

“EPR”でエネルギーを選択する時代 “エネルギー取り出し効率”を考える



天野 治[※]

■ 石油を取り出すためのエネルギーが増える

一般に油田というものは、太古の海洋生物や陸上の植物が酸素欠乏の状態では厚い土砂に埋没し、多孔質の岩石にからまっていたり、液体のように流動性のあるものがある。われわれはボーリングを行い、そのボーリング穴から自噴する流動性のあるものを取り出し、すでに地球に存在する原油の半分も使ってしまった。残りの原油を取り出すには、海水をポンプで注入して圧力をかけ、海水に混じったドロドロしたものを取り出すしかない。岩石に絡まったものは、液体にした二酸化炭素を高压で岩石に吹きつけ、溶融させて取り出すことになる。原油を取り出すためにエネルギーが多くかかるようになる。言い換えると、石油を取り出すために石油が必要になるというわけだ。

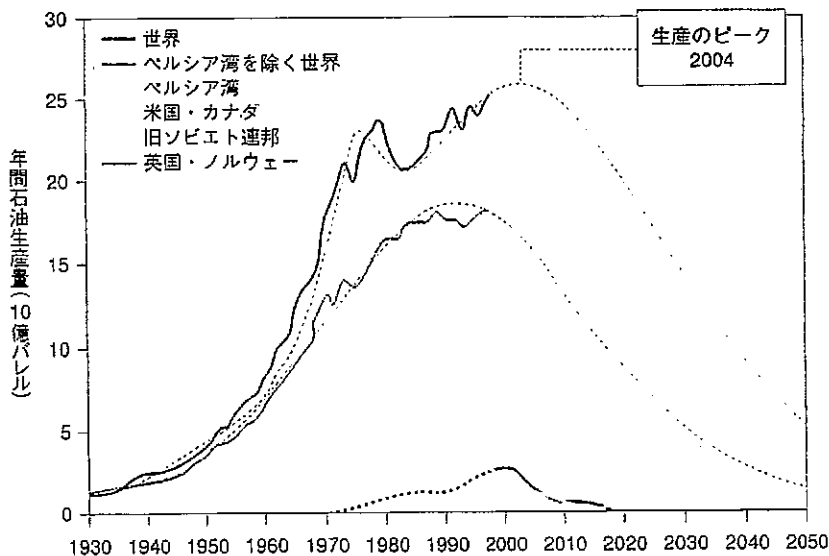
図1は石油資源の専門家であるキャンベル博士がハバート曲線¹⁾を用い、今後の石油の供給量を予測したもので、質のよい安価な石油の供給は今後減少することを示している。生産のカーブがなだらかなため、ピークが2000年頃なのか、2010年頃なのかは、はっきりしないが、今後、供給が減少することは間違いない。

■ 電力需要は今後も増え続ける

世界の人口は今後も増加し、中国、インドを中心に生活水準の向上が予測される。図2は世界1人当たりの年間電力消費量を示したもので、世界の平均は1人年間2373kWhである。わが国のそれは8220kWhと平均を大きく上回っている。世界の人口の4分の1を占める中国やインドの生活水準が上がり、電力消費が増えると、同5000kWh程度まで上昇する可能性がある。

そうしたなかで、石油の供給が減少し、図2に示すように石油の需要は増える。中国、インドなどの

図1 世界の石油生産量：過去と未来、ハバートピーク(C. J. Campbell 1988)



※電力中央研究所上級特別契約研究員、もったいない学会理事、日本工学アカデミー会員、原子力学会企画委員

需要増を外挿し、一つの図にまとめると、図3のようになり、需要と供給の乖離が始まる。その乖離は2015年で3倍、2040年には10倍にもなる。

この問題を解決するには、2015年までに石油の消費を3分の1にする技術の開発や生活の見直しが必要となり、さらに2040年までには石油の消費を10分の1にする取り組みが必要とされる。言い換えれば、2015年には石油を3倍有効に使う技術、2040年には同10倍に有効に使う技術が要求されることになる。

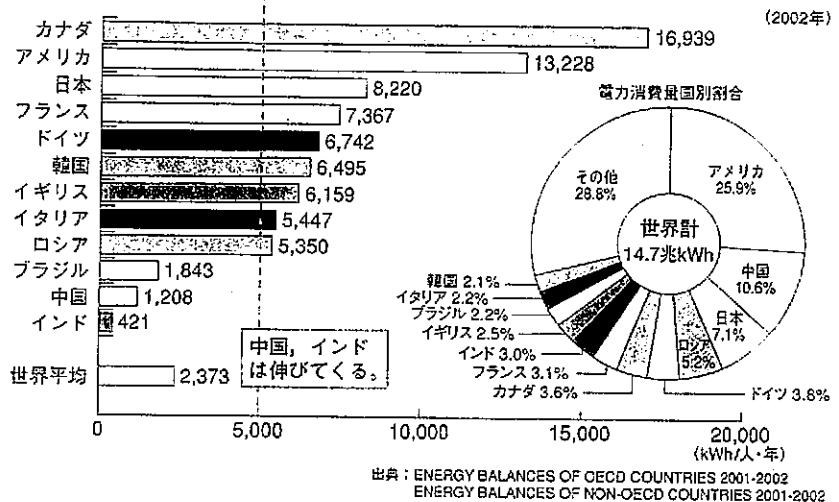
石油だけではない。天然ガスも10年前後でピークを迎える。石油の代わりとして、各国の天然ガス需要が急激に増加するためである。

■ 石油はどこに使われるか

石油は、ガソリン、軽油として自動車などの動力源、冷暖房などの熱源、さらには化学原料として使われている。このうち40%以上は輸送用(動力源)であり、この分野でのエネルギー利用効率の向上が急がれている。ガソリン駆動と電気駆動の2種類の動力によるハイブリッド車が開発され、燃費は約30km/ℓ(従来車は約10km/ℓ)と大幅に改善された。さらに夜間に自宅でも充電できるプラグインハイブリッド車や電気自動車が普及すれば、石油の消費を10分の1以下にするだろう。

生活のありようを見直し、鉄道などの公共交通機関を利用したり、東京一極集中から地方に分散して、移動しない、輸送しない社会の構築も必要である。自然の豊かな地方にいながら遠くの友人とITを用いてコミュニケーションできる時代を迎え、地方の良さを楽しむべきだろう。「もったいない学会」(会長・石井吉徳東大名誉教授)が設立され、生活をアカデミ

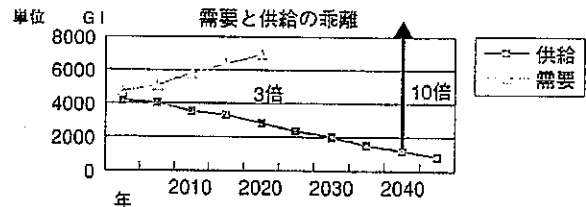
図2 主要国の1人あたり電力消費量



出典: ENERGY BALANCES OF OECD COUNTRIES 2001-2002
ENERGY BALANCES OF NON-OECD COUNTRIES 2001-2002

図3 需要と供給の乖離

需要と供給の乖離は2015年では3倍になる。2040年ごろには、その乖離は10倍になる。



ックに見直そうとしている。

■ 石油の代替を質と量の面から考える—まず質から

石油を取り出すためのエネルギーが増えてきていることは先に述べた。

ところで、取り出すことのできるエネルギー(石油の量)を、取り出すために必要なエネルギーで割ったもの、つまりEPR(Energy Profit Ratio)は、“エネルギー取り出し効率”とでもいえるもので、エネルギー選択の有力な指標となる。

石油を取り出すのに、より少ないエネルギーで取り出せるほうがよいに決まっている。石油発見当初における石油および随伴するガスのEPRは100を超え

表1 石油火力発電でのEPRを計算するための項目

投入エネルギー	設備エネルギー	燃料採掘	素材エネルギー
		燃料輸送	素材エネルギー
		発電所建設	素材エネルギー
			製造エネルギー
			建設エネルギー
	発電所廃炉	分解、分別他エネルギー	
	運用エネルギー	燃料採掘	作業エネルギー
		燃料輸送(船舶他)	作業エネルギー
		燃料精製	作業エネルギー
		発電所運転、補修	作業エネルギー
廃棄物処分		作業エネルギー	
生産エネルギー	設備容量		
	設備利用率		
	所内利用率		
	発電電力量		

ていた(1940年代)。ところが1970年代には8まで低下した。つまり、「1」の石油で「100」の石油を取り出せたものが、「1」の石油で「8」の石油しか取り出せなくなったのである。

このEPRの考え方は広範に使える。発電でのEPRは、発電電力(生産エネルギー)を取り出すために必要なエネルギー(投入エネルギー)で割り算して求める。運転開始から廃炉に至るまで、寿命期間(30年)中に取り出せる電力の合計値が生産エネルギーである。一方、投入エネルギーは、発電所建設、運転、廃炉および廃棄物処分と燃料の採掘、輸送、燃焼などのエネルギーである。

発電所の建設時には、コンクリート、鉄筋などを使うが、それらを地球から取り出すためのエネルギーも必要である(素材エネルギー)。次のその素材を工場に運んで部品を作る、輸送と製造のエネルギーがある。さらに現地に部品を運ぶ、輸送エネルギーと現地での組み立てのエネルギーが必要である(設備エネルギー)。

また、発電所の運用中においても、運転員や機器のための冷暖房エネルギーや補修する際には部品交換に伴うエネルギーが必要である。部品といえども素材エネルギー、工場での建設エネルギー、輸送エネルギーがかかるのである。これらをまとめて運用

エネルギーと呼ぶ。原子力発電所などの大型の建造物では、寿命後の廃炉、放射性廃棄物の地層への埋設のエネルギーも運用エネルギーに加える必要がある(表1)。

石油火力発電などでは、燃料の採掘、輸送のエネルギーも必要である。石油は中東での採掘エネルギー(先に述べたようにこのエネルギーが増加している)、船で日本まで輸送するエネルギーがいる。天然ガスは気体であり、輸送のために液体にして体積を小さくする必要があり、液体にするた

めの低温化に相当なエネルギーが必要である。天然ウランは、核分裂するウラン235の含有率は0.7%であり、発電に使うためには5倍程度、濃縮する必要がある。ここにも相当なエネルギーが必要であり、これらも運用エネルギーに加えることになる。

発電所から取り出すエネルギーは、設備容量に設備利用率(1年間に定格で運転できる割合)を乗じ、発電所内で使う分(所内利用率)を引いて求める。例えば、設備容量が1GW(ギガワット)、設備利用率が75%で、所内利用率が3.4%の場合、取り出すエネルギーは

$$1\text{GW} \times 365\text{日} \times 0.75 \times (1 - 0.034) = 264.4\text{GW} \cdot \text{日}$$

発電所の寿命は、一般的に30年程度である。発電所を建設するエネルギーは1回だけ必要なエネルギーである。運転、補修のエネルギーは毎年かかる。燃料のエネルギーも毎年必要である。

以上から発電のEPRは以下のように求められる。

$$\text{年間の生産エネルギー} \times 30\text{年間} \div (\text{発電所建設など設備エネルギー} + \text{運用エネルギー} \times 30\text{年間})$$

以上のように求めてまとめたのが図4である。

資源の乏しい時代のEPRは10以上が好ましい。つまり、「1」のエネルギーで「10」以上のエネルギーを得る。図4に示すように、中小水力は15.3、原子力発電は17.4と、EPRは10を超えており好ましい。

しかし、風力発電のEPRは3.9、太陽光発電は2.0と高くはない。風力発電や太陽光発電には燃料が不要なのだが、なぜEPRが低いのか。それは、出力が低いのが原因である。

風力発電や太陽光発電のEPRはなぜ低いのか

風力発電のEPRが低いのは、図5に示すように風が吹いて発電する時間、すなわち稼働率が低いことが理由である。この図は、わが国では比較的風の強い北海道の冬(1月)、夏(8月)の例である。冬場は夏に比べて出力は得られるが、最大でも定格の60%から80%程度であり、設備利用率は低い。波形で示した部分を平均すると、30%程度であり、得られるエネルギーが低いことがわかる。夏場は平均すると10%以下になる。

風力発電のEPRを設備容量100kW、設備利用率35%、所内利用率10%として計算すると

発電電力量は

$$100 \times 0.35 \times (1 - 0.10) \times 365 \times 24 = 275940 \text{ kWhr}$$

275940 kWhrは237.3Gcal

設備エネルギーは1195Gcal

毎年の運用エネルギーは22Gcal

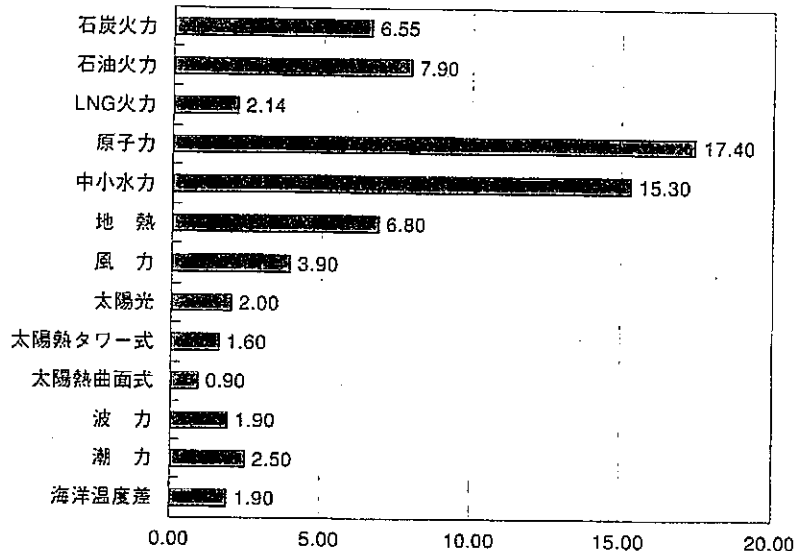
耐用年数30年間でみたEPRは

年間取り出すエネルギー×30年間÷(発電所建設

エネルギー+運転・補修エネルギー×30年間)

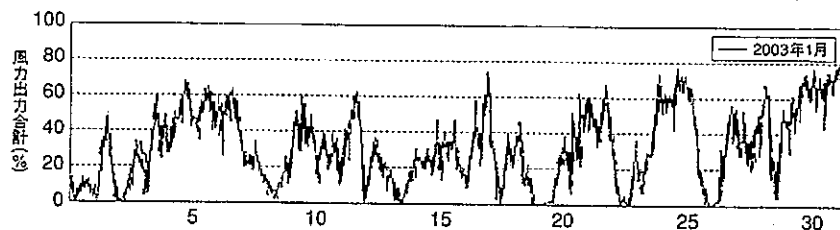
$$237.3 \times 30 / (1195 + 22 \times 30) = 3.84$$

図4 電気を得る手段(発電)をEPRで評価

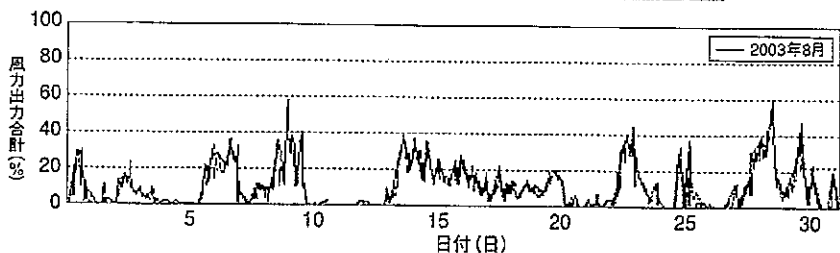


注) 原子力では、U235濃縮法をガス拡散と遠心を半分ずつにしている
設備利用率は、石炭、石油、LNG、原子力は75%、水力45%、風力35%、太陽光15%、太陽熱15%

図5 風力発電の出力変動(実例) EPRが低い理由 北海道(冬と夏)



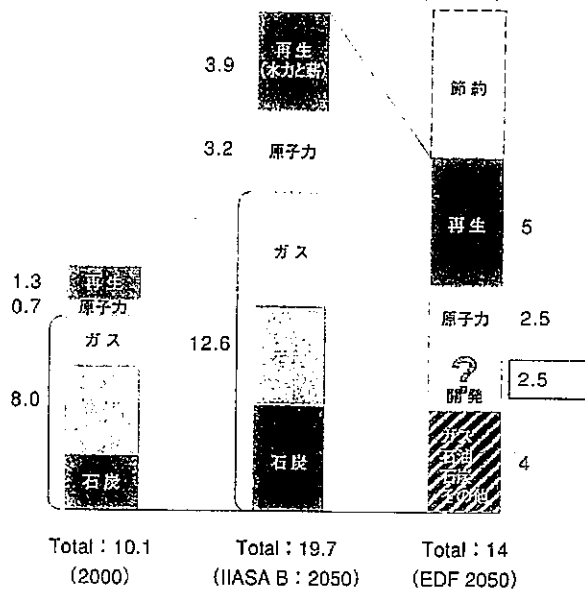
- 風の強い冬でも、風力は定格の60%程度、全体で平均すると30%程度
- 夏は風が枯れる、なごの状態が多い、平均すると10%程度の出力



出典：原文「原子力・エネルギー」図面集2005-2006

太陽光発電のEPRが低いのも設備利用率が低いためである。年平均の日照時間は年間24%程度であり、冬は照度が低い。設備利用率は15%程度である。

図6 世界の一次エネルギーの内訳
2000年と2050年の世界一次エネルギー(ギガトン)



石油の代替を質と量の面から考える—量の面から

資源は質と量の面から考えることが大事である。ここまでEPRを用いて質の議論をしてきたが、以下では、その質の良いもの、石油を代替できるものが2050年以降も量的に存在するかについて議論する。

水力発電は燃料が不要ゆえに、環境とのバランスをとりながら積極的に進めるべきである。日本はモンスーン地帯であり、森を伐採しても30年で復活させられるため、再生エネルギーの薪炭も一つの候補である。原子力発電は、図6の右図で示すように、世界で原子力発電が3.6倍増加すると、ウランピークを2050年に迎える。このため、それまでにウランを増殖して利用する高速増殖炉をある割合(例えば30%程度)で準備する必要がある。

高速増殖炉を運転するために、最初にプルトニウムが必要であり、1GWの高速増殖炉に必要な量は、六ヶ所再処理工場における2年間分に相当する。

日本には、幸いにも多くの水力発電所がある。原

子力発電所も52基あり、高速増殖炉の建設、運転技術もある。再処理工場も試運転中である。国も来年から原子力立国計画として、原子力発電に本格的に取り組むことにしている。

日本はオイルピーク後の石油の供給減に対して準備ができつつある。原子力発電は、石油火力発電と同様に負荷追従運転が可能で、フランスでも多くの実績がある。原子力の比率を高めることは十分可能である。

一方、水力発電や薪炭のこれ以上の利用にも限界があるだろう。原子力発電も高レベル廃棄物処分問題を含め、国民的コンセンサスができていない。これらの問題を科学的合理的に議論するためにアカデミーが必要である。

図6右に示すように、世界の一次エネルギーのフランスシナリオでも30%以上の節約と2.5Gtのエネルギー源が不明である。以上から、エネルギー資源の脱浪費が一番大切である。

まとめと考察

1. 石油の化学原料としての役割は他では代替できない。ペットボトルなど、極力無駄を排除することである。
2. 石油の動力用としての代替は、電気自動車などで代替が可能である。その電気は、原子力発電や水力発電が有望である。
3. 水力は燃料が不要であり、持続的エネルギーである。原子力発電のウラン燃料は世界の原子力発電が増加すると、2050年頃にピークを迎える。それまでにウランを繰り返し使える高速増殖炉の割合を高める必要がある。原子力発電の国民的議論のためのアカデミーが必要である。
4. 2050年までに30%以上の節約を念頭にエネルギー資源の脱浪費が一番大事である。
5. 生産量は、究極埋蔵量の50%を生産した時点で現象しはじめる、というモデルを採用する。これはアメリカの地質学者ハバートが提唱したモデルである