

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

研 究 区 分	： 環境問題対応型研究（一般課題）
研 究 実 施 期 間	： 2022（令和4）年度～2024（令和6）年度
課 題 番 号	： 1-2202
体 系 的 番 号	： JPMEERF20221002
研 究 課 題 名	： アジア途上国における気候中立社会の実現に向けたロードマップの 定量化に関する研究
Project Title	： Research on Quantification of Roadmap Toward Climate Neutral Society in Asian Developing Countries
研 究 代 表 者	： 増井 利彦
研 究 代 表 機 関	： 国立環境研究所
研 究 分 担 機 関	： 立命館大学、東京大学
キ ー ワ ー ド	： アジア、気候中立社会、統合評価モデル、ロードマップ、気候変動 緩和策評価

2025（令和7）年11月



環境研究総合推進費
Environment Research and Technology Development Fund



独立行政法人
環境再生保全機構
ERCA Environmental Restoration and Conservation Agency

目次

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書.....	1
研究課題情報.....	3
<基本情報>	3
<研究体制>	3
<研究経費>	4
<研究の全体概要図>	5
1. 研究成果.....	6
1. 1. 研究背景	6
1. 2. 研究目的	6
1. 3. 研究目標	6
1. 4. 研究内容・研究結果.....	8
1. 4. 1. 研究内容	8
1. 4. 2. 研究結果及び考察.....	17
1. 5. 研究成果及び自己評価.....	32
1. 5. 1. 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献	32
1. 5. 2. 研究成果に基づく研究目標の達成状況及び自己評価	33
1. 6. 研究成果発表状況の概要.....	35
1. 6. 1. 研究成果発表の件数.....	35
1. 6. 2. 主要な研究成果発表.....	35
1. 6. 3. 主要な研究成果普及活動.....	36
1. 7. 国際共同研究等の状況.....	36
1. 8. 研究者略歴	36
2. 研究成果発表の一覧.....	38
(1) 研究成果発表の件数	38
(2) 産業財産権	38
(3) 論文	38
(4) 著書	39
(5) 口頭発表・ポスター発表.....	39
(6) 「国民との科学・技術対話」の実施.....	43
(7) マスメディア等への公表・報道等.....	43
(8) 研究成果による受賞	43
(9) その他の成果発表	43
権利表示・義務記載.....	44
Abstract	

研究課題情報

<基本情報>

研究区分：	環境問題対応型研究（一般課題）
研究実施期間：	2022（令和4）年度～2024（令和6）年度
研究領域：	統合領域
重点課題：	【重点課題2】ビジョン・理念の実現に向けた研究・技術開発 【重点課題7】気候変動の緩和策に係る研究・技術開発
行政ニーズ：	（1-6）アジア途上国における気候中立社会を実現するロードマップ作成とその実装化を支援する枠組の検討
課題番号：	1-2202
体系的番号：	JPMEERF20221002
研究課題名：	アジア途上国における気候中立社会の実現に向けたロードマップの定量化に関する研究
研究代表者：	増井 利彦
研究代表機関：	国立環境研究所
研究分担機関：	立命館大学、東京大学
研究協力機関：	みずほリサーチ&テクノロジーズ、千葉大学、タマサート大学（タイ）、ボゴール農業大学（インドネシア）、バンドン工科大学（インドネシア）、中国科学院 広州能源研究所（中国）、中国国家発展和改革委員会能源研究所（中国）、北京大学（中国）、北京航空航天大学（中国）、アーメダバード大学（インド）、インド経営大学院アーメダバード校（インド）、マレーシア工科大学（マレーシア）、國家實驗研究院（台湾）

<研究体制>

サブテーマ1「アジア途上国における気候中立社会の実現に向けたロードマップの定量化に関する研究」

<サブテーマリーダー（STL）、研究分担者、及び研究協力者>

役割	機関名	部署名	役職名	氏名	一時参画期間
リーダー	国立環境研究所	社会システム領域	領域長	増井利彦	
分担者	国立環境研究所	社会システム領域	副領域長	高橋潔	
分担者	国立環境研究所	社会システム領域	室長	花岡達也	
分担者	国立環境研究所	社会システム領域	室長	芦名秀一	

分担者	国立環境研究所	社会システム 領域	主幹研究員	金森有子	
分担者	国立環境研究所	社会システム 領域	主任研究員	Silva Herrn Diego	
分担者	国立環境研究所	社会システム 領域	主任研究員	高倉潤也	
分担者	国立環境研究所	社会システム 領域	主任研究員	土屋一彬	
分担者	国立環境研究所	社会システム 領域	主任研究員	有賀敏典	2022年度
分担者	国立環境研究所	社会システム 領域	主任研究員	牧誠也	
分担者	国立環境研究所	福島地域協働 研究拠点	室長	五味馨	
分担者	立命館大学	総合科学技術 研究機構	教授	長谷川知子	
分担者	東京大学	大学院新領域 創成科学研究 科	准教授	張潤森	
協力者	国立環境研究所	社会システム 領域	研究連携コー ディネーター (アジア太平 洋統合モデル 担当)	日比野剛	
協力者	千葉大学	工学部	准教授	有賀敏典	2023年度～ 2024年度

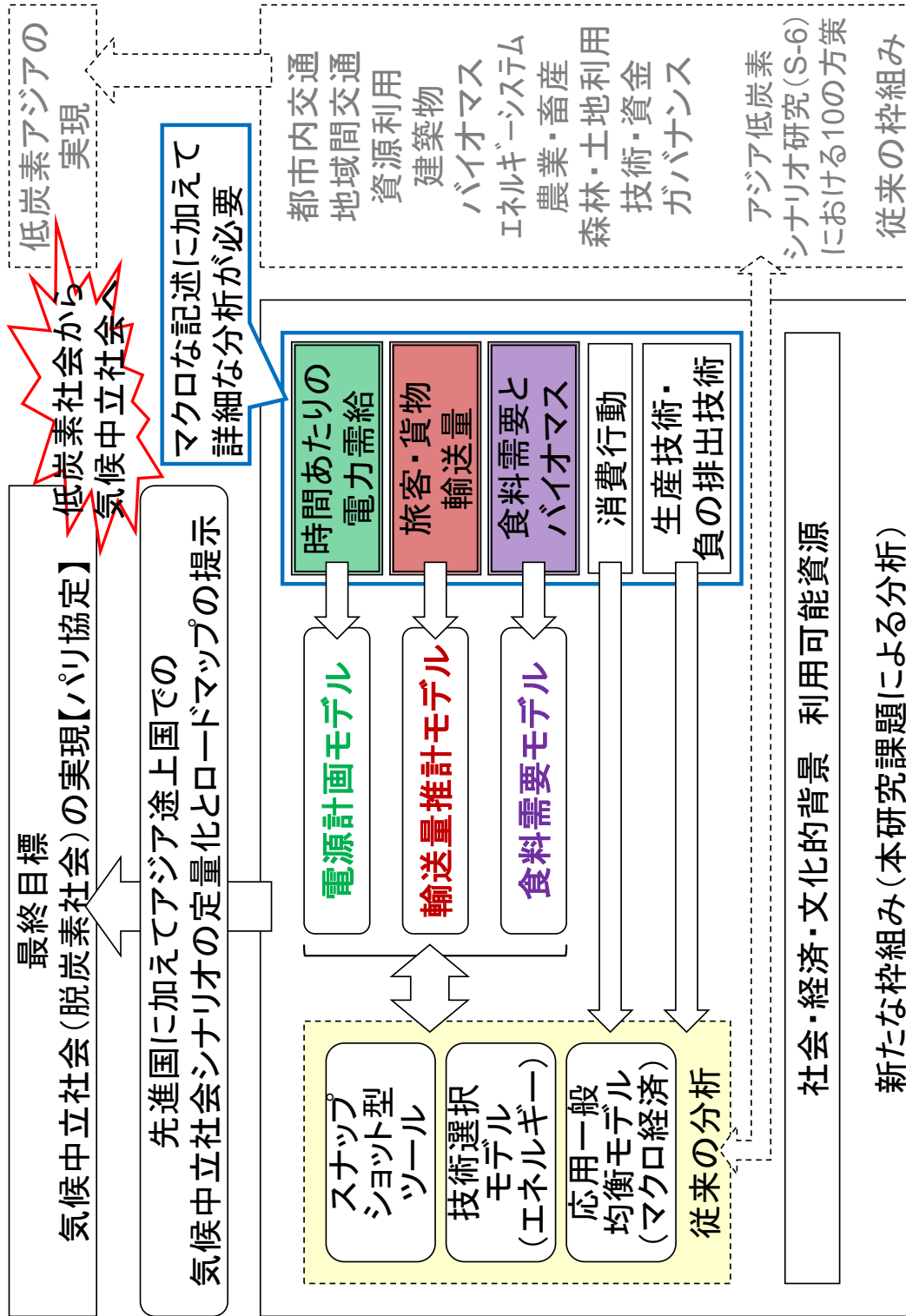
<研究経費>

<研究課題全体の研究経費（円）>

年度	直接経費	間接経費	経費合計	契約上限額
2022	24,045,137	7,581,923	31,627,060	32,855,000
2023	23,659,738	7,580,733	31,240,471	32,855,000
2024	25,334,868	7,581,923	32,916,791	32,855,000
全期間	73,039,743	22,744,579	95,784,322	98,565,000

<研究の全体概要図>

アジア途上国における気候中立社会の実現に向けたロードマップの定量化に関する研究



1. 研究成果

1. 1. 研究背景

パリ協定により1.5℃目標に代表される気候中立社会の実現に向けた取り組みがアジア途上国でも求められ、2025年5月1日時点で長期低温室効果ガス排出発展戦略（以下、長期戦略）を提出した国や地域は76となり、アジアでは日本を含めて11カ国となっている。日本を含めて中国、韓国、タイ、インドなどでは実質的な排出ゼロを長期戦略に明記しており、排出ゼロが明記されていないインドネシアなどにおいても現在、排出ゼロに向けた分析が進められている。また、長期戦略を提出していないベトナムやマレーシアなどでも排出ゼロに向けた議論が進められている。しかしながら、気候中立社会の実現には、排出ゼロを実現する長期戦略の計画だけではなく、具体的な対策や施策を含めたロードマップの構築が急務であり、その中で検討された対策をできるだけ早急に「実装」することが求められている。一方、アジアの途上国は多様で、各国の発展段階や再生可能エネルギーの賦存量、抱える課題は異なり、各国の事情を反映した分析が必要となる。

これまでに国立環境研究所が中心となって取り組んできた日本の長期戦略策定や、環境研究総合推進費S-6に代表されるアジア低炭素研究の経験から、ロードマップの構築や対策の社会実装の実現には、国全体とともに各国で重視される個別分野を解決するロードマップの作成も重要となる。例えば、発電部門においては、再生可能エネルギーの主力電源化により、年間の供給ポテンシャルの評価とともに、時間あたりの需給バランスを含めた詳細なエネルギーシステム分析が必要となる。交通分野では、都市構造や生産構造の変化など発展段階に応じた旅客、貨物輸送量の詳細な推計が求められる。農業・土地利用分野では、土地利用起源の排出や吸収源などの評価に向けて、食料やバイオマス資源の需要量の推計が大きな課題である。このほか、社会変容の可能性や温室効果ガスの負の排出技術の導入なども重要な課題の1つである。気候中立社会の実現に向けて、これらの個別分野における精緻な議論を反映させたマクロなロードマップが、途上国での経済発展と気候中立社会の両方を実現するリープフロッグ型発展に求められている。そうした支援の必要性が、2025年2月に閣議決定された我が国の地球温暖化対策計画にも第8節2.(2)において「相手国への政策提言や我が国の経験の共有を行うほか、アジア太平洋統合評価モデル（AIM）による長期戦略策定支援やNDC改訂支援、アジアにおける温室効果ガスインベントリ整備に関するワークショップ（WGIA）やコ・イノベーションのための透明性パートナーシップ（PaSTI）等を通じた温室効果ガスインベントリの精度向上及び温室効果ガス排出量の算定報告や気候関連情報開示に係る制度構築、隔年透明性報告書作成に係る二国間支援、必要な人材育成に係る協力等を支援し、相手国の野心の向上や脱炭素に向けた取組の強化に貢献する。」と明記されるようになっていく。

こうした状況を踏まえ、本研究では、重点課題の「②ビジョン・理念の実現に向けた研究・技術開発」及び「⑦気候変動の緩和策に係る研究・技術開発」に対応し、行政要請研究テーマ「（1-6）アジア途上国における気候中立社会を実現するロードマップ作成とその実装化を支援する枠組みの検討」に対応する課題として、アジア各国が気候中立社会を実現するために必要なツールであるAIMの改良と、それらを用いた将来シナリオの定量化に取り組んできた。

1. 2. 研究目的

本研究課題では、これまでに構築してきたアジア太平洋統合モデル（AIM）を基礎として、アジア途上国向けの電源計画モデルや輸送量推計モデル、食料需要モデルを開発し、開発したモデルを用いて将来シナリオの定量化を、アジア途上国を対象に実施することを目的とする。また、これまでに開発、適用してきた拡張型スナップショットツール（ExSS）、技術選択モデル（AIM/Enduse）や応用一般均衡モデル（AIM/CGE）について、そうした個別の課題を反映できるように改良し、個別モデルの分析から得られる将来シナリオや消費行動、産業構造の変化を含む社会変容、さらには負の排出技術の普及も含めて気候中立社会の実現に向けたロードマップを、マクロな社会経済像やエネルギー需給の面から定量的に明らかにすることも目的としている。

本研究で取り組むモデル開発やシナリオの定量化は、重点課題の「②ビジョン・理念の実現に向けた研究・技術開発」及び「⑦気候変動の緩和策に係る研究・技術開発」に対応するとともに、得られたツールやシナリオをアジア各国に提供することは、行政要請研究テーマ「（1-6）アジア途上国における気候中立社会を実現するロードマップ作成とその実装化を支援する枠組みの検討」を具体化するものである。

1. 3. 研究目標

<全体の研究目標>

研究課題名	アジア途上国における気候中立社会の実現に向けたロードマップの定量化に関する研究
全体目標	<p>分析対象とするアジア途上国として、インドネシア、タイ、台湾を取り上げ、これらの国を対象に、電源計画モデル、輸送量推計モデル、食料需要モデル（以下ではこれらをまとめて「個別モデル」という）のいずれかのモデル開発を完了させる、また、開発したモデルを用いて、各分野における将来シナリオの定量化を行う。さらに、こうした分析結果を、スナップショット型ツールであるExSSや、動的経路を明らかにする技術選択モデルや応用一般均衡モデル（以下、これらをまとめて「統合モデル」という）と連携させることで、気候中立社会の実現に向けて個別分野の課題解決を踏まえたマクロなロードマップの定量化を行う。</p> <p>初年度は、本研究で開発する個別モデルの開発を行う。また、統合モデルにおいて個別モデルと連携するためのモデルの拡張を行い、予備的な試算を行うことを目標とする。</p> <p>2年度は、個別モデルや統合モデルの改良を行い、シナリオの定量化を行うことを目標とする。</p> <p>3年度は、シナリオの更新を通じて、対象国の気候中立に向けたロードマップを定量的に明らかにするとともに、モデル開発やロードマップの定量化に関する課題を整理し、アジア他国に適用するためのマニュアル等の作成を目標とする。</p> <p>なお、各機関の役割は以下の通りである。</p> <p>国立環境研究所では、統合モデルを用いた分析と、電源計画に関する分析を行う。</p> <p>立命館大学は、国立環境研究所と協力して食料需要推計に関する分析を行う。</p> <p>東京大学は、国立環境研究所と協力して輸送量推計に関する分析を行う。</p>

<サブテーマ1の研究目標>

サブテーマ1名	アジア途上国における気候中立社会の実現に向けたロードマップの定量化に関する研究
サブテーマ1実施機関	国立環境研究所、立命館大学、東京大学
サブテーマ1目標	<p>分析対象とするアジア途上国として、インドネシア、タイ、台湾を取り上げ、これらの国を対象に、電源計画モデル、輸送量推計モデル、食料需要モデル（以下ではこれらをまとめて「個別モデル」という）のいずれかのモデル開発を完了させる、また、開発したモデルを用いて、各分野における将来シナリオの定量化を行う。さらに、こうした分析結果を、スナップショット型ツールであるExSSや、動的経路を明らかにする技術選択モデルや応用一般均衡モデル（以下、これらをまとめて「統合モデル」という）と連携させることで、気候中立社会の実現に向けて個別分野の課題解決を踏まえたマクロなロードマップの定量化を行う。</p> <p>初年度は、本研究で開発する個別モデルの開発を行う。また、統合モデルにおいて個別モデルと連携するためのモデルの拡張を行い、予備的な試算を行うことを目標とする。</p> <p>2年度は、個別モデルや統合モデルの改良を行い、シナリオの定量化を行うことを目標とする。</p> <p>3年度は、シナリオの更新を通じて、対象国の気候中立に向けたロードマップを定量的に明らかにするとともに、モデル開発やロードマップの定量化に関する課題を整理し、アジア他国に適用するためのマニュアル等の作成を目標とする。</p> <p>なお、各機関の役割は以下の通りである。</p> <p>国立環境研究所では、統合モデルを用いた分析と、電源計画に関する分析を行う。</p> <p>立命館大学は、国立環境研究所と協力して食料需要推計に関する分析を行う。</p>

東京大学は、国立環境研究所と協力して輸送量推計に関する分析を行う。

1. 4. 研究内容・研究結果

1. 4. 1. 研究内容

本研究課題では、アジア途上国を対象に、気候中立（温室効果ガス排出量の実質ゼロ）社会の実現を目指したロードマップを、これまでに開発してきた統合評価モデルであるAIM（アジア太平洋統合評価モデル）に、重要な個別課題ごとの視点について定量化した要素を組み込むことで、総合的かつ詳細に明らかにする。環境研究総合推進費S-6（2009-13年度）をはじめ、アジアを対象とした低炭素シナリオ開発に関する分析はこれまでも行われてきたが、温室効果ガス排出削減目標を実質ゼロとする分析は十分ではない。また、S-6では交通、再生可能エネルギー、農業・土地利用など途上国での脱炭素化に向けた論点が明示されており、こうした諸課題について気候中立社会を実現するという観点から本研究において改めて検討するものである。図1-1に本研究における全体像を示す。

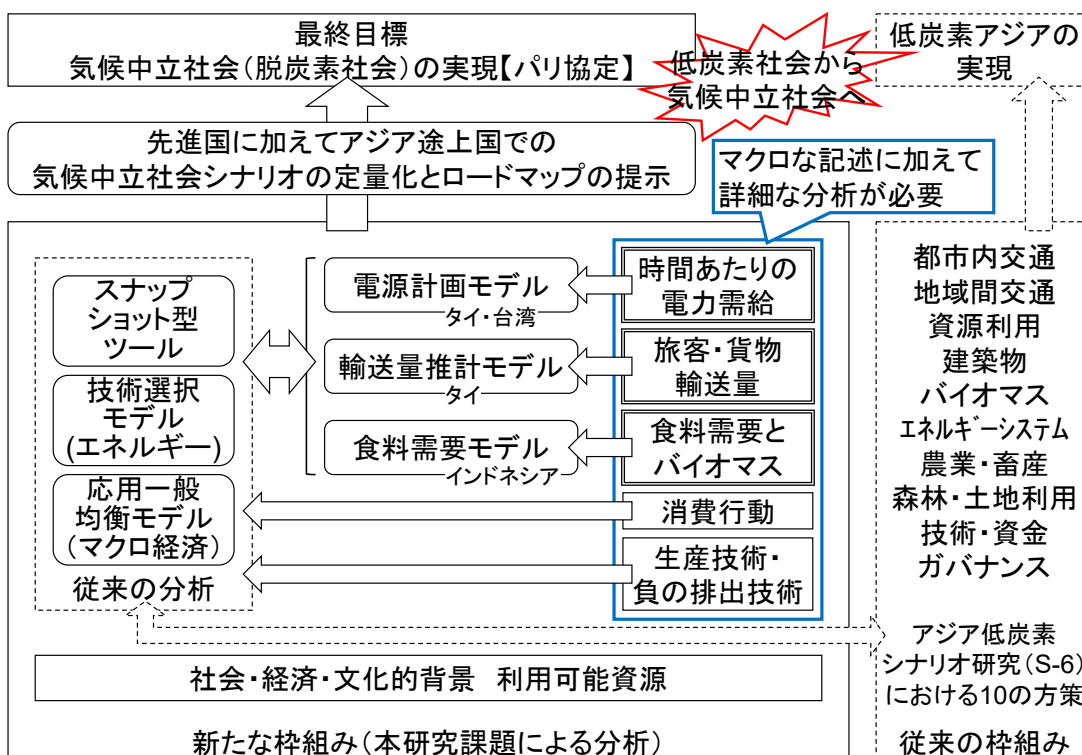


図1-1 気候中立社会の実現に向けた本研究課題の全体像

2022年に報告されたIPCC第6次評価報告書は、全球の平均気温を工業化前と比較して1.5℃に抑えるためには、2050年までに世界の二酸化炭素量を実質ゼロにすることが必要であるとした。そこで、本研究においても2050年までに二酸化炭素排出量の実質ゼロを基本とするが、実際に設定されている各国の長期戦略ではそうした目標よりも緩い場合がある。このため、2050年までの二酸化炭素排出量を実質ゼロにすることにはこだわらずに定量化を行うこととした。

本研究では、排出量の実質ゼロに向けた道筋や課題を明らかにするために、新たにアジア途上国を対象とした電源計画モデルや輸送量推計モデル、食料需要モデルなど、気候中立社会の実現と経済発展の両立を明らかにする上で重要な分野の個別モデルの開発と、それらを用いた将来シナリオの定量化を行った。なお、途上国における気候中立社会の実現可能性を踏まえて、モデルによっては分析対象年を2050年から延長したものもある。また、そうした分析結果をこれまでに開発してきた技術選択モデルや応用一般均衡モデルに反映させ、マクロな気候中立社会を実現する将来シナリオにおいてこれら個別課題の位置付けや重要性を明らかにした。

アジア途上国においても気候中立社会の実現において鍵となるのは再生可能エネルギーの導入である。一方で、現状でも石炭火力発電からの脱却が求められているが、急激な社会の変化は電力不足を招き、電力価格の上昇を引き起こす。こうした状況を踏まえ、電源計画モデルでは、再生可能エネルギーの年間ポテンシャルに加えて、気象条件等から時間単位の電力供給可能量を明らかにし、1時間単位で電力の需給バランス

を考慮したシナリオを明らかにする。次に、輸送量推計モデルでは、今後の経済発展や都市化等の影響を踏まえて、旅客や貨物の輸送量がどのように変化するかを推定するとともに、ICT導入や社会変容（通勤需要の削減など）など、気候中立社会に向けてどのように輸送量を管理するかを明らかにする。さらに、食料需要モデルは、経済発展と人口増加に伴って生じる食料需要の可能性に対して、食品ロスの低減やBECCSを含めたバイオマス資源との競合などを踏まえた対策の影響を明らかにする。

あわせて、発展途上国の将来シナリオの定量化において従来から開発、利用してきた技術選択モデルや応用一般均衡モデルに結果を反映させることで、マクロな視点からの気候中立社会への道筋を明らかにするとともに、こうした結果を各国の共同研究者を通じて政策決定者に提供し、各国の気候政策の実現にも貢献してきた。

なお、研究計画においては、個別課題に関するモデル開発を対象とする国として、タイ、インドネシア、台湾を挙げているが、すべての国ですべての個別課題に関する分析を行うのではなく、連携する各国の研究者の専門に近い分野を対象に分析を行い、アジア途上国におけるモデル化やデータ推計に関する課題などを明らかにし、そうした課題の解決について検討を行ってきた。研究開始以降、ベトナムやバングラデシュ、マレーシアなど、本研究で開発するモデルやシナリオに関心を持つ国からの問い合わせも受け、研究対象地域の拡大も並行して行ってきた。こうした他の途上国に展開する際の課題を明らかにする。

(1) 多地域源計画モデル

多地域電源計画モデル（Multi-regional Optimal Generation Planning Model、AIM/MOGPM）は、1時間ごとの電力需要と変動性再生可能エネルギー（VRE）の出力パターンを入力として、発電設備の出力変動量の上下限やシナリオとして設定するCO2排出量上限などの制約条件のもとで、5年ごとに設備費、運転維持費、燃料費の合計で求める総費用の最小化計算を行い、発電設備ごとの毎時発電量や設備容量、電力系統ネットワークの構造や各系統の容量を求めることができるモデルである。図1-2に多地域電源計画モデルの概要を示す。

モデルの対象

- ・ 電気によるエネルギー量。石炭等の物質は発熱量（換算係数）を乗じて考慮。
- ・ フロー（電力量・kWh=3600 MJ（60秒×60分））とパワー（能力）（電力・kW = kJ/s）。

想定するシステム(系)の概略(全体で孤立系をなす)

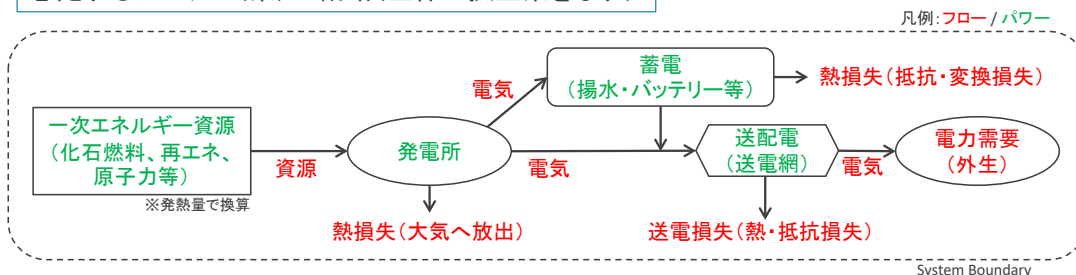


図1-2 多地域電源計画モデルの概要

本課題で用いるにあたって、AIM/EnduseやAIM/CGE等の統合モデルが数理最適化モデリングシステム（GAMS；General Algebraic Modeling System）を基盤として構築されていることを踏まえ、これらモデルと連携した分析を容易とするために、プログラム言語Pythonを主としたシステムをもとに、新たにGAMSを中心とし、最適化計算にGAMSと統合されたCPLEXを用いたシステム（AIM/MOGPM [GAMS]）を開発した。

本研究では、分析対象とするアジア諸国について、電力系統が地域内で完結する台湾と中国の海南省、多国間での電力融通も考慮したシステム設計に向けてラオス・カンボジアとの連系ネットワークを有するタイを主たる対象国・地域として取り上げ、モデル適用と将来シナリオ分析を行った。これら地域への電源モデル適用にあたっては、毎時単位での電力需要や太陽光発電や風力発電等の変動性再生可能エネルギーの出力といった電力需給に関するデータのほか、発電所の位置・容量、既設電力系統等が必要となるが、これらについては、各国の公開情報のほか、連携研究機関の協力も得て整備等を行った。

これら取組に加えて、AIM/MOGPM [GAMS]の概要、定式化、データ準備からモデル実行・結果の整理までの一連の手法と、インストール・実行ガイドを含むマニュアルのとりまとめを行った。

(2) 再エネポテンシャル評価モデル

アジアにおける脱炭素社会の実現には、再生可能エネルギーの開発と大規模導入が不可欠であり、前述の電源計画モデルにおいても再生可能エネルギー、特に、太陽光と風力エネルギーはエネルギー供給の脱炭素

化において重要な役割を担う。こうしたことから、本研究課題では、当初の個別モデルに加えて、アジアにおける再生可能エネルギー源の潜在的な貢献を明らかにするため、太陽光と風力エネルギーのエネルギーポテンシャルを高い空間・時間解像度で評価するモデルを開発し、その結果を各国の分析に提供した。

このモデルは、気候、地形、土地利用などの地理的情報データに基づいている。エネルギーポテンシャルは、理論的エネルギーポテンシャル（従来の技術を用いて特定の再生可能エネルギー源から得られる潜在的なエネルギー出力のみを考慮する）と技術的エネルギーポテンシャル（主に土地の適合性に関連する技術導入上の制約を考慮する）で特徴付けらる。エネルギーポテンシャルは、時間単位および 0.25° （約28km）で囲まれたグリッドセルレベルで評価され、国別およびグレード別に年間値に集計される。エネルギーポテンシャルのグレードは、年間設備利用率の範囲で特徴付けられる場所で生産されるエネルギー出力を示したものである。設備利用率は、特定のエネルギープラントにおけるエネルギー生産の収益性を示す指標であり、設備利用率が高いほど設置容量あたりのエネルギー出力が高くなり、エネルギー費用が低くなる。

対象となる技術は、公益事業規模の太陽光発電、陸上風力発電所、および洋上風力発電所である。太陽光発電については、変換効率20%の太陽光パネルを想定し、 0.25° （約28km）における1時間ごとの日射量データを入力データとして使用する。陸上および洋上風力発電については、出力3.4MWの風力タービンを想定し、同じ空間解像度で高度100mにおける1時間ごとの風速を使用する。太陽光発電および陸上風力発電については、土地被覆の種類に応じて土地の適性制限が想定される。太陽光発電および風力発電所の設置から除外される地域には、森林、氷に覆われた地域、水域、湿地、標高2000mを超える地域、および傾斜が3%（太陽光発電の場合）もしくは20%（陸上風力の場合）を超える地域が含まれる。その他の土地被覆については、技術の設置に使用できる土地の割合を示す土地適性係数が想定される。洋上風力については、ハブの高さが160mで容量が10.9MWの風力タービンが考慮される。最大182.5km沖合の海域が想定される。海洋深度が60メートルまでの海域では固定式の風力タービンが想定され、同60メートルから1000メートルの深度では浮体式のタービンが想定される。

(3) 運輸モデル

本研究課題では、運輸部門を対象としたモデル開発にあたり、タイを対象に分析を行った。具体的には、タイ政府が長期戦略で掲げたカーボンニュートラル目標の実現に向けて、運輸部門の脱炭素化とその効果を定量評価するために、交通・インフラ・エネルギー・経済・環境関連データを整備し、図1-3のように運輸モデルとエネルギーシステムモデルを組み合わせた統合評価フレームワークの開発を実施した。

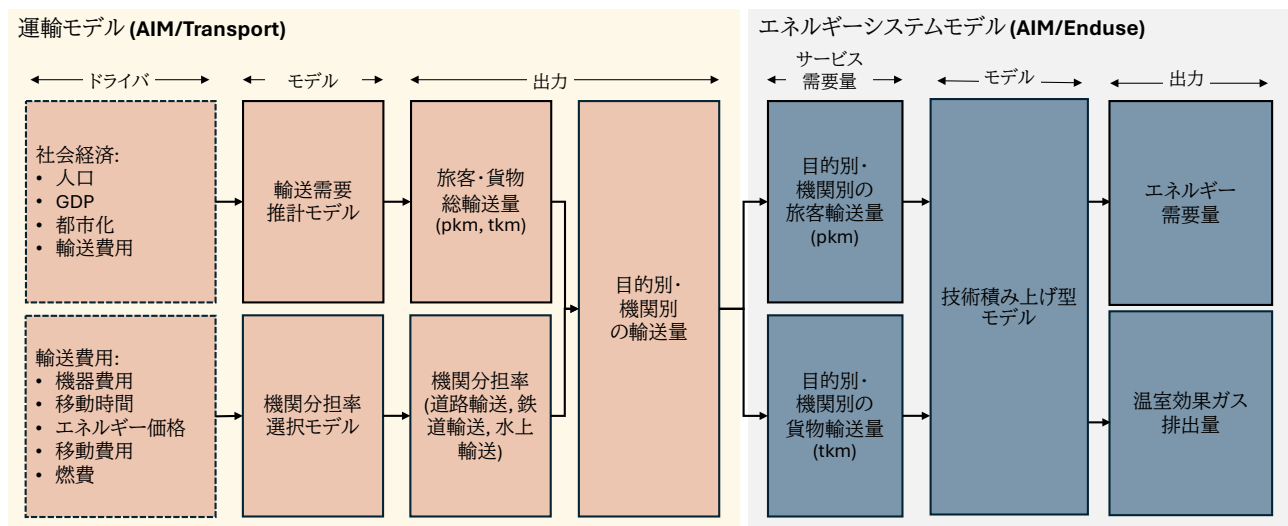


図1-3 運輸モデルとエネルギーシステムモデルの統合

運輸モデルは、1) 輸送需要推計モデル（経済成長、人口動態、インフラ、都市化率、輸送費用などを入力条件として、旅客と貨物の2部門に分けて輸送需要量を推計する）と、2) 機関分担率選択モデル（移動速度、移動時間、ロードファクター（乗車率および積載率）、機器費用、燃料費用、インフラ費用などを考慮して異なる輸送モード間の機関分担率を推計する）から構成され、それらを組み合わせることで目的別・機関別の輸送量が推計できる。一方、エネルギーシステムモデルは、運輸モデルで推計した旅客・貨物輸送量に基づいて計算されるエネルギーサービス需要量を所与とし、費用最小化の観点から最適な技術の組合せを選択する技術積み上げ型モデルであり、エネルギー種別消費量やガス種別排出量が推計できる。また、運輸モデルとエネルギーシステムモデルの間では各モデルの出力が相互に影響を及ぼすため、モデル間の入出力データを考慮した統合評価を実施している。具体的には、運輸モデルからエネルギーシステムモデルへ、

運輸部門の目的別・機器別の輸送需要のデータが渡され、エネルギーシステムモデルから運輸モデルへ、技術ミックス、機器費用、およびエネルギー価格などのデータが渡される。そして、将来シナリオを定量化し、電気自動車（EV）や燃料電池車（FCV）の普及による気候変動緩和策の対策の効果だけでなく、輸送量の需要削減やモーダルシフトなど対策を組み合わせた際の経済的・環境的な側面のトレードオフ効果、シナジー効果などが評価できる。本研究では、「回避、転換、改善（ASI: Avoid, Shift, Improve）」フレームワークに基づいた先行研究を参考に、タイが掲げる運輸政策の分析に適用できるように、モデル開発およびデータ収集を実施し、タイの運輸政策の状況を考慮したカーボンニュートラル目標に向けた運輸部門の脱炭素シナリオを評価した。

(4) 食料需要モデル

食料需要モデルについては、研究計画に沿い、① インドネシアを対象に食料需要を推計するモデルの開発を行い、将来シナリオの定量化を行った。次に、②食料需要モデルと応用一般均衡モデル等と連携させることで、気候中立社会の実現に向けた食料農業分野の対策の定量化を行った。最後に、③ 食料需要に関して日本からアジア途上国を含む世界への新たな発信を検討するために、応用一般均衡モデル等を用いて世界への日本食の普及による温室効果ガス排出削減への寄与を評価した。

(4)-① 食料需要を推計するモデルの開発と将来シナリオの定量化

本課題では、食料需要モデルを開発し、これまで使用してきた応用一般均衡モデルなどと組み合わせることで、農業・土地利用部門における緩和策の検討の深化に貢献することを目指している。特に東南アジア地域においては、脱炭素社会の実現に向けて農業・土地利用部門における対策は重要な役割を担っており、需要から供給にわたるフードシステムのあらゆる観点からの対策が求められる。しかし、従来の当該部門における緩和策は、供給側からの視点のみで検討されることが多かった。今回、食料需要モデルを開発し活用することで、需要側も含めたより包括的な対策を検討することが可能になる。

こうした観点から、これまでに本研究課題においては、新たな食料需要モデルの開発に取り組んできた。新たな食料需要モデルの開発については、インドネシアを事例として、その脱炭素目標年である2060年までの食料需要を推計することを目的とした。農業経済学など関連分野の既往の知見を参考に、食料需要の最も大きな駆動要因の1つである所得に着目し、所得に応じた食品群ごとの需要量が推計出来るようにモデルを設計した。また、米の需要が他国に比べて相対的に多いなどのインドネシアにおける食料需要の特徴が反映できるように配慮した。本課題で使用した食品群の分類について図1-4に示す。モデルに使用するデータの選定にあたっては、今後の他国への応用可能性も考慮し、国連食糧農業機関（Food and Agriculture Organization, FAO）などが提供する国際的なデータセットを主に使用した。あわせて、モデルに使用しているデータの検証に使用することを目的として、インドネシア国内の関連データのうち、家計調査における食料関係の支出に関するデータや、家計部門の食品廃棄物に関するデータなどを、相手国の担当者の訪日機会を利用した対面意見交換にもとづいて収集した。

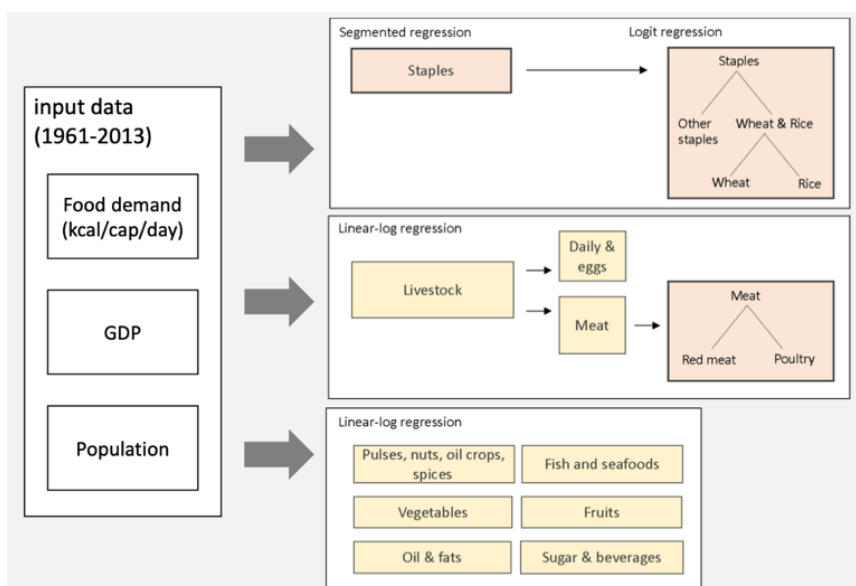


図1-4 食料需要モデルの構成と食品群の分類

(4)-② 食料需要モデルと応用一般均衡モデル等と連携させた、気候中立社会の実現に向けた食料農業分野の対策の定量化

以上で開発した食料需要モデルによる食料需要の推計による温室効果ガス排出量の変化と、異なる食生活へと転換した場合の温室効果ガス排出量の削減効果を検討するために、応用一般均衡モデルと連動させた分析を実施した。分析には、図1-5に示すように、食料需要モデル、応用一般均衡モデル、農業部門の技術選択型モデルを用いた。まず、推計された食料需要から食品群ごとの所得弾力性を求め、応用一般均衡モデル（AIM-Hub）の入力とした。次に、その入力と社会経済シナリオ（IPCC等で用いられるShared Socioeconomic Pathway 2, SSP2）の想定のもとで、必要となる農業活動や土地利用を応用一般均衡モデルで推計した。この際、将来シナリオとして、現状推移シナリオに加えて、2℃相当の気候変動緩和策と持続可能で健康な食生活（Eat-Lancet委員会が推奨するもの）に転換した場合を相対したシナリオの分析も実施した。また、応用一般均衡の出力を農業部門の技術選択型モデルであるAFOLUBモデルに入力し、GHG排出量、GHG削減量、削減費用を算出した。AFOLUBモデルは国・地域レベルで緩和策の情報に基づいて、AFOLU部門のGHG排出量・削減量を計算するボトムアップ型モデルである。このモデル枠組みを用いることで、食生活の転換による効果を他の農業食料分野の緩和策と相対化して理解することができる。

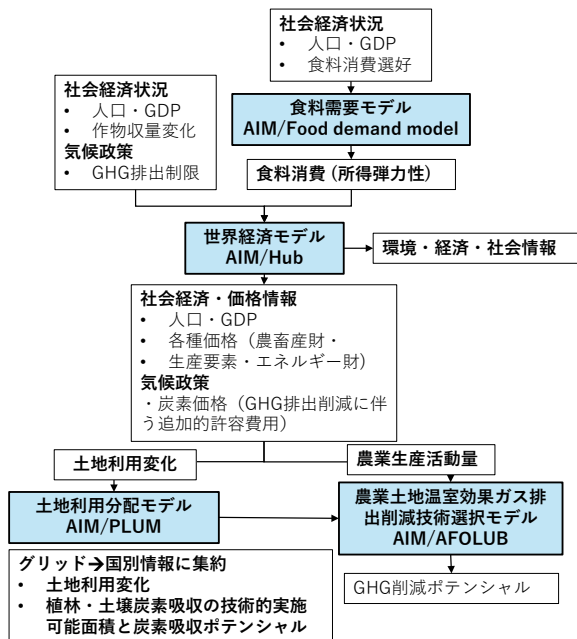


図1-5 食料需要モデルを活用した温室効果ガス排出量の推計の枠組み

(4)-③ 世界への日本食の普及による温室効果ガス排出削減への寄与の評価

農業由来の排出削減策として、作物を中心とした食事への移行や畜産物消費の抑制が、GHG排出削減や生物多様性の保全に効果的であることが報告されている。日本の1人あたり食肉消費はOECD38カ国の中でも2番目に少なく、日本食は魚介類やコメを中心とした食事であることから環境にも健康にも良いとされているが、日本食による環境や世界の食料システムへの影響はまだ明らかにされていない。本研究では、日本食を普及させることによる世界的な影響を分析することを目的とした。

図1-6に本研究で用いたモデル、地域区分、食事内容変更シナリオの食料消費カロリーの想定を示す。本研究は応用一般均衡モデル（AIM-Hub）を用いて、食料消費選好変更しない「ベースラインシナリオ」、日本食の食事内容に変更した「日本食シナリオ」と世界で推奨される食事内容に変更した「EAT-Lancetシナリオ」の3つのシナリオを分析した。いずれのシナリオでも将来の社会経済状況にはSSP2を想定した。食料消費選好の変更による食事内容の変化は、モデル内で所得弾力性を変えることで表現した。「日本食シナリオ」は、農林水産省が推奨している「バランスよく食べる食事例」の1日の食事例を使用し、各食事例を農林水産省が提供するSV（サービング）早見表などを用いて財の分類と重量計算を行った。その重量から文部科学省「日本食品基準成分表（八訂）増補2023年」を用いて財ごとのカロリーを計算し、廃棄量を割り戻した上で日本食の財ごとの食料消費カロリーとした。「EAT-Lancetシナリオ」は、EAT-Lancet委員会による健康的な食生活と持続可能な食料生産のために1人1日あたりの財別食料消費カロリー推奨値を使用した。これは世界の平均的な30代男性を対象とした値であるため、各国の人口構成を考慮して地域別平均値に変換した。

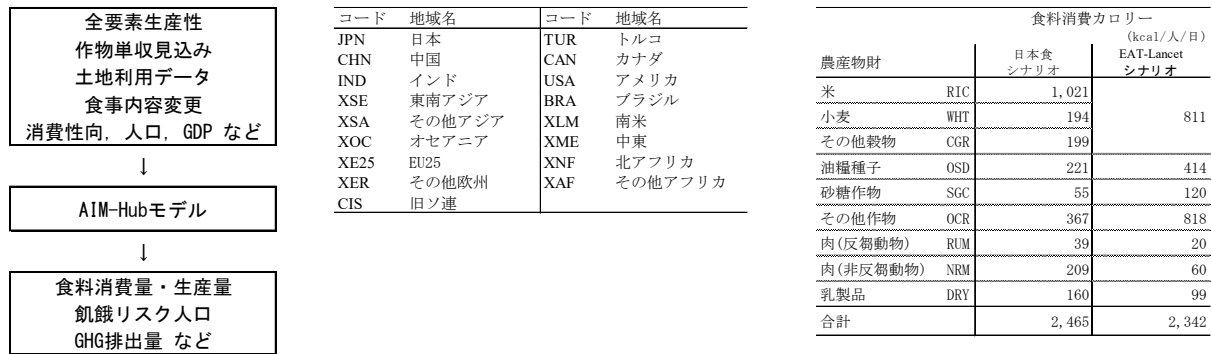


図1-6 本研究で使した a)モデル入出力、b)地域区分、c)シナリオ別消費カロリー想定

(5) 技術選択モデル

タイとインドネシアを対象に、技術選択モデル(AIM/Enduse)を用いて2050年に気候中立社会を実現するための排出経路の定量推計を行った。AIM/Enduseは、技術の情報やエネルギーサービス需要、その他外生的な条件を所与とした上で、費用最小化を目的関数とし、逐次動学的な最適化手法(一年毎に最適解を導出する計算を解析期間分繰り返す手法)によって技術選択を行い、技術ごとにエネルギー消費量を積み上げ、対象地域における各年のエネルギー需給と排出量を推計するモデルである。AIM/Enduseの概要を図1-7に示す。

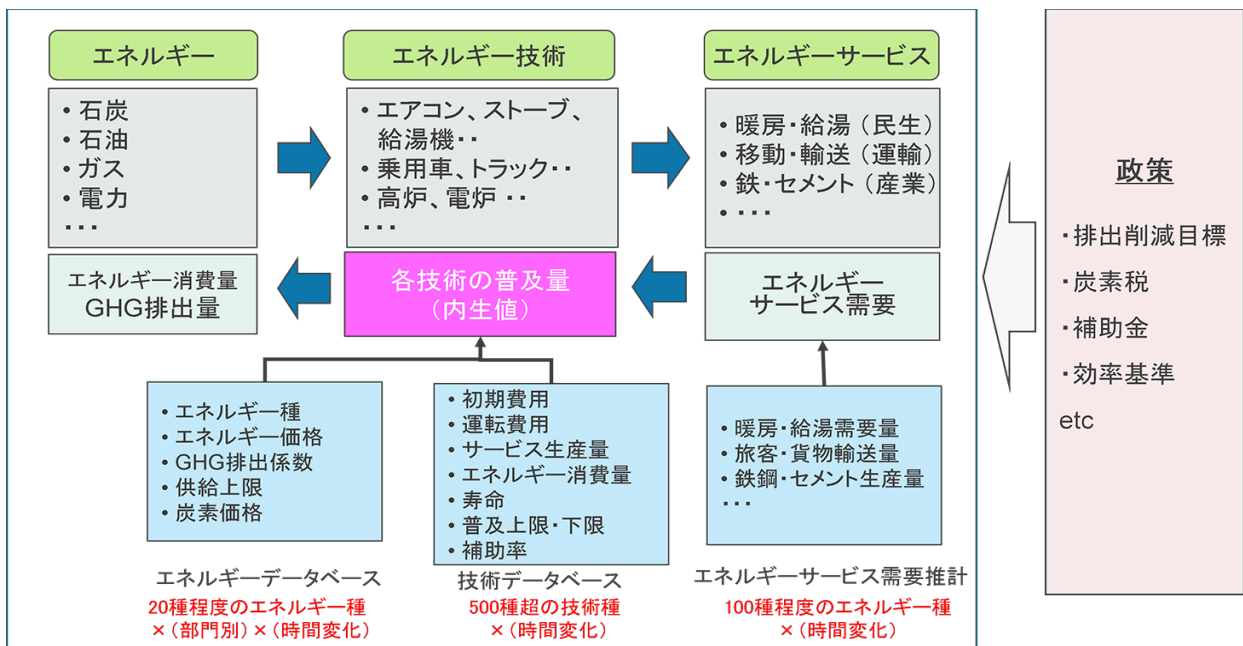


図1-7 技術選択モデルAIM/Enduseの概要

AIM/Enduseの推計に際し、①供給側の再生可能エネルギーの比率と需要側の電化率を高めた「電化シナリオ」、②供給側の再生可能エネルギーの比率と需要側の水素利用機器の普及率を高めた「水素シナリオ」、③供給側のCCS付火力発電の利用率を高めた「CCSシナリオ」の3通りの脱炭素シナリオ(2050年にCO2排出量ゼロ)を作成した。これらの対策シナリオに加え、排出量やエネルギー消費量を対策シナリオのものと比較するため、需要側の技術の導入率を分析開始年から固定した「技術固定シナリオ」を作成した。各シナリオの概要を表1-1に示す。脱炭素シナリオにおいて、水素は全て対象国内で電気分解により製造することを想定した。またすべてのシナリオにおいて、SSP(Shared Socioeconomic Pathways、共通する社会経済シナリオ)より、緩和策と適応策の困難性がそれぞれ中庸的な世界を想定するSSP2をベースとし、2030年の技術固定シナリオの排出量が各国のBaUケースにおけるNDC目標と概ね整合するように補整した。導入済みの既存技術が寿命を迎えるタイミングで対策技術を導入することで、既存技術の座礁を極力回避しつつ排出削減対策が進むものとしたが、石炭火力発電など、一部の寿命の長い技術については座礁資産化が生じる。なお本分析では、3種の脱炭素シナリオのそれぞれの特徴を強調するため、費用最小化では選択されない一部の技術もシナリオ内で導入されるよう外生的制約を与えている。

表1-1 シナリオの概要

	①電化シナリオ	②水素シナリオ	③CCSシナリオ	(ref.) 技術固定シナリオ
概要	発電部門における再エネ比率の向上と電化の促進を想定するシナリオ。 例えば、産業部門では電気式のボイラ、運輸部門ではEVを積極的に導入することを想定する。	発電部門における再エネ比率の向上とグリーン水素利用の促進を想定するシナリオ。 例えば、産業部門では水素を燃料とするボイラや工業炉、運輸部門ではFCVを積極的に導入することを想定する。	発電部門における再エネ比率を抑え、CCS付きの火力発電を増やすシナリオ。 他の対策シナリオよりも化石燃料起源の残余排出が大きいが、BECCSによる相殺を想定する。	基準年以降に技術革新が行われず、基準年以降に導入される需要側の技術の効率や導入率を基準年値のまま不変とするシナリオ。 対策シナリオからの削減効果を把握するために設定する。

AIM/Enduseによる推計の実施においては、他のモデルとの連携を実施した。タイとインドネシアの電源構成については、で電源計画モデルとも連携を行い、発電所の寿命や発電に係る費用、送電ロス率等の前提を両モデルで共有した上で、推計結果の比較を実施し、1年の解像度での分析されるAIM/Enduseでの電源構成の1時間解像度でのフィージビリティを確認した。また、タイについては輸送量モデルとも連携を行い、各輸送手段の寿命や初期費用、燃費、積載率、年間走行距離等の前提を共有した上で、輸送量モデルから算定された輸送モード別の輸送量をAIM/Enduseの推計に活用した。

(6) 応用一般均衡モデル

AIM/Enduseをはじめとする各モデルで明らかとなる気候中立社会の実現に向けて、必要となる対策や技術を導入するためには直接的な対策費用が必要となる一方、省エネが実現することで化石燃料需要が減少し、様々な財の均衡状態に影響を与え、GDPをはじめとするマクロ経済にも影響する。こうした対策によるマクロ経済への影響を分析するのが応用一般均衡モデルであるAIM/CGEの役割であり、経済発展との両立を目指す上での追加的な施策の評価も本モデルを用いて行う。

図1-8に示すように、AIM/CGEでは技術水準を前提に利潤最大化を目指す生産者と、効用最大化を目指す家計が、価格メカニズムのもとで温室効果ガス排出量の実質ゼロを目指した対策の導入による市場均衡の変化を定量的に明らかにしている。また、各個別モデルで分析される様々な取り組みに対応したマクロ経済影響を明らかにするために、部門や財の詳細化や技術水準の詳細化を行ってきた。具体的には、電源計画モデルに対応して発電技術や新燃料を導入したり、輸送量推計モデルに対応した運輸部門の詳細化や食料需要モデルに対応した食料品の詳細化等を行った。また、温室効果ガス排出量の実質ゼロを実現するために、合成燃料などの新たな燃料やBECCS（バイオマス発電+炭素隔離貯留）等の負の排出技術の導入が必要不可欠となり、これらの評価が可能となるような新たなモジュールの開発を行った。表1-2に各国共通の枠組みで開発する場合の部門・財の分類を示す。あわせて、家庭部門におけるエネルギー消費量については、省エネ技術の導入量とそれによるエネルギー消費量の削減効果が明示できるような需要関数を設定している。つまり、自動車や冷房機器など家庭におけるエネルギー消費に関係する機器については、フローとしての機器の最終消費に加えて過去に購入された機器のストックを明示し、過去からの技術の蓄積によってエネルギー消費量が増える構造としている。

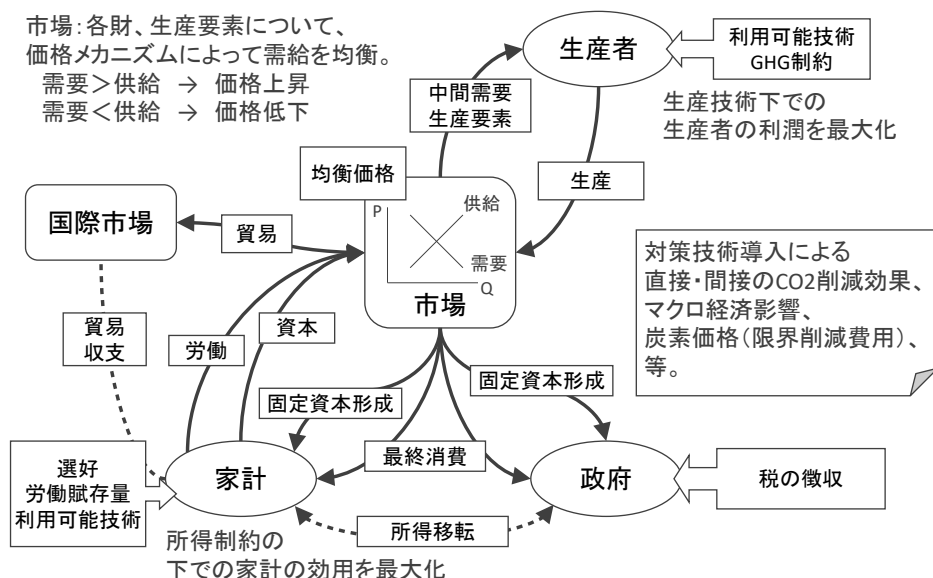


図1-8 応用一般均衡モデルAIM/CGEの概要

表1-2 AIM/CGEにおける財・部門の区分

	commodity	Sector
Endogenous sectors	Paddy	Paddy
	Corn	Corn
	Wheat	Wheat
	Other food crops	Other food crops
	Edible oil crops	Edible oil crops
	Other crops	Other crops
	Livestock	Livestock
	Marine and fishery	Marine and fishery
	Forestry	Forestry
	Food, beverage and tobacco	Food, beverage and tobacco
	Textile, foot and leather	Textile, foot and leather
	Processed wood products	Processed wood products
	Pulp and Paper Products	Pulp and Paper Products
	General machinery	General machinery
	Electric and electronic equipment	Electric and electronic equipment
	Transport equipment	Transport equipment
	Basic chemical	Basic chemical
	Plastic products	Plastic products
	Specialty chemical products	Specialty chemical products
	Cement	Cement
	Iron and steel	Iron and steel
	Metal and non metal product	Metal and non metal product
	Other manufacture	Other manufacture
	Other mining	Other mining
	Construction	Construction
	Coal mining	Coal mining
	Crude oil mining	Crude oil mining
	Natural gas mining	Natural gas mining
	Petroleum refineries	Petroleum refineries
	Coke refinery (coke)	Coke refinery (coke)
	Gas (Town gas)	Gas (Town gas)
	Heat supply	Heat supply
	Hydrogen	Hydrogen
	Ammonia	Ammonia
	Biofuel	Biofuel
	Electricity	Coal-fired electricity
		Oil-fired electricity
		Gas-fired electricity
		Bioenergy-fired electricity
		Waste-fired electricity
		Geothermal electricity
		Hydropower electricity
		Solar PV electricity
		Wind electricity
		Nuclear electricity
	Railway transport	Railway transport
	Road transport except railway transport	Road transport except railway transport
	Other transportation and services	Other transportation and services
	Water supply	Water supply
	Waste and recycling services	Waste and recycling services
	Trade (wholesale)	Trade (wholesale)
	Telecommunication, computer and information technologies services	Telecommunication, computer and information technologies services
	Public administration	Public administration
	Finance and insurance	Finance and insurance
	Real estate	Real estate
	Education and research	Education and research
	Health, medical and social security services	Health, medical and social security services
	Restaurant and hotel	Restaurant and hotel
	Other services	Other services
Value added	Capital	-
	Labor	
	Indirect tax	
	Subsidy	
Final demand	-	Household final consumption
		Government final consumption
		Fixed capital formation
		Export
		Import (including tax)
		Stock change

注：CCS等は、該当する部門における複数技術の1つとして評価する。網掛けは新エネルギーとして評価。

本研究では、AIM/CGEを用いた分析として、タイとインドネシアを対象に両国で検討されている温室効果

ガス排出削減に向けた取組について評価する。タイを対象とした分析では、上記の構造をもつモデルに対して、電源計画モデルや技術選択モデルからの情報が取り込めるようにインターフェースの開発を行った。また、図1-9に示すように、タイ政府が長期戦略として掲げている2050年に二酸化炭素排出量を実質ゼロ（CN2050）にし、2065年に温室効果ガス排出量を実質ゼロ（NZE2065）にするシナリオについて評価することを目的として、分析対象年の延長に向けた改良を行った。

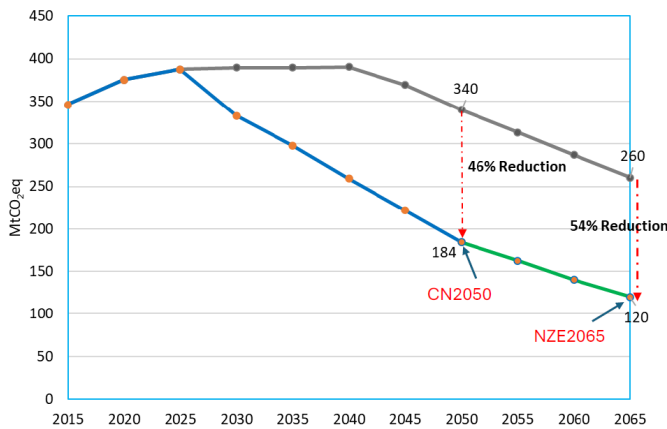


図1-9 AIM/CGEを用いたタイの分析で使用した将来の温室効果ガス排出シナリオ

一方、インドネシアを対象とした分析では、食料需要モデルの結果が反映できるように、食料部門・財の細分化を行うとともに、従来のモデルでは1つの需要関数で食料を含むすべての財の家計最終消費が計算されていた構造を、食料需要が食料に対する需要関数を別途農業部門における対策を評価することができるようモデルの改良を行い、表1-3のような排出削減に向けた取組を実現するシナリオ（LCCP）に加えて健康的な食事を追加するシナリオ（LCCP+）を想定し、食事の変化によるGHG排出量への影響を評価した。

表1-3 インドネシアを対象とした分析における3つのシナリオ

		Business as Usual (BaU)	Low Carbon Compatible with Paris Target (LCCP)	LCCP with a Sustainable and Healthy Diet (LCCP+)
Technology	Conventional technology	✓	✓	✓
	New technology	×	✓	✓
Agriculture mitigation activities ¹		×	✓	✓
Food-related assumptions	Food demand	Conventional Trajectory ²		Sustainable healthy diet ³
	Food loss reduction rate	Baseline rate ⁴	Sustainable rate ⁵	
	Food waste	Increasing rate ⁶		

1: Scale and intensity of mitigation activities were set to follow Indonesia LTS.

2: Consumption pattern which follows the historical trend with no behavioral change.

3: Based on the ideal calorie structure and sufficiency level of Desirable Dietary Pattern (DDP) regulated under National Food Agency Law 11/2023,

4: Food loss reduction rate was set to follow assumptions in Indonesia NZE pathway, which food loss rate in the future will be declined due to income growth that triggers improved infrastructure,

5: Food loss reduction at sustainable rate assumed to be 50% higher than the baseline rate due to enhanced skills of managing the food products (FAO, 2018),

6: Food waste is assumed to increase following the transition to a high-income country (Cederberg & Sonesson, 2011).

(7) スナップショット型ツール

スナップショット型ツールは、もともとステークホルダーとのビジョン共有などコミュニケーションを目的としたツールであり、電源計画モデル等の結果を柔軟に取り込むことが可能な構造を有している。このため、モデルの複雑化となる変更は行わず、モデルに入力するパラメータの変更で個別モデルの結果を反映させることとした。あわせて、コミュニケーションツールという特性を活かして、これからAIMを学ぶ、もしくはAIMを用いて温室効果ガス排出量の削減策を評価を実施したいと考えている研究者や政策決定者に対し

てトレーニングを行い、分析の全体像を理解してもらうことにした。

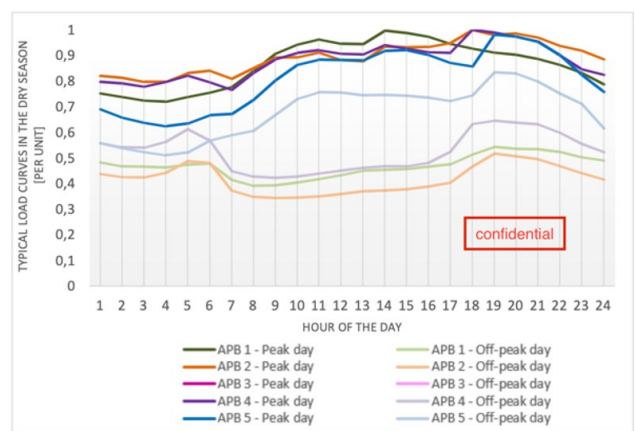
1. 4. 2. 研究結果及び考察

(1) 多地域電源計画モデル

多地域電源計画モデル（AIM/MOGPM）を用いた分析にあたってまず、電力需要量（年間・毎時）、個々の発電所の容量・燃料や位置、電力系統ネットワークに関する情報を整備した。整備したデータのうち、電力需要量の例として、図1-10に、タイ全国とインドネシア（乾期）（電力供給区分（APB）単位、各地域の最大需要で規格化）の1日の電力需要量の推移を示す。日本では、平日が高く土曜日・日曜日が低くなる傾向があるが、タイでは平日と土曜日が類似した傾向を示しており、特に土曜日における労働習慣が異なることが示唆される。インドネシアでは、ピーク日は全体として平坦な変動であり、オフピーク日も、朝と夕方を除くと電力需要が平坦な傾向が見て取れる。また、ピーク日・オフピーク日を問わず早朝に電力消費量が大きくなり、日中11時頃からやや下がり19時以降に増加する傾向が見られるが、これはインドネシアの人口の多くを占めるイスラム教の礼拝の時間（早朝、正午、夕方など1日5回）前後の時間帯にあっており、習俗が電力需要に大きく影響していることを示唆している。



(a) タイ全国の需要量



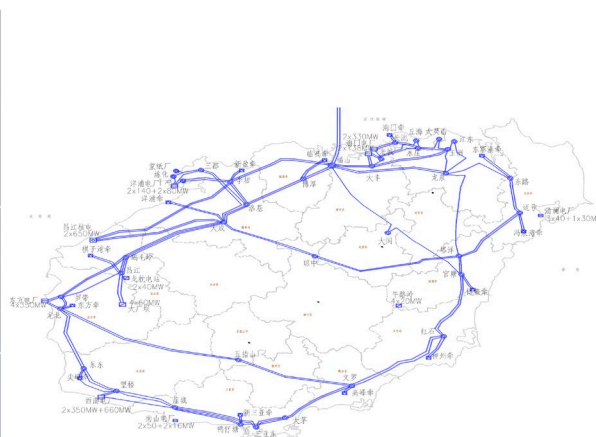
(b) インドネシア（乾期：ピーク日とオフピーク日）

図1-10 収集した電力需要量データの例

発電所の立地と電力系統ネットワークについて、タイと中国・海南島、台湾の例を図1-11に示す。また、既設発電所の設備容量や再生可能エネルギーポテンシャル量について、台湾の例を表1-4に示す。こうした現状の把握を行うことで、どのような取り組みが重要となるかの概要をつかみ、その上で得られた結果を解釈する。



(a) タイ



(b) 中国・海南島



(c) 台湾

図1-11 対象とした各国の電力系統ネットワークの例

表1-4 地域別発電設備容量（左）と地域別再生可能エネルギーポテンシャル量（右）の例（台湾）

※個別発電所のデータから集計					(kW)	洋上風力	陸上風力	太陽光発電	その他再エネ
Region	Installed Capacity (KW)	(A). Gross Electricity Generation (kWh)	(B). Power Plant use (kWh)	(C)=(A)-(B). Net electricity generation (kWh)	基隆市	0	0	19,134	2,495
North of Taiwan					台北市	0	0	65,175	260
Pumped Storage	0	0	0	0	新北市	0	13,340	129,453	110,720
Coal fired power plant	2400000	1.9298E+10	1.06E+09	1.82E+10	桃園市	0	100,706	550,640	168,230
Oil fired power plant	1028640	2850795028	1.04E+08	2.75E+09	新竹市	0	12,000	38,844	0
Gas fired power plant	4984200	2.8882E+10	5.62E+08	2.83E+10	新竹縣	0	11,500	162,845	0
Nuclear power plant	985000	7757443000	2.45E+08	7.51E+09	苗栗縣	128,000	404,100	293,986	84,338
					台中市	0	118,135	553,645	1,150,875
South of Taiwan					彰化縣	0	552,452	1,264,514	1,455
Pumped Storage	0	0	0	0	南投縣	0	0	169,645	250,802
Coal fired power plant	3700000	2.3351E+10	1.3E+09	2.2E+10	雲林縣	0	233,332	984,137	2,261
Oil fired power plant	0	0	0	0	嘉義市	0	0	38,828	0
Gas fired power plant	4393750	2.8319E+10	5.83E+08	2.77E+10	嘉義縣	0	0	828,831	50,504
Nuclear power plant	1902000	1.5997E+10	5.93E+08	1.54E+10	台南市	0	0	1,863,712	2,616
					高雄市	0	0	949,772	8,088
West of Taiwan					屏東縣	0	4,500	1,013,686	1,788
Pumped Storage	0	0	0	0	宜蘭縣	0	0	127,502	31,325
Coal fired power plant	5500000	2.9272E+10	1.66E+09	2.76E+10	花蓮縣	0	0	92,921	244,300
Oil fired power plant	280000	23786000	97300	23688700	台東縣	0	0	65,343	4,279
Gas fired power plant	3771000	2.904E+10	4.9E+08	2.86E+10	澎湖縣	0	19,200	18,898	0
Nuclear power plant	0	0	0	0	金門縣	0	4,000	13,047	0
					連江縣	0	0	145	0

※Centralは揚水発電のみ。Eastは和平電廠（煤）を除き主要発電所はない。

※ガス火力は大林電廠（高尾）を除いてCCGT

これらの情報も踏まえ、アジア諸国の対象地域におけるモデル開発を推進した。本課題では、電力需要や発電設備の分布を踏まえて地域区分とネットワーク構造を設定した。具体的には、中国・海南島モデルでは、主要な都市を中心とした5地域を設定し、5頂点の車輪グラフとしてモデル化した。タイについては国土中央のバンコク地域から北部と南部を接続する、台湾については北部の台北から、東部、南部まで接続する直列的な構造を想定した。

モデル分析の結果として、タイと中国海南島での結果を示す。分析にあたっては、CO2排出量に上限を置かないケース（BaUケース）に加え、CO2削減ケースと2050年ゼロケースの2つをおいた。具体的には、図1-12に示すように、タイではBaUケースのCO2排出量に対して、CO2削減ケースでは2030年にピークアウトして2050年に基準年と同程度まで削減されるとし、2050年ゼロケースでは同様に2030年にピークアウト後、2050年にゼロ（100%削減）となるとした。中国海南島については、CO2削減ケースにおける2050年の排出量を基準年の50%まで削減されるとしたほかは、タイと同様の想定を置いた。なお、いずれの地域でも、電力需要量はケース間で同一とした。また、タイモデルでは、政府計画等を踏まえ、原子力発電所は将来の電源オプションとしては考慮しないこととした。

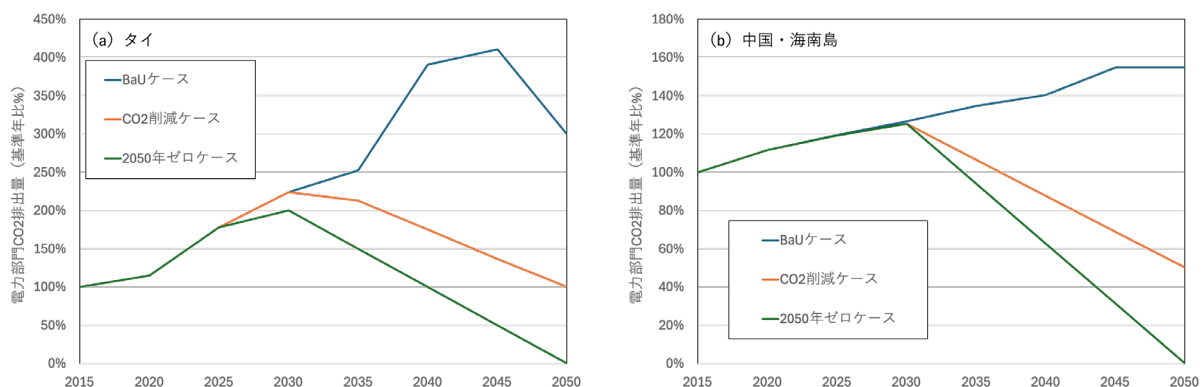


図1-12 ケース別の将来のCO2排出量の想定（左：タイ、右：中国海南島）

2050年の電源構成について、ケース別のタイと中国海南島の結果を図1-13に示す。タイモデルの結果に着目すると、分析では2050年に向けて太陽光発電等の再生可能エネルギーの価格低減を想定していることもあって住宅用太陽光発電の導入が加速する結果となり、2050年にはBaUケースでは4割程度が太陽光発電により供給される結果となった。太陽光発電は2045年から2050年にかけて急増しており、CO2排出量の結果（図1-

12の左図)においても、2045年から2050年にかけての減として確認される。しかし、BaUケースでは、残り6割の多くは石炭火力発電とガス火力発電により供給されるため、CO₂排出量全体としては2050年でも2015年から大きく増加する傾向は維持される。CO₂削減ケース、2050年ゼロケースとCO₂削減目標を強化するにつれて、石炭火力とガス火力からCCS付ガス火力への転換が進み、CO₂回収を経ても残余する分を相殺するためにCCS付バイオマス火力が導入される。風力発電は陸上・洋上ともにポテンシャルはあるものの、大きくは増加しない。

中国海南島の結果を見ると、BaUケースではほぼ全量が石炭火力とガス火力により供給されており、タイの結果とは異なり、再生可能エネルギー、特に太陽光発電の導入はほとんど進まない。2050年のCO₂削減量を増加させるにつれて、まず石炭火力から原子力発電、ついでガス火力発電から原子力発電への転換が行われ、2050年ゼロケースでは大部分が原子力発電へと転換される。しかし、原子力発電は出力変動を想定していないため、夜間の需要減や日中の需要増に対応するために、大規模な蓄電池導入が進む。原子力発電の導入可能量上限は前記連携研究機関との議論を踏まえて設定しており、容量としても海南島全体で4.2GW（計画分も含み、海南島に立地する原子力発電所の約2倍）と、実現可能な水準とは判断される。

このように、同じ2050年ゼロを達成するとしても、国や地域によってその道筋や発電構成の変化の方向性が大きく異なることがわかる。また、再生可能エネルギーのポテンシャル量や将来の価格のほか、原子力発電所の利用可能性によっても期待される対策が変わりうるため、将来の電力需要量や時間別パターンのほか、再生可能エネルギー、原子力発電等に関する各国の政策動向を踏まえた分析・評価と、それに基づくロードマップの提示が重要であることが示唆されている。

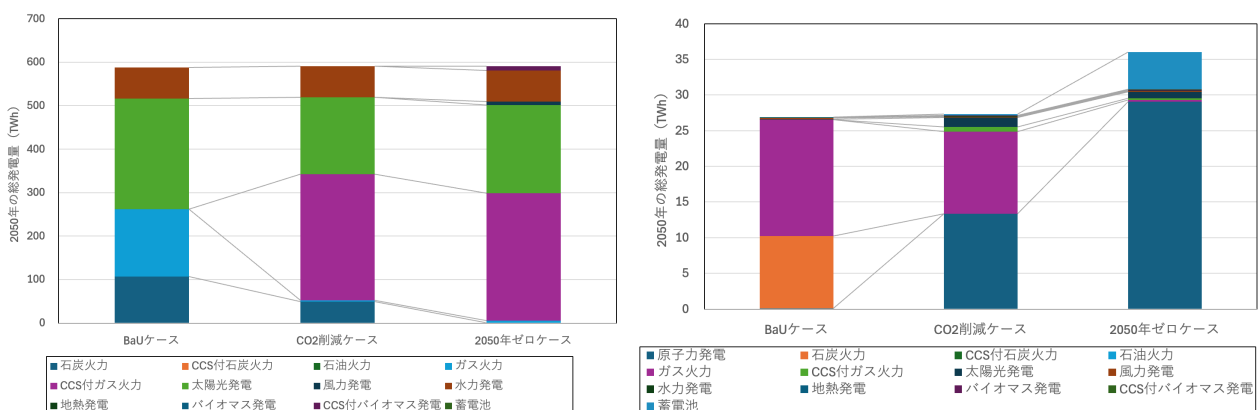


図1-13 ケース別の2050年の発電構成の比較（左：タイ、右：中国海南島）

これらに加え、各国でのAIM/MOGPM [GAMS]の適用と分析の推進に向けて、2024年5月20日から5月24日に、国立環境研究所に台湾、中国の研究者を招へいしてのトレーニングワークショップを開催した。なお、タイはタマサート大学と連携した研究を推進している国立環境研究所の特別研究員の参加を得た。ワークショップでは、モデルの構築（Hands-on）を中心に参加者間の議論も組み合わせることで、本研究で開発している多地域電源計画モデル（AIM/MOGPM）の理解を深めつつ、各国独自での開発改良を継続できるように工夫した。

(2) 再エネポテンシャル評価モデル

開発した再エネポテンシャル評価モデルを用いて、選定されたアジア諸国における太陽光および風力エネルギーの理論的および技術的エネルギーポテンシャルを評価した。これらの地域における技術的ポテンシャルは、太陽光発電で451PWh/年、陸上風力で102PWh/年、浅海域洋上風力で167PWh/年、深海域洋上風力で259PWh/年となることが分かった。国別に見ると、太陽光発電のポテンシャルは主に中国（65%）とインド（31%）に集中していた。陸上風力の場合、ほとんどのポテンシャルは中国（92%）に見られた。洋上風力の場合、浅海域／深海域におけるポテンシャルは日本（18%/40%）、中国（32%/15%）とインドネシア（20%/14%）に集中していることがわかる。

技術的ポテンシャルを、技術的経済的実現可能性を確保するのに十分な設備利用率（太陽光発電で10%超、陸上風力で20%超、洋上風力で30%超）に限定すると、図1-14に示すようにかなりの低下が見られた（太陽光発電で81%、陸上風力で93%、浅海域洋上風力で87%、深海域洋上風力で87%）。評価対象となった4種類の再生可能エネルギー資源について、ほとんどの国で、設備利用率の基準値を超える技術的ポテンシャルは総量の20%未満に過ぎなかった。太陽光発電の場合、設備利用率10%を超える技術的ポテンシャルは、総量の28～48%であった。なお、韓国では技術的ポテンシャル全体の設備利用率が10%を超えていた。陸上風力エネルギーの場合、設備利用率20%を超える技術的ポテンシャルは非常に小さく、評価対象となった国の半数では、総量エネルギーポテンシャルの設備利用率がこの基準値を下回っていた。洋上風力（浅海域および深海

域)の場合、設備利用率が30%を超える技術的ポテンシャルの割合は、ほとんどの国で総量の11～17%であった。タイでは、設備利用率の閾値を超える技術的ポテンシャルは全体のわずか1～4%であったが、マレーシアではすべての技術的ポテンシャルが基準値を下回っていた。

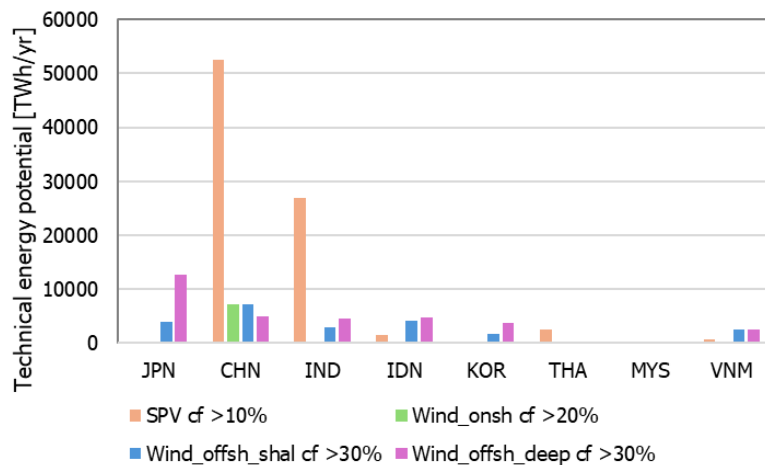


図1-14 アジア諸国における設備利用率を制限した場合の再生可能エネルギーの技術的ポテンシャルの年間総量 (TWh/年)

表1-5は、技術的ポテンシャルを現在の電力消費量（2022年）と比較したものである。アジア地域全体において、技術的ポテンシャルと電力消費量の比率には、国間で大きな差があることがわかった。例えば、各国において、太陽光発電の潜在的発電量は電力消費量の34～9070%である。設備利用率10%を超える技術的ポテンシャルは、日本、韓国、マレーシアを除くほとんどの国で電力消費量を大きく上回った。インドとタイでは、太陽光のポテンシャルが電力消費量の10倍を超えており、太陽光発電の余剰電力を他地域に供給する大きな可能性があることを示唆している。一方、陸上風力発電の技術的ポテンシャルは、ほとんどの国で電力消費量を下回り、中国、インド、タイのみで技術的ポテンシャルが電力需要を上回った。設備利用率20%を超える技術的ポテンシャルは、電力需要の83%を占める中国でのみ顕著であった。洋上風力発電の場合、技術的ポテンシャルはすべての国で電力需要の数倍であった。設備利用率30%を超える技術的ポテンシャルはほとんどの国で電力需要を上回った。なお、マレーシアではすべての技術的ポテンシャルが設備利用率の基準値を下回る結果となった。

表1-5 アジア諸国における電力消費量（2022年）と比較したエネルギーポテンシャル（%）

	太陽光		陸上風力		洋上風力・着床式		洋上風力・浮体式	
	総量	設備利用率>10%	総量	設備利用率>20%	総量	設備利用率>30%	総量	設備利用率>30%
日本	117	29	14	1	3137	401	10529	1292
中国	3396	605	1072	83	612	83	459	58
インド	9070	1753	508	5	1102	185	1691	297
インドネシア	2102	444	27	0	9721	1177	10378	1341
韓国	34	34	10	0	1625	270	4694	629
タイ	2746	1238	143	0	906	5	980	34
マレーシア	177	84	2	0	631	0	770	0
ベトナム	1085	229	62	0	7473	933	8680	993

本モデルにおける今後の課題として、保護区域やインフラまでの距離に関する制限、そして経済的可能性の評価を考慮して拡張する必要がある。さらに、本モデルで扱った高い時間解像度のデータを活用して、太陽光および風力エネルギーの潜在的年間変動の評価を検討することで、前述の電源計画モデルでの詳細な分析が可能となる。

(3) 運輸モデル

タイ政府は、2050年カーボンニュートラル目標(2050CN)、2065年GHGネットゼロ排出目標を掲げているが、発電部門の脱炭素化と同時に需要部門のエネルギー需要削減が喫緊の課題である。「国が決定する貢献

(NDC: Nationally Determined Contribution) 」および「中長期温室効果ガス低排出開発戦略 (LTS: mid-century, Long-Term low greenhouse gas emission development Strategy) 」に掲げられた目標を実現するには、すべての部門において気候変動緩和策を強化し、CO₂の大幅な排出削減が必要とされる。特に、運輸部門は現時点で排出量が2番目に大きく、今後、大きく伸びていくと予想されるため、大幅削減が期待される部門の一つであり、技術的な気候変動緩和策の評価だけでなく、輸送量の需要削減やモーダルシフトなど対策を組み合わせた総合評価が期待されている。そこで本研究では、それらの要素を取り込んだ運輸部門の持続可能な将来シナリオ評価の新たなアプローチに取り組んだ。本研究で開発した統合評価モデルは、交通計画分野と気候変動分野の対策評価の方法論やモデリング手法を統合し、交通運輸システムとエネルギーシステムの相互関係を把握した上で、包括的な視点から運輸部門におけるエネルギー消費量や温室効果ガス排出経路を算出する。そして、交通運輸政策の設計に対する有用な情報の提供を目指した。

まず、タイの運輸部門の統合評価モデルを新たに開発するため、タイの共同研究機関（タマサート大学）と共にデータ収集を行い、モデル開発に必要な交通・運輸関連のデータベースを構築した。そして、運輸政策を包括的に評価するために、輸送量の需要変動やモーダルシフトを考慮した4つの運輸需要シナリオと、電気自動車 (EV: Electric Vehicle) や燃料電池車 (FCV: Fuel Cell Vehicle) の普及を考慮した2つの技術普及シナリオを組み合わせた、複数の将来シナリオを評価した。輸送量の需要変動やモーダルシフトを考慮した運輸需要シナリオについては、COVID-19により2020~2021年にかけて運輸需要量が減少したため、その影響も考慮する必要がある。そこで、現状までの機関別輸送量の傾向および将来のタイ政府が掲げる運輸政策を考慮して、以下の4つのシナリオを評価した。

- 1) REFシナリオ [Referenceシナリオ]: COVID19以前の傾向に基づいて、COVID19が起こらなかった状況を仮想した運輸需要シナリオ
- 2) TDLシナリオ [Low Transport Demandシナリオ]: COVID-19の影響で運輸輸送量が減少した状況を反映し、COVID-19以前の状況までは回復しないシナリオ
- 3) TDPシナリオ [Policy Transport Demandシナリオ]: COVID19の影響から徐々に運輸輸送量が回復し、かつタイ政府が掲げる将来のモーダルシフト政策を実現するシナリオ
- 4) TDMシナリオ [Mass Transport Demandシナリオ]: TDPシナリオに対し、モーダルシフト政策よりも公共交通機関の大量輸送手段へのシフトをさらに加速させるシナリオ

図1-15に4つのシナリオにおける2060年の旅客輸送および貨物輸送の機関分担率を示す。REFシナリオでは、2060年までCOVID-19以前と同じ機関分担率が継続する状況を設定した。TDLシナリオでは、COVID-19以後の機関分担率のまま2060年まで変化しない状況を設定した。一方で、タイ政府による交通インフラ開発計画では、2037年までに公共交通機関の割合を61.1%にまで増加させる目標を掲げている。そこで、TDPシナリオでは、COVID-19からの社会経済の回復の影響を考慮し、またタイ政府によって運輸政策が適切に推進され、公共交通機関の割合が2037年までに政府目標で掲げた61.1%に達する状況を想定し、そして2060年までその水準を維持すると設定した。このTDPシナリオでは、依然としてバスの割合が優勢である。そこで、TDMシナリオでは、TDPシナリオと同様に、全体に占める公共交通機関の割合を61.1%に維持するが、大量輸送手段である鉄道交通の割合を増加する設定とした。

貨物輸送については、COVID-19以前は道路輸送が全体の約90%を占めており、水上輸送の割合は8.8%、鉄道輸送は1%未満のシェアにとどまる。REFシナリオでは、このCOVID-19以前の機関分担率が2060年まで継続される状況を設定した。また、旅客輸送の分析と同様に、TDLシナリオにおいて、COVID-19の影響を考慮した。しかし、COVID-19は貨物輸送の機関分担率の変化にほとんど影響を与えていない。そのため、輸送分担率の設定はREFシナリオとTDLシナリオで非常に類似している。TDPシナリオでは、タイ政府による交通インフラ開発計画を考慮し、水上輸送のシェアは2037年までに19.0%まで上昇し、また鉄道輸送のシェアは2037年までに10.0%まで増加するとし、2060年までこの水準を維持する設定とした。TDMシナリオでは、モーダルシフトがさらに顕著になり、2060年には水上輸送と鉄道輸送のシェアが30%と20%にまで上昇する。その結果、2060年における道路貨物のシェアはTDMシナリオでは50%に減少する。

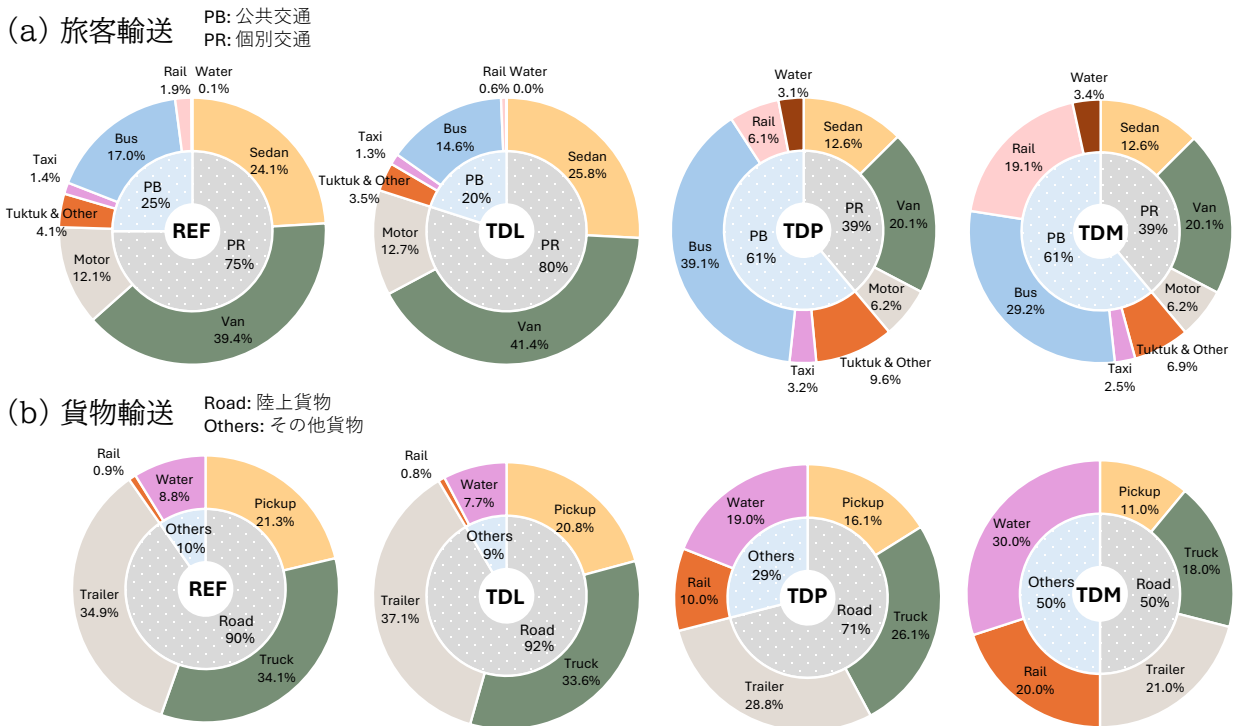


図1-15 タイにおける2060年のシナリオ別の機関分担率：旅客（上図）と貨物（下図）

図1-16にCOVID19の影響も含めた過去から現在までの運輸需要量の推移の特徴、および将来の運輸需要量推計の結果を示す。タイにおける輸送需要の増加は、主に経済成長、人口動態の変化、都市化によってもたらされ、特に可処分所得の増加に伴い、より多くの個人が自家用車を購入できるようになった。そこで過去から現在までの傾向およびCOVID-19の影響を考慮し、輸送需要推計モデルを用いて、将来の輸送需要量を推計した。REFシナリオでは、COVID-19が起こらなかった状況を仮想し、COVID-19以前の傾向に基づいて推計した結果、総旅客需要量は2007年の3232億人kmから2060年には7423億人kmまで増加する（年平均成長率は1.58%）。一方で、TDLシナリオでは、COVID-19の影響で運輸輸送量が減少した状況を反映し、そしてCOVID-19以前の傾向に基づいて推計した結果、旅客輸送は十分に回復せず、2060年までに総旅客需要量は6336億人kmとなり、REFシナリオよりも15%ほど低い。REFシナリオとTDLシナリオでは、個別交通の割合が大きい。TDPシナリオでは、タイ政府が掲げる将来のモーダルシフト政策を実現し、公共交通機関の促進と利便性の向上により、COVID-19の影響から徐々に旅客輸送量が回復し、2060年までに総旅客需要量がREFシナリオをわずかに上回り、7498億人kmになる。そして、TDMシナリオでは、特に大量輸送手段である鉄道を中心とした公共交通機関へのシフトを促進するため、総旅客需要量はさらに増え、2060年までに7601億人kmに達する。

貨物輸送に関しては、タイが製造拠点として重要な役割を果たしているため、国内での貨物輸送の需要が大幅に増加する。原材料や完成品の流通は、道路、鉄道、水上輸送に大きく依存しており、産業のサプライチェーンや地域的なつながりを支えている。REFシナリオでは、物流輸送の拡大により、総貨物需要量は2007年の2141億トンkmから2060年には5665億トンkmへと増加する（年平均成長率1.85%）。COVID-19の影響により貨物需要は若干減少したが、旅客輸送への影響はより小さい。そのため、TDLシナリオでは、総貨物需要量は2060年までに5403億トンkmが予測され、REFシナリオと比較すると4.6%程度の減少にとどまる。TDPシナリオでは、貨物輸送需要が潜在的に増加し、水上輸送や鉄道輸送などの費用対効果の高い輸送手段の普及により、2060年までに総貨物需要量は5638億トンkmとなる。TDMシナリオでは、鉄道輸送や水上輸送へモーダルシフトをさらに促進するため、需要は増加し、総貨物需要量は5815億トンkmになる。

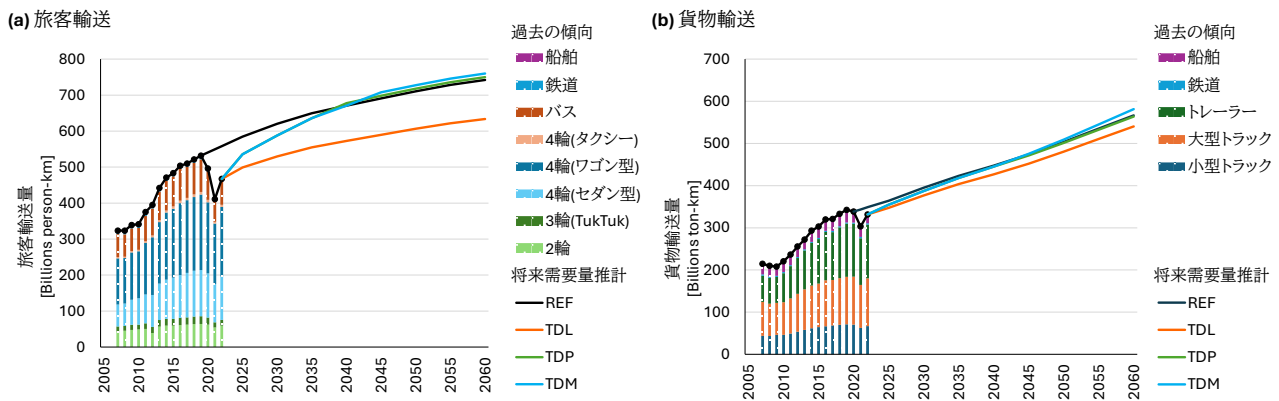


図1-16 タイにおけるモード別の旅客輸送量（左図）と貨物輸送量（右図）

また上述した運輸需要シナリオに対して、エネルギーシステムモデルで評価する技術普及シナリオについては、以下の2つを考慮した。

- 1) DCシナリオ [Decarbonizationシナリオ]: 中長期温室効果ガス低排出開発戦略 (LTS: mid-century, Long-Term low greenhouse gas emission development Strategy) で考慮される電気自動車 (EV: Electric Vehicle) や燃料電池車 (FCV: Fuel Cell Vehicle) の普及を想定したシナリオ
- 2) DDCシナリオ [Deep-Decarbonizationシナリオ]: DCシナリオに対し、LTSで考慮されるEVとFCVの普及をさらに加速させるシナリオ

運輸モデルを用いた運輸需要シナリオとエネルギーシステムモデルを用いた技術普及シナリオを組み合わせ、本研究では、表1-6に示す合計10通りのシナリオの結果を比較評価した。

表1-6 本研究における運輸需要シナリオと技術普及シナリオの組み合わせ

		緩和対策の推進		
		緩和策なし	脱炭素	大幅な脱炭素
運輸需要量	Ref	REF		
	Low	TDL	TDL_DC	TDL_DDC
	Mid	TDP	TDP_DC	TDP_DDC
	High	TDM	TDM_DC	TDM_DDC

表1-6に示すシナリオ群におけるエネルギー消費量の結果を図1-17に示す。すべてのシナリオにおいて、運輸部門の総エネルギー消費量は着実に増加する。REFシナリオでは、総エネルギー消費量は2015年の21,493ktoeから2060年には36,949ktoeに増加する。COVID-19は一時的に輸送需要を減少させ、そのCOVID-19の影響を受けた状況を考慮したTDLシナリオでは、REFシナリオと比較して、総エネルギー消費量が8.2%減少する。一方で、図1-16に示すようにTDPシナリオおよびTDMシナリオでは、COVID-19の影響から回復し、輸送需要が増加するが、脱炭素化技術を考慮しなくてもモーダルシフトに基づく公共交通機関の拡大の影響で、2060年の総エネルギー消費量は、REFシナリオと比較してそれぞれ16.0%減、23.6%減となる。したがって、公共交通機関や大量輸送手段へのモーダルシフトを促す政策は、エネルギー消費量削減の観点で、重要であることが分かる。さらに、公共交通機関や大量輸送手段へのモーダルシフトに加えて、EVやFCVといった先進技術を推進する脱炭素対策と組み合わせることで、エネルギー消費はさらに減少する。REFシナリオと比較すると、DCシナリオ群およびDDCシナリオ群におけるエネルギー消費は、それぞれ36~42%、および38~43%減少する。最も総エネルギー消費量の少ないTDM_DDCシナリオでは、2060年の総エネルギー消費量が2015年レベル相当のままで維持されている。

旅客輸送のエネルギー消費量は増加するが、総エネルギー消費量よりも緩やかな増加にとどまる。REFシナリオでは、2015年の10,109ktoeから2060年には15,627ktoeへと着実に増加するが、これは社会経済発展による需要の高まりを反映している。一方で、COVID-19はこの傾向を打ち消し、TDLシナリオでは図1-16に示すようにREFシナリオよりも輸送需要が小さいため、2060年までにエネルギー消費量はREFシナリオと比較して12.8%減少する。TDPシナリオにおけるエネルギー消費量は、2030年までは旅客輸送量の増加に伴って増加するが、その後は旅客輸送量が増大するにもかかわらず、2040年まで減少する。これは、2037年までにタイの運輸政策に基づく大量輸送へのモーダルシフトが影響している。2037年以降は、輸送手段のシェアが変化し

ないため、輸送量の増加に伴いエネルギー消費量は再び増加傾向となる。TDPシナリオおよびTDMシナリオにおける旅客輸送の消費量は、輸送需要の増加にもかかわらず、REFと比較して大幅に削減されている。エネルギー消費量はREFシナリオと比較して、TDPシナリオでは17.3%、TDMシナリオでは17.8%減少している。これらの削減は、消費エネルギー当たりの乗客輸送能力が高い公共交通機関へシフトするためである。さらに、EVやFCVの先進技術の導入によってエネルギー消費が削減され、2060年のREFシナリオと比較すると、DCシナリオ群ではエネルギー消費が41～44%削減され、DDCシナリオ群では35～42%削減される。

貨物輸送のエネルギー消費は旅客輸送のエネルギー消費量よりも大幅に増加する。貨物輸送の需要の高まりとそれに伴うエネルギー消費は、貨物輸送が旅客輸送よりも脱炭素化が困難な分野であることを示している。REFシナリオでは、2015年の11,384ktoeから2060年には21,322ktoeに増加する。これは主に、貨物輸送需要量の増加による。しかし、TDLシナリオ、TDPシナリオおよびTDMシナリオでは、それぞれREFシナリオと比較して2060年までに4.9%、15.1%、27.8%削減される。さらに、EVやFCVなどの脱炭素技術の導入により、REFシナリオと比較して、DCシナリオ群では29～43%減、DDCシナリオ群では37～48%減となる。したがって、EVやFCVなど先進技術の導入が極めて重要となる。

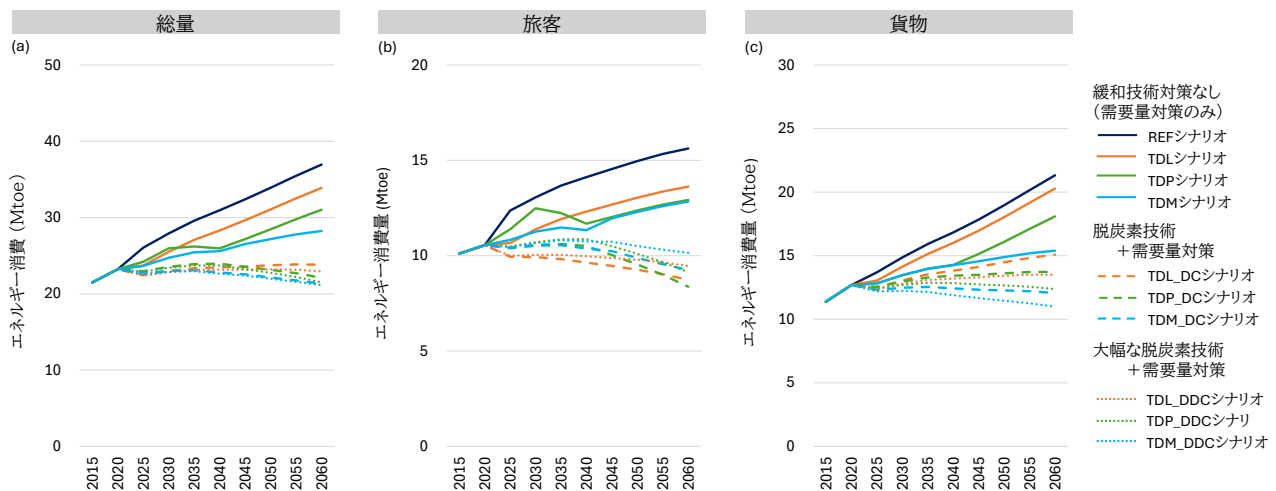


図1-17 タイにおけるシナリオ別のエネルギー消費量：総量（左図）、旅客（中図）、貨物（右図）

EVやFCVは、内燃機関（ICE）車両に対する代替手段として、脱炭素化に不可欠な2つの技術であるが、ガソリンやディーゼルの消費が削減される一方で、電気と水素の需要量が増加する。REFシナリオでは、EVの電気消費量は2030年の82.85ktoeから2060年に99.14ktoe（＝総エネルギー消費量の0.3%）へとわずかに増加する。TDPシナリオでは、モーダルシフト政策と鉄道の普及により、2060年までに電気消費量は総エネルギー消費量の1.0%になる。TDMシナリオでは、2060年までに電気消費量は857.4ktoe（＝総エネルギー消費量の3.0%）まで増加する。電気消費量は、乗用車と貨物車両の両方でEVの広範な導入により、TDM_DDCシナリオで最も高くなる。EV普及策を推進する際は、発電部門において再生可能エネルギーの普及と火力発電に対してCO₂回収・貯留（CCS）技術を導入した低排出電源の実現が不可欠である。

FCVに関しては、本研究では2030年から徐々に普及が始まると想定している。DCシナリオ群とDDCシナリオ群では、2030年の水素使用のシェアがそれぞれ4.1～4.3%と6.3～6.7%であり、2060年までにはDCシナリオ群で16.1～22.5%、DDCシナリオ群で24.9～36.3%まで増加する。TDL_DDCシナリオが2060年に最も高い水素消費割合を示し、これは主に道路貨物輸送における大幅なFCV普及が要因である。FCVはトラック、バス、列車などの長距離または重積載の輸送手段に適しているため、水素の主な用途は貨物輸送に集中し、DCシナリオ群では62～68%、DDCシナリオ群では67～73%を占める。ただし、脱炭素化を実現するには、再生可能エネルギーを使って水を電気分解して生産するグリーン水素の利用が不可欠である。

図1-18にエネルギー消費に伴うシナリオ別のGHG排出量の経路を示す。なお、GHGの総排出量は、a)総排出量（直接排出量＋現状の発電電源構成下における電力消費に伴う間接排出量）、b)総排出量（直接排出量＋中長期GHG低排出開発戦略で掲げる脱炭素な発電電源構成下における電力消費に伴う間接排出量）、およびc)直接排出量のみ、の3通りを算出した。

緩和技術対策を考慮していないREFシナリオ、TDLシナリオ、TDPシナリオ、およびTDMシナリオのいずれにおいても、旅客・貨物輸送の両分野において輸送需要量が増加し、それに伴ってエネルギー消費が拡大するため、総GHG排出量は増加の傾向を示す。現状の発電電源構成下における電力消費に伴う間接排出量も考慮した総GHG排出量の傾向を見ると、REFシナリオでは2015年の60,459ktCO₂eqから2060年までに104,257ktCO₂eqへと増加する。TDLシナリオでは、REFシナリオ比で2030年までにGHG排出量が8%減であり、これは主にCOVID-19による輸送需要の減少が要因である。TDPシナリオでは、タイの交通政策に沿った公共

交通の拡大と個別交通の削減により、2060年までにREFシナリオ比で15%削減される。TDMシナリオでは、大量輸送への依存度が高まるためREFシナリオ比で23%削減される。DCシナリオ群とDDCシナリオ群では、REFシナリオ比で53～54%および60～63%の削減となり、2020年水準比で示すと24～27%減および36～41%減となる。

一方で、タイ政府が中長期GHG低排出開発戦略（LTS）で掲げる脱炭素な発電電源構成の条件下で、電力消費由来の間接排出量を推計すると、現在の発電電源構成で考えたときと比較して、運輸部門の総GHG排出量は約5～8%削減される。中長期GHG低排出開発戦略を想定したDCシナリオ群のGHG排出量はREFシナリオ比で58～61%減（2020年比で28～33%減）となり、脱炭素技術をさらに促進するDDCシナリオ群では、REFシナリオ比で69～70%減（2020年比で47～48%減）となる。DDCシナリオ群の削減内訳を見ると、貨物輸送が削減量の62～66%を占める。貨物部門は、長距離輸送や大型車両輸送において化石燃料に依存しているため、クリーンな電力とEVおよびFCVの対策の組み合わせによる恩恵を最も受ける部門である。

電力消費に伴う間接排出量を考慮せず、運輸部門からの直接排出量のみでみたとき、DCシナリオ群とDDCシナリオ群は、2060年までにREFシナリオ比でそれぞれ64～68%と77～78%の削減であり、2020年比では43～49%と63～65%の削減となる。TDM_DDCシナリオ群が、REFシナリオに対して最も大きいGHG削減効果を示しているが、図18に示すようにEVやFCVの普及率が2060年に約30%前後であり、以前としてガソリンやディーゼルの消費に由来するGHG排出が残っている。したがって、運輸部門におけるGHG排出量を2020年比で80～90%減近くまで大幅に削減するためには、EVやFCVをさらに大幅に普及促進する様なシナリオを描く必要がある。

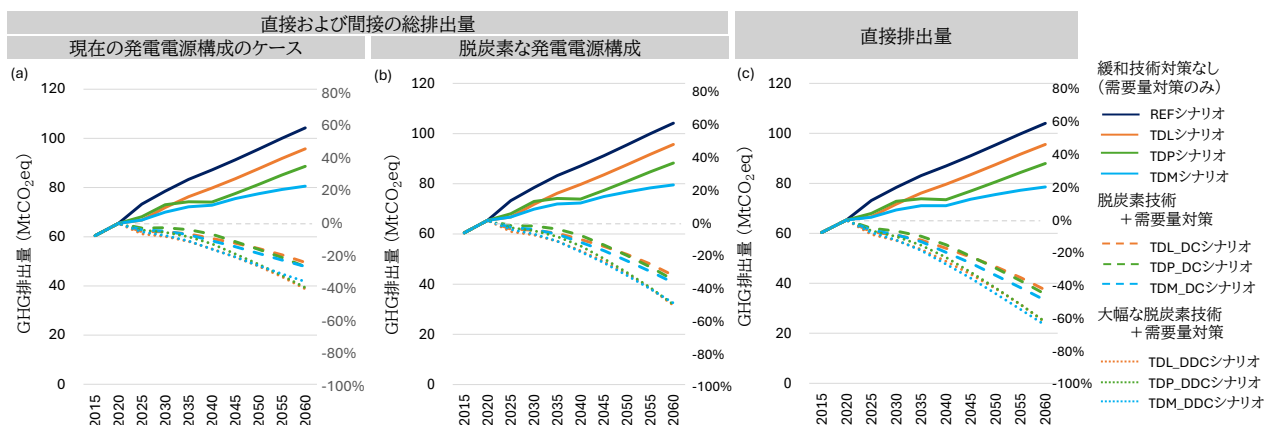


図1-18 タイにおけるシナリオ別のGHG排出量の推移

(4) 食料需要モデル

(4)-① 食料需要を推計するモデルの開発と将来シナリオの定量化

開発した食料需要モデルでは、食品群それぞれについて所得と需要の間に統計的に有意な関係がみられた。食料需要モデルを用いて所得に関する将来推計（SSP2）を用いた分析の結果、2060年にかけてインドネシアの1人あたりの食料需要は大きな増加が見込まれる結果となった（図1-19）。なお、個々での食料需要の推計には消費分だけでなく廃棄分（食品ロス）も含まれている。食品群別にみると、肉類や乳製品などの生産に必要時に発生する温室効果ガスが相対的に大きな食品群でも1人あたり需要の顕著な増加傾向が推計された。1人あたりの食料需要全体では、カロリーベースで2020年から2060年に16%の増加が推計された。同時期に推定される人口増はSSP2で8%、国連の中位推計で17%であることから、1人あたりの食料需要量の増大が食料需要全体に与える影響は、人口と同程度から、人口よりも相対的に大きくなるが見込まれる結果となった。食料需要全体の増大は、農業生産・土地利用を通じて温室効果ガス排出を増大させる力として働く可能性がある。このことから、1人あたりの食料需要量の増大の抑制が農業・土地利用部門の排出抑制にとって重要になる可能性が推察された。

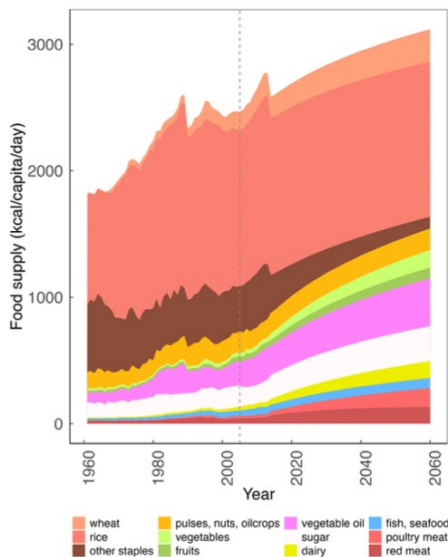


図1-19 インドネシアの食料需要の過去の推移と将来推計結果

(4)-② 食料需要モデルと応用一般均衡モデル等と連携させた、気候中立社会の実現に向けた食料農業分野の対策の定量化

現状推移シナリオでの農業部門の温室効果ガス排出量はほぼ横ばいからやや減少の推計となった。この理由として、食料需要増が作物収量向上によって補われるため農地拡大・森林伐採は大きく発生しないこと、家畜由来の排出は増加する一方で、稲作由来の排出が減ることがあげられた。現状推移シナリオと温室効果ガスの削減を目指したシナリオとの比較の結果（図1-20）、提案されているEat-Lancet型の持続可能で健康な食生活への転換により2060年前後ではおよそ20MtCO₂eq/年程度の削減が可能であることが示された。農業分野でのその他の排出量削減策と比べても、ひとつの対策オプションとして食生活転換の効果を検討する意義があると考えられた。従来、食生活の転換は肉の消費量が多いヨーロッパなどの先進国を中心に議論されてきたが、インドネシアなどの途上国でも今世紀後半には経済発展によって食料需要が大きく変化し、食生活転換による温室効果ガス排出量削減の効果が一定程度見込める可能性が示された。なお、本分析においては、食品ロスの削減による温室効果ガスの削減効果について十分に扱えていない。食生活転換に食品ロスの削減を組み合わせた場合の分析を進めることが今後の課題である。

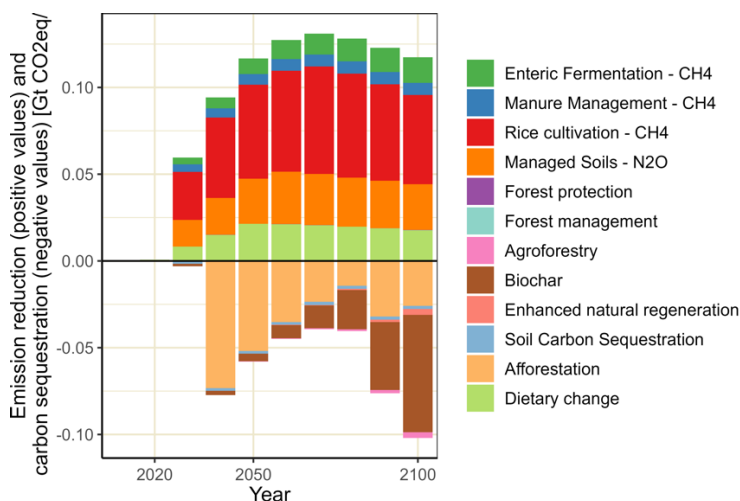


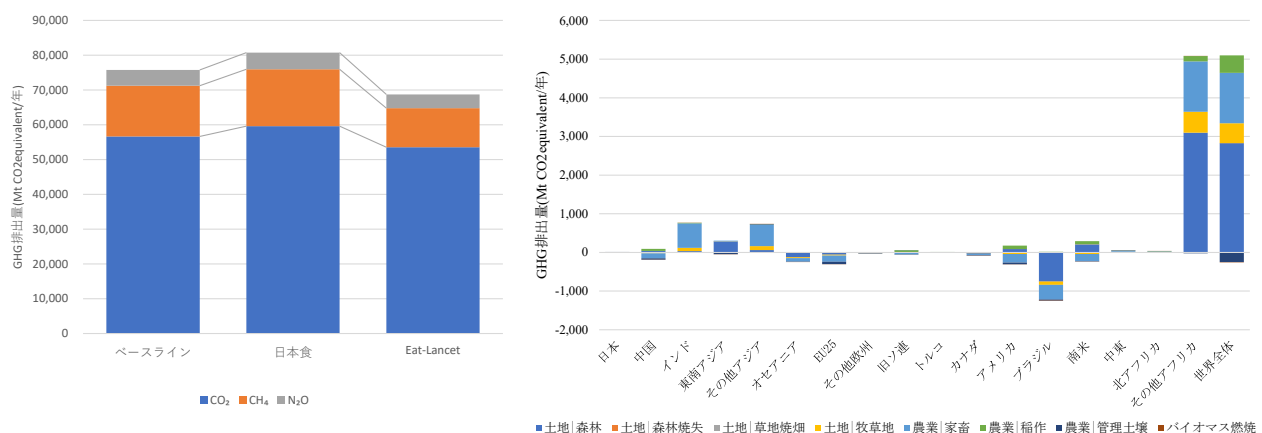
図1-20 インドネシアにおける食生活の転換（dietary change）およびほかの農業部門の緩和策による排出量削減・炭素吸収の推移。プラス側は排出量削減を、マイナス側は炭素吸収を示す。

(4)-③ 世界への日本食の普及による温室効果ガス排出削減への寄与の評価

世界全体に日本食が普及することにより2050年世界全体の温室効果ガス排出量は食事内容の変更を行わないベースライン比で5,000MtCO₂eq/年(6.6%)増加した（図1-21）。この増加は主にアフリカ地域での排出量増加に起因しているが、アジアでも増加がみられた。増加の要因として考えられるのは、コメの消費増に伴う稲作由来のメタンガス排出増である。もう一つは、今回用いた農林水産省が推奨する食事内容では豚肉の消費量がEAT-Lancetに比べて高く、これが家畜由来の排出量増加を招いたと考えられた。一方、EAT-Lancet

シナリオでは排出量2050年ベースラインより7,040MtCO₂eq(9.3%)低くなった。現代の日本食は、食肉消費量が途上国よりも相対的に高く、気候変動緩和に必ずしも貢献しない可能性があると考えられた。他方で、国・地域別に見ると、日本食の普及は、中国などのすでに食肉消費の多い国・地域でのGHG排出量削減に一定効果的であった。なお本研究で使用した「日本食シナリオ」は農林水産省が健康面に考慮して提案している食事をベースとしており、環境面は検討されていない。そのため、日本食の導入によって、一部の地域ではベースラインと比べコメ、肉(非反芻動物)、乳製品の生産や、農地、牧草地の面積が増加した。今後、より食肉等の消費を抑えた、魚介類や大豆食品を肉類の代替とした、環境面にも考慮した食事を検討する余地があると考えられた。さらに、稲作でのメタン排出削減対策や、途上国向けの農畜産物の生産技術支援といった生産面の対策も同時に講じることによって、日本食は環境にも健康にも良い食事の1つの基準となれる可能性があると考えられた。

なお、本研究では、世界各地の文化や宗教の影響は明示的に取り扱えていない。世界に日本食を普及していくためには、文化、宗教的な配慮が必要であることに加え、原材料の普及、調理方法や調理器具の普及などの課題をクリアしなければならない。また、今回の分析では、稲作に必要な水需要を空間レベルで考慮できていない。一部の地域で生産量が伸びる結果となったが、作物の潜在生産力などの農地分布を考慮していない点で生産量を過大に評価している可能性がある。



a) シナリオ別世界全体

b) 地域別の日本食シナリオAFOLU由来ベースライン比

図1-21 日本食の普及による2050年のGHG排出量

(5) 技術選択モデル

図1-22にAIM/Enduseによる燃料燃焼起源CO₂と工業プロセス起源CO₂の排出経路の推計結果を示す。技術固定シナリオでは、2030年の排出量が2030年のNDC目標 (BaU) と 概ね一致しつつ、2050年の排出量はタイでは635MtCO₂、インドネシアでは2,880MtCO₂となり、長期戦略の2050年の排出目標と比較して大きく増加する結果となった。一方脱炭素シナリオにおいて2050年にカーボンニュートラルを達成する排出経路は、すべてのシナリオで2025~2030年までに排出のピークを迎えつつ、2030年にNDC目標 (国際支援なし) を達成しかつより踏み込んだ排出量となるものであり、実現のためには日本を含む先進国の支援が求められることが示唆された。

図1-23に最終エネルギー消費量と発電電力量の推計結果を示す。2050年の脱炭素シナリオの最終エネルギー消費量は、技術固定シナリオと比較してタイでは27~35%、インドネシアでは28~40%少なく、省エネ技術の導入や燃料転換といった脱炭素対策の導入に伴い最終エネルギー消費量も減少する。一方で、対策シナリオの発電電力量は技術固定シナリオの約2~3倍に増加することから、脱炭素対策として電化と水素利用を進めることに加え、増大する電力需要への対応と電源の脱炭素化が求められる。計画的に脱炭素政策を推進することにより既存技術の座礁を極力回避する本推計においては、2030年以降を中心とした電力の脱炭素化 (電化の促進と再生可能エネルギーの普及)、および2040年以降を中心とした熱利用の脱炭素化 (産業部門での革新的脱炭素技術 (CCSや水素利用技術) の導入) が排出削減に重要な役割を果たすことが推計結果から定量的に示された。

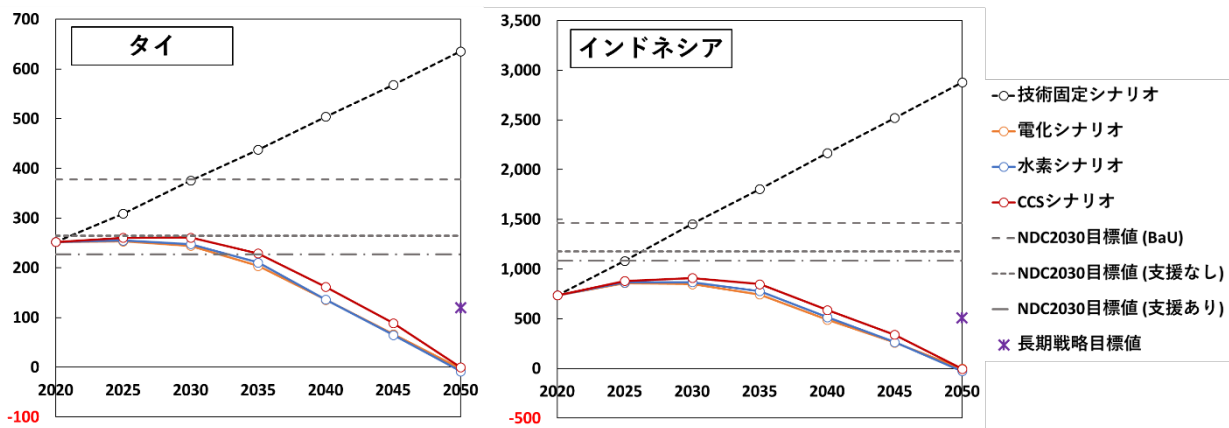


図1-22 燃料燃焼起源CO2と工業プロセス起源CO2の排出経路の推計結果（単位：MtCO2）

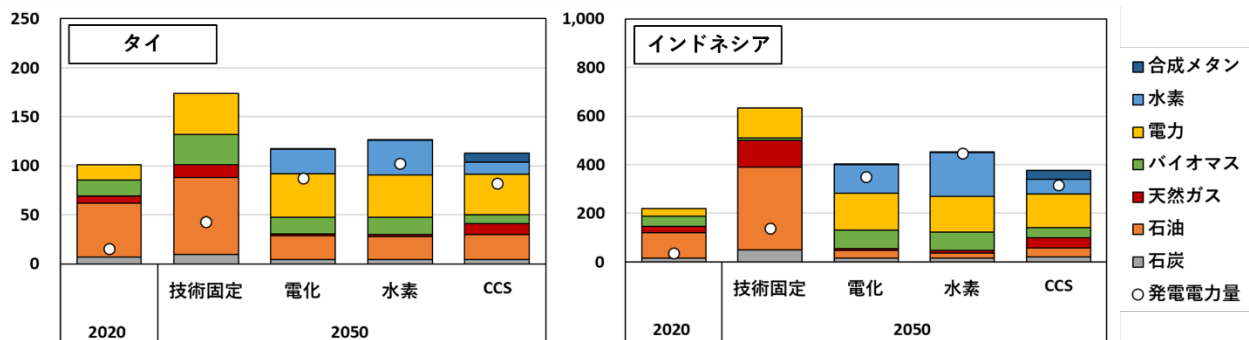


図1-23 最終エネルギー消費量と発電電力量の推計結果（単位：Mtoe）

図1-24には、技術固定シナリオと電化重視シナリオについて、より具体的な部門別のCO2排出量の内訳を示した。タイの技術固定シナリオの2050年に着目すると、家庭部門と業務部門における電子機器起源の間接排出量、及びセメント製造業、及びセメント・鉄鋼以外の製造業において、活動量やサービス需要の増大に伴う排出量の増加が見られる。対策後の再エネ・電化重視シナリオでは、家庭部門の熱用途、鉄鋼・セメント以外の軽工業を中心とする製造業での電化、水素利用拡大を最大限見込みながら、電力の排出係数を低減に進めることで、2050年におけるCO2ゼロ排出を達成できる。工業プロセスでのCO2の排出削減が困難なセメント部門においては、CCSを利用することで残余排出の削減を図る。インドネシアについてもタイと同様の傾向が見られるが、同国では特に陸上輸送での活動量が増大することから、乗用車に留まらず貨物自動車における電動化も脱炭素化に向けて重要な対策となることが示唆された。

AIM/Enduseによるタイ・インドネシアの脱炭素シナリオ分析（2050年CO2排出量ゼロを達成するシナリオ）の定量分析の結果から、水素重視シナリオを例に、主要な対策の2050年時点の強度とその対策の導入開始が必要とされる時期について、部門別にロードマップとして整理を行った。両国に共通し、ハイブリッド自動車の導入など省エネルギー（効率改善）に資する対策は、足元からすぐに導入を促進していく必要性が示された。また、鉄鋼製造業における電炉やセメント製造業における高効率型キルンなど、寿命の長いプラント型の脱炭素技術においては、より早期から更新を計画的に行っていくことで初めて、2050年における削減効果をもたらすことが可能となる。さらに、化石燃料ボイラーに対するヒートポンプ型のボイラー・給湯器、内燃機関自動車に対するEVなど、電化が可能な技術のうち、電化後に著しくエネルギー効率が改善する技術についても、早期の導入を行うことで累積排出量の削減に寄与することができる。このような技術は、先進国においてもまだ市場に多く出回っていないような技術に相当するが、発展途上国においても、先進国の技術支援・財政支援等を受けながら、より早期に導入を促していくことがアジア地域の脱炭素化に望ましいと考えられる。

このような電化の促進においては、電力セクターにおける脱炭素化を、早期から計画的に実施していくことが不可欠となる。また、それを踏まえた需要側のロードマップに落とし込んでいく際には、各技術の削減貢献量を時系列に可視化して分析を行うことが必要となる。図1-25にはタイとインドネシアの水素重視シナリオにおける電力排出係数の推移と、両国において電化が脱炭素効果を持ち得る時期の分析（図内上段）と、各部門における各対策の削減貢献量を可視化した結果（図内下段）を示す。両国とも、電力の排出係数は再エネの導入により足元から急速に低減し、2046年頃にネガティブとなる。その過程で電化による削減量が最も出にくい直接加熱（ガス使用機器）の電化が2038年頃から削減効果を持つようになる。

需要側の削減貢献量の推移を見ると、運輸部門では2030年ころ以降に、自動車の電動化（水素化を含む）

による削減貢献量が大きく増えていく。島嶼地域を含むインドネシアでは、船舶の脱炭素化による削減貢献量が運輸全体の10%を占める。産業部門では両国において、2040年代の後半で、部門全体としてネガティブエミッションを達成している。これは両国がエネルギー多消費産業である鉄鋼・セメントの生産量よりも、繊維工業や機械産業、軽工業の生産量が多い産業構造を持つことから、電化による削減貢献量を大きく受けている結果を反映している。2040年以降は、電解水素による削減効果も見られる。特にタイでは農林水産業におけるエネルギーの脱炭素化も重要になることを示している。家庭部門の削減貢献量を見ると、タイ、インドネシアともに、脱炭素シナリオでの排出量が、電力の排出係数の低減速度にほぼ並行しており、家庭部門における電化とその削減効果を後押しする電力の低炭素化の重要性が見て取れる。個別で見ると、冷房の省エネによる削減効果が大きく、特にインドネシアで顕著である。

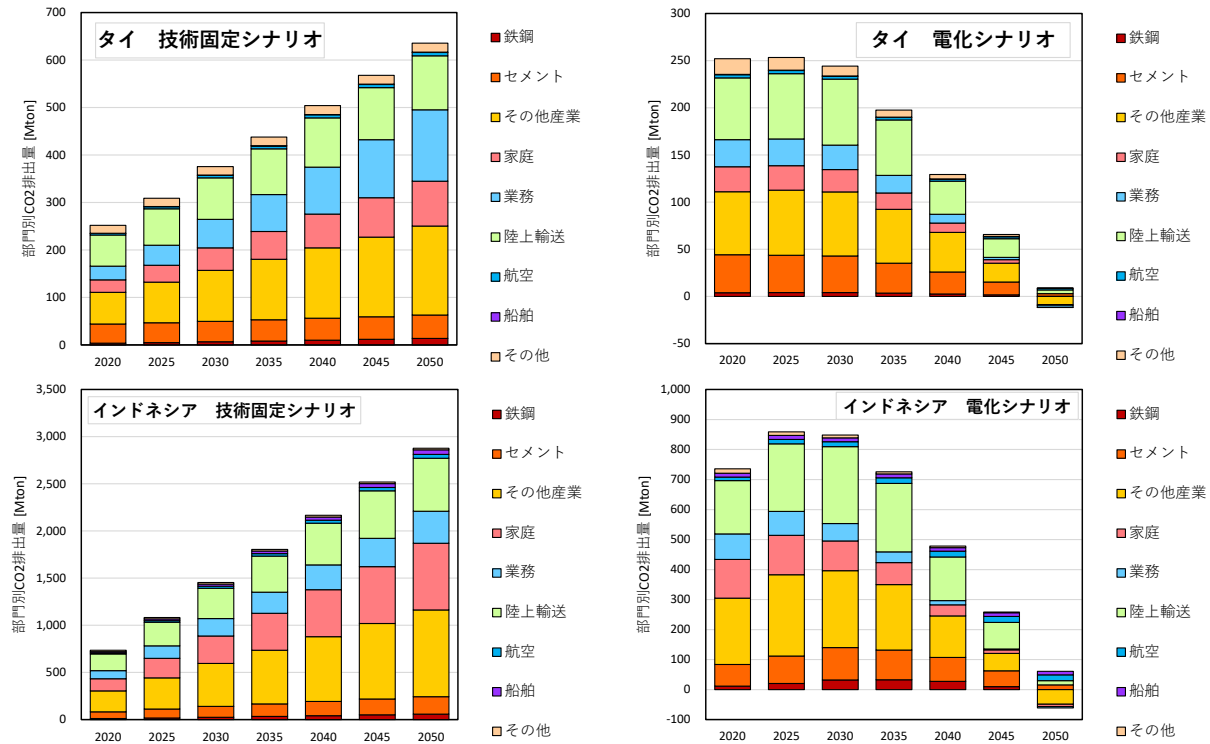


図1-24 部門別CO2排出量（技術固定シナリオと電化シナリオ）

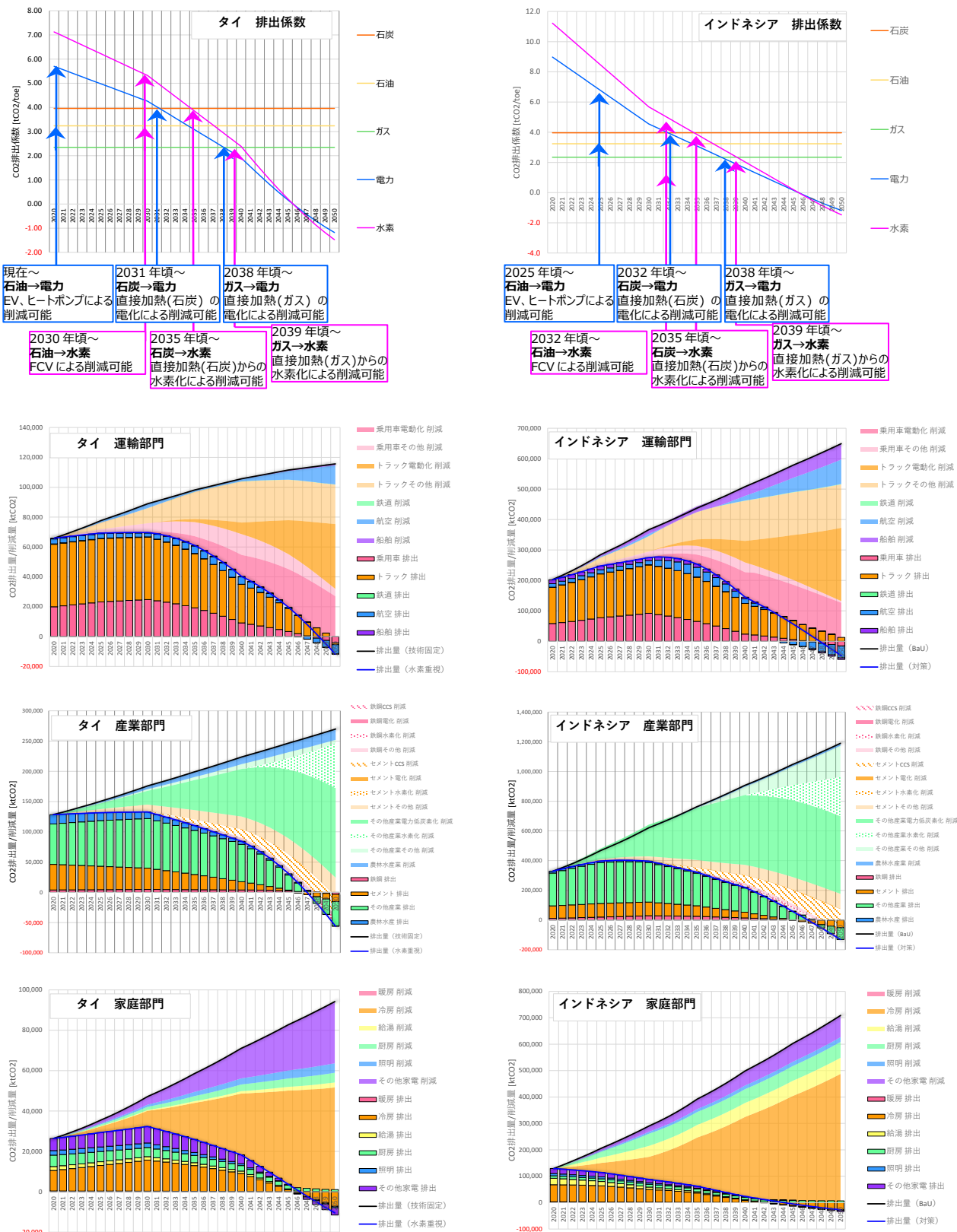


図1-25 技術ロードマップの作成に資する電力排出係数・需要対策による削減貢献量の経年分析（水素シナリオ）

本研究では前述で実施したAIM/Enduseによる気候中立なシナリオ分析の手順、それを精緻化する際に連携するAIM/CGE、電源計画モデル、輸送量モデル、食料需給モデルとのデータ授受、および各国における技術ロードマップの作成に資する可視化ツールの活用方法について、今後のアジア途上国の研究者や政策決定者へのキャパシティビルディングに活用できるよう、手順マニュアルの作成を行った。

(6) 応用一般均衡モデル

本研究では、国を対象とした応用一般均衡モデルであるAIM/CGEをタイやインドネシアに適用し、両国における温室効果ガス排出削減に関するシミュレーションを行った。

タイを対象とした分析では、なりゆきシナリオであるREFと2050年に二酸化炭素排出量を実質ゼロにし、2065年に温室効果ガス排出量を実質ゼロにするシナリオCN2050について分析を行った。電源構成は図1-26の通りである。2065年には発電の80%は太陽光をはじめとする再エネが占めるようになる。一方で、こうした取り組みによるGDPへの影響は、2065年にREFと比較して4.7%のGDPロスとして表れる結果となった。2065年まで経済成長は維持されてはいるもののこうした経済影響を小さくするための追加的な分析が必要となる結果となった。

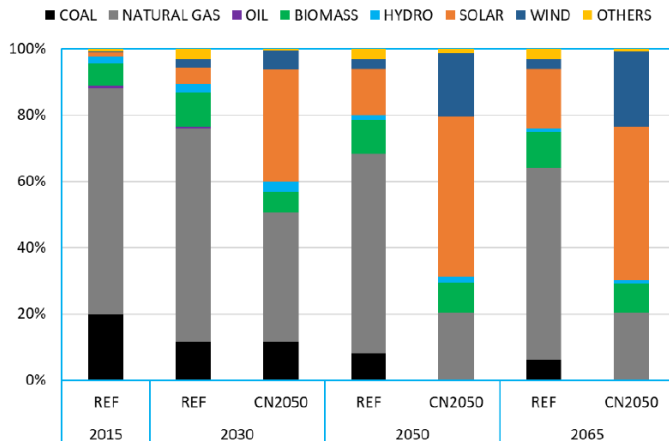


図1-26 タイを対象としたAIM/CGEによる電源構成の推移

インドネシアでは、食料需要モデルの分析結果を反映させた計算を行った。なりゆきシナリオであるBaUや従来の温暖化対策では、経済成長に伴って食料需要が増加する結果となり、図1-27に示す通り2060年の農業部門からの温室効果ガス排出量は、363MtCO₂eと現状から250MtCO₂eだけ増加するのに対して、温暖化対策を実施するLCCPでは295MtCO₂eに増加する結果となった。これに対して、温暖化対策とともに食料需要を持続的にするLCCP+では、2060年の温室効果ガス排出量は233MtCO₂eと伸びを半分に抑えることが可能となった。GDPは2060年まで年率5%以上の経済成長が実現するが、LCCP+では2060年にBaUと比較して0.9%の経済影響が見られる結果となった。

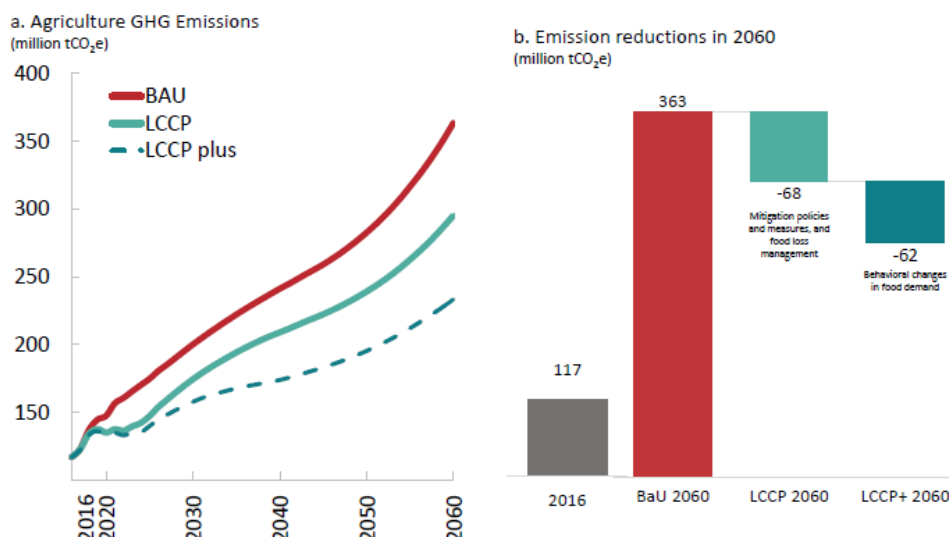


図1-27 インドネシアを対象としたAIM/CGEによる農業部門からの温室効果ガス排出量の推移

なお、タイ及びインドネシアにおいても、現状において政府が公表している取り組みの評価に止まっており、技術選択モデルが示した二酸化炭素排出量の実質ゼロのような気候中立という結果には至っていない。そうした目標を達成するためにも追加的な対策の導入による評価が今後の課題である。

このほか、AIM/CGEに関してもモデルを各国に適用するためのトレーニングワークショップをオンライン

で開催してきた。2022年7～10月に簡易な静学モデルから上記に示した複雑な動学モデルのトレーニングを行い、2024年11月には動学モデルについてのみ追加でトレーニングを実施した。

(7) 拡張型スナップショットツール

本研究では研究内容に記載の通り、拡張型スナップショットツールについてはモデル構造の変更は行わずに想定されているパラメータの変更にとどめることとした。これは、本ツールの役割は脱炭素社会など気候中立社会の実現に向けて様々な意見や対策を反映させた情報を入力し、その結果を瞬時に提示することでステークホルダーとビジョンを共有することを目的としたものであるためである。一方で、本ツールを用いたトレーニングを2023年1～2月に行うとともに、JICAの要請を受けて実施したトレーニングにおいても本ツールを用いた演習を行い、マニュアルの更新等を行った。

(8) アジアにおけるAIMの共有に向けた取り組み

気候中立社会の実現に向けて、研究者とステークホルダーは一体となって対策の検討とその評価、実施を行うことが求められており、温暖化対策計画にも明記されているように日本の経験や技術などについての支援も期待されている。そのためには、図1-28に示すように、研究として各国のモデル開発を行うことはもちろんではあるが、政策決定者をはじめとするステークホルダーとの情報共有、日本など先進国の政府との連携構築も重要となる。

本研究では、図1-28に示す構造を具体化するために、前述の各モデルの成果で記述した個別モデルの開発に関するトレーニングに加えて、本研究の全体枠組みとともに新たに開発する個別モデルとその開発に必要なデータについての詳細な説明会を、2022年7-8月にオンラインで行った。また、2022年9月には、アジアの政策決定者向けのトレーニングワークショップを実施し、AIMをはじめとするモデルやシナリオ分析の役割、研究者が提供する長期戦略等の分析結果に対してどのようにフィードバックするか、といった説明を行い、研究者と政策決定者が一体となって気候中立社会の実現に向けて取り組むために必要なことについて解説を行った。

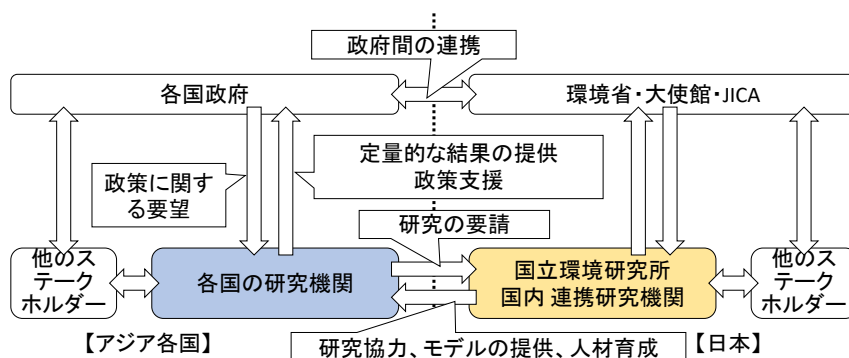


図1-28 途上国において気候変動緩和策を理想的に進める構造

引用文献

- Cederberg, C., & Sonesson, U. (2011). Global food losses and food waste: Extent, causes and prevention; study conducted for the International Congress Save Food! at Interpack 2011, [16 - 17 May], Düsseldorf, Germany (J. Gustavsson, Ed.). International Congress Save Food!, Rome. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. (2018). The future of food and agriculture - Alternative pathways to 2050.

1. 5. 研究成果及び自己評価

1. 5. 1. 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>

個別モデルの開発や定量化に関して、マニュアルを作成し、対象国以外においてもモデル開発等の展開が可能となっていることは、学術的な裾野を広げることにつながり、意味は大きい。また、複数のモデルを連携して活用する手法は、個々のモデルの持つ弱点を補う手法であり、学術的にも意味のある分析手法につながると考えられる。

個々のモデル開発のうち、電源計画モデルは時間当たりの電力需給を対象としており、日本を含めた多様なアジアの国々が独自に気候中立社会を構築するための方策の検討に資するものであり、学術的意義は大きい。食料需要モデルについては、食料需要の違いがもたらす影響についても対象とすることが可能であり、

さらに食品ロスなどの削減による気候政策への効果についても示唆を与えるものであり、今後の学術的な展開が期待できる。一方、統合モデルである応用一般均衡モデルについては、従来の生産や消費といった経済活動のフローだけでなく技術のストックもモデル化するなどより現実に近い分析が可能となっている点は学術的な意義も大きい。

<環境政策等へ既に貢献した研究成果>

2021年10月に閣議決定された「地球温暖化対策計画」に続き、2025年2月に閣議決定された「地球温暖化対策計画」においても「アジア太平洋統合評価モデル（AIM）による長期戦略策定支援やNDC改訂支援（第3章第8節2.（2））」が明記された。こうした文言が継続して示されるのは、本研究でも開発、適用を進めているAIMの有効性が認識されたためであると考えている。

また、タイにおいては本研究の協力者であるタマサート大学のProf. Bundit Limmeechokchaiの働きかけにより、2022年11月と2024年12月にそれぞれ国連に提出された長期戦略「Mid-century, Long-term Low Greenhouse Gas Emission Development Strategy (Revised Version)」や隔年透明性報告書「Thailand's First Biennial Transparency Report」において、本研究で開発しているAIM/EnduseやAIM/CGEモデルを使った分析結果を用いていることが明記された。インドネシアにおいても本研究の研究協力者であるProf. Rizaldi Boerが本研究の結果を政府に共有しており、環境政策に貢献している。

<環境政策等へ貢献することが見込まれる研究成果>

本研究で対象としたAIMの開発とそれを用いた将来シナリオの定量化について、環境省を通じてバングラデシュやベトナム等の国々への適用の依頼があり、モデル開発に向けた作業の準備を行ってきた。こうした取り組みは、今後、これらの国における長期戦略の策定につながることから、今後、これらの国で環境政策に貢献することが見込まれる。

また、環境省との議論において、技術選択モデルにおいて評価する技術として、JCMを通じて普及が期待できる技術の評価することで、日本企業への裨益にもつながることが指摘された。そうした技術の市場規模の評価のためには費用など詳細な情報が必要となるが、関心のある企業と連携することで、脱炭素に資する日本発の技術の世界的な普及につなげることが期待できる。

1. 5. 2. 研究成果に基づく研究目標の達成状況及び自己評価

<全体達成状況の自己評価>

2. 目標を上回る成果をあげた

「アジア途上国における気候中立社会の実現に向けたロードマップの定量化に関する研究」
(国立環境研究所、増井 利彦)

全体目標	全体達成状況
<p>分析対象とするアジア途上国として、インドネシア、タイ、台湾を取り上げ、これらの国を対象に、電源計画モデル、輸送量推計モデル、食料需要モデル（以下ではこれらをまとめて「個別モデル」という）のいずれかのモデル開発を完了させる、また、開発したモデルを用いて、各分野における将来シナリオの定量化を行う。さらに、こうした分析結果を、スナップショット型ツールであるExSSや、動的経路を明らかにする技術選択モデルや応用一般均衡モデル（以下、これらをまとめて「統合モデル」という）と連携させることで、気候中立社会の実現に向けて個別分野の課題解決を踏まえたマクロなロードマップの定量化を行う。</p> <p>初年度は、本研究で開発する個別モデルの開発を行う。また、統合モデルにおいて個別モデルと連携するためのモデルの拡張を行い、予備的な試算を行うことを目標とする。</p> <p>2年度は、個別モデルや統合モデルの改良を行い、シナリオの定量化を行うことを目標とする。</p> <p>3年度は、シナリオの更新を通じて、対象国の気候</p>	<p>3つの個別モデルについては目標通りモデルを開発し、各分野における将来シナリオの定量化を行うことができた。また、個別モデルの結果を踏まえた分析を統合モデルにおいても実施することができた。分析結果の一部は、タイにおいて長期戦略や隔年透明性報告書において引用されるなど気候政策に貢献することができた。さらに環境省を通じて、ベトナムやバングラデシュなど当初は想定していなかった国を対象とした分析に向けて議論を進めることになり、目標を上回る成果をあげたと自己評価している。</p>

<p>中立に向けたロードマップを定量的に明らかにするとともに、モデル開発やロードマップの定量化に関する課題を整理し、アジア他国に適用するためのマニュアル等の作成を目標とする。</p> <p>なお、各機関の役割は以下の通りである。</p> <p>国立環境研究所では、統合モデルを用いた分析と、電源計画に関する分析を行う。</p> <p>立命館大学は、国立環境研究所と協力して食料需要推計に関する分析を行う。</p> <p>東京大学は、国立環境研究所と協力して輸送量推計に関する分析を行う。</p>	
---	--

<サブテーマ1 達成状況の自己評価>…………… 2. 目標を上回る成果をあげた

「アジア途上国における気候中立社会の実現に向けたロードマップの定量化に関する研究」
(国立環境研究所、増井利彦)

サブテーマ1 目標	サブテーマ1 達成状況
<p>分析対象とするアジア途上国として、インドネシア、タイ、台湾を取り上げ、これらの国を対象に、電源計画モデル、輸送量推計モデル、食料需要モデル（以下ではこれらをまとめて「個別モデル」という）のいずれかのモデル開発を完了させる、また、開発したモデルを用いて、各分野における将来シナリオの定量化を行う。さらに、こうした分析結果を、スナップショット型ツールであるExSSや、動的経路を明らかにする技術選択モデルや応用一般均衡モデル（以下、これらをまとめて「統合モデル」という）と連携させることで、気候中立社会の実現に向けて個別分野の課題解決を踏まえたマクロなロードマップの定量化を行う。</p> <p>初年度は、本研究で開発する個別モデルの開発を行う。また、統合モデルにおいて個別モデルと連携するためのモデルの拡張を行い、予備的な試算を行うことを目標とする。</p> <p>2年度は、個別モデルや統合モデルの改良を行い、シナリオの定量化を行うことを目標とする。</p> <p>3年度は、シナリオの更新を通じて、対象国の気候中立に向けたロードマップを定量的に明らかにするとともに、モデル開発やロードマップの定量化に関する課題を整理し、アジア他国に適用するためのマニュアル等の作成を目標とする。</p> <p>なお、各機関の役割は以下の通りである。</p> <p>国立環境研究所では、統合モデルを用いた分析と、電源計画に関する分析を行う。</p> <p>立命館大学は、国立環境研究所と協力して食料需要推計に関する分析を行う。</p> <p>東京大学は、国立環境研究所と協力して輸送量推計に関する分析を行う。</p>	<p>3つの個別モデルについては目標通りモデルを開発し、各分野における将来シナリオの定量化を行うことができた。また、個別モデルの結果を踏まえた分析を統合モデルにおいても実施することができた。分析結果の一部は、タイにおいて長期戦略や隔年透明性報告書において引用されるなど気候政策に貢献することができた。さらに環境省を通じて、ベトナムやバングラデシュなど当初は想定していなかった国を対象とした分析に向けて議論を進めることになり、目標を上回る成果をあげたと自己評価している。</p>

1. 6. 研究成果発表状況の概要

1. 6. 1. 研究成果発表の件数

成果発表の種別	件数
産業財産権	0
査読付き論文	6
査読無し論文	1
著書	1
「国民との科学・技術対話」の実施	0
口頭発表・ポスター発表	41
マスコミ等への公表・報道等	0
成果による受賞	1
その他の成果発表	5

1. 6. 2. 主要な研究成果発表

成果番号	主要な研究成果発表 (「研究成果発表の一覧」の査読付き論文又は著書から10件まで抜粋)
1	Khamphilavanh B., Masui T. (2022) Contribution of Municipal Solid Waste Management to Decarbonization in Laos. Global Environmental Research, 26 (1&2), 65-70
2	Silva D. (2022) Assessment of renewable energy potentials in Asia toward a decarbonized world. Global Environmental Research, 26 (1&2), 5-10
3	Silva D., Ashina S. (2023) Characterization of the proximity to urban areas of the global energy potential of solar and wind energies. Environmental Research Communications, 5 (7)
4	Zhang R., Hanaoka T. (2023) Opportunities and challenges of post-pandemic' s new normal: Rethinking the contribution of the transport sector to China' s carbon neutrality by 2060. Science of the Total Environment, 894
5	高倉潤也 (2023) 気候変動に関する地球規模でのリスク評価. リスク学研究, 32 (2), 91-95
6	Hibino G., Masui T. (2024) Development of AIM (Asia-Pacific Integrated Model) and its contribution to policy-making for the realization of decarbonized societies in Asia.. Sustainability Science, 19, 223-239
7	林明日香, 長谷川知子 (2024) 世界への日本食の普及による環境と食料システムへの影響評価, 土木学会論文集, 80(27)

8	Hibino G., Ashina S., Masui T., Kainuma M. (2025) Chapter 11 Emission Pathways to Achieve a 2050 Decarbonized Society in Japan Using AIM. In: Anjula Gurtoo, Rajib Shaw and Satish Kumar Yawale eds. India-Japan Sustainability and Technology-led Social Transformation, Cambridge Scholars Publishing, 205-224.
---	---

注：この欄の成果番号は「研究成果発表の一覧」と共通です。

1. 6. 3. 主要な研究成果普及活動

本研究課題での成果普及活動として、アジアの共同研究者を通じて各国の気候変動対策へのインプットを行ってきた。タイでは、2022年11月に国連に提出された長期戦略の改訂版「Mid-century, Long-term Low Greenhouse Gas Emission Development Strategy (Revised Version)」や2024年12月に国連に提出された隔年透明性報告書「Thailand's First Biennial Transparency Report」では、AIMを用いて定量的な分析が行われたことが明記されている。このほか、環境省からの依頼を受けて、第10回日台環境協議（2022年）、e-ASIA JRP International Environment Workshop（2022年）、Climate Modelling Workshop between EU and Japan（2025年）、気候変動枠組条約締約国会議（COP）でのサイドイベント等で、本研究の成果を公表してきた。

1. 7. 国際共同研究等の状況

<国際共同研究の概要>

タイ王国・Thammasat UniversityのBundit Limmeechokchai教授と、タイを対象としたモデル開発を行い、Bundit Limmeechokchai教授を通じて研究成果がタイ政府に提供され、タイの長期戦略や隔年透明性報告書に本研究で開発したAIMとその成果が引用された。

インドネシア共和国・IPB UniversityのRizaldi Boer教授と、インドネシアの食料を対象とした分析を行い、Rizaldi Boer教授を通じて研究成果がインドネシア政府に提供されている。

環境省とベトナム社会主義共和国の天然資源環境省が2020年8月及び2021年11月にそれぞれ締結した「Joint Ministerial Statement: 6th Viet Nam - Japan Environmental Policy Dialogue」と「Joint Cooperation Plan on Climate Change toward Carbon Neutrality by 2050 between the MOEJ and the MONRE of Viet Nam」に基づき、Viet Nam's Institute of Meteorology, Hydrology and Climate Changeと連携して、ベトナムを対象としたモデル開発と定量的な分析、人材育成の取り組みを進めてきた。

<相手機関・国・地域名>

機関名（正式名称）	（本部所在地等の）国・地域名
Thammasat University	タイ王国
IPB University	インドネシア共和国
Viet Nam's Institute of Meteorology, Hydrology and Climate Change	ベトナム社会主義共和国

注：国・地域名は公的な表記に準じます。

1. 8. 研究者略歴

<研究者（研究代表者及びサブテーマリーダー）略歴>

研究者氏名	略歴（学歴、学位、経歴、現職、研究テーマ等）
増井利彦	研究代表者 大阪大学大学院工学研究科博士後期課程修了 博士（工学）

	<p>国立環境研究所 室長を経て、 現在、国立環境研究所社会システム領域 領域長 中央環境審議会臨時委員、IPCC第6次評価報告書第3作業部会主執筆者 専門は環境システム学、研究テーマは統合評価モデルを通じた環境政策評価</p>
--	---

2. 研究成果発表の一覧

注：この項目の成果番号は通し番号です。

(1) 研究成果発表の件数

成果発表の種別	件数
産業財産権	0
査読付き論文	6
査読無し論文	1
著書	1
「国民との科学・技術対話」の実施	0
口頭発表・ポスター発表	41
マスコミ等への公表・報道等	0
成果による受賞	1
その他の成果発表	5

(2) 産業財産権

成果番号	出願年月日	発明者	出願者	名称	出願以降の番号
	特に記載する事項はない				

(3) 論文

<論文>

成果番号	発表年度	成果情報	主たるサブテーマ	査読の有無
1	2022	Khamphilavanh B., Masui T. (2022) Contribution of Municipal Solid Waste Management to Decarbonization in Laos. Global Environmental Research, 26 (1&2), 65-70	1	有
2	2023	Silva D. (2022) Assessment of renewable energy potentials in Asia toward a decarbonized world. Global Environmental Research, 26 (1&2), 5-10	1	有
3	2023	Silva D., Ashina S. (2023) Characterization of the proximity to urban areas of the global energy potential of solar and wind energies. Environmental Research Communications, 5 (7)	1	有
4	2023	Zhang R., Hanaoka T. (2023) Opportunities and challenges of post-pandemic's new normal:	1	有

		Rethinking the contribution of the transport sector to China's carbon neutrality by 2060. Science of the Total Environment, 894		
5	2023	高倉潤也 (2023) 気候変動に関する地球規模でのリスク評価. リスク学研究, 32 (2), 91-95	1	無
6	2024	Hibino G., Masui T. (2024) Development of AIM (Asia-Pacific Integrated Model) and its contribution to policy-making for the realization of decarbonized societies in Asia.. Sustainability Science, 19, 223-239	1	有
7	2024	林明日香, 長谷川知子 (2024) 世界への日本食の普及による環境と食料システムへの影響評価, 土木学会論文集, 80(27)	1	有

(4) 著書

<著書>

成果 番号	発表 年度	成果 情報	主たる サブテーマ
8	2025	Hibino G., Ashina S., Masui T., Kainuma M. (2025) Chapter 11 Emission Pathways to Achieve a 2050 Decarbonized Society in Japan Using AIM. In: Anjula Gurtoo, Rajib Shaw and Satish Kumar Yawale eds. India-Japan Sustainability and Technology-led Social Transformation, Cambridge Scholars Publishing, 205-224.	1

(5) 口頭発表・ポスター発表

<口頭発表・ポスター発表>

成果 番号	発表 年度	成果 情報	主たる サブテーマ	査読 の有無
9	2022	Masui T. (2022) Introduction of AIM (Asia-Pacific Integrated Model) and its application to assess long-term strategies. Training on formulating low GHG policies based on quantitative approach, Tokyo, Japan (Online)	1	無
10	2022	Masui T. (2022) Comments on "Research needs (Roundtable V)". Academic Focus Group Discussion on The Challenges of Indonesia Energy Sector Long Term Strategy, Bandung, Indonesia (online)	1	無
11	2022	高倉潤也 (2022) 気候変動に関する地球規模でのリスク評価. 日本リスク学会2022年度年次春季シンポジウム, オンライン	1	無
12	2022	増井利彦 (2022) 脱炭素社会と大気環境. 俯瞰ワークショップ「これからの持続可能な大気環境に関する研究開発の枠組みについての小検討会」, 東京	1	無
13	2022	Masui T. (2022) Development of AIM (Asia-Pacific Integrated Model) and its application to assess roadmap toward decarbonization society. International Conference on Systems Analysis for Enabling Integrated Policy Making, New Delhi, India (Online)	1	無
14	2022	増井利彦 (2022) Asia-Pacific Integrated Model (アジア太平洋統合モデル; AIM)とは?. 第10回日台環境協議, 東京・台北 (オンライン)	1	無

15	2022	Silva D. (2022) Technical energy potentials of solar PV and onshore wind in Asia-Pacific regions. 28th AIM International Workshop, Online		
16	2022	Masui T. (2022) Application of AIM (Asia-Pacific Integrated Model) for LTS formulation. AFD-JICA Joint Side Event Development and Implementation of Long Term Strategies: The Role of Development Banks, Online	1	無
17	2022	Masui T. (2023) Development of Asia-Pacific Integrated Model and its contribution to carbon neutral society. e-ASIA JRP International Environment Workshop, Bangkok, Thailand (online)	1	無
18	2022	Masui T. (2023) Net-zero GHG emissions and Long-term scenario. Capacity Development for formulating Long-term Low Greenhouse Gas Emission Development Strategies under Paris Agreement, Yokohama, Japan	1	無
19	2022	Masui T. (2023) Collaboration between ASEAN and Japan toward decarbonized society. 50th Year of ASEAN-Japan Friendship and Cooperation Commemoration Dialogue on Science, Technology and Innovation, Bangkok, Thailand (online)	1	無
20	2022	Masui T. (2023) Development and Application of AIM to Realize Decarbonized Society -For Decision Making Based on Scientific Knowledge-. Scoping Meeting on the ASEAN Climate Change Strategic Action Plan 2023-2030 (ACCSAP) & Guidance for National Long-term Roadmap to Synergize Mitigation and Adaptation, -Bangkok, Thailand (online)	1	無
21	2023	Takahashi K. (2023) Competing and complementary national priorities - Panel on regional priorities: Japan -. Snowmass Workshop - Climate Action in a World of Multiple Priorities, Snowmass, USA	1	無
22	2023	Masui T. (2023) Contribution of AIM (Asia-Pacific Integrated Model) to assess decarbonized society. JICA Training "Capacity Development for Progression of Nationally Determined Contribution", Tsukuba, Japan	1	無
23	2023	増井利彦 (2023) 日本における脱炭素社会に向けた定量化の経緯と今後必要な研究. 環境科学会2023年会, 神戸	1	無
24	2023	Chaichaloem A. (2023) Thailand's AIM/Enduse. Training on Zero Emission Policy Formation based on a Quantitative Approach Hands-on Training on Asian Pacific Integrated Model (AIM), Tokyo, Japan	1	無
25	2023	Masui T. (2023) Introduction to AIM (Asia-Pacific Integrated Model) to assess decarbonized society. Training on Formulating Zero Emission Policies based on a Quantitative Approach, Tokyo, Japan	1	無

26	2023	Rajbhandari S. (2023) Thailand's Net-zero Emissions by 2050: Analysis of Economy-wide Impacts Using AIM/CGE Model. Training on Formulating Zero Emission Policies based on a Quantitative Approach, Tokyo, Japan	1	無
27	2023	増井利彦 (2023) 気候変動問題についての科学的知見と脱炭素社会の実現に向けた取組. 国立社会保障・人口問題研究所「人新世における人口動態と環境の新たな相互作用メカニズムに関する総合的研究 (人口と環境)」研究会, 東京	1	無
28	2023	Silva D. (2023) Regional supply-cost curves for solar and wind energy reflecting technological progress. 16th IAMC Annual Meeting, Venice, Italy	1	無
29	2023	Silva D. (2024) Estimation of the global energy potential of onshore wind based on hourly data. 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	1	無
30	2023	Masui T. (2024) Introduction of AIM (Asia-Pacific Integrated Model). Integrated Programme for Improving Air Quality in Asia (IBAQ), Tsukuba, Japan	1	無
31	2023	Rajbhandari S. (2024) Economy-wide Impacts of Decarbonization Policies in Nepal using AIM Models. Integrated Programme for Improving Air Quality in Asia (IBAQ) Seminar on "Co-benefit Approach", Tsukuba, Japan	1	無
32	2023	Rossita A. (2024) Indonesia's Low carbon Assessment on Land and Food System (AIM Activities in Indonesia). Integrated Programme for Improving Air Quality in Asia (IBAQ) Seminar on "Co-benefit Approach", Tsukuba, Japan	1	無
33	2024	Chaichaloem A. (2024) Thailand Decarbonization Analysis by using AIM. JICA Training "Capacity Development for Progression of Nationally Determined Contribution under the Paris Agreement", Tsukuba, Japan	1	無
34	2024	Masui T. (2024) Introduction and overview of AIM (Asia-Pacific Integrated Model) to assess decarbonized society. JICA Training "Capacity Development for Progression of Nationally Determined Contribution under the Paris Agreement", Tsukuba, Japan	1	無
35	2024	Rajbhandari S. (2024) Activities in Nepal using AIM. JICA Training "Capacity Development for Progression of Nationally Determined Contribution under the Paris Agreement", Tsukuba, Japan	1	無
36	2024	Rossita A. (2024) Scenario Analysis using AIM Indonesia: Low-Carbon Assessment on Land and Food. JICA Training "Capacity Development for Progression of Nationally Determined Contribution under the Paris Agreement", Tsukuba, Japan	1	無

37	2024	Chaichaloem A., Hanaoka T., Zhang, R., Limmeechokchai, B. (2024) Implications of Transport Demand and Modal Shift Effect on GHG Emissions in Thailand. The 30th AIM International Workshop, Tsukuba	1	無
38	2024	Silva D. (2024) Model for estimating the global energy potential of solar and wind energies with hourly data. 30th AIM International Workshop, Tsukuba, Japan	1	無
39	2024	林明日香, 長谷川知子 (2024) 世界への日本食の普及による環境と食料システムへの影響評価, 第32回地球環境シンポジウム, 熊本	1	無
40	2024	Rossita A., Masui T. (2024) Socioeconomic Impacts from Shifting to Sustainable Food Consumption towards Indonesia's Net Zero Emission. 10th International Conference on Low Carbon Asia (ICLCA), Dalian, China	1	無
41	2024	Chaichaloempreecha, A., Hanaoka, T., Zhang, R., Limmeechokchai, B. (2024) Changes in Transport Demand and Modal Shift on GHG Emissions in Thailand, International Conference on sUustainable Energy 2024 (ICUE 2024) on Energy Transition and Net-Zero Climate Future, Pattaya, Thailand	1	無
42	2024	Chaichaloempreecha, A., Hanaoka, T., Zhang, R., Limmeechokchai, B. (2024) Pathways toward Decarbonized Transport in Thailand: Development of Integrated Transport Model, 17th IAMC annual meeting. Seoul, Korea	1	無
43	2024	Masui T. (2024) Integrated Assessment Model to Support Climate and Environment Policies. Integrated Assessment Modeling on Climate Change and Circular Economy, Seoul, Korea	1	無
44	2024	増井利彦 (2024) アジアにおける脱炭素シナリオ開発研究の成果と役割. ISAP2024 持続可能なアジア太平洋に関する国際フォーラム, オンライン	1	無
45	2024	Takakura J. (2024) Estimating global-scale economic impact of climate change: overview of statistical and structural models. Climate Finance & Risk 2024, Tokyo, Japan	1	無
46	2024	Masui T. (2025) Overview of AIM (Asia-Pacific Integrated Model) toward decarbonized society. JICA Training -Implementation and Advancement of the MRV System, Tsukuba, Japan	1	無
47	2024	Silva D. (2025) Comparative analysis of the global energy production from conventional and unconventional wind power technologies. 41st Conference on Energy, Economy, and Environment, Tokyo, Japan	1	無
48	2024	Masui T. (2025) Overview of AIM (Asia-Pacific Integrated Model) and its application to Asian countries. Science-Policy Dialogue on Development of Long-Term Strategy for GHGs Mitigation: Exploring Net Zero Pathways of Bangladesh, Dhaka, Bangladesh (online)	1	無

49	2024	Masui T., Hibino G., Ashina S. (2025) Quantitative Analyses on GHG Emission Pathways and Mitigation Measures toward Japan's Net-Zero GHG Using AIM (Asia-Pacific Integrated Model). Climate Modelling Workshop between EU and Japan, Online	1	無
----	------	---	---	---

(6) 「国民との科学・技術対話」の実施

成果 番号	発表 年度	成果 情報	主たる サブテーマ
		特に記載する事項はない	

(7) マスメディア等への公表・報道等

成果 番号	発表 年度	成果 情報	主たる サブテーマ
		特に記載する事項はない	

(8) 研究成果による受賞

成果 番号	発表 年度	成果 情報	主たる サブテーマ
50	2024	Best Presenter: Rossita A., Masui T. (2024) Socioeconomic Impacts from Shifting to Sustainable Food Consumption towards Indonesia's Net Zero Emission. 10th International Conference on Low Carbon Asia (ICLCA).	1

(9) その他の成果発表

成果 番号	発表 年度	成果 情報	主たる サブテーマ
51	2022	第8回NIES国際フォーラム / 8th International Forum on Sustainable Future in Asia - How has Asia-Pacific Integrated Model committed to decarbonization? -を、日本ASEAN友好協力50周年記念事業の一環として地球環境戦略研究機関と共同で開催し、本研究課題の成果も含めたアジアでの気候中立社会の実現に向けた取り組みについて報告、情報共有を行った。 日程：2023年2月16日13:30～17:40 会場：オンライン 開催報告： https://www.nies.go.jp/event/forum/2022/syosai.html	1
52	2022	第28回AIM国際ワークショップでの情報共有 日程：2022年9月13-14日 会場：オンライン 開催報告： https://www-iam.nies.go.jp/aim/aim_workshop/aimws_28/aimws_28_j.html	1
53	2023	第29回AIM国際ワークショップでの情報共有 日程：2023年9月14-15日 会場：国立環境研究所＋オンライン 開催報告： https://www-iam.nies.go.jp/aim/aim_workshop/aimws_29/aimws_29_j.html	1
54	2024	AIM and LoCARNet Peer-to-Peer Meeting for Sharing Experience and Lessonsを開催し、AIMを用いた気候政策の評価を実施してきたタイやインドネシアと、これからAIMを適用する国々（バングラデシュ、ベトナム、フィリピン等）との間の意見交換の場を設定。 日程：2024年8月27日14:00-17:15 会場：国立環境研究所	1

55	2024	第30回AIM国際ワークショップでの情報共有 日程：2024年8月28-29日 会場：国立環境研究所+オンライン 開催報告： https://www-iam.nies.go.jp/aim/aim_workshop/aimws_30/aimws_30_j.html	1
----	------	---	---

権利表示・義務記載

特に記載する事項はない。

この研究成果報告書の文責は、研究課題に参画した研究者にあります。
この研究成果報告書の著作権は、引用部分及びERCAのロゴマークを除いて、原則的に著作者に属します。
独立行政法人環境再生保全機構（ERCA）は、この文書の複製及び公衆送信について許諾されています。

Abstract**[Project Information]**

Project Title : Research on Quantification of Roadmap Toward Climate Neutral Society in Asian Developing Countries

Project Number : JPMEERF20221002

Project Period (FY) : 2022-2024

Principal Investigator : Masui Toshihiko

(PI ORCID) : ORCID0000-0003-0497-1368

Principal Institution : National Institute for Environmental Studies
16-2, Onogawa, Tsukuba, Ibaraki, 305-8506 JAPAN
Tel: +81-29-850-2524
E-mail: masui@nies.go.jp

Cooperated by : Ritsumeikan University, University of Tokyo

Keywords : Asia, Climate Neutral Society, Integrated Assessment Model, Roadmap, Assessment of Climate Change Mitigation Measures

[Abstract]

In order to realize the 1.5°C target agreed to in the Paris Agreement, not only developed countries but also developing countries are required to make efforts to contribute to a climate neutral society. The Plan for Global Warming Countermeasures, which was approved by the Cabinet in February 2025, includes “supporting the formulation of long-term strategies and revision of NDCs using the Asia-Pacific Integrated Model (AIM)” as part of Japan's support for developing countries, and calls for the development of models that contribute to the evaluation of climate mitigation policies in each country and analyses based on these models.

In this research project, based on the framework of the AIM, we have developed a power plan model, a transport model, and a food demand model for Asian developing countries to enable social implementation of measures in highly important areas such as power generation, transportation, and food, in addition to the evaluation of macro climate mitigation measures.

These newly developed models were applied to Thailand, Indonesia and other countries in collaboration with researchers in these countries, and were also used in conjunction with the integrated models, the technology selection model, named AIM/Enduse model, and the computable general equilibrium model, named AIM/CGE model. Then, quantitative analyses have been conducted on the contribution of each sector's efforts toward a climate neutral society in each country.

Some of the results have been provided to national governments through collaborating researchers in those countries. For example, in the case of Thailand, some of the results of this study were cited in the long-term strategy and the biennial transparency report submitted to the UNFCCC

in 2022 and 2024, respectively.

In addition, training workshops were held to apply the models to various countries, and manuals were developed to make it possible to apply the models to other countries. In collaboration with the Ministry of the Environment, discussions have been initiated for application of the models to other countries, such as Bangladesh and Vietnam.

This research was performed by the Environment Research and Technology Development Fund (JPMEERF20221002) of the Environmental Restoration and Conservation Agency provided by Ministry of the Environment of Japan.