【 論 文 】

LCA による RDF 発電事業の有効性に関する評価

—— 石川県北部地域でのケーススタディ ——

山 成 素 子*・島 田 莊 平*

【要 旨】 わが国では、一般廃棄物は焼却処理をし、発電をするなどのサーマルリサイクルが主流となっており、廃棄物発電の導入が積極的に進められているが、広域処理と高効率のエネルギー回収を目指した RDF（固形化燃料）による発電方式が一つの手段として検討されている。そこで本研究では、LCA 的な観点を用いて RDF 発電事業の有効性を、エネルギー消費量、環境負荷排出量（CO₂、NO_x、SO_x）、コストの面から評価した。石川県北部を対象地域とし、現在稼働中の RDF 発電事業を従来焼却（焼却のみ）や広域処理（焼却・発電）、分散処理（焼却・発電）と比較した結果、以下のことが明らかになった。(1) 発電を伴う焼却処理方式では十分に効果がある、(2) RDF の利用により収集コストの削減が見込める、(3) RDF 発電事業は CO₂ 削減に大いに役立つ。

したがって可燃性一般廃棄物を処理する際に、RDF の輸送性が発揮される人口密度が小さい地域は RDF を利用し、広範囲で大規模に焼却・発電を行い、発電効率を上昇させることが、最も環境負荷の少ないシステムを構築する際に効果的である。

キーワード：RDF, LCA, 石川県北部, サーマルリサイクル, 地域特性

1. は じ め に

近年、廃棄物は大量に排出され続けており、排出された廃棄物をどのように処理するのが重要な課題となっている。わが国では、一般廃棄物処理は 78.4% が焼却処分¹⁾されており、この割合は他の先進国と比べて約 2 ～ 5 倍と非常に高い²⁾。この理由として、(1) 日本は平地が少なく、高度な土地利用を強いられているため、最終処分場の建設が困難であること、(2) 廃棄物の減容化が迫られること、(3) 生ごみが多いため廃棄物の焼却処理は衛生的であること、等があげられている。わが国は、焼却処理が多いという現状と、さらにごみ質の向上でごみの発熱量が上昇したため、焼却時の排熱を利用して発電をするなどのサーマルリサイクルが主流となっている。

一方、厚生省は、ごみ資源化の推進およびダイオキシン排出量の削減を目的として、平成 9 年 5 月、「ごみ処理の広域化計画について」を各都道府県に通知した。「ごみ処理の広域化」の必要性について安田³⁾が整理している。安田によると、広い地域でごみの分別収集方法を統一することによるリサイクル効果、大規模な連続式のごみ焼却施設を整備することによるダイオキシン排出削減などを広域化の目的としてあげている。しかし、広域化に向けての課題・問題点として、(1) 複数の市町村が共同処理を行うため、市町村の合意と住民の合意形成、(2) 広域化による収集費、運搬費の増加、(3) 地域性の影響、があげられる。特に(3)地域性の影響は、人口密度の低い地域を有する自治体においては広域化を行う際、収集・運搬が深刻な問題となる。

このような状況を踏まえ、現在、廃棄物処理やリサイクルに関する処理技術が提案され、それらの評価や検証が行われている。河野ら⁴⁾は、ごみの広域処理における輸送計画に着目し、輸送モデルについて考察している。廃棄物発電の一つである RDF 発電の有効性については、劉ら⁵⁾が環境負荷と社会的費用便益分析を行っている。

原稿受付 2005. 9. 1 原稿受理 2006. 10. 19

* 東京大学大学院 新領域創成科学研究科

連絡先：〒 277-8563 千葉県柏市柏の葉 5-1-5

東京大学大学院 新領域創成科学研究科 島田 莊平

E-mail: s-shimada@k.u-tokyo.ac.jp

その結果、RDF 製造、焼却施設のプロセスの改善が要求されるが、高効率のエネルギー回収が可能であり、回収エネルギー 1 単位あたりの環境負荷は少ない。経済性分析においては、エネルギー回収に関わる各費用を分析しており、システム全体の評価はされていない。このように、既存の研究は収集の最適化や処理技術の実証実験、性能評価に関する研究が多く、廃棄物処理システム全体を評価した研究例は数少ない。地域に適した廃棄物処理システムの構築のためにも、全プロセスを網羅すべきである。また環境負荷だけではなく経済性も考慮すべき点であることはいうまでもない。

そこで本研究は、平成 14 年度から RDF 発電事業を行っている石川県北部地域をスタディエリアにして、RDF 発電の有効性を経済性、省エネルギー性、環境負荷排出量の削減効果の視点から評価を行う。また従来焼却（平成 14 年までの対象地域における処理方式）、広域処理、分散処理の分析もあわせて行い比較することで、客観的な判断が可能となる。さらに実際のデータを用いることで、より実用的な分析を行っている。

2. 対 象 地 域

2.1 石川県北部

本研究の対象地域は石川県北部で、人口約 32 万人である。Fig. 1 に石川県北部の各市町村における平成 13 年度の可燃ごみ排出分布（ton/年）を示す。石川県では、平成 9 年に能登地区に点在する中小の自治体廃棄物処理の効率化・適正処理化を目的としてごみ処理広域計画（RDF 化構想）を策定した。この計画は河北郡以北の能登地区（24 市町村）を対象とし、廃棄物処理エリアを

越えて、5つの広域処理ブロックに取りまとめ、各ブロックに「ごみ固形燃料化施設」を建設・稼働させ、運搬等取扱いが容易となるごみ固形燃料（RDF）を製造するというものである。

また、製造された RDF は 24 市町村によって構成される「石川北部アール・ディ・エフ広域処理組合（平成 12 年 5 月 15 日設立）」が運営する「石川北部 RDF センター」に一括搬入・処理される。「石川北部 RDF センター」では、RDF 焼却時に発生する熱エネルギーを利用した発電や、焼却・熔融した後の焼却灰の再利用など資源の再利用を行っている。

この構想の背景には、「廃棄物処理法」の改正があり、ダイオキシン類の排出基準が一層厳しくなりかつ、焼却施設に対する構造・維持管理基準が適用されるので、当時の焼却炉の運営が困難になったことがある。

現在、石川県北部 RDF 発電事業は、能登半島にある 20 市町村を対象にしており、RDF 製造施設は ① エコラ（河北郡広域事務組合、処理能力：119.5 ton/16 h）、② クリンクルはくい（羽咋郡市広域圏事務組合、処理能力：66 ton/16 h）、③ ななかりサイクルセンター（七尾鹿島広域圏事務組合、処理能力：94 ton/16 h）、④ 奥能登クリーンセンター（奥能登クリーン組合、処理能力：48 ton/8 h）の 4 つで構成されている。残り 1 つの RDF 製造施設は、平成 21 年に稼働予定である（輪島市、穴水町門前町環境衛生施設組合）。4 つの施設で製造された RDF は石川北部 RDF センター（石川北部アール・ディ・エフ広域処理組合）に運ばれ、焼却の熱エネルギーにより発電をするとともに、熔融スラグは路盤材等に活用している。RDF 専焼炉の処理能力は 160 ton/day で、発電出力 7,000 kW である。分析では、現

Fig. 1 Four cases evaluated in this study (Northern area of Ishikawa prefecture)

Table 1 Summary of RDF manufacture plants and RDF power generation plant (H 15)

	RDF manufacture plant				RDF power generation plant
	Kahoku	Hakui	Nanao Kashima	Okunoto	Ishikawa Hokubu RDF Center
Planned population	96385	96385	84029	43173	—
Amount of MSW treated (ton/year)	26239	16383	25414	7545	—
Treatment capacity (ton/day)	120	66	94	48	160
Operating time (h/day)	16	16	16	8	24
Operating expense (¥1000/year)	455481	274147	484183	168887	518618
Transport cost (yen/year)	38816	13631	8303	30065	—
Construction cost (¥1000)	5633530	3144750	5296290	4084500	10230000
Kerosene consumption (L/year)	2040021	1163970	1378800	379570	357200
Electricity consumption (kWh/year)	7569036	2442847	3920460	2291511	12533455
Electricity production (kWh/year)	—	—	—	—	37014545
Kerosene consumption for RDF transport (L/year)	41376	12194	20583	18008	—

Table 2 Four cases evaluated in this study

Study case	Type and number of incinerator	Electric power generation
Old system	Incinerator : 9 facilities	No
RDF	Gasification : 1 facility, RDF : 4 facilities	Yes
Large area treatment	Gasification : 1 facility	Yes
Distributed treatment	Gasification : 4 facilities	Yes

状の RDF 製造施設 4 施設の平均値と発電施設 1 施設で行っている。RDF 製造施設 4 施設の RDF 生産量は、ほぼ一定である。本研究で用いた各施設に関するデータ⁶⁻¹⁰⁾を Table 1 に示す。

2.2 ケーススタディ

分析は Table 2, Fig. 1 に示した 4 つのケース ①従来焼却(焼却のみ), ②RDF 発電事業, ③広域処理(焼却・発電), ④分散処理(焼却・発電), で行った。①従来焼却は、平成 14 年まで石川県北部地域で採用されていた処理方式で、焼却のみの施設が 9 施設稼動していた。RDF 焼却発電施設がガス化溶融炉であることから、比較する ③広域処理, ④分散処理の焼却方法はガス化溶融炉として算出した。分散処理は、現存のガス化溶融炉

の最小規模が 60 ton/day 以上なので、対象地域における最大施設数は計算の結果、4 つの処理施設(焼却・発電)となった。② RDF 発電事業の分析は、平成 15 年の実績データを元に行う。コストに関しては、建設費、人件費、電力費、燃料費、整備補修費について考慮している。

3. 解析方法

3.1 分析範囲

分析は、処理施設の建設工程、ごみ収集工程、RDF 製造工程、運搬工程、発電工程、焼却・所内電力工程、灰搬出工程、埋立工程、解体工程に関する LCI (Life Cycle Inventory : LCI) 分析を行った。スタディエリ

Fig. 2 LCA application range

アでの LCA の適用範囲を Fig. 2 に示す。ただしコスト分析に関しては建設工程、ごみ収集工程、RDF 製造工程、運搬工程、発電工程、焼却・所内電力工程について行っており、灰搬出工程、埋立工程、解体工程については行っていない。

3.2 分析方法

平成 13 年度における石川県北部地域の年間ごみ処理量¹¹⁾は、94,359 ton であるので、この値を用いた。各工程の分析については、以下に記す。また灯油、重油、軽油、電力のエネルギー、CO₂ (C 換算) 排出係数、NO_x 排出係数、SO_x 排出量係数の原単位は文献¹²⁻¹⁵⁾より Table 3 の値を用いた。

3.2.1 建設工程、RDF 製造工程、発電工程、焼却・所内電力工程

処理施設の建設・運用コストとエネルギーについては、プラントの実績データや文献^{12, 16, 17)}を元に算出した (Table 4)。ここでガス化溶融炉の建設工程におけるエネルギーに関してだが (Table 4 の※印部分)、既存の清掃工場の建設工程におけるエネルギーを参考にして求めた。

まず、文献¹⁸⁾よりプラントコストとプラント容量 (規模) の関係は、一般的に式 (1) のような指数乗則法が成り立つことが知られている。

$$Y_2 = Y_1 \left(\frac{X_2}{X_1} \right)^n \quad (1)$$

X_1 : プラント A の生産能力 (月産能力)

X_2 : プラント B の生産能力 (月産能力, プラント A と
ブ同種で生産能力が異なる)

Y_1 : プラント A の設備コスト

Y_2 : プラント B の設備コスト

また、 n がほぼ 0.6 になることから 0.6 乗則とも呼ばれ、式 (1) に代入すると次式のようにになる。

$$Y_2 = Y_1 \left(\frac{X_2}{X_1} \right)^{0.6} \quad (2)$$

本研究では、式 (2) に表されるようなプラントコストとプラント容量の関係が建設工程におけるエネルギーとプラント容量との関係にも適用できるとして、建設工程におけるエネルギーを算出することにした。文献¹⁹⁾では東京都の M 清掃工場の建設工程におけるエネルギーを算出しており、この値を用いて算出した。この M 清掃工場は発電設備も有しており、処理能力は 600 ton/日である。この M 清掃工場の建設工程におけるエネルギーの内訳は、資材製造エネルギー量が 92,404,280 Mcal、資材輸送エネルギー量が 4,892,560 Mcal、直接投入エネルギー量が 5,857,200 Mcal である。これらを基準として建設工程におけるエネルギーを算出する。

RDF 製造工程に関しては、エコラ、クリンクルはくい、ななかりサイクルセンター、奥能登クリーンセンターの 4 施設の実績データの平均値を用いている。施設の耐用年数は 25 年とした。発電工程では、売電分だけコストとエネルギーが削減されるとしている。売電による収入は、北陸電力 (株) の廃棄物発電電力単価より 6.00 円 /kWh (夏季平日昼間: 6.30 円 /kWh とその他季平日昼間: 5.90 円 /kWh の加重平均値) とした。RDF 発電事業の発電工程に関しては、石川北部 RDF センターからの実績データを用いている。

処理規模は、文献²⁰⁾より式 (3) を使い、発電効率は、RDF 発電事業に関しては実データを用いた。広域処理と分散処理の発電効率については、文献²¹⁾の値より Fig.

Table 3 Basic unit

	Energy	C or CO ₂	NO _x	SO _x
Kerosene	7900 (kcal/L)	0.6896 (kg-C/L)	5.890 (g/L)	0.060 (g/L)
Heavy oil	9300 (kcal/L)	0.8016 (kg-C/L)	9.000 (g/L)	4.990 (g/L)
Diesel oil	9200 (kcal/L)	0.7212 (kg-C/L)	6.600 (g/L)	7.940 (g/L)
Electricity	2250 (kcal/kWh)	0.3280 (kg/kWh)	0.123 (g/kWh)	0.082 (g/kWh)

Table 4 Energy and cost when each facility is constructed and operates

		Construction Process		Operating Process	
		Energy (Gcal/year)	Cost (¥/year)	Energy	Cost (¥/year)
Old system		$83.67 \times X^{0.6}$	—	Electricity 300 kWh/ton Heavy oil 0.4 L/ton	—
RDF	Manufacture	Depreciation cost $\times 22.454 \times 10^{-5}$	Real data	Real data	
	Incineration	※see text	Real data	Real data	
Incineration and power generation		※see text	$625.21 \times X^{-0.5016}$	Electricity 300 kWh/ton Heavy oil 0.4 L/ton	$25290 \times \text{the amount of treatment}^{0.95}$

X: waste treatment capacity (ton/day)

Fig. 3 Relation between treatment capacity and power generation efficiency

3を作成し、式(4)を用いた。

$$\text{処理規模：} S(\text{ton/日}) = Q_s / \beta_1 \times \beta_2 \quad (3)$$

Q_s ：ごみ処理量 [ton/年]

β_1 ：最大年間稼働日数 [日/年] = 320

β_2 ：焼却施設以外の年間稼働日数 [日/年] = 365

$$\text{発電効率(\%)} = 4.7678 \times \text{Ln}(S) - 9.3835 \quad (4)$$

建設工程における CO_2 排出量は、文献^{13, 22)}より資材製造による CO_2 排出量と資材輸送による CO_2 排出量と施工による CO_2 排出量の合計により算出できる。Table 5, Table 6 で示した単位床面積あたりの炭素排出量 (kg-C/m^2) を用いて述べ床面積より算出した。

3.2.2 ごみ収集工程、運搬工程

ごみ収集車の製造・廃棄も含めて算出している。RDF 発電事業の運搬工程は実データを使用した。ごみの収集は週2回と設定した。収集車の製造エネルギー量は原単位 $13,390 \text{ Mcal/ton} \cdot \text{台}^{23)}$ を用いて算出した。4 ton トラックの資材製造・車輛製造・解体による CO_2 排出量²⁴⁾ は Table 7 に示す原単位を用いて算出した。ごみは市町村ごとに収集し、各処理施設に運ぶターミナ

Table 5 Emissions-unit of carbon by making material

Material	Emissions-unit of carbon (kg-C/m^2)
Gravel・Stone	0
Wood	1
Cement	21
Ceramic	2
Steel	51
Other	6

Table 6 Emissions-unit of carbon by transporting material and construction

	Emissions-unit of carbon (kg-C/m^3)
Transporting material	23
Construction	10.2

ル輸送を想定し算出した。広域処理は処理施設が1施設であるため、中継施設を4施設あると設定して算出した。市町村ごとの延べ収集距離 $dc[\text{km}]$ については、石川県北部地域の8市町村から得られたデータにより解析を行った。なお得られたデータは平成15年度のものである。

延べ収集距離は、文献²⁵⁾より各市町村の人口 $p[\text{人}]$ と可住地面積 $S[\text{km}^2]$ の平方根との積に比例するものとし、最小二乗法から式(5)を得た(決定係数0.89)。Fig. 4 は縦軸に述べ実収集距離を横軸に人口 $p[\text{人}]$ と可住地面積 $S[\text{km}^2]$ の平方根をプロットした図である。データが得られた8市町村は実データを用い、残りの16市町村は式(5)を用いて述べ収集距離を求めた。

$$\text{延べ収集距離：} dc = 0.7955p\sqrt{S} \quad (5)$$

また各市町村や中継施設から処理施設までの運搬距離は、市役所・町村役場から処理施設までの地図上の直線距離を算出し、さらに直線距離を道路距離に変換するため文献²⁶⁾を参考に1.2倍した。燃費はヒアリングより、収集 3 km/L 、運搬 4.3 km/L であったのでこの値を用いた。燃料(軽油)から投入エネルギー量を、収集距離から Table 8¹⁴⁾に示した原単位をかけて環境負荷排出量を算出した。コストは文献²⁷⁾より Table 9を用いた。

3.2.3 灰搬出工程

灰搬出車の製造・廃棄も含めて実際に排出された焼却残渣(煤塵を含む)と最終処分場までの距離、車輛台数から算出している。

Table 7 Emissions-unit of carbon by manufacturing and dismantling of truck

Item	Emissions-unit of carbon (kg-C/truck)
Making material	1100
Making truck	500
Dismantling	9

Fig. 4 Distribution chart of explaining variable ($p\sqrt{S}$) and actual total collecting distance

Table 8 Emissions-unit of CO₂, NO_x, SO_x by collecting waste

Driving	Emissions-unit
CO ₂ (kg-C/km)	0.15
NO _x (g/km)	1.6
SO _x (g/km)	1.0
Collecting	Emissions-unit
CO ₂ (kg-C/km)	0.19
NO _x (g/km)	3.5

Table 9 Emissions-unit of cost by collecting waste

Cost of a truck (2 ton) (¥)	5000000
Useful life of a truck (year)	7
Number of refuse collector by one truck	2
Payroll (¥/year)	7000000
Electricity (¥)	20
Diesel oil (¥)	57

Table 10 Unit of energy and CO₂, SO_x, NO_x emissions by landfill operation

Diesel oil (L/kg)	0.00094
CO ₂ (kg-C/kg)	0.00067
NO _x (g/kg)	0.0075
SO _x (g/kg)	0.003

Table 11 Unit of energy and CO₂, SO_x, NO_x emissions after landfilling

Electricity (kWh/kg)	0.002
CO ₂ (kg-C/kg)	0.0003
NO _x (g/kg)	0.00034
SO _x (g/kg)	0.0004

3.2.4 埋立工程

埋立工程は、(i)埋立作業と(ii)最終処分場における埋立物質からの排出物の2つについて、灰量から原単位をかけて算出した。

- (i) 埋立作業とは、ブルドーザーやダンプを用いて埋立作業をすることで、処理したごみの量から Table 10²⁸⁾ に示す原単位をかけることで投入エネルギー量と環境負荷排出量が算出できる。
- (ii) 最終処分場における埋立物質からの排出物とは、

最終処分場からの浸出水と廃棄物の分解によるガス発生によるもので、Table 11²⁸⁾ に示す原単位をかけることでそれらが算出できる。

これらを合わせて埋立工程での投入エネルギー量と環境負荷排出量とする。従来焼却は灰溶融を行っていないので、灰残渣率を 0.11 とした。RDF 発電事業の溶融炉は実績データより算出した。実績データでは、灰残渣率は 0.098 (対 RDF 重量比) であった。広域処理と分散処理の溶融炉は、文献²⁰⁾ より灰残渣率 0.11 を用いた。

3.2.5 解体工程

解体工程は、参考文献²⁹⁾ より建設投入エネルギーの 10% と廃棄物搬出エネルギー量の和とした。廃棄物搬出エネルギー量は建設工程の資材輸送エネルギー量と同じである。

4. 結 果

ここでは、まず発電効率の変化について述べ、その後、各工程におけるエネルギー消費量、環境負荷排出量(CO₂, NO_x, SO_x)、コストの結果を示す。

4.1 発電効率

発電効率の変化について述べる。発電効率は RDF 発電事業に関しては実データ(発電出力: 6,147 kW, 処理量: 5,933 kg/h) を元に計算した。Table 12 に各 RDF 製造施設で製造された RDF の低位発熱量を示す。これを元に式(6), (7) のように発電効率を求めた。

$$\begin{aligned} \text{低位発熱量(kcal/kg)} \\ &= 4,545 \times 0.335 + 4,423 \times 0.213 + 4,904 \\ &\quad \times 0.360 + 4,665 \times 0.092 = 4,659.3 \text{ (kcal/kg)} \quad (6) \end{aligned}$$

これらから、現状での発電効率(%)を求めると以下のようになる。2次エネルギー換算で 1 kWh = 860 kcal を用いている。

$$\begin{aligned} \text{発電効率(\%)} \\ &= \frac{6,147(\text{kW}) \times 860(\text{kcal/kWh})}{4,659(\text{kcal/kg}) \times 5,933(\text{kg/h})} \\ &\quad \times 100 = 19.1(\%) \quad (7) \end{aligned}$$

Table 12 Lower heating value of RDF manufactured by each plant

RDF manufacture plant	Lower heating value (kcal/kg)	Rate of RDF (%)
Nanao Kashima	4545	33.5
Hakui	4423	21.3
Kahoku	4904	36.0
Okunoto	4665	9.2

よって、現状の RDF 発電事業の発電効率（年間平均）は 19.1% となった。石川北部 RDF 事業の発電設備は、ボイラー（RDF 焼却炉）2 基に対しタービン発電機 1 基の構成となっている。ごみ焼却施設という性格上、年間を通じて定格運転を行うわけではなく、ごみ（RDF）発生量が一定ではないことや、施設の定期点検によりボイラー 1 基運転となることも多くなるため、年間平均の発電効率は前述の値となる。ボイラー 2 基の定格運転時には、当然、設計上の発電効率の 21% になると思われる。広域処理と分散処理の場合は、式 (3)、(4) を用いた結果、

それぞれ処理規模は 295 (ton/day)、74 (ton/day) となり、発電効率は 17.7% と 11.1% となった。

4.2 エネルギー消費量

エネルギー消費量を工程別に算出したものを Fig. 5 にまとめている。グラフから、RDF 製造、焼却・発電工程が全体に対する寄与が高く、埋立工程、解体工程は極めて小さいことがわかる。RDF 発電事業のケースでは RDF 製造工程に最もエネルギーを投入し、それ以外のケースでは焼却工程に最も多くのエネルギーを投入し

Fig. 5 Energy consumption

Fig. 6 CO₂ emission

ている。

本研究の評価手法では、ごみを直接焼却する手法を採用した場合、焼却工程の投入エネルギーは施設規模によらず同じになる。以上のことから、発電の有無により大きな差が生じ、建設工程またはごみ収集工程のシステムにより小さな差が生まれ、その他の工程で生まれる差はごくわずかと考えることができる。

4.3 CO₂ 排出量

CO₂ 排出量を工程別に算出した結果を Fig. 6 にまとめている。グラフから、RDF 製造、発電、焼却・所内電力、収集の工程が比較的全体に対する寄与が高く、ごみ収集工程、RDF 運搬工程、灰搬出工程、埋立工程、解体工程は比較的寄与が低いことがわかる。RDF 発電事業のケースでは RDF 製造工程で最も多く CO₂ を排出し、それ以外のケースでは焼却工程で最も多くの CO₂ を排出している。

本研究の評価手法では、ごみを直接焼却する手法を採用した場合、焼却工程の CO₂ 発生量は施設規模によらず同じになる。処理において焼却を選択した場合には、発電工程または収集工程のシステムにより大きな差が生まれる。

4.4 NO_x 排出量

NO_x 排出量を工程別に算出した結果を Fig. 7 にまとめている。グラフから、収集、RDF 製造、焼却・所内電力の工程が全体に対する寄与が高いことがわかる。RDF 発電事業のケースでは RDF 製造工程で最も多く

NO_x を排出し、それ以外のケースでは収集工程で最も多くの NO_x を排出していて、ここがエネルギー消費量、CO₂ 排出量と異なるところである。

本研究の評価手法では、ごみを直接焼却する手法をとった場合、焼却工程の NO_x 発生量は施設規模によらず同じになる。ごみ処理において焼却を選択した場合には、発電工程または収集工程のシステムにより大きな差が生まれる。特に収集工程が重要となる。

4.5 SO_x 排出量

SO_x 排出量を工程別に算出した結果を Fig. 8 にまとめている。グラフから、収集、RDF 製造、RDF 輸送、発電、焼却・所内電力、灰搬出の工程が全体に対する寄与が高いことがわかる。すべてのケースにおいて収集工程で最も多くの SO_x を排出している。本研究の評価手法では、ごみを直接焼却する手法をとった場合、焼却工程の SO_x 発生量は施設規模によらず同じになる。処理において焼却を選択した場合には、特に発電工程または収集工程のシステムにより大きな差が生まれる。

4.6 コスト

コストを工程別に算出した結果を Fig. 9 にまとめている。グラフからコストは収集工程に大きく寄与していることがわかる。広域処理は収集距離が長いコストが最も大きくなる結果となった。建設工程では、RDF 製造施設の建設費用が高いが、全体のコストにはそれほど影響しない程度であることがわかる。

Fig. 7 NO_x emission

Fig. 8 SO_x emission

Fig. 9 Cost

5. 考 察

エネルギー消費量、環境負荷排出量 (CO₂, NO_x, SO_x), コストに関して, RDF 発電事業の特徴をまとめると次のようになる。

5.1 エネルギー消費量

Fig. 5 の合計を見ると, RDF 発電事業のエネルギー消費量は従来の焼却方式に比べて約 42% 減っている。

これは RDF システムとしての削減効果と考えるより, 今まで行っていなかった発電を導入した効果である。RDF の場合は, 発電によるエネルギー消費量の削減効果が大きい。しかし RDF 製造工程のエネルギー消費量が極めて高く, RDF システムを導入する際には RDF 製造でのエネルギー消費の低減をはかることが重要である。RDF 乾燥工程に予備乾燥工程を設けて, それに燃焼排熱あるいは太陽熱を利用する方法も考えられる。

5.2 CO₂ 排出量

Fig. 6 の合計を見ると、RDF 発電事業の CO₂ 排出量が従来焼却に比べて約 77% 減っている。非常に高い削減効果があったが、エネルギー消費量と同様に、RDF システムとしての削減効果と考えるより、発電を導入した効果である。また、エネルギー消費量と同様に、発電による CO₂ 削減効果が大いだが、RDF 製造工程の CO₂ 排出量が極めて高い。RDF システムを導入するには RDF 製造での CO₂ 排出量対策を充分はかることでより高い削減効果が得られる。

5.3 NO_x 排出量

Fig. 7 の合計を見ると、RDF 発電事業の NO_x 排出量が以前の従来焼却より多い。RDF 施設導入により NO_x がより多く排出される結果であった。しかし、従来焼却の NO_x 排出量がかなり少ないため、比較すると RDF 発電事業では多くなっているのであり、RDF 発電事業でも規制値を大きく下回っている。NO_x 排出量は、エネルギー消費量、CO₂ 排出量と比較すると発電工程における寄与が低い。NO_x の排出量削減を重視する場合には、発電効率を上昇させて、NO_x 排出量の削減をはかるよりも RDF 製造工程での低減が必要になる。

5.4 SO_x 排出量

Fig. 8 の合計を見ると、RDF 発電事業の SO_x 排出量が約 53% 減っている。これも、エネルギー消費量、CO₂ 排出量と同様に、RDF システムとしての削減効果と考えるより、発電を導入した効果である。SO_x は車輛を使用し運搬する工程の収集工程、RDF 運搬工程、灰搬出工程で比較的多く排出される。

5.5 コ ス ト

Fig. 9 の合計を見てみると、RDF 発電事業は従来焼却とほぼ変わらない。RDF 製造施設の建設費がかかるものの、収集工程において RDF の輸送性が優れていることから、コスト低減へ大きな効果を発揮している。コストは収集工程が占める部分が大いなので、処理施設が一箇所である広域処理は収集コストがかかり、全体のコストも最も大きくなる。RDF 発電はごみ輸送重量を減少させ、広域処理での収集コストを低減させる方法であるが、その効果は具体的な広域処理の広さによって決まるので、個々のケースで評価する必要がある。今後は灰搬出工程、埋立工程、解体工程の分析も続ける必要がある。

6. ま と め

本研究では、石川県北部地域の RDF 発電事業を LCA 的な観点を用いて、エネルギー消費量、CO₂、NO_x、SO_x、コストの面から評価した。その結果、発電を伴う焼却処理方式では十分に効果があることが明らかになったが、その中でも RDF 発電は、RDF 製造工程で灯油使用量が多いという課題があるが、輸送コストを抑えることができるなどの効果を確認することができた。また、CO₂ 削減効果があることも今回の研究により明らかになった。これは RDF による発電効率の上昇が CO₂ 削減に大きく寄与しているからである。

したがって、可燃性一般廃棄物を処理する際に、RDF の輸送性が発揮される人口密度が小さい地域は RDF を利用し、広範囲で大規模に焼却・発電を行い、発電効率を上昇させることが、最も環境負荷の少ないシステムを構築する際に効果的である。今後、新エネルギーとして期待される RDF 発電を含む廃棄物発電をさらに有効に利用するためにも、さらなる分析と技術の開発を続ける必要がある。

[謝 辞]

本論文においてデータ提供に多大な支援して頂いた石川県環境安全部廃棄物対策課をはじめ、石川北部アール・ディ・エフ広域処理組合、河北郡市広域事務組合、羽咋郡市広域圏事務組合、七尾鹿島広域圏事務組合、奥能登クリーンセンター、輪島市、穴水町門前町環境衛生施設組合、関係者の方々に大変感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 環境省発表資料：一般廃棄物の排出及び処理状況等 (2002)
- 2) 小川紀一郎：日本における廃棄物発電技術の動向、エネルギー総合研究所第 3 回高効率廃棄物発電技術に関するセミナー、講演資料 (2003 年 10 月 30 日)
- 3) 安田憲二：ごみ処理の広域化に向けて、廃棄物学会誌、第 9 巻、第 7 号、pp. 462-469 (1998)
- 4) 河野裕和、小泉 明、荒井康裕、稲員とよの：広域を対象とした多目的廃棄物輸送モデルに関する一考察、第 13 回廃棄物学会研究発表会講演論文集、pp. 182-184 (2002)
- 5) 劉 庭秀、安田八十五：一般廃棄物を用いた固形燃料化システムの有効性評価——エネルギー回収における環境負荷と社会的費用便益分析——、廃棄物学会誌、第 10 巻、第 2 号、pp. 67-76 (1999)
- 6) 石川北部アール・ディ・エフ広域処理組合：石川北部 RDF センターパンフレット

- 7) 羽咋郡市広域圏事務組合：クリンクルはくいパンフレット
- 8) 奥能登クリーン組合：奥能登クリーンセンターパンフレット
- 9) 河北郡広域事務組合：河北郡クリーンセンターエコラパンフレット
- 10) 七尾鹿島広域圏事務組合：ななかりサイクルセンターパンフレット
- 11) 石川県環境安全部環境整備課：石川県の廃棄物処理（一般廃棄物）——平成13年度実績——
- 12) 石川県：環境調和型エネルギーコミュニティ形成促進補助事業 能登地域における一般廃棄物利用 RDF 発電の導入に関する調査 調査報告書，NEDO 報告書（1998）
- 13) 酒井寛二：建築活動と地球環境——建築のライフサイクル環境負荷——，理工図書（1995）
- 14) 科学技術庁：アジアのエネルギー利用と地球環境（1992）
- 15) 東京電力資料
- 16) 松藤敏彦，田中信寿，金 羸載：都市ごみ RDF 生産のモデル化による原料ごみ選択の検討，廃棄物学会論文誌，第7巻，第6号，pp.295-304（1996）
- 17) 荒井康裕，稲貝とよの，小泉 明：ごみ処理システムの広域化計画に関する最適化モデル分析，環境システム研究論文集，第31巻，p.270（2003）
- 18) 斎藤義己：化学装置記載コストハンドブック改訂三版，工業調査会（2000）
- 19) 福山辰夫，横山 隆：ライフサイクルエネルギーからみた清掃工場の評価考察，都市清掃，第49巻，第210号，pp.79-84（1996）
- 20) 北海道大学大学院工学研究科廃棄物処分工学分野：都市ごみの総合管理を支援する評価計算システムの開発に関する研究（1998）
- 21) 勸エネルギー総合工学研究所：新エネルギーの展望 廃棄物発電（その4）——次世代型廃棄物発電——（2003）
- 22) 酒井寛二，漆崎 昇，相賀 洋，下山真人：建築物のライフサイクル二酸化炭素排出量とその抑制方策に関する研究，日本建築学会計画系論文集，第484号，pp.105-112（1996）
- 23) ㈱資源協会：家庭生活のライフサイクルエネルギー，あんほろめ（1994）
- 24) 門間博之，村田俊之，福永和広，高草木明，竹内良一，木村 均，滝澤明夫：一般廃棄物処理システムの LCA による評価 その1. モデルによる LCA 計算の条件と計算方法，日本建築学会大会学術講演梗概集（九州），pp.597-598（1998）
- 25) 西村正志，大澤義明：ごみ焼却によって発生するダイオキシン類と収集車が出す排ガスに着目したごみ処理広域圏，第37回日本都市計画学会学術研究論文集，pp.1069-1074（2002）
- 26) シンポジウム資料：地域のバイオマス利活用推進に向けたチャレンジ，農林水産バイオリサイクル研究「施設・システム化チーム」主催（2004）
- 27) 田中信寿，松藤敏彦：都市ごみの発生・循環・適正処理を管理する計画システム構築と開発，北海道大学（1988）
- 28) 和田安彦，三浦博之，中野加都子：LCA におけるリサイクルと廃棄物処理・処分の評価手法とその適用，土木学会論文集，第539号/II-35，pp.155-165（1996）
- 29) 福山辰夫，横山 隆：ライフサイクルエネルギーからみた清掃工場の評価考察，都市清掃，第49巻，第210号，pp.79-84（1996）

Life Cycle Assessment of RDF Power Generation in Northern Ishikawa Prefecture

Motoko Yamanari* and Sohei Shimada*

* Department of Environment Systems, Graduate School
of Frontier Sciences, The University of Tokyo

† Correspondence should be addressed to Sohei Shimada :
(5 - 1 - 5 Kashiwanoha, Kashiwa City, Chiba, 277 - 8563 Japan)

Abstract

Through analysis of the RDF power generation business, which has been operating since FY 2003 in Northern Ishikawa Prefecture in Japan, this study assesses RDF power generation availability from the viewpoints of cost savings, energy, and reduction of environmental impacts.

Results of detailed investigations of each process in terms of Life Cycle Analysis demonstrated that the introduction of RDF power generation presents three advantages of reducing energy consumption, CO₂ emissions, and transportation costs.

The main results obtained through this study are that : (1) the introduction of power generation is effective ; (2) the RDF system uses an advantageous transportation process ; (3) the RDF system is useful for CO₂ reduction.

Key words : RDF, LCA, Northern Ishikawa Prefecture, thermal recycle, regional characteristics