

将来のエネルギーシステムにおける 化学エネルギーの役割

Role of Chemical Energy in Future Energy Systems



笛 木 和 雄*

1. 化学エネルギーの特徴

エネルギーには、電気エネルギー、熱エネルギー、機械的エネルギー、化学エネルギー、光エネルギー、核エネルギーなどの諸形態があり、それぞれ特徴を有している。これらのうち化学エネルギーは、物質の結合エネルギーの形をとっている関係上、貯蔵性に極めて富んでいるのが第一の特徴である。このことは、現在の主要な一次エネルギーである石油、天然ガス、石炭などの化石燃料が数百万年以上も地中に保存されてきたことをみても容易に理解できよう。エネルギーを貯えた物質を輸送することは容易であるから、化学エネルギーはまた輸送性にもすぐれている。タンカーによる原油、LNGの輸送や、パイプラインによる原油、天然ガスの輸送はその例である。またガソリンによって自動車は自由に走行できるのは、化学エネルギー形態の燃料が貯蔵性・輸送性にすぐれているからに他ならない。化学エネルギーの第3の特徴は、必要に応じ、熱に容易に交換できることである。すなわち、燃料の場合、空気中の酸素によって酸化すると、化学結合の組み換えが行なわれて、その際余ったエネルギーが熱として系外に取り出される。若し電気化学反応が用いられる場合には、化学エネルギーの電気エネルギーへの直接交換も可能である。

化学エネルギーのもう一つの特徴は、天然ガス、石油、石炭、ガソリン、灯油、重油、メタノール、水素、一酸化炭素、都市ガスなど、エネルギー担体となる物質が多様であるということである。物質が異なれば、性質も異なり、性質が異なれば使い方も異なるわけで、現在の2次エネルギーシステムがうまく機能

している理由の一つは、多種多様のエネルギー担体の特徴を巧みに利用しているからに他ならない。従って化学反応によって一つの物質から他の物質へと化学エネルギーを移し換えること、別の言葉でいえば化学エネルギーの同質変換は、異なる形態間のエネルギー変換に劣らず重要であることを指摘しておきたい。

以上述べたように化学エネルギーは極めて特徴ある形態のエネルギーであり、化学エネルギーなしにはいかなるエネルギーシステムも成り立ち得ないといっても少しも過言ではない。

2. 現在のエネルギーシステム

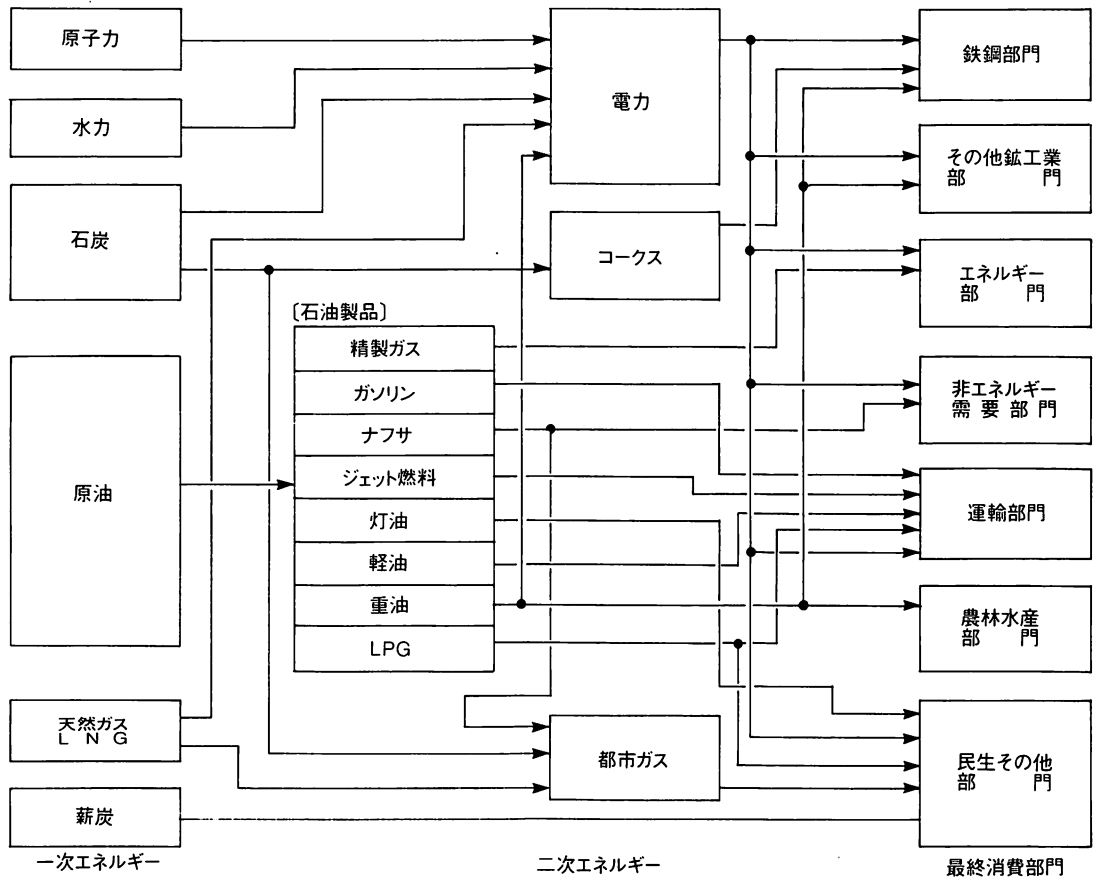
将来どのようなエネルギーシステムになってゆくかを推測することは、極めて重要な課題であるが、その前に現在のエネルギーシステムがどのようなかを概観しておこう。

第1図はわが国のエネルギーの流れ図である。一次エネルギーは、石油、石炭、天然ガスなどの化石燃料がほとんどで、化石燃料だけで一次エネルギーの93%を占めており、それ以外に水力と原子力がある。薪炭は僅少である。これら一次エネルギーをそのまま消費にまわすことは希で、ほとんどは使用、輸送に便利な二次エネルギーに変換される。電力、石油製品、都市ガス、コークス都市ガスなどがそれであるが、電力以外は化学エネルギー形態の燃料で、わが国の場合、電力が28%、燃料が72%になっている。

3. 将来の一次エネルギー

現在の一次エネルギーの大宗はいうまでもなく石油であるが、1990年代に生産がピークに達し、以後急速に枯渇に向うものと考えられており、事態は極めて切迫しているといつてよい。従って先ずは石油に代替し

* 東京大学工学部工業化学科教授



第1図 わが国におけるエネルギーの流れ (主要なもののみ示してある)

得るエネルギー源の確保ということになるが、資源的にも豊富で、利用技術の完成度も高く、経済性もあると判断されるエネルギー源が有力な候補となる。化石燃料資源では、石油にくらべ世界的にはまだ利用度の低い天然ガス、かつては一次エネルギーの王座を占め資源的にも豊富な石炭などが挙げられる。オイルシェールやタールサンドも石油に匹敵する資源量があるが、採取の方法がまだ確立していないので早急な利用は望めそうもない。化石燃料以外は原子力があるが、やはり当分は軽水炉などの在来型原子炉が中心となろう。在来型原子炉は、出口温度が低いため発電の効率も低く、また ^{239}Pu を ^{235}U へ転換する転換比も 0.6~0.7 位と小さい。この点を改良するため、高温ガス炉、新型転換炉、更には高速増殖炉の開発も進められており、こうしたタイプの炉の比率も今後次第に高まってくると思われる。

さて、石炭、オイル・シェール、タールサンドなどの化石燃料資源は、量的にはかなり多いが、石油同様使

えばいずれば枯渇する運命にある。従って非枯渇性一次エネルギーの開発も今から並行して進めねばならない。そのようなエネルギー源としては、太陽エネルギー・地熱・潮汐エネルギーなどの自然エネルギーなどの自然エネルギー、高速増殖炉・核融合などの原子力が挙げられる。核融合の開発研究はまだ極めて初期段階で、今後科学的実証、技術的実証、経済・安全・環境上の実証などの諸段階を経なければならないので、現時点ではいつ頃実用化されるかはわからない。

以上述べたように、今後一次エネルギーには大きな変化が生ずると予測されるが、一次エネルギーが変われば、これを受ける二次エネルギーにも当然変化を生ずる。新二次エネルギー、エネルギー有効利用における化学エネルギーの役割は大きく、以下にこれを述べよう。

4. 低利用化石燃料資源の高度利用における役割

現在のエネルギーシステムは、石油、天然ガスなど

の液体化石燃料を主要な一次エネルギーとするシステムである。このシステムへの適応性、技術的完成度、更に資源量の豊富さからみて、先ず考えられるのは一般炭の利用である。一般炭は固体である上、灰分、硫黄分を含み、また燃焼させると煤煙を出すので、クリーン燃料化、流体化をはからねばならない。現在研究開発が進められているスラリー化、ガス化、液化はこのような方向を目指したもので、大部分の操作は化学エネルギーの同質変換である。スラリー化は石炭を微粉砕して重油などを混じて流動性を与える方法で、このCOM(coal oil mixture)は火力発電の燃料などに用いられる。

ガス化は石炭の有する化学エネルギーを気体燃料の化学エネルギーに同質交換するもので、大別すると低カロリーガス化と高カロリーガス化の二つがある。低カロリーガス化は水蒸気と空気をガス化剤とするガス化法で、得られる可燃ガスは CO 、 H_2 であり、発熱量は小さい。ガスタービンと蒸気タービンの組み合わせによる複合サイクル発電の燃料とすることを目的としている。高カロリーガス化は発生量の大きいメタン主成分の気体燃料を製造しようというもので、天然ガス代替をねらっている。従ってガス化剤には酸素と水蒸気を用いられ、ガス化の段階から発熱量の大きいメタンがある程度生成するよう加圧することが多い。生成したガスはシフト反応によって $\text{CO}:\text{H}_2=1:3$ になるよう調節された後、触媒を用い圧力を加えて $\text{CO}+3\text{H}_2=\text{CH}_4+\text{H}_2\text{O}$ の反応でメタンに転化する。

液化は石炭より液体燃料をつくらうというものである。れき青炭は H/C の割合がモル比で $0.5\sim 1$ 位であるが、重油では 1.2 、原油では $1.7\sim 1.8$ 、ガソリンでは $1.9\sim 2.0$ なので、液化するためには水素を添加する必要がある。直接水素を添加する方法、溶媒を用いて水素添加をする方法、乾溜によって石炭の一部からタールとして取り出す方法、一たんガス化して CO と H_2 をつくり、メタン化と同じように触媒を用い加圧化で炭化水素を合成する方法などがある。

石油代替の化石燃料を化学原料化することもまた重要である。すなわち、わが国の化学工業は石油留分の一つであるナフサを出発原料としているが、石油資源が枯渇して来た場合、他に原料を求めなければならない。新たな原料としては石炭、タールサンド、オイルシエルからのピチュメンなどが挙げられる。かつては石炭の乾留生成物であるタールから芳香族化合物を得ていたこともあるが、石炭、ピチュメン全部を化

学原料とすることが今後の課題である。石炭、ピチュメンは複雑な組成物であり、これを分離して単一の組成物を得ることは困難なので、 CO 、 H_2 などの炭素1個の単純な化合物に分解した後、これらを出発物質として、各種の有機化合物を合成する化学技術体系が現在つくられつつある。この化学はC化学と呼ばれている。

5. 核熱の利用における役割

原子力は現在軽水炉が主体で出口温度が約 300°C と低いので、核熱はほとんど蒸気タービンと発電機により電力に変換され、ごく一部がスチーム、海水の淡水化などに利用されているに過ぎない。原子力の一次エネルギーにおける比率は今後急速に高まり、原子炉の出口温度も一層高まると考えられるので、核熱を発電以外特に鉄鋼や化学のプロセス熱として利用する可能性も出てくる。

先ず第一は重質油や石炭のガス化への利用である。ガス化の反応は吸熱反応で、熱の供給を必要とする。これまでは原料の一部を燃焼させて必要な熱を供給していたが、これに高温ガス炉の核熱を用いようというもので、化石燃料資源の節約となる。原子力製鉄もこの延長上にあるもので、得られた水素を還元剤として鉄鉱石の還元が行なわれる。第二は核熱を利用した水素の製造である。水素は、無尽蔵な水を原料として製造でき、クリーンで、いかに大量に消費しても地球の資源循環を乱すことはない。また、利用範囲も広く、家庭・ビルの暖房、厨房用、航空機や自動車の燃料、化学原料、製鉄用など多くの用途がある。このような理由から、将来の二次エネルギーの一つとして水素が有望視され、水素エネルギーシステムが検討されているが、問題はいかにして安く水素を製造するかであり、核熱を用いて水素を製造するプロセス研究・開発が世界的に行なわれている。核熱を用いて発電を行ない、水電解によって水素を製造することは従来技術で可能であるが、総合熱効率が $25\sim 28\%$ と低いのでより高い変換効率をねらって熱化学製造法が研究されつつある。これはいくつかの熱化学反応を組み合わせでサイクルをつくり、全反応としては水の酸素・水素への分解反応が残るといった原理に基づいた方法である。現在まだ研究は初期の段階ではあるが、今後の発展が期待される。

6. 自然エネルギーの利用における役割

自然エネルギーのうち、量的に最も多く、また普遍

的に存在しているのは太陽エネルギーである。太陽エネルギーは非枯渇、クリーンで、エネルギーそのもののコストはただであるというすぐれた特徴を有する反面、エネルギーが希薄である上、昼夜、季節、天候によって強さが変動するという問題点を有している。従って太陽エネルギー利用のためには、集エネルギー、蓄エネルギーが必要である。太陽光発電によって発電を行えば、当然電力貯蔵設備が必要で、2次電池、あるいは水電解槽と水素・酸素燃料電池の組み合わせなどを設備しなければならない。これと同じ事情は風力発電や波力発電においても存在している。

光合成を利用すると太陽エネルギーは化学エネルギーに変換貯蔵される。これがバイオマスであるが、バイオマス利用においては、必要に応じ、メタン醗酵、アルコール醗酵のような化学エネルギーの同質変換が行なわれる。

7. 電力システムにおける役割

近年我が国では電力の需給構造に大きな変化が起きている。すなわち需要面においては昼夜間の負荷率が次第に隔りをみせていること、クーラーの普及に伴ない著しい夏ピーク型になったことで、その結果として負荷率は年々低下し、全国の年平均負荷率は昭和53年度57%にまで落ちこんで来ている。一方供給面からみると、従来はベース負荷に大容量火力、中間負荷に旧式火力、ピーク負荷に揚水発電とガスタービンがそれぞれ用いられて来たが、今後ベース負荷型の原子力が増加すると予想される上、エネルギー価格の高騰から効率の悪い旧式の火力を中間負荷用に用いることは必ずしも得策でないという考え方が出て来ている。更に揚水発電の候補地も次第に数が少なくなっている。こうした電力需給上の諸問題を解決する方法として電力貯蔵が取り上げられ、従来の揚水発電に代る方式として地下揚水、圧縮空気、超伝導コイル、二次電池などが考えられている。これらの諸方式のうちでは二次電池方式が有望と判断されて米国ではBEST(Battery Energy Storage Test)計画、わが国ではムーンライト計画が、それぞれ国家的プロジェクトとして動き出している。

電力貯蔵用二次電池には、これまでの二次電池にくらべ、いろいろきびしい要求がつけられている。第1は揚水発電に匹敵する効率ということから、充放電1サイクルの変換効率が60~70%以上であることが要求されている。その他サイクル寿命が3000サイクル(従

来型鉛蓄電池で500サイクル)以上であること、用いる材料に資源的制約がなく、廉価であることなどの要求もある。こうした要求を満たすべく、種々の新型2次電池の研究・開発が進められている。

また夜間電力の利用、自動車排気ガス対策の一環としてわが国ではかつて電気自動車の開発が行なわれたが、アメリカにおいては、現在エネルギー節約の観点から電気自動車の開発を行なっている。電気自動車用電池はサイクル寿命、経済性など以外に、エネルギー密度、出力密度が大きいかも要求される。

次に燃料電池発電の話に移ろう。これまでの火力発電は発電効率40%程度で実に60%が無駄に廃棄されている。若し発電所が大都会に近く立地できれば、数十度の熱は暖房、給湯用等に利用できようが、現実には益々遠隔立地の傾向にある。さて燃料電池は発電効率が60~70%と高く、負荷率30%程度でもこの高効率は変わらない。また有害物質の放出はほとんどなく、運転も静粛に行なわれる。従って都会の中心部に設置も可能で、廃熱も利用できるため、エネルギー利用率は85%にも達する。燃料電池技術の進歩は目ざましく、4,800MWの燃料電池発電所が試験的にニューヨーク市に建設されている。わが国でも近く同じような試みがなされる予定といわれている。化学エネルギーと電気エネルギーを結ぶ新しい架け橋といえよう。

8. 新しい二次エネルギーとしての役割

石油代替エネルギー源の候補として天然ガスが注目され、わが国でも昨今LNGの輸入が急速に増している。LNGは特殊のタンカーを必要とする上、輸入後長期保存が難しいという問題がある。これを解決する方法として現地で天然ガスからメタノールを合成し、これを我が国で運んで利用するという考え方がある。メタノールは液体なので従来の石油タンカーが利用して海上輸送でき、また国内での貯蔵も楽である。利用面では加熱用として用いる点には問題はなく、化学原料としても用途は広く、現にメタノールを出発原料として種々の化学製品が製造されている。既に述べたように今後の石油枯渇に備えてC₁化学と呼ばれる新しい化学技術体系がつくられつつあるが、メタノールはC₁化学の重要な出発原料の一員となり得る。また容易に分解して水素を与えるので、工業用水素源としても有望である。純粋なメタノールを燃料とする自動車はまだ出来ていないようであるが、恐らく本格的に取り組めば、つくり得よう。このように考えてみると、

メタノールは二次エネルギーとして有望と思われる。

次は水素であるが、水素は水素エネルギーや水素エネルギーシステムの言葉があるように、将来の二次エネルギーの有力候補の一つと見なされている。既に述べたように、将来化石燃料に代って核熱や自然エネルギーが主要な一次エネルギーになった場合、これらをもとにして燃料を合成しなければならず、原料面、利用面などを勘案して水素が有望と考えられているわけである。

熱の貯蔵・輸送に化学エネルギーの形態を利用することは興味深い。すなわち、熱エネルギーは逸散し易いエネルギー形態であるため、長期間高い温度に保持して貯えたり、あるいは数十km先まで輸送することは難しい。しかし、吸熱反応を用いて熱エネルギーを化学エネルギーに変換して貯蔵・輸送を行ない、熱を必要とする時点あるいは個所において前と逆の反応（発熱反応）で化学エネルギーを熱エネルギーに変換すれば、長期間の貯蔵、長距離の輸送も可能である。このような方式の熱輸送はケミカルヒートパイプと呼

ばれる。ドイツのユーリッヒ研究所では $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} = \text{CO} + 3\text{H}_2$ の吸熱反応を利用して、核熱を化学エネルギーに変換し、 $\text{CO} + 3\text{H}_2$ をパイプラインで遠距離輸送して目的地で逆反応（発熱反応）によって熱を発生させ、得られた CH_4 を別のパイプラインでもとの原子炉にもどすという熱輸送システム（EVA-ADAM）を研究している。ケミカルヒートパイプは反応系の選び方で、輸送し得る熱の温度がさまる。

9. おわりに

以上将来のエネルギーシステムを想定して、その中における化学エネルギーの役割を述べた。はじめにも述べたように、化学エネルギーの担体は多種多様で、すぐれた担体を選ぶことにより、エネルギーの利用は一層便利となると同時に、時には有効利用にもつながる。また、二次電池、燃料電池、ケミカルヒートパイプのように化学反応自身をエネルギー変換に有効に利用することも、今後益々重要となると考えられる。化学者、化学技術者のすぐれた着想が大いに望まれる。

