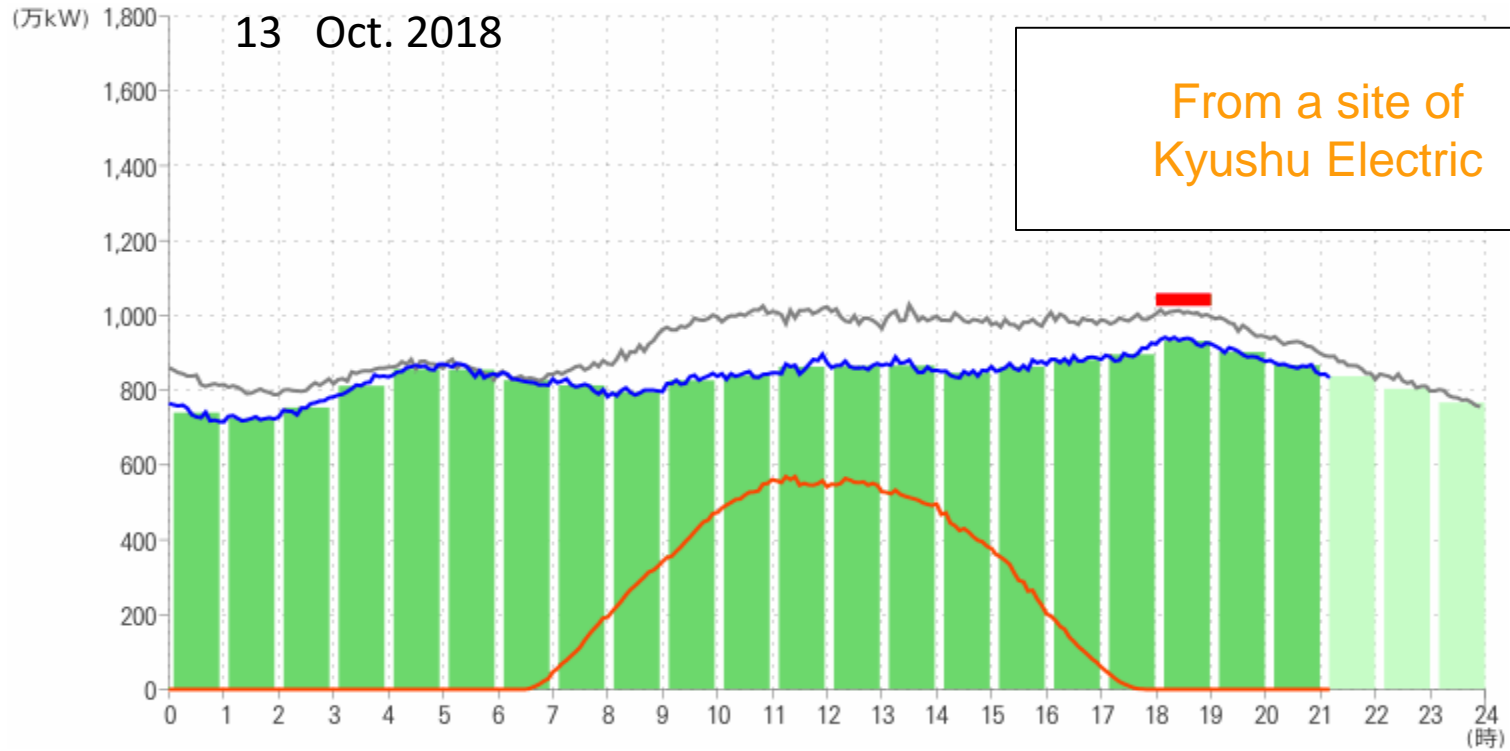
By courtesy of Ministry of Economy, Trade and Industry

九州襟あにおける最初のエリア大の再エネ出力抑制

電力使用状況の推移

13 Oct. 2018

From a site of
Kyushu Electric

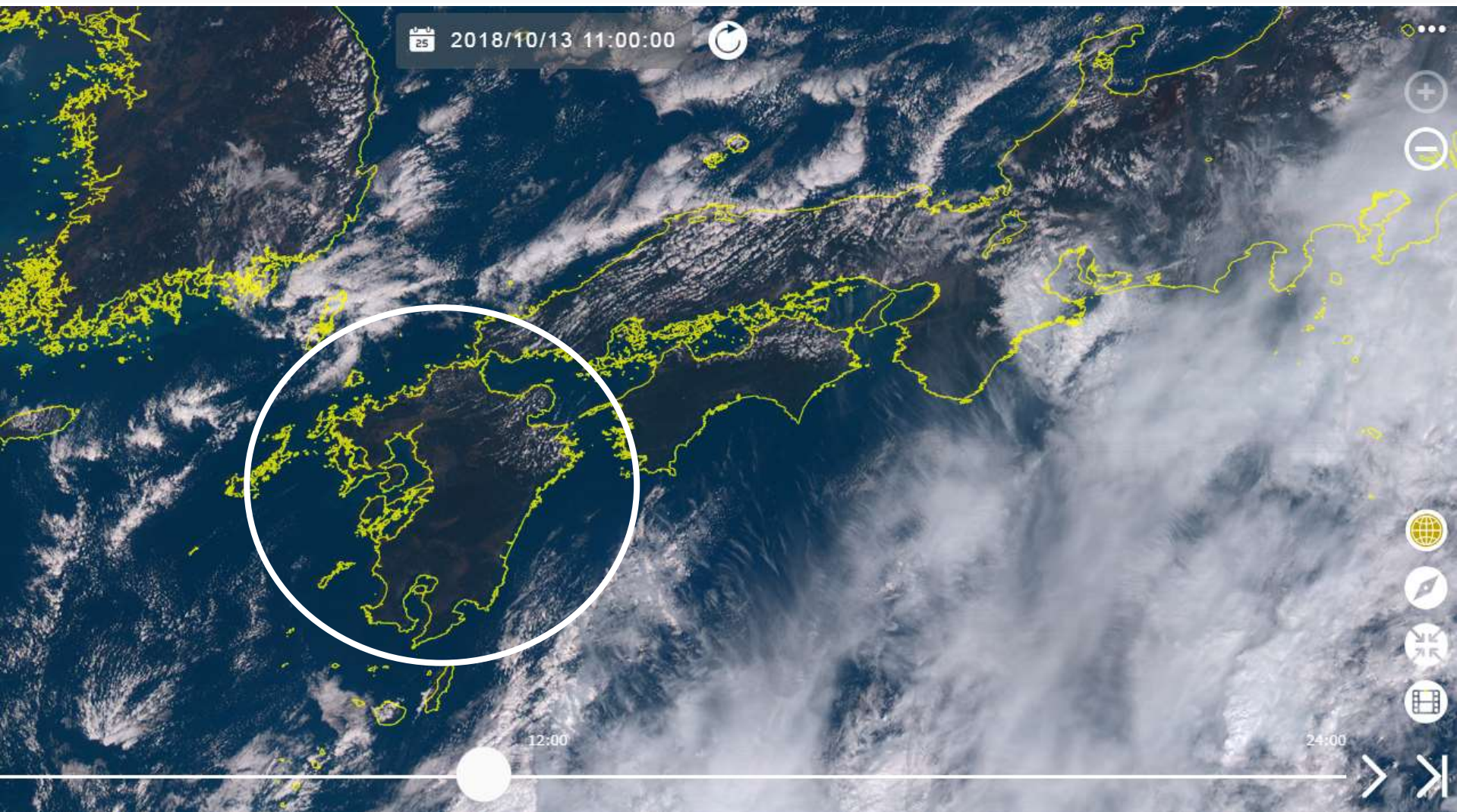


— 本日実績 (5分値)
 ■ 本日実績 (1時間値)
 ■ 予測値
 ■ ピーク時供給力
— 本日の太陽光発電実績 (5分値)
— 前日実績 (5分値) ※土・日曜日については前週実績、月曜日については前週金曜日実績を参考値として表示します。

- ・ 数値は送電端の値です。
- ・ 0時から0時10分頃は、データが更新されません。予めご了承下さい。
- ・ 太陽光発電実績は、日射量による推計値を含む九州エリア（本土、離島）の値です。

https://www.kyuden.co.jp/power_usages/pc.html

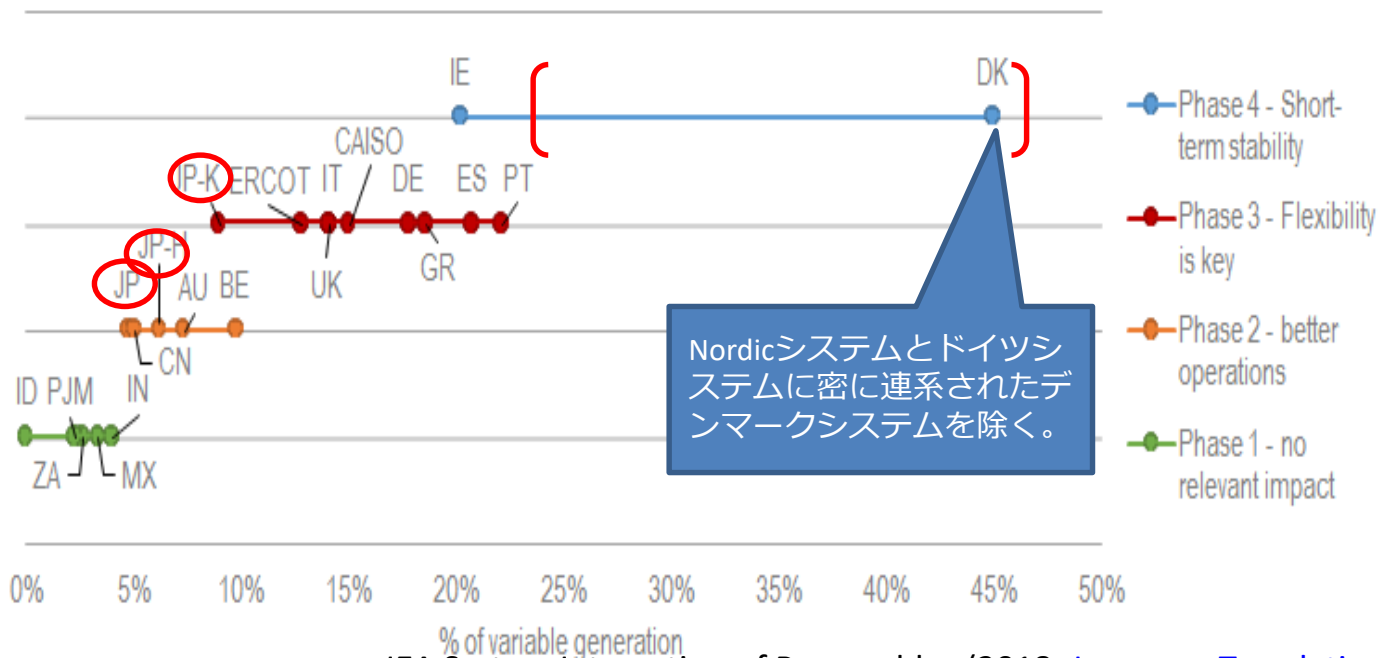
最初の再エネ出力抑制の日の天気



<http://himawari8.nict.go.jp/>

再エネ導入の影響：IEAによるシステム運用の困難さの段階

- IEAの“System Integration of Renewables (2018)”によれば、大・中規模の、電力システムにおける再エネの比率は最大25%程度。
- 日本においては、再エネの電力量比率は、日本全体では5 %程度であるが、九州では10%である。システムの規模がアイルランと同等の北海道におけるPVと風力の導入率も同国と同じ程度である。
- Phase 3にランクされた九州エリアでは、高度な需給運用により再エネの出力抑制を最小限にしつつ、安定運用を確保している。

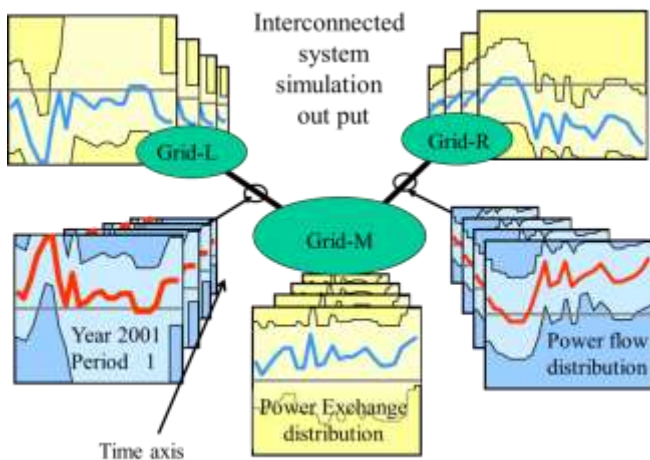


IEA System Integration of Renewables (2018, [Japanese Translation@NEDO](#))

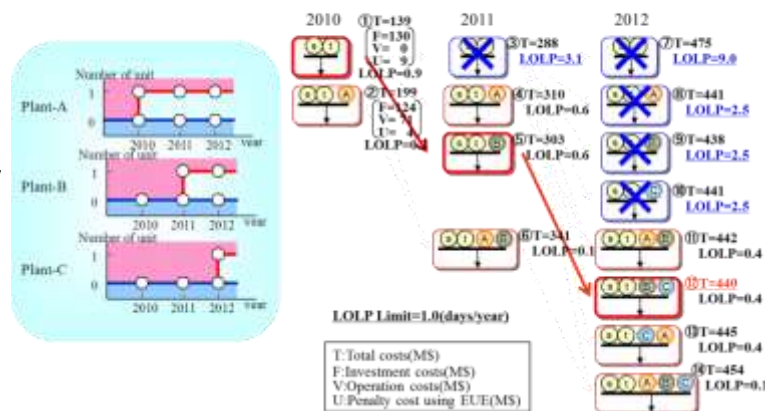
エネルギー/電力システム：実施可能な計画策定

- 電力需給における需要想定と電源確保方法についての解析・評価
- 50Hz/60Hz間連系を含む送電網などの流通設備の課題の発見と対応策の解析・評価
- 需要の能動化による電力システムの需給調整力の確保、向上
- 2020年, 2030年, その後に向けた **S+3E** など目標の再確認
- 実行可能な移行プロセスの実践

電力システム間連系の最適化



需給最適化手順 最小費用経路の選定



電源と流通設備の統合解析・評価

NAME	NwG1	NwG2	NwG3	NwG4	TOTAL	LOLP (DAYS/ YEAR)	RESERVE (%)
CAP	400	400	400	400	1200		
2005	0	0	0	0	400	8.113	22.3
2006	0	0	0	1	400	9.098	26.2
2007	0	0	0	1	400	9.894	26.9
2008	0	0	0	1	400	9.918	24.8
2009	0	1	1	1	400	1.633	28.3
TOTAL	0	1	1	1	1200		

- 電源投入地点
 - N34(2年目): 需要地に近い
 - N33(4年目): 同上
 - N32(5年目): N31より需要地に近い
- 送電設備
 - L-419(2年目): 重負荷地点に接続
 - L-315(4年目): 重負荷地点に接続
 - L-205(5年目): 重負荷地点に接続



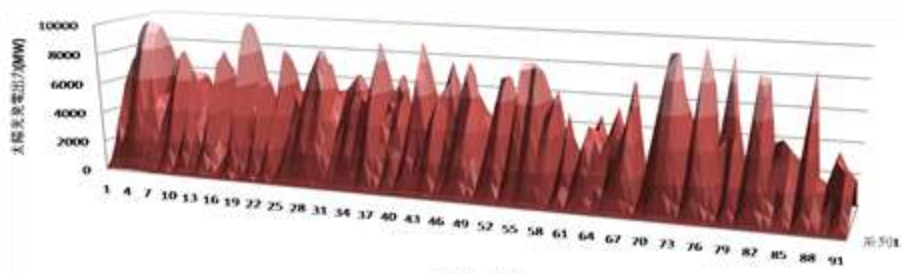
荻本和彦：論壇 日本の長期エネルギー需給戦略, 日本エネルギー学会誌Vo.91,pp141-145(2012)

荻本和彦：時論 長期エネルギー需給計画とインテグレーション, 原子力学会誌Vol. 54, No. 7, p02-03 (2012)

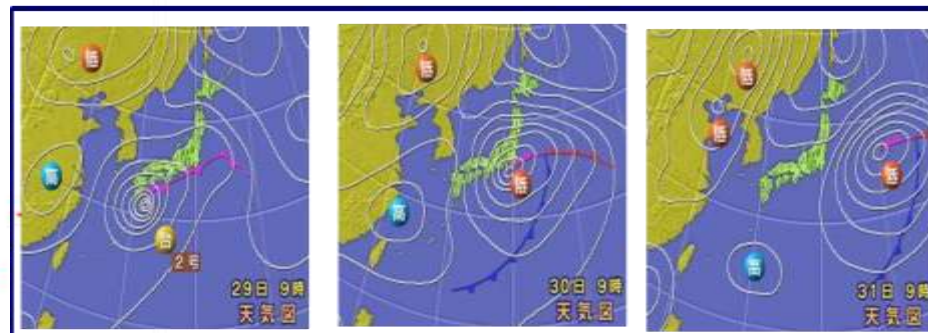
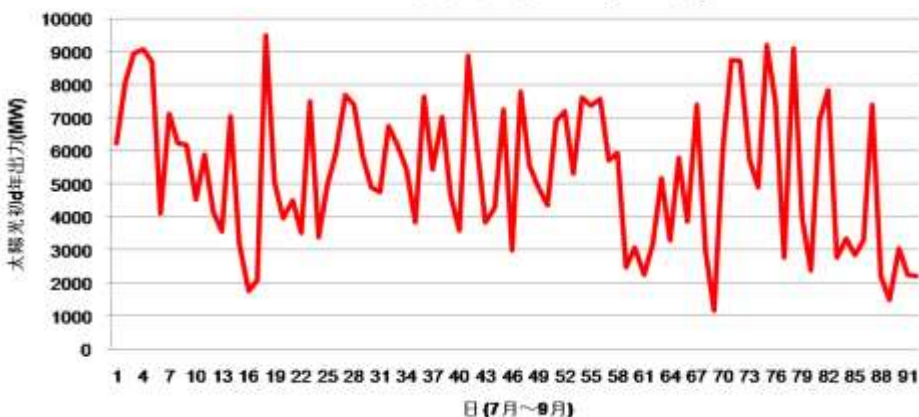
荻本和彦：総論 わが国における電力需給の展開と課題, 電気評論12月号_p7-12 (2012)

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。



太陽光発電出力(14時)

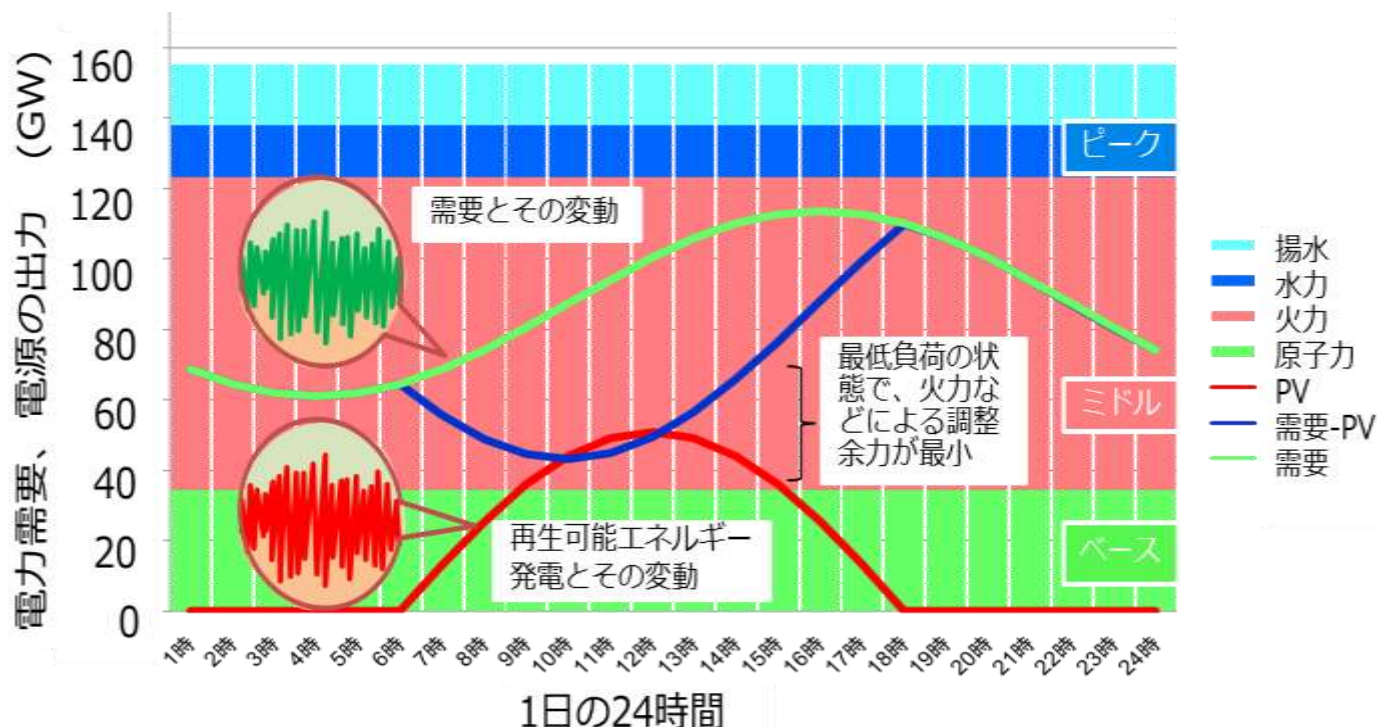


50Hzの電力会社管内別，合計の風力発電電力
荻本和彦,池上貴志,片岡和人,齊藤哲夫:電力需給解析のための全国風力発電量データの収集と分析,電気学会平成24年電気学会全国大会講演論文集,6-003,5-6 (2012)

RE導入の課題：需給調整力不足の2つの要素

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)

需給調整は共通の課題

- 原子力や、石炭火力などの大規模系統電源は、優れた経済性、環境性を有するが、その特性を最大限に発揮するためには、一定出力の運転を行うことが望ましい。
- 低炭素化は、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5つの分野での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**

- 出力制御、出力変化率制御、その他の有効電力制御
- 無効電力制御と事故時運転継続機能

□ 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**を含めたシステム運用と市場運営の高度化と電力システムの進化

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

2. 再エネの最適構成・配置と調整力向上



風力



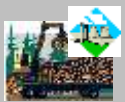
太陽光



小水力



地熱



バイオ



海洋

3. 分散エネルギー・マネジメントと需要の能動化



産業



業務(大規模)



業務(小規模)



住宅



交通



蓄電池



燃料貯蔵



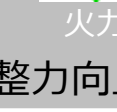
揚水



水力

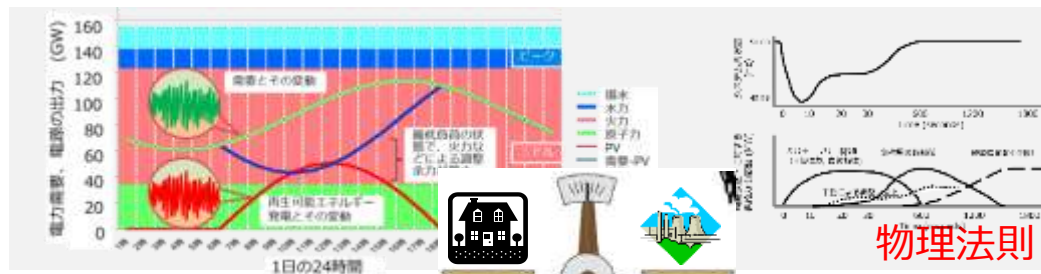


原子力



火力

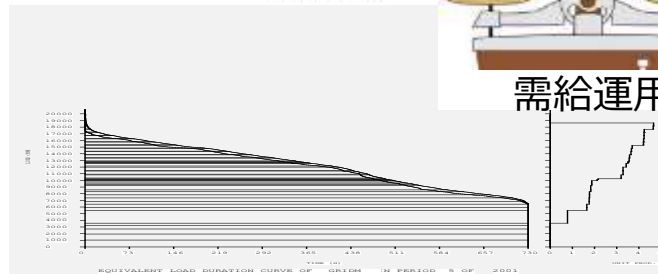
エネルギー貯蔵技術活用



需給運用



経済原理



電力・情報ネットワーク



4. 送配電網と系統連系



5. 予測と運用高度化



1. 系統電源の調整力向上

The maximum use of the traditional generation

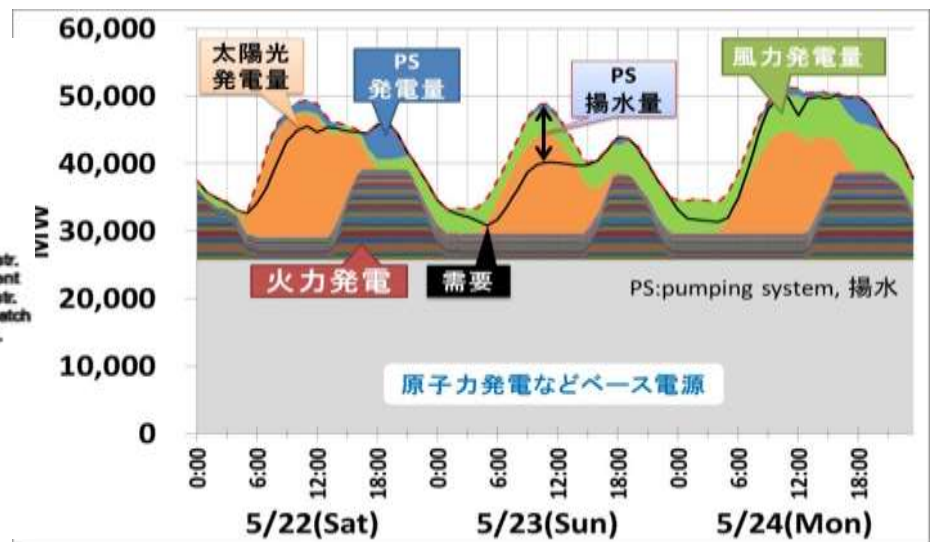
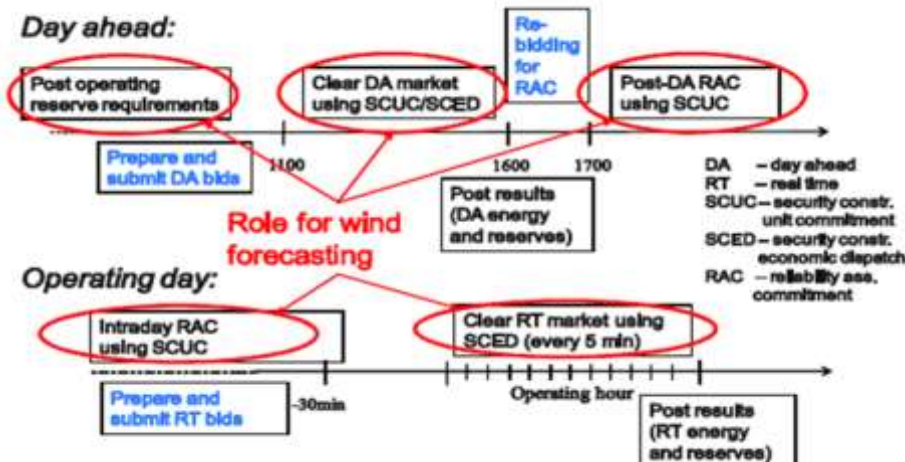
- There are various efforts to realize the maximum use of traditional gen..
- In 2018, IEA GIVAR published the report of Advanced Power Plant Flexibility Initiative, mainly focusing on thermal generation and CHP.
- The report shows the following policy options to realize the utilization of flexibility or system services from the traditional power plants:
 - Regulatory interventions for more flexible power plant operation
 - Economic incentives for more flexible power plant operation
 - To unlock investment in power plant flexibility – wholesale market systems and regulatory systems
- The report concludes the importance of the Policy approaches to enhance long-term planning processes including technical feasibility study and cost benefit analysis using production cost modelling.



IEA: A report of [Advanced Power Plant Flexibility Initiative](#) (2018)
[JP Translation](#) by [Thermal and Nuclear power Generation Society \(TENPES\)](#)

Flexibilityの向上: 電力システム運用の進化

- 太陽光発電や風力発電の発電量の変動により、発電機の起動停止計画を含めた、電力システムの運用は徐々に変化する。
- 発電量が大きく変動する可能性がある場合、その変動に追従するためにより多くの台数の発電機を運転が必要となり、安定運用の確保には、経済性の劣る発電機の追加起動と全体の部分負荷運転による効率低下により運用コスト増が発生する。
- 電源、需要、流通設備の個別の機能向上と、系統間連系、再生可能エネルギーの発電特性分析と予測を最適に組み合わせ、安定性、経済性、環境性を向上する、電力システムの運用と設備形成の進化が必要。



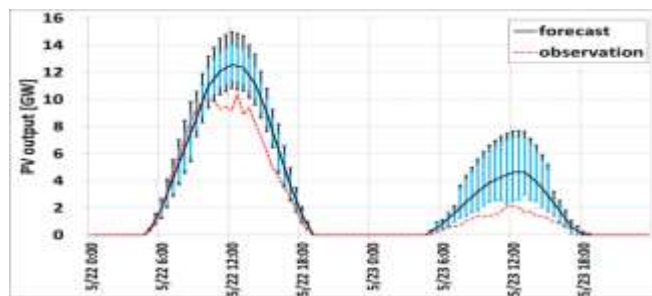
米国Midwest ISOの市場運用スケジュール
(風力発電予測を取り入れた前日と当日運用)

発電予測誤差を含めた東北-東京連系系統の
起動停止計画解析例

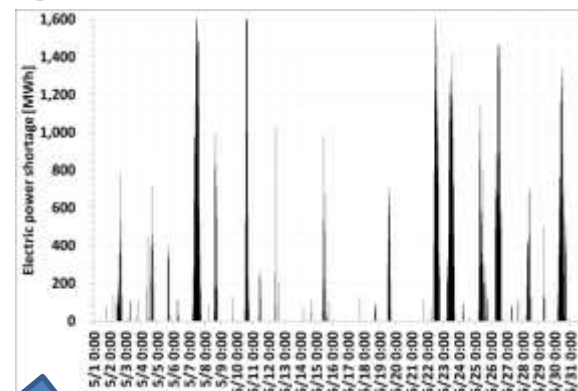
宇田川, 荻本, 福留, 池田: 再生可能エネルギー発電の予測誤差を考慮した電力需給計画手法の予備検討, エネ資学会第29回コンファレンス, 6-3 (2013)

不確定性と予測誤差に耐える運用への進化

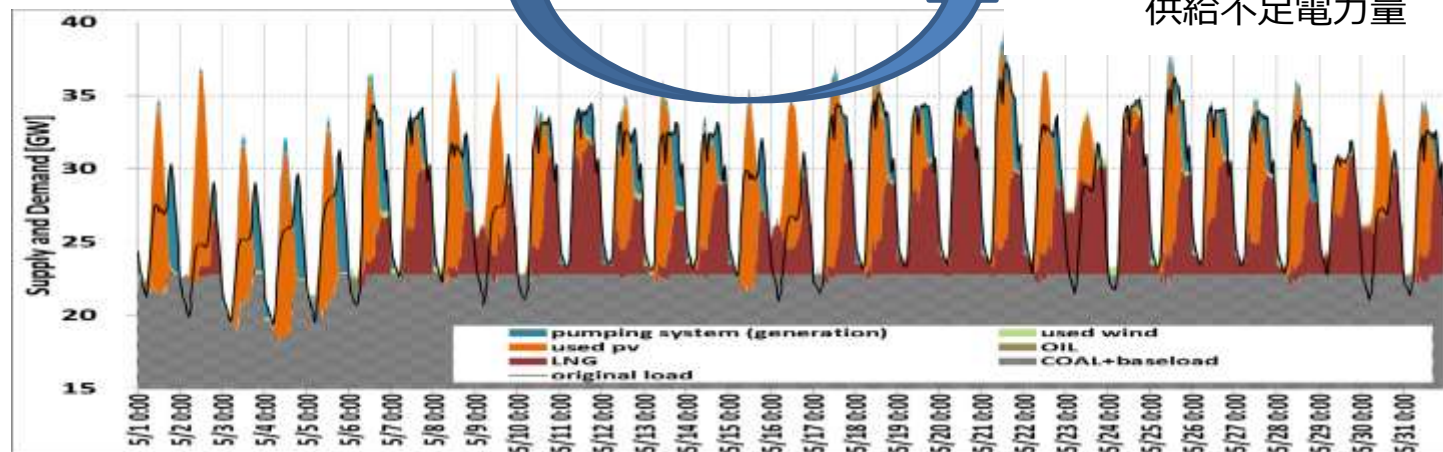
- 電力システムの需給運用について、発電出力予測を含めた計画 (Unit commitment) と、その誤差を反映したシミュレーションの実施により、出力予測誤差やランプの影響を評価する。



発電予測と誤差 (太陽光発電)



供給不足電力量

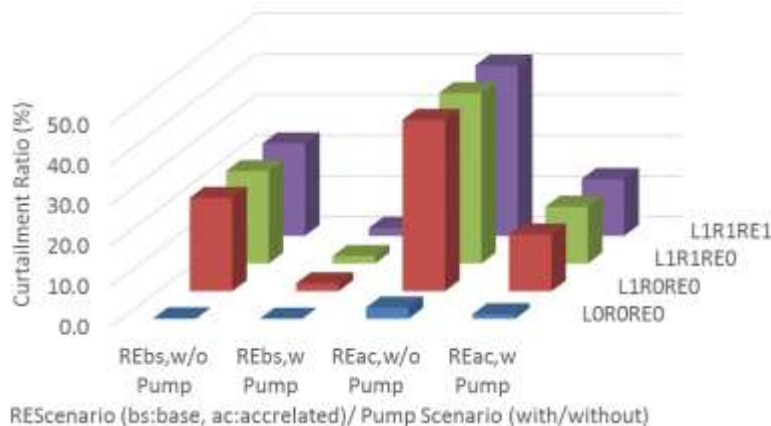


Unit commitmentにもとづくシミュレーション

宇田川佑介, 荻本和彦, 池上貴志, 大関崇, 福留潔: 太陽光発電の予測誤差が需給運用と発電コストに与える影響, 電気学会新エネルギー・環境・メタボリズム社会・環境システム合同研究会資料, FTE-13-60, MES-13-16, pp85-95 (2013)

水力発電からの柔軟性

- 火力に加え、水力発電は、小さい最低発電出力、短い起動時間、大きな出力変化速度といった特徴を活用して柔軟性を提供する。
- 揚水発電は、約10時間分のエネルギー貯蔵という特性により、低炭素化された電力システム運用におけるシステムの柔軟性をさらに向上する。
- 水力発電から持続可能な形で柔軟性を確保するためには、市場においてその貢献をマネタイズすることが必要。



Case	LOROREO		L1ROREO		L1R1REO		L1R1RE1	
	w/o	w	w/o	W	w/o	W	w/o	W
Pump								
PV64	4,757	24.3	5125	314.8	5,133	325.2	5,134	323.4
PV103	3,941	59.3	4,800	637.8	4,810	643.4	4,808	645.8
PV64	-	-0.1	-	-6.1	-	-5.8	-	-5.9
PV103	-	-9.5	-	-15.5	-	-15.2	-	-14.8

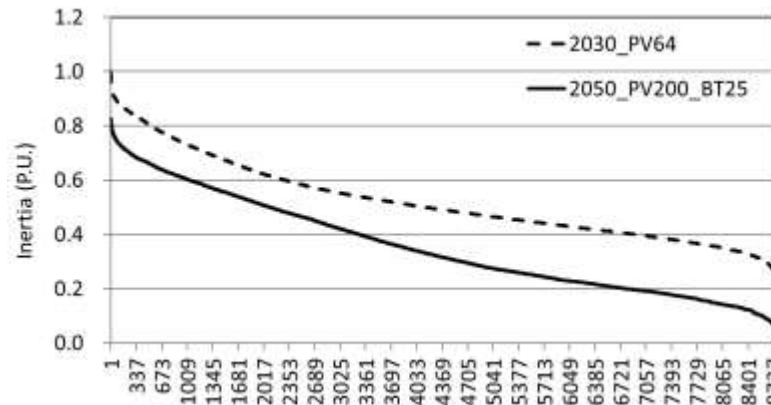
PVと太陽光発電の出力抑制割合 (%)

運用費の合計、その低減と揚水の収入 (10億円/念)

Cases; L;LFC制約, R:Ramp 制約, RE: Ramp 調整力融通

New challenges

- パワエレクトロニクス機器であるインバータはPVや風力そして需要側機器のインターフェイスとして大量に導入され、将来の電力システムで大きな割合を占める。
- インバータが電力需給で大きな割合を占めるようになると、同期機の割合が減少し、新たな課題が発生する。
 - 交流周波数の安定化に寄与するシステム慣性の低下
 - システムの動的な安定性、系統事故後の交流周波数の瞬間的な低下の防止に必要な同期化力の低下
 - システムの保護体系の基本となっている事故電流の低下
 - その他



日本におけるシステム慣性の年間持続曲線の比較 (2030年と2050年)

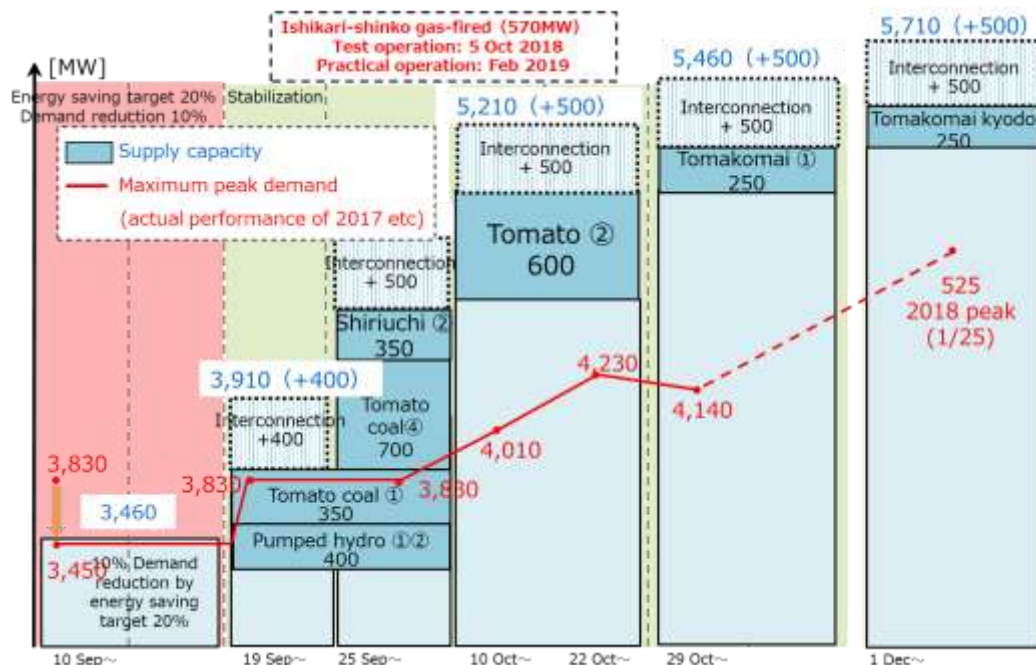
荻本和彦, 岩船由美子, 占部千由, 斉藤哲夫, 片岡和人, 東仁, 磯永彰: 超長期の電力需給解析に関する動向と新たなモデル開発の必要性、エネルギー資源学会コンファレンスJSER Conference,

新たな課題に対する追加の価値

- 火力発電に加え、水力発電は、火力に加え、水力発電は、小さい最低発電出力、短い起動時間、大きな出力変化速度といった特徴を活用して様々な時間領域のシステムサービス、即ちアンシラリーサービスを提供する。
- 水力発電と揚水発電は、顕在化する課題に対し、システム慣性、同期化力、事故電流の供給などを行うことができる。
- 揚水発電が再エネの発電出力が大きく揚水運転をしている状況では、揚水発電の価値は火力発電の価値より高い価値を提供している。
- 可変速型の揚水発電は、揚水入力を変化させることができ、揚水運転中に周波数制御の調整力を提供することができる。
- “hydraulic short-circuit type”の揚水発電は、揚水と発電において異なる運転特性を持つ。
- 将来の電力システムの運用の変化において、水力発電の価値を評価してその活用を図ることが望ましい。

大規模災害時の貢献

- 2018年の北海道の地震後の供給力の回復においては、水力発電、揚水発電はブラックアウトスタートとその後需給の安定化に大きく貢献した。
- 2011年の東日本大震災後の東京での輪番停電の期間においては、水力と揚水は、エネルギー供給と短時間で起動可能な予備力として、限られた火力の運用を支えた。

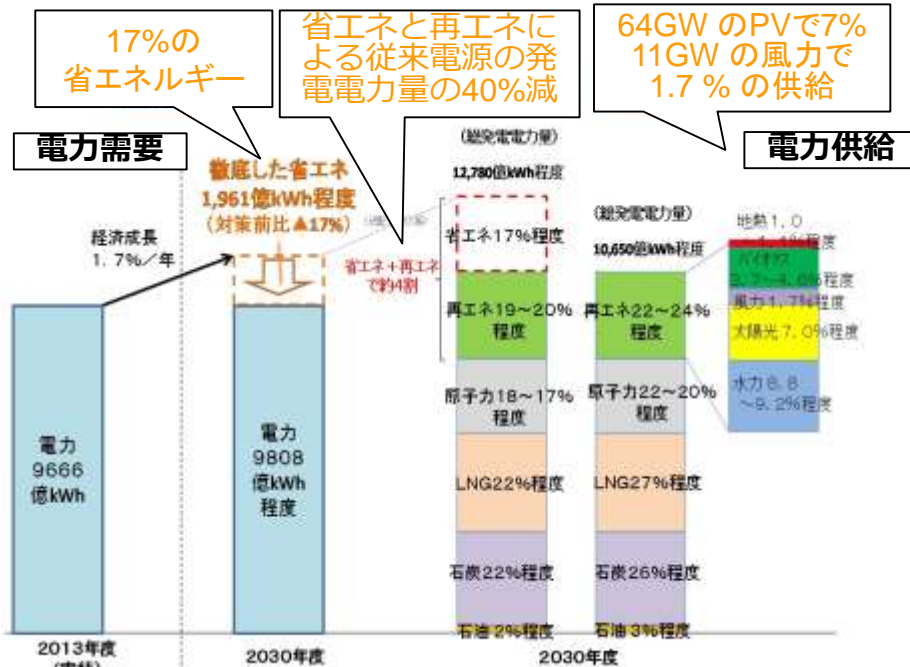


出典:- METI, 第17回系統ワーキンググループ (2018年9月)

http://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/shin_energy/keito_wg/pdf/017_06_00.pdf

長期計画の再構築が必要

- 2018年に日本のエネルギー基本計画が改訂され、再エネの大量導入を含めた3E+S (Energy security, Economy) の実現の考え方が示された。
- 長期需給見通しは2015年のものが踏襲された。
- 2018年11月、ECは”strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy by 2050 – A Clean Planet for all”を発表した。
- この戦略は、欧州が、変化において社会の公正を確保しつつ気候影響の中立化への現実的な技術解決策への投資と、市民のエンパワーリングにより気候影響の中立化をリードする道筋を示すとされている。



METI: Long-term Energy Demand and Supply Outlook (2015)

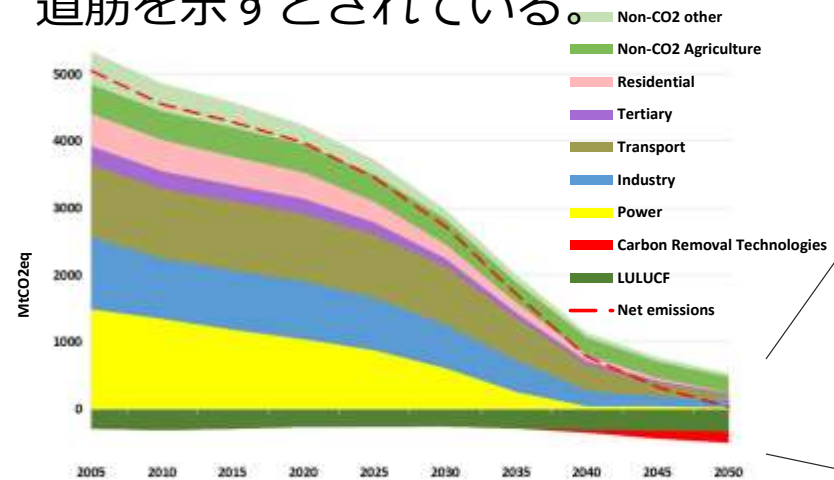


Fig. 6. 1.5°CシナリオにおけるGHG排出削減経路
 出典: EC: A Clean Planet for All, COM(2018)773
https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/docs/pages/com_2018_733_en.pdf

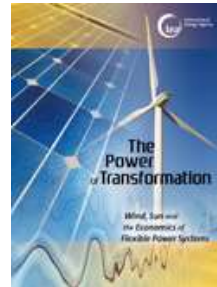
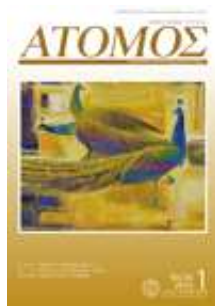
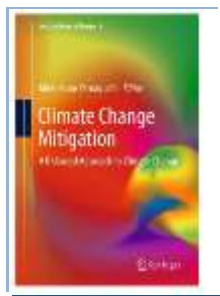
結論：水力と揚水の価値の実現

- 日本では、水力発電と揚水発電の以下の価値が認識され、あるいはさらに認識されつつある。
 - 出力が変動する再エネの大量導入の下での、需給運用の安定性の向上
 - 再エネの必要となる出力抑制の低減と火力のより安定な運用による需給運用の経済性の向上
 - 地震や、大雨や台風などの極限事象の際の安定供給の確保
- 水力発電や揚水発電の活用は、今後の持続可能な電力システムへの進化の必須条件である。
- 水力発電や揚水発電の価値を実現するためには、運用の制約を取り除き需給運用を向上し、投資と運用の段階で得られる価値にたいしてインセンティブを与えることが不可欠である。

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://nippon.com/ja/in-depth/a00302/>

「シナリオ選択のインパクト」を、2012年 Springer 発行の「Climate Change Mitigation」とその和訳である2013.4丸善訳である「実現可能な気候変動対策」に掲載しました。
<http://www.springer.com/us/book/9781447142270>

「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1,2,5月号に連載しました。
<http://www.aesj.or.jp/atomos/tac-hiyomi/mihon.html>

IEA “The Power of Transformation”を監訳し、NEDOより公開しました。
http://www.nedo.go.jp/library/denryoku_henkaku.html

IEA PVPSの報告書“Power System Operation and Augmentation Planning with PV Integration”をまとめました
<http://www.iea-pvps.org/index.php?id=322>

IEA “Re-powering Markets”を翻訳し、NEDOより公開しました。
http://www.nedo.go.jp/library/repowering_markets.html

IEA “System Integration of Renewables”を翻訳し、NEDOより公開しました。
http://www.nedo.go.jp/library/repowering_markets.html