

■ 論 説 ■

21世紀を迎えてのエネルギー問題

上之園 親佐*

Chikasa Uenosono



1. はしがき

人間が生きて、活動するためには、食糧、エネルギー、および情報は不可欠であることは周知の通りである。これら3要素のうち、ここではエネルギー問題、特に11年後に21世紀を迎えることになるので、21世紀のエネルギー問題について、(1)21世紀の半ばには、地球上の人口は100億人に達するというがエネルギーは確保されるであろうか。(2)電気エネルギーは、化石燃料、核燃料を燃焼して得られる熱エネルギーと、河川の水のもつ位置エネルギーとからエネルギー変換によって得られているが、その効率はどうか。(3)化石燃料の燃焼に伴うCO₂ガス等による地球の規模での温暖化と反原発運動への対応問題。(4)石油危機時代に発足した新エネルギー、省エネルギーの開発には利用できるものがあるのだろうか等について述べる。

エネルギーは上述したように人間の生存と活動にとっての必需品であるので、(1)安価であること、(2)豊富で、長期にわたって供給しうるものであること、(3)環境を汚染しないものであるか、または汚染を除去する技術が完備されていることなどが望まれる。

2. 歴史的に概観したエネルギー需要とその資源の動向

今日、エネルギー資源として表1に示すものがある。これらを大別すると、化石燃料、核燃料、太陽エネルギー、自然エネルギーとなる。これら資源のうち今日、主に利用されているものは、石炭、石油、天然ガスの化石燃料、ウラン235の核燃料、降雨（水力）の自然エネルギーである。地球上の生物、自然現象は主として太陽からのエネルギーと月の引力に依存している。表1の海洋エネルギーには地球と月との間に働く引力に依存しているものがある。

表1 エネルギー資源と含有元素、成分、エネルギー形態、および環境汚染物

エネルギー資源名	含有元素と成分	エネルギー形態名	環境汚染物	
化石燃料	石炭 ある歴青炭の成分は、下記の通りである。 C : 62.25% H : 4.74% O : 11.84% S : 2.24% N : 1.26% 灰分 : 16.80% 水分 : 0.87%	化学エネルギー	CO ₂ ガス SO _x ガス NO _x ガス 灰分 熱汚染	
	石油 ある重油の成分 C : 86.1% H : 11.8% S : 2.1% 灰分 : 0.1%	化学エネルギー	CO ₂ ガス NO _x ガス SO _x ガス 灰分 熱汚染	
	天然ガス 主成分はメタン C : 99.7% その他CO ₂ : 0.3%	化学エネルギー	CO ₂ ガス NO _x ガス 熱汚染	
核燃料	ウラン ウラン系核燃料 UO ₂	核エネルギー	放射能とその汚染物 熱汚染	
太陽エネルギー	—	光・熱エネルギー	なし	
自然エネルギー	海 温度差 波浪、海流 潮流 潮汐 濃度差	— — — — —	熱エネルギー 力学エネルギー 位置エネルギー 濃度エネルギー	なし なし なし なし
	風	—	力学エネルギー	なし
	降雨(水力)	—	位置エネルギー	なし
	地熱	—	熱エネルギー	少々重金属汚染
	薪炭	—	化学エネルギー	なし

われらの祖先である原始人は原始人の時代の末期に火を作り出すことを発見して、薪炭を燃料とした熱エネルギーを暖房、料理などに用いた。10万年前の狩猟人の時代、紀元前5000年頃肥沃な三角州地帯で穀物を栽培し、家畜のエネルギーを使用した初期農業人の時代、13世紀の北西欧では、水力、風力をエネルギー源として使用し、石炭を暖房用に用い、家畜を輸送用に使っていた高度農業人の時代、19世紀に入ると、鉄鋼が製造され、蒸気機関が産業界の動力源となり、1875年には産業革命が英国におこり、産業人の時代が招来した。20世紀に入ると、石油を燃料とする内燃機

* 関西電力(株)顧問・京都大学名誉教授工学博士

〒530 大阪市北区中之島3丁目3-22

表2 資源埋蔵量一覽

		石 油		天 然 ガ ス		石 炭 (高品位炭)	オイルサンド オイルシェール	ウ ラ ン (自由世界)
		1	2	1	2			
究極可採埋蔵量	世界計	(*1) 2兆バレル	(*3) 1.7兆バレル	(*5) 204兆m ³	(*7) 251兆m ³	(*10) 5.7兆トン	(注2)(*11) オイルサンド 28,714億バレル オイルシェード 31,330億バレル	(注3)(*12) 約1,300万トン (\$130/kgU以下)
	世自共	1.5 0.5	1.4 0.3		164 87	(賦存量)		
確認可採埋蔵量 (R)	世界計	86年1月(*2) 7,001億バレル	84年12月(*4) 6,933億バレル	86年1月(*2) 99兆m ³	84年8月(*8) 90兆m ³	83年9月(*10) 5,060億トン		85年1月(*12) 225万トン \$80/kg以下 161万トン \$80~\$130/kg 64万トン
	世自共	6,188 814	5,905 1,027	55 44	53 37	2,670 2,380		
地域別 賦存状況	北中	4.9%	4.9%	8.5%	9.1%	23.2%		26.4%
	西中	12.0"	12.3"	5.4"	6.0"	0.5"		8.2"
	ア	3.8"	2.7"	6.5"	5.9"	14.2"		8.0"
	フ	56.8"	53.9"	24.6"	24.8"	-		0.2"
	共	2.7"	2.9"	4.9"	6.2"	7.7"		25.5"
	米欧東	8.1"	8.5"	5.7"	6.5"	10.8"		31.6"
太平洋	11.6"	14.8"	44.4"	41.4"	43.6"		-	
年 生 産 量 (P)	世界計	85年(*2) 195億バレル	84年(*4) 198億バレル	84年(*6) 1.70兆m ³	84年(*9) 1.60兆m ³	80年(*10) 27.9億トン	(少 量)	84年(*12) - 3.9万トン -
	世自共	141 54	143 55	0.66	0.96 0.65			
可 採 年 数 (R/P)	世界計	36年	35年	58年	56年	196年	(大)	- 58年 -
	世自共	44 15	41 19	53 67	55 57			
(注1) 確認可採埋蔵量 (石油換算, 億トン)		952	943	889	813	3,640	-	-

(注1) 石油換算値: 石油1バレル = 0.134トン, 天然ガス39.2×10³ft³ = 1トン, 同1.111×10³m³ = 1トン

(注2) オイルシェール, オイルサンドは原始埋蔵量である。

(注3) ウランの究極可採埋蔵量は確認埋蔵量, 推定追加埋蔵量及び期待埋蔵量の合計とした。(OECD~IAEAの分類による)

(注4) 表示数値未満は4捨5入のため, 合計数値と一致しない場合がある。

出 典

(*1) Moody ('75)

(*2) Oil & Gas Journal '85-12-30

(*3) USGS「Distribution and Quantitative Assessment of World Crude Oil Reserves and Resources」(Masters, Root and Dietzman '83)

(*4) World Oil '85-8-15

(*5) Weeks ('71年)

(*6) International Petroleum Encyclopedia 1985

(*7) IEA「North Sea Petroleum Developments in the Context of the Global Outlook for Oil and Natural Gas」(Franssen '85) 原データはM.Halbouty (1983) 等、天然ガス鉱業会「天然ガス総説」1983年

(*8) Petroleum Economist '84-8

(*9) BP Statistical Review of World Energy '85-6

(*10) 世界エネルギー会議 ('83年)

(*11) オイルサンド: Unitar/UNDP (1984), オイルシェール: 米国地質調査所 (1976)

(*12) OECD/IAEA (1986)

[注] 通産省編 21世紀エネルギービジョンより

関が出現し、地上には自動車、海上には船舶、空には飛行機ということで石油によって地球上の空間は支配される状態となった。また、1950年代には中東の石油生産が増大して、石油価格が値下がりしたことで、わが国の火力発電用の石炭は石油に切り換えられてきた。かくして、この産業人の時代は多消費エネルギー時代、またハード・ウェア時代ともいわれている。1973年末と1979年初めに遭遇した石油ショックによって、先進諸国の産業構造はエネルギー多消費型からエレクトロニクスによる高度情報化型、さらには新素材を導入したハイテック型に移行している。先進諸国であるわが国の製造業界のエネルギー需要の伸び率は著しく低下し、代わって民生用エネルギー需要が伸び、その伸び率は上昇している。

石油ショックが起こるまでのエネルギーは上述したように、石炭、石油、水力などのエネルギー資源に依存していたが、石油ショックによって、それまで発電原価が高く、実用化の望みが断たれていた原子力発電はその発電原価が突然火力発電のそれより安価となり、ウラン235核燃料が立派に石油代替エネルギーの務めを果たすこととなったことは、エネルギー資源の乏しいわが国にとっては、新たにエネルギー資源が生まれ、確保されたということで大変嬉しいことである。

また、石油ショックを契機として、先進諸国は一律に石油への過度の依存体制を改め、エネルギー資源の多様化を図るという観点からこれまでの原油生産地では燃焼廃棄されていた天然ガスが注目され、世界の天然ガス市場は拡大している。世界の天然ガス資源の埋蔵量は、表2に示すように確認可採埋蔵量で、889億トン、または813億トンで、今後とも埋蔵量は増加する方向にあるといわれている。天然ガスはメタンを主成分とする可燃性ガスの総称であって、生産の形態、性状によって(1)油溶性天然ガス、(2)水溶性天然ガス、(3)遊離性天然ガスに区分されている。最近、トーマス・ゴールド(Thomas Gold)教授の著書に、「地球深層ガス(Power From The Earth)」がある。この図書は1987年に発行されている。また、東大教授脇田宏氏の訳本が1988年12月に日経サイエンス社から発行されている。この地球深層ガスについて、著者は地球深部には、木星や土星に多量の炭化水素ガスが存在するのと同様に地球内部に多量の非有機性ガスが存在するとの学説をたてている。この学説を実証するため、スウェーデン、アメリカ、ソ連で探査が進められている。わが国でもエネルギー総合工学研究所の未来エネ

ルギー研究グループが調査研究している。

その他として、石油代替エネルギー、省エネルギーの研究があるが、実用化は道遠しの感がある。また、プラズマ核融合炉の開発研究が30年を越えて行われているが、この方も何時項目処がつくかは不明である。さらに、水素ガスは環境汚染がない点で期待されるが、水素の製造価格が高いことに難点がある。

3. 電気エネルギーへのエネルギー変換について

電気エネルギーは、周知のように自然界にはそのものは実在しない。したがって、図-1に示すように、化石燃料や核燃料等を、化石燃料の場合には火炉とボイラで、また核燃料の場合には原子炉で燃焼させて水を熱して蒸気とし、その内部エネルギーを高めた熱エネルギーを蒸気タービンで力学エネルギーに変換し、蒸気タービン軸に直結している発電機を回転して、力学エネルギーを電気エネルギーに変換する。また、ダムの高さで決まる位置エネルギーをもつ水をダムに直結する水圧管を通して落下させ、その端末に取りつけた水車のランナーを回転させることによって水の位置エネルギーを水車の力学エネルギーに変換され、水車軸に直結している発電機で水車の力学エネルギーを電気エネルギーに変換させる。

上述したように熱エネルギーから力学エネルギーをとり出す装置は、一般に熱機関と呼ばれる。ここでは蒸気タービンが熱機関である。熱機関を中心とした熱エネルギーの移動の間における力学エネルギーのとり出す機構について図-2によって述べる。すなわち、高温熱源から熱機関に流入する熱量 Q_H を受け取り、低温熱側へ熱量 Q_L を放出し、その差($Q_H - Q_L$)の熱量が外部へ仕事をす。熱の流れは高温源の温度 T_H から低温熱源の温度 T_L へ向かって流れるもので、一方向性であって、逆方向性は存在しない。

熱機関へ高温熱源から放出される蒸気の内部エネ

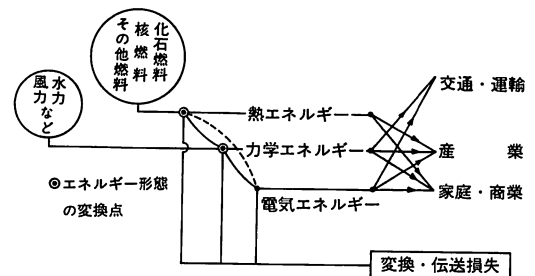


図-1 エネルギーの流れとエネルギー形態の変換

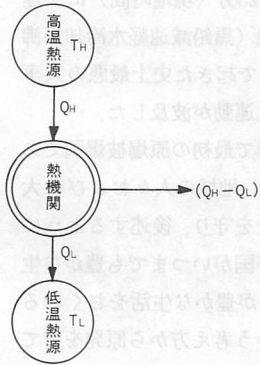


図-2 熱機関

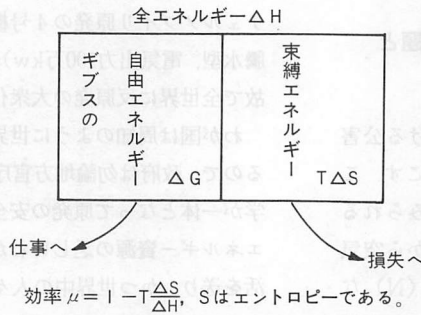


図-3 温度一定変化の効率

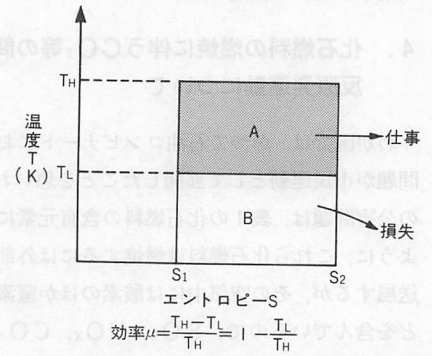


図-4 カルノー機関の理想効率

ギーの中には、外部へ力学的仕事を行うことのできるエネルギー（これを自由エネルギーという）と熱として外へ放出されるエネルギー（これを束縛エネルギー、または無効エネルギーという）とがある。この束縛エネルギーを取り除かないと外部へ仕事がされない。この束縛エネルギーが低温熱源側に放出される熱量 Q_L である。かように熱機関は何らかの温度差 ($T_H - T_L$) がないと、仕事を外部にしない。これは熱力学の基本的公理で、熱力学第2法則である。この束縛エネルギーの尺度とした「エントロピー」の考え方が生かされている。

力学エネルギーから電気エネルギーへのエネルギー変換方式には、電界型変換と磁界型変換とがあるが、上述は何れも磁界型変換で、その原理は電磁誘導の法則によるもので、エネルギー的には束縛エネルギーが極めて小さい。

ここでは、熱エネルギーから力学エネルギーへのエネルギー変換、力学エネルギーから電気エネルギーへの変換について述べたが、その他の変換方式をも含めて各変換方式の変換効率について述べる。前述したようにエネルギーの中には自由エネルギーと束縛エネルギーとがある。束縛エネルギーは温度一定の条件下では、エントロピーの変化分に関係している。エントロピーは状態系の秩序の正しさを示したもので、系の秩序が整っていればエントロピーは小さく、秩序が乱れてくるとエントロピーが増大する。エネルギー変換においては、エントロピーが増大すると、それだけ変換効率は下がる。この関係を示したのが図-3である。

自由エネルギーの変化分はギブスの自由エネルギーと呼ばれている。電気、力学、化学エネルギー形態間の直接エネルギー変換では、図-3に示すようにエン

トロピーの変化分が小さいので、すなわち、 $T (\Delta S / \Delta H) \approx 0$ であるので、エネルギー変換効率は大きい。エネルギー変換効率が低いのは、熱エネルギーから力学エネルギーへの変換であって、 $(\Delta S / \Delta H)$ が大きいからである。熱機関の理想的エネルギー変換効率は、周知のようにカルノー・サイクルである。このサイクルをエントロピーと温度との関係で図示したのが図-4である。今回の(A+B)の面積が高温熱源から供給される熱量である。面積Bは、低温熱源へ放出される熱量である。両者の差、面積Aの熱量は自由エネルギーとして外へ対してなされる仕事となる。このときの変換効率 μ は図-4の中での式であらわされる。したがって、カルノー・サイクルの理想的効率は、図-4に示されるように、二つの差エントロピー過程と二つの等温過程とから成り立っている高温熱源の温度と低温熱源の温度から決められる。この場合の温度は絶対温度表示である。

熱機関の変換効率を高めるには、高温源と低温源の温度差を大きくすることであるが、それにはまず高温源に使用する材料を耐熱材料とすることであるが、現在のところ600℃止まりであるので、今後の開発研究にまつ。低温源の温度についても、外部の大気温度等を加味すると現在より下げることに経済的に無理であろう。

各種の熱機関にはそれぞれのサイクルをもっているが、それらの機関の概略の効率は、3つの機関の作動温度域から出されたカルノー効率の約1/2以下と想定すればよい。例えば蒸気タービンを用いた発電に使われているランキン・サイクルの効率は起臨界圧大容量機で、41%ほどである。最近にはトッパー・サイクルとして高温ガスタービンを用いた複合サイクル発電

(効率45%)が採用されている。

4. 化石燃料の燃焼に伴うCO₂等の問題と 反原発運動について

わが国では、かつて石油コンビナートにおける公害問題が市民運動として展開したことを想いおこす。この公害問題は、表1の化石燃料の含有元素にみられるように、これら化石燃料は燃焼するには外部から空気送風するが、その空気中には酸素のほか窒素(N)などを含んでいるので、SO_x、NO_x、CO₂などが煙突から排出され、SO_x、NO_xは環境を汚染するガスとして、廃除するための開発研究がなされ、その結果は、脱流装置、脱硝装置が開発され、それらを取りつけてSO_x、NO_xの除去に成功して、今日に至っている。

前述したように、CO₂ガスについては、化石燃料、燃料に伴うCO₂ガスだけでなく、焼畑によるもの、火山の火口からの噴出ガス等によるものなどがあるが、その他地球温暖化については、今日オゾン層の破壊で問題となっているフロンガスをも関与しているということである。地球の温暖化については2030年頃大気中の炭酸ガス濃度が600ppmに達して海面が今日より1m程度上昇すると言われている。

大気中の水蒸気や炭酸ガスは、太陽光をよく通すが、地表面から放出される熱し赤外線を吸収して宇宙空間に逃げる熱を地表面に戻すために、大気温度が上昇する。この現象を温室効果という。大気中の炭酸ガス濃度の定常観測点は世界に20地点(1981年4月現在)であったが、わが国では1987年1月に岩手県三陸町綾里のロケット観測所に大気中の炭酸ガス濃度の定常観測装置が設置されたことは誠によろこばしいことである。

最近では異常気象という言葉を目にする。この異常気象は中緯度の上空を流れる偏西風が南北に大きく波をうつために起こることが多く、世界的にみると、著しい高温の地域と著しい低温のところ、多湿の地域と早ばつの地域など、正反対の異常気象が起こりやすくなったのは、世界の気候変化と関連があり、火山噴火、海流異変、太陽活動の変動、炭酸ガス濃度の増加、大気汚染、森林面積の縮小などによって起きてきたという諸説もある。そのために、世界気象機関が中心となって規格した気候に関する国際的な研究計画があるので、成果を期待したい。

反原発運動は1978年3月28日のスリーマイル島にある原発2号機(PWR型、959MW)の事故で火がつ

き、1986年4月26日午前1時23分(現地時間)にソ連チェルノブイリ原発の4号機(黒鉛減速軽水冷却炉沸騰水型、電気出力100万kw)で起きた史上最悪の重大事故で全世界に反原発の大衆化運動が波及した。

わが国は周知のように世界で最初の原爆被爆国であるので、政府は勿論地方官庁、地域の人々および各大学が一体となって原発の安全を守り、後述するようにエネルギー資源の乏しいわが国がいつまでも豊かな生活を送り、かつ世界中の人々が豊かな生活をおくれるようにしたいものであるという考えから原発を育てる人々が多い。

5. 21世紀のエネルギーとその資源について

通産省編の21世紀エネルギービジョンは昭和61年12月5日発行された。その巻末に参考資料として表2の資源埋蔵量一覧が掲載されている。この表には、石油、天然ガス、石炭、オイルサンド、ウランについての確認可採埋蔵量、年生産量、可採多数、および究極可採埋蔵量が表示されている。これらの数値から直観的に私が気がついたことは、21世紀の半ばには世界の人口が100億人に達するというが、地球に埋蔵されるエネルギー資源は21世紀末までに大丈夫であろうかということである。

表1で自然エネルギーが掲げられているが、水力、地熱、薪炭は実用化されている。そのうちわが国の水力資源は乏しくなっている。地熱は僅かであり、薪炭の使用は特定なものとなっている。その他は企業化しても採算が合わないので、利用されていない。太陽エネルギーについても企業化することは採算上難しいと思う。太陽光を採用した卓上計算機などは世界史上で商品として売られているが、太陽光をエネルギー供給用電源として使用するには現在の電力供給制度の価格より割高であるので、現在では特定な限界のもとで使用される状態である。将来に対して期待できることを望んでいるが、将来とも特定の条件のもとで使用されることであろう。

プラズマ核融合に関する研究は約30数年を経過しているが、実用化をみるのは、21世紀に入ってからのようである。私はプラズマ核融合炉の実現を待ち望んでいる。その理由は、重水素の存在率は0.015%であるので、海水中には相当な量が存在していることになるので、この重水素を燃料とする核融合炉を完成し、その炉で得られる超高温の熱で水を直接分解して水素ガスと酸素ガスを製造できればと考えている。水の直

接熱分解には理論的に4,500°C程度が必要であるが、現在、それだけの高温を持続して出せる熱源がないので、核融合炉の実現が望まれる。

水を直接熱分解するようになれば、水の熱分解で水素と酸素ガスが無限に近いほど製造できるのでエネルギーの心配は無用となる。また、熱機関には水素ガスを用い、燃料電池の燃料に水素と酸素を用いて発電する方式を採用することによって、われらが使用するエネルギーは電気エネルギーとして水素と酸素の供給で得られ、また燃焼した後はこれらは蒸気、水となってもとの姿に帰って行くので、エネルギーの循環系が自然環境系の中に組み込まれることになり、エネルギーによる環境汚染が皆無に近くなることが期待される。それにはまず核融合炉の実現が待ち望まれる。

6. むすび

21世紀を迎えるに当たって、人類のエネルギーとのかわり合いの歴史を述べ、人間にとってエネルギーは不可欠であるが、その資源は地球の賦存するエネルギー資源を消費して行くことになる。また現在は化石燃料の燃焼から地球規模での炭酸ガス濃度が600ppmに近づく2030年頃には地球温暖化によって海水面が1mほど上昇するといわれている。一方、反原発運動が大衆化してきているが、これにいかに対応するかは社会的問題として勿論国民のエネルギーを確保する

ことを考えると重要な課題である。21世紀半ばには100億人に達する人口をかかえることになるが、21世紀のエネルギーは地球の賦存エネルギー資源で大丈夫だろうか。それへの対応としてプラズマ核融合炉の実現が待ち望まれる。

参 考 文 献

- 1) 通産省編；21世紀エネルギービジョン（複合エネルギー時代の幕開け）昭和61年12月発行
- 2) エネルギー変換懇談会編；総合エネルギー講座，1～8巻 昭和54年12月発行
- 3) エネルギー変換懇談会編；エネルギー変換技術 昭和62年1月発行
- 4) 通産省編；エネルギー '88 昭和63年9月
- 5) 本間氏外他；エネルギーをつかむ ブルーボックスB-332 昭和53年11月発行
- 6) 長倉 功；炭酸ガス 1988年7月発行
- 7) 増田善雄；日本の波力発電 昭和62年6月発行
- 8) 高野健三；海のエネルギー 昭和59年6月発行
- 9) 人類とエネルギー研究会編；原発と人間 1988年11月発行
- 10) 水谷幸男；燃焼工学 1982年8月発行
- 11) トーマス・ゴールド著 脇田 宏訳；地球深層ガス 1988年12月発行
- 12) エネルギー総合工学研究所 未来エネルギー研究グループ編；極限領域エネルギーへの挑戦 1988年6月発行
- 13) 吉川庄一，飯吉厚夫；核融合入門 昭和47年7月発行

