

New ESRI Working Paper Series No.5

温暖化対策分析用 CGE モデルへの新技術・新エネルギーの導入方法

by

武田史郎、川崎泰史、伴 金美

December 2007



内閣府経済社会総合研究所  
Economic and Social Research Institute  
Cabinet Office  
Tokyo, Japan

新E S R Iワーキング・ペーパー・シリーズは、内閣府経済社会総合研究所の研究者および外部研究者によってとりまとめられた研究試論です。学界、研究機関等の関係する方々から幅広くコメントを頂き、今後の研究に役立てることを意図して発表しております。

論文は、すべて研究者個人の責任で執筆されており、内閣府経済社会総合研究所の見解を示すものではありません。

なお、研究試論という性格上今後の修正が予定されるものであり、当研究所及び著者からの事前の許可なく論文を引用・転載することを禁止いたします。

(連絡先)総務部総務課 03-3581-0919 (直通)

# 『温暖化対策分析用 CGE モデルへの新技術・新エネルギーの導入方法』\*

武田史郎\*\*

川崎泰史†

伴金美‡

## 1. 導入

地球温暖化問題の重要性が高まるにつれ、経済学においても地球温暖化防止策、特に二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)の排出規制の分析が重要なテーマと認識されるようになった。その種の分析では、応用一般均衡モデル(CGEモデル)によるシミュレーション分析が主要な分析方法の一つとなっており、様々なCO<sub>2</sub>排出規制の分析がCGEモデルによっておこなわれている<sup>1</sup>。CO<sub>2</sub>排出規制を分析するためのCGEモデルでは、エネルギーをどのように扱うかという点が特に重要となるが、その一つとして「新しいエネルギー」、また「エネルギーに関する新しい技術」をどのようにモデルに取り入れるかという問題がある。5年～10年程度の視野での分析では、新エネルギー、新技術を考慮しなくてもそれでも支障はないかもしれないが、温暖化の分析では50年以上の長期の分析がしばしば必要となる。そのような長期の分析では新エネルギー、新技術を考慮しているかどうかによって分析結果が大幅に変わってくる可能性が高い。この意味でCGEモデルに新エネルギー、新技術をどのように取り入れるかは非常に重要なテーマである。

本稿の目的は二つある。まず一つは、CGEモデルを利用した既存の温暖化対策分析において新エネルギー、新技術がどのように扱われているかを概観することである。既存分析でのアプローチを比較するとともに、その問題点を把握する。第二の目的は、新エネルギー、新技術を考慮したCO<sub>2</sub>の排出規制分析用CGEモデルのプロトタイプを構築し、それを利用して新エネルギー、新技術の導入がCO<sub>2</sub>排出規制の効果にどのような影響を与えるかを明らかにすることである。また、シミュレーション結果を提示するだけでなく、本稿の成果を他の研究者が利用しやすいように、(GAMSで書かれた)シミュレーションのプログラムの公開もおこなう。

本稿は以下のように構成される。まず、次節で本稿での「新エネルギー」、「新技術」の定義・意味について明確にしておく。第3節では、既存のCGE分析において「新エネルギー」、「新技術」がどのように扱われているかを見る。第4節では、日本経済を対象とした既存の排出規制分析用モデルに新エネルギー、新技術を組み込んだモデルを構築する。さらに、そのモデルを利用し、新エネルギー、新技術を考慮することで、排出規制の効果がどのような影響を受けるのかを分析する。最後に、今後の研究課題について触れることにする。

## 2. 新技術・新エネルギー

### 2.1. 新エネルギー

---

\* 本稿を作成するにあたって、黒田昌裕氏(ESRI)、広瀬哲樹氏(ESRI)をはじめとする、ESRI環境モデルプロジェクト、ESRIセミナーの参加者の方々から有益なコメントをいただいた。記して感謝したい。なお、本稿に残された誤りはいうまでもなく筆者の責に帰するものである。

\*\* 関東学園大学経済学部：<zbc08106@park.zero.ad.jp>

† 内閣府経済社会総合研究所

‡ 大阪大学大学院経済学研究科

<sup>1</sup> 例えば、日本におけるCO<sub>2</sub>の排出規制を分析したものとして、Takeda(2007)、川崎・飯島(2007)等がある。

初めに、本稿の分析対象とする「新エネルギー」、「新技術」が具体的にどのようなものを指すのかということ、及びその温暖化対策、CGE 分析との関連性について確認しておきたい。まず、新エネルギーであるが、一般には現在主流のエネルギー源である化石燃料、原子力、水力の代替物となるもので、かつ現在のところ開発・普及の途上にある新しいエネルギーのことを意味する。ただし、厳密な定義が決められている用語ではないので、文脈によって若干異なった定義で利用されることもある。例えば、日本の「新エネルギー利用等の促進に関する特別措置法」(以下、「新エネ法」)は、「新エネルギー」を「技術的に実用化段階に達しつつあるが、経済性の面での制約から普及が十分でないもので、石油代替エネルギーの導入を図るために特に必要なもの」と定義し、次のようなエネルギーを指定している。すなわち、供給サイドの新エネルギーとしては、太陽光発電、風力発電、廃棄物発電、バイオマスエネルギー(発電、熱利用、燃料製造)、太陽熱利用、廃棄物熱利用、廃棄物燃料製造、温度差エネルギー、雪氷熱利用であり、需要サイドの新エネルギー(新しい利用形態)としては、燃料電池、天然ガスコージェネレーション、クリーンエネルギー自動車の3つである。

「石油代替エネルギー」という用語が示唆するように、新エネ法の定義では、現在の日本における主要なエネルギー源である「石油の代替物」となりうるという性質が重視されている。ただし、「経済性の面での制約から普及が進展しておらず」という条件が付くので、石油の代替物ではあっても水力、原子力は(既に普及しているため)新エネルギーとは分類されない。また、「技術的に実用化段階に達しつつある」という条件もあるので、現時点では実用化には至っていないエネルギー(例えば、まだ研究開発段階にある波力発電や海洋温度差発電)は含まない定義となっている。日本で新エネルギーと言った場合、この新エネ法で指定されたエネルギーのことを指していることが多いが、上の説明が示すように、この定義は一般の定義よりも若干範囲が狭いので注意が必要である。実際、新エネ法の定義には当てはまらないもの、あるいは新エネ法では指定されていないものでも、新エネルギーとして高い注目を浴びているものはある。例えば、オイルサンド、オイルシェール、メタンハイドレートである<sup>2</sup>。

オイルサンド、オイルシェールは在来型の原油に代わる石油資源であるが、特にオイルシェールは、1.埋蔵量が石油の数倍と言われている、2.偏在する石油とは異なり世界各地に分散して存在しているという二つの理由から、大きな期待を持たれているエネルギーである。同様に、メタンハイドレートも在来型天然ガスの何倍もの資源量が世界各地に存在していることから、その研究が進められている。メタンハイドレートは日本の周辺海域にも大量に存在するので、日本にとっても特に重要な意味を持ちうる新エネルギーである。

以上のように、新エネルギーとみなされるものは多々存在するが、エネルギーによってその性質は大きく異なる。エネルギーを比較するには、資源量、埋蔵量、再生可能性、経済性等様々な基準があるが、温暖化問題という観点からは、CO<sub>2</sub>を排出するエネルギーかどうか(つまり、化石燃料かどうか)という点が特に重要である。上に挙げた新エネルギーでは、太陽光発電、風力発電、バイオマスエネルギー等は、その生産・利用からCO<sub>2</sub>を排出しない(あるいは排出量が極めて少ない)が、オイルサンド、オイルシェール、メタンハイドレートは在来型の化石燃料と同様にその利用からCO<sub>2</sub>を排出する。在来型の化石燃料から新エネルギーに代替が進んだとしても、後者のタイプの新エネルギーへの代替の場合には、石油の枯渇という問題への解決には繋がるかもしれないが、温暖化の対策としての意味合いは小さい。このように、新エネルギーの導入が進んだからといって、温暖化の防止に繋がるとは限らないことに注意する必要がある。

また、新エネルギーを定義する際に、普及度が一つの基準となったが、同じエネルギーでもその普及の度合いは地域によって大きい差があることにも注意する必要がある。すなわち、ある地域では全く普及しておらず文字通りの新エネルギーと言えるものが、別の地域ではすでに在来型

<sup>2</sup> これらのエネルギーについては、例えば化学工学会(編)(2004)が詳しい。

のエネルギーと同等の（もしくは同等に近い）レベルにまで普及している場合があるということである。例えば、バイオエタノールというエネルギーは日本ではまだほとんど普及していないが、ブラジルではガソリンに代わる自動車のエネルギーとしてかなり前から広範囲に利用されている。また、風力発電も、日本では総発電量の 1%にも満たないレベルでしかないが、デンマークでは総発電量の 10%以上のシェアを占める段階まで導入が進んでいる<sup>3</sup>。以上のように、ある国ではまだ全く普及していないエネルギーが、別の国では広く普及しているケースもあるので、単純に一地域における普及度だけで新エネルギーを分類してしまうのが問題となる場合もありうる。

普及度という観点は、CGE モデルへの新エネルギーの導入の際にも重要なポイントとなる。CGE モデルでは、生産関数や効用関数（のパラメータ）を特定化する際に、ベンチマークデータを基にカリブレーションするという方法をとることが多い。新エネルギーが十分に普及しているのなら、ベンチマークデータにそのエネルギーの生産・投入・消費額（量）のデータが含まれることになる。よって、通常の財・部門と同じようにその生産関数、効用関数等をカリブレーションすることができる。しかし、十分に普及していないためベンチマークデータにそのエネルギーのデータが反映されていない場合には、生産関数、効用関数をベンチマークデータでカリブレーションするという手法が利用できなくなる。その場合、別の方法で生産関数、効用関数を特定化する必要がでてくる。以上のように、エネルギーの普及度は、CGE モデルにおける生産関数、効用関数の特定化の方法に関わってくる。この問題については、第 3.2 節の EPPA モデルの部分と第 4 節の本稿独自の分析例の部分でも少し論じている。

ここまで新エネルギーを論じてきたが、在来型エネルギーが重要ではないことではない。確かに、在来型のエネルギーには限界、問題点が多々存在しており、将来性という点では新エネルギーのほうが高い評価を受けるのは当然かもしれない。しかし、温暖化対策という側面で評価するのなら、必ずしも在来型のエネルギーが劣るわけではない。例えば、在来型エネルギーでも水力や原子力は CO<sub>2</sub> を排出しないという利点を持っており、化石燃料型の新エネルギー（例えば、オイルシェール、メタンハイドレート）を利用するよりも、水力、原子力等の在来型エネルギーへの転換を進めることのほうが、温暖化対策としてははるかに望ましい可能性が高い。また、温暖化対策分析用 CGE モデルの構築という観点でも、水力、原子力というエネルギーは依然重要なテーマである。というのは、これまでの CGE モデルが水力、原子力というエネルギーを適切に扱えているとは言えないからである。本来、どのエネルギー（火力、水力、原子力）を利用して発電をおこなうかで CO<sub>2</sub> 排出量は大きく変わってくる。従って、同じ電力であってもどのエネルギーを利用して発電をしたのかを区別できるような形で分析しなければ、正確な CO<sub>2</sub> 排出量を求めることはできない。しかし、既存の CGE モデルでは電力部門（発電部門）を単一の技術を持ったものとして一括して扱い、火力、水力、原子力による発電を区別していないことがほとんどである。電力部門は元々 CO<sub>2</sub> 排出量が多い傾向にあるので、その排出量を正確に捉えなければ、排出規制の効果を見誤る可能性は高い。よって、エネルギー自体の新規性は低いですが、水力、原子力は CGE モデル構築において依然重要なテーマであると言える。既存の分析では、EPPA モデル、Sue Wing (2006) 等が異なったエネルギーによる発電を区別した形の CGE モデルの構築を試みている。

## 2.2. 新技術

次に、本稿のもう一つの分析対象である「新技術」の議論に移ろう。まず指摘しておくべきことは、ここまで新技術を新エネルギーとは異なったもののような表現をしてきたが、実際には両者は密接に関連しているものであり、明確に区別することはできない、あるいは区別するのは適

<sup>3</sup>Danish Energy Authority(2006)によれば、2005 年のデンマークの総発電量 130,879TJ のうち風力発電による発電量は 23,810TJ であり、全体の約 18%を占めるレベルにまで達している。

切ではないということである。例えば、前節で新エネルギーの例として太陽光発電、風力発電を挙げたが、その普及はどれだけ高い効率、かつ低コストで太陽光、風力を電力に変えることができるかということ、すなわち太陽光・風力発電に関する技術水準に強く依存している。同様に、メタンハイドレートは現在のところほとんど利用されていないが、その大きな理由は地中に埋まるメタンハイドレートから低コストでメタンガスを取り出す技術がまだ開発されていないからである。以上の例が示すように、新エネルギーが普及するかどうかは、生産、採掘、利用に関する技術の発展に強く依存しており、その意味で新エネルギーと技術は互いに密接な関係を持っているのである。よって、前節の新エネルギーについての議論で、既に間接的には新技術という側面も考慮していると言うことができるが、以下ではこれまでの議論では取り上げられていない技術を幾つか付け加えておこう。

まず、これは第3.2節で紹介するEPPAモデルにおいて新しい発電技術として考慮されているものであるが、石炭ガス化複合発電(integrated gasification combined cycle、IGCC)や天然ガス複合発電(natural gas combined cycle)という新技術がある。前者は石炭をガスに変換した上で複合発電に利用するという技術であり、後者は天然ガスで複合発電をおこなうという技術である。どちらも従来の火力発電の方法よりも効率の高い発電を実現するための技術である。

さらに、エネルギーに関する技術とは若干異なるかもしれないが、温暖化対策で非常に高い注目を浴びている技術として炭素回収・貯留(carbon capture and storage、以下CCS)がある<sup>4</sup>。CCSは化石燃料の利用から排出されるCO<sub>2</sub>を分離・回収し、地中、海中に溜めておくことで大気から隔離する技術のことである。どの程度CO<sub>2</sub>を貯留できるかで、温暖化対策としてのCCSの有用性が大きく左右されるが、「CCSに関する特別報告書」(IPCC、2005)においてIPCCは、全世界の地中貯留のポテンシャルは約2兆CO<sub>2</sub>トン、海洋の貯留ポテンシャルは数兆CO<sub>2</sub>トンと推定している。地中貯留の量だけでも2004年の世界全体のCO<sub>2</sub>排出量265億CO<sub>2</sub>トンの75.5年分を貯留できることになるので、IPCCはCCSを有効な温暖化対策の一つと評価している。日本についても、地球環境産業技術研究機構(RITE)の試算によれば、地中貯留可能量は帯水層全体では約1,500億CO<sub>2</sub>トン、構造的帯水層の基礎試錐データのあるものに限っても52億CO<sub>2</sub>トンに及ぶので、有望な温暖化対策の一つとなりうる<sup>5</sup>。

CCSは、CO<sub>2</sub>の分離・回収、貯留場所への輸送、地中・海中への圧入、漏洩のモニタリングといった様々局面でコストがかかり、現在のところ他のCO<sub>2</sub>削減手段と比べてまだコスト面で劣っていることが多いが、技術進歩に伴い徐々に競争力は高まってきている。また、日本のような国にとってCCSは単なる温暖化対策でしかないが、化石燃料の産出国ではCCSを化石燃料の採掘と組み合わせることで、石油・ガスの生産を増加させることができるというメリットもあり、導入により積極的である<sup>6</sup>。既存のCGE分析では、第3.2節で紹介するEPPAモデルがこのCCSを考慮しているが、非常に有効な温暖化対策となる可能性を持つ技術であるので、第4節のシミュレーション分析でもCCSを取り上げている。

なお、エネルギーに関する技術については、需要サイド(消費サイド)に関わるものもある。例えば、利用側でエネルギーの効率を高めるような省エネルギー技術である。省エネルギー技術の動向がCO<sub>2</sub>排出規制の効果に強い影響を与える可能性は高く、排出規制の分析で考慮すべき要素であることは間違いないが、この種の技術(進歩)は、生産関数、効用関数内のパラメータを変化させることで、完全にではないが捉えることができる。例えば、 $t$ 期の生産量を $Q_t$ 、エネル

<sup>4</sup>同じような技術を指す用語として、carbon capture and sequestration (CCS)、carbon sequestration and storage (CSS)等があるが、ここではcarbon capture and storageで統一する。

<sup>5</sup>日本におけるCCSの動向は、中央環境審議会(2006)、二酸化炭素回収・貯留(CCS)研究会(2007)等が詳しい。

<sup>6</sup>油田、ガス田に回収されたCO<sub>2</sub>を注入することで石油、ガスの増産を図る技術を、石油増進回収(enhanced oil recovery、EOR)、ガス増進回収(enhanced gas recovery、EGR)という。

ギー財の投入量を  $E_t$ 、非エネルギー財の投入量を  $NE_t$  としたとき、以下のような生産関数  $f(\cdot)$  がよく利用される。

$$Q_t = f(NE_t, \alpha_t E_t)$$

このタイプの生産関数では、エネルギー投入量にかかる外生的な係数  $\alpha_t$  でエネルギー利用の効率性を表すことができる。 $\alpha_t$  はエネルギー価格の変化には依存しない、技術的な効率性を表すパラメータであるので、autonomous energy efficiency improvement (AEEI) パラメータとよばれる<sup>7</sup>。この AEEI パラメータを利用する形で、エネルギー利用の効率性の上昇を考慮することは既存の CO2 排出規制の CGE 分析でもよくおこなわれている<sup>8</sup>。その重要性は高いが、既に多くの分析で考慮されているものであるため、本稿では取り上げないことにする。なお、温暖化対策分析用モデルにおける技術進歩全般に関しては、Sue Wing and Popp (2006) のサーベイが詳しい<sup>9</sup>。

### 3. 既存研究

この節では、既存の CGE モデルにおける「新エネルギー」、「新技術」の扱われ方を概観する。既存の CGE モデルは数多く存在するが、ここでは OECD による GREEN モデルと MIT による EPPA モデルを取り上げる。GREEN モデルについては Lee et al. (1994)、Mensbrughe (1994)、EPPA モデルについては Paltsev et al. (2005) の説明を参考にしている。

#### 3.1. GREEN モデル

##### 3.1.1. GREEN モデルでのエネルギーの仮定

まず、GREEN モデルにおけるエネルギー、技術の扱い方を見てみよう。GREEN モデルでのエネルギーは表 1 に示されている。在来型エネルギー (conventional energy) としては「原油」、「石炭」、「天然ガス」、「石油製品」、「電力」の 5 つがある。これに加え、7 つのバックストップエネルギー (以下、BS エネルギー) を想定している<sup>10</sup>。BS エネルギーには、在来型化石燃料と同じように「CO2 を排出するもの (Carbon-based BS、CBS)」と、化石燃料とは異なり「CO2 を排出しないもの (Carbon-free BS、CFBS)」の二種類があると仮定されている。原油、石炭、天然ガスの 3 つに対しては CBS と CFBS が一つずつ存在すると仮定されているが、石油製品には BS エネルギーは存在しない。電力については、在来型化石燃料による発電以外に、Carbon-free の発電技術による電力が代替物として存在すると仮定されている。

GREEN におけるエネルギーの扱い方の一つの特徴は、在来型エネルギーと BS エネルギーが「不完全代替物」と仮定され、両者が CES 型関数を通じて統合されるという点である。GREEN モデル

<sup>7</sup> 文脈によっては、GDP 一単位当たりのエネルギー投入量のことを AEEI パラメータと定義することもあるが、CGE 分析ではここに現れるようなパラメータを AEEI パラメータと呼ぶことがほとんどである。

<sup>8</sup> 第 3 節で取り上げる GREEN モデル、EPPA モデルもこの AEEI パラメータの形でエネルギー効率性の上昇を考慮している。

<sup>9</sup> 例えば、R&D による内生的な技術進歩、エネルギー生産における Learning by doing よるコスト削減効果等、本稿では扱っていない様々なテーマが論じられている。

<sup>10</sup> GREEN モデルでは、新エネルギーではなくバックストップエネルギーという用語を使っているため、ここでもそちらの用語を使うが、特別な意味があるわけではなく、単に在来型エネルギーの代替物となる新しいエネルギーというような意味で利用している。

におけるエネルギー統合の構造は図 1 に表現されている。基準年（1985 年）には、BS エネルギーは供給・生産されておらず、在来型エネルギーしか生産・供給されていないと仮定されている。

その他の BS エネルギーについての仮定は表 2 に示されている。表の第一列の単位費用は各 BS エネルギーを生産するための単位費用を表している。CBS よりも CFBS のほうが単位費用は高いと仮定されている。二列目は TJ(テラジュール)あたりの単位費用である。炭素係数は TJ の CO<sub>2</sub> 排出量（炭素トン/TJ）、EOS は在来型エネルギー、CBS、CFBS の間の代替の弾力性の値である。最後のシェア（penetration share）は投入シェアを表している。CBS、CFBS の penetration share が 0.3 ずつということは、在来型エネルギー、CBS、CFBS がどれも同じ価格であったとき、それぞれへの支出シェアが 0.4、0.3、0.3 となるという意味である。この penetration share の値は外生的に決定されている。

### 3.1.2. GREEN モデルの問題点

GREEN モデルは比較的古いモデルにもかかわらず新エネルギーをかなり詳しく扱っているという意味で評価できるが、問題点もある。第一に、これはモデル自体の問題点というよりもモデルの解説書の不備と言ったほうが適切であるが、全般的に BS エネルギーの供給・生産についての説明が不十分であるという問題がある。例えば、Lee et al.(1994)、Mensbrugge (1994)では、「一定の MC で無限に供給される」という記述がある一方、「BS の生産では全ての投入物が固定比率で供給される」というように MC が可変、かつ供給が有限であることを示唆する記述もあり、BS エネルギーの生産・供給についてどのような仮定を置いているのかははっきりしない。

さらに、BS エネルギーが具体的にどのようなエネルギーなのかを明確にしていないという問題もある。BS エネルギーの例として、「太陽エネルギー」、「バイオマスエネルギー」、「核融合エネルギー」等が挙げられているが、あくまで例としての意味合いであり、それらを特に念頭においてモデルの作成、パラメータの決定をおこなっているわけではない。このように曖昧な想定しかしていないためか、原油、石炭、天然ガスに対する CBS、CFBS に全て同じ費用条件、penetration share を想定するという現実的とは言えない仮定を置いている。

もう一つの大きな問題点は、GREEN モデルでは BS エネルギーの導入時期が外生的に決定されるという仕組みになっているという点である。BS エネルギー（新エネルギー）の導入時期、つまり BS エネルギーがいつ導入されるかは、本来、技術、生産要素・投入物の価格、その他のエネルギーの価格、排出規制の状況等の様々な要素に依存して内生的に決まってくるものである。例えば、在来型化石燃料の価格の上昇が早ければ早いほど BS エネルギーの導入時期は早まるであろうし、CO<sub>2</sub> 排出規制が強くなればなるほどやはり BS エネルギー導入は早まるだろう。しかし、GREEN モデルでは BS エネルギーが導入される時期を分析者が外生的に決める仕組みになっているため、外的要因によって BS エネルギーの導入時期がどう変わるかというような分析はできない。

このように、BS エネルギーの導入時期が外生的に決定されるという仕組みになっているのは、在来型エネルギーと BS エネルギーを不完全代替とし、両者を CES 関数によって統合すると仮定しているためである（この点については Appendix 1 を参照）<sup>11</sup>。GREEN モデルの分析では、2010 年に BS エネルギーの導入が始まると仮定されている。

### 3.2. EPPA モデル

次に EPPA モデルを見よう。EPPA モデルは元々 GREEN モデルを発展させる形で開発されたモデル

<sup>11</sup> Sue Wing and Popp, 2006, p.23 も CES 型関数で在来型、新エネルギーを統合することの問題点を指摘している。



であるため、全般的に GREEN モデルよりも洗練されている。

### 3.2.1. EPPA モデルの特徴

EPPA モデルで扱われているエネルギーの種類は表 3 の通りである。在来型エネルギーは、GREEN と同様に、「原油」、「石炭」、「天然ガス」、「石油製品」という 4 つの化石燃料と「電力」の合計 5 つである。また、在来型技術のもとでは、電力は化石燃料、原子力、水力の 3 つのエネルギーによって発電されると仮定されている。第 2.1 節で指摘した通り、正確な CO2 排出量を計算するには、どのエネルギーで発電をおこなっているかを考慮する必要があるが、多くの CGE モデルではエネルギーの区別をおこなっていない。これに対し、EPPA モデルは化石燃料、原子力、水力による発電を区別して扱っている<sup>12</sup>。

在来型のエネルギー、技術に加え、新エネルギー、新技術が想定されているが、それには大きく分けて 2 つのタイプがある（表 3 参照）。第一のタイプは、化石燃料の代替物となるような新エネルギーである。これには 3 種類のエネルギーが想定されている。もう一つは、化石燃料、原子力、水力以外のエネルギーを利用する新しい発電技術である。このタイプの発電技術には 5 つが想定されている。GREEN モデルに比べ新エネルギー、新技術の種類は豊富で、しかも細かく特定化しているところに特徴がある。また、新しい発電技術に CCS を組み合わせているところも EPPA モデルの特徴である。

新エネルギー、新技術はどれも当初は導入されていないと仮定されている点は GREEN モデルと同じであるが、「風力・太陽光により発電された電力」を除き、「新エネルギー」、「新発電技術による電力」は、「在来型エネルギー」、「在来型の技術により発電された電力」と完全代替の関係にあると仮定している点は GREEN と異なっている。不完全代替と仮定していた GREEN モデルでは、新エネルギーの導入時期は外生的に決める必要があったが、完全代替と仮定している EPPA では内生的に新エネルギーの導入が決まる<sup>13</sup>。新エネルギー、新技術による発電は、全てその生産関数が特定化されており、しかもエネルギー、技術によって異なった形の生産関数が仮定されている。図 2 はその中のシェールオイルの生産関数を表している。シェールオイルは二段階の CES 型関数で生産される。生産に利用する投入物としては、他の財と同じように資本・労働、中間投入財を利用するが、それらに加え「シェールオイル用の資源」という特殊要素も利用すると仮定されている。

他の新エネルギー、発電ではまた違う生産関数が想定されているが、どれも様々な投入物を利用して生産されるので、新エネルギー、新技術による発電の単位生産コストは投入物の価格に依存して変化することになる。また、特殊要素を利用して生産がおこなわれると仮定しているものが多いため、新エネルギー、新技術による発電の生産量・供給量は、特殊要素の賦存量に強く依存するという性質を持つ。逆に言えば、特殊要素の賦存量によって新エネルギー・新技術発電の生産量のある程度コントロールできるような仕組みになっている。

### 3.2.2. 生産関数のパラメータの特定化

通常の CGE 分析では、生産関数内のパラメータは、ベンチマークデータを利用したカリブレーションによって特定化される。しかし、EPPA モデルでは、新エネルギー、新技術による発電はベ

<sup>12</sup> CGE 分析がベンチマークデータに利用する社会会計表 (SAM) では、電力部門は一括して扱われていることが多く、生産、投入データがエネルギー別に分けられているということは少ない。Sue Wing (2006b) はそのように一括してまとめられているデータをエネルギー別に分割する方法を提示している。

<sup>13</sup> 在来型エネルギーと新エネルギーの関係を完全代替とするか不完全代替にするかについては、Sue Wing and Popp (2006), p.5 でも論じられている。

ンチマークにおいて生産・供給されていないと仮定されているため、ベンチマークデータで生産関数を特定化するという方法が利用できない<sup>14</sup>。EPPA モデルではこれに対し、各投入物の「投入シェア」、および「マークアップファクター (markup factor)」を外生的に決定することで、生産関数を特定化している。各投入物の「投入シェア」とは、基準年における投入物価格を前提としたときの費用に占める各投入物への支出シェアのことである。また、「マークアップファクター」とは、基準年における投入物価格を前提としたとき、新エネルギーの単位費用が、在来型エネルギーの単位費用の何倍となるかを表す数値である。例えば、石炭ガス (Coal gas) のマークアップファクターは 3.5 と仮定されているが、これは基準年における投入物価格を前提としたとき、石炭ガス生産の単位費用は、在来型の天然ガスの単位費用の 3.5 倍ということを意味している。マークアップファクターに大きい数値を想定するほど、その新エネルギー・技術は導入されにくいことになる。表 4 は幾つかの新エネルギー、新技術による発電について EPPA モデルで仮定されているマークアップファクター、投入シェアの値を表している。マークアップファクターについては Appendix 2 も参照して欲しい。

#### 4. 分析例

この節では、既存の CGE モデルを参考にしつつ、新エネルギー、新技術を考慮した CGE モデルのプロトタイプを作成する。さらにそのプロトタイプを利用して、簡単なシミュレーションをおこない、新エネルギー、新技術を考慮することにより CO2 排出規制の効果がどの程度影響を受けるのかを分析する。ただし、モデルは試作品の段階で、パラメータ等についても多くのアドホックな仮定を置くため、シミュレーション結果を現実的な数値とみなすのは難しい。以下の計算結果はあくまで数値例的な意味しか持たないことに注意して欲しい。また、以下ではスペースの都合上、簡単な説明しかおこなっていないが、シミュレーションのプログラムが筆者から入手可能であるので、モデル、データの詳細はそちらを参照して欲しい。

##### 4.1. 利用するデータ・モデル

独自のデータ、CGE モデルを構築するという選択肢もあるが、川崎・飯島 (2007) が日本経済を対象とした CO2 排出規制分析用のデータ・モデルを構築し、しかもそのシミュレーションのコードを公開しているので、ここではそのデータ、モデルをベースとし、必要な修正を加えて利用することにする。モデル、データについての詳細は川崎・飯島 (2007) を参照して欲しいが、以下で簡単に説明をおこなう。

まず、データであるが、金額のデータは 2000 年の産業連関表データを、エネルギー消費量 (CO2 排出量) のデータは同じく 2000 年の産業連関表の物量表をベースにしている。想定する部門・財は表 5 の通りである。まず、部門は 36 部門である。各部門はそれぞれ一つの財を生産しているが、「鉱業 (化石燃料)」部門だけは「石炭」、「原油」、「天然ガス」の 3 つの財を結合生産しているので、財の数は 38 財となる。川崎・飯島のオリジナルのモデル・データでは、製油製品部門 (S08 部門) は 9 種類の石油製品を生産するという形になっているが、ここではモデルを単純化するため一つの財 (S08 財) に統合している。その結果、エネルギー財は次の 7 つとなる：石炭 (S031)、原油 (S032)、天然ガス (S033)、石油製品 (S08)、石炭製品 (S09)、電力 (S20)、ガス・熱供給 (S21)。これらの 7 つのエネルギーのうち電力 (S20) 以外のエネルギーはその利用・消費から CO2 が発生すると仮定される。

<sup>14</sup> 第 2 節で指摘した通り、新エネルギーは一般には普及度が小さいものを指すが、普及度はエネルギーの種類、地域によってかなり違っており、新エネルギーといってもかなり普及が進んでいるものもある。そのような場合には、普通のケースと同じようなカリブレーションが可能かもしれない。

各部門は図 3 で表される多段階の CES 型生産関数を持つ。まず、資本・労働が CES で統合され合成生産要素 (VA) となる。同時に燃焼用に利用されるエネルギー中間財が CES 型で統合され合成エネルギーとなる。両者がさらに統合され、VA・エネルギー合成財となる。最後にトップレベルでは、その他の中間財 (非燃焼用のエネルギー中間財を含む) と VA・エネルギー合成財がレオンチェフ型で投入され生産がおこなわれる。本来は、GREEN モデルや EPPA モデルのように多段階で (燃焼用の) エネルギー財の統合をおこなうのが望ましいが、ここでは単純化のため一段階で全てのエネルギー財を統合する形を仮定している<sup>15</sup>。エネルギー中間財を燃焼用のものと非燃焼用のものに区別しているのは本稿のモデルの独自の拡張で、川崎・飯島モデルではおこなわれていない<sup>16</sup>。また、産出側では、生産された財が CET 型 (constant elasticity of transformation 型) の関数に従い、国内供給と輸出供給に振り分けられると仮定している。

需要サイドに関してほぼ川崎・飯島モデルをそのまま踏襲しているが、効用関数を少し修正している。元のモデルでは、効用関数内の消費財の統合は一段階の CES 型でおこなわれているが、本稿では図 4 のようにエネルギー財の統合、非エネルギー財の統合をおこない、その上で両者を統合するという二段階の CES 型関数としている。効用が余暇に依存し、労働供給が内生的に決定されるという点は元モデルと同じである。投資・貯蓄一定の静学モデル、小国モデルという点も元モデルと変わらない。

その他の川崎・飯島モデルとの重要な相違点は CO2 排出量の計算方法である。オリジナルのモデルではエネルギーの用途別に分けて CO2 排出量を計算しているが、ここでは全ての用途で一括して CO2 排出量を計算している<sup>17</sup>。用途別に分けるほうが正確な排出量を計算できるので、川崎・飯島の方法を利用するのが本来望ましいが、変数の数が多くなるということと、新エネルギーの導入方法が複雑になるという欠点があるので、一括で計算するという方法に変更した。

CO2 排出規制としては、国内の排出権取引をともなう総量規制を想定する。シナリオとしては、まず新エネルギーも新技術もなにもない状況を考えるが、それに加え、在来型エネルギーの代替物となる新エネルギーが存在するケース、さらに CCS がおこなわれるケースを考慮する。以下、新エネルギー、CCS についての仮定を説明する。

#### 4.2. 新エネルギーについての仮定

7つの在来型エネルギー財に対し、一つずつ新エネルギーが存在すると仮定する。例えば、「在来型の石油製品」に対する代替物として、「新しい石油製品」が存在するという形である。電力を除いた 6つの在来型化石燃料はその消費・投入から CO2 を排出するが、在来型エネルギーと比較し新エネルギーではその CO2 排出量 (エネルギー単位当り CO2 排出量) が少ないと仮定する。これは排出権の購入のための支出は新エネルギーを利用したほうが少ないということを意味する。シミュレーションでは新エネルギーの排出係数は在来型エネルギーの 1/2 と仮定している。

GREEN モデルのように在来型と新エネルギーを不完全代替と仮定すると、新エネルギーの導入時期を外生的に決めなければいけないという問題点が生じた。そこで本稿では、EPPA モデルと同

<sup>15</sup> エネルギー財を一段階の CES 関数で統合するということは、全てのエネルギー財間の代替の大きさが等しいということになる。現実にはエネルギーのタイプによって代替の大きさは異なってくるはずであるので、この性質は望ましくない。

<sup>16</sup> 非燃焼用のエネルギーの多くは原材料として利用されていると考えられる。

<sup>17</sup> 川崎・飯島では、エネルギーの用途 (各部門の中間投入、消費、投資、政府支出) 別に

$$= \frac{\text{CO2排出量}}{\text{エネルギー投入額}}$$

という関係で CO2 の排出係数を求め、それを基に各用途からの CO2 排出量を計算しているが、本稿では、全ての用途で一括した形で CO2 の排出係数を求め、CO2 排出量も一括で計算している。

様に、新エネルギーと在来型エネルギーは利用者から見て完全代替であると仮定する<sup>18</sup>。これより、各エネルギーの「総供給」＝「在来型エネルギーの供給量」＋「新エネルギーの供給量」となる。完全代替であるので、利用者はより低い価格（コスト）で提供されるほうを利用することになる。この選択を図5で少し詳しく見てみよう。在来型エネルギー*i*の価格をPA(*i*)、排出権の価格をPCO2とすると、排出権への支払いも含んだ在来型エネルギー*i*の価格はPA(*i*)＋(*i*)PCO2となる。(i)は在来型エネルギー*i*の排出係数(一単位から排出されるCO2の排出量)である。同様に、新エネルギー*i*の価格をPNE(*i*)、新エネルギーの排出係数を<sup>NE</sup>(*i*)とすると、排出権への支払いも含んだ新エネルギー*i*の価格はPNE(*i*)＋<sup>NE</sup>(*i*)PCO2となる。新エネルギーのほうがCO2排出量は少ないという仮定より、<sup>NE</sup>(*i*) < (*i*)である。初期均衡では、排出規制は存在せず、かつ新エネルギーの生産コストが高い、つまりPNE(*i*)が高いため、

$$PA(i) + (i)PCO2 < PNE(i) + {}^{NE}(i)PCO2$$

が成立するので、在来型エネルギーが選択され、新エネルギーは供給・利用されない。それが、排出規制が強まり排出権価格PCO2が上昇してくるにつれ、排出権により多くの支払いをしなければならぬ在来型エネルギーの価格が急速に上昇し、その結果新エネルギーの競争力が高まり、供給が始まることになる<sup>19</sup>。なお、図5は電力を除いたエネルギーを表すので、在来型エネルギー、新エネルギーのどちらにも排出権への支払いがあるが、電力については利用・消費からCO2は排出されないの、排出権への支払はない。よって、排出権への支払を除いたPA(*i*)とPNE(*i*)の部分の比較で、在来型と新エネルギーの選択がおこなわれる。

ここでの新エネルギーは具体的な対応物があるわけではなく、あくまで仮想的なものでしかないことに注意して欲しい。EPPAモデルのように具体的に新エネルギーを特定化し、現実に沿った形で新エネルギーを考慮するのが望ましいのは言うまでもないが、それには新エネルギーについての詳細な技術的、経済的情報が必要になる。本稿の目的は、プロトタイプモデルを作成するということであるので、現実的に沿った形で新エネルギーを取り入れるというテーマは今後の課題とし、とりあえず仮想的な新エネルギーを考慮するにとどめる。仮想的なものにすぎないので、以下で説明する新エネルギーの生産では様々なアドホックな仮定を置いている。よって、後のシミュレーション結果はあくまで数値例の意味しか持たないことに注意して欲しい。

#### 4.2.1. 新エネルギーの生産

EPPAモデルでは、多くの新エネルギーは既存の投入物(資本・労働、中間投入物)＋特殊要素から生産されると仮定されていた。ここでもそれを踏襲し、新エネルギーは資本・労働と特殊要素である「資源」から生産されると仮定する。具体的には図6の二段階のCES型生産関数を仮定する。生産にエネルギー中間財を利用しないという仮定より、排出規制の下では利用面(需要面)だけではなく、生産面においても新エネルギーは有利になる。電力はその消費自体からはCO2を排出しないので、元々消費の際に排出権を購入する必要はない。しかし、従来の電力は大量の化石燃料を利用して生産されるということで、やはり排出規制は電力の生産を抑える方向に作用していた。一方、上の仮定より新技術による発電では化石燃料が利用されないの、電力に関しても新しい技術による電力のほうが排出規制の下では優位に立つことになる<sup>20</sup>。

<sup>18</sup> 厳密に言うと、新エネルギーは燃焼用に利用される在来型エネルギーの代替物であり、非燃焼用のエネルギー財の代替物としては利用できないと仮定されている。

<sup>19</sup> 両辺が等しい、つまり両者の価格が等しければ、在来型エネルギーと新エネルギーが同時に供給・利用され、さらに右辺の方が小さくなれば新エネルギーのみが供給・利用されることになる。

<sup>20</sup> 新しい発電技術は化石燃料を利用しない技術であるので、イメージとしては水力、原子力、風力、太陽光発電

#### 4.2.2. カリブレーション

EPPA モデルと同様に、新エネルギーはベンチマーク均衡では生産がおこなわれていないと仮定するので、その生産関数をベンチマークデータによってカリブレーションすることはできない。よって、その他の方法でパラメータを決定してやる必要があるが、ここでは EPPA モデルと同様の方法、つまり、マークアップファクター、投入シェアを外生的に特定化することでカリブレーションをおこなうという方法を採用した。とりあえずここでは全ての新エネルギーにおいてマークアップファクターは 4、資本・労働・特殊要素（資源）の投入シェアはそれぞれ 1/3 ずつと仮定している。

#### 5. CCS（炭素回収・貯留）

新エネルギーが存在するケースに加え、CCS がおこなわれるケースも考慮する。第 2.2 節で説明した通り、CCS は排出された CO<sub>2</sub> を分離・回収して、地中・海中に貯留しておく活動であり、有効な温暖化対策の一つと期待されている。CCS がおこなわれる状況では、CCS の分だけ大気中に放出される CO<sub>2</sub> の量が減少するので、排出権の発行量、CO<sub>2</sub> 排出量、CCS による CO<sub>2</sub> 回収量の間に以下の関係が成立する。

$$\text{排出権の発行量} = \text{CO}_2 \text{ 排出量} - \text{CCS による回収量}$$

これを書き直すと

$$\text{排出権の発行量} + \text{CCS による回収量} = \text{CO}_2 \text{ 排出量}$$

となる。この式が示すように、CCS による CO<sub>2</sub> 回収量は追加的な排出権の発行と同じような意味を持っている。よって、本稿のモデルでは CCS を「排出権の生産活動」として捉えている。

CCS についてもここでは仮想的なレベルで考えるにとどめることにし、単純化のため CCS 生産は新エネルギーと全く同じような扱いをしている。つまり、CCS は資本・労働と特殊要素である資源を利用し二段階の CES 型関数を通じて生産されると仮定する（図 7）。CCS についてもベンチマーク均衡ではおこなわれていないと仮定するので（現実にもそうであるが）、やはり生産関数のパラメータをベンチマークデータでカリブレーションすることはできない。このカリブレーションについても新エネルギーのケースと同じようなアプローチで対処している。

##### 5.1. シナリオ、シミュレーションの手順

シミュレーションは以下のような二段階の手順でおこなっている。

[1] まず、ベンチマーク均衡の状態から資本・労働を増加させ BAU 均衡を求める。

[2] その BAU 均衡に対し CO<sub>2</sub> の総量規制を課す。

つまり、ベンチマーク均衡の状態に直接排出規制を課すのではなく、一度資本・労働を変化させた BAU 均衡を求め、そこで排出規制を課すという手順をとる。これは川崎・飯島（2007）の手順をそのまま踏襲した。ベンチマーク均衡に直接排出規制を導入するのではなく、まず BAU 均衡を求めるのは、日本が排出規制を導入し始める時点（2008 年以降）の状態とデータのベンチマーク

---

等による発電である。

年（2000年）の状態との乖離を埋めるためである。

排出規制としては排出権取引をともなう総排出量規制を採用するが、CO2削減率は、最小の4%から4ポイントおきに最大で40%まで削減するという合計10段階の削減率を想定している。以上のような排出規制の効果を（C-1）新エネルギーもCCSもないケース、（C-2）新エネルギーが存在するケース、（C-3）CCSが存在するケースで分析している。

## 5.2. シミュレーション結果

それではシミュレーション結果を検討しよう。既に指摘した通り、新エネルギー、CCSについてはあくまで仮想的なものを考えているにすぎず、アドホックな部分が多い。従って、計算結果をそのまま現実的なものとして受け取ることにはできないことに注意して欲しい。

表7にC-1、C-2、C-3の3つのケースでの排出規制の効果が示されている。まず、C-1の削減率40%ケースでは、排出権の価格は19万9,800円/CO2トンという非常に高い水準に達している。この結果、効用、GDPはそれぞれBAU均衡の値より6.8%、8%減少するという結果になっている。排出権価格が非常に高くなり、効用、GDPの減少率がかなり大きいのは、削減率が高いということに加え、生産関数、効用関数内の代替の弾力性に比較的小さい値を想定していることが要因と考えられる。

次に、C-2のケースを見てみよう。排出権価格は削減率40%のケースで11万300円/CO2トンで、C-1よりはかなり低い水準にとどまっている。これは在来型エネルギーよりも排出係数が低い新エネルギーに代替が進み、排出権への需要が減少するからだと考えられる。このようにエネルギーの代替があるので、効用、GDPの減少率もC-1よりも小さく、それぞれ3.2%、4.5%にとどまっている。上で指摘した通り、この数値を現実的な数値として解釈することはできないが、新エネルギーを導入することで排出規制の効果が非常に強く影響を受ける可能性があるということがこの結果から読み取ることができる。

同じように、C-3を見てみよう。C-3の削減率40%のケースでは、排出権価格は16万3,400円/CO2トン、効用、GDPの減少率はそれぞれ5.1%、6.5%となっている。CCSがあることでやはり効果が大きく変わりうるということがわかる。C-3については、さらにCCSによるCO2の回収量と回収率（総排出量に占める回収された割合）を示してある。削減率40%のケースで、回収量は年間4,910万CO2トン、回収率は5.5%となっている。後に見るように、これらの数値はCCS生産についての仮定に強く依存している。

以上で、効用、GDP等の経済全体へ及ぶ効果はわかったが、新エネルギーの導入により何が起きているのかをより深く理解するため、C-2のケースを詳しく見てみよう。表8はC-2における新エネルギー供給、エネルギー価格、新エネルギーのシェアを表している。一番上の段は各新エネルギーの供給量の推移である（空白の欄はゼロを表す）。空欄であった部分に数値が入った時点で新エネルギーの供給が始まったことを意味する。二段目はエネルギー価格（排出権への支払いも含んだ価格）の推移である。網がかかっている部分は新エネルギーの供給がおこなわれている状況を表している。最下段は総エネルギー供給（＝在来型エネルギー＋新エネルギー）に占める新エネルギーのシェア（%）である。0より大きく100より小さい数値は在来型エネルギーと新エネルギーが共存している状態であり、100となっているところは全て新エネルギーに置き換わっている状態を表している。

供給量の推移から、新エネルギーがどのタイミングで供給され始めるか、言い換えるといつ新エネルギーが競争力を持ち始めるかを読み取ることができる。これもそのまま現実的な結果としては受け取ることにはできず、あくまで数値例にすぎないが、石炭（S031）、原油（S032）で新エネルギーへの代替が非常に早く起きるという結果になっている。

二段目のエネルギー価格の推移を見ると、上のようなタイミングで新エネルギーが導入されて

いる理由を推測することができる。例えば、石炭はBAU均衡では4,700円/トンという価格であったのが、新エネルギーが導入され始める削減率8%の時点では18,700円/トンにまで上昇している。つまり、石炭では元の水準の4倍程度に価格が上昇した時点で新エネルギーが導入され始めていることになる。同様に原油はBAU均衡では23,100円/klであるが、新エネルギーが導入され始める時点(削減率20%)では80,400円/klにまで上昇していることが確認できる。元の価格の約3.5倍となった時点である。

その他のエネルギーについてもBAU均衡の価格と新エネルギー導入時点での価格を比較してみると、(電力を除いて)だいたい価格が3倍から4倍程度の水準になった時点で新エネルギーが導入されはじめていることがわかる。このような結果になるのは、新エネルギーのマークアップファクターに4という共通の数値を仮定しているからだと考えられる<sup>21</sup>。

最後に、CCSが存在するケースで、CCS生産の特殊要素である「資源」の腑存量を変化させたケースを見てみよう。結果は表9にある。C-3の削減率40%では、CO<sub>2</sub>回収量は4,910万CO<sub>2</sub>トン/年、回収率は5.5%に過ぎなかった、資源を10倍にしたこのケースでは回収量は10倍に近い4億4,740万CO<sub>2</sub>トン/年、回収率は34.8%に上昇している。回収量が増加する結果、効用の減少率も5.1%であったのが、0.3%と非常に小さくなっている。この数値例からもCCS生産に関する仮定によって排出規制の効果が大きく変わってくることが確認できる。

## 6. 今後の課題

本稿では、新エネルギー、CCSを考慮したCGEモデルを構築し、CO<sub>2</sub>排出規制のシミュレーション分析をおこなった。分析によって、新エネルギー、CCSを考慮することで、排出規制の効果が大きく変わりうることは示すことができた。しかし、新エネルギー、CCSのどちらに関しても仮想的なものを想定しているのにすぎず、その生産・供給について多数のアドホックな仮定を置いていた。このため、本稿のシミュレーションはあくまで数値例の意味しか持たず、そこから現実的な政策インプリケーション等を導くことはできていない。この点を改善し、より現実に即した形で新エネルギー、CCSをCGEモデルに取り入れていくことが今後の課題である。

改善すべき点は多々存在するが、特に重要なものとして以下の点が考えられる。まず、新エネルギーについては、具体的に特定化した形で扱う必要がある。GREENモデル、あるいは本稿のモデルのように特定化しない形で新エネルギーを扱うのは、数値例的な分析をおこなうのには良いかもしれないが、エネルギーを特定化しなければ、その生産関数、費用条件、埋蔵量等に現実的な仮定を置くことができなくなる。そして、その結果分析全体の妥当性がどうしても低くなってしまふ。また、本稿では新エネルギーの生産性は外生的に一定と仮定して分析をしているが、新エネルギー、新技術等に関しては、learning by doing等による生産性上昇の効果、すなわち同一技術であっても経験・知識の蓄積が進むにつれ生産性が上昇していくという効果も重要な役割を果たすことが多い。このような内生的な技術進歩もできれば考慮するのが望ましい。

CCSについても、改善すべき点は数多く存在する。例えば、第4節ではCCSを他の生産活動から独立した活動として捉えているが、現実のCCSは他の生産活動と密接に結びついた形で導入される可能性が高い。第一に、CCSで大量のCO<sub>2</sub>を回収するには、CO<sub>2</sub>の大規模排出源、すなわち発電所、製鉄所等の近傍で活動する必要がある。第二に、CCSはCO<sub>2</sub>の回収効率を高めるために石炭発電、特に石炭ガス化複合発電との組み合わせで導入される可能性が高い。第三に、第2.2節で触れたが、産油国ではCCSは石油、ガスの採掘と組み合わせ、EOR、EGRの形態で導入される可能性が高い。いずれの場合でも、CCSは独立した活動ではなく、発電、製鉄、化石燃料採掘といった別の生産活動と結びついておこなわれることになる。CGEモデルにCCSを導入する際にも

<sup>21</sup> マークアップファクターについては第3.2.2節を参照して欲しい。

この点を考慮するのが望ましいであろう<sup>22</sup>。

## 参考文献

Burniaux, Jean-Marc, John P. Martin, Giuseppe Nicoletti, and Joaquim Oliveira Martins (1992) “GREEN. A Multi-Sector, Multi-Region General Equilibrium Model for Quantifying the Costs of Curbing CO2 Emissions: A Technical Manual”, OECD Economics Department Working Papers No. 116 (May).

Danish Energy Authority (2007) *Energy Statistics 2006*, Amaliegade 44, 1256 Copenhagen K.: Danish Energy Authority.

Lee, Hiro, Joaquim Oliveira-Martins, and Dominique van der Mensbrugghe (1994) “The OECD GREEN Model: An Updated Overview.” OECD Working Papers No. 97 OCDE/GD(94)75.

van der Mensbrugghe, Dominique (1994) “GREEN: The Reference Manual”, OECD Economic Department Working Papers No. 143 OCDE/GD(94)45.

Metz, Bert, Ogunlade Davidson, Heleen de Coninck, Manuela Loos, and Leo Meyer eds. (2005) *Carbon Dioxide Capture and Storage: IPCC Special Report*, New York: Cambridge University Press.

Paltsev, Sergey, John M. Reilly, Henry D. Jacoby, Richard S. Eckaus, James McFarland, Marcus Sarofim, Malcolm Asadoorian, and Mustafa Babiker (2005) “The MIT Emissions Prediction and Policy Analysis (EPPA) Model: Version 4.” MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change, Report No. 125, August 2005.

Sue Wing, Ian (2006a) “The Synthesis of Bottom-up and Top-down Approaches to Climate Policy Modeling: Electric Power Technologies and the Cost of Limiting US CO2 Emissions,” *Energy Policy*, Vol. 34, No. 18, pp. 3847-3869.

(2006b) “The Synthesis of Bottom-up and Top-down Approaches to Climate Policy Modeling: Electric Power Technology Detail in a Social Accounting Framework.” Forthcoming in *Energy Economics*.

Sue Wing, Ian and David Popp (2006) “Representing Endogenous Technological Change in Models for Climate Policy Analysis: Theoretical and Empirical Considerations,” in M. Hanneman and A. Farrell eds. *Managing Greenhouse Gas Emissions in California*, Chap. 7. U.C. Berkeley California Climate Change Center Report.

Takeda, Shiro (2007) “The Double Dividend from Carbon Regulations in Japan,” *Journal*

---

<sup>22</sup> EPPA モデルは CCS を考慮しているが、独立した活動としては扱わず、石炭ガス化複合発電、天然ガス複合発電と組み合わせる形で扱っている。



*of the Japanese and International Economies*, Vol. 21, No.3, pp. 336.364, September.

化学工学会 SCE . Net (編) (2004) 『図解新エネルギーのすべて』, 工業調査会 .

川崎泰史・飯島亜希(2007) 「日本経済の CGE モデルの環境分析向け拡張について (テクニカル・ノート)」. 内閣府経済社会総合研究所, New ESRI Working Paper Series No. 3, June 2007 .

中央環境審議会(2006) 「CO2 回収・貯留技術 (CCS) について (審議経過の整理)」, 8 月 . 中央環境審議会地球環境部会気候変動に関する国際戦略専門委員会 .

二酸化炭素回収・貯留 (CCS) 研究会(2007) 「二酸化炭素回収・貯留 (CCS) 研究会中間取りまとめ - 地球温暖化対策としての CCS の推進について - 」. 2007 年 10 月, 経済産業省産業技術環境局地球環境技術室 .

#### Appendix 1 : CES 型関数による在来型エネルギーと新エネルギーの統合

GREEN モデルのように、在来型のエネルギーと新エネルギーが CES 型関数で統合されているとする。

$$q = \left[ \sum_i \alpha_i x_i^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} \right]^{\frac{\sigma}{\sigma-1}}$$

ここで、 $i$  はエネルギーのタイプ (在来型か新エネか) を表すインデックス、 $x_i$  はエネルギー  $i$  の量、 $q$  は合成エネルギーの量、 $\sigma$  はエネルギー間の代替の弾力性 (EoS) である。以上のような統合関数を仮定すると、 $x_i$  への単位需要は次式となる。

$$x_i = \left[ \frac{\alpha_i}{p_i} \right]^{\frac{\sigma}{\sigma-1}} \left[ \sum_j \alpha_j^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} p_j^{1-\frac{\sigma-1}{\sigma}} \right]^{\frac{\sigma-1}{\sigma}}$$

ただし、 $p_i$  はエネルギー  $i$  の価格である。この式より、 $\alpha_i > 0$  なら、 $p_i < \infty$  のとき必ず  $x_i > 0$  となる、つまり、 $\alpha_i > 0$  であるなら、エネルギー  $i$  の価格がどんな水準であっても必ずエネルギー  $i$  の投入量はプラスとなるということがわかる。これが意味するのは、当初新エネルギーが投入されていなかったのが、新エネルギーの価格の下落 (あるいは、他のエネルギーの価格の上昇) によって、新エネルギーの投入がプラスに変化するという状況は、統合関数に CES 型を想定しているときにはありえないということである。言い換えると、統合関数が CES 型の場合には、初期時点で投入されているエネルギーは、価格がどう変化しようが投入され続け、逆に初期時点で投入されていないエネルギーは常に投入されないということである。以上のような性質が成立するため、GREEN モデルは新エネルギーの投入がゼロからプラスになるという状況を表すのに、 $\alpha_i = 0$  で

あったのが  $\alpha_i > 0$  となるというようにパラメータ自体を変化させている。このように新エネルギーの導入に統合関数のパラメータの変化が必要になり、そのパラメータの変化は外生的におこなわれるので、本文で述べたとおり新エネルギーの導入時期は外生的に決まることになる。

## Appendix 2：マークアップファクター

ベンチマークでは生産がおこなわれていない新エネルギーの生産関数を特定化する際に、マークアップファクターという概念が利用された。以下では、マークアップファクターによる生産関数の特定化とはどのような作業を意味しているのか説明する。

まず、在来型エネルギーは生産要素とエネルギー財を利用して CRTS の生産関数によって生産されているとする。このとき、在来型エネルギーの単位費用関数は

$$c^C = c^C(p^{VA}, p^E)$$

と表せる。 $p^{VA}$  は生産要素の価格指数、 $p^E$  はエネルギー財の価格指数である。一方、新エネルギーは生産要素と非エネルギー財を利用して生産されるとする。よって、新エネルギーの単位費用関数は次式のように表せる。

$$c^N = c^N(p^{VA}, p^{NE}) = \alpha \tilde{c}^N(p^{VA}, p^{NE})$$

と表せる。 $p^{NE}$  は非エネルギー財の価格指数であり、 $\alpha$  は生産性の水準を表す技術パラメータである ( $\alpha$  が小さいほど生産性が高い)。ベンチマークにおける投入物価格をバー付きの変数で表すとすると、在来型エネルギーのベンチマークにおける単位費用は

$$\bar{c}^C = c^C(\bar{p}^{VA}, \bar{p}^E)$$

と表せる。同様に、ベンチマークにおける投入物価格を前提としたときの、新エネルギーの単位費用は

$$\bar{c}^N = \alpha \tilde{c}^N(\bar{p}^{VA}, \bar{p}^{NE})$$

となる。仮定より、新エネルギーはベンチマークにおいて生産されていない。よって、 $\bar{c}^N$  はベンチマークにおいて実際に実現している単位費用ではなく、「ベンチマークにおける投入物価格を前提としたときに実現するはずの新エネの単位費用」であることに注意して欲しい。

マークアップファクターは、「基準年における投入物価格を前提としたとき、新エネルギーの単位費用が、在来型エネルギーの単位費用の何倍となるかを表す数値」であった。よって、上で定義した記号を利用すると、マークアップファクター  $\phi$  は次のように表現できる。

$$\phi = \frac{\bar{c}^N}{\bar{c}^C} = \frac{\alpha \tilde{c}^N(\bar{p}^{VA}, \bar{p}^{NE})}{c^C(\bar{p}^{VA}, \bar{p}^E)}$$

ここで、生産関数とベンチマークにおける投入物価格を特定化すれば、 $c^C(\bar{p}^{VA}, \bar{p}^E)$  と  $\tilde{c}^N(\bar{p}^{VA}, \bar{p}^{NE})$  の値は決まるので、結局  $\alpha$  の値でマークアップファクター  $\phi$  の値が決まることになる。つまり、

マークアップファクターの値を指定するということは、生産性パラメータの値を特定化することに等しくなる。例えば、 $c^C(\bar{p}^{VA}, \bar{p}^E)$  と  $\tilde{c}^N(\bar{p}^{VA}, \bar{p}^{NE})$  それぞれ 1、1.5 であったとする。このとき、マークアップファクターを 3 と仮定することは、生産性パラメータ  $\alpha$  を 2 と置いているということである。マークアップファクターとして大きい値を仮定するほど、 $\alpha$  の値も大きくなるので新エネルギーの生産性は低くなる（費用条件が悪化する）ということになる。

表 1：GREEN モデルにおけるエネルギー

在来型エネルギー	バックストップ技術・エネルギー
原油	Carbon-based BS
	Carbon-free BS
石炭	Carbon-based BS
	Carbon-free BS
天然ガス	Carbon-based BS
	Carbon-free BS
石油製品	
電力	Carbon-free BS

表 2：GREEN モデルにおける BS エネルギーについての仮定（出所、Lee et al. 1994）

	単位費用	単位費用/TJ	炭素係数 <sup>(a)</sup>	EOS <sup>(b)</sup>	シェア <sup>(c)</sup>
石炭、原油、天然ガスに対する Carbon-based BS	\$50/barrel	\$8,473	39	10	0.3
石炭、原油、天然ガスに対する Carbon-free BS	\$100/barrel	\$17,487	0	10	0.3
電力への BS	\$0.075/Kwh	\$28,126	0	5	0.1

単位は 1985 年 US\$

(a) 炭素トン/terajoule

(b) 在来型エネルギーとの代替の弾力性 (elasticity of substitution)

(c) Penetration share. CBBS、CFBS のシェアが 0.3 ずつということは、在来型化石燃料、CBBS、CFBS の価格が等しいとき、それぞれの投入物を 0.4、0.3、0.3 の比率で投入するということ。

表 3：EPPA モデルにおけるエネルギー

技術	説明
在来型エネルギー（5つ）	
原油	
石炭	
天然ガス	
石油製品	
電力	
化石燃料の代替物となるエネルギー・技術（3つ）	
石炭ガス化（Coal gasification）	石炭をガスの完全代替物に変換する技術
シェールオイル（Shale oil）	シェールから原油の完全代替物を生産する技術
バイオマスオイル（Biomass oil）	バイオマスから石油製品の完全代替物を生産する技術
発電技術（化石燃料、原子力、水力を利用する既存の技術以外）	
バイオマス電力（Biomass electricity）	バイオマスから電力の完全代替物を生産する技術
風力・太陽光（Wind and solar）	風力、太陽光を電力の不完全代替物に変換する技術
Advanced gas	天然ガス複合発電（ガス 電力）
Advanced gas with CCS	天然ガス複合発電 + 90%の CO2 を回収
Advanced coal with CCS	石炭ガス化複合発電 + 90%の CO2 を回収

表 4 : EPPA モデルにおける新技術・新エネルギーについての仮定

	マークアップ ファクター	投入シェア					
		資源	その他の投入物	資本	労働	固定要素	
Coal gas	3.5-4.0	0.4	0.1	0.3	0.2	--	
Shale oil	2.5-2.8	0.1	0.27	0.36	0.27	--	
Bio oil	2.1	0.1	0.18	0.58	0.14	--	
Bio electric	1.4-2.0	0.19	0.18	0.44	0.14	0.05	
Wind&Solar	1.0-4.0	0.05	0.25	0.4	0.25	0.05	

投入シェア：基準年における投入物価格を前提としたときの費用に占める各投入物への支出シェア。

マークアップファクター：基準年における投入物価格を前提としたとき、新エネルギーの単位費用が、在来型エネルギーの単位費用の何倍となるかを表す数値。

表 5 : 部門・財の分類と代替の弾力性の値

	部門・財名	記号	E_F	E_M	E_X
1	農林水	S01	1	2	4
2	鉱業	S02	1	2	4
3	石炭	S031		0	0
4	原油	S032		0	0
5	天然ガス	S033		0	0
6	食料品	S04	1	2	4
7	繊維	S05	1	2	4
8	パルプ・紙・木製品	S06	1	2	4
9	化学	S07	1	2	4
10	石油製品	S08	1	0.1	0.1
11	石炭製品	S09	1	0.1	0.1
12	窯業・土石	S10	1	2	4
13	鉄鋼	S11	1	2	4
14	非鉄金属	S12	1	2	4
15	金属製品	S13	1	2	4
16	一般機械	S14	1	2	4
17	電気機械	S15	1	2	4
18	輸送機械	S16	1	2	4
19	精密機械	S17	1	2	4
20	その他製造業	S18	1	2	4
21	建設	S19	1	0	0
22	電力	S20	1	0	0
23	ガス・熱供給	S21	1	0	0
24	上下水道・廃棄物処理	S22	1	0	0
25	商業	S23	1	0	0
26	金融・保険	S24	1	0	0
27	不動産	S25	1	0	0
28	鉄道輸送	S26	1	0	0
29	道路輸送	S27	1	0	0
30	水運	S28	1	0	0
31	航空輸送	S29	1	0	0
32	その他運輸	S30	1	0	0
33	通信・放送	S31	1	0	0
34	教育・研究	S32	1	0	0
35	医療・保健・介護	S33	1	0	0
36	対事業所サービス	S34	1	0	0
37	対個人サービス	S35	1	0	0
38	一般政府	S36	1	0	0
j3	鉱業(化石燃料)	S03	1		

表 6：代替の弾力性の値

記号	説明	値
生産関数内の EOS		
E_KLE	VA とエネルギーの間の EOS	0.1
E_EN	エネルギー-中間財間の EOS	0.1
E_F	K と L の間の EOS	別表
効用関数内の EOS		
E_LC	余暇と消費の間の EOS	0.5
E_C	エネルギー消費と非エネルギー消費の EOS	0.2
E_EC	エネルギー消費財の間の EOS	0.5
E_NEC	非エネルギー消費財の間の EOS	1
新エネルギー生産に関する EOS		
E_NE_VAR	新エネルギー生産での VA と資源の間の EOS	0.2
E_NE_VA	新エネルギー生産での K と L の EOS	0.5
CCS 活動に関する EOS		
E_CCS_VAR	CCS での VA と資源の間の EOS	0.2
E_CCS_VA	CCS での K と L の EOS	0.5
その他		
E_GOV	政府支出の EOS	0.2
E_INV	投資支出の EOS	0.2
E_M	国内財と輸入財間の EOS	別表
E_X	国内供給と輸出供給の間の EOT	別表

表 7：排出規制の効果

	CO2排出量 (MtCO2)	CO2削減率 (%)	効用	消費	政府支出	GDP	CO2集約度 (a)	排出権価格 (b)		
<b>(C-1) デフォルトのケース</b>										
BAU	1,395.1							2.4		
1	1,339.3	-4	0.0	-0.2	-0.3	-0.1	2.3	3.8		
2	1,283.5	-8	0.0	-0.5	-0.7	-0.4	2.2	10.1		
3	1,227.7	-12	-0.2	-0.9	-1.3	-0.7	2.1	18.9		
4	1,171.9	-16	-0.4	-1.6	-2.0	-1.2	2.0	31.0		
5	1,116.1	-20	-0.7	-2.6	-2.9	-1.8	1.9	47.0		
6	1,060.3	-24	-1.3	-3.9	-4.0	-2.6	1.9	67.4		
7	1,004.5	-28	-2.1	-5.6	-5.3	-3.5	1.8	92.7		
8	948.7	-32	-3.2	-7.7	-7.0	-4.7	1.7	123.2		
9	892.9	-36	-4.8	-10.4	-8.9	-6.2	1.6	159.0		
10	837.1	-40	-6.8	-13.7	-11.2	-8.0	1.6	199.8		
<b>(C-2) 新エネルギーが存在するケース</b>										
BAU	1,395.1							2.4		
1	1,339.3	-4	0.0	-0.2	-0.3	-0.1	2.3	3.8		
2	1,283.5	-8	0.0	-0.3	-0.5	-0.3	2.2	5.9		
3	1,227.7	-12	-0.1	-0.4	-0.6	-0.4	2.1	7.7		
4	1,171.9	-16	-0.2	-0.7	-0.9	-0.6	2.0	12.5		
5	1,116.1	-20	-0.3	-1.3	-1.6	-0.9	1.9	22.7		
6	1,060.3	-24	-0.6	-1.8	-2.0	-1.3	1.8	29.8		
7	1,004.5	-28	-1.0	-2.6	-2.7	-1.8	1.7	42.7		
8	948.7	-32	-1.5	-3.7	-3.8	-2.5	1.7	60.3		
9	892.9	-36	-2.2	-5.1	-5.0	-3.4	1.6	82.6		
10	837.1	-40	-3.2	-7.0	-6.5	-4.5	1.5	110.3		
<b>(C-3) CSSが存在するケース</b>										
									CCS <sup>(c)</sup>	回収率(%) <sup>(d)</sup>
BAU	1,395.1							2.4		
1	1,339.3	-4	0.0	-0.1	-0.2	-0.1	2.3	2.4	16.7	1.2
2	1,283.5	-8	0.0	-0.2	-0.4	-0.2	2.2	5.2	40.9	3.1
3	1,227.7	-12	-0.1	-0.6	-0.8	-0.5	2.1	11.5	45.5	3.6
4	1,171.9	-16	-0.2	-1.1	-1.4	-0.8	2.0	20.5	47.1	3.9
5	1,116.1	-20	-0.5	-1.8	-2.1	-1.3	1.9	32.9	47.9	4.1
6	1,060.3	-24	-0.8	-2.8	-3.0	-1.9	1.8	49.3	48.3	4.4
7	1,004.5	-28	-1.4	-4.1	-4.2	-2.7	1.8	70.2	48.6	4.6
8	948.7	-32	-2.3	-5.8	-5.5	-3.7	1.7	96.0	48.8	4.9
9	892.9	-36	-3.5	-8.1	-7.2	-4.9	1.6	127.1	49.0	5.2
10	837.1	-40	-5.1	-10.8	-9.2	-6.5	1.5	163.4	49.1	5.5

特に指示がないものはBAUからの変化率(%)。

(a) CO2集約度はkg-CO2/GDP1000円。

(b) 排出権価格は1000円/CO2トン。

(c) CSSはCSSにより回収されたCO2の量(MtCO2)。

(d) CSSのシェアは排出されたCO2のうち回収された割合。



表 8：新エネルギーが存在するケース（C-2）

	CO2削減率 (%)	排出権価格 (a)	石炭 (s031)	原油 (s032)	天然ガス (s033)	石油製品 (S08)	石炭製品 (S09)	電力 (S20)	ガス・熱供給 (S21)
<b>新エネルギーの供給量</b>									
1	-4.0	3.8							
2	-8.0	5.9	140.3						
3	-12.0	7.7	299.3						
4	-16.0	12.5	378.0						
5	-20.0	22.7	366.8	102.6					
6	-24.0	29.8	359.3	238.0	263.1		109.6		
7	-28.0	42.7	347.7	231.9	351.8		322.2		
8	-32.0	60.3	334.7	223.9	395.9	239.8	378.2		
9	-36.0	82.6	316.6	212.6	423.1	337.9	410.9	258.2	
10	-40.0	110.3	300.1	202.5	441.7	383.8	432.8	340.2	280.9
<b>エネルギー価格</b>			千円/トン	千円/kl	千円/トン	千円/kl	千円/トン	円/kwh	円/m <sup>3</sup>
BAU			4.7	23.1	26.1	64.2	38.5	13.7	97.6
1			13.8	32.9	36.6	73.8	50.9	14.8	105.2
2			18.7	38.0	42.3	78.7	57.4	15.3	109.4
3			22.9	42.5	47.0	83.2	63.1	15.7	112.8
4			34.0	54.8	59.7	95.3	78.5	16.9	121.9
5			44.0	80.4	86.1	120.6	110.4	18.7	141.2
6			51.0	91.6	102.5	138.5	132.3	19.8	153.0
7			64.2	105.1	135.2	169.6	171.7	21.8	176.9
8			82.3	123.2	178.7	211.0	224.2	24.6	208.8
9			104.7	145.8	232.3	262.1	288.9	27.9	248.2
10			132.2	173.2	296.7	323.5	366.6	31.9	295.6
<b>新エネルギーのシェア (%) (b)</b>									
1									
2			35						
3			76						
4			100						
5			100	42					
6			100	100	19		7		
7			100	100	27		22		
8			100	100	31	2	28		
9			100	100	36	2	32	2	
10			100	100	39	3	36	2	12

(a) 排出権価格は1000円/CO2トン

(b) 総エネルギー供給に占める新エネルギーのシェア

(注) 空白のセルはゼロを表している。

表 9 : CCS が存在する + CCS 資源を 10 倍にしたケース

	CO2排出量 (MtCO2)	CO2削減率 (%)	効用	消費	政府支出	GDP	CO2集約度 <sup>(a)</sup>	排出権価格 <sup>(b)</sup>	CCS <sup>(c)</sup>	回収率 (%) <sup>(d)</sup>
BAU	1,395.1						2.4			
1	1,339.3	-4.0	0.0	-0.1	-0.2	-0.1	2.3	2.4	17.2	1.3
2	1,283.5	-8.0	0.0	-0.1	-0.2	-0.1	2.2	2.4	72.7	5.4
3	1,227.7	-12.0	-0.1	-0.2	-0.2	-0.1	2.1	2.4	128.1	9.4
4	1,171.9	-16.0	-0.1	-0.2	-0.2	-0.2	2.0	2.5	183.0	13.5
5	1,116.1	-20.0	-0.1	-0.2	-0.2	-0.2	1.9	2.6	237.2	17.5
6	1,060.3	-24.0	-0.1	-0.3	-0.3	-0.2	1.8	2.8	289.7	21.5
7	1,004.5	-28.0	-0.2	-0.3	-0.3	-0.2	1.7	3.3	339.5	25.3
8	948.7	-32.0	-0.2	-0.4	-0.4	-0.3	1.6	4.2	384.4	28.8
9	892.9	-36.0	-0.3	-0.5	-0.5	-0.4	1.5	6.1	421.2	32.1
10	837.1	-40.0	-0.3	-0.7	-0.8	-0.6	1.4	9.6	447.4	34.8

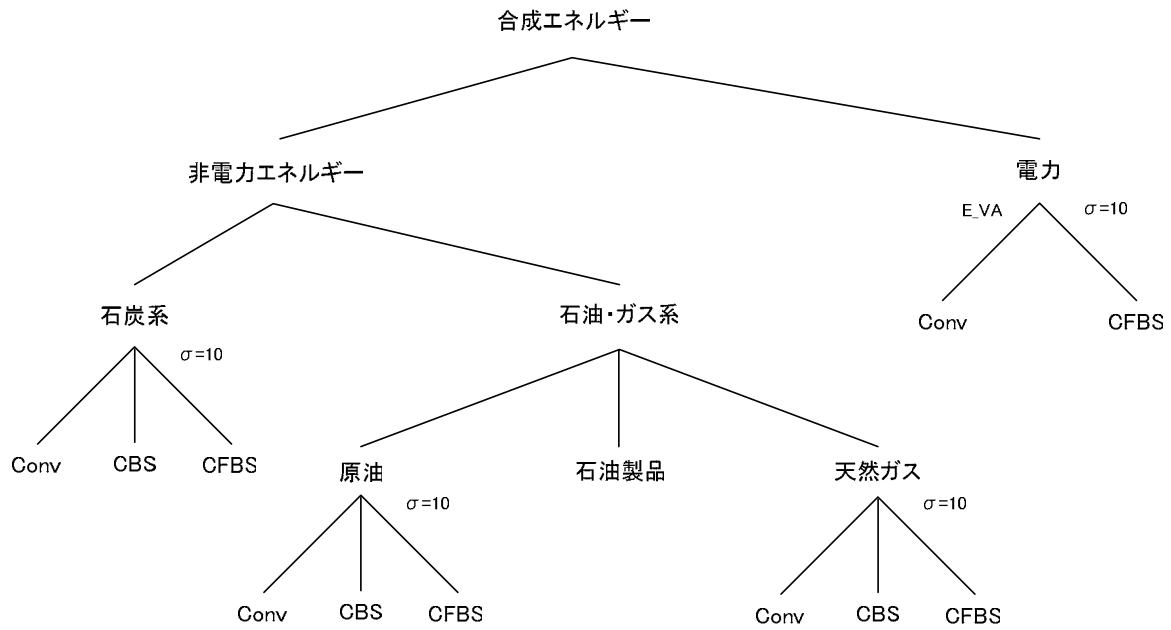
特に指示がないものはBAUからの変化率(%)。

(a) CO2集約度はkg-CO2/GDP1000円。

(b) 排出権価格は1000円/CO2トン。

(c) CSSはCSSにより回収されたCO2の量(MtCO2)。

(d) CSSのシェアは排出されたCO2のうち回収された割合。



Conv: 在来型エネルギー  
 CBS: Carbon-based backstop  
 CFBS: Carbon-free backstop  
 $\sigma$ : 代替の弾力性

図 1: GREEN モデルにおけるエネルギー統合の構造

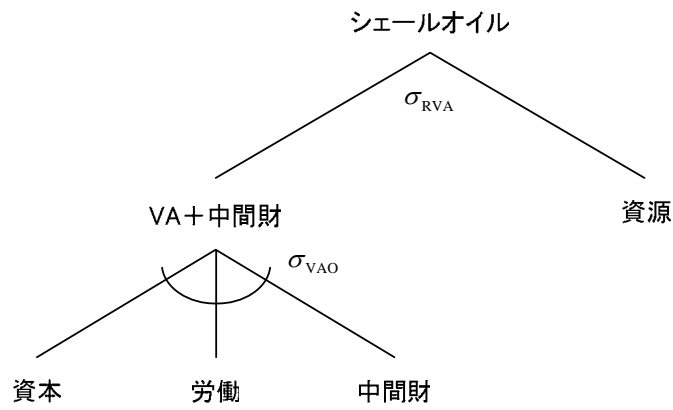


図 2: EPPA モデルにおけるシェールオイルの生産関数

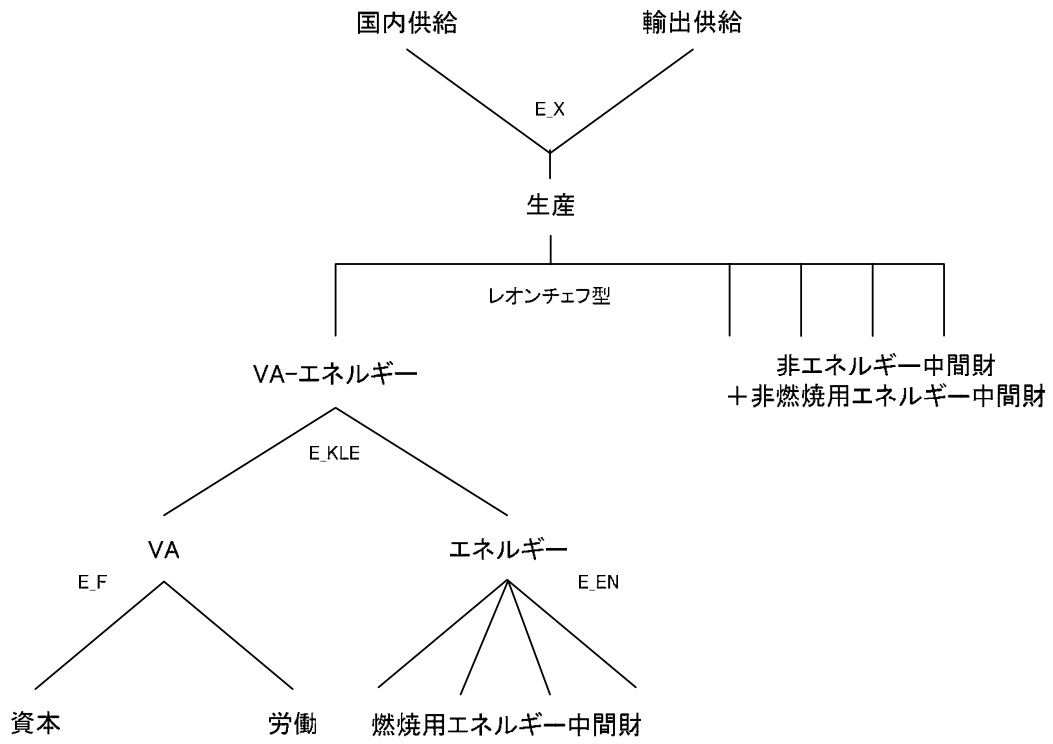


図 3：生産関数

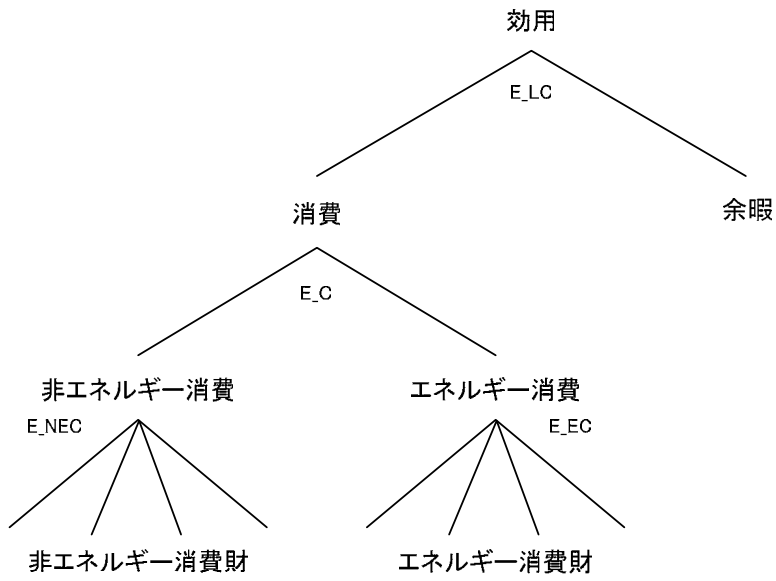
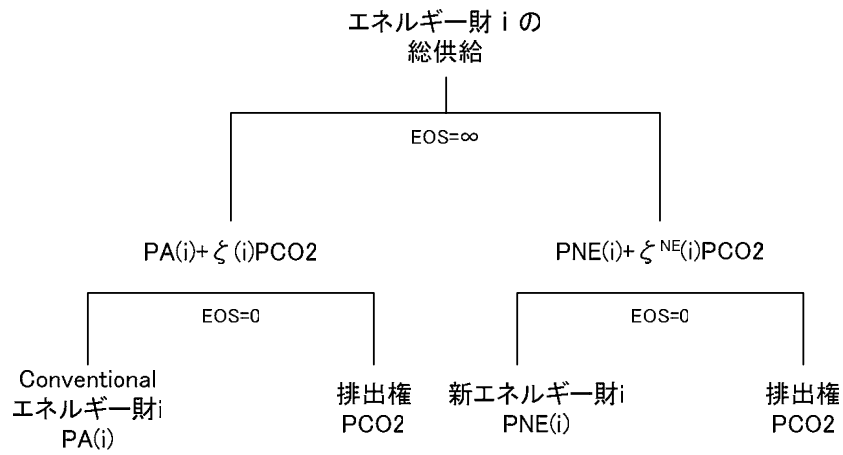


図 4：効用関数



エネルギー財  $i$  の総供給量 = 在来型エネルギー  $i$  の供給量 + 新エネルギー  $i$  の供給量

図 5：在来型エネルギーと新エネルギーの関係

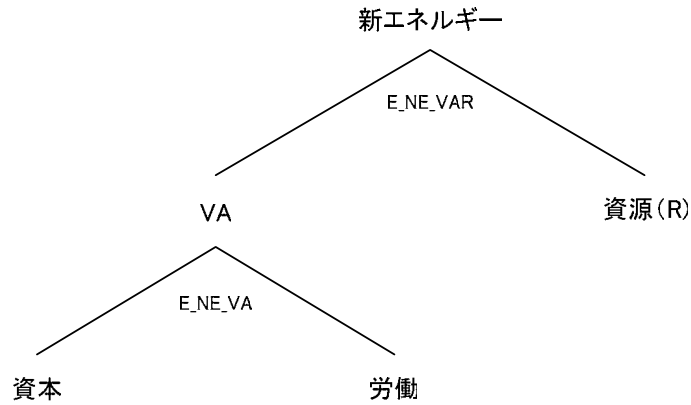


図 6：新エネルギーの生産関数

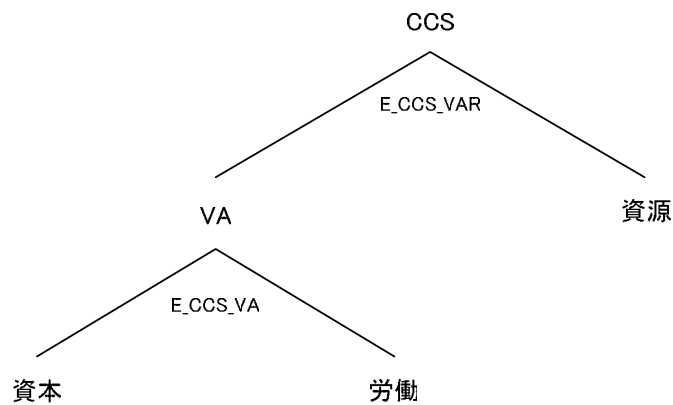


図 7：CCS の生産関数