

B-54 アジア太平洋地域統合モデル（AIM）を基礎とした気候・経済発展統合政策の
評価手法に関する途上国等共同研究

（1）持続的発展に向けた地域詳細研究とモデルの普及

②-2 インドにおける温暖化対策と経済発展施策との統合評価に関する国際交流研究

独立行政法人国立環境研究所 EFFフェロー

Rajesh Nair

社会環境システム研究領域 統合評価モデル研究室

甲斐沼美紀子・藤野純一

平成12～16年度合計予算額

2,400千円

（うち、平成16年度予算額

1,200千円）

〔要旨〕インドにおいて予想される経済成長、人口増大、エネルギー消費の拡大に対して、どのようなエネルギー政策をとるべきかを解析することは、インドのみならず世界における温室効果ガス排出を制御する上で重要な課題である。そこで、今後のインドの経済活動の変化が温室効果ガス排出に及ぼす因果関係を表現するために、エンドユースモデルと応用一般均衡モデルであるAIM/CGE(Asia)モデルを適用した。インドはエネルギー消費に伴う二酸化炭素の排出のみならず、稲作や畜産などの農業生産や廃棄物処理により排出されるメタンや亜酸化窒素の排出量が多い。このため、非二酸化炭素ガスの主な排出源である農業部門や廃棄物部門をモデル要素に追加し、非二酸化炭素ガスに関する各排出源のデータ調査を行った。また、インドを対象に、市場の動向（自由化、国際化など）および自治のあり方（中央集権か地方分権か）の2つを軸にした4つの将来シナリオに基づいたメタンおよび亜酸化窒素の将来シナリオを構築した。メタンの主要な排出源は畜産業と米作で、2000年の排出シェアは全体の約65%を占める。一方、都市ゴミによる排出量は都市化に伴い将来増加すると予想される。亜酸化窒素は主に化学肥料の施肥（全体の約67%）と農業残渣の耕作地での焼却によるものである。これらの温室効果ガス排出量の削減ポテンシャルおよび限界削減費用を検討した。インドの温室効果ガス発生源は多様であることから、種々の対策オプション組み合わせることは、対策の実行可能性を高める上で有用である。

〔キーワード〕インド、温室効果ガス、排出量削減対策、応用一般均衡モデル、限界削減費用

1. はじめに

世界の約25%の人口を抱える南アジア地域は、近年の経済成長によるエネルギー需要拡大に対して、主に石炭燃焼による大気汚染、エネルギーインフラ不足、低いエネルギー利用効率、貧しい農村部における非在来型エネルギーへの依存など各種問題によりエネルギー供給不足に陥っている。今後予想される経済成長、人口増大、エネルギー消費の拡大に対して、どのようなエネルギー政策をとるべきかを解析することは、南アジア地域のみならず世界における温室効果ガス排出を制御する上で重要な問題である。また、南アジア地域は主にエネルギー消費に伴うCO₂排出量のみならず、稲作や畜産などの農業生産や廃棄物処理により排出されるCH₄やN₂Oの排出量が多い。

これまで、温室効果ガス排出量の削減に関する研究は主にエネルギー資源からのCO₂排出が注目されてきた。しかし、非二酸化炭素温室効果ガスは、CO₂よりも温室効果が大きく気候変動に大き

な影響を及ぼす。このため、CH₄やN₂Oを含めた解析が重要となってきた。インドのCH₄排出量（18.63 Tg）とN₂O排出量（0.31 Tg）は2000年に温室効果をCO₂排出量に換算して、温室効果の要因のそれぞれ27%と7%を占め、残りをCO₂排出量（928 Tg）が占めた¹⁾。表1は主要カテゴリ別のインドの温室効果ガス排出の主な発生源である。石炭製品（46%）と石油製品（15%）の消費は合計で排出量全体の60%超を占めている。これらの燃料の主たる消費者は工業部門（発電を含む）と輸送部門である。畜産などを含む農業は29%を占めている。

インドの温室効果ガス排出量は、インド人口の大部分（70%超）が農業を主な経済活動とする農村部に居住しているのに、都市活動からの排出量が大部分を占めている。また、主要エネルギー集約型部門における大量の化石燃料消費によって、CO₂排出量は1999～2000年に年率約5%と、急激に増加した¹⁾。一方、CH₄排出量の増加率は、腸管発酵と米作が主たる排出源であり、その増加率が年間1%未満であったため、年間1.8%と緩やかであった。農業はN₂O排出でも主要排出源であるが（約90%超）、主たる排出要因である化学肥料の使用量の増加が約5%と急速であったために排出量が急増した。これらの温室効果ガスの削減方法について検討する。

表1 インドの2000年におけるCO₂相当の温室効果ガス排出量の主要排出源¹⁾

排出源カテゴリ	主な排出ガス	シェア (%)	主たる排出源
石炭燃料発電	CO ₂	29.9	大規模発生源50施設
製鉄産業	CO ₂	8.8	大規模発生源5施設
セメント産業	CO ₂	5.1	大規模発生源50施設
畜産関連	CH ₄ , N ₂ O	12.6	散在
米作	CH ₄	6.6	散在
バイオマス消費	CH ₄ , N ₂ O	5.2	散在
化学肥料使用	N ₂ O	4.1	散在
輸送部門	CO ₂	9.5	散在、移動
廃棄物処理	CH ₄	3.8	大規模廃棄場40箇所
その他	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O	14.4	各種、散在
インド全体 (Tg)		1442 ^a	同上

CO₂相当の温室効果ガス排出量への換算には、IPCC(1996)²⁾による地球温暖化ポテンシャル(GWP)を使用（CO₂のGWP=1、CH₄のWGP=21、およびN₂OのWGP=310）

^a1442=956(CO₂)+21*18.63(CH₄)+310*0.308(N₂O)、排出量の単位はいずれもTg

2. 研究目的

インドにおける温室効果ガスは今後急増すると予想されることから、世界規模で温室効果ガスを削減していくためには、インドにおける対策の可能性を検討することは急務である。本研究は南アジアを中心とした一般均衡モデルを開発し、世界モデルと組み合わせて、インドにおける経済発展と温室効果ガスの削減という目標を実現するための方策を探るものである。インドの温室効果ガス削減のインセンティブを明らかにすることは、第二約束期間において途上国が温室効果ガス削減プログラムに参加するために重要な要件である。

開発している応用一般均衡モデルについて、南アジアのデータを整備し、南アジアにおける温暖化対策が経済に及ぼす影響について詳細に分析できるようにする。特に、インドでの発生量が大きいCH₄やN₂Oの排出量に焦点を当てた分析を行い、種々の対策オプション組み合わせた排出量

削減対策の検討を行う。

3. 研究方法

(1) 応用一般均衡モデルのインドへの適用

温暖化対策への投資効果、温暖化対策による地域改善などの副次的効果を分析するためには、対策の技術モデルに加えて、経済モデルを開発することが不可欠である。このため、二酸化炭素以外のガス（non-CO₂ガス）を取り扱える応用一般均衡モデルのプロトタイプを開発する。アジアを対象とした経済モデルであるAIM/CGE（アジア）モデルをベースにした。このモデルはトップダウン型の一般均衡モデルである。モデルには18の地域と13の部門からなる。

本モデルには家計および政府と生産者がそれぞれの行動を最適になるように財のやりとりを行っている。家計は生産者に労働、資本、資源、土地などの一次投入要素を提供した分に見合う収入を得て、生産者の生産した財を購入している。政府は生産、輸出入、消費の各段階で税を徴収し、政府消費に必要な財を購入する。生産者は家計から供給される一次投入要素、自国の他の生産者および他国の生産者から供給される中間投入財を用いて財を生産し、家計や政府に供給する。なお、計算の都合上、モデル内では家計と政府を合わせて最終消費者としている。

生産部門は電力以外のエネルギー財、電力、非エネルギー財に大別できる。石炭、原油、天然ガスの枯渇性資源については利用可能な埋蔵量を想定し資源が枯渇する様子を表現している。電力については、石炭火力、石油火力、天然ガス火力の他、水力・地熱を考慮している。

二酸化炭素ならびにその他ガスの排出はモデル内の活動に付随する形で行われる。CO₂削減は燃料転換、財の需給構造の変化、自動的な省エネルギーの想定により行われる。その他ガスとして、CH₄とN₂Oを組み込んだ。その他ガスの削減は財の需給構造の変化の他、US/EPAの提供する限界削減費用関数を表現するため、生産関数における排出削減を考慮する。

(2) インドの温室効果ガス排出シナリオの開発

今後30年間のインド経済の状況を、市場の動向（自由化、国際化、及び世界市場との統合の程度）と自治のあり方（中央集権か地方分散か）の2つを軸とした4つのシナリオ別に検討する。4つのシナリオは高成長シナリオ、標準シナリオ、持続可能な開発シナリオ、地域開発シナリオである。シナリオ毎に、社会・経済の主要な要因を整理し、モデルの主要パラメータを検討し、主要な温室効果ガス排出量を予測する。

(3) 限界削減費用の推計と対策オプションの検討

インドにおいては化石燃料消費によるCO₂排出量のみならず、農業、畜産、バイオマス燃焼、下水処理等に伴うCH₄、N₂OなどのCO₂以外の温室効果ガス(non-CO₂ガス)抑制が今後大きな問題となることが予想される。このため、経済データに加えてnon-CO₂ガスに関する排出データ、対策手法に関するデータを収集し、温室効果ガス全般を対象として効率的な削減対策を検討するために、排出と除去プロセスとの関係をモデル化し、除去技術に関するデータの整備を行う。収集した除去技術に関するデータをもとに、AIM/エンドユースの枠組みを用いて、インドにおけるCH₄の限界削減費用を推計する。

4. 結果・考察

(1) 応用一般均衡モデルのインドへの適用

本解析では、AIM/CGE(Asia)モデルを用いて、CO₂およびCH₄の長期排出量を予測した。使用したシナリオは、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の排出シナリオに関する特別報告書(SRES)³⁾のB2シナリオをベースにした。B2シナリオのストーリーラインでは、経済・社会の発展と環境の調和を実現するため地域環境政策を重視する世界を想定している。

図1にB2シナリオのCO₂排出量予測を示した。全世界のCO₂排出量は、2000年の約7GtCから2100年には約12GtCに増加する。インドからの排出量は2000年の約0.28GtCから今世紀末までには1.58GtCに増加する。南アジアと東南アジアからの排出量は、2000年の0.26GtCから2100年までに0.7GtCと3倍近く増加する。

図2は世界各地域のCH₄排出量の予測である。全世界のCH₄排出量は、炭素換算約1.6 GtCから今世紀末までに約2.25 GtCに増加する。21世紀当初のCH₄排出量は増加傾向だが、今世紀後半には減少傾向に転じる。これは、経済が成長するにつれてGDPに占める農業部門の割合が低下するためである。また、コスト的に有利になるCH₄削減技術の導入もその理由である。

インドの人口一人当たりのCO₂排出量は2000年の約0.26トンから2100年までには約3.5倍の1トンになるものと予想される(図3)。炭素強度(CO₂/GDP)は100年間に着実に低下する(図4)。

インドの2100年の人口一人当たりのCO₂排出量は先進国の現在のそれを下回り、主要なIPCCシナリオの世界平均より低い³⁾。2100年のCO₂対GDP比率は2000年のそれのおよそ10分の1である。つまり、インド経済はCO₂排出量を抑えながらGDP成長を実現できる可能性がある。

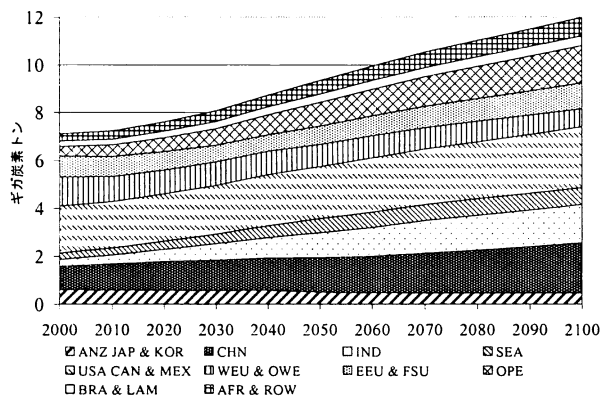


図1 IPCC B2シナリオにおけるCO₂排出量

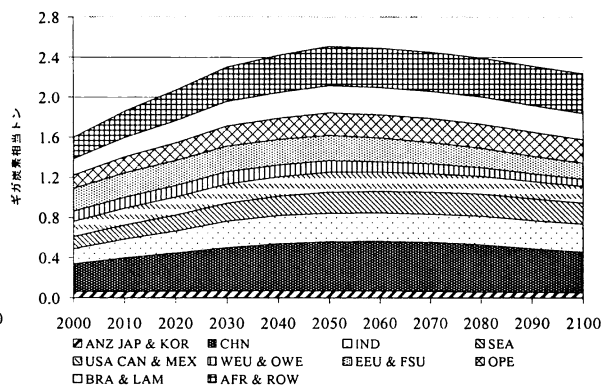


図2 IPCC B2シナリオにおけるCH₄排出量

(2) インドの温室効果ガス排出シナリオの開発

① インドの将来シナリオ

インド経済の向こう30年間の状態は、市場の動向(自由化、国際化、および世界市場との統合の

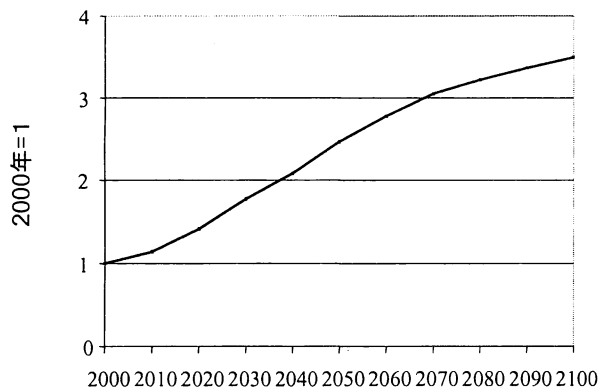


図3 インドの一人当たり CO2 排出量の推計
(指数：2000 年 = 1)

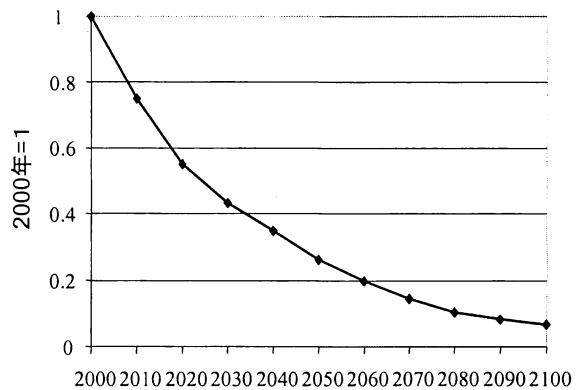


図4 インドの GDP 当たり CO2 排出量の推計
(指数：2000 年 = 1)

程度)と自治のあり方(中央集権か地方分権か)の2つを軸とした4つのシナリオの下で広範に評価することができる。市場統合のシナリオには、国際化が進むシナリオと、分断化されたままで国内志向が続くシナリオがある。自治のシナリオには、中央集権化されるシナリオと、地方分権が重んじられるシナリオがある。4つのシナリオにはそれぞれIA1、IA2、IB1、およびIB2の呼称を付した。これら2つの軸はIPCC SRESにおいて考慮されたものと似ており、インドの異なった開発パラダイムも考慮に入れている。これら4つのシナリオは、市場統合の程度と自治のあり方の2つの軸による座標で確認すると理解しやすい。この軸の延長上には他にも複数のシナリオが存在することだろうが、本研究では、もっともありそうな典型的シナリオだけを取り上げることにして、他のシナリオについては論じない。4つの内のひとつであるシナリオIA2は、既存の政策トレンドと経済動向を捉えたものにもっとも近いため、標準シナリオと呼ぶことにする。IA2では、2000～2030年の年間GDP成長率を現在のGDP成長トレンドに相当する5.5%とした。IA2の人口予測もまた公式人口予測に合わせた。また、このシナリオでは、政府のさまざまな省庁による部門別成長想定および予測をそのまま使用しているので、その意味でも標準シナリオと呼ぶことにした。

本研究のシナリオの筋書きは、インドにおける将来の社会経済、技術、および環境の進展の特徴を示すものである。4つのシナリオの各々の方向性を、主たる要因とシナリオおよびモデル解析のための重要パラメータとの間の関係から定量化した(表2)。

② 標準シナリオ (IA2) の結果

CO₂相当の温室効果ガス排出量は、CO₂およびN₂O排出量の急増によって2000～2030年に約2.4倍に増加する(図5)。CO₂排出量の割合は増加してCH₄排出量の割合を押し下げるが(図6)、CH₄排出量の絶対量は増加する(表3)。

表2 シナリオ、主要な要因、およびモデルパラメータとの関係

シナリオ	主要な要因	シナリオおよびモデル解析の重要パラメータとの関係
IA1： 高度成長	競争と民営化、世界経済と世界の技術へのアクセス、技術研究開発、技術移転と技術力強化、リスクの危惧の緩和	燃料価格（↑）、技術コスト（↓）、効率（↑）、伝達および普及上のロス（↓）、資本力（↑）、技術のオプション（↑）、デフレ率（↓）、高度技術の早期普及、都市ごみ管理（↑）、化学肥料の使用（↑）
IA2： 標準シナリオ	GDP成長、エネルギー効率、非化石燃料と化石燃料の割合、石油消費、技術進歩、燃料の代替	部門別需要（↑↓）、投資上の制約（↑↓）、燃料供給（↑↓）、化石燃料価格の範囲（↑↓）、化石燃料の価格調整、石油とガスを使用する技術の効率
IB1： 持続可能な開発	強い環境意識と自然保護論者的価値観、環境保全、消費パターンの変化、唯物主義からの脱皮、協力、化石燃料からの転換、国内の生産能力強化、地方のエネルギーおよび電力開発	環境的制約（↑）、商品／サービスにおけるエネルギーと原材料の使用（↓）、効率改善による電力消費（↓）、伝達および普及上のロス（↓）、クリーンな再利用技術の浸透（↑）、化石燃料の価格（↑）、化学肥料の使用（↑）
IB2： 地域開発	GDP成長、人口、地方の排出、生産性、農業の重視、資源集約度、自主性	人口増加（↑）、部門別需要（↑↓）、投資（↓）、クリーンな再生利用技術の浸透（↑↓）、農業のシェア（↑）、地方の資源集約型経済、有機肥料の使用（↑）

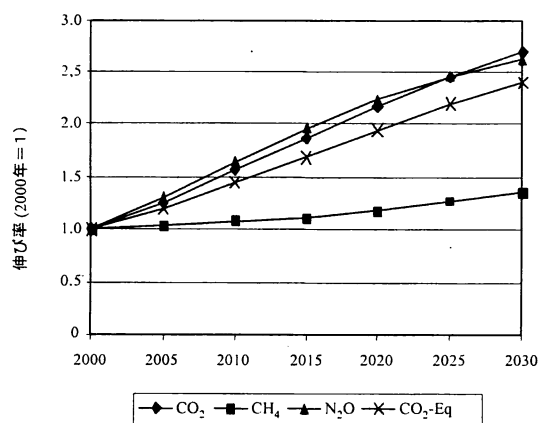


図5 IA2シナリオを用いた排出予測

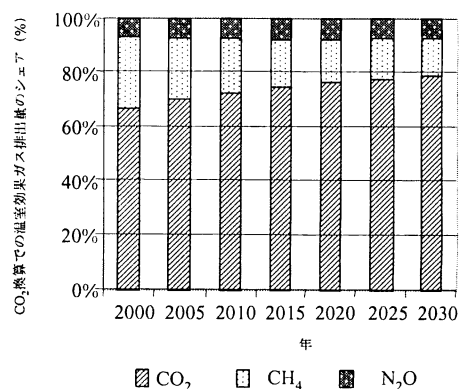


図6 IA2シナリオを用いたCO₂相当温室効果ガス排出シェア

表3 IA2シナリオを用いたインドの排出量予測

排出ガス (Tg)	2000	2010	2020	2030
CO ₂	956	1507	2080	2572
CH ₄	18.63	20.08	21.73	24.36
N ₂ O	0.308	0.505	0.689	0.807
CO ₂ 相当のGHG ^a	1454	2115	2839	3507

a CO₂相当のGHG排出量への換算に使用した地球温暖化ポテンシャルはCO₂ (1)、CH₄ (21)、およびN₂O (310)。

③ メタン排出

CH₄排出量の予測を表4に示す。農業および畜産業関連の排出シェアは減少傾向にあるが、廃棄物と採炭からの排出のシェアは徐々に増加する(表4)。

表4 IA2シナリオを用いたインドのCH₄排出予測

排出源	2000	2010	2020	2030
農業残存物	0.10	0.12	0.14	0.16
バイオマス消費	2.91	3.00	3.07	3.11
石炭生産	0.72	1.07	1.86	2.89
石油と天然ガス	0.88	0.85	0.50	0.61
家畜の腸管発酵	7.59	8.04	8.23	8.25
肥料の施肥	0.95	1.00	1.03	1.03
米作	4.00	3.98	3.93	3.87
都市固形廃棄物	1.02	1.46	2.30	3.64
下水	0.46	0.56	0.67	0.80
CH ₄ (Tg) 合計	18.63	20.08	21.73	24.36

④ 亜酸化窒素の排出

現在、農業部門からのN₂Oの排出は、化学肥料の使用からの66%、農業残存物の耕作地焼却と間接土壌排出からのそれぞれ約10%、および家畜の排泄物からの約5%を含めて全体の90%超を占めている。現在、化学肥料の使用はN₂Oの最大の排出源であり、将来的にも最大の排出源と予想される(表5)。

インドは2000年に11 Tgの窒素肥料を使用した⁴⁾。消費量は、耕作面積と地域の施肥方法に依存する。使用肥料の適切性と妥当性は、総耕作面積の1ヘクタール当たりの食糧生産高と1ヘクタール当たりの肥料使用量から推計可能である。パンジャブとハリヤナでは1ヘクタール当たりの食糧生産性が高いが、デリーでは総耕作面積の1単位当たりを使用される窒素肥料の量が多い。このように多様な施肥方法は使用する窒素肥料1 kg当たりの食糧生産高をばらつかせている。FAIによれば、一定量の肥料を使用すれば、1ヘクタール当たりの総食糧生産高はある程度まで向上することが示された⁴⁾。施肥後の水遣りはN₂O排出量削減において重要な役割を果たす⁵⁾。農作業の方法を改

表5 IA2シナリオを用いたインドのN₂O排出量予測

排出源	2000	2010	2020	2030
石炭の燃焼	9.9	16.8	24.0	28.0
石油製品の燃焼	2.0	3.6	6.4	10.0
農業残存物の耕作地焼却	33.9	41.5	42.6	33.4
生物による窒素固定	5.6	6.6	7.8	9.1
化学肥料の使用	206.1	368.4	524.9	626.8
家畜	12.2	14.1	16.3	18.8
工業プロセス	12.1	23.0	31.0	38.0
間接的排出	26.0	30.7	36.2	42.6
N ₂ O合計 (Gg)	307.8	504.6	689.0	806.7

善すれば、化学肥料の使用量が最適化されて、その結果としてN₂O排出量が減少する可能性がある。ただし、インドでは多量の有機肥料が使用されていることにも注目する必要があるだろう。また、食糧生産高は、灌漑、土質、種子の品種や害虫駆除などの他の数々の要因によっても左右され、肥料の使用は要因のひとつに過ぎない。

N₂O排出のもうひとつの重要な要因は農作物残存物の耕作地焼却である。農作物残存物をどの程度燃やすか、あるいはその場に残して置くかは、インドでは大きな問題である。IPCCのデフォルト値は0.45である。しかし、この国の多くの地域において、農夫は農作物の残存物を畜牛の餌として一年中保存する。一方、パンジャブやハリヤナのような一部の先進的な豊かな州においては、機械化農法が用いられていて、収穫後には1フィート近くの高さの作物残存物が残り、そのほとんどが再利用されずにその場で焼却される。しかし、一部の州が最近干ばつに見舞われたので、政府はこれらの先進した州に畜牛の飼料を干ばつの多い州に提供するよう命じざるを得なかった。したがって、農作物残存物の耕作地焼却は将来的に減少する可能性がある。

⑤ シナリオ間の比較

IPCC SRESシナリオは、2つの軸において、すなわち、経済志向か環境志向かで世界の経済とガス排出を説明しており、そして、世界および地域の開発パターンを説明している。主たる動因は、経済成長、人口、地域の特異性と自主性、有効な新技術の導入スピード、および文化的・社会的相互作用の程度である。

ア. 4つのシナリオの部門別メタン排出量の比較

図7は4つのシナリオ別のCH₄排出量の推計を示している。標準シナリオ（IA2）では、CH₄の排出量が2000年の約17 Tgから2030年の約25 Tgへと約1.5倍に増加する。農業部門はインドのCH₄排出量の約65%を占める。CH₄の将来の排出は主にマクロ経済構造、農業部門の革新、灌漑技術の開発、および改良技術の浸透に依存する。

CH₄排出量の増加は、高度成長シナリオを代表するIA1シナリオで最高である。CH₄排出量は2030年に約30 Tgに増加する。ベースケースの排出量増加の要因となる主な部門は、採炭部門、畜産業、および都市ごみである。IB1（持続可能な開発）シナリオとIB2（地域開発）シナリオからの排出はIA2（標準）シナリオの排出よりも低い。持続可能な開発のシナリオでは、排出量増加が最低である。このシナリオにおけるCH₄排出量は2030年に約20 Tgに増加する。このシナリオの排出の要

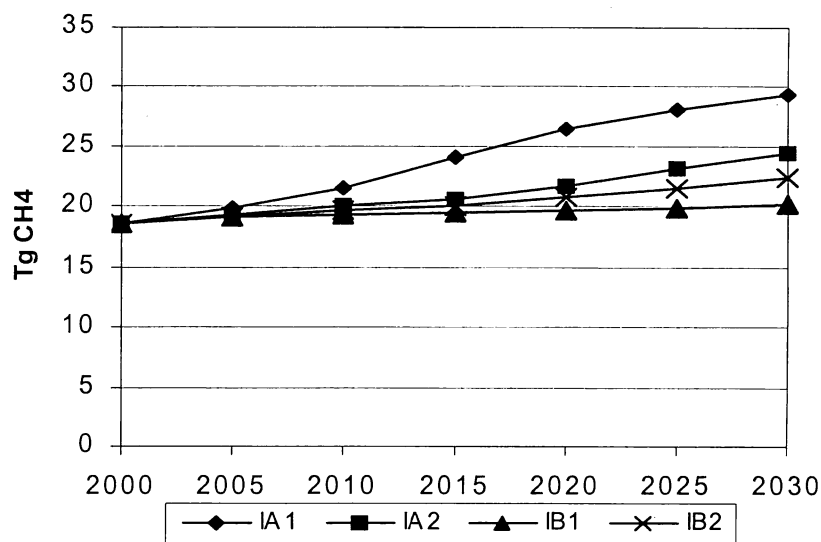


図7 4つのシナリオ別のCH₄排出量の予測

因となる主な部門は、採炭部門、畜産業、米作や都市ごみなどである。次に、これらの部門の4つのシナリオにおける排出傾向について述べる。

4つのシナリオのすべてにおいて、石炭層からのCH₄排出は長期的に徐々に増加する。この増加は、初めのうちは、主に露天掘り炭鉱からの産出レベルが上がるためであり、その後は、露天掘り炭鉱が枯渇して地下炭鉱から採炭するようになるからである。排出量の増加は高度成長ケース（IA1）において最高である。高度経済成長は特に電力部門における石炭需要の増加を招く。深い炭鉱からの石炭への需要が増すほど国内石炭価格が上昇して、輸入石炭の使用量も増す（ただし、輸入石炭が増えても、国内炭鉱からの排出への影響はそれほど大きくはない）。地下炭鉱への依存は、高度成長以外のシナリオの2015年より後の排出を増加させる。高度成長シナリオにおいては、地下炭鉱へとシフトする傾向が比較的早期に現れる。IB1シナリオの排出増加は標準ケースのシナリオよりも低い。これは、このシナリオでは代替エネルギー源へのシフトが促進されるからである。

畜産から生成されるCH₄の90%近くが腸管発酵からのものである⁶⁾。インドでは、反芻動物、すなわち、畜牛、水牛、羊、およびヤギがこのカテゴリからのCH₄排出全体のほとんどすべてを占める。これらの排出は1990年代に着実に増加しており、持続可能な開発のシナリオ（IB1）を除くすべてのシナリオにおいて、この傾向が続くものと予想される。最近の傾向から判断すると、標準シナリオにおける畜牛の頭数は、インドの多くの州において減少すると予想される。しかし、国内種の畜牛は減るものの、交配種の乳牛の頭数は増える。交配種の乳牛は国内種の畜牛よりも1頭当たりのCH₄排出量が多い。乳牛以外の頭数もまた牛肉の消費と輸出が増えるにつれて減少すると予想される。乳牛の中では水牛のインドにおけるミルク総生産量に占めるシェアが急増して、20年前には40%であったが2000年現在では約54%であり、この傾向は今後も続くものと予想される。乳牛は1頭当たりのCH₄排出が最高であり、乳牛の中では水牛の排出係数が最高である。したがって、IA2シナリオでは、家畜の頭数が減ると予想されていても、インドにおける腸管発酵からのCH₄排出が極大化する。IA1シナリオにおける排出量増加は、乳製品への需要の増加に応じる必要性から水牛の頭数が増えるからである。これとは対照的に、IB2シナリオでは、乳牛は増えるが水牛は減る。家畜の頭数は減らないのだが、水牛の頭数が減るおかげでこの部門からの排出量は比較的に少ない。

都市ごみ関係の排出の増加は、インドの都市圏における人口の増加、廃棄物回収、およびゴミの投げ捨てる増加とゴミ捨て場の深層化に起因する。これらの過程は CH_4 生成速度を加速する。インドではこれらの傾向が既に顕在化しており、標準ケースのシナリオでは今後も続くと言われている。標準ケースのシナリオでは、排出量が約4.5倍になる。IA1シナリオでの増加が最高であり、排出量は約7倍になる。その原因は、高度経済成長と、都市化と都市人口の増大である。これらの両シナリオにおいて、ゴミ捨て場からの CH_4 の回収に向けた努力が段階的に払われる。IA1シナリオにおける都市ごみ生成速度は回収速度よりも高いために排出量が急増する。しかし、IB1シナリオでは、最善の廃棄物処理慣行が実践される上に都市化と人口増加も適度であるため、この部門からの排出は低い。IB2シナリオでは廃棄物発生が最低である。しかし、廃棄物処理と廃棄物からエネルギーに転換する技術がIB1シナリオほどには開発されないため、IB1シナリオよりも排出量は大きい。

米作からの排出は2000年に排出量全体の約21%を占めた。IB2シナリオを除くすべてのシナリオにおいて、この部門からの排出は徐々に減少すると予想される。排出量が徐々に減るのは、灌漑および耕作慣行が改善されるためである。これらの慣行のほとんどでは、水田において生じる嫌気状態の期間を短縮したり、 CH_4 生成微生物を抑制するために土地を改良したりするための水管理体制の改善が行われる。これらの慣行はIA1、IA2、およびIB1において普及する。IA1シナリオでは最善の農業慣行が実践されて、企業農業経営も取り入れられる。

イ. 4つのシナリオの部門別亜酸化窒素排出量の比較

N_2O 排出の要因となる主な部門は農業部門と工業プロセス部門である。農業部門の排出源には化学肥料の使用と農業残存物の耕作地焼却が含まれる。工業プロセス部門にはアジピン酸と硝酸の生産からの排出が含まれる。図8にシナリオ別の N_2O の排出量の推計を示す。

化学肥料の使用から生じた N_2O の排出は2000年に全体の約66%を占めた。2000年のこの部門からの排出量は N_2O が約0.21 Tgである。標準ケースのシナリオでは排出量が3倍になって、2030年には N_2O が0.63 Tgに達する。排出量はIB1シナリオにおいて最低であるが、これは有機肥料の使用が増えるためである。しかし、IA1シナリオでは、高度経済成長に加えて多くの化学肥料が使用されるので、排出量は N_2O が0.75 Tgへと増加する。

N_2O 排出の2番目に大きな要因は農業残存物の耕作地焼却である。しかし、この部門からの排出量は化学肥料の使用ほどに速くは増加しない。事実、4部門のすべてにおいて、排出量は2015年から減少する。排出量はIA1シナリオにおいて最高である。排出量は2015年に N_2O 素が47 Tgに達して、その後は減少する。すべてのシナリオにおいて、将来には農業残存物の別の用途が見つかって排出量は減少する。別の用途には、農業残存物を土に戻す、耕作地以外の場所で利用するなどがある。土に戻せない農業残存物は、エネルギー生産に、建設材料に、紙や厚紙に、堆肥や土質改善に、土壌侵食防止のための埋め立て用に、そして、その他の用途に利用される。現在のところ、エネルギー生産を除けば、これらの用途のいずれも農業残存物の有意な市場を提供していない。ベースケースにおける畜産部門からの排出量は向こう30年間に約12 Ggから19 Ggへと約1.5倍になる。畜産部門からの CH_4 排出と同様に、IB1の N_2O 排出量は最低であるが、これは他のシナリオよりも水牛の頭数が少なく、酪農慣行が良好だからである。この部門からの排出の大部分は主に放牧家畜の排泄物の窒素から発生したものである。高度成長シナリオではIB1シナリオよりも人口が

大きいので、畜牛の消費も大きい。これらのシナリオでは良好な酪農慣行が実践されないため、 N_2O 排出が高い。高度成長シナリオにおける排出量は2000年のレベルから2倍近くになり、2030年

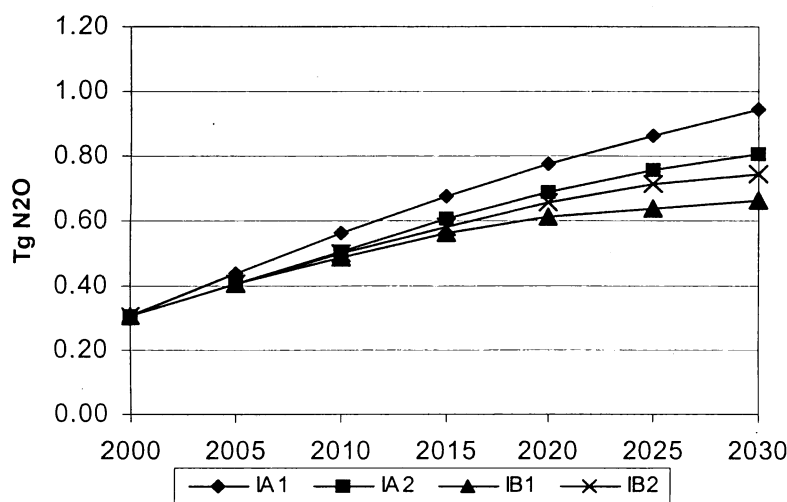


図8 4つのシナリオ別の N_2O 排出量の予測

には N_2O が22 Ggに達する。IB2シナリオの増加率はIB1シナリオよりも低い、IB2シナリオの排出は良好な排泄物／酪農管理慣行が全体として実践されないために高い。工業生産部門からの排出は主に硝酸生産からのものである。この部門からの排出と経済成長との間には相関関係がある。IA1シナリオの排出量が最高であるが、IB2シナリオの排出量は最低である。IA1シナリオでは、排出量が2030年に基準年のレベルの約4倍に増加する。IA2シナリオの排出量は約3倍に増加する。この排出量増加は硝酸生産の増大に関係しており、言い換えれば、経済成長によって増加する。

N_2O のその他の排出源は、石炭、石油や天然ガスの燃焼である。天然ガス燃焼からの排出は取るに足りない。化石燃料の中では石炭部門からの排出が最高である。標準ケースにおけるこの部門からの排出は2000年に N_2O が約10 Ggであった。このシナリオでは排出量が30年間に約3倍に増加して、 N_2O が約28 Ggに達する。IB2シナリオの排出量増加が最低であるが、代替エネルギー資源へのシフトが促進されるからである。石炭部門と石油部門からの排出の増加が最高なのはIA1シナリオである。このシナリオでは、高度経済成長が化石燃料の大量消費を招く。

(3) 限界削減費用の推計と対策オプションの検討

シナリオの開発では、インドにおける4つの将来シナリオを想定して CH_4 および N_2O の排出量の将来傾向について検討した。これらの将来シナリオを用いて削減方策を検討するには、トップダウン型の応用一般均衡モデルとボトムアップ型のエンドユースモデルを組み合わせた解析が有効である。応用一般均衡モデルからは国内総生産（GDP）、サービス需要とエネルギー価格の予測値が得られ、この予測値がエンドユースモデルの外生入力として使用される。エンドユースモデルからはサービス需要を供給するための技術の組み合わせや限界削減コストが得られる⁷⁾。

エンドユースモデルを持ちいてインドにおける CH_4 排出量削減対策を詳細に分析するため、まず、

CH₄排出と除去プロセスの関係を整理した。図9と図10はそれぞれ石炭部門および畜産部門におけるプロセスの関係図である。除去プロセスに関する技術情報の主な出所はEPAレポート⁸⁻¹⁰⁾と、各分野の専門家へのインタビューである(表6参照)。各種除去プロセスを適用した部門は、石炭、天然ガス、排出物管理、腸管発酵、米作、および都市固形廃棄物などである。表6に挙げられた技術のほとんどは、米国やEUの数カ国などの先進諸国において実用段階にあるか開発段階にある。

インドでは、これらの技術が2010年頃から然るべき規模で実用化されると予想される。CH₄の2020年の限界削減費用曲線は、AIM/エンドユース(インド)モデルをベースにして開発した。MACはCH₄削減量と限界削減費用を示す。2020年についての予備的解析からの結果は図11のとおりである。エンドユースモデルから得られた限界削減費用曲線は、応用一般均衡モデルで使用される生産関数のパラメータ推定に有効である。

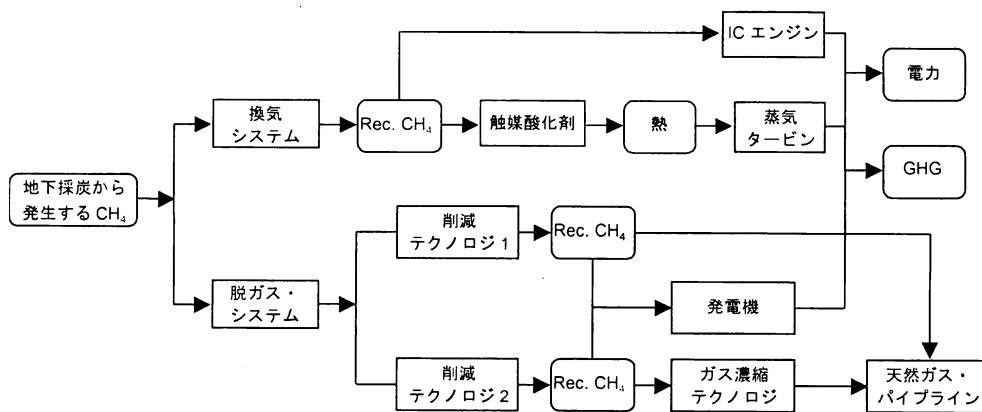


図9 石炭部門からの排出と除去プロセスとの関係

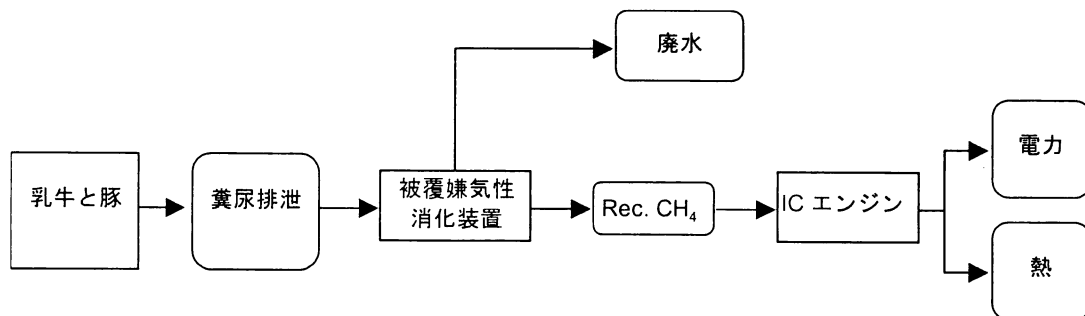


図10 畜産部門からの排出と除去プロセスの関係

表6 モデル化のために考案されたCH₄排出源と削減技術

排出源	部門	削減技術
石炭生産	エネルギー - 逸散排出（個体）	発電および脱ガスのための脱ガス技術、発電のための換気、および発熱のための酸化剤
畜産（排泄物）	農業	遮蔽嫌気性消化槽、プラグフロー消化槽、および完全混合消化槽
畜産（腸管発酵）	農業	粗飼料の濃縮飲料への部分的代替
ガスの生産・供給	エネルギー - 逸散排出（石油とガス）	ロープリード圧縮空気装置と計器用空気
稲田	農業 - 米作	耕作シーズン中の排水、尿素のASへの代替、および代替浸水／排水方法
廃棄物	廃棄物 - 地上固形廃棄物処理	メタンを電力に変換。ガス資源として直接利用。

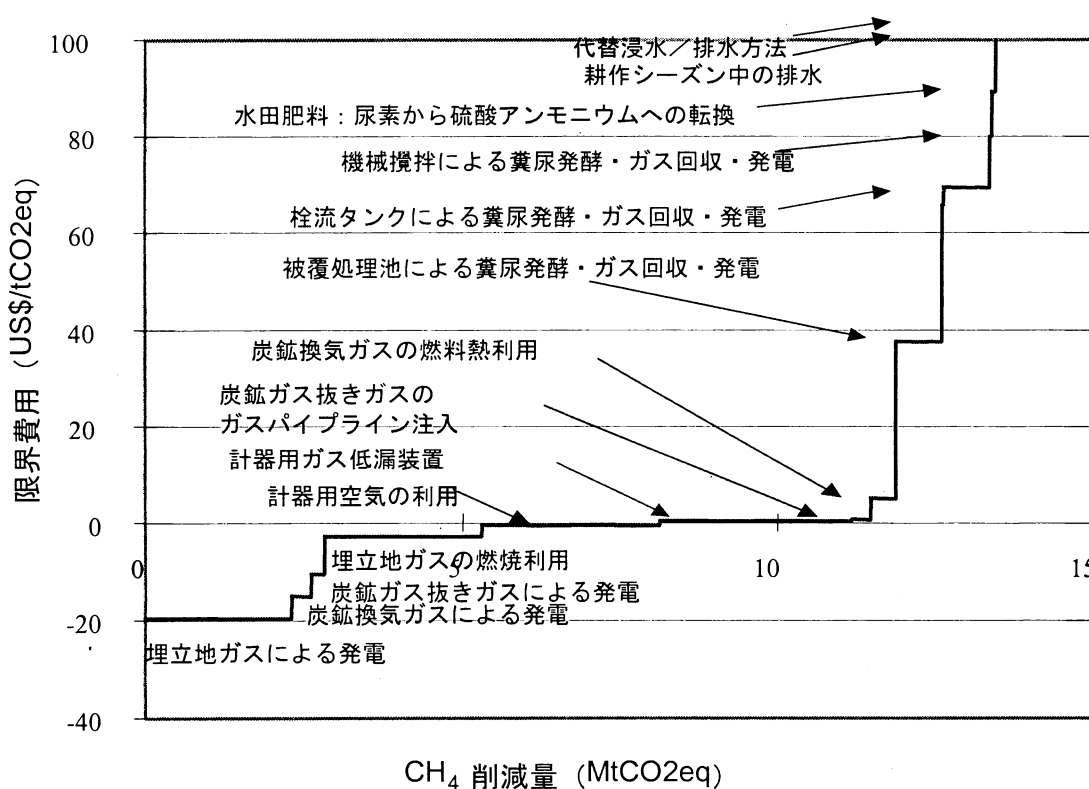


図11 メタンの限界削減費用曲線（2020年）

5. 本研究により得られた成果

本研究では、二酸化炭素に加えて、温室効果ガスであるCH₄とN₂Oを主に対象として排出量の傾向について解析した。二酸化炭素排出量は21世紀を通じて世界全体で増加傾向にある。インドでは2000年に

比べて2100年の一人当たりCO₂排出量が3倍以上に、それに対してGDPあたりのCO₂排出量が10分の1程度に変化する可能性が示された。一方、CH₄は農業セクタにおける生産量の変化により2050年以降世界全体のCH₄排出量が減少する可能性があるが、インドでは農業セクタの生産が維持され2050年以降ほとんど変化が見られない。

CH₄とN₂Oの排出の要因の中でもっとも大きな部門は農業部門である。現在は農業部門が優勢であるため、標準ケースのシナリオ下では、これらのガスの排出が短期的には着実に増加するであろう。しかし、社会が環境にもっと気を使うようになれば（IB2シナリオにあるように）、これらの排出量の増加を抑制できるはずである。これらの排出量の増加速度の抑制では、政策イニシアティブが大きなカギを握るが、インドでは農業部門のGDPに占めるシェアが長期的に低くなると予想されるため、より持続可能な社会へと向かう見込みもある。インドのような発展途上国はさまざまな温室効果ガスと希少資源に対する緩和オプションをうまく融合させられる可能性がある。インドにおいてCH₄のようなガスをエネルギー資源として利用するための技術オプションの導入を目指す政策イニシアティブは、温室効果ガス緩和策において大いに必要とされるフレキシビリティを高める有用な策となる可能性がある。

6. 引用文献

- 1) A. Garg, and P.R. Shukla, 2002. Emissions Inventory of India. Tata McGraw-Hill Publishing Company Ltd., New Delhi.
- 2) IPCC, 1996. Revised IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Reference Manual, Vol. 3. Inter Governmental Panel on Climate Change, Bracknell, USA.
- 3) N. Nakicenovic, et al., 2000. Special Report on Emissions Scenarios. Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge.
- 4) FAI (Fertilizer Association of India), 2001. Fertilizer Statistics 2000-01. The Fertilizer Association of India, New Delhi, India.
- 5) N. Kalra and P.K. Aggarwal, 1994. Evaluating water production functions for yield assessment in wheat using crop simulation models. In: Nitrogen Economy of Irrigated Rice: Field of Simulation Studies. H.F.M. ten Berge, M.C.S. Wopereis and J.C.Shin (Eds.), SARP Research Proceedings, AB-DLO, Wageningen, 254- 266.
- 6) A. Garg, S. Bhattacharya, P.R. Shukla, and V.K. Dadhwal, 2001. Regional and sectoral assessment of greenhouse gas emissions in India. Atmospheric Environment 35, 2679-2695.
- 7) G. Hibino, R. Pandey, M. Kainuma, and Y. Matsuoka, 2003. A Guide to AIM/Enduse Model. In Kainuma et al, Climate Policy Assessment: Asia-Pacific Integrated Modeling. Springer-Verlag, Tokyo, Japan.
- 8) USEPA. 1999. U.S. Methane Emissions 1990–2020: Inventories, Projections, and Opportunities for Reductions, EPA, Washington, DC, September, 1999. (<http://www.epa.gov/ghginfo>)
- 9) USEPA. 2001a. U.S. High GWP Gas Emissions 1990–2010: Inventories, Projections, and Opportunities for Reductions. June 2001
- 10) USEPA. 2001b. Non-CO₂ Greenhouse Gas Emissions from Developed Countries: 1990-2010. September 2001. EPA-430-R-01-007.

7. 国際共同研究等の状況

本研究は国際交流研究に基づくものである。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- ① R.Nair, P.R.Shukla, A.Garg, K.Manmohan, and A.Rana: Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, Kluwer Academic Publishers, Vol 8, Issue 1, 53-69 (2003)
“Analysis of Long-term Energy and Carbon Emission Scenarios for India”
- ② A.Garg, P.R.Shukla, G.Debyani, K.Manmohan, and R.Nair: Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, Kluwer Academic Publishers, Vol 8, Issue 1, 71-92 (2003)
“Future GHG and Local Emissions for India: Policy Links and Disjoints”
- ③ P.R.Shukla, A.Rana, A.Garg, M.Kapshe, and R.Nair: Environmental Economics and Policy Studies, Springer, Special Issue (Forthcoming 2005)
“Global Climate Change Stabilization Regimes and Indian Emission Scenarios: Lessons for Modeling of Developing Country Transitions”
- ④ P.R.Shukla, A.Garg, M.Kapshe, and R.Nair: The Energy Journal, Special Issue, International Association for Energy Economics (Forthcoming 2005)
“India’s Non-CO₂ GHG Emissions: Development Pathways and Mitigation Flexibility”

<その他誌上発表（査読なし）>

- ① P.R.Shukla, A.Garg, A.Rana, M.Kapshe, and R.Nair: Climate Policy Assessment for India, Universities Press, Hyderabad (2004)
“Applications of Asia Pacific Integrated Model (AIM)”
- ② R.Nair, P.R.Shukla, and A.Rana: In Sushil Dash and Prakash Rao (eds.) “Climate Change Scenario in India.” WWF-India Publication, New Delhi (2004)
“Assessment of Climate Change in India and Mitigation Policies”

(2) 口頭発表（学会）

- ① J.Fujino, T.Masui, R.Nair, M.Kainuma, and Y.Matsuoka: Energy Modeling Forum 21, Multi-Gas Mitigation & Climate Change, Stanford, 2003
“Preliminary Model Results of Multi-gas Analysis from AIM Team”
- ② J.Fujino, T.Masui, R.Nair, M.Kainuma, and Y.Matsuoka: Workshop on GHG Stabilization Scenarios, Tsukuba, 2004
“AIM Multi-gas Model Analysis on Stabilization Scenarios”
- ③ 藤野純一、増井利彦、R. Nair、甲斐沼美紀子、松岡譲：エネルギー・資源学会、第20回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス、東京（2004）
「非CO₂ガスを含めた温室効果ガス削減効果分析モデルの開発」
- ④ R.Nair: the 9th AIM International Workshop, NIES, Tsukuba, 2004
“Developing Energy Emission Scenarios for South Asia Using AIM Family of Models”
- ⑤ R.Nair : the SARI/E conference on Summary and Review of Energy Statistics, USAID South Asian Regional Initiative/Energy, Hotel Hyat, New Delhi, January 6-7, 2005

“South Asian Regional Energy Cooperation”

- ⑥ R.Nair: the 1st Atlantic Workshop on Energy and Environmental Economics, University of Vigo, A Toxa, Vigo, Spain, September 10, 2004

“Energy and Environmental Security in South Asia: Integrating the Primary Energy and Electricity”
Market

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

なし

(5) マスコミ等への公表・報道等

なし

9. 成果の政策的な寄与・貢献について

CO₂以外の温室効果ガスを含めた解析を行うことで、インドにおける効果的な温室効果ガス削減策を提供した。