

PV予測の需給制御へのインパクト評価

東京大学・生産技術研究所/（株）構造計画研究所 宇田川佑介
udagawa@iis.u-tokyo.ac.jp

問題提起 再エネ電源の大量導入が電力システムへ与える影響

再生可能電源（風力、太陽光）は出力が天候に依存し、電力安定供給に影響

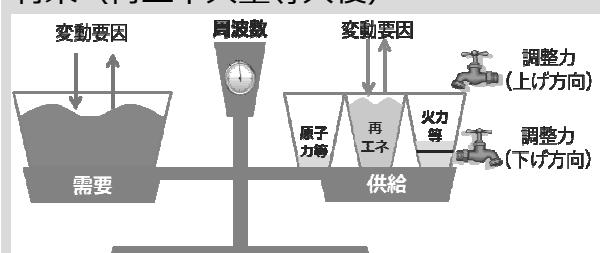
- ✓ 再エネの導入に伴い出力変動幅が増大し、Load Frequency Control 容量（数分～20分程度の短時間変動に対する調整力）不足が発生、周波数変動が大きくなる
- ✓ 火力発電機の最低出力制約により、下げ代（軽負荷時に供給力を下げる調整力）が不足し、発電量が需要を上回る（周波数の上昇）

現在（再エネ大量導入前）



- ✓ 変動要因は需要のみ
→ 充分な調整力で対応可能

将来（再エネ大量導入後）



- ✓ 変動要因は需要と再エネ
→ 調整力不足の懸念あり

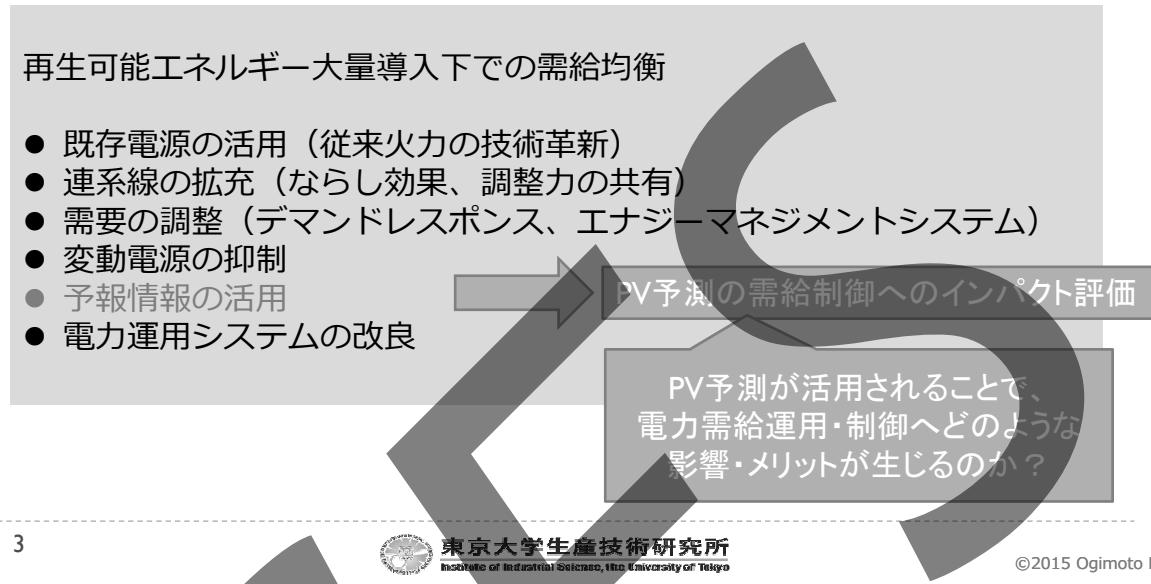
調整力：発電所の持つ周波数調整可能な、調整容量

出典：環境省低炭素社会づくりのためのエネルギーの低炭素化に向けた提言（平成24年3月）
<https://www.env.go.jp/earth/report/h24-08/index.html>

問題提起

再エネ電源の大量導入が電力システムへ与える影響

- ▶ 再エネ・大量導入下の需給均衡の維持は非常に困難
- ▶ 様々な時間レンジの変動に対応するための調整力不足の顕在化
 - ▶ 不確実な再エネ電源の変動・予測誤差には予備力のみでは対応できない可能性
- ▶ 安易な調整力確保（火力発電機の新設）は、経済性、環境性、安定供給性から非現実的



研究意義

なぜ、PV予測の需給制御へのインパクト評価？

- ▶ 従来は、電力システム運用における不確実性は電力需要のみで、電力会社の経験により予測が大外れする頻度は少なく、不確実性は予備力で考慮することで大きな問題は生じなかった。
- ▶ 太陽光および風力発電の大量導入は、新たな不確実性要因、その予測誤差は大きい。
- ▶ 再エネ電源は気象条件により、その発電出力が大きく変化することから、気象予測の技術革新が非常に重要。
 - ✓ 予測値・予測誤差の評価にはME,RMSEを用いられることが多く、その予測技術の適用先である電力システムに与える影響を正確に評価することはできない。
 - ✓ 気象予測データが電力システム運用に与える影響、具体的には、
 - ✓ 発電コスト（燃料費、起動費など）といった経済性、
 - ✓ 供給力不足、短周期変動に対する調整力不足などの供給安定性に与える影響を分析することで、必要な気象予測技術の仕様が明らかになる。



研究アプローチ 起動停止計画問題

電力システムを確実に、安全・安定かつ効率的に運用するためには、多くの制約条件を満たす必要がある：

需要と供給の均衡（需給均衡）

均衡が崩れる、システムの周波数が変動し、工場等の製品品質に悪影響を及ぼす大きく逸脱すれば大停電をもたらすことになる

この大前提の下、システム運用では、発電コストを最小化する様々な計画を立てる

期間	計画対象
長期（数年～数十年）	発電所の運転、廃止計画
中期（年間～月間）	燃料供給、設備保全計画
短期（週間～前日～当日）	発電所（発電機）の運用計画

日々の火力、水力、揚水発電所等の運用計画は起動停止計画問題と呼ばれる

▶ 5



©2015 Ogimoto Lab.

研究アプローチ 起動停止計画モデル



翌日の電力需要を満足する（均衡する）、様々な特性を持つ発電機群の

- 起動・停止の時間（いつ起動して、いつ停止するか？）
- その発電量（どの発電機が、いつどのくらいの発電出力をするのか？）

を決定することを、“起動停止計画問題”と呼ぶ。

（総費用を最小化するオペレーションズ・リサーチ：OR、最適化問題）

翌日の電力需要と均衡する各発電機の運用を決定するスケジューリング問題

かつ、その発電コストが最小になる運転計画を求める費用最小化問題

もし、送電線潮流も考慮するならば、ネットワークフロー問題

様々な特性を持つ発電機群の起動・停止の時間、その発電量の計画は、
その費用を最小化する最適化問題として定式化することで、日々の運用に使用

起動停止計画をモデル化、シミュレーションを実施することで、
予測情報が電力システムの運用に与える影響を分析可能

▶ 6



©2015 Ogimoto Lab.

研究アプローチ 古典的な起動停止計画モデル

一般的な定式化

• 目的関数

$$\text{minimize} \sum_{t=1}^T \left[\sum_{n=1}^N \left(\text{fulCosTher}_n \times p_{n,t} + \text{strCosTher}_n \times p_{\text{Str},n,t} \right) \right]$$

minimize { 燃料費×発電出力(連続変数) + 起動費×起動変数(0,1変数) }

• 制約条件

✓ 需給均衡

$$\text{火力発電量} + \text{水力発電量} + \text{揚水発電量} + (\text{再エネ発電量}) = \text{需要量}$$

✓ 出力制約

$$\text{最低出力} \leq \text{発電出力} \leq \text{最大出力}$$

✓ 短時間変動制約 (Load Frequency Control調整力、他)

$$\sum (\text{最大出力} \times 5\% \times \text{稼動変数}) \geq \text{需要量} \times 3\%$$

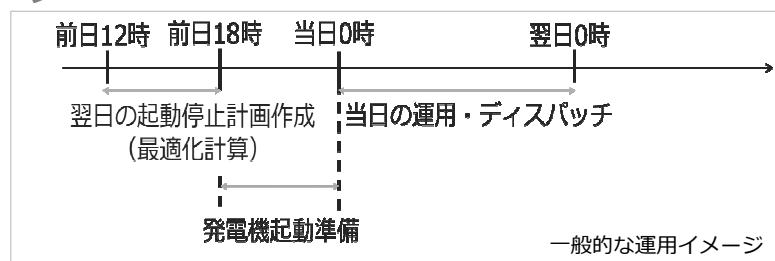
エッセンスは非常にシンプルな問題

▶ 7

研究アプローチ 電力運用システム運用における起動停止計画のモデル化

電力運用の前提

- ✓ 発電機の起動に数時間を必要とするため、火力発電機の運用は前日に決定される
 - ✓ 実際には、当日も行うところが増えている
- ✓ 翌日の需要もまた、前日に決定する必要があるため、予測値となる
- ✓ 需要や天候が予測と外れても、起動に数時間を要するため、当日の起動停止計画(on/off)は変更できない（一部変更可）



モデルへのニーズ

再エネの出力が予測に対して正負どちらに外れても当日に需給均衡可能かつ、不安定な再エネに対する十分な調整力を確保できる起動停止計画が必要

▶ 8

モデル 定式化（一部抜粋）【信頼区間付き、決定論アプローチ】



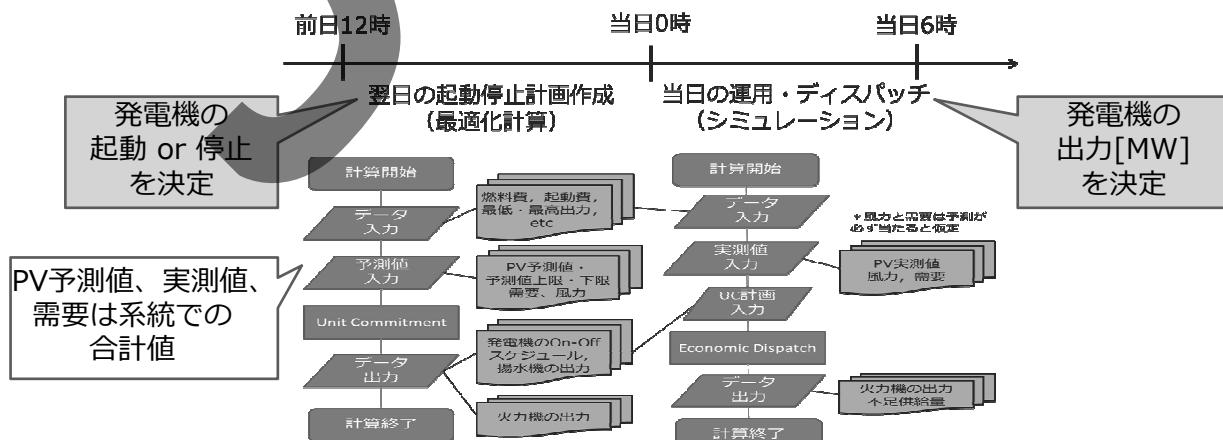
宇田川佑介, 萩本和彦, 池上貴志, 大関崇, 福留潔:「太陽光発電の予測誤差が需給運用と発電コストに与える影響」,
電気学会新エネルギー・環境メタボリズム社会・環境システム合同研究会, FTE-13-60, MES-13-16, pp.85-95 (2013)

▶ 9

モデル アルゴリズム

- ▶ モデル構成
 - ▶ 火力発電機モジュール、揚水発電機モジュール、バッテリーモジュール
- ▶ 分析対象
 - ▶ 電力システムサイズ（系統ネットワークは非考慮）
- ▶ 分析期間
 - ▶ 1年間（24時間48タイムステップを対象に最適化）

具体的な分析ケース
については後述

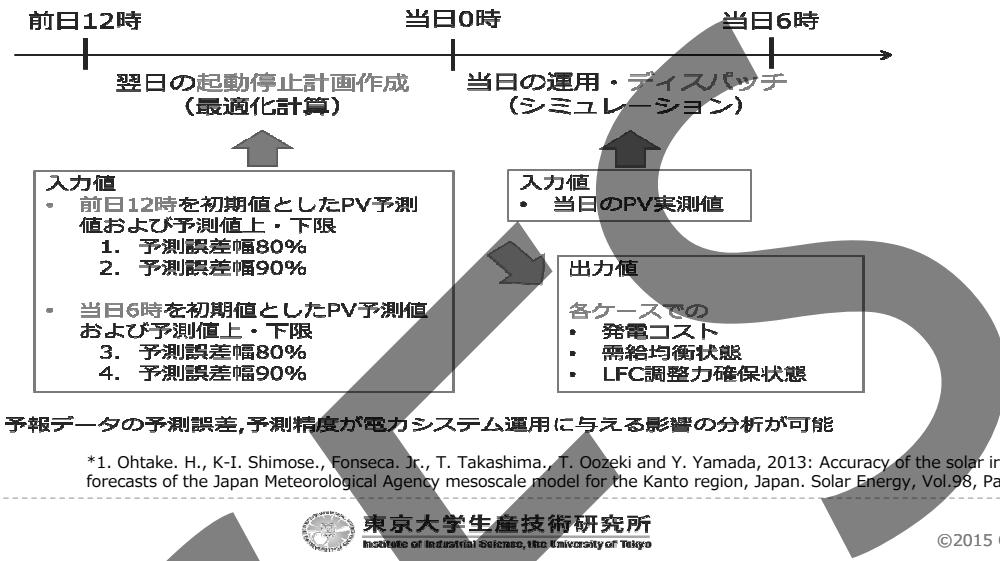


▶ 10

分析 解析項目

- ▶ 分析内容
 - ▶ 起動停止計画モデルを作成し、2030年の電力システムを分析
- ▶ 評価項目
 - ▶ 予報データの予測誤差幅（信頼区間）
 - ▶ 予報データの初期値時刻

予測データは気象庁メソスケールモデルによる
日射量予報値をPV発電データへ換算。
詳細はOhtake et al. [2013] *1。



分析 解析対象

- ▶ 再エネ電源が大量導入されていると想定される2030年がターゲット
- ▶ 東京電力システム規模を想定
- ▶ 解析期間は1年間（365日×48タイムステップ/日。最適化は1日単位）
- ▶ 2030年における発電データに換算するため、
 - ▶ 2010年度の太陽光発電データ*1に対して、2010年エネルギー基本計画の導入量（全国53GW、東京電力17.5GW）を乗じることで、想定
 - ▶ 需要データは、2010年のものを使用。
ただし2011/3/11以降は、震災の影響のないデータに修正。詳細は福留ほか(2011)*3

供給力	合計定格容量	機数	内訳
火力	42.56[GW]	92	石炭: 15 LNG: 57 石油: 20
揚水	13.68 [GW]	52	可变速型: 11 定速型: 41
ベース	13.71[GW]	1	原子力 一般水力

*1. 大関 崇, Joao Fonseca, 高島工, 萩本和彦: 太陽光発電システムの代表的な発電量データセットに関する検討, FTE-11-029, MES-11-015, 電気学会研究会(2011.11)

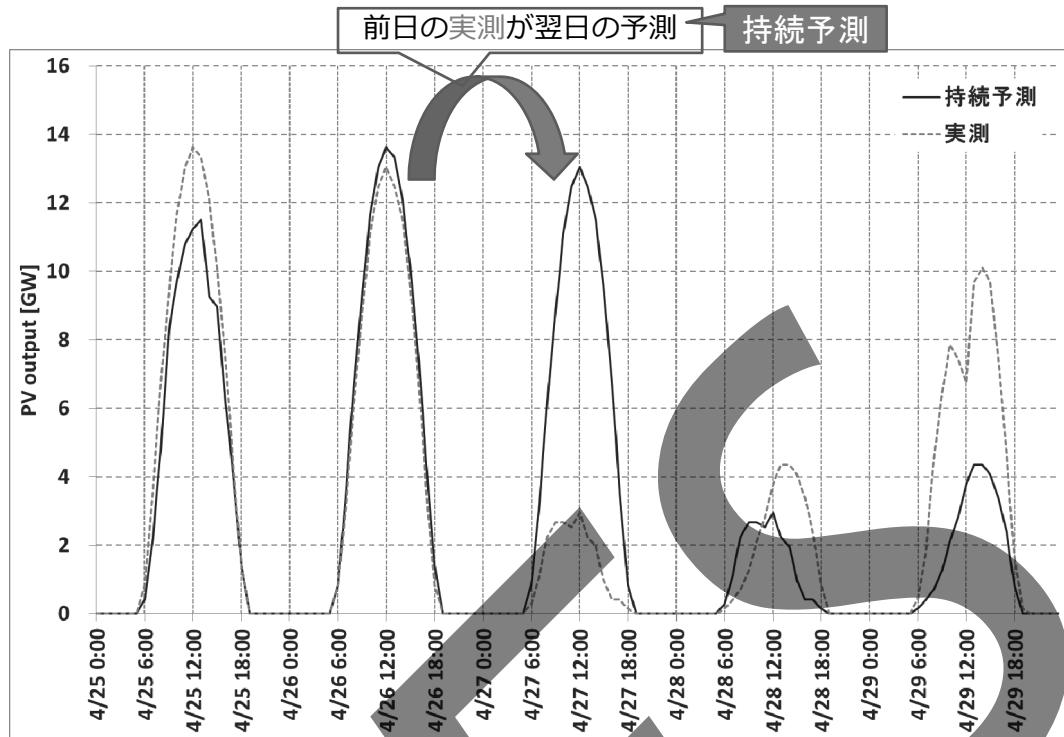
*2. 萩本和彦, 池上貴志, 片岡和人, 斎藤哲夫: 電力需給解析のための全国風力発電量データの収集と分析, 電気学会平成24年電気学会全国大会講演論文集, 6-003, 5-6 (2012)

*3. 福留潔, 東仁, 池田裕一, 岩船由美子, 萩本和彦: 「長期電力需給解析のための電力需要曲線の想定手法」, 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, FTE-11-46, MES-11-32, pp.89-94 (2011)



予測

PVの実測と持続予測



▶ 13

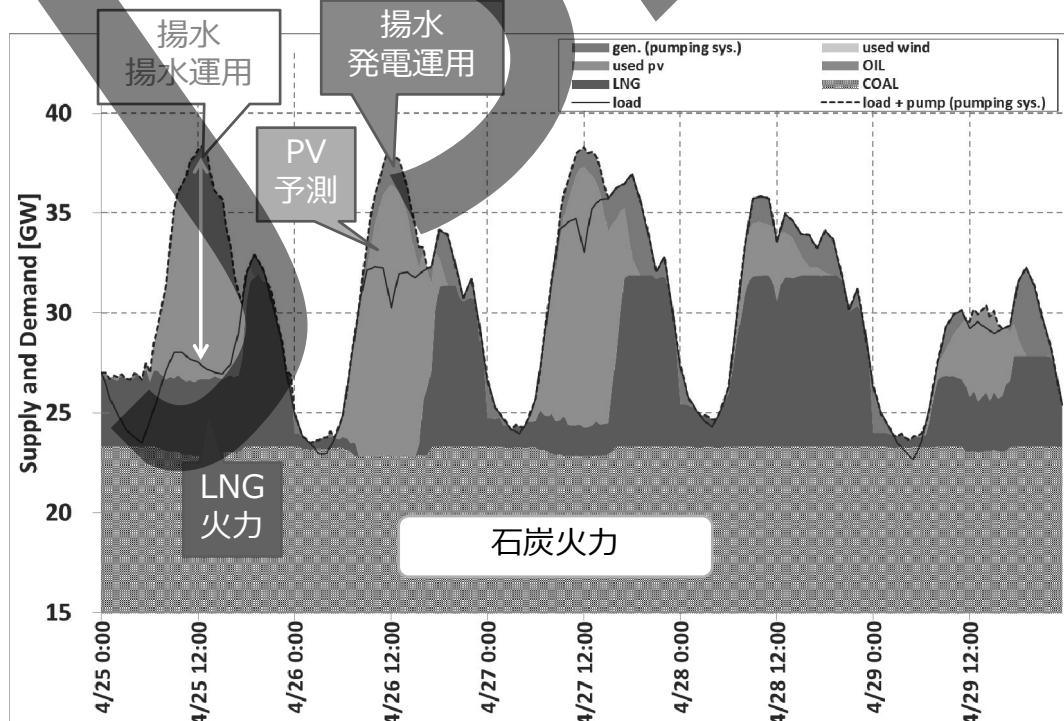


東京大学生産技術研究所
Institute of Industrial Science, the University of Tokyo

©2015 Ogimoto Lab.

結果

PV予測技術を用いない発電機運用計画（PVは持続予測） 4/25-4/29



▶ 14

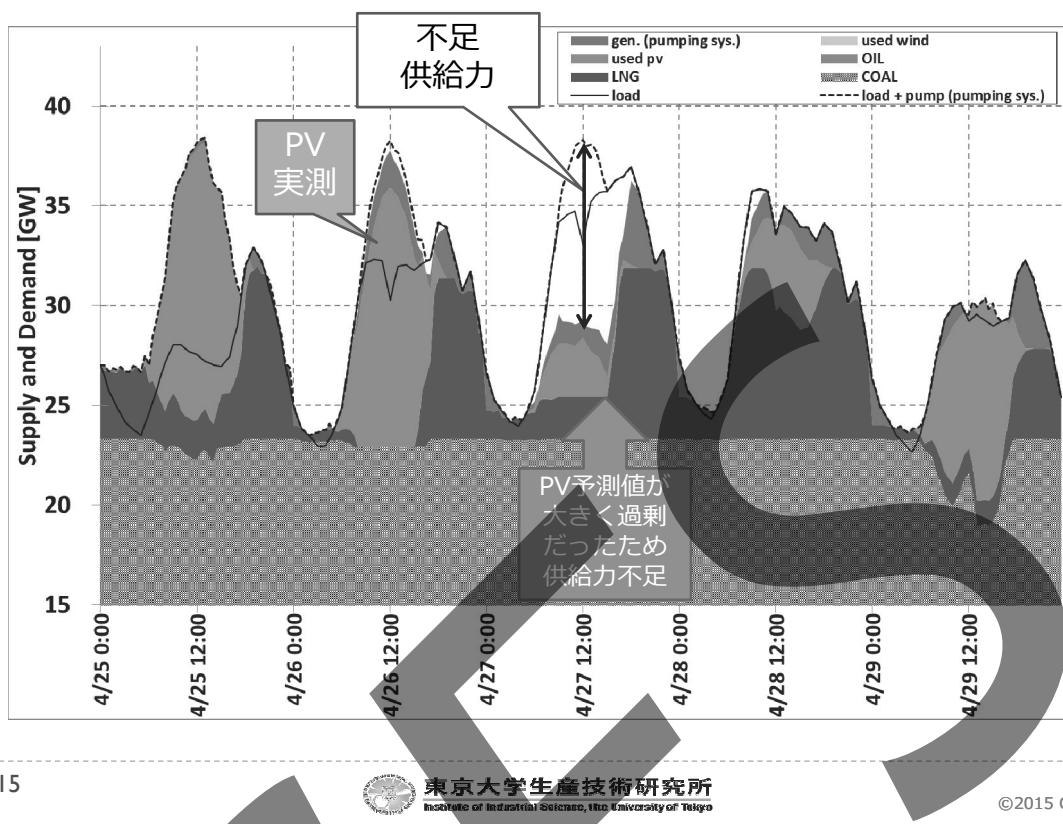


東京大学生産技術研究所
Institute of Industrial Science, the University of Tokyo

©2015 Ogimoto Lab.

結果

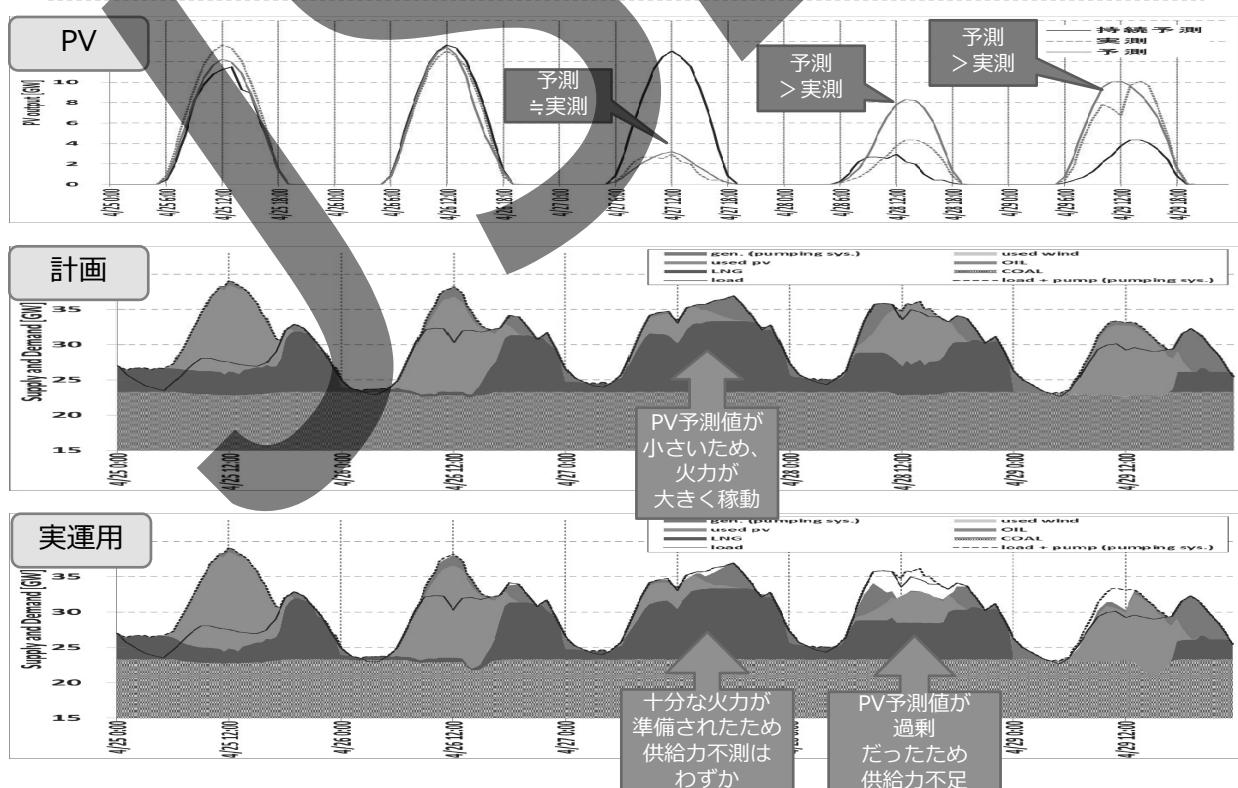
PV予測技術を用いない発電機運用実績（PVは実績） 4/25-4/29



▶ 15

結果

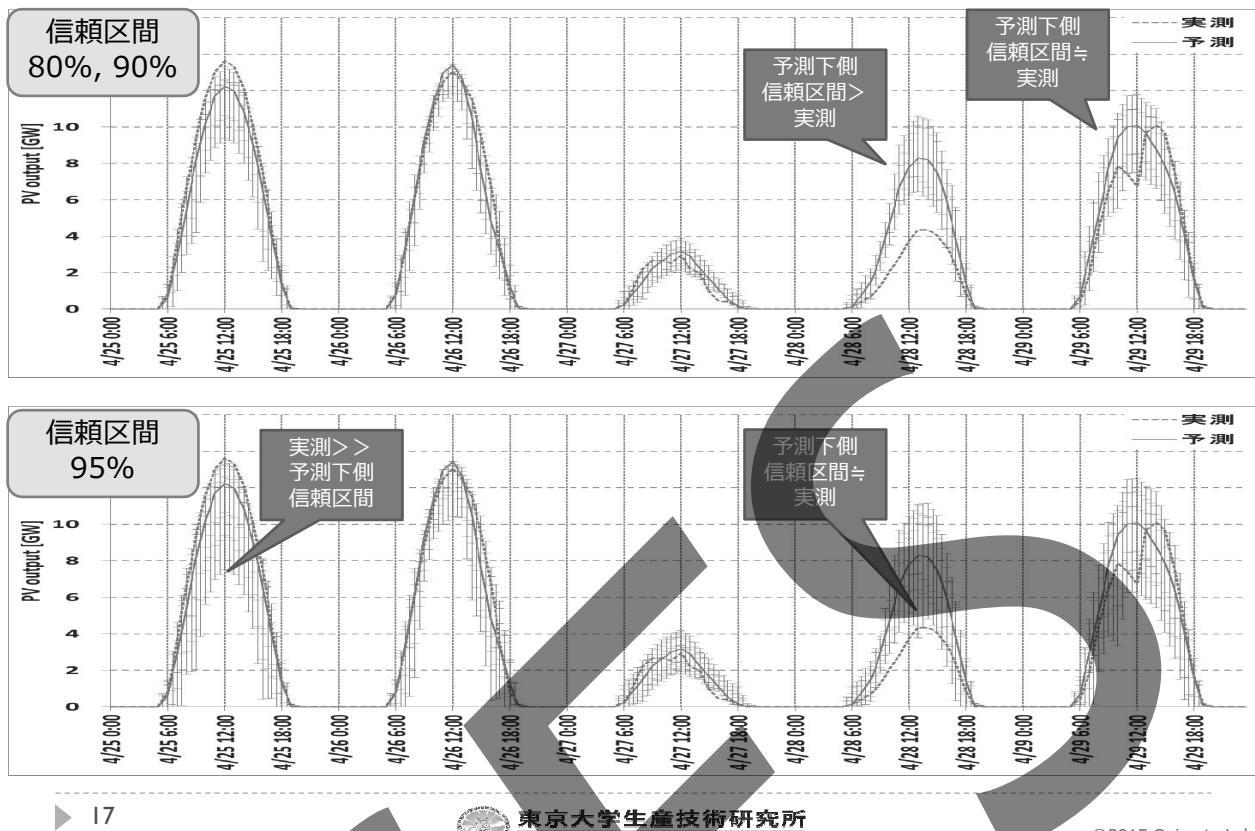
PV予測値を考慮した発電機運用計画（上）と実際の運用（下）



▶ 16

結果

PVの実測値、前日予測値、信頼区間（80%, 90%, 95%）



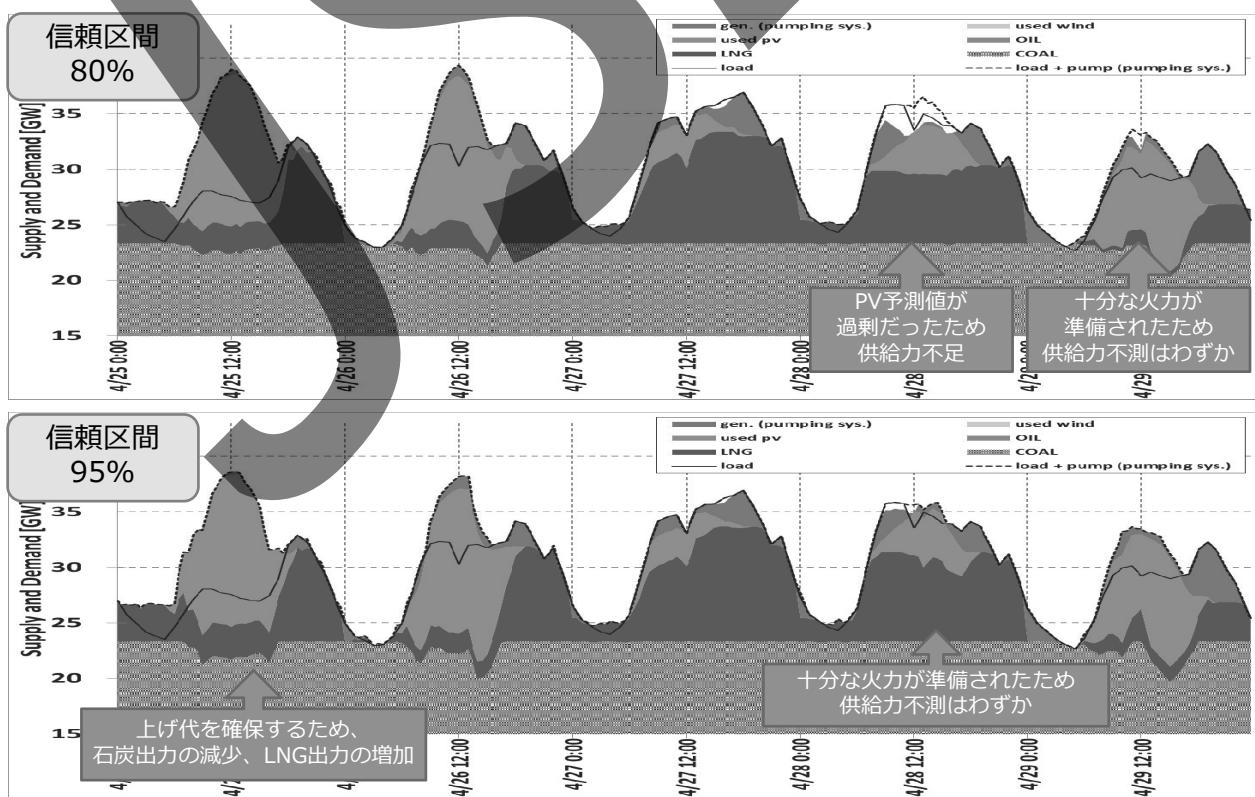
▶ 17



©2015 Ogimoto Lab.

結果

PV予測値の信頼区間を考慮した実際の運用



▶ 18

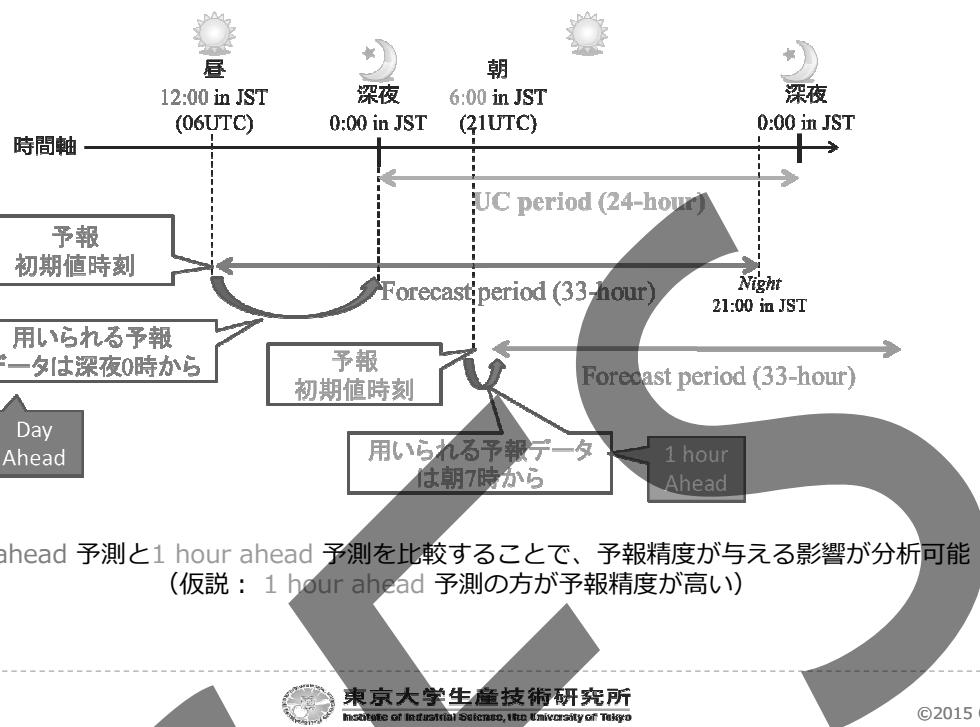


©2015 Ogimoto Lab.

結果

PV予測スケジュール

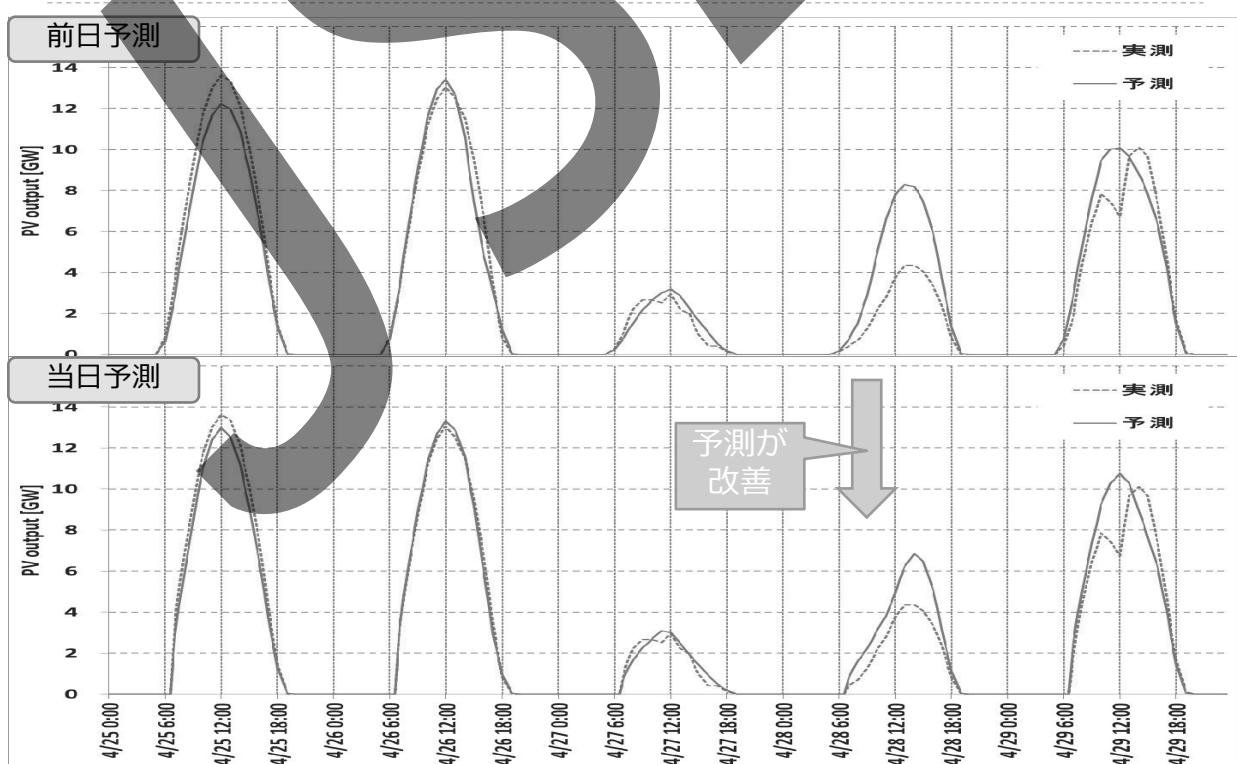
- 気象庁は1日8回、うち、4回が33時間予測を行なっている（2010年では）



▶ 19

結果

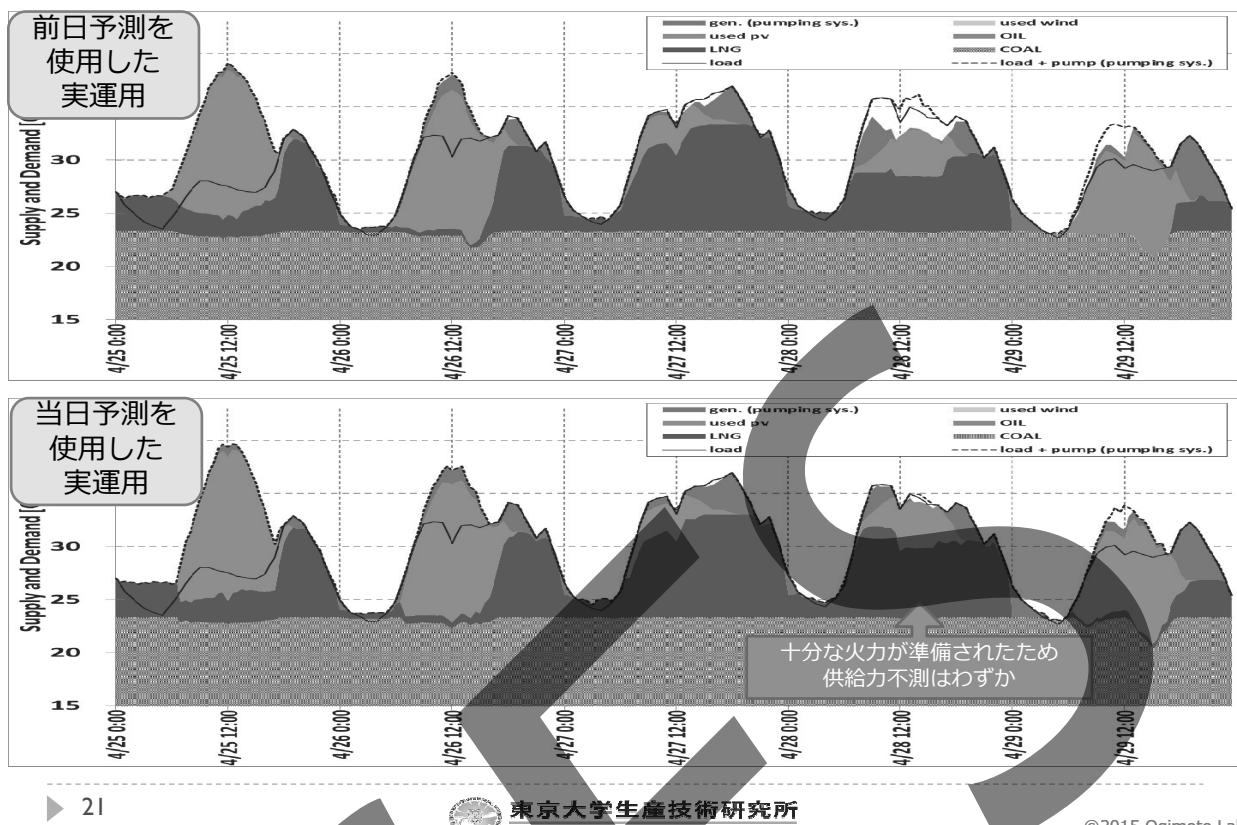
PVの実測値、前日予測値（上）、当日予測（下）



▶ 20

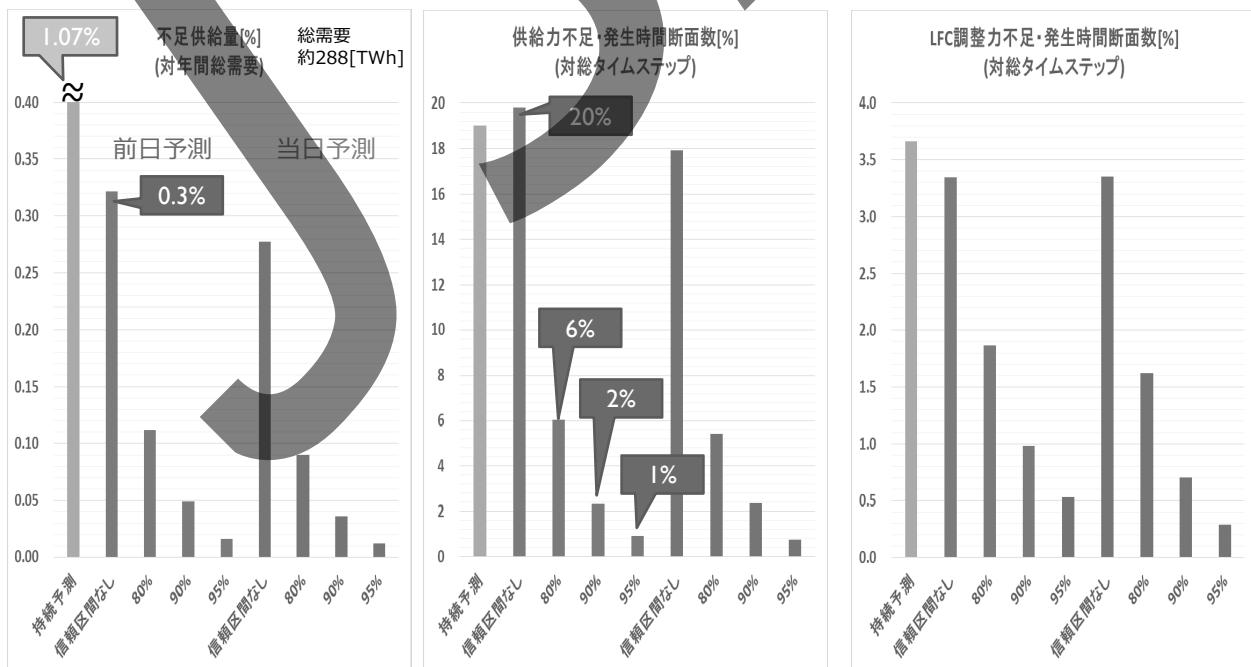
結果

PV予測値(当日) + 信頼区間(80%)を考慮した実際の運用

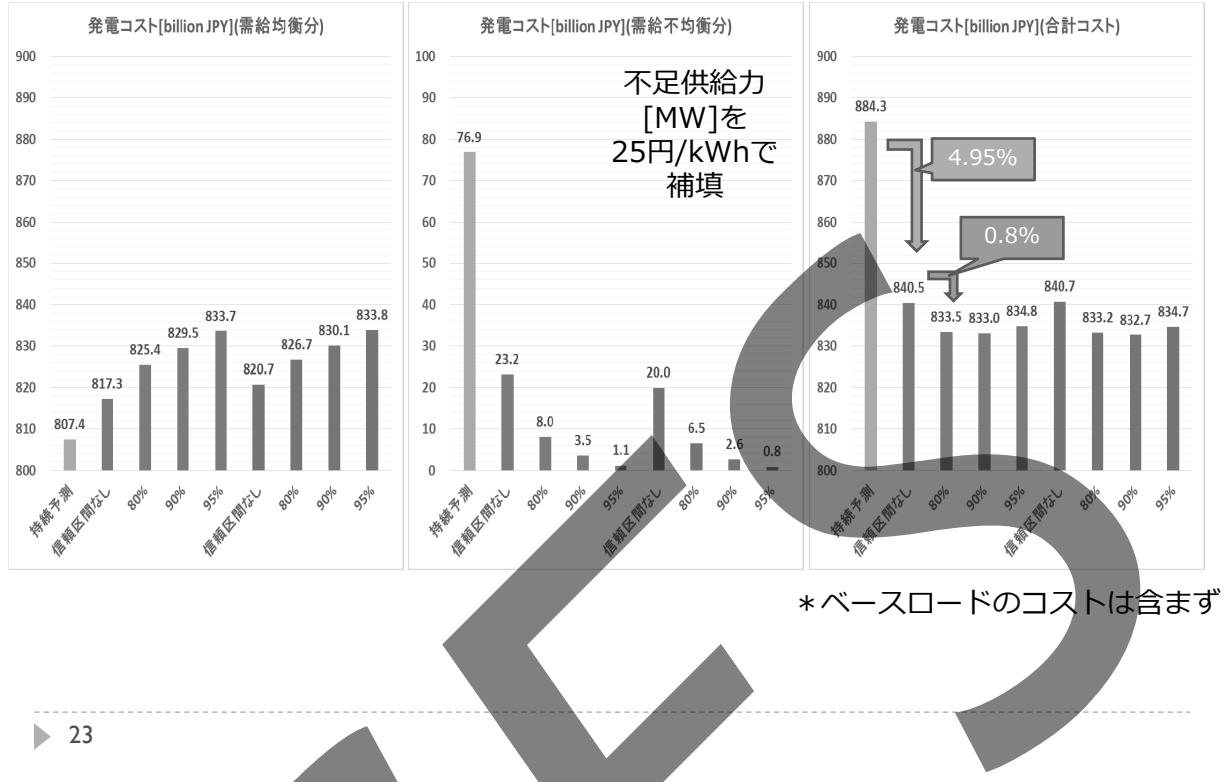


結果

不足供給量、供給力不足発生時間数、LFC調整力不足発生時間数（年間）



結果 発電コストの比較（年間）



まとめ

再エネ電源が大量導入されると想定される2030年における電力システム・発電機群（東京電力）を模擬し、開発されたPV発電量予測データが、需給運用に与える影響を分析した。

予測なし（持続予測）、前日予測、信頼区間付き前日予測、当日予測、信頼区間付き当日予測

信頼性

- ▶ 前日にPV予測が提供されることで、当日の供給力不足は大きく防げる
 - ▶ 不足供給量が “約1%→約0.3%” へ減少（対総需要）
- ▶ PV予測に信頼区間が提供されることで、当日の供給力不足発生確率が大きく減少
 - ▶ 供給力不足発生時間断面数が “約20%→約6%, 2%, 1%” へ減少（80%, 90%, 95%）

経済性

- ▶ 前日にPV予測が提供されるだけで、発電コストは大きく減少
 - 供給力不足を、急速に稼働できる電源（石油火力）、DRなどで補填した場合
 - ▶ 発電コストが “約5%” の減少（¥25/kWhで補填）
- ▶ PV予測に信頼区間が提供されることで、さらに発電コストが減少
 - ▶ 発電コストが予測ありのケースから約0.8%の減少

その他

- ▶ 信頼区間を広くとることで、信頼性は増加するが、経済性は途中から減少する
- ▶ 今回のケースでは、90%の信頼区間を用いた方がコストが安い。
 - ▶ 80%では補填費用が高く、95%では安全側過ぎて費用が高くなる。
- ▶ 当日予測を現状の運用では使用することは厳しいが、信頼性、経済性へよい影響を与える
 - ▶ 予報技術の改良は、再エネ大量導入時の電力システム運用に大きく資する