

■ 研究論文 ■

熱の多段階利用における温度別料金

Temperature-of-Use Pricing in Heat Cascading

島崎 洋一*・秋澤 淳**・柏木 孝夫***

Yoichi Shimazaki Atsushi Akisawa Takao Kashiwagi

(原稿受付日1998年12月21日, 受理日1999年6月11日)

Abstract

The aim of this study is to propose a new exergy cost theory which defines the temperature-of-use pricing in heat cascading from the viewpoint of welfare economics. A large number of optimization methods related to exergoeconomics emerged in the 1980s and were applied to the optimization of energy systems from the systems engineering. For example, CGAM problem. These models did not take into account the welfare economics approach.

The authors assume the combination of two heat exchangers for the high and low temperature of heat demand. One considers heat exchanger on parallel flow i. e. conventional heat supply, the other assumes heat exchanger on series flow i.e. heat cascading supply. We have developed a cascade price model so as to maximizing the consumer surplus. Solution optimization is determined by Kuhn-Tucker's condition. The optimal solutions for given fuel price conditions show that the behavior of heat supply and marginal value of low temperature heat strongly depend on transport efficiency of cascade systems. Furthermore, we developed the temperature-of-use pricing model. We estimated exergy cost in a numerical example. It was found that exergy unit cost of heat is not correlated.

1. はじめに

熱の多段階利用が省エネルギーの切り札として注目されている。近年、異業種の工場群を結合して、相互に排熱の需給を行った場合に得られる省エネルギー効果を評価する研究^{1, 2)}が盛んに行われている。しかし、熱料金に焦点をあてた研究はあまり行われていない。従来のように熱と燃料が一对一で対応していれば熱の価値と燃料価格は一致するが、熱の多段階利用が図れれば、一对一ではなくなるので、熱料金に対する理論的な裏付けが不可欠である。従来、エネルギーシステムの最適化を行う際にエクセルギーコスト^{3, 4, 5)}が考慮されているが、これは工学的に定義されたものであり、経済学的な裏付けが明らかではない。

一方、電力料金については、時間帯別料金制度が存

在し、デマンドサイドマネジメントの有効な手段として古くから議論されている。均一料金と時間帯別料金における利得の違いは、厚生経済学により明確に説明されている^{6, 7)}。時間帯により需要関数が異なるのであれば、各々で料金を考える方が望ましい状態で実現できる。この考え方は熱の場合にもあてはまると考えられる。高温の熱はエクセルギーが高いので、発電やプロセス加熱など、様々に使いうるが、低温の熱の用途は限定される。温度の異なる熱は物理的に異なる能力を持つので、異なる商品として取り扱うべきである。したがって、温度によって需要関数が異なると考えられるので、温度別に料金を与える方が社会的に好ましいと予想される。

そこで、本研究では、社会的厚生最大化の観点から、従来型とカスケード型の2つの熱供給方法を2つの熱交換器の組み合わせによりモデル化し、熱の多段階利用における温度別熱料金のメカニズムを明らかにすることを目的とする。本解析では、熱の価格は温度の関数と考えるので、エクセルギーに対する料金を導出することができる。以下では、熱供給方法に関する仮定、

*山梨大学工学部循環システム工学科助手

〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11

**東京農工大学工学部機械システム工学科助教授

*** " " " 教授

〒184-8588 東京都小金井市中町2-24-16

カスケード料金モデルの定式化を示し、カスケード型熱交換器が稼働する最適条件を導き、従来型の燃料価格の変化に伴う熱交換器の最適挙動を求める。次に、数値例として、燃料価格を固定しカスケード熱交換器の挙動に大きな影響を及ぼすパラメータ、供給コストと輸送効率について感度分析を行う。さらに、カスケード型熱交換器のみに着目して、温度と流量の因子を含めた温度別料金モデルに拡張し、エクセルギーを考慮した熱料金の分析を試みる。

2. カスケード料金モデル

2.1 熱供給方法に関する仮定

図1に示すように高温と低温の2つの温度レベルを想定し、その熱需要を満たすような熱交換器の組み合わせを考える。並列が従来型熱供給、直列がカスケード型熱供給を表す。つまり、カスケード型熱供給の場合、高温側の熱交換器からの排熱を低温側で回収する。なお、従来型熱供給では燃料を焼き、カスケード型熱供給では工場などの排熱源から熱を受け取ることを想定する。

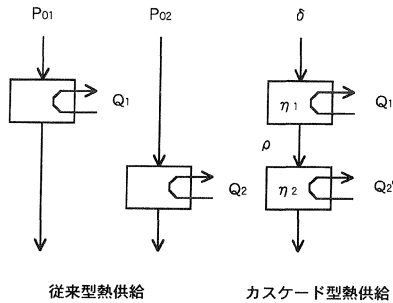


図1 カスケード料金モデルの概要

2.2 社会的厚生最大化

カスケード型熱供給設備の保有者（以下、カスケード）は、従来型熱供給の燃料価格が与えられた状況で、コスト的に有利であればカスケード熱交換器を運転すると考えられる。すなわち、ある経済的指標を最大化するような合理的行動をとるとみなす。本解析では、社会的厚生⁽³⁾の最大化を指標として、カスケードの立場から従来型の燃料価格を所与とするときのカスケード型熱交換器の挙動を導く。熱供給で得られる便益は、熱の消費によって得られた効用からエネルギーコストを差し引いたものとし、(1)式のように定式化される。

$$W = \int_0^Q P(q) dq - C(Q) \rightarrow \text{Max.} \quad (1)$$

$P(q)$: 熱の需要家の効用関数, $C(Q)$: コスト関数

本研究で使用する記号一覧を以下に示す。

- <添字> i : 温度領域 (i=1:高温, i=2:低温)
 0 : 初期, med : 中間, out : 最終
 a : 環境状態 (15°C)
- <記号> E : エクセルギー [W]
 K : カスケード型設備容量 [W]
 L : ラグランジアン [円]
 P : 燃料価格, 熱の限界価値 [円/MJ]
 PE : エクセルギー限界価値 [円/MJ]
 Q : 従来型熱供給 [W]
 Q' : カスケード型熱供給 [W]
 T : 温度 [°C]
 ΔT : ピンチポイント温度 [°C]
 W : 目的関数 (社会的厚生) [円]
 c : 比熱 [kJ/kg°C]
 h : 比エンタルピー [kJ/kg]
 m : 流量 [kg/s]
 α : 変換効率 [-]
 γ : カスケード型固定費 [円/MJ]
 δ : カスケード型変動費 [円/MJ]
 ϵ : 価格弾性値 [-]
 η : 機器効率 [-]
 κ : 有効比 [-]
 λ : ラグランジェ乗数 [円/MJ]
 μ : ラグランジェ乗数 [円/MJ]
 ρ : 輸送効率 [-]

2.3 モデルの定式化

評価関数は、2つの温度レベルおよび従来型とカスケード型のシステムコストを考慮し、(2)式で表すことができる。

$$W = \int_0^{Q_1+Q_1'} p_1(q) dq_1 + \int_0^{Q_2+Q_2'} p_2(q) dq_2 - (\gamma K + \delta Q_1') - (P_{01} Q_1 + P_{02} Q_2) \rightarrow \text{Max.} \quad (2)$$

(2)式において第1項目が高温熱の効用、第2項目が低温熱の効用、第3項目がカスケード型熱交換器の供給コスト、第4項目が従来型熱交換器の燃料コストを意味する。(3)~(5)式に制約条件を示す。(3)式はカスケード型熱供給が設備容量以下であること、(4)式はカスケード型熱交換器の1段目と2段目の熱量バランスを意味する。 α は熱交換器の効率 η で決定される変換効率、 ρ は輸送効率を示している。

$$Q_1' \leq K \quad (3)$$

$$Q_2' \leq \eta_2 \rho \left(\frac{1}{\eta_1} - 1 \right) Q_1' = \alpha \rho Q_1' \quad (4)$$

$$Q_1, Q_2, Q_1', Q_2', K \geq 0 \quad (5)$$

2.4 カスケード型熱供給の最適条件

(2)~(5)式の目的関数および制約条件より, (6)式に示すラグランジアンを構成する.

$$L = W + \lambda(\alpha\rho Q_1' - Q_2') - \mu(K - Q_1') \quad (6)$$

次に, クーン・タッカーの条件から, カスケード型熱交換器による供給が常に行われる最適条件を導く. この条件は(7)式で表される. すなわち, 不等号が成り立つときは変数の値がゼロであり, ゼロでない値が最適となるとときには等号が成立する.

$$\frac{\partial L}{\partial X_i} \leq 0 \quad \begin{cases} < 0 \rightarrow X_i = 0 \\ = 0 \rightarrow X_i > 0 \end{cases} \quad (7)$$

各変数について, この条件を適用した結果が(8)~(12)式である.

$$\frac{\partial L}{\partial Q_1} = P_1 - P_{01} \leq 0 \rightarrow P_1 \leq P_{01} \quad (8)$$

$$\frac{\partial L}{\partial Q_2} = P_2 - P_{02} \leq 0 \rightarrow P_2 \leq P_{02} \quad (9)$$

$$\frac{\partial L}{\partial Q_1'} = P_1 - \delta + \lambda\alpha\rho - \mu \leq 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial L}{\partial Q_2'} = P_2 - \lambda \leq 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial L}{\partial K} = -\gamma + \mu \leq 0 \quad (12)$$

(10)~(12)式において等号が成立する場合をとり, カスケード型熱供給が行われる場合の最適条件, (13)式が導かれる. これは, 1 段目の熱料金と輸送効率を加味した 2 段目の熱料金の和が, カスケード型熱交換器の変動費と固定費の和, すなわち, カスケード型熱交換器の供給コストに等しいことを表す. いい換えれば, 高温熱と低温熱によるコストの分担を規定している.

$$P_1 + \alpha\rho P_2 = \delta + \gamma \quad (13)$$

2.5 燃料価格の変化による最適解の挙動

表 1 に示すように 4 つの熱交換器の稼働に基づき, A~E の運転モードを設定する. そして, 上記の最適条件に基づき, 従来型の燃料価格 P_0 を変化した場合の最適解の挙動を調べる. ここで, 簡略化のため, 従来型の燃料価格は高温供給と低温供給を問わず同じとし, $P_0 = P_{01} = P_{02}$ と考える.

図 2 は, 燃料価格 P_0 の変化による分析を図解したものである. 右下がりの太線が(13)式で表されるカスケード熱料金ラインを示し, カスケード型が稼働した場合における熱料金の軌跡を表している. 一方, 右上がりの太線がカスケード使いきりラインを示し, (4)

表 1 カスケード料金モデルの運転モード

モード	従来型供給		カスケード型供給	
	Q_1	Q_2	Q_1'	Q_2'
A	×	×	○	○
B	○	×	○	○
C	×	○	○	○
D	○	○	○	○
E	○	○	×	×

○: 供給あり, ×: 供給なし

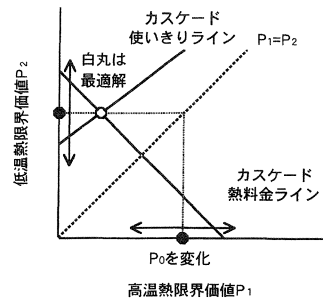


図 2 燃料価格 P_0 の変化による運転モード分析

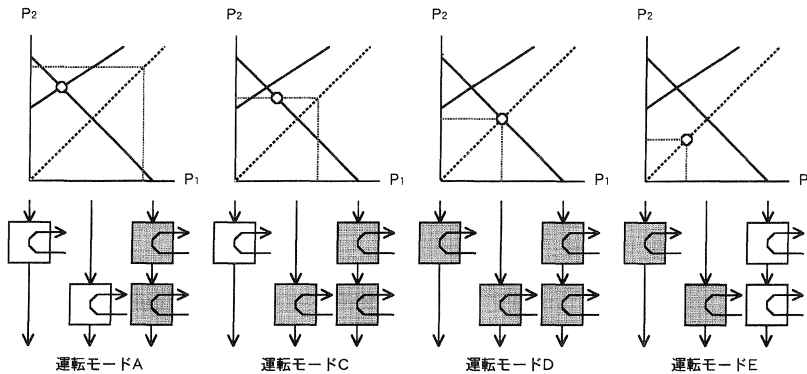


図 3 燃料価格 P_0 の変化による運転モード A→C→D→E

式のカスケード熱交換器の1段目と2段目の熱量バランスで等号が成り立つ状態と定義し、カスケード型熱交換器においてすべて熱を使いきる場合の熱料金の軌跡である。

図3のように熱交換器の最適挙動は、カスケード熱料金ラインとカスケード使いいきりラインの交差点が $P_1 = P_2$ のラインの上側か下側により軌跡が異なる。カスケード熱料金ラインとカスケード使いいきりラインの交差する点が $P_1 = P_2$ ラインの下側の場合、燃料価格 P_0 が安くなるに伴い運転モードは、 $A \rightarrow B \rightarrow D \rightarrow E$ の軌跡を描く。一方、交差する点が $P_1 = P_2$ ラインの上側の場合、燃料価格 P_0 が安くなるに伴い運転モードは、 $A \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E$ の軌跡を描くことがわかった。

3. カスケード料金モデルの数値例

3.1 熱の需要関数の推定

次に、燃料価格 P_0 を固定し、他のパラメータを変化させた場合の最適挙動を数値例により確かめる。はじめに、熱の需要関数を(14)式のような一次関数として、推定する。

$$P_i(q_i) = \left(1 + \frac{1}{\varepsilon_i}\right) P_0 + \left(\frac{P_0}{\varepsilon_i Q_{0i}}\right) q_i \quad (14)$$

そして、表2に示すような産業用（高温熱）および空調用（低温熱）の都市ガス消費量のデータ⁹⁾から、(15) (16) 式で表される熱需要関数を推計した。なお、需要関数 $P(q)$ の単位は [円/MJ]、熱需要量 q の単位は [GW] である。価格弾性値 ε は高温熱、低温熱ともに0.3とした。

$$P_1(q_1) = 4.71 - 1.13q_1 \quad (15)$$

$$P_2(q_2) = 7.53 - 8.73q_2 \quad (16)$$

3.2 基準ケースにおける最適解

表3に数値例で用いる基準パラメータ一覧を示す。ここで、カスケード型熱供給コスト ($\delta + \gamma$) はデータが存在しないため、1.0 [円/MJ] と設定した。基準ケースにおけるカスケード使いいきりの条件とカスケード熱料金ラインは、(4)、(13)式に基づき、次式で表される。

$$Q_2' = 0.2Q_1' \quad (17)$$

$$P_1 + 0.2P_2 = 1.0 \quad (18)$$

図4は基準ケースにおける最適解を示したものである。図から明らかなように、カスケード熱料金ラインとカスケード使いいきりラインの交差点が、従来型の燃

表2 熱の需要関数の推計データ⁹⁾

記号	定義	高温熱	低温熱
Q_{0i}	熱需要 [GW]	3.20	0.66
P_{0i}	燃料価格 [円/MJ]	1.09	1.74
ε_i	価格弾性率 [-]	0.30	0.30

表3 基準パラメータ一覧

記号	定義	数値
$\delta + \gamma$	カスケード型コスト [円/MJ]	1.0
ρ	カスケード型輸送効率 [-]	1.0
η_1	カスケード型高温機器効率 [-]	0.8
η_2	カスケード型低温機器効率 [-]	0.8
α	カスケード型変換効率 [-]	0.2

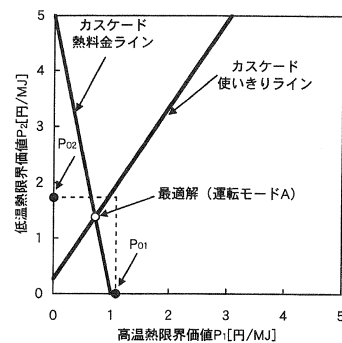


図4 基準ケースにおける最適解

料価格 P_{01} と P_{02} より安いことから、基準ケースにおける運転モードは、カスケード型熱供給ですべての熱需要を賄うAである。

3.3 パラメータ感度分析

カスケード型熱交換器の最適挙動に影響を及ぼす2つのパラメータ、カスケード型熱交換器の供給コスト ($\delta + \gamma$) と輸送効率 (ρ) について感度分析を行った。図5と図6にその結果を示す。図中で白丸はカスケード熱料金ラインとカスケード使いいきりラインの交点を記したものであり、実線は最適解の軌跡を表す。黒丸は従来型の高温と低温の燃料価格を示し、それらを垂直に結んだ破線は従来型とカスケード型の熱供給方法の境界を表すことになる。この領域で白丸をつなぐラインが出た場合には最適解は境界上を移動する。

図5のようにカスケード型熱交換器の供給コストを変化させた場合、カスケード使いいきりラインの軌跡は変わらないため、常にカスケード使いいきりライン上で交点が移動する。カスケード型熱供給コストが高くなるに伴い交点は従来型の低温側の燃料価格 P_{02} に達し、

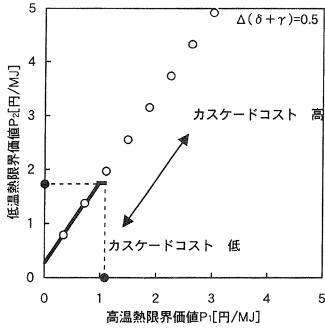


図5 カスケード供給コストの感度分析

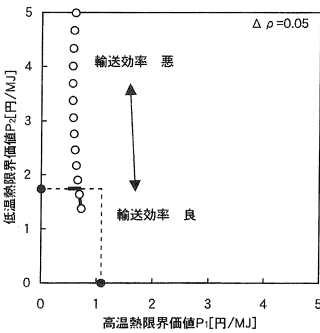


図6 輸送効率の感度分析

運転モードはAから低温側は従来型で補うCに切り替わる。やがて従来型の高温側の燃料価格 P_{01} より高くなるため、すべてを従来型で賄うEとなる。

一方、図6のように輸送効率を変化させた場合、両方のラインが同時に動くため、基準ケースの交点から左上がりの軌跡を描く。すなわち、輸送効率が悪くなるにしたがい、交点は従来型の低温側の燃料価格 P_{02} に達し、運転モードはAから低温側は従来型で補うCに切り替わる。これは、カスケード型熱供給において、高温側から低温側からへの排熱再利用量が少なくなるほど、低温側の熱料金が増すため、低温側は従来型で供給を行った方が低コストとなることを表している。

4. 温度別料金モデルへの拡張

4.1 モデルの概要

以上の分析より、カスケード型熱供給器の最適導入形態、各パラメータの影響を把握することができた。次に、カスケード型熱供給の熱を使いきる状態に着目し、カスケード型の熱交換器に温度と流量の因子を含めたモデル化を行う。温度を考慮することにより、熱量をエクセルギーに変換することが可能となり、エクセルギーと熱料金の関係、熱のエクセルギー単価を導

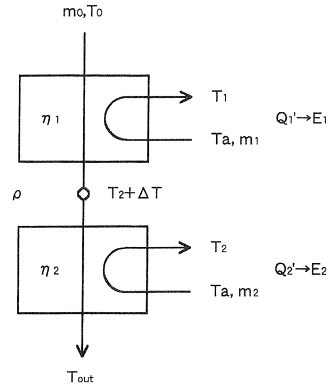


図7 温度別料金モデルの概要

出することができる。

図7は、温度別料金モデルの概要を示したものである。はじめに、高温側の熱交換器で主流温度 T_0 の流量 m_0 と環境温度 T_a の流量 m_1 を熱交換させ、高温側に熱を供給する。そして、低温側の熱交換器で排熱である主流温度 $T_2 + \Delta T$ の流量 m_0 と環境温度 T_a の流量 m_2 を熱交換させ、低温側に熱を供給する。このような熱の2段階利用により、高温側と低温側の需要を満たす構造になっている。

4.2 モデルの定式化

熱交換器の高温側と低温側における熱量バランスは、(19) (20) 式で表される。

$$Q_1' = m_0 c_0 (T_0 - T_2 - \Delta T) = m_1 c_1 (T_1 - T_a) \quad (19)$$

$$Q_2' = m_0 c_0 (T_2 + \Delta T - T_{out}) = m_2 c_2 (T_2 - T_a) \quad (20)$$

ここでは、低温側の温度 T_2 を変化させることを考える。(19) (20) 式を展開することにより、以下に示すように高温側の温度 T_1 および主流最終温度は T_{out} は T_2 の従属変数となる。

$$T_1 = \frac{m_0 c_0}{m_1 c_1} (T_0 - T_2 - \Delta T) + T_a \quad (21)$$

$$T_{out} = \frac{m_2 c_2}{m_0 c_0} (T_a - T_2) + T_2 + \Delta T \quad (22)$$

ここで、(23) 式に示すような流量比となる無次元数を導入する。簡単のため流量比を1とした場合、温度 T_1 および主流最終温度は T_{out} は、(24) (25) 式のようにになる。

$$\frac{m_1 c_1}{m_0 c_0} = \frac{m_2 c_2}{m_0 c_0} = 1 \quad (23)$$

$$T_1 = T_0 - T_2 - \Delta T + T_a \quad (24)$$

$$T_{out} = T_a + \Delta T \quad (25)$$

熱交換器の効率は、環境温度を基準とした主流の比エンタルピー-hの入出力比として考え、(26) (27) 式のように定式化する。

$$\eta_1 = \frac{h_0 - h_{med}}{h_0} = \frac{T_0 - (T_2 - \Delta T)}{T_0 - T_a} \quad (26)$$

$$\eta_2 = \frac{h_{med} - h_{out}}{h_{med}} = \frac{T_2 - T_a}{T_2 - \Delta T - T_a} \quad (27)$$

以上より、低温側の出口温度 T_2 を決定することにより、カスケード型熱交換器の機器効率が決定され、カスケード使いきり状態における熱の限界値が定まる。さらに、本研究では、熱のエクセルギー-限界値とエクセルギーの関係調べるため、(28) 式で定義される有効比を用いて、得られた熱量をエクセルギー換算する。なお、熱のエクセルギーはその熱量によってなし得る仕事量で定義されることから、有効比が高いほど、熱のエクセルギーは大きいとされる。いい換えれば、熱量が等しくても熱のエクセルギーは、温度 T_i により異なり、高温になるほど大きいことを意味する。

$$\kappa_i = \frac{E_i}{Q_i} = 1 - \frac{T_a}{T_i - T_a} \ln \frac{T_i}{T_a} \quad (28)$$

4.3 温度別料金モデルの計算結果

表4に温度別料金モデルの計算条件を示す。ここでは、低温出口温度 T_2 を10℃ごとに100~200℃まで変化させた場合について、高温側と低温側の解の挙動を

表4 温度別料金モデルの計算条件

記号	定義	数値
T_2	低温出口温度 [°C]	100→200
T_0	主流初期温度 [°C]	1000
T_a	環境温度 [°C]	15
ΔT	ピンチポイント温度 [°C]	15
$\delta + \gamma$	カスケード型コスト [円/MJ]	1.0
ρ	カスケード型輸送効率 [-]	1.0

みる。なお、ここで考える温度範囲において需要関数は温度によらず等しいと仮定する。

図8~図13に分析結果を示す。図8と図10から明らかなように低温出口温度 T_2 を100~200℃に変化させた場合、高温出口温度 T_1 は900~800℃に変化する。

図9と図11はエクセルギーと熱エクセルギー-限界値の関係を高熱、低熱それぞれについて示したものである。ここで、熱エクセルギー-限界値とは、高熱の限界値を800℃、低熱の限界値を100℃の有効比を用いてエクセルギー換算したものである。これらの図から明らかなように高熱、低熱ともにエクセルギーあたり一定の単価が存在しないことがわかる。特に、低熱は温度が低下するにしたがい急激にエクセルギー-限界値が上昇する。

図12は高熱と低熱の限界値の関係を示したものである。高熱の限界値と比べて、低熱の限界値が大きく変化し、低温出口温度が170℃あたりか

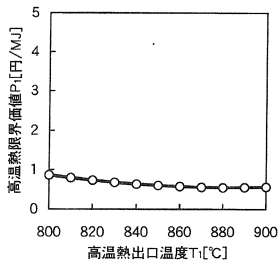


図8 高熱の出口温度と限界値

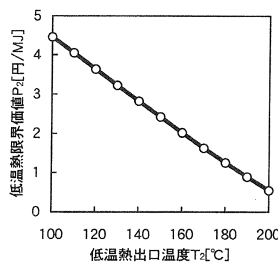


図10 低熱の出口温度と限界値

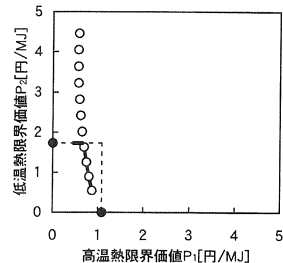


図12 高熱と低熱の限界値の関係

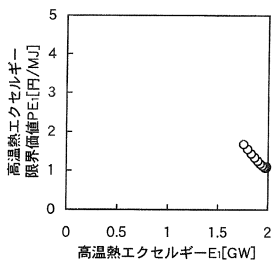


図9 高熱のエクセルギー-限界値

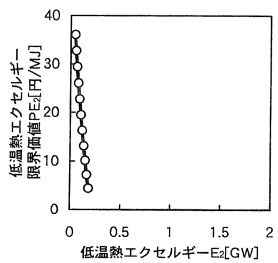


図11 低熱のエクセルギー-限界値

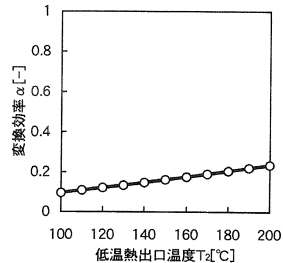


図13 低熱出口温度と変換効率

ら運転モードがCからAに変化する。これは、図13の低温熱出口温度と変換効率が示すように低温熱出口温度が200℃に近づくにつれ、高温側からの排熱の変換効率を表す α の値が上昇することに起因する。

5. おわりに

本研究では、従来型とカスケード型の2つの熱供給方法についてモデル化を行い、社会的厚生最大化を評価規準にカスケード型熱交換器が稼働する最適条件および温度別料金の設定メカニズムを明らかにした。その結果、熱の多段階利用に関して、以下の知見が得られた。

第1に、熱の多段階利用に要するコストは、高温側の熱料金と熱回収、輸送効率で割引いた低温側の熱料金の和に等しい。低温側の熱料金が低く設定されると高温側熱料金が高くなり、カスケード利用がされにくくなるとともに、直炊きによる低温熱供給が増えるため、熱力学的に好ましくない。

第2に、低温側の熱の限界価値は輸送効率に対する感度が高い。効率改善が熱の多段階利用の促進に非常に効果的である。

第3に、温度別料金の導出から、温度領域全般にわたる熱のエクセルギー単価は存在しない。低温熱については温度上昇が単価の低減に強く影響する。

本解析で使用した需要関数のデータベースは、契約

規模の大小による単価設定の影響を受けている。そのため、高温熱の方が限界価値が小さく出ており、一般的感覚に必ずしも合わない。契約状態による影響を排除したデータによる推定が課題である。

参考文献

- 1) 島崎洋一・秋澤 淳・柏木孝夫：エネルギーカスケード型工業団地における最適エネルギー多段階利用モデルの開発，日本エネルギー学会誌，77 (12)，(1998)，1193-1200.
- 2) Shimazaki, Y. Akisawa, A. Kashiwagi, T. : A Model Analysis on the Effects of Energy Cascade System, TAIES'97, Beijing, China, (1997), 313-320.
- 3) Gaggioli, R. A. Wepfer, W. J. : Exergy Economics, Energy, 5(8), (1980), 823-837.
- 4) Valero, A. et al. : CGAM problem define and conventional solution, Energy, 19 (3), (1994), 279-286.
- 5) Valero, A. et al. : Application of the exergetic cost theory to the CGAM problem, Energy, 19 (3), (1994), 365-381.
- 6) 茅 陽一：電力時間帯別料金制の動学的分析（基礎理論），電気学会論文誌C, 105 (10), (1985), 193-200.
- 7) 山地憲治：電力市場のシナジェティックス，電気学会論文誌C, 107 (11), (1987), 994-999.
- 8) 秋澤 淳・茅 陽一：時間帯別料金制下における電力託送を含めたコジェネ自家発の最適挙動，電気学会論文誌B, 115 (8), (1995), 939-945.
- 9) 資源エネルギー庁ガス事業課ガス保安課監修：ガス事業便覧，社団法人日本ガス協会 (1997).

協賛行事ごあんない

「平成12年電気学会基礎・材料・共通部門大会」について

〔開催日時〕平成12年9月7日(木)，8日(金)

〔大会参加費〕8,000円，懇親会参加費5,000円

〔開催場所〕北海道大学工学部

〔問合せ先〕

(札幌市北区北13条西8丁目)

実行委員会幹事 菅原 広剛

〔一般講演〕(取り扱う分野)

〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目

1. 教育・研究，2. 放電基礎・応用，

北海道大学大学院工学研究科電子情報工学専攻

3. 光応用・視覚・照明，4. 計測，

電話：011-706-6480 (直通) Fax：011-706-7890

5. 誘電・絶縁材料等

E-mail：sgwr@eng.hokudai.ac.jp