

エネルギー・システム

とそのモデル化

茅 陽 一*

齊 藤 雄 志**



はじめに

エネルギーが現代の文明社会の中に基本財として深く根をおろしていることは言うまでもないが、その発生から最終利用に至る全過程のあり方が問題になるようになったのは、比較的最近のことである。

本文では、このようなエネルギーシステムの取り扱いは方と、その研究の今後の方向について、概括的に説明を行なってみたい。

1. エネルギーシステムとそのモデル化

通常、経済学的には、エネルギーは資本、労働とともに生産要素を構成する原材料の一部としかみなされない。エネルギー価格はここ数年の間にかなり上昇したが、それでも生産額に占めるエネルギー費の割合は平均的にみてまだ数%のオーダーであり、経済学的視点からは労働その他との対比においてその相対的地位はあまり高くはないとする考え方にも一理ある。

しかしながら技術的視点から見ると、エネルギー転換部門を除く一般産業部門における多くのエネルギーは資本設備を稼働させるための動力源や熱源として利用されており、一般の原材料が加工される立場にあるのに対し、エネルギーは資本設備と協働して原材料を加工する立場にある。このようにエネルギーは資本設備と密接した形で存在するために、技術的意味での重要性はきわめて高く、他の生産要素との代替性を一般の原材料と並列した単純な形で考えるべきではなからう。エネルギーはすべての産業にとって不可欠の生産要素であるとともに日常生活における必需品である。

昭和53年度現在における我が国のエネルギー消費量

は一次エネルギー段階において石油換算4.1億klであり、戦前と比較すると10倍以上にもなっている。今後、短中期的には産油国の経済的、政治的要因によって、長期・超長期的には資源的要因によって、石油の供給量は制約されるとともに、価格も上昇するものと考えられている。将来の我が国のエネルギーシステムの構造は需要部門も含めて大きく変化する可能性が高い。

しかし石油の代替エネルギーとなるべき石炭、原子力、LNG、新エネルギーにも様々な障害があり、今後の我が国のエネルギー需給はかなり基本的な点から再検討する必要がある。

エネルギーの生産、貯蔵、輸送、転換、利用のプロセスは巨大で複雑に錯綜していると同時に、エネルギー間には相互の変換可能性があるために、エネルギー全体の流れを一つのシステムとして総合的に分析する必要がある。図1は将来も含めた我が国のエネルギーシステムを一つのフロー図として表現したものである。我が国のエネルギーシステムは、新しいエネルギー源の出現によって増々複雑化していくと考えてよいであろう。

エネルギーシステムを総合的に分析する一つの有力な手段はエネルギーモデルである。エネルギーモデルはエネルギーの生産から消費にいたるプロセスを数学的モデルとして表現しシミュレーション分析を行なうものである。エネルギーモデルは、そのモデル化する範囲によって、エネルギーのフローを中心としたエネルギー需給モデルないしプロセスモデルと、エネルギーと経済活動の相互作用をも分析対象に含めるエネルギー経済モデルに大別することができる。また手法的にはシミュレーション型のモデルと最適化型のモデルに分けて考えることができる。

現在、多くの国々で多数のエネルギーモデルが作ら

* 東京大学工学部電気工学科教授

** 電力中央研究所経済研究所

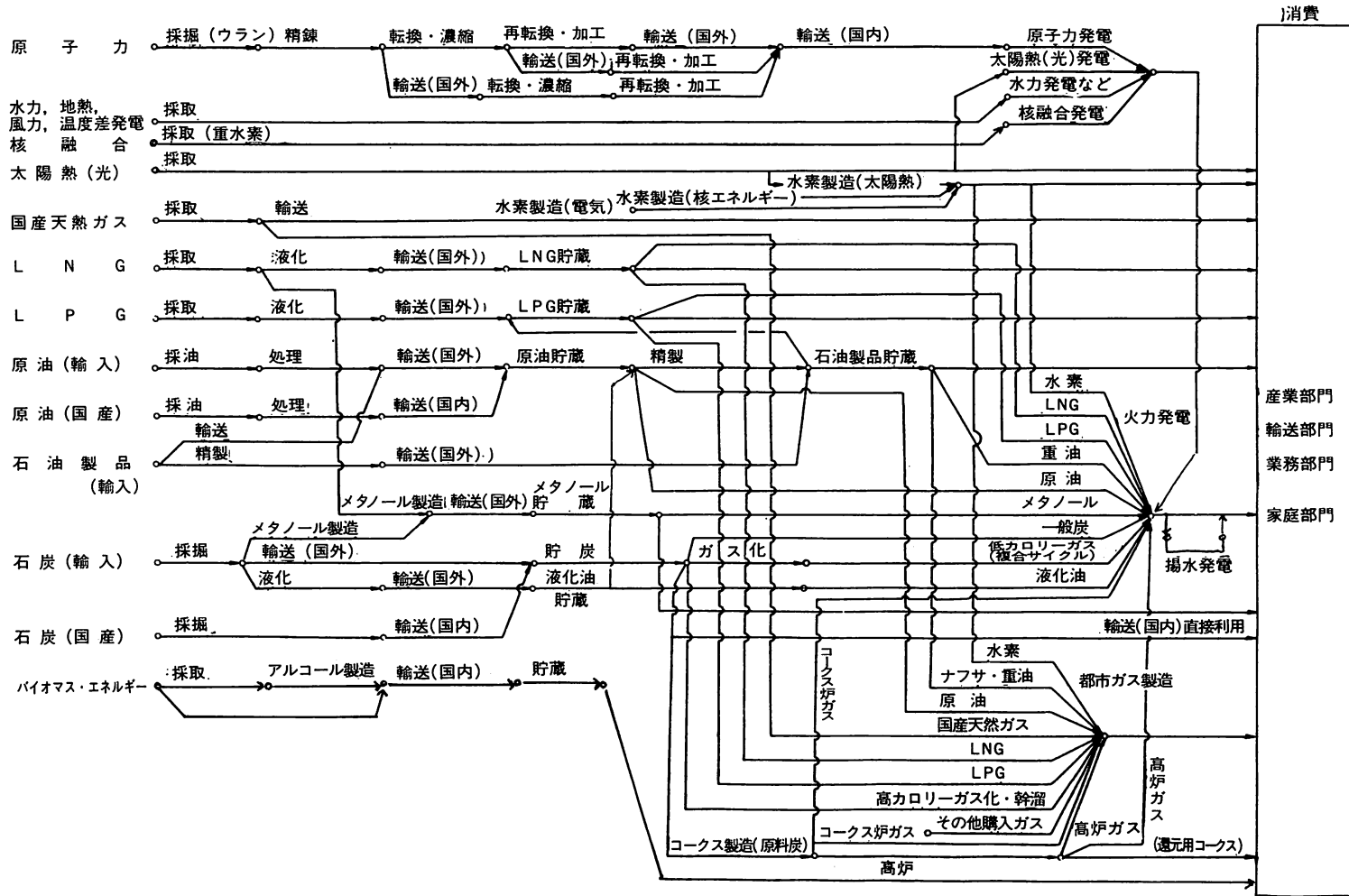


図-1 我が国のエネルギーシステム (現在+将来)

出所 文献〔1〕を参考に作成。

れており、⁽²⁾⁽³⁾エネルギーモデルの代表例としては、エネルギー需給型のものとしては Hoffman モデル、⁽³⁾エネルギー経済型としては Hudson & Jorgenson モデル⁽⁴⁾をあげることができる。米国ではエネルギー需給型のモデルにあまり遅れることなく、経済学者が参加した多くのエネルギー経済モデルが作られ、むしろ現在はこの種のモデルに対する批判も存在し反省期に入っている。米国のエネルギーモデルはすでに第二世代の後半に入っているといつてよい。

我が国の場合は、精密なエネルギー需給モデルがいくつか作られているが、経済との相互作用を明示的に組込んだエネルギー経済モデルについては必ずしも十分なレベルに達しているわけではなく、日本のエネルギーモデルは第二世代の初期の段階とみてよいであろう。

エネルギーモデルの有効性や分析結果の信頼性に対しては批判も存在する。そのうち最も素朴なものは、エネルギーモデルの持つブラックボックス性もしくは不透明性である。また現在のエネルギー関係のデータや理論の水準からいって、エネルギー間の代替性や価格弾力性などを適切にモデル化することがはたして基本的に可能かどうかという指摘もある。モデルの規模の大小も含めてどのようなモデルが最も有効であるかは、人によって意見が分れるところである。しかしエネルギーシステムの分析においてエネルギーモデルをなすですますことは事実上不可能である。エネルギーモデルを考える場合は、対象とする問題の性質上、技術的面と経済的面の両方をとりあつかえること、モデル利用における操作性の高さなどが不可欠である。

また我が国の場合、現在、エネルギー経済に関する情報が不足、もしくは分散しており、エネルギーシステムの総合分析のためには、エネルギーモデルの開発ばかりでなく、エネルギー統計やデータベースの整備も必要である。

2. エネルギー源の評価

エネルギー源の評価が重要な技術的、経済的問題となつて現われるケースには2つの場合がある。第一のケースは安価なエネルギー源が出現するときであり、第二のケースは重要なエネルギー源に供給制約と価格上昇が生ずる場合である。

現在、進行中のケースは後者であり、石油のごとく重要で、高度な経済活動の基礎を形成しているエネル

ギー源の場合は、その影響は非常に大きく、必然的にその代替エネルギーの開発には大きな社会的関心が集中し、多くの資金とマンパワーが投入される。

その結果、現在、実に数多くのエネルギー技術が開発あるいは提案されつつある。同種のエネルギーを対象とする場合でもかなり多くの方式が考えられている。しかしながら、現実の市場における複雑な技術的、経済的、政治的競争過程を勝ちぬいて生残る技術はおそらくそのごく一部であり、社会的損失を軽減するためにはなるべく早い時期に合理的基盤に立ってこれらのエネルギーの評価を行なう必要がある。

エネルギー源を評価するための基本的基準はその技術的特性と経済性である。各エネルギーの生産、輸送、貯蔵、転換、利用の各プロセスにおいて、エネルギー利用効率、経済性、運用・保守を含めた技術的特性、あるいは立地環境特性などを考慮して評価が行なわれなければならない。この中で最も重要なものは経済性であるが、それは、そのエネルギーの供給能力、需要、あるいは生産および利用における様々な要素を総合的に反映しているからである。

しかしながら将来のエネルギー源の経済性評価は困難な面が多く、かつ可能であっても結果の信頼性には問題があることが多い。そのような場合には、経済性評価の補助的手段として物量ベースの評価（実物主義評価）⁽⁵⁾もしばしば有効な情報を提供する。あるエネルギー技術が導入された場合の直接間接の影響を技術的生産関係の連鎖を通して体系的に分析することによって経済性評価の結果の信頼性を側面から高めることができる。

エネルギー分析、あるいはエネルギー収支分析はエネルギーという一つの財にのみ注目した一種の実物主義評価の一方法であり、現在各国においてかなり多くの研究がなされている。

エネルギー収支分析によるエネルギー源の評価が最も盛んに行なわれているのは原子力発電である。ガス拡散法によって濃縮された燃料を使用する軽水炉の場合、設備、原材料を介した間接的エネルギー投入よりも直接的なエネルギー投入の方がはるかに多く、分析結果は比較的安定している。1のエネルギーを投入すれば、電力を発熱量ベースで評価して約4程度のエネルギーを得ることができる。同じ燃料を石油火力に投入する場合と較べて、原子力発電所は10倍以上（4×100/発電効率）の電気エネルギーを生産することができる。*

エネルギー収支分析によるエネルギー源の評価は核融合発電、太陽熱発電、風力発電、海洋温度差発電、その他に関して行なわれているが、前提条件や使用するモデル、その他の条件のちがいのために結果の信頼性にはまだ不十分な点が多い。これらの結果によれば太陽熱発電は原子力発電よりも倍以上エネルギー利用効率が悪いが、風力や核融合の場合は意外に効率が高いという結果がでている。

今後、我が国のエネルギーシステムは前述のように大きく変化する可能性を持っている。石炭、原子力、LNGを代替エネルギーの中心とするハードパス路線から、省エネルギー、分散型の再生エネルギーの利用を基本とするソフトエネルギーパス路線まで大きな幅があって、現在様々な論争が展開されているが、今後利用するエネルギー技術は巨大で複雑な設備を利用したり、希薄なエネルギーを対象とする場合が多いので、以上のような分析も含めたエネルギー源の総合評価を的確に行なうことが今後増々必要になっていくものと思われる。（*ただしここでは核燃料そのものもつエネルギーは勘定に入れていない。）

3. 今後のエネルギー・システムへの鍵

今後のエネルギー・システムを考えていく上での基本条件は、国民にとっての生活の利便が充分満されるという前提の下で、

- 1) できるだけ安価にエネルギーが供給される（コスト条件）
- 2) エネルギー供給の安定性ができるだけ確保される（供給安定性条件）
- 3) エネルギー利用の効率ができるだけ高い（効率条件）

の三つになろう。このような条件を満たすには、産業・運輸・国民生活における絶えざる努力が必要なのは当然であるが、石油資源事情と現在のエネルギー多消費型産業・生活構造を考慮すると、長期的にはかなり抜本的な変革が必要と考えられる。本節では、その変革につながると考えられる二、三の新しい考え方をそれがただちに受容可能なものでないことは当然であるが--を指摘しておこう。

その一つはこゝ二、三年話題となっているA. Lovins⁽⁶⁾のSoft Energy Pathの議論である。小規模分散型で資本集約度の多い、できるだけフロー型の太陽エネルギー（直接・間接含めて）を利用したエネルギーシステムが、現存のハード・システムよりむしろ安価で長期的にも安定で環境へのインパクトも少い、とするこの

考えは、たしかに現システムの問題点を見事についている。もとより、太陽エネルギーの物理的ポテンシャルが日本の国内需要を満す大きさをもつからといって、それだけですべてがこのようなシステムで賄うとするのは幻想であろう。（本誌に既に掲載された鶴屋氏の論文⁽⁷⁾でこの点について殆ど論じられていないのは残念である）しかし、その発想の中に将来有効に生かされるものはいくつか見出しうる。

たとえば、家庭におけるエネルギー需要は、将来はエネルギー貯蔵技術が進めば、太陽熱でかなり充足される可能性がある。需要の大半は低温熱需要のため、その供給に大がかりな設備は必要としないし、また、電力も、電力用半導体とマイクロコンピュータの進歩により、従来と同程度の高品質の電力が小規模な自然利用型電源から供給することが可能であろう。そのため鍵は、太陽熱が時間変動の激しいエネルギー源であるため、これを如何に高効率安価に長時間熱あるいは電気形で貯蔵するかで、その進歩如何がこの分野の先行きを左右しよう。また、現状の都市構造は、集積のメリットを前提に集中化しており、自然エネルギー利用という立場からは決して好ましいものではない。我国の場合、農村地域にみられる如く、木造で通風がよく、木々に囲まれた家が夏期の高湿多湿にむいているが、現在の都市家屋はまさにその逆である。しかし、今後、都市の集積のメリットは、情報技術の発達と所得上昇に伴う人々の選好の変化によって、相当に低減されると思われ、より自然に即した（いわゆるpassiveな形での太陽エネルギー利用）分散型の居住形態が一般化する可能性がある。

ソフト・エネルギー・パスにからんだ別の一つの面白いアイデアは、Schweppeらの提唱する電力均衡制御（homeostatic utility control）⁽⁸⁾にも見出される。この概念は、従来からいわれる電力需要調整を思いきった形、すなわち電力系統の時々刻々の運営に市場原理を導入することによって行なおうとするものである。供給側は、一定レベル以上の需要の上昇に伴う供給コストの増大を、その時刻の価格として何らかの媒体を用いて需要者に通達し、需要者はその情報を用いて需要を調節する。この場合、一般家庭・産業の需要者は、それぞれの考え方にもとづいて、恐らくは自動化機器を用いて、需要を調節することになろう。

この考えは、需給バランスを価格に対する需給の正負の弾力性を用いて調節する、という自由主義経済原則を、電力という需要の時々刻々の、しかも事前予測

の難かしい対象にあてはめようとするもので、殆ど固定価格のシステムに慣れた需要者には、供給者の負担を需要者に転化するアイデアとして簡単には受容できないものかもしれない。しかし、エネルギー・システム全体としてみるならば、このシステムは、市場原理を用いてエネルギーのもつ効用をできるだけ高く維持しながら一しかもその効用の高さは需要者の判断にまかせて一需給を調節する、というきわめてのぞましい特性を有している。そのまゝの形態は無理としても、このアイデアのもつ思想を今後の電力システムの中にできるだけ生かしていく努力が必要であろう。

4. エネルギー・システム研究の今後

近年、長期的観点から一つの国・地域の総合的なエネルギー・システム像をえがこうとする研究が世界的にいくつかあらわれている。世界的な立場からのものとしては、数年前に行なわれた国際的なWAESプロジェクト⁹⁾つい最近終了した国際応用システム解析研究所 (IIASA) のHäfeleを中心とする研究¹⁰⁾などがあげられるが、我国に関してはこの種研究は必ずしも充分ではない。(もっとも、個別の問題や、マクロなエネルギー需給に関しては非常な数の研究が存在する)筆者らは、本年度より、文部省エネルギー特別研究の一環として、我国の今後のエネルギーシステムの長期的未来像を総合的に検討する研究プロジェクトをスタートしているが、これまで述べたような考え方を踏まえて、更に次の点に留意しながら検討を進めていきたい。

- 1) 過渡的なトランスファー・コスト、その経済成長への影響等、国民経済視点からみての feasibility.
- 2) 地域的な特性差。たとえば、北海道などの北部、裏日本のような日照の少い積雪地域、表日本の冬の日照の多い地帯などでは、エネルギー需要も、太陽熱利用の可能程度も大きく異ってくる。
- 3) 各エネルギー源の特性差。在来エネルギー源はともかく、石炭液化・核融合・太陽熱などの新しいエネルギー源は、コストのみならず、利用特性・環境へのインパクトなど総合的にみた特性の検討はまだ充分でない。エネルギー源構成の長期的最良選択の決定には、このような検討がぜひとも必要となる。

4) 新しいエネルギー源及び、システムに関する R D & D の段階の評価。

本文では、紙面の制約があり、エネルギー・システム構成上の諸問題について、一般的指摘にとどまり、具体的検討が殆どできなかったが、この点はあらためて別の機会に論ずること、したい。

参考文献

- 1) 各種エネルギーの生産、貯蔵、輸送、転換、利用プロセスの分析、電力中央研究所報告 Z08, 昭和54年。
- 2) Charpentier, J. P. (ed); A Review of Energy Models, No. 1, No. 2, IIASA, 1974-1975.
- 3) Manne, A. S., Richels, R. G., and Weyant, J. P.; Energy Policy Modeling: A Survey, Operations Research, Vol. 27, No. 1, pp. 1-36, 1979
- 3) Hoffman, K. C.; A Unified Framework for Energy System Planning, in Energy Modeling, IPC Science and Technology Press, England, 1973.
- 4) Hadson, E. A. and Jorgenson, D. W.; U. S. Energy Policy and Economic Growth, 1975-2000, Bell Journal of Economics and Management Science, Vol. 5, No. 2, pp. 461-514, 1974.
- 5) 齊藤; 「エネルギー収支分析」の有効性と代替エネルギーの評価, 東洋経済近代経済学シリーズNo.53, 昭和55年7月。
- 6) Lovins, A. 著, 樋屋, 室田訳, ソフト・エネルギー・ハス, 時事通信社, 1979
- 7) 樋屋浩紀: 日本におけるソフト・エネルギー・ハスの可能性, 「エネルギー・資源」Vol. 1-No. 1, pp. 15-22, 1980
- 8) New Electric Utility Management and Control Systems, 1979, MIT Energy Lab, Tech. Rep. No. MIT-EL-79-024
- 9) WAES: 世界エネルギーの将来1985-2000, 1977
- 10) Häfele, W. et al.: Energy in a Finite World, IIASA (to be published)