

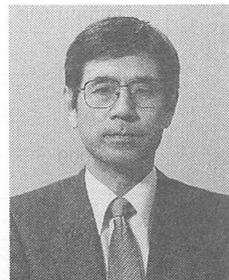
## ■ 展望・解説 ■

## 長期的視点からの資源問題の行方

Trends and Prospects for Supply of Energy and Minerals

西山 孝\*

Takashi Nishiyama



## 1. 資源エネルギーの指数関数的増加

## 1.1 いま、なぜ資源エネルギー問題か

この半世紀余りの間に資源エネルギー界に起こった、最も注目すべき変化は、消費量の急激な増加である。産業革命以後、より便利で、より快適な社会を求めて、技術文明は華々しく発展してきた。この発展は多量のエネルギー消費に支えられているが、地殻の大きさや大気の許容量を配慮すると、この増え続ける資源・エネルギーの需要をいつまでまかなない続けられるか、こころもとない状況にある。

よく知られているように、人類は古くからさまざまな形で資源・エネルギーを使ってきた。最近100年余りの消費量の変遷をたどると、産業革命以降1950年頃までの期間は全体としてゆるやかな増加を示し、世界大戦の影響から立ち直った1950年代以後、急激な増加に転じている。その後、石油危機により一時停滞していたが、現在は再び成長を続けている。このエネルギー資源に起こっている現象は、エネルギー資源に限られるものではなく、金属資源にも認められる。この需要増加がいかに著しいかをみるために、ある年(1970年)の生産量を1として世界エネルギー消費量、鉄、銅、亜鉛について増加率で表示すると、1950年代から1970年代前半にかけて起った消費量の増加が、いかに著しいか、またエネルギー資源も金属資源も似たような動きをしているのがわかる(図-1)。しかし、この数年に限ると、これまでとは少し異なった動きが読みとられる。すなわち金属資源には停滞傾向がみとめられるが、エネルギー資源には顕著な増加が認められることである。しかし、これが一時的な動きか、あるいは新しく生まれてきた傾向かはもう少し時間がたたないと判定できない。

それでは、この膨れ上がった資源・エネルギーの需要がどのようにしてまかなわれてきたのかをみると、いうまでもなく、それはたえず新しい資源の開発によって補充されてきた。幸いにも、資源技術者のたゆまぬ探査、開発努力がみのり、消費した量あるいはそれ以上の資源が獲得されてきたから枯渇は起こらなかった。

また、資源・エネルギーの消費量が巨大になったことは、環境問題にも深刻な影響を与えている。古くから資源・エネルギーの利用は、環境問題と深いかかわりを持ちながら発展してきた。以前には、公害あるいは鉱害と呼ばれ、その影響はローカルな現象にとどまっていたが、現在対策が急がれている温室効果や酸性雨などは、特定地域に限らず、地球全体にまで影響が及んでいる。これらも、もとをただせば、この資源・エネルギーの消費量の膨張と密接にかかわった現象である。

つきつめると、現在の資源・エネルギー問題は、地殻に賦存する資源・エネルギーをどれぐらい抽出、利用できるかと同時に、どの程度まで使ってもよいかをみきわめねばならない時期になっていることである。

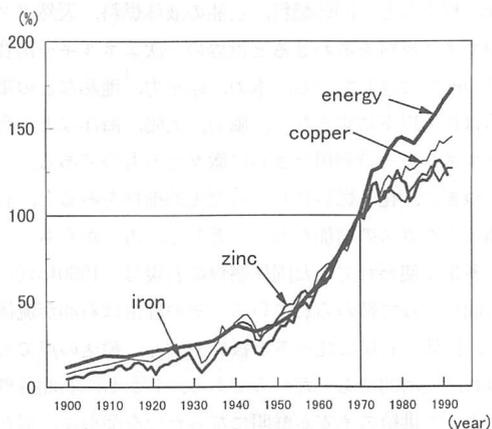


図-1 一次エネルギー、鉄、銅、亜鉛の生産量の増加率(1970年を100とする)

\* 京都大学大学院エネルギー科学研究科教授  
〒606-01 京都市左京区吉田本町

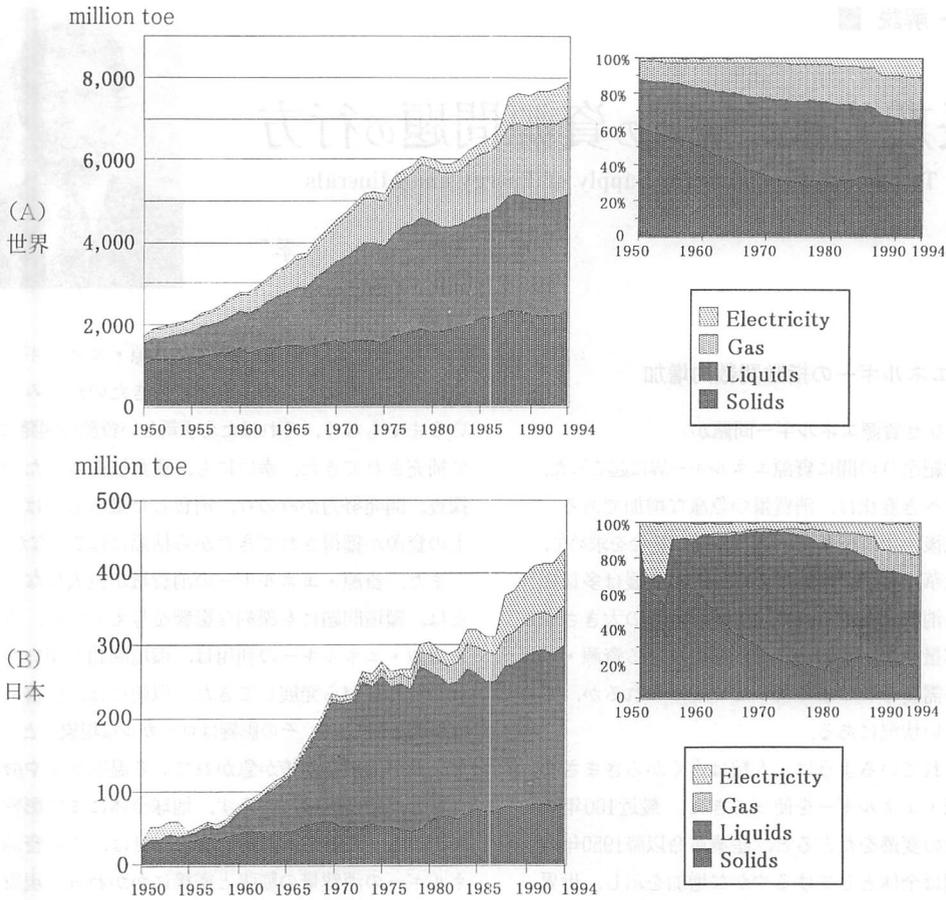


図-2 世界および日本の一次エネルギー消費量の推移, 各種エネルギー消費の割合の推移 (出典: UN)

1.2 現在使われているエネルギー資源

それでは, どのような種類のエネルギー資源が, どれくらい使われているか. いうまでもなく, もっとも多量に使われているエネルギー資源は化石燃料で, 石炭, 褐炭などの固体燃料, 石油の液体燃料, 天然ガスのガス体燃料をあわせると世界の一次エネルギー消費量の90%に達している. 水力, 原子力, 地熱などの電力は10%以下にすぎない. 風力, 太陽, 海洋などの自然エネルギーの利用はさらに微々たるものである.

つぎに, 化石燃料における歴史的推移をみると, 石油と天然ガスの増加がとくに著しく, 古くからもっとも多量に使われてきた固体燃料の石炭は, 1960年代に石油にとって替わられている. その理由は石油が流体で, 固体の石炭に比べると扱いやすく, 輸送の点でも優れ, 経済的であったからである. しかし, 石油危機によって供給の不安が鮮明になったのを契機に, 偏在性が少なくかつ先進工業国からの生産も多い石炭への指向が再び強まっている (図-2).

1993年の世界のエネルギー消費は石油に換算すると78億トンで, 石油が29億トン (37%), 石炭は22億トン (29%), 天然ガスは19億トン (24%), 一次電力 (水力, 原子力) は8億トン (10%) である. また, 最近の資源統計から埋蔵量をみると, 石油ではおよそ1380億トン, 天然ガス1400億トン, 石炭1.03兆トンとなっている.

一方, わが国のエネルギー状況をみると, 世界の5.4%を消費し, 液体燃料に大きく偏っているのが特徴で, 一次エネルギーにしろ石油の割合は, 一時は, 77%に達していたが, 漸次改善されてきている. それでも1993年では49%が石油により占められ, これは世界平均に比べると1.3倍高い. また, 最近の傾向としては, 天然ガスおよび原子力からの供給が増えてきている.

これらは国連および通産省による一次エネルギーの統計で, 一定の比率で石油に換算したものである. すなわち, 1トンの石油は, 1.4トンの石炭に, あるいは1,170m<sup>3</sup>の天然ガスに相当する. また, 水力, 原子

力などの一次電力は火力発電所で同量の電力をうるために必要な石油の量で表したものである。

## 2. 資源・エネルギーの需要はなぜ増大するのか

### 2.1 エネルギー消費量を増大させている理由

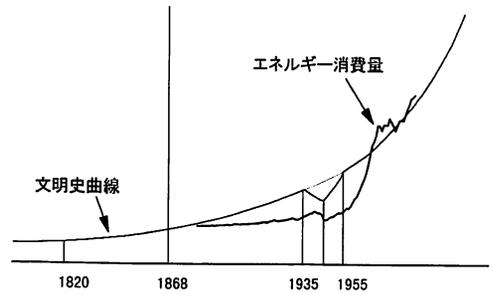
では、なぜ、資源・エネルギーの消費の増大が続いているかを考えてみる。この原因については、人口の増加、発展途上国の生活水準の向上、および科学技術の発達の影響の3つが大きいとされている。

世界の人口は毎秒3人、一日に25万人ずつ増えている。1950年の人口は25億人であったが、1990年には50億人になった。かりに一人当たりのエネルギー消費量が、1950年の消費量（石油換算で0.70t/人）と同じ水準で維持されたとしても、この40年間に人口が2倍に増加したのだから、世界のエネルギー消費量は2倍に増えることになる。つぎに、発展途上国の生活水準の向上によるエネルギー消費量の増加による影響があげられる。たとえば、11億あるいは8億の人口を有し、近年急速な発展をしている中国あるいはインドの人々が、1990年のアメリカ人（7.51t/人）や日本人（3.20t/人）と同じような生活水準になったとすると、必ずしも現在のアメリカ人や日本人と同じ量の資源エネルギーを消費するとは限らないが、中国（0.55t/人）あるいはインド（0.22t/人）のエネルギー消費量は現在の数十倍に膨張することが容易に想像される。それぞれの国全体の消費量は、これに人口をかけたものであるから、巨大なものになる。さらに、科学技術の発展によりつくりだされる、快適で便利な社会は多量のエネルギー消費をうながしている。1950年からの40年間のアメリカあるいは日本の一人当たりのエネルギー消費量を見ると、それぞれ1.4倍および8倍になっているが、これは科学技術の発展によるものももっとも大きいと推察される。

### 2.2 文明史曲線とエネルギー消費曲線

このように、エネルギー・資源が現代文明を支える重要な基礎となっていることについては異論はない。それでは文明の発達とエネルギー・資源の消費の間はどのように関連づけて考えられるであろうか。

梅棹忠夫は横軸に年代をとり、縦軸に社会的な変化の量的表現をとって文明史をグラフに表している。それによると、近代日本の文明史はおおよそ図-3のようになるという。すなわち、明治維新以来、連続的になめらかな上昇曲線を描いてきたが、第二次大戦によ



(出典：梅棹 (1971), 資源エネルギー庁)

図-3 文明史曲線とエネルギー消費量

て乱れ、1935年から急に下降したが、戦争の終わった1945年をさかいに急上昇に移り、1955年にはもとの曲線の延長線上に戻り、成長を続けているという。この文明史曲線と名付けられた曲線は一見するとこれまで述べてきた資源・エネルギーの指数関数的消費曲線と大変よく似ている。この文明史曲線は日本について描かれたものであるので、日本国内資源エネルギーの消費推移と重ねると、きわめて類似しているのがわかる。また、石油危機によるエネルギー消費曲線の乱れが、第二次世界大戦に匹敵するできごとであったことがわかる。

## 3. 現・近未来におけるエネルギー需給予測

それでは、今後の需要はどのように推移していくか。これまでにあげた資源統計、人口増加、発展途上国の生活水準の向上、科学技術の発達から推察してみよう。

### 3.1 資源統計に基づくエネルギーの需要予測

過去の生産動向から将来の需要を推測する方法は、もっともよく使われている手法であり、短期予測には有効な手法となっている。すなわち、エネルギー統計に表われている傾向を単純に外挿して将来の需要を推測するものである。この場合、まず、どこまで古い資料を遡り参考にするかが問題で、すでに触れたようにエネルギー資源の需要はゆるい成長のみられる1950年以前、急成長の続いていた1950～1970年代前半、石油危機によって停滞した1970年代後半から1980年前半、再び成長を始めた1980年後半以降の4つに分けられる。また、1950～1990年の間の5年ごとに区切った成長率をみると、もっとも高いのが1965～1970年の5.8%で、低いのは1980～1985年の0.79%である。20年間の年平均成長率では1950～1970年が5.3%、1970～1990年が2.2%である。これからの20年間、あるいは30年間を考えると、急成長する要素も存在するが、一方では、

需給を乱す予期せぬことも起こりかねない。そこで、(1) 急成長のみられた期間(1950~1970)、(2) 急成長の終わりの部分から石油危機およびその後の回復期を含む期間(1970~1990)、(3) 両者をあわせた1950~1990年の40年間(平均成長率3.7%)の3つを想定して、かつ石油、石炭、天然ガス、電力が使われる割合は1990年と同じと仮定し、累積生産量がどのように進展するかを計算した。結果は表1ようになる。石油についてみると、埋蔵量1380億tは、2017年~2026年に枯渇することになる(図-4)。天然ガスは2020~2031年で、石炭はしばらくの間枯渇の心配はない。世界が順調な発展を続ければ図-5(a)に近い成長となり、石油危機のような大きな攪乱が起これば図-5(b)に近い状況となる。

3.2 人口増加によるエネルギー消費量の増加

人口増加によるエネルギー消費量の増加を、世界人口の増加を一つにまとめた場合と、各国の人口増減を考慮した場合の2つに分けて算出した。

3.2.1 世界人口の増加とエネルギーの需要の増加

世界銀行の人口予測によると、1992年に54.7億であった人口は、2000年には61.6億、2025年には81億、2050年には1990年の1.8倍の96億になると推察されている。仮に、1993年の一人当たりの世界平均エネルギー消費量(石油換算で1.4kg/人)が維持されたとすると、2000年、2025年、2050年の人口に相当する消費量は、88億トン、117億トン、138億トンになる。また、1994年からの累積消費量では、670億トン、3250億トン、6450億トンに達する。化石エネルギー種、電力などの割合は1993年と同じであったとすると、もっとも枯渇の心配される石油については、2028年ごろになくなることになる。

3.2.2 各国の人口増加とエネルギー消費量の増加

ところが、上記のような世界の人口増加と一人当たりの平均エネルギー消費量から求めた推測値は、必ず

しも人口増加によるエネルギー消費の増加を、的確に表したことはない。よく知られているように、人口増加は発展途上で著しく、先進工業国では低い。一方、一人当たりのエネルギー消費量は逆で先進工業国および新興工業国で高く、発展途上で低い。そこで、個別に今後のそれぞれの国の人口増加あるいは減少によってどのように変化するかを算出しおいた。なお、各国の一人当たりのエネルギー消費量は前の計算と同様に現状のまま消費量が維持されたと仮定した。

まず、エネルギーを多量に消費しているアメリカ、

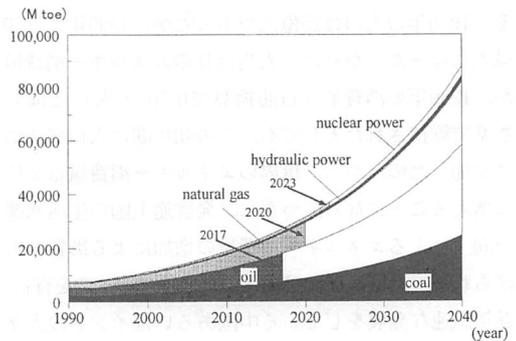


図-4 (a) 1950~1970年(5.25%)の成長率にもとづくエネルギー生産量の予測

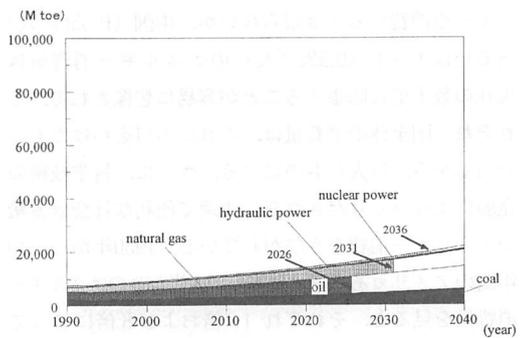


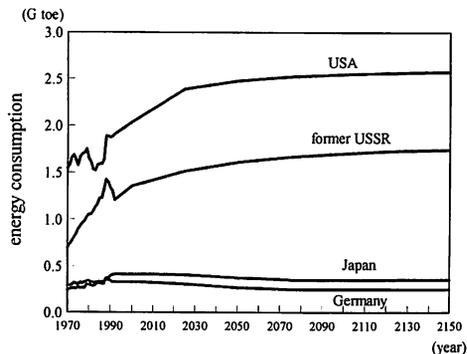
図-4 (b) 1970~1990年(2.20%)の成長率にもとづくエネルギー生産量の予測

表1 年成長率と予想年消費量及び予想累積消費量

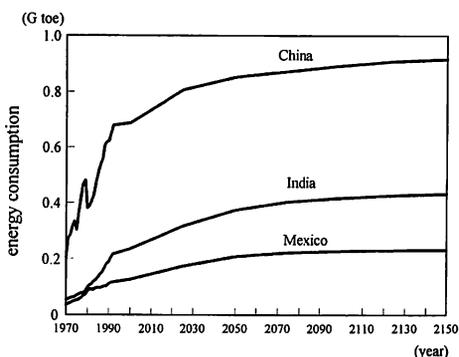
(M toe)

	平均成長率		1993年	2000年	2025年	2050年	2075年	2100年
一次エネルギー生産量	5.25%	1950~1970年	7,956	11,000	41,000	150,000	530,000	1,900,000
	2.20%	1970~1990年	7,956	9,000	16,000	28,000	47,000	82,000
	3.71%	1950~1990年	7,956	10,000	26,000	64,000	160,000	400,000
累積エネルギー生産量	5.25%	1950~1970年	7,956	77,000	670,000	800,000	10,000,000	38,000,000
	2.20%	1970~1990年	7,956	69,000	380,000	920,000	1,800,000	3,400,000
	3.71%	1950~1990年	7,956	73,000	500,000	1,600,000	4,200,000	11,000,000

出典：World Energy Supplies, UN



(a) 先進国工業国



(b) 発展途上国

図-5 各国の人口予測に対応したエネルギー消費量の動き

旧ソ連、ドイツ、日本と発展途上国あるいは新興工業国の中国、インド、メキシコの7カ国について、1992年の一人当たりのエネルギー消費量と予想人口との関係からエネルギーの消費量を求めた(図-5)。アメリカでは33年間では1.3倍になっているが、ドイツ、日本では2000年ごろまでは緩やかな増加をした後に減少している。なお、1992年ではこれら3カ国で世界消費量は51%を占めている。つぎに残りの3カ国では33年間で1.2~1.6倍にいずれも増加し、上記3カ国よりも大きい。しかしながら、これらの国の消費量そのものは小さく、世界の15%(1992年)程度で、世界のエネルギー消費量に与える影響は比較的小さい。

このようにして、国別人口予測と1992年のエネルギー消費量から187国について求められた2000年、2010年、2025年のエネルギー消費量は表2のようになる。世界全体を一つとして扱った場合に比べると、増加量は2025年では16%、2050年では24%小さくなることわかる。

### 3.3 発展途上国の生活水準の向上

発展途上国の生活水準が向上すると、あらたに必要

表2 人口の増加にともなうエネルギー消費量の推移

	(M toe)			
	1992年	2000年	2025年	2050年
世界全体を一つに扱った場合	7,630	8,500	11,000	13,000
国別に計算した場合	7,630	8,200	9,500	10,000

となるエネルギーの需要増加がどの程度になるか概算してみる。

発展途上国の経済発展段階はまちまちで、経済成長率もきわめて高い国から、ほとんど停滞、あるいはマイナス成長の国も見られる。すなわち、発展途上国と先進工業国との間の生活水準は急速に縮まってきている国もあるが、さらに広がってきている国も存在している。したがって、発展途上国を一つにまとめて論ずるのは困難である。

しかしながら、世界的エネルギー消費量増加に顕著な影響をもっているのは、中国やインドをはじめとした、人口が多く経済発展の著しい国々である。そこで、近年2桁の経済成長を続ける中国とインドを例にとって考えてみよう。すなわち中国およびインドが、2025年に先進工業国のアメリカの一人当たりのエネルギー消費量と同じ水準まで上昇したと仮定すると、エネルギー消費量がどの程度になるか試算してみた(図-6)。その結果、中国およびインドのエネルギー消費量は、それぞれ2014年、2017年に1992年の世界のエネルギー消費量と等しくなり、きわめて膨大なものになる。この期間の成長率は中国では8.9%、インドでは12.6%である。

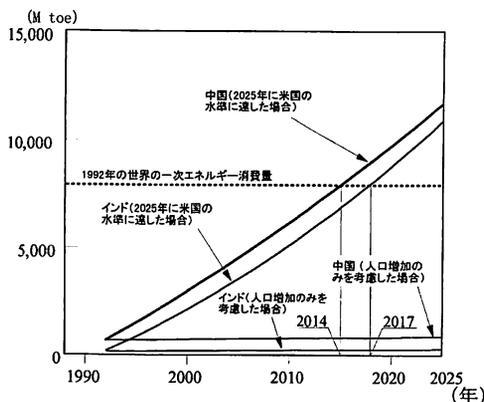


図-6 中国およびインドの一人当たりのエネルギー消費量が、2025年にアメリカの1992年の水準に達した場合の中国およびインドのエネルギー年消費量

表3 エネルギーの比較

エネルギーの源	(10億kWh/年)	石油換算 (100万トン)	世界のエネルギー 消費量を1とすると
地球の受ける太陽放射 大気圏の外縁で受ける量	156,000,000	134,160,000	16,770
地球の表面で受ける量	930,000,000	79,980,000	9,998
陸上で受ける量	250,000,000	21,500,000	2,668
地球内部からの対流熱	230,000	19,780	2
世界のエネルギー消費量 (1994年)	93,000	8,000	1

### 3.4 科学技術の発達に伴う需要の増加

最後に、もう一つエネルギー消費量が増大する理由として、科学技術の発達がある。最近の科学技術の発達は多種多様で、熱効率、省エネルギーには種々の工夫がこらされているが、基調としては、便利で快適な社会はエネルギーを多量に消費する社会であるという構図は変わっていない。アメリカ、イギリス、ドイツ、日本の一人当たりのエネルギー消費量の最近の動きをたどると、停滞ないし微増している。科学技術の発達が一面でエネルギー消費を抑える方向に作用していることは理解できるが、全体としては、依然として、エネルギーの消費の増加をうながして続けている。しかしながら、その量を予測するのは困難である。

## 4. 枯渇しそうな資源エネルギーといくらでも ある資源エネルギー

これまでのところをまとめると、資源・エネルギーの枯渇は繰り返し懸念されてきた問題であるが、これまで枯渇に至った資源・エネルギーはない。たびたび経験した資源・エネルギー問題は、つきつめると、分配の問題、すなわち政治的あるいは社会的障害に起因するものであった。ところが、現在直面している資源・エネルギーの枯渇問題は、新しく起こってきた、真の意味での枯渇問題で、人類が初めて経験する問題となっている。また、ここでは触れなかったが、省エネルギーや、リサイクルも枯渇時期を遅らせることはできても、現在のような需要増加が持続されれば、枯渇そのもの避けることはできない。

一方、地球表面には表3に示すように、太陽から世界エネルギー消費量の1万倍にも達するような多大のエネルギーが降り注いでおり、地球内部にも人間が使いきれないような量のエネルギーが存在している。しかも、これらの資源は枯渇の心配がなく、環境保全にも適したものが多い。このことから得られる結論は、しばしば指摘されているが、現在の化石エネルギー主体の供給体制から、漸次、自然エネルギーからの供給

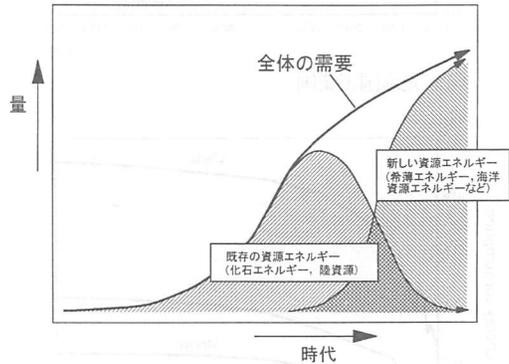


図-7 資源エネルギーの好ましい需給動向

体制に移行していくことである。

ところが、現実の動きは、エネルギー供給を如何に安く、安定に、あるいは効率よくできるかを基調としており、枯渇を前提として扱われているわけではない。現在の資源技術で、現在の価格で利益を生み出せるものを追求し、それに適合した産業構造、社会基盤になってしまっている。新しい異なったタイプのエネルギーを大量に導入するとなると、必然的に、これまでとは違った生活様式、社会構造が求められ、既存の社会を修正することになる。

この両者の間にできているギャップは、今後どのようにして埋められていくべきか。過去の鉱山がたどってきた盛衰などから推察してみると、図-7のようなものが考えられる。すなわち、現在のエネルギー消費の90%以上を供給し続ける化石エネルギーの急激な減少は考えられないが、石油の枯渇問題、あるいは化石エネルギーに共通した環境問題を考慮すると、いずれは下降線をたどらざるをえない。その時期ははっきりしないが近未来には訪れるものと推察され、このピークが転換点に達する時期に合わせて、自然エネルギーの開発を行わなければならない。新しいエネルギーの胎動のための研究開発、実証実験、企業化などアプローチを考慮すると時間的余裕は残されていないことになる。