

■ 特 集 ■ エネルギー経済・エネルギーシステム

エネルギー・アナリシスとその方法

Energy Analysis and It's Methods

茅 陽 一*
Yoichi Kaya
手 塚 哲 央**
Tetsuo Tezuka

はじめに

エネルギー源をはじめとして、諸種の財や活動を、その形成と維持に必要なエネルギーで評価する手法を、一般に「エネルギー・アナリシス」(energy analysis)とよんでいる¹⁾。本文では、このエネルギー・アナリシス研究の歴史的背景をまず述べ、次いで一般的方法論として重要な産業連関分析の拡張手法について説明し、最後に諸種のエネルギー源の評価結果について述べる。なお、本文の内容は、過去の諸研究の結果のみでなく、筆者らのオリジナルな研究成果も含んでいる。

1. 研究の発展

エネルギー・アナリシスは、基本的には次の二つの動機に刺戟されて行なわれるようになったと考えられる。すなわち、第一は、エネルギーの需給がひっ迫し、社会の諸活動のあらゆる面でエネルギー消費の実状把握の関心が強まったことである。エネルギー・アナリシス研究が、事実上1970年代に入って行なわれるようになったことは、この動機の強さを如実にあらわしている。第二は、財の価値把握の手段としての認識の強まりであって、これは金額ベースの評価手法への一つの補完手段としての意味を持つ。過去から、財の価値は市場価格の形で評価されてきているが、この評価は市場の完全性が成立するときに論理的妥当性をもつものであり、環境制約・資源有限性などの外部経済因子が顕在化し、また市場内での競争性が著るしくそがれるような状況の下では、市場価格が財の価値を総合

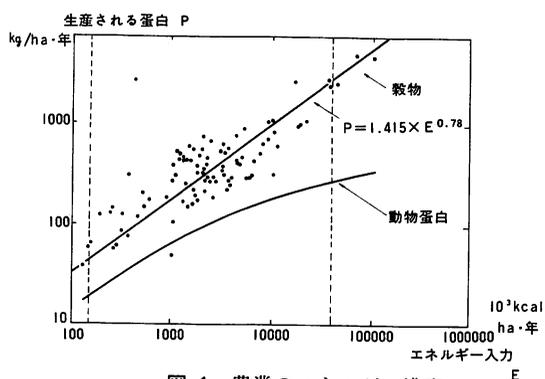


図-1 農業のエネルギー濃度

的に表現したのとは云いがたい。この状況では、エネルギーベースでの評価は、その財を金額ベースとは異った別の側面からみた一つの評価手法として有意性をもつ。

このエネルギー・アナリシス研究は、基本的には次の三つの分野でまず研究が促進された。すなわち、農業生産分析・エネルギー源、特に発電システムの評価・産業構造分析の三つである。

第一の農業生産の分野は、農業生産が、特に先進国においてエネルギー集約化の傾向を強めたことに対する農学者の関心が、エネルギー・アナリシスを進める直接の要因となった。米国の Hirst²⁾、Pimentel³⁾らの穀物生産に関する分析は特に著名で、彼等は米国において単位生産当りのエネルギー消費が大巾に増大していることを示したが、イギリスの Slessor は、世界の各地の主として穀物生産を分析し、単位蛋白生産当りのエネルギー消費は生産の上昇と共に上昇するという、いわゆる収穫低減則を示した⁴⁾。この結果は、図-1に示されている。1973、74両年にかけ、スウェーデンの IFIAS

* 東京大学工学部電気工学科教授

〒113 東京都文京区本郷 7-3-1

** 東京大学工学部電気工学科大学院博士課程

(International Federation of Institutes for Advanced Study) 主催のエネルギー・アナリシスのワークショップがもたれたが、この報告集をみると大半が農業生産の分析にさかれており、この分野でのエネルギー・アナリシスへの関心がよくわかる。

エネルギー源の分析が広く世間の関心を集めるようになったのは、やはりイギリスの物理学者Chapmanの原子力発電所の分析がきっかけである⁵⁾。Chapmanは、ウラン濃縮を中心に原子力発電所がエネルギー集約的な性格が強く、原子力発電所の建設を急速に推進すると、新しい発電所の建設がそれ以前の発電所の発生するエネルギーを消費するという形でエネルギーを消費し、ネットのエネルギー収支が黒字となるには相当の年月を要するおそれがあることを指摘した。このことは、イギリスのみならず、世界的に大きな反響を呼び、以後、エネルギー源のエネルギー・アナリシスが諸方面で行なわれるようになった。この場合は、エネルギー発生源をエネルギー入出力という観点から評価するので、特にエネルギー収支分析(Net Energy Analysis)と呼ぶことが多い。この内容についてはあらためて三節で述べる。

エネルギー・アナリシスの第三の分野は、産業構造の分析である。一つの財の生産が、産業の連鎖を通じて、他の財の生産をどのように誘発するかについては、産業連関分析によって既に広く検討されているが、この概念を拡張し、産業別のエネルギー集約度(energy intensity)を求めることを提案したのは米国のHerendeenであって⁶⁾、この方式は修正の上エネルギー・アナリシスの基本手法として現在一般に用いられている。この手法とそれから得られる結果については、あらためて次節で述べる。

このようにエネルギー・アナリシスは、財の価値評価の一方として現在広く用いられるようになってきているが、一方においてその効用への批判もある⁷⁾。その詳細は避けるが、もっとも多いのは、エネルギーをすべて一次カロリー換算し、エネルギー種別の効用差を考慮していない点である。石油・天然ガス等の流体燃料が石炭・薪炭の固体燃料を駆逐したのは、単なる価格差ではなく、運送・処理・利用における扱い易さの差に多分に原因することを思えば、この批判はたしかに傾聴に値しよう。この点については、たとえば産業連関分析型の手法では、容易に二次エネルギー・一次エネルギー種別での計量が可能であり(次節参照)、エネルギー種別の効用差の定量的把握がなし得るなら一残

念ながらこのような研究は未だなされていないが—この批判にこたえることができると考えられる。いづれにしてもエネルギー・アナリシスは、あくまでも一つの評価手法であり、財の価値を総合評価するものではなく、その範囲で有効なものであることを記憶しておく必要がある。

2. 産業連関分析の拡張手法

エネルギー・アナリシスの方法は、大別して、1)積み上げ方式、2)連関分析方式の二つになる。積み上げ方式は、次節の例で具体的に説明するように、対象となる財を個々の構成要素に分割し、その要素毎にその形成に必要なエネルギーを調査、積算していくもので、どのような対象にも応用可能な方法である。しかし一方、一つの要素毎に調査を行なわなくてはならないため、著しい労力を要し、また対象サンプルの選択によって結果がばらつくという危険を有している。

一方、連関分析方式は、従来の産業連関分析を拡張したもので、産業連関表の部門分類(我国の場合最大で約400部門)以上の細かな部門別の結果が引出せない、という基本的制約はあるが、我国全体のエネルギー統計とよく整合した結果が、殆ど産業連関表の操作のみによって求め得る、という利点を有している。

諸分野のエネルギー・アナリシスは、この二種の方法を適宜組合せて用いることが多い。この場合、積み上げ方式は方法論的には単純で理解し易いが、連関分析方式は方法論的に幾つかの取扱い上の問題点を有し、その対応の仕方で結果がかなり異ってくる。そこで本節では、連関分析方式の手法について説明を加えると同時に、その手法による日本産業の分析結果を示すこととする。

2.1. 基本手法

今、産業各部門の総生産額を $X_i (i=1, 2, \dots, n)$ 、 i 産業から j 産業への投入額を X_{ij} とする。また、 i 産業の中で作り出される一次エネルギーを G_i とする。

ここで、各産業で消費されたエネルギーは、その産業で生産された財に含まれ、他産業なり、最終消費にまわされる、という“エネルギー保存則”を想定する。このような意味での、産業各部門で生産される財に含まれるエネルギーの量を、単位生産額当りの集約度の形で μ_i とあらわそう。これをエネルギー濃度(energy intensity)とよぶ。すると、これらの定義から(1)式が成立する。

$$\mu_j X_j = \sum_i \mu_i X_{ij} + G_j \quad (1)$$

(ただし、こゝでは輸入については考慮していない。
この点は後述する。)

$$\frac{X_{ij}}{X_j} = a_{ij}, \quad \frac{G_j}{X_j} = r_j \quad (2)$$

と書き、(1)に代入し両辺を X_j で除すると

$$\mu_j = \sum_i \mu_i a_{ij} + r_j \quad (3)$$

あるいは、ベクトル形であらわすと

$$\mu^A = A' \mu^A + r \quad (4)$$

ただし、 μ^A 、 r は、 μ_i 、 r_i をそれぞれその i 番要素とするベクトル、 A は a_{ij} を (i, j) 要素とするマトリクスで A' は A の転置である。

(4)から、 μ^A と A があらかじめ知られているならば

$$\mu^A = (I - A')^{-1} r \quad (5)$$

で各産業部門のエネルギー濃度が求められる。これは Herendeen が最初に提案した手法⁶⁾であって、彼はこの式に基づいて米国の場合の μ^A を計算している。(5)を展開すると

$$\mu^A = r + A' r + A^2 r + \dots \quad (6)$$

(6)右辺第一項はその産業部門内で作り出された一次エネルギーを、第二項は他部門から投入されたエネルギーをあらわす。もとより第一項は非エネルギー部門では存在せず、第二項がその産業で直接消費されるエネルギーになる。第三項以降は、他産業から投入される非エネルギー財に含まれるエネルギーで、いわば間接分である。この(6)でわかるように、この計算法ではその財の原料生産に要するエネルギー、その原料のまた原料の生産に要するエネルギー、と産業の連鎖をとことんまで辿って足し合せていく方法であり、積み上げ方式が、実際には連鎖の三、四段目位までしか辿れないのに比し、論理的にもすっきりしている。

この方法で、 X_i 、 X_{ij} の単位を金額にとると A は産業連関分析における投入係数マトリクスとなり、たとえば我国では最新のもので昭和50年表(部門数約400)が利用可能である。

ただ、この(5)式はあくまでもエネルギー・アナリシスの基本の式で、この儘であると従来の産業連関分析における誘発係数の考えと本質的には何等変らない⁸⁾。実際には、以下に示すようなさまざまな考慮が必要となってくる。

2.2. 輸入の取扱い

前節では輸入は全く考慮されていないが、(5)の計算は、輸入財と国産財のエネルギー濃度を等しいと仮定したことに当る。このことは、以下のようにして簡単に説明できる。先の A を投入係数マトリクスとすると、

産業連関表の定義から次式が成立つ。

$$X = A X + D + E - I^A \quad (7)$$

ここで X は先の X_j に対応する生産額ベクトル、 $A X$ は中間需要、 D は国内最終需要(消費及び投資)、 E は輸出、 I^A は輸入である。(7)に I^A を乗じ(4)を代入すると容易に次式を得る。

$$I^A X + I^A I^A = I^A (D + E) \quad (8)$$

これを図にあらわしたのが図-2である。すなわち、国内産エネルギーと輸入財(エネルギーを含め)に含まれるエネルギーが、産業活動を通じて国内の最終需要(エネルギーシステムでの最終需要とは意味が異なる。政府及び個人消費、在庫投資、民間及び政府投資を意味する)と、輸出財に分配されることになる。この(8)、ないし図2では、輸入財のエネルギー濃度が国内財のそれと同一と考えることが明らかに前提になっており、その前提により始めて(5)の算式が正当化できることになる。

しかし、この前提は、輸出入の対GNP比率の高い国では大きな誤差を生む可能性がある。特に我国では、大部分のエネルギーが輸入であり、国内産エネルギーと価格差を有するため、(5)をそのままの形で用いるのはのぞましくない。これへの対応の方法はいくつかあり得るが、一つの方法はエネルギー生産部門の非エネルギー部門からの投入構造のみを日本とエネルギー生産国が同一と仮定し、その部門でのエネルギー/生産額比((2)の r_j)を国内生産・輸入の総合平均とすることである。すなわち、エネルギー部門(j_0 部門)については、(1)の代りに

$$\mu_{j_0}(X_{j_0} + M_{j_0}) = \sum_i \mu_i X_{ij_0} \frac{X_{j_0} + M_{j_0}}{X_{j_0}} + (G_{j_0}^D + G_{j_0}^E) \quad (9)$$

を用いる。ここで、

$G_{j_0}^D$: 国内生産総エネルギー量

$G_{j_0}^E$: 輸入総エネルギー量

をあらわす。エネルギー部門の生産構造が同一という想定は必ずしも妥当ではないが、技術の共通性と非エ

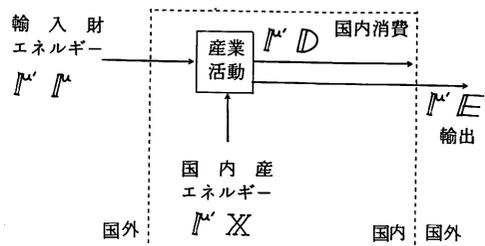


図-2 エネルギーの流れ

エネルギー部門からのエネルギー濃度への寄与分が相対的に小さい（一般に数%以下）ことを考えれば、一応許される仮定であろう。しかも、(9)の方式をとると、国内でのエネルギー消費量は計算値と実統計値と一致することになる。

2.3. 金額計量と物量計量の混合

2.1節の説明で、(1)式の計量単位が何であるかを特に定義しなかった。2.1節で述べたように、これをすべて金額とすると産業連関分析に近い形となるが、現実にはエネルギー含有量は、同一産業部門内でも、金額には必ずしも比例しない。したがって、計量単位は、部門毎に、そのエネルギー含有量にできるだけ比例的な変量を選ぶのがぞましい。しかし、一方、現実にはそのような変量別の産業連関構造データはきわめて不備であり、日本のように統計整備の進んだ国でも、一部しか利用可能ではない。実際に利用できるのは電力、石炭及石油、ガスなどのエネルギー部門で、ここでは物量ベース（Kwh, ton, m³等）のデータが得られるので、これをベースに(1)式を記述するのが有効である。たとえば、電力一つをとりあげても、部門別の物量投入量/金額投入量比は、倍率でいって1～4という大きなばらつきがあり、このような取扱いの重要性が知られる。

非エネルギー部門でも、可能であれば同様な物量ベース（たとえば鉄鋼、非鉄金属原材料重量）の取扱いをすべきであろうが、実際には殆ど不可能である。したがって、金額ベースで扱わざるを得ない。それ故に、各産業部門別のエネルギー濃度は、その部門内での金額を重み係数とした荷重平均値と考えて扱うべきであろう。

2.4. 労働、資本財の取扱い

一つの財の生産には生産要素として、労働、資本が投入され、それらの生産にはまたエネルギーを要する。このために、これらのエネルギー濃度を算定し、財の連関分析から得られた濃度に加えあわせることがしばしば行なわれる。

この考え方は一応合理的にみえるが、連関分析方式の中でこの考え方で計算を行なうことは誤りを招き易い。というのは、図-2に示したように、この方式の計算は生産されたエネルギーが国内最終需要、すなわち消費と投資、及び輸出に吸収されるという概念にもとづいているからである。消費は人間の生活行動に対応するのでそのエネルギー濃度は労働のそれに当り、投資エネルギー濃度はいうまでもなく資本財のそれに当

る。したがって、労働と資本のエネルギー濃度が生産に再びフィードバックされることになると、エネルギーは輸出にしか吸収の場をもたないことになり、輸出のない場合は各産業部門のエネルギー濃度は発散して意味をもたなくなる。

したがって、産業部門別のエネルギー濃度の計算に当っては、特定部門のみを扱う場合は別として、労働・資本からの寄与はむしろ考慮しないのが妥当であろう。仮にもし考慮するとしても、一方のみ——常識的には資本のみ——に限定しなくてはならない。

2.5. その他の取扱い上の問題

この計算方式では、他にも注意すべき点がある。一つは部門分類であって、これがエネルギーのフローを考慮した分類とは必ずしもなっていないことがある。たとえば、エネルギー濃度の異なる二種の金属が、鉱山部門では別部門となりながら、精製工程で同一部門にまとめられている（我国の160部門表）のがその好例であって、このような分類は結果に著しい誤差をひき起すので注意を要する。

また、スクラップの扱いも大きな問題であって、鉄・非鉄スクラップとも、エネルギー濃度の高いものであり、それを如何に扱うかによってかなり最終結果が変わってくる。これらを廃棄物であるという理由でエネルギー濃度を零とみなす、という考え方も一つの方式であるが、いづれにしても計算の上で考え方をあらかじめ明確に定め、その基準に応じた取扱いをすることが重要である。

2.6. 日本の産業別エネルギー濃度

以上の諸点を考慮、昭和50年における日本の産業別エネルギー濃度を筆者らが求めた結果を表1にまとめる。エネルギー部門を別にすると、鉄鋼・非鉄部門の値の大きいことその他、一部のサービス部門のエネルギー濃度が意外に高いことが眼につく。この結果の詳細な分析は、紙面の都合上割愛するが、この結果が諸種のエネルギー分析の基礎となるデータとして有用なものであることを繰返したい。

3. エネルギー源のエネルギー収支

初めに一寸ふれたように、エネルギー・アナリシスが注目を浴びた一つの理由は、原子力発電所のエネルギー収支の評価である。ウランが大きなエネルギーポテンシャルを持つものであっても、それから真にエネルギーを抽出するにはウランの精製・濃縮、発電所及

注：表1末尾参照

び機器の製造にエネルギーを消費しなくてはならない。このエネルギーが発電所から送り出されるエネルギーに比してどの程度のオーダになるかが問題であって、このエネルギー収支という考え方はあらゆるエネルギー源に適用する。原子力発電所についての分析は、Chapman 以来世界的に数多く行なわれているが、その結果は大よそ一致している。

その結果を示す前に、エネルギー収支の算定に当たっての問題点を述べておきたい。第一は、電気エネルギーの取扱い方である。現在のように火力中心に発電が行なわれている現状では、使用した電力は発電効率（現在の日本では平均35%前後）で除して一次エネルギー換算して考えるのが妥当であろう。一方、発電された電力は、その本質的価値を考えればやはり一次エネルギーに換算すべきだと考えられるが、一方、現実には電力のかかなりの部分が低温熱需要という低質の需要に向けられていることを考えると、発電効率で除せずそのまゝの値（すなわち1kwh=860kcal）で計量すべきだという見方もできる。事実、Chapmanはその立場で計算を行なっている。この扱い方により結果はかなり異ってくる。

第二は、エネルギー収支の表現の方法であって、しばしばエネルギー比という概念が用いられる。これは発電所の場合は、その一生の間に発生する総エネルギー出力を、その間に建設時を含め消費する総エネルギー入力で除した値である。一見当り前の概念であるが、補填燃料の製造・発電所補機の運転などに用いる運転用エネルギーの扱い方で、実は以外に計算結果は異なることがある。一つの方式は、これをエネルギー入力に含める方式であり、もう一つの方式はエネルギー出力から差引く方式である。濃縮燃料を用いる原子力発電のような場合は、運転用エネルギー（しかもその大部分が電力）が案外大きいので、前者の方式をとるとエネルギー比がかなり低い値になる。実はChapmanの結果と他での計算での結果がかなり見掛上異っているのも、この取扱いの差に原因がある¹⁾。この欠点を防ぐには、エネルギー比の定義を一本化するのも一つの方法であるが、もう一つは、エネルギー回収年数の概念を利用することで、これは投入されたエネルギーを発電によって回収するのに要する年数をあらわす。これであると、運転用エネルギーは年に差引かれるので、エネルギー比の場合のような計算方式による差という妙な事態は起らない。

以上は、エネルギー収支計算の方式上の問題である

が、第三の、より本質的な問題は、エネルギー収支算定の信頼度を如何に向上させるかである。このような計算は、ウラン濃縮工程の消費電力、といった詳細な計算の積上げであり、前節で述べたような産業連関分析型の手法のみでは到底情報不足で、個別工程の調査が必要である。そうとなると、特定サンプルの調査にならざるを得ないのでどうしても結果にあるばらつきを持つことになる。このようなばらつきを防ぐには、サンプル数を増すなり、業界統計をチェックするなり、何らかの形で情報を増す努力をするしかない。また、もう一つの問題は、対象が将来技術の場合、各工程におけるエネルギー原単位が将来かなり変るおそれのあることで、対象毎に技術革新の見通しをよく調べておく必要がある。たとえば 太陽光発電のように、太陽電池の材料の革新が起りつつある状況では、現在のエネルギー原単位から将来を割り出すことは危険なことといえよう。

原子力発電所についての Chapman の結果の一部を政策科学研究所が行なった⁽⁹⁾石油・石炭・LNG火力発電所についての計算結果とあわせ表2に示す。これを見ると、エネルギー収支から考えても原子力発電所は案外とよい値を示すことが知られる。もっとも、当然のことながらこの値が現実化するか否かは、発電所の稼働率次第で、発電所が安定かつ安全に運転される

表2 諸種発電所のエネルギー収支

(a) 在来火力発電のエネルギー・アナリシス (政策科学研究所による⁽⁹⁾)

	エネルギー入力中 初期入力に占める 割合 (%)	エ ネ ル ギ ー 比		主 要 な エ ネ ル ギ ー 入 力
		電 気 出 力 直接熱換算	電 気 出 力 一次換算	
重油火力	1.8	4.8	13.7	燃料輸送及び加工
LNG火力	0.1	1.45	4.1	燃料前処理と輸送 (液化)
石炭火力	3.6	4.98	14.3	燃料輸送

備考1. 100万KW, 平均稼働率70%, 30年稼働を前提。
2. エネルギー比=出力/総エネルギー入力(運転分含む)

(b) 原子力発電のエネルギー・アナリシス (Chapman, F.P. による⁽⁵⁾)

	エネルギー入力中 初期入力に占める 割合 (%)	エ ネ ル ギ ー 比		エ ネ ル ギ ー 回 収 年 数 (電 気 出 力 直 接 熱 換 算 時)
		電 気 出 力 直接熱換算	電 気 出 力 一次換算	
MAGNOX	49.1	15.1	60.4	1.65
SGHWR	65.6	11.2	44.8	2.23
PWR	75	10~16	40~60	1~2
CANDU	41.3	11.1	44.4	2.25
HTR	83.0	15.8	63.2	1.58

ことが前提条件である。

ここでもう一つ指摘したいのは、やはり Chapman の示した設備増によるエネルギー回収年数の遅延効果である。すなわち、一基の発電所でのエネルギー回収年数を T_0 とすると、このような発電所が年々増設される場合、一基目の運開から数えての全体のエネルギー回収年数は、毎年の増設量が一定のときは $2T_0$ ないし $2T_0 - 1$ 年の範囲に*、毎年の増設量が拡大を続けるときはそれ以上に増大することが容易に示される。これは、一基目の発生するエネルギーを二基目の建設がぐいつぶす、という連鎖が起るためである。したがって、一基のエネルギー回収年数がたとえば数年に及ぶときは、その型の発電所を建設していく場合、十年の程度の間は発電所はエネルギーの生産者というより消費者として機能することになる。このような効果は、考えてみると当り前のことであるが、しばしば見逃されがちな点であり、代替エネルギーの急速な開発にエネルギー問題の解を求めることの一つの限界を示している。

原子力発電に限らず、さまざまなエネルギー源について、エネルギー収支の算定が各方面で行なわれている⁽¹⁾。そのすべてをここに示す余裕はないが、一例として、海洋温度差発電の結果を示そう。これについては、米国 Oakridge グループが、電気出力 25 万 KW のプラント（ただし概念設計にもとづく）の評価を行なった結果があるが⁽¹⁰⁾、筆者らは、各要素についての算定を我国のデータにもとづいて行ない、比較を試みた。

その結果をとりまとめて表 3 に示す。

表 3 海洋温度差発電システムのエネルギー・アナリシス

	オークリッジデータ			東大データ		
	10^5 kcal ton エネルギー 濃度	10^{12} kcal ton 全必要 エネルギー	0.16 0.74 0.02 0.18	10^5 kcal ton エネルギー 濃度	10^{12} kcal ton 全必要 エネルギー	0.21 0.16 0.02 0.08
プラットフォーム	238.8	0.69	0.16	0.89	0.21	
コンクリート	26.6	28.00	0.74	5.95	0.16	
鉄機建	0.51	35.3	0.02	33.0	0.02	
パイプモジュール						
鉄機建	35.2	28.00	0.99	5.95	0.21	
チタン加工	7.8	132.6	1.03	210.0	1.64	
機建	2.9	12.6	0.1	70.0	0.55	
パイプ		35.3	0.1	65.0	0.19	
冷			0.42		0.52	
水						
パイプ	32.6	0.69	0.02	0.89	0.03	
鉄機建	3.63	28.0	0.10	5.95	0.02	
鉄機建			0.02		0.01	
保留システム						
鉄機建	11.0	28.0	0.31	5.95	0.07	
他部分			0.06		0.01	
その他						
アンモニア	24.9	9.83	0.024	19.2	0.048	
高圧系統			0.4	60.0	0.4	
			0.66		0.2	
計			5.33		4.37	
エネルギー回収年数(年)			1.96		1.61	
前提平均稼働率			80%		80%	

対象プラント 米 OLMSC 社設計 250 MW 電気出力プラント (うち 30% 補機運転分)

* 年毎離散モデルと連続時間モデルでこの値には 1 年の差が生ずるが、現実はこの両者の結果の間と考えてよいであろう。

筆者らの検討によると、米国の評価で鉄鋼のエネルギー密度——産業連関分析方式で求めたという——は余りに過大であるが、一方、熱交換器材料のチタンの製造については、米国は過少に見積っていると考えられる。しかし、結局全体としては、表からわかるように米国と筆者らの結果とは、エネルギー回収年数において大きな差はなく、2 年程度の値となっている。

この値は、海洋温度差発電の熱効率の低さ、装置の巨大さを考えると予想以上に小さく、その実用の可能性を示している。ただ、この計算はあくまで実プラントではなく設計のみにもとづいており、また発電所が全年を通じ高い稼働率を維持する（日本の場合、冬期は水温が低下するためこの計算のような設備利用率はおそらく得られまい）、という前提にもとづくことを忘れてはならない。

この他のエネルギー源のエネルギー収支についての議論は別の機会にゆずるが、エネルギー収支という面からみて特に問題があるとみられるのは、太陽熱発電・バイオマス（特にさとうきびからのアルコール製造）などであり、筆者もまた今後検討を続けていきたいと考えている。

4. おわりに

エネルギーアナリシスは、エネルギーシステム、エネルギー源の一つの評価手法としてそれなりに有効なものであり本文が読者がその手法と性格を理解する一つの参考となれば幸いである。

本文の内容中、海洋温度差発電の部分は卒論学生開原弘康君の調査によるところが大きかった。また、本文内容の作業の大部分は、文部省エネルギー特別研究の一環として行なわれているものである。

参考文献

1. 茅陽一編著, エネルギー・アナリシス, 電力新報社, 1980
2. Hirst, E.: Ford-Related Energy Requirements, Science, 184, p 307, 1974
3. Pimentel, D. et al: Food Production and the Energy Crisis, Science, 182, p 443, 1973
4. Slesse, M.; Energy Subsidy as a Criterion in Ford Policy Planning, J. Soc. of Food and Agriculture, 24, 1973
5. Chapman, F.P.; Energy Analysis of Nuclear Power Stations, Energy Policy, 3, 4, p 285, 1975
6. Herendeen, R.A. et al; Energy Impact of Consumption Decisions, Proc. IEEE, 63, 3, 1976
7. Alessio, F.J.; Energy Analysis and the Energy Theory of Value, The Energy Journal, 2, 1, p 61, 1981
8. たとえば 内田忠夫他; 産業連関分析, 有斐閣, 1968
9. 政策科学研究所, エネルギー利用構造とエネルギー収支に関する調査, 1977
10. Perry, A.M. et al; Net Energy Analysis of Five Energy Systems, Oakridge Assoc. Univ., 1977

表1 昭和50年産業連関表によるエネルギー分析結果(1)

単位：kcal/百万円 但し 石炭類：kcal/t (原料炭～亜炭) 石油製品：kcal/kl (揮発油～ナフサ) 電力：kcal/MWH	酪農産物	0.194 E 08	セロファン	0.374 E 08
	農産物の野菜	0.260 E 08	新印刷	0.177 E 08
	農産物の果実	0.150 E 08	出版	0.178 E 08
	農産物の加工品	0.381 E 08	製革	0.185 E 08
	水産物の魚	0.379 E 08	製毛	0.175 E 08
	水産物の製食品	0.264 E 08	製品(革製履物身用品を除く)	0.182 E 08
	冷蔵魚	0.464 E 08	ゴム製	0.451 E 08
	凍蔵魚	0.313 E 08	製品	0.332 E 08
	油蔵魚	0.480 E 08	製品	0.221 E 09
	精製パ	0.127 E 08	硫酸	0.318 E 09
ン・葉	0.285 E 08	カド	0.177 E 09	
砂糖	0.206 E 08	ソバ	0.118 E 09	
植物油	0.387 E 08	工業	0.309 E 09	
調味料	0.300 E 08	製品(石油系を除く)	0.724 E 08	
めん類	0.310 E 08	環式中間物(石油系を除く)	0.402 E 08	
粉類	0.224 E 08	エタノール系	0.117 E 09	
糖粉	0.374 E 08	メタノール系	0.100 E 09	
塩化糖	0.382 E 08	アセチレン系	0.106 E 09	
水食	0.145 E 09	可塑性	0.711 E 08	
製茶	0.224 E 08	油脂加工製品	0.254 E 09	
その他の食料	0.186 E 08	石油化学基礎製品	0.229 E 09	
配合食料	0.341 E 08	石油化学系芳香族製品	0.165 E 09	
アルコール	0.120 E 08	その他の石油系芳香族製品	0.474 E 08	
加工用アルコール	0.135 E 08	人絹	0.669 E 08	
アイソキ	0.432 E 08	繊維原料用合成樹脂	0.738 E 08	
その他の酒	0.950 E 07	ニロン	0.698 E 08	
清涼飲料	0.195 E 08	ビニロン	0.650 E 08	
煙草	0.212 E 08	アクリルニトリル	0.108 E 09	
糸	0.841 E 07	エステル	0.899 E 08	
紡織	0.147 E 08	その他の合成繊維	0.789 E 08	
絹	0.263 E 08	熱硬化性樹脂	0.623 E 08	
麻	0.172 E 08	塩化ビニル	0.125 E 09	
合成繊維	0.218 E 08	油系合成樹脂	0.145 E 09	
絹	0.283 E 08	その他の合成樹脂	0.499 E 08	
絹	0.434 E 08	アロンモニヤ	0.114 E 09	
絹	0.504 E 08	アロンモニヤ	0.698 E 08	
絹	0.180 E 08	石ん灰	0.120 E 09	
絹	0.308 E 08	その他の化学肥	0.508 E 08	
絹	0.189 E 08	農機	0.934 E 08	
絹	0.233 E 08	無機	0.114 E 09	
絹	0.301 E 08	高合成	0.414 E 08	
絹	0.329 E 08	その他の基礎薬	0.436 E 08	
絹	0.209 E 08	塗料	0.703 E 08	
絹	0.220 E 08	医薬	0.225 E 08	
絹	0.318 E 08	石化	0.592 E 08	
絹	0.236 E 08	けん界活性	0.348 E 08	
絹	0.992 E 07	化粧品	0.557 E 08	
絹	0.777 E 07	印刷	0.223 E 08	
絹	0.184 E 08	マッ	0.454 E 08	
絹	0.264 E 08	火薬	0.190 E 08	
絹	0.170 E 08	弾薬	0.368 E 08	
絹	0.215 E 08	写真感光材料	0.451 E 08	
絹	0.116 E 08	その他の最終化学製品	0.938 E 07	
絹	0.216 E 08	揮発燃料	0.970 E 07	
絹	0.139 E 08	灯油	0.970 E 07	
絹	0.138 E 08	軽油	0.100 E 08	
絹	0.158 E 08	A重油	0.108 E 08	
絹	0.165 E 08	B重油	0.108 E 08	
絹	0.198 E 08	C重油	0.108 E 08	
絹	0.711 E 07	ナフ	0.938 E 07	
絹	0.158 E 08	その他の石油製品	0.651 E 09	
絹	0.968 E 07	コーク	0.340 E 09	
絹	0.137 E 08	その他の石炭乾溜製品	0.527 E 09	
絹	0.170 E 08	煉炭	0.188 E 09	
絹	0.145 E 08	舗装材料	0.174 E 09	
絹	0.287 E 08	耐火	0.421 E 08	
絹	0.465 E 08	その他の建設用土石製品	0.390 E 08	
絹	0.457 E 08	板ガラス	0.730 E 08	
絹	0.539 E 08	セラミックス	0.478 E 08	
絹	0.540 E 08	磁器	0.328 E 08	
絹	0.223 E 08	セメント	0.193 E 09	
絹	0.360 E 08	炭素	0.103 E 09	
絹	0.262 E 08	炭研	0.316 E 08	
絹	0.215 E 08	石綿	0.240 E 08	

表1 昭和50年産業連関表によるエネルギー分析結果(2)

生コンクリート	0.613E	08	電気通信機械及び関連機器	0.175E	08	水運付帯サービス	0.977E	07
その他のセメント製品	0.544E	08	電気計測器	0.187E	08	航空空輸送	0.379E	08
その他の土石製品	0.366E	08	電気照明器具	0.302E	08	航空付帯サービス	0.177E	08
鉄屑	0.178E	09	電気機械修理	0.163E	08	その他の運輸付帯サービス	0.110E	08
エロアロ	0.000E	00	電線・ケーブル	0.298E	08	倉庫	0.115E	08
粗鋼	0.140E	09	鋼	0.276E	08	倉庫	0.383E	08
普通鋼	0.131E	09	その他の船	0.274E	08	郵便	0.406E	07
特殊鋼	0.126E	09	船舶修理	0.319E	08	国内電信電話	0.551E	07
普通鋼	0.126E	09	船舶道修車	0.317E	08	国際電信電話	0.641E	07
特殊鋼	0.932E	08	産業用鉄道車	0.277E	08	その他の通信サービス	0.743E	07
冷けんじ	0.932E	08	鉄道車	0.286E	08	公務(中央)	0.123E	08
めっき	0.835E	08	自動車修理	0.254E	08	公務(地方)	0.810E	07
鍛鋼	0.835E	08	自動車修車	0.195E	08	学校教育(国立)	0.503E	07
鋳鋼	0.769E	08	自動車修理	0.215E	08	学校教育(私立)	0.828E	07
鋼管	0.571E	08	自動車二輪車	0.292E	08	自然科学・学校研究機関(国立)	0.958E	07
鋼管	0.671E	08	自転車・リヤカ	0.300E	08	人文科学(国分立)	0.545E	07
鋼管	0.603E	08	航空機修理	0.211E	08	人文科学(私立)	0.846E	07
鋼管	0.646E	08	その他の輸送機械	0.203E	08	自然科学(私立)	0.387E	07
鋼管	0.259E	08	その他の輸送機械修理	0.155E	08	自家用教育	0.280E	08
鉛	0.298E	08	化学	0.205E	08	社会教育(国立)	0.203E	08
鉛	0.294E	08	度量衡器・計量器	0.247E	08	社会教育(非営利)	0.132E	08
鉛	0.565E	08	医療機械	0.217E	08	その他の教育訓練機関(国立)	0.296E	08
鉛	0.558E	08	精密機械修理	0.140E	08	産業	0.362E	08
アルミニウム	0.127E	09	カメラ	0.116E	08	自然科学研究機関(国立)	0.739E	07
アルミニウム	0.127E	09	その他の光学機械	0.180E	08	自然科学研究機関(国立)	0.502E	07
非鉄金属	0.000E	00	時計修理	0.141E	08	自然科学研究機関(産業)	0.144E	08
その他の非鉄金属地金	0.375E	08	玩具・運動用品(ゴム製を除く)	0.229E	08	自然科学研究機関(産業)	0.899E	07
銅	0.229E	08	楽器	0.128E	08	自家用研究	0.347E	08
銅	0.784E	08	合成樹脂製品	0.474E	08	医療(国立)	0.126E	08
機械用鑄造品(非鉄)	0.484E	08	筆記用具	0.188E	08	医療(非営利)	0.130E	08
その他の非鉄金属一次製品	0.303E	08	刃細貨品	0.161E	08	産業	0.138E	08
軽鉄骨系パネル	0.444E	08	その他の製造品	0.285E	08	保健衛生(国立)	0.707E	07
その他の鉄構物	0.542E	08	住宅新建築(木造)	0.185E	08	保健衛生(非営利)	0.117E	08
金属製のドア・シャッター	0.528E	08	住宅新建築(非木造)	0.260E	08	産業	0.895E	07
その他の建設用金属製品	0.432E	08	非住宅新建築(木造)	0.185E	08	社会保険事業	0.134E	08
家庭用具	0.328E	08	非住宅新建築(非木造)	0.275E	08	社会福祉施設(国立)	0.986E	07
道路器具	0.419E	08	非建設補修	0.255E	08	社会福祉施設(非営利)	0.844E	07
その他の金属製品	0.362E	08	道路関係公共事業	0.334E	08	社会福祉施設(国立)	0.986E	07
原動機・ボイラ	0.227E	08	河川・下水道・その他の公共事業	0.289E	08	社会福祉施設(非営利)	0.844E	07
工作機械	0.219E	08	公共事業・農業土木・林道・活山・災害	0.240E	08	社会福祉施設(非営利)	0.844E	07
金属加工機械	0.303E	08	鉄道軌道建設	0.260E	08	社会福祉施設(非営利)	0.844E	07
農業機械	0.225E	08	電力施設建設	0.358E	08	社会福祉施設(非営利)	0.844E	07
山・土木建設機械	0.261E	08	電信電話施設建設	0.237E	08	社会福祉施設(非営利)	0.844E	07
鉱化機械	0.299E	08	その他の建設	0.243E	08	社会福祉施設(非営利)	0.844E	07
繊維機械	0.248E	08	その事業用電力	0.239E	10	社会福祉施設(非営利)	0.844E	07
食料加工機械	0.286E	08	自都市発給	0.184E	10	社会福祉施設(非営利)	0.844E	07
製材木工機械	0.263E	08	熱水供給	0.190E	09	社会福祉施設(非営利)	0.844E	07
印刷・製本・紙加工機械	0.251E	08	水道・簡易水道	0.299E	08	社会福祉施設(非営利)	0.844E	07
特殊産業機械	0.268E	08	工業用水	0.391E	08	社会福祉施設(非営利)	0.844E	07
ポンプおよび圧縮機	0.239E	08	下水道	0.582E	08	社会福祉施設(非営利)	0.844E	07
運搬機	0.265E	08	廃棄物処理(公営)	0.172E	08	社会福祉施設(非営利)	0.844E	07
冷凍機・温湿調整装置	0.253E	08	廃棄物処理(産業)	0.110E	08	社会福祉施設(非営利)	0.844E	07
サービス用機器	0.298E	08	命害保険	0.345E	07	社会福祉施設(非営利)	0.844E	07
産業用運搬車	0.291E	08	不動産仲介業	0.106E	08	社会福祉施設(非営利)	0.844E	07
産業用搬送機	0.365E	08	住宅賃貸	0.219E	07	社会福祉施設(非営利)	0.844E	07
その他の一般産業機械および装置	0.247E	08	住動産賃貸料	0.116E	08	社会福祉施設(非営利)	0.844E	07
一般機械修理	0.159E	08	国有鉄道(除国電旅客)	0.297E	08	社会福祉施設(非営利)	0.844E	07
業務用機械	0.194E	08	国有鉄道(国電旅客)	0.249E	08	社会福祉施設(非営利)	0.844E	07
ミシン・毛糸手編機	0.195E	08	地方鉄道	0.256E	08	社会福祉施設(非営利)	0.844E	07
銃砲	0.269E	08	ハイヤー・タクシー	0.194E	08	社会福祉施設(非営利)	0.844E	07
その他の機械・同部分品	0.311E	08	自家用旅客自動車輸送	0.330E	08	社会福祉施設(非営利)	0.844E	07
発電機	0.342E	08	道路貨物輸送	0.221E	08	社会福祉施設(非営利)	0.844E	07
送配電機	0.299E	08	通家用貨物自動車輸送	0.159E	08	社会福祉施設(非営利)	0.844E	07
電送機	0.293E	08	道路輸送施設提供	0.585E	07	社会福祉施設(非営利)	0.844E	07
その他の産業用重電機	0.256E	08	外洋	0.975E	08	社会福祉施設(非営利)	0.844E	07
電球	0.251E	08	沿海	0.116E	09	社会福祉施設(非営利)	0.844E	07
電気音響機器	0.174E	08	港湾	0.723E	07	社会福祉施設(非営利)	0.844E	07
ラジオ・テレビ受信機	0.165E	08				社会福祉施設(非営利)	0.844E	07
民生用電気機器	0.205E	08				社会福祉施設(非営利)	0.844E	07
電子計算機同付属装置	0.207E	08				社会福祉施設(非営利)	0.844E	07
その他の軽電機	0.248E	08				社会福祉施設(非営利)	0.844E	07
その他の電子応用装置	0.221E	08				社会福祉施設(非営利)	0.844E	07
電子	0.272E	08				社会福祉施設(非営利)	0.844E	07
半導体素子・集積回路	0.232E	08				社会福祉施設(非営利)	0.844E	07