

# エネルギー供給技術の有効性の検討

<b>1. 工業を支える基本エネルギー資源の満足すべき条件…</b>	<b>2</b>
1-1 エネルギー産出比	
1-2 エネルギー資源の質	
1-3 エネルギー資源の総合的評価	
<b>2. エネルギー利用技術の評価～特に発電について</b>	<b>… 10</b>
2-1 エネルギー利用技術の評価におけるエネルギー産出比	
2-2 エネルギー産出比と迂回過程	
<b>3. エネルギー供給技術各論</b>	<b>… 14</b>
3-1 石油火力発電	
3-2 自然エネルギー発電	
3-3 その他のエネルギー供給装置	
<b>4. 結論</b>	<b>… 28</b>

2012/10/22 版

## はじめに

米国の地質学者 M.K. Hubbert の提唱する Hubbert モデルによって石油生産量を推定すると 2010～2020 年にピークが現れ、その後は次第に石油生産量が減少局面に入るとされています。これは“Peak Oil”として知られています。

Hubbert モデルの推定時期が正しいかどうかはともかく、有限の地下資源である石油は有限の期間で利用不可能になることは事実です。ポスト石油を想定して、エネルギー資源の多様化とエネルギー供給技術の開発が行われようとしています。その方向は 2 つに大別できます。

一つの方向は、石油に代わるエネルギー資源の開発です。石炭・天然ガスは既に利用されていますが、その他にオイルサンド、オイルシェール、メタンハイドレートなどが考えられています。

そしてもう一つの方向が、いわゆる自然エネルギーを利用する発電システムの技術開発です。

しかし、これらの技術開発に対して基本的な熱力学的な考察が欠落しているために、誤った方向に向かいつつあります。本稿ではエネルギー技術を総合的・科学的に評価する視点を示すことにします。

## 1. 工業を支える基本エネルギー資源の満足すべき条件

はじめに、エネルギー技術を熱力学的な視点から科学的に評価する基本的な視点を示すことにします。

### 1-1 エネルギー産出比

産業革命を支えたのは、石炭というエネルギー資源であり、その燃焼熱から動力を取り出す技術である蒸気機関でした。そして現在の工業化社会を支える最も根源的なエネルギー資源は石油であり、その利用技術である内燃機関です。以下、工業生産を成立させている最も基本となるエネルギー資源を基本エネルギー資源と呼ぶことにします。

基本エネルギー資源となる必要条件の一つは、自らを拡大再生産できることです。例えば、燃料石油 1 単位を石油生産に投入した場合、少なくとも燃料石油を 1 単位よりも多く生産できることが必要です。得られる燃料石油量が 1.0 以下であればエネルギー資源として独立して供給を継続することが出来ないために基本エネルギー資源になることはできません。

石油生産に投入する燃料石油量（あるいはその熱量）に対する最終的に生産される燃料石油量（あるいはその熱量）の比率を「エネルギー産出比」と定義します。

$$\text{エネルギー産出比} = \frac{\text{産出エネルギー量}}{\text{投入エネルギー量}}$$

エネルギー産出比を用いて基本エネルギー資源に求められる最低の条件を表すと次のとおりです。

$$\text{基本エネルギー資源のエネルギー産出比} > 1.0$$

エネルギー産出比を算定する場合にエネルギー量を表す具体的な尺度は、同一のエネルギー資源であれば体積、経済価値（価格）でも構いません。

異なるエネルギー資源であれば、例えば石油を投入して石炭を生産するような場合には、投入石油燃料の熱量に対する産出された石炭燃料の熱量の比率として算定することができます。

またエネルギー産出比とは工業的な技術としての評価の指標ですから、自然エネルギー発電の場合には風力や太陽光、地熱などの自由財は投入エネルギーから除外します。

総合的にエネルギー産出比の高い燃料資源あるいはエネルギー供給技術ほど優れています。近代工業を支えるためには少なくとも基本エネルギー資源のエネルギー産出比は 10 のオーダーが必要でしょう。

## 1-2 エネルギー資源の質

### 1-2-1 低エントロピー性

石炭や石油を始めとするエネルギー資源の優劣を判断する基本的な評価の視点の一つが低エントロピー性です。エントロピーとは物質の拡散の程度を示す状態量です。エネルギー資源の低エントロピー性とは、密度が高く不純物が少ないことです。

例えば、各種の石油燃料という工業製品の原料となる原油は、色々な炭化水素化合物を主体とし、その他に硫黄などを含む混合物です。混合物は同一の空間に多種類の物質が相互に拡散した状態なので、物質が純粋な状態で存在する場合に比べて“混合エントロピー”の大きな状態にあります。

そのため、原油に含まれる特定の成分だけを分離するためには分溜などの化学プロセスを通して外部から工業的エネルギーを投入して最終的な石油製品を製造することになります。この石油燃料の製造プロセスにおいて、硫黄などの不純物が多いほど=エントロピーが大きいほど製造プロセスは複雑になり、投入するエネルギーを多く必要とすることになります。

### 1-2-2 固体・液体・気体・包接水和物

現在利用されているエネルギー資源には、固体の石炭、液体の石油、気体の天然ガス、石油ガスなどがあります。

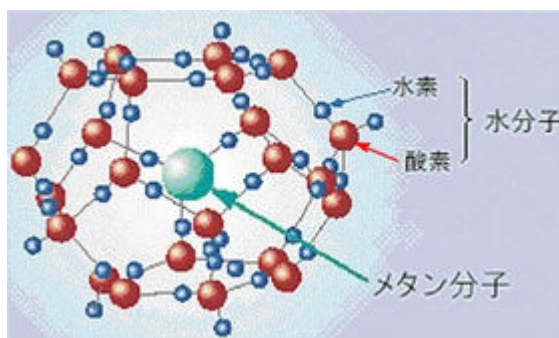
固体の石炭は高炉における製鉄工程の燃料・還元剤として用いられる他、大規模ボイラーの熱源として利用されています(一部には暖房用)。産業革命を支えた優れたエネルギー資源ですが、固体であるため取り扱いが面倒であり、自動車を始めとする近代的な動力機関の多くが内燃機関になったことから、エネルギー資源としての主役の座を石油に譲り渡しました。しかし特定の用途では不可欠であり、エネルギー産出比の高い優れたエネルギー資源です。

液体の石油は現在最も普遍的に利用されている“基本エネルギー資源”です。その決定的な要因は、現在の社会の主要動力機関が内燃機関になったことによります。それ以外に燃料資源として、液体の石油は単位体積(あるいは重量)あたりの発熱量が大きく、しかも常温で液体で安定していることから取り扱いやすいことによります。

常温で気体である天然ガスは、気体のままでは体積あたりの発熱量が小さすぎるために低温で圧縮して液化天然ガス(LNG=Liquefied Natural Gas)として利用するのが一般的です。LNGは優れた燃料ですが、これは天然ガスを原料とした工業製品です。気体燃料を液化するためには低温の下で高圧をかけることが必要であり、莫大なエネルギーの投入が必要になります。また、LNGを使用するためには液体で安定した石油に比べて、耐圧容器や配管に注意が必要であり、どこでも気軽に使える燃料ではありません。

最近注目されはじめた資源としてメタンハイドレートがあります。ハイドレートは日本語では包接水和物と言い、低温高圧の条件下に水と気体が置かれた時に、水の水素結合の

かご状構造の中に気体分子を取り込んだ構造をしています。メタン（CH<sub>4</sub>）は LNG の主成分です。

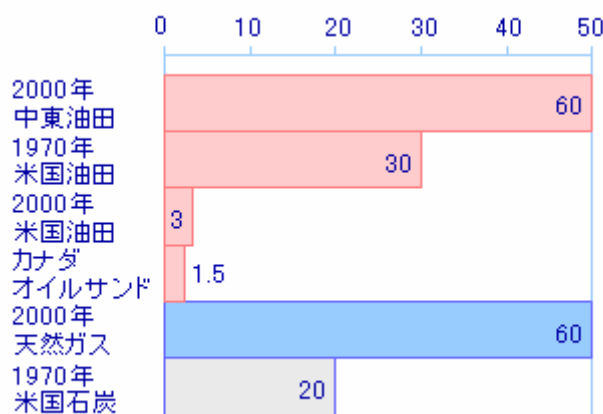


### 1-2-3 鉱床の状態

同じ原油でも、鉱床が陸にあるのか海にあるのかによって、また鉱床の深さなどの状態によって掘削に必要な設備や投入するエネルギー量には大きな開きがあります。例えば、陸上で自噴する条件の良い油田と、水圧で加圧しなければ汲み上げられない油田、海底深いところにある油田ではまったくエネルギー産出比が異なります。

また、燃料資源が個体か液体か気体かによっても採掘に必要な設備や投入エネルギー量が大きく異なります。

下図に油田の条件や資源の種類によるエネルギー収支比（EPR=Energy Profit Ratio）の例を示します。ここに示すエネルギー収支比は本稿におけるエネルギー産出比と基本的に同じものですが、最終的な石油燃料や LNG ではなく、原油や天然ガスの状態に対する投入エネルギー量と産出エネルギー量の比率です。埋蔵量が多くてもエネルギー収支比が 1.0 を切った段階でエネルギー資源として採掘することが無意味になります。



エネルギー資源の鉱床の状態によるエネルギー収支比（EPR）の比較

石油生産量の減少を見据えて、これまで条件が悪く燃料資源として利用されてこなかったものまでが注目され始めています。前出のメタンハイドレートやオイルサンド、オイルシェール、シェールガスなどがあります。

オイルサンドとは重質原油（揮発成分を含まない粘性の高い鉱物油）成分を含む砂岩のことです。オイルシェールは原油成分（油母＝ケロジェン）を含む頁岩（層状に剥がれる性質を持つ堆積岩）のことです。シェールガスは頁岩層に含まれる天然ガスです。いずれも通常の油田やガス田とは異なり、何らかの方法で母岩を物理化学的に破碎するなどして分離して原油成分や天然ガスを抽出しなくてはなりません。それだけエネルギー産出比は小さくなります。

### 1-3 エネルギー資源の総合的評価

基本エネルギー資源となるには、1-2 節で示したエネルギー資源の質を考慮して 1-1 節で示したエネルギー産出比が 1.0 を大きく上回ることが必要です。これまで基本エネルギー資源となってきた石炭や石油のエネルギー産出比は少なくとも 10 のオーダーにあると考えられます。

ここでは、石炭や石油が基本エネルギーになり得た理由を考察し、近年注目されるようになったメタンハイドレートやオイルシェールに代表される「非在来型エネルギー資源」の可能性について整理しておきます。

#### 1-3-1 在来型エネルギー資源の優位性

まず、物性として、石炭は固体であり石油は液体であり、常温で安定した取り扱い易い物質です。同時に、体積あたりの発熱量が大きいことも優れた性質です。

その上で、世界の工業を支えることができるほど量的に豊富です。比較的容易に採掘できることも重要な要素です。さらに、採掘した石炭や原油から最終製品である燃料に加工するために投入するエネルギーが小さいことも重要です。

良質な油田や炭鉱が地域的に偏って集中していることは、実はエネルギー資源としては大きな長所です。資源が集中していることによって、一つの設備で大量の資源を掘り出すことができるということは、採掘エネルギー資源量あたりの設備や投入エネルギー量を小さくできるのです。逆にエネルギー資源が低い密度で広範囲に広がっている場合には、得られるエネルギー資源量に対して採取のための設備と投入エネルギー量が大きくなるためエネルギー産出比が悪化することになります。

石炭と石油を比較すると、石炭は固体であり、液体の石油よりも採掘に手間がかかり、特に坑道を掘削しなければならない場合には生産性に大きな差が生まれます。更に、現在の動力装置の大部分が内燃機関なので基本エネルギー資源は石炭ではなく石油なのです。しかし石炭は、製鉄における還元剤としてこれに優るものはなく、また火力発電など大型ボイラーの燃料としても重要であり、現在でも高い利用価値があります。

天然ガスは常温で気体であり、体積あたりのエネルギー量が小さいことが大きな問題です。この欠点を克服するために低温高压で液化することが行われています。この圧縮工程に莫大なエネルギー投入が必要なために、LNG のエネルギー産出比は石炭や石油に比較して必然的に小さくなります（エネルギー産出比は 10 以下?）。天然ガスから製造された

LNG は優れた燃料ですが、その保管のためには貯蔵用の圧力容器や配管などに特殊な施設・設備（LNG チェーン）が必要です。これもエネルギー産出比を低下させる要因になります。しかし、燃料としての LNG は排気ガスが清浄であり、最新のコンバインドサイクル火力発電の重要な燃料です。

### LNGチェーン



以上を総合的に判断すると、現状では石油が基本エネルギー資源として最も優れていると考えられます。現在の工業化社会では石油を基本エネルギー資源として利用し、石炭やLNGの優れた特性を利用するために、石油燃料を投入して石炭やLNGを生産しているのです。

#### 1-3-2 非在来型エネルギー資源実用化の可能性

近年、日本の周辺海域にメタンハイドレートが大量にあること、また秋田においてオイルシェール層があることなどが話題となっています。

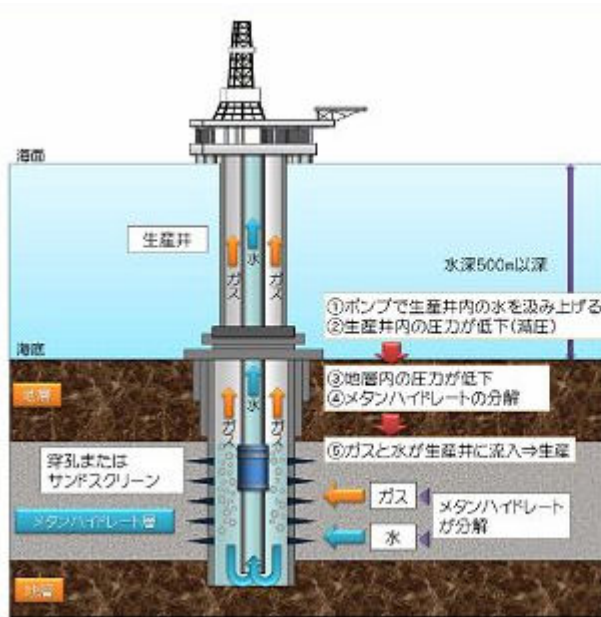
既に述べたように燃料となる物質が地下や海底にあることと、それを利用することに価値があるかどうかはまったく別の問題なのです。なぜこれまでメタンハイドレートやシェールオイルに代表される非在来型エネルギー資源が使われて来なかったのかを考えることにします。

第一に探査技術の限界から鉱床を見つけることが出来なかったことが挙げられます。これは裏を返せばそれほど難しい環境の中にあることを示しています。

第二に、見つかった鉱床から資源を効率的に採取する技術がない事が挙げられます。

第三に、石油や石炭ほど凝集した資源ではなく、鉱床が薄く広範囲に分布していることも大きな欠点です。

例えば、1996年時点で日本周辺海域にあるメタンハイドレートの量は天然ガス換算で7.35兆立方メートル、日本で消費される天然ガスの約96年以上あるとされていました。しかし、1000mの深海から包接水和物＝固体であるメタンハイドレートからメタンを気体として分離して取り出すためには莫大なエネルギーの投入が必要になるため、事実上エネルギーを生み出すことはない、つまりエネルギー産出比<1.0であろうと言われているのです。また、メタンハイドレート鉱床の厚さが薄く広範囲に分布していることも大きな欠点です（石井吉徳「メタンハイドレートは資源ではない」<http://www.alterna.co.jp/7097>）。



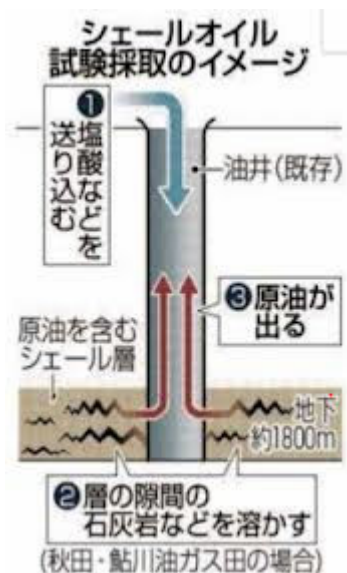
- 第1回海洋産出試験では、左に示す減圧法を用いて生産試験を実施する。
- 減圧法ではメタンハイドレートを地層中でメタンガスと水に分解し、メタンガスを回収する。

メタンハイドレートからのメタン採取概念図

さらに回収したメタンは実用的には圧縮して LNG にすることが必要であり、エネルギー産出比は更に低くなります。

以上から、日本周辺海域のメタンハイドレートのエネルギー資源としての利用に実効性は殆ど無いと考えるべきです。

先日、秋田において日本で初めてシェールオイルの採取に成功したとして大きく報道されました。板状の層構造を持つ堆積岩の一種である頁岩の中で、油母という石油の元になる成分を含有するものをオイルシェールと呼びます。



オイルシェールからのシェールオイル採取概念図

油田とは異なり、オイルシェールからシェールオイルを取り出すためには、オイルシェ



ールを水圧や酸を含む水で物理・化学的に破碎した上で、酸を含む水と一緒に油分を回収し、混合液から何らかの方法で（秋田の試掘では遠心分離機を用いた）シェールオイルを分離抽出します。

詳細はまだわかりませんが、おそらくメタンハイドレート同様、日本におけるオイルシェールのエネルギー資源としての利用に合理性（＝エネルギー産出比 $>1.0$ ）がある可能性は小さいと考えるべきです。

### 1-3-3 石油に代わる基本エネルギー資源

メタンハイドレートやオイルシェールに限らず、非在来型エネルギー資源は一般的に採掘条件の厳しい場所にあり、エントロピーが大きいいため、採取・精製するための設備・装置や投入するエネルギー量が多くなる傾向があります。

現状では石油燃料を大量に投入することでメタンハイドレートやオイルシェールから燃料を生産することは技術的に可能ですが、果たして実質的にエネルギーを生み出しているのかどうかはエネルギー産出比を厳密に検討することが必要です。

おそらく、非在来型エネルギー資源のうちで実質的にエネルギーを供給する可能性のある鉱床（＝エネルギー産出比 $>1.0$ ）はよほど状態が良いごく一部に限られると考えるべきです。非在来型エネルギー資源のエネルギー産出比は平均すれば1.0を超えることはないでしょうから、基本エネルギー資源にはなり得ません。エネルギー産出比が1.0を下回れば、いくら埋蔵量が多くても敢えて石油を投入して生産することにはまったく意味はなく、単に石油燃料の浪費にすぎないことを理解しておかなければなりません。

ピークオイル説が事実だとして、ポスト石油を担うことのできる基本エネルギー資源となり得るのは、非在来型エネルギー資源ではなく、おそらく質・量から見て石炭以外に可能性はないと考えられます。

## 2. エネルギー利用技術の評価～特に発電について

ここでは、エネルギー資源に対する利用技術について考えることにします。エネルギー利用技術の中で、特に注目されているのが発電技術です。石油枯渇後のエネルギー供給において、発電に対して過大な評価がされています。しかし、発電技術とは基本エネルギー資源に支えられた工業生産システムの中で存在することが許されたエネルギー変換技術に過ぎず新たにエネルギーを生み出すことはできません（自然エネルギー発電は例外です）。したがって、基本エネルギー資源を代替することはできません。

画期的な発電技術によって石油に替わるエネルギー供給が可能なのではないかという幻想を抱かせている一因が、NEDO（独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構）や電力中央研究所などの“専門機関”が公表しているEPR（エネルギー収支比）が1.0をはるかに超える大きな値を示しているからです。

まず、本稿で用いるエネルギー産出比と彼らのEPRの違いを明らかにすることから始めることにします。

### 2-1 エネルギー利用技術の評価におけるエネルギー産出比

エネルギーの利用技術についてもその評価の尺度としてエネルギー産出比を用いることができます。エネルギー利用技術における投入エネルギーは基本エネルギー資源である石油燃料換算のエネルギー投入量とし、それに対する産出エネルギー量の比率で表すことにします。

エネルギー資源の利用技術は、有用なエネルギー資源を投入することで何らかの有用なエネルギーを取り出すプロセスです。熱力学におけるエネルギー保存則とエントロピー増大則から、必ず「投入エネルギー量>産出エネルギー量」となるので、エネルギー資源に対するエネルギー産出比とは異なり、エネルギー利用技術については「エネルギー産出比<1.0」になります。電力という二次的なエネルギーで基本エネルギー資源を代替することは不可能なのです。

ここで発電技術に対してNEDOや電力中研によって算定されたEPRについて紹介しておきます。通常、EPRは投入エネルギー量に対する産出エネルギー量の比率で表される量なので、本稿におけるエネルギー産出比と同じ定義です。

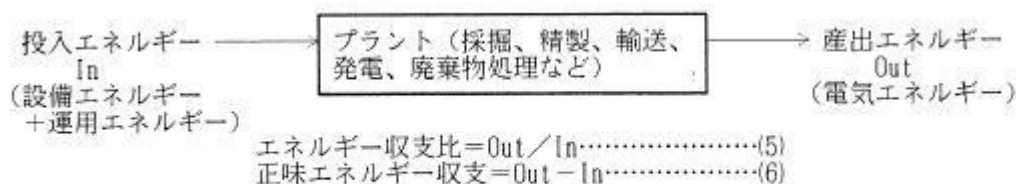


図6 発電システムのエネルギー収支  
Fig.6 Energy analysis of power generation system

電中研報告 Y94009 「発電システムのライフサイクル分析」 p.14 (1995年)

ところが、現在日本で流通している NEDO や電力中研による発電におけるエネルギー収支比は、発電燃料用のエネルギー資源投入量を意図的に除いているのです。その結果、EPR が 1.0 を大きく上回る値となり、あたかも発電によって新たにエネルギーが生産されているような錯覚を与えているのです。このような EPR では発電技術を正當に評価することはできません。図 9 に示す火力と原子力に対する数値はまったく無意味です。

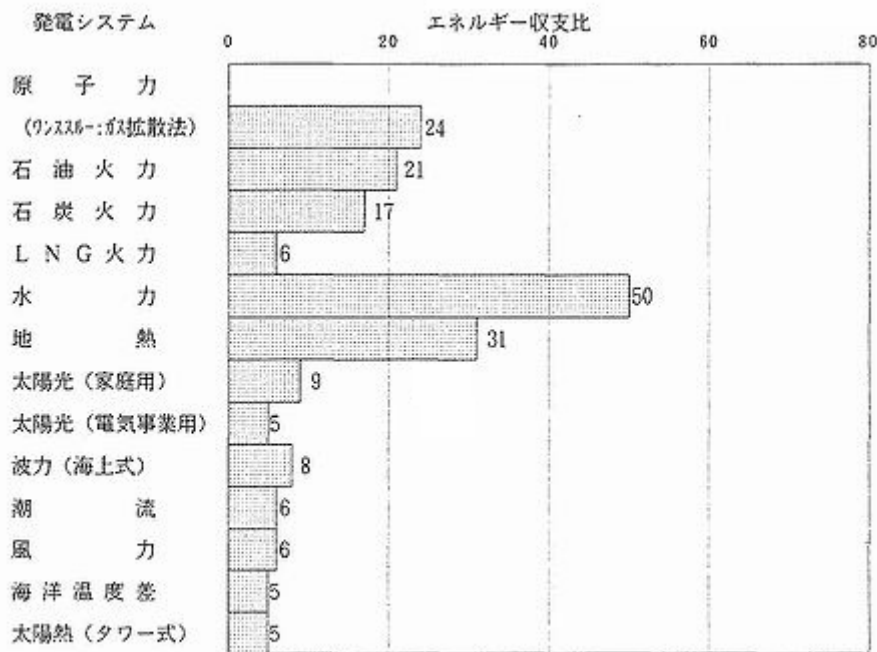


図 9 発電システムのエネルギー収支比 (寿命30年)  
Fig.9 Energy ratio of power generation system

電中研報告 Y94009 「発電システムのライフサイクル分析」 p.16 (1995 年)

熱力学的に見れば、発電というプロセスは投入エネルギーを電力に変換するものですから、エネルギー保存則とエントロピー増大則から、その効率が 1.0 を上回ることはありません。

本稿では、発電技術を含めて、すべての工業的なエネルギー利用技術の優劣を熱力学的に評価するための尺度として、プロセスを実現するために投入する燃料も含めたすべての投入エネルギー量に対する産出エネルギー量の比率をエネルギー産出比と定義します。

近年話題となっている自然エネルギー (太陽光、風、地熱、波力、潮汐力など) 発電では、無価値な自由財である自然エネルギーのプロセスへの投入量はエネルギー産出比におけるエネルギー投入量には含めません。ここで問題にしているのはあくまでも工業技術としての優劣の評価であって、自然エネルギーはどこにでも普遍的に存在するエネルギーであり、それを得るためにはエネルギー資源を消費しないからです。そのため、自然エネルギー発電のエネルギー産出比は 1.0 を上回る可能性があります、実際にはそのような発電システムは実現されていません。

自然エネルギー発電では発電燃料としてエネルギー資源を投入しないので、電力中研報告図 9 に示す自然エネルギー発電についての EPR は本稿で用いるエネルギー産出比と同じ定義になります。ところが、電力中研による自然エネルギー発電に対する EPR の値は

すべて 1.0 をはるかに上回る値を示しています。これはあり得ないことであり、投入エネルギー量の算定において重大な積算漏れがあるものと考えられます。

もし図 9 に示す値が正しいとすれば、自然エネルギー発電システムを建設するための鉱物資源が枯渇しないとすれば、私たちは工業的に利用可能な無限のエネルギーを手にしたことを意味し、エネルギー問題は消滅することになります。

## 2-2 エネルギー産出比と迂回過程～電力化はエネルギー資源を浪費する

エネルギー利用技術は熱力学的なエネルギーの変換過程なので、熱力学の基本法則による明らかな限界が存在します。エネルギー量は保存され、エントロピーは不可逆的に増加するのです。

その結果、変換プロセスを経ることによって、投入したエネルギーの一部は必ず環境中に散逸（エントロピーの増加）するため、プロセスを通過して有効に利用できるエネルギー量は減少するのです。

初期投入エネルギー量を  $E_0$ 、プロセス  $i$  の効率を  $\eta_i$  ( $0.0 < \eta_i < 1.0$ ) とすると、 $i=1 \sim n$  段階の変換プロセスを経た後のエネルギー量  $E$  は次式で表せます。

$$E = E_0 \times \eta_1 \cdot \eta_2 \cdots \eta_n, \quad \therefore \text{エネルギー産出比} = \frac{E}{E_0} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdots \eta_n$$

つまり、エネルギー利用技術はできるだけ単純で変換プロセスが少ないほど優れた技術になります。その少ないプロセスの変換効率を高める＝発生エントロピーを減少させることが技術の改良の目的となります。

ある目的を達成するために二つの技術があった場合、より変換の回数が多く複雑な過程を迂回過程と呼び、その程度を迂回度と呼ぶことにします。

ここで水を加熱して湯を沸かすという簡単な例題を考えてみます。その方法として

- ①ガス瞬間湯沸器で湯を沸かす。
- ②火力発電の電気を使って電気ポットで湯を沸かす。
- ③燃料電池の電気を使って電気ポットで湯を沸かす。

の 3 つの方法を考えることにします。

①の方法では、現在の瞬間湯沸器は高性能で、変換効率（＝エネルギー産出比）は 0.9 を超えています。

②の方法を具体的に考えてみます。火力発電所で電力を作る場合、燃料の燃焼熱に対する発電効率は  $\eta_1=0.4$  程度です。発電所から電気ポットまでの送電の効率を  $\eta_2=0.8$  とします。そして電気ポットの効率を  $\eta_3=0.9$  とします。②のエネルギー産出比は、

$$\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 = 0.4 \times 0.8 \times 0.9 = 0.288$$

③では、火力発電で得られた電力（ $\eta_1=0.4$ ）で水を電気分解して水素を作ります（ $\eta_4$

=0.8)。水素を耐圧ポンペに充填し ( $\eta_5=0.5$ )、燃料電池で水素から電気を取り出します ( $\eta_6=0.7$ )。そして最後に電気ポットで湯を沸かします ( $\eta_3=0.9$ )。③のエネルギー産出比は、

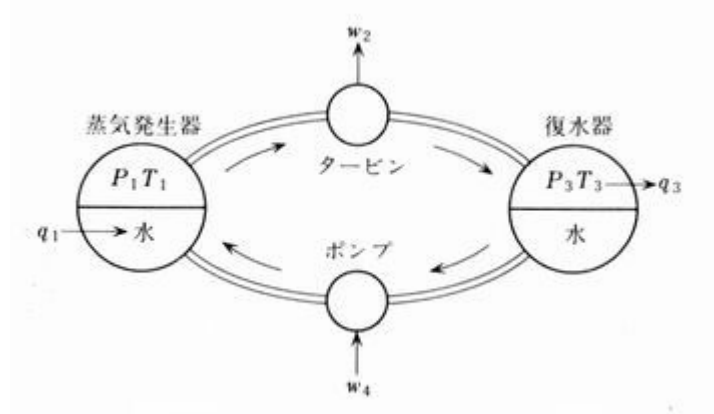
$$\eta_1 \cdot \eta_4 \cdot \eta_5 \cdot \eta_6 \cdot \eta_3 = 0.4 \times 0.8 \times 0.5 \times 0.7 \times 0.9 = 0.101$$

以上からわかるように、一般的に迂回度の高い過程ほどエネルギー産出比が指数関数的に低下します。また、発電というプロセスは莫大なエネルギー損失を生じるので、電力でなければ実現できない技術に限って利用すべきです。単純な低温熱源を得るためにわざわざ電力を使用するという迂回過程を使うべきではないのです。昨今のオール電化ハウスのような最終エネルギーの“電力化”は社会全体のエネルギー利用効率を著しく低下させる愚かな選択なのです。

### 3. エネルギー供給技術各論

#### 3-1 石油火力発電

火力発電、原子力発電などの水を動作物質とする熱機関の構造の模式図を示します。



蒸気発生器（高温熱源）で高温高圧の水蒸気を発生して蒸気タービンで力学的な仕事を取り出し発電を行い、復水器で水蒸気を凝集してポンプで蒸気発生器に循環させます。水を動作物質とする熱機関を用いて発電する発電方法を総称して汽力発電と呼びます。

熱機関についてのエネルギー保存則と、熱機関で発生するエントロピーを  $g_s$  とした場合のエントロピー増大則を表す式を示します。

$$q_1 + w_4 = q_3 + w_2$$

$$q_1/T_1 + g_s = q_3/T_3$$

ここに、

$q_1, T_1$  : 高温側の熱量及びその温度

$q_3, T_3$  : 低温側の熱量及びその温度

$g_s$  : 熱機関のエントロピー発生量

$w_2$  : 蒸気タービンで得られる仕事

$w_4$  : 水循環ポンプに加える仕事

二つの式から  $q_3$  を消去すると、

$$w_2 - w_4 = w = q_1 \left( 1 - \frac{T_3}{T_1} \right) - T_3 \cdot g_s, \quad w = w_2 - w_4 : \text{熱機関で得られる正味の仕事}$$

熱機関の効率  $\eta$  は高温熱源が熱機関に加える熱量  $q_1$  に対する熱機関で得られる正味の仕事  $w$  の比率で定義します。

$$\eta = \frac{w}{q_1} = \left( 1 - \frac{T_3}{T_1} \right) - \frac{T_3 \cdot g_s}{q_1} = \eta_0 - \frac{T_3 \cdot g_s}{q_1}$$

$\eta_0$ はエントロピーを発生しない ( $g_s=0$ ) 理想的な熱機関であるカルノーサイクルの熱効率です。式からわかるように、熱機関の効率  $\eta$  は発生するエントロピー量に比例して小さくなります。またカルノーサイクルの効率  $\eta_0$  は高温側と低温側の温度差が大きいほど高い効率になります。

実際の汽力発電の効率は、一般的な石油火力で 0.4 程度、原子力で 0.3 程度です。ガスタービン・水蒸気タービンの複合方式であるコンバインドサイクル火力の効率は 0.6 程度に達しています。

最も基本的な発電方式として石油火力発電を例に、発電技術に対するエネルギー産出比の算定方法を示します。

算定条件を以下に示します<sup>注)</sup>。

- ①燃料石油価格 25 円/リットル
- ②燃料石油エネルギー量 9Mcal/リットル = 37.8MJ/リットル = 10.5kWh/リットル
- ③発電施設建設・運用・維持管理費用の内のエネルギー費用の割合 20%
- ④石油火力発電電力原価 10 円/kWh

注) 最近、石油価格は社会情勢の影響で乱高下しています。また、石油火力発電電力原価について最新の信頼しうるデータが公表されていないため、平成 15 年前後を想定した C 重油価格と石油火力発電電力原価を想定しています。風力発電、太陽光発電についても同様の条件で試算することとします。

電力原価とは、石油火力発電所を建設して耐用期間中の運用を行うための総費用を耐用期間中の総電力量で割ることによって求めた単位発電電力量当たりの費用です。総費用には発電所建設費、運転経費、維持管理費、燃料費が含まれます。

まず燃料費を計算します。標準的な石油火力発電の熱効率は 0.4 程度です。1kWh の電力を供給するために必要な燃料石油の燃焼熱量は  $1\text{kWh} \div 0.4 = 2.5\text{kWh}$  になります。発電量 1kWh あたりの燃料費は次のとおりです。

$$2.5\text{kWh} \times 25 \text{ 円/リットル} \div 10.5\text{kWh/リットル} = 5.95 \text{ 円}$$

残りの  $(10 - 5.95) = 4.05$  円/kWh が燃料費以外の費用になります。その内の 20% をエネルギー費用とすると  $4.05 \text{ 円/kWh} \times 20\% = 0.81$  円になります。

以上をまとめると、電力原価の内、投入エネルギーの費用の合計は、

$$5.95 \text{ 円} + 0.81 \text{ 円} = 6.76 \text{ 円}$$

これを燃料石油費用とすれば、投入エネルギー量は次式で求めることができます。

$$6.76 \text{ 円} \div 25 \text{ 円/リットル} \times 10.5 \text{ kWh/リットル} = 2.84 \text{ kWh}$$

$$\therefore \text{エネルギー産出比} = 1 \text{ kWh} / 2.84 \text{ kWh} = 0.352$$

石油火力以外の LNG 火力や石炭火力は石油火力とは別の利用価値があり、石油火力発電と併存していくと考えられます。LNG はガスタービン・蒸気タービンの複合発電、いわゆるコンバインドサイクル火力用燃料として重要です。また石炭火力は最も経済的な発電方式の一つです。

ここで求めた石油火力発電のエネルギー産出比 0.352 を基準に、これよりも高いエネルギー産出比を得ることのできる新たな発電技術があれば、石油火力発電に替わって主要な発電方式として利用する可能性が生まれます（ただし、石油火力発電所が更新される場合にはコンバインドサイクル火力発電になる可能性が高く、エネルギー産出比は 0.4～0.5 程度になる可能性が高いと考えられます）。現在話題になっている再生可能エネルギー発電システムの総合的なエネルギー産出比が 0.352 を上回る可能性があるかどうか、導入の科学的技術的な判断の一つの分岐点になります。

## 3-2 自然エネルギー発電

### 3-2-1 自然エネルギー発電の特性

再生可能エネルギー特措法の施行によって、太陽光発電や風力発電、地熱発電などの自然エネルギー発電が注目されています（ここでは、既に長年の実績があり主要な発電方式としてその有効性が確認されている水力発電は除外することにします）。

発電方式としての自然エネルギー発電の特徴は、電力の原料としてエネルギー資源を使わず、環境中に普遍的に存在する自由財である無価値な自然エネルギーを利用することです。この段階で三つの大きな欠陥が予測されます。

- ①自然エネルギーの「環境中のどこにでも存在する」という特性は大きな欠点です。どこにでもあるということは必然的に「エネルギー密度が小さい」ことを示しています。これは、発電電力量あたりの自然エネルギー発電装置が巨大なものになることを示しています。
- ②自然エネルギーは非定常に変動し制御することができません。これは自然エネルギー発電装置の設備利用率が低くなることを示しています。これは同時に平均出力に対して過大な発電装置が必要になることを示しています。
- ③この不安定な自然エネルギー発電装置を大規模に導入して電力需要に合わせて運用するためには、その他に巨大な蓄電システム、出力調整用ないし出力欠損時のバックアップ用の制御可能な発電装置、広域の電力融通用の超高電圧大容量送電線網など、発電装置本体よりもはるかに巨大な付帯設備を併用することが必要になります。

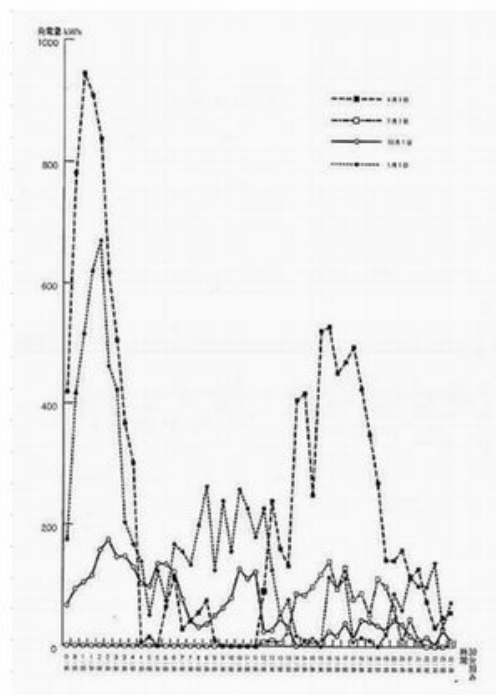


横浜市の 2MW 風力発電ハマウィングの実例を見ておくことにします。

## 風車の諸元表

| V80-2.0MW

メーカー	Vestas	
機種	V80-2.0MW	
風車仕様	ハブ高さ(m)	78m
	定格出力(kW)	1,980kW
	カットイン風速(m/s)	4m/s
	カットアウト風速(m/s)	25m/s
	定格風速(m/s)	15m/s
ローター・ブレード仕様	ローター直径	80m
	ブレード枚数	3枚
	ローター回転数(rpm)	9~19
	ブレード材質	GFRE
発電機仕様	発電機形式	巻線型誘導発電機
	発電電圧	690V
設計上の耐風速	70m/s (Class-I)	
タワー仕様	タワータイプ	モノポール
	タワー高さ(m)	78m
	タワーの材質	鋼製
	タワーの上部直径(m)	2.314m
	タワーの下部直径(m)	4.186m
重量	ブレード(t)	6.5t
	ナセル(t)	67.6t
	タワー(t)	163.8t



この風力発電装置の定格出力は約  $2\text{MW}=2,000\text{kW}$  ですが、右に示す 30 分間平均の実際の出力は最大でも  $1,000\text{kW}$  に達していません。更に出力は激しく変動しており、平均発電出力は  $250\text{kW}$  程度です。

ハマウィングは上部構造の重量だけで  $238\text{t}$ 、下部構造まで含めるとその全重量はおそらく  $250\text{t}$  を上回ると考えられます。一方、定格出力  $250\text{kW}$  のディーゼル発電機やガスタービン発電機の重量は  $6\text{t}$  程度です。ハマウィングは平均発電能力あたりの重量比で 40 倍以上の施設規模が必要なのです。

また、ハマウィングの定格出力は  $2\text{MW}$  であり、瞬間的には更に大きな出力を持っています。しかし平均的な出力は  $250\text{kW}$  であり、発電機能力の  $1/10$  程度しか利用されていないのです。それならばもう少し小さな発電機にすれば良いのではないかと考えるかもしれませんが、あまり発電機を小さくすると強風が吹いた時に発電機が加熱して火災が発生する危険性が高まるのです。



さらに出力変動のグラフから分かるように、このように激しく変動する電力ではとても使い物になりません。風力発電を高い品質を求められる送電線網に接続するためには、何らかの蓄電装置によって短期的な出力変動を個別に平滑化し、風力発電装置を接続する広域の送電線網によって更に出力を平均化し、その他に出力調整用あるいは風力発電の欠損の穴埋めのためのバックアップ用の制御可能な発電装置を準備しなければなりません。

自然エネルギー発電は発電用の燃料としてはエネルギー資源を使用しないという点であまりにも過大に期待をかけられています。自然エネルギー発電を導入することに合理性があるかどうか、熱力学的に徹底的に検証しなければなりません。

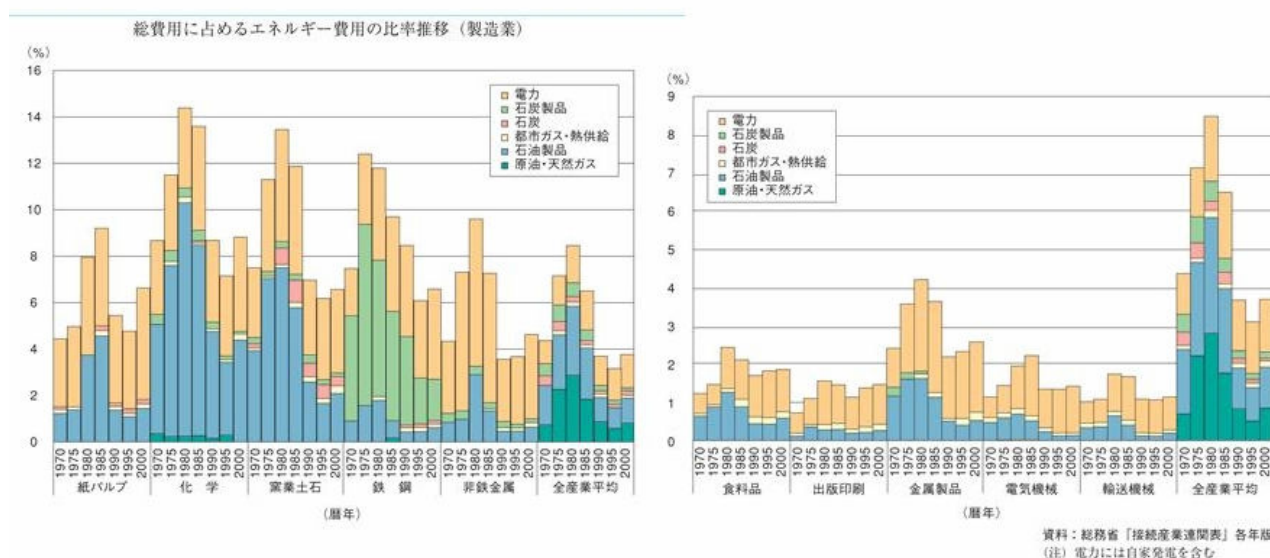
発電システムの中核システムの一つとして自然エネルギー発電を大規模に運用するためには発電装置以外に莫大な鉱物資源とエネルギー資源を投入して非定常・制御不能な電力を安定運用するための付帯設備と併用しなければならないため、発電装置単体でのエネルギー産出比は石油火力発電の0.352を大幅に上回らなければなりません。

### 3-2-2 自然エネルギー発電のエネルギー産出比

自然エネルギー発電の本質は自由財である自然エネルギーではなく、それを捕捉するための発電装置です。自然エネルギー発電のエネルギー産出比の算定における投入エネルギーは、発電装置の製造・建設、そして発電装置の運用・維持補修に投入されるエネルギー（資源）量です。

厳密には発電装置の原料資源の採掘から輸送、精錬過程を含めた全製造過程で投入されたエネルギー量を積算して求めるべきですが、それはかなり難しいことです。ここでは自然エネルギー発電の概略の特性を把握することが目的ですから、簡易的な推定方法を用いることにします。

現在の日本の工業生産物費用に占める投入エネルギー費用比率を図に示します。



投入エネルギー費用は、産業毎にばらつきがありますが、5～10%程度です。実際の発

電装置は、素材の製造、部材の加工・組立、運搬、建設という一連の過程を経て完成されます。以上を考慮して、自然エネルギー発電の投入エネルギーの費用を次のように算定することにします。

$$\text{投入エネルギー費用} = (\text{発電所建設費用} + \text{運転費用} + \text{維持補修費用}) \times 20\%$$

もし、自然エネルギー発電電力の 1kWh 当たりの原価がわかっている場合には、次式によって 1kWh を産出するために必要な投入エネルギー費用を算定します。

$$\text{投入エネルギー費用} = \text{電力原価} \times 20\%$$

この 20% という値を一律に自然エネルギー発電に適用することが適切かどうか、意見の別れるところですが、それほど大きな誤りはないと考えていますが、より適切な積算根拠が示された場合にはこの値を訂正すれば良いことです。まずは概要の把握のための一次近似としてこの値を使うことにします。

新エネルギーの現状 (太陽光・風力)

	太陽光	風力
発電コスト <sup>※</sup>	[住宅用] ・平均値: 66円/kWh [非住宅用] ・平均値: 73円/kWh	[大規模] ・10~14円/kWh [中小規模] ・18~24円/kWh
必要な敷地面積 <sup>※※</sup>	100万kW級原子力発電所 1 基分を代替する場合	
	・約67km <sup>2</sup> 山手線の内側面積 (約70km <sup>2</sup> ) とほぼ同じ	・約248km <sup>2</sup> 山手線の内側面積 (約70km <sup>2</sup> ) の約3.5倍
設備利用率 <sup>※※</sup>	・12%	・20%

出典: 総合資源エネルギー調査会新エネルギー部会報告書(2001年6月)<sup>※</sup>  
資源エネルギー庁「核燃料サイクルのエネルギー政策上の必要性」(2002年3月)他<sup>※※</sup>

参考: 太陽光発電・風力発電の発電コスト (2001年6月)

### 3-2-3 主要な自然エネルギー発電

#### (1) 風力発電

風力発電装置のブレードの回転面積  $A(\text{m}^2)$  を通過する風速  $v(\text{m/s})$  の風の持つ単位時間あたりの運動エネルギー量  $w(\text{W} = \text{Nm/s})$  は、大気密度を  $\rho(\text{kg/m}^3)$  とすると次式で近似することが出来ます。

$$w = \frac{(\rho \cdot A \cdot v) \times v^2}{2} = \frac{\rho \cdot A \cdot v^3}{2} \quad (\text{W})$$

風力発電装置の発電能力は $w$ に比例する、つまり風速の3乗に比例することになります。このように、風力発電電力は風速の3乗に比例して激しく変動するために、工業的に利用するには非常に扱いづらいエネルギーです。

日本における風力発電による電力原価は1kWh当たり 25円程度だと考えられています。

$$\text{投入エネルギー費用} = 25 \text{円} \times 20\% = 5 \text{円}$$

これを石油換算の投入エネルギー量に換算します。

$$\begin{aligned} 5 \text{円} \div 25 \text{円/リットル} \times 10.5 \text{kWh/リットル} &= 2.10 \text{ kWh} \\ \therefore \text{エネルギー産出比} &= 1 \text{kWh} / 2.10 \text{ kWh} = 0.47 \end{aligned}$$

次に、前節で紹介したハマウイングの実績で検討してみます。ハマウイングは2007年に運用を開始しました。ハマウイングの運用実績は次の通りです。

総工費	5億円
年間運転・維持費	5,000万円/年
年間発電量	223万 kWh/年
耐用年数	20年

$$\begin{aligned} \text{投入エネルギー費用} &= (5 \text{億円} + 5000 \text{万円/年} \times 20 \text{年}) \times 20\% = 300,000,000 \text{円} \\ \text{総発電電力量} &= 223 \text{万 kWh/年} \times 20 \text{年} = 44,600,000 \text{kWh} \end{aligned}$$

以上から、電力1kWh当たりの投入エネルギー費用は次のとおりです。

$$\text{投入エネルギー費用} = 300,000,000 \text{円} \div 44,600,000 \text{kWh} = 6.72 \text{円/kWh}$$

ハマウイングはデンマークのVestas社製なので燃料石油価格は不明ですが35円/リットル程度と仮定すると、電力1kWh当たりの投入エネルギー量は、

$$\begin{aligned} 6.72 \text{円} \div 35 \text{円/リットル} \times 10.5 \text{kWh/リットル} &= 2.02 \text{ kWh} \\ \therefore \text{エネルギー産出比} &= 1 \text{kWh} / 2.02 \text{ kWh} = 0.50 \end{aligned}$$

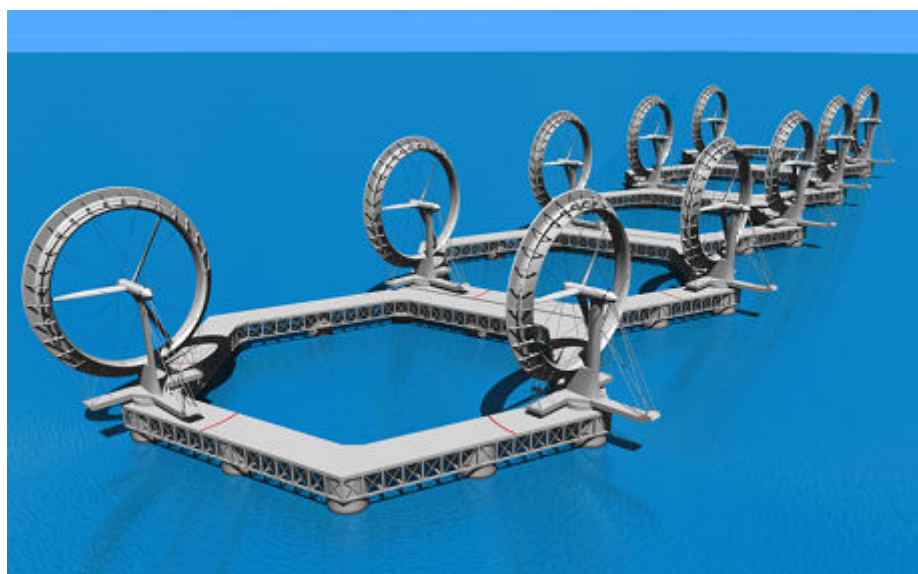
以上、二つの条件で風力発電のエネルギー産出比を求めてみましたが、その値は0.47～0.50<1.0です。自然エネルギー発電の中ではエネルギー産出比が高いと言われる風力発電ですが、基本エネルギー資源には成り得ないのです。また、この程度のエネルギー産出比では付帯設備を含めた風力発電システムで石油火力発電を代替することには合理性はありません。

風力は自然エネルギーの中でも特に変動の激しいエネルギーであり、出力変動の激しい低品質の電力しか作ることができません。日本は急峻な山が多く地表付近の風が乱されているのが原因の一つです。更に、日本はアジアモンスーン気候帯に属し、季節によって風況が大きく変化するため、風力発電の季節変動も非常に大きくなります。日本は風力発電には不向きな自然環境なのです。

日本では風力発電風車は海岸部や山の稜線に建設されてきました。再生可能エネルギー特措法の施行によって、大規模洋上風力発電の計画が各地で持ち上がっています。九州では国の補助金で九州大学と福岡市が博多湾でモデル実験を行なっています。

九州大学はレンズ風車という強制的に乱流を発生する装置を付加することで同一ブレード回転面積で高出力を実現する技術を開発し、これを実際の風力発電風車に実装することを考えています。しかし、小さな玩具のような実験モデルなら有効であっても、ブレード回転半径が 100m にもなる実際の大型風力発電風車にこの乱流発生用のレンズを実装することは構造的に無理があります。

構想図でもわかるように、巨大なレンズを構造的に成り立たせるためには、おそらく通常の風力発電風車の倍以上の資材を投入することが必要になると考えられます。更にこれを洋上に巨大な浮体構造物を建設して、その上に設置することになれば、途方も無い鉱物資源とエネルギー資源の投入が必要になります。



**レンズ風車による浮体構造風力発電構想**

この風力発電構想を立案した技術者は、同一規模の風車（ブレード回転半径の同じ風車）の発電能力を最大化することを目的としているようですが、これはまったく目的を見失った発想です。エネルギー供給技術はエネルギー産出比で判断すべきなのです。

レンズ風車による洋上風力発電装置 1 基あたりの建設費用が、少なめに見積もって、同一のブレード回転半径を持つ通常風車の 5 倍になり、そのかわり発電能力が 2 倍になったと仮定した場合のエネルギー産出比は

$$(0.47\sim 0.50)\times\frac{2}{5}=(0.188\sim 0.200)$$

となり、陸上に建設されている従来の風力発電以上にエネルギー産出比は小さくなり、火力発電代替の合理性は完全に失われます。

更に洋上風力発電で得た低品質の不安定電力の欠点を克服するために、水の電気分解プラントを併設して水素を製造し、水素を燃料電池や水素用のエンジンの燃料にするという構想もありますが、これは典型的な迂回過程です。しかも、天然ガス同様、水素をそのまま利用することは難しいため実用上はこれを高圧で圧縮することが必要ですが、それには莫大なエネルギーの投入が必要になるため、利用可能なエネルギーは絶望的に小さくなります。ここでも不安定電力の欠点を克服することに目を奪われ、エネルギー供給技術で最も重要なエネルギー産出比を考慮していないのです。

### <参考>

電力中研による風力発電に対する **EPR** の妥当性を検討することにします。電力中研による風力発電の **EPR** は **6.0** です。**EPR** が **6.0** とした場合の投入エネルギー費用を算定します。まず風力発電電力原価が **25 円/kWh** の場合についてその内の投入エネルギー費用を求めます。

$$\text{投入エネルギー量} = 1\text{kWh} \div \text{EPR} = 0.167\text{kWh}$$

$$\text{投入エネルギー費} = 0.167\text{kWh} \times 25 \text{ 円/リットル} \div 10.5\text{kWh/リットル} \doteq 0.4 \text{ 円}$$

$$\therefore \text{原価に占めるエネルギー費用の比率} = 0.4 \text{ 円} / 25 \text{ 円} = 1.6\%$$

ハマウイングの実績では、電力原価 =  $6.72 \text{ 円} \div 20\% = 33.6 \text{ 円}$ なので、

$$\therefore \text{原価に占めるエネルギー費用の比率} = 0.4 \text{ 円} / 33.6 \text{ 円} = 1.2\%$$

「総費用に占めるエネルギー費用の比率推移」に示す値から見て、高度の工業製品で構成された風力発電装置を建設し運用するための総費用に対して、エネルギー費用の割合が **1.2~1.6%** という値はあまりにも非現実的な値です。

## (2) 太陽光発電

太陽電池パネルの太陽放射から電気への変換効率は、標準条件（放射強度  $1,000\text{W}/\text{m}^2$ 、太陽電池パネル温度  $25^\circ\text{C}$ 、エア・マス 1.5）の下で現在 **20%**程度を実現しています。

物体は表面の温度状態によって電磁波を放射します。表面温度  $25^\circ\text{C} = 298\text{K}$  の物体は赤外線を放射します。そのエネルギー密度はステファン・ボルツマンの法則から近似的に次のように推定できます。



$$\sigma T^4 = 5.67 \times 10^{-8} \times 298^4 = 447 \text{W/m}^2$$

今、 $1,000 \text{W/m}^2$ の太陽放射を受ける  $25^\circ\text{C}$ の太陽電池パネルの理想的な発電効率  $\eta$  は、エネルギー保存則から次のように算定されます。

$$\eta = (1,000 \text{W/m}^2 - 447 \text{W/m}^2) \div 1,000 \text{W/m}^2 = 55.3\%$$

現在の発電効率は 20%程度ですから、さらに技術的な改良の可能性があるように見えます。しかし、太陽放射強度  $1,000 \text{W/m}^2$ とは夏場の真昼の太陽光に相当します。このような炎天下に物を放置すると非常に高温になり、太陽電池パネルの表面温度は  $60 \sim 65^\circ\text{C}$ にも達します。 $T=65^\circ\text{C}=338\text{K}$  の場合の太陽電池パネル表面からの赤外線放射強度は次のように算定されます。

$$5.67 \times 10^{-8} \times 338^4 = 740 \text{W/m}^2$$

さらに、大気にさらされた太陽電池パネルの表面には細かい塵などに覆われるため、太陽放射の有効な入射量は 10%程度低減します。これらを考慮すると、屋外における最大発電能力は次のように推定されます。

$$1,000 \text{W/m}^2 \times (1.0 - 0.1) - 740 \text{W/m}^2 = 160 \text{W/m}^2$$

つまり、屋外環境における発電効率の理論的な上限は 16%程度ということになります。現在、太陽電池パネルの屋外での実績は既に 10%程度の発電効率を達成していますから、今後の技術改良による改善幅は大きくないと考えられます。発電効率に対する部分的な技術改良についてはいろいろ検討されていますが、ここに示した本質的な問題を克服して発電効率を飛躍的に向上させる技術はないのです。

太陽光発電による電力原価は  $66 \sim 73$  円/kWh 程度といわれています（最近、輸入太陽光発電パネルが増加して価格が安くなっていますが、海外製品では生産環境が異なるので、あくまでも国産品を対象に考えることにします）。この値を検証しておくことにします。

まず兵庫県の事例を紹介します。92ヶ所の公共施設の太陽光発電装置設置の総事業費は 34 億円で、年間発電量の実績は 310 万 kWh です。

この太陽光発電が 20 年間稼働し、その間発電量は減少せず、維持補修費はゼロという楽観的なモデルで検討します。

$$\text{総発電電力量} = 310 \text{ 万 kWh/年} \times 20 \text{ 年} = 6,200 \text{ 万 kWh}$$

$$\therefore \text{電力原価} = 34 \text{ 億円} \div 6,200 \text{ 万 kWh} = 54.8 \text{ 円/kWh}$$

もう一つ、岐阜県のある町の中学校に設置された事例（竣工 2003 年）を検討します。

設置費用は 4,515 万円で、年間発電量の実績は 30,160kWh です。その他の条件は同じです。

$$\begin{aligned} \text{総発電電力量} &= 30,160\text{kWh} / \text{年} \times 20 \text{年} = 603,200\text{kWh} \\ \therefore \text{電力原価} &= 4,515 \text{万円} \div 603,200\text{kWh} = 74.9 \text{円/kWh} \end{aligned}$$

冒頭に示した値は概ね妥当な値だと考えられます。ここでは太陽光発電電力の原価を 60 円/kWh とします。エネルギー産出比は次のとおりです。

$$\begin{aligned} \text{投入エネルギー費用} &= 60 \text{円} \times 20\% = 12 \text{円} \\ 12 \text{円} \div 25 \text{円/リットル} \times 10.5\text{kWh/リットル} &= 5.04 \text{kWh} \\ \therefore \text{エネルギー産出比} &= 1\text{kWh} / 5.04 \text{kWh} = 0.20 \end{aligned}$$

太陽光発電では、発電装置単体でのエネルギー産出比で既に石油火力発電を下回るため、石油火力発電を代替にすることに科学的な合理性はありません。

### <参考>

電力中研による太陽光発電に対する EPR の妥当性を検討することにします。電力中研による太陽光発電の EPR は 5.0～9.0 です。EPR が 7.0 とした場合の投入エネルギー費用を算定します。

$$\begin{aligned} \text{投入エネルギー量} &= 1\text{kWh} \div \text{EPR} = 0.143\text{kWh} \\ \text{投入エネルギー費} &= 0.143\text{kWh} \times 25 \text{円/リットル} \div 10.5\text{kWh/リットル} \approx 0.34 \text{円} \\ \therefore \text{原価に占めるエネルギー費用の比率} &= 0.34 \text{円} / 60 \text{円} = 0.57\% \end{aligned}$$

特に太陽光発電パネルの製造工程はエネルギーを大量に使用するため、平均的な工業製品以上にエネルギー費用比率が高いので、0.57%という数値は風力発電以上にありえない値です。

### (3) その他の自然エネルギー発電

風力発電と太陽光発電についてエネルギー産出比を推定しましたが、その他の自然エネルギー発電についても同様に電力原価からエネルギー産出比を推定することができます。

ここでは、エネルギー産出比以外の特性について簡単に触れておきます。風力、太陽光以外で話題になっているのが海洋に関するエネルギーと地熱発電です。

海洋関連の自然エネルギー発電装置には、運動エネルギーを利用するものと熱エネルギーを利用するものの二種類があります。

運動エネルギーとしては潮汐波、表面波、潮流を利用するものがあります。いずれも非定常に変動するエネルギーであり、制御することの難しいエネルギーです。



熱エネルギーを用いるものとして海洋温度差発電があります。これは海洋表層と中深層の 20～30℃程度の温度差を用いて熱機関を駆動するものです。これはその他の自然エネルギーと異なり比較的安定した電力供給が可能だと考えられます。しかし、海洋のように拡散したエントロピーの大きな低温の熱源から運動エネルギーを取り出す場合の熱効率は絶望的に小さいため、投入エネルギー量を回収することは不可能だと考えられます。

例えば、海洋表層の高温側水温  $T_1=30^\circ\text{C}$ 、中深層の低温側水温  $T_2=10^\circ\text{C}$  とした場合、理想的な熱機関の効率は、

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{10 + 273}{30 + 273} = 0.067$$

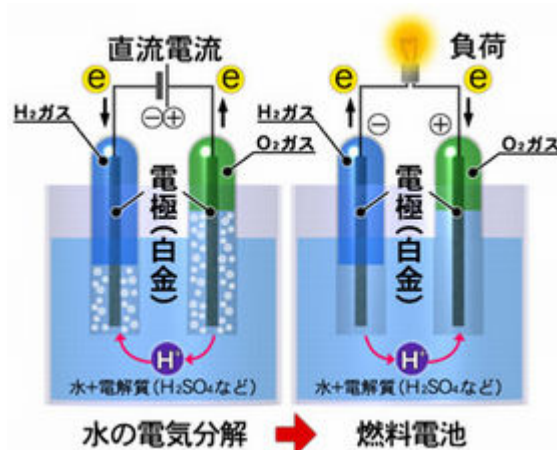
であり、とても使い物になるとは考えられません。

海洋関連の自然エネルギー発電装置に共通する問題は、塩分を含み多様な生物が生息する環境の中に発電装置を置かなくてはならないことです。装置の劣化は早く、維持補修に大きな費用が発生し、耐用年数は短いと考えられます。

地熱発電は比較的安定した出力が期待でき、条件によっては実質的なエネルギーを生み出す可能性のあるほとんど唯一の自然エネルギー発電だと考えられます。しかしながら、日本における実績を見ると発電コストは高く、成功していないようです。地熱発電は、銜物質を含む酸性の蒸気や熱水を使用するために熱交換器の劣化が早く運用、維持補修費用は安くないと考えられます。

### 3-3 その他のエネルギー供給装置

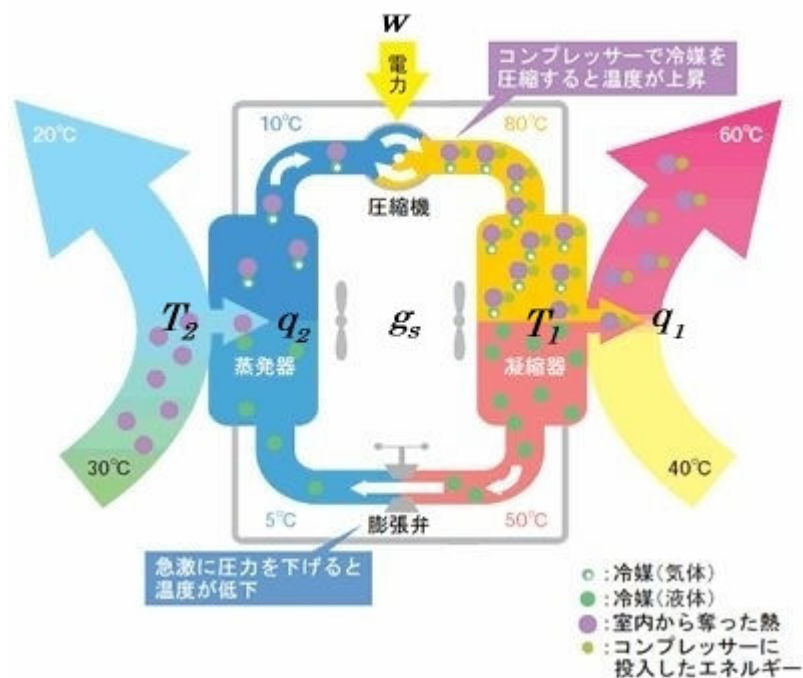
#### 3-3-1 燃料電池



燃料電池とは、水の電気分解の逆反応であり、水素（燃料）と空気中の酸素を利用して電気を取り出す装置です。既に紹介したように水素製造過程を含めた燃料電池は極めて迂回度が高く、エネルギー産出比が極端に低いために、一般的なエネルギー供給装置として

利用することは考えられません。宇宙空間などの特殊な環境下での使用など、エネルギー供給能力そのものではない使用価値で存在価値があるのです。

### 3-3-2 ヒートポンプ



ヒートポンプとは動作物質（冷媒）に仕事を加えることで通常の熱機関とは逆のサイクルを作ること、低温熱源から熱を吸収して高温熱源に熱を放出する熱機関です。通常の熱機関は高温熱源と低温熱源の温度差を利用して仕事を取り出しますが、ヒートポンプでは仕事を加えることで熱を低温熱源から高温熱源に移します。

ヒートポンプのエネルギー保存則とエントロピー増大則を表す式は次のようになります。

$$q_2 + w = q_1$$

$$q_2/T_2 + g_s = q_1/T_1$$

ここに、

$q_2, T_2$  : 低温側の熱量及びその温度

$q_1, T_1$  : 高温側の熱量及びその温度

$g_s$  : ヒートポンプのエントロピー発生量

$w$  : ヒートポンプに加える仕事

高温熱を取り出す場合は、上の2式から  $q_2$  を消去して、

$$q_1 = \{T_1/(T_1 - T_2)\}(w - T_2 \cdot g_s)$$

上式からわかるように、高温側と低温側の温度差が小さいほど、またヒートポンプの発生エントロピーが小さいほど取り出せる熱量  $q_1$  が大きくなります。

ヒートポンプについて、投入する仕事  $w$  に対する得られる熱量  $q_1$  の比率  $q_1/w$  を COP (Coefficient Of Performance) と呼びます。社団法人日本冷凍空調工業会の HP の給湯器の定格運転の条件、外気温度 (=低温側温度)  $T_2=16^\circ\text{C}=289\text{K}$ 、給湯温度 (=高温側温度)  $T_1=65^\circ\text{C}=338\text{K}$  だとすると、 $\text{COP}=3.7$  程度だとしています。これを具体的に計算すると

$$q_1 = \{338/(338-289)\}(w-289g_s) = 6.9(w-289g_s) = 3.7w$$

$$\therefore g_s = 0.0016w$$

ヒートポンプは加えた仕事よりも得られる熱量が多いことから、エネルギーを生み出す夢の熱機関ではないのかという疑問を聞くことがあります。この点を検討することにします。理想的な熱機関の効率を  $\eta$  とするとヒートポンプで得られる熱量は次のとおりです。

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad \therefore q_1 = \frac{1}{\eta}(w - T_2 \cdot g_s)$$

この熱エネルギーを熱機関に投入して得られる仕事  $w'$  は次のとおりです。

$$w' = q_1 \cdot \eta = (w - T_2 \cdot g_s) \leq w$$

つまり、エントロピーを発生しない ( $g_s=0$ ) ヒートポンプで得られた熱量  $q_1$  を、エントロピーを発生しない理想的な熱機関に入力した場合に得られる仕事の最大値が  $w$  なのです。これは熱力学からの当然の結果であり、エントロピーの発生しない熱機関は可逆機関なのです。実際には必ずエントロピーが生じるため、ヒートポンプを熱源に使っても始めに入力した仕事  $w$  以上の仕事を取り出すことはできないのです。

外気温度  $T_2=289\text{K}$  としてヒートポンプで  $100^\circ\text{C}=373\text{K}$  の熱湯を作る場合を考えます。

$$q_1 = \{373/(373-289)\}(w-289 \times 0.0016w) = 4.44 \times 0.538w = 2.39w$$

火力発電所で投入した熱量を  $Q$ 、火力発電のエネルギー産出比を  $0.35$  とすると、

$$w = 0.35Q, \quad \therefore q_1 = 2.39 \times 0.35Q = 0.837Q$$

これに対して一般の石油給湯器の熱効率は  $0.83$  程度、潜熱回収型の高効率給湯器では  $0.95$  程度です。

ヒートポンプは冷房や冷蔵庫に対して有効な技術であることは既に実証済みです。また、給湯程度の低温熱源としての利用では通常の電熱ヒーターよりも有効ですが、単純な石油給湯器のほうが優れているのです。確かにヒートポンプに適した用途は存在しますが、あくまでも適用の限界があることを認識した上で、適切な利用を行うことが必要です。

## 4. 結論

最近注目されている新しいエネルギー資源とエネルギー供給技術について見てきましたが、いずれも過大な期待だけが先行しており、科学・技術的に評価すれば、ほとんどの新エネルギー資源とエネルギー供給技術の導入に合理性はないようです。

電力供給を始めとするエネルギー利用技術に於いて、最も基本的な視点はエネルギー産出比で表されるエネルギー資源の利用効率です。

例えば、電力供給技術の評価において重要なのは、石油・石炭・天然ガスなどのエネルギー資源を燃料として利用するか否かという問題ではありません。もちろん燃料も含めて、対象となる電力供給技術を成立させる装置設備、その他の蓄電・給電設備、そしてその廃棄まで考慮した総合的な給電システムのライフサイクル全体を含めたエネルギー産出比が問題になるのです。

自然エネルギー発電装置のエネルギー産出比が現状の火力発電よりもエネルギー産出比が劣るということは、自然エネルギー発電の導入で削減された燃料として使用されるエネルギー資源量よりも、巨大な自然エネルギー発電システムの装置設備の製造や建設に投入されるエネルギー資源量の増加のほうが大きいことを示しています。このことは同時に、工業生産規模が爆発的に拡大すること＝希少資源を含む鉱物資源消費量が爆発的に拡大することを示唆しているのです。

更に、出力が非定常に変化し制御不能な自然エネルギー発電を、高い安定性を求められる現在の電力供給網に接続するためには巨大な蓄電システム、広域の電力融通を実現するための広域高電圧大容量の付加的な送電線網、気象条件による電力供給欠損に備えるためのバックアップ用の制御可能な発電システムが必要となります。これらの自然エネルギー発電の導入に欠くことの出来ない付帯設備まで含めた『自然エネルギー発電システム』の総合的なエネルギー産出比が、現行の火力発電を上回ることはありません。

現在、自然エネルギー発電導入促進を目指す NPO の中には、不安定電力を安定化するための高価な付帯設備は電力会社の責任で整備すべきだという主張をする人たちがいます。しかし、それは非科学的であまりにも横暴な要求です。個別の風力発電風車や太陽光発電装置は、巨大な自然エネルギー発電システムのごく一部を構成するパーツにすぎないことが理解されていないのです。彼らの主張は何のために自然エネルギー発電の導入を行うかを見失い、科学的に評価することを怠った愚かな主張です。

今後も新たなエネルギー資源の開発や新発電技術が提案されるでしょう。現段階で全てが無駄とは言い切れませんが、その評価においては熱力学的に徹底的な検証を行うことが必要であることを銘記しておくことが必要です。