



天然資源総合利用の一視点 : エントロピー増大の極小化

石光, 亨

(Citation)

国民経済雑誌, 134(5):74-92

(Issue Date)

1976-11

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/00172051>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/00172051>



天然資源総合利用の一視点

——エントロピー増大の極小化——

石 光 亨

I.

国連統計局は、最新のエネルギー統計（J シリーズ No. 19）で、1950年以降の長期的統計を集大成している。早速これを利用して、今世紀後半の動きをみてみよう。

わが国のエネルギー消費量は、もし人口の増加に比例してふえただけであったのならば、石炭に換算して、1950年の4,597万tから1974年に6,075万tとなっていただろう。しかしながら、実際には同年のエネルギー消費量は4億2,099万tをこえている。¹24年昔と比べて、わが国全体の年間エネルギー消費量は3億7,502万tふえたことになるが、このうちの96%に相当する3億6,024万t分は、豊かさに由来する1人当たりエネルギー消費量の上昇によってもたらされたものであって、人口増加に起因する増加分（1,478万t）はこれと比較にならないほど小さい。

1 United Nations: World Energy Supplies, 1950-1974, 1976, Table 2.

		一次エネルギー消費量		同じく生産量	
		総 量 10 ⁸ t.c.e.	1人当たり kg	合 計 10 ⁸ t.c.e.	うち石炭 10 ⁸ t.c.e.
日 本	1950	45,971	554	44,115	38,884
	1974	420,999	3,839	36,562	20,358
西 欧	1950	574,315	1,900	503,323	486,497
	1974	1,542,103	4,243	624,047	315,565
アメリカ	1950	1,113,988	7,316	1,165,059	506,328
	1974	2,433,476	11,485	2,105,807	543,777
先進地域全体	1950	1,863,669	3,223	1,795,802	1,095,579
	1974	4,798,261	6,349	3,232,652	1,032,111

しかも、1950年には、日本ばかりでなく今日先進国の範疇に入れられている各国とも、エネルギーの消費と生産とが均衡していたといつてよい。つまり、石炭、石油、天然ガスおよび水力電気からなる販売用エネルギー需要を、各国ともそれぞれが自給する建前を堅持し、やむを得ない場合にのみ僅かな不足分を発展途上国から輸入していたに過ぎない。先進国は、押しなべて産炭国だったし、当時はまだ石炭が低廉な燃料だったのである。

事実わが国は、1950年に、エネルギー需要の96%を自給し、そのうちの88%を国内の石炭で賄っていた。世界的にみても、アメリカでは自国の消費を上まわる燃料の生産を行っていたし、西欧20か国も88%まで燃料を自給していた。前述の国連資料によると、同資料が発展市場経済地域²と呼びいわゆる先進地域全体では、域内でエネルギー需要の96%が自給できていた。ところが1974年になると、域内各国の消費が生産を上まわり、先進地域全体の不足分は、エネルギー消費量の3分の1に膨張している。

人口の増加というよりは、所得の向上が招く1人当たり消費の上昇の方がむしろ大きく影響して、自国の生産と消費との間に乖離が生ずるのは、20世紀後半の先進地域でみられた特徴である。そして、その及ぶ範囲は燃料だけではなく、食料や飼料、木材や綿花から鉄鉱石などの原料全般にまで、広まっていた。

そして、先進地域の中では日本やいくつかの西欧諸国が、特に端的にこの変化の過程を経験している。つまり、所得の向上が大きく、原燃料の自給率低下が激しかったといえる。その結果、1950年当時とは対照的に、エネルギー需要の自給が困難となり、日本（自給率9%）やイタリア（15%）、フランス（21%）は大部分を、西ドイツ（49%）やイギリス（53%）は半分を、西欧全体（40%）で半分以上を輸入に依存するに至っている。アメリカ（86%）ですら、エネルギー自給から離れ、これを完全に過去のものとしてしまっている。³

2 西欧20か国のほか、アメリカ合衆国、カナダ、オーストラリア、ニュージーランド、イスラエル、南アフリカ共和国および日本が、この範疇に入れられている。

3 前掲、第2表より算出。

先進地域全体として、かつて消費量の4%に相当する燃料を域外からえていたに過ぎなかったのが、今や33%を域外に仰いでいる。割合でいえば8倍増余りであるが分母が2.5倍となっているので、量的には20倍以上になる。そのほとんどを石油が占め、発展途上地域の産油国から供給されていることは、もはや常識と化している。

石炭に換算して約15億tに相当する燃料、あるいは世界の燃料生産量全体の18%相当、又は世界原油生産量の37%相当、さらに発展途上地域だけの原油生産量の69%相当の燃料を、1974年に先進地域が輸入している。⁴この燃料が全部原油だとすれば、石炭換算約15億tは原油で約10億tだから、1万重量トン・タンカーで延べ10万隻分に匹敵する。比喩的にいえば、発展途上地域から先進地域へ、かつて年間延べ5千隻弱の燃料が動いていたのが、今や延べ10万隻分になったといってよい。このうち2万隻分以上を、日本が受入れるに至っている。

この背景には、第2次世界大戦後の国際政治上の変化、とりわけかつての植民地または半植民地が解放され、それまで互に自立していた国家関係が、国際的な相互依存性を高め、各国とも内政と外交とがますます重複していく緊密な国家関係を深める傾向が、底流としてある。国際平和機構としての国連の結成、技術の発達とその影響、国際貿易の自由化とその影響、これらの影響を広めあるいは調整しようとする国際協力や、国際的諸体制の整備や改善の努力が払われるようになったのは、戦後の特質としてあげられよう。

他方、米ソ両大国への分極化が成立し、核戦争の危険が存在し、局地戦争や紛争は絶えないが、上述の努力によって、とにかく第3次世界大戦を避けえている間に、技術、経済、社会などあらゆる分野で、国際的な相互依存性がますます深まっている。事実、世界の輸出総額は、過去10年間に名目額で1,772億ドルから8,476億ドルへと5倍近くにふえた。平均して、年間16.8%の成長率に当たる。このうち発展途上国からの輸出総額に限ってみると、この10年間の

4 前掲、第2表より算出。

平均が年率21%に相当する。しかし、これらには価格の上昇による影響が含まれているので、数量面での増加はこれほどでないことはいうまでもない。⁵

ことに近年におけるOPEC輸出総額の急増は、石油価格の高騰によるもので、数量面での変化はわずかであった。OPEC諸国からの原油輸出量は増大を続けていたが、1973年をピークに74年に僅かに（75年はもっと）減少したのにもかかわらず、輸出総額は72年の291.7億ドル、73年に426.5億ドル、そして74年は1,351億ドルへと飛躍的にふえたと推定される。

これから産油国政府歳入を推定すると、72年が約150億ドル、73年が約214億ドル、74年が約894億ドルとなり、翌年の輸出量から政府歳入を推定すると、75年が約1,010億になる。OPEC諸国の政府歳入が、1975年に1,000億ドルの大台に達した。これは1972年歳入の10倍、73年の約5倍である。

他方、OPEC諸国に滞留する投資可能な外貨（オイルダラー）は、1973年の49億ドルから74年に593.5億ドルに急増したが、75年は416.5億ドルとなり、早くも減少する傾向に転じたと推定されている。⁶これに対し、OPEC諸国の歳出は、この間に約164億ドルから約300億ドルを経て、約570億ドルへ、3年で約3.5倍増したものと推定される。

OPEC諸国からの原油輸出量は、1973年に対前年比14.3%増で1億3,500万kl伸びたが、74年には対前年比マイナス1.2%で1,340万kl減っている。石油を輸入する先進国が国際収支の悪化を避けるため、総需要抑制策をとった結果が、ここに歴然と現われている。それにもかかわらず、産油国政府の石油歳入

5 国連統計月報1967年6月号、1975年6月号によると

(億ドル)	1964年	1972年	1974年
先進国	1,172.6	2,985.7	5,446.0
発展途上国	346.7	748.9	2,319.5
うちOPEC	—	291.7	1,351.0
社会主義国	202.7	431.9	710.9
世界輸出総数	1,772.0	4,166.5	8,476.4

UN, J-No. 19 (前掲), 第7表からOPEC13か国の原油輸出総量を算出, 換算すると。

(万kl)	1972年	1973年	1974年
原油輸出総量	95,169	108,736	107,392

6 PIW (Petroleum Intelligence Weekly), Jan 26, 1976, p. 10.

が激増しているのは、大幅な値上げの結果にほかならない。

また産油国の余剰ドルが、74年をピークに縮少傾向に転じたのは、世界的インフレにより石油の実質価格が低下し、産油国の輸入する製品価格が高騰して、その歳出が急膨張しているからにほかならない。逆に、先進国の貿易収支は74年の大幅赤字から、75年には黒字に転じている。1974年前半に、一時、産油国のオイルダラーの累積による世界経済・貿易の混乱が予想されたことがあったが、幸に杞憂に終わったとみてよいであろう。

しかしながら、非産油発展途上国の貿易収支は更に悪化が続き、回復の見通しは決して明るくない。先進国におけるエネルギーの消費と生産との間の乖離の拡大が、経済的次元をこえ、政治的次元の問題と複合するようになっている。

II

1970年代前半における、われわれの使う主要エネルギー源は化石燃料である。このエネルギーは、石炭の炭素原子と、石油や天然ガスの水素、炭素、酸素原子の中にもっと複雑な形状で、たくわえられている。炭素原子や水素原子の中に秘められたエネルギーは、燃焼（酸化）する時、新しい異なる形態の熱エネルギーに転換されて、解放される。石油などに若干の非燃料用途がみられるが、世界で消費される一次エネルギーは、水力電気（含原子力）を除いた97.6%（74年）が化石燃料で、燃料として熱エネルギーに転換されている。

しかし、化石燃料は、太古の太陽エネルギーによって育った生物が、地下に埋没したために腐敗を免れて変化したものであって、地球に存在するエネルギーとしては比較的少ない部類に属する。

太陽と植物と石炭との間で、エネルギーに何が起ったのか、追跡してみよう。まず、50億年昔に太陽が生まれ、45億年昔に地球が誕生していたという。そして、3億年昔、古生代後期に属する石炭紀の中葉には、植物が熱帯低湿地あたりから発生し、しだやこけからもっと大きな木が繁茂し、森林が広く地球各地を覆う状態になっていったという。

これは、輻射する陽光のごくごく一部分が植物の光合成作用というエネルギー転換過程を経て、エネルギーが変容をとげたのである。つまり輻射陽光の運動エネルギーが、植物の中の化学的位置エネルギー（有機物中のエネルギー）に転換された。次にこの植物が地下に埋もれ、加圧と加熱条件の下で化学変化が進行して、この化学的位置エネルギーに凝縮が起った。こうして、植物の1kg 当たり 2,800kcal 前後の熱量が、良質な石炭では 7,000kcal 前後となる。原油や液体天然ガスの場合は、動物が関係するが、もっと熱量が高くそれぞれがおおよそ 10,000kcal と 11,500kcal となる。

高い所にある物体のもつ位置エネルギーは理解しやすいが、これは地球に引力（重力）の位置エネルギーが備わっているからである。地球にある3大位置エネルギーの第1が、これである。第2が、原子核に内蔵されている核の位置エネルギーである。第3は、電気的位置エネルギーであって、われわれにとって最も重要なのが、さきに化学的位置エネルギーとよんだ、食料、飼料、燃料に含まれている位置エネルギーである。

燃料・動力源として、今日はほとんどもっぱら第3の化学的位置エネルギーに依存しており、ついで僅かながら水力発電において第1の重力の位置エネルギーを利用している。これらよりはるかに大量のエネルギーが、元素周期表最上部の軽い元素と、最下部の重い元素との原子核に、第2の核の位置エネルギーが内蔵されている。われわれは、いまやこの核エネルギーを取り出す原理を知り、重い原子核を分ける（分裂反応）原理による原子力発電の実用化時代を迎えた。軽い原子核同志を合せるときに生ずる（融合反応）核エネルギーを発電に利用する方は、目下研究段階にある。

1974年に、世界で消費した化石燃料と水力（含原子力）からなるエネルギーは、石炭に換算して約80億⁷tになる。この熱量は 5.5×10^{16} kcal に匹敵し、あるいは 2.3×10^{20} ジュールに相当する。

7 前掲の国連資料によると、1950年と比べ、74年のエネルギー消費量は3.19倍、1人当たり消費量は1.65倍になっている。

これに対して、莫大な太陽熱の 100 億分の 4 ほどが地球の大気圏外に到達するに過ぎないが、地球が受ける太陽エネルギーは 1 日で 1.49×10^{22} ジュールに相当する⁸。上述の世界の年間エネルギー消費量は、1 日分の太陽熱と比べてけた違いに少ない。1950 年で 7 分間、74 年で 22 分間も太陽が照れば、世界中のエネルギーが賄えてしまえる勘定だから、太陽熱がいかに巨大であるかが想像できる。

他方、地球自身には、前述の重力の位置エネルギーのほか、地球のマントル内部の溶解した地核には、相当量の熱エネルギーがたくわえられている。それに、太陽の惑星としての地球、地球の衛星としての月と、これら 3 者の間には運動エネルギーと位置エネルギーがたくわえられている。

この地核の熱エネルギーが、マントルや地殻を経て、火山の溶岩や温泉の湯として地表にもれる。地殻の伝導熱で、熱せられた地下水の蒸気をボーリングで掘り当てて、発電に利用しようとするのが地熱発電である。まだ僅かしか利用されていないが、火山や温泉からもれる地球内部の対流エネルギーと比べ、その 100 倍の熱が伝導エネルギーとして地殻を通して放熱されている。大気圏外に届く太陽熱は、1 日で 1.49×10^{22} ジュールだから、これは毎秒 1.73×10^{17} ジュールずつのエネルギーが流れていることになる。毎秒 1 ジュールのエネルギーのする仕事の能力を、電力に特有の表現でワットと呼ぶ。電力換算で $1.73 \times 10^{17} \text{W}$ 、または $1.73 \times 10^{14} \text{kW}$ と等しい。これと比べて、地熱エネルギーは合計 $3.23 \times 10^{10} \text{kW}$ と推定されるので、地表に出てくる地熱も、太陽熱と比べ

8 理科年表 (1975 年, 天文 22 頁) によると、太陽定数は $1.95 \text{cal/cm}^2/\text{分}$ である。地球の断面積は、平均半径 = 6,371 km (同地理 1 頁) の球として $\pi r^2 = 127.5 \times 10^6 \text{km}^2$ だから太陽定数から $35.71 \times 10^{17} \text{kcal}/\text{断面}/\text{日}$ 。

1 kcal = 4186 ジュールで換算して、 1.49×10^{22} ジュール / 断面 / 日。または、 1.73×10^{17} ジュール / 断面 / 秒。

あるいは、 $W = \text{ジュール} / \text{秒}$ と定義されるから $1.73 \times 10^{17} \text{W} / \text{断面}$ 、又は $1.73 \times 10^{14} \text{kW} / \text{断面}$ 。

9 本格的なのは、アメリカ・カリフォルニア州ガイサー地区 (1974 年能力 44.1 万 kW)、イタリアのラルデレロ地区 (同 40.6 万 kW)、ニュージーランドのワイラケイ地区 (19.2 万 kW) にある。あとはメキシコ (7.8 万)、日本 (4.8 万)、アイスランド (0.2 万 kW) で、世界合計で 120 万 kW 弱である。発電能力は国連資料 (前掲)、第 18 表による。

10
てケタ違いに少ない。

地球の公転と自転は、太陽と地球と月との間にたくわえられた引力（重力）の位置エネルギーと、運動エネルギーとの複雑な組合せの結果である。地球を自転させている運動エネルギーの一部と、おもに月（若干は太陽）の引力（重力）の位置エネルギーの一部とが潮流作用に使われ、潮の干満をもたらす。この種の自然の力を発電に利用する試みとして本格的な事例は、フランスのサンマロー湾に注ぐランス川河口の潮力発電所（24万 kW）にみられる。世界の潮力エネルギーは、 $3 \times 10^9 \text{ kW}$ と推定され、地熱エネルギーより1ケタ少ない。

途中で単位を変えたので、混乱を防ぐために整理しておこう。機械的な仕事をする能力である kW で統一すると、次のようになる。まず、世界のエネルギー消費量（1974年）は $7.29 \times 10^9 \text{ kW}$ なのに対し、地球の受ける太陽熱が $1.73 \times 10^{14} \text{ kW}$ 。そして地熱が $3.23 \times 10^{10} \text{ kW}$ 、潮力が $3 \times 10^9 \text{ kW}$ 。だから、人類の使うエネルギーは、全世界の潮流エネルギーを上まわり、地熱エネルギーの規模に近づきつつあるといえる。

太陽熱、地熱、潮流は、いずれも運動エネルギーであり、フローの性質をもつ。とりわけ太陽熱は、あと50億年と推定される長い寿命をもつので、真に永続性のあるエネルギー源であると考えることができる。

大気圏外に達した太陽熱は、すべてが地表に届く訳ではない。雲などによって直接に宇宙に反射されたり、一旦大気圏に吸収されてから再輻射されたりするからである。さらに蒸発や氷粒をとかして雨を降らす熱としても使われる。さらに、貿易風を吹かせたり、大気圏内の気象現象にみられるもろもろの風を動かす運動エネルギーとして、地球引力の位置エネルギーや地球自転の運動エネルギーと組んで、大気圏内で使われる。

大気圏内で吸収される太陽熱が、オゾンを発生させ、これが紫外線を遮ぎる働きをする。こうして、量的には約半分が、質的には大気圏をほとんど素通りする可視光線として、太陽の輻射熱が地表に届く。波長の短い光が、緑色植物

の葉の組織を通して、葉緑素のもつ光合成作用で、炭水化物になる。光線の運動エネルギーが、植物の化学的位置エネルギーに転換されることは、前にも述べた。

太陽熱は、一旦地表の土壌や岩石に吸収された後、波長の長い赤外線を中心とした熱線で再輻射される。しかし、今度は大気がこれを素通しをさせない。大気圏に浮遊する二酸化炭素や水蒸気の分子がこれを吸収して、遮ぎるからである。もしこの働きがなければ、昼温められた地表からの再輻射熱が宇宙に素通りし、夜は激烈な酷寒にさらされてしまうだろう。大気圏に一旦吸収される地表からの再輻射熱は、半分が宇宙に再輻射され、半分は地表に戻る。こうして、温和な気温が保たれる。

海洋や陸水に注ぐ太陽熱は、蒸発熱として水を水蒸気に変える。これが雲となり、風に運ばれ、山に降る雨となる。雨水は集まって川となり、海や陸水に戻る。太陽熱の運動エネルギーと、地球重力の位置エネルギーおよび地球自転の運動エネルギーとが複合されて、上述の水文学的循環をもたらす。また、もろもろの海象現象を起こす。水文学的循環が、海洋を污水处理槽兼海水淡水化装置として、陸地に淡水を供給し続ける。特に、高い所に降った雨水は、水力発電に利用される。

地表の植物によって、陽光の運動エネルギーが炭素化合物の炭素原子や水素・酸素原子の中の化学的位置エネルギーに転換された形状で捕えられる。これが、生物圏に成立している生態系にエネルギーを取入れる働きをする。陸でも海でも、植物だけが動物に消化し吸収できる炭素化合物を提供し、かつ動物の呼吸や運動に必要な酸素をも同時に提供する。

今度は微生物が、生命を終えた生物体有機物を腐敗して二酸化炭素や無機物に分解させ、これらを再び植物の光合成に繋げる役割を果たす。こうして生態系の物質循環が行われる。つまり、植物が太陽に寄生し、動物は植物に寄生するから、生態系こそ人類の生命維持装置であるといえる。人類は食物を栽培作物に依存するので、生態系の物質循環のうち、耕地土壌への有機物還元が致命

的であって、これを絶っては物質循環が完結しえない。

III

宇宙（つまりある閉じた系）のエネルギーは、創造されることも破壊されることもなく、常に一定である。

「エネルギー恒存の原理」として知られる、熱力学第1法則である。科学者が散々失敗と実験を重ねながら、自然から学び取った基本的原理の1つである。エネルギーは、決して破壊されることがないのだから、第1法則だけからいえば、エネルギーは決して枯渇しないことになる。

しかし、第1法則のみがすべてではない。熱力学には、もう2つの法則がある。その1つが、熱力学第1法則と対をなす法則であるから、とりわけ重要である。これが、「エントロピー増大の原理」として知られる熱力学第2法則である。

これをしっかり理解するために、具体的に考えていこう。例えば、火力発電所と末端の家庭との間で、何が起っているかを追跡しよう。発電所で燃料を焚いて電気を起こすのは誰でも知っているが、そのエネルギーの転換で何が起っているのか、ということである。

エネルギーは、位置エネルギーとしてたくわえられる。化石燃料は、化学的にたくわえられている位置エネルギーである。食料も飼料もそうである。高い所にある水は、重力（引力）の位置エネルギーをたくわえている。核燃料は、ウランにせよ水素にせよ、燃料となる特定の原子核の核構造の中にたくわえられている位置エネルギーである。¹¹

たくわえられている位置エネルギーは、これを利用するとき必ず運動エネルギーに転換しなくてはならない。一旦は、熱エネルギー、電気エネルギーあるいは機械エネルギーのいずれであるにせよ、運動エネルギーの状態にしないと利用できない。最終用途は、運動エネルギーの状態の場合と、位置エネルギー

11 太陽熱、地熱および潮力は、運動エネルギー（動いているエネルギー）である。

の状態の場合とがある。

さて、火力発電所に戻ろう。1t の重油には、約 10,000kcal の熱量がある。これが巨大なボイラーに吹き込まれて焚かれる。熱量の大部分 (85~90%) が、ボイラーの水を蒸気に変え、これがタービンの軸を回転させる。そしてこの軸が、発電機を直接回転させる。残りの10~15%の熱は、直接、または煙が一旦脱硫装置を経由させられて、煙突からにげる。タービンを回転させた蒸気は、水にしてまたボイラーに戻し、反復利用される。しかし、排気を水に戻す復水器で使われる冷却水に、相当の熱量を捨てなくてはならない。

発電所で、燃料の化学的位置エネルギーがまず燃焼によって、代表的な運動エネルギーである熱エネルギーの状態になる。ボイラーで、この熱エネルギーが分子運動の激しい水蒸気に移り、これがタービンで、第2の運動エネルギーである機械的エネルギーに一旦転換される。これは中間的段階であって、さらに発電機で、第3の運動エネルギーである電気エネルギーに、また転換される。

電気自身も、中間的な存在である。エネルギーの最終用途として需要の多い熱源と機械的動力源をはじめ、電磁氣的用途 (光・音・電波等) と化学的用途との4つの大きく分類できるが、電気はどれにでも使える。もちろん前章でみたように、気圏、水圏、地圏および生物圏において、この上なく見事に地球物理的・地球化学的・生態学的循環機能を発揮する地球エンジンを動かす太陽エネルギーほど、多芸多能なエネルギーはない。しかし、たくわえられた状態の位置エネルギー (化石燃料・核燃料など) を利用する時、必ず運動エネルギーに転換されるが、これらの中では、電気エネルギーが最も多芸である。

この多芸な電力をつくるために、わが国では、化石燃料消費量の約30%が、¹² 火力発電所 (除原子力) で発電用燃料に当てられている。発電所で焚く燃料の

12 国連資料 (前掲) 第20表によると、1974年の総発電量は4600億 kWh で、このうち火力は3680億 kWh である。国連の換算方式に従うと、1kWh=860kcal であるから、これは325兆 kcal に当たる。資源エネルギー庁総合エネルギー統計から、この年の全国の火力発電所の平均熱効率を概算値で38%と押えれば、所要燃料は883兆 kcal である。国連方式の換算用標準炭は 1kg=7,000kcal としていたので、これは石炭換算1.19億tに等しく、この年の化石燃料の29.0%に相当する。

うち、煙突から10～15%が逃げるとすれば、差引き47～52%のほとんど全部が冷却水へ捨てられる。電気エネルギーに転換されるのは、正味で発電用燃料の38%だからである。これが、国際的にトップレベルにある今日の日本の平均値である。

発電機の熱効率¹³は、きわめて高く100%にごく近い。ボイラーのそれは、上述のように85～90%である。蒸気タービンそれ自身の熱効率¹³はともかく、蒸気の熱エネルギーを機械エネルギーに転換するので、蒸気から強制的に熱を除き液体にして瞬時にボイラーへ戻さなくてはならない。かくて、タービン及び付帯施設の総合効率が50%前後となり、主として煙突から失う損失と合わせて、火力発電所では、過半のエネルギーを水圏と気圏に散逸させる犠牲を払って、化石燃料を電気と交換している。その上、高圧線や低圧線を通じて送配電する場合も、送配電損失（変圧に伴う放熱など）の犠牲を若干伴うのである。

そして、失うエネルギーは、もはや利用価値の少ない状態になってしまう。それでも、熱の捨て方をもう少し工夫して、千人風呂や温水プール、魚の養殖や増殖、あるいは地域暖房や温室栽培など試みる余地はある。

それはそうだとにしても、どうにもならないのが、蒸気タービン及び付帯施設にみられる大きな熱損失であり、これと比べたら小さいとはいえ、送配電に伴う損失である。どんなに科学技術が進歩しても、100%の効率で熱エネルギーを仕事に転換することは、不可能である。熱力学第2法則が、そのことを次のように明示している。

ある閉じた系の中で、エネルギーを転換したり、あるいは移動したりするときは、その系のエントロピーが増大する。

13 タービンは、熱機関である。高圧高温蒸気の分子が回転軸の翼に吹きつけられ、その衝撃で軸を回転させる。この衝撃を繰返えす間に蒸気はエネルギーを失い、回転の機械エネルギーは大きくなる従って、蒸気は熱エネルギーを失う分だけ、タービンに熱機関としての仕事を残す。タービンの効率は $1 - T_2/T_1 \times 100\%$ で測定される。 T_1 は噴入蒸気温度、 T_2 は排出蒸気温度で、ともに絶対温度で示す。近年の実績から噴入蒸気を 547°C ($T_1=820^\circ\text{K}$)、排出蒸気を 55°C ($T_2=328^\circ\text{K}$) とすると、この熱機関の理論的熱効率は60%と計算される。実際は、総合的にみて前述のように47～52%になる。なお、発電所の冷却用水に取り入れた海水温度を 8°C ほど高めて廃熱される熱汚染の影響が批判されている。

この法則があるために、火力発電所で 1t の重油を焚くごとに、もし 100% の効率であれば 11.6kWh の割合で電気が起るはずなのに、実際には日本全国を平均して 4.4kWh の割合で発電し、7.2kWh 相当分が利用価値の低い熱となって失われている。

100g の氷塊を 100g の熱湯に入れると、200g の温湯となる。別々にある場合と、混合した場合とでは、熱量計算をするまでもなく、何れの場合でもカロリーの合計は等しい。しかし、利用価値を考えれば、同じではない。氷でオン・ザ・ロックをやり、熱湯でコーヒーが飲めるが、温湯では余り利用価値がない。この利用価値の減少を表現し、測定するために作られたのが、エントロピーの概念であるといってよい。そして、別々の状態のときと、混合状態のときのエントロピーを比べると、前者よりも後者の方がエントロピーが大きい。つまり、利用価値の高い状態が、利用価値を失う状態になるとき、エントロピーは増大するのである。

温湯に、熱を加える仕事をすれば熱湯となり、熱を取る仕事をすれば、氷となる。こうして利用価値は増大する。しかし、これらの仕事をさすために、何がしかの燃料を使う。今度は、燃料にあった仕事のできる秩序の高い状態が失われ、あとには仕事のできない状態に劣化した熱が残って、やはりエントロピーを増大さす。

温湯を放置すれば、湯がさめて水になる。温湯の熱が、もっと利用価値の低い熱となって逃げ、エントロピーは僅かながら増大する。これが、熱力学第 2 法則であって、放置しておくでエントロピーが増大はしても、減少することはない。つまり、エネルギーは役に立たない方向に変化していく、というのである。

ここで第 2 法則を紹介したのは、このエントロピーの概念が、もっと広く秩序と無秩序とに関連して解釈できるからである。ある系の状態と、ある系のものつ利用価値の大小を考えると、秩序が整然とし凝縮した状態からそうでない状態となるにつれて、利用価値がますます小さくなる、と解釈できる。

石炭の利用価値が高いのは、石炭の炭素原子が結晶構造をなし、高度に秩序立った配置で凝縮しているからである。石炭の燃焼で生ずる二酸化炭素は、熱い気体であって、その分子運動は奔放で無秩序に動く。高い秩序が失われて無秩序になると、エントロピーも増大する。

炭焼きによって、人為的に炭素を凝縮させ、木炭を造れる。これに対して石炭は、自然が、地下の炭がまに当たる炭層で炭素を凝縮させたものである。従って、炭層を発見することは、広く散在する薪炭材を伐採し、集材し、炭焼きをする手間を省くことを意味する。だから石炭の利用は、石炭にたくわえられたエネルギーと秩序とを消費するのであって、その結果、宇宙のエントロピーを増大させる。

石炭に限らず、他の化石燃料や核燃料、さらに非燃料鉱物全般についても、自然の地球化学的物質循環機能が、これらの鉱物にエネルギーと秩序とを付与したと考えられる。又、地下で生成されたエネルギーと秩序の高い物質を、人間が勝手に鉱物と呼び、天然資源という概念を当てはめている、といってもいいだろう。

化石燃料を焚き、核燃料を分裂さすにつれ、また鉄や銅などの鉱物鉱床を採掘するにつれて、宇宙のエントロピーが着実に累積する。エントロピーの累積は、宇宙に熱と無秩序とを累積し続け、やがて宇宙最後の日を迎えることになる。そんなに遠い将来のことをわれわれが心配をする必要は、さらさらないといえる。それにもかかわらず、エントロピー増大の法則は、エネルギー工学の専門的・技術的問題を超えて、エネルギー問題をもっと広く、天然資源の総合利用の一環として考える上で、現実的な意義をもつ。

無生物世界では、エントロピーは速かに増大し続ける。ところが、生物の出現と進化によって、その増大を遅らせている。それはあたかも、ダムが流れる水を貯え、海に注ぐのを遅らせ、しかもダムの逆調整池の操作によって、自然の川の流れを乱さないように制御しながら、ダムから落下する水の位置エネルギーを電気エネルギーに変え、これを仕事に利用するのと似ている。とりわけ

太陽熱をたくわえる植物と、はるかに劣化し最終的に散逸してしまう前のかすかな熱を引きとめる微生物とは、エネルギーを生命の維持に利用するように変え、エントロピーの増大を遅らせる効果を果たすのである。

もっと単純に、植物に覆われた山と、丸裸な山を比較してみればよい。森林が山膚を守るだけでなく、貯水池の役を果たして、雨水を徐々に川に流すので、治山治水の効果をあげる。裸地に降る雨は、土壌を洗い流し、水は母岩にしみ込んでこれを削り、小石や砂にして運び去り、侵食が激しく進む。洪水は、下流部を荒廃さす。つまり、無秩序さが累増するのだから、植生の有無だけで、エントロピー増大の進行に大差を生ずる。

このように、生物圏の出現によってそれまでのエントロピーの増大が、一旦はゼロ・エントロピー成長とでも呼ぶべき状況に様変りをし、生態系の秩序が精緻の度を加えつつ、長い歳月に堪えてきた。それなのに、ふたたび、人間がもたらすエントロピーの増大が、環境の大気や水質、そして土壌までを汚染し、生態系を脅威にさらすにいたっている。

VI

わが国の人口1人当たり食料供給量の概数は、近年 $2,500\text{kcal/日}$ を示す¹⁴。いま仮にこれを人類の最適熱量標準所要量と考えよう。平均的な成人にとって、肉体的機能を維持するための最低所要量は、 $1,500\text{kcal/日}$ であり、労働が激しくなるにつれて所要量が大きくなり、最大ではこの4倍前後にも及ぶことがあろう。しかし幼児や老人をも含めた全人類の平均所要量として、わが国の全国平均値概数を援用し、これが妥当するものと仮定するのである。そうだとすると、この平均的なミスター人類が、諸活動を正常に維持するために60ワットの電球2個分、あるいはもしあるとすれば120ワットの電球を1個灯し続ける

14 日本国勢図会1976年版、9-7表によると、増加傾向をたどってきた食料供給量が、1974年には1人1日当たりで、前年の2,522カロリーを20カロリー下回る2,502カロリーとなった。栄養熱量の1カロリーは、物理学の1kcalと等しい。 $2,500\text{kcal/日}$ は約 104kcal/時 で、かつ 860kcal/kW時 であるから、この熱量所要量は、約121Wに相当する。

のに匹敵するエネルギーを、生きている限り消費し続けると考えることができる。

食料は、植物が太陽熱を光合成作用によって、化学的位置エネルギーに直接転換して細胞内にたくわえたものである。例えば、日本の水稻栽培を調べてみよう。平均収量の概数を 5t/ha と押えると、収量の熱量換算概数は $17.0 \times 10^6 \text{kcal/ha}$ となる。平均栽培所要日数を 120 日として、1 日当たり熱量収量は $14.2 \times 10^4 \text{kcal/ha/日}$ に相当する。

これに対して、わが国の全国平均年間日照時間の概数¹⁵を 2,000 時間と押えると、1 日当たりにして概数で 330 分に匹敵し、地上に注ぐ太陽輻射熱が 1 ラングレーとされることから、1 日当たり太陽熱は $330 \text{cal/cm}^2/\text{日}$ 、つまり $33 \times 10^6 \text{kcal/ha/日}$ と推定される。上述の 1 日当たり熱量収量との関係から、わが国における水稻栽培は、太陽熱の 0.4 % に相当する効率で、太陽熱を、澱粉という形の化学エネルギーに転換することがわかる。

逆に、太陽熱の方から攻めてみよう。日照時間中に地上に到達できるのは、日本では年に 2,000 時間であるが、その輻射熱は 1 ラングレーであることから、太陽熱は 698W/m^2 に等しい¹⁶。そこで日本全国の平均日照時間内に、 1m^2 の土地に注ぐ太陽エネルギーは、 159W/m^2 と出る。従って、もしこの太陽熱を 100 % の効率で食料に変換できるとすれば、 1m^2 の耕地で 1 人を扶養して余りある勘定になる。しかし実際には、米の太陽熱変換効率は 0.4 % であるから、1 人当たり 330m^2 の水田が必要である。2 期作で同じ収量をあげれば、太陽熱の利用率は 0.8 % に高まり、1 人当たり耕地所要面積が半減するのはいうまでもない。

15 理科年表, 1975, 気象 24~25 頁によると、北は稚内から南は那覇にいたる 81 ケ所の気象観測地点における過去 30 ケ年 (1941~70 年) の平均日照時間が掲載されている。その中位日照時間は、網走の 2013 時間がこれに該当する。

16 $1 \text{ langley} = 1 \text{ cal/cm}^2/\text{分}$ (定義) $= 10 \text{ kcal/m}^2/\text{分} = 41,860 \text{ ジュール/m}^2/\text{分}$
 $= 698 \text{ ジュール/m}^2/\text{秒} = 698 \text{ W/m}^2$

但し、一定の土地からみると、夜も曇りの日もあるので、日照時間に限ってみると
 $698 \text{ W/m}^2 \times 2000 \text{ 時間} \div 8760 \text{ 時間} = 159 \text{ W/m}^2$

なお、1 人当たり所要面積 $= 159 \text{ W/m}^2 \div 120 \text{ W} \div 0.4\% = 330 \text{ m}^2$

南極大陸を除いて、世界陸地面積136億haの10%が耕作され、40億の人口が養われているのが現状である。1人当たり耕地面積の平均は、 $3,400\text{m}^2$ となるから、日本の米作なみの高い熱量収量を基準にした最適熱量標準を充足する所要面積の10倍に相当する。それでも食料不足が憂慮されるのは、1つには世界の稲作や他の穀物の熱量収量が低いことと、もう1つには人間は植物だけでなく動物をも食べるからである。

太陽熱が植物細胞内の化学的エネルギーに転換される過程や効率については論じてきたが、食料や飼料が動物細胞内の化学的エネルギーに転換されてたくわえられる効率はどうかのだろうか。

水稻の場合、受けた太陽熱の0.4%が米にたくわえられることをみたが、稲全体としたら、1%に近い効率となる。草もそうだが、作物も位取りでいうと0.1%級の上位に属する効率で、家畜に消化できる化学的エネルギーに転換する。そして動物は、人間もそうであるが、食べた化学的エネルギーの10%見当が、生体の細胞内の化学的エネルギーに転換されて新陳代謝に使われる。つまり、90%見当が、排泄物や熱になって体外に放出される。

このように、家畜に飼料を与えて動物性食品と交換するときの効率が低いので、植物は0.1%級の効率で太陽熱をとらえるが、動物は太陽熱の0.01%級を抽出したエネルギーをたくわえる。しかも、濃厚飼料として穀物を与えるので、耕地面積の相当部分がそのために使われるからにはかならない。

動物性食品としての魚肉を考えてみよう。小型魚（イワシ・サンマ・アジ・ニシンの類）は、植物プランクトンに依存するので、陸の家畜と同様に、太陽熱の0.01%級の効率で抽出された化学エネルギーを肉にたくわえる。しかし、大型魚（マグロ・ブリ・カツオの類）となると、実際は動物プランクトンなど途中で段階を経るのもっと効率が悪いが、最も単純化した食物連鎖の場合でも、太陽熱の0.001%級の転換効率の化学エネルギーを生体細胞にたくわえる。

逆にいえば、日本の米の1カロリーは、太陽熱250カロリーに相当し、タイの米（平均収量玄米換算 1.45t/ha として）の1カロリーは860カロリーの太陽

熱に匹敵する。これに対して牛肉やイワシの肉の1カロリーは、太陽熱の数千カロリー、マグロの肉の1カロリーは太陽熱の数万カロリーに相当する。

このように、何を食べるかによって、太陽熱の利用率は大差が生ずる。あるいは逆に、一定の土地、一定の海域で扶養しうる人口に大差が生ずる。人口が多くなるに従って、肉食が困難になってくる。

しかるに経済発展による所得の上昇は、これと逆行する傾向を助長する。たとえば、わが国の食生活を維持するためのオリジナル・カロリーは、1960年の100兆から70年の150兆キロカロリーにふえた。そして、農業による熱量生産は、この間に74兆から56兆キロカロリーに減少している。¹⁷ それにもかかわらず、近年の農業近代化の傾向は、農林狩猟業での燃料・動力消費量を、同じ期間に5兆から22兆キロカロリーに激増させている。¹⁸ 機械や化学肥料、農薬などに含まれる間接的投入エネルギーを考えると、水稻栽培だけで、同じ期間に60兆から105兆キロカロリーに増大している。¹⁹ そして熱量生産は兩年とも49兆キロカロリーであるから、わが国の稲作はもはやエネルギー経済的に、赤字から超赤字に転じているといわなくてはならない。

自然環境におけるエントロピー増大を阻止する機能は、植物に依存するしかない。それなのに、年々植物の栽培にたずさわる農業までが、エネルギーの追加的投入による熱量増産は50年代からすでに収穫逡減の法則が働らき、60年代に入るや全く効果がなくなってしまったことが明らかなのに、なぜエネルギー投入の増加がやまないのか、全く理解に苦しむ。²⁰

17 農林統計協会編「食糧自給」所載の並木正吉論文、1973年。

18 日本エネルギー経済研究所：エネルギー・マトリックス，昭和48年度，産業別エネルギー消費実績表，1974年。

19 宇田川武俊：水稻栽培における投入エネルギーの推定，環境情報科学，5—2，1976，表12の単位面積当たり投入エネルギーより算出。

20 宇田川論文（前掲）から，水稻栽培における投入エネルギーと産出カロリーを引用すると，次の通り。（単位：10³kcal/ha）

	投入エネルギー	産 出 量	対 前 期 増 加 量 投入エネルギー	産 出 量
1950	9150	11600		
55	13350	14800	4200	3200

今世紀の後半に先進工業諸国で、生産と消費の乖離がますます目立ち、環境汚染を広めてまでして追求してきたのは、何であったのだろうか。所得の向上、あるいは物的消費水準の改善であったとすれば、果たしてこれに追求するだけの価値があったのだろうか。近代化と信じて進めた農業のやり方が、エネルギー経済的に日本の農業を破産させてしまっている。

これからは、環境との和解、南北問題の緩和、天然資源利用の高度化、産業構造の方向などを総合的に考える上で、他の「ゼロ成長論」とともに、「ゼロ・エントロピー成長」をモットーとする発想が、ますます重要になると思われる。

60	19430	15900	6080	1100
65	27690	15900	8260	0
70	37080	17300	9390	~10390
74	47070	17700	9990	400