

エクセルギー評価設計について

Lecture on Exergy Base Design

久 角 喜 徳*
Yoshinori Hisazumi



1. まえがき

二酸化炭素の排出を抑制するには、省エネルギーの促進と非化石燃料エネルギーの導入が最も重要である。省エネルギーは、従来、産業部門および民生部門で積極的に推進が図られてきたが、今後は環境に対する影響をいっそう小さくする観点からさらに強化し、社会全体を省エネルギー型に変えていく必要がある。そのためには、これまでのエネルギー変換尺度を熱量保存則から、エクセルギー評価則に変えることが重要である。本誌においても、エクセルギーとエネルギー有効利用において、エクセルギー損失低減の研究成果がまとめられている¹⁾。最近では、大学での講義はもちろん、中高生の体験学習のなかでも、エクセルギー解析の意義やエントロピー増大の問題を取り扱う時代になってきた²⁾。またweb上にもエクセルギー計算の手法³⁾や気体・液体燃料の高発熱量とエクセルギー⁴⁾が掲載されている。そこで、エクセルギー評価則の理解をさらに深めていただくため、エネルギー（エンタルピー）とエクセルギー（エントロピー）の関係を小遣いと給料の関係に当てはめ、熱力学の意味するところを考えてみたい。またエネルギー事業におけるエクセルギー評価設計の一例を紹介する。

2. エクセルギーの基礎

日本の政治の世界では、今変革が叫ばれている。21世紀のエネルギー変換も、熱量保存則から脱却し、エクセルギー評価則への変革が必要である。なぜ、エクセルギー評価則が必要なのか。エネルギー倫理の問題として、エントロピーの増大は、再生不可能な環境破壊の後始末を未来世代に押し付けるからである⁵⁾。熱量保存則では、このエントロピー増大の評価ができないのである。

たとえば

- ・ヒートポンプの成績係数 (COP) は、どこまで上がる⁶⁾？
- ・等量の水温の異なる温水のエネルギー価値は⁷⁾？

*大阪ガス(株)エネルギー技術研究所 シニアエンジニア
E-mail: yoshinori-hisazumi@osakagas.co.jp
〒554-0051 大阪市此花区西島6-19-9

これらの疑問は、熱力学第1法則の熱量保存則では、答えることができない。熱力学第2法則すなわちエントロピーの理解が必要になる。そこで、エントロピーを含めたエネルギーにおける損失の概念を、類似（アナロジー）や比喩でわかり易く説明したい。

図1に給料の〔支給額〕・〔控除〕と〔有効熱〕・〔燃料の発熱量に占める損失〕との類似性を示す。支給額（手取り）は、総支給額から税金・保険料などを引いたものである。有効熱は、燃料の発熱量から機器放熱や排ガスを引いたものである。

支給額が多くても、必要経費や消費税が高いと豊かな生活は送れない。必要経費は何かをしようとすると必ず生じる。また消費税は生活する地域や社会情勢で変わる。

現実の社会では、豊かに生活するため、必要経費や消費税を議論し、公平な税金制度で、必要経費を押さえることに努めている。しかるに発熱量と有効熱の熱量保存則による評価では、必要経費や消費税が議論できない単に目に見える一部の経費だけ（機器放熱と排ガス損失）を扱うエネルギー変換尺度である。

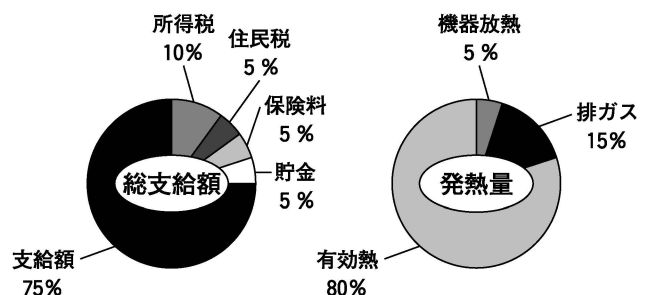


図1 給料の支給額・控除と発熱量に占める損失・有効熱との類似性

一方、エクセルギーは必要経費や消費税が議論できるエネルギー変換尺度である。そのため、21世紀のエネルギー変換効率の向上は、エクセルギー評価則の理解からはじまるといってよい。

ここで、エクセルギー（有効仕事）とはカルノー効率に熱量をかけたものである。すなわち、カルノーサイクルで

得られる有効仕事量Workは、
 (カルノー効率) $\eta = (T - T_0) / T$
 (単位熱量q)を掛け $e = (h - h_0) - T_0(s - s_0)$
 さらに(利用できる流量F)を掛けて、有効仕事は
 $Work = Q - T_0 \Delta S$ となる。

ここでhとsは、エンタルピーとエントロピーであり、
 添え字oは外界の基準条件(大気圧、たとえば15℃)を表す。
 さて、エクセルギー評価則の理解を深めるため、エクセルギーとエンタルピー(プロセスに取り込んだ熱量)の関係を小遣いと給料(手取り)の關係に当てはめ、熱力学の意味するところを考えてみたい。図2に小遣いと手取り(支給額)の關係とエクセルギー(有効仕事)と機器投入有効熱量Qとの關係の類似性を示す。

小遣い = 手取り - (1 + 消費税) × (必要経費)で表される。
 必要経費には、食費、レジャー・車費、教育費、教養費・交際費、光熱費・雑費、住居費などがあり、サラリーマンの小遣いは、手取りの約10%になってしまう。
 一方、エクセルギーは、投入熱Qから外界条件T₀を加味した損失を差し引き、
 $エクセルギー(Work) = Q - T_0 \times \Delta S$ で表される。

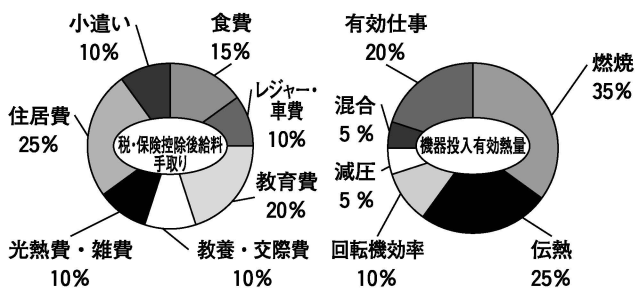


図2 小遣いとエクセルギーとの類似性

エクセルギー評価則においては、損失ΔSは、熱損失とは異なる「エントロピー損失」である。

ここで、有効仕事とは、動力や蒸気・温水・冷水などであり、一方、エントロピー損失とは、燃焼、伝熱、回転機の効率ロス、減圧や混合といったプロセスにより発生する。これらの損失は、熱量保存則では、現れてこない。したがって、図1の有効熱80%は、図2の有効仕事ではわずか20%になってしまう。例えば、発電効率35%、総合熱効率75%のコージェネレーションの有効仕事は、熱の利用形態によって数値は変わるが、約50%となる。

さて、大学の教育では、エントロピーは「熱量」を「その流体の絶対温度」で割ったものと教えられた。そのため、訳がわからず、熱力学が嫌いになった方が多いのではなかろうか。エントロピーの実体は、熱量を有効仕事に変換する際の損失評価のためのエンタルピーと同じ「状態量」である。このように説明されると、エントロピーの大切さが

理解しやすくなる。

そこで、図3のモリエル線図を用いて、回転機の効率ロスに伴う損失およびバルブの絞りによる損失によるエントロピーの増大を説明する。縦軸は、圧力変化p₁~p₂、横軸はエンタルピー変化、また図中には、等温曲線T₁、T₂と等エントロピー曲線(s₁<s₂<s₃)を示す。バルブによりp₁からp₂に断熱で減圧操作を行うと、等エンタルピーで変化(垂直降下)し、エントロピーは、s₁からs₃に増大する。圧縮機によりp₂からp₁に昇圧すると、等エントロピー曲線s₁上で変化せず、p₁とs₂で決まる右上がりの変化をする。タービンによりp₁からp₂に減圧すると、等エントロピー曲線s₁上で変化せず、p₂とs₂で決まる左下がりの変化をする。このように操作した後の状態量sは、操作前より大きくなる。このことは、何かをやると必ず経費が発生するのと同じである。

熱力学第2法則では、エントロピーは増大すると教えている。この教え方では、良い比喻で原体験をさせないため、教わった者は、熱量保存則の域を脱しない。原体験とは、小学校での社会見学や九九の暗記みたいなものである。

地球環境問題が取り上げられる時代にあって、なぜ小、中学校や高等学校でエクセルギーを教えないのか。また、大学でなぜエクセルギーの原体験をさせないのか。エントロピーやエクセルギーという言葉は知っていても、社会生活に役立たないといわれるが、知識と知恵は別物である。本質を見抜く力を養うのが教育である。ゆとり教育でこの力を身につけさせるには、エネルギーの使用のあり方に、変革が必要ではなかろうか。

具体的なエネルギー使用のあり方の理解とは、外界温度と比べて、夏の冷房、冬の暖房温度のありがたみや、電気ですぐお湯を沸かすとエネルギー利用効率が悪いことを知ることである。同様にガスで風呂を沸かすとエネルギー利用効率が良くない。なぜなら、図2の伝熱と燃焼のエントロピー損失が極めて大きく、風呂のお湯の持つ有効仕事は、燃料の持つ化学エクセルギーの5%程度になるからだ。

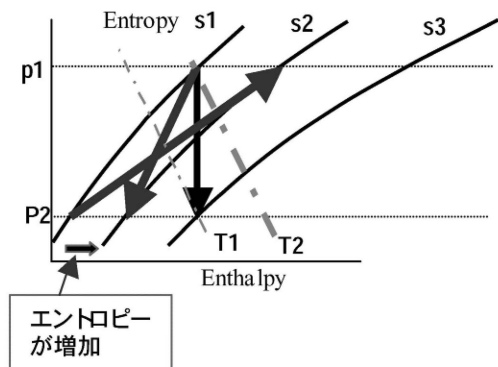


図3 回転機の効率やバルブによるエントロピー増加

3. エントロピー損失の低減策

それでは、伝熱や燃焼におけるエントロピー損失を低減させる方法について説明する。図4に熱交換におけるエントロピー損失低減策を示す。高温流体（EH）が低温流体（EC）と熱交換する過程で、熱交換温度差を小さくする程、エントロピー損失が低減する。そのためには、伝熱面積を増やすとか伝熱促進の技術を採用する必要がある。どれだけ金をかけて損失を減らせるか、またそれによるLCAのメリットは如何ほどかを評価することが大切である。

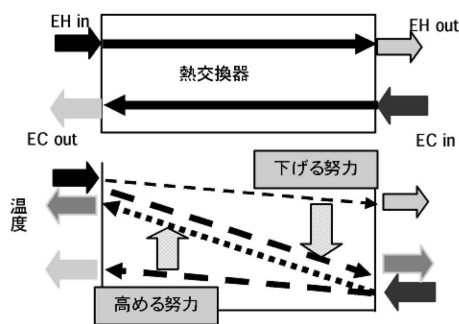


図4 熱交換におけるエントロピー損失低減策

次に、図5にガスなどの燃料の燃焼に伴うエントロピー損失の発生と損失低減策を示す。化学の世界では、ギブスの自由エネルギーから議論するが、ここでは機械屋のセンスで考えたい。

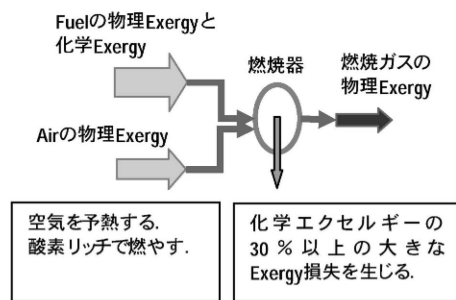


図5 燃焼によるエントロピー損失の発生

図5に示すように燃焼器には、物理エクセルギーと化学エクセルギーが燃焼器に投入される。物理エクセルギーは、流体の持つ温度・圧力の有効仕事であり、前述の

$$E = ((h - h_0) - T_0(s - s_0)) \times F \text{ で計算できる。}$$

一方、燃料の化学エクセルギーもこの式で計算できる。具体的には、「燃料の化学エクセルギー」は、標準状態の「燃焼前の酸素と燃料の混合気」のh（比エンタルピー）とs（比エントロピー）および「反応生成物の混合気（CO₂とH₂O）」のh₀とs₀を用い計算できる。

たとえば、メタンの燃焼 $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ では、1atm、20℃の $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$ のh、sと1atm、20℃の

CO₂+2H₂Oのh₀、s₀を用いることになる。T₀は、周囲環境の温度であるため、燃料の化学エクセルギーは、外界温度に応じて変わる。宇宙や極地で燃料を燃やすと、周りの温度が低いから、化学エクセルギーは大きな値となる。

通常の空気で燃焼させると、化学エクセルギーの30%以上が燃焼に伴うエントロピー損失となる。理由は、空気燃焼では、約79%含まれる窒素を常温から昇温させる必要があるため、大きな損失が生じる。そのため、理論空気燃焼、空気予熱や酸素富化により、この損失を減らす方策がとられる。燃料から動力を回収する場合、機器の耐熱温度の上限やNO_xの発生抑制から、希薄燃焼が避けられない。しかし燃料電池特にSOFCでは、図5の燃焼器において直接電気を発生させるため、そこでのエントロピー損失を燃焼させた場合に比べ、半減させることができる。

それでは、これらのエントロピーやエンタルピーはどのようにして計算すればよいのか。理想気体の状態方程式 $PV = nRT$ が基本となる。実際には係数補正で精度を上げた実在気体の状態方程式（Pen g Robinsonなど）を使う。ここで、これらの値を手計算で求めることは、時間の浪費である。今は、ITの時代、コンピュータがプロセスのエントロピー損失を計算してくれる。プロセスシミュレータ（HYSYS）とExergy計算用Excelソフトで瞬時にシステムのエクセルギー評価が行える。次項にその実施例を示す。

4. エクセルギー評価設計

2001年度の日本のLNG受入量は、約5,400万トンに達し、その内約3,700万トンが発電用燃料に用いられている。

液化天然ガス（LNG）は、沸点約-160℃の低温液体で常温までの潜熱・顕熱は、840J/kgである。LNG 1トンの化学エクセルギーは、14,400kWh（発熱量で41.6kJ/Nm³）であり、また冷熱エクセルギーとして250kWh（化学エクセルギーの1.7%）を有する。エネルギー事業者としては、省エネルギーの面から、この冷熱エクセルギーを有効活用する責務がある。LNG冷熱利用の効率を議論する場合、エクセルギー評価が必須となる。LNGをポンプで7 MPaまで昇圧させ、気化送出すれば、冷熱エクセルギーの約60%を圧力エクセルギーとして有効活用できる。さらに気化の過程で冷熱エクセルギーを空気分離設備や冷熱発電などで回収できる。冷熱エクセルギーの回収率は、空気分離で約80%、冷熱発電では、15~30%である。

しかしながら、現在、経済的な理由から、気化過程でのLNGの冷熱利用が進んでいない。こうした中で、LNGで大気を直接-100℃以下に冷却し、LNG冷熱をガスタービンの吸気冷却に活用できるハイブリッド気化発電システムの開発が進められている⁸⁾。

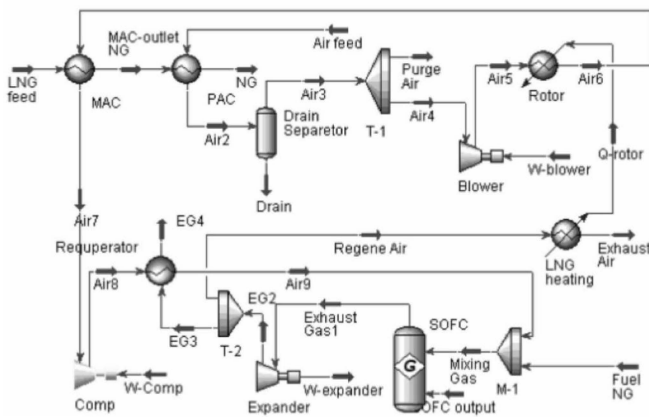


図6 SOFCとLNG冷熱利用の吸気冷却ガスタービン
組合せシステムのプロセスフロー

そこで、図6のSOFCとLNG冷熱利用の吸気冷却ガスタービンを組み合わせたシステムのプロセスフローをもとに、エクセルギー評価設計の一例を示す。

吸気Air feedは、低温の天然ガスで予冷され、その後、ブローで昇圧された空気は、除湿ロータで露点を -30°C 以下に下げられ、LNG/空気熱交MACで -125°C まで冷却される。

表1 プロセスデータ
(外界の評価条件は、 15°C 、1気圧)

Name	Temp C	Press kPa	Flow kg/h	Exergy kW	Heat kW
Air feed	15	101	4,395	0	-133
Air6	30	102	3,656	1	-76
Air7	-125	101	3,656	58	-251
Comp				120	157
Air8	19	811	3,656	178	-99
Air9	480	762	3,656	374	410
Fuel NG	10	762	73	6	-88
Mixing Gas	457	762	3,730	374	322
NG Chemical				1,034	
SOFC				517	
Exhaust Gas1	850	762	3,730	710	-195
Expander				-478	-434
EG2	501	102	3,730	232	-629
EG3	501	102	3,555	221	-600
EG4	40	101	3,555	4	-1109
Regene Air	501	102	174	11	-29
LNG feed	-150	7,400	1,000	250	-1423
MAC-out NG	-15	7,300	1,000	157	-1248
NG	2	7,100	1,000	154	-1232
Purge Air	5	101	733	-0	-20
Exhaust Air	80	101	174	0	-52

表1に、このプロセスの主要な温度、圧力、流量、エクセルギー、エンタルピーおよび圧縮機、タービン、SOFCの出力並びに投入された燃料のエクセルギー値を示す。

このシステムでは、冷熱エクセルギー 96kW （以下利用するLNG 1ton/h 当たり）の内、ガスタービンの吸気冷却に 57kW が与えられ、冷熱エクセルギーの回収率は、 59%

となる。このSOFCコンバインドサイクルのシミュレーションでは、SOFCによる燃料の化学エクセルギー回収効率を 50% 、出口排ガス温度を 850°C 、各回転機の効率を 80% 、熱交のピンチポイントを 20°C として行った。このシステムで発電効率を向上させるには、MACと再生器の伝熱性能を高め、そこでのエントロピー損失を低減させる必要がある。

このシステムの特徴は、圧縮機を出た空気Air8が 19°C と低いため、再生器出口排ガスEG4は、 40°C まで下げられる。またタービン排ガスEG2の約 5% が、除湿ロータの再生に有効利用され、冬季には、送出ガスを 0°C 以上に昇温するのに役立つ。また、投入された燃料 $92\text{Nm}^3/\text{h}$ の化学エクセルギーは、 1034kW であり、発生電力は、ACで 720kW となり、発電効率は、 69.6% となる。蒸気タービンを組み合わせることなく、LNG冷熱を用いたガスタービンの吸気冷却効果により高い発電効率を達成できる。

5. おわりに

エネルギー利用率 85% のマイホーム発電エコウィルや定格COP4.2の自然冷媒ヒートポンプ給湯機エコキュートといった高効率の民生用機器が販売されだした。残念ながら効率評価は、熱量保存則である。2005年度には、家庭用の燃料電池コージェネが販売される予定である。当然発電効率が上がるため、エクセルギー効率は大幅に向上されるが、温水による熱回収が減るため、エネルギー利用率の値は、若干、下がってしまう。販売される時点では、是非、エクセルギー評価則で効率を評価してほしい。

参考文献

- 1) 特集エクセルギーとエネルギー有効利用；エネルギー・資源、19巻、5号（1998）、396～441。
- 2) エネルギー総合工学研究所；中高生のためのエネルギー情報ポータルサイト（2002）
<http://www.iae.or.jp/energyinfo/energydata/data6019.html>
- 3) 月刊省エネルギー、2000年12月号～2002年4月号および2003年3月号、省エネルギーセンター
http://www.eccj.or.jp/he_qa/heat/index.html
- 4) 車のエンジンオイルと添加剤のホームページ<http://web.kyoto-inet.or.jp/people/macchann/hiroshi/tannkasuiso3.html>
- 5) 新宮秀夫；エネルギー倫理、第17回環境工学連合講演会（2002）
<http://web.kyoto-inet.or.jp/org/enekan/energyethics.htm>
- 6) 飛原英治；ヒートポンプにおけるエクセルギー評価について、JSME熱工学講演会岡山（2001）
<http://heat6.mech.okayama-u.ac.jp/thermal/ronbun/H108.P>
- 7) 小林一朗；エクセルギーの考え方とその用途、（2003）
<http://www.h5.dion.ne.jp/~ichiro.k/text/energy002.html>
- 8) 久角喜徳；新LNG冷熱発電方式の開発、JSME関西支部 年次大会（2002）。