2024/07/12
Webex

環境研究総合推進費
令和6年度事後評価ヒアリング

課題番号：2-2104
体系的番号： JPMEERF20212004
研究課題名：脱炭素トランジション：イノベーションとライフスタイル変容の複数モデル評価

課題代表名：杉山昌広
課題代表機関名：国立大学法人 東京大学 未来ビジョン研究センター

研究実施期間：2021年度 ～2023年度

研究体制：

1 杉山昌広 （東京大学未来ビジョン研究センター）
2 木村宰 （電力中央研究所社会経済研究所）
3 大城賢 （京都大学大学院工学研究科）
4 松尾雄司 （日本エネルギー経済研究所）
5 小宮山涼一 （東京大学大学院工学系研究科）

東京大学未来ビジョン研究センター
Institute for Future Initiatives
The University of Tokyo

1．はじめに（研究の背景・目的）

政策的背景

- 2020/10/26：菅首相所信表明演説で2050年実質排出量ゼロを宣言
- 温対法改正、グリーン成長戦略、COP26（1.5目標）、COP27、COP28…

研究の背景

- 統合評価モデル等によるシナリオ分析(例えばSugiyama et al.,2019)とトランジション研究（木村・杉山, 2020）が有用
- 両者の接合は大きな課題（日本では研究不足、欧米でも課題大）
- 例：シナリオ分析で示される理想化された炭素価格を具体的にどのようなイノベーション政策やライフスタイル変容政策に落とし込むかは自明ではない

研究の目的

- **複数モデルのシナリオ分析とトランジション研究**を組み合わせ不確実性を踏まえた国内の環境政策および気候政策の議論に資する政策的知見を導出
- 頑健な対策を達成するための**具体的な政策パッケージを提案**

2．研究開発目的

複数の統合評価モデル・エネルギー経済モデルのシナリオ分析
エネルギー技術イノベーションDB→シナリオ分析に活用
シナリオDB（AIM/Hub, AIM/Technology, IEEJ-NE-Japan, DESOM, TIMES-Japan）
→経済性・技術的実現可能性や持続可能性の多面的評価
→不確実性下の日本の頑健な脱炭素トランジションの道筋を検討

トランジション研究に基づくシステムイノベーション政策分析
実質ゼロ排出(菅首相所信表明演説)のための革新的イノベーション（グリーン成長戦略）やライフスタイル変容を引き起こす、具体的な政策パッケージ

アウトプット　報告書→日本の環境政策への貢献
査読付き学術論文→IPCC などの国際的な科学的アセスメントやエネルギー政策の科学的レビューメカニズム等への貢献、アジアの気候政策の強化への含意

体制（サブテーマ構成）

1 杉山昌広	（東京大学未来ビジョン研究センター）	統括・モデル比較
2 木村宰	（電力中央研究所社会経済研究所）	トランジション理論
3 大城賢	（京都大学大学院工学研究科）	SDGs評価
4 松尾雄司	（日本エネルギー経済研究所）	Innovation Database
5 小宮山涼一	（東京大学大学院工学系研究科）	セクターカップリング

3. 研究目標及び研究計画

目標

- 複数の統合評価モデル・エネルギー経済モデルでシナリオ・データベース構築（サブテーマ１，３～５）と個別の詳細モデル分析
  →日本の頑健な脱炭素トランジションの道筋
- エネルギー技術イノベーションのデータベースを構築（サブテーマ４）
  →シナリオ分析に活用
- シナリオDBを踏まえ日本の具体的な技術イノベーションやライフスタイル変容についての政策ミックスを明らかに（サブテーマ１，２）
- 日本の環境政策に貢献し、IPCCなどの国際的な科学的アセスメント等に貢献

計画

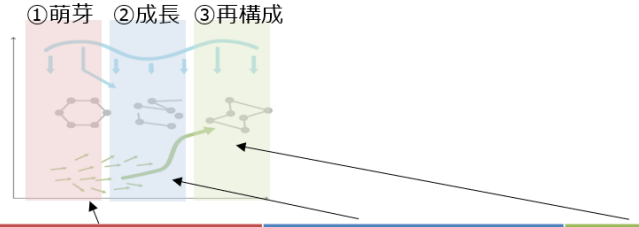
2021年度	サブテーマ１：シナリオ初期設計 サブテーマ２：政策ミックス枠組み構築 サブテーマ３～５：モデル・データ提出＆個別分析
2022年度	サブテーマ１：モデル相互比較中間分析＆シナリオ更新 サブテーマ２：トランジション研究の日本への応用試論 サブテーマ３～５：モデル更新＆データ提出、個別分析更新
2023年度	全体：モデル相互比較最終分析＆政策ミックス分析

4. 研究開発内容（サブテーマ1）

- サブテーマ２，４のインプットを受けてシナリオ設計
  - 再エネコスト、CDR、水素・アンモニアのコスト
  - 政策目標
- 5つの統合評価モデル・エネルギーシステムモデルでシナリオのモデル相互比較を実施
- 政策ミックス分析で日本の政策を他国に対してベンチマーク

モデル	解法	時間の扱い	AFOLU以外のCDR
AIM/Hub-Japan	一般均衡	逐次解	BECCS
AIM/Technology-Japan	部分均衡	逐次最適	BECCS, DACCS
DESOM	部分均衡	通時最適	BECCS, DACCS
IEEJ-NE_Japan	部分均衡	通時最適	BECCS, DACCS
TIMES-Japan	部分均衡	通時最適	BECCS, DACCS

トランジションの各フェーズの特徴と政府の役割



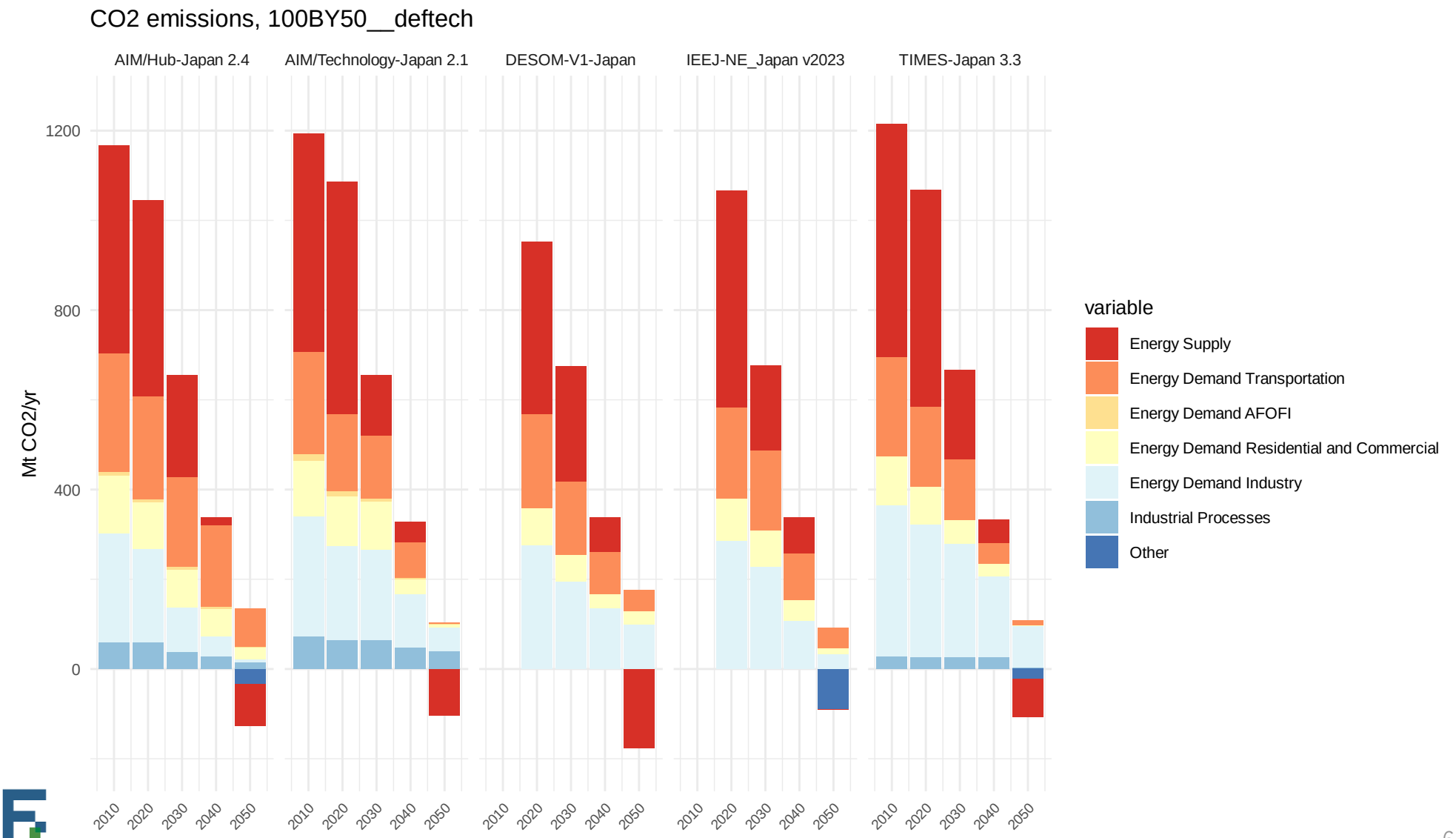
	萌芽期	成長期	再構成期
特徴的な現象やアクターの行動	• スタートアップの立ち上げ • 草の根活動 • 新技術/サービスの登場 • ニッチ市場の形成	• ニッチ市場の拡大 • グリーン消費者の増加 • 関心向上，社会的圧力の増加 • 既存権益アクターの抵抗	• 既存勢力の変容・取り込み • 新たな価値観や習慣の定着 • 新たなレジームの形成
政府の役割	• 方向性やビジョンの提示，長期目標の設定 • 技術見通し • 研究開発 • 新規参入者への支援 • ネットワーク形成 • 普及啓発・情報提供 • 科学的知見の整理	• 市場形成(補助金，政府調達等) • 価格付け(炭素税等) • 市場バリアの除去(情報提供等) • 既存技術を優遇する補助金や規制等の改革 • 既存権益アクターの変容・退出促進	• 標準化(規制・基準等) • 新たに生まれた歪みへの対応(退出アクターへの手当等)

(Asquith, et al. 2018, Geels, et al. 2019に基づき筆者作成)
Asquith, et al. (2018). Perspectives on transitions to sustainability. EEA Report. 25/2017, European Environment Agency (EEA).
Geels, et al. (2019). Sustainability transitions: policy and practice. EEA Report. 09/2019, European Environment Agency (EEA).

（図はサブテーマ２作成）

5. 結果及び考察（サブテーマ1）

モデル相互比較で頑健な対策を同定、
省エネ、電源脱炭素、電化、クリーンエネルギー導入に加えCDRが新たな頑健な対策として浮上



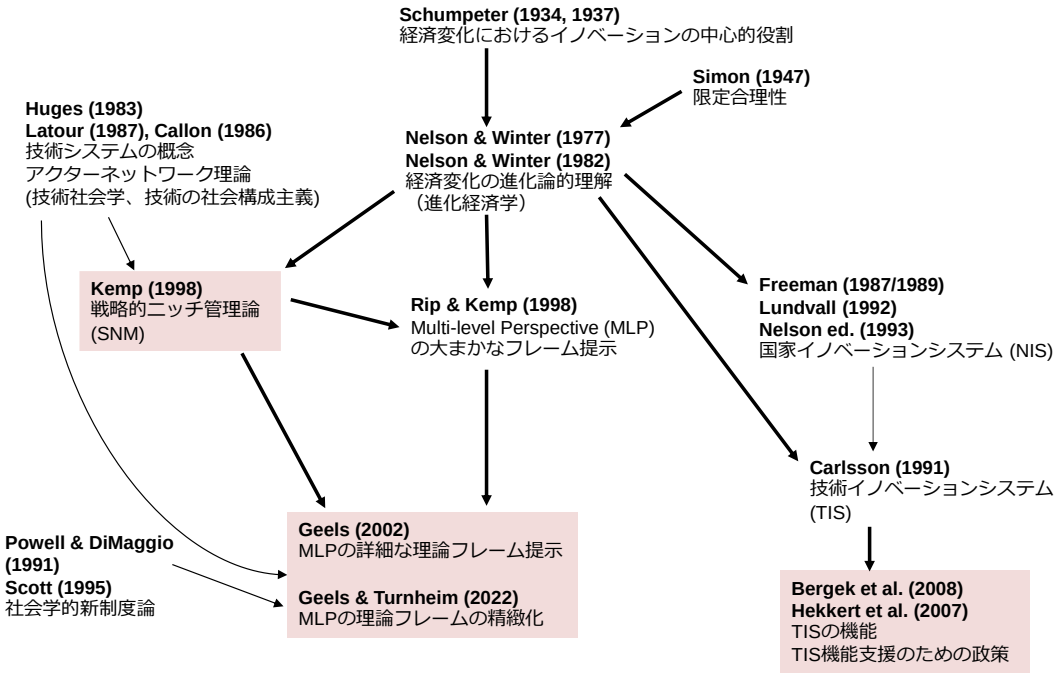
5. 結果及び考察（サブテーマ1）

CDRの政策ミックスについて日本をベンチマーク
→市場形成が重要

	政策の種類	米国	EU	日本
成長期	①市場形成（補助金、政府調達等）	・税控除（最大180ドル／トン） ・Regional DAC Hubs（100万トン/年×2か所の建設補助） ・CDR Purchase Pilot Prize（CDRのクレジット購入）等	・補助（EU Innovation Fund）（現状では少数）	・補助（バイオ炭のみ）
	②価格付け（炭素税等）	・Low Carbon Fuel Standard（CA州等）	・Carbon Removal Certification・EU ETS（準備中）	・Jクレジット制度（バイオ炭のみ）
	③市場バリアの除去（情報提供等）	・Carbon Matchmaker等		
	④既存技術を優遇する補助金や規制等の改革			
	⑤既存権益アクターの変容・退出促進			

4. 研究開発内容（サブテーマ2）

- トランジション研究の理論的フレーム（特に社会技術システム分析アプローチ）について包括的なレビューを行い、サブテーマ1と連携して政策ミックスに関する含意を抽出。
- トランジション理論と定量的シナリオ分析との接合可能性について、両分野から第一線の研究者が参加して実施されたEU Framework Programmeのプロジェクト “PATHWAYS” の経験を基に検討。
- トランジション理論を日本の食行動変容の分析に適用。
  日本での食行動変容の必要性を整理した上で、長期的な食変化等を分析。
  日本での食トランジションの促進に必要な政策措置を整理。



MLP：マルチレベル・パースペクティブ

持続可能性トランジションに関する
社会技術システム分析アプローチの展開

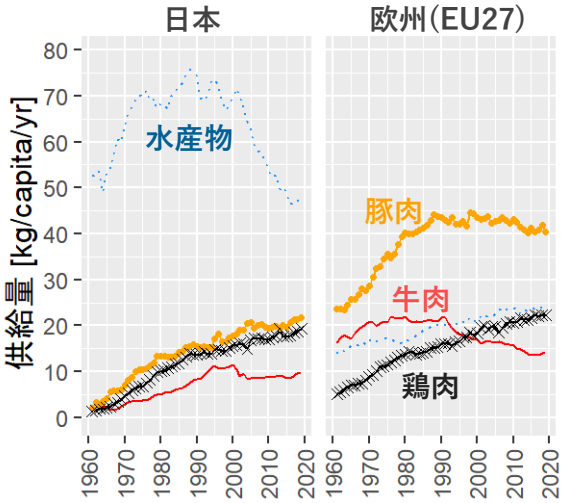
5. 結果及び考察（サブテーマ2）

- トランジション研究の文献レビューにより、移行フェーズに応じた政策ミックスのフレームを整理。サブテーマ1の政策ミックス分析に活用。
- PATHWAYSプロジェクトの経験から、定量的シナリオ分析と社会技術システム分析の一体的な統合は困難。本研究ではより平易な接合を志向、政策示唆の導出での共同作業を実施。
- 日本の食起因GHG排出総量を定量化、食行動変容の必要性を確認。長期的な食変化やそのドライバの分析等に基づき、食トランジションを促す対策を整理、日本の特性を踏まえた検討の必要性を指摘。

トランジションを促す政策ミックス

(1) 多様なニッチ生成を促す措置 • R&D支援 • 技術見通し、ビジョン提示 等	**(3) 既存の社会技術レジームの解体・再構成を促す措置** • 規制緩和 • 既得権益の解体 等
(2) ニッチ市場の成長を促す措置 • 補助金、炭素価格 等	**(4) 社会技術レジームの再構成に伴う負の影響の緩和措置** • 公正な移行対策 等
(5)社会技術レジームに影響を与える背景要因（ランドスケープ）を導く長期的な対策 • 国際的な合意形成	

日本と欧州の長期的な食変化



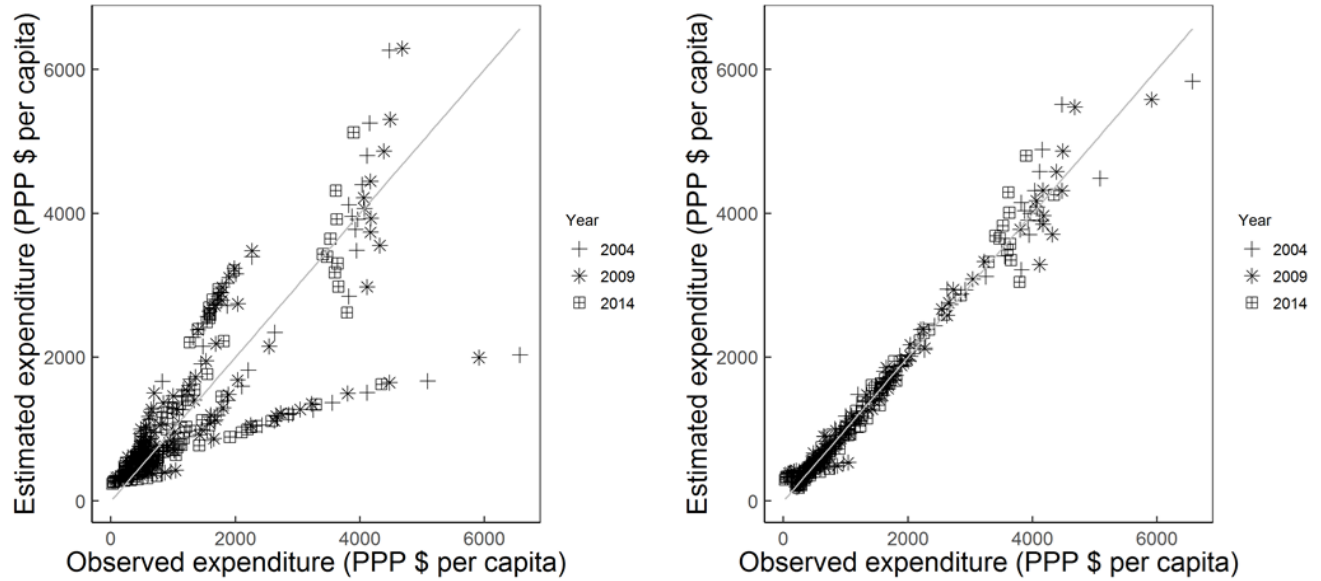
食トランジションを促す対策

技術	• 代替肉の品質向上、価格低下
市場	• 小売段階の取扱増 • 海外代替肉業者の参入と競争促進 • 代替肉を用いた調理方法等の普及 • サプライチェーン排出量の削減強化
消費者選好	• 食の環境負荷への意識向上 • 健康意識の向上
政策	• 食の環境負荷の見える化 • 学校給食等での率先導入 • 日本での持続可能で健康的な食のあり方・方向性の検討 • 食事ガイドラインの改正

木村他 (2024) エネルギーシステム・経済・環境カンファレンス; 坂本・木村 (2024) エネルギー・資源学会論文誌 45

4. 研究開発内容（サブテーマ3）

- 所得階層別の所得・支出モデル（AIM/PHI）について、**日本を対象とした評価が可能となるよう改良**を実施。日本の所得階層別消費支出データを用いた（下図右）ことで推計精度を改善。
- AIM/PHIの入力として、従来用いていた経済モデル（AIM/Hub）に加えて、ボトムアップ型のエネルギーシステムモデルからの入力にも対応。
- 改良後のモデルを用いて、**2030年、2050年の削減目標水準に対応した炭素税を課した緩和シナリオについて分析を実施**。

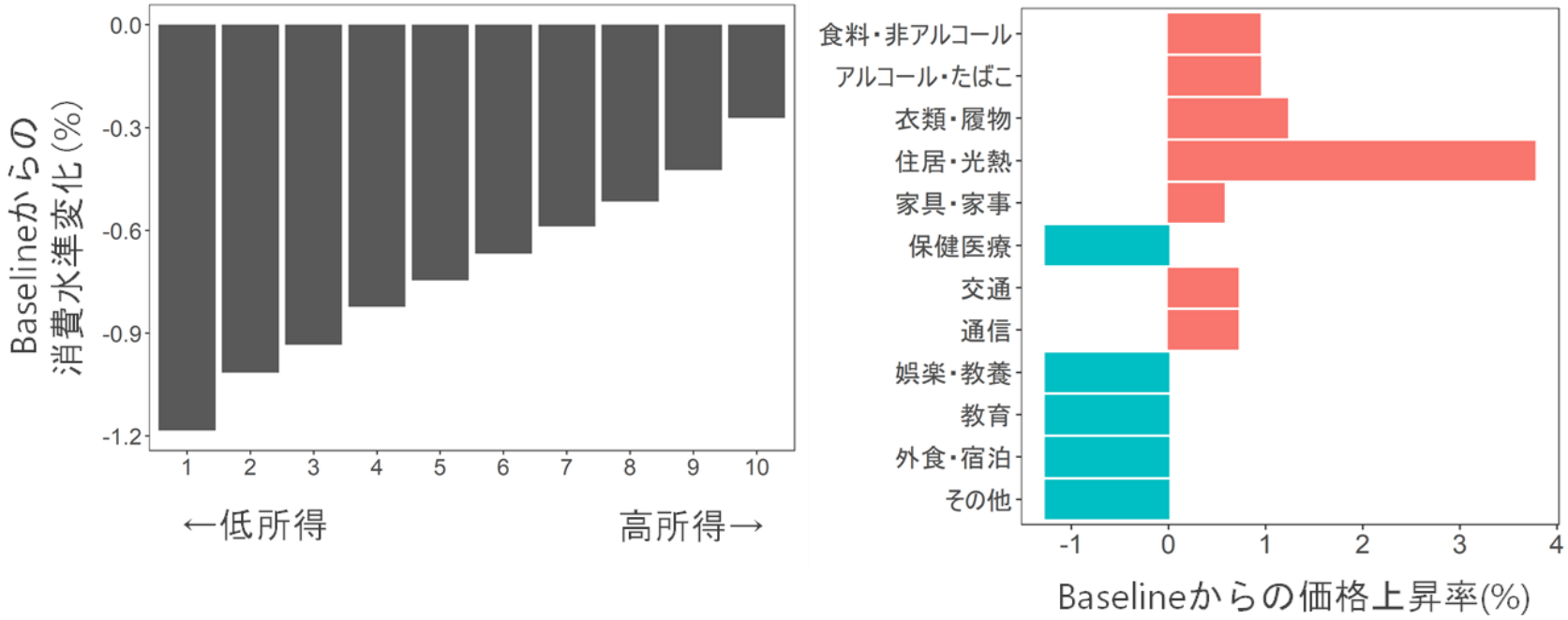


グローバルパラメータによる支出推定（左）とナショナルパラメータによる推定（右）

佐々木ら (2021) 土木学会論文集G（環境）

5. 結果及び考察（サブテーマ3）

- 所得が低い層（Decile1）ほど、炭素税による支出の減少率が大きい。
- 入力として用いる統合評価モデルの種類によって結果には幅が大きいものの、炭素税による逆進性は2030年、2050年いずれにおいても見られた。
- 逆進性を改善する方策として、炭素税収の還元が挙げられる。ただしネットゼロ排出では税収が十分に確保できない可能性があるため、脱炭素技術導入への補助等、多様な政策を組み合わせることが有効と考えられる



（左）所得階層別の消費水準変化の推計結果（右）消費項目別の価格上昇率（Baseline比）

4. 研究開発内容（サブテーマ4）

エネルギー技術イノベーションに関する情報収集・整理

- 脱炭素トランジションに資するエネルギー関連技術（需要側、供給側、エネルギーシステム全体に関するもの）について、コスト（現状及び将来見通し）、効率、ポテンシャルなどを網羅的に収集、整理。
- 学術論文の他、国際機関・業界団体（例：IEA、IRENA、World Steel Association, World Nuclear Association）や各国政府の公開資料等を対象とした。
- 収集したデータは他のサブテーマや研究協力者のモデル研究チームに提供するとともに、サブテーマ１のシナリオ設計にも利用した。

	エネルギー供給側に関する技術	エネルギー需要側に関する技術	エネルギーシステム全体に関する技術
対象技術	太陽光発電、風力発電、原子力発電、水素・アンモニア、蓄電池	電気自動車、ヒートポンプ、鉄鋼、セメント、紙・パルプ	直接大気回収（DAC）、二酸化炭素回収・貯留（CCS）、カーボンリサイクル

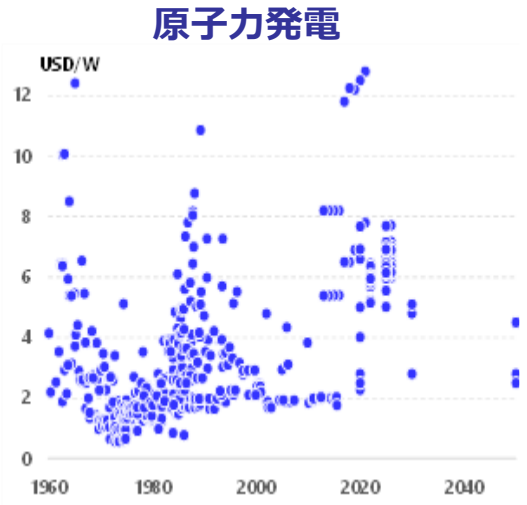
IEEJ-NE_Japanモデルを用いた分析

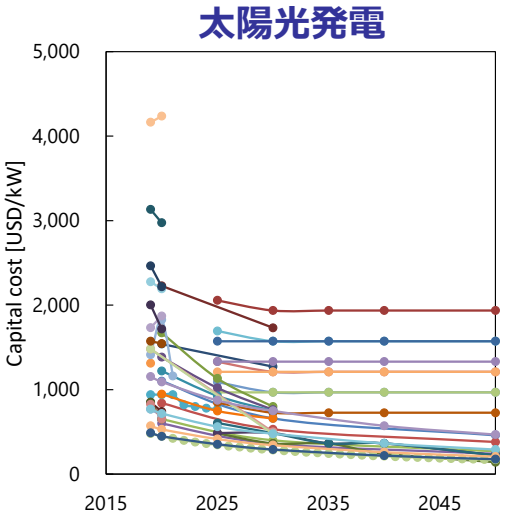
- 上記のイノベーションデータを参考に、エネルギー技術イノベーションに関する分析を実施、評価した。
- サブテーマ1が取りまとめるモデル相互比較にモデル分析結果を提供した。

5. 結果及び考察（サブテーマ4）

エネルギー技術イノベーションに関する情報収集・整理

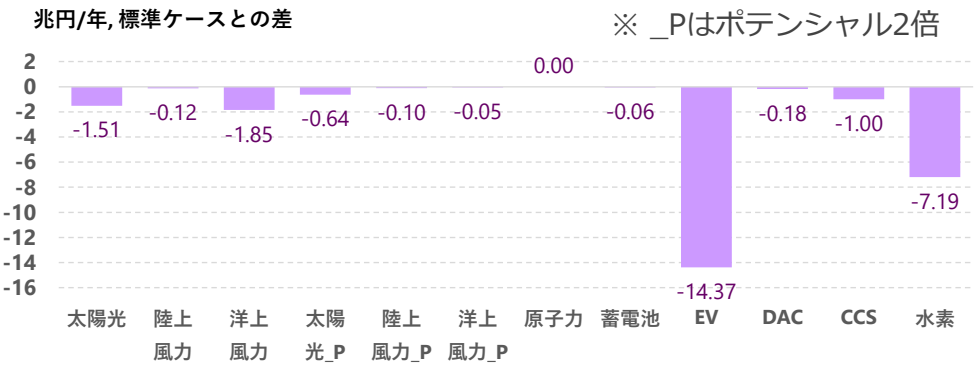
- どの技術であっても、現状・将来見通しともにコスト評価の幅は広く、不確実性は極めて大きい。
- 一部の技術（太陽光、蓄電池など）は今後のコスト低下が見込まれる一方で、他の技術（原子力、カーボンリサイクルなど）はコスト低下はほとんど見込まれていない。





エネルギー技術イノベーションの効果に関する分析

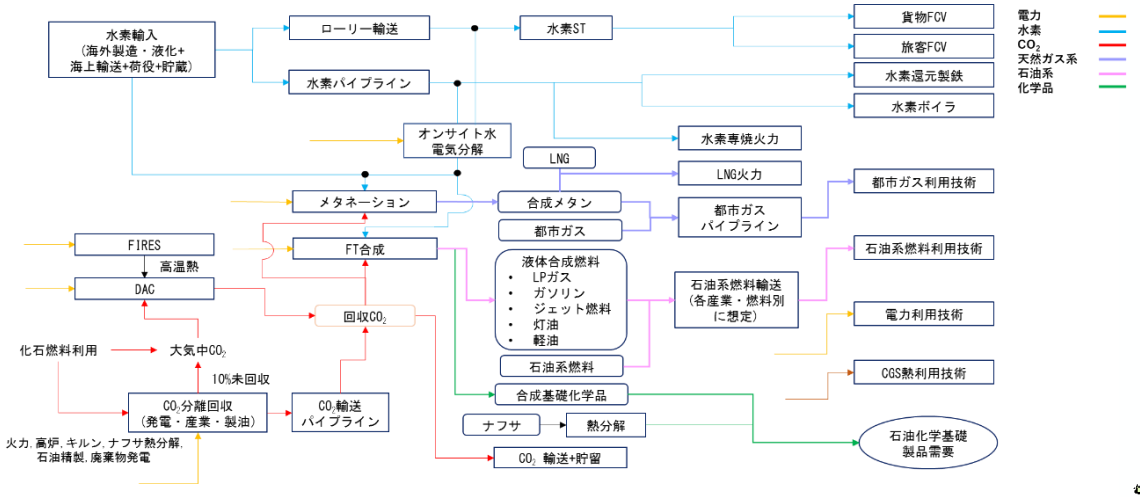
- 水素、太陽光、洋上風力、電気自動車などでコスト低減が進むことにより、限界削減費用や総システム費用を大きく低下させることができる。
- DACやCCS、蓄電池等は必須な技術であるが、そのコスト低減がエネルギーシステム全体に与える影響は必ずしも大きくない。



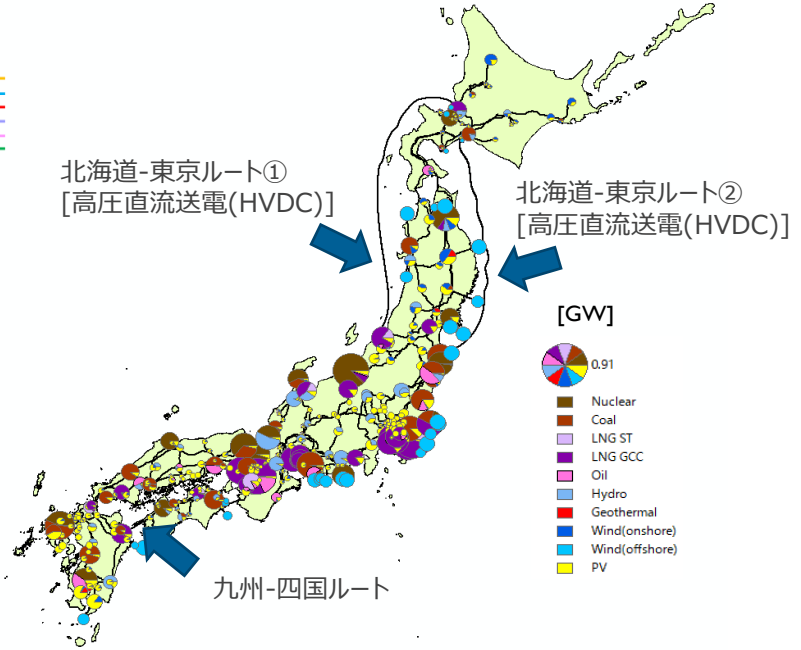
4. 研究開発内容（サブテーマ5）

- 主力化していく再生可能エネルギーについて、供給側だけでなく他の部門とのカップリングの相乗効果について、技術情報の収集を行い、時間高解像度エネルギー・システム・モデルに組み込んだ。脱炭素に対するセクター・カップリングの貢献度について分析を行った。
- エネルギー需給モデル、電力需給モデルにより、カップリングの相乗効果に関して分析を行った。

エネルギー需給モデル(水素・CCUSのシステムフロー)



電力需給モデル(発電・需要ノードの分布)

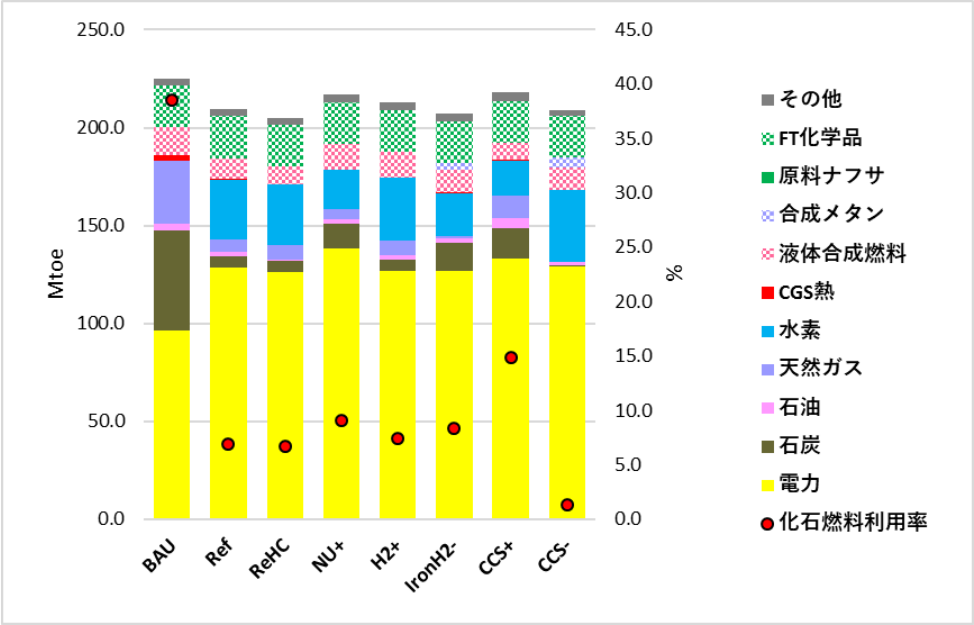


＊全量メリットオーダー・間接オークション取引を想定

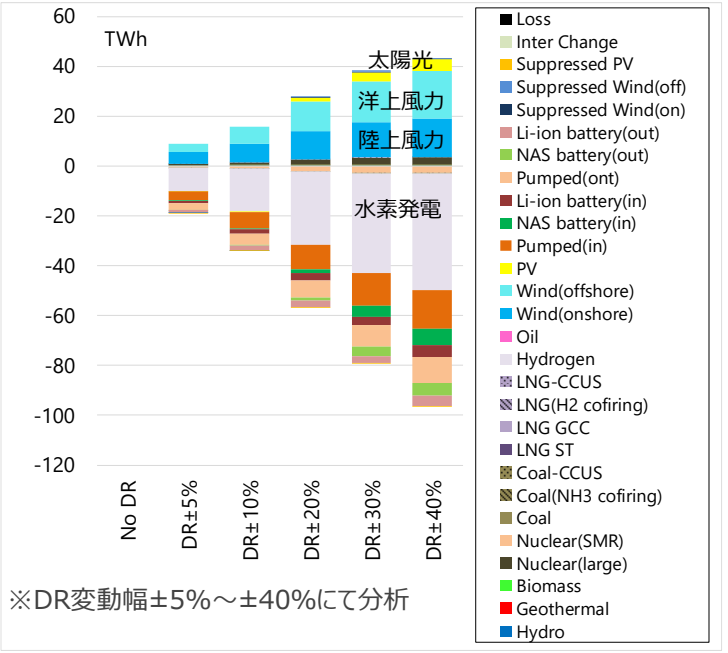
5. 結果及び考察（サブテーマ5）

- エネルギー需給モデル：再エネの導入拡大⇒電力・電力由来の脱炭素エネルギーの利用が進展(電力、水素、合成燃料[合成メタン、合成液体燃料、合成原材料])
- 電力需給モデル：ディマンドレスポンスの導入拡大(電力需要の柔軟性の向上)→風力発電や太陽光発電の接続量拡大、調整力確保の投資(水素発電、蓄電池)の低減などへ貢献

エネルギー需給モデル：最終エネルギー消費



電力需給モデル：電源構成(発電量)の変化(基準値:No DR)



※DR変動幅±5%～±40%にて分析

6. 目標の達成状況　→　自己評価「2．目標を上回る成果をあげた」(ST: サブテーマ、G:業績番号)

目標	達成状況	代表的な業績
複数のモデルでシナリオDB構築（ST1,3-5）→日本の頑健な脱炭素トランジションの道筋	頑健な政策の同定（省エネ、電源脱炭素、電化、化石燃料減少、CDR）	G5
エネルギー技術イノベーションDB構築（ST4）→シナリオ分析に活用	供給側・需要側など様々な技術のイノベーションDB構築	報告書
シナリオDBを踏まえ日本の具体的な技術イノベーションやライフスタイル変容についての政策ミックスを明らかに（ST1,2）	CDRの市場創造政策の必要性 炭素の価格付けと税収還元 再エネ拡大と需要応答促進	G56
日本の環境政策に貢献し、IPCCなどの国際的な科学的アセスメント等に貢献	IPCC準拠のIIASAシナリオDB State of CDRへ貢献	State of CDR IPCC（予定）
追加的な内容	ライフスタイル変容を含む需要側のレビュー・論考 日本の脱炭素の実現可能性に関する100人以上の専門家へのアンケート調査	G4 G2

6. 環境政策等への貢献、学術的意義

＜得られた研究成果の学術的意義＞

- 日本におけるCDRの重要性とその量の分析は、単独モデルで行われていたが、複数モデル分析枠組みで行いモデルによる違いの不確実性に対して頑健な知見として示したのは、本研究が初めて
- 本課題全体の革新性は、持続可能性トランジション研究と統合評価モデルやエネルギーシステムモデルによるシナリオ分析の接合を、技術イノベーションの分析において新たな展開をしたところにある
- なお、モデル相互比較のシナリオ分析を政策ミックスにつぐなげる枠組みは、今後のさらなる脱炭素政策の分析や、そのほかの循環経済や自然復興といった環境領域への展開の可能性あり

＜行政等に貢献することが見込まれる成果＞

- 本研究課題のシナリオ・データベースはIPCCの今後の報告書に活用できるよう、IIASAシナリオ・データベースに格納されており、IPCCの分析に利用され、ひいては日本の環境行政に貢献することが見込まれる
- 今年発表予定の国際科学アセスメントのState of Carbon Dioxide Removal (CDR)の報告書に研究代表は貢献しており、本研究結果も反映予定

成果番号	主要な成果（10件まで）
2	Ju, Y., Sugiyama, M., & Shiraki, H. (2023). Perceived feasibility and potential barriers of a net-zero system transition among Japanese experts. Communications Earth & Environment, 4(1), 431. https://doi.org/10.1038/s43247-023-01079-8
4	Sugiyama, M., Wilson, C., Wiedenhofer, D., Boza-Kiss, B., Cao, T., Chatterjee, J. S., ... & Zimm, C. (2024). High with low: Harnessing the power of demand-side solutions for high wellbeing with low energy and material demand. Joule, 8(1), 1-6. https://doi.org/10.1016/j.joule.2023.12.014
5	Sugiyama, M., Fujimori, S., Wada, K., Kato, E., Matsuo, Y., Nishiura, O., Oshiro, K., Otsuki, T. (2024). Residual emissions and carbon removal towards Japan's net-zero goal: A multi-model analysis. Environmental Research Communications, accepted. （サブテーマ３， ４， ５と協力）
7	陳奕均, 城山英明, 杉山昌広, 青木一益, 木村宰, 森晶寿, 太田響子， 松浦正浩, 松尾真紀子. (2022). 日本における持続可能性移行 (サステナビリティ・トランジション) 研究の現況と今後の展望. 環境経済・政策研究, 15(2), 1-11. https://doi.org/10.14927/reeps.15.2_1 （サブテーマ１と協力）
8	坂本将吾, 木村宰（2024）「日本の食消費に伴う土地利用改変起因CO_2排出量」エネルギー・資源学会論文誌, 45, 掲載予定（2024年3月5日受理）.
9	佐々木克哉, 藤森真一郎, 長谷川知子, 大城賢 (2021) 日本における所得階層を考慮した炭素税の家計消費への影響. 土木学会論文集G（環境）, 77(5), I_263-I_273.
12	大城賢, 藤森真一郎. (2022). 日本の2050年ネットゼロ排出目標における残存排出量削減方策のシナリオ分析. 土木学会論文集G（環境）, 78(5), I_429-I_439.
18	Otsuki, T., Obane, H., Kawakami, Y., Shimogori, K., Mizuno, Y., Morimoto, S., & Matsuo, Y. (2022). Energy mix for net zero CO2 emissions by 2050 in Japan. Electrical Engineering in Japan, 215(4). https://doi.org/10.1002/eej.23396
20	Otsuki, T., Komiyama R., Fujii Y., & Nakamura H. (2023). Temporally detailed modeling and analysis of global net zero energy systems focusing on variable renewable energy. Energy and Climate Change, 4, 100108.
25	今川智稀, 小宮山涼一, 藤井康正. (2023). CCU技術を詳細化した技術選択モデルによる日本の2050年カーボンニュートラル実現可能性に関する分析. エネルギー・資源学会論文誌, 44(1), 1.

7. 研究成果の発表状況

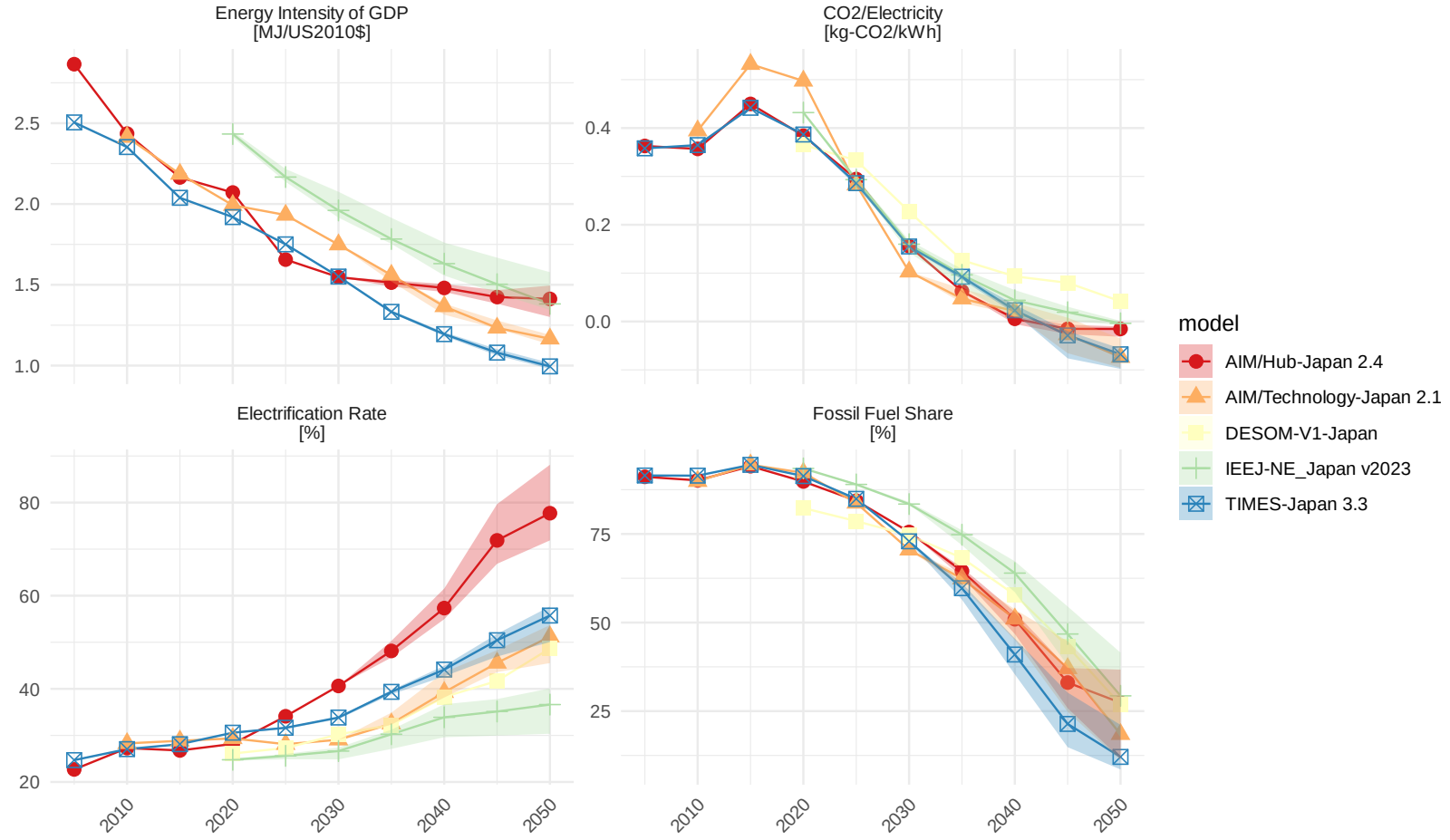
成果の種別	件数
査読付き論文：	28
査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）：	0
その他誌上発表（査読なし）：	3
口頭発表（国際学会等・査読付き）：	10
口頭発表（学会等・査読なし）：	78
知的財産権：	0
「国民との科学・技術対話」の実施：	6
マスコミ等への公表・報道等：	1
研究成果による受賞：	6
その他の成果発表：	0

ご清聴ありがとうございました

補足資料

5. 結果及び考察（サブテーマ1）

モデル相互比較で頑健な対策を同定



図：頑健（ロバスト）な対策を示す指標．左上：GDPのエネルギー原単位、右上：電力部門のCO2原単位、左下：最終エネルギー消費に占める電力の割合（電化率）、右下：一次エネルギーに占める化石燃料の比率．