

# 熱エネルギーに関する革新的省エネルギー理論

## — 熱の完全循環再利用を目指して —

堤 敦司（つづみ あつし）東京大学 生産技術研究所

**要約** 燃料を燃焼して発生させた熱を利用した後、熱を回収してより低温の熱として利用する燃焼・加熱力スケード熱利用が従来の熱利用原理であった。これは燃焼・伝熱過程で大きなエクセルギー損失が起これるとともに回収できる割合が少ないため、結果として、多くのエネルギーを消費していた。これに対して自己熱再生は、断熱圧縮という仕事を加えることで温度を上昇させ、全ての顕熱・潜熱を自己熱交換し、一切加熱することなく自己熱を完全に循環再利用する全く新しいエネルギー利用原理である。自己熱再生は、すべての熱的単位操作に適用可能であり、燃焼によるエクセルギー損失がないためプロセスのエネルギー消費を1/5から1/10程度まで激減させることができ、大幅な省エネルギー化が可能となる。

### 1. はじめに

従来のエネルギー生産・利用体系は、熱あるいは仕事を生産するエネルギー生産（エネルギー変換）システムと、熱あるいは仕事を受け取って利用するエネルギー利用システムとからなっている。省エネルギーには、まず、エネルギー生産システムにおいてエネルギーを効率よく利用すること、すなわち、エネルギー変換の効率向上を図ることが重要と考えられた。次に、エネルギー利用システムにおける省エネルギーは、動力回収あるいは熱回収といったエネルギー回収が考えられてきた。ここでは、熱エネルギー利用技術に関して、どのようにすれば省エネルギー化が図れるのかについて考える<sup>1)</sup>。

### 2. エネルギー生産（エネルギー変換）システム

エネルギー生産（エネルギー変換）システムでは、化学エネルギーである燃料を燃焼させ熱を発生させ、熱 $Q$ および仕事 $w$ の形でエネルギーを取り出す（図1）。燃焼で取り出すことができる全エネルギー量は $-\Delta H$ で表され、エネルギー保存則より、

$$-\Delta H = w + Q = -\Delta G - T\Delta S \quad (1)$$

取り出す仕事を最大にするには、取り出す熱を常温

の熱として可逆的に取り出せばよい。取り出しうる最大の仕事量、すなわちエクセルギーを $Ex$ とすると、

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

となる。すなわち、エネルギーは、仕事として取り出すことができるエクセルギーと、環境温度の熱エネルギー、すなわち無価値の無効エネルギー（アネルギー）からなっており、両者の和は常に一定である。そして、プロセスに不可逆過程が含まれると、エントロピー $S_{gen}$ が生成し、仕事として取り出すことができるエネルギー、すなわちエクセルギーが減少する。これがエクセルギー損失であり、エクセルギー損失 $Ex_{loss}$ とエントロピー生成 $S_{gen}$ の関係は、次式となる。

$$Ex_{loss} = T_0 S_{gen} \quad (3)$$

従って、不可逆過程が含まれる場合は、(2)式は、次のように書き換えられる。

$$-\Delta H = \underbrace{(Ex - Ex_{loss})}_{\text{全エネルギー}} + T_0 \underbrace{(-\Delta S + S_{gen})}_{\text{アネルギー}} \quad (4)$$

(4)式の右辺第1項は取り出せる最大仕事（エクセルギー）を表し、第2項は環境に捨てる熱（無効エネルギー、アネルギー）を表している。(4)式から、エネルギーの量は保存されており一定であるが、取り出せる仕事が不可逆性によるエクセルギー損失により減っていくのがわかる。「エネルギーを消費する」ということは、エネルギー保存則から考えて間違った表現で、エクセルギーがアネルギー（無効エネルギー）