

特集

エネルギー経済・エネルギーシステム（その2）

新エネルギー技術の評価のためのエネルギーシステム分析

Energy System Analysis for the Evaluation of New Energy Technologies

小山 茂 夫*
Shigeo Koyama

1. はじめに

エネルギーは人類の活動を維持するための最も重要な因子の一つである。現在世界のエネルギー供給はその大部分を限りある化石燃料に依存しているが、将来のエネルギー供給の長期的安定化のためには各種の新エネルギー技術を開発し、導入することが必須である。

今後は全盛期の石油のように特定のエネルギー源のみでエネルギー需要の大部分をまかなうことは不可能と考えられ、需要に整合した形で各種のエネルギー源により協調的に供給することが必要と考えられる。そのためできるだけ多くの技術の芽を育て、開発を進めることが望ましい。

しかし新エネルギー技術の開発には多くの資金や人材と長い期間を要するため、すべての技術の開発を同時に進めることは困難でありそれぞれの技術の状況と重要度に応じて重点的、効率的に開発を行わなければならない。

そのためにまず各種の新エネルギー技術の現状と潜在的能力、将来の発展の可能性およびエネルギーシステムにおいて果し得る役割りを分析し、重要度を明確にするための評価を行うことが必要となる。

本文ではそのためのエネルギーシステム分析の方法の概要を述べる。

2. 新エネルギー技術の分析・評価の考え方

新エネルギー技術の評価に際してはいくつかの方法を、目的と範囲などに応じて使いわけ、補い合う必要がある。ここでは、筆者らが実際に評価を行う場合に採用している考え方の概要を述べる。

2.1 評価の進め方

新エネルギー技術としては、現在までに開発され実

際に導入が開始されたものや、現在あるいは今後の開発段階を経て導入される可能性のあるものを対象として考える。それらの新技術の重要性とそれに基づく研究開発の優先度の決定のための一つの有用な方法は、それらの技術が将来のエネルギーシステムに対してなし得る寄与を分析することである。

分析は個々の技術の固有の特性の調査から始めて、技術間の比較、将来のエネルギーシステムにおけるそれらの技術に対するニーズと果し得る役割りについて行う。分析のための環境と手順の概要を示すと図-1のようになる^{1)~4)}。

図は、(i)関連するシステムにおける将来の状況を予測あるいは想定し、(ii)そのようなもので存在する可能性のある技術について達成が予想される技術的レベルと規模を現状および動向に基づいて評価し、(iii)エネ

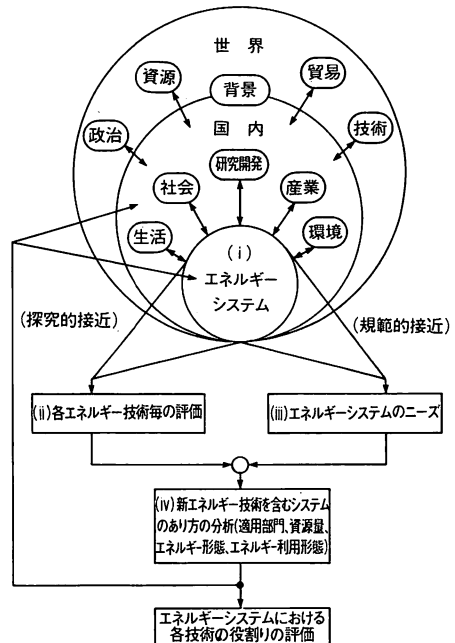


図-1 将来のエネルギーシステムにおける新エネルギー技術の評価のための流れ図

* 工業技術院電子技術総合研究所エネルギーシステム部主任 研究官

ギーシステムの需要と構成を設定し、(iv)両方の結果を組み合わせる新エネルギー技術が将来に果し得る役割りを分析し評価する、ことを示している。

2.2 研究開発段階の不確定要因の扱い方

技術評価を行う場合、その技術の研究開発過程に関する負担、開発成功の可能性の評価も重要である。

研究開発中の技術には一般に、過去の蓄積から今後の開発の進み方が予測でき技術的には開発達成が可能とみられるものと、大きなブレークスルーを必要とし革新的アイデアの入る余地があって開発成功の可能性、時期、達成レベルなどの予測が困難なものに分けることができる。またそれぞれ研究開発のための期間、所要資源に関して予測される情報の質が異なる。

後者のように研究開発段階で不確定要因を含み予測が困難な各種の新技術は統一的に扱うことができないので技術毎にそれぞれの特殊性を考慮に入れた個別の取扱いが必要になる。

そのような煩雑さを避けるための一つの手順は、始めは研究開発段階の詳細に言及せず、とりあえず各技術が開発されたものとして分析を行い、その結果において寄与の大きいとみられる技術を中心として詳細に調査を行うとともに、感度解析を加えることにより研究開発に関する目標値、予測値などを得ることである。

3. 新エネルギー技術の評価のための分析手段

3.1 エネルギーシステムモデル

「エネルギーシステム」の範囲をここでは一国の一次エネルギー供給から変換、貯蔵、輸送、最終需要までを含むエネルギー需給システム全体と考える。

そのようなシステムの構成要素は個々のエネルギー関連装置であるが、実際にはそれらの装置の数は極めて多いので、モデル化においてはまず種類、特性、他の要素に対する効果などを考慮して現実的レベルまで集約する。

次に、システムの状態を表す変数のうちある種のものを用意パラメータとして与え、他を変数として最適化法（線形計画法）によりシステムを最適化する数学モデル（最適化モデル）を構築する。

この最適化モデルは、将来のエネルギーシステムをモデル化したものであり、予め設定した条件と評価関数のもとで最適化することによってそれらの条件のもとでの望ましいエネルギーシステムのあり方が求められる。

最適化の結果により一次エネルギー供給、エネルギー

変換技術、および最終利用技術などとして採用すべきものと除くべきものとが判明し、将来のエネルギーシステム構成の望ましいあり方とそのようなシステム構成の実現に向けてなすべき施策、および新エネルギー技術の研究開発と導入の方策が明らかになる。それらの分析を通じて新エネルギー技術の評価が可能になる。

この種のモデルの草分けは K. C. Hoffma⁵⁾ のものであり、米国のエネルギー研究開発の進め方に関する分析に広く使われたが³⁾、その後多くの同様なモデルが開発されている⁶⁾。それらのうち、国際エネルギー機関 (IEA) においてエネルギー研究開発戦略策定⁴⁾ のために開発された MARKAL (Market Allocation より命名)⁷⁾ は、新エネルギー技術の評価の用途にとりわけ優れた機能をもっている。筆者らもその開発、改良に協力するとともに電子技術総合研究所においてもコンピュータプログラム化し、改良、発展をはかるとともに、各種の分析を行っている（わが国では他に日本原子力研究所においても MARKAL を実用化している）。

3.2 MARKAL モデルの概要

(1) モデル化の概要

エネルギーシステムモデルの構造は図-2に示すように、エネルギー供給側から変換過程などを経て最終需要に到るエネルギー媒体の流れを表すネットワークにより表現される。図中の各ブランチ（枝）はエネルギー技術（装置）に対応している（実際の分析ではさらに細分化されている）。それぞれの技術には特性データ（効率、コスト、運転特性、制約など）が与えられ、最終需要には用途別に一定間隔（通常5年）でエネルギーサービス量（エネルギー利用により受ける恩恵、例えば暖房の場合はデグリー・デイ、輸送の場合は人・kmとかトン・kmのような量に相当し、一般には最終利用装置へのエネルギー入力にその装置の効率を乗じた値）が設定される。これらの入力から作成されたデータに基づく最適化計算により、全対象期間にわたって最終需要を満たすエネルギー供給方式のうち、評価基準からみて最も望ましい解が求められる。

通常1期5年間として、9期45年間を全対象期間とし、各期の中央の年（ここでは基本年と呼ぶ）によりその期を代表する。電力、最終需要については1年を6季節・時間帯（夏、冬、中間季の各日中と夜間）、熱供給については3季節に分けて扱っている。

(2) 特徴と性能

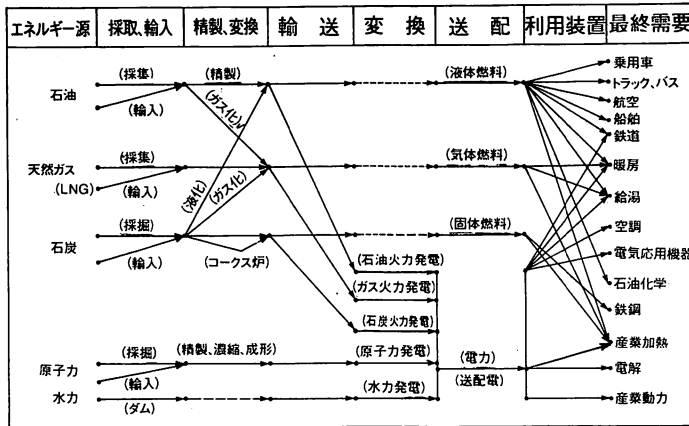


図-2 エネルギーフローネットワーク説明用概念図

MARKALの構造上の特徴は次のようである。

- i) 線形計画法を用い、時間に関し多段階構造をもった長期的同時最適化モデルである。
 - ii) エネルギーシステムのみを対象としており、他のシステムとの関係は外生的な条件として与える。
 - iii) 最終エネルギー需要は用途別に基本年毎に設定され、モデルはそれを満足するように解を求める。
 - iv) エネルギー技術については設備導入量、現有設備容量、運転量、定期点検保守容量などを独立な変数としている。
 - v) 季節・時間変動の影響の大きな電力、熱供給システムに関するモデル化は他に比べ詳細である。
- これらにより、性能的には次のような特長がある。

- i) 長期間を対象とするためその間のエネルギーシステム構造の望ましい時間的推移が求められる。また全期間にわたり同時に最適化するので、ある時点では不利でもその後の準備過程として必要な技術は前以って導入される。原子燃料のリサイクルなどのモデル化も容易になる。(これらのことを静的モデルで行うのは困難である)。
- ii) 各技術に対して設備容量の他に運用に関する独立変数が基本年毎に1~9個与えられているので、導入量のみでなく年間を通じての運用方法に関する検討も可能である。

(3)主な制約式

①エネルギー媒体需給バランス式

種類別エネルギー媒体毎に、基本年毎に、電力は1年間を6季節・時間帯に、熱供給は3季節に分け、その他一般エネルギー媒体は1年間を一括して、需給バランスを確保するための式が設けられる。

②設備容量式

技術毎に、基本年毎に、利用可能な設備容量を、初期時存在したもののうちの残存分、その時点までに新設され耐用期間中にあるもの、およびその時点に新設されたものの総和として表わす式である。

③設備利用制約式

技術毎に、基本年毎に、設備容量のうち定期点検保守、故障などの強制停止などを除き運転可能量を規定する式である。

④ピーク負荷発電予備力制約式

基本年毎に、電力系統全体として年間の最も需要の高い季節・時間帯に生じる最大ピーク負荷に対して十分な設備容量を確保することを規定する式である。地域熱供給プラントについても同様な式がある。

⑤ベース負荷運転制約式

発電プラントのうち、運転特性あるいは経済的理由により昼夜一定負荷運転(すなわちベース負荷運転)をしているものがある。しかし系統負荷は常に変動しており需給バランスを維持するため常にある割合以上の負荷追従運転の可能なプラントを含んでいなければならない。それを規定するのが当式であり、ベース負荷運転プラント以外のプラントが少くなる夜間についてベース負荷運転プラントの発電量が全発電量に対し一定比率(85~90%程度)を越えることができない、という形式で表わされている。

⑥最終需要制約式

基本年毎に、各最終需要へ供給する最終利用装置からのエネルギーサービスの和は、予め設定された需要値を満たすことを規定する。

⑦成長制約式

技術毎の設備容量または種別一次エネルギー消費量の成長速度の上限を規定する。

⑧エネルギー媒体累積消費量制約式

対象期間中の種別一次エネルギー累積消費量を、設定した上限値内に規定する。

⑨比率制約式

利用者が任意に追加できる等式または不等式の制約式で、基本年毎の任意の変数群の一次式である。

⑩目的関数式

目的関数式には、総システムコスト、重み付け累積一次エネルギー消費量、種別累積排出物量、これらのトレードオフ関数、などが用意されている。最適化ではこれらの関数を最小化する。

(4)分析の進め方

分析の基本的手順は図-3のようである。現在から将来にかけての主要前提条件（国際状況、人口の増加、経済成長など）を設定し、その条件のもとで一次エネルギー取得可能量上限、価格、最終エネルギー需要、技術特性と制約、などのデータを設定し、それらを入力データとしてマトリックスジェネレータにより線形計画用行列データを作製し、それを用いてMPS/X（数理計画ソフトウェア）により最適化計算を行い、その結果をレポートジェネレータにより処理して表や

グラフ形式の出力を印刷する。

このような手順を前提条件、主要パラメータ、評価関数などを変更して繰り返し、それらの結果から所期の分析情報を求める。

4. 新エネルギー技術の評価方法

前節で述べたエネルギーシステムモデルを用いる新エネルギー技術の評価のための分析は、各技術が将来のエネルギーシステムにおいて果しうる役割りを定量的に求めるものである。新技術を評価する因子は数多くあり、それらのうちのいくつかは定量化困難であるために現在の手法だけで完全な分析が行えるとは言い難いが、以下に述べるように評価に有用な多くの情報を提供しうる。

4.1 新エネルギー技術の導入量

最適化計算の結果得られた技術の導入量（設備容量あるいはエネルギー出力）は、その技術の市場競争力とシステムへの調和性（その技術への入力が存在し、かつ出力に対する需要があること）を表わし、技術評価の重要な指標の一つである。

さらに導入量をいくつかのケースの計算結果の間で比較すれば、各技術がシステムに受け入れられる条件を把握できる。また導入可能量の上限設定値と計算結果における導入量を比較すれば、その技術の競争力と市場ニーズに対する余裕がわかる（計算結果が上限に達していれば競争力が強く、達していなければ競争力が弱い場合か、競争力は強いがニーズがその上限値に達するほどはない場合である）。

4.2 技術の競争力

計算結果において技術が導入されていても、かろうじて入っている場合と余裕をもって入っている場合とがある。また導入されていない場合でも、もう少しで入る場合と全く不利で入る可能性のほとんどない場合とがある。これらの指標を与えれば技術の比較が行え、競争力の不足する技術に競争力をもたせるための方策を探究するのにも役立つ。

そのための有効な指標の一つは、最適化計算の結果得られた技術毎の容量を表わす変数に対するレデューストコスト (reduced cost) である。これは最適解において容量変数があるとりうる値の範囲の上限または下限に張りついている時、その限度を広げて容量を一単位増加または減少させた時目的関数がどの位変わるかを表わしている。すなわち競争力の強い技術（導入により目的関数を改良できる技術）の場合は、弱い技

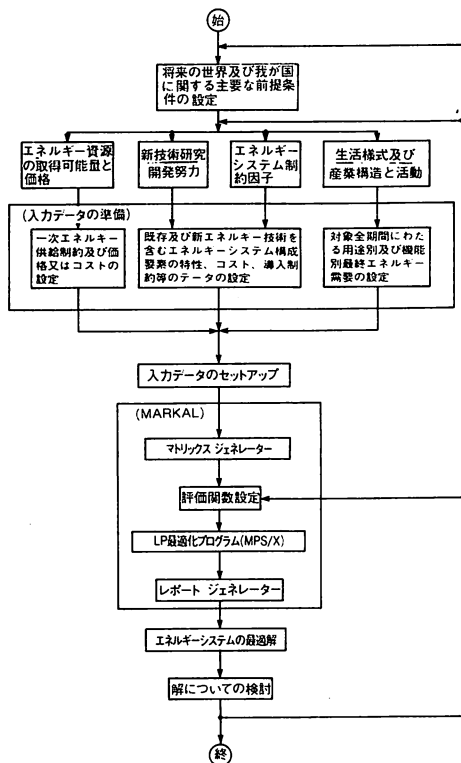


図-3 MARKALによるエネルギーシステム分析手順概念図

術（上限までかろうじて入っている技術）に比べて上限値に張りついた時に負符号でより大きな絶対値をもつ。すなわち目的関数を最小化する解を求める時、解の改良は目的関数を減少させることになる。上限に達していないもの（マージナル技術）は達しているものに比べて競争力が弱いといえるが、全く入っていないもの（ゼロの下限に張りついたもの）はさらに弱い。下限に張りついている技術の場合には、導入量を増加させようとするとも目的関数が増加（悪化）してしまう。このように下限に張りついた変数のレデュースコストを比較した場合に、正符号で絶対値が大きいほど導入するのが好ましくない技術（市場競争力が弱い）であると判断できる。

なお、出力エネルギーに関する技術の競争力は、利用率が上限に達しているものについては、容量導入の競争力に適切な係数を乗ずることにより求めることができるが、利用率が上限に達していないものや、発電におけるピーク供給プラントなどについてはこの方法を直ちに適用することはできない。

4.3 新技術導入の効果

新技術は、既存技術だけで将来のエネルギーシステムを構築する場合に比べてシステムの状態を改良できると期待される場合のみに導入の意味がある。導入による利益の程度に応じて今後の研究開発への動機が強められたり弱められたりすることになるので、導入の効果は新技術の評価における重要な指標である。

評価指標として計算対象期間にわたる総コスト、エネルギー資源累積消費量（種類別、輸入・国産別、総量など）、環境への排出物の量などがある。これらは新技術の導入による経済的節約効果とか、石油輸入量の削減効果などのように表現される。

導入の効果の最も直接的な計量の方法は、検討の対象の技術が入る場合と入らない場合の二つのケースについて最適化計算を行い、結果における両者の評価指標の差を求めることである。同様なことを導入時期を変えたいくつかのケースについて行えば、導入効果の時期に関する変わり方がわかり、技術開発の進め方（繰り上げるべきか、遅らせるべきかなど）を検討するのに役立つことができる。

4.4 新技術の役割りの評価

以上のような各技術の導入量、競争力、導入効果をエネルギーシステムの時間的変遷などを背景として考察すれば、将来のエネルギーシステムにおける各技術の役割りが明らかになる。

上記のいずれの評価指標も量の大きい技術が重要な役割りを果たしていると見ることは妥当であるが、通常の量が小さくても欠くことのできない役割りをもっている技術もありうる。例えば重要な役割りを果たすと期待されている技術が何らかの理由で導入が制限される場合、代って導入される技術がそれにあたる。このような技術は通常の計算ケースでは入りにくいだが、特殊な計算（厳しい条件のケース）では重要な役割りを果たことになる。特に供給安定性を重視する場合などに、そのような技術を準備しておく必要がある。このような観点からの評価も必要である。

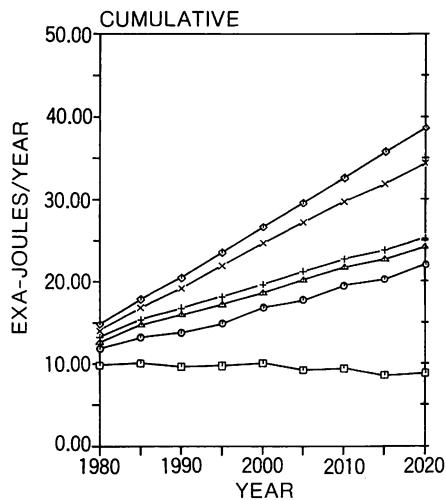
5. わが国についての分析の例^{10) - 11)}

前述の MARKAL モデルを用いて行った計算結果の例をここに紹介する。ここでは個々の技術の評価についてはふれず、それらの可能性を計算例を通じて述べる。

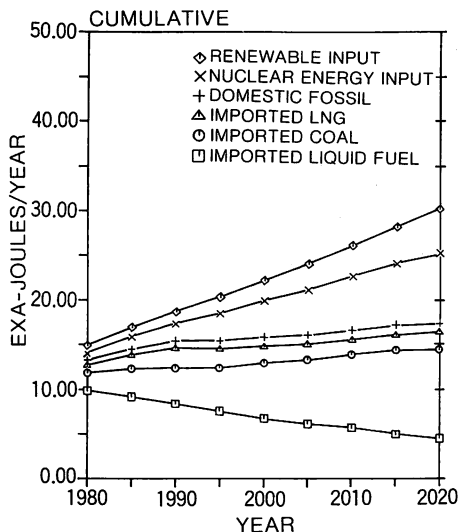
わが国のエネルギーシステムについて、1978年から2022年までの45年間を対象とし、1期を5年として9期に分けて、一次エネルギー源20種（他に再生可能エネルギーあり）、最終需要36種、最終利用装置158種、発電または熱供給プラント33種、その他エネルギー変換処理装置75種をもつシステムをモデル化すると、式の数5351、変数の数6736、非零要素数43,410からなる行列を扱う線形計画問題となる。これを FACOM-M-200 計算機で最適化計算すると最適解を得るための CPU タイムは、初期状態より開始して50~100分、他の計算ケースの最適解より開始して10~30分を要する。

1980年1月1日を貨幣価値の基準時点として、1980年平均米ドルで表示し、価値換算の割引率を6%/年とする。輸入燃料価格（1980年を1.0としたCIFの実質値）として、原油は高価格シナリオで2000年2.0、2020年2.5（中間は内挿、以下同じ）、低価格シナリオで2000年1.5、2020年2.0；石炭は高価格シナリオで2000年2.75、2020年3.5、低価格シナリオで2000年1.57、2020年2.14（海外液化用石炭についてはFOB価格を用いる）；LNGは原油と比べ熱量あたりの価格が10%程度安い、と設定する。経済成長およびそれに対応する需要については高、低両シナリオを設ける。

最終需要については、産業部門のうちエネルギー集約産業の伸びは少なめに、高付加価値製造業および第3次産業の伸びは大きめにする。また民生部門の伸びは大きめに、運輸部門の伸びは小さめにしている。



(a)低燃料価格・高成長シナリオ



(b)高燃料価格・低成長シナリオ

図-4 一次エネルギー供給の構成 (コスト最小化)

図-4は基本的2シナリオについて、総コストを目的関数として最適化した時の一次エネルギー構成を示している(輸入石炭には海外液化用が含まれている)。これらの結果における主な傾向は次のようである。

一般炭は産業用および発電用で増加している。石炭液化は海外および国内の両方式をモデル化しているが、海外液化は受け入れられ、国内液化は不利となっている。原子力の大部分は発電用であり、全期間を通して軽水炉が大宗を占め、新型転換炉が補完的に、高速増殖炉が末期頃に入ってくる。再生可能エネルギーとしては、水力発電、地熱発電、太陽熱直接利用などが有利に受け入れられ、太陽光発電もコストの減少に伴い

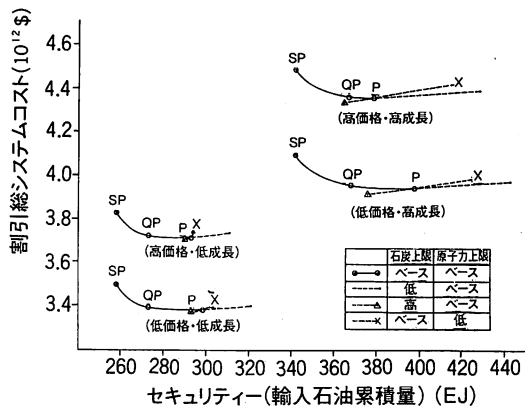


図-5 コスト・セキュリティ・トレードオフ 曲線

受け入れられるが、一般に設備費が高く稼働率の低い技術は不利である。

図-5は各種のシナリオにおけるコスト・セキュリティ・トレードオフ曲線を示している。セキュリティ(供給安定性)指標として累積石油輸入量を取り、図中のP, SP, QPは目的関数がそれぞれ、コスト、セキュリティ、およびコストとセキュリティの和であることを示す。セキュリティ指標(すなわち輸入石油)を減少させようとするとコストが上昇する。

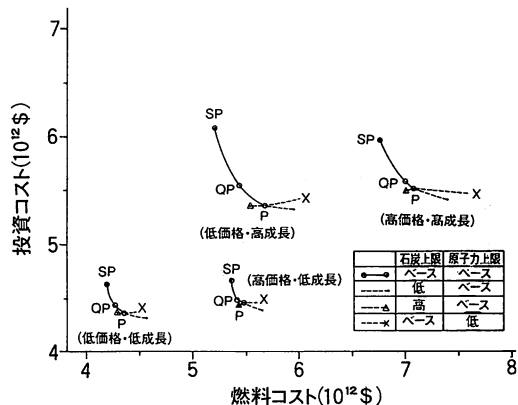


図-6 シナリオによる燃料コストと投資コストの変動の関係

図-6は、図-5に対応して各シナリオにおける燃料コストと投資コストの関係を示す。ここにおけるコストは45年間の単純和であり価値換算を行っていないので厳密さを欠くが、輸入石油を減らすことにより燃料コストが減少する反面、石油の代替として石炭、天然ガスが上限に張りつき、次に設備費の高い技術が導入されて、投資コストが増大するという全体的傾向が読みとれる。

ここでは全体的特徴について述べたが計算結果には前節で述べた評価指標に関する情報が含まれており、それらをシステム全体の中での各技術の評価や、各技術の重要度を向上させるための研究開発の方策の検討などに役立てることができる。

6. おわりに

エネルギーシステムモデルは新エネルギー技術の評価に必要な定量的分析情報を得る手段として有用である。本文では筆者らが使用しているモデルの概要とそれに基づく新エネルギー技術の評価方法を述べた。

さらに評価の完全を期するために、モデルの改良に加えて、定量化困難な因子を評価に取り込む研究を進めている。それらを含めて、技術の具体的な評価の結果については別の機会に報告したいと考えている。

本研究はサンシャイン計画およびIEAの国際協力プロジェクトのもとで行われている。多くの関係機関の各位には御支援、御協力いただいている。特に電子技術総合研究所の伊原征治郎氏、柏原斌紀氏、遠藤栄一氏には本研究に関し直接御指導あるいは御協力いただいている。これら各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 若松清司, 小山茂夫; 将来のエネルギーシステムに関する一考察 (新エネルギー技術の位置づけについて), 昭和52年電気学会全国大会, No.1671
- 2) 小山茂夫, 柏原斌紀; 新エネルギー技術評価のためのエネルギーシステム分析, 電総研調査報告第203号, 1980
- 3) A National Plan for Energy RD & D, Creating Energy Choices for the Future, ERDA-76, 1976
- 4) A Group Strategy for Energy RD & D, IEA, 1980
- 5) Hoffman, K. C.; The United States Energy System - A Unified Planning Framework, Doctoral Thesis for Polytechnic Institute of Brooklyn, 1972
- 6) 若松清司, 小山茂夫; エネルギーシステム最適化モデルに関する検討, 電総研彙報, 44巻5, 6号, 1980
- 7) Fishborne, L. G., Giesen, G., Abilock, H., et al.; User's Guide for MARKAL (BNL/KFA Version 2.0), A Multi-Period, Linear-Programming Model for Energy Systems Analysis, BNL & KFA, 1982
- 8) Müller, M., Maher, K. J. (ed.); Summary Report on Technology Characterizations, IEA Energy Technology Systems Analysis Project, KFA Jülich 1982
- 9) 小山茂夫, 柏原斌紀, 遠藤栄一; エネルギーシステム分析のためのエネルギー技術特性データ調査, 電総研彙報, 47巻, 4号, 1983
- 10) 小山茂夫, 柏原斌紀, 遠藤栄一; MARKAL によるわが国のエネルギーシステムの分析, 電総研彙報 (1983, 投稿中)
- 11) Energy After Eighties, A Cooperative Study of the IEA (1983, in preparation)

1) 若松清司, 小山茂夫; 将来のエネルギーシステムに関する

話の泉

太陽エネルギー自動車でオーストラリア横断に成功

この太陽エネルギー自動車「静かな勝利者号 (The Quiet Achiever)」は、細い鉄パイプを組立てた台車に、ファイバークラスの車体を乗せ、2m×3mの天井パネルに720個の太陽電池が並べてある。車体にはバッテリーとモータを搭載し、車輪にはレース用自転車のタイヤを取付けた4輪車で、全重量わずかに125kgである。

オーストラリアでは真夏にあたる1982年12月19日から1983年1月7日までの20日間をかけて、西

岸のバースから東岸のシドニーまで4,130km(ほぼ日本の稚内から那覇に相当)のオーストラリア大陸横断に成功した。平均走行速度は25km/時、最高速度65km/時で、心配された急峻なビクトリア山脈地帯の難所もなんとか乗り越えた。

ゴールのシドニー オペラハウスの前には約2,000人の観衆がつめかけ、エネルギー開発担当大臣も出迎えて、この快挙を祝した。

(National Geographic Magazine, 1983年11月号, p.600-607 より抜粋)