

多面的評価指標の拡張に関する調査（Ⅱ）

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

2003年1月

MIZUHO 富士総合研究所
Mizuho Financial Group

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :
Technical Cooperation Section.
Technology Management Division.
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaragi 319-1194, Japan



核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2003

多面的評価指標の拡張に関する調査（Ⅱ）
(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

田原靖彦*、瓜生暢哉*、佐々木誠夫*

要 旨

核燃料サイクル開発機構のFBRサイクル実用化戦略調査研究では、FBRサイクルシステム候補概念の比較評価を目的とした評価システムの開発の一環として、経済性、環境負荷など評価視点から考えた評価指標の下で価値付けを実施している。その際、同システムを候補概念抽出に有効に機能させるためには、評価の基本となる評価指標の範囲をなるべく広げ、客観性、説得性を向上させることが重要である。

このため、昨年度から従来の経済性評価では考慮されないFBR導入の外部経済性（環境・人的健康影響、安全性、エネルギーセキュリティ、核不拡散等）の評価手法、検討例等を調査している。本年度は、FBRサイクルの特長であるエネルギーセキュリティに関する外部経済性に着目し、その評価手法、検討例等を調査した。

まず、エネルギーセキュリティの概念や現状、エネルギーセキュリティ上の原子力の位置付けについて整理し、化石資源やウラン資源の枯渇を考慮した中長期的な視点でのエネルギーセキュリティの重要性及びその向上策としてのFBRの役割を明確にすることが必要であることを明確にした。

次に、既存のエネルギー経済モデルについて調査し、エネルギーセキュリティの定量評価への適用可能性について検討した。検討の結果、世界全体を対象とし、化石資源の貿易市場がモデル化されている一般均衡モデルGTAP（Global Trade Analysis Project：世界貿易計画）が中長期的なエネルギーセキュリティの定量評価に有効である、との結論を得た。

最後に、今後GTAPモデルを用いた中長期的なエネルギーセキュリティの定量評価を実施していくことを想定し、必要な作業項目及び留意事項をまとめた。具体的には、「電源構成（FBRや原子炉のシェア）を内生変数とする場合」及び「電源構成（FBRや原子炉のシェア）を外生変数とする場合」の2通りを想定し、必要となる入力データ、出力データのイメージ、必要なモデル改良項目等について整理した。

本報告書は、株式会社富士総合研究所が核燃料サイクル開発機構との契約により実施した業務成果に関するものである。

機構担当部課室：大洗工学センター システム技術開発部 FBRサイクル解析Gr.

*株式会社富士総合研究所

Study on dilatation of Multi-Criteria Evaluation Method (Ⅱ)

Yasuhiko Tabaru^{*}, Masao Tomizawa^{*}, Shigeo Sasaki^{*}

Abstract

In the study on FBR-cycle practical application strategy conducted by JNC, as part of development of evaluation system aiming at comparative evaluation of promising concept for FBR-cycle system, they grade the value of the concepts under the criteria evaluation such as economical efficiency and environmental load. In order that this system functions effectively in selecting promising concepts, we believe that it is important to extend the range of criteria evaluation and improve objectivity and persuasiveness of it.

This is why since the last fiscal year we have been studying on evaluation methodology of and investigation examples on external economical efficiency (effects on the environment and human health, safety, energy security, nuclear non-proliferation, etc.) relevant to introduction of FBR, which had not been included in the conventional evaluation of economical efficiency. In this work, we have especially focused on the external economical efficiency relevant to energy security which is peculiar to FBR-cycle and studied on its evaluation methodology and investigation examples.

Firstly, we summarized up on the concept and current situation of energy security and the position of nuclear energy in energy security. Then we identified the necessity of clarifying the importance of energy security with the middle-term point of view allowing for deficiency of fossil or uranium resources, and also the importance of the role of FBR as an improvement action for it.

Secondly, we studied on the current energy economic model and examined the possibility of applying energy security for quantitative evaluation. As a result, we have concluded that the general equilibrium model GTAP (Global Trade Analysis Project) in which fossil resource market around the world is modeled should be effective for quantitative evaluation of long term energy security.

Finally, assuming that we will conduct the quantitative evaluation of long term energy security using GTAP model in the future, we put together necessary operation items and points of concern. To be specific, we assumed the two cases, that is, “power source structure (the share of FBR or nuclear reactors) should be endogenous variable” and “power source structure (the share of FBR or nuclear reactors) should be exogenous variable”, and collected and integrated necessary input data, prospective output data, necessary items to improve models, and so on.

Work performed by Fuji Research Institute Corporation, under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute

JNC Liaison : Technology Management Division, O-Arai Engineering Center

^{*} Fuji Research Institute Corporation

目 次

はじめに	1
1. エネルギーセキュリティとは.....	3
1.1. 歴史的な経緯	3
1.2. エネルギーセキュリティの定義	4
1.3. エネルギーセキュリティ確保の費用対効果	5
1.3.1. 費用対効果	5
1.3.2. エネルギーセキュリティ確保に関する政府の役割	8
1.4. エネルギーセキュリティの現状	10
1.4.1. 総合資源エネルギー調査会の見解	10
1.4.2. 石油市場の現状と長期的展望	15
1.4.3. 競争市場とエネルギーセキュリティ	17
1.4.4. 電力市場自由化とエネルギーセキュリティ	18
1.5. エネルギーセキュリティと原子力	21
1.6. まとめ	26
2. 評価手法の検討.....	28
2.1. エネルギー経済モデル	28
2.1.1. 最適化型モデル	28
2.1.2. 一般均衡型モデル	31
2.1.3. 既存のモデル	39
2.1.4. 適用事例	41
2.2. エネルギーセキュリティ評価手法	44
3. 評価アプローチとその限界	46
3.1. 電源構成を外生条件とする場合	46
3.1.1. 入出力のイメージ	46
3.1.2. 必要となる作業項目	50
3.1.3. メリットとデメリット	50
3.2. 電源構成を外生変数とする場合	51
3.2.1. 入出力のイメージ	51
3.2.2. 必要となる作業項目	52
3.2.3. メリットとデメリット	53
4. まとめ	54
参考文献	55
付録資料	56

表 目 次

表 1 OECD/NEA におけるエネルギーセキュリティの定義.....	4
表 2 世界、アジア及び日本のエネルギー情勢.....	10
表 3 中東及びアジア地域の政治情勢	11
表 4 エネルギーセキュリティに関する諸外国の動向.....	12
表 5 今後のエネルギーセキュリティ対策のあり方.....	14
表 6 エネルギーセキュリティに係る原子力の特性（原子力開発利用長期計画）	22
表 7 エネルギーセキュリティに係る原子力の特性（総合資源エネルギー調査会答申類）	23
表 8 原子力のエネルギーセキュリティ上の意義	24
表 9 原子力のエネルギーセキュリティ上の特性の向上策.....	24
表 10 代表的なエネルギー経済モデル	39
表 11 モデル構造の特徴と適性.....	41

図 目 次

図 1 エネルギーセキュリティ確保の費用対効果	6
図 2 エネルギー供給支障に関する限界損害関数の変遷	7
図 3 エネルギーセキュリティ確保に関する政府の役割	8
図 4 最適化型モデルの概論	29
図 5 最適化型モデルの概要	30
図 6 最適化型モデルにおける電源選択のイメージ	31
図 7 一般均衡型モデルの例	36
図 8 一般均衡モデルの概要	37
図 9 一般均衡モデルにおける電源選択のイメージ	38
図 10 各モデルによる炭素税導入時の国内経済への影響の違い	41
図 11 日本の機械産業の付加価値率の変化（内閣府、1986-1997年）	43
図 12 想定シナリオでの産業構造の変化	43
図 13 エネルギーセキュリティ分析の範囲	44
図 14 エネルギーセキュリティ分析に必要なモデル特性	45
図 15 GTAP モデルの入手条件	46
図 16 一般均衡モデルの入出力のイメージ（電源構成：外生条件）	47
図 17 電力価格の決定メカニズム（電源構成：外生条件）	48
図 18 経済波及の影響経路	49
図 19 価格ショックの影響に関する分析可能性	49
図 20 必要となる改良作業項目（電源構成：外生条件）	50
図 21 一般均衡モデルの入出力のイメージ（電源構成：内生変数）	51
図 22 電力価格の決定メカニズム（電源構成：内生変数）	52
図 23 必要となる改良作業項目（電源構成：内生変数）	53

はじめに

核燃料サイクル開発機構（以下機構）が行う FBR サイクル実用化戦略調査研究における、FBR サイクルシステム候補概念の比較評価を目的とした評価システムの開発の一環として、経済性、環境負荷など評価視点から考えた評価指標の下で価値付けを実施している。その際同システムを候補概念抽出に有効に機能させるためには、評価の基本となる評価指標の範囲をなるべく広げ、客観性、説得性を向上させることが望まれる。

昨年度において、上記目的を満たすために環境・人的健康影響に重点を置いた外部コスト解析・評価を実施するために必要となる手法、検討例などを調査、整理した。

今年度は、FBR サイクルの特長であるエネルギーセキュリティと核拡散の懸念などの環境・人的健康影響以外の外部性（非環境影響外部性と定義する）を評価するために必要となる手法、検討例などを調査、整理する。

①考え方

「エネルギーセキュリティ」及び「核不拡散」は、両者とも明確な定義であり、その定量化には多くの要因を考慮する必要がある。また、考慮すべき要因の中には定量化が困難なものが多く含まれる。このため、これらの外部性の定量化手法検討に先立って、「エネルギーセキュリティ」及び「核不拡散」に関する考え方を整理する。

【主要な参考文献】

- 「Projected Cost of Electricity Generation 1998、OECD/NEA(1998 年)」
- 「総合エネルギー調査会エネルギーセキュリティ WG 報告書」(2001 年)
- 「エネルギーセキュリティ」矢島正之 (2002 年 5 月)
- 「原子力学会誌、原子力学会予稿集等における関連情報」
- 「ExternE Vol.7 Methodology 1998 update」EC (1998 年)

なお、核不拡散の外部性については、定量化が非常に困難であり、検討例も限られていることから本作業の対象外とした。

② 非環境外部コストの定量化事例

ExternE プロジェクトでは、主にエネルギー供給に係る環境外部コストの詳細な検討・評価が実施されているが、原子力に関しては、「エネルギーセキュリティ」等の非環境外部性も重要であるとの認識の下で、文献のレビュー等に基づく非環境外部コストの検討が行われている。本作業では、ExternE の公開レポート（非環境外部性については簡易な記述、詳細版は入手不可）に基づき、非環境外部性の検討事例をまとめた。

【主要な参考文献】

- 「ExternE Vol.7 Methodology 1998 update」EC (1998 年)

(非環境外部性に関する詳細レポートは入手困難であるため、全体レポートの中での記述から概要を把握)

「原油価格上昇の日本経済への影響」(2001年、電力中央研究所)

③ 非環境外部コストの評価手法の検討

資源価格の変動、化石資源の枯渇（採掘コストの増加）等に起因する社会的費用（エネルギーセキュリティに関する外部コスト）を評価することを目標として、必要となる経済モデルについて調査し、評価に必要となるモデルや入力データを検討する。

「エネルギーセキュリティ外部性評価における影響経路」は、環境外部性の場合のような物質的なものではなく、市場構造を通して機能するものである。つまり、国内経済モデル（マクロ経済モデル、一般均衡モデル等）を構築し、エネルギー供給能力の低下（エネルギー価格の上昇）が経済活動に与える影響をつきとめることによって、その外部性が確認・定量化されるということになる。

ExternEでは、コンピューターシミュレーションに多大な時間を要する複雑な経済モデルを用いた分析は実施されず、分析的な研究が可能なレベルのシンプルな経済評価モデルを用いて、多様な外部性の影響経路の特徴を把握することに重点が置かれた。本分析では、ExternE等における外部コスト評価の視点を参考にしながら、GTAP（Global Trade Analysis Project）等の一般均衡型のエネルギー経済モデルや電力中央研究所が開発しているマクロ経済モデル（エネルギー価格の経済波及分析を主目的に開発）を用いた外部コスト評価手法を検討する。また、検討に当たっては、短期的なセキュリティ（原子力による日本のエネルギー自給率の向上効果）と長期的なセキュリティ（FBR導入による世界全体で長期的にエネルギーを確保できる効果）を考慮する。

【主要な参考文献】

「GTAP」：「応用一般均衡モデルの基礎と応用(経済構造改革のシミュレーション分析)」
川崎 研一 (1999年)

1. エネルギーセキュリティとは

本章では、エネルギーセキュリティに関する様々な検討・分析例（検討の経緯、定義、費用対効果、現状、原子力の位置付け等）を整理することにより、エネルギーセキュリティに関する論点を明確にする。

1.1. 歴史的な経緯

1973年10月に勃発した第4次中東戦争を契機に、原油の国際価格は3倍に跳ね上がった。いわゆる第1次石油危機である。このショックをきっかけとして、西側諸国のエネルギー政策の中核にエネルギーセキュリティ、とりわけ石油の供給保障が据えられることとなった。

その後、1970年代から1980年代半ばにかけて、OPEC (Organization of Petroleum Exporting Countries) による高価格政策が維持され、1次エネルギーの供給保障は、西側先進国にとって重要な政策課題であった。1985年末になると、サウジアラビアは「スwing・サプライヤー」としての役割を放棄し、増産に踏み切った。原油価格は急激に下落し、1990年から1991年の湾岸戦争時を除き、価格は1998年に至るまで低位で安定的に推移した。

このような状況を背景として、また世界的な規制緩和の潮流の中でエネルギー政策の重点も、1980年代後半からは1次エネルギーの供給の安定的な確保から、エネルギー産業の効率化または競争導入にシフトしていった。同時に、地球規模の環境問題の高まりの中で、エネルギー利用に関連した環境への影響についても、重要な検討課題として位置付けられるようになった。

近年に至り、2つの観点から再びエネルギーセキュリティが重要視されるようになってきている。

1つは、英国や米国におけるエネルギー市場への競争導入の進展に伴うエネルギーセキュリティ低下の懸念である。例えば、英国では電力市場の自由化により、投資リスクが小さい天然ガス火力のシェアが大幅に上昇し、天然ガス需要が大幅に増加している（ダッシュ・フォー・ガス）。このままのペースでガス火力が建設されることになれば、将来的に天然ガスの価格上昇の可能性や供給保障上の問題が懸念されている。また、米国においても2000年夏から2001年初めにかけてカリフォルニア州で電力危機が発生したが、発電コストの上昇にはガス価格の高騰も大きく貢献したと考えられており、最近に至りエネルギーセキュリティの確保が大きくクローズ・アップされるようになってきている。

もう1つは、アジア（特に中国）地域を中心として、発展途上国における今後の経済成長とそれに伴うエネルギー需要量の急激な増加が、世界のエネルギー市場に与える影響に関するものである。特に、アジア地域は、その人口に比してエネルギー資源に恵まれていないことから、今後急激に1次エネルギーの輸入依存度（特に、石油の中東依存度）が高まると予想されている。このことから、日本だけでなくアジア全体としてのエネルギーセキュリティ確保のあり方について検討していく必要があると考えられている。

さらに、1999年にはOPEC諸国による減産合意により、原油価格は急騰し、1998年12月の9.69ドル/バレルから2000年8月には31.48ドル/バレルにまで高騰した。このことは、OPECの価格支配力を再認識させる出来事であり、上述の特に2つ目の懸念が重要かつ現実的になりえることを示唆している。

1.2. エネルギーセキュリティの定義

ここでは、エネルギーセキュリティに対する外部性に関する OECD/NEA 及び ExternE における定義を示す。

(1) OECD/NEA

表 1 に、OECD/NEA におけるエネルギーセキュリティに関する外部性の定義を示す。

OECD/NEA では、「特定の燃料を使用することにより発生するが、燃料の使用者は直接負担せず、社会全体で負担しているコスト」をエネルギーセキュリティに関する外部コストと定義しており、その要因として以下の項目を挙げている。

外部性を引き起こす要因：

- A：コスト上昇（市場支配（短～長）、資源枯渇（長））
- B：価格ショック（供給支障（短）、需給バランスの変化による供給支障発生確率の変化（長））
- C：軍事費用

影響の種類：

- 燃料購入段階で被る直接影響
- 燃料価格の経済波及に伴って発生する間接影響

表 1 OECD/NEA におけるエネルギーセキュリティの定義

影響の種類	"直接的な"マクロ経済影響	"間接的な"マクロ経済影響
A. コスト上昇	A.1. エネルギー資源輸入価格の緩やかな上昇	A.2. 富の移転(輸入国から輸出国への増加及びそれが貿易バランス、長期的な生産性向上、雇用等に及ぼす影響)
		A.3. 富の移転が長期インフレに及ぼす影響
B. 価格ショック	B.1. エネルギー資源輸入コストの急上昇	B.2. 価格ショックに起因する経済状況の変化
		B.3. 長期的な需要増加による価格ショック発生リスクの増加
C. 軍事費用		C.1. エネルギーセキュリティ確保のための軍事費用

(2) ExternE

ある電力供給者によって下される決定（キャパシティ選択、燃料混合など）が、その電力供給者が意識していない電力の価格（または、発電に使用されている燃料の価格）に影響を与える場合に、電力供給事業者における外部性が発生する。例えば、非化石燃料による発電の増加によって輸入化石燃料への依存が減ることにより、化石燃料価格の経済への影響が減少する（正の外部性）。

1.3. エネルギーセキュリティ確保の費用対効果

1.2 節で述べたように、エネルギーセキュリティに関する外部経済性が存在する場合に、政府はエネルギーセキュリティの確保にどの程度の役割、どの程度のコストをかけるべきであろうか？本節では、エネルギーセキュリティ確保に関する費用対効果分析の概観を説明し、エネルギーセキュリティ確保に関してこれまでに政府が果たしてきた役割と今後求められる役割をまとめる。

1.3.1. 費用対効果

(1) 背景

1970 年代および 1980 年代前半の OPEC の高価格政策は、西欧先進諸国に OPEC 石油を他の石油（新規開発の北海やアラスカを含む）、他の燃料（ガス、石炭、原子力）および資本（エネルギー利用率向上）に代替させるインセンティブを与えることとなった。その結果、世界市場における OPEC のシェアは 1970 年代初めの 50% 以上から 1980 年代にはほぼ 33% にまで減少した。その後、OPEC はこのように大きく変化した市場環境のもとで、非現実的な価格目標に固執することはもはやできなかった。1985 年～1986 年には、石油価格は暴落し、実質で 1973 年の価格レベル以下にまで下落した。低い価格は高い消費をもたらし、その結果、世界市場における OPEC のシェアは再び増大している。長期的に見たとき、その価格支配力の行使は排除できない。それゆえ、供給保障の確保は依然として重要な政策課題と考えられている。事前に供給保障のための手段を講じておくことで、供給支障に社会的損害を回避することができるからである。

供給保障を講ずることは追加的なコストを発生させることになるため、それをどの程度まで講ずべきかについては、供給保障のコストと便益の間で最適な選択がなされなくてはならない。

(2) 概要

経済学的には、最適な供給保障は、供給保障確保の限界コストが供給保障による経済損害コストに等しい市場均衡のもとで達成されているといえる。この定義が意味するように、最適な供給保障は、供給支障のシナリオ、予想される損害コスト、対策とそのコストなどに依存している。

また、この定義は 1 次エネルギーの供給が経済的な考慮を無視して、いかなる状況のもとでも確保されるべきであるということは意味していない。図 1 を用いて、供給中断が発生した場合の損害を回避するための供給保障の程度を説明する。

OX は現在国内で利用されている 1 次エネルギー量である。また、MDe は限界損害関数を示している。限界損害は燃料供給が 1 単位減少することで発生する追加的損害であり、ここでは損害と供給中断確率の積（期待値）で示される。損害関数は燃料供給が増加するに従って減少していくと考えられている。

MSC は限界セキュリティ費用関数である。限界セキュリティ費用とは、追加的な燃料 1 単位を利用可能とするための追加的な費用を示している。図では、2 種類のセキュリティ確保の戦略が示されている。まず、戦略 A (MSC_A) では、国内資源のみが供給の中止に対して国を保護する手段として用いられる。世界市場からの供給中断の場合には、供給は国内資源 OY に限定される。その場合の損害は面積 YAX で示される。

つぎに、戦略 B (MSC_B) は供給保障のために備蓄又はエネルギー多様化のような追加的な手段を講じるものである。戦略 B は、MSC_B が MDe に等しくなるまで講じられ、それにより確保さ

れる燃料供給は OV である。その場合の供給支障時の損害は VBX で示され、また戦略 B を講ずることによる追加的コストは YBV で示される。明らかに、追加的な戦略 B を講じることで、経済に生じる損害額は YAX から YBX にまで減じる。

この単純なモデルをより具体的に理解するためには、供給中断の具体的なシナリオ、予想される損害コストの額、対策とそのコストの額などが解明されなくてはならない。これらの問題への解答したいので、供給保障確保の便益と費用は国によって異なってくる。供給保障の評価は 1 次エネルギーの供給構造や輸送方策などの客観的なファクター以外にも、供給保障の重要性に関する心理的なファクターにも依存している。

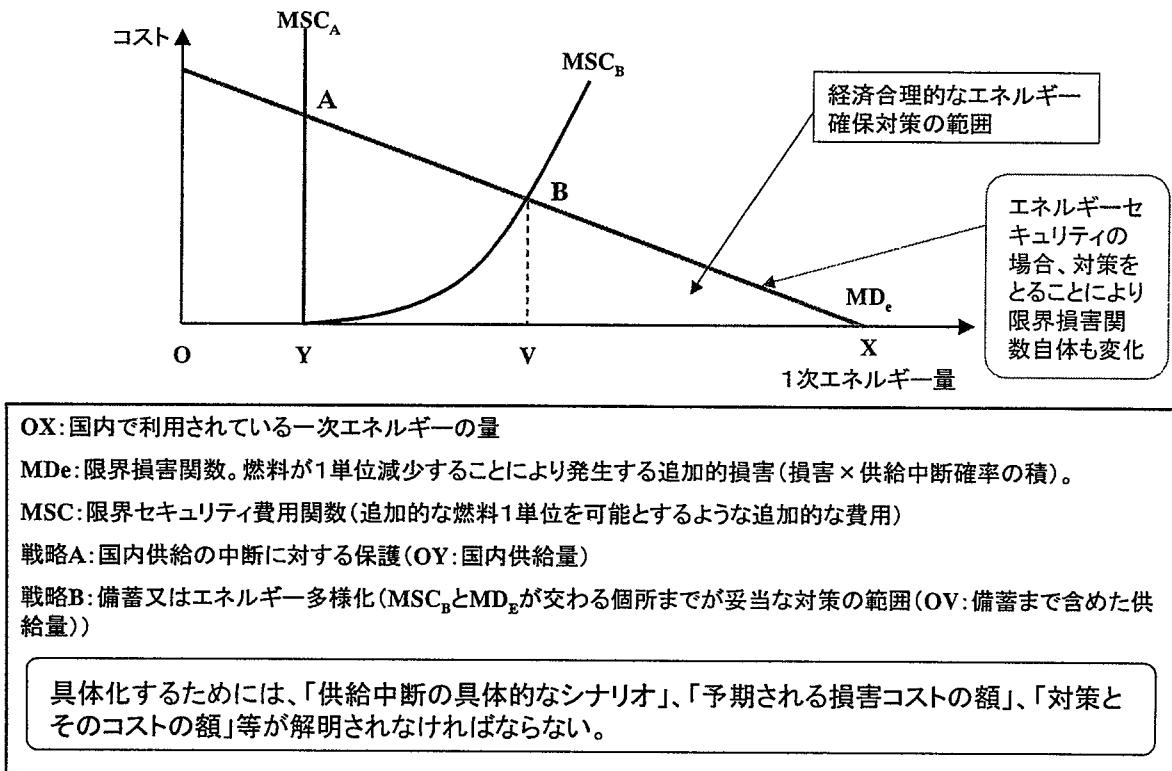


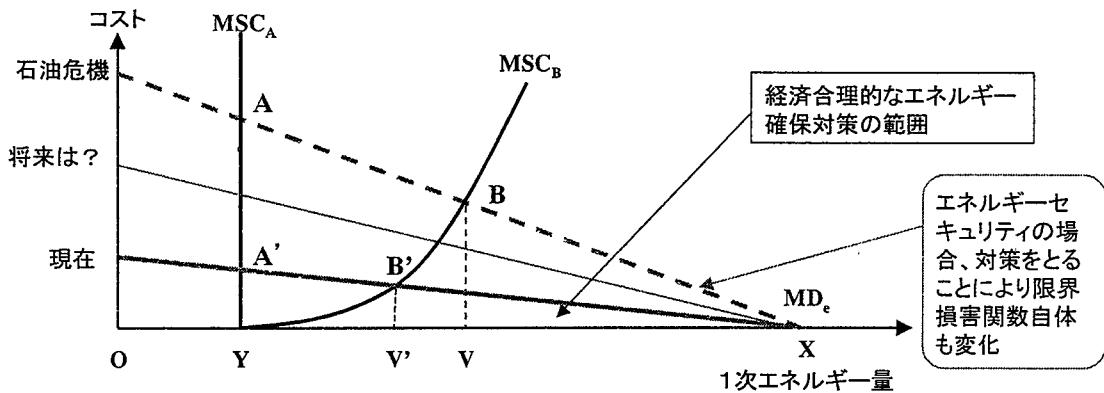
図 1 エネルギーセキュリティ確保の費用対効果

エネルギーセキュリティの限界損害関数は、その時点の世界情勢、産業構造、対策の有無等の要因によって常に変化するものである。この点が、環境被害の外部性と大きく異なる。

図 2 に、エネルギー供給支障に関する限界損害関数のこれまでの変遷のイメージ図を示す。

石油危機以降、先進国が協調してエネルギーの多様化（発電部門における天然ガス、石炭及び原子力利用の推進）、省エネルギーの推進、市場機能の強化、供給契約の多様化等を進めた結果、エネルギー供給に関する限界損害関数は石油危機時と比べて、大幅に低下している可能性がある。このため、現時点での短期的なエネルギーセキュリティの確保（価格ショックの軽減）のみを根拠に原子力の推進を唱えても説得性に乏しい。

しかし、地球環境問題を意識したエネルギーセキュリティ、資源枯渇（途上国の経済成長）等を視野に入れた中長期のエネルギーセキュリティ分析の必要性（将来の限界損害関数はどうなるのか？）が認識され始めている。



石油危機以降、先進国が協調してエネルギーの多様化（発電部門における天然ガス、石炭及び原子力利用の推進）、省エネルギーの推進、市場機能の強化、供給契約の多様化等を進めた結果、エネルギー供給に関する限界損害関数は石油危機時と比べて、大幅に低下している可能性がある。このため、短期的なエネルギーセキュリティの確保（価格ショックの軽減）のみを根拠に原子力の推進を唱えても説得性に乏しい。

- ・原子力導入の限界費用曲線を安価にする努力が必要である。
- ・化石資源価格にCO₂価格も上乗せした形での限界損害関数との比較で議論する必要がある。
- ・資源枯渇（途上国の経済成長）を含めた中長期のエネルギーセキュリティを視野に入れた分析が必要である。

図 2 エネルギー供給支障に関する限界損害関数の変遷

(3) 試算例

電力中央研究所では、2000年春から秋にかけての原油価格高騰（CIF価格50%上昇）が3年間継続した場合の経済影響を電中研短期マクロ経済モデルを用いて評価している[4]。

以下に、評価結果の概要を示す。

- | |
|--|
| －実質GDPの低下幅：1年目：0.09%、2年目：0.41%、3年目：0.95% |
| －消費者物価の上昇幅：1年目：0.13%、2年目：0.27%、3年目：0.23% |

原油価格上昇の経済への影響度は石油危機時の1/4程度に留まっており、エネルギー供給支障の限界損害関数が石油危機時に比べて低下していることを示唆する結果となっている。この主要因としては、石油・原油 関係製品の比率低下、石油業界の競争激化（小売りへの転嫁が困難）、為替レートの円高安定等が挙げられる。

1.3.2. エネルギーセキュリティ確保に関する政府の役割

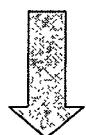
前項で示した限界損害関数の変遷は、エネルギーセキュリティ確保への政府の介入の妥当性についても影響を与えている。

図3に示すように、石油危機～1980年代前半にかけては、原油の供給力が中東に大きく依存していたことから、原油は大きな外部性を有する（限界損害関数が大きい）財であり、エネルギーセキュリティの確保のための政府の役割は大きく、かつ正当なものであった。しかし、その後の西側先進国におけるエネルギー多様化の推進、資源開発、市場の自由化等の影響により、現時点では、エネルギーセキュリティの確保の重要性及びその中の政府の役割は大きく低下してきている。

しかし、途上国の経済成長や環境制約の観点から、中長期的なエネルギーセキュリティの確保に対する政府の役割が再び問われている。

過去

原油（エネルギー）の供給力が特定の国・地域に大きく依存していたため、エネルギーは、その取引において大きな外部性を有する財であった。このため、エネルギー・セキュリティ確保への政府の役割は極めて大きく、かつ正当なものであった。



- ・OPECの市場支配力を低下させる努力
(規制下での強力なエネルギー多様化の推進)
- ・エネルギー市場の自由化

現在

- 石油危機時と比較するとOPECの市場支配力は相対的に低下
- エネルギーセキュリティ確保に関して政府が果たしてきた役割の一部は市場参加者へ（特に、短期的な供給支障（価格高騰）などへの対応）
- 途上国の成長や環境制約を考慮した長期的なエネルギーセキュリティ確保戦略の必要性



将来は？

図3 エネルギーセキュリティ確保に関する政府の役割

以下では、代表的なエネルギーセキュリティ政策である資源外交と国内長期対策についての論点を示す。

(1) 資源外交

現実の世界では、資源の確保をめぐって国家が積極的に乗り出しているのが通例である。

エネルギー資源をめぐり、2国間、多国間で繰り広げられる交渉や対立において、各国政府がセキュリティ確保の問題に深く関与していることは、現実には否定できない。

例えば、米国では、エネルギー分野への市場原理の導入が進むとともに、エネルギーセキュリ

ティの確保に関する市場原理を活用すべきとの考え方支配的となってきた。しかしその一方では、米国は中東地域における兵力展開の改善を図ってきており、湾岸戦争時におけるイラク攻撃の本質は、石油の確保であると考えられている。また、欧米や中国では、石油を「戦略的商品」と考えているのに対し、最近の日本は、単なる「市況商品」と考える向きが一般化しており、「市況商品論」一色の考え方は、世界の常識とかけ離れた平和ボケの表れといった批判もある。

このような見方には、それなりの根拠があり、国家の役割を否定すべきではない。しかしながら、このことは、政府と市場が代替関係にあることを意味しているわけではない。むしろ、政府は市場参加者による取引が行われる枠組みを設定し、その枠組みの中で商業的な取引が行われると考えるならば、政府は可能なかぎり自由な取引を保障するために行動することが可能であり、この意味では政府と市場とは補完的なものと理解すべきである。政府の役割は、民間の投資を保護し、自由な取引を保障するための国際的な枠組みを構築することに限定されるべきであり、そのような国際協定の締結が求められている。政治的な理由に基づく、国家の必要以上の介入（政府の失敗）は極力回避されなくてはならない。

(2) 国内長期政策

各国政府はエネルギーセキュリティ確保のために、備蓄のような短期の政策のみならず、国産エネルギーの開発、代替エネルギーの開発、エネルギー利用効率の向上や省エネルギーなどの長期の政策に関して積極的に関与してきた。

国内長期対策についてもエネルギーセキュリティ確保の費用対効果を意識した取組みを実施する必要がある。そのためには、例えば、「代替エネルギーの開発にどの程度の期間と費用を要するか?」、「その開発により中長期的な視野でどの程度の限界損害関数の低下(資源価格上昇による経済成長率の低下)が見込めるか?」といった点を整理しておく必要がある。

1.4. エネルギーセキュリティの現状

本節では、エネルギーセキュリティの現状に関して、総合資源エネルギー調査会の最近(2001年度 WG 報告書[1])の見解、石油市場の動向と見通しを紹介するとともに、欧米諸国における最近の電力・ガス市場の流れがエネルギーセキュリティに及ぼす影響についてまとめる。

1.4.1. 総合資源エネルギー調査会の見解

(1) 現状認識

①日本及び世界のエネルギー情勢における状況の変化

70年代と最近の状況を比べると、国際的なエネルギーセキュリティは全般的に向上してきたといえる。

その背景として、世界的なレベルでのエネルギー供給源の分散化や経済のグローバル化の進展等により今日の工業社会を支える主要なエネルギー源である石油が、戦略商品であることには変わりがないが、一方で市況商品としての特性を一段と強めていることがある。他方、近年になって、価格ボラティリティ（変動性）の高まりという新たなリスクが拡大している。

日本を取り巻く情勢については、アジア地域での石油を中心としたエネルギー域外依存の高まりの可能性という地域的な状況に加え、欧米諸国に比べて石油依存度、石油の特定地域への依存度が高いこと等、世界的なエネルギーセキュリティの状況とは同様に論ずることが難しい面がある。

表 2 に、世界、アジア及び日本のエネルギー情勢を示す。

表 2 世界、アジア及び日本のエネルギー情勢

地域	情勢・動向
国際エネルギー情勢	<p>①エネルギーセキュリティの向上要因</p> <ul style="list-style-type: none">石油危機以降のエネルギー供給源の多様化自由化・市場メカニズムの導入と国際石油市場の発達 <p>②エネルギーセキュリティ上の新たなリスク（自由化の影響）</p> <ul style="list-style-type: none">原油の余剰生産能力の縮小原油の余剰生成能力及び創業在庫の縮小過度の価格ボラティリティの高まり (2000年には、欧米の国民生活に影響を与える事態に発展)
アジア地域におけるエネルギー情勢	<p>①エネルギー供給リスクの高まり</p> <ul style="list-style-type: none">エネルギー需要規模及び石油を中心とした域外依存度の拡大中国のエネルギー需給構造の転換による影響拡大の可能性石油備蓄等緊急時対応体制の未整備原油輸入量が日本にとって無視できないレベルに到達
日本のエネルギー情勢	<p>①エネルギーセキュリティの向上要因</p> <ul style="list-style-type: none">原子力等の代替エネルギー利用拡大

	<ul style="list-style-type: none"> ・省エネルギーの推進 ・約 160 日分の石油備蓄 <p>②潜在的なエネルギー供給リスク</p> <ul style="list-style-type: none"> ・エネルギー輸入依存・中東依存度の高さ
--	---

②中東地域及びアジア地域における国際的な政治情勢の変化

国際政治情勢をみると、全般的にいえば、冷戦終結に伴い緊張緩和がみられている。一方、日本の石油等の供給地域・輸送経路に当たる中東地域及びアジア地域ではむしろ潜在的な不安定化要因が多様化している。

表 3 に、中東及びアジア地域の政治情勢の概要を示す。

特に、東南アジアにおける輸送障害発生した場合の日本への影響については、アジア地域における脆弱なエネルギー供給体制も踏まえて以下のように分析している。

例えば、マラッカ海峡を通過し中東地域との間を往復するタンカーは、全行程往復で 40 日程度の日数がかかる。これがロンボク、オンバイ海峡を通過する経路に変更された場合には、さらに 5~7 日程度を追加的に要することとなる（通常航路に比べ 13~17% 程度の日数増加）。その際、通常経路と同じオペレーションを行うためには、航行日数の増加と同じ割合でタンカーを調達することが必要となる。仮に洋上で航行しているタンカーの数が 120 隻あるとすれば、迂回経路を選択することにより、さらに 16~20 隻のタンカーが追加的に必要となる。

こうした事態が生じた場合、我が国のみを想定すれば、仮に追加用船ができなくとも相当な長期間に渡って輸送障害が継続しない限り、備蓄を含めた原油等在庫の取崩しで対応可能である。しかし、輸送経路を共有する他のアジア諸国において、石油備蓄等緊急時対応体制が十分でないこと等を背景として、パニック的な事態が生じる場合には、仮需の発生により、アジア地域におけるエネルギー需給がさらに逼迫し、我が国に対しても供給障害や価格上昇を通じて影響が及ぶおそれがある。

表 3 中東及びアジア地域の政治情勢

地域	国際政治情勢
中東	<ul style="list-style-type: none"> ①90 年以降の長期かつ大規模な供給削減等の可能性の低下 ②留意すべきリスク・シナリオ <ul style="list-style-type: none"> ・若年層の増加による失業増大や財政悪化 ・中東和平プロセスの後退懸念（2002 年時点では顕在化） ・大量破壊兵器の導入開発 ・宗教的対立要素
アジア	<ul style="list-style-type: none"> ①領有権問題、政治的混乱等の不安定要因の蓄積 <ul style="list-style-type: none"> （日本のエネルギー輸送経路にも関連） ②留意すべきリスクシナリオ <ul style="list-style-type: none"> ・東南アジア地域等でのエネルギー輸送障害

(2) 諸外国の動向

表 4 に、エネルギーセキュリティに関する諸外国の動向を示す。

米国、中国及びインドにおいては、石油資源の戦略的な開発や原子力発電の利用拡大が主要なエネルギーセキュリティ向上策として提示されているのに対し、EU では、省エネルギーの推進と再生可能エネルギーの利用拡大を重視した向上策をとっている点が特徴的である。

表 4 エネルギーセキュリティに関する諸外国の動向

国・地域	動向・政策
米国	<ul style="list-style-type: none"> 原油価格や天然ガス価格の高騰、カリフォルニア州における電力供給危機等のエネルギーセキュリティを脅かす事態の発生。 ブッシュ政権は、2001年5月に国家エネルギー政策を発表、エネルギー供給の拡大・エネルギー安全保障の強化は最重要目標との位置付け。 国内に豊富に賦存する石炭燃料の利用拡大、温室効果ガスを排出しない原子力をはじめとする各種燃料の生産を増大、多様化することが必要との認識。 具体策としては、 「アラスカ自然保護区(豊富な石油埋蔵量)の鉱区開放とこれに伴う歳入の再生可能エネルギーへの充当」 「クリーンコール技術への投資」 「水力発電所認可プロセスの合理化」 「原子力発電所認可プロセスの合理化及び廃棄物処理対策の取組み強化」等が挙げられている。
EU	<ul style="list-style-type: none"> 2000年11月、EU委員会は、「グリーンペーパーエネルギーセキュリティのヨーロッパ戦略に向けて～」において、高いエネルギー域外依存により経済が国際価格変動に大きく影響を受けているとの現状評価。 具体的なエネルギーセキュリティ向上策として、 「省エネルギーやエネルギー源の多様化の促進」 「再生可能エネルギーのシェア拡大のための財政措置」 「欧州戦略石油備蓄メカニズムの強化」 「天然ガスの備蓄の創設」 「エネルギー供給ネットワークの強化」等を提示。
中国	<ul style="list-style-type: none"> 近年の石油輸入量の増大 2001年3月に発表された「第10次5ヵ年計画」において、石油を資源戦略における重要課題と位置付け、 「石油・天然ガスの探鉱・開発」 「石油資源の節約」

	<p>「石油などの戦略資源の早期樹立」 「中東・ロシアとのエネルギー外交」 等が提唱されている。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・エネルギー多様化戦略として 「タリム盆地等西部の天然ガスを上海など東部沿岸地域へ輸送する大型インフラ建設」 「エネルギー需要の多い沿岸地域での原子力発電所の建設」
インド	<ul style="list-style-type: none"> ・ 今後の石油需要の増大、国内の石油市場の規制緩和計画等の要因により、石油の安定確保が大きな課題 ・ 国営石油会社を通じてサハリンの石油・天然ガスプロジェクトに関与 ・ 石油備蓄戦略に関する検討開始

(3)今後のエネルギーセキュリティ対策

WG 報告書では、(1)及び(2)で示された現状認識に基づき、「日本」、「アジア」及び「グローバル」の3つの枠組みでの今後のエネルギーセキュリティ確保のための取組みを提言している。

その中で、原子力は、

- ・エネルギー密度が高く備蓄が容易（燃料工場在庫で2年強の運転が可能）
- ・ウラン資源が、カナダ、オーストラリア等の比較的政情が安定した国に分布

等の理由から、エネルギーセキュリティ上極めて優れたエネルギー源と位置付けられ、原子力の着実な開発利用がエネルギーセキュリティの向上につながると評価されている。

また、アジア地域におけるエネルギー需要の将来的な増加に対するエネルギー源として、原子力発電は有力な選択肢であることから、日本で長年にわたって培われた安全な原子力平和利用技術を移転することにより、アジア地域のエネルギーセキュリティ向上に貢献できると評価されている。その際には、核不拡散に十分配慮した国際協力を進めることが重要であり、原子力資材の供給のみならず、日本で培われた安全思想とあわせて移転するといった視点が必要と指摘されている。

表 5 今後のエネルギーセキュリティ対策のあり方

項目	内容
日本	<ul style="list-style-type: none"> ①情報収集・分析評価体制の強化 ②石油の安定供給確保 <ul style="list-style-type: none"> －効率的かつ効果的な自主開発の促進 －中東産油国との協力関係強化 －石油備蓄の活用のあり方 －LPガス（液化石油ガス）の安定供給確保 ③石油代替エネルギーの利用促進 <ul style="list-style-type: none"> －原子力の利用拡大 －天然ガスの利用拡大 －運輸部門での石油代替燃料の確保 －新エネルギーの導入促進 ④省エネルギーの促進
アジア	<ul style="list-style-type: none"> ①アジア諸国との情報・認識の共有 ②石油の安定供給確保 <ul style="list-style-type: none"> －石油備蓄等の石油セキュリティ確保に対する協力の推進 <ul style="list-style-type: none"> ～アジア石油セキュリティ・イニシアティブの推進～ －アジアにおける地域対地域の対話強化 －透明性の高い国際石油市場整備の検討 ③石油代替エネルギーの開発・利用拡大 <ul style="list-style-type: none"> －天然ガスの開発・利用拡大 －環境負荷の少ない石炭利用技術の移転 －原子力に関する協力 ④省エネルギー・新エネルギー普及のための協力
グローバル	<ul style="list-style-type: none"> ①国際的な石油市場の安定化 <ul style="list-style-type: none"> －産油国と消費国の対話の推進 －石油市場透明性の向上 －欧米諸国と連携した産油国との緊密な意見交換 ②緊急時対応体制の強化 <ul style="list-style-type: none"> －エネルギーセキュリティ・システムの維持・向上 －IEAにおけるアジア諸国等非加盟国との協力の推進 ③IEAにおけるエネルギー源多様化等での協力

1.4.2. 石油市場の現状と長期的展望

(1) 国際石油市場の現状

1985 年に OPEC が高価格政策を放棄して以降、1990-1991 年の湾岸戦争時と 1999-2000 年の OPEC 減産合意の時期を除き、原油価格は低位で安定的に推移している。この大きな要因としては、最大の産油国であるサウジアラビアが 1980 年代前半までの生産調整路線から増産路線に方針を変更したことがある（アラスカ及び北海油田の開発が進んだことによって、市場環境が大きく変化したためである）。

ここでは、資源開発と市場支配力の観点で、石油市場の現状を分析する。

① 資源開発

1999 年現在、石油の埋蔵量は 1 兆 338 億バーレル、これに対して生産量は 7189 万バーレル/日(1999 年)であり、可採年数は 41 年という状況である。可採年数は、1963 年以降ほぼ一貫して 35 年を下回ってきたが、1987 年頃から上昇し、以降ほぼ 40 年を上回るレベルで推移している。埋蔵量のうち、サウジアラビアが 25.5%、イラクが 10.9%、アラブ首長国連邦が 9.4%、クウェートが 9.3% とこれら 4ヶ国で 55.1% を占める。このほか、旧ソ連が 6.3%、他の OPEC 諸国が 22.5%、OECD 諸国が 8.3% を占めている（1999 年）。また、石油の資源量は 7.1 兆バーレル程度と見られている。

石油の埋蔵量が増加している要因としては、1980 年代前半までの OPEC の高価格政策が以下のような結果をもたらしたことによると考えられる。

- ・ 原油や石油製品から他の燃料（とくに、ガスと石炭）及び資本（エネルギー効率向上）への代替が行われた。
- ・ 高コストの採掘が経済的になった。
- ・ OPEC 以外の地域での石油開発のインセンティブを西側諸国や石油企業に付与した。

そのほか、存在しているものの採掘されていないオイル・サンド（タール・サンド）やオイル・シェールなどの非在来型の石油資源もある。これらの資源量の推計は難しいがオイル・サンドは 2 兆バーレル、オイル・シェールは 3 兆バーレル以上と推計されている。現在のところ、これら資源の生産は技術的・経済的および環境的制約で制限を受けている。

上述した資源開発の観点からみれば、少なくとも今後 20-30 年間は、石油市場の逼迫は考えにくいとの見方が支配的である。

② 市場支配力

最近の原油価格の低下によって、世界的に石油の需要量が増大し、OPEC 原油への輸入依存度が再び高まりつつある。日本においても、その傾向は顕著である。

埋蔵量の観点でも、1970 年代において原油の埋蔵量に占める OPEC のシェアは約 78% であり、1985 年に 66.5% まで一旦低下したものの、1999 年には 77.6% に達している。世界の原油埋蔵量の 3 分の 2 は中近東に存在することになる。そのため、OPEC のシェアの増大は再びその市場支配力を強めることになる可能性は十分にありえる。OPEC の結束により、1998 年末から 2000 年

中頃にかけて石油価格は3倍に高騰したが、このような状況が今後も発生することは否定しきれない。

(2) 長期的展望

現在、有限なエネルギー資源、とりわけ石油の長期的な利用可能性については、異なる見解が存在する。

一方では、予見可能な将来において石油資源は本質的に確保されているとする研究者が存在している。代表的な見解として、Fesharaki[19]「少なくとも向こう20年間は、資源供給の問題は心配の種とはならないことは明らかである。OPECの石油生産は1998年から2010年にかけて1500万から2000万バレル/日は容易に増産しうる。また、非OPECの石油供給は数百万バレル/日増大するであろう。これに対して、向こう10年における石油需要の増大は、世界で1000万から1500万バレル/日と見られている。仮に、政治的な原因により石油価格が上昇するとなれば、新たな生産を加速することになるため、それは長くは続かないであろう。…資源は、本質的に確保されており、…ある国がそれを購入できる限り、石油は存在している」

他方では、新たな石油危機の可能性に関してだけでなく、石油時代の終焉に関して警告を発する者も存在している。その主張の要点は、「世界のほとんどの石油はすでに発見されており、そのことは最近新しい巨大原油が発見されていないことからも明らかである。中東の埋蔵量は政治的な理由で過大に述べられている。現在の油田は、規模と生産において他の予測が示すほど拡張し続けることはないであろう。中東以外の大部分の石油生産国は、近く、石油の埋蔵量の50%が生産された時点で、そのピークに達するといわれている。生産は、その後急激に落ち込んでいく。このように、彼らは『安い石油の終わり』が近く、価格は間もなく上昇していくと予想する」(Lynch(1998)[20])。

資源の有限性に関する争点は、エネルギー資源の物的資源量とともに人間の工夫と技術的な進歩に関するものである。これに関連してGorden[21]は、「エネルギーにおける基本的な論争は、人間の工夫力のみが経済成長の制約であると信じるものと、資源の利用可能性が究極的には経済成長の制約であるとの意見を有する者との間で行われているが、人間の工夫力が資源の希少性にはるかに勝っているとの明らかな証拠が存在している。このことは、上記の（経済成長は人間の工夫力に依存している）状況は少なくとも来世紀（21世紀）の前半までは持続されることを示唆している」と述べている。多くの研究者も、人間の工夫力が天然資源を生み出すとの考え方には立っているといえる。Zimmerman[22]によれば、資源は存在するのではなく、資源となるのであり、その原動力は技術進歩であり、より一般的には人間の工夫力である。

政策的な観点からは、資源の有限性が特別な市場の失敗を生み出すかどうかに関して検討されなくてはならない。仮に、市場の失敗が存在すれば、政府による市場への介入が是認され、事態は改善される。仮に、そのような失敗が存在しなければ、いつかは枯渇するという厳しい現実に従うほかない。

その際、資源の枯渇性が市場にどのように影響を与えるか、すなわち、化石燃料のコストと価格が下落するのか、それとも上昇するかについては、市場の失敗の議論とは別の問題であることに注意を要する。仮に、資源の過剰な採掘につながるような市場の失敗があれば、資源のコストと価格が上昇していくようと下落していくよう、政府の介入が求められる。逆に、市場の失敗が存

在していない限り、資源のコストと価格が上昇していようと下落していようと、政府による介入は有益ではない。

1.4.3. 競争市場とエネルギーセキュリティ

欧米を中心に電力・ガス市場に競争原理が導入された国では、需要家は様々なエネルギー商品の中からサービスを選択する状況が生まれている。このような中で、需要家は、低価格のエネルギー供給を求めるだけなく、安定的な供給を求める場合もありえる。このため、競争市場では、価格と並んでエネルギー供給保障も重要な商品特性となっており、エネルギー企業は他の事業者との差別化を図るために様々なエネルギーセキュリティ確保戦略を模索している。

以下に、競争市場におけるエネルギー企業の代表的なエネルギーセキュリティ確保戦略を示す。

(1) 資本統合

資本統合は、エネルギーセキュリティの確保を第一目的と実施されるものではなく、むしろ資本統合の結果としてエネルギーセキュリティが向上すると捉えるのが妥当である。資本統合の主目的は、効率向上と市場支配力の増大にある。

最近の傾向としては、グローバルな企業再編と異業種間統合が挙げられる。前者は、特に欧州の電力産業における国際的M&Aの拡大、後者は電力事業とガス事業の価値連鎖を追求する電力会社とガス会社の合併が挙げられる。後者の場合、合併会社の電力事業部門はガスの供給途絶リスクの軽減というエネルギーセキュリティ上のメリットを享受することができる。

(2) ヘッジ契約

先渡し(Forwards)、先物(Futures)、オプション(Options)等の派生商品（デリバティブ）をエネルギー企業のエネルギーセキュリティリスクのヘッジに活用されるようになってきている。先渡しは、市場参加者2者間の契約により特定の将来の日に商品（現物）の受け渡しを行うものである。一方、先物は、先渡しとは異なり、通常、反対売買により取引を清算できる「金融取引」の性格を有しており、標準化された規格品が取引所で取引される。

オプションは、その所有者に予め決められた価格で、ある期間内に（アメリカン・オプション）、またはある特定の日に（ヨーロピアン・オプション）、電気、ガス、石油等の商品を購入（コール・オプション）または売る（プット・オプション）権利を付与する契約である。

先渡し契約は、エネルギー市場に共通して用いられてきた。先物やオプションは、初め石油市場において取引されていたが、その後、電力やガスの取引の重要性が増すにつれ、これらの市場においても用いられるようになった。

これらの商品の活用においては、取引コストが低いことが重要である。市場の自由化に伴って取引所が整備されたことにより、取引量が増大し、取引コストも減少したことがヘッジ契約の有効性が大きく高まった一因である。

(3) 供給途絶契約

供給支障が生じた場合には、エネルギー供給事業者は最悪の場合、最終需要家へのエネルギー供給が不可能となる恐れがある。供給がなされない場合、企業は違約金を支払う必要がある。こ

のようなリスクをヘッジするために、エネルギー供給事業者は需要家と供給遮断可能契約を締結し、あらかじめ定められた事態が発生した場合には、供給を遮断する権利を得ることができる。通常、供給遮断可能契約のもとで供給されるエネルギーの価格は常時契約で供給されるものよりも割安である。この常時と供給遮断可能契約の価格差（スプレッド）は、エネルギー供給事業者が支払うリスク・プレミアムとなる。

供給遮断可能契約を結ぶ需要家は、通常、燃料転換の容易な需要家である。このような需要家は、大部分産業用の需要家か発電需要家である。これらの需要家は、供給されない場合に対応策を講ずる代わりに安価なエネルギー供給を享受することになる。

経済のグローバル化やエネルギー分野の自由化の中で、エネルギー・セキュリティのかなりの部分は需要家も含めた市場参加者によって確保することが可能であるし、ヘッジ契約や供給遮断契約のような契約の多様化（市場メカニズム）が有効に活用されるべきと考えられる。

1.4.4. 電力市場自由化とエネルギー・セキュリティ

本項では、電力市場への競争導入がエネルギー・セキュリティに及ぼす影響についてまとめる。ここでは、主に発電用燃料供給及び発電設備への投資の観点からまとめているが、これ以外にも、技術的な系統運用の信頼性（最終需要家への供給）の観点もある。

(1) 発電の燃料構成変化

電力市場の自由化はリスク負担の変化をもたらす。コスト規制のもとでは、需要の伸びに関する誤った予測などの投資リスクは基本的に需要家によって負担される。完全な自由化市場においては、投資リスクはもはや需要家に転嫁することはできず、このことは投資家に対し、リスクを最小化するインセンティブを付与することになる。

このようなリスクを軽減するために、投資家は早期の償却や資本コストの小さい投資を選好するようになる。このことは、近年におけるガス価格の低下や先端的なコンバインド・サイクル・ガス・タービン技術の発展とあいまって、英国に典型的に見られるようにガスを利用する電源を増大させている。英国は主として国産ガスに依存しているものの、国産ガスの賦存量の少ない他の国では輸入ガスに依存することになり、輸入依存度が高まっていくと見られている。

また、石油についても、近年の石油価格の低迷は石油需要の増大とOPECの生産シェアを増大させており、電力市場の自由化によりガス同様需要が増大し輸入依存度が高まっていく場合には、価格ショックに対する影響は大きくなり、供給保障上の問題が生ずるとの懸念がある。

(2) 発電における効率向上による燃料投入量の低下

競争圧力が増大する中でコスト低減を行う1つの方法は、発電における効率を向上し燃料投入を軽減することである。発電においては効率向上の潜在的 possibility が存在しており、発電用燃料の需要が減少していくことが期待できる。

(3) コスト削減圧力による燃料ストックの低下

規制下においては、電気事業は1次エネルギーの合理的な貯蔵コストは規制当局によって回収

することが通常認められている。しかし、競争が市場に導入されることによりコスト削減の圧力が増大する結果、貯蔵のためのコストは極力圧縮されることになると予想される。

(4) 電力の輸入比率の増大

市場の自由化は供給事業者の自由な選択を可能にする。そのさい、その「国籍」、すなわち国内の供給事業者であるか又は外国の供給者であるかが問われることはない。電力は産業にとって重要な投入要素であり、その価格が高い国においては、輸入を増大させることが経済的であるため、電力の輸入比率が増大する。しかし、送電の制約やコストによって、輸入の可能量は限定される。

(5) 供給契約の弾力化

エネルギー市場の自由化は、市場参加者のニーズ（価格、契約期間、遮断可能性等）に適合した供給契約を締結する機会を提供する。その結果、エネルギー供給は供給支障が最も大きな損害をもたらし、供給保証確保のために最も高い価格を支払う用意のある利用者に対して行われることになる。このことは、供給保証がより効率的に確保されていることを意味している。

(6) 供給の多様化

エネルギー市場の自由化により、ガス輸出国は新たな国外市場への進出を積極化するであろう。その結果、新たな輸送設備が建設され、輸入国に対し輸入燃料のポートフォリオを再構築するチャンスを与え、燃料の多様化が促進されることから、供給支障のリスクを軽減されることになる。

(7) 国際協調

各国市場の国際的リンクが強化されるにつれ、市場の条件も調整が求められる。このような中で、供給保証確保のための措置に関する規制（例えば、備蓄義務）も調整が必要とされている。供給保障に関する方策の国際的な調整により、各の方策はより国際的な協調システムに組み込まれるようになり、地域全体の供給保障のレベルは高まっていくことだろう。

(8) 国際的な投資を通じての相互依存関係の強化

電力市場の自由化により、(1)で見たように市場参加者にとっての経済的リスクは増大する。このため、市場参加者はこのようなリスクを垂直的・水平的統合（垂直的統合：エネルギー事業の価値連鎖の異なる段階に属する事業者間の統合（例えば、発電事業者と電力小売事業者、発電事業者と燃料供給事業者（以下の例）等）、水平的統合：エネルギー事業の価値連鎖の同じ段階に属する事業者間の統合（例えば、ガス小売事業と電力小売事業の統合））によりヘッジしようとする可能性がある。

たとえば、ガス火力のシェアが高い発電事業者には他国のガス生産者の株式の一部を購入するインセンティブが働く。その一方で、ガスを輸出する会社は他国の主要な供給事業者を買収し、販売を確保しようとする可能性がある。

このように、将来、国際的な投資を通じての相互依存関係は強化されていくと考えられ、そのため、輸出国と輸入国相互の利害調整は進展し、供給支障のリスクは軽減していくと指摘されて

いる。

以上の考察から、電力市場自由化のエネルギーセキュリティに及ぼす影響に関して唯一の結論を引き出すことはできないが、一般的には、燃料輸出国と輸入国の関連に見られるような国際的相互依存関係の深化により供給支障の発生の可能性は減少していくと考えられている。しかし、エネルギーセキュリティへの影響については、各国の固有の条件によって異なってくると考えられる。特に、日本では、原子力発電をエネルギーセキュリティ確保政策の中心に位置付けている。このため、電力市場の自由化によって、電気事業者が投資リスクを非常に重視する（上記(1)の影響）ようになり、初期投資の大きい原子力発電所の新設が滞る状況は、エネルギーセキュリティ確保の観点から懸念されている。日本でも、現在、電力市場は部分的に自由化されており、将来的には小口需要家まで含めて完全に自由化される見込みであるが、電力自由化と原子力政策の整合性については、今後の詳細な制度設計の中で検討していくべきと考えられている。

1.5. エネルギーセキュリティと原子力

本節では、2002年の原子力学会論文誌に掲載された『エネルギー安全保障における原子力の評価－政策文書からの分析－（入江、神田）[5]』での問題提起を参考にしながら、「原子力のエネルギーセキュリティ上の優位性に関するこれまでの評価」、「エネルギーセキュリティの現状を踏まえて今後重視及び協調していくべき論点」についてまとめる。

(1) 問題提起

石油資源に恵まれない日本にとって、石油危機以降、エネルギーセキュリティの確保は最優先のエネルギー政策目標として掲げられてきた。ウラン資源の供給安定性やFBR導入によるウラン使用効率の飛躍的向上の可能性を踏まえて、原子力エネルギーは将来に向けてエネルギーセキュリティの向上に大きく寄与するものと位置付けられてきた。言い換えれば、原子力を日本に導入する根拠として、エネルギーセキュリティが論じられてきた面があるといえる。

しかし、エネルギーセキュリティの概念は歴史的に変遷しており、その定義は必ずしも明確ではなかった。特に、輸入エネルギーの不意の供給削減・中断という短期的な脅威に対応してエネルギーの安定供給を図る「短期的（あるいは狭義の）エネルギーセキュリティ」と、エネルギー資源の枯渇といった中長期的な脅威に対応してエネルギーの安定供給を図る「中長期的（あるいは広義の）エネルギー安全保障」との区別が曖昧なまま論じられてきたため、混乱してきた側面がある。

こうしたエネルギーセキュリティの概念自体の曖昧性も一つの要因となって、原子力がいかにエネルギー安全保障に寄与しうるかの論理は必ずしも明快なものとはなっていない。すなわち、上述の短期的エネルギー安全保障と中長期的エネルギーとの区別が曖昧なまま、エネルギー安全保障が論じられているため、原子力のいかなる特性を捉えてエネルギー安全保障への寄与を評価するかも十分整理されていない。

特に、近年では、日本における原子力は海外からのウラン資源輸入に依存しており、エネルギー安全保障上も有利ではないのではないか、といった疑問の声が聽かれる。また、ウラン資源も石油資源と同様に早晚枯渇してしまうので、原子力は将来のエネルギー安全保障には寄与できないといった意見も聽かれる。「むしろ天然ガスのほうがウラン資源よりも賦存量が遥かに多く、エネルギー安全保障において有利である」あるいは「太陽光や風力などの新エネルギーこそ、純粹に国産エネルギーであり、エネルギー安全保障に最も貢献する」といった議論が提起されている。このため、天然ガスや新エネルギーとの競合を論ずる上では、原子力のエネルギーセキュリティ上の意義について一貫性のある主張が必要である。

(2) 原子力のエネルギーセキュリティ向上への寄与度に関する評価

日本のエネルギー政策文書においては、原子力のエネルギーセキュリティへの寄与が高く評価されてきている。その中で、特に原子力に関わる政策文書としては、原子力委員会が決定した原子力開発利用長期計画と経済産業省総合資源エネルギー調査会が提言した各種の答申・報告書の2系統の政策文書がある。以下では、両政策文書における原子力のエネルギーセキュリティ上の特性に関する記述の変遷を略述し、それらを踏まえて原子力のエネルギーセキュリティ上の意義をまとめる。

① 原子力長期計画

表 6 に、原子力開発利用長期計画における原子力のエネルギーセキュリティ上の特性に関する記述を示す。1956 年から 2000 年までに、おおむね 5 年ごとに 9 回にわたって同種の長期計画が策定されている。

全体的な傾向は以下のようにまとめられる。

- ・ 国内ウラン資源への依存の期待が高かった第 1 回計画(1956 年)を除くと、第 3 回(1967 年)から第 5 回にかけては、短期的エネルギーセキュリティ上はウラン資源の供給安定性、燃料輸送及び燃料備蓄の容易性が評価され、中長期的エネルギー安全保障上は増殖可能性が評価される傾向にあった。
- ・ 第 6 回(1967 年)から第 8 回(1994 年)にかけては、短期的エネルギーセキュリティ上として Pu 等の回収利用が重視され、中長期的エネルギーセキュリティ上は増殖可能性や核融合まで含めて評価される結果となっている。
- ・ 直近の第 9 回では、短期的エネルギーセキュリティ上はウラン資源の供給安定性と燃料備蓄の容易性に関心が回帰する一方、中長期的エネルギーセキュリティでは従来の傾向が続いている。

表 6 エネルギーセキュリティに係る原子力の特性（原子力開発利用長期計画）

長期計画	短期的エネルギー安全保障関連					中長期的エネルギー安全保障関連				
	国内資源 依存	資源供給 安定	燃料輸送 容易	燃料備蓄 容易	Pu 等 回収利用	発電原価 安定	技術集約 型エネル	Pu 等 回収利用	増殖可能 性	核融合
第1回 (1956)	○								○	
第2回 (1961)		(○)								○
第3回 (1967)	○	○	○						○	
第4回 (1972)	○	(海外資 源開発可	○	○					○	
第5回 (1978)	○	○	○	○	○				○	
第6回 (1982)				○				○	○	○
第7回 (1987)			○	(燃料の 備蓄性高	○	○	○	○	○	○
第8回 (1994)				○		○	○	○	○	○
第9回 (2000)	○	(輸出国 の政情安	○	○				○	○	○

注：(○) はエネルギー安全保障上の特性分析であるかが明確でないもの。

② 総合資源エネルギー調査会

総合資源エネルギー調査会は、エネルギーの安定的かつ合理的な供給の確保に関する総合的かつ長期的な施策に関する重要事項を調査審議するための経済産業省の諮問機関である。

総合資源エネルギー調査会は、その下部機関として部会、小委員会を持ち、エネルギー政策に関わる多くの答申、報告書をとりまとめてきている。そのうち、原子力政策上の諸課題について

は原子力部会が答申をまとめているが、原子力のエネルギー安全保障上の意義については、むしろエネルギー政策の全体像を検討する総合部会及びエネルギー需給を検討するエネルギー需給部会の答申が重要である。

表 7 に、これまでの主要な答申における原子力のエネルギーセキュリティ上の特性に関する記述を示す。1960 年代

全体的な傾向は以下のようにまとめられる。

- エネルギーセキュリティ概念の萌芽期(1960 年代～1970 年代前半)から確立期(1970 年代前半～1980 年代前半)には、燃料備蓄の容易性や核燃料サイクルといった原子力の物理特性への関心が高く、資源枯渇への懸念から中長期的エネルギーセキュリティ上の評価も見られた（最もエネルギーセキュリティへの関心が高かった時代）。
- 第 1 の変容期（1980 年代中盤）に入ってエネルギーセキュリティへの関心が低下すると、原子力のエネルギーセキュリティ上の評価の議論も簡略化されている。この時代には、エネルギーセキュリティの確保は必ずしも最重要の政策目標ではなく、コスト低減要請と並置される形で議論された。
- 第 2 の変容期（1990 年代）には、地球環境問題という科学的であると同時に政治的な課題への対応が求められる中で、原子力についてもウラン資源が先進国に広く賦存し供給が安定しているという政治的特性が注目されている。
- 近年（2000 年以降）には、発展途上国におけるエネルギー消費量の増大に伴う資源枯渇への懸念から、核燃料サイクルによる燃料資源の回収・再利用及び増殖可能性による中長期エネルギーセキュリティに再び関心が向けられつつある。

表 7 エネルギーセキュリティに係る原子力の特性（総合資源エネルギー調査会答申類）

答申類	短期的エネルギー安全保障						中長期的エネルギー安全保障	
	資源供給安定	燃料輸送容易	燃料備蓄容易	Pu等回収利用	増殖可能性	その他	Pu等回収利用	増殖可能性
1. 調査会答申(1967)	○	○	○		○	(核燃料サイクル確立)		○
2. 調査会中間答申(1975)		○		○	○		○	○
3. 基本問題懇談会報告(1975)			(備蓄効果)	(新型炉開発等)	○	(新型炉開発等)	○	(新型炉開発等)
4. 石油代替エネルギー導入指針(1980)	○	○	○	(核燃料サイクル確立)	○	(発電コスト安)	○	(新型炉開発等)
5. 基本政策分科会・需給部会報告(1983)				(自立的核燃料サイクル)				○
6. 需給部会報告(1987)				(備蓄効果)	(核燃料サイクル確立)			
7. 調査会中間報告(1990)	○					(技術集約型)		
8. 基本政策小委中間報告(1993)	○							
9. 需給部会中間報告(1994)	○							
10. 基本政策小委中間報告(1996)	○			○	(備蓄効果)	(核燃料サイクル確立)		
11. 需給部会中間報告(1998)							(核燃料サイクル確立)	
12. 総合部会エネルギーセキュリティWG報告(2001)	○		○	(備蓄効果)	○	(核燃料サイクル自立性向上)	○	○
13. 総合部会・需給部会報告(2001)								

注：(○)はエネルギー安全保障上の特性分析であるかが明確でないもの。

③ 原子力のエネルギーセキュリティ上の意義

①及び②を踏まえると、原子力の今日におけるエネルギー安全保障上の意義は、表 8 に示すよ

うに要約される。

表 8 原子力のエネルギーセキュリティ上の意義

項目	内容
短期	①燃料資源国の政情の安定性（燃料供給の安定性） ②燃料備蓄の容易性（意図的な備蓄以外に、加工工程・燃料装荷による事実上の備蓄効果） ③発電原価の安定性 ④使用済み燃料の再処理による燃料の回収・再利用の可能性
中長期	①使用済み燃料の再処理による燃料の回収・再利用の可能性 ②増殖炉開発による燃料増殖の可能性 ③核融合開発による無尽蔵の燃料資源の活用可能性

(3) 原子力の意義の向上

① エネルギーセキュリティ向上のための施策

日本では、これまで原子力のエネルギーセキュリティ上の特性を高く評価して、しばしば原子力を「準国産エネルギー」として性格づけてきた。しかし、「準国産エネルギー」という呼称は、ともすれば「国産エネルギー」と同等の供給安定性が何らの努力を要さずに確保されるとの誤解を招いてきたのではないかと危惧される。原子力も、ほとんどをエネルギー資源の輸入に依存し、かつその資源が枯渇性の鉱物資源であることを省みると、国産エネルギー並みの供給安定性を維持伸張するためには、継続的な技術開発や資源外交が必要である。

表 9 に、原子力のエネルギーセキュリティ上の特性を更に向上させるための施策を示す。

表 9 原子力のエネルギーセキュリティ上の特性の向上策

期間	項目	向上策
短期	燃料供給の安定性	－資源輸出国との政策対話 －核燃料資源開発への公的関与 －核燃料加工の工程に関する国内能力の維持
	備蓄	－核燃料の公的備蓄支援制度
	発電原価の安定	－燃料費の低価格安定の追及（備蓄とも関連）
	再処理及びプルサーマル	－プルサーマルに関する社会的合意形成
中長期	高速増殖炉	－継続的な技術開発
	核融合開発	－継続的な技術開発

② 長期エネルギー需給見通しの必要性

政府が望ましいエネルギー構成を示す目標として、総合資源エネルギー調査会において長期工

エネルギー需給見通しが策定されてきている。しかし、エネルギー政策においては、技術の研究開発のみならず、資源の探鉱開発や利用においても相当の期間を要することが多い。特に、原子力の場合には、原子力発電所の立地に長期間を要することから、エネルギー利用のリードタイム（準備期間）が数10年に及ぶ場合もある。総合資源エネルギー調査会需給部会が策定する「長期エネルギー需給見通し」は、「長期」と称しつつも現在は、せいぜい10年強の期間を対象とした中期的な見通しであり、数10年を対象とした中期的な見通しであり、数10年を対象とする長期的需給の見通しは、総合資源エネルギー調査会とは別途の非公式な諮問機関を設置してときおり試みられているに留まっている。今後、原子力のエネルギーセキュリティ上の意義、「特に中長期的なエネルギーセキュリティ上の意義」をより的確に反映させるためには、公式の長期エネルギー需給見通しにおいても、数10年単位のより長期の見通しを立てていく必要があると考えられる。

仮に、数10年単位の、より長期的なエネルギー需給見通しが公式に策定されるならば、エネルギー資源の枯渇や地球温暖化への対応といった中長期的エネルギーセキュリティの問題を正面から取り上げざるを得ないものと考えられる。その場合、使用済み燃料からのPuの回収・利用の可能性や高速増殖炉による燃料増殖の可能性等、原子力が中長期的エネルギーセキュリティに対してどのように寄与するかについても定量評価も含めた十分な検討が必要になると考えられる。

1.6. まとめ

本章の調査内容は、以下のように要約できる。

【エネルギーセキュリティの定義】

価格ショック（短期的なエネルギーセキュリティ）と資源枯渇等による価格上昇（中長期的なエネルギーセキュリティ）の2通りの観点がある。また、エネルギー価格への直接的な影響だけではなく産業への経済波及による間接的効果まで含む概念である。

【エネルギーセキュリティ確保の費用対効果】

エネルギー供給支障に係る限界損害関数を上回らない範囲のコストでのエネルギーセキュリティ対策が有効である。

エネルギー供給支障に係る限界損害関数は絶対的なものではなく、時代と共に変化するものである。我が国の短期的な価格ショックに着目する限り、現時点の限界損害関数は石油危機時に比べて低水準にある。しかし、地球温暖化などの環境影響、途上国の経済発展による資源枯渇の可能性等を考慮すると、定性的には中長期的に限界損害関数が再び上昇すると考えられおり、中長期的なエネルギー供給支障に係る限界損害関数を定量化する努力が必要である。

【エネルギーセキュリティと政府の役割】

石油危機～1980年代前半にかけては、原油の供給力が中東に大きく依存していたことから、原油は大きな外部性を有する（限界損害関数が大きい）財であり、エネルギーセキュリティの確保のための政府の役割は大きく、かつ正当なものであった。しかし、その後の西側先進国におけるエネルギー多様化の推進、資源開発、市場の自由化等の影響により、現時点では、エネルギーセキュリティの確保の重要性及びその中の政府の役割は大きく低下してきている。

しかし、途上国の経済成長や環境制約の観点から、中長期的なエネルギーセキュリティの確保に対する政府の役割が再び問われている。

【エネルギーセキュリティと原子力】

ウラン資源の供給安定性やFBR導入によるウラン使用効率の飛躍的向上の可能性を踏まえて、原子力を日本に導入する最大の根拠として、エネルギーセキュリティが論じられてきた。

しかし、エネルギーセキュリティを取り巻く状況は上記のように歴史的に変遷してきているにも拘らず、輸入エネルギーの不意の供給削減・中断という短期的な脅威に対応してエネルギーの安定供給を図る「短期的（あるいは狭義の）エネルギーセキュリティ」に対する原子力の役割と、エネルギー資源の枯渇といった中長期的な脅威に対してエネルギーの安定供給を図る「中長期的（あるいは広義の）エネルギー安全保障」に対する原子力の役割の区別が曖昧なまま論じられてきた。このため、近年では、日本における原子力は海外からのウラン資源輸入に依存しており、エネルギー安全保障上も有利ではないのではないか、といった疑問の声が聽かれる。

以上の状況踏まえると、現在、我が国における中長期的なエネルギーセキュリティ確保戦略が

問われており、エネルギーセキュリティ上の原子力（FBR の開発まで含めて）の役割も中長期的な観点から明確にする必要があるといえる。特に、我が国は今後急速に経済発展し、エネルギー消費量が伸びると予想されるアジア地域との経済的にも結びつきが強いことから、アジア全体でのエネルギーセキュリティ確保といった視点も重要である。

また、エネルギーセキュリティに関する定量的な分析を実施する場合には、エネルギー価格への直接的な影響だけではなく産業への経済波及による間接的効果まで含めた検討が必要である。

2. 評価手法の検討

本章では、既存のエネルギー経済モデルについて調査し、今後の中長期的なエネルギーセキュリティ（エネルギーコスト上昇・供給途絶に伴う直接・間接的な損害費用、FBR という技術が中長期的なエネルギーセキュリティ確保に果たす役割）の定量評価への適用可能性について検討する。2.1 節では、代表的なエネルギー経済モデル（最適化型モデル及び一般均衡モデル）の概要、既存のエネルギー経済モデルの概要及びその適用例について調査結果をまとめた。2.2 節では、エネルギーセキュリティの定量評価に必要な条件を考慮して、各モデルの評価への適用可能性について検討する。

2.1. エネルギー経済モデル

2.1.1. 最適化型モデル

まず、最適化型モデルで取扱う変数やデータのイメージを理解することを目的として、簡易なモデル例を示す。次に、一般的な最適化型モデルの概要及びモデルでの技術選択の取扱いについて説明する。

(1) 簡易なモデル例

ある工場において、エネルギーとして電力と蒸気を必要とし、今工場には A と B の 2 種類のエネルギー プラントがあるとする。プラント A からは、電力と蒸気をそれぞれ 40% と 15% の効率で同時に発生させることができ、同様にプラント B からは電力と蒸気をそれぞれ 25% と 30% の効率で発生させることができるとする。さらに、A、B のプラントには 1 時間当たりに消費できる燃料の量には制約があり、プラント A は 2GJ 以上 8GJ 以下、プラント B は、2GJ 以上 6GJ 以下であるとする。

そして、この工場は 1 時間以内に少なくとも 2GJ の電力と 1.5GJ の蒸気が必要であるとし、プラント A の燃料費は 1GJ 当り ¥1,000、プラント B のそれは ¥800 であるとする。このとき、最適化問題として、「プラント A、B をどのように組み合わせて運用すれば燃料費の合計が最小になるであろうか」を考える。そこで、この問題を数式で表現する。1 時間当たりのプラント A の燃料消費量を $x[GJ]$ 、プラント B のそれを $y[GJ]$ とすると、電力と蒸気の供給量に関する制約式と目的関数、すなわち燃料費の総計を最小にする問題は図 4 のように記述できる。この問題を解くには、制約条件を満たす X と Y の組み合せの中で、目的関数を最小にするものを見つけ出せばよい。つまり、以下の線形計画問題を解くことになる。

$$\begin{aligned} \text{制約条件 : } & 0.40X + 0.25Y > 2.0 \\ & 0.15X + 0.30Y > 3.0 \end{aligned}$$

$$\text{最小化 : } y = 1000X + 800Y \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

とかけるので、傾きが -5/4 の直線群の中で最も Y 切片が小さい直線の上にあることになる。図 4 より、この最適化問題の解は

$$X = \frac{30}{11} \text{ [GJ/h]} \quad \dots \dots \dots (3.2)$$

$$Y = \frac{40}{11} \text{ [GJ/h]} \quad \dots \dots \dots (3.3)$$

となることがわかる。

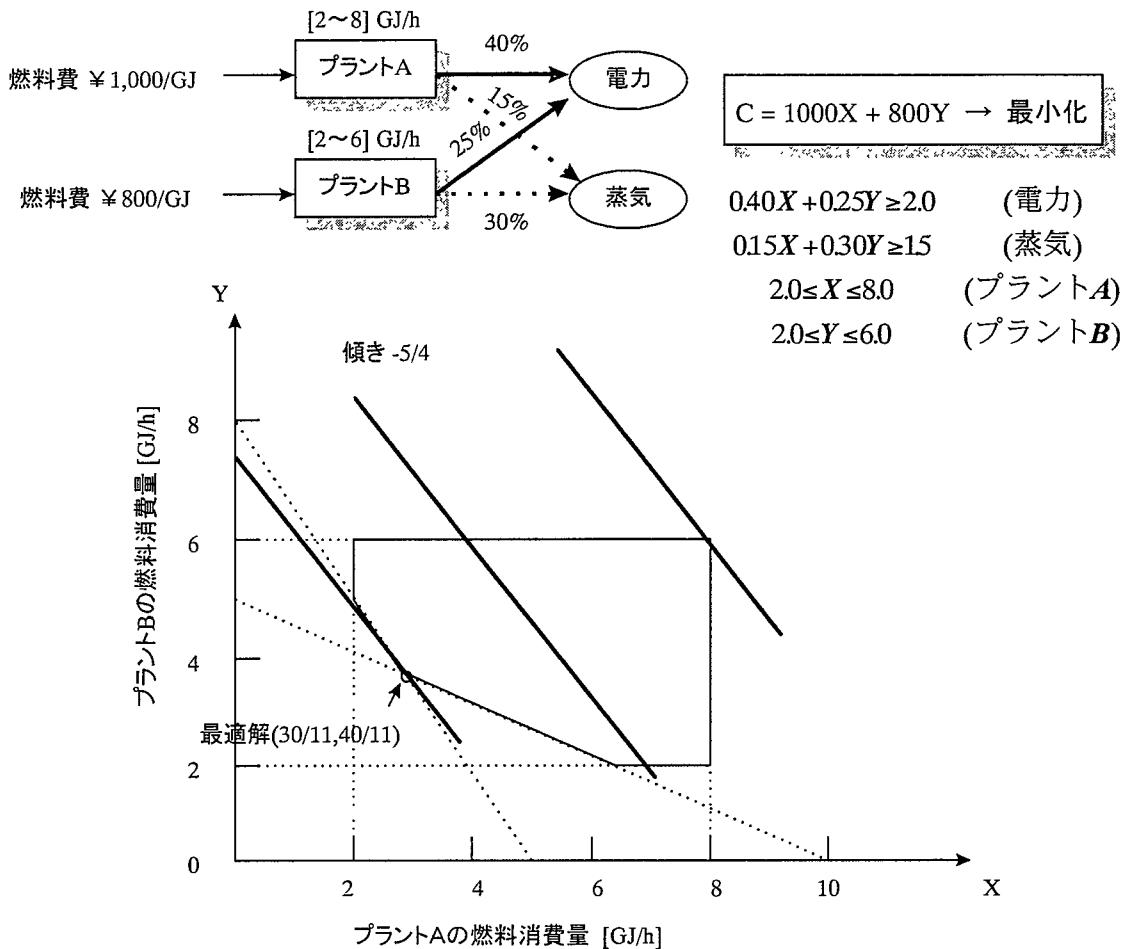


図 4 最適化型モデルの概論

(2) 概論

図 5 に、エネルギー供給セクターに対する最適化型モデルのイメージを示す。

(1)で示した例のように最適化型モデルでは、ある需要を最小（又は最大）の目的関数（コスト、燃料消費量等）で満たす解を求ることになる。入力データとしては、エネルギー需要シナリオ、供給技術の技術進展（効率向上、コストダウン等）、エネルギー資源の埋蔵量（埋蔵量が減少するにつれて生産コストが増大するような資源供給コスト関数）、その他の環境制約（CO₂規制）等である。技術関連データは、資本費、発電効率等の設計目標データをそのまま入力することが可能

である。また、世界全体を対象としたモデルでは、資源貿易についてもモデル化されるが、市場の需給状況や市場支配力の影響は考慮されず、世界全体でコストが最小になるような資源供給(完全に平等な貿資源易市場)が想定される。

なお、エネルギー需要は外生変数として取扱われることが多いが、計算されたエネルギー価格が経済成長への影響及びエネルギー需要に及ぼす影響をフィードバックすることにより、エネルギー価格の経済への影響を内生的に取扱うモデルもある。

多くの最適化型のエネルギー経済モデルでは、各エネルギー技術の導入量を変数とし、その単位がエネルギー生産量(MJ, kWh)であることから、結果はある技術の導入量そのものを示すことになる。また、入力データに技術の設計目標を反映できることから、設計条件と技術導入量の関係を明確に把握することができる。

最適化型モデルは、目的関数が供給者側の行動原理のみを反映するものである。このため、実際の社会では、エネルギーの供給側と需要側、資源の輸出側と輸入側で異なる価値観に基づいて行動すると考えられるが、最適化型モデルではこれらの点については考慮することができない。

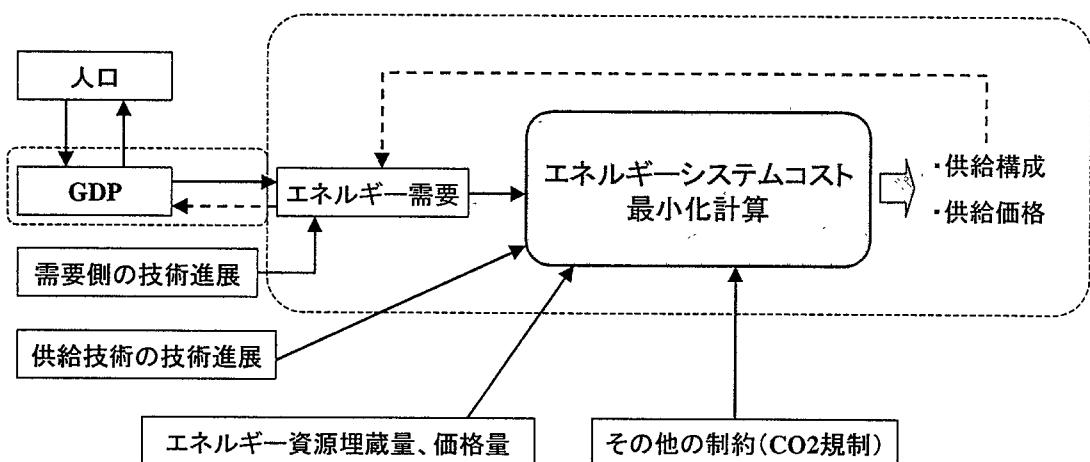


図 5 最適化型モデルの概要

(3) 技術選択の取扱い

図 6 に、最適化型モデルにおける技術選択（電源選択）のイメージを示す。

発電技術としてガスタービン（建設費：安、燃料消費：大）及びCCGT（コンバインドサイクル ガスタービン）（建設費：高、燃料消費：小）の2種類を想定し、LNG の価格が時間とともに上昇する場合を想定している。この2つの情報から費用最小化計算を実施すると、燃料価格が安い場合には建設費の安いガスタービンが選択され、燃料価格が上昇しあるレベルに到達した時点でCCGTの方が経済的となりCCGTが導入されるようになる。このように、最適化型モデルは、技術導入のシナリオが明確に示されることとなる。

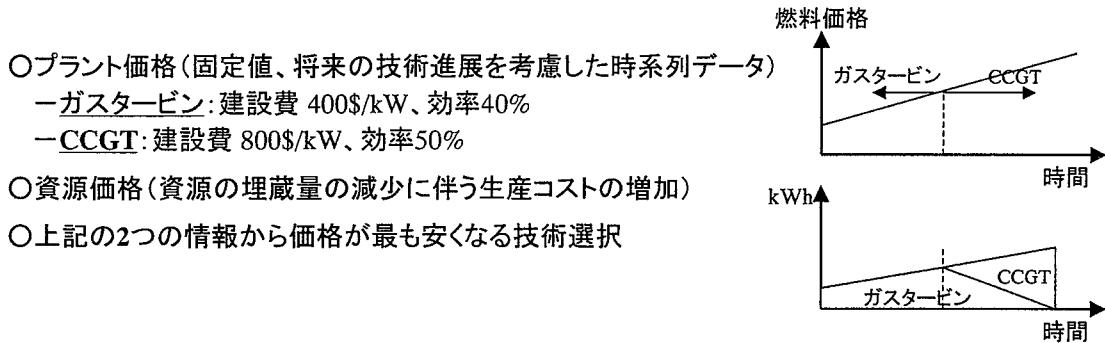


図 6 最適化型モデルにおける電源選択のイメージ

2.1.2. 一般均衡型モデル

まず、一般均衡型モデルで取扱う変数やデータのイメージを理解することを目的として、簡易なモデル例を示す。次に、一般均衡型モデルの概要及びモデルでの技術選択の取扱いについて説明する。

(1) 簡易なモデル例

一般均衡モデルを説明するために、2部門閉鎖経済モデルの具体的な例を示す。なお、各変数の単位は、金銭である。

① 需要関数の導出

消費者は、その所得の範囲内で効用(満足感)を最大にするような消費活動を行うと考える。数式で示すと、(3.5)式の制約の下で、(3.4)式を極大化する。ここで、(3.4)式は、消費者の効用関数を表す。

$$U = C_1^{\frac{1}{2}} C_2^{\frac{1}{2}} \quad \dots \dots \dots \quad (3.4)$$

$$P_1 C_1 + P_2 C_2 = Y \quad \dots \dots \dots \quad (3.5)$$

C_1, C_2 : 財の消費量

P_1, P_2 : 財の価格

Y : 消費者の所得

ラグランジエの未定乗数法を用いて、この問題の最適解の必要条件を求める。

$$Z = C_1^{\frac{1}{2}} C_2^{\frac{1}{2}} + \lambda(P_1 C_1 + P_2 C_2 - Y) \quad \dots \dots \dots \quad (3.6)$$

$$\text{必要条件: } \frac{\partial Z}{\partial C_1} = \frac{\partial Z}{\partial C_2} = \frac{\partial Z}{\partial \lambda} = 0 \quad \dots \dots \dots \quad (3.7)$$

つまり、

$$\frac{1}{2}C_1^{-\frac{1}{2}}C_2^{\frac{1}{2}} + \lambda P_1 = 0 \quad \dots \dots \dots (3.8)$$

$$\frac{1}{2}C_1^{-\frac{1}{2}}C_2^{\frac{1}{2}} + \lambda P_2 = 0 \quad \dots \dots \dots (3.9)$$

$$P_1 C_1 + P_2 C_2 = Y \quad \dots \dots \dots (3.10)$$

(3.8)式と(3.9)式の方程式は λ 以外を右辺に移項すれば、 λ について解くことができる。その結果、2つの式が等しいと置くと次が得られる。

$$P_2 = P_1 \frac{C_1}{C_2} \quad \dots \dots \dots (3.11)$$

上式を)式に代入すると次のようになる。

$$P_1 C_1 + P_2 C_2 = Y \quad \dots \dots \dots \quad (3.12)$$

ここから、次式が得られる。

$$C_1 = \frac{Y}{2P_1} \quad \dots \dots \dots (3.13)$$

同様にして

$$C_2 = \frac{Y}{2P_2} \quad \dots \dots \dots (3.14)$$

(3.13)式と(3.14)式は、それぞれ財1と財2に対する需要関数を表している。

② 供給関数の導出

完全競争産業での企業の供給関数の導出は、供給者の費用最小化と利潤最大化の2段階の手続きとなる。

【第一段階(総費用の最小化)】

算出水準を満たす要素需要量を示す(3.14)式の制約の下に、総費用を示す(3.15)式を極小化する問題を解く。(3.15)式は、生産関数と呼ばれ、1単位の生産をするために必要な生産投入要素を示している。様々な種類の生産関数が提案されているが、代表的なものとしては、産業連関表の固定投入係数(Leontief係数)に基づいて生産量を記述するLeontief型の生産関数(投入要素の価格によらず、投入要素の構成が等しい)、投入要素間の代替性を考慮したCES(Constant Elasticity of Substitution)関数等がある。各生産に投入する中間生産財に対してはLeontief型の生産関数、

生産要素（エネルギー、資本、労働、土地等）に対しては CES 関数を使用するのが一般的である。なお、代替弹性値の詳細は付録 B.3 で説明している。

$$TC_1 = rK_1 + wL_1 \quad \dots \dots \dots (3.14)$$

$$X_1 = K_1^{\frac{1}{4}} L_1^{\frac{1}{2}} \quad \dots \dots \dots (3.15)$$

K_1 ：資本投入量

L_1 ：勞動投入量

r, w : それぞれの要素価格

(3.15)式より $L_1 = X_1^2 / K_2^{1/2}$ が得られ、(3.14)式に代入すると次式が得られる。

$$TC_1 = rK_1 + w \left(\frac{X_1^2}{K_1^{\gamma_2}} \right) \dots \dots \dots (3.16)$$

この式から、算出量の水準を維持しながら極小化する 1 階の条件はであり、次式が得られる。

$$r - \frac{wX_1^2}{2K_1^{3/2}} = 0 \quad \dots \dots \dots (3.17)$$

ここから

$$K_1 = \left(\frac{wX_1^2}{2r} \right)^{\frac{2}{3}} \dots\dots\dots (3.18)$$

この関数は、企業 1 の資本への需要を、算出水準と要素価格とに結び付けて示している。同様にして企業 1 の労働に対する需要は以下のようになる。

$$L_1 = \left(\frac{2rX_1^4}{w} \right)^{1/3} \dots \dots \dots (3.19)$$

【第二段階(利潤の最大化)】

第2段階では、企業の利潤を最大化することを考える。企業1の利潤関数 (Π_1) は、総収入 ($P_1 X_1$) から総費用 (TC_1) を差し引いた値であるから、(3.20)式のように記述できる。

$$\Pi_1 = P_1 X_1 - r \left(\frac{r X_1^2}{2r} \right)^{\frac{2}{3}} - w \left(\frac{2r X_1^4}{w} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \dots \dots \dots (3.20)$$

利潤極大化算出水準は、 $d\Pi_1 / dX_1 = 0$ とすることで得られる。その結果を X_1 について整理すると

$$X_1 = \frac{P_1^3}{16w^2 r} \quad \dots \dots \dots (3.21)$$

(3.21)式は、企業1の供給関数である。同様にして、2番目の企業の生産関数を以下のように定義する。

$$X_2 = K_2^{\frac{1}{2}} L_2^{\frac{1}{4}} \quad \dots \dots \dots (3.22)$$

これより、企業1と同様の費用極小化と利潤極大化の演算を行うと、2つの要素需要方程式が得られる。

$$K_2 = \left(\frac{2w X_2^4}{r} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \dots \dots \dots (3.23)$$

$$L_2 = \left(\frac{r X_2^2}{2w} \right)^{\frac{2}{3}} \quad \dots \dots \dots (3.24)$$

供給関数は以下のようになる。

$$X_2 = \frac{P_2^3}{16r^2 w} \quad \dots \dots \dots (3.25)$$

③ モデルの構築

以上をまとめると、ここで想定した2部門閉鎖経済モデルでは、以下の連立方程式（内生変数15、外生変数2）を解くことになる。なお、外生変数として与えた K^* 及び L^* は、対象地域内の総資本及び総労働を示す。図7に、この2部門閉鎖経済モデルのフロー図を示す。

供給者側の行動規範は、(3.38)及び(3.39)式で表される利潤を最大化する（労働投入を最小化する）ことである。しかし、一方で、労働投入量の減少は消費者所得の減少につながり、その結果、生産財の需要が低下し、生産財の生産量が低下することもありえる。つまり、供給者の利潤最大化行動は消費者の効用最大化行動に対する制約であり、逆に、消費者の効用最大化行動は、供給者の利潤最大化に対する制約条件となっている。一般均衡型モデルでは、このような条件を考慮した上で供給者側と消費者側の効用が最大になる均衡解を求めることがある。

【財市場】

$$\text{需要} \quad C_1 = \frac{Y}{2P_1} \quad \dots \dots \dots \quad (3.26)$$

$$C_2 = \frac{Y}{2P_2} \quad \dots \dots \dots \quad (3.27)$$

$$\text{供給} \quad X_1 = \frac{P_1^3}{16w^2r} \quad \dots \dots \dots \quad (3.28)$$

$$X_2 = \frac{P_2^3}{16w^2r} \quad \dots \dots \dots \quad (3.29)$$

$$\text{市場均衡} \quad C_1 = X_1 \quad \dots \dots \dots \quad (3.30)$$

$$C_2 = X_2 \quad \dots \dots \dots \quad (3.31)$$

【要素市場】

$$\text{需要} \quad K_1 = \left(\frac{wX_1^2}{2r} \right)^{\frac{2}{3}} \quad \dots \dots \dots \quad (3.32)$$

$$K_2 = \left(\frac{2wX_2^4}{2r} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \dots \dots \dots \quad (3.33)$$

$$L_1 = \left(\frac{2rX_1^4}{w} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \dots \dots \dots \quad (3.34)$$

$$L_2 = \left(\frac{rX_2^2}{w} \right)^{\frac{2}{3}} \quad \dots \dots \dots \quad (3.35)$$

$$\text{市場均衡} \quad K_1 + K_2 = K^* \quad \dots \dots \dots \quad (3.36)$$

$$L_1 + L_2 = L^* \quad \dots \dots \dots \quad (3.37)$$

【所得方程式】

$$\text{企業} \quad \Pi_1 = P_1 X_1 - r K_1 - w L_1 \quad \dots \dots \dots (3.38)$$

$$\Pi_2 = P_2 X_2 - r K_2 - w L_2 \quad \dots \dots \dots (3.39)$$

$$\text{消費者} \quad Y = r(K_1 + K_2) + w(L_1 + L_2) + \Pi_1 + \Pi_2 \quad \dots \dots \dots (3.40)$$

15 個の内政変数 $(C_1, C_2, X_1, X_2, K_1, K_2, L_1, L_2, P_1, P_2, w, r, \Pi_1, \Pi_2, Y)$

2 個の外生変数 (K^*, L^*)

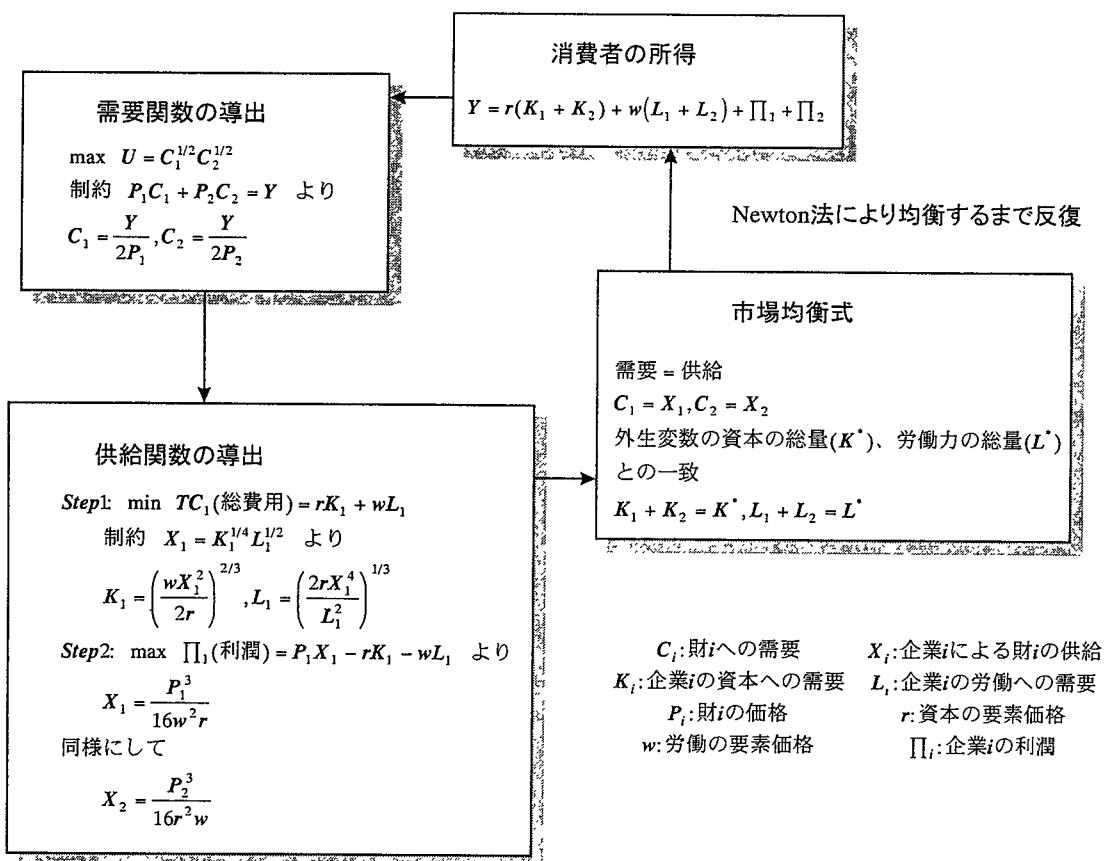


図 7 一般均衡型モデルの例

(2) 概要

図 8 に、一般均衡モデルの概要の概要を示す。

(1)の例題で示したように、最適化型モデルが主に供給者側の費用といった一つの目的関数に着目したモデルであるのに対して、一般均衡モデルでは、「消費者の効用最大化」と「供給者(企業)の利潤最大化」の 2 つの行動原理の結果としての需給の均衡解が求められる。より具体的に記述すると、一般均衡理論はミクロ経済学を基礎としており、家計、企業などの経済主体が経済合理

性の下で行動することを前提に、経済全体の動きを説明する理論体系である。消費者は予算制約下での需要・サービスから得られる効用を最大化するために行動するようモデル化され、企業は設備投資のみを行うのではなく生産主体として扱われており、自らが有する資源や技術により利潤が最大化となるように行動するようモデル化されている。このように、消費者側の行動まで含めてモデル化されているため、経済成長率、失業率、エネルギー需要といった最適化型モデルは入力条件として外生的に与えるデータが内生的に求められる。なお、一般均衡型モデルでは、全ての変数は基本的に金銭単位である。

一般均衡モデルの主要な入力データとしては、人口、労働者数(人口構成、女性の雇用環境等)、貿易構造、産業構造(連関表、Leontief 投入係数)、価格弹性値、代替弹性値等が挙げられる。人口及び労働者数については、世界や日本の専門機関が推定した将来の人口予測シナリオが利用可能である。貿易構造及び産業構造については、現状の統計データから初期値を作成することは可能であるが、将来の状況予測は非常に困難である。特に、超長期のシミュレーションを実施する場合には、「完全な自由貿易が確立する社会（南北間格差縮小、グローバル化社会）」、「貿易構造はある程度ロック化構造となる社会」等のシナリオ想定が必要と考えられる。

価格弹性値及び代替弹性値は、一般均衡モデルの入力データとして非常に重要である（詳細は、付録 B.3 参照）。例えば、「環境に優しい製品は多少高くても買う」等の消費者の価値観や「一般家庭での電力消費量は価格が変化してもあまり変化しない」等の財特有の性質は、各財の価格弹性値としに反映される。また、「非常にコストの安い省エネ技術が開発された」といった技術革新は、資本とエネルギー使用量との代替弹性値の変化（より少ない資本で多くのエネルギーを代替できる）として反映される。

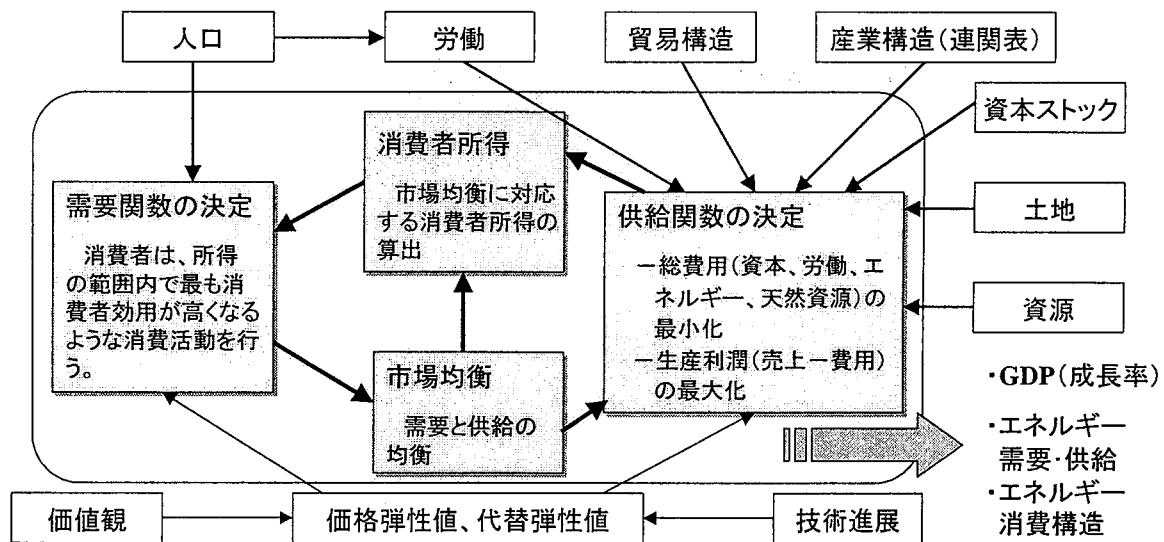


図 8 一般均衡モデルの概要

(3) 技術選択の取扱い

図 9 に、一般均衡型モデルにおける技術選択（電源選択）のイメージを示す。図 6 の場合と同様に、将来燃料価格（LNG 価格）が上昇した場合の技術選択変化を示している。一般均衡型モデルでは、LNG 価格の上昇に伴い、電気事業者は利潤最大化の観点からより熱効率の高い発電所（資本費が高い）を建設する。この結果、燃料投入が減少し、資本投入が増加する。

このため、既存の一般均衡型モデルでは、入力データとして（又は分析結果から）技術の詳細な代替関係を把握することは困難である。一般均衡型モデルで電源構成変化に関する詳細な分析を行うためには、電力財を 1 財ではなく、原子力発電の電力財、火力発電の電力財等のように財を電源別に分割し、発電種別ごとに、資本、労働、燃料、土地等の投入要素の特性を反映する必要があると考えられる。各電源に関する入力データを作成するためには、「何単位の資本、労働、燃料、土地の投入が必要であるか？」、「各要素間に代替性（燃料に関しては、輸入国間の代替性を含めて）はあるのか？」等について検討する必要がある。

○燃料価格が上昇は、主に燃料と資本間又は燃料間の代替によって考慮される。

→ 燃料価格が上昇すれば、熱効率の高い発電所を建設する（資本投入が増加し、燃料投入が減少）

→ 燃料価格が上昇すれば、他の安価な燃料に転換

○燃料と資本の代替関係を示す指標 →「価格弹性値、代替弹性値（後述）」

（将来的技術進展を踏まえて設定）

※各電源の特性

－火力（石油、ガス）：燃料大、資本小

－原子力：燃料小、資本大、雇用やや大

－新エネ：燃料小、資本大、土地大

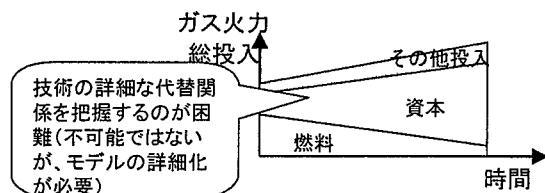


図 9 一般均衡モデルにおける電源選択のイメージ

2.1.3. 既存のモデル

(1) 代表的なエネルギー経済モデル

化石資源の枯渇や規制緩和、環境税導入などの国内外の要因による経済への影響の分析では、これまでの分析事例の多くは、影響を受ける業界において価格がどの程度上下したか、需要がどの程度変化したかといったある特定市場におけるものであった。しかしエネルギー資源の枯渇や規制緩和の影響は、ある市場への影響に留まらず、ある市場の変化が相対的な価格変化や生産要素の配分の変化を通じて他の市場へも波及する場合が少なくないと考えられる。このような経済全体への影響を分析する上では、特定市場における最適化や部分均衡による分析では限界がありより大きな市場モデルでの検討が必要となってくる。そのような要請を踏まえて開発された経済モデルが一般均衡モデルである。以下に代表的なエネルギー経済モデルをまとめるとする。

表 10 代表的なエネルギー経済モデル

	モデル	タイプ	開発者	対象地域	モデル概要	特徴
1	GREEN	一般均衡	Burniaux ら	12	OECD での経済予測などで使用	
2	GTAP ^{*)}	一般均衡	Pardue U. (Hertel)	30	世銀、WTO や経済企画庁などで使用	貿易財を中心
3	GTAP-E	一般均衡	N.S.W U.(Truong)	30	エネルギー間の代替を考慮し多国間貿易均衡下で燃料間代替を考慮の資本貯蓄の検討が可能	
4	ORANI-G(日本モデル)	一般均衡	内閣府経済社会総合研究所(伴ら)	1	一国を対象としたモデル。データ構造は GTAP に類する。内閣府経済社会総合研究所で日本モデルを開発。	サービス部門追加
5	SGM	一般均衡	国立環境研究所(日引ら)	1	GDP をベースとし家計、企業、政府、外国部門の 4 経済主体をモデル化し税の還流による影響が検討可能	税の還流を明示
6	KEO	一般均衡	慶應大学(黒田)	1	国内エネルギー産業を詳細にモデル化(産業区分 48)	国内エネルギー部門の細分化
7	WEP2001	部分均衡	電力中央研究所(星野ら)	11	燃料の需要供給と経済をリンクし世界での需給均衡下でのエネルギー価格の検討が可能	
8	Global2100	最適化	Stanford U. (Manne ら)	5,11,12	産業は 1 部門、経済はリンクしていないため貿易の整合性はとれない	
9	NE21	最適化	東京大学(藤井ら)	10	世界エネルギー総コストと CO ₂ 排出量の総和を最小化する最適技術メニューの検討が可能	炭素回収を明示
10	GDMEM	最適化	東京大学(後藤)		マクロ経済とエネルギー市場をリンクし想定シナリオ下の将来の市場、エネルギー需給均衡が検討可能	GDP、エネルギー一均衡価格明示
11	MARIA	最適化	東京理科大学(森)	8	世界貿易収支を基に温暖化対策、土地利用、気候変動の戦略策定が可能	土地利用、食料需給考慮
12	超長期世界エネルギー需給モデル	マクロ計量	日本エネルギー研究所	12	エネルギー需要の所得弾力性で経済とリンクしたエネルギー需給の超長期でのシナリオ検討が可能	再生可能エネルギー導入量を明示
13	AIM	マクロ計量	国立環境研究所・京都大学	経済 19、気候 5x5	400 種類を超えるエネルギー技術を用い各部門のエネルギー消費構造を詳細に検討可能	エネルギー技術積上

*) GTAP モデルについては、付録 A を参照のこと

(2) 一般均衡モデルの優位性

マクロ経済モデル、一般均衡モデルとも、消費者、企業、政府による取引関係が構成する経済システムを説明する点では同様であるが、理論上の視点が異なっている。マクロ経済モデルでは、モデル全体の中に消費者や企業は 1 つずつしか存在せず、この単一の消費者は所得規模に応じて

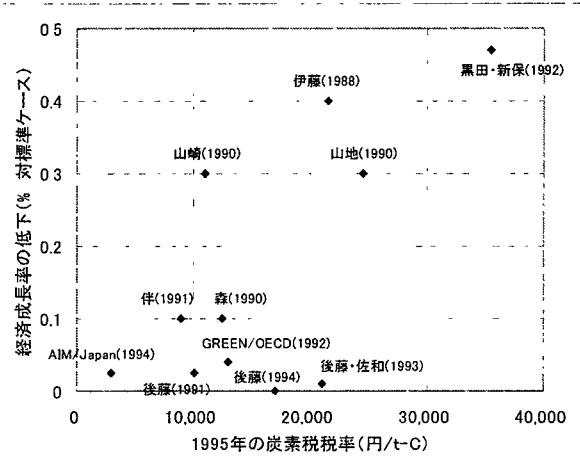
消費量を決定する。また企業は設備投資主体として表され、社会全体の所得規模が拡大により生産対応する行動主体としてモデル化されている。

一般均衡理論はミクロ経済学を基礎としており、家計、企業などの経済主体が経済合理性の下で行動することを前提に、経済全体の動きを説明する理論体系である。消費者は予算制約下での需要・サービスから得られる効用を最大化するために行動するようモデル化され、企業は設備投資のみを行うのではなく生産主体として扱われており、自らが有する資源や技術により利潤が最大化となるように行動するようモデル化されている。ここで、マクロ経済モデルでは生産量に基づいて生産活動を行うのに対して、一般均衡モデルでは市場分析に基づき生産要素の価格に対して経済主体が行動を行うようモデル化されている。

各種経済モデルが前提とする理論面や仮定条件の相違による結果の違いについては、西岡ら（文献[8]）の研究にまとめられている。文献では、炭素税の税率とその経済的影響について国内数量モデル 12 種についてまとめている（図 10 参照）。図に示す通り 2000 年から CO₂ 排出量を 1990 年レベルに安定化させる炭素税の税率は 3000～35000 円/t·C となり、税金による経済成長率の低下は 0～0.5% ポイントの範囲にばらついている。このばらつきの要因として、モデルの基本構造（トップダウン or ボトムアップ、短期マクロ or 長期平衡、エネルギー部門の有無、技術開発部門の有無など）、モデルの仮定（GDP トレンド、技術効率の進歩、エネルギー代替弾力性、化石燃料価格トレンド、技術革新の費用など）、政策の考え方（現存する税の歪みの除去、税収活用および活用方法、将来的取引市場（排出権などの）導入のモデルへの導入の有無、二酸化炭素削減量とそのタイムアロケーション、対策便益の有無など）を挙げている。例として図 10 では、一般均衡や動学的最適化モデルといった長期的な経済の適応課程を強調したモデルやエネルギー需給サイドの適応過程を強調したモデル（ボトムアップモデル）では、技術や施設がその価格に敏感に反応して更新されるため、炭素税の税率や経済成長率の低下が小さめに出ており、一方、回帰分析などマクロ経済モデルでは価格調整メカニズムが小さく現れ炭素税の税率や経済成長率の低下は大きめに出ていている。

表 11 にエネルギー経済モデルの構造の特徴と適性についてまとめる。

一般均衡理論モデルの優位性としては、家計、企業などの経済主体における経済的合理性を考慮しており、経済政策や外部環境の変化が家計や企業の行動自体を変化させる場合の分析に適している点である。価格、市場を明示化しているので、価格変化をもたらす政策変更の効果を分析しやすい。また、市場、産業の細分化といった作業を採用することが可能であり、特定産業への影響分析なども容易となる。しかしモデルの規模などの問題からも、ボトムアップ型が有するような個別の技術や機器に対する影響を分析することは一般的に困難である。



(「持続的発展のための世界モデルに関する研究」、環境省国立環境研究所 研究成果報告書より作成)

図 10 各モデルによる炭素税導入時の国内経済への影響の違い

表 11 モデル構造の特徴と適性

モデル構造	シナリオに関する評価		部門別見通し評価 部門別高精度評価 部門、用途、エネルギー源別評価	モデルの特徴
	税制等マクロ政策評価 環境税など経済措置の影響評価	技術規制評価 機器効率規制、グリーン化など影響評価		
一般均衡モデル	○	×	△	長期的な経済の適応課程を強調
最適化モデル	△	△	○	特定の経済主体の長期的な適応課程を強調
マクロ計量モデル	回帰分析型	△	△	過去の経済動向に沿って将来を予測
	ボトムアップ型	×	○	エネルギー需給サイドの適応過程を強調

○：適性が高い、△：ある程度適性がある、×：適性が低い

- ・回帰分析型：過去のエネルギー需要を、経済成長率、世帯数、自動車普及台数等の変数の変化の動向で時系列的に説明する関数を推計し、当該関数を外挿することで将来を推計するモデル
- ・ボトムアップ型：過去のエネルギー消費を、個別エネルギー消費装置・機器によるエネルギー消費の総和であると仮定し、個別エネルギー消費装置・機器の普及動向を変化させて将来を推計するモデル

2.1.4. 適用事例

税制の変更や地球環境問題などについては、当該分野への影響のみならず、それに伴う価格や需要量などの変化を通じてその影響が他の市場にも大きく波及することが想定される。マクロ計量モデルや最適化モデルにおいても価格ショックなどが与える需要や生産性、労働力の変化を取り扱うことが可能なモデルもあるが、ある特定の市場に着目したいわゆる部分均衡的な分析であり、マクロ経済への影響を分析するにあたっては、他の市場への影響を含めて行うこと必要である。その意味で、経済全体への波及効果を分析するにあたっては一般均衡モデルの優位性は高

いといえる。一般均衡理論モデルの応用分野として以下のような研究事例が報告されている。

(1) 租税分野

税制は全体として所得分配にほとんど影響しないと考えられてきたが一般均衡モデルでは税制による歪みから生じる厚生費用が 10%程度まで変化すると推定され、従来の考え方を覆した。これまでの研究では複数税制案の順位付けや改革案の評価などに利用されている。

(2) 国際貿易分野

一般均衡モデルでは同一財であっても地域間の特性（需要、供給特性など）や貿易障壁を導入することができ、現実的な貿易動向が再現できる。これまでの研究では国際価格変動の影響や関税による影響評価に利用されている。例えば、石油国際価格の上昇影響 H は先進国 GDP には大きな影響を及ぼさず石油輸入後進国への影響は多大であると推定されている。

(3) 地球環境分野

これまでの研究では炭素税の導入や排出権取引市場の創設による効果などについて利用されている。地球環境モデルの場合時間的視野が長期であり、動学的な制約条件下で社会厚生を最大にするような経済主体（企業、家計）の最適技術選択モデルによる評価が最適である。前述のように標準的な一般均衡モデルは比較静学的モデルであることから分析では、将来シナリオをいくつか設定し、各モデル間の比較により効果を求めることが一般的である。最新の研究では、GTAPなどの一部のモデルで動学モデルへと拡張したものも開発されてきている。

【参考】－一般均衡モデルを用いた分析事例[14]

「温暖化ガス排出削減が世界貿易を通じてマクロ経済に与える影響」、WWF(2001)

一般均衡モデル GTAP を用い、日本単独で温暖化対策を行う場合の世界貿易を通じた影響を分析している。日本の産業界の温暖化対策シナリオとして、単なるコスト上昇として受身に対応する場合（想定シナリオ 1）と過去に日本で実際に起こった原油価格上昇への対応を考慮する場合（想定シナリオ 2）を想定し、比較検討を行っている。

本研究事例のユニークな点としては、規制がビジネスチャンスとなり結果的に全体の経済効率や産出が向上する可能性を考慮したシナリオ（変革ケース）を検討している点である。ここでは、機械産業部門のみの検討に留まっているが、エネルギー資源問題に対するエネルギー産業の対応について同様の考え方を適応することが可能であれば、新しい視点での評価が可能になるものと考えられる。

○想定シナリオ 1（受身ケース）：エネルギー価格の上昇

温暖化ガスの排出削減はエネルギー税などの課税措置により実現されると設定。ここでは税率を変更するのではなく実質エネルギー価格が上昇するとして、現状価格の 20% 増（30 \$/t·C の課税に相当）としてケースを設定。

○想定シナリオ 2（変革ケース）：機械産業付加価値の向上

通常、資源などの制約がある場合経済効率や産出は低下するが、規制がビジネスチャンスとなり結果的に全体の経済効率や産出が向上する可能性がある。実際、国内機械産業の付加価値率は技術進歩とエネルギー価格上昇により上昇してきている。ここでは規制下での技術革新として機械産業の付加価値率が0.9%増となるケースを設定。

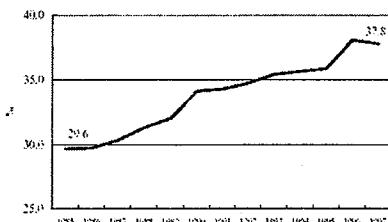


図 11 日本の機械産業の付加価値率の変化（内閣府、1986-1997年）

受身ケース（想定シナリオ1）結果では、国内産業構造は機械・サービスが生産を拡大するが、エネルギー関係（エネルギー、石油石炭製品、電力・ガス）とその他製造、その他産業の生産は縮小する。エネルギー税（ここでは20%）の賦課による国内エネルギー消費は9%程度減少している。また、変革ケース（想定シナリオ2）結果では、機械部門の生産が大幅増となり、それ以外の産業部門でも実質減であるが、エネルギー関係（エネルギー、石油石炭製品、電力・ガス）部門は受身ケースよりも減少幅が小さい。エネルギー関係においても、同様に技術向上を考えすれば機械同様の結果が得られると考えられている。

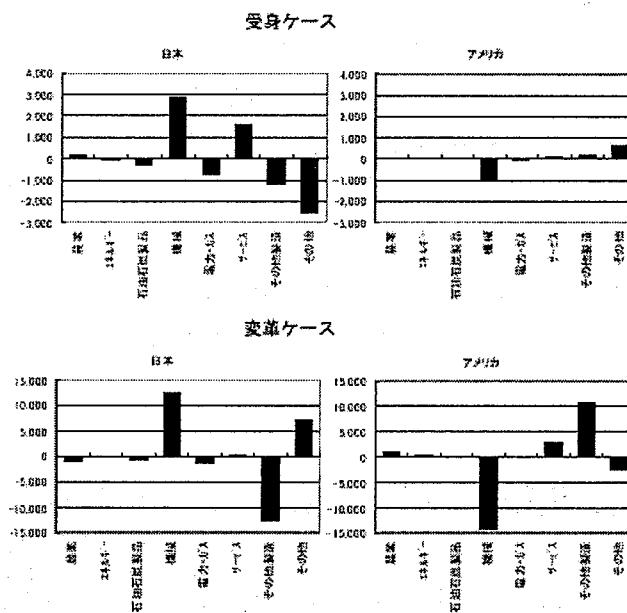


図 12 想定シナリオでの産業構造の変化

2.2. エネルギーセキュリティ評価手法

図 13 に、エネルギーセキュリティ評価で取扱うべき経済影響の範囲を示す。1 章での議論から、まず、中長期的な資源枯渇によるエネルギー価格の上昇 (A.1) とその経済波及に伴う間接的なマクロ経済影響 (A.2 及び A.3) を評価できることが重要である。また、途上国でのエネルギー需要が急増し、資源量が減少していくにつれて価格ショックの発生リスク (カテゴリ B.3) が将来的にどの程度増大しうるか? といった視点も重要である。

図 14 は、上記のような分析の範囲から必要となるモデル特性をまとめたものである。資源枯渇及び資源貿易を内生的に取扱う必要があることから、『世界全体』を対象としたモデルが必要である。また、資源貿易市場における資源価格の決定、資源価格の経済波及効果 (間接影響)、貿易市場における価格ショック発生メカニズム等を考慮できる必要があることから、『一般均衡型モデル』が必要である。なお、貿易市場における価格ショック発生メカニズムの分析では、価格ショックの発生確率そのものを評価することは不可能であり、仮に、何らかの要因により価格ショックが発生した場合に、それが更なる高騰や価格の高止まりにつながるのか、それとも市場が有効に機能して価格ショックが緩和されるのか? といった分析に留まる。

上記の FBR の長期のエネルギーセキュリティ確保への貢献度の評価に必要な要素から、世界全体を対象にした『一般均衡モデル (例えば GTAP)』を FBR 技術の導入を取扱えるように改良するのが妥当であると考えられる。

既存の一般均衡型モデルでは、各財の生産、貿易、雇用、貯蓄等に主眼が置かれているため、一般的に電源構成は外生変数として与えられ、内生化されていない。このため、エネルギーセキュリティに関する FBR の価値を明確に評価するためには、電源構成を内生変数として取扱えるように一般均衡型モデルを改良する必要がある。また、電源構成自体はあくまで外生変数としており、様々な電源構成パターン (原子力の導入量、FBR の有無で区別) を入力条件として与えることにより、FBR の価値を把握するといった方法が考えられる。この点に関しては、3 章で詳細に検討する。

GTAP 以外の一般均衡モデルとしては、OECD の Green モデル (付録 B 参照) 等があるが、貿易、産業構造データが 1985 年時点のものと古く、使用するためにはデータの大幅な更新が必要になると考えられる。

影響の種類	"直接的な"マクロ経済影響	"間接的な"マクロ経済影響
A. コスト上昇	A.1. エネルギー資源輸入価格の緩やかな上昇	A.2. 富の移転(輸入国から輸出国へ)の増加及びそれが貿易バランス、長期的な生産性向上、雇用等に及ぼす影響 A.3. 富の移転が長期インフレに及ぼす影響
	B.1. エネルギー資源輸入コストの急上昇	B.2. 価格ショックに起因する経済状況の変化
B. 価格ショック	B.3. 長期的な需要増加による価格ショック発生リスクの増加	
C. 軍事費用	C.1. エネルギーセキュリティ確保のための軍事費用	

図 13 エネルギーセキュリティ分析の範囲

【カテゴリA】

- 資源の枯渇を有意に取扱いことが可能 → 世界
- 資源価格の上昇に伴う間接的な経済影響を評価することが可能 → 一般均衡
- 日本と他地域との資源貿易量及び資源価格を内政的に評価可能 → 世界、一般均衡
- 資源価格への市場支配力の反映 → 一般均衡
- FBRの導入効果が明確に見えること → 最適化又は一般均衡(改良複雑)

【カテゴリB】

- 将来時点での価格ショックの起きやすさが把握可能 → 一般均衡(部分的*)
- 価格ショックが経済に与える影響 → 一般均衡

*価格ショックの発生自体は、如何なるモデルを持ってしても予測困難。ただし、ある地域(中東)の原油価格の高騰が世界全体の価格高騰につながる可能性は一般均衡でも把握可能?

図 14 エネルギーセキュリティ分析に必要なモデル特性

3. 評価アプローチとその限界

本節では、世界全体を対象にした一般均衡モデル（例えば GTAP）を用いて FBR の長期のエネルギーセキュリティ確保への貢献度の評価することを想定し、具体的な評価手順について検討する。『電源構成を外生条件（入力条件）とする場合』と『電源構成を内生変数とする場合』では、分析に必要なデータの種類やコードの改良作業量が大幅に異なると考えられるため、公開されている GTAP モデル関連の解説書・論文に基づき、両ケースごとに入出力イメージ、必要な作業項目及びメリット・デメリットをまとめる。

なお、市販されているバージョンの GTAP モデルの入手条件は、以下に示す通りである。GTAP モデルでは、入力データの更新が定期的に実施されており、世界全体を対象にして作成されているデータとしては、最新の 1995 年時点のデータを利用することが可能である。

○GTAPモデル

価格:\$8,000

内容:ソース(モデル構築用GUI、ソルバ)、デフォルト入力データ、マニュアル
(注)GTAP-E自体は商品ではなく、GTAPを基に第三者が改良したもの

図 15 GTAP モデルの入手条件

3.1. 電源構成を外生条件とする場合

3.1.1. 入出力のイメージ

図 16 に、入出力データのイメージ図を示す。分析において固定的な入力として取扱うデータとしては、為替レートの想定、資源量、土地投入可能量、資本ストック、生産構造等が挙げられる。これらのデータは、基本的に既存の GTAP モデルで使用されている値をそのまま利用可能である。また、実際問題として、日本以外の地域に対してこれらのデータを独自に準備することは非常に困難であり、多大な時間を要すると考えられる。

様々な将来状況を想定してシナリオとして与えるべき条件としては、人口、環境制約 (CO₂ 制約)、電源構成（原子力の導入程度、FBR の有無）、貿易構造等が挙げられる。世界人口に関しては国連、日本の人口に関しては国立社会保障・人口問題研究所が今後 50～100 年間の長期の人口シナリオ（低位～高位の数種類）を推計している。

電源構成に関しては、いくつかのシナリオを想定して与えることも可能である。また、世界を対象とした電源（エネルギー）構成シナリオを想定する場合には、IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change : 気候変動に関する政府間パネル (国連)) の SRES シナリオ (IPCC の第三次評価において作成された排出シナリオ。排出シナリオに関する特別報告書(SRES : Special Report on Emission Scenarios)の名前を冠して、SRES シナリオと呼ばれる)、あるいは UNDP が UNDESA(United Nations Department of Economic and Social Affairs) 及び WEC(World Energy Council) と共同で実施した WEA(World Energy Assessment) で作成された 2100 年までのエネルギー需給シナリオ等が参考になる。しかし、日本一国ではなく世界全体（地域別）を対象に整合性のある入力を与える必要性を考慮すると、最適化型などの他の世界モデルでの評価結果を使用する等の方法も検討する必要がある。

長期のシミュレーションを実施する場合、貿易構造（特に本分析では、資源貿易構造）に関する想定も重要になる。つまり、貿易がグローバル化の方向に進むのか、それとも、ある程度地域内でブロック化するのかといった点である。もちろん、一般均衡型モデルでは、貿易財の価格変動による貿易構造の変化は内生的に評価される。ここで、述べている貿易構造の想定とは、ある財を同価格で供給する A 国と B 国がある場合に、グローバル化が進んだ社会では両国から同量の財を輸入するのに対し、ブロック経済化した社会では、両国からの貿易量に差が生じえるという意味である。

出力データとしては、FBR が一定比率導入された場合と導入されない場合の、エネルギー価格の差、その結果としての GDP の差が得られる。FBR を導入することによってエネルギー価格が有意に低下するシナリオ下では、FBR は GDP の増加に貢献することになり、その増加分が FBR の中長期的なエネルギーセキュリティ向上に関する効果と定義することが可能である。反面、人口やエネルギー需要がそれほど増加しないシナリオでは、FBR を導入することによって、逆にエネルギー価格が上昇し GDP が低下することも考えられる。

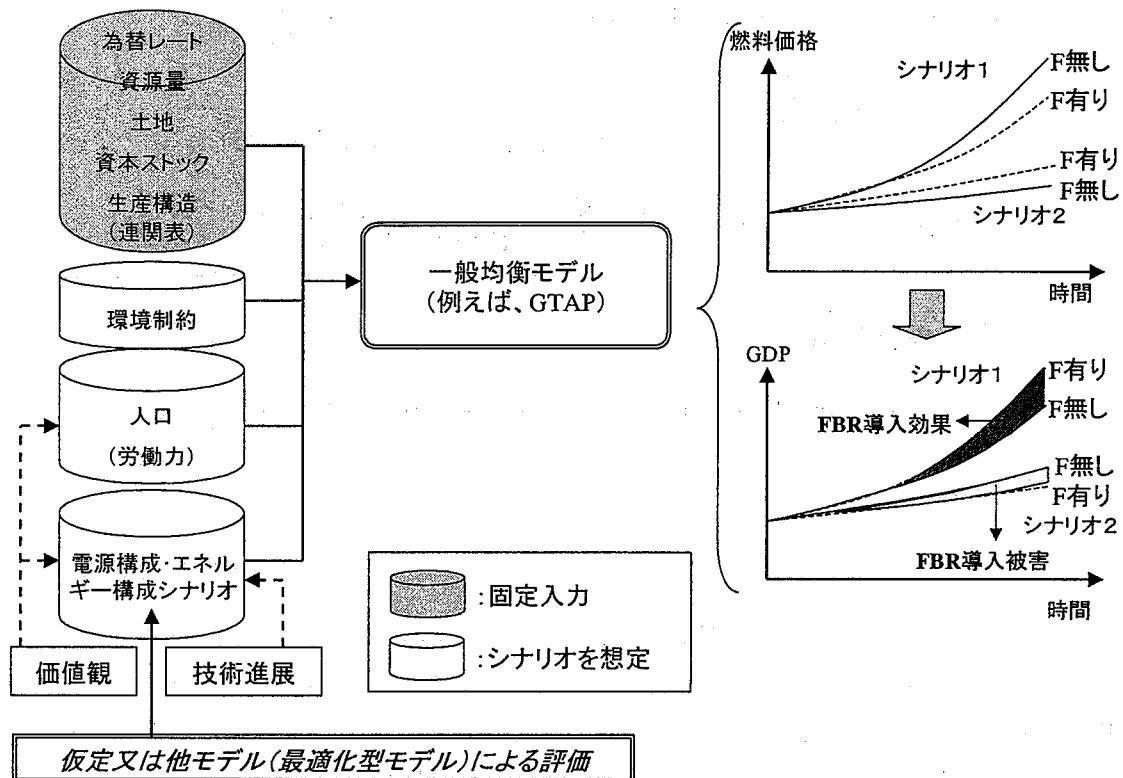


図 16 一般均衡モデルの入出力のイメージ（電源構成：外生条件）

図 17 に、電力価格の決定メカニズムを示す。GTAP モデルでは、電気事業者も産業部門の一つとして取扱われており、資本、土地、労働及び 1 次エネルギー供給事業者からの燃料投入により、電力を生産する部門である。このとき、1 次エネルギー供給事業者からの燃料投入は、現状の電源構成に基づく固定係数（産業連関表から求められる Leontief 係数）によって決定される。このため、現状の電源構成以外の電源構成を想定する場合には、この係数をモデルのデフォルト

値から変更する必要がある。

一方、1次エネルギー供給事業者の燃料調達は、現状の資源貿易市場を考慮してモデル化されている。具体的には、地域間の代替弹性値及び資源価格に基づいて、各地域からの資源輸入量が決定されている。例えば、中東の原油が値上がりすれば、他地域からの輸入量が上昇するといった市場の動きを考慮することが可能である。

なお、ウラン資源については、既存のモデルでは考慮されておらず、新しく追加する必要があるものと考えられる。

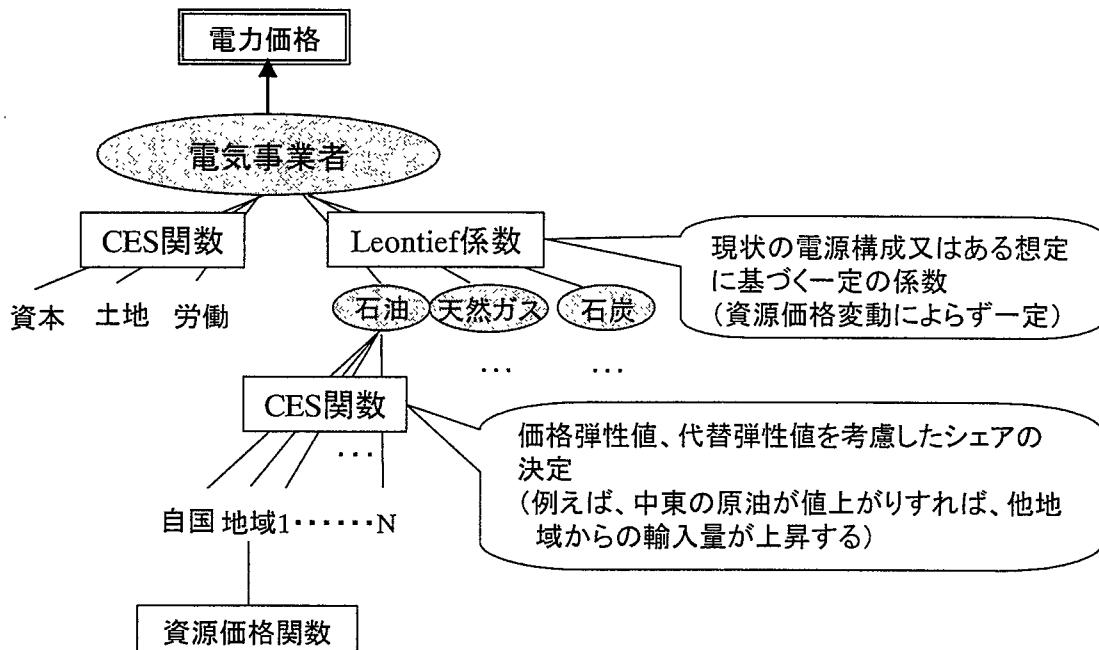
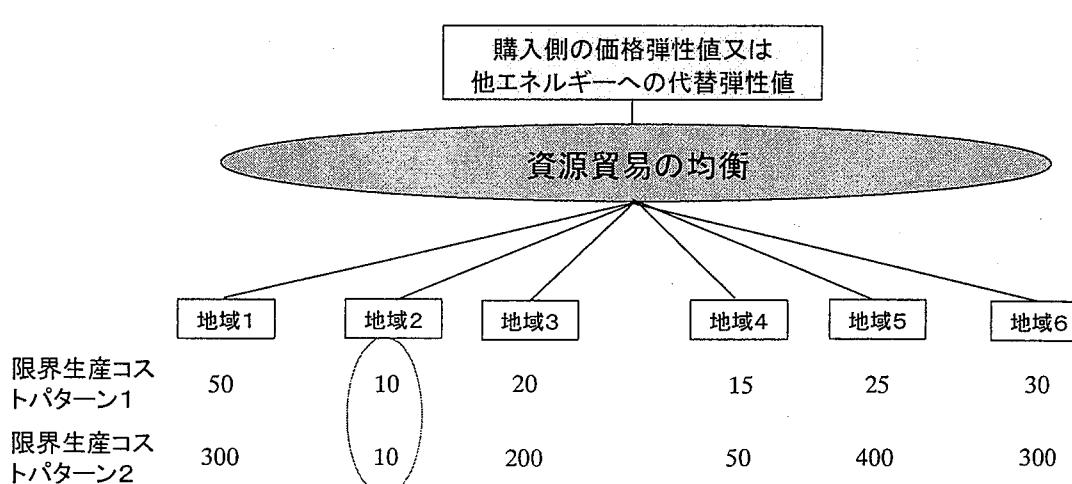
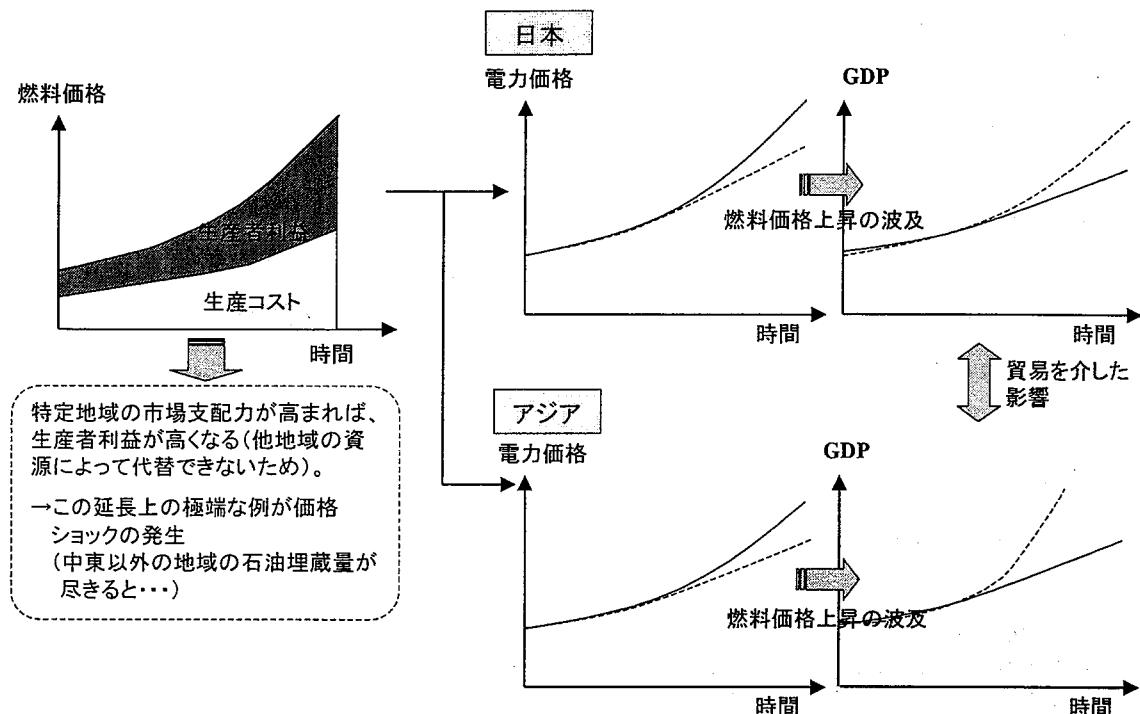


図 17 電力価格の決定メカニズム（電源構成：外生条件）

図 18 に、モデル分析によって把握できるエネルギー価格の経済波及の影響経路の概要を説明する。まず、エネルギー価格は、エネルギー（燃料）供給事業者の生産投入コストと生産者利益から構成されており、資源量が減少し特定地域の市場支配力が高まれば、生産者利益が増加することになる（この極端な例が価格ショックである（図 19 参照））。

エネルギー価格の我が国への影響を考えた場合、一つは我が国の産業界への直接的な価格波及効果であり、もう一つは、我が国の主要な貿易相手国（アジア、米国など）におけるエネルギー価格の上昇の影響が貿易を通して我が国に波及する可能性である。特に、今後アジアの経済規模が飛躍的に増大する可能性が高いことから、アジアからの波及効果の分析は重要である。



何らかの理由で地域2からの資源供給価格が急上昇した場合

- ①生産パターン1であれば、価格の急上昇は市場(他地域の生産)によって軽減。
- ②購入側の生産構造がその資源に対する豊富な代替資源を有していれば、生産パターン2であっても価格ショックは購入者側に波及しない。また、逆に、価格は高止まりしない。
- ③生産パターン2でありかつ購入者側の資源に対する価格・代替弾性が小さい場合に、資源価格のさらなる高騰及び高止まりが発生する。
- ④将来的にパターン2のような生産構造になり得るか?といった分析。また、適当な価格ショックを仮定した感度分析は可能。

図 19 価格ショックの影響に関する分析可能性

3.1.2. 必要となる作業項目

図 20 に、本分析で必要となる作業項目を示す。

電源構成を外生条件とする場合、基本的に既存の GTAP モデルをそのまま利用可能であるが、『FBR の導入によって電力価格がウラン資源価格の変動の影響を受けにくくなる』といった本分析の条件を満たすためには、ウラン資源及び市場を明示的に取扱う必要がある。

入力データとしては、GTAP のデフォルトデータ（産業構造、資本ストック）に加えて、化石資源、人口、長期エネルギー技術進展（省エネ進展）シナリオ、価値観変化、電源構成シナリオを準備する必要がある。

○改良作業

＜ソースレベルでの改良＞

①ウラン資源の明示的な取扱い

○データの準備

- －産業構造、資本ストック、土地：GTAPデフォルトデータ
- －化石資源：Rogner、ウラン：OECD/NEA
- －人口（日本：人口問題研究所、世界：国連）
- －長期のエネルギー技術進展（コスト）：IPCC SRESやUNDPのエネルギー需要推定の前提
- －価値観：IPCC SRES等の評価軸
- －電源構成シナリオ

図 20 必要となる改良作業項目（電源構成：外生条件）

3.1.3. メリットとデメリット

電源構成を外生条件とした場合、既存の GTAP モデルをそのまま適用できるというメリットがある反面、経済情勢やエネルギー情勢の結果としての電源構成は評価できることになる。DNE21 モデルなどを用いて電源構成を算定し、それを GTAP の入力値に反映することも考えられるが、両モデルで使用する制約条件の整合性に留意する必要がある。一般均衡モデルと最適化型モデルでは、同様の制約式でも異なる表現をする可能性が高い。

3.2. 電源構成を内生変数とする場合

3.2.1. 入出力のイメージ

図 21 に、入出力データのイメージ図を示す。

各電源の導入量を一般均衡モデル内で内生的に求めるため、FBR 技術や他電源の技術を一般均衡型モデルの考え方沿ったデータで表現する必要がある。つまり、1 単位の電力生産を行うために必要な生産要素（資本、土地、労働、燃料）を各発電技術ごとに準備する必要がある（発電コストを資本費、燃料費、人件費、土地費に細分化するようなイメージ）。

図 22 に、電源構成を内生変数とした場合の電力価格の決定メカニズムを示す。電気事業者の下に各発電技術ごとの生産関数があり、各技術の生産価格と電源間の代替弹性値に基づいて、電源構成が内生的に決定される。このためには、各発電技術ごとに生産関数を準備する必要があるが、原子力や FBR 以外の電源に関しては、GTAP-E モデルでの設定値が一つの参考になるものと考えられる。

資源貿易の取扱いは、従来の GTAP モデルと同様であり、ウラン資源を追加する必要があると考えられる。

出力データに関しては、FBR が経済的に合理的でないシナリオでは、FBR が導入されないことになり、FBR という技術の有無に係らず、GDP は変化しない。

その他の入出力データのイメージは、3.1 節と基本的に同様である。

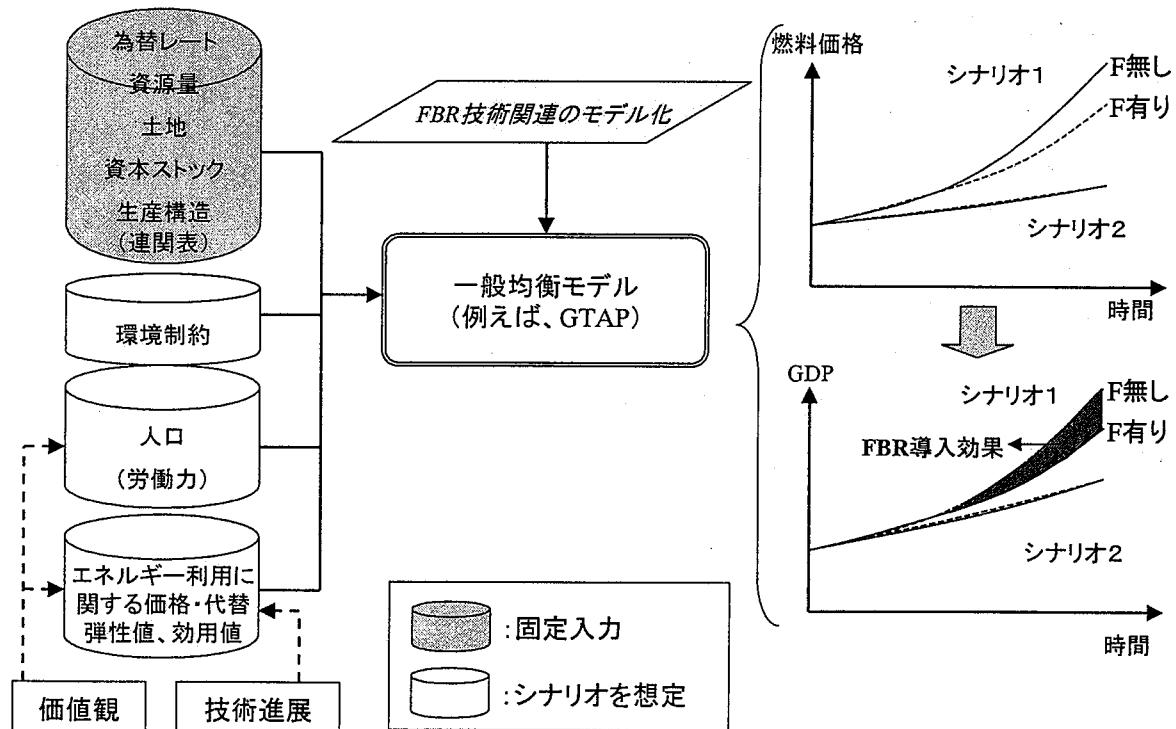


図 21 一般均衡モデルの入出力のイメージ（電源構成：内生変数）

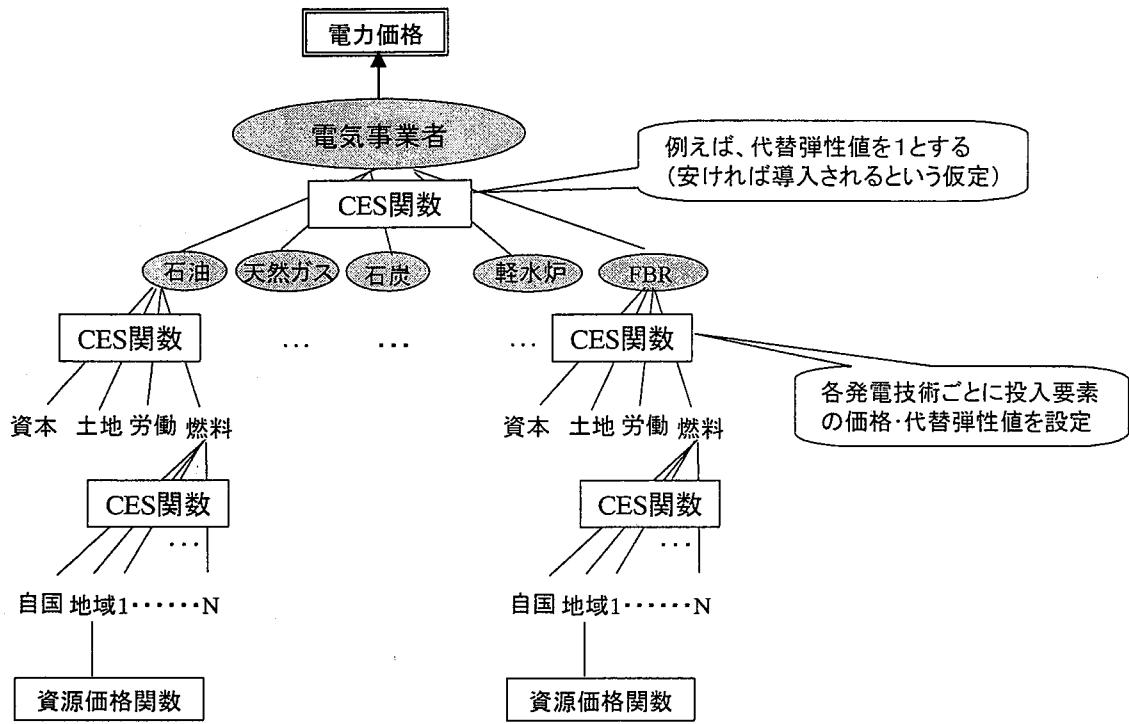


図 22 電力価格の決定メカニズム（電源構成：内生変数）

3.2.2. 必要となる作業項目

図 23 に、本分析で必要となる作業項目を示す。

電源構成を内生変数とする場合、エネルギーセクターの詳細化、その中の原子力や FBR のモデル化等が必要となる。これらの作業は、GTAP モデルが提供する独自の GUI (Graphical User Interface) 環境上で比較的簡単に実施することで可能である。ただし、モデルの詳細化に伴うデータの整備は煩雑な作業である。また、ウラン資源及び市場を明示的に取扱う必要があるという点は、3.1 節の場合と同様である。

入力データとしては、GTAP のデフォルトデータ（産業構造、資本ストック）に加えて、化石資源、人口、長期エネルギー技術進展（省エネ進展）シナリオ、価値観変化、電源構成シナリオを準備する必要がある。

○改良作業

<GUI上での改良>

- ①エネルギーセクター全般の詳細化(GTAP-Eの構造・データ説明論文を参考に)
- ②原子力やFBRのモデル化(生産構造の中でどのような財と位置付けるか?)
- ③モデルの詳細化に伴うデータの整備
※①及び②のモデルの詳細化は比較的簡単に実施可能。ただし、それに付随するデータの整備は煩雑(1部門の追加は、マトリックスの1列分の追加×時点分のデータ作成を意味する)。

<ソースレベルでの改良>

- ①ウラン資源の明示的な取扱い

○データの準備

- 産業構造、資本ストック、土地:GTAPデフォルトデータ
- 化石資源:Rogner、ウラン:OECD/NEA
- 人口(日本:人口問題研究所、世界:国連)
- 長期のエネルギー技術進展(コスト):IPCC SRESやUNDPのエネルギー需要推定の前提
- 価値観:IPCC SRES等の評価軸

図 23 必要となる改良作業項目（電源構成：内生変数）

3.2.3. メリットとデメリット

電源構成を内生変数とした場合、経済情勢やエネルギー情勢の結果としての電源構成が評価できる(FBRと技術がどのような社会情勢の時に経済成長に大きく寄与するか、又はしないのかを評価できる)反面、GTAPを大幅に改良する必要がある。モデルの詳細化は比較的簡易であるが、データの整備に多くの作業時間を要する可能性がある。

また、電源投資が非常に長期間に渡るといった特性(資本の固定性)等の取扱いについても、特に、エネルギー需要の伸びが鈍化又は停滞するような状況下では、留意しておく必要がある。動学的な問題を取り扱う上でのGTAPモデルの限界については、付録B.5に記述している。

4.まとめ

以下に、本調査の成果を要約する。

- ・ エネルギーセキュリティの概念や現状、エネルギーセキュリティ上の原子力の位置付けについて整理し、化石資源やウラン資源の枯渇を考慮した中長期的な視点でのエネルギーセキュリティの重要性及びその向上策としてのFBRの役割を明確にすることが必要であることを明確にした。
- ・ 既存のエネルギー経済モデルについて調査し、エネルギーセキュリティの定量評価への適用可能性について検討した。検討の結果、世界全体を対象とし、化石資源の貿易市場がモデル化されている一般均衡モデル GTAP が中長期的なエネルギーセキュリティの定量評価に有効である、との結論をえた。
- ・ 今後 GTAP モデルを用いた中長期的なエネルギーセキュリティの定量評価を実施していくことを想定し、必要な作業項目及び留意事項をまとめた。具体的には、「電源構成（FBR や原子炉のシェア）を内生変数とする場合」及び「電源構成（FBR や原子炉のシェア）を外生変数とする場合」の 2 通りを想定し、必要となる入力データ、出力データのイメージ、必要なモデル改良項目等について整理した。

参考文献

- [1] 「総合エネルギー調査会エネルギーセキュリティ WG 報告書」(2001年)
- [2] 「エネルギーセキュリティ」矢島正之(2002年5月)
- [3] 「Projected Costs of Generating Electricity : Update 1998」OECD/NEA(1998年)
- [4] 「原油価格上昇の日本経済への影響」電力中央研究所報告、Y00015(2000年)
- [5] 「エネルギー安全保障における原子力の評価」入江一友、神田啓治、日本原子力学会和文論文誌、Vol1、No.2(2002年)
- [6] 「ExternE Vol.7 Methodology 1998 upgrade」(1998年)
- [7] 「World Energy Assessment : Energy and Challenge of Sustainability」UNDP(2001年)
- [8] 「持続的発展のための世界モデルに関する研究」、西岡秀三、環境省国立環境研究所 研究成果報告書、平成6年
- [9] 「応用一般均衡モデルの基礎と応用」川崎研一、日本評論社、1999
- [10] 「世界エネルギーモデル WEP2001 の開発」、星野優子、熊倉修(財)電力中央研究所報告(Y01017)、2002.3
- [11] 「超長期世界エネルギー需給モデルによる計量分析」(財)日本エネルギー経済研究所 研究レポート、2000.11
- [12] 「日本を巡る自由貿易協定の効果」堤雅彦、清田耕造、(社)日本経済研究センター JCERDISCUSSION PAPER No.74、2002.2
- [13] 「規制改革による経済効果分析のための応用一般均衡モデルの開発」伴金美ら、経済企画庁 経済研究所 経済分析、1999.6
- [14] 「温暖化ガス排出削減が世界貿易を通じてマクロ経済に与える影響」高瀬香絵、室田泰弘、WWF、2001
- [15] 「GTAP-E : An Energy-Environmental Version of the GTAP Model」GTAP Technical Paper No.16、2002
- [16] 「環境政策の一般均衡分析」、黒田昌祐、野村浩二、三田商学研究41巻4号、1998
- [17] 「日本経済の生産・代替構造分析」、奥島真太郎、後藤則行、日本経済研究 No.42、2001.3
- [18] 「エネルギーシステムにおける CO₂問題対策の評価(東京大学学位論文 藤井康正)」(1992年)
- [19] 「Energy Security and the Asian Security Nexus」Fesharaki, F., Journal of International Affairs, No.1, p81-89, 1999.
- [20] 「Crying Wolf : Warnings about Oil Supply」, Lynch, M.C., MIT, 1998.
(<http://sepwww.stanford.edu/sep/jon/world-oil.dir/lynch/worldoil.html>)
- [21] 「Energy, Exhaustion, Environmentalism and Ettatism」, Grodon, R.L., Energy Journal, Vol.15, No.1, p1-16, 1994.
- [22] 「Erich W.Zimmermans Introduction to World Resources」, Zimmerman, E.W., Harper & Row, New York, 1964.

付録資料

【目 次】

A. GTAP モデル	57
A.1. 概要	57
A.2. モデルの全体構造.....	57
A.3. 市場均衡のモデル化.....	59
A.3.1. 価格弾力性の一般的説明	61
A.3.2. 価格弾力性の推計	64
A.4. GTAP モデルによるシミュレーション	66
A.5. GTAP モデルの問題点	68
B. Green モデル	70
B.1. 開発の経緯	70
B.2. 概要	70
C. 報告会資料	76

A. GTAP モデル

A.1. 概要

GTAP (Global Trade Analysis Project : 世界貿易計画) は 1992 年に設立された世界貿易分析センターにより開発され、現在多くの研究機関などで用いられている応用一般均衡モデルである。GTAP は一般均衡問題を解く際に必要となる各国の需要や所得に関する弾性値がデータベースとしてまとめられており現在 5 版まで刷新されている。このデータベース作成にあたっては、OECD、国際連合貿易開発会議 (UNCTAD)、世界銀行、世界貿易機関 (WTO) のほか日本、米国、EC 政府機関が参画するまさにグローバルなシステムとなっている。データベースは、各国・地域内の産業間の投入算出データだけでなく、各国・地域間の貿易財の取引・輸送コストおよび関税・非関税障壁データを統合したものである。地域は 30 地域を網羅しており産業については 37 に区分されている。

国内では、経済企画庁、日本輸出入銀行などで導入されており、APEC 貿易自由化や最近のアジア経済における変調を実証分析する研究が盛んに行われている。このモデルは、貿易部門、国際経済に特化したモデルであり、関税の引き下げなど世界貿易の自由化を分析することを目的としている。

表 A-1 GTAP が取り扱う地域区分・産業区分

地域区分		産業区分	
略号	国・地域	略号	商品・産業
1 AUS	オーストラリア	1 pdr	米
2 NZL	ニュージーランド	2 wht	小麦
3 JPN	日本	3 gro	その他穀物
4 KOR	韓国	4 ngc	非穀物作物
5 IDN	インドネシア	5 wol	羊毛
6 MYS	マレーシア	6 olp	その他畜産生産物
7 PHL	フィリピン	7 for	林産物
8 SGP	シンガポール	8 fsh	水産物
9 THA	タイ	9 col	石炭
10 CHN	中国	10 oil	石油
11 HKG	香港	11 gas	ガス
12 TWN	台湾	12 ome	その他鉱物
13 IDN	インド	13 pcr	米製品
14 RAS	その他南アジア	14 met	肉製品
15 CAN	カナダ	15 mil	乳製品
16 USA	アメリカ	16 ofp	その他加工食品
17 MEX	メキシコ	17 b_t	飲料、たばこ
18 CAM	中米、カリブ	18 tex	織維
19 ARG	アルゼンチン	19 wap	衣料品
20 BRA	ブラジル	20 lea	皮革製品
21 CHL	チリ	21 lum	木製品
22 RSM	他の南米	22 ppp	パルプ、紙
23 E_U	EU12カ国	23 p_c	石油、石炭製品
24 EU3	オーストリア、フィンランド、スエーデン	24 crp	化学、合成ゴム、プラスチック
25 EFT	欧州自由貿易地域	25 nmm	窯業、土石
26 CEA	中央欧州諸国	26 ls	鉄鋼
27 FSU	旧ソビエト連邦	27 nfm	非鉄金属
28 MEA	中東、北アフリカ	28 fmp	金属製品
29 SSA	サハラ、アフリカ	29 trn	輸送機器
30 ROW	その他	30 orne	その他機械
		31 omf	その他製造業
		32 egw	電力、ガス、水道
		33 cns	建設業
		34 tt	貿易、運輸
		35 osp	その他サービス(民間)
		36 osg	その他サービス(政府)
		37 dwe	住宅賃貸料

A.2. モデルの全体構造

マクロレベルの枠組としては、各国・地域ごとに取引主体として、企業(生産者)、民間家計および政府の存在が仮定されている。各経済主体は、家計では、予算制約下での需要・サービスから得られる効用を最大化するために行動する。また企業は、設備投資のみを行うのではなく生産主体

として扱われており、自らが有する資源や技術により利潤が最大化となるよう行動するようモデル化されている

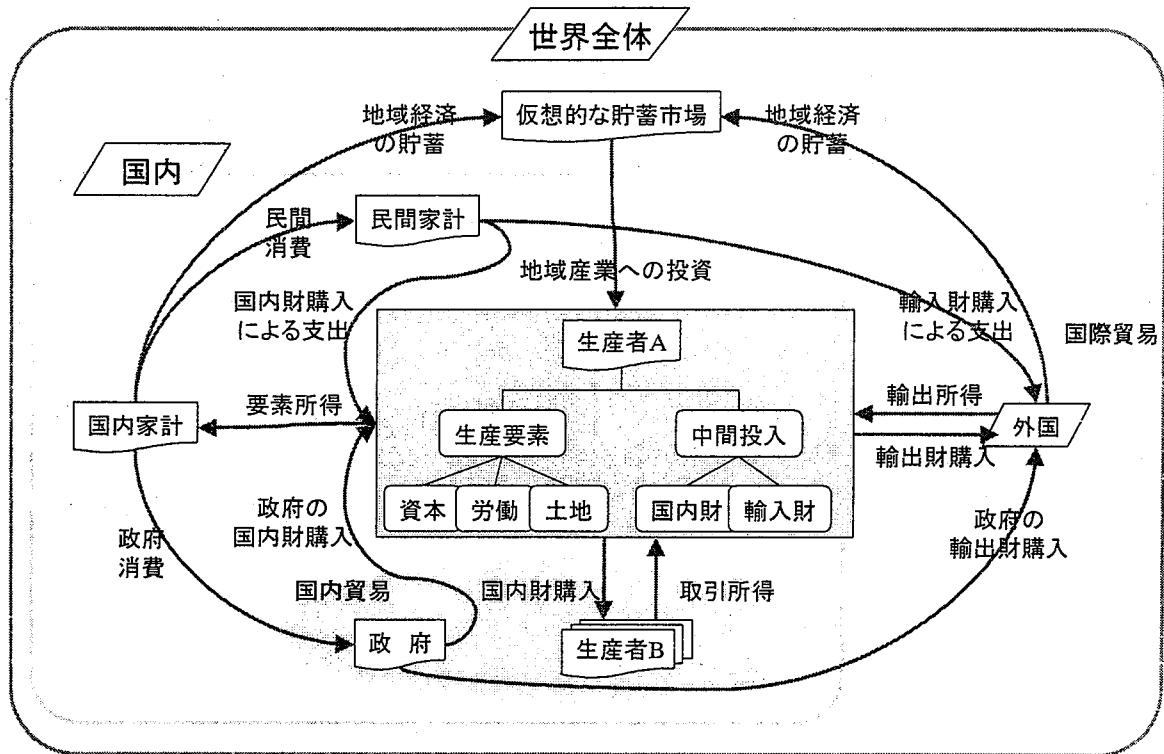


図 A-1 モデルの全体構造

家計の行動は、①消費活動として企業から財・サービスを購入、②貯蓄活動として資金を貯蓄、③納税活動として政府に租税を支払うことがモデル化されている。ここで GTAP モデルでは、民間家計と政府は国内家計という広義の取引主体として扱われている。従って資金の流れとしては、国内家計は生産要素である労働、資本及び土地を保有しており、これらを企業に提供することで要素所得を得る。ここで家計の支出は消費活動に伴う民間消費支出と納税活動による政府消費支出の合計として定義される。所得のうち民間消費支出と政府支出の合計を上回る部分は貯蓄に回され、仮想的な貯蓄市場に支出される。この貯蓄分は企業に対し投資として支出される。

企業の行動は、①雇用活動として賃金を民間家計に支払うほか、②生産活動として購入財の代金を他の生産企業に支払うことがモデル化されている。資金の流れとしては、財・サービスを提供することで家計から所得を得ると共に投資資金を得て、利潤を最大化するように、生産要素への支出と資材など中間投入への支出を費用最小化原則に基づき決定する。ここで、生産要素は各要素の複合財として扱われ、各要素間での費用最小化行動により決定される。要素間の振り分けは代替弾力性 (σ_{VAE}) で決定される。また、中間投入は国内財と輸入財に振り分けられこれも代替弾力性 (σ_D) で決定される。更に輸入財をどこから調達するかについては輸入財の輸入先の代替弾力性 (σ_M) をもとに費用最小化により決定される。

GTAP(standard model) Production Structure

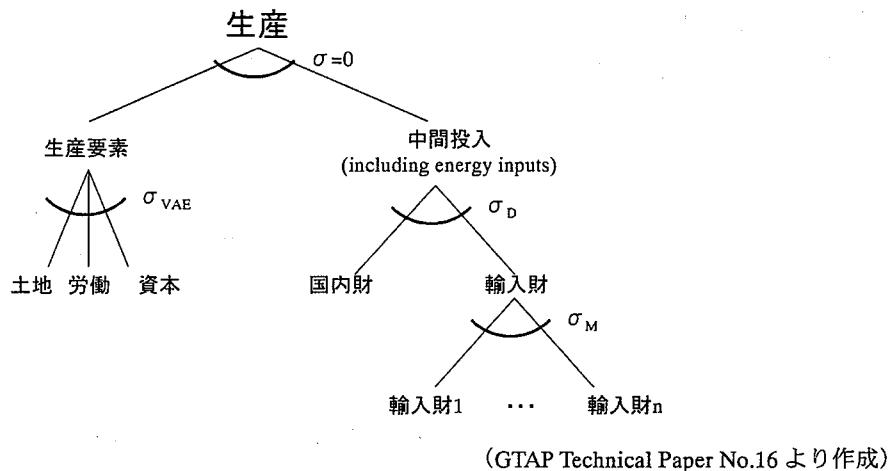


図 A-2 企業の生産構造

上述の経済的合理化行動をもとに、モデルでは市場の均衡を達成するように財の取引が行われる。ここで、GTAP では取引量が（数量）×（単価）として記述される。市場の均衡とは、各市場での財の需要と供給が一致することである。ある産業の財に関して、その財の各国の生産額の総和が供給であり、各国の他産業、家計消費、政府消費の需要額の総和が需要である。この需要と供給が各市場において成立することが均衡条件となる。

GTAP におけるモデルの全体構造を以下にまとめると。

- ① 需給の均衡は世界各国での超過投資総額と超過貯蓄総額の間で成立し、総和がゼロとなる恒等式が維持される。ただし各国地域の貯蓄と投資については一致する必要はない。
- ② 会計バランスは家計、企業（生産者）、政府部門からなり、家計部門は効用最大化を実現するように財（労働、資本、土地）を需要し、企業部門は完全競争下での利潤最大化原理に従うことで、各要素需要と財の供給を行う。政府部門は仮想的な部門で家計部門に準ずる。
- ③ 家計部門の効用最大化行動の前提として社会厚生関数が各国に想定されており、家計消費、政府消費、国内貯蓄により成り立っている。各支出項目は所得に対する一定のシェアで定義される。
- ④ 輸出入財は各財ごとに国内財と競合し代替弾力性により財の振り分けが行われる。自由貿易による資本の国際的な移動や所得増加に伴う資本ストック（貯蓄と投資の量）の変動を取り扱うことが可能である。

A.3. 市場均衡のモデル化

需給の均衡には前述の通り、家計、企業などの経済主体が最適化行動を行った結果初めて到達する。ここで、上述したように GTAP では全ての取引について $(\text{取引額}) = (\text{数量}) \times (\text{単価})$ で表現している。これを変化率で書き改めると、 $(\text{取引額の変化率}) = (\text{数量の変化率}) + (\text{価格}$

の変化率) という線形式で表現できる。GTAP では外的に与える変化に対する新たな市場均衡について、上述の線形化プロセスを用いて均衡解を導出している。この均衡解を導くため、GTAP ではある変化要因が取引量の変化に及ぼす影響度をパラメータとして与えている。そしてモデルでは各経済主体の最適化行動が与えられたパラメータを説明変数とした関数で表現されている。企業の生産構造を例にとり説明を行うと、生産要素の需要関数は以下の通りとなっている。

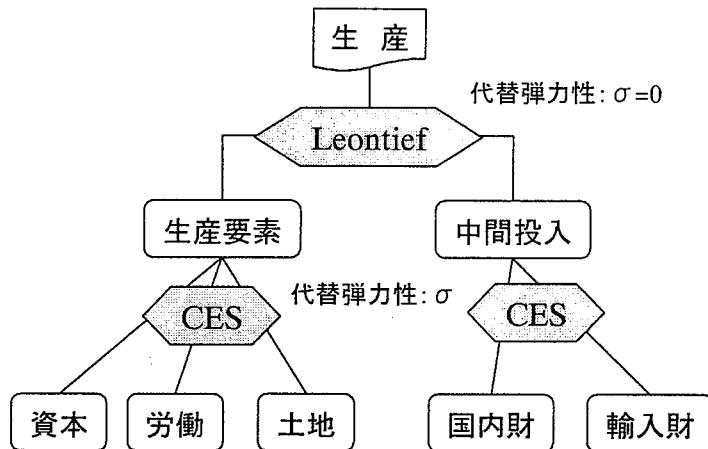


図 A-3 企業の生産構造と行動関数

GTAP では生産要素の需要関数は CES (Constant Elasticity of Substitution) 型で定義されている。資本と労働の代替弾力性を $\sigma_j = 1/(1+\rho)$ とする。生産量 Q_j は以下で表される。

$$Q_j = \alpha_j \left[\beta_j K_j^{-\rho_j} + (1 - \beta_j) L_j^{-\rho_j} \right]^{\frac{1}{\rho_j}} \quad (K: \text{資本需要}, L: \text{労働需要}) \quad \dots \dots \dots (C.1)$$

ここで、生産量を所与とする費用最小化行動を仮定すると、以下式が表される。

$$\frac{K_j}{L_j} = \left(\frac{1 - \beta_j}{\beta_j} \frac{P_K}{P_L} \right)^{-\sigma_j} \quad \dots \dots \dots (C.2)$$

従って、CES 型生産関数で定義される企業の生産行動を表現するためには、 α 、 β 、 ρ の各パラメータを与える必要がある。

ここで、均衡条件から $P_K=P_L=1$ とすると、上式は

$$\beta_j = \frac{1}{1 + \left(\frac{K_j}{L_j} \right)^{-(1+\rho_j)}} \quad \dots \dots \dots (C.3)$$

となる。これを 1 番目の式に代入すると、

$$\alpha_j = \frac{Q_j}{[\beta_j K_j^{-\rho_j} + (1 - \beta_j) L_j^{-\rho_j}]^{\frac{1}{\rho_j}}} \quad \cdots \cdots \cdots \text{(C.4)}$$

が得られる。即ち、先に述べた α 、 β 、 ρ の各パラメータは代替弾力性 σ_j が特定されれば全ての値を特定することができる。

企業の生産要素と中間投入要素との振り分けは Leontief 型関数で定義され、これは代替弾力性 $\sigma = 0$ の場合の関数である。この場合各生産要素の需要量は相対価格が変化しても一定となる。従って上記の生産構造においては、企業が財・サービスを提供するために必要とする資本、労働などの生産要素と中間投入財の需要量は変わらない。

この他にも GTAP では経済主体の最適化行動を表現する関数として、 $\sigma = 1$ となるコブ・ダグラス型関数や CDE (Constant Difference of Elasticity) 型関数などが用意されている。コブ・ダグラス型関数は家計の効用関数として用いられ、各要素のシェアが一定となり、相対価格の変化に応じてシェアを満たすように数量が調整される。また CDE 型関数は民間家計の支出関数として用いられ、財の代替弾力性の差が一定となるように各財の代替弾力性が変化する関数となっている。

A.3.1. 価格弾力性の一般的説明

GTAP では、外部から与える弾力性として

- ① 企業の生産要素間の代替弾力性
 - ② 国内財、輸入財間、輸入国間の代替弾力性
 - ③ 民間家計の消費に対する価格弾力性、所得弾力性
 - ④ 資本ストックの変化に対する期待資本収益率の弾力性
- の 4 種類がある (文献[15])。

以下では、弾力性の説明として価格弾力性について一般的な説明を加える。

企業は利潤最大化を目的とするが、消費者は何を目的として行動するのかと問えば、それは予算制約の下で自己の満足度、つまり効用を最大にするように行動する。すなわち、ある財の価格が上昇した場合、企業は自己利益を最大にするように供給量を増大させ、逆に消費者は自らの予算制約に見合う範囲で需要 (消費) 量を減少させる。この企業および消費者行動を財の量と価格の関係から表したもののが供給曲線、需要曲線と呼ぶ。経済学上の仮想社会では、ある財の価格に対し需要量と供給量が一致するように、企業と消費者が行動すると仮定される。

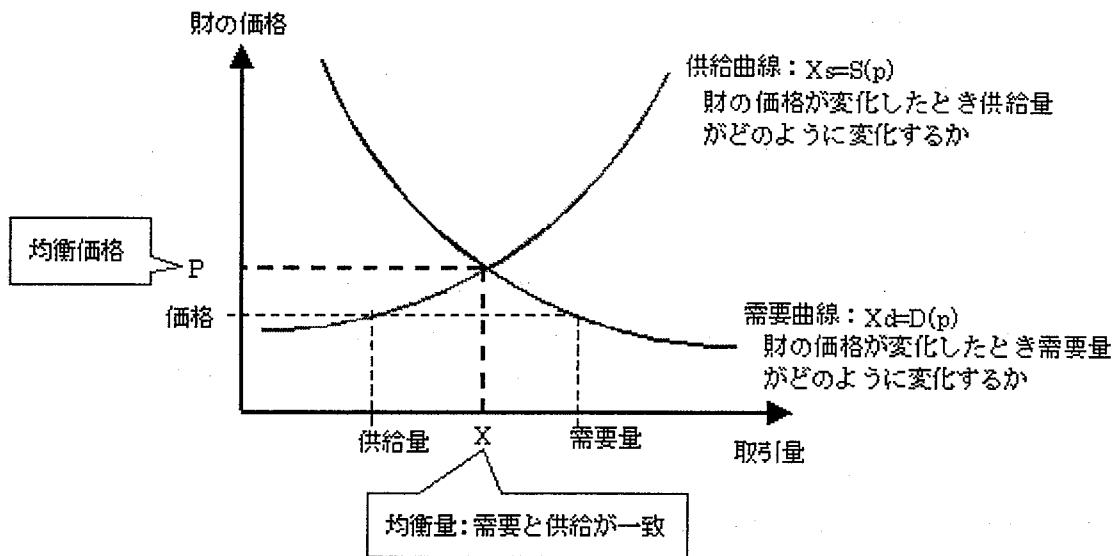


図 A-4 需要と供給の関係

価格弾力性とは、需要および供給曲線の傾き具合を測る尺度で、需要（もしくは供給）量の変化率と価格変化率の比で表される。その場合、市場には財は1つではなく、 i 財の価格の変化が、自己の*i*財の需要量に与える影響と、他の*j*財に与える影響がある。後者は需要の交差価格弾力性といい、それに対して前者は需要の自己価格弾力性というが、「自己」が省略されることがある。一般的に需要と供給の価格弾力性は ε と η で表されるが、需要と供給の論議は同様であるので、以下では需要についてのみ説明する。

需要の自己価格弾力性は以下で表される。

i 財の価格の変化率=価格の変化量／元の価格水準

$$\alpha_i = \Delta P_i / P_i = |P_{i1} - P_{i2}| / P_{i1} \quad \dots \dots \dots (C.5)$$

i 財の需要の変化率=需要の変化量／元の需要水準

$$\beta_i = \Delta X_{i1} / X_{i1} = |X_{i1} - X_{i2}| / X_{i1} \quad \dots \dots \dots (C.6)$$

$$\begin{aligned} \text{自己価格弾力性: } \varepsilon_{ii} &= -\frac{\beta_i}{\alpha_i} = \frac{\Delta X_{i1} / X_{i1}}{\Delta P_{i1} / P_{i1}} \\ &= (P_{i1} / X_{i1}) / ((P_{i1} - P_{i2}) / (X_{i1} - X_{i2})) \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (C.7)$$

このとき、

$|\varepsilon| > 1$ のとき需要曲線は弾力的

$|\varepsilon| < 1$ のとき需要曲線は非弾力的

という。

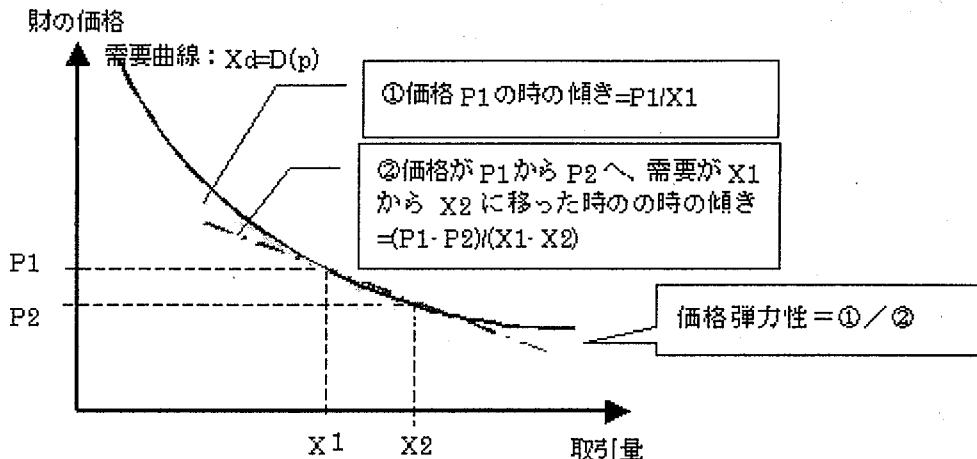


図 A-5 需要の価格弾力性

非弾力的需要曲線に直面する企業は、商品の価格を上げた方が収入(価格×数量)を増やすことができる。それは値上げ分ほど需要量が減少しないからである。他方、弾力的需要曲線の場合には、価格を上げた方が収入は減る。それは値上げ分以上に需要量が減少するからである。

需要の(自己)価格弾力性の大きさは、

$$\text{総合効果}(-) = \text{自己代替効果}(-) + \text{所得効果}(-)$$

より決まる。ここで、

自己代替効果：ある財の価格の変化が自己の需要量に与える効果で、それは常にマイナス効果を持つ。

i 財の価格の低下は負の自己代替効果よりその需要量を増加させる。また価格の低下は実質所得を増加させ、i 財が正常財であれば、その需要量を増加させる。よって、i 財の需要量は実質所得の増加と同方向に動くので、実質所得に対しては正の所得効果をもつが、価格低下とこの所得効果による需要量増加は反対方向に作用するので、価格に対する所得効果の符号は負となる。この 2 つの効果の合計は負の効果を持つ。これが「正常財の需要曲線が右下がりになる」理由である。そして、この 2 つの効果の絶対値が大きければ大きいほど、需要曲線は弾力的になる。贅沢品は所得増加(減少)に対して増加(減少)しやすいので所得効果が大きい。よって、その需要曲線は弾力的になる。他方、必需品は所得の変化に大きな影響を受けないから所得効果が小さい。その結果、その曲線は非弾力的になる。

交差価格弾力性も同様に以下で表される。

$$\text{交差価格弾力性} : \varepsilon_{ij} = -\frac{\beta_j}{\alpha_i} = \frac{\Delta Xj_d / Xj_d}{\Delta Pi_d / Pi_d} \quad \dots\dots\dots(C.8)$$

このとき

$|\varepsilon| > 0$ のとき j 財は i 財の代替財

$|\varepsilon| < 0$ のとき j 財は i 財の補完財

という。

交差価格弾力性の大きさは、

総合効果(+) = 交差代替効果(+) + 所得効果 (-)

より決まる。ここで、

交差代替効果：ある財の価格の変化が他の財の需要量に与える効果で、価格と需要量が同方向に変化する場合をプラス効果、反対方向に変化する場合をマイナス効果を持つという。

i 財の価格の低下は、 j 財が代替財であれば、相対的に高くなった j 財の需要量を低下させる(正の交差代替効果)。また価格の低下は実質所得を増加させ、 j 財が正常財であれば、その需要量を増加させてるので、価格と所得効果による需要量は反対方向に変化するので、その符号は負となる。したがって、正の交差代替効果と負の所得効果の大きさで総合効果が正になるか負になるかが決まる。正の交差代替効果が勝れば、代替財の総合効果は正になり、需要の交差価格弾力性は正となる。つまり、 i 財の価格の低下は代替財 j の需要量を低下させるのである。もし負の所得効果が勝てば、総合効果は負となり交差価格弾力性も負となる。 j 財が補完財の場合は、負の交差代替効果をもつので、それが正常財であれば所得効果も負となる。よって、総合効果は常に負になり、交差価格弾力性も負となる。つまり、 i 財の価格の低下に対して、補完財 j の需要量は確実に増加することになる。

A.3.2. 価格弾力性の推計

価格弾力性の推計については研究機関などで検討事例がいくつか報告されている。ここでは、奥島、後藤の研究成果を取り上げ概要を記載する。

(1) 概要

奥島真太郎、後藤則行は「日本経済の生産・代替構造分析」(日本経済研究、2001)にて、産業連関表をもとに、資本、労働、エネルギー、原材料の投入要素を取り込んだモデル(ELEM モデル)により国内の全産業部門を対象とした価格弾性および代替弾性値の検討を行っている。代替性の検討では、エネルギーとその以外の生産要素(資本、労働、原材料)との代替弾力性について推計している。エネルギー要素は石炭、石油、ガスを対象とし、データサンプルは産業連関表の1960年から1995年までの長期データを参照している。生産関数としてはトランスログ関数を使用している。下表に算定された価格弾力性をまとめた。

表 A-2 産業別のエネルギー価格弾力性

産業	自己価格 弾力性				交差価格弾力性			
	ε_{EE}	ε_{KE}	ε_{LE}	ε_{ME}	ε_{KE}	ε_{LE}	ε_{ME}	
全産業	-0.40	-0.01	0.03	0.03				
農林水産業・鉱業・建設業	-0.43	-0.03	-0.02	0.04				
エネルギー消費型製造業	-0.72	-0.13	0.09	0.10				
その他製造業	-0.24	-0.05	-0.02	0.02				
運輸	-0.50	0.13	0.04	0.02				
サービス	-0.17	0.03	0.02	-0.03				

(2) 分析モデル

本研究ではエネルギー費用関数にトランスログ(Translog)モデルを適応している。トランスロゴ費用関数は以下で表される。

$$\ln C = \alpha_0 + \sum_i \alpha_i \ln P_i + \frac{1}{2} \sum_i \sum_j \beta_{ij} \ln P_i \ln P_j \quad \dots \dots \dots (C.9)$$

但し、C：単位当たり費用

P_i ：生産要素価格 ($i=1$: 資本、 $=2$: 労働、 $=3$: エネルギー、 $=4$: 原材料)

トランスログモデルの場合、推計したパラメータ（上式の α 、 β ）を基に代替弾力性 σ_{ij} 、価格弾力性 ε_{ij} が以下式で求められる。

$$\begin{aligned} \sigma_{ii} &= \frac{\beta_{ii} + S_i^2 - S_i}{S_i^2}, \sigma_{ij} = \frac{\beta_{ij}}{S_i S_j} + 1 \\ \varepsilon_{ij} &= \frac{\partial \ln X_i}{\partial \ln P_j} = S_i \sigma_{ij} \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (C.10)$$

$$S_i = \frac{\partial \ln C}{\partial \ln P_i} = \alpha_1 + \sum_j \beta_{ij} \ln P_j, (i, j = K, L, E, M) \quad \dots \dots \dots (C.11)$$

ここで、 X_i : i 生産要素の需要

S_i : i 生産要素の総費用に占めるシェア

本研究では、更にエネルギー要素 (E)、原材料要素 (M) について構成要素をトランスログモデルで表現し、全体として Nest (層状) 化している。エネルギー要素、原材料要素のトランスモデルでは上式の要素 i 、 j が異なり

- エネルギー要素

石炭・石炭製品価格 : P_{E1}

石油・石油製品価格 : P_{E2}

電力価格 : P_{E3}

ガス価格 : P_{E4}

- 原材料要素

農林水産業・鉱業・建設業製品価格 : P_{M1}

エネルギー消費型製造業製品価格 : P_{M2}
(紙パルプ、鉄鋼、化学、窯業土石)

その他製造業製品価格 : P_{M3}

運輸サービス価格 : P_{M4}

サービス価格 : P_{M5}

となっている。

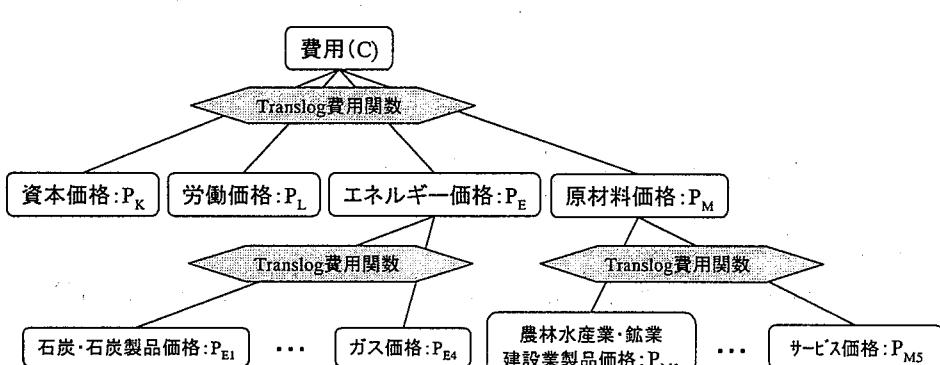


図 A-6 Net-Translog 関数の構造

A.4. GTAP モデルによるシミュレーション

一般均衡モデルによるシミュレーションの手順は図 A-7に示されるフローで表される。最初の手順としては、分析対象とする国なり産業なりの経済状態を表す外生変数を推計・設定する。外生変数としては、生産要素のシェアや労働人口、資本ストック、為替レート、世界貿易量および価格、所得弹性値などが挙げられる。特に価格、所得弹性値は経済主体の行動を表す需要関数や供給関数の形により異なることから、モデルの構築を鑑みたパラメータの設定が必要である。

GTAP では各経済主体の行動関数を定義した上で 30 地域 37 産業を網羅したデータベースを持っている。従って、定義に則ったシミュレーションを行う上では、労力が必要となるデータベースおよびモデルの構築は必要となる。外生変数を設定した後は、例えば、化石燃料価格の上昇、地域資源生産量の減少、生産技術の上昇、といった検討するシナリオを作成し、シミュレーションを実施する。その結果、生産・消費量の変化、輸出・輸入量の変化、経済成長率や投資増加率といった変数が内生的に計算される。

ここで注意すべきは、シミュレーションによって得られる結果は設定したシナリオからもたらされる変化率による最終的な均衡状態である。従って、結果からは新たな均衡解への移行過程を計りることはできない。結果の解釈はあくまで基本となるケースとそれ以外のケースとの比較から行うこととなる。例えば、石油資源の枯渇シナリオを設定したとする。これは輸入価格を上昇させるため輸出国の所得を押し上げることとなる。その結果企業への投資が拡大し生産活動は活発化する。一方、輸入国側では価格上昇による需要の収縮が発生する。このため世界貿易量は縮小し、ある均衡点で価格の上げ止まりと取引量の下げ止まりに到る。シミュレーションの結果は変化の結果最終的にもたらされる均衡状態のみを表し、例えば、輸入国側での価格ショックによる需要の収縮から徐々に回復基調に移行し、ある均衡点に到達するといった変化の過程を追いかけることはできない。

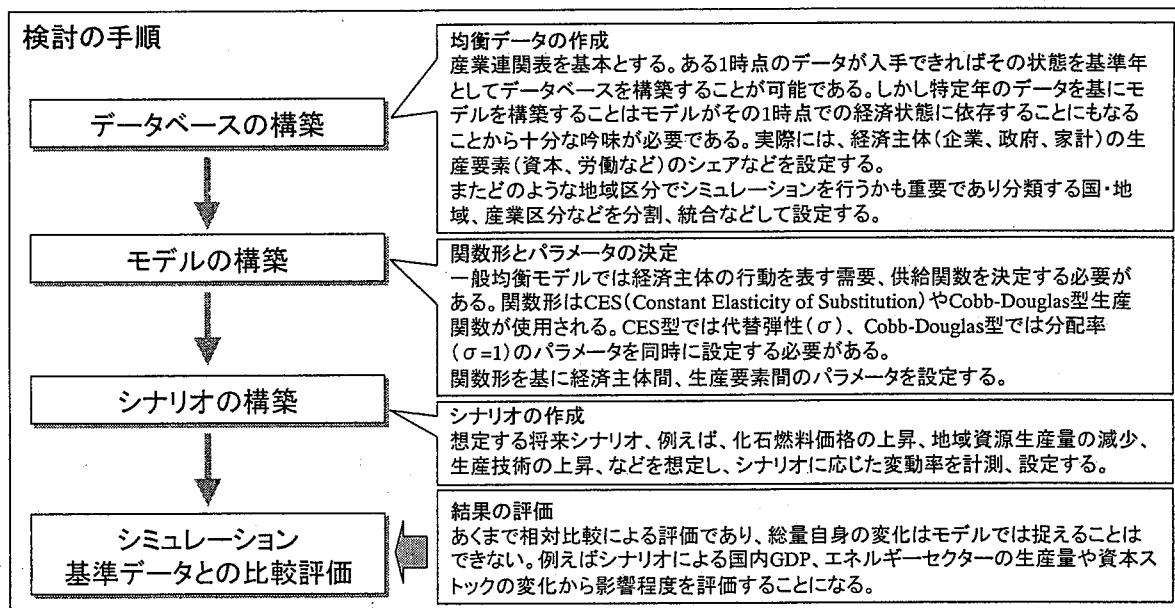


図 A-7 シミュレーションの手順

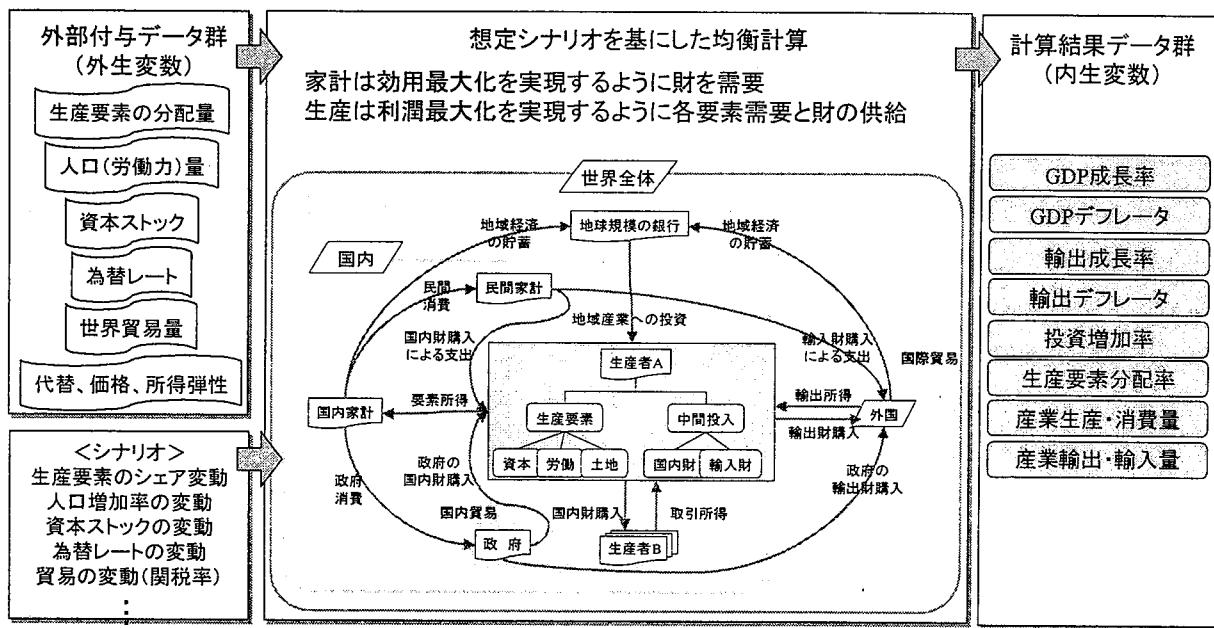


図 A-8 GTAP によるシミュレーションの流れ

A.5. GTAP モデルの問題点

標準的な GTAP モデルの問題点としては以下の 2 つが挙げられる。

- ① 動学的な結果の評価ができない
- ② 生産要素としてエネルギーが明示されていない

①について、標準的な GTAP モデルは比較静学モデルである。比較静学とは、(ある体系において、与件 (パラメーター) が変化するとき、そのシステムの状態 (内生変数) がどのように変化するかを明らかにすることを意味する。上述したように、シミュレーションからは変化に対する新たな均衡状態が示されるのみで、時系列モデルのように時と共に変化する新たな均衡状態への移行過程を表現することはできない。この問題について動学的なモデルを導入することについては多くの研究がなされている。実際の問題として、多国間、多部門の大型モデルでは計算の煩雑化、長期化などの面から現状の形に留まっているのが現状である。異時点間の一般均衡の枠組みを取り込み、長期的な経済効果の推移が時系列的に計算可能な多国間多部門モデルとしては McKibbin and Wilcoxen(1992,1995)で開発された G-Cubed モデルなどがある。

②について、先に企業の生産構造図で示したように標準的な GTAP モデルでは生産要素は資本、労働、土地の 3 つとなっている。エネルギーは経済の根幹に係わる必要なファクターであり、特にエネルギー政策の議論を行う上では必須となる要素である。この問題に対して、米国パデュー大学、豪国ニューサウスウェールズ大学により GTAP に新たにエネルギー要素を取り入れた GTAP-E の開発が行われている。このモデルでは、資本の代わりにエネルギー・資本複合要素が定義され、また自然資源も生産要素として付け加えられている。エネルギー・資本複合要素は資本とエネルギーが代替弾力性で配分され、エネルギーについては、電力と非電力要素から構成され、代替弾力性 $\sigma = 1$ のコブ・ダグラス型関数 (各シェアが一定) により定義されている。電力

は国内、および国外からの調達が表現でき、非電力要素は石炭および非石炭（ガス、石油、石油製造物）を構成要素として、電力同様に国内、および国外の調達が表現可能となっている。

GTAP-E Production Structure

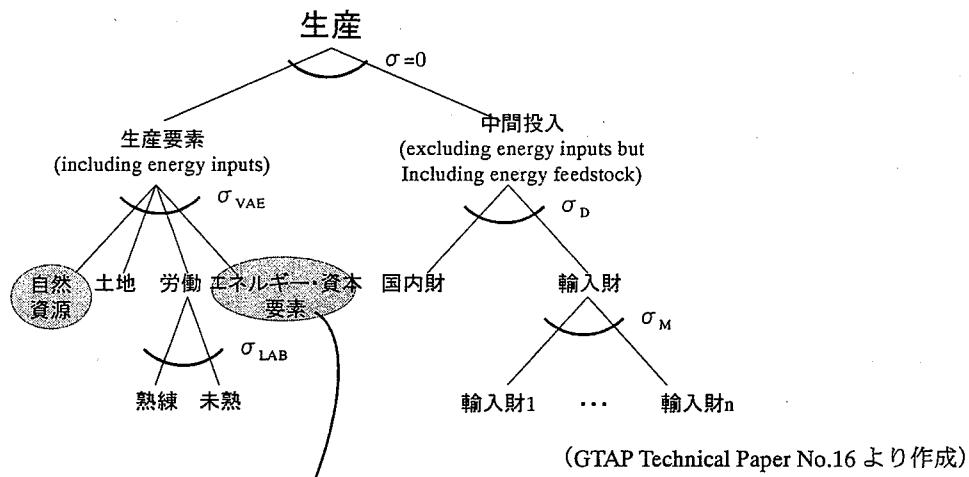
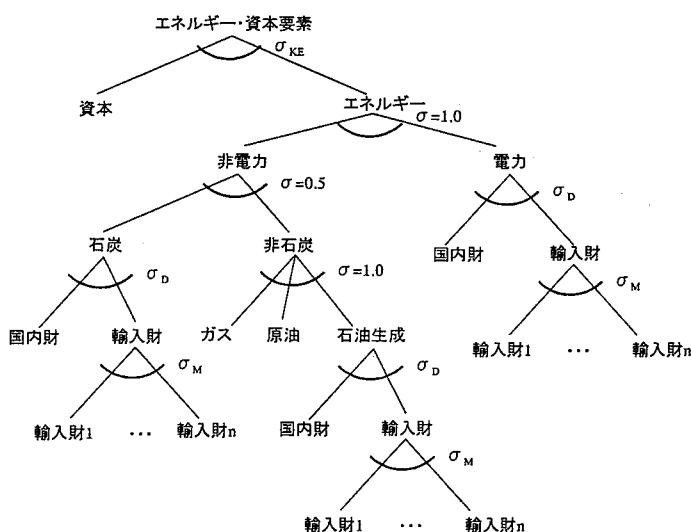


図 A-9 GTAP-E モデルの生産構造



(GTAP Technical Paper No.16 より作成)

図 A-10 GTAP-E モデルのエネルギー・資本複合要素

B. Green モデル

B.1. 開発の経緯

OECD の経済統計部局は、OECD 諸国及び 8 つの非 OECD 諸国を含む、全世界の一般均衡 (applied general equilibrium; AGE) モデルを開発した。このモデルは、大気中の CO₂ 排出を削減するような政策を定量的に評価することを目的としている。プロジェクトは、"the GeneRal Equilibrium Environmental model"と呼ばれ、後に GREEN として参照されるようになった。

GREEN モデルは、Burniaux、Martin、Nicoletti、Oliveria Martins によって開発され、1992 年春より利用されている。その後、初期バージョンに、タイムスケールの延長、計算対象地域の分割及びパーセンテージ生産構造を組み込むことにより全世界を考慮、バックステップ技術、石油価格の内生的な決定、エネルギー価格のひずみの取り扱い、について改良項目として機能追加している。

B.2. 概要

GREEN は、CO₂ 排出削減の政策を評価するための動的 AGE モデルであり、複数セクター・複数地域を対象にしている。現在のところ、地域は 12 に分けられており、OECD 地域は米国、日本、EC、その他の OECD 諸国の 4 地域である。残り 8 地域は非 OECD 地域であり、旧ソ連、中国、OPEC を主とするエネルギー輸出国 (LDCs)、中央及び東ヨーロッパ、アジア経済地域 (DAEs)、インド、ブラジル、その他の地域となっている。全ての国や地域は、2 国間ずつ世界貿易マトリクスでリンクされている。モデルは、化石燃料の枯渇、エネルギー生産、エネルギー消費、CO₂ 排出のそれぞれの関係に重点を置いている。そのため、エネルギーセクターに焦点を当てている。3 つの化石燃料資源、すなわち原油、天然ガス、石炭、及び非化石燃料資源、電力セクターとに分けられている。さらに、非従来型のエネルギー資源（いわゆるバックステップ技術）も、シミュレーション期間の過程では、利用可能になると仮定された。各地域の生産サイドのモデルは、生産プロセスにおいて、化石燃料の供給、化石燃料及び非化石燃料エネルギーの入力について詳細に記述されている。農業を別のセクターとして取り扱うこと、2 つの主要な集合体であるエネルギー集約型産業とその他の産業及びサービスを区別することによって、生産の構成要素の変化も考慮されている。

現バージョンの GREEN は、簡易な再帰的かつ動的構造を持っており、貯蓄動向が生産資本の蓄積を通じて将来の経済結果に影響を与えるしくみとなっている。企業による投資はモデル化されておらず、計算の過程で追加的に計算されるにとどまっている。モデルは、要素市場厳正を含んでおり、資本をセクター特有にするとともに、"古い"型の資本と"新しい"型の資本とを区別している。

現バージョンの GREEN は、1985 年から 2050 年までをシミュレーション期間としている。1985 年から 2010 年までは 5 年刻みに、残りの期間は 20 年刻みのタイムステップである。各地域において、ベースのモデルは GDP 及び人口の成長率とエネルギー利用における自然な技術進歩（すなわち省エネルギー）が外生的に定められている。モデルの再帰的な構造が与えられているため、経済の時間的進展が、各時点の静的一時均衡の連続として表現される。以下に、これら均衡の特徴について説明する。

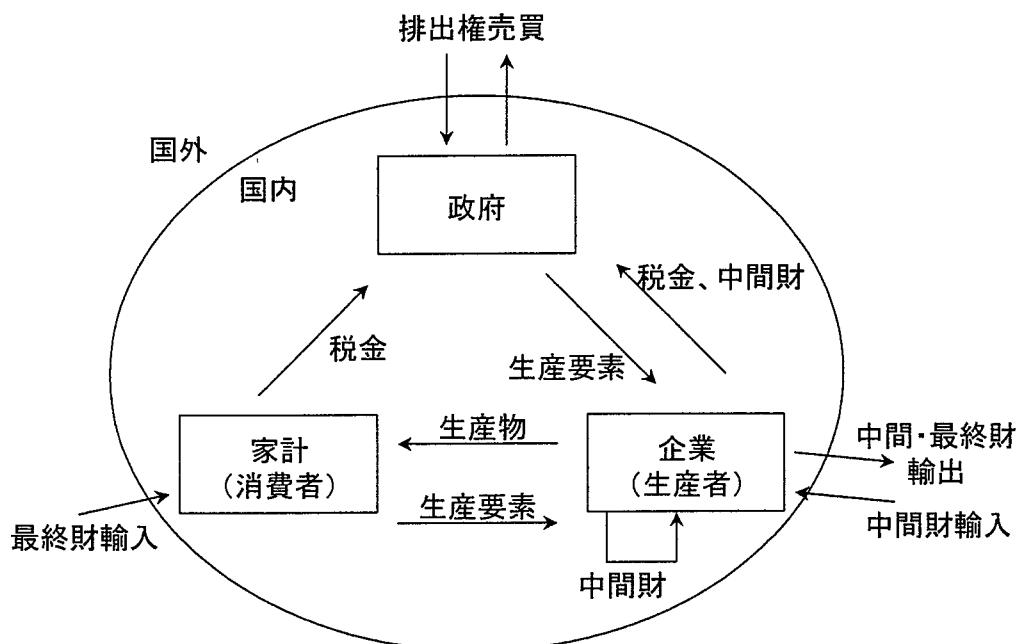


図 11 GREEN モデルの概観

【単時点の均衡モデル】

生産ブロックは、11つのセクターに分けられている。石炭採掘、原油、天然ガス、精製石油製品、電力、ガス・水道供給の5部門は、従来型エネルギーの供給と分配に関するものであり、3つの非従来型エネルギー資源の供給部門がそれに加わる。残りの3部門は、農業、エネルギー集約型産業、エネルギー非集約型産業及びサービス業であり、これらは、商品やサービスの生産に関わる部門である。

石炭、石油、天然ガス、電力の4つの1次エネルギーは、将来のある時点において、”バックストップ”と呼ばれる代替技術に置き換えられる可能性がある。GREEN モデルでは、バックストップ技術に次の3つの特徴を持たせている。1) 全ての地域で同時に利用可能となる。2) バックストップエネルギーは、限界費用が一定であり、資源量に限界がない。3) その価格は、全地域で同一で外生的に与えられる。3種類の化石燃料に対して、2種類の代替バックストップ技術を仮定している。すなわち、従来技術より炭素含有量の高いものから燃料を合成する炭素ベースのバックストップと、炭素フリーのバックストップ燃料である。発電のためのバックストップ技術についても、炭素フリーのバックストップ技術が1つ用意されている。石炭、石油、天然ガスに対する炭素ベースのバックストップ技術と炭素フリーのバックストップ技術は、同じものが用意されている。表3に、GREEN モデルで設定されている11の、従来型及びバックストップ型の生産セクターを示す。

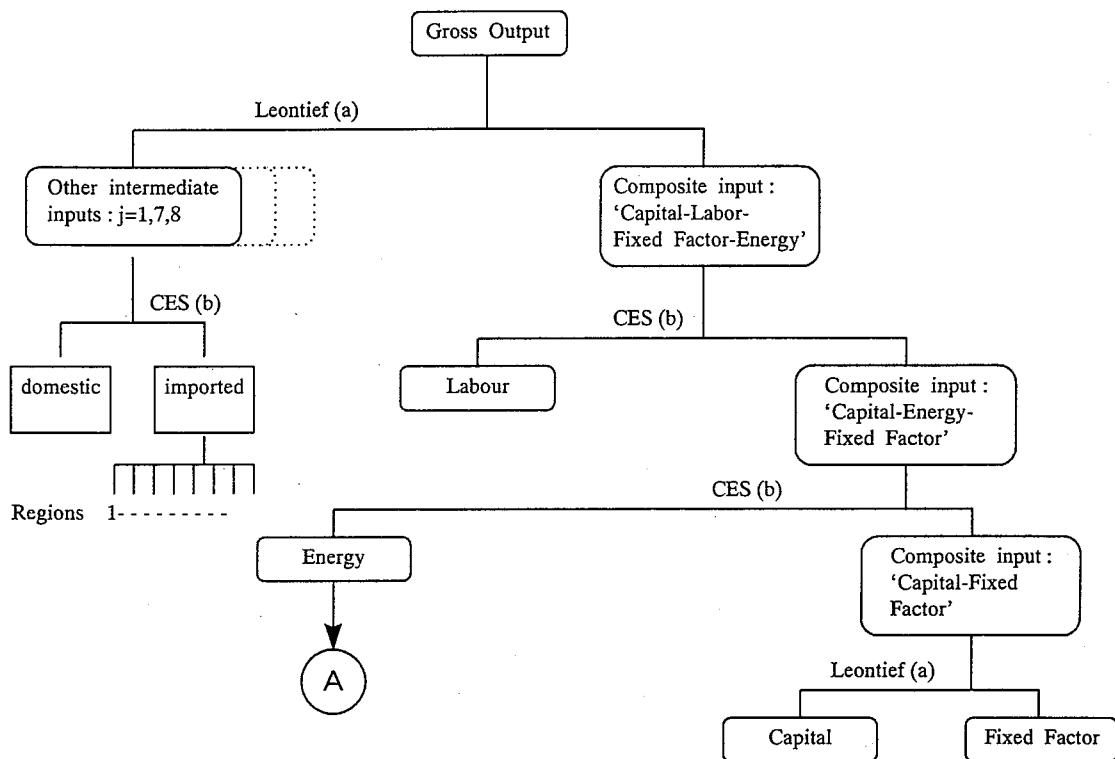
表 3 GREEN モデルの生産セクター

1	農業
2	石炭採掘（従来型）
3	原油（〃）
4	天然ガス（〃）
5	精製石油製品
6	電力（従来型）、ガス・水道供給
7	エネルギー集約型産業
8	その他の産業及びサービス業
9	炭素ベースのバックストップ燃料
10	炭素フリーのバックストップ燃料
11	電力のバックストップオプション

それぞれの従来型の生産セクターにおいて、総産出は 4 種類の 1 次エネルギーまたはそれらのバックストップ技術、精製石油製品、固定要因（土地、化石燃料または炭素フリーの資源）、資本、労働力、中間製品及びサービスから作り出されている。GREEN モデルでは、動的構造のため、それぞれの時点で、当該時点で導入される”新しい”資本（新資本）と当該時点より以前に導入された”古い”資本（旧資本）の 2 種類の資本が存在する。従来型エネルギーと中間製品（財）は、国内または海外から調達される。バックストップエネルギーは、全地域で価格が同一でありその量も無限にあるという仮定から、資本及び労働力のみから生産され、かつ貿易はされない。

各時点での 1 次要因の供給は、次に挙げる事項を除いては、あらかじめ決定されている。第 1 点めは、新資本の供給があらかじめ与えられているのに対し、旧資本は、部分的にその賃貸費用に依存している点である。中古市場の構造については後述される。第 2 点めは、土地、従来型バックストップ資源、原油、天然ガス、石炭は、それぞれ同時期の価格に影響を受けやすいと仮定されていることである。土地の供給曲線は、辺境の土地が開発される可能性のあることを説明している。原油及び天然ガスは、需要を上回るような供給ポテンシャルがあるときのみ、それぞれの自身の価格に敏感であるという仮定がなされている。石油とガスの供給曲線は、エクストラクションコストによる圧力を説明している。石炭の価格弾力性は、有限であるが非常に大きいと仮定されている。時点を通じて、化石燃料の供給ポテンシャルは、資源量を基に決められると仮定される。石炭の貯蔵量は無限と仮定されているが、原油と天然ガスの供給については、GREEN の動的構造の一部である、資源の枯渇サブモデルにより記述されている。しかしながら、枯渇サブモデルは、供給ポтенシャルや究極の資源の価格敏感性をも許容している。

まとめると、原油とガスについて 2 つの産出概念が区別されている。ポテンシャル産出量と実際の産出量である。ポテンシャル産出量は、枯渇性資源の価格に敏感である枯渇メカニズムにより決定される。実産出量も、価格に依存する固定要因の供給曲線により決定されるが、供給ポテンシャルの側面により跳ね返りがある。各時点のポイントで、石油及びガスの生産者は、与えられた市場価格でのポテンシャル生産量より少なく供給することが可能である。この場合、将来の貯蔵量及び供給ポтенシャルの時間断面が影響を受けることになる。



- a. Leontief : fixed coefficients
b. CES : constant elasticity-of-substitution

図 12 GREEN における生産セクターの構造

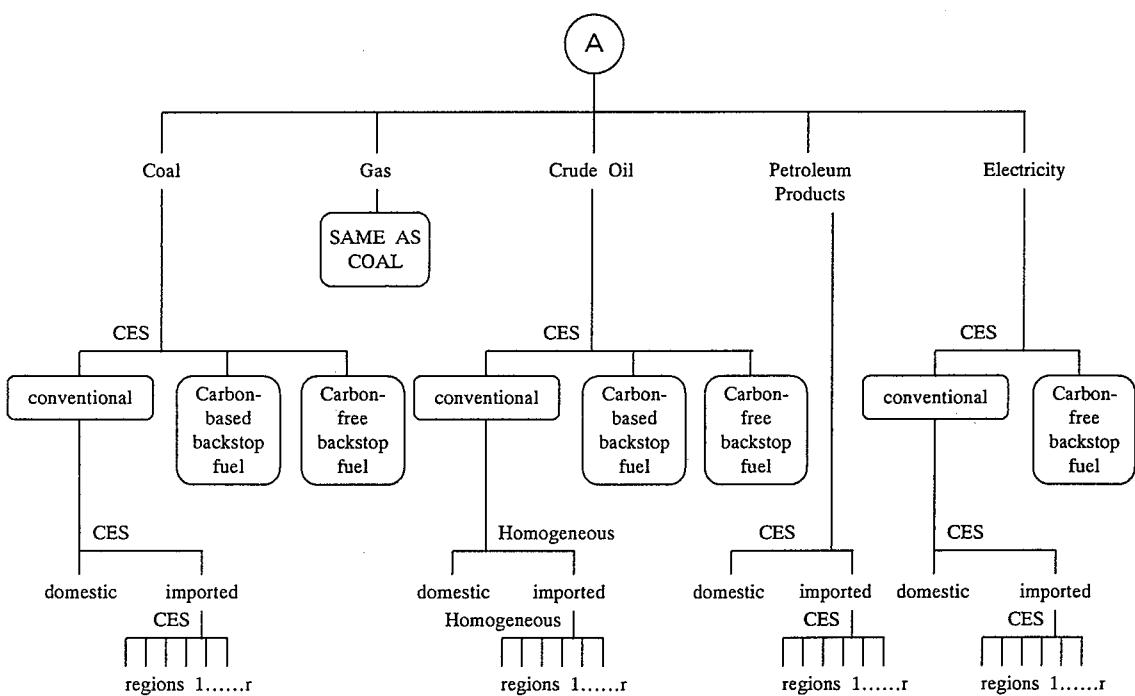


図 13 GREEN におけるエネルギー及びバックストップ技術

図 12及び図 13に示すように、全てのセクターは、共通の生産構造を分け、スケールに応じた収益を上げるように運営される。全投入の量は、セクターごとの需要のレベルで決まる生産コストと関係する税額を最小にするように、最適に選ばれる。導入可能な技術における仮定を単純化することにより、生産者の決定がいくつかの段階に分けられている。第 1 に、生産者は、第 1 次要因（資本、労働、固定要因）と電力を含む混合投入物と中間投入物のミックスを選択する。次に、労働と他の一次要因との混合投入の分割が決定される。3 番目に、エネルギーと資本／固定要因をミックスしたものが選択される。4 番目に、石炭、石油、ガス、精製石油製品及び電力の総称であるエネルギーが選択される。5 番目に、これら各エネルギーについて、従来型及びバックストップ技術の最適な組み合わせ形態が決定される。6 番目に、資本と固定要因の組み合わせが決定され、最後に、国内及び輸入の間で、貿易された中間生成物とエネルギー投入の需要量が決定される。

他の簡略化のための仮定が、生産過程の各段階での投入量において代替の可能性の幅を制限している。全てのセクターにおいて、総産出に対する中間生成物投入の割合は固定である。同様に、資本あるいは固定要因の単位量当たりの投入構造は、固定である。また、従来型及びバックストップによる燃料、石油製品、バックストップによる電力の生産については、全ての投入量は固定された割合で投入されると仮定している。

1人の消費者は、その可処分所得を 4 つの消費財に最適に振り分けると仮定されている。4 つの消費財は、食物及び飲料、燃料及び電力、輸送及び通信、その他の財及びサービスである。それに貯蓄が加わる。消費総量は、8 つの生産セクターの生産量とは異なっている。固定係数のマトリクス（変換マトリクスと呼ばれる）によって、消費財及びサービスの需要がエネルギー及びその他の生産財の需要へ変換される。また、生産者価格から消費者価格を計算するときにも使用される。消費財のエネルギー強度は、変換マトリクスにより与えられた技術データであるので、消費財の燃料構成は、消費者により最適に配分されている。結果的に、国内あるいは国外の供給者によって、消費需要が満たされると仮定されている。

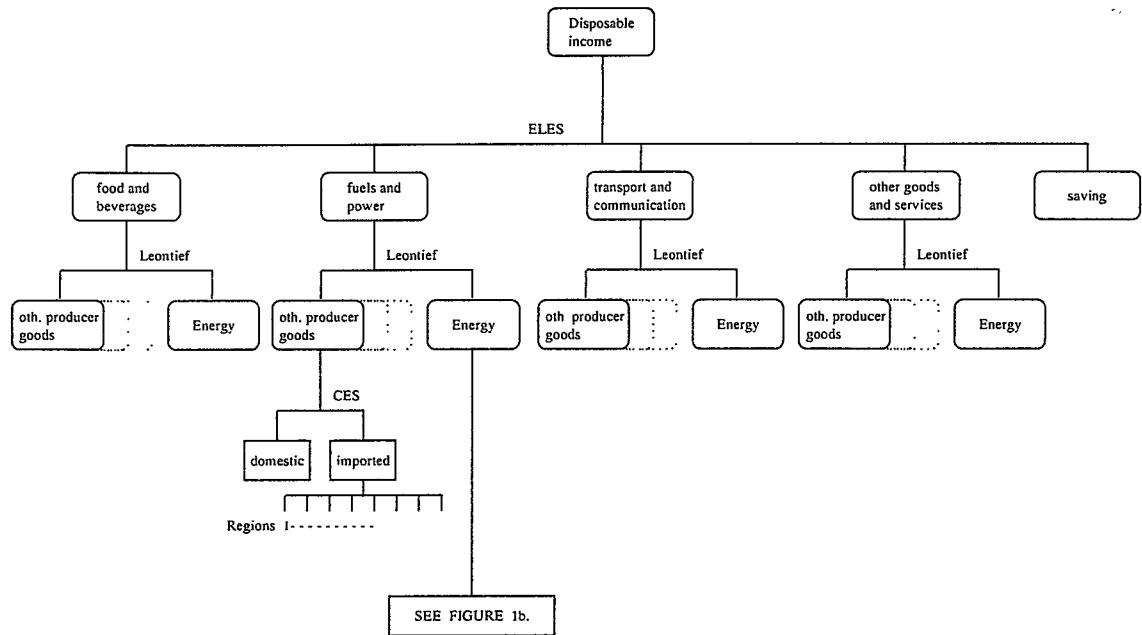


図 14 GREEN における民間消費需要構造

家計需要の構造を図 14に示す。消費と貯蓄の割合は、完全に固定である。貯蓄は、第 5 番目の“財”として取り扱われ、その量は他の財の需要量と同時に決まる。貯蓄の価格は、恣意的に、消費財の平均価格と等しく決められる。

消費選好性の仮定により、消費決定は 3 段階に分けて考えられる。第 1 に、消費者の可処分所得及び消費財の価格が与えられることによって、消費者は、所得を貯蓄と 4 種の消費財とに振り分ける。この段階では、消費需要モデルにおいて消費財間では異なる弾性値が使われる。消費財需要は、変換マトリクスによって生産財とエネルギーの需要へと変換される。

第 2 に、各商品のエネルギー強さ及び各種燃料の価格が与えられることにより、消費者は燃料の最適な構成を選ぶことになる。第 3 に、各商品の国内価格と輸入価格が決まるため、それぞれ国内需要と海外需要とが最適に配分される。経済活動により生成されるすべての収入は、消費者に配分されると仮定している。それゆえ、消費者は、次の 3 つの項目に基づき選択を行う。1) 労働と資本（新と旧）からの収入。2) 固定要因の賃貸料及び原油とバックストップ生産品に付随する他の賃貸料。3) 政府が譲渡する純税額。モデル内では、財務上の中間物を取り扱っていないため、貯蓄は企業の商品を購入するという形で仮定されている。

C. 報告会資料

核燃料サイクル開発機構 御中

多面的評価指標の拡張に関する調査研究(Ⅱ)

2003年2月6日

MIZUHO 富士総合研究所

ご報告内容

1. エネルギーセキュリティとは
 - 1-1 定義
 - 1-2 費用対効果
 - 1-3 市場自由化、政府の役割
 - 1-4 エネルギーセキュリティ確保と原子力
2. 評価手法の検討
 - 2-1 エネルギー経済モデルの概要
 - 2-2 既存モデル
 - 2-3 適用事例
 - 2-4 エネルギーセキュリティ評価への適用
3. 評価アプローチ
 - 3-1 電源構成を外生条件とする場合
 - 3-2 電源構成を内生変数とする場合

付録(核不拡散、GTAPモデルの概要、他)

1-1 エネルギーセキュリティの定義

●OECD/NEAにおける考え方(「Projected Cost of Electricity Generation 1998」より)

エネルギー供給支障のを発生要因:

- A.コスト上昇(市場支配(短～長)、資源枯渇(長))、
- B.価格ショック(供給支障(短)、需給バランスの変化による供給支障発生確率の変化(長))
- C.軍事費用

影響の種類:

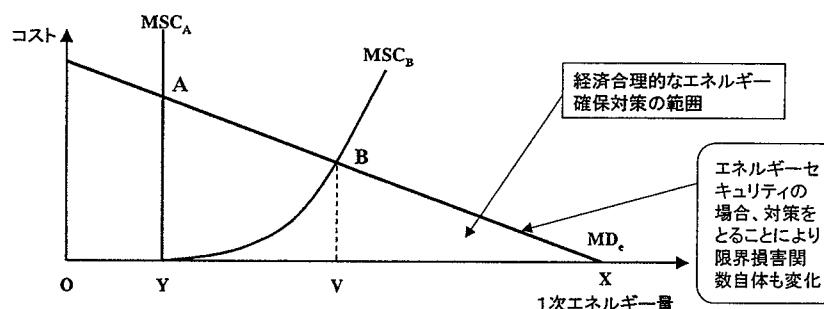
- 燃料購入段階で被る直接影響
- 燃料価格の経済波及に伴って発生する間接影響

影響の種類	"直接的な"マクロ経済影響	"間接的な"マクロ経済影響
A. コスト上昇	A.1. エネルギー資源輸入価格の緩やかな上昇	A.2. 富の移転(輸入国から輸出国へ)の増加及びそれが貿易バランス、長期的な生産性向上、雇用等に及ぼす影響 A.3. 富の移転が長期インフレに及ぼす影響
B. 価格ショック	B.1. エネルギー資源輸入コストの急上昇	B.2. 価格ショックに起因する経済状況の変化 B.3. 長期的な需要増加による価格ショック発生リスクの増加
C. 軍事費用	C.1. エネルギーセキュリティ確保のための軍事費用	

3

Fuji Research Institute

1-2 エネルギーセキュリティ確保の費用対効果(1)



OX:国内で利用されている一次エネルギーの量

MD_e:限界損害関数。燃料が1単位減少することにより発生する追加的損害(損害×供給中断確率の積)。

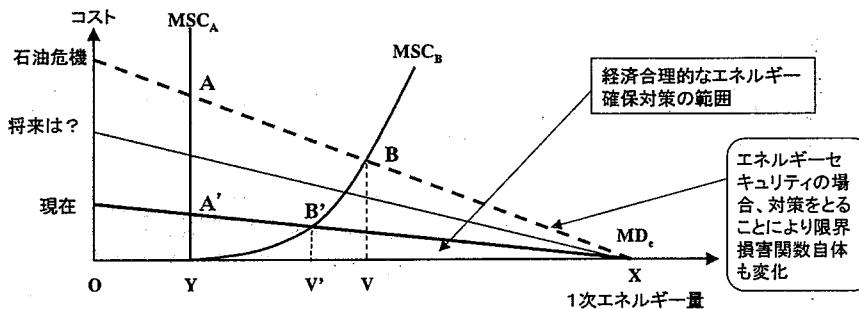
MSC:限界セキュリティ費用関数(追加的な燃料1単位を可能とするような追加的な費用)

戦略A:国内供給の中止に対する保護(OY:国内供給量)

戦略B:備蓄又はエネルギー多様化(MSC_BとMD_eが交わる箇所までが妥当な対策の範囲(OV:備蓄まで含めた供給量))

具体化するためには、「供給中断の具体的なシナリオ」、「予期される損害コストの額」、「対策とそのコストの額」等が解明されなければならない。

1-2 エネルギーセキュリティ確保の費用対効果(2)



石油危機以降、先進国が協調してエネルギーの多様化(発電部門における天然ガス、石炭及び原子力利用の推進)、省エネルギーの推進、市場機能の強化、供給契約の多様化等を進めた結果、エネルギー供給に関する限界損害関数は石油危機時と比べて、大幅に低下している可能性がある。このため、短期的なエネルギーセキュリティの確保(価格ショックの軽減)のみを根拠に原子力の推進を唱えても説得性に乏しい。

- ・原子力導入の限界費用曲線を安価にする努力が必要である。
- ・化石資源価格にCO₂価格も上乗せした形での限界損害関数との比較で議論する必要がある。
- ・資源枯渇(途上国の経済成長)を含めた中長期のエネルギーセキュリティを視野に入れた分析が必要である。

1-2 エネルギー供給支障の経済影響評価事例

●電力中央研究所(2000年)

2000年春から秋にかけての原油価格高騰(CIF価格50%上昇)が3年間継続した場合の経済影響を電研短期マクロ経済モデルを用いて評価。

実質GDPの低下幅:1年目:0.09%、2年目:0.41%、3年目:0.95%

消費者物価の上昇幅:1年目:0.13%、2年目:0.27%、3年目:0.23%

→原油価格上昇の経済への影響度は石油危機時の1/4程度(主要要因としては、石油・原油関係製品の比率低下、石油業界の競争激化(小売りへの転嫁が困難)、為替レートの円高安定)

●米国DOE(1990年)

原油の消費量あたりのエネルギーセキュリティに係る外部コストを試算(主に短期的な価格支配力、価格ショックに着目)

—政府による石油備蓄なし:0.44~1.27\$/bbl

—政府による石油備蓄あり:0.17~0.49\$/bbl(米国の原油価格の1%~3%程度)

—以前と比較して、エネルギーセキュリティの外部性は低下傾向

1-3 エネルギーセキュリティの確保における政府の役割

過去

原油(エネルギー)の供給力が特定の国・地域に大きく依存していたため、エネルギーは、その取引において大きな外部性を有する財であった。このため、エネルギー・セキュリティ確保への政府の役割は極めて大きく、かつ正当なものであった。



- ・OPECの市場支配力を低下させる努力
(規制下での強力なエネルギー多様化の推進)
- ・エネルギー市場の自由化

現在

- 石油危機時と比較するとOPECの市場支配力は相対的に低下
- エネルギー・セキュリティ確保に関して政府が果たしてきた役割の一部は市場参加者へ
(特に、短期的な供給支障(価格高騰)などへの対応)
- 途上国の中成長や環境制約を考慮した長期的なエネルギー・セキュリティ確保戦略の必要性



将来は？

7

Fuji Research Institute

1-3 競争市場とエネルギー・セキュリティ

●電力・ガス市場への競争導入に伴う動向

- －他の事業者との差別化を図る上で低価格や高品質に加えて安定供給も重要な商品要素
- －エネルギー産業のエネルギー・セキュリティ確保戦略
 - ・資本統合(規模の拡大による供給安定、電力・ガスの異業種統合(電力にとって供給保証ガスにとっては需要の安定化)等)
 - ・ヘッジ契約(先渡し、先物、オプションなどのデリバティブ取引の活用による将来リスクのヘッジ、市場全体の流動性を高める効果(例えば、石油価格の高止まりを抑止))
 - ・事業者レベルでの燃料調達国の多様化(特にパイプライン網の整備が進んだ西欧諸国で顕著)
 - ・多様な事業者によるガスの貯蔵(自由化前(ガス輸送会社のみ)→自由化後(すべての市場参加者))
 - ・供給遮断契約(供給支障が生じた場合に需要家への供給を遮断する契約を事前に締結、この契約で供給されるエネルギーは常時契約のものに比べて割安であり、その価格差が供給支障に対するリスクプレミアム)

8

Fuji Research Institute

1-4 エネルギーセキュリティと原子力(1)

●「エネルギー安全保障における原子力の評価(入江一友、神田啓治、日本原子力学会誌、Vol.1, No.2(2002)」

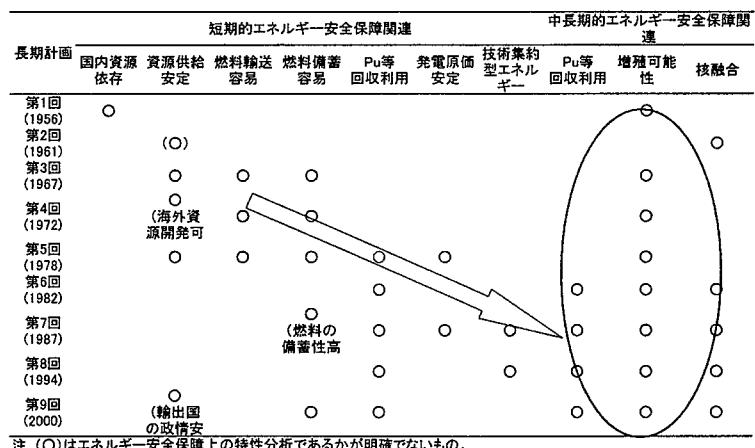
【前提と主要な問題提起】

- エネルギーセキュリティの向上は、石油危機以降は最優先の政策目標として掲げられてきた。
- エネルギーセキュリティの向上は日本に原子力を導入する必要性を主張する大きな根拠の一つであった。
- 短期的な供給保障(輸入エネルギーの不意の供給中断・価格高騰への対応)と中長期的な供給保障(エネルギー資源枯渇への対応)との区別が曖昧なまま論じられてきたため、原子力のエネルギーセキュリティ上の特性が必ずしも明瞭でない。
- 「準国産エネルギー」という呼称が、「国産エネルギー」と同等の供給安定性が何らの努力を有さずに確保されるとの誤解を招いてきたのではないか?
- 使用済み燃料の再処理・再使用の促進、高速増殖炉の開発継続がなければ、中長期的には原子力もエネルギーセキュリティ上有利なエネルギー源とはいえない。

- ➡ ・これまでの原子力長期計画、総合エネルギー調査会等の政策文書の整理
・原子力のエネルギー・セキュリティへの寄与を向上させる施策の提言

1-4 エネルギーセキュリティと原子力(2)

【原子力開発利用長期計画】



注 (O)はエネルギー安全保障上の特性分析であるかが明確でないもの。

- ・原子力の中長期的エネルギーセキュリティ上の特性を重視
・近年では、特にPu回収利用を重点的に記述

1-4 エネルギーセキュリティと原子力(3)

【総合資源エネルギー調査会答申類】

答申類	短期的エネルギー安全保障					中長期的エネルギー安全保障		
	資源供給安定	燃料輸送容易	燃料備蓄容易	Pu等回収利用	増殖可能性	その他	Pu等回収利用	増殖可能性
1.調査会答申(1967)	○	○	○		○	(核燃料サイクル確立)	○	
2.調査会中間答申 (1975)	○			○	○	(新型炉開発等)	○	○
3.基本問題懇談会 報告(1975)				○		(核燃料サイクル確立)	○	○
4.石油代替エネルギー 導入指針(1980)	○	○	○	○		(自主的核燃料サイクル)		(新型炉開発等) (新型炉開発等)
5.基本政策分科会・ 需給部会報告				○	○	(備蓄効果) (核燃料サイクル確立)		
6.需給部会報告 (1987)					○	(自主的核燃料サイクル)	○	
7.調査会中間報告 (1990)	○						○	
8.基本政策小委中 間報告(1993)	○							
9.需給部会中間報 告(1994)	○							
10.基本政策小委中 間報告(1998)	○		○	○		(備蓄効果) (核燃料サイクル確立)	○	
11.需給部会中間報 告(1998)								
12.総合部会エネルギー セキュリティ WG報告(2001)	○		○	○		(核燃料サイクル自立性向上)	○	○
13.総合部会・需給 部会報告(2001)								

注:(○)はエネルギー安全保障上の特性分析であるかが明確でないもの。

- ・原子力長期計画に比べて、短期的エネルギー安全保障や原子力の経済性に関する議論が主流
- ・10年～20年程度の将来を見据えたエネルギー需要予測の中での原子力を役割を他のエネルギー源と比較する形で議論

ute

1-4 エネルギーセキュリティと原子力(4)

原子力も「量的」な意味でのエネルギーセキュリティ向上への寄与だけではなく、「質的」な寄与拡大を図るべき時期(原子力も必要な努力(研究開発、政策面での努力等)を怠れば、エネルギーセキュリティ上の優位性は崩れるとの認識を持つべき)

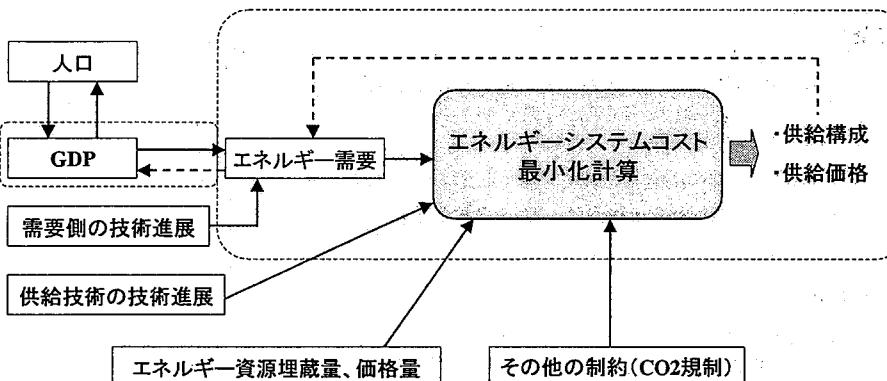
【短期的エネルギーセキュリティ向上】

- ① 核燃料資源の安定供給性の更なる向上(輸出国との政策対話を継続し、輸出国側の核燃料資源の開発意欲を減退させないように努めるこ)
- ② 核燃料備蓄の容易性の活用(公的備蓄も視野、ランニングストックの価値も考慮した経済性のアピール)
- ③ 発電原価の安定(一定量の備蓄を行うことが市況の変動(今後の中国等における大量の原子力導入も視野)に対する抵抗力を増す)
- ④ 使用済み燃料の再処理による燃料資源の回収・再利用の実現

【中長期的エネルギーセキュリティ向上】

- ① 使用済み燃料の回収・再利用の拡大
- ② 高速増殖炉の開発(国の公的な検討の場で、より長期のかつ世界的なエネルギー需要を見据えた議論・分析が必要であり、その中でFBRの価値・必要性が議論されるべき)

2-1 エネルギー経済モデルの概要(1):最適化型モデル



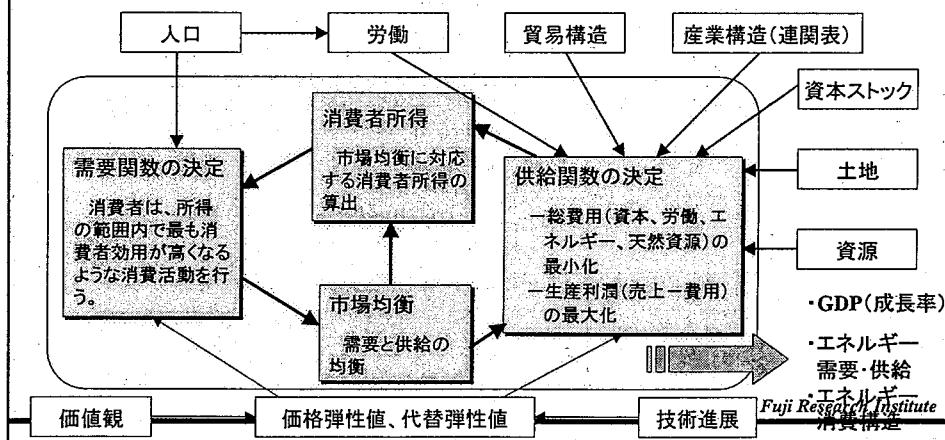
- エネルギー資源価格やエネルギー変換コストの将来シナリオ、エネルギー需要想定を入力データとして、エネルギー供給システムのコストを最小化
- エネルギー需要(及びその基となる経済成長率)は外生的に取扱われる。(簡易的に内生化は可能、例えば、CO₂規制によるエネルギー価格上昇がGDPやエネルギー需要に与える影響を考慮した均衡計算)
- 評価尺度がシステムコストの最小化のみ→実際の社会では、エネルギーの供給側と需要側、資源の輸入側と輸出側では、異なる行動原理を有するのでは?

13

Fuji Research Institute

2-1 エネルギー経済モデルの概要(2):一般均衡モデル

- 消費者:所得の範囲内の消費効用を最大化
- 企業(生産者):総費用を最小化(エネルギーも投入財の一つ)した上で、利潤を最大化
- 消費者と生産者が上記の行動原理に従うものとして、需給が均衡するまで反復計算。
- 労働、土地、資源、資本は全て金銭単位で考慮(絶対量の制約はある)。
- 経済成長は内政的に評価。
- また、1次エネルギー供給事業者は、資源探査費用を抑えながら利潤を最大化。電気事業者は、発電費用(燃料費、建設費、人件費)を抑えながら利潤を最大化。



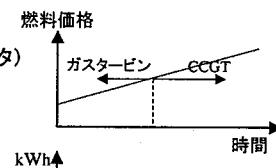
2-1 エネルギー経済モデルの概要(3): 発電技術選択

最適化モデル

- プラント価格(固定値、将来の技術進展を考慮した時系列データ)
 - ガスタービン:建設費 400\$/kW、効率40%
 - CCGT:建設費 800\$/kW、効率50%

- 資源価格(資源の埋蔵量の減少に伴う生産コストの増加)

- 上記の2つの情報から価格が最も安くなる技術選択



一般均衡モデル

- 燃料価格が上昇は、主に燃料と資本間又は燃料間の代替によって考慮される。

→燃料価格が上昇すれば、熱効率の高い発電所を建設する(資本投入が増加し、燃料投入が減少)

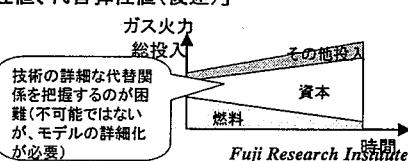
→燃料価格が上昇すれば、他の安い燃料に転換

- 燃料と資本の代替関係を示す指標 →「価格弹性値、代替弹性値(後述)」
(将来の技術進展を踏まえて設定)

※各電源の特性

- 火力(石油、ガス):燃料大、資本小
- 原子力:燃料小、資本大、雇用やや大
- 新エネ:燃料小、資本大、土地大

15



Fuji Research Institute

2-2 既存モデル

代表的なマクロ経済モデル

モデル	タイプ	開発者	地域	モデル概要	特徴
1 GREEN	一般均衡	Burniauxら	12	OECDでの経済予測などで使用	
2 GTAP	一般均衡	Pardue U. (Hertel)	66	世銀、WTOや経済企画庁などで使用	貿易財が中心
3 GTAP-E	一般均衡	N.S.W.U.(Truong)	30	エネルギー間の代替を考慮し多国間貿易均衡下での資本貯蓄の検討が可能	燃料間代替を考慮
4 ORANI-G(日本モデル)	一般均衡	内閣府経済社会総合研究所(伴)	1	一国を対象としたモデル。データ構造はGTAPIに類似する。内閣府経済社会総合研究所で日本モデルを開発。	サービス部門追加
5 SGM	一般均衡	国立環境研究所 (日引ら)	1	GDPをベースとし家計、企業、政府、外国部門の4経済主体をモデル化し税の還流による影響が検討可能	税の還流を明示
6 KEO	一般均衡	慶應大学(黒田)	1	国内エネルギー産業を詳細にモデル化(産業区分48)	国内エネルギー部門の細分化
7 WEP2001	部分均衡	電力中央研究所 (星野ら)	11	燃料の需要供給と経済をリンクし世界での需給均衡下でのエネルギー価格の検討が可能	
8 Global2100	最適化	Stanford U. (Manneら)	5,11,12	産業は1部門、経済はリンクしていないため貿易の整合性はどうない	
9 NE21	最適化	東京大学(藤井ら)	10	世界エネルギー総コストとCO2排出量の総和を最小化する最適技術メニューの検討が可能	炭素回収を明示
10 GDMEEM	最適化	東京大学(後藤)		マクロ経済とエネルギー市場をリンクし想定シナリオ下の将来的な市場、エネルギー需給均衡が検討可能	GDP、エネルギー均衡価格明示
11 MARIA	最適化	東京理科大学 (森)	8	世界貿易収支を基に温暖化対策、土地利用、気候変動の戦略策定が可能	土地利用、食料需給考慮
12 超長期世界エネルギー需給モデル	マクロ計量	日本エネルギー研究所	12	エネルギー需要の所得弾力性で経済とリンクしたエネルギー需給の超長期でのシナリオ検討が可能	再生可能エネルギー導入量を明示
13 AIM	マクロ計量	国立環境研究所・京都大学	経済19、気候5×5	400種類を超えるエネルギー技術を用い各部門のエネルギー消費構造を詳細に検討可能	エネルギー技術積上

16

Fuji Research Institute

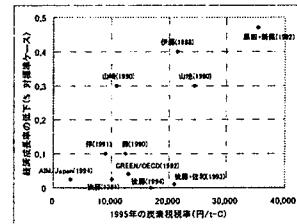
2-2 既存モデル(2)

モデル構造の特徴と適性

モデル構造	シナリオに関する評価			モデルの特徴
	税制等マクロ政策評価	技術規制評価	部門別高精度評価	
	環境税など経済措置の影響評価	機器効率規制、グリーン化など影響評価	部門、用途、エネルギー源別評価	
一般均衡モデル	○	×	△	長期的な経済の適応課程を強調
最適化モデル	△	△	○	特定の経済主体の長期的な適応課程を強調 過去の経済動向に沿って将来を予測
マクロ計量モデル	△	△	○	エネルギー需給サイドの適応過程を強調
回帰分析型 ボトムアップ型	×	○	△	

数量モデルによる炭素税導入時の国内経済への影響の違い

長期的な経済の適応課程を強調したモデル(一般均衡や動学的最適化モデル)やエネルギー需給サイドの適応過程を強調したモデル(ボトムアップモデル)では、技術や施設がその価格に敏感に反応して更新されるため、炭素税の税率や経済成長率の低下が小さめに出る。
一方、回帰分析などマクロ経済モデルでは価格調整メカニズムが小さく現れ炭素税の税率や経済成長率の低下は大きめに出る。



2-2 既存モデル(3)

モデルが結果に与える影響

政策効果やマクロ経済動向に影響を与える要因として以下が挙げられる。

1. モデルの基本構造
地域的、短期的推定結果は非常に大きな差があり、長期的な推定結果は比較的小さな範囲に収まる。
 - ・ ツップダウンorボトムアップ、短期マクロor長期平衡、エネルギー部門の有無、技術開発部門の有無など
2. モデルの仮定
将来の潜在的経済成長率を高く見込む場合相対的に高い税率や大きな経済損失が推定される。また、エネルギーの代替弾力性も結果に大きく影響する。
 - ・ GDPトレンド、技術効率の進歩、エネルギー代替弾力性、化石燃料価格トレンド、技術革新の費用など
3. 政策の考え方
新たな税収を所得税減税などで還元したり新たな技術導入の原資にするかで経済成長や新技術の導入促進が大きく変化する。
 - ・ 現存する税の歪みの除去の有無、税収活用の有無および活用方法、将来的取引市場(排出権などの)導入の有無など

2-3 一般均衡モデルの適応事例(1)

一般均衡モデルを用いた分析事例

「温暖化ガス排出削減が世界貿易を通じてマクロ経済に与える影響」、WWF(2001)

一般均衡モデルGTAPを用い、日本単独で温暖化対策を行う場合の世界貿易を通じた影響を分析している。日本の産業界が温暖化対策を、単なるコスト上昇として受身に対応する場合(想定シナリオ1)、GDPは減少する。しかし、過去に日本で実際に起きた原油価格上昇への対応を考慮する場合(想定シナリオ2)、機械産業の輸出の大増加によりGDPは増加する。

想定シナリオ1:エネルギー価格の上昇

温暖化ガスの排出削減はエネルギー税などの課税措置により実現されると設定。ここでは税率を変更するのではなく実質エネルギー価格が上昇するとして、現状価格の20%増(30\$/t-Cの課税に相当)としてケースを設定。

想定シナリオ2:機械産業付加価値の向上

通常、資源などの制約がある場合経済効率や産出は低下するが、規制がビジネスチャンスとなり結果的に全体の経済効率や産出が向上する可能性がある。実際、国内機械産業の付加価値率は技術進歩とエネルギー価格上昇により上昇している。ここでは規制下での技術革新として機械産業の付加価値率が0.9%増となるケースを設定。



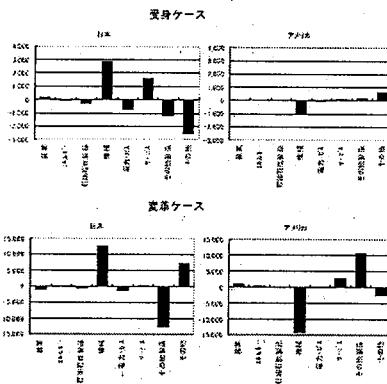
2-3 一般均衡モデルの適応事例(2)

一般均衡モデルを用いた分析事例

「温暖化ガス排出削減が世界貿易を通じてマクロ経済に与える影響」、WWF(2001)

受身ケース(想定シナリオ1)結果では、国内産業構造は機械・サービスが生産を拡大するが、エネルギー関係(エネルギー、石油石炭製品、電力・ガス)とその他製造、その他産業の生産は縮小する。エネルギー税(ここでは20%)の賦課による国内エネルギー消費は9%程度減少する。

変革ケース(想定シナリオ2)結果では、機械部門の生産が大幅増となり、それ以外の産業部門でも実質減であるが、エネルギー関係(エネルギー、石油石炭製品、電力・ガス)部門は受身ケースよりも減少幅が小さい。エネルギー関係においても、同様に技術向上を考慮すれば機械同様の結果が得られると考えられる。



想定シナリオでの産業構造の変化

*生産額は基準年生産額を基に計算結果での基準ケースとの乖離度から算定していると考えられる。基準年については不明である。

2-4 エネルギーセキュリティ評価への適用

影響の種類	"直接的な"マクロ経済影響	"間接的な"マクロ経済影響
A. コスト上昇	A.1. エネルギー資源輸入価格の緩やかな上昇	A.2. 富の移転(輸入国から輸出国へ)の増加及びそれが貿易バランス、長期的な生産性向上、雇用等に及ぼす影響 A.3. 富の移転が長期インフレに及ぼす影響
B. 價格ショック	B.1. エネルギー資源輸入コストの急上昇	B.2. 價格ショックに起因する経済状況の変化 B.3. 長期的な需要増加による價格ショック発生リスクの増加
C. 軍事費用		C.1. エネルギーセキュリティ確保のための軍事費用

■ 本分析で評価しなければならない経済影響の範囲

□ 本分析の対象とすることが望ましい経済影響の範囲(重要であるが困難)

2-4 エネルギーセキュリティ分析に必要な要件

【カテゴリA】

- 資源の枯渇を有意に取扱いことが可能 → 世界
- 資源価格の上昇に伴う間接的な経済影響を評価することが可能 → 一般均衡
- 日本と他地域との資源貿易量及び資源価格を内政的に評価可能 → 世界、一般均衡
- 資源価格への市場支配力の反映 → 一般均衡
- FBRの導入効果が明確に見えること → 最適化又は一般均衡(改良複雑)

【カテゴリB】

- 将来時点での價格ショックの起きやすさが把握可能 → 一般均衡(部分的※)
- 價格ショックが経済に与える影響 → 一般均衡

※價格ショックの発生自体は、如何なるモデルを持ってしても予測困難。ただし、ある地域(中東)の原油價格の高騰が世界全体の價格高騰につながる可能性は一般均衡でも把握可能?

FBRの長期のエネルギーセキュリティ確保への貢献度の評価に必要な要素

→世界全体を対象にした一般均衡モデル(例えはGTAP)

3 エネルギーセキュリティ分析アプローチ

○GTAPモデル

価格:\$8,000

内容:ソース(モデル構築用GUI、ソルバ)、デフォルト入力データ、マニュアル

(注)GTAP-E自体は商品ではなく、GTAPを基に第三者が改良したもの

3-1 電源構成(外生条件)

- 既存のGTAPモデルをそのまま適用可能。
- 経済情勢やエネルギー情勢の結果としての電源構成ではない。
- DNE21モデルなどを用いて電源構成を算定し、それをGTAPの入力値に反映することも可能(両モデルで使用する制約条件の整合性に留意する必要がある)

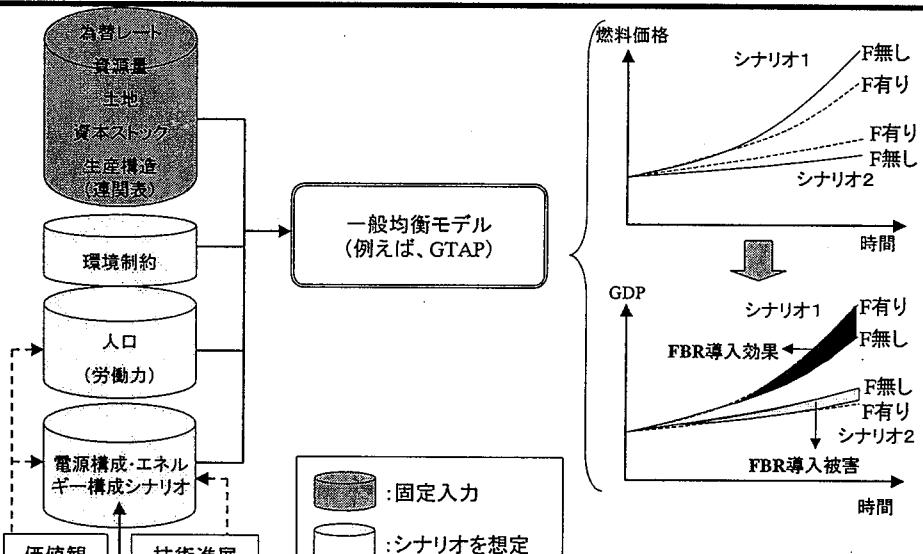
3-2 電源構成(内生変数)

- 経済情勢やエネルギー情勢の結果としての電源構成が評価可能。
(FBRと技術がどのような社会情勢の時に経済成長に大きく寄与するか、又はしないのかを評価できる)
- GTAPを大幅に改良する必要性。
- モデルの詳細化は比較的簡単であるが、データの整備に多くの作業時間を要する可能性。
- 電源投資が非常に長期間に渡るといった特性(資本の固定性)等の取扱いについても、留意しておく必要性。

23

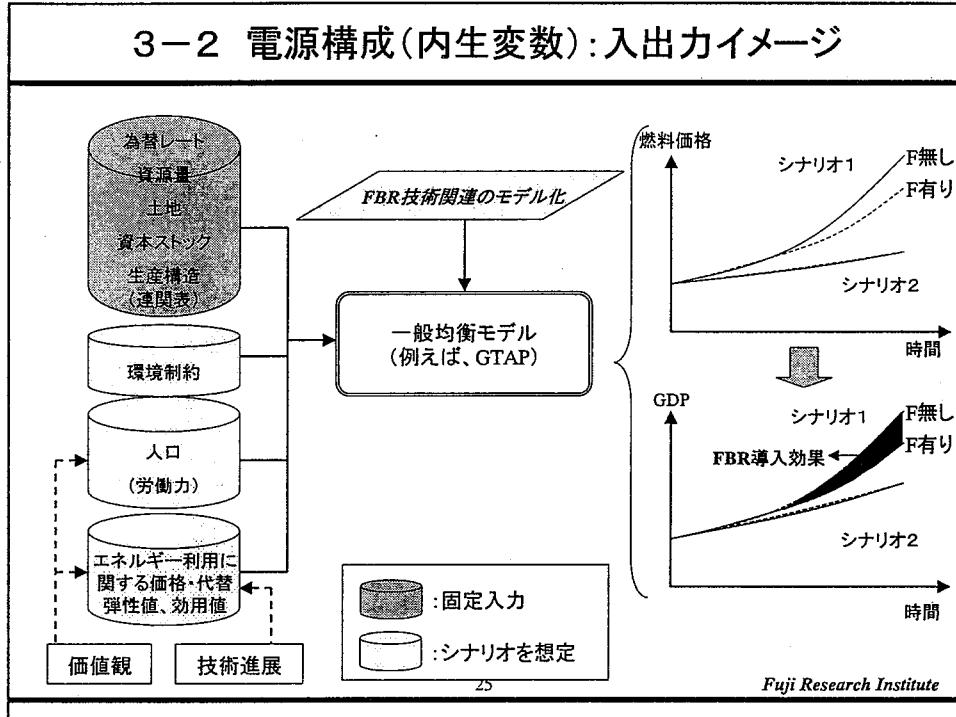
Fuji Research Institute

3-1 電源構成(外生条件):入出力イメージ

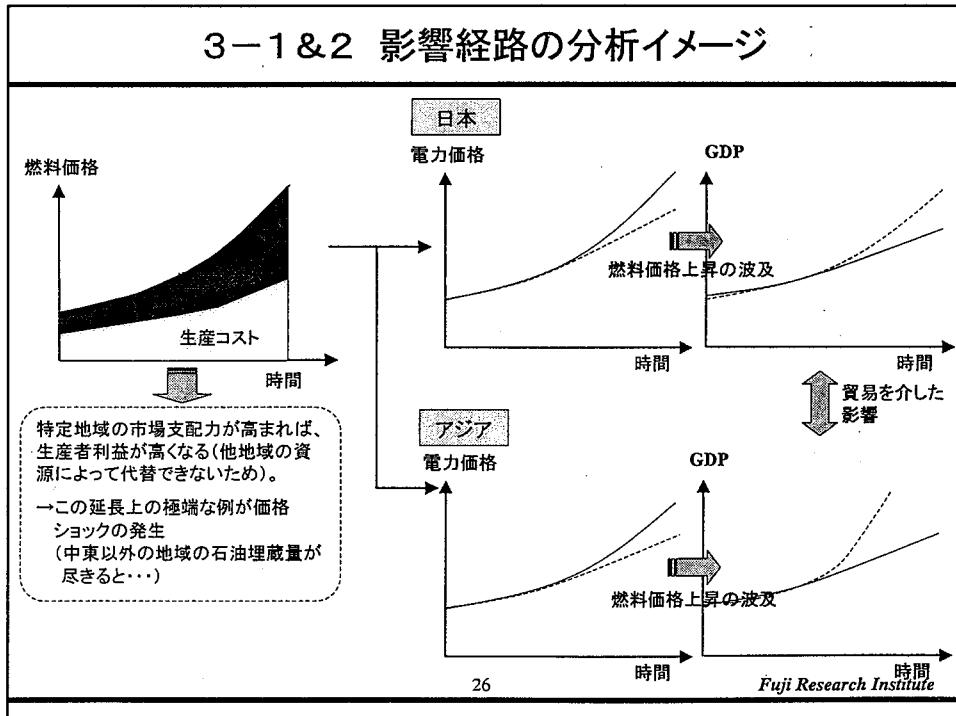


Fuji Research Institute

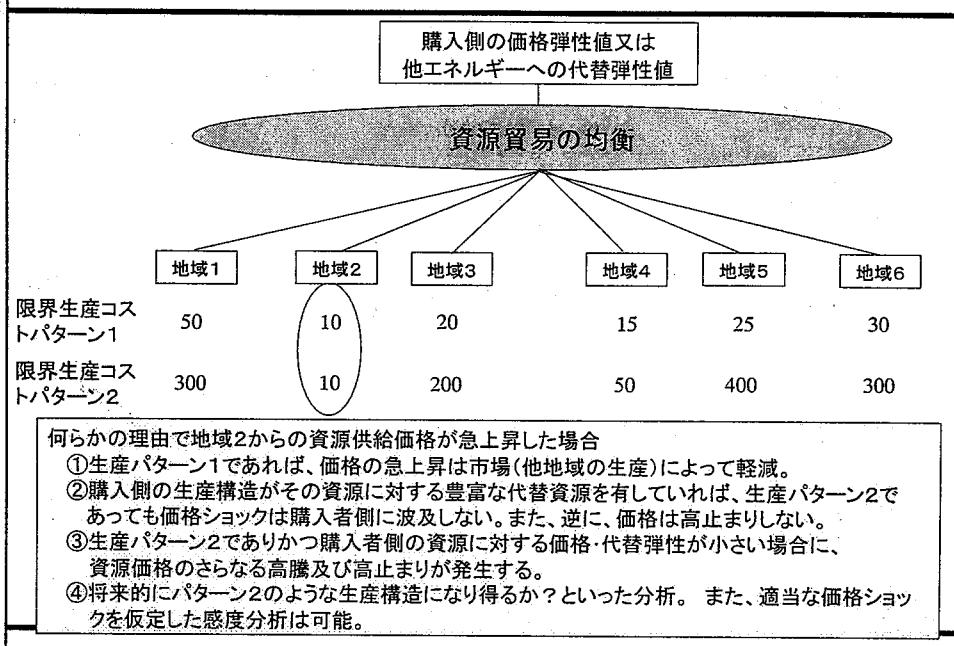
3-2 電源構成(内生変数):入出力イメージ



3-1 & 2 影響経路の分析イメージ



3-1 & 2 價格ショックの分析イメージ



3-2 電源構成(外生変数):改良作業項目、データの準備

○改良作業

<ソースレベルでの改良>

- ①ウラン資源の明示的な取扱い

○データの準備

-産業構造、資本ストック、土地:GTAPデフォルトデータ

-化石資源:Rogner、ウラン:OECD/NEA

-人口(日本:人口問題研究所、世界:国連)

-長期のエネルギー技術進展(コスト):IPCC SRESやUNDPのエネルギー需要推定の前提

-価値観:IPCC SRES等の評価軸

-電源構成シナリオ

3-2 電源構成(内生変数):改良作業項目、データの準備

○改良作業

<GUIでの改良>

- ①エネルギーセクター全般の詳細化(GTAP-Eの構造・データ説明論文を参考に)
- ②原子力やFBRのモデル化(生産構造の中でどのような財と位置付けるか?)
- ③モデルの詳細化に伴うデータの整備

※①及び②のモデルの詳細化は比較的簡単に実施可能。ただし、それに付随するデータの整備は煩雑(1部門の追加は、マトリックスの1列分の追加×時点分のデータ作成を意味する)。

<ソースレベルでの改良>

- ①ウラン資源の明示的な取扱い

○データの準備

- 産業構造、資本ストック、土地:GTAPデフォルトデータ
- 化石資源:Rognier、ウラン:OECD/NEA
- 人口(日本:人口問題研究所、世界:国連)
- 長期のエネルギー技術進展(コスト):IPCC SRESやUNDPのエネルギー需要推定の前提
- 価値観:IPCC SRES等の評価軸

参考文献

- (1) 「総合エネルギー調査会エネルギーセキュリティWG報告書」 (2001年)
- (2) 「エネルギーセキュリティ」 矢島正之 (2002年5月)
- (3) 「Projected Costs of Generating Electricity : Update 1998」 OECD/NEA (1998年)
- (4) 「原油価格上昇の日本経済への影響」 電力中央研究所報告、Y00015 (2000年)
- (5) 「エネルギー安全保障における原子力の評価」 入江一友、神田啓治、
日本原子力学会和文論文誌、Vol1、No.2 (2002年)
- (6) 「ExternE Vol.7 Methodology 1998 upgrade」 (1998年)
- (7) 「応用一般均衡モデルの基礎と応用」 川崎研一、日本評論社 (1999年)
- (8) 「世界エネルギーモデルWEP2001の開発」 電力中央研究所報告、Y01017 (2002年)
- (9) 「超長期世界エネルギー需給モデルによる計量分析」 IEEJ (2000年)
- (10) 「日本を巡る自由貿易協定の効果」 (社) 日本経済研究センター (2002年)
- (11) 「規制改革による経済効果分析のための応用一般均衡モデルの開発」
経済企画庁経済研究所 (1999年)

参考文献

- (1 2) 「温暖化ガス排出削減が世界貿易を通じてマクロ経済に与える影響」WWF（2001年）
- (1 3) 「GTAP-E : An Energy-Environmental Version of the GTAP Model」GTAP
Technical Paper No.16(2002年)
- (1 4) 「炭素税導入のシナリオ分析」伴金美（1998年）
- (1 5) 「環境政策の一般均衡分析」黒田昌祐、野村浩二、三田商学研究41巻4号（1998年）
- (1 6) 「エネルギー・システムにおけるCO₂問題対策の評価（東京大学学位論文 藤井康正）」
(1992年)
- (1 7) 「総合エネルギー調査会需給部会報告書」（2000年）

参考資料

核不拡散のリスクと外部性(ExternEでの考え方)

核拡散のリスク

核関連技術を平和的な目的で利用している中で、核関連技術/燃料が核兵器に転用されるリスク。民間の核燃料サイクル施設が増えるとともに拡散の統計的確率は増加し、特にウラン濃縮施設や使用済み燃料の再処理施設は核拡散の機会を大きくする可能性がある。

核拡散の外部性

原子力発電プラントの運転(燃料サイクルまで含めて)に伴う核拡散の確率と核拡散に伴うダメージ予測(核兵器使用時のダメージは非常に大きいが、発生リスクも非常に小さいという点では、原子炉の事故と同様に、他の外部性と横並びで比較できない側面もある)

政治的側面

主なポスト冷戦問題として認識されており、近年の主要な懸念事項は、イラクや北朝鮮の核開発、インド・パキスタン間の核兵器開発競争、ロシアからイランへの原子力技術供与問題、ロシアの解体核兵器管理問題などが挙げられる。また、テロなどのサブナショナルレベルの組織への核拡散が懸念されている。

技術的側面

- ①濃縮技術の転用
- ②使用済み燃料の再処理・再利用の工程で発生する分離プルトニウムの管理

33

Fuji Research Institute

核拡散の外部性評価アプローチ(ExternE)

核拡散問題には、不明確で未知な部分が多くある。それは技術的側面だけでなく、軍事戦略、政治、社会及び経済的な側面も持っている。ExternEでは、核拡散に関する外部性を評価するための3種類のアプローチ(取り組み)を紹介している。

Simple Expected Utility Approach

単純な仮定に基づく試算。最大限リスクが増加する場合として、10億人が死亡するような世界規模の核戦争の発生確率が核拡散により1982-2010年の間に1%増加すると想定すれば、外部コストは約120mills/kW Hと試算される(1992年、米国)。

Risk Assessment Considering the Problem of Nuclear Hot Spot

各国固有の技術的・政治的側面を考慮した分析アプローチ。核能力評価(民間核燃料サイクルにおけるプルトニウム生産キャパシティ、軍事転用システムに関する分析から兵器生産ポテンシャルを評価)及び保有インセンティブ評価(各国の政治状況や隣国との関係から核保有インセンティブを評価)により、核兵器転用リスクを評価する。ExternEのコンセプトには適合するが、定量的に評価が困難な部分を含む。

Abatement and Control Cost Approach

核拡散の抑制/管理に必要な費用から外部費用を評価するアプローチ。例としては、IAEAのセーフガードコストが挙げられる。また、イラクへの立入検査に要した費用なども含まれると考えられる。

34

Fuji Research Institute

ExternEプロジェクトの核拡散外部性に対する見解

1. 現時点で核拡散に関連するダメージの確固とした予測は困難である。
2. 核拡散問題を定量的に取り扱った調査報告書や文献は限られている。
3. Shuman & Cavanagh (1982) が提示した包括的範囲が政策決定への適用にどの程度有用なのかを判断するのは難しい。しかし、定量予測を行おうとすることにより、Shuman & Cavanagh レポートは少なくとも話し合いを前進させることができ、多くの有用な問題を提起した。
4. 核拡散問題への対応プロセスの透明性を高めるためにも、核拡散リスクを定量化するための努力が求められている。

※外部性の定義に従えば、各国の政治状況と核関連技術を考慮した核拡散リスクの定量化が重要である。日本における核燃料サイクルからの核拡散リスクが非常に低いことを合理的に主張するためには、日本が核兵器を保有しても何のメリットがないことを示せるかが重要と考えられる。

※先進国側による過度な核不拡散政策の実施は、今後の途上国の原子力導入に負の外部性をもたらす可能性もある。

35

Fuji Research Institute

エネルギーセキュリティに関する他の意見

【総合資源エネルギー調査会原子力部会(平成11年12月16日)、東京電力 勝俣委員】

原子力というのは経済性だけではなくて、電気事業者がLNGの価格交渉をする際にも原子力を持っているというのは一つの手段、交渉材料である。そういうことも含めてのエネルギーセキュリティ、あるいはこれから出てくるCO₂問題等々も含めて総合的に原子力の価値を判断すべきだと考える。

【総合資源エネルギー調査会エネルギーセキュリティWG】

日本、韓国及び中国は、中東からの原油の輸送ルートが重複しており、今後の経済成長に伴って中国の原油輸入量が飛躍的に増大した場合、マラッカ海峡のタンカー運行量が限界に達する可能性がある。

36

Fuji Research Institute

供給支障発生リスク最小化分析(ポートフォリオ分析)(1)

●総合資源エネルギー調査会エネルギーセキュリティWG
2つのリスク要因(世界の需給バランス、日本のエリア別輸入依存度)に着目した供給リスク最小化ポートフォリオ分析

【世界の需給バランスに起因するリスク指標】

特定エリアの域外輸出量／世界の総供給量
(各資源の供給エリアがどの程度偏在しているか?)

【日本のエリア別輸入依存度に起因する】

特定エリアへの輸入依存度×各エリア別の政治経済リスク(Euromoney誌のカントリーリスク)
(日本の輸入が政治・経済が不安定な地域にどの程度依存しているか?)

➡ エリア間の相関を考慮した各指標のリスクマトリクス(分散・共分散)の作成

【世界の需給バランス】

	石油	天然ガス	石炭	原子力
石油	1.000	0.018	-0.030	-0.060
天然ガス		0.046	0.005	0.517
石炭			0.012	0.015
原子力				0.767

【日本のエリア別輸入依存度】

	石油	天然ガス	石炭	原子力
石油	1.000	0.267	0.010	-0.050
天然ガス		1.941	0.763	-0.060
石炭			0.317	-0.019
原子力				0.026

→石油を1として規格化

→共分散が負の要素は、両方の資源を持つことにより供給リスクが減少

(お互い(例えは、石油と原子力)の資源供給エリアが異なることを示す)

→日本の輸入依存度起因のリスクで天然ガスの分散が大きいのは、輸入先がアジアに集中しているため

ch Institute

供給支障発生リスク最小化分析(ポートフォリオ分析) (2)

●前頁のリスクマトリックス(2要因の平均)を用いた供給リスク最小化資源ポートフォリオ分析

$$\text{目的関数: } \sum_{i,j} \sigma_{ij} x_i x_j \rightarrow \text{最小化}$$

σ_{ij} :リスクマトリクス

x_i :一次エネルギー源iの構成比

(注)水力、新エネ等については分散、共分散とも0と仮定

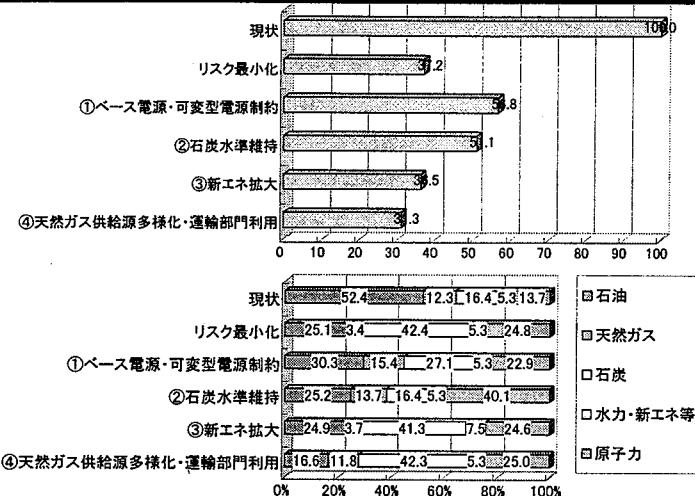
前提条件

- ①各部門(民生、産業、運輸)の最終エネルギー消費は現状維持。
- ②電力と電力以外の間には代替関係がない。
- ③水力・新エネについては現状の構成比を維持する。
- ④原子力は電力としてしか用いない。
- ⑤運輸部門は石油のみを使用する。
- ⑥民生部門での電力以外のエネルギーについては石炭は用いない。

解析ケース

- ①ベース電源・可変型電源(ベース(石炭・原子力)とピーク対応電源(石油・天然ガス)に代替性なし)
- ②石炭の上限制約(CO2制約の観点から石炭の使用上限を現状レベルに設定)
- ③新エネの拡大(現状の3倍)
- ④天然ガスの供給多様化と運輸部門での天然ガス利用

供給支障発生リスク最小化分析(ポートフォリオ分析)(3)



- ①の制約→リスクの最小化ケースと比べて石炭の構成比が低下し、天然ガスが大きく拡大する。
- ②の制約→石炭についてリスクが小さい原子力の利用拡大
- ③の制約→エネルギーの構成はリスク最小化ケースと変わらないが、新エネの増加分だけリスク低減
- ④の制約→リスクの最も高い石油の比率が低下し、全体のリスクも小さくなる。

供給支障発生リスク最小化分析(ポートフォリオ分析)(4)

ポートフォリオ分析の課題

①備蓄によるリスク低減効果

石油備蓄によるリスク低減効果を考慮することが課題となる。また、原子力燃料における国内のランニング・ストックや長期の炉内燃焼期間が供給リスクを低減する効果がある。

②現実的な制約条件の設定

エネルギー構成を変化させる場合には、発電所の立地制約があり、また、設備改良には、時間とコストがかかるなど、より現実的な制約条件の設定が必要となる。供給リスクを価格の上昇(又は変動)という形で評価した上で、長期間のエネルギー・システムコストを最小化する等の分析が必要となる。

③プルサーマル及びFBRの反映

本試算では、天然ウラン市場の供給リスクを原子力のリスクとして取り上げており、ワンスルーフの燃料サイクルの範囲での分析となっている。原子力には、プルサーマルやFBRの導入によりさらに燃料供給リスクを低減できる可能性がある(分析手法の中で時間が考慮されるのが前提)。

④エネルギー源ごとのリスク特性の認識

エネルギー・セキュリティに関するリスクには、環境負荷の高まりといった様々な要素があり、より広義のリスクへの配慮が必要である。また、リスクシナリオをベースとした定量化について、輸送リスクなどを含めて検討する必要がある。

電力市場自由化とエネルギーセキュリティ(1)

①発電の燃料構成の変化

完全な自由化市場では、電気事業者の投資リスクはもはや需要家に転嫁することはできず、このことは投資家に対し、リスクを最小化するインセンティブを付与することになる。このようなリスクを軽減するため、投資家は早期の償却や資本コストの小さい投資(CCGT等)を選考するようになる。

②効率向上による燃料投入量の低下

発電における効率を向上し燃料投入量を削減する。

③コスト削減圧力による燃料ストックの低下

競争市場でのコスト削減圧力が増大する結果、(規制下では回収が認められていた)燃料貯蔵のためのコストが極力圧縮されるようになる。

④電力輸入比率の増大

周辺諸国と比べて電力価格が高い国では電力輸入比率が増大する(欧州での独で代表的)。ただし、送電の制約等により輸入可能量には制限がある(他国との送電線を持たない日本では、輸入可能量は0である)。

⑤電力価格低下による電力消費量の増大

エネルギー市場の自由化は価格の低下をもたらし、価格の低下は消費の増加につながる。電力価格の低下は省エネルギー方策にも影響を及ぼす(回避可能コスト(電力コスト)の低下により、省エネ投資の費用対効果が低下する)。

41

Fuji Research Institute

電力市場自由化とエネルギーセキュリティ(2)

⑥供給契約の弾力化

エネルギー市場自由化は、市場参加者にとってそのニーズ(価格重視、安定供給重視)に適合した供給契約を締結する機会を与える。その結果、エネルギー供給保障は、供給支障が最も大きな損害をもたらし、安定供給確保のために最も高い価格を支払う用意のある利用者に対して行われる(社会全体からみて、供給保障がより効率的に確保されている)。

⑦エネルギーセキュリティの確保に関する国際協調

各国市場の国際的なリンクが強化されるにつれて、市場の条件も調整が求められる。このような中で、供給保障のための措置に関する規制(例えば、備蓄義務)も国際的な協調により、各の方策はより国際的な協調システムに組み込まれるようになる(特に、EU)。その結果、地域全体の供給保障のレベルは高まることになる(アジア地域においても、今後、備蓄政策に関する国際協調の必要性が指摘されている(総合資源エネルギー調査会、エネルギーセキュリティWG))。

⑧国際的な投資を通じての相互依存関係の強化

電力市場の自由化により、市場参加者にとって(今後の電力価格が保障されないと意味で)経済的リスクが増大する。このため、市場参加者はこのようなリスクを垂直的・水平的統合によりヘッジしようとする可能性がある。例えば、ガス火力のシェアが発電事業者は、ガス生産者の株式を取得しようとするかもしれないし、その一方で、ガスを輸出する会社は外国の主要な供給事業者を買収し、販売を確保しようとする可能性がある。このように、事業者間の資本関係の強化により、輸出国と輸入国側の利害調整は進展し、供給支障リスクが軽減する可能性がある。

42

Fuji Research Institute

電力市場自由化とエネルギーセキュリティ(3)

●日本における競争導入下のエネルギーセキュリティ確保のあり方

- 市場自由化の流れの中で、市場参加者や市場メカニズムによるセキュリティ確保は有効に活用されるべき(政府の役割としては、備蓄を有効に活用して市場の円滑な運営を促すこと)と考えられる
- エネルギー資源に恵まれない、他国のとの電力取引が不可能といった日本固有の条件考慮したとき、特に中長期的なセキュリティ確保の具体的なあり方についての政策的判断が求められている。
- とりわけ原子力開発が重要な政策オプションとして存在している場合には、代替的手段とのコスト効果性を評価した上で、長期的なセキュリティ確保の手段として、また環境面に関してその位置付けが明確にされる必要がある。
- 電力市場の自由化が進展すれば、初期投資コストの高い原子力発電所の新設は困難になる可能性があるため、エネルギー政策における原子力の長期的な位置付けを明確にすることがこれまで以上に重要になると考えられる。

一般均衡モデルの概要(1)

一般均衡モデルとは

化石資源の枯渇や規制緩和、環境税導入などの国内外の要因による経済への影響の分析では、これまでの事例の多くは、影響を受ける業界において価格がどの程度上下したか、需要がどの程度変化したかといったある特定市場における分析であった。しかしエネルギー資源の枯渇や規制緩和の影響は、ある市場への影響に留まらず、ある市場の変化が相対的な価格変化や生産要素の配分の変化を通じて他の市場へも波及する場合が少なくないと考えられる。このような経済全体への影響を分析する上では、特定市場における最適化や部分均衡による分析では限界があり大きな市場モデルでの検討が必要となってくる。そのような要請を踏まえて開発された経済モデルが一般均衡モデルである。

一般均衡モデルの比較優位性

化石燃料価格の上昇といったエネルギーセキュリティを大きく揺るがす要因の影響については、エネルギーセンターへの影響のみならず、それに伴う価格や需要量などの変化を通じてその影響が他の市場にも大きく波及することが想定される。マクロ計量モデルや最適化モデルにおいても価格ショックなどが与える需要や生産性、労働力の変化を取り扱うことが可能なモデルもあるが、ある特定の市場に着目したいわゆる部分均衡的な分析であり、マクロ経済への影響を分析するにあたっては、他の市場への影響を含めて行うことが必要である。その意味で、経済全体への波及効果を分析するにあたっては一般均衡モデルの優位性は高いといえる。

一般均衡モデルの概要(2)

一般均衡モデルの特徴

1. 需給の均衡は世界各国での超過投資総額と超過貯蓄総額の間で成立し、総和がゼロとなる恒等式が維持される。ただし各地域の貯蓄と投資については一致する必要はない。
2. 会計バランスは家計、企業(生産者)、政府部門からなり、家計部門は効用最大化を実現するように財(労働、資本、土地)を需要し、企業部門は完全競争下での利潤最大化原理に従うことで、各要素需要と財の供給を行う。政府部門は仮想的な部門で家計部門に準ずる。
3. 家計部門の効用最大化行動の前提として社会厚生関数が各国に想定されており、家計消費、政府消費、国内貯蓄により成り立っている。各支出項目は所得に対する一定のシェアで定義される。
4. 輸出入財は各財ごとに国内財と競合し代替弾力性により財の振り分けが行われる。
5. 自由貿易による資本の国際的な移動や所得増加に伴う資本ストック(貯蓄と投資の量)の変動を取り扱うことが可能である。

一般均衡モデルの概要(3)

一般均衡の応用分野

♪租税分野

税制は全体として所得分配にほとんど影響しないと考えられてきたが一般均衡モデルでは税制による歪みから生じる厚生費用が10%程度まで変化すると推定され、従来の考え方を覆した。これまでの研究では複数税制案の順位付けや改革案の評価などに利用されている。

♪国際貿易分野

一般均衡モデルでは同一財であっても地域間の特性(需要、供給特性など)や貿易障壁を導入することができ、現実的な貿易動向が再現できる。これまでの研究では国際価格変動の影響や関税による影響評価に利用されている。例えば、石油国際価格の上昇影響は先進国GDPには大きな影響を及ぼさず石油輸入後進国への影響は多大であると推定されている。

♪地球環境分野

これまでの研究では炭素税の導入や排出権取引市場の創設による効果などについて利用されている。地球環境モデルの場合時間的視野が長期であり、動学的な制約条件下で社会厚生を最大にするような経済主体(企業、家計)の最適技術選択モデルによる評価が最適である。前述のように標準的な一般均衡モデルは比較静学的モデルであることから分析では、将来シナリオをいくつか設定し、各モデル間の比較により効果を求めることが一般的である。最新の研究では、後述するGTAPなどの一部のモデルで動学モデルへと拡張したものも開発されてきている。

一般均衡モデル: GTAP(1)

世界貿易分析計画(GTAP: Global Trade Analysis Project)モデルの概要

GTAPは1992年に設立された世界貿易分析センターにより開発され現在多くの研究機関などで用いられている応用一般均衡モデルである。GTAPは一般均衡問題を解く際に必要となる各国の需要や所得の弾性値がデータベースとしてまとめられており現在5版まで刷新されている。このデータベース作成にあたっては、OECD、国際連合貿易開発会議(UNCTAD)、世界銀行、世界貿易機関(WTO)のほか日本、米国、EC政府機関が参画するまさにグローバルなシステムとなっている。

データベースは、各國・地域内の産業間の投入算出データだけでなく、各國・地域間の貿易財の取引・輸送コストおよび関税・非関税障壁データを統合したものである。地域は30地域を網羅しており産業については37に区分されている。

地域区分	産業区分
1AU5 オーストラリア	1prod 商品・農業
2NZL ニュージーランド	2lwht 小麦
3JPN 日本	3lpro その他の穀物
4KOR 韓国	4lncg 非穀物作物
5IND インドネシア	5wool 羊毛
6PHL フィリピン	6lob その他の畜産品生産物
8SGP シンガポール	7fsh 海洋漁獲
9THA タイ	8col 古代
10CHN 中国	10oil 石油
11HKG 香港	11gas ガス
12TWN 台湾	12comn その他の穀物
13IDN インドネシア	13pcr 未製品
14RAS 南の他南アジア	14met 肉製品
15CAN カナダ	15mil 乳製品
16COL コロンビア	16ofp その他の加工食品
17MEX メキシコ	17dlc 飲料、化粧品
18CAM 中米、カリブ	18lcm 服飾品
19ARG アルゼンチン	19mpg 旅行用品
20BRA ブラジル	20cea 皮製品
21CHL チリ	21lum 天然資源
22RSM 他の南米	22pxp ハレフ、紙
23E_U EU(12)西ヨーロッパ	23pmi 石油、石炭製品
24EU3 オーストリア、フィンランド、スウェーデン	24erp 化学、合成ゴム、プラスチック
25EFT 欧州自由貿易地域	25nmn 糖果、土石
26BOL 中央アメリカ	26lsl 鮮花
27PER ペルー	27lcm 服飾品
28MEA 中東、北アフリカ	28lce 金属製品
29SSA サハラ以南アフリカ	29tce 旅行機器
30ROW その他	30com 地の他の機器
	31lomf 地の他の製造業
	32eww 電力、ガス、水道
	33cmx 建設業
	34ltt 賃貸、運賃
	35osp その他のサービス(民間)
	36osg その他のサービス(政府)
	37dwe 住宅資本財

Fuji Research Institute

47

一般均衡モデル: GTAP(2)

世界貿易分析計画(GTAP: Global Trade Analysis Project)モデルの概要

モデル構造

モデルのマクロレベルの枠組としては、各國・地域ごとに取引主体として、企業(生産者)、民間家計および政府の存在が仮定されている。

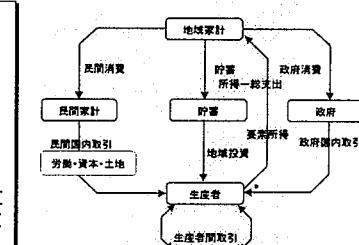
GTAPモデルでは、民間家計と政府は地域家計という広義の取引主体として扱われている。したがって、地域家計の支出は、民間消費支出と政府消費支出の合計として定義される。民間家計は、生産要素である労働、資本及び土地を保有しており、これらを企業に提供することで要素所得を得る。所得のうち民間消費支出と政府支出の合計を上回る部分は貯蓄に回され、企業にとって投資として支出される。

企業の生産構造

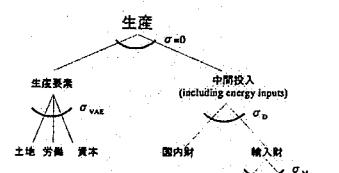
GTAPでは企業の生産量を所与として、生産要素への投入と資材などへの中間投入を費用最小化原則に基づき決定する。

生産要素は各要素の複合財として扱われ、各要素間での費用最小化行動により決定される。要素間の振り分けは代替弾力性(σ_{VAE})で決定される。

中間投入は国内財と輸入財に振り分けられこれも代替弾力性(σ_D)で決定される。更に輸入財をどこから調達するかについては輸入財の輸入先の代替弾力性(σ_M)をもとに費用最小化により決定される。



GTAP(standard model) Production Structure

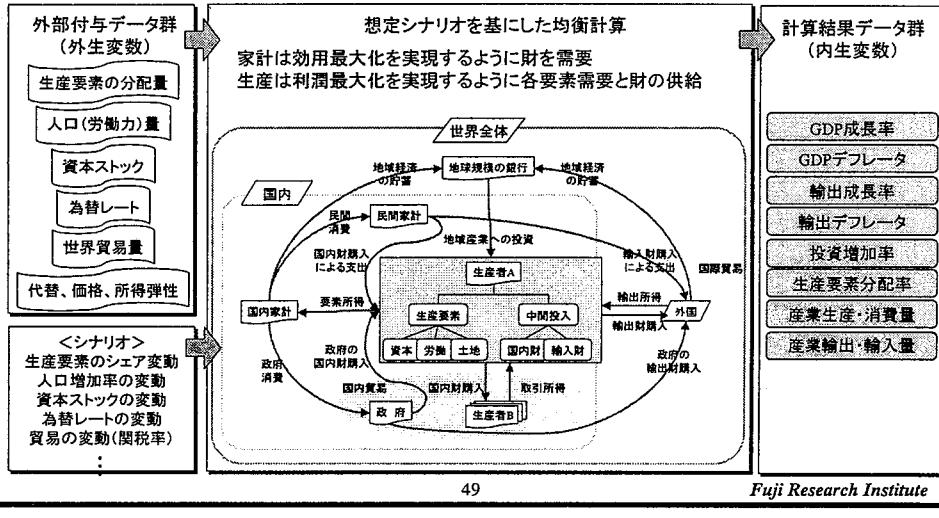


Fuji Research Institute

48

一般均衡モデル: GTAP(3)

一般均衡モデルは比較静学モデルであり、ある経済構造の変化に対する評価では、変化が発生する以前の基準となる状態を初期の均衡状態として、変化による経済全体への波及が収斂した新たな均衡状態とを比較することでその影響程度を明らかにするモデルである。



一般均衡モデル: GTAP(4)

企業行動

ある資本量のもとで生産要素投入と中間投入を最小にする(利益を最大にする)行動をとる。

$$QO_{jr} = e^{ao_{jr} t} \min \{ QVA_{jr} e^{ava_{jr} t}, QF_{jr} e^{af_{jr} t} \}$$

QO_{jr} : (国)産業の生産量

QVA_{jr} : (国)産業の生産要素投入量

QF_{jr} : (国)産業の財の中間投入量

ao_{jr} : (国)産業の全要素集約的技術進歩率

ava_{jr} : (国)産業の生産要素集約的技術進歩率

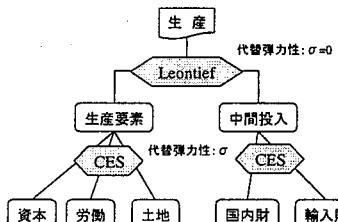
af_{jr} : (国)産業の財の中間投入集約的技術進歩率

生産要素と中間投入の構造はレオンチエフ型関数で定義される。レオンチエフ型関数は代替弾力性 $\sigma=0$ の関数でそれぞれの需要量が一定として扱われる。

生産要素間(資本、労働、土地)および中間投入要素間(国内、輸入財)はCES型関数で定義される。CES型関数は各要素間の代替弾力性が示され、それにより各々の相対価格変動から需要量が決定される。

また、コ・タグラム型関数も用意されており、この場合 $\sigma=1$ となって各々のシェアが一定になるように需要量が決定される。

各々の要素は価格弾力性 ε により自己価格変化に対する自己需要変化が定義され、均衡計算の過程で求められる価格変動に対する需要の変化が求められる。



価格弾力性とは自己の価格(p)変動に対する需要(q)変動

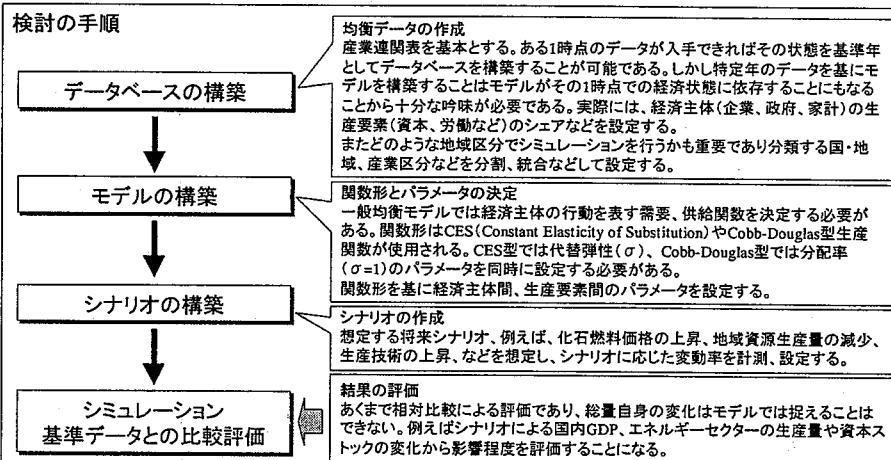
$$\text{自己価格弾力性 } \varepsilon_{11} = -\frac{\partial \log q_1}{\partial \log p_1} \approx \frac{\Delta q_1 / q_1}{\Delta p_1 / p_1}$$

$$\text{交差価格弾力性 } \varepsilon_{21} = -\frac{\partial \log q_2}{\partial \log p_1} \approx \frac{\Delta q_2 / q_2}{\Delta p_1 / p_1}$$

代替弾力性とは要素シェア(S)と交差価格弾力性の比
要素シェアとは総費用に占める要素1のシェア

$$\sigma_{21} = \frac{\varepsilon_{21}}{S_1} \quad S_1 = \frac{\partial \log C}{\partial \log p_1} \approx \frac{\Delta C / C}{\Delta p_1 / p_1}$$

一般均衡モデル: GTAP(5)



51

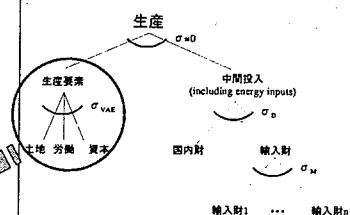
Fuji Research Institute

一般均衡モデル: GTAP(6)

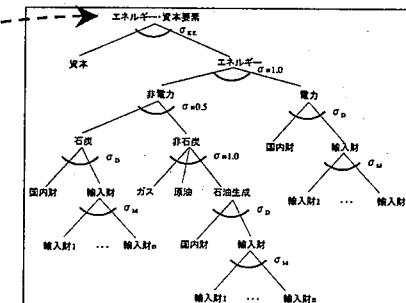
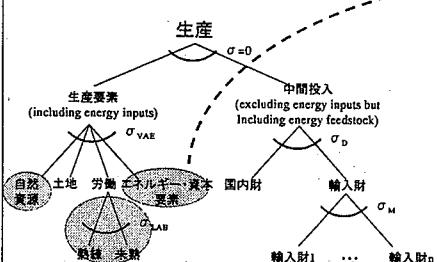
標準GTAPモデルでは生産要素としてエネルギーがない。
✓エネルギー(資源)間の代替性が表現できない
✓エネルギーと土地、労働などの相互影響が表現できない

これらの問題を解消するために改良モデルとしてGTAP-Eモデルが開発されている。ここでは、生産要素としてエネルギー・資本要素が組み込まれ、エネルギー調達に係わる詳細なモデル化が可能となっている。

GTAP(standard model) Production Structure



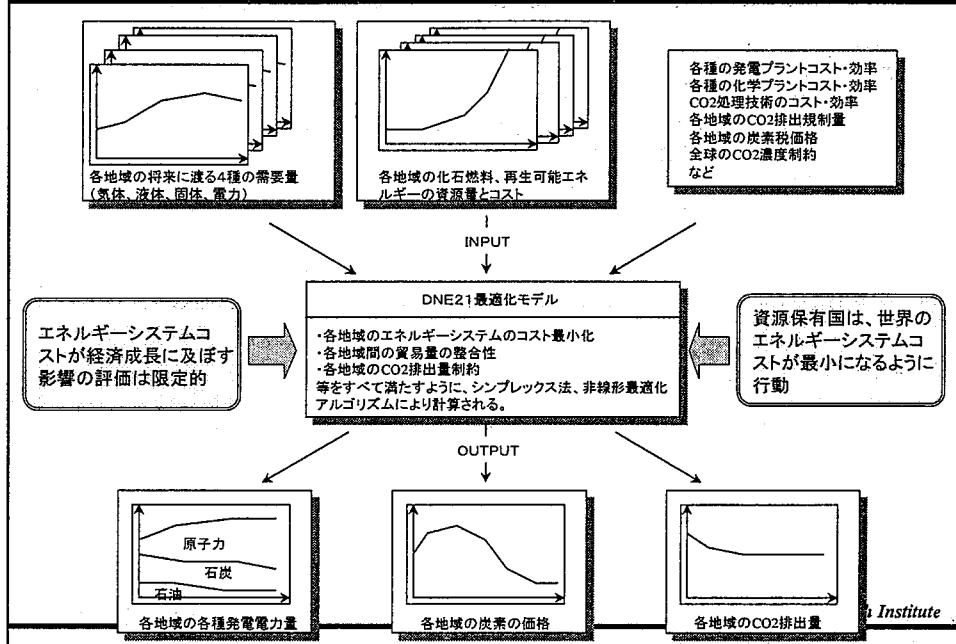
GTAP-E Production Structure



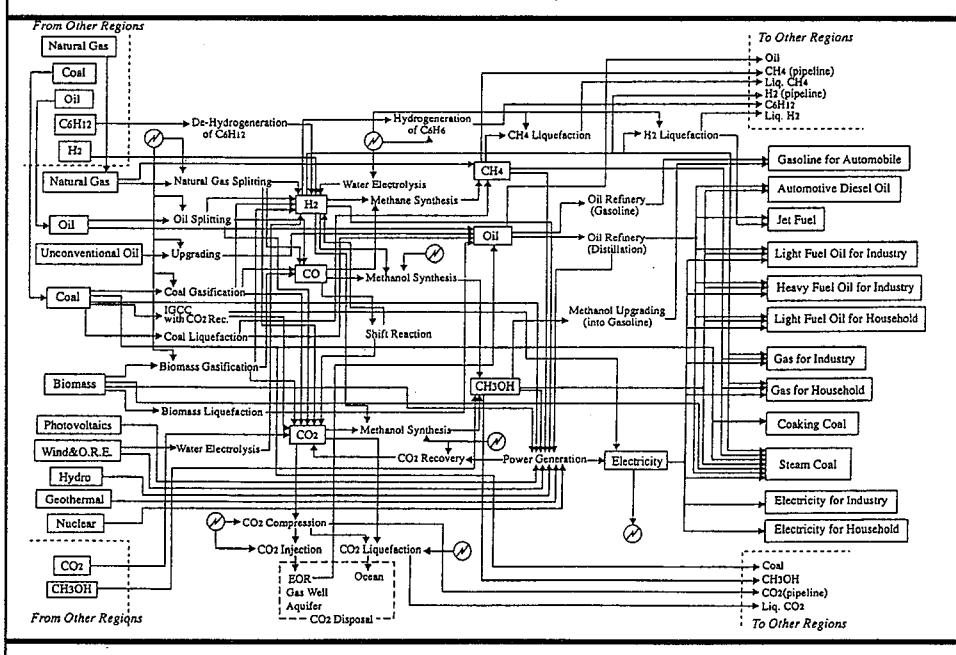
52

Fuji Research Institute

DNE21モデルの概要(1)



DNE21モデルの概要(2)



その他のコード

○Greenモデル(世界、OECD)

価格:\$5,000～6,000程度

内容:ソース、デフォルト入力データ、マニュアル

※富士総研で1985年初期値バージョンは保有。現在、OECD東京事務所では取扱っておらず、バージョン・データの更新状況は不明。

モデルを使った分析例は、最近の論文誌などでも散見。

○KEOモデル(日本、慶應大学)

取得や使用には黒田先生との交渉が必要。JNC殿からアプローチをされた方が取得は容易。

○WEP2000(世界・資源需給のみ、電力中央研究所)

取得や使用には電力中央研究所との交渉が必要。JNC殿からアプローチをされた方が取得は容易。