産業排熱のカスケード利用による 環境低負荷型ヒートコンビナートの有効性評価

学生員 若 園 芳 嗣 (名古屋大学) 正 員 加 藤 丈 佳 (名古屋大学)
正 員 早 川 直 樹 (名古屋大学) 正 員 鈴 置 保 雄 (名古屋大学)
正 員 茅 陽 一 (慶應義塾大学)

Feasibility Assessment of Efficient, Environmentally Benign and Economic Heat Combinat
by Cascade Use of Waste Energy in Industries

Yoshitsugu Wakazono, Student Member, Takeyoshi Kato, Member, Naoki Hayakawa, Member,
Yasuo Suzuoki, Member (Nagoya University), Yoichi Kaya, Member (Keio University)

In recent years, cascade use of waste energy, so called "heat cascading", in the industrial sector is expected to be one of the promising measures for improving the energy efficiency of regional energy system. This paper discusses the feasibility of heat cascading among major energy intensive industries from technical and economical aspects.

The simulation results revealed that (i) the introduction of heat cascading contributes to the drastic energy saving, (ii) the energy transmission by electricity achieves the drastic energy saving when heat transmission loss is large, (iii) heat cascading promotes the efficiency of regional energy system including industrial, residential and commercial sectors by optimizing the energy flow in the heat combinat, (iv) high cost of heat transmission brings about a trade-off relationship between energy-saving and economical potentials, (v) the economical incentive such as reduction of cost of heat transmission and/or introduction of carbon tax relaxes the trade-off relationship.

キーワード：ヒートカスケーディング、ヒートコンビナート、省エネルギー、エネルギー輸送、炭素税

1. はじめに

近年、エネルギー・環境問題が地球規模での重大な課題となっている。1997年12月の地球温暖化防止京都会議(COP3)では、日本国内において1990年比6%の温室効果ガス排出削減が義務づけられた。この値を達成するには、化石燃料消費の抑制によるこれまで以上の省エネルギー化が不可欠である。このような状況下で、エネルギーシステムの効率化・高度化による省エネルギー化方策の一つとして、未利用エネルギーの有効活用による地域エネルギーシステムの総合的合理化・省エネルギー化技術が注目されている。特に、産業部門における未利用エネルギーの活用方法として、産業排熱の多段階利用(ヒートカスケーディング)が提案・検討されている⁽¹⁾⁻⁽⁶⁾。ヒートカスケーディングは、工場の生産プロセスにおける排熱エネルギーを回収・再利用することにより、未利用エネルギーの有効活用・エネルギー効率の向上を実現する方法である。

筆者らは、可能な省エネルギー技術の導入がほぼ完了し、近年下げ止まりや逆に上昇の傾向にあるエネルギー消費原

単位を再び低減させる一方策として、従来の工場単位を対象としたヒートカスケーディングの概念・視点を異業種間における排熱エネルギーの相互融通に拡大した環境低負荷型ヒートコンビナートの構築を提言している。これまでに地域産業構造の特徴や新規産業立地・再開発を考慮して、異業種間ヒートカスケーディングの省エネルギー性について基礎的な検討を行った⁽⁶⁾。

本論文では、従来までの検討に対して熱輸送損失の考慮や経済的観点からの評価を加えることにより、ヒートカスケーディングの導入に関する実現性の観点から検討することを目的としている。そこで、熱輸送損失およびカスケーディングに要するコストを従来のヒートコンビナートモデルに取り入れ、その影響について評価を行った。また、民生需要をも考慮に入れ、産業と民生を含めた地域エネルギーシステム全体としての効率化の可能性について検討を行った。さらに、省エネルギー性のみではなく経済性の観点も考慮して、異業種間ヒートカスケーディングの有効性の評価を行った。

2. エネルギー多消費型産業の排熱需給

本論文では、エネルギー多消費型主要4業種(鉄鋼、窯業土石、紙パルプ、化学工業)をヒートカスケード対象業種として取り上げた。エネルギー需給を7温度帯(500°C、300°C、200°C、150°C、100°C、60°C、30°C)の熱需給および電力需要に区分した。図1に1990年における全国の主要4業種の単位面積当たりの排熱供給および熱・電力需要(2次換算)を示す⁽³⁾。図に示されている排熱供給量および熱・電力需要量とは、現状の工場内においてヒートカスケードに関連している熱エネルギー量を指している。実際の工場内部では、図に示されていないエネルギー需給が存在する。しかし、本論文では現状の業種単体で行われているヒートカスケードの対象を異業種間に拡張した場合の省エネルギー性評価を目的としている。そこで、現状のヒートカスケードに関与していない部分のエネルギーフローについては、本モデルでの最適化の対象外としている。また、各業種で製品製造にともなって産出される副産物についても、燃焼によって得られる熱エネルギー量としてモデル内での排熱エネルギーに計上している。なお、主要4業種はいずれも素材型産業であることから連続操業を仮定し、1時間帯モデルで表現した。

(a) 排熱供給

(b) 熱・電力需要

図1 1990年における主要4業種の排熱供給および熱・電力需要

Fig. 1. Recoverable waste heat supply and energy demand of major industries in 1990.

3. 異業種間ヒートカスケードの省エネルギー性

〈3・1〉 目的関数および評価方法 エネルギー多消費型主要4業種で構成されるコンビナートモデルを想定する。ヒートコンビナート内の熱利用設備としては、背圧タービン、復水タービン、減圧器、蒸気・温水回収設備、また将来技術としてスーパーヒートポンプ(SHP)を想定した。さらに、熱供給・電力供給の不足分を補うために、500°Cの蒸気を発生する重油焚きボイラをモデルに組み込んだ。本モデルの定式化で用いた記号を以下に示す。

- E_1 : 異業種間ヒートカスケードを実施しない場合のヒートコンビナート全体の燃料エネルギー消費量 [Tcal]
- E_2 : 異業種間ヒートカスケードを実施する場合のヒートコンビナート全体の燃料エネルギー消費量 [Tcal]
- $E_t(i)$: 業種 i が単独でエネルギーフローを最適化した場合の単位面積当たりの燃料エネルギー消費量 [Tcal/km²]
- $e(i, T_1, j, T_2)$: 業種 i の温度帯 T_1 から、業種 j の温度帯 T_2 へ移動する排熱量 [Tcal]
- $f_h(j, T_2)$: 業種 j の熱供給の不足分を補うための燃料消費量 [Tcal]
- $f_e(j)$: 業種 j の電力供給の不足分を補うための燃料消費量 [Tcal]
- S_{total} : ヒートコンビナート全体の敷地面積 [km²]
- $S(i)$: ヒートコンビナート内における業種 i の敷地面積 [km²]
- $E_s(i, T_1)$: 業種 i の温度帯 T_1 での単位敷地面積当たりの排熱供給量 [Tcal/km²]
- $E_d(j, T_2)$: 業種 j の温度帯 T_2 での単位敷地面積当たりの熱需要量 [Tcal/km²]
- $E_e(j)$: 業種 j の温度帯 T_2 での単位敷地面積当たりの電力需要量 [Tcal/km²]
- α : ボイラ効率 (80 %)
- η : 復水タービン発電効率 (33.8 %)
- γ : 熱輸送損失率 (0~30 %)

本章では、異業種間ヒートカスケード導入による省エネルギー性の評価を行う。目的関数を異業種間ヒートカスケードの導入によるヒートコンビナート全体の単位敷地面積当たりの熱利用設備の燃料(ボイラ重油)エネルギー消費削減量として、それが最大化されるようなヒートコンビナート内部の最適業種構成およびエネルギーフローを算定した。

$$\frac{E_1 - E_2}{S_{total}} \rightarrow \max \quad \dots\dots\dots (1)$$

本モデル内で設定した主な制約条件を以下に示す。

- ・業種 i が単独でエネルギーフローを最適化した場合のヒートコンビナート内部の燃料消費量

$$E_1 = \sum_i E_t(i) \times S(i) \dots\dots\dots (2)$$

- ・異業種間ヒートカスケーディングが導入されたヒートコンビナートのエネルギー消費量

$$E_2 = \sum_j (\sum_{T_2} f_h(j, T_2) + f_e(j)) \dots\dots\dots (3)$$

- ・ヒートコンビナート全体の敷地面積

$$S_{total} = \sum_i S(i) = 10\text{km}^2 \dots\dots\dots (4)$$

- ・排熱供給

$$\sum_j \sum_{T_2} e(i, T_1, j, T_2) \leq S(i) \times E_s(i, T_1) \dots\dots (5)$$

- ・熱需要

$$\begin{aligned} & \gamma(\sum_i \sum_{T_1} e(i, T_1, j, T_2) + \alpha f_h(j, T_2)) \\ &= S(j) \times E_d(j, T_2) \dots\dots (6) \end{aligned}$$

- ・電力需要

$$\begin{aligned} & \eta(\sum_i \sum_{T_1} \sum_{T_2} e(i, T_1, j, T_2) + \alpha f_e(j)) \\ &= S(j) \times E_e(j) \dots\dots (7) \end{aligned}$$

また、ヒートカスケーディング導入による燃料エネルギー削減率を以下のように定義した。

$$\text{燃料エネルギー削減率} = \frac{E_1 - E_2}{E_1} \dots\dots\dots (8)$$

〈3・2〉異業種間ヒートカスケーディングの省エネルギー性
 上述の目的関数による最適化計算によって得られた結果を図2に示す。図2(a)は異業種間ヒートカスケーディングの導入による省エネルギー性を示す。ヒートカスケーディングを導入することにより、10km²のヒートコンビナートにおいて5800Tcal(83%)の燃料エネルギーの削減が可能になることがわかる。図2(b)は、その最適コンビナート内の業種構成を示す。同図のように、最適ヒートコンビナートは、化学工業と紙パルプを中心とした業種構成である⁽⁶⁾。図3は、最適ヒートコンビナートのエネルギーフローを示す。高温排熱供給の多い化学工業から、背圧タービンを経て中低温蒸気需要の多い紙パルプへ異業種間ヒートカスケーディングを行うことにより、大幅な省エネルギー化を実現できることがわかる。また、最適ヒートコンビナートには鉄鋼が組み入れられていない。これは、他の3業種と比較して鉄鋼の単位敷地面積当たりのエネルギー需給量が小さいため、本検討のように敷地面積が限られたコンビナートでは、鉄鋼を組み入れることによる燃料エネルギー削減効果が相対的に小さくなるためである。

(a) 省エネルギー効果

(b) 最適ヒートコンビナート内の業種構成

図2 最適ヒートコンビナートの省エネルギー性、業種構成

Fig. 2. Energy-saving potential and industrial structure in optimized heat combinat.

図3 最適ヒートコンビナートのエネルギーフロー

Fig. 3. An energy flow in optimized heat combinat.

図 4 熱輸送損失パラメータに対する省エネルギー性の推移
Fig. 4. Energy-saving potentials as a function of heat transmission loss parameter.

〈3・3〉 熱輸送損失の影響 本節では、異業種間ヒートカスケーディングにともなう熱輸送損失が省エネルギー効果に与える影響について検討した。熱輸送損失に関しては、これまでに、業種間の距離に関わらず一律に生じる場合や、各業種間の距離の様々な関数として記述される場合を想定して検討を行った。しかし、本論文のヒートコンビナート内部で想定される熱配管の規模の範囲内では、近似式の違いによらず、得られた結果は同様の傾向を示すものであった⁽⁷⁾。そのため、ここでは簡単のため、熱輸送損失は熱輸送を行う業種間の距離等に関わらず一律に生じるものとして、モデル内において損失パラメータ γ を導入した。 γ の値としては、地域熱供給配管における熱輸送損失の実績を考慮して、0～30 % の範囲で変化させた。この値には、配管出口においても入口と同温・同圧の熱エネルギーを得るものとして、その補償用エネルギーも含まれているものとする。

熱輸送損失を考慮して最適化計算を行った場合のヒートコンビナート内における各業種の敷地面積・燃料エネルギー削減率・排熱利用状況の推移を図 4 に示す。図 4(a) から、損失パラメータが小さい場合には、前節に示したように、ヒートコンビナートは化学工業と紙パルプを中心として構成され、積極的な異業種間ヒートカスケーディングが行われていることがわかる。しかし、損失パラメータの増加にともない、中低温蒸気需要の多い紙パルプの敷地面積が減少し、逆に電力需要のみからなる窯業土石の敷地面積が増加する。これは、熱輸送損失を考慮する場合、蒸気と比較して輸送損失の少ない電力にエネルギー変換して輸送・消費することがエネルギー削減にとって好ましいことを示している。

図 4(b) は、図 4(a) において、損失パラメータの変化に対して業種構成を最適化した場合(実線)と、損失パラメータが 0 % の場合の業種構成を維持した場合(破線)について、燃料エネルギー削減率の推移を比較したものである。同図から、損失パラメータの変化に応じた最適業種構成を選択することにより、ヒートコンビナートにおける熱利用設備の燃料エネルギー消費量を約 80 % 削減できることがわかる。また、同図において損失パラメータが増加するにも関

わらず、最適業種構成を達成した場合の燃料エネルギー削減率は上昇している。これは、損失パラメータの増加にともなう最適業種構成の変化によって、カスケーディング導入後の燃料消費量 E_2 よりも、カスケーディング導入前の燃料消費量 E_1 が大きく減少するためである。その結果、(8)式からわかるように、燃料エネルギー削減量 $E_1 - E_2$ は減少するものの、見かけ上燃料エネルギー削減率は上昇することになる。

さらに、図 4(c) は、損失パラメータの変化に対する熱利用設備の排熱利用内訳を示す。同図から、熱輸送損失の増加とともに排熱利用量が低減し、排熱が復水タービンを経て電力に変換され、窯業土石で利用されていることがわかる。

〈3・4〉 民生需要を含めたヒートカスケーディング 前節までの主要 4 業種を対象とした最適ヒートコンビナートにおいては、30℃、60℃ の低温排熱は利用されず、廃棄されていた。本節では、工場排熱を近郊の民生地域における暖房・冷房・給湯の熱需要にも利用することを想定し、産業部門と民生部門を合わせた地域エネルギーシステムとしての総合的効率化について検討した。

工場近郊の民生地域における年間熱需要の推定値を表 1 に示す。同表では、全国の家計・業務部門における年間エネルギー需要^{(8)~(11)}、工場地区周辺地域の面積、世帯数、事業所数を調査し⁽¹²⁾、単位敷地面積当たりの熱需要として示している。また、暖房・冷房需要は 100℃、給湯需要は 60℃ とし、エネルギー源別・用途別の熱利用設備の効率を考慮した。さらに、同表の熱需要を 3 季節帯(夏期、冬期、中間期)×3 時間帯(ピーク、ミドル、オフピーク)モデルで表現した。

表 1 工場近郊の民生地域における年間熱需要推定値
Table 1. Annual heat demand in residential and commercial sectors around industrial area.

	暖房	冷房	給湯
家庭 [Tcal/km ²]	12.0	3.4	9.7
業務 [Tcal/km ²]	8.5	7.1	6.0

図5 民生の敷地面積に対する省エネルギー性の推移

Fig. 5. Energy-saving potentials as a function of site area of residential and commercial sectors.

目的関数は、民生地域の敷地面積 S_p [km²] を新たに導入して、以下のように設定した。

$$\frac{E_1 - E_2}{S_{total} + S_p} \rightarrow \max \quad (9)$$

ここでの E_1 および E_2 は、民生地域の燃料エネルギー消費量を含む。また、熱輸送損失としては、産業と民生との熱輸送の際に $\gamma=10\%$ を想定した。

主要4業種の敷地面積の合計を 10 km²、民生の敷地面積を 0~100km² で変化させた場合について、ヒートコンビナート内の業種構成・エネルギー削減率および消費量の推移を図5に示す。図5(a)から、民生の敷地面積の増加とともに、窯業土石の敷地面積が増加し、紙パルプの敷地面積が減少する。しかし、民生の敷地面積が 24km² 以上になると逆に窯業土石の敷地面積が減少し、紙パルプおよび化学工業の敷地面積が増加する。この業種構成の変化は、図1の各業種におけるエネルギー需給の特徴から説明できる。紙パルプは、窯業土石と比較して敷地面積当たりの低温熱供給量が小さい業種である。そのため、民生の敷地面積が 24km² 以下の場合には、民生の低温熱需要の増加とともに、紙パルプの敷地面積を減少させ、窯業土石の敷地面積を増加させることによって低温熱供給量を増加させることが、省エネルギー的観点から有利となる。一方、窯業土石には低温排熱の供給に加えて電力需要が存在するため、窯業土石の敷地面積の増加は電力需要の増加をもたらすこととなり、補機による燃料消費量の増加を引き起こす。その結果、民生の敷地面積が 24km² 以上の場合には、紙パルプの敷地面積の増加による低温熱供給の不足分を補うための燃料消費量を増加させることが、電力需要の増加分を賄うための燃料消費量よりも省エネルギー的に有利となり、窯業土石の敷地面積が減少することになる。

また、図5(b)から、図4(b)と同様に、コンビナート内の業種構成を最適化することにより、民生を含めた地域エネルギーシステムとして、70%以上の高い燃料エネルギー削減率を達成できることがわかる。特に、民生地域の敷地面積が 50km² 以下の場合には、燃料エネルギー削減率は 85%前後で維持され、図5(c)に示すように、燃料エネルギー

消費量を増加させることなく、10km²の主要4業種からの排熱エネルギーを異業種間でカスケード利用するとともに、50km²の民生地域の熱需要をも賄い得ることがわかる。

4. 異業種間ヒートカスケードの経済性

本章では、異業種間ヒートカスケードの経済性を評価するために、まず従来の省エネルギー性の観点からみた最適ヒートコンビナートと経済性の観点からみた最適ヒートコンビナートを比較する。次に、熱輸送コストの影響を評価し、最後に省エネルギー性と経済性の両面からみた異業種間ヒートカスケードの総合的評価を行う。なお、簡単のため、ここでは、民生地域を考慮せず、産業地域のみを対象とする。

〈4・1〉 目的関数および評価方法 異業種間ヒートカスケードの経済性については、ヒートコンビナート内の各種熱利用設備コスト、燃料エネルギー（ボイラ重油）コスト、熱輸送コストの総和を評価対象とした。3章で用いた記号に加え、本モデルの定式化で新たに用いた記号を以下に示す。

- C_1 : 異業種間ヒートカスケードを実施しない場合のヒートコンビナート全体の総コスト [100 万円/Tcal/year]
- C_2 : 異業種間ヒートカスケードを実施する場合のヒートコンビナート全体の総コスト [100 万円/Tcal/year]
- $C_i(i)$: 業種 i が単独でエネルギーフローを最適化した場合の単位面積当たりの総コスト [100 万円/Tcal/km²/year]
- $B(T_1, T_2)$: 温度帯別・熱利用設備別コストの単価 [100 万円/Tcal/year]
- $H(T_1)$: 温度帯 T_1 の熱輸送コストの単価 [100 万円/Tcal/km/year]
- $L(i, j)$: 業種 i, j 間の熱輸送距離 [km]
- p : 燃料単価 [100 万円/Tcal]

経済性評価における目的関数として、〈3・1〉節と同様に、異業種間ヒートカスケードを実施する前後でのヒートコンビナートの単位敷地面積当たりのエネルギー利用コ

図6 経済性および省エネルギー性からみた最適ヒートコンビナートの比較

Fig. 6. Comparison of heat combinats optimized from economical viewpoint and energy-saving viewpoint.

スト削減量として、それが最大化されるものとしてヒートコンビナート内部の燃料消費量を最適化した。

$$\frac{C_1 - C_2}{S_{total}} \rightarrow \max \quad \dots\dots\dots (10)$$

本モデル内で設定した主な制約条件を以下に示す。

- ・業種 i が単独でエネルギーフローを最適化した場合のヒートコンビナートの総コスト

$$C_1 = \sum_i C_i(i) \times S(i) \quad \dots\dots\dots (11)$$

- ・異業種間ヒートカスケーディングが導入された場合のヒートコンビナートの総コスト

$$C_2 = \sum_i \sum_{T_1} \sum_j \sum_{T_2} e(i, T_1, j, T_2) \times (B(T_1, T_2) + H(T_1) \times L(i, j)) + p \times \left(\sum_j \sum_{T_2} f_h(j, T_2) + \sum_j f_e(j) \right) \quad (12)$$

本論文では、過去の地域熱供給導入計画における熱輸送経費の試算、年経費率、各温度帯における蒸気・温水の比熱から、熱輸送コストの単価 H の値を温度帯別に算定した。また、輸送距離 $L(i, j)$ は、両業種の敷地形状を円形とみなし、各業種の半径の和とした。異業種間熱輸送にともなう熱輸送損失については、実例を考慮して、最適化計算の際に $\gamma=10\%$ の熱輸送損失を考慮した。

〈4・2〉異業種間ヒートカスケーディングの経済性 図6は、目的関数をコスト削減額、および前章で示した燃料エネルギー削減量としたケースについて、最適ヒートコンビナートの業種構成、経済性、省エネルギー性を比較したものである。図6(a)より、コスト削減額を目的関数とした場合には、前章の燃料エネルギー削減量を目的関数とした場合とは異なり、化学工業と窯業土石を中心としたヒートコンビナートが形成されることがわかる。これは、熱輸送コストの不要な電力の形態によるエネルギー輸送が促進されることを示している。このため、コスト削減額を目的関数とした場合のエネルギーフローとしては、復水タービンを

図7 総コストの内訳の比較

Fig. 7. Comparison of details in total cost.

用いて化学工業の高温排熱を窯業土石の電力需要へ異業種間カスケーディングするフローが最も大きくなっている。

また、図6(b)および図6(c)から目的関数によって、燃料エネルギー削減量、コスト削減額が大きく異なることがわかる。これは以下の理由による。燃料エネルギー削減額最大化を目的とした場合には、異業種間で積極的に熱輸送を行うため、熱配管が大規模に建設される。図7に示すように、熱輸送コストの増加額が燃料コストの削減額を相殺するため、総コスト削減額は小さくなる。一方、コスト削減額最大化を目的とした場合には、相対的にコストの高い熱配管の導入が促進されず、排熱の有効利用が行われないために、燃料エネルギー削減量最大化を目的とした場合と比較して燃料エネルギー削減量は480Tcal低下する。

このように、本モデルでは、高い熱輸送コストが原因となって、ヒートカスケーディングの省エネルギー性・経済性を同時に満足させることができないことがわかる。そこで、ヒートカスケーディングの省エネルギー性に対する熱輸送コストの影響について次節で検討する。

図 8 熱輸送コストに対する経済性・省エネルギー性

Fig. 8. Economical and energy-saving potentials as a function of unit cost of heat transmission.

図 9 熱輸送コストに対する熱・電力輸送の内訳

Fig. 9. Heat and electric power transmission as a function of unit cost of heat transmission.

図 10 熱輸送コストに対する熱配管長・熱輸送量

Fig. 10. Length and amount of heat transmission as a function of unit cost of heat transmission.

〈4・3〉 熱輸送コストの影響 本節では、熱配管の敷設状況等により変化すると考えられる熱輸送コストをパラメータとして、異業種間ヒートカスケードの経済性評価を行う。ここでは、〈4・1〉節の熱輸送コストの単価 H を用いる場合を基準ケース (100%) とする。図 8 に熱輸送コストに対する最適業種構成、経済性、省エネルギー性を示す。各図から、熱輸送コストが基準ケースの 50% に低減した場合には、省エネルギー性を目的とした場合とほぼ同程度の燃料エネルギーの削減が可能となり、異業種間ヒートカスケードが経済的にも有効であることがわかる。逆に、図 9、図 10 から、熱輸送コストが基準ケースの 200% になった場合には、異業種間において、熱エネルギーが電力に変換されて輸送・消費されていることがわかる。このため、必要最低限の熱量が配管で輸送されることになる。

以上のように、熱輸送コストが本論文で想定した基準ケースの 50% 以下に低減する場合には、経済性を目的としたヒートコンビナートにおいても、熱輸送を用いた異業種間熱輸送が積極的に導入されることになる。その結果、ヒートコンビナートでは省エネルギー性を目的とした場合に相当するエネルギー削減量を達成できることがわかる。

〈4・4〉 経済性・省エネルギー性の総合的評価 前節では、熱輸送コストの低下が経済的なインセンティブとなり、コスト削減額最小化を目的とする場合でも、高い省エネ

ギー性を達成できることがわかった。同様に、燃料エネルギーコストが上昇することが、ヒートカスケード促進の経済的インセンティブになると考えられる。そこで本節では、炭素税を導入し、等価的な燃料エネルギーコストの上昇を想定する。このような手法により、省エネルギー性をコスト換算することによって、省エネルギー性と経済性の両面から総合的な評価を試みる。ここでは、燃料 (ボイラ重油) エネルギー消費量を CO_2 排出量に換算して、炭素税 $\text{tax} [\text{円}/\text{ton-C}]$ を乗じ、総コストに加算した。なお、省エネルギー化を促進する経済的方策として、炭素税の他に CO_2 排出権取引が想定される。本論文の炭素税額を、 CO_2 排出権取引市場が実施された場合の取引価格として読み換えることによって、本論文の結果を排出権市場の取引価格を考慮した場合の評価結果として解釈することも可能である。

tax を 0~30000 円/ton-C まで変化させたときの最適ヒートコンビナートにおける業種構成、経済性、省エネルギー性を図 11 に、排熱利用量を図 12 に示す。 $\text{tax} = 10000$ 円/ton-C の場合、図 11(a) の最適業種構成が示すように、無税の場合と比較して紙パルプの割合が増加する。これにより、図 12 の排熱利用量からわかるように、減圧器を介した異業種間熱輸送と背圧タービンを介した同業種間熱輸送が拡大し、紙パルプの中低温熱需要に対する排熱の有効利用が促

図 11 炭素税に対する経済性・省エネルギー性

Fig. 11. Economical and energy-saving potentials as a function of carbon tax.

進される。この結果、エネルギー削減量は350Tcal上昇し、省エネルギー性を目的とした場合とほぼ同程度の燃料エネルギーの削減が可能となることがわかる。また、燃料エネルギー消費量の削減にともない、燃料エネルギーコストも削減される。しかし、熱輸送コストの増加によって、炭素税以外のコスト（熱利用設備コスト、燃料エネルギーコスト、熱輸送コストの総和）削減額は1億円減少する。図11(b)において、総コスト削減額は炭素税の増額分だけ増加するが、総コストに占める炭素税の割合がカスケード導入前後においてともに上昇するため、コスト削減率としては、逆に大幅に低下する。さらに、*tax*を10000円/ton-Cから30000円/ton-Cまで増額した範囲内では、燃料エネルギーの削減余地がないため、最適業種構成、エネルギーフロー、燃料エネルギー削減量および削減率はほぼ一定となる。一方、コスト削減額については炭素税の増額分だけ増加し続けるが、上記と同様の理由により、総コストに占める炭素税の割合がカスケード導入前後においてともに上昇するため、コスト削減率は徐々に低下する。

以上のことから、炭素税の導入によって省エネルギー性へのインセンティブを与えることにより、排熱の有効利用が促進され、コスト削減額最大化を目的関数とした場合においても、ヒートカスケードの導入による省エネルギー性の向上が可能になることがわかる。

5. ま と め

本論文では、熱輸送損失や民生需要、熱輸送コストを考慮して、異業種間ヒートカスケードの有効性評価を行った。また、炭素税の導入により、経済性と省エネルギー性の総合的評価を試みた。本論文で得られた知見を以下に示す。

- (1) 異業種間ヒートカスケードの導入により、熱利用設備の燃料エネルギー消費量を約80%削減できる可能性がある。
- (2) 熱輸送損失の増加にともない、排熱を蒸気と比較して輸送損失の少ない電力に変換して輸送・消費す

図 12 炭素税に対する排熱利用量

Fig. 12. Waste heat utilization as a function of carbon tax.

ることが、エネルギー削減に有効である。

- (3) 民生の敷地面積が50km²以下である場合には、コンビナートの業種構成を最適化することにより、民生・産業を含めた地域エネルギーシステム全体で85%前後の燃料エネルギー消費量の削減が可能となる。
- (4) 本論文で用いた熱輸送コストは他の熱利用設備コストと比較して高いため、ヒートカスケードによる省エネルギー性と経済性を同時に満足させることができない。
- (5) 熱輸送コストが本論文で用いた基準値の50%以下である場合や、10000円/ton-C以上の炭素税の導入を想定した場合には、省エネルギー性への経済的インセンティブが生じる。このため、経済性を目的としたヒートコンビナートにおいても、熱配管を用いた異業種間熱輸送が積極的に行われ、省エネルギー性を目的とした場合と同等の省エネルギー効果を得られる。

現状のコンビナートは一般に製品の効率的な生産を目的として建設されており、本論文で得られたような最適業種構成を満足するように現状のコンビナートの業種構成を変

更することは事実上困難であると考えられる。筆者らは、発展途上国のように今後産業立地が見込まれる場合や、先進国において工場の再建設が行われる場合に、本論文で得られた知見が有効に活用されるものと考えている。近年の地球環境問題の解決を求める社会的要請に応えるためにも、従来までのマテリアルの視点に加えて、本論文で提唱しているような熱エネルギーの相互融通による省エネルギーの視点を考慮した産業立地が必要になると考えられる。

最後に、本研究を進める上で貴重な助言を頂いた東京ガス(株)岡本洋三氏(名古屋大学理工科学総合研究センター客員教授)に感謝致します。また、卒業研究として本研究の一部に従事した名古屋大学工学部学生 西村賀彦氏に感謝致します。なお、本研究は、平成10年度文部省科学研究費補助金基盤研究(C)(No.10680481)の補助を受けている。

(平成11年1月4日受付, 同11年5月9日再受付)

文 献

- (1) H.-M. Groscurth, R. Kümmel and W. van Gool, "Thermodynamic limits to energy optimization", Energy, Vol. 14 No.5, pp. 241-258, 1989
- (2) H.-M. Groscurth and R. Kümmel, "Energy, cost, and carbon dioxide optimization of disaggregated, regional energy-supply systems", Energy, Vol. 18 No.12, pp. 1187-1205, 1993
- (3) 中田, 茅, 「ヒートコンビナートモデルによるエネルギー多消費型産業の省エネルギーの基礎的な評価」, 電学論 B, Vol.115, No.2, pp.149-155, 1995
- (4) 繁在家, 松橋, 石谷, 「業種間熱フローを明示化した最適多段利用に関する研究」, エネルギー・資源学会第13回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集, pp.105-110, 1997
- (5) 島崎, 秋澤, 柏木, 「エネルギーカスケードモデルの開発 - エネルギーカスケードバランス表の提案 -」, エネルギー・資源学会第16回研究発表会講演論文集, pp.95-100, 1997
- (6) N. Hayakawa, Y. Wakazono, T. Kato, Y. Suzuoki, Y. Kaya, "Minimizing Energy Consumption in Industries by Cascade Use of Waste Energy", IEEE/PES Winter Meeting, 98WM266, 1998
- (7) 若園, 早川, 加藤, 鈴置, 茅, 「産業排熱のカスケード利用による地域エネルギーシステムの効率化」, エネルギー・資源学会第14回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, pp.157-162, 1998
- (8) (財)日本エネルギー経済研究所エネルギー計量分析センター, 「エネルギー・経済統計要覧1996年版」, (財)省エネルギーセンター, pp.16-17, 66-73, 86-97, 1996
- (9) 空気調和・衛生工学会, 「都市ガスによるコージェネレーションシステム計画・設計と評価」, 丸善, pp.138-142, 1994
- (10) (財)日本エネルギー経済研究所エネルギー計量分析センター, 「民生部門エネルギー消費実態調査(総括編)」, pp.156-157, 1995
- (11) 坂野, 加藤, 早川, 鈴置, 茅, 「エネルギーシステム全体からみたCGSを主体とする地域熱供給システムの導入可能性」, エネルギー・資源学会第14回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, pp.181-186, 1998
- (12) 朝日新聞社編, 「'95 民力」, pp.502-503, 朝日新聞社, 1995
- (13) 石坂, 山地, 茅, 「需要分布を考慮した都市におけるコージェネレーションシステムの導入評価」, 電学論 B, Vol.114, No.5, pp.505-513, 1994

若園 芳 嗣 (学生員) 1973年11月9日生。98年3月名古屋大学大学院工学研究科博士課程前期課程修了。現在、名古屋大学大学院工学研究科博士課程後期課程在学中。エネルギーシステムに関する研究に従事。

加藤 丈 佳 (正員) 1968年5月7日生。96年3月名古屋大学大学院工学研究科博士課程後期課程修了。同年4月名古屋大学理工科学総合研究センター助手、現在に至る。工学博士。超電導電力システム、エネルギーシステムに関する研究に従事。エネルギー・資源学会会員。

早川 直 樹 (正員) 1962年9月9日生。90年3月名古屋大学大学院工学研究科博士課程後期課程満了。同年4月名古屋大学工学部助手、96年4月名古屋大学理工科学総合研究センター助教授、98年4月名古屋大学大学院工学研究科助教授、現在に至る。工学博士。超電導送電、環境調和型エネルギーシステムに関する研究に従事。96年電気学会論文賞。IEEE、エネルギー・資源学会会員。

鈴置 保 雄 (正員) 1950年5月26日生。78年3月名古屋大学大学院工学研究科博士課程後期課程修了。同年4月名古屋大学工学部助手、87年同講師、89年同助教授、95年4月名古屋大学理工科学総合研究センター教授、現在に至る。工学博士。主として、電気電子材料、エネルギーシステムに関する研究に従事。IEEE、応用物理学会、高分子学会、エネルギー・資源学会会員。

茅 陽 一 (正員) 1934年5月18日生。62年3月東京大学大学院電気工学専攻博士課程修了。同年4月東京大学工学部講師、63年同助教授、78年同教授、95年4月慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科教授、現在に至る。96年4月～98年3月名古屋大学理工科学総合研究センター客員教授。工学博士。システム制御工学、エネルギー・電力システムの計画・分析、および地球温暖化対策の評価に関する研究に従事。IEEE、電子情報通信学会、計測自動制御学会、エネルギー・資源学会会員。