

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

公募区分： 環境問題対応型研究（一般課題）

研究予定期間： 令和3（2021）年度 ～ 令和5（2023）年度

課題番号： 【2-2104】

体系的番号： （J P M E E R F 2 0 2 1 2 0 0 4）

研究課題： 「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」

Research Title： Decarbonization transition: Multi-model assessment of innovation and lifestyle change

研究代表者： 杉山 昌広

研究代表機関： 国立大学法人 東京大学 未来ビジョン研究センター

研究分担機関： 電力中央研究所、京都大学、立命館大学、日本エネルギー経済研究所、東京大学大学院工学系研究科

研究協力機関： 早稲田大学高等研究所、名古屋大学、エネルギー総合工学研究所

研究領域： 気候変動領域

キーワード： 気候政策、統合評価、イノベーション、エネルギー経済学、環境経済学

令和6（2024）年5月

目次

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書	1
I. 成果の概要	4
1. はじめに（研究背景等）	6
2. 研究開発目的	6
3. 研究目標	7
4. 研究開発内容	8
5. 研究成果	9
5-1. 成果の概要	9
5-2. 研究目標の達成状況	10
5-3. 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献	14
6. 研究成果の発表状況の概要	16
6-1. 成果の件数	16
6-2. 主な査読付き論文等の主要な成果	16
7. 国際共同研究等の状況	17
8. 研究者略歴	17
II. 成果の詳細	19
II-1 サブテーマ1「技術変化と社会変容に関するシナリオ分析、およびトランジション研究との接合」	19
[サブテーマ1要旨]	19
1. サブテーマ1研究開発目的	19
2. サブテーマ1研究目標	19
3. サブテーマ1研究開発内容	19
4. サブテーマ1結果及び考察	24
5. サブテーマ1研究目標の達成状況	32
II-2 サブテーマ2「脱炭素トランジションの理論的フレームワークと日本への応用」	34
[サブテーマ2要旨]	34
1. サブテーマ2研究開発目的	34
2. サブテーマ2研究目標	35
3. サブテーマ2研究開発内容	35
4. サブテーマ2結果及び考察	36
5. サブテーマ2研究目標の達成状況	46
サブテーマ2引用文献（成果以外）	47
II-3 「脱炭素トランジションと持続可能性に関する評価」	49
[サブテーマ3要旨]	49
1. サブテーマ3研究開発目的	49
2. サブテーマ3研究目標	49
3. サブテーマ3研究開発内容	49
4. サブテーマ3結果及び考察	55
5. サブテーマ3研究目標の達成状況	62
II-4 サブテーマ4「脱炭素トランジションのためのイノベーション・データベース構築」	63
[サブテーマ4要旨]	63
1. サブテーマ4研究開発目的	63
2. サブテーマ4研究目標	63

3.	サブテーマ4 研究開発内容	63
4.	サブテーマ4 結果及び考察	64
5.	サブテーマ4 研究目標の達成状況	77
II-5	サブテーマ5 「トランジションを支える再生可能エネルギーとセクター・カップリング」 ..	78
	[サブテーマ5 要旨]	78
1.	サブテーマ5 研究開発目的	78
2.	サブテーマ5 研究目標	78
3.	サブテーマ5 研究開発内容	78
4.	サブテーマ5 結果及び考察	82
5.	サブテーマ5 研究目標の達成状況	89
III.	研究成果の発表状況の詳細	90
(1)	成果の件数	90
(2)	誌上発表	90
(3)	口頭発表	93
(4)	知的財産権	99
(5)	「国民との科学・技術対話」の実施	99
(6)	マスメディア等への公表・報道等	100
(7)	研究成果による受賞	100
(8)	その他の成果発表	101

I. 成果の概要
 <課題情報>

公募区分：	環境問題対応型研究（一般課題）
研究実施期間：	令和3（2021）年度～令和5（2023）年度
課題番号：	【2-2104】
研究課題：	「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」
研究代表者：	杉山 昌広（国立大学法人 東京大学 未来ビジョン研究センター）
重点課題（主）：	【重点課題⑦】 気候変動の緩和策に係る研究・技術開発（気候変動領域）
重点課題（副）：	【重点課題②】 ビジョン・理念の実現に向けた研究・技術開発（統合領域）
行政要請研究テーマ（行政ニーズ）：	(1-1) 持続的な脱炭素社会の実現に必要な革新的技術・社会変革の実現可能性評価に関する研究
研究領域：	気候変動領域

<キーワード>

気候政策
統合評価
イノベーション
エネルギー経済学
環境経済学

<研究体制>

サブテーマ1 「技術変化と社会変容に関するシナリオ分析、およびトランジション研究との接合」

<サブテーマ1 リーダー及び研究分担者>

機関名	部署名	役職名	氏名	参画期間
東京大学	未来ビジョン研究センター	教授	杉山 昌広	

サブテーマ2 「脱炭素トランジションの理論的フレームワークと日本への応用」

<サブテーマ2 リーダー及び研究分担者>

機関名	部署名	役職名	氏名	参画期間

電力中央研究所	社会経済研究所	上席研究員	木村 宰	
---------	---------	-------	------	--

サブテーマ3 「脱炭素トランジションと持続可能性に関する評価」

＜サブテーマ3リーダー及び研究分担者＞

機関名	部署名	役職名	氏名	参画期間
京都大学	大学院工学研究科 都市環境工学専攻	助教	大城 賢	
京都大学	大学院工学研究科 都市環境工学専攻	教授	藤森 真一郎	
立命館大学	理工学部	准教授	長谷川 知子	
立命館大学	理工学部	教授	橋本 征二	2021年4月～2022年3月

サブテーマ4 「脱炭素トランジションのためのイノベーション・データベース構築」

＜サブテーマ4リーダー及び研究分担者＞

機関名	部署名	役職名	氏名	参画期間
日本エネルギー経済研究所	計量分析ユニット	特別主幹研究員	松尾 雄司	
日本エネルギー経済研究所	計量分析ユニット	研究主幹	末広 茂	2021年4月～2023年11月
日本エネルギー経済研究所	資源・燃料・エネルギー安全保障ユニット	ユニット担任・研究理事	久谷 一朗	
日本エネルギー経済研究所	資源・燃料・エネルギー安全保障ユニット	主任研究員	下郡 けい	
日本エネルギー経済研究所	クリーンエネルギーユニット	特別主幹研究員	大槻 貴司	
日本エネルギー経済研究所	計量分析ユニット	主任研究員	江藤 諒	2023年12月～2024年3月

サブテーマ5 「トランジションを支える再生可能エネルギーとセクター・カップリング」

＜サブテーマ5リーダー及び研究分担者＞

機関名	部署名	役職名	氏名	参画期間
東京大学	大学院工学系研究科原子力国際	教授	小宮山 涼一	

	専攻			
--	----	--	--	--

< 研究経費（間接経費を含む） >

年度	直接経費	間接経費	経費合計
2021	29,631千円	5,940千円	35,571千円
2022	26,274千円	5,202千円	31,477千円
2023	26,101千円	5,372千円	31,472千円
合計	82,006千円	16,514千円	98,520千円

1. はじめに（研究背景等）

2015年に国際社会が合意したパリ協定では長期的な地球温暖化の気温目標として、1.5度または2度より十分に低い水準が掲げられた。これを受けて、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)は2018年10月に1.5度の地球温暖化に関する特別報告書を公表し、1.5度または2度達成のためにはそれぞれ2050年、2070年ごろまでに脱炭素を達成する必要性が示された。日本政府も2019年6月にパリ協定の下での長期戦略を提出し、21世紀後半のできるだけ早い時期に脱炭素を目指すことが謳われた。パリ協定では2023年にグローバル・ストックテイクも実施され、気候変動緩和策を加速させる機運が高まっている。

具体的な脱炭素の実現のための方策としては、社会全体の変革（社会経済の移行やライフスタイルの変革）、特にそれを支える（非連続なものも含めた）イノベーションの重要性が認識されている。例えば長期戦略ではイノベーションは100回以上言及されており、Society 5.0の達成を通じて環境と成長の好循環を目指すとしてされている。しかしながら、日本ではイノベーションと気候政策をつなげた政策分析は極めて限られる。以前の長期排出削減目標（80%）に加えた最後の20%排出削減については日本の置かれる状況（再生可能エネルギーの限られた賦存量と電力貿易の難しさ、重工業の重要性など）の考慮が必須であり、欧米の知見（例えば英国や欧州委員会の分析）を直接活用することができない。これにも関わらず既存の日本独自の政策分析は極めて不十分であった。

2. 研究開発目的

こうした状況を受け、本研究課題ではイノベーションと関連する概念（トランジションやライフスタイルの変革）について、脱炭素の観点から研究を行うことを目的とした。重要なイノベーションについて個別具体的な研究を進める。個別の知見を統合するために複数のエネルギー経済モデル・統合評価モデルのモデル相互比較を通じて、環境行政に貢献する。

緩和策の立案にあたっては統合評価モデルによるエネルギー／排出シナリオ分析が有効であるが、既存の分析には限界がある。既往の分析の太宗は2050年80%削減という低炭素で留まっており、長期戦略自体が詳細なモデル分析に裏付けられていない。また旧来の分析ではイノベーションの不確実性や他の不確実性との相互作用の扱いが不十分であった（Sugiyama et al. 2016; Sugiyama et al. 2019）。

本研究では脱炭素イノベーションに関する知見を整理し、複数のエネルギー経済モデル／統合評価モデルに反映することで脱炭素イノベーションの可能性と不確実性についてシナリオ分析を実施する。これにより脱炭素社会へのビジョンと政策を示し、気候変動の観点から地域循環共生圏の実現に向けた環境行政へ役立つ知見を生み出すことを目的とする。

具体的には、（1）脱炭素イノベーションやライフスタイルの変化、社会経済のトランジションに関する文献調査を行い、この知見を踏まえ（2）エネルギー技術イノベーションに関するデータベース

を構築する。これと並行して（３）再生可能エネルギーを中心とした電力システムのイノベーションおよび（４）直接空気回収などの負の排出技術のイノベーションを詳細に検討する。さらに（５）脱炭素イノベーションの経済成長に対する影響について評価する。これらを総合し、（６）複数のエネルギー経済モデル統合評価モデルで気候政策の評価を行うことで、不確実性に対して頑健な政策パッケージ（伝統的な緩和策、イノベーション政策、ライフスタイルの変化に関する政策等の組み合わせ、国際枠組み・協力）を提案する。

3. 研究目標

全体目標	日本を代表する複数の統合評価モデル・エネルギー経済モデルを用いてシナリオ分析を行い、シナリオ・データベースを構築し、日本の頑健な脱炭素トランジションの道筋を検討する。エネルギー技術イノベーションのデータベースを構築しシナリオ分析に活用する。シナリオ・データベースを用い経済性・技術的実現可能性や持続可能性に関して多面的に評価し、革新的イノベーションやライフスタイル変容について、脱炭素に必要な対策と現行政策とのギャップを明確にする。トランジション研究に基づき、ギャップを埋めるための革新的イノベーションやライフスタイル変容を引き起こす、具体的なシステム・イノベーションのための政策パッケージを明らかにする。これにより日本の環境政策に貢献し、ひいてはアジアの気候政策の強化への含意を引き出す。また査読付き学術論文を公表することで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に貢献する。
サブテーマ1	「技術変化と社会変容に関するシナリオ分析、およびトランジション研究との接合」
サブテーマ1 実施機関	東京大学未来ビジョン研究センター
サブテーマ1 目標	研究全体の全体統括を行い、政策的含意の取りまとめを行う。2-1704のシナリオ設計を発展させ、各サブテーマと協力しながら革新的イノベーションおよびライフスタイル変容を複数モデルで評価できるシナリオ設計を行い、これに基づき日本の主要な統合評価モデルおよびエネルギー経済モデルが参画するモデル相互比較のコーディネーションおよびシナリオ・データベースの構築を行う。さらにシナリオ分析の結果を踏まえて、持続可能性トランジション理論に基づいた具体的な政策パッケージを導き出す。
サブテーマ2	「脱炭素トランジションの理論的フレームワークと日本への応用」
サブテーマ2 実施機関	電力中央研究所社会経済研究所
サブテーマ2 目標	持続可能性へのトランジション(sustainability transition)の理論的フレーム(multi-level perspective等)について包括的なレビューを行い、政策的含意の整理や日本における気候変動分野の事例(再生可能エネルギーやライフスタイル変容等)への適用を行う。また理論的フレームとモデルによるシナリオ分析の接合について、具体的なシステム・イノベーション政策の観点から検討する。サブテーマ1と連携し、シナリオ設計およびシナリオ分析の解釈にトランジション研究の知見を反映する。
サブテーマ3	「脱炭素トランジションと持続可能性に関する評価」

サブテーマ3 実施機関	京都大学・立命館大学
サブテーマ3 目標	脱炭素トランジションに関して、持続可能な開発目標（SDGs）に関連する複数の項目（経済や雇用、格差など）について評価枠組みを構築する。この評価枠組みを用いて、研究課題全体のシナリオ設計に基づき、脱炭素トランジションについてシナジーとトレードオフについて多面的に評価する。またサブテーマ1が取りまとめるモデル相互比較にAIM/Enduse, AIM/Hubモデルで参画する。
サブテーマ4	「脱炭素トランジションのためのイノベーション・データベース構築」
サブテーマ4 実施機関	日本エネルギー経済研究所
サブテーマ4 目標	脱炭素トランジションに資するエネルギー供給技術、需要側技術、またシステム全体に関する技術の情報収集および整理を行う。これに基づき、革新的イノベーションを中心にエネルギー技術イノベーションに関するデータベースを構築し、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。エネルギー技術イノベーションの効果に関する分析を実施する。またサブテーマ1が取りまとめるモデル相互比較にIEEJ-NE-Japanモデルで参画する。
サブテーマ5	「トランジションを支える再生可能エネルギーとセクター・カップリング」
サブテーマ5 実施機関	東京大学大学院工学系研究科
サブテーマ5 目標	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・モデルに組み込む。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う。またサブテーマ1が取りまとめるモデル相互比較に時間高解像度エネルギー・システム・モデルを用いて参画する。

4. 研究開発内容

本研究では、（1）脱炭素イノベーションやライフスタイルの変化、社会経済のトランジションに関する文献調査を行い、この知見を踏まえ（2）エネルギー技術イノベーションに関するデータベースを構築する。これと並行して（3）再生可能エネルギーを中心とした電力システムのイノベーションおよび（4）直接空気回収などの負の排出技術のイノベーションを詳細に検討する。さらに（5）脱炭素イノベーションの経済成長に対する影響について評価する。これらを総合し、（6）複数のエネルギー経済モデル、統合評価モデルで気候政策の評価を行うことで、不確実性に対して頑健な政策パッケージ（伝統的な緩和策、イノベーション政策、ライフスタイルの変化に関する政策等の組み合わせ、国際枠組み・協力）を提案する。

サブテーマごとに説明すると、サブテーマ1ではIIASAと協力して、IIASAのシステムScenario Explorer上に5つのエネルギーシステムモデルおよび統合評価モデルのデータを収集したシナリオ・データベースを構築する。IAMCデータベース形式で構築したシナリオ・データベースをもとに、モデルの相互比較を行い、頑健な対策を同定する。サブテーマ2の結果を踏まえて、トランジション研究の政策ミックスの枠組みを用いて、政策がようやく立ち上がりつつある二酸化炭素除去および水素技術について政策ミックスの導出を行う。

サブテーマ2は、トランジション研究、特に社会技術システムのトランジションを3層に分けて分析する重層的視座（MLP）という理論枠組みについて広範にレビューをし、欧州のPATHWAYSプロジェクト

トなどを対象に、シナリオ分析とトランジション研究の接続や政策ミックスの枠組みについて検討する。またライフスタイル変容の事例として、日本の食のトランジションについて分析する。

サブテーマ3は持続可能性評価として、経済や格差などについて分析する。所得階層別の家計所得・支出モデルAIM/PHIモデルと統合評価モデルAIM/HubとAIM/Technologyモデルを用いる。また、サブテーマ3は2つのモデルで複数のシナリオを計算し、IIASAのデータベースに提出し、サブテーマ1のモデル相互比較に貢献する。

サブテーマ4は、技術イノベーションで鍵となる技術について査読付き論文や各種報告書から将来のコスト推計を抽出し、イノベーション・データベースという形でまとめる。この結果をサブテーマ1に引き渡し、シナリオ設計に活用する。コスト推計の影響について、IEEJ_NE-Japanモデルで計算する。また複数のシナリオを計算し、IIASAのデータベースに提出し、サブテーマ1のモデル相互比較に貢献する。

サブテーマ5は、時間高解像度エネルギー・システム・モデルを用いて、主力化する再生可能エネルギーとセクターカップリング（需要側の柔軟性など）についてエネルギーシステム分析を行う。またサブテーマ3～5と同様に、DESOMモデルを用いてサブテーマ1が設計する複数シナリオを算出し、IIASAのシナリオ・データベースにデータを提出する。

5. 研究成果

5-1. 成果の概要

研究課題全体を通じて、日本の2050年GHG排出量正味ゼロへ向けた道筋について、技術イノベーションやライフスタイル変容に関して、5つの統合評価モデル・エネルギーシステムモデルを用いて分析を行い、頑健（ロバスト）な対策を明らかにした。具体的には、経済全体のエネルギー効率化、電源の脱炭素化と需要側の電化、化石燃料利用削減とクリーンエネルギーの拡大、また二酸化炭素除去（CDR）を同定した。経済効率的な緩和策のためには、2050年のCDR導入量は約100MtCO₂/yrに達することが明らかになった（成果番号5）。またトランジション研究に基づいて政策ミックスの分析枠組みを整理し、CDRや水素技術などに適用し、日本の萌芽期の対策については市場形成が重要であることを明らかにした。

サブテーマ1は全体を統括し、シナリオ設計とモデル相互比較、政策ミックスへの翻訳を行った。世界に比べて内外価格差が存在する再生可能エネルギーのコスト低減のスピードや、輸入水素等のコスト、CDRの導入可能量などの不確実性を踏まえたシナリオを設計した。シナリオ・データベースをもとにモデル相互比較を行い、技術やモデルの違いに起因する不確実性に対して頑健（ロバスト）な対策を同定した。サブテーマ2からの持続可能性へのトランジションに関する文献のレビューを受けて、萌芽期にあるCDRや水素については政策ミックスの中で、補助金や政府調達といった市場形成（例：米国のインフレ抑制法の税額控除）の強化が必要であることを明らかにした（成果番号56）。さらに、当初の研究計画に追加的に、シナリオの実現可能性の専門家認知（成果番号2）や、CDRの公衆認知（成果番号6）についても明らかにした。

サブテーマ2では、トランジション研究の包括的な文献レビューを行い、理論形成の経緯と主な概念を整理することを通じて理論的基礎を確認した（成果番号7）。その上で、近年の展開動向を概観し、トランジションの段階に応じた幅広い政策ミックスを導出した（成果番号56、サブテーマ1と協力）。脱炭素化において重要でありかつライフスタイル変容にも直結する食のトランジションを事例として選択し、トランジション研究における中核的な理論であるマルチレベル・パースペクティブ論（MLP）に基づいた事例分析を行った。日本では、食の環境負荷の見える化・情報提供による知識基盤の形成と認知向上により、食トランジションの必要性に関する議論を開始することが課題であることを指摘した。

サブテーマ3においては、日本経済全体のGDPロス・消費ロスの評価に加えて、所得階層別の影響評

価を実施する枠組みを構築し、脱炭素トランジションの多面的な持続可能性評価を可能とした（成果9）。具体的には統合評価モデルやエネルギーシステムモデルと所得階層別所得・支出モデルを用い、炭素税の逆進性などトレードオフの関係を明らかにするとともに、その影響を低減するための方策（技術政策や税収還元）を明らかにした（成果9）。サブテーマ1のシナリオプロトコルに応じたシナリオを2つのモデルから提供し、モデル比較論文に掲載された（成果番号5、56、サブテーマ1と協力）。

サブテーマ4では、エネルギー供給側、需要側、更にエネルギーシステム全体に関する多数の技術を対象とし、学術論文等の公開文献に基づき情報収集・整理を行った上で、イノベーション・データベースを構築し、サブテーマ1や他のモデル研究チームに提供した（図4-1～16、表4-1、4-2）。どの調査対象技術も不確実性が非常に大きく、コストの幅が広いことを明らかにした。このデータベースはサブテーマ1のシナリオ設計に活用された。さらに前述のエネルギーイノベーションデータの収集結果を踏まえ、IEEJ-NE_Japanモデルを用いてエネルギー技術イノベーションの効果に関する分析を実施した（図4-17及び4-18）。サブテーマ1との間で調整を行い、モデル相互比較に分析結果を提供した（成果番号5、56、サブテーマ1と協力）。

サブテーマ5では、再エネ大量導入時に特に重要となるエネルギー需給バランス維持に関して、エネルギー供給側に加え、最終消費部門の多数の技術を明示的に考慮した時間高解像度エネルギー・システム・モデル（成果番号25）ならびに最適化型電力需給モデル（図5-4、5-5）を構築し、セクターカップリングの相乗効果を分析し、需要応答の効果を定量的に明らかにした（図5-9、5-10など）。また、サブテーマ1がとりまとめるモデル相互比較に参画した（成果番号5、56、サブテーマ1と協力）。

成果は28本の学術論文などで公開した。

5-2. 研究目標の達成状況

<全体の達成状況>・・・・・・・・・・・・・・・・ 2. 目標を上回る成果をあげた

「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」

全体目標	全体の達成状況
<p>日本を代表する複数の統合評価モデル・エネルギー経済モデルを用いてシナリオ分析を行い、シナリオ・データベースを構築し、日本の頑健な脱炭素トランジションの道筋を検討する。エネルギー技術イノベーションのデータベースを構築しシナリオ分析に活用する。シナリオ・データベースを用い経済性・技術的実現可能性や持続可能性に関して多面的に評価し、革新的イノベーションやライフスタイル変容について、脱炭素に必要な対策と現行政策とのギャップを明確にする。トランジション研究に基づき、ギャップを埋めるための革新的イノベーションやライフスタイル変容を引き起こす、具体的なシステム・イノベーションのための政策パッケージを明らかにする。これにより日本の環境政策に貢献し、ひいてはアジアの気候政策の強化への含意を引き出す。また査読付き学術論文を公表することで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に貢献する。</p>	<p><u>複数のモデル分析とシナリオ・データベース</u>については、サブテーマ1が全体統括をし、全てのサブテーマが協力しシナリオ設計を行った。複数の統合評価モデル・エネルギーシステムモデル（サブテーマ3～5）からのデータを収集し、シナリオ・データベースを構築した（成果番号5）。また炭素の価格付けについての所得階層別の所得・支出モデルの分析、技術イノベーション・データベースを踏まえたエネルギーシステムモデルによるコスト分析、高時間解像度エネルギーシステムモデルによるセクターカップリングの分析など、個別課題の詳細な分析も行った。</p> <p><u>イノベーション政策およびライフスタイル変容に関する政策</u>については、CDRと水素技術を例に、トランジション研究で開発された政策ミックス・パッケージの枠組みに基づき、国際的に日本の政策をベンチマークし、日本では研究開発やカーボンプライシングに加えて補助金や政府調達といった市場形成の大幅な強化がギャップを埋めるために必要であることを明らかにした（成果番号56）。アジアについてもレビュー等を通じて、日</p>

	<p>本と同様な状況にあり、同様な政策が有効であることが明らかになった（成果番号6）。ライフスタイル変容については文献調査を行い統合評価モデルやエネルギーシステムモデルにおける課題を明らかにした（成果番号5）。また詳細なモデル分析から、炭素税の逆進性の対応や、再生可能エネルギーの大量導入のための需要応答の拡大など、技術普及の再構成期においては、対策の負の影響の緩和や分野をまたいだ対策が必要であることを示した。</p> <p>国際的科学アセスメント 研究代表はIPCCに代表執筆著者として参画し、またState of CDRにも参加している。</p> <p>シナリオに関する俯瞰的研究 シナリオ研究に関する包括的なレビューを行い（成果番号3）、脱炭素シナリオにおいて以前不足していた実現可能性に関する分析を実施し（成果番号2、サブテーマ1）、当初計画に比べて一層俯瞰的な観点からの研究も行うことで、シナリオの全体像の理解を深めることができた。</p> <p>全体を通じて28本の査読付き学术论文で公表した。</p>
--	--

<【サブテーマ1】達成状況> 2. 目標を上回る成果をあげた

「技術変化と社会変容に関するシナリオ分析、およびトランジション研究との接合」

サブテーマ1 目標	サブテーマ1 の達成状況
<p>研究全体の全体統括を行い、政策的含意の取りまとめを行う。2-1704のシナリオ設計を発展させ、各サブテーマと協力しながら革新的イノベーションおよびライフスタイル変容を複数モデルで評価できるシナリオ設計を行い、これに基づき日本の主要な統合評価モデルおよびエネルギー経済モデルが参画するモデル相互比較のコーディネーションおよびシナリオ・データベースの構築を行う。さらにシナリオ分析の結果を踏まえて、持続可能性トランジション理論に基づいた具体的な政策パッケージを導き出す。</p>	<p>全体統括としては、定期的に研究会合を開催し、全体をとりまとめた。</p> <p>シナリオ設計については、各サブテーマと共同して開発し（表1-2、1-3、1-4）、技術や政策などの幅広い不確実性を分析できる枠組みを構築した。</p> <p>シナリオ・データベースおよびモデル相互比較については、サブテーマ3～5および研究協力者からの複数モデル(AIM/Hub, AIM/Technology, DESOM, IEEJ_NE-Japan, TIMES-Japan)の分析結果を収集し、IPCC準拠のIT基盤をもとにシナリオ・データベースを構築した（成果番号5）。モデル相互比較の分析からCDRをはじめとする頑健な対策を明らかにした。</p> <p>政策パッケージについては、サブテーマ2からの情報提供を受け、萌芽期、成熟期、再構成期という技術普及段階別に政策ミックスを整理する枠組みを、二酸化炭素除去（成果番号56）と水素に適応した。</p> <p>以上に加えて、シナリオに関する追加的な分析</p>

	（実現可能性に関する専門家アンケート調査、成果番号2）など、当初の計画を超えた成果も生み出した。ほとんどの成果を学術論文として公開した。
--	--

<【サブテーマ2】達成状況>・・・・・・・・・・ 3. 目標どおりの成果をあげた

「脱炭素トランジションの理論的フレームワークと日本への応用」

サブテーマ2 目標	サブテーマ2 の達成状況
<p>持続可能性へのトランジション (sustainability transition)の理論的フレーム (multi-level perspective等) について包括的なレビューを行い、政策的含意の整理や日本における気候変動分野の事例（再生可能エネルギーやライフスタイル変容等）への適用を行う。また理論的フレームとモデルによるシナリオ分析の接合について、具体的なシステム・イノベーション政策の観点から検討する。サブテーマ1 と連携し、シナリオ設計およびシナリオ分析の解釈にトランジション研究の知見を反映する。</p>	<p><u>「持続可能性へのトランジション (sustainability transition)の理論的フレーム (multi-level perspective等) について包括的なレビューを行い」</u>については、トランジション研究における社会技術システム分析アプローチについて包括的な文献レビューを行い、理論形成の経緯と主な概念を整理、理論的基礎を確認した（成果番号7、図2-1）。</p> <p><u>「政策的含意の整理」</u>については、トランジションのフェーズに応じた幅広い政策ミックスを導出した（成果番号56、表2-1）。</p> <p><u>「政策的含意の整理や日本における気候変動分野の事例（再生可能エネルギーやライフスタイル変容等）への適用を行う」</u>については、脱炭素化とライフスタイル変容の観点から重要である食トランジションを事例として、トランジション理論（特にマルチレベル・パースペクティブ論）に基づく分析を行った。具体的には、日本等での長期的な食事パターンの変化等を分析し、中長期的には大幅な食行動変容が起こる可能性や政策措置の重要性を指摘し、トランジション促進に必要な対策を整理した。また、日本は食トランジションの萌芽期にさえ至っていない状況にあることから、議論を開始することが喫緊の課題であることを指摘した。これらの成果は、査読付き学術論文（成果番号8）および学会報告（成果番号57, 58, 59, 60）として発表した。</p> <p><u>「理論的フレームとモデルによるシナリオ分析の接合について、具体的なシステム・イノベーション政策の観点から検討する。サブテーマ1 と連携し、シナリオ設計およびシナリオ分析の解釈にトランジション研究の知見を反映する。」</u>については、社会技術システム分析と統合評価モデルの接合を目指した国際研究プロジェクト「PATHWAYS」を取り上げ、異なる研究アプローチ間の協働体制や成果シナリオ等をレビューした。この結果、両アプローチの一体的な統合は困難であることが判明したことから、本研究課題ではより平易な接合方法を志向し、特に定量的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行うことが有益と結論した。この結果はサブテーマ1 におけるCDRの政策ミックスの分析に活用し、具体的</p>

	<p>な政策提言につなげた（成果番号7、サブテーマ1などとの共同の成果番号56）。</p> <p>以上により、本サブテーマの研究目標は達成したと考えられる。</p>
--	--

<【サブテーマ3】達成状況>・・・・・・・・・・ 2. 目標を上回る成果をあげた

「脱炭素トランジションと持続可能性に関する評価」

サブテーマ3目標	サブテーマ3の達成状況
<p>脱炭素トランジションに関して、持続可能な開発目標（SDGs）に関連する複数の項目（経済や雇用、格差など）について評価枠組みを構築する。この評価枠組みを用いて、研究課題全体のシナリオ設計に基づき、脱炭素トランジションについてシナジーとトレードオフについて多面的に評価する。またサブテーマ1が取りまとめるモデル相互比較にAIM/Enduse, AIM/Hubモデルで参画する。</p>	<p>全体として、早期から家計所得・支出モデルの日本への適用に着手し、モデル比較へのシナリオ提出・貢献についても計画に従い実施した。</p> <p><u>持続可能性評価枠組の構築</u>については、日本経済全体のGDPロス・消費ロスの評価に加えて、所得階層別の影響評価を実施する枠組みを構築し、脱炭素トランジションの多面的な評価を可能とした（成果9）。</p> <p><u>シナジーとトレードオフの多面的評価</u>については、炭素税の逆進性などトレードオフの関係を明らかにするとともに、その影響を低減するための方策（技術政策や税収還元）を明らかにした（成果9）。</p> <p><u>モデル相互比較への参画</u>については、サブテーマ1のシナリオプロトコルに応じたシナリオを2つのモデルから提供し、モデル比較論文に掲載された（成果番号5、56、サブテーマ1と共同）。</p>

<【サブテーマ4】達成状況>・・・・・・・・・・ 3. 目標どおりの成果をあげた

「脱炭素トランジションのためのイノベーション・データベース構築」

サブテーマ4目標	サブテーマ4の達成状況
<p>脱炭素トランジションに資するエネルギー供給技術、需要側技術、またシステム全体に関する技術の情報収集および整理を行う。これに基づき、革新的イノベーションを中心にエネルギー技術イノベーションに関するデータベースを構築し、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。エネルギー技術イノベーションの効果に関する分析を実施する。またサブテーマ1が取りまとめるモデル相互比較にIEEJ-NE-Japanモデルで参画する。</p>	<p><u>「脱炭素トランジションに資するエネルギー供給技術、需要側技術、またシステム全体に関する技術の情報収集および整理を行う。これに基づき、革新的イノベーションを中心にエネルギー技術イノベーションに関するデータベースを構築し、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。」</u>については、エネルギー供給側、需要側、更にエネルギーシステム全体に関する多数の技術（太陽光、風力、原子力、水素・アンモニア、蓄電池、CCS、DAC、カーボンリサイクル、電気自動車、ヒートポンプ、鉄鋼、セメント、紙・パルプ）を対象とし、学術論文等の公開文献に基づき情報収集・整理を行った上で、エクセルによるイノベーション・データベースを構築し、他のモデル研究チーム等に提供した（図4-1～16、表4-1、4-2およびサブテーマ1の図1-2）。</p>

	<p><u>「エネルギー技術イノベーションの効果に関する分析を実施する。」</u>については、上記のエネルギーイノベーションデータの収集結果を踏まえ、IEEJ-NE_Japanモデルを用いてエネルギー技術イノベーションの効果に関する分析を実施した（図4-17および4-18）。</p> <p><u>「またサブテーマ1が取りまとめるモデル比較にIEEJ-NE_Japanモデルで参画する。」</u>については、サブテーマ1との間で調整を行い、モデル相互比較に分析結果を提供した（成果5、56、サブテーマ1が主の成果）。</p> <p>また、これらの成果を学術論文として公表した。</p>
--	--

<【サブテーマ5】達成状況>・・・・・・・・・・ 3. 目標どおりの成果をあげた

「トランジションを支える再生可能エネルギーとセクター・カップリング」

サブテーマ5目標	サブテーマ5の達成状況
<p>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・モデルに組み込む。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う。またサブテーマ1が取りまとめるモデル相互比較に時間高解像度エネルギー・システム・モデルを用いて参画する。</p>	<p>再エネ大量導入時に特に重要となるエネルギー需給バランス維持に関して、エネルギー供給側に加え、最終消費部門の多数の技術を明示的に考慮した<u>時間高解像度エネルギー・システム・モデル（成果番号25）</u>ならびに<u>最適化型電力需給モデルを構築（図5-4、5-5）</u>した。</p> <p><u>セクターカップリングの相乗効果</u>をこのモデルで分析した（図5-9、5-10など）。</p> <p><u>モデル相互比較</u>については、サブテーマ1ヘデータを提供し、分析に参画した（成果番号5、56、サブテーマ1が主の成果）。</p> <p>これらの研究結果をとりまとめ、学術論文、学会発表を通じて成果を多数公表した。</p>

5-3. 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献

<得られた研究成果の学術的意義>

本課題全体の革新性は、日本の2050年正味排出ゼロ目標について複数モデルの相互比較により頑健な道筋を明らかにした点、また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（部分的ではあるものの）接合をし、有効な政策ミックスを導いた点にある。

モデル相互比較へはサブテーマ1、2、4が主にシナリオ設計に貢献し、サブテーマ3～5がモデルによるシナリオ分析を行った。モデル相互比較の結果については、日本の気候緩和政策で旧来の80%削減（低炭素）から（温室効果ガスで正味）100%削減（脱炭素）の目標に強化されたため、以前から言われていた頑健な対策に加えて、新たにCDRがコスト効率的な対策にきわめて重要であることが明らかになった。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、本研究が初めてである。

政策ミックスについては、統合評価モデルなどによるシナリオ分析は日本を含めた国レベルの気候政策の評価やIPCCといった国際的科学的アセスメントにおいて重要な役割を果たしてきた。一方で、モデルによる定量分析は社会の動的な変化やシステミックな政策の分析から距離があることが指摘されており、モデルによるシナリオ分析と他の知見を接合することが指摘されている。Geels et al. (2016)やPeng et al. (2021)にあるように、定性的な社会科学の知見を定量的なモデル分析につなげるのは認識論・存在論的といった科学の根本的な在り方についての問題や方法論上の課題などで分析事例が限られている。本研究では、日本の脱炭素を対象として、モデルによるシナリオ分析とトランジション研究の政策ミックス枠組みを橋渡しする試みを行った。まず、サブテーマ2がトランジション研究を踏まえて政策ミックスを分析するための包括的な枠組みを整理した。続いて、サブテーマ1がこの政策ミックスの枠組みを分析に適用した。具体的には、全てのサブテーマが貢献したモデル相互比較のシナリオ分析において明らかになったCDRおよび水素技術について、日本における政策ミックスのギャップを明らかにした。脱炭素に関する政策ミックスに関連する研究はそもそも数が少なく、日本については初めての研究といえる。

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、その他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がある。

<行政等に既に貢献した成果>

特になし。

<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。

また、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、本研究結果も一部引用される予定である。

6. 研究成果の発表状況の概要

6-1. 成果の件数

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

6-2. 主な査読付き論文等の主要な成果

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. <i>Communications Earth & Environment</i> , 4(1), 431. https://doi.org/10.1038/s43247-023-01079-8
4	Sugiyama, M., Wilson, C., Wiedenhofer, D., et al. (2024). High with low: Harnessing the power of demand-side solutions for high wellbeing with low energy and material demand. <i>Joule</i> , 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. <i>Environmental Research Communications</i> , accepted.
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）研究の現状と今後の展望. <i>環境経済・政策研究</i> , 15(2), 1-11.

	https://doi.org/10.14927/reeps.15.2_1
8	坂本将吾, 木村幸 (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.

※この欄の成果番号は「Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細」と共通です。

7. 国際共同研究等の状況

<国際共同研究等の概要>

International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA, 国際応用システム分析研究所) とシナリオ・データベース構築について共同で作業を行った。シナリオ・データベースの情報を当初よりIIASAのソフトウェアScenario Explorerで開発することで、IPCCの次期の報告書 (AR7) や関連研究でも有効に活用できる。シナリオ・データベースの結果は論文 (成果番号5) で報告されている。また需要側のシナリオのレビューにおいても、IIASAを起点として多くの研究者と文献レビューで協力を行い、サブテーマ1は全体取りまとめと同時に、日本の政策やモデリングについて情報インプットを行った (成果番号4)。

<相手機関・国・地域名>

機関名	国・地域名 (本部所在地等)
International Institute for Applied Systems Analysis	オーストリア・ラクセンブルグ

8. 研究者略歴

<研究代表者略歴>

代表者氏名	略歴 (学歴、学位、経歴、現職、研究テーマ等)
杉山 昌広	東京大学理学部卒業、マサチューセッツ工科大学理学部博士課程修了、東京大学サステイナビリティ学連携研究機構特任研究員、(一財)電力中央研究所社会経済研究所主任研究員、現在、東京大学未来ビジョン研究センター教授

＜研究分担者（サブテーマリーダー）略歴＞

分担者氏名	略歴（学歴、学位、現職、研究テーマ等）	参画期間
1) 木村 宰	東京大学教養学部卒業、同大学院工学系研究科博士課程修了、現在、（一財）電力中央研究所社会経済研究所上席研究員	2021年度 ～ 2023年度
2) 大城 賢	慶應義塾大学理工学部卒業、東京工業大学社会理工学研究科博士課程修了、現在、京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻助教	2021年度 ～ 2023年度
3) 松尾 雄司	東京大学理学部卒業、同大学院理学系研究科修了、政策研究大学院大学博士（社会システム分析）、現在、（一財）日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット特別主幹研究員、立命館アジア太平洋大学准教授	2021年度 ～ 2023年度
4) 小宮山 涼一	東京大学工学部卒業、同大学院工学系研究科博士課程修了、現在、東京大学大学院工学系研究科教授	2021年度 ～ 2023年度

参考文献

Geels, F. W., Berkhout, F., & van Vuuren, D. P. (2016). Bridging analytical approaches for low-carbon transitions. *Nature Climate Change*, 6(6), 576-583.

<https://doi.org/10.1038/nclimate2980>

Peng, W., Iyer, G., Bosetti, V., Chaturvedi, V., Edmonds, J., Fawcett, A. A., Hallegatte, S., Victor, D. G., van Vuuren, D., & Weyant, J. (2021). Climate policy models need to get real about people—Here’s how. *Nature*, 594(7862), 174-176. <https://doi.org/10.1038/d41586-021-01500-2>

Sugiyama, M., Sakata, I., Shiroyama, H., Yoshikawa, H., & Taniguchi, T. (2016). Research management: Five years on from Fukushima. *Nature*, 531(7592), 29-30.

<https://doi.org/10.1038/531029a>

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, 1120-1131.

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.091>

II. 成果の詳細

II-1 サブテーマ1「技術変化と社会変容に関するシナリオ分析、およびトランジション研究との接合」

[サブテーマ1 要旨]

サブテーマ1ではトランジション研究の知見（サブテーマ2）を踏まえ、複数の統合評価モデル・エネルギーシステムモデルを用いたモデル相互比較プロジェクトを設計し、様々な不確実性に対して頑健な日本の2050年ネットゼロへの道筋を明らかにした。経済全体でのエネルギー効率化（省エネルギーおよび需要減）、発電部門の脱炭素化と需要側の電化、クリーンエネルギーの導入などの重要性が確認されたと同時に、100MtCO₂/yr程度の二酸化炭素除去（CDR）が経済効率的な緩和策にとって重要であることを示した。モデルによるシナリオ分析の結果を緩和策に翻訳し、日本の政策の方向性を明らかにするために、トランジション研究を踏まえた政策ミックスについて日欧米を主に対象とし、CDR（特に直接空気回収）と水素関連技術について政策ミックスのギャップ分析を行った。日本では研究開発などの政策が進んでいるものの、欧米に比べて、補助金や政府調達といった市場形成のような萌芽期の政策が不足していることが示された。本研究の成果の一部は国際的な科学アセスメント、State of CDRにも反映される予定である。

1. サブテーマ1 研究開発目的

サブテーマ1では、技術イノベーションや政策、分析ツールである統合評価モデルやエネルギーシステムモデルの違いなど様々な不確実性を踏まえて、2050年正味排出量ゼロ（ネットゼロ）に到達するための頑健な排出削減のための道筋を明らかにする。その上で、旧来モデル分析で強調された炭素の価格付けを超えたトランジション研究に基づく政策パッケージを示し、GX政策パッケージなど現在進行中の日本の政策に不足しているところを明らかにする。また、幅広いテーマを扱う各サブテーマの知見を統合する。

2. サブテーマ1 研究目標

サブテーマ1	「技術変化と社会変容に関するシナリオ分析、およびトランジション研究との接合」
サブテーマ1 実施機関	東京大学未来ビジョン研究センター
サブテーマ1 目標	研究全体の全体統括を行い、政策的含意の取りまとめを行う。2-1704のシナリオ設計を発展させ、各サブテーマと協力しながら革新的イノベーションおよびライフスタイル変容を複数モデルで評価できるシナリオ設計を行い、これに基づき日本の主要な統合評価モデルおよびエネルギー経済モデルが参画するモデル相互比較のコーディネーションおよびシナリオ・データベースの構築を行う。さらにシナリオ分析の結果を踏まえて、持続可能性トランジション理論に基づいた具体的な政策パッケージを導き出す。

3. サブテーマ1 研究開発内容

3.1. 全体統括

サブテーマ1では全体統括を担当し、各サブテーマを接合し、複数モデルの相互比較による頑健な排出対策の道筋を明らかにした（図1-1）。

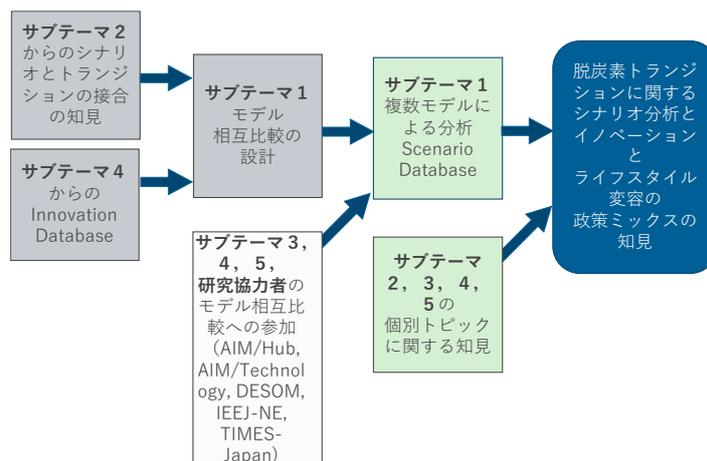


図1-1. 全体統合のイメージ図.

サブテーマ1では、サブテーマ2とサブテーマ4からの知見を踏まえて、日本のネットゼロに向けた詳細なモデル相互比較のためのシナリオを設計した。シナリオ設計は政策や技術についての感度解析を含むものである。その後、サブテーマ3, 4, 5および研究協力機関からはデータ提出を受けた。実際の研究推進に当たっては、定期的な研究会合を開催し、個別のミーティングも必要に応じて設定した。

3. 2. 頑健な政策を同定するための複数モデルによるシナリオ分析

サブテーマ1では複数の統合評価モデル、エネルギーシステムモデルを用いてモデル相互比較を実施した。それにより頑健な2050年までの温室効果ガス排出削減の道筋を明らかにした。表1-1にモデル相互比較に参加したモデルの一覧を示す。サブテーマに加えて研究協力者（TIMES-Japan）も参加した。

京都大学、立命館大学、国立環境研究所が開発するAIM/Hubモデル(Fujimori et al. 2019)は一般均衡モデルであり、エネルギーシステム以外に加えて経済的側面を検討できる強みがある。またすべての温室効果ガスをカバーしている。一方、エネルギー技術の詳細な表現について限界がある。

他のAIM/Technology（京都大学、Oshiro et al. 2021）、DESOM（東京大学、Kawakami et al. 2018, 今川ほか2023）、IEEJ-NE_Japan（横浜国立大学、立命館アジア太平洋大学、日本エネルギー経済研究所、Otsuki et al. 2022, 2023）、TIMES-Japanモデル（エネルギー総合工学研究所、Kato & Kurosawa 2021）はすべて技術選択型で部分均衡のエネルギーシステムモデルである。モデルによって強みが異なる。例えばAIM/Technologyは逐次最適のため、大量の計算を行うのに適している。IEEJ-NE_Japanは時間解像度が高く、再生可能エネルギーの導入のための系統における対策を評価するのに適している。TIMES-Japanは詳細な電源系統や需要側モデルとソフトリンクをしており、統合的な対策の検討に強みがある。なお、モデルによって扱っている温室効果ガスが異なる点については注意が必要である。AIM/HubとAIM/Technologyは京都議定書で対象とされる温室効果ガスをすべて対象にしているが、DESOM、IEEJ-NE_Japan、TIMES-JapanはCO₂のみを対象としている。

メインのシナリオとしては二つを設けた（表1-2）。

感度解析のシナリオの設計にあたっては政策と技術における2つの次元について複数のシナリオを設定した（表1-3、表1-4）。政策の感度解析を行う理由は、CO₂の正味ゼロ排出は、CO₂以外の温室効果ガスを考えると、全ての排出で見たときに正味ゼロ排出になっていない可能性があるからである（詳しくは後述）。技術面については、再生可能エネルギーのコスト、輸入エネルギーコスト、二酸化炭素除去の利用可能量について技術シナリオを設けた。設計にあたってはサブテーマ4のイノベーション・データベースの分析に基づき、また複数のモデル分析での意義を考慮した。

表 1-1. モデル相互比較に参加したモデル一覧.

モデル	解法	時間の扱い	植林や土地利用関連以外のCDR	二酸化炭素回収貯留の場所	海外との二次エネルギー貿易	バージョン
AIM/Hub-Japan	一般均衡	逐次解	BECCS	国内	バイオ燃料	2.4
AIM/Technology-Japan	部分均衡	逐次解	BECCS, DACCS	国内	水素、アンモニア、合成燃料	2.1
DESOM	部分均衡	通時解	BECCS, DACCS	国内	該当なし	1
IEEJ-NE_Japan	部分均衡	通時解	BECCS, DACCS	国内および海外へのCO ₂ 輸出も考慮	水素、アンモニア	2023
TIMES-Japan	部分均衡	通時解	BECCS, DACCS	国内	水素、アンモニア、カーボンニュートラル合成ガス	3.4

※どのモデルもバイオマス、DAC、CCSを個別に考慮し、システム全体としてBECCS、DACCSを考慮している。DAC: direct air capture, CCS: carbon capture and storage, DACCS: direct air carbon dioxide capture and storage, BECCS: bioenergy with carbon capture and storage.

表 1-2. メインシナリオ.

シナリオ	説明
BASELINE__deftech	既存の炭素の価格付けを超えたような大きな明示的な炭素価格を含まない成り行きシナリオ
100BY50__deftech	2013年比で2030年までの排出削減量を46%として、2050年までに100%を排出削減する。国が決定する貢献(nationally determined contribution, NDC)と長期戦略に整合的な排出削減目標を想定している。本プロジェクトではCO ₂ のみ扱うモデルもあり、排出制約はCO ₂ について与えることとした(CO ₂ と同じ限界削減費用を他のガスにも適応することでモデル内の整合性を取っている)。

表 1-3. 政策目標に関する感度解析シナリオ.

シナリオ	説明
100BY50__YY	2030年までの排出削減量を46%として、2050年までに100%を排出削減する。ただしYYには技術感度解析の設定が入る。YY=deftechの場合、技術に関して標準的な仮定を適用し、表 1-2 の100BY50__deftechと同じになる。
105BY50__YY	2050年のCO ₂ 排出削減量を105%とするシナリオ
110BY50__YY	2050年のCO ₂ 排出削減量を110%とするシナリオ

表 1-4. 技術イノベーションに関する感度解析シナリオ.

シナリオ	説明
XX__deftech	デフォルトの技術仮定。
XX__re	太陽光発電と風力発電のコスト(資本とO&Mの両方)は、2030年から標準の値から時間的に線形に低減させ、2050年までに半減する。またCDRの年間導入量を最大100MtCO ₂ /yrに制限した。それ以外の技術前提は、XXX__deftechと同じである。
XX__import	カーボンフリーのエネルギー輸入コスト(水素(H ₂)、(クリーン)アンモニア、e-fuel、カーボンニュートラルLNGなど)。化石燃料価格は変更しない。またCDRの年間導入量を最大100MtCO ₂ /yrに制限した。それ以外の技術前提は、XXX__deftech

	と同じである。
XX__cdr	XX__deftechと同じ。ただし、CDRの最大導入量は全体を通して100 Mt-CO ₂ /yrに制限される。
XX__innov	最良の技術革新ケース。他のシナリオの良いケースの組み合わせ。

※CDRの制約は他のシナリオにも共通で、排出削減の対象となるエネルギーと産業プロセス、DACCS（BECCS、DACCS、利用など）からのCO₂に直接関係するものに限定される。製品からの排出時期は、モデルのデフォルト値に従う。植林等は除外する。CDRの100MtCO₂/yrという数字は厳密に定められたものではないが、スウェーデンがネットゼロ達成にむけて15%までを植林などの補完的措置で扱う方針を示していることなどを考慮している。また政府のCDRやCCSの検討でも100Mtのオーダーの数字が議論されている。

再生可能エネルギーの技術感度解析の設定の例を図1-2に示す。Cost databaseはサブテーマ4が構築した各種技術の将来コスト推計のデータベース（イノベーション・データベース）の値を示している。deftechが各モデルの標準的な設定で、reがコスト減少のシナリオである。reシナリオのコスト低減はイノベーション・データベースの下側に位置することが見て取れる。（なお、このグラフは為替にも依存することに注意されたい。）

ライフスタイル変容についてはサブテーマ2と議論を行い、またサブテーマ1でも需要側対策についてのレビューを行った（その結果の一部は成果番号4としてまとめた）。需要側シナリオについては今回のモデル比較のような統合評価モデルやエネルギーシステムモデルでは直接扱うことに限界があることがあるため、統合評価モデル・エネルギーシステムモデルでの直接的な分析は行わず、サブテーマ2で食のトランジションに限定して扱うこととした。

シナリオ・データベースの構築にあたっては、IIASAの協力を受けた。データベースのソフトウェアはIPCCで使われている標準的なデータベースの枠組みであるIIASA Scenario Explorerを用い、またデータ形式も同様にIPCC使われているIntegrated Assessment Modeling Consortium (IAMC)のデータ形式を用いた。なお、今回の分析対象である直接空気回収(direct air capture)についてはデータ・テンプレート自体の更新も必要となるため、調整を行った（サブテーマ3が主の成果、成果番号68）。

3. 3. 政策ミックス分析

サブテーマ2と協力し、重層的視座（multi-level perspective）と関連研究から政策ミックスの具体的な知見を得るために、CDRと水素を対象に政策ミックス分析を行った。この二つは部分的に技術感度シナリオのXXX__cdrとXXX__importに対応している。

分析の枠組みは表1-5を用いた。この表では、社会政治と技術経済を一体的に見る社会技術システムの観点で、技術の普及段階（萌芽期、成長期、再構成期）に応じて必要な政策を分類している（成果56、成果7（サブテーマ2が主））。

対象国は、CDRについては日本、米国、欧州連合（EU）、英国、水素関連技術については日本と米国とし、文献調査によって現行政策を調査した。その後、表1-5に示した政策ミックスの枠組みを用いて比較し、相互にベンチマークを行った。CDRと水素については表1-5の最後の再構成期に到達している国はないため、分析から除外した。

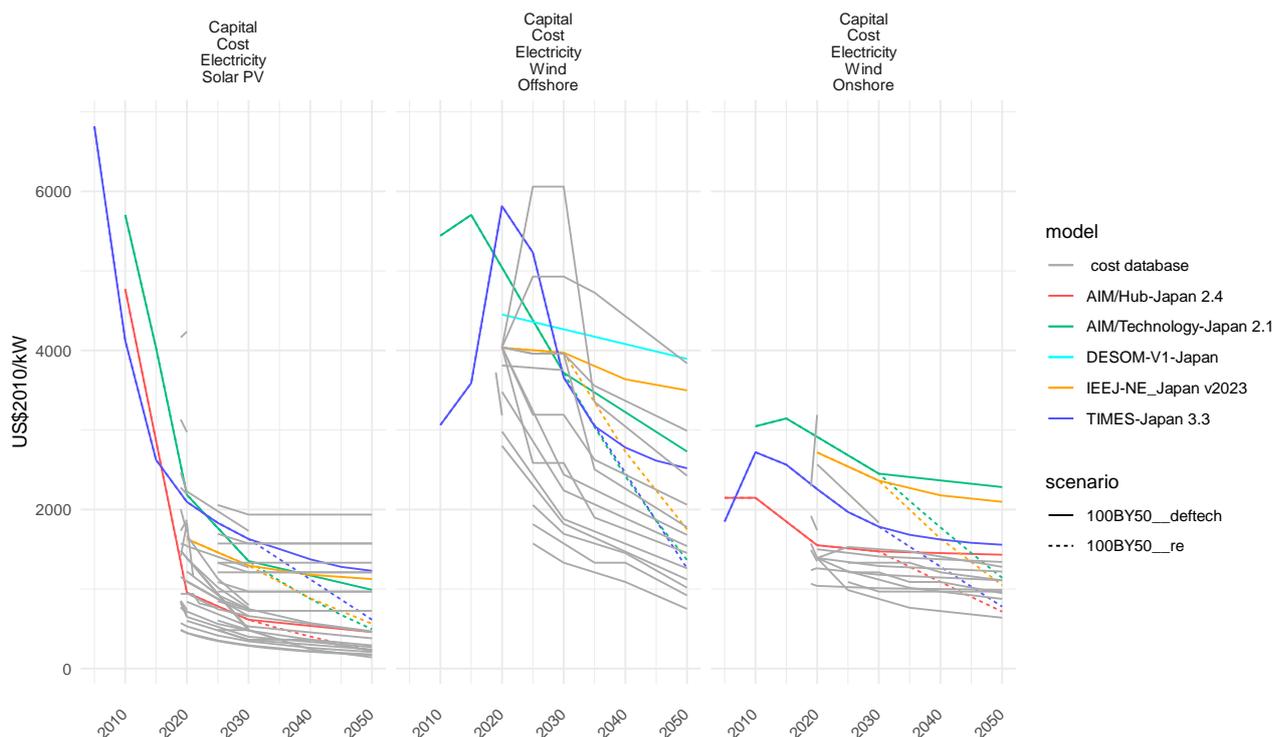


図1-2. モデルにおける再生可能エネルギー（太陽光発電と陸上・洋上風力発電の資本費）の将来推定（サブテーマ4の成果、詳しくは図4-1, 4-2, 4-3を参照）とモデル内の仮定の比較。

表1-5. 政策ミックス分析の枠組み（詳細についてはサブテーマ2、特に表2-1を参照）

萌芽期 (技術の普及S字カーブの立ち上がりの前あたり)	成長期 (技術の普及S字カーブの立ち上がりの近傍)	再構成期 (技術の普及S字カーブの飽和段階のあたり)
①方向性やビジョンの提示、長期目標の設定 ②技術見通し ③研究開発 ④新規参入者への支援 ⑤ネットワーク形成 ⑥普及啓発、情報提供 ⑦科学的知見の整理	①市場形成（補助金、政府調達等） ②価格付け（炭素税等） ③市場バリアの除去（情報提供等） ④既存技術を優遇する補助金や規制等の改革	①標準化（規制・基準等） ②新たに生まれた歪みへの対応（退出アクターへの手当等）

3. 4. 脱炭素に関する新たな研究手法についての検討

本研究課題の中心はシナリオ研究とトランジション研究であるが、2050年正味排出ゼロの議論の際には、しばしば実現可能性が議論の俎上に上り、メディア等でもそのような議論がよくなされている。一方で、これらのシナリオの実現可能性を評価する研究は十分に実施されてきていない。具体的には、脱炭素移行の実現可能性を議論した先行研究は、統合評価モデル等の数理シミュレーションを用いて主に技術経済的な側面に焦点を当てて評価されてきており、各国の状況や地域の社会文化的特徴など、より広範な文脈を考慮することはほとんどされていなかった。そこで、シナリオ研究・トランジション研究に加えて、新たな研究手法として専門家アンケート調査を実施することにした。

そこで、本研究課題では、技術経済面だけでなく、社会制度などの広範な側面を考慮可能な新しい評価フレームワークを提案した。提案した評価フレームワークは、既往研究を踏まえた実現可能性に関する4つの提議（①実現可能性は有か無かの二値ではなく確率的なものである／②実現可能性に影響を与える障壁が存在する／③実現可能性と望ましさは異なるが関係している／④実現可能性は多様な視点から検討されるべき）に基づき設計した。具体的には、①実現可能性を生起確率により評価する／②実現

可能性とともに障壁を併せて評価する／③実現可能性と望ましさを分けて評価する／④幅広い分野の専門家から調査協力を得ることにより、4つの提議に基づく評価フレームワークを設計した。加えて、提案したフレームワークを用いて工学・社会科学・理学等の様々な分野で気候変動問題を研究している日本国内の108人の専門家を対象にアンケート調査を行い、日本の脱炭素移行の実現可能性を評価した。

4. サブテーマ1 結果及び考察

4. 1. 中心的なシナリオの結果

図1-3にモデルの100BY50_deftechシナリオの結果を示す。総排出量はNDC、長期戦略に整合的に減るが、具体的な削減の内訳の詳細はモデルによって異なる。どのモデルでも民生部門の排出量削減率は大きいが、2050年時点で産業部門や運輸部門の排出量が残る傾向にある。この残余排出をCCS付きバイオマス・エネルギー（BECCS）や直接空気回収で相殺することになる（詳しくは後述）。つまり、2050年では残余排出とCDRによる吸収量がつり合い、正味ゼロ排出が達成されている（成果番号5, 56）。

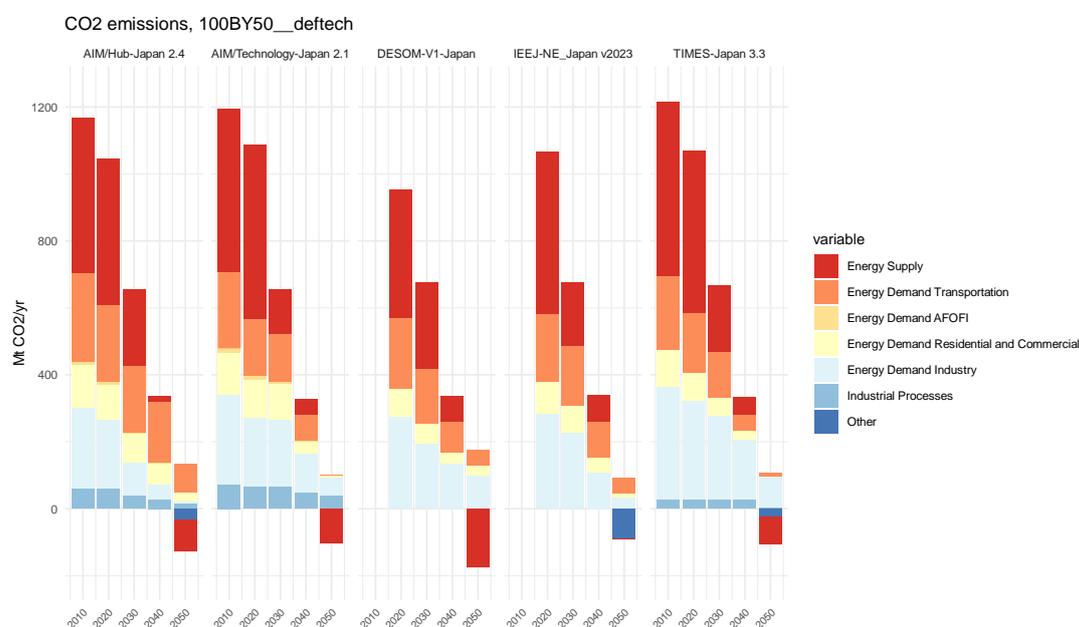


図1-3. 各モデルの100BY50_deftechシナリオにおける二酸化炭素排出量・吸収量の時系列

図1-4に緩和策の主要な戦略を示す指標を図示した。GDPあたりのエネルギー消費を見ると、経済全体でエネルギー効率化（省エネルギーおよびエネルギー需要減）が進むことが分かる。また発電部門の排出原単位は2050年にはゼロまたは負になる。図1-3で示したようにCDRが展開されるが、負の排出原単位は二酸化炭素回収貯留（CCS）付きバイオマス発電が利用されていることを示す。発電部門からの排出がゼロまたは負値に移行していくと同時に、最終エネルギー消費に占める電力の割合、つまり電化率が上昇していく。また一次エネルギーに占める化石燃料の割合も減少していく。電化率や化石燃料の割合などはモデルによるばらつきが見られるが、大まかな傾向は頑健（ロバスト）と言える。この知見はIPCCの第6次評価報告書や、本研究課題の先行課題2-1704と同じ傾向であり、日本の2050年目標でも同様な知見が活用できる。

100BY50_deftech

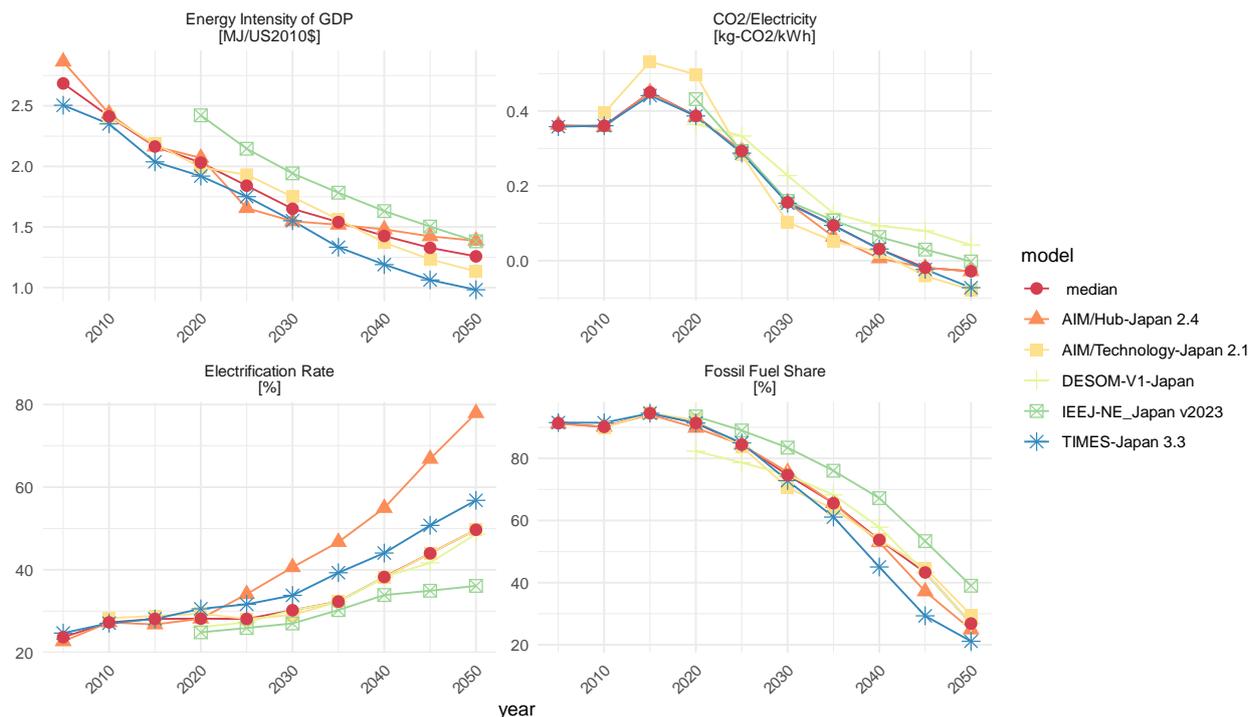
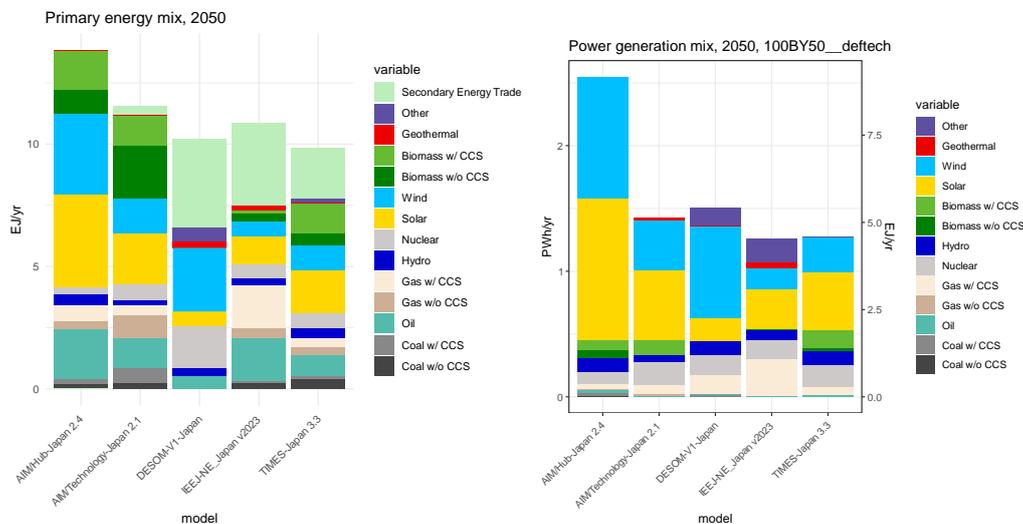


図1-4. 主要な緩和策の指標。左上：GDPのエネルギー原単位、右上：電力部門のCO₂原単位、左下：最終エネルギー消費に占める電力の割合（電化率）、右下：一次エネルギーに占める化石燃料の比率。モデルの中央値は赤丸(median)で示している。

次にエネルギー構成について、一次エネルギー、発電量、最終エネルギー消費を見る（図1-5）。2050年の断面にしぼると、どのモデルでも太陽光発電や風力発電が主力化し、大きな割合を占めることが理解できる。しかし、具体的な導入量はモデルによって異なり幅が見て取れる。発電構成に占める水素やアンモニア等の輸入クリーン燃料（図の紫色のOther）はDESOMとIEEJで一定の割合を占めるが、そのほかのモデルでは見られない。これは水素や輸入燃料のイノベーションの不確実性を示唆する。なお、輸入クリーンエネルギーは一次エネルギーで見ると大きな割合を占めることが分かる。クリーンエネルギー輸入は脱炭素には貢献するが、エネルギー自給率の確保の観点からは問題が残る。最終エネルギー消費は前述の頑健（ロバスト）な戦略から明らかのように電力が非常に伸びる。



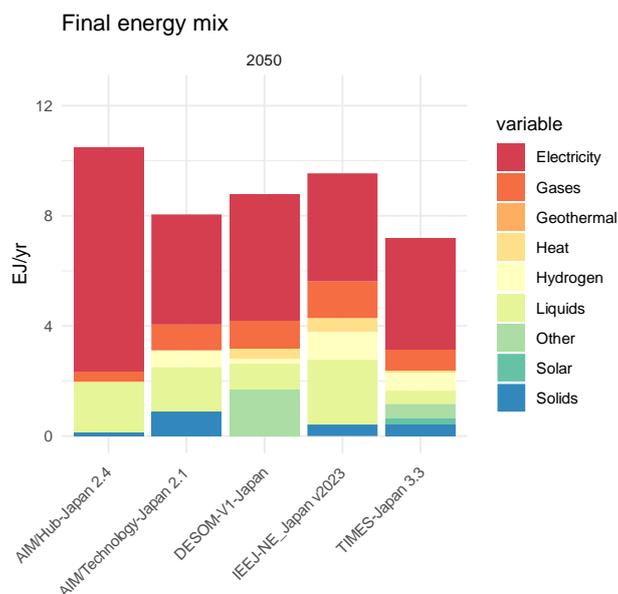


図 1 - 5 . 2050年時点での一次エネルギー構成（左上）と発電構成（右上）、最終エネルギー構成（下） .

（植林や土地利用関連を除いた）CDRの量については以下のようなになる（図 1 - 6） . 100MtCO₂/yrのCDRが必要になることが理解できる（成果番号5） . これは現在の日本の総排出量の10%のオーダーに相当する . 10%という値はスウェーデンや米国の政策や分析例と比較しても大きく変わらない値である . CDRの種類は、IEEJ-NE_JapanモデルではDACCSが中心であるのに対し、それ以外の3つのモデルでBECCSが大宗を占める .

この図からCDRは2050年までには大規模に導入されるものの、現時点では（以前から存在する森林吸収源を除いて）大規模には存在せず、技術の普及段階から考えれば萌芽期に該当するといえる . したがって、技術についてはその種類・導入量ともに大きな不確実性が存在することに注意されたい .



図 1 - 6 . 100BY50_deftechシナリオにおけるCDRの導入量 .

図1-7にCO₂の排出削減量を変化させたときのGHGの排出削減量を示す。モデルにおける設定で地球温暖化ポテンシャル（GWP）に応じた統合的な炭素価格がかけられている。AIM/HubモデルではGHGでの正味ゼロ排出はCO₂での105%排出削減から110%排出削減の間、AIM/Technologyモデルでは同様にGHG正味ゼロ排出は100%排出削減から105%排出削減の間に収まることが見て取れる。CO₂以外のGHGでは吸収が難しいと思われており、その分、CO₂が多めにCDRする必要があるからである。GHG正味ゼロ排出がどのCO₂排出削減量に対応するかはモデル内部での様々な排出削減やCDRの限界削減費用に依存するため一意に決めることはできない。しかしこの2つのモデルの結果から、CO₂の105%排出削減がGHGの100%削減相当であることが理解できる。

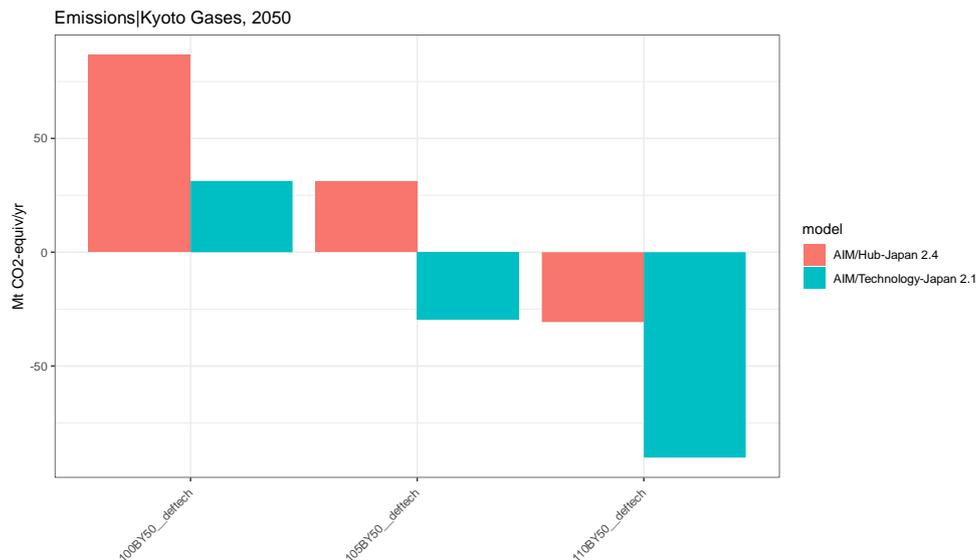


図1-7. 複数のGHGを対象にしたモデルにおける温室効果ガス排出量の変化。

4. 2. 技術・政策シナリオによる感度解析

分析するモデルの選び方に依存しない頑健な対策として省エネルギーや電源脱炭素化（または低炭素化）、電化、化石燃料の大幅削減を示したが、シナリオの仮定を変えても頑健であることが確かめられる（図1-8）。

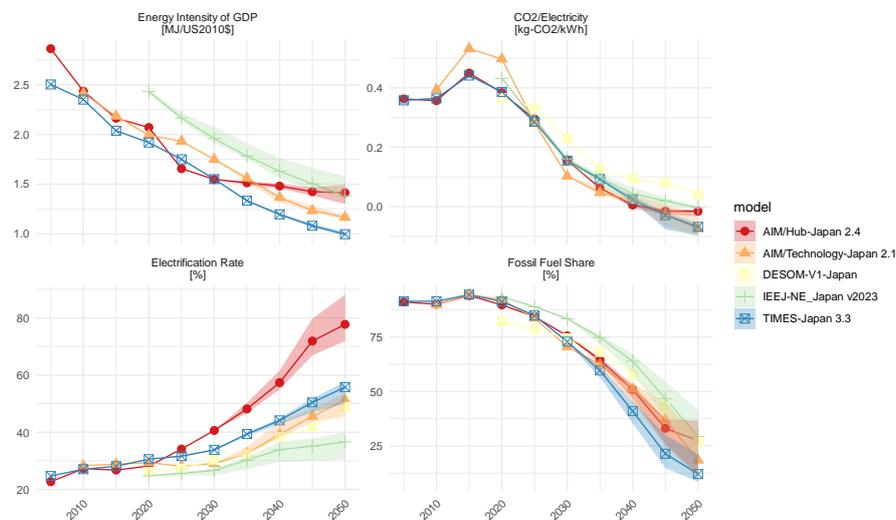


図1-8. 図1-4と同じであるが、感度解析シナリオを全て含めてリボンで示している。実線は中央値である。

次に、発電量の技術と政策に関する感度実験の結果を示す（図1-9および図1-10）。発電総量だが、その感度はモデルによって異なる。例えばAIM/Hubモデルはシナリオによる技術の仮定を変更すると発電総量が大きく変化するが、排出制約を100BY50から110BY50と変化した場合、発電量は逆に減少する。一方、IEEJ-NE_JapanおよびTIMES-Japanモデルは技術や政策の仮定によらず発電総量がほとんど変化しない。

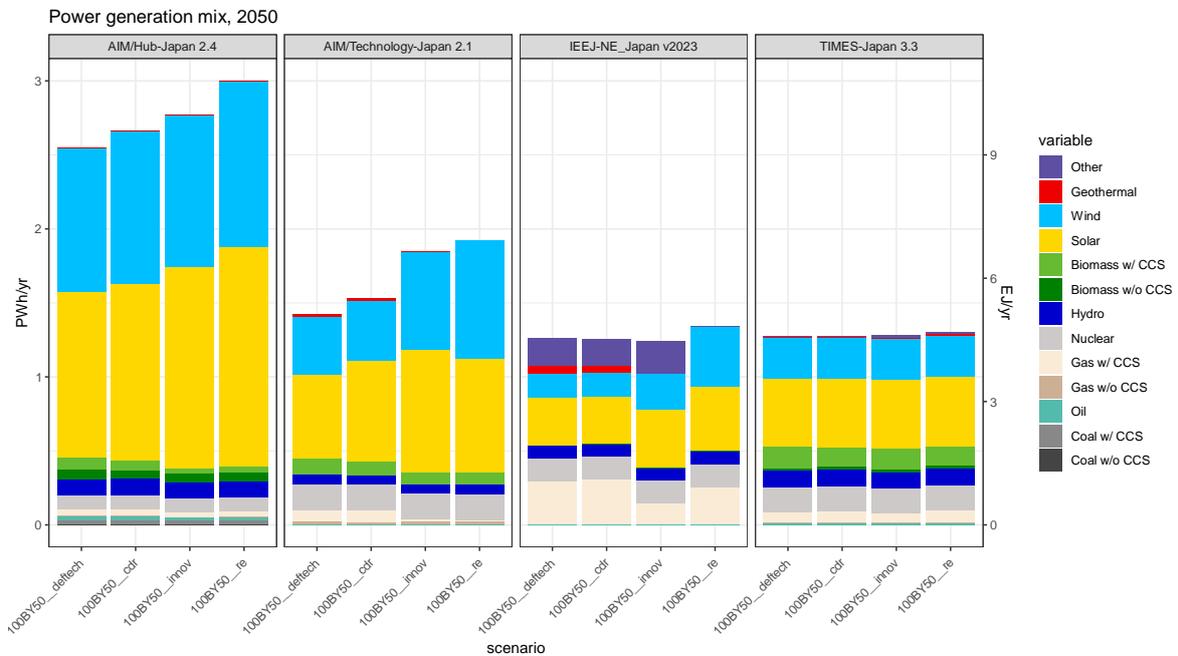


図1-9. 2050年のシナリオ（技術感度解析シナリオ）、モデルごとの発電構成。

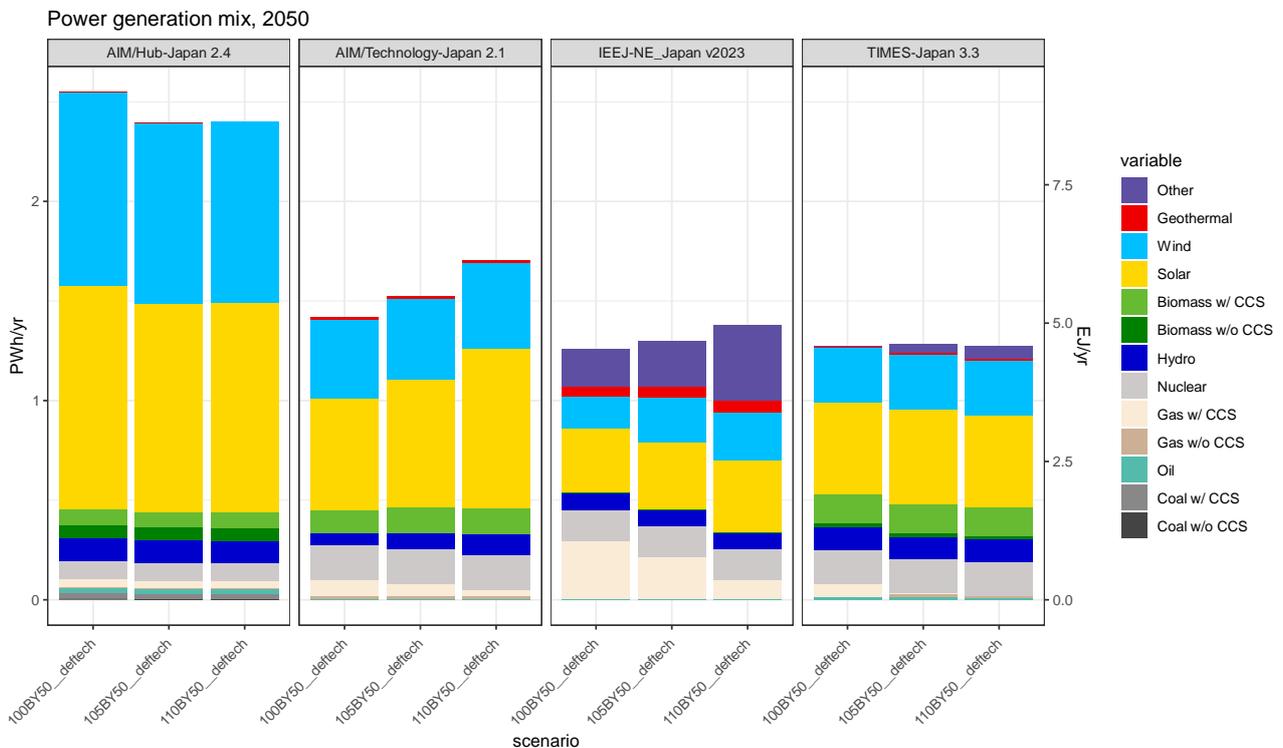


図1-10. 2050年のシナリオ（政策目標感度解析シナリオ）、モデルごとの発電構成。

次にコストの指標として、割引・平均した炭素価格 $\left[\sum_t \frac{p(t)}{(1+r)^t} \right] / \left[\sum_t \frac{1}{(1+r)^t} \right]$ を計算した (図 1-1

1)。Importシナリオの影響はモデルによって異なり、解釈が難しい。Importを除いて特に105%削減シナリオに注目すれば、コストの低い順番におおむねInnov < deftech < re < cdrという順番になる。再生可能エネルギー、CDRともにコストへの影響が大きい。さらに110%削減シナリオを見るとCDRを制約する場合解が得られないシナリオもあるため、CDRの制約の方がコストへの影響が大きいと言える。

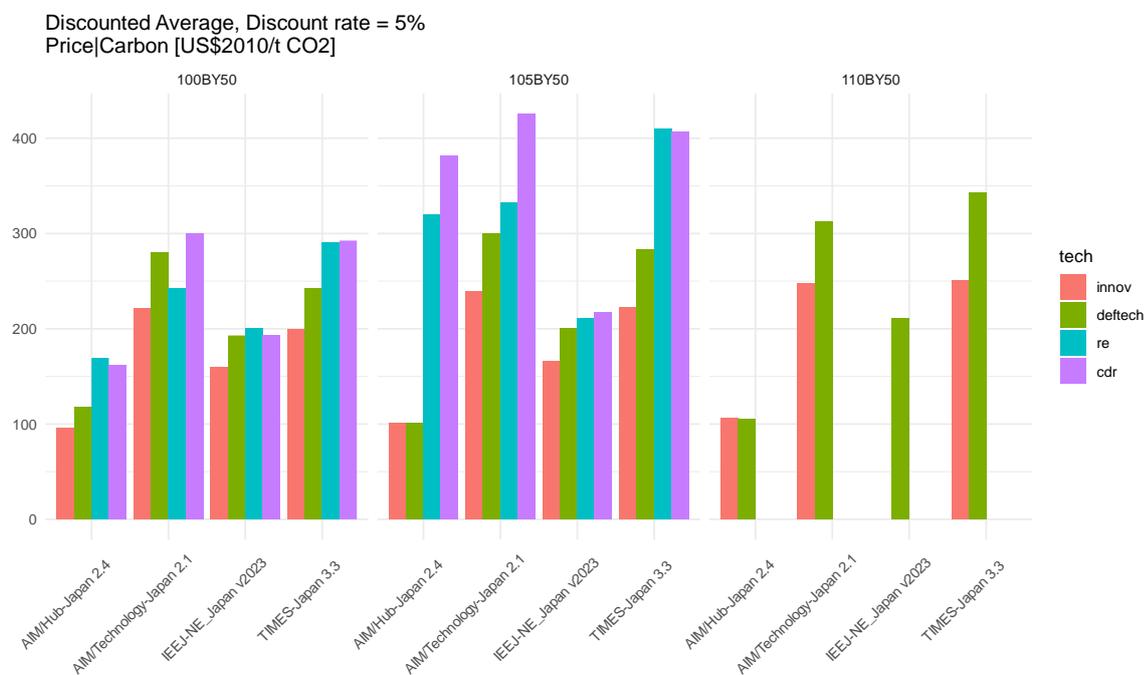


図 1-1 1. 割引炭素価格のモデル、シナリオごとの比較。

4. 3. トランジション研究の知見を踏まえた政策ミックスのギャップ分析

以上の複数モデルのシナリオ分析から省エネルギーや電源の脱炭素化、電化など頑健な対策が同定された。すでに日本では様々な政策が実施されてきているが、本研究課題で同定された対策で十分に議論されていないのがCDRである。図 1-6 を見れば分かるようにCDRは萌芽段階にある。(2030年ではほぼ導入量が見られない)そこでCDRの政策ミックスについて分析することにした(成果番号56)。また、同じく萌芽段階にある技術として、水素関連技術を分析対象として選定した。

まず、日本、米国、欧州連合、英国のCDRについて検討する。萌芽期の政策について述べれば、目標設定に関しては、米国ではCarbon Negative Shotによって、2050年までに大気中からギガトン単位でCO₂を回収し、1トンあたり100ドル未満で永続的に貯留するという具体的な目標を設定して政策を推進している。また、EUではSustainable Carbon Cyclesにおいて「2030年までに、500万トン/年を大気中から除去し、地中に恒久的に貯留」としており、イギリスでもNet Zero Strategyによって2030年までに少なくとも年間500万トンCO₂を人工的に除去すること、DACその他のGGR (Greenhouse Gas Removals)に1億ポンドの資金を提供することをコミットしている。一方で、日本では技術の紹介にとどまっており、温暖化対策においてCDRの位置づけがまだ明確にされていない。

技術開発への支援については、米国ではエネルギー省を中心にCCSに関する研究が長年実施されてきたが、2018年よりDACに関する研究開発が開始されている。DACをテーマにした個別の公募型の研究開発事業が多数実施され、また革新的な技術開発を行うARPA-Eのプログラムにおいても当該分野の研究開発が行われてきている。EUでは、研究開発プログラムのHorizon Europeから様々なCDR技術に支援が行われている。CDRに直接的、間接的に関連する活動に1億8,500万ユーロ(34プロジェクト)、直接関連す

るプロジェクトのみでは1億6,100万ユーロ（28のプロジェクト）が支援されているとの報告がある。イギリスでもGGRに関する様々な研究開発への支援が数多く実施されており、DAC、BECCSだけでなく、バイオチャー、岩石風化などの研究に対して支援が行われている。

日本でも、ムーンショット型研究開発制度においてDACに関する研究開発が開始されたが、それ以外のNEDOや環境省予算の事業では、当該分野を主目的とした開発は行われておらず、水素やバイオマスなど他分野の研究開発の一部で実施されているものが存在する程度である。

成長期について検討すると、米国では、2023年8月に100万トン/年規模の商業プラントを建設する2つの事業へ総額12億ドルの補助を決定し、成長期に入ったといえる。大型事業への助成は2件にとどまらず、商業化を目指した設計やFS調査についても引き続き支援が行われている。また、最大180ドル/トンの税控除制度（45Q）の存在が、長期的に導入を支援するものとなっており、テキサス州では既に50万トン/年規模のDACプラントが着工するなど、本分野の成長を促す強力な政策となっている。なお、このプラントで発生するCDRクレジットについては日本のANAやAmazonなどの企業が購入を発表している。さらに、エネルギー省はCDR Purchase Pilot Prizeにおいて、CDRクレジットを最大3,500万ドルまで購入する予定を発表した。DACだけではなく風化によるCDRなど現状ではさほど流通していないボランティアクレジットの普及を促すものとなっている。

EUでは、EU Innovation Fundから各種事業を支援する制度があり、ストックホルムでのBECCS事業に補助することが2022年4月に発表されているが、CDRに関するプロジェクトを包括的に支援する政策は現時点ではない。Sustainable Carbon Cyclesに基づき、2022年11月にEU全域を対象とした炭素除去認証枠組（Carbon Removal Certification）に関する規則案を提案しており、排出量取引における除去の扱いについても、2023年5月に採択・発行したEU ETS指令改正案において、EU ETSにおけるネガティブエミッションの扱いについて、欧州委員会が欧州議会及び理事会に2026年7月までに報告を行うことを明記している。

イギリスでも現時点では包括的な支援策はないが、GGR導入拡大に向けて炭素差額決済による値差補填、政府調達、政府による余剰クレジット買取り等の手法が検討されている。BECCSについても、電力と炭素除去それぞれに対する差額補填の仕組みを検討している。2023年中には、ビジネスモデルの詳細設計と実装に関するプロポーザルが行われる予定となっている。また、UK ETSに関しても、関連する意見を募集し準備が行われている。

日本では、バイオ炭に関してJクレジットでの方法論が採用され、具体的なプロジェクトも登録され始めた。またDACについての方法論も検討中である。しかし、DACやBECCSプラントの建設を促進するような市場形成策はまだ存在しない。

水素に関しては、米国と日本の政策について、萌芽期、成長期、再構成期に分けて表2のように整理した。CDRと同様に規模の大きい政策等について太字とした。

萌芽期に関して述べると、米国では2021年6月に発表されたHydrogen Shotにおいて、クリーンな水素のコストを今後10年で80%削減し、1kgあたり1ドルに削減することを目標に設定した。2023年6月には、U.S. National Clean Hydrogen Strategy and Roadmapが発表され、国内でのクリーン水素の生産量を2050年までに5,000万トンまで増加させることで、GHG排出量を2005年比で10%削減することを見込んでいる。エネルギー省では、様々な技術開発への支援を長年実施してきており、最近では水素製造技術や派生品である合成燃料に関するもの、さらには普及後の関連機器のリサイクルに関する分野、自然に存在している天然水素の開発技術など、多岐にわたって支援を行っている。

一方、日本ではこれまで燃料電池の開発に力を入れてきており、NEDOでは2005年から燃料電池・水素技術開発ロードマップを発表、更新してきている。政府においても水素・燃料電池戦略ロードマップを2014年に策定し、家庭用燃料電池や燃料電池自動車、水素ステーションに係る自立化に向けた道筋や定量目標等が盛り込まれた。2017年には世界で初めて水素基本戦略を策定し、2023年6月にその改定を行った。この改定では新たに2040年目標を1,200万トンと設定した。NEDOでは、燃料電池・水素関連の技術開発事業を実施してきており、2021年3月には、2兆円規模のグリーンイノベーション基金が造成され、この基金の予算においても、水素関連分野に支援が行われている。

成長期については、米国ではインフレ抑制法によって、クリーン水素の生産に関し最大\$3/kg-H₂の生産額控除か、投資額の最大30%の投資税額控除を選ぶことができる税控除制度が用意されている。Regional Hydrogen Hubsでは、クリーン水素の生産・加工・輸送・貯蔵・利用を一体的に実証するためのクリーン水素地域ハブの構築に総額80億ドル（1.1兆円）を助成する予定で、2023年10月に7か所が選ばれた。環境保護庁では、火力発電所に対する排出規制を強化する案を発表しており、新規・既存のガス火力発電所は、2035年までにCO₂排出量の90%を回収する装置を導入するか、低炭素水素を2032年までに30%、2038年までに96%混焼することを求めている。

日本では、燃料電池自動車の購入や水素ステーションの整備に対する補助金が用意されている。またJOGMECでは、日本の企業が行う海外での水素生産関連の事業に対して、出資・債務保証を行う制度を設けた。現在、クリーン水素の生産や消費を支援するため、値差支援制度を設けるための法案が国会審議中である（本稿執筆時点）。海外では米国以外でも競争を急ぐようにこのような制度が成立しており、日本においても迅速な実施が期待される場所である。

ここではCDRと水素について掘り下げたが、サブテーマ3の炭素の価格付けの逆進性の問題や、サブテーマ4のイノベーションの不確実性、サブテーマ5のセクターカップリングも政策ミックスで整理することが可能である。特にサブテーマ3と5の結果は再構成期の課題と解釈できる。

表1-6. CDRについての政策ミックスの国際比較。

	政策の種類	米国	EU	イギリス	日本
萌芽期	①方向性やビジョンの提示、長期目標の設定	・ Carbon Negative Shot (ギガトン単位で大気中から回収 (2050年))	・ Sustainable Carbon Cycles (500万トン/年 (2030))	・ Net Zero Strategy (2030年までに500万トン/年)	・ CDR技術の紹介 (地球温暖化対策計画、ネガティブエミッション市場創出に向けた検討会)
	②技術見直し	・ LTS (DAC2億トン/年 (2050))		・ Net Zero Strategy (7,500~8,100万トン/年 (2050))	
	③研究開発	・ 各種補助 (DOE等多数) ・ 賞金制度 (DAC Prize)	・ 補助 (Horizon Europe)	・ 各種補助 (GGR事業)	・ 委託/補助 (ムーンショット事業、NEDO、環境省)
	④新規参入者への支援	・ 各種補助 (実証等)		・ 各種補助 (GGR事業)	
	⑤ネットワーク形成	・ ワークショップ (DOE等)		・ CO ₂ RE - The Greenhouse Gas Removal Hub	
	⑥普及啓発、情報提供	・ 関連ホームページの整備、イベント開催			・ イベント開催 (ムーンショット事業)
	⑦科学的知見の整理	・ 報告書データベース			・ 報告書データベース (NEDO)
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)	・ GGR business models (準備中)	・ 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)	・ UK 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				

表1-7. 水素関連技術に関する政策ミックスの国際比較.

	政策の種類	米国	日本
萌芽期	①方向性やビジョンの提示、長期目標の設定 ②技術見通し	<ul style="list-style-type: none"> Hydrogen Shot (今後10年で1kgあたり1ドルに) National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap (国内生産量: 1,000万トン(2030)、2,000万トン(2040)、5,000万トン(2050)) 	<ul style="list-style-type: none"> NEDO燃料電池・水素技術開発ロードマップ 水素・燃料電池戦略ロードマップ 水素基本戦略(導入目標: 300万トン(2030)、1,200万トン(2040)、コスト目標: 30円/Nm³(2030)、20円/Nm³(2050))
	③研究開発 ④新規参入者への支援	<ul style="list-style-type: none"> 各種補助(DOE、その他省庁) 	<ul style="list-style-type: none"> 委託/補助(NEDO、イノベーション基金、環境省)
	⑤ネットワーク形成 ⑥普及啓発、情報提供	<ul style="list-style-type: none"> ワークショップ(DOE等)、関連ホームページの整備、イベント開催 	<ul style="list-style-type: none"> イベント開催(NEDO等)
	⑦科学的知見の整理	<ul style="list-style-type: none"> 報告書データベース 	<ul style="list-style-type: none"> 報告書データベース(NEDO)
成長期	①市場形成(補助金、政府調達等) ②価格付け(炭素税等) ③市場バリアの除去(情報提供等)	<ul style="list-style-type: none"> 税控除(最大\$3/kg-H₂ or 30%投資税額控除) Regional Hydrogen Hubs(80億ドル補助、7か所が決定) Loan Guarantee Program(政府債務保証) H2 Matchmaker Low Carbon Fuel Standard(CA州等) 	<ul style="list-style-type: none"> JOGMECによる出資・債務保証 値差支援制度(予定) 補助(イノベーション基金(予定))
	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	<ul style="list-style-type: none"> Clean Hydrogen Production Standard 石油関連企業向け研究開発助成 EPAによる火力発電規制案(低炭素水素を2032年までに30%、2038年までに96%混焼) 	

4. 4. 気候変動専門家の認知に基づく日本の脱炭素移行の実現可能性評価

アンケート調査の結果、調査した108名の専門家のうち、半数以上の専門家が日本の2050年の排出目標としては、ネット・ゼロ目標が望ましいと評価した(図1-13(a))(成果番号2)。一方、ネット・ゼロ目標の実現可能性については、33~66%の確率と認識している専門家の割合が最も多く、全体の約4割を占めていた(図1-13(b))。それぞれの専門による認識の差を分析した結果、技術経済的な評価を中心的に実施してきた専門家(統合評価モデルIAM研究者や気候変動に関する政府間パネル(IPCC)報告書の著者)とそれ以外の専門家の間で、実現可能性評価の分布(すなわち、実現可能性の認識)が異なっていることがわかった(図1-13(b)の2行目、3行目のグラフの比較より)。この結果から、研究コミュニティ内、および、研究コミュニティ間で、ネット・ゼロ目標の実現可能性について、知見や認識を共有・検討する機会を増やすことが望ましいと考えられる。

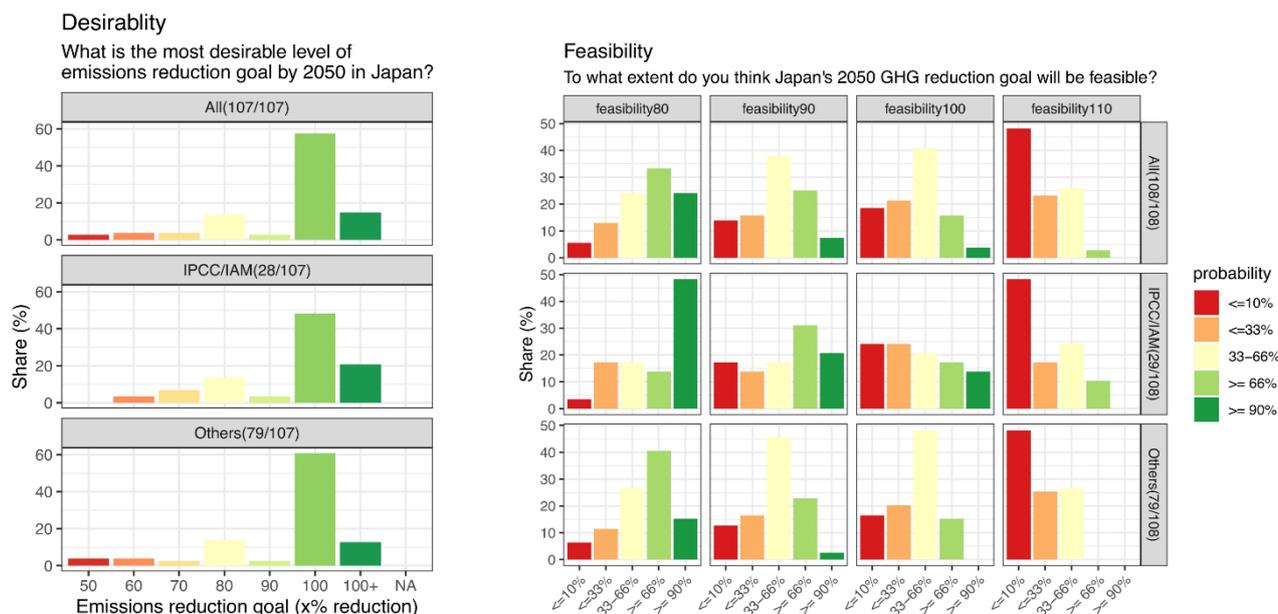
また、アンケート結果に基づき、脱炭素移行の障壁となりうる要因のリスクの認知を分析した結果、専門家は、ネット・ゼロ・システム移行の実現可能性に影響を与える主要な障壁として、国家戦略の不足やクリーンエネルギー供給の限界など、日本特有の国情などを反映した要因を認識していることが明らかになった。

その他の関連研究も学術論文等にまとめて公表した。

5. サブテーマ1研究目標の達成状況

サブテーマ1が全体統括をし、全てのサブテーマが協力シナリオ設計を行った。複数の統合評価モデル・エネルギーシステムモデル(AIM/Hub, AIM/Technology, DESOM, IEEJ_NE-Japan, TIMES-Japan)(サブテーマ3~5)からのデータを収集し、シナリオ・データベースを構築した(成果番号5, 56)。革新的イノベーション政策については、水素技術と直接空気回収(direct air capture)技術を例

に、トランジション研究で開発された政策ミックス・パッケージの枠組みに基づき、国際的に日本の政策をベンチマークし、日本（ひいてはアジアにおいて）では研究開発やカーボンプライシングに加えて補助金や政府調達といった市場形成の大幅な強化が必要であることを明らかにした。ライフスタイル変容については文献調査を行い統合評価モデルやエネルギーシステムモデルにおける課題を明らかにした（成果番号4）。国際的科学的アセスメントについては研究代表はIPCCに代表執筆著者として参画し、またState of CDRにも参加している。全体を通じて（サブテーマ1が主として）6本の査読付き学術論文を公表した。さらに、シナリオに関する追加的な分析（実現可能性に関する専門家アンケート調査、成果番号2）など、当初の計画を超えた成果も生み出した。



(a) 2050年の排出削減目標別の望ましき

(b) 排出削減目標の実現可能性の認知

図1-1-3. 気候変動専門家への対面アンケート調査の結果 (n=108)

サブテーマ1 参考文献

Fujimori, S., Oshiro, K., Shiraki, H., & Hasegawa, T. (2019). Energy transformation cost for the Japanese mid-century strategy. *Nature Communications*, 10(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12730-4>

Kato, E., & Kurosawa, A. (2021). Role of negative emissions technologies (NETs) and innovative technologies in transition of Japan's energy systems toward net-zero CO₂ emissions. *Sustainability Science*, 16(2), 463-475. <https://doi.org/10.1007/s11625-021-00908-z>

Kawakami, Y., Komiyama, R., & Fujii, Y. 2018. Penetration of Electric Vehicles toward 2050: Analysis Utilizing an Energy System Model Incorporating High-Temporal-Resolution Power Generation Sector. *IFAC-PapersOnLine*, 51(28), 598-603. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.11.769>

Oshiro, K., Fujimori, S., Ochi, Y., & Ehara, T. (2021). Enabling energy system transition toward decarbonization in Japan through energy service demand reduction. *Energy*, 227, 120464. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120464>

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: An analysis considering siting constraints on variable renewable energy. *Electrical Engineering in Japan*, 215(4), e23396. <https://doi.org/10.1002/eej.23396>

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. <https://doi.org/10.1016/j.egvcc.2023.100108>

今川, 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), 1-13. https://doi.org/10.24778/jjser.44.1_1

II-2 サブテーマ2 「脱炭素トランジションの理論的フレームワークと日本への応用」

[サブテーマ2 要旨]

サブテーマ2では、トランジション研究における社会技術システム分析アプローチに着目し、以下の3つの研究項目を実施した。(1) トランジション研究における社会技術システム分析アプローチを構成する主な理論フレームについて包括的な文献レビューを行い、理論形成の経緯と主な概念を整理することを通じて理論的基礎を確認した。また、これら理論フレームの近年の展開動向を概観した上で、トランジションのフェーズに応じた幅広い政策ミックスを導出した。(2) 社会技術システム分析と統合評価モデルを用いたシナリオ分析との接合について検討するため、両分野から第一線の研究者が参加して実施された国際研究プロジェクト「PATHWAYS」を取り上げ、プロジェクト内での異なる研究アプローチ間の協働体制等をレビューするとともに、成果として発表されたシナリオ等のレビューを行った。これに基づいて、本課題での社会技術システム分析とシナリオ研究の接合の方向性を検討した。その結果、定量的シナリオ分析と社会技術システム分析の相互参照やフィードバックはより多面的なシナリオ作成や政策的示唆の導出に繋がり得るものの、両アプローチの一体的な統合は困難であることがわかった。そこで本研究課題ではより平易な接合方法を志向し、特に定量的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行うことが有益と考えられることを導いた。(3) 脱炭素化において重要でありかつライフスタイル変容にも直結する食のトランジションを事例として、トランジション研究における中核的な理論であるマルチレベル・パースペクティブ論 (MLP) に基づいた事例分析を行った。具体的には、日本およびその比較対象となる諸外国における長期的な食事パターンの変化等を分析し、中長期的には大幅な食行動変容が起こり得る可能性やそこでの政策措置の重要性を明らかにするとともに、食トランジションの促進に必要な対策 (レジームドライバ) を整理した。また、日本は食トランジションの萌芽期にさえ至っていない状況にあることから、食の環境負荷の見える化・情報提供による知識基盤の形成と認知向上により、食トランジションの必要性に関する議論を開始することが課題であることを指摘した。

1. サブテーマ2 研究開発目的

カーボンニュートラル社会の実現には、革新的な脱炭素技術の開発と普及が不可欠であることは論を待たない。しかし、カーボンニュートラル社会への移行は、単に技術の追加や置換によりもたらされるものではなく、広範な社会システムの変容を伴うものと考えられている。現代社会において技術はそれ単体で存在するわけではなく、市場、物理的・制度的インフラ、政策、習慣、消費者選好、文化等と密接に結びついて「社会技術システム」を形成しており、新しい技術システムへの移行には社会経済の諸側面の変革が必要となるためである¹。このような視点から、持続可能な社会に向けた社会技術システムの変革の必要性やプロセスを分析する研究分野は、「持続可能性トランジション研究」(以下、トランジション研究)と呼ばれており、主なアプローチとして定量的シナリオ分析、社会技術システム分析、参加型アクションリサーチなどがある (Turnheim et al., 2015)。なかでも社会技術システム分析アプローチのトランジション研究は、2000年以降欧州を中心に興隆しており、IPCC第6次評価報告書でも詳しく取り上げられるなど広く関心を呼んでいる (Grubb et al., 2022)。

社会技術システム分析アプローチのトランジション研究は、過去に起きた社会技術システムの移行の分析に広範に応用され、実証的な知見や理論的な深化が積み重ねられてきたものの、トランジション促進のための政策的示唆が十分に整理されているとは言えない。また、脱炭素社会に向けた中長期的なトランジションの可能性を分析する統合評価モデル研究との相互補完的な役割が期待されるものの、その接合は一部で試行されるにとどまっている。さらに、日本では社会技術システム分析アプローチの研

¹ 本サブテーマでは、IPCC第6次評価報告書 (Grubb et al. 2022, pp.183-184) に則り、社会技術システムが大幅に変化した姿・アウトカムを「変革」、それをもたらすプロセスを「移行」(またはトランジション)と呼ぶ。

究蓄積自体が少なく、気候変動分野における事例分析はほぼ皆無である。

そこで本サブテーマでは、トランジション研究における社会技術システム分析アプローチに着目し、以下の達成を目的とする。第一に、トランジション研究の理論的フレームについて包括的なレビューを行い、サブテーマ1と連携して政策的含意を整理する。第二に、トランジション理論と定量的シナリオ分析との接合について示唆を得る。第三に、トランジション理論を日本における気候変動分野の事例に適用し、トランジションに向けた政策措置への示唆を得る。

2. サブテーマ2 研究目標

サブテーマ2	「脱炭素トランジションの理論的フレームワークと日本への応用」
サブテーマ2 実施機関	電力中央研究所社会経済研究所
サブテーマ2 目標	持続可能性へのトランジション(sustainability transition)の理論的フレーム (multi-level perspective等) について包括的なレビューを行い、政策的含意の整理や日本における気候変動分野の事例(再生可能エネルギーやライフスタイル変容等)への適用を行う。また理論的フレームとモデルによるシナリオ分析の接合について、具体的なシステム・イノベーション政策の観点から検討する。サブテーマ1と連携し、シナリオ設計およびシナリオ分析の解釈にトランジション研究の知見を反映する。

3. サブテーマ2 研究開発内容

本サブテーマでは、以下の3つの研究項目を実施した。

(1) トランジション研究の理論的フレームの包括的なレビューと政策ミックスへの含意

トランジション研究における社会技術システム分析アプローチを構成する主な理論フレームに関する理論文献や実証研究の包括的なレビューを通じて、理論形成の経緯と主な概念を整理し、理論的基礎を確認した。また、これら理論フレームの近年の展開動向を概観した上で、政策ミックスに対するトランジション研究からの含意を整理した。

(2) トランジション研究とシナリオ研究の接合可能性の検討

社会技術システム分析と統合評価モデルを用いたシナリオ分析との接合について検討するために、実際に接合を試みた研究例から学ぶことが有用である。そこで本研究課題では、両分野から第一線の研究者が参加して実施された国際研究プロジェクト「PATHWAYS」を取り上げ、プロジェクト内での異なる研究アプローチ間の協働体制等をレビューするとともに、成果として発表されたシナリオ等のレビューを行った。これに基づいて、本課題での社会技術分析とシナリオ研究の接合の方向性を検討した。

(3) 日本の事例への応用：食トランジションの可能性の検討

先述の通り、トランジション研究の理論フレームを日本の気候変動分野に適用した事例研究は筆者らの知る限り存在しない。そこで本サブテーマでは、脱炭素化において重要でありかつライフスタイル変容にも直結する食のトランジションを事例として選択し、日本における食行動変容の可能性を分析することとした。ここで、日本ではカーボンニュートラル社会に向けた食行動変容の議論自体まだほとんどなされておらず、その根拠知見も整理されていない。このような現状を踏まえて、本サブテーマではまず、日本での食行動変容の重要性に関する知見を整理・確認した上で、トランジション研究の理論フレームに基づく事例分析を行うこととした。具体的には以下を実施した。

(3-1) 日本における食行動変容の重要性の検討

(a) 日本における食起因温室効果ガス排出量

食システムに起因する温室効果ガス（GHG）排出量は、世界のGHG排出量の約3分の1を占めるとされるものの（Shukla et al., 2019）、日本の食起因GHG排出量は十分明らかにされていない。そこで、食消費に伴う温室効果ガス排出量をライフサイクル評価（LCA）手法等を用いて定量化するとともに、食行動変容に関するLCA研究と統合評価モデル研究の知見の比較分析を通じて、カーボンニュートラル社会に向けた食のトランジションの必要性を確認した。具体的には、総務省産業連関表（2015年版）および国立環境研究所「産業連関表による環境負荷原単位データブック（3EID）」を用いて、日本における食品消費に起因するGHG排出量を食のサプライチェーン全体について推計した。ただし、土地利用改変起因CO₂排出量は産業連関分析では推計できないことから、Pendrillらが開発した土地バランスモデルによる土地利用改変起因CO₂排出量データベース（Pendrill et al., 2022）を補完的に用いた。

(b)カーボンニュートラルシナリオと統合的な食行動変容

カーボンニュートラルの達成に向けて、特に消費者による食行動変容（特に畜産物消費の削減）が重要との議論が国際的に高まっているが、その根拠は主にLCA分野の既往研究に基づいており、統合評価モデルに基づくカーボンニュートラルシナリオとの整合性は明確になっていない。そこで、カーボンニュートラルの達成に向けた食行動変容の必要性を指摘する代表的な既往研究を取り上げ、それらの長期的な排出量推計のアプローチを整理した上で、統合評価モデルによるアプローチと比較し、カーボンニュートラルと統合的な食行動変容をどのように捉えるべきか明らかにした。

(3-2) MLPに基づく食トランジションの可能性の検討

トランジション研究における中核的な理論であるMLPのフレームに基づいて、日本の食行動トランジションの可能性を検討した。具体的には、日本およびその比較対象となる諸外国における(a)長期的な食事パターンの変化、(b)代替肉・代替ミルク製品の普及、(c)食行動変容をめぐる政策プロセスの3つを題材として、過去10年ないし数10年におけるニッチ形成やレジーム変容、その主なドライバについて分析するとともに、日本での食トランジションの促進に必要な政策ミックスを明らかにした。

4. サブテーマ2 結果及び考察

(1) トランジション研究の理論的フレームの包括的なレビューと政策ミックスへの含意

トランジション研究における社会技術システム分析アプローチでは、「戦略的ニッチ管理論（SNM: Strategic Niche Management）」「マルチレベル・パースペクティブ論（MLP: Multi-level Perspective）」「技術イノベーションシステム論（TIS: Technological Innovation System）」の3つが主な理論的フレームとされる（Markard et al., 2012, Koheler et al., 2019）。これらについて、文献レビューを通じて理論形成の経緯を整理した（図2-1）。

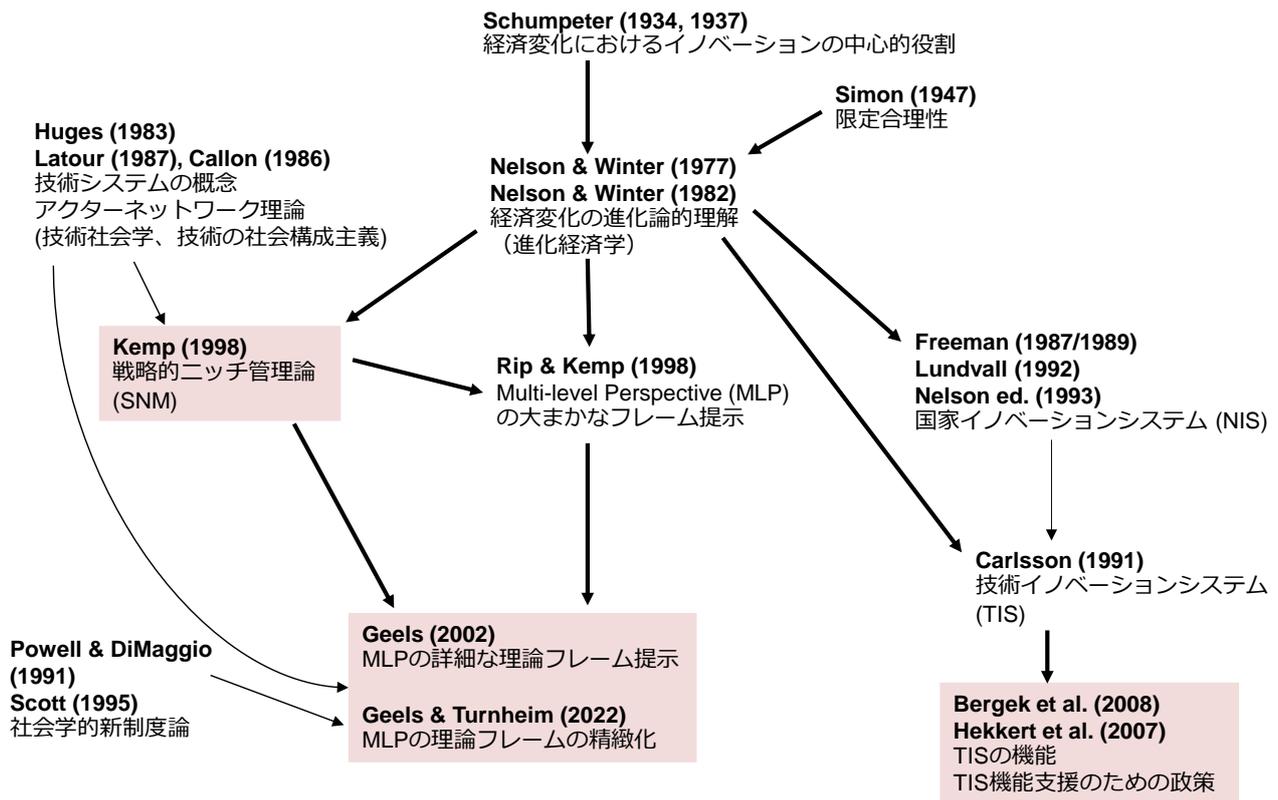


図 2-1. トランジションに関する社会技術分析の主な理論フレーム（赤網掛け）の理論的基礎

SNMは、革新的な技術やイノベーションを育てる場である「ニッチ」に着目し、ニッチを戦略的に管理することによって社会技術システムの変革をもたらされるとする考え方である。SNMはKemp (1998)により提案されたものであり、その基盤としてはSchumpeterに端を発しNelson & Winter (1982)において確立された進化経済学、およびHugesやLatour、Callonらにより形成された技術社会学の2つが指摘できる。

MLPは、ニッチで生まれた新しい技術がいかに中長期的なトランジションをもたらすかについて、「ニッチ」「社会技術レジーム」「ランドスケープ」という3つの階層の相互作用プロセスとして捉える。ニッチにおいてさまざまなイノベーションが育成される一方、既存の社会技術レジーム（ある技術を維持する知識体系や政策、規範、文化、市場等の複合体）は、基本的に安定的・現状維持的であり革新的な技術やアイデアを容易に受け入れないが、ランドスケープと呼ばれる外的要因（人口動態やマクロ経済、気候等）から何らかの圧力を受けると不安定化し、ニッチに対して機会の窓（windows of opportunity）を与える場合がある。そこでニッチが拡大し、既存レジームに取り込まれ、それを変容させて新たなレジームを形成していくと考える。

MLPは、2002年にGeels (2002)によって提案されて以降、非常に高い注目を集めている概念モデルである。SNMがニッチからレジーム変化への一方向的なプロセスを想定し、既存レジームからの反応や対立を十分考慮していなかったのに対し、MLPは既存レジームやその背景にあるランドスケープとの相互作用を明示的に取り入れた点で、SNMを発展させたものと言える。

一方、TISは、Carlsson et al. (1991)がスウェーデンの技術戦略を検討する中で作り出した概念であり、「ある技術の開発・普及・利用に関して、関連制度やインフラの下で相互作用するアクター間のネットワーク」と定義されている。これは同時期にNelsonらにより提唱された「国家イノベーションシステム（NIS）」と類似の概念であるが、NISが国全体のイノベーションシステムやその競争力との関係に主関心があるのに対し、TISは再生可能エネルギー等の新規技術の開発・普及やそれに伴う産業成長のメカニズムを主な対象とする。Hekkert et al. (2007)やBergek et al. (2008)は、TISには企業家による活動、新たな知識の創出と普及、知識探索の方向づけ、需要の創出、資源の動員、正統性の獲

得といった重要な「機能」があると指摘するとともに、それら機能の評価や支援政策の検討が重要として、TISに関する研究を進展させた。

以上より、社会技術システム分析アプローチにおけるいずれの理論的フレームも進化経済学を重要な基礎としていることがわかる（図2-1）。また、TISが基本的に進化経済学の枠組みに基づくのに対して、MLPは進化経済学やそれに基づくSNMをベースとしつつ、技術社会学や新制度論など幅広い社会科学理論を取り入れることで、トランジションへの統合的視座の構築と精緻化を図っていることがわかる。

MLPを中心とする社会技術分析アプローチでは、近年事例分析の蓄積と理論フレームの精緻化が進展しており、トランジション経路の類型化や、イノベーションを生み出す場となる「ニッチ」の形成プロセス、既存の技術体系や制度・ルール体系で構成される「社会技術レジーム」の変容プロセスの詳細化等が進められるほか、政策やガバナンスへの示唆が活発に議論されている。特に後者の論点に関する政策・ガバナンスに関する既往研究（Weber & Rohracher, 2012, Schot & Steinmueller, 2018, Kanger et al., 2020等）に基づいて、トランジションの局面やアクターに応じた政策ミックスを整理したのが表2-1である。これまでの環境政策ミックスは、基本的に新古典派経済学に基づいて、規制的措置・経済的措置・情動的措置・自主的対策といった枠組みで議論されてきたが、MLP等の社会技術システム分析アプローチに基づくと、(1)多様なニッチ生成と成長を促す措置、(2)その成長を促す措置、(3)既存の社会技術レジームの解体・再構成を促す措置、(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、(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）を長期的に導く対策、といったより幅広い政策介入があり得ることがわかる。したがって、本研究課題のサブテーマ1における政策提言の導出においては、このようなトランジションのフェーズに応じた幅広い政策措置を考慮する必要がある。

表 2-1. トランジションを促す政策ミックス

移行フェーズ	萌芽期	成長期	再構成期
特徴的な現象 やアクターの 行動	<ul style="list-style-type: none"> 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 	<ul style="list-style-type: none"> 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 	<ul style="list-style-type: none"> 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
移行フェーズ に応じた 政策ミックス	<p>(1) 多様なニッチ生成を促す措置</p> <ul style="list-style-type: none"> 研究開発支援 技術見通しやビジョン提示 長期目標設定 ベンチャー支援 ネットワーク形成 科学的知見の構築・整理 普及啓発・情報提供 <p>(2) ニッチ市場の成長を促す措置</p> <ul style="list-style-type: none"> 補助金 炭素価格付け 政府調達 市場バリアの除去 <p>(3) 既存の社会技術レジームの解体・再構成を促す措置</p> <ul style="list-style-type: none"> 規制緩和 既存技術への補助金等の再編 既得権益の解体 標準化 <p>(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</p> <ul style="list-style-type: none"> トランジションの影響を受け る産業等への社会補償 リスキリング支援 公正な移行対策 <p>(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)を長期的に導く対策</p> <ul style="list-style-type: none"> 国際的な合意形成 		

(2) トランジション研究とシナリオ研究の接合可能性の検討

EU Framework Programme 7のプロジェクトとして実施された「PATHWAYS」は、MLPを提唱したGeelsを代表者とし、2013～2016年にかけて実施された大規模な学際研究プロジェクトである。統合評価モデル・チーム (IAM)、MLPに基づく社会技術システム分析チーム (MLP)、参加型アクションリサーチチーム (PAR) の3チームで構成され、チーム間の対話と相互調整を重視して進められた。

同プロジェクトの成果は70本超の報告書と22本超の学術論文・書籍に取りまとめられたが、大半は定量的シナリオ分析または社会技術システム分析のいずれかに基づく研究成果であり、プロジェクトが目指した異分野アプローチの接合を主題とした成果は、MLPチームの中心メンバーであるTurnheim と Geelsによる2論文 (Turnheim et al., 2015, Geels et al., 2016)、およびTechnological Forecasting and Social Change誌の特集号 (van Vuuren et al., 2020) に限られる。このうち、前者の2論文は、IAM・MLP・PARという3アプローチの特質や長短、接合の可能性を一般論として整理したものである。後者の特集号は、このような一般論に基づいて実施されたシナリオ分析の具体的な成果であり、5つの個別テーマ (電力、暖房、運輸、農と食、土地利用) に関するIAMチームによる定量的モデル分析の結果とともにMLP・PARにより作成された叙事的ストーリーラインが提示されている。そこで異なるアプローチの橋渡し・相互調整の手法としては、相互参照しつつも基本的に別々に分析を進める方法 (comparative)、統合評価モデルによる定量的一貫性の確認や社会技術分析による実現性の確認など手順を定めて共同作業を進める方法 (procedural)、マルチエージェントモデルにMLPの知見を反映させるといった統合的分析を図る方法 (integrative) の3つが採用されている (Hof et al., 2020)。このシナリオ分析での大きな特徴は、いずれもプロジェクト開始当初に作成されたベースライン経路および理念的な2経路 (表2-2) に基づいたシナリオが用いられていることである。すなわち、アプローチ間の相互調整がなされる前に作成された3つのシナリオ (表2-2) が基本シナリオとして採用されてお

り、アプローチ間の協働作業を通じてその詳細化と定量化がなされたものの、本質的には新しいシナリオが作成されていない。さらに、PATHWAYSプロジェクトの膨大な成果のうち、統合評価モデル（IAM）と社会技術システム分析（MLP）・参加型アクションリサーチ（PAR）の協働作業によるシナリオ分析は同特集号のみであったこと、それもプロジェクト終了3年後の発表であったことを踏まえると、PATHWAYSプロジェクトではアプローチ間の相互調整に多大な努力が払われたものの、その成果創出には大きな困難があった様子が伺える。Geelsらは、これら3つのアプローチは分析手法に加えて現実の捉え方（認識論、存在論）が大きく異なるため、包括的・統合的な分析を行うことは困難であるものの、アプローチ間の反復的な相互調整・対話ないし橋渡し（bridging）が有益と論じた（Turnheim et al., 2015, Geels et al., 2016）。

表2-2. PATHWAYSプロジェクトで作成された理念的な3経路

	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。既存レジームの他部分や構造はそのまま）	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、文化等）
イメージ	成り行きの世界	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を基に作成)

PATHWAYSの経験からは、定量的シナリオ分析と社会技術システム分析の相互参照やフィードバックはより多面的なシナリオ作成や政策的示唆の導出に繋がり得るものの、両アプローチの一体的な統合は困難であることがわかる。このような既往研究のレビューを踏まえ、本研究課題ではより平易な接合方法を志向し、特に定量的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行うことが効果的と判断した。この結論は、サブテーマ1におけるCDRの政策ミックスの分析に活用し、本サブテーマにおいて検討したフレームワーク（表2-1）を用いてCDR政策に関する提言を行った（成果番号56）。

(3) 日本の事例への応用：食トランジションの可能性の検討

(3-1) 日本における食行動変容の重要性の検討

(a) 日本における食起因温室効果ガス排出量（成果番号60, 8）

産業連関分析およびPendrill et al. (2022)を用いて推計した2015年における日本の食起因GHG排出量を表2-3に示す。比較のために世界の食起因GHG排出量（Crippa et al. 2021）も示している。これは、土地利用改変起因CO₂も含めた日本の食起因GHG排出量の推計として世界初の推計である。日本の食起因GHGは、日本の消費ベース排出量²の15%を占める。この割合が世界における食起因GHG割合の33%より小さい理由は、日本では畜産物消費による排出量割合が世界と比べて小さいこと（Xu et al., 2021）、近年に土地利用改変がほとんど発生していない米国・カナダ等が主要な食料輸入先であるため土地利用改変起因CO₂が比較的小さいことが考えられる。このように日本では世界全体と比べると食起因GHGの割合は小さいものの、それでも家計消費に起因するGHG総排出量の21%に相当し、エネルギー消費に次ぐ消費活動である。したがって、日本国民のライフスタイルの脱炭素化を進める上で、食の脱炭素化は避けることのできない重要な課題と言える。

² 日本国内の家計消費・政府消費・資本形成等の最終需要に伴う直接間接GHG排出量（食消費に伴う土地利用改変起因CO₂排出量を含む）。

表2-3. 日本および世界における食消費に起因するGHG排出量（2015年）

	食消費起因GHG排出量		総GHG排出量に占める割合
		うち土地利用改変起因CO ₂	
日本	234.2 [Mt-CO ₂ eq.]	43.0 [Mt-CO ₂ eq.]	15%
世界	17.9 [Gt-CO ₂ eq.]	5.7 [Gt-CO ₂ eq.]	34%

（成果番号60，8より作成。土地利用改変起因CO₂はMRI0モデルによる推計値を、また日本の総排出量としては2015年の消費ベース排出量（15.5 Gt-CO₂）をそれぞれ用いた。世界のデータはCrippa et al.（2021）による）

(b) カーボンニュートラルに整合的な食の姿（成果番号58）

食システムの脱炭素化に向けて食行動変容の重要性を指摘した代表的な研究として、EAT-Lancet委員会報告（Willett et al., 2019）、IGES1.5℃ライフスタイル報告（Akenji et al., 2019）、Clark et al.（2020）がある。EAT-Lancet委員会報告は、「Planetary Health Diet（PHD）」と呼ばれる食事ガイドラインを提唱したことで有名である。PHDは動物性食品の摂取量が非常に少ないのが特徴であり（例えば牛肉や豚肉は週100g程度、鶏肉は週200g程度、水産物は週200g程度）、それが健康増進・疾病予防の観点から望ましいことに加え、気候変動の2℃目標などの環境制約制約をも満たす持続可能な食事であるとした。

また、IGES1.5℃ライフスタイル報告は、1.5℃目標を達成するには日本は家計消費起因のGHG排出量を約90%削減する必要があると、そのためには食起因GHGについてもベジタリアン食の採用等により半減する必要があるとした。Clark et al.（2020）は、1.5℃ないし2℃目標に向けた残余排出量（カーボンバジェット）に対して、食起因GHGがどの程度を占めるかを複数のシナリオで推計したものである。主な食起因GHGは短寿命ガスであるCH₄・N₂Oのため、通常は残余排出量の議論ができないところ、近年提案されている「GWP*」（Allen et al., 2016等）の換算方法を用いることによってCH₄・N₂O排出によるバジェットへの影響を評価した点の特徴であり、その結果、PHDに沿った食行動変容を含む削減対策を広範に講じなければ食起因GHGのみでバジェットを食い尽くしてしまうとした。

これらの既往研究は、共通して以下のような方法とロジックで結論を導いている。

- IPCCシナリオデータベースから抽出した統合評価モデルによる1.5℃シナリオ（または2℃シナリオ）に基づいて、食起因GHG排出量の目標水準を設定する。この際、1.5℃シナリオ（または2℃シナリオ）にも大きな幅があるため、各研究が「代表的」とみなすシナリオを選定する。
- 一人当たりの食品別摂取量について将来シナリオを設定し、将来の食品別需要量（ないし生産量）を推定し、それに既往LCA研究から得られている食品別のカーボンフットプリントを乗じることで、将来の食起因GHG排出量を推計する。この際、一人当たりの食品別摂取量の将来シナリオ設定においては、統合評価モデルによるシナリオは参照せず、外生的にPHDを導入するシナリオを設定したり、一人当たりGDPと食品摂取量の関係式等を用いて現状延長シナリオを設定したりする。
- こうして推計した食起因GHG排出量は、現状延長シナリオでは食起因GHG排出量の目標水準を大きく超過することを確認する。また、食起因GHG排出量の削減策として農業の生産性向上や食品ロス削減等の対策も評価したうえで、それらだけでなくPHDやベジタリアン食のような大幅な肉消費削減・菜食化が必要であることを確認する。

一方、統合評価モデルを用いたシナリオ分析では、食行動に関しては一人当たりの動物性食品および植物性食品の需要量（摂取カロリー）や農畜産物の生産量がパラメータとして想定されることが多い。シナリオ分析で共通して必要になる基礎的な社会経済の諸条件を整理した「共有社会経済経路」（SSP: Shared Socio-economic Pathway）の叙事的シナリオにおいても食需要の想定が置かれており、例えばSSP1（持続可能性重視）では、動物性食品が少なく健康的な食事が普及、食品ロスは少ない、といった想定が置かれている。しかし、実際にシナリオデータベースにおける畜産物の生産シナリオを確

認すると、GHG排出量が小さいほど畜産物生産量が小さい結果を示す統合評価モデルも存在するものの、それ以上にモデル間の差が大きく、モデルによる具体的な実装の差異が大きい。図2-2は、AR6シナリオデータベース（IIASA 2023）のうち、今世紀半ば頃にネットゼロ達成を想定する1.5°Cシナリオ約150件における世界全体の食需要（一人あたり摂取カロリー）を集計したものである。2100年の食料需要を見ると、2,500～3,500 [kcal/cap/day]程度と大きな幅がある。また、動物性食料の摂取カロリーについては減少傾向のシナリオが多く存在する一方で、減少しないまたは増加するシナリオも多数存在している。すなわち、1.5°Cシナリオであっても食需要および動物性食品の需要想定は多様であり、例えば「1.5°C目標達成のためには動物性食料をこの程度に抑える必要がある」といった議論はできない。

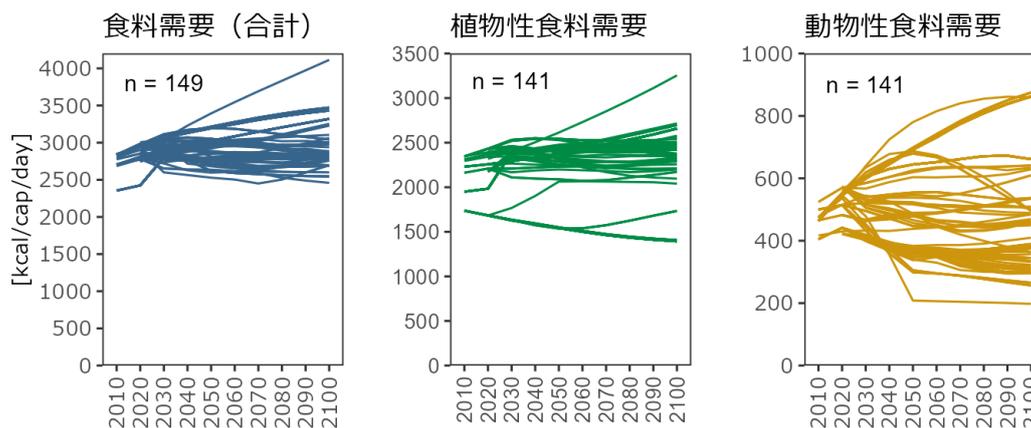


図2-2. AR6シナリオデータベースに含まれる1.5°Cシナリオの食需要（nはシナリオ数）

（温暖化カテゴリーC1とC2に含まれる1.5°Cシナリオのうち、食需要データが存在したシナリオを抽出して作成）（成果番号58）

このように同じ1.5°Cシナリオであっても食料需要に大きな差がある主な理由の一つは、統合評価モデルでは食や農業部門のGHG排出量は他部門の排出量および除去量との相互関係を通じて決まるためである。1.5°C目標達成の態様は、特に排出削減と除去のどちらがより容易または困難と想定するかに大きく影響されるため、仮に食起因GHGの排出削減が小さくとも、他部門の排出削減や除去を大きく想定すれば目標達成が可能である。逆に、食起因GHGの排出削減が大きいならば、他部門の排出削減や除去の必要性を緩和できる。実際に、二酸化炭素除去（CDR）に過度に頼らずに1.5°C目標を達成するシナリオを検討したvan Vuuren et al. (2018) は、培養肉の大幅な導入やPHDに類する動物性食品摂取を大幅に抑制した食事の導入を仮定した1.5°Cシナリオにおいて、ベースラインの1.5°Cシナリオに比べてBECCSによる除去量が大幅に減少できることを示している。

以上のように、LCAをベースに食行動変容が必要とする研究と、統合評価モデルによるシナリオ分析との比較を踏まえると、前者が指摘するように食行動変容は重要なGHG削減策であるものの、後者に基づくと「カーボンニュートラル達成のために食行動変容が必要不可欠」とまでは言えない。カーボンニュートラル達成は、他の削減対策や除去策の導入量にも依存するためである。

しかしながら、統合評価モデルを用いたシナリオ分析では、1.5°C目標の達成にはBECCSの大量導入のように実現可能性や生態系影響等の観点から問題が指摘される想定が置かれる場合が多いのも事実である。BECCSなどのCDRに過度に依存した温度目標の達成には、従来から問題提起がなされている。エネルギー作物の大量導入は土地利用競合を通じて食料供給・飢餓リスクを悪化させるとの指摘があるほか、植林でさえ大量の場合は生態系影響が懸念されている（Smith et al., 2016等）。

したがって、食行動変容によるGHG排出削減は、BECCS等の大規模導入への懸念やリスクが大きい対策の必要性を緩和する点で極めて重要である。環境負荷削減のためのライフスタイル変容策にはさまざまなものがあるが、食行動変容はとりわけ人の嗜好に介入し、大きな制約を与えるものである。このた

め、「持続可能な社会のためにはこれが不可欠」という強いロジックがないと、社会的な受容や政策形成が困難な部分がある。LCAベースの研究は、このような背景からあえて議論を単純化し、「カーボンニュートラル達成には食行動変容が不可欠」と主張しているとも考えよう。

(3-2) MLPに基づく食トランジションの可能性の検討

(a) 長期的な食事パターンの変化

図2-3は、日本および主要国における肉類・水産物の年間一人当たり供給量の推移である。これより、3つの点が指摘できる。第一は、過去半世紀において多くの国で肉類や水産物の大きな消費量変化が起こってきたことである。これは、変化しにくいと考えられることが多い食文化も中長期的には大きく変容しうることを示唆している。

第二に、欧米諸国に比べて日本の肉消費量はかなり小さく、一方で水産物消費量は2000年代以降減少傾向にあるものの非常に大きい。日本の肉消費水準は、EAT-Lancet委員会によるPlanetary Health Dietが提示する水準などに比べると高いものの、欧米諸国のように環境負荷削減だけでなく疾病予防・健康増進の観点からも真っ先に肉消費削減が検討されるべき状況とは異なっている。一方、日本で消費量が多い水産物は、魚種や漁法によっては肉類よりカーボンフットプリントが低いことから (Gephart et al. 2021)、日本の食行動変容においては肉消費削減だけでなく水産物の見直しが重要な要素になる可能性が指摘できる。ただし、そのためには水産業が低炭素であるだけでなく、資源管理や生態系影響等の観点からも持続可能である必要がある。

第三に、緩やかではあるものの、欧米諸国の牛肉消費量が減少傾向にあることが注目される。これはFAOの食料需給データだけでなく各国の食事摂取量調査でも同様の傾向が確認されており、そのGHG削減効果も推計されている。肉消費量の規程要因については多数の既往研究があり、特に所得との間に逆U字の関係が指摘されているが、宗教や文化的な要因も大きいとされており、減少要因は国によって異なると考えられる。例えば、オーストラリアでの牛肉消費量の減少については、

- 価格：鶏肉の生産性向上と相対的な価格低下
- 利便性：鶏肉の調理・加工における利便性の向上
- 供給安定性：放牧の気象災害等への脆弱性、サプライチェーンの課題
- 政策：食事ガイドラインによる牛肉の摂取抑制と鶏肉摂取の推奨
- 消費者の嗜好変化：健康志向、環境意識の高まり

といった要因が指摘されている (Ferraro et al., 2022等)。

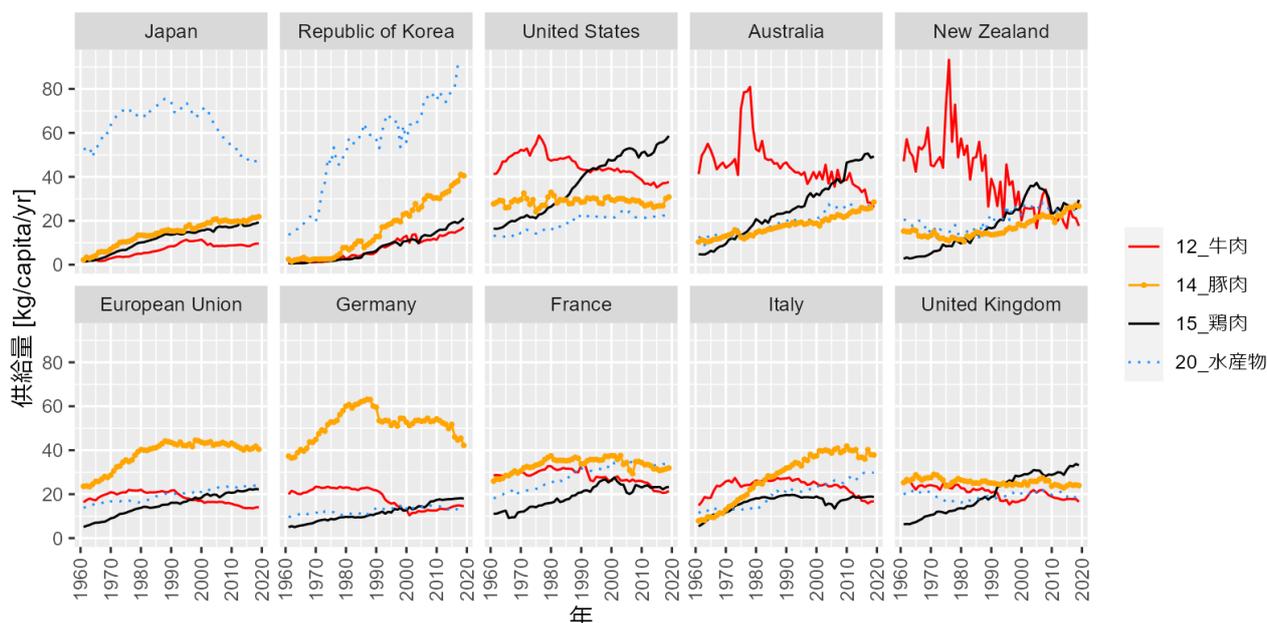


図2-3. 日本および主要国における肉類・水産物の一人当たり供給量
(成果番号59。FAO Food Balance Sheetsより作成)

日本では、水産物消費が減少する一方、鶏肉・豚肉の需要が増加してきた。肉食が一般的ではなかった日本で戦後に鶏肉消費が大きく増加した要因としては、全国に販売展開する企業の登場（ケンタッキーフライドチキンなど）、食品スーパーの普及による生鮮食品の普及、養鶏業への直接投資（三菱商事等）、養鶏技術の向上（品種改良等）、畜産の集約化・大規模化、さらに政府による養鶏技術の導入支援、米国政府の飼料輸出支援、学校給食での鶏肉導入、政府が定めた「食生活指針」での肉摂取の推奨などが指摘されている。その一方で、水産物消費量が減少した要因としては、肉類との価格や利便性の点での競合が指摘されている（Moberg et al., 2021）。

(b) 代替肉・代替ミルク製品の普及

近年、植物性原料から生産される代替肉や大豆ミートが国内外の大手ハンバーガーチェーンやレストランでも採用されるようになるなど注目が高まっている。小麦グルテンや豆腐などの植物性たんぱく質の歴史は古いが、現在のような代替肉や大豆ミートが製造されるようになったのは20世紀以降であり、特に1960年代に二軸エクストルーダー（押出加工機械）を用いた加工技術が開発されてからのことである。この技術により植物性タンパク質を繊維状に組織化することで、製品の食感が大きく改善したとされる。ただし、それでも2000年代まで大豆ミート市場はごく小さなニッチ市場に留まっていた。

その状況が大きく変化したのは、2010年頃からBeyond Meat、Impossible Foodsといったスタートアップ企業が代替肉開発に参入してからである。従来の製品が倫理観や健康・環境意識の高い限られた消費者層に向けられていたのに対して、それらのスタートアップ企業は一般的な肉好きの消費者を主なターゲットとした。そして、一般消費者への訴求のため、肉の味や食感、色までをできる限り疑似できる製品開発を進め、2016年頃から大手ハンバーガーチェーン等の大衆向けチャンネルでの販売を開始した。これによって、代替肉市場は2010年代以降、国内外で拡大している（図2-4左、図2-4中）。その規模は畜肉市場と比べるとまだ小さいものの、POSデータによると米国の生鮮肉小売市場における代替肉シェアは、挽肉の小売市場に絞ると7%程度と推定されている（2020年データ、Neuhofer & Lusk 2022）。ただし、試し買い需要が大きくリピートしない消費者が多いこと、代替肉利用者は畜肉消費をある程度減らすものの消費を継続していることも明らかにされている。

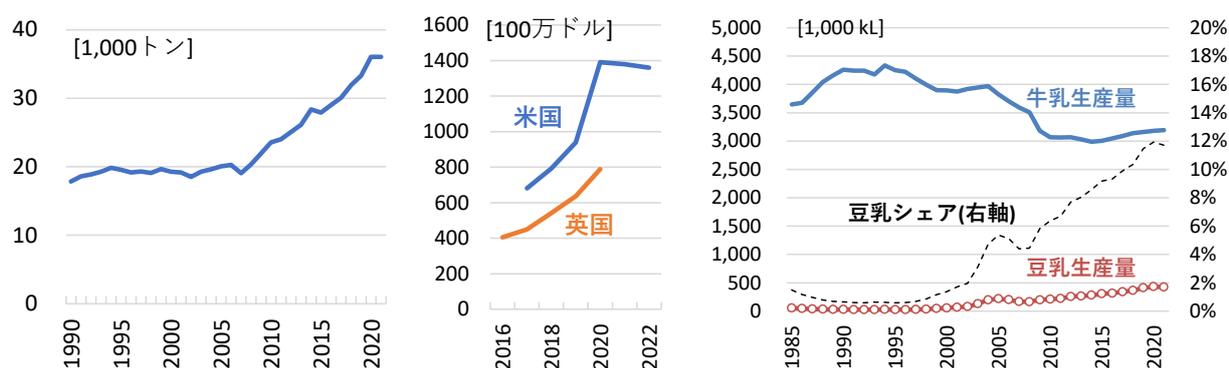


図2-4. 日本での粒状大豆たんぱく質の生産量（左）、米国・英国での代替肉販売額（中）、および日本での牛乳および豆乳の生産量（成果番号59。日本植物蛋白食品協会資料、Good Food Institute 資料、USDA 2022、牛乳乳製品統計、日本豆乳協会資料より作成）

豆乳やアーモンドミルク等の植物性ミルクの生産量も近年増加しており、日本では豆乳の市場シェアは既に10%を超える（図2-4右）。一方で、牛乳の消費量は過去30年ほど減少傾向にある。海外でも、植物性ミルク需要が増加し牛乳需要が低下している国が多い。イギリスでの植物性ミルク普及では、そ

の市場拡大において牛乳の文化的な意味付け (cultural meaning) の変化が重要であったとの指摘がある (Mylan, et al., 2019)。これまで酪農業界が発信してきた乳製品の「健康食品」「自然 (natural) なもの」という文化的な意味づけに対して、環境NGOやビーガン食推進団体が乳製品の環境・動物福祉・健康面への懸念を発信してきたことで、消費者の乳製品と植物性食品への意味づけが変化したという。また、酪農業界の対立的な動きとは対照的に、ダノン、ネスレ、コカ・コーラといった大手の食品加工会社やコーヒーショップチェーン等の流通事業者が、消費者の潜在需要を見て植物性ミルクの取扱いや品揃えを増加させたことも大きな要因であったという (Mylan, et al., 2019)。

(c) 食行動変容をめぐる政策プロセス

持続可能で健康的な食行動を促すための政策措置は、わが国も含めて策定されていない場合が多いが、一部の国では検討の開始に伴って、既得権益アクターからの反発が起こるなど論争が起きているケースがある。

大きな論点の一つは食事ガイドラインである。食事ガイドラインとは、健康増進と疾病予防につながる食事の取り方を国民に知らせるために政府や公的機関が定めるガイドラインである。上述のオーストラリアでの牛肉消費量減少の要因でも触れたように、政府が定める食事ガイドラインは学校給食や栄養指導等を通じて国民の食選択に大きな影響を与えるため重要である。しかし、その重要性ゆえに、従来から食品産業の圧力を受けやすく、栄養学的知見が歪められやすいことが指摘されてきた。

近年、食事ガイドラインの策定において、栄養学的な観点だけでなく持続可能性の観点を導入しようとする動きが各国で生じている。既にスウェーデンやドイツでは持続可能性の観点を取り込んだ食事ガイドラインが策定され、結果として肉消費削減を推奨するガイドラインが発表されているが、一部の国ではそのようなガイドライン策定をめぐる論争となっている。例えば米国の2015年版食事ガイドライン策定では、科学諮問委員会報告書では将来世代の食の安全保障の観点から持続可能性が考慮され、健康と環境の両面から赤肉 (牛肉や豚肉) の摂取削減が推奨されていたが、ガイドライン策定の最終段階で農業省長官・健康省長官の判断によって持続可能性の観点は全面的に削除された。

また近年では、カーボンニュートラル目標やその達成計画において、GHG削減策の選択肢として食行動変容を含める動きが増えている。例えばイギリス政府の気候変動委員会によるネットゼロ報告書 (CCC, 2019)、フランス環境移行省・ADEMEによる2050トランジションシナリオ等である。特に動きが活発なフランスでは、「国家食料・栄養・気候戦略」を2023年に策定することとされており、これに向けて食料農業省の諮問委員会である国家食品委員会が発表した提案には、「肉と乳製品の供給緩和」「植物性食品を増やして動物性食品を減らし、食品ロスを減らした健康的で持続可能な食事を促す」「食事のカーボンフットプリントについての国民の意識啓発・教育」などが明記されている (CAN, 2023)。ただし、この提案のコンサルテーションに参加した複数の食品業界団体からは、これらの項目に対して「動物性食品を差別せずバランスの良い食事を重視すべき」といった反対意見が表明されている。食品業界からの強い反対を背景に、SNANCの策定も予定より大幅に遅れている。

以上で述べたMLPに基づく3つの事例分析の結果からは、以下の示唆が導出される。第一に、事例(a)で示した過去数10年で大きな食行動変化があったという事実は、今後も中長期的には大きな変容がありうることを示唆する。肉類の一人当たり総消費量が明確な減少傾向を示す国はまだないものの、牛肉消費量は既に多くの国で減少傾向にある。さらに、事例(b)で示したように、植物性代替食品は既に一部の市場で5~10%程度の市場シェアに達している。当然ながら不確実性は大きいものの、今後も食行動変容が進んでいく可能性がある。

第二に、事例(a)で指摘した日本の肉類・水産物消費の特徴を踏まえると、日本における食行動変容では、欧米諸国で活発に議論されている肉消費量削減だけでなく、水産物の持続可能な利用を含めた日本の食文化や地域特性を反映した独自の方向性を模索する必要があることが示唆される。

第三の示唆は、食行動変容における政策の重要性である。事例(a)のオーストラリアの例および事例(c)で見たように、特に食事ガイドラインは重要な政策と考えられ、今後健康・栄養の観点だけでなく

持続可能性の観点を取り込んだ食事ガイドラインを策定する国が増える可能性がある。

このように諸外国の状況を踏まえると、少なくとも一部の国は表2-1に示すトランジションフェーズで言うところの萌芽期にあり、必要な政策措置を準備しつつある。それに対して、日本ではまだ食と持続可能性・気候変動に関する議論はほとんどなされておらず、政策的な検討もほぼ皆無であることから、萌芽期にさえ至っていないと言える。

トランジション理論から導出した表2-1と3つの事例分析を基に、食行動変容を促すための対策を表2-4に整理した。日本では、食の環境負荷の見える化・情報提供による知識基盤の形成と認知向上により、食トランジションに関する議論を開始することが必要であろう。その際には、水産物の持続可能な利用など日本の食文化や地域特性を反映した持続可能な食のあり方・方向性を検討することが必須と考えられる。

表2-4. 食トランジションの促進に必要な対策（レジームドライバ）

技術	<ul style="list-style-type: none"> ● 代替肉の品質の向上(味や栄養素) ● 代替肉の価格低下
市場	<ul style="list-style-type: none"> ● 大手食品スーパー・外食チェーンでの取り扱い増加 ● 海外代替肉メーカーの参入と競争促進 ● 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・文化	<ul style="list-style-type: none"> ● より積極的なマーケティング ● 食の環境負荷への意識向上 ● 健康意識の向上
政策	<ul style="list-style-type: none"> ● 研究開発支援 ● 食の環境負荷の見える化・情報提供 ● 公共施設・学校給食での率先導入 ● 持続可能で健康的な食のあり方・ビジョン・方向性の検討 ● 食事ガイドラインへの持続可能視点の導入 ● 炭素価格付け

5. サブテーマ2 研究目標の達成状況

サブテーマ2では、トランジション研究における社会技術システム分析アプローチに着目し、以下の3つの研究項目を実施した。(1) トランジション研究における社会技術システム分析アプローチを構成する主な理論フレームについて包括的な文献レビューを行い、理論形成の経緯と主な概念を整理することを通じて理論的基礎を確認した。また、これら理論フレームの近年の展開動向を概観した上で、トランジションのフェーズに応じた幅広い政策ミックスを導出した。(2) 社会技術システム分析と統合評価モデルを用いたシナリオ分析との接合について検討するため、両分野から第一線の研究者が参加して実施された国際研究プロジェクト「PATHWAYS」を取り上げ、プロジェクト内での異なる研究アプローチ間の協働体制等をレビューするとともに、成果として発表されたシナリオ等のレビューを行った。これに基づいて、本課題での社会技術システム分析とシナリオ研究の接合の方向性を検討した。その結果、定量的シナリオ分析と社会技術システム分析の相互参照やフィードバックはより多面的なシナリオ作成や政策的示唆の導出に繋がり得るものの、両アプローチの一体的な統合は困難であることがわかった。そこで本研究課題ではより平易な接合方法を志向し、特に定量的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行うことが有益と考えられることを導いた。(3) 脱炭素化において重要でありかつライフスタイル変容にも直結する食のトランジションを事例として選択し、トランジション研究における中核的な理論であるマルチレベル・パースペクティブ論（MLP）に基づいた事例分析を行った。具体的には、日本およびその比較対象となる諸外国における長期的な食事パターンの変化等を分析し、中長期的には大幅な食行動変容が起り得る可能性やそでの政策措置の重要性を明らかにするとともに、食トランジションの促進に必要な対策（レジームドライバ）を整理した。また、日本は食トラ

ンジションの萌芽期にさえ至っていない状況にあることから、食の環境負荷の見える化・情報提供による知識基盤の形成と認知向上により、食トランジションの必要性に関する議論を開始する必要がある、またその際には日本の食文化や地域特性を反映した持続可能な食のあり方を検討する必要があることを指摘した。

以上の成果は、サブテーマ1におけるCDRの政策ミックスの分析に活用し、具体的な政策提言につなげた。また、日本における食起因温室効果ガス排出量の定量化を初めて行い、日本の食トランジションを開始するための具体的な政策提言を行った。

以上より、本サブテーマの研究目標は達成したと考えられる。

サブテーマ2 引用文献（成果以外）

- Grubb et al. eds. 2022. Introduction and Framing. In IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Turnheim, et al. 2015. Evaluating sustainability transitions pathways: Bridging analytical approaches to address governance challenges. *Global Environmental Change* 35: 239-253.
- Shukla et al. eds. 2019. Climate Change and Land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems.
- Markard, et al. 2012. Sustainability transitions: An emerging field of research and its prospects. *Research Policy* 41 (6): 955-967.
- Köhler, et al. 2020. Low carbon transitions pathways in mobility: Applying the MLP in a combined case study and simulation bridging analysis of passenger transport in the Netherlands. *Technological Forecasting and Social Change* 151: 119314.
- Kemp, et al. 1998. Regime shifts to sustainability through processes of niche formation: The approach of strategic niche management. *Technology Analysis and Strategic Management* 10 (2): 175-198.
- Nelson & Winter 1982. *An evolutionary theory of economic change*. Harvard University Press.
- Geels. 2002. Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: A multi-level perspective and a case-study. *Research Policy* 31 (8-9): 1257-1274.
- Carlsson & Stankiewicz. 1991. On the nature, function and composition of technological systems. *Journal of Evolutionary Economics* 1 (2): 93-118.
- Hekkert, et al. 2007. Functions of innovation systems: A new approach for analysing technological change. *Technological Forecasting and Social Change* 74 (4): 413-432.
- Bergek, et al. 2008. Analyzing the functional dynamics of technological innovation systems: A scheme of analysis. *Research Policy* 37 (3): 407-429. Citations: 804.
- Weber & Rohracher. 2012. Legitimizing research, technology and innovation policies for transformative change. *Research Policy* 41 (6): 1037-1047.
- Schot & Steinmueller. 2018. Three frames for innovation policy: R&D, systems of innovation and transformative change. *Research Policy* 47 (9): 1554-1567.
- Kanger, et al. 2020. Six policy intervention points for sustainability transitions: A conceptual framework and a systematic literature review. *Research Policy* 49 (7): 104072.
- Van Vuuren, et al. eds. 2020. Understanding transition pathways: Insights from bridging modelling and transition-science based studies. Special issue of *Technological Forecasting and Social Change* 151.
- Geels, et al. 2016. Bridging analytical approaches for low-carbon transitions. *Nature*

- Climate Change 6 (6): 576-583.
- Crippa, et al. 2021. Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions. *Nature Food* 2 (198-209).
- Xu, et al. 2021. Global greenhouse gas emissions from animal-based foods are twice those of plant-based foods. *Nature Food* 2 (9): 724-732.
- Willett, et al. 2019. Food in the Anthropocene: the EAT-Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *The Lancet* 393 (10170): 447-492.
- Akenji, et al. 2019. 1.5-Degree Lifestyles: Targets and Options for Reducing Lifestyle Carbon Footprints. Institute for Global Environmental Strategies (IGES).
- Clark, et al. 2020. Global food system emissions could preclude achieving the 1.5° and 2° C climate change targets. *Science* 370 (6517): 705-708.
- IIASA. 2023. AR6 Scenario Explorer and Database hosted by IIASA, <https://data.ece.iiasa.ac.at/ar6/> (アクセス日2023.11.20)
- Smith, et al. 2016. Biophysical and economic limits to negative CO₂ emissions. *Nature Climate Change* 6 (1): 42-50.
- Ferraro, et al. 2022. Historical food consumption declines and the role of alternative foods. *Environmental Research Letters* 17 (1): 014020.
- Moberg, et al. 2021. Combined innovations in public policy, the private sector and culture can drive sustainability transitions in food systems. *Nature Food* 2 (4): 282-290.
- Neuhofer & Lusk. 2022. Most plant-based meat alternative buyers also buy meat: an analysis of household demographics, habit formation, and buying behavior among meat alternative buyers. *Scientific Reports* 12 (1).
- Mylan, et al. 2019. Rage against the regime: Niche-regime interactions in the societal embedding of plant-based milk. *Environmental Innovation and Societal Transitions* 31: 233-247.
- CCC. 2019. Net Zero: The UK's contribution to stopping global warming, Committee on Climate Change (CCC).
- CAN. 2023. Cliquez ici pour retrouver l'intégralité de la contribution, Conseil National de l'Alimentation.

II-3 「脱炭素トランジションと持続可能性に関する評価」

[サブテーマ3 要旨]

本サブテーマは、(3-1) 所得階層別の家計所得・支出モデルの日本への適用、(3-2) 複数の統合評価モデルを用いた日本脱炭素シナリオにおける所得・支出への影響評価、(3-3) エネルギーシステムモデル・経済モデルによる日本の脱炭素シナリオの定量評価、の3点を主として実施した。サブテーマ1が主導するモデル比較には、研究(3-3)を通じて2つのモデル(ボトムアップ型エネルギーシステムモデルAIM/Technology-Japanと、経済モデルAIM/Hub)を用いて、本研究課題を通じて設定された、シナリオプロトコルに応じたシナリオを定量化・提供した。持続可能性評価については、(3-3)を通じた日本全体の経済影響(GDPロス、消費ロス)の評価に加え、10分位の所得階層別の家計所得・支出モデル(AIM/PHI)を日本の家計消費データに基づいて日本に適用できるよう改良し、2030年、2050年目標の評価を行った。結果として、炭素税は排出削減目標の達成に向けて有効な対策の一つではあるものの、炭素税のみに依存した場合、低所得層への影響が大きいたことが示された。これを回避する方策としては、炭素税に加えて、家庭における排出削減・電化を促進するための追加的技術政策や、炭素税収の還元が有効であることが示唆された。また、AIM/Hub、AIM/Technologyの2つのモデルを用いた評価より、特に2050年ネットゼロシナリオの定量化にあたっては、エネルギー価格変化や家庭のエネルギー構成変化についてモデル間の幅が大きいたことから、複数モデルによる評価の重要性が示された。

1. サブテーマ3 研究開発目的

本サブテーマは、これまで当研究グループが世界全域を対象として実施してきた統合評価モデルを用いた緩和シナリオ評価・持続可能性指標への影響評価の枠組みに基づき、日本の中長期シナリオに対してこの枠組みを拡張することで、脱炭素トランジションが持続可能性指標に及ぼす影響を評価することを目的とした。世界を対象とした研究では飢餓リスク評価や大気汚染への影響評価も実施してきたが、本研究は日本を対象とすることから、経済影響、所得・格差に焦点を当てた。また、日本の長期戦略に応じて、2050年脱炭素化シナリオを定量化するため、エネルギーシステムモデル・経済モデルを改良し、サブテーマ1のモデル比較にシナリオを提供することを目的とした。

2. サブテーマ3 研究目標

サブテーマ3	「脱炭素トランジションと持続可能性に関する評価」
サブテーマ3 実施機関	京都大学・立命館大学
サブテーマ3 目標	脱炭素トランジションに関して、持続可能な開発目標(SDGs)に関連する複数の項目(経済や雇用、格差など)について評価枠組みを構築する。この評価枠組みを用いて、研究課題全体のシナリオ設計に基づき、脱炭素トランジションについてシナジーとトレードオフについて多面的に評価する。またサブテーマ1が取りまとめるモデル相互比較にAIM/Enduse, AIM/Hubモデルで参画する。

3. サブテーマ3 研究開発内容

本サブテーマは、(3-1) 所得階層別所得・支出モデルの日本への適用、(3-2) 複数の統合評価モデルを用いた日本脱炭素シナリオにおける所得・支出への影響評価、(3-3) エネルギーシステムモデル・経済モデルによる日本の脱炭素シナリオの定量評価、の3点を主として実施した。以降にそれぞれの研究開発内容を示す。

(3-1) 所得階層別の家計所得・支出モデルの日本への適用

気候変動緩和策の一つである炭素税は、効率的な排出削減に向けた有効な方策の一つとされているが、CO₂排出の多い財の価格増、支出増をもたらし、低所得層への影響を通じた所得・格差への悪影響が懸念される。これまでの研究は世界全域を対象としたもの（Fujimori et al., 2020など）が主であったが、本研究では所得階層別の家計所得・支出モデル(AIM/PHI, Asian-Pacific Integrated Modeling Poverty, Household and Income distribution) について、これまで世界全域を対象としていたモデルを拡張し、日本の家計消費データを用いることで、日本を対象とした評価が可能となるよう改良した。本モデルを用いて、将来の社会経済状況変化や排出削減目標を前提に経済モデルAIM/Hub(Asian-Pacific Integrated Modeling/Hub)モデルで推定された価格変化、過去の価格情報および消費支出データ等を入力とし、AIM/PHIを用いて将来消費支出を計算した。

AIM/PHIモデルは、所得分布を計算するIncome modelと、将来消費支出を計算するExpenditure modelにより構成される。Income modelでは、平均所得とジニ係数を説明変数とする対数正規モデルにより、所得分布を近似する。この手法により、マクロ経済指標を用いてパラメータの導出が可能となる。Expenditure modelでは、価格変化を主な入力として、AIDADS(An Implicitly Directly Additive Demand System)モデルを用いて将来の消費支出を計算する。AIDADSモデルは、従来の研究で広く用いられていた需要モデルであるLES(Linear Expenditure System)の一般形であり、従来の需要モデルにおける諸問題をより現実的な推定パラメータ数で解決したものである。これを用いることで、所得の変化に対する需要の変化をより現実に近い形で推定することが可能である。炭素税による影響を表す指標の一つとして、等価変分(Equivalent Variation: EV)を用いた。EVは、排出削減策を行わない場合の全支出を基準として、排出削減策実施後の支出水準を達成するために必要な、追加支出の割合を表している。EVが正の値であれば削減策により実質的な消費支出が増加することを意味する一方、EVが負の値であれば、実質的な消費支出が減少することを意味する。また、モデルで求めたパラメータをもとに、各消費が価格変化にどのように応答するかを調べるため、需要の価格弾力性を算出する。価格弾力性は、価格が1%変化したときの消費の変化率を表している。

本研究ではAIM/PHIのパラメータ推定にあたり、日本を対象とする消費・価格に関するデータを用いた。AIM/PHIの消費支出データとしては、90か国・4所得階層区分のデータをまとめたGlobal Consumption Database (GCD)、34か国・五分位階級ごとのデータをまとめたEUROSTATが用いられている。これらは、COICOP (Classification Of Individual Consumption by Purpose)消費分類に従い、かつ一人あたり消費支出として集約されている。本研究ではこれらの国際消費統計データに、日本の消費支出データとして全国消費実態調査を導入した。これにより、日本以外の国のデータをもとに構築されていた消費モデルを、日本の消費データを反映させた形に更新することを可能とした。また価格については、世界全体での一貫した尺度として購買力平価米ドル(Purchasing Power Parity U.S dollar : PPP\$)を用いた。日本については過去の消費者物価指数を用いて、物価の変化をパラメータ推定に反映させた。

日本の消費支出データをAIM/PHIで用いるため、以下の手順で集約・修正を行った。まず、「用途分類」と「品目分類」のデータを用いて、COICOPへの集約のずれをできるだけ修正した。本研究では、所得階層間の違いがより詳細に記述されたデータを用いるため、十分位階級別、世帯当たり1カ月の消費支出データ(用途分類)を主として使い、COICOPへの集約により生じた誤差の検出や集約データの修正作業に、品目分類データを用いた。具体的には、まず総務省統計局が公表している「収支項目分類表(新旧対照表)」および「COICOP分類と収支項目分類(品目分類)対比表」に基づき、日本の品目分類・用途分類からCOICOPへの対応付けを行った。この際、用途分類データにおける消費項目で、COICOPの複数分類にまたがって集約されているものについては、前後の消費項目をふまえて、一意に集約先を決定した。そして、十分位階級別の消費データを五分位階級別のデータに集約したうえで、同じく五分位階級別の品目分類データをと比較し、品目分類データに対する相対誤差が5%以上となっている項目を特定し、修正を行った次に、1ヶ月あたり消費支出の修正を行った。これは、全国消費実態調査の調査対象月が、単身世帯については9-10月、二人以上世帯は9-11月であり、1年を代表した値ではない可能性を考慮する必要があるためである。具体的には、家計調査の月別データ(2000年~2019年、各年12カ月)を用いて、9-11月平

均消費支出と年平均消費支出の比をとることで、補正係数を求めた。そして、集約が完了したデータに補正係数を乗ずることで、1カ月あたりの消費支出額の代表値となるように補正を行った。最後に、OECD尺度を用いて一人当たり消費支出額に変換し、各年の米ドルへの為替レートとICPより得られた日本についての購買力情報で除することで、PPP\$への変換を行った。

日本の消費実態調査に基づいたパラメータを用いた支出額の推定結果と、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の比較を図3-1に示す。図3-1（左）は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精度を表しており、横軸が観測値、縦軸が推定値を表している。途上国や他の先進国のデータすべてを最もよく近似するようパラメータが設定されているため、精度は低い。一方で、図3-1（右）は日本の所得階層別消費支出データを用いて推定されたパラメータを用いた比較を示しており、精度がかなり改善していることがわかる。世界全体の消費データをもとに計算された消費項目ごとの所得弾力性と、日本の所得階層ごとのデータを用いてパラメータ推定した後の各所得階層ごとの所得弾力性の値を図3-2に示す。縦軸のスケールは各消費項目で異なることに注意する。図から、日本の消費データを用いることにより、所得階層ごとの消費パターンの違いが導入されていることがわかる。また、一部の消費項目、例えば、CFWやHWE（Housing, Water, Energy）、MGSは、日本での所得階層ごとの所得弾力性が、グローバルパラメータによる所得弾力性の上側または下側に大きく偏っている。これは、日本の家計における消費パターンが世界全体の平均的な消費パターンとは違っており、日本の消費データを導入したことにより、こうした違いが反映されるようにモデルが更新されたことを意味している。なお、以下、図や表、および本文中でCOICOP消費項目に個別で言及するときは、表3-1に記載の略記を用いる。

評価対象とするシナリオの排出削減策の設定については、削減策を特に行わないBaseline経路に加えて、Fujimori et al. (2020)における2℃目標相当の炭素税率を入力条件とした。具体的には、2030年に2℃シナリオで84.1ドル/t-CO₂の炭素税が課されるとした。

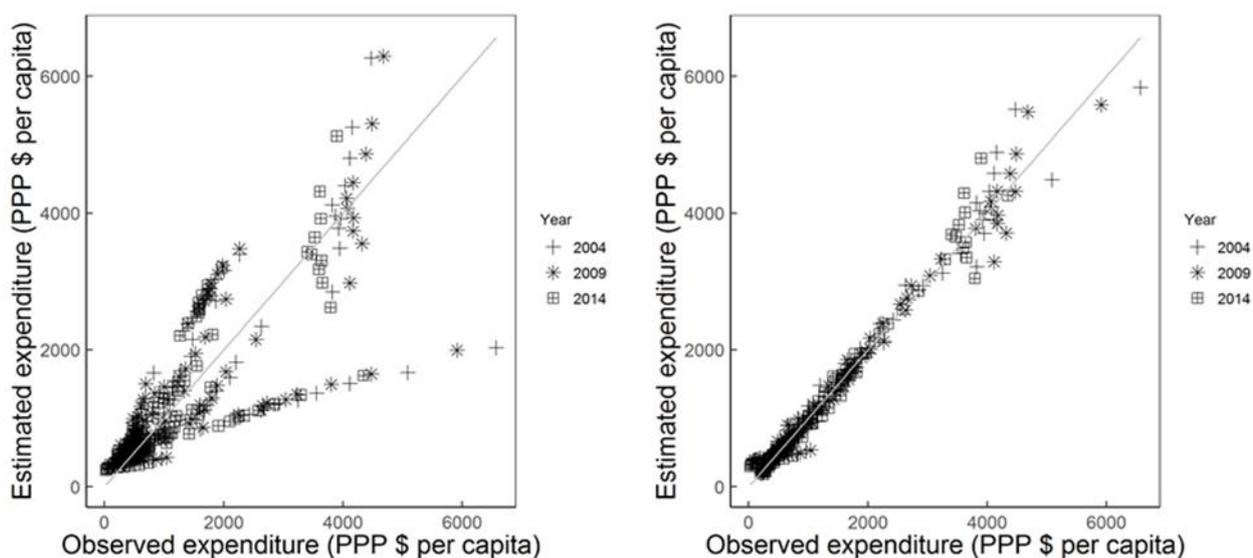


図3-1 従来用いていたグローバルパラメータによる支出推定（左）と、日本を対象としたナショナルパラメータによる支出推定（右）

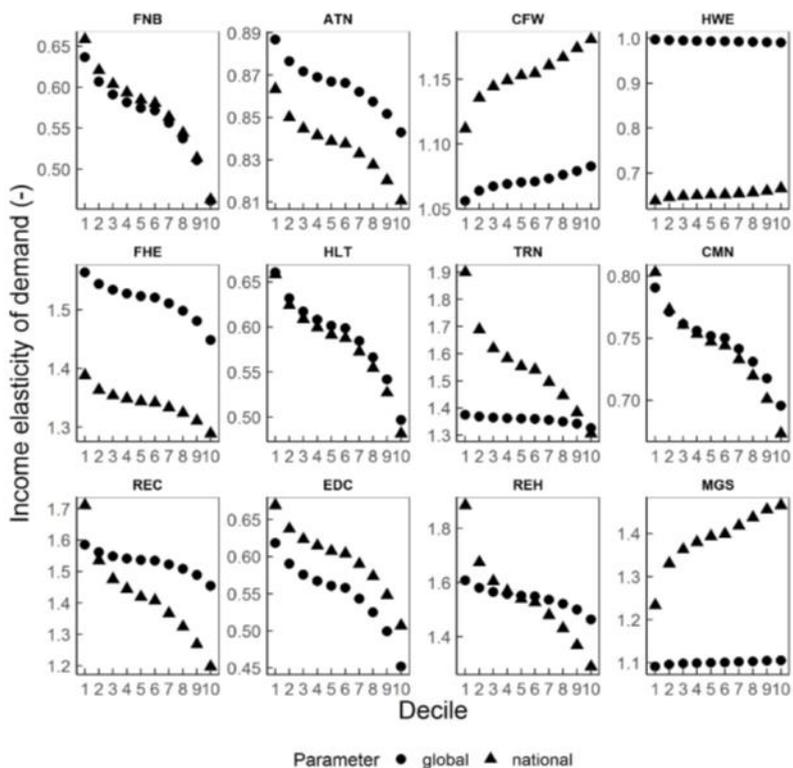


図 3-2 グローバルパラメータによる所得弾力性とナショナルパラメータによる所得弾力性の比較

表 3-1 家計の消費支出項目の詳細と略称

日本語表記	英語表記	略記
食料及び非アルコール飲料	Food and nonalcoholic beverages	FNB
アルコール飲料及びたばこ	Alcohol beverages, tobacco and narcotics	ATN
被服及び履物	Clothing and footwear	CFW
住居	Housing	HSG
水	Water	WTR
エネルギー	Energy	ENE
家具, 家庭用機器及び家事サービス	Furnishings, household equipment and maintenance	FHE
保健・医療	Health	HLT
交通	Transport	TRN
通信	Communication	CMN
娯楽・レジャー・文化	Recreation and culture	REC
教育	Education	EDC
外食・宿泊	Restaurants and hotels	REH
その他	Miscellaneous goods and services	MGS

(3-2) 複数の統合評価モデルを用いた日本脱炭素シナリオにおける所得・支出への影響評価

研究(3-1)で用いた家計所得・支出モデルAIM/PHIを用いて、日本の2050年ネットゼロ排出シナリオにおける所得階層別消費・支出への影響について評価を行った。この際、評価対象が長期になること、およびネットゼロ排出シナリオの多様性を踏まえ、AIM/PHIへの入力として用いる統合評価モデルについて、日本を対象とした複数の統合評価モデル、エネルギーシステムモデルを用いた。2030年頃の短中期においては、再生可能エネルギーの拡大等による低炭素エネルギーへの移行、省エネ・電化によるエ

エネルギー需要部門の削減が主要な方策となる点は比較的どのモデルでも同様の傾向を示すが、長期ゼロ排出シナリオの場合、それらに加えて二酸化炭素除去（Carbon Dioxide Removal, CDR）の表現、電力部門の表現に応じた変動性再生可能エネルギーの導入可能性・費用、水素等のエネルギーの表現に応じて、エネルギーシナリオは多様である。IPCC AR6における世界を対象としたシナリオでも、需要削減を大規模に行うもの（IMP-LD）、CDRを大規模に実施するもの（IMP-Neg）、再生可能エネルギー拡大と電化に依存したもの（IMP-Ren）など多様な幅がある（Riahi et al., 2022）。本研究では、統合評価モデル・エネルギーシステムモデルとして、一般均衡モデルAIM/Hub、エネルギーシステムモデルAIM/Technologyを用いた。本研究では、財・サービスの内、消費支出項目の1つであるエネルギー財価格変化の推計に2つのモデルを用いた。ただしAIM/Technologyはエネルギー部門のみを対象としたエネルギーシステムモデルであり、それ以外の財・サービスの価格変化は出力されないため、それらについてはAIM-Hubの推計結果を用いた。

AIM-Hub (Fujimori et al., 2017) は産業部門別の活動を推計する逐次動学型応用一般均衡モデルであり、炭素への価格付けに応じた税収は、代表家計に一括して還元される。ただしこの還元は平均所得を変化させるだけで、所得階層間の再分配は考慮されておらず、それらはAIM/PHIによって出力される。AIM-Technology (Oshiro et al., 2021) は、エネルギーサービス需要および各種技術の初期費用・運転費用・エネルギー効率等を入力とし、エネルギーシステムコストを最小とするように技術・エネルギーを選択する部分均衡モデルである。両モデルの出力をAIM/PHIに入力するにあたっては、AIM-HubとAIM-Technologyによって推計された家計の最終エネルギーの価格と消費量より、消費項目の一つである家計のエネルギー財の価格変化を推計した。その結果を図3-3に示す。温室効果ガス排出経路には、緩和策なしの経路（Baselineシナリオ）とNetZeroシナリオの2つを用いた。Baselineシナリオは特段の緩和策を想定しない。NetZeroシナリオは、シナリオはサブテーマ1が主導するモデル比較のプロトコルに沿ったシナリオとして、2030年にNDC相当、2050年にCO₂ネットゼロ排出を達成するものを用いた。Baselineシナリオにおける家計のエネルギー財の価格変化は両モデルとも現状から大きくは変化しておらず、長期的には太陽光発電の価格低下見通し等を反映してやや現状より低下する傾向にある。AIM/Hubでは、2050年に炭素価格が上昇するためにエネルギー財の価格が大きく増加している。一方AIM/Technologyでは、発電部門でのCDR実施により電力コストがやや低下すること、家庭部門はほぼ2050年までに電化することから、家計のエネルギー財価格は低下している。

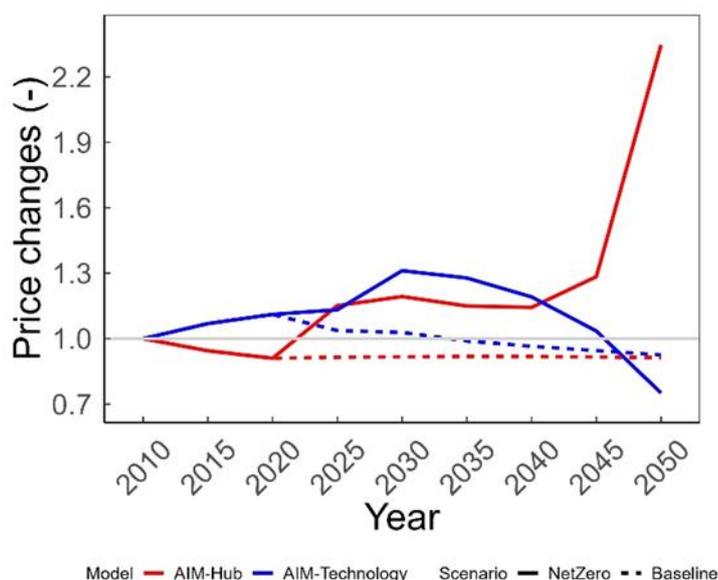


図3-3 AIM/Hub, AIM/Technologyによる家計のエネルギー財の価格変化（2010年を1とする）の比較

(3-3) エネルギーシステムモデル・経済モデルによる日本の脱炭素シナリオの定量評価

日本を対象としたエネルギーシステムモデルAIM/Technology-Japan (AIM/Enduse-Japan V2.1から改名) (Oshiro et al., 2021) (図3-4)、応用一般均衡モデルAIM/Hub-Japan (Fujimori et al., 2017) (図3-5)の、2つの異なるモデルを用いて、サブテーマ1が主導するモデル相互比較

(JMIP2)のシナリオプロトコルにしたがい、2050年にCO₂排出ゼロとするシナリオを含む複数の排出経路について分析を実施し、シナリオデータ提出を行った。特に、ゼロ排出の達成において重要となりうるCarbon Dioxide Removal (CDR)や水素等の技術の評価できるように改良するとともに、CDRの量を制約した場合のエネルギーシステム・経済への影響について分析した。

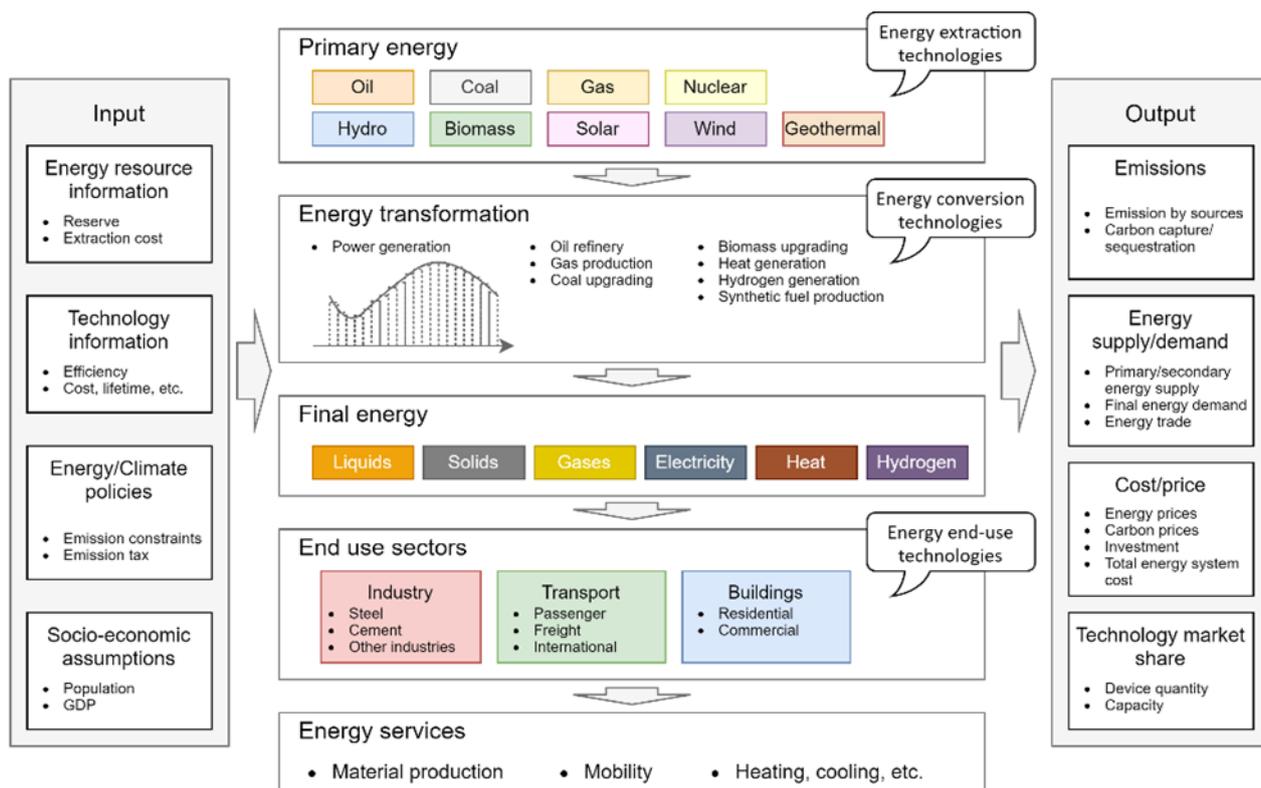


図3-4 AIM/Technologyモデルの概要

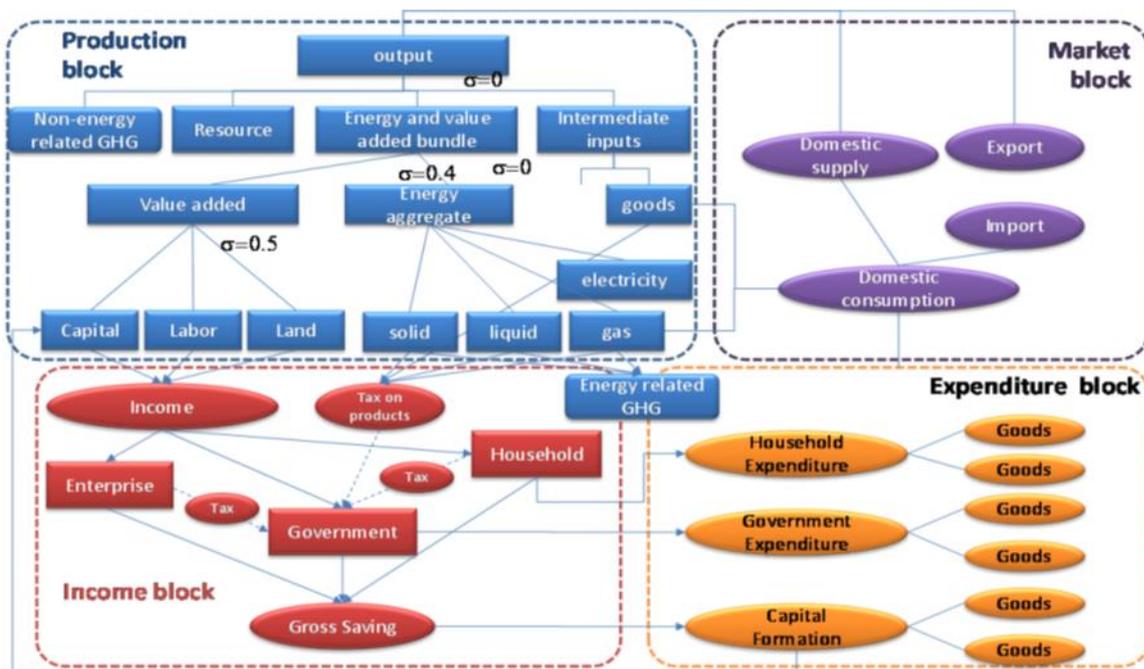


図 3-5 AIM/Hubモデルの概要

4. サブテーマ 3 結果及び考察

(3-1) 所得階層別の家計所得・支出モデルの日本への適用

結果では、異なる所得階層を十分位階級として示し、表記には” Decile” を用いる。Decileの番号が小さいほど低所得階層であることを示している。なお結果はすべて2030年の値である。

図 3-6 左に2030 年における消費項目ごとのBaselineシナリオに対する価格変化(炭素税による上昇分を含む)を示す。Baseline シナリオにおける価格を1としており、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わかる(3.8%の価格上昇)。2°Cシナリオにおける2030年の各所得階層ごとの等価変分(Baseline比)の計算結果を図 3-6 右に示す。最も所得が低い層(Decile 1)では、Baselineシナリオを基準としたとき、支出が1.18%ほど減少している。この減少割合は、所得が高くなるにつれて小さくなり、最も所得が高いDecile10では0.27%の減少にとどまっている。

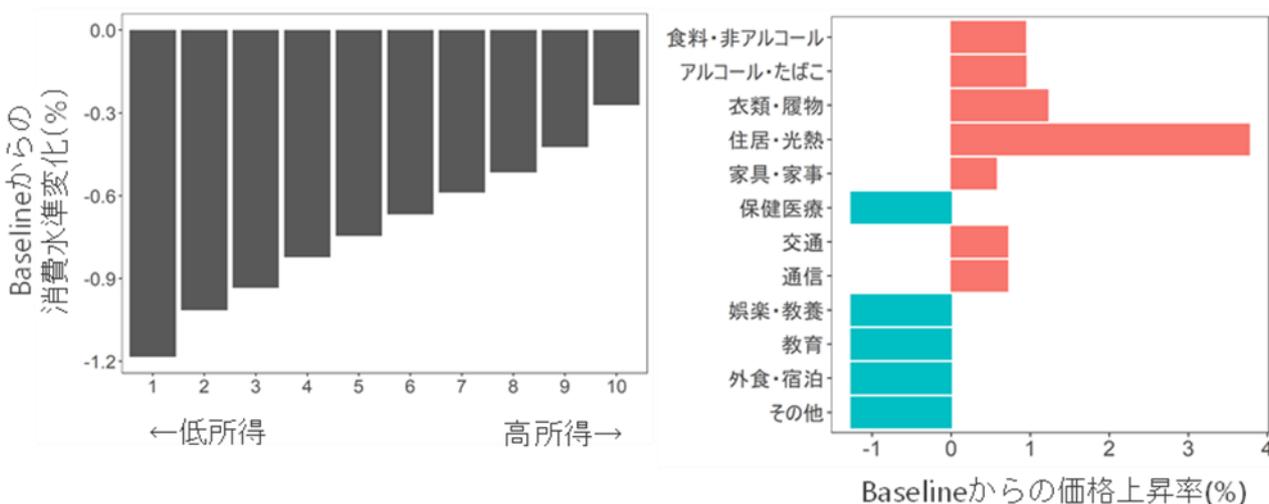


図 3-6 (左) 所得階層別の消費水準変化の推計結果 (右) 消費項目別の価格上昇率 (Baseline比) .

Baselineシナリオにおける消費項目ごとの支出割合を図3-7左に示す。全所得階級を通して、全支出に占める支出割合が大きいのはHWEである。Decile1では全体の36.0%を占めており、支出割合は最大である。しかし所得が上昇するにつれて割合が減少し、Decile10では全体の19.3%となっているが、依然として全体の中ではウェイトが大きい。一方で、所得の上昇によって支出割合が増加しているのがMGSである。Decile1では17.1%の支出割合であるのに対し、Decile10では30.8%にまで上昇している。Decile8より上の所得階層で支出割合が最も大きい消費項目となっている。HWEと同じ傾向を示しているのはFNB、ATN、HLT、CMN、EDCであり、その他の消費項目はMGSの傾向を示している。続いて、2℃シナリオにおけるBaselineシナリオからの消費量の変化率を図3-7右に示す。HWEのみが、所得階層ごとの消費量変化が他の消費項目と異なる傾向を示しており、低所得階層ほど消費減少が小さい。具体的には、Decile1の変化率は-1.37%である一方、Decile10では-2.91%の変化率である。その他の消費項目で、高所得階層でむしろ消費が増加しているのがHLT、REC、EDC、REH、MGSである。また、程度に差はあるが、HWEを除くすべての消費項目で、低所得階層ほど消費が減少し、高所得階層ほど消費があまり減少しないまたは増加するという傾向がある。

財・サービスの価格変化率に対する、消費量の変化率を表す価格弾力性の推定値を図3-8に示す。TRN、REHでは価格弾力性が所得階層に関わらず-1になっている。これは、最低消費量が0であるためである。これらの消費項目では価格の変化に比例して消費が減少する。これら2つの消費項目以外では、低所得階層より高所得階層の方が価格弾力性が小さい。つまり、価格の変化に対してより消費が減少することを示している。

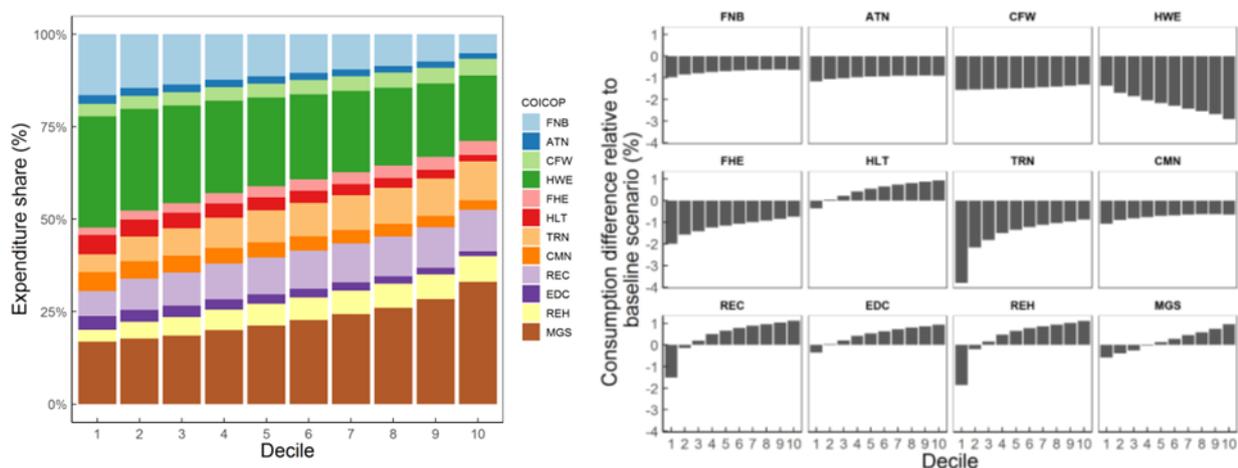


図3-7 (左) Baselineシナリオにおける所得項目別支出割合 (右) Baselineシナリオに対する2℃シナリオの消費量変化率

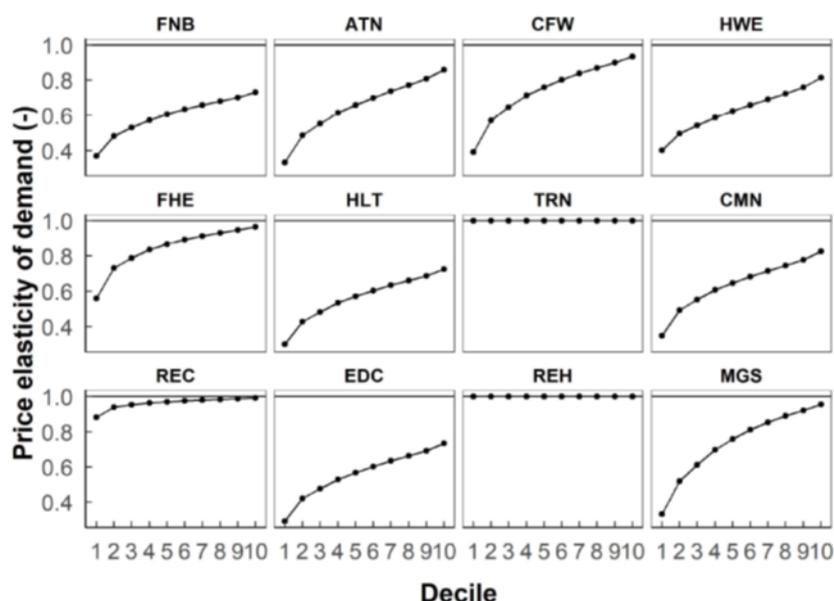


図 3-8 Baselineシナリオにおける価格弾力性

等価変分の結果について、低所得階層と高所得階層で全支出変化に約0.9%の差が生じており、所得階層間で支出への影響が様ではないことがわかる。また、HWEにおいて、高所得階層ほど消費を減らしており、等価変分とは逆の傾向を示している。一方で、他の消費項目については、等価変分の結果と同じく、低所得階層ほど減少が大きく、高所得階層ほど減少が小さいという傾向を示している。この結果は、Baselineシナリオからの価格変化、および家計のとり消費行動の変化という観点をふまえると、次のように解釈できる。まず、HWEについては他の消費項目よりも価格上昇が大きい。HWEはすべての所得階層で支出割合が大きいため、価格上昇の影響で家計消費が圧迫される。これに対応し、消費者はHWEの消費を減らすことで家計消費への影響を相殺しようと試みる。しかし、価格弾力性の値が、Decile1では約0.4であるのに対しDecile10では約0.81であり、低所得階層ほど価格変化に対する消費減少が小さい。これは、低所得階層ほど最低水準に近い消費をすでに行っており、消費を追加的に減らすことが難しいためだと考えられる。一方で、高所得階層は低所得階層よりも消費を大幅に減らすことが可能である。この結果、高所得階層はHWEの価格上昇による家計消費への影響の大部分を、消費を大幅に減らすことで相殺することができる一方、低所得階層は影響を完全に相殺できないという違いが生じる。低所得階層においては、HWEで減らしきれなかった分の過剰支出を別の消費項目で減らす必要が出てくる。そこで、価格変化がHWEに比べて小さい他の消費項目についても、消費に余裕が残っていれば消費を減らそうと消費行動を変化させる。これらの項目については、HWEほどの価格変化が生じていないため、複数の項目にまたがって消費が減少する。一方で、高所得階層は消費に余裕があることから、一部の消費項目で消費を増やすことが可能である。以上から、炭素税導入による総支出減少が所得階層間で不均一になるのは、炭素税がHWEの消費に大きく影響し、かつHWEの価格弾力性の絶対値が低所得階層ほど小さいことが原因であると考えられる。

以上より、炭素税の所得に対する逆進性が認められることが示された。このような炭素税の逆進性を改善する方法としては、既存税の減税、税収を家計に一律に還元する方式などがあり、既に高い税率で炭素税を導入している国でもこのような政策が行われている。しかし、今までの考察をふまえると、家計の消費行動の変化に着目した補償政策を考えることが可能であると考えられる。例えば、日本において、低所得階層のHWE以外の消費に対して補償を行うことで、HWEにおいて排出削減を効率的に行いつつ、全体の支出への影響を抑えられると推測される。また、特に低所得階層について、低炭素技術の導入を推進することで、全支出に対するHWEの割合を減らし、価格上昇による影響を減らすことができると考えられる。

本研究では、炭素税導入によって、所得階層ごとに影響がどのように異なるのかを、家計の消費行動の変化に着目して分析した。結果として、Baselineシナリオと比較して、2℃シナリオについては約-1.2%~-0.3%の支出減少が生じることがわかった。この支出減少幅は所得階層の違いに起因するものであり、日本における炭素税導入が家計消費にもたらす影響は、所得階層間で均一ではない。この要因として、価格変化に対して選択できる消費行動が所得階層ごとに違うことが挙げられる。

本研究の結果で留意すべき点は以下の2点である。まず、本研究ではCOICOP分類の中でも12の大分類に準拠した集約を行ったが、実際にはより細かな消費項目が存在し、それぞれで炭素税による影響の大きさが異なると考えられる。例えばひとえにHWEといっても、具体的エネルギーのどの部門での価格変化が最終的な結果に大きな影響を及ぼしているのか分析できていない。次に、多くの先行研究同様、消費パターンに注目した分析しか行えていないが、実際には、炭素税が所得に影響を及ぼすことも考えられる。そのため、これらを考慮したモデル構築を行い、より詳細な分析を行っていくことが今後の課題である。また本研究では、具体的にどれくらい緩和措置をとれば低所得階層への影響を緩和できるのか示せていない。今後は、本研究で得られた結果をもとに、消費行動に着目した具体的な補償方法を考える必要がある。また、消費行動については、所得階層間での違いだけでなく世代間の違いも考えられ、影響もそれに応じて異なるものになると推測される。こういった情報を組み込んだ分析を行うことで、補償方法をより具体的に提供できるようになると考えられる。

本研究成果は土木学会論文集（成果番号9）に掲載された。

（3-2）複数モデルを用いた持続可能性評価手法の日本の2050年目標への適用

2050年のNetZeroシナリオにおけるBaselineシナリオからの各消費支出項目の消費量変化率を所得階層ごとに表したものを図3-9に示す。ここで、DECILE1が最低所得階層、DECILE10が最高所得階層を表している。2050年においてBaselineシナリオと比較してNetZeroシナリオでは、ENEの価格がAIM-Hub（AIM-Technology）では2.57倍（0.81倍）に上昇する。他の財については、TRNとCMNの価格が6%上昇しているのを除いて、大きな変化はみられない。また、消費量変化率は両モデルでENEが大きい。AIM-Hub（AIM-Technology）による推計結果では、ENEの変化率はDECILE1で-17.2%（4.06%）となっているが、DECILE10で-46.1%（17.6%）となっている。AIM-Hubでは高所得階層ほどENEの消費量減少割合が大きい一方、AIM-Technologyでは全所得階層でENEの消費量が増加し、高所得階層ほどENEの消費量増加割合が大きい。つまり、両モデルでENEの消費量が累進性に変化している。AIM-TechnologyでENEの消費量が増加する理由は、AIM-Technologyの推計ではNetZeroシナリオにおける2050年のエネルギー財価格がBaselineシナリオよりも低くなるためである。

2050年のNetZeroシナリオにおける価格弾力性、所得弾力性を所得階層ごとに表したものを図3-10に示す。価格弾力性の値が-1より大きい（0に近い）場合は価格の変化率に対して消費量の変化率が小さいことを表し、-1より小さい（0から遠い）場合は価格の変化率に対して消費量の変化率が大きいことを示している。また、所得弾力性の値が1より大きい場合は価格の変化率に対して消費量の変化率が大きいことを表し、1より小さい場合は価格の変化率に対して消費量の変化率が小さいことを示している。2050年のNetZeroシナリオにおいて、両モデルのすべての財で価格弾力性の値が-1より大きく、低所得階層ほど値が大きい。つまり、低所得階層ほど価格の変化率に対して消費量の変化率が小さい。そして、AIM-TechnologyのENEに関して価格弾力性の値が高所得階層ほど小さい。また、2050年のNetZeroシナリオにおいて、両モデルでFNB、ATN、ENE、HLT、CMN、EDCの所得弾力性の値が1より小さい。つまり、所得の変化率に対する消費量の変化率が小さい。そして、AIM-TechnologyのENEに関して所得弾力性の値が高所得階層ほど小さい結果となっている。

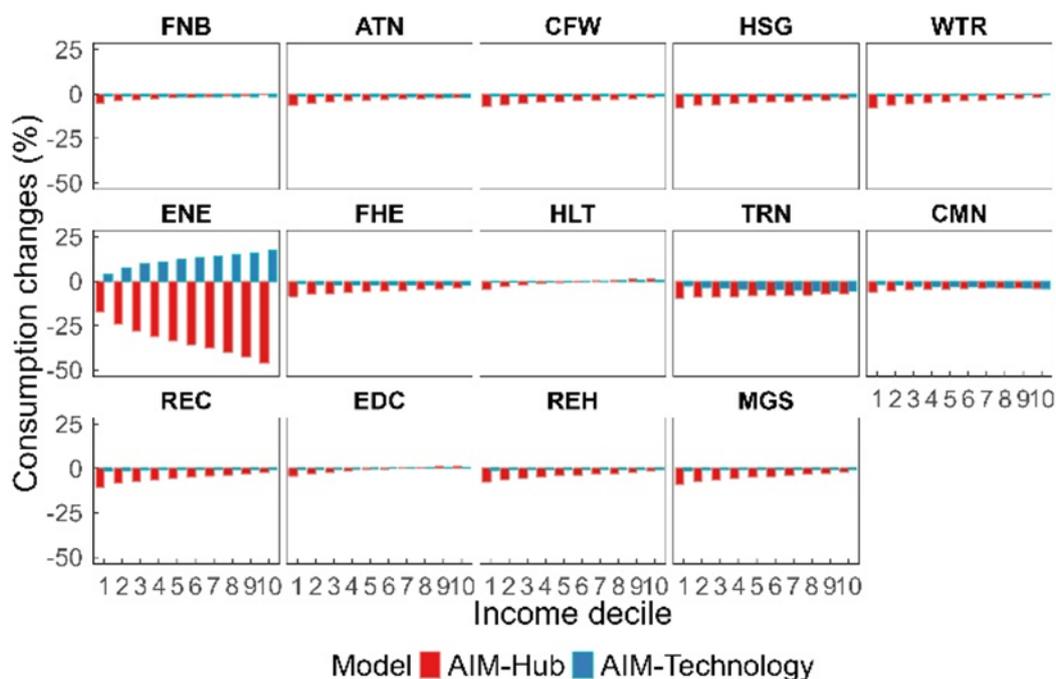


図 3 - 9 Baselineに対する消費量変化率 (2050年)

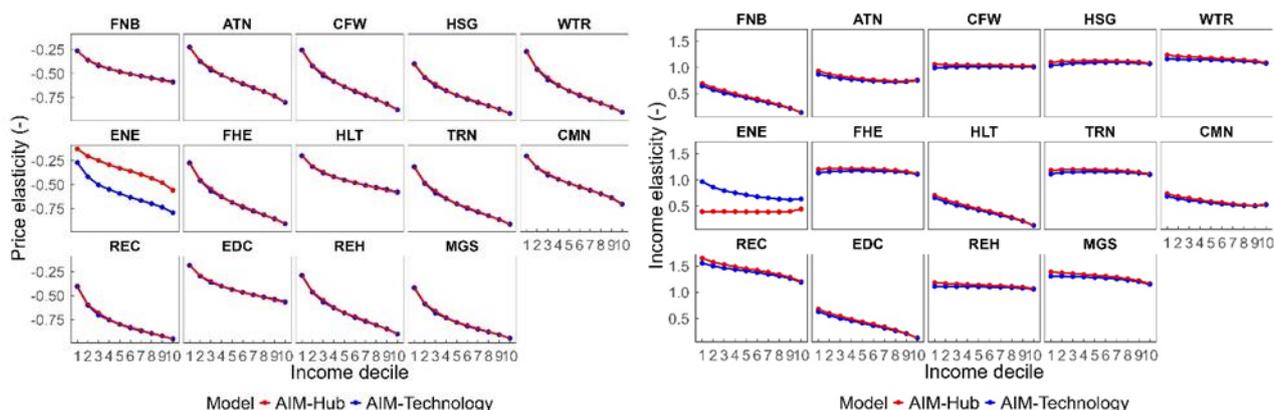


図 3 - 1 0 (左) 価格弾力性 (2050年) (右) 所得弾力性 (2050年)

2050年のBaselineシナリオにおける家計消費支出割合を所得階層ごとに表したものを図 3 - 1 1 に示す。また、2050年のNetZeroシナリオにおけるBaselineシナリオに対する各消費支出項目の等価変分を所得階層ごとに表したものを図 3 - 1 2 に示す。両モデルでMGSを除いてHSGの消費支出割合が最も大きい。さらに、所得階層が上がるにつれてTRN、RECの支出割合が大きくなる。逆に、所得階層が上がるにつれて、FNB、ENE、HLTの支出割合が小さくなる。また、両モデルで全所得階層においてHSG、ENE、TRNの等価変分の値が大きい。AIM-Hub (AIM-Technology) による推計結果では、ENEの等価変分はDECILE1で-0.80% (0.19%) となっているが、DECILE10で-1.16% (0.45%) となっている。値の変化が一番大きい所得階層はDECILE7で-1.31% (0.49%) となっている。つまり、AIM-Hubでは全所得階層で等価変分が減少するが、AIM-Technologyでは増加する。ここで、ENEの最大値がDECILE7である理由は、ENEに関してBaselineシナリオにおける支出割合が逆進性を示すのに対して、およびBaselineシナリオからの消費量変化が累進性を示すため、その2つの積を計算するとDECILE7で値が最大になると考えられる。

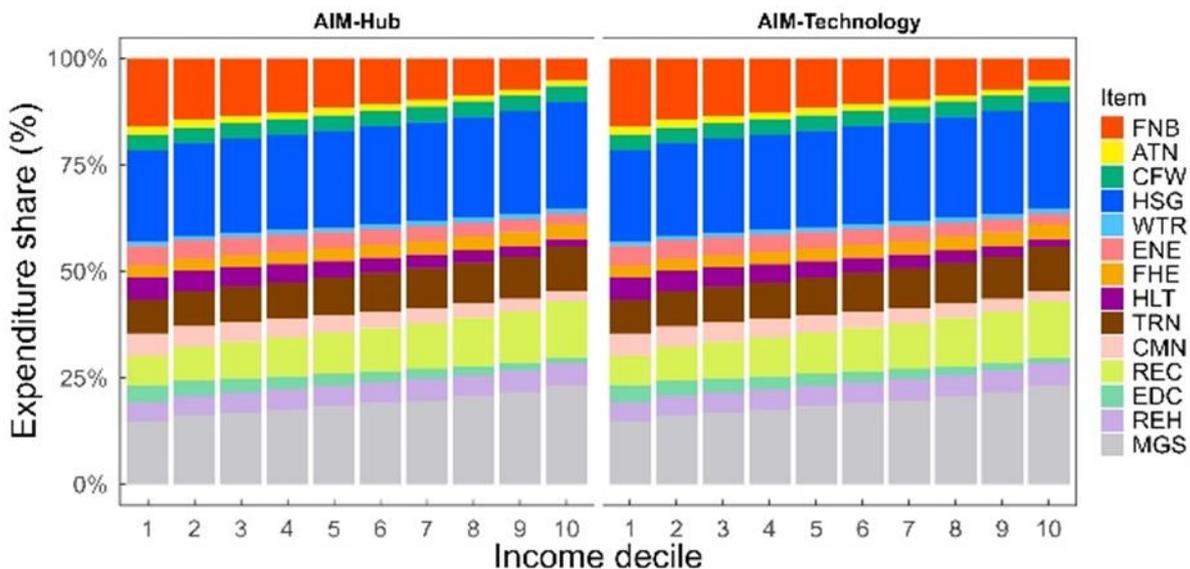


図3-1-1 Baselineにおける家計消費支出割合（2050年）

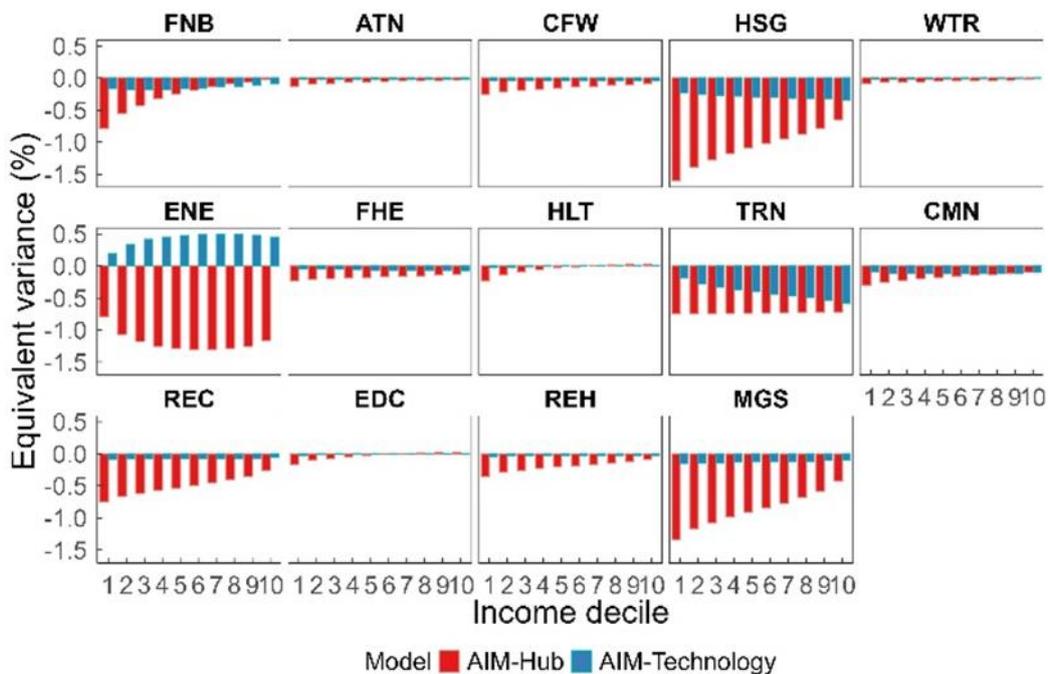


図3-1-2 Baselineに対する等価変分（2050年）

本研究では、炭素税は2050年ネットゼロ排出シナリオにおいても、家計消費に対して逆進的な影響を与えることを示した。ただし家計のエネルギー財価格は推計に用いたモデルによって大きく異なった。これは2つの統合評価モデルの構造、パラメータの違いに起因するものであり、例えばAIM/Hubは財の価格に応じて経済活動の規模が内生的に変化するが、AIM/Technologyは外生的に設定したサービス需要量は緩和の度合いに対しては一定である。また、家庭におけるエネルギー需要の表現についても差があり、AIM/Technologyは費用を最小化するエネルギー技術が選択されるため、高い炭素税の下では電化が進みやすいが、AIM/HubはAIM/Technologyと比較して、価格変化に対して急速な技術の変化が起きにくい傾向にある。以上の結果より、炭素税のみではなく、低所得層への電化技術等の技術導入をサポートする政策など、包括的な政策の実施が有効であることが示唆された。さらに、特に2050年脱炭素化シナリオには家計のエネルギー財の価格に関する指標についてモデル間の幅が大きいことから、複数モデルに基づ

く分析の重要性が示された。

また、2050年のエネルギー財価格の推計においては、発電においてバイオマス・CCSを組み合わせたBECCSの導入に応じて、排出が負となる場合があることに留意が必要である。モデル内では負の排出に対しては補助金が与えられるような想定が置かれているため、BECCSの実施量が大きいほど電力価格が低減する構造となっているが、この前提については実態の税制や料金算定方法との整合を踏まえた議論が必要になると考えられる。

本研究成果は土木学会論文集に投稿中である。

(3-3) エネルギーシステムモデル・経済モデルによる日本の脱炭素シナリオの定量評価

図3-13にAIM/Technology-Japanによる日本2050年ゼロ排出シナリオの推計結果を示す。ゼロ排出シナリオでは、BECCS・DACCSによる負の排出により残存排出を相殺しており、残存排出は産業・工業プロセス、CO₂以外のGHGなど、いわゆる脱炭素化が困難な部門からの排出となっている。その中で、CDR制約シナリオ（CDR50）ではCDRによる相殺が困難となるため、残存排出を大幅に減少させることでゼロ排出を達成している。このため、電化に加えて水素も2050年の最終エネルギー消費の1割程度まで増加し、大気中から回収したCO₂と水素による合成燃料利用も増加する結果となった。ただし、ゼロ排出シナリオでは炭素価格・エネルギーシステム費用とも、80%減シナリオと比べて増加幅が大きく、特にCDR制約による影響は特に大きい結果となった。そのため、費用面ではCDRが相対的に優位なオプションであり、水素エネルギーキャリア、CCUも重要な対策となりうるが、費用面に課題があることが示唆された。図3-14はAIM/Hub-Japanによる消費ロスの試算結果であり、脱炭素シナリオにおける経済影響は、2050年80%減シナリオの約4%から、6%程度に増加する結果となっている。これらのシナリオ定量化の成果はサブテーマ1のモデル比較に提供した（サブテーマ1と協力、成果番号5, 56）。

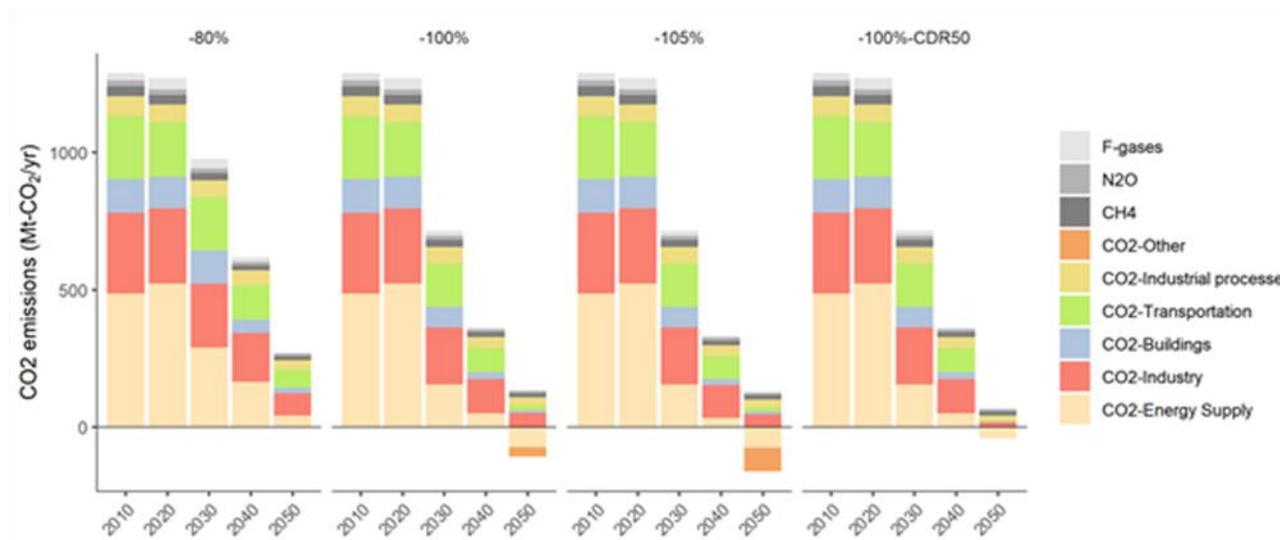


図3-13 AIM/Technology-Japanによる温室効果ガス排出量推計結果

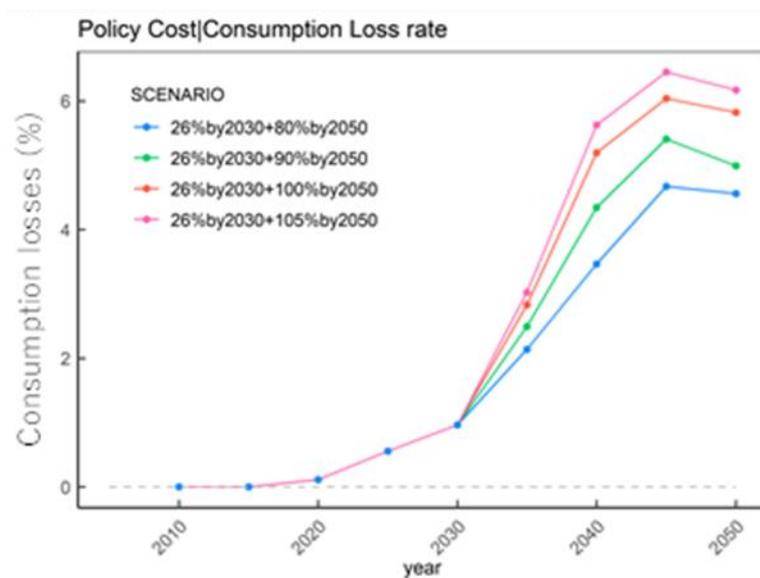


図3-14 AIM/Hub-Japanによる消費ロスの推計結果。

サブテーマ3 参考文献

Fujimori, S., Hasegawa, T., Masui, T., Takahashi, K., Herran, D. S., Dai, H., Hijioka, Y., Kainuma, M. 2017. SSP3: AIM implementation of Shared Socioeconomic Pathways. *Global Environmental Change*, 42, 268-283. doi:10.1016/j.gloenvcha.2016.06.009

Fujimori, S., Hasegawa, T., Oshiro, K. 2020. An assessment of the potential of using carbon tax revenue to tackle poverty. *Environmental Research Letters*, 15(11), 114063. doi:10.1088/1748-9326/abb55d

Oshiro, K., Fujimori, S., Ochi, Y., Ehara, T. 2021. Enabling energy system transition toward decarbonization in Japan through energy service demand reduction. *Energy*, 227, 120464. doi:10.1016/j.energy.2021.120464

Riahi, K., Schaeffer, R., Arango, J., Calvin, K., Guivarch, C., Hasegawa, T., Jiang, K., Kriegler, E., Matthews, R., Peters, G., Rao, A., Robertson, S., Sebbit, A. M., Steinberger, J., Tavoni, M., van Vuuren, D. P. 2022. Mitigation pathways compatible with long-term goals. In P. R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, . . . J. Malley (Eds.), *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK and New York: Cambridge University Press.

5. サブテーマ3 研究目標の達成状況

早期から家計所得・支出モデルの日本への適用に着手し、モデル比較へのシナリオ提出・貢献についても計画にしがい実施した。日本経済全体のGDPロス・消費ロスの評価に加えて、所得階層別の影響評価を実施する枠組みを構築したことで、脱炭素トランジションの多面的な評価が可能となった。結果として炭素税の逆進性などトレードオフの関係を明らかにするとともに、その影響を低減するための方策（技術政策や税収還元）を明らかにした。ほとんどの研究成果は研究機関内に査読付論文として掲載された。

II-4 サブテーマ4 「脱炭素トランジションのためのイノベーション・データベース構築」

[サブテーマ4 要旨]

本サブテーマでは、脱炭素トランジションのために大きな役割を果たし得る革新的技術のイノベーションを想定し、エネルギー需要側、エネルギー供給側、ならびにエネルギーシステム全体に係る多数の技術について、学術論文や報告書等の公開情報をもとに、それらのコストや効率、将来見通し等についてデータを収集し、イノベーション・データベースを作成した。これにより、一部の技術（例えば太陽光、風力や蓄電池等）のコスト低減は急速に進んでおり、今後も低減が進むことが予想される一方で、他の技術（例えば原子力やカーボンリサイクル、産業関連技術など）はコスト低減の実績も予測も見られない、といった差異を確認するとともに、何れの技術についても現在・将来におけるコスト想定には等しく大きな幅があり得る、といったことも確認することができた。

また、これらを踏まえ、主要な技術の想定を変化させることにより、エネルギー技術イノベーションの効果に関する分析を行った。それによれば、2050年の脱炭素化のもとでは、電力部門の中では洋上風力の影響が最も大きく、ついで太陽光発電の影響が大きくなることが示された。これらの技術や輸入水素のコスト低減が最適な電源構成に大きく影響を与える一方で、電力部門内の技術進歩が限界削減費用に与える影響は比較的小さく、EV等の需要側技術や、「最後の1トン」を直接定める水素の輸入価格等が与える影響が大きくなることが示された。但し、これらの結果は制約条件の与え方によって大きく変わることが予想され、より詳細な検討は依然、今後の課題として残ると言える。

1. サブテーマ4 研究開発目的

脱炭素トランジションはエネルギーシステムの根本的な革新を必要とする。そのため、技術イノベーションは脱炭素トランジションにおいて中心的な役割を果たす。これらの革新的技術はエネルギー需要側・エネルギー供給側の多くのセクターにまたがって存在する。このため、これらの技術イノベーションについて詳細に情報を収集し、その影響を評価することは極めて重要である。本サブテーマでは、学術論文や各種公開資料等に基づき、エネルギー需要側、供給側、もしくはエネルギーシステム全体に関わる革新的技術を対象として、そのコストや効率に関するデータを収集し、データベースを構築する。これをサブテーマ1や他のモデル研究チームに提供し、活用するとともに、エネルギー技術イノベーションの効果に関するモデル分析を実施し、定量的に評価することを目的とする。

2. サブテーマ4 研究目標

サブテーマ4	「脱炭素トランジションのためのイノベーション・データベース構築」
サブテーマ4 実施機関	日本エネルギー経済研究所
サブテーマ4 目標	脱炭素トランジションに資するエネルギー供給技術、需要側技術、またシステム全体に関する技術の情報収集および整理を行う。これに基づき、革新的イノベーションを中心にエネルギー技術イノベーションに関するデータベースを構築し、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。エネルギー技術イノベーションの効果に関する分析を実施する。またサブテーマ1が取りまとめるモデル相互比較にIEEJ-NE-Japanモデルで参画する。

3. サブテーマ4 研究開発内容

本サブテーマでは、まず、以下の技術を対象として、公開文献（学術論文や調査報告書、レポート等）をもとに調査を行い、それらのコスト、効率、ならびに将来見通しについて情報を収集・整理を行った。

- ・太陽光発電
- ・風力発電
- ・原子力発電
- ・水素・アンモニア
- ・蓄電池
- ・二酸化炭素回収・貯留 (Carbon Capture and Storage : CCS)
- ・直接大気回収 (Direct Air Capture : DAC)
- ・カーボンリサイクル
- ・電気自動車 (Battery Electric Vehicle : BEV)
- ・ヒートポンプ
- ・鉄鋼
- ・セメント
- ・紙・パルプ

収集した情報等はエクセルによるイノベーション・データベースとしてとりまとめるとともに、他モデル研究チームに提供するとともに、特にサブテーマ1の検討において役立てることとした。

更に、これらのデータの整理を踏まえた上で、IEEJ-NE_Japanモデルによってエネルギー技術イノベーションの効果に関する分析を実施した。具体的には、2050年にカーボンニュートラルを達成する「標準」ケースの中で、主要な技術に関するイノベーション（更なるコスト低減やポテンシャルの拡大）を想定し、それが最適な電源構成ならびにその中で再生可能エネルギー比率や限界削減費用、エネルギーシステム総費用等に与える影響について定量的に分析を行った。

4. サブテーマ4 結果及び考察

太陽光発電

太陽光発電のコスト指標として、定格出力あたりの費用を示す資本費[USD/kW]と、発電電力量あたりの費用に相当する均等化発電原価 (Levelized Cost Of Electricity: LCOE) などが存在する。LCOEで文献毎のコスト比較を行った場合、太陽光発電を設置する場所の日射条件などに依存してしまうため、本調査では資本費を比較の対象とした。

本調査では、2018年以降に公刊された研究機関等の報告書8件、および学術論文1件を対象とした。

図4-1に各文献における太陽光発電の設備費の2050年までの予測結果を示す。一つ一つの線が異なる予測を示す（以下の図でも同じ）。なお、単位はUSD/kWに換算した。対象とした文献における将来の資本費の予測手法として、(a)過去の生産量とコストの関係に基づく学習曲線、(b)各要素のコスト削減ポテンシャルを積算するボトムアップ法、(c)専門家への聞き取り調査の三種類が挙げられる。2050年における資本費の予測の最大値は1,936 USD/kW (BEIS 4kWシステム)、平均値は702 USD/kW、最小値は141 USD/kW (BEIS Large scale low case) となった。

風力発電

風力発電についても、LCOEで文献毎のコスト比較を行った場合、風況などの設置する場所の条件に依存するため、太陽光発電と同様に資本費を比較の対象とした。本調査では、2018年以降に公刊された研究機関等の報告書5件、および学術論文1件を対象とした。

図4-2および図4-3に各文献における陸上風力および洋上風力の設備費の2050年までの予測結果を示す。なお、単位はUSD/kWに換算した。IEAと発電コスト検証ワーキンググループは学習曲線による推計、EIAはボトムアップ方による推計、Wiser et al.は専門家への聞き取りによる推計を行っている。なお、IRENAの推計方法は明示されていない。2050年における資本費の予測の最大値は1,340 USD/kW (IEA EU 陸上風力)、3,838 USD/kW (wiser et al. 洋上風力)、最小値は639 USD/kW (wiser et al. 陸上風力)、750 USD/kW となった (BEIS 洋上風力)。

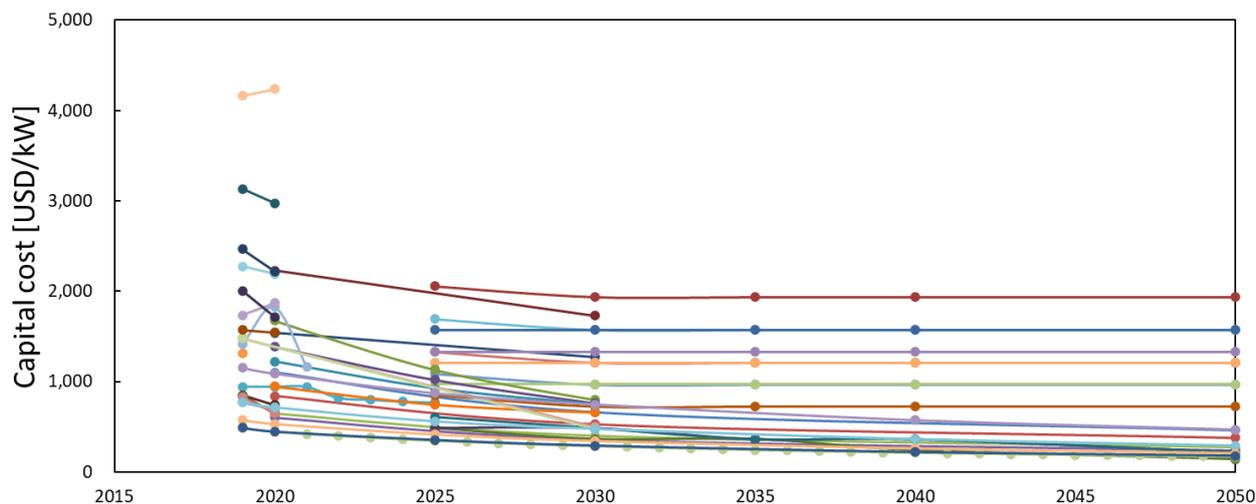


図 4 - 1 . 太陽光発電の設備費の予測.

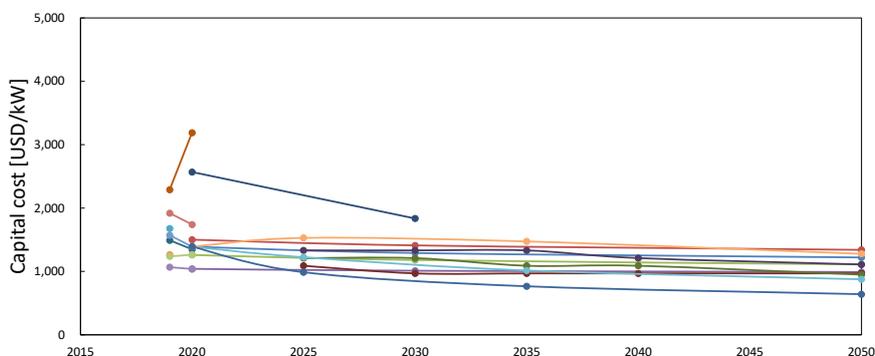


図 4 - 2 . 陸上風力の設備費の予測.

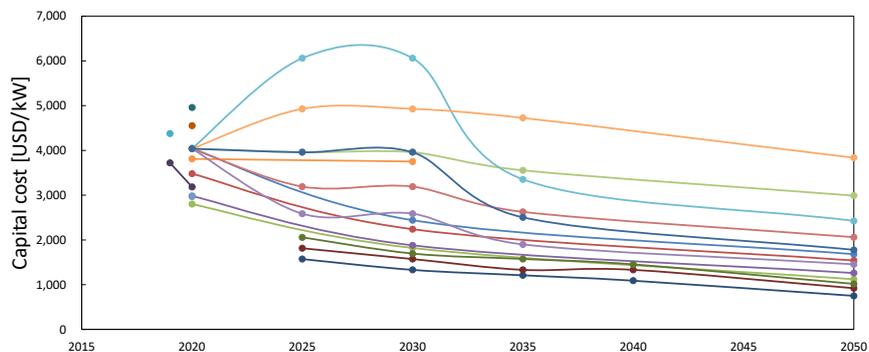


図 4 - 3 . 洋上風力の設備費の予測.

原子力発電

原子力発電のコスト指標として、主に建設費に相当する一夜費用（Overnight Cost）や発電電力量あたりの費用に相当する均等化発電原価（Levelized Cost Of Electricity: LCOE）が存在する。本調査では建設費を対象に、研究機関等の報告書 22 件、および学術論文 1 件を調査対象文献としてコスト情報を整理した。

図 4 - 4 に各文献における原子力発電の建設費の推移と将来見通しを示す。大型軽水炉はこれまで建設費の急速な低下と上昇を経験しており、習熟によるコスト低減は有意には観測されない。その動向は国によって大きく異なるが、商用化されていない新型炉を除き今後建設費の大幅な低下は予測されていない。2050 年における建設費の予測の最大値は 4,500 USD/kW（米国及び EU）、最小値は 2,500 USD/kW

(中国)となった。なお、小型炉の建設費は幅が広く、炉型による差と推察される。小型炉については現行の軽水炉よりも安価なもの、高価なもの双方が存在する。

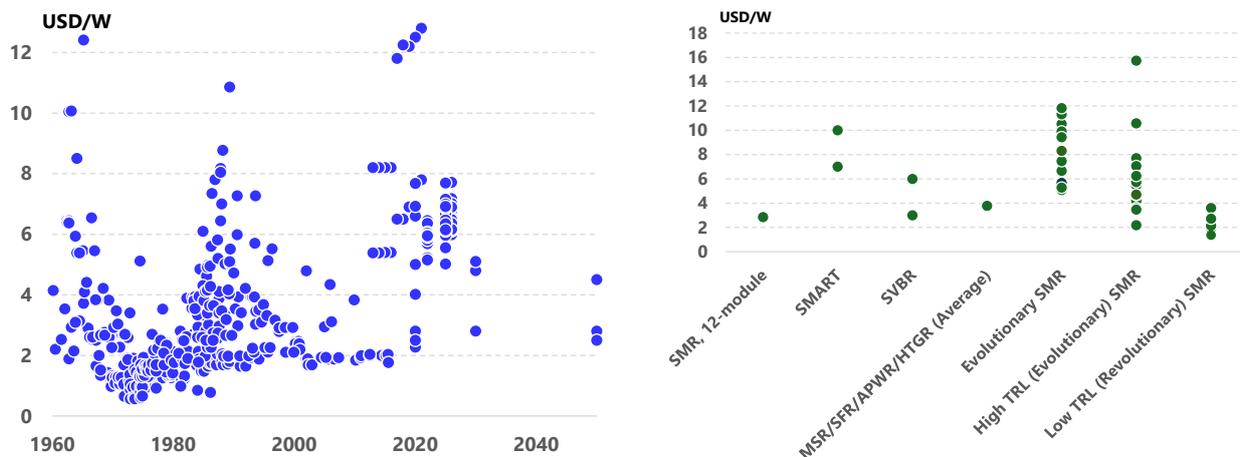


図4-4. (左) 大型炉の建設費の推移及び予測 (右) 小型炉の建設費.

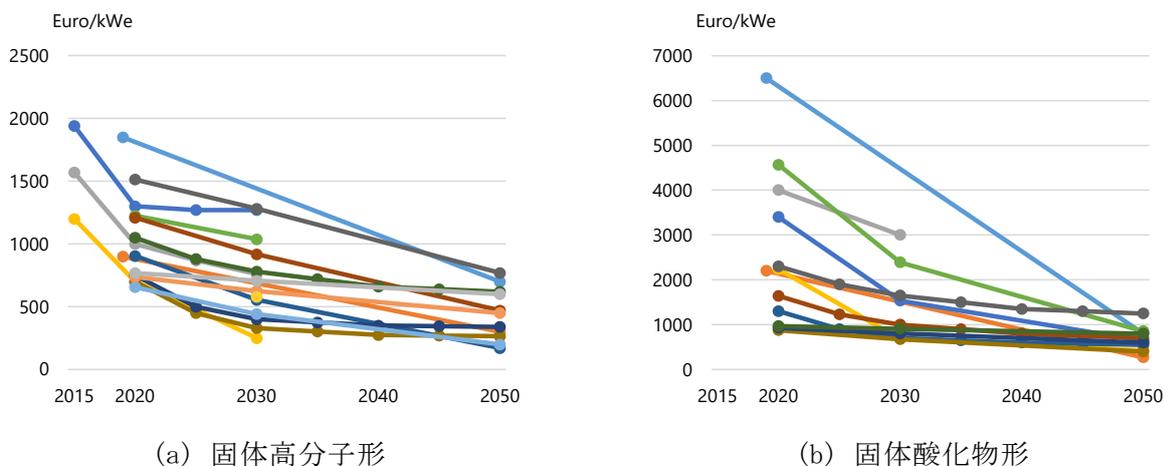
水素・アンモニア

水素・アンモニアは再生可能エネルギーの長距離輸送手段として、また、熱需要の脱炭素化策として期待されている。本調査では、水電解技術として固体高分子 (PEM) 形水電解および固体酸化物形水電解 (SOEC) を、アンモニア合成技術として従来技術のハーバー・ボッシュ法および革新的技術の電解合成法について調査した。電解合成法は水と窒素からアンモニアを合成する技術である。

調査文献数としては、査読付き論文7本、関連機関の研究報告書4本である。

図4-5に水電解装置の設備費を示す。水電解装置の設備費は現状の値自体の幅が広く、その傾向はPEM形水電解よりもSOECの方が著しい。PEMに比べてSOECは技術的な成熟度が比較的低いことが指摘されており (IRENA, 2018)、その不確実性が現状の費用の幅に影響していると推察される。将来に向けてはPEM形・SOECともに、多くの文献にてコストの低減が予想されている。

図4-6にアンモニア合成技術の設備費を示す。ハーバー・ボッシュ法の現状の初期費用は概ね300-600ドル/(Mt-NH₃/yr)の水準であることが確認された。他方、電解合成法の経済的情報は大きな幅がある。開発途上の技術であり、将来の不確実性が相当高いと推察される。



(a) 固体高分子形

(b) 固体酸化物形

図4-5. 水電解装置の設備費に関する文献調査結果.



図4-6. 製造技術の設備費に関する文献調査結果.

蓄電池

蓄電池は、再生可能エネルギーによる安定的な電力供給の実現を中心に様々な用途・種類の開発が進められている。特にリチウムイオン電池のコスト低減は非常に急速に進んでおり、今後も太陽光と並んで大きなコスト低減が見通される技術の一つである。

本調査ではリチウムイオン電池を中心にコスト及び価格の情報を整理した。調査対象文献は、主として2018年以降に発刊された研究機関等の報告書23件および学术论文4件である。

図4-7に各文献における蓄電池の資本費の推移と将来見通しを示す。蓄電池のコスト情報の中心はリチウムイオン電池であった。電池の用途や容量規模によって幅はあるものの、いずれの文献値も2050年に向けて大きな低減傾向を示す。鉛蓄電池やレドックスフロー電池については現状のコスト情報が中心となるものの、習熟によるコスト低減を見込む既往研究も存在する。

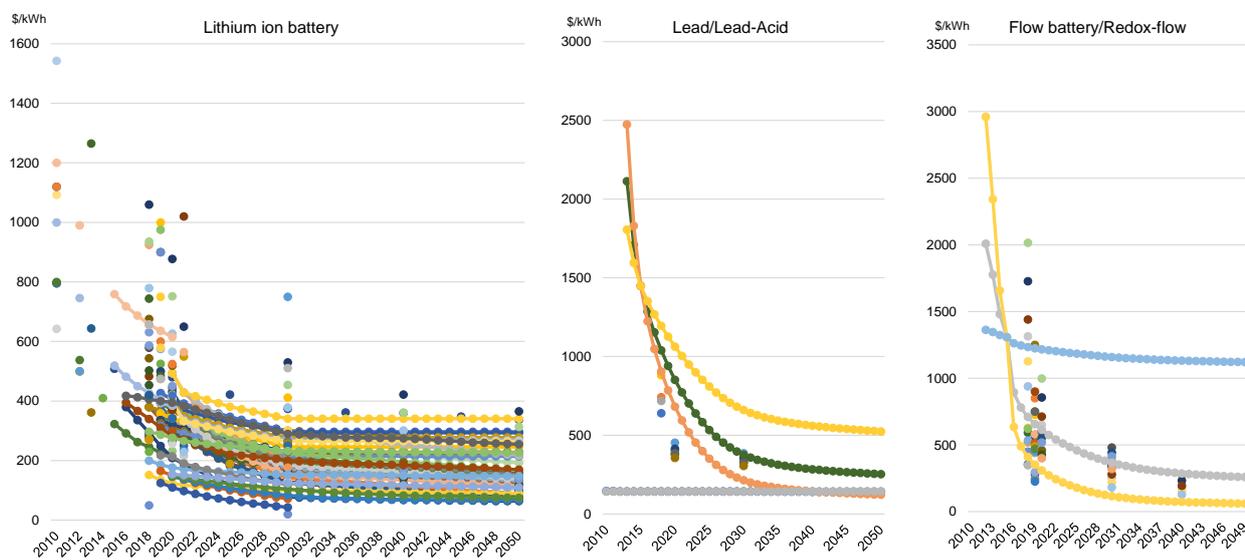


図4-7. 蓄電池の資本費の推移と将来見通し.

二酸化炭素回収・貯留 (CCS)

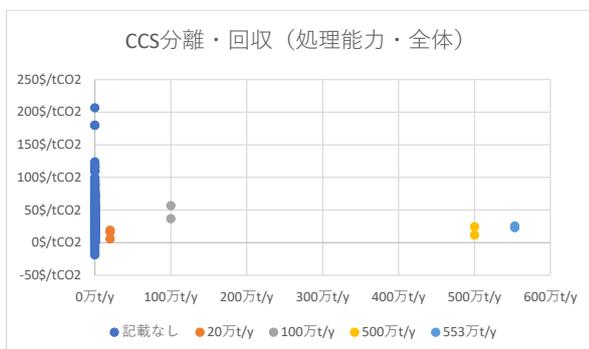
地球温暖化の防止には、CO₂の排出削減が求められている。化石燃料を使用した火力発電所から排出されるCO₂を直接回収することが効率的であり、回収した大量のCO₂については、再利用することが望まれている。しかしながら、現時点で回収したCO₂の用途は限られており、地層への貯留がもっとも効率的と考えられている。その手段としてCCS (carbon dioxide capture and storage)が長年研究されてきた。CCSについては、分離・回収、輸送、貯留の3段階で処理されるため、各工程の運営費用を処理能力と輸送距離の規模に応じて対象のレビューを行った。CCSの実用化はまだ一部の施設に限られて

おり、試験設備や机上の検討を行う研究・政府機関レポート、および学術論文を対象に比較した（図4-8、図4-9、図4-10）。

CCSのうち分離・回収については、処理能力の記載が無いものが多数を占め、費用は概ねマイナス20\$/tCO₂からプラス150\$/tCO₂までの幅がある。処理能力が20万t/y以上は、事例に限られており全体にはバラつきがみられるが、傾向として捉えることは可能と思われる。なお、EORでの分離・回収の場合は、費用がマイナス（収益の計上）となる場合がある。

CCSのうち輸送については、200km以内では費用はある一定程度に収まる傾向を示している。500km以上では、事例が少ないこともあり、バラつきがみられる。なお、陸上輸送と海上輸送を比較した場合、陸上のパイプラインよりも海上輸送の船舶による輸送の方が、費用が増える傾向にあることが確認出来る。

CCSのうち貯留については、処理能力に関わらず、費用が概ね20\$/tCO₂以内にまとまっており、一部、処理能力の記載が無いものは20\$/tCO₂から50\$/tCO₂でのバラつきがみられる。



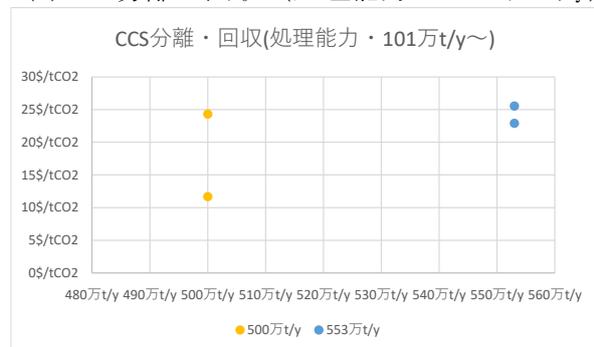
(A) CCS 分離・回収（処理能力・全体）



(B) CCS 分離・回収（処理能力・～20万 t/y）

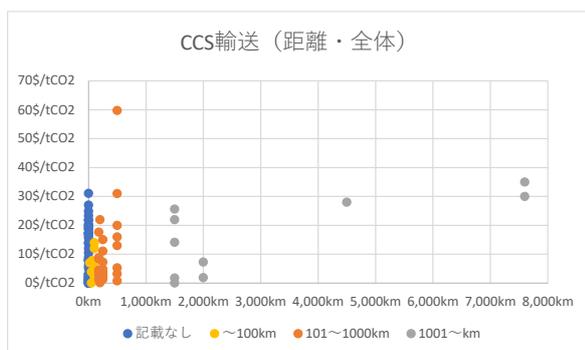


(C) CCS 分離・回収（処理能力・21～100万 t/y）

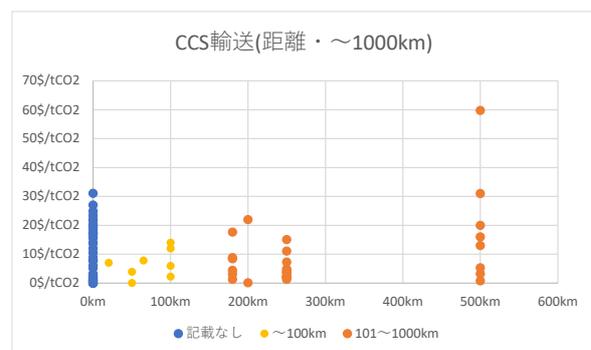


(D) CCS 分離・回収（処理能力・101万 t/y～）

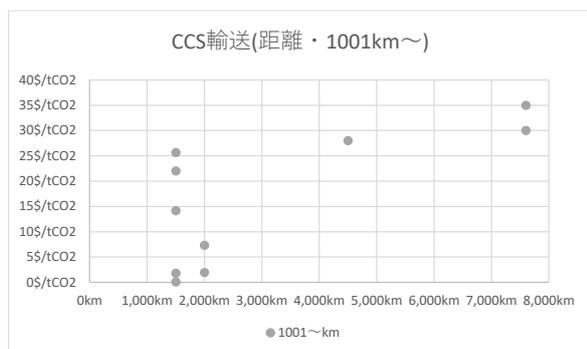
図4-8. 分離・回収 運営費用.



(A) CCS 輸送（距離・全体）

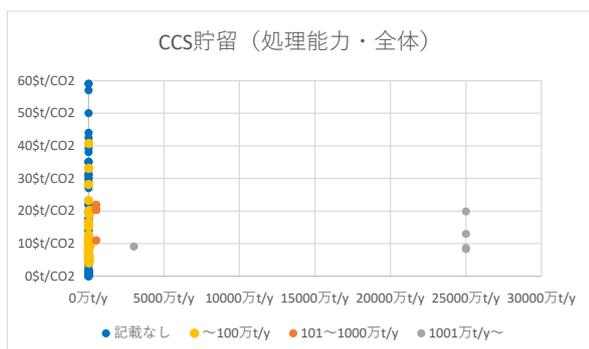


(B) CCS 輸送（距離・～1000km）

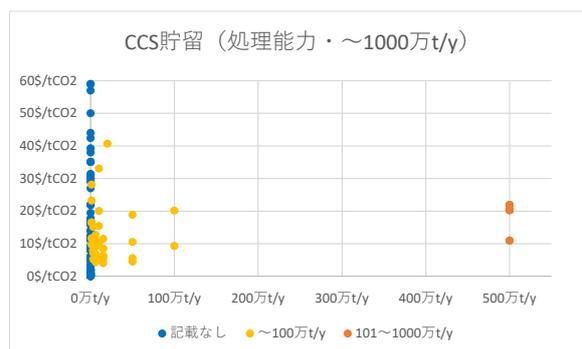


(C) CCS 輸送 (距離・1001km～)

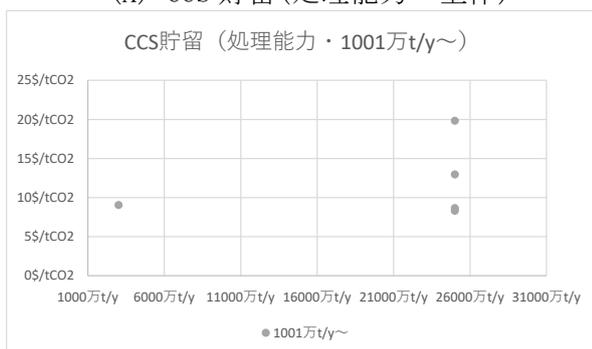
図4-9. 輸送 運営費用.



(A) CCS 貯留 (処理能力・全体)



(B) CCS 貯留 (処理能力・～1000 万 t/y)



(C) CCS 貯留 (処理能力・1001 万 t/y～)

図4-10. 貯留 運営費用.

直接大気回収 (Direct Air Capture)

大気中からの直接 CO₂ 回収技術 (以下、Direct Air Capture=DAC) は、Liquid-DAC と Solid-DAC の 2 種類に大別される。前者は液体吸着剤 (水酸化カリウム等のアルカリ水溶液) を用いて CO₂ を回収する手法である。回収能力 1MtCO₂/年といった大規模化に適しているが、CO₂ 回収時に高温熱 (300-900℃) が必要となる。他方、Solid-DAC は固体吸着剤を用いる方法である。低圧・低温 (80-100℃) で回収可能な特徴がある。1 基あたりの規模は小さい (例えば、50tCO₂/年) が、モジュール化が可能である。

本調査では Liquid-DAC および Solid-DAC の設備費やエネルギー消費を調査した。調査文献としては査読付き学術論文 5 本と関連機関の報告書 2 本 (国際エネルギー機関と科学技術振興機構) を対象とした。

大気中からの CO₂ 回収に係る費用は設備費やエネルギー費、吸収剤・吸着剤の費用等から構成され、合計値は概ね 30-1000USD/tCO₂ の水準とされる (Fuss et al., 2018)。これらの費用項目のうち支配的な要素はエネルギー費であり (IEA, 2022)、そのため DAC の経済性は設置地域のエネルギー・電力価格に大きく依存する。例えば、IEA (2022) によると、2050 年の中東地域では Liquid-DAC による回収費用は 50USD/tCO₂ 前後、Solid-DAC は 100USD/tCO₂ 前後もしくはそれを下回る水準であることが推計され

ている。他方で、日本の場合、Liquid-DACは100USD/tCO₂前後、Solid-DACは150-200USD/tCO₂前後と推計されている（他プラントからの廃熱を利用しない場合の試算値）。

表4-1は、設備費やエネルギー消費に関する具体的な調査結果である。DACの経済性を左右するエネルギー消費（熱・電気の単純合計値）はLiquid-DACの場合は4.7-8.8GJ/tCO₂、Solid-DACは4.1-9.5GJ/tCO₂の水準で報告されている。熱・電気の比率は技術種別やシステム設計によって異なり、概してLiquid-DACにて熱比率が高い傾向がある。ただし、Fasihi et al. (2019)では完全電化プロセスのLiquid-DACを想定している等、Liquid-DACの中でも差異がある点には留意が必要である。設備費については、Liquid-DACは文献の間で差が見られる。例えば、Nth plantで793USD/(tCO₂/年)との報告（Keith et al., 2018）やLow-cost caseで1308USD/(tCO₂/年)という報告（Realmonte et al., 2019）がある一方、Fasihi et al. (2019)は2050年に222Euro/(tCO₂/年)との見通しを公表している。Solid-DACの設備費については、文献数が少ない点には留意が必要であるが、Liquid-DACと比較して比較的安価な傾向が見られている（Realmonte et al. (2019)やFasihi et al. (2019)では430USDや199Euroの水準）。

表4-1 DACの設備費やエネルギー消費に関する文献調査結果。

			Capital cost [USD/(tCO ₂ /yr)]	Heat [GJ/tCO ₂]	Electricity [GJ/tCO ₂]	Other OPEX [USD/tCO ₂]
Liquid DAC	Keith et al. (2018)	Baseline	1146	8.81	0	42
		Baseline N th plant	793	8.81	0	30
		Gas and electricity input	694	5.25	3.66	26
	Realmonte et al. (2019)	High-cost case	2060	8.1	1.8	--
		Low-cost case	1308	5.3	1.3	--
	Fasihi et al. (2019)	Year 2020	815 Euro	--	5.5 (1535kWh)	--
		Year 2050	222 Euro	--	4.7 (1316kWh)	--
	JST (2019)		137,227 JPY	8.84	--	1500 JPY
IEA (2022)		--	5.5-8.8 GJ (share of heat: 80-100%)		--	
Solid DAC	Realmonte et al. (2019)	High-cost case	750	7.2	1.1	--
		Low-cost case	430	4.4	0.6	--
	Fasihi et al. (2019)	Year 2020	730 Euro	6.3 (1750 kWh)	0.9 (250kWh)	--
		Year 2050	199 Euro	4.0 (1102 kWh)	0.7 (182kWh)	--
	Terlouw et al. (2021)	Autonomous DACCS system (Fresnel + PV + battery)	--	5.4 (1500 kWh)	2.5 (690kWh)	--
		Autonomous DACCS system (HTHP + PV + battery)	--	0	4.6 (1271kWh)	--
	Note: electricity consumption includes CO ₂ storage.	DACCS (HTHP + grid)	--	0	4.1 (1132kWh)	--
		DACCS (waste heat + grid)	--	5.4 (1500 kWh)	2.2 (614kWh)	--
		DACCS (waste heat + PV + battery)	--	5.4 (1500 kWh)	2.5 (690kWh)	--
	IEA (2022)		--	7.2-9.5 GJ (share of heat: 75-80%)		--

カーボンリサイクル

カーボンリサイクル技術の中で、燃料への利用として、メタノールやメタン等の合成燃料化する技術がある。メタノールは現在、主に石油から改質して製造されており、貯蔵に適する液体燃料として輸送分野での活用期待されている。

メタノールへの変換技術は、CO₂の水素による直接変換と、複数のプロセスのある間接変換がある。間接変換は、CO₂を一旦COに変換し、その後にフィッシャー・トロプシュ(FT)プロセスまたはメタノール合成プロセスとなる。既存の変換技術は技術的には成熟しており、新しいプロセスも実証を進めている。

本調査では、e-methanolの合成に関するコスト見通しを調査した。調査文献としては査読付き学術論文3本と関連機関の報告書4本（国際エネルギー機関と科学技術振興機構）を対象とした。

カーボンリサイクルとしてメタノールを生産する場合、原料の水素はメタノール1トンあたり0.189トンが必要となる。生産コストの中で水素の製造または購入コストが50~80%を占めており、原料以

外の生産コストは IRENA, (2021)によると 30-50US\$/ton となっている。メタノールの生産コストは、現状の実例に関する 24 件の論文を分析によると 510US\$/ton となっている (Hepburn et al., 2019)。メタノールの採算コストに関する論文は多数あり、200-2,200US\$/ton と幅が大きい。時代的に懐疑的なものから楽観的なものへと変化はしているが、コストの傾向はつかめない。各機関の報告書でも、表 4-2 の通り幅が大きい。これは、グリーン水素の製造をどういう電力で行うか、購入した場合の TAX の扱いなどの条件設定が様々である。将来コストの削減として、カーボンクレジットを導入した場合 (IRENA, 2021) などもケース設定している。

表 4-2 メタノール生産に関する文献調査結果。

		US\$/ton	
Market Price		100	300
Product cost		Low	High
Gabriele et al.(2020)	Research of numerous papers	200	2,200
Hepburn et al.(2019)	24 sites implemented	510	
IEA(2020)		250	820
IRENA(2021)	2015-1018	820	1,620
	2050	250	630
	2050 with carbon credit	70	460
Energy Policy at Columbia(2021)		1,824	
Christoph et al.(2018)	Grid connect without tax	507	
	Grid connect with tax	1,211	
	Local Wind Power(off-grid)	860	

電気自動車 (Battery Electric Vehicles : BEV)

走行時に CO₂ 等の排出ガスを出さないゼロエミッション・ビークル (Zero Emission Vehicle) のうち車載バッテリーのみで走行する BEV の世界各国での販売価格を調査した。対象国は、米州、欧州、アジア、中東など 15 개국以上、対象期間は 2010 年から 2023 年まで、国内外 21 メーカーの 40 以上のモデル、1,600 件以上の各国の自動車を扱う価格情報サイトに掲載されている価格や仕様等の情報を収集した。価格については、各国で比較の為、年月の換算レートにより米ドルへの換算している。なお、現在 BEV で大きなシェアを有している米国企業 Tesla はバッテリー容量などの一部仕様を公表していない為、価格情報サイトが独自に掲載している仕様を同じ年式と同じモデルに当てはめている。

図 4-1-1 に年式毎のバッテリー容量別のモデル数を示す。2010 年から 2011 年にかけては、販売メーカーもモデルもごく限られていた。2012 年から徐々に販売メーカーとモデル数が増加し、2015 年には 100 を超えるようになった。その後、2018 年に一時的な落ち込みがみられたが、2021 年以降は 200 を超えるモデルが販売されている。バッテリー容量は、30kWh 未満の割合が 2017 年までは多くみられた。2016 年から 60kWh 未満が徐々に増加し 30%程度を占めている。90kWh 未満は、2021 年から増加している。120kWh 未満は、2016 年からみられるが、その割合は大きな変化なく推移している。

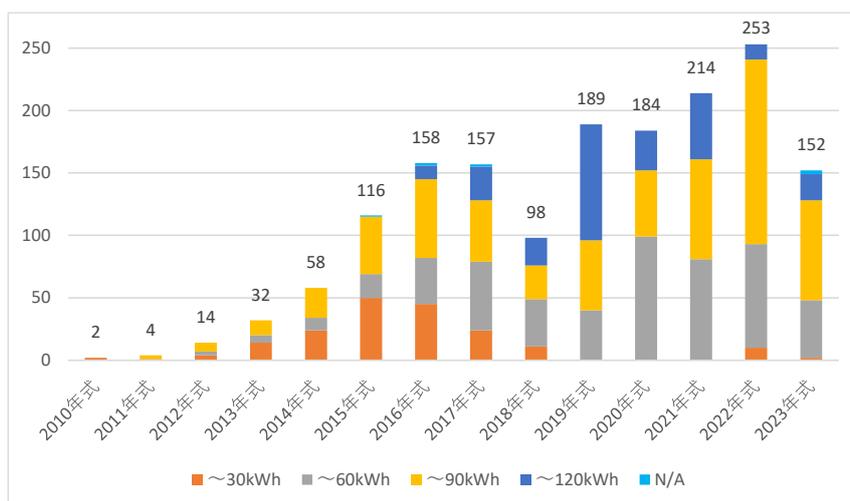


図4-11. 年式毎のバッテリー容量別のモデル数。

図4-12に年式毎のバッテリー容量別の平均価格（US\$換算）を示す。バッテリー容量30kWh未満の平均価格は、2010年から2011年に半額近く下落したものの2012年には2010年と同レベルに上昇、2013年に再び3割程度下落した。その後は多少の上下はあるものの緩やかに下落する傾向を示している。他の容量でも2022年までは緩やかな下落傾向を示していたが、2023年は一転して上昇の傾向を示している。全体としてみた場合、価格は下落傾向を示しているが、その動きは緩やかで、量産効果による大幅な価格下落の傾向はみられない。

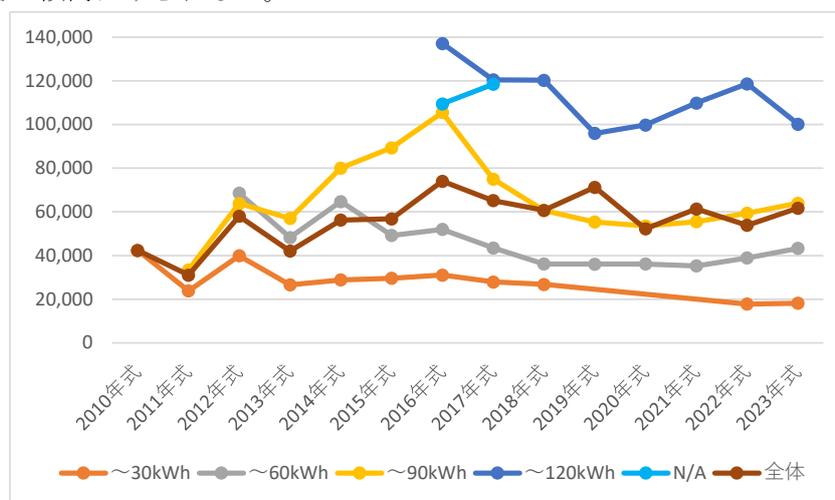


図4-12. 年式毎のバッテリー容量別の平均価格（US\$換算）。

ヒートポンプ

ヒートポンプは、主として4つの熱源（空気、水、地中熱、排熱）を利用し、家庭用は空気・水・地中熱が中心であり、産業用は排熱活用のほか空気・排温水・地中熱などを利用する。家庭用、業務用、産業用とヒートポンプは部門を横断して利用されており、幅広い温度帯に対応している（マイナス50～60℃から100℃、産業用は150℃までの熱需要に対応）。

本調査では、家庭用ヒートポンプの投資費用についてコスト情報を整理した。調査対象文献は研究機関等の報告書7本（ウェブサイト掲載データ含む）である。

図4-13に家庭用ヒートポンプの投資費用を示す。ヒートポンプの投資費用は、国・製造者・ヒートポンプの種類によって大きく異なる。投資費用には機器・設置費・配熱システム等が含まれること、また文献によって費用のバウンダリが異なる点に注意が必要である。

ヒートポンプに関する既往文献の多くは過去及び現状のコスト情報が中心であり、国によって文献値には大きな幅が存在する。IEA (2021)によると Air-to-air では2,600 USD (スウェーデン) から9,500 USD (英国) まで、Air-to-water では6,100 USD (スウェーデン) から13,500 USD (ドイツ) まで幅がある。Air-to-air、Air-to-water、Ground-source を比較すると地中熱を用いる Ground-source の投資費用が最も高価となるが、国による値の違いの幅は最も狭い。なお、本調査で得られた将来見通しとして EIA (2023) が挙げられるが、2050 年に向けた将来想定は 2022 年値と同値か微増すると見込まれ、費用低減は見込まれていないと推察される。例として、Air-source の Typical では 2022 年の 6,880 USD が 2050 年に 7,330 USD へ微増し、Ground-source の Typical (下限値) では 2022 年と 2050 年が同値 (14,880 USD) となっている。

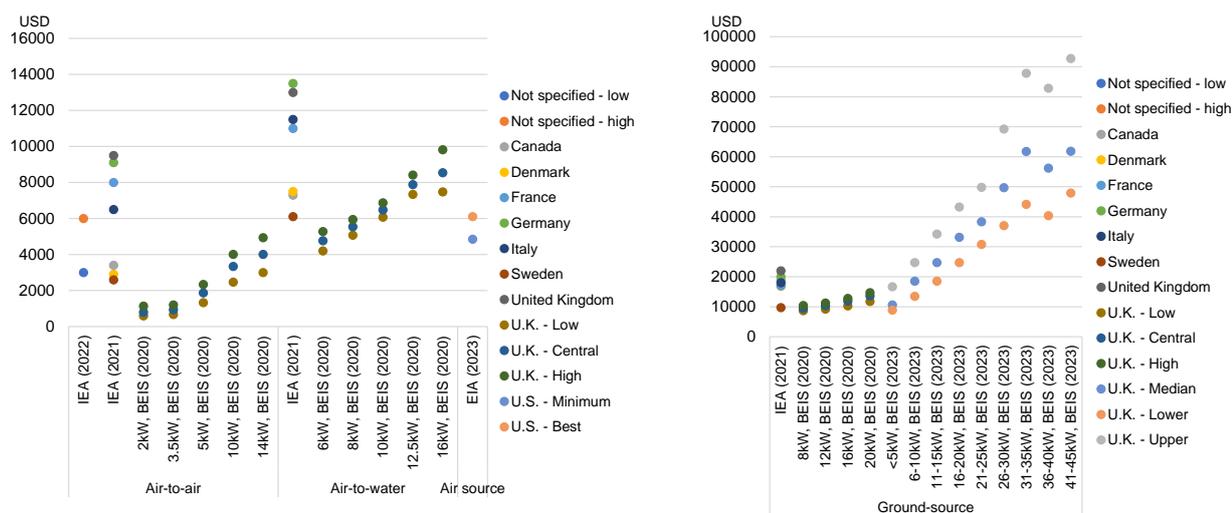


図 4-13. 家庭用ヒートポンプの投資費用。

鉄鋼

粗鋼生産方式は4種類に大別される。1つ目は高炉法と転炉を組合せた方式である(以下、「高炉転炉」と記述)。この方式は現在主流の粗鋼生産プロセスである。鉄鉱石を焼結化した後、高炉で熔融還元して銑鉄を製造し、転炉で鋼に転換する。2つ目は熔融還元法と転炉を組合せた方式である。高炉法のような鉄鉱石・石炭の前処理は行わずに、紛鉱石を熔融還元して銑鉄を製造する。3つ目は直接還元法と電気炉の組合せである。こちらでは鉄鉱石を固体状態で還元し、電気炉で熔融・製錬する。プラントとしては小規模ながらも、天然ガスを用いた直接還元は商業化している(MIDREX法をはじめ、30程度の還元法が存在する)。カーボンニュートラル社会の実現に向けては、水素を用いた直接還元法が期待され、技術開発が行われている。4つ目は、鉄スクラップを電気炉で熔融させる方式である。

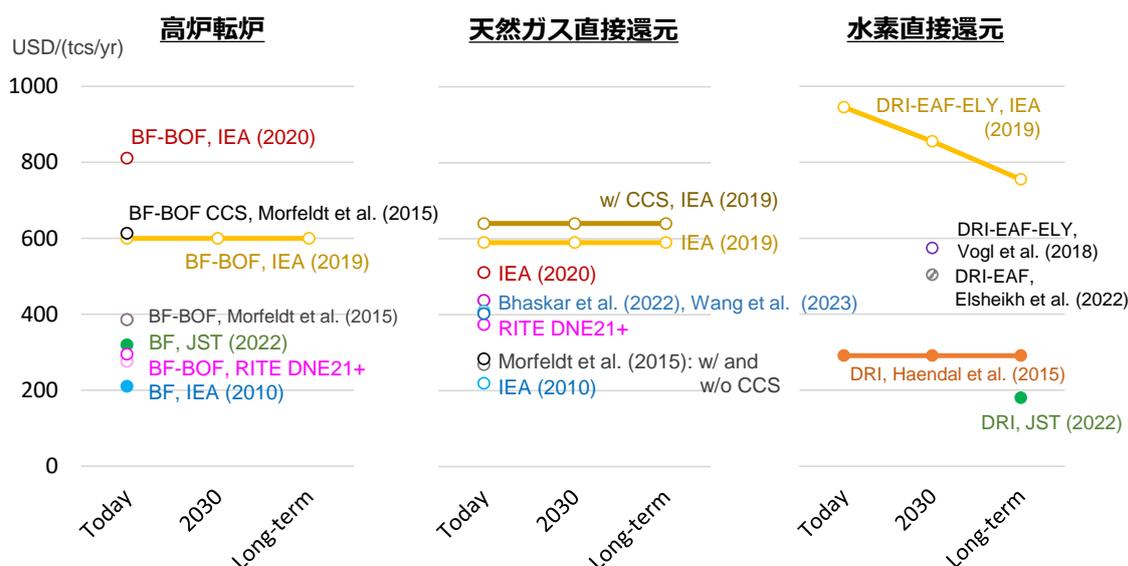
本調査では、これらのうち、高炉転炉、天然ガス直接還元、および水素還元製鉄についてコスト等の将来見通しを整理した。調査対象文献としては査読付き学術論文7本とエネルギー関連機関(国際エネルギー機関、科学技術振興機構、地球環境産業技術研究機構)の報告書5本である。

図4-14に粗鋼生産技術の設備費を示す。文献によって設備費のバウンダリが異なる点に注意が必要である。例えば、高炉転炉には高炉のみの設備費を含む場合(図中「BF」)と高炉+転炉の両者を含む場合(図中「BF-BOF」)が含まれている。上記の点に留意しつつ、同図からは下記2点が読み取れる。

まず、設備費の文献値には大きな幅が存在している。現状のBF-BOFは276-811 USD/(tcs/yr)、そして天然ガス直接還元+電気炉(CCS無し)は220-590 USD/(tcs/yr)の範囲の値が報告されている。水素直接還元製鉄においても、直接還元炉・電気炉・水電解装置の3つを含んだ値(2030年値)として、

Vogl et al. (2018)の 574 USD/t(t-cs/yr)から IEA (2019)の 855 USD/(t-cs/yr)の値が本調査では得られた。

2点目は、2030年より先の長期の見通し値についてである。高炉転炉および天然ガス直接還元については、IEA (2019)のみが長期の見通し値を明示的に示している。そこでは現状と同様の設備費が将来にわたって想定されており、今後の費用低減の余地は限定的であることが示唆されている。水素還元製鉄については、IEA (2019)は長期的な設備費の低減を見込んでいるが、この低減の大部分は水電解装置の経済性改善によるものであることには留意が必要である。同文献は別途、水電解装置の費用見通しも想定している。その想定を基に図中の見通し値から水電解装置分を控除すると、直接還元炉と電気炉は将来にわたって概ね 600 USD/(tcs/yr)と推計される。水素還元製鉄における水電解以外の部分について、IEA(2019)の想定においても大幅な設備費低減は織り込まれていないことが推察される。



※tcs=粗鋼1トン、BF=高炉、BOF=転炉、CCS=CO₂回収・貯留、DRI=直接還元、EAF=電気炉、ELY=水電解装置

図 4-14. 高炉転炉、天然ガス直接還元および水素直接還元の設備費。

セメント

セメントコストについては、以下論文に基づき、CAPEX と OPEX それぞれのデータ収集を実施。脱炭素技術については CCS を想定したデータを収集し、比較した (図 4-15)。

- IEA Energy Technology Systems Analysis, Cement Production (2010)
- Calin-Cristian Cormos, Decarbonization, Decarbonization options for cement production process: A techno-economic and environmental evaluation, Fuel 320, 2022

IEA ESTAP(2010)と Cormos(2022)では、想定している CAPEX に開きがある。また、導入する省エネなどの技術次第で、同一論文のデータにおいても CAPEX に大きな差が見られる。なお、IEA ESTAP はクリンカあたりの CAPEX を掲載しているため、IEA が想定している材料フローを元に (800 g-clinker/1000g cement) で単位換算を行った。

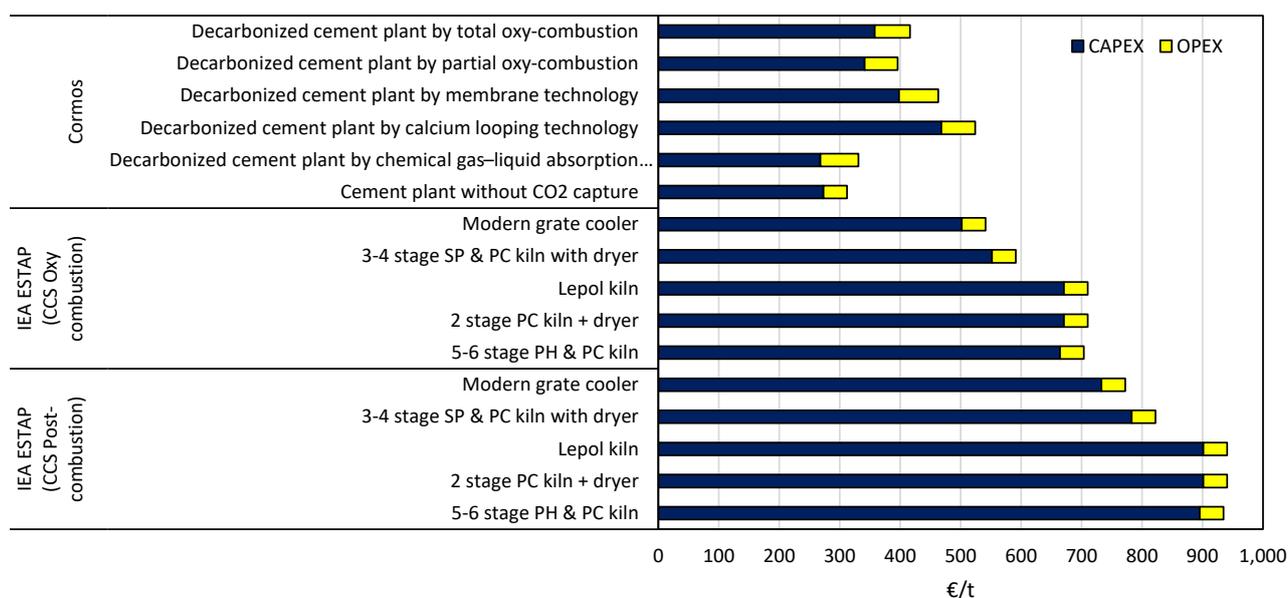


図4-15. セメントコストの比較

紙・パルプ

紙・パルプについては、以下論文に基づき、CAPEX と OPEX それぞれのデータ収集を実施。脱炭素技術については既存技術である黒液の回収・再利用を想定したデータを収集し、比較した（図4-16）。

- IEA Energy Technology Systems Analysis, Pulp and Paper Industry (2015)
- European Bank for Reconstruction and Development (EBRD) and PÖYRY, 2012. A summary of EBRD's new Russian forest policy dialogue study. Presentation by Eric Rasmussen (EBRD) at Northern Dimension Business Council, Saint Petersburg, March 23, 2012.

EBRD & PÖYRY(2012)では、利用する材料(広葉樹か針葉樹か)やエリア毎の環境により、設備投資額や原材料額などに差が生じるため、材料別・国別の代表的なデータを掲載している。特徴としては、広葉樹(Hard Wood)の方が針葉樹(Soft Wood)よりもパルプ化の際の収率が高く、生産性が高い。また、ロシアやオーストラリアでは、両方の樹種を原料として利用するため、CAPEXが高くなる。

エネルギー技術イノベーションの効果に関するモデル分析

ここでは、以上検討した諸技術のうち、太陽光、風力(陸上・洋上)、原子力、蓄電池、電気自動車(EV)、直接大気回収(DAC)、二酸化炭素回収・貯留(CCS)、ならびに水素を対象として、エネルギー技術イノベーションが2050年のエネルギーミックスに与える影響について定量的に分析を行った。分析に際してはIEEJ-NE_Japanモデルを使用し、2050年に日本全体でカーボンニュートラルを達成する標準ケースに対し、感度解析の形で分析を行った。

ここでは、今回収集したデータベースに従い、それぞれの将来の技術想定については非常に幅が広い結果となっているため、更なるイノベーションの想定として、上記のそれぞれの技術について標準ケースに比べてコスト低減がより急速に進み、2050年に標準ケース想定50%減となるケースを想定して試算を実施した。また、太陽光及び風力(陸上・洋上)についてはコスト50%減に加えて導入ポテンシャルを2倍としたケースについても試算を実施した。

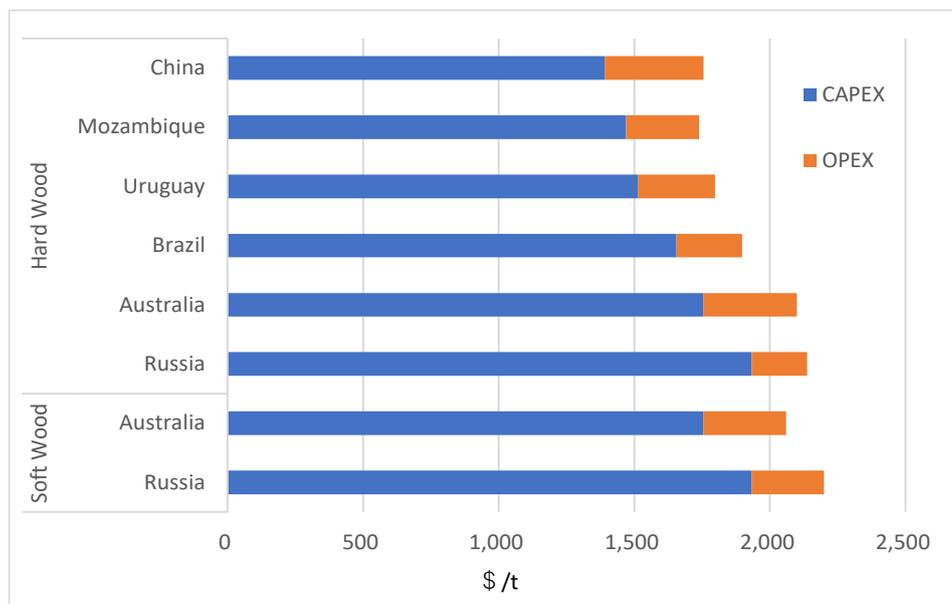


図 4-16. 紙・パルプコストの比較

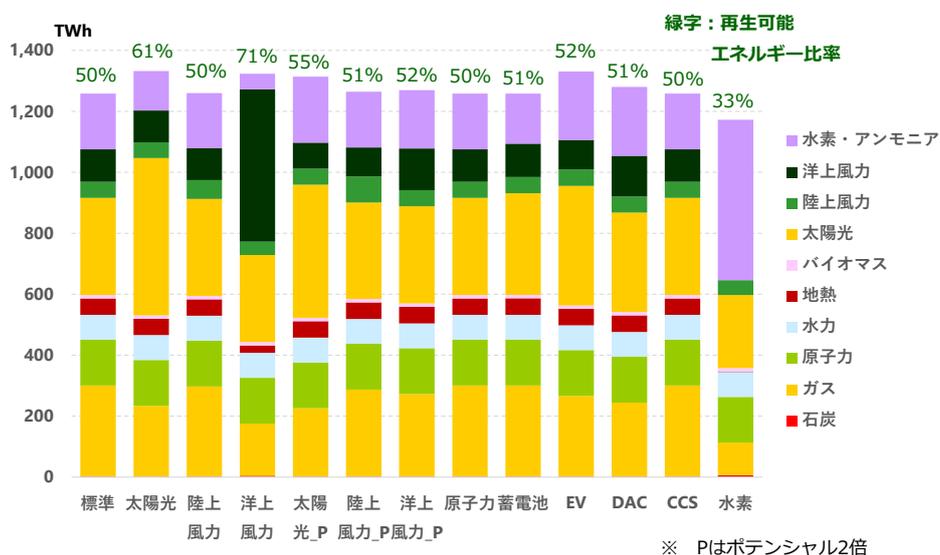


図 4-17. 電源構成の変化 (2050年)

図 4-17 はそれぞれのケースにおける 2050 年の電源構成を示している。標準ケースでの再生可能エネルギー比率 50% に対し、多くのケースで 55% 程度まで再生可能エネルギー比率がやや上昇する結果が見られている。これに対し、最も顕著に比率が上昇したのは洋上風力コストを 50% 減とした場合 (71%) と太陽光コストを 50% 減とした場合である。また、水素コストが 50% 減となった場合には再生可能エネルギー比率が 33% と顕著に小さくなっている。

図 4-18 は 2050 年の限界削減費用と年間総システム費用を示す。限界削減費用に与える影響は輸入水素価格が最も大きく、他の技術の影響は比較的少ない。これは、限界削減費用は最後の 1 トンの CO₂ を何の技術で削減するかによっているため、それ以外の技術の想定には大きく影響されない場合があるためである。水素価格の他の技術としては、EV や洋上風力のコストの影響が相対的に大きい。

年間総システム費用への影響は EV が特に大きい。これは、運輸部門のコスト、特に自動車の購入金額が他の技術セクターと比べても特に大きいからである。次いで水素、洋上風力コストなどが大きく影響する。

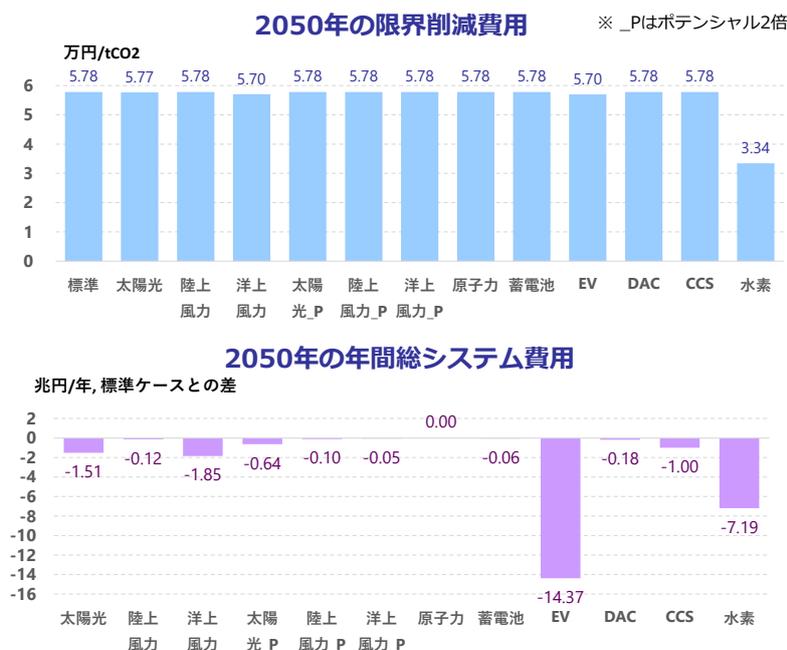


図4-18. 限界削減費用と年間総システム費用 (2050)

これらの結果から、次のことが結論付けられる。2050年に電源をほぼ完全に脱炭素化することを想定した場合、電力部門内の技術進歩が限界削減費用に与える影響は比較的小さくなる。他方で、EV等の需要側技術や、「最後の1トン」を直接定める水素の輸入価格等が与える影響が大きくなる。また、総費用への影響は、EV等、導入量の大きな技術によるものが最も大きくなる。

電力部門の中では洋上風力の影響が最も大きく、ついで太陽光発電の影響が大きくなる。但し、これらの結果は制約条件の与え方によって大きく変わることが予想される。例えばCCSの利用制約や原子力発電の設備容量上限を撤廃すると、結果が大きく変化する可能性がある。

5. サブテーマ4 研究目標の達成状況

「エネルギー供給技術・需要技術イノベーションのとりまとめ、データベース構築」においては、前年度までに収集・整理したデータに加えて、DAC、鉄鋼、自動車、セメント、カーボンリサイクル等について更なる情報の収集・整理を行った。その上で、エクセルによるデータベース構築を行った。

「エネルギー・システムにおけるイノベーションの効果に関する評価」においては、これらのデータに基づいて、IEEJ-NE_Japanモデルを用い、主要なエネルギー供給技術及び需要技術（太陽光、陸上風力、洋上風力、原子力、蓄電池、電気自動車、DAC、CCS、輸入水素・アンモニア）の条件を変化させることにより、それらの技術革新の効果に関して分析を行い、特に、限界削減費用や総システム費用等に与える影響を定量的に評価した。

更に、「IEEJ-NE-Japanモデルを用いた試算、モデル相互比較（サブテーマ1）への情報提出」として、まず、技術データをデータベース等の最新の情報を元に更新するとともに、2050年のカーボンニュートラルに貢献し得る革新技術の追加、重要な革新的マクロフレームや一次エネルギー価格等の更新、再生可能エネルギーの導入ポテンシャルの精緻化などのモデルの改良・更新を行った。その上で、改良されたモデルによってモデル比較のための分析を実施し、サブテーマ1に提供するとともに、計算結果等を査読論文として公表した（サブテーマ1と協力、成果番号5, 56）。これらの成果により、当初の目標を十分に達成できたと考えられることができる。

II-5 サブテーマ5 「トランジションを支える再生可能エネルギーとセクター・カップリング」

[サブテーマ5 要旨]

時間高解像度エネルギーシステムモデルにおいて、デマンド・レスポンス等を含む需要端の電力技術の表現の向上（電気自動車、ヒートポンプ等）を行い、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う。エネルギーサプライチェーン全体を対象とするエネルギーシステムモデルと電力需給モデルにおいて、再生可能エネルギー大量導入時のセクター・カップリングに関して分析を行った。その結果、エネルギーシステム総コスト最小化の観点から分析したところ、電気自動車やヒートポンプ等のエンドユース技術を需要応答として活用すると、集中型エネルギー資源の代替や投資の回避や抑制、再生可能エネルギーの出力抑制の減少に貢献できることが分かった。

1. サブテーマ5 研究開発目的

日本では2050年のカーボンニュートラル実現に向けて、徹底した省エネルギーの推進、再エネ主力電源化、原子力活用、水素・アンモニア導入などに関する具体的な推進工程が示され、エネルギー安定供給確保を前提として、脱炭素化に向けて、GX実現を進めることになった。その中で、再エネ主力電源化をGX実現に向けた重点項目として位置づけ、2030年度の電源構成に占める再エネ比率36～38%の達成を目指すとしており、太陽光や風力発電といった自然変動電源の普及拡大が進めば、安定した電力品質の確保に向けた取組が重要になる。再エネ大量導入実現に向けた課題として、電力部門に加えて、需要側も含めたエネルギーシステム全体でのセクター横断的な調整力の最大限の確保が重要になる。本研究では、再エネ出力をエネルギーシステムで最大限活用するための需要側資源を考慮したエネルギーモデルを開発し、セクター・カップリングの効果を定量的に分析することを目的とする。

2. サブテーマ5 研究目標

サブテーマ5	「トランジションを支える再生可能エネルギーとセクター・カップリング」
サブテーマ5 実施機関	東京大学大学院工学系研究科
サブテーマ5 目標	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・モデルに組み込む。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う。またサブテーマ1が取りまとめるモデル相互比較に時間高解像度エネルギー・システム・モデルを用いて参画する。

3. サブテーマ5 研究開発内容

時間高解像度エネルギーシステムモデルは、日本の最適なエネルギー需給、技術構成・運用を線形計画法により計算するエネルギー経済モデルである。モデル構造は、エネルギー源の輸入・国内生産、エネルギー転換、エネルギーキャリアの送配、最終消費技術による各エネルギーサービス需要へのエネルギー供給より構成される(図5-1)。モデルでは、エネルギー源の輸入コスト、技術のコスト・効率・稼働年数・特性データ、有効エネルギー需要などを外生データとして与え、評価期間である2050年までのエネルギーシステム総コストが動学的に最小となるように、考慮した変数の最適解が決定される。これまでの当方のモデルにおける時間解像度は、2050年までの評価期間内における5年間隔の代表時点において、非電力部門では年間ベースでの需給の最適解が計算される一方、電力部門では、各代表時点において年間8,760時間での需給バランスの最適解が計算可能であり、再生可能エネルギーの出力変動に対

するバックアップ電源や電力貯蔵、水電解装置などの運用を、エネルギーシステム全体の需給とともに詳細に分析可能な点に特徴がある。一部のエネルギー消費部門においては、技術選択を詳細に考慮し、1時間値でのエネルギー需給を明示的に考慮している(図5-2)。

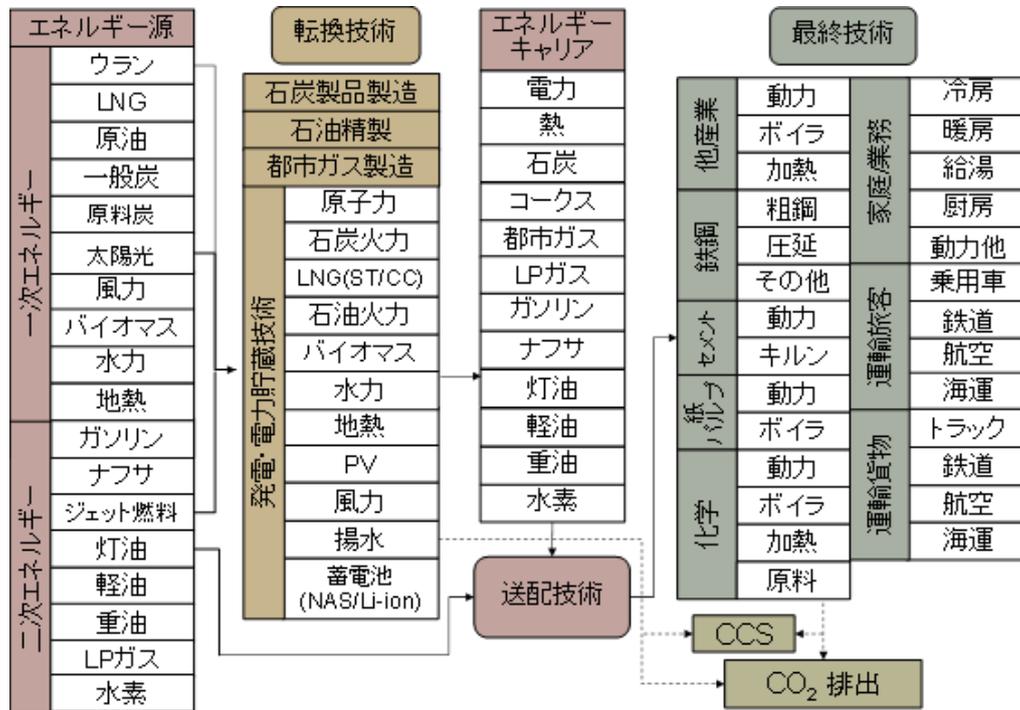


図5-1 エネルギーシステムモデルの構造

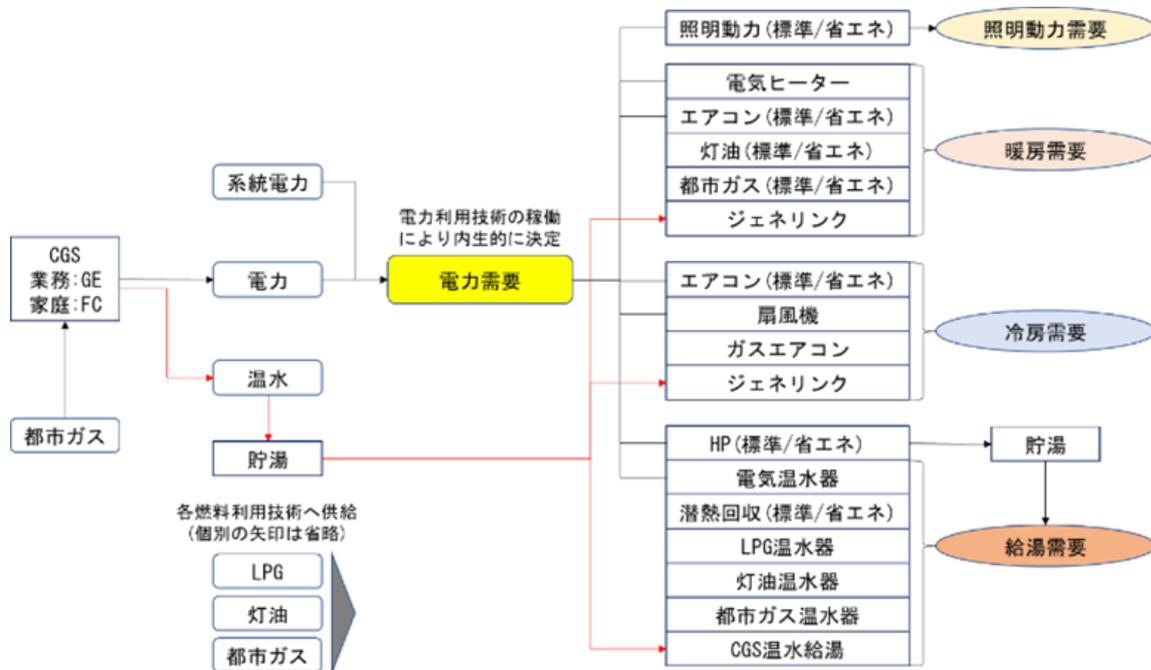


図5-2 業務部門・家庭部門のエネルギー需給構造

行っている。

また電力分野でも近年、再エネ大量導入を実現するオプションの一つとして、分散型エネルギー資源 (DER: Distributed Energy Resource) など需要側資源の能動的制御や消費者の行動変容等を通じたデマンドレスポンス (DR) の活用への関心が高まっている。再エネ大量導入には、調整力を有する電源や送電線などへの大規模投資が必要になるが、需要側資源の活用を通じて電力需要の柔軟性を高めることができれば、それらの電力インフラ投資を抑制し、より経済的な再エネ導入実現が可能になることも考えられる。そこでDRを考慮した最適化型電力需給モデルを開発し、DR進展が再エネ大量導入時の電力需給や電力システムコストに与える影響等をマクロ的視点にて試算する。日本の全ての基幹系統を383ノード、475本の送電線で網羅し、将来導入が期待される新技術を考慮して拡張した最適化型電力需給モデルを開発した(図5-4、図5-5)。そしてさらにDRを考慮し、年間8,760時間にて、CO₂排出制約(カーボンニュートラル制約など)を想定の上、再エネ大量導入時の電力需給解析を行う。最適化型電力需給モデルの目的関数である年間総発電費用(資本費[電源、電力貯蔵技術等]、燃料費[化石燃料、輸入水素])の最小化により、経済合理性の観点から最適な設備投資とメリットオーダーに基づく需給運用を決定する。383ノードと475本での送電線の潮流制約も踏まえて、時々刻々の電力需給運用に加え、電源設備容量等への投資も同時に分析可能である。制約条件は同時同量制約、設備容量制約、供給予備力制約、負荷追従制約、最低出力制約、電力貯蔵制約、送電制約、電源の定期点検制約、SNSP制約、バッテリーのCレート制約、CO₂制約等を考慮する。時間解像度は1年間1時間値にて、年間8,760時間にて分析する。電源と電力貯蔵技術は、原子力、火力(LNG複合、LNG汽力、石油、石炭、LNG-CCUS、石炭-CCUS、LNG-水素混焼、石炭-アンモニア混焼)、一般水力、地熱、バイオマス、陸上風力、洋上風力、太陽光、揚水式水力、NAS電池、Li-ion電池を考慮する。原子力や水力等の設備容量は供給計画を基に外生的に与え、太陽光・風力や火力、バッテリー等の設備容量を内生的に決定する。電力需要の柔軟性(DR)は、基準となる各時点、各ノードの電力負荷の水準に上限制約、下限制約を与え、加えて、各ノードの年間電力需要総量はDR前後で不変とする制約を与えた上で、最適化を行い、各時点、各ノードでの最適なDR導入量(上げDR、下げDR)の水準を決定できるようにした。

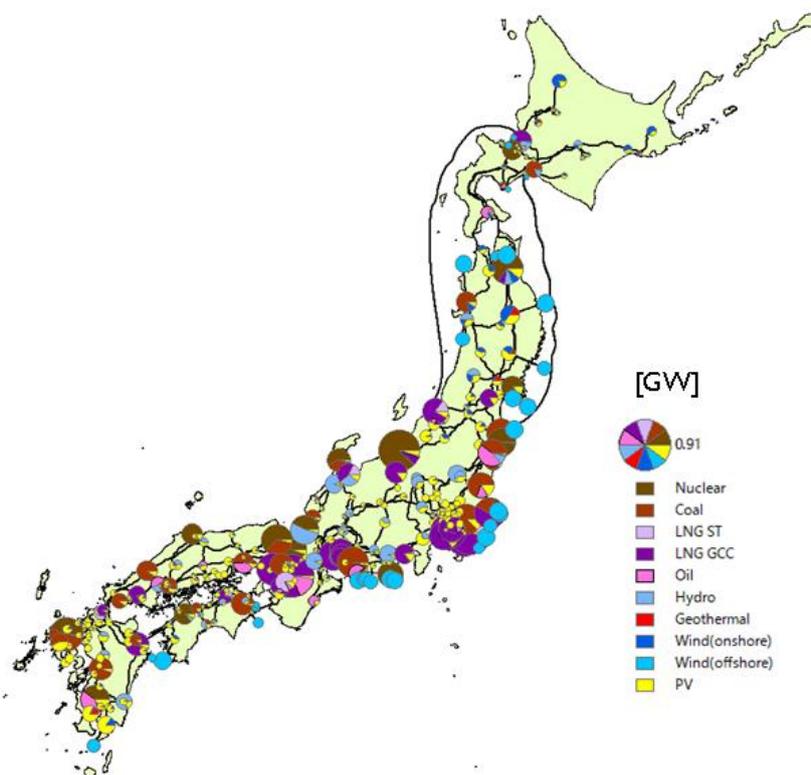


図5-4 電源設備容量，送電線の分布

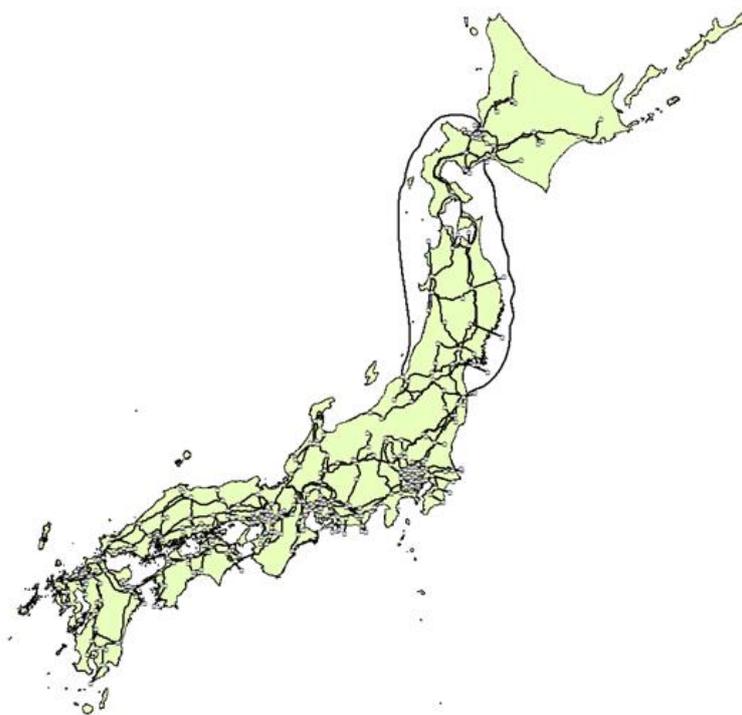


図5-5 送電ネットワークの地理的配置

4. サブテーマ5 結果及び考察

2050年に向けて不確実性の大きい技術を中心に8ケースを設定し、数値シミュレーション分析を行った。CO₂排出制約を課さないケース(BAU)以外の全てケースにおいて、2050年カーボンニュートラル制約を想定している。基準ケース(Ref)に加え、VRE価格が低減しないケース(ReHC)、原子力新增設に上限制約を想定しないケース(NU+)、水素輸入可能量を2倍へ拡大したケース(H2+)、水素還元製鉄を想定しないケース(IronH2-)、CO₂貯留可能量が拡大するケース(CCS+)、CO₂貯留可能量が減少するケース(CCS-)を設定した。

2050年ネットゼロにおける一次エネルギー供給(図5-6)では、化石燃料は天然ガスの供給が大半を占め供給量が小さく、脱炭素エネルギーである再エネ、原子力、水素が中心となる。再エネ、原子力は電力部門の由来であり、ネットゼロでの電力需要の増加が示唆される。最終エネルギー消費構成(図5-7)では電化、水素、合成燃料が中心であり、一次エネルギー供給構成からもわかるが、化石燃料利用は全体的に小さく天然ガスを中心に石油系燃料、石炭を僅かに利用する。合成燃料は液体合成燃料の利用が大きく、合成メタンは一部ケースでの限定的な利用となる。化学製品原料に関してはほぼすべてがFT合成燃料となる。一次エネルギー供給・最終エネルギー消費のケース間比較の内容を以下に示す。

- ✓ ReHC：一次エネルギー供給・最終エネルギー消費で天然ガスが増加、石油が減少する。
- ✓ NU+：最終エネルギー消費で電化率が拡大するが、一次エネルギー供給・最終エネルギー消費で石炭が増加する。
- ✓ H2+：一次エネルギー供給で水素輸入量が拡大、再エネが減少し、最終エネルギー消費で液体合成燃料が微増、天然ガスも微増する。
- ✓ IronH2-：エネルギー部門全体で天然ガス・石油がほぼゼロとなる。化石燃料は石炭が大半となり、鉄鋼産業での利用となる。最終エネルギー消費では液体合成燃料に加え合成メタンが導入される。
- ✓ CCS+：一次エネルギー供給・最終エネルギー消費で天然ガスを中心に化石燃料の利用全体が増加

する。

- ✓ CCS-：エネルギー部門全体で化石燃料利用がほぼゼロとなる。最終エネルギー消費では、液体合成燃料に加え、合成メタンの導入も拡大する。

2050年の発電量・設備量構成を図5-8に示す。CO₂ネットゼロを達成する場合、原子力の新規増設が可能なNU+を除きVREが大量導入される。各ケースに関する分析から、VRE導入は本研究のコスト・各時間の設備利用率の想定下でPV・陸上風力が優先的に導入され、洋上風力が電力需要の増減に対し導入量を変化させることが分かる。発電部門の脱炭素はVREを中心に、原子力、水力、地熱、電池の活用で行われる。一方、ネットゼロにおいても残存するLNG複合火力発電は、合成メタンではなく化石燃料であるLNGによる発電が行われる。ReHCシナリオでは、VREが減少し、LNG複合火力が増加する。VREの内訳は、設備利用率が低いPVが減少、設備利用率が高い洋上風力が増加しており、VRE価格が現状維持の場合、洋上風力が経済的であると示唆される。また、VREの建設コストが高価なため、卸電力価格の水準が高い。これまでの分析結果から、ネットゼロ達成における電力部門の脱炭素・大量の電力需要への対応に重要となるVREの建設コストが低減されない場合、電力コストが増加するため、脱炭素エネルギーである電力・水素・合成燃料に必要な発電を抑制し、脱炭素エネルギー減少による化石燃料利用増加は、従来石油を利用していた部門・サービスで排出係数の小さい天然ガスを利用することでCO₂排出の増加を抑える。NU+シナリオでは、原子力発電所の新規増設を行うことで発電量の大半を原子力により供給しており、発電部門の脱炭素が可能となる。ネットゼロにおける大量の電力需要に対し、原子力発電所の新規増設が可能な場合、設備量は震災前の基準約50GWから約5倍の250GWとなるが、原子力発電の設備利用率は高く、VREの建設と比較して必要な発電設備容量は非常に小さい。また、原子力発電の燃料費も安価なため、卸電力価格の水準では最も低くなり、最終消費の電化が促進される結果となる。これまでの分析結果から、発電部門の脱炭素や最終消費の電化促進によりエネルギー部門全体のCO₂排出削減が容易となる。H2+シナリオでは、電力需要が抑制されており、発電においては洋上風力が減少する。また、安価な水素が大量輸入されることで、水素専焼火力が利用可能となっている。電力需要抑制により減少する洋上風力の価格想定が安価なため、電力価格への影響が小さくなっていると考えられる。CCS-シナリオでは、電力需要が最も大きくなる。洋上風力が増加し、LNG複合火力はゼロとなるため、発電部門はほぼ完全に脱炭素化される。電力需要が増加するが、卸電力価格は殆ど変化しない。

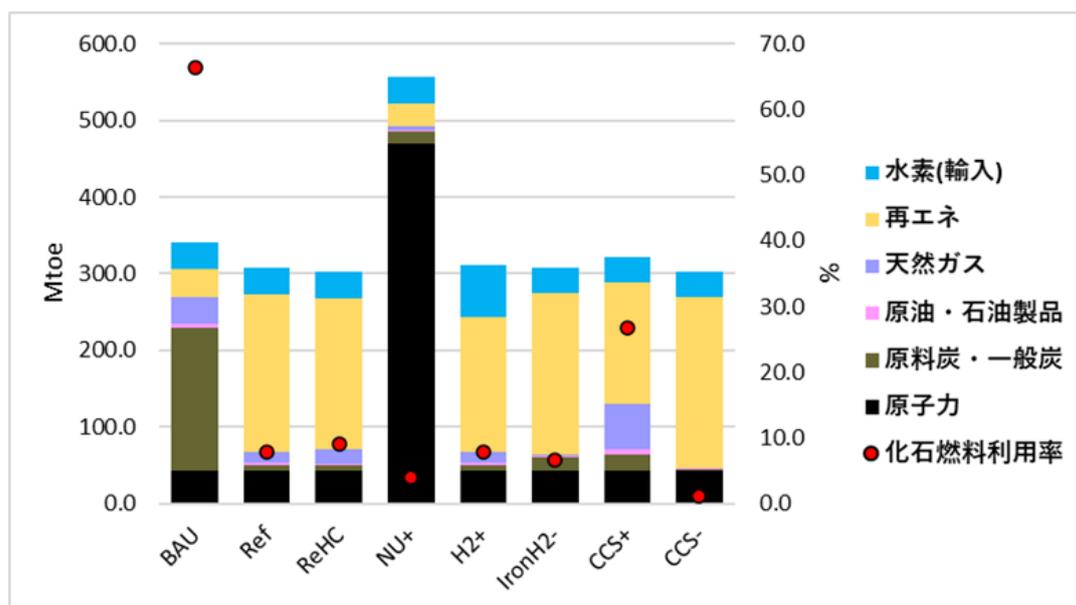


図5-6 2050年の一次エネルギー供給構成(輸入水素含む)

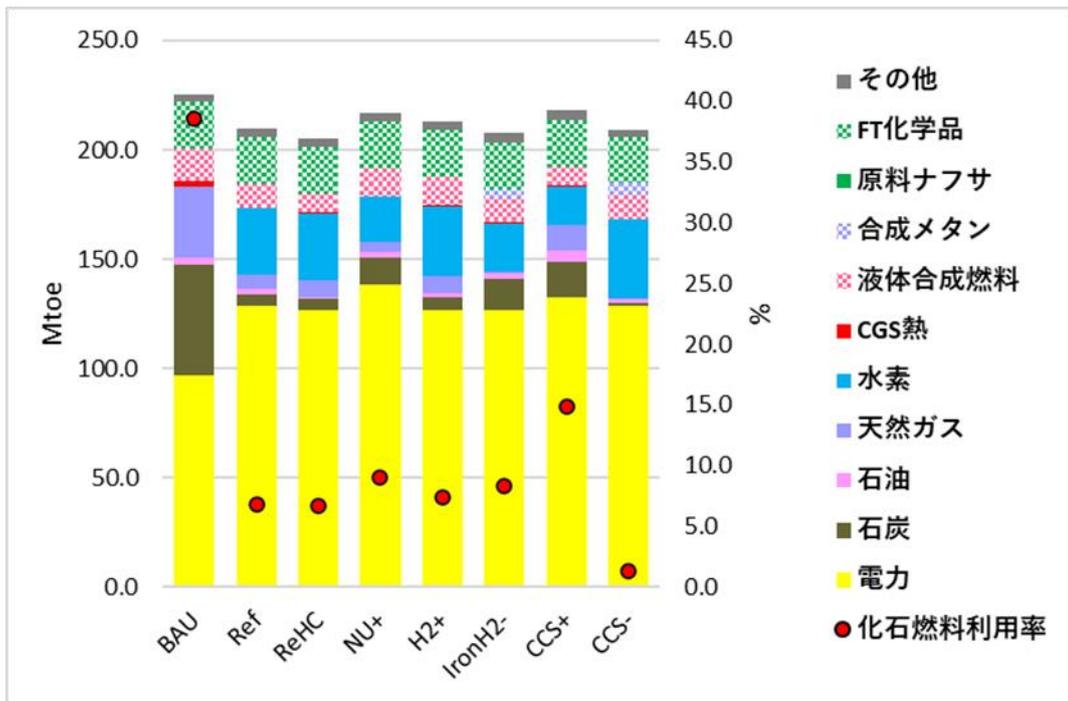


図 5 - 7 2050年の最終エネルギー消費構成

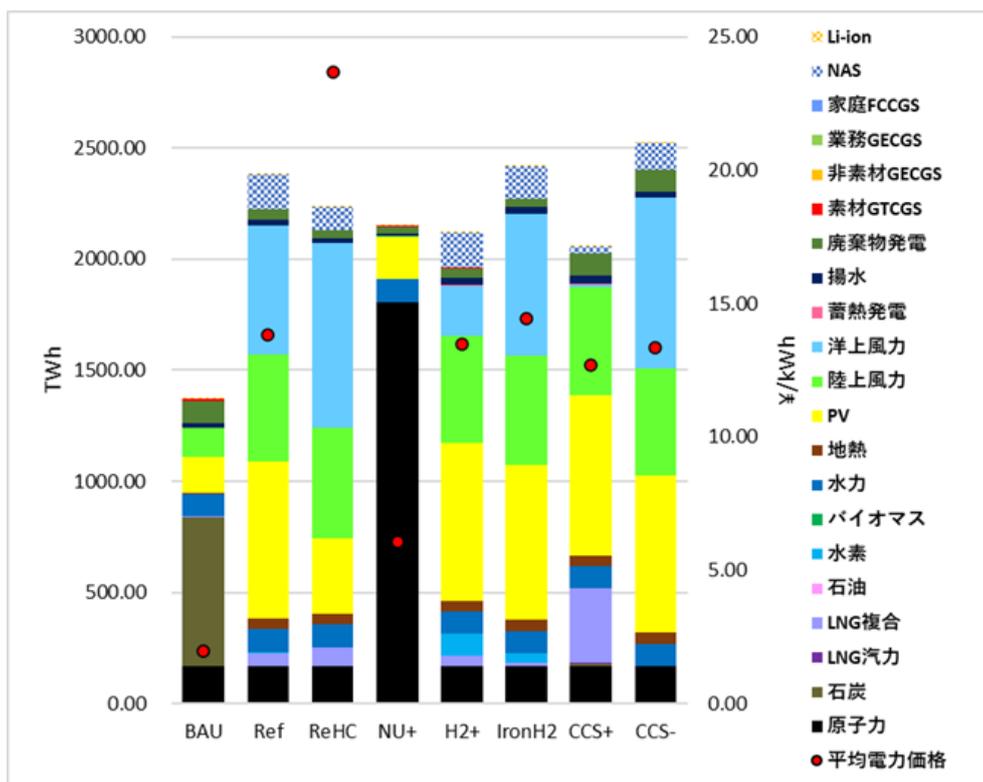


図 5 - 8 2050年の発電量別技術構成

また、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時間値で分析可能とし、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。図 5 - 9 に2050年1月における再エネ大量導入時の1時間値の部門別電力需要の挙動を図示する。再エネ大量導入により卸電力価格が大きく変化し、再エネ電力量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)に加えて、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ことがわかる。また、家庭部門の給湯需要に

おける再エネ大量導入時の需給の挙動を図5-10に示す。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。

また、カーボンニュートラル達成時の需要の挙動の1例として、2050年における部門別電力需要の構成を図5-11に図示する。2050年にCO₂排出ネットゼロを達成する場合、最終消費部門の電化に加え、水電解やDACにおける電力消費が増加することが分かる。水電解水素は直接利用及び合成燃料の製造に輸入水素と併せて利用されるものであり、エネルギーシステム各部門の脱炭素化やCCUに必要となる。DACは合成燃料製造向けの大気中CO₂回収の役割を担い、持続可能な燃料製造・利用に貢献する。その中で、水素輸入量が拡大するケース(H2+)では、水素直接利用や合成燃料製造向けの国内水電解水素の必要量が抑制されるため、水電解用の電力需要が減少すること、また、安価な輸入水素による合成燃料供給量が増加することから、最終消費部門における電化が抑制され、電力需要が他ケースに比べて減少する。一方、CO₂貯留可能量が減少するケース(CCS-)では、化石燃料のクリーン利用が制限される一方、脱炭素化実現のため、水素還元製鉄や合成燃料の必要性が高まって水電解水素への需要が増加することから、その結果、電力需要が増加する。この水電解による電力需要の増大が顕著になるため、全ケースで最も電力需要が増加している。

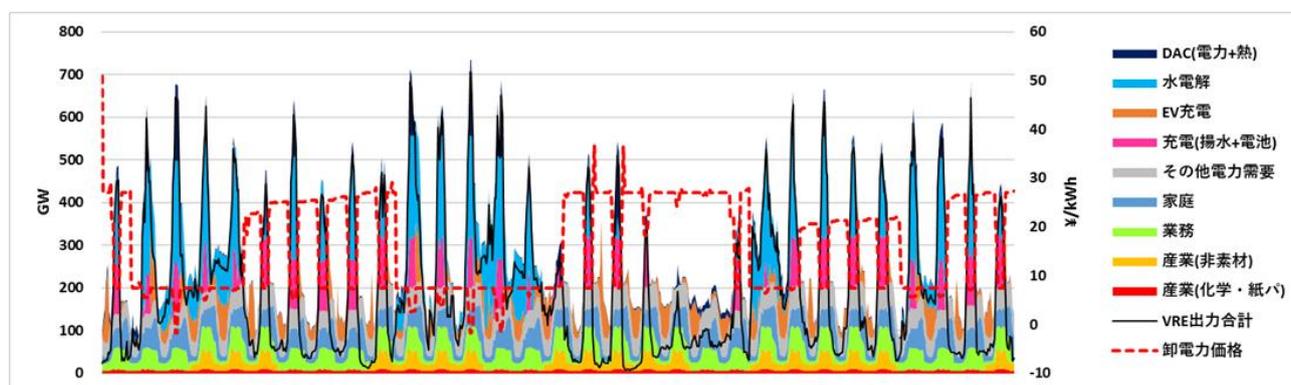


図5-9 2050年1月の電力利用状況(Ref)

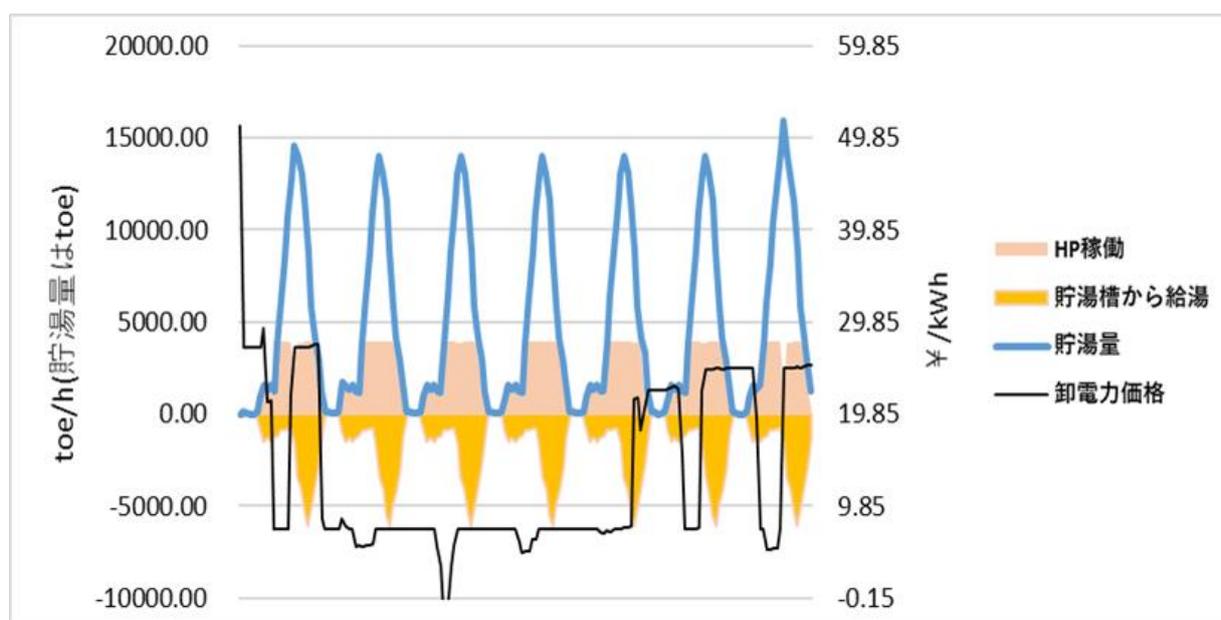


図5-10 2050年1月第1週の家部門給湯需給(Ref)

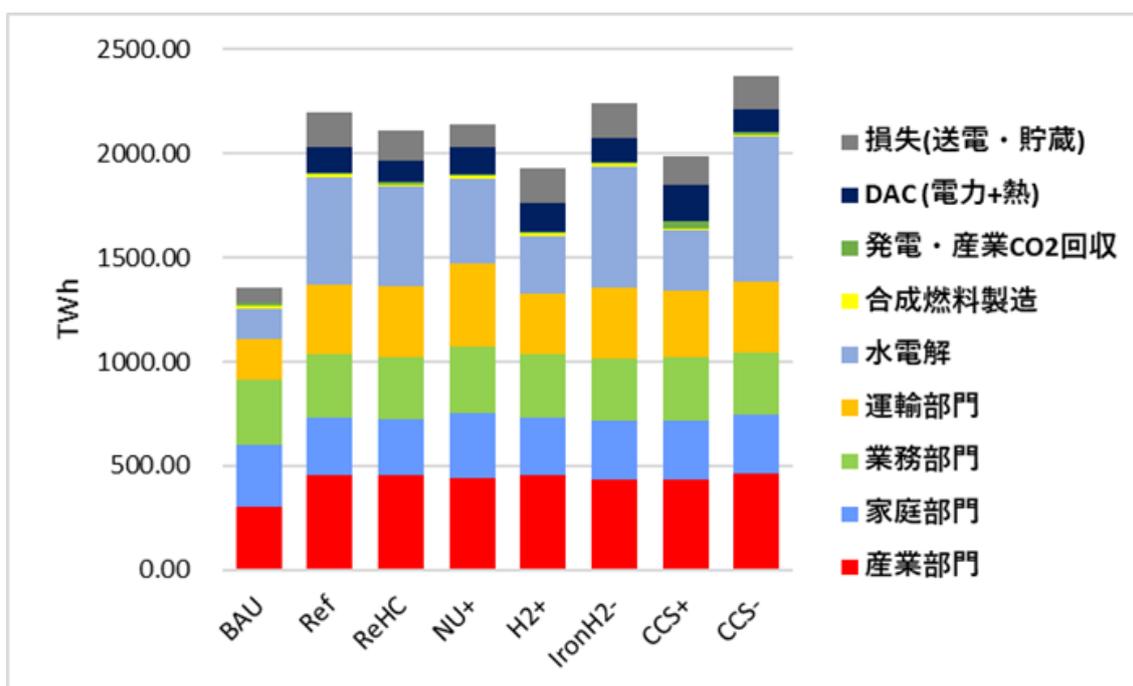


図5-1-1 2050年の電力需要構成

また、電力需給モデルによる分析においては、各時点、各ノードでのDRの許容水準に関して、ケース設定を行う。各ノードの各時点の電力需要に対して上限制約、下限制約を課し、上限値は各時点の電力需要に増加率を乗じ、下限値は減少率を乗じることで設定する。なお、増加率と減少率は年間8760時間を通じて一定とする。需要の増加率、減少率に関して0%～±40%の需要制御幅にてケース設定を行う。各時点、各ノードの電力需要が最大40%で変動することを許容する制約条件の下で最適化を行う。なお、全てのケースでCO₂排出ゼロ制約を課して分析を行う。

各ケースにおける電源構成を分析すると(図5-1-2)、各ケースにおいて、再エネ電源が発電量の半分程度を占め、残りが原子力、ゼロエミ火力(水素発電等)、電力貯蔵(揚水、蓄電池)となり、電力脱炭素化が実現される。また、No DRケースを基準とした各ケースの発電量の変化を見ると(図5-1-3)、DRの導入規模の拡大につれて、再エネ大量導入時に調整力の役割を担う水素発電、ならびに、揚水や系統用蓄電池の充放電量が減少し、太陽光発電の出力抑制量も減少する一方、風力発電や太陽光発電の導入量が増加する傾向が確認できる。このため、電力需要の柔軟性の向上は、調整力への投資の低減、再エネの導入拡大や有効利用に貢献する可能性があると考えられる。

また例えば、DR±30%ケースにおける5月1ヵ月の日本全体の電力需給を見ると(図5-1-4)、太陽光発電等に起因する昼間の余剰電力が発生する際、電力需要が増加して上げDRが創出される。また本稿では、年間の電力消費量は不変であると仮定しているため、昼間の電力需要(上げDR)の増加を受けて、夕刻や朝方に電力需要が減少する傾向が確認できる。余剰電力の発生時は卸電力価格が低下するため、電力需要の増加はシステムコスト抑制に貢献し、夕刻など他の時間帯では卸電力価格が上昇するため、電力需要の減少は同じくシステムコスト抑制に貢献する。そのため、システムコスト最小化を目的関数とする本稿のモデルでは、余剰電力発生時は電力需要増加、その他の時間帯では電力需要減少が合理的なオプションとなる。5月のある1週間での各ケースにおけるDRの挙動を見ると(図5-1-5)、各ケースの許容水準に応じてDRが最大限導入される。

また、DR導入は各電源の運用にも影響を与える。結果では電力脱炭素化実現の上で太陽光発電、風力発電が拡大する中、ゼロエミッション調整力として、水素発電が導入されるが、DR導入水準に応じて、その運用も変化する(図5-1-6)。DRを考慮しないケース(No DR)では、自然変動電源の出力に応じて、大幅な出力調整が行われるが、DR導入が進展した場合は(DR±40%)、水素発電は一定出力による発電時間が相対的に増加することが分かる。これは、本稿ではDR導入に伴うコストを考慮していない

め、調整力としてDRが優先的に導入され、それが再エネの出力調整を担うようになるため、水素発電は調整力としての運用から稼働率を高めた出力一定運転へシフトする。

図5-17にDRに関する各ケースでの電力システム総コストを示す。DR導入により、再エネ調整力への投資抑制効果が働き、システム全体のコストが低下する。例えば、脱炭素化実現ならびに再エネ導入時に調整力の役割を担う水素発電や蓄電池の導入量および投資がDR導入により低減し、コスト抑制に貢献する(図5-18)。

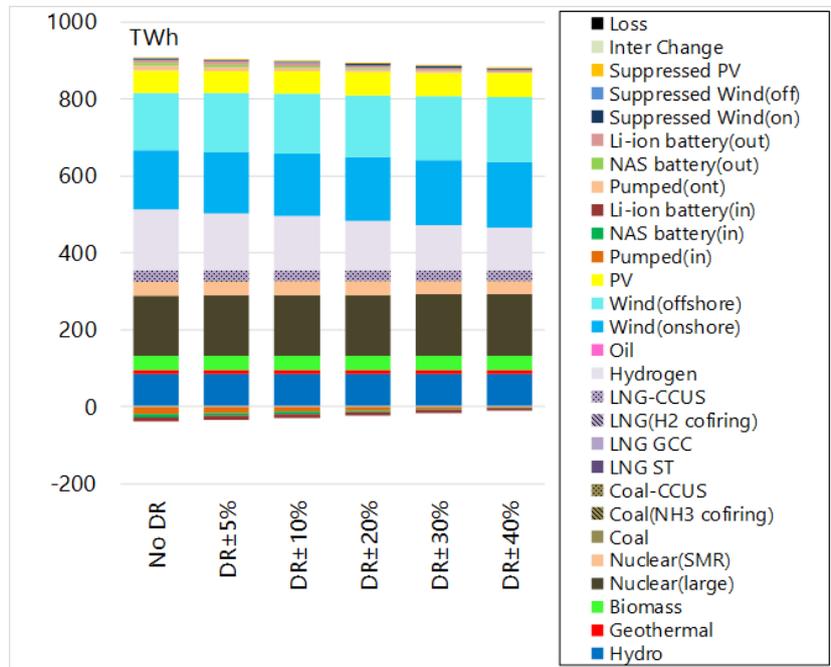


図5-12 電源構成(発電量)

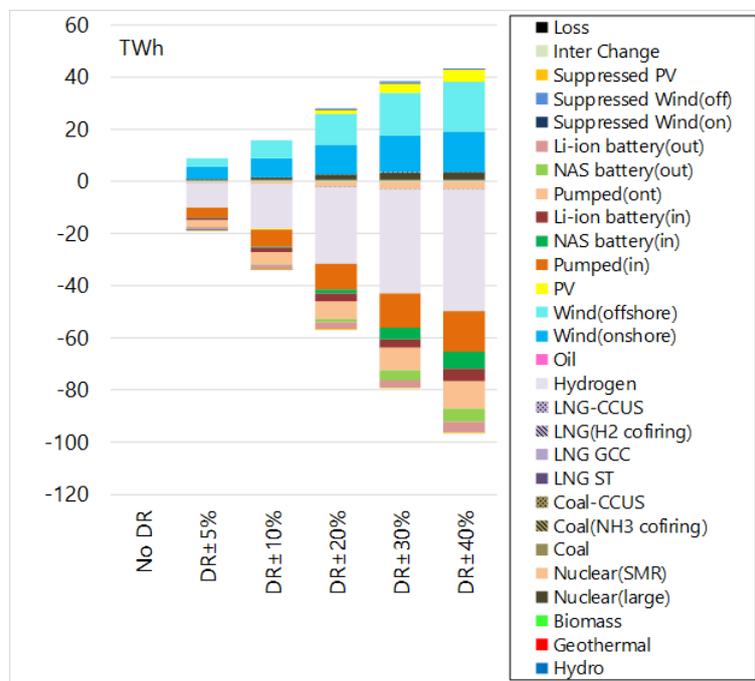


図5-13 電源構成(発電量)の変化(基準値:No DR)

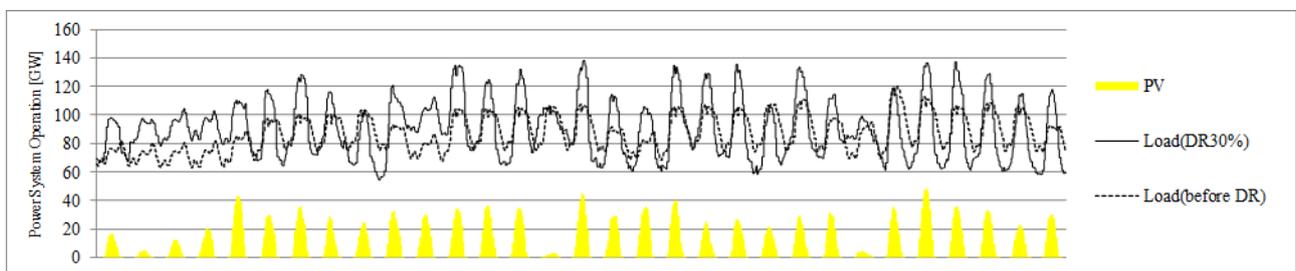
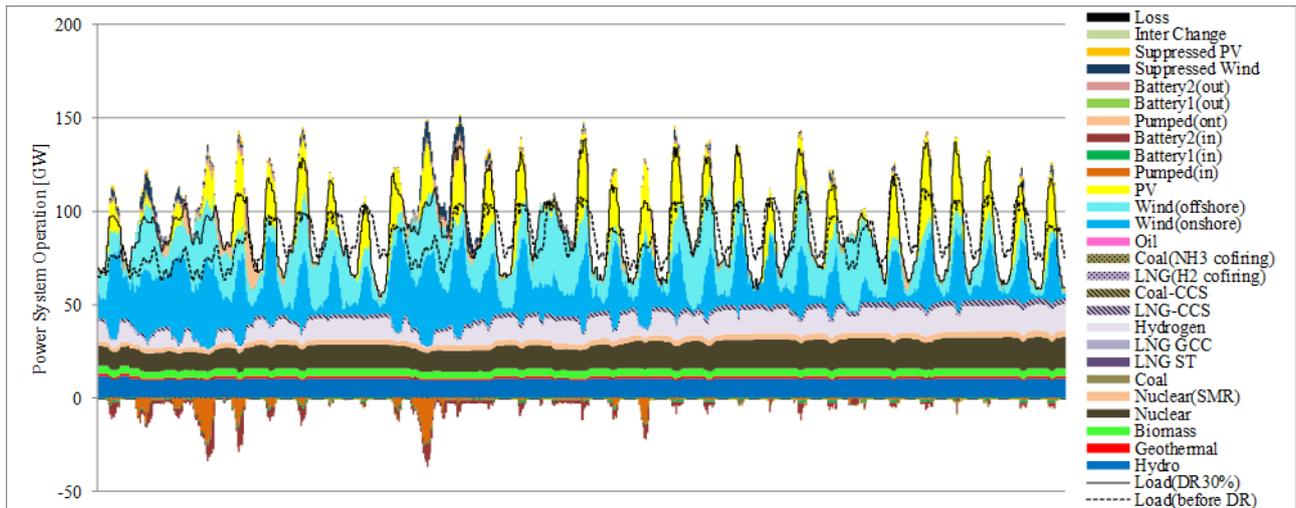


図 5 - 1 4 日本全体の電力需給運用 (5月)

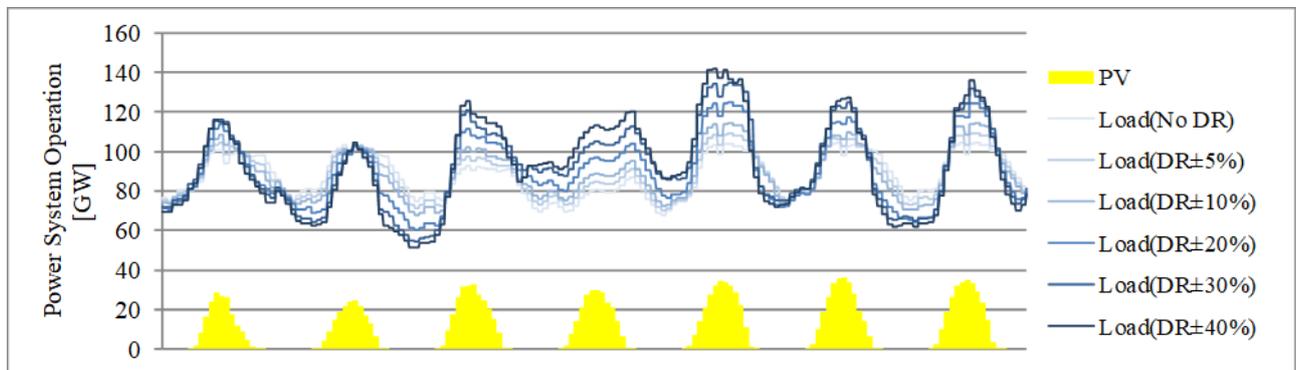
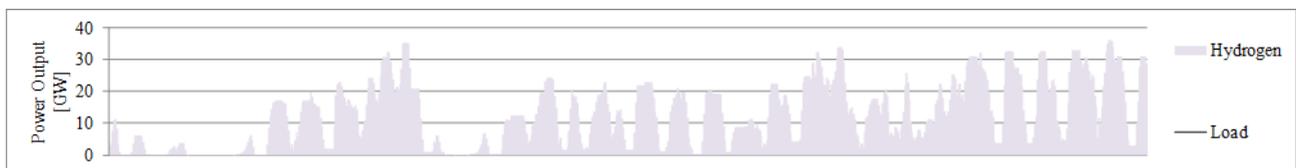
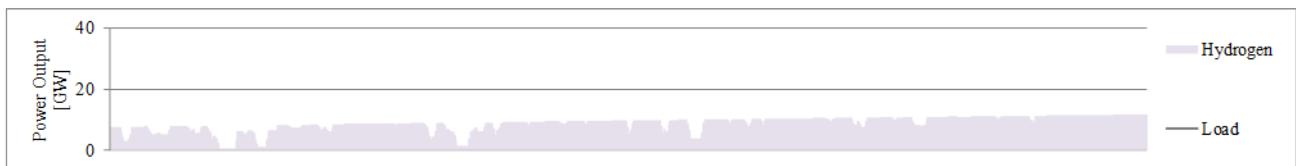


図 5 - 1 5 日本全体の電力需要と太陽光発電 (5月)



(a) No DR



(b) DR±40%

図 5 - 1 6 水素発電の運用 (5月)

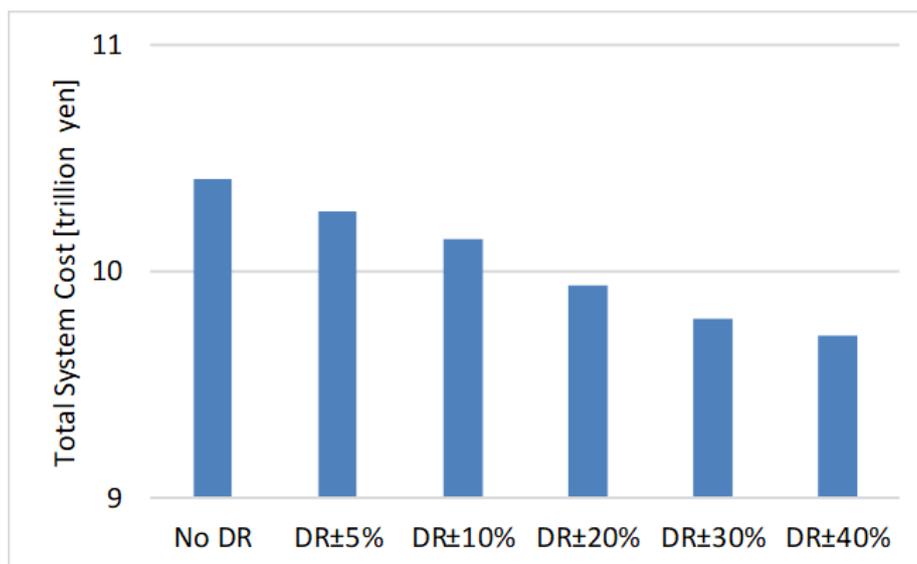


図5-17 電力システム総コスト(ケース別)

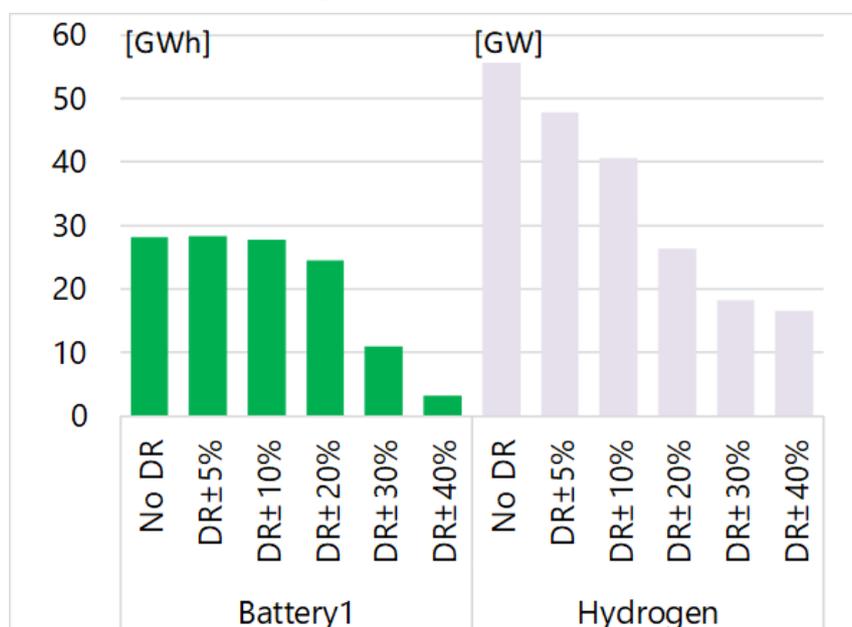


図5-18 最適導入量(左：蓄電池[長周期]、右：水素発電)

5. サブテーマ5 研究目標の達成状況

高時間解像度エネルギーシステムモデルにおいて、デマンド・レスポンス等を含む需要側の電力技術の表現の向上を行い、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い、また、日本全国の送電システムを考慮した最適電源構成モデルに需要側の柔軟性に関して拡張を行い、DR導入の影響分析を実施した。これにより、再生可能エネルギーに関して、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、時間高解像度エネルギー・システム・モデルに組み込み、脱炭素に対するセクター・カップリングの貢献について分析を実施できた。時間高解像度エネルギー・システム・モデルで日本の脱炭素のシナリオを計算し、サブテーマ1にデータを提出した(成果番号5, 56)。以上から、当初の目標を達成できたと考えられる。

Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細

(1) 成果の件数

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

(2) 誌上発表

< 査読付き論文 >

成果番号	【サブテーマ1】の査読付き論文
1	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, https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119178 （サブテーマ3と協力）
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
3	杉山昌広, 筒井純一, 高橋潔. (2024). 分野横断型気候シナリオ研究: 過去, 現在, 未来. 「天気」71(2), 57-68. https://doi.org/10.24761/tenki.71.2_57

4	Sugiyama, M., Wilson, C., Wiedenhofer, D., et al. (2024). High with low: Harnessing the power of demand-side solutions for high wellbeing with low energy and material demand. <i>Joule</i> , 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. <i>Environmental Research Communications</i> , accepted. (サブテーマ3, 4, 5と協力)
6	Atris, A. M., Sugiyama, M., Chen, Y. C., JU, Y., Yamaura, K. (2024). Public Perception of Carbon Dioxide Removal in Three Asian Regions. <i>Sustainability Science</i> , accepted.

成果 番号	【サブテーマ2】の査読付き論文
7	陳奕均, 城山英明, 杉山昌広, 青木一益, 木村幸, 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) 研究の現状と今後の展望. <i>環境経済・政策研究</i> , 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, 木村幸. (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).

成果 番号	【サブテーマ3】の査読付き論文
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. <i>土木学会論文集G (環境)</i> , 77(5), I_263-I_273.
10	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. <i>土木学会論文集G(環境)</i> , Vol. 77, No. 5, I_177-I_182.
11	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. <i>土木学会論文集G (環境)</i> , Vol. 77, No. 5, I_285-I_292.
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. <i>土木学会論文集G (環境)</i> , 78(5), I_429-I_439.
13	中村彩華, 越智雄輝, 長谷川知子, (2023). 廃棄物分野の二酸化炭素を考慮した脱炭素社会シナリオ構築手法の開発と京都市への適用. <i>土木学会論文集</i> , 79(27). https://doi.org/10.2208/jscej.23-27041 .

成果 番号	【サブテーマ4】の査読付き論文
14	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— . <i>電気学会論文誌B</i> , 142(7), 1-13.
15	岡林秀明, 太田啓介, 松尾雄司. (2022). 「2050年に向けた最適電源構成の検討—原子力と水素価格のマクロ経済影響を加味した定量分析—」. <i>エネルギー・資源学会論文誌</i> , 43(5), 197-205.
16	尾羽秀晃, 遠藤聖也, 松尾雄司, 玄海亨, 長尾吉輝. (2022). 共食い効果を考慮した太陽光・風力発電の導入評価モデルの検討. <i>エネルギー・資源学会論文誌</i> , 43(4), 162-171.
17	Matsuo, Y. (2022). Re-defining system LCOE: Costs and values of power sources. <i>Energies</i> , 15(18), 6845. https://doi.org/10.3390/en15186845
18	Otsuki, T., Obane, H., Kawakami, Y., Shimogori, K., Mizuno, Y., Morimoto, S., & Matsuo, Y. (2022). Energy mix for net zero CO ₂ emissions by 2050 in Japan. <i>Electrical Engineering in Japan</i> , 215(4). https://doi.org/10.1002/eej.23396
19	大槻貴司, 尾羽秀晃, 松尾雄司, 森本壮一. (2023). 日本の2050年カーボンニュートラルに向けたエネルギー構成: 再生可能エネルギー100%の電力供給の限界費用分析. <i>エネルギー・資源学会論文誌</i> , 44(3), 115-125.

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. <i>Energy and Climate Change</i> , 4, 100108.
21	Otsuki, T., Shibata, Y., Matsuo, Y., Obane, H. & Morimoto, S. (2024). Role of carbon dioxide capture and storage in energy systems for net-zero emissions in Japan. <i>International Journal of Greenhouse Gas Control</i> , 132, 104065.

成果 番号	【サブテーマ5】の査読付き論文
22	Gyanwali, K., Komiyama, R. and Fujii, Y. (2021). Deep decarbonization of integrated power grid of eastern South Asia considering hydrogen and CCS technology, <i>International Journal of Greenhouse Gas Control</i> , 112, December 2021, 103515.
23	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, <i>Journal of Japan Society of Energy and Resources</i> , 42(5), 295-304.
24	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?, <i>Journal of Japan Society of Energy and Resources</i> , 42(6), 368-384.
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. <i>エネルギー・資源学会論文誌</i> , 44(1), 1.
26	西倉寛太, 小宮山涼一, 藤井康正. (2023). 災害の予測可能性を考慮した近似確率動的計画モデルによる分散型エネルギーシステムのレジリエンスに関する定量的分析. <i>エネルギー・資源学会論文誌</i> , 44(2), 74-86.
27	Yi, Y., Komiyama, R. and Fujii, Y. (2023). Development of Chinese Dynamic Optimal Power Expansion Planning Model Integrated with Hydrogen and Fuel Cell System, <i>IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering</i> . https://doi.org/10.1002/tee.23793
28	Gyanwali, K., Adhikari, P., Khanal, S., Bhattarai, N., Bajracharya, T.R., Komiyama, R., Fujii, Y. (2023). Integrating glacio-hydrological and power grid models to assess the climate-resiliency of high mountain hydropower in Nepal, <i>Renewable & Sustainable Energy Reviews</i> , 183, 113433. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113433

< 査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野） >

成果 番号	【サブテーマ1】の査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ2】の査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ3】の査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ4】の査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ5】の査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）
	特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

成果 番号	【サブテーマ1】のその他誌上発表（査読なし）
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ2】のその他誌上発表（査読なし）
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ3】のその他誌上発表（査読なし）
29	桑葉祐斗, 藤森真一郎, 越智雄輝, 長谷川知子. (2022). 京都市を対象とした将来のカーボンニュートラル実現に向けたシナリオ構築. 第30回地球環境シンポジウム, 北海道, 2022年8月31日-9月2日.
30	佐々木克哉, 藤森真一郎, 大城賢, 長谷川知子. (2021). 家計の消費行動変化を考慮した日本における炭素税の異なる所得階層への影響. 環境衛生工学研究, 35(3), 141-143.
31	佐竹良介, 越智雄輝, 長谷川知子, 大城賢. (2023). エネルギー費用を考慮した脱炭素社会シナリオ構築手法の開発と京都市への適用. 第31回地球環境シンポジウム講演集.

成果 番号	【サブテーマ4】のその他誌上発表（査読なし）
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ5】のその他誌上発表（査読なし）
	特に記載すべき事項はない。

(3) 口頭発表

<口頭発表（国際学会等・査読付き）>

成果 番号	【サブテーマ1】の口頭発表（国際学会等・査読付き）
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ2】の口頭発表（国際学会等・査読付き）
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ3】の口頭発表（国際学会等・査読付き）
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ4】の口頭発表（国際学会等・査読付き）
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ5】の口頭発表（国際学会等・査読付き）
32	Komiyama, R. (2021). (Panel Session: PN1: New Power System Technology Under the “Carbon Neutral” Target) Energy Modelling Study for Achieving Carbon Neutrality in Japan, The International Conference on Electrical Engineering (ICEE), July 6th, 2021.
33	Komiyama, R., Fujii, Y., Kawakami, Y., Otsuki, T. (2021). Long-term Energy Strategy for Carbon Neutrality in Japan and the World. Global Alliance of Universities on Climate (GAUC), ‘Pathways to net zero emissions and carbon/climate neutrality’, June 30th, 2021.
34	Komiyama, R. (2021). Discussion on Long-term Resource Adequacy from “Financing the Energy Transition in a Low-Cost Intermittent Renewables Environment”. 2021 Asian Development Bank Institute Annual Conference: Climate Change Mitigation and Green Finance, December 1st, 2021.
35	Gyanwali, K., Komiyama, R., Fujii, Y. (2021). Deep decarbonization of integrated power grid of eastern South Asia considering hydrogen and CCS technology. International Energy Workshop 2021, June 17, 2021 .
36	Sieed, J., Komiyama, R., Fujii, Y. (2021). Development of Optimal Power Generation Mix for Bangladesh in Different Socio-Economic and Emission Reduction Policy Scenarios, International Conference on Applied Energy 2021, Dec.4, 2021.
37	Sieed, J., Komiyama, R., Fujii, Y. (2021). An Investigation of Energy Self-sufficiency of Bangladesh for Different Socio-economic Scenarios using Dynamic Energy Economic Model. 第40回エネルギー・資源学会研究発表会 講演論文集, pp.37-43.
38	Komiyama, R., and Fujii, Y. (2021). Installable Potential of Small Modular Reactors and Renewable Energy for Achieving Carbon Neutrality in Electric Power System. 6th AIEE Energy Symposium, Online, Concurrent session 16. Circular economy and Smart Solutions, December 16, 2021.
39	Minatomoto, H., Komiyama, R., Fujii, Y. (2021). An Analysis of Electricity Decarbonization in Japan with Nuclear and Renewable by Long-term Optimal Power Generation Mix Model considering Nuclear Fuel Cycle. 6th AIEE Energy Symposium, Online, Concurrent session 12, The role of nuclear power in energy transition, December 15, 2021.
40	Komiyama, R. (2022). Optimal Deployment of Small Modular Reactors Under Large - scale Integration of Variable Renewable Energy. 39th USAEE/IAEE North American Conference, Houston, USA, October 25, 2022.
41	Komiyama, R. (2023). A Study on Net Zero Strategy of Electric Power System in Japan with Optimal Power Generation Mix Model. 40th USAEE/IAEE North American Conference, November 8, 2023.

＜口頭発表（学会等・査読なし）＞

成果番号	【サブテーマ1】の口頭発表（学会等・査読なし）
42	杉山昌広. (2021). 長期気候・エネルギー政策シナリオ：役割と限界. 東京大学「未来社会協創」国際卓越大学院 (WINGS-CFS) 社会連携講座研究会.
43	杉山昌広. (2022). IPCCの知見から考える気候変動・脱炭素社会. 環境情報科学シンポジウム, 2022.12.8.
44	杉山昌広. (2022). 気候変動対策とシナリオ分析／プランニング. 環境経済・政策学会 SEEPSワークショップ2022年大会, 九州大学, 福岡, 2022.12.20.
45	Sugiyama, M. (2022). SDGs Symposium 2022 - Energy systems at the interface of multiple Sustainable Development Goals. Energy scenarios for decarbonization transition. 東京.
46	Sugiyama, M. (2022). Japan's decarbonization policy and pathways. STEPI Korea online workshop, Online, 30 Sep, 2022.
47	Sugiyama, M., Fujimori, S., Wada, K., Kato, E., Komiyama, R., Matsuo, Y., Nishiura, O., Oshiro, K., Otsuki, T. (2022). A multi-model analysis of Japan's net zero target: residual emissions and the role of carbon dioxide removal. Poster presented at the 15th IAMC Annual Meeting, Online (Poster), Nov, 2022.
48	Sugiyama, M. (2023). Need for a modeling forum in the Asia-Pacific? Research workshop on modeling toward net-zero: an Asia-Pacific perspective Hybrid event. (UTokyo Hongo Campus / ZOOM), February 27, 2023.
49	Sugiyama, M. (2023). Role of Carbon Dioxide Removal in Deep Mitigation. Asian Conference on Low Carbon Technology and Innovation - China-Japan-ROK Youth Low-Carbon Forum, Zhuhai, Guangdong, China and online (hybrid), May 28, 2023.
50	杉山昌広. (2023). 二酸化炭素除去(CDR)と太陽放射改変(SRM)の動向. SPEED 研究会, 伊豆今井浜東急ホテル・オンライン, 2023.6.29.
51	杉山昌広. (2023). 再生可能エネルギーに関する幾つかの論点. 環境経済・政策学会 (SEEPS) 2023年大会, 東海大学湘南キャンパス, 神奈川, 2023.10.1.
52	杉山昌広. (2023). 「移行」から考える「再生」. 東京大学CREIリジェネラティブ・フォーラムセミナーイベント. 東京. 2023.10.11.
53	杉山昌広. (2023). 日本における二酸化炭素除去(CDR)に関する複数モデルによる分析. LCA 日本フォーラム「CR2 技術研究プロジェクト」第8回, 航空会館502/オンライン(Zoom), 2023.11.2.
54	Sugiyama, M. (2024). Japan Model Intercomparison Project (JMIP) and Japan's Emissions Reduction pathways. U.S.-Japan Exchange Program for Green Growth Collaboration through Clean Energy Technologies (EXCET) Workshop. Waseda University, Tokyo, 2024.1.17.
55	CAO, T., Sugiyama, M., Ju, Y. (2024). Prospects of regional supply chain relocation for iron & steel industry decarbonization: a case study of Japan and Australia. 第40回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 東京, 2024.1.31.
56	杉山昌広, 大城 賢, 大槻貴司, 加藤悦史, 木村宰, 富田哲也. 西浦理, 藤森真一郎, 松尾雄司, 和田謙一. (2024). 日本のネットゼロ達成のための二酸化炭素除去：シナリオと政策ミックス. エネルギー・資源学会, 第40回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 東京, 2024.1.31. (サブテーマ2, 3, 4, 5と協力)

成果番号	【サブテーマ2】の口頭発表（学会等・査読なし）
57	坂本将吾, 木村宰. (2023). 日本の食消費に伴う土地利用改変起因CO ₂ 排出量. 第42回エネルギー・資源学会研究発表会, 2023年8月2日, 大阪大学中之島センター.
58	木村宰, 坂本将吾, 杉山昌広. (2024). カーボンニュートラルに整合的な「食」の検討, 第40回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 2024年1月31日, 東京大学生産技術研

	研究所。（サブテーマ1と協力）
59	木村宰, 杉山昌広. (2024). 持続可能な食へのトランジションは可能か? トランジション理論に基づく検討. 第40回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 2024年1月31日, 東京大学生産技術研究所. (サブテーマ1と協力)
60	稗貫峻一, 木村宰. (2024). 国内産業連関表で捉える食品起因のサプライチェーンGHG排出量分析. 第19回日本LCA学会研究発表会, 2024年3月6日, 宇都宮大学.

成果番号	【サブテーマ3】の口頭発表（学会等・査読なし）
61	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. 第29回地球環境シンポジウム.
62	藤森真一郎. (2021). 長期気候緩和シナリオ研究とカーボンニュートラル. 日本学術会議近畿地区会議学術講演会「2050年までに何をすべきか カーボンニュートラル」.
63	佐々木克哉, 藤森真一郎, 大城賢, 長谷川知子. (2021). 家計の消費行動変化を考慮した日本における炭素税の異なる所得階層への影響. 第43回京都大学環境衛生工学研究会シンポジウム.
64	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. 第29回地球環境シンポジウム.
65	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. 第29回地球環境シンポジウム.
66	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. 第30回地球環境シンポジウム、北海道大学工学部.
67	Sasaki, K., Fujimori, S., OSHIRO, K., Hasegawa, T., ZHAO, S. (2021). Distributional impact of carbon taxes on household consumption in Japan. Paper presented at the Fourteenth Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) 2021, online. (The meeting Time Zone is UTC.).
68	Oshiro, K., Fujimori, S., Sugiyama, M. (2022). IAMC data template applications and extensions in Japan and Asian modelling activities, Scientific Working Group on Data Protocols and Management, Fifteenth Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) 2022, College Park, MD, USA.
69	桑葉祐斗, 藤森真一郎, 越智雄輝, 長谷川知子. (2022). 京都市を対象とした将来のカーボンニュートラル実現に向けたシナリオ構築, 第30回地球環境シンポジウム, 北海道大学工学部.
70	Mori, S., Nishiura, O., Fujimori, S., Oshiro, K. (2023). Mitigation of rapid end-use technology transition with synthetic fuels in net-zero emissions scenarios, Sixteenth Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) 2023, Hilton Molino Stucky, Venice, Italy.
71	中村彩華, 越智雄輝, 長谷川知子. (2023). 廃棄物分野の二酸化炭素を考慮した脱炭素社会シナリオ構築手法の開発と京都市への適用, 第31回地球環境シンポジウム, 滋賀県立大学.
72	佐竹良介, 越智雄輝, 長谷川知子, 大城賢. (2023). エネルギー費用を考慮した脱炭素社会シナリオ構築手法の開発と京都市への適用, 第31回地球環境シンポジウム, 滋賀県立大学.

成果番号	【サブテーマ4】の口頭発表（学会等・査読なし）
73	岡林秀明, 太田啓介, 松尾雄司. (2022). 2050年に向けた最適電源構成の検討—原子力と水素価格のマクロ経済影響を加味した定量分析—. 第38回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス.
74	尾羽秀晃, 遠藤聖也, 松尾雄司, 玄海亨, 長尾吉輝. (2022). 共食い効果を考慮した太陽光・風力発電の導入評価モデルの検討. 第38回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス.

75	松尾雄司, 大槻貴司, 尾羽秀晃, 森本壮一. (2022). 日本における2050年カーボンニュートラル達成のモデル分析(2):最適解に関する感度分析. 第41回エネルギー・資源学会研究発表会.
76	大槻貴司, 尾羽秀晃, 松尾雄司, 森本壮一. (2022). 日本における2050年カーボンニュートラル達成のモデル分析:再エネ100%の電力供給の経済性に関する感度分析. 第41回エネルギー・資源学会研究発表会.
77	大槻貴司. (2023). リチウム供給制約を考慮した100%再生可能エネルギーシナリオ:長時間解像度世界エネルギーシステムモデルによる分析. 第32回日本エネルギー学会大会.

成果番号	【サブテーマ5】の口頭発表(学会等・査読なし)
78	小宮山涼一. (2021). カーボンニュートラル社会実現に向けた原子力エネルギー戦略, セッション1「脱炭素社会に向けた地球規模の課題, コロナ禍の世界と日本—環境・エネルギーの課題と原子力」. 第54回原産年次大会, 2021年4月13日(火)
79	小宮山 涼一. (2021). 脱炭素化に向けたエネルギーベストミックスと原子力, 日本保全学会第17回学術講演会、提言テーマ次「エネルギー問題」①、2021年7月7日(水)
80	小宮山涼一. (2021). 2050年温室効果ガス排出実質ゼロを達成するための提言, [W081-01] 原子力・再生可能エネルギー調和型エネルギーシステム研究会報告(1), W08100 原子力システムおよび要素技術[動力エネルギーシステム部門企画], 日本機械学会 2021年度 年次大会, 2021年9月6日(月)
81	小宮山涼一. (2021). 脱炭素と地層処分～環境への適合～について, 公益社団法人 日本技術士会四国本部, 第74回CPDセミナー・公開講座(愛媛例会), えひめ共済会館, 愛媛, 2021年11月26日
82	古川慶人, 小宮山涼一, 藤井康正. (2021). 世界エネルギーモデルを用いた南極における相変化型大気中CO ₂ 直接回収技術の導入可能性の評価. 第40回エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集, pp. 274-279.
83	田原聡史, 藤井康正, 小宮山涼一. (2021). 海底直流送電による電力広域融通を想定した最適電源構成に関する分析. 第40回エネルギー・資源学会研究発表会 講演論文集, pp. 324-329.
84	吉武宗浩, 藤井康正, 小宮山涼一. (2021). 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. 第40回エネルギー・資源学会研究発表会 講演論文集, pp. 370-376.
85	今川智稀, 小宮山涼一, 藤井康正. (2021). コージェネレーション及びPower to Gas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. 第40回エネルギー・資源学会研究発表会 講演論文集, pp. 388-297.
86	湊本穂高, 小宮山涼一, 藤井康正. (2021). 核燃料サイクルを統合した日本の長期最適電源構成モデルによる電力脱炭素化に関する分析. 第40回エネルギー・資源学会研究発表会 講演論文集, pp. 472-477.
87	田原聡史, 小宮山涼一, 藤井康正. (2021). 地域間連系線によるLFC調整力の融通を考慮した最適電源構成に関する分析. 電気学会電力・エネルギー部門大会2WEB2-15-2WEB2-20.
88	吉武宗浩, 小宮山涼一, 藤井康正. (2021). カーボンニュートラル制約および原子力シナリオを考慮した世界エネルギーモデルによる洋上風力発電の導入可能性分析. 電気学会電力・エネルギー部門大会3WEB10-19-3WEB10-20.
89	小宮山涼一. (2022). 「原子力利用に関する基本的考え」について. 内閣府原子力委員会定例会, オンライン, 2022年2月15日
90	小宮山涼一. (2022). 脱炭素化・カーボンニュートラルに向けた日本のグリーンイノベーション. 帝京大学主催 イノベーション シンポジウム, 帝京大学霞が関キャンパス, 2022年2月28日
91	小宮山涼一. (2023). 日本の電力システムの脱炭素化に向けた課題. 帝京大学主催 イノベーションシンポジウム「地政学リスクが拡大する中の脱炭素化・デジタル化イノベーション」, 帝京大学霞が関キャンパス, 2023年3月3日(金)
92	湊本穂高, 小宮山涼一, 藤井康正. (2022). 核燃料サイクルと再生可能エネルギーの大量導入を考慮した長期最適電源構成モデルによる日本の発電部門脱炭素化に関する分析. 令和4年電気学会全国大会 WEB29-A1 エネルギー発生・変換 エネルギーシステム, 2022年3月21日

93	小宮山涼一, 藤井康正. (2022). 送電網を考慮した電源投資・運用最適化に関する電力需給解析. 令和4年電気学会全国大会 カーボンニュートラル時代の電力需給解析(H6), 2022年3月21日
94	西倉寛太, 小宮山涼一, 藤井康正. (2022). 近似確率動的計画法を用いた停電リスクを考慮した分散型エネルギーシステムのレジリエンスに関する定量的分析. 令和4年電気学会全国大会 WEB29-A1 エネルギー発生・変換 エネルギーシステム, 2022年3月21日
95	古川慶人, 小宮山涼一, 藤井康正. (2022). 大気中CO ₂ 直接回収技術を考慮した世界エネルギーモデルによるネガティブエミッション実現に関する分析. 令和4年電気学会全国大会 WEB28-B2 系統運用・解析 系統解析(Ⅱ), 2022年3月22日
96	吉武宗浩, 小宮山涼一, 藤井康正. (2022). 数理計画法の分解解法を適用した世界エネルギーモデルの並列計算手法の検討. 令和4年電気学会全国大会 WEB27-B1 系統運用・解析 電力需給・電源構成, 2022年3月22日
97	田原聡史, 藤井康正, 小宮山涼一. (2022). 再エネ大量導入時の水素製造・合成メタン導入を含めた日本の最適電源構成に関する分析. 令和4年電気学会全国大会 WEB27-B1 系統運用・解析 電力需給・電源構成, 2022年3月22日
98	小宮山涼一. (2022). カーボンニュートラル実現に向けたエネルギー・電力システム. 日本学術会議 公開シンポジウム「2050年カーボンニュートラル実現に向けたエネルギーシナリオ」, 2022年4月1日
99	小宮山涼一. (2022). カーボンニュートラル実現に向けたエネルギー・電力システムシミュレーション. スーパーコンピューティング技術産業応用協議会セミナー, 2022年8月24日(水)
100	小宮山涼一. (2022). 小型原子炉とエネルギー戦略, 時代を刷新する会. 参議院議員会館, 2022年9月6日(火)
101	西倉寛太, 小宮山涼一, 藤井康正. (2022). 近似確率動的計画法を用いた断水, 水冷式CGS停止を考慮した分散型エネルギーシステムのレジリエンスに関する定量的分析. 令和4年電気学会電力・エネルギー部門大会, 2022年9月9日(金)
102	小宮山涼一. (2022). 原子力の持続的活用に向けた展望と課題. 2022年SNWシンポジウム, エネルギー安全保障と原子力の積極活用, 2022年9月16日(金)
103	湊本穂高, 小宮山涼一, 藤井康正. (2022). 再生可能エネルギー大量導入を考慮した長期最適電源構成モデルによる核燃料サイクル導入シナリオの分析. 第38回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, pp. 108-113.
104	田原聡史, 藤井康正, 小宮山涼一. (2022). 日本国内における最適電源構成と組み合わせた水素製造・メタネーション技術の経済性評価. 第38回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, pp. 217-223.
105	古川慶人, 小宮山涼一, 藤井康正. (2022). 世界エネルギーモデルによる相変化型大気中直接回収技術の技術的普及要因に関する分析. 第38回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, pp. 274-281.
106	大槻貴司, 小宮山涼一, 藤井康正. (2022). 1時間値の電力需給を考慮した大規模世界エネルギーシステムモデルの開発. 第38回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, pp. 282-287.
107	今川智稀, 小宮山涼一, 藤井康正. (2022). コージェネレーションを考慮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シナリオ分析. 第38回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, pp. 706-715.
108	小宮山涼一. (2023). セクターカップリング、電力需要の柔軟性を踏まえたエネルギー需給解析. 科研費プロジェクト第6回研究会, 京都大学, 2023年2月27日(月)
109	小宮山涼一. (2023). 最適化型電力需給モデルによる電力需要の柔軟性に関する基礎的分析. 令和5年電気学会全国大会, S6 再エネ発電大量導入のための各種需給調整力のあり方, 名古屋大学, 2023年3月15日(水)
110	西倉寛太, 小宮山涼一, 藤井康正. (2023). 過疎地域における地産地消の分散型エネルギーシステムを考慮した応用一般均衡モデルの開発. 第42回エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集.
111	香川寛多, 小宮山涼一, 藤井康正. (2023). 電力系統を考慮したマルチエージェント型電力市場モデル開発と電力価格挙動に関する基礎的分析. 第42回エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集.

112	本田悠人, 藤井康正, 小宮山涼一. (2023). 太陽光発電導入下での大規模災害リスクを考慮した首都圏のエネルギーレジリエンス分析. 第42回エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集.
113	高田達矢, 藤井康正, 小宮山涼一. (2023). 動学的多部門エネルギー経済モデルによるサプライチェーン脱炭素化に関する基礎的分析. 第42回エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集.
114	宮寄颯人, 藤井康正, 小宮山涼一. (2023). 最適化型技術選択モデルによる環境政策の不確実性を考慮した脱炭素トランジションに関する基礎的分析. 第42回エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集.
115	小宮山涼一. (2023). 電源ベストミックスに向けた電力系統数値シミュレーション分析. 独立行政法人経済産業研究所, 「電力市場のシステム・デザインとわが国への示唆」研究会, 2023年10月10日(火)
116	小宮山涼一. (2023). 最適化型電力需給モデルによる脱炭素電源ベストミックス分析. 環境経済・政策学会2023年大会, 東海大学, 2023年10月1日(水)
117	小宮山涼一. (2023). カーボンニュートラル・エネルギーセキュリティを巡る情勢と課題, 溶接構造シンポジウム2023 特別講演, 2023年11月28日(火)
118	西倉寛太, 小宮山涼一, 藤井康正. (2023). 地域社会会計行列に基づく応用一般均衡モデルによる分散型電源の経済効果に関する定量的分析. 電気学会電力・エネルギー部門大会論文集.
119	宮寄颯人, 藤井康正, 小宮山涼一. (2024). 環境政策の不確実性を考慮した多段階確率計画法による最適エネルギー計画に関する分析. エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集.

(4) 知的財産権

成果番号	発明者	出願者	名称	出願以降の番号	出願年月日
	特に記載すべき事項はない。				

(5) 「国民との科学・技術対話」の実施

成果番号	実施年度	【サブテーマ1】の実施状況
120	2021	2021年12月21日, シナリオ研究とトランジション研究で迫る脱炭素の姿, オンライン実施. 「シナリオ研究とトランジション研究で迫る脱炭素の姿」について講演.
121	2022	2022年12月21日, IPCC執筆者とマスメディア関係者の対話: 統合報告書とその先へ向けて, 東京大学伊藤国際学術研究センターおよびオンライン配信. 企画自体がIPCCの成果について幅広く議論するものであり, シナリオは中心的な議題であった. 研究代表者の杉山は企画および当日のロジまで中心的な役割を果たした.
122	2023	2023年10月7日, IPCCの知見から考える脱炭素とカーボンニュートラル, 東京大学山上会館.

成果番号	実施年度	【サブテーマ2】の実施状況
123	2021	2021年12月21日, 「シナリオ研究とトランジション研究で迫る脱炭素の姿」(環境研究総合推進費2-2104国民対話シンポジウム, オンライン実施)において「トランジション研究から見る脱炭素化」を講演し, 参加した一般市民との対話を実施.
124	2023	2024年3月10日, 「食のサステナビリティ推進フォーラムin東北」(主催: 環境省東北地方環境事務所, 共催: 農林水産省東北農政局, オンライン実施)において「気候変動に向き合う食のあり方」を講演し, 参加した一般市民との対話を実施.

成果番号	実施年度	【サブテーマ3】の実施状況
125	2021	2021年12月21日、「シナリオ研究とトランジション研究で迫る脱炭素の姿」（環境研究総合推進費2-2104国民対話シンポジウム，オンライン実施）においてAIM/Technology-Japanによる脱炭素シナリオ分析について講演し，参加した一般市民との対話を実施。

成果番号	実施年度	【サブテーマ4】の実施状況
		特に記載すべき事項はない。

成果番号	実施年度	【サブテーマ5】の実施状況
		特に記載すべき事項はない。

(6) マスメディア等への公表・報道等

成果番号	【サブテーマ1】のメディア報道等
	特に記載すべき事項はない。

成果番号	【サブテーマ2】のメディア報道等
	特に記載すべき事項はない。

成果番号	【サブテーマ3】のメディア報道等
126	エコせん（2021年4月号（No. 72）、2-3頁、インタビュー京の地球人「多角的な視点が地球を守るカギ」）長谷川知子。

成果番号	【サブテーマ4】のメディア報道等
	特に記載すべき事項はない。

成果番号	【サブテーマ5】のメディア報道等
	特に記載すべき事項はない。

(7) 研究成果による受賞

成果 番号	【サブテーマ1】の研究成果による受賞
127	2023年度環境経済・政策学会奨励賞 (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, https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119178 に対する賞、2023年10月、代表受賞：居 又義)

成果 番号	【サブテーマ2】の研究成果による受賞
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ3】の研究成果による受賞
128	Highly Cited Researchers 2021 (高被引用論文著者)、2021年11月、長谷川知子

成果 番号	【サブテーマ4】の研究成果による受賞
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ5】の研究成果による受賞
129	電気学会 電力・エネルギー部門大会 YOC奨励賞, 2021 (令和3) 年10月 (田原聡史, 小宮山涼一, 藤井康正: 地域間連系線によるLFC調整力の融通を考慮した最適電源構成に関する分析(2021))
130	電気学会 電力・エネルギー部門大会 YOC奨励賞, 2021 (令和3) 年10月 (吉武宗浩, 小宮山涼一, 藤井康正: カーボンニュートラル制約および原子力シナリオを考慮した世界エネルギーモデルによる洋上風力発電の導入可能性分析(2021))
131	電気学会 電力・エネルギー部門大会 YOC奨励賞, 2022 (令和4) 年10月 (西倉寛太, 小宮山涼一, 藤井康正, 近似確率動的計画法を用いた断水, 水冷式CGS 停止を考慮した分散型エネルギーシステムのレジリエンスに関する定量的分析).
132	エネルギー・資源学会 学生発表賞(西倉寛太, 小宮山涼一, 藤井康正: 災害の予測可能性を考慮した近似確率動的計画モデルによる分散型エネルギーシステムのレジリエンスに関する定量的分析)(2023)

(8) その他の成果発表

成果 番号	【サブテーマ1】のその他の成果発表
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ2】のその他の成果発表
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ3】のその他の成果発表
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ4】のその他の成果発表
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ5】のその他の成果発表
	特に記載すべき事項はない。

Abstract

[Research Title]

Decarbonization transition: Multi-model assessment of innovation and lifestyle change

Project Period (FY) :	2021-2023
Principal Investigator :	Sugiyama, Masahiro
(PI ORCID) :	0000-0002-2038-1045
Principal Institution :	The University of Tokyo, Institute for Future Initiatives 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, JAPAN Tel: +81-3-5841-0942 Fax: +81-3-5841-1709 E-mail: masahiro@ifi.u-tokyo.ac.jp
Cooperated by :	Central Research Institute of Electric Power Industry, Kyoto University, Ritsumeikan University, The Institute of Energy Economics, Japan, University of Tokyo
Keywords :	Climate Policy, Integrated assessment, Innovation, Energy Economics, Environmental Economics, Sustainable Development

[Abstract]

We analyzed robust pathways for Japan's net-zero emissions goal by 2050 and the policy mix required to achieve such a target. We used a multi-model framework for scenario analysis and bridged it with the insights from sustainability transitions research.

Scenarios were developed to analyze uncertainties such as the rate of cost reduction of renewable energy, the cost of imported hydrogen and ammonia, and the scale of carbon dioxide removal (CDR) deployment. Scenario design was informed by an innovation database that collated wide-ranging future projections of energy technology costs. Results from five energy-economic and integrated assessment models were collected to create a scenario database. Model intercomparison revealed robust mitigation strategies, including economy-wide energy efficiency, decarbonization of power sources, end-use electrification, expansion of clean energy, and CDR. In particular, a significant scale of CDR (~ 100MtCO₂ or about 10% of the current emissions) was found to be important for economically efficient mitigation policies (Sugiyama et al., 2024a). We also identified power generation based on hydrogen and ammonia as an uncertain innovation.

To translate the modeling results into policy mixes, we conducted an extensive literature review on sustainability transitions research (e.g., Chen et al. 2022), particularly on multi-level perspectives and policy mixes. We developed a framework for analyzing policy mixes based on the phase of technology diffusion: niche support and research and development for the emergence phase, carbon pricing and deployment subsidies for the growth phase, and support for those sectors that may be negatively affected in the final reconfiguration phase. Focusing on CDR and hydrogen, we benchmarked Japan's policy with those of other regions, such as the United States. Our analysis showed that while important steps have been taken, the niche market creation programs are weak in Japan's policy mix, and subsidy or tax credit programs similar to the United States' Inflation Reduction Act are needed.

For lifestyle change, we conducted an extensive literature review (e.g., Sugiyama et al., 2024b) on how to

bridge model-based scenario analysis with transitions research. Focusing on food system transformation, the study found that Japan is at a pre-emergence stage and that basic policy actions, such as information dissemination, are needed. The study also identified the need to address the inequality-increasing (regressive) effects of strict carbon pricing on low-income households under a net-zero policy, as well as grid flexibility measures to enable high penetration of variable renewable energy sources such as solar and wind.

[References]

- Yi-chun Chen, Hideaki Shiroyama, Masahiro Sugiyama, Kazumasa Aoki, Osamu Kimura, Akihisa Mori, Kyoko Ohta, Masahiro Matsuura, Makiko Matsuo (2022). The current status and future prospect of sustainability transitions research in Japan. *Review of Environmental Economics and Policy Studies*, 15(2), 1-11. (in Japanese) https://doi.org/10.14927/reeps.15.2_1
- Masahiro Sugiyama, Shinichiro Fujimori, Kenichi Wada, Etsushi Kato, Yuhji Matsuo, Osamu Nishiura, Ken Oshiro, Takashi Otsuki, (2024). Residual emissions and carbon removal towards Japan's net-zero goal: A multi-model analysis. *Environmental Research Communications*, accepted.
- Masahiro Sugiyama, Charlie Wilson, Dominik Wiedenhofer, Benigna Boza-Kiss, Tao Cao, Joyee S. Chatterjee, Souran Chatterjee, Takuya Hara, Ayami Hayashi, Yiyi Ju, Volker Krey, María Fernanda Godoy León, Luis Martinez, Eric Masanet, Alessio Mastrucci, Jihoon Min, Leila Niamir, Setu Pelz, Joyashree Roy, Yamina Saheb, Roberto Schaeffer, Diana Ürge-Vorsatz, Bas van Ruijven, Yoshiyuki Shimoda, Elena Verdolini, Frauke Wiese, Yohei Yamaguchi, Carina Zell-Ziegler, and Caroline Zimm. (2024b). High with low: Harnessing the power of demand-side solutions for high wellbeing with low energy and material demand. *Joule* 8, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2023.12.014>

This research was funded by the Environment Research and Technology Development Fund (ERTDF).