

“エネルギー問題”に関する講義について

山口多恵子・後藤 信行・岩永 浩
松島 晟・柴田 昇

(昭和52年9月27日受理)

A Lecture on “Energy Problem”

Taeko Yamaguchi, Nobuyuki Goto, Hiroshi Iwanaga
Akira Matsushima and Noboru Shibata

Abstract

A lecture on Energy Problem is presented which is given to the students majoring non-scientific courses for a period of one semester. The contents of the lecture are ; 1. definition of energy and conservation of energy, 2. irreversible process and entropy, 3. conservation of energy and consumption of energy, 4. energy transformation, 5. energy of nuclear fission, 6. energy of nuclear fusion. Relating to the second law of thermodynamics, entropy is introduced as a measure of randomness and energy is divided into two categories; one is effective energy and the other is ineffective energy. The effective energy is the one with zero entropy and the ineffective one is with high entropy. In the lecture much emphasis is put on an idea that from the thermodynamical point of view, consumption of energy does not result in dissipation of energy but results in energy transformation from the effective energy to the ineffective one, in other words, it results in an increase in waste energy which will cause serious change in our circumstances if the human beings consume much energy.

I. 緒 論

教養課程における物理教育は、物理学の内容、つまり現在までの物理学の成果の初歩的な部分を講義し、学生に物理学の立場、考え方、方法論を理解させるとともに、その応用の基礎となるものを身につけさせることを目的としたものが主流である。

近年、科学史に関する講義もかなり行われるようになってきたが、これは、物理学の成果を教授することが物理学の中に入り込んでいって物理を見るということに対して、物理学を含めた科学の進歩の流れを外から見る教育法であるということもできそうである。当教養部においては、文化系学生に対する従来のオーソドックスな物理の講義の受講生は年々減少し、科学史を受講する学生が増加している。このことは、常に云われている“敷居の高い物理学”に対する学生の拒絶反応の現われの一つとも見ることができるであろう。

如何なる学問も、その奥行きの高さは変わらないであろうが、数学や物理学は入り口にある

バリエーションが高く、学生にとってとっつき難い学問であろう。このバリエーションを越えるためには、かなりの時間をかけての努力を学生に要求しなければならない。そのような努力を学生に要求することは、大学における教育の在り方として当然であり、激しいトレーニングを必要とする講義は、物理教育の中心的存在でなければならないことは言をまたない。

しかしながら、一方では学生に得手、不得手があることも認めなければならない。数学を言葉として用い、我々の直接的な経験からかなり抽象化された概念を取り扱う物理学を学ぶことに耐えられず、物理学に興味を失っていく学生も多く存在するという現実を無視することはできない。物理に興味を持たない学生は物理学から遠ざかってしまえ、と切り捨ててしまうことは簡単である。しかし、科学技術の進歩にともなって、物理学の成果の応用が人間の生活、社会の在り方やその進む方向に大きな影響を及ぼすようになった現在、物理学の成果の応用が人類の未来にどのようにかかわってくるかを、学生に考えさせる基礎を与えるような教育を行うことの意義は決して小さなものではないと考えられる。

我々はこのような立場から、“エネルギー問題”をテーマに文科系学生を対象にした週二時間、一期（半年）の講義内容を検討してまとめてみた。エネルギー問題をテーマとして取り上げた具体的理由は以下に述べる。

- 1) エネルギーは物理学上で最も重要な保存量の一つであり、その巨視的な取り扱いには熱力学第一法則、第二法則によってまとめられている。これらの法則は必ずしも多くの数式を用いなくとも、厳密ではないが我々の直接的な経験から推論、納得できる部分が多い。
- 2) エネルギー問題は **up-to-date** なテーマであり、学生が興味を示しやすい。
- 3) エネルギー問題は、大量のクリーンなエネルギーを開発することによって解決できるという考え方が一般に流布されているが、この考え方の中には物理学者が見逃すことのできない重要な点が欠落しているなのでその点を強調する。

以上のような講義を行うことは、物理学の成果自身の中にはあまり深く立ち入らず、物理学を含む自然科学の応用をひきがねの一つとして生じた現在の大量生産、大量消費という社会現象を、物理学の成果自身（熱力学の法則）によって批判する基礎を与えることであり、科学史教育と同じように、どちらかといえば物理学を外から見る立場に近いものと考えられる。このように社会現象を批判するのに、物理学自身が用いられるということを知ることによって、学生が物理学に多少なりとも興味を示すようになることは、物理教育の立場からしても好ましいことであろう。

社会現象批判の基礎を与えるような講義を物理学の中で行うことに対しては、我々自身多少の躊躇を感じないでもない。しかし、学生に興味を起こさせるためには、今日的な問題と関連した物理の講義を行う方がよりよい結果が得られるであろうし、エネルギー問題に対する提言、批判を行うためには特に熱力学第二法則の理解が必要であり、それをよりよく理解していると考えられる物理の専門家が、この種の講義を行うことは妥当性を欠いたものではないと考えら

れる。さらに具体的に問題を指摘し、提言を行うためには、社会科学系諸分野の専門家との協力による総合科目として取り扱っていく方がより効果的であろうし、学生に対するアピールも強化されると考えられる。

以下、“エネルギー問題”についての講義内容の概略を記し、問題点のいくつかについて触れてみる。

II. “エネルギー問題”についての講義内容の概要

講義は文科系学生を対象とするので、物理学の内容に関する知識はほとんど持たないこと、数学的な取り扱いを好まないことを前提にしなければならない。したがって、講義内容に論理的飛躍が生じ、物理的な厳密性に欠けるところが出てくることは避けられない。もちろん、熱力学をもう少し厳密に理解したい学生には、教養課程の物理学のテキストや熱力学、統計力学のテキストや解説書^{1~4)}を利用することをすすめ、一般の学生にも数多く出版されているエネルギー問題に関する啓蒙書^{5~9)}を読むことを要求するべきである。

講義は、熱力学第一法則でエネルギー保存を、第二法則で不可逆変化の存在を教え、その結論として、我々がエネルギーを消費することは、エネルギーがなくなるのではなく、有効エネルギーが無効エネルギーに変化する、すなわち、産業廃棄物同様な廃棄エネルギー（廃熱）を生み出すことになる点に焦点をあてる。さらに太陽エネルギーはクリーンであり、無限に利用できるという考え方が正しくないことを示す。その他、現在考えられているエネルギー変換法の概要を述べ、当面の問題になっている核分裂、核融合によるエネルギー変換について指摘されている問題点を紹介する。

以下に熱力学に関する部分を中心に、講義内容の概要を § 別に箇条書きで示してみる

§1. エネルギーの定義とエネルギー保存

体系のもつエネルギーというものを、力学的な立場から説明し、それと温度という巨視的な状態量との関連を理解させる。エネルギー保存則は、純粋に力学的立場のみから説明可能であることを示す。

1. エネルギーは、仕事をなす能力という形で、力学においてまず導入された物理量であるが、この力学的エネルギーと等価な物理量がすべてエネルギーと呼ばれている。

2. 体系（原子や分子の集団からなる気体、液体、固体）の巨視的な状態は、わずかの物理量（状態量）によって定まり、体系の状態が定まれば体系のエネルギーも定まっている。体系のエネルギーは、体系を構成する各分子のもつ力学的エネルギーの和である。したがって、熱が関係しない場合には、体系に加えられた仕事だけ体系のエネルギーが増加するという形で、エネルギー保存則が成り立っている。

3. 温度は体系を構成する分子がもつエネルギー——ランダム運動のエネルギー——を表わ

す状態量で、温度が上昇するという事は、分子のランダム運動が盛んになるということである。

4. 熱は温度差のある二物体間に移動する。体系の温度を上昇させることは、熱を加えることによっても仕事を加える（まさつする）ことによっても行われるので、熱と仕事は等価であり、ともにエネルギー移動の形である。したがって、体系に加えられた仕事と熱の分だけ体系のエネルギーが増加しているという形で、熱を加えたエネルギー保存則が成り立つ。

5. 通常“まさつによって熱が発生する”といわれていることを厳密に考えると、まさつを通して巨視的な形の力学的エネルギーが減少するかわりに、温度上昇が生じているということであり、この温度上昇に見合うだけの加えるべき熱量のことを“まさつによって発生した熱”といっている。この際、失われた力学的エネルギー（仕事）と発生した熱との間の等価性が実験的に確かめられ、熱を含めた形でのエネルギー保存則が成り立っていることの実験的証拠となっている。

6. まさつによる熱の発生の例として、水平な机の上に置いた物体に仕事を加えて運動をはじめさせると、まさつによって静止するという単純な実験事実について考えてみる。運動を始めたときに物体のもつエネルギーは、その温度に相当した分子のランダム運動のエネルギー（このエネルギーのことを熱エネルギーと云う場合が多い）と、物体が並進運動をすることによってもっている分子の整った運動エネルギーとの和である。まさつによって静止したときには、分子の整った運動のエネルギーは0になり、それが分子のランダム運動のエネルギーに変わり、ランダム運動が盛んになったことに対応して、物体と机の接触面近くの部分の温度が上昇したことになる。

§2. 不可逆変化とエントロピー

§1のように、力学的立場のみからエネルギーを論じると、現象はすべて可逆的であることになるが、現実には起る変化はすべて不可逆的であり、これを説明するためには、力学的な考え方に加えて、統計的な考え方を導入しなければならないことを理解させる。

1. §1. 6. で示した例において、分子の整った運動のエネルギーは、まさつによって容易にランダム運動のエネルギーに変化して、接触面近くの部分の温度は上昇し、物体は静止する。可逆的である力学の立場からすると、この逆過程、すなわち、分子のランダム運動のエネルギーが分子の整った運動のエネルギーに変わる——すべての分子の運動の方向がそろうことによつて——ことも十分に起こり得る。このことを巨視的な立場から見ると、静止した物体を放置しておいたら突如全体として動き出し、物体と接触面近くの部分の温度が下がっていたということで、このようなことは絶対に起こらないと断言してよい。すなわち、この実験事実（まさつによる熱の発生）は“不可逆変化”の例である。

2. このような不可逆変化の存在を説明するためには、力学的な考え方のみでは充分でない

ことは明らかで、統計的な考え方を導入しなければならない。統計的な考え方を上記の例に適用してみると次のようになる。すべての分子がそろった方向に運動する場合の数は、分子がでたらめな方向に運動する場合の数に比べて小さい。すなわち整った運動をする状態の存在確率は、でたらめな運動をする状態の存在確率より小さい。しかも分子数が増大すると前者の存在確率はほとんど0になる。したがって、エネルギー保存則が成り立つという力学的な考え方に加えて、実際に起こる変化では、存在確率が小さな状態（整った状態で場合の数が小さい）から、存在確率の大きな状態（でたらめな状態で場合の数が大きい）への変化が起こるので、その逆の変化は起こらないという統計的な考え方を導入することによって、上記の例が不可逆変化であることが説明できる。

3. このようにして不可逆変化は、存在確率の小さな状態（整ったでたらめさの小さな状態）から存在確率の大きな状態（でたらめさの大きな状態）へと体系が変化していき、その逆の変化が生じないということである。この“でたらめさ”（ランダムネス、無秩序さ、不規則性ともいわれる）の度合を表わす物理量がエントロピーで、不可逆変化が生じるとでたらめさが増すので、エントロピーは増大する。体系のエントロピーは、その状態の場合の数 W に関係することが理解されるが、統計力学ではエントロピー S は、有名なボルツマンの式

$$S = k \log W \quad (1)$$

で与えられる。但し、 k はボルツマン定数である。

4. 巨視的な立場に立つ熱力学では、体系が絶対温度 T で熱量 Q を吸収したときのエントロピー増加は、 Q/T で与えられる。例えば温度 T_2 の高熱源 A から Q の熱が、温度 T_1 ($T_2 < T_1$) の低熱源 B に移動した場合、 A のエントロピー減少は Q/T_2 、 B のエントロピー増加は Q/T_1 で、 $Q/T_1 > Q/T_2$ であるから、この過程（熱伝導）ではエントロピーが増加しており“熱伝導は不可逆変化である”と結論される。

5. エントロピーはエネルギー、温度、圧力等と同じく状態量であり、エネルギー同様体系の間で受授される量である。エネルギーは保存量であるので受授に際して、体系が出した分だけ体系のエネルギーが減少している。熱伝導の例では、高熱源 A が Q/T_1 のエントロピーを出し、それを低熱源 B が受け取るという形での受授関係が成り立っている。しかし、 A のエントロピー減少は Q/T_2 であって、 Q/T_1 より小さい。つまり、出したエントロピーよりも体系のエントロピー減少の方が小さく、結果として、 A 、 B を合わせた全体系のエントロピーは増加している。このエントロピー増加は受授過程（変化過程）において生じたと見るべきである。我々の日常生活での物品受授は、ほとんどの場合、エネルギー同様保存量的性格をもっているが、例外と見ることが出来る場合もある。例えば、借金の返済に利子をつけて支払うと、借金の減り高よりは支払った金額の方が多く、相手は支払額だけ受け取るので、エントロピー受授と似た性格をもっていると見る事ができる。

6. 以上のことから、まさつによる熱の発生と熱伝導が代表的な不可逆変化であることが理

解された。自然界で実際に起こる変化には、これらの現象が必ずつきまとうので、自然界に変化が起これば必ずエントロピーが増大することになる。生物が生命を保つためには、自らの体内の秩序を保つようエントロピーを減少させているが、このエントロピー減少のために、それ以上のエントロピーを環境に放出している。また、我々の経済活動で、資源から製品をつくることは、エントロピーの大きい資源からエントロピーの小さな製品をつくり出すことであり、その結果として、環境に莫大なエントロピーを放出することになる。我々が環境汚染と呼んでいるものは、この環境のエントロピー増大と密接に関連していることが諒解できる。

§3. エネルギー保存則とエネルギー消費

この節が本講義の主眼点で、熱力学第一法則と第二法則とを組み合わせると、我々がエネルギーを消費するということは、エネルギーがなくなるのではなく、有効エネルギーが無効エネルギーに変わるのみで、他の産業廃棄物同様な廃熱エネルギーを生み出すにすぎないことを示す。

A. 有効エネルギーと無効エネルギー

1. 熱機関は熱源から熱をもらってその一部を仕事に変え、残りの熱をまわりの物体（冷却器）に与えることをくりかえして行うサイクルである。簡単に言えば、熱エネルギー（分子のランダム運動）を仕事（分子の整った運動）に変えることである。このことが 100%行われないうちであろうことは、まさつによる熱の発生が不可逆変化であることから推察できる。効率 100%の熱機関（第二種永久機関）ができないことと、不可逆変化が存在することが密接に関連していることが窺われ、両者が同等であることが物理的に証明される。

2. したがって、エネルギーは仕事となりうる有効エネルギー（その最大を自由エネルギーという）と、仕事となりえない無効エネルギー（束縛エネルギー）との二つに分けて考えることができる。

$$(\text{エネルギー}) = (\text{有効エネルギー}) + (\text{無効エネルギー}) \quad (2)$$

有効エネルギーは、エントロピー 0 のエネルギーであり、無効エネルギーは、エントロピーの大きなエネルギーであるから、有効エネルギーは容易に無効エネルギーに変わるが、その逆は容易でないことが不可逆変化の存在から推察される。石油のようなエネルギー資源は、有効エネルギーを持ったエントロピーの小さなエネルギー源である。

3. 我々がエネルギーを消費するということは、エネルギー保存則から考えても明らかのように、エネルギーがなくなるのではなく、有効エネルギーを無効エネルギーに変えることである。(2)式から明らかのように、石油などから発生させたエネルギーは、最終的にはすべて無効エネルギーに変わり、太陽からの有効エネルギーも、それを利用すればすべて無効エネルギーに変わるのである。したがって、エネルギーを消費することは“廃熱エネルギー”を生み出すことであり、莫大なエントロピーを環境に捨てるということである。

4. この意味から、環境汚染の全くない完全にクリーンなエネルギーは存在しない。太陽エネルギーもその例外でないことをエントロピーを中心に考えてみよう。

B. 地球のエネルギーとエントロピー収支

1. 閉じた系（外界と物質やエネルギーのやりとりをしない体系）では、変化が起こればエントロピーは増大し、一つの平衡状態（死の世界）に近づく。地球は閉じた系ではなく、太陽からエネルギーをもらう。地球は高温にある地表で太陽からの熱を吸収し、低温である上空でほぼ同量の熱を宇宙に向けて放射している。地球の熱バランスとエントロピー減少についての槌田の計算¹⁰⁾を図に示す。上空の低温部で熱放射を行うことによって、地球のエントロピー増大が防がれている。このエントロピー減少は、主に雨水として地表に届けられ、これが地球上の生物が利用している有効エネルギー（エントロピー0のエネルギー）である。

	熱バランス (kcal/cm ² y)	エントロピー減少 (cal/°Kcm ² y)
大気上空	太陽入射光256=反射88+熱放射168	$S_2 = \frac{-Q}{T_2} = -288$
大気		$T_2 = 250^\circ \text{K}$ $\Delta S = S_1 + S_2 = -40$ $T_1 = 290^\circ \text{K}$
地表	吸収熱112=熱放射40+残留熱Q72	$S_1 = \frac{Q}{T_1} = 248$

図：地球の熱バランスとエントロピー減少

2. この意味で太陽エネルギーは低エントロピーであるといわれている。しかし、太陽エネルギーもそれを利用すれば必ずエントロピーの高い無効エネルギーに変わり、他のエネルギー資源の利用と同様に、地球上の残留熱を増加させ、図の水サイクルに影響を与えることになる。

C. エネルギー消費の拡大と節約

1. 人類は効率のよい便利な高度な生活水準を求めて、大量のエネルギーを消費するようになってきた。しかし、地球上で大量のエネルギーを消費する先進国に属する人口は、地球上人

口の $\frac{1}{4}$ に過ぎず、人類が電気という形で大量のエネルギーを使用し始めてから、未だ100年そこそこしか経過していないことは、我々がエネルギー問題を考えるときに、着目しなければならない点である。つまり、爆発的に増加しつつある地球上人口のすべてが、大量のエネルギーを長期にわたって消費した場合、環境にどのような影響を与えることになるかは、人類が全く経験していないことである。

2. 現在提唱されているエネルギー節約は主としてエネルギー資源の涸渇を防ぐ目的からの発想である。もちろん環境汚染に対する問題提起もなされているが、それは二次的なものであり、技術的に解決可能であるという“技術的楽観論”の前提に立っているように見受けられる。このような立場からすれば、石油にかわる代替エネルギー——核分裂、核融合、太陽エネルギー利用等の開発が進めば、いくらでもエネルギーを消費してよいという結論に達することになる。

3. すでに述べてきたことから明らかなように、エネルギー大量消費の環境に及ぼす影響は、技術的楽観論を越えた物理の法則自身にかかわる問題であり、技術的に解決しようのない問題である。したがって、莫大なエネルギーの消費をしないようにしなければならないが、そのためには、個人あたりのエネルギー消費量を減少させるか（生活水準の低下）、人口を抑制する以外に解決法はない。

§4. エネルギー変換

太陽エネルギー（化石燃料、風力等を含む）、核エネルギー、地熱エネルギー、潮力エネルギーの利用法とそれらの可能性について説明する。

§5. 核分裂エネルギーの利用

原子炉（増殖炉を含む）の構造、核燃料の再処理、放射線障害について述べる。

§6. 核融合エネルギーの利用

核融合を起す方法、核融合エネルギー利用の利点と問題点について述べる。

Ⅲ. 講義内容についての問題点

初めに述べたように、数式をなるべく用いず、論理的一貫性、物理的な厳密さを犠牲にした講義の進め方であるので、その内容には幾多の問題点がある。以下それらの点のうちのいくつかについて議論してみる。

1. 状態と状態量の問題：微視的な状態から出発して、巨視的な状態を導入するような道筋をたどっている——例えば、微視的な分子の運動エネルギーを巨視的な温度という状態量と対応させるといような形で——状態の定義はかなり理解してもらえると考えられる。しか

し、エントロピーは状態量であり熱や仕事の状態量でないということを学生が理解しているかどうかの疑問が残る。

2. エントロピーの定義：巨視的な立場でのエントロピーと微視的な立場でのエントロピーの二つの定義の間のギャップを埋める努力が全くなされていないので、学生がとまどうことになるおそれがある。このギャップを多少でも埋めようとする、熱力学を通常のような方法で講義しなければならないので、熱伝導を例にして Q/T をエントロピー変化と考えることができるといっておしつけをせざるを得なかった。

3. 有効エネルギーと無効エネルギーについて：熱力学的関数を全く用いないので、自由エネルギーのかわりに、実際に仕事に変わったエネルギーという意味をもつ有効エネルギーという言葉を用いた。したがって、それ以外に体系がもっていたエネルギーが無効エネルギーで、これは、(温度) × (エントロピー) で与えられる束縛エネルギーとは異ったものである。つまり、変化過程で生じるエントロピー増大にともなう無効エネルギー増大分も、始めから体系内の束縛エネルギーに組み込まれていることになっている。この点物理的な厳密さに欠けているが、学生の理解のためにはやむを得ないのではなかろうか。

4. 化学的物質による環境汚染については、人類の現在までの経験や種々の実験から具体的な数値としての基準が示されているが、地球上でどの程度のエネルギーを消費すれば、我々の環境を著しく破壊することになるのかについての具体的な試算がないことが本講義での一つの悩みである。

講義内容については、上記以外の問題点もあるが、学生が大筋として熱力学の法則を理解し、エネルギー問題を考える一つの基礎となりうるであろう。

本稿は文部省の教育方法等改善経費の援助をうけて、当物理教室で議論してえられた結果である。ここに、文部省に対して謝意を表わす。

参 考 文 献

- 1) ブリッジマン, 村田良夫訳: 熱とエントロピー, 東京図書, 1973.
- 2) 井田幸次郎: やさしい熱力学, 東京図書, 1977.
- 3) 押田勇雄; 藤城敏幸: 熱力学, 裳華房, 1970.
- 4) 寺本英: エネルギーとエントロピー, 化学同人, 1973.
- 5) 東京大学公開講座, エネルギー, 東京大学出版会, 1974.
- 6) 崎川範行編: 特集エネルギー, 新資源の探求, 別冊サイエンス, 日本経済新聞社, 1974.
- 7) NHK取材班: エネルギー, 日本放送出版協会, 1976.
- 8) 武谷三男: 原子力発電, 岩波書店, 1976.
- 9) 大場英樹, 小出五郎: 原子力は必要か? 技術と人間, 1976.
- 10) 槌田 敦: 核融合発電の限界と資源物理学, p. 938, 日本物理学会誌, 第31巻, 1976.