



エネルギー科学の周辺における最近の情勢

石谷清幹*

1. 緒言

現在は転換期であると主張する声が多い。何がどう転換しつつあるのかという具体的な内容に関する見解はさまざまにわかれるが、人間が生産に当って手足の延長として使用する技術的手段における大きな変革がすべての転換の根底にあり、そして、生産は人間にとって本質的に重要だから、その変革が人間活動のあらゆる局面に波及しつつあるとみる考え方は、当たっているように見える¹⁾。人間のいとなむ生産活動で人間が直接することは、結局は何かを手足でうごかすことである（この意味は二重である。第一に、たとえば他人に指図することで生産に参加する人でも、その命令のもとで結局は誰かが手足をうごかすことで生産活動しない限り無効である。第二に、手足を動かす方法以外の参加のしかた、例えば体温を使ってヒナをかえすとか、自分の肉体の一部を原料に提供するとかいった参加のしかたは、してはならないこととされている）。手足で直接または間接に何かをうごかすには結局は動力とか制御が必要だから、動力と制御は人間の生産にとって他の原材料にみられない重要性をもつ。さらに、太古の火の発見いらい、熱も人間の生産にとって重要となり、現在にいたっている。熱と動力はともにエネルギーの発現形体であるから²⁾、エネルギーの生産における重要性、そして、じつは生産が消費と表裏一体関係にあることから判るように、消費も含めた人間生活全体におけるエネルギーの重要性は、きわめて大きい。

そして、ほかならぬこのエネルギーの生産と消費にも、転換期が到来しており、現在その転換が急激に進行中である。そのひとつのあらわ

れが現在のエネルギー問題であり、これは「石油がなくなつてつぎのエネルギー源——それが太陽熱か、原子力か、水素エネルギーかは別問題として——の時代がくる」というだけの単純なものではあり得ない。

では現在のエネルギー問題をどうとらえるべきか。ことに、資源小国、経済大国といわれる日本の立場からすれば、エネルギー問題をどうとらえるべきものか。この問題は1978年からはじまった日本学術会議第11期の課題として日本学術会議が自らに課した重要問題である。この問題の解明には日本学術会議全体があたるが、直接的には同会議のエネルギー・資源開発問題特別委員会が担当する。同委員会の審議はまだ始まったばかりでどのような結論が出るかは予想できないし、またこの重要問題を直接論ずることは本稿の目的でもなく、そのような大きな技術転換が現在進行中であることの例証として、特別委員会の存在を紹介しただけである。ここでは、そのような大きな技術転換を念頭におきつつ、エネルギー科学の周辺における最近の情勢変化の二、三について述べてみたい。

2. 石油埋蔵量予測における変化

各国の公的機関の採択しているエネルギー需給計画は、いずれも石油の地球上の究極埋蔵量を2兆バレル前後とみて、1985年ころから石油需給が窮屈になり、原子力への転換は絶対に必要とするものばかりであったし、現在もまだそうである。しかし、話題の1985年が近づくとつれ、論調に微妙な変化があらわれつつあることは注目してよい。

地球の石油埋蔵量の究極値がわかることは大変のぞましいことだが、現代の科学はまだこの問題に正しくこたえ得る段階に達していない。そこで大胆な仮定のもとに推定するしかないの

* 石谷清幹 (Seikan ISHIGAI), 大阪大学工学部, 機械工学科, 教授, 蒸気工学

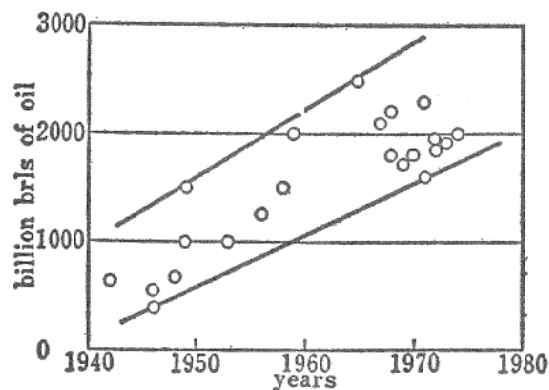


図1. 石油究極可採埋蔵量推定値の推移³⁾

だが、その仮定のたしかさの論議をぬきにして、また、いわゆる究極可採埋蔵量の数値そのものが図1のように年とともに増えてきた事実をぬきにして、2兆バーレルという数値が独走したきらいがある。石油の起源には昔から生物起源説と無機起源説とがあって、現在もまだ結着はついていないが、埋蔵量をすくなくない方向に評価するのに有利な生物起源説だけが喧伝されつつづけている。生物起源説では、地球上の原始生物の遺体の堆積が長年月のうちに石油に変化したとする。無機起源説では、地域が創生されたときの原始大気はアンモニア、炭酸ガス、メタンなどを現在よりももっと濃密に含んでいて、その原始大気中の炭化水素が現在の石油の起源であるとする。無機起源説では石油のもとになった物質の存在量が生物起源説にくらべて比較にならぬくらい大きくなるのである。

現在の地球の大気中の酸素が地球に発生した生物の生み出したものとみる点では現在の学説は一致しているから、無機起源説の支持者は相当に潜在している筈と思うのであるが、どういふわけか世間では無機起源説はあまり普及していない。地球の大気に酸素が乏しかったころ、大気中に炭化水素がかなり豊富にあったと信ずるに足る根拠は、太陽系の一員としての地球の生成とその後の進化に関する最近の研究の進展によって、ますます補強されつつあるようだ。そう考えると、そのころ高温だった地球が漸時冷却しはじめたとき、最初に地上に降る雨は沸点の水よりも高温の炭化水素が主体であったとせねばならない。つまり原始海洋は石油の海であったのだ。これがその後の地殻変動によって

埋蔵されたものが現在の石油の起源であるとするのが石油の無機起源説である。ついでながら大阪大学関係で石油の無機起源説の支持者としては、もと総長の赤堀四郎、もと応用化学教授の堤 繁、の両名誉教授をあげることができる。

2兆バーレルというと大きいようだが、3,000億 m^3 だから、びわ湖（面積680 km^2 、平均水深41.2m、保有水量280億 m^3 ）をマスにして計ると10杯ぶんである。ミシガン湖（57,850 km^2 、平均水深99m、保有水量5.7兆 m^3 ）をマスにするとその $\frac{1}{10}$ にしかならない。地球儀におけるびわ湖、ミシガン湖のサイズを想像したとき、かつて地球の原始地表の凹所をみたしたであろう原始石油がこれだけしか残存しないと考えるのは、果たして妥当かどうか、私には疑問に思える。

1973年の石油危機のとき、オイルシェールやタールサンドに含まれている石油ぶんは既知量だけで現在の石油埋蔵量だけあることが報道された。しかし、液状あるいはガス状で採れる石油や天然ガスが存在する限り、オイルシェールやタールサンドでは競争にならないことは自明である。逆にいえば、オイルシェールやタールサンドに真剣に開発努力が傾注されなかったのも、石油資源の究極可採量として2兆バーレルという数字が実務家にあまり信用されていなかった証拠のひとつにあげてよいだろう。第二次大戦後に従来植民地の独立があいついでいるが、石油に限らず一般に資源がその存在国のものであるという原理がひろく承認されているので、これら新興国が経済的実力をつけてくれば、おいおいに自主的な資源探査が進行することが期待できる。自主探査の偉力の例として、中国とメキシコがあげられる。各国政府が公式には石油資源についての悲観説をとってはいても、実務家の間ではその悲観説がそのままでは信用されず、事実また石油需給もゆるんできている背後には、このような事情があるのである。

こういった環境の中で、日本石油連盟の石油需給長期見通し特別委員会（委員長は小出栄一共同石油社長）は「石油は十分にあり、今世紀

中は物理的な不足は起こらない」というきわめて楽観的な石油需給見通しを昨年11月発表した⁴⁾。その発表によると、メキシコの推定埋蔵量は570億バレルで、究極埋蔵量としては2,000億バレルという予測もあるという。前出の図1でも、究極可採埋蔵量の数値は1946年の約5,000億バレルから1970年の2兆バレルに、つまり25年間に4倍増している。今後ともあまり2兆バレルという数字にこだわらない方がおそらく正しいであろう。

誤解のないようにつけ加えておくが、以上の所論は、金さえ出せば石油はいつでも買えるものだとは主張するものでもないし、石油が買える限り日本の国土でのエネルギー消費をいくらでもふやしつづけてよいと主張するものでもない。省エネルギー運動の推進の必要と環境における人工熱負荷限界の存在はかねてから私の主張しているところであって、この態度をかえるつもりはさらさらない。石油資源ももとより有限のものである。ただ、その希少性を過度に主張するのは科学的根拠が薄弱だと指摘しているだけである。

3. 資源と技術的手段における 技術時代転換の機構

資源はもちろん大切なものであるが、資源とそれを消化する技術的手段のいずれがより根源的に重要かといえ、それは技術的手段の方である。空気中の窒素はその固定法の発明によってはじめて資源となったのであり、石炭や石油にしても熱機関の発明によってはじめて動力資源の仲間入りをしたのであった。人間が使用する動力資源を歴史に登場した順に記してみると、サルからヒトになったばかりのころは自分の肉体以外の動力源はなかったから、動力資源は人間の食料であったとせねばならない。やがて家畜の導入により飼料が動力資源となり、ついで風車水車の導入により風水力が資源となり、さらに熱機関の発明により石炭、石油、天然ガスが動力資源となった。食料→飼料→風水力→いわゆる化石燃料、という変遷の跡になんらかの法則性を見出そうとしても、それは無理であろう。

また、以上の資源交代は、前の時代の動力資源がなくなったからつぎの動力資源が登場した、という交代方式は一度もなかったことがない。やや見方を変えて、エネルギー資源の主役交代史を木材→石炭→石油と考えるとしても、前者がなくなったから後者、というのではない。石炭にいたっては、現在でも石油より豊富に存在しているのに、主役の座を石油に奪われたのである。

してみれば、石油がなくなるから原子力、という想定は、人類が過去のエネルギー資源交替において一度もなかった方式による交替を想定することになり、かりに結果的にそのような交替が実現するとしても、その機構は「石油がなくなるからもっと多量にある原子力」といった単純なものではあり得ない。もっと多量にあるというのが最も主要な理由であるならば、原子力は石炭や太陽熱や地球の自転のエネルギーなどに比べて、あまり優位にあるとはいえない。

これに反して、資源を消化する技術的手段の方には、人力→畜力→風水力→熱機関というすべての主役交替を一貫して、もっとはっきりした交替法を認め得る。それは好適出力規模の巨大化という傾向である。人力の出力規模は0.1 kW、家畜力は1 kW、風車や水車は10 kW、そして現代の熱機関や水力タービンは数十万 kW のオーダーである。現代のように動力需要が巨大化しても1台で1億 kW を連続的に出す動力源は、発明されたとしても使い道がない。このことから容易にわかるように、いつの動力源交替期においても、前期にくらべてケタがいに巨大な次期の主役動力源の出現には、動力需要の潜在的成熟が先行せねばならなかった。事実また動力需要の方がさきに成熟し、その成熟は前期の末期に既存動力技術によっては解決し難い矛盾となって現象した。この矛盾をとくべくあらゆる努力が傾注され、やがて新動力技術の発明となって結実した。そうするとすでに動力需要は成熟しているので、技術的手段の改良進歩さえあればそれは容易に実用先を発見できる。こうして新動力技術の嵐のような発展がはじまるのである。以上のような一般性がすべての動力技術交代期に見てとれるのである。

だから、もしも現代が動力技術における転換期であるとするならば、その転換も同様な機構によるであろうと推定するのは、立証された法則に基づく推定であるから科学的推定といえるだろう。科学に進歩発達はずきものだから、この種の技術的発達法則の研究も進歩するだろうし、現在の知見が最終最高などと主張するつもりはさらさない。しかし、現在知られている限りの状況のもとでは、すくなくとも核分裂原子力発電の方には、技術時代を画するような重要性を認め難い。それは動力発生が結局は蒸気タービンに依存する点でいわゆる通常火力と全く同様であるばかりでなく、熱効率の点ではかえって通常火力よりも悪く、信頼性、無公害性、経済性のどの点をとってみても、通常火力より格段によいとはいえないからである。真に時代を画するものはまだ出現していないが、その出現直前の様相を呈しているとみる方が当たっているようである。

以上の立論は筆者にしてみれば20年来の議論のむしかえしであって格別新しい点はない¹⁾。ただ、最近の事態の進展は以上の立論の正当性をますます裏付けているように見えるので、再論した次第である。

以上は核分裂原子力の研究開発をただちに無用とするものではない。ただし、通常火力以上に格別の優遇を与えてもそれには限度があって、基本的には他の多くの動力源と同列かつ公正に扱うべきものということになる。以上の所論は、また、核融合についても、基本的には他の新動力源と同列に扱うべきものという結論を提出する。核分裂と核融合以外に国としてのエネルギー源開発努力があまり傾注されていない現状は一考を要する。また、核融合炉にしても、せつかく1億度近い高温を発生しておいて、それを単純に熱機関の熱源として利用し、作業流体の温度としてはたかだか1,000°Kのオーダーにおとして使うのでは、あまり魅力がないと主張することになる。つまり核融合炉の本来的用途はまだ発明されていないとみられる。現在を動力技術における主役交替期の前夜とみると、現状も合理的に納得できるであろう。

では本来の核融合炉の適正用途とはどんなも

ので、例えば水素エネルギーなどの新技術開発とどのような相関をもたせるのが妥当であろうか。これこそ日本学術会議核融合研究連絡会、原子力研究連絡委員会、エネルギー・資源開発問題特別委員会などが取り組むべき課題であり、本稿で扱えるようなものではない。しかし各層研究者の間でこの問題への認識がようやく深まりつつあり、今後の審議には期待できると考えている。

4. 石炭燃焼技術関連

石油危機で石油が値上がりした結果、石炭が石油に対する競争力を回復したといわれているが、都市では環境規制がきびしいので、都市の小口需要家に石炭が再度使われる見込みは依然として稀薄である。石炭の燃焼に関する技術開発の中で、ガス化、流動層燃焼法、およびMHD発電の最近の情勢を簡単にのべよう。

4.1 ガス化発電

いまから5年ばかり前には石炭のガス化発電が先進諸国で競って研究されていた。これは、石炭をいったんガス化してから燃焼することにより燃焼反応を2段階に分割し、ガス化過程と後段の燃焼過程の温度を一挙に燃焼させる場合よりも低くしてNO_xの発生をおさえ、またサイクルをガス蒸気結合サイクルとすることにより熱効率を従来よりも10%くらい改善しようとするものである。5年前には米、独、ソ各国それぞれに独自の方式を発表してかなりの規模のパイロットプラントの建設計画も発表されていたが、1978年末現在の情勢は各国とも開発をつづけてはいるが大きな進展がないというのが実態のようである。

石炭だき火力発電所を新設する場合、従来のプラントに脱硫脱硝装置をつける方式とガス化発電方式とを比較すると、廃ガス中のNO_x、SO_xの残存率を低く設計するのであれば、ガス化発電の方が有利になるが、廃ガスの浄化をそれほどやかましくいわない場合は、簡単な脱硫脱硝装置をつけた方がコスト安になることは確かである。環境基準がきびしい場合には燃料を天然ガスまたは低硫黄重油にかえる対策が考えられ、これとの競争になる。そこで都市区域

で環境基準がきびしい場合には天然ガスや低硫黄重油に負け、離れ島などで排出ガス規制がゆるい場合には通常の在来火力に負け、ガス化燃焼の好適範囲というのが案外実用される場合がすくないと予想されるので、開発努力が各国ともスローダウン傾向にあるのではあるまいか。しかし、将来もしも良質重油や天然ガスの供給に不安が出ると困るので、それにそなえ一応の開発努力を継続しているのであろう。

4.2 流動層燃焼法

多孔板上に30cmくらいの高さに砂をのせ、下から空気を流すと、空気流速が低ければ砂層は静止して空気流は砂粒の間をぬってしずかに流れるだけであり、空気流速が高ければ砂の層は吹き飛んでしまう。その中間に砂の層が流動層となって激しく運動する領域がある。この流動層に燃料を供給して燃焼させる方式が各国で注目され、日本でも石炭、重油、都市ゴミなどを対象として各所で研究されている。ボイラ用を使う場合、流動層中に過熱器の最高温部を設置すると、流動する砂の作用で過熱管外表面へのバナジウム化合物の付着が防止され、したがって過熱器の高温腐食が防止でき、過熱蒸気温度を600°C以上に高めて発電所の熱効率を改善できるといわれている。また流動層中の伝熱管への伝熱係数は通常ガス中伝熱管の数倍に達し、建設費も低下すると主張されている。

一般に燃焼装置は負荷変動に追従する必要があるが、流動層では空気流速の許容変動幅があまりひろくはないので、流動層を分割して負荷に応じて使用区画数を増減する必要がある。石炭の場合には灰分が流動層中に蓄積するからその除去対策が必要で、また灰分の性質や石炭中の固定炭素の燃焼上の特質が炭質によって大幅にかわるので、その対策も用意する必要がある。設計上、また運転上の自由度が多く、規模や用途に応じて妥当な方法を見極めるのに時間がかかるであろうが、しだいに実用化されるであろうと期待されている。

4.3 MHD

MHDにも種々の方式があるが、燃焼ガスを磁場中で流動させる方式では、空気を1,000°C程度に予熱して燃料の燃焼温度を上げて熱解離

させ、さらにカリウムを含む物質（シードという）を添加して燃焼ガスの電気伝導度をあげ、これを強力な磁場中で膨脹させて高速で流す。こうすれば、磁場中を荷電粒子が運動することになる。だからガス流と磁束の双方に直角な方向に電極を設けると電位差が発生し、発電できる。電極から流出した高温ガスは廃熱ボイラと空気予熱器、NO_x除去装置、シード物質回収装置などを通過して大気中に放出される。廃熱ボイラの発生蒸気でも発電し、電極部での発生電力とあわせて外部へ送り出すのである。

MHDの研究開発の歴史はおよそ30年にわたるが、10年ほど前からスローダウン傾向がみえはじめ、1975年に米ソ共同開発協定が発表されたときには、實際上米ソ両国のみが大規模開発を継続しているだけとなった。当時日本ではまだ細々ながら研究がつづけられていたが、1978年いっぱいくらいでその研究の灯もいよいよ消えそうである。ところが、米ソ共同開発の方は着実に進行し、MHD部出力25,000kWのテストプラントでの実験は順調で、その経験を織りこんで、総出力100万kW（うちMHD出力は半）のパイロットプラントの設計がよいよいよ1979年から着手されるということである。電極の冷却にはしみ出し冷却などの手法も研究されたが、種々実験の結果、複合材料による高温型電極方式が実用化にむけて採択されるだろうということである。

MHDの研究開発は電極部だけの研究開発で済むものでは全然なくて、これにつづく廃熱回収部、ガス浄化・シード物質回収部などの全面的な研究開発が必要である。これをそのような総合開発として正面から受けとめ、U25と呼ばれている総合テストプラントを建設したのがソ連で、アメリカの超伝導技術が共同開発として結びついているのである。詳細は学術論文としておいおいに発表されるであろうが、米ソ以外の各国が放棄したプロジェクトだから、いろいろな意味で興味深い。

現在のU25プラントは天然ガスで運転されているが、MHDは石炭を消化できる見込みがある点で他の新種エネルギー研究開発とくらべて顕著な差異がある。この電極部は従来の熱機関

とは動作原理においてはっきり差異があり、従来の熱機関の中に含めず、直接発電方式に属するとされている。現代を「転換期」というとき、技術史論としては熱機関の時代が終わってつぎの新しい動力の時代へ移行する意味での転換期という考え方も現在のところ放棄できないことは既述した。MHD が果たしてポスト熱機関時代の主役かどうかについてはまだ確信しかねるが、巨大出力に適することは明白であり、この点では次代をにやう資格をもつ。今後の推移が注目される。

5. エクセルギー関連

最後にエクセルギー概念への関心のたかまりについて一言してこの小論を終わることにしたい。国民経済全体の中でエネルギー経済とか省エネルギーとかいう場合のエネルギーとは、じつは物理学で定義されているエネルギーとの対応が甚だわるいのである。詳細はすでに発表済み¹³⁾なのでそれらをごらん願うとして、ひとつだけ例をあげておくと、物理学で定義されるエネルギーには熱力学第一法則が厳密に適用されるが、第一法則は保存則ともいわれるもので、エネルギーは発生も消滅もしないことを保証する。ところが経済的な意味でのエネルギーは明らかに生産、消費、浪費、節約等の対象になり得るもので、第一法則でいうエネルギーとは異質である。では「物理学では物質にも保存則が成り立つとされるのに、経済的な財は生産、消費等々の対象となるのと全く同様か」というと、完全に同様なのではない。それはエネルギーには熱力学第二法則（いわゆるエントロピー増加の法則）があるのに、物質にはそのようなものはないからである。最近「経済的な意味でのエネルギーとはじつはエントロピーのことだ」という主張もきかれるが、これはじつは考えすぎで、経済的な意味でのエネルギーに対応する物理量は、第一法則で定義されるエネルギーと、第二法則で定義されるエントロピーの複合量である。これがエクセルギーで、次式で定義される。

$$E = H - H_0 - T_0(S - S_0)$$

ここでE = エクセルギー、H = エンタルピー、

S = エントロピー、 T_0 = 外界の絶対温度K、 H_0 と S_0 は外界との平衡状態におけるその系のエンタルピーとエントロピー、である。

この複合量エクセルギーは、経済的な意味でのエネルギーの原因別損失分析をする場合に大変便利である。火力発電所などの設計に用いてももちろん便利であるが、火力発電所のように従来からエネルギー経済を大切に設計されているものにエクセルギーを導入しても（原因別損失分析表が詳細につくれるから従来よりもよく判るにちがいないが、それを運用して最適化設計をやりなおして真の最適値に近づいても）、従来の設計点が最適点のよい近似値になっているので、実用的には計算手順の簡易化という効果しか出ない。ところが、火力発電所と地域のエネルギー需要の結合を考える場合、例えば発電所から電力のみでなく蒸気や圧縮空気、あるいはゴミ輸送用の真空系、さらに発電所に到着した液化天然ガスの寒冷を地域に配給して、これら全体を総合したトータルシステムの運営、コスト計算、最適化などをする場合には、エクセルギーは偉力を発揮する。つまり電力1 kWhを熱にかえると860 kcalになるが、蒸気なり冷媒なりのエネルギー860 kcalを消費しても電力1 kWhは得られないという矛盾は、エンタルピーだけを使っている限り解決できず、一方、エクセルギーとは温熱あるいは冷熱の電力価値という物理的意味もあるので、電力、温熱、冷熱を含むシステムを扱うのにきわめて便利なのである。しかし従来からボイラや火力発電の関係者は省エネルギー運動の熱心な推進母体を形成しているのだから、この人達にまずエクセルギーの使い方を体得していただくことは大いに意味がある。さいわいエクセルギー概念とその使いかたは省エネルギー関係者の間で大きな関心をあつめつつあるが、国民経済全体の省エネルギー化にはシステム化が大いに有効と考えられるので、エクセルギーとその使いかたの研究が今後ますますさかんになることを希望している。

6. 結 語

エネルギー科学の周辺における最近の情勢と

してはまだ論ずべき点は多々ある。ことに原子力発電所の現実の立地問題や安全問題、あるいは、エネルギー基地の洋上立地問題なども当然考えるべきであろうが、筆者はその適任者とも思えないので割愛した。現在はたしかに大きな転換が進行中で、エネルギー関係者はエネルギー科学周辺における変化にいつも注目している必要がある。本稿がそのような関心をよびおこす一助になれば幸いである。

参考文献

- 1) 石谷清幹：工学概論（増補版），1977，コロナ社。
- 2) エネルギーという概念を厳密に解すると、エネルギーは状態量で熱も仕事も状態量ではないので、この種の表現にはかなり重要な問題がある。文献1)のP. 269, または富山小太郎：物理学への道，1974，岩波書店。
- 3) 岩尾，黒田：日本の鉱物資源。共立出版，1977，P. 5。
- 4) 1978-11-2 付朝日新聞。
- 5) 石谷清幹：熱管理士教本。1977，共立出版。