

都市循環システムにおける エネルギーネットワークの構築

三浦浩之¹・中野加都子²・和田安彦³・村岡 治⁴・藤井 亮⁵

¹正会員 博士(工学) 関西大学助手 工学部土木工学科 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)

²正会員 関西大学工業技術研究所研究員 (同上)

³正会員 工博 関西大学教授 工学部土木工学科 (同上)

⁴正会員 株式会社極東技工コンサルタント (〒564-0042 大阪府吹田市穂波町19-40)

⁵学生会員 関西大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)

廃棄物処理施設、下水処理施設を一つの都市循環システムとして捉え、両処理施設で未利用エネルギー(ごみ焼却廃熱と下水汚泥消化ガス)を回収し、相互に利用した場合の、システム全体でのエネルギー消費量、環境負荷量の削減効果の評価した。未利用エネルギーを全て電力として回収する方法(回収①)、消化ガスによりメタノールを生成する方法(回収②)、消化ガスを補助燃料とする方法(回収③)について評価した。エネルギー自給、環境負荷削減という点で最も良い方法はメタノール生成を行うものであった。さらに、回収した未利用エネルギーを廃棄物収集も含めて利用することで、10万人の都市での都市循環システムのエネルギーの約40%を、40万人以上の都市でほぼ100%を自給し、このエネルギー消費抑制に相当する量の環境負荷削減の可能性を明らかにした。

Key Words : energy network, energy consumption, carbon dioxide emission, NOx emission, SOx emission, waste treatment plant, sewage treatment plant, self-supply of energy, sludge-digestion gas, waste heat

1. 緒論

エネルギー消費量の削減と、CO₂等温室効果ガスの排出抑制は世界的な重要課題であり、わが国でも企業、自治体、団体、個人において様々な取り組みが行われている。

廃棄物処理事業、下水処理事業においても、これらは非常に重要な課題である。これは、廃棄物処理事業では最終処分地容量の不足に対応して最終処分量を削減しなければならないという大きな課題を抱えており、今後溶融処理やリサイクルの導入が必要となる。また、下水処理事業では公共用水域の水質改善や水循環の適正化にむけた処理水還流等により、処理の高度化が必要となる。したがって、これに伴い、両処理事業のエネルギー消費量、温室効果ガス排出量の増加を引き起こすことが予想されるためである¹⁾。このような問題に対し両処理事業では、未利用エネルギーの利用により総エネルギー消費量及び温室効果ガスの排出を抑制することが検討・実施されている^{2)~4)}。

下水処理事業における取り組みとしては、下水熱を利用した冷暖房、汚泥消化ガスによる発電又は燃料利用、汚泥焼却廃熱による熱利用及び発電、水位

差を利用した水力発電、水処理施設の上部空間を利用した太陽光発電等があり、特に下水熱と汚泥消化ガスは利用できる熱量が多いため導入が進んでいる^{5)~8)}。

廃棄物処理事業における取り組みとしては、その膨大な熱量を利用した廃熱発電、冷暖房、地域供給等がある^{9),10)}。特に廃熱発電への期待と重要性が高まっており、総合エネルギー対策推進閣僚会議における「新エネルギー導入大綱」では、廃棄物発電を2000年で200万kW、2010年で400万kWという飛躍的な導入目標を掲げている¹¹⁾。さらに、今後より一層の廃棄物発電の導入を図るために発電効率の向上、新たな余熱利用方法などの研究、技術開発が進められている¹²⁾。

筆者らは、下水処理施設の多様な未利用エネルギーを効率よく回収することにより、処理に必要なエネルギーをほぼ自給し、環境負荷量を大幅に削減することが可能であることを明らかにした³⁾。

本論文では、さらに廃棄物処理施設と下水処理施設を一つの都市循環システムとしてとらえ、システム全体でのエネルギー自給の可能性、環境負荷削減について検討した。本研究の目的は次のものである。

①エネルギーネットワーク構築による循環システ

ムのエネルギー的自立可能性を明らかにする。
 ②廃棄物の収集・運搬を含む効率的なエネルギーネットワークの構築手法を示す。

2. エネルギーネットワーク

(1) エネルギーネットワークの考え方

都市には、都市活動に伴って発生し、自然界に排出されている熱や固形廃棄物のもつ潜在的エネルギー(未利用エネルギー)が多数存在する¹⁴⁾。廃棄物処理、下水処理に伴う未利用エネルギーもその一つである。

廃棄物処理施設では、処理効率の向上、廃熱発電による発電量の増加により、発電電力が消費電力を上回り、余剰電力を電力会社へ売電している処理施設もある。また、下水処理施設では、汚泥消化効率の向上に向けた技術開発、消化ガスを用いた新発電技術の開発、下水熱のヒートポンプによる回収及び冷暖房熱源としての利用、等様々な技術開発がなされているが、依然処理エネルギーの大半を外部供給に依存しており、より一層の省エネルギーが必要とされている。

一方で、近年複数の施設を一つのシステムとしてとらえた上でシステム全体での物質循環を考え、トータルな環境負荷を削減するという「低環境負荷型社会システム」の考えが、科学技術庁などの戦略的基礎研究の課題となっており、今後の成果が期待されている¹⁵⁾。

そこで、廃棄物処理施設での余剰電力を下水処理施設へ送る一方で、下水処理施設での下水汚泥消化ガスを廃棄物処理施設に送るエネルギーの相互融通を考える。また、廃棄物処理施設(廃熱)と下水処理施設(有機ガス、下水熱、電力)では回収可能な未利用エネルギーの種類が異なるため、都市循環システムとしてのより効率的な利用方法を探る。本論文ではこれをエネルギーネットワークとする。

(2) 評価方法

対象とする未利用エネルギーは、廃棄物処理施設では焼却廃熱、下水処理施設では下水汚泥消化ガスである。

① 廃棄物処理・下水処理での未利用エネルギー回収・利用による環境負荷削減

廃棄物処理施設及び下水処理施設のそれぞれにおいて未利用エネルギーを回収・利用した場合のエネルギー回収量、環境負荷削減量を定量する。また、未利用エネルギーを回収し、利用しやすい形態で施設へ提供するには、未利用エネルギー回収・転換施設

表-1 エネルギー資源の環境負荷原単位

	単位	エネルギー消費 (kcal/l)	CO ₂ 排出 (kg-C/)	NO _x 排出 (kg/)	SO _x 排出 (kg/)
電力 ¹⁶⁾	/kWh	2,250	0.1115	0.00124	0.00024
A重油 ^{17)~20)}	/ℓ	9,300	0.7358	0.0017	0.034
消化ガス ^{21),22)}	/ℓ	5,500	0.5357	0	0
軽油 ¹⁶⁾	/ℓ	9,200	0.7212	0.00232	0.00635
メタン ^{23),24)}	/kg	4,800	0.5455	0	0

設の建設が必要となるため、各処理施設における未利用エネルギー回収・転換施設の建設による環境負荷量を定量する。これより、各処理施設においてこの新たに必要となる施設を建設して未利用エネルギーの利用を行った場合の、建設時環境負荷、運用時環境負荷、未利用エネルギー利用により削減される環境負荷を定量し、未利用エネルギーの回収・利用による環境負荷削減の効果を明らかにする。

② エネルギーネットワークの構築による環境負荷削減効果

都市循環システムにおいてエネルギーネットワークを考えた場合の、エネルギー自給の可能性、及びそれに伴う環境負荷削減の効果を明らかにする。

③ 地域特性による未利用エネルギー利用効果への影響

都市の人口、人口密度が変われば処理施設規模及び廃棄物収集距離が変わるため、未利用エネルギーの利用によるエネルギー回収量、環境負荷削減量に変化が生じると考えられる。そこで、人口として大都市、中都市、小都市の3ケース、人口密度として中核都市、地方都市の2ケースを設定し、未利用エネルギーの回収・利用によるエネルギー回収量、環境負荷削減量を定量することで、人口・人口密度による影響を評価し、地域特性に適したエネルギーネットワークの提案を行う。

(3) 環境負荷評価

評価項目はエネルギー消費量とCO₂、NO_x、SO_xの排出量である。評価に用いる各エネルギーの低位発熱量とCO₂等の排出係数を表-1に示す。

エネルギー資源としての化石燃料の環境負荷原単位には、エネルギー資源の燃焼に伴い直接的に発生する環境負荷量を表したものと、これにエネルギー資源の採掘、輸送、精製及び転換に伴い間接的に発生する環境負荷量も含んだものがある^{16),25)}。これら2種類の原単位を比較した結果、化石燃料の採掘等により間接的に発生する負荷量は燃焼により直接的に発生する負荷量に比べ非常に少なく、その割合は数%程度であった。そこで、本研究では化石燃料については直接的にその燃焼に伴い発生する環境負荷

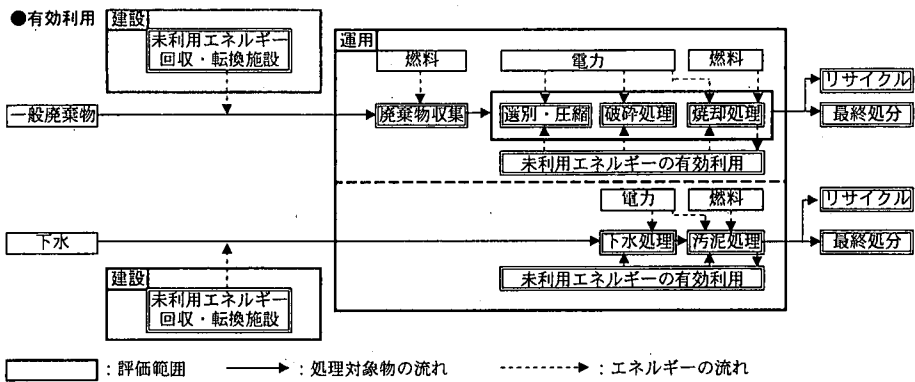


図-1 環境負荷の評価範囲

表-2 環境負荷の評価対象

	建設時環境負荷	運用時環境負荷
廃棄物	未利用エネルギーの回収・転換に必要な施設の建設	①廃棄物の収集 ②廃棄物処理 ③未利用エネルギーの回収・転換
下水	未利用エネルギーの回収・転換に必要な施設の建設	①下水処理 ②下水汚泥処理 ③未利用エネルギーの回収・転換

表-3 産業連関分析による発電施設の環境負荷原単位

	エネルギー	CO ₂
ボイラー	11.1 Gcal/百万円	0.854 t-C/百万円
タービン	12.0 Gcal/百万円	0.896 t-C/百万円
原動機	12.14 Gcal/百万円	0.936 t-C/百万円
非住宅建築(非木造)	9.19 Gcal/百万円	0.827 t-C/百万円

表-4 ごみ発電施設建設時の環境負荷量

建設時環境負荷原単位(a)	60 Gcal/(t/日)	(4.5 t-C/(t/日))
日処理ごみ量(b)	可燃ごみ 389 t/日	
建設時環境負荷量=(a)×(b)	23,000 Gcal	(1,800 t-C)

量の原単位を用いる。

また、本論文では未利用エネルギーの回収・利用をしてもその処理過程で削減不可能な、ごみ、下水汚泥自体から排出される CO₂、NO_x、SO_x 量は評価範囲に含まない。なお、下水処理と廃棄物処理における温室効果ガスとして CH₄、N₂O も無視できないことが指摘されている^{26),27)}が、わが国におけるこれらに関する基礎的データの整備がまだ十分でないため、今回は評価対象としなかった。

3. 下水処理・廃棄物処理での未利用エネルギーの回収量と環境負荷

(1) 評価対象と評価範囲

新たな未利用エネルギー回収・転換施設の建設による負荷量と、未利用エネルギー回収量、ならびに回収時の環境負荷を定量化する。

対象とする未利用エネルギー回収・転換施設は、廃棄物処理施設では廃熱ボイラと蒸気タービン(発

電効率の高い復水タービンとする)を含む発電設備、下水処理施設では嫌気性消化槽とガスエンジン発電設備とする。評価範囲を図-1に、環境負荷の評価対象を表-2に示す。なお、施設建設に関する環境負荷量は NO_x、SO_x 排出量原単位が得られなかったため、エネルギー消費量と CO₂ 排出量のみで評価とする。

また、都市規模によって未利用エネルギーの量や利用効果が異なると考えられることから、次の3通りの都市規模について評価した。

小都市	10万人(大阪府池田市など)
中都市	40万人(大阪府高槻市など)
大都市	100万人(愛知県名古屋など)

(2) 未利用エネルギー回収・転換施設建設における環境負荷

都市人口により建設負荷量が異なってくる。そこで、まず中規模な都市を想定して人口40万人の都市について未利用エネルギー回収・転換施設の建設負荷量を算出した。

a) 廃棄物の焼却廃熱発電

ごみ発生量原単位は、1998年版廃棄物年鑑²⁸⁾での全国の平均的なごみ発生量とその内訳より可燃ごみ 355kg/人・年、粗大ごみ 20kg/人・年、資源ごみ 25kg/人・年と設定した。また、各ごみの処理方式は、近年広く採用されている(可燃ごみ；焼却処理、粗大ごみ；切断+回転式破碎処理、資源ごみ；選別+圧縮処理)方式とした。

単位処理規模当たりの発電施設の人件費を除いた建設費は 450~860 万円/(t-焼却量/日)であり、その内訳がボイラー：タービン=3：1であるため²⁹⁾、表-3に示すボイラーとタービンの環境負荷原単位を用いて発電施設建設時の環境負荷量を算出した。

また、廃棄物焼却発電施設の環境負荷には永田らによる算出値³⁰⁾を用いた。

これより、ごみ発電施設の建設時環境負荷原単位

を60Gcal/(t/日), 4.5t-C/(t/日)と設定してごみ発電施設建設時環境負荷量を算出した。算出結果を表-4に示す。

b) 下水汚泥消化ガス利用

汚水発生量原単位は、下水道施設計画・設計指針と解説³¹⁾における都市域での計画一人一日平均汚水量が350~600ℓ/人・日程度であることから、平均的な500ℓ/人・日とした。また、処理方式は一般的な水処理方式である標準活性汚泥法と汚泥の焼却処理とした。なお、下水汚泥の発生量はヒアリング調査³²⁾による7下水処理場での実績値を基に処理水量の1/40と設定した。

汚泥消化ガスの利用方法として、ここではガスエンジン発電と補助燃料としての直接燃焼を考える。そこで、各利用方法において新たに必要となる施設の建設を対象とする。

①消化ガス発電施設の建設

消化ガス発電施設(嫌気性消化槽, ガスエンジン, 発電機等)建設時の環境負荷には花木ら³³⁾によるものを用いた。なお、処理規模の拡大に伴い建設費, 建設時負荷量が効率的となると考えられるが、これに関するデータが得られなかったため、建設時環境負荷量は処理規模に比例すると設定した。

②直接燃焼利用施設の建設

消化ガスを補助燃料として直接燃焼利用を行うには「嫌気性消化槽」が必要となる。この嫌気性消化槽の建設に係る環境負荷に関するデータが得られなかったため、消化ガス発電施設建設時の環境負荷よりガスエンジンと発電機を含むガス発電設備の製造・建設にかかる環境負荷を除いたものを、嫌気性消化槽の建設に係る環境負荷と見なした。

100t-DS/日規模の消化発電施設の建設時CO₂排出量は16,200t-Cであり、その内のガス発電設備の占める割合は41%(6,700t-C)である³⁴⁾。この割合を基に50t-DS/日でのガス発電設備建設時CO₂排出量を推定すると2,400t-C(=5,900t-C×41%)となる。

次に、CO₂排出量に関するデータしか得られなかったため、表-3に示した産業連関分析による環境負荷原単位³⁵⁾を用いてガス発電設備の建設時エネルギー消費量を算出する。ガス発電設備の建設時CO₂排出量の内訳³⁴⁾(機械・電気90%, 土木・建築10%)を基に、機械・電気には原動機, 土木・建築には非住宅建築(非木造)より求めた単位CO₂当たりのエネルギー(エネルギー/CO₂)を用いた。

算出結果を表-5に示す。これより、嫌気性消化槽のみの建設負荷量は表-6に示す値となる。

表-5 ガス発電設備建設時エネルギー消費量の算出

モデル都市でのガス発電設備(a)	CO ₂ 排出量; 2,400 t-C	
	機械・電気	土木・建築
CO ₂ 排出量の内訳 ³⁴⁾ (b)	90%	10%
モデル都市での各負荷量(c)={a}×(b)}	2,150 t-C	250 t-C
エネルギー/CO ₂ (d)	13.0 Gcal/t-C	11.1 Gcal/t-C
モデル都市でのガス発電設備(=c)×(d)	28,000 Gcal	2,800 Gcal
	計; 30,800 Gcal	

表-6 嫌気性消化槽建設時の環境負荷

	エネルギー消費量	CO ₂ 排出量
消化ガス発電施設(a)	65,000 Gcal	5,900 t-C
ガス発電設備(b)	30,800 Gcal	2,400 t-C
嫌気性消化槽{=(a)-(b)}	34,200 Gcal	3,500 t-C

(3) 未利用エネルギー回収・転換施設運用時の環境負荷

a) 廃棄物焼却廃熱発電

廃熱発電は運用時エネルギーを全てごみ焼却廃熱により補っているため、廃熱発電を行っても新たな運用時負荷量は生じない。

b) 下水汚泥消化ガス利用

嫌気性消化槽の運用は、消化ガスをガスエンジン発電と補助燃料のどちらに利用する場合でも必要となる。しかし、ガスエンジンの運用に必要となる電力は、ガスエンジン発電で回収した電力により補うことができるため、実質的には運用に伴うエネルギー資源を必要としない。

これより、下水処理施設における未利用エネルギー回収・転換施設の運用時負荷量は、消化ガスの利用方法に関係なく、嫌気性消化槽の運用に係るもののみとなる。

(4) 未利用エネルギーの回収可能量

a) 廃棄物焼却廃熱発電

廃棄物焼却廃熱発電では処理規模の拡大により発電効率が高まると考え、復水タービンの発電出力として廃棄物処理・再資源化技術ハンドブック³⁶⁾に示されている値より、次に示す焼却処理規模と発電出力の関係式を求めた。

$$\text{発電出力(kW)} = 13.8 \times \text{焼却量(t/24h)} - 723 \quad (1)$$

可燃ごみの発生量を355kg/人・年と設定しているため、1人1日当たりの可燃ごみ発生量は約1kgとなり、人口100万人の都市では100万kg/日=1,000t/24hの焼却量となる。これだけの規模の都市では複数の廃棄物処理施設が立地することも考えられるが、この規模の施設が現実に存在すること、技術開発により処理規模が大きくなれば発電効率も高まると考えられることから、人口100万人の都市でもひとつの処理施設で全量処理し、発電すると設定した。

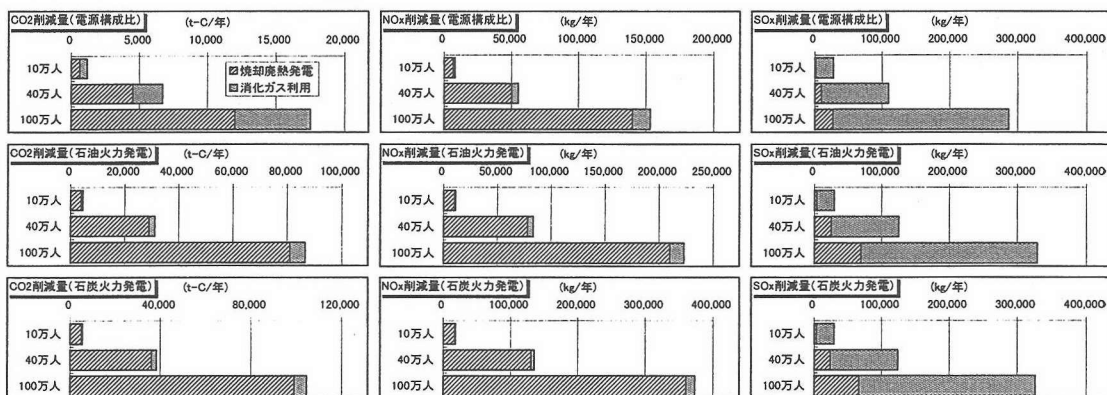


図-2 未利用エネルギーの有効利用による環境負荷削減量

表-7 人口規模別未利用エネルギー回収量

人口	廃熱発電量	消化ガス量
10万人	5,380 MWh/年 12,000 Gcal/年	1,270,000 Nm ³ /年 7,000 Gcal/年
40万人	40,600 MWh/年 91,000 Gcal/年	5,070,000 Nm ³ /年 28,000 Gcal/年
100万人	111,000 MWh/年 250,000 Gcal/年	12,700,000 Nm ³ /年 710,000 Gcal/年

b) 下水汚泥消化ガス利用

生汚泥 1m³あたりの消化ガス発生量を下水道統計ならびに文献等^{6),32)}より算出したが、処理場毎の差が大きく、処理規模と消化ガス発生量との間に有意な関係は見られなかった。このため、平均的な値として 2.8Nm³/m³(生汚泥)を用いた。

c) 未利用エネルギー回収可能量

廃棄物処理施設での発電電力のCO₂, NO_x, SO_x排出量の評価は電源構成によって変化する。そこで、電源を①日本の電源構成、②石油火力発電、③石炭火力発電とし、それぞれのCO₂, NO_x, SO_x排出量の削減量を求めた。各処理施設における回収エネルギーの有効利用による環境負荷削減量を図-2に示す。ここで、消化ガスを燃料として用いる場合では、消化ガスにより同じ発熱量分のA重油を代替した場合を想定して削減量を求めている。

また、各都市規模での年間の発電量と消化ガス回収量は表-7に示すものとなる。

この結果、年間のエネルギー回収可能量は、廃棄物処理が下水処理の3倍程度となった。CO₂, NO_x排出量では廃棄物処理の削減量の方が多いが、SO_x排出量のみ下水処理の方が多い。これは、下水処理では発生した消化ガスをSO_x排出量の多いA重油の代替燃料としているため、その削減量が多くなったものと考えられる。

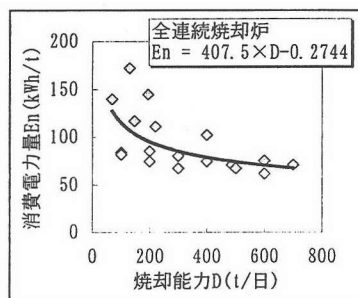


図-3 焼却処理能力と消費電力の関係

4. 未利用エネルギー利用によるエネルギー自給の可能性

(1) 評価方法

未利用エネルギーを利用するために新たに未利用エネルギー回収・転換施設を建設した場合は、その建設に伴う新たな環境負荷が発生する。しかし、その後の運用では未利用エネルギーが有効利用されるため、トータルの環境負荷量は削減される。そこで、未利用エネルギー回収・転換施設の耐用年数を25年とし、この期間における未利用エネルギー利用による環境負荷削減効果を評価する。

(2) 処理施設運用時エネルギー資源消費量

評価に際してまず、未利用エネルギー回収・転換施設を持たない各処理施設の運用に伴う負荷量と、廃棄物収集に伴う負荷量を算出する。算出手順と算出結果を人口40万人を例に示す。

a) 廃棄物処理施設

廃棄物処理における消費電力は、複数の実処理施設における実績値、メーカー公表値より求めた処理規模と消費電力の関係(図-3)から、表-8に示すように設定した。

表-8 破碎処理、選別・圧縮での消費電力

施設規模	破碎処理	選別処理	減容処理
25 t/日	56 kWh/t	25 kWh/t	35 kWh/t
50 t/日	43 kWh/t	30 kWh/t	45 kWh/t
75 t/日	33 kWh/t	40 kWh/t	55 kWh/t
100 t/日	27 kWh/t	50 kWh/t	65 kWh/t

表-9 下水処理施設運用時エネルギー資源消費量

人口 40万人	電力 (kWh/m ³)	A重油 (ℓ/m ³)	消化ガス (Nm ³ /m ³)
水処理	0.241	—	—
汚泥処理(a)	0.145	0.0188	0.00875
消化プロセス(b)	0.025	—	0.00875
消化を除く汚泥処理 (a)-(b)	0.120	0.0188	—

表-10 人口規模別エネルギー資源消費原単位の一覧

人口	10万人	40万人	100万人
焼却処理	116 kWh/t	79 kWh/t	62 kWh/t
破碎処理	56 kWh/t	56 kWh/t	33 kWh/t
選別・圧縮処理	12.0 kWh/t	7.5 kWh/t	6.3 kWh/t
下水・汚泥処理	電力: 0.446 kWh/m ³ A重油: 0.0232 ℓ/m ³	電力: 0.361 kWh/m ³ A重油: 0.0188 ℓ/m ³	電力: 0.325 kWh/m ³ A重油: 0.0169 ℓ/m ³

表-11 人口規模別の収集条件

		設定条件
収集方式		ステーション方式
ステーション数		10万人：1,760箇所 40万人：7,040箇所 100万人：17,600箇所
収集車量		ディーゼル車(積載量2t)
収集回数	可燃ごみ	2回/週(104回/年)
	粗大ごみ	1回/月(12回/年)
	資源ごみ	1回/週(52回/年)

表-12 モデル都市収集面積一覧

人口密度	6,000人/km ²	1,500人/km ²
人口 10万人	モデル都市①-A 17km ²	モデル都市①-B 67km ²
40万人	モデル都市②-A 67km ²	モデル都市②-B 267km ²
100万人	モデル都市③-A 167km ²	モデル都市③-B 667km ²

表-13 モデル都市における収集距離の一覧

モデル都市	可燃ごみ (km/年)	粗大ごみ (km/年)	資源ごみ (km/年)	合計 (km/年)
①-A	137,000	9,000	21,000	167,000
①-B	273,000	19,000	42,000	334,000
②-A	987,000	62,000	115,000	1,160,000
②-B	1,980,000	124,000	230,000	2,330,000
③-A	3,750,000	277,000	378,000	4,400,000
③-B	7,500,000	455,000	756,000	8,710,000

b) 下水処理施設

下水処理施設におけるエネルギー資源消費量は、7ヶ所の実処理施設へのヒアリング調査を基に、処理規模40万人について算出した結果、表-9に示す値となった。

なお、汚泥処理は消化を含まない流動焼却処理に関するデータが得られないため、消化を含む流動焼

却処理の運用負荷量から消化に要する負荷量を差し引いて算出した。また、下水処理では処理規模が倍になれば10%程度の効率化が図れるという結果が得られている³²⁾。これより、効率を10%として他の処理規模での運用時エネルギー消費量を算出した。

c) 運用時エネルギー資源消費量

各人口規模毎のエネルギー資源消費原単位の一覧を表-10に示す。各処理において人口規模が大きい方が処理は効率的となる。

(3) 廃棄物収集

a) 収集条件の設定

各人口規模の都市の収集条件を表-11に示す。なお、ステーション数は、一般的に1ステーション当たり20~30世帯である³⁷⁾ことから、1ステーション/57人として算出した。

b) 収集距離の算出

収集距離の算出には、地域条件、収集条件から収集距離を推定できるグリッドシティーモデル³⁸⁾を用いた。本モデルの走行距離算出式は次のものである。

$$D = \xi \cdot \left(\frac{W}{q} + f \cdot \sqrt{N} \right) \cdot \sqrt{A} \quad (2)$$

ここで、 D ：収集距離(km/年)、 W ：年間廃棄物排出量(t/年)、 q ：最大積載量(t)、 f ：年間収集回数、 N ：ステーション数、 A ：収集面積(km²)、 ξ ：屈曲補正係数である。なお、屈曲補正係数は1.52を用いた³⁸⁾。

可住地面積を廃棄物収集面積とし、可住地人口密度より算出する。地域経済総覧99³⁹⁾より大阪市、名古屋市等の大都市、浦和市、高槻市等の中核都市での可住地人口密度は3,000~20,000人/km²程度であり、北海道帯広市、青森県青森市、秋田県能代市等の地方都市で100~3,000人/km²である。

そこで、人口密度により中核都市と、地方都市に分け収集面積を表-12、収集距離の一覧を表-13の様に求めた。なお、人口と人口密度の組み合わせにより、モデル都市を設定した。

(4) 運用時環境負荷量

モデル都市における運用時環境負荷量算出結果を、人口40万人を例に図-4に示す。廃棄物処理、収集に比べ下水処理による環境負荷量は3倍程度である。また、廃棄物収集による環境負荷量は全体の10%以下であるため、人口密度の違いによる環境負荷量の差は小さい。

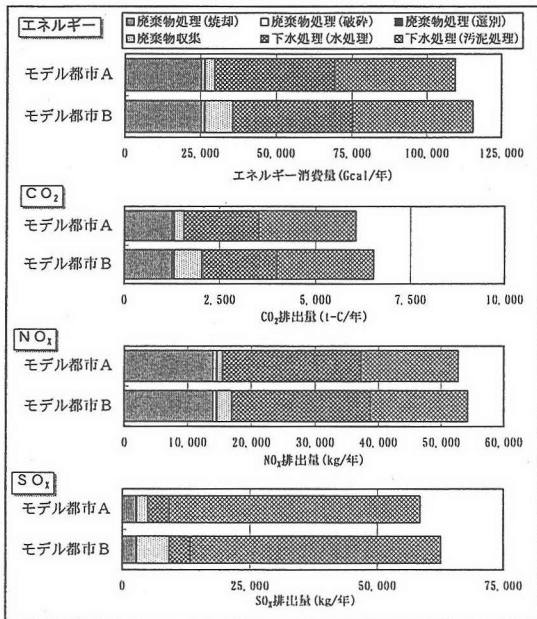


図-4 各処理における運用時負荷量(40万人)

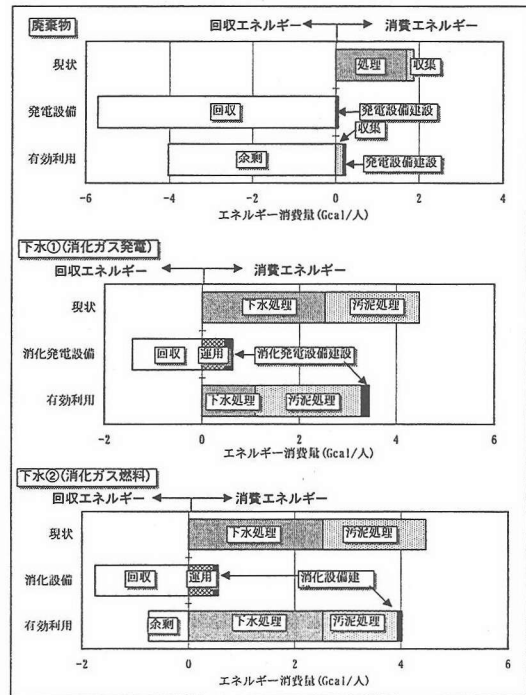


図-5 25年間の環境負荷削減量
＜モデル都市②-A＞

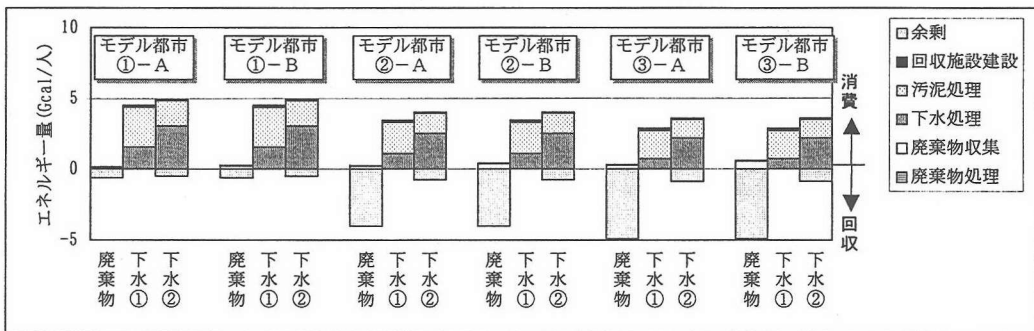


図-6 各モデル都市での環境負荷量

(5) 未利用エネルギー回収・利用による環境負荷削減

a) 評価ケース

未利用エネルギーは廃棄物処理施設では焼却廃熱発電とし、下水処理施設では次の2通りの利用方法を評価する。

下水①	消化ガスにより発電を行う。 ガスエンジンによる消化ガス 1Nm ³ 当たりの発電力は2.0kWhとする。
下水②	消化ガスを補助燃料として利用する。

b) 環境負荷算出結果

環境負荷算出結果の比較をモデル都市②-A(40万人, 6,000人/km²)を例に図-5に示す。

廃棄物処理施設、下水処理施設共に未利用エネルギー

回収・転換施設の建設に伴い負荷量が発生しているが、施設運用負荷量、未利用エネルギーの回収・利用による負荷削減量に比べて微量であるため省エネルギー効果が得られる。特に廃棄物処理施設では回収できる未利用エネルギー量が多いため、処理電力の自給だけでなく、さらに処理に必要な電力の2倍以上の余剰電力も発生している。

下水処理施設では、消化ガスを発電に用いた場合でも燃料として用いた場合でも、処理に必要なエネルギー量に比べ回収可能な未利用エネルギー量は1/3程度である。下水②(消化ガス燃料)において余剰エネルギーが生じている原因は、汚泥焼却時の補助燃料以外で燃料を消費しないため、回収した消化ガスの熱量の方が多く、焼却時補助燃料の代替燃料と

して使ってもまだ利用可能な熱量が残るためである。他のモデル都市での未利用エネルギー有効利用による消費エネルギー量と余剰エネルギー量を図-6に示す。

他のモデル都市においても同様に、廃棄物処理施設では廃棄物処理に要するエネルギーを全て自給し、更に余剰電力が生じている。また、下水処理施設での下水②(消化ガス燃料)でも余剰エネルギーが発生している。処理人口が多くなるに従い、消費エネルギー量は減少し、回収エネルギー量は増加している。特に廃棄物処理施設での廃熱発電における余剰エネルギー量は人口増加に伴い大きく増加している。

一方、人口密度による各環境負荷量の違いは、いずれの人口規模においてもほとんど現れていない。これは下水処理に比較して廃棄物処理の各環境負荷量が少ないことと、及び、廃棄物処理での各環境負荷量の多くが廃棄物の焼却プロセスで生じていることにより、人口密度の影響する廃棄物収集の環境負荷の全体の環境負荷に対する割合が小さいことによる。

5. 都市循環システムにおけるエネルギーネットワークの構築

(1) 評価方法

都市循環システムにおいて未利用エネルギーを相互に、より効率的に利用した場合の、循環システム全体でのエネルギー自給の可能性、環境負荷削減の効果を定量的に評価する。なお、前章で未利用エネルギー回収・転換施設の建設時環境負荷量は運用時環境負荷量に比べ非常に少ないことが明らかになったため、本章では施設運用時の環境負荷のみに着目し評価を行う。本章の評価範囲を図-7に示す。

(2) エネルギーの効率的利用方法

a) 廃棄物処理施設

廃棄物処理施設における焼却廃熱発電の余剰電力の利用として次の方法を検討する。

- ・下水処理施設への送電
- ・電気収集車への活用

b) 下水処理施設

下水処理施設の未利用エネルギーである消化ガスはそのまま発電用燃料、その他の燃料として利用することが可能である。さらに、消化ガスはメタンが主成分であるため天然ガス同様メタノールを生成し、車両燃料として利用することも可能である。そこで、消化ガスの利用として次の方法を検討する。

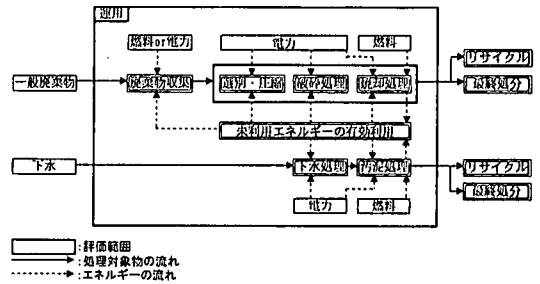


図-7 評価範囲

- ・ガスエンジン発電による処理電力の自給
- ・補助燃料としての利用
- ・メタノールの生成

(3) エネルギーの有効利用に伴うエネルギー損失
各施設で回収した未利用エネルギーの効率的利用を考える場合、エネルギーの転換・供給に伴って生じるエネルギーロスを考慮する必要がある。ここでは、各利用方法において生じるエネルギーロスについて検討する。

a) 送電・充電損失

発電した電力により、処理場内での消費電力を自給する場合、損失は生じないが、処理場において電気自動車に充電する際や、余剰電力を下水処理施設へ送電する際には電力のロスが生じる。そこで、余剰電力の利用におけるエネルギーロスとして①送電時のロス、②充電時のロスを考慮する。

①送電時のロス

日本の発電所における送電損失はおおよそ5~15%となっている⁴⁰⁾。ここで、送電に伴う電力損失は送電距離により変わると考えられるが、本研究で考える処理場間距離は、実際の発電所からの送電距離に比べ遙かに短いと考えられるため、ここでは最も小さい送電損失5%と設定した。

②充電時のロス

電力を貯蔵する際にエネルギーの変換に伴う損失が生じる⁴¹⁾。充電に伴う効率として60~90%という報告がなされているため^{41)~44)}、ここでは充電損失30%(充電効率70%)と設定する。

b) エネルギー転換時のロス

補助燃料として用いる際には消化ガスの持つ熱焓を損失なく利用できるが、ガスエンジンによる発電や、メタノールの生成を行う際にはエネルギーの転換による損失が生じる。

①ガスエンジン発電時のロス

下水道統計⁴⁵⁾より消化ガス発電を行っている全国の下水処理場での単位消化ガス当たりの平均発電量

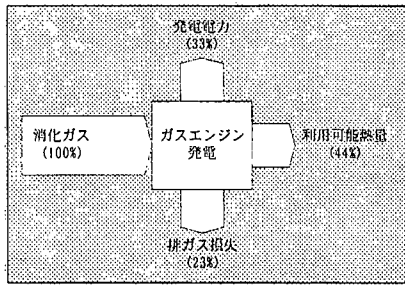


図-8 ガスエンジン発電のエネルギー収支

表-14 ガスエンジン発電時のロス

消化ガス(a)		5,500 kcal/Nm ³
未利用エネルギー	電力(b)	2 kWh/Nm ³ (1,720 kcal/Nm ³)
	廃熱利用(c)	692 kcal/Nm ³
エネルギーロス={b}+{c}-{a}		-3,088 kcal/Nm ³

表-15 メタン精製に伴う環境負荷量

水酸化ナトリウム ⁴⁶⁾	0.642 kg/Nm ³
工水 ⁴⁶⁾	0.0357 m ³ /Nm ³
エネルギー消費量	766 kcal/Nm ³
CO ₂ 排出量	0.0678 kg-C/Nm ³

* : 水酸化ナトリウムの NO_x, SO_x 排出原単位が得られなかったため、メタン精製での NO_x, SO_x 排出量は算出できない。

表-16 メタノール精製時のロス

消化ガス(a)	1.0 Nm ³ (5,500 kcal)
メタン精製に必要なエネルギー量(b)	766 kcal
メタノール(c)	0.71 kg(3,400 kcal)
メタノール生成時ロス(c)-{a}+{b}	-2,866 kcal

を算出した。その結果、消化ガス単位消費量当たりの発電量は、発電規模が小さい場合には処理場によるばらつきが大きいもののほぼ 1.5~2.5kWh/Nm³ の範囲にあり、規模が大きくなるにつれてこの値が 2.0kWh/Nm³ に収束し、全施設の平均値も 2.0kWh/Nm³ であった。これより、消化ガスを燃料とするガスエンジン発電での単位消化ガス当たりの発電量を、施設規模と関係なく、2.0kWh/Nm³ (1,720kcal/Nm³) と設定した。

さらに、ガスエンジンに付属した廃熱回収設備により、ガスエンジンの排気ガス及び冷却水の廃熱を回収し、この回収熱により汚泥消化タンクの加温を行うことが可能であると報告されている^{6),14)} (図-8)。このときの廃熱としての回収量は投入エネルギーの 44% であり、消化ガス 1Nm³ (5,500 kcal) に換算すると約 2,400 kcal となるため、消化槽加温熱量(692 kcal)を十分に賄えることが確認できる。

ガスエンジン発電での廃熱量を消化槽加温(692kcal/Nm³)のみに利用した場合の、ガスエンジン発電時のロスは表-14 に示すものとなる。

表-17 評価ケース

評価ケース	廃棄物処理	下水処理	利用方法
回収①	ごみ発電	ガスエンジンによる発電	・両処理電力 ・電気収集車への活用
回収②		メタノールの生成	・両処理電力 ・メタノール収集車 ・処理補助燃料の自給
回収③		補助燃料	・両処理電力 ・処理補助燃料の自給

②メタノール生成時のロス

天然ガス(メタン 90%)からのメタノール生成に伴う効率として、62%という値が示されている²³⁾。そこで、この値を消化ガス(メタン 65%)からのメタノール生成においても用いることとするが、消化ガスは天然ガスに比べメタン濃度が低いため、消化ガスからのメタン精製(メタン 92%)も合わせて考慮する必要がある。メタン精製における薬品使用量、環境負荷量を表-15の様に設定する⁴⁶⁾。なお、下水処理場は利用可能な水が豊富に存在する施設であるため、工水の環境負荷は考慮せず、水酸化ナトリウムの消費に伴う環境負荷のみとする。評価に用いた水酸化ナトリウムの環境負荷原単位は、エネルギー消費量 1,193kcal/kg、CO₂排出量 0.1056kg-C/kg⁴⁷⁾である。

メタノール生成時のロスは表-16 に示すものとなる。

(4) エネルギーネットワーク構築による環境負荷削減

a) 評価ケース

評価ケースを表-17のように設定する。回収①は廃棄物処理施設と下水処理施設における全ての未利用エネルギーを電力として回収し、処理電力、電気収集車へ利用する方式である。回収②は下水処理施設での消化ガスによりメタノールを生成し、メタノール収集車へ利用する方式である。回収③は消化ガスを下水汚泥処理での補助燃料として利用する方式である。

回収①、②では、得られた各エネルギーをごみ収集車の燃料として活用することによる環境負荷の削減も評価した。

b) 評価結果

一例としてモデル都市②-Aにおいて循環システムでのエネルギーネットワークを考え、未利用エネルギーの有効利用を行った場合の、各評価ケースにおけるエネルギーの消費量と回収量を比較して図-9に示す。

各ケースにおけるエネルギー自給率、環境負荷削減率を表-18に示す。なお、各ケースにおいて発生した余剰電力、余剰燃料も合わせて示す。

表-18 各ケースにおける未利用エネルギー利用効果(モデル都市②)

	モデル都市A			モデル都市B		
	回収①	回収②	回収③	回収①	回収②	回収③
電力自給率	100%	97%	97%	100%	97%	97%
エネルギー自給率	88%	98%	95%	88%	96%	93%
CO ₂ 削減率	83%	98%	94%	83%	95%	91%
NO _x 削減率	96	97%	96%	96%	97%	95%
SO _x 削減率	17%	99%	96%	18%	85%	93%
余剰電力(kWh/年)	8,600,000	0	0	7,600,000	0	0
余剰燃料(Gcal/年)	0	4,700	12,000	0	0	12,000

表-19 各評価ケースにおける算出結果一覧

評価ケース	10万人						100万人					
	①-A		①-B		③-A		③-B		③-B		③-B	
利用方法	回収①	回収②	回収③	回収①	回収②	回収③	回収①	回収②	回収③	回収①	回収②	回収③
電力自給率	60%	41%	41%	60%	41%	41%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
エネルギー自給率	55%	51%	49%	54%	52%	49%	88%	100%	95%	88%	93%	91%
CO ₂ 削減率	52%	56%	54%	52%	57%	53%	83%	100%	94%	83%	91%	88%
NO _x 削減率	58%	44%	44%	57%	44%	43%	96%	100%	98%	96%	97%	95%
SO _x 削減率	11%	90%	88%	11%	89%	87%	17%	100%	94%	18%	47%	89%
余剰電力(MWh/年)	0	0	0	0	0	0	46,000	23,000	23,000	42,000	23,000	23,000
余剰燃料(Gcal/年)	0	970	2,000	0	0	2,000	0	8,500	34,000	0	0	34,000

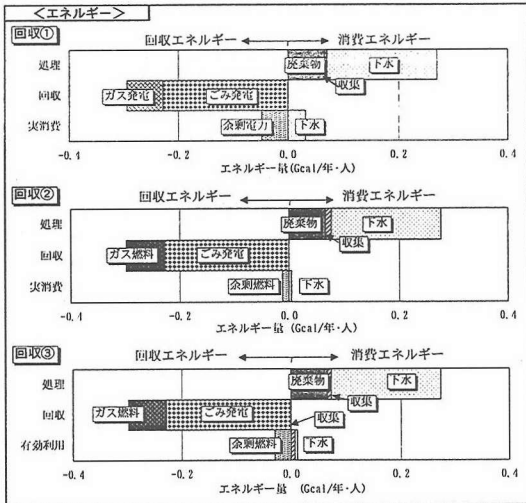


図-9 エネルギーの消費と回収
〈モデル都市②-A〉

- この評価により、以下のことが明らかとなった
- ・ 消化ガスを発電に利用する回収①では、処理に要する電力を100%、エネルギーを80%自給可能である。また、他のケースでは処理に要する電力、エネルギーを共に90%以上自給可能である。
 - ・ CO₂, NO_x 排出量は、回収①でCO₂排出量が80%程度となる以外は90%以上の高い削減率となっている。
 - ・ SO_x排出量は、回収②、回収③が85%以上の削減率であるのに対し、回収①のみが20%以下とかなり低い値となっている。これは、SO_x排出量は廃棄物収集、下水処理での燃料の消費によるものが主であるため、消化ガスを発電のみに

利用する回収①では燃料を自給出来ないため削減率が低いものと考えられる。

- ・ 回収①では余剰電力、回収②と回収③では余剰消化ガスによる余剰エネルギーが生じており、他の施設への更なる有効利用の可能性がある。
- ・ 全体的な削減率は回収②が最も高いが余剰エネルギーはほとんど発生していない。しかし、若干削減率の小さい回収③では年間消費エネルギー量の10%程度の消化ガスが、回収①では年間消費電力の20%程度の余剰電力が生じている。

6. 地域特性による未利用エネルギー利用効果の影響評価

(1) 評価方法

都市の条件により、未利用エネルギーの利用による都市循環システムでのエネルギー収支、環境負荷削減効果は異なると考えられる。そこで、人口、人口密度の違いによるエネルギー収支、環境負荷削減への影響を評価する。

(2) 未利用エネルギーの有効利用による環境負荷削減効果の比較

未利用エネルギーの相互利用による各評価ケースでの環境負荷の削減量を、人口、人口密度により比較し、都市条件の違いによる影響を評価する。モデル都市毎の各評価ケースにおけるエネルギー自給率、環境負荷削減率を表-19に示す。なお、各ケースにおいて発生した余剰電力、余剰燃料も合わせて示す。

表-20 未利用エネルギー利用効果の相対比較

	<エネルギー自給率>			<排出量削減率>			
	評価ケース			評価ケース			
	回収①	回収②	回収③	回収①	回収②	回収③	
モデル都市	①-A	10	7	7	6	10	9
	①-B	10	8	7	6	10	9
	②-A	9	10	9	6	10	9
	②-B	9	10	9	7	9	10
	③-A	9	10	9	6	10	9
	③-B	9	10	9	7	8	10

	<平均削減率>			<余剰エネルギー>			
	評価ケース			評価ケース			
	回収①	回収②	回収③	回収①	回収②	回収③	
モデル都市	①-A	8	10	9	0	4	10
	①-B	8	10	9	0	0	10
	②-A	7	10	9	10	2	6
	②-B	8	10	10	10	0	7
	③-A	7	10	9	10	5	8
	③-B	8	9	10	10	5	9

※回収①での余剰エネルギーは全て利用しやすい電力であるため、他の方式に比べ余剰エネルギーの有効利用に適している。

この評価により次のことを明らかにした

a) 処理人口による関係

各処理人口でのエネルギー自給率、排出量削減率は、モデル都市①(10万人)で40%程度、モデル都市②(40万人)で80%程度、モデル都市③(100万人)で90%程度となる。これより、処理人口が多いほどエネルギー自給率、排出量削減率が高くなっており、特に10万人と40万人との間で大きな自給率・削減率の向上が見られる。

b) 人口密度による関係

人口密度の違いによる影響は、SOx 排出量において若干人口密度の高い地域の方で削減率が高くなっている程度で、他の負荷項目においてはほとんど影響は見られない。これは、どの都市条件においても、全環境負荷量のうち、廃棄物収集の占める割合が非常に小さいため、収集距離の違いによる影響が全体として現れなかったものである。

c) 利用方法による関係

未利用エネルギーの利用方法毎の環境負荷削減率は評価項目により異なり、単純な優劣は見られないため、次の4つの視点により評価する。

- ①エネルギー自給率（電力自給率とエネルギー自給率の平均値）
- ②排出量削減率（CO₂、NO_x、SO_x 排出量削減率の平均値）
- ③平均削減率（全評価項目の自給率、削減率の平均値）
- ④余剰エネルギー（余剰エネルギー量）

各視点での相対比較を表-20に示す。なお、最も削減率の高い方式を10点とし、相対化した。

1. エネルギー自給率

人口10万人の場合には回収①が最も自給率が高

いが、人口40万人、人口100万人ではいずれも回収②が最も自給率が高い。しかし、他の利用方法との差は小さい。

2. 排出量削減率

人口密度6,000人/km²であれば回収②が最も削減率が高いが、回収③との差は小さく、人口密度1,500人/km²の場合には逆転しているケースもある。

回収①は他の利用方法の比べ削減率は低い。これは、未利用エネルギーを全て電力として回収するため、下水処理で消費されている燃料を自給できず、燃料消費による排出が大部分を占めるSOx 排出量の削減率が低いためと考えられる。

3. 平均削減率

モデル都市③-Bを除いて、回収②が最も削減率が高く、次いで回収③となっているが、これら2方式の差は小さい。また、他の利用方式に比べ回収①の削減率が若干低い原因は、排出量削減率で述べたSOx 排出量の削減率が低いためと考えられる。

4. 余剰エネルギー

人口10万人では回収③が最も多く、人口40万人以上では回収①が最も多い。また、回収②はどの都市条件でも余剰エネルギーは少ない。これはメタノール生成時の損失が大きいため、他の利用方式に比べ余剰エネルギーが発生しにくいものと考えられる。なお、回収①では余剰エネルギーが全て利用しやすい電力として回収できるため、余剰電力を他の様々な公共施設へ容易に供給可能であると考えられる。

7. 結論

廃棄物処理施設、下水処理施設において、未利用エネルギーの回収・利用によるエネルギー自給、環境負荷の削減効果について検討した。その上で、両処理施設において回収した未利用エネルギーを、施設間で相互に利用するエネルギーネットワークを構築した場合のエネルギー自給率、環境負荷削減率の評価を行った。

廃棄物処理施設、下水処理施設において、未利用エネルギー回収・転換施設を建設し、未利用エネルギー利用を行った場合、両処理施設共に未利用エネルギー回収・転換施設の建設に伴い負荷量が発生するものの、施設運用負荷量、回収可能未利用エネルギー量に比べて微量であるため省エネルギー効果が得られる。特に廃棄物処理施設では回収できる未利用エネルギー量が膨大であるため、処理電力の自給だけでなく、余剰電力の他施設への供給も可能であることが明らかになった。

廃棄物処理施設と下水処理施設を一つの都市循環システムとしてとらえ、エネルギーネットワークを構築することで、中都市(40万人)、大都市(100万人)では全ての利用方法においてシステム全体のエネルギーをほぼ100%自給可能であり、環境負荷量も90%程度削減可能であることが明らかとなった。小都市(10万人)ではエネルギー自給率、環境負荷削減率は40%程度となり、処理人口10万人と40万人との間に大きな効率の差が見られた。これは各処理施設の処理効率の向上と、廃棄物処理施設のごみ発電出力の向上によるものと考えられる。

また、モデル都市の条件に適した利用方法の検討を行った結果、エネルギー自給、環境負荷削減という点では、ほぼ全ての都市条件で消化ガスによりメタノールを生成する回収②が最も効果が高いことがわかった。しかし、余剰エネルギーの他施設への供給による環境負荷削減を考慮すると、40万人以上の処理規模では余剰エネルギーが電力として回収でき、しかも発生量の最も多い回収①(消化ガスをガスエンジン発電)の方が高い省エネルギー、環境負荷削減量となる可能性もある。

以上より、廃棄物処理施設・下水処理施設を一つの都市循環システムとしてとらえ、エネルギーネットワークの構築を行うことで、個別の処理施設で未利用エネルギーの利用を行うよりも、システム全体のエネルギー消費量、環境負荷量を大きく削減できることを明らかにした。これより、今後廃棄物処理施設、下水処理施設における未利用エネルギーの利用を考える場合には、個別の施設だけではなく、複数の処理施設あるいは都市全域を一つのシステムとして捉え、エネルギーネットワークを構築することによるシステム全体のより効率的な省エネルギー、環境負荷削減の方法を検討する必要がある。

謝辞：最後に、本研究の遂行に当たり、種々の面からお世話になった方々に心からお礼を申し上げます。また、メーカー各社をはじめ貴重な資料を提供いただいた方々に厚くお礼申し上げます。なお、データ解析に当たっては、卒研究生大山秀格君、谷口正修君の協力を得ました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 片山英明：消化ガスを用いた燃料電池の実用化への取り組み、月刊下水道、Vol.21, No.11, pp.66-69, 1998.
- 2) 森岡泰裕：地域開発での利用にも期待一下水熱利用の現状とこれから、月刊地球環境、Vol.29, No.8, pp.15-19, 1998.
- 3) 佐藤治、宮澤千里：下水汚泥のもつエネルギー利用の

- 技術開発の動向、月刊下水道、Vol.16, No.9, pp.14-18, 1993.
- 4) 一瀬正寛、河田尚、寺岡泰浩、児玉芳実：ごみ焼却工場のエネルギープラントとしての位置づけ、都市沼排、第203号、pp.61-66, 1994.
- 5) 森野仁夫：在来システムに比べ約30%の省エネを実現 - 未利用エネルギー高度活用負荷平準化冷暖房技術の開発、月刊地球環境、Vol.29, No.8, pp.26-29, 1998.
- 6) 小杉聖海：汚泥資源化工場の運転、月刊下水道、Vol.16, No.9, pp.33-37, 1993.
- 7) 冠城敏之、水上啓：汚泥焼却廃熱の回収システムと蒸気発電設備の導入、第34回下水道研究発表会講演集、pp.959~961, 1997.
- 8) 川田富弘：下水処理水を利用した小水力発電設備について、下水道協会誌、Vol.25, No.295, pp.67-72, 1988.
- 9) 西口信幸：高効率ごみ発電の現状と課題、廃棄物学会誌、Vol.6, No.3, pp.205-217, 1995.
- 10) 森山正和、山本和久：神戸市域における未利用エネルギーによる地域冷暖房システムの導入可能性に関する研究、神戸大学都市安全研究センター研究報告、第2号、pp.33-48, 1998.
- 11) 多賀龍二：横浜市における高効率廃棄物発電の取り組みについて、月刊地球環境、Vol.28, No.5, pp.32-35, 1997.
- 12) 石川禎昭：ごみ焼却廃熱有効利用の現状と展望、都市と廃棄物、Vol.26, No.10, pp.39-62, 1996.
- 13) 三浦浩之、村岡治、中野加都子、和田安彦：エネルギー自給型の下水処理システムに関する研究、下水道協会誌論文集、投稿中。
- 14) 未利用エネルギー活用の手引き：中本至監修、下水熱利用促進研究会編、山海堂、p.17, 1994.
- 15) 盛岡通：循環型経済社会の構築をめざした戦略研究、環境情報科学、Vol.27, No.2, pp.26-34, 1998.
- 16) 製品等による環境負荷評価手法等検討調査：環境情報科学センター、p.37, 1998.
- 17) 資源エネルギー庁長官官房企画調査課：総合エネルギー資源統計平成7年度版、1996.
- 18) 北九州市：地球温暖化対策地域促進モデル計画策定調査報告書、1992.3.
- 19) プラスチック処理促進協会：プラスチック製品の使用量増加が地球環境に及ぼす影響評価報告書、1993.3.
- 20) 参考文献15)より、1kg当たりのCO₂排出原単位と1ℓ当たりのCO₂排出原単位の比率から算出。
- 21) 玉寄長立：消化ガス発電システムによるエネルギーの有効利用について、月刊下水道、Vol.16, No.9, pp.43~48, 1993.
- 22) 参考文献19)より、消化ガスをメタン65%、CO₂35%として算出。
- 23) 地球温暖化防止対策ハンドブック4交通編、環境庁企画調整局地球環境部編、pp.130-142, 1992.
- 24) メタノールの化学式(CH₃OH)より設定した。
- 25) 平成4年度石油製品需給適正化調査：三菱総合研究所、pp.11-49, 1992.
- 26) 安田恵二：廃棄物の焼却にともなう温室効果ガスの排出状況、廃棄物学会誌、Vol.8, No.6, pp.432-437, 1997.
- 27) 山根昭、関根富明、平野祐司：エアレーションタンクから発生する一酸化二窒素についての調査研究、第34回下水道研究発表会講演集、pp.1129-1131, 1997.
- 28) 廃棄物年鑑1998年版、環境産業新聞社、1998.
- 29) メーカーへのヒアリング調査、1998.
- 30) 永田勝也、伊藤悦子、出口昭浩、藤井美文：廃棄物焼

- 却発電システムのLCA評価, 第9回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp.87-90, 1998.
- 31) 下水道施設計画・設計指針と解説 前編:建設省都市局下水道部監修, 日本下水道協会, p.38, 1994.
- 32) 下水処理場及び下水道事業団へのヒアリング調査, 1996.
- 33) 花木啓祐, 黄龍雨, 田中俊博: LCCO₂による汚泥集約処理の評価, 下水道協会誌, Vol.33, No405, pp.88-95, 1996.11.
- 34) 花木啓祐, 黄龍雨, 田中俊博: 汚泥処理システムにおけるLCCO₂に関する考察, 下水道協会誌, Vol.33, No405, pp.75-87, 1996.11.
- 35) 産業連関分析による財・サービス生産時のエネルギー消費量とCO₂排出量:電力中央研究所, pp.44-55, 1996.
- 36) 廃棄物処理・再資源化技術ハンドブック:廃棄物処理・再資源化技術ハンドブック編集委員会編, 建設産業調査会, pp.203-211, 1993.
- 37) 廃棄物ハンドブック:廃棄物学会編, オーム社, p.129, 1997.
- 38) 石川雅紀:家庭系一般廃棄物の分別収集の環境及び経済影響, エコバランス国際会議講演集, pp.342-346(日本語版)・pp.397-402(英語版), .
- 39) 地域経済総覧'99:週刊東洋経済, 東洋経済新聞社, pp.332-359, 1998.
- 40) 現代電力輸送工学:関根泰次編, オーム社, 1995.
- 41) 電池の進化とエレクトロニクス:池田宏之助著, pp.192,193, 1992.
- 42) リチウムイオン二次電池の話:西美緒著, pp.118-121, 1997.
- 43) リチウムイオン二次電池—材料と応用—:芳尾真幸, 小沢昭弥編, pp.134,135, 1996.
- 44) 電池のサイエンス:岡田和夫著, p.160, 1997.
- 45) 平成6年度 下水道統計.
- 46) 片山英明:消化ガスの燃料電池への適用技術について, 第32回下水道研究発表会講演集, pp.685-687, 1995.
- 47) 金材研データベース.

(1999. 1. 13 受付)

PROPOSAL OF ENERGY NETWORK IN WASTE TREATMENT FACILITIES AND SEWAGE TREATMENT FACILITIES

Hiroyuki MIURA, Kazuko NAKANO, Yasuhiko WADA,
Osamu MURAOKA and Ryo FUJII

We proposed an energy network in waste treatment facilities and sewage treatment facilities. This network can reduce the energy consumption and the environment loads from their treatment facilities, in case collected energy (waste heat and sludge-digestion gas) are utilized each other in their treatment facilities. A means to collect the energy is as follows: Case-1 is that all energy are collected as electricity, Case-2 is that methanol is produced from sludge-digestion gas and Case-3 is that sludge-digestion gas is collected as fuel. As the result, Case-2 is better than the another cases in this evaluate at reduction of the energy consumption and the environment loads from the system. Furthermore, it is possible to reduce about 40% of the energy consumption and the environment loads in the system of 100,000 persons and about 100% of them in the system of over 400,000 persons.