

中間処理方法の組み合わせに着目した 一般廃棄物処理システムの包括的評価

天野 耕二¹・曾和 朋弘²

¹正会員 立命館大学教授 理工学部 (〒525-8577 草津市野路東1-1-1)

E-mail: amano@se.ritsumei.ac.jp

²大阪府環境農林水産部 (〒540-8570 大阪市中央区大手前2丁目)

E-mail: SowaT@mbox.pref.osaka.lg.jp

本研究では、滋賀県草津市の一般廃棄物処理を対象として、中間処理方法の異なる複数の一般廃棄物処理シナリオにおける環境負荷(温室効果ガス(GHG)排出量, 最終処分量)と処理コストについてライフサイクルインベントリ分析に基づく包括的な評価を試みた。基本シナリオ(平成16年度実績)に対するGHG排出量の増減率は、プラスチックごみをマテリアルリサイクルするシナリオで-10%、厨芥類を堆肥化するシナリオで-7%、ごみ発電とバイオガス発電を組み合わせたシナリオで+9%、一括収集によるごみ発電徹底シナリオで+12%となり、ごみ発電による削減分を考慮してもマテリアルリサイクルシナリオが最もGHG排出量が少ない結果となった。最終処分量および処理コストについては、ごみ発電を含むシナリオについて優位な結果が得られた。

Key Words : *municipal solid waste, intermediate processing, GHGs emission, terminal waste disposal, lifecycle inventory*

1. はじめに

循環型社会の形成に向けた法整備は、「廃棄物の処理及び清掃に関する法律(廃棄物処理法)」の改正、「容器包装に係る分別収集及び再商品化の促進等に関する法律(容リ法)」、「特定家庭用機器再商品化法(家電リサイクル法)」等の各種リサイクル関連法の制定にみられるように、1990年代後半から急速に進められてきた。このような法整備の結果、自治体における一般廃棄物処理は、従来までの焼却中心の処理方法から、循環資源の有効利用を目標としたリサイクル中心の処理へと変化している。一方、最終処分量は資源化量の増加に伴い減少しており、最終処分場の残余容量は減少傾向にあるものの、残余年数は微増しているという状況にある。残余年数は平成15年度の全国平均で132年¹⁾となっているが、最終処分場の設置は地域的な偏りがあるため、残余年数の少ない地域では廃棄物の域外への流出が目立つ状況にある。

一般廃棄物の処理システム全体あるいは各種リサイクルシステムを対象とした環境負荷評価に関する研究は数多く報告されており、紙類²⁾、PETボトル³⁾、スチール缶アルミ缶等の飲料容器、プラスチック製容器包装物⁵⁾⁶⁾、あるいは、厨芥類等の有機性廃棄物⁷⁾を対象とした研究報告まで多岐に亘っている。また、松藤ら⁸⁾は、都市ご

みゼロエミッションに向けての2つの処理シナリオ(埋立量最小化、焼却量ゼロ)を想定し、CO₂排出量、エネルギー消費量、コストを指標として比較・評価している。加えて、松藤らは、多様かつ複雑な選択肢を有する現在の一般廃棄物処理システムから有効な処理システムを選択するためのモデル⁹⁾を構築している。

上記の研究報告等においては、いずれも一般廃棄物の中間処理方法を特定した上で各々個別にライフサイクル的な評価を行った結果が提示されているが、実在の対象地域あるいは自治体において複数の中間処理オプションの組み合わせを想定した上で実績データに基づいて比較検討した事例は少ない。本研究は、人口十万人規模の地方中核都市における実際の一般廃棄物処理システムを対象として、一般廃棄物の中間処理方法(減容・減量化やリサイクルオプション)の組み合わせを考慮しながら処理システムの実際の運用に伴う環境負荷とコストの収支を最新かつ詳細な実績データに基づいて包括的に評価することを目的としている。環境負荷の評価項目としては、温室効果ガス(GHG)排出量と最終処分量の2項目とする。最終的には、中間処理方法の組み合わせ(オプション)を考慮したシナリオ設定による複数の処理システムを比較検討し、循環型社会形成に向けた一般廃棄物処理計画を戦略的に進めていくための方向性の提示を目指している。

2. 評価手法

中間処理方法の異なる複数の一般廃棄物処理シナリオを設定し(表-1)、一般廃棄物処理システムの運用段階における GHG 排出量、最終処分量および処理コストをライフサイクルインベントリ(LCI)分析に基づいて評価する。基本シナリオは、研究対象地域における平成 16 年度の一般廃棄物処理実績である。マテリアルリサイクル(以下、MR)シナリオは、容器包装プラスチック類をマテリアルリサイクルするシナリオであり、MR 徹底シナリオは、さらに厨芥類を分別収集して堆肥化するシナリオである。サーマルリサイクル(以下、TR)シナリオは、分別収集した厨芥類をメタン発酵させバイオガス発電するとともに、PET ボトル以外のプラスチック類と普通(可燃)ごみの焼却による熱回収・発電を行うシナリオである。TR 徹底シナリオは、厨芥類を含む普通ごみ、容器包装プラスチック類、PET ボトルを一括収集し、焼却による熱回収・発電を徹底するシナリオである。

シナリオ間の比較においては、各シナリオが提供する

サービス(1年間の一般廃棄物処理・マテリアルリサイクルによる製品産出)を統一するため、付加システム(天然資源からの製品製造システム)を考慮し(図-1)、付加システムにおける GHG 排出量も併せて評価した。

(1) 研究対象地域

本研究の対象地域である滋賀県草津市は、面積 48.22km²、人口 115,594 人(平成 17 年 10 月末現在)の地方中核都市である。人口増加率(平成 12 年比)が 4.9%と高いことが目立っているが、その要因としては草津市が京阪神のベッドタウンとして急速に発展していることが挙げられる。一般廃棄物排出量は近年増加傾向にあるが¹⁰、平成 15 年度の 1 人 1 日あたり一般廃棄物排出量は、963g/人/日と全国平均値¹¹(1,106g/人/日：平成 15 年度値)を若干下回っている。一方で、リサイクル率については、平成 15 年度時点で 11.3%と全国平均値¹¹(16.8%)を下回っている。

草津市では、家庭生活に伴って排出される一般廃棄物(以下、家庭系一般廃棄物)および事業活動に伴って排出

表-1 中間処理方法の異なる複数の一般廃棄物処理シナリオ

| | 厨芥類以外の普通ごみ | 厨芥類 | 容器包装プラスチック類 | PETボトル | 金属類 | びん類 | 不燃物 | 小型破砕ごみ | 粗大ごみ |
|----------------------|------------|----------|------------------------|------------|------------|-----|------|-----------|------|
| 基本シナリオ(平成16年度実績) | 単純焼却 | | 一部マテリアルリサイクル・減容固化・埋立処分 | マテリアルリサイクル | | | 埋立処分 | 金属回収・埋立処分 | |
| マテリアルリサイクル(MR)シナリオ | 単純焼却 | | マテリアルリサイクル | | | | | | |
| マテリアルリサイクル(MR)徹底シナリオ | 単純焼却 | 堆肥化 | マテリアルリサイクル | | | | | | |
| サーマルリサイクル(TR)シナリオ | 焼却・熱回収 | メタン発酵・発電 | 焼却・熱回収 | | | | | | |
| サーマルリサイクル(TR)徹底シナリオ | 焼却・熱回収 | | | | マテリアルリサイクル | | | | |

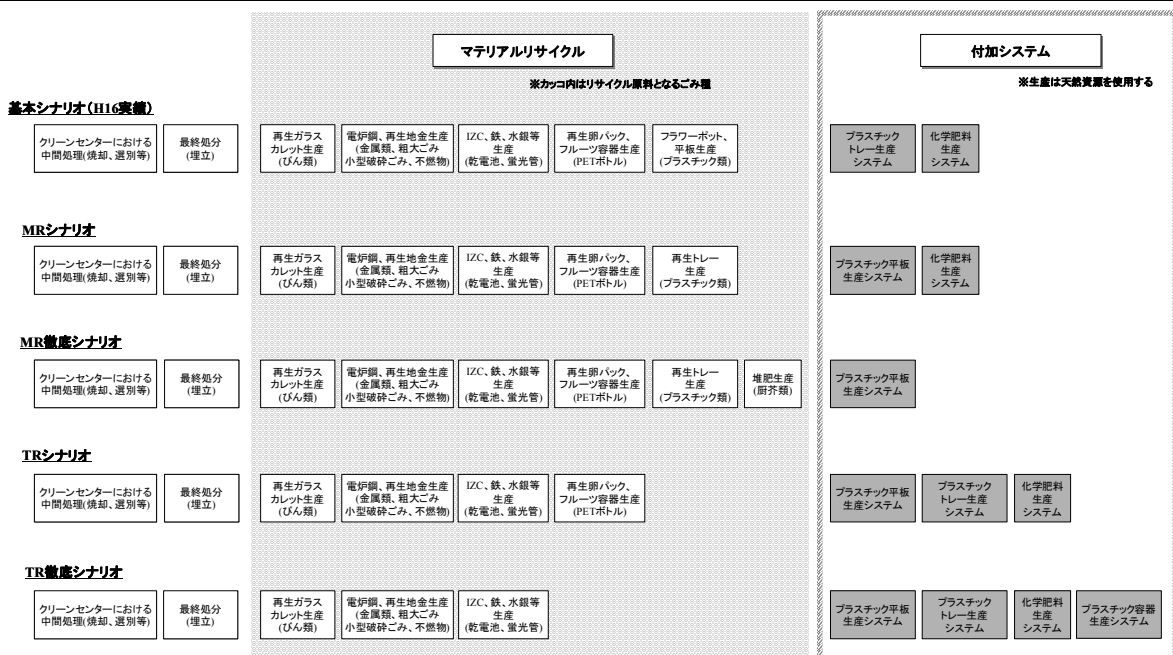


図-1 各シナリオの提供するサービス

される一般廃棄物(以下、事業系一般廃棄物)を収集し、草津市クリーンセンター(以下、クリーンセンター)に搬入し、処理を行っている。家庭系一般廃棄物については、平成16年時で10種類(普通ごみ、プラスチック類、PETボトル、金属類、びん類、小型破碎ごみ、不燃物、粗大ごみ、乾電池、蛍光管)の分別収集を実施している。粗大ごみは、定期戸別収集方式、乾電池・蛍光管は拠点回収方式、その他の7種類についてはステーション方式(1,762箇所：平成16年度末現在)による収集を行っている。事業系一般廃棄物については、市内の業者が許可収集を行っている。

クリーンセンターに搬入されたごみは、ごみ種別に処理されている。平成16-17年度における処理の概要を以下に記す。普通ごみは全量が焼却処理されている。焼却処理に伴って生じた焼却灰および飛灰、減容固化プラスチック、および不燃物については、大阪湾広域臨海環境整備センターに委託し、最終処分している(大阪湾フェニックス計画)。プラスチック類の処理方法については、平成16年度までは、一部をクリーンセンター内でプラント・平板等にリサイクルし、残りが減容固化・最終処分されていたが、平成17年度からは収集されたプラスチック類から容リ法対象物を選別・圧縮し、ベール成形・梱包した後、指定法人ルートでのマテリアルリサイクルを行っている。

PETボトルについては、選別・圧縮し、ベール成形・梱包した後、指定法人ルートでのマテリアルリサイクルを行っている。金属類については、手選別で不適物を除去した後、磁選機で鉄および非鉄に選別し、圧縮・成形している。小型破碎ごみおよび粗大ごみは、破碎後、磁選機で金属回収している。破碎物はふるい選別によって可燃破碎物と不燃破碎物と分けられ、前者は焼却処理、後者はそのまま最終処分されている。不燃物は、市が所有する最終処分場において、仮置き・選別され、そのほとんどが最終処分されている。乾電池・蛍光管については、一時貯留後リサイクル業者に引き渡している。

草津市の一般廃棄物処理コストは、近年微増傾向にある¹²⁾。これは、排出量の増加がその一因と考えられるが、廃棄物処理量1トンあたりの処理コストも増加しており、排出量の増加のみが処理コストに影響を与えているとは言いがたい状況である。今後、リサイクル率を引き上げるにより、処理コストも上昇すると考えられる。全国的なリサイクル機運の高まりの中で、いかに処理コストを抑えていくかが直近の課題となっている。

(2) 基本データ

収集体制、一般廃棄物排出量、クリーンセンター内でのエネルギー投入量等の一般廃棄物処理に関わる数値データについては、草津市クリーン事業課、クリーンセンター、廃棄物処理委託業者、およびリサイクル業者等にヒアリング調査を行い、平成16年度実績データとして提供されたものを研究に用いる。

一般廃棄物収集量およびクリーンセンターへの搬入量に関しては、処理量と同値と考える。表-2に処理量(平成16年度実績)を示す。この表において、委託とは家庭系一般廃棄物の業者委託収集分、許可とは事業系一般廃棄物の許可業者収集分、持込は住民および業者がクリーンセンターへ直接持ち込んだ一般廃棄物量を意味している。また、表-2における「普通ごみ」は「焼却ごみ」と同義である。

クリーンセンターでは、年12回のごみ質調査、年4回のごみ組成分析を行っている。ごみ質調査とは、普通ごみ(焼却ごみ)に含まれる水分・可燃分・灰分の3成分の割合を調査するものである。また、ごみ組成分析は、焼却ごみに含まれる厨芥類、紙・布類、木・竹・わら類、プラスチック類、不燃物類、その他の6種類の重量割合(乾ベース)を測定するものである。本研究では、平成14~16年度(ごみ質調査36回、ごみ組成分析12回)の平均値を基本として、文献値¹³⁾を参考に作成した各ごみ組成別の3成分値(水分、可燃分、灰分)を使用し、ごみ組成別の湿重量割合を推計した。3成分値について実測値

表-2 草津市の一般廃棄物処理量(平成16年度実績)

(草津市のごみ状況(平成17年度版)¹⁰⁾より引用)

| | 単位:t | | | |
|------------------------|--------|--------|-------|--------|
| (普通ごみ中の厨芥類比率4.9%、湿ベース) | 委託 | 許可 | 持込 | 計 |
| 普通ごみ | 20,057 | 13,719 | 1,140 | 34,915 |
| プラスチック類 | 2,581 | 311 | 16 | 2,908 |
| 金属類 | 625 | 0 | 9 | 634 |
| びん類 | 912 | 0 | 10 | 922 |
| 不燃物 | 569 | 18 | 42 | 629 |
| PETボトル | 237 | 1 | 0 | 238 |
| 小型破碎ごみ | 168 | 0 | 2 | 170 |
| 電池 | 19 | 0 | 0 | 19 |
| 蛍光管 | 11 | 1 | 1 | 13 |
| 粗大ごみ | 193 | 0 | 154 | 347 |
| 計 | 25,373 | 14,050 | 1,375 | 40,798 |

と比較して誤差を生じる場合は、実測の3成分値と一致するように、ごみ組成別に誤差を重量比により按分した。これより、普通ごみ中の厨芥類比率（湿ベース）は4.9%であった。

(3) システム境界

本研究では、草津市の一般廃棄物処理システム(以下、処理システム)の運用段階に関して、一般廃棄物の中間処理方法(減容・減量化やりサイクルオプション)の組み合わせを変更したときの、処理システムの運用に伴う環境負荷量(GHG 排出量, 最終処分量)および処理コストの LCI 分析を試みる。処理システムの比較オプションは、平成 16 年度処理実績(基本シナリオ)および中間処理方法の組み合わせを変更した場合の各シナリオ(表-1)とする。機能単位は、草津市における1年間に発生する一般廃棄物の処理およびマテリアルリサイクルによる付加価値産出(図-1)とする。

図-2 に LCI 分析のシステム境界を示す。処理システムに投入される物質・エネルギー(インプット)に関しては、一般廃棄物、電力、燃料(軽油および重油)、各種薬品、水である。処理システムから搬出・排出される物質(アウトプット)の評価対象は、不活性埋立物(焼却灰, 不燃物等)、温室効果ガス(GHG)、再生物質(マテリアルリサイクルにより生産されるもの)である。熱回収(ごみ発電, バイオガス発電等)により回収されたエネルギーは、処理システム(クリーンセンター)内で自家消費されたものとして CO₂ 換算した上で処理システム(クリーンセンター)からの GHG 排出量から差し引く。

(4) GHG 排出量の推計

一般廃棄物処理システムを収集・中間処理・搬出輸送・最終処分・リサイクルの5つの段階に分け、各々の段階についてエネルギー及び物質投入による直接および間接的に排出される GHG を推計した。尚、収集・輸送車両、施設、機材等の製造・建設段階における GHG 排出量については計上していない。ライフサイクルアセスメント本来の主旨において一般廃棄物処理システムを評価する場合は、製造・建設段階において発生した環境負荷を平均耐用年数で除した上で1年間あたりの「製造・建設+運用」に伴う環境負荷として計上すべきであるが、本研究では、一般廃棄物の中間処理方法(減容・減量化やりサイクルオプション)の組み合わせを考慮しながらシステムの運用に伴う GHG の収支を比較検討することを目的として、運用段階における詳細な実績データに基づいた GHG 排出の推計に焦点を絞っている。

a) 電力・燃料・薬品使用に伴う CO₂ 排出量

一般廃棄物処理の各段階では、電力、燃料(重油、軽油、灯油等)、各種薬品が使用される。それらの使用に伴って排出される CO₂ を算出するために、本研究では、各省庁および既往研究で公表されている電力・燃料・薬品の単位使用量あたり CO₂ 排出量(以下、CO₂ 排出原単位)の数値を用いる(表-3)。

b) ごみ収集過程

家庭系一般廃棄物の収集段階における収集品目別の CO₂ 排出量の推計には、収集車両の燃料消費率(以下、燃費)と年間総走行距離が必要である。年間総走行距離

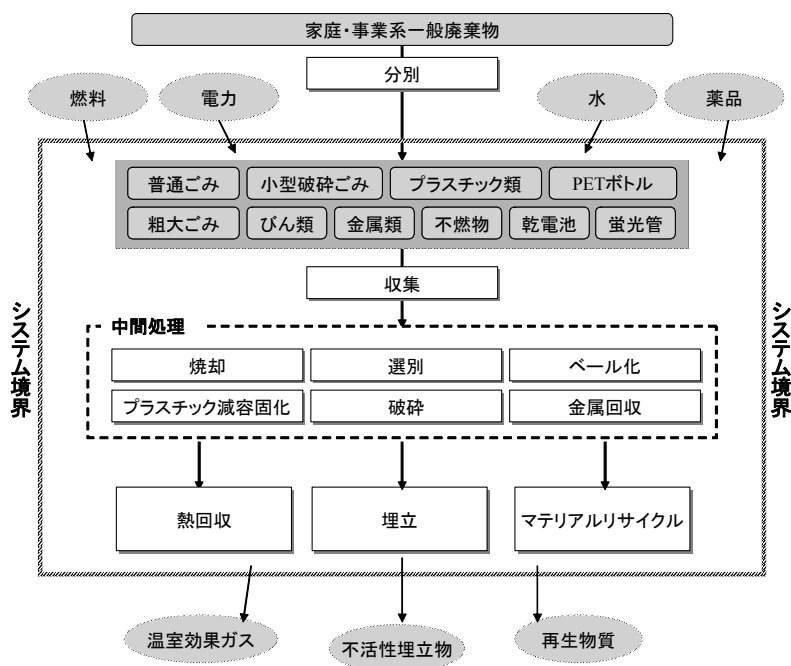


図-2 一般廃棄物処理 LCI のシステム境界とインプット/アウト

については、改良 Grid City Model²¹⁾を用いて推計した。このモデルによる収集車の年間総走行距離推計結果（平成16年度基本シナリオ）は302,086 kmとなり、平成16年度の実測値(292,560 km)との誤差は3%と精度よく推計できていることがわかる。

なお、分別数や収集頻度が基本シナリオと変わらないMRシナリオにおける年間総走行距離は基本シナリオと同一とした。MR徹底シナリオにおいては、厨芥類を普通ごみと分別して週2回の頻度で収集することとし、TRシナリオにおいては、厨芥類を分別収集しながら容器包装プラスチック類を普通ごみと一括収集することとし、TR徹底シナリオでは、普通ごみに加えて容器包装プラスチック類とPETボトルを一括収集することとして年間総走行距離を各々推計した。

改良 Grid City Modelでは、ステーション方式の収集による走行距離は推計できるが、戸別収集による走行距離の推計には対応していない。そこで、粗大ごみの戸別収集によるCO₂排出量は、ヒアリング調査によって得られた年間軽油消費量1,800 Lに基づいて算出した。また、事業系一般廃棄物の収集における収集車両の走行距離については、ヒアリング調査で得られた収集車両の平均燃

費および年間軽油消費量から算出した(548,625 km)。

家庭系一般廃棄物における収集車両の平均燃費については、ヒアリング調査によって得られた収集車両10台分の年間走行距離と年間軽油使用量に基づいて設定した(2.3 km/L)。また、事業系一般廃棄物における収集車両の燃費については、ヒアリング調査で得られた平均値(7.5 km/L)とした。家庭系収集車両と事業系収集車両の平均燃費の差については、車両構造の違いや車体の大きさに起因しているものと考えられる。ヒアリング調査対象車両の偏りも考慮する必要があるが、全ての車両の運転条件を把握することが困難であったため、調査結果の平均値を適用した。

c) ごみ焼却過程

ごみを焼却する際には、電力・薬品使用による間接的なCO₂排出とごみの燃焼による直接的なGHG排出が考えられる。間接的なCO₂排出量については、電力または薬品使用量にCO₂排出原単位(表-3)を乗じて推計する。一方、直接的なGHG排出量は、焼却されるごみに含まれる炭素分が完全燃焼し、そのすべてがCO₂に変換されたと仮定しCO₂排出量を計上した上で、焼却ごみ量に一般廃棄物焼却に伴うCH₄とN₂Oの排出原単位¹⁴⁾を乗じた値をCO₂換算して積み上げた。

焼却ごみ中に存在する炭素分は、横浜市および東京都の元素組成分析値²²⁾を参考に、草津市のごみ組成分類に合致するようにごみ組成別に推定した。ただし、草津市のごみ組成の分類では、紙類と布類は同一項目となっているが、横浜市と東京都の元素組成分析値は紙類と布類(繊維類)の項目が分かれているため、紙および布類の重量比(92:8)を考慮して元素組成値を推定した(表-4)。

また、焼却ごみ起因のCO₂排出量のうち、植物由来の焼却ごみ(厨芥類、紙・布類、木・竹・わら類)から発生するCO₂はカーボンニュートラルであると考えて計上しない。ただし、布類には化石燃料由来の繊維製品も含まれているため、紙類と布類の重量比を考慮して紙・布類のCO₂排出量から紙類起因のCO₂排出量を差し引いた。

焼却残渣発生量については、平成16年度における焼却量1トンあたり主灰および飛灰の発生量(湿ベース)

表-3 電力・薬品・燃料のCO₂排出原単位

| | | 単位* | CO ₂ 排出原単位 | 参考文献 |
|----|----------|------|-------------------------|---------|
| | | | t-CO ₂ /* | |
| 電力 | 事業用電力 | kWh | 5.55 × 10 ⁻⁴ | 14) |
| | 軽油 | L | 2.62 × 10 ⁻³ | 15) |
| 燃料 | A重油 | L | 2.71 × 10 ⁻³ | 15) |
| | 灯油 | L | 2.49 × 10 ⁻³ | 15) |
| | 凝集助剤 | t | 2.94 | 16) |
| | 苛性ソーダ | t | 0.502 | 16),17) |
| 薬品 | 塩化第二鉄 | t | 0.499 | 16),17) |
| | キレート剤 | t | 2.66 | 20) |
| | 消石灰 | t | 1.10 | 20) |
| | 炭酸カルシウム | t | 0.179 | 18) |
| | 硫酸 | t | 0.103 | 16),17) |
| | 次亜塩素酸ソーダ | t | 0.191 | 16),17) |
| | 高分子凝集剤 | t | 2.67 | 21) |
| | 凝集剤 | t | 0.499 | 21) |
| | 鉄道(貨物) | t・km | 2.10 × 10 ⁻⁵ | 19),20) |

表-4 ごみ組成分類別の元素組成推計値

(「厨芥類」, 「紙・布類の92%」, 「木・竹・わら類」はバイオマス由来(乾ベース))

| | 厨芥類 | 紙・布類 | 木・竹・わら類 | プラスチック類 | その他 | |
|------------|-------|-------|---------|---------|-------|-------|
| 可燃分(%) | 85.30 | 90.80 | 92.36 | 95.99 | 79.30 | |
| 可燃分中の元素(%) | C | 42.13 | 42.19 | 45.87 | 75.28 | 49.04 |
| | H | 5.68 | 6.20 | 5.88 | 10.23 | 5.83 |
| | N | 2.96 | 0.49 | 0.87 | 0.37 | 1.89 |
| | S | 0.09 | 0.04 | 0.02 | 0.04 | 0.22 |
| | Cl | 0.25 | 0.15 | 0.16 | 3.51 | 1.67 |
| | O | 34.20 | 41.73 | 39.57 | 6.58 | 20.67 |
| 灰分(%) | 14.71 | 9.20 | 7.64 | 4.02 | 20.70 | |

表-5 中間処理施設における処理量1トンあたりの電力使用量

単位: kWh/t-処理量

| | 焼却施設 | プラスチック減容固化施設 ごみ破碎施設 金属プレス成形施設 | PETボトル処理施設 廃プラスチック処理施設 |
|-------------------|------|-------------------------------------|---------------------------|
| 処理量1tあたり 電力使用量 | 95 | 193 | 507 |

表-6 中間処理施設における処理量1トンあたりの薬品使用量

単位: t/t-処理量

| | アクリル酸ナトリウム アクリルアミド共重合体 | 苛性ソーダ | 塩化第二鉄 | キレート剤 | 消石灰 | 炭酸カルシウム |
|-------------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------|
| 処理量1tあたり 薬品使用量 | 5.97×10^{-7} | 4.33×10^{-5} | 4.16×10^{-4} | 8.20×10^{-4} | 5.89×10^{-3} | 0.265 |

と焼却灰含水率平均値(主灰 35.6%, 飛灰 23.0%)を用いて、焼却ごみ1トンあたりの焼却残渣発生量(乾ベース、0.125t/焼却量)から推計した。

d) 搬出輸送過程

クリーンセンターからの搬出輸送に関するデータ(搬出物別の搬出頻度、1回あたりの搬出量、使用トラック最大積載量)はヒアリング調査によって入手した。搬出に係わる輸送機関(トラック)の走行距離は、クリーンセンターから搬出先(最終処分場、リサイクル業者)までの往復距離とした。算出した往復距離を10tonトラックの燃費(3.5km/L)²⁰⁾で除して求めた軽油使用量にCO₂排出原単位を乗じてCO₂排出量を推計した。

e) 最終処分過程

最終処分過程のCO₂排出量は、木原ら²⁰⁾による海面埋立処分における運用時のCO₂排出量を参考に、埋立量1トンあたりのCO₂排出量(4.17×10²t-CO₂/t埋立量)を用いて推計した。このCO₂排出原単位は、最終処分場で埋立に使用される重機使用に伴うCO₂排出量および浸出水処理に伴うCO₂排出量を考慮している。なお、本研究で評価対象としたいずれの中間処理シナリオにおいても植物由来ごみ(厨芥類、木・竹・わら類、紙・布類)の直接埋立は行わないため、最終処分過程におけるCH₄の排出は考慮していない。

f) 中間処理および再生品製造過程(堆肥化以外)

クリーンセンターにおいて電力を使用する施設は、焼却施設、プラスチック減容固化施設、ごみ破碎施設、金属プレス成形施設、PETボトル処理施設、廃プラスチック処理施設、事務所棟がある。これらのうち、焼却施設、事務所棟については個別の電力使用量データが得られたが、その他の施設については、プラスチック減容固化施設、ごみ破碎施設、金属プレス成形施設を合計した電力使用量、およびPETボトル処理施設、廃プラスチック

表-7 リサイクル段階における電力・薬品・燃料等使用量

| リサイクル製品 | 単位 | 搬入量1tあたり投入量 |
|-----------|--------|-------------|
| | * | */t-搬入量 |
| 再生ガラスカレット | 電力 kWh | 8 |
| 電炉鋼(鉄) | 電力 kWh | 69 |
| 再生地金(アルミ) | 電力 kWh | 69 |
| IZC・鉄・水銀等 | 電力 kWh | 418 |
| | 重油 L | 113 |
| | 灯油 L | 21 |
| | 軽油 L | 7 |
| 卵パック等 | 電力 kWh | 200 |
| 平板等 | 電力 kWh | 501 |
| 再生トレー | 電力 kWh | 200 |

処理施設を合計した電力使用量が得られなかったため、各々年間処理量で按分し、施設ごとの電力使用量を推計した。平成16年度の電力使用量を各中間処理施設でのごみ処理量で除したものを処理量1トンあたりの電力使用量として表-5に示す。また、平成16年度の薬品使用量を各薬品が使用される中間処理施設のごみ処理量で除したものを処理量1トンあたりの薬品使用量として表-6に示す。

びん類からの再生ガラスカレット製造、金属類・粗大ごみ・小型破碎ごみ・不燃物から回収された金属(鉄、アルミ、鉄くず、粗大くず)からの電炉鋼・再生地金製

造、乾電池・蛍光灯からの IZC(アイゼットカルサイ
ン)・鉄・水銀等の製造、PET ボトルからの再生卵パッ
ク・フルーツ容器製造、およびプラスチック類からのフ
ラワーポット・平板・再生トレー製造については、リサ
イクル段階における電力・薬品・燃料等使用量に関する
各リサイクル業者へのヒアリング調査で得られたデータ
(表-7)に基づいて CO₂排出量を推計した。ここでは、各
リサイクル業者には草津市以外の自治体からも搬入があ
るため、各業者における年間総搬入量と電力等年間使用
量から搬入量 1 トンあたりの使用量を求め、草津市の搬
入分に対する電力等使用量を推計している。また、鉄く
ずおよび粗大くずのリサイクルに関しては、電炉鋼(鉄)
の搬入量に計上した。電炉鋼・再生地金生産時における
CO₂排出量の推計に関しては、文献²⁰⁾を参考に金属類の
電炉鋼・再生地金製造業者への搬入量 1 トンあたりの
CO₂排出量を求めて推計した。電炉鋼・再生地金製造業
者への搬入量は、リサイクル業者へのヒアリング調査で
得られた鉄・アルミの歩留まり(98.5%)を用いて算出し
た。また、鉄くずおよび粗大くずの歩留まりを 50%と仮
定し、電炉鋼・再生地金製造業者への搬入量に計上した。

g) 堆肥化過程

厨芥類の搬入量は、平成 16 年度普通ごみ搬入量(実
績値)に湿ベースの厨芥類割合(4.9%)を乗じて算出した
1,711 トンとした。選別時に発生する選別残渣量は、厨
芥類の残渣発生率 0.15²⁰⁾から求めた。また、発生した残
渣は全量焼却されることとした。

堆肥化においては、発酵層温度は 50~60℃、投入ご
み含水率は 60~70%、投入ごみ C/N 比は 30~35、酸素
濃度は流出ガス中で 10%以上が適当とされている²⁰⁾。
ここでは、発酵層温度および酸素濃度については満足す
るものとし、投入ごみ含水率と C/N 比に関して条件設定
する。選別前の厨芥類は、平均含水率は 69.1%、平均
C/N 比は 14 であった。含水比は条件を満足しているが、
C/N 比が適切な範囲にないため、添加剤を投入し調整す
ることとした。添加剤の種類としては、もみがら、バー
ク(おがくず)、稲わらがあるが、この中で含水率、C/N
比とも最も高いバークを用いることとする。ここで C/N
比が 30 になるようにバークの添加量求めたところ、添
加量は 408 トンとなった。バーク添加後の含水率は
62.7%に低下したが、前述の条件を満足している。

発酵層投入量に対する堆肥の収率(乾ベース)は、文献
値(厨芥類 0.25、添加物 0.55)²⁰⁾を引用した。また、堆肥
の含水率は 40~50%が適当とされている²⁰⁾ため、その中
間値 45%を適用した結果、堆肥 548 トンが生産されるこ
ととなった。堆肥化は好氣的に行われ、厨芥類含有の炭
素はほとんどが CO₂に変換されるが、CH₄と N₂O も堆肥
化過程で発生するため、日本国内温室効果ガスインベン

トリ報告書³⁰⁾の原単位に基づいて堆肥化に伴う CH₄ お
よび N₂O 排出量を算出した上で CO₂換算した。

h) バイオガス発電過程

搬入される厨芥類から袋等の発酵不適物を除去し、可
溶化する。可溶化した厨芥類を嫌気性菌(メタン菌等)で
分解し、バイオガス(CH₄と CO₂の混合ガス)を回収する。
バイオガスは発電に利用し、発酵液処理後の処理水は下
水道放流(活性汚泥法により処理)、脱水汚泥は焼却処分
するものとする。厨芥類の搬入量は、g)と同様に普通ご
み搬入実績に厨芥類割合(4.9%)を乗じた 1,711 トンとし
た。バイオガス化施設における選別残渣量および発酵残
渣(汚泥)発生量は、国内のバイオガス化施設(中空知衛
生施設組合、砂川地区保健衛生組合、富山グリーンフー
ドリサイクル株式会社)にアンケート調査を行った結果
得られた搬入量 1 トンあたりの選別残渣発生量
0.151[t/t-搬入量]、メタン発酵層投入量 1 トンあたりの
発酵残渣発生量 0.042[t/t-発酵層投入量]を各々用いて
算出した。

メタン発酵における物質転換は、化学量論式³⁰⁾に基づ
くものとした。投入厨芥類の元素組成(乾ベース)を炭素
47.8%、水素 6.7%、酸素 38.0%、窒素 3.3%とし³⁰⁾、これ
らの値を化学量論式に代入すると、バイオガス中の理論
メタン含有率は 57.8%となる。また、日本の厨芥類(生
ごみ)からのバイオガス発生量は経験的に 100~150m³/t
であると報告されている³⁰⁾ことから、ここでは、投入厨
芥類 1 トンあたりのバイオガス発生量を 125 m³/t とする。
以上より、バイオガス発生量は、180,375m³ (うち CH₄ :
104,257 m³, CO₂ : 76,118 m³)と推計された。バイオガス発
電による発電効率は、ガスエンジンまたはマイクロガス
タービンを用いた場合、一般的に 20~30%であるので³⁴⁾、
発電効率を 25%と設定した結果、バイオガス発電による
発電量は 259,194 kWh と推計された。

i) ごみ発電過程

ごみ発電による発電能力²⁰⁾、平成 15 年度における全
国のごみ発電施設の発電効率(平均値で 10.23%)¹¹⁾、ご
みの低位発熱量推計式³⁰⁾に基づいて発電量を推計した。ご
み中の可燃分および水分について(2)で推計したごみの
3 成分値を適用した結果、ごみの低位発熱量は厨芥類を
含む場合 10,409 kJ/kg、厨芥類を含まない場合 10,728 kJ/kg
となった。以上より、ごみ発電による発電量は、TR シ
ナリオで 10,960,735 kWh、TR 徹底シナリオで 11,108,501
kWh と推計された。

j) 付加システム

プラスチック平板生産システムにおける生産量は、平
板・フラワーポットの生産量 46 トン(基本シナリオ平
成 16 年実績)と同等とする。プラスチック平板生産シ
ステムにおける CO₂排出量推計については産業連関分析

によるCO₂排出量原単位¹⁸⁾(列部門名：プラスチック製品、原単位は細品目プラスチック平板の単価を用いて算出した結果、234t-CO₂/t)を適用した。

プラスチックトレー生産システムにおける生産量は、再生トレーの生産量727トンと同等とする。これは、プラスチックボールのクリーンセンター搬出量1,454トン(MRシナリオ平成17年度実績)にヒアリング調査で得られた歩留まり(50%)を乗じたものである。プラスチックトレー生産システムにおけるCO₂排出量推計については産業連関分析によるCO₂排出量原単位¹⁸⁾(列部門名：プラスチック製品、原単位は統合品目プラスチック板・棒の平均単価を用いて算出した結果、3.12t-CO₂/t)を適用した。

プラスチック容器生産システムにおける生産量は、卵パック等の生産量203トンと同等とする。これは、PETボトルボールのクリーンセンター搬出量226トン(基本シナリオ平成16年実績)にヒアリング調査で得られた歩留まり(90%)を乗じたものである。プラスチック容器生産システムにおけるCO₂排出量推計については産業連関分析によるCO₂排出量原単位¹⁸⁾(列部門名：プラスチック製品、原単位は全細品目の平均単価を用いて算出した結果、2.59t-CO₂/t)を適用した。

化学肥料生産システムにおける化学肥料生産量は、化学肥料の施肥によるリン酸の肥効が一般的な堆肥の施肥によるリン酸の肥効と等しくなるように設定した。草津市における厨芥類から生産される堆肥のリン酸含有割合が不明のため、一般的な堆肥のリン酸含有割合(1.2%)および肥効率(35%)²⁷⁾が厨芥類から生産された堆肥と同等であると仮定した。一方、化学肥料のリン酸含有割合は14%とする。これは、全国農業協同組合連合会が販売している化学肥料「アラジン」3種類のリン酸含有割合(14%、10%、18%)³⁰⁾の平均値である。以上より、g)で算定した厨芥類からの堆肥548トン生産と同等のサービス

を提供する化学肥料の生産量は16トンとなる。化学肥料生産システムにおけるCO₂排出量推計については産業連関分析によるCO₂排出量原単位¹⁸⁾(列部門名：化学肥料、原単位は細品目の単価平均値を用いて算出した結果、0.718t-CO₂/t)を適用した。

(5) 処理コストの推計

処理コストの推計においては、自治体が負担するコストを対象範囲とし、リサイクルによる事業者・リサイクル業者の負担するコストについては評価に含めない。

歳入項目は、手数料および資源化物等売却による収益に分けられる。手数料には、粗大ごみ処理手数料や一般廃棄物の許認可に係わる手数料等が含まれる。また、資源化物等売却には、資源ごみの売却代(金属類・粗大ごみ等からの金属回収物売却分)、資源化物(堆肥等)の売却代、および電力等の売却代が含まれる。

歳出項目はごみ処理・リサイクルに直接係わる経費と共通経費に分けられる。まず、ごみ処理・リサイクルに直接係わる経費を処理工程別(収集・中間処理・搬出輸送・最終処分・リサイクル)に分けて考える。草津市は、収集を市内の業者に委託しているため、収集に関する経費はすべて収集委託費となる。中間処理においては、クリーンセンター内の施設・機材等は草津市の所有物であるが、クリーンセンター内の作業はすべて外部委託により行っているため、作業員の人件費はすべて処理委託費に含まれる。中間処理におけるその他の経費は、電力等使用による光熱費、施設の工事・修繕費、施設建設費、調査・分析費等であるが、年間ごみ処理コストを試算するため、施設建設費については減価償却費として考慮する。搬出輸送、最終処分項目には、大阪湾広域臨海環境整備センターへの処理委託費および最終処分場建設負担金が含まれる。リサイクル項目には、(財)容器包装リサイクル協会への容器包装プラスチックごみの引取り料金を、

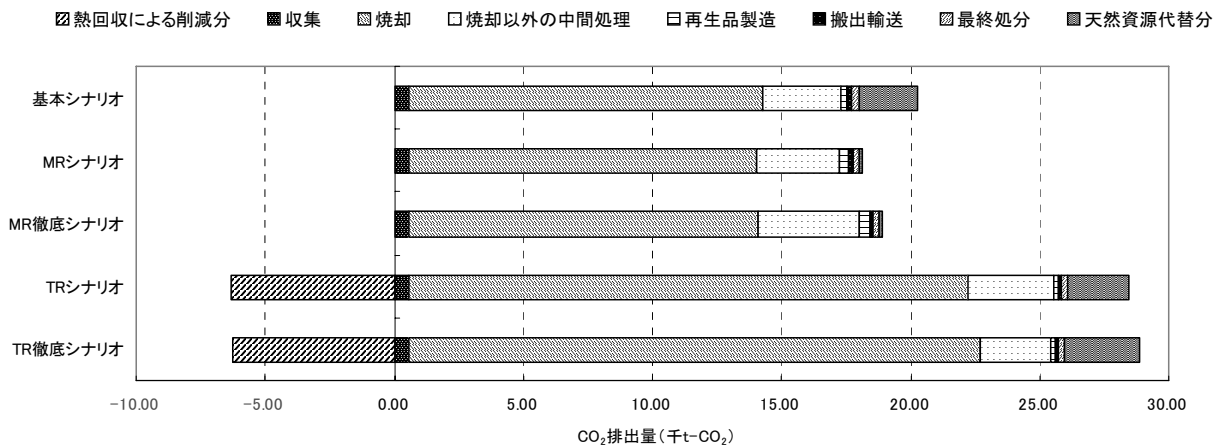


図-3 各シナリオにおけるGHG排出量推計結果

およびリサイクル業者への委託費が含まれる。共通項目には、市職員の人件費、生ごみ処理機・集団回収等への補助金、および広報費等が含まれる。

3. 結果と考察

(1) GHG排出量の推計結果

各シナリオにおける GHG 排出量推計結果を図-3 に示す。基本シナリオ (H16 年度実績) に対する GHG 排出量の増減率は、MR シナリオで -10%、MR 徹底シナリオで -7%、TR シナリオで +9%、TR 徹底シナリオで +12%と

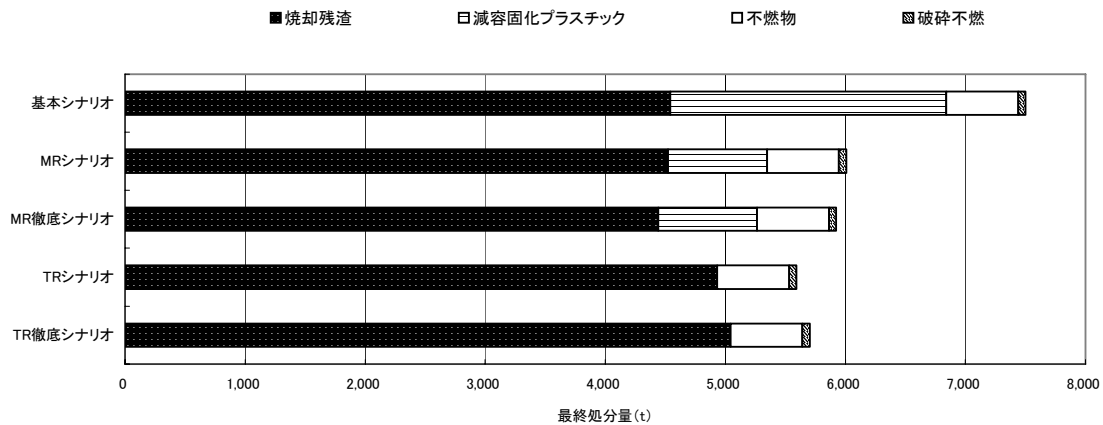


図-4 各シナリオにおける最終処分量推計結果

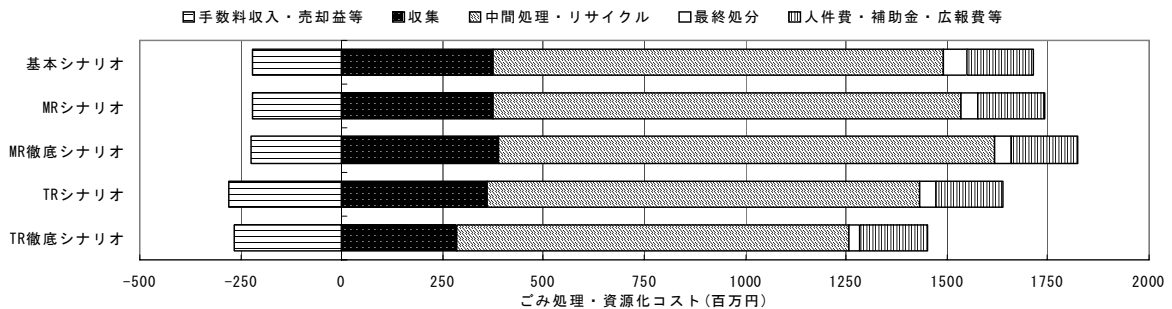


図-5 各シナリオにおける処理コスト推計結果

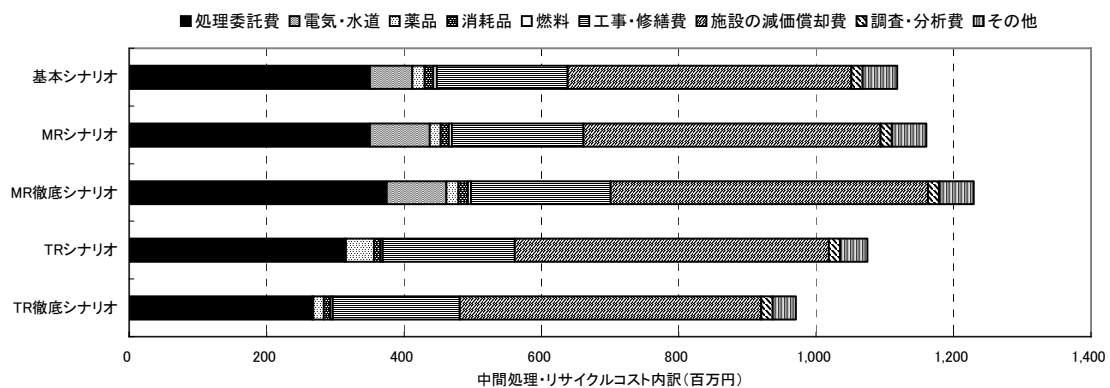


図-6 各シナリオにおける中間処理・リサイクルの項目別コスト

なり、MR シナリオが最も低い結果となった。MR 徹底シナリオでは、中間処理（焼却以外）および再生品製造過程における GHG 排出の 17%を堆肥化に伴う CH₄および N₂O の排出が寄与していたことから、堆肥化を行わない MR シナリオよりも GHG 排出量が大きい結果となったものと考えられる。焼却時の GHG 排出割合(熱回収による削減分は含まない)は、全体の 68~77%と非常に大きい割合を占めている。TR および TR 徹底シナリオにおいては、焼却量および焼却ごみ中のプラスチック類が占める割合が増加するため、他のシナリオに比べて GHG 排出量が大きくなっている。

バイオガス発電やごみ発電における電力消費削減効果により、TR シナリオ(厨芥類バイオガス発電+普通ごみ発電)、TR 徹底シナリオ(一括収集ごみ発電)ともに約 22%の GHG 削減が見込まれる結果となった。しかし、MR シナリオおよび MR 徹底シナリオに比べると、熱回収による削減分を考慮しても GHG 排出量は大きい値を示しており、熱回収に比べてマテリアルリサイクルのほうが GHG 排出量削減効果は高いと考えられる。

厨芥類の重量割合が比較的低いことから、バイオガス発電においては、ごみ発電による発電量に比べて相対的に小さい削減ポテンシャル(ごみ発電量の約 24%)となっている。しかし、ごみ発電を行う場合には焼却ごみの低位発熱量が高いほど有利であるため、焼却ごみの発熱量低下の原因となっている厨芥類を焼却ごみから分別するメリットも評価するべきであろう。

(2) 最終処分量の推計結果

各シナリオにおける最終処分量推計結果を図-4 に示す。基本シナリオに対する増減率は、MR シナリオで -20%、MR 徹底シナリオで -21%、TR シナリオで -25%、TR 徹底シナリオで -24%となった。基本シナリオ以外のシナリオでは、プラスチックの減容固化量が少ないか全く無く、プラスチックの減容固化による減量化よりも、マテリアルリサイクルや焼却による減量化の方が効果的であることがわかる。特に、TR シナリオおよび TR 徹底シナリオが低い値を示しており、マテリアルリサイクルよりも焼却による減量化が優位であることがわかる。さらに、容器包装プラスチック類の焼却残渣発生量を別個に調査して厳密に適用すれば、TR シナリオおよび TR 徹底シナリオにおける焼却残渣がより少なくなる可能性にも留意すべきである。

(3) 処理コストの推計結果

図-5 に各シナリオにおける処理コストを項目別を示す。手数料収入・売却益等項目では、TR シナリオおよび TR 徹底シナリオがやや多い結果となった。これは、

ごみ発電やバイオガス発電時の売電による収入が影響している。また、MR 徹底シナリオにおける堆肥の売却益による大幅な収入増は見込めないと考えられる。収集コスト項目では、TR 徹底シナリオが最も優位な結果となった。これは、一括収集による収集の効率化(年間延べ搬入回数の減少)による効果が大きいことを示している。

いずれのシナリオにおいても最も大きな割合を占めている中間処理・リサイクルコストについて詳細に検討するために、各シナリオにおける中間処理・リサイクルの項目別コストを図-6 に示す。リサイクルを含む中間処理コストについては、TR 徹底シナリオが最も低い結果となった。この要因としては、中間処理工程の簡略化による処理委託費の減少、ごみ発電によって処理工程における全電力需要を賄えることが考えられる。TR シナリオにおいても発電効果によるコストの低減が見られるが、TR 徹底シナリオに比べて中間処理工程が複雑化することによって処理委託費、施設の減価償却費、工事・修繕費が大きくなるため、TR 徹底シナリオよりもコストが増加する結果となった。資源化物等売却による収入はそれほど見込めないが、ごみ発電によるコスト削減効果はごみ処理・資源化コストの約 1 割と大きいため、ごみ発電を導入するメリットは無視できないと考える。

4. 結語

本研究では、一般廃棄物処理において中間処理方法の組み合わせに着目し、中間処理方法（オプション）の異なる複数の処理シナリオにおける GHG 排出量、最終処分量およびごみ処理・資源化コストを推計し、比較・評価を行った。

GHG 排出削減を優先する場合は、マテリアルリサイクルを優先し可能な限り焼却を回避することが効果的であることがわかったが、厨芥類の堆肥化に関しては、堆肥化過程での CH₄および N₂O の排出に留意する必要がある。一方、最終処分量及びごみ処理・資源化コスト削減を優先する場合は、一括収集によるサーマルリサイクル徹底が優位であることが確認できた。また、収集および中間処理を簡略化することによるコスト削減効果と並んで、ごみ発電によるコスト削減効果も大きいことを示した。

本研究において、現在想定されるごみ処理・資源化方法の組み合わせをすべて網羅したとは言えないが、複数の中間処理・資源化方法の組み合わせを考慮しながら、GHG 排出削減、最終処分量最小化、およびごみ処理・資源化コスト削減という複合的な観点で包括的な評価を行う方向性を提示できたと考える。

ただし、本研究では、コスト分析において自治体負担分のみを対象として評価を行ったが、事業者負担分や国あるいは広域自治体共同負担分も考慮に入れた多面的かつ詳細なコスト分析を行うべきであると考え。容器包装リサイクル法の問題として、リサイクルコストにおいて事業者負担に比べ自治体負担が大きいという問題も指摘されており、このような問題について詳細に検討する必要がある。さらには、特に最終処分コスト負担においては、今回対象とした草津市のケースは大阪湾フェニックス計画による大規模海面埋立事業に依存しているという現状もあり、評価対象とする一般廃棄物処理システムにおける実質的な最終処分コスト負担分を国あるいは広域自治体共同負担も含めて一定の精度で抽出することも求められよう。

謝辞：基本統計データの収集に際して、詳細なヒアリング調査および資料閲覧に際してご協力頂いた草津市クリーン事業課ならびに草津市クリーンセンター、関連各種協会団体の方々に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部廃棄物対策課：日本の廃棄物処理平成15年度版，2004。
- 2) 井村秀文，中嶋芳紀，森下兼年，前田利家：一般廃棄物処理システムのライフサイクルアセスメントに関する研究—エネルギーを指標として—，環境システム研究，Vol.24，pp.261-267，1995。
- 3) 寺園淳，酒井伸一，高月紘：PETボトルのライフサイクルアセスメント，第6回廃棄物学会研究発表会講演論文集，Vol.6，pp.111-113，1995。
- 4) 天野耕二，田灘未来：ペットボトルのリサイクルシステムに関する総合評価，エコテクノロジー研究，Vol.10，pp.135-141，2004。
- 5) 中野勝行，萩原喜之，金熙濬：廃プラスチック再資源化処理のLCA—名古屋市におけるPSPトレイのケーススタディー，第12回廃棄物学会研究発表会講演論文集，Vol.12，pp.128-130，2001。
- 6) (社)プラスチック処理促進協会：プラスチック廃棄物の処理・処分に関するLCA調査研究報告書，p.123，2001。
- 7) 浪花伸和，藤原健史，松岡謙，藤吉秀昭，大塚康治，立尾浩一：厨芥利用を中心とした一般廃棄物処理・資源化システムのシナリオ評価に関する研究，環境衛生工学研究，Vol.19，No.3，pp.207-210，2005。
- 8) 松藤敏彦，田中信壽，羽原浩史：都市ごみゼロエミッションシナリオのコスト・二酸化炭素排出量・エネルギー消費量評価，第12回廃棄物学会研究発表会講演論文集，Vol.12，pp.134-136，2001。
- 9) 松藤敏彦，田中信壽：一般廃棄物処理システムのコスト・エネルギー消費量・二酸化炭素排出量評価手法の提案，土木学会論文集，N0.678/VII-19，pp.49-60，2001。
- 10) 草津市市民環境部クリーン事業課：草津市のごみ状況(平成17年度版)，2005。
- 11) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部廃棄物対策課：日本の廃棄物処理平成15年度版，2003。
- 12) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部廃棄物対策課：一般廃棄物処理実地調査平成10～15年度調査結果，2003。
- 13) (社)全国都市清掃会議，(財)廃棄物研究財団：ごみ処理施設の計画・設計要領，p.136，1999。
- 14) 環境省，経済産業省：算定・報告・公表制度における算出方法・排出係数一覧，<http://www.env.go.jp/earth/ghg-santeikohyo/material/tiran.pdf>，2006。
- 15) 資源エネルギー庁長官官房総合政策課 編：総合エネルギー統計平成14年度版，通商産業研究社，2004。
- 16) 齋巻峰夫，野池達也：LCA手法を用いた排水処理の評価手法に関する研究，土木学会論文集，No.643/ VII -14，pp.11-20，2000。
- 17) 齋巻峰夫，野池達也：LCAにおける多項目環境負荷量の定量化に関する研究，環境システム研究，vol.25，pp.217-227，1997。
- 18) 南齋規介，森口祐一，東野達：産業連関表による環境負荷原単位データブック(3EID)，(独)国立環境研究所地球環境研究センター，2002。
- 19) 地球温暖化問題への国内対策に関する関係審議会合同会議資料(<http://www.kantei.go.jp/index.html>)，2002。
- 20) (財)日本エネルギー経済研究所計量分析部 編：EDMC/エネルギー・経済統計要覧，2004。
- 21) 田中信壽，松藤敏彦：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，北大研究，1998。
- 22) (財)東京市町村自治調査会：LCAとコストから見る市町村廃棄物処理の現状～廃棄・リサイクルシステムの改善に向けて～，pp.32-48，2003。
- 23) (社)全国都市清掃会議，(財)廃棄物研究財団：ごみ処理施設の計画・設計要領，p.138,p.141，1999。
- 24) (社)全国都市清掃会議，(財)廃棄物研究財団：ごみ処理施設の計画・設計要領，pp.146-147，1999。
- 25) 木原勇信，井上隆，間宮尚，小林謙介，折笠聡，長谷川善明：生活系一般廃棄物処理に係る環境負荷の把握—その2 東京23区の最終処分場の建設と運用に係る環境負荷—，第18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，Vol.18th，pp.325-328，2002。
- 26) (財)政策科学研究所：平成16年度容器包装ライフ・サイクル・アセスメントに係る調査事業報告書—飲料容器を対象

- としたLCA調査— II資料編, 2005.
- 27) 西尾道徳：農業生産環境調査にもとづく我が国のリン酸施用実態の解析, 日本土壌肥科学雑誌, Vol.74, No.4, pp.435-443, 2003.
- 28) 田中信壽, 松藤敏彦, 角田芳忠, 東條安匡：リサイクル・適正処分のための廃棄物工学の基礎知識, p.124, 技報堂出版, 2003.
- 29) (社)全国都市清掃会議：ごみ処理施設構造指針解説, p.506, p.537, 1990.
- 30) (独)国立環境研究所 地球環境研究センター：日本国温室効果ガスインベントリ報告書, 2006.
- 31) (社)全国都市清掃会議, (財)廃棄物研究財団：ごみ処理施設の計画・設計要領追録版(炭化施設・ごみメタン回収施設), p.631, 2003.
- 32) 佐々木宏, 李玉友, 関廣二, 上垣内郁夫：生ごみの高温・高濃度メタン発酵に及ぼす滞留時間と負荷の影響, 水環境学会誌, Vol.22, No.12, pp.983-989, 1999.
- 33) 益田光信：生ごみからのバイオガス回収, タクマ技報, Vol.7, No.2, pp.68-77, 1999.
- 34) (社)全国都市清掃会議, (財)廃棄物研究財団：ごみ処理施設の計画・設計要領追録版(炭化施設・ごみメタン回収施設), p.647, 2003.
- 35) (社)全国都市清掃会議, (財)廃棄物研究財団：ごみ処理施設の計画・設計要領, p.144, 1999.
- 36) 全国農業協同組合連合会HP「アラジン肥料の種類」, <http://www.zennoh.or.jp/bu/hiyaku/aladdin/3.htm>, 2005.
- (2007. 3. 31 受付)

STUDY ON COMPREHENSIVE EVALUATION OF MUNICIPAL SOLID WASTE DISPOSAL SYSTEMS FOCUSED ON COMBINATION OF INTERMEDIATE PROCESSING

Koji AMANO and Tomohiro SOWA

In this study, we comprehensively evaluated greenhouse gas (GHG) emission, terminal waste disposal and waste disposal cost related to municipal solid waste (MSW) treatment based on lifecycle inventory (LCI) analysis. Our evaluation considered multiple scenarios combining numerous MSW intermediate processing options. Material recycle of plastics was estimated to reduce 10% of GHG emission of the basic scenario in 2004. Also composting kitchen scraps was estimated to reduce 7% of GHG emission. Though thermal recovery by MSW incineration and/or methane fermentation of kitchen scraps was estimated to increase 9 to 12% of GHG emission, terminal waste disposal and waste disposal cost on the thermal recovery scenario could be lower than those on the material recycle scenarios.