

<特集>

エネルギー新時代に向けて

A Step Toward Improvement of Energy and Environment

笠原 三紀夫

京都大学大学院エネルギー科学研究科* 教授

MIKIO KASAHARA

Graduate School of Energy Science, Kyoto University

1 はじめに

20世紀,特に第二次世界大戦後の20世紀後半には,科学技術はかつて経験したことのないめざましい発展をとげ,例えば,医療の進歩は人間の寿命を飛躍的に伸ばし,交通機関の発達も移動空間を飛躍的に広め,行動範囲を地球の隅々にまで拡大し,またコンピュータ・情報通信機器の発達は,莫大な計算を正確かつ超短時間に行い,膨大な情報を収集・処理するとともに,瞬時に世界中の人々と情報の共有や交換を可能とした¹⁾。

本稿では,最初に科学技術とエネルギー問題・環境問題について概観し,次にエネルギー新時代に向けての科学技術について述べる。

2 科学技術の進展とエネルギー問題・環境問題

20世紀の科学技術の進展により,経済・産業は急速に発展し,人々,といっても主として先進国を中心とした人々であるが,は物質面での豊かさを満喫し,便利で快適な生活を享受してきた。しかしながら,20世紀の象徴ともいえる科学技術の進展や経済の急成長,また物質的な豊かさは,大量生産,大量消費,大量廃棄を前提としたものであり,それはFig.1に示したように,エネルギーの大量消費とともに,地域の環境汚染や地球環境の破壊,資源の枯渇,またごみ量の大量発生など,負の遺産をももたらした。

科学技術,とりわけコンピュータ技術は,原子力発電や宇宙開発など巨大科学に不可欠であり,それらの推進

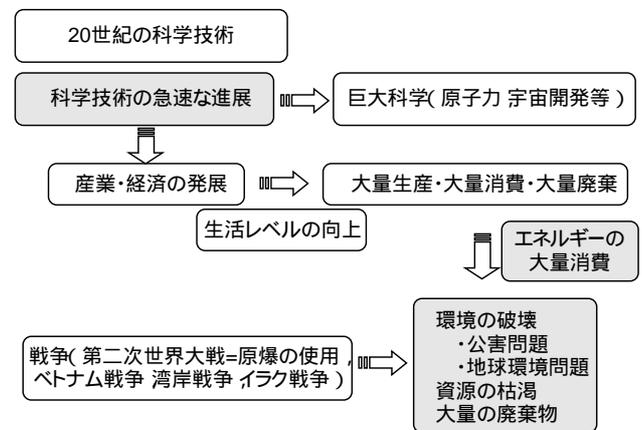


Fig.1 Development of science and technology in the 20th century.

に大きく寄与した。一方,科学技術,中でもコンピュータ技術は,イラク戦争でいやというほど見られたように,軍事的にも広く利用(一面では,軍事研究が科学技術を進展)されてきた。20世紀に開発された核兵器,生物・化学兵器,ミサイルなどは,大量破壊,地球規模に及ぶ環境破壊をもたらし,兵器等の生産,使用,破壊されたものの復興も含めれば,それらに要するエネルギー,それに伴うCO₂排出量は,いったいどの位に達するのだろうか。戦争は,人の生命を奪うばかりでなく,間違いなく大量のエネルギーを消費し,環境を破壊するのである。

1991年のベルリンの壁の崩壊とともに,冷戦時代が集結した20世紀末からは,人類の生存をも脅かす地球温暖化や成層圏オゾン層破壊,酸性雨などの地球環境問題が大きな関心を呼んでいる。地球環境問題では,個人レベルから世界的規模に至るまでの各種対応が迫られている

*〒 606-8501 京都市左京区吉田本町
TEL:075-753-9127 FAX:075-753-9127
E-mail:kasahara@energy.kyoto-u.ac.jp

が、今日では「地球にやさしい…」とか「持続的発展が可能…」、「エコ…」といった言葉が頻繁に使われようになり、また成果は別として、それなりに法的・技術的対応が図られ、社会的にもエネルギーの削減・環境保全の意識の向上が芽生えてきている。

エネルギーの生産・利用は、環境問題とりわけ大気環境問題と密接に関わっている。エネルギー消費量の比較的少ない時期においては、二酸化硫黄や窒素酸化物などによる地域汚染、すなわち公害問題が主体であったが、エネルギー消費量の増大は、地球温暖化をはじめとした地球環境問題へとその質を変えていった。

3 エネルギー問題・環境問題の推移

21世紀には、発展途上地域の人口の増大と生活レベルの向上のために、エネルギー需要量はますます増大すると予測されている。Fig.2²⁾は、1990年代末のエネルギー需要の実績と2010年、20年におけるエネルギー需要予測を、世界の地域ごとに推定した例である。

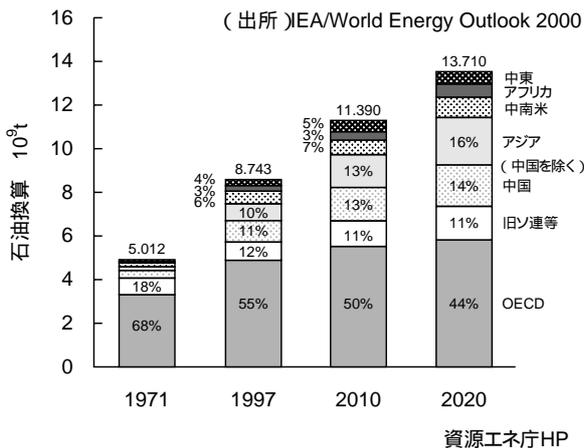


Fig.2 Change of energy demand separated into seven regions.

全世界の1997年におけるエネルギー需要量は、石油換算トン（TOE：Tons of Oil Equivalent, 10,000kcalに相当）で87.4億トンであるのに対し、2020年には約60%増の137.1億TOEに達するものと推定されている。また、地域別ではアジアを中心とする発展途上地域で急増し、日本を除くアジア地域のシェアは1997年の21%から2020年には30%に増大し、全体の伸びの約半分を占めるものと推定されている。

一方、エネルギー需要動向を燃料別にみると、クリー

ンな化石燃料といわれる天然ガスは1997年から2020年には絶対量で19.2億TOE→35.6億TOE、構成比で22%→26%へと増大することが見込まれている。一方、石油、石炭のシェアは各々41%→40%、26%→24%と微減するものの、エネルギー需要量全体の増大から、絶対量は増大すると予測されている。

次に、20世紀後半の日本のエネルギー需要の推移を、燃料別一次エネルギー供給量として、大気環境問題の推移とともにFig.3に示した。

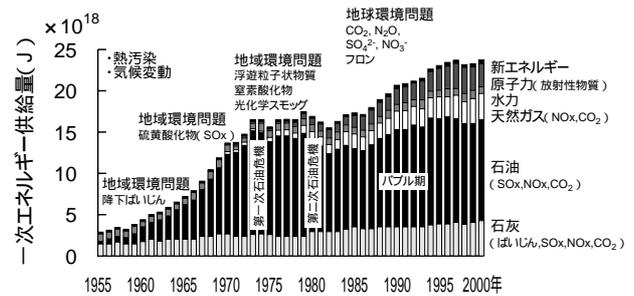


Fig.3 Changes of supply of primary energy and atmospheric environmental problems in Japan.

戦後しばらくは石炭、水力発電、薪炭を中心とした低エネルギー消費時代が続いたが、1960年代の高度成長期に石油の利用拡大が進み、わが国のエネルギー消費量は、高い伸びを記録し、1973年には石油依存率が77.4%にまで達した。しかし、わが国はエネルギー資源に乏しく、一次エネルギーの99.7%を輸入しているため、エネルギー供給構造は極めて脆弱な状況にあった。そのような中、1973年と79年の2回の石油危機を経験することにより、エネルギー消費の削減に務めるとともに、産業界を中心に省エネルギー化が進み、エネルギーの消費量を低い伸びに留めることに成功した。また、石油危機を契機にエネルギーの安定供給の確保を図るために、脱石油化への努力がなされ、原子力や天然ガス、石炭などへの分散化が行われエネルギーの多様化が進んだ。すなわち、1973年と2000年の一次エネルギーに占める石油、石炭、天然ガス、原子力発電の比率は、各々77→52%、15→18%、2→13%、1→12%と推移し、特に原子力については発電電力量に対する比率は3→34%へと増大し、現在では電気の1/3以上は原子力発電が占めている。

しかしながら、1986年以降は、石油価格の低下とバブル期の景気拡大を背景に再び高い伸びを示し、不景気が長引いている最近においても、微増の状態にある。すなわち、原油に換算した最終エネルギー消費量は、第一次、第二

次石油危機が起こった1973, 79年には28.0, 30.1GL/y, パブル期の1990年34.9GL/yに対し, 1997年~2000年の4年間は各々39.6, 39.2, 40.2, 40.5 GL/yであった。

わが国の大気環境問題も, このようなエネルギー消費動向に伴って大きく変化した。すなわち, 石炭を中心とした1950年代には, 黒煙が空を覆い, 降下ばいじんが家庭を襲い「咳が出る」「洗濯物が汚れる」といったような直接的影響からはじまり, 1950~60年代の重工業化が急速に進む中, 大気汚染問題は各地で激化の一途をたどった。その後1960年代には, 石炭から石油へと燃料転換が行われ, 大気汚染問題も降下ばいじんから粉じん, 二酸化硫黄による汚染へと変化した。なお, 四日市市石油コンビナートから排出される硫酸酸化物が原因と認定された「四日市公害裁判」(1967年提訴)は, その後の開発政策や環境行政に大きな影響を与えた。

1970年代に入り, ばいじんや硫酸酸化物の削減技術の進展ならびにモータリゼーション化に伴い, 大気汚染問題は浮遊粒子状物質(SPM)や窒素酸化物, 光化学スモッグ問題へと移行した。これらの汚染物質に対する技術的, 行政的対策は種々講じられてきたが, 現在においてもなお地域汚染問題の中心となっている。

一方, 1980年代に入ると, 大気汚染の観点からは従来ほとんど問題とされることのなかった化石燃料の燃焼に伴い排出される二酸化炭素による地球温暖化や, 二酸化硫黄や窒素酸化物による酸性雨問題などの地球規模の環境問題が世界的に大きな関心と呼ぶようになった。これら地球環境問題では, 従来の産業公害のように, 人の健康や生活環境に直接被害をもたらす可能性は小さいが, 長期的には人類の生存基盤である地球環境に大きな脅威を与え, わが国一国だけの取り組みでは不十分で, 国境を越えた国際的な取り組みが強く求められている。特に先進国においては, これまでの大量のエネルギー消費を前提とした大量生産, 大量消費, 大量廃棄型の生産, 消費構造について厳しい見直しが行われている。

地球温暖化のような地球環境問題は, 原因が生じてから, その影響が目に見えて明らかになるまでに相当の時間遅れがあり, また影響や被害が現れた後では, 元に戻すことはほとんど不可能であることから, 現在取るべき対策は直ちに実施していく必要がある。

このようにエネルギーの生産・利用は, 地域~地球規模の環境汚染の一大要因となっている。したがって, 将来にわたってよりよい環境を保全し, 持続的発展が可能な社会を築いていくためには, エネルギー削減型の社会を推進し, 省エネルギー技術・エネルギー高効率利用技術を開発するとともに, 環境負荷のより小さいエネルギー

システムを開発する必要がある。

4 エネルギー新時代に向けて

前述したように, 21世紀にはエネルギーの需要量は急増すると予想され, 環境に調和し, かつ未来にわたって安定的に供給できるエネルギーシステムを構築していく必要がある。

環境調和型エネルギーシステムの構築にあたっては, 何よりもまず一人一人が, 種々の形でエネルギー消費の無駄をなくすことを基本とした上で, 技術的, 政策的な対策に取り組まねばならない。技術的対策としては, 省エネルギー技術開発, 新エネルギー開発などがある。一方, 政策的な面からは, 地球規模の対策としては, 人口の抑制や文化的意識の変革などが, また国~地方規模の対策としては, エネルギーのベスト・ミックス, 大容量集中/小容量分散型ネットワークシステムの形成, 物流システムや交通システム, 循環型社会の形成(リサイクル社会の発展・リサイクル技術の開発)など社会・経済システムの改善が, そしてさらに身近な対策としては, ライフスタイルの改善などがある。

4.1 省エネルギー技術³⁾

産業, 運輸, 民生部門の部門別にみたわが国の最終エネルギー消費の推移は, 第一次石油危機が起こった1973年を100とした比率で表せば, 2000年には各々106, 208, 207であった。

特に, 産業部門でのエネルギー消費比率は, 石油危機以後1980年代半ばまでは減少傾向を示し, 1993年以前は100以下であった。その要因は, 省エネルギー対策を積極的に推進したことと, 鉄鋼, 化学, セメント, 紙パルプなどのエネルギー多消費型産業から, エネルギー消費量が比較的少ない機械産業やサービス業への転換が進んだことにある。ただし, 1990年代に入りエネルギー消費原単位の改善傾向は頭打ちとなり, 以降は微増傾向にある。今後の省エネルギー対策には, この頭打ちを打開する革新的な技術を開発するための材料やエネルギー変換技術に関する基礎的な研究が必要となる。省エネルギー技術のための技術開発戦略をFig.4³⁾に示した。

一方, 運輸部門, 民生部門では, 石油危機の影響をほとんど受けることなく, 石油危機後もエネルギー消費比率は一貫して増加傾向にある。運輸部門については, 輸送機関単体の効率は向上しているものの, 自動車保有台

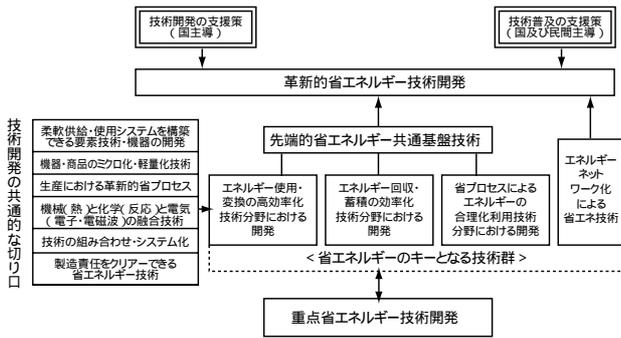


Fig.4 Strategy for technical development of energy saving.

数の増加や車両の大型化、交通事情の悪化等により増大しており、自動車のさらなる省エネルギー化（燃費改善など）や交通制御システムの改善、モーダルシフト等による輸送手段の適正化が必要である。Fig.5は、輸送部門における省エネルギーの必要性の一例として、単位距離・単位人数または単位重量を輸送するのに必要なエネルギー量を交通手段別に比較したものである⁴⁾。

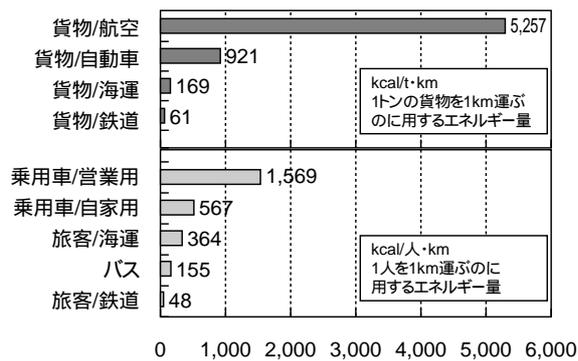


Fig.5 Comparison of energy consumption of various kinds of vehicle.

人の輸送手段は鉄道・バスから自家用車へ、また、物の輸送手段は鉄道・海運から自動車・航空機へと、便利ではあるが輸送効率のより低い手段へと変化している。自家用車から公共交通機関利用へ、トラック輸送から鉄道・海運輸送への切り替え（モーダルシフト）が必要である。

次に民生部門については、オフィスにおけるOAや空調需要の増大、家庭での利便性や快適性のさらなる追求などから、堅調な伸びを示しており、特に家電製品の普及による動力・照明用需要が著しく増大している。エネルギー消費削減のためには、引き続き機器の効率向上や消費者の省エネルギーに対する意識改革が必要である。

先のモーダルシフトと同様に、我々の周囲には、省エネルギーに逆行するものが多々ある。エネルギーの固まりのようなハウス加温による野菜作り、昼夜別なく蛍光灯が付けっぱなしのコンビニや切れ目なく放映されるTV放送といった24時間型生活の定着など、我々の社会システムや生活様式は、より多くのエネルギーを必要とする形態に変わりつつあることは、多くの例に見られる。まさに、「反」省エネルギー化であり、見直しが必要である。

4.2 新エネルギー利用

新エネルギーは、法律により「技術的に実用化できるレベルに達しつつあるが、経済性の面における制約から普及が十分でないものであって、石油代替エネルギーの導入を図るために特に必要なもの」と定義され、現在以下のものが指定されている。

- 自然界のエネルギーを利用する「再生可能エネルギー（自然エネルギー）」
 - ・太陽光発電
 - ・風力発電
 - ・バイオマス発電
 - ・バイオマス燃料製造
 - ・太陽熱利用
 - ・雪氷熱利用
 - ・バイオマス熱利用
- 従来は廃棄していたものを有効に利用しようとする「再生可能エネルギー（リサイクル・エネルギー）」
 - ・廃棄物発電
 - ・廃棄物燃料製造
 - ・廃棄物熱利用
 - ・温度差エネルギー
- 従来の化石燃料を用いるが新しい使い方をする「従来型エネルギーの新利用形態」
 - ・燃料電池
 - ・クリーンエネルギー自動車
 - ・天然ガスコージェネレーション

新エネルギーについては、本特集の他の部分で詳述されているのでそちらを参照願いたい。

4.3 リサイクルによるエネルギー削減，環境保全

前述したように石油危機以後，産業部門では省エネルギー化が進み，エネルギー消費は微増にとどまっているが，運輸部門，民生部門では，石油危機の影響をほとんど受けることなく，エネルギー消費は一貫して増加傾向にある．民生部門，運輸部門におけるエネルギー消費は，都市システムや社会システム，ライフスタイルなどと深く関連しており，エネルギー消費の多くは，エネルギー問題や環境問題に対する個々人の意識とも深く関わっている．

ここでは，社会システムや個人意識と関係の深いエネルギー問題の一例としてリサイクル（ここでは Reduce, Reuse, Recycle, Reproduction を総称してリサイクルと呼ぶ）について考える．リサイクルはエネルギー削減，環境負荷低減における最重要項目の一つであり，資源の採掘，物の生産・輸送・廃棄全過程におけるエネルギー消費の削減ばかりでなく，環境の保全や資源の保全，廃棄物の削減にも結びつく．エネルギーの固まりともいわれるアルミについてみると，リサイクルにより回収されたアルミ缶から再生地金をつくるエネルギーは，原料のボーキサイトから新たに地金をつくる時のエネルギーのわずか3%ですみ，97%ものエネルギーを節約することができる．しかも，アルミニウム資源を節約し，ごみを減らすことができることから，リサイクルはきわめて重要である．

従来の大量生産・大量消費・大量廃棄型の社会構造，経済活動，浪費的生活様式を見直し，生産，流通，消費，廃棄のいずれの段階においても，物質の循環，再利用を基調とした循環型社会の確立が不可欠である．しかしながら，リサイクルの内容，方法などによっては，エネルギー削減，環境負荷削減の効果は異なり，場合によってはリサイクルをすることによってエネルギー，環境面からは，むしろマイナス効果となることもあり得る．したがって，リサイクルを導入するに当たっては，近年基本データも整備され広く利用されるようになってきたライフサイクルアセスメント（LCA）手法等を用い，エネルギー，環境，経済，社会的受容性など，各種観点から事前に十分な解析・評価を行う必要がある．

5 おわりに

本稿中では，「エネルギー需要量は xxTOE で，そのためにはどのようなエネルギー対策をすべきか」という考え方の下に述べてきたが，逆の発想，すなわち「供給できるまたは供給すべきエネルギー量は xxTOE であり，そ

れを実現するためにはエネルギー対策として何をすべきか」といった議論も必要であり，むしろ本質的な議論と考える．現在，東京電力の 17 基の原子力発電所が全て停止し，今夏には大停電も予想される中，奇しくも逆の発想による，停電を防ぐには何をすべきか，何ができるか，が議論されている．エネルギー需要の急増が進む 21 世紀，逆の発想の「枠をはめたエネルギー供給とその対策」が検討されてもよいのではないだろうか．

20 世紀に開発・実用化された巨大科学の一つである原子力発電は，2000 年には年間発電電力量の 34% を占め，LNG，石炭，石油火力の各 26, 18, 10% を大きく上回っている．Fig.6⁵⁾ は LCA 手法を応用し，各種発電プラントからの CO₂ 排出原単位を解析したものである．

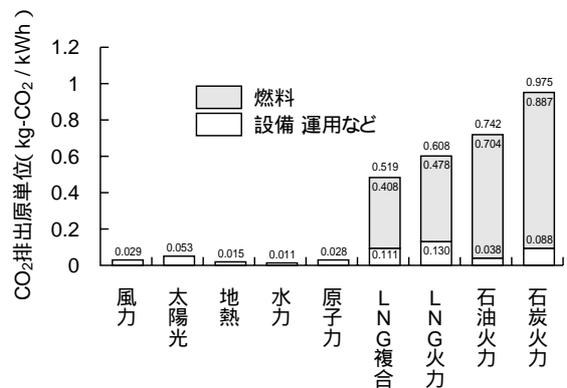


Fig.6 CO₂ emission rate from various kinds of electric power station estimated using Life Cycle Assessment.

原子力発電は，原料の採掘や建設，輸送，発電に関わり排出されるのみで，燃料の燃焼からは CO₂ は排出されないことから，化石燃料による火力発電に比較し極端に小さい．このため，エネルギー資源に乏しく，一方 CO₂ 削減を迫られているわが国においては，原子力発電は将来のエネルギー源として，その比率を拡大していく計画となっている．

しかしながら，もんじゅのナトリウム漏洩事故や JCO 事故，今回の東京電力による隠蔽など，原子力研究施設や原子力発電所での事故等に際し，正確で十分な情報の開示が行われず，また一部には情報隠しや虚偽の報告がなされ，さらには管理や監視を行うべき政府機関の対応も適切でなかった．このため，原子力発電に対する住民の不信は根強く，予定された原子力発電所の新規建設は困難となっている．原子力基本法での，原子力の平和利用にあたっての精神：自主・民主・公開を関係者は改め

て認識する必要がある。

最初にも触れたが、原子力発電や未来エネルギーとしての核融合、宇宙太陽光発電などは、巨大科学技術の一つである。巨大科学技術開発には、巨額の投資が必要である。一度研究開発がスタートすると、その方向を転換すること、ましてやそれを停止することは容易ではない。超巨大科学技術の一つである核融合の ITER 計画が現在進んでいる。エネルギーを生産するための開発が、巨大なエネルギー利用に終わってはならず、原子力開発と同様、研究段階での自主・民主・公開が重要である。

20 世紀の科学技術が、真の意味で私たちの生活を豊かにしてくれたのかどうか疑問を持つ人々が増えている。21 世紀には、環境の持つ自浄能力の範囲の中で、自然と調和のとれたエネルギーシステムを築き、真の意味での豊かさのあふれた社会に導く科学技術の発展を願う次第である。

職責上やもなく購入した機能に満ちあふれた携帯電話、しかしながら半年たっても未だ着信電話と発信電話にしか利用できない私、コンピュータ・情報の技術開発は、「のんびりゆこうよ、どっこうまでも…」、年寄りに優しい速度での発展を心の隅で願っている。

[参考文献]

- 1) 平成 12 年版科学技術白書，第一部 (2000)
- 2) 資源エネルギー庁ホームページ，<http://www.enecho.meti.go.jp/energy/world/world01.htm> より
- 3) 省エネルギーセンター：省エネルギー技術動向調査，p.1-43 (2000)
- 4) 東京電力 (株) ホームページ，<http://www.tepco.co.jp/kknnp/more/ines/ines.html> より
- 5) 本藤祐樹：電中研ニュース 338，P.1-4 (2002)