

---

第7回再エネ講座公開研究会(オンライン)、京都大学、2023年4月24日(月)

# 需給両面から考える脱炭素電源ベストミックス

東京大学 小宮山 涼一



# 電力システムの課題

再エネ大量導入、自然災害等による需給ひっ迫、GX推進

## ■ 電力安定供給の強化

✓ 供給力・調整力・慣性力の確保、送配電網の維持・増強、需給バランス最適化、電力コストの抑制

## ■ レジリエンス強化

✓ 自然災害や厳気象など予期せぬ稀頻度リスクへの対応

## ■ 脱炭素技術の活用

✓ 再エネ(洋上風力等)、電力貯蔵(蓄電池等)、水素・アンモニア発電、次世代革新炉、CCUS技術

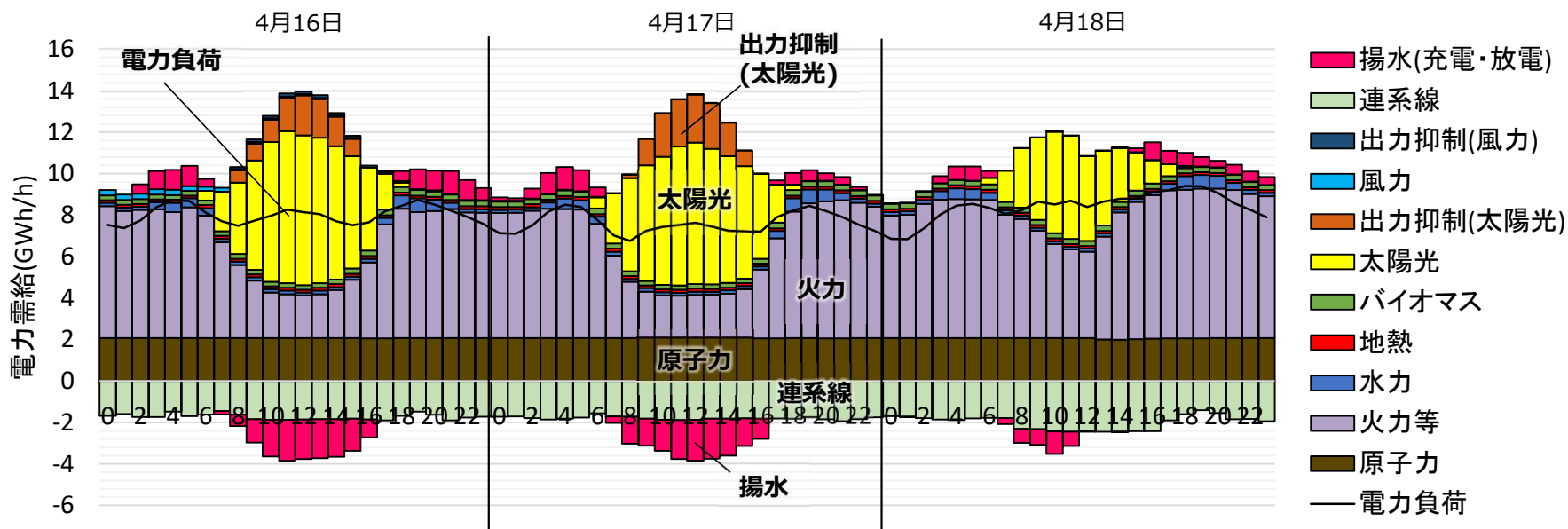
## ■ 電力システム運用の高度化

✓ 電力フローの双方向化(地域間・上下流間)、DER活用と柔軟化(EV、ヒートポンプ、PV+蓄電池等)

需給両面での安定供給対策の強化が重要

# 電力需給バランス(九州エリア、2022年4月16日~4月18日)

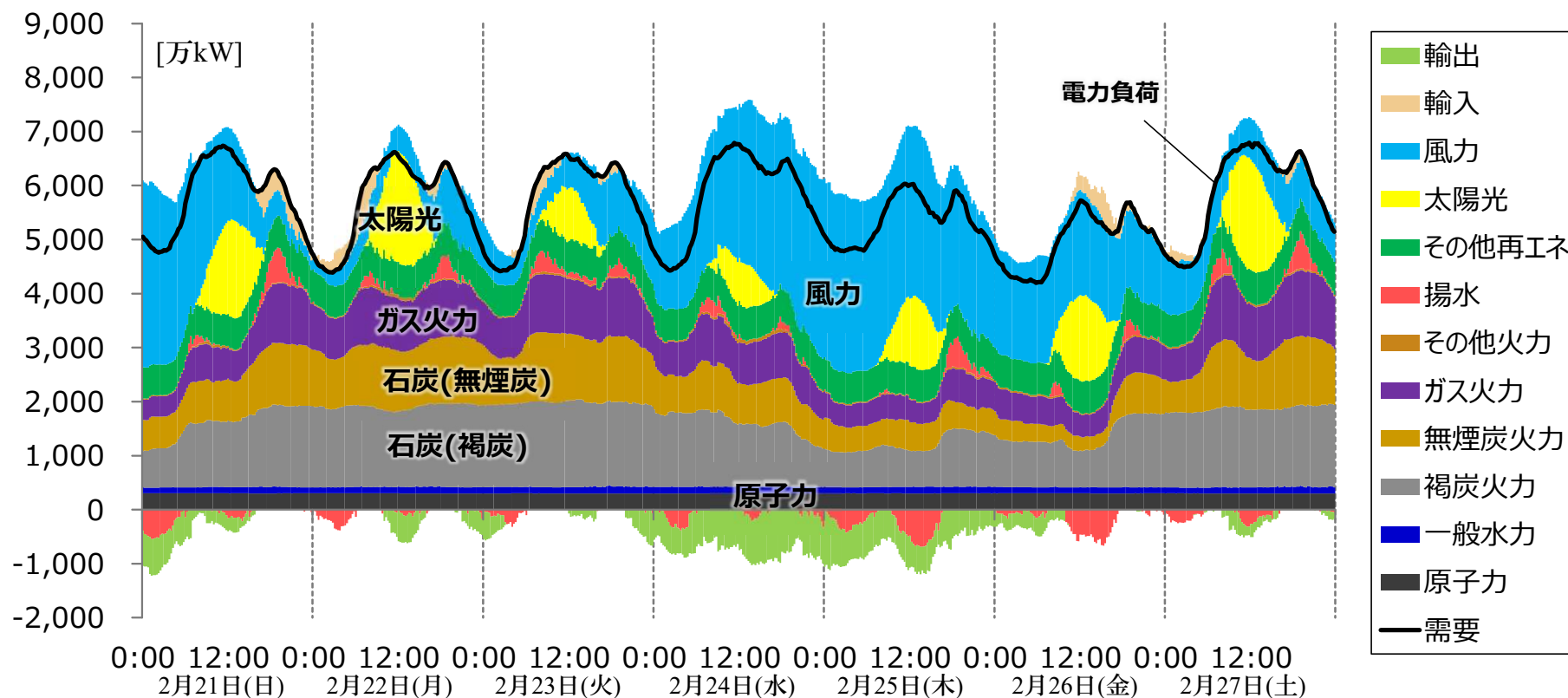
- 再エネ比率の高いエリアでは、再エネ最大活用に向けた対策の早期実行が必要
  - 調整力の確保、送電容量の最大活用や増強、電力貯蔵機能の拡充、電力需要の柔軟性向上
- 定量評価ツール開発による各種対策の費用対効果など、客観的評価が重要に



(出所) 九州電力エリア需給実績データを基に作成

# 電力需給バランス(ドイツ、2023年2月21日~2月27日)

風力や太陽光発電出力の変動に対して、石炭・ガス火力、バイオマス等に加え、他国との国際送電網(ピーク電力の約3割の規模に相当)を通じた電力の輸出入で調整→再エネ電力拡大に貢献

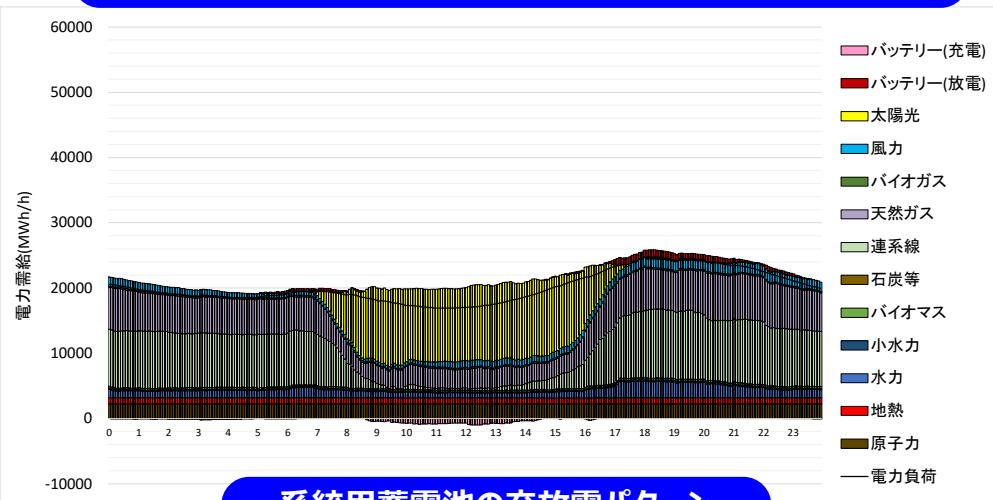


(出所) ENTSO-Eの統計データを基に作成

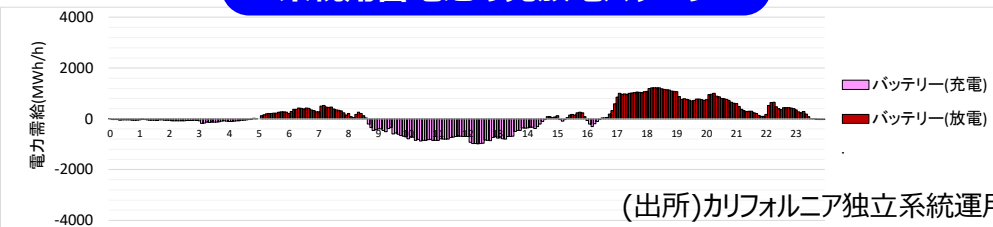
# 電力需給バランス(米・カリフォルニア州、2023年2月4日,9月5日)

- コスト低下や電気自動車普及等を背景に系統用蓄電池の活用への関心が高まっている。
- カリフォルニア州では系統用蓄電池の運用が再エネ出力変動の緩和や需給ひっ迫時に活用されている。

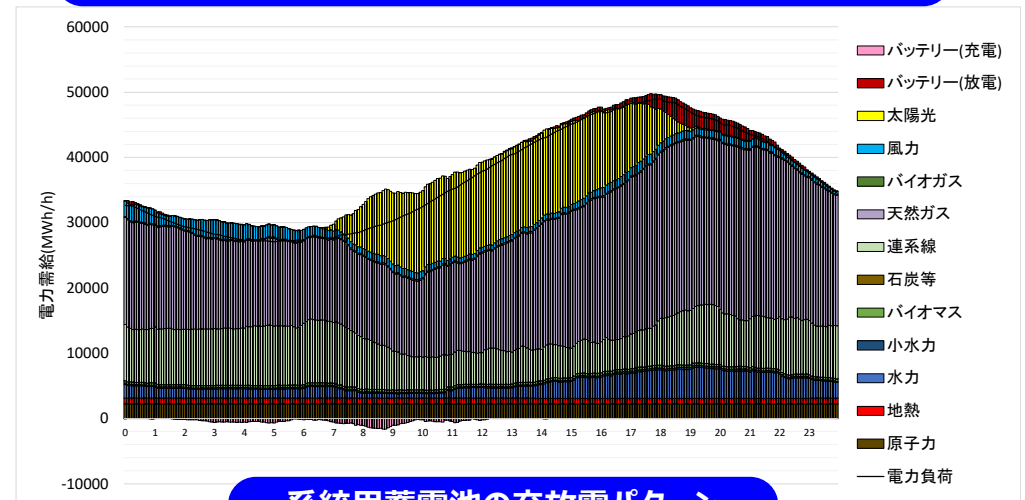
電力需給バランス(カリフォルニア州、2022年2月4日[日])



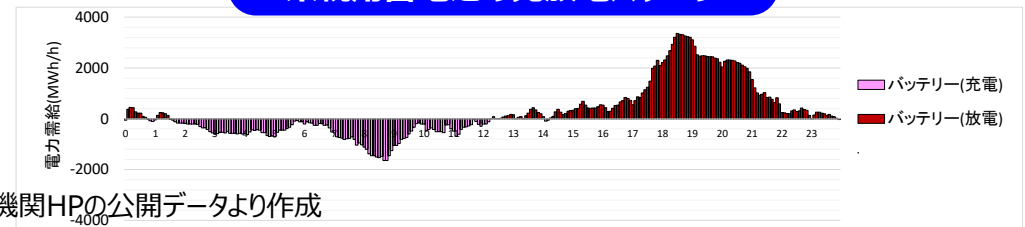
系統用蓄電池の充放電パターン



電力需給バランス(カリフォルニア州、2022年9月5日[月])



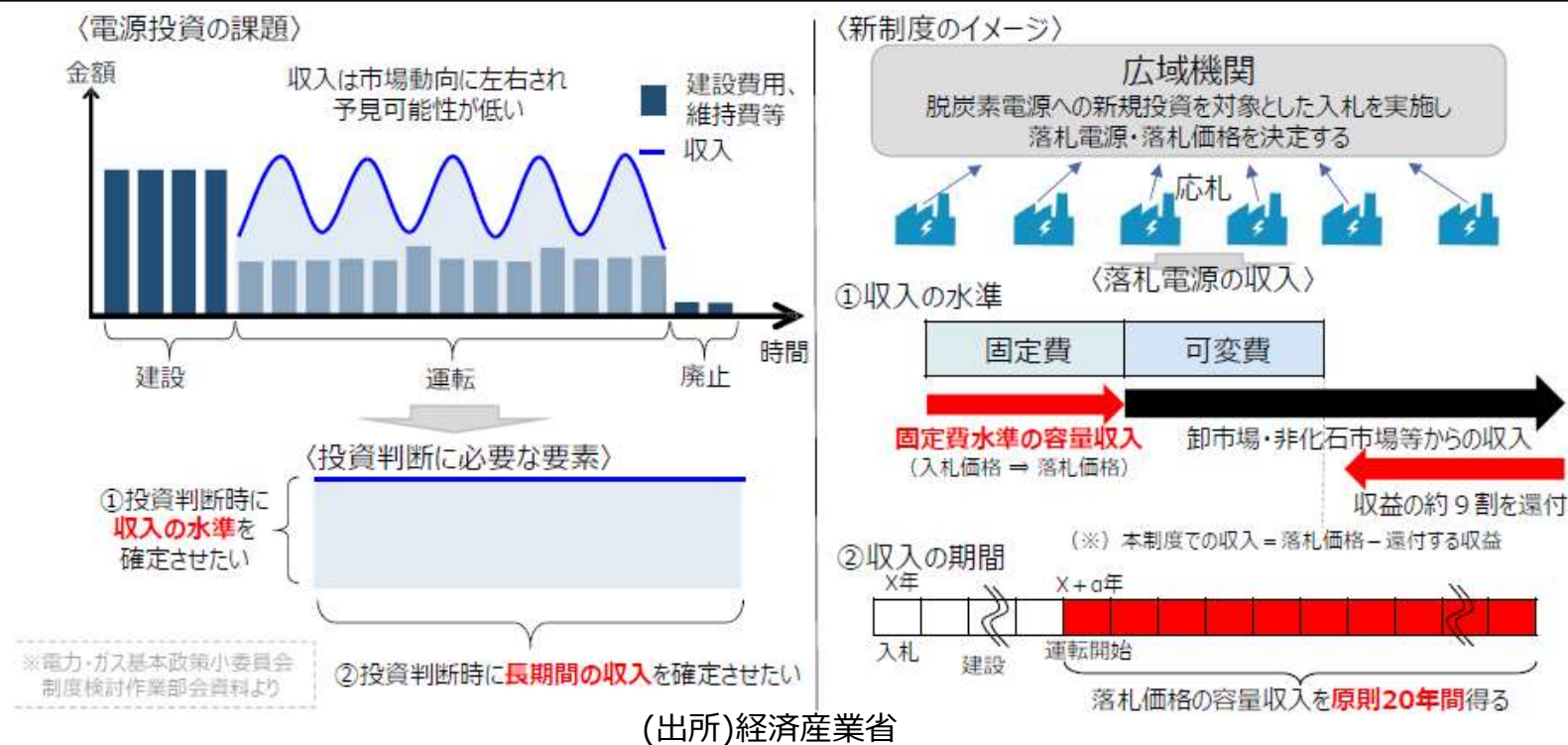
系統用蓄電池の充放電パターン



(出所)カリフォルニア独立系統運用機関HPの公開データより作成

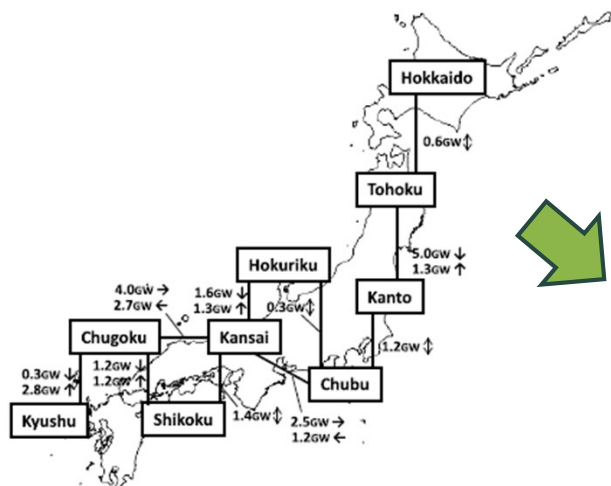
# 長期脱炭素電源オークション

- 電源投資の長期的な予見可能性が低い→電源新規投資の促進を目的、長期間の固定収入を確保する制度導入見込み。
- オークション方式：マルチプライス方式、電源の固定費水準の容量収入(kW価値に対する収入)が原則20年間得られる仕組み、可変費を超過する他市場収益は還付。
- 脱炭素電源の新設やリプレース、改修が対象：水素/アンモニア、バイオマス、LNG(脱炭素改修条件)、蓄電池、一般水力、揚水、地熱、原子力、太陽光、風力。2023年度は400万kWを募集

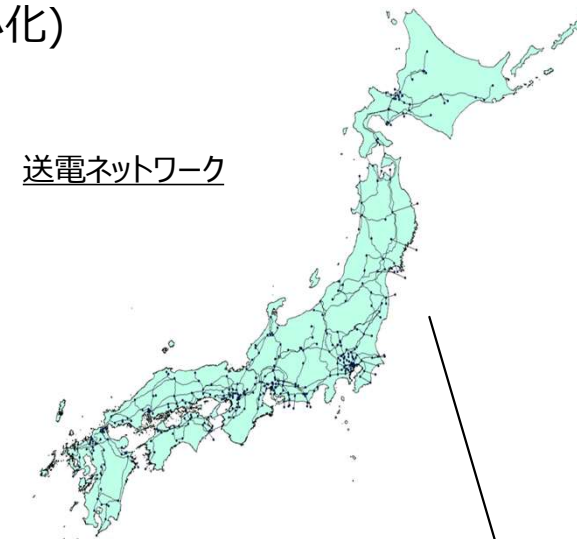
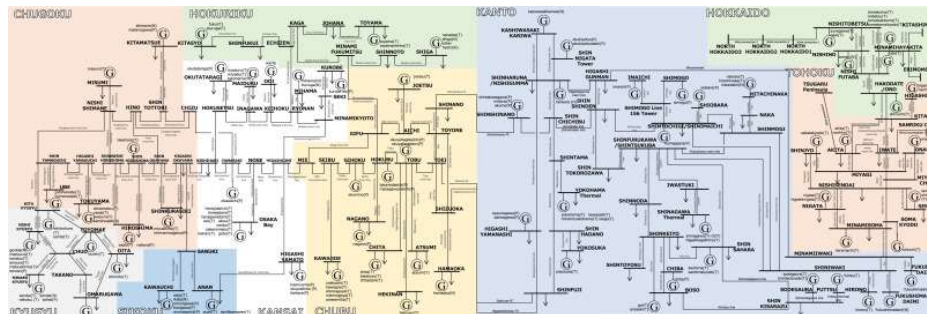


# 最適化型電力需給モデル

発電、送電網、電力貯蔵等の投資、運用を総合的に最適化(電力システム総コスト最小化)



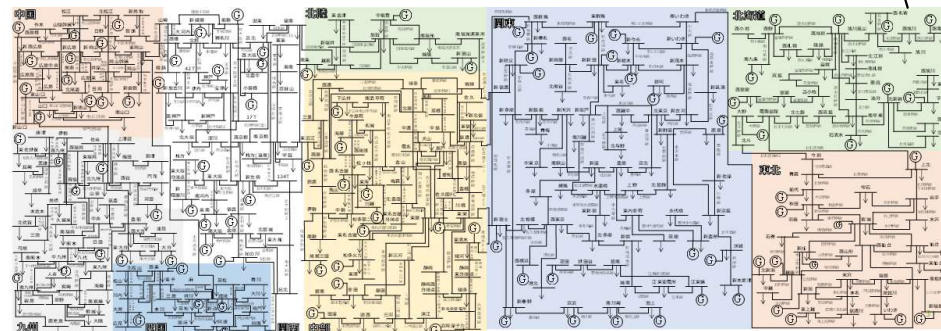
- 地理的解像度: **135地点・送電線166本**
- 時間解像度: **年間52,560時点(10分値)**



- 地理的解像度: 9地点・送電線10本
- 時間解像度: **年間52,560時点(10分値)**



- 地理的解像度: **383地点・送電線475本**
- 時間解像度: **年間8,760時点(1時間値)**



(参考文献)

- 小宮山, 柴田, 藤井: 電気学会論文誌B, **133**(3), 263-270 (2013)
- 杉山, 小宮山, 藤井: 電気学会論文誌B, **136**(12), 864-875 (2016)
- Komiyama R, Fujii Y: *Energy Policy*, **101**, 594-611 (2017)
- Komiyama R, Fujii Y: *Renewable Energy*, **139**, 1012-1028 (2019)
- Komiyama R, Fujii Y: *Sustainability Science*, **16**, 429-448 (2021)
- 田原, 藤井, 小宮山: エネルギー・資源学会論文誌, **43**(3), 75-83 (2022)

# 最適化型電力需給モデル(特徴)

- **1年間1時間値、8,760時間での分析**(1年間10分値、52,560時点での実績も有り)
  - ✓ 年間の再エネ出力変動(季節間変動など)を踏まえた投資・運用の同時最適(系統用蓄電池等)
- **電力系統ネットワーク(基幹系統)を考慮した分析**(地理的解像度: 383地点・送電線475本)
  - ✓ 電源・電力貯蔵設備容量や地域間・地内線容量の最適化、電力価格の可視化、再エネ資源等の偏在性の考慮
  - ✓ 系統NWを考慮しない場合、電源・電力貯蔵設備容量の必要量や電力価格の過小評価、需給運用の過大評価
- **様々な電源、脱炭素電源を考慮した分析**
  - ✓ 石炭, 石炭-アンモニア混焼, 石炭-CCS, ガス複合, ガス汽力, ガス-水素混焼, ガス-CCS, 石油, 水素, 原子力(大型炉, 小型炉), 一般水力, 地熱, バイオマス, 海洋, 太陽光, 陸上風力, 洋上風力, 揚水, NAS電池(長周期変動用), Li-ion電池(短周期変動用)
- **部門横断的な技術の考慮**
  - ✓ 燃料製造技術(電解水素、合成ガス[メタネーション]等)、脱炭素プロセス技術(高温熱貯蔵、DAC[Direct Air Capture])、分散型エネルギー資源(CGS、EV等)

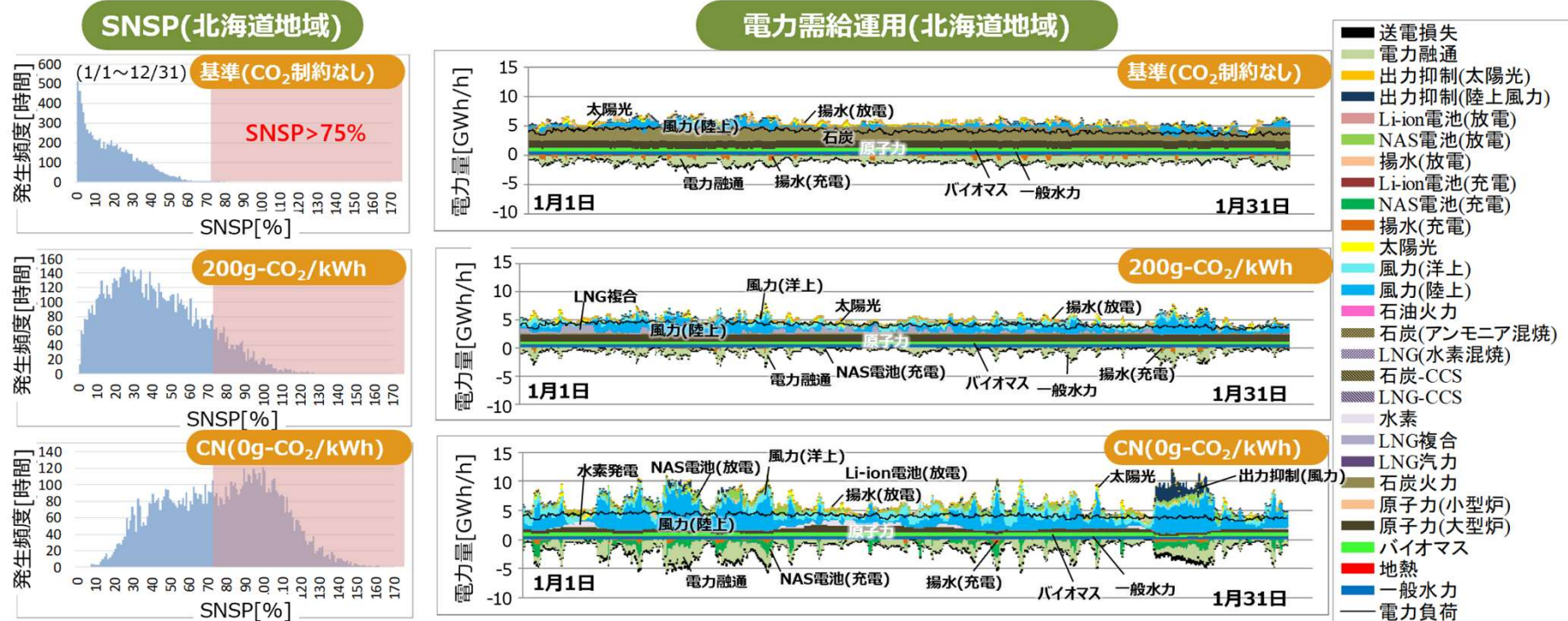
※(実績) 経済産業省 総合資源エネルギー調査会基本政策分科会資料(第43回会合,2021年), 経済産業省 産業経済研究受託事業「電力需給モデルを活用したシミュレーション調査」(2016年)他



# ご紹介するツールの主機能4：時系列の再エネ比率評価

慣性力強化を要する期間・量の導出が可能。慣性強化施策の効果定量評価が可能

再エネインバータの擬似慣性制御、同期調相機、グリーン火力(水素、CCSなど)、原子力、揚水式水力、蓄熱発電など



SNSP: the System Non-Synchronous Penetration (非同期電源比率)

(出典)小宮山, 藤井, (シンポジウム講演)カーボンニュートラル時代の電力需給解析, 電気学会全国大会(令和4年)(2022)での分析結果より作成

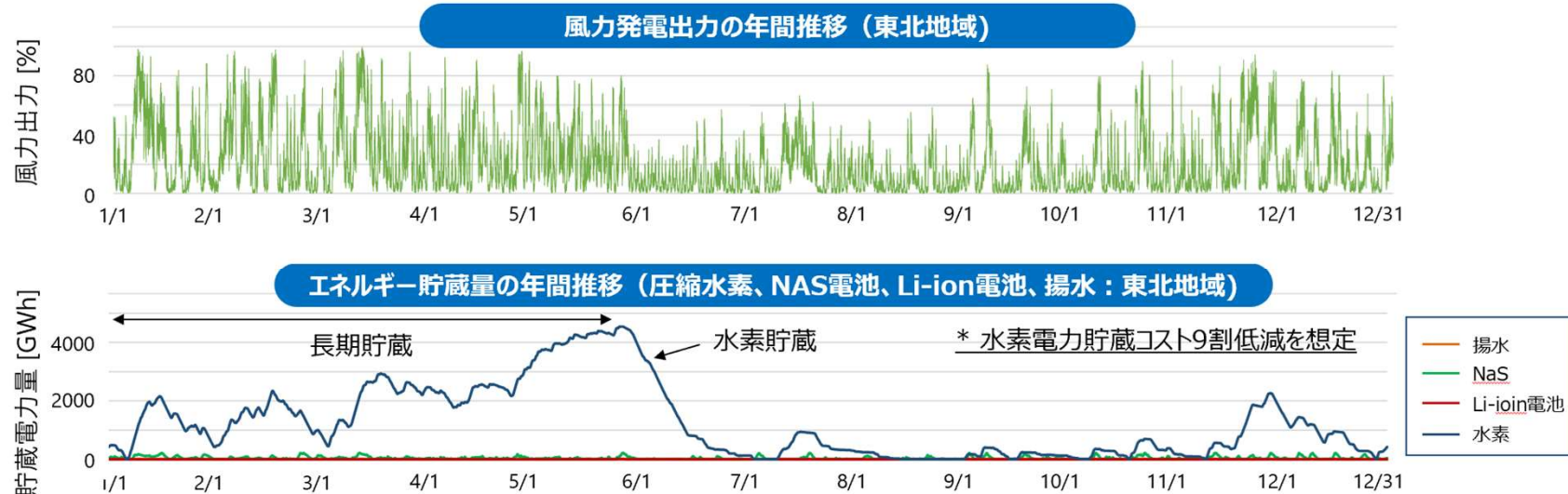
© H-UTokyo Lab. 2023. All rights reserved. 8

(出典) 小宮山涼一:「2050年カーボンニュートラルを想定したエネルギーシミュレーション」,日立東大ラボ 第5回産学協創フォーラム『Society 5.0を支えるエネルギーシステム』, 東京大学 安田講堂, 2023年1月25日 (2023)

### 見えてきた課題3：貯蔵とエネルギー確保を両立する水素技術と電力制御の融合

#### エネルギー貯蔵期間と量を適切に把握し、それに合わせた最適貯蔵技術の運用と要素技術開発が必要

- 水素貯蔵は貯蔵損失が小さく、長期間(週間、月間、季節間)の貯蔵に適する技術オプションの一つ (ただし、長期の水素貯蔵はOPEXが高いため、メタネーションやアンモニア、MCH変換等での貯蔵がより経済的となる可能性)
- 長期のバッテリー電力貯蔵はロスが大きい一方、日単位での頻繁な充放電は、バッテリーがより適する
- ただし、再エネ季節間貯蔵には、初期投資の大幅な抑制が必要(充放電の機会が少なく、収益機会が限定的)



MCH: Methylcyclohexane, OPEX: Operating Expense

(出典) Komiyama, R., Fujii, Y, *Energy*, 81, pp.537-555 (2015) より作成

© H-UTokyo Lab. 2023. All rights reserved. 11

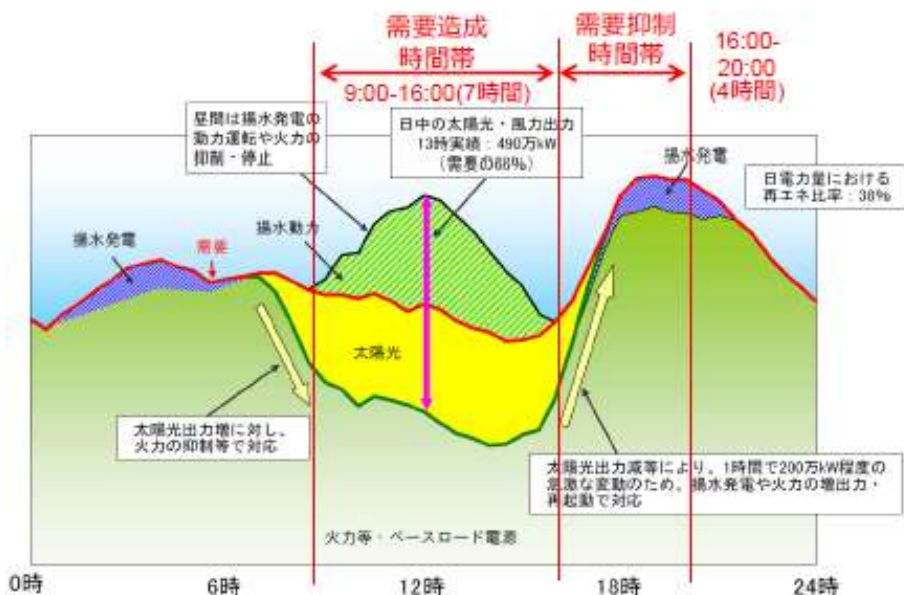
(出典) 小宮山涼一：「2050年カーボンニュートラルを想定したエネルギーシミュレーション」, 日立東大ラボ 第5回産学協創フォーラム 『Society 5.0を支えるエネルギーシステム』, 東京大学 安田講堂、2023年1月25日 (2023)

# 電力需要の柔軟性(DR)の活用に向けた期待

## 需要側資源(DER)活用による調整力の確保、電力コスト抑制への貢献(大規模集中型資源の投資抑制)

- 電気自動車、ヒートポンプ給湯機など、下げDR(4千~6千万kW),上げDR(2千~4千万kW)
- 自家発電設備の余力活用等、下げDR(1千~3千万kW),上げDR(1千~4千万kW)

### DR活用による電力需給調整



### 自家発電によるDRポテンシャル



季節・時間帯	ポテンシャル (万kW)	
	需要造成	需要抑制
夏 昼間	最大	4,265(1.5)
	最小	3,537(1.3)
夏 夜間	最大	3,641(1.3)
	最小	2,185(0.8)
冬 昼間	最大	4,161(1.5)
	最小	2,965(1.0)
冬 夜間	最大	3,745(1.3)
	最小	1,977(0.7)
春秋 昼間	最大	3,953(1.4)
	最小	2,861(1.0)
春秋 夜間	最大	3,537(1.3)
	最小	1,820(0.6)

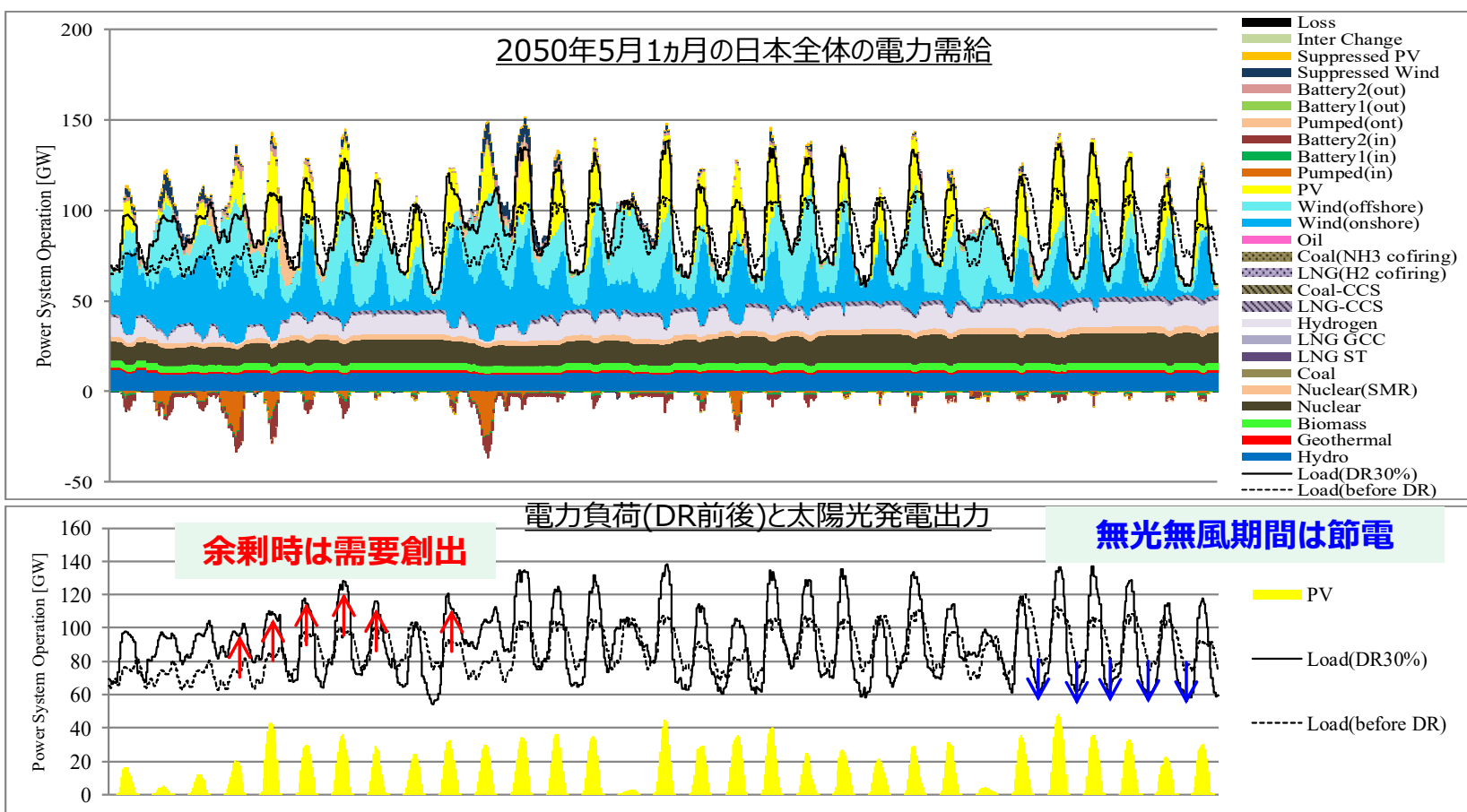
※ 括弧内は電力調査統計上の発電所数2,826で割った数値

電力調査統計における  
火力・水力自家発電  
設備容量  
5,201万kW

※ 操業シフトが可能な場合は、これまで稼働していない時間帯に発電をすることで、出力全量分の需要抑制ポテンシャルが存在  
※ 操業シフトによる需要造成のポテンシャルは右表と同様

# 電力需給バランスへの影響評価

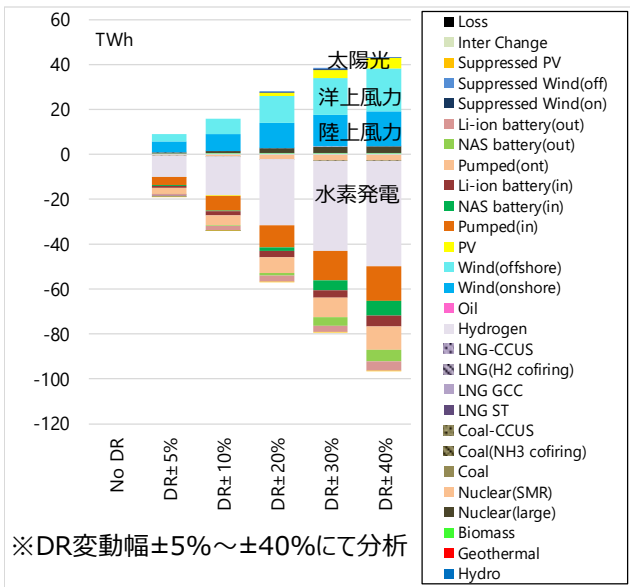
- 余剰電力発生時は電力需要増加（上げDR），その他の時間帯では節電（下げDR）が経済合理的オプション。
- 太陽光に起因する昼間の余剰電力発生の際，電力需要が増加して上げDR創出。夕刻や朝方に需要を抑制する傾向。



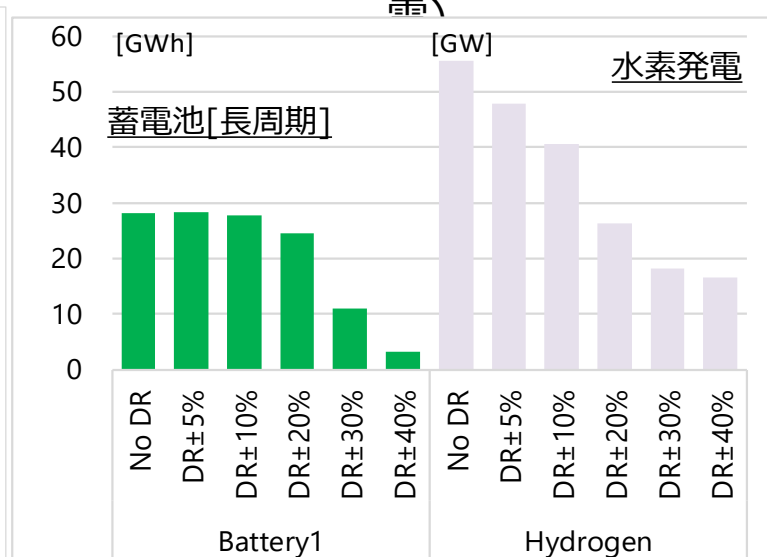
# 電力コスト等への影響評価

- 電力需要の柔軟性の向上は、調整力確保の投資の低減、再エネの導入拡大や有効利用に貢献。  
→風力発電や太陽光発電の接続量拡大への貢献。
- 例えば、脱炭素化実現ならびに再エネ導入時に調整力の役割を担う水素発電や蓄電池の導入量および投資がDR導入により低減し、コスト抑制に貢献。
- DR導入により、再エネ調整力への投資抑制効果が働き、システム全体のコストが低下。

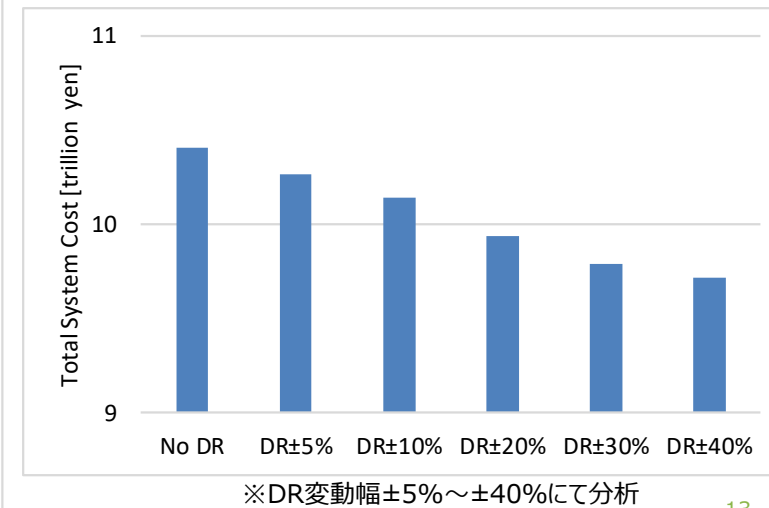
電源構成(発電量)の変化  
(基準値:No DR)



最適導入量  
(左:蓄電池[長周期]、右:水素発電)



電力システム総コスト



# 結 語

- 日本全国の送電システムを考慮した最適電源構成モデルに電力需要の柔軟性に関して拡張を行い、電力脱炭素化の将来像、ならびに、DR導入の影響分析を実施
- 今後の課題
  - DR技術の詳細化(HP給湯器、電気自動車などのポテンシャルの詳細考慮)
  - DR導入コストを考慮した分析

謝辞：本研究はJSPS科研費JP22H00572の助成を受けた。