

エネルギー再考

生活工学のための熱力学序論 V

Energy Reexamined Introduction to Thermodynamics for Human Environmental Engineering V

妹尾学

Manabu SENO

(東京大学名誉教授)

1. はじめに

前報 IV¹⁾が印刷ミスを治して再び掲載されることになったので、そこでの議論を補い、もう少し広い立場からエネルギーの問題を考えておくことにしたい。エネルギーに相当する概念は力あるいは活力として認識されてきた。興味深いことにニュートンはエネルギーを必要としなかった。エネルギーが保存されるという特別な性質があることを知らなかったからである。同時代のデカルトは物体の衝突で量 mv (m は質量, v は速度) が保存されることを見出した。ライブニッツは、力の測度として mv をとるデカルトに反対して、 mv^2 で表される活力をとるべきだと主張し、両陣営で激しい論争が行われた。この論争はやがて一応の終結をみた。ダランベールがその力学論 (1743) で、どちらの主張もそれぞれの意味をもち、運動の効果を時間で考えると速度に比例し、動いた距離で考えると速度の2乗に比例することを示した。すなわち、 mv は Ft (力積, F は力, t は時間) に、 mv^2 は Fs (仕事, s は距離) に相当する。 mv^2 を $1/2mv^2$ とすることを提案したのはコリオリである。

運動体の活力 $1/2mv^2$ に対してエネルギーという用語を用いたのはヤングである (1807)。その語源であるギリシャ語のエネルギーはアリストテレスの用語で、働きを実現している現実態を意味する。力学的エネルギーの保存則を経て、熱を含めた形でエネルギー保存則 (熱力学第一法則) が確立された経緯については II で既に述べた²⁾。これによりエネルギーは高度の普遍性をもったのである。しかし第一法則は余りにも大きな原理であり、容易に実証できない。そのためしばしばこの法則の正当性を疑われたが、その都度再生し、我々の科学の進むべき方向を指示するようである。エネルギー保存則は、我々の—というよりもむしろヨーロッパの—というべきか

もしれないが—基本的な世界観に根ざしているようにも思える。

2. 効率の問題

前報 IV で生活におけるエネルギーの流れとして、燃料からいったん熱をつくりこれを電力に変換すると、カルノー効率の制約をうけ変換効率は一般にかなり低くなり、このようにして得た電力を暖房など低温加熱に使うのは非常に無駄が多い。これに対し燃料電池では高い効率で燃料を直接電力に変換できるなどと述べた。そこで効率という用語を十分に説明せずには用いたが、エネルギー問題を考えるときその意味を注意深くみる必要がある。

簡単な例として、燃料を燃やし 0°C の空気を 30°C まで暖める場合を考えよう。実際の数値はそのときの条件によるが、代表的な数値としてエネルギー効率 (第一法則) は

$$\eta_{1\text{stlaw}} = \frac{\text{空気に与えられた熱}}{\text{燃料の発生熱}} = \text{約 } 70\%$$

これに対してカルノー効率 (第二法則) は

$$\eta_{\text{Carnot}} = \frac{\text{なされた仕事}}{\text{燃料の発生熱}} = 0$$

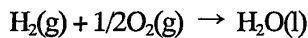
あるいは暖房によって住む人が活力を得てなにか仕事をすることもかもしれないが、それは考慮に入っていない。第二法則に基づくもう一つの効率が定義され、

$$\eta_{2\text{ndlaw}} = \frac{\text{系に残るエネルギー}}{\text{系への入力 (エネルギー)}} = \text{約 } 5\%$$

これは温められた空気は仕事をしうる能力 (エネルギー) を保持することを表すもので、系の有効度 (effectiveness) の尺度となる。 η_{Carnot} が availability (有効仕事, エクセルギー) の解析で求められるのに対し、 $\eta_{2\text{ndlaw}}$ は lost work (失われた仕事) の解析から得られ、前者が機械工学系でよく用いられるのに対し、後者は化学工学系で利用される³⁾。このように

効率という用語はなかば慣例化したいろいろな意味に使われるので、注意が必要である。

次に、燃料電池の効率を考えてみよう。代表的な水素-酸素燃料電池で、化学反応（燃焼）

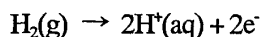


に対して、熱力学状態量の変化（1 atm, 25 °C）は

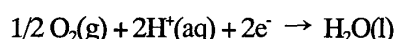
$$\begin{aligned}\Delta H^\circ &= \Delta G^\circ + T\Delta S^\circ \\ &= -237.1 \text{ kJ} - 48.7 \text{ kJ} \\ &= -285.8 \text{ kJ}\end{aligned}$$

となる。この式は 1 atm, 25 °C で 1 mol の H_2 が燃焼するとき、反応系のエネルギーは 285.8 kJ 減少する（定圧の条件なのでエンタルピー変化 ΔH で表される）ことを示し、そのうち定温を保持するために $T\Delta S^\circ = -48.7 \text{ kJ}$ が使われ、差引き $\Delta G^\circ = -237.1 \text{ kJ}$ が仕事をしうるエネルギー（最大値）となる。したがって、この反応系の理論（最大）エネルギー効率は 82.9 % である。この反応を仕事を取り出す工夫をせずに行うと、 ΔH はすべて熱になるので、熱効率とよばれることもある。この例では $\eta_{1\text{stlaw}}$ も $\eta_{2\text{ndlaw}}$ も同じ値を与える。なお、燃料電池の効率が 100 % を越える場合もある。 $\text{H}_2\text{-O}_2$ 燃料電池では反応でエントロピーが減少するので、効率は 1 を越えないが、たとえば C（黒鉛）- O_2 燃料電池、 $\text{C}(\text{s}) + \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \text{CO}_2(\text{g})$ 、では ΔS はほとんど 0 で、効率は 1 になる。エントロピーが増大する反応系を用いれば、効率が 1 を越えることもあるが、勿論この場合でも第一法則は成り立ち、必要な余分のエネルギーは外界から熱として取り入れられる。

燃料電池では、反応で生成するギブズ（自由）エネルギー変化 ΔG をどのようにして電気エネルギーとして取出すかが問題となる。 $\Delta G^\circ < 0$ であるからこの反応は定温定圧で自発的に進む。この反応を、水素酸化のアノード反応



と酸素還元のカソード反応



に分けて進め、高いエネルギー準位（低い電位）にあるアノードの電子を低いエネルギー準位（高い電位）のカソードへ移動する流れを電流として外部回路に取り出せばよい。このエネルギー準位の差は電位差として測定され、1 atm, 25 °C で 1.23 V（理論起電力）である。実際には無駄な電子の流れなどが

起こり、理論効率には達しない。実用の装置では効率をできるだけ上げ理論値に近づけるのが技術の役割となる。

既に述べたように火力発電では効率は低く、40 % 程度にとどまる。貴重な化石燃料から取出した熱エネルギーの半分以上が無駄に捨てられるばかりでなく、過大な排熱は環境問題も起こす。排熱を有効に利用しようとする技開発が熱心に進められている。コージェネレーション（cogeneration, 熱電併給）とよばれるシステム技術である。排熱を給湯や冷暖房用スチームにして有効利用するのは容易であるが、火力発電所が超大型化し消費地から遠く離れて建設される場合が多くなり、低密度の熱の輸送がネックになり、効率的なヒートポンプの開発が必要となっている。

これに対し燃料電池はとくにスケールメリットがないので、需要に応じた規模で消費地に設置するのが基本となる。そのため排熱を利用する冷暖房・給湯システムの併置が可能となり、コージェネ用燃料電池の開発が進められ、燃料電池の効率が高いことと相まって、80 % 以上の総合エネルギー効率を達成することが可能になっている。

3. 電磁波のエネルギー

情報処理技術にみられるように、我々の生活の場で電磁波のもつエネルギーはきわめて重要な位置を占めるようになった。エネルギー理解の一環として電磁エネルギーの特徴にふれておこう。定常的な電磁波は振動数 ν または波長 λ で特性化され、 $\nu\lambda = c$ は光速で、 $c = 2.9979 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$ である。電磁波は広範囲にわたる波長領域をもち、波長 10^4 m 以上を電波、 $10^4 \sim 10^9 \text{ m}$ は光波で、可視光線（ $3.8 \sim 7.6 \times 10^7 \text{ m}$ ）をはさんで赤外線、紫外線に分けられ、また 10^9 m 以下は X 線とよび区別される。

高温の物体は放射により熱を放出する。これは熱放射（熱輻射）とよばれ、熱伝導、熱対流とともに重要な熱伝達プロセスとして知られてきた。炭を熱していくと 500 °C で赤熱し、1000 °C になると鮮やかな桜赤色となり、電球は 1300 °C を越えてまぶしい白色に光る。このように高温の物体は熱と光を放射し、高温ほど放射光の振動数は高くなる。温度を維持し放射を続けるとやがて熱平衡状態に達する。

このとき物体の熱放出率と吸収率の比は物体の種類によらず、温度 T と振動数 ν のみの関数になり、放射強度 $I(T, \nu)$ とよばれる (キルヒホフの法則)。とくに吸収率 1 の黒体では、放出率は放射強度 I に等しくなる。放射強度 I と放射エネルギー密度 u との間には一般に下記の関係が成り立つ。

$$u = \frac{4\pi I}{c} \quad (1)$$

19世紀の終り頃、 $u(T, \nu)$ の関数形を決定するという難問に直面した。当時の理論 (古典的電磁気学) で導かれる $u(T, \nu)$ を用いると、全放射エネルギー

$$u(T) = \int_0^{\infty} u(T, \nu) d\nu \quad (2)$$

は無限大に発散してしまう。その難点を避けるために、1900年、M. プランクは次式を提出した。

$$u(T, \nu) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (3)$$

(h はプランク定数、 k はボルツマン定数)

この式は現実の結果をよく説明したが、当時は非常に奇異とみえる前提、すなわち放射エネルギーは $h\nu$ という不連続な値 (エネルギー量子) よりなるという量子仮説に基づいてはじめて導かれるものであった。続いて 1905 年、A. アインシュタインは金属の光電現象の結果からエネルギー $h\nu$ をもつ光量子の存在を提唱したと相まって、プランクの仮説は革新的な意味をもつことが明らかになった。このあたりの事情は量子論のはじまりとしてよく知られている。

プランクの式(3)を用いると、全放射エネルギーは、

$$u(T) = \sigma T^4 \quad (4)$$

となり、既に実験的に知られていたシュテファン-ボルツマンの法則(4)が導かれた。式(3)は黒体放射のスペクトルを与えるもので、これから温度 T で $u(T, \nu)$ の最大値を与える振動数 ν_m または波長 $\lambda_m = c/\nu_m$ に対してウィーンの変位則

$$T\lambda_m = 2.8979 \times 10^{-3} \text{ mK} \quad (5)$$

が成り立つことが示され、観測結果を十分に説明した。

太陽光の放射エネルギーの振動数分布は約 6000 K の黒体放射としてよく表される。このエネルギーはプランクが示したように、エネルギー $h\nu$ の光量子ま

たは光子 (photon) の集まりとみなすことができる。そして黒体放射の平衡状態はその温度で空間に詰められるだけの光子をつめた状態とみなされる。太陽の表面から放射された光は太陽を中心とする球面に広がり、光子の密度は小さくなり、地球に達すると約 18 万分の 1 になる。

地表に住む人間にとって、局所的な冷暖房は別にして外界の温度を基本的に決めているのは太陽の放射エネルギーである。太陽光は波長 480 nm の可視光を最大強度として、4 μm の赤外線から 170 nm の紫外線までの波長領域に広がり、地球の位置で太陽光に対して垂直な面に入射するエネルギーは約 2 cal/cm²min で、太陽定数とよばれる。地球表面の単位面積あたりに換算すると大体その 1/4 になる。地球大気は太陽光に対してほぼ透明であるが、入射光のうち約 34 % が大気上層で反射され、残り 66 % が地表に達し、そこで約 2 % が雲に、17 % が大気に、そして 47 % が地表とくに海面に吸収され、地表の温度を平均約 290 K に維持する。

地表を温めた熱も最終的には大気上層から黒体放射として宇宙空間に放射される。この放射エネルギーが太陽光からの吸収エネルギーに等しいとして、シュテファン-ボルツマンの式(4)から地球上層の温度を推算すると、約 250 K (-23 °C) となる⁹⁾。以上の結果は、地球大気層は等温の熱平衡状態ではなく、地表で 290 K、上層で 250 K の温度勾配をもつ定常状態にあることを示している。この定常状態を維持している主なメカニズムは対流と赤外線放射であり、これらの過程で水蒸気や二酸化炭素が微妙に関与する。

地表の温度が大気上層の温度より高いので、地表から放射された赤外線がそのまま宇宙空間へ発散されるとすれば、放射エネルギーは温度の 4 乗に比例するので、太陽から入射するエネルギーの 1.8 倍のエネルギーが放射されてしまうことになる。しかし実際には地表から放射される赤外線は大気中の二酸化炭素や水蒸気によって一部が吸収される。この温室効果によって地球の寒冷化が防がれるが、逆に二酸化炭素など温室効果ガスの量が増えると、赤外線吸収の程度が強まり地球の温暖化が招くことになる。現在産業活動の活発化とともに二酸化炭素の排出量が増え、これによる地球温暖化の問題が深刻になっ

ている。地球を一つの熱力学システムとして考えるのは非常に重要であるが、種々の要因が複雑に働くので、見通しがつき難い問題にぶつかることが多い。しかしどのような場合にも基本的な事項を見失わないことが重要である。

この項の最後に、家庭でもよく用いられるようになった電子レンジにふれておこう。電子レンジはマグネトロンで発生する 2.45 GHz の電波を利用するもので、調理のメカニズムは誘電加熱による。高周波電界におかれた食材（誘電体）は電波を吸収し電氣的分極を起こすが、分子振動が入力振動に追従できなくなると誘電損失となり熱を発生する。電子レンジでは振動数 2450 MHz は波長 12.24 cm に相当し、水分子によく吸収されるように選んである。対応する光子のエネルギー $h\nu$ は小さく、温度 $T = h\nu/k$ に換算すると 0.12 K にしかならない。これは写真技術などで用いられている色温度に相当する。一方、電子レンジの電波の波長幅は十分に狭く、いわば単色光であり、この波長で同じ程度の放射エネルギー流を与える黒体放射を想定すると、対応する黒体の温度は 10^{16} K にもなる。これは輝度温度とよばれるが、このように電子レンジでは色温度は非常に低いが、水の加熱に有効な振動数における輝度温度は非常に高い。高周波の電波が食材に含まれる水に吸収され熱となる。定常的に注入される放射エネルギーは熱に変換され、約 400 K の黒体放射として放出されるように設計されている。これまででない内部加熱方式であるが、非常に効率のよい調理法を提供する。

これに対し従来と同じ外部加熱方式をとるものに電磁調理器がある。これは誘導加熱を利用するもので、コイルに高周波磁束を発生させ、その上におかれた鉄製の鍋に渦電流が流れ熱を発生する仕組みをもっている。

4. エネルギーと質量

少し歴史を遡るが、熱の粒子説（熱素説）はかなり長い間信じられていたが、光については当初から波動説が優位を占めていた。光の波動説の展開において、光の伝播を支えるなんらかの空間を満たす媒質の存在が前提とされ、エーテルという名でその普遍的存在が信じられてきた。1864 年、マクスウェルはファラデーの媒質理論を定式化し、電磁場の基

本方程式を導いたが、それもエーテルの存在を確めるものと考えられた。しかし実際はマクスウェルの電磁理論はエーテルの存在を前提とするものではない。

エーテルの存在は長い間信じられてきたが、その性質についてはなかなか知見が得られなかった。1887 年、アメリカの物理学者 A. A. マイケルソンはエーテルに関する情報を得るために、光速度に関する次のような測定を企てた。地球は絶対静止のエーテルの中をなんの攪乱も受けずに動いていると考えられている。地球がエーテルに対し速さ v である方向に動いているとする。光が速さ c で地球と同じ方向に進むならば、光のエーテルに対する速さは $c - v$ になり、逆に光が地球と反対方向に進むならば $c + v$ になる。一般に互いに直角をなす 2 つの方向における光の速さの比は $\sqrt{1 - (v/c)^2}$ になるはずである。

したがって互いに直角な 2 つの方向の光速比の測定から、地球がエーテル中を進む速さ v が求められることになる。自身で開発した光干渉計を用い、同僚の化学者 E. W. モーリーの協力を得て行われた実験は、当初の目的に対し否定的な結果を与え、光の速さは方向によらないことが示された。

マイケルソン-モーリーの実験結果は広く受け入れられ、これを説明するための議論が続けられた。1893 年、オランダライデン大学の H. A. ローレンツはこの結果を説明するために、エーテル中を動く物体は速度に比例して運動の方向に僅かに収縮すると考えた。同じ考えはダブリンのトリニティカレッジの J. F. フィッツジェラルドによっても提出され、ローレンツ-フィッツジェラルド収縮として知られる。1895 年、ローレンツはこの考えをさらに発展させ、電子が静止しているときその半径が r_0 であれば、速さ v で動くとき半径 r は

$$r = r_0 \sqrt{1 - (v/c)^2} \quad (6)$$

となり、さらに電子の質量は半径に逆比例し、静止質量を m_0 とすれば、速さ v で動く電子の質量 m は

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \quad (7)$$

となると結論した。これらの結果は相対性理論への道を暗示するものであった。

1905年、A.アインシュタインは2つの重要な仮定、すなわち、(1)異なる速度で動いている観測者にとって運動の諸法則は正確に同じでなければならない、そして(2)光源がどのように運動していても光の速度は常に一定であることを前提として包括的な理論を提出した。特殊相対性理論である。この理論はローレンツが提出した結果(7)を包括的に説明した。既に1900年W.カウフマンは、電子が高速で運動するときその質量が増大することを示す実験的な知見を得ていた。アインシュタインはその理論から一般化した(7)式を導き、さらに高速で動く粒子の有効質量 m と静止質量 m_0 との関係から、速度変化により起こる質量の変化 Δm が運動エネルギー E_k を光速の2乗で割った値に等しい、すなわち $\Delta m = E_k/c^2$ となることを示した。そして物体の質量はその物体のエネルギー含量の測度と考え、物体のエネルギーが E だけ変化すると、その物体の質量 m は E/c^2 だけ変化する、すなわち現在広く知られている関係

$$E = mc^2 \quad (8)$$

に到達した。

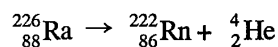
ここで話が変るが、地球を熱力学の対象としてみることは熱力学の創始者ヘルムホルツやケルヴィン卿以来のことである。問題の一つに地球の年齢があった。聖書は地球が数千年以前に神によって創られたと教えたので、キリスト教国ではこれを疑うことを知らなかった。しかし地殻の変動や岩石の変質などを科学の目でみると、とても数千年の歴史と肯んずることは難しかった。ケルヴィン卿は当初の高温状態から現在の状態にまで冷却する過程を解析し、1862年地球の年齢は約1億年と見積った。ただし注意深く、“地球の内部に別の熱源がないならば”という注釈をつけるのを忘れなかった。

1896年、A.ベクレルはラジウム鉱から自然放射能を発見した。1903年、D.キュリーはラジウムが放射線を出すときに発生する熱を測定し、1gのラジウムが1hに13gの水の温度を凝固点から沸点まで上げるのに十分な熱を発生することを見出した。また、ラザフォードはラジウムの放射性崩壊に伴う熱の量は放出される α 粒子(ヘリウム核)の数に比例することを見出し、 α 粒子の運動エネルギーが熱になると考えたが、 α 粒子の運動エネルギーの源は

なお不明であった。同じ頃、J.エルスターとH.ガイテルは放射性物質によって放射される放射線のエネルギー源に注目し、さまざまな可能性を注意深く検討した結果、エネルギーが外部の源からくるものではないことを示し、エネルギー保存の法則が成立する以上、原子そのものの内部に源をもつに違いないと結論した⁹⁾。

地球には莫大な量の放射性物質が蓄えられているので、これから生じる熱によって地球の温度は長い間保たれ、ケルヴィンの推定値は小さ過ぎることが明らかになった。放射性崩壊はまた岩石の年代を決定する手段を提供した。ラザフォードは採取した岩石試料に対して約5億年という年代を得た。これはケルヴィンの推定値の誤りを決定的に示すものであった。放射年代測定の結果、地球はおよそ45億年の間、現在の状態で存在してきたことが明らかになっている。

この状態は地球の中心核をつくる高温・高密度の鉄を主体とする物体の存在と莫大な量の放射性物質の存在によって維持されている。たとえば質量数226のラジウムは



のように崩壊し、質量欠損は原子質量単位 au で

$$226.0312 - (222.0233 + 4.0026) = 0.0053 \text{ au}$$

である。アインシュタインの公式(8)から

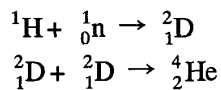
$$1 \text{ au} = 931.5 \text{ MeV}$$

であるので、上の質量欠損は4.9 MeVのエネルギーに相当する。

ケルヴィン卿は太陽の年齢にも興味をもった。もし太陽の熱が石炭の燃焼によるのであれば、1500年程度しかもたないと推定されるので、別の熱源が必要である。そこで重力による収縮が進むとし、重力のなす仕事が熱へ変換されると考え、約1億年と推定した。これは先に述べた地球の年齢の推定値にほぼ一致する値である。その後、放射性崩壊の寄与が明らかになり、太陽のエネルギーを維持するには 3.6 g/m^3 のラジウムがあればと見積られた。しかし、その後太陽光のスペクトル解析によって元素組成が調べられるようになり、その結果ほとんどが水素とヘリウムで、重い元素は1%にも満たないことが明らかになり、この仮説は基礎を失った。太陽で見出されたこの元素組成は多くの恒星に共通で、宇宙全

体の組成にほぼ等しい。

太陽の状態は、1920年 A. S.エディントンによって解明された。太陽は6000 Kに達する高温にあり、次の核融合反応が進む。



これに伴う質量欠損は0.0292 auで、27.2 MeVのエネルギーに相当する。太陽の輝度を保つためには、 6×10^8 トン/秒、あるいは 2×10^{16} トン/年の水素の消費を必要とするが、太陽の質量 2×10^{27} トンはおよそ100億年の燃料を保証している。現在ほぼその半分を消費しているようであるが、すべての水素がヘリウムに変換され燃料が枯渇したとき、重力による収縮が起こり、重力エネルギーが熱に変換され、温度上昇とともに外側が膨張し“赤色巨星”になる。そして中心核の温度が 10^8 Kに達すると、ヘリウムが炭素へ変換されおよそ10億年この状態にとどまるが、ヘリウムも使い果すと、主に炭素からなる内核は収縮とともに冷却し、最後に“白色矮星”として落ち着くと予想されている。

5. おわりに—エネルギー再考

前報 IV のはじめに使用する立場からエネルギーの分類を示したが、エネルギーの含意は広く、種々の分類が可能である。本稿では宇宙にまで目を広げて、エネルギーの様々な形をみてきた。自然は幾重もの階層をつくる粒子よりなり、それらの離合集散により様々な状態をとり、その過程でいろいろなエネルギーが関与する。このように考えると次のような分類が考えられる。

- ・ポテンシャル (位置) エネルギー
- ・運動エネルギー
- ・仕事
- ・熱

ポテンシャルエネルギーは種々の粒子間相互作用が働く場のエネルギーで、その強さは力として測られる。自然の力として次の4つの基本的な力が区別されている。

- ・重力 (万有引力)
- ・弱い (核の) 力
- ・電磁気力
- ・強い (核の) 力

それぞれの力の強さは、重力を基準として1にとると、弱い力 10^{25} 、電磁気力 10^{37} 、強い力 10^{39} となる。強い力は陽子、中性子などハドロン (重い粒子) 間の相互作用に関与し、弱い力は電子、ニュートリノなどレプトン (軽い粒子) の相互作用に関与する。

最後に一つの話にふれておこう。弱い力が関与するβ崩壊で放出されるβ粒子 (電子) のエネルギーを測定すると、電子の一部は確かにこの過程に見合うエネルギーをもっていたが、多くはそれより低いエネルギーしかもたない。この結果はエネルギー保存の法則が成立しない例となる可能性があった。この可能性を打消すためには失われたエネルギーの行方をつきとめなければならない。1931年、W.パウリはこのエネルギーは電荷をもたず非常に軽い粒子により運び去られたという考えを提唱し、E.フェルミはこの粒子にニュートリノ (中性微子) という名前を与えた。

ニュートリノを検出しようという試みは多くの試練を経て、ようやく1956年アメリカのF.ライネスとC. R.コーワンによって達成され、ここでもエネルギー保存の法則が破られることはなかった。毎秒、 1 cm^2 あたり 7×10^{10} 個ものニュートリノが我々の身体を通り抜けている。1987年2月23日、大マゼラン星雲でひとつの超新星が観測され、およそ 10^{58} 個のニュートリノが放出された。16万年前に誕生したこの超新星が放出したニュートリノは、この日小柴昌俊ら日本の研究陣によって設置された検出器カミオカンデによってその11個が確実に捕えられた。このことはなお我々の記憶に新しい。

引用文献

- 1) 妹尾学, 生活工学研究, 6, No.1, 72 (2004)
- 2) 妹尾学, 生活工学研究, 5, No.1, 78 (2003)
- 3) N. de Nerves, *CHEMIECH*, 1982, May, 306
- 4) 杉本大一郎, エントロピー入門, 中公新書 (1985)
- 5) K. J.レイドラー (寺嶋英志訳), エネルギーの発見, 青土社 (2004)