

地球環境問題のモデル解析(2): CO₂対策技術評価

山地 憲治

1. 主要な CO₂ 政策評価モデル

前回予告したように、今回は CO₂対策技術の評価を目的とするモデル解析を紹介するが、その前に、CO₂政策評価モデル一般について概観しておこう。表1は筆者が内容をかなり詳しく知っている7つの主要なCO₂政策評価モデルの特徴を整理したものだ。New Earth 21 (NE 21 と略記) は後述するように東京大学で開発されたモデル、MARKALはOECD/IEAで利用されているモデル、ETA-MACROはスタンフォード大学で開発されたモデル、FORECAST 21は

電力中央研究所で開発したモデル、GREENはOECD経済局で開発されたモデル、Edmonds-Reillyモデルは米国オークリッジで開発されたモデル、DICEはエール大学で開発されたモデルである。もちろん、ここに掲げたもの以外にも、わが国の国立環境研究所で開発されているAIM (Asia-Pacific Integrated Model)、オランダで開発され IPCC (気候変動に関する政府間パネル) で利用された IMAGE (Integrated Model to Assess the Greenhouse Effect) など重要なモデルがいくつかあるが、モデルの類型を紹介するには表1でほぼ十分と思われる。モデルの構成という

表1 主要なCO₂政策評価モデルの比較

	New Earth 21	MARKAL	ETA-MACRO	FORECAST 21	GREEN	Edmonds-Reilly	DICE
手法	NLP	LP	NLP	Simulation (多部門・不均衡動学)	Simulation (一般均衡動学)	Simulation (化石エネルギー価格均衡)	NLP
焦点	CO ₂ 対策技術評価	エネルギー技術評価	エネルギー-経済相互作用	中期エネルギー経済予測	貿易を考慮したCO ₂ 対策評価	CO ₂ 排出解析	温暖化の損害を考慮したCO ₂ 対策評価
時間の扱い	~2050年 (10年)	~2030年 (5年)	~2100年 (10年)	~2005年 (1年)	~2050年 (2010年まで5年以降は20年)	~2100年 (25年)	~2100年以上 (10年)
地域の扱い	10地域 (エネルギーとCO ₂ の貿易)	1地域	1地域 (global 2100 以後多地域)	1地域 (日本)	12地域 (エネルギーを含む一般財貿易)	9地域 (化石エネルギーの貿易)	1地域 (多地域版もある)
技術の扱い	極めて詳細	極めて詳細	詳細	詳細	簡略	簡略	なし
備考	CO ₂ 回収・固定、グローバルなエネルギーネットワークが扱える	ETSAPで各国モデル開発、MARKAL・MACROに展開	11Rの開発でWECのエネルギー展望に利用中	電中研で改訂中 (2010年)	世界交易を扱えるエネルギー-経済モデル	古典的モデル、SGM開発中	Integrated Modelの先駆

やまじ けんじ 東京大学 工学系研究科 電気工学専攻
〒113 文京区本郷7-3-1

点からこれら7つのモデルを分別すると次のようになる。

1.1 手法（アルゴリズム）と解析の焦点

モデルの出力を最適化アルゴリズムで得るか、シミュレーションで求めるかはモデル解析手法として重要な選択である。一般的に最適化手法を適用すると、少ない入力条件でモデル解析が行なえるが、結果の現実的妥当性を保証するための制約式の選択にモデル作成者の力量が問われることになる。一方シミュレーションでは、モデル作成者の意図する結果を数量的に示すことが比較的容易になるが、そのためには大量の入力条件の設定が必要になることが多い。表1に示されているように、4つのモデルが線形計画法（LP）あるいは非線形計画法（NLP）による最適化モデルであり、3つが経済理論に準拠したシミュレーションモデルである。ただし、シミュレーションといっても、一般均衡など経済的な最適解を解析的に解くという形態をとっている場合もある。

NE 21 や MARKAL のように数多くの技術オプションを選択するモデルでは、最適化アルゴリズムが用いられる。一方、FORECAST 21, GREEN, Edmonds-Reilly など経済活動全体を取り扱うモデルでは、エネルギー需要の価格弾力性など統計的に推計されるパラメータを駆使したシミュレーション手法が用いられている。DICE や ETA-MACRO でも経済活動全体が扱われるが、ごく少数のパラメータで経済を表現するこれらのモデルでは、効用最大化を直接最適化アルゴリズムで解いて結果を求めている。経済全体としての動向から結果を求めるアプローチをトップダウン型、具体的な技術の選択にもとづいて結果を求めるアプローチをボトムアップ型という。

1.2 時間と地域の扱い

表1に示されているように、CO₂問題を扱うモデルの多くは対象とする時間範囲が極めて長い。わが国の中期的なエネルギー経済予測の下で炭素税の効果評価を目的とした FORECAST 21 を除いて、ほとんどが21世紀半ばあるいはもっと長期を解析対象としている。これは、前回説明したように、地球温暖化問題では長期的考察が重要であることを反映している。なお、表1の時間の扱いの説明におけるカッコ内は、モデルで用いられている時間ステップの長さを示している。

地域の扱いについては、1地域しか扱えないものが

4つある。しかし、これも前回説明したように、地球温暖化対策では、地域毎の条件の違いを考慮した上で世界全体を扱う必要があるので多地域モデルが望ましい。表1にも記したように、実際、いくつかのモデルは多地域モデルへと展開している。さらに、地球温暖化対策では、地域間の協調が重要であり、これを扱うためにはモデルは単に多地域に分かれているだけでなく、地域間の相互作用もモデル化されている必要がある。これについては、化石エネルギーの貿易だけを考慮するものから、一般財の貿易、さらには金融・資本移動、技術移転を扱うものまで様々なレベルがあるが、この方面へのモデル開発は難しく発展はまだ緒といったばかりである。

1.3 技術の扱い

今回の中心テーマであるCO₂対策技術の評価のためには、対策技術オプションがモデルに適切に表現されている必要がある。表1に示したモデルの中で、技術の表現が最も詳しいのはNE 21 と MARKAL である。これら以外のモデルでは、エネルギー資源や2次エネルギーの選択は抽象的に表現されているだけで、石炭ガス化複合サイクル発電とか太陽電池と水の電気分解を組み合わせた水素製造などという具体的な技術の選択は扱わない。また、石油精製などの化学変換プロセスの得率制約や負荷形状を考慮した電源構成などエネルギーシステム構成上の重要な制約条件も考慮できない（ただし、初期のETA-MACROでは原子力を中心にかなり詳細な取扱いがなされていた）。

MARKAL と NE 21 のモデル構成上の大きな違いは、1) MARKAL は対象とする全時間範囲について最適解が得られるのに対し、NE 21 は1つのタイムステップでの最適解を逐次連結する準最適解しか得られない、2) 一方、NE 21 は、MARKAL ではできない非線形なコスト関数を扱え、また、エネルギーとCO₂の交易が扱える多地域モデルだという点である。

ここでは、NE 21 モデルを例として、CO₂対策技術評価のモデル解析の詳細を報告する。

2. NE 21 モデルの開発

2.1 モデルの概要

NE 21 モデルは、横浜国立大学工学部講師の藤井康正氏が、東京大学大学院に在籍中に学位論文の一部としてその原型を開発したものである。NE 21 モデルは、費用最小化を基準として、最適なエネルギーシス

テムの構成を求める。本モデルにより、エネルギーシステムにおける種々の制約条件を整合的に考察でき、より合理的な世界のエネルギーの将来像を描くことができる。また、本モデルを利用して各種のCO₂対策技術の可能性・有効性の包括的評価を行なうことができる。

NE 21 モデルでは世界各地の特性を考慮に入れるため、世界を次の10地域に分割して評価を進めている。

- 1) 北米, 2) 西欧, 3) 日本, 4) オセアニア,
- 5) 社会主義アジア, 6) その他のアジア, 7) 中東・北アフリカ, 8) サハラ以南のアフリカ, 9) ラテンアメリカ, 10) 旧ソ連・東欧

また、NE 21 モデルでは対策技術の評価を目的としているため、将来の潜在的なエネルギー需要(省エネルギーについては後述)は予測することはせずに予めシナリオとして与える。標準シナリオとしては、CO₂問題を議論する際にしばしば引用されるIPCCによるシナリオ (IS 92 a) を採用した。

なお、原子力は、現状のNE 21 モデルでは最適化の対象とはせず、地域別時点別の将来シナリオとして与えている。標準ケースでは、世界全体の原子力設備容量は2010年までに5億kWのレベルまで拡張し、その後は一定に保たれると想定した。

2.2 CO₂対策技術のモデル化

1) 省エネルギー

NE 21 モデルでは、最終需要部門を12部門(表2参照)に分割して省エネルギーの可能性評価を行なう。省エネルギーコストの記述の仕方は、一般的に、個別技術の投資コストを積み上げるボトムアップ方式と、価格弾性値の概念を用いたトップダウン方式とがある。NE 21 はエネルギーの供給サイドは、ボトムアップ型だが、省エネについては入手可能なデータに制約があ

表2 エネルギー最終需要部門と利用可能な2次エネルギー

	ガソリン	軽油	重油	石炭	天然ガス	電力	エネルギー	水素	バイオマス
ガソリン需要	○	—	—	—	—	—	—	—	—
ジェット燃料需要	—	○	—	—	—	—	—	○	—
運輸用軽質油需要	—	○	—	—	—	—	—	—	—
産業用軽質油需要	—	○	—	—	—	○	○	—	—
産業用重質油需要	—	○	○	—	—	○	○	—	—
産業用ガス需要	—	—	—	○	○	○	○	○	—
石炭需要(熱源)	—	○	○	○	○	—	—	○	○
鉄鋼用石炭需要	—	—	—	○	—	—	—	—	—
産業用電力需要	—	—	—	—	—	○	—	—	—
民生用軽質油需要	—	○	—	—	—	○	○	—	—
民生用ガス需要	—	—	—	○	○	○	○	—	—
民生用電力需要	—	—	—	—	—	○	—	—	—

ることから、価格弾性値によるトップダウン方式を採用している。省エネルギーコストは、逆需要関数を積分した図1の斜線部の面積として求める。この斜線部の面積は、厚生経済学の分野では消費者効用の損失として解釈されるものである。入力として与える潜在的エネルギー需要(D₀)は、それに対応する価格P₀とワンセットで与えることになる。

2) 燃料転換

化石燃料(石炭、石油、天然ガスなど)については地域毎に、資源枯渇に伴うコスト上昇をモデルで表現した。CO₂制約がなければコスト上昇の少ない石炭が有利だが、制約が課せられると、発熱量あたりのCO₂発生量の少ない天然ガスが有利になる。

原子力以外の非化石エネルギーとしては、実用的に利用可能な資源量の大きさを基準に、水力、地熱、森林バイオマス、太陽光、風力の5種類の自然エネルギーを考慮することにした。これらの自然エネルギーの資源量とコストの推定値にはまだ多くの不確実性があるが、最新の知見にもとづき設定した。なお、太陽光発電と風力発電は出力が間欠的になることから、電力系統の供給信頼性を保つために、それぞれの設備容量を系統総容量の一定比率以下に制限されるとした。しかし、水電気分解プラントや電力貯蔵装置へ供給される電力に対してはこの制約条件は適用されない。

3) CO₂の分離・回収・処分・リサイクル

NE 21 モデルではCO₂分離回収方法として、発電所排ガスからの化学吸収法と、ガス化プラントおよび石炭ガス化複合発電プラントからの物理吸収法とを考慮している。回収されたCO₂の処分については、1) 石油の増進回収用に油田に圧入する方法、2) 枯渇した天然ガス田に圧入する方法、3) 地下の帯水層に圧入

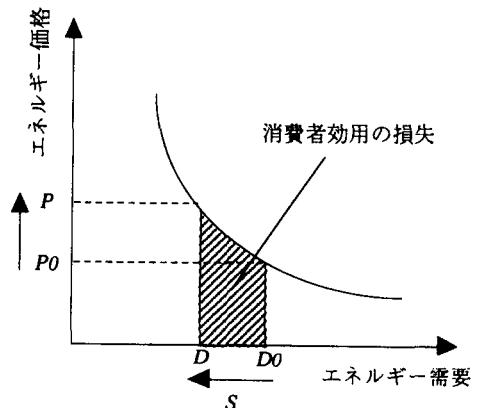


図1 逆需要曲線と省エネルギーコスト斜線部が消費者効用の損失である

する方法、および4) 海洋処分(海水への溶解と深海底での貯留がありうるが後者)を想定した。なお、回収されたCO₂の一部をメタノール合成にリサイクル利用する可能性も考慮している。

4) その他の対策技術

地球的規模で最適なエネルギーシステムの構築を目指すとなると、地域間のエネルギー輸送技術として従来の化石燃料輸送に加え、水素、メタノールや電力、そして回収されたCO₂の長距離輸送が重要な役割を演ずると考えられるのでこれらを考慮した。

また、石炭や石油などの燃料から、水素、メタン、メタノールなどの単位発熱量当たりの炭素放出量の少ない燃料を生成すれば、さらなるCO₂排出量の削減が期待できる。もちろん水素などを製造する過程において発生するCO₂の回収が前提となる。ここでは、各燃料からH₂、CO、CO₂を主成分とする燃料ガスを生成し、その後シフト反応により水素、メタン、メタノールを製造する図2のような統合型エネルギーシステムを想定した。

2.3 エネルギーフローとモデルの大きさ

以上概略を説明したNE 21のモデル構造をエネルギーフローとして示すと図3のようになる。図3は1地域を示しておりこれが10個結合して全体モデルとなる。

NE 21モデルの1時点(10年ステップ)あたりの変数の数は約3200個、制約条件式は約1400本である。2050年までの計算ではこの最適化計算を6回逐次行なうことになる。制約条件は図3に示すエネルギーフ

ローのバランスの他、地域間の取引のバランス、時点間の設備更新、世界全体としての資源需給などから構成される。もちろんCO₂排出量に制約を課すこともできる。

2.4 NE 21モデルの発展方向

1) 全時間範囲に関する最適化(NE 21の動学化)

NE 21モデルは複数時点の動学的な最適化は行っていない。CO₂対策の究極の目的は、各時点毎に排出量を制約することではなく、排出量の累積の結果である大気中の濃度を安定化することである。この究極の目的を表現するには動学的な最適化が必要になる。また同時に解析対象期間も延長することが望ましい。この方向での改良の試みはすでに着手されているが、モデルが大規模化するため、コスト関数を線形化してLPによって行なわれている。動学化することにより、CO₂濃度規制の不確実性が最適解に与える影響を確率的な規制シナリオ(分岐パスで表現)を与えることで解析できるようになる。また、原子力におけるプルトニウム利用など、複数時点間に制約が課せられるような対策の最適戦略を求めることもできる。

2) 対策オプションの追加

NE 21モデルでは他のモデルと比較して数多くのCO₂対策技術が扱われているが、それでも追加すべき重要なオプションがいくつか残っている。1つは現在では外生条件として与えている原子力であり、もう1つは植林などによるCO₂吸収源の拡大である。モデルの規模を適切な範囲に抑えつつ重要な対策についてはモデルでの扱いを詳細化していく必要がある。

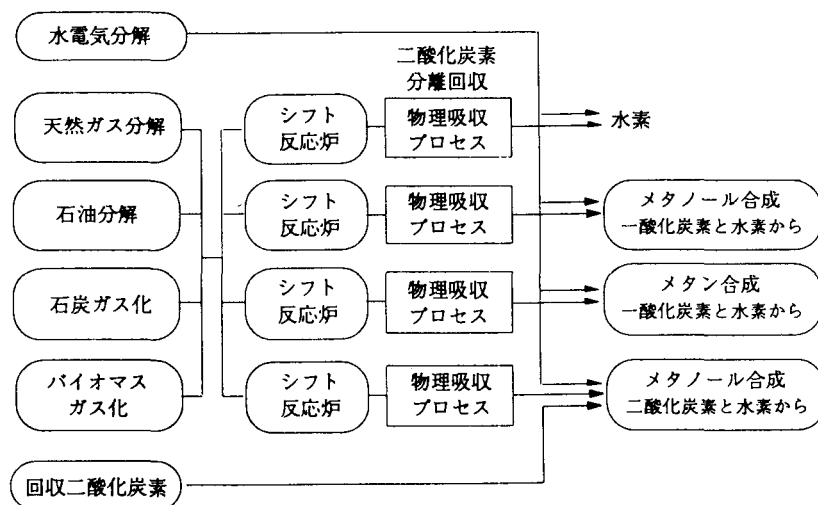


図2 水平統合型エネルギーシステムの概要図

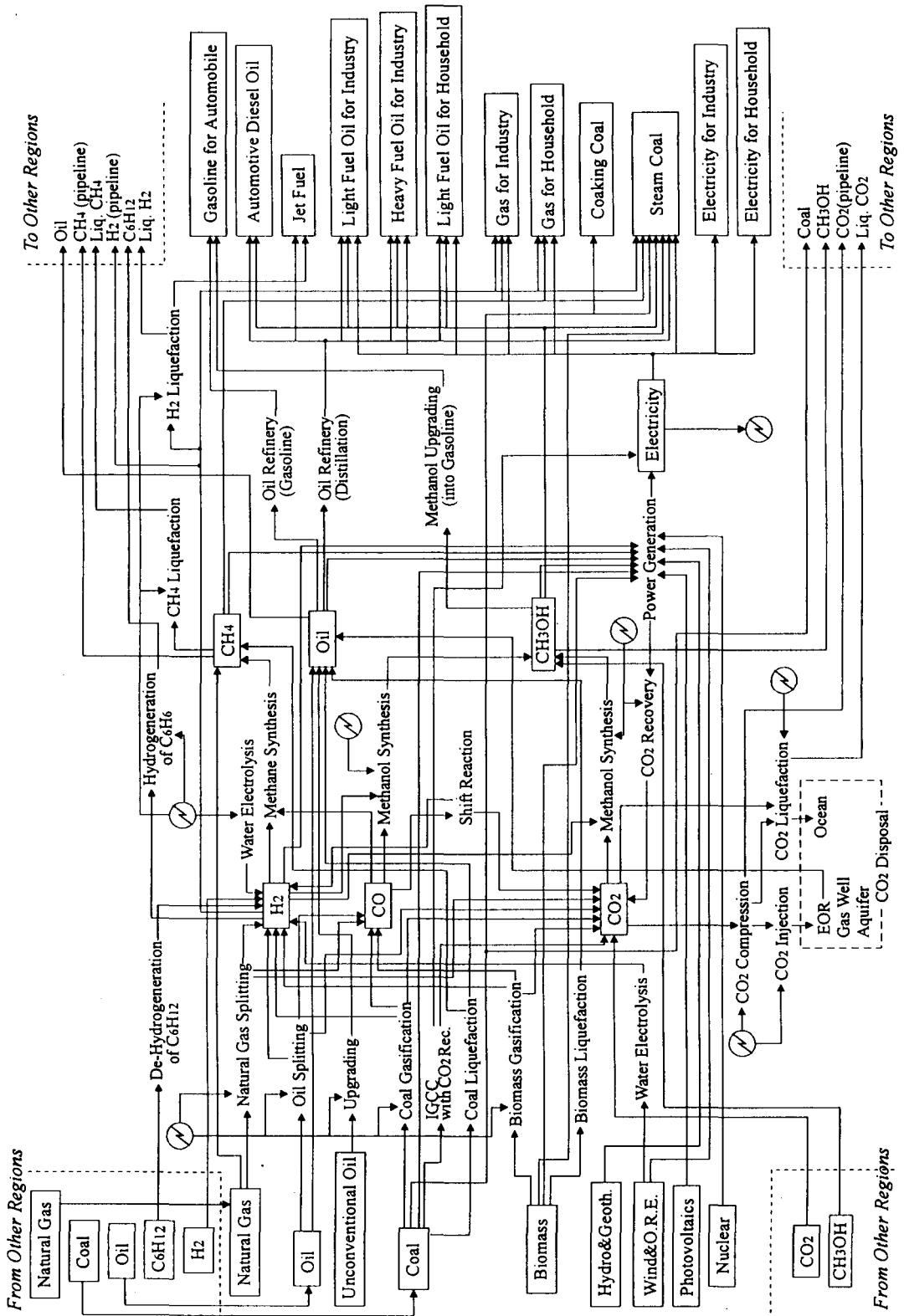


図3 NE21モデルエネルギーフロー

3) モデル境界の拡大

NE 21 モデルでは潜在的エネルギー需要は与件であり、その背景にある経済活動やライフスタイルはモデルの範囲外にある。しかし、最適化によって選択されるエネルギーシステムの構成の変化が、経済活動の規模や産業構造を変更し、その結果、所与としたエネルギー需要を変化させるというフィードバックループが存在する。このようなエネルギー・経済相互作用の解析は、エネルギーモデルの重要なテーマでもあった。さらには、DICE モデルのように、CO₂濃度増加による気候変化の損害コストを評価関数に組み込む統合モデルへの展開も考えられる。もちろん、無闇なモデルの巨大化は解析の焦点を失わせることになる。技術評価という目的の範囲内でのモデル境界の拡大のためには、対象とする技術オプションを絞り込み、NE 21 のエネルギーシステム構造を大幅に簡略化する必要がある。

3. 今までに NE 21 モデルが明らかにしたこと

NE 21 モデルによる CO₂対策技術の評価については、藤井康正氏との共著「グローバルエネルギー戦略」（電力新報社、1995 年）に詳しく書いたもので、ここでは要点のみを挙げておく。

「グローバルエネルギー戦略」で示したモデル解析では、まず与えられた条件下でエネルギーシステムの費用を最小化する「通常政策ケース」を計算した。ついで、CO₂の排出量に制約を課し、すべての年の CO₂排出量を 1990 年水準に安定化する「排出量安定化政策ケース」と大気中の CO₂濃度を 420 ppm に安定化する「大気中濃度安定化政策ケース」を計算した。さらに感度解析として、原子力が 2050 年には 1 次エネルギーの約 2 割を占めるまでに拡大すると仮定した「原子力拡大ケース」などを計算した。

3.1 通常政策ケースでは石炭が選択される

経済性の基準でエネルギーの将来を選択すれば、やはり低廉で資源賦存量の多い石炭が選択される。図 4 の最も上のグラフに示されているように、通常政策ケースでは、石炭の供給量は現在の 3 倍以上に増大し、2050 年の世界の 1 次エネルギー供給の約半分を占めることになる。しかし、このようなエネルギーの選択の結果、2050 年の CO₂排出量は 1990 年の 2 倍以上、炭素換算 125 億トンに増大する。そして、2050 年の大気中の CO₂濃度は 500 ppm を越えると予想される。これ

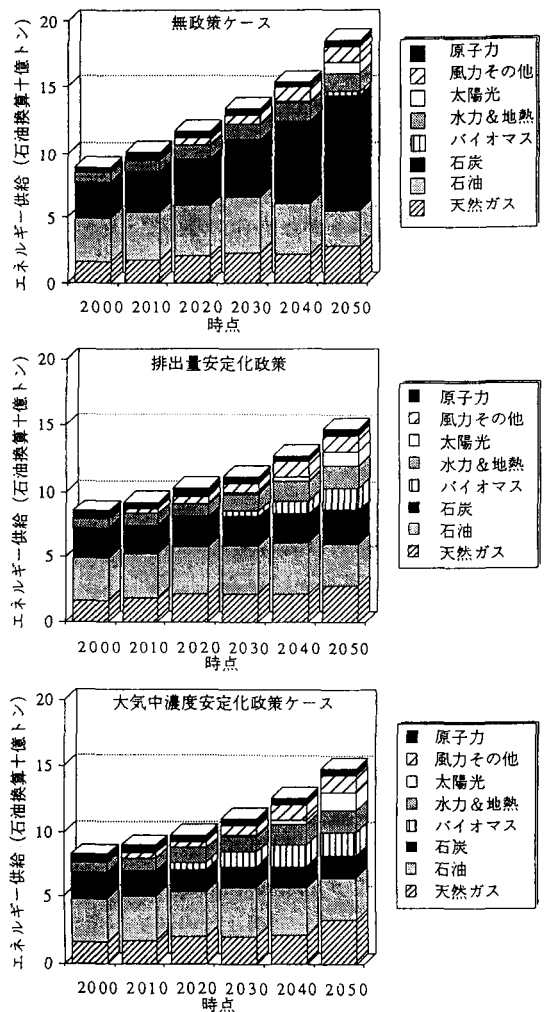


図 4 世界の 1 次エネルギーの生産の推移

では地球温暖化は避けられない。

3.2 エネルギーの多様化で実現できる CO₂抑制

CO₂排出制約を課すと、まず省エネで需要が 2 割程度減る。1 次エネルギー供給では、図 4 の下部の 2 つのグラフに示されているように、通常政策ケースと比べて石炭が激減する。通常政策ケースと対照的に、石炭の供給量は、排出量安定化政策ケースの場合 2050 年までほぼ横ばい、大気中濃度安定化政策ケースの場合には減少している。

非化石エネルギーについては、最も大きな変化はバイオマスの大量導入である。太陽電池も若干増えて、大気中濃度安定化政策ケースの場合 2050 年には原子力も含めた非化石エネルギーが 1 次エネルギー供給の約半分になる。

図から端的に分かるように、CO₂排出量制約を課すと各エネルギー資源の分担率が均等化され、1次エネルギー構成は多様化する。つまり、CO₂抑制はどれか1つのエネルギーの選択によって実現されるのではなく、多くのエネルギーの組合せによって実現される。

3.3 大きな役割を果たすCO₂の回収・処分

NE 21 モデルの特徴の1つはCO₂の回収・処分技術を本格的に取り扱っていることである。その結果、CO₂排出制約を課したケースでは、相当規模のCO₂回収・処分が選択されることが分かった。2050年には、排出量安定化政策ケースでは炭素換算10億トン程度、大気中濃度安定化政策ケースでは20億トン以上が回収・処分されることが示されている。これは大気中濃度安定化政策ケースの場合、CO₂発生量の40%近くが回収・処分されることを意味している。

3.4 原子力の役割

原子力の役割については、感度解析として原子力拡大ケースを設定して行なった。このケースでは、原子力は発電部門において経済的にほぼ上限と思われる水準(先進国で全電力の65%、途上国で45%)まで導入されている。この場合、2050年の世界の原子力規模は現在の約10倍となり、CO₂排出量制約を課したケースでは、石油を抜いてシェア第1位のエネルギー源になる。原子力拡大の効果は、当然であるが発電部門で大きく、CO₂排出抑制のために必要になる発電コストの増分を、2050年では標準ケースの場合の半分以下にすることができる。モデル解析結果は、原子力を拡大し

なくてもCO₂の抑制はできるが、原子力が拡大すればCO₂抑制にかかるコストを大幅に下げることができることを定量的に示している。

3.5 効率と公平のジレンマ

NE 21 モデルでは、世界全体として最も費用の少ないCO₂削減方策を見つけることができる。CO₂排出制約は世界全体に対する総量として課せられているので、モデルの最適解は単に削減の手段を選ぶだけでなく、各地域ごとの削減分担をも決める。

モデル解析の結果は、図5に示すように、発展途上国により大きな削減率を課すことが世界全体として効率的であることを示している。つまり、世界的に効率的なCO₂削減は、先進国により大きな負担を求める公平性への要求と矛盾する。公平性は今回のモデル解析の目的を越えた問題であるが、地球温暖化対策を考える上で避けては通れない。負担の公平性と削減の効率性と両立させるために、先進国と途上国が協定を結んでCO₂削減を行なう「共同実施」などの方策が現実検討中である。

3.6 シャドープライスとしてのCO₂削減コスト

NE 21 モデルでは、CO₂排出量を制約条件として、費用最小のエネルギーシステムを求める。CO₂制約のシャドープライスは、CO₂抑制シナリオを実現するために必要な理論的な炭素税率を示している。モデル解析結果によると、2050年のシャドープライスは排出量安定化の場合で炭素トンあたり約200ドル、濃度安定化の場合には約600ドルである。このように、NE 21

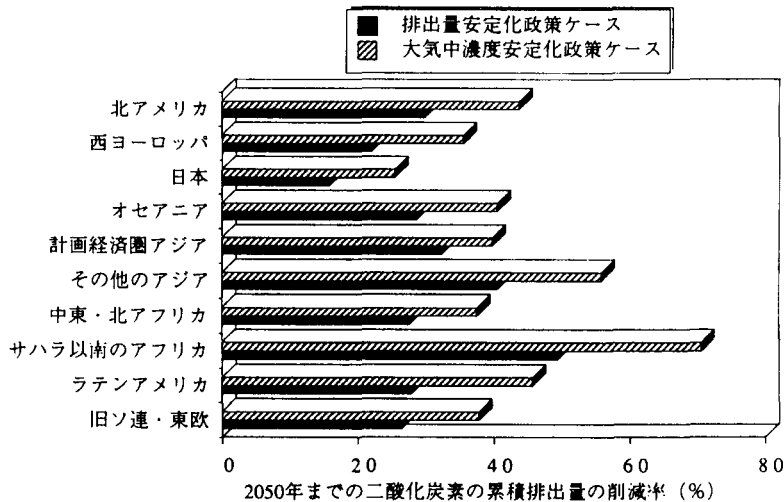


図5 世界地域別の二酸化炭素累積排出量の削減率

モデルをさまざまな条件下で必要となる炭素税率を求める道具として使うことも可能である。

3.7 対策の組合せで実現できる CO₂抑制

図6にCO₂削減効果を、1)最終需要部門の省エネ(効率改善とともに節約を含む)、2)エネルギー転換部門の効率化、3)燃料転換、4)CO₂の回収・処分に分けて表示した。同図から分かるように、それぞれ大きさにはある程度の違いはあるものの、どれか特定のタイプの対策による削減効果が突出して大きいわけではない。これは、前回の定性的な検討でも指摘したように、エネルギーシステムから排出されるCO₂を大幅に削減するためには、省エネの推進からCO₂の回収処分にいたるまで、すべてのタイプの方策を組み合わせた複合的なアプローチを取ることが望ましいことを示している。

書評欄の充実に向けてのお願い

編集委員会ではOR学会誌を知的情報源として充実させてゆくために、書評欄の一層の充実を目指しています。そのために出版社から学会に寄せられたORに関する書物を誌面で紹介いたします。

読者は本の紹介欄をご覧いただき「この本を読みたい」という希望があれば、郵便またはファックスにて担当の栗田宛に氏名、所属、連絡先、電話、専門分野をご連絡ください。折り返し本をお送りいたします。もしその本にOR誌の読者に紹介すべき見所がある、と判断なさった場合はその書評をお寄せください。加えて読者諸氏による書評の投稿も歓迎します。皆さんがお手元にお持ちの本の中からOR誌にふさわしい書評をお寄せください。学会誌を活性化するための具体的な試みです。なにとぞご協力をお願いします。

なお、誌面の都合で寄せられた書評のすべてを掲載することはできないかもしれませんし、書き直しをお願いすることがあるやもしれません。どうぞご高配をお願いします。

「オペレーションズ・リサーチ」編集委員会

担当 栗田治 (〒223 横浜市港北区日吉町3-14-1
慶應義塾大学理工学部管理工学科
FAX 045-563-5979 (学科事務局))

今月の新着本(書評希望者は栗田まで)

島田達巳『アウトソーシング戦略』日科技連出版社
花岡 菫『情報システム部門の役割と人材育成』日科技連出版社
東岡卓三『TQCを活用した新製品開発』日科技連出版社

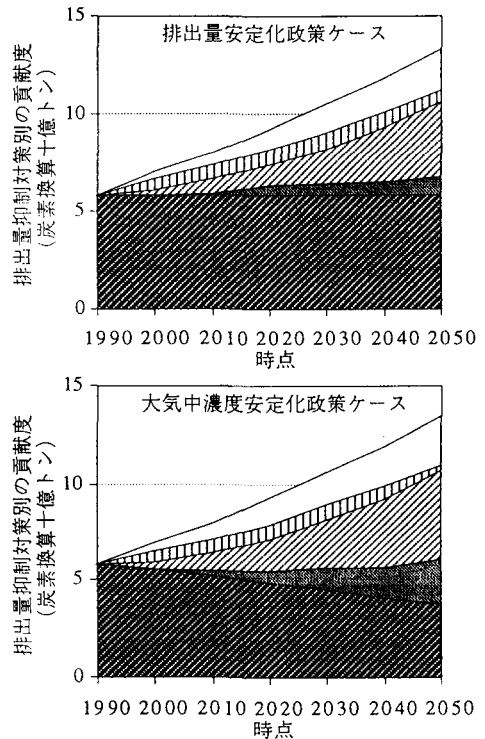
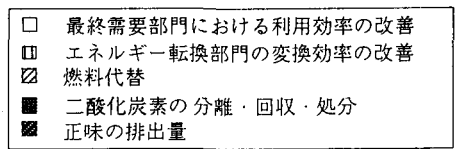


図6 対策技術別の貢献度

会合記録

8月4日(金) 表彰委員会

11名

おわびと訂正

40巻9号におきまして以下の誤植がございました。

490ページ 著者のうち

「よしながりえ」は「よしながえり」の誤り。

494ページ 著者のうち

「森口剛」は「守口剛」の誤り。

また印刷上の手違いにより、490ページのタイトル部分が切り貼りになってしまいました。

慎んでおわびいたします。今後このようなことが起きないように勤める所存でございます。

「オペレーションズ・リサーチ」誌編集委員会