

6. 2 エネルギー (Energie, energy)

エネルギーは、国民の最大関心事のひとつであり、世界には、エネルギーに関する莫大な情報が溢れている。化学産業とエネルギー資源は不可分のものであり、素材産業である産業ガスも密接に関わっている。ここでは、産業ガスビジネスに参考となるエネルギーの情報、周辺技術についてまとめる。

6. 2. 1 エネルギーとは

6. 2. 1. 1 エネルギーの概念

「エネルギー」は、日常会話にも頻繁に現れる言葉であるが、比較的近年に導入された「物理学の概念」であって、大昔から知られているものではない。エネルギーには実体がなく、これがエネルギーであるということを具体的に示すことができない抽象的な「概念」である。

現在では、エネルギーを測る「単位」があって、ほとんどの人がエネルギーの「存在」を疑っていないが、難解で実体のつかめない「概念」を理解することは容易ではない。石炭や石油は熱エネルギーと呼ばれるものに転換される原料であるが、エネルギーそのものではない。電気も動力に変換することができるが、エネルギーそのものではない。

われわれが、エネルギーらしきものを感じるのは、「力」であり、その力のもとになっているスタミナのようなもの、「活力」のようなものが、エネルギーと呼ばれているが、こんなに曖昧で正体不明のものを理解することは難しい。過去、多くの天才的な学者達が、この何となく感じる「活力」を理解するために思索をめぐらした。活力は哲学と生まれたばかりの科学の大きな課題であった。

(1) 活力論争 (力の元「活力」)

17世紀初頭、ガリレオ・ガリレイ (1564~1642年、フィレンツェ公国ピサ) は、現代の人たちが、エネルギーと考えているものを、運動する物体が持つ「固有の力」と考えた。「力」というものは、人々が感じ取ることができるが、その元になっているものは何なのか、実体の見えない何かについて、哲学者は様々な仮説をたてた。

17世紀中頃、力の元をめぐる大きな科学論争が起こった。

ルネ・デカルト（1596～1650年、フランス）は、重さと速さの積のようなもの（現在では運動量、 mv ）を考え、ゴットフリート・ライプニッツ（1646年～1716年、神聖ローマ帝国ライプツィヒ）は、重さと速度の二乗の積（現在の運動エネルギーの2倍、 mv^2 ）のようなものだと考えた。

デカルトやライプニッツが考えた、力の元は、「活力」（vis viva）と呼ばれた。

釣り合いの力（静力学）がよく研究されていたので、これに対応するように、動く物体には、何か「生きた力・活力」が含まれていると考えられた。

しかし、デカルトの考えた活力とライプニッツが考えた活力は、異なる数式を与え、現代の言葉で言えば、物理量の次元が異なるため、概念が異なる。どちらの活力の解釈が正しいのかということが大きな議論になった。

ライプニッツは、デカルトよりも50歳も年下、両者の活動時期は重なっていないが、ライプニッツがデカルト派の活力を批判し、大勢の学者を巻き込んだ「活力論争」が起こった。現在の科学の言葉を使えば、デカルトの示した運動量、ライプニッツが示した運動エネルギーの、いずれが、活力を正しく表現しているのかという論争である。しかし、いずれも物体そのものが保有するものであり、現在の解釈とは異っている。

活力論争は、答えがでないまま、一旦、下火になったが、18世紀になって、数学者ヨハン・ベルヌーイ（1667～1748年、スイス）が「物体の衝突に関する論文」を提出し（1720年）、この論文がきっかけとなって、活力論争が復活した。物体の衝突が研究され、衝突前後の「活力の保存」が議論された。

18世紀中頃の科学の常識は、運動する物体は何らかの「力」を持っているとされていた。しかし、3人の学者、ピエール・ルイ・モーペルテュイ（1698～1759年、フランス）、レオンハルト・オイラー（1707～1783年、スイス）、ジャン・ル・ロン・ダランベール（1717～1783年、フランス）は、この原理を否定、活力とは物体が保有するものではなく、運動そのものと考えられるようになり、活力論争は解消に向かい始めた。

活力論争を研究した京都大学大学院文学研究科の有賀暢迪氏が「活力論争とは何だったのか」（『科学哲学科学史研究』第3号（2009））の中で活力論争とその終結を解説しているが、当時の帰結は何であったのか、非常に難解である。

18世紀には、およそ次のような議論があった。

オイラーは、慣性力は物体に内在する「力」ではないことを示し、「力は物体の

本質ではない」ため、活力などの言葉の意味を変えるべきであると主張した。

ダランベールは「動力学論（1743年）」において、活力論争は言葉の論争であるとしてこれを決着させようとした。これは、「ダランベール神話」と言われたが、後年の研究者によって、活力論争におけるデカルトの活力とライブニッツの活力は言葉の論争ではなく、より本質的な問題であり、力の「尺度」と「保存」の二つの論点から見解の不一致が生じていたと指摘されている。

オイラーやダランベールによって「力は物体が持つ物性である」というそれまでの科学の常識が覆されたということは科学史上の大きなできごとであり、物理学は新たな転換点を迎えることになった（1740年頃）。ただし、今日の、力、運動量、エネルギーといった概念にはまだ遠い。

なお、当時の力学の研究者のほとんどが数学者であり、実験専門の科学者は非常に少ない。活力論争で活躍したモーペルテュイ、オイラー、ダランベールの3人も著名な数学者であり、物理学における最も基本的な原理である「最小作用の原理」の発見に寄与している。3人の著名な数学者が、活力は物体固有のものではないと示したが、活力が何なのかは、それは何となく曖昧なままであった。

（2）エネルギーの概念の発明

活力の尺度と活力の保存の見解の違いが解消されないまま、19世紀になり、トマス・ヤング（1773～1829年、スコットランド）が、著書「自然哲学講義」（1807年）の中で、それまでの活力に変わる概念として「エネルギー」という言葉を初めて用いた。

これは、ギリシア語の「仕事をする能力」という意味の言葉から作られている。活力は、「力と運動の関係」を示そうとした概念であったが、エネルギーは、「力と仕事を関係づける」新たな概念であった。ヤングは、エネルギーを発見したのではなく、エネルギーを発明した。

その後、ガスパー＝ギュスターヴ・コリオリ（1792～1843年、フランス）によって、活力は、 $1/2 mv^2$ と定式化された（1829年）。ライブニッツの活力に似ている。

後に、ウィリアム・トムソン（ケルビン卿）は、この物理量を、「運動エネルギー」（kinetic energy）と名付けた（1850年）。ケルビンはこの時、何故か、dynamicという英語を使わずに、ギリシア語の接尾詞-kinesisを使って、この言葉を作った。

キネティック（kinétk）あるいはカイネティック（kainétk）という英語は、現在では、動きを表わす普通の言葉として用いられているが、19世紀半ばに、ウィリ

アム・トムソンがギリシャ語から作った造語である。

自然科学、物理学の歴史の中でみると「エネルギー」は非常に新しい概念である。ヤングが提唱してから200年、コリオリが運動エネルギーを定式化して190年、ウィリアム・トムソンがこれを運動エネルギーと名付けてから170年ほどしかたっていない。誰もエネルギーという概念を疑っておらず、エネルギーという言葉は、今まさに巷にあふれかえっているが、実体がないエネルギーを本当に理解することは容易ではない。

エネルギーの概念を発明したトマス・ヤングは、医者でありヒエログリフを解読する言語学者であったが、同時に光や音、波の研究を行う物理学者でもあった。

ヤングは、音の研究からヤング音律を考案、不協和音が少ないヤングの調律法は、当時のバロック音楽に多用された。光の研究では「ヤングの実験」によって、光が干渉することを示し、光の波動説を唱えた。量子力学と不確定性原理における有名な「二重スリットの実験」のオリジナルは、このヤングの波の実験である。

ヤングは、医学と光学の両方の知見を持ち、乱視や色覚の研究を行ない、ヤング＝ヘルムホルツの三色説を提唱した。ヤングの三原色RGBは、その後の光の原色のスタンダードになった。光には色という特性はなく、三原色はヒトという動物の視覚が生み出したものである。物理学と医学に精通したヤングとヘルムホルツならではの学説である。ヤングは、弾性力学の研究にも貢献し、フックの法則における、ひずみと応力の比例定数（縦弾性係数）は、ヤング率と呼ばれる。

ヤングの様々な業績が後世に伝わっているが、新たに導入した「エネルギー」の概念が、その後の科学、社会に与えた影響は非常に大きい。様々な自然科学分野にエネルギーの概念とそれを表す記号が現れ、物理学や化学の式の多くがエネルギーを用いて記述されるようになった。自然科学以外でもエネルギーという言葉を使う人は多い。しかし、ヤングの名前は、エネルギーの発明者としてはあまり大きく取り上げられることはない。ヤングはエネルギーという言葉を発明したが、いきなりひとりでエネルギーの概念を発明したというのではなく、それまでの多くの学者による力、活力、熱などの様々な研究があって、それらをまとめる基本的な概念としてエネルギーという言葉を発明した。

エネルギーは、わずか200年の間に、科学以外の、ありとあらゆる分野に浸透し、日常会話の中にも入っていった。しかし、過去の活力論争にみられるように、このような、実体のない抽象的概念は、具体的な形で示すことができないため、エネルギーを理解することは非常に難しい。

古典力学では、運動エネルギーとポテンシャルエネルギー（位置エネルギーなど）が数式で示され、食物や燃料では活力や熱がエネルギーの存在や大小を感じさせてくれる。しかし、エネルギーは、取り出して測ることができず、エネルギーを直接測定する方法もない。ほとんどの物理量は、間接的ではあるが、何らかの現象を利用して測ることができ、長さ、温度、力（重力、圧力、電力）などを測定する機器がある。エネルギーの測定は、さらに間接的であり、これらの物理量やその変化からエネルギーが計算される。数字にすることはできるがその実体はとてもしっかりにくい。

エネルギーの最も重要な性質は、エネルギーが保存される、ということである。エネルギーそのものは、創造することはできず、枯渇したり消滅したりすることはない、失われたように見えても、それは形態が変わって現象が観測しにくくなっただけであり、エネルギーそのものの総量は不変であると考えられている。エネルギー保存則という法則を議論するときは、「系」を決めて行わなければならないが、われわれの身近にあるエネルギーは、少なくとも地球や太陽の階層の系を考えた時には系外との出入りもなく保存される。

エネルギーは作り出すことができないので、たとえば、「エネルギーを産み出す」という表現は、エネルギーが変換される状態、特に使いやすい形態に変換される過程を比喩的に表わしているのであって、エネルギーの本質を正しく表現していない。教育・研究現場でも、エネルギーは増えたり減ったりせず、ただ形が変わるだけと教えており、大学のエネルギーに関する学科や研究室の名前にも「エネルギー変換工学」という言葉が使われることが多い。生物や人間は、エネルギーが様々に変換する過程を利用し活力のようなものとしており、エネルギーの変換過程をうまく利用する実学が重要となる。エネルギーを生む、エネルギーがなくなるといった表現は、少なくとも自然科学の言葉ではない。

エネルギーには、様々な「形態」が知られている。

運動エネルギーは、力学エネルギー（位置エネルギー、弾性エネルギー、運動エネルギー、音のエネルギー）の一種である。熱エネルギー、化学エネルギー（自由エネルギー、イオン化エネルギー）、光エネルギー、電気エネルギー、質量、空間（真空のエネルギー）など、エネルギーは実に様々な形態で現われる。

エネルギーが、形を変える時に、力が現れ、温度や圧力が変化する現象が起こる。

エネルギーの正体は、分からないが、このようなエネルギーの変換過程における現象を通じて、われわれは、エネルギーの存在を何となく感じている。力や熱、ス

タミナや持久力といったエネルギーではない何か別のものからエネルギーを感じている。

(3) エネルギーの定義（定式化）

エネルギーを、ぼんやりとした言葉や哲学的な概念ではなく、科学の概念として理解するための手法は、定式化である。科学では、理解しにくい概念を分かりやすくするために、数学を利用して法則を定式化したり、数式で定義したりといったことがよく行われる。一部の天才の頭の中でしか理解できないことを、一般の人が理解できるように数学が利用されている。

ヴィンチェンツォ・ガリレイは自然現象の記述に数学を用い、その影響を受けた息子のガリレオ・ガリレイは、純粋数学を実際の科学に用い、実験結果を数値や数式で表すことを始めた。多くの人がこれにならい、16世紀の中頃からは、科学の説明に、数学や数式がよく用いられるようになった。17世紀以降に現われる科学（物理、化学）、生物学やその他の実学（工学、医学）などほとんどの自然科学が、数学の助けなしには成り立たない。

エネルギーを含む数式、エネルギーによって記述される法則や定理などが非常にたくさんあるが、しかし、これがエネルギーであるとすばりと定義する式はあまり見かけない。実体がなく分かりにくいエネルギーが数式によって分かりやすくなるだろうか。

ニュートン力学を再定式化した解析力学のひとつハミルトン力学では、「エネルギーに対応する物理量」として定義されるハミルトニアン（ハミルトン関数）がエネルギーの定義や説明に用いられる。

ニュートンの時代には、エネルギーという概念そのものがまだ確立していない。オリジナルのニュートン力学は、記述が直感的であり数学的（解析的）ではないため、ラグランジュやハミルトンのような数学者たちがこれを再構築し、その中で新たに導入されたエネルギーを議論した。ニュートン力学は、まだ錬金術（魔法）と科学の境界があいまいな時代に生み出されたもので、同時代のボイルの法則と同様、非常に簡単な数式で記述されている。中高生でも理解できる数式は、直感的に現象の理解を助けるが、実際に何かの問題を解こうとすると使いにくいことが多い。

たとえば、ニュートンの運動方程式は、ベクトル方程式でありデカルト座標系であれば、簡単に記述できるが、その他の座標系では煩雑な座標変換を必要とする。そこで、ジョゼフ＝ルイ・ラグランジュ（1736～1813年、フランス）は、一般化

座標によって記述されるラグランジュ形式の力学を構築した。これは、ラグランジュ力学と呼ばれ、物理学を数学（解析学）によって、より扱いやすくベクトルの方程式をスカラーで記述することなどが可能となる。欠点としては、座標や力、エネルギーといった物理量が、直感的には見えにくくなるということがあり、現象と数式が直感的につながらないが、数学的に洗練されることによって、様々な物理量の定義などが厳密に行え、エネルギーはラグランジアンと呼ばれる関数に置き換えられて定義された。

ウィリアム・ローワン・ハミルトン（1805～1865年、アイルランド）がさらに解析力学を発展させてハミルトン力学を構築した。ハミルトン形式もラグランジュ形式と同様にエネルギーをハミルトニアンで表現した。解析力学が優れている点は、ニュートン力学を数学的に取り扱ったということだけでなく、量子力学や20世紀以降の非ニュートン力学の記述にも利用できるという点である。特にエネルギーの記述は、古典力学だけでなく現代力学において非常に重要であるが、ラグランジアンとハミルトニアンは古典力学（この場合は関数）と量子力学（この場合は演算子）においてエネルギーを表現するようになり、一般的には次のような形で記述される。

$$L(q, \dot{q}, t) = T - V \quad \text{ラグランジアン (古典力学の場合の関数)}$$

$$H(q, p, t) = T + V \quad \text{ハミルトニアン (古典力学の場合の関数)}$$

ここで T : 運動エネルギー、 V : ポテンシャルエネルギー、 t : 時間、 $q(t)$: 一般化座標、 $p(t)$: 一般化運動量。

しかし、ラグランジアンやハミルトニアンはエネルギーを表現するものであるが、エネルギーそのものではないため、この定義式自体は、エネルギーを定義していない。エネルギーの定式化は、ここが出発点になる。

”マンガでわかる素粒子物理学”（うるの拓也著、KEK 監修、学研）は、中学生を対象とした KEK の Web 連載漫画を書籍にしたものであるが、この本の導入部、第1章第1話は「エネルギーってナニ？」である。ここに中学生に説明するエネルギーの定義がある。

KEK を探検する子供たち（カソクキッズ）が、エネルギーとは何かという課題に取り組んでいる時、主役のひとりフジモト博士（モデルは実在の人物らしい）は、ホワイトボードに向かって物理学の式を展開、ラグランジアン L が時間に対して一様であるという条件から数学的に導出した次の式の時間微分の「かっこの中のものをエネルギーとよぶ」と定義する。

$$\frac{d}{dt} \left(\sum_i \dot{q}_i \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - L \right) = 0$$

ここで、 q_i は一般化座標、 L はラグランジアン、 t は時間であり、ドットは時間による微分を表わし、ラグランジアンは、ハミルトニアンに変換される前のエネルギーに関する関数である。

この式のカッコの中が「エネルギー」である。これを「エネルギーと呼ぶ」と決めたのだから、エネルギーを定義はなにかという問いの答えは出ているのだが、フジモト博士の数式を用いたエネルギーの定義を登場人物たちは誰も理解していない。

一般化座標は、ニュートン力学を再定式化した解析力学において、一般化運動量とともに基本変数として用いられるもので、ここに示された、ラグランジアンは、ハミルトニアン同様、一般化座標による系のエネルギーに対応した関数である。フジモト博士は、このラグランジアンと一般化座標を用いて「これをエネルギーと呼ぶ」とはっきりと定義し、正体不明のエネルギーを解析力学と数式で「簡単に」示した。物理学の流儀に従って、最も基本に忠実にエネルギーを説明したということである。

しかし、ニュートン力学は、中学から高校までに習うが、ラグランジュの運動方程式や解析力学は、大学で教えるものなので、おそらく普通の中学生であるカソクキッズたちは、ここで使われている記号の意味を習っておらず、フジモト博士の説明には無理がある。数式を使ってもエネルギーの説明は少しも簡単になっていないのである。解析力学に現れる関数は、数学的には洗練されるが、直感的には理解されにくいのが特徴である。

フジモト博士は、ラグランジアンが量子論や相対論にも応用できることから、このエネルギーの定義式を相対論的粒子に対して適用し、わずかに数行後には、(やや展開に無理があるように見えるが) $E = mc^2$ を導く。エネルギーと質量が等価であるというこのアインシュタインの特殊相対性理論の式は、理系以外の人でも知っている非常に有名な式であり、中学生であるカソクキッズも知っていた。エネルギーの定義式から(簡単に)このアインシュタインの式が導出できるというのがこのシーンのオチである。

作者は、カソクキッズや読者が、解析力学におけるエネルギーの定義を理解できるとして書いているとは思えないが、日常会話にあまりにも簡単にでてくるエネルギーという言葉は、実は非常に難解なものであって、分かり易く書いたはずの

式も、実はきちんと勉強をしていかないと分からないというところが、高エネルギー研究所の物語の導入部になっている。

話しは、この後、高エネルギーを使えば、ミクロな世界や宇宙のかなたを見ることができると言えることを示し、物質や宇宙の謎に挑む冒険が始まる。時には、KEKの元機構長の小林誠先生が登場し、ノーベル物理学賞を受賞した「CP対称性の自発的対称性の破れ」の説明やダークマターの話に進むが、はじめのはじめ、KEKのE、「エネルギー」は、非常に大きな命題となっている。

補足 6-1：KEK

現在の正式名称は、「大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構」であるが、古くから呼ばれていた「高エネルギー研究所」「高エネ研」「ケーイーケー」の名称を引き継いでおり、海外でもKEKで通じる。

高エネルギーを用いた素粒子物理学や物質、生命の研究、宇宙の研究などを行う機関であるが、一般向けの科学の啓蒙にも熱心に取り組んでいる。KEKは、日本で最初のインターネットのホームページ（後にページからWeb Siteに発展）を開設したことで知られ、ネットを通じた情報発信に先駆的な機関である。エネルギーは何かというテーマは非常に重要でありこの物語の導入部も長い。

補足 6-2：解析力学のおさらい

高校で習うニュートン力学は、解析的ではなく、ベクトル記述であるため、円運動などの座標変換がかなり面倒である。一方、ラグランジュ力学は解析的であり、ラグランジアンは一般化座標系を用いたスカラー量であるため座標の変換も容易である。

解析力学は、形式が一般化座標記述であり、原理も最小作用の原理が基本であるから、非常にスマートである。ニュートン力学が作られた時にはなかった「エネルギー」の概念も導入されている。

古典力学は解析力学として再公式化され、さらに、電磁気学、相対性理論、量子力学などの法則や数式は、それに対応したラグランジアンで記述される。エネルギーはフジモト博士が記述したように数式で示すことができるようになったが、解析力学はニュートン力学のような直感的な記述ではなく、数学の技法に基づくため高校では習わない。解析力学は、理工系の大学で初めの頃に習うため、使わないと忘れてしまうことも多い。少しだけおさらいしておく。

解析力学のひとつハミルトン力学では、系の運動エネルギー T とポテンシャル

エネルギー V の和、全エネルギーを表す関数としてハミルトニアンを定義する。

$$H(p, q, t) = T + V$$

ここで、 p は一般化運動量、 q 、は一般化座標である。

物理学において、エネルギーを記述する時には、多くの場合、このハミルトニアンが用いられる。

一方、フジモト博士が書き記したラグランジアンは、ハミルトニアンの元になったもの(変換前)で、こちらは、運動エネルギーとポテンシャルの差の形式である。

$$L(q, \dot{q}, t) = T - V$$

こちらも、物理学におけるエネルギーの記述に多く用いられる。

たとえば、モーペルテュイとオイラーが発見した「最小作用の原理」は、「全ての物理法則は、作用積分を最小にするように運動する」という最も重要な指導原理であるが、ここでいう「作用」とは、「ラグランジアンの時間積分」である。

最小作用の原理は物理学における最も基本的な原理であるが、その「作用」の定義は、意外に直感的ではない。

オリジナルのラグランジュ力学は、古典力学を解析的にしたものであるが、その後、電磁気学、相対性理論、量子力学に应用することができるようになり、ラグランジアンは、ラグランジュ力学におけるエネルギーだけでなく、広く物理学のエネルギーを記述する関数となっている。そのため、古典力学から相対論、量子論まで多くの法則、それを記述する方程式が、最小作用の原理とそれぞれの現象に対応するラグランジアンから導出され、物理学は非常に簡潔に表現されるようになった。

ほとんど数式らしい数式の記述がなく、理解が難しかったニュートン力学は解析力学によって使えるものになった。ラグランジュ力学を創始したのはオイラーと並ぶ18世紀最大の数学者、ジョゼフ＝ルイ・ラグランジュ(1736～1813年、イタリア・フランス)であり、ハミルトン力学を創始したのは、四元数を発見した19世紀の数学者、ウィリアム・ローワン・ハミルトン(1805～1865年、アイルランド)である。

ラグランジュ力学とハミルトン力学は、系の持つ多くの性質を表す物理量を、それぞれエネルギーを表現するラグランジアン、ハミルトニアンとしており、エネルギーは力学において極めて重要な概念となっている。

6. 2. 1. 2 エンタルピー

エネルギーという言葉は、様々な分野に現われるが、定義式をみることがほとんどない。しかも、エネルギーを定義するラグランジアンは実際には観測できない物理量であり、値自体には物理的な意味がないため、これを用いてエネルギーの定式化ができて、非常に抽象的であり、エネルギーそのものを理解することは容易ではない。

そこで、力学におけるラグランジアンやハミルトニアンを理解を助けるために、熱力学におけるエネルギーを記述する関数、エンタルピーを考えてみることにする。熱力学におけるエンタルピーは、ガスの科学を考える時に、最も重要な熱力学関数のひとつであり、実際の設計でも多用される。エンタルピーは、ガス屋にとって最もエネルギーを近くに感じる関数である。

エンタルピーの概念は、ヘイケ・カメルリング・オネス（1853～1926年、オランダ）によって導入された。

エンタルピーは、エネルギーを記述するのに用いられるが、エネルギーそのものではなく、ラグランジアンなどと同様、特に物理的な意味を持たない、観測されない量である。

深冷空気分離装置のような化学装置を設計する時に、系の熱エネルギーや圧力エネルギーの代わりにエンタルピーを用いて収支を記述することが多い。条件はあるが、エンタルピーは多くの場合、保存されるため交換熱量などの記述に用いられる。

エンタルピーは、次式で定義される。

$$H = U + pV$$

ここで、 H ：エンタルピー、 U ：内部エネルギー、 p ：圧力、 V ：体積

右辺第1項 U は内部エネルギーであるが、右辺第2項は、特に物理的な意味を持たない。エネルギーと足し算をしているので、この項および左辺のエンタルピーは、エネルギーと次元が等しいことが分かる。定圧条件であれば、右辺第2項を外部への仕事とみなすことができるので、この定義式は、定圧下で系に熱を加えると内部エネルギーと仕事になる、ということを表現している。

熱力学において、系の平衡状態における熱力学の情報を全て持つ示量性状態量を「熱力学ポテンシャル」あるいは「完全な熱力学関数」と呼ぶ。エンタルピーをエントロピー S 、圧力 p 、物質質量 N の3つの独立変数の関数とみると、エンタルピー

ーは、完全な熱力学関数となる。

内部エネルギーは、力学エネルギー(運動エネルギーとポテンシャルエネルギー)に対する系の熱力学な状態を記述する示強性状態量であるが、この場合のエネルギーの定義も容易ではない。一般的には、内部エネルギーの変化量=熱エネルギーの変化量+物質のエネルギーの変化量-仕事、と定義されるが、熱の定義あるいは熱エネルギーの定義そのものが、容易ではないからである。

完全な熱力学関数は、状態量、エントロピー S 、体積 V 、物質質量 N の全てを変数に含み、熱力学の状態を記述する。内部エネルギー U は、変数変換によって完全な熱力学関数エンタルピー H として定義され、内部エネルギーも含めてギブスの自由エネルギー G 、ヘルムホルツの自由エネルギー F などが、適当な変数が選ばれた時に、完全な熱力学関数として定義される。

たとえば、内部エネルギー U の体積 V に関するルジャンドル変換からエンタルピーが定義される。

$$H(S, p, N) = U(S, V(S, p, N), N) + pV(S, p, V)$$

これは、前述の定義式と同じであるが、独立変数の関係、エンタルピーの意味を明示している。

ルジャンドル変換は、関数の変数を変えるために用いられる変換で、数学者のアドリアン=マリ・ルジャンドル(1752年~1833年、フランス)によって見出されたが、ルジャンドルは、解析力学においてラグランジアンからハミルトニアンへの変換に用い、これが最もよく知られるルジャンドル変換の応用例であるが、熱力学の関数の変数変換にも用いられる。

ここに示した内部エネルギーからエンタルピーへの変換($H = U + pV$)の他にも、自由エネルギーへの変換($F = U - TS$)、ギブスの自由エネルギーへの変換($G = H - TS$)などがルジャンドル変換によって導かれる。

なお、自由エネルギーとは、全エネルギーから「束縛エネルギー」(温度を維持するために用いられ、仕事を取り出せないエネルギー)を除いた残りであるが、等温条件の下で仕事として取り出し可能な「自由エネルギー F 」(エネルギー)と等温等圧条件下で仕事として取り出しが可能なエネルギー(着目する仕事のみに使われる正味のエネルギー)の2種類の定義が可能である。前者は、単に自由エネルギーあるいはヘルムホルツの自由エネルギーと呼ばれ、後者はギブスの自由エネルギー G と呼ばれる。

エンタルピーは、内部エネルギーを記述し、計算によって値を求められる熱力学関数であるが、観測できない物理量であり、物理的な意味を持たない。これは、ハミルトニアンが力学エネルギーを記述する関数（あるいは演算子）であるが、観測されず、物理的な意味を持たないのと似ている。

エンタルピーは物理的な意味がないため、計算はできるが、値そのものには意味がない。しかし、エンタルピーの変化量は重要な意味を持っており、熱力学におけるエンタルピーの微分は、他の熱力学状態量と同じように扱われ、非常に重要な値となる。たとえば、定圧変化であれば、エンタルピーの変化は、熱エネルギーの変化と同じ意味を持つ物理量となる。

関数としてのエンタルピーには、独立変数の微分との間に重要な関係があり、たとえば、エンタルピーをエントロピーで偏微分すると温度、圧力で偏微分すると体積、物質量で偏微分すると化学ポテンシャルとなり、示強性状態量が導かれる。内部エネルギーや自由エネルギーなど他の熱力学関数も同様に偏微分が示強性状態量を導く。このような熱力学関数の変換を全て暗記するのは容易ではないが、熱力学記憶図や thermodynamic squareなどを参照すると機械的に利用することができる。

熱力学の状態を表す主要な4つの関数、内部エネルギー、エンタルピー、自由エネルギー、ギブスの自由エネルギーは、変数のルジャンドル変換によって、互いに変換可能な関係にあるが、この中では、実用的には、エンタルピーが最も使いやすく、深冷空気分離装置をはじめ、様々なプロセスにおいて多用される。

膨張弁からガスを放出する時の「断熱自由膨張過程」は、系外との熱の授受のない「等エンタルピー変化」であり、気体のジュール=トムソン効果は、等エンタルピー膨張における現象として定式化された。JT効果が発見されたのは1861年、オネスがエンタルピーを表す記号として「H」が科学論文に初めて登場したのは1909年である。それまでしばしば、熱を表す記号としてHが用いられていたが、これ以降、熱力学では、記号Hはエンタルピーに、記号Qは熱に用いられるのが普通になった。

ジュール=トムソン効果は、発見から50年後に、エンタルピーという関数が発明されて、「等エンタルピー変化」という非常に分かりやすい説明がなされるようになり、ガスのプロセスにおいて様々な場面で、エンタルピーという考え方が使われるようになった。

エンタルピーは、実際に観測される物理量ではなく、作られた関数であるが、ガ

スの取扱いでは、その概念は外せない。熱交換器では、温度、圧力、組成が異なる流体の間で熱エネルギーが交換されるが、実際の熱交換器では、流路内で圧力損失があって圧力が変わり、気体であれば液体よりも圧縮性が大きいので、等圧、等積の変化にならない。

そこで、熱収支には、エネルギーを表現する関数としてエンタルピーが用いられ、エンタルピー収支によって記述され。

温流体が失ったエンタルピーは、冷流体が得たエンタルピーに等しいとおけば熱交換の現象が簡単に記述される。熱交換器と呼ぶが、実際にはエンタルピーが保存されるエンタルピー交換器となっている。

エンタルピーは、気体と液体で連続的に定義することができるため、ガスの液化を取り扱う深冷空気分離装置のようなプロセスでは非常に使い易い。ほとんどの場合、エネルギー収支、熱収支がエンタルピー収支で記述される。

たとえば、飽和蒸気が持つエンタルピーと飽和液体が持つエンタルピーの差は系の蒸発潜熱を表わし、気液二相流であれば、熱力学クォリティをその流体が持つエンタルピーと飽和蒸気のエンタルピー、飽和液体のエンタルピーから定義できる。気体と液体の間の熱交換も、特に圧力や容積の変化を気にせずに、エンタルピーの収支で記述できる。

時間変化が大きい時（非定常状態）の場合は、エンタルピーは空間だけでは保存されないが、定常状態とみなせる場合は保存されるので、非常に取扱いが容易にな

表 6-2-1-エネルギーに関する概念の年表

| 人名 | 生誕年 | 導入された概念 |
|------------|--------|-----------------------------------|
| R デカルト | 1596 年 | 活力 |
| I ニュートン | 1642 年 | ニュートン力学 |
| G ライブニッツ | 1646 年 | 活力 |
| P モーペルテュイ | 1698 年 | 活力論争に決着 |
| L オイラー | 1707 年 | |
| J ダランベール | 1717 年 | |
| J ラグランジュ | 1736 年 | ラグランジュ力学 ラグランジアン L ポテンシャル |
| T・ヤング | 1773 年 | エネルギー |
| GG コリオリ | 1792 年 | 運動エネルギー T |
| WR ハミルトン | 1805 年 | ハミルトン力学 ハミルトニアン H |
| H ヘルムホルツ | 1821 年 | 自由エネルギー F (1882 年) |
| R クラウジウス | 1822 年 | エントロピー S |
| JW ギブズ | 1839 年 | 自由エネルギー G (1873 年) 化学ポテンシャル |
| H オネス | 1853 年 | エンタルピー H (1909 年) |
| A アインシュタイン | 1879 年 | エネルギー・運動量テンソル (1905 年) |

年は概念が提唱された年ではなく提唱者の生誕年。
ヤングがエネルギーという言葉を提唱、概念を導入した時、エネルギーを代表する関数、ラグランジアン (ラグランジュ力学) は既にあった。ヤングは何もない状態からエネルギーを提唱したのではなく、解析力学における概念としては存在していた。

る。

エンタルピーは、変化量が重要であり、値そのものは意味を持たないため、物性値として示す場合の基準点は任意であるということに注意が必要である。特に基準点をどこに置かかということに決まりはないが、標準的な圧力における純物質の飽和液体を基準点にすることが多いようであり、サブクール液体でマイナス、飽和液体でゼロ、気体でプラスに表示される。飽和液体と飽和蒸気のエンタルピー差を尺度にして規格化、気液混合物の状態を表すことも多い。

表 6-2-2 熱力学の3つの自由エネルギーのまとめ ※1

| 記号 | 名称、定義※3 | 提唱年 | 提唱者 | 別名 |
|----------|--|--------|-------------|----------------------|
| <i>F</i> | ギブスの自由エネルギー ※2 $G \equiv U - TS + pV$ | 1873 年 | ウィラード・ギブス | ギブスエネルギー |
| <i>G</i> | ヘルムホルツの自由エネルギー $F \equiv G - pV = U - TS$ | 1882 年 | ヘルマン・ヘルムホルツ | 自由エネルギー |
| <i>H</i> | エンタルピー $H \equiv G + TS = U + pV$ | 1909 年 | ハイキ・オネス | 熱関数※4 オネスの自由エネルギー |

※1 参考：東北大学 エネルギー学講座熱制御工学分野琵琶・兵頭研究室「自由エネルギーの幾何学的性質」

※2 「物体の熱力学的諸性質の曲面による幾何学的表示」と題する論文で、ギブスは自由エネルギーを幾何学的に導入した。

※3 自由エネルギーの定義式は、ギブスが示すように U - V - S 空間における平衡曲線からルジャンドル変換によって求められており、形式的には U に TS と pV を足し引きしたものになっている。

※4 エンタルピーを熱関数 (heat function) と呼ぶことがあり、記号に H を用いるようになった。エンタルピーはオネスが作った造語である。

提唱者のフルネームは以下の通り

Josiah Willard Gibbs (1839-1903 年)

Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (1821~1894 年)

Heike Kamerlingh-Onnes (1853~1926 年)

6. 2. 1. 3 エネルギーの保存と運動量の保存

観測されず、物理的意味を持たないエンタルピーであるが、内部エネルギーの変換形式であるため、空気分離のようなプロセスでは、熱収支の代わりに用いられ、実用的である。内部エネルギー、熱エネルギー、仕事など概念としてつかみにくい物理量が、エンタルピーと言う関数で「扱いやすく」なっている。

ヤングがエネルギーを発明してから、エネルギーの概念は非常に大きく広がり、力学系のエネルギーは、ハミルトニアンやラグランジアンで表現されるようになり、熱力学の分野ではエンタルピーのような関数が利用されるようになった。

しかし、ガス屋が通常取り扱う範囲では、ラグランジアンによるエネルギーの表現では、概念が今ひとつつかみにくい。そこで、古典力学的な表現を用いて、次のようにエネルギーを考えてみてはどうだろうか。

「力」を時間で積分する→「運動量」

「力」を空間で積分する→「エネルギー」

ここで、力の次元： MLT^{-2} 、

運動量の次元： MLT^{-1} 、

エネルギーの次元： ML^2T^{-2} 。

「力 (force)」の形態は、様々であるが、量が実感しやすい。

「運動量 (momentum)」は、それ自体の概念は分かりやすいとは言えないが、式で表すと(質量×速度) $p = mv$ である。物体が衝突などによって相手の運動量を変化させるのが「力積 (impulse)」であり、運動量と力積は同じ次元を持つため、何となくイメージできる。日本語の「運動量」には、物理学の言葉以外に身体のもつスタミナやエネルギーのようなものにも用いられるので注意が必要である。エネルギーと運動量(モーメンタム)は次元が異なる。

力、運動量、エネルギーの3つの物理量のうち、力と運動量は直感的に理解できそうである。力を時間積分したものが運動量、力を空間積分したものがエネルギーであると考えることができる。実体のないエネルギーでも、力や運動量から何となく連想できるような気がする。

「運動量」と「エネルギー」は異なった次元を持つ異なった概念の物理量であるが、いずれも力を起源としているため、かつては活力論争として大きな議論があった。最終的には、新たに、エネルギーの概念が持ち込まれた。

一方、20世紀の科学では、エネルギーと運動量は統一され、質量とエネルギーも等価である。時間と空間は対等なミンコフスキー時空間と定義され、空間と時間を別に取り扱う。力を時間で積分したり、空間で積分したりするは、本質的には正しくない。ミンコフスキー時空を基本的な幾何学とするアインシュタインの特殊相対性理論では、時間と空間は同等であり、運動量とエネルギーは、別々の概念ではなく、ひとつの「エネルギー・運動量テンソル」として表現される。したがって、保存則もエネルギー・運動量テンソルが保存されるため、「運動量保存則」と「エネルギー保存則」は、本質的には同じものを別の方向から観測した結果ということになる。

さらに、20世紀の科学からは、何も無い空間（真空）のエネルギーから物質が生じ（粒子と反粒子が対生成する）、また、物質が消滅してエネルギーに転換することが明らかとなり、エネルギーと質量も等価となった。見たり触れたりすることができる「物質」、動いている物体が示す「運動量」、実体はよく分からないが活力のような「エネルギー」、何も無い「空間」、それまで全く別のものに見えていた物理量は、同じものの別の側面であるということが明らかになった。

したがって、いくつかの物理量が持つと思われている「保存される」という重要な性質は、実際は、単独のものではない。普段、われわれが考えている運動量保存則、質量保存則、エネルギー保存則といったものは、ひとつの法則の部分法則であって、本来は統一的に取り扱わなければならないということが分かる。物理学は、現象をできる限り簡潔に表現することを基本にしているため、保存される物理量がエネルギー、運動量、質量とたくさんあるより、これらをあわせた量がひとつだけ保存されると記述されるのが望ましい。

しかし、保存量をテンソルとして取り扱うのは煩雑である。これらは、実体として非常に分かりにくい概念であり、統一して取り扱うことは、実用的ではない。実学としては、各分野において、条件に応じて各保存則が、切り離されて取り扱われている。工学的には、運動しているときにだけ定義される「運動量」といつでも定義できる「エネルギー」は、別のものとして取り扱われ、諸問題を解く時には、「運動量保存則」と「エネルギー保存則」の両方が成り立つと考え、「運動量収支」と「エネルギー収支」の二つが記述されている。

たとえば、化学工学のような応用分野では、エネルギー保存則が単独で成り立つものとする。熱力学の第一法則（エネルギー保存則）が経験則として成り立つ。通常の熱力学が取り扱う範囲では、エネルギー保存則、質量保存則、運動量保存則はそれぞれが独立して成立すると考えることができる。具体的には、解くべき問題に

応じて、物質収支式（分子の収支、原子の収支、成分の収支、核種の収支など）、熱収支式（エンタルピー収支、内部エネルギー収支、反応エネルギー）、運動量収支などが組み合わされて、現象が記述され、解が得られる。

一方、時間と空間も同等であるから、物理学の現象の記述は、時間に対しても統一されるべきであるが、これも、実用的には、解くべき問題が複雑過ぎないことが重要である。空間軸と時間軸を分けて、時間軸に対して一様であって変化がない状態を「定常状態」として、時間変化のある「非定常状態」と分けて取り扱う方が便利である。時間変化を含まない定常問題の方が、式が簡単で、解法が容易であり、計算精度も高いため深冷空気分離装置のような化学装置のプロセス計算は、定常解を基本設計とするのが普通である。

深冷空気分離装置のような化学装置のプロセス計算では、定常解を基本設計として、運転モードの変更や外乱に対しては、定常解を基本として非定常の問題を記述するダイナミック・シミュレーション（dynamic simulation）が行われる。

6. 2. 1. 2 エネルギーという言葉

エネルギーの概念は簡単ではないが、それでもエネルギーという言葉がいたる所で使われている。

中国語では、エネルギーを「能源」書くが、エネルギーは能力のようなものであって、「仕事をする能力」と理解されている。

エネルギーは、新しい概念であり、日本語に同じ概念の単語がなかったが、中国語のように自国の言葉に翻訳されることもなかったため、外来語がそのまま日本語になった。

エネルギーという言葉を発明したトマス・ヤングは、スコットランド人であるが、日本語のエネルギーは、ドイツ語の「Energie」から来た。カタカナの「エネルギー」が作られ、ドイツ語の「energisch」から日本語の形容詞・副詞「エネルギーシユ」が作られた。

ドイツ語から来たエネルギー、エネルギーシユは既に日本語である。英語のenergy（エナジー）、energetic（エナジエティック）、energies（エナジャイズ）も時折、見かけるようになったが、英語の方は、まだ外国語に聞こえる。

エネルギー以外にもドイツ語から日本語になった言葉は多く、アルバイト、アレルギー、ボンベ、カリウム、ナトリウム、ウラン、アレルギー、ゲノムなど、ドイツ語をそのままカタカナにした借用語や、レントゲンやガウスなどの人名、また酸素や窒素のようにドイツ語を直訳して漢字をあてたもの、などがよく知られている。特に医学用語、元素名、登山用語に非常に多くのドイツ語が日本語になっており、ほとんどの場合、外国語であるという印象がない。その中でも、おそらくエネルギーは、最も深く日本語として定着したドイツ語かも知れない。

エネルギーは、「経済産業省／資源・エネルギー庁」「高エネルギー加速器研究機構」など日本の正式な公的機関の名称にも用いられている。国の行政機関で正式名称にカタカナを使うのは、固有名詞である日本ユネスコ国内委員会と〇〇センターを除くと、「資源・エネルギー庁」と「スポーツ庁」だけである。エネルギーが日本語であることを示している。

エネルギーは、増えることも減ることもなく、作り出すこともできず消滅もしない。エネルギーの実体は分かりにくい、これがエネルギーの本質である。

ところが、社会科学の分野や経済学の分野では、エネルギーが作られたり、蓄えられたりする。物理学の概念から出発したエネルギーは、拡大利用され、様々な

ところで使われている。最近では工学の分野でも、エネルギーの概念が拡大解釈・利用され、もともと分かりにくかった概念が、さらに複雑さを増している。

エネルギーと組み合わせて意味を持つ用語は、熱エネルギー、自由エネルギー、ポテンシャルエネルギー、運動エネルギーなどごく限られているが、非常に多くの単語がエネルギーと組み合わされて、言葉が作られている。

「石油エネルギー」「新エネルギー」「原子力エネルギー」「省エネルギー」などの言葉が作られ、近年は、「クリーンエネルギー」、「再生可能エネルギー」、「枯渇エネルギー」など、中には定義がよく分からないものも増えてきている。

本来は、物理学、自然科学の概念として生まれたエネルギーであるが、社会科学や経済学、一般生活の中に言葉が広がるなかで、その意味は益々分かりにくくなってきている。エネルギーは、エネルギーである。クリーンだとかダーティだといった性質を持たず、本質的には、再生されたり枯渇したりするものではない。

エネルギーを使った言葉の中には、勝手に作られた難解な造語・新語が多く含まれるようになり、学術的にしっかり定義されていないため、何となく分かったような気になっていて、エネルギーの本質を見誤る可能性が増えてきている。

近年、作られた用語に、「創エネ」という言葉がある。エネルギーは創り出せないもので、学術用語ではない。自然科学ではなく経済学の用語である。

この言葉が意味するところは、「何かの資源を使って、これを比較的使えそうなエネルギー形態に変換して利用する」ことである。

水車や風車で動力を作り出したり、太陽光のエネルギーを電力に変換したりすることを「創エネ」と呼ぶ。水や風の運動エネルギーや太陽光の光エネルギーを利用して、力や電力を産み出しているが、これを、エネルギーを創り出すと表現、「創エネ」という。

実際は、発電機（水素→電力、太陽光→電力、風力→電力）やエンジン（水力→動力、化学エネルギー→動力）によるエネルギー形態の変換が行われており、科学的にも工学的にも「エネルギー変換」である。

「電気（エネルギー）を作り出す」（electricity generation）という表現は、以前からあり「発電」と呼ぶが、創電とは言わない。エネルギーを創り出すというのは新語・時事用語である。

太陽光発電設備では、光子が電子に変換され、光のエネルギーが電気エネルギーに変換され、経済誌などでは、これを「エネルギー創出」、「太陽光による創エネ」と呼ぶが、大型の発電所で「電気を作る」時は、創エネとは呼ばず、従来通り発電

のままである。地産地消型の小規模発電や地熱利用、小型ガス発電、小水力発電なども「創エネ」と呼んでいるが、発電と創エネの線引きは、はっきりしない。

生物の世界では、細胞内で物質が合成されることを「産生」と言うが、生物が食物や呼吸から力を作り出すとき「エネルギー産生 (energy production)」という。エネルギーは作ることができないが、エネルギー源になるものから「力」が生み出されたり、エネルギー源となる物質が他の形態に変換されたりする時、「エネルギーが作られる」と表現されることが多い。

「蓄エネルギー、energy storage」とは、すぐに使わないエネルギーを後で使えるように、別の形態のエネルギーとして貯めておくことをいう。これも科学の用語ではないが、工学的には重要な操作であり、電池や揚水発電などの技術が「蓄エネルギー技術」となる。「蓄エネ」と縮められることが多い。

エネルギーは、「貯める」ことはできないので、蓄エネとは、「エネルギー資源の形態を変えて、後から人や機械が使えるようにするエネルギー資源の変換技術」である。したがって、蓄エネルギーには、貯める技術と払い出す技術の両方の要素が含まれる。

蓄電池であれば、電気化学的に利用できる化学物質、蓄熱器では高温あるいは低温のエクセルギー（周囲と温度が異なる熱エネルギー）、揚水発電所であれば地球の重力を利用したポテンシャルエネルギーに変換し、必要な時に、これを取り出す技術が「蓄エネ」である。貯めるだけではだめで、取り出すことが重要である。

運輸機器などで、一旦、運動エネルギーに変換されたものを減速時に別のエネルギー形態として回収、再利用することを特に「エネルギー回生 regeneration」と呼ぶ。電車や自動車の回生ブレーキがよく知られており、運動エネルギーを電気エネルギーに変換することが多いが、回生ブレーキのエネルギーをフライホイールや圧縮空気に蓄えることも行われており、回生とは、必ずしも電力回生だけを意味するものではない。

深冷空気分離装置では、プロセスガスを膨張タービンで膨張させて外部に仕事をさせて、寒冷（マイナスのエクセルギー）を発生させているが、この時、外部に汲み出されるエネルギー（仕事）は、同軸の圧縮機を回して他のプロセスガスを圧縮するエネルギーとして（同時に）回生されている。昔は、膨張タービンで発電機を回して発電制動を行ってエネルギー回生（電力回生）を行うこともあったが、現在は、設備コストや効率を考えると圧縮エネルギーで回生することが多い。

なお、深冷空気分離装置では、regeneration という言葉は、水／炭酸ガスを除去する前処理装置の再生を意味する。かつて主流であった前処理に熱交換を利用した

方式では、前処理装置のことを regenerator と呼んでいた。これは水/炭酸ガスを除去した装置が加熱ガスによって再生されるためであるが、日本語に直訳すると再生器となり、意味が通らないので、通常は「蓄冷器」と呼んでいる。再生された蓄冷材が、原料空気を冷却し、水/炭酸ガスを再び昇華除去できるようになるためこのように呼ぶ。現在は、吸着方式が主流であるため蓄冷器は用いられていない。

「創エネ」、「蓄エネ」、「エネルギー回生」は、いずれもエネルギー変換を別の言葉で表現したものであるが、「省エネ」はこれらの変換技術とはやや趣が異なる。

省エネルギー（省エネ）は、日本独特の言葉であって、直接これに相当する英語はない。日本では、「エネルギーの効率的利用」（efficient energy use）と「エネルギーの消費削減（節約）」（energy conservation）を合わせて「省エネ」と呼ぶ。さらに「省エネ」には、 unnecessary 消費をできるだけ押さえる社会的行動（energy save）も含まれるため、エコロジーにも近い。

日本語の「省エネ」を表わすキーワードは「高効率」+「削減」+「エコロジー」である。

なお、"energy conservation"は、「エネルギー消費削減」"conservation of energy"は「エネルギー保存（則）」である。英語が非常によく似ているが、意味が全く異なるので注意が必要である。

欧米には、省エネの概念がないが、米ロッキーマウンテン研究所が「電気エネルギーの高効率利用や電力消費削減は、発電に匹敵する」として提唱した「ネガワット（negawatt power）」という概念が現れており（1989年）、ネガワット発電所（節電所）やネガワット取引という言葉も生まれている。ネガワットの発想は、日本の「省エネ（消費削減+効率化）」に近い。

創エネ、蓄エネ、エネルギー回生などエネルギー変換を別の言葉で表し、省エネという日本独特の活動やネガワットなど、エネルギーに関わる新語・造語が増えているが、巷にあふれている「エネルギー」の中には、エネルギーという物理の概念から派生した、何となくこれに近い言葉だけでなく、「エネルギー資源」あるいは「エネルギーの消費形態」といった、社会科学的なエネルギーも増えている。

「エネルギー資源」とは、安価で入手しやすいエネルギー変換の源（ソース）を指しており、石炭や石油のような地下資源である。エネルギーは作れないがなくなりもしないため「エネルギーの枯渇」というのは、このような資源が入手しにくくなることを意味している。

地球や太陽も永遠のものではないが、人類の文明の尺度で考えると、これらの

資源は非常に大きいため、「無尽蔵のエネルギー」と呼ばれ、ある時期にのみ生産され、今後生産されないと思われる石炭のような資源は「枯渇性エネルギー資源」と呼ばれる。

IEA（世界エネルギー機関）は、エネルギーと人間社会の関係を「安価で安定した大量のエネルギー源がなければ、現代文明は一日として維持することが出来ない」と評価しており、エネルギーとは、資源であり、重要なのは、その供給量と価格であると考えられている。社会科学や政治経済の場面における「エネルギー」とは、「使えるエネルギー資源」のことであって、物理の概念として導入された本来のエネルギーとは全く異なる概念となっている。

最近では、再生可能エネルギー（renewable energy、RE）という言葉が作られている。これは「消費する以上の速度で自然に再生するエネルギー源」という意味である。

エネルギーは、形態が変換することはあっても消費されたり、再生されたりはしないので、再生可能とは、「エネルギーを産み出す資源が再生される」と読み替えないといけないが、資源が再生可能かどうかは、定性的に決まるのではなく、定量的に考えなければならず、実際の「再生可能」を明らかにするのは、容易ではない。エネルギー工学のような学問体系が必要である。

通常は、現在の地球上の環境で、今後の人類の文明が消費していても、「自然に」補給されると考えられるものを「再生可能エネルギー（資源）」と呼ぶ。したがって、消費速度と再生速度を将来に渡って検証して「持続可能」を議論しなければ、再生可能かどうかは分からない。再生可能という曖昧な言葉よりも、現実的な持続可能性の方が重要であるが、定量的な議論は簡単ではない。

再生可能エネルギーの具体例としては、太陽光、太陽熱、水力、風力、地熱、波力、温度差、バイオマスなどが挙げられている。太陽や惑星の寿命は、有限であるが、人類の短い歴史の中では、議論することに意味がないので、これらのエネルギー資源は「無尽蔵（枯渇しない）」である。

無尽蔵のエネルギー源を利用する時にも、変換のためのエネルギーを必要とする。たとえば風力発電所や太陽光発電所の発電設備や送電線などの建設や維持には、それなりのエネルギーを消費する。利用可能なエネルギーが必要とされるエネルギーよりも小さければ、資源の相手が無尽蔵であっても持続可能ではなく、再生可能とは呼べない。

1950年代に初めて光起電力（PV）から電力が取り出せるようになった時、効率

があまりにも低かったため、通常の発電には使うことができなかった。近年、技術が大幅に進歩し、実質的な発電が可能となってきたことがよく知られるようになったが、本当の再生可能となるためには、設備の耐用年数、総合的な効率、生産から廃棄までのトータルのエネルギー消費、再生可能エネルギーのバックアップのために付加的に必要となるエネルギー消費など、総合的な検証が重要である。太陽光は、それこそ天の恵みであるから、無尽蔵であり再生可能にも見えるが、エネルギー経済としての再生可能性は常に満たされている訳ではない。特に太陽光のような「自然エネルギー」は、安定性に大きな課題があり、PVの効率や最大の能力だけでは議論できない複雑な問題がある。

石炭は、石炭紀の石炭層にしか存在しないため、「枯渇性資源」とされ化石資源、化石燃料とされる。石炭は、太陽光や太陽熱のエネルギーが作り出した植物が石炭化したものであるから、太陽が無尽蔵である限り、石炭も無尽蔵の資源となるはずである。しかし、現在の、地球環境は、枯れた植物を分解する微生物が存在するため、石炭紀の地球の環境とは大きく異なり、植物から新たな化石資源が作られる可能性がない。石炭の場合は、エネルギー資源の生産速度と消費速度の関係というよりも、今後は、全く生産されない枯渇性資源と考えるのが普通である。地球の地下のことが全て分かっている訳でもなく、石炭の埋蔵量が全て把握されている訳でもないが、石炭層はそれほど多くはないと思われる。

これに対して、石油と天然ガスの多くが、未だに生成機構が解明されておらず、有機成因説と無機成因説がある。消費速度は予測できるが、生成速度が推算できていないため、現在は確認埋蔵量と消費量の関係から可採年数が推定されている。石炭は、成因が科学的に明らかであり、ほぼ埋蔵地層が決まっているのに対して、多くの油田、ガス田が化石層とは無関係であり、成因と埋蔵地層については分からないことが多すぎるのである。

石油の確認埋蔵量は年々増えており、実際はどれだけあるのかも分かっていない。石油の成因が有機起源であっても無機起源であっても、あるいは生成速度がゼロであったとしても、もし埋蔵量が人類の文明の規模をはるかに超えるものであれば、枯渇性資源とはならないが、成因も埋蔵量も分からないことが多いということから、無尽蔵なのか枯渇性なのか、未だに判断ができない状態である。現在、コスト競争力の高い油田やガス田は、一部の「資源国」に限定されるため、石油・天然ガスを「枯渇性資源」として扱う国・機関が多いが、科学的には未解決部分である。

成因は不明ながら、国際的なエネルギー機関や各国の法律では、石油・天然ガス

は、いつ枯渇するかは書かれていないが、少なくとも再生可能エネルギーとはみなされていない。日本では、科学的な結論とは無関係に石油・天然ガスを「化石資源」「化石燃料」と呼ぶことが多いが、その根拠はよく分かっていない。

エネルギーという言葉は、物理学の概念として作られたが、20世紀後半からは、世界経済や文明を表わす重要な言葉になっている。

日本のように「エネルギー資源」の大半を輸入している国では、「エネルギーのベスト・ミックス」という言葉が使われ、コスト、入手の安定性、環境負荷、エネルギーの質（出力、安定性、安全性）などを考慮して、資源の組合せが議論されている。この構成を変える時は、「代替エネルギー」という言葉も使われている。過去に起こった石油ショック（オイルショック）は、日本だけの言葉であり、世界的には「エネルギー危機」と呼ばれており、エネルギー資源の国際的な需給に大きな問題が生じる時、世界経済は大混乱に陥る。

補足 6-3：再生可能エネルギーと再生エネルギー

深冷空気分離装置などの化学プラントでは、機器を再利用する時に消費されるエネルギーを「再生エネルギー」と呼んでいる。これは装置の再生に必要なエネルギー消費という意味である。

深冷空気分離装置では、原料空気中の水分とCO₂を除去するために吸着装置を使用している（前処理）。水やCO₂を吸着した吸着材を再使用する時に、これらの吸着ガスを脱着するために熱エネルギーや再生用ガスを消費しており、これを再生エネルギーと呼んでいる。

「再生可能エネルギー」と「再生エネルギー」は似たような用語であるが、前者は、「自然に再生されるエネルギー資源」、後者は「再生のために消費されるエネルギー」という意味である。法律の正式名称はいつも長いので、「電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法」は「再エネ特措法」と呼び、「再生可能エネルギー発電促進賦課金」は「再エネ賦課金」と呼ぶ。

最近の報道でみかける「再生エネルギー」という短縮形は「再生可能エネルギー」を縮めているようであるが、全く意味が異なる言葉が使われている。勝手な短縮の方法によって意味が変わってしまっているので、「再エネ」と縮める方がまだ間違いがない。

6. 2. 2 エネルギー資源の基準

カナダのエネルギー学者ピーター・テルツァキアン(Peter Tertzakian, 1961年～)は、エネルギーを資源と考えた時、その資源は9つの基準で評価されるということを提唱している。①汎用性②量的柔軟性③貯蔵性と運搬性④コピキタス性⑤エネルギー密度⑥出力密度⑦出力安定性⑧環境負荷⑨供給安全保障、である。

価格・コストは、エネルギー資源本来の性質ではなく、状況によって大きく変わるが、資源選択の要素としては9つの基準と同じく重要であるとされるので、エネルギー資源の選択の条件は10あるということになる。

現実的に9つの基準を完全に満たす夢のエネルギー資源はひとつもなく、各資源には、必ず欠点があるため、実際はいくつかの資源が組み合わせられて利用されている。

表6-2-1 各エネルギー源のメリット・デメリット(9つの基準の評価)

| 基準 | 基準の意味 | 石炭 | 石油 | 天然ガス | 原子力 | 水力 | 風力 |
|----------|---------------------|----|----|------|-----|----|----|
| ①汎用性 | どんな用途でも利用できるか | × | ○ | △ | × | × | × |
| ②量的柔軟性 | 微小出力、巨大出力に自在に対応できるか | × | ○ | ○ | × | △ | × |
| ③貯蔵性と運搬性 | 貯蔵と運搬に手間や費用がかからないか | ○ | ○ | △ | △ | △ | × |
| ④コピキタス性 | 常に利用可能か | △ | ○ | △ | × | × | × |
| ⑤エネルギー密度 | 面積、体積、重量あたりのエネルギー量 | ○ | ○ | ○ | ○ | × | × |
| ⑥出力密度 | 時間当たりのエネルギー量は十分か | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | × |
| ⑦出力安定性 | 出力はふらつかないか | ○ | ○ | ○ | ○ | △ | × |
| ⑧環境負荷 | 利用に伴う環境汚染、環境破壊はどうか | × | △ | △ | △ | △ | ○ |
| ⑨供給安全保障 | 安定供給に関する政治的リスクはどうか | △ | × | △ | △ | ○ | ○ |

表中の9基準はP テルツァキアンが提唱した。各資源の評価は主に石井彰氏(JOGMEC)による。

表は、各エネルギー資源を JOGMEC の石井彰氏が9つの基準で評価した例である。評価は評価者によって異なり、条件によって変わるので、ここに示されたものは、広く認められた標準的な評価であって絶対的なものではない。

たとえば、石炭の環境負荷は「×」になっているが、使用される技術レベルや燃料に大きく依存する。日本のように石炭火力発電に高度な技術が投入されている場合は、他の資源に比べても環境汚染は小さくなく、ドイツのような褐炭を用いた石炭火力発電の場合は、極端に環境負荷が高くなるため、石炭＝環境負荷が高い、とは一概には決められない。

風力の環境負荷は最も小さく評価されているが、建設場所によっては、公害問題や景観問題は存在し、反対運動もあるので、評価者によって相対評価は異なる。

この評価表の「○」の数を見ると、石油が最も優れているエネルギー資源であるが、安定供給に関する政治リスクは非常に大きいため、○の数だけでは選択できない。

なお、ここに示されるのは「エネルギー資源」であり「一次エネルギー」であるから、水素や電池などの「二次エネルギー」（貯蔵・輸送手段）は対象となっていない。たとえば、自動車の動力源には、ガソリン（または軽油）、水素、電気の3つが候補になっているが、これらは一次エネルギーの利用ではなく二次エネルギーによる評価となる。

ガソリンや軽油は、石油から作られるため、一次エネルギーと二次エネルギーの違いがそれほど小さくなくイメージしやすいが、水素の場合は、様々な一次エネルギーがあり、現在は、水素の製造、精製・輸送（圧縮）に大きなエネルギー消費・環境負荷が伴うため、消費だけを考えることはできない。

水素自動車や電気自動車は発電時（使用時）には、CO₂や有害排気ガスを出さないが、水素や電気の生成、送電・輸送時、充電・充填時に消費されるエネルギー資源と環境負荷を総合的に評価しなければならない。電気の場合は、使用時の環境負荷は低いが、発電方式は様々であり、発電・送電などに伴う環境負荷の評価が非常に重要である。

時折、火力発電や原子力発電と水素エネルギーを対比するような混乱もみられるが、水素エネルギーは、電池などと同じ二次エネルギー、エネルギーの輸送形態であるから、一次エネルギーと同列に議論することができない。テルツァキアンが示した表には、二次エネルギーが含まれていない。

6. 2. 3 エネルギー資源と文明

人類の文明の歴史、特に人口の推移はエネルギー資源の変遷と深く関わっている。石井彰氏（JOGMEC、早稲田大学）は、著書「エネルギー論争の言点－天然ガスと分散化が日本を救う NHK 出版新書」でエネルギー資源と文明について次のように説明している。（自分なりの理解でかなり縮めたが、参考になる点が多いので、少し長く引用する）

①再生可能エネルギー時代：

狩猟採取時代：1km²の面積で0.1～1人が生存可能とされ、縄文時代の日本の人口は30万人と推定される。世界人口は最大1,000万人ほどであり、人口増加率がほぼゼロの時代が長く続いた。

農業革命（1回目の人口爆発）：紀元前8千年頃から農耕が起り、紀元までの8千年間に人口は3億人に達した。

初期の粗放農業でも、狩猟採取に比べると単位面積当たり養える人口は100倍以上になった。しかし、一人当りに使えるエネルギーは大幅に減少したため生活レベルは大きく低下し、人口は30倍の増大にとどまったと思われる。農業革命後、産業革命の前までに人口は6億人ほどになったが、この間の増加率は年間0.03%であり、人口増加はほぼ停滞した。

狩猟時代から農業革命を経て産業革命の前までの1万年間は、再生可能エネルギー時代であり、「人口転換論」では、「多産多死社会」（出生率は高いが人口が増えない社会）とされる。

②石炭時代：（18世紀、二度目の人口爆発）

18世紀半ばから、産業革命が起り、200年間で世界の人口は100倍になった。技術の進歩と工業化、暖衣飽食、移動手段の拡大、公衆衛生の向上により、世界は、「多産多死社会」から「多産少死社会」へと変わっていった（出生率は変化しなかったが、死亡率の減少が続いた）。

産業革命が始まった当初のエネルギー資源は、再生可能エネルギーであった。

しかし、欧州では、製鉄、窯業、レンガ、暖房、調理などに使用される薪炭（しんたん、薪と木炭）の大量消費（1億トン/年）によって、1万km²/年の森林が消費されていった。それ以前から建設や造船にも大きな木材需要があったため、薪炭の価格が高騰、資源枯渇も進んだ。

石炭・コークスを使った製鉄は、4世紀頃には中国で発明されていたが、欧州では長く木炭が使われていたため、産業革命は、森林枯渇を招き、持続不可能と思われた。

しかし、産業革命発祥の国、英国には、石炭が大量に埋蔵されており、これが採掘されコークス製鉄法が普及することによって状況は一変し、森林の消滅は回避された。

18世紀末には、ワットの蒸気機関が発明され、産業革命は、石炭文明として持続可能となった。

英国に続いて、ベルギー、フランス、米国（1776年にアメリカ合衆国が独立）、ロシアへ産業革命が広まり、人口爆発が起こった。

日本には、6世紀頃にインドや中国から伝わった「たたら製鉄」（和鋼）があったが、砂鉄を原料とするこの製法も大量の森林資源を必要としたため、大きな鉄文明とはならなかった。日本で鉄鉱石を原料とする近代的な製鉄が興ったのは19世紀中盤（江戸末期、1858年）以降である。

③石油時代：20世紀

20世紀初頭に、米国、中東、インドネシアで石油生産が開始され、第二次世界大戦後、中東に大規模油田が発見され、本格的な石油時代が始まった。その後、原子力と天然ガスが実用化された。

日本は、産炭国であり、第二次世界大戦からの復興も石炭中心であったが、1960年代に石炭から石油へのエネルギー転換が起こり、国内の石炭生産は消滅へ向かった。

1970年代に、世界的な資源枯渇問題が議論されるようになり、2度のオイルショックを経て、石炭が見直されるようになったが、日本の国産石炭産業は復活しなかった。

1940～1960年代に緑の革命が起こり、高収量品種、化学肥料の大量投入により穀物の生産性が大きく向上した。

「多産少死社会」が続き、人口は増加。世界人口は、1900年には16億人、1950年には25億人、2000年には60億人を越えた。世界的には、多産少死時代であるが、一部の先進国では、再び人口転換が起こり、「少産少死時代」に入った。

いくつかの国では出生率の低下が著しく、韓国、台湾、香港、シンガポールでは1960年代より、南欧では1970年代より、出生率が低下している。

少子化による人口減は、台湾、韓国などいくつかの国では、かなり急速に進んでおり、イタリア、ドイツ、日本でも進行している。

ただし、全ての先進国で少子化が継続しているのではなく、フランス、英国、スウェーデンなどでは、20世紀末に出生率が回復、米国、ロシアの人口はほぼ横ばいとなっている。

----- (↑ここまで、主に石井彰氏の解説の要旨)

④多彩なエネルギー時代：21世紀

次々に発見される大規模油田、ガス田、シェール革命や重質油などの非在来型資源の活用により、20世紀末にはエネルギー資源の枯渇懸念は消滅した。

様々な議論はあるものの、少なくとも石炭、石油、天然ガスの枯渇は喫緊の課題ではなくなった。2000年頃よりは、枯渇懸念ではなく、急速な経済発展に伴う環境問題や持続可能性の議論が大きくなった。

全世界的には、人口増加は、さらに進んでおり、2011年に人口は70億人を突破、2050年には90億人に達すると予想されている。地球温暖化による気候変動、食糧不足、水資源不足、環境問題が深刻化しつつあり、文明の持続可能性が大きな課題となっている。

図は、IIASA (International Institute for Applied System Analysis、国際応用システム分析研究所、日本委員会委員長は茅陽一)の学会で、米国の研究者が示した、米国の一次エネルギーの変遷である。

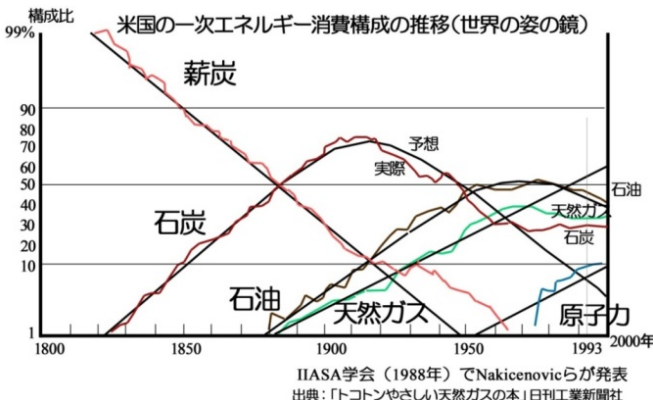


図 6-2-1 米国の一次エネルギーの変遷

薄いシグザグの線が実際の値、濃い滑らかな線が研究者らの推定などである。縦軸は絶対値ではなく、エネルギーの構成比率である。1800年以降、薪→石炭→

石油・天然ガスとエネルギー源が大きく変遷してきたが、完全に入れ替わっているのではない。発表時（1988年）の予想では、石炭が減少して天然ガスに置き換わっているが、実際は、石炭・石油・天然ガス・原子力が混在した状態である。

補足6-4：国際エネルギー機関（International Energy Agency、IEA）

第1次石油危機を契機に米国主導で石油供給危機回避を目的として1974年に設立された安価・クリーンなエネルギーを提供するための諮問機関。現在の主目的は、石油に限定されず、エネルギー政策立案、エネルギー安全保障、経済発展と環境保護である。

具体的な活動は、①石油・ガス供給途絶等の緊急時への準備・対応、市場分析②中長期の需給見通し③エネルギー源多様化④電力セキュリティ⑤エネルギー技術・開発協力、⑥省エネルギーの研究・普及、⑦加盟国のエネルギー政策の相互審査⑧非加盟国との協力である。加盟条件は①OECD加盟国であること②石油純輸入量の90日分を備蓄していること。米国、欧州各国、日本、韓国など現在28ヶ国が加盟。大国としては中国、インド、ロシア、ブラジルなどのOECD非加盟国が加盟していない。意見の対立から2009年に国際再生可能エネルギー機関（IRENA加盟72ヶ国）が生まれた。

エネルギー・ミックスは、国や地域によってそれぞれ特徴があるが、ここに示した米国の事例がおおよそ世界のエネルギー資源の潮流を表わしている。

次の表に、石井彰氏の資料を参考にエネルギー源と文明の変遷をまとめる。生物が獲得できるエネルギーが食料エネルギーに足りないと、種は絶滅するが、人ひとりが獲得できるエネルギーが3倍ほどであった狩猟時代は、人口が維持された。農業革命、産業革命を通じて、エネルギー生産が効率化され、余剰人口（食糧生産に関わらない人口）によって科学技術が発展し、人口爆発が進んでいるのが現代である。

表 6-2-2 エネルギー源と文明の変遷

| 時代 | 食料以外のエネルギー源 | エネルギーの利用形態 | 生産物 | 人口 | 文明の内容 |
|----------|--------------------------|-----------------|-----------------|------|---|
| 狩猟採取時代 | 薪 | 焚火 | 料理 | ～千万人 | 食料エネルギーの3倍。 ヒト一人は一人しか養えないため人口は増えない。 180万年前～ |
| 初期粗放農業時代 | 薪、炭、蓄糞 | かまど | 土器、青銅器、レンガ | ～3億人 | 定住農業により食料生産が数倍～数十倍になる。 1万年前～2000年前 |
| 伝統農業時代 | 薪、炭、水車、風車、牛馬(牧草) | かまど、馬車、鋤 | 陶器、鉄器、粉製品 | ～6億人 | 人間の労働を牛馬や機械が行うようになり、食料生産を行わない余剰人口が生まれた。～17世紀 |
| 産業革命時代 | 石炭 | 蒸気機関、鉄道、汽船、ストーブ | 鉄鋼、繊維、ガラス、セメント | 16億人 | 石炭の利用によってエネルギー産出/投入効率が桁違いに向上した 18～19世紀 |
| 20世紀 | 石油、石炭、天然ガス、水力発電、原子力 | 内燃機関、電気、自動車、航空機 | 鉄鋼、アルミ、化学品、電気機器 | 60億人 | 余剰人口による生産活動が高度化し、世界規模で市場交換がおこる |
| 21世紀 | 石油、石炭、天然ガス、水力発電、原子力、風力発電 | | | 70億人 | |