

LCA によるごみの RDF 化における環境負荷低減に関する研究

The Reduction of Environmental Loads by Refuse Derived Fuel System using LCA Method

中野加都子*, 三浦浩之**, 和田安彦***, ○村上真一***

Kazuko NAKANO*, Hiroyuki MIURA**, Yasuhiko WADA***, Shinichi MURAKAMI***

ABSTRACT : The various kinds of high efficiency systems for waste-to-energy are developed and proposed. RDF (Refuse Derived Fuel) is included as one of these systems. In this paper, we compared a RDF incinerator system with a direct refuse incinerator system from the view point of environmental load and amount of produced energy in entire these life cycle. We applied LCA method to assess energy consumption, energy recovery, carbon dioxide emission volume, NO_x gas emission volume and SO_x gas emission volume. As the result, it became clear that the RDF system consumed more energy resources than the refuse incineration system, because the refuse contained much water (content of 60%) and it required a lot of burning oil to dry the refuse.

KEYWORDS : LCA, Refuse Derived Fuel, Direct Refuse Incinerator, Environmental Loads

1. はじめに

新たな最終処分場の用地確保の困難性, ダイオキシン問題に端を発したごみ処理の広域化への動き, 容器包装リサイクル法の施行に伴う再商品化方法の一手段として, ごみ固形燃料(RDF: Refuse Derived Fuel)化技術が注目されている。RDF 製造施設は, 立地場所でごみを燃やさず臭気・粉塵のみを防止すればよいと, 施設建設に住民の理解を得やすく, さらに RDF はごみを破碎, 乾燥, 成形する技術であるため, ハンドリング性がよく, 輸送, 貯蔵が容易, 集約して大規模な燃料として利用することが可能, 必要なときに必要な量を利用することが可能等の利点がある¹⁾。

わが国における本格的な稼働実績はここ数年であり, RDF の特性に関する分析, ごみ焼却技術と RDF 化技術の比較, RDF 化施設とその利用実績に関する調査報告等^{2)~5)}は行われているが, ごみの RDF 化とその利用が, 従来のごみ直接焼却及びそれによるエネルギー利用と比べてシステム全体として環境負荷面でどのような損益があるか, またごみのエネルギー利用面でどのような効果があるのかに関する定量的な分析, 評価研究は行われ始めた状況にすぎない^{6),7)}。しかし, ごみ処理の広域化や, リサイクルの推進への動きに伴って, RDF 化は今後急速に進むことが予想されるため, RDF システム全体としての環境負荷を低減するための方策を明らかにすること, 及び RDF を用いたエネルギー回収を効果的にするための目標を明らかにすることは緊急の課題である。

本論文ではこのような課題に向けて, ごみを RDF 化して専焼炉で燃焼する場合と, 直接焼却処理する場合を LCA 手法を用いて環境負荷面から比較評価を行い, ごみを RDF 化し, エネルギー利用する場合における効果と問題点を明らかにした。

* 関西大学工業技術研究所 Institute of Industrial Technology, Kansai Univ.

** 関西大学工学部 Department of Civil Engineering, Kansai Univ.

*** 関西大学大学院工学研究科 Graduate school of Engineering, Kansai Univ.

2. RDFシステムと直接焼却システムによる環境負荷

本論文では、一般廃棄物の RDF 化施設として関西で最も早く国庫補助事業の対象となり稼働実績のある人口 34,000 人、年間ごみ排出量が 8,030t の地域を評価対象のモデル地域とした。そして、一般廃棄物として排出される可燃ごみを RDF 化し、専焼炉で燃焼する場合（RDF システム）と、直接焼却処理する場合（直接焼却システム）におけるごみ、RDF、埋立物の輸送、プラント建設・稼働、RDF・ごみ燃焼、RDF 不適物、RDF 燃焼残さ、焼却灰の埋立処分に伴う環境負荷を定量化した（図-1）。環境負荷項目はエネルギー消費量、利用エネルギー量、埋立処分量、CO₂ 排出量、NO_x 排出量、SO_x 排出量とする。処理対象となる可燃ごみは、評価対象モデル地域における分別基準から厨芥類、プラスチック類を含めたものであり、ごみの低位発熱量は同地域のデータより 1,700kcal/kg、水分 60%、灰分 5%、可燃物 35%である。

また RDF 不適物、RDF 燃焼残さ、焼却灰の排出量は対象施設の実績値とした。ごみ焼却施設の熱しゃく減量は 4%である。なお、ごみのマスバランスを図-2 に示した。

2. 1 輸送に伴う環境負荷

各輸送対象プロセスでの車両の運用による軽油消費量を対象とした。軽油消費量は、輸送距離を一往復するために消費する軽油量に必要車両台数を乗じるにより算出した。

G = (D/c) × (Wt/q) (1)

ここで、G；軽油消費量（ℓ）、Wt；輸送量（t）、D；輸送距離（km）、c；車両の燃費（km/ℓ）、q；車両の最大積載量（t）である（表-1）。輸送車両はごみ搬入プロセスは 2t パッカー車とし、その他のプロセスは 4t ダンプ車とした。

2. 2 プラント建設に伴う環境負荷

プラント建設は RDF 製造施設、RDF 燃焼施設、ごみ焼却施設、埋立処分場（埋立地造成、浸出水処理施設）を対象とした。RDF 製造施設、RDF 燃焼施設、ごみ焼却施設の建設に関わるエネルギー消費量は、Herendeen により提案された産業関連分析の拡張方式⁸⁾により、科学技術庁によって試算されている単位費用あたり投入エネルギー量⁹⁾（エネルギー集中度）と建設費を乗じ、耐用年数で除することにより算出した。

E = (C × e) / Y (2)

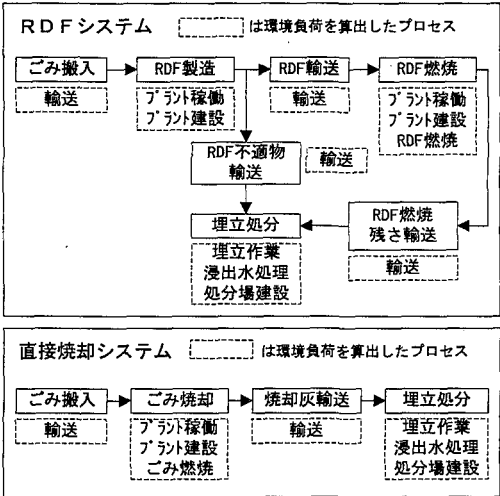


図-1 システムの概念図

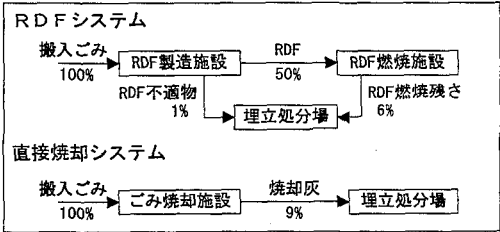


図-2 ごみのマスバランス

表-1 輸送条件の設定

項目	輸送量 (t/年)	距離 (km)	燃費 (km/ℓ)	積載量 (t/台)
ごみ搬入	8,030	15	4.5	1.5
RDF輸送	4,015	6	5.0	3.0
RDF不適物輸送	80	12		
RDF燃焼残さ輸送	482	6		
焼却灰輸送	723	6		

ここで、 E ；施設建設にかかわるエネルギー消費量 (kcal/年)， C ；建設費用 (円)， e ；エネルギー集中度 (kcal/円)， Y ；耐用年数 (年) である。

埋立処分場の施設建設に関わるエネルギー消費量は、埋立処分量に単位埋立量あたりの建設投入エネルギーを乗じるにより算出した。

$$E = \frac{W_o}{w} \times Eu \quad Eu = \frac{C \times e}{U} \quad (3)$$

ここで、 W_o ；埋立処分量 (t)， w ；かさ密度 (t/m³)， Eu ；単位埋立量あたりの投入エネルギー (kcal/m³)， U ；計画総埋立量 (m³) である。(表-2)

また、CO₂排出量、NO_x排出量、SO_x排出量は式(2)、(3)で求めたエネルギー消費量と表-3に示す廃棄物処理施設建設時の環境負荷原単位¹⁰⁾を用いて算出した。

2. 3 プラント稼働に伴う環境負荷

プラント稼働に伴う環境負荷は、RDF 製造、RDF 燃焼、ごみ焼却の各プロセスで消費するエネルギー (電力、灯油) によるものを対象とした (表-4)。

モデル地域の RDF 製造施設の RDF 収率は、調査対象とした RDF 製造施設のデータから 50%であり、年間 4,015t の RDF が製造されている。RDF 製造プロセスではごみ中の水分量が 10%以下になるまで乾燥させた後に消石灰 (ごみ量に対して 2~3%) を添加する方式をとっている。また処理対象となるごみは厨芥類を含む可燃ごみであるため、ごみ中の水分量が 60%と高く、ごみを乾燥させる工程で 80ℓ/t の灯油を消費している。

RDF 燃焼施設はモデル地域と同規模の地域で実在する 24 時間稼働ボイラーで、処理能力 500t/年の施設を対象とし、施設数は RDF 製造量 (4,015t/年) より 9 施設とした。

比較対象のごみ焼却施設は、モデル地域に実在する処理規模 8,030t/年の施設である。運転時間 8hr/日の機械バッチ式ごみ焼却プラントであり、炉数は一般的な 2 炉である。

また、RDF 燃焼施設、ごみ焼却施設で回収する利用エネルギーの形態は蒸気・温水であり、熱利用率は各施設の実績値とした。RDF 燃焼施設は 79%，ごみ焼却施設は場内利用のみの 5%である¹¹⁾。

RDF、ごみの燃焼時における大気汚染物質 (CO₂、NO_x、SO_x) の排出量は文献値により表-5 のように設定し^{5),12)}、除去率は、NO_x:60%，SO_x:65%とした¹³⁾。

2. 4 埋立処分に伴う環境負荷

埋立処分に伴う環境負荷は埋立作業における機器 (ダンプ、ブルドーザーなど) の運用による環境負荷、浸出水処理の環境負荷を対象とした。環境負荷原単位は著者らがこれまでに調査によって求め

表-2 施設条件の設定

	建設費用 (百万円)	エネルギー 集中度 (kcal/円)	耐用 年数 (年)
RDF製造施設	2,200	22.54	30
RDF燃焼施設	765	21.51	
直接焼却施設	2,559	22.74	
埋立地造成	129	29.60	—
浸出水処理施設	138	19.30	

表-3 施設建設時環境負荷原単位¹⁰⁾

CO ₂ 発生量(kg-C/Mcal)	0.09
NO _x 発生量(g/Mcal)	0.30
SO _x 発生量(g/Mcal)	0.36

表-4 プラント稼働の設定

RDF製造 (8,030t/年)	電力消費量 1,205MWh/年 灯油消費量 642kt/年
RDF燃焼 (4,015t/年)	電力消費量 875MWh/年 灯油消費量 31kt/年 利用エネルギー量 12,663Gcal/年
ごみ焼却 (8,030t/年)	電力消費量 604MWh/年 灯油消費量 7kt/年 利用エネルギー量 682Gcal/年

() 内は各施設の年間処理量

表-5 RDF・ごみ燃焼の設定^{5),12)}

項目	RDF1kgあ たり燃焼	ごみ1kgあ たり燃焼
CO ₂ 発生量(kg-C/kg)	0.41	0.24
NO _x 発生量(g/kg)	72	89
SO _x 発生量(g/kg)	98	40

表-6 埋立処分の設定¹⁴⁾

廃棄物埋立	軽油消費量 9.4×10^{-4} ℓ/kg
浸出水処理	電力消費量 6.5×10^{-4} kWh/kg

たデータ¹⁴⁾を用いた(表-6)。ただし、浸出水処理方法は内陸埋立での生物処理+凝集沈殿処理+高度処理(砂ろ過、活性炭吸着)である。

3. 評価結果と考察(図-3)

評価結果と考察は以下の通りである。

3. 1 エネルギー消費量, 利用エネルギー量

エネルギー消費量は RDF システムの方が直接焼却システムより約3倍多い。これは本論文で対象とした RDF システムでは、ごみの乾燥に使用される灯油消費量のごみ1tあたり80ℓと多いため、RDF 製造工程におけるエネルギー消費量が非常に大きくなるからであり、この工程は RDF システム全体の約6割を占めている。

また、施設建設に関しては、直接焼却システムではごみ焼却施設1施設に対し、RDF システムでは RDF 製造の1施設のほか、RDF 燃焼施設が9施設必要となる。しかし、RDF システムでのそれぞれの施設は規模が小さいため、施設全体のエネルギー消費量で比較するとごみ焼却施設の約1.1倍程度である。

利用エネルギー量は RDF システムの方が約20倍多い。これは、RDF システムでは安定した燃焼が可能であり、立地場所、規模にかかわらず利用先が確保されているのに対し、直接焼却システムでは、日平均ごみ処理量が22t/日と少ないことによりごみ焼却施設が24時間連続運転出来ず、エネルギー利用が場内利用程度に限られるからである。

3. 2 大気への排出

CO₂ 排出量は RDF システムの方が直接焼却システムの約1.2倍である。RDF システムでは RDF 燃焼工程が約6割、RDF 製造工程が約2割を占めており、直接焼却システムではごみ燃焼工程が9割弱を占めている。RDF システムの方が CO₂ 排出量が多いのは RDF 製造工程が付加されるためである。

NO_x 排出量では RDF システムの方が直接焼却

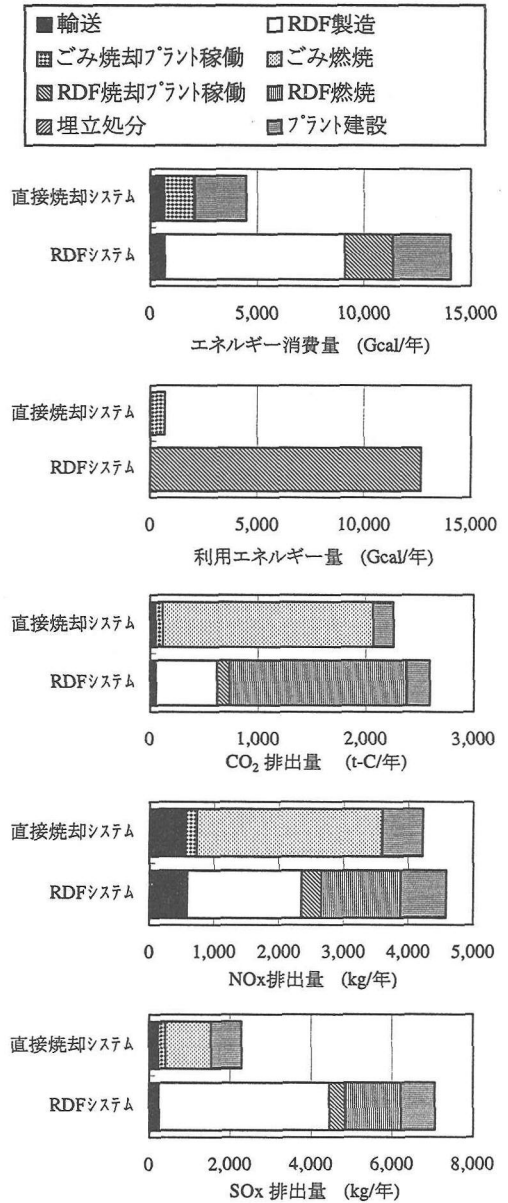


図-3 環境負荷評価結果

システムより多いが、約 1.1 倍とほぼ同量である。このように CO₂ 排出量に比べて差が少ないのは、RDF システムでは RDF 製造工程での消石灰添加により、アンモニアの揮散（脱臭除去）によって RDF 中の窒素分が少なくなり、燃焼時の NO_x 排出量が減少するためである。

また NO_x 排出量では、輸送（ごみ搬入、RDF 輸送、埋立物輸送）が全行程に占める割合は、RDF システム、直接焼却システムともに 13%であり、他の環境負荷項目と比べて比較的大きい割合を占めている。

SO_x 排出量では RDF システムの方が直接焼却システムより約 3.1 倍多い。このような大きな差となるのは、RDF システムでは RDF 製造工程で灯油を多く使用するために、全体としての SO_x 排出量が多くなるためである。

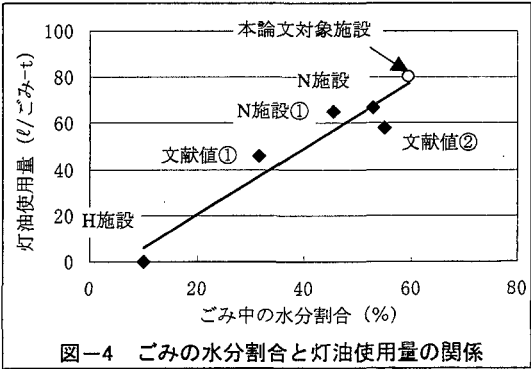
3. 3 埋処分量

埋処分量は直接焼却システムの方が RDF システムより約 1.3 倍多い。これは RDF システムでは RDF 製造工程で不適物（不燃物、金属等）の除去が行われたあと、RDF 燃焼時に均質な燃料であるために安定燃焼がはかれるのに対し、直接焼却システムではそれらの除去を行わないまま焼却が行われるために、直接焼却システムでは完全に焼却されない物質が多くなるためである。

4. ごみ乾燥時の灯油使用量変化における環境負荷比較

エネルギー利用率（利用エネルギー／投入エネルギー）は、RDF システム 0.90、直接焼却システム 0.15 であり、RDF システムの方がエネルギー面では優位なシステムである反面、CO₂、NO_x、SO_x 排出量においては RDF システムの方が約 1.1～3.1 倍多い。即ち、RDF システムはエネルギー利用面で有利であると同時に、利用に至るまでの環境負荷も高いシステムである。環境負荷の高くなる要因は RDF 製造工程でのごみ乾燥時の灯油使用量が多いことである。

本論文で対象としたモデル地域における RDF 製造施設では、搬入ごみの水分率が 60%と高く、これが灯油消費量の多い原因となっている。そこで、ごみ中の水分割合と灯油使用量の関係に基づいた環境負荷低減策について検討した。



表一七 RDF 施設の対象ごみの水分割合と灯油使用量

	本論文対象施設	N 施設① ¹¹⁾	N 施設② ¹¹⁾	文献値① ⁶⁾	H 施設 ¹⁵⁾	文献値② ¹⁶⁾
対象ごみ	生活ごみ (厨芥類を含む 可燃ごみ)	生活ごみ (厨芥類を含む可燃ごみ)		生活ごみ (厨芥類を含む可燃ごみ)	事業系ごみ (木材、プラスチック、紙くず)	生活ごみ (厨芥類を含む可燃ごみ)
水分率(%)	59.7	45.6	53.0	31.5	10	55
灯油使用量(ℓ/t)	80	65	67	46	0	58

4. 1 灯油使用量とごみ中の水分割合の関係

現在稼働中のRDF施設のデータや文献値により、対象処理ごみの水分割合とごみ 1t あたり乾燥にかかる灯油使用量との関係を表-7、図-4に示した。このように、ごみ中の水分率と灯油使用量とは比例関係となり、ごみ中の水分割合が低くなると、灯油使用量が減少する。

4. 2 灯油使用量による環境負荷の変化

図-5にごみ乾燥時の灯油使用量を現状の80ℓ/t(現状)から40ℓ/t(代替案1)、0ℓ/t(代替案2)に変化させたときの環境負荷評価結果を示した。

(1) エネルギー消費量

RDF システムのエネルギー消費量は、灯油使用量を0ℓ/t(代替案2)とした場合、80ℓ/t(現状)の約60%の量まで減らすことが出来るが、直接焼却システムのエネルギー消費量の1.9倍である。これは、RDF システムではごみを固化化した後、燃焼するといった2段階の処理が必要であることにより、プラント稼働に必要なエネルギー(電力)が直接焼却システムより多いためである。

しかし、図-2で示したように、利用エネルギー量はRDF システムの方が直接焼却システムより約20倍多いため、エネルギー利用率(利用エネルギー/投入エネルギー)はRDF システム0.90(現状)~1.51(代替案2)、直接焼却システム0.15であり、RDF システムは灯油使用量を減らすことによりエネルギー面でより有利なシステムとなる。

(2) 大気への排出

CO₂ 排出量は灯油使用量を0ℓ/t(代替案2)とした場合RDF システムの方が少なくなり、灯油使用量が18.86ℓ/tの場合に、RDF システムと直接焼却システムのCO₂ 排出量は等しくなる。灯油使用量18.86ℓ/tは、ごみ中の水分割合が約19%にあたる。このため、搬入ごみ中の水分割合を19%以下にすれば、RDF システムが直接焼却システムよりCO₂ 排出量が少なくなる。

NO_x 排出量は、現状の灯油消費量である80ℓ/tでもRDF システムのNO_x 排出量は、直接焼却システムとほぼ同量である。このため、ごみ中の水分率を減らし、灯油使用量が40ℓ/t(代替案1)、0ℓ/t(代替案2)と減少することによって直接焼却システムよりもNO_x 排出量を少なくすることが出来る。

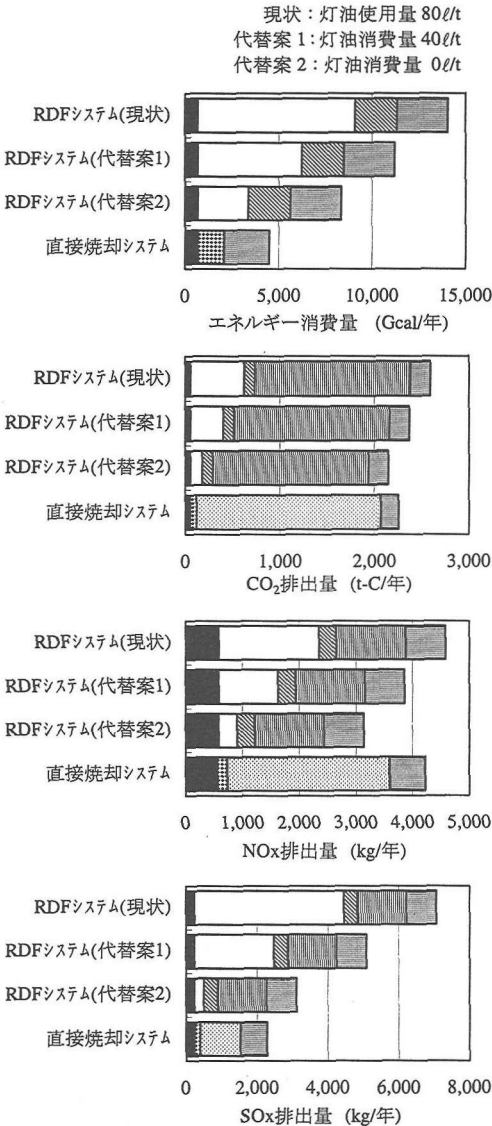


図-5 灯油使用量の変化における環境負荷評価結果

SOx 排出量は、RDF システムで灯油使用量を 0ℓ/t (代替案 2) に減らすことにより、灯油使用量 80ℓ/t (現状) の約 45%の量まで減らすことは出来るが、直接焼却システムよりも SOx 排出量を少なくすることは出来ない。これは、RDF システムでは、ごみを固形化した後、燃焼させる 2 段階の処理が必要なため、プラント稼働に必要なエネルギー (電力) が直接焼却システムより多いためである。

5. おわりに

RDF システムと直接焼却システムの環境負荷比較評価により、RDF システムでは利用エネルギー量が多く、エネルギー面では優れたシステムである反面、RDF 製造時においてごみ中の水分を乾燥させるために用いる灯油消費量が CO₂ 排出量、NOx 排出量、SOx 排出量の負荷を高くする主要な要因となることを明らかにした。

このため、RDF システムにおけるエネルギー利用率の良さを生かし、かつ環境負荷を低減させるには、RDF 製造時でのごみ乾燥の灯油使用量を減らすことが重要な対策であることを示した。

このため、今後ごみ処理の広域化や容器包装リサイクルの一形態として RDF システムを推進し、それを環境負荷の少ないものとしていくためには、ごみ乾燥に関わる環境負荷を低減する対策として、ごみの水切りや脱水等の協力を求める必要がある。

【 参考文献 】

- 1) 松藤敏彦：ごみ燃料 (RDF) 製造・利用の現状と課題，都市清掃，第 49 巻，第 211 号，平成 8 年 4 月。
- 2) 鍋島淑郎：RDF (ごみ燃料) の技術評価，廃棄物学会誌，Vol.7，No.4，pp.294-304，1996。
- 3) 三浦広仁：札幌市における固形燃料化事業について，廃棄物学会誌，Vol.7，No.4，pp.316-325，1996。
- 4) 西村潔：地球にやさしい ごみ固形化処理施設の取り組みと稼働，廃棄物学会誌，Vol.7，No.4，pp.338-351，1996。
- 5) 鍵谷司：都市ごみ処理における固形燃料化技術の実用性と今後の課題，廃棄物学会誌，Vol.7，No.4，pp.352-362，1996。
- 6) 永田勝也，嬉野通弥：RDF の有効性に関する検討，廃棄物学会誌，Vol.7，No.4，pp.282-293，1996。
- 7) 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の評価，廃棄物学会誌，Vol.10，No.2，pp.67-76，1999。
- 8) Heredeem,R.A. and C.W.Bullard：Energy impact of consumption decisions，Proceeding of the IEEE，Vol.63，No.3，pp.484-493，1975。
- 9) 科学技術庁資源調査研究会編：衣・食・住のライフサイクルエネルギー，大蔵省印刷局，1989。
- 10) 田中勝，大迫政浩，藤井崇，斎藤聡，杉山涼子，栗原和夫：インベントリ分析に基づく都市ごみ処理代替案の比較研究，The Third International Conference on EcoBalance，pp.497-500。
- 11) (財) エンジニアリング振興協会：ごみ固形 (RDF) 化エネルギー利用社会システムの総合評価に関する調査研究，平成 9 年 3 月。
- 12) 廃棄物学会：廃棄物ハンドブック，pp.163-165，平成 9 年。
- 13) 寺園淳，LCA における廃棄物の考え方，日本エネルギー学会誌，第 77 巻，第 10 号，1998。
- 14) 和田安彦，三浦浩之，中野加都子：LCA リサイクルにおけるリサイクルと廃棄物処理・処分の評価手法と適用，土木学会論文集，II-35，1996。
- 15) 北海道大学工学部：都市ごみ固形燃料生産の研究，1995.3。
- 16) 鍵谷司：ごみ固形燃料 (RDF) の特性と魅力，PPM-1996.5。