

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

2-1908

アジアにおける温室効果ガス排出削減の深掘りと
その支援による日本への裨益に関する研究
(JPMEERF20192008)

令和元年度～令和3年度

Assessment of Further Reduction of GHG Emissions in Asian Countries and
Benefit to Japan by Assisting their Reduction Efforts

〈研究代表機関〉

国立研究開発法人国立環境研究所

〈研究分担機関〉

京都大学

立命館大学

みずほリサーチ&テクノロジーズ(株)

〈研究協力機関〉

東京工業大学

国家発展と改革委員会エネルギー研究所

北京大学

北京航空航天大学

中国科学院広州エネルギー研究所

アーメダバード大学

インド経営大学院アーメダバード校

モーラーナ・アザット国立工業大学

インド統合システム分析研究所

タマサート大学 シリントーン国際工学部

ボゴール農業大学

バンドン工科大学

マレーシア工科大学

自然資源環境戦略政策研究所

アジア工科経営大学

工業技術研究院

国際応用システム分析研究所

令和4年5月

目次

I. 成果の概要	1
1. はじめに（研究背景等）	
2. 研究開発目的	
3. 研究目標	
4. 研究開発内容	
5. 研究成果	
5－1. 成果の概要	
5－2. 環境政策等への貢献	
5－3. 研究目標の達成状況	
6. 研究成果の発表状況	
6－1. 査読付き論文	
6－2. 知的財産権	
6－3. その他発表件数	
7. 国際共同研究等の状況	
8. 研究者略歴	
II. 成果の詳細	
II－1 2℃目標の達成に向けたアジア主要国での温室効果ガス排出削減の深掘りの効果と 日本への波及効果の定量化 （国立研究開発法人国立環境研究所、京都大学）	17
要旨	
1. 研究開発目的	
2. 研究目標	
3. 研究開発内容	
4. 結果及び考察	
5. 研究目標の達成状況	
6. 引用文献	
II－2 2℃目標の達成に向けたアジア主要国における温室効果ガス排出削減の深掘りに向けた技術と そのポテンシャルの定量化 （京都大学、みずほリサーチ&テクノロジーズ(株)）	31
要旨	
1. 研究開発目的	
2. 研究目標	
3. 研究開発内容	
4. 結果及び考察	
5. 研究目標の達成状況	
6. 引用文献	

Ⅱ－3 2℃目標の達成から見たアジア主要国における排出削減目標の深掘りの国際的な効果

・・・・・・・・・・ 42

(京都大学、立命館大学)

要旨

1. 研究開発目的

2. 研究目標

3. 研究開発内容

4. 結果及び考察

5. 研究目標の達成状況

6. 引用文献

Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細

・・・・・・・・・・ 54

Ⅳ. 英文Abstract

・・・・・・・・・・ 66

I. 成果の概要

課題名 2-1908 アジアにおける温室効果ガス排出削減の深掘りとその支援による日本への裨益に関する研究

課題代表者名 増井 利彦 (国立研究開発法人国立環境研究所社会システム領域 領域長)

重点課題 主：【重点課題⑥】気候変動の緩和策に係る研究・技術開発
副：【重点課題⑤】低炭素で気候変動に柔軟に対応する持続可能なシナリオづくり

行政要請研究テーマ（行政ニーズ） 非該当

研究実施期間 令和元年度～令和3年度

研究経費

108,000千円（合計額）

（各年度の内訳：令和元年度：36,000千円、令和2年度：36,000千円、令和3年度：36,000千円）

研究体制

（サブテーマ1）2℃目標の達成に向けたアジア主要国での温室効果ガス排出削減の深掘りの効果と日本への波及効果の定量化（国立環境研究所、京都大学）

（サブテーマ2）2℃目標の達成に向けたアジア主要国における温室効果ガス排出削減の深掘りに向けた技術とそのポテンシャルの定量化（京都大学、みずほリサーチ&テクノロジーズ(株)）

（サブテーマ3）2℃目標の達成から見たアジア主要国における排出削減目標の深掘りの国際的な効果（京都大学、立命館大学）

研究協力機関

東京工業大学、国家発展と改革委員会エネルギー研究所、北京大学、北京航空航天大学、中国科学院広州エネルギー研究所、アーメダバード大学、インド経営大学院アーメダバード校、モラーナ・アザット国立工業大学、インド統合システム分析研究所、タマサート大学シリントーン国際工学部、ボゴール農業大学、バンドン工科大学、マレーシア工科大学、自然資源環境戦略政策研究所、アジア工科経営大学、工業技術研究院、国際応用システム分析研究所

本研究のキーワード 気候変動緩和策、アジア、統合評価モデル、将来シナリオ、経済影響

1. はじめに（研究背景等）

パリ協定の実施に向けて、国際的には長期低炭素発展戦略の作成、グローバルストックテイクや各国の温室効果ガス（GHG）の排出削減目標（NDC）の見直しなどが求められている。特に、パリ協定で示された「2℃目標」や「1.5℃目標」の実現には、各国が既に提示したNDCの水準では不十分であり、温室効果ガス排出削減目標の深掘りが求められている。今後の温室効果ガス排出量の大幅な増加が見込まれるアジアでも、中国やインドなど既に温室効果ガス排出量の多い国をはじめとして経済発展と排出削減の取り組み強化の両立が求められているが、タイ、インドネシア等では、各国独自で行う削減目標に

加え、国際的な支援が得られる場合の削減目標も掲げており、日本等からの技術支援が期待されている。

一方、日本では、第五次環境基本計画での重点戦略として、「持続可能な生産と消費を実現するグリーンな経済システムの構築」や「国際貢献による我が国のリーダーシップの発揮と戦略的パートナーシップの構築」を挙げており、未来投資会議においても途上国を巻き込んだ環境と経済の好循環への転換が指摘されている。これらは、日本のグリーン製品や環境インフラが、人材育成や制度設計とあわせてアジアに普及することで、環境改善や緩和策の促進とその基盤整備を実現し、環境ビジネスの拡大とともに持続可能な社会をアジアで目指したものである。日本における取り組みや技術が、アジア各国の取り組みにどのように貢献し、また、アジアでの取り組みが日本の環境改善や経済活動にどのようにフィードバックするか、更には世界全体の2℃目標や1.5℃目標の実現にどのように貢献するかを定量的に示すことは、日本がアジアにおいて緩和策に積極的に取り組む上で重要な情報となる。

2. 研究開発目的

本研究では、中国やインド等の大国に加えて、タイ、インドネシア等のアジアの国々を対象に、温室効果ガス排出削減目標の深掘りと経済発展に向けてわが国の技術がどのように貢献するか、アジアでの活動が日本の環境及び経済活動にどのような裨益をもたらすか、さらにはわが国の技術がアジアを通じて2℃目標や1.5℃目標の実現にどのように貢献するかについて、対象国が重要と認識する課題にあわせてモジュールの追加を行い、更新したモデルを用いて定量的に明らかにすることを目的とする。これらの分析結果をもとに、対象国の専門家との議論も行い、政策2℃目標や1.5℃目標の実現に向けた具体的なロードマップの提示を行う。

具体的には、上記の国々を対象としたスナップショットツール、技術選択モデル、応用一般均衡モデルの開発を行い、これらのモデルを用いて各国のNDCの達成に向けた取り組みや長期低炭素発展戦略における排出削減目標の可能性について定量的に評価を行う。また、あわせて、条件付きの排出削減目標において、日本の技術によって取り組む場合に、日本にどのような影響がもたらされるかについて明らかにする。さらに、こうした取り組みが世界全体の2℃目標や1.5℃目標の実現に向けてどのような影響を及ぼすかについても明らかにする。図2.0.1に本研究課題の全体構造を示す。

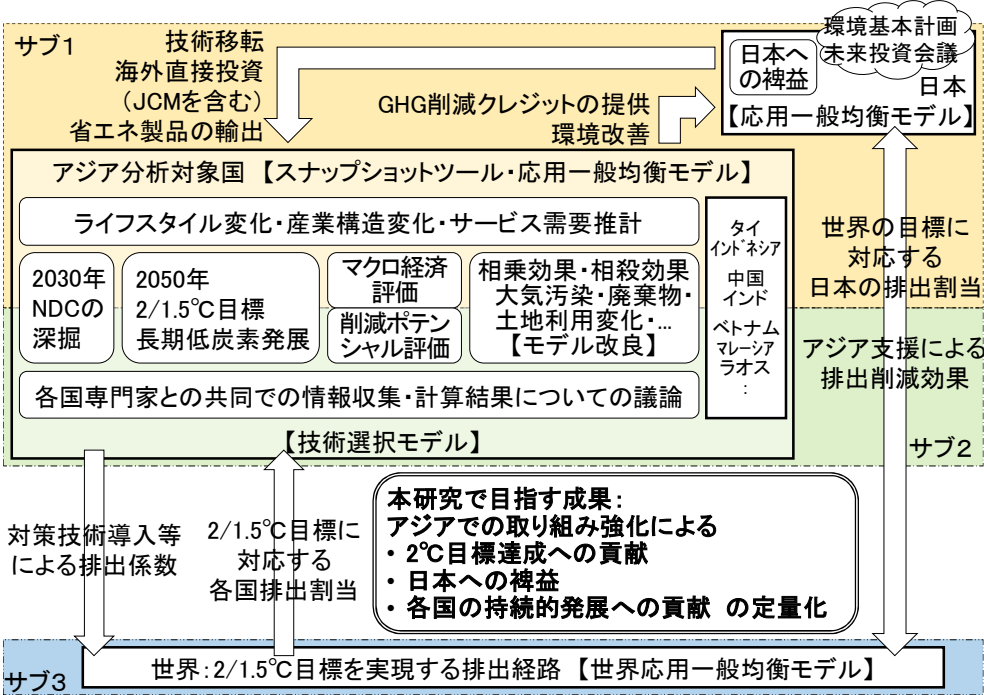


図2.0.1 本課題の全体構造

3. 研究目標

全体目標	本課題の研究目標は、分析対象とするアジアの国々において、現在定められている2030年を対象とした温室効果ガスの排出削減目標（NDC）を深掘りするための技術や取り組み、特に海外からの支援が期待されているものを明らかにし、そうした活動を日本からの支援によって実現する場合の日本への裨益（省エネ製品やインフラ輸出の増加やクレジット獲得を通じた経済活動への影響、各国での環境負荷削減が日本に及ぼす影響など）を定量的に明らかにすることである。
サブテーマ1	2℃目標の達成に向けたアジア主要国での温室効果ガス排出削減の深掘りの効果と日本への波及効果の定量化
サブテーマリーダー/所属機関	増井利彦／国立環境研究所
目標	タイやインドネシアなどの対象国について、社会経済シナリオを定量化することを目標とする。また、対象国の応用一般均衡モデルを用いて、2030年や2050年の取り組みに対する経済的な影響を定量化し、各国の専門家と計算結果の妥当性等について議論を行うとともに、排出削減対策の相互作用や副次効果として、廃棄物処理や土地利用変化などの問題解決への貢献も定量的に明らかにする。さらに、各国に対する技術援助や省エネ技術の輸出、日本の環境改善等を通じた日本への裨益を定量的に明らかにする。
サブテーマ2	2℃目標の達成に向けたアジア主要国における温室効果ガス排出削減の深掘りに向けた技術とそのポテンシャルの定量化
サブテーマリーダー/所属機関	大城賢／京都大学
目標	タイ、インドネシアなどの対象国について、2030年、2050年の技術的な排出削減ポテンシャル、必要となる対策を明らかにすることを目標とする。また、技術選択モデルを用いて、2030年、2050年の技術的な排出削減ポテンシャルを定量化し、各国の専門家と計算結果の妥当性等について議論を行うとともに、排出削減対策の相互作用や副次効果として、大気汚染などの問題解決への貢献も定量的に明らかにする。
サブテーマ3	2℃目標の達成から見たアジア主要国における排出削減目標の深掘りの国際的な効果
サブテーマリーダー/所属機関	藤森真一郎／京都大学
目標	世界を対象とした応用一般均衡モデルを用いて、世界的な目標である2℃/1.5℃目標の実現に対して、各国に必要な排出削減目標を推計し、その情報を各サブテーマに提供するとともに、サブテーマ1及び2から得られる削減ポテンシャルや日本による支援を組み入れた場合の世界への影響について明らかにすることを目標とする。

4. 研究開発内容

サブテーマ1では、サブテーマ2を中心に各国の専門家と共同で収集する将来シナリオや対策技術に関する情報をもとに、エネルギーサービス需要を含む将来シナリオの。また、これまでに開発してきた対象国における応用一般均衡モデルであるAIM/CGEに対して、廃棄物処理などの新たなモジュールの開発を含めたモデルの改良を行い、収集したデータやサブテーマ3から示される2℃目標を実現する排出量を前提とした予備的な試算を行う。改良したモデルをもとに、2030年におけるNDCの深掘りについての評価を行う。特に、対象国において海外からの支援による排出削減の深掘りによるマクロ経済への影響を評価するとともに、日本の削減支援の可能性を踏まえ、そうした技術の輸出や環境改善による日本への裨益を定量的に評価する。さらに、世界モデルから示される2℃/1.5℃目標に対応する2050年を対象とした排出削減目標に対して、改良したモデルを用いて分析を行い、対象国の低炭素発展戦略に関する定量化と日本への裨益を定量的に明らかにする。また、2050年の排出削減目標と整合するような2030年のNDCを明らかにする。

サブテーマ1では、図4.0.1に示すような国を対象とした応用一般均衡モデルAIM/CGE [Country]の開発を対象国別に行い、各国におけるNDCや長期戦略の評価を行う。また、得られた計算結果やモデル分析の意義を、サブテーマ2と連携して各国の政策決定者に提供し、各国における気候変動緩和策の取り組みの支援を行うことを目的としている。また、同じ枠組で開発した日本モデルを用いて、アジアにおける取り組みを日本が技術支援等の形で援助する場合の試算を行う。各国を対象としたモデルでは、各国間でできる限り部門や財を共通化できるようにデータを準備するとともに、各国の特性や関心に応じて部門や財の詳細化を実施する。また、モデル化とあわせて、対象国のNDCや長期戦略に関する情報収集を行い、計算結果の評価についても併せて行った。

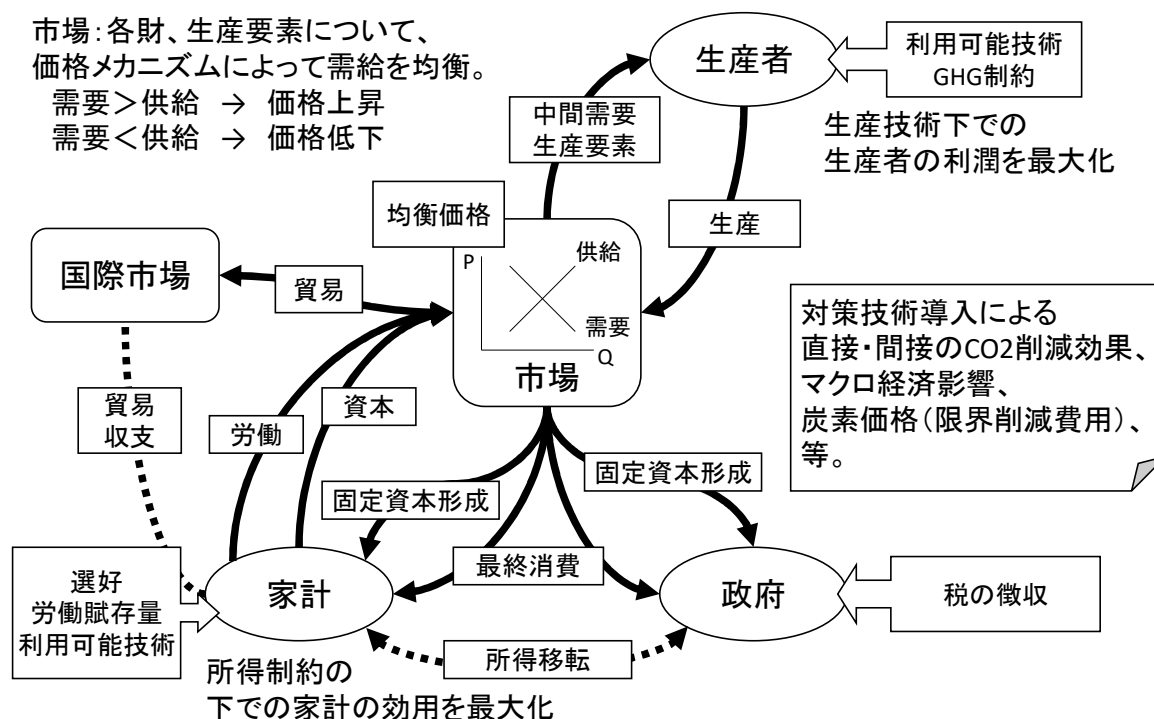
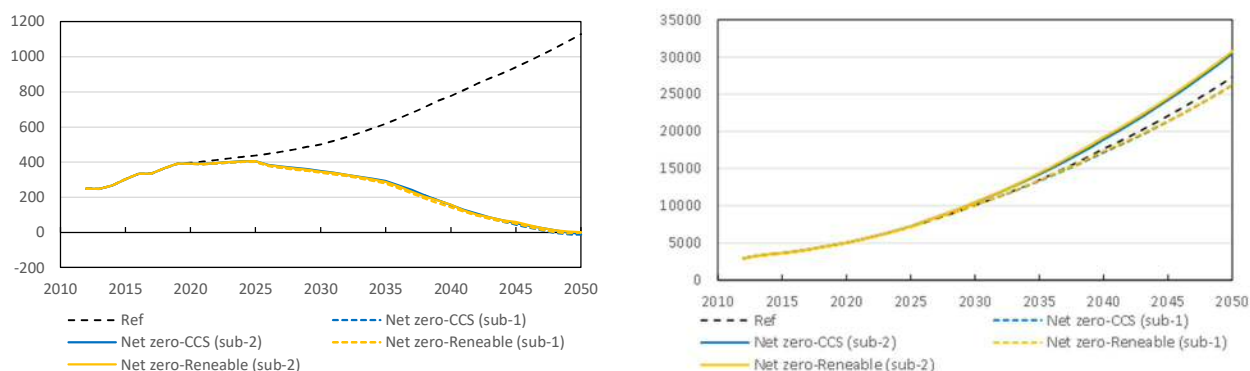


図4.0.1 国を対象とした応用一般均衡モデルAIM/CGE [country]の概要図

ベトナムを対象とした分析では、2050年に温室効果ガス排出量を実質ゼロにするための取り組みを、国内で実施する場合と海外からの資金で行う場合について比較を行った。図4.0.2は、温室効果ガス排出量と実質GDPの推移を示したものであり、対策としては積極的にCCSを導入するNet Zero-CCSと再生可能エネルギーの導入を最大化するNet zero-Renewableの2つを想定している。国内資金のみで排出削減

に取り組むsub-1の場合、2050年の実質GDPはなりゆき（Ref）と比較して3.8-3.9%の低下が確認された。これは、省エネや再エネの導入に必要な費用により、生産活動への投資が低減することによる、一方で、上記に必要な対策が海外からの支援でまかなわれるsub-2の場合、省エネや再エネの導入と生産資本の維持が同時に実現し、2050年には温室効果ガス排出量の実質ゼロを満たしながら実質GDPはなりゆきと比較して6.2%増加する結果となった。なお、こうした経済活動の増加は温室効果ガス排出量の潜在的な増加をもたらすことから、取り組みによっては温室効果ガス排出量が正となり、追加的な対策が必要となり注意が必要である。



温室効果ガス排出量（単位：100万トンCO₂eq）

実質GDP（単位：2012年価格兆ベトナムドン）

図4.0.2 ベトナムを対象としたAIM/CGEモデルによる温室効果ガス排出量と実質GDPの推移

こうした海外からの支援による経済活動の増加は、インドネシアにおける分析においても見られた。このほか、インドネシアにおける定量的な分析においては、再生可能エネルギーを生み出す設備を輸入ではなく自国で生産することによって、国内の生産活動や雇用の拡大にも影響することも示された。脱炭素社会の実現により、現在の化石燃料に関わる活動が衰退するが、そうした雇用の受け皿としてサプライチェーンも含めた再生可能エネルギー事業が重要な役割を担うようになり、公正な移行（Just Transition）の実現に向けても重要となる。

また、日本に対する裨益について、サブテーマ2と協力して、ベトナムの脱炭素社会の実現に必要な家庭部門と運輸部門における省エネ投資を、日本で製造して輸出する場合の効果を明らかにした。家庭部門の対策については、2050年には1.6兆円（2005年価格）の輸出が必要であるが、それに伴って2050年の日本の実質GDPはなりゆきと比較して1.5兆円（2005年価格）の増加となるが、生産活動の増加に伴って温室効果ガス排出量も2.8MtCO₂eq増加する。その結果、日本において2℃目標を達成するためには、GHG価格を5000円/tCO₂増加させる結果となり、実質GDPの増加も1.3兆円（2005年価格）にとどまる結果となった。これに対して、2050年までにできるだけ早期に省エネ技術が普及するように追加対策を進めることで、GHG価格は1000円/tCO₂低下し、実質GDPの増加も1.6兆円（2005年価格）となった。こうしたことから、日本における裨益を最大化するためにも日本での追加的な対策の導入が重要になるといえる。

こうした排出シナリオに関する分析結果を、各国の研究者を通じて政策決定者に提供し、各国の脱炭素社会の実現に向けた議論の基礎として活用されている。図4.0.3に示すタイのほかインドネシアでは、国連に提出された長期戦略にAIMの分析結果が活用された旨が明記され、日本の貢献として認識され、今後も継続して支援することが期待されている。これに対して、2021年10月に閣議決定された地球温暖化対策計画において、「相手国への政策への関与を強化し、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、NDC 改訂支援、民間企業の制度構築及び実施能力向上を支援し、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。」と本研究課題における取り組みが日本の途上国支援として取り上げられている。また、各国における脱炭素に向けた取り組みを効果的、効率的に実施するために、サブテーマ1において国を対象とするモデルだけでなく、地域詳細化したモデルの開発も行

い、地域的な相違を反映した取り組みの重要性を明らかにしている。

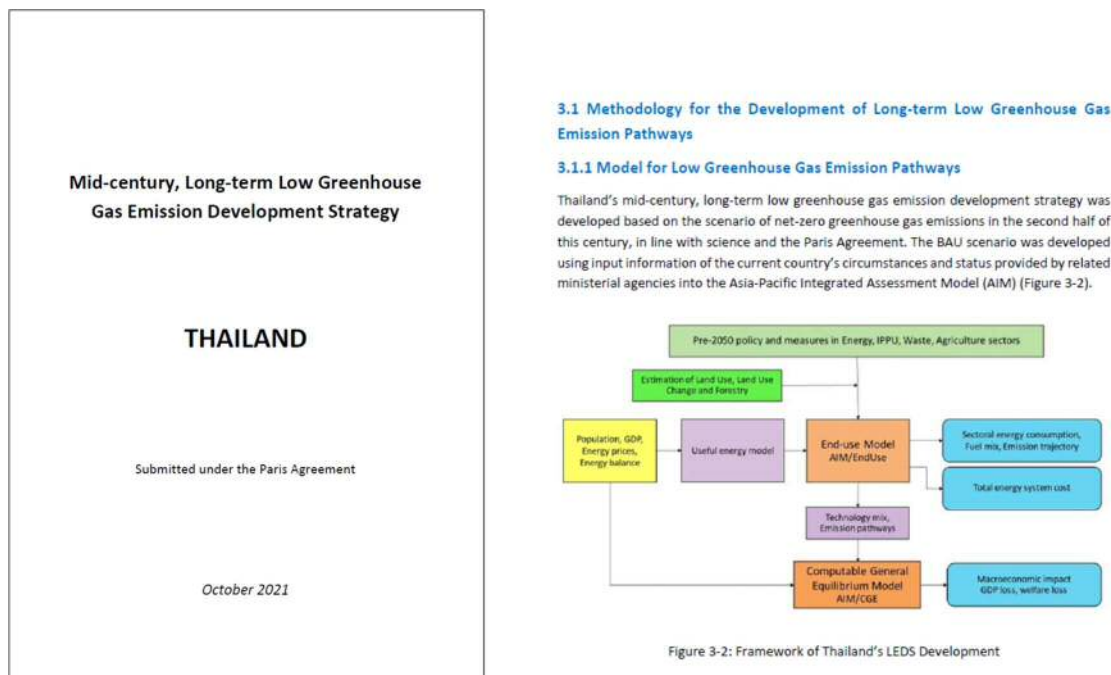


図4.0.3 タイにおける長期戦略とAIMに関する記述

サブテーマ2では主に、2℃目標の達成から見たアジア主要国におけるCO₂排出量推計、気候変動緩和策がもたらすアジア主要国における大気汚染物質の副次削減効果の推計、2℃目標の達成から見たアジア主要国における技術のポテンシャル推計、1.5℃目標に向けた達成に向けたアジア主要国における技術のポテンシャル推計を実施した。

これらの分析においては、技術積み上げ型のエネルギー需給モデルであるAIM/Enduseを用いた。本モデルは、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最適化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、技術ごとのエネルギー消費量を積み上げて対象地域、対象年のエネルギー需給と排出量を推計するフレームワークを持つ。モデルは、その対象地域の社会経済指標（人口、GDPなど）に基づくサービス需要（素材生産量、業務床面積、旅客貨物輸送量など）を所与のインプットとし、エネルギー価格、炭素税、補助金、技術革新による価格低下、エネルギー供給量の制約、CO₂排出量の制約などの複数の制約の下で初期投資額と運転維持費、光熱費などのシステムコストを最小化する。AIM/Enduseの構造模式図は図4.0.4に示す。

また、AIM/Enduseは、エネルギー起源CO₂を中心とする温室効果ガスのほか、SO₂、NO_x等の気体大気汚染物質、ブラックカーボンを含む一次生成の粒子状大気汚染物質の排出量の推計が可能である。大気汚染物質の推計は、発電部門と産業部門のプラントのタービンやボイラーで燃焼生成される大気汚染物質に対して「排煙脱硝装置」「集塵装置」「排煙脱硫装置」を介して回収する推計フローを採用し、推計を行っている。

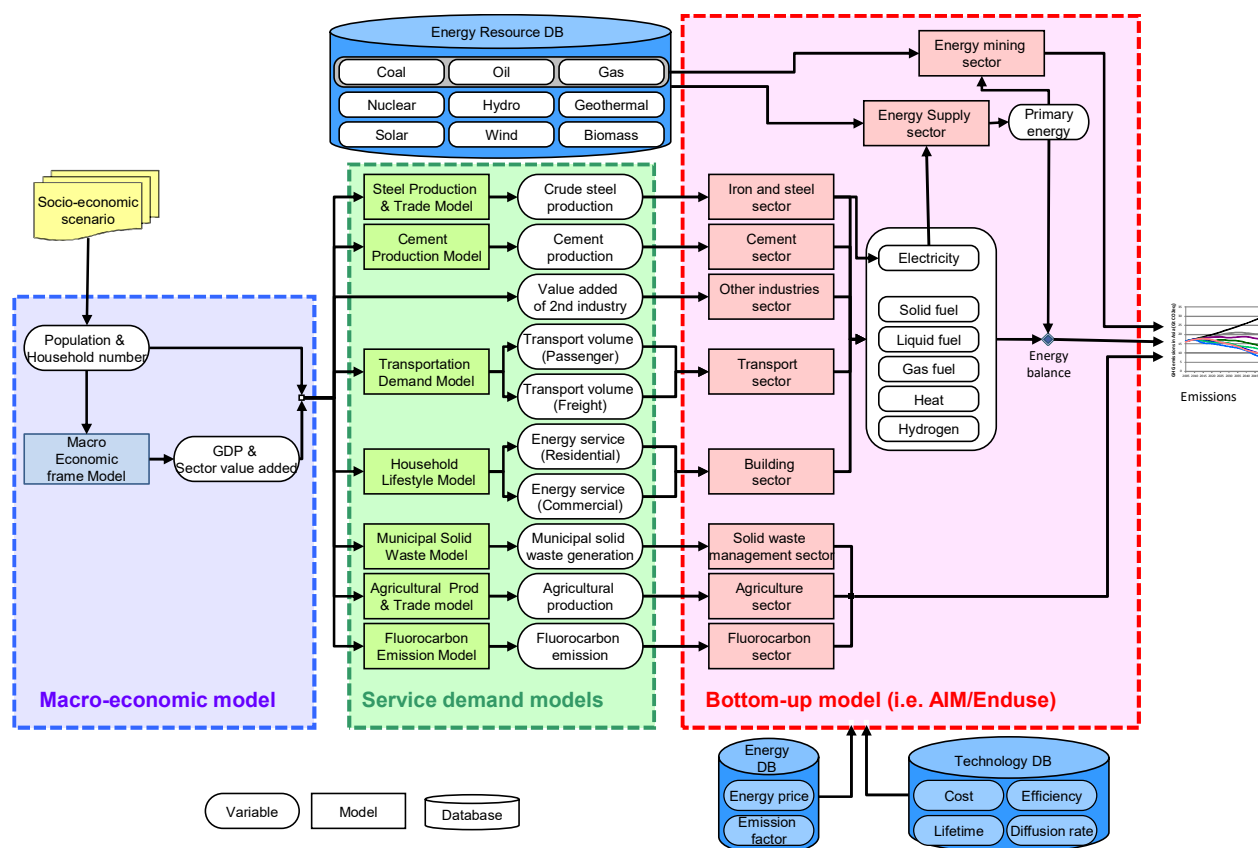


図4.0.4 技術積み上げ型モデルAIM/Enduseの構造図

本課題ではAIM/Enduseを用いて、中国、インド、タイ、インドネシア、ベトナムの2050年までの排出シナリオの定量化と、それに伴い算定される省エネ・脱炭素技術による削減貢献量、各技術で見込まれる投資額の推計を実施した。排出量推計の対象をCO₂、推計の基準年を2015年とし、現行施策シナリオ（現在各国で導入されている、あるいは国家計画の中で今後の導入が見込まれる政策のみを考慮した、BAU（Business as usual、なりゆき）と、対策シナリオ（世界全体での平均気温上昇を産業革命前と比べて2℃以内に抑える可能性が高いシナリオをベースに、アジア主要各国の排出シナリオとしたもの。サブテーマ1、3とも整合）の定量化を行った。推計に際しては、収集した各国データ等をもとに、基準年として2015年の足元の技術情報とエネルギーバランス実績の整合を図る等、技術選択モデルの改良も併せて行った。現行施策シナリオと対策シナリオの比較を行うことで、発電、産業、民生、運輸の各部門の対策が各国の脱炭素化に向かう排出パスにもたらす影響を分析した。また、CO₂削減に向けた各国の気候変動緩和策がもたらす副次的な大気汚染物質の削減効果の定量化も併せて実施した。

技術選択モデルのインプットとなる、各国の2050年までのエネルギーサービス需要については、SSPシナリオ（Shared Socioeconomic Pathways、共通する社会経済シナリオ）から、検証する現行施策及び対策シナリオの社会経済動向として、どちらもSSP2をベースとしたシナリオを用い、各種活動量とそれに基づくエネルギーサービス需要を計算して使用した。SSP2は、中庸的な社会経済を描写するシナリオに相当する。

SSP3シナリオ・・・教育水準、ガバナンスともに低水準であり、途上国と先進国の格差は拡大する。技術水準は低く、国際社会は分断されている。出生率は下がり人口は21世紀を通して増加する。適応策は困難であり、かつ温室効果ガス排出量も増大し、緩和策の導入は困難となる。

SSP1シナリオ・・・教育水準、ガバナンスともに高水準であり、国際的に協調し、その結果技術進歩も高い。教育水準の向上に伴い出生率は下がり、人口は低位で推移する。高い教育水準は適応策を容易にするとともに、高い技術水準が温室効果ガス排出量を低下させ、緩和策も比較的容易に行える。

SSP2シナリオ・・・SSP1とSSP3の間に位置する中庸的な世界。

また、2℃目標の達成に向けて導入が見込まれる対策技術について、中国、インド、タイ、インドネ

シア、ベトナムのカウンターパートの研究機関である国家発展改革委員会エネルギー研究所（中国）、北京工業大学（中国）、国立マウラナアザド国立研究所（インド）、アーメダバッド大学（インド）、タマサート大学（タイ）、バンドン工科大学（インドネシア）、天然資源環境戦略研究所（ベトナム）に情報収集を依頼し、ストック技術の効率や価格、普及率に関する情報を整理した。またこれらの研究機関とは、提供された足元技術データを用いて実施した後述の排出量や対策の追加的投資額の推計の検証においても協働した。

将来技術はIEAのETP等の情報から作成した各国共通データをベースとしつつ、今回は「日本への裨益」の観点から、将来年の技術については、国内の政府見通し資料や学術論文、商品カタログ等から日本の技術のデータ（機器効率、機器コスト）を収集整備し、推計に適用して排出量や削減ポテンシャル、投資額の推計に適用した。具体的には表4.0.1に赤字で示す次世代自動車、空調や給湯器をはじめとする家庭・業務用の電子機器、ボイラーや工業炉など産業部門で横断的に用いられる汎用技術について更新を行った。

表4.0.1 AIM/Enduseの対策シナリオ分析で考慮した主な省エネ・脱炭素技術

エネルギー起源CO ₂	エネルギー転換部門	石炭・ガス火力(高効率)、CCS付石炭・ガス火力、水力、風力、太陽光、地熱、バイオマス、地域熱供給(高効率、再エネ)、水素(ガス、再エネ)、廃棄物発電
	運輸部門	ハイブリッド車、プラグインハイブリッド車、電気自動車 CNG自動車、燃料電池自動車、ハイブリッドバス、EVバス 電化鉄道、航空機(高燃費)、船舶(高燃費) バイオ混合燃料(ガソリン・ディーゼル・ジェット・重油)
	家庭・業務部門	断熱材、ヒートポンプ給湯機、ヒートポンプ空調、エアコン(高効率)、ガス調理器(高効率)、電気調理機、LED照明、テレビ・冷蔵庫等家電製品(高効率)
	産業部門	高効率製鉄プロセス、電炉製鉄、高効率セメント製造プロセス(キルン)、産業CCS(製鉄・セメント製造)、ボイラー(高効率)、産業用ヒートポンプ 高効率工業炉、電気工業炉、高効率モーター、インバーター
その他GHG		農林水産業、廃棄物処理、Fガス等への諸対策
大気汚染物質		排煙脱硫装置、脱硝装置、集塵装置

ここまでで整理した各国の社会経済シナリオを前提に、AIM/Enduseを用いて対策技術のコスト最小化の下での導入量を推計し、中国、インド、タイ、インドネシア、ベトナムの2050年までの排出シナリオの推計を実施した。特に2℃目標相当に該当する対策シナリオは、グローバルで見たときの排出量がRCP2.6に相当し、特に対策として再生可能エネルギーの導入と業務・家庭・運輸部門での電化を優先的に促進するようなシナリオを想定した。この時に必要となる炭素価格は推計の結果、400USD/tCO₂相当となる。さらに、対策シナリオと現行施策シナリオの排出量を比較することによって、発電、産業、民生、運輸部門での気候変動緩和策が、各国の排出量の低減に与える寄与についても定量的な分析を実施した。更に、大気汚染物質としてSO₂とOM_{2.5}に着目し、対策シナリオで実施する再エネ導入・電化促進を主とする気候変動緩和策によって副次的に得られる、大気汚染の低減効果についても、発電、産業、民生、運輸部門での寄与が見える形で定量的に推計した。これらの結果を①2℃目標の達成から見たアジア主要国におけるCO₂排出量推計、②気候変動緩和策がもたらすアジア主要国における大気汚染物質の副次削減効果の推計、③2℃目標の達成から見たアジア主要国における技術のポテンシャル推計として考察を行った。

更に、1.5℃目標に向けての分析について、以下を実施した。まず中国とインドについて、革新技術のモデルへの組み込みを実施した。これらの国は、2050年においても産業部門、特に鉄鋼の製造に要するエネルギー消費量が大きく、また家庭、業務部門で都市ガスを含む化石燃料の消費が残ることから、水素還元製鉄技術と、CCSを活用した気体燃料の合成技術を2040年以降に見込み、1.5℃目標に向けたこれらの技術による2050年までの深掘りポテンシャルを定量化した。タイとインドネシアについては、

ASEAN諸国の中でも先立って、2021年に長期戦略を策定し、UNFCCCへ提出した。これらの国の長期戦略に記載される電源構成などを参考に、2℃目標相当シナリオから更に削減を深掘りしたケースの排出パスの推計を実施した。ベトナムについては、天然資源環境戦略研究所とも連携を行い、ベトナム政府が2021年10月に公表した2045年までの電力のマスタープランの計画について、2050年以降早期のカーボンニュートラルに向かう排出パスとの比較を行うことで、現行電源計画の考察を行った。

サブテーマ3では主として3つの事項を実施した。第一に、これまで開発してきた世界応用一般均衡モデルを用いて、世界を対象とした温室効果ガス排出経路を推計し、世界及びアジアにおける温室効果ガス排出量やエネルギーシステムに関連する指標を定量化することである。第二に、衡平性を考慮した複数のエフォートシェアの概念および上記の世界の温室効果ガス排出経路を用いて、アジア各国の排出経路を提示することである。なお、ここでエフォートシェアは、削減能力、責任などを考慮したものである。第三は、IPCCなどで用いられる統合評価モデルを用いたシナリオの設計に関する提案で、グローバルシナリオの今後の在り方の一つを提案した。第三の作業は当初想定していなかったが、課題途中にIPCCの1.5℃に関する特別報告書が出版され、第6次評価報告書全体にかかわる統合評価モデルのシナリオの問題は深刻であると判断されたので、緊急に作業として取り組むこととした。実際にその成果は第6次評価報告書に適切に反映され、IPCCの報告書全体に大きな影響を与えることとなった。

第一の作業の推計には世界応用一般均衡モデルを用いた。本研究では世界応用一般均衡モデル AIM/CGE (Computable General Equilibrium) モデルを用いてシナリオの定量化を行った。AIM/CGEにより得られたガス別の排出量を簡易気候モデルであるMAGICC (Model for the Assessment of Greenhouse-gas Induced Climate Change) に入力し、全球平均気温など気候情報を得る。パラメータはRCPs (Representative Concentration Pathways) 作成時に用いられたパラメータ設定をそのまま使用し、気候感度は3℃を使用した。シミュレーションは2005年から2100年までの全世界を対象とした。本研究では緩和策シナリオを扱うが、いずれの緩和策シナリオも世界全体で共通のGHG排出価格が課される。そのGHG排出価格はGHG排出税としてすべての排出に課税され、その税収はその国の家計が全額を受け取ると仮定する。本研究では排出権取引を想定していないが、現実には排出権取引が国際制度の基ある程度実施され、それに伴い資金フローも新たに発生すると考えられるが、本研究ではそれらの効果の分析は対象外とする。エネルギーの最終消費部門はこの温室効果ガスに対する課税により、省エネ化と低炭素排出のエネルギー源へシフトする。一方発電部門も同様に化石燃料火力発電は相対的に発電費用が高くなり、再生可能エネルギーや原子力発電へとシフトしていく。ただし、火力発電、バイオマス発電などでは炭素隔離貯蔵(CCS)の導入が可能であり、炭素価格に応じてCCSの導入比率が決定される。CCSの導入は、CCSサービスを提供する産業を仮定し(生産構造はIEA(2008)を基に作成)、そのサービスを各種発電部門が中間投入とするとした。土地利用についてはGHG排出価格が土地の炭素ストックに応じて価値を持ち地代に追加されるとして、土地利用変化に伴うCO₂排出が減少するように定式化した。その他の非エネルギー起源排出に対しては、限界削減費用曲線を導入して、炭素価格に応じて削減が行われる。非CO₂の排出量については大規模事業者に対しては排出量の報告義務などを通じて課税できると思われるが、小規模事業者、特に個別農業者に対して課税するのは現実的には難しい可能性があることには留意する必要がある。

モデルは既存のものをベースとしてさらに以下の改良を行った。1)モデル内での電力部門の発電容量の物理量を明示的に表せるようにする。2)発電容量、設備稼働率、費用等を2005-2010年の推計期間を用いてキャリブレーションを行う。3)IEAのエネルギーバランス表との整合性を図るために2005-2010年の期間で、エネルギー消費強度、燃料消費割合、並びに発電の電源シェアを表すパラメータを内生的に決定する。これにより、直近年のエネルギー消費量や温室効果ガス排出量が報告値と近いものとなる。シナリオは以下の4つを想定する。①気候変動緩和策を実施しないいわゆるベースラインシナリオ(Baseline)、②パリ協定で提出された国別の約束草案(NDC)ベースの政策を2030年付近まで実施し、その後同程度の緩和と努力(2030年と同一の炭素価格)を続けるシナリオ(NDC)、③2030年まではNDCで、それ以降全世界が共通の炭素価格のもと2℃目標を目指して気候変動対策を実施するシナリオ

(NDC_2D)、④NDCより強度の強い緩和策を2020年より全世界が共通の炭素価格のもと実施するコスト費用効果的な2℃目標へ向かうシナリオ (Opt_2D) である。これらの計算では各サブで得られる各国のエネルギー情報や国別排出目標等の情報を参考にモデル内パラメータを決定した。

世界全体のエネルギー供給部門における投資額（追加的に配備される資本による投資）はBaseline、NDC（2030年に各国のNDC目標を達成）と2℃目標シナリオでおおよそ異なる傾向を示す。図4.0.5に示すように、前者は2100年までの期間においてエネルギー供給量とほぼ似たような増加率2.3倍となる一方、2℃目標シナリオはエネルギー供給量よりも大きな増加率となり、約4倍（2兆ドル）となる。これはGDPに対して約2.5%を占める。なお、GDP比で2010年と2℃目標下の2100年を比較すると、両者はほぼ同程度である。これは、技術進歩などによりエネルギー強度がBaselineにおいても着実に下がっていくためである。

2℃目標下 (Opt_2D) の地域別の情報を見ると、図4.0.5からおおよそどの地域でも投資額は増加することがわかる。このうち、日本を除くアジア（図4.0.5のASIA）についてみると2050年において約1.7兆ドルと現在の日本のGDPの約3分の1を占めている。このうち大部分は発電由来であり、エネルギー投資という観点からは世界全体としてもいえることであるが、アジアにも大きな可能性があることがわかる。

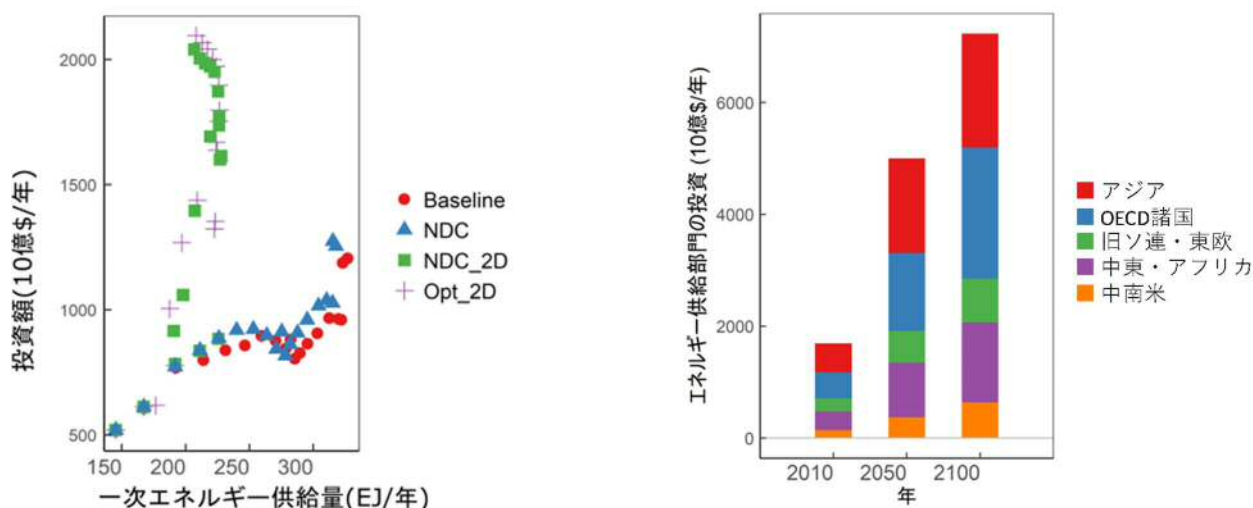


図 4.0.5 世界全体の一次エネルギー供給量（左）と NDC_2D における地域別エネルギー投資の関係（右）

第二の作業のために、エフォートシェアを計算するツールの開発を行った。エフォートシェアとは、産業革命以降の気温上昇を2℃あるいは1.5℃未満に抑制するために必要な温室効果ガス排出削減量を、一定の基準により公平に国別に割り当てる考え方である。既存文献の研究によると、エフォートシェアを各国に配分するルールは以下の表4.0.2に示す7種類に大別される。本作業ではこの7種類のうちCost Optimalを除く6種類のルールによるエフォートシェアを計算するツールを作成した。またエフォートシェアの割り当ての方法として、2℃目標/1.5℃目標の達成にあたって排出が可能な残りのCO₂または温室効果ガスの排出総量を国別に配分する「カーボンバジェット (Carbon Budget)」と、同目標の達成に向けたグローバルの削減シナリオに基づいて年毎の排出量を配分する「排出経路 (Emission Pathway)」の2通りがある。本研究で作成したツールでは6種類の各ルールにつきカーボンバジェットと排出経路の双方を計算可能である。ただし、「Equal cumulative per capita emissions」のルールについては、カーボンバジェットのみを対象とした。

表4.0.2 エフォートシェアの考え方

ルール	原則	正当化の根拠	配分方法
Grandfathering (GF)	Sovereignty 領有権	これまでに構築された文化や慣習として正当化される既得権	現状の排出量シェアで配分
Immediate per capita convergence (IEPC)	Equality 平等	すべての人間が平等な価値、権利を有する	人口の比率で配分
Per capita convergence (PCC)	Sovereignty/Equality 領有権/平等	GFとEqualityの組み合わせ	現状の排出量シェアと人口シェアの両方を勘案して配分
Equal cumulative per capita emissions (ECPC)	Equality/Responsibility 平等/責任	先進国が既に世界全体の排出枠を過度に使用している	一定期間の累積1人当たり排出量をもとに配分
Ability to pay (AP)	Capability/Need 能力/ニーズ	支払い能力	ベースライン排出量と削減目標との差を1人当たりGDPで配分
Greenhouse development rights (GDR)	Responsibility/ Capability/Need 平等/責任/ニーズ	尊厳ある持続可能な人間開発の水準に達する権利の保護	ベースライン排出量と削減目標との差をResponsibility-Capacity Indexに基づき配分
Cost-optimal (CO)	費用対効果	限界削減費用曲線により費用最小化	各国の限界削減費用をもとに世界全体で費用が最小になるように配分

図4.0.6にアジアの主要国、具体的には日本、中国、韓国、インド、インドネシア、タイの例を示す。例えば、IEPC（即時的に一人当たり排出量の均等化）であれば、日本は10 GtCO₂強程度しかバジェットがなく、現状の排出量を考えると10年もするとこれを消費してしまうということになる。最も大きなバジェットはGF（グランドファザリング）であるが、それでも30GtCO₂程度である。一方、GDR（温室効果開発権）では負値となっている。一般的にこのスキームは、所得が高い国に対して厳しいものであり、日本もその例外ではない、といった解釈が可能である。一方、インドはバジェットの許容量が比較的大きくあり、最も小さいものは30～40年程度であるが、最も長いGDRでは150年以上となっている。サブテーマ3からはこれらをアジア各国についてのデータをサブテーマ1、2へデータを提供した。

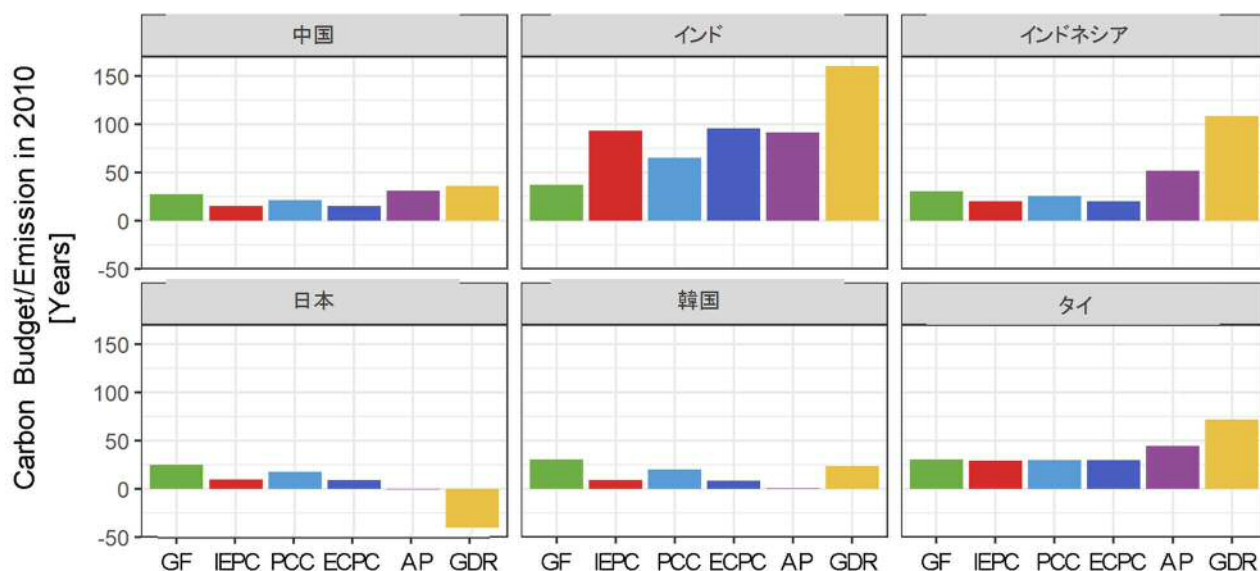
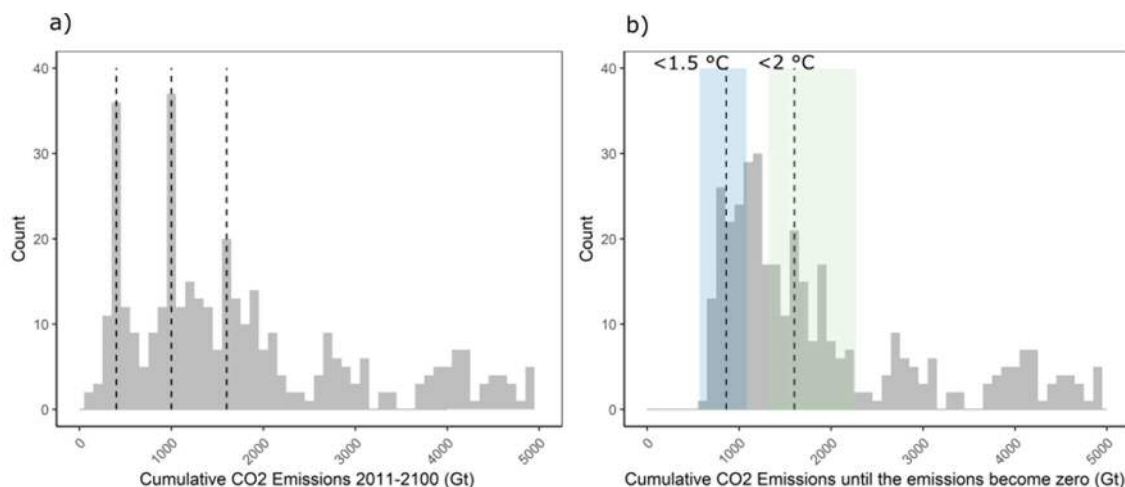


図4.0.6 アジアの主要国のカーボンバジェットの計算結果

第三の作業では、IPCCの1.5℃特別報告書の問題点を指摘し、新しいシナリオの提案を行った。具体的には図4.0.7のa)は1.5℃報告書で収録された統合評価モデルのカーボンバジェット別シナリオの頻度分布で、ある特定のバジェット、400、1000、1600GtCO₂付近に集中していることがわかる。これは1.5℃目標の定量化にあたって主要なモデル比較プロジェクトが特定のバジェットを決め打ちしてシナリオを定量化した結果である。もしカーボンバジェットの量がもう今後動かない非常に頑健な数値であればこれでも良いが、第6次評価報告書では気候モデルの結果が収録され、その更新により改定が必要になり、今後も気候モデルの開発改良を通じて、数値は動くものと思われる。こういった不確実性に対

応するには決め打ち的な手法ではなく、広い範囲をカバーできるように気候安定化シナリオは100GtCO₂刻みで多数のシナリオを準備しておき、様々な不確実性に対応できるようにすることを提案した。



2011 年から 2100 年までの累積炭素排出量（パネル a）と、排出量がゼロになるまでの累積炭素排出量（パネル b）の度数分布。パネル a の破線は、過去数年間のコミュニティシナリオの設計に使用された 3 つのレベルの累積 CO₂ 排出量を示している。パネル b の青と緑の範囲は、産業革命以前のレベルに対して温暖化を 1.5℃と 2℃に制限することと一致する炭素バジェットの残り幅を示している。この範囲は、33th から 67th の分布のパーセンタイルにまたがっている。パネル b の破線は、それぞれの中央値推定値。両パネルにおけるシナリオのデータは、IPCC SR1.5 のデータに基づいている。

図 4.0.7 IAM シナリオにおける累積炭素排出量の分布。

5. 研究成果

5-1. 成果の概要

本研究課題では、3つのサブテーマを通じてアジアの主要国における2℃目標や1.5℃目標を達成するような排出経路とその取り組みによる影響について、アジア太平洋地域統合評価モデル（AIM: Asia-Pacific Integrated Model）を用いて定量的に解析を行うとともに、各国の気候変動緩和策に対して情報提供を行ってきた。

サブテーマ1では、国を対象とした温室効果ガス排出削減経路のマクロ経済への影響を定量化するとともに、そうした影響を軽減するための施策の検討と効果を明らかにした。各国による取り組みだけでは経済的な影響が生じるが、先進国からの支援を行うことで経済的にもプラスの効果をもたらしつつ大幅な温室効果ガス排出量の削減が可能となることを示した。また、対策を効果的に導入するために、対象地域を国から州や省に詳細化したモデルの開発を行った。さらには、各国において導入される気候変動対策が日本にどのような影響をもたらすかについて明らかにした。日本の省エネ機器が輸出されることで日本にも経済的便益がもたらされる一方で、活動水準の増加は温室効果ガス排出量を潜在的に増加させることにもつながることから、日本国内においても省エネ技術への早期の置き換えなどの追加対策が必要となることを明らかにした。また、インドネシア及びタイでは、2021年に国連に提出された長期戦略において、本研究課題が開発、改良を行っているAIMを用いて定量化を行ったことが明記され、さらに1.5℃目標の実現に向けた国内議論においても各国研究者がAIMの結果を政策担当者に提供している。また、ベトナムにおいても長期戦略の策定に向けた議論において、AIM/EnduseやAIM/CGEの結果が活用されている。こうした取り組みについて、2021年10月に閣議決定された地球温暖化対策計画の第8章においても、「相手国の政策・制度構築」において「相手国への政策への関与を強化し、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、NDC 改訂支援、民間企業の制度構築及び実施能力向上を支援し、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、モデルや

シナリオ開発に関する人材育成を含めた研究成果の社会実装が期待されている。

サブテーマ2の分析から、中国、インド、タイ、インドネシア、ベトナムで2℃目標相当の排出量シナリオ、NDCから多い国で半減以上の削減深掘りを進める必要があること、2050年断面で見たとき、アジアの2大排出国である中国とインドでは産業部門の排出量が大半を占め、発電部門はほぼゼロエミッション化が進展していることが分かった。さらに1.5℃目標の達成に向けては、エネルギーの供給側では電源構成に占める再エネ比率を9割程度にした上でバイオマスCCSを活用し、需要側では最大限の電化を勧めたうえで、産業部門で一部残る化石燃料起源の排出に対して、CCSの設置と水素還元製鉄や回収したCO₂を活用する気液体燃料の合成技術などの革新技术の導入を行っていく必要があることを示した。気候変動緩和策がもたらすアジア大気汚染物質の副次削減効果の推計については、SO₂では産業・発電部門、PM_{2.5}ではこれに加え民生・運輸部門での脱炭素技術の導入により、2020年頃以降大きく汚染物質を削減できることが分かり、気候変動対策による大気汚染物質の副次削減効果が定量的に示された。また、目標の達成から見たアジア主要国における技術のポテンシャル推計民生部門と運輸部門の電化、省エネ化に伴う今後の対策技術の規模は、排出削減の観点から留まらず、投資額から見た市場規模の観点からもポテンシャルが大きいことが定量的に示された。今後の大幅削減に向け、次世代自動車や空調機器、給湯用ヒートポンプなど、運輸部門と民生部門での日本の技術の導入が期待される。

サブテーマ3では主として3つの成果を得た。第一に、これまで開発してきた世界応用一般均衡モデルを用いて、世界を対象とした温室効果ガス排出経路を推計し、世界及びアジアにおける温室効果ガス排出量やエネルギーシステムに関連する指標を定量化し、将来のアジアで生じるであろう脱炭素関連の投資額を明らかにした。具体的には、日本を除くアジアのエネルギー供給部門の投資についてみると2050年において約1.7兆ドルと現在の日本のGDPの約3分の1を占めている。このうち大部分は発電由来であり、エネルギー投資という観点からは世界全体としてもいえることであるが、アジアにも大きな可能性があることがわかった。その第二は、世界全体の温室効果ガス排出経路をもとにした国別の炭素バジレットの推計を行い、6つのエフォートシェアスキームに基づく炭素バジレットをサブチーム間で共有した。日本においてはいずれのエフォートシェアスキームでも残された炭素バジレットが小さい一方、インドでは大きい値を示し、国によって大きく異なる結果となった。これらは今後の削減負担の在り方を検討する材料であるとともに他のサブテーマの研究実施及び研究成果の解釈に重要な役割を担った。第三に、IPCCの醍醐寺評価報告書や1.5℃特別評価報告書などで用いられてきたグローバルシナリオの問題点と今後の方向性の一つのあり方を提案し、Nature Climate Changeで発表した。その提案は実際にAR6で主として用いられる統合評価モデルシナリオに反映され、グローバルの研究コミュニティ全体へ大きく貢献した。

5-2. 環境政策等への貢献

<行政等が既に活用した成果>

日本におけるNDC（国が決定する貢献）や長期低炭素排出発展戦略（長期戦略）の策定について議論されている総合資源エネルギー調査会基本政策分科会（第44回；2021年6月）において国立環境研究所が報告した「2050年脱炭素社会実現に向けたシナリオに関する一分析」では、本研究で開発している日本を対象としたCGEモデル：AIM/CGE [Japan]の計算結果が、将来の部門別生産の想定として用いられた。また、日本におけるカーボンプライシングの議論に対して、2021年6月に開催された中央環境審議会地球環境部会カーボンプライシングの活用に関する小委員会（第16回）において「AIM/CGE [Japan]を用いたカーボンプライシングの定量化」を報告した。

インドネシア、タイがそれぞれ2021年に国連に提出した長期戦略において、AIMモデルを用いて定量化が行われたことが明記され、長期戦略策定に貢献した。ベトナムについては、第6回日越環境政策対話（2020年8月）や2050年までのカーボンニュートラルに向けた気候変動に関する共同協力計画（2021年11月）において、AIMモデルを用いた研究協力が行われることが覚書に明記され、ベトナムにおける脱炭素シナリオの定量的な結果を提供した。

また、IPCC第6次評価報告書の作成に向けて整備された国別のシナリオデータベースに対して、本研究課題の成果の一部が提供された。

＜行政等が活用することが見込まれる成果＞

2021年10月に閣議決定された地球温暖化対策計画の「第8章 海外における温室効果ガスの排出削減等の推進と国際的連携の確保、国際協力の推進」において、「相手国への政策への関与を強化し、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、NDC 改訂支援、民間企業の制度構築及び実施能力向上を支援し、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。」と本研究で開発を行ってきたAIMモデルを用いた途上国支援に関する活動が明記された。こうしたことから、今後、脱炭素社会の実現に向けた計画策定に貢献することが見込まれ、タイやインドネシアでは既に各国の研究者と連携して定量化を進めている。また、ベトナムについては、前述の覚書に基づいて、2050年温室効果ガス排出量を実質ゼロにするシナリオの定量化を開始しており、このほか、マレーシア、バングラデシュ等からも支援要請を受けている。

5－3．研究目標の達成状況

当初検討していた目標を概ね達成し、さらに追加的に取り組んだ事項についても非常に影響力の大きな成果が得られた。具体的には、タイやインドネシアでは、国別の技術選択モデルであるAIM/Enduseや経済モデルであるAIM/CGEを用いた結果が、各国の2050年を対象とした長期戦略策定に用いられ、さらに1.5℃目標に対応した温室効果ガス排出量の実質ゼロを早期に実現するシナリオの定量化に向けた分析を各国の研究者と共同で進め、政策決定者に提供している。このほか、ベトナムでは、環境省、JICAの支援を受けて、自然資源環境戦略政策研究所と協力して天然資源環境省に対して長期戦略策定に向けた定量シナリオの結果を提供するとともに、2050年の温室効果ガス排出量の実質ゼロに向けた分析を進めている。こうした取り組みの実施について、マレーシアやバングラデシュなど他の国からも同様の要請を受けており、本研究課題を通じて開発したモデルを活用して可能な限り取り組む予定である。

また、AIM/Enduseを用いた分析では、アジア主要対象国での主要2℃及び1.5℃目標の達成から見たアジア主要国におけるCO₂排出量推計、気候変動緩和策がもたらすアジア大気汚染物質の副次削減効果の推計および目標の達成から見たアジア主要国における技術のポテンシャル推計を実施し、2030年、2050年の技術的な排出削減ポテンシャルや見込まれる市場規模、必要となる対策を明らかにした上で、今後の大幅削減に向け、日本の技術の導入に資する分析結果を創出することができた。さらに、これらの結果を各国のAIM/CGEに入力することで、対象国における温室効果ガス排出削減と経済成長を両立させる取り組みについて検討することが可能となった。また、日本を対象としたAIM/CGEに必要な投資額を入力することで、日本が省エネ製品を輸出する場合の経済効果と温室効果ガス排出量の大幅削減に向けた課題を明らかにした。

世界を対象とした分析では、世界応用一般均衡モデルを用いて、世界的な目標である2℃/1.5℃目標の実現に対して、必要となる投資量の推計、並びに各国で必要な排出削減目標を推計した。また、その情報を各サブテーマに提供し、課題全体の目標達成に大きく貢献できた。また、IPCCの第6次評価報告書で用いられた多くのシナリオデータは、本研究成果が提案した統合評価モデルシナリオの枠組みに基づくもので、国際的な統合評価モデリングコミュニティに対して大きな影響を及ぼした。

6．研究成果の発表状況

6－1．査読付き論文

＜件数＞

36 件

＜主な査読付き論文＞

- 1) 藤森真一郎、大城賢、長谷川知子(2019) アジアのエネルギー関連低炭素技術投資の見通し、土木学会論文集G（環境）75(5), I_247-I_254.
- 2) Fujimori, S., Rogelj, J., Krey, V., Riahi, K. (2019) A new generation of emissions scenarios should cover blind spots in the carbon budget space, Nature climate change (IF:25.170), 9, 798-800.
- 3) Boonpanya T., Masui T. (2020) Assessment of Thailand Socio-Economic Impact towards Greenhouse Gas Mitigation Actions in 2030 Using a Computable General Equilibrium Model. Chemical Engineering Transactions (SJRe=0.27 (Q3)), 78, 289-294.
- 4) Li Z., Hanaoka T. (2020) Development of large-point source emission downscale model by estimating the future capacity distribution of the Chinese iron and steel industry up to 2050. Resources, Conservation & Recycling (IF=10.204), 161, 104853.
- 5) Fujimori S., Krey V., van Vuuren D., Oshiro K., Sugiyama M., Chunark P., Limmeechokchai B., Mittal S., Nishiura O., Park C., Rajbhandari S., Silva D., Tu T.T., Zhao S., Ochi Y., Shukla P.R., Masui T., Nguyen P.V.H., Carbados A.M., Riahi K. (2021) A framework for national scenarios with varying emission reductions. Nature Climate Change (IF=21.72), 11 (6), 472-480.

6－2．知的財産権

特に記載すべき事項はない。

6－3．その他発表件数

査読付き論文に準ずる成果発表	0 件
その他誌上発表（査読なし）	15 件
口頭発表（学会等）	81 件
「国民との科学・技術対話」の実施	3 件
マスコミ等への公表・報道等	17 件
本研究に関連する受賞	1 件

7．国際共同研究等の状況

タイについては、タマサート大学シリントーン国際工学部のBundit Limmeechokchai准教授と連携して、タイの長期戦略策定の基礎となる将来シナリオの定量化を行った。また、インドネシアでは、ボゴール農業大学のRizaldi Boer教授、バンドン工科大学のRetno Gumilang Dewi博士、Ucok Welo Risma Siagian博士らとインドネシアを対象とした長期シナリオの定量化を行い、インドネシアにおける長期戦略支援を行った。

ベトナムでは、自然資源環境戦略政策研究所のTung Lam Nguyen博士らと連携して、ベトナムの2050年までの温室効果ガス排出シナリオの定量化に取り組み、天然資源環境省に対して結果を提供している。このほか、マレーシア工科大学のChin Siong Ho教授とマレーシアにおける長期戦略策定支援についての議論を開始し、ラオスとは東京工業大学博士課程のBounEua Khamphilavanh（天然資源環境省職員）と長期シナリオの定量化に向けたAIMの適用に向けた作業を開始した。これらについては、将来シナリオの定量化には至っていないが、モデル開発に向けたデータ整備や気候変動緩和策に関する情報収

集を行うことができたと考えている。

また、中国の国家発展和改革委員会 能源研究所のXiulian Hu教授、Kejun Jiang教授、北京大学のHancheng Dai助教、北京航空航天大学のYang Xie准教授、中国科学院 広州能源研究所のDaiqing Zhao教授らと、中国におけるデータ収集やモデル開発（特に大気汚染対策を踏まえた気候変動対策の分析や鉄鋼業を対象とした分析の詳細化など）を行い、インドのインド経営大学院アーメダバード校のAmit Garg教授、モーラーナ・アザット国立工業大学のManmohan Kapshe教授、インド統合システム分析研究所のRahul Pandey博士とは、インドにおける具体的な政策を見据えた州別の分析を目的として、共同でモデル開発、シナリオの定量化を行ってきた。また、IPCC第3作業部会の共同議長でもあるインド・アーメダバード大学のP. R. Shukla教授や国際応用システム分析研究所のKeywan Riahi博士、Volker Krey博士とは、2℃目標や1.5℃目標の実現に向けたシナリオ定量化について議論を行い、IPCC第6次評価報告書に対して様々なインプットを行った。

8. 研究者略歴

研究代表者

増井 利彦

大阪大学大学院工学研究科修了、博士（工学）、現在、国立環境研究所社会システム領域長

研究分担者

1) 大城 賢

東京工業大学大学院社会理工学研究科修了、博士（工学）、みずほ情報総研株式会社チーフコンサルタント、現在、京都大学大学院工学研究科助教

2) 藤森 真一郎

京都大学大学院工学研究科修了、博士（工学）、国立環境研究所研究員、現在、京都大学大学院工学研究科准教授

II. 成果の詳細

II-1 2℃目標の達成に向けたアジア主要国での温室効果ガス排出削減の深掘りの効果と日本への波及効果の定量化

国立研究開発法人国立環境研究所

社会システム領域 脱炭素対策評価研究室

増井 利彦・金森 有子・

Silva Herran Diego（令和2年5月25日から）

地球持続性統合評価研究室

花岡 達也・高倉 潤也

地域計画研究室

芦名 秀一

福島地域協働研究拠点 地域環境創生研究室

五味 馨

国立大学法人京都大学

工学研究科 都市環境工学専攻

島田 洋子

＜研究協力者＞

国立研究開発法人国立環境研究所

社会システム領域 脱炭素対策評価研究室

Marissa Malahayati・Ambiyah Abdullah・

日比野 剛（令和2年7月1日から）

地球持続性統合評価研究室

Satish Yawale Kumar・Zhaoling Li・

Saritha Vishwanathan

東京工業大学 工学院 Li Gen・Tanawat Boonpanya・BounEua Khamphilavanh・Yalong Han・

大谷 菜々子・Enzo Ma

中国 国家発展和改革委員会 能源研究所 Xiulian Hu・Kejun Jiang

中国 北京大学 Hancheng Dai

中国 北京航空航天大学 Yang Xie

中国 中国科学院 広州能源研究所 Daiqing Zhao

インド アーメダバード大学 P. R. Shukla

インド インド経営大学院アーメダバード校 Amit Garg

インド モーラーナ・アザット国立工業大学 Manmohan Kapshe

インド インド統合システム分析研究所 Rahul Pandey

タイ タマサート大学 シリントーン国際工学部 Bundit Limmeechokchai

インドネシア ボゴール農業大学 Rizaldi Boer

インドネシア バンドン工科大学 Retno Gumilang Dewi・Ucok Welo Risma Siagian

マレーシア マレーシア工科大学 Chin Siong Ho

ベトナム 自然資源環境戦略政策研究所 Tung Lam Nguyen

ネパール アジア工科経営大学 Ram Manohar Shrestha

台湾 工業技術研究院 Yi-Hua Wu

【要旨】

タイ、インドネシア、ベトナム等のアジアの研究者と連携して、国別の経済モデルであるAIM/CGE [Country]を開発し、各国におけるNDCや2℃目標、1.5℃目標に対応する温室効果ガス排出経路の定量化を行った。また、サブテーマ2と連携して、AIM/Enduseの結果と整合した対策の導入によるマクロ経済への影響をあわせて評価した。特に、温室効果ガス排出削減に向けた取り組みが海外からの支援のもとで行われることで、経済的な便益を得つつ排出削減目標の達成が可能となることを明らかにした。一方で、対策に用いられる設備が、輸入ではなく国内で供給されることで、国内産業の育成や雇用の創出にもつながることから、Just Transition（公正な移行）を実現することが可能となることを示した。た

だし、こうした経済活動を促進するような取り組みは、温室効果ガス排出量を増加させる要因でもあることから、排出削減目標を達成するためには追加的な排出削減が必要となることも明らかにした。

また、こうした温室効果ガス排出量の大幅削減を実現する省エネ設備を、日本が輸出することによって生じる日本への裨益について、日本を対象としたAIM/CGEを用いて検討を行った。具体的には、ベトナムを対象に、家庭部門や交通部門に必要な機器の輸出についての評価を行った。その結果、日本における輸出の増加は経済的な便益をもたらすものの、活動水準の増加は温室効果ガス排出量の増加をもたらすことから、日本において脱炭素を実現するためには追加的な取り組みが必要となることを示した。そうした追加的な取り組みの1つとして、将来も残存する従来技術の設備を廃棄し、効率的な設備に置き換えることが、経済的な便益を受けながら温室効果ガス排出量の増加も最小限に抑えられることを明らかにした。

このほか、脱炭素に向けた取り組みを実効性のあるものにするためには、国全体の施策だけでなく地域の実情を反映させた取り組みが必要となる。そこで、インドや中国などを対象に、州や省などに詳細化したAIM/Enduseを開発し、都市と農村など地域によるエネルギー需要構造の相違を踏まえた取り組みの重要性を明らかにした。

本研究を通じて、インドネシアやタイが国連に提出した長期戦略において、AIMを用いて分析が行われたことが明記され、ベトナムでは日越環境政策対話における共同閣僚声明を通じてベトナムにおける脱炭素社会を実現する排出シナリオの定量化に取り組んできた。こうした取り組みは、2021年に閣議決定された地球温暖化対策計画において日本における海外での貢献として記載されており、今後もこうした取り組みを継続して行う予定である。

1. 研究開発目的

パリ協定が採択され、地球の平均気温を産業革命前から2℃より十分低い水準に抑えるという2℃目標や、1.5℃に抑えるという1.5℃の目標の実現に向けて、先進国だけでなく途上国においても脱炭素社会の実現に向けた取り組みが求められている。特に、2021年に開催された気候変動枠組条約締約国会議（COP26）において、1.5℃目標が強調され、実効性のある排出削減経路の提示が途上国でも急務となっている。

こうした背景を踏まえて、アジアの主要対象国について国別モデルの開発、特にマクロ経済への影響を評価できる経済モデルであるAIM/CGE [Country]の開発を行い、脱炭素社会の実現に向けた将来シナリオの定量化を本サブテーマの目的とする。また、そうした将来シナリオを実現するために必要な取り組みを明らかにするために、経済成長と両立させるような取り組みの提案とその評価、モデルの詳細化を通じた効率的な施策の検討などもあわせて行う。さらに、こうした取り組みを日本が積極的に支援するためにも、途上国での温室効果ガス排出削減に向けた設備の輸出を通じた我が国への裨益を明らかにすることも本サブテーマの目的の1つとしている。

2. 研究目標

タイやインドネシアなどの対象国について、社会経済シナリオを定量化することを目標とする。また、対象国の応用一般均衡モデルを用いて、2030年や2050年の取り組みに対する経済的な影響を定量化し、各国の専門家と計算結果の妥当性等について議論を行うとともに、排出削減対策の相互作用や副次効果として、廃棄物処理や土地利用変化などの問題解決への貢献も定量的に明らかにする。さらに、各国に対する技術援助や省エネ技術の輸出、日本の環境改善等を通じた日本への裨益を定量的に明らかにする。

3. 研究開発内容

サブテーマ1では、図3.1.1に示す1カ国を対象とした応用一般均衡モデルAIM/CGE [Country]の開発を

対象国別に行い、各国におけるNDCや長期戦略の評価を行う。また、得られた計算結果やモデル分析の意義を、サブテーマ2と連携して各国の政策決定者に提供し、各国における気候変動緩和策の取り組みの支援を行うことを目的としている。また、同じ枠組で開発した日本モデルを用いて、アジアにおける取り組みを日本が技術支援等の形で援助する場合の試算を行う。表3.1.1に、各国共通で開発するCGEモデルの部門や財・サービスの定義を示す。各国を対象としたモデルでは、できる限りこの部門に対応するようにデータを準備するとともに、各国における関心にあわせた部門の詳細化を行う。ただし、各国の特性や関心に応じて部門の詳細化は実施する。また、これらの部門に対応したデータが集まらない場合は、統合化を行った上で分析を行う。また、本モデルの特徴として、複数の省エネ技術の導入を扱うことが可能な点である。こうしたモデル化とあわせて、サブテーマ2と協力して対象国のNDCや長期戦略に関する情報収集を行い、計算結果の評価についても併せて行う。

シナリオの定量化では、サブテーマ2と共通の将来人口、経済成長を想定し、サブテーマ2で明らかにされる投資額とエネルギー効率改善の情報を反映させて、将来の排出経路とマクロ経済への影響について定量化を行う。また、マクロ経済への影響を抑えるための取り組みを提案し、それらをモデルに反映させたシミュレーションもあわせて行う。あわせて、国の施策の実効性を高めることを目的として、国内の各地域の実情に応じた取り組みが展開できるように、サブテーマ2でも用いる技術選択モデルであるAIM/Enduseを国から省や州に詳細化する。

さらに、日本を対象としたモデルに、必要となる設備を日本から輸出することで、日本のGDPや温室効果ガス排出量がどのように変化するかを定量化し、途上国と日本の両方の視点から必要となる脱炭素社会の実現に向けた取り組みを明らかにする。

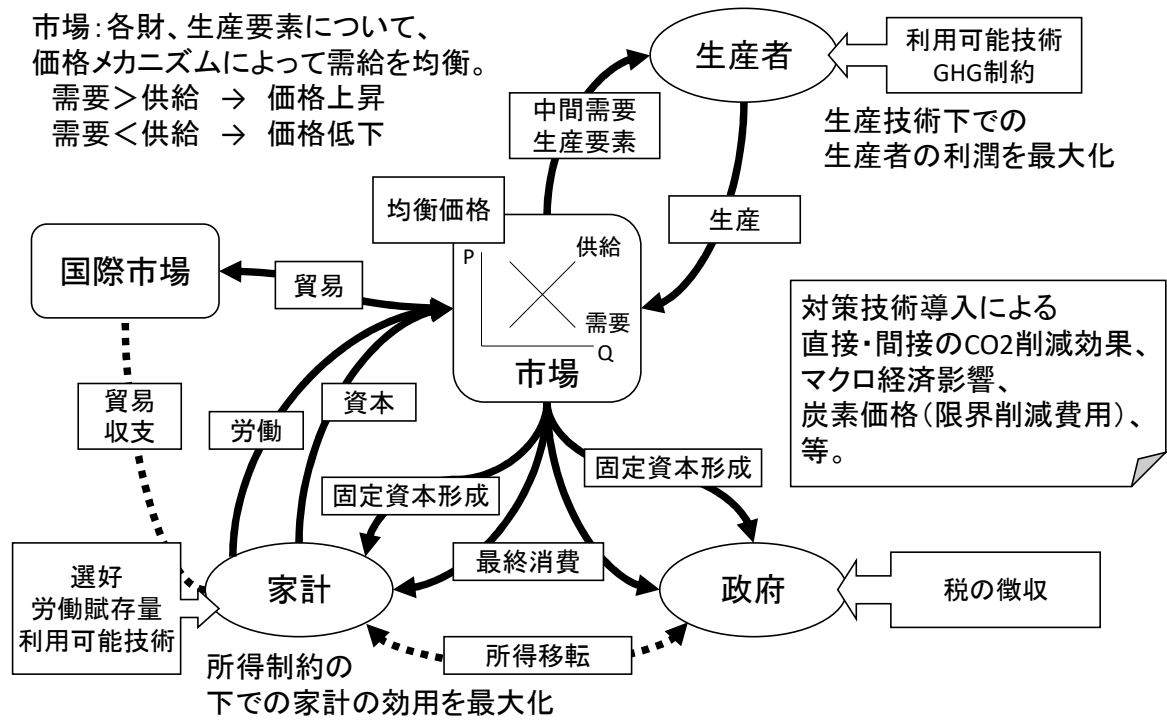


図3.1.1 AIM/CGE [Country]の構造

表3.1.1 AIM/CGE [Country]における部門や財・サービスの定義

	commodity		sector	
	commodity for 11 classification	commodity for detail classification (46 commodities)	sector for 12 classification	sector for detail classification (54 sectors)
Endogenous sectors	Agriculture, livestock and fishery	Paddy	Agriculture, livestock and fishery	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	Forestry	Forestry
	Food	Food, beverage and tobacco	Food	Food, beverage and tobacco
	Light industry	Textile, foot and leather	Light industry	Textile, foot and leather
		Processed wood products		Processed wood products
		Pulp and Paper Products		Pulp and Paper Products
	Machinery	General machinery	Machinery	General machinery
		Electric and electronic equipment		Electric and electronic equipment
		Transport equipment		Transport equipment
	Other heavy industry and mining	Basic chemical	Other heavy industry and mining	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	Construction	Construction
	Fuel	Coal mining	Fuel	Coal mining
		Crude oil mining		Crude oil mining
		Natural gas mining		Natural gas mining
		Petroleum refineries		Petroleum refineries
		Cole refinery (coke)		Cole refinery (coke)
		Gas (Town gas)		Gas (Town gas)
		Heat supply		Heat supply
Electricity	Electricity	Fossil fuel thermal fire	Coal-fired electricity	
			Oil-fired electricity	
			Gas-fired electricity	
		Non-fossil fuel thermal fire	Geothermal electricity	
			Hydropower electricity	
			Solar PV electricity	
			Wind electricity	
	Bioenergy-fired electricity			
	Nuclear electricity			
Endogenous sectors	Service	Service	Water supply	
			Waste and recycling services	
			Trade (wholesale)	
			Railway transport	
			Road transport except railway transport	
			Other transportation and services	
			Telecommunication, computer and information technologies services	
			Public administration	
			Finance and insurance	
			Real estate	
			Education and research	
			Health, medical and social security services	
			Other services	
			Value added	Capital
Labor				
Indirect tax				
Subsidy				
Final demand	-	-	Household final consumption	Household final consumption
			Government final consumption	Government final consumption
			Private fixed capital formation	Private fixed capital formation
			Public fixed capital formation	Public fixed capital formation
			Export	Export
			Import (including tax)	Import (including tax)
	Stock change	Stock change		

4. 結果及び考察

4. 1 長期戦略策定に向けたアジアにおける取り組み

2015年に採択されたパリ協定では、各国に対して2050年を対象とした長期低炭素排出発展戦略（長期戦略）を2020年までに国連に提出するように求めている。特に、IPCCが2018年に1.5℃特別報告書¹⁾

を公表してから、パリ協定で示された2℃目標に相当する排出削減目標（2050年の温室効果ガス排出量を現状から80%削減する）から、1.5℃目標に相当する排出削減目標である2050年の温室効果ガス排出量を実質ゼロにするという目標を表明する国が多く見られるようになってきている。日本でも2019年6月に「2050年の温室効果ガス排出量を80%削減し、21世紀後半のできるだけ早い時期に脱炭素社会を実現する」という長期目標を国連に提出していたが、2020年10月に菅総理大臣（当時）が「2050年に日本は脱炭素社会を実現する」ことを表明し、2021年10月に2050年に温室効果ガス排出量を実質ゼロにするという新たな長期戦略が、新たなNDC（2030年の温室効果ガス排出量を2013年比46%削減する）とともに閣議決定され、国連に提出された。こうした長期戦略の提出は、先進国だけでなく、途上国においても見られるようになっており、図4.1.1に示すように、アジアでも日本のほか中国、韓国、インドネシア、タイ、シンガポール、ネパール、カンボジアが既に長期戦略を提出している。また、インドやベトナムのように、国連に長期戦略を提出していないが、2021年に英国グラスゴーで開催されたCOP26において2050年以降の目標を公表する国も見られるなど、世界が1.5℃目標の実現に向けて大きく動き出している。

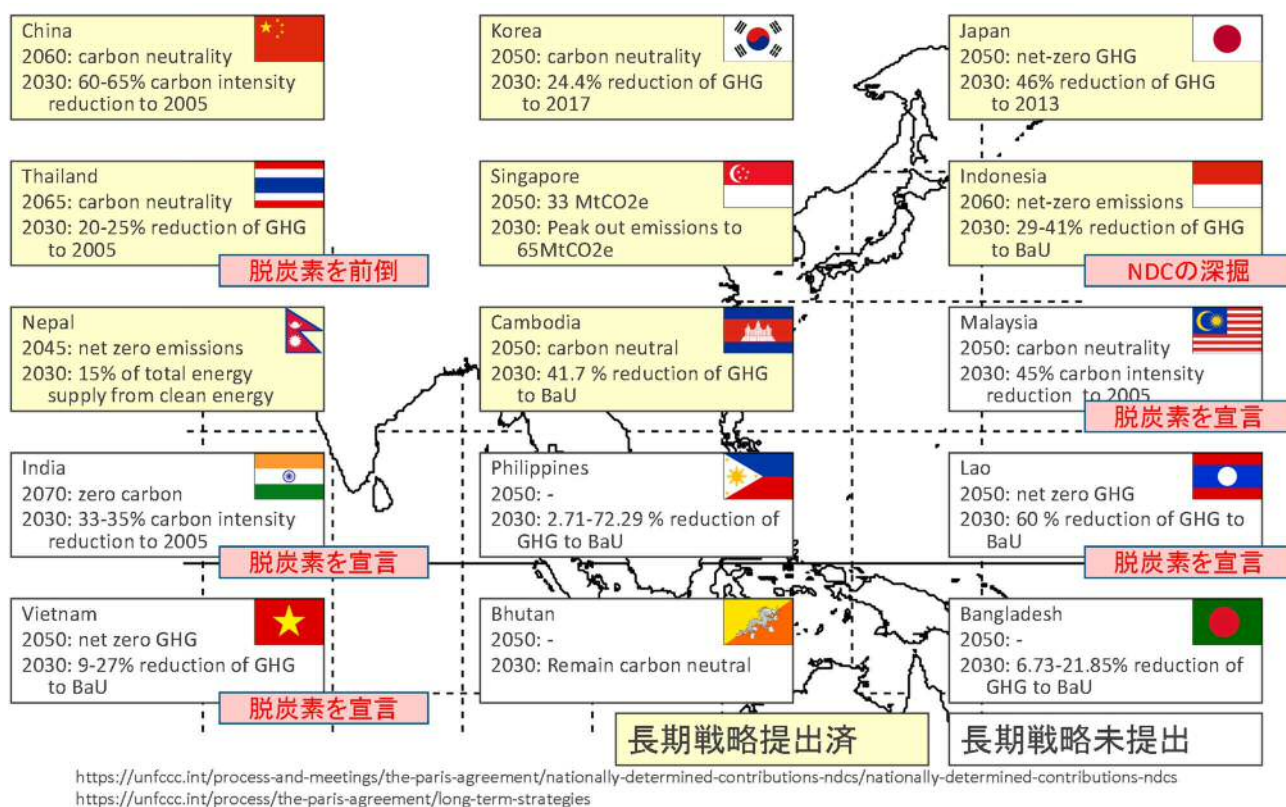


図4.1.1 アジア主要国における長期戦略とNDC

4.2 ベトナムを対象とした長期シナリオの定量化

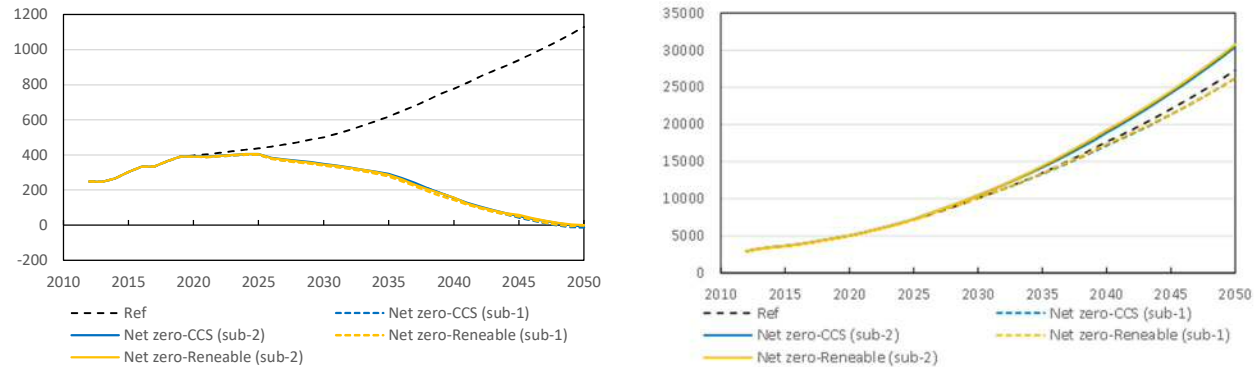
パリ協定では、2020年までに各国は長期戦略を国連に提出することになっていたが、2020年に英国グラスゴーで開催されるCOP26が1年延期されたことを受けて、2021年までに多くの国がそれぞれの長期戦略を公表することとなった。そうした長期戦略の策定において、統合評価モデルによる将来シナリオの定量化は必要不可欠であり、特に、本研究課題で開発した技術選択モデルであるAIM/Enduseは、どのような技術をどれだけ導入することで温室効果ガス排出量を実質ゼロにすることが可能となるかを定量的に明らかにし、また、そうした取り組みを実施することによるマクロ経済への影響は、経済モデルであるAIM/CGEによって定量化が可能となることから、本研究課題を通じて各国の研究者と協力してモデル開発と定量化を行ってきた。

ベトナムでは、2020年8月の第6回日越環境政策対話における共同閣僚声明を受けて、温室効果ガス排出量が頭打ちとなる時期とその排出量について、環境省とJICAの支援のもとで自然資源環境戦略政策研究所と連携して定量化を行い、その結果をベトナム天然資源環境省に提供してきた。また、2021年に開催されたCOP26の前には、天然資源環境省から2050年に温室効果ガス排出量を実質ゼロにするような排出経路の提示が求められるようになり、そうした分析をサブテーマ2と連携して行ってきた。温室効果ガス排出量を実質ゼロにするために、電源計画そのものを見直すことになったために、CCSの導入可能性と再エネポテンシャルを踏まえて表4.1.1のような2種類の対策シナリオを想定し、それぞれにおいてベトナムが自国の努力で対策を行う場合（sub-1）と、海外からの援助で追加投資が導入される場合（sub-2）を想定した。図4.1.2に温室効果ガス排出量と実質GDPの推移を示す。

自国の資金で対策を行うsub-1の場合、Net zero-CCSの2050年における実質GDPはRefのそれと比較して3.9%低下し、Net zero-Renewableの場合は3.8%の低下となった。これは、本来であれば生産資本に投下される設備投資の費用が、温暖化対策として使用され、2050年の生産資本のストックがRefと比較して低下するためである。一方、温暖化対策のための追加投資が、海外の支援でまかなわれる場合には、生産投資はRefと同水準が維持され、また、省エネ投資の実現によって少ないエネルギーでの活動が可能となることから、2050年のGDPはともにRefを6.2%上回る結果となった。こうした結果から、温室効果ガス排出量の実質ゼロの実現に向けて、先進国の支援がどれだけ可能となるかによって経済活動への影響は大きく変わることが明らかとなった。なお、Sub-2の海外からの支援がある場合、経済活動の水準がRefよりも大きくなることから、自国での取り組みを想定したSub-1よりも温室効果ガス排出量が増大する。このため、こうした経済活動のリバウンドによってより多くの温室効果ガス排出量の削減に向けた取り組みが必要となる点に注意が必要である。

表4.1.1 ベトナムを対象とした将来シナリオ

シナリオ名		概要
Ref		温室効果ガス排出削減を想定しないなりゆきシナリオ
Net zero-CCS	sub-1	CCSの積極的な導入を行い、温室効果ガス排出量の実質ゼロを目指すシナリオ（国際的な支援はなく自国において対策を導入する）
	sub-2	CCSの積極的な導入を行い、温室効果ガス排出量の実質ゼロを目指すシナリオ（必要な追加投資が国際的な支援によって導入される）
Net zero-Renewable	sub-1	再生可能エネルギーの積極的な導入により、温室効果ガス排出量の実質ゼロを目指すシナリオ（国際的な支援はなく自国において対策を導入する）
	sub-2	再生可能エネルギーの積極的な導入により、温室効果ガス排出量の実質ゼロを目指すシナリオ（必要な追加投資が国際的な支援によって導入される）



温室効果ガス排出量（単位：100万トンCO₂eq） 実質GDP（単位：2012年価格兆ベトナムドン）

図4.1.2 ベトナムを対象としたAIM/CGEモデルによる温室効果ガス排出量と実質GDPの推移

4.3 インドネシアを対象とした温室効果ガス排出削減の評価

インドネシアを対象としたAIM/CGE [Indonesia]の開発では、ボゴール農業大学のRizaldi Boer教

授、バンドン工科大学のRetno Gumilang Dewi博士、Ucok Welo Risma Siagian博士と共同で、2030年のNDC（なりゆきの排出量と比較して29%削減）についてエネルギー、AFOLU（農業・土地利用）、廃棄物、IPPU（工業プロセス）の各部門の分析を行った。なお、モデル化においては、パーム油産業が重要となることから、パーム油を個別の部門、財としている。また、土地利用起源の温室効果ガス排出量のうち、泥炭地における火災からの排出については、経済モデルで評価することが困難であることから分析対象外としている。分析の結果、図4.1.3に示すように、AFOLU、廃棄物、IPPUについては、政府見通しを再現することができたのに対して、エネルギー起源については、2030年の温室効果ガス排出量が政府見通しを下回る結果となった。これは、伝統的バイオマスエネルギーから化石燃料利用への転換が影響しているものと思われる。図4.1.4に、インドネシアにおける一次エネルギー供給量の推移を示す。こうした結果は、インドネシアの上記の共同研究者を通じて、エネルギー省や森林環境省をはじめとしたインドネシア政府に提供されるとともに、2020年2月にジャカルタで行われた政策対話会合において情報共有を行った。

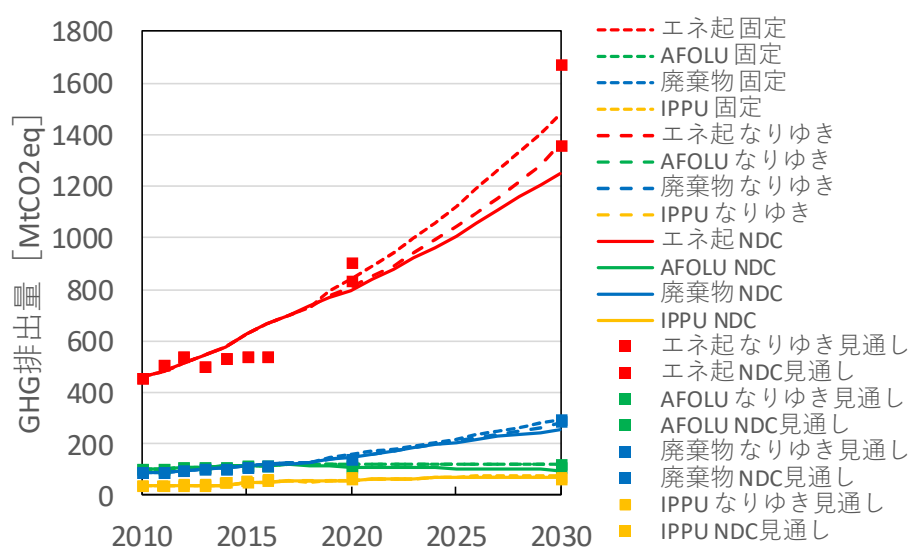
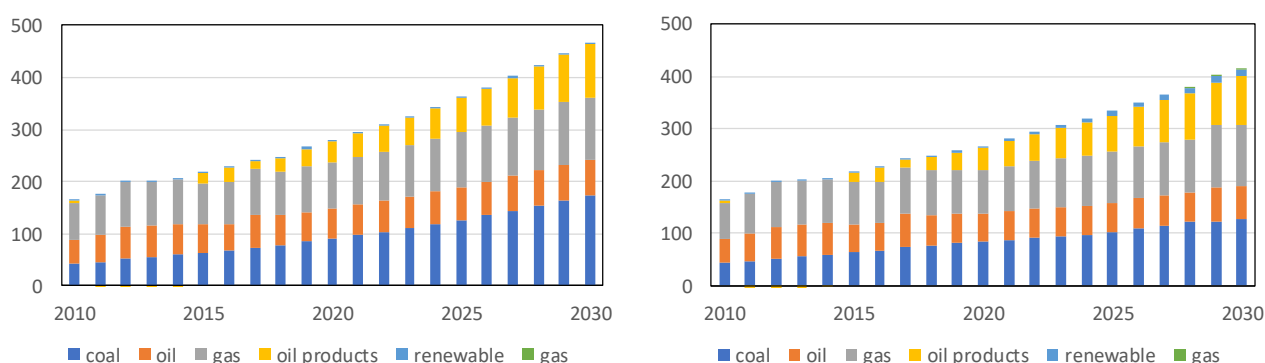


図4.1.3 インドネシアを対象とした部門別温室効果ガス排出量の推計結果



固定ケース

NDCケース

図4.1.4 インドネシアにおける一次エネルギー供給量の推計結果

現状のインドネシアにおける長期戦略の目標は、2050年までに540MtCO₂eqを実現し、2060年に排出量を実質ゼロにするとしている。こうした目標に対応し、インドネシアの長期戦略の策定に貢献できるように、2060年まで分析期間を延長し、分析を行っている、また、同じモデルを用いて、インドネシアにおけるフードロスの改善による経済活動への影響等についても定量化を行っている。

4. 4 タイを対象とした温室効果ガス排出削減シナリオの評価

タイについては、タマサート大学シリントーン国際工学部のBundit Limmeechokchai准教授と連携して分析を行っている。2010年の産業連関表をもとにしたAIM/CGE [Thailand]を構築し、2030年におけるNDC（なりゆきに対して20%削減）を評価した。タイにおける様々な計画（産業部門における投資の2%を省エネのために追加する；火力発電部門におけるCCUの導入）による経済活動への影響を図4.1.5に示す。このほか、運輸部門を対象とした取組の評価も実施した。タイにおいても、2019年10月にバンコクで行われた政策対話会合においてAIMモデルの紹介等を行ったほか、民間企業や地方政府とモデル分析の可能性についての意見交換を行った、そのほか、タイ温室効果ガス管理機構や天然資源環境省の職員やボードメンバーが来日した際に、モデル分析の意義や日本における取り組みなどの紹介を行った。

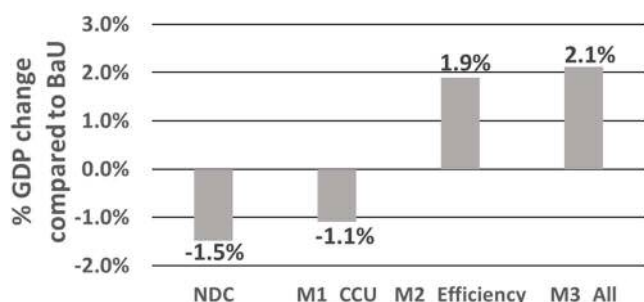


図4.1.5 タイにおける分析結果（2030年における対策によるGDPへの影響）

タイもCOP26以降、NDCの深掘りや、2050年にカーボンニュートラル、2065年までにネット・ゼロ・エミッションをそれぞれ実現することを表明しており（現行の長期戦略では2065年までにカーボンニュートラルを実現）、Bundit Limmeechokchai准教授を中心にモデルと協力して、定量化の拡張作業を引き続き実施している。

4. 5 他のアジア諸国における将来シナリオの定量化に向けた取り組み

ラオスでは、2021年5月に国連に提出された現在のNDCでは、2030年の温室効果ガス排出量をなりゆきと比較して60%削減するという排出削減目標を掲げている。ラオスでは、発電の大部分が水力発電であり、エネルギー起源のCO₂排出量の多くは運輸部門である。こうしたことから、政府ではCO₂排出削減の取り組みとして電気自動車の導入を検討しており、ラオスの天然資源環境省のBounEua Khamphilavanh氏（東京工業大学博士課程在学中）とともにラオスを対象としたAIM/CGEモデルの開発を行い、電気自動車導入の影響を明らかにした。また、ラオスでは廃棄物起源の温室効果ガス排出量も課題となっていることから、廃棄物対策を反映させることが可能となるように、モデルの改良を行った。こうした分析結果を政策に反映させるために、2020年2月にビエンチャンで行われた政策対話会合では、ラオスを対象とした静学モデルによる試算結果を紹介し、モデル分析を通じた排出削減シナリオの検討方法とその役割について説明を行い、ラオスの排出削減に向けた取り組みの現状について意見交換を行った。

マレーシアにおいても2050年に脱炭素社会を実現することが示されており、それを実現する詳細なシナリオの定量化が急務となっている。マレーシア工科大学のChin Siong Ho教授と協力して、マレーシアを対象としたモデル開発を行うためのエネルギー、経済、温室効果ガス排出量のデータを収集、整備するとともに、シナリオ定量化に向けて必要となる対策や施策についての情報収集を行った。

4. 6 日本における裨益の評価

日本では2013年以降、2国間クレジット制度（JCM: Joint Crediting Mechanism）を実施し、17カ国と共同で温室効果ガス排出量の削減に向けた取り組みを行っている。2021年のCOP26に合意されたグラ

スゴー気候合意においても、パリ協定6条の市場メカニズムについて合意され、国連主導で取引されるクレジット（CO₂排出枠）だけでなく、2国間のクレジットについてもルール整備が行われた。これにより、日本の協力によって途上国で実現した排出削減の一部が日本の削減分としてカウントされるようになり、こうしたクレジットの活用は、温室効果ガス排出削減の制約条件を緩和することになるため、日本の経済活動にとって大きな便益となる。

そのほか、各国における長期戦略の実現に向けて、様々な部門での省エネや再エネの導入が必要となり、特に省エネ技術については日本に対する期待が大きい。サブテーマ2において、ベトナムを対象に2050年に脱炭素社会を実現するために必要な部門別の省エネのための投資額が計算されることから、省エネ機器が日本から輸出されると想定した場合の日本経済への影響について試算を行った。分析に用いたモデルは、日本を対象とした応用一般均衡モデルAIM/CGE [Japan]である。2021年から家庭部門を対象とした省エネ機器の輸出が開始され、2050年には1.6兆円（2005年価格）分の輸出が必要となる。

なりゆきケースにおいてこうした輸出の増加を適用すると、図4.1.6に示すように2050年における日本の実質GDPは1.5兆円（2005年価格）増加し、これにともなって温室効果ガス排出量も2.8MtCO₂eqだけ増加する結果となった。そのため、2℃目標に相当する2050年の温室効果ガス排出量を80%削減する場合、2050年の日本の炭素価格は従来の結果（投資回収年数10年を想定した場合）である5.4万円/tCO₂から5.9万円/tCO₂へと5000円/tCO₂増加させる結果となった。それにより、実質GDPの増加も1.3兆円

（2005年価格）へと増分が縮小する。一方で、同じ温室効果ガス排出削減目標を想定し、2030年以降に残存している従来技術から省エネ技術への置き換えを推進し、それに対応して投資を拡大する場合では、2050年のGHG価格は1.5万円/tCO₂eqから1.4万円/tCO₂eqと低下し、実質GDPの増加も1.6兆円（2005年価格）と、なりゆきケースを対象とした場合以上の伸びが得られる結果となった。こうしたことから、日本において省エネ製品の輸出が増えることによる裨益は見られるものの、国内での排出削減に向けた取り組みによって、日本のマクロ経済への影響は変化することが明らかとなった。

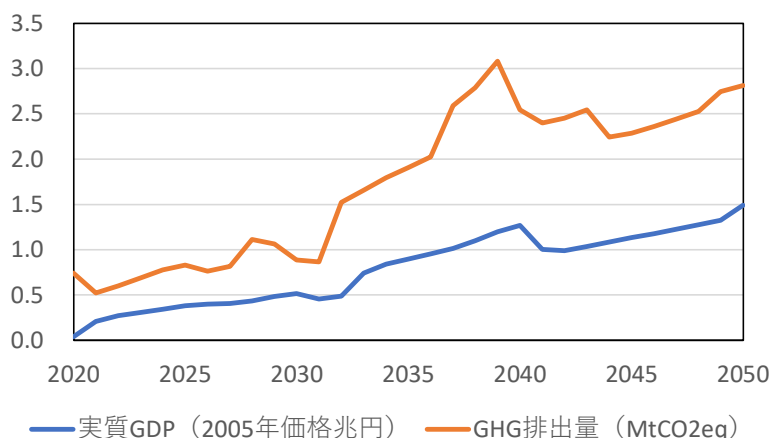


図4.1.6 ベトナムの脱炭素社会実現に必要な家庭部門における省エネ技術を日本から輸出した場合の日本の実質GDPと温室効果ガス排出量の変化（なりゆきケース）

なお、こうした影響の大きさは、どのような財を輸出するかによっても異なる。運輸部門の場合、2050年に必要とする新規投資額は、8.7兆円（2005年価格）と家庭部門が必要とする投資額よりも大きく、またサプライチェーンも拡大する。このため、日本が省エネの輸送機器をすべて輸出すると想定した場合、なりゆきケースでの2050年の温室効果ガス排出量の増加が15MtCO₂eqと大きくなることから、上記と同様の取り組み（投資回収年数10年＋2030年以降に残存している従来技術の退出を促進し、それに対応して投資を拡大）を行っても2050年のGHG価格は8000円/tCO₂eq増加し、実質GDPの増加は8.4兆円（2005年価格）となった。ただし、従来の温暖化対策の場合には、実質GDPの増加は6.9兆円（2005年価格）にとどまることから、国内における取り組みの強化とあわせることで、得られる裨益もより大きく

なる傾向は同様である。こうした結果から、日本における追加需要の発生は裨益を得る機会ではあるが、国内における取り組みの強化が伴わなければ、そうした追加需要による温室効果ガス排出量の潜在的な増加による影響が大きくなり、本来得られる経済的な便益を損なう結果となる。

4. 7 詳細モデルの検討

脱炭素社会の実現に向けた取り組みを加速させるためには、国レベルのマクロな分析に加えて、地域や部門などをより詳細に解析して、ミクロな視点でどのような課題があるかを検討し、解決に向けた取り組みを明らかにする必要がある。

そこで、サブテーマ2と連携して、中国、インド、タイを対象にAIM/Enduseを地域モデルに拡張し、地域の経済状況（人口分布や経済活動の規模）や賦存資源、気象条件を考慮したモデル開発と分析を行った。図4.1.7は、中国を31省に分割したモデルを用いて、鉄鋼部門のLPS（大規模発生源）の情報も加味して評価した鉄鋼部門の地域別生産容量の変化を示したものである。LPSの評価には、現状のLPSの稼働年数のほか、鉄鋼の需要地や生産に必要な資源も考慮している。

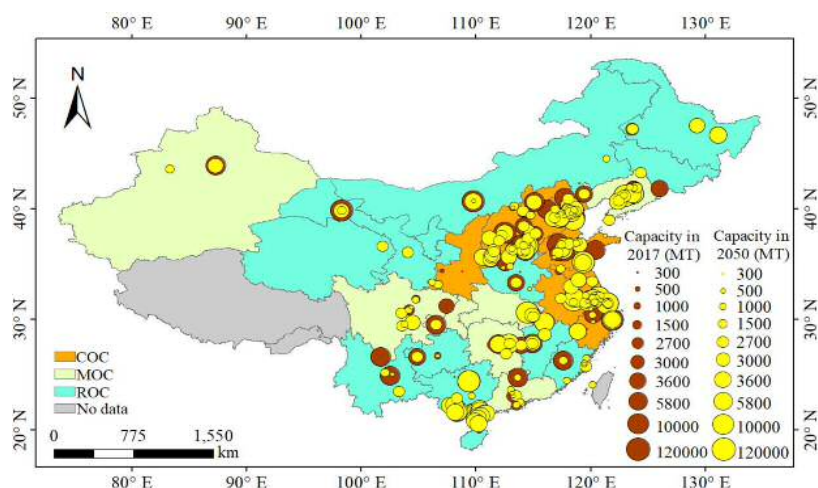


図4.1.7 中国を対象としたAIM/Enduse [China]の省別モデルと鉄鋼部門のLPSを評価するモデルを用いて評価した2017年と2050年の中国の鉄鋼部門のLPSの分布

このほか、中国省別の旅客・貨物輸送量を推計し、補助金政策を通じた電気自動車への移行によるカーボンニュートラルへの貢献について明らかにした。分析の結果、大規模な電気自動車導入の潜在性はあるものの、電気自動車への転換が難しい大型貨物由来（ディーゼル由来）のCO₂排出が残るため、2060年までに運輸部門におけるCO₂排出量は2015年比40%削減にとどまる結果となった。このため、中国の長期戦略である2060年カーボンニュートラルの実現に向けて、一定程度の貢献は期待されるが、電気自動車化だけでは目標の実現は難しい。また、図4.1.8に示すように、省別の経済格差やモード別運輸状況の違い等により、電気自動車化による省別CO₂削減効果だけでなく、費用対効果も省別に大きく異なるため、省別の特徴に応じた施策が必要であることがあきらかとなった。

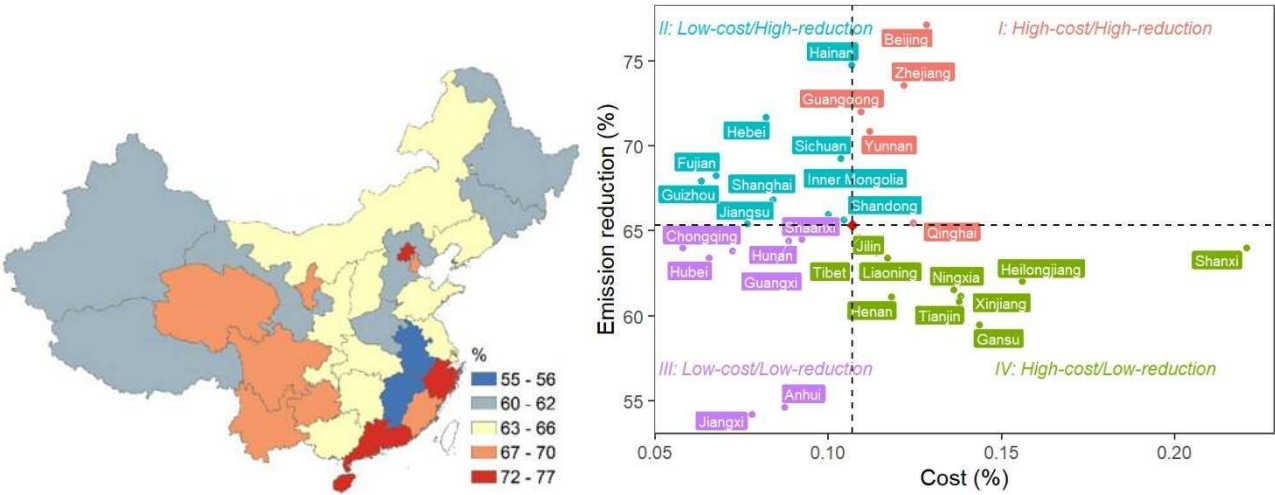


図4. 1. 8 2060年省別のEV導入によるCO₂削減効果（左）と費用対効果（右）

インドでは、州別および都市・農村別の経済格差が大きく、特に発展途上の州・農村部では、伝統的なバイオマスに大幅に依存しており、社会問題となっている。こうした背景のもとで州別の家庭部門エネルギー需要量推計を行い、エネルギー貧困および脱炭素化について分析を行った。経済が発展し、都市化が進んでいくと、農村部ではバイオマス消費が減少し、同時に一人当たりエネルギー消費量も減少していく。一方で、都市部では、すでにバイオマスの消費率は小さく、冷房、調理およびその他家電における電力消費が急増し、一人当たりエネルギー消費量は増加する。インドにおいて、経済発展・都市化は進展するが、図4. 1. 9に示すように、依然として、家庭部門の一人当たりエネルギー消費は世界主要国の2010年のレベルよりも低い結果となった。

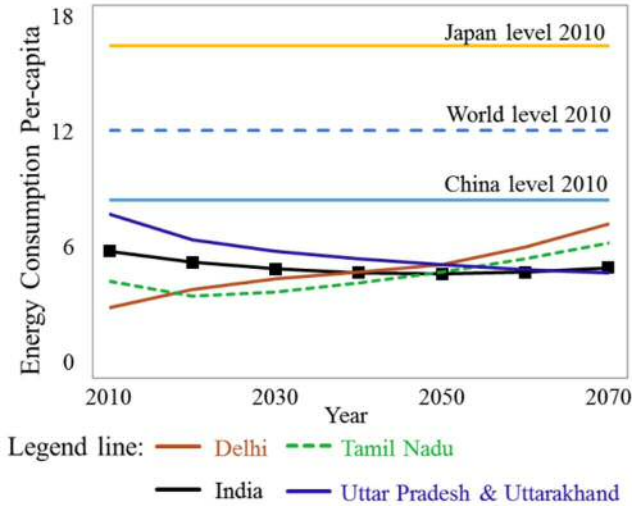


図4. 1. 9 インドにおける州別一人当たりの家庭部門エネルギー消費量と世界主要国の状況との比較

4. 8 途上国における経済発展と脱炭素の両立に向けた取り組み

4. 2において、脱炭素社会の実現に向けて必要となる省エネ投資等が、海外からの支援によって実現されることで、GDPの増加と温室効果ガス排出削減を同時に実現することを、ベトナムを例に示した。このほかにも、雇用の面から、脱炭素社会の実現に向けた取り組みの有効性を明らかにしている。

分析では、インドネシアを対象に、現行の長期戦略に対応した取り組みを導入することで、2050年には化石燃料関連部門の雇用は40万人減少する一方、再エネ生産部門の雇用は30万人増加し、再エネ機器

生産部門においては雇用が20万人増加するという結果となった。この結果は、再エネ機器の導入について国産品か輸入品かの選択を変更しない場合のものであるが、再エネ機器を国内で生産すれば、さらに多くの雇用が国内において見込まれる結果となる。特に途上国では、石炭を中心とした化石燃料からの移行が必要となるが、その受け皿の確保が課題となる。上記の結果は、公正な移行（Just Transition）を実現する上で重要な示唆を与えるものである。

4. 9 各国の脱炭素政策への貢献

インドネシアやタイでは、各国の研究者の働きかけにより、2021年に国連に提出された長期戦略において、AIMを用いて定量化が行われたことが、図4.1.10及び図4.1.11のように明記されている。また、ベトナムでは環境省やJICAの支援のもとで、2050年に温室効果ガス排出量を実質ゼロにする分析結果を天然資源環境省に提供し、COP27に向けて国内での議論が行われているが、そのきっかけは図4.1.12の第6回日越環境政策対話における共同閣僚声明による。こうした各国における長期戦略の策定やNDCの深掘りに向けた支援は、2021年10月に閣議決定された地球温暖化対策計画の第8章（海外における温室効果ガスの排出削減等の推進と国際的連携の確保、国際協力の推進において、「相手国への政策への関与を強化し、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、NDC改訂支援、民間企業の制度構築及び実施能力向上を支援し、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。」と明記されるなど、日本の途上国支援として取り上げられるようになっている。本課題においても、人材育成を目的としたモデル開発トレーニングを計画していたが、新型コロナウイルス感染症の影響で、AIM/Enduse、AIM/CGEそれぞれ1回ずつにとどまっている。本課題は終了するが、将来シナリオの検討や対策の強化に向けた新たなシナリオ開発に向けて、オンラインでの開催も含めて実施することを検討している。



図4.1.10 インドネシアにおける長期戦略とAIMに関する記述

4.1. Scenario Development

4.1.1. Models for Mitigation Pathways

Indonesia used a set of models in developing the emission pathways with two stages of analysis. In the first stage, separate models were developed for modelling agriculture, forestry and other land uses (AFOLU), and energy. The AFOLU sector used AFOLU Dashboard (a spreadsheet model), meanwhile energy sector used AIM-EndUse and the AIM-ExSS (Extended Snapshot). In both models, economic and population growth are the key drivers for changes in food and energy demand. In the second stage, the economic and economic impact of both AFOLU and energy sector mitigation are analysed by utilizing the Asia Pacific Integrated Model/Computable General Equilibrium (AIM/CGE)-Indonesia (see Figure 3).

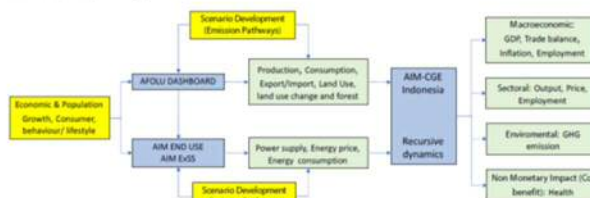
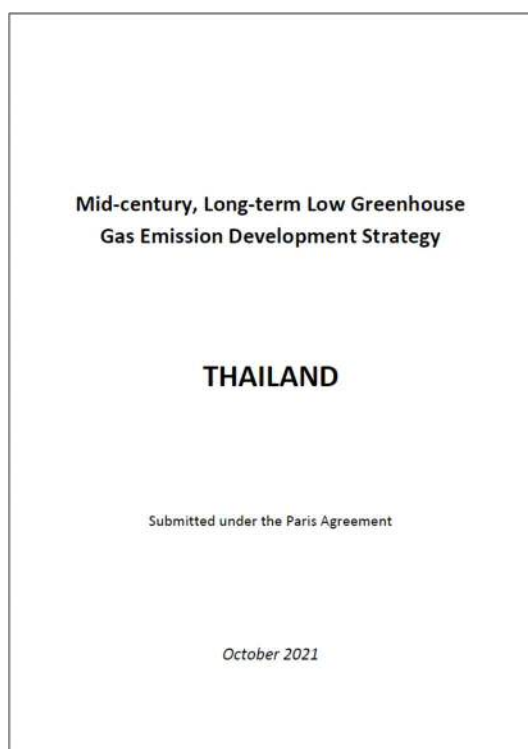


Figure 3. Models for developing emission pathways in Indonesia



3.1 Methodology for the Development of Long-term Low Greenhouse Gas Emission Pathways

3.1.1 Model for Low Greenhouse Gas Emission Pathways

Thailand's mid-century, long-term low greenhouse gas emission development strategy was developed based on the scenario of net-zero greenhouse gas emissions in the second half of this century, in line with science and the Paris Agreement. The BAU scenario was developed using input information of the current country's circumstances and status provided by related ministerial agencies into the Asia-Pacific Integrated Assessment Model (AIM) (Figure 3-2).

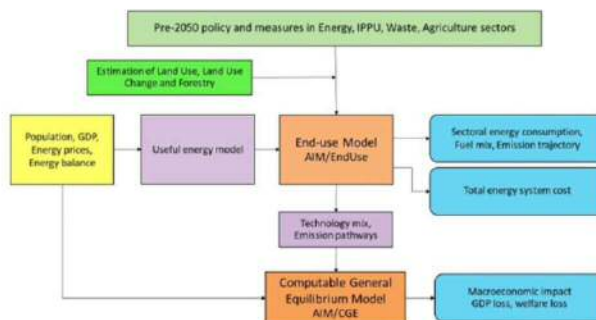


Figure 3-2: Framework of Thailand's LEDS Development

図4.1.11 タイにおける長期戦略とAIMに関する記述

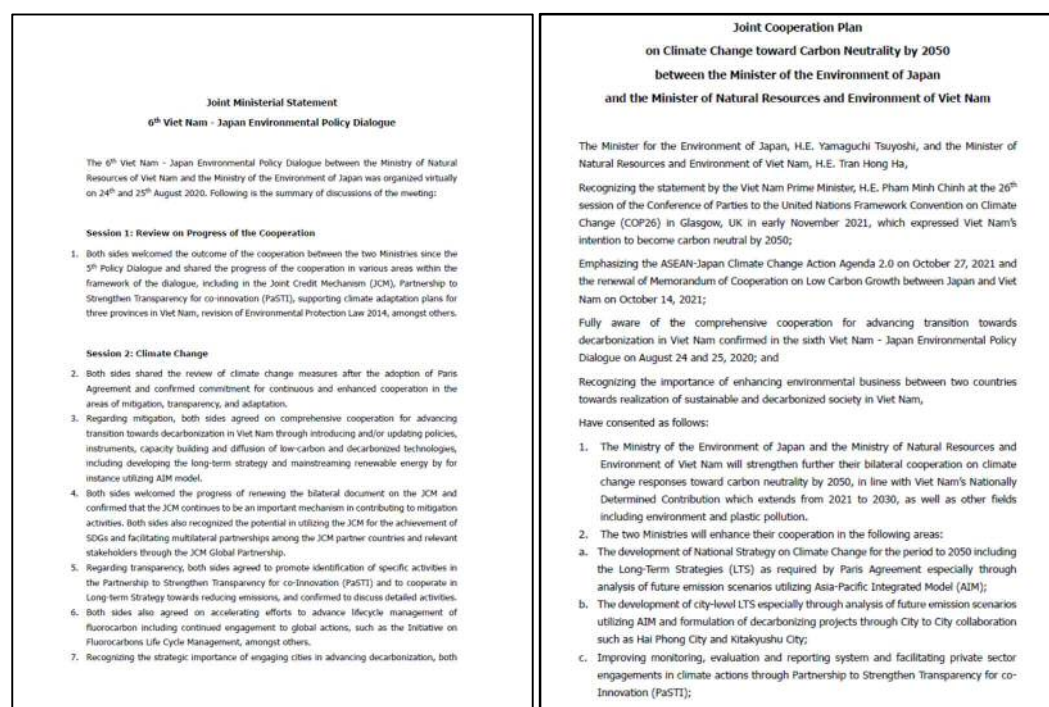


図4.1.12 第6回日越環境政策対話（2020年8月；左）や2050年までのカーボンニュートラルに向けた気候変動に関する共同協力計画（2021年11月；右）における覚書

5. 研究目標の達成状況

タイ、インドネシア、ベトナムについては、各国の研究者と協力、連携して、モデル開発を行い、また、サブテーマ2で得られた分析結果を前提に、脱炭素社会の実現に向けた経済影響について評価することができた。また、研究にとどまらず、インドネシアやタイでは、長期戦略の策定において本課題で開発したAIMが活用され、また、ベトナムを含めて脱炭素社会の実現に向けたシナリオの検討に貢献し

ていることは、当初の目標を大きく超えて達成したと評価している。今後は、詳細モデルも含めて、実効性のある脱炭素政策に向けた分析結果の提供が必要になると考えている。一方、新型コロナウイルス感染症の影響を受けて、政策決定者との対面での議論やトレーニングが2020年度以降は実施できない状況にあった。このため、本研究課題で得られた成果をそのまま各国政府に提供する場合もあり、シナリオ開発に関する人材育成が十分でない点もあった。能力向上を目指したモデル開発や脱炭素シナリオの評価を行うことが今後の課題であるといえる。

また、アジアにおける温暖化対策導入による日本への裨益については、JCMに見られるようなクレジットの獲得以外の省エネ設備の提供という側面について評価を行うことができたことから、当初の目標は達成できたと考えている。また、途上国においても脱炭素社会を更なる経済成長のもとで実現させる取り組みとその効果を示すことは、当初の設定にはなかった項目である。一方で、今回行った分析では、各国のモデルを個別に用いて分析したものであり、相互のフィードバックが十分ではなく、また、省エネ設備等の供給、受け入れも複数存在することから、世界モデルを含めた多国モデルの開発、適用を通じた分析が必要であると認識している。特に省エネ設備の生産に関する日本企業の関わりは多様であり、様々な状況を想定した分析が必要になると考えている。

6. 引用文献

- 1) IPCC (2018) Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5° C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5° C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty

Ⅱ－２ 2℃目標の達成に向けたアジア主要国における温室効果ガス排出削減の深掘りに向けた技術とそのポテンシャルの定量化

国立大学法人京都大学

工学研究科 都市環境工学専攻

大城 賢

みずほリサーチ&テクノロジーズ（株）

サステナビリティコンサルティング第1部 元木 悠子・平山 智樹・

日比野 剛（令和2年6月30日まで）・

滝見 真穂（令和元年12月31日まで）・

川村 淳貴（令和3年6月30日まで）

<研究協力者>

国立研究開発法人国立環境研究所

日比野 剛（令和2年7月1日から）

〔要旨〕

アジア主要対象国における2050年までの技術的な排出削減ポテンシャルを定量化し、有効な対策技術と日本の技術の貢献の可能性について明らかにすることを目的として。技術積み上げ型のエネルギー需給モデルであるAIM/Enduseを用いて、アジア主要対象国での2℃及び1.5℃目標の達成から見たCO₂排出量推計、気候変動緩和策がもたらす大気汚染物質の副次削減効果の推計、および目標の達成から見たアジア主要国における技術のポテンシャル推計を実施した。分析に用いたAIM/Enduseは、費用最小化を目的関数とし、逐次動学的な最適化手法によって技術選択を行い、技術ごとのエネルギー消費量を積み上げて対象国、対象年のエネルギー需給と排出量を推計する。

定量分析の結果として、2℃及び1.5℃目標の達成から見たアジア主要国におけるCO₂排出量推計からは、中国、インド、タイ、インドネシア、ベトナムで2℃目標相当の排出量シナリオ、NDCから、多い国で半減以上の削減の深掘りを進める必要があること、また、2050年断面で見たとき、アジアの2大排出国である中国とインドでは産業部門の排出量が大半を占め、発電部門はほぼゼロエミッション化が進展していることが分かった。さらに1.5℃目標の達成に向けては、エネルギーの供給側では電源構成に占める再エネ比率を9割程度にした上でバイオマスCCSを活用し、需要側では最大限の電化を勧めたうえで、産業部門で一部残る化石燃料起源の排出に対して、CCSの設置率をほぼ100%まで高め、産業部門の排出が大きな比率を占める中国やインドでは、水素還元製鉄や回収したCO₂を活用する気液体燃料の合成技術などの革新技術の導入を行っていく必要があることを示した。気候変動緩和策がもたらすアジア大気汚染物質の副次削減効果の推計については、SO₂では産業・発電部門、PM_{2.5}ではこれに加え民生・運輸部門での脱炭素技術の導入により、2020年頃以降大きく汚染物質を削減できることが分かり、気候変動対策による大気汚染物質の副次削減効果が定量的に示された。また、目標の達成から見たアジア主要国における技術のポテンシャル推計民生部門と運輸部門の電化、省エネ化に伴う今後の対策技術の規模は、排出削減の観点からに留まらず、投資額から見た市場規模の観点からもポテンシャルが大きいことが定量的に示された。今後の排出量の大幅削減に向け、次世代自動車や空調機器、給湯用ヒートポンプなど、運輸部門と民生部門での日本の技術の導入が期待される。

1. 研究開発目的

アジア主要対象国における2050年までの技術的な排出削減ポテンシャルを定量化し、有効な対策技術と日本の技術の貢献の可能性について明らかにする。技術選択モデルを用いて、アジア対象国における2050年までの技術的な排出削減ポテンシャルを定量化し、有効な対策技術と日本の技術の貢献の可能性を評価する。

2. 研究目標

タイ、インドネシアなどの対象国について、2030年、2050年の技術的な排出削減ポテンシャル、必要となる対策を明らかにすることを目標とする。また、技術選択モデルを用いて、2030年、2050年の技術的な排出削減ポテンシャルを定量化し、各国の専門家と計算結果の妥当性等について議論を行うとともに、排出削減対策の相互作用や副次効果として、大気汚染などの問題解決への貢献も定量的に明らかにする。

3. 研究開発内容

サブテーマ2では主に、2℃目標の達成から見たアジア主要国におけるCO₂排出量推計、気候変動緩和策がもたらすアジア主要国における大気汚染物質の副次削減効果の推計、2℃目標の達成から見たアジア主要国における技術のポテンシャル推計、1.5℃目標に向けた達成に向けたアジア主要国における技術のポテンシャル推計を実施した。

これらの分析においては、技術積み上げ型のエネルギー需給モデルであるAIM/Enduseを用いた。本モデルは、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最適化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、技術ごとのエネルギー消費量を積み上げて対象地域、対象年のエネルギー需給と排出量を推計するフレームワークを持つ。モデルは、その対象地域の社会経済指標（人口、GDPなど）に基づくサービス需要（素材生産量、業務床面積、旅客貨物輸送量など）を所与のインプットとし、エネルギー価格、炭素税、補助金、技術革新による価格低下、エネルギー供給量の制約、CO₂排出量の制約などの複数の制約の下で初期投資額と運転維持費、光熱費などのシステムコストを最小化する。AIM/Enduseの構造模式図を図3.2.1に示す。

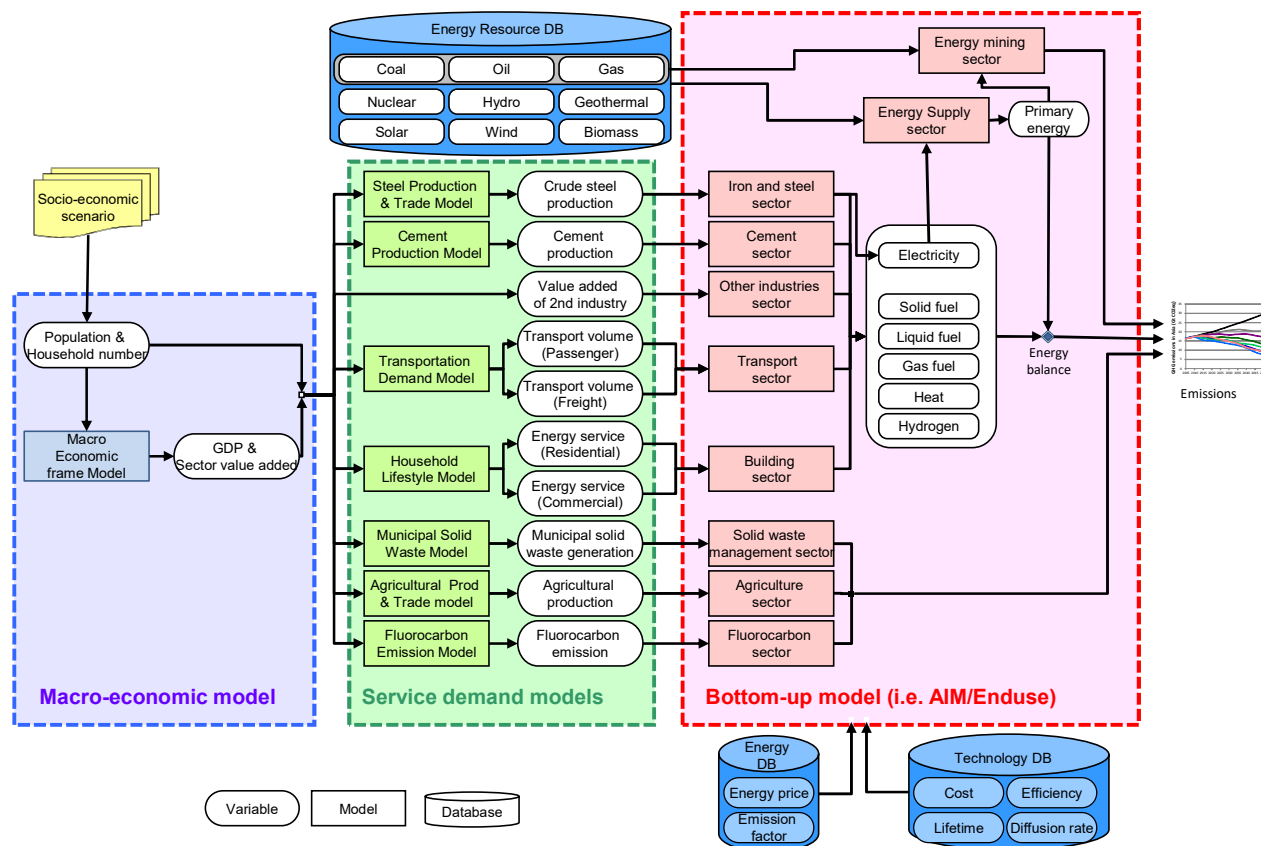


図3.2.1 技術積み上げ型モデルAIM/Enduseの構造図

また、AIM/Enduseは、エネルギー起源CO₂を中心とする温室効果ガスのほか、SO₂、NO_x等の気体大気汚染物質、ブラックカーボンを含む一次生成の粒子状大気汚染物質の排出量の推計が可能である。大気

汚染物質の推計は、発電部門と産業部門のプラントのタービンやボイラーで燃焼生成される大気汚染物質に対して「排煙脱硝装置」「集塵装置」「排煙脱硫装置」を介して回収する推計フローを採用し、推計を行っている。

本課題ではAIM/Enduseを用いて、中国、インド、タイ、インドネシア、ベトナムの2050年までの排出シナリオの定量化と、それに伴い算定される省エネ・脱炭素技術による削減貢献量、各技術で見込まれる投資額の推計を実施した。排出量推計の対象をCO₂、推計の基準年を2015年とし、現行施策シナリオ（現在各国で導入されている、あるいは国家計画の中で今後の導入が見込まれる政策のみを考慮した、BAU（Business as usual、なりゆき）と、対策シナリオ（世界全体での平均気温上昇を産業革命前と比べて2℃以内に抑える可能性が高いシナリオをベースに、アジア主要各国の排出シナリオとしたもの。サブテーマ1、3とも整合）の定量化を行った。推計に際しては、収集した各国データ等をもとに、基準年として2015年の足元の技術情報とエネルギーバランス実績の整合を図る等、技術選択モデルの改良も併せて行った。現行施策シナリオと対策シナリオの比較を行うことで、発電、産業、民生、運輸の各部門の対策が各国の脱炭素化に向かう排出パスにもたらす影響を分析した。また、CO₂削減に向けた各国の気候変動緩和策がもたらす副次的な大気汚染物質の削減効果の定量化も併せて実施した。

技術選択モデルのインプットとなる、各国の2050年までのエネルギーサービス需要については、SSPシナリオ（Shared Socioeconomic Pathways、共通する社会経済シナリオ）から、検証する現行施策及び対策シナリオの社会経済動向として、どちらもSSP2をベースとしたシナリオを用い、各種活動量とそれに基づくエネルギーサービス需要を計算して使用した。SSP2は、中庸的な社会経済を描写するシナリオに相当するが、代表的なシナリオは以下の通りである。

SSP1シナリオ：教育水準、ガバナンスともに高水準であり、国際的に協調し、その結果技術進歩も高い。教育水準の向上に伴い出生率は下がり、人口は低位で推移する。高い教育水準は適応策を容易にするとともに、高い技術水準が温室効果ガス排出量を低下させ、緩和策も比較的容易に行える。

SSP3シナリオ：教育水準、ガバナンスともに低水準であり、途上国と先進国の格差は拡大する。技術水準は低く、国際社会は分断されている。出生率は下がらず人口は21世紀を通して増加する。適応策は困難であり、かつ温室効果ガス排出量も増大し、緩和策の導入は困難となる。

SSP2シナリオ：SSP1とSSP3の間に位置する中庸的な世界。

また、2℃目標の達成に向けて導入が見込まれる対策技術について、中国、インド、タイ、インドネシア、ベトナムのカウンターパートの研究機関である国家発展改革委員会エネルギー研究所（中国）、北京工業大学（中国）、国立マウラナアザド国立研究所（インド）、アーメダバード大学（インド）、タマサート大学（タイ）、バンドン工科大学（インドネシア）、天然資源環境戦略研究所（ベトナム）に情報収集を依頼し、ストック技術の効率や価格、普及率に関する情報を整理した。またこれらの研究機関とは、提供された足元技術データを用いて実施した後述の排出量や対策の追加的投資額の推計の検証においても協働した。

将来技術はIEAのETP等の情報から作成した各国共通データをベースとしつつ、今回は「日本への裨益」の観点から、将来年の技術については、国内の政府見通し資料や学術論文、商品カタログ等から日本の技術のデータ（機器効率、機器コスト）を収集整備し、推計に適用して排出量や削減ポテンシャル、投資額の推計に適用した。具体的には表3.2.1に赤字で示す次世代自動車、空調や給湯器をはじめとする家庭・業務用の電子機器、ボイラーや工業炉など産業部門で横断的に用いられる汎用技術について更新を行った。

表3.2.1 AIM/Enduseの対策シナリオ分析で考慮した主な省エネ・脱炭素技術

エネルギー起 源CO ₂	エネルギー 転換部門	石炭・ガス火力(高効率)、CCS付石炭・ガス火力、水力、風力、太陽光、地熱、 バイオマス、地域熱供給(高効率、再エネ)、水素(ガス、再エネ)、廃棄物発電
	運輸部門	ハイブリッド車、プラグインハイブリッド車、電気自動車 CNG自動車、燃料電池自動車、ハイブリッドバス、EVバス 電化鉄道、航空機(高燃費)、船舶(高燃費) バイオ混合燃料(ガソリン・ディーゼル・ジェット・重油)
	家庭・業務 部門	断熱材、ヒートポンプ給湯機、ヒートポンプ空調、エアコン(高効率)、ガス調理器 (高効率)、電気調理機、LED照明、テレビ・冷蔵庫等家電製品(高効率)
	産業部門	高効率製鉄プロセス、電炉製鉄、高効率セメント製造プロセス(キルン)、産業 CCS(製鉄・セメント製造)、ボイラー(高効率)、産業用ヒートポンプ 高効率工業炉、電気工業炉、高効率モーター、インバーター
その他GHG		農林水産業、廃棄物処理、Fガス等への諸対策
大気汚染物質		排煙脱硫装置、脱硝装置、集塵装置

ここまでで整理した各国の社会経済シナリオを前提に、AIM/Enduseを用いて対策技術のコスト最小化の下での導入量を推計し、中国、インド、タイ、インドネシア、ベトナムの2050年までの排出シナリオの推計を実施した。特に2℃目標相当に該当する対策シナリオは、グローバルで見たときの排出量がRCP2.6に相当し、特に対策として再生可能エネルギーの導入と業務・家庭・運輸部門での電化を優先的に促進するようなシナリオを想定した。この時に必要となる炭素価格は推計の結果、400USD/tCO₂相当となる。さらに、対策シナリオと現行施策シナリオの排出量を比較することによって、発電、産業、民生、運輸部門での気候変動緩和策が、各国の排出量の低減に与える寄与についても定量的な分析を実施した。更に、大気汚染物質としてSO₂とPM_{2.5}に着目し、対策シナリオで実施する再エネ導入・電化促進を主とする気候変動緩和策によって副次的に得られる、大気汚染の低減効果についても、発電、産業、民生、運輸部門での寄与が見える形で定量的に推計した。これらの結果を、① 2℃目標の達成から見たアジア主要国におけるCO₂排出量推計、② 気候変動緩和策がもたらすアジア主要国における大気汚染物質の副次削減効果の推計、③ 2℃目標の達成から見たアジア主要国における技術のポテンシャル推計として考察を行った。

更に、1.5℃目標に向けての分析について、以下を実施した。まず中国とインドについて、革新技術のモデルへの組み込みを実施した。これらの国は、2050年においても産業部門、特に鉄鋼の製造に要するエネルギー消費量が大きく、また家庭、業務部門で都市ガスを含む化石燃料の消費が残ることから、水素還元製鉄技術と、CCSを活用した気体燃料の合成技術を2040年以降に見込み、1.5℃目標に向けたこれらの技術による2050年までの深掘りポテンシャルを定量化した。タイとインドネシアについては、ASEAN諸国の中でも先立って、2021年に長期戦略を策定し、UNFCCCへ提出した。これらの国の長期戦略に記載される電源構成などを参考に、2℃目標相当シナリオから更に削減を深掘りしたケースの排出パスの推計を実施した。ベトナムについては、天然資源環境戦略研究所とも連携を行い、ベトナム政府が2021年10月に公表した2045年までの電力のマスタープランについて、2050年以降早期のカーボンニュートラルに向かう排出パスとの比較を行うことで、現行電源計画の考察を行った。

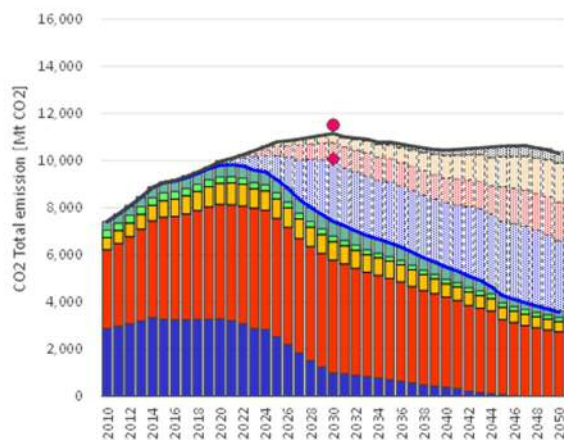
4. 結果及び考察

4. 1 2℃目標の達成から見たアジア主要国におけるCO₂排出量推計

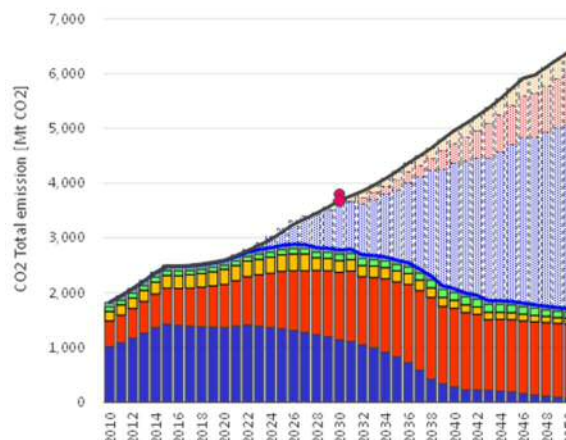
図4.2.2には、AIM/Enduseを用いた排出シナリオの定量分析の結果として、中国、インド、タイ、インドネシア、ベトナムの現行施策シナリオ及び対策シナリオのCO₂直接排出量（黒色・青色実線）、そのうち対策シナリオの部門別排出量内訳（色付き棒グラフ）、現行施策シナリオから対策シナリオへの削減量の部門別要因分解（ドット棒グラフ）、および2030年における各国の削減目標（2022年3月時点）

に相当する排出量のプロット（赤色の●、◆）を示す。

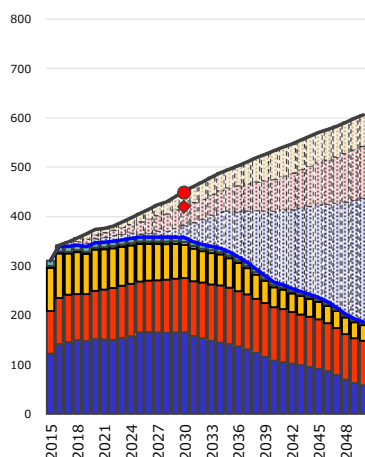
中国



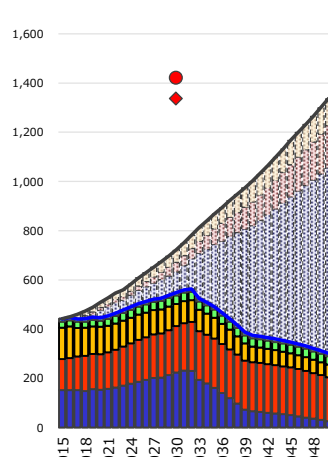
インド



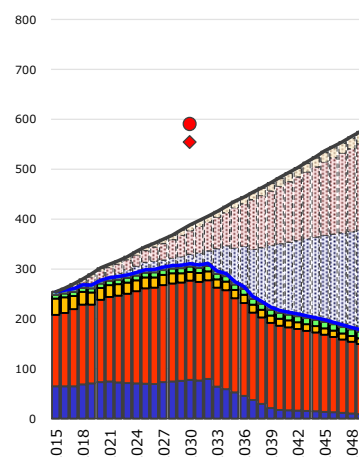
タイ



インドネシア



ベトナム



■ 発電部門 排出量 ■ 産業部門 排出量 ■ 運輸部門 排出量 ■ 民生部門 排出量
■ 他部門 排出量 ▨ 発電部門 削減寄与 ▨ 産業部門 削減寄与 ▨ 運輸部門 削減寄与

図4.2.2 中国、インド、タイ、インドネシア、ベトナムの現行施策シナリオ及び対策シナリオのCO₂直接排出量と各国NDCの2030年目標値（図内●◆）

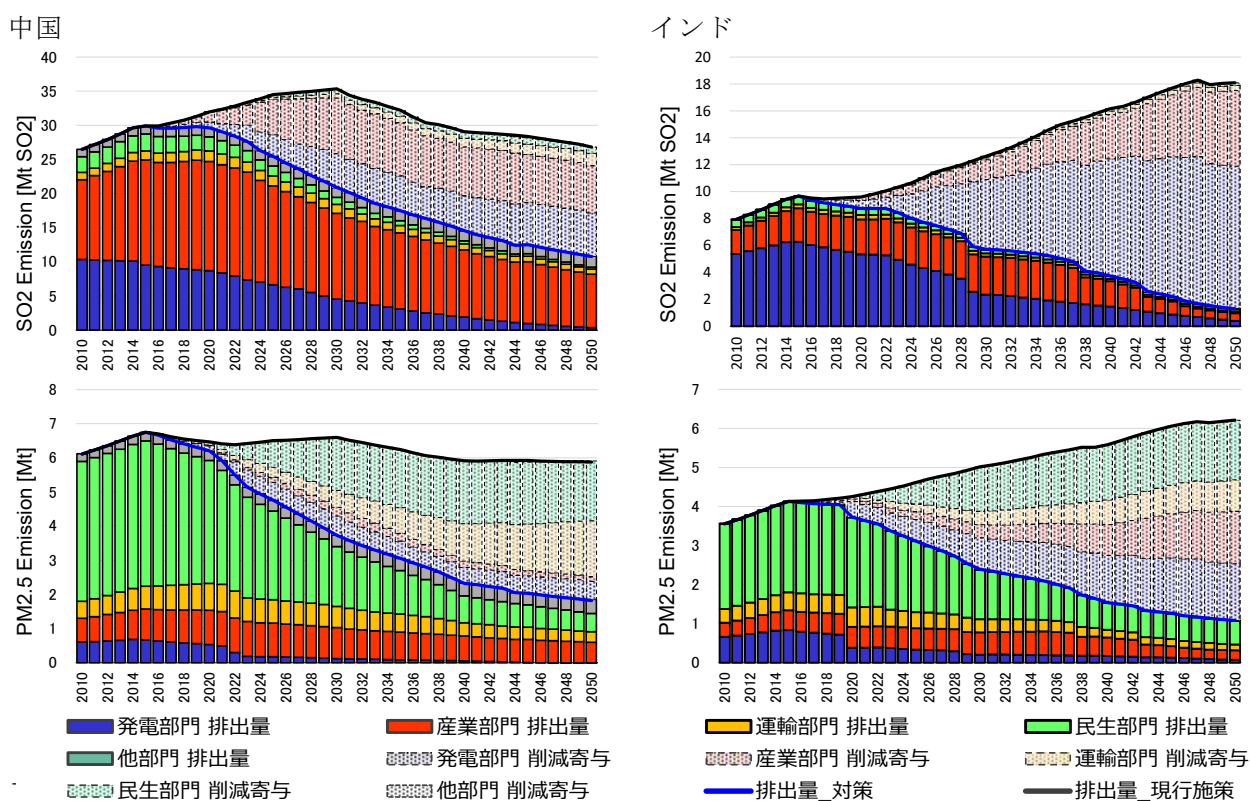
中国、インド、タイの結果について、現行施策シナリオ及び対策シナリオの排出量と、それぞれのNDC目標（中国：2005年比でGDP当たりの温室効果ガス排出量▲60～▲65%、インド：2005年比でGDP当たりCO₂排出量▲33～▲35%、タイ：2030年のBaU排出量比で▲20%（無条件）～▲25%（先進国支援条件））を比較すると、現行施策シナリオの排出量が、ちょうどNDC目標程度に相当している結果となった。さらに対策シナリオの場合、NDC目標値の約半減程度となっていることが分かる。このことから、2℃目標の達成に向けて、中国、インドの現行のNDCには、さらに深掘りのポテンシャルが存在し得るといえる。対策シナリオの部門別排出量内訳では、特に中国とインドで、2050年には発電部門でほぼゼロエミッション化が進展し、排出量の内訳は産業部門の直接排出が大半を占める。現行施策シナリオからの削減量でみると、大きな電力部門の削減量のほか、産業と運輸部門での削減ポテンシャルも存在することが分かった。インドネシアとベトナムでは、それぞれのNDC目標（インドネシア：2030年のBaU排出量比で▲29%（無条件）～▲41%（先進国支援条件）、ベトナム：2030年のBaU排出量比で▲8%（無条件）～▲25%（先進国支援条件））を、現行施策シナリオが大きく下回っている。2℃目標を達成する対策シナリオは、2030年時点でこれらのNDC目標から半減以下程度にある。

以上から、中国、インド、タイ、インドネシア、ベトナムで2℃目標相当の排出量シナリオ、NDCか

ら多い国で半減以上の削減深掘りを進める必要があること、また2050年断面で見たとき、アジアの2大排出国である中国とインドでは産業部門の排出量が大半を占め、発電部門はほぼゼロエミッション化が進展していることが分かった。

4. 2 気候変動緩和策がもたらすアジア主要国における大気汚染物質の副次削減効果

図4.2.3に、中国とインドの現行施策シナリオ及び対策シナリオのSO₂とPM2.5の排出量、また発電・産業・民生・運輸の各部門における削減貢献寄与の推計結果を示す。黒い実線で示す現行施策シナリオから、青い実線で示す対策シナリオにかけて、大気汚染対策に特化したエンドオブパイプ技術の対策強度は変化しないものと想定していることから、これらの2つの排出量の差分は、現行施策シナリオから2℃目標相当の対策シナリオで強化された、省エネ・脱炭素技術の導入による気候変動緩和策の削減効果と見なすことができる。その結果、中国及びインドのSO₂及びPM2.5の排出量は、5割～9割削減される結果が得られた。特にSO₂では産業・発電部門、PM2.5ではこれに加え民生・運輸部門での脱炭素技術の導入により、2020年頃以降大きく汚染物質を削減できることが分かり、気候変動対策による大気汚染物質の副次削減効果が定量的に示された。



- (上) : 中国（左）及びインド（右）の現行施策シナリオ及び対策シナリオのCO₂排出量と削減量の要因分解。CO₂直接排出量（黒色・青色実線）、そのうち対策シナリオの部門別排出量内訳（色付き棒グラフ）、現行施策シナリオから対策シナリオへの削減量の部門別要因分解（ドット棒グラフ）、および2030年における中国・インドのNDC削減目標に相当する排出量のプロット（●、◆）を示す。
- (中) : 中国（左）及びインド（右）の現行施策シナリオ及び対策シナリオのSO₂排出量と削減量の要因分解。SO₂直接排出量（黒色・青色実線）、そのうち対策シナリオの部門別排出量内訳（色付き棒グラフ）、現行施策シナリオから対策シナリオへの削減量の部門別要因分解（ドット棒グラフ）を示す。
- (下) : 中国（左）及びインド（右）の現行施策シナリオ及び対策シナリオのPM2.5（一次生成）排出量と削減量の要因分解。PM2.5直接排出量（黒色・青色実線）、そのうち対策シナリオの部門別排出量内訳（色付き棒グラフ）、現行施策シナリオから対策シナリオへの削減量の部門別要因分解（ドット棒グラフ）を示す。

図4.2.3 中国・インドの2050年までのSO₂、PM2.5の排出経路と気候変動緩和策による副次削減効果

4. 3 2℃目標の達成から見たアジア主要国における技術のポテンシャル推計

図4.2.4には、タイのタマサート大学と共同で、2030年のタイの温室効果ガスの排出経路について、AIM/Enduse [Thailand]を用いた部門別の分析を実施した結果を示す。タイのNDC目標（2030年にBAU比

▲20%、削減量で▲111MtCO₂eq)のうち、家庭部門及び道路輸送部門の削減量はそれぞれ20MtCO₂eq、15MtCO₂eq（どちらも電気熱配分後排出量相当）で、これらの部門の削減量はNDC目標達成のための温室効果ガス排出量の32%を占める。家庭部門では厨房機器、給湯機、冷房機器の順に排出削減ポテンシャルが大きく、道路輸送部門ではモーダルシフトの進展によって鉄道起源の排出量が増加するものの、ハイブリッド車の普及等による内燃機関自動車の高効率化によって、前述の20MtCO₂eq相当の削減が達成される結果となった（モーダルシフトに伴う自動車サービスの低減寄与を含む）。

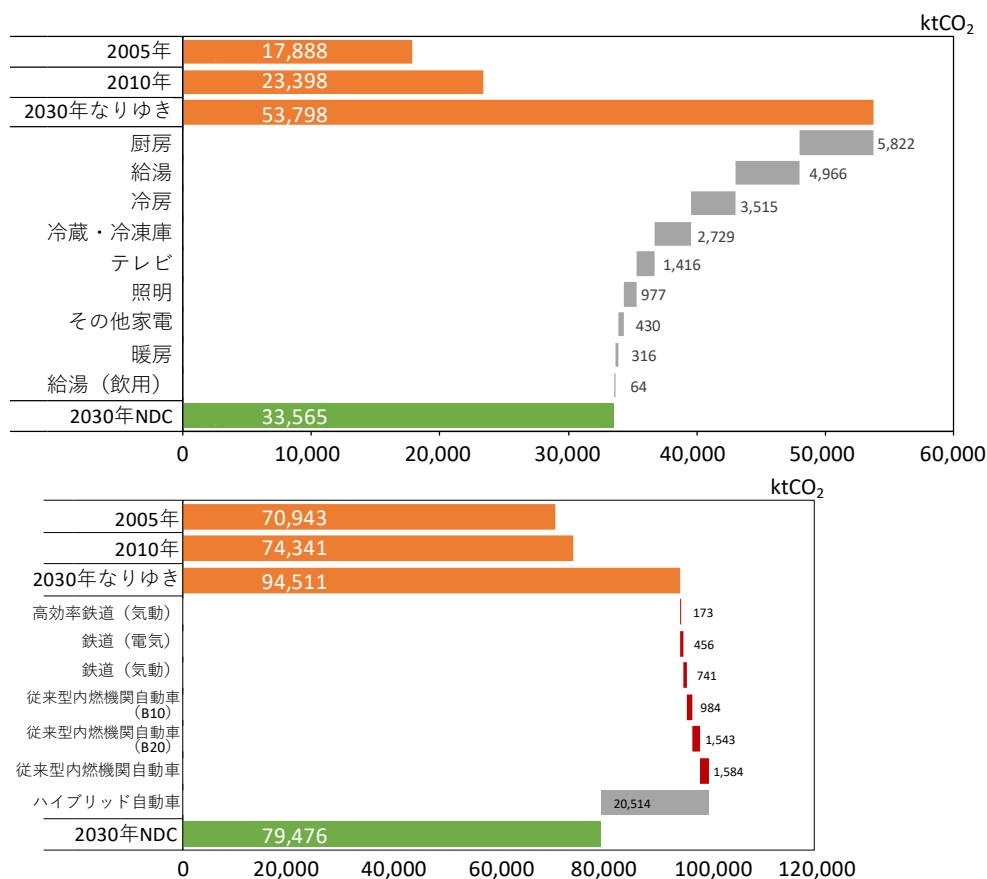


図4.2.4 タイにおける家庭部門（上）と道路輸送部門（下）における2030年の排出量と技術別削減ポテンシャル

また、AIM/Enduseを用いた推計結果から、2℃目標相当シナリオの2050年における技術ごとのCO₂の削減ポテンシャルについて分析を行った結果を、タイ・インドネシア・ベトナムと、中国・インドの別にそれぞれ集計した結果として図4.2.5に示した。中国・インドの2050年2℃相当シナリオの技術別の排出削減ポテンシャル（現行施策シナリオ比）を分析すると、タイ・インドネシア・ベトナムの東南アジア地域に比べ、産業部門での削減ポテンシャルが大きいことがわかる。タイ・インドネシア・ベトナムの2050年2℃相当シナリオの技術別の排出削減ポテンシャル（現行施策シナリオ比）を分析すると、民生の空調・家電機器や産業用ボイラ・モーター、乗用車・貨物自動車などで削減ポテンシャルが大きい結果となった。

これまでに示した結果から、2030年までは民生部門と運輸部門において、また2050年にかけてはこれに加えて、産業部門のボイラーやモーターで大きな排出削減ポテンシャルがあることが分かった。これらの我が国の強みとなる技術を多分に含んでおり、長期大幅排出削減の観点から、今後日本の技術の普及によりアジア諸国での大幅排出削減を進展する余地があることが示唆される。

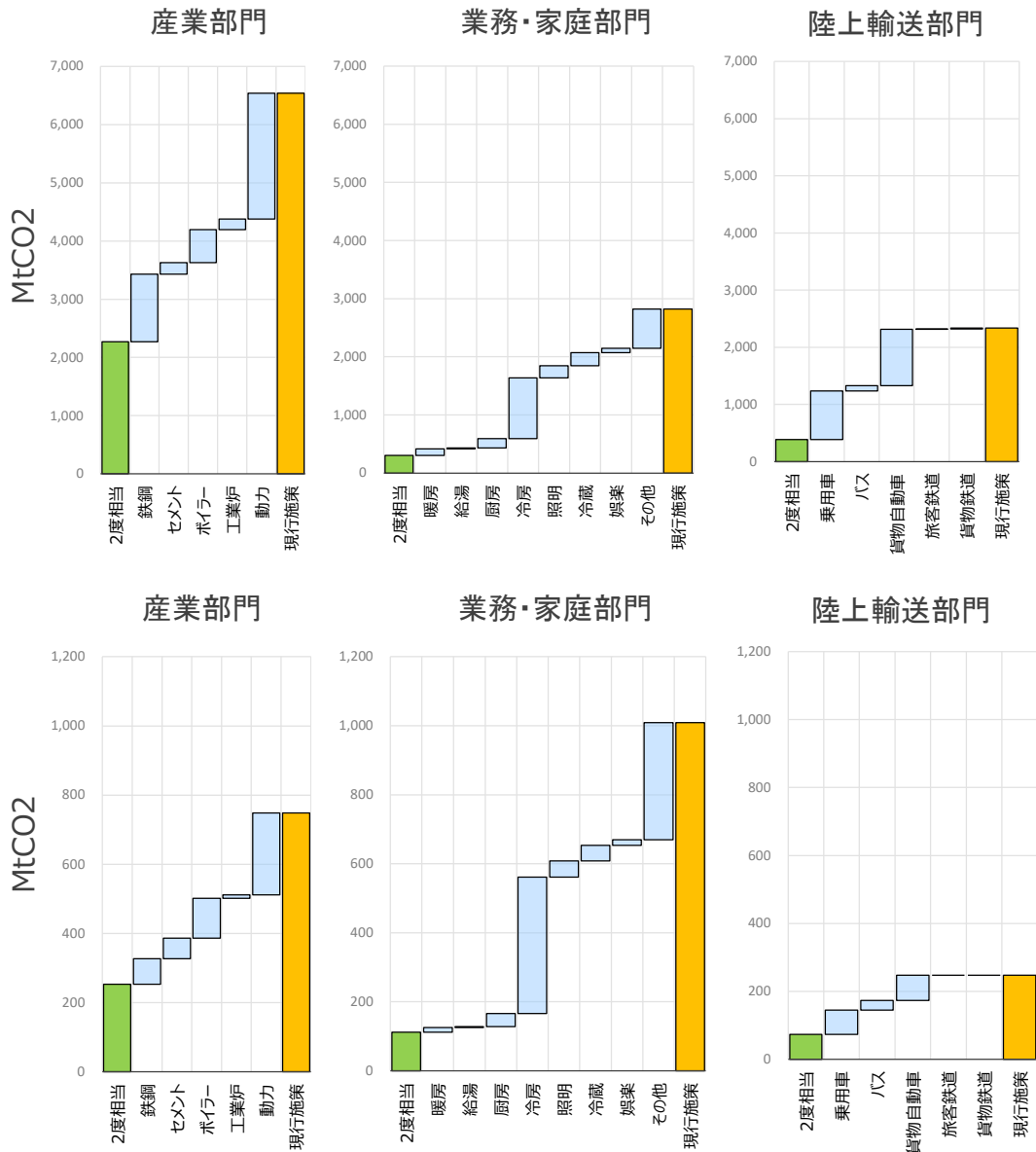


図4.2.5 中国・インド（上）およびタイ・インドネシア・ベトナム（下）の2050年における対策シナリオのCO₂削減ポテンシャル（現行施策シナリオ比）

図4.2.6には、開発・改良した技術積上モデルAIM/Enduseを用い、対象国である中国・インド・タイ・インドネシア・ベトナムについて現行施策シナリオを基準とした場合の、対策シナリオにおける2050年までの追加的投資の累積額についての結果を、部門別、国別にそれぞれ示した。国別で見た場合中国とインドで2℃目標達成に必要な投資額が、2050年時点で全体の9割程度を占め、これらの2か国で2030年までに累積4兆ドル程度、2050年までで累積24兆ドル程に達することが定量的に示された。また部門別の対策技術に対すると投資額に着目した場合、2030年まででは民生部門への投資額が、さらに2030年以降では運輸部門と発電部門での投資額の比率が大きくなっていく。民生部門と運輸部門の電化、省エネ化に伴う今後の対策技術の規模は、前節で述べた排出削減の観点からに留まらず、投資額から見た市場規模の観点からもポテンシャルが大きいことが定量的に示された。今後の大幅削減に向け、次世代自動車や空調機器、給湯用ヒートポンプなど、運輸部門と民生部門での日本の技術の導入が期待される。

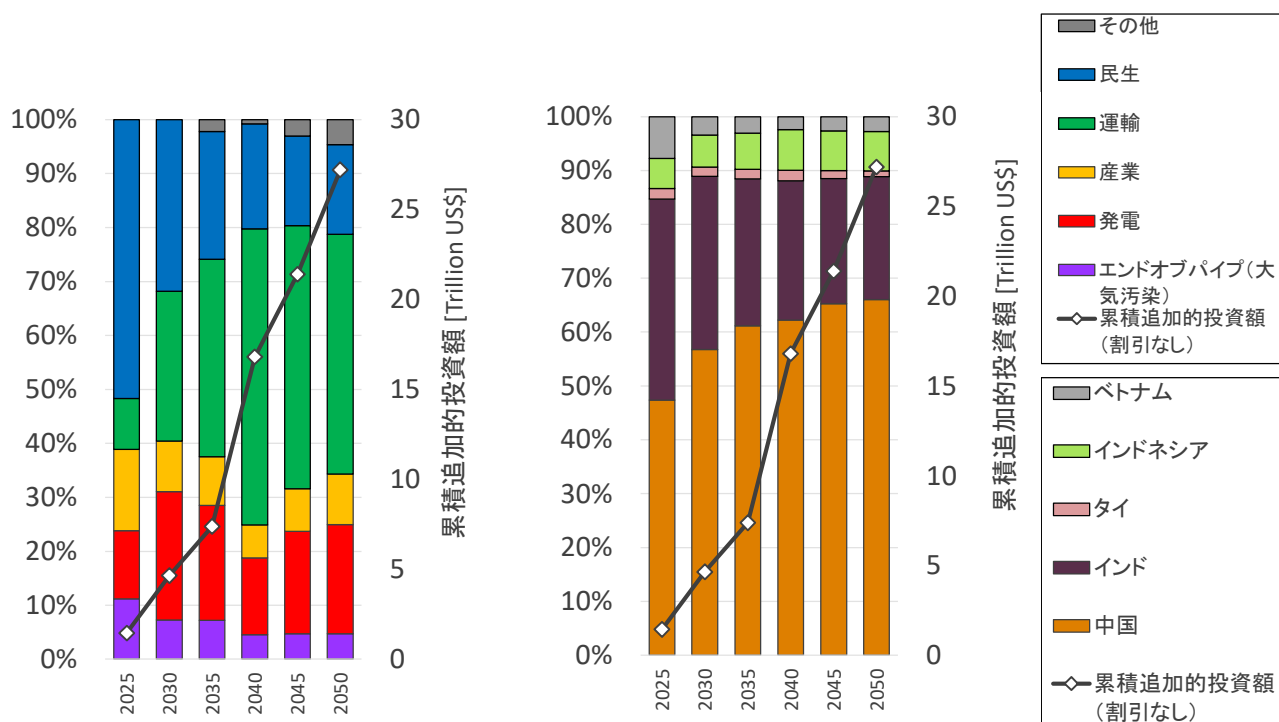


図4.2.6 中国・インド・タイ・インドネシア・ベトナムの2050年までの対策に要する追加的投資額
(左：部門別 右：国別)

4. 4 1.5℃目標に向けた達成から見たアジア主要国における排出シナリオ技術ポテンシャルの推計

中国、インドについては、革新技术のモデル上での再現も実施。今回は特に中国インドの産業部門の残余排出量に着目し、水素還元製鉄と、気液体燃料の合成について推計への組み込みを行った。なお、水素還元製鉄（H2DRI）は、直接還元鉄（Direct Reduced Iron, DRI）は還元ガスを用いて直接鉄鉱石を還元することで得られる鉄を指す。高炉を必要とせず、水素製造時に消費する電力は非化石電源由来であると想定されている。本技術は実証段階にあり、2016年にスウェーデンで発足したHYBRIT（Hydrogen Breakthrough Ironmaking Technology）プロジェクトは、2035年までに水素還元でカーボンフリーの鉄鋼製造を目指す。またコークスを製造・使用しないため、小規模化・省CO₂化が可能になる。特にまた気体合成燃料の製造技術について、今回考慮した技術はCO₂とH₂の反応により生成される燃料であり、サバティエ反応等のメタネーションを通じて生成される気体のメタンが気体合成燃料に区分される。CO₂を炭素源としており、将来は事業所や大気中から回収したCO₂を利用することによって、脱炭素燃料とみなすことができる。

以上の技術の導入を考慮し、2050年時点で水素還元製鉄の導入量を粗鋼全体の25%、産業部門での液体・気体燃料の炭素強度を50%低減とした場合の排出経路について分析した結果を、図4.2.7に示す。2040年以降に深掘り対策をはじめ、2050年時点で水素還元製鉄の導入量を粗鋼全体の25%、産業部門での気液体燃料の炭素強度を50%低減とした場合、2060年頃にネットゼロ（エネ起源・工プロCO₂）がおおよそゼロに届く排出経路となることが推計の結果から分かった。

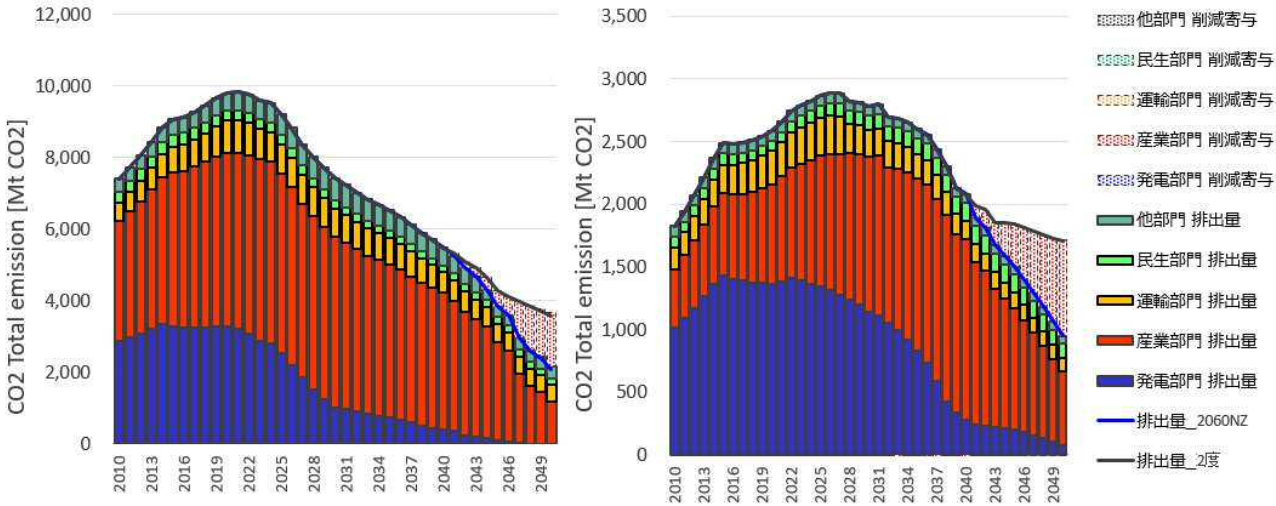
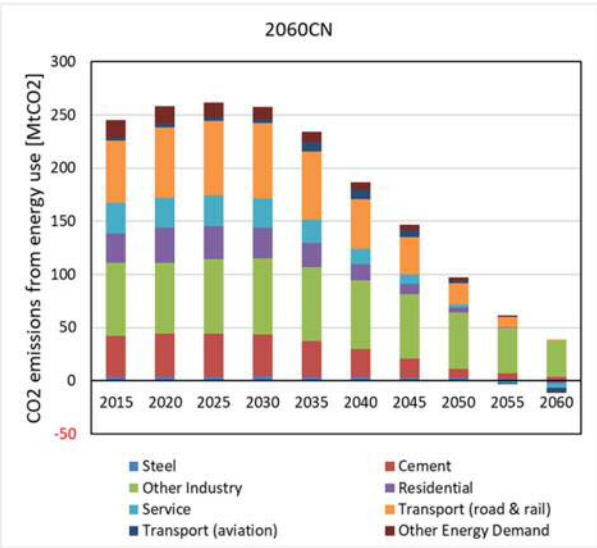


図4.2.7 2050年時点で水素還元製鉄の導入量を粗鋼全体の25%、産業部門での液体・気体燃料の炭素強度を50%低減とした場合の排出経路（左：中国 右：インド）

タイとインドネシアについて、2℃目標相当の対策シナリオからさらに踏み込み、2060～2065年頃にカーボンニュートラル（エネルギー起源CO₂）を目指す対策シナリオ（再エネ優先・産業・民生・運輸部門で電化と水素利用の促進）について分析した。タイとインドネシアはASEAN諸国の中でも先立って、2021年に長期戦略を策定し、UNFCCCへ提出した。これらの国の長期戦略に記載される電源構成などを参考に対策強度を設定している。図4.2.8にはタイとインドネシアの削減を深掘りした排出パスの推計結果について、電力と熱を需要側に配分した間接排出量で部門別に示した。タイとインドネシアで、それぞれ将来年において、主に産業部門で残る残余排出（棒グラフの正の方向）を、電力の排出係数をバイオマスCCSを活用してネガティブエミッション化を実現した上で、民生部門と自動車輸送部門での電力消費によって得られるオフセット（棒グラフの負の方向）によって相殺していき、2060～2065年にエネルギー起源CO₂がゼロとなるパスを達成している。このような排出経路の実現には、エネルギーの供給側では電源構成に占める再エネ比率を9割程度にした上でバイオマスCCSを活用し、需要側では最大限の電化を勧めたうえで、産業部門で一部残る化石燃料起源の排出に対して、CCSの設置率をほぼ100%まで高めていくが必要になる。

タイ



インドネシア

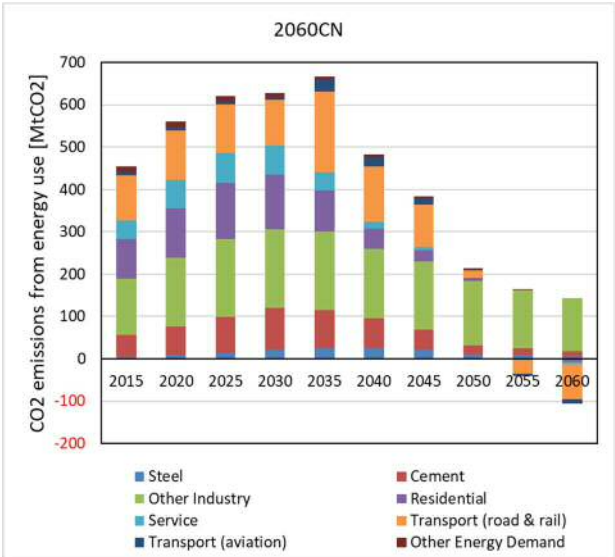
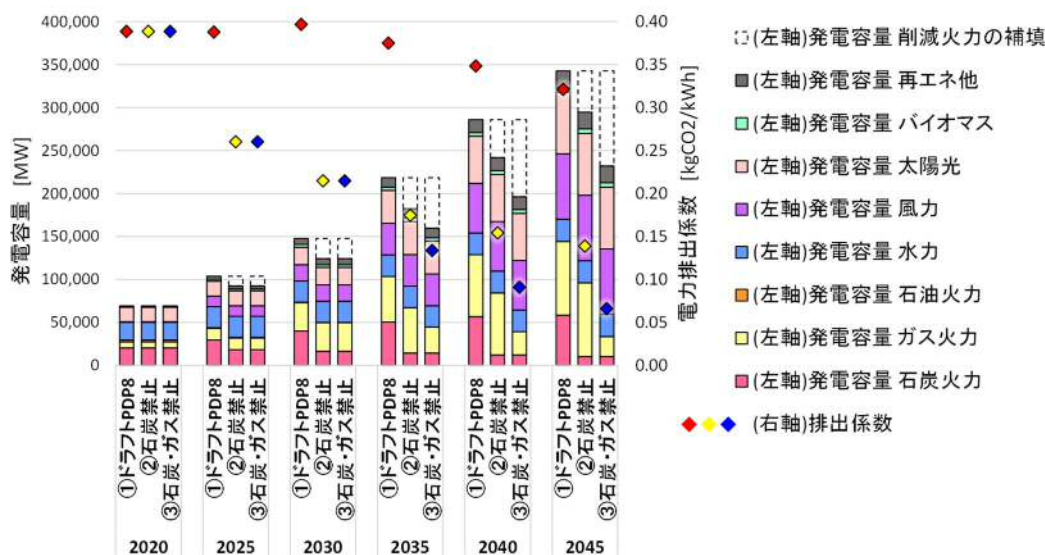


図4.2.8 タイ・インドネシアの2060～2065年頃にカーボンニュートラル（エネルギー起源CO₂）シナリオの推計結果

2050年カーボンニュートラルに向けたベトナムの分析について、図4.2.9にベトナムが2021年10月に公表した2045年までの電力のマスタープランの改定（第8次、以降PDP8と記載）のドラフトに記載される発電容量の計画をもとに、①ドラフトPDP8（高位ケース）、②ドラフトPDP8から石炭火力発電の2021年以降の新設を禁止する場合、③石炭火力発電の2021年以降の新設及び2031年以降のCCS無ガス火力の新設を禁止する場合についての、発電容量と電力排出係数の推移の分析結果を示した。①ドラフトPDP8の場合、2045年まで石炭火力とガス火力の新設が続く、2045年でも発電容量ベースで5割程度を占める。これらの火力が仮にCCSを設置に対応していない設備である場合、電力の平均排出係数は2045年でも0.33kgCO₂/kWh（ガス火力の排出係数と同程度）となり、2050年以降早期のカーボンニュートラルに整合せず、火力発電の設備が大量に座礁資産化する可能性が示唆される。③ドラフトPDP8から2021年以降の石炭火力新設及び2031年以降のガス火力の新設を禁止してその補填を再エネやCCSによって行う場合、電力排出係数は2045年までに0.07 kgCO₂/kWh まで低減可能であり、BECCSの活用等をさらに実施することで、排出係数のゼロ化、あるいはネガティブ化も可能となる。以上より、検討が進められているベトナムの電力マスタープランは、現状の計画から再エネの導入量を大幅に拡大し、石炭火力発電の段階的廃止も考慮に入れるなど、カーボンニュートラルの達成に資するものへと変更する必要があると言える。



※PDP8の2021年10月ドラフト版における高位ケースが対象

図4.2.9 ベトナムの電力マスタープランの発電容量推移と火力発電の新設禁止による電力排出係数の低減効果の分析結果

5. 研究目標の達成状況

技術積み上げ型のエネルギー需給モデルであるAIM/Enduseを用いて、アジア主要対象国での主要2℃及び1.5℃目標の達成から見たアジア主要国におけるCO₂排出量推計、気候変動緩和策がもたらすアジア大気汚染物質の副次削減効果の推計および目標の達成から見たアジア主要国における技術のポテンシャル推計を実施し、2030年、2050年の技術的な排出削減ポテンシャルや見込まれる市場規模、必要となる対策を明らかにした上で、今後の大幅削減に向け、日本の技術の導入に資する分析結果を創出することができた。

6. 参考文献

特に記載すべき事項はない。

Ⅱ－3 2℃目標の達成から見たアジア主要国における排出削減目標の深掘りの国際的な効果

国立大学法人京都大学

工学研究科 都市環境工学専攻

藤森 真一郎

学校法人立命館大学

理工学部環境都市工学科

長谷川 知子

橋本 征二（2021年4月から2022年3月まで）

〈研究協力者〉

国立大学法人京都大学

工学研究科 都市環境工学専攻

西浦理

国際応用システム分析研究所（IIASA）

エネルギープログラム

Keywan Riahi・Volker Krey

【要旨】

サブテーマ3では主として3つの事項を実施した。第一に、これまで開発してきた世界応用一般均衡モデルを用いて、世界を対象とした温室効果ガス排出経路を推計し、世界及びアジアにおける温室効果ガス排出量やエネルギーシステムに関連する指標を定量化することである。第二に、衡平性を考慮した複数のエフォートシェアの概念および上記の世界の温室効果ガス排出経路を用いて、アジア各国の排出経路を提示することである。なお、ここでエフォートシェアは、削減能力、責任などを考慮したものである。第三は、IPCCなどで用いられる統合評価モデルを用いたシナリオの設計に関する提案で、グローバルシナリオの今後の在り方の一つを提案した。第三の作業は当初想定していなかったが、課題途中にIPCCの1.5℃に関する特別報告書が出版され、第6次評価報告書全体にかかわる統合評価モデルのシナリオの問題は深刻であると判断されたので、緊急に作業として取り組むこととした。実際にその成果は第6次評価報告書に適切に反映され、IPCCの報告書全体に大きな影響を与えることとなった。

1. 研究開発目的

世界全体の1.5℃、2℃目標に相当する排出パスやそれを基にした各国の排出許容量を計算し、サブテーマ1、サブテーマ2でアジアの各国の脱炭素化シナリオを検討できるようにすることを第一の目的とする。また、アジア各国の情報をいながら世界全体の1.5℃、2℃目標の評価を行う。

2. 研究目標

世界を対象とした応用一般均衡モデルを用いて、世界的な目標である2℃/1.5℃目標の実現に対して、各国で必要な排出削減目標を推計し、その情報を各サブテーマに提供するとともに、サブテーマ1及び2から得られる削減ポテンシャルや日本による支援を組み入れた場合の世界への影響について明らかにすることを目標とする。

3. 研究開発内容

サブテーマ3では主として3つの事項を実施した。第一に、これまで開発してきた世界応用一般均衡モデルを用いて、世界を対象とした温室効果ガス排出経路を推計し、世界及びアジアにおける温室効果ガス排出量やエネルギーシステムに関連する指標を定量化することである。第二に、衡平性を考慮した複数のエフォートシェアの概念および上記の世界の温室効果ガス排出経路を用いて、アジア各国の排出経路を提示することである。なお、ここでエフォートシェアは、削減能力、責任などを考慮したものである。第三は、IPCCなどで用いられる統合評価モデルを用いたシナリオの設計に関する提案で、グロー

バルシナリオの今後の在り方の一つを提案した。

3. 1 世界一般均衡モデルの開発とその応用

第一の作業の推計には世界応用一般均衡モデルを用いた。本研究では世界応用一般均衡モデル AIM/CGE (Computable General Equilibrium) モデル (Fujimori, Kainuma, Masui, Hasegawa & Dai, 2014; Fujimori, Masui & Matsuoka, 2014, 2015; Hasegawa et al., 2014; Hasegawa, Fujimori, Takahashi & Masui, 2015) を用いてシナリオの定量化を行った。AIM/CGEにより得られたガス別の排出量を簡易気候モデルであるMAGICC (Model for the Assessment of Greenhouse-gas Induced Climate Change) (Meinshausen, Raper & Wigley, 2011) に入力し、全球平均気温など気候情報を得る。パラメータはRCP s (Representative Concentration Pathways) (Vuuren et al., 2011) 作成時に用いられたパラメータ設定をそのまま使用し、気候感度は3℃を使用した。シミュレーションは2005年から2100年までの全世界を対象とした。

本研究で用いるCGEモデルは生産、消費、投資、貿易活動が各種生産要素、財等の価格を所与とした関数を用いて記述されている。生産活動は利潤最大化を前提としており、中間財、生産要素を投入する。生産活動により発生する所得(雇用者報酬、営業余剰、生産にかかる税)は代表的家計が受け取る。家計は所得の一部を貯蓄に回し、所得から貯蓄を引いた可処分所得を所与として消費を行う。消費財の支出割合は効用最大化のもと決定される。次に最終消費は家計消費、資本形成で構成される。ここでは家計消費と政府消費を集約して代表的家計消費として表している。資本形成の総額はGDPと同じ比率で上昇すると仮定し、財別の資本形成のシェアは基準年で固定し、財間の消費割合は変化しないとした。貯蓄と投資がバランスするため貯蓄性向は資本形成に応じて内生的に決定するとした。ここで、新たに蓄積される資本は次の年の新規資本として稼働し、生産要素の一つとなる。本モデルは1年単位の逐次動学型モデルである。旧資本と新規資本が区別されており、資本の情報が次年へ更新される。一般に統合評価モデルには逐次動学型と動学最適型モデルの二つのタイプが存在するが、本論文が対象としている緩和策シナリオはすでに決められた温室効果ガス排出パスの下でエネルギーシステム、土地利用などのレスポンスを解析するということを行っており逐次動学型モデルを使用する。詳細な式体系については、Fujimori, Masui and Matsuoka (2012) に記述されているのでそちらを参照されたい。

風力、太陽光エネルギーのポテンシャルは (Herran, Dai, Fujimori & Masui, 2016)、化石燃料資源については (Rogner, 1997) を用いた。バイオマス供給ポテンシャル及び供給費用については (Hasegawa, Fujimori, Ito, Takahashi & Masui, 2017) を用いた。

温室効果ガスとしては、エネルギー起源CO₂、土地利用起源CO₂、CH₄、N₂O、F-ガスを扱う。エネルギー起源のCO₂排出量は、化石燃料消費量と燃焼に係数を乗じて計算される。非エネルギー関連のCO₂排出量は土地利用の変化と産業プロセスで構成されており、土地利用変化排出量は、炭素ストック密度を前年と当年の森林面積の変化量に乘じる。土地利用変化の排出以外の非エネルギー関連の排出量は、活動量レベルに比例すると仮定される。CH₄はさまざまな排出源を持っているが、主として米の生産、家畜、化石燃料の採掘、及び廃棄物管理部門から排出される。N₂Oは、施肥や家畜糞尿管理、化学工業によって排出される。CH₄、N₂Oいずれも活動量に係数を乗じる。大気汚染物質の排出 (BC、CO、NH₃、NMVOC、NO_x、OC、SO_x) は、燃料の燃焼及び活動レベルに排出係数を乗じる形で定式化され、その係数は、大気汚染物質除去技術や関連法規の実施に応じて経年的に変化していく。

本研究では緩和策シナリオを扱うが、いずれの緩和策シナリオも世界全体で共通のGHG排出価格が課される。そのGHG排出価格はGHG排出税としてすべての排出に課税され、その税収はその国の家計が全額を受け取ると仮定する。本研究では排出権取引を想定していないが、現実には排出権取引が国際制度の基ある程度実施され、それに伴い資金フローも新たに発生すると考えられるが、本研究ではそれらの効果の分析は対象外とする。エネルギーの最終消費部門はこの温室効果ガスに対する課税により、省エネ化と低炭素排出のエネルギー源へシフトする。一方発電部門も同様に化石燃料火力発電は相対的に発電費用が高くなり、再生可能エネルギーや原子力発電へとシフトしていく。ただし、火力発電、バイオマ

ス発電などでは炭素隔離貯蔵(CCS)の導入が可能であり、炭素価格に応じてCCSの導入比率が決定される。CCSの導入は、CCSサービスを提供する産業を仮定し（生産構造はIEA（2008）を基に作成）、そのサービスを各種発電部門が中間投入とするとした。土地利用についてはGHG排出価格が土地の炭素ストックに応じて価値を持ち地代に追加されるとして、土地利用変化に伴うCO₂排出が減少するように定式化した。その他の非エネルギー起源排出に対しては、限界削減費用曲線を導入して、炭素価格に応じて削減が行われる。非CO₂の排出量については大規模事業者に対しては排出量の報告義務などを通じて課税できると思われるが、小規模事業者、特に個別農業者に対して課税するのは現実的には難しい可能性があることには留意する必要がある(Fujimori et al., 2019)。

モデルは既存のものをベースとしてさらに以下の改良を行った。1)モデル内での電力部門の発電容量の物理量を明示的に表せるようにする。2)発電容量、設備稼働率、費用等を2005-2010年の推計期間を用いてキャリブレーションを行う。3)IEAのエネルギーバランス表との整合性を図るために2005-2010年の期間で、エネルギー消費強度、燃料消費割合、並びに発電の電源シェアを表すパラメータを内生的に決定する。これにより、直近年のエネルギー消費量や温室効果ガス排出量が報告値と近いものとなる。シナリオは以下の4つを想定する。①気候変動緩和策を実施しないいわゆるベースラインシナリオ（Baseline）、②パリ協定で提出された国別の約束草案（NDC）ベースの政策を2030年付近まで実施し、その後同程度の緩和努力（2030年と同一の炭素価格）を続けるシナリオ（NDC）、③2030年まではNDCで、それ以降全世界が共通の炭素価格のもと2℃目標を目指して気候変動対策を実施するシナリオ（NDC_2D）、④NDCより強度の強い緩和策を2020年より全世界が共通の炭素価格のもと実施するコスト費用効果的な2℃目標へ向かうシナリオ（Opt_2D）である。これらの計算では各サブで得られる各国のエネルギー情報や国別排出目標等の情報を参考にモデル内パラメータを決定した。

3. 2 エフォートシェアツールの開発

第二の作業のために、エフォートシェアを計算するツールの開発を行う。エフォートシェアとは、産業革命以降の気温上昇を2℃あるいは1.5℃未満に抑制するために必要な温室効果ガス排出削減量を、一定の基準により公平に国別に割り当てる考え方である。既存文献の研究(van den Berg et al., 2019)によると、エフォートシェアを各国に配分するルールは以下の表3.3.1に示す7種類に大別される。本研究ではこの7種類のうちCost Optimalを除く6種類のルールによるエフォートシェアを計算するツールを作成した。またエフォートシェアの割り当ての方法として、2℃目標/1.5℃目標の達成にあたって排出が可能な残りのCO₂または温室効果ガスの排出総量を国別に配分する「カーボンバジェット（Carbon Budget）」と、同目標の達成に向けたグローバルの削減シナリオに基づいて年毎の排出量を配分する「排出経路（Emission Pathway）」の2通りがある。本研究で作成したツールでは6種類の各ルールにつきカーボンバジェットと排出経路の双方を計算可能である。ただし、「Equal cumulative per capita emissions」のルールについては、van den Berg et al. (2019)にも排出経路の計算方法が示されていないため、カーボンバジェットのみを対象とした。

表3.3.1 エフォートシェアの考え方

ルール	原則	正当化の根拠	配分方法
Grandfathering (GF)	Sovereignty 領有権	これまでに構築された文化や慣習として正当化される既得権	現状の排出量シェアで配分
Immediate per capita convergence (IEPC)	Equality 平等	すべての人間が平等な価値、権利を有する	人口の比率で配分
Per capita convergence (PCC)	Sovereignty/Equality 領有権/平等	GFとEqualityの組み合わせ	現状の排出量シェアと人口シェアの両方を勘案して配分
Equal cumulative per capita emissions (ECPC)	Equality/Responsibility 平等/責任	先進国が既に世界全体の排出枠を過度に使用している	一定期間の累積1人当たり排出量をもとに配分
Ability to pay (AP)	Capability/Need 能力/ニーズ	支払い能力	ベースライン排出量と削減目標との差を1人当たりGDPで配分
Greenhouse development rights (GDR)	Responsibility/ Capability/Need 平等/責任/ニーズ	尊厳ある持続可能な人間開発の水準に達する権利の保護	ベースライン排出量と削減目標との差をResponsibility-Capacity Indexに基づき配分
Cost-optimal (CO)	費用対効果	限界削減費用曲線により費用最小化	各国の限界削減費用をもとに世界全体で費用が最小になるように配分

3. 3 グローバルシナリオを用いた国別シナリオの提案と開発

第三の作業では、グローバルシナリオの作業を行った。グローバルシナリオについて説明すると、既存のシナリオを整理し、それらの特徴を明らかにする。ここではIPCCの1.5℃特別報告書で用いられたシナリオデータベースを整理した。次に、国際的な気候政策の議論で求められるシナリオの要件が何かを議論し、最終的に提案を実施した。

温暖化を許容範囲内に抑えるための要件を理解することは脱炭素のレベルを決定するうえで鍵となるが、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の「1.5℃の地球温暖化に関する特別報告書」（SR1.5）（Rogelj, Shindell et al., 2018）で評価された結果によると、産業革命以前の水準と比較して、温暖化を1.5℃に抑えながら排出できる二酸化炭素の量（いわゆる残存炭素バジェット）の評価に加えて、これらの炭素バジェットを維持しながら長期的に社会を変革する道筋も記述されている。これらの道筋は統合評価モデル（IAM）により検討され、モデル化されたエネルギーおよび土地利用システムの変革は、想定される利用可能な炭素バジェットに決定的に依存している。ただし、炭素バジェットの見積もりには不確実性の範囲があり、その値は主としてIPCCの第一作業部会の最新の科学的知見をもとに更新されてきた（Rogelj, Forster, Kriegler, Smith & Séférián, 2019）。その結果、IAMシナリオが用いる炭素バジェットは、元々設計された気候目標とは異なる気温の結果が推計されるということがある。これは、これまでのIAMのシナリオがそうであったように、ある特定の炭素バジェットのもとで作成するシナリオを生成することに焦点を合わせる限り、今後も同様に起こる可能性がある。しかし、IAMコミュニティといったより広範囲について考慮し、次世代のIAMシナリオを適切にデザインすることで、このような事態を避けることができる可能性がある。そこで本研究では、この問題にシステムティックに対応し、IAMシナリオがいつでも最新の気候科学に基づいて地球規模の気候政策に情報を提供できるようにするための、コミュニティシナリオの取り組みについて提案した。

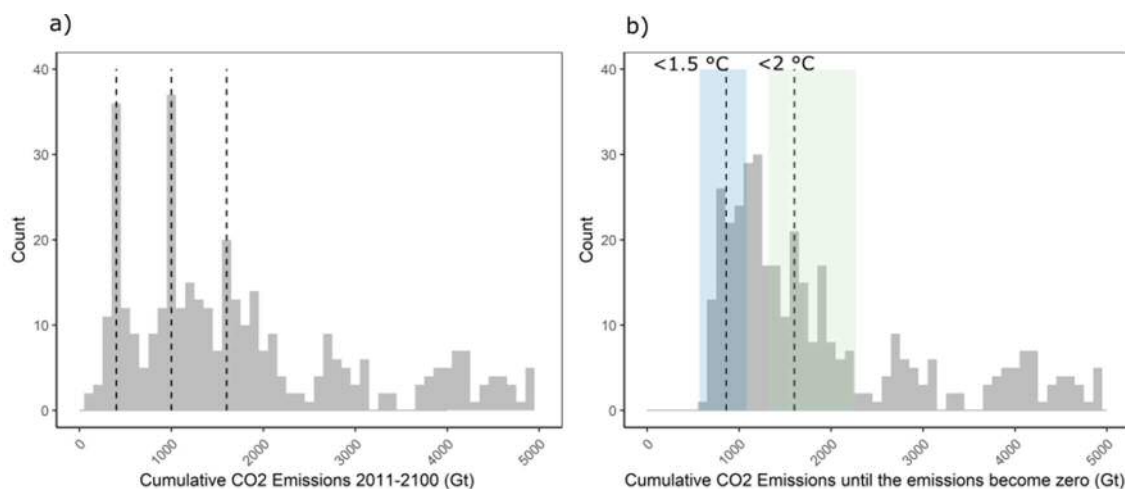
SR1.5収録されているIAMシナリオのうち1.5℃目標、2℃目標（66%以上、50%以上の確率で）を達成するシナリオは、ある特定の炭素バジェットの仮定のもとで作成された。具体的には、ADVANCE（Luderer et al., 2018）、CD-LINKS（McCollum et al., 2018）およびEMF33（Bauer et al., 2018）といった統合評価モデル比較プロジェクトが大きくSR1.5データベースへ貢献した（Huppmann et al., 2018）。これらの研究は、2011年から2100年までの二酸化炭素の累積排出量を3つのレベル（400、1000、1600GtCO₂）に仮定した。その結果シナリオの頻度分布は累積排出量に対してある特定の範囲にピークを持つという特徴を持つことになった（図3.3.1a）。

しかし、炭素バジェットの推定値は時間の経過とともに改良されることが予想される。これは、気候モデル実験が数年ごとに行われ、CO₂濃度に対する気温のレスポンスが変わってくることによる。特に気温上昇を厳しく抑制するような昨今の気候目標下では炭素バジェットは非常に感度が高くなると考

えられる。そのため、数年たつとそれまで使っていた炭素バジェットは有効でなくなるかもしれない。例えば、ある温度制限に対して、残りの炭素バジェットの見積もりを200~300GtCO₂更新した場合、気候変動緩和の課題に対する理解に大きな影響を与える。このことは、更新された特定の炭素残量予算と気候目標を達成するために必要な、モデル化された炭素価格の変動によって説明される。IAMによってモデル化された炭素価格は、しばしば気候政策の必要な厳しさの代替的な指標として理解されているが、図3.3.2 から、600GtCO₂から800GtCO₂に移行する場合、厳しい緩和シナリオでは250US\$/tCO₂も変動することがあることを示す。参考までに、250US\$/tCO₂炭素価格の上昇は、暗黙のうちに50US\$/bblの基準価格から約3倍に原油価格が上昇することに相当する。このため、国連パリ協定の長期気温目標の実現可能性について、かなり異なる提言や結論が出される可能性がある。

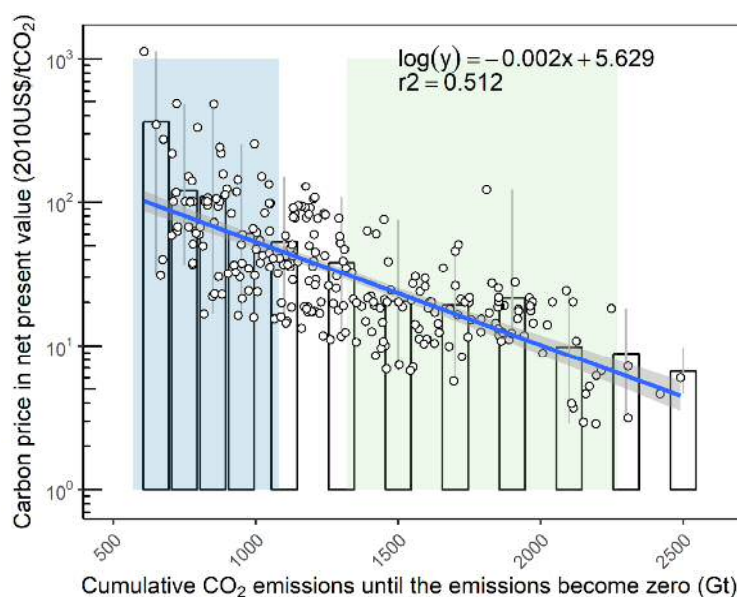
炭素バジェットの推定を取り巻く現在の不確実性には様々な側面があり、その詳細については別の場所で議論されている(Rogelj et al., 2019; Rogelj et al., 2018)。これらの不確実性は近い将来のどの時点でも完全に解決されるわけではないが、時間、気候変動、そして気候変動問題の物理学に対する我々の理解が進むにつれて、これらの推定値の継続的な改善が期待される。IAMによるシナリオは、こういった知見の更新に備える必要があり、これは、エネルギーシステムとシナリオモデリングのコミュニティに明確な科学的課題を提起するものである。コミュニティが従ってきた従来のアプローチは、限られたカーボンバジェットのセットを事前に選択することから成っている。このアプローチは、的外れな結果を招く危険性があり、利用可能なIAMシナリオの大半が、気候政策に関連すると考えられる地球温暖化の特定のレベルと一致しない状況になる可能性が高い(Schleussner et al., 2016)。

したがって、我々は、シナリオモデルコミュニティが追随し、以前に発表された単一モデル研究に沿って、より体系的に炭素バジェット空間を探索することができる、異なるアプローチを提案した。



2011年から2100年までの累積炭素排出量（パネル a）と、排出量がゼロになるまでの累積炭素排出量（パネル b）の度数分布。パネル a の破線は、過去数年間のコミュニティシナリオの設計に使用された3つのレベルの累積CO₂排出量を示している(Bauer et al., 2018; Luderer et al., 2018; McCollum et al., 2018)。パネル b の青と緑の範囲は、産業革命以前のレベルに対して温暖化を1.5℃と2℃に制限することと一致する炭素バジェットの残り幅を示している。この範囲は、33thから67thの分布のパーセンタイルにまたがっている。パネル b の破線は、それぞれの中央値推定値 s。両パネルにおけるシナリオのデータは、IPCC SR1.5 のデータに基づいている。

図 3.3.1 IAM シナリオにおける累積炭素排出量の分布



縦軸のc炭素価格は、今世紀中の炭素価格推移の正味現在価値を、2010年まで年率5%で割り引いたものの。棒グラフは、累積排出量レベルごとの平均炭素価格。100GtCO₂ステップは、600-1000GtCO₂の範囲の累積CO₂排出量について、200GtCO₂ステップは、1000-2500GtCO₂の範囲を対象としている。エラーバーは、各バーにおける炭素価格の最小-最大範囲を示している。対数線形回帰の結果は青い線で、95%信頼区間は灰色の範囲として表されている。青と緑の範囲は、産業革命以前の水準に比べて温暖化をそれぞれ1.5℃と2℃に抑制するのに一致する炭素バジェットの残り幅を示している。

図 3.3.2 炭素価格と累積CO₂排出量

4. 結果及び考察

4. 1 2℃目標の達成から見たアジア主要国における排出削減目標の深掘りの国際的な効果

第一の作業結果の概要を以下に示す。図4.3.3から、世界全体の温室効果ガス排出量はBaselineでは堅調に増加し、およそ2100年には95GtCO₂eq/年となる。一方NDCシナリオは2020年までは増加するものの、その後排出量増加は落ち着くが、2030年以降は再び増加する。これはNDCに相当する排出削減努力は一定の効果はあるもののGDPや人口の増加などの影響で排出量を減少させるほどではないことを意味する。一方、2℃目標に相当する2つのシナリオは21世紀前半から大幅な排出削減が実施され、2100年に向けてほぼゼロとなる。図には明示されていないがCO₂は2080年以降に負値となる。これは、バイオマスと炭素隔離貯留（CCS）を組み合わせたBECCS（Bioenergy Carbon Capture and Storage）や大規模植林を用いて負の排出量を実現し、純排出量でも2080年以降負の排出量となる。産業革命以前比で2100年における全球平均気温上昇量はBaseline、NDC、2℃目標のシナリオでそれぞれ3.8、3.4、1.8℃となる。IPCC第5次評価報告書でも見られるように、本研究の2℃以下に抑えるOpt_2DとNDC_2Dにおいては、全球気温上昇を2℃以下に抑えるために今世紀中盤で気温がピークを打ち、その後下がっていく経路を取る。気温上昇幅の最大値は2080年付近で1.7-1.8℃となり、2100年ではそこから0.02℃下がる程度であることから、気候条件としては気温のオーバーシュート前後では大きくは変わらないと思われる。アジアについても傾向は同様であるが、世界全体と比べると2030年ころまではBaselineでの増加率が高いがその後増加率がやや低下するという特徴がある。

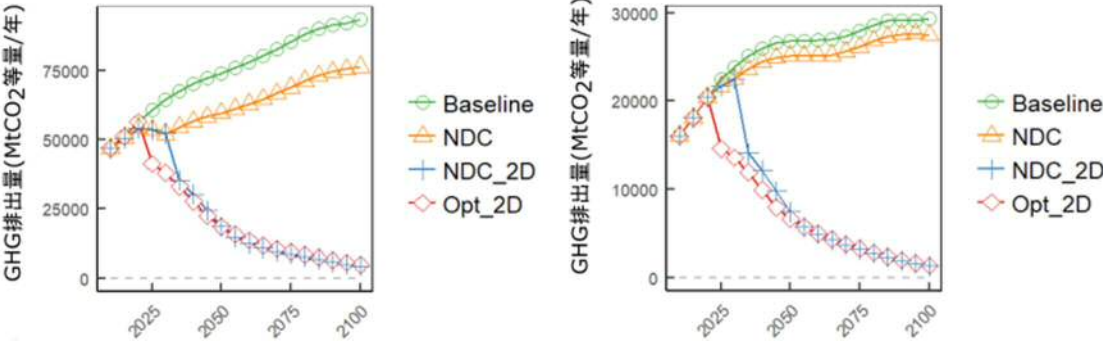


図 4. 3. 3 世界全体（左）、アジア（右）における温室効果ガス排出量

図4. 3. 4に示すアジアにおける一次エネルギー供給量は、Baselineでは今世紀中増加し続け、最終的には310EJ/年程度となるがその内訳は化石燃料を中心とした供給となる。NDCでも若干のエネルギー供給量の抑制とエネルギー源の再生可能エネルギーへのシフトが見られるが、限定的である。一方、2℃目標に相当する2つのシナリオは、いずれもエネルギー供給量を大幅に減少させ（2100年において200EJ/年）、その内訳も大部分が再生可能エネルギー、もしくはCCS付きの化石燃料となっている。また、アジアではCCS付きのバイオマス（発電のバイオエタノール燃料精製）が一定量の役割を果たすことも図4. 3. 4から見て取れる。

発電について見るとその傾向はより顕著である。Baselineではエネルギー総供給量は今世紀中で約2倍となるが、発電量は約6倍となる。これは全世界的に最終エネルギーキャリアが電化していくこと、及びアジアでは特に中進国・途上国において化石燃料ベースの消費よりも電気需要の伸びのほうが大きいことに由来する。2℃目標下では一段と電化の傾向は強くなり、21世紀の増加は約8倍となる。これは最終エネルギー消費でCCSなし化石燃料起源の燃料がほぼ使えなくなるためである。発電の内訳について見ると、2℃目標下では一段と再生可能エネルギー、及び原子力への依存が高まり、化石燃料の発電はすべてCCS付きとなる。

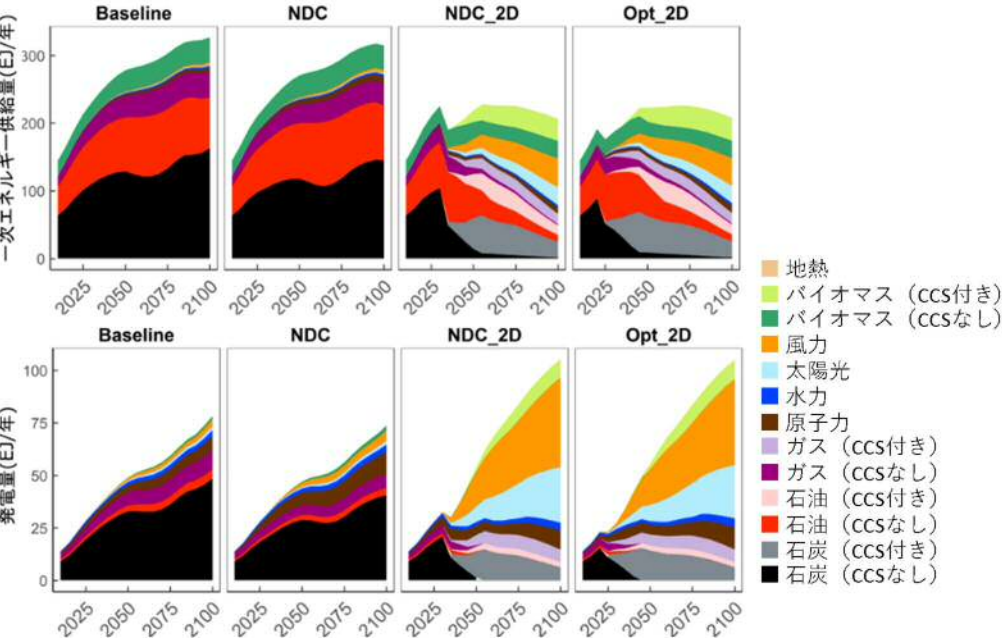


図4. 3. 4 アジアの一次エネルギー供給量（上）と発電量（下）

世界全体のエネルギー供給部門における投資額（追加的に配備される資本による投資）はBaseline、NDCと2℃目標シナリオでおおよそ異なる傾向を示す。図4. 3. 5に示すように、前者は2100年

までの期間においてエネルギー供給量とほぼ似たような増加率2.3倍となる一方、2℃目標シナリオはエネルギー供給量よりも大きな増加率となり、約4倍（2兆ドル）となる。これはGDPに対して約2.5%を占める。なお、GDP比で2010年と2℃目標下の2100年を比較すると、両者はほぼ同程度である。これは、技術進歩などによりエネルギー強度がBaselineにおいても着実に下がっていくためである。

2℃目標下（Opt_2D）の地域別の情報を見ると、図4.3.5からおおよそどの地域でも投資額は増加することがわかる。このうち、日本を除くアジア（図4.3.5のアジア）についてみると2050年において約1.7兆ドルと現在の日本のGDPの約3分の1を占めている。このうち大部分は発電由来であり、エネルギー投資という観点からは世界全体としてもいえることであるが、アジアにも大きな可能性があることがわかる。

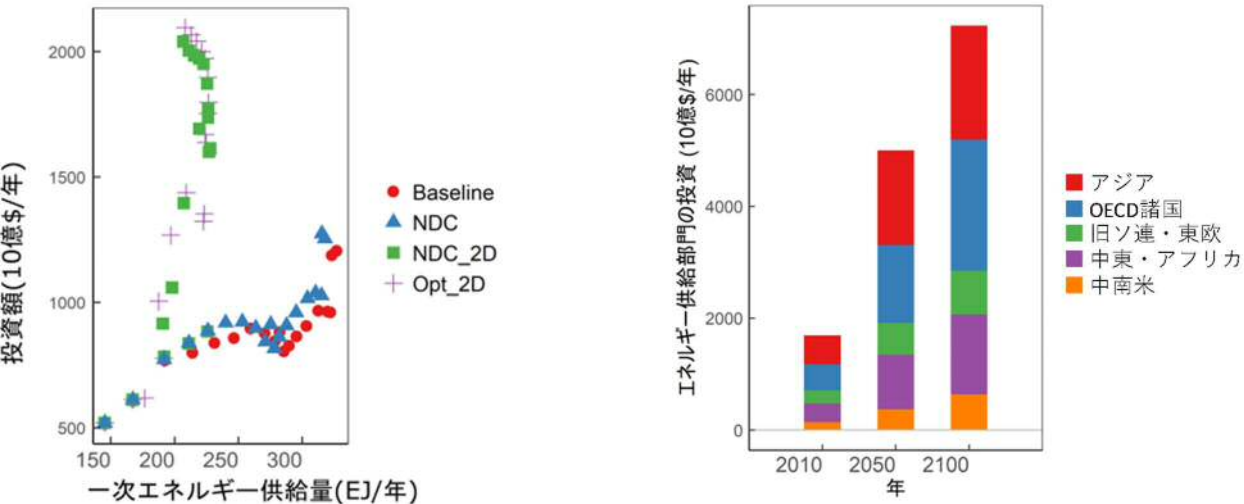


図 4.3.5 世界全体の一次エネルギー供給量（右）と NDC_2D における地域別エネルギー投資エネルギー投資の関係（左）

図4.3.6から、アジアの投資量のベースラインと緩和シナリオの比較を行う。最終エネルギー消費の省エネ等の追加的投資も上記に加わる。マイナス値はベースラインよりも小さいことを意味し、化石燃料の採掘、化石燃料を用いた火力発電が大きく下回る。一方その代わりに再生可能エネルギーを中心とした低炭素エネルギーの投資が大きく増加する。また、エネルギー需要側でも投資が追加的に発生する。このうち再生可能エネルギーの増加は2℃目標下において主要なシェアを占めていることがわかる。NDCシナリオのbaselineからの違いは限定的であり、2℃目標へ向かうか否かが、中長期的な大勢を決めている。2040年以降はNDCベースで2030年まで進むかどうかにかかわらず（NDC_2D、Opt_2D）低炭素投資が進み、例えば2040年では500億ドル以上の再生可能エネルギー関連投資が追加的に発生する。

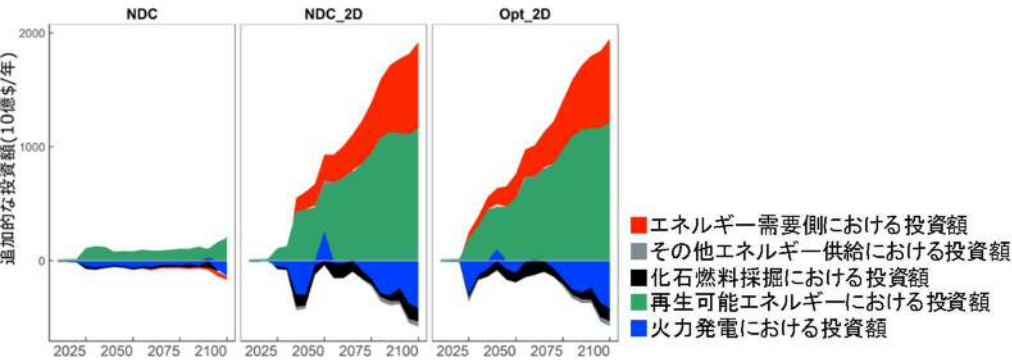


図 4.3.6 アジアのベースライン比のエネルギー関連投資

4. 2 エフォートシェアの結果

表3.3.1のエフォートシェアに基づいて2℃目標に対応する炭素排出バジェットを計算した。図4.3.7はアジアの主要国、具体的には日本、中国、韓国、インド、インドネシア、タイの例である。例えば、IEPC（即時的に一人当たり排出量の均等化）であれば、日本は10GtCO₂強程度しかバジェットがなく、現状の排出量を考えると10年もするとこれを消費してしまうということになる。最も大きなバジェットはGF（グランドファザリング）であるが、それでも30GtCO₂程度である。一方、GDR（温室効果開発権）では負値となっている。一般的にこのスキームは、所得が高い国に対して厳しいものであり、日本もその例外ではない、といった解釈が可能である。一方、インドはバジェットの許容量が比較的大きくあり、最も小さいものは30-40年程度であるが、最も長いGDRでは、150年以上となっている。インドネシアやタイはインドほどではないが似たような傾向であり、過去にそれほど多くの温室効果ガスを排出していない途上国ではバジェットがまだ残されていることがわかる。中国は、途上国というくくりでよいのかどうかも議論が必要であるが、少なくとも他のアジア諸国よりは残余バジェットが小さい。これは現状の排出量がすでにかなり大きいことも要因の一つと考えられる。サブテーマ3からはこれらをアジア各国についてのデータをサブテーマ1、2へデータを提供した。

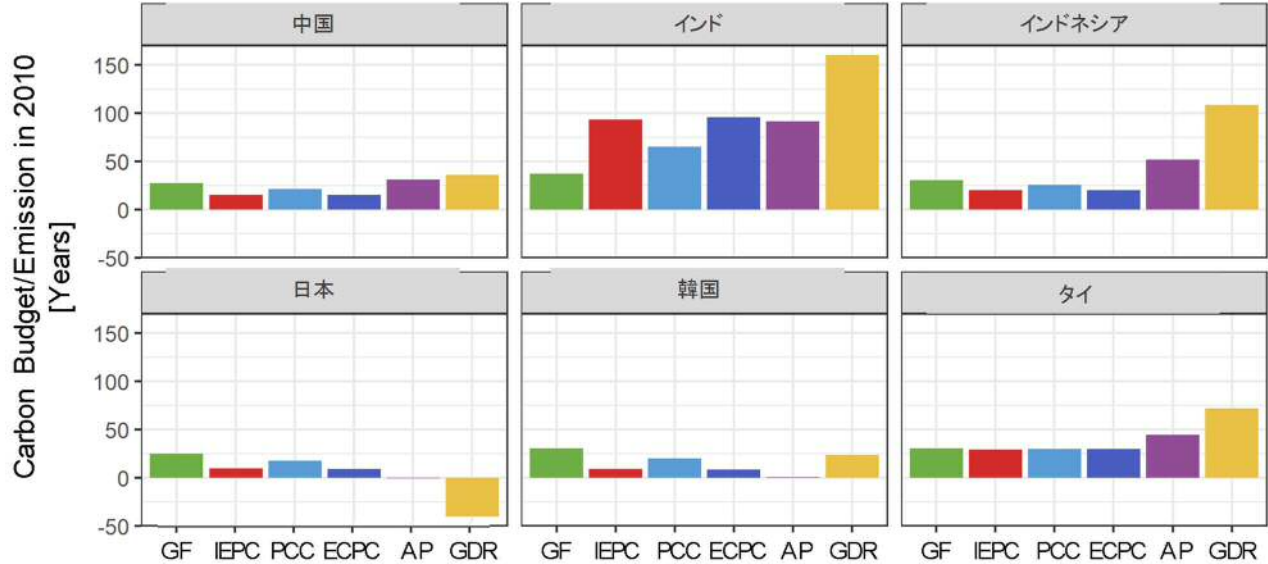


図4.3.7 アジアの主要国のカーボンバジェットの計算結果

4. 3 グローバルシナリオ提案の結果

開発内容の節で示した問題点を踏まえて今回新しく提案したのは、いわゆる「炭素バジェットバスケット」にすべての卵を入れないことで、将来の炭素バジェットの不確実性に対して対応しようというものである。我々は、200GtCO₂から2000GtCO₂までの残りの炭素バジェットに関する14のシナリオを、2018年以降、シナリオが世界的に純CO₂の排出をゼロにするまでカウントして探索することを提案する。200GtCO₂と1000GtCO₂の間の領域は、2℃未満に温暖化を抑えることができると考えられる空間を詳細に調査するために、100GtCO₂単位でカバーする。1000GtCO₂の間の領域は、2℃未満に温暖化を抑える確率が低いと現在評価されている、より高い炭素バジェットの可能性をカバーするために200GtCO₂単位でカバーされる。

このシナリオセットで炭素バジェットを体系的に探ることのメリットは以下のとおりである。すなわち、炭素バジェットの変化や温室効果ガスに対する地球システムの反応に関する他の問題により、シナリオが特定の気候目標に対応しないリスクを回避することができる。例えば、最近の文献では、過去に気候のフィードバックが過小評価されていたことが示唆されている (Gasser et al., 2018; Lowe & Bernie, 2018)。また、緩和経路に対する非CO₂の寄与は、不確実であることが知られている。非CO₂排

出削減の可能性と関連コストは、IAMによって大きく異なる(Gernaat et al., 2015)。このため、従来は、同じような気候結果を目指していても、モデルによって炭素バジェットに大きなばらつきがあった(Rogelj, Popp, et al., 2018)。我々が提案するシナリオの枠組みは、異なるCO₂と非CO₂の関係がもたらす気温の影響を、モデル間で系統的に評価できるという利点を備えている。言い換えれば、ある温度レベルを評価するために、それぞれのモデルの 特有の非CO₂排出フィンガープリントに応じて、異なるモデルの異なる炭素バジェットの実行に依存することも可能である。同時に、それはまた、関連する非CO₂排出の変動の結果として、与えられたCO₂予算の気候の結果を取り巻く社会経済的不確実性の理解を向上させるであろう。

今回提案するシナリオデザインで解決できる疑問の一つは、長期炭素バジェットと、国連パリ協定の下で約束草案(NDC)のような現在提案されている短期的な政策との整合性である。このため、同じ炭素バジェットシナリオであっても、近未来の政策の前提を変えることを提案する。例えば、長期予算案ごとに、NDCの実施を想定したシナリオと、全体の炭素バジェットと整合的な即時行動を想定したシナリオを実行することができる。この2つのシナリオを対比させることで、NDCが特定のピーク時の炭素バジェットと整合しているかどうかを理解し、さらに、どの分野でNDCを超える行動の加速が必要かを理解するのに役立つだろう。これは、国連パリ協定の実施の一環として実施されるグローバルストックテイクのプロセスに重要な情報を提供することになる。

ここで提案されたシナリオの枠組みは、実際にIPCCの第6次評価報告書で多く収録されることとなったENGAGEなどのモデル比較プロジェクトのシナリオの基盤となり、IPCCの第6次評価報告書に対して非常に大きな影響力を与えた。また今後に向けても、気候変動研究コミュニティの異なる分野における物理的気候科学と緩和評価の間の一貫性を保証することができ、したがって、IPCCの異なる作業部会が今後AR7に向けて作業する際に不可欠であると考えている。

5. 研究目標の達成状況

当初検討していた目標は順調に達成し、さらに追加的に取り組んだ事項についても非常に影響力の大きな成果が得られた。具体的には、世界を対象とした応用一般均衡モデルを用いて、世界的な目標である2°C/1.5°C目標の実現に対して、各国で必要な排出削減目標を推計した。また、その情報を各サブテーマに提供し、課題全体の目標達成に大きく貢献できた。また、IPCCの第6次評価報告書の用いられた多くのシナリオデータは、本研究が提案した統合評価モデルシナリオの枠組みに基づくもので、国際的な統合評価モデリングコミュニティに対して大きな影響を及ぼした。

6. 引用文献

- 1) Fujimori, S., Kainuma, M., Masui, T., Hasegawa, T., Dai H. (2014) The effectiveness of energy service demand reduction: A scenario analysis of global climate change mitigation. *Energy Policy*, 75(Supplement C), 379-391. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.09.015>
- 2) Fujimori S., Masui T. & Matsuoka Y. (2014) Development of a global computable general equilibrium model coupled with detailed energy end-use technology. *Applied Energy*, 128(0), 296-306. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.074>
- 3) Fujimori, S., Masui, T., Matsuoka, Y. (2015). Gains from emission trading under multiple stabilization targets and technological constraints. *Energy Economics*, 48, 306-315. doi:10.1016/j.eneco.2014.12.011
- 4) Hasegawa, T., Fujimori, S., Shin, Y., Takahashi, K., Masui, T., Tanaka, A. (2014) Climate change impact and adaptation assessment on food consumption utilizing a new scenario framework. *Environ Sci Technol*, 48(1), 438-445. doi:10.1021/es4034149
- 5) Hasegawa, T., Fujimori, S., Takahashi, K., Masui, T. (2015) Scenarios for the risk of

- hunger in the twenty-first century using Shared Socioeconomic Pathways. *Environmental Research Letters*, 10(1), 014010. Retrieved from <http://stacks.iop.org/1748-9326/10/i=1/a=014010>
- 6) Meinshausen, M., Raper, S. C. B., Wigley, T. M. L. (2011) Emulating coupled atmosphere-ocean and carbon cycle models with a simpler model, *MAGICC6 - Part 1: Model description and calibration*. *Atmos. Chem. Phys.*, 11(4), 1417-1456. doi:10.5194/acp-11-1417-2011
 - 7) Vuuren, D. et al. (2011) The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 109(1-2), 5-31. doi:10.1007/s10584-011-0148-z
 - 8) Fujimori, S., Masui, T., Matsuoka, Y. (2012) AIM/CGE [basic] manual (2012-01). Retrieved from <http://www.nies.go.jp/social/dp/pdf/2012-01.pdf>
 - 9) Herran, D. S., Dai, H., Fujimori, S., Masui, T. (2016) Global assessment of onshore wind power resources considering the distance to urban areas. *Energy Policy*, 91, 75-86. doi:10.1016/j.enpol.2015.12.024
 - 10) Rogner, H.-H. (1997) An assessment of world hydrocarbon resources. *Annual Review of Energy and the Environment*, 22(1), 217-262. doi:10.1146/annurev.energy.22.1.217
 - 11) Hasegawa, T., Fujimori, S., Ito, A., Takahashi, K., Masui, T. (2017) Global land-use allocation model linked to an integrated assessment model. *Science of The Total Environment*, 580, 787-796. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.12.025
 - 12) IEA (2008) CO₂ Capture and Storage - A Key Carbon Abatement Option. Retrieved from Paris, France
 - 13) Fujimori, S. et al. (2019) A multi-model assessment of food security implications of climate change mitigation. *Nature Sustainability*, 2(5), 386-396. doi:10.1038/s41893-019-0286-2
 - 14) van den Berg, N. J. et al. (2019) Implications of various effort-sharing approaches for national carbon budgets and emission pathways. *Climatic Change*, 162(4), 1805-1822. doi:10.1007/s10584-019-02368-y
 - 15) Rogelj, J. et al. (2018) Mitigation pathways compatible with 1.5° C in the context of sustainable development. In *Special Report on the impacts of global warming of 1.5 ° C*. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change.
 - 16) Rogelj, J., Forster, P. M., Kriegler, E., Smith, C. J., Séférian, R. (2019) Estimating and tracking the remaining carbon budget for stringent climate targets. *Nature*, 571(7765), 335-342. doi:10.1038/s41586-019-1368-z
 - 17) Luderer, G. et al. (2018) Residual fossil CO₂ emissions in 1.5-2 ° C pathways. *Nature Climate Change*. doi:10.1038/s41558-018-0198-6
 - 18) McCollum, D. L. et al. (2018) Energy investment needs for fulfilling the Paris Agreement and achieving the Sustainable Development Goals. *Nature Energy*. doi:10.1038/s41560-018-0179-z
 - 19) Bauer, N. et al. (2018) Global energy sector emission reductions and bioenergy use: overview of the bioenergy demand phase of the EMF-33 model comparison. *Climatic Change*, 163(3), 1553-1568. doi:10.1007/s10584-018-2226-y
 - 20) Huppmann, D. et al. (2018) IAMC 1.5° C Scenario Explorer and Data hosted by IIASA (Publication no. 10.22022/SR15/08-2018.15429). from Integrated Assessment Modeling Consortium & International Institute for Applied Systems Analysis <https://data.ene.iiasa.ac.at/iamc-sr15-explorer>
 - 21) Schleussner, C.-F. et al. (2016) Science and policy characteristics of the Paris Agreement temperature goal. *Nat Clim Chang*, 6, 827. doi:10.1038/nclimate3096

<https://www.nature.com/articles/nclimate3096#supplementary-information>

- 22) Gasser, T. et al. (2018) Path-dependent reductions in CO₂ emission budgets caused by permafrost carbon release. *Nature Geoscience*, 11(11), 830–835. doi:10.1038/s41561-018-0227-0
- 23) Lowe, J. A., Bernie, D. (2018) The impact of Earth system feedbacks on carbon budgets and climate response. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 376(2119). doi:10.1098/rsta.2017.0263
- 24) Gernaat, D. E. H. J. et al. (2015) Understanding the contribution of non-carbon dioxide gases in deep mitigation scenarios. *Global Environmental Change*, 33(0), 142–153. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.04.010>
- 25) Rogelj, J., Popp, A. et al. (2018) Scenarios towards limiting global mean temperature increase below 1.5 ° C. *Nat Clim Chang*, 8, 325–332. doi:10.1038/s41558-018-0091-3

Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細

(1) 誌上発表

<査読付き論文>

【サブテーマ1】

- 1) Wu Y., Liu C., Hung M., Liu T., Masui T. (2019) Sectoral energy efficiency improvements in Taiwan: Evaluations using a hybrid of top-down and bottom-up models. *Energy Policy* (IF=6.142), 132, 1241-1255.
- 2) Boonpanya T., Masui T. (2020) Assessment of Thailand Socio-Economic Impact towards Greenhouse Gas Mitigation Actions in 2030 Using a Computable General Equilibrium Model. *Chemical Engineering Transactions* (SJR=0.27 (Q3)), 78, 289-294.
- 3) Cheewaphongphan P., Hanaoka T., Chatani S. (2020) Long-term trend of regional passenger road transport demand and emission estimation under exhaust emission regulation scenario in Thailand. *Environmental Research Communications* (IF=2.104), 2 (5), 051009.
- 4) Li Z., Hanaoka T. (2020) Development of large-point source emission downscale model by estimating the future capacity distribution of the Chinese iron and steel industry up to 2050. *Resources, Conservation & Recycling* (IF=10.204), 161, 104853.
- 5) Nishiura O., Tamura M., Fujimori S., Takahashi K., Takakura J., Hijioka Y. (2020) An Assessment of Global Macroeconomic Impacts Caused by Sea Level Rise Using the Framework of Shared Socioeconomic Pathways and Representative Concentration Pathways. *sustainability* (IF=3.251), 12, 3737.
- 6) Yawale S., Hanaoka T., Kapshe, M. (2020) Development of energy balance table for rural and urban households and evaluation of energy consumption in Indian states. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (IF=14.982), 136, 110392.
- 7) Boonpanya T., Masui T. (2021) Assessing the economic and environmental impact of freight transport sectors in Thailand using computable general equilibrium model. *Journal of Cleaner Production* (IF=9.297), 280 (Part1), 124271.
- 8) Chunark, P., Hanaoka T., Limmeechokchai, B. (2021) Shared socioeconomic pathways and long-term GHG mitigation towards 2050 in Thailand cement industry. *Cleaner and Responsible Consumption*, 2, 100006.
- 9) Wu W., Kanamori Y., Zhang R., Zhou Q., Takahashi K., Masui T. (2021) Implications of declining household economies of scale on electricity consumption and sustainability in China. *Ecological Economics* (IF=5.389), 184, 106981
- 10) Xing, R., Hanaoka T., Masui T. (2021) Deep decarbonization pathways in the building sector: China's NDC and the Paris Agreement. *Environmental Research Letters* (IF=5.389), 184, 106981.
- 11) Fujimori S., Krey V., van Vuuren D., Oshiro K., Sugiyama M., Chunark P., Limmeechokchai B., Mittal S., Nishiura O., Park C., Rajbhandari S., Silva D., Tu T.T., Zhao S., Ochi Y., Shukla P.R., Masui T., Nguyen P.V.H., Carbados A.M., Riahi K. (2021) A framework for national scenarios with varying emission reductions. *Nature Climate Change* (IF=21.72), 11 (6), 472-480.
- 12) Khamphilavanh B.E., Masui T. (2021) Assessing the Impacts of Introducing of Carbon Tax and Technologies for Road Transportation in Laos. *Chemical Engineering Transactions* (SJR=0.27 (Q3)), 89, 103-108.
- 13) Marissa M., Masui T. (2021) Potential impact of introducing emission mitigation

- policies in Indonesia: how much will Indonesia have to spend?. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change (IF=3.583), 26, 37.
- 14) Marissa M., Masui T. (2021) Impact of Reducing Food Wastage to the Environment and Economics: A Preliminary Finding of Indonesia Case. Chemical Engineering Transactions (SJR: 0.27 (Q3)), 89, 67-72.
 - 15) Marissa M., Masui T., Anggraeni L. (2021) An Assessment of the Short-Term Impact of COVID-19 on Economics and the Environment: A Case Study of Indonesia. Economia (SJR: 0.32 (Q2)), 22 (3), 291-313.
 - 16) Zhang R., Hanaoka T. (2021) Deployment of electric vehicles in China to meet the carbon neutral target by 2060: provincial disparities in energy systems, CO₂ emissions and cost effectiveness. Resources, Conservation & Recycling (IF=10.204), 170, 105622.

【サブテーマ 2】

- 1) Fujimori, S., Oshiro, K., Shiraki, H., Hasegawa, T. (2019) Energy transformation cost for the Japanese mid-century strategy. Nature Communications (IF:14.919), 10(1), 4737.
- 2) 藤森真一郎、大城賢、長谷川知子 (2019) アジアのエネルギー関連低炭素技術投資の見通し、土木学会論文集G (環境), 75(5), I_247-I_254.
- 3) Bao, S., Nishiura, O., Fujimori, S., Oshiro, K., Zhang, R. (2020) Identification of Key Factors to Reduce Transport-Related Air Pollutants and CO₂ Emissions in Asia. Sustainability (IF:3.251), 12, 7621.
- 4) 大城賢、藤森真一郎、長谷川知子、明石修 (2020) アジアにおける温室効果ガス短期削減目標が2050年までのエネルギー投資に及ぼす影響、土木学会論文集G (環境) 76(5) I_243-I_252
- 5) 西浦理、藤森真一郎、大城賢 (2020) アジア各国における温室効果ガス大幅削減に必要な対策とその経済的影響の要因分析、土木学会論文集G (環境) 76(5) I_97-I_107.
- 6) Roelfsema, M., van Soest, H.L., Harmsen, M., van Vuuren, D.P., Bertram, C., den Elzen, M., Höhne, N., Iacobuta, G., Krey, V., Kriegler, E., Luderer, G., Riahi, K., Ueckerdt, F., Després, J., Drouet, L., Emmerling, J., Frank, S., Fricko, O., Gidden, M., Humpenöder, F., Huppmann, D., Fujimori, S., Fragkiadakis, K., Gi, K., Keramidas, K., Köberle, A.C., Aleluia Reis, L., Rochedo, P., Schaeffer, R., Oshiro, K., Vrontisi, Z., Chen, W., Iyer, G.C., Edmonds, J., Kannavou, M., Jiang, K., Mathur, R., Safonov, G., Vishwanathan, S.S. (2020) Taking stock of national climate policies to evaluate implementation of the Paris Agreement. Nature Communications (IF:14.919), 11, 2096.
- 7) 松井そら、大城賢、藤森真一郎、西浦理 (2021) 交通部門における技術・社会の変容が気候変動政策へ及ぼす影響、土木学会論文集G (環境) 77(5), I_275-I_283.
- 8) 大城賢、藤森真一郎 (2021) パリ協定CO₂排出削減目標の達成における水素エネルギーキャリアの役割の評価、土木学会論文集G (環境) 77(5), I_197-I_207.

【サブテーマ 3】

- 1) Zhang, R., Fujimori, S. (2020) The role of transport electrification in global climate change mitigation scenarios, Environmental Research Letters (IF:6.793), 15, 034019.
- 2) Zhou, W., McCollum, D.L., Fricko, O., Fujimori, S., Gidden, M., Guo, F., Hasegawa,

- T., Huang, H., Huppmann, D., Krey, V., Liu, C., Parkinson, S., Riahi, K., Rafaj, P., Schoepp, W., Yang, F., Zhou, Y. (2020) Decarbonization pathways and energy investment needs for developing Asia in line with ‘well below’ 2° C, *Climate Policy* (IF:4.797), 1-12.
- 3) Edelenbosch, O.Y., van Vuuren, D.P., Blok, K., Calvin, K., Fujimori, S. (2020) Mitigating energy demand sector emissions: The integrated modelling perspective, *Applied Energy* (IF:9.746), 261, 114347.
 - 4) Fujimori, S., Rogelj, J., Krey, V., Riahi, K. (2019) A new generation of emissions scenarios should cover blind spots in the carbon budget space, *Nature climate change* (IF:25.170), 9, 798-800.
 - 5) Fujimori, S., Oshiro, K., Shiraki, H., Hasegawa, T. (2019) Energy transformation cost for the Japanese mid-century strategy, *Nature Communications* (IF:14.919), 10, 4737.
 - 6) 藤森真一郎、大城賢、長谷川知子(2019) アジアのエネルギー関連低炭素技術投資の見通し, 土木学会論文集G (環境) 75(5), I_247-I_254.
 - 7) 櫛部航、藤森真一郎、長谷川知子(2019) 食料廃棄物削減目標を達成することによる社会・経済・環境への副次的影響, 土木学会論文集G (環境) 75(5), I_233-I_238.
 - 8) 西浦理、藤森真一郎、田村誠(2019) 全世界の波及的な効果を考慮した海面上昇によるマクロ経済影響評価, 土木学会論文集G (環境) 75(5), I_81-I_88.
 - 9) Bao, S., Nishiura, O., Fujimori, S., Oshiro, K., Zhang, R. (2020) Identification of Key Factors to Reduce Transport-Related Air Pollutants and CO2 Emissions in Asia, *Sustainability* (IF:3.251), 12, 7621.
 - 10) 大城賢、藤森真一郎、長谷川知子、明石修 (2020) アジアにおける温室効果ガス短期削減目標が2050年までのエネルギー投資に及ぼす影響, 土木学会論文集G (環境) 76(5), I_243-I_252
 - 11) 西浦理、藤森真一郎、大城賢 (2020) アジア各国における温室効果ガス大幅削減に必要な対策とその経済的影響の要因分析, 土木学会論文集G (環境) 76(5) I_97-I_107
 - 12) van Zeist, W.-J., Stehfest, E., Doelman, J.C., Valin, H., Calvin, K., Fujimori, S., Hasegawa, T., Havlik, P., Humpenöder, F., Kyle, P., Lotze-Campen, H., Mason-D’Croz, D., van Meijl, H., Popp, A., Sulser, T.B., Tabeau, A., Verhagen, W., Wiebe, K. (2020) Are scenario projections overly optimistic about future yield progress? *Global Environmental Change* (IF:9.523), 64, 102120.
 - 13) Fujimori, S., Hasegawa, T., Takahashi, K., Dai, H., Liu, J.-Y., Ohashi, H., Xie, Y., Zhang, Y., Matsui, T., Hijioka, Y. (2020) Measuring the sustainable development implications of climate change mitigation, *Environmental Research Letters* (IF:6.799), 15, 085004.
 - 14) Yalew, S.G., van Vliet, M.T.H., Gernaat, D.E.H.J., Ludwig, F., Miara, A., Park, C., Byers, E., De Cian, E., Piontek, F., Iyer, G., Mouratiadou, I., Glynn, J., Hejazi, M., Dessens, O., Rochedo, P., Pietzcker, R., Schaeffer, R., Fujimori, S., Dasgupta, S., Mima, S., da Silva, S.R.S., Chaturvedi, V., Vautard, R., van Vuuren, D.P. (2020) Impacts of climate change on energy systems in global and regional scenarios, *Nature Energy* (IF:60.858), 5, 794-802.
 - 15) Nishiura, O., Tamura, M., Fujimori, S., Takahashi, K., Takakura, J., Hijioka, Y. (2020) An Assessment of Global Macroeconomic Impacts Caused by Sea Level Rise Using the Framework of Shared Socioeconomic Pathways and Representative Concentration Pathways, *Sustainability* (IF:3.251), 12, 3737.
 - 16) Roelfsema, M., van Soest, H.L., Harmsen, M., van Vuuren, D.P., Bertram, C., den

- Elzen, M., Höhne, N., Iacobuta, G., Krey, V., Kriegler, E., Luderer, G., Riahi, K., Ueckerdt, F., Després, J., Drouet, L., Emmerling, J., Frank, S., Fricko, O., Gidden, M., Humpenöder, F., Huppmann, D., Fujimori, S., Fragkiadakis, K., Gi, K., Keramidas, K., Köberle, A.C., Aleluia Reis, L., Rochedo, P., Schaeffer, R., Oshiro, K., Vrontisi, Z., Chen, W., Iyer, G.C., Edmonds, J., Kannavou, M., Jiang, K., Mathur, R., Safonov, G., Vishwanathan, S.S. (2020) Taking stock of national climate policies to evaluate implementation of the Paris Agreement, *Nature Communications* (IF:14.919), 11, 2096.
- 17) Fujimori, S., Krey, V., van Vuuren, D., Oshiro, K., Sugiyama, M., Chunark, P., Limmeechokchai, B., Mittal, S., Nishiura, O., Park, C., Rajbhandari, S., Silva Herran, D., Tu, T.T., Zhao, S., Ochi, Y., Shukla, P.R., Masui, T., Nguyen, P.V.H., Cabardos, A.-M., Riahi, K. (2021) A framework for national scenarios with varying emission reductions, *Nature climate change* (IF:25.170), 11, 472-480.
- 18) 松井そら、大城賢、藤森真一郎、西浦理(2021) 交通部門における技術・社会の変容が気候変動政策へ及ぼす影響, 土木学会論文集G(環境) 77(5), I_275-I_283.
- 19) 西浦理、藤森真一郎、大城賢(2021) 世界およびアジアにおける二酸化炭素の地下貯留容量を考慮した気候変動緩和策の評価, 土木学会論文集G(環境) 77(5), I_251-I_262.
- 20) 和田悠暉、長谷川知子(2021) 日米の食の変化を考慮した農畜産業由来の温室効果ガス排出削減に関する研究, 土木学会論文集G(環境) 77(5), I_177-I_182.

<その他誌上発表(査読なし)>

【サブテーマ1】

- 1) 増井利彦 (2019) これからの脱炭素社会に向けて. 環境技術会誌, 178, 15-17.
- 2) Gentile E., Li G., Mariasingham M.J. (2020) Assessing the Impact of the United States-People's Republic of China Trade Dispute Using a Multiregional Computable General Equilibrium Model. ADB Economics Working Paper Series, 620, 1-48.
- 3) 増井利彦 (2020) 脱炭素社会の実現に向けて. ニュースで深掘り英語 (ジャパントイムズ出版), 1, 122-123.
- 4) 増井利彦 (2020) パリ協定が提起した気候変動問題. 経済, (298), 44-53.
- 5) 増井利彦 (2020) 低炭素社会から脱炭素社会へ. Indust, 35 (12), 7-11.
- 6) 増井利彦 (2021) 脱炭素社会の実現に向けて取り組むべきこと. 環境技術会誌, 182, 9-11.
- 7) 増井利彦 (2021) 脱炭素社会をどう実現するか?. 環境と文明, 29(1), 3-4.
- 8) 増井利彦 (2021) 2050年脱炭素社会実現への課題 環境研究の視点からの考察. エネルギーレビュー, 41(6), 11-14.
- 9) 増井利彦 (2022) 脱炭素社会をどのように実現するか?. 常陽産研NEWS, 375, 8-9.

【サブテーマ2】

- 1) 横山直人、長谷川知子、大城賢、藤森真一郎 (2020) 日本の農畜産業における温室効果ガス排出削減に関する研究, 第28回地球環境シンポジウム講演集, 28, 53-58.
- 2) 西浦理、藤森真一郎、大城賢 (2020) アジア各国における温室効果ガスの大幅な削減に必要な対策とその経済的な影響の要因分析, 環境衛生工学研究, 34(3), 4-6
- 3) 大城 賢(2020) 日本の中長期温室効果ガス排出削減シナリオのモデル分析, 環境衛生工学研究, 34(2), 11-14.
- 4) 松井そら、藤森真一郎、大城賢、西浦理(2021) 交通部門の社会変革が気候変動政策へ及ぼす影響, 環境衛生工学研究, 35(3), 124-126.

- 5) 西浦理、藤森真一郎、大城賢(2021) 世界およびアジアにおける炭素地下貯留技術の物理的制約を考慮した気候変動緩和策の評価, 環境衛生工学研究, 35(3), 144-146.

【サブテーマ3】

- 1) 藤森真一郎、張潤森、松井そら(2020) 交通部門の電化が気候変動対策に果たす役割, 自動車技術, 74, 79-85.
- 2) 槇山直人、長谷川知子、大城賢、藤森真一郎(2020) 日本の農畜産業における温室効果ガス排出削減に関する研究, 第28回地球環境シンポジウム講演集, 28, 53-58.
- 3) 西浦理、藤森真一郎、大城賢(2020) アジア各国における温室効果ガスの大幅な削減に必要な対策とその経済的な影響の要因分析, 環境衛生工学研究, 34(3), 4-6.
- 4) 松井そら、藤森真一郎、大城賢、西浦理(2021) 交通部門の社会変革が気候変動政策へ及ぼす影響, 環境衛生工学研究, 35-3, 124-126.
- 5) 西浦理、藤森真一郎、大城賢(2021) 世界およびアジアにおける炭素地下貯留技術の物理的制約を考慮した気候変動緩和策の評価, 環境衛生工学研究, 35-3, 144-146.

(2) 口頭発表(学会等)

【サブテーマ1】

- 1) 増井利彦, 大城賢 (2019) わが国における2050年のゼロ排出に向けた可能性と課題. 地球温暖化対策を考えるためのエネルギー・シナリオ分析: 2050年とその後を見据えて.
- 2) Hanaoka T., Masui T. (2019) Mitigation Scenarios of Short-Lived Climate Pollutants and Air Pollutants in Asia by Considering Synergies and Tradeoffs of Decarbonization Measures toward 2 °C target. The 8th International Symposium on Non - CO2 Greenhouse Gasses
- 3) Masui T. (2019) AIM (Asia-Pacific Integrated Model) and its contribution to climate mitigation policies. BUAA-NIES Bilateral Workshop on Integrated Assessment of Health Co-benefits of Climate Change Mitigation Policy, Beijing, China.
- 4) Masui T. (2019) AIM (Asia - Pacific Integrated Model) and its contribution to climate mitigation policies. High - level Workshop on Climate Policy and Assessment
- 5) 増井利彦 (2019) 気候変動問題の最新動向と中小企業の役割. 2019年度経営者「環境力」クラブ第1回会合
- 6) Takimi M., Masui T. (2019) Assessment of value of carbon price to achieve NDC of Japan using national scale CGE model. EcoMod2019 - International Conference on Economic Modeling and Data Science
- 7) Hanaoka T., Hirayama T., Hibino G., Masui T. (2019) Cobenefits and Investment Costs of Alternative Decarbonization Pathways toward 2 Degree Targets in China and India. International Conference on Applied Energy 2019
- 8) Li Z. , Hanaoka T. (2019) Estimating the Future Emission Pattern of Iron and Steel Industry in China Using AIM/Enduse Model. The 11th International Conference on Applied Energy
- 9) 増井利彦, MARISSA Malahayati, AMBIYAH Abdullah, Retno Dewi, Ucok Siagian, Rizaldi Bore (2019) アジア主要国を対象とした経済モデルの開発とそれを用いた低炭素シナリオの定量化: インドネシアを例に. 環境科学会2019年会
- 10) Cassen C., Masui T., Lefevre J., Teixeira A., Lecocq F. (2019) A Tool for Scenario Analysis: An IPCC perspective. LCS-RNet 11th Annual Meeting
- 11) Masui T. (2019) Introduction of Asia-Pacific Integrated Model (AIM) and its

- contribution to climate mitigation policies. Sharing of View on Climate Change Policies and Mitigation Actions
- 12) Hanaoka T. (2019) Decomposition Analysis of National CO₂ Emissions inventory in the Residential and Commercial Sectors in Japan - Effects of Energy Efficiency Improvement and Behavior Change. 10th International Conference on Energy Efficiency in Domestic Appliances and Lighting (EEDAL' 19)
 - 13) Masui T. (2020) Introduction of AIM (Asia-Pacific Integrated Model) and Assessment of Climate Mitigation Actions using AIM. Sharing of View on Climate Change Policies and Mitigation Actions in Lao PDR
 - 14) Masui T., Marissa M. (2020) Long Term Strategy toward 1.5oC in Asia. Policy Dialogue on Challenges and Opportunity to Deep Decarbonization Pathway to Achieve NDC Target
 - 15) Vishwanathan S. (2020) Indian Iron and Steel Industry Transitions: 1990-2030. 11th International Sustainability Transition Conference
 - 16) Vishwanathan S. (2020) Technological transitions in Indian iron and steel industry from 1900 to 2020. AIM International Workshop 2020
 - 17) Yawale S., Hanaoka T., Kapshe M. (2020) India's state-wise indoor air pollution and emission inventory at household sector. The 26th AIM International Workshop
 - 18) Boonpanya T., Masui T. (2020) Decarbonizing Thailand: a case study of peak emissions before 2050. 32rd Annual Environmental Technology Conference, Environmental Engineering Association of Thailand
 - 19) Masui T. (2020) Scenario approach and climate mitigation actions toward sustainable society. Minamata online science sessions Mercury emissions: Estimation and projection
 - 20) Chunark P., Hanaoka T., Limmeechokchai B. (2020) Long-term GHG mitigation towards 2050 in Thailand cement industry. The Thirteenth Integrated Assessment Modeling Consortium Annual Meeting 2020 (IAMC2020)
 - 21) 増井利彦 (2020) アジアにおける脱炭素社会形成支援. 石炭からの卒業 - ネット・ゼロ排出へ: 日本とドイツの共通課題
 - 22) Yawale S., Hanaoka T., Kapshe M. (2020) Enduse energy projections and status of energy poverty in states of India. The Thirteenth Integrated Assessment Modeling Consortium Annual Meeting 2020 (IAMC2020)
 - 23) 増井利彦 (2021) 2050年脱炭素社会を目指して. 東京理科大学総合研究院 再生可能エネルギー研究部門 第1回シンポジウム 再生可能エネルギー技術の最新動向
 - 24) 増井利彦 (2021) 持続可能な社会の世界モデルになる日本のエネルギー需給システムの理想像とは?. 自然エネルギーシフトコミュニティ 第4回理想社会フォーラム
 - 25) Masui T. (2021) Asia - Pacific Integrated Model (AIM) and its contribution to climate neutral society development in Asia. Meeting with Department of Environment, Bangladesh
 - 26) Masui T. (2021) Asia - Pacific Integrated Model (AIM) and its application to Indonesia to support climate neutral society development. Policy Dialogue on Challenges in the implementation of NDC and opportunity for increasing the ambitious in the long - term toward 2050 to be compatible with Paris target
 - 27) 増井利彦 (2021) Scenario Development for Long - Term Strategies: Application of Asia - Pacific Integrated Model (AIM). The 29th Asia - Pacific Seminar on Climate Change

- 28) Masui T. (2021) Asia - Pacific Integrated Model (AIM) and its contribution to climate neutral society development in Asia. Policy - Research Dialogue on Malaysia' s Mid - /Long - Term Emissions Reduction Scenario Analyses
- 29) 増井利彦 (2021) 2050年に日本で脱炭素社会を実現するために. 日本の脱炭素化を考えるための世界の科学者からの気候変動10の最新メッセージ シンポジウム
- 30) 増井利彦 (2021) 2050年ゼロカーボン、2030年46% - 50%削減目標達成に向けて企業が行うべきこと. 2021年度経営者「環境力」クラブ第1回会合
- 31) 増井利彦, 高橋潔 (2021) 脱炭素にむけたモデル研究の状況と研究展望. 環境科学会2021年会
- 32) 増井利彦 (2021) 脱炭素の日本経済への影響 応用一般均衡モデルを用いた定量分析の概要. 大和証券セミナー
- 33) 増井利彦 (2021) AIMを用いた炭素税によるCO2排出削減効果の試算. 再生可能エネルギー経済学講座 第2回再エネ講座公開研究会【部門C】
- 34) Masui T. (2021) Assessment of carbon tax in Japan toward Carbon Neutral Society. Japan - Germany Exchange on Climate Research Policy and Cooperation
- 35) Marissa M., Masui T. (2021) Impact of Reducing Food Wastage to the Environment and Economics: A preliminary Finding of Indonesia Case. The 7th International Conference on Low Carbon Asia and Beyond (ICLCA)
- 36) Marissa M. (2021) How Much Food is Wasted?: A Lesson from Indonesia' s Case. The 7th International Conference on Low Carbon Asia & Beyond (ICLCA 2021)
- 37) Yawale S., Hanaoka T., Kapshe, M. (2021) Indoor air pollution and Decarbonization from residential sector of India. The 27th AIM International Workshop
- 38) Masui T., Hibino G., Silva D., Hirayama T., Ota T., Motoki Y., Ochi Y., Nguyen T.H., Fujino J., Ishikawa T. (2021) AIM' s contribution to Asia. COP26 Side Event: Partnerships between Japan and the rest of Asia for a new age -Using the Asia - Pacific Integrated Model (AIM) to pave the way for carbon neutrality in the region
- 39) 増井利彦 (2021) AIM (アジア太平洋統合モデル) を用いた2050年脱炭素社会の定量化. 地球環境に関するアカデミアと金融界のワークショップ
- 40) Hibino G., Masui T., Silva D. (2021) Contribution of AIM (Asia-Pacific Integrated Model) to support carbon neutrality of Asian countries. Viet Nam-Japan Environmental Week
- 41) Masui T., Hibino G. (2021) Contribution of AIM (Asia-Pacific Integrated Model) to decarbonized society in Asia. LCS-RNet 12th Annual Meeting
- 42) 日比野剛 (2022) COP26前後における各国の脱炭素に向けた動き. 環境研究総合推進費2-1908 国民対話シンポジウム「脱炭素に向けたアジアの動き」 (オンライン) .
- 43) 増井利彦 (2022) 脱炭素社会の実現に向けた取り組みと役割. 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 (オンライン) .

【サブテーマ2】

- 1) 大城賢(2019) Asia-Pacific Integrated Model (AIM)による日本の緩和シナリオ分析、EU-日本気候変動政策シンポジウム.
- 2) Oshiro, K., Fujimori, S., Gi, K., van Soest, HL., Bertram, C., Després, J., Masui, T., Rochedo, P., Roelfsema, M., Vrontisi, Z. (2019) Japan' s emission pathways in the context of the 2° C goals and their implications for the mid-century strategy, The 12th Annual Meeting of the IAMC. Tsukuba. Japan.
- 3) 大城賢(2019) パリ協定気候目標を踏まえた日本の長期排出経路に関する分析、環境科学会

2019年会.

- 4) 藤森真一郎、大城賢、長谷川知子(2019) アジアのエネルギー関連低炭素技術投資の見通し、第27回地球環境シンポジウム、富山国際会議場.
- 5) 増井利彦、大城賢(2019) わが国における2050年のゼロ排出に向けた可能性と課題、シンポジウム 地球温暖化対策を考えるためのエネルギー・シナリオ分析：2050年とその後を見据えて.
- 6) Masui, T., Oshiro, K. (2019) Net-zero emission pathways. APERC Annual Conference 2019, Tokyo, Japan
- 7) 大城賢、藤森真一郎、長谷川知子、明石修(2020) アジアにおける温室効果ガス短期削減目標が2050年までのエネルギー投資に及ぼす影響、第28回地球環境シンポジウム（オンライン）.
- 8) 西浦理、藤森真一郎、大城賢(2020) アジア各国における温室効果ガス大幅削減に必要な対策とその経済的影響の要因分析、第28回地球環境シンポジウム（オンライン）.
- 9) 松井そら、大城賢、藤森真一郎、西浦理(2021) 交通部門における技術・社会の変容が気候変動政策へ及ぼす影響、第29回地球環境シンポジウム（オンライン）.
- 10) 大城賢、藤森真一郎(2021) パリ協定CO₂排出削減目標の達成における水素エネルギーキャリアの役割の評価、第29回地球環境シンポジウム（オンライン）.
- 11) 松井そら、藤森真一郎、大城賢、西浦理(2021) 交通部門の社会変革が気候変動政策へ及ぼす影響、第43回京都大学環境衛生工学研究会シンポジウム（オンライン）.
- 12) 西浦理、藤森真一郎、大城賢(2021) 世界およびアジアにおける炭素地下貯留技術の物理的制約を考慮した気候変動緩和策の評価、第43回京都大学環境衛生工学研究会シンポジウム（オンライン）.
- 13) Chunark, P., Rajbhandari, S., Pradhan, B.B., Limmeechokchai, B., Fujimori, S., Oshiro, K., Ochi, Y. (2021) Scaling up climate ambition post-2030: A long-term GHG mitigation analysis for Thailand, Fourteenth Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) 2021(online) (Poster Session).
- 14) Hirayama, T., Hibino, G., Motoki, Y. (2021) Reduction Potentials in Asian Countries as Contribution of Decarbonizing Technologies, The 27th AIM International Workshop, Online
- 15) Hirayama, T., Hibino, G., Motoki, Y. (2020) Estimation of Further Reduction of GHG Emissions in Asian Countries as Contribution of Installing Decarbonizing Technologies, The 26th AIM International Workshop, Online
- 16) Hirayama, T., Hibino, G., Motoki, Y. (2019) Analysis of GHG emission compositions and national reduction targets in Asian countries, The 25th AIM International Workshop, Tsukuba, Japan
- 17) 平山智樹、日比野剛、元木悠子(2019) アジア主要国における排出構造と削減目標に関する分析、環境科学会2019年会 シンポジウム-7 パリ協定の気候・排出削減目標の達成に向けた世界・アジア・日本の気候政策の統合分析

【サブテーマ3】

- 1) Fujimori, S. (2019) Climate change impacts: a CGE modeling approach, Twelfth Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) 2019, Tsukuba, Japan.
- 2) Wu, Y., Dai, H., Zhang, Y., Xie, Y., Fujimori, S., Hijioka, Y. (2019) Co-benefits of Climate Change Mitigation in Improvement of Global Air Quality and Human Health, Twelfth Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) 2019, Tsukuba, Japan.

- 3) Fujimori, S., Takahashi, K., Dai, H., Hasegawa, T., Liu, J.Y., Matsui, T., Ohashi, H., Xie, Y. (2019) Exploring the Implications of Asian Climate Change Mitigation Actions to Sustainable Development Goal, Twelfth Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) 2019, Tsukuba, Japan.
- 4) Herran, D. S., Fujimori, S., Kainuma, M. (2019) Assessment of Japan's 2050 mitigation goal and the relevance of uncertain nuclear policy, Twelfth Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) 2019, Tsukuba, Japan.
- 5) Oshiro, K., Fujimori, S., Gi, K., van Soest, H., Bertram, C., Després, J., Masui, T., Rochedo, P., Roelfsema, M., Vrontisi, Z. (2019) Japan's emission pathways in the context of the 2° C goals and their implications for the midcentury strategy, Twelfth Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) 2019, Tsukuba, Japan.
- 6) Liu, J. Y., Fujimori, S., Takahashi, K., Hasegawa, T., Wu, W., Masui, T. (2019) The importance of socioeconomic condition in achieving climate mitigation and SDGs, Twelfth Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) 2019, Tsukuba, Japan.
- 7) Yokohata, T., Kinoshita, T., Sakurai, G., Pokhrel, Y., Ito, A., Satoh, Y., Kato, E., Fujimori, S., Tachiiri, K., Hajima, T., Takahashi, K., Hanasaki, N., Emori, S. (2019) Future projection of water, food, bio-energy, ecosystem and land investigated with an integrated Earth System Model (MIROC-INTEG), Twelfth Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) 2019, Tsukuba, Japan.
- 8) Fragkos, P., Van Soest, H., Schaeffer, R., Reedman, L., Köberle, A., Macaluso, N., De Vita, A., Sha, F., Kejun, J., Mathur, R., Boer, R., Dewi, R. G., HERRAN, D. S., Fujimori, S., Park, C., Safonov, G., Lyer, G. (2019) Energy System Transition and Low-Emission Pathways in Australia, Brazil, Canada, China, EU, India, Indonesia, Japan, Republic of Korea, Russia, and United States, Twelfth Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) 2019, Tsukuba, Japan.
- 9) 藤森真一郎、大城賢、長谷川知子(2019) アジアのエネルギー関連低炭素技術投資の見通し、第27回地球環境シンポジウム、富山国際会議場 富山
- 10) 櫛部航、藤森真一郎、長谷川知子(2019) 食料廃棄物削減目標を達成することによる社会・経済・環境への副次的影響、第27回地球環境シンポジウム、富山国際会議場 富山
- 11) 西浦理、藤森真一郎、田村誠(2019) 全世界の波及的な効果を考慮した海面上昇によるマクロ経済影響評価、第27回地球環境シンポジウム、富山国際会議場 富山
- 12) 藤森真一郎(2019) Climate change and SDGs、ロシアミッション交流事業、京都経済センター、京都
- 13) Zhang, R., Fujimori, S. (2019) Transport electrification requires renewable energy penetration to mitigate climate change, Twelfth Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) 2019, Tsukuba, Japan.
- 14) Fujimori, S., Kushibe, K. (2019) Ancillary Benefits of Reducing Global Food Loss and Waste, Twelfth Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) 2019, Tsukuba, Japan.
- 15) Nishiura, O., Fujimori, S., Tamura, M. (2019) An Assessment of Global Macro-Economic Impacts caused by Sea Level Rise Using SSPs and RCPs framework, Twelfth Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) 2019,

- Tsukuba, Japan.
- 16) Hasegawa, T., Havlik, P., Frank, S., Palazzo, A., Valin, H. (2019) Tackling food consumption inequality to fight hunger without pressuring the environment, The 25th AIM international workshop.
 - 17) Wu, W., Hasegawa, T., Fujimori, S., Takahashi, K., Ochi, Y. (2020) Climate change and mitigation impacts on human health through undernourishment, AgMIP Global Economics Team Meeting, Potsdam, Germany.
 - 18) Herran, D. S., Fujimori, S. (2020) Insights and challenges for Japan's 2040 emission target considering multiple ambition levels, Thirteenth Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) 2020, (online, The meeting Time Zone is UTC).
 - 19) 大城賢、藤森真一郎、長谷川知子、明石修(2020) アジアにおける温室効果ガス短期削減目標が2050年までのエネルギー投資に及ぼす影響、第28回地球環境シンポジウム（オンライン）
 - 20) 渡邊諒一、藤森真一郎、長谷川知子、大城賢(2020) 世界を対象とした対流圏オゾンの作物収量に対する影響と気候政策の副次的便益に関する研究、第28回地球環境シンポジウム（オンライン）
 - 21) 西浦理、藤森真一郎、大城賢(2020) アジア各国における温室効果ガス大幅削減に必要な対策とその経済的影響の要因分析、第28回地球環境シンポジウム（オンライン）
 - 22) 横山直人、長谷川知子、大城賢、藤森真一郎(2020) 日本の農畜産業における温室効果ガス排出削減に関する研究、第28回地球環境シンポジウム（オンライン）
 - 23) 松井そら、大城賢、藤森真一郎、西浦理(2021) 交通部門における技術・社会の変容が気候変動政策へ及ぼす影響、第29回地球環境シンポジウム（オンライン）
 - 24) 西浦理、藤森真一郎、大城賢(2021) 世界およびアジアにおける二酸化炭素の地下貯留容量を考慮した気候変動緩和策の評価、第29回地球環境シンポジウム（オンライン）
 - 25) Fujimori, S. (2021) Model results for Asian decarbonization pathways, ENGAGE: Stakeholder Workshop Asian Decarbonization Pathways(online).
 - 26) 松井そら、藤森真一郎、大城賢、西浦理(2021) 交通部門の社会変革が気候変動政策へ及ぼす影響、第43回京都大学環境衛生工学研究会シンポジウム（オンライン）
 - 27) 西浦理、藤森真一郎、大城賢(2021) 世界およびアジアにおける炭素地下貯留技術の物理的制約を考慮した気候変動緩和策の評価、第43回京都大学環境衛生工学研究会シンポジウム（オンライン）
 - 28) Nishiura, O., Fujimori, S., Oshiro, K. (2021) An assessment of global and Asian climate change mitigation measures considering carbon capture and storage constraints, Fourteenth Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) 2021(online) (Poster Session).
 - 29) Chunark, P., Rajbhandari, S., Pradhan, B.B., Limmeechokchai, B., Fujimori, S., Oshiro, K., Ochi, Y. (2021) Scaling up climate ambition post-2030: A long-term GHG mitigation analysis for Thailand, Fourteenth Annual Meeting of the Integrated Assessment Modeling Consortium (IAMC) 2021(online) (Poster Session).
 - 30) 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

(3) 「国民との科学・技術対話」の実施

【サブテーマ1及び2】

- 1) 国民対話シンポジウム「低炭素社会から脱炭素社会を目指して」 主催：国立環境研究所 社

会環境システム研究センター・環境再生保全機構環境研究総合推進費2-1702及び2-1908、2019年11月20日、TKPガーデンシティPREMIUM秋葉原（約90名の参加登録）

- 2) 環境研究総合推進費2-1908、1-2002、1-2003 国民対話シンポジウム「日本の2050年脱炭素社会」 主催：国立環境研究所 社会環境システム研究センター・環境再生保全機構環境研究総合推進費2-1908、1-2002、1-2003、2021年3月10日、オンライン（約210名の参加登録）
- 3) 環境研究総合推進費2-1908 国民対話シンポジウム「脱炭素に向けたアジアの動き」 主催：国立環境研究所 社会システム領域・環境再生保全機構環境研究総合推進費2-1908、共催：公益財団法人 地球環境戦略研究機関、2022年3月18日、オンライン（約180名の参加登録）

【サブテーマ3】

特に記載すべき事項はない。

（4）マスコミ等への公表・報道等＞

【サブテーマ1】

- 1) 朝日新聞（2020年9月27日、1頁、「温室ガス「ゼロ」中国の野心」）
- 2) 日本経済新聞（2021年3月23日、1頁、「脱炭素30年目標策定」）
- 3) 日本経済新聞（2021年6月22日、電子版、「炭素税1万円でも成長」）

【サブテーマ2】

- 1) 中日新聞（2019年12月14日、滋賀県版、社会面(12版)、「「意外と小さい」新試算 温室ガス削減で経済損失 京大など研究「GDPの0.8%」」）
- 2) 中日新聞（2019年12月14日、岐阜県版、社会面(11版)、「「経済負担 意外と小さい」「温室ガス削減でGDP 2～8%損失」 京大など試算では「0.8%」」）
- 3) 中日新聞（2019年12月14日、岐阜県版、社会面(10版)、33頁、「温室ガス 減 経済損失 小 京大などグループ試算 先行研究「GDPの2～8%」→「0.8%」」）
- 4) 毎日新聞（2019年11月12日、大阪支社、総合面、4頁、「温室ガス削減費用 10分の1に圧縮 2050年時点 年5.3兆円 再生エネ導入費安く 京大チーム試算」）

【サブテーマ3】

- 1) 毎日新聞（2019年5月9日、「国際面（P8）焦点 国連IPCC総会 京都で開幕」）
- 2) 毎日新聞（2019年5月14日、総合・社会面、25頁、「温暖化抑えると50年1.6億人飢餓リスク バイオ燃料に添削→食料価格上昇」）
- 3) 読売新聞（2019年5月14日、社会面、33頁、「バイオ燃料推進で1億6000万人飢餓恐れ 京大など試算」）
- 4) 日本経済新聞電子版（2020年3月10日、プレスリリース、「京大など、電気自動車の完全普及によるCO2排出量削減の効果を解明」）
- 5) 日本経済新聞（2020年10月27日（第48358号）、第1面（13版）、「成長へ技術革新 号砲／首相「温暖化ガス2050年ゼロ」表明／エネ政策 抜本見直し」）
- 6) 産経ニュース（2020年11月13日、ウェブ版、「【知識考論】温室効果ガス「50年ゼロ」本当にできる？ 経済や暮らしへの影響は」）
- 7) 産経ニュース（2020年11月13日、ウェブ版、「【経済インサイド】温室効果ガス2050年実質ゼロは実現可能か」）
- 8) 産業経済新聞（サンケイ）（令和2年(2020)11月26日夕刊、日刊27967号（4版）、総合（第2面）、「2050温室ガスゼロの実現性 削減コストの縮小可能 電力は再エネ中心に」）
- 9) 日本経済新聞（2021年4月11日、日曜版、日刊第48519号(12版)、サイエンス（第26面）、

「電気自動車が「排ガス」 電池製造でCO₂再エネに期待」)

- 10) えこせん (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」)

(5) 本研究費の研究成果による受賞

【サブテーマ1】

特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ2】

特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ3】

研究奨励賞、京都大学環境衛生工学研究会、2021年7月30日、西浦理

IV. 英文Abstract

Assessment of Further Reduction of GHG Emissions in Asian Countries and Benefit to Japan by Assisting their Reduction Efforts

Principal Investigator: Toshihiko MASUI

Institution: National Institute for Environmental Studies

16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki, 305-8506 JAPAN

Tel: +81-29-850-2524 / Fax: +81-29-850-2572

E-mail: masui@nies.go.jp

Cooperated by: Kyoto University, Ritsumeikan University and Mizuho Research & Technologies

[Abstract]

Key Words: Climate change mitigation, Asia, Integrated assessment model,
Future scenario, Economic impact

This study quantifies the greenhouse gas (GHG) emission pathways reflecting Nationally Determined Contributions (national greenhouse gas emission reduction targets) for 2030 and the long-term strategies toward 2050 for Asian countries such as Thailand, Indonesia and Vietnam. We assessed the GHG emissions and the air pollutant emission reduction as a co-benefit of climate change mitigation measures to achieve the 2° C target, and the GHG emission reduction potential by technology to achieve the 1.5° C target. Our analysis uses a technology selection model, AIM/Enduse. In addition, the economic impacts of GHG mitigation actions were also assessed using the national computable general equilibrium (CGE) model, AIM/CGE. These models were officially used to assess the long-term strategies in Indonesia, Thailand and Vietnam. This study also quantified the economic benefits to Japan if Japan were to provide the support for the reduction efforts in those countries. Using a global CGE model, which we have developed, we estimated the global GHG emission pathways and quantified indicators related to GHG emissions and energy systems in the world and Asia to achieve the global mitigation targets. In addition, using multiple definitions of effort-sharing reflecting various ideas on equity and the global GHG emission pathways, the necessary emission pathways for Asian countries were presented. Furthermore, we proposed a way for the future global scenario for IPCC AR6.