

【寄稿】

ごみと持続性

燃やす、埋めるは持続的か（上）



東京都立大学
名誉教授 教授

広瀬 立成

Hirose Tachishige

■一般エンジンの仕組み

日本は焼却大国である。毎年、家庭から出る約5000万tのごみは、ほとんどが燃やされている。ごみを燃やすことによって町の美化が進められていくというが、果たしてそれは、大きな犠牲の上に築かれた、一時しのぎの楼閣ではないだろうか。

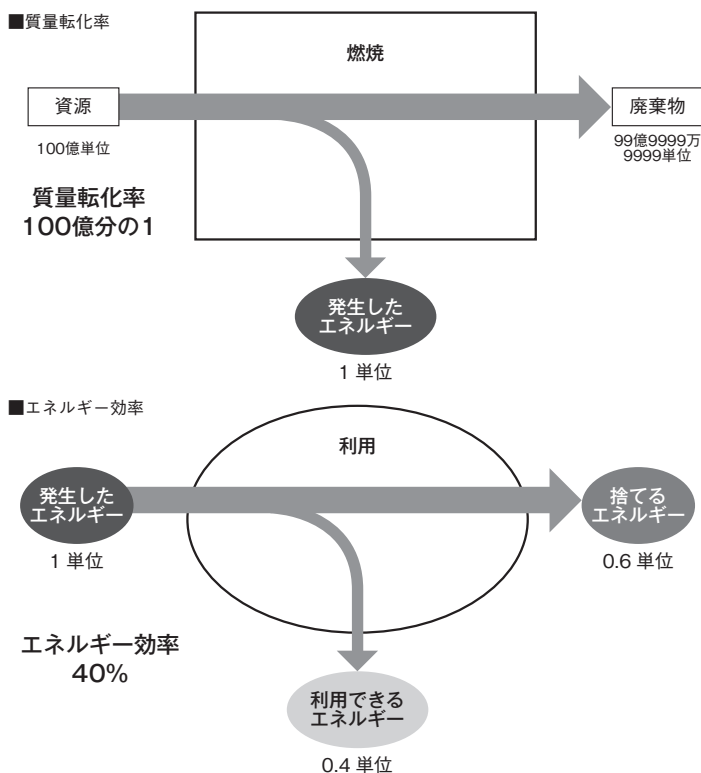
「燃やす、埋める」というわが国のごみ政策は、「化石燃料や核燃料を燃やしてエネルギーをとりだす」という現代社会のエネルギー政策と軌道を一にする。つまり、いずれも「燃やす」という基本的なしくみに

変わりはない。

ここでは、資源の燃焼に科学の光をあて、持続性との関係を考えてみたい。まずはじめに、複雑な物質の流れを見通しよくするために、燃焼のしくみを「エンジン」と考えることにしよう。このようなモデルを想定することによって、ごみ問題はもとより、火力発電、原子力発電、さまざまな生産活動、さらに生命活動などに共通した課題が浮かびあがってくる。

ここでは、特別なエンジンを想定するのではなく、活動の一般的なしくみを解明するためのモデルを考え

図1 質量転化率とエネルギー効率



るのだから、これを「一般エンジン」と呼ぶことにする（図1参照）。

■質量転化率とは

一般エンジンは、「資源を取りこみ、エネルギーを生産し、廃棄物を放出する」という一般的なしくみを備えている。ここで重要なことは、資源は燃焼によって、その質量の一

部をエネルギーに転化し、残りを廃棄物として、まわりの環境に放出していることである。資源の質量がエネルギーに転化する割合を「質量転化率」と呼ぶことにする。

質量転化率を正確に割り出すためには、「質量とエネルギーの等価性」という、アインシュタインの特殊相対性理論を用いなければならない。質量m、エネルギーをE、光の速度

をCとしたとき、次の関係が成り立つ。

$$E \parallel mc^2$$

これは、「世界一重要で、世界一簡単な関係式」と言われている。この式から分かることは、ごみを燃やして熱エネルギーを取り出したり、化石燃料を燃やしてエネルギーを生産する場合はすべて、もとの資源の質量がmだけ減少して、エネルギーEに転化しているということだ。

燃焼とは、炭素原子Cが酸素分子O₂と結合して、炭酸ガス(CO₂)を生成すること。このとき、炭素原子1gから、約8キロカロリーの熱が出る。この熱エネルギーを、E_熱を用いて質量に変換すれば、熱エネルギーに転化した質量を求めることができる。詳しい計算は、図2を見ていただきたい。

この計算から、2つの重要な事実がわかる。

① 質量転化率は、100億分の1で、驚くほど小さい。

② 資源のほとんどは、環境に放出され、温室効果がスなどとして蓄積されていく。

ここでは触れないが、原子力発電(核分裂)の質量転化率は約1000分の1で、燃焼に比べれば10

00万倍も大きさが、それでも1000単位の資源のうち、999単位は環境に捨てなければならぬのだ。しかも、危険極まりなり放射能を含んだごみとして。

現在、人類が直面している最大の課題は、いかにして持続社会を創造するかということだが、その実現は、一般エンジンがいつまでも動き続ける仕組みを見つけることにほかならない。

私たちはとかく一般エンジンの入口に注目し、出口の役割を忘れがちだ。入口は資源を取りこむ役割をもち、その資源はエネルギーを生産し、さまざまな活動を引き起こすという期待があるからだろうか。けれども、出口は入口に劣らず重要である。例えば、自動車のエンジンでも排気ガスの出口をふさいでしまつたら、とたんにエンジンは停止する。むしろ、出口からいかにうまく廃気するかが、エンジンの性能を左右するといっても過言ではない。人間でも、便秘は大変苦しいし、腎臓の機能が損なわれたりすると、命取りになりかねない。

出口がいかに重要であるかについて、2011年3月11日の福島第一原発の事故で、私たちはきわめて厳

しい体験をした。原子力発電を一般エンジンのしくみに照らして考えてみると、入口からは、ウラン燃料が取りこまれ、出口からは、危険な放射能のごみ「高レベル放射性物質」が廃出される。それは、匂いも味もなく、見ることもできないという幽霊のような存在だが、そのくせ、人間にとつて、きわめて強い毒性をもつのだ。

日本では、原発がエネルギー政策において重要な役割を担うという前提のもとに、私たちは、長年、原子力エンジンの出口には目もくれないで、しゃにむにエネルギー生産を追い求めてきた。そしていまになって、危険な放射能ごみ(高レベル放射性物質)の捨て場所がないことがはっきりしてきて、あわてふためくというありさまだ。

一般エンジンは、ごみのない活動はありえないこと、したがって、ごみ問題は、それを単に厄介者として人間生活から遠ざけるという一時しのぎの問題ではないことを示している。出口を軽視するというこれまでの私たちの行為が、ものごとを正しく把握していないことに警鐘を鳴らしている。

■質量転化率とエネルギー問題

たしかに、質量転化率100億分の1は、あまりにも微少で、日常感覚では捉えにくいかもしれない。しかし、この点にこそ、今日のエネルギー問題考えるうえで見過ごすことのできない2つの重要な課題がひそんでいる。

第1は、もとの物質(資源としての石油)まで立ち返らないで、燃やした後のエネルギーだけを問題にしていること。たしかに、新聞では石油価格の変動などが神経質に報道されるが、私たちの生活が「質量転化率100億分の1」という細い糸にぶら下がって成り立っていることは理解されていない。つまり人々が、100億分の1のエネルギーをいかに効率よく使うかだけを考えていることが問題なのだ。

けれども、資源の枯渇が現実問題になってきている現在、「まずエネルギーありき」では、持続性の本質を見失ってしまう。これからの地球環境がいかにあるべきかを考えるうえで、一般エンジンの全体に目を向け、入口から取りこむ資源までさかのぼって考え直す必要があるのだ。

第2は、一般エンジンの出口が無

視されてきたこと。もっともこの点は、私たち科学者が出口の重要性を強調しなかったことにも原因があるのだが。そこで、出口に目を向けて燃焼過程を考えてみると、さらに重要で、シヨッキングな事実が明らかになる。つまり、一般エンジンに100億単位の資源（石油）を投入すると、そのうちの1単位だけがエネルギーの発生に使われ、残りの99億9999万9999単位は、ごみとして廃棄されているのだ。これは石油ばかりでなく、ごみを含むあらゆる燃焼過程にあてはまる一般的な法則である。

私がごみ問題を議論するとき、「燃やしたごみは決して消えてなくなるのではなく、そのほとんどが温室効果ガスなどになって大気中に蓄積される。それは持続性を破壊することになる。だから、ごみは減らすべし」という趣旨のことを、声を大にして主張しているのも、「質量とエネルギーが、たがいに転化する」という動かしがたい自然法則を基礎にしているからだ。

いまかりに、あの大きな東京ドームに、石油が詰められたと想定してみよう。5万5000人が収容できる巨大なドームの容積は、124万

m³あり、石油の比重を0・9とすると、112万tの石油が詰められることになる。ちよつと物騒な話だが、このドームが大火災をおこし、そこに詰まっている石油が全部燃えたとすると、112万tの100億分の1の質量が失われて熱エネルギーになる。これはおよそ100gだが、これ以外のほとんどの質量は煙に化けて大気中に拡散することになる。

東京ドームの火災などというありえない事件を想定したが、火力発電所では、毎日さらに大量の石油を燃やし、その熱で電気がつくられているのだ。ちなみに、2005年度の日本の石油消費量は2億8000万klである。キロリットルは立方メートルに相当するので、日本人は、1年間に2億8000万m³の石油を消費することになる。これを東京ドームの容積とくらべると、2億8000万÷124万=226となる。つまり日本人は、1年間に、東京ドーム200個分を越す石油を燃やしているのだ。世界の石油消費量は、日本の20倍だから、年間ドーム4000個分、1日当たりドーム10個分を越す石油が燃やされていることになる。このような莫大な量の廃棄ガスが利用価値のないごみとして、たえ

ず大気中に蓄積されていくのでは、いくら地球が広いとはいえ温暖化や大気汚染が問題になるのは当たり前である。

石油とは、炭化水素（CH）、窒素（N）、酸素（O）、硫黄（S）で構成されている油のこと。それを燃やすのは、これらの物質が酸素と結合することで、酸化とよぶ。石油の主成分である炭化水素を、炭素（C）と水素（H）に分解した上で、石油に含まれる元素の割合は、炭素8、水素1、酸素0・4、窒素0・1、硫黄0・5となる。

炭素は、温室効果ガス、二酸化炭素として温暖化を進めることになり、また窒素や硫黄の酸化物は、生物にとって有害だ。今では大部改善されたが、光化学スモッグは、排気ガスなどに含まれる窒素酸化物が日光に含まれる紫外線の影響で光化学反応をおこして発生したもの。日本の発生件数は1970年代をピークに減少傾向にあるが、目がチカチカしたり、喉の痛み、咳などを発症する。石油の大量消費による資源の枯渇を心配する以前に、排気ガスによる大気汚染が問題になる。

■エネルギー効率の罠

ここで、「質量転化率」と混同されやすい「エネルギー効率」の意味を考えてみよう。

一般にエネルギー効率は、「投入したエネルギーに対して回収（利用）できるエネルギーとの比」として説明されている。そこでこのことの意味を、火力発電を例にとり、具体的に考えてみる。

火力発電では、まず石油を燃やして熱エネルギーを発生する。これまでに、たびたび触れてきたように、このとき石油の質量の100億分の1がエネルギーに転化する。火力発電所には、赤と白の帯状に塗りわけられた高い煙突があるが、そこから石油のほとんどが、燃えかすとして大気中に放出されている。

次に、熱エネルギーを、原動機によって機械的エネルギーに変える。原動機とは、ボイラーと蒸気タービンの組み合わせから成り立っていて、ボイラー内の水は、石油の燃焼で得た熱エネルギーによって、高温高压の水蒸気になり、蒸気タービンの羽根車を回す。こうして、熱エネルギーが機械的エネルギーに変えられる。さらに、蒸気タービンには、発電機

図2 炭素の燃焼とエネルギー



E=mc²を用いて、炭素(C) 1gの炭素で発生した熱エネルギー
2kcal (2000cal) をエネルギーの単位ジュール(J) に換算すると、

$$E = 2000 \times 4.2 = 8400\text{J} \quad (1\text{cal} = 4.2\text{J})$$

$$c = 3 \times 10^8 \text{m}$$

このエネルギーに相当する質量は

$$m = E / c^2$$

$$= 8400 / (3 \times 10^8)^2$$

$$= \text{約 } 10^{-13} \text{ kg} = \text{約 } 10^{-10} \text{g}$$

が連結されており電気エネルギーを生み出す(図)。

火力発電のしくみを考えることによって、エネルギーの具体的なイメージがわいてきた。原動機に投入されるエネルギーは熱エネルギーで、回収されるエネルギーは機械的エネルギーで、この2種のエネルギーの比が、原動機のエネルギー効率である。

以上の議論から、火力電力のエネルギー効率が次のように求められる。

火力発電のエネルギー効率

|| 原動機のエネルギー効率×タービンのエネルギー効率

|| (機械的エネルギー／熱エネルギー) × (電気的エネルギー／機械的エネルギー)

|| 電気的エネルギー／熱エネルギー

つまり、火力発電のエネルギー効率とは、燃焼で発生する熱エネルギーのうち、電気エネルギーとしてどれだけ回収できるかという比率のことである。このように、エネルギーを他の形態に変換する場合は、その効率は入力エネルギー(熱エネルギー)と出力エネルギー(電気的エネルギー)を同一のエネルギー単位、ジュールに換算することによって求められる。

原動機やタービンにはエネルギー損失があるので、投入するエネルギーのすべてが利用されることはない。電気エネルギーに変換されなかった分が排気熱(エネルギー)として失われるわけだ。火力発電の効率は、燃料の違いや技術の進歩とともに年々良くなっていて、最近では、40%を超えるまでに向上している。火力発電に見るように、エネルギー効率の議論には、資源や廃棄物

は直接かわってこない。はじめに燃焼で得られる熱エネルギーが基準になっていて、原動機、タービンなどのエネルギー効率が決まっていくな。しかし、一般エンジンの仕組みからわかるように、エネルギーだけを取り出してその利用効率を云々するのは、これからの持続社会を考えるうえでは、ふさわしくない。なぜなら、一般エンジンで代表されるあらゆる活動体は、入口と出口を通じて、自然や人間社会などの環境とながっているからだ。入口から資源を取りこみ、出口から廃棄物を放出することによってのみ、一般エンジンは活動することができなのであり、その入口と出口に無頓着であつては、活動自身に支障が生じることになる。

断っておくことは、エネルギー効率を考えることは意味がない、というつもりはないことだ。エネルギー効率を向上すれば、それだけ資源の節約ができるはずだから、そのような努力はなされるべきだと思う。ただし、エネルギー効率だけに目を奪われることは、持続性の視点を見失うことになるので注意が必要だ。

最後に、上記の議論を踏まえて、最近話題になっている、バイオガシステムについて触れておこう。

バイオガシステムとは、生ごみをメタン発酵させ、発生するメタンガスからエネルギーを取り出そうとするシステムである。発酵後には、「固形残さ、液肥、メタンガス」が発生する。

ここで注意することは、このシステムの「質量転化率」である。メタンガスは、いずれにせよ燃やさなければエネルギーに転化することができず、生ごみの100億分の1という微少な質量をエネルギー化しているに過ぎない。問題は、生ごみの大部分が「固形残さ」として残り、これをどのように処理するかである。ここにはチッソ、カリ、リンなど豊富な栄養分が含まれていて、これを作物の成長に利用する時、はじめてメタン発酵の意義が評価される。

全国の農村部などで小型の施設が実用化されていて、それなりの効果を上げているのも、肥料としての利用がなされているからである。生成した固形残さを燃やし、液肥を河川に捨てるのでは、「単純に燃やす」というこれまでのシステムに比べてメリットはない。W

【参考文献】

・広瀬立成『エネルギー・環境問題への挑戦 相対性理論』朝日新聞出版(2012年)