

【2-1704】 日本における 長期地球温暖化対策経路の 複数モデルを用いた評価と不確実性の分析

- 杉山昌広 (東京大学未来ビジョン研究センター)
IPCC第6次評価報告書lead author (Chapter 12)
- 小宮山涼一 (東京大学大学院工学系研究科)
黒沢厚志 (エネルギー総合工学研究所)
松尾雄司 (日本エネルギー経済研究所)

【2-1704】日本における長期地球温暖化対策経路の複数モデルを用いた評価と不確実性の分析

長期戦略

- 2019年6月、日本政府、UNFCCCに長期戦略提出
- 詳細なモデル分析、特にモデル間の違いに起因する不確実性の分析は未実施
- 長期戦略に関するトピックの知見の不足

中長期の気候政策の評価

- サブテーマ1 ← モデル相互比較
- サブテーマ2 — 再エネ大量導入評価
- サブテーマ3 — イノベーション
- サブテーマ4 — 原子力シナリオ

サブテーマと研究協力者はモデル比較にも参加

環境行政への貢献・学知創出

- 日本の排出削減経路に関するロバストな理解と政策的に重要な不確実性の同定
- 個別の政策課題(再エネ、イノベーション、原子力)と全体の排出経路との関係についての理解

研究会合スケジュール、 国際連携

- 研究会合
 - 毎月約一回のペースで定例研究会
 - 2017年12月14日～15日、JMIP国際ワークショップ
 - 2018年4月26日、推進費気候政策3課題合同研究会
 - 2019年12月5日、EMF 35 JMIP国際ワークショップ
- 国際連携
 - モデル比較の部分はスタンフォード大学Energy Modeling Forumのプロジェクト(EMF 35 JMIP)としても位置付け
 - IIASAのご厚意でデータベース・システムを利用
 - IPCC AR6へのインプット（シナリオ提出）

サブテーマ 1

複数の統合評価モデル比較による 長期の地球温暖化対策の評価

東京大学未来ビジョン研究センター

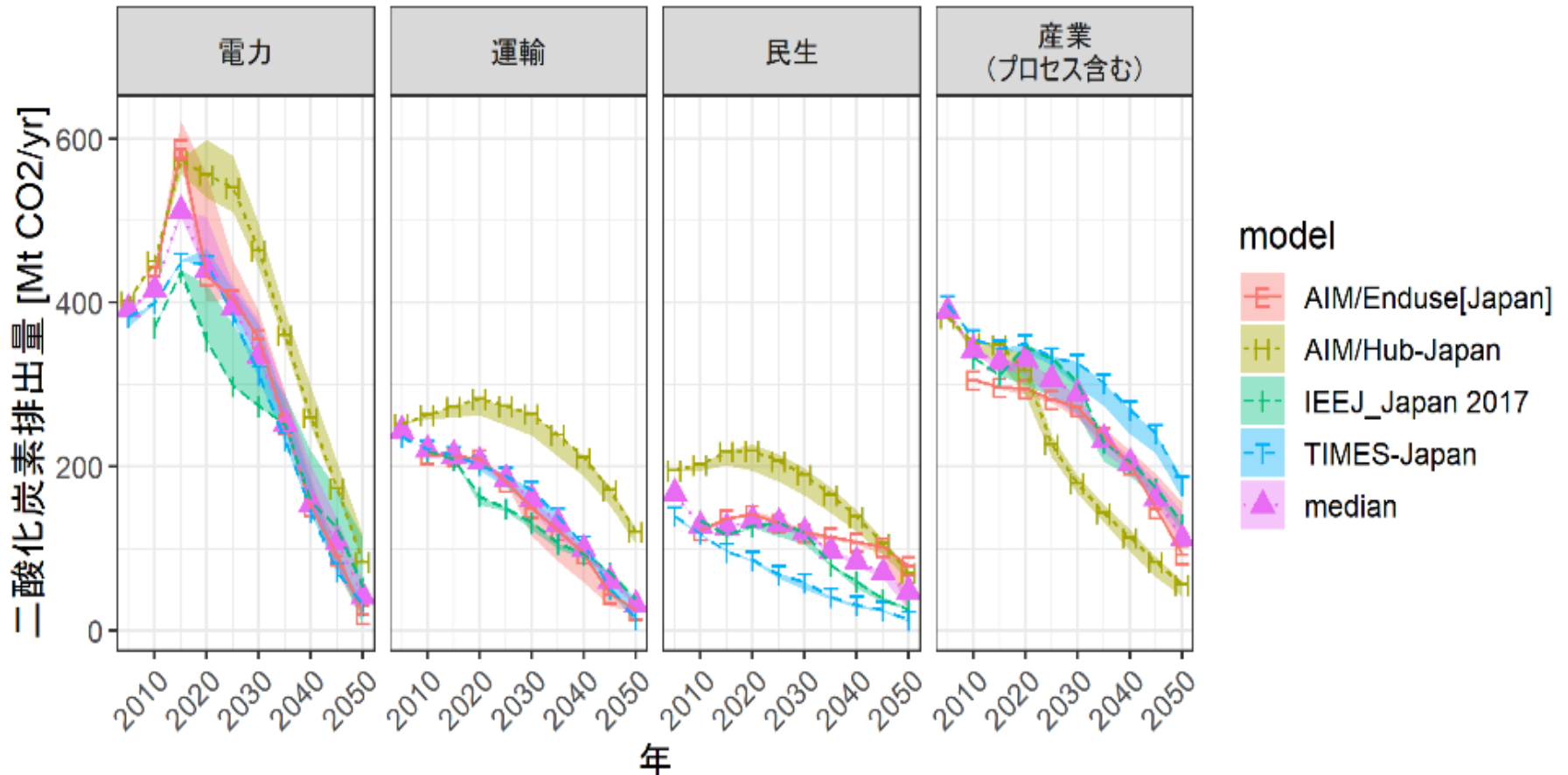
モデル：日本を代表する5つの エネルギー経済モデル／統合評価モデル

モデル	研究機関	均衡概念	地域	時間
AIM/Hub-Japan	京都大学／ 国立環境研究所	一般均衡	日本	逐次最適
AIM/Enduse[Japan]	京都大学	部分均衡	日本	逐次最適
DNE21	東京大学	部分均衡	世界	通時最適
IEEJ	日本エネルギー 経済研究所	部分均衡	日本	通時最適
TIMES-Japan	エネルギー 総合工学研究所	部分均衡	日本	通時最適

2050年80%削減は全部門で大幅削減を意味し、 例外の部門はない

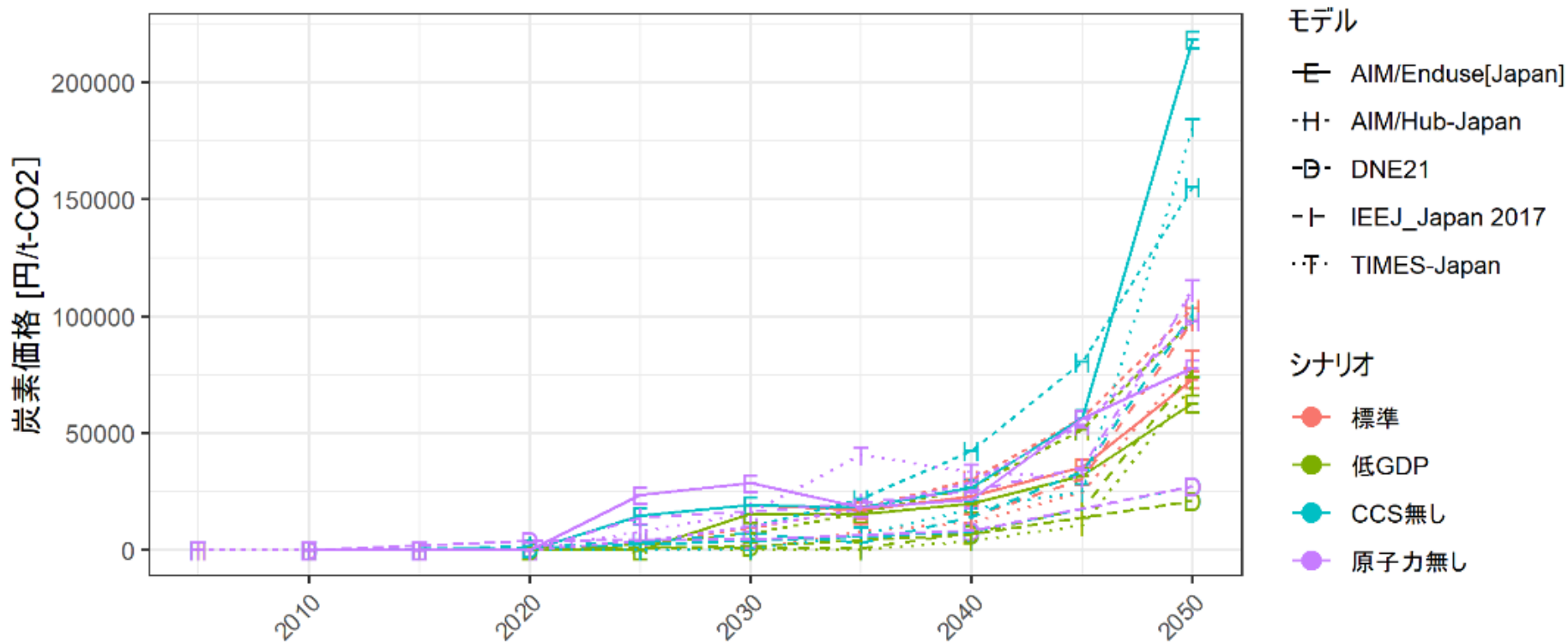
- リボンは4ケース（Def: 標準ケース、LoDem: 低位GDPケース、NoCCS: CCS利用不可ケース、NoNuc: 原子力利用不可）の幅を示すが、シナリオ間の違いは極めて小さい

シナリオ: 26by30+80by50_Def



全部門CO₂排出削減の際には 炭素価格がすべての部門に適用される

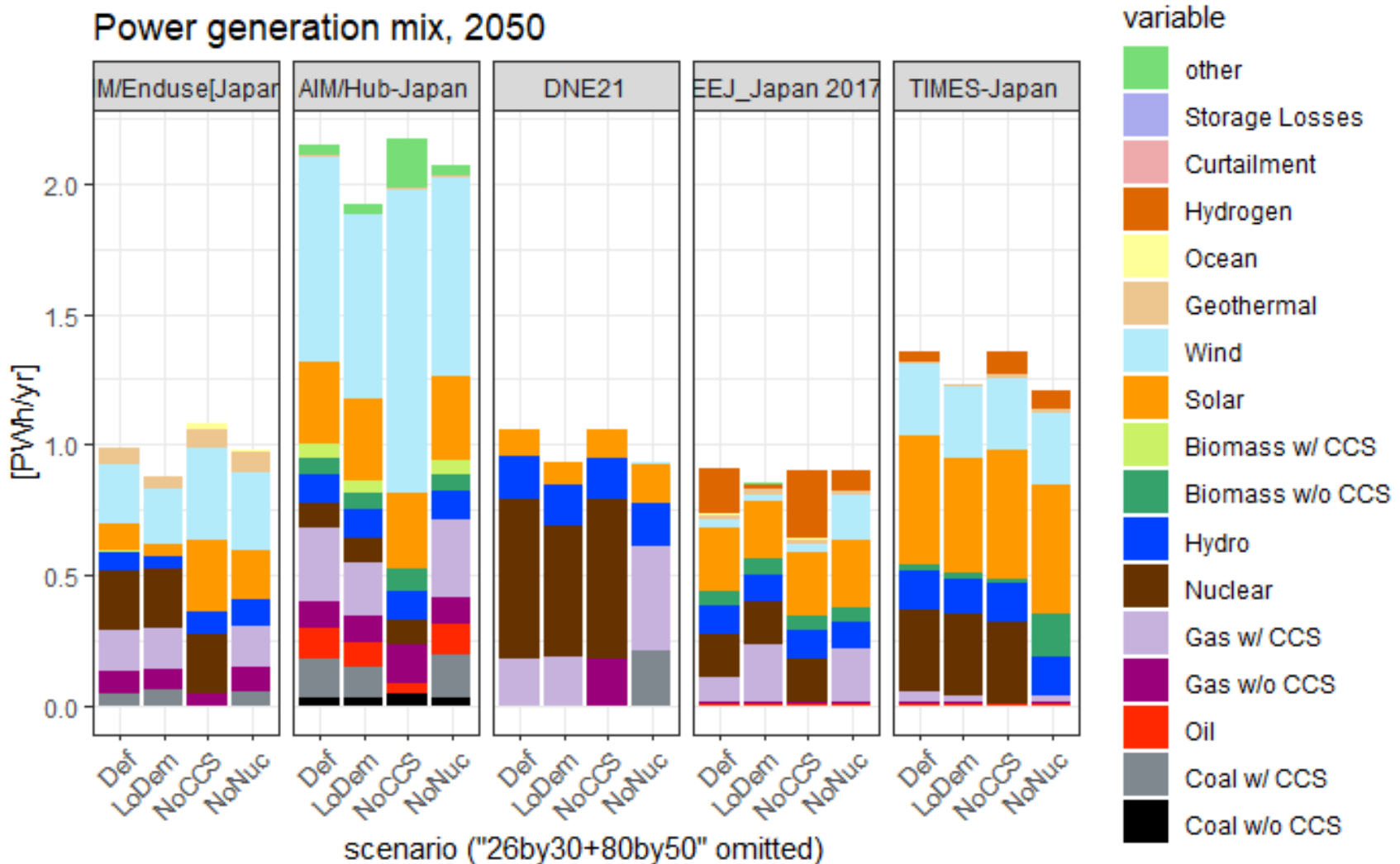
- 炭素価格については排出量取引、炭素税にとられず直接規制や研究開発、普及促進、情報的手法など暗示的な炭素価格を強化する手法も積極的に考慮する必要



頑健な対策：省エネ、電源脱炭素化、電化

不確実な領域：電源選択など

- 2050年の電源構成、Def: 標準ケース、LoDem: 低位GDPケース、NoCCS: CCS利用不可ケース、NoNuc：原子力利用不可ケース



サブテーマ 2
再生可能エネルギー大量導入の
モデリング手法改善に関する研究

東京大学大学院工学系研究科

サブテーマ2：再生可能エネルギー大量導入のモデリング手法 改善に関する研究

東京大学大学院工学系研究科 小宮山涼一

●日本の電力システム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)、送電容量制約、電力貯蔵設備制約、設置可能容量制約、SNSP制約など

- 地理的解像度:352母線、441本の基幹送電線(沖縄除く)
→アメダスを基に、352地点別に日射量、風況を考慮

■ 時間解像度:

- 10分値以上で任意選択可能(1時間値で分析)
- 24時間/日×365日=8,760 時点/年

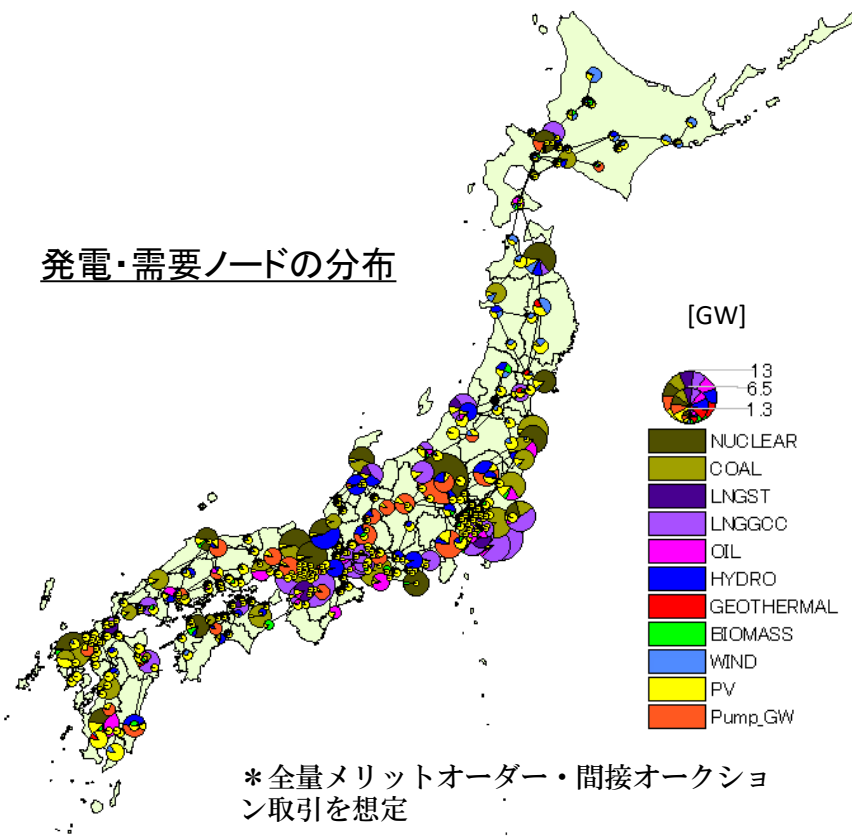
- 発電設備:石炭, ガス複合, ガス汽力, 石油, 原子力, 水力, 地熱, バイオマス, 海洋, 太陽光, 風力

- 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)

- 諸前提:経済産業省の長期エネルギー需給見通し(2030年)、広域機関の供給計画等を基に設定

* 計算規模:(10分値) 制約条件数:3.7億本、内生変数2.6億個

発電・需要ノードの分布



太陽光発電の最適な電力系統接続地点の分析、洋上風力発電の導入可能性評価、
デマンドレスポンスの挙動分析、電力市場価格分析を実施

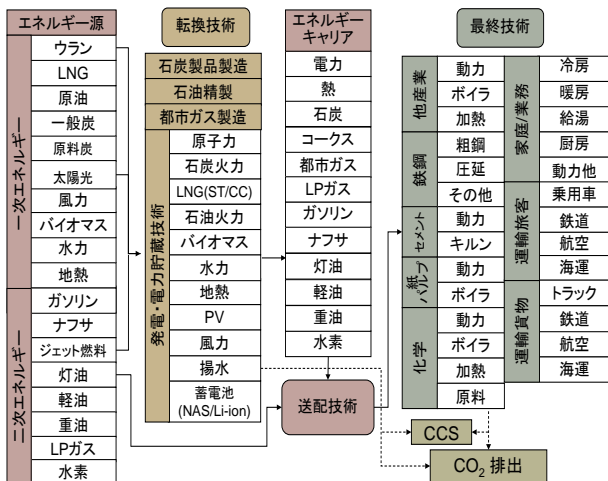
サブテーマ2：再生可能エネルギー大量導入のモデリング手法改善に関する研究

東京大学大学院工学系研究科 小宮山涼一

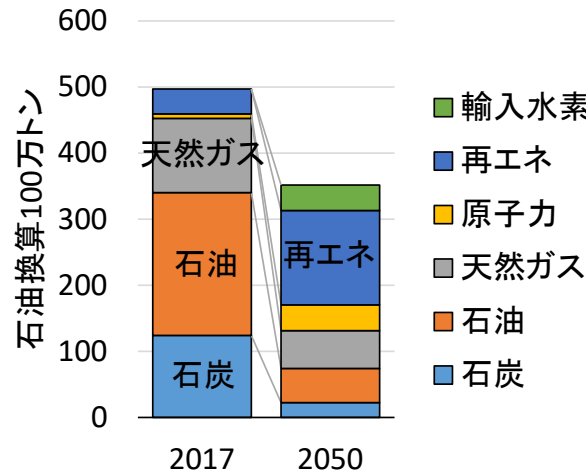
●日本の2050年CO₂排出大幅削減戦略(8割削減)の分析

- CO₂80%削減(2017年12億トン→2050年2億トン)：省エネ進展、電化、再エネ拡大
- 原子力の想定：40年運転+20年運転延長、新增設無(2017：約40GW→2050：約20GW)
- 省エネ(一次ベース)：約3割(現状比)の省エネ進展；エネルギー利用高効率化
- 電力需要：1兆kWh(2017)→1.5兆kWh(2050)；EVやヒートポンプ技術拡大
- 再エネ電源比率：2割(2017)→8割(2050)；自然変動電源比率：1割→6割
- CO₂限界削減費用(シャドープライス)：2050年 30万円/トン-CO₂

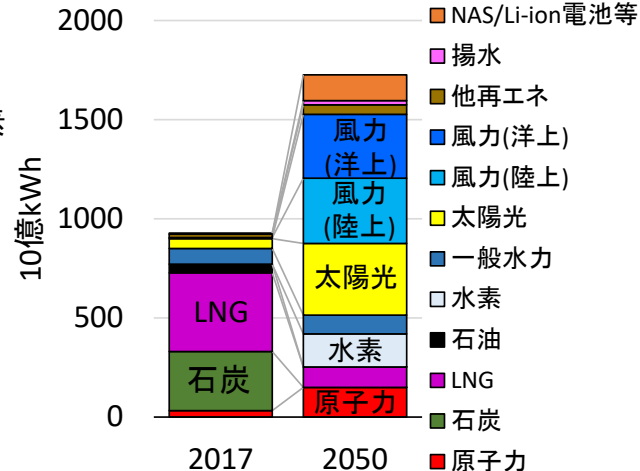
エネルギー技術選択モデル
(システム総コスト最小化型モデル)*



一次エネルギー供給



電源構成(発電量)



サブテーマ2：再生可能エネルギー大量導入のモデリング手法改善に関する研究

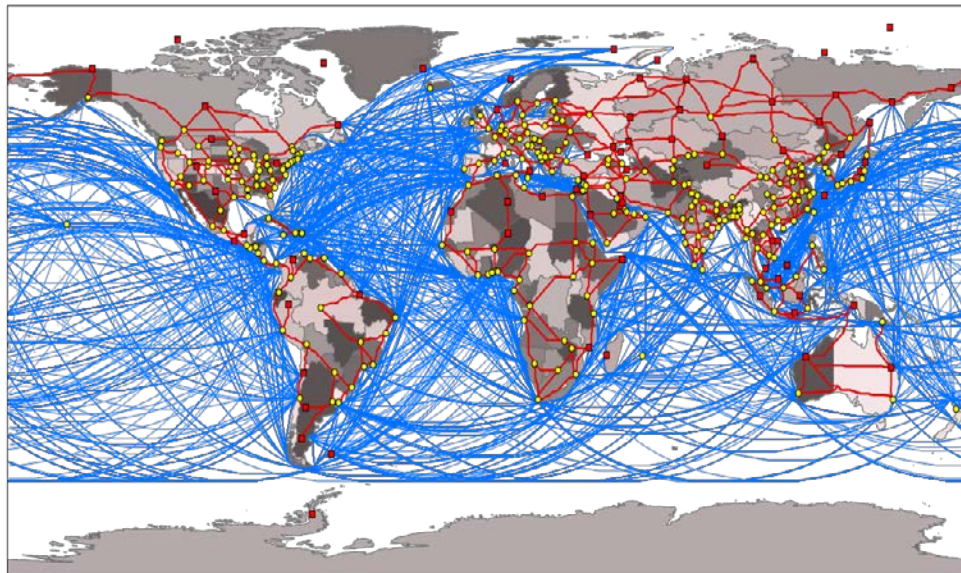
東京大学大学院工学系研究科 小宮山涼一

●世界の2050年CO₂排出大幅削減戦略(2°C目標)の分析

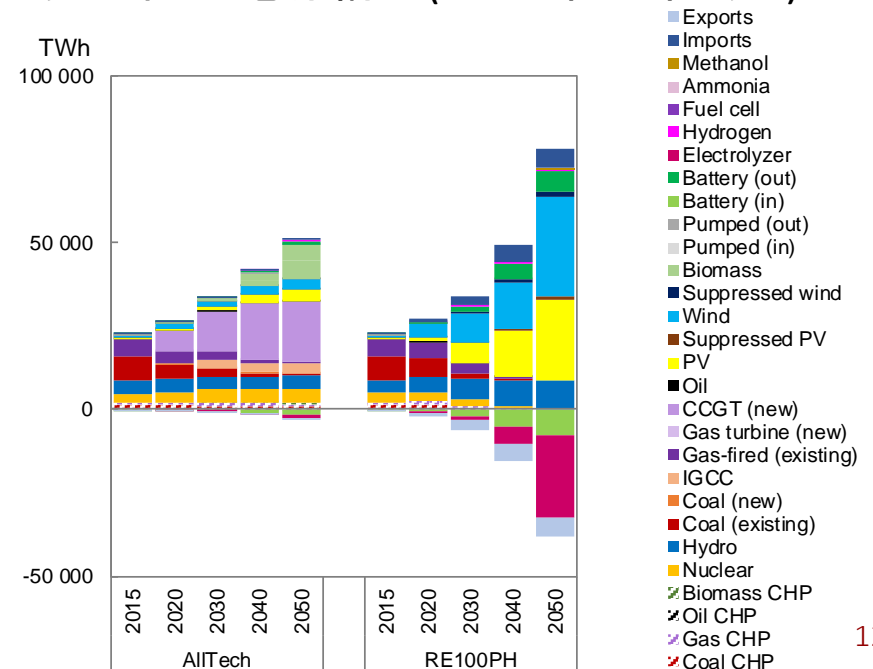
- 世界363地域分割。エネルギー需給の地域特性やエネルギー・CO₂輸送を詳細に考慮
 - AllTechシナリオ：モデル化した全ての技術を利用可能と想定したシナリオ
 - RE100PHシナリオ：2050年までに電力供給と水素製造を100%再エネで行うシナリオ
- AllTechシナリオでは2050年の世界のVRE電力比率は14%の一方、RE100PHシナリオでは、VRE電力比率は82%まで上昇する。

世界エネルギーモデル

(モデルの地域分割と海上・陸上輸送経路)



世界全体の電源構成(2°C目標制約あり)



サブテーマ 3 エネルギー技術イノベーションの モデリング手法の向上に関する研究

(一財) エネルギー総合工学研究所

サブテーマ3

エネルギー技術イノベーションのモデリング手法の向上に関する研究

計画

技術パラメータ の不確実性評価

- ・二次電池およびバイオエネルギーCCS(BECCS)に関するイノベーション関連文献の同定&内容とりまとめ
- ・データの不確実性評価および加工

結果

- ・二次電池に関するとりまとめ
- ・BECCSはネガティブエミッション技術(NETs)の一環ととらえ、対象技術群を拡張調査してとりまとめ

日本の低炭素 シナリオ試算

- ・日本の中期目標および長期戦略を想定したマルチシナリオ試算(2050年まで)

- ・日本の中期目標および長期戦略を想定したマルチシナリオ試算
- ・今世紀後半に正味でゼロエミッションを達成するシナリオを追加試算.

二次電池コストの将来の不確実性

- 各種文献をもとに、2030年および2050年におけるコスト範囲を推定。他サブテーマに対し、モデル分析用に、低位、標準、高位の3シナリオを提供。
 - 車載用(パック, 単位\$/kWh)
 - 2030年頃 低位100, 標準150, 高位200
 - 2050年頃 低位50, 標準75, 高位100
 - 定置用
 - 車載用とほぼ同等と推定
- 定置用エネルギー貯蔵には、貯蔵時間別に揚水発電, 水素, 空気貯蔵など様々なオプションがある。革新技術も含め、網羅的な情報提供を実施。

文献名	説明	パック価格(\$/kWh)
Schmitdt, et al. (2017)	学習効果外挿から累積生産1TWhのコスト推定	150-200
JST (2015)	次世代リチウムイオン(セル 5.1円/kWh)	90 (*)
JST (2016)	リチウム空気(セル 6.7円/kWh)	120 (**)
JST (2017)	リチウム硫黄(セル 5.1円/kWh)	250
ICEF (2017)	次世代リチウム, 全固体, 空気電池を候補に例示	90
Meeus (2018)	リチウムイオン系電池	125以下

(*) モジュール化、パック化として5円/kWhを追加 (**) モジュール化、パック化として7円/kWhを追加

ネガティブエミッション技術の不確実性

- 各種文献をもとにした、2050年に向けた BECCSコストおよびポテンシャル
 - NASEM (2019) では、現在でも広範囲に実施可能であり緩和戦略としてもコスト的に見合う技術として、BECCSを含む土地利用に基づく技術をレビュー
 - 100\$/tCO₂以下で実施可能な世界のBECCS量は 3.5-5.2 GtCO₂/yr
 - Fuss et al. (2018) では、6596件の文献を利用したシステムチックレビュー
 - 2050年のBECCSの妥当な値として、100\$/tCO₂から200\$/tCO₂の範囲において、0.5–5 GtCO₂/yr の可能量と推定
 - ただし文献値の幅は、コストは15–400\$/tCO₂、ポテンシャルは1–85 GtCO₂/yrと大きく、地理的に詳細な推定に課題あり
- DACの各種公開情報による回収コストの整理が Fasihi et al. (2019) でなされ(下表)、2050年に向けた学習効果を考慮したCO₂除去コストを、液体吸収液システムで49–64\$/tCO₂、低温熱利用固体吸着剤システムで34–62\$/tCO₂と推定

文献におけるDAC技術	最小値 (\$/tCO ₂)	最大値 (\$/tCO ₂)
液体吸収液	68	338
低温熱利用固体吸着剤	10	183
湿度変動利用固体吸着剤	21	89
一般	13	810

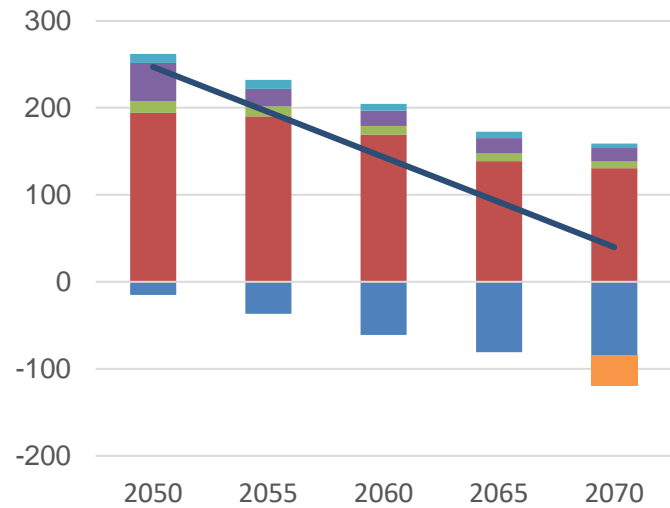
今世紀後半の正味ゼロエミッションシナリオにおける ネガティブエミッションの役割

2070年ネット・ゼロ排出の達成有無

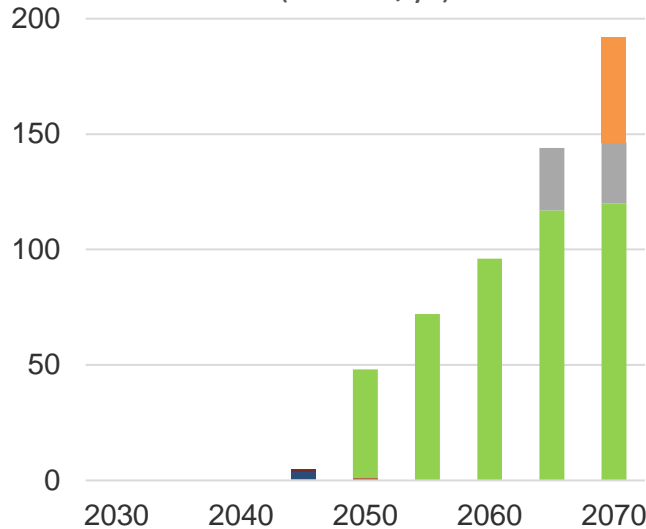
- ❑ エネルギーサービス需要設定の想定によらず、ネガティブエミッション技術の利用が無いケースでは2070年正味ゼロ排出の解なし
- ❑ 2070年需要想定が最も高いケースでは、ネガティブエミッション技術が利用可能である場合でも解なし
- ❑ 2番目に需要想定が高いケースでは、解を得るにはBECCSとDACCSの両者、あるいはBECCSが利用できない場合はDACCS+DACUが必須
- ❑ 2070年需要想定が一番低いケースはDACCSなしでも解を得たが、他の需要ケースではDACCSが必須

試算例 (BECCS, DACCS, DACUあり)

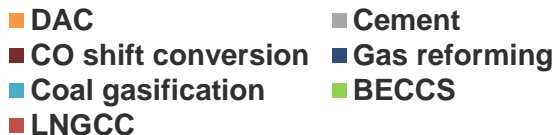
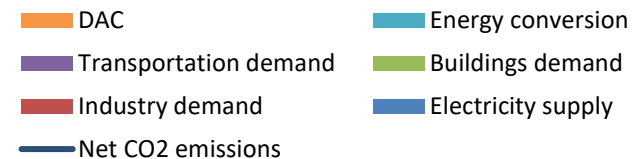
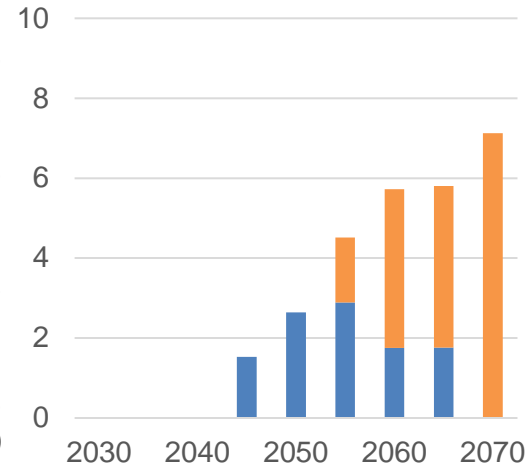
CO2 Emissions (2050以降)



CCS (MtCO2/yr)



CO2 for methanol production (MtCO2/yr)



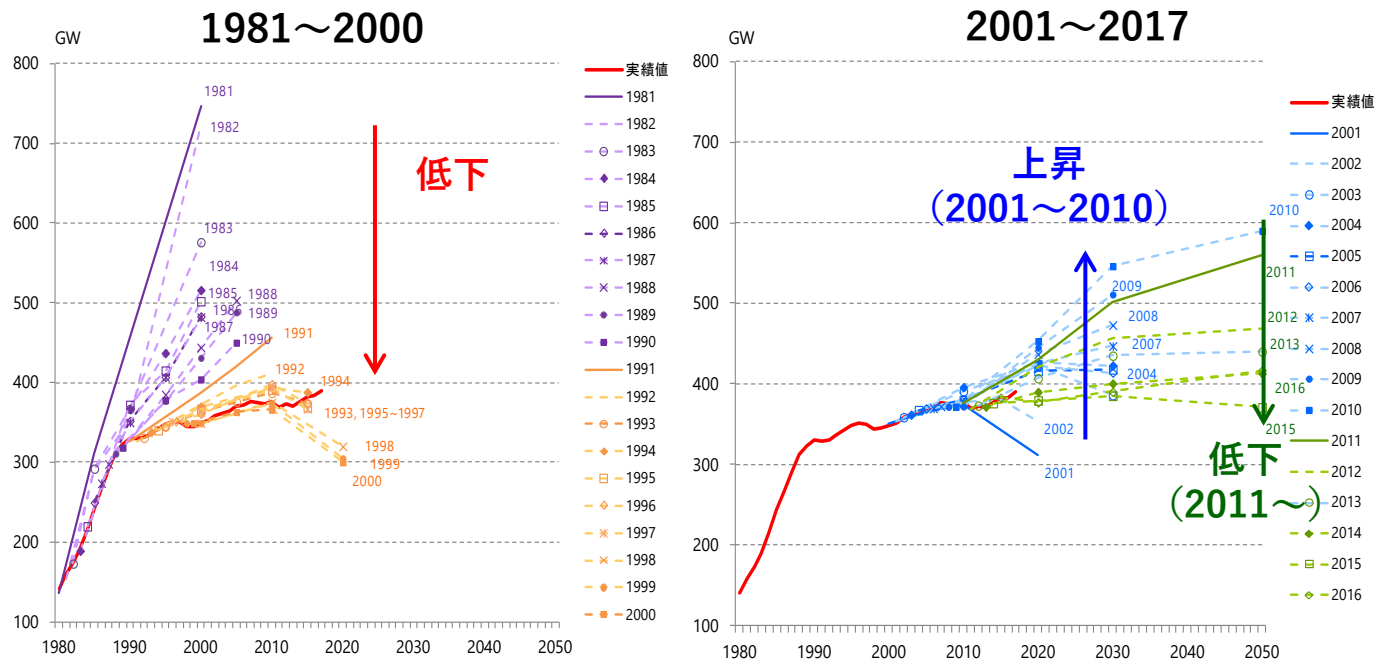
サブテーマ 4 長期の気候政策における原子力の 役割に関する包括的なシナリオ研究

(一財) 日本エネルギー経済研究所

サブテーマ4：原子力シナリオに関する調査・分析

- 世界及び各地域を対象として継続的に公表されている国際機関等の原子力シナリオを網羅的に収集し、その変化の要因について定量分析を実施した。
- 分析の結果、①地球環境問題への顧慮、②他電源に対するコスト優位性、及び部分的に③大規模事故の影響によって原子力シナリオの変化が十分に説明できることが示された。
- チェルノブイリ事故やシェールガスの増産等、一部の地域のみにおいて影響をもつ要因も存在する。

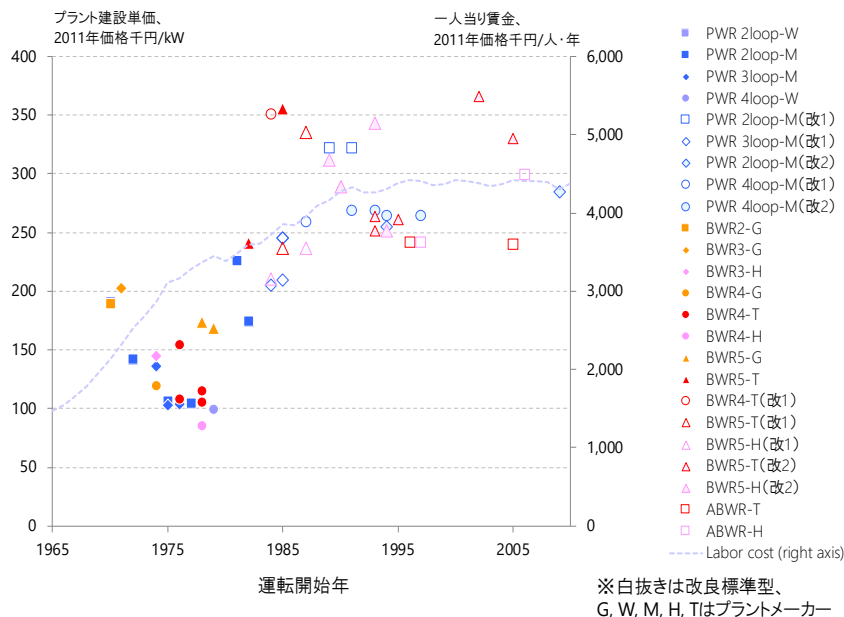
世界の原子力発電設備容量見通しの変化例（IAEA、低位ケース）



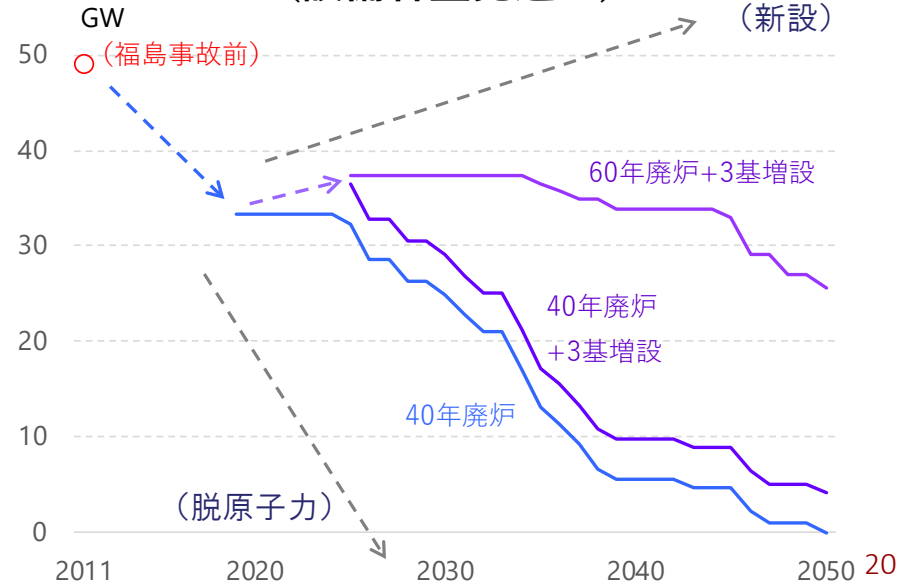
日本の原子力シナリオ

- コスト競争力が大きな決定要因であることから、①日本の原子力発電所建設費用の公式データを定量分析し（下図左）、更に②将来の再生可能エネルギー大量導入下での原子力の経済性についてモデル分析を実施（次頁）。
- 建設単価は「改良標準化」（1985年頃）の後、概ね一定を保ってきた。これは欧米と異なり、概ね5年の建設期間で遅延なく建設が進められてきたことによる。
- 仮にこれが今後も続くならば、経済合理性上は将来に向けた新設もあり得る。一方で政治的・社会的な要因による脱原子力もシナリオとしてはあり得るため、幅広い原子力シナリオを考慮し、不確実性を踏まえた検討が必要となる。

日本の原子力発電所建設単価

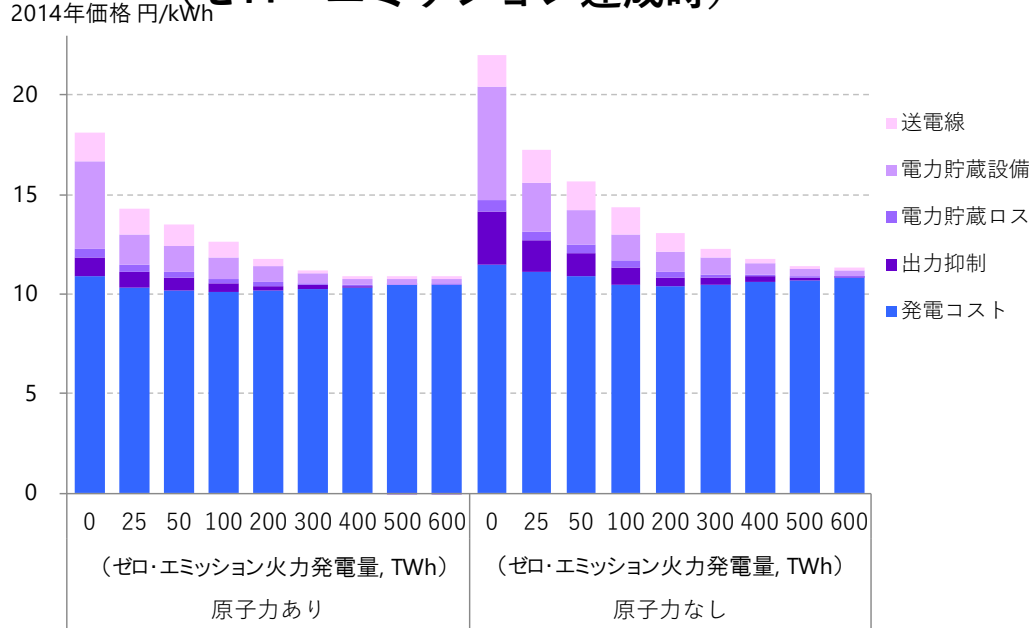


2050年までの日本の原子力シナリオ (設備容量見通し)



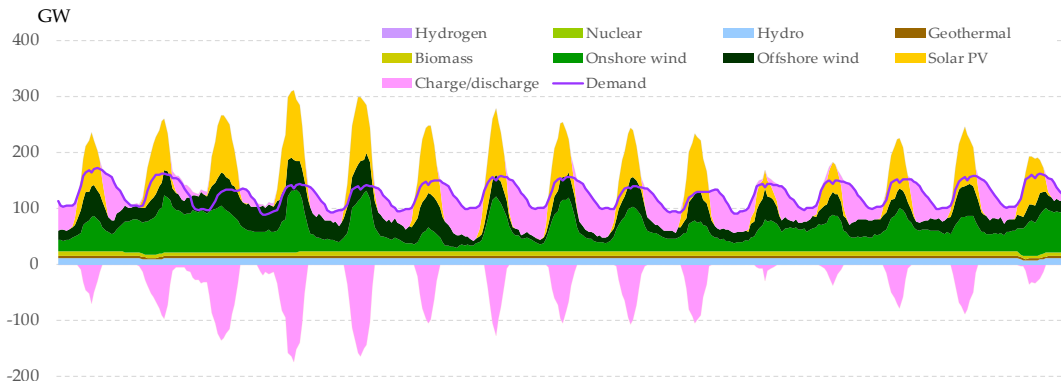
再エネ大量導入時の原子力発電の経済性（モデル分析結果）

2050年のシナリオ別電力単価
（ゼロ・エミッション達成時）



- ゼロ・エミッション火力発電（CCS付き火力または水素火力）が安価・大量に利用可能であれば電力部門のゼロ・エミッション化は大きなコスト上昇なく可能。
- 火力発電量が極めて小さくなると、電力単価が上昇する。原子力はこの単価上昇の抑制に貢献し得る。
- 再エネ大量導入時には、「無風期間（Dark doldrums）」即ち太陽光・風力の発電量が極めて小さくなる期間が最大どの程度持続するかによって、蓄電システムの所要量が定まる。
- 原子力等の安定電源が存在した場合、晩夏または冬に発生し得る無風期間に電力を供給することにより、蓄電システムの所要量を低減し、コスト上昇を抑制し得る。

電力需給推計例（全国計、2000年データ、9月1～15日）



研究成果

査読付き論文のみ、口頭発表・ポスター発表は省略

研究成果（以下に加えて*Sustainability Science*誌での特集号 （2021年3月刊行） 予定）

- 1) Sugiyama, M., Fujimori, S., Wada, K., Endo, S., Fujii, Y., Komiyama, R., Kato, E., Kurosawa, A., Matsuo, Y., Oshiro, K., Sano, F., Shiraki, H. (2019). Japan's long-term climate mitigation policy: Multi-model assessment and sectoral challenges *Energy*, 167(15), 1120-1131.
- 2) Shiraki, H., and Sugiyama, M. (2020). Back to the basic: Towards improvement of techno economic representation in integrated assessment models. *Climatic Change*, <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02731-4>.
- 3) 川上恭章, 小宮山涼一, 藤井康正, 電気学会論文誌B, Vol. 138、 No. 5 (2018) 高時間解像度の発電部門を持つエネルギーシステム技術選択モデルによるCO2削減シナリオの分析
- 4) R.Komiyama and Y.Fujii: *Renewable Energy*, Volume 139, August 2019, Pages 1012-1028 (2019) Optimal Integration Assessment of Solar PV in Japan's Electric Power Grid
- 5) Y.Matsuo, S.Endo, Y.Nagatomi, Y.Shibata, R.Komiyama and Y.Fujii: *Energy*, Vol.165, pp. 1200-1219, (2018) A quantitative analysis of Japan's optimal power generation mix in 2050 and the role of CO2-free hydrogen
- 6) 川上恭章,小宮山涼一,藤井康正: エネルギー・資源学会論文誌, Vol.39, No.4, pp.10-19 (2018)多地域・高時間解像度の電力部門を有する技術選択モデルによる日本のCO2削減に関する分析
- 7) K.Gyanwali, R.Komiyama and Y.Fujii: *Energy* (2020) Representing hydropower in the dynamic power sector model and assessing clean energy deployment in the power generation mix of Nepal (Accepted to be published)
- 8) Matsuo, Y. Endo, S. Nagatomi, Y. Shibata, Y. Komiyama, R. Fujii, Y.: *Applied Energy*, Vol.267, 113956 (2020) Investigating the economics of the power sector under high penetration of variable renewable energies

研究成果（以下に加えて *Sustainability Science* 誌での特集号（2021年3月刊行）予定）

- 9) 小宮山涼一, 藤井 康正: エネルギー・資源学会論文誌, Vol.40, No.6, pp.232-241(2019) 再エネ大量導入下でのコージェネレーションシステム(CGS)による上げDR・下げDR導入可能性分析
- 10) 大槻貴司, 小宮山涼一, 藤井康正: エネルギー・資源学会論文誌, Vol.40, No.5, pp.180-195 (2019) 詳細地域分割に基づく世界エネルギーモデルの開発と低炭素システムにおけるエネルギー・CO₂輸送の分析
- 11) 磯貝基, 小宮山涼一, 藤井康正: 電気学会論文誌B, Vol.139, No.7, pp.461-469 (2019) エネルギー部門を詳細化した動学的多部門エネルギー経済モデルの開発と2050年における日本の最適電源構成の検討
- 12) 松尾雄司, 遠藤聖也, 永富悠, 柴田善朗, 小宮山涼一, 藤井康正: エネルギー・資源学会論文誌, Vol.40, No.3, pp.49-58 (2019) 2050年の発電部門ゼロ・エミッション化に向けた検討 (2) 気象条件の変動に関する評価
- 13) 大槻貴司, 小宮山涼一, 藤井康正: 日本エネルギー学会誌, Vol.98, No.4, pp.62-72 (2019) 発電・自動車用燃料としての水素の導入可能性: 地域細分化型世界エネルギーシステムモデルを用いた分析
- 14) E. Kato, A. Kurosawa: Energy Procedia, 158, 4141–4146 (2019) Evaluation of Japanese energy system toward 2050 with TIMES-Japan – deep decarbonization pathways
- 15) Y. MATSUO and H. NEI: Energy Pol., 124, 180-198 (2019), An analysis of the historical trends in nuclear power plant construction costs: The Japanese experience.
- 16) 松尾雄司, 下郡けい, 根井寿規: エネルギー・資源学会論文誌、40, 4, 101-110 (2019), 長期原子力見直しへの影響要因に関する分析.