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

行政ニーズ：(1-1) 持続的な脱炭素社会の実現に必要となる
革新的技術・社会変革の実現可能性評価に関する研究

研究期間：2021年度 ～2023年度

研究代表者 （番号はサブテーマ）

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

IPCC第３作業部会第６次評価報告書主執筆者（第12章）

研究分担者

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

１．はじめに（研究背景等）
２．研究開発目的

政策的背景

- 2020年10月のカーボンニュートラル宣言→改正温対法で法定化
- 政策強化（グリーン成長戦略の推進、地域脱炭素ロードマップ）

研究の背景

- 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, IPCC 2022,陳ほか, 2022 ）が有用
- 両者の接合は大きな課題（陳ほか, 2022）
- 例：シナリオ分析で示される理想化された炭素価格をイノベーション政策やライフスタイル変容政策にどのように落とし込むかは自明でなく、また日本の個別事情を踏まえた政策は更なる研究が必要

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・気候政策に資する政策的知見を導出
- イノベーション（再エネ、二酸化炭素除去（CDR））、デジタル化、食などのライフスタイル変容、素材産業を中心とした産業部門の脱炭素化、再生可能エネルギーとセクター・カップリング等への**政策ミックス・パッケージを提案**

３．研究目標及び研究計画

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・データベース(AIM/Hub, AIM/Technology, IEEJ-NE_Japan, DESOM, TIMES-Japan他）→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

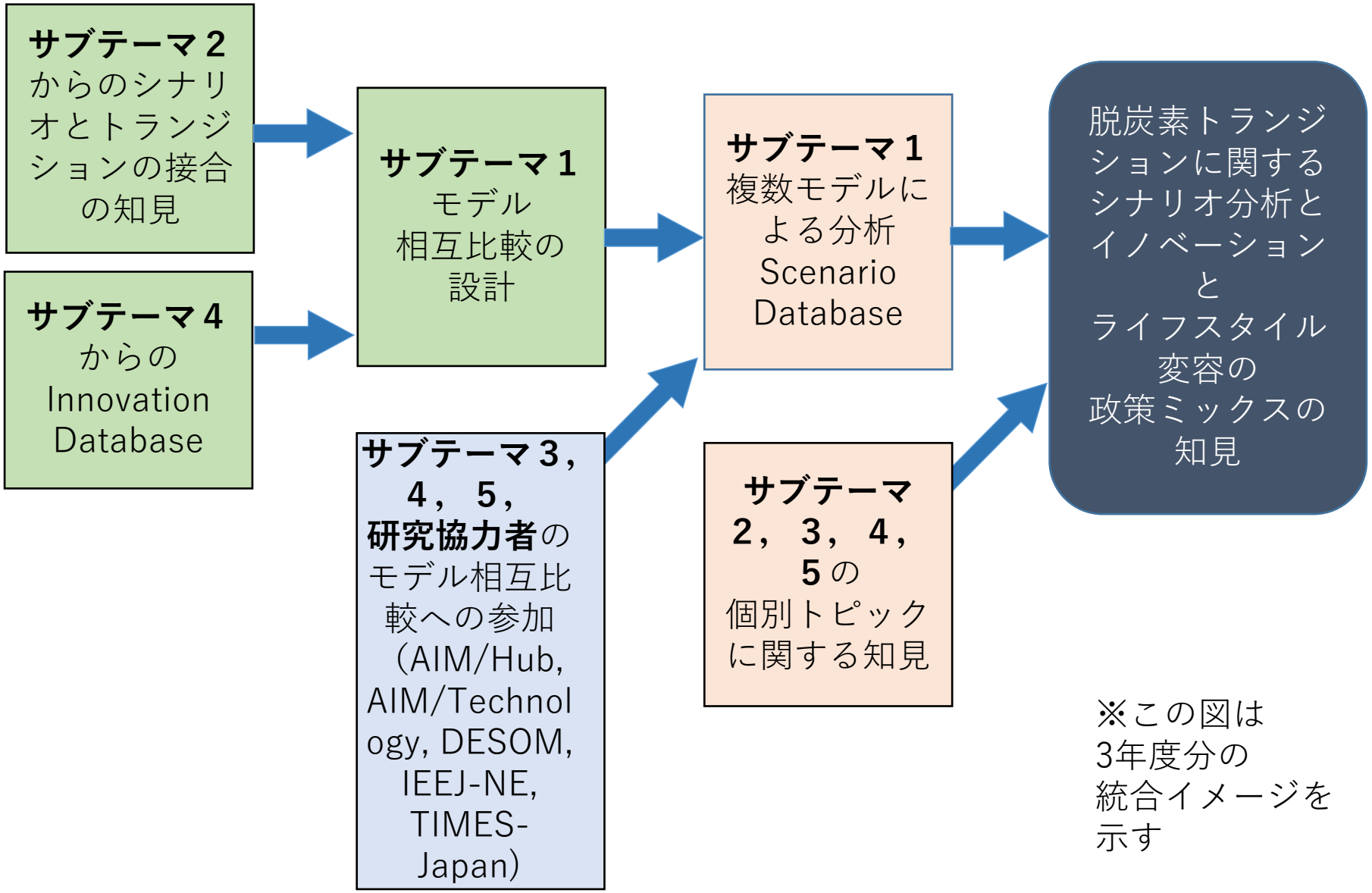
正味ゼロ排出のための革新的イノベーション（グリーン成長戦略）やライフスタイル変容を引き起こす、具体的な政策パッケージ

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

４．研究開発内容：サブテーマ１
全体の統合イメージ



※この図は
3年度分の
統合イメージを
示す

トランジション研究における中心的な理論：マルチレベル・パースペクティブ (MLP)

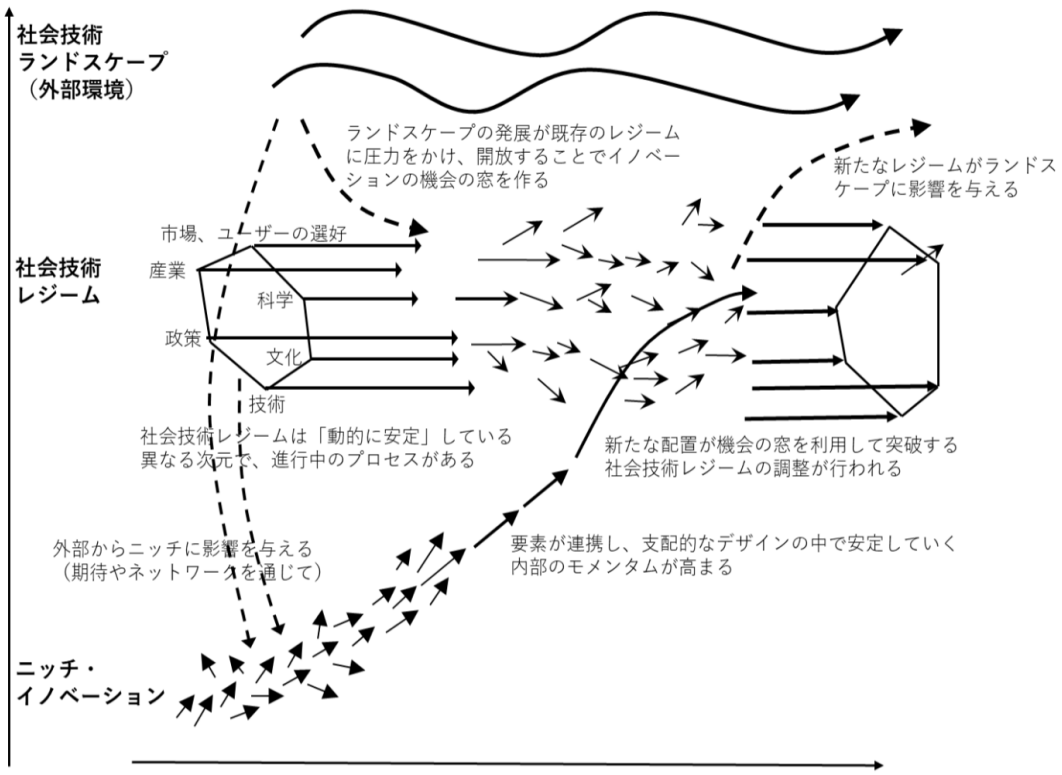


図 1 持続可能性移行への MLP

出典：Geels（2002, 2011）に基づき，筆者らによる和訳

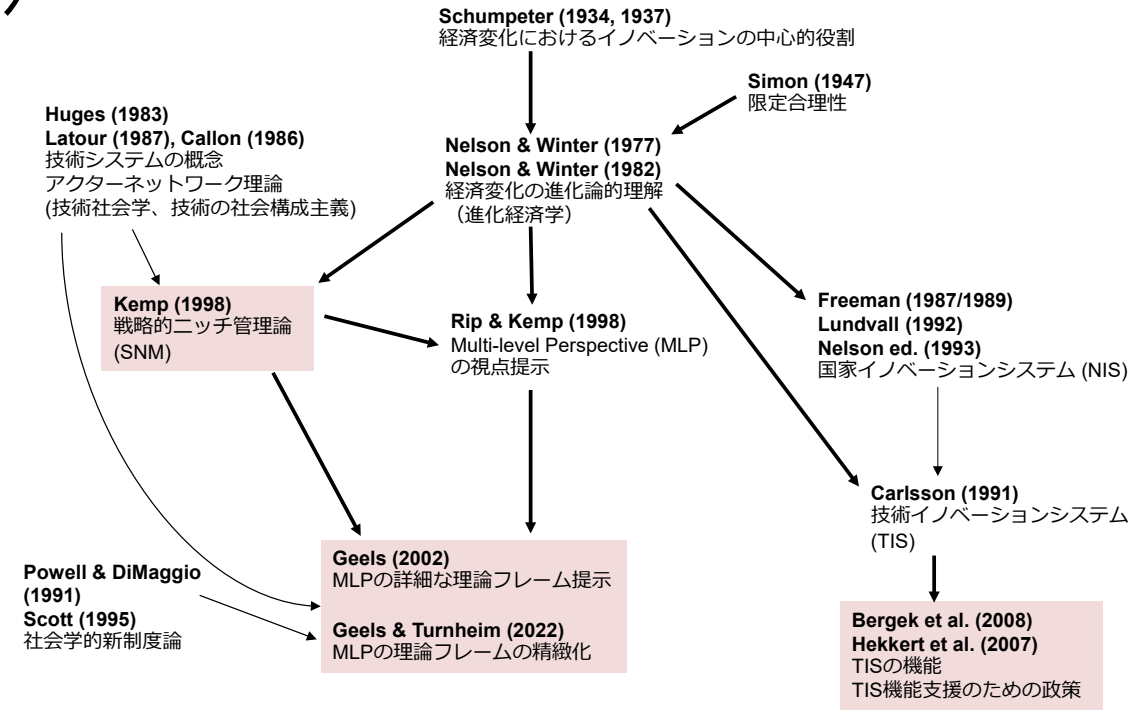
(陳ほか2022、環境経済・政策研究)

- 持続可能な社会へのトランジションには新規技術は不可欠だが，技術単体ではトランジションは起こらない
- 技術は制度的・物理的インフラやユーザーの選好・習慣・文化などと絡み合い，変化しにくい「レジーム」を構成
  →レジームの変革が必要
- レジームの変革を促す要因の一つは**ニッチで育まれる革新的な技術や取組(イノベーション)**
- ニッチだけではレジームは大きく変化しない
  →**ランドスケープ(外部要因)の変化**を受けて**既存レジームが不安定化し，**そこにイノベーションが組み入れられて**レジームを再構成**する

４．研究開発内容　＆　５．結果と考察
サブテーマ2（１）

①トランジション理論の理論的基礎の整理

- 文献レビューによりMLP等の理論フレームの形成経緯を分析 (右図)
- MLPは進化経済学をベースとしつつ、技術社会学や新制度論など幅広い理論を取り入れた統合的視座であることを確認



②トランジション理論からの政策的含意の整理

- 新古典派経済学に基づく炭素価格付を中心とした政策ミックスには限界

- MLP等に基づくと、トランジションの局面やアクターに応じて、より幅広い政策ミックスが想定（右表）
⇒シナリオ構築およびそれに政策提言の導出において参照すべき

(1)多様なニッチ生成と成長を促す措置	R&Dや革新技術の支援・保護、ビジョン構築、ベンチャー支援、補助金、炭素価格付け等
(2)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、既存技術への補助金等の再編、既得権益の解体等
(3)社会技術レジームの再構成に伴う負の影響の緩和措置	トランジションの影響を受ける産業等に対する社会補償、社会人教育、公正な移行対策等
(4)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)を長期的に導く対策	国際合意形成等

４．研究開発内容　＆　５．結果と考察
サブテーマ2（２）

- MLP等のトランジション理論と定量的モデル分析との接合方策について、それを試行した大規模なEU研究プロジェクト「PATHWAYS」(2013-2016)の経験を踏まえて検討
- PATHWAYSでは、プロジェクト開始時に**2つの理念シナリオ**を作成したことが大きな特徴
- さらに電力/運輸/土地利用等の5テーマについて、トランジション理論と定量的モデル分析の共同作業により詳細シナリオを作成しているが、重要な示唆は理念シナリオに集約
- 発表された成果シナリオの文献数は少なく、異分野接合に苦労した様子が伺える。トランジション理論と定量的モデル分析の一体的な統合は困難、費用対効果が低い

⇒本推進費プロジェクトではより平易な接合方法を志向

モデル分析の結果解釈や政策的示唆の導出において共同作業を企図

	Pathway 0 (ベースライン)	Pathway A (要素技術代替)	Pathway B (広範なレジーム変革)
主導的なアクター	既得権益者	既得権益者	新規参入者、市民社会
変化の程度	小規模・漸進的	部分的な変化 (要素技術のみ大幅に変化。既存レジームの大勢はそのまま)	革新的な変化 (社会技術システムが広範囲に変化・再構成)
変化の範囲	多側面で変化なし	少数の側面で変化 (要素技術とそれに直結する社会側面のみ)	多面的な変化 (技術体系、市場、制度、消費行動、文化など)
イメージ	成り行きのトレンド	既存電力会社による大規模集中型の再エネ電源やCCSの大量導入	ベンチャーや市民組織による分散型の再エネ導入、消費者の行動変容

(van Sluisveld et al. 2014, Berkhout & Turnheim, 2015より作成)

４．研究開発内容：サブテーマ１ 統括・モデル比較

サブテーマ	モデル	機関	均衡概念	地域	時間の扱い
3	AIM/Hub-Japan	京大／立命館大学／国立環境研	一般	日本	逐次最適
3	AIM/Technology	京大	部分	日本	逐次最適
4	IEEJ-NE_Japan	エネ研	部分	日本	通期最適
5	DESOM	東大	部分	日本	通期最適
研究協力者	TIMES-Japan	エネ総研	部分	日本	通期最適

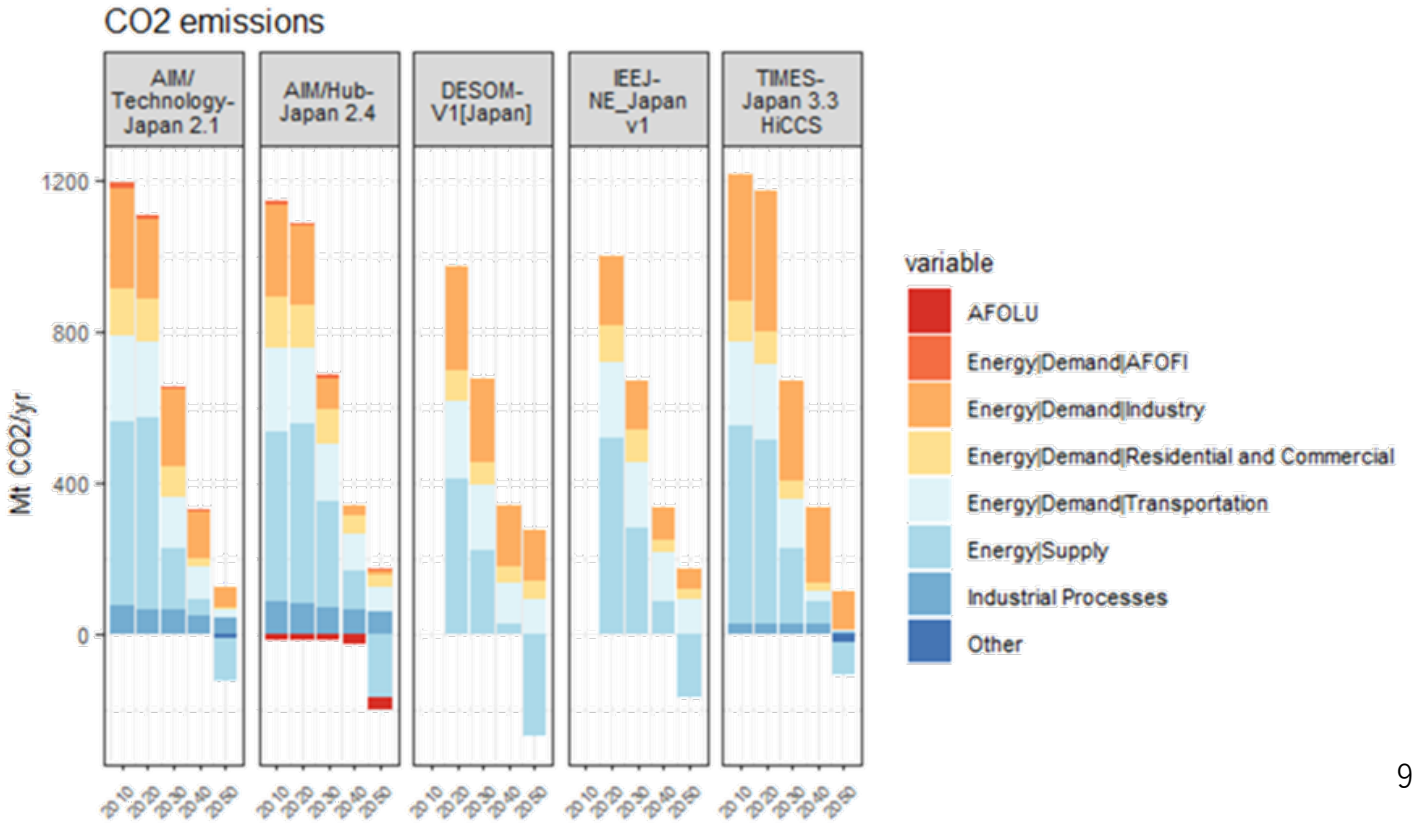
- 文献や進行中の研究（EDITS等）を参考にイノベーションとライフスタイル変容を反映するためのシナリオの骨子を設計
- 初年度の以下のモデル比較のために詳細化→シナリオ・データベース構築

シナリオ名	説明
Baseline	基準ケース（大規模なcarbon pricingは想定しない）
46by30+100by50	2030年46%削減、2050年100%削減
Xby30+Yby50	XとYにはそれぞれ2030年、2050年の排出削減の%の数値が入る $X \in \{26, 46, 55\}$, $Y \in \{80,90,100,105\}$
…_CDRzz	以上のシナリオに加えて一年間に導入可能なCDRの量にzz[$MtCO_2$/yr]の制限をかけたシナリオ。

５．結果及び考察：サブテーマ１ 統括・モデル比較

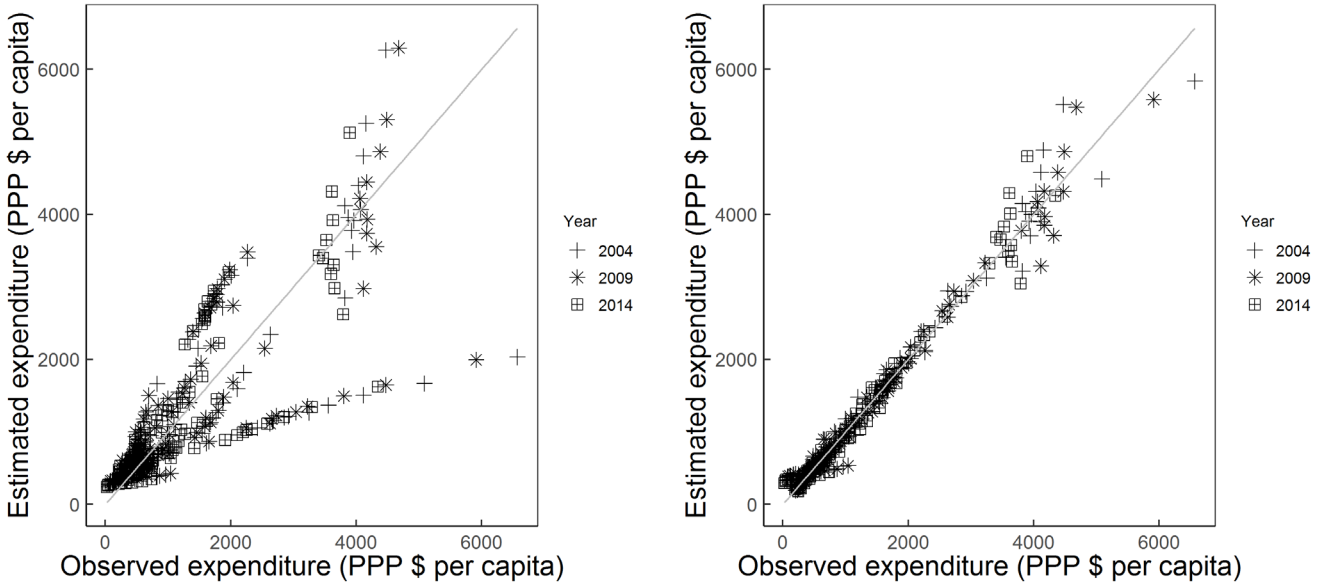
- シナリオから判断すると現状の対策は幅・深さともに不十分であり、**政策の大幅強化が必須**
- 正味ゼロ達成のためにはCCS付きバイオエネルギー(BECCS)、直接空気回収(DAC / DACCS)、大規模な植林といった**CDRは避けることができない**
- 日本で必要と見込まれるCDRの導入量は100-200Mt/yrのオーダー（ただ量は仮定に大きく依存）

46by30+100by50（2030年46％削減、2050年100%削減）シナリオにおけるモデルごとの排出とCDRのバランス



４．研究開発内容：サブテーマ３
所得階層別の影響評価

- 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。
- 世界全体の消費データにより推定されたパラメータを用いた支出額の推定結果（下図左）と比較して、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。
- 改良後のモデルを用いて、**2030年に84.1ドル/t-CO_2の炭素税を課した緩和シナリオについて分析を実施**。

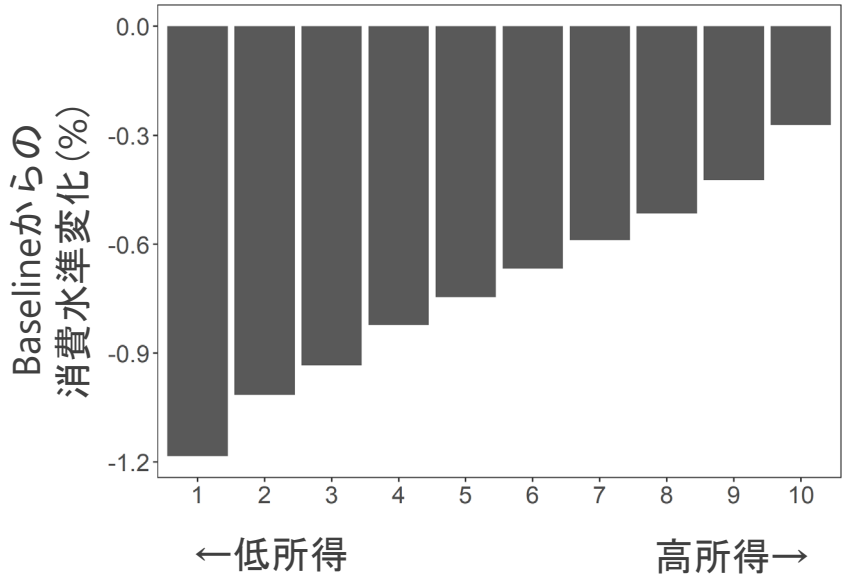


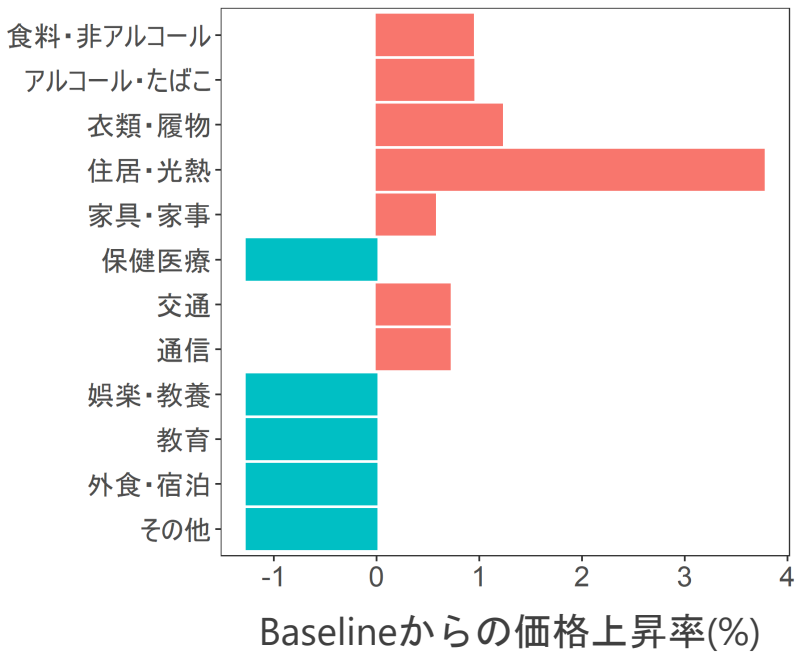
グローバルパラメータによる支出推定（左）とナショナルパラメータによる推定（右）

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 所得階層別の影響評価

- 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（下図左）
- 炭素税により住居・光熱の価格上昇が他の項目と比べて特に大きいことが寄与（下図右）
- 炭素税の逆進性を改善する方策として、炭素税収の還元、炭素税以外の緩和政策（規制・イノベーション政策・補助金等）を組み合わせた施策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）

佐々木ら (2021) 土木学会論文集G（環境）

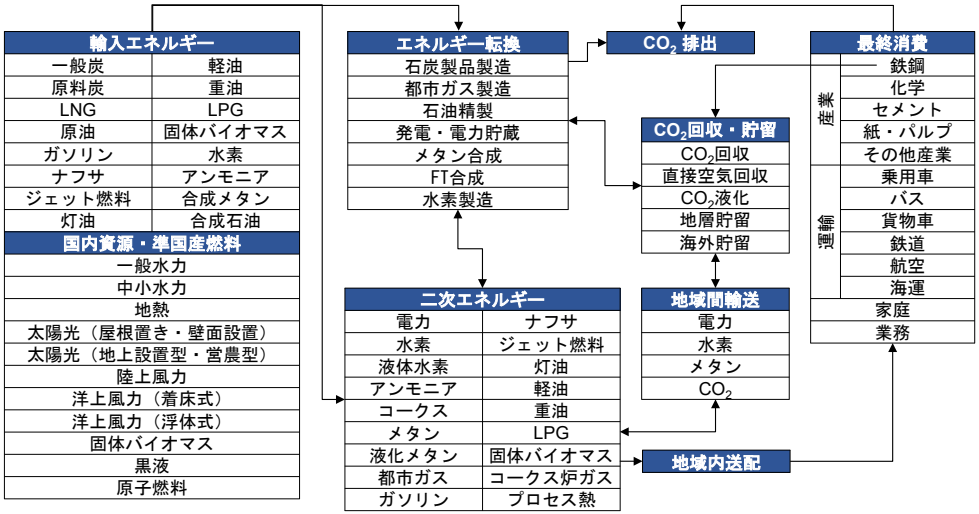
4．研究開発内容：サブテーマ４ Innovation Database

- 脱炭素トランジションに資するエネルギー技術について、データの収集・整理を行い、データベースとしてとりまとめた。
- 特に供給側技術（下記参照）を対象とし、各技術の経済性（コスト）を中心に、可能なものについては効率のデータについても収集した。データ収集に当っては、①政府機関・国際機関・研究機関等によるレポート、及び②学術文献を主な収集源とした。
- 過去及び現在の実績値に加え、将来予測（2050年までのコスト低減見通しなど）についてもデータ収集を行い、その幅を評価することで、モデル分析へのインプットデータの検討に資するものとした。
- 更に、線形計画型エネルギーシステムIEEJ-NE_Japanを改良し、試計算を行った上で、モデル比較分析に資するデータを提出した。

データ収集対象（供給側）

- **変動性再生可能エネルギー（太陽光・風力）**
- **蓄電池**
- **原子力**
- **水素・アンモニア**
- **CCS**
- **カーボンリサイクル**

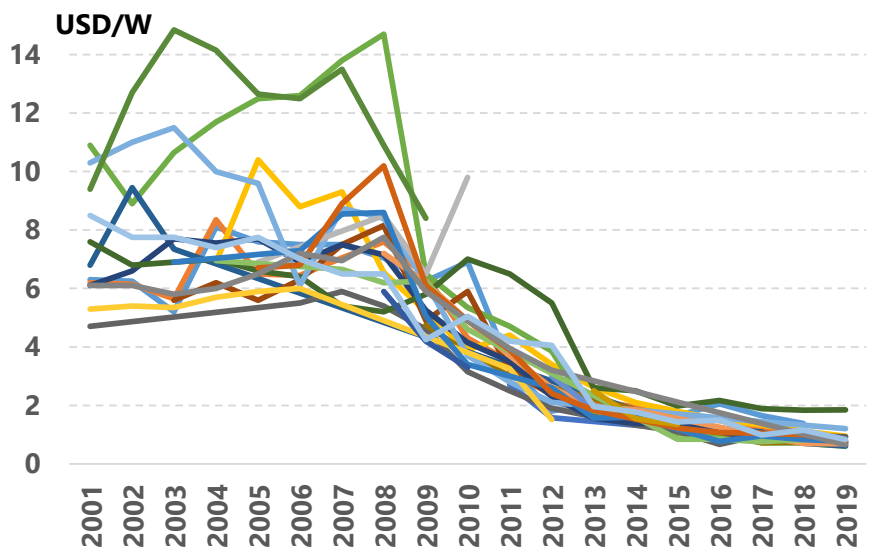
IEEJ-NE_Japanモデルの構造



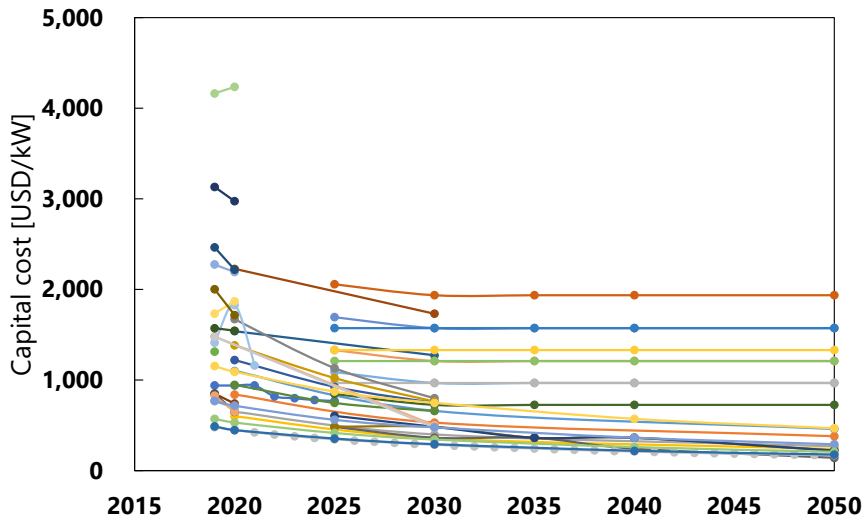
４．研究開発内容：サブテーマ４ Innovation Database

- 収集したデータにより、特に太陽光発電で顕著なコストの低下（習熟率にして20%程度）が見られており、今後も2050年にかけて急速なコストの低下が予測されることが明確となった。但し予測は不確実性を伴っており、2050年時点で**0.14ドル/W～1.9ドル/Wと幅は広い。**
- 太陽光発電のみでなく、蓄電池のコストも低下を続けており、また風力発電コストも資材価格の高騰が一段落した2010年以降緩やかにコストが低下している。今後もコスト低下が予測されている。他方で原子力やCCSについては今後顕著なコスト低減は予測されていない。
- 変動性再生可能エネルギーについてはコストのみでなく将来の導入ポテンシャルの評価も多くなされているが、例えば**日本の地上設置型太陽光については20.5GW(耕作放棄地の1/4のみ設置)～230GW(陸上風力と競合する雑草地などにも設置)**と評価の幅も広く、将来の導入見通しの不確実性が改めて示唆された。

例：太陽光発電コストの実績推移



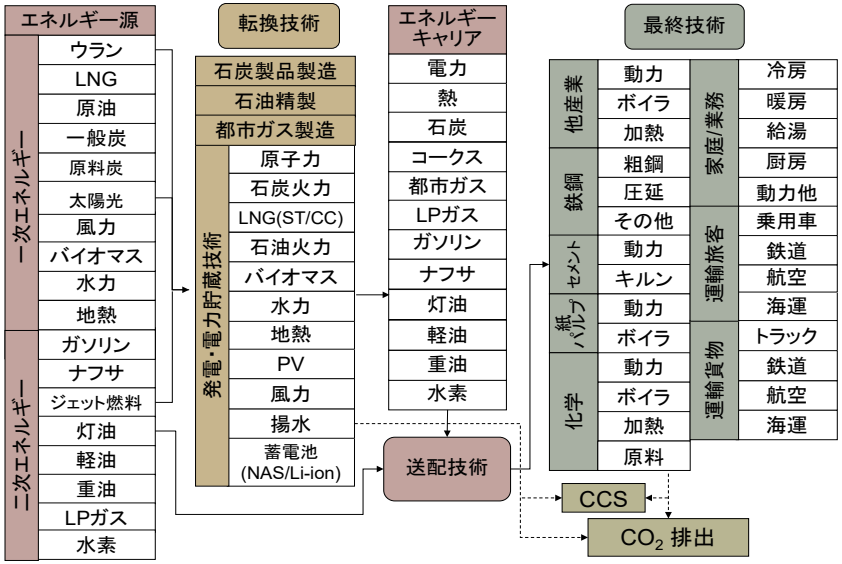
例：太陽光発電コストの将来見通し



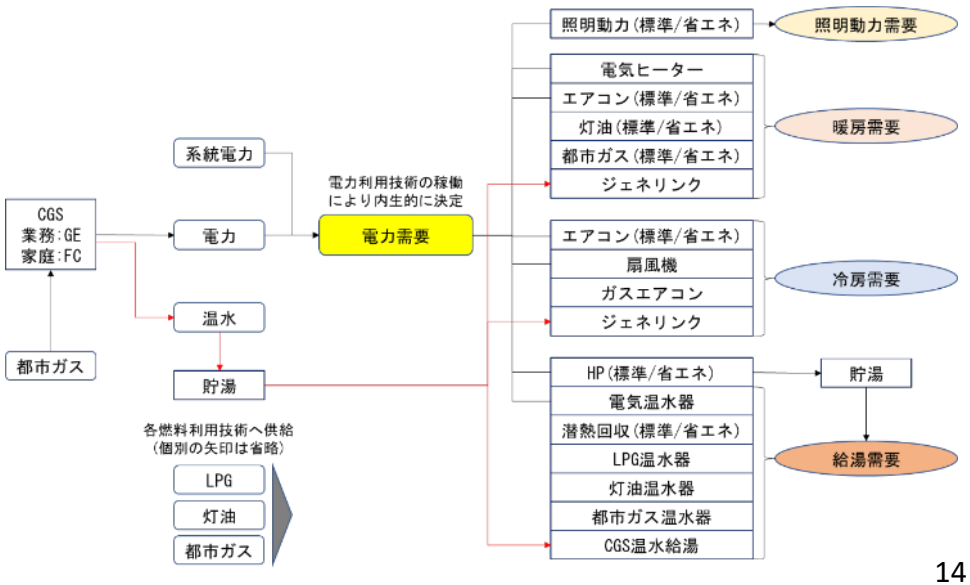
4．研究開発内容：サブテーマ５ セクターカップリング

- 日本のエネルギー全体を分析対象に、CO_2排出制約の下での最適エネルギー需給構造を分析
  - エネルギーシステム全体を評価(一次エネルギー、転換部門、最終消費部門[産業、家庭、業務、旅客、貨物])
  - 電力部門の詳細分析(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300種類以上の技術要素・プロセス等を考慮
- **最終需要部門のサービス需要(照明動力、暖房、冷房、給湯サービス需要等)の時間変動と、需要側技術の制御パターンを1時間値で評価可能となるようにモデルを改良 ⇒ CGS（コージェネレーションシステム）の出力制御、給湯でのヒートポンプ給湯器や電気温水器、冷暖房におけるヒートポンプ(エアコン)など、再エネ出力変動が影響しうるこれらの電力消費機器の制御を1時間値で分析することが可能となった。**

エネルギー技術選択モデル



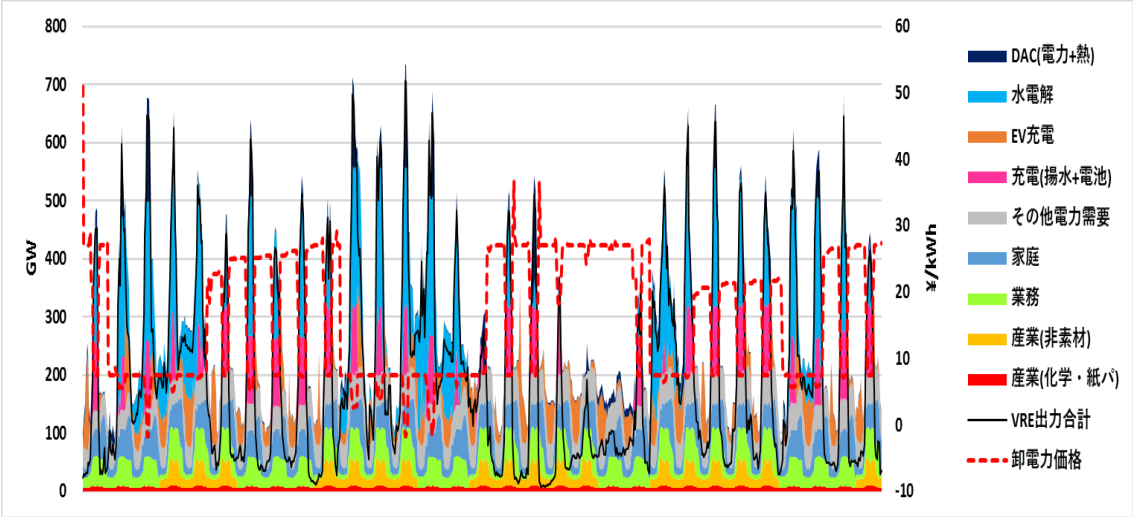
業務部門・家庭部門のエネルギー需給構造



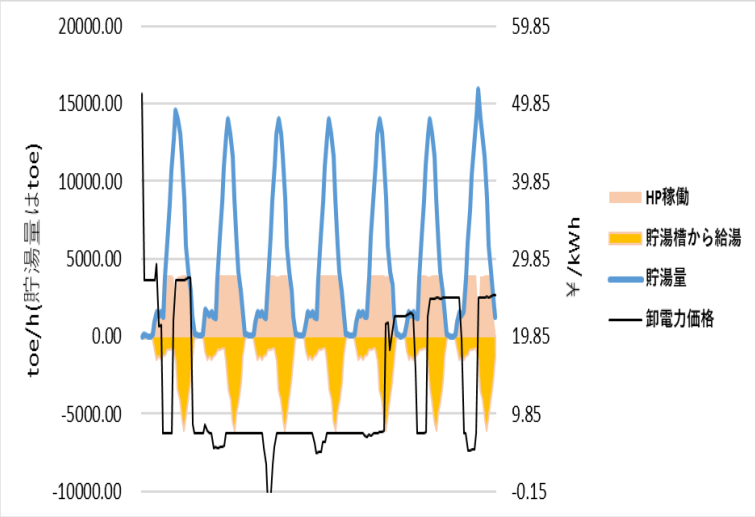
5．結果及び考察：サブテーマ５ セクターカップリング

- 再エネ出力変動による最終需要部門の技術制御に関する挙動を1時間値で分析、再エネ大量導入時のセクターカップリングの分析が可能となった
- 卸電力価格が大きく変化し、再エネ電力が拡大する際に卸電力価格が低下し、その際、揚水・電池への電力貯蔵のみならず、最終消費部門の電力需要の増加(上げDR)に加え、水電解、DAC等の消費電力が増加し、再エネ電力が電力部門のみならず、他部門の技術により制御される
- 再エネ大量導入時において、ヒートポンプ給湯器は再エネ電力供給が拡大して卸電力価格が低下する際に全般的に貯湯量を増加する運用が行われる傾向にあり、再エネと家庭部門のセクターカップリングの分析がモデルの拡張により可能となった

2050年1月の電力利用状況(CN実現時)



2050年1月第１週の
家庭部門給湯需給(CN実現時)



６．研究の進捗状況と環境政策等への貢献
（１）進捗状況

〇計画の進捗状況
全てのサブテーマが能動的に参画しつつ、初期的な各種データベース（シナリオ、エネルギー・イノベーション）の構築およびシナリオ分析を実施し、具体的に二酸化炭素除去に関する政策ミックスの知見を導出した。

〇目標達成の見通し
全てのサブテーマで順調に推移しており、計画通り目標を達成できる見通しである。

６．研究の進捗状況と環境政策等への貢献
（２）環境政策等への貢献

＜行政等が活用することが見込まれる成果＞

該当なし。

＜行政等が既に活用した成果＞

サブテーマ4が、総合資源エネルギー調査会・第44回基本政策分科会（令和3年6月30日）において、IEEJ-NE_Japanモデルを用いた2050年ゼロエミッションシナリオの分析結果を提示するとともに、日本におけるゼロエミッション達成のための方策について、他の専門家等と議論を行った。

また、計算自体は以前の推進費2-1704の結果であるが、本課題の支援を受けデータをオープン・アクセスにして公開したところ（https://zenodo.org/record/4817656）、同上の基本政策分科会における電力中央研究所の参考資料「『2050年ネット・ゼロ排出シナリオ』の分析」において情報が活用され（p. 15, 16）、また2-2104についても言及があった（p. 16）。

７．研究成果の発表状況
査読付き論文のみ抜粋

【サブテーマ１】
1)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*. 受理済（サブテーマ１と２の共同成果）
2)Ju, Y., Sugiyama, M., Kato, E., Oshiro, K., & Wang, J. (2022). Job creation in response to Japan's energy transition towards deep mitigation: An extension of partial equilibrium integrated assessment models. *Applied Energy*, 318, 119178. doi:10.1016/j.apenergy.2022.119178　（サブテーマ１と３の共同成果）

【サブテーマ２】
1)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*. 受理済（サブテーマ１と２の共同成果）

【サブテーマ３】
1)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.
2)和田悠暉, 長谷川知子（2021）. 日米の食の変化を考慮した農畜産業由来の温室効果ガス排出削減に関する研究. *土木学会論文集G(環境）*, VOl.77,No.5,I_177-I_182.
3)奥田啓太, 越智雄輝, 長谷川知子, 五味馨（2021）. 京都市を対象とした2050年二酸化炭素排出実質ゼロの姿の定量化. *土木学会論文集G(環境）*, VOl.77,No.5,I_285-I_292.
4)Ju, Y., Sugiyama, M., Kato, E., Oshiro, K., & Wang, J. (2022). Job creation in response to Japan's energy transition towards deep mitigation: An extension of partial equilibrium integrated assessment models. *Applied Energy*, 318, 119178. doi:10.1016/j.apenergy.2022.119178 （サブテーマ１と３の共同成果）

７．研究成果の発表状況　つづき
査読付き論文のみ抜粋

【サブテーマ４】

1)大槻貴司, 尾羽秀晃, 川上恭章, 下郡けい, 水野有智, 森本壮一, 松尾雄司 (2022) . 2050年CO_2正味ゼロ排出に向けた日本のエネルギー構成―自然変動電源の立地制約を考慮した分析―. *電気学会論文誌B,* 142(7), 1-13.

【サブテーマ５】

1)Gyanwali, K., Komiyama, R. and Fujii, Y. (2021) Deep decarbonization of integrated power grid of eastern South Asia considering hydrogen and CCS technology, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 112, December 2021, 103515.

2)Sieed, J., Komiyama, R., and Fujii, Y. (2021) Dynamic Multi-Sector Energy Economic Analysis to Identify Potential of Nuclear and Renewable Energy Options in Expanding Electricity Sector of Developing Countries: Bangladesh Case Study, *Journal of Japan Society of Energy and Resources*, 42(5), 295-304.

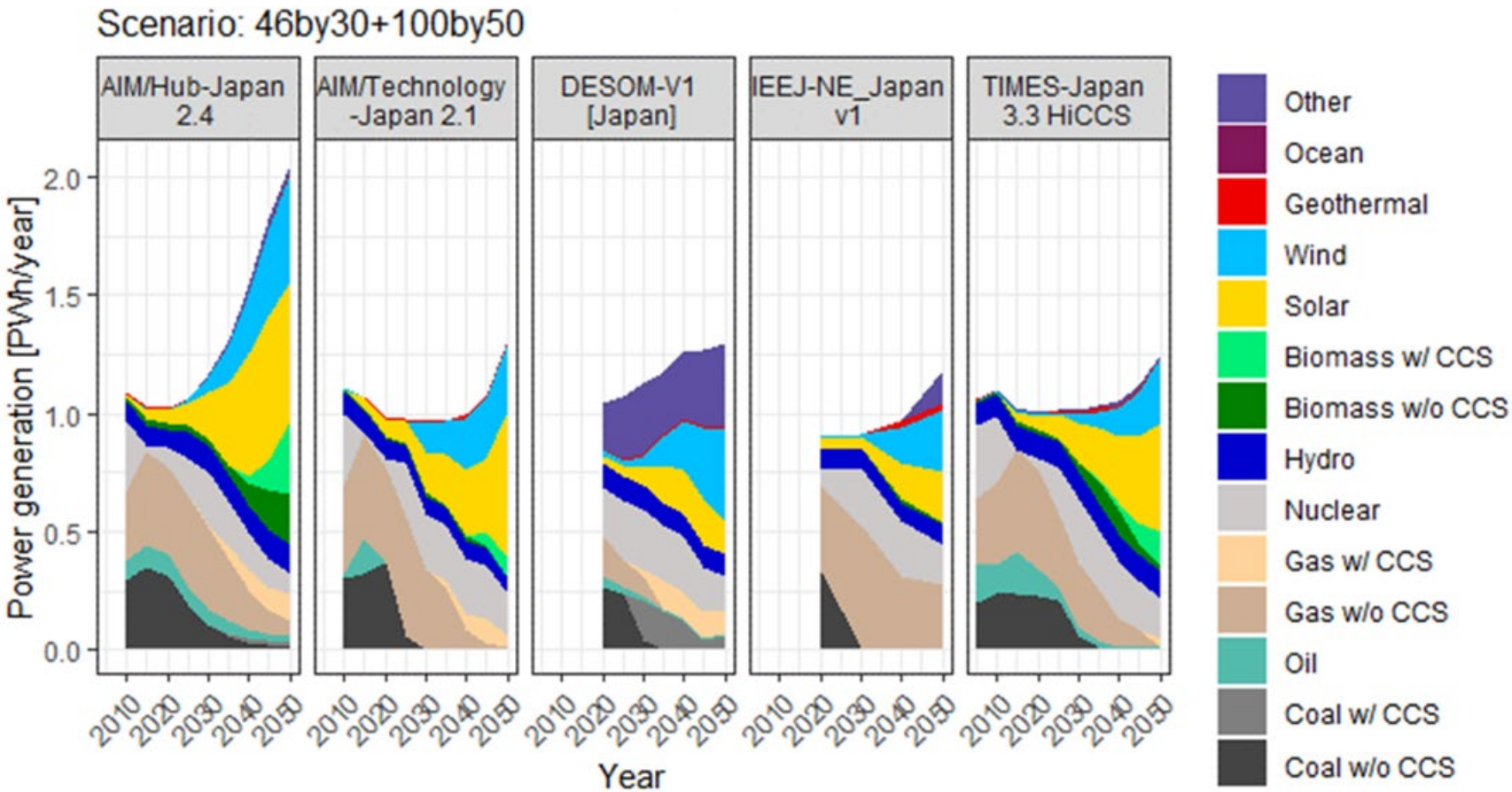
3)Yi, Y., Gyanwali, K., Komiyama, R., Fujii, Y., and Yamaguchi, A. (2021) How Will the Capital Cost Influence the Integration of CCS Coal Plants into the Chinese Low-carbon Optimal Power Expansion Plan by 2050 *?, Journal of Japan Society of Energy and Resources*, 42(6), 368-384.

4)吉武宗浩, 小宮山涼一, 藤井康正(2022). 洋上風力発電の出力変動を考慮した世界エネルギーモデルによる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,* 43(2), 108-118.

補足資料

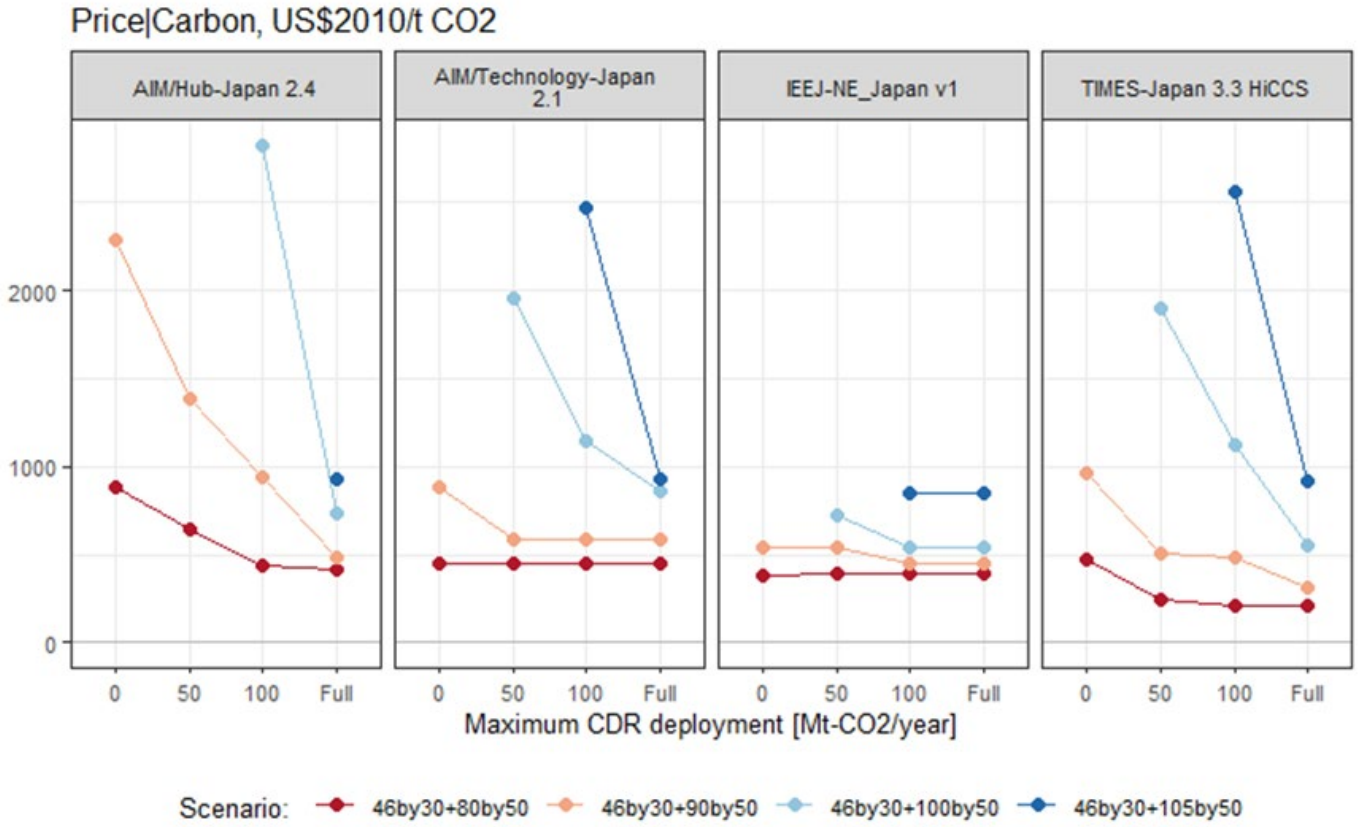
５．結果及び考察：サブテーマ１
統括・モデル比較

- 2030年46%，2050年100%削減シナリオの発電構成
- 電源は2050年までに大幅削減
- 量は不確実だが、太陽光・風力が増える傾向はモデルに共通



５．結果及び考察：サブテーマ１ 統括・モデル比較

- 100%排出削減の場合、AIM/HubではCDR制約が50Mt/yrで、他のモデルでは0Mt/yrでは実行可能解が存在しなくなる
- 限界削減費用を1000USD/tCO_2（13万円/tCO_2, 1ドル＝130円換算）程度に抑える経済効率的な政策のためには、**<u>～100MtCO_2/yrのオーダーのCDRが必要</u>**

2050年の排出削減目標とCDR制約を変化させたときの炭素価格（限界削減費用）の変化

線の色が異なる削減目標、
右軸がCDR導入制約に対応