

バックカスティング法によるわが国のエネルギーシステム分析 Energy Systems Analysis of Japan by using Backcasting Approach

遠藤 栄一 独立行政法人 産業技術総合研究所 主任研究員

ENDO Eiichi, National Institute of Advanced Science and Industry, Senior Research Scientist

アブストラクト

2100年という超長期のエネルギーシステム分析も、現状を延長した技術やエネルギーによるものが一般的である。その一方で、核融合、宇宙太陽光発電、メタンハイドレート採掘など、現在とは全く異なるエネルギーシステムを実現する可能性を有する技術開発も進められている。本研究は、現状の延長で将来のエネルギーシステムを予測するのではなく、今世紀末に水素社会が実現できていると仮定し、そこからバックカスティングの考え方で現在までさかのぼり、21世紀の中期にどのようなエネルギーシステムを実現しておく必要があるか分析することを目的とする。エネルギーシステム分析には、線形計画法を用いた最適化形のエネルギーシステムモデルである MARKAL を用い、2100年までのわが国のエネルギーシステムをモデル化する。特に水素社会の実現で大きく変わると予想される運輸部門に焦点を当てて、エネルギーシステムの姿を明らかにする。

Abstract

Energy systems analysis, even if it covers very long-term such as toward 2100, is usually assumed future technologies and energies based on extrapolation of present one. On the other hand, R&D of technologies which have possibility to realize new energy system other than present one, such as nuclear fusion, space photovoltaic system, methane hydrate, is ongoing. The purpose of this study is to analyze what kind of energy system we should realize in the middle of this century not by forecasting energy system in the future based on the present one, but by using Backcasting approach assuming hydrogen economy will be realized by the end of this century. In this analysis MARKAL (Market Allocation), which is one of the energy system models based on multi-objective linear programming, is used to model energy system of Japan until 2100. The future energy system will be made clear especially focusing on the transportation sector, which seems to be changed drastically by realization of hydrogen economy.

1. 研究目的

MARKAL モデルを用い、2100年までのわが国のエネルギーシステムをモデル化する。モデルの中では、2100年に、エネルギーとして電気・熱・水素のみを使う社会が実現できているものとして、エネルギーシステムを描く。そして、将来から現在へ遡ることによって、現状から新しいエネルギーシステムへ移行していく際の中間地点である2050年のエネルギーシステムの姿を明らかにする。以上の分析を通して、例えば、いったん化石燃料から水素を製造するインフラを整備した後、化石燃料以外による水素製造へ移行するのか、化石エネルギーを介さない水素ネットワークを部分的に作り、それを拡大していくのかといったエネルギーシステムに関する将来の選択に対して、システムコストや二酸化炭素排出量、主要技術の実現時期やコスト、効率などの異なる条件に対する分析結果を提示し、それらから何らかの有用な示唆を得ることを本研究の目的とする。

2. 研究経過

本研究を開始する時点で、2100年までのエネルギーシステム分析が可能な MARKAL(Market

Allocation)のプログラム一式を入手・改良済みであり、かつ2050年までのわが国のエネルギーシステムのモデル化は完了し、乗用車部門に着目した分析を実施していた。ただし、その後、1990～2000年度のエネルギー統計が大幅に見直されたことや、「2030年のエネルギー需給展望」が発表されたことをふまえて、これらのデータ・ビジョンに基づくとともに、さらに2100年までのエネルギー需要や主なエネルギー技術の導入シナリオを新たに作成してわが国のエネルギーシステムのモデル化を進めることにした。

一方、2100年までのエネルギーシステムを対象とすると、現在、長期的な視点で研究開発が進められている種々の技術も実用化され、導入可能になることは十分予想される。このような革新的かつ不確定性の高いエネルギー技術について、あらかじめ調査しておくことにした。

併せて、本研究のような水素経済に着目し、また MARKAL 等のエネルギーシステムモデルを用いた2050年ないし2100年までの(超)長期のエネルギーシステム分析に関する研究動向についても、国内外で情報収集に努めた。

3. 研究成果

3.1 エネルギー技術に関する調査結果

水素製造に関連して、水素経済への移行過程において、エネルギーシステムの姿に大きな影響を及ぼす可能性のあるエネルギー技術として、核融合発電、宇宙太陽光発電、高温ガス炉、メタンハイドレート、および北東アジア天然ガスパイプラインがあげられる。これらの技術は、実現可能時期やコスト、導入可能量に関する不確実性が高い。これらの技術の、特に実用化時期に焦点を当てて調査を実施した結果は、以下のとおりである。

核融合発電に関しては、「原子力委員会核融合専門部会において早期実用化路線を検討。研究加速により 2034 年に発電実証をめざす」とされており、「21 世紀後半に実用化」することが目標となっている。一方、新聞報道では、「実用化は早くして今世紀末」とみている。また、「実証発電炉の運転が成功裡に達成されるのは、ITER の運転開始(2015 年予定)からおよそ 20 年後であろうといわれている。財政的、手続き的な遅延があれば、この時間スケールはおよそ 40 年程度に延びるかもしれない。」との OECD/IEA の見通しもある。

宇宙太陽光発電に関しては、2030-2040 年に 1GW の商業システム(Commercial system)を開発するとのロードマップが描かれている。高温ガス炉に関しては、HTTR 水素製造システムの研究開発において、実証試験開始が 2008 年度頃、また、産業界の実用化計画として、プロセス熱利用高温ガス炉のパイロットプラントが 2020-2025 年度、実用炉は 2025-2030 年度とされている。メタンハイドレートに関しては、「メタンハイドレート開発計画」において、2012-2016 年度に商業的産出の準備をするとされている。北東アジア天然ガスパイプラインに関しては、パイプライン網の構想とともに、2020 年を目標年次(target year)としたビジョンが示されている。

以上は実用化時期の目標であるが、デルファイ法による技術予測もあり、それでは核融合発電炉および宇宙太陽発電システムの開発が 2031 年以降、メタンハイドレートの採掘技術の実用化が 2022 年という結果が得られている。以上のエネルギー技術の実用化時期をまとめると、図 1 に示すようになる。

一方、これらのエネルギー技術のコストに関しては、核融合発電に関するものや、天然ガスパイプラインに関するものがある。ただし、コストは不確実性が極めて大きいいため、導入可能になる価格が実現されるものとして、その実現可能時期に関する不確実性のみ、モデル上で感度解析を実施することを考えている。

3.2 エネルギー需要シナリオ

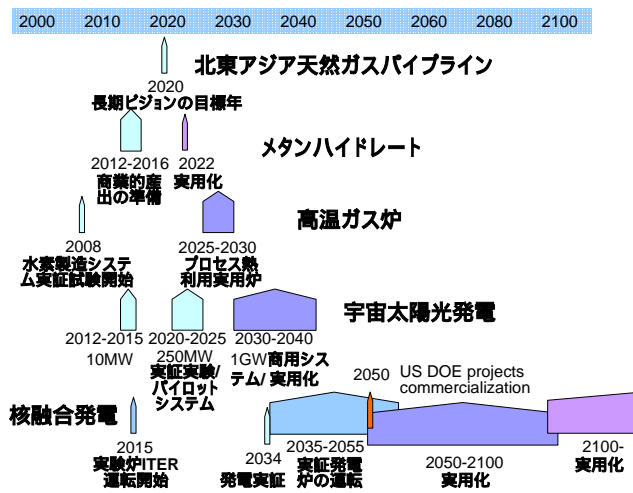


図 1 エネルギー技術の実用化時期

MARKAL では、分析に当たって、あらかじめエネルギー需要を設定する必要がある。わが国のエネルギー需要に関しては、2030 年までは、「2030 年のエネルギー需給展望」を参照する。その後の 2100 年までは、人口変化率と人口一人当たりの最終エネルギー消費の変化率とに基づく方法を適用する。人口に関しては、2100 年までの将来人口推計(中位, 高位, 低位)がある。将来、わが国の人口はピーク時に比べ大幅に減少すると予測されていることから、移民の受け入れが検討される可能性もあり、産業構造や省エネルギーの進展などと合わせたシナリオライティングは有効である。図 2 は、以下の分析における最終エネルギー消費のシナリオで、2030 年以降の人口一人当たりの最終エネルギー消費の増加率が、「2030 年のエネルギー需給展望」のレファレンスケースでの 2000 年から 2030 年までの平均増加率(0.35%/年)と同じとし、人口を人口推計の中位推計とした場合である。ピーク時と比べた 2100 年における減少の程度は、人口がほぼ 1/2 になるのに対して、最終エネルギー消費の方はこれよりゆるやかである。

各需要部門の最終エネルギー消費は、「2030 年のエネルギー需給展望」で示されている 2030 年までの各種指数, 産業: 鉱工業生産指数, 家庭: 世帯数, 業務: 床面積計, 旅客: 輸送需要人キロ, 貨物: 輸送需要トンキロを、これらの指数と人口との相関に配慮して 2100 年まで延長し、各需要部門に割り振る。仮定した各需要部門の指数を図 3 に示す。

3.3 2100 年の水素経済

分析にあたっては、バックカスティングにおける目標として、2100 年にわが国において実現すべき水素経済をモデル上で規定しなければならない。これは、基本的には、電気、熱のほか、化

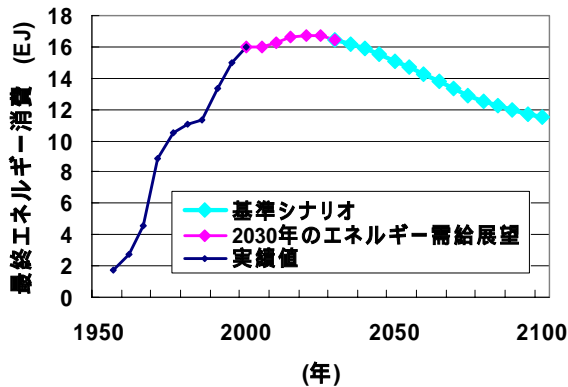


図2 最終エネルギー消費のシナリオ

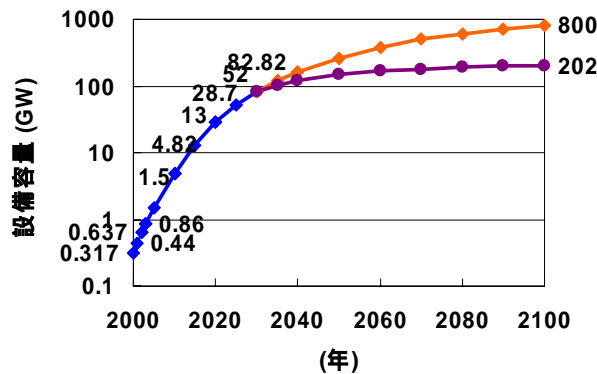


図4 仮定した太陽光発電の設備容量

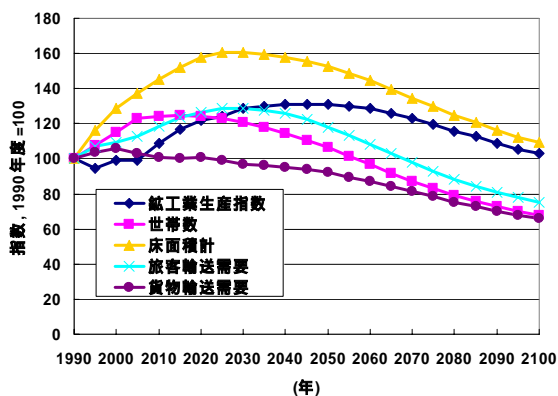


図3 仮定した各需要部門の指数

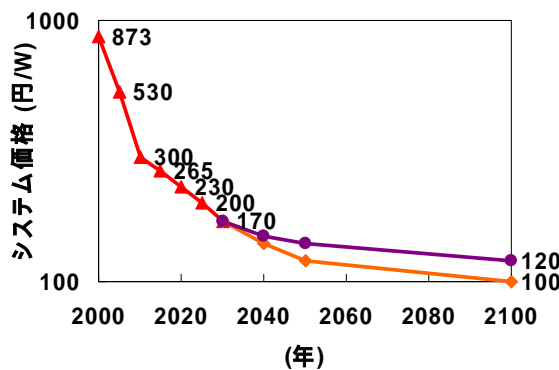


図5 仮定した太陽光発電システムの価格

石燃料によらない水素が燃料として利用されるエネルギーシステムと考えることができる。しかし、製鉄用のコークス、化学工業用原料・アスファルト・潤滑油等の非エネルギーについても、代替可能か、代替することが適切かについては、十分調査、確認できていない。また、二酸化炭素の回収隔離を考慮する場合には、都市ガス(天然ガス)をオンサイトで水素に改質するのではなく、大規模プラントで集中的に水素を製造する方が有利であるが、この場合、需要端までの水素の輸送が問題となる。都市ガスと水素とでは、体積当たりの発熱量が異なり、水素の混入量も一定割合以下に抑える必要があるので、現状の都市ガスの配管網をそのまま利用することはできない。

3.4 分析方針

以上の検討をふまえ、本分析では非エネルギー用石油や製鉄用石炭等に関しては、現状どおりとする。これによって、化石燃料の供給をゼロにすると可能解が得られなくなることから、二酸化炭素の排出を可能な限り削減する低炭素型のエネルギーシステムを実現することとし、乗用車部門の車種構成を求める。また、3.1で調査したエネルギー技術に関しては、電力や天然ガスを豊富かつ安価に供給する技術として位置づけ、便宜的に、

既にモデルに組み込んでいる太陽光発電と国産天然ガスとで代表させて取り扱う。

太陽光発電は、NEDOのロードマップPV2030など、2030年までの目標に基づいて、次の二つの導入量の上限值を与える。一つは2100年の導入量上限値が、わが国の物理的限界潜在量ともいえる8000GWの1/10、800GWとするもの(PV Highシナリオ)、他の一つは2030年の実際の潜在量といえる202GWにとどまるとするもの(PV Lowシナリオ)で、それぞれ2100年時点での価格を100円/W、120円/Wとする。後者は現在の研究開発の目標のうち最も低価格のものであり、前者は技術的な見通しは、現段階では得られていない。以上を図示すると、図4,5のようになる。

天然ガスに関しては、日本向けLNG価格と、パイプラインで供給されているヨーロッパ向け天然ガスとの価格比がおおむね1:0.85~0.9であること、およびわが国の場合は海底パイプラインになることを考慮して、価格比0.9で2050年以後導入可能になるものとする。炭素税率に関しては、現在、環境省の具体案である2400円/t-C(6ドル/t-CO₂)、およびこの10倍の24000円/t-C(60ドル/t-CO₂)に設定する。

3.5 分析結果

分析の結果得られた乗用車部門の車種構成を図 6, 7 に、エネルギーシステム全体からの二酸化炭素排出量を図 8 に示す。

図 6 は、炭素税税率 24000 円/t-C，太陽光発電 PV High ケースの場合で、乗用車部門においては、在来型のガソリン、LPG、ディーゼルエンジン自動車から、ガソリンハイブリッド自動車を経て、水素燃料電池自動車に移行しており、2030 年以降は基本的には燃料電池自動車だけになる。さらに、化石燃料によらない安価な電力が大量に供給可能になると、それで燃料電池自動車用の水素を製造するのではなく、電気自動車に直接利用するという選択が起こる。このような選択は、PV Low ケースでは全くみられず、また、炭素税税率が低くなるにしたがって、電気自動車が選択される時期は徐々にずれ込む。図 7 に示すように、炭素税税率 2400 円/t-C の場合には、太陽光発電 PV High ケースでも、電気自動車の導入は 2100 年になってしまう。

一方、水素燃料電池自動車がガソリンハイブリッド自動車に代わって導入され始める時期は、炭素税の税率によって変わり、24000 円/t-C の場合は 2025 年のところ、2400 円/t-C では 2030 年になる。ただし、2050 年前後で、水素燃料電池自動車がシェアのほとんどを占めることには変わりはない。

4. 今後の課題と発展

本研究の本来の目的は、バックカスティング法を用いた分析を実施することであったが、予定の期間内では、この目標に到達できず、バックカスティングによる分析は今後の課題として残ることになった。しかし、それを実施するための指針は得られた。

すなわち、図 8 に見られるように、図 2 で与えているエネルギー需要では、二酸化炭素の排出量は、1990 年比で 30% 程度にまでしか削減することができない。当初目標としていた化石燃料によらない水素社会の実現、あるいは二酸化炭素排出を 1990 年比 25% 以下にまで削減する低炭素社会を実現するためには、化石燃料以外への転換を不可能としている産業部門に抜本的な省エネルギー技術を導入したり、それらを海外に移転させるなど、さらに踏み込んだ技術オプションや需要シナリオを作成して、分析を実施する必要があることが明らかになった。

本分析は、水素エネルギーロードマップの妥当性を検証する上でも重要であり、水素関連技術のデータを見直すなど分析の完成度を高め、将来のエネルギー技術開発の指針を提供できるよう、さらに研究を進展させていきたいと考えている。

5. 発表論文リスト

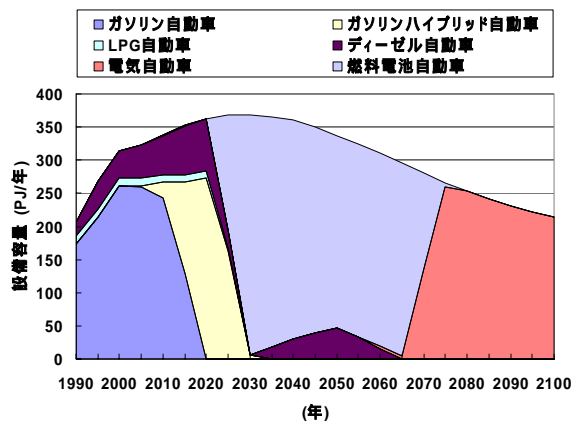


図 6 乗用車部門の車種構成 (PV High, 炭素税税率 24000 円/t-C ケース)

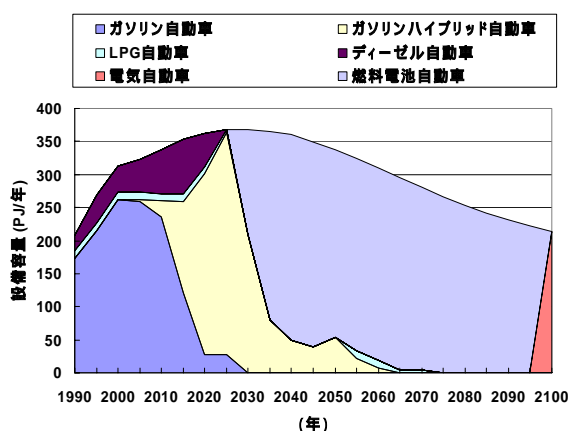


図 7 乗用車部門の車種構成 (PV High, 炭素税税率 2400 円/t-C ケース)

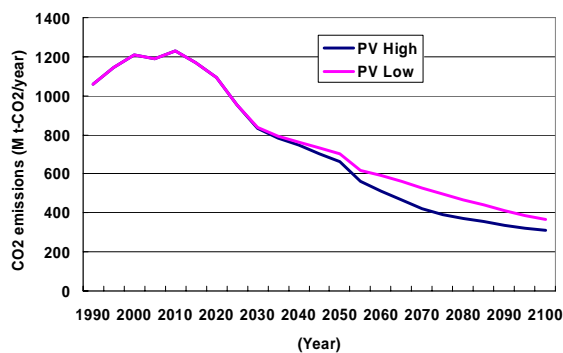


図 8 二酸化炭素排出量

- 1) Endo, E.: Long-term energy systems analysis of Japan based on Backcasting approach, Proceedings of the World Renewable Energy Congress VIII, (September 3, 2004)
- 2) 遠藤栄一: 水素経済に向けたわが国の超長期エネルギーシステム分析のための検討, エネルギー・資源学会第 21 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, (2005 年 1 月 27 日)