
第5回 再エネ講座公開研究会(第2回【部門 A】)『米国型送電システムおよび我が国の実潮流による
2050年送電シミュレーションと課題』、京都大学再生可能エネルギー経済学講座、2022年7月25日(月)

再エネ主力電源化に向けた 最適電力需給シミュレーション分析

東京大学大学院工学系研究科
小宮山 涼一



THE UNIVERSITY OF TOKYO

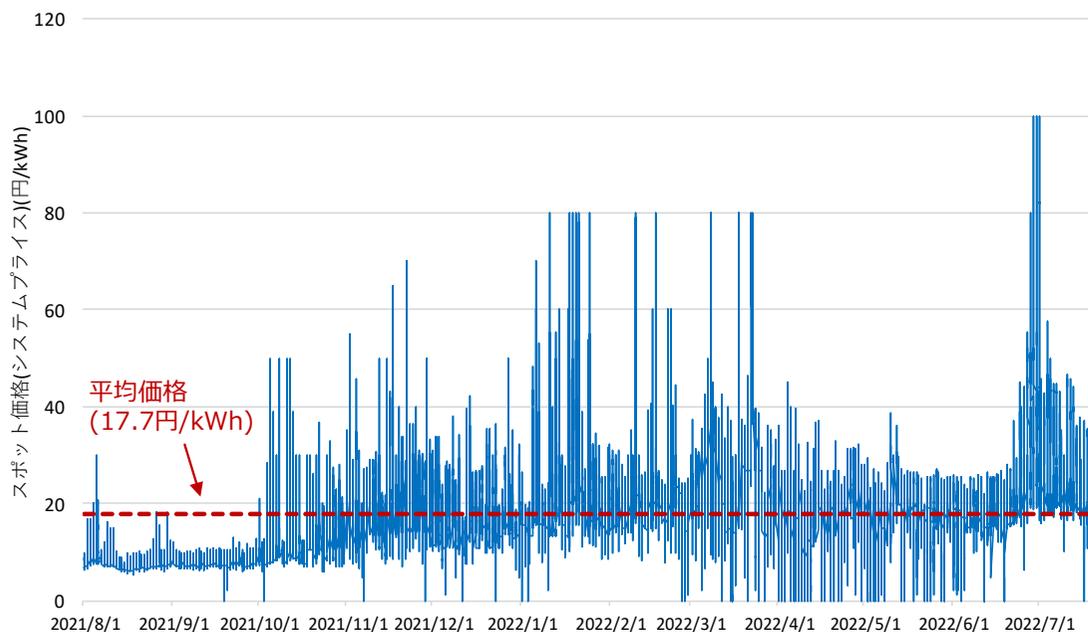
内容

- 背景
- 最適電力需給シミュレーション
- まとめ

電力需給の情勢

- ウクライナ危機等を背景とした燃料・電力価格高騰、エネルギーセキュリティへの意識の高まり
- 脱炭素化、電力自由化、再エネ普及の中、火力発電所の休廃止が近年増加
- 2022年度冬季の電力需給は現状、厳しい見通し(多くのエリアで予備率[厳冬H1需要での需給]は3%以下)

電力スポット価格(2022年8月1日～2022年7月21日)



(出典) JEPX取引情報より作成

2022年12月～2023年3月の電力需給 (厳気象H1需要に対する予備率)

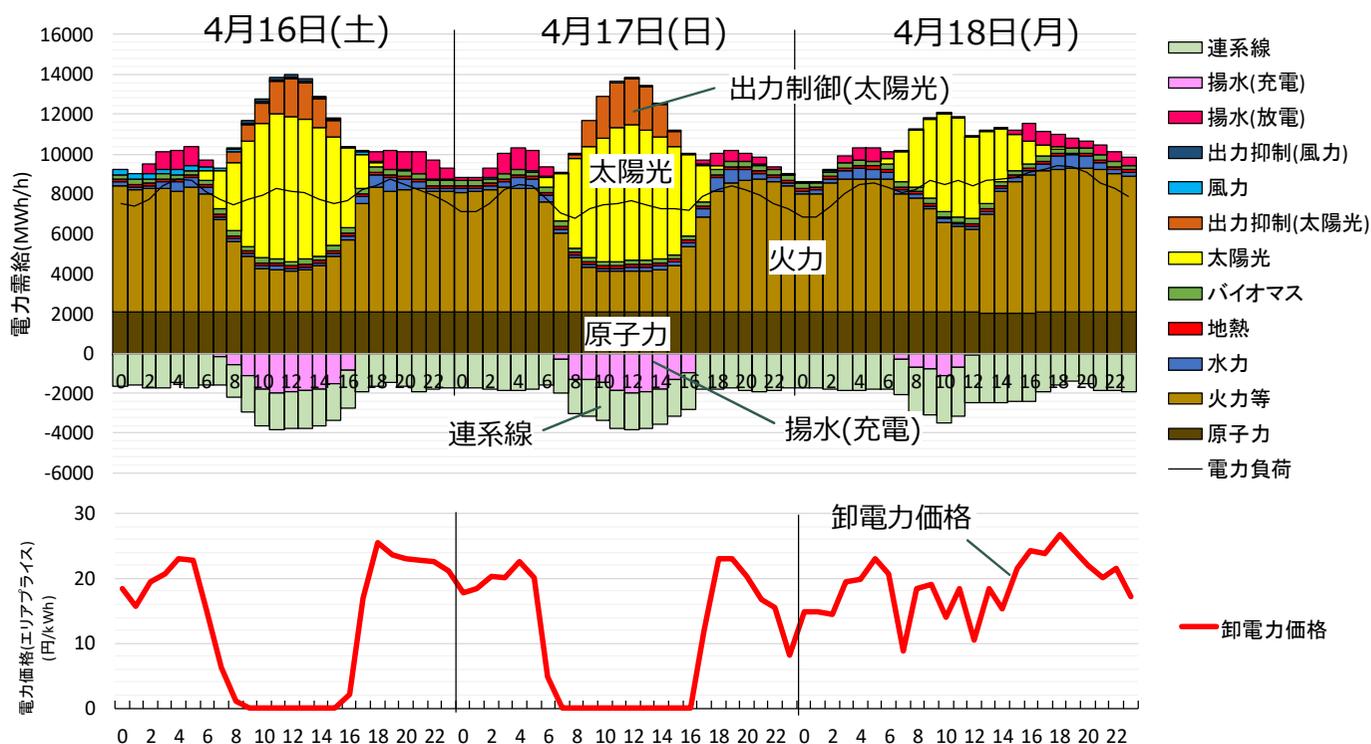
各エリアの予備率(厳寒H1) (6/28)					
エリア	12月	1月	2月	3月	(単位: %)
北海道	12.6	6.0	6.1	12.3	
東北	7.8	1.5	1.6	12.3	
東京	7.8	1.5	1.6	10.1	
中部	5.5	1.9	3.4	10.1	
北陸	5.5	1.9	3.4	10.1	
関西	5.5	1.9	3.4	10.1	
中国	5.5	1.9	3.4	10.1	
四国	5.5	1.9	3.4	10.1	
九州	5.5	1.9	3.4	10.1	
沖縄	45.4	39.1	40.8	65.3	

(出典)電力広域的運営推進機関:2022年度冬季の需給見通しについて(2022)
<https://www.occto.or.jp/iinkai/chouseiryoku/2022/files/chousei_74_01.pdf>

電力需給運用(九州地域：2022年4月16日～18日)

- 再エネ出力対策→火力出力抑制、揚水充電運転、連系線活用(関門連系線)、再エネ出力抑制
- 再エネ普及が卸電力価格に影響を与えている状況

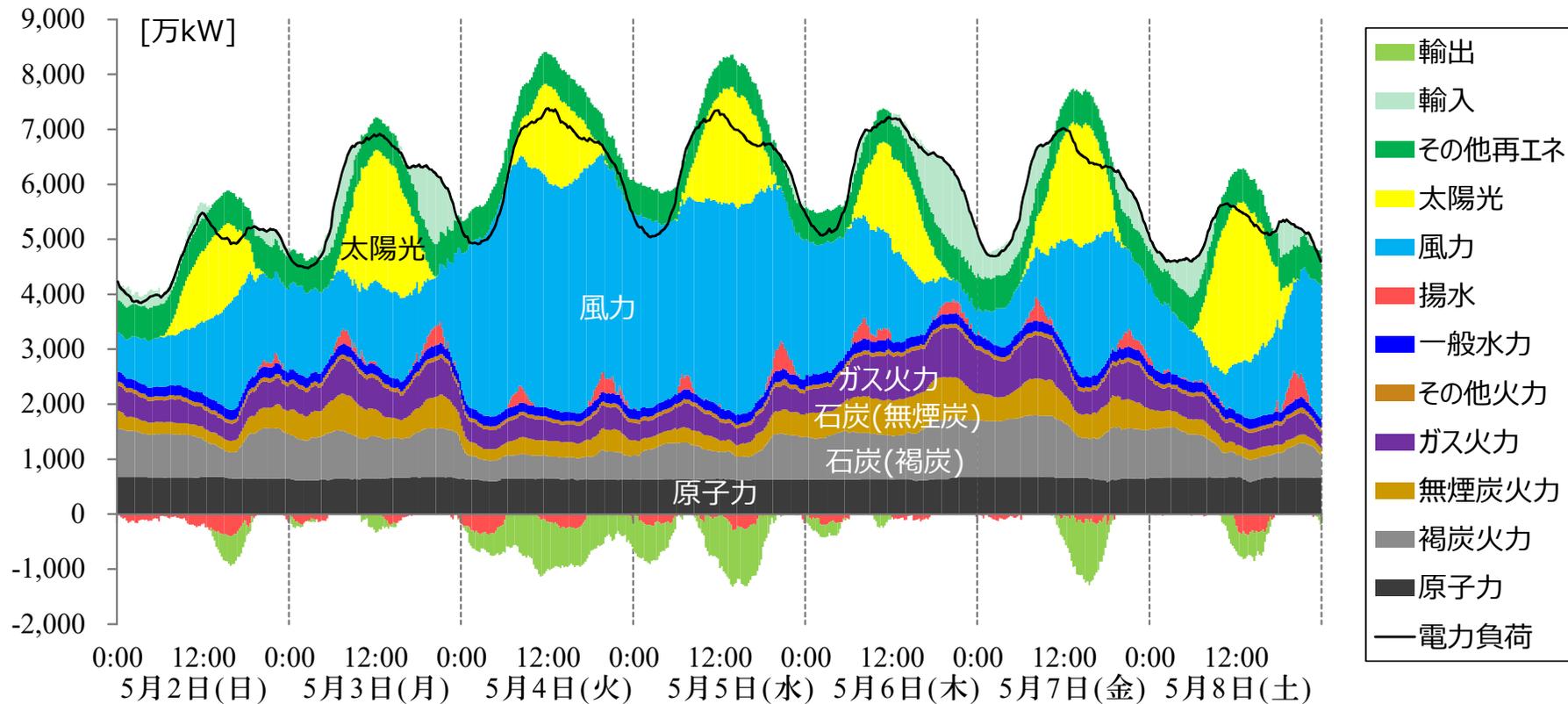
電力需給運用、卸電力価格(九州)：2022年4月16日～18日



(出典) 九州電力需給情報、JEPXデータベースより作成

電力需給運用(ドイツ：2021年5月2日～5月8日)

- 再エネが普及拡大し、電力需給の運用に影響
- 再エネ出力変動の緩和のためには、電力システムの柔軟性向上が必要



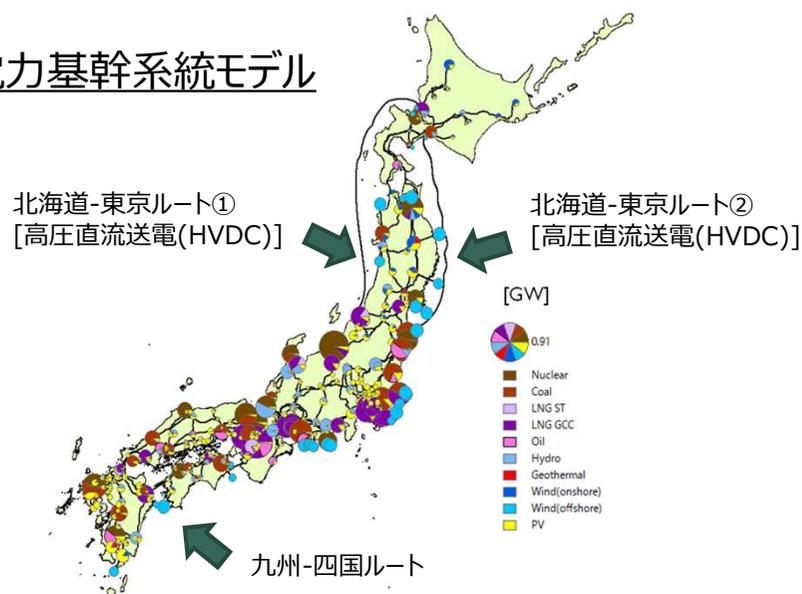
(出典) ENTSO-E Transparency Platformの統計データ等より作成

電力系統と安定供給

■ 電力基幹系統の役割と電力安定供給

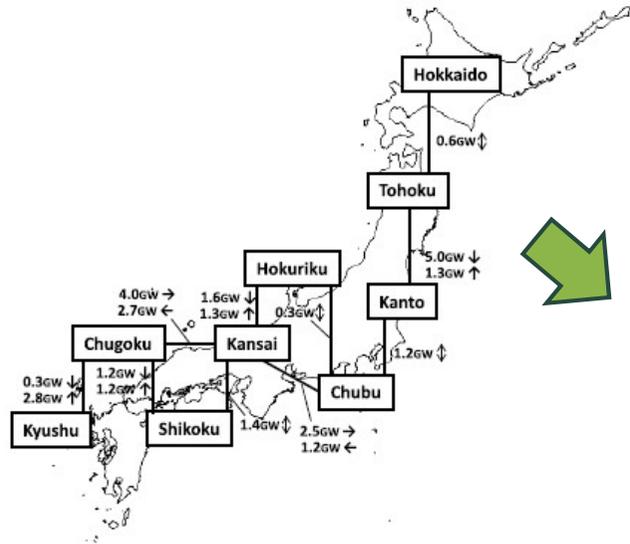
- 供給力、電力量、系統安定性(周波数、電圧など)、慣性力・同期化力の確保
- 系統停止を回避する供給力(アデカシー)と系統故障の影響波及の抑制能力(セキュリティ)の維持
- 電力系統計画→個別電源の要請で建設する「プル型」から再エネポテンシャル等を踏まえて計画する「プッシュ型」へ
- 次世代計画(北海道-東京ルート等)を考慮したカーボンニュートラルへの系統・電源の投資・運用の全体最適評価

電力基幹系統モデル

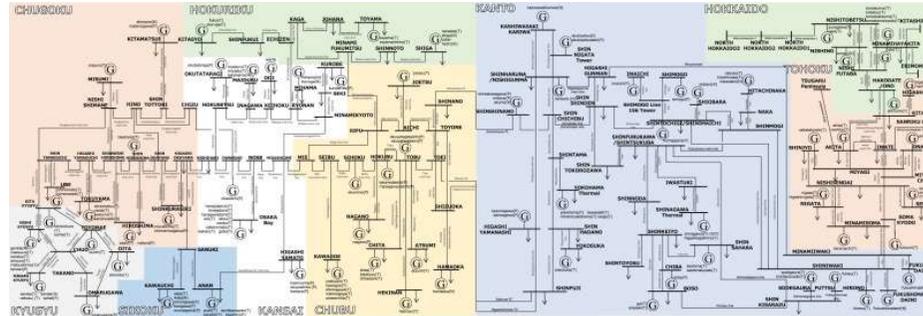


- 電力量の確保(kWhの確保)
- 供給力の確保(kWの確保)
- 調整力の確保(Δ kWの確保)
- 慣性力・同期化力の確保

電力システムの数値シミュレーションの経緯



- 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)**



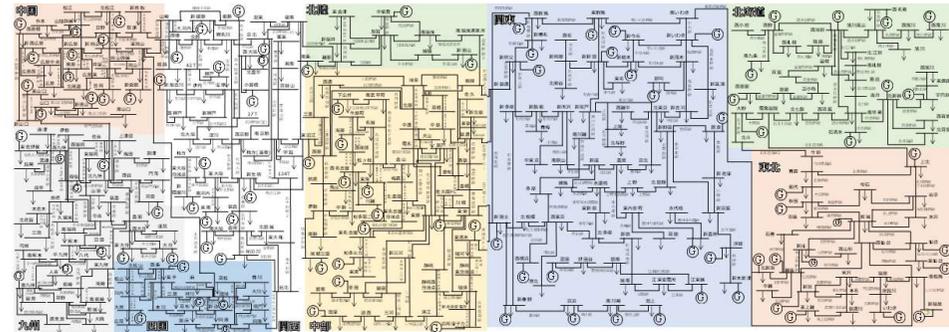
- 地理的解像度: 9地点・送電線10本
- 時間解像度: **年間52,560時点(10分値)**



- 地理的解像度: **352地点・送電線441本**
- 時間解像度: **年間8,760時点(1時間値)**

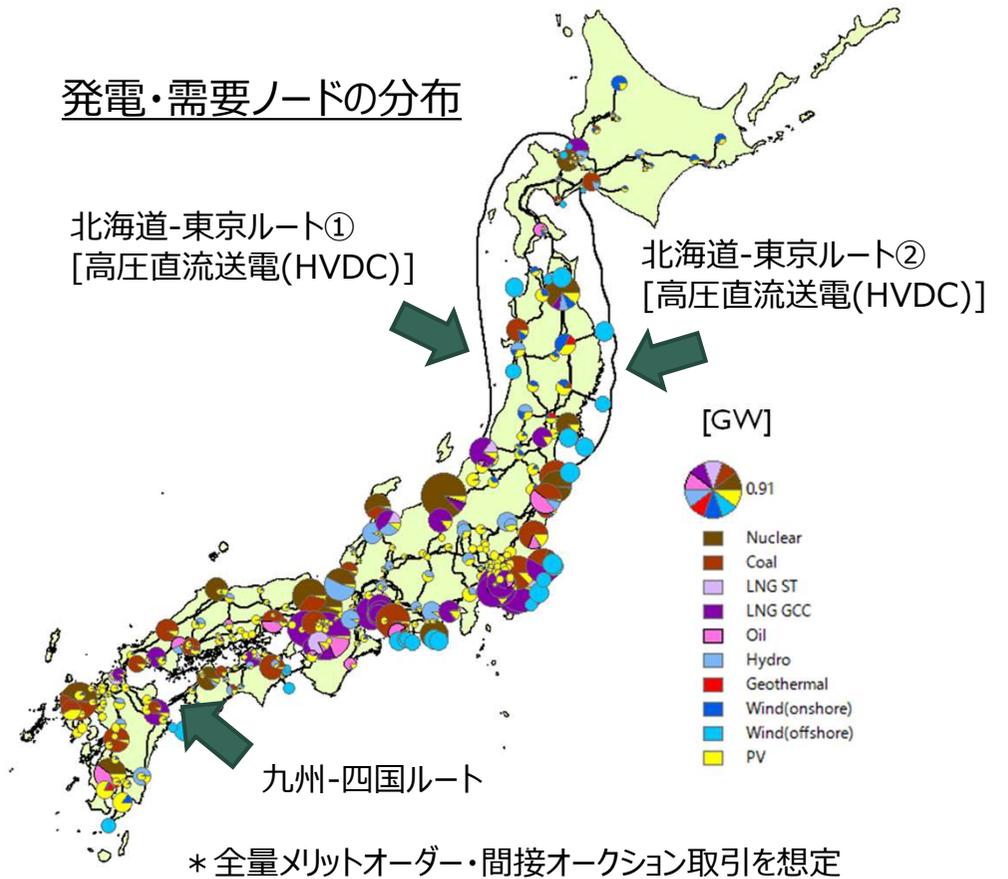
(参考文献)

- 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)



日本の電力系統の数値シミュレーション

- 分析手法：電力需給モデル(線形計画法)
- 目的関数：固定費(発電・電力流通設備) + 燃料費(火力・原子力) + 電力貯蔵設備運用費
- 制約条件：同時同量制約、発電出力制約(定検パターンを考慮→作業停止計画も最適化)、供給予備力制約、負荷追従制約、最低出力制約(火力・原子力、DSS運転)、送電容量制約、電力貯蔵設備制約、設置可能容量制約、再エネ出力抑制(太陽光、風力)、SNSP制約(慣性力に関する制約)、電力貯蔵Cレート制約など
- 時間解像度：
 - 年間8,760時間、1時間値で分析
- 発電技術：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
- 電力貯蔵設備：揚水, NAS電池(長周期変動用), Li-ion電池(短周期変動用)
- 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/Nm3)、原子力発電(60年運転シナリオ[23.7GW]、新增設無し)など

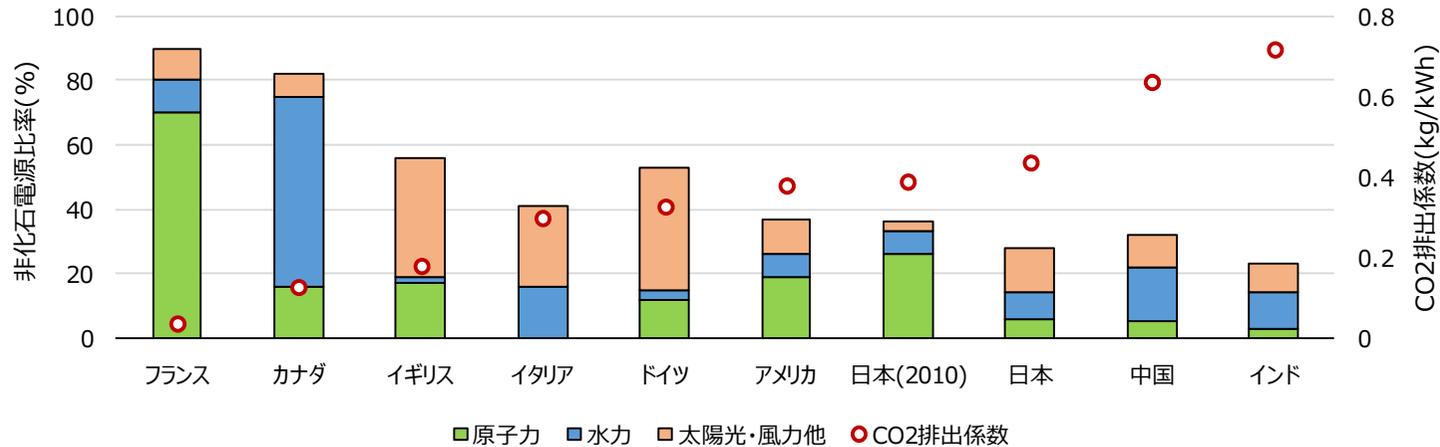


カーボンニュートラル実現に向けた電源ベストミックス

ケース設定(CO₂制約に関するケース設定)

- 基準(CO₂制約無し)
- 200g-CO₂/kWh [英国:180g-CO₂/kWh]
- 100g-CO₂/kWh [カナダ:130g-CO₂/kWh]
- 50g-CO₂/kWh [フランス:40g-CO₂/kWh]
- CN (CO₂ネットゼロ)
- CN+ (CO₂ネットゼロ+再エネ出力抑制無し) [再エネ電力の最大限の活用]

電力CO₂排出係数、非化石電源比率(2019年)

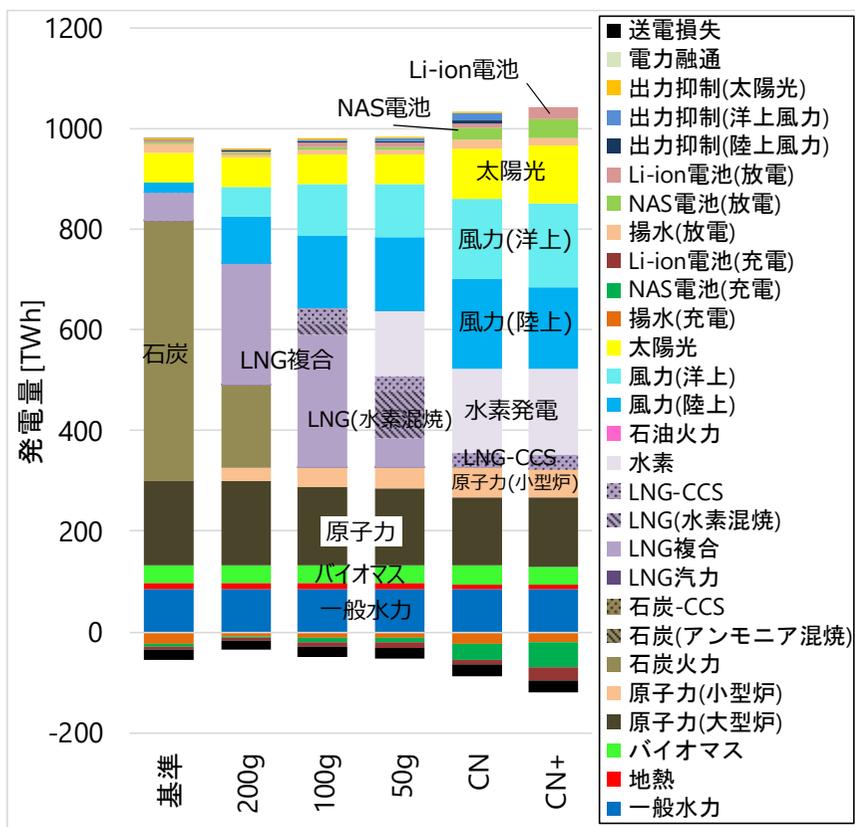


(出典) IEA, World Energy Balances 2021等より作成

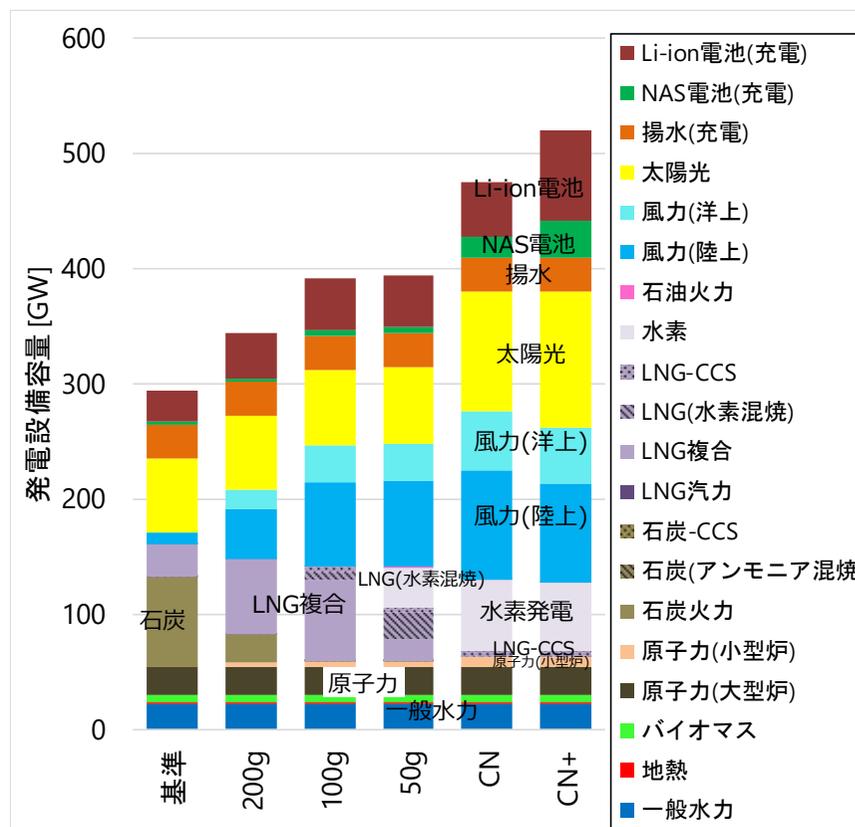
カーボンニュートラル実現に向けた電源ベストミックス

カーボンニュートラル制約→太陽光、風力(陸上・洋上)、水素発電、バッテリー等の導入拡大

電源構成(発電量)



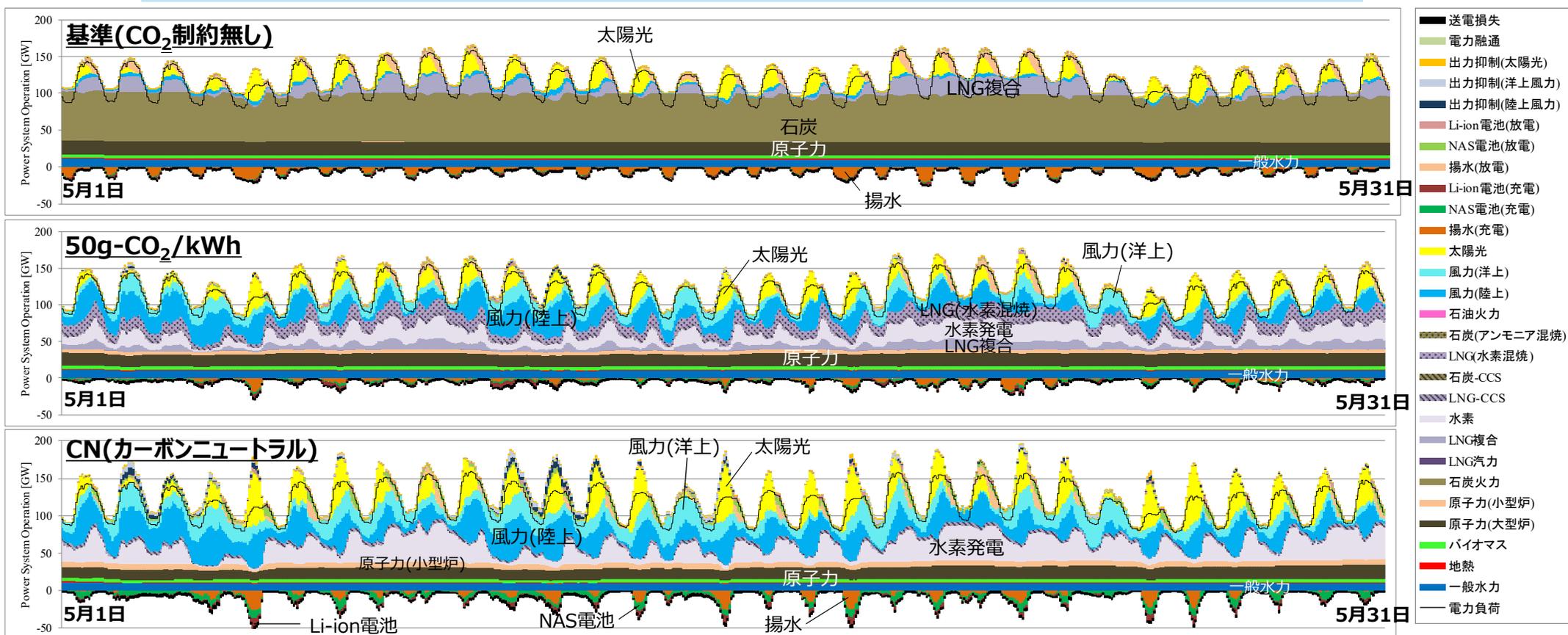
電源構成(設備容量)



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

電力需給運用(日本全体：5月、1カ月間1時間値)

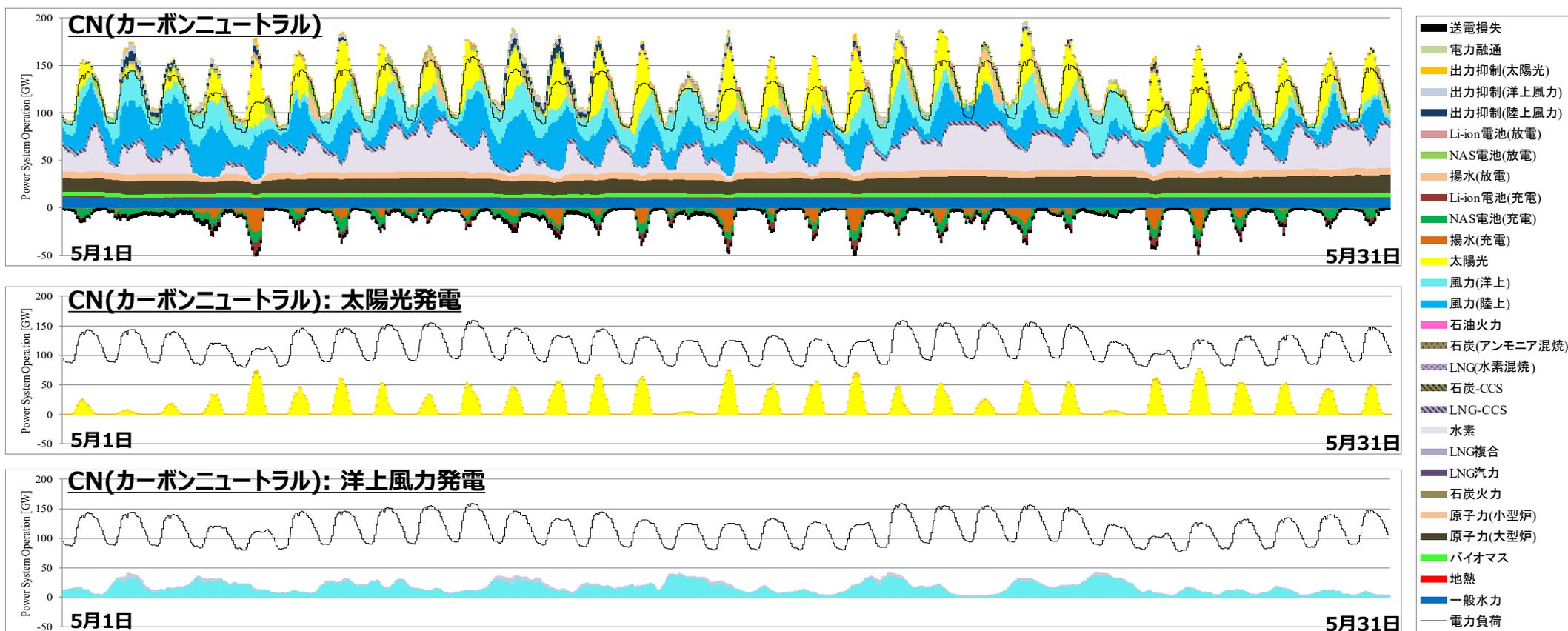
カーボンニュートラル・再エネ大量導入→自然変動電源(太陽光、洋上風力、陸上風力)、水素、原子力、バッテリー、CCUS等の最大限の活用による脱炭素化と調整力の確保



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

電力需給運用(日本全体：5月、1カ月間1時間値)

洋上風力発電は設備利用率は高いが、出力変動は安定電源に比べ大きく、無風期間も存在



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

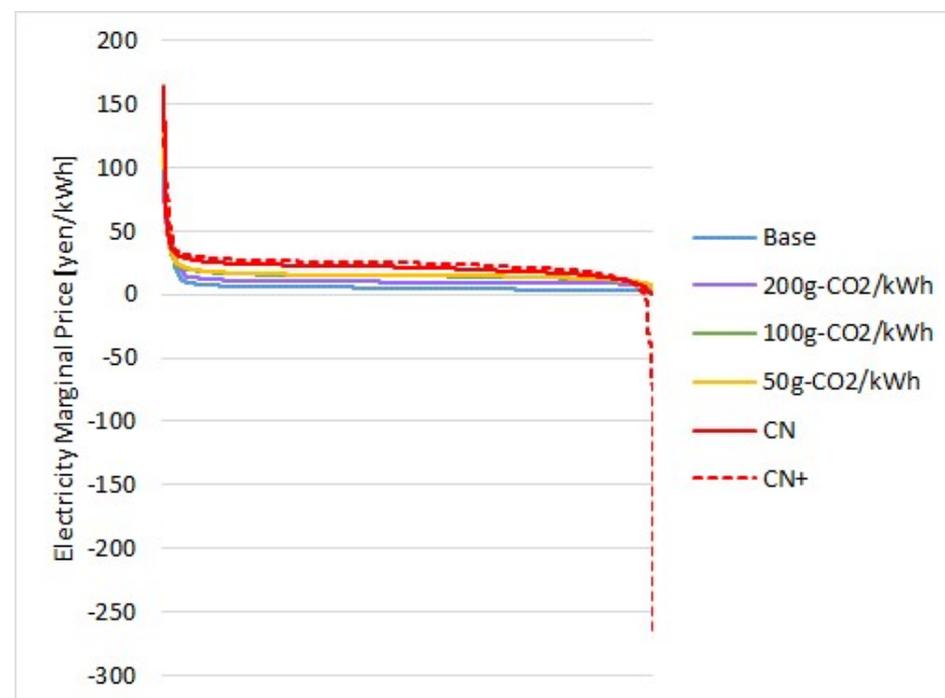
カーボンニュートラル実現に向けた電源ベストミックス

電力価格はCO₂制約により上昇、変動幅も拡大→脱炭素化と経済性の両立が課題

電力価格(電力限界価格)



電力価格曲線(電力限界価格)



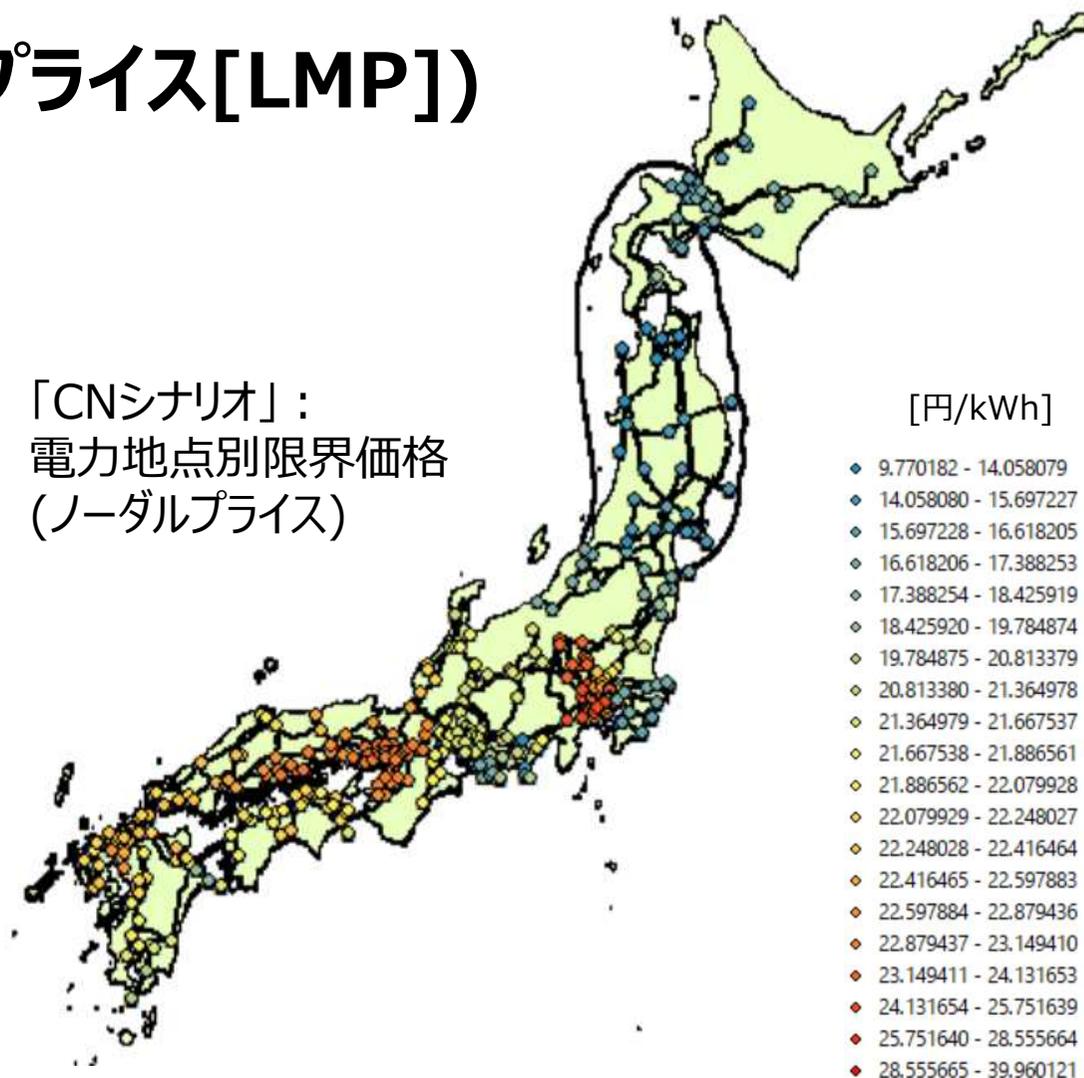
[円/kWh]	電力限界価格	電力平均価格	標準偏差	最高価格	最低価格
基準	6.4	8.4	8.2	99.4	2.2
200g-CO ₂ /kWh	10.5	9.5	8.7	122.7	4.2
100g-CO ₂ /kWh	15.5	10.7	9.2	141.0	2.9
50g-CO ₂ /kWh	15.9	11.9	9.0	138.3	2.6
CN	21.2	13.4	10.9	163.6	0.0
CN+	23.6	14.3	14.2	134.8	▲270.1

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

地点別電力限界価格(ノーダグプライス[LMP])

- 各地点の需給状況を反映
 - 低価格：供給余剰、さらなる電源増強の費用対効果は低い
 - 高価格：電力不足、さらなる電源増強は費用対効果が高い
- 送電線投資検討の重要指標(ノーダグプライスの差分 = 送電権費用)
- 再エネ主力電源化に向けて、ノーダグプライス情報提供の基盤整備が重要な課題
 - 高価格地点での再エネ普及→費用対効果が高い

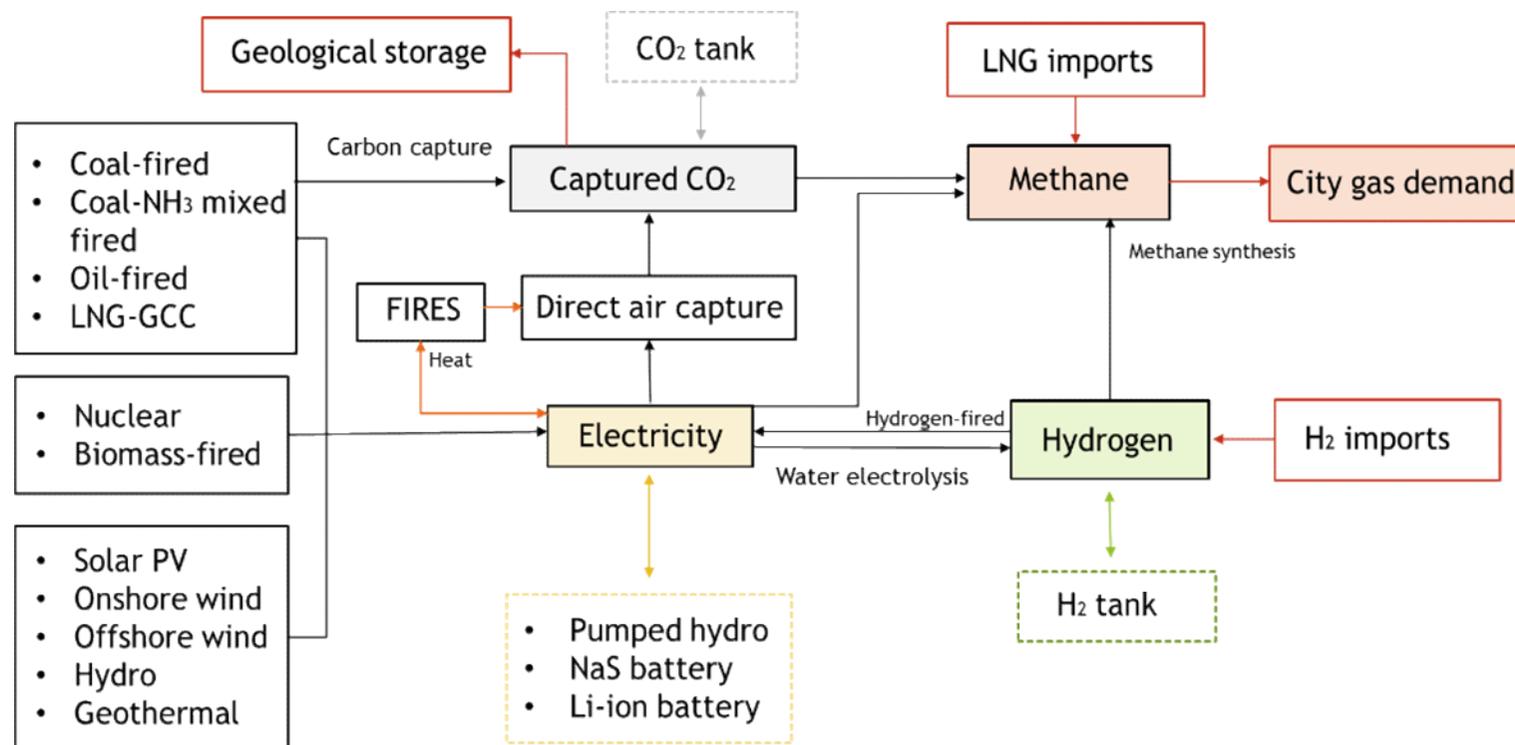
「CNシナリオ」：
電力地点別限界価格
(ノーダグプライス)



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

セクター・カップリング技術の考慮

- 水素輸入、CCUS、合成メタン(メタネーション、サバティエ反応)、DAC、高温熱貯蔵等を考慮
- 都市ガス需要を電力需給モデルで考慮→電力・ガス部門の統合的最適化

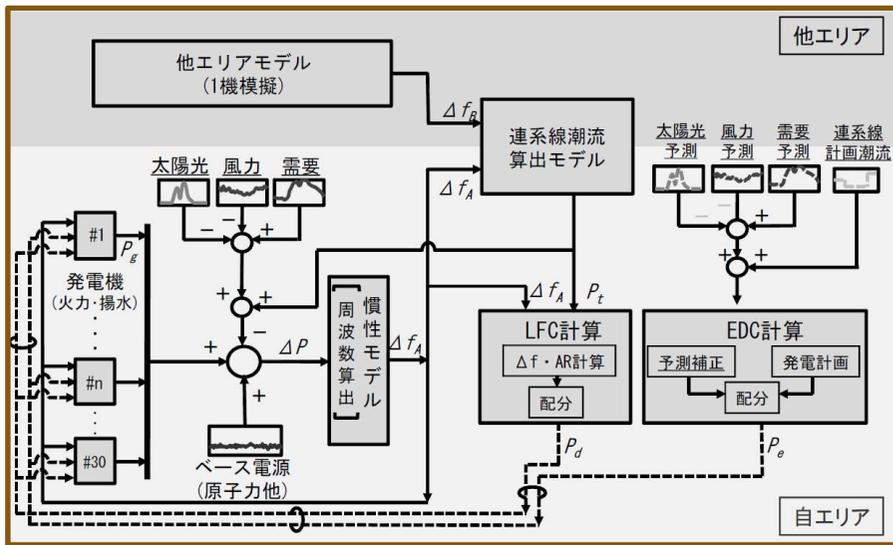


(出典) 田原, 藤井, 小宮山: エネルギー・資源学会論文誌, 43(3), 75-83 (2022)ほか

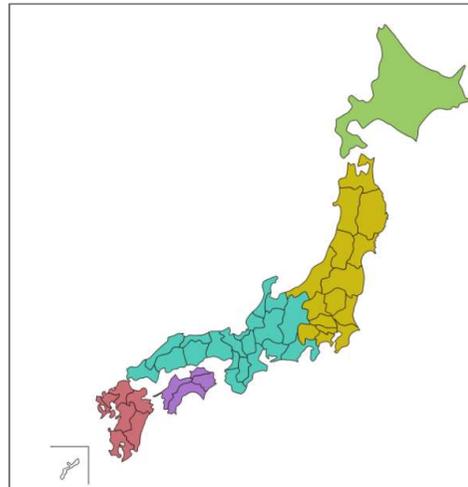
系統慣性に関する制約

- 電気学会 電力需給・周波数シミュレーションモデルを用いて系統慣性と周波数変化を定量的に評価
- 電源脱落が発生した際に、インバータ電源が解列しない周波数変化率(RoCoF)を満たす系統慣性について評価
- 同期連系された系統慣性管理区分ごとに系統慣性の下限値を設定

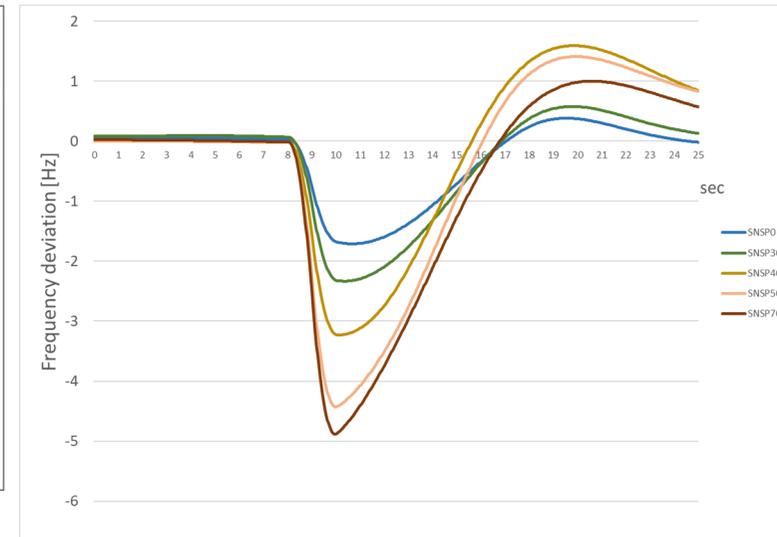
電気学会 電力需給・周波数シミュレーションモデル



系統慣性管理区分



各SNSP比率での周波数低下



$$\text{SNSP} = \frac{\text{非同期電源出力} + \text{移入(連系線)}}{\text{需要} + \text{移出(連系線)}}$$

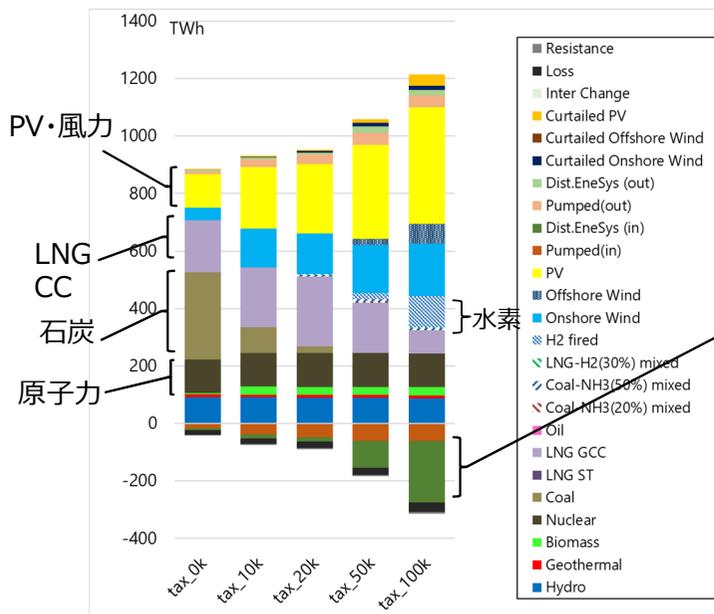
(出典)「電力需給・周波数シミュレーションモデル」,電気学会技術報告,vol.1386,2016.

(出典) 田原, 藤井, 小宮山: エネルギー・資源学会論文誌, 43(3), 75-83 (2022)ほか

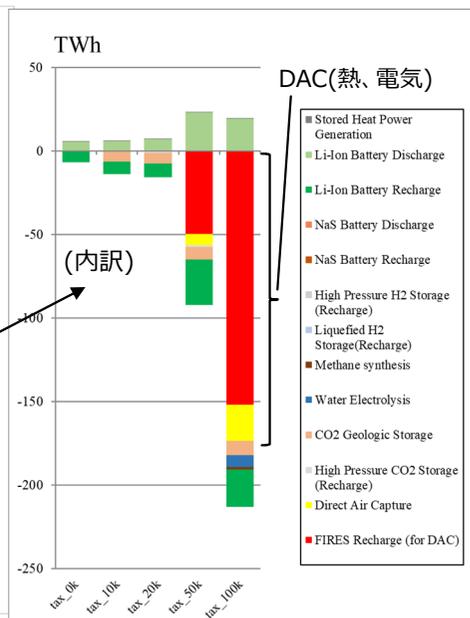
電源構成、都市ガス供給

- 炭素税率によるシナリオ分析(0~10万円/トン)
- 炭素税率上昇により、再エネ比率の拡大、火力比率の低下および石炭→LNG→水素専焼への燃料転換
- DACでの電力消費増加→炭素高税率下では余剰電力+DACによるCO₂回収の経済性が高まる
- 炭素税10万円/トンにて合成メタン(メタネーション)が導入される

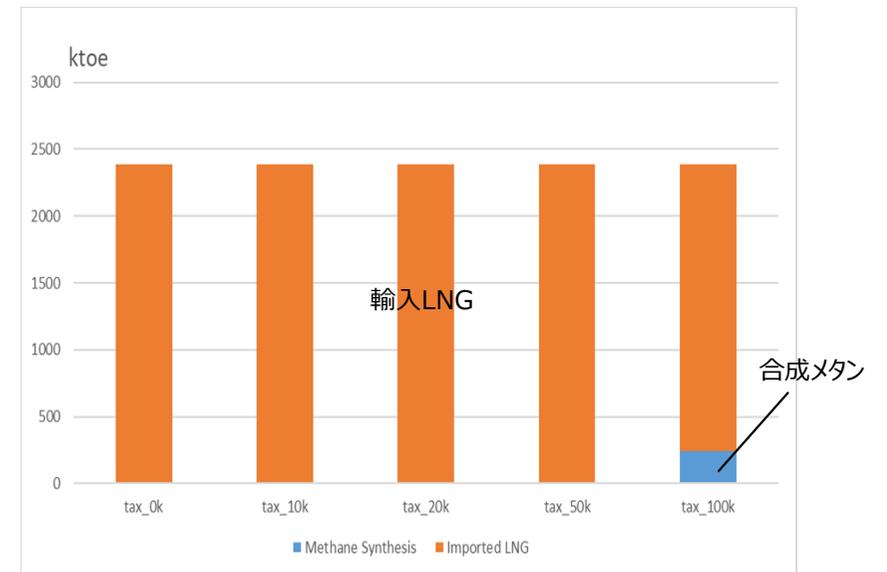
電源構成(日本全体)



需給調整技術の構成



都市ガス供給内訳(日本全体)

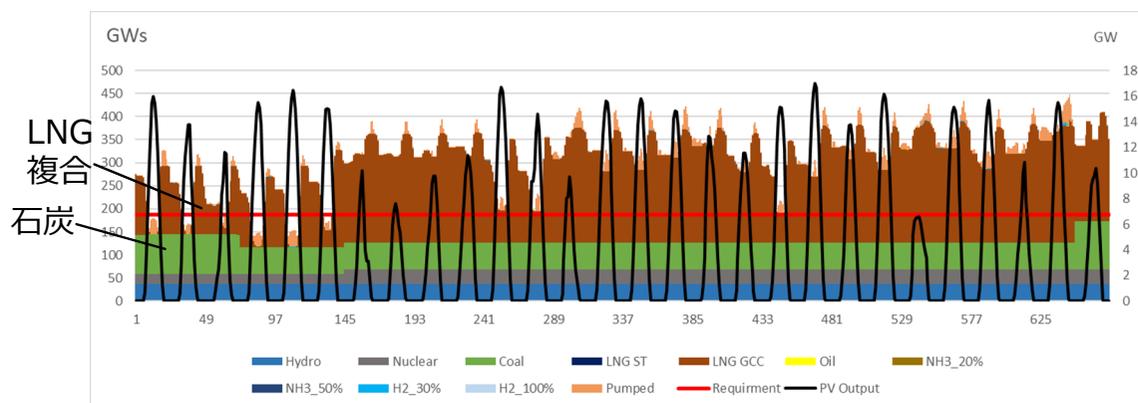


(出典) 田原, 藤井, 小宮山: エネルギー・資源学会論文誌,43(3),75-83 (2022)ほか

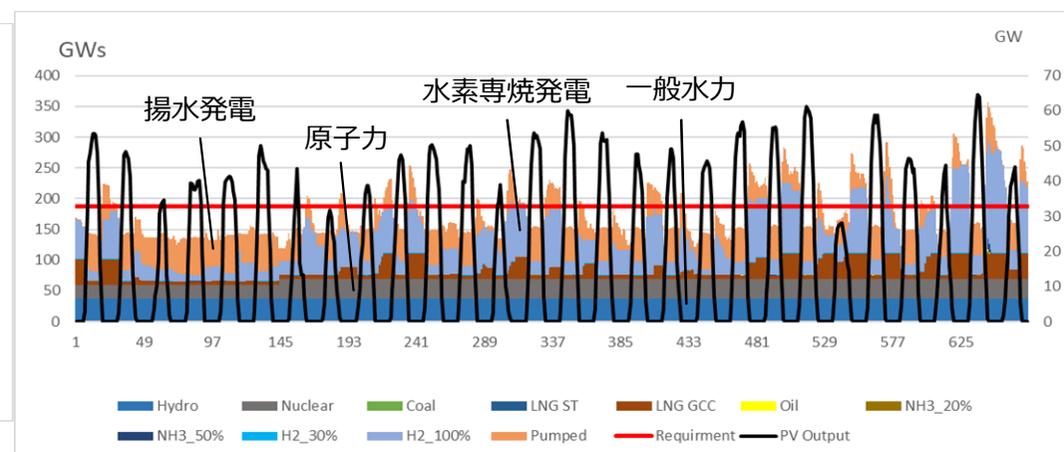
系統慣性の分析

- 慣性力維持の方策は電源ミックスにより変化
- 炭素税低水準、再エネ普及小：石炭火力、LNG複合の並列運転を中心とした系統慣性の維持
- 炭素税高水準、再エネ普及拡大：揚水、一般水力、原子力、水素専焼発電の並列運転を中心とした系統慣性の維持

系統慣性(炭素税0円/トン、関東圏)



系統慣性(炭素税10万円/トン、関東圏)

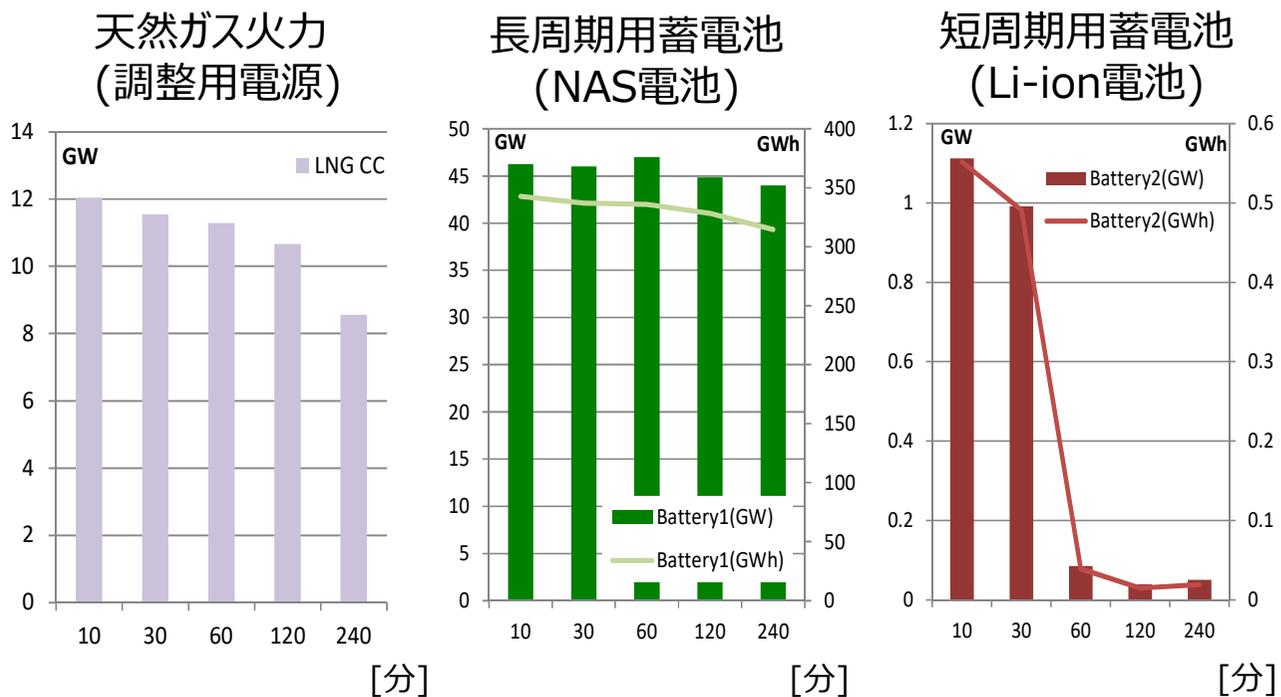


(出典) 田原, 藤井, 小宮山: エネルギー・資源学会論文誌,43(3),75-83 (2022)ほか

(例)時間的解像度に関する分析

時間的解像度が低いほど(荒くなるほど)、調整力(LNG複合、蓄電池)の導入量が減少 (特に短周期変動対策)

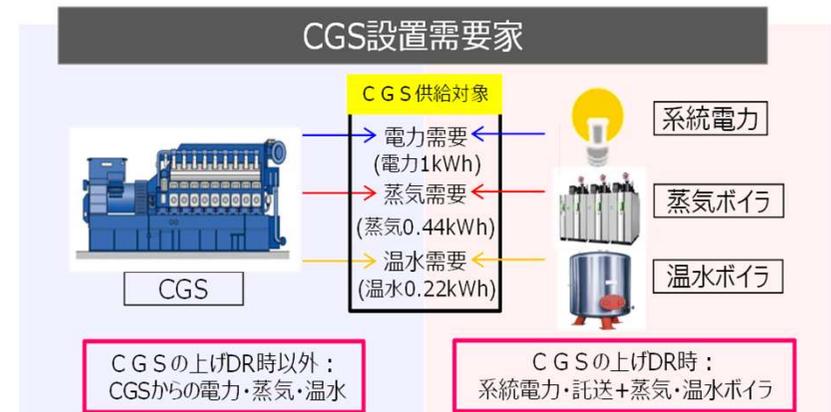
各時間解像度に応じた新設導入量



(例)需要家側技術の能動的制御(発動指令電源等)

- IoT/IoE技術普及拡大、再エネ普及拡大→需要側技術(Edge Technology)の能動的制御による電力系統安定化への期待
- 普及が進むコージェネレーションシステム(CGS)の運用余力(上げ/下げDR)を基にした能動的制御(VPP制御等)の価値に関する分析
- 上げDR: CGS出力抑制
= 系統需要の創出→再エネ出力抑制回避、電力脱炭素化
- 下げDR: CGS出力増加
= 系統需要の抑制→再エネ出力減少分の補完、レジリエンス強化

CGSによる上げDR制御、下げDR制御(電力、熱)



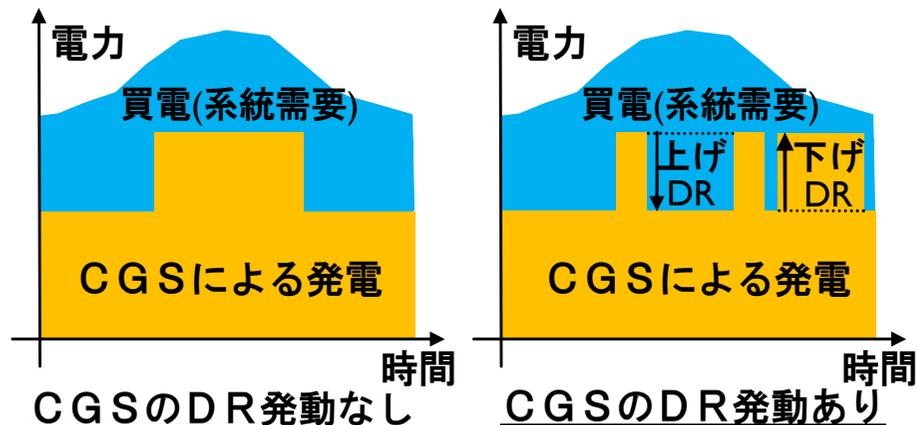
上げDR(CGS出力抑制)→再エネの限界費用ゼロの電力購入 + ボイラの追い炊き

下げDR可能量のモデル化(CGS設備量に対する比率)

	ガスエンジン(GE)	ガスタービン(GT)
民生(ホテル・病院等,その他)	昼間: 10%、夜間: 100%	昼間: 10%、夜間: 50%
産業(24時間) (24時間操業: 負荷率高)	昼間: 10%、夜間: 20%	昼間: 10%、夜間: 20%
産業(24時間) (24時間操業: 負荷率低)	昼間: 10%、夜間: 100%	昼間: 10%、夜間: 50%
産業(昼操業) (昼間操業等)	昼間: 10%、夜間: 0%	昼間: 10%、夜間: 0%

昼間の出力増加余力は小さく、夜間は相対的に大きい

需要家のCGSによる上げDR制御、下げDR制御(電力)



(出典) 小宮山, 藤井: エネルギー・資源学会論文誌, 40(6), 232-241 (2019)

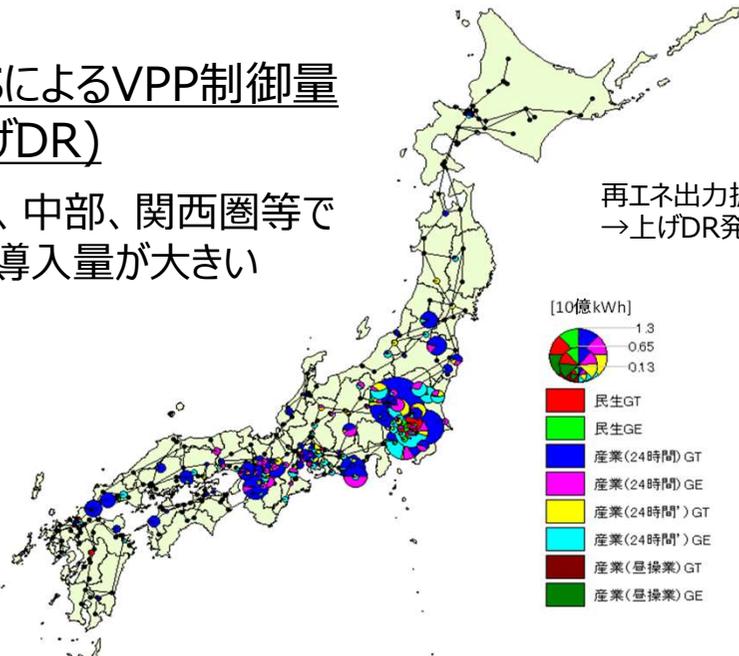
小宮山, 解説論文(特集 脱炭素への道をつなぐ天然ガスの新規・高度利用) エネルギー・資源学会論文誌, 42(2), 108-112 (2021)

(例)需要家側技術の能動的制御(発動指令電源等)

- CGSのVPP制御量(再エネ比率, CGS調整コスト別)
 - 下げDR: 最大180~370万kW, 40~100億kWh
 - 上げDR: 最大0~150万kW, 0~8億kWh
- [参考]電源 I' 調達量(調整力公募実績):96万kW
- CGSの能動的制御: 発動指令電源としての電力系統安定化への貢献可能性

CGSによるVPP制御量(下げDR)

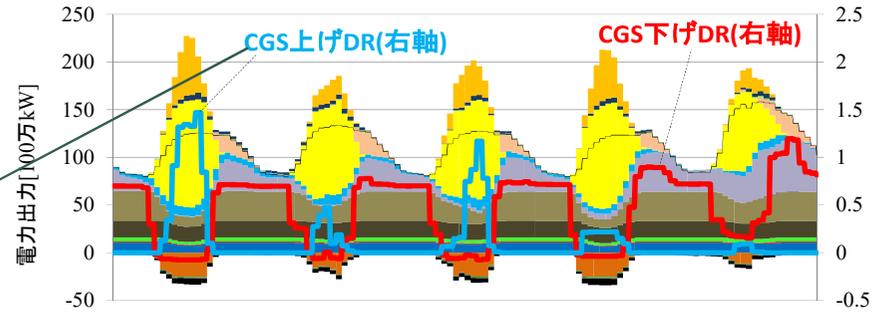
関東、中部、関西圏等でVPP導入量が大きい



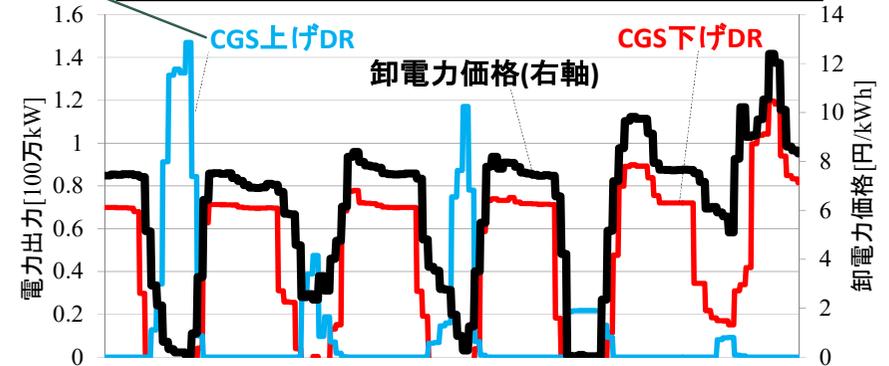
再エネ出力拡大、卸電力価格の暴落
→ 上げDR発動(CGS出力抑制)



CGSのVPP制御と電力需給運用の推移(5月の5日間)



CGSのVPP制御と卸電力価格の推移



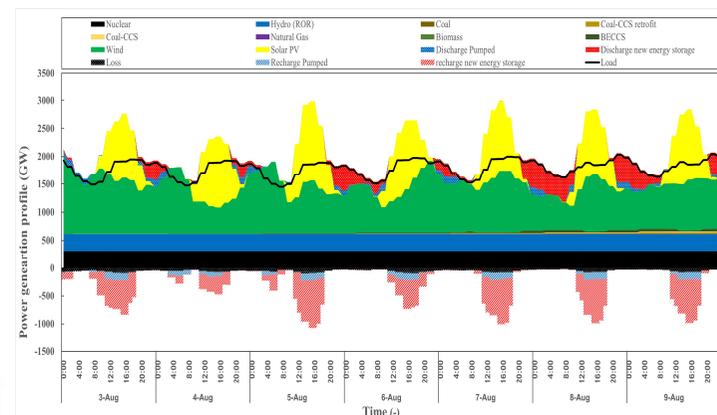
(出典) 小宮山, 藤井: エネルギー・資源学会論文誌, 40(6), 232-241 (2019)

小宮山, 解説論文(特集 脱炭素への道をつなぐ天然ガスの新規・高度利用) エネルギー・資源学会論文誌, 42(2), 108-112 (2021)

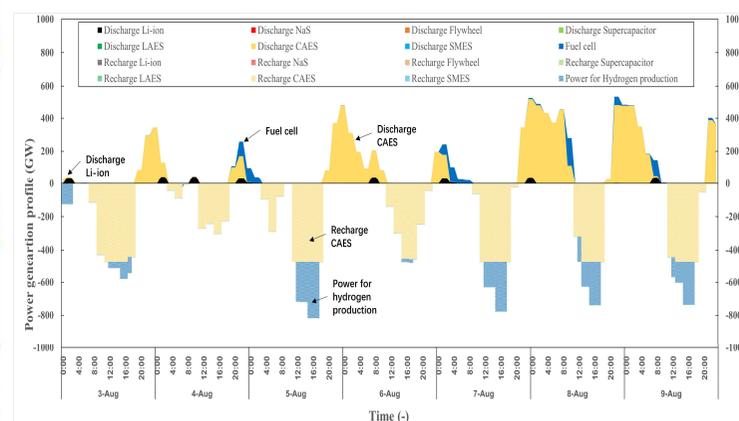
(例)中国の電力供給：カーボンニュートラル実現可能性分析

- 中国：2060年カーボンニュートラル実現
- 中国のエネルギー：石炭依存、電力需要の増加、再エネ拡大
 - 内陸・産炭地域→石炭CCS、風力、太陽光の導入拡大
 - 沿海地域→原子力、ガス火力、内陸からのグリーン電力輸送(西電東送)
- 新技術の導入可能性分析(先進エネルギー貯蔵技術[水素電力貯蔵、蓄電池(Li-ion、NAS)、LAES、CAES、フライホイール、SMES、キャパシタ])

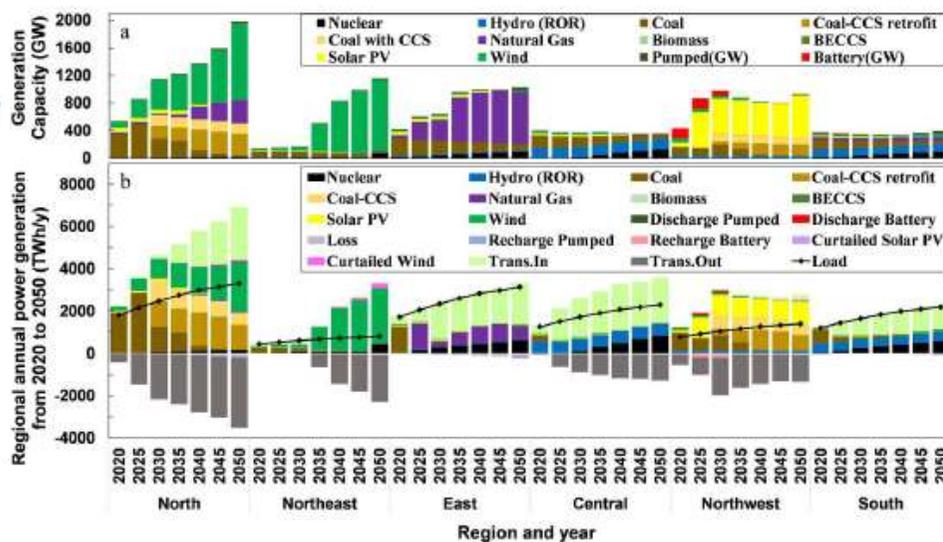
最適需給運用(夏季1週間、2050年)



電力貯蔵運用(夏季1週間、2050年)



中国の地域別電源構成の展望(2020-2050年)



中国の地域区分



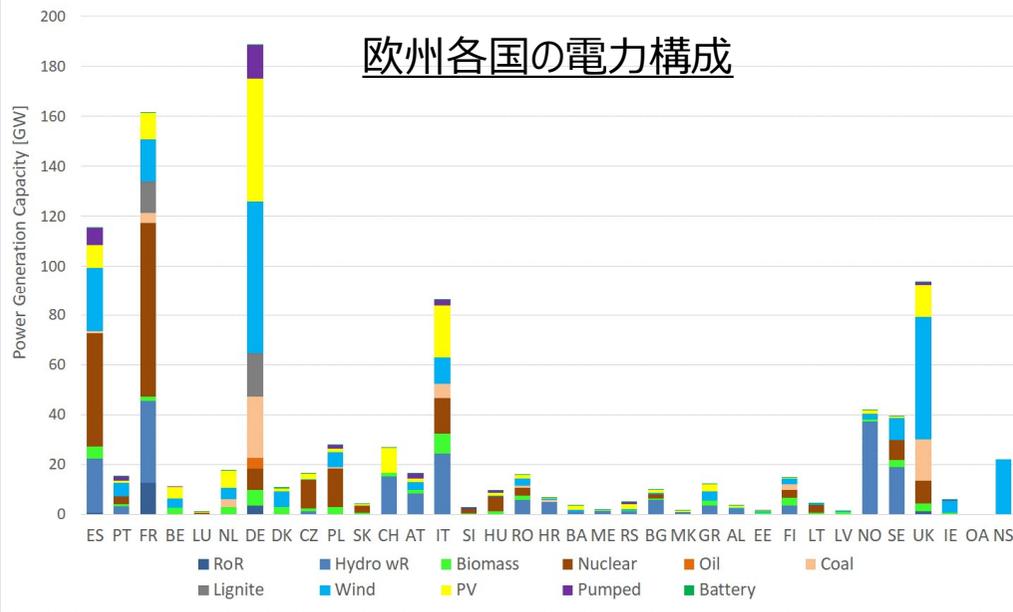
(出典)

- Yi Y., Gyanwali K., Komiyama R., Fujii Y., Yamaguchi A.: *Journal of Japan Society of Energy and Resources* 42 (6), 368-384 (2021)
- Yi Y., Komiyama R., Fujii Y.: *The 40th Edition of International Energy Workshop 2022, Freiburg, Germany* (2022)

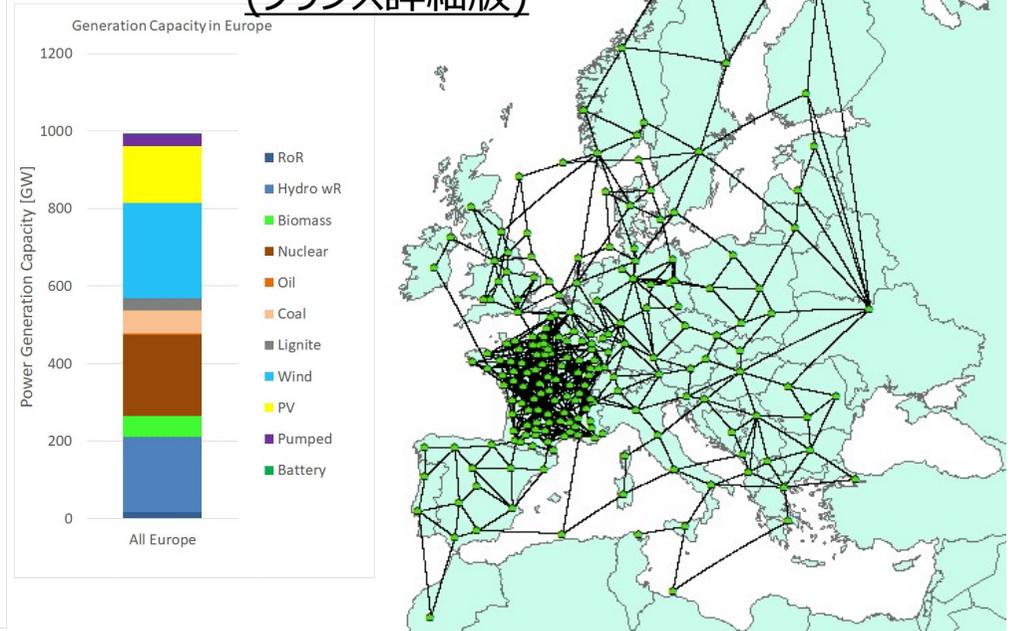
(例) 欧州の電力システムシミュレーション

欧州の電力システムモデル(フランス詳細版) :
208ノード、基幹送電線555本、年間8,760時間

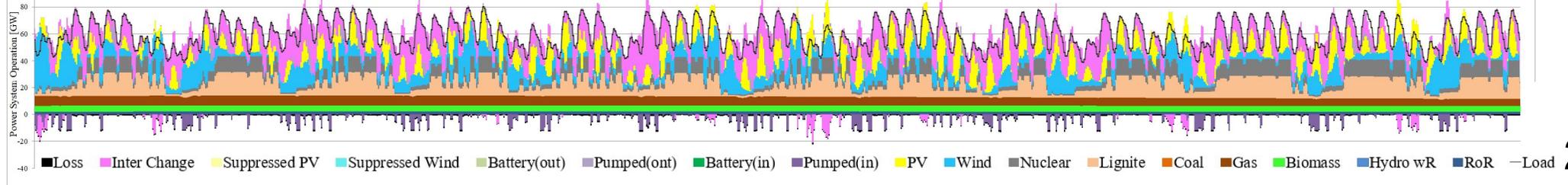
欧州各国の電力構成



欧州の電力システムモデル
(フランス詳細版)



ドイツの電力需給(4月~6月) : 再エネ大量導入時→連系線による需給調整の役割が大きい



結 語

日本全国の送電系統、潮流制約を考慮した最適電源構成モデルによる
カーボンニュートラル実現に向けた影響分析

今後の課題

- 下位系統への拡張モデルの開発
- 基幹系統(383母線、475本の基幹送電線)+1時間値 or 10分値
+2050年までの各年の投資行動を考慮した動学最適化型モデル開発

<謝辞>本発表はJSPS科研費JP20H02679, 22H00572, (独)環境再生保全機構環境研究総合推進費(2-2104),
文部科学省原子力システム研究開発事業JPMXD0220354480の助成を受けた。