

## A-0808 統合評価モデルを用いた気候変動統合シナリオの作成及び気候変動政策分析

## (3) 国別排出シナリオの作成

みずほ情報総研(株)

日比野剛・岡和孝・藤原和也

〈研究協力者〉

中国 能源研究所

Xiulian Hu・Kejun Jiang

インド 経営大学院アーメダバード校

P. R. Shukla

タイ アジア工科大学

Ram Shrestha

タイ タマサート大学シリントーン国際工学部

Bundit Lim

米国 スタンフォード大学

John Weyant

東京工業大学大学院社会理工学研究科

Hancheng Dai

平成 20～22 年度累計予算額：55,389 千円（うち、平成 22 年度予算額：18,465 千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨] 今後更なる経済発展に伴い、温室効果ガス排出量の増加が続くと見られるアジア途上国、この地域が低炭素社会へ移行しない限り、地球温暖化問題の解決へ向かうことはない。これらの地域においても、気候変動問題への認識は高まりつつあるものの、経済発展や大気汚染等の地域環境問題の解決など、取り組むべき課題は様々であり、これらの諸課題と温暖化対策を同時に改善するような施策の検討が求められている。すなわち、対策の受け入れを促進する制度との総合的検討が不可欠である。発展途上国において温暖化対策を促進するためには、温暖化対策の環境面、経済面の副次的効果を併せて評価することが必要である。

本研究では、これまでに開発してきたエネルギー技術選択モデルや一般均衡モデルをアジア諸国に適用し、様々な将来シナリオの下での温室効果ガス排出量、対策導入による効果および経済影響などを総合的かつ定量的に示すことにより、削減シナリオの作成に貢献した。中国についてはエネルギー技術選択モデルおよび一般均衡モデルを用いて、2050 年までの排出量・削減量の推計を行うとともに、その経済影響等を分析した。インドについては、AIM/Enduse [Local] モデルの適用を通じて、CO<sub>2</sub> 削減対策の効果や副次的効果について分析を行ったほか、世界での気温上昇の安定化目標を達成するという条件下での、インドの成長パスや対策技術の動向などについて評価を試みた。タイについては、一定の排出制約を設けた場合や、複数のポリシーパッケージを設定した条件下での排出量・削減量の推計を行った。

また、日本を対象として、様々な文献調査や最新動向の収集等を通じて技術情報の更新を行うとともに、2030 年頃までの温室効果ガス排出量の試算を行った。これらの結果は各種検討会に提示され、温暖化政策の立案に貢献した。

[キーワード] 地球温暖化、温室効果ガス、緩和策、グローバルシナリオ、中期目標

## 1. はじめに

アジア途上国は多くの人口を抱え、更に現在の高い経済成長率を今後も続けていくだけの大きな潜在的な能力も有している。今後の経済発展に伴ない温室効果ガスの排出量も年々増大していき、このままの傾向が続けば、2050年にはアジア地域のCO<sub>2</sub>排出量が世界全体の36～49%になると予測される(IPCC SRES AIM)。中国やインドなどのアジア途上国の低炭素社会の実現なくしては、地球温暖化問題の解決に向かうことはできない。IPCC新シナリオ削減過程においても、途上国の視点を反映された長期の気候変動シナリオを作成することが主要な課題として掲げられている。これらの地域においても、気候変動問題への認識は高まりつつあるものの、経済発展や大気汚染等の地域環境問題の解決など、取り組むべき課題は様々であり、これらの諸課題と温暖化対策を同時に改善するような施策の検討が求められている。すなわち、対策の受け入れを促進する制度との総合的検討が不可欠である。発展途上国において温暖化対策を促進するためには、温暖化対策の環境面、経済面の副次的効果を併せて評価することが必要であり、実効性のある温室効果ガス排出量の対策シナリオの検討が重要な役割を担う。

## 2. 研究目的

地球温暖化問題は、100年以上の長期にわたる課題であるとともに、極めて大きな不確実性をもち、科学による解明と政策による対応の同時進行が必要な課題の1つである。こうした課題には、将来の様々な可能性を盛り込んだシナリオアプローチが有効である。本研究ではこれまでに開発してきた応用一般均衡モデルや技術選択モデルをアジア諸国に適用し、将来の社会経済活動、温室効果ガス排出量、対策による削減量、経済影響などを総合的かつ定量的に示して、各国の削減シナリオの作成を実施する。

## 3. 研究方法

中国、インド、タイ等の国々を対象として、モデル構築のための環境、経済、技術に関するデータの収集を行い、人口、経済発展、技術進歩に関する将来シナリオの整備を各国別に行う。また、対象国の研究機関と共同で各種モデルの各国への適用を行う。適用するモデルは、技術の普及状況と温室効果ガス排出量の関係を技術ベースで評価することを目的としたエンドユースモデルと、地球温暖化問題の解決と経済発展の両立を目指した政策の評価が可能となるように、応用一般均衡モデルをベースとしたモデルから構成される。これらのモデルは相互補完の関係にあり、2つのモデルを連携することで、環境要素モデルで表現されるリアリティと環境政策評価モデルで示されるマクロ的な整合性の両方を兼ね備えた分析を行う。

### (1) アジア各国を対象としたエネルギー技術選択モデルの改良とその適用

#### 1) 中国における削減シナリオ

中国については複数の将来シナリオを作成し、エネルギー技術選択モデルおよび一般均衡モデルを用いて、将来排出量の推計や対策技術の削減ポテンシャルの推計を行った。対象期間は2050年までとした。

平成20～21年度には、主にエネルギー技術選択モデルによる分析を実施した。使用するモデルは、AIM/Enduseモデルをベースに作成した技術積上モデルである。エネルギーサービスを供給する際の総

コストが最小となるよう最適化計算が行われる。発電、産業、民生などをさらに細分化した 42 部門から構成されており、対策技術については、すでに実用化されているものから今後実用化が予想されるものまで含めて、総計 600 近い技術を取り扱っている。

将来シナリオの作成にあたっては、中国政府の発表する発展計画や既往研究等を参考にして、社会経済指標を設定した。これらに加え CO<sub>2</sub> 排出量の緩和政策の観点も加えて、合計 4 つのシナリオを設定し（表 1）、2050 年の排出量推計を行った。

表 1 エネルギー技術選択モデルによる分析に用いたシナリオ

シナリオ名	GDP 成長率 2005-2050	定義
参照ケース	7.5%	消費動向は多消費型で、環境対策への配慮が薄いシナリオ。リファレンスシナリオ。
LC シナリオ	6.2%	持続可能な発展を考慮して各種対策を導入するシナリオ。省エネ技術、再生可能エネルギー、原子力発電の技術開発、CCS 技術の導入を積極的に進める。
ELC シナリオ	6.2%	LC シナリオに比べて、CCS 技術を含む主要な削減技術の導入がさらに進み、より早期の削減を推進するシナリオ。
LLC シナリオ	5.7%	LC シナリオと同様の想定で、GDP 成長率が低いケース。

平成 22 年度には、一般均衡モデルを用いた定量分析を行い、2050 年までの温室効果ガス排出量や炭素価格の推移等についてシミュレーションを行った。一般均衡モデルは AIM/CGE モデルをベースにしたもので、生産部門では 41 の部門と財を対象とし、発電部門では表 2 に示す 12 の技術を扱った。最終消費部門では、家計は一次投入要素の提供分から収入を得て、消費および投資に使用されることとした。GDP や人口といった社会経済指標は、表 3 に示すように各種機関の最新の推計値を用いて新たに設定することとした。

将来シナリオは参照ケースと炭素強度集約ケースを用意した。炭素強度収束ケースでは 2050 年における GDP 当りの炭素強度を世界全体で収束させることとし、その場合の 2005 年から 2050 年の排出量を外生的に与えてシミュレーションを行った。

表 2 発電部門における対策技術

種別	技術	種別	技術
石炭火力	臨界圧蒸気タービン	非化石燃料	水力
石炭火力	超臨界圧蒸気タービン	非化石燃料	原子力
石炭火力	超々臨界圧蒸気タービン	非化石燃料	風力
石炭火力	循環流動層	非化石燃料	バイオマス
石炭火力	石炭ガス化複合発電	非化石燃料	太陽光
石油火力	石油火力発電		
ガス火力	ガス火力発電		

（このほか、CCS はセメント、鉄鋼、石油化学、石炭火力、ガス火力を対象に、2020 年以降に導入が開始されると想定）

表3 一般均衡モデルによる分析に用いたシナリオ

シナリオ名	GDP 成長率				定義
	05-20	20-30	30-40	40-50	
参照ケース	8.0%	6.2%	4.1%	3.1%	リファレンスケース。
炭素強度 集約ケース	同上	同上	同上	同上	2050年のGDPあたり炭素強度を世界全体で収束。その場合の2005年から2050年の排出量を外生的に与えるケース。

## 2) インドにおける削減シナリオ

平成20年度には、大規模発生源毎の技術選択モデルである AIM/Enduse[Local]モデルをインドに適用して、CO<sub>2</sub>削減対策の効果や費用、およびSO<sub>2</sub>削減効果との関係について分析を行った。対象部門は発電部門とし、推計期間は2030年までとした。使用するモデルは、発電所ごとに技術データをセットしてエネルギー消費やCO<sub>2</sub>排出量を積上げるもので、インド全域で514の発生源を特定した。発生源ごとに稼働年数や使用する燃料の質、発電方法や運転方法などの要素が異なっているが、こうした点を考慮して分析を行った。火力発電の高効率化や石炭からガスへの燃料転換など費用対効果の優れた温暖化対策は、CO<sub>2</sub>排出量だけでなくSO<sub>2</sub>排出量も削減するが、クリーンコール技術や低硫黄軽油といった大気汚染対策は温室効果ガスの削減にはほとんど寄与しない。そこで、炭素税を導入した際のこれらの削減量について推計し、温暖化対策の効果とその副次的効果について分析を行った。

平成21～22年度には、世界での気温上昇を2度に安定化させるシナリオと整合する成長の経路を、インドにおいて実現することを目指し、低炭素社会に変革するためのシナリオについて、サービス量推計モデルや AIM/CGE モデル等から構成される統合評価モデルを用いて評価を試みた。対象は2050年とした。分析に使用する AIM/CGE モデルでは、インドを含む18の地域と13の部門を扱っており、新市場における経済効果や新しい投資、技術移転に関する分析が可能という特徴がある。GDPについてはインド計画委員会「8%成長シナリオ」を、人口については国連「中位シナリオ」の値を参考に設定した(表4)。推計に当たっては3つのシナリオを設定した(表5)。これらのシナリオについて、21世紀半ばまでの累積排出量が同じになる条件下で、シミュレーションを行った。

表4 将来における GDP、人口の想定 (インド)

年	GDP (10 億ルピー、2005 年価格)	人口 (百万人)
2005	32,833	1,131
2030	229,573	1,485
2050	774,673	1,614

表5 インドの将来シナリオ

シナリオ名	定義
参照ケース	従来どおりの成長パスを将来も取り続けるケース。資源消費強度の変化などは現状の先進国の数値を追従するものと想定。リファレンスシナリオ。
炭素税シナリオ	厳しい炭素税を導入しつつ、基本的な社会構造は参照ケースと同様と想定するシナリオ。世界の気温上昇が 2-3 度となる安定化目標 (450 ppmv CO <sub>2</sub> eq) に整合する排出経路をとると想定。
持続型社会シナリオ	経済成長と資源利用のデカップリングを進め、ガバナンス強化や法・市場制度の整備などの施策によって、持続可能な発展を目指すシナリオ。世界の気温上昇が 2-3 度となる安定化目標 (450 ppmv CO <sub>2</sub> eq) に整合する排出経路をとると想定。

### 3) タイにおける将来シナリオの開発と評価

平成 20~21 年度には、タイの一部あるいは全土を対象にエネルギー技術選択モデルを適用し、一定の炭素制約を与えた場合の技術選択の動向や、副次的効果の分析を行った。推計期間は 2050 年までとした。使用するモデルは中国やインドと同様に技術積み上げ型モデルである。

平成 20 年度には、分析の対象をバンコクの運輸部門に限定した。使用するモデルにはエンドユース技術としてバスや乗用車など 78 の技術を用意した。将来シナリオとして、政策導入を考慮しない参照ケース、2015 年に参照ケースよりも CO<sub>2</sub> 排出量を 10%削減する ERT10 ケース、同 20%削減するケース ERT20 ケース、これら 3 ケースについてシミュレーションを行った。バンコクにおける各種の社会経済指標の 2050 年値は、過去の実績などから、人口が 1.5 倍、一人あたり域内総生産が 6.1 倍 (いずれも 2005 年比) になると想定した。

平成 21 年度には、タイ全土を対象にエネルギー技術選択モデルを適用した。タイの将来シナリオとして、政策導入を考慮しない参照ケース、世界全体での炭素濃度安定化目標に整合した炭素税を導入する対策ケース、これら 2 ケースについて分析を行った (表 6)。社会経済指標については、GDP はタイ発展研究所の推計を参考に年成長率 5.6%を、人口は国連の推計を参考に年増加率 0.4%を設定した。

表6 タイの将来シナリオ

シナリオ名	定義
参照ケース	GHG 削減対策を採らないケース。原子力発電や燃料電池車、CCS 技術などは 2020 年以降に導入開始されると想定。太陽光発電、風力発電、バイオマス発電技術などの学習効果も考慮。技術の効率向上も一定程度見込む。
対策ケース	世界 450ppmv、550ppmv、650ppmv 安定化を達成するために必要な炭素価格を設定するケース。450ppmv では 2050 年に 100 ドル程度、550ppmv では 2050 年に 20 ドル程度、650ppmv では 10 ドル程度まで上昇すると想定。

平成 22 年度には、低炭素社会の実現可能性について評価することとし、部門ごとに用意したポリシーパッケージを適用した場合の削減効果等の分析を行った。分析対象は 2030 年までとした。社会経済指標については、タイの公的機関等から得られる最新の情報を参考に定量化した (表 7)。ポリシーパッケージを用意するに当たっては、2005 年から 2030 年までの間に利用可能になると考えられる低炭素技術や施策を想定した (図 1)。また、炭素税の導入は見込まなかった。

表7 将来における GDP、人口の想定（タイ）

	2005	2030	2030/2005
人口(千人)	60,991	68,815	1.1
GDP(百万バーツ)	8,016,595	30,802,306	3.8
業務床面積(百万 m <sup>2</sup> )	88	394	4.5
旅客輸送量(百万人 km)	191,520	216,088	1.1
貨物輸送量(百万トン km)	188,524	589,859	3.1

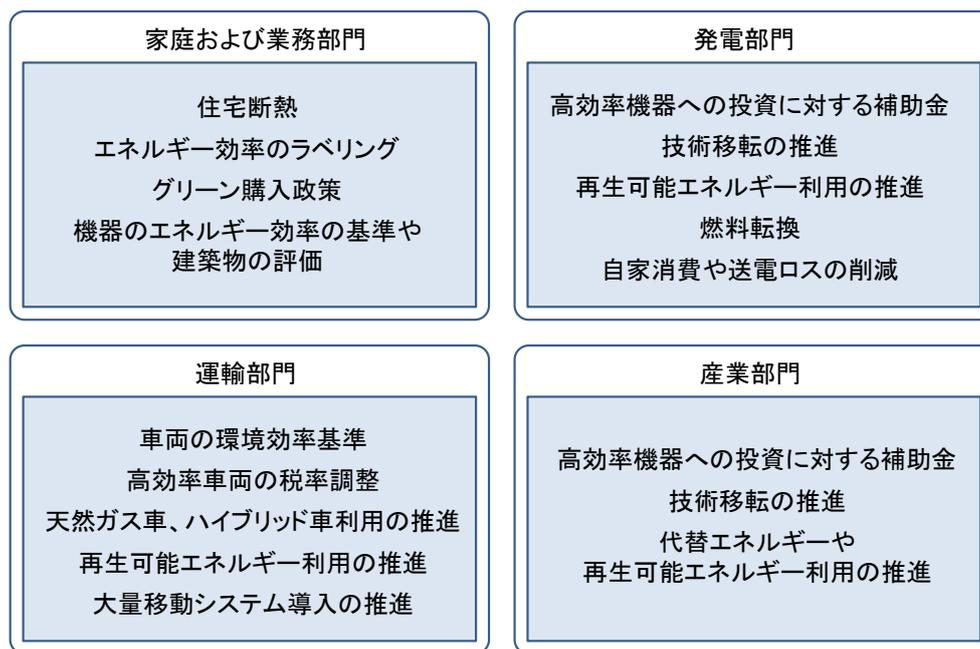


図1 部門ごとに用意したポリシーパッケージ

## (2) 日本を対象としたエネルギー技術選択モデルの改良とその適用

### 1) AIM/Enduse モデルの適用

AIM/Enduse モデルをわが国に適用にし、技術積み上げ方式によってわが国の温室効果ガス排出量および対策技術の効果量などを推計した。

分析結果は、平成 20 年度には内閣官房「中期目標検討委員会」における国民に選択肢として提示するわが国の 2020 年温室効果ガス排出目標の検討に、平成 21 年度には地球温暖化問題に関する閣僚委員会タスクフォース、環境省中長期ロードマップ検討会に、平成 22 年度には中央環境審議会 地球環境部会 中長期ロードマップ小委員会に提供され、わが国における温暖化政策の立案に貢献した。

### 2) 分析の前提

#### a. マクロフレームの想定

将来の社会や経済に関するシナリオ（マクロフレーム）については、近年の行政機関・研究機関における推計値を用いている（表 8）。素材生産量・業務床面積については総合資源エネルギー調査会「長期エネルギー需給見通し」、鉱工業生産指数については日本エネルギー経済研究所の見通し、世帯数に

については社会保障・人口問題研究所の見通し、輸送量については国土交通省の見通しなどを参考に設定した。

表 8 マクロフレームの前提

部門	要素	単位	1990	2000	2005	2020	2030	
産業	素材生産量	粗鋼	万トン	11,171	10,690	11,272	11,966	11,925
		エチレン	万トン	597	757	755	706	690
		セメント生産量	万トン	8,685	8,237	7,393	6,699	6,580
		紙・板紙生産量	万トン	2,854	3,174	3,107	3,244	3,190
	鉱工業生産指数	食品	2005年=100	102.9	102.8	99.5	87.2	78.4
化学		2005年=100	84.0	97.1	99.5	116.6	133.2	
非鉄金属		2005年=100	90.6	98.9	100.7	103.3	105.8	
機械他		2005年=100	89.2	95.7	101.5	136.2	157.6	
その他		2005年=100	84.7	108.8	100.0	94.0	94.9	
家庭	世帯数	万世帯	4,116	4,742	5,038	5,357	5,242	
業務	床面積	百万 m <sup>2</sup>	1,285	1,655	1,759	1,932	1,920	
運輸	旅客輸送量	総量	億人キロ	11,313	12,969	13,042	13,066	13,036
	貨物輸送量	総量	億トンキロ	5,468	5,780	5,704	6,341	6,344
農業	家畜頭数	乳牛・肉牛	万頭	535	456	438	495	495
	作付面積	総量	万 ha	487	453	439	428	428
廃棄物	発生量	一般廃棄物	百万トン	50	55	53	49	46

#### b. マクロフレームの変動

AIM/Enduse モデルと AIM/CGE モデルは相互補完的なモデルである。つまり、日本技術モデルは、マクロフレームから想定されるサービス需要量を満たすようにエネルギー技術が選択される技術ボトムアップ型のモデルであり、日本経済モデルは、エネルギー効率を前提としてマクロ的に整合的な活動水準や価格を計算するトップダウン型のモデルである。それぞれの利点を生かし、各モデルを用いた計算を何度か繰り返すことで（図 2）、2つのモデルに整合的なマクロフレームを検討することができる。ただし、実際のシミュレーション作業では、主要な要素（発電電力量、粗鋼生産量等）についてだけフィードバックするケースを想定した。

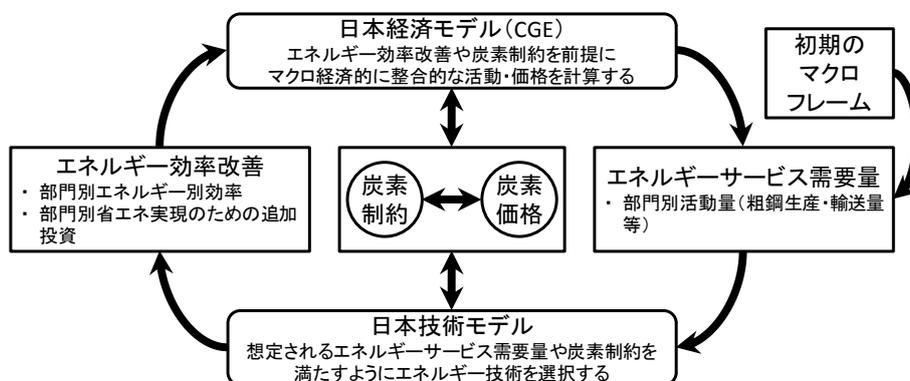


図 2 2つのモデルの結果のフィードバック

AIM/CGE モデルによって計算されたマクロフレームの変動幅を表 9 に示す。表 8 で示したマクロフレームに基づき排出量を推計するマクロフレーム固定ケースと、表 9 に示された変動幅を反映させたマクロフレームに基づき推計するマクロフレーム変動ケース、2つのケース毎に排出量を推計した。

表 9 AIM/CGE モデルによる削減目標に応じたマクロフレームの変化（参照ケース=100）

	2020 年			2030 年		
	▲15%	▲20%	▲25%	下位	中位	上位
農業	98	97	96	94	93	92
食料品	97	96	95	94	93	93
化学繊維	99	99	99	98	97	97
紙・パルプ	97	96	96	95	94	94
化学	99	99	99	98	97	97
エチレン	100	101	101	101	101	101
ガラス製品	109	119	126	111	120	118
セメント	97	96	96	93	92	91
窯業土石	95	94	93	92	91	91
鉄鋼	99	99	96	98	97	97
非鉄金属	99	99	99	98	98	98
機械等	100	99	99	98	98	98
その他製造業	99	99	98	96	96	95
建設	97	96	96	93	92	91
運輸	97	96	95	96	95	95
サービス	99	98	98	97	96	96
廃棄物	99	99	98	97	97	97

#### c. ケース設定

将来の排出量については、以下の 3つのケースについて推計を行った。

##### i. 固定ケース

技術の導入状況やエネルギー効率が現状（2005 年）の状態固定されたまま将来にわたり推移すると想定したケース。但し、下表に示すように部門に応じて固定ケースの考え方を変えている。

##### ii. 参照ケース

これまでの効率改善については既存技術の延長線上で今後も継続的に実施すると想定した（「長期エネルギー需給見通し」の努力継続ケースにおける対策を考慮した）ケース。

##### iii. 対策ケース

様々な政策を講じることで、エネルギー効率や CO<sub>2</sub> 排出効率の改善が見込まれる機器について、その普及を加速させ進展させるケース。講じる施策のレベルに基づき、2020 年については▲15%、▲20%、▲25%のケースについて推計を行った。2030 年については、2020 年に 1990 年比▲15%～▲25%に向けて排出削減のために取り組んだ対策を 2021～2030 年も継続して実施する場合を想定し、2030 年の排出量試算を実施。

#### d. 対策技術導入に関する想定

本試算において想定した主な対策技術とその導入量は表 10、表 11 の通りである。この想定については環境省中長期ロードマップ検討会における検討結果を参考に設定した。

表 10 本試算で想定した主な対策技術とその導入量(1)

	現状	2020年(上段) / 2030年(下段)					
		固定	参照	▲10%	▲15%	▲20%	
産業	鉄鋼・次世代コークス炉	0	—	—	6基	6基	6基
			—	—	12基	12基	12基
	セメント・廃熱発電	77%	77%	77%	88%	88%	88%
			77%	77%	99%	99%	99%
	化学・エチレンラッカーの省エネ化	—	—	—	15万kL	15万kL	15万kL
			—	—	30万kL	30万kL	30万kL
	紙パルプ・高効率古紙パルプ	17%	17%	17%	71%	71%	71%
			—	—	100%	100%	100%
	高性能工業炉	—	—	—	130万kL	130万kL	130万kL
			—	—	260万kL	260万kL	260万kL
	高性能ボイラ	—	—	—	40万kL	40万kL	40万kL
			—	—	40万kL	40万kL	40万kL
	高効率空調・産業ヒートポンプ	—	—	—	41万kL	41万kL	41万kL
		—	—	84万kL	84万kL	84万kL	
インバータ制御	24%	24%	24%	38%	38%	38%	
		24%	24%	50%	50%	50%	
高効率モータ	11%	11%	11%	41%	41%	41%	
		11%	11%	71%	71%	71%	
天然ガス転換	10%	10%	10%	15%	15%	18%	
		10%	10%	20%	20%	23%	
家庭	99年基準以上住宅(新築)	10%	10%	70%	80%	70%	70%
			10%	70%	60%	50%	40%
	既設住宅の断熱改修	—	—	—	20%	30%	30%
			—	—	40%	50%	60%
	電気ヒートポンプ給湯器	48万台	240万台	540万台	1100万台	1190万台	1400万台
			240万台	520万台	1570万台	1780万台	1830万台
	潜熱回収型給湯器	20万台	150万台	380万台	1700万台	1760万台	2290万台
			140万台	370万台	2410万台	2730万台	2840万台
	燃料電池コージェネ	0	0万台	30万台	100万台	100万台	100万台
			0万台	30万台	200万台	200万台	200万台
	太陽熱温水器	350万台	140万台	140万台	750万台	750万台	750万台
			140万台	140万台	770万台	1400万台	1600万台
	エアコン・COP(冷房/暖房)	3.7/2.7	4.7/3.3	5.3/3.7	6.2/4.3	6.2/4.3	6.2/4.3
		4.7/3.3	5.3/3.7	6.9/4.6	6.9/4.6	6.9/4.6	
エアコン・暖房比率	35%	33%	33%	42%	50%	59%	
		34%	34%	47%	60%	75%	
照明効率(1m/W)	82	82	110	166	166	166	
		82	110	222	222	222	
その他家電効率	100	107	115	126	132	139	
		107	115	137	149	164	
省エネナビ普及率	—	—	—	30%	50%	80%	
		—	—	50%	80%	80%	

表 11 本試算で想定した主な対策技術とその導入量(2)

	現状	2020年(上段) / 2030年(下段)					
		固定	参照	▲10%	▲15%	▲20%	
業務	99年基準建築物(新築)	56%	56%	80%	80%	70%	50%
			56%	80%	60%	30%	20%
	既設建築物の断熱改修	0%	0%	0%	20%	30%	50%
			0%	0%	40%	70%	80%
	電気ヒートポンプ給湯器	—	—	—	310万kW	810万kW	1010万kW
			—	—	530万kW	1650万kW	2060万kW
	潜熱回収型給湯器	—	—	—	10300万kW	10800万kW	17950万kW
			—	—	12700万kW	13000万kW	14400万kW
	太陽熱温水器	34万m <sup>2</sup>	34万m <sup>2</sup>	34万m <sup>2</sup>	56万m <sup>2</sup>	94万m <sup>2</sup>	196万m <sup>2</sup>
			34万m <sup>2</sup>	34万m <sup>2</sup>	100万m <sup>2</sup>	200万m <sup>2</sup>	300万m <sup>2</sup>
	HP空調・中央式(冷/暖)	4.5/3.0	4.5/3.0	4.8/3.2	5.3/3.5	5.3/3.5	5.3/3.5
			4.5/3.0	4.8/3.2	6.4/4.3	6.4/4.3	6.4/4.3
	HP空調・個別式(冷/暖)	3.0/2.0	3.0/2.0	3.8/2.5	4.1/2.8	4.1/2.8	4.1/2.8
			3.8/2.5	4.9/3.2	4.9/3.2	4.9/3.2	
HP空調・暖房比率	14%	14%	23%	23%	32%	50%	
			23%	28%	44%	60%	
照明効率(1m/W)	89	89	116	170	170	170	
		89	116	223	223	223	
その他電気機器	100	100	115	126	132	139	
		100	115	137	149	164	
BEMS	—	—	10%	30%	40%	40%	
			15%	50%	70%	80%	
運輸	乗用車燃費 (在来・販売)	100	100	100	120	120	120
			100	100	125	125	125
	貨物車燃費 (在来・販売)	100	100	100	109	109	109
			100	100	114	114	114
	乗用車燃費 (次世代含む・販売)	100	100	135	145	155	165
			100	157	168	178	190
	貨物車燃費 (次世代含む・販売)	100	100	111	112	113	115
			100	115	116	117	117
	次世代 (乗用車・販売)	1.3%	1.5%	17%	30%	41%	52%
			1.5%	39%	50%	60%	70%
バイオ燃料	—	—	21万kL	70万kL	70万kL	70万kL	
		—	21万kL	100万kL	100万kL	100万kL	
エコドライブ	110万tCO <sub>2</sub>	110万tCO <sub>2</sub>	170万tCO <sub>2</sub>	340万tCO <sub>2</sub>	490万tCO <sub>2</sub>	650万tCO <sub>2</sub>	
		110万tCO <sub>2</sub>	150万tCO <sub>2</sub>	340万tCO <sub>2</sub>	490万tCO <sub>2</sub>	650万tCO <sub>2</sub>	
カーシェアリング	0万tCO <sub>2</sub>	0万tCO <sub>2</sub>	10万tCO <sub>2</sub>	30万tCO <sub>2</sub>	60万tCO <sub>2</sub>	100万tCO <sub>2</sub>	
		0万tCO <sub>2</sub>	8万tCO <sub>2</sub>	30万tCO <sub>2</sub>	60万tCO <sub>2</sub>	100万tCO <sub>2</sub>	
新エネ	太陽光発電	144万kW	299万kW	299万kW	3500万kW	4200万kW	5000万kW
			299万kW	299万kW	9100万kW	9500万kW	10100万kW
	風力発電	109万kW	248万kW	248万kW	1131万kW	1131万kW	1131万kW
			248万kW	248万kW	2700万kW	2700万kW	2700万kW
	水力発電	2061万kW	2196万kW	2199万kW	2321万kW	2536万kW	2756万kW
			2199万kW	2199万kW	2766万kW	2909万kW	3056万kW
	地熱発電	53万kW	53万kW	53万kW	171万kW	171万kW	171万kW
		53万kW	53万kW	234万kW	234万kW	234万kW	
バイオマス発電	408万kW	593万kW	593万kW	761万kW	761万kW	761万kW	
		589万kW	589万kW	799万kW	799万kW	799万kW	
バイオマス熱利用	470万kL	563万kL	584万kL	757万kL	757万kL	887万kL	
		478万kL	500万kL	783万kL	783万kL	883万kL	

### (3) 温暖化政策評価シナリオ、関連モデルについての情報収集

各国の将来シナリオ作成の参考とするため、開催されたエネルギーモデリングフォーラムを通じて温暖化政策評価シナリオや関連モデルについての情報収集を行った。この会合は 1974 年にエネルギー・環境問題に関する研究者間の意見交換のため、スタンフォード大学に設置された会合で、気候変動に関するモデルプロジェクトを進めている。平成 21 年度および 22 年度に開催された同会合での発表のうち、統合評価モデルを含むモデル開発や適用事例、気候変動対策が環境や経済に与える影響の評価事例などを中心に情報収集を行った。以下に収集した事例（一部）を記載する。

#### 1) モデルの開発や適用に関するもの

##### i. Overview of Integrated Assessment (John P. Weyant、スタンフォード大学)

統合評価モデルがどのような知見を提供ができるか（気候変動が及ぼす影響や対策立案のための各種情報など）、適用形態としてどのようなものがあるか（政策評価か費用便益分析か）、不確実性分析としてどのようなアプローチがあるか（感度解析、確立論的分析など）などの一般的な情報を整理している。

##### ii. The ReMIND Integrated Assessment Model: Treatment of Renewable Energy Technologies & Insights from Model Intercomparisons (Elmar Kriegler、ポツダム研究所)

複数の統合評価モデルを比較し、再生可能エネルギー技術に関する評価例を紹介。再生可能エネルギーの取り扱いでは、再生可能エネルギーの系統連系コストの表現の仕方や、土地利用変化・バイオマスの表現の仕方、持続可能性指標の表現などが、主要課題となっていると述べている。

##### iii. Modelers Perspective on the Use of IAMs (Jae Edmonds、パシフィックノースウエスト国立研究所)

統合評価モデルのこれまでの貢献について紹介。CO<sub>2</sub>濃度安定化には抜本的变化が必要ということを示した。たとえば CO<sub>2</sub>貯蔵は現在ほとんど行われていないが 550ppm 安定化を目指す場合、2020 年に 70 (炭素換算百万トン)、2095 年に 6,000 (炭素換算百万トン) が必要との結果が、モデルから得られていると指摘。今後、統合評価モデルがどのような役割を統合評価モデルは果たしていくべきかに関する問題提起もしている。

#### 2) 気候変動対策が環境や経済に与える影響に関するもの

##### i. Assessing the value of climate policy: The decision maker's dilemma (Jay Gullede、ピューサーセンター)

効果的な政策決定のために、気候変動政策の効果を適切に評価することが可能な手法が必要と主張し、Pew Benefit Workshop の内容について紹介。現状の評価手法による推計結果には不確実性があり、リスクを十分に考慮できていない、等の主張を引き合いに出し、政策決定者が理解し易く、政策の効果を比較可能な手法の必要性を主張している。

##### ii. VIA Needs for RSPs (Gary Yohe, Kris Ebi and Richard Tol、ハンブルグ大学)

経済モデルを用いて、競争市場において財に環境税を課した際の副次的効果の考え方を整理。一番

良いケース（環境税の額が排出に伴う社会的費用に等しい場合）では、副次的効果は発生しないと主張。炭素のみに課税した場合、炭素以外の環境負荷物質の排出を抑制する効果があるが、これらにも同様に課税した場合、温暖化対策の副次的効果は減少すると主張している。

#### 4. 結果・考察

##### （1）アジア各国を対象としたエネルギー技術選択モデルの改良とその適用

##### 1) 中国における削減シナリオ

エネルギー技術選択モデルを用いて推計した、各シナリオにおける最終エネルギー消費量、CO<sub>2</sub>排出量を図3、図4に示す。対策ケースではエネルギー消費量が顕著に低下しており、技術効率向上など施策効果が現れている。対策シナリオではいずれも石炭の使用量が抑制され、風力や太陽光、バイオマスといった再生可能エネルギーがシェアを伸ばしており、参照ケースに比べてCO<sub>2</sub>排出量が大幅に削減された。LC、ELC、LLCの各対策シナリオにおいて、2020年にはベースライン比でいずれも20%程度、2050年にはLCシナリオでは30%程度、ELC、LLCシナリオではいずれも60%程度の削減が可能であることが示された。

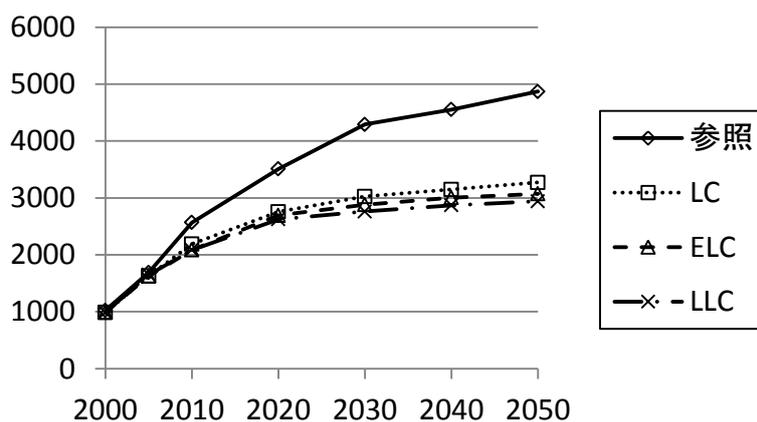


図3 最終エネルギー消費量の変化【中国】（単位：石炭換算百万トン）

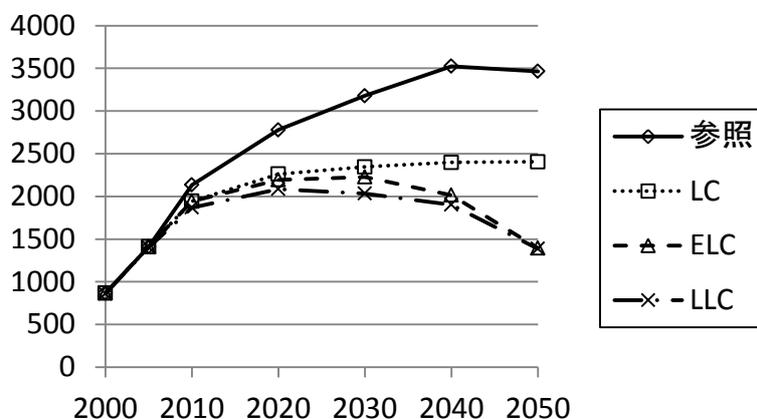


図4 CO<sub>2</sub>排出量の変化【中国】（単位：炭素換算百万トン）

また、シミュレーションから得られる機器普及率等から、各部門における主要な対策技術について、普及ロードマップを描いた（図 5）。

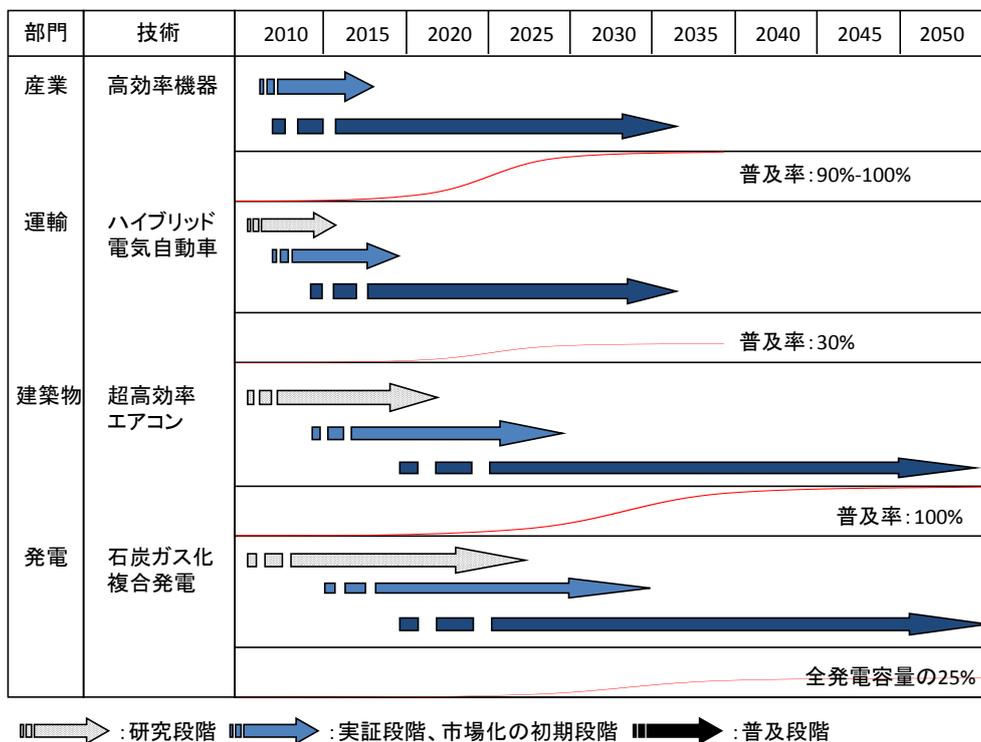


図 5 技術普及のロードマップの例【中国】

次に、一般均衡モデル用いた分析結果について、図 6～図 8 に示す。CO<sub>2</sub>排出量については、参照ケースでは 250 億トン CO<sub>2</sub>、炭素強度集約ケースでは約 50 億トン CO<sub>2</sub> となり、炭素強度集約ケースでは、参照ケースに比べて 80% 程度の排出削減になるとの結果が得られた。この場合、2050 年の GDP ロスは約 10%、炭素価格はトン CO<sub>2</sub> あたり 450 ドル程度になると推計された。参照ケースでは 2050 年の一次エネルギー供給量は 5 倍程度となり石炭のシェアが非常に大きくなるが、炭素強度集約ケースでは 2 倍程度の増加にとどまり、化石燃料系以外のシェアが高まることが示された。最終エネルギー消費量についても同様の傾向が見られたが、最終エネルギー消費にあつては、参照ケースでも石炭のシェアはそれほど高まらないことが示された。

推計結果を茅恒等式に基づき要因分解したところ、参照ケースにおいては、CO<sub>2</sub> 排出量の増加は主に、一人あたり国内総生産の増加の影響を受けていると考えられた。また炭素強度集約ケースにおいては、国内総生産あたりのエネルギー強度や化石燃料以外のエネルギー利用の増加、CCS 技術の採用などが排出削減に貢献していると考えられた。

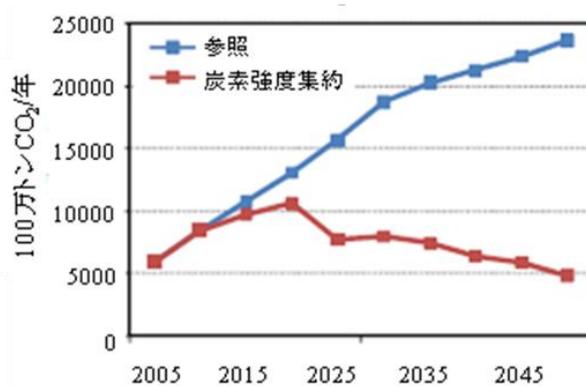
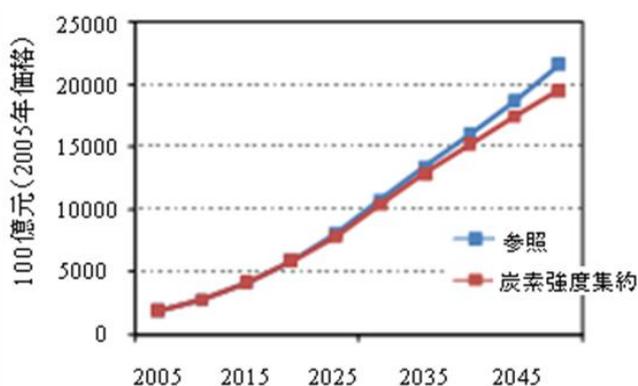
図6 CO<sub>2</sub>排出量の推移【中国】

図7 GDPの推移【中国】



図8 炭素価格の推移【中国】

## 2) インドにおける削減シナリオ

AIM/Enduse[Local]モデルを用いた、温暖化対策の効果の分析では、参照ケースではCO<sub>2</sub>排出量は増加し続ける結果となった。一方で、トンCO<sub>2</sub>あたり5ドル以下の比較的安価な炭素税が導入される場合には、既存の火力発電の効率改善、超臨界圧発電の導入、高品質の石炭の輸入、ガスへの燃料転換、新エネルギーの導入などが促進される結果となった。これにより、トンCO<sub>2</sub>あたり5ドルの炭素税ケースでは参照ケースと比べて、2005年から2030年までの累積で250億トンのCO<sub>2</sub>が削減され、対策費

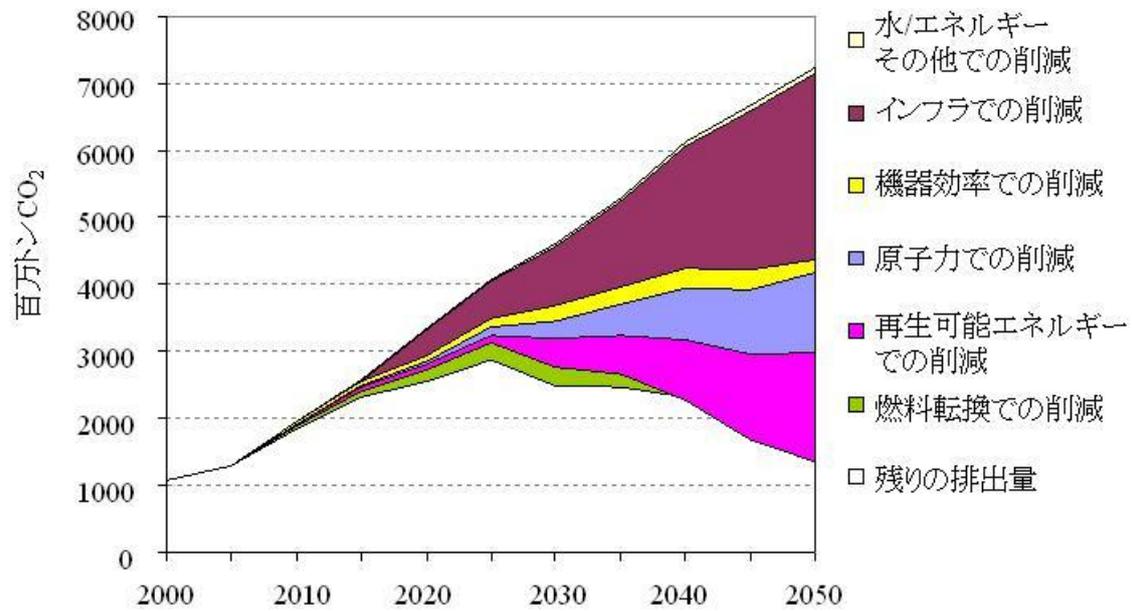
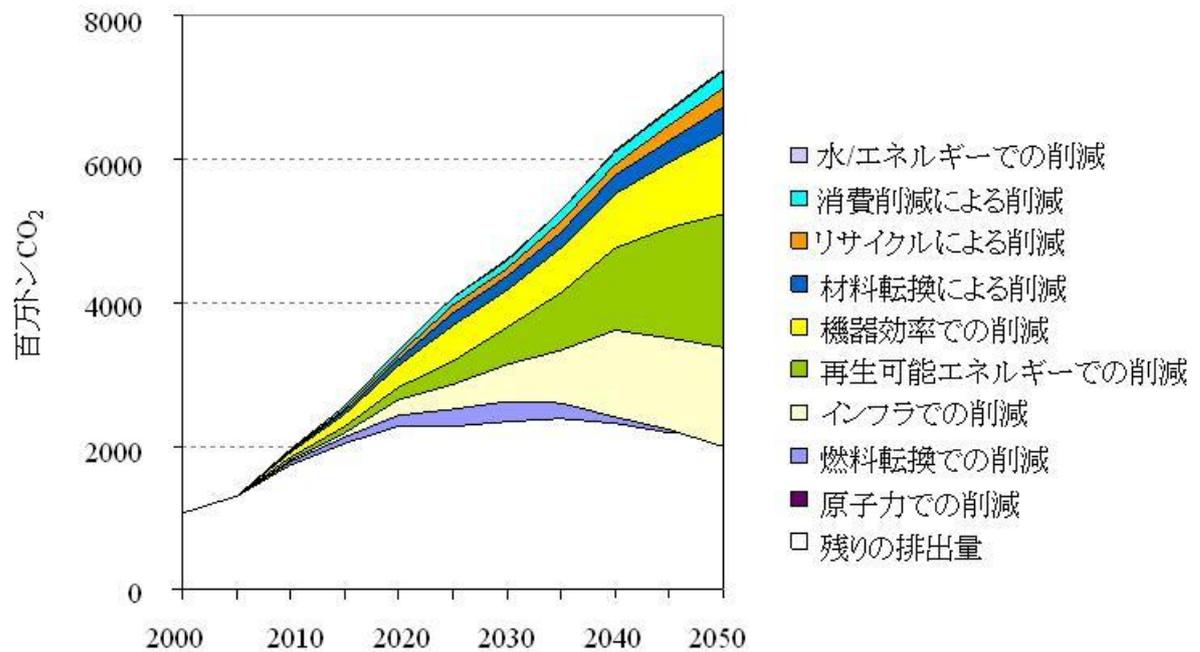
用は累積で 79 億ドルとなった。炭素税をトン CO<sub>2</sub>あたり 10 ドルにすると、効率改善や燃料転換により、同期間で追加的に 5 億トン程度の CO<sub>2</sub>が削減されるとともに、SO<sub>2</sub>の削減効果も増大する結果となった。このときの削減費用は 106 億ドルとなり、SO<sub>2</sub>削減対策と CO<sub>2</sub>削減対策をそれぞれ単独に行った場合（110 億ドル）よりも安価になった。以上の分析より、比較的安価な炭素税の導入により、CO<sub>2</sub>排出量の削減が進むとともに、SO<sub>2</sub>排出量の削減といった副次的効果も表 12 のように得られ、温暖化対策のみならず大気汚染対策も推進できることがわかった。

表 12 複数の推計ケースにおける削減費用と得られる便益

削減手法	削減費用	便益
(1) SO <sub>2</sub> の削減のみ単独で実施する方式(技術中心の政策)	55 億ドル	-
(2) SO <sub>2</sub> の削減のみ単独で実施する方式 (SO <sub>2</sub> のキャップ&トレード方式を追加)	31 億ドル	(1)に比べて 14 億ドルの節約が可能
(3) トン CO <sub>2</sub> あたり 5 ドルの炭素価格を設定する方式	79 億ドル	170 億ドルの炭素歳入を得られる
(4) 上記(2)と(3)を組み合わせた方式	106 億ドル	196 億ドルの炭素歳入を得られる

次に、AIM/CGE モデル等を用いた将来シナリオの分析結果を図 9、図 10 に示す。炭素税シナリオでは削減の主要な部分はインフラや発電部門における先進技術（CCS など）、原子力発電の活用など供給サイドでの対策によって達成されていた。また、エネルギー消費量自体は参照ケースに比べて増加しており、エネルギー利用と CO<sub>2</sub>排出のデカップリングが重要であることが示された。一方で、持続型社会シナリオでは、供給サイドと需要サイドの双方において、幅広く技術が活用されることで、炭素税シナリオと同様の排出削減を達成することができることがわかった。供給サイドでは、インフラと再生可能エネルギーの導入などクリーン電力が重要な役割を果たす一方、需要サイドでは脱物質化や持続可能な消費、機器の効率的な利用が重要な役割を果たすことが明らかとなった。

さらに、インドにおける低炭素社会を実現させるため、必要となる排出削減手法を 10 個のパッケージとして取りまとめた（図 11）。これらの施策パッケージは、セクターごとに個別の取り組みに変換する必要がある。その際には、技術移転や財政支援、効果的なガバナンスなど途上国として特有の条件を考慮すべきと考えられる。

図9 炭素税シナリオでのCO<sub>2</sub>排出量の変化【インド】図10 持続社会型シナリオでのCO<sub>2</sub>排出量の変化【インド】

<p><b>1. 持続可能な交通</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 大量輸送システム</li> <li>・ 電気自動車の普及</li> <li>・ 情報通信技術を活用した道路交通マネジメント</li> <li>・ パイプラインインフラの活用</li> <li>・ 水路輸送の推進</li> </ul>	<p><b>2. 低炭素電力</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 炭素の貯蔵固定技術</li> <li>・ より高度な再生可能エネルギー技術の利用</li> <li>・ 原子力技術の利用</li> </ul>	<p><b>3. 燃料転換</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 石炭からガスへの転換</li> </ul>
<p><b>4. 建築物デザイン</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ エネルギーラベリングプログラム</li> <li>・ 持続可能、エネルギー強度の低い素材の利用</li> <li>・ エネルギー消費基準</li> <li>・ エネルギー監査</li> </ul>	<p><b>5. 物質代替、リサイクル</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 省資源</li> <li>・ 脱物質化</li> <li>・ リサイクル</li> </ul>	<p><b>6. 消費削減、機器効率の向上</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ より高度な産業技術</li> <li>・ エネルギー強度の低い物質とプロセスの利用</li> <li>・ 機器効率に関する基準</li> </ul>
<p><b>7. 都市計画</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 自然環境の向上</li> <li>・ 緑被率の向上</li> <li>・ 都市デザインの規範の向上</li> </ul>	<p><b>8. 資源マネジメント</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 廃棄物のエネルギー転換</li> <li>・ 水資源マネジメント</li> </ul>	<p><b>9. ガバナンス</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ コーディネート</li> <li>・ 計画</li> <li>・ 実行</li> </ul>
<p><b>10. 財政支援</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ ヴァイアビリティ・ギャップ・ファンディング</li> </ul>		

図 11 排出削減のための施策パッケージ【インド】

- 施策 1「持続可能な交通」
  - この施策では、自家用車での移動から公共交通機関へのシフトと、電気自動車の普及がメインとなる。このほかにも、持続可能な交通に貢献する施策は数多く存在しており、道路交通マネジメントや、貨物輸送における水路の利用なども考えられる。
- 施策 2「低炭素電力」
  - この施策では、再生可能エネルギーの利用拡大や、炭素の貯蔵固定（CCS）技術の併用などを通じて、発電部門の炭素強度を低下させることが中心となる。CCS 技術はいわゆるエンドオブパイプ技術であり、しっかりとした技術移転や財政支援が必要となる。
- 施策 3「燃料転換」
  - この施策では、石炭からガスへの燃料転換がメインとなる。燃料転換はどのセクターにおいても可能である。産業、家庭、発電など様々な分野での燃料転換を実現するためには、技術やインフラ整備に関する大規模な財政支援が必要である。
- 施策 4「建築物デザイン」
  - この施策では、建築物におけるエネルギーフローをコントロールすることが重要な取り組みとなる。建築物における各種技術の活用や、エネルギー監査やエネルギー基準の設定など、

適切な政策手段を用いることが必要である。

- 施策5「物質代替とリサイクル」
  - この施策では、省資源や脱物質化、リサイクルを推進することがメインとなる。持続可能なライフスタイルなどを推進することができるなど、この施策を通じて重要な副次的効果を提供することができる。
- 施策6「消費削減と機器効率の向上」
  - この施策では、機器性能の向上と、エネルギー集約産業プロセスにおけるエネルギー消費の削減に注目する。効率向上の成果は、建築物におけるエネルギー基準の導入や、低炭素強度素材を使った建築物やデザインなどにより発現する。
- 施策7「都市計画」
  - この施策では、緑被率の向上や自然環境の向上をターゲットとし、都市のヒートアイランド効果の低減させることがメインとなる。この施策では同時に、クオリティオブライフの向上や、都市空間の計画的利用によるエネルギーサービスマネジメントなどの副次的効果をもたらすことになる。
- 施策8「資源マネジメント」
  - この施策では、持続可能な温室効果ガス削減に向けた天然資源マネジメントを目指す。たとえば各セクターでの廃棄物のエネルギー利用や、農業部門での地下水利用の低減などは、エネルギー利用の現状を変化させるものと考えられる。
- 施策9「ガバナンス」
  - 低炭素社会へのスムーズな移行のためには、政府が効果的なガバナンスを発揮したり、立法措置を施すことが必要となる。
- 施策10「財政支援」
  - 低炭素社会に移行するためには、財政支援が非常に重要となる。低炭素インフラへの投資や低炭素技術の選択は、経済的な損失を生むことになると考えられるため、国際的な投資や技術移転などによって補われる必要がある。

### 3) タイにおける削減シナリオ

バンコクの運輸部門を対象とした分析では、2050年までの累積でCO<sub>2</sub>排出量は、参照ケースに比べて、ERT10ケースで9400万トンCO<sub>2</sub>、ERT20ケースでは1億8800万トンCO<sub>2</sub>それぞれ削減される結果となった。排出制約を設けたケースではほとんどの自動車は低公害燃料や高効率自動車に置き換わる結果となった。ディーゼルバスはハイブリッドディーゼルバスに、ディーゼル小型バスやバンはハイブリッドディーゼル車やCNG車に、LPGタクシーはハイブリッドガソリン車に、ガソリンオートバイはバイオ混合ガソリン車に置き換わる結果となった。より強い排出制約を設けたERT20ケースではERT10ケースに比べ、より多くのハイブリッドバスやバンの普及が必要となるなど、技術の置き換えが進むことが明らかとなった。また、削減を達成するための炭素価格はERT10ケースではトンCO<sub>2</sub>あたり18ドル、ERT20ケースではトンCO<sub>2</sub>あたり26ドルであった。

タイ全土を対象とした分析では、参照ケースにおいてCO<sub>2</sub>排出量は2050年に17億6600万トンCO<sub>2</sub>（2005年比で7倍程度）まで増加すると見込まれたが、排出制約を設けるケースでは参照ケースに比べ最大で30%程度の排出削減が達成される結果となった（図12）。累積排出量では、最も厳しい排出制

約を与えるケースで、参照ケースに比べて 20%程度の削減が可能であると考えられた。また、上記の対策の副次的効果として、SO<sub>2</sub>および NO<sub>x</sub>の排出量が 2050 年にベースケースに比べてそれぞれ約 40%、約 7%の削減が可能であるとの結果が得られた（図 13）。

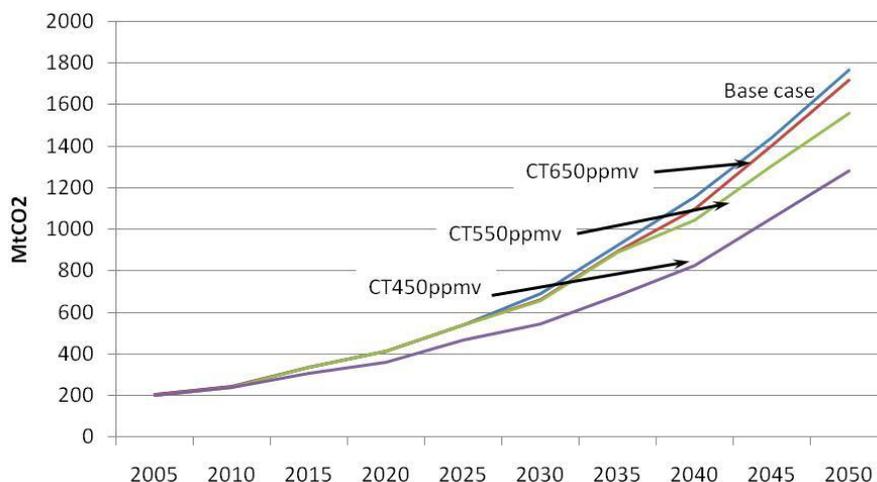


図 12 対策ケースにおける排出パス【タイ】

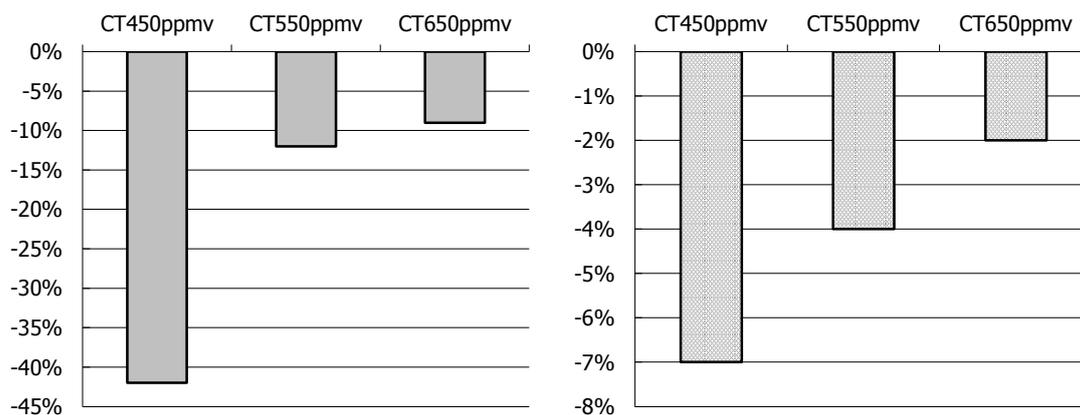


図 13 副次的効果【タイ】（SO<sub>2</sub>排出量（左）、NO<sub>x</sub>排出量（右））

最後に、今年度実施した低炭素社会の実現可能性に関する分析では、各種データの精査の結果、基準年（2005 年）における温室効果ガス排出量は約 1 億 8500 万トン CO<sub>2</sub>で、2030 年における温室効果ガス排出量は、図 14 に示すように参照ケースで 5 億 6300 万トン CO<sub>2</sub>（基準年の 3 倍）、対策ケースで 3 億 2400 万トン CO<sub>2</sub>（参照ケースからおよそ 4 割の削減が可能）になるとの結果が得られた。温室効果ガス排出量を低いレベルに抑えるためには、複数の包括的な方策が必要であることが示された。具体的には、家庭部門における低炭素技術の普及や、高効率建築物、産業の効率化、燃料転換、運輸部門や発電部門での燃料転換などである。これらの政策・施策が早い段階から計画されれば、タイは主要な成長拠点になるだけでなく、低炭素社会のモデルを提供することができると考えられる。加えて、より高い削減目標は、需要側と供給側双方におけるイニシアティブを組み合わせることで達成可能となる。供給側にあっては再生可能エネルギーの利用技術や再生可能エネルギーによる発電などが重要

な役割を果たすと考えられる。また、需要サイドでは、高効率機器や燃料転換が重要な役割を果たすと考えられる。

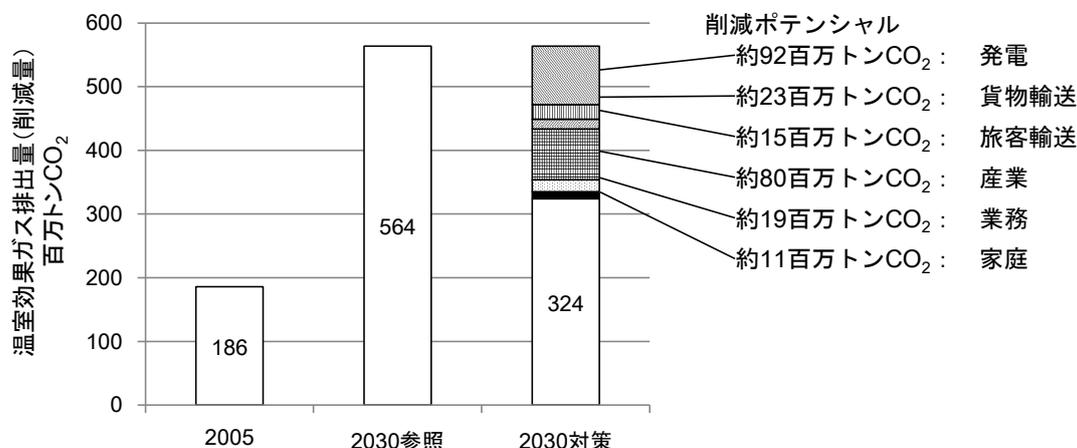


図 14 シナリオごとの GHG 排出量の変化【タイ】

上記の削減ポテンシャルを実現するために必要となる、各種の手法を 9 個のパッケージとして取りまとめた。2030 年の対策シナリオにおいては、温室効果ガス削減のための 9 個の施策パッケージを用意した。施策は家庭、業務、産業、交通および発電の各部門に対するものである。

- 施策 1 「家庭におけるエネルギー効率の向上」
  - 2030 年の対策シナリオでは、冷暖房や照明、冷蔵庫、調理機器などのエネルギー機器について、高効率機器が完全に普及することを想定している。デマンドサイドマネジメントやエネルギー効率向上計画を導入によって容易に目標達成が可能と考えられる。
- 施策 2 「建築物におけるエネルギー効率の向上」
  - 2030 年の対策シナリオでは、家庭と同様に、冷暖房、照明、冷蔵庫などのエネルギー機器について、高効率機器が完全に普及することを想定している。省エネ推進法（ECP 法）やデマンドサイドマネジメント、エネルギー効率向上計画によって容易に目標達成が可能と考えられる。
- 施策 3 「建築物のエネルギー基準の導入」
  - 2010 年に導入された建築物外皮のエネルギー基準を、全ての新築の建築物が遵守することで、2030 年までに普及率を 100%にすることを目指す。
- 施策 4 「産業部門におけるエネルギー効率の向上」
  - 2030 年の対策シナリオでは、農業、建設業、繊維、食料品、化学など、各種産業プロセスで使用される、モーターやボイラー、加熱機器などについて、高効率機器が完全に普及することを想定している。省エネ推進法（ECP 法）やデマンドサイドマネジメント、エネルギー効率向上計画によって容易に目標達成が可能と考えられる。
- 施策 5 「産業部門における燃料転換」
  - 繊維、食料品、化学など各種産業プロセスで使用される燃料を低炭素燃料に転換する。農業、

鉱業、建設業などでは、燃料の転換はそれほど進まないと考えられる。

- 施策6「交通部門における燃料経済性の向上、交通需要マネジメント」
  - 車体については、旅客・貨物の双方において、乗用車や輸送車、バス、二輪車のいずれについても、エネルギー効率を2030年までに20%向上させる。税制優遇や補助金などにより、エコカーの増加を促す。自動車に関する環境基準の導入も必要である。また、旅客交通における交通需要マネジメントを包括的に向上させることが必要である。エコドライブやバスの優先利用、非自動車交通を増やすことによって、乗用車等の輸送量を減少させる必要がある。交通需要マネジメントなどの施策は優遇措置や宣伝以外のコストを必要としないため、コスト効果が高い。
- 施策7「交通部門における燃料転換」
  - 旅客・貨物ともに、乗用車およびバスの燃料をガソリンから天然ガス（CNG）に転換させる。あわせてCNGエンジンの効率を2030年までに20%向上させることを目指す。また、従来型のガソリン自動車が、ハイブリッド自動車、プラグインハイブリッド自動車に置き換わることを目指す。
- 施策8「交通部門におけるモーダルシフト」
  - 旅客輸送においては、各種交通手段の機関分担率を、徒歩交通を25%、バス交通を20%、鉄道交通を13%にするなど、モーダルシフトを進める。貨物輸送においては、大型車から鉄道へのモーダルシフトを進める。
- 施策9「発電部門における効率向上、燃料転換」
  - 電力供給における送電ロス等を5%程度まで減少させることを目指す。また、タイの電力開発計画を考慮して、再生可能エネルギーや原子力エネルギーのシェアを向上させる。特に原子力については、現状および参照ケースでは使用を想定していないが、2030年対策ケースでは10%を超すシェアを見込む。また、石炭ガス化複合発電技術やコンバインドサイクル・ガス発電技術などの代替技術を導入し、発電効率を向上させる。

## (2) 日本を対象としたエネルギー技術選択モデルの改良とその適用

## 1) 温室効果ガス排出量

前述までの想定に基づき、日本技術モデル (AIM/Enduse[Japan]) を用いてマクロフレーム固定ケース、マクロフレーム変動ケース、それぞれにおける排出構成を推計した (表 13～表 16)。

表 13 温室効果ガス排出量 (マクロフレーム固定ケース, 間接排出量)

(百万トンCO <sub>2</sub> eq)	1990	2000	2005	2008	2020					2030				
					技術固定	参照	▲15%	▲20%	▲25%	技術固定	参照	対策下位	対策中位	対策上位
産業部門	482	467	459	419	444	437	397	392	380	437	431	361	352	335
家庭部門	127	158	174	171	185	165	119	107	90	176	156	78	59	44
業務部門	164	206	236	235	262	218	166	146	124	248	200	111	81	58
運輸部門	217	265	254	235	228	194	179	171	163	223	163	138	127	114
エネルギー転換部門	68	71	79	78	78	68	53	50	42	74	63	38	33	24
エネルギー起源計 (90年比削減率)	1,059	1,167 (10%)	1,203 (14%)	1,138 (7%)	1,197 (13%)	1,082 (2%)	915 (▲14%)	866 (▲18%)	799 (▲25%)	1,159 (9%)	1,014 (▲4%)	725 (▲31%)	651 (▲38%)	575 (▲46%)
非エネルギー起源	202	177	152	144	177	176	162	152	149	199	184	158	151	148
合計 (90年比削減率)	1,261	1,344 (7%)	1,355 (7%)	1,282 (2%)	1,374 (9%)	1,257 (0%)	1,076 (▲15%)	1,018 (▲19%)	949 (▲25%)	1,359 (8%)	1,198 (▲5%)	884 (▲30%)	803 (▲36%)	723 (▲43%)

表 14 温室効果ガス排出量 (マクロフレーム固定ケース, 直接排出量)

(百万トンCO <sub>2</sub> eq)	1990	2000	2005	2008	2020					2030				
					技術固定	参照	▲15%	▲20%	▲25%	技術固定	参照	対策下位	対策中位	対策上位
産業部門	379	374	360	323	354	354	332	332	329	357	357	320	320	315
家庭部門	57	69	68	59	66	63	53	48	43	61	56	41	34	29
業務部門	84	101	110.7	98	111	97	87	76	64	107	87	70	52	40
運輸部門	211	259	247	228	221	186	173	165	157	217	155	133	124	111
エネルギー転換部門	328	364	418	430	445	381	269	244	206	417	358	161	122	79
エネルギー起源計 (90年比削減率)	1,059	1,167 (10%)	1,203 (14%)	1,138 (7%)	1,197 (13%)	1,082 (2%)	915 (▲14%)	866 (▲18%)	800 (▲25%)	1,159 (9%)	1,014 (▲4%)	725 (▲32%)	652 (▲38%)	575 (▲46%)
非エネルギー起源	202	177	152	144	177	176	162	152	149	199	184	158	151	148
合計 (90年比削減率)	1,261	1,344 (7%)	1,355 (7%)	1,282 (2%)	1,374 (9%)	1,257 (0%)	1,076 (▲15%)	1,018 (▲19%)	949 (▲25%)	1,359 (8%)	1,198 (▲5%)	884 (▲30%)	803 (▲36%)	723 (▲43%)

表 15 温室効果ガス排出量 (マクロフレーム変動ケース, 間接排出量)

(百万トンCO <sub>2</sub> eq)	1990	2000	2005	2008	2020					2030				
					技術固定	参照	▲15%	▲20%	▲25%	技術固定	参照	対策下位	対策中位	対策上位
産業部門	482	467	459	419	444	437	393	387	369	437	431	351	343	323
家庭部門	127	158	174	171	185	165	123	115	99	176	156	80	72	51
業務部門	164	206	236	235	262	218	167	157	135	248	200	112	100	69
運輸部門	217	265	254	235	228	194	177	168	159	223	163	135	124	110
エネルギー転換部門	68	71	79	78	78	68	54	51	42	74	63	37	34	25
エネルギー起源計 (90年比削減率)	1,059	1,167 (10%)	1,203 (14%)	1,138 (7%)	1,197 (13%)	1,082 (2%)	914 (▲14%)	877 (▲17%)	804 (▲24%)	1,159 (9%)	1,014 (▲4%)	715 (▲32%)	673 (▲36%)	579 (▲45%)
非エネルギー起源	202	177	152	144	189	188	159	148	145	199	198	151	143	138
合計 (90年比削減率)	1,261	1,344 (7%)	1,355 (7%)	1,282 (2%)	1,386 (10%)	1,270 (1%)	1,072 (▲15%)	1,025 (▲19%)	949 (▲25%)	1,358 (8%)	1,212 (▲4%)	866 (▲31%)	816 (▲35%)	718 (▲43%)

表 16 温室効果ガス排出量（マクロフレーム変動ケース，直接排出量）

(百万トンCO <sub>2</sub> eq)	1990	2000	2005	2008	2020					2030				
					技術固定	参照	▲15%	▲20%	▲25%	技術固定	参照	対策下位	対策中位	対策上位
産業部門	379	374	360	323	354	354	328	327	319	357	357	311	309	303
家庭部門	57	69	68	59	66	63	54	53	48	61	56	42	41	34
業務部門	84	101	111	98	111	97	89	86	75	107	87	72	67	50
運輸部門	211	259	247	228	221	186	171	162	154	217	155	130	120	107
エネルギー転換部門	328	364	418	430	445	381	272	250	209	417	358	161	137	86
エネルギー起源計 (90年比削減率)	1,059	1,167 (10%)	1,203 (14%)	1,138 (7%)	1,197 (13%)	1,082 (2%)	914 (▲14%)	877 (▲17%)	804 (▲24%)	1,159 (9%)	1,014 (▲4%)	715 (▲32%)	674 (▲36%)	579 (▲45%)
非エネルギー起源	202	177	152	144	189	188	159	148	145	199	198	151	143	138
合計 (90年比削減率)	1,261	1,344 (7%)	1,355 (7%)	1,282 (2%)	1,386 (10%)	1,270 (1%)	1,072 (▲15%)	1,025 (▲19%)	949 (▲25%)	1,358 (8%)	1,212 (▲4%)	866 (▲31%)	816 (▲35%)	718 (▲43%)

図 15 および図 16 はマクロフレーム固定ケースとマクロフレーム変動ケース、それぞれの対策導入率を同値とした場合の 2020 年・2030 年排出量の比較である。対策導入率が同値であるため、両ケースの違いはマクロフレームの変化によるものとなる。マクロフレームの変化は排出量に対して 2020 年で 1%~2%、2030 年で 3%程度の影響を与えている。

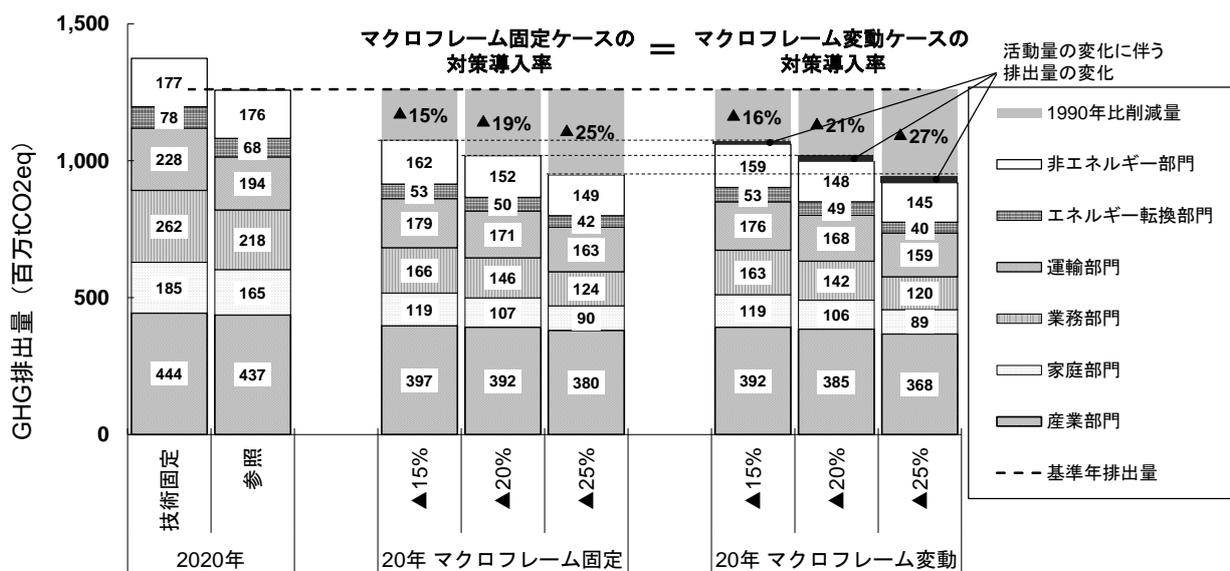


図 15 マクロフレーム固定/変動ケースの 2020 年排出量比較  
(両ケースの対策導入率を同値とした場合)

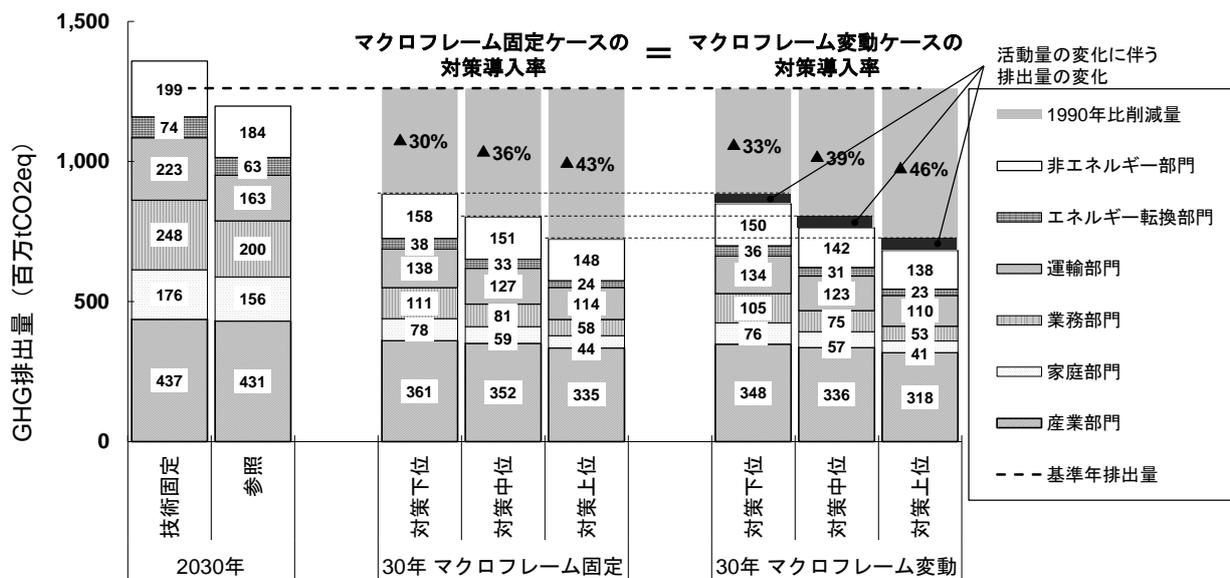


図 16 マクロフレーム固定／変動ケースの 2030 年排出量比較  
(両ケースの対策導入率を同値とした場合)

図 17 および図 18 はマクロフレーム変動ケースの 2020 年排出量が、マクロフレーム固定ケースのそれと同値となるように、対策導入率を調整したものである。マクロフレーム変更ケースはマクロフレーム固定ケースよりも活動量が小さくなるため、その影響で排出量が小さくなり、その分対策強度を弱めることができる。2020 年▲25%ケースの排出量において、家庭部門では 900 万トン CO<sub>2</sub>、業務部門では 1100 万トン CO<sub>2</sub>、対策強度を弱めることで排出量が増加している。

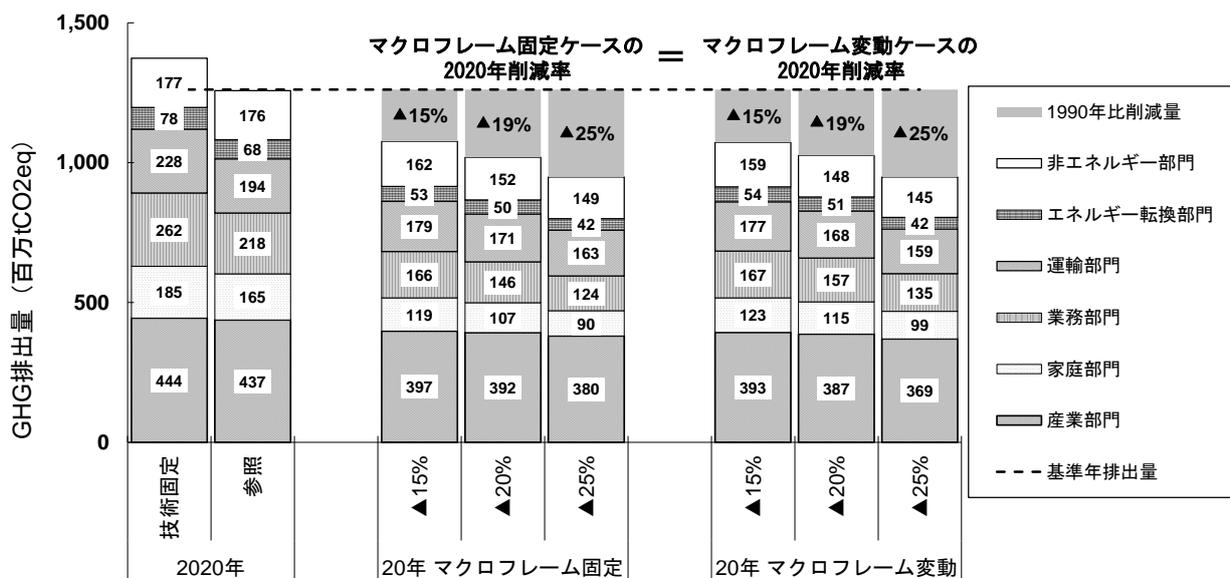


図 17 マクロフレーム固定／変動ケースの 2020 年排出量比較  
(2020 年総排出量が同値となるように対策強度を調整)

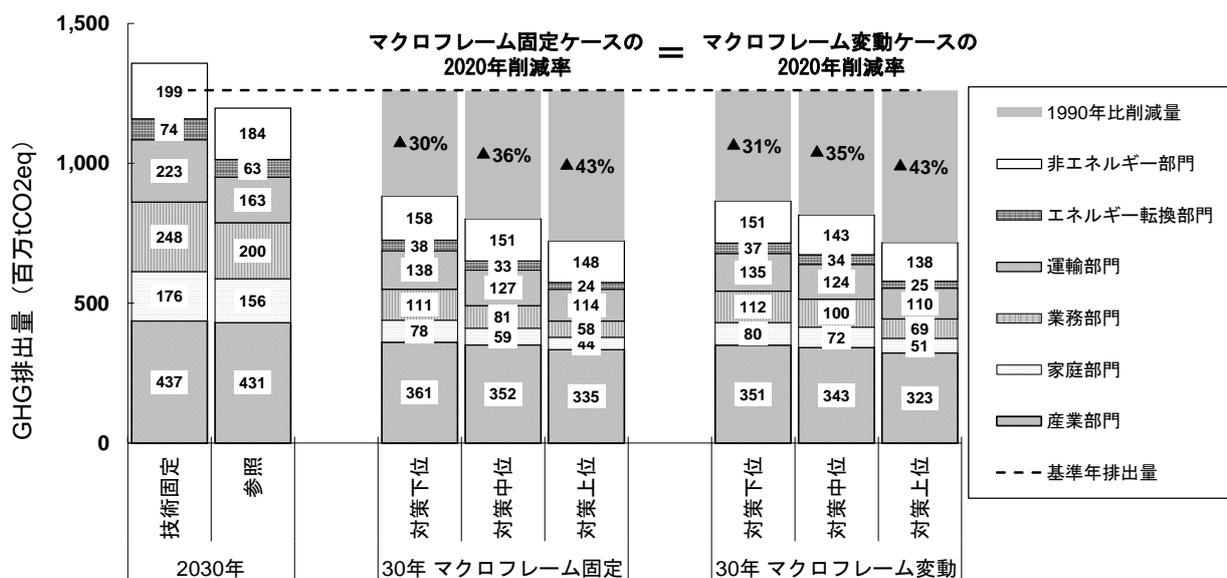


図 18 マクロフレーム固定／変動ケースの 2020 年排出量比較  
(2020 年総排出量が同値となるように対策強度を調整)

さらに、設定したマクロフレームのうち、表 17 に示すように粗鋼生産量、原子力発電の発電電力量、輸送需要量について±10%の変化の幅を与え、その変化によって CO<sub>2</sub> 排出量がどの程度変化するか試算した。その結果、±10%の変化の幅に対して粗鋼生産量は 1990 年温室効果ガス排出量比±1.6%、原子力発電の発電電力量は±1.9%、輸送需要量は±1.6%の排出量が変化した。主要なマクロフレームの 10%の変化は排出量に 2%弱の変化を与えることがわかった。

表 17 マクロフレームの変化と CO<sub>2</sub> 排出量の変化の関係

	想定	想定+10%	想定-10%
粗鋼生産量	1 億 2,000 万トン	+2,000 万 tCO <sub>2</sub> +1.6% (90 年 GHG 比)	-2,000 万 t-CO <sub>2</sub> -1.6% (90 年 GHG 比)
原子力発電 の発電電力量	4,345 億 kWh	-2,400 万 t-CO <sub>2</sub> -1.8% (90 年 GHG 比)	+2,400 万 t-CO <sub>2</sub> +1.8% (90 年 GHG 比)
輸送需要量	自動車 (旅客) : 5,190 億 km (貨物) : 2,370 億 km 自動車以外 (旅客) : 5,160 億人 km (貨物) : 2,320 億人 km	+2,000 万 t-CO <sub>2</sub> +1.6% (90 年 GHG 比)	-2,000 万 t-CO <sub>2</sub> -1.6% (90 年 GHG 比)

2) 削減費用と削減量の関係

a. 削減費用の算定方法

対策毎の削減費用と削減量の関係について検討する。以下に示す式を対策毎に適用して削減費用を求めた。

$$AC_i = (C_i - C_i^0) / (Q_i^0 - Q_i)$$

$AC$	: 削減費用 (円/tCO <sub>2</sub> eq)		
$C$	: 対策技術の年価	$C^o$	: 競合技術の年価
$Q$	: 対策技術の GHG 排出量	$Q^o$	: 競合技術の GHG 排出量
$i$	: 対策技術		

技術の年価については購入から償却までの費用を時間的な割引を考慮しつつ年価に換算した ALCC (Annualized Life-Cycle Cost) 法を用いた場合、オプション間の初期投資費用増を維持管理費用減で回収する期間長によって評価する回収期間法の 2 つの方法を採用した。ALCC 法については利子率を 5%、投資回収期間法については投資回収年数を 3 年 (資本利子率の調整は行わず) と設定して費用の算定を行った。前者の手法は、機器の寿命に準ずる比較的長期の期間を対象として、対策の実施が経済的に見合うものであるかを評価するために用いた。後者の手法は、企業や家庭の主体は数年という極めて短期的な投資判断を行っていることを鑑み、短期の回収年数を前提とした対策選択の可能性を評価するために用いた。なお、本試算での費用分析には温暖化影響に伴う被害費用やそのための適応策に必要とされる費用は含めていない。

- ・ ALCC 法の場合の年価

$$C_i = P_i \cdot \frac{\theta(1+\theta)^{L_i}}{(1+\theta)^{L_i} - 1} + E_i + OM_i$$

- ・ 投資回収年数法の場合の年価

$$C_i = \frac{P}{\min(T, L_i)} + E_i + OM_i$$

$P$	: 技術の初期費用	$E$	: 技術の年間エネルギー費用
$OM$	: 技術の維持管理費用	$L$	: 技術の寿命
$T$	: 投資回収年数	$\theta$	: 利子率

#### b. 削減費用と削減量の関係

図19および図20は、2020年▲15%ケース及び▲25%ケースにおいてどのような対策がどの程度削減に貢献しているかを削減費用毎に示している。次世代自動車、ヒートポンプ給湯器、太陽光発電などの先端的技術は、多くの削減ポテンシャルを有するものの、現状の削減費用は高額となっている。

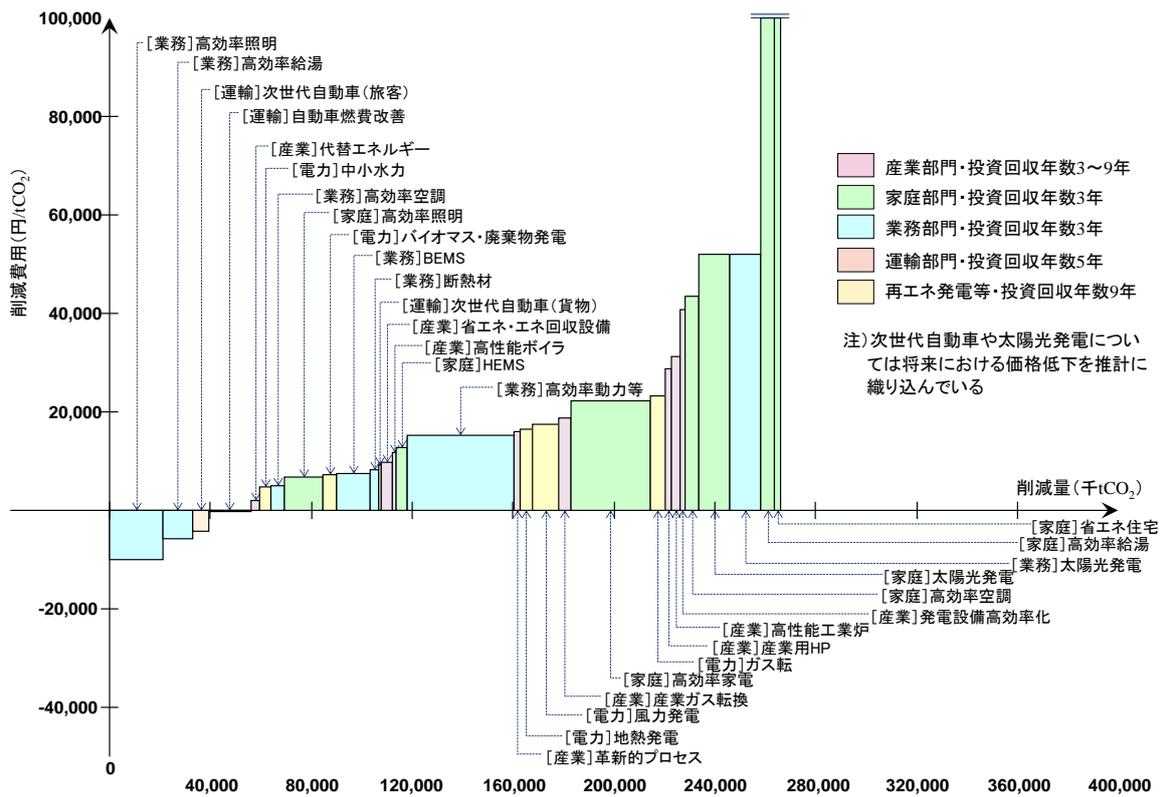


図 19 削減費用と削減量の関係【2020年▲15%ケース：短い投資回収年数を想定した場合】

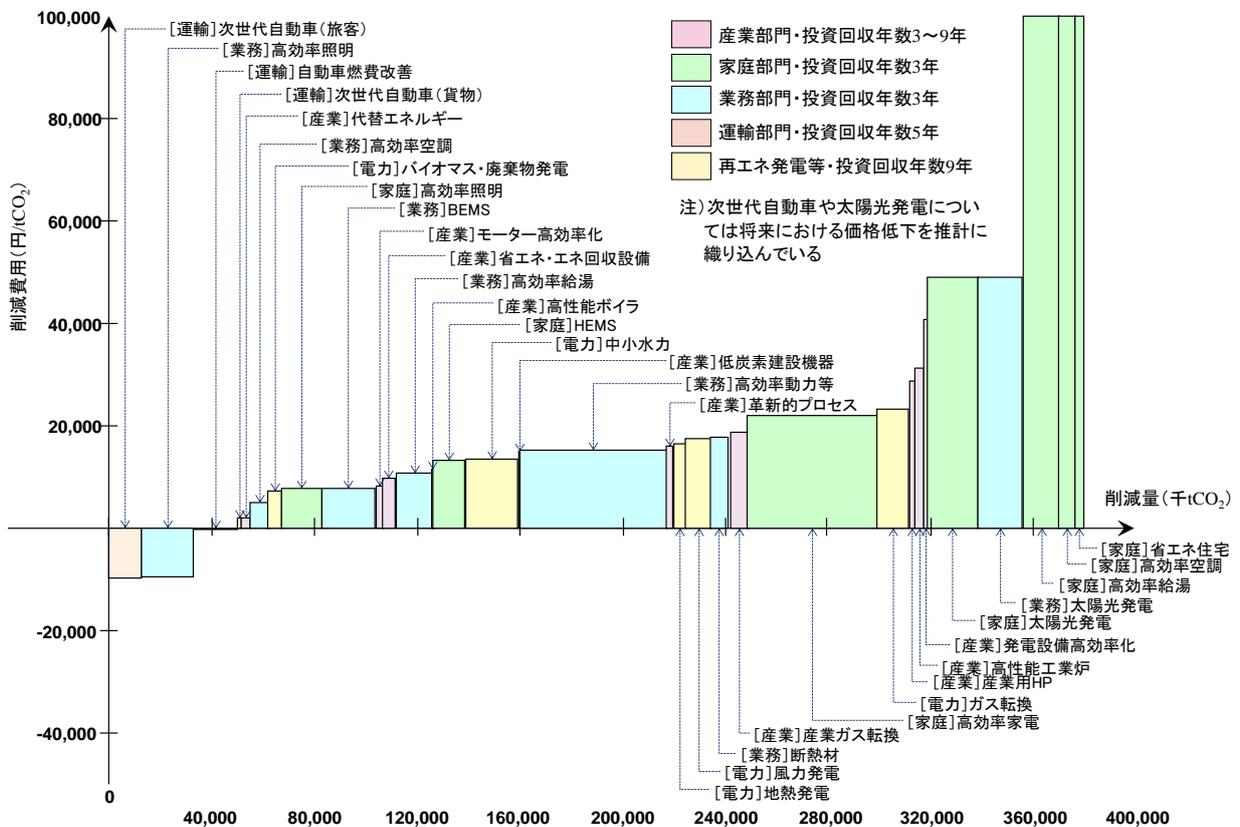


図 20 削減費用と削減量の関係【2020年▲25%ケース：短い投資回収年数を想定した場合】

図 21 は異なる投資回収年数を前提とした 2020 年における削減費用と削減量との関係を示したものである。短い投資回収年数を想定したケース（＝各主体が様々なリスクを勘案して短期の回収年を念頭に投資を行う場合・主観的割引率を用いた場合）では、投資回収年数を概ね 3～5 年とした。一方、長い投資回収年数を想定したケース（＝政策の後押しなどによって長期の回収年を前提に投資が行われる場合・社会的割引率を用いた場合）では、機器の寿命に応じた投資回収年数の設定を行った。民生機器や輸送機器など寿命が 10 年程度のものについては投資回収年数を 8 年とし、産業プラントなど寿命が 30 年程度のものについては投資回収年数を 12～15 年とした。

両ケースの結果を比べると、例えばトン CO<sub>2</sub>あたり 0 円の削減費用では、投資回収年数の違いによって削減量に約 2 億トン CO<sub>2</sub>と非常な大きな差がある。各主体に任せては対策技術の導入は進まず、主観的な選択が外部費用や社会費用も加味して変容するような施策の後押しがあれば、そこに大きな削減ポテンシャルことがわかる。

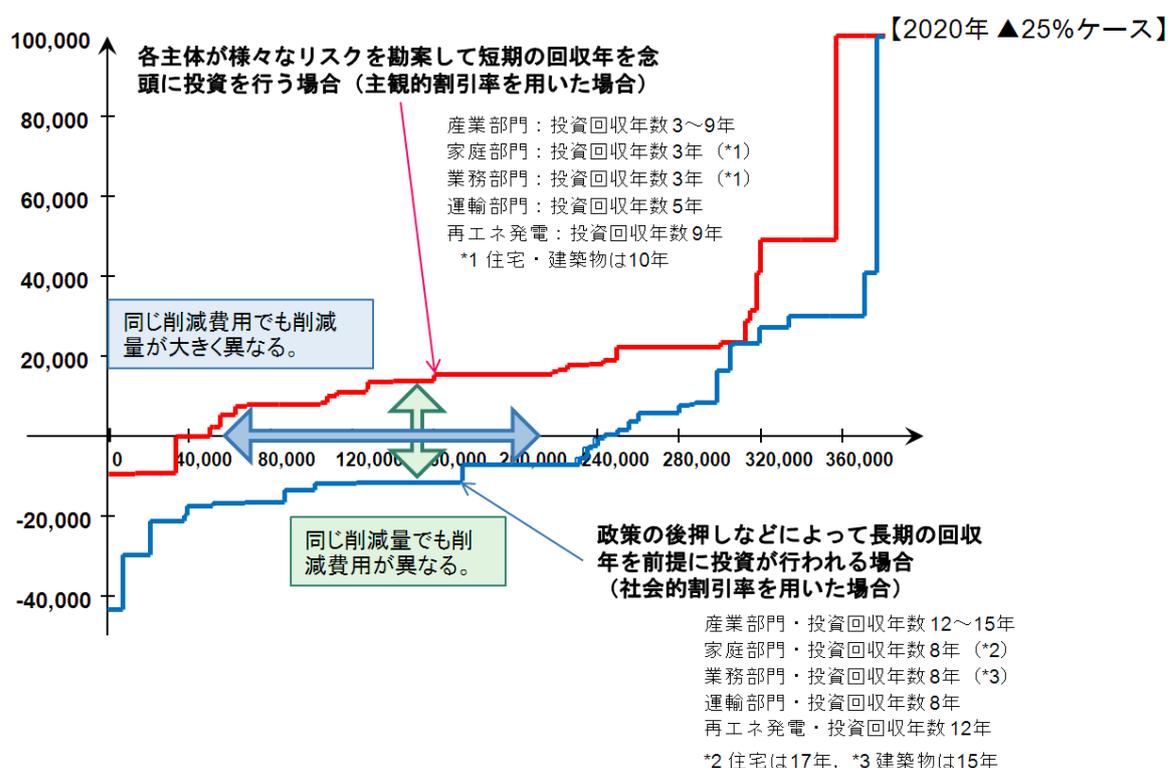


図 21 投資回収年数の違いと削減費用と削減量の関係

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

日本については応用一般均衡モデルである AIM/CGE モデルと技術積み上げモデルである AIM/Enduse モデルを連携させ、炭素価格のマクロフレームへの影響と技術選択の同時的な変化を分析できるようにした。このような分析はそれぞれのモデルの短所を補完しており、科学的に非常に意義のある分析と言える。

## (2) 地球環境政策への貢献

平成 20 年度には、わが国を対象とした AIM/Enduse モデルの分析を行い、地球温暖化問題に関する閣僚委員会タスクフォースに提示され、取りまとめ作成に貢献した。分析結果に関する詳細な資料を国立環境研究所の Web サイトに掲載しており、成果の広報・普及に努めている。平成 21 年度には、環境省地球温暖化対策に係る中長期ロードマップ検討会において、当試算結果をたたき台として、2020 年 25%削減に向けた施策ロードマップの検討が行われた。平成 22 年度には、分析結果を中央環境審議会 地球環境部会 中長期ロードマップ小委員会に提供し、低炭素社会実現に向けたロードマップづくりに貢献している。

さらに、アジアの中でも重要な地域である中国、インド、タイについて、それらの CO<sub>2</sub> 排出量・削減可能量を推計したほか、想定しうる削減対策についてその効果や影響を分析したことは、世界的な環境政策の検討を大きく前進させたと考えられる。

## 6. 引用文献

なし。

## 7. 国際共同研究等の状況

本研究では、アジアの発展途上国のモデル構築、シミュレーション分析を実施するにあたって、以下の各国の研究機関と共同で作業を行っている。

- (1) 中国：中国能源研究所
- (2) インド：インド経営大学院アーメダバード校
- (3) タイ：タマサート大学シリントーン国際工学部
- (4) 米国：スタンフォード大学エネルギーモデリングフォーラム

## 8. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

<誌上発表（査読あり）>

- 1) Shukla, P. R., Dhar, S. and Mahapatra, D., Low carbon society scenarios for India, *Climate Policy*, 8, 156-176, 2008.
- 2) Deepa, M.C. and Shukla, P.R., An integrated strategy for urban air quality management in India, *International Journal of Environment and Pollution*, 39, 3/4, 233-52, 2009.

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) Jiang K., Hu X., Zhuang X., Liu Q., and Zhu S., Low carbon development scenario and technological routine map in China(The fifth chapter). In: Research team of sustainable development and strategies of Chinese Academy of Science (ed) *China Sustainable Development Strategy Report 2009-China Approach Towards a Low Carbon Future*. Chinese Science Press, 132-171, 2009.

### (2) 口頭発表（学会）

特に記載すべき事項はない。

### (3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

特に記載すべき事項はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

内閣官房 中期目標検討会（平成 20 年度）での公開資料、地球温暖化問題に関する閣僚委員会タスクフォース（平成 21 年度）での公開資料、中央環境審議会 地球環境部会 中長期ロードマップ小委員会（平成 22 年度）での公開資料のほか、これに関連した報道が多数ある。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。