

16 エクセルギー

16.1 熱エネルギーの特殊性

以上見たように、熱エネルギーは特殊なエネルギーである。熱エネルギーを他のエネルギーに変えようとするとき、その熱の一部が変換できるだけである。逆に熱以外のエネルギーは、固体摩擦、粘性、電気抵抗等により、最後には全て熱エネルギーに変わってしまう。熱エネルギーは、エネルギーの最後の形（エネルギーの墓場）であるといえる。

16.2 熱エネルギーの価値

温度 T の熱源が持っている Q の熱量は、熱源の温度が一定であれば、カルノーサイクルを使って

$$W = Q \left(1 - \frac{T_0}{T} \right)$$

の仕事に変えることができる。ただし、 T_0 はそのときに利用できる低温熱源の温度である。冷凍機などを動かして周囲温度以下の温度の熱源をつくることもできるが、そのためには別に仕事（電力等）を必要とし、損をすることはあっても得することはない。結局、低温熱源として使えるのは大気や海水等の 周囲温度の熱源 しかありえない。

$Q/T = \Delta S$ は、 Q の熱を受け取る際、熱源から作業流体へ移動したエントロピーであり、上の式は

$$W = Q - T_0 \Delta S \quad (13)$$

と書き換えることもできる。

もし、熱源の温度が変わる場合には、熱を受け取る作業流体の温度を熱源と同じ温度になるように変化させてやれば、取り出せる仕事は

$$W = \int \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) dQ$$

となる。ここでも、熱源から作業流体へ熱と共に移動したエントロピーは

$$\Delta S = \int \frac{dQ}{T} \quad (14)$$

となるので、式 (13) で表すことができる。

さらにもし、熱源と作業流体の間に温度差があれば、熱源が Q と共に失ったエントロピー ΔS_1 より、作業流体が Q と共に受け取ったエントロピー ΔS_2 は大きくなり、作業流体から取り出せる仕事は

$$W = Q - T_0 \Delta S_2$$

となる。

以上みたように、熱量 Q のうち、 $T_0 \Delta S$ は必ず無駄になり、残りが他のエネルギー（仕事）に変換可能となる。

16.3 エクセルギー

前節の例は、ある量の熱エネルギーから仕事を取り出す例である。では、ある状態の物質から一体いくらの仕事を取り出せるのであろうか。

ある状態の物質から熱や仕事を取り出し、その熱も有効に仕事に変えながら、これ以上変化しなくなる（周囲と平衡する状態）まで状態変化させたときに取り出せる最大の総仕事量を、物質の持つエクセルギーという。実用上は、開いた系だけを考えればよい。最大の仕事は可逆変化のときに得られ、状態 (H, S) で表される物質の持つエクセルギーは、式 (13) と同様に次式で表される。

$$E = (H - H_0) - T_0(S - S_0) \quad (15)$$

ただし、 H_0, S_0 は周囲と平衡する状態での物質のエンタルピーおよびエントロピーである。これをエクセルギーの定義式と考えても良い。

比熱一定の物質の場合は、 $dH = Gc_p dT$, $dS = G(c_p/T)dT$ より、次式となる。

$$E = Gc_p(T - T_0) - Gc_p T_0 \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) = Gc_p \left[T - T_0 - T_0 \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) \right] \quad (16)$$

周囲と平衡するまでにはエンタルピー差 $H - H_0$ の熱量が利用できるが、そのうちの $T_0(S - S_0)$ はもともと仕事にはならない無駄なエネルギーであったのである。 $T_0(S - S_0)$ のことをアネルギーと呼ぶこともある。

$$(\text{エクセルギー}) = (\text{全エネルギー}) - (\text{アネルギー})$$

16.4 エクセルギーの活用

燃焼プロセス 発熱量 40000 kJ/kg の燃料を 1kg/s 燃焼させて、比熱 1.428 kJ/(Nm³ K) の空気 14 Nm³/s を 20 から 2020 にした場合

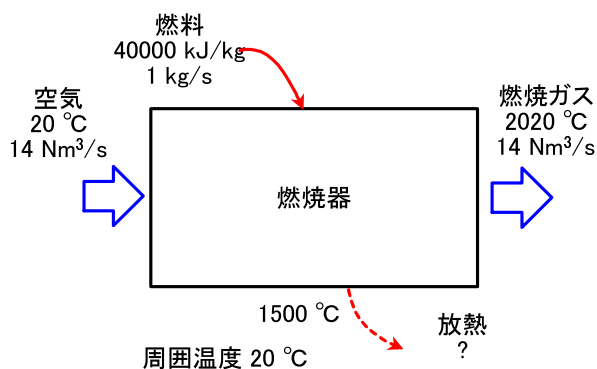


図 8: 燃焼プロセス

流入エネルギーは

燃料の持っていた化学的エネルギー（発熱量）： $1 \times 40000 = 40000$ kJ/s と

空気のエンタルピー： $14 \times 1.428 \times (293 - 293) = 0$ kJ/s

合計： 40000 kJ/s である。

流出エネルギーは

燃焼ガス（空気と同じとみなす）： $14 \times 1.428 \times (2293 - 293) = 39980$ kJ/s

だけである。放熱によるエネルギー損失は 20 kJ/s 程度であり、ほとんど無視できる。

エクセルギーを考えると、
 流入は燃料の化学エネルギー 40000 kJ/s だけ（燃料のもつエクセルギーは近似的にその発熱量に等しい）である。

燃焼ガスが持ち出すエクセルギー（周囲温度は 20 とする。以下同様）は、

$$E = 14 \times 1.428 \times \left[2293 - 293 - 293 \times \ln \left(\frac{2293}{293} \right) \right] = 27932 \text{ kJ}$$

となり、12068 kJ/s (30 %) がエクセルギー損失となっている。

熱以外のエネルギーが熱エネルギーに変わると、少なからぬ損失が生じる。損失の程度は、その結果生じた熱の温度に依存する。

熱交換プロセス A 温度 2020 の比熱 1.428 kJ/(Nm³ K) の燃焼ガス 14 Nm³/s を 500 に冷却したときの熱を使って、9.0 MPa 150 の水 (h=637.5 kJ/kg, s=1.8323 kJ/(kg K)) 10 kg/s を 9.0 MPa 618 の過熱蒸気 (h=3675 kJ/kg, s=7.0067 kJ/(kg K)) とする場合 (周囲状態の水は h=84.0 kJ/kg, s=0.2963 kJ/(kg K))

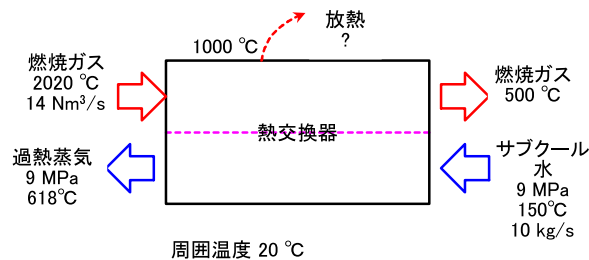


図 9: 熱交換プロセス A

流入するエネルギーは

燃焼ガスのエンタルピー： $14 \times 1.428 \times (2020 - 20) = 39980 \text{ kJ/s}$ と

水のエンタルピー： $10 \times (637.5 - 84.0) = 5535 \text{ kJ/s}$

計： 45515 kJ/s である。

流出するエネルギーは

燃焼ガスのエンタルピー： $14 \times 1.428 \times (500 - 20) = 9596 \text{ kJ/s}$ と

蒸気のエンタルピー： $10 \times (3675 - 84.0) = 35910 \text{ kJ/s}$

計： 45506 kJ/s である。

残りの 13 kJ/s が周囲への放熱と考えられるが、これは無視できる程度の値である。

これをエクセルギーを用いて考えると、

流入量は

燃焼ガスのエクセルギー： $14 \times 1.428 \times [2293 - 293 - 293 \times \ln(2293/293)] = 27932 \text{ kJ/s}$

水のエクセルギー： $10 \times [637.5 - 84.0 - 293 \times (1.8323 - 0.2963)] = 1035 \text{ kJ/s}$

計： 28967 kJ/s である。

流出量は

燃焼ガスのエクセルギー： $14 \times 1.428 \times (773 - 293 - 293 \times \ln(773/293)) = 3914 \text{ kJ/s}$ と

蒸気のエクセルギー： $10 \times [3675 - 84.0 - 293 \times (7.0067 - 0.2963)] = 16249 \text{ kJ/s}$

計： 20163 kJ/s である。

残りの 8803 kJ/s が伝熱に伴う非可逆変化により失われたエクセルギーであり，これは流入エクセルギーの 30% となっている。

温度差を伴う熱移動は非可逆変化であり，それに伴ってエクセルギーの損失が生じる。損失の程度は，温度差に依存する。

熱交換プロセス B （前ケースで周囲への放熱が無視できない例）

温度 2020 の比熱 1.428 kJ/(Nm³ K) の燃焼ガス 14 Nm³/s を 420 に冷却したときの熱を使って，9.0 MPa 150 の水 (h=637.5 kJ/kg, s=1.8323 kJ/(kg K)) 10 kg/s を 9.0 MPa 550 の過熱蒸気 (h=3510 kJ/kg, s=6.814 kJ/(kg K)) とする場合 (周囲状態の水は h=84.0 kJ/kg, s=0.2963 kJ/(kg K))

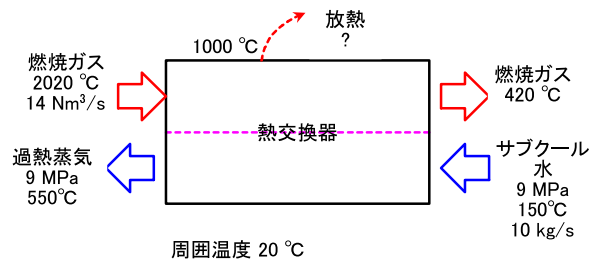


図 10: 熱交換プロセス B

流入するエネルギーは

燃焼ガスのエンタルピー： $14 \times 1.428 \times (2020 - 20) = 39984 \text{ kJ/s}$ と

水のエンタルピー： $10 \times (637.5 - 84.0) = 5535 \text{ kJ}$

計： 45519 kJ/s である。

流出するエネルギーは

燃焼ガスのエンタルピー： $14 \times 1.428 \times (420 - 20) = 7997 \text{ kJ/s}$ と

蒸気のエンタルピー： $10 \times (3510 - 84.0) = 34260 \text{ kJ}$

計： 42257 kJ/s である。

残りの 3262 kJ/s が周囲への放熱と考えられ，流入エネルギーの 7.2% である。

これをエクセルギーを用いて考えると，

流入量は前ケースと同じく 28967 kJ/s である。

流出量は

燃焼ガスのエクセルギー： $14 \times 1.428 \times (693 - 293 - 293 \times \ln(693/293)) = 2954 \text{ kJ/s}$ と

蒸気のエクセルギー： $10 \times [3510 - 84.0 - 293 \times (6.814 - 0.2963)] = 15163 \text{ kJ/s}$
 計： 18117 kJ/s である。

残りの 10850 kJ/s がこの熱交換過程で失われたエクセルギーであるが、この中には、周囲への直接の放熱量 3262 kJ/s が持ち出すエクセルギーも含まれている。放熱時のガスまたは蒸気の温度を $1000 \text{ (}1273 \text{ K)}$ と推定すると、
 放熱量が持ち出すエクセルギー： $3262 \times (1 - 293/1273) = 2511 \text{ kJ/s}$
 となり、残りの 8229 kJ/s が純粋に熱交換に伴うエクセルギー損失であると推定できる（この量が前ケースより小さいのは温度差が小さくなったためと思われる）。

管路損失 圧力 9.0 MPa 温度 550 の過熱蒸気 ($h=3510 \text{ kJ/kg}$, $s=6.814 \text{ kJ/(kG k)}$) の過熱蒸気が配管内を流れ、管路抵抗により、圧力 6.0 MPa 温度 540 ($h=3510 \text{ kJ/kg}$, $s=6.971 \text{ kJ/(kG k)}$) となる場合

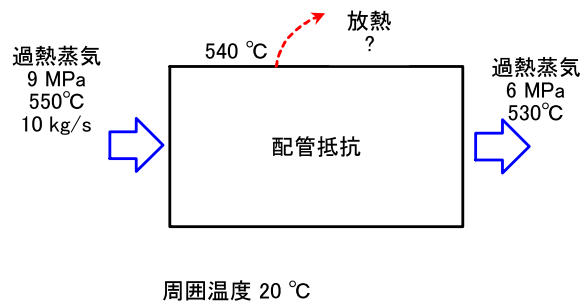


図 11: 管路抵抗による圧力損失

水力学の管路損失は、熱力学の絞り変化に対応する。周囲への放熱がなければ断熱絞り変化と呼ばれ、エンタルピー一定の変化となる。

流入蒸気のエンタルピー： $10 \times (3510 - 84.0) = 34260 \text{ kJ/s}$
 流出蒸気のエンタルピー： $10 \times (3510 - 84.0) = 34260 \text{ kJ/s}$
 であり、両者は等しく、この場合は周囲への放熱はないことがわかる。

圧力降下があるので、ベルヌーイ式で表される力学的エネルギーは減少しているが、その減少分は熱エネルギー（エンタルピーの一部）となるので、熱も含めたエネルギーは減少していない。

これをエクセルギーを用いて考えると、
 流入蒸気のエクセルギー： $10 \times [3510 - 84.0 - 293 \times (6.814 - 0.2963)] = 15163 \text{ kJ/s}$
 流出蒸気のエクセルギー： $10 \times [3510 - 84.0 - 293 \times (6.971 - 0.2963)] = 14703 \text{ kJ/s}$
 となり、 460 kJ/s のエクセルギー損失がある (3%)。

エンタルピーで評価している場合は、放熱や流体の漏れ等がない限り、損失は出てこないが、エクセルギーで評価すると、非可逆変化に伴う損失を算出することができる。

周囲を含めた全体系のエントロピーの増加量を ΔS^* とすると、エクセルギー損失 LW は次式で求めることができる。

$$LW = T_0 \Delta S^* \quad (17)$$

これは グイ=ストドラ (Gouy=Stodola) の定理と呼ばれている。上で述べたケースを含めて、一般にこの定理が成り立つことが知られている。

エクセルギー評価の利点 熱力学第二法則によると、熱エネルギー以外のエネルギーと熱エネルギーとは等価ではなく、また同じ熱エネルギーの間でも、その温度によってそこから取り出せる仕事量は異なる。エンタルピーを用いた従来のエネルギー評価ではエネルギーの質の違いを無視しており、エネルギーの価値を正しく評価することができない。

エクセルギーはエネルギーのうちの有効な部分だけを取り出したものであり、質の違いを含めたエネルギーの正しい評価方法である。

上のケースで見た例は、産業への応用分野で広く見られる例である。火力発電所の場合を例として見てみると、得られた蒸気でこの後ターピンを回して発電し、ターピンを出た低温の蒸気を海水で冷やして元の水に戻す。その際、大量の熱を海水中に捨てることになるが、エンタルピーで評価する限りは、ここで大量のエネルギーを海水中へ捨てて無駄が生じていることしか分からない。この無駄を少なくするためには、発電プラント全体の種々の条件を手当たり次第に変えて、繰り返し計算して最適の条件を見つかなければならない。膨大な作業となる。

エクセルギーを用いて評価すると個々の要素プロセスごとに損失を計算でき、さらにその損失の原因を特定することができるため、どこを改善すべきかは容易に判断できる。損失の機器別・原因別分析を的確に行うことができる。エネルギー問題や地球環境問題が重要な課題となっている現代において、エクセルギーは省エネルギーのための極めて有力な手段であるといえる。