

**H-UTokyo Lab.**

日立東大ラボ 第5回産学協創フォーラム  
「第5回 Society5.0を支えるエネルギーシステムの実現に向けて」

---

## 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

**小宮山 涼一**

東京大学 大学院 工学系研究科 教授

2023年1月25日

## 電力システムの脱炭素化を実現するためには、電力安定供給、レジリエンス強化、脱炭素技術の活用、電力システム運用の高度化、データ・デジタル技術活用が主要な課題

電力需給シミュレーションモデルは対策技術の定量化、客観的評価に貢献する重要なツールの一つ

### 電力安定供給の強化

再エネ大量導入に向けた対策強化  
供給力・調整力・慣性力の確保、送配電網の維持管理・最大活用・増強、需給バランス最適化・投資の確保、電力コストの抑制

### レジリエンス強化

平時・需給ひっ迫時の対応能力の強化  
[電化進展で電気の世界での役割は一層重要に]  
平時の供給信頼度の更なる向上、自然災害や厳気象など予期せぬ稀頻度リスクへの対応

### 電力システム脱炭素化の実現

オープンデータ基盤整備とデジタル技術活用による電力システムの定量化、効率化、イノベーション創出

### 脱炭素技術の活用

技術イノベーションの促進  
再エネ主力電源化(太陽光・風力)、電力貯蔵(系統用蓄電池、EVバッテリー、蓄熱発電等)、水素・アンモニア発電(混焼、専焼)、分散型電源(燃料電池、コジェネ)、送配電網(高圧直流送電、マイクログリッド等)、デマンドレスポンス、原子力(革新軽水炉、小型炉)、CCUS(CO<sub>2</sub>回収、利用、貯蔵)技術、セクターカップリング技術(メタネーション等)

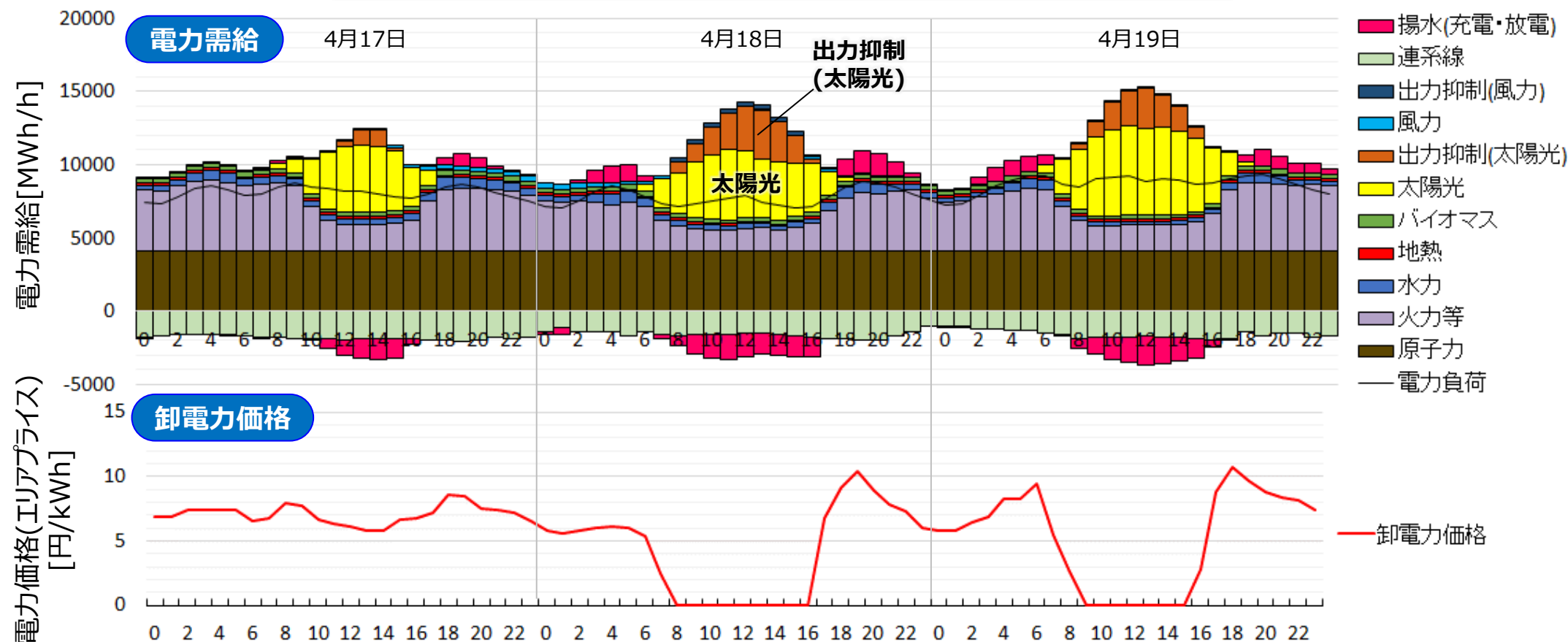
### 電力システム運用の高度化

再エネ等DER活用に向けた運用高度化  
電力系統運用の高度化(電力フローの双方向化[地域間・上下流間])、電力需要の柔軟性向上(DER活用[電気自動車(EV)、ヒートポンプ、PV+蓄電池、需要家の行動変容など])

## 再エネ比率の高い九州では大規模な出力抑制が発動。再エネ最大活用に向けた施策の早期立案と実装が必要

- 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
- 卸電力価格の変動、低下→電源新增設・維持に関するインセンティブの低下、将来の供給力不足への懸念

多面的かつ定量的な課題の可視化、対策施策の評価が必要



(出典)九州電力エリア需給実績をもとに作成

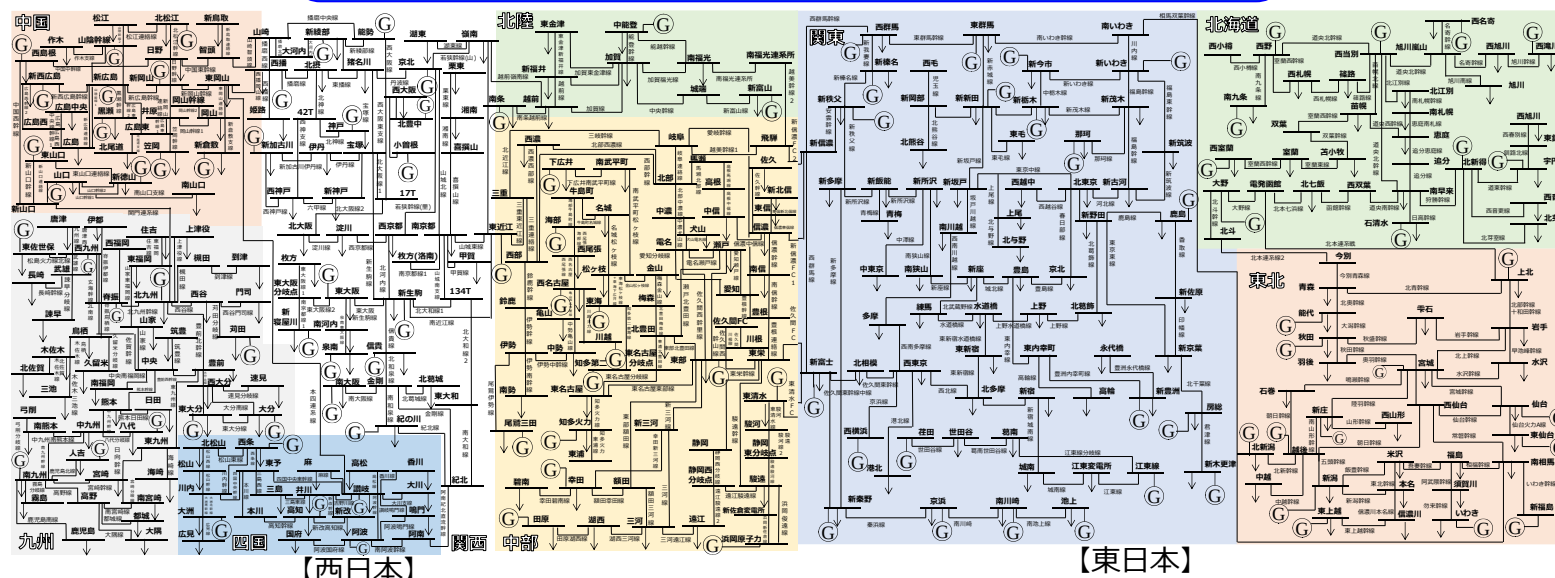
## 最適化型電力需給モデルによる電力数値シミュレーション (東京大学 藤井・小宮山研究室にて開発)

日本の電力基幹系統全体を対象に、様々な技術条件、CO<sub>2</sub>制約のもとで電源ベストミックスを分析

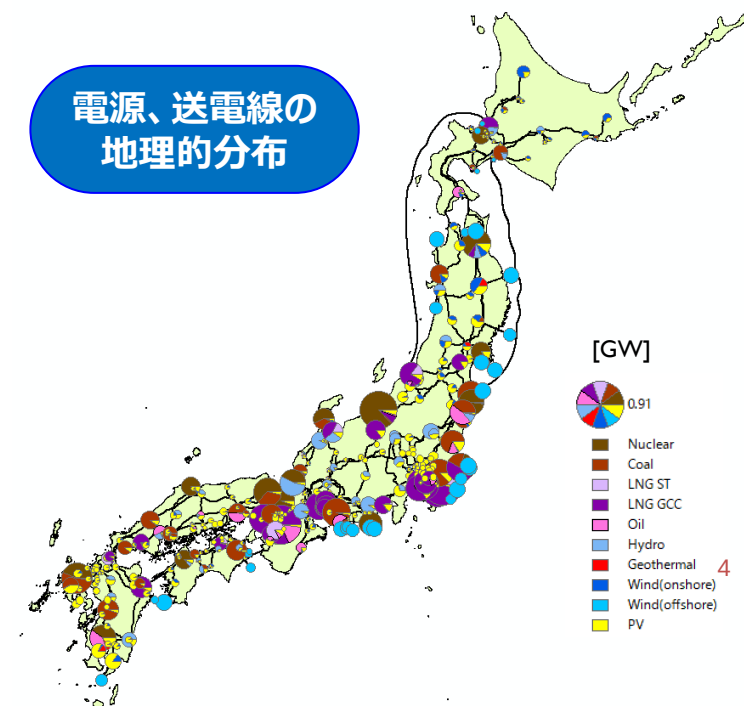
- 地理的解像度→383母線、475本の基幹送電線→電力系統制約や再エネ気象条件を詳細に考慮
- 時間解像度→1時間値、年間8,760時間で分析→再エネ出力変動を詳細に考慮
- 革新的技術など多様な技術要素を考慮：石炭、石炭-アンモニア混焼、石炭-CCS、ガス複合、ガス火力、ガス-水素混焼、ガス-CCS、石油、水素、原子力(大型炉、小型炉)、一般水力、地熱、バイオマス、海洋、太陽光、陸上風力、洋上風力、揚水、NAS電池(長周期変動用)、Li-ion電池(短周期変動用) \*CCS火力で回収できないCO<sub>2</sub>は他部門でのネガティブエミッション技術等で相殺と仮定
- 主な前提条件：太陽光(設備容量上限を設定せず新增設可能)、風力(環境省による導入ポテンシャル評価等を踏まえ上限値を設定)、水素発電(輸入量年間上限2,000万トン、輸入価格20円/Nm<sup>3</sup>)、原子力発電(60年運転シナリオ[23.7GW]、新增設無し)など
- (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

報告ポイント：デジタルで解く、系統制約と再エネ気象条件の詳細モデル化による慣性対策の定量化・混雑管理の重要性

### 全国の基幹系統モデル(383母線、475本の基幹送電線)



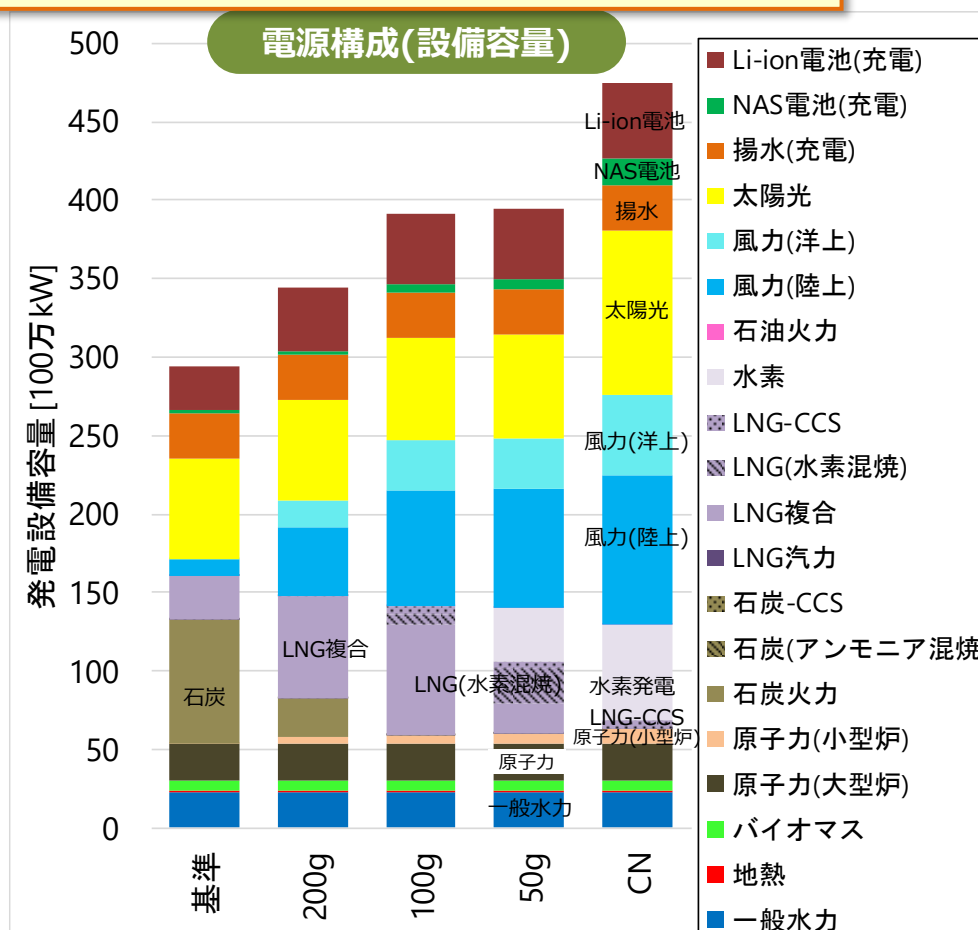
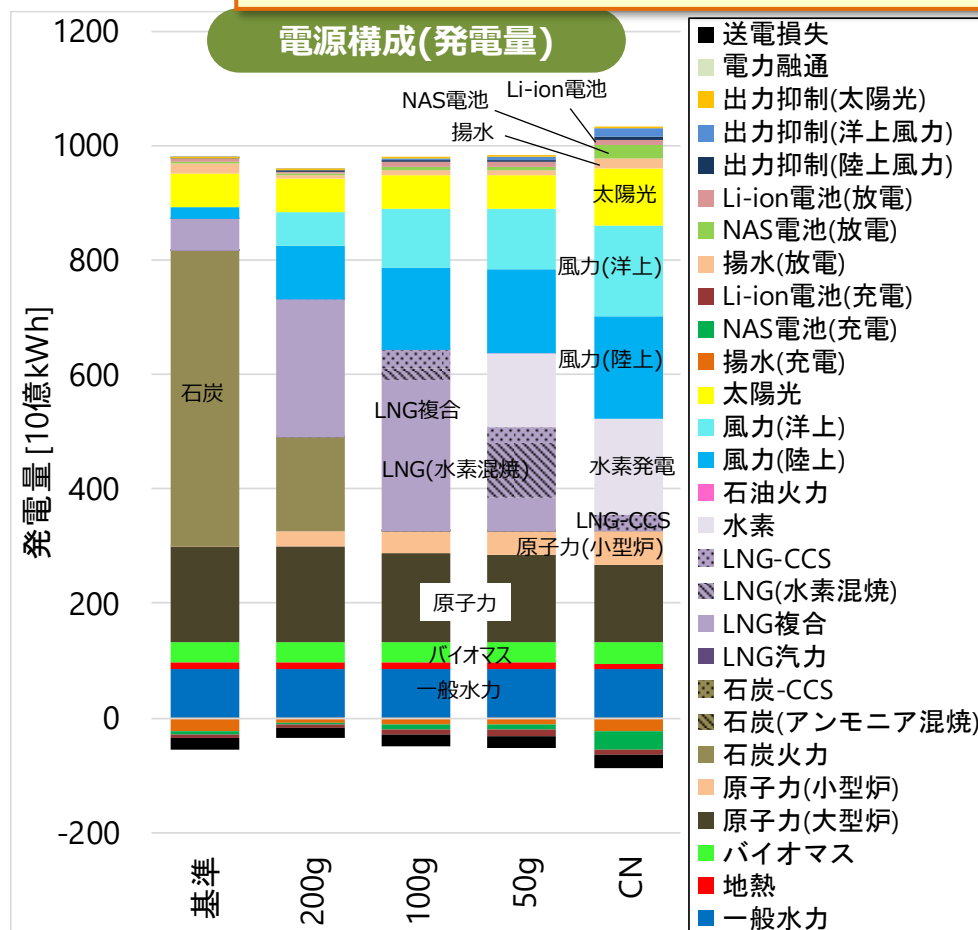
### 電源、送電線の地理的分布



## 送電・リソース制約のもと、目標CO<sub>2</sub>排出を実現する社会コスト最小の電源構成およびその発電量を導出

- ケース設定(CO<sub>2</sub>排出量上限) : 基準(CO<sub>2</sub>制約無し), 200g-CO<sub>2</sub>/kWh, 100g-CO<sub>2</sub>/kWh, 50g-CO<sub>2</sub>/kWh, CN(CO<sub>2</sub>排出量ゼロで制約)
- カーボンニュートラル制約→太陽光、風力(陸上・洋上)、クリーン火力(水素発電等)、系統用蓄電池等の導入拡大

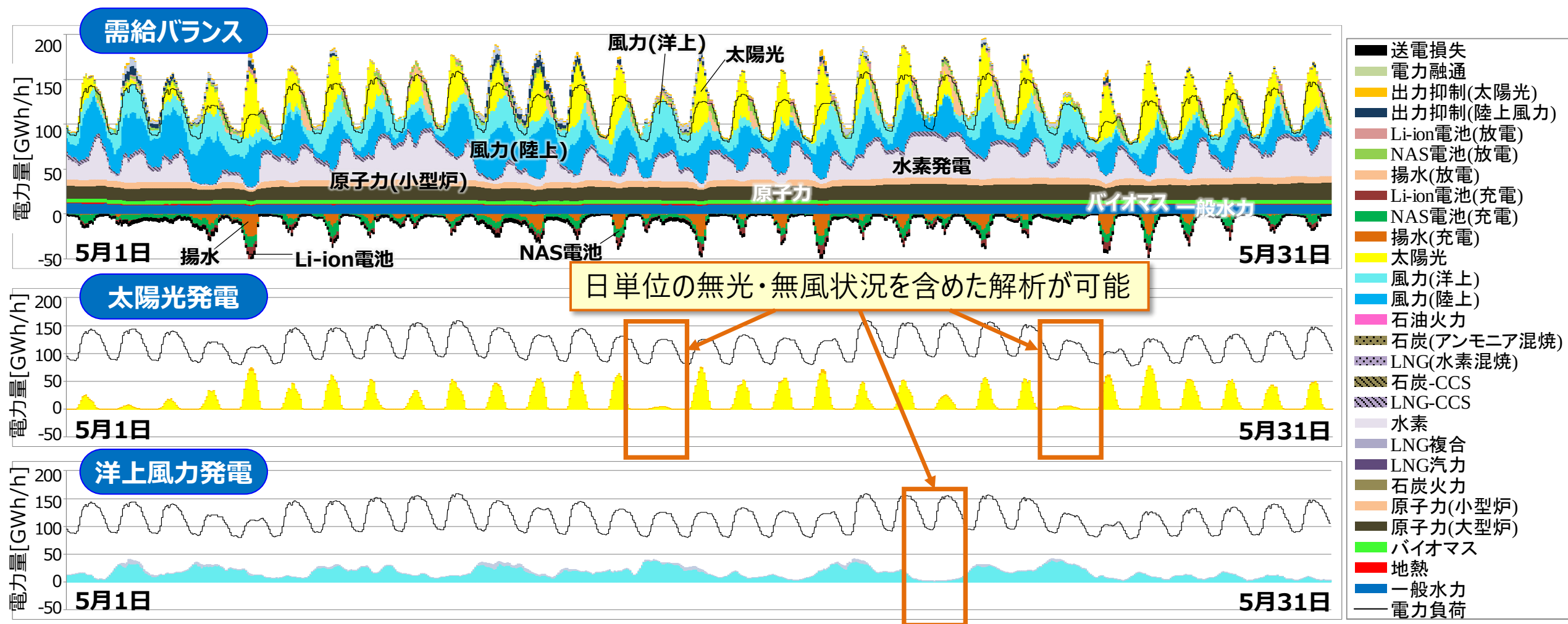
需給シミュレータと383地点の地理的解像度を有する系統シミュレーションの連成解析





# ご紹介するツールの主機能 2 : 高時間分解能

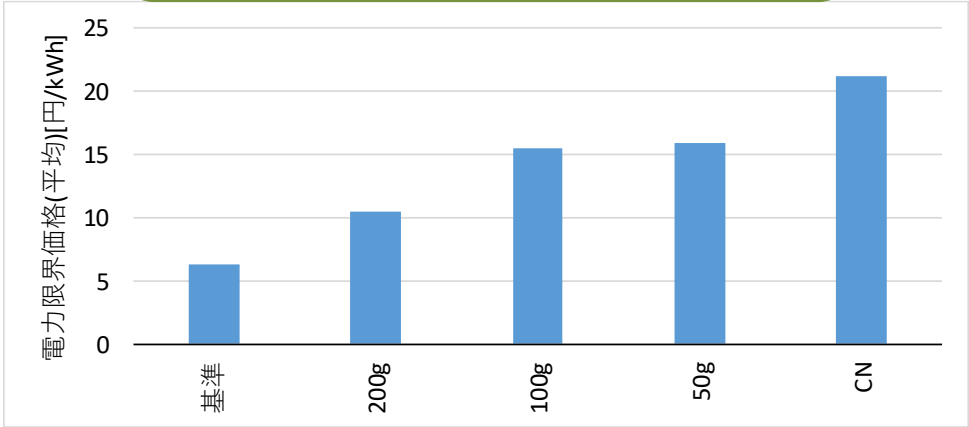
8,760[時間/年]断面での解析で、時間・日・季節単位の変動を組み込んだ電源・蓄エネ・需要の需給解析が可能



発電・蓄電・送電損失を含めた電力コストの時間変化の算出が可能。送電網強化プランに応じたコスト変化を可視化

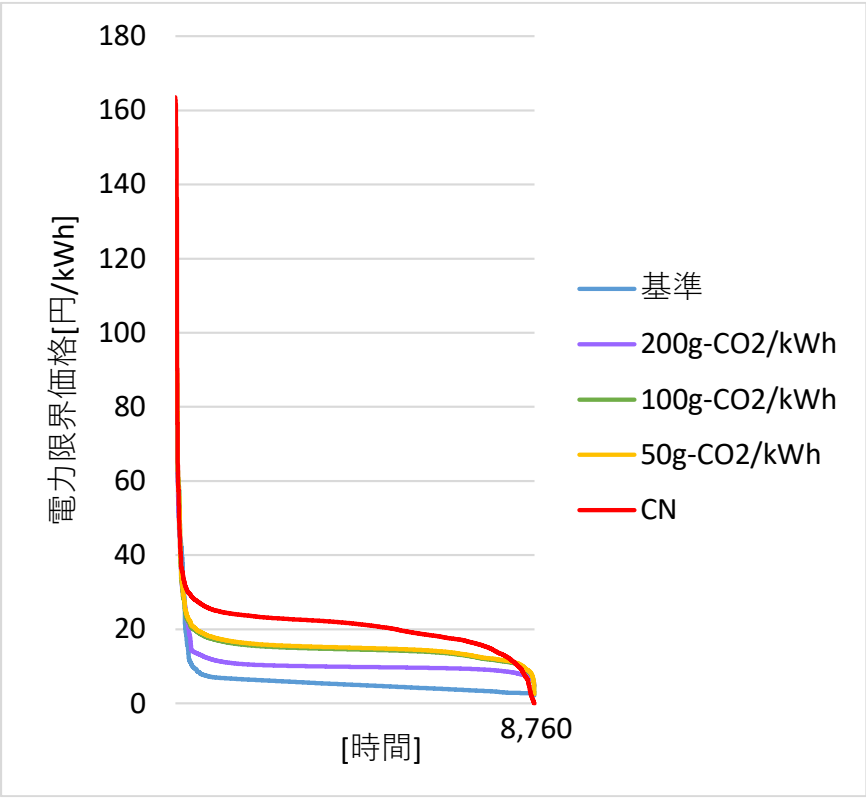
- CO<sub>2</sub>制約、再エネ普及により電力価格の平均水準は上昇、変動幅も拡大の可能性
- 再エネ普及→調整力確保(系統用蓄電池、グリーン火力)、送電線増強→電力価格を押し上げ

電力価格(電力限界価格)



| [円/kWh]                   | 電力限界価格 | 電力平均価格 | 標準偏差 | 最高価格  | 最低価格 |
|---------------------------|--------|--------|------|-------|------|
| 基準                        | 6.4    | 8.4    | 8.2  | 99.4  | 2.2  |
| 200g-CO <sub>2</sub> /kWh | 10.5   | 9.5    | 8.7  | 122.7 | 4.2  |
| 100g-CO <sub>2</sub> /kWh | 15.5   | 10.7   | 9.2  | 141.0 | 2.9  |
| 50g-CO <sub>2</sub> /kWh  | 15.9   | 11.9   | 9.0  | 138.3 | 2.6  |
| CN                        | 21.2   | 13.4   | 10.9 | 163.6 | 0.0  |

電力価格の年間推移(電力限界価格)



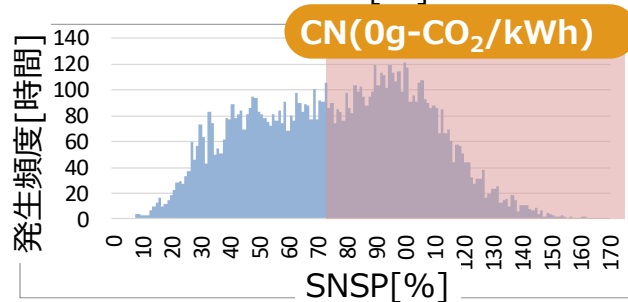
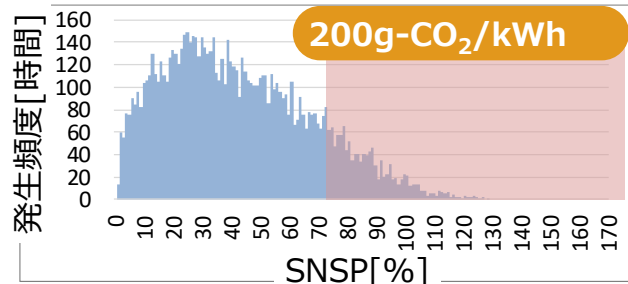
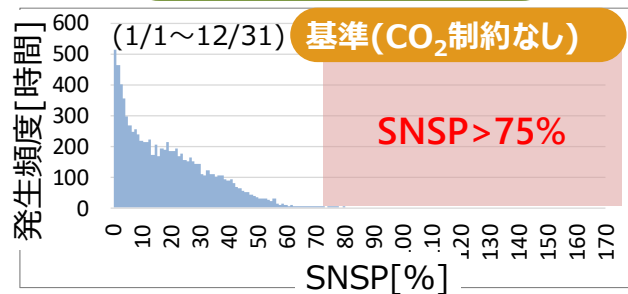
(出典)小宮山, 藤井, (シンポジウム講演)カーボンニュートラル時代の電力需給解析, 電気学会全国大会(令和4年)(2022)

# ご紹介するツールの主機能4：時系列の再エネ比率評価

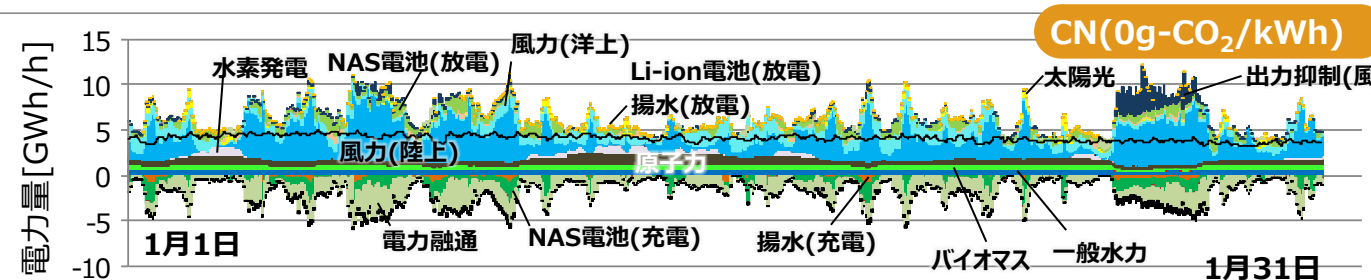
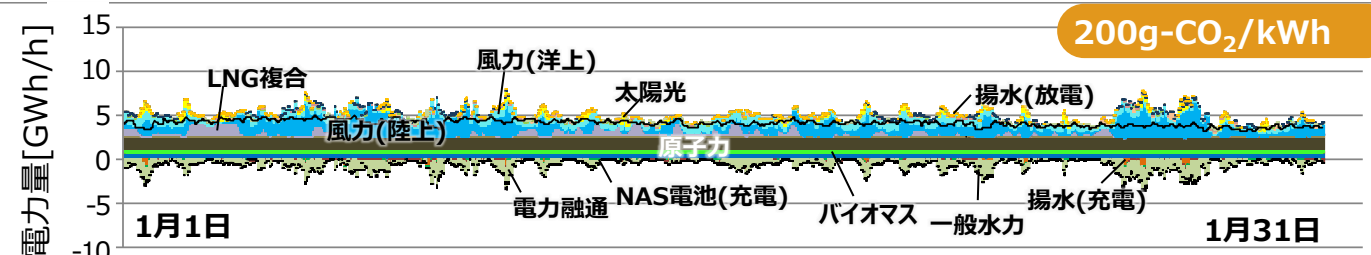
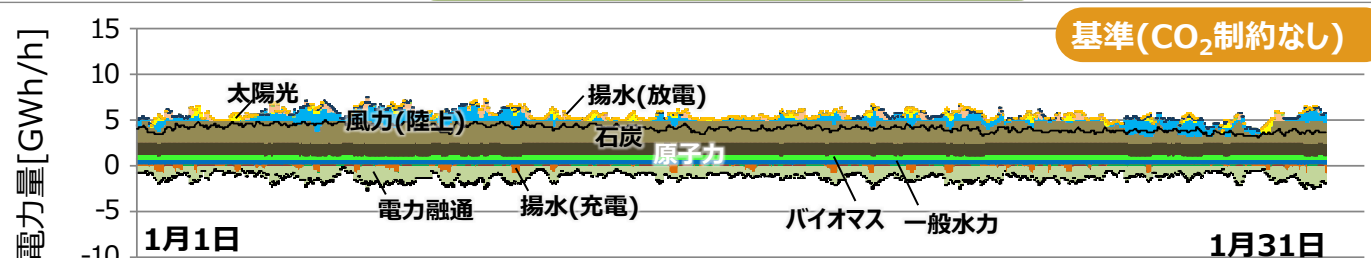
慣性力強化を要する期間・量の導出が可能。慣性強化施策の効果定量評価が可能

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(北海道地域)



電力需給運用(北海道地域)



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

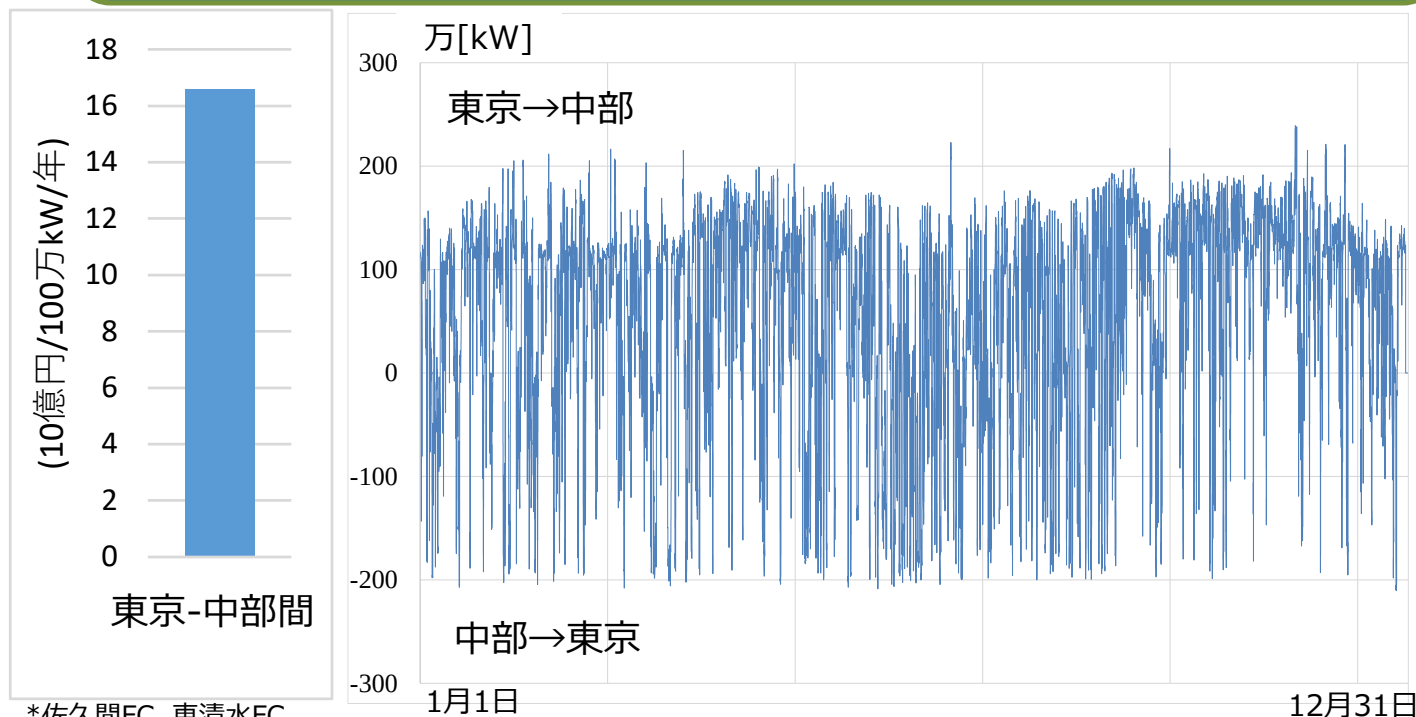
(出典)小宮山, 藤井, (シンポジウム講演)カーボンニュートラル時代の電力需給解析, 電気学会全国大会(令和4年)(2022)での分析結果より作成



## 再エネ主力電源化に向けた最適な送電網の構築(送電線容量の有効利用や増強)には 地点別電力価格(ノーダンプライス)の仕組みで送電混雑緩和が有効

- 送電線増強：送電線混雑緩和措置(DR、蓄電池など)のコストも踏まえ、送電線増強コストの費用対効果の評価が重要
- 地点別電力限界価格(ノーダンプライス[LMP])：各地点の需給状況を反映し(高価格地点→電源増強の費用対効果が相対的に高い)、送電線投資検討の重要な指標。ノーダンプライス可視化による再エネ電源の立地誘導も送電線混雑緩和に向けた重要な課題

### 送電線容量シャドープライス、地域間送電フロー(例：東京-中部間)

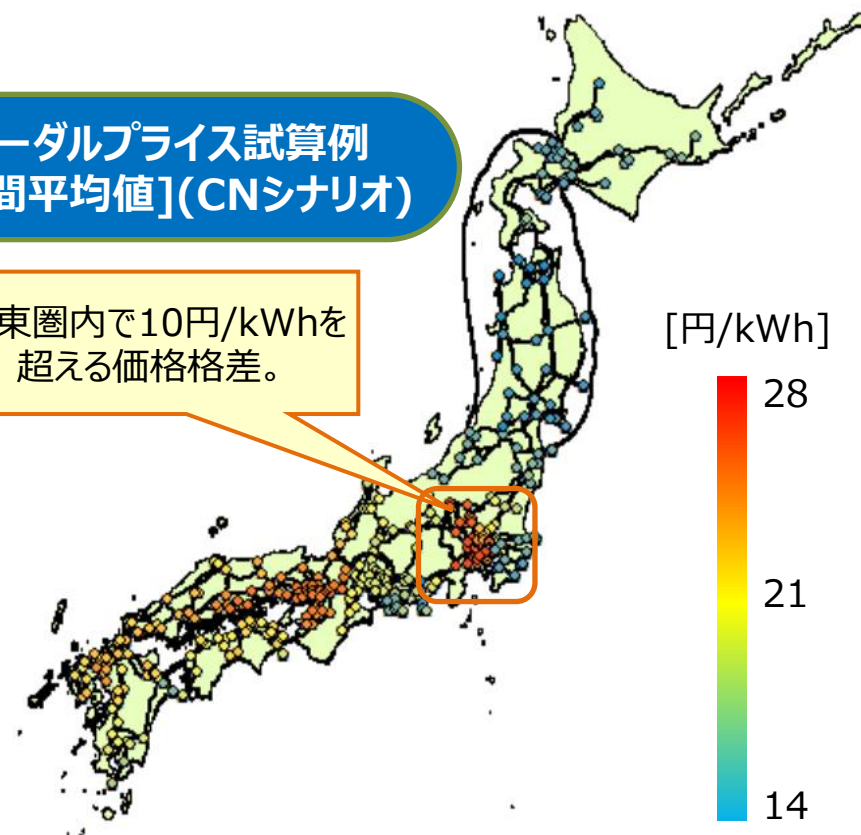


\*佐久間FC、東清水FC、  
新信濃FCの加重平均値

FC: Frequency Converter, LMP: Locational Marginal Price

### ノーダンプライス試算例 [年間平均値](CNシナリオ)

関東圏内で10円/kWhを  
超える価格格差。

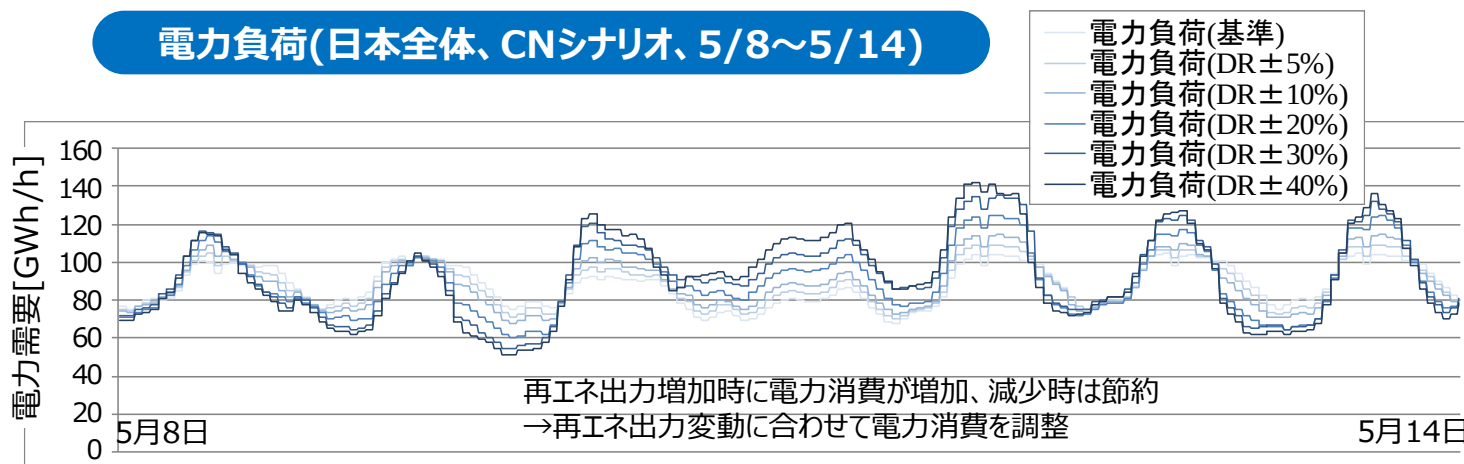


# 見えてきた課題 2 : 電力需要の柔軟性向上施策の立案

経済合理的な再エネ主力電源化にはDRなど電力需要の柔軟性向上が極めて有効。  
需要協調のモチベート、コミットベースの確保と自発的協調の最適活用を検討すべき

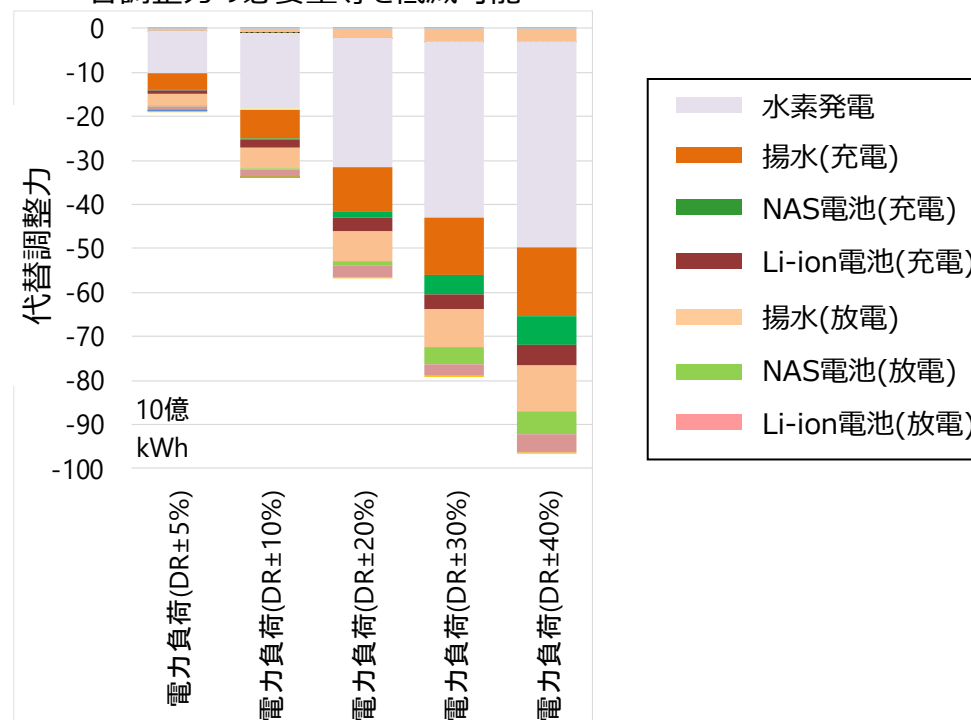
- エンドユース技術(電気自動車、ヒートポンプ、BEMS、HEMS等)や行動変容による電力需要の柔軟性をいかに高めてゆくか、需要側技術を需給調整にいかにコミットさせてゆくのか

電力負荷(日本全体、CNシナリオ、5/8~5/14)

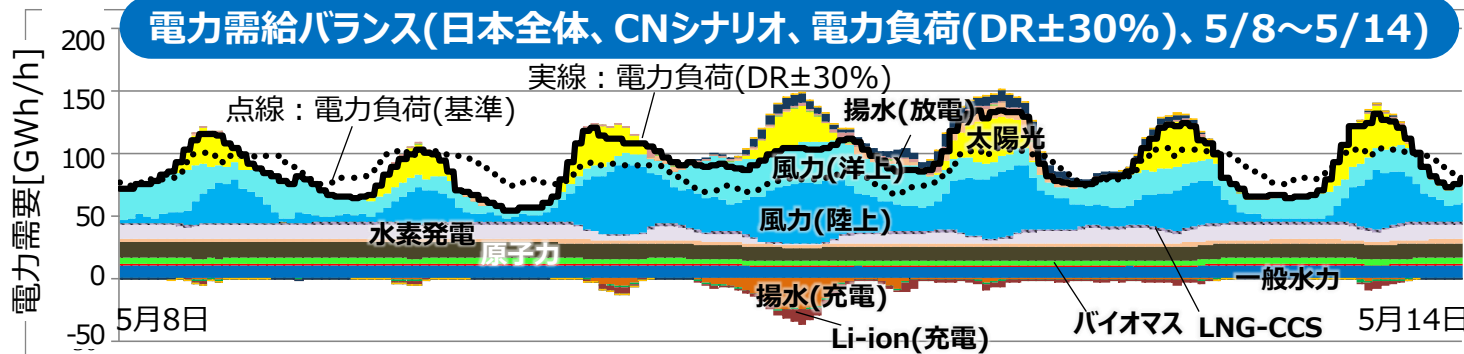


DR導入による各資源の代替量

電力需要の柔軟性向上により  
各調整力の必要量を低減可能



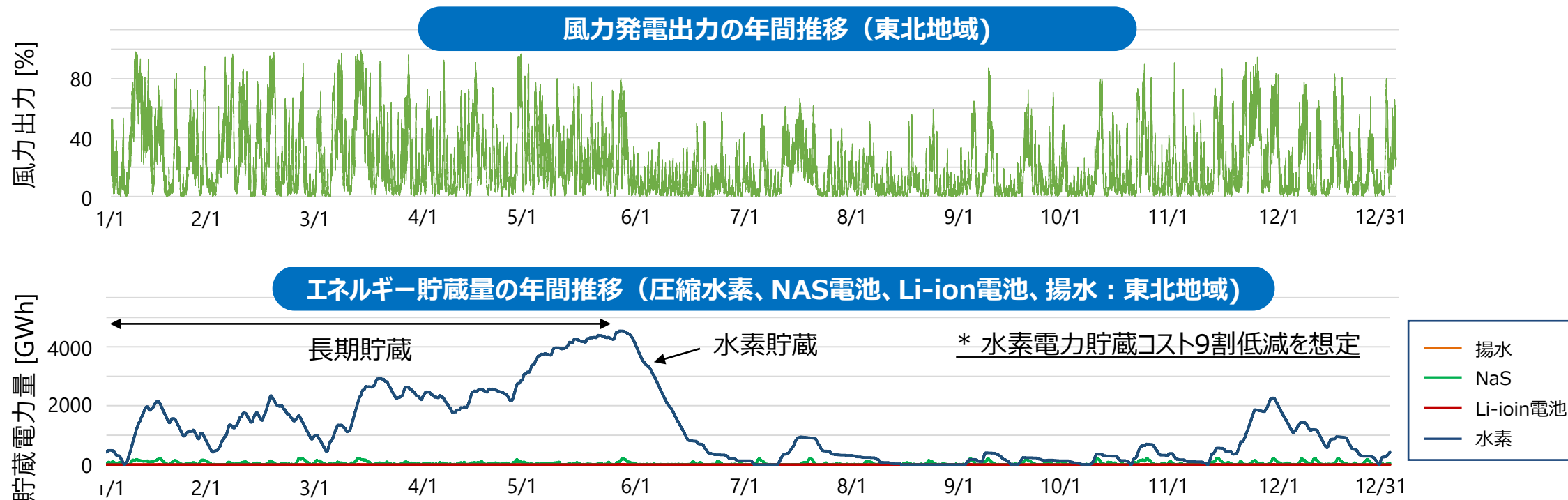
電力需給バランス(日本全体、CNシナリオ、電力負荷(DR±30%)、5/8~5/14)



(備考)各ノードの各時点での電力負荷水準にDR上限・下限制約を与え、各ノードの年間電力需要総量はDR前後で不変と仮定の上でシステムコスト最小化を行い、各ノード各、時点での最適DR導入量を決定

## 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が高いので、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

## 電力需給の大規模数値シミュレーションモデルで導かれた電力システム脱炭素化の課題と提言

電力システム脱炭素化には①数値シミュレーションモデルによる多面的・定量的な課題の可視化、②施策の評価、が必要。  
デジタル技術に裏付けられた大規模数値シミュレーションモデルでの評価が不可避

### ■ モデルの主機能

- 電源解析：送電・リソース制約のもと、目標CO<sub>2</sub>排出を実現する社会コスト最小の電源構成およびその発電量を導出
- 高時間分解能：8,760[時間/年]断面での解析で、時間・日・季節間の変動を組み込んだ電源・蓄エネ・需要の需給解析
- 発電コスト定量化：発電・蓄電・送電損失を含めた電力コストの時間変化、送電網強化プランに応じたコスト変化を可視化
- 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

### ■ モデル分析で見えてきた課題

#### • 地点別電力価格制度と分散リソース協調の必要性

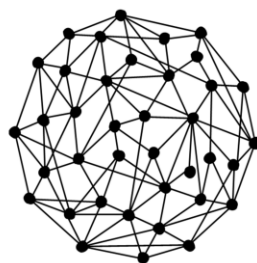
再エネ主力電源化に向けた最適な送電網の構築には、地点別電力価格(ノードルプライス)の仕組みによる送電混雑緩和が有効

#### • 電力需要の柔軟性向上施策の立案

経済合理的な再エネ主力電源化には、DRなど電力需要の柔軟性向上が極めて有効。需要協調のモチベート、コミットベースの確保と自発的協調の最適活用を検討すべき

#### • 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



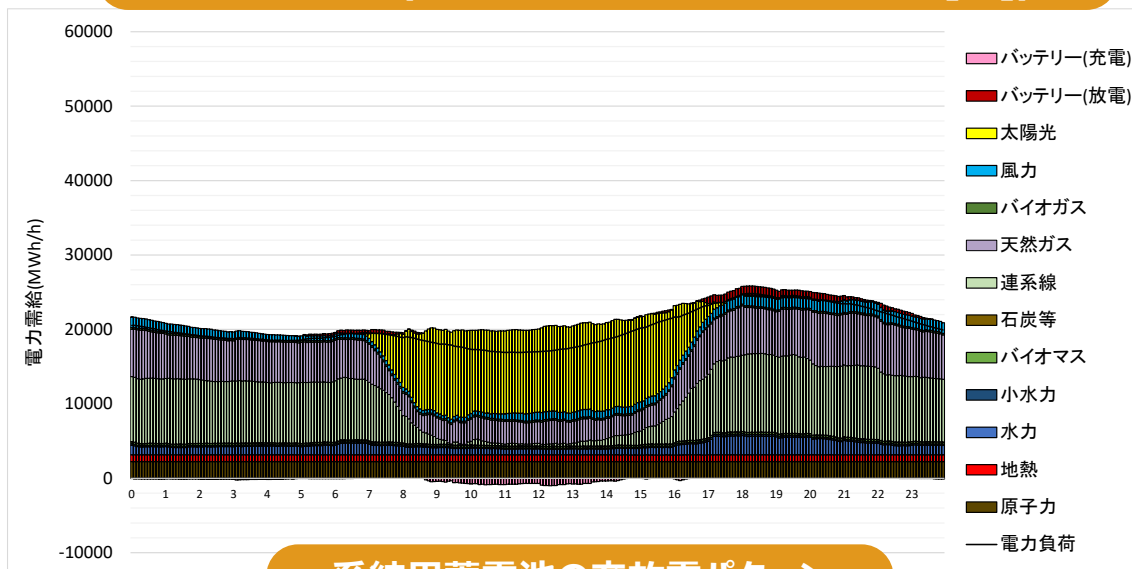
**H-UTokyo Lab.**



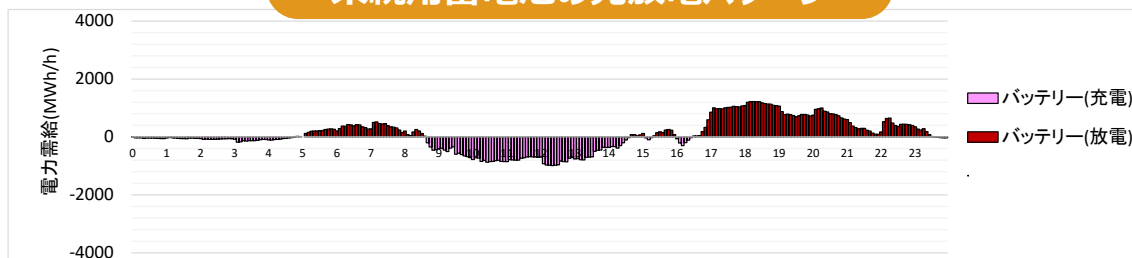
## 電力安定供給、再エネ大量導入に向けた電力貯蔵活用への期待

- 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。

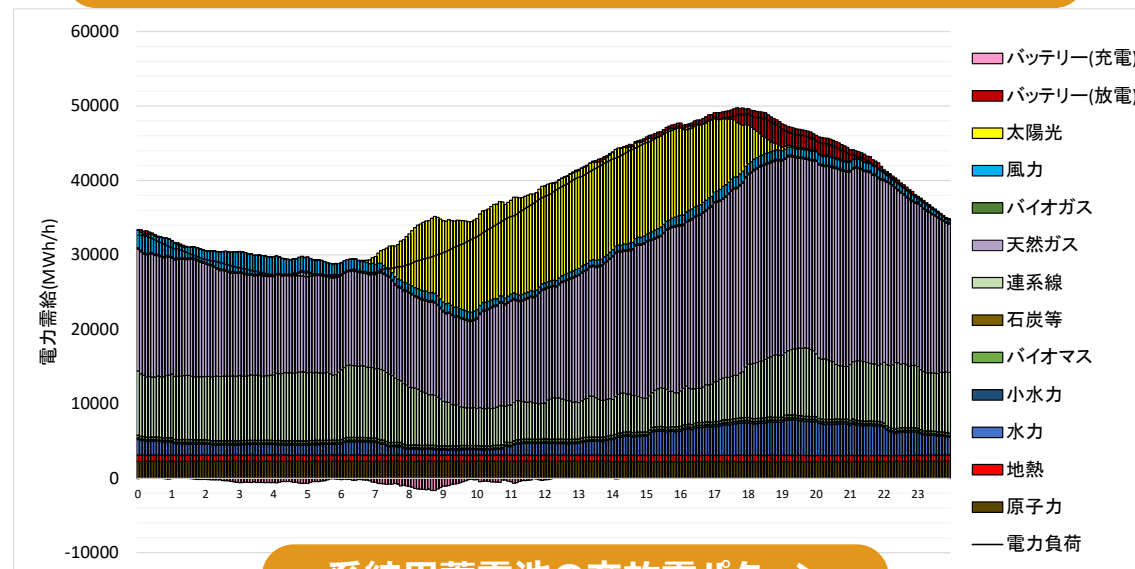
電力需給バランス(カリフォルニア州、2022年2月4日[日])



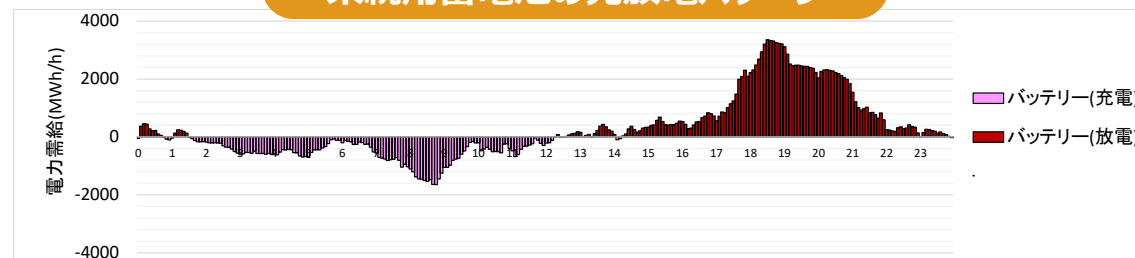
系統用蓄電池の充放電パターン



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

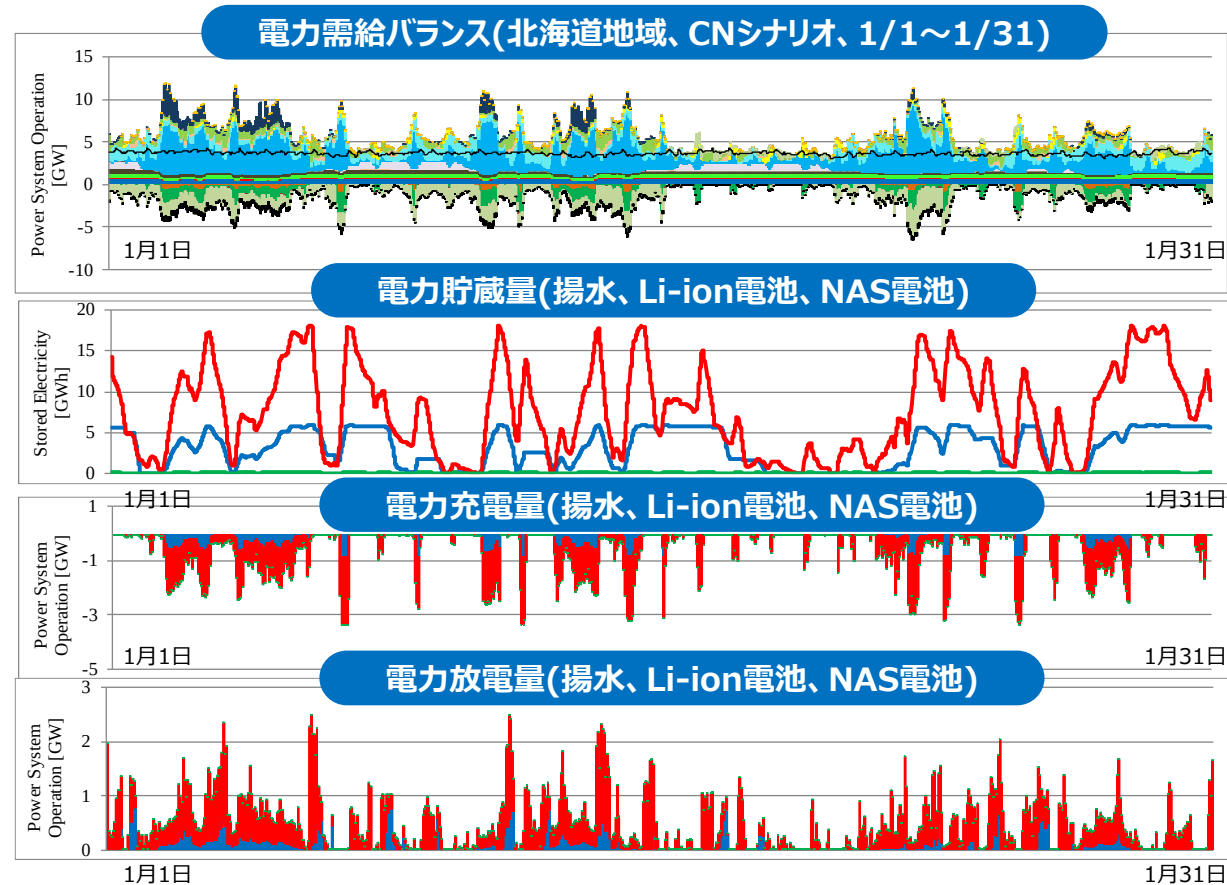
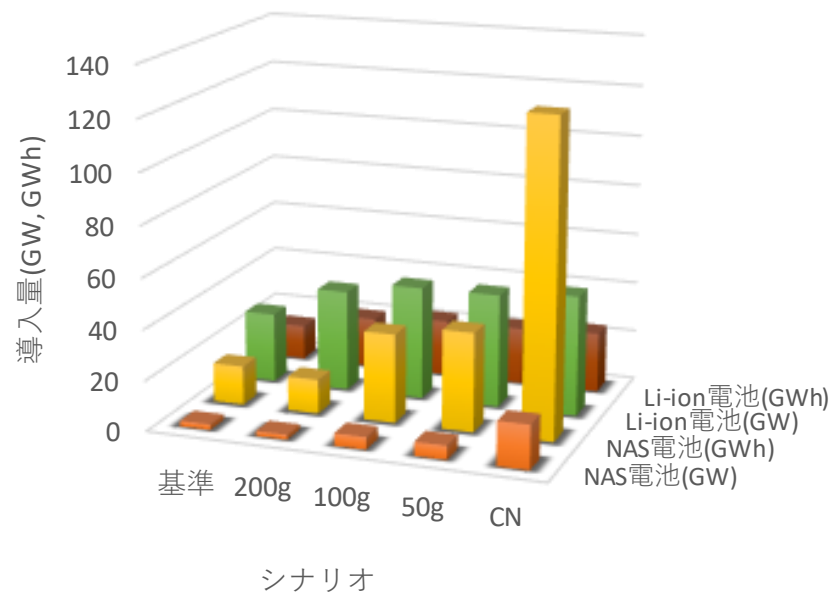


(出所)カリフォルニア独立系統運用機関HPの公開データより作成

## 系統用蓄電池導入ならびに揚水式水力の活用が脱炭素、再エネ導入拡大に貢献

- 再エネ大量導入時には無風期間に備えて十分な電力貯蔵を維持し、無風時に放電する傾向
- 電力貯蔵技術は期先の需給状況の予測を踏まえた運用を行うことが最適との示唆

### 系統用蓄電池(Li-ion電池、NAS電池)の最適導入量(各シナリオ)

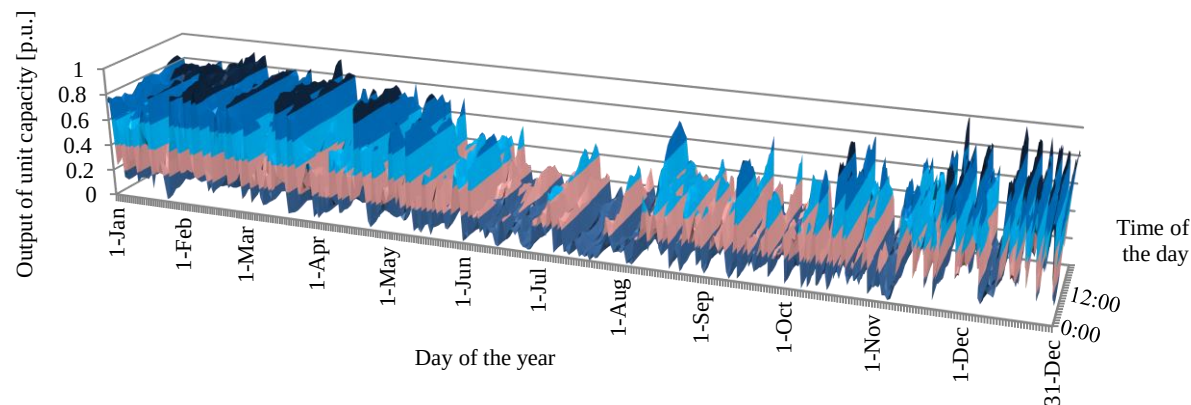


(出所)小宮山, 藤井, (シンポジウム講演)カーボンニュートラル時代の電力需給解析, 電気学会全国大会(令和4年)(2022)での分析結果より作成

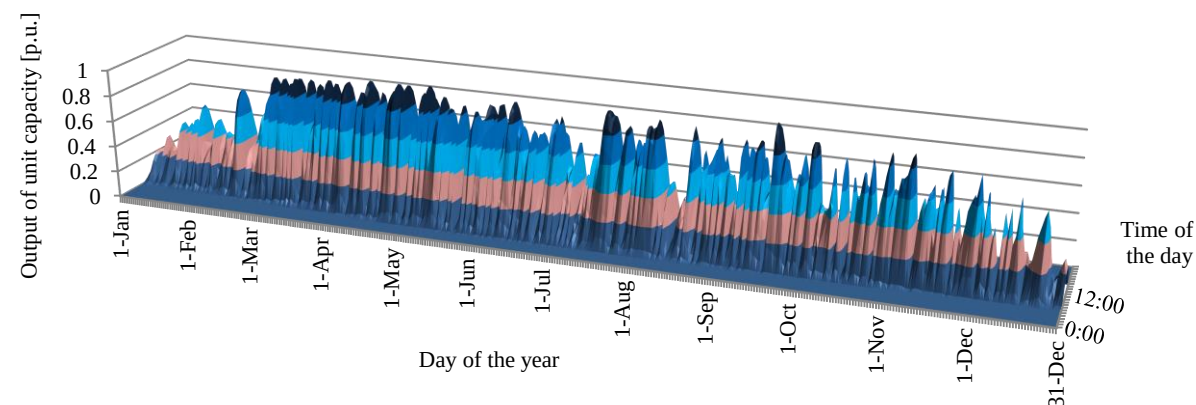
## 再エネ大量導入実現に向けては再エネ出力変動(分、時間、日間、季節間)への総合的対策も必要に

- ・ 風力発電、太陽光発電は短周期(分、時間、日間)での出力変動に加え、長周期(季節間)でも変動
- ・ 風力発電：夏季付近で相対的に出力低下、太陽光発電：冬季付近で相対的に出力低下
- ・ 自然変動電源大量導入時での再エネ電力の有効活用のためには、季節間の変動への対応が重要な課題
- ・ 課題：長期間でのエネルギー貯蔵が必要、充放電の機会が限定的→投資回収が容易ではない

風力発電出力実績(2021年1/1～12/31、東北地域)



太陽光発電出力実績(2021年1/1～12/31、東北地域)



(出典)東北電力ネットワーク エリア需給実績をもとに作成