

再エネ大量導入時代の電力システム

2016年2月24日(水)

電気学会公開シンポジウム

「電気エネルギーの未来を考える」

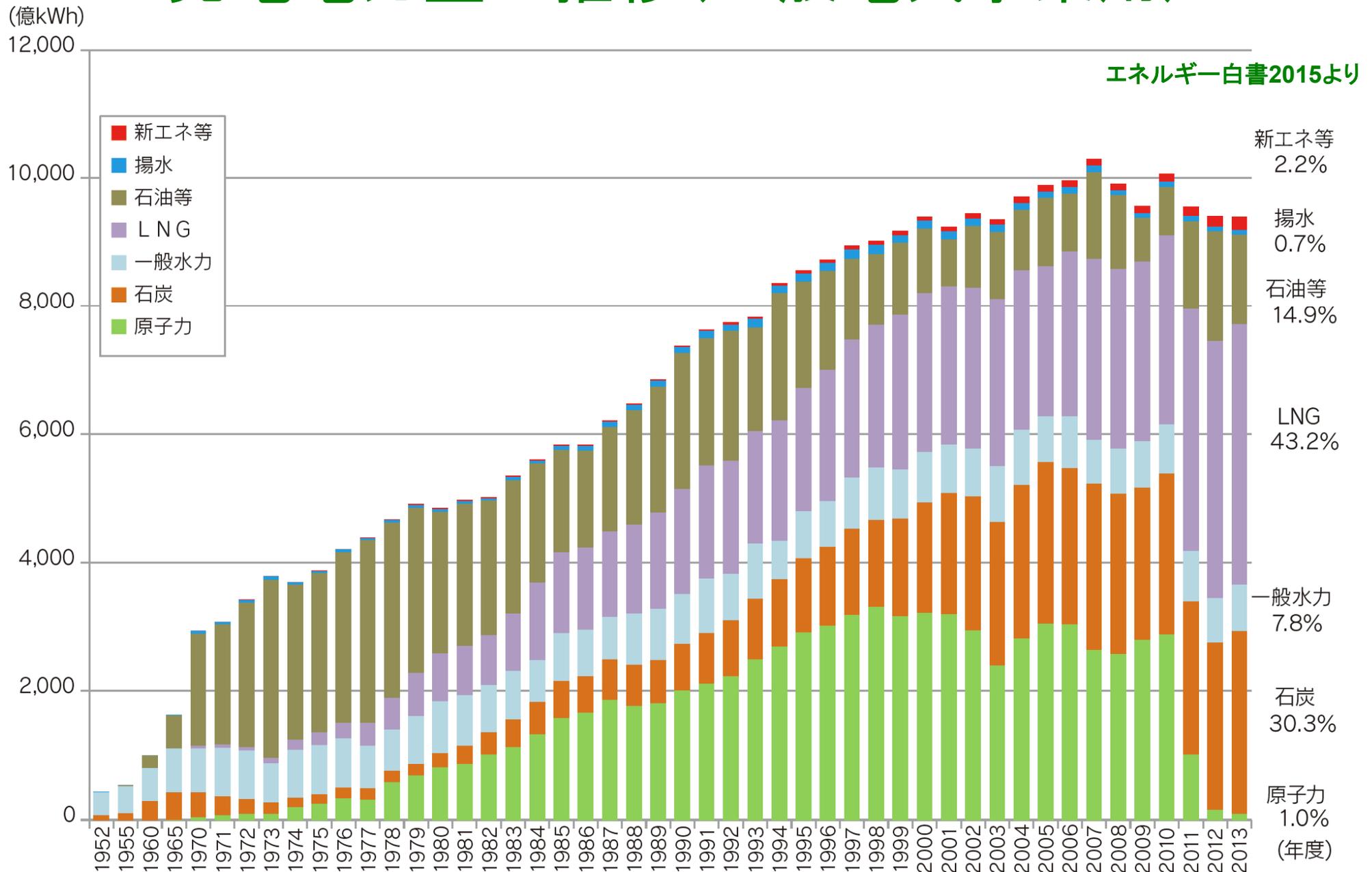
名古屋大学未来材料・システム研究所

加藤 丈佳

本日の内容

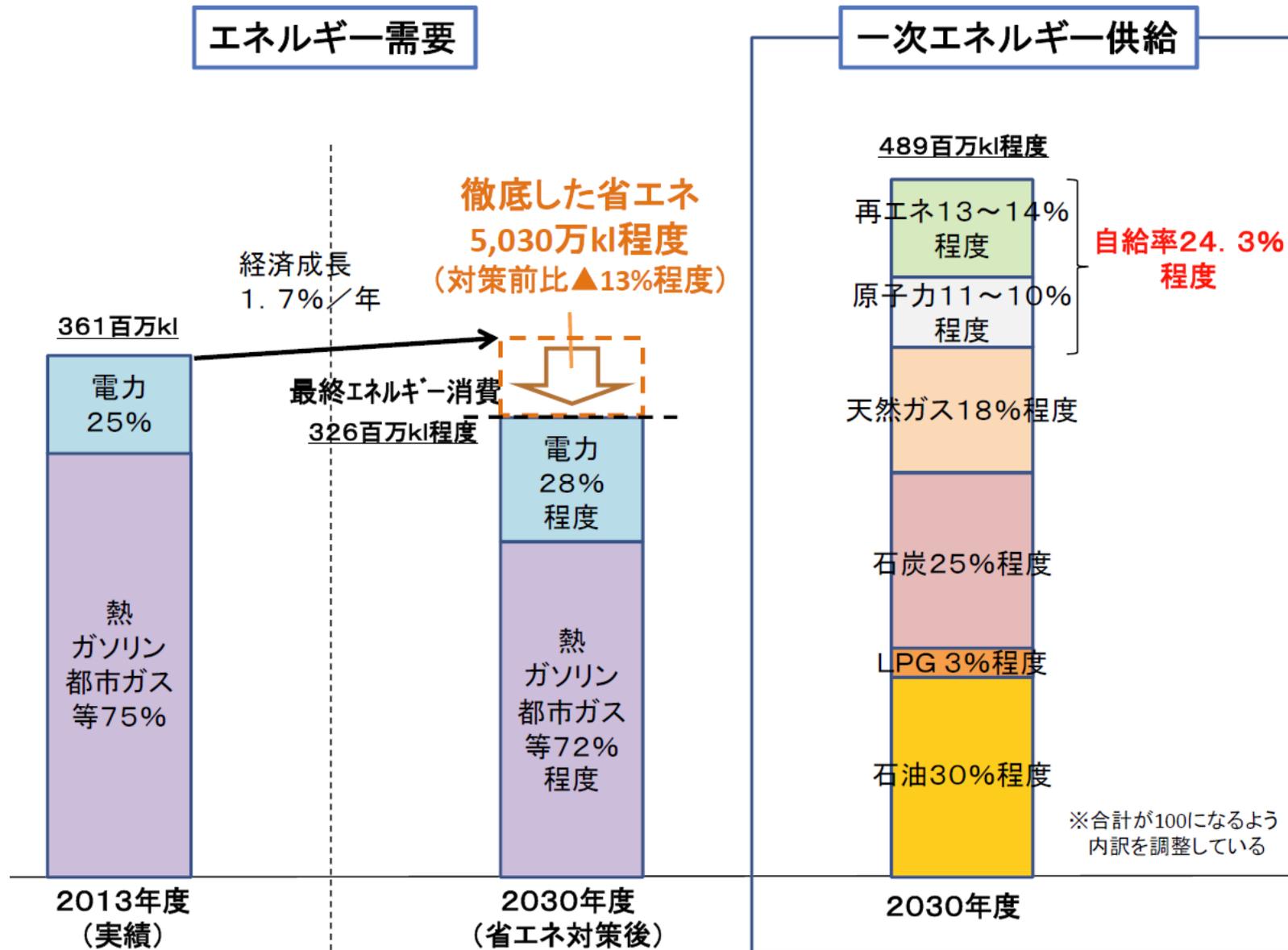
- 電力・エネルギー需給の現状と計画
- 再エネ発電(太陽光・風力)の導入状況
- 再エネ発電大量導入時の残余負荷変動特性
- 太陽光出力予測のニーズと開発状況
- 電力市場における再エネ発電

発電電力量の推移(一般電気事業用)



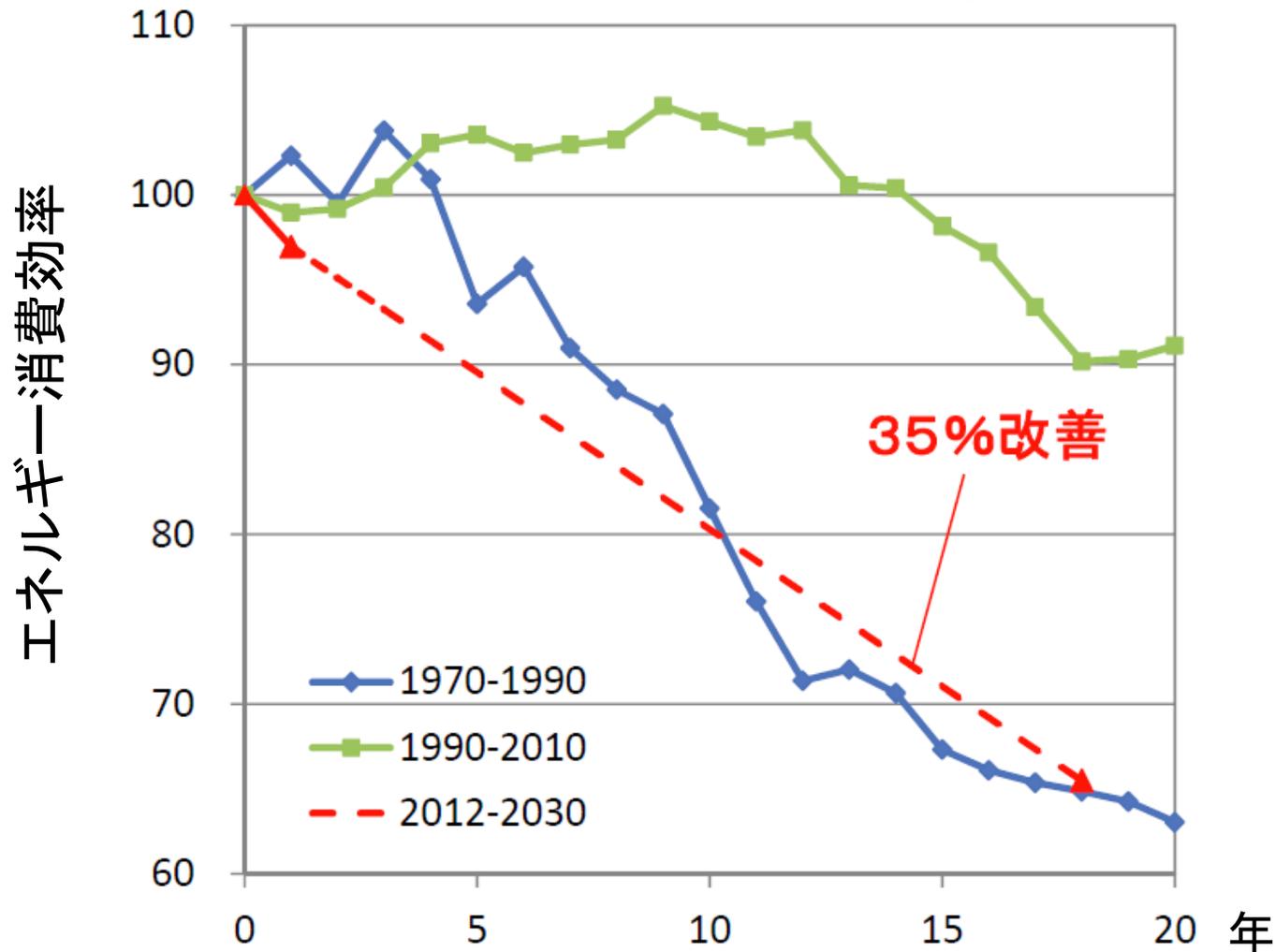
(注) 1971年度までは沖縄電力を除く。 出典：資源エネルギー庁「電源開発の概要」、「電力供給計画の概要」を基に作成

エネルギー基本計画における エネルギー需要・一次エネルギー供給

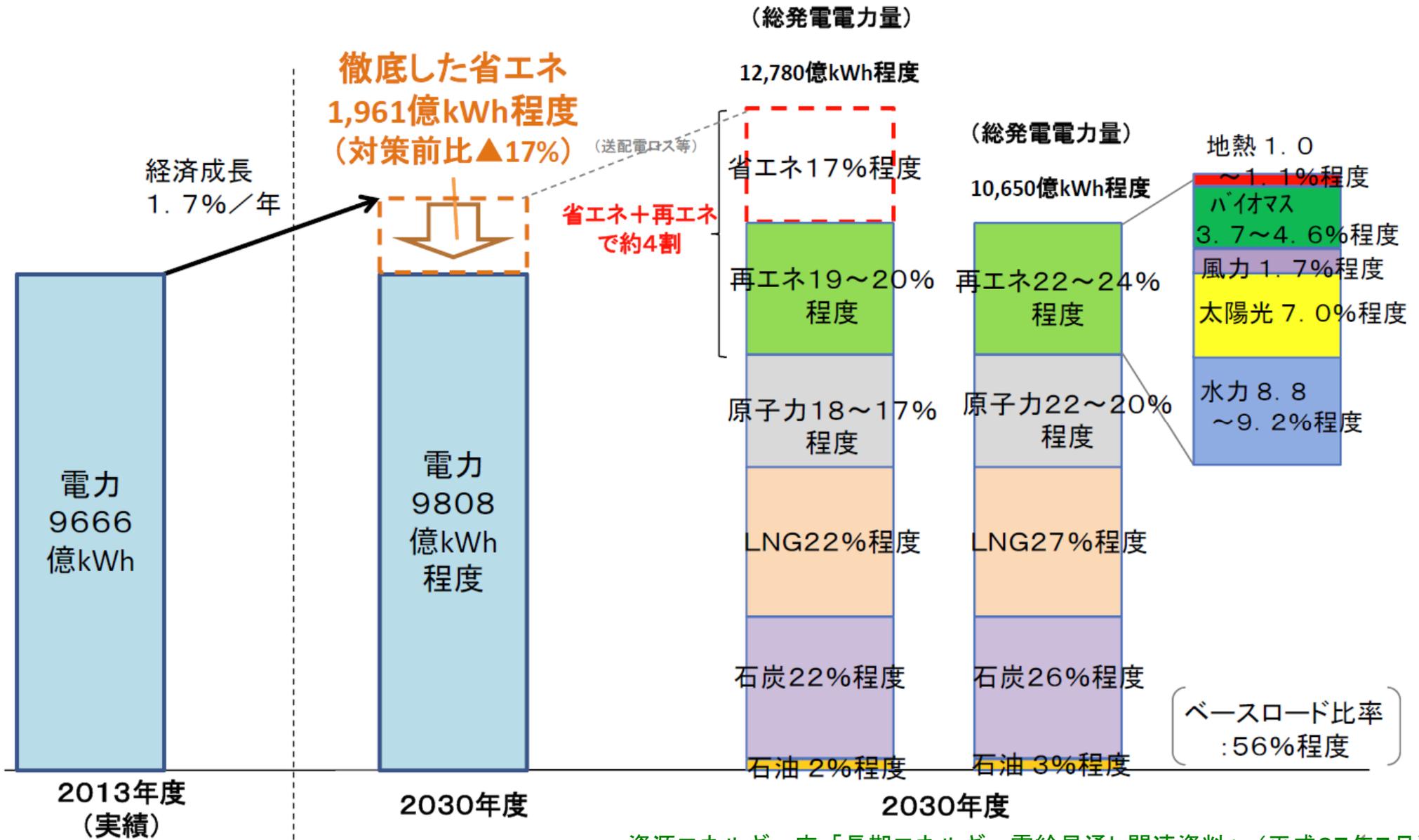


エネルギー基本計画における エネルギー消費効率改善の想定

$$\text{エネルギー消費効率} = \frac{\text{最終エネルギー消費量}}{\text{実質GDP}}$$



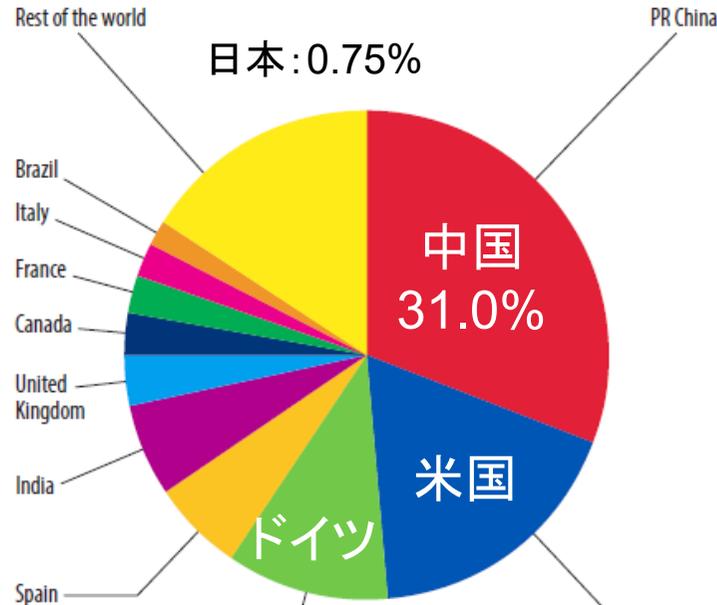
エネルギー基本計画における 電力需要・電源構成



風力発電の国別導入容量

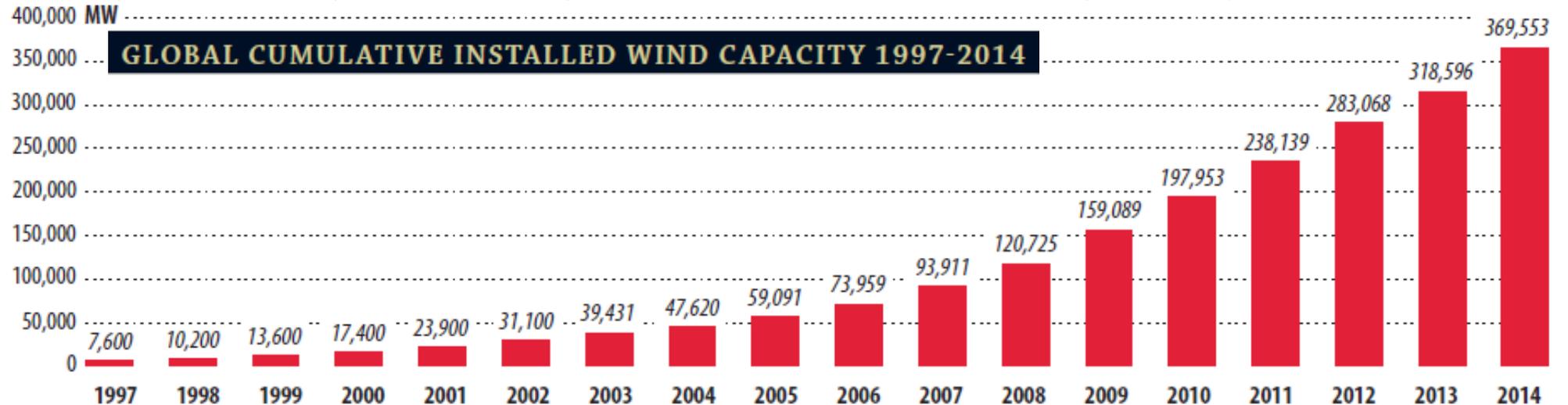
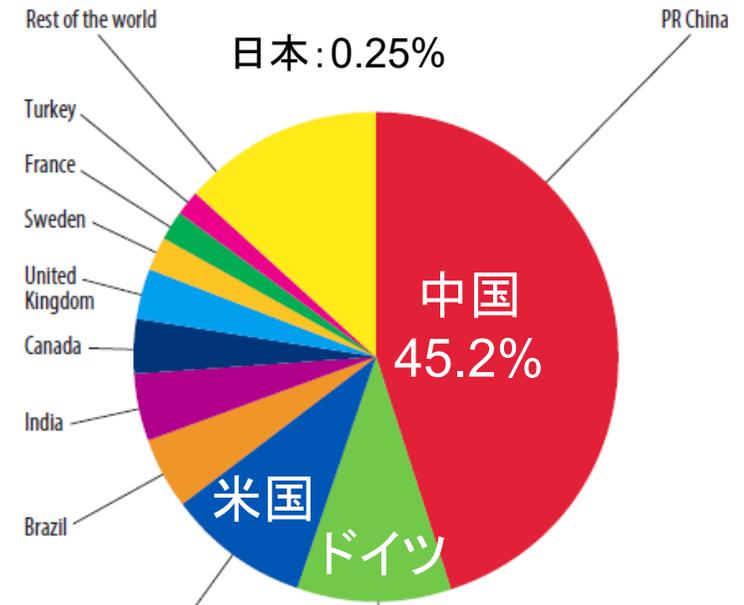
累積導入量: 370 GW

TOP 10 CUMULATIVE CAPACITY DEC 2014



2014年導入量: 51 GW

TOP 10 NEW INSTALLED CAPACITY JAN-DEC 2014



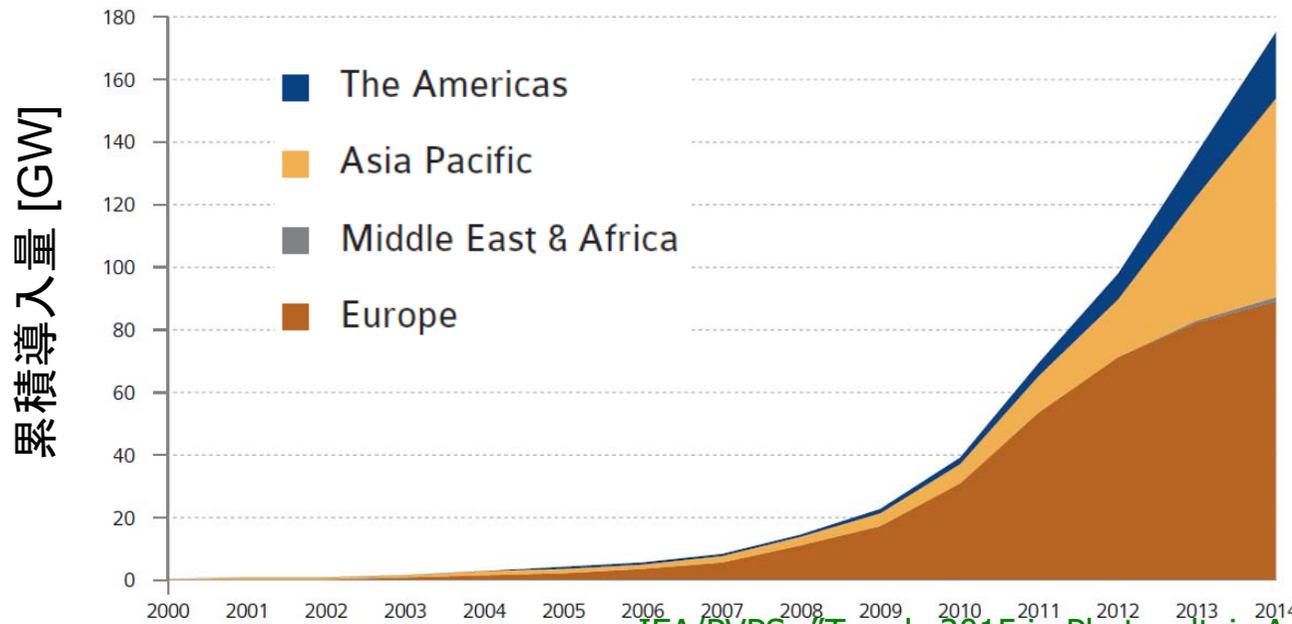
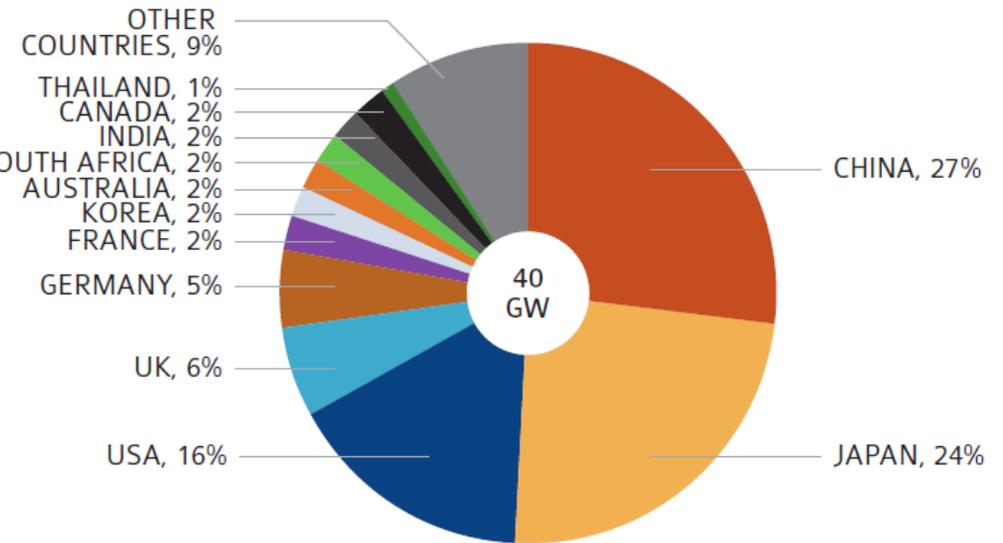
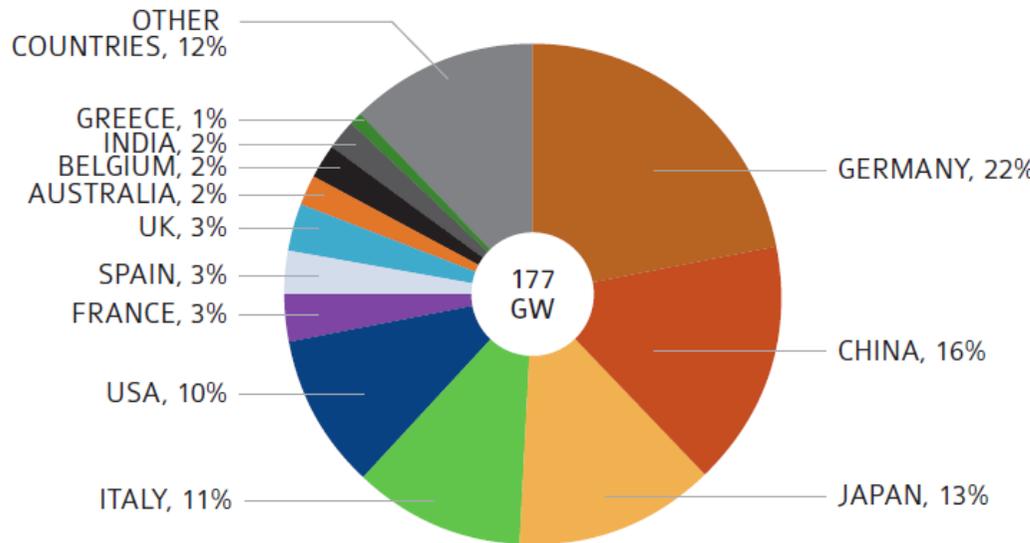
GLOBAL CUMULATIVE INSTALLED WIND CAPACITY 1997-2014

Source: GWEC "Global Wind Report, annual market update 2014"

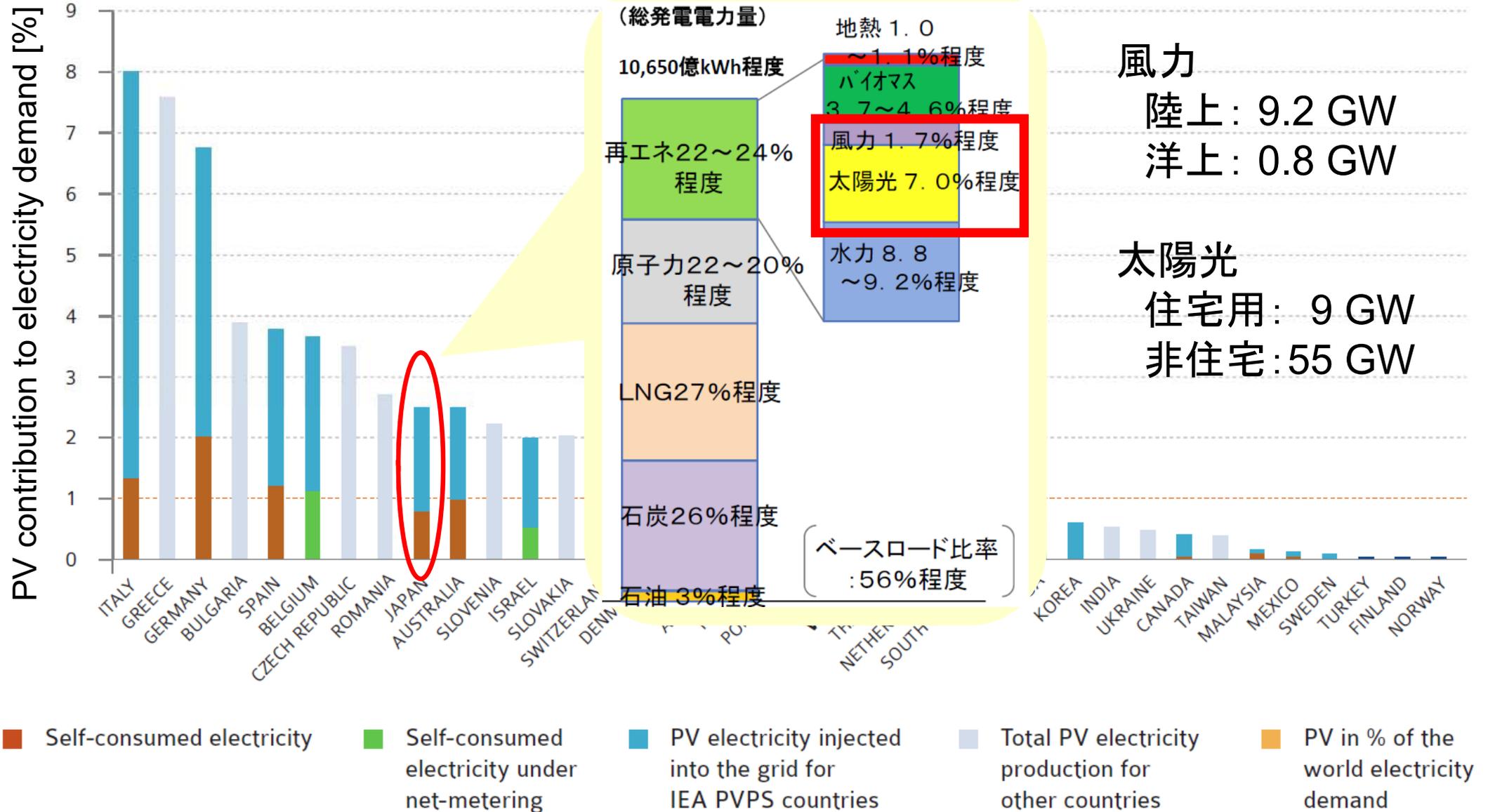
各国の太陽光発電導入容量

累積導入量: 177 GW

2014年導入量: 40 GW



各国における太陽光発電による電力供給割合 [%]

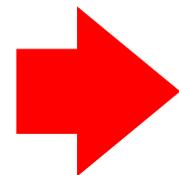


再生可能エネルギーの固定価格買取制度 (FIT)

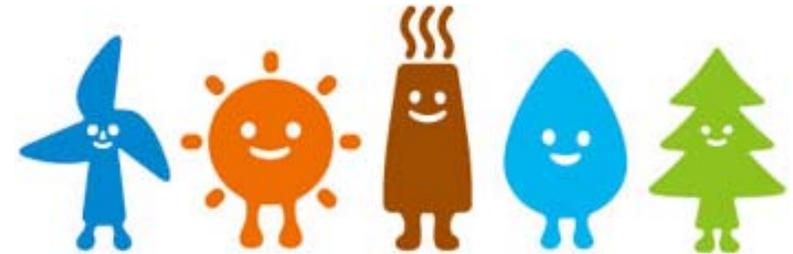
従来の制度



	< 10kW	10kW – 500kW	500kW <
	余剰電力 42円/kWh		
	発電電力 40円/kWh		
 発電事業用 (自家消費なし)			



2012年7月からの制度



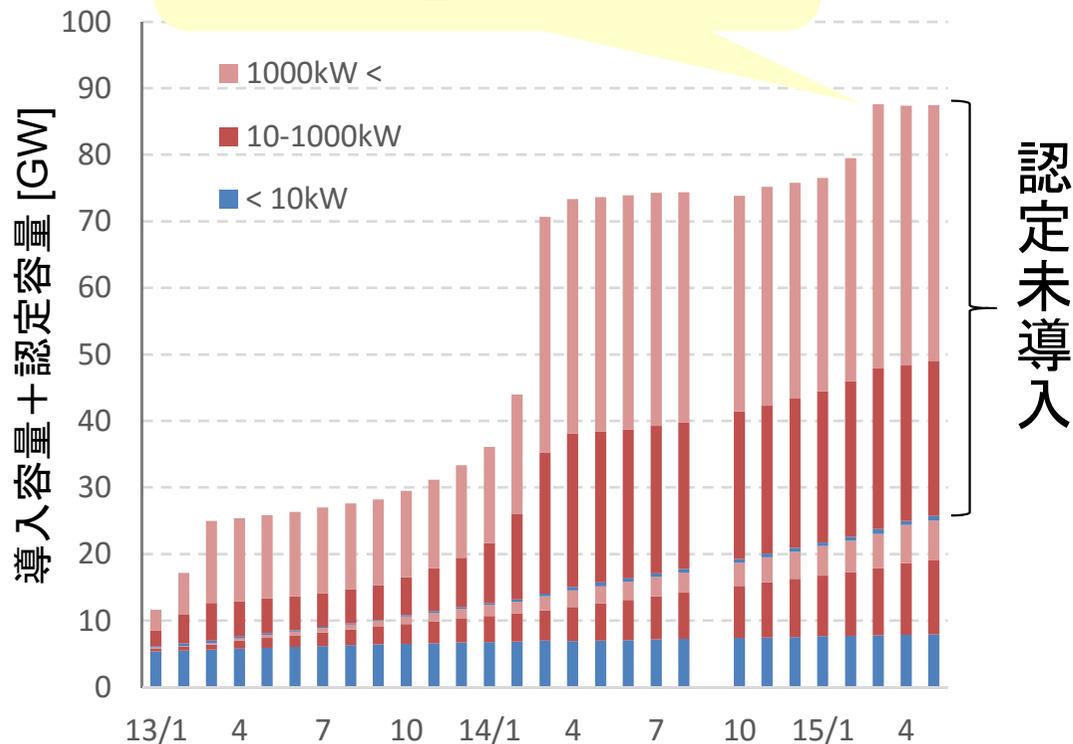
	< 10kW	10kW – 500kW	500kW <
	調達期間 10年	調達期間 20年	
	余剰電力 42円/kWh ↓ 33円/kWh (H27/4)	発電電力 40円/kWh + 税金 ↓ 27円/kWh + 税金 (H27/4)	
 発電事業用 (自家消費なし)			

- 上記の単価は太陽光発電の場合
- 単価は毎年見直し(削減)

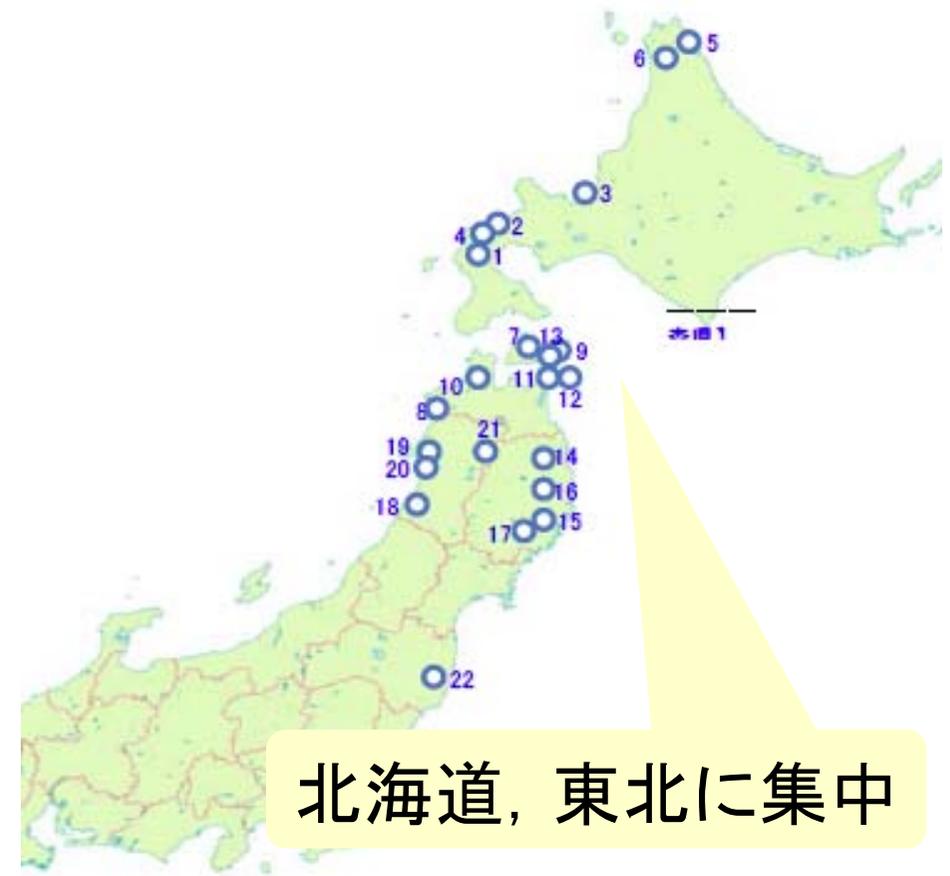
FIT導入後の太陽光発電・風力発電の導入状況

太陽光発電の導入・認定容量

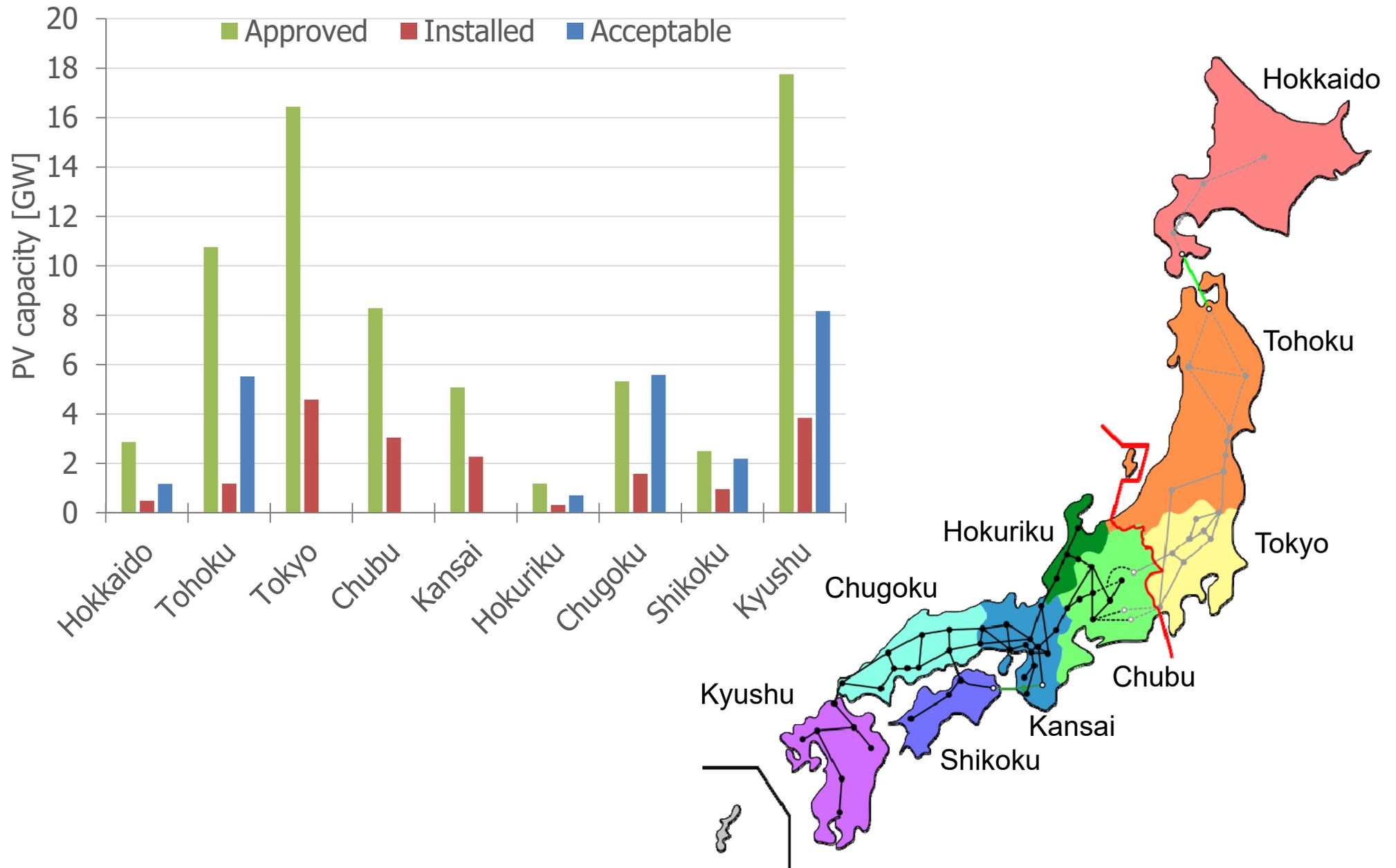
2030年の導入目標
64GWを大幅超過



環境アセス中の風力発電



各電力会社における太陽光発電の認定容量



再エネ発電の意義と課題

<意義>

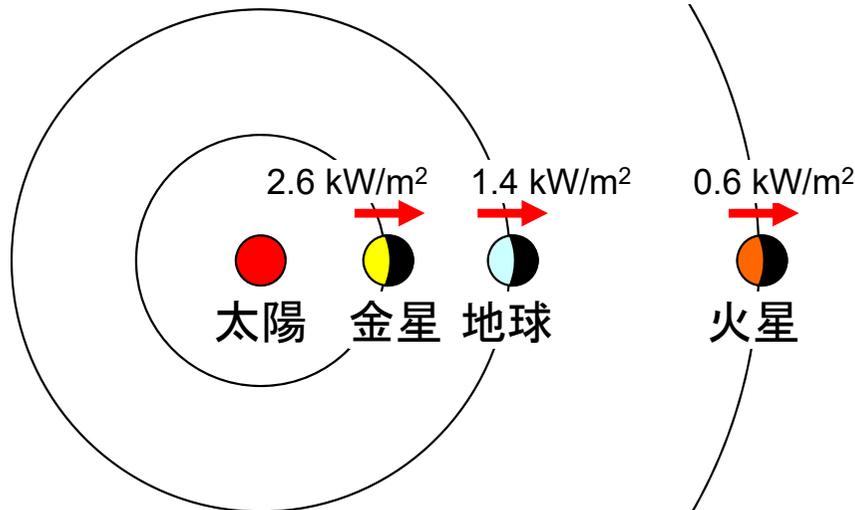
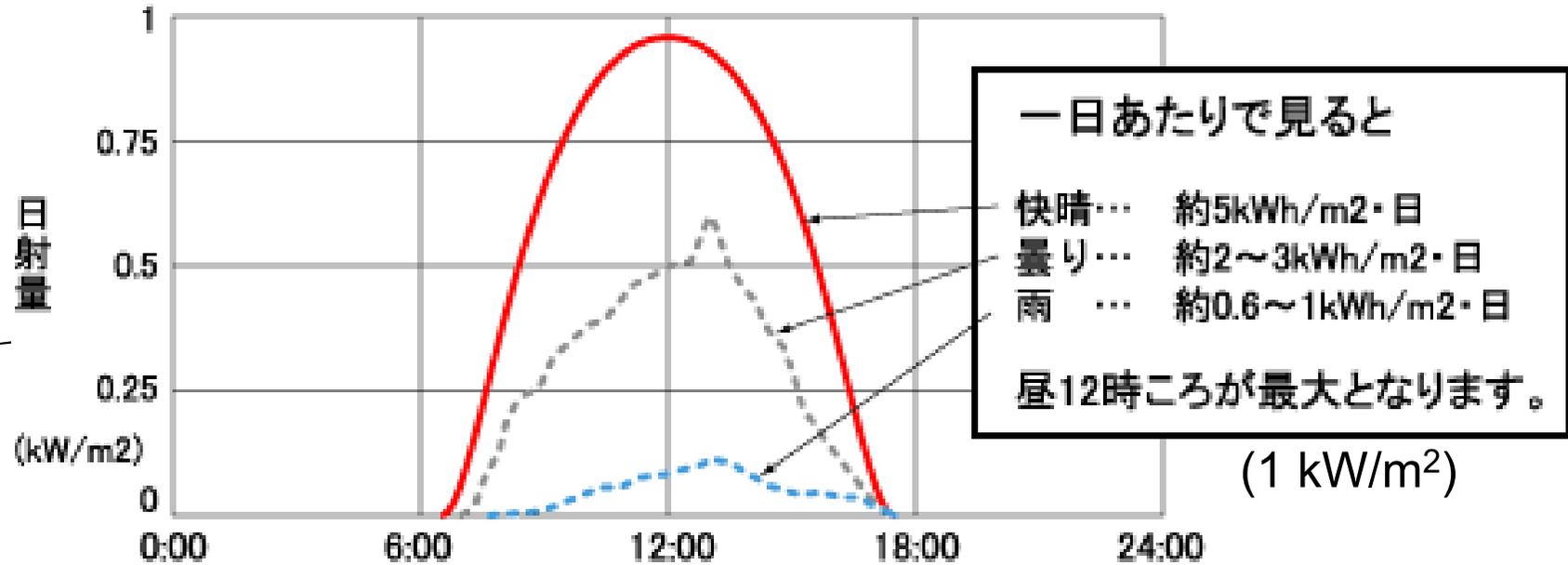
- CO₂排出削減
- エネルギー自給率向上
- 大災害時の電力供給源
- 新規産業、雇用の創出
など

<課題>

- 出力変動への対応
 - ◆ 予測の高精度化・高信頼化
 - ◆ 火力機・揚水機の柔軟性向上
 - ◆ 広域連系の強化
 - ◆ デマンドレスポンス
 - ◆ 余剰時の再エネ出力抑制
- FIT買取費用の増加
- 再エネ設備コスト削減
 - ◆ 長期的な設備容量の維持
- 低稼働率の火力機の維持
など

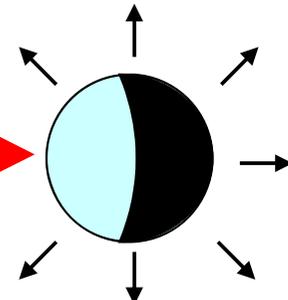
日射強度

地表面の日射強度 => 最大 1 kW/m²



太陽定数:

1.367 kW/m²



地球への入射パワー:

太陽定数 × 正射影面積 = 174000 TW
 (世界の1秒あたりのエネルギー消費の10000倍)

太陽光発電は1年間でどのぐらい発電するか？

- 日射が最大(1 kW/m²)のとき1 kWの発電に必要な面積:
$$1 \text{ kW} \div (1 \text{ kW/m}^2 \times 12\% \times 80\%) = 10\text{m}^2$$

(モジュール効率) (システム効率)
- 年間負荷率: 13%程度(日本の場合)
(= 発電電力量 / (設備容量 × 年間の時間数))
 - ◆ 国内であれば, 設置場所による年負荷率の差は風力と比較して小さい
- 1 kWの設備の年間発電電力量: 1140 kWh程度
 - ◆ 一世帯あたりの電力消費量: 5,315 kWh/年(太陽光発電協会試算)
 - ◆ 4.7 kWの設備の年間発電電力量は一世帯の電力消費量と概ね等しい

メガソーラの年間発電電力量 (数MW規模の太陽光発電所)

1MW=1,000kW=1,000,000W



メガソーラ武豊(7.5MW)

武豊火力(燃料:石油)

1号機 1966年(2002年廃止)

2~4号機 1972年(合計112.5万kW)

=> 1070 MWの石炭火力に移行
(2021年運開予定)

8.5GWhは、新しい武豊石炭火力の
約8時間分の発電電力量に対応

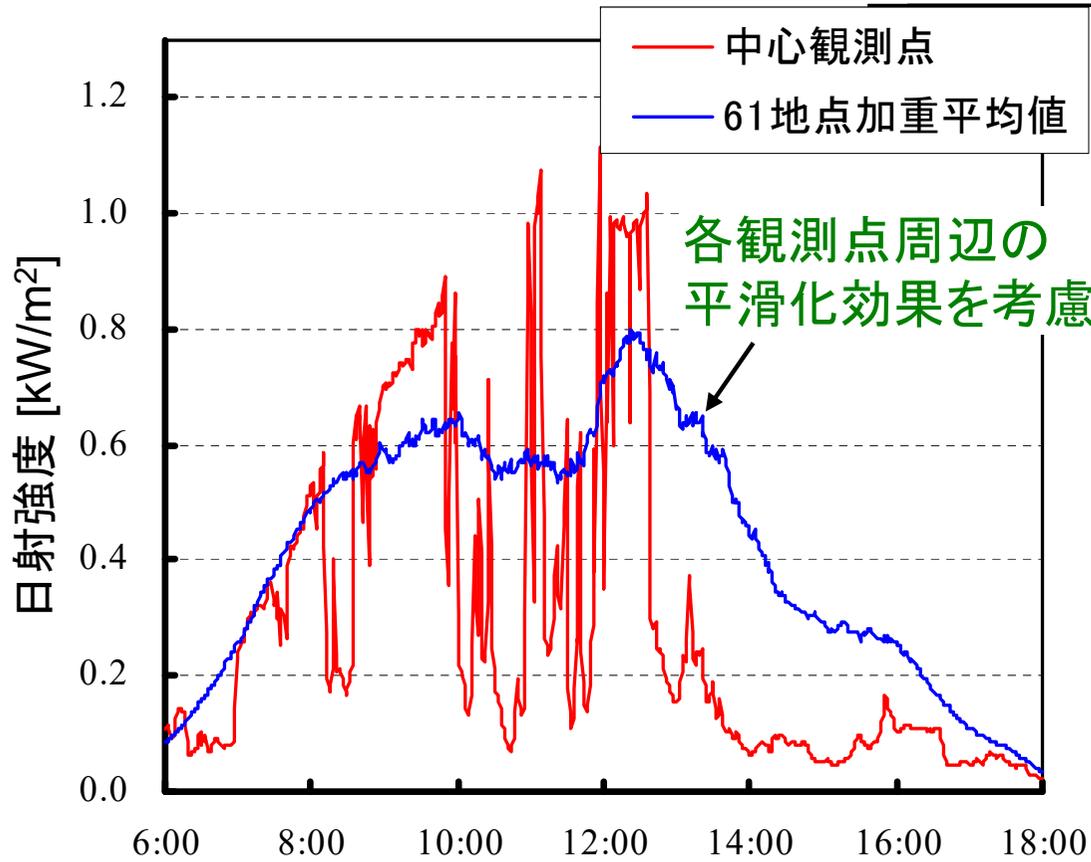
逆に、
新しい武豊石炭火力が年負荷率70%
程度で運転する場合の電力量を得る
には、メガソーラ武豊が800個必要
(最大電力:6000MW)

年間発電電力量

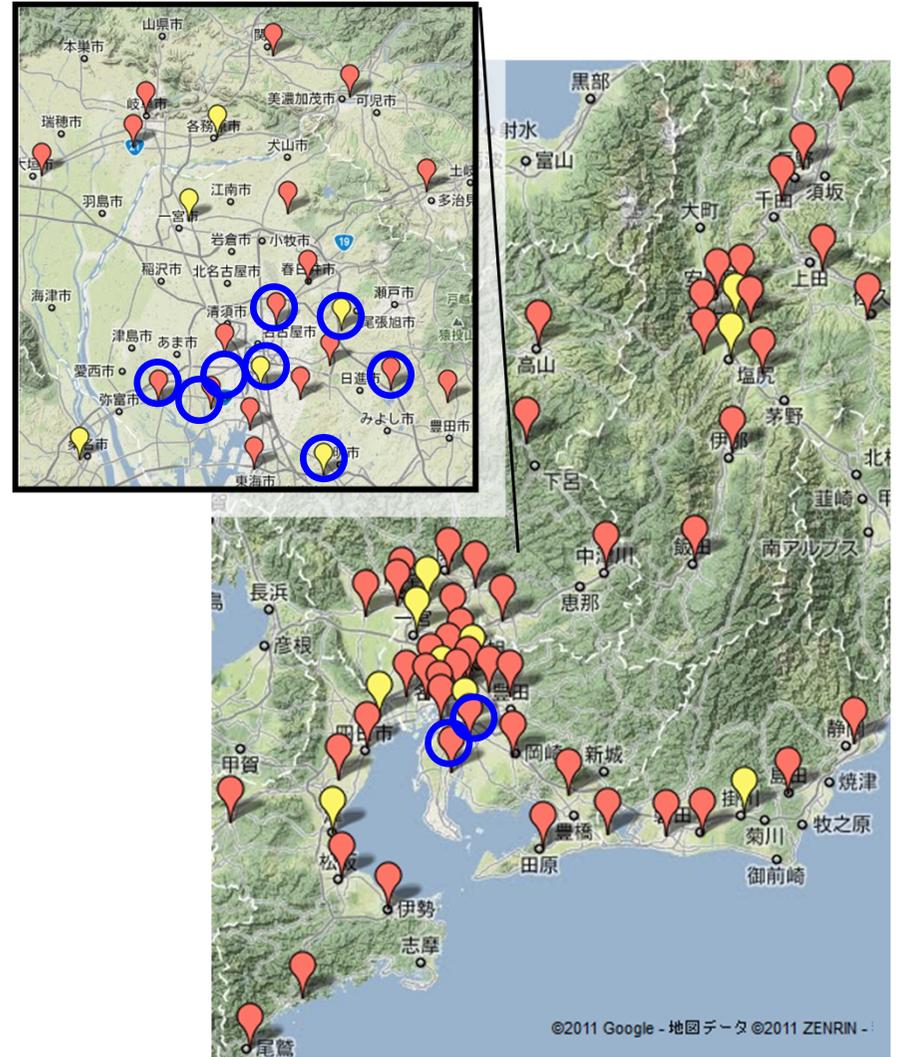
$$7.5 \text{ MW} \times (8760 \text{ 時間} \times 0.13) = 8.5 \text{ GWh}$$

開発面積: 14万m² => 約0.05 kW/m²
(50 MW/km²)

太陽光発電出力の特徴

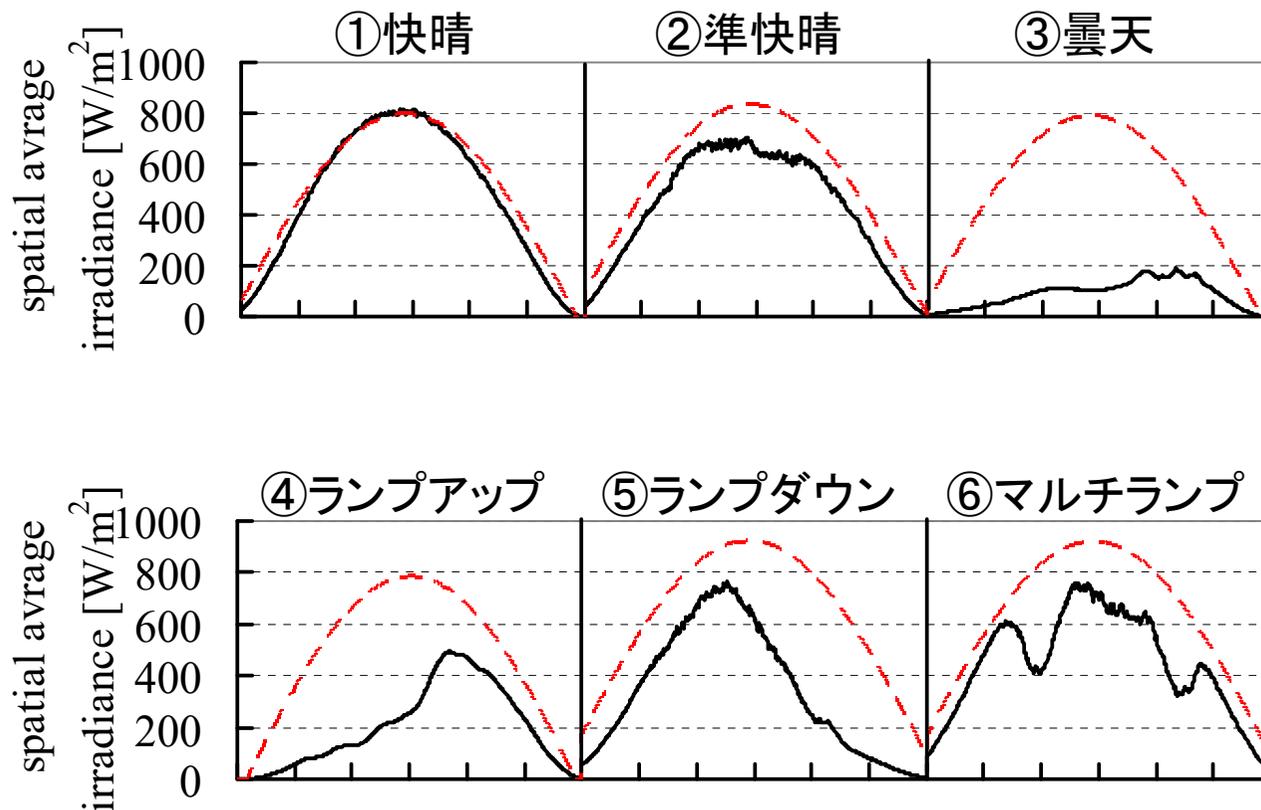


平滑化効果により、
短周期変動は大幅に減少

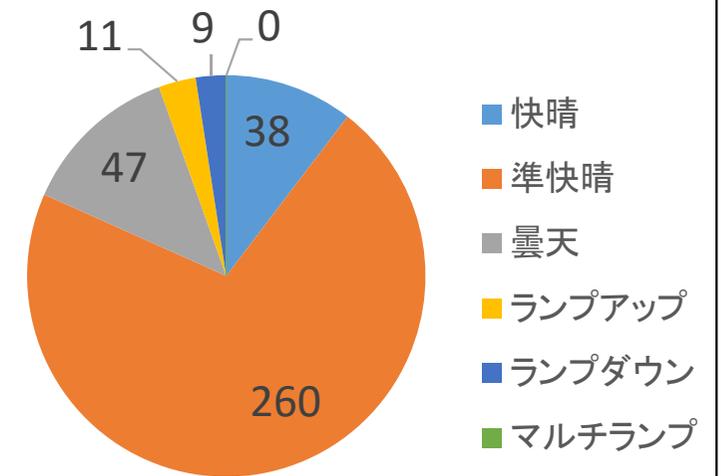


空間平均日射変動の分類

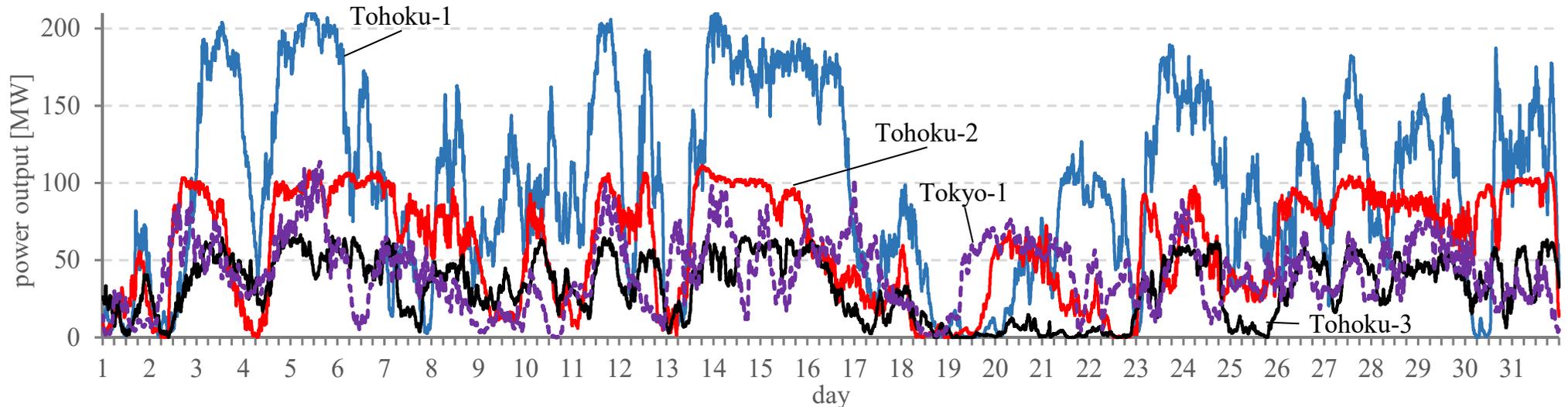
— 空間平均日射強度 - - - - 快晴時日射強度



2013年中部エリアの場合

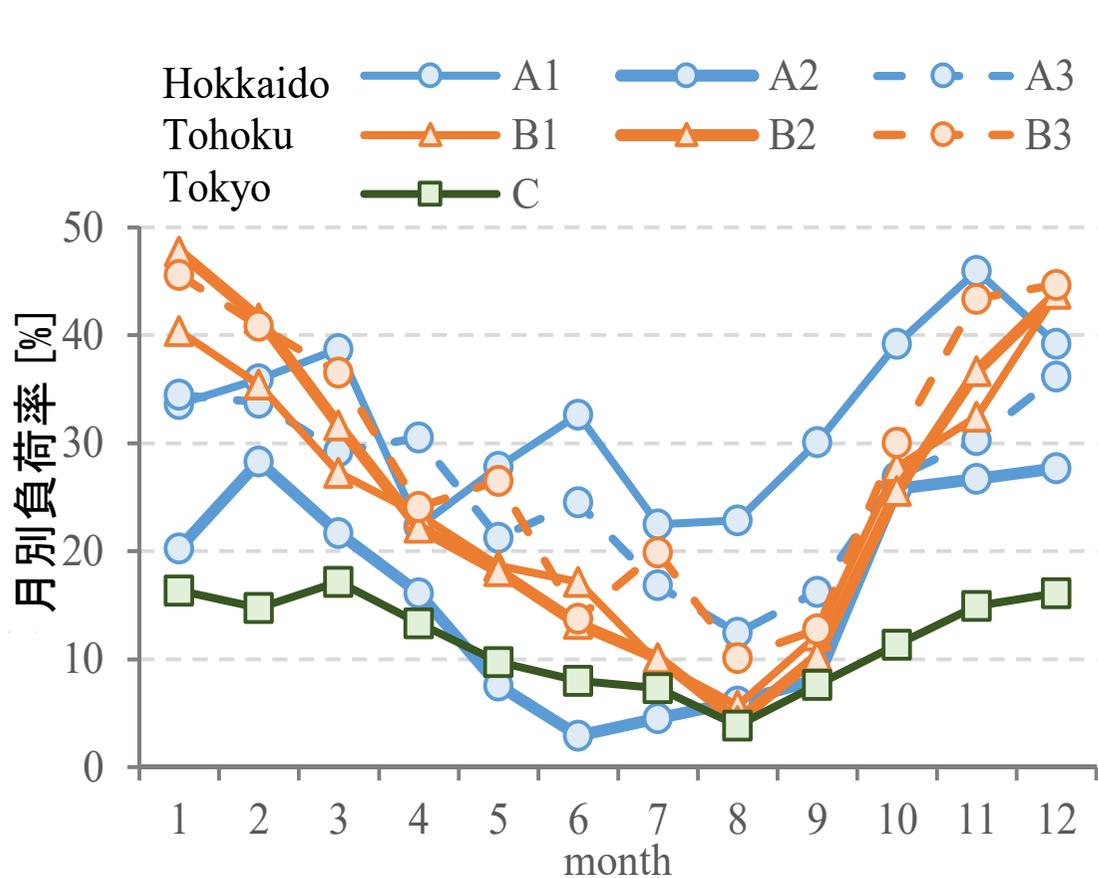


風力発電出力の特徴

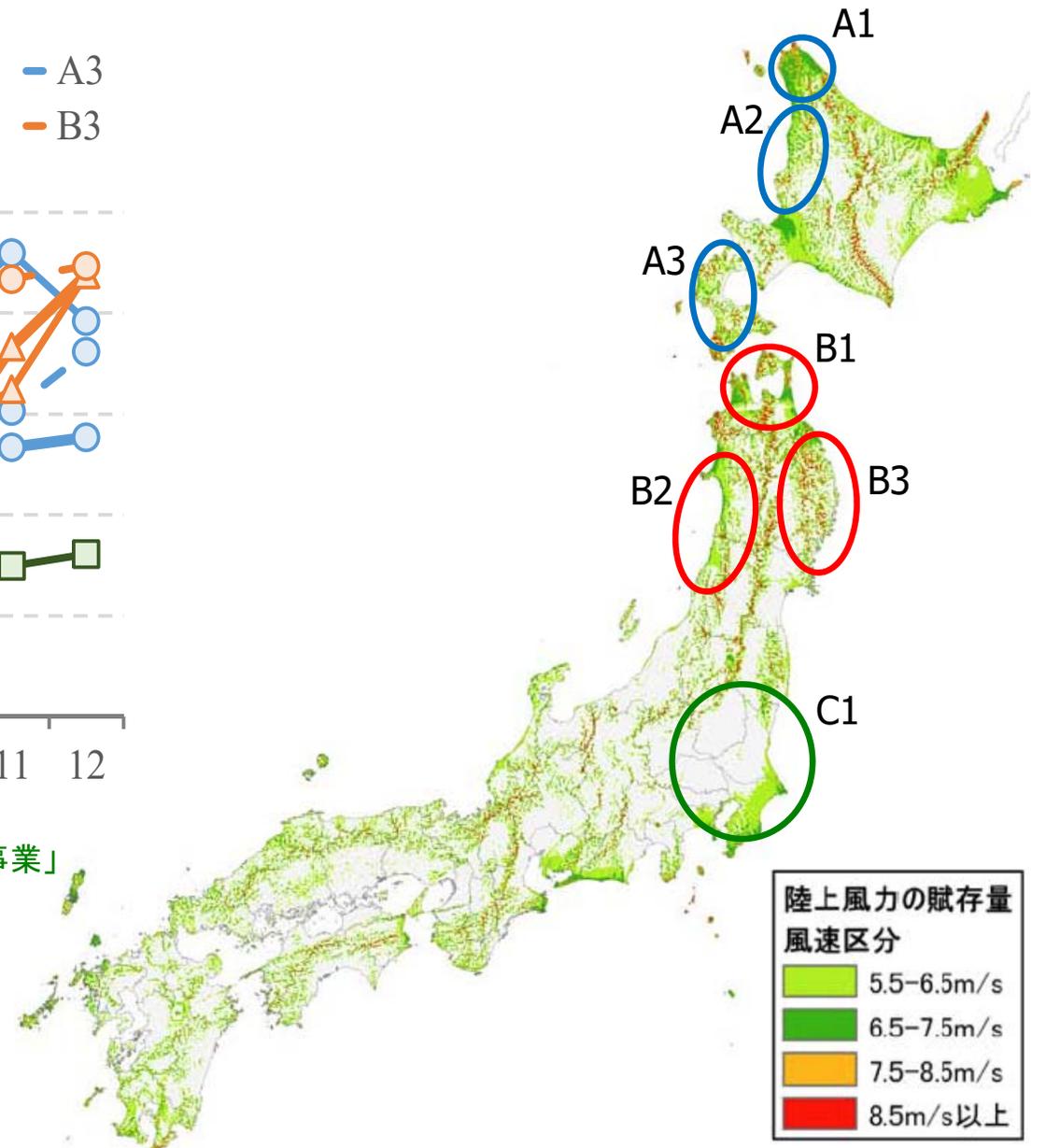


- エリア全体の合計出力は、数日単位で出力が大きく変動。
- 太陽光発電と比較して周期性は低い
- 電力会社間において、ある程度の平滑化効果あり
- エリア合計出力の急増・急減(ランプ変動)の予測が重要
 - ◆ 6時間先～12時間先にランプ変動発生の有無を予測できるだけでも、電力システムの制御には有用

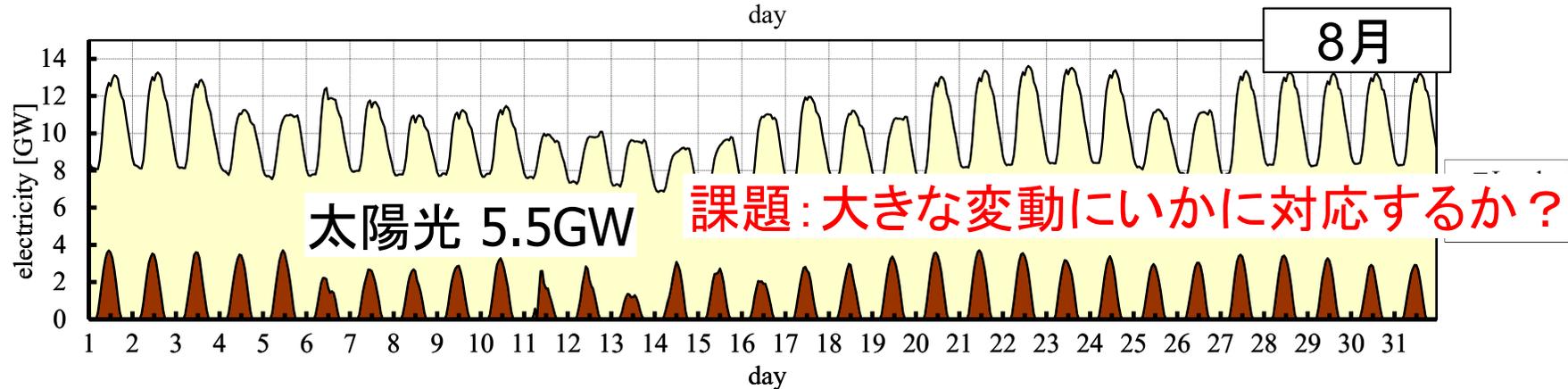
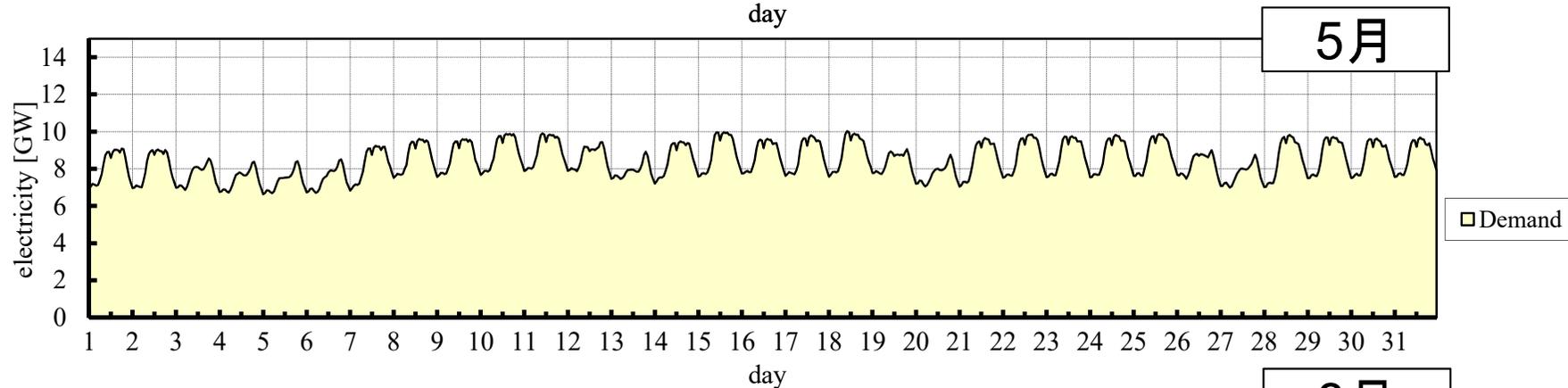
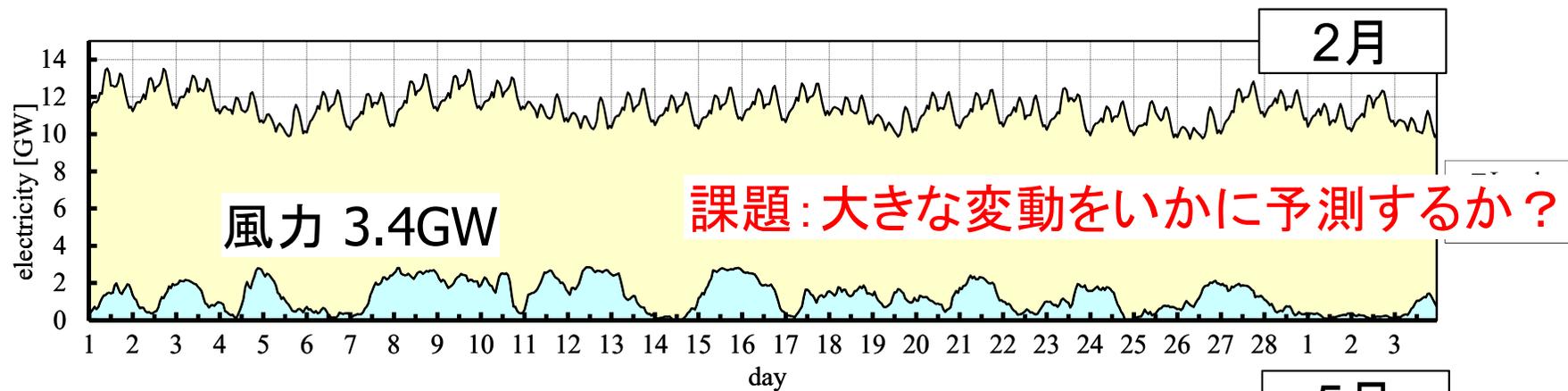
風力発電は1年間でどのぐらい発電するか？



データ提供: NEDOプロ「電力系統出力変動対応技術研究開発事業」



東北エリアの電力需要(2012年)

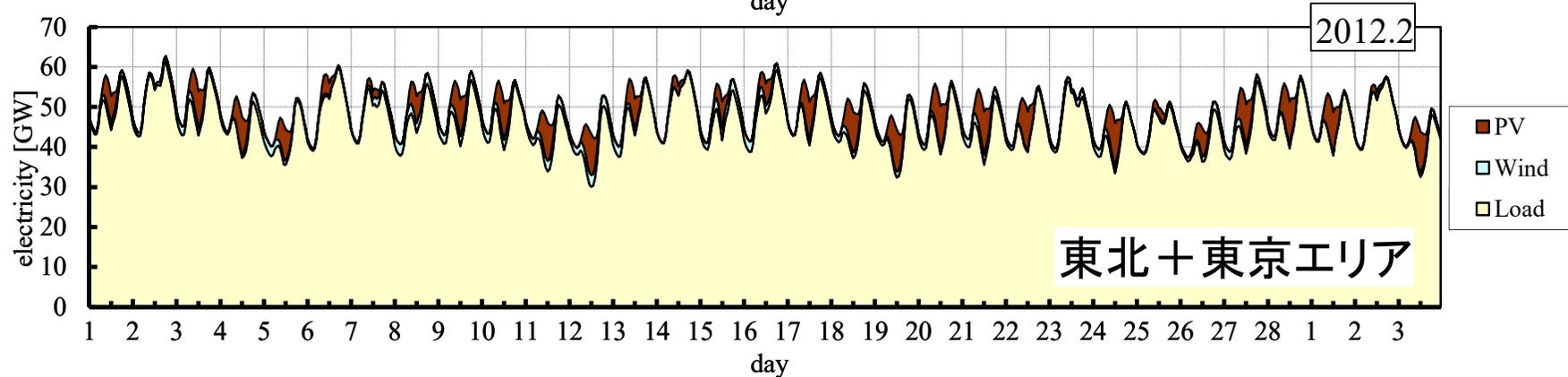
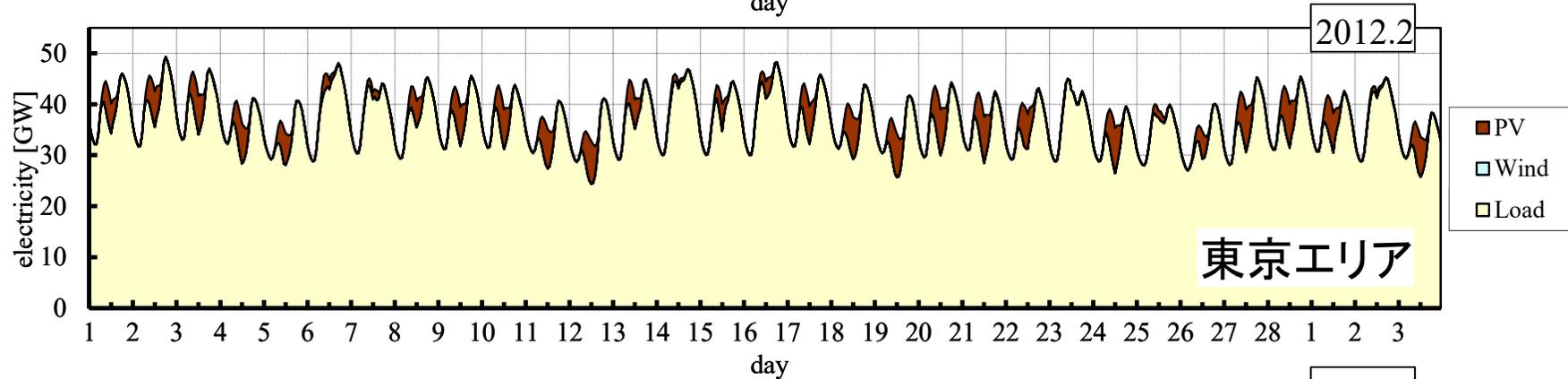
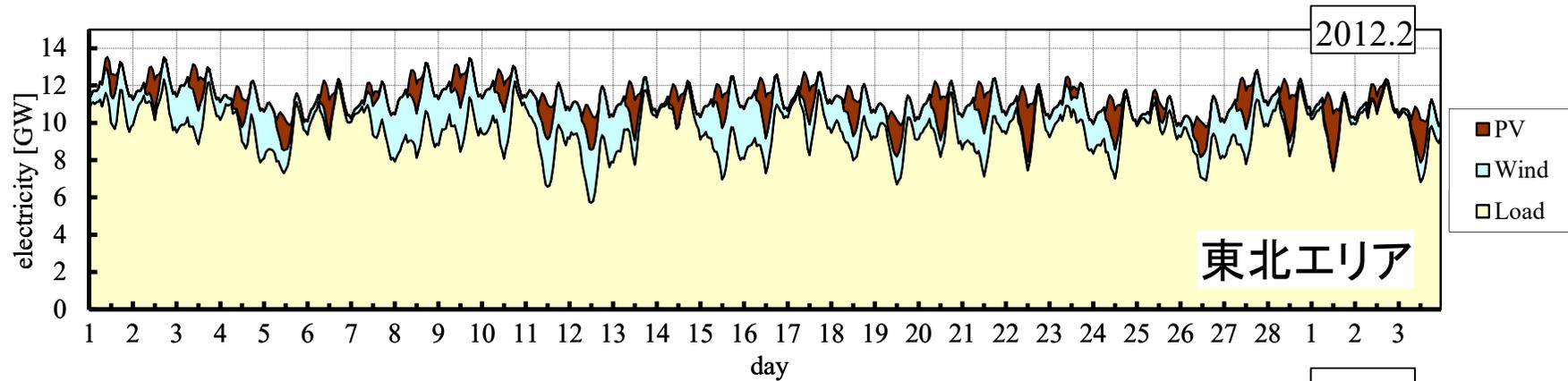


本発表における将来の設備容量の想定

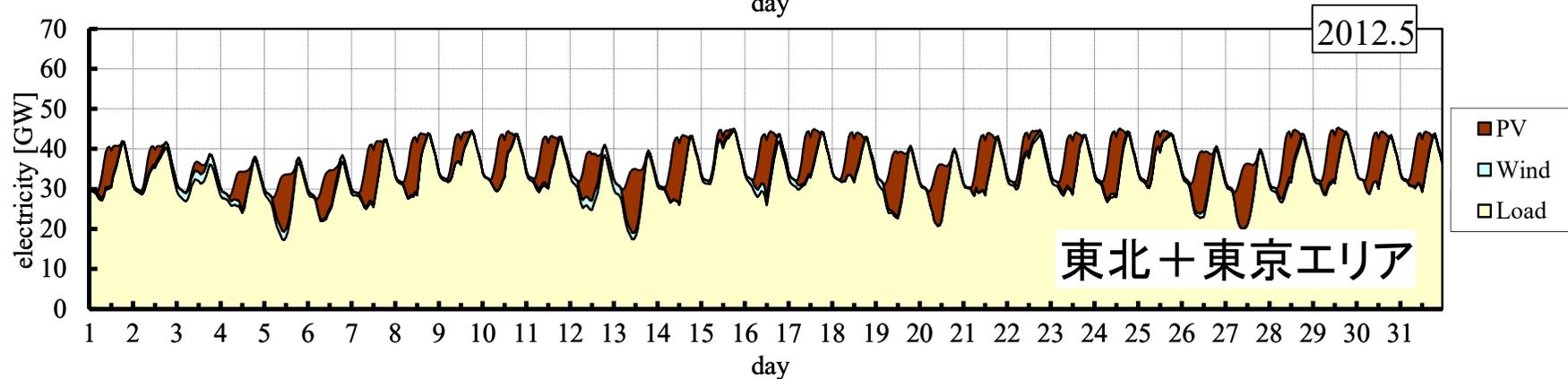
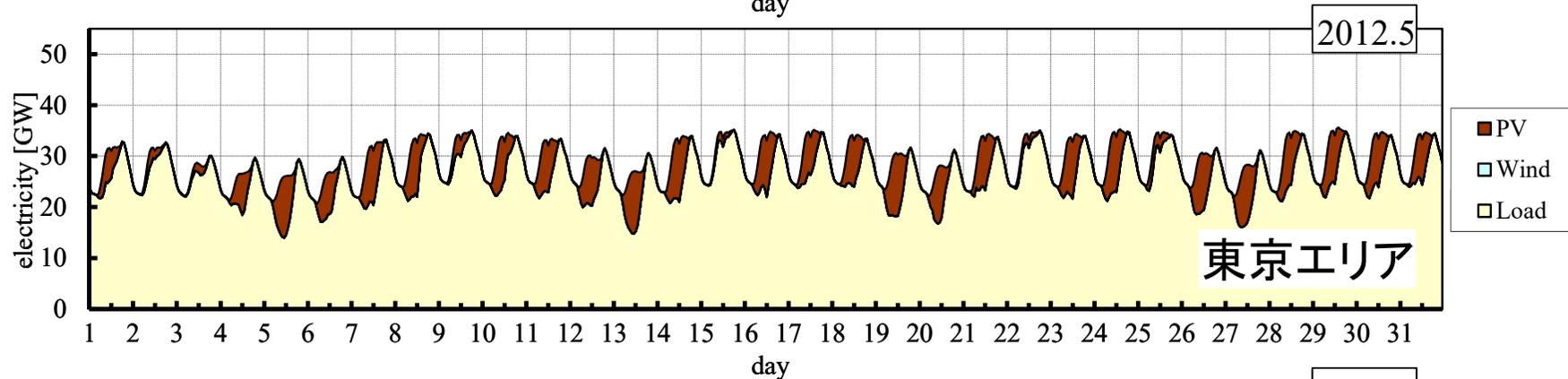
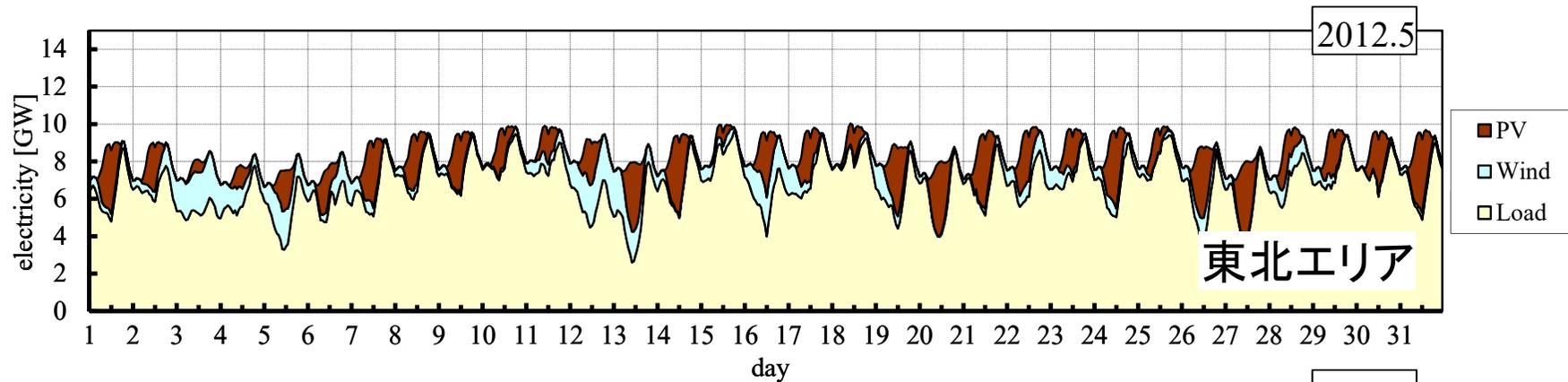
エリア	グループ	太陽光発電	風力発電
東北	B1	--	1150 MW
	B2	--	1100 MW
	B3	--	1120 MW
	合計	5520 MW	3370 MW
東京	C1	16440 MW	320 MW

- 風力発電：
 - ◆ METI新エネ小委員会第9回配布資料に記載の環境アセス中・終了（運開前）を含む設備容量
- 太陽光発電：
 - ◆ 東北エリア：同委員会第8回配布資料における風力発電の導入見込み量を前提とした接続可能量
 - ◆ 東京エリア：上記委員会第9回配布資料に記載の認定量（2014年10月末）

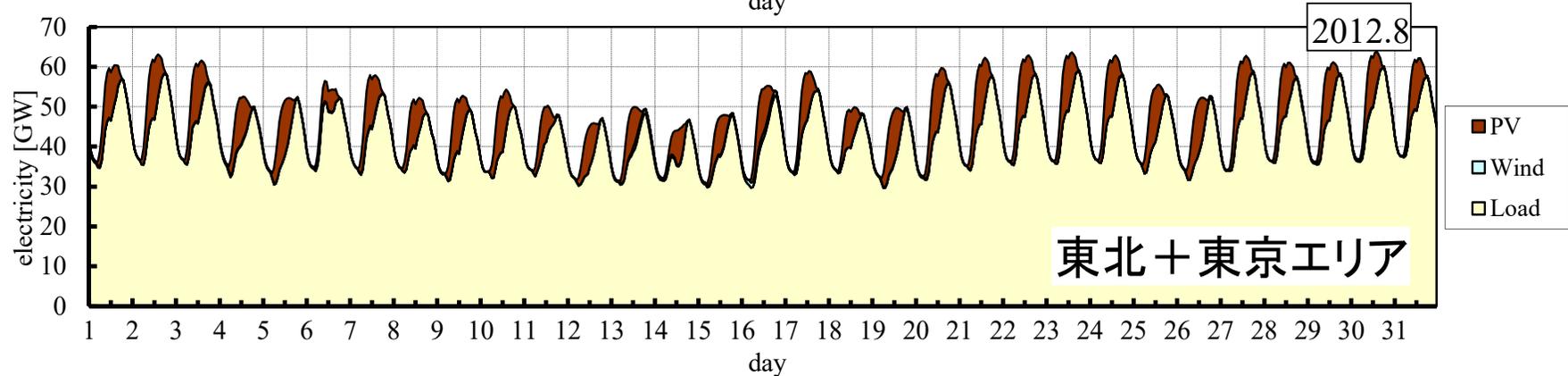
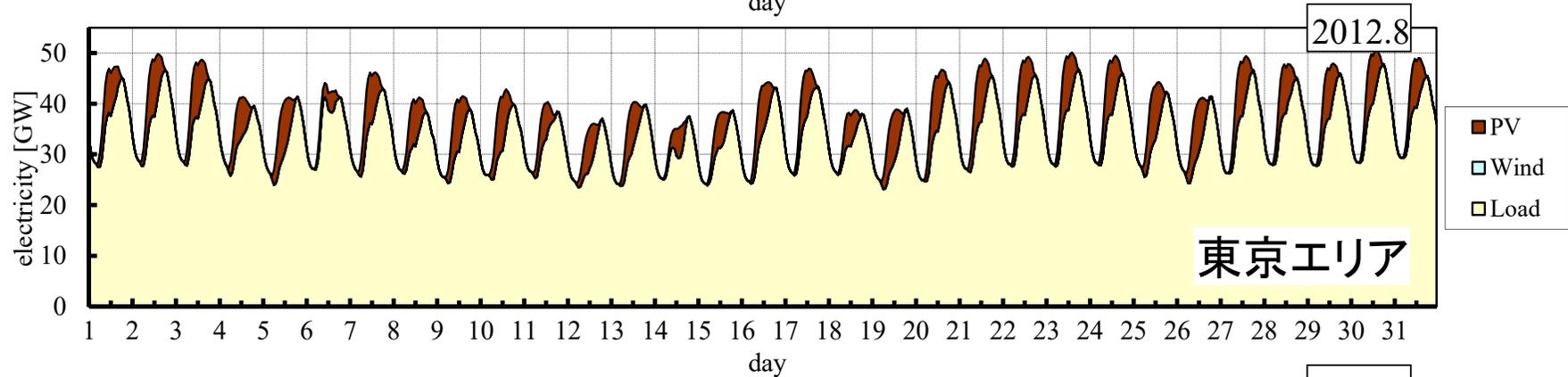
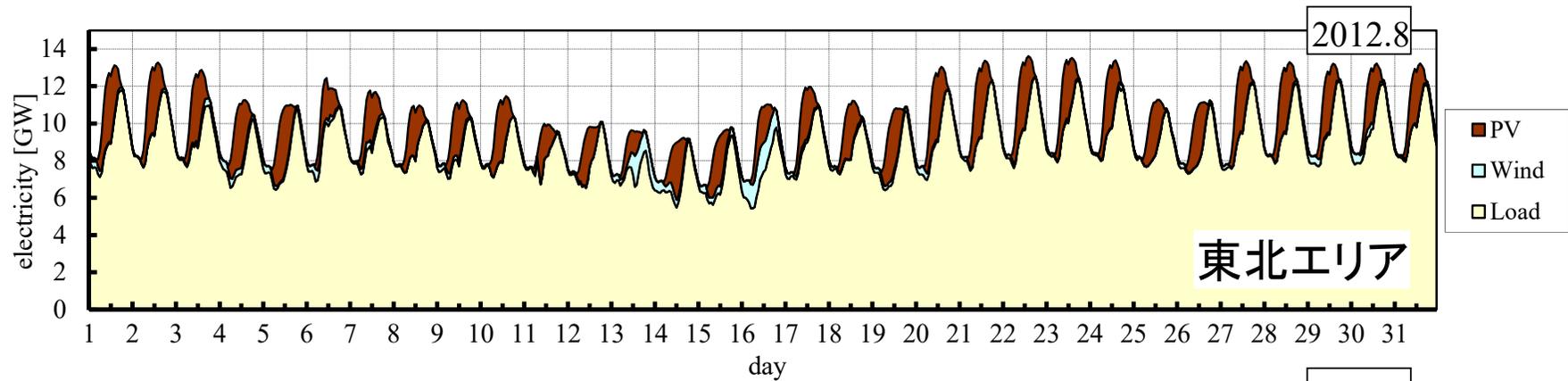
残余電力負荷の時間変化(2012年2月)



残余電力負荷の時間変化(2012年5月)

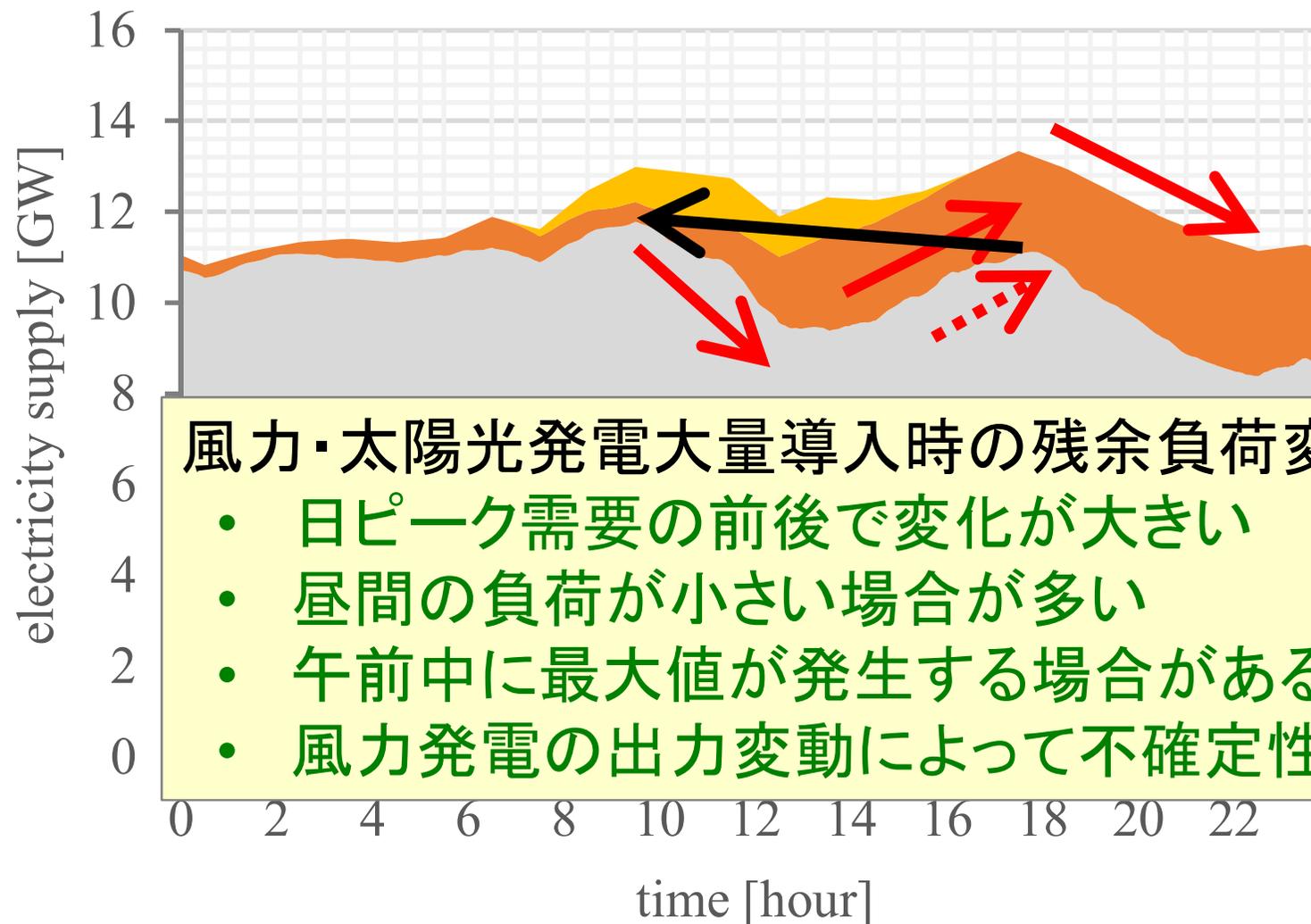


残余電力負荷の時間変化(2012年8月)



残余電力負荷の時間変化の例

(東北エリア, 2012年1月13日)

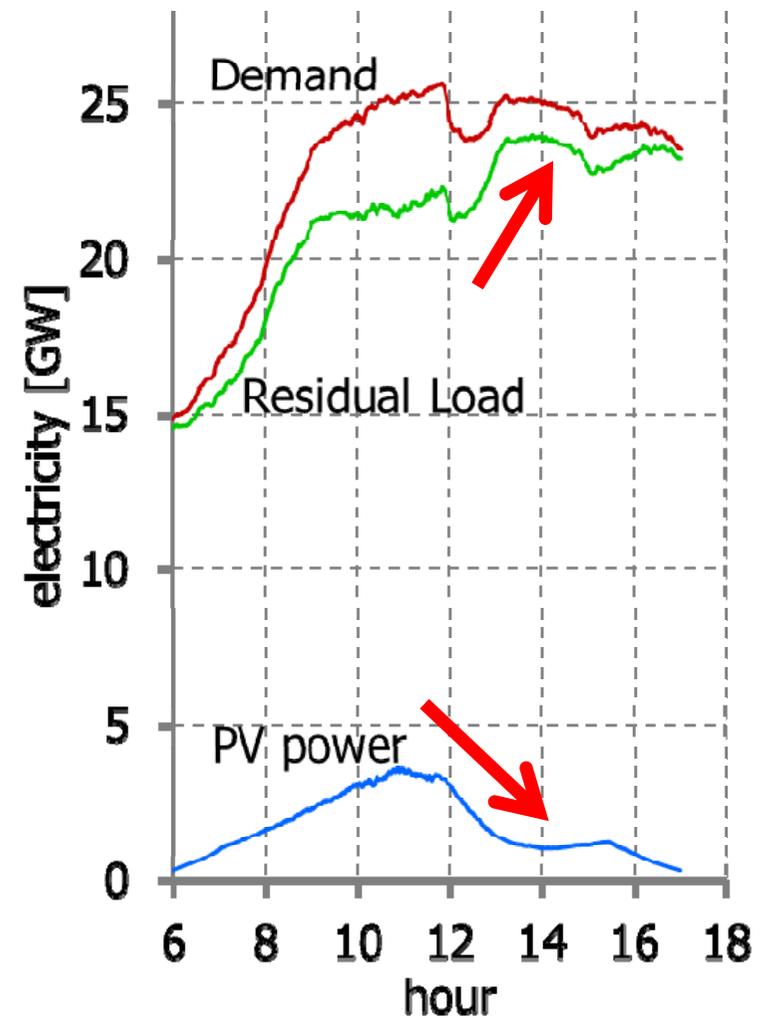
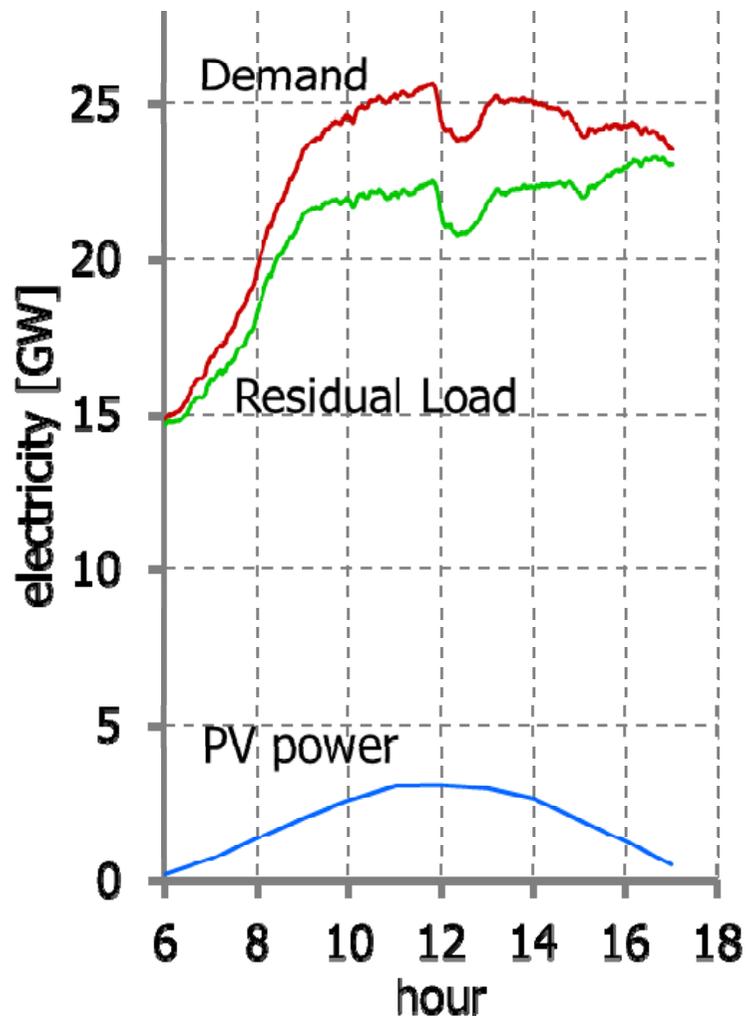


風力・太陽光発電大量導入時の残余負荷変動の特徴

- 日ピーク需要の前後で変化が大きい
- 昼間の負荷が小さい場合が多い
- 午前中に最大値が発生する場合がある
- 風力発電の出力変動によって不確実性が増加

ランプ変動時の残余電力負荷変動

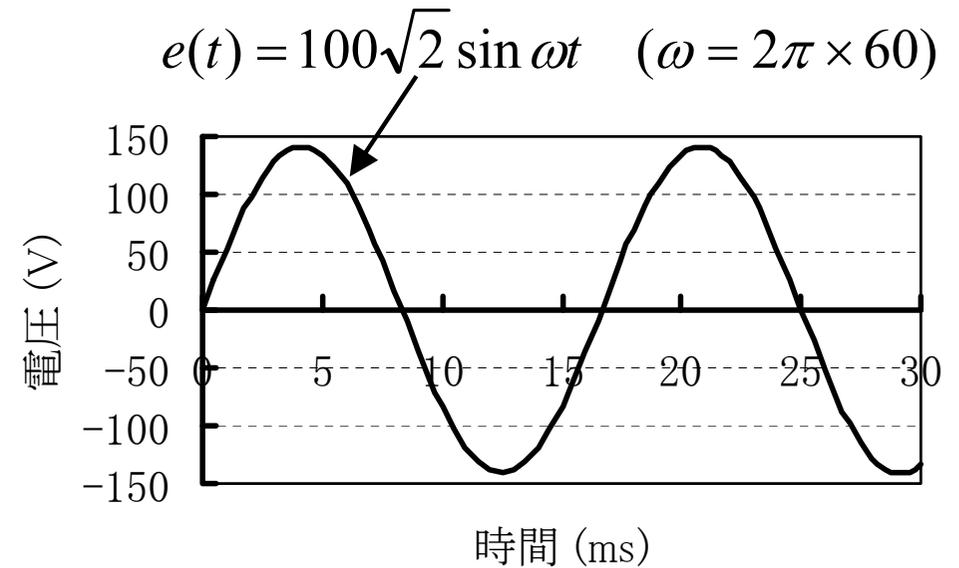
- 正午前後のランプ変動により, 残余負荷は大きく変動
- ランプ変動の前日予測は困難な場合が多い



電力システムの制御

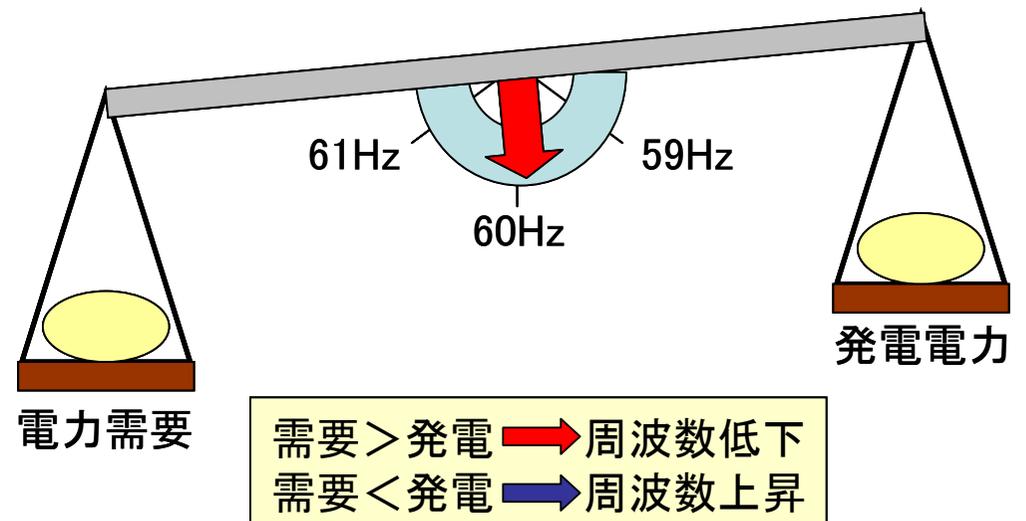
- 電圧

- ◆ $101\text{ V} \pm 6\text{ V}$
(低圧受電端)



- 周波数

- ◆ $60 \pm 0.2\text{ Hz}$ (西側系統)



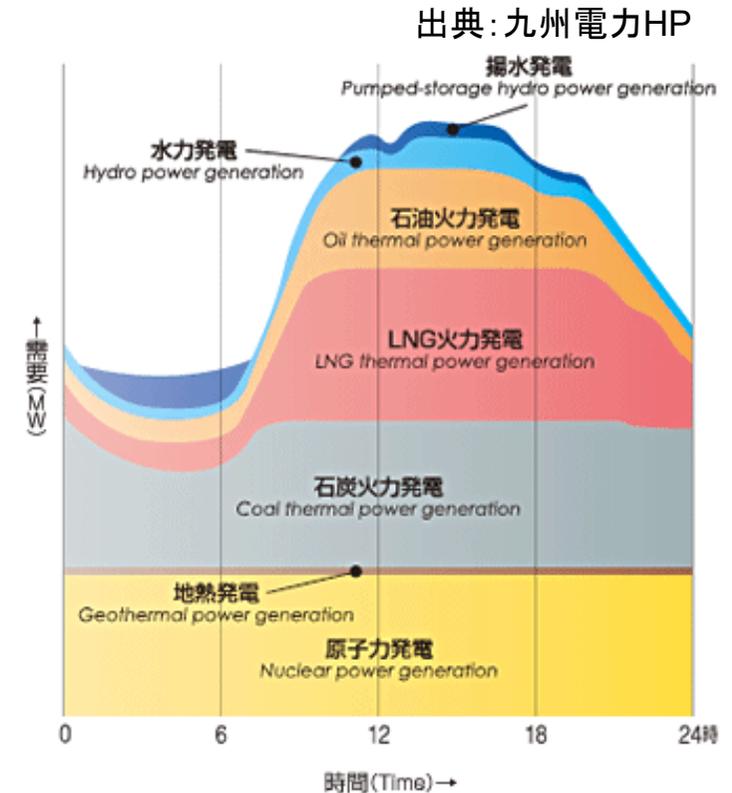
電力システムにおける需給計画・運用

● 翌日の計画

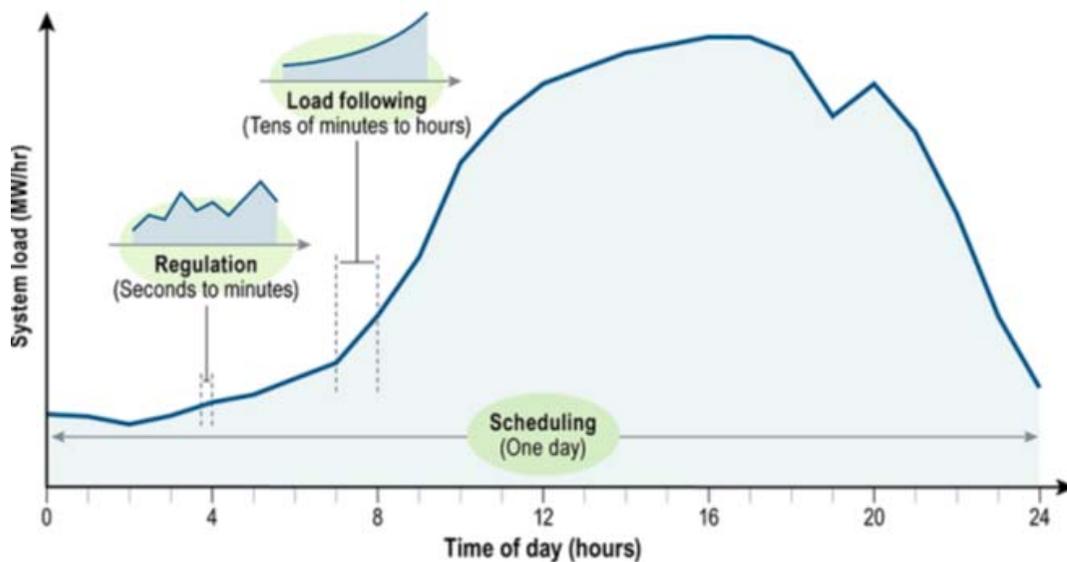
- ◆ 電力需要を予測
- ◆ 発電機の起動台数, 起動・停止時刻を決定
- ◆ 事故等による供給支障への対応策を考慮

● 当日の運用

- ◆ 発電コストを最小化するように, 長周期の需要変化に対し各発電機出力を数分単位で制御
- ◆ 発電機合計出力と前日に予測した電力需要とを比較し, 数分先の予測を補正
- ◆ 周波数の変動の大きさをフィードバックして, 発電機出力を調整
- ◆ 発電機合計出力と需要の予測値とを比較し, 予測誤差を把握



電力需給運用における予測ニーズ



- 翌々日計画または週間計画
 - ◆ 予測範囲: 2~10日先
 - ◆ 時間解像度: 30分~1時間
- 翌日計画
 - ◆ 予測範囲: 24~39時間先
 - ◆ 時間解像度: 30分値~1時間値
 - ◆ 必要なタイミング: 12時頃まで
- 当日計画
 - ◆ 予測範囲: 24時間先
 - ◆ 時間解像度: 30分~1時間
 - ◆ 必要なタイミング: 0~6時頃まで

でんき予報

<http://denki-yoho.chuden.jp/index.html>

きょうの電力使用状況

前週同曜日実績表示

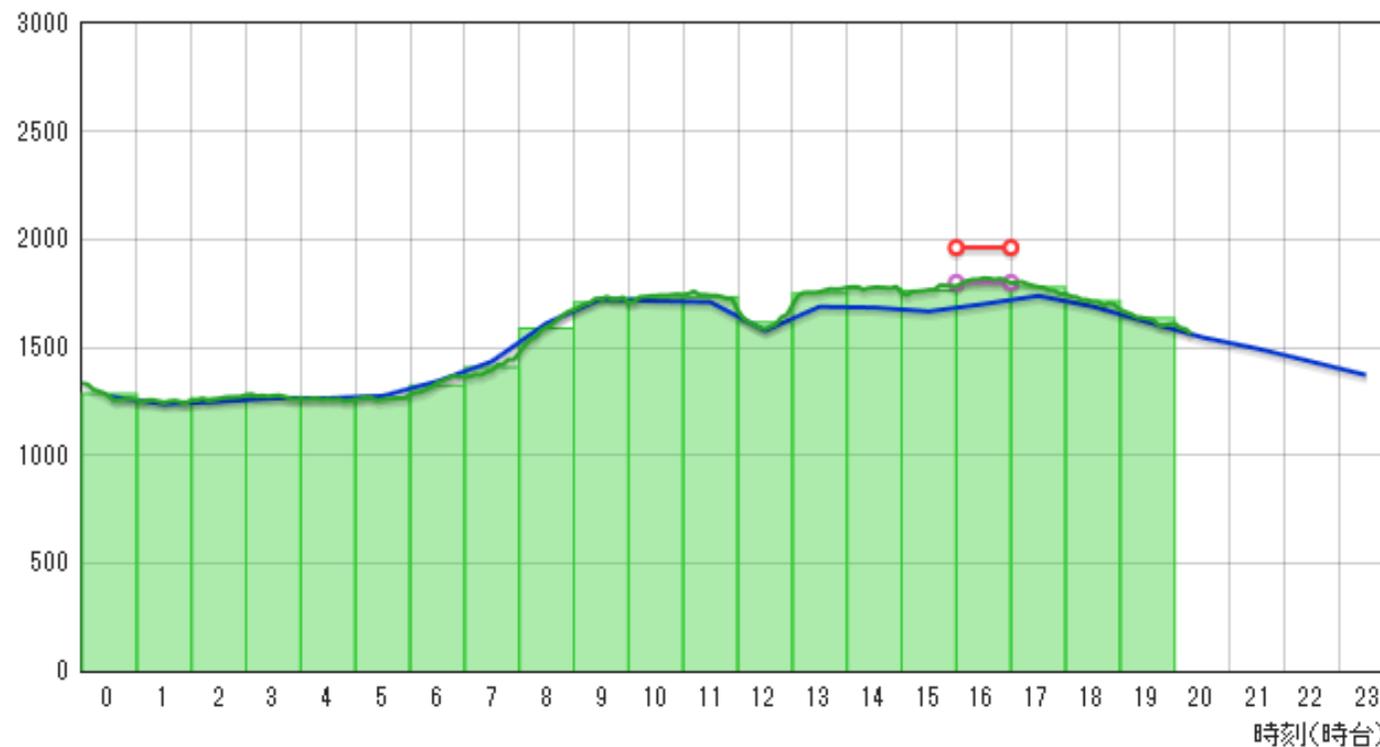
前日実績表示

両実績表示

実績

現在

電力需要・供給力
(万kW)



使用率
当日実績
(瞬時値)

80%

需要
当日実績
(瞬時値)

1,562万kW

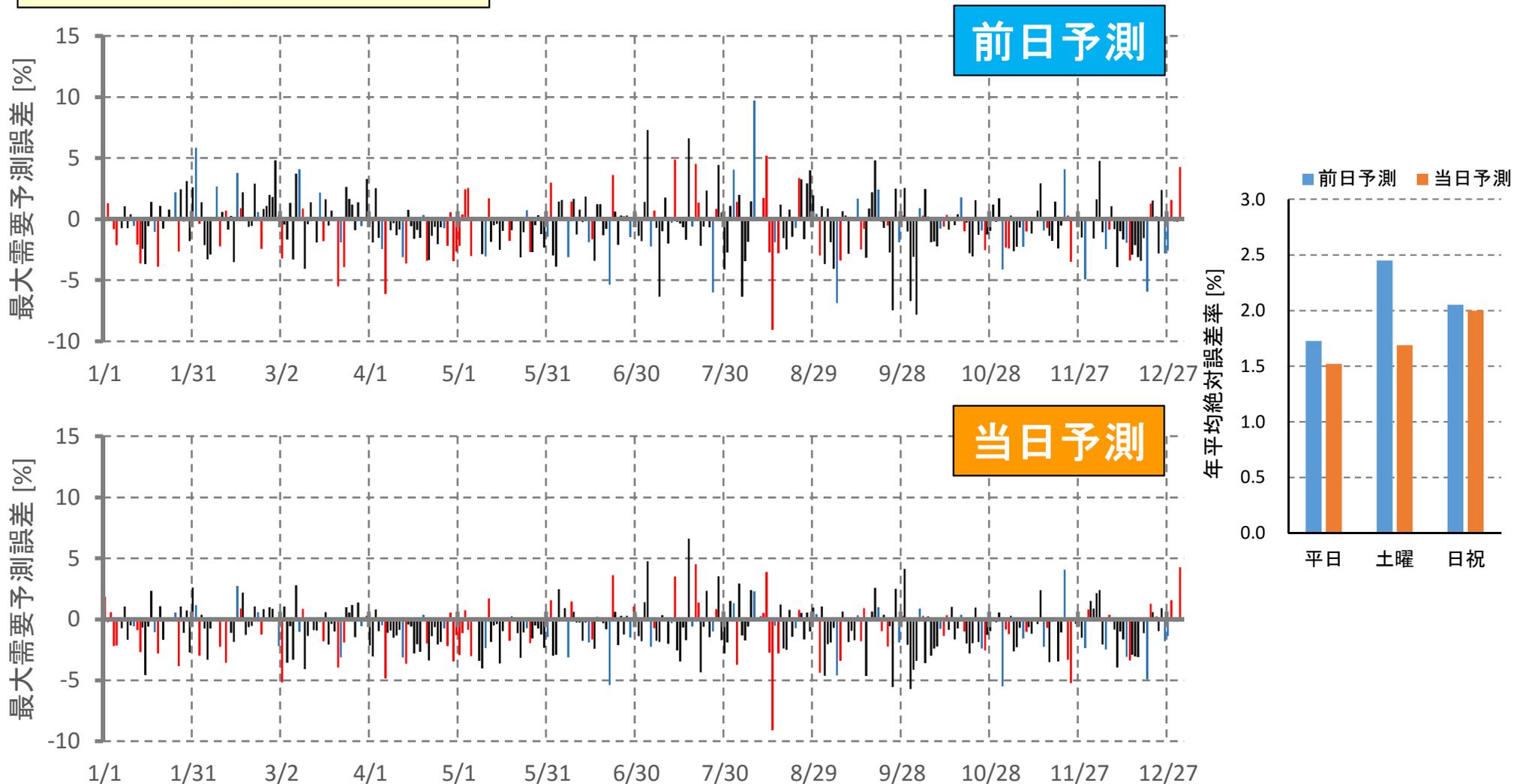
- ピーク時供給力
- 予想最大電力
- 当日実績(瞬時値)
- 当日実績(1時間値)
- 前週同曜日実績
- 前日実績

● [電力使用状況グラフの見方](#)

中部エリアにおける日最大需要の予測誤差

電力需要: 中部電力(株)でんき予報<http://denki-yoho.chuden.jp/>
 期間: 2014/1/1 ~ 2014/12/31

$$\text{予測誤差} = \frac{(\text{予測値} - \text{実測値})}{\text{実測値}} \times 100\%$$



残余電力負荷の予測

- 日ピーク需要の前日予測の誤差は2%程度
- 誤差が大きい場合は正の誤差（供給力が余る側）

- 残余電力負荷の予測

$$= \boxed{\text{電力需要の予測}} - \boxed{\text{太陽光・風力発電の出力予測}}$$

不確定要素の増加

- ・小売全面自由化
- ・デマンドレスポンス

小売全面自由化後, FIT電源
については, 特例制度①により,
一般送配電事業者がマクロの
発電計画を策定

再エネ発電出力予測の利用状況

- 国内

- ◆ 太陽光発電の急増により、出力予測の高精度化・高信頼化は緊急の課題
- ◆ 風力発電の予測については、2010年度より、東北エリアの合計出力の予測システムが本格運用

- 海外

- ◆ 北米、スペインなどでは、10年ほど前より、風力発電の出力予測は既に系統運用に利用
 - CAISO (California Independent System Operator) の場合
 - 6時間先までを5分間隔で予測. 5分毎に更新
 - 9日先までを1時間間隔で予測. 1日1回更新
 - ERCOT (Electric Reliability Council of Texas) の場合
 - 48時間先までを予測. 1時間毎に更新
 - 6時間先でのランプ発生 of 規模と期間を15分間隔で予測. 15分毎に更新

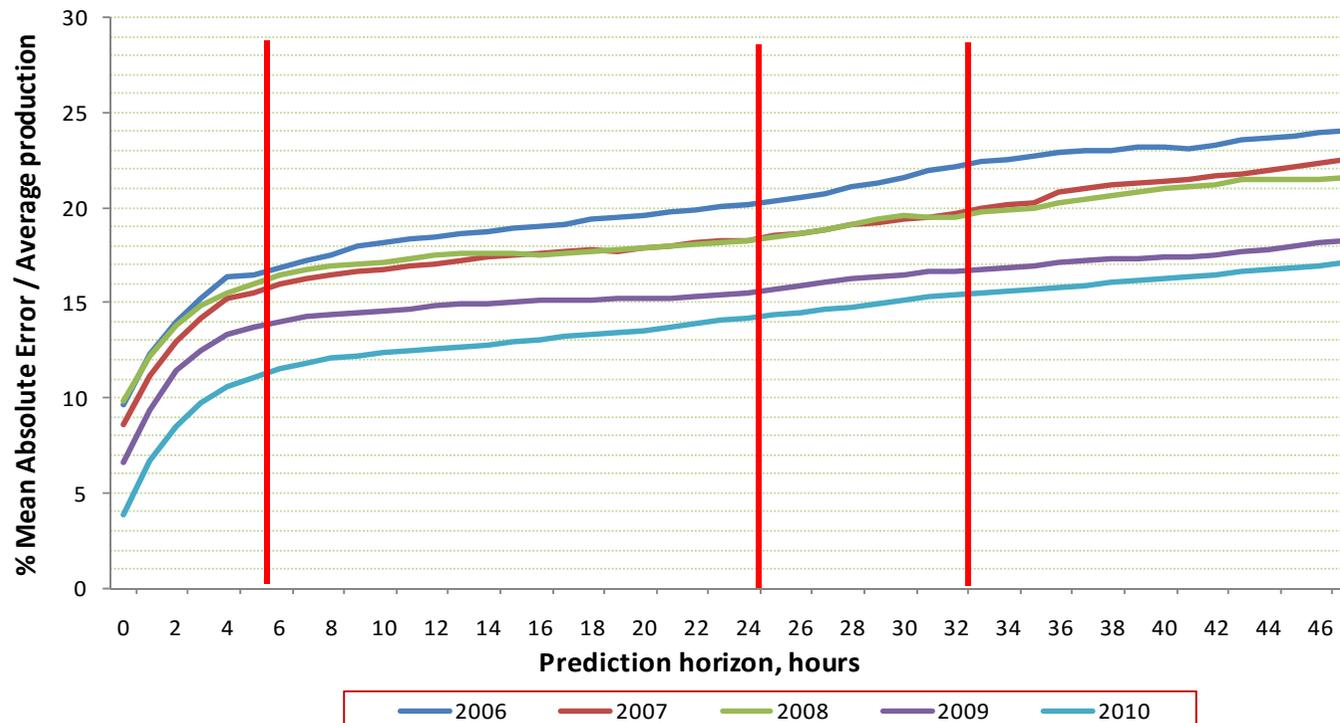
スペイン再生可能エネルギー監視・制御センター

- CECRE:再生可能エネルギー発電を監視・制御
 - 再生可能エネルギーによる発電電力を最大化するが、常に電力系統の安定を維持する。(優先給電)



気象予測システムによる風力発電出力予測

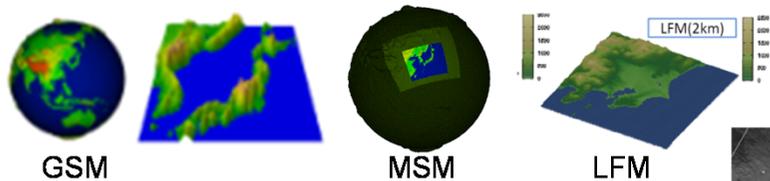
- REEでは、独自に開発した気象予測に基づく発電出力予測システム“SIPREOLICO”を適用
 - ◆ 48時間先までの予測(15分更新)と10日先までの予測(1時間更新)を実施
 - ◆ 重要な、タイムラインは、翌日予測の為の**24時間前**および**32時間前**と、リアルタイム評価の為の**5時間前**。
 - ◆ 24時間先の平均出力予測誤差*を2010年には14%まで低減。
* : 平均出力によって無次元化された平均絶対誤差
 - ◆ 各RESCCから伝送される「気象予測システムによる出力予測値」も参考にしている。



系統運用ニーズと 太陽光発電出力予測手法のイメージ図

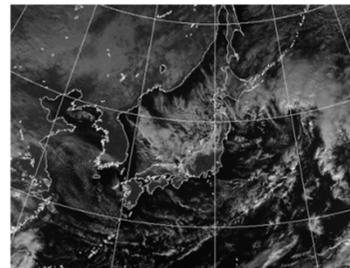


数値予報モデル
(NWP: Numerical Weather prediction)



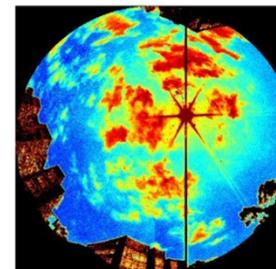
出典：JMA

衛星画像等



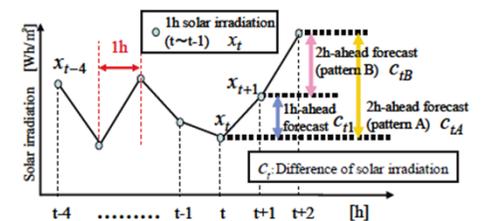
出典：JMA

天空画像



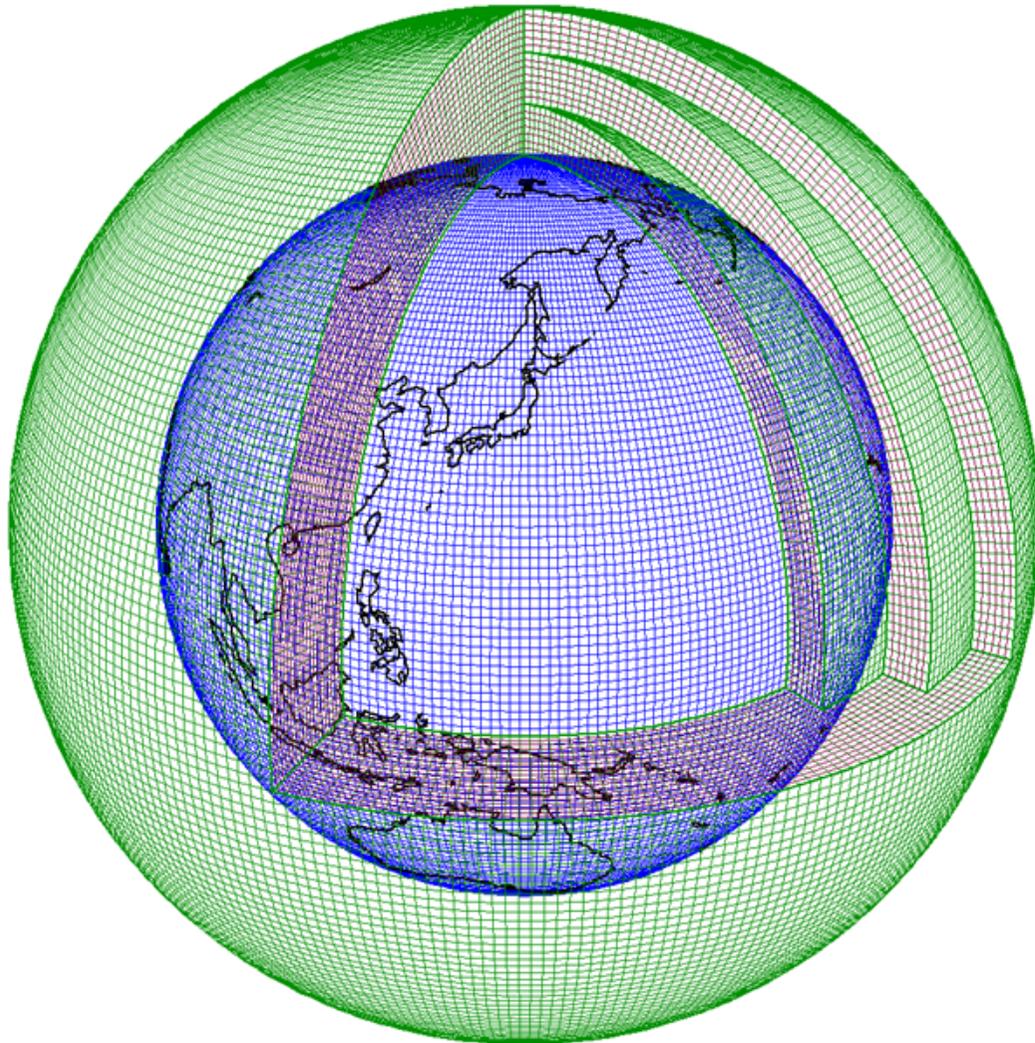
出典：Bryan

実測データ(持続モデル)



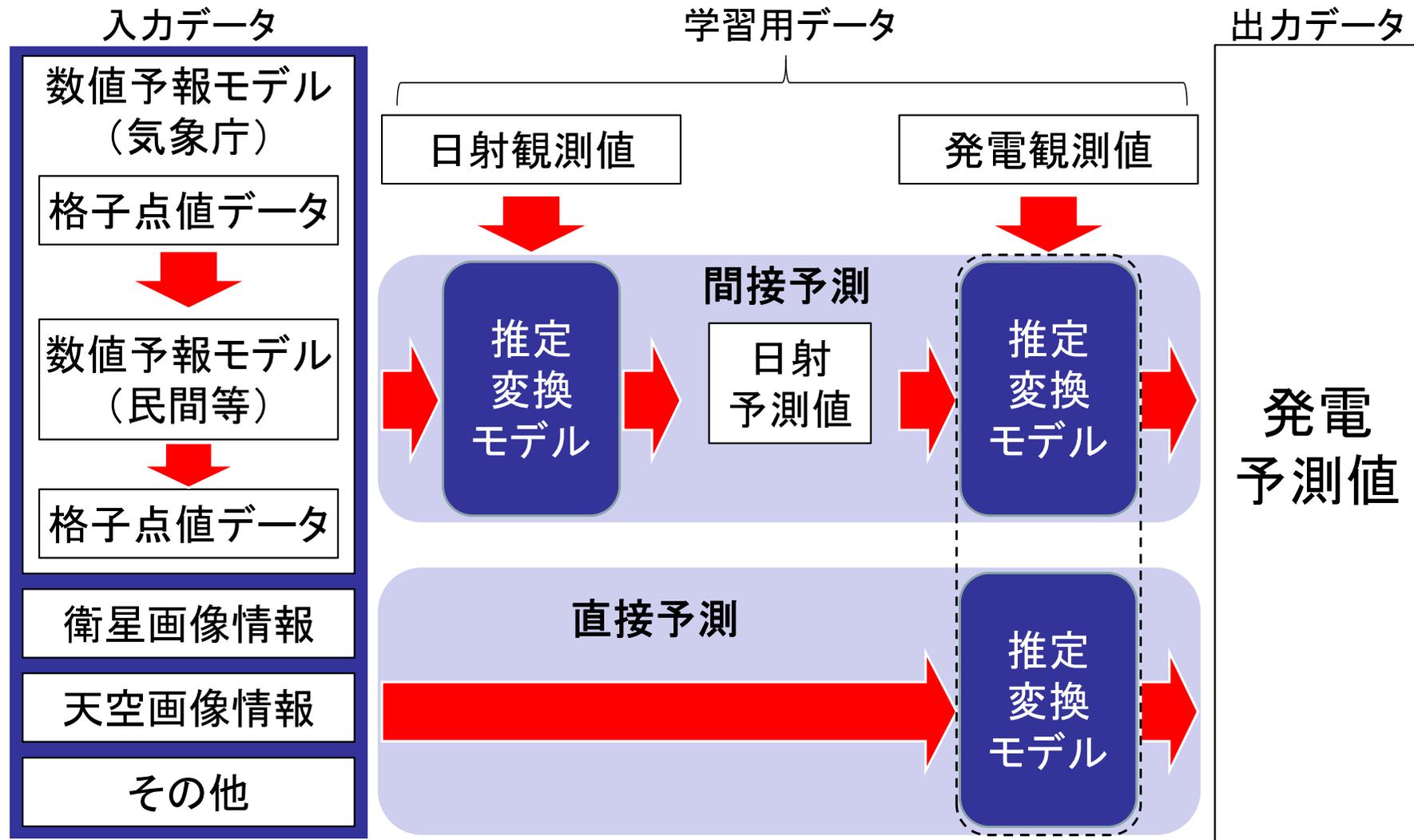
出典：waseda

数値気象予報モデル



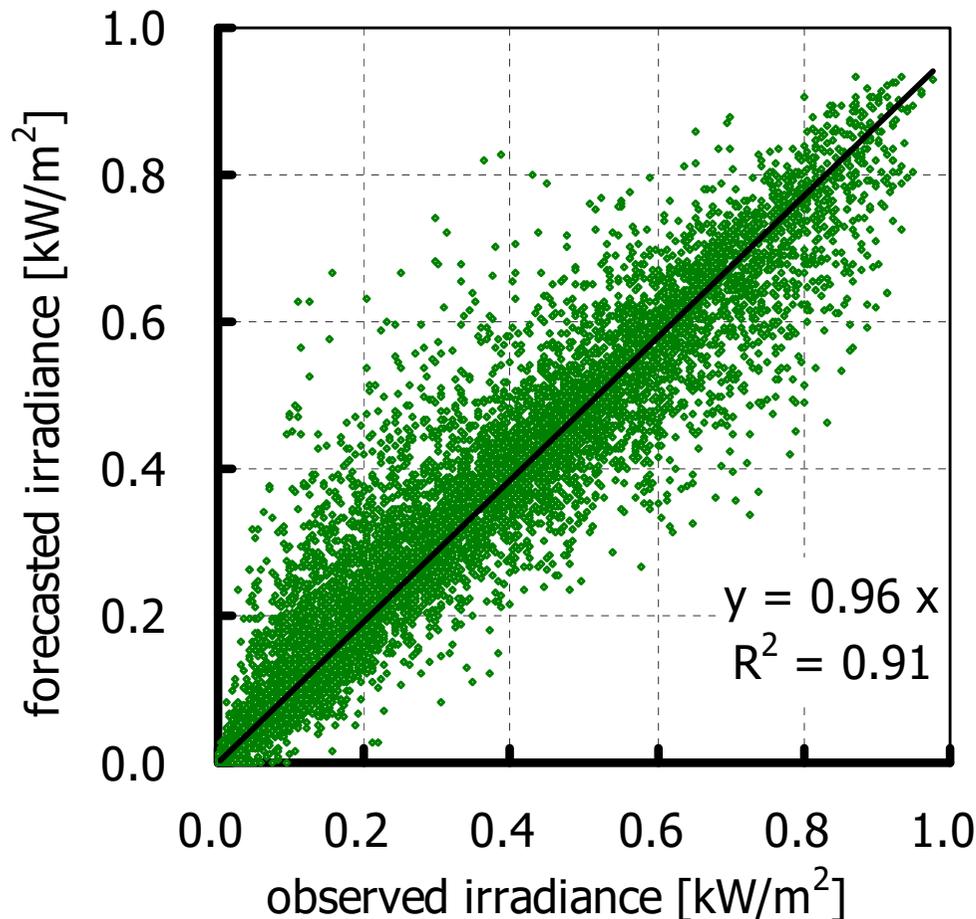
- スーパーコンピュータを使った地球の大気シミュレーション
- 天気予報の元データ
- 格子点ごとに、気圧、風速、気温、湿度などを予測
 - ◆ 全球モデル：
解像度20km, 264時間先, 6時間毎
 - ◆ メソモデル：
解像度 5km, 39時間先, 3時間毎
 - ◆ 局所モデル：
解像度 2km, 9時間先, 1時間毎

太陽光発電出力予測の基本構造



重回帰分析に基づく空間平均日射強度の前日予測

$$I = a_0 + (a_1 + a_2 RH + a_3 C_L + a_4 C_M + a_5 C_H) I_0$$



年間%MAE = 15.8 %

$$\%MAE = \frac{\sum_t |I_F(t) - I(t)|}{\sum_t I(t)}$$

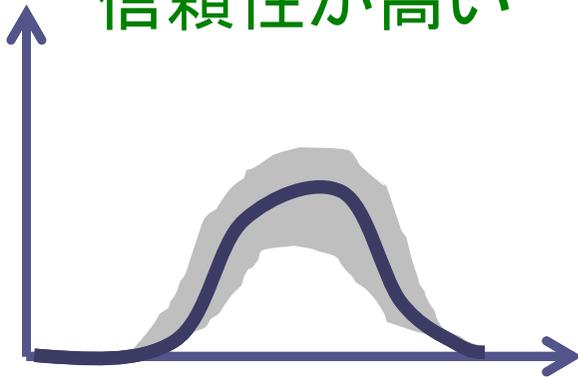
$I_F(t)$: 予測値

$I(t)$: 観測値

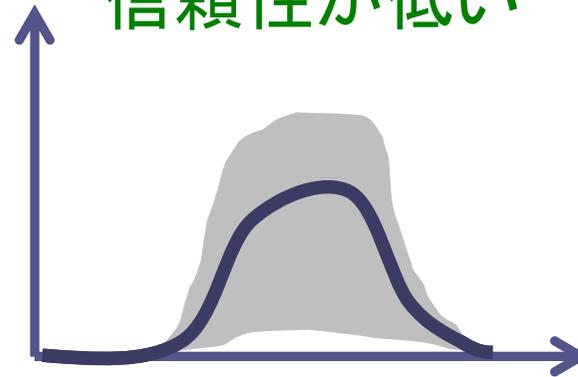
確率的予測の必要性

予測誤差をゼロにはできない

誤差範囲が小さい予測
信頼性が高い

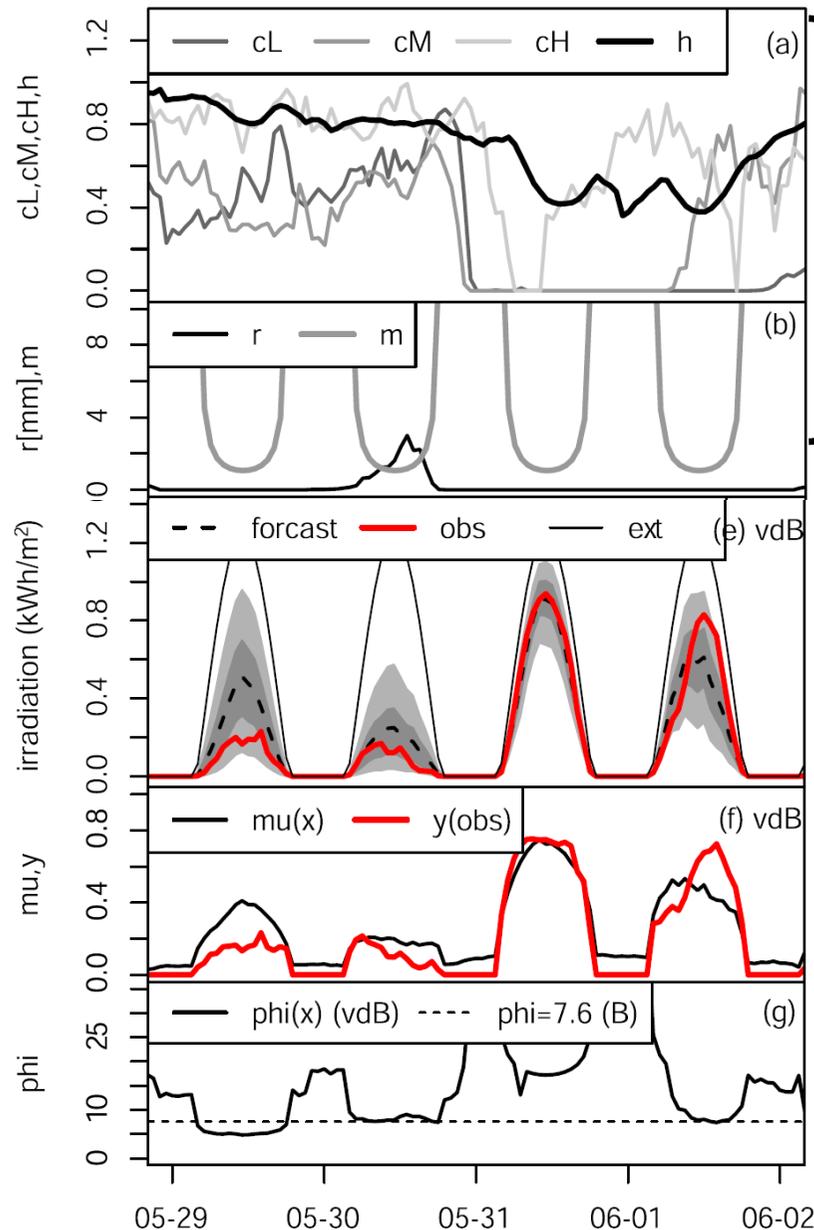


誤差範囲が大きい予測
信頼性が低い



- 予測値は同じでも信頼性が異なる
- 両者を区別して予測値を利用する必要がある

ベータ回帰モデルによる予測結果の例



x

$\mu(x)$

$\phi(x)$

平均値パラメータ μ

分布広くなる
外れやすい

精度パラメータ ϕ

分布狭くなる
当たりやすい

期待値

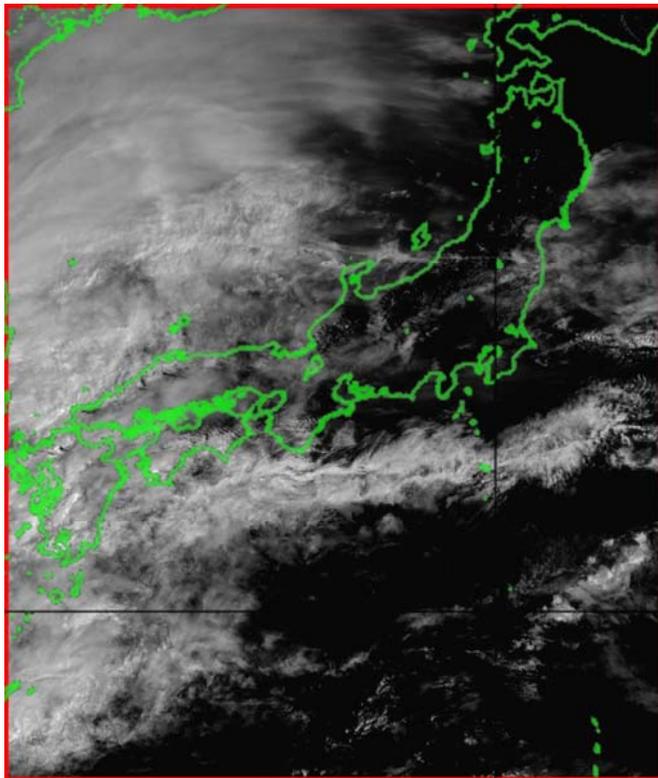
$$\mu(x|\beta) = \exp(-\beta_0 - \beta_M c_M^{\alpha_M} - \beta_H c_H^{\alpha_H} - \beta_{RH} h^{\alpha_{RH}} - \beta_{PR} r^{\alpha_{PR}} - \beta_{AM} \log m)$$

分布の鋭さ

$$\phi(x|\beta) = \exp(+\beta_0 - \beta_M c_L^{\alpha_L} - \beta_M c_M^{\alpha_M} + \beta_{PR} r^{\alpha_{PR}} + \beta_{AM} \log m)$$

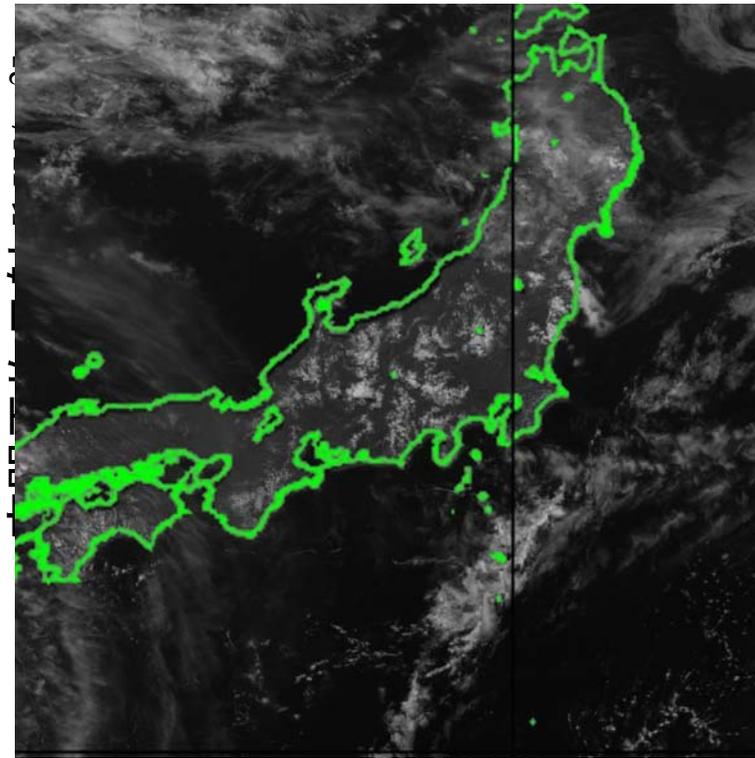
衛星画像に基づく数時間先のランプ変動の予測

大きな雲の移動に起因



雲の移動方向・速度が分かれば、
ランプ変動の予測可能性あり

雲の発生・発達に起因



雲の移動方向に着目しても
予測は難しい

電力システム改革 (平成25年4月閣議決定)

第1段階 (平成27年4月1日):

● 広域的運営推進機関の設立

- ◆ 需給計画・系統計画を取りまとめ、周波数変換設備、地域間連系線等の送電インフラの増強や区域(エリア)を超えた全国大での系統運用等を図る
- ◆ 平常時において、各区域(エリア)の送配電事業者による需給バランス・周波数調整に関し、広域的な運用の調整を行う
- ◆ 災害等による需給ひっ迫時において、電源の焚き増しや電力融通を指示することで、需給調整を行う

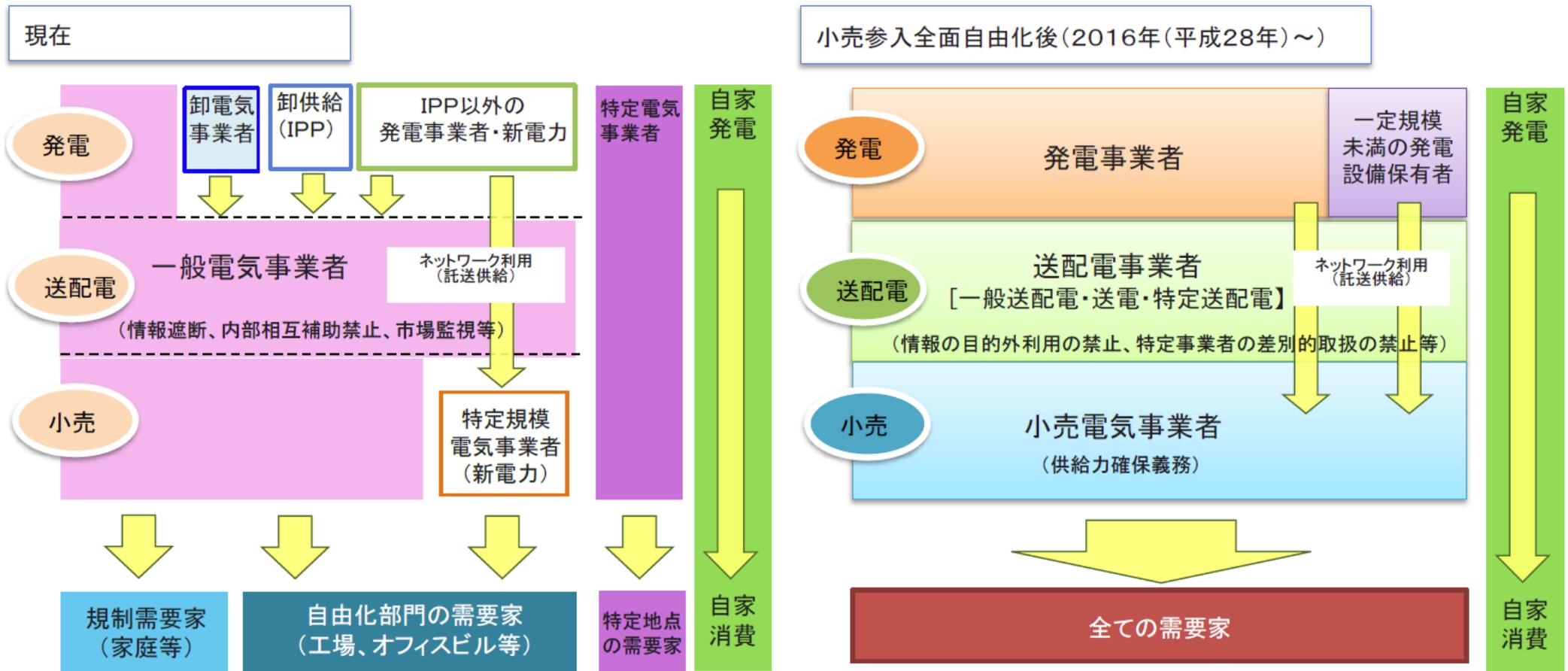
第2段階 (平成28年を目途):

● 電気の小売業への参入の全面自由化

第3段階 (平成30年～平成32年までを目途):

- 法的分離による送配電部門の中立性の一層の確保
- 電気の小売料金の全面自由化

電力システム改革(小売全面自由化)に伴う 事業類型の見直し

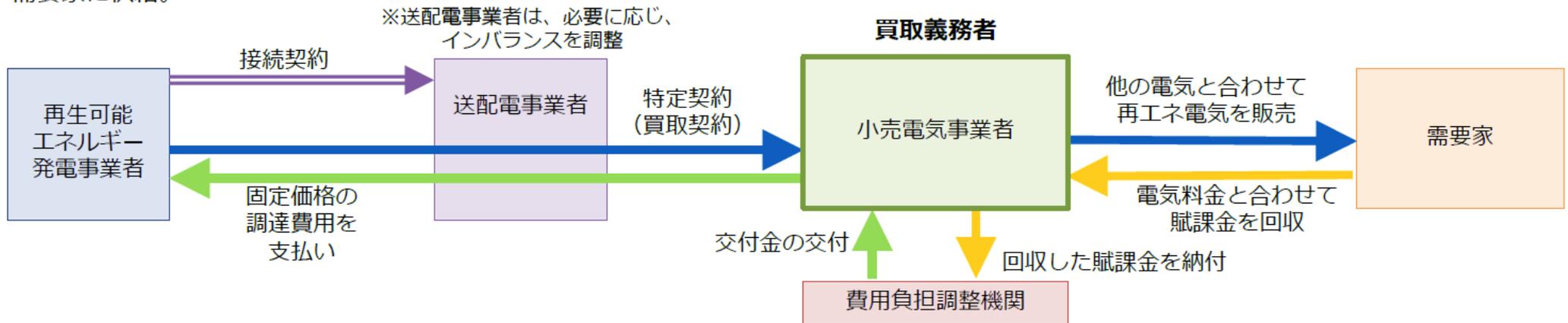


誰がFIT電源の買取義務を負うか？

FIT電源の買取義務者に関する検討

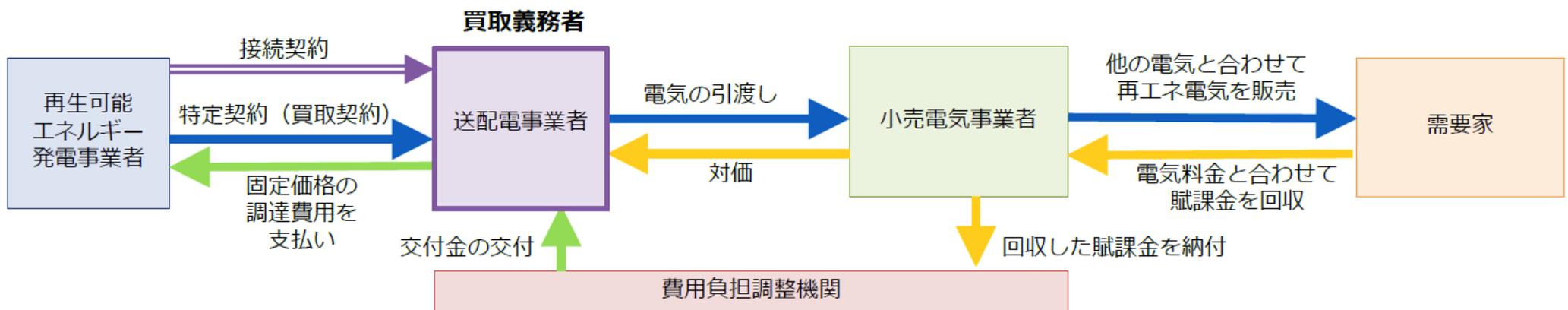
①小売電気事業者を買取義務者とする場合

個々の小売電気事業者が、認定を受けた再生可能エネルギー電源から生み出された電気を買取り、調達した電気を他の電気と合わせて需要家に供給。

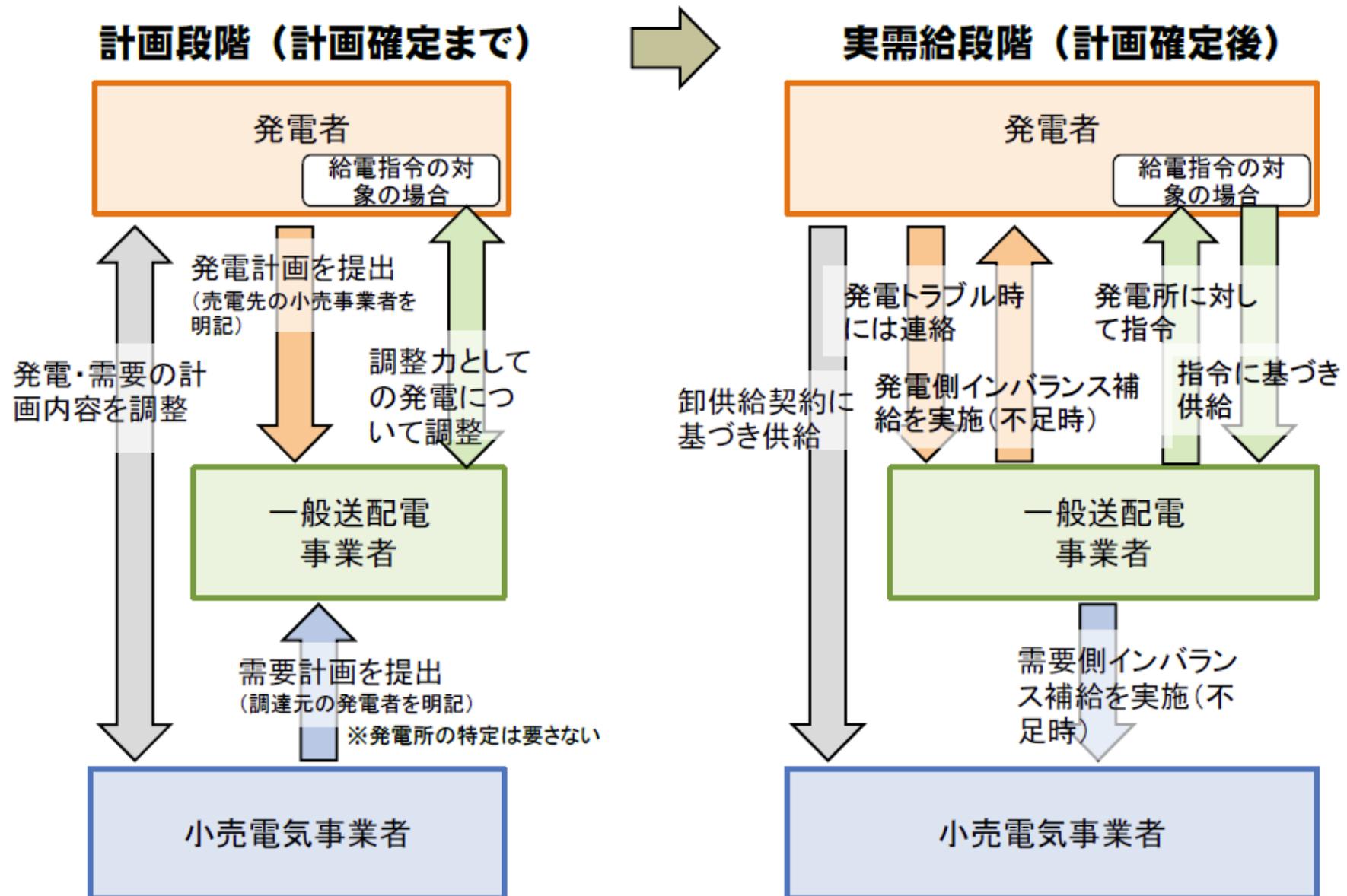


②送配電事業者を買取義務者とする場合 (イメージ)

各エリアの送配電事業者が、認定を受けた再生可能エネルギー電源から生み出された電気を買取り (注: 法制的な整理は別途必要)、小売電気事業者に市場経由又は割付けを通じて引き渡し、小売電気事業者が他の電気と合わせて需要家に供給。

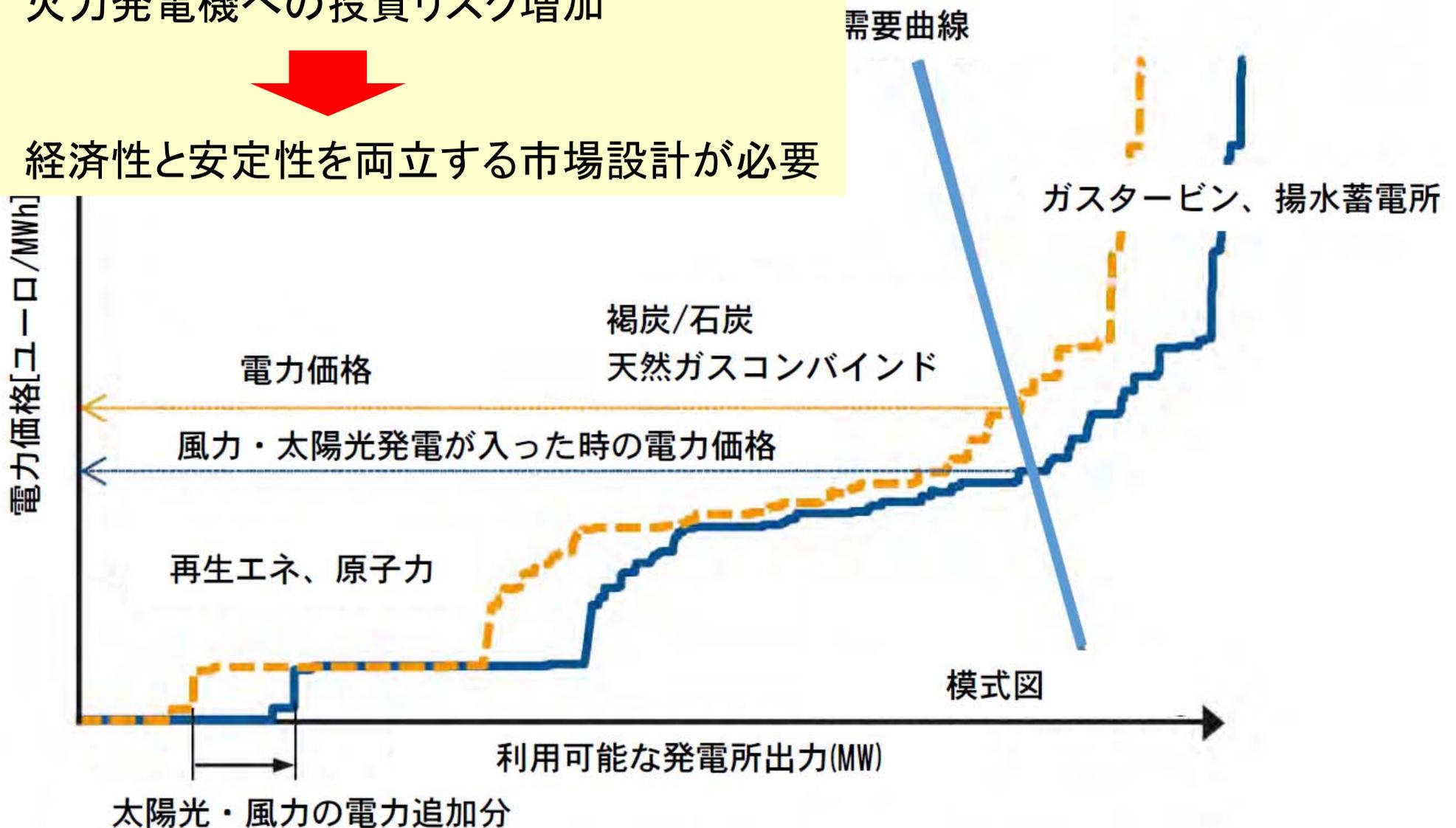


計画値同時同量



再エネ発電大量導入がメリットオーダに与える影響

- 電力価格の低下
 - 火力発電機への投資リスク増加
- ↓
- 経済性と安定性を両立する市場設計が必要



おわりに

- 再生エネ発電の大量導入、消費者行動の多様化等に対応するため、様々な分野の融合により、電力システムの計画・制御の高精度化・高信頼化が必要

