

1. はじめに

都市ごみ焼却工場において発生する燃焼熱を有効なエネルギー形態で回収利用する方法には、例えば、燃焼空
気予熱、地域冷暖房やプロセス用及び農作物栽培用の蒸気利用、各種近隣施設への給湯、さらには発電及び逆送
売電等があり、これらは従来から種々の規模で実施されてきている。ところが、最近のエネルギー情勢の変化
にともない、一般廃棄物処理事業を所管する各市町村等は、オ1に処理事業における省エネルギー、オ2に清掃
工場における余剰エネルギーを積極的に系外に供給することをめざし、多様なエネルギー回収の方法を検討しは
じめている。これらのエネルギー回収は、ごみ処理システムが次第に資源化指向のものに代替されていく過程の
総合資源化システムの1部として計画されることも多い。いずれにせよ、こうした焼却工場におけるエネルギー
回収を計画する場合、予め既存のエネルギー回収方法の予備的評価を充分行っておくことが所要となろう。本報
告では、既存の地域特性に根ざした多様なエネルギー回収事例のうちから、先駆的なしかも異なった形態のエン
رژی回収を実施している2つの清掃工場をとりあげ、これらについて主に経済的評価に資する調査解析を行ない、
簡単なしかも興味ある結果を得たので報告する。比較評価にとりあげた清掃工場は、1つは発電電を中心とする
エネルギー回収を行っている東京区部の葛飾清掃工場であり、もう1つは地域暖房-給湯-発電電を組合せたエ
ネルギー回収方法を採用している札幌市の厚別(オ2)清掃工場である。

2. 葛飾工場及び厚別工場におけるエネルギー回収

一般に積極的なエネルギー回収を行なうことができ、かつ
系外に余剰を供給できるごみ焼却工場は、その規模が300[t/d]
以上の連続燃焼式の焼却施設を有するものと言われている。
ごみ焼却工場は、可燃性ごみの適正な処理・処分が第一義に
あるが、このためには、燃焼室温度を普通900℃前後に保つ
必要があり、また燃焼ガスを高効率除じん装置(電気集じん
器)に導入するためにガス温度を300℃付近まで何らかの
方法で連続的に冷却しなければならない。従来、このガス冷
却は中小規模の施設にあっては水噴射によって行なわれる場
合が多かったが、排ガス量の増大、水処理の必要性、白煙防
止などから、代って廃熱ボイラーによって冷却を行なうもの
が増大してきた。ごみ焼却工場におけるエネルギー回収は、
従って、基本となるこの燃焼ガスの冷却に伴う副次的機能に
よるものである。また、普通燃料と目される搬入ごみも、そ
の安定化、無害化、減容化などの適正処理が優先されるので、
きわめて大きな制約を負っているといえる。

清掃工場におけるエネルギー回収は、本来このような厳し
い条件のもとでしか可能でないため、例えば電力会社の火力
発電所などと一緒に比較することは適当でない。即ち、上記

表1 2事例焼却工場の設備概要²⁾³⁾

清掃工場名	葛飾工場	厚別工場
所在地	東京都葛飾区元飯島町	札幌市白石区厚別町
竣工・運用時期	昭和51年12月	昭和49年8月
規模	1,200 [t/24h]	600 [t/24h]
主要エネルギー回収利用	発電電	地域暖房発電
焼却炉	容量×炉数 1炉の負荷 設計燃熱量	400 [t/24h] × 3 85,500 [kcal/m ³ h] 1,100~2,500 [kcal/kg]
ボイラー	蒸気量×蒸数 スーパヒーター出口 蒸気質	58.8 [t/h] × 3 19.5 kg/cm ² G-270℃
タービン	形式 容量×台数 入口蒸気 真空度(背圧)	単反復式凝汽機 12,000 [kW] × 1 17 kg/cm ² G-260℃ 560 [mm Hg]
発電機	容量×力率 電圧	単反復式凝汽機 1,400 [kW] × 1 17 kg/cm ² G-230℃ 1.8 [kg/cm ² G]
	15,000 [kVA] × 0.8 6,600 [V]	1,750 [kVA] × 0.8 3,300 [V]

表2 葛飾工場及び厚別工場におけるごみ処理及びエネルギー回収の実績¹⁾

(昭和53年度)

	焼却処理概要		エネルギー回収利用の概要							エネルギー回収利用率[%]	電力自給率[%]
	焼却量[t]	使用電力量[kWh]	総発電量[t]	ボイラー回収エネルギー[Gcal]	発電電力量 $\times 10^6$ [kWh] 合計	所内利用	送電量	外部熱供給量[Gcal]	回収利用エネルギー総量[Gcal]		
葛飾工場	230,352	21.17×10^6	397,700	270,684	37.59	18.52	19.07	0	32,320	11.9	87.5
	1	132.7	1.726	1.175	228.7	114.4	114.3	0	196.7×10^3 [kcal]	—	—
厚別工場	187,464	9.203×10^6	496,516	328,851	8.475	7.252	1.223	75,573	82,861	28.4	78.8
	1	52.1	2.649	1.754	45.2	38.7	6.5	地域向け 403.1×10^3 [kcal]	442.0×10^3 [kcal]	—	—

の制約のほかに、ごみ質の変動やボイラー水質の腐蝕などを飛越して、エネルギー回収設備としては、通常きわめてひかえ目なものとなっており、運転も適正処理を標準にして行なわれている。⁴⁾

表1は、本研究で事例にとった東京都葛飾工場及び札幌市厚別工場の設備概要を示した。また、表2は、両工場における昭和53年度のゴミ処理実績ならびにエネルギー回収の実績をそれぞれ実数及び入力ゴミ1t当たりの値で示した。なお、厚別清掃工場においては、隣接する地域暖房会社に蒸気供給することを主眼にしているので、熱併給発電を行っている。このため、発電は自家発電設備とし、少量の余剰を逆送売電している。またタービンバックの低温蒸気をも地域暖房会社に供給している。(図1参照)

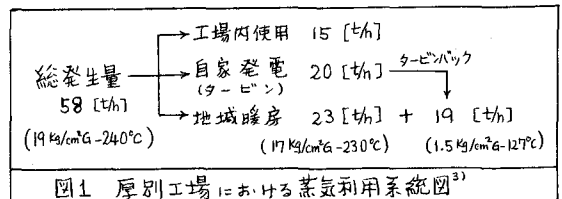


図1 厚別工場における蒸気利用系統図³⁾

3. 焼却工場のエネルギー回収に伴う社会的便益の評価

ゴミ焼却工場において種々のエネルギー回収を行ない、これを所内及び所外において利用することにより幾多の効果・便益が期待できる。ゴミ処理事業が地方公共団体(市町村等)の責務であるところから、一般にこれらの効果は、たんに事業主体だけの便益にとどまらず、公共的かつ社会全体にわたる意義をもつものと思われる。

3-1 エネルギー回収に伴う効果 焼却工場におけるエネルギー回収は、これを行なわなかった場合に比べ、いくつかのプラスの効果が考えられ、これらは、(1)事業を行っている公共主体が直接受ける効果と、(2)事業主体以外のものが間接的に受ける効果、とがある。(1)のカテゴリーに入るものは、①回収エネルギーを所内又は同一事業主体に所内動力等の形で利用して得られる省エネルギー効果、②①と外部に熱供給・売電などを行って実質ゴミ処理費用が軽減される効果、③工場からの排熱がかなり削減される効果、④施設そのもの或は清掃施設そのものが従来のものより相対的に魅力あるものとなり立地等が容易になる効果、などがある。また、(2)に入るものとして、①清掃工場で必要とする動力等の購入を大巾に削減でき更にエネルギーを供給しうるので、電力会社等でその分省エネルギーとなる効果、②さきの①と同様に電気事業等における汚染削減の効果、③清掃施設のイメージ変化により工場近接地区の地価等が相対的に上昇する効果、などが考えられる。なお、二の(2)の①と②は、直接的には特定の事業主体が、また③は工場近隣の特定の住民が享受する効果となるが、社会全体から見ると結果的には公共主体である清掃工場のもたらす外部効果となっていることは着目すべきである。

3-2 社会的便益の定式化 エネルギー回収に伴う上記の諸効果のうち、(1)②は、事業主体となる市町村等が特定の清掃工場でエネルギー回収を計画・実施する直接的動機となっている。とくに、最近のエネルギー費用の高騰は、これに拍車をかけている。このエネルギー回収によるゴミ処理費用軽減効果は事業主体に対する直接的経済効果に加えて、市町村等のゴミ処理費用が普通会計によりまかなわれていることを考えると、この費用軽減額相当の財源を他の公共施策(たとえば福祉の充実)に充当できるので、地域住民は相応の社会的便益を受ける。すなわち、経済学的には焼却工場の事業主体がゴミ処理サービスと有効エネルギーという2つの財を結合生

産し供給し、回収エネルギーの所内利用及び外部売却によりこれらの経費の生産に貨幣的外部効果を及ぼし、結果ゴミ処理費用軽減効果が生れると考えられる。この費用軽減効果を金銭評価するために、限界理論を用いて社会的余剰の増大として定式化してみる。図2には、ゴミ焼却処理でエネルギー回収を行なう場合とそうでない場合の限界費用曲線を、それぞれ MC_R と MC_I とで示してある。さらに、ゴミ処理サービス(エネルギー回収も含む)を公共料金価格を有する私的財と看做すと、その社会的需要曲線がDのようにつける。この場合の最適需給均衡は、従って、それぞれB、C点となり、エネルギー回収を行った場合の社会的余剰の増大分は $\square ABCE$ である。いま、これを SB_2 とすると、

$$SB_2 = \int_0^{y_0} (MC_R - MC_I) dy \quad (1)$$

ここで、ゴミ1単位当りのエネルギー回収のための限界費用、限界収入をそれぞれ、 e 及び f [円/t]とすると、

$$\begin{aligned} MC_R &= MC_I + e - f \\ &= MC_I - g \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 g [円/t]はゴミ1単位当りのエネルギー回収による限界利益である。(2)式を(1)式に代入し、 g を y によらず一定とすれば、 $SB_2 = g \cdot y_0$ --- (3)、となり、これはゴミ処理費用軽減総額にほかならない。

さて、次に同様な考え方で、さきに述べた(1)①、③及び(2)①、②の効果、つまりエネルギー回収に伴う省エネルギー・汚染削減効果の市場的金銭評価を行なう。上掲の図3に、エネルギー回収のうち発電を行った場合を例にとって、その考え方を示した。ここで、 MC_0 はゴミ発電で行られる電力量 OG を通常の火力発電によった場合の限界費用曲線で、 MC_w はゴミ発電によるものである。 MC_w が MC_0 より下方にあることは、ゴミ発電の場合は燃料のゴミが無料であること等から容易に推定されるので、結局、ゴミ発電による社会的余剰(=消費者余剰+生産者余剰)の増大は $\square ABCE$ になる。いま、これを SB_1 とすれば、

$$SB_1 = \int_0^{x_0} (MC_0 - MC_w) dx \quad (4), \quad \text{そして} \quad MC_w = MC_0 - (a \cdot b + c \cdot d) \quad (5)$$

である。ここで、 a [kl/kwh]及び c [kg/kwh]は、それぞれゴミ発電による単位当りの電力量の追加がもたらす石油の節約量と汚染質排出削減量であり、また、 b [円/kl]及び d [円/kg]は、それぞれ単位当りの石油価格と汚染質除去費用である。 a 、 c を x に無関係な定数とすれば、結局、

$$SB_1 = \int_0^{x_0} (a \cdot b + c \cdot d) dx = x_0 \cdot (a \cdot b + c \cdot d) = (x_0 \cdot a) b + (x_0 \cdot c) d \quad (6)$$

をうる。 $(x_0 \cdot a)$ 及び $(x_0 \cdot c)$ は、それぞれ石油節約総量、汚染削減総量である。

いまのところ、ゴミ焼却工場におけるエネルギー回収の他の効果については、定性的な議論にとどまっている。

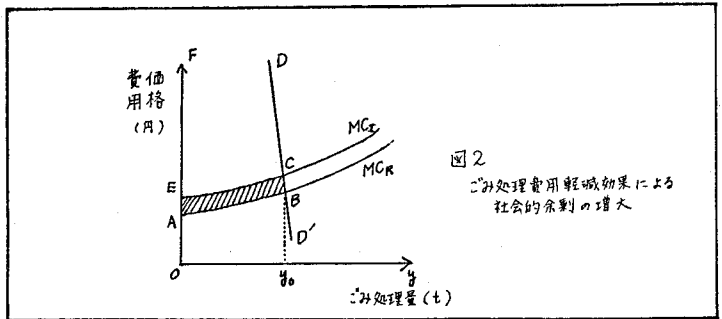


図2
ゴミ処理費用軽減効果による
社会的余剰の増大

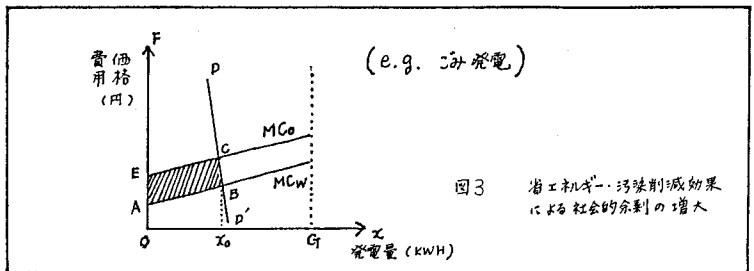


図3
省エネルギー・汚染削減効果による
社会的余剰の増大

従って、上記の社会的便益をまとめると、

$$\left(\begin{array}{l} \text{エネルギー回収の} \\ \text{もたらす社会的便益} \end{array} \right) \cong (\text{石油節約量}) \times (\text{石油価格}) + (\text{汚染質削減量}) \times \left(\begin{array}{l} \text{汚染質1単位} \\ \text{当りの除去費用} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{l} \text{ゴミ処理費用} \\ \text{軽減総額} \end{array} \right) \quad (7)$$

という定式化を得る。なお、ゴミ処理の場合、現実にはそのサービスの生産者（市町村等）は公共主体であり、又エネルギー生産者（例えば電力会社）は地域独占の公益企業であるから、生産者余剰が消費者余剰に転嫁される可能性は大きい。このため、社会的余剰 $\cong$ 消費者余剰となることが指摘できる。

3-3 事例2清掃工場のエネルギー回収に伴う社会的便益の算定方法¹⁾ さきの(7)式にもとづき、省エネルギー効果、汚染質削減効果、およびゴミ処理費用軽減効果を算定する。

(A) 省エネルギー効果 事例のスエ工場におけるエネルギー回収の形態は、電力及び蒸気による熱である。これに相当する石油節約量は、次式で算定する。

$$\text{石油節約量} \quad \left[\frac{\text{Kl}}{\text{t}} \right] = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{\text{ゴミ1t当りの回収電力量} [\text{Kwh/t}] \times 2450 [\text{Kcal/kwh}]}{9900 \times 10^3 [\text{Kcal/Kl}]} & (\text{ゴミ発電の場合}) \\ \frac{\text{ゴミ1t当りの外部熱供給量} [\text{Kcal/t}]}{8900 \times 10^3 [\text{Kcal/Kl}]} & (\text{外部熱供給の場合}) \end{array} \right.$$

ただし、電力会社では平均熱効率（35.1%）の重油専焼火力を想定し、地域の暖房は通常灯油で行なわれているものとしている。

なお、石油価格は輸入原油のCIF価格を用いる。昭和53年度の平均CIF価格は、17.622 [円/Kl] であった（大蔵省「日本貿易月報」）ので、ここでは、石油価格を一律18 [円/L] として用いた。しかし、最近のオーストラリア原油危機以降、原油価格は急騰していることに鑑み、昭和55年1月7日現在の原油輸入CIF価格である29.53 [\$/bbl]、即ち45 [円/L] についても将来動向をみるため参考に用いた。

(B) 汚染質削減効果 ゴミ焼却工場においてエネルギー回収を行うことにより間接的に種々の汚染質が削減されるが、ここでは簡単のため大気汚染のうちNO_xの削減効果のみを算定する。昭和51年度に環境庁の行った首都圏での調査によると²⁾、69.058 × 10⁹ [kWh] の電力生産に対しNO_x排出量が77.747 × 10⁶ [kg] となっている。同様に、厚別工場のように外部熱供給を行なっている場合は、通常の灯油暖房等によるNO_x排出原単位を知らなければならない。上記と同じ調査から、この値は15.4 [kg/10⁸ kcal] を採用する。まとめると、

$$\text{NO}_x \text{削減量} \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{t}} \right] = \left\{ \begin{array}{ll} \text{ゴミ1t当りの回収電力量} [\text{kwh/t}] \times (1.126 \times 10^{-3} [\text{kg/kwh}]) & (\text{ゴミ発電の場合}) \\ \text{ゴミ1t当りの外部熱供給量} [\text{kcal/t}] \times (15.4 \times 10^{-8} [\text{kg/kcal}]) & (\text{外部熱供給の場合}) \end{array} \right.$$

以上に加えてさらに、NO_x削減費用を知る必要がある。これは、環境庁の推定³⁾を用いることにした。即ち全国のNO_x環境濃度を環境基準の上限値以下に改善するためには、合計12.89万tのNO_x削減が必要となるが、そのための設備投資の累計は4710億円、運転費は3100億円、総額7810億円が必要と見積られている。ゴミ発電による電力量は相対的に少量であるので、この場合の削減費用は上記のうち運転費のみとし、2.405 [円/kg] を用いる。また、地域暖房の場合は通常NO_x除去は行なわれていないことから、この場合は全削減費用をベースに考えることにし、6.059 [円/kg] を採用する。

なお、汚染削減効果については、ほかに発電所の廃熱等による熱汚染があるが、この算定は金銭部価がでないので、たんに通常の発電効率から推定した熱損失分を熱量単位で表示するにとどめた。

(C) ゴミ処理費用直接軽減効果 回収エネルギーを所内及び売却等により所外で利用することにより、焼却工

場にとってどの位の経費削減が図れるか算定してみる。一般に清掃工場のごみ処理原価計算は、最近まで統一した様子がなかったため¹⁾、各市の結果をそのまま比較検討することはできない。ここでは、事例の2工場を比較するため、次のような算定を行った。ただし、基準を処理ごみ1トン当たりとする。

$$\left(\begin{array}{l} \text{焼却処理だけ} \\ \text{の総費用, } C_B \end{array} \right) = \left(\begin{array}{l} \text{焼却原価から電力費} \\ \text{を除外した費用, } C_{B0} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{l} \text{買電による} \\ \text{電力費用, } C_{B1} \end{array} \right)$$

$$\left(\begin{array}{l} \text{エネルギー回収を行} \\ \text{った場合の総費用, } C_R \end{array} \right) = C_{B0} + \left(\begin{array}{l} \text{買電支払} \\ \text{総額, } C_{R1} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{l} \text{エネルギー回収設備} \\ \text{の償却費用, } C_{R2} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{l} \text{エネルギー回収設備} \\ \text{の運転費用, } C_{R3} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{l} \text{回収エネルギー} \\ \text{の売却収入, } C_{R4} \end{array} \right)$$

即ち、上記の式式の差が、ごみ1トン当りの処理費用軽減額 $(=C_{B1}-(C_{R1}+C_{R2}+C_{R3}-C_{R4}))$ となる。なお、計算に当っては、 C_{B1} 、 C_{R1} 及び C_{R4} については両工場の場合とも公表されている値を採用した。厚別工場の発電設備の総額は約1億円とされているので³⁾、これを残存価値10%、償還期間15年、利率6%とし、複利による減価償却引当金を算出し、これを C_{R2} とした。また、オーバーホール費用などから C_{R3} の総額を年間500万円と見積った。葛飾工場については、 C_{R2} 及び C_{R3} に関するデータが不明なので次のような仮定をした。エネルギー回収設備は、工場の全建設費の2割とし、この内の半額を自治体が負担するものとして上記と同様の方法で減価償却引当金を算出し、これを C_{R2} とした。 C_{R3} は、厚別工場の場合と同じ値と見積った。

以上の算定方法を用いて、事例とした2清掃工場のエネルギー回収に伴う社会的便益を省エネルギー効果、汚染削減効果、及びごみ処理費用軽減効果について、推定した。

4. 評価結果と考察

社会的便益のうちで、定量化できたものの結果を、処理ごみ1トン当たりを基準にし、両清掃工場について比較したものが、表3である。同表には、高騰中の最近の石油価格にベースした結果もあわせて示してある。また、各効果については、実数値と便益を金銭評価したものの両方が示してある。ただし、汚染削減効果については、廃熱削減量のみを実数で示しただけである。

既に、さきの表2にも示した通り、一般に焼却工場自身が必要とするエネルギーは、消費電力でいえば、処理ごみ1トン当たり50～100[kWh]と考えられ、中規模以上の焼却工場では廃熱ボイラーを設備することにより充分自給できる。実際、事例の葛飾工場では使用電力の2倍の発電をし、所内使用電力とほぼ同量を売電している。また、厚別工場では、

表3 事例焼却工場の社会的便益評価結果¹⁾

項 目	方式	葛飾清掃工場 (発電中心方式)	厚別清掃工場 (熱供給中心方式)
発 電 量, [kWh/t]		228.7	45.2
熱 供 給 総 量, 10^3 [kcal/t]		0	403.1
エネルギー回収量, 10^3 [kcal/t]		196.7	442.0
エネルギー回収率, [%]		11.9	28.4
<省エネルギー効果>			
熱 量, 10^3 [kcal/t]		560.3	513.8
石油換算量, [t/t]		56.6	56.5
金銭評価額, [円/t]		1,019	1,017
<NO _x 削減効果>			
削 減 量, [kg/t]		0.258	0.113
金銭評価額, [円/t]		620	498
<廃熱削減効果>			
削 減 量, 10^3 [kcal/t]		560.3	513.9
<ごみ処理費用軽減効果>			
軽 減 額, [円/t]		434	458
自治体の直接便益, [円/t]		434	458
社会的付加便益, [円/t]		1,639	1,515
社会的便益総額, [円/t]		2,073	1,973
石油価格を45 [円/t]と看做した場合の評価:			
<省エネルギー効果>			
金銭評価額, [円/t]		2,547	2,543
自治体の直接便益, [円/t]		434	458
社会的付加便益, [円/t]		3,167	3,041
社会的便益総額, [円/t]		3,601	3,499

蒸気発生は多量に行ないながら、発電はほぼ必要量にとどめ、残余の蒸気の全て外部への熱供給に回わしている。従って、葛飾工場はできるだけ発電を指向し、厚別工場は熱供給を中心としたエネルギー回収だと言える。エンタルピー値による平均エネルギー回収効率¹⁾は、それぞれ11.9%と28.4%と異なるが、両工場はそれぞれの地域特性を最も生かした形のエネルギー回収を行っており、この回収率の違いのみで評価することはできない。実際、表3に示すように、両工場の直接的な費用軽減効果は、経済的便益評価額としては殆んど同値である。この意味で、今後エネルギー回収をエクセルギー効率を用いて表現することが試みられて良いであろう。なお、両工場の直接便益の大きさは、従来焼却処理費用の概ね5~10%（現在、1t当りの焼却費用は5000~8000円と言われている）と推定されており、この場合も妥当な推定値と思われる。

本報告では、社会的便益に当該焼却工場における直接的な処理費用の軽減額のほかに、間接的な省エネルギー効果及び汚染削減効果を社会的付加便益として算定評価している。表3でみるように、両工場の場合とも省エネルギー効果で、約1,000[円/t]、汚染削減効果のうちNO_xだけで、500[円/t]前後となっており、あわせておおよそ1,500[円/t]と、直接的な便益の3倍以上にのびていることが分る。とくに石油価格を最近のものにベースとして計算した結果からも分るように、省エネルギー効果に基づく付加便益は、直接便益の約6倍にもなり得る。このことは、焼却工場におけるエネルギー回収をもたらす外部（経済）効果がきわめて大きく、今後ますます増大するものと期待される。これらの社会的便益の大きさについては、既存の報告がみられないので、今後なお精度をあげた推算が望まれる。しかし、いずれにせよ公共事業主体の実施するゴミ焼却工場のエネルギー回収は、これを適切に行なうことにより、概ね処理費用の半額に近い社会的便益をもたらすことが示された。

5. おわりに

ゴミ焼却工場におけるエネルギー回収は、最近多くの市町村等で関心をあつめ、再検討され始めている。その第1の目的は、電力料金値上げをはじめとするエネルギー価格の高騰に対処するための工場の省エネルギー或は自給体制の確立にある。しかし、こうした当面するしかも内部的な要求に応えることに加えて、焼却工場のエネルギー回収は本報告で示したように、大きな長期的かつ広域的な社会的便益をもたらす。従って、市町村等が新たにエネルギー回収を計画・実施する際には、その評価にこうした外部効果を見逃すことはできない。とくに、回収エネルギーを外部に供給・販売する場合には、輸送効率等を考慮し、地域に最もマッチした利用方法を考えるべきである。こうした多様な評価をふまえた特異なシステムこそが、またゴミ処理事業の公共性を担保するエネルギー回収の最良の方法であると思料される。

〔引用文献〕

- 1) 樫本康之(1980):「廃棄物の資源化政策の有効性評価」,筑波大学大学院環境科学研究科修士論文。
- 2) 山井・前嶋・鈴木(1979):ゴミ焼却処理施設における余熱利用と売電,公害と対策,15(11),1435-44。
- 3) 三谷晋人(1976):札幌市のゴミ焼却熱有効利用の実績,都市と廃棄物,6(6),19-36。
- 4) 小泉・荻須・山田(1975):中小都市におけるゴミ焼却炉の余熱利用,燃料協会誌,54(584),1002-22。
- 5) 環境庁大気保全局(1972):「都市型大気汚染防止対策調査」昭和51年度委託調査,(財)計量計画研究所。
- 6) 環境庁大気保全局(1973):窒素酸化物対策の費用効果について,公害と対策,14(6),29-34。
- 7) 費用分析専門委員会(1979):「廃棄物処理事業原価計算の手引」(社)全国都市清掃会議,昭和54年3月。