

# 新しいエクセルギー解析法

石田 愈、金 紅光

東京工業大学 資源化学研究所  
〒226 横浜市緑区長津田町4259

## New Method of Exergy Analysis

Masaru ISHIDA, Hongguang JIN

In a world rapidly running out of fossil fuel, the second law of thermodynamics together with the exergy principle may well turn out to be the central scientific truth of the twenty-first century. So far, traditional exergy analysis has focused simply on the absolute exergy and the trifling of mathematical formulae, only offering the magnitude of the exergy loss and some guidance, instead of detailed specific information on internal phenomena of each process. Here, we demonstrate a new method of exergy analysis, called EUD (Energy-Utilization Diagram) methodology by analyzing a current combined cycle plant and comparing it with the JIS method. It is clear that the graphical exergy analysis based on EUD is very easy and intuitive and that it may give important information even for a complex system.

### 1. 緒言

エクセルギーはエントロピーに変わる概念として考えだされた。地球上の資源やエネルギーの有限性が重要なキーワードになってきた現在、この概念は、化学プラントなどの生産システムばかりでなく、社会システム内でのエネルギーの有効利用にも応用されていくであろう。本稿では、エクセルギーの考え方をやさしく示し、新しいエクセルギー解析法であるEUD法をJIS法と対比させながら、説明する。

### 2. エクセルギーの考え方

#### 2.1 物質の変化に伴うエネルギーのとり込みや放出

図1では、物質の変化（これをプロセスと呼ぶ）を円で示している。変化前の物質と変化後の物質を円に向かう矢印と円から離れていく矢印で表わし、それぞれのエネルギーの量を黒四角の面積で示してある。(a)では、物質のエネルギーは変化前より変化後の方が多。この差は、外部より熱や仕事や電気や光などをとり込んだことによる。(b)では、変化前より変化後の方が少ない。この差は、熱や仕事や電気や光などを放出したことによる。図1では、このとり込まれたり、放出されたりするエネルギーの量と向きを白抜き四角と白抜きの矢印で示している。

この白抜きの四角で示したエネルギーは、あるプロセスから放出されたものが他のプロセスでとり込まれ、利用されることが多い。このように、プロセス間でのエネルギーの移動の仲介をしている。本節ではこの仲介エネルギーに注目して、エクセルギーを説明する。

仲介エネルギーは流れの方向と量と質の三つの特性を持っている<sup>1)</sup>。流れの方向は $\Delta H (=H_{out}-H_{in})$ の符号で決まり、 $\Delta H > 0$ のときとり込み、 $\Delta H < 0$ のとき放出である。量は $\Delta H$ の絶対値 $|\Delta H|$ で決まる。この仲介エネルギー $\Delta H$ は、図2のように、熱的部分 $T\Delta S$ （プロセスのエントロピー変化量 $\Delta S (=S_{out}-S_{in})$ とその位置での絶対温度 $T$ の積）と仕事の部分 $(\Delta H - T\Delta S)$ とに分けられる。そこで、仲介エネルギーの量 $\Delta H$ が同じであっても、 $T\Delta S$ と $(\Delta H - T\Delta S)$ との割合の違いによって、仲介エネルギーの質の違いが生じてくる。

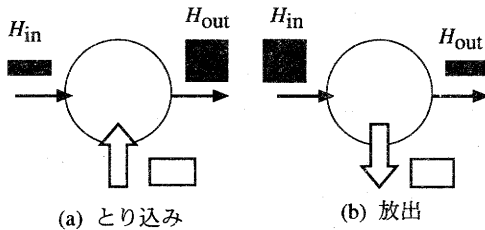


図1 物質の変化と仲介エネルギーのとり込みや放出

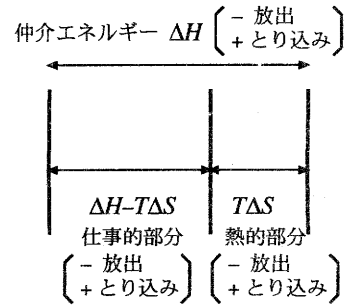


図2 仲介エネルギーの熱的部分と仕事の部分

## 2. 2 仕事換算量としてのエクセルギー変化量 $\Delta \epsilon$ の導入

カルノー効率 $\eta$ は、温度 $T$ の熱量 $Q$ からとり出せる最大仕事を $W_{max}$ としたとき、 $W_{max}$ と $Q$ との比で定義される。

$$\eta_{Carnot} = (T - T_l) / T \quad (1)$$

仕事に変換できなかったエネルギー $(Q - W)$ は、低温度 $T_l$ の熱として放出される。熱の温度 $T$ が高いほど、また、放熱温度 $T_l$ が低いほど、 $\eta_{Carnot}$ は大となる。

そこで、仲介エネルギー $\Delta H$ から取り出せる最大仕事量を求めてみる。仲介エネルギーの仕事の部分についてはそのまま、すなわち変換率1で仕事量に変換できる。一方の熱的部分は温度 $T$ の熱に相当し、放熱温度 $T_l$ を環境温度 $T_0$ として、カルノー効率をかければ仕事に変換できる。合計の仕事量は

$$\begin{aligned} & (\Delta H - T\Delta S) \times 1 + (T\Delta S) \times (T - T_0) / T \\ & = \Delta H - T\Delta S + T\Delta S - T_0\Delta S = \Delta H - T_0\Delta S \end{aligned}$$

この仕事量 $(\Delta H - T_0\Delta S)$ は、自由エネルギー変化量 $\Delta G (= \Delta H - T\Delta S)$ の温度 $T$ を環境温度 $T_0$ に置き換えた形をしていて、エクセルギー変化量 $\Delta \epsilon$ と呼ばれる。

$$\Delta \epsilon = \Delta H - T_0\Delta S \quad (2)$$

$\Delta G$ は温度 $T$ で生じている発熱反応や吸熱反応に対して使うので、 $\Delta G$ を用いる場合には、温度 $T$ の熱が供給できたり、除去できる環境が備わっている。 $\Delta \epsilon$ は $\Delta G$ の中の温度 $T$ を環境温度 $T_0$ に変えたものなので、 $\Delta \epsilon$ を用いる場合には、環境温度 $T_0$ の熱が供給できたり、除去できることを想定している。実際に、環境温度 $T_0$ の熱は、化学プラントをとり囲む大気として十分にあり、温度 $T_0$ の熱をとり込むことは常に可能である。逆に、温度 $T_0$ の熱を大気に放出することもできる。

次に、プロセス  $j$  ( $\Delta H_j$ と $\Delta S_j$ が決まる)の集合体としてのシステム全体について、熱力学第一法則の $\sum \Delta H_j = 0$  (エネルギー保存則)と第二法則の $\sum \Delta S_j \geq 0$  (エントロピー増大則)が成立する。この二式を利用すると、各プロセスのエクセルギー変化量

$\Delta\epsilon_j$ の和は次式のように環境温度 $T_0$ が正なので零あるいは負の値となる。

$$\Sigma\Delta\epsilon_j = \Sigma(\Delta H_j - T_0\Delta S_j) = \Sigma\Delta H_j - T_0\Sigma\Delta S_j = -T_0\Sigma\Delta S_j \leq 0$$

そこで、エントロピー $S$ の代わりにエクセルギー $\epsilon$ を使って、熱力学第一法則と第二法則を次のように記述できる。

$$\Sigma_j \Delta H_j = 0 \quad (\text{エネルギー保存則}) \quad (3)$$

$$\Sigma_j \Delta\epsilon_j \leq 0 \quad (\text{エクセルギー減少則}) \quad (4)$$

$\Delta\epsilon_j = \epsilon_{j,\text{out}} - \epsilon_{j,\text{in}}$ であることを考えると、 $\Sigma\Delta\epsilon_j \leq 0$ は $\Sigma\epsilon_{j,\text{out}} \leq \Sigma\epsilon_{j,\text{in}}$ となり、エクセルギーはシステム全体では減少していく。

### 2. 3 エクセルギー $\epsilon$ の解釈

図3のように、プロセスに入る原料物質のエクセルギーが $\epsilon$ で、生成物質のエクセルギーが0であるとき、このプロセスからとりだせる最大仕事 $W$ を求めてみる。このとき、環境温度 $T_0$ の熱は環境から自由にとり込むこともできるし、 $T_0$ の熱を環境へ自由に放出できるとする。

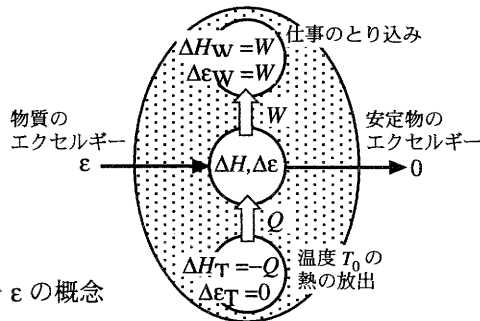


図3 物質のエクセルギー  $\epsilon$  の概念

図3では仕事溜と環境温度 $T_0$ の熱源を設けている。式(4)を適用すると(詳しくは文献<sup>1)</sup>を参照)

$$\Delta\epsilon + \Delta\epsilon_w + \Delta\epsilon_T \leq 0$$

仕事 $W$ をとり込む仕事溜に対しては、前節の仕事換算率 $1$ から $\Delta H = \Delta\epsilon$ となり、 $\Delta\epsilon_w = \Delta H = W$ となる。温度 $T_0$ の熱 $Q$ を供給する熱源に対しては、 $\eta_{\text{Carnot}} = 0$ となるので、 $\Delta\epsilon_T = 0$ である点が重要である。その結果、上式から

$$\Delta\epsilon + W \leq 0$$

$\Delta\epsilon = (\text{生成物質の}\epsilon) - (\text{原料物質の}\epsilon) = 0 - \epsilon = -\epsilon$ なので

$$W \leq \epsilon$$

したがって、物質のエクセルギー $\epsilon$ は、環境温度の熱を利用してその物質からとり出せる最大仕事を表している。

エクセルギー 'exergy' はex (出す) とerg (仕事: 仕事の単位にergがある) から合成された語で、その物質からどれだけ仕事とり出せるかを示す量であることが、上の結果から理解できよう。エクセルギー $\epsilon$ は、 $H$ や $S$ と同じように状態量で、この物質が過去にたどってきた経路に関係なく、現在の状態で決まる。

### 3. 絶対エクセルギー法によるエクセルギー解釈

例として、複合サイクルによる発電方式(図4)をとり上げて説明する。空気は圧縮器で12atmとなり、燃焼器に入る。燃料のLNGは加圧されているので、そのま

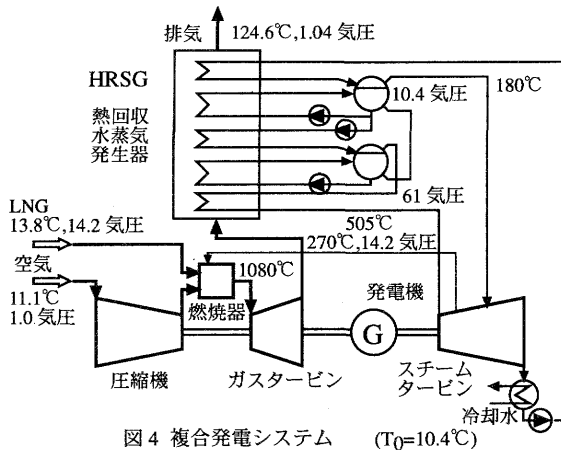


図4 複合発電システム (T<sub>0</sub>=10.4°C)

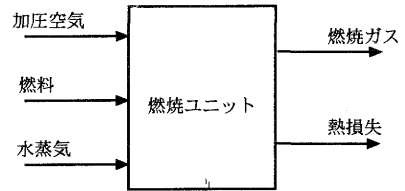


図5 燃焼ユニットの物質とエネルギーの出入り

ま燃焼器に入る。燃焼後の高温ガスはガスタービンで動力を発生し、熱回収水蒸気発生器（HRSG）を経て、排気される。HRSGでは505°C、61atmの過熱水蒸気と180°C、10.4atmの飽和水蒸気が発生し、スチームタービンへ送られている。また、スチームタービンから抽気された少量の水蒸気が燃焼器に送られている。スチームタービンを出了後は、冷却水により凝縮され、ポンプで加圧されて、HRSGへ戻る。

### 3. 1 絶対エクセルギー法（JIS法）の視点

絶対エクセルギー法では、システムをユニットに分けて考察する。分け方はかなり自由であるが、ここでは燃焼系、熱交換系、動力系、廃棄系とし、各ユニットでの入る物質、入るエネルギー、出る物質、出るエネルギーを考える。燃焼ユニットについてみると、図5のように入る物質として圧縮空気と燃料と水蒸気が、出る物質として高温燃焼ガスが、出るエネルギーとして熱損失がある。

これらのエネルギーの量 $H$ に関しては熱力学第一法則（エネルギー保存則）から  
 (燃料の $H$ ) + (空気の $H$ ) + (水蒸気の $H$ ) = (燃焼ガスの $H$ ) + (熱損失)  
 が成り立つ。第二法則（エクセルギー減少則）からは、出る側のエクセルギーの方が低くなるが、この分をユニット内で生じたエクセルギー損失( $EXL$ )と呼んでいる。

(燃料の $\epsilon$ ) + (空気の $\epsilon$ ) + (水蒸気の $\epsilon$ ) = (燃焼ガスの $\epsilon$ ) + ( $EXL$ )  
 各ユニットごとにエクセルギー損失の値を求めた結果を棒グラフで示したのが図6で、燃焼ユニットでは16.9MJ/kg-fuelのエクセルギー損失が生じている。

一般に現象が生じるためには、ある程度のエクセルギー損失は必要である。エクセルギー損失が現象を推進させる機能をしていると考えれば、エクセルギー損失の必要性は理解できよう。したがって、エクセルギー損失が大きくなるほど、現象が速く進むことが多い。しかし、エクセルギー損失が大きくなり過ぎると、システム全体としてのエネルギー効率が悪くなる。そこで、図6を作成することで、この発電システムでは、送電端電力23.5MJ/kg-fuel（エクセルギー効率46.0%）に対して、燃焼ユニットで多くのエクセルギーが損失していることが分かる。このように、図6は対象システムに潜んでいる課題の抽出に成功している。

### 3. 2 エネルギーの流れとエクセルギーの流れ

以上のように、絶対エクセルギー法では出入りする物質やエネルギーに注目する。これら出入りする流れに対して、エネルギーやエクセルギーの値を計算するので、これらの流れをシステム全体に対して図示できる。25°C、1atmの標準状態での物質

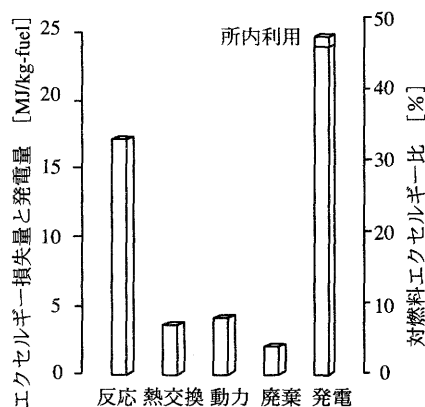


図6 エクセルギーの行き先の分布

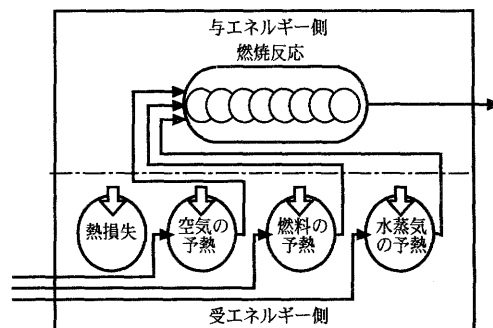


図7 燃焼ユニットの物質とエネルギーの出入り

のエンタルピーは、 $H_2$ 、 $O_2$ 、 $N_2$ などの単体元素のみからなる分子の値を0と約束することが多い。他の分子のエンタルピー値は、これらの単体元素から生成する際のエンタルピー変化量として求めている。この基準に基づく、単体元素より低いエネルギーの値は負の値となる。たとえば、 $25^\circ\text{C}$ 、 $1\text{atm}$ の $1\text{mol}$ の $\text{HCl}$ のエンタルピーは $-92.31\text{kJ}$ となる。このように、物質のエネルギーやエクセルギーの値が負になってしまうと、上記の流れ図を描くのに支障が生じる。これを回避するには $H_2$ 、 $O_2$ 、 $N_2$ などの単体元素を基準物質とせず、図3のように環境条件下で最も安定な物質を基準物質として選び、それらの安定物質のエンタルピーとエクセルギーを0と置く基準を採用すればよい。エクセルギーでは濃度も影響するので、たとえば空素では、空気中のモル分率0.7560の窒素が基準になる。こうして計算される物質のエンタルピーやエクセルギーは、絶対エンタルピー、絶対エクセルギーと呼ばれている。これらの計算法の詳細は文献<sup>2, 3)</sup>に載っている。なお、 $\Delta\epsilon$ の値は、こうした基準のとり方には影響されず、 $\Delta\epsilon = \Delta H - T_0\Delta S$ によって計算すればよい。

#### 4. EUD方法論

##### 4. 1 EUD (Energy-Utilization Diagram) 法の視点<sup>4,5)</sup>

図5の燃焼ユニットをEUD法でみていこう。図7に示すように、EUD法では仲介エネルギーを放出する側（与エネルギー側ed=energy donor）と仲介エネルギーをとり込む側（受エネルギー側ea=energy acceptor）に分けて考えていく。燃焼ユニットでは、与エネルギー側は燃焼反応である。この燃焼が燃焼炉出口温度の一定温度下で生じていると仮定しよう。一方、受エネルギー側は、熱損失を取り込む温度 $T_0$ の環境と、空気や燃料など（この場合は水蒸気も）の流入口温度から燃焼温度までの予熱がある。EUD法では、与エネルギー側のプロセスが質 $A_{ed}$ の仲介エネルギーを放出し、受エネルギー側のプロセスが質 $A_{ea}$ の仲介エネルギーをとり込むときに、 $A_{ed}$ から $A_{ea}$ への仲介エネルギーの質の低下がエネルギー変換の推進力として使われ、この分がエクセルギー損失（EXL）として失われると考える。

##### 4. 2 仲介エネルギーの質の定義

仲介エネルギーの質 $A$ はエネルギーレベルと呼ばれ<sup>1)</sup>、次式で定義される。

$$A = \Delta\epsilon / \Delta H \quad (5)$$

各プロセスに対して、 $\Delta\varepsilon$ と $\Delta H$ から $A$ の値が求まる。また、 $\Delta\varepsilon$ と $\Delta H$ は物質質量に比例する示量因子であるが、 $A$ は物質質量に依存しない示強因子である。仲介エネルギーが図2の仕事の部分のみであれば、 $\Delta S=0$ で $\Delta\varepsilon=\Delta H$ となり、 $A=1$ となる。一方、仲介エネルギーが熱的部分のみであれば、 $\Delta H=T\Delta S$ となり

$$A = 1 - (T_0/T)$$

$T=T_0$  (環境温度) のとき $A=0$ 、 $T$ が無限に高温であれば $A=1$ となり、仕事の質に達する。通常は $A$ が0と1の間をとることが多いが、環境温度以下の熱では $A<1$ 。 $\Delta H$ と $\Delta S$ が異符号となると $A>1$ となる。この物理的な解釈は文献<sup>1)</sup>にある。

#### 4. 3 エクセルギー損失

3. 1では、エクセルギー損失 $EXL$ が $\sum\varepsilon_{j,in} - \sum\varepsilon_{j,out}$ として求められた。これは次式となる。

$$EXL = -\sum_j \Delta\varepsilon_j \quad (6)$$

与エネルギー側 $ed$ と受エネルギー側 $ea$ に分けると、第一法則より $\Delta H_{ed} + \Delta H_{ea} = 0$ なので

$$EXL = -(\Delta\varepsilon_{ed} + \Delta\varepsilon_{ea}) = \Delta H_{ea} (A_{ed} - A_{ea}) \quad (7)$$

このように、エクセルギー損失は、変換されたエネルギー量 $\Delta H_{ea}$ と、 $ed$ 側と $ea$ 側のエネルギーの質の差 $(A_{ed} - A_{ea})$ の積となる。

この式を図7に適用すると、反応系のEUDとして図8を得る。そのためには、図7の各プロセスを一括して $\Delta H$ と $A$ を求めずに、燃焼反応の箇所にも多数の円で描いてあるように、微小な変化に分割して $\Delta H$ と $A$ を求めることで、プロセスの進行によって生じる $A$ の変化を表示している。そこで、絶対エクセルギー法で図6の一つの棒で表示された燃焼ユニットのエクセルギー損失 $EXL$ は、EUD法では図8の $A_{ed}$ の線と $A_{ea}$ の線の間の面積で表示される。

EUD法では、このように微小プロセスの集合体として図示しているために、各プロセスの $A_{ed}$ の変化が表示されている。たとえば、反応が進むにつれて $A$ が急激に変化する反応もあれば、この例のように、ほぼ一定な場合もあり、この $A$ の曲線の形はプロセスの特性を表している。さらに一番重要な特徴は、ピンチの箇所の表示である。ここでピンチとは、与エネルギー側の質 $A_{ed}$ と受エネルギー側の質 $A_{ea}$ との差が極めて小さくなる箇所をいう。

いま、 $A_{ed}$ の線と $A_{ea}$ の線との間の面積 ( $EXL$ ) が大きいと仮定しよう。そのときに、エネルギー効率の向上を目指して、エクセルギー損失が小さくなるように $A_{ed}$ の線を下げるか、 $A_{ea}$ の線を上げるように操作条件を変更すると、両者の線が接近する箇所が現れる。これがピンチで、このピンチが現れてしまうと、他の領域で $(A_{ed} - A_{ea})$ がいくら大きくても、それ以上の改善は望めない。さらに改善するためにはシステム構造を根本的に組み直すことが必要になる。

#### 4. 4 システム全系の表示

絶対エクセルギー法では、図6の棒グラフや流れ図でシステム全系のエネルギー変換の特徴を表示した。EUD法では、システム内のエネルギー変換を反応系、熱交換系、動力系、ならびに廃棄系に分けて表示する。

図4の複合サイクルについては、図8が反応系、図9が熱交換系、図10が動力系の図である。図9の熱交換系では、横軸は熱交換量 $Q$ となり、縦軸 $A$ はカルノー効率 $(T - T_0)/T_0$ となる。この図では、予熱流体 ( $ed$ 側) と受熱流体 ( $ea$ 側) をまとめたコン

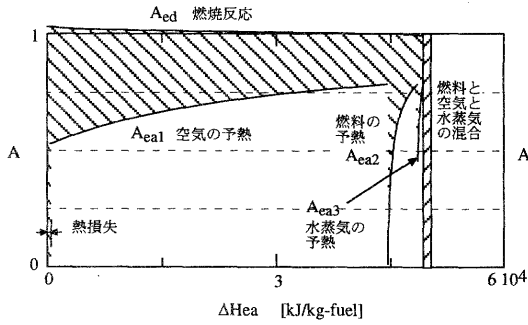


図8 反応系のEUD

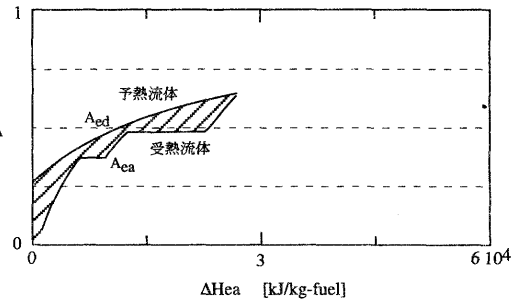


図9 熱交換系のEUD

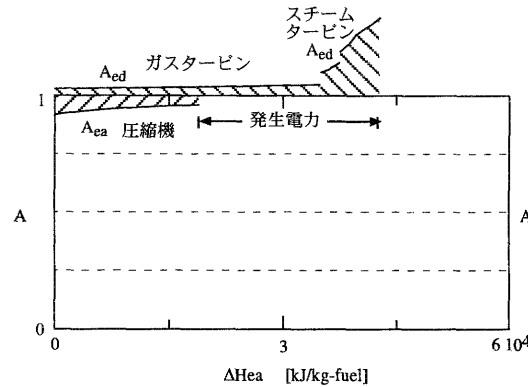


図10 動力系のEUD

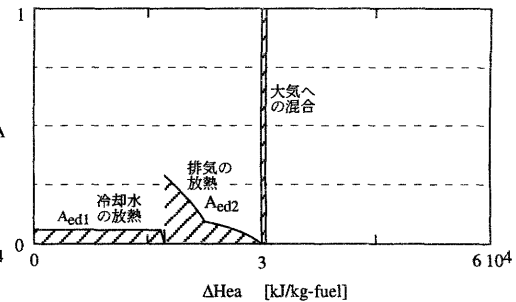


図11 廃棄系のEUD

ポジットカーブの線 ( $A_{ed}$ と $A_{ea}$ ) で表示している。

図10の動力系では、横軸の幅は圧縮機では所要動力を、タービンでは発生動力を表している。これらの線と $A=1$  (仕事の質のレベル) との間の面積がエクセルギー損失となる。圧縮機やタービンが改良されてその効率が1に近づくと、これらの線も $A=1$ の線に近づいて、エクセルギー損失は小さくなる。図10では、ガスタービンとスチームタービンによる発生動力から圧縮機の所要動力を引いたものが発電量となる。

その他に、水蒸気の凝縮に用いた冷却水や熱回収後の排ガスがエクセルギーを持っている。絶対エクセルギー法の図7の廃棄分で、これらが環境と平衡になるまでの変化に対してEUD (図11) を描くと、この分を評価できる。

以上のEUDでは、反応や熱交換や動力系などの異なる現象が同一の座標上に表示されている。そこでこれらを眺めて比較し、エクセルギー損失の大きい箇所を探すことことで、システムのエネルギー効率が向上しない原因がどこにあるかが容易にわかる。この点は絶対エクセルギー法の効果と同じで、問題箇所の指摘ができる。

EUD法では、 $A_{ed}$ と $A_{ea}$ の線の曲がり具合や ( $A_{ed} - A_{ea}$ ) の値をみることで、ピンチに至るまでにどの程度の改善が期待できるか、すなわち改善の可能性の大きさが予測できる。その実現のために、どのような手段がありそうかなど、新しい提案 (システム合成) をしていく際にも、 $A_{ed}$ や $A_{ea}$ の線の高さや曲がり具合の情報が生きてくる。

4. 5 プロセスシステム合成へのアプローチ

メタノール自動車で利用されている増エネルギー法を例に、提案型の利用を考えてみよう。



この反応は、図12に示すようにエネルギーレベルは平均でA=1.02と大きい。この反応が1000℃で生じるとすると、174kJという大きなEXL（右上がりの斜線部の面積）が生じている。このようにEXLが大きいと、そこには改善できる可能性が秘められていることが多い。そこで、次の二つの反応に分解してみる。

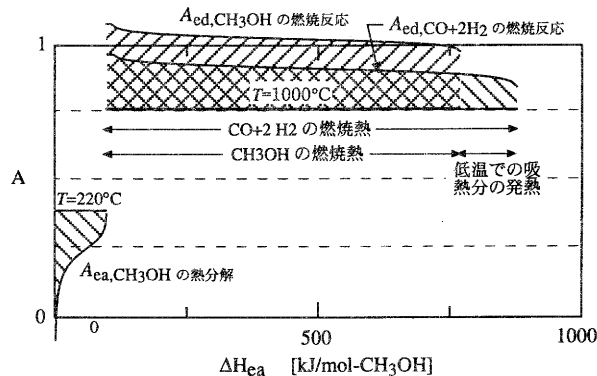
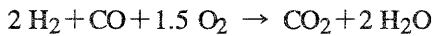
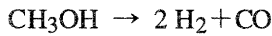


図12 エクセルギー損失を減少させる試みの例

上の反応は96kJの吸熱反応で、図に示すように220℃の廃熱で行うとEXLが17kJである。一方、後者は発熱反応で、その発熱量はメタノールの燃焼熱674kJより96kJ大きい780kJになっている。すなわち、吸熱反応の反応熱として低温でとり込んだ熱を、発熱反応の高温での熱として放出している。その結果、エネルギーレベルAは平均A=0.96に下がり、EXLは116kJと低くなっている。吸熱反応のEXL17kJとこの116kJを合わせても133kJで、直接燃焼の損失より41kJも小さくなっている。このように、メタノールの直接燃焼のエクセルギー損失を低くしていく努力が、1000℃での発熱量の96kJの増加に結びついている。

引用文献

- 1) 石田 愈 ‘熱力学-基本の理解と応用-’ 培風館 (1995)
- 2) JIS Z29204 ‘有効エネルギー評価方法通則’ (1991)
- 3) Kameyama, H. et al. ‘Evaluation of Reference Exergies for the Elements,’ Applied Energy, **11**, 69-83 (1982)
- 4) Jin, H. and Ishida, M. ‘Graphical Exergy Analysis of Complex Cycles,’ Energy-The Int. J., **18**, 615-625 (1993)
- 5) Ishida, M. and Jin, H. ‘A New Advanced Power-Generation System Using Chemical-Looping Combustion,’ Energy-The Int J., **19**, 415-422 (1994)