

© 1985 ISIJ

# エネルギー収支分析による新エネルギーの 評価



坂田直起\*

## Evaluation of New Energy Technologies with Net Energy Analysis

Naoki SAKATA

### 1. はじめに

エネルギー収支分析はエネルギー分析の1分野であるので、まずエネルギー分析とは何かについて説明しよう。

エネルギー分析とはエネルギーに関するすべての分析であるように思われるが、実際にはある財やサービスを生産し供給するために直接、間接に投入されるエネルギー量を計量し、対象とする財やサービスをエネルギー消費の観点から評価しようとするものである。例えば自動車を1台製造するためには自動車工場に直接投入される電力や燃料のほか、使用材料である鋼板については製鉄所で鋼材を製造するために投入された石炭や電力の投入量を加え、さらに自動車工場や製鉄所を建設するために使われた鋼材やセメントに投入されたエネルギーも自動車1台あたりに換算して加え、自動車1台あたりに直接、間接を含めどれほどのエネルギーが投入されたかを見るものである。

同様にトマト1kgを生産するために耕運機の燃料のような直接エネルギーのほか、肥料、農薬、機械類などを介しての間接エネルギーの投入をも加え、合計どれほどのエネルギーが投入されたかを見ることもできる。

このようにエネルギー分析の対象は多岐にわたるが、特に分析の対象が電力や都市ガス、石油製品などのようにエネルギーである場合に、産出されたエネルギー（収入）と投入されたエネルギー（支出）の大小を比較、分析するのをエネルギー収支分析（Energy Accounting）と言う。

以上のようにエネルギー分析という言葉は特別な意味あいでは使われているが、一方熱工学などではあるプロセスのエネルギー効率を求める際プロセスに出入りする直接エネルギーを計量するのを、エネルギー収支と称している。両者を区別するため我が国ではエネルギー分析をエネルギー・アナリシス（Energy Analysis）と呼んでいる。

さてエネルギー収支分析が注目された例としては1974

～5年にイギリスのCHAPMAN<sup>1)</sup>が原子力発電システムについて分析を行い、産出エネルギー量から投入エネルギー量を差し引き、正味得られるエネルギーが場合によっては負になりうることを示した報告が有名である。彼はこれを正味エネルギー分析（Net Energy Analysis）と称した。

一方この頃は第1次石油危機の直後であり、アメリカでは石油輸入量を減らすため原子力および各種新エネルギーの開発を進めようとしていたので1974年にはPublic Law 93-577が制定された。これは非核エネルギーの研究開発を連邦政府が行う場合には正味エネルギー分析による評価を行うことを定めたものである。

また同じ年にスウェーデンの国際高等研究所（IFIAS）がエネルギー分析の国際シンポジウムを開催し<sup>2)</sup>、工学者、経済学者、農学者などが一堂に会し、エネルギー分析の効用や、分析手法のとりきめなどについて論議されたが経済学と工学の両方にまたがる領域であることや、発生して間もない学問であり、学問的厳密さに欠けるなどのため統一した結論は得られなかった。

しかしながら第1次石油危機と第2次石油危機の間に各種新エネルギーの開発が進み、エネルギー収支分析のもととなる実測データが蓄積されてきたことや、分析手法が整理されてきたこと、逆に昨今のように原油価格の変動が大きいと経済条件も大きく変化し、新エネルギーのように長いリードタイムと、巨額の投資を必要とするものに対しては経済分析（コスト計算）のみでは長期的な予測が難しく、これを補完あるいは別の視点から評価する方法が必要であることなどからエネルギー収支分析が定着しつつある。

以上のようにエネルギー分析は海外、特にイギリスで盛んであるが、これに対して日本ではエネルギー分析に関する報告が多いとは言えない<sup>3)</sup>。

そこで本報告ではエネルギー収支分析の手法を説明し、さらに今までの各種エネルギーシステムの分析結果を紹介するとともに新エネルギーシステムの評価を行ってみる。

昭和60年4月15日受付（Received Apr. 15, 1985）（依頼解説）

\* 日本鋼管(株)技術開発本部企画部（Planning & Coordination Dept. Engineering, Research & Development Div., Nippon Kokan K. K., 1-1-2 Marunouchi Chiyoda-ku Tokyo 100）

2. エネルギー収支分析の方法

エネルギー収支分析の方法の細部についてはまだ厳密に定められていず、研究者により異なる点もあるので、ここでは術語の説明も兼ねて、最も妥当と思われる分析方法について概説しよう。

今、簡単化のため2種類の燃料を生産する社会を想定する。

まずエネルギー生産部門 (P<sub>1</sub>) は資源 **X** を年間 R<sub>X</sub> t 採取し、精製加工して年間 x<sub>11</sub> kcal の燃料 A を社会に送り出している。ここで x<sub>11</sub> の量は (P<sub>1</sub>) 部門が生産した内から自己消費分を差し引いたあとの値とする。(P<sub>1</sub>) 部門が燃料を生産するための設備関係に各種資材が投入されるが、ここでは1種類とする。投入される資材量を耐用年数で割った年間の資材投入量は x<sub>21</sub> t であるとする。さらに運転のために (P<sub>3</sub>) 部門からの燃料 B を年間 x<sub>31</sub> kcal 投入している。またエネルギー生産部門 (P<sub>3</sub>) は別種の資源 **Y** を年間 R<sub>Y</sub> バレル採取し、年間 x<sub>33</sub> kcal の燃料を社会に送り出している。その際年間、資材を x<sub>23</sub> t と燃料 A を x<sub>13</sub> kcal 投入している。

資材生産部門 (P<sub>2</sub>) は年間、燃料 A を x<sub>12</sub> kcal と燃料 B を x<sub>32</sub> kcal 投入し資材を x<sub>22</sub> t 生産している。(C) 部門は燃料と資材をもつばら消費する部門であり、その消費量は年間燃料 A については (x<sub>11</sub>-x<sub>12</sub>-x<sub>13</sub>) kcal, 燃料 B については (x<sub>33</sub>-x<sub>31</sub>-x<sub>32</sub>) kcal, 資材は (x<sub>22</sub>-x<sub>21</sub>-x<sub>23</sub>) t である。

各部門間の燃料と資材のやりとりをマトリックスであらわすと Table 1 のごとくとなる。(ここで産出は正、投入は負の記号をつけることとする。)

さて各燃料および資材を1単位量生産するために必要なエネルギー資源量は **X** 資源と **Y** 資源をある量ずつ組み合わせて必要であることが予想される。そこで燃料 A を1単位量 (1 kcal) 生産するために **X** 資源を a<sub>1</sub> の量と **Y** 資源を b<sub>1</sub> の量必要であるとする

$$f_A = a_1 X + b_1 Y \quad [\text{資源量/kcal}] \quad \dots\dots\dots (1)$$

資材1単位 (1 t) については

Table 1. Flow of fuels and materials between sectors.

sector \ item	Fuel A production (P <sub>1</sub> )	Material production (P <sub>2</sub> )	Fuel B production (P <sub>3</sub> )	Other (C)
Fuel A (kcal)	x <sub>11</sub>	-x <sub>12</sub>	-x <sub>13</sub>	-(x <sub>11</sub> -x <sub>12</sub> -x <sub>13</sub> )
Material (t)	-x <sub>21</sub>	x <sub>22</sub>	-x <sub>23</sub>	-(x <sub>22</sub> -x <sub>21</sub> -x <sub>23</sub> )
Fuel B (kcal)	-x <sub>31</sub>	-x <sub>32</sub>	x <sub>33</sub>	-(x <sub>33</sub> -x <sub>31</sub> -x <sub>32</sub> )
Extracted energy resource	R <sub>X</sub> (t)	0	R <sub>Y</sub> (barrel)	0

$$f_M = a_2 X + b_2 Y \quad [\text{資源量/t}] \quad \dots\dots\dots (2)$$

燃料 B 1 単位 (1 kcal) については

$$f_B = a_3 X + b_3 Y \quad [\text{資源量/kcal}] \quad \dots\dots\dots (3)$$

とベクトルの形であらわされる。このとき (P<sub>1</sub>) 部門のエネルギー資源に関するバランス式は Table 1 の (P<sub>1</sub>) 部門を縦に見て

$$x_{11} f_A - x_{21} f_M - x_{31} f_B = R_X X \quad \dots\dots\dots (4)$$

(P<sub>2</sub>) 部門は

$$-x_{12} f_A + x_{22} f_M - x_{32} f_B = 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

(P<sub>3</sub>) 部門は

$$-x_{13} f_A - x_{23} f_M + x_{33} f_B = R_Y Y \quad \dots\dots\dots (6)$$

となる。(4)~(6)式に(1)~(3)式を代入し整理するとエネルギー資源 **X** については

$$a_1 x_{11} - a_2 x_{21} - a_3 x_{31} = R_X \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$-a_1 x_{12} + a_2 x_{22} - a_3 x_{32} = 0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$-a_1 x_{13} - a_2 x_{23} + a_3 x_{33} = 0 \quad \dots\dots\dots (9)$$

エネルギー資源 **Y** については

$$b_1 x_{11} - b_2 x_{21} - b_3 x_{31} = 0 \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$-b_1 x_{12} + b_2 x_{22} - b_3 x_{32} = 0 \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$-b_1 x_{13} - b_2 x_{23} + b_3 x_{33} = R_Y \quad \dots\dots\dots (12)$$

となる。(7)~(12)式を a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>, a<sub>3</sub>, b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub>, b<sub>3</sub> について解くと

$$a_1 = \frac{R_X}{\Delta} (x_{22} x_{33} - x_{23} x_{32}) \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$b_1 = \frac{R_Y}{\Delta} (x_{21} x_{32} + x_{31} x_{22}) \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$a_2 = \frac{R_X}{\Delta} (x_{12} x_{33} + x_{32} x_{13}) \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$b_2 = \frac{R_Y}{\Delta} (x_{11} x_{32} + x_{12} x_{31}) \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$a_3 = \frac{R_X}{\Delta} (x_{12} x_{23} + x_{22} x_{13}) \quad \dots\dots\dots (17)$$

$$b_3 = \frac{R_Y}{\Delta} (x_{11} x_{22} - x_{21} x_{12}) \quad \dots\dots\dots (18)$$

ここに Δ は次式であらわされる行列式である。

$$\Delta = \begin{vmatrix} x_{11} & -x_{21} & -x_{31} \\ -x_{12} & x_{22} & -x_{32} \\ -x_{13} & -x_{23} & x_{33} \end{vmatrix} \neq 0 \quad \dots\dots\dots (19)$$

(13)~(18)式を(1)~(3)式に代入すれば各燃料、資材を1単位量生産するために必要なエネルギー資源量が求められる。

さてここではエネルギー資源量を t, バレルなどの単位であらわしたが、これは産出される燃料の単位 (kcal) と混同されないために選んだものである。しかし一般にエネルギー資源量はその資源状態で測った発熱量で示される場合が多い。(例えば石炭は 6500 × 10<sup>3</sup> kcal/t, 原油は 1.47 × 10<sup>6</sup> kcal/バレルなど) そこで資源 **X** の発熱量を H<sub>X</sub> (kcal/t), 資源 **Y** のそれを H<sub>Y</sub> (kcal/バレル) とし, R<sub>X</sub>, R<sub>Y</sub> にそれぞれ H<sub>X</sub>, H<sub>Y</sub> を掛ければ各燃料及び資材を1単位量生産するために必要なエネルギーを資源状態で測った熱量 (1次エネルギーベース) で表すことができる。すなわち燃料 A を1単位

Table 2. Direct and indirect energy requirements for energy in 1967<sup>5)</sup> (in Btu\* per Btu).

Category	Coal	Crude oil & gas	Nuclear & hydro	Total primary
Coal	1.0035	0.0054	0.0006	1.0092
Refined petroleum products	0.0196	1.1991	0.0067	1.2227
Distributed natural gas	0.0112	1.1037	0.0031	1.1166
Electricity	2.0198	1.3543	1.1263	4.0683

(\* Btu: British thermal unit=0.252 kcal)

量 (1 kcal) 生産するのに必要なエネルギーは1次エネルギーベースで

$$f_A = \frac{1}{\Delta} (x_{22}x_{33} - x_{23}x_{32}) R_X H_X + \frac{1}{\Delta} (x_{21}x_{32} + x_{31}x_{22}) R_Y H_Y \quad [\text{kcal/kcal}]$$

燃料B 1単位 (1 kcal) については

$$f_B = \frac{1}{\Delta} (x_{12}x_{23} + x_{22}x_{13}) R_X H_X + \frac{1}{\Delta} (x_{11}x_{22} - x_{21}x_{12}) R_Y H_Y \quad [\text{kcal/kcal}]$$

資材1単位 (1 t) については

$$f_M = \frac{1}{\Delta} (x_{12}x_{33} + x_{32}x_{13}) R_X H_X + \frac{1}{\Delta} (x_{11}x_{32} + x_{12}x_{31}) R_Y H_Y \quad [\text{kcal/t}]$$

となる。

このように産物1単位量あたりに投入されるエネルギーを資源量ベースで求める分析をグロス (Gross) エネルギー分析と称する。BULLARD ら<sup>5)</sup>が1967年のアメリカのエネルギー産業について産業連関表を用いて分析した結果を例として Table 2 に示す。

表から明らかのようにグロス分析では産出されるエネルギー1単位に対し投入されるエネルギーの方が必ず大きい。その理由は資源状態で含まれるエネルギーは社会に流通するエネルギー (燃料, 電力など) に精製, 変換される過程で廃熱やハンドリングロス, 自己消費などでその一部が失われるからである。

グロス分析は社会に流通するエネルギーを1単位生産するためにどれほどエネルギー資源を消費するかを示すものではあるが, 逆に生産されたエネルギーの内, 社会が自由に使つてもよいエネルギーは正味どれほどであるかを示すものではない。

そこで次に正味 (Net) エネルギー分析を行おう。まず (P<sub>1</sub>) 部門の正味エネルギー産出量は R<sub>X</sub> の量の X 資源から f<sub>A</sub> が何単位得られるかを求めることである。f<sub>A</sub> は (1) 式に示すごとく X, Y から成るベクトルであるが燃料Aの主原料は X 資源であるので f<sub>A</sub> ベクトルの X 成分 a<sub>1</sub> で制約されることは明らかである。よつて (P<sub>1</sub>)

部門の正味産出量 NE(A) は

$$NE(A) = R_X / a_1 = \Delta / (x_{22}x_{33} - x_{23}x_{32}) \quad (\text{kcal}) \quad \dots (20)$$

となる。ここで Δ を x<sub>11</sub>, x<sub>12</sub>, x<sub>13</sub> で展開すると次式となる。

$$NE(A) = x_{11} - \frac{(x_{21}x_{33} + x_{23}x_{31})}{(x_{22}x_{33} - x_{23}x_{32})} x_{12} - \frac{(x_{21}x_{32} + x_{22}x_{31})}{(x_{22}x_{33} - x_{23}x_{32})} x_{13} \quad (\text{kcal}) \quad \dots (21)$$

この式は (P<sub>1</sub>) 部門が x<sub>11</sub> の量の燃料Aを生産してゆぐために x<sub>21</sub> の資材と x<sub>31</sub> の燃料Bの投入を必要とするが, (P<sub>2</sub>) 部門から x<sub>21</sub> の資材の供給を確保するためには (P<sub>2</sub>) 部門へ最少限 (21) 式右辺第2項の量の燃料Aを支給しなければならない。

また (P<sub>3</sub>) 部門から x<sub>31</sub> の燃料Bの供給を確保するためには最少限 (21) 式右辺第3項の燃料Aを (P<sub>3</sub>) 部門に支給しなければならないことを示している。

以上のごとく (P<sub>1</sub>) 部門の正味産出量は (C) 部門へ支給される (x<sub>11</sub> - x<sub>12</sub> - x<sub>13</sub>) なる量ではなく, (21) 式で示される量であることに注意すべきである。

さて (P<sub>1</sub>) 部門は上記量の燃料A以外にさらに直接エネルギーとして燃料Bを x<sub>31</sub> の量と x<sub>21</sub> の投入資材中に含まれる燃料Bの分として x<sub>21</sub>  $\frac{x_{32}}{x_{22}}$  の量の合計 (x<sub>31</sub> + x<sub>21</sub>  $\frac{x_{32}}{x_{22}}$ ) の燃料Bを受けている。したがつて (P<sub>1</sub>) 部門以外の社会から見れば, (P<sub>1</sub>) 部門から x<sub>11</sub> の燃料Aをいつたん受けとり, 改めて (21) 式右辺の第2項と第3項の量の燃料Aと, 別のシステム (P<sub>3</sub>) 部門から (x<sub>31</sub> + x<sub>21</sub>  $\frac{x_{32}}{x_{22}}$ ) の量の燃料Bを (P<sub>1</sub>) 部門へ支給していることになる。そこで (P<sub>1</sub>) 部門のエネルギー生産性を

(産出エネルギー) / (社会が投入するエネルギー) = R とし, R をエネルギー比と呼ぶこととすると, (P<sub>1</sub>) 部門のエネルギー比は

$$R_A = \frac{x_{11}}{\left( \frac{x_{21}x_{33} + x_{23}x_{31}}{x_{22}x_{33} - x_{23}x_{32}} \right) x_{12} + \left( \frac{x_{21}x_{32} + x_{22}x_{31}}{x_{22}x_{33} - x_{23}x_{32}} \right) x_{13} + \left( x_{31} + x_{21} \frac{x_{32}}{x_{22}} \right)} \quad \dots (22)$$

とあらわされる。

ここでもし R<sub>A</sub> が1より小さければ社会は (P<sub>1</sub>) 部門へ投入したエネルギーよりも少ないエネルギーしか得ることができず, (P<sub>1</sub>) 部門はエネルギー生産部門としての意味を持たない。逆に1より大きければ社会は投入したエネルギーよりも多くのエネルギーが得られ, その余剰のエネルギーでさらにエネルギー生産部門を拡大し得ることが判定できる。

同様の計算は燃料Bを生産している (P<sub>3</sub>) 部門についても行うことができる。

(P<sub>3</sub>) 部門の燃料Bの正味産出量は

$$NE(B) = R_Y / b_3 = \Delta / (x_{11}x_{22} - x_{12}x_{21})$$

Δ を x<sub>33</sub>, x<sub>32</sub>, x<sub>31</sub> で展開して

$$= x_{33} - \frac{(x_{11}x_{23} + x_{13}x_{21})}{(x_{11}x_{22} - x_{12}x_{21})} x_{32} - \frac{(x_{12}x_{23} + x_{13}x_{22})}{(x_{11}x_{22} - x_{12}x_{21})} x_{31} \dots\dots\dots (23)$$

(P<sub>3</sub>) 部門のエネルギー比は,

$$R_B = \frac{x_{33}}{\left(\frac{x_{11}x_{23} + x_{13}x_{21}}{x_{11}x_{22} - x_{12}x_{21}}\right) x_{32} + \left(\frac{x_{12}x_{23} + x_{13}x_{22}}{x_{11}x_{22} - x_{12}x_{21}}\right) x_{31} + \left(x_{13} + x_{23} \frac{x_{12}}{x_{22}}\right)} \dots\dots\dots (24)$$

となる。このようにエネルギー生産システムが複数種存在する場合、それぞれのシステムのエネルギー比を求め、その値の大小でシステムを評価することができる。

以上は一般的な場合であるが、ここで (P<sub>3</sub>) 部門を既存のエネルギー生産部門 (例えば石油の生産、精製部門)、(P<sub>1</sub>) 部門をこれから参入、あるいは新規に参入した、いわゆる新エネルギー部門であるとしよう。このような場合 (新エネルギーの産出量  $x_{11}$ ) << (既存エネルギーの産出量  $x_{33}$ ) であるので新エネルギーである燃料 A が (P<sub>2</sub>) 部門や (P<sub>3</sub>) 部門に支給される量はきわめて少なく、大部分は直接、最終消費部門 (C) へ向けられるであろう。このとき  $x_{12} = x_{13} = 0$  と置き、新エネルギー部門 (P<sub>1</sub>) のエネルギー比は

$$R_A = x_{11} \left/ \left( x_{31} + x_{21} \frac{x_{32}}{x_{22}} \right) \right. \dots\dots\dots (25)$$

と簡単になる。

この式の意味するところは、社会が新エネルギーシステムを導入し、そこから  $x_{11}$  のエネルギーを得るためには既存のエネルギーを直接、間接の形で  $\left(x_{31} + x_{21} \frac{x_{32}}{x_{22}}\right)$  の量だけ投入しなければならないことを示している。

以上から何種類かの新エネルギーシステムを比較評価する場合には、それぞれのシステムについて (25) 式によるエネルギー比を求め、その値の大小で比較すればよい。

このように正味産出量、あるいはエネルギー比を求める分析を正味エネルギー分析と称するのであるが、今までの式に見られるように、正味エネルギー分析では結果的には採取エネルギー資源量はいつさいあられず、社会に流通しているエネルギー量のみで計量されることに注意すべきである。

さて、上に述べた分析例は簡単化のため燃料の形のエネルギーのみ生産する社会を想定したが、実際の社会では燃料のほかに電力の形のエネルギーも存在する。このように質の異なるエネルギー種が投入、あるいは産出の項にあらわれる場合には燃料と電力の換算率を定めておかないとエネルギー比が求められない。そこで産出エネルギーが燃料で  $F_0$  kcal、直接、間接に投入されるエネルギーが燃料の形で  $F_i$  kcal、電力の形で  $E_i$  kWh である場合には、現在の社会では電力の大部分が燃料を焚いて電力を得ているのでその平均的熱効率 (日本では 1 kWh は 2450 kcal) から投入電力量を燃料に換算し

$$R = \frac{F_0 \text{ (kcal)}}{F_i \text{ (kcal)} + 2450 E_i \text{ (kWh)}} \dots\dots\dots (26)$$

によりエネルギー比を計算することとする。

また産出エネルギーが電力 ( $E_0$  kWh) で、それに対する投入エネルギーが  $F_i$  kcal の燃料と  $E_i$  kWh の電力の場合には、投入燃料分をそれから得られるであろう電力量に換算して

$$R = \frac{E_0 \text{ (kWh)}}{F_i \text{ (kcal)} / 2450 + E_i \text{ (kWh)}} = \frac{2450 E_0 \text{ (kWh)}}{F_i \text{ (kcal)} + 2450 E_i \text{ (kWh)}} \dots\dots\dots (27) \dagger$$

によりエネルギー比を計算することとする。

電力と燃料の等価関係を以上のように定めれば産出エネルギーが電力であろうと燃料であろうとエネルギー比の持つ意味は同じとなり、燃料を生産するシステムと発電システムとを  $R$  の大小で直接比較することができる。

### 3. エネルギー比による各種エネルギーシステムの評価

代替エネルギー、新エネルギーの開発は今までエネルギーの大宗であつた石油資源がいろいろな意味で入手し難くなり、それに替わるエネルギー資源に移行しようとするものである。それゆえ資源の入手しやすさ、あるいは資源消費量よりはむしろどれだけのエネルギーが正味得られるかの方が関心が深いと思われる。そこでここでは各種エネルギーシステムをgross分析ではなく正味分析のエネルギー比で比較評価してみよう。

まず既存エネルギーである石油、天然ガス、石炭を新規に開発する場合、エネルギー比がどの程度であるかをアメリカを中心に調べてみる。

石炭生産については、アメリカの露天掘りの場合、山元での  $R$  の値は約 60 である<sup>6)</sup>。この石炭を鉄道で 300 マイル (アメリカの平均輸送距離) 輸送すると  $R=45$  程度となる。なお日本の地下掘り石炭については  $R=12$  という報告がある<sup>9)</sup>。また筆者の試算ではオーストラリアの露天掘り石炭をバルクキャリアーで輸送した場合、日本着で  $R=38$  となる。

次に原油の生産であるが、アメリカ本土 48 州の油田は老朽化しており、1 井戸あたりの平均生産量は 1974 年時で 13 バレル/日と低く、 $R=80$  と見積もられる<sup>6)</sup>。これに対し中東などの巨大油田の生産性は非常に高く 1 井戸あたり 1 万バレル/日以上あり、筆者の見積りでは井戸元で  $R=6000 \sim 10000$  となる。この原油をタンカーで輸送した場合、ニューオーリンズ着で  $R=27$  となり、国産、輸入原油を加平均すると  $R=54$  となる。

大規模な設備投資で注目される北海油田 (英領) については KLITZ<sup>7)</sup> が  $R=54 \sim 92$  という値を報告してい

† (27) 式の分子を  $860 E_0$  (kWh) として  $R$  を求める報告もある<sup>4)</sup>。

る。これに対して中東原油をタンカーでロッテルダムまで運んだ場合には  $R=29$  となる。なお中東原油を日本まで輸送した場合は  $R=48$  である。

これらの原油を精製した場合、石油製品の合計でエネルギー比を求めると、アメリカの場合  $R=11^{(6)}$ 、日本の場合  $R=32$  となる。日本の値がこのように高いのは石油精製のエネルギーを主に製品である重油で賄っており外部エネルギーの投入が少ないためである。それに対しアメリカでは外部エネルギーとして天然ガスを大量に投入しているためエネルギー比が大きく下がる。

次にアメリカにおける天然ガス生産についてエネルギー比を求めてみると、1974年において1井戸あたりの平均生産量は  $468 \times 10^3 \text{ ft}^3/\text{日}$  でこれは熱量ベースで比較すると石油井の 5.3 倍であること、また生産された天然ガス自体が操業用のエネルギーに用いられ、外部エネルギーの投入が少ないことなどから井戸元で  $R=108$  で、これを 500 マイルパイプラインで輸送すると  $R=61$  となる<sup>(7)</sup>。

インドネシア産の天然ガスを液化し LNG タンカーで日本まで運び、再気化した場合のエネルギー比は  $R=66$  となりかなり高い値と言える。その理由は液化用動力、LNG タンカーの燃料などをすべて天然ガスで賄っており外部エネルギーの投入が少ないためである。

次に既存の発電システムについて見てみると、アメリカにおいて露天掘りからの石炭を 300 マイル鉄道輸送し 100 万 kW 級の石炭火力発電所にて発電を行う場合、送電端で  $R=21$  となる<sup>(8)</sup>。

原子力発電システムについてはウラン鉱石の採掘からガス拡散法による濃縮、発電所、燃料再処理などから成る一連のシステムを考え、100 万 kW 級の軽水炉で発電する場合、送電端で  $R=10$  前後となる<sup>(9)</sup>。

既存のエネルギーシステムのエネルギー比が上に述べた範囲にあるのに対し新エネルギーではどのような値となるかを見てみよう。

石油製品と比較すべき新エネルギーとしてオイルシェールからの合成油がある。アメリカのコロラド州で品位 30~35 ガロン/t のオイルシェール鉱石を地下柱房法で採掘し 10 万バレル/日の規模で中間留分相当の合成油を生産する場合、自家発電を持つと  $R=22$ 、買電によると  $R=13$  という報告がある<sup>(9)</sup>。

石炭を H-Coal 法や EDS 法により直接液化し、軽質油相当品を 10 万バレル/日生産する場合、買電を想定すると  $R=3\sim4$  になると報告されている<sup>(9)</sup>。自家発電の場合は  $R=7\sim8$  となる<sup>(9)</sup>。

再生可能エネルギーからの液体燃料として、現在ブラジルではさとうきびを、アメリカではとうもろこしを原料にし、これらを発酵させてエタノールを製造しガソリン増量剤として用いることが既に商業化されている。

とうもろこしを 6 万ブッシェル/年用い、エタノールを年間 186 000 ガロン (704 kl/年) 生産する場合、農場、アルコール工場を含めて考えると  $R=0.7$  と 1 を切る<sup>(9)</sup>。さとうきびの場合は  $R=1.8$  程度となる<sup>(9)</sup>。

次に自然エネルギーからの発電を見てみよう。

自然エネルギーの賦存状態は地域により大きく異なるので発電プラントの立地点でエネルギー比はかなり変化する。日本立地を想定した分析が科学技術庁<sup>(10)</sup>から報告されているのでその値を紹介する。

1 万 kW の水力発電は耐用年数を 30 年とすると  $R=41$  となる<sup>(10)</sup>。なおアメリカにおいては  $R=30\sim35$  という報告がある<sup>(11)</sup>。

1 万 kW の地熱発電は耐用年数を 20 年とすると  $R=17$  となる<sup>(10)</sup>。

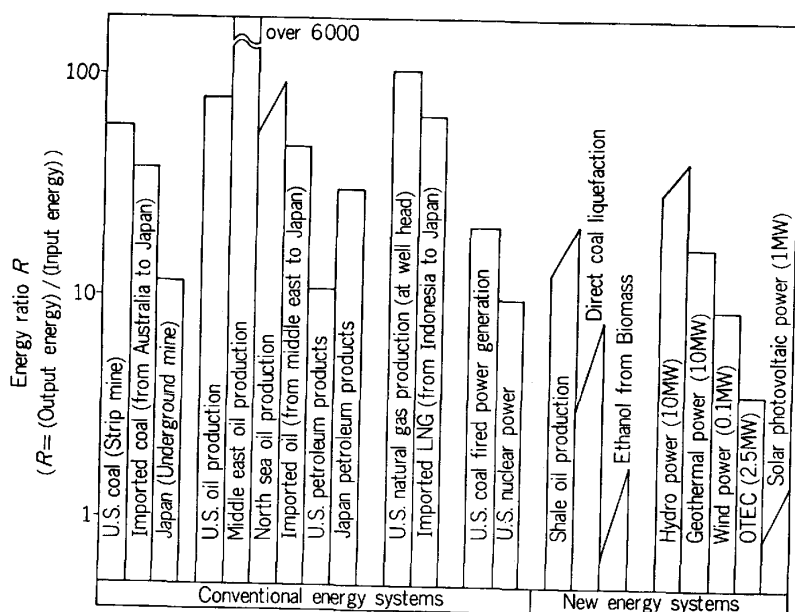


Fig. 1. Energy ratio of various energy systems.

100 kW の風力発電は耐用年数を 20 年とすると  $R=9$  となる<sup>10)</sup>.

2500 kW の海洋温度差発電 (OTEC) では発電端出力の 50% が所内動力に消費されるとし, 耐用年数を 20 年とすると  $R=3.7$  となる<sup>10)</sup>.

太陽光発電はソーラーグレードシリコンによる光電池で 1000 kWp の規模を想定した場合<sup>10)</sup>, 年間稼働時間をピーク時換算で 1400 h, 総合効率を 63%, 耐用年数 20 年と仮定すると  $R=0.83$  となる. 日本より日射量が多い中東などに設置した場合  $R=1.9$  程度となろう.

以上既存エネルギーから新エネルギーにわたり各種エネルギーシステムのエネルギー比の値を紹介した. これらを図示すると Fig. 1 のごとくとなる.

図から明らかのように既存エネルギーシステムのエネルギー比は大略 10 以上を示すのに対し新エネルギーシステムは 2, 3 の例を除きこれより低い. これは資源状態でのエネルギー密度が低いため採取, 濃縮のための設備が出力に比して大きくなり, それによる間接エネルギーの投入が大きいためである.

#### 4. 結 言

前に述べたようにエネルギー比が 1 より大きければエネルギー生産システムとして意味を持つのであるが, 実際には Fig. 1 に示されるように現在商業化されているエネルギーシステムのエネルギー比は 9~10 以上が要求されるようである. したがってこの値を超えるエネルギー生産システムであれば参入, 普及が容易であることが推測される. しかしながら現在開発中の新エネルギーはこの値を下まわるものが多く, 現状の技術レベルではまだ参入は難しいと考えられる. しかし現在流通しているエネルギーの大部分は化石燃料資源に立脚しており, これは石油の開発に示されるように, 資源の消耗とともに新規に入手することが次第に困難となり, エネルギー比は今後低下する性質を持つている. これに対し新エネルギーは, これらとは別の新しいエネルギー資源に立脚し, また採取, 変換技術も開発途上にあることから, エネルギー比は現在より上昇する可能性を秘めている. よって今後とも新エネルギーに対してエネルギー比を上げ

る努力を続けてゆくことが必要であろう.

なお最後に注意すべきことは, エタノール生産の例に見られるように, エネルギー比が 1 を切つても商業化される場合もあるということである. これはエタノールの生産が単にエネルギー対策のみを目的として始められたものではなく, 余剰農作物の対策をも兼ねているからである. このように実際の社会ではエネルギーシステムが純粹にエネルギー生産性のみを追求しているとは限らないのでエネルギー収支分析による評価も絶対的なものではなく, あくまでエネルギー生産の面を強調した評価法の一つであるということである.

なお本報告は筆者が(財)日本エネルギー経済研究所に出席中にとりまとめた研究にもとづくものであり, 本発表を心よく許可された同研究所に厚く謝意を表する.

#### 文 献

- 1) P. F. CHAPMAN: Energy Policy, 8 (1975) 4, p. 285
- 2) International Federation of Institutes for Advanced Studies: Resources and Energy, 1 (1978), p. 151
- 3) 科学技術庁資源調査会編: 衣・食・住のライフサイクルエネルギー (1979) [大蔵省印刷局]
- 4) 茅 陽一編著: エネルギーアナリシス (1980) [電力新報社]
- 5) C. BULLARD, P. PENNER and D. PILATI: Resources and Energy, 1 (1978), p. 267; C. BULLARD and R. HERENDEEN: Energy Policy, 8 (1975) 4, p. 268
- 6) A. FRABETTI: A Study to Develop Energy Estimates of Merit for Selected Fuel Technologies (1975) [Development Sciences, Incorporated]
- 7) J. KLITZ: North Sea Oil (1980) [Pergamon Press]
- 8) Comptroller General of the United States: DOE Funds New Energy Technologies without Estimating Potential Net Energy Yields, General Accounting Office (1982)
- 9) C. HOPKINSON Jr.: Science, 207 (1980) 8
- 10) 科学技術庁資源調査会編: 自然エネルギーと発電技術 (1983) [(社)資源協会]
- 11) M. GILLILAND: Net Energy of Seven Small-Scale Hydroelectric Power Plants (1981) [Oak Ridge National Laboratory]