ごみ焼却施設の更新シナリオの構築に基づく 広域化とエネルギー回収を評価する手法の開発

山本 司¹・盛岡 通²・尾崎 平³・北詰 恵⁴

¹学生会員 関西大学大学院 理工学研究科 博士前期課程 (〒564-8680 吹田市山手町3-3-35)

²正会員 関西大学教授 環境都市工学部 (〒564-8680 吹田市山手町3-3-35)

E-mail:tmorioka@kansai-u.ac.jp

³正会員 関西大学助教 環境都市工学部 (〒564-8680 吹田市山手町3-3-35)

E-mail:ozaki_t@kansai-u.ac.jp

⁴正会員 関西大学准教授 環境都市工学部 (〒564-8680 吹田市山手町3-3-35)

本研究では、人口減少および低炭素社会への移行の中で、ごみ焼却施設を更新していくシナリオの構築に基づき、広域化とエネルギー回収を評価する手法を開発した。兵庫県を対象に2010年から2030年のコスト、CO₂排出量、総発電量、リサイクル率、最終処分量を算定した。広域化シナリオは、Bauシナリオよりも収集コストは増大するものの、施設運営・管理にかかるコストを低減できるため、両シナリオには差がないことを明らかにした。また、発電の効果を売電収入およびグリーン電力としてCO₂削減に計上すると、わずかに広域化シナリオの方が優位となった。総発電量に限って言えば、広域化シナリオでは、Bauシナリオの2倍近い発電量が得られ、地域エネルギー供給施設の拠点となり得ることが示唆された。

Key Words : incineration plant renovation , region-wide solid waste management, energy recovery, low-carbon society, declining population ,scenario approach

1. 研究の背景と目的

本研究では、人口減少および低炭素社会への移行の中で、基本的な社会基盤であるごみ焼却施設を更新していくシナリオデザイン手法を開発する。わが国のごみ焼却施設のストックは、2010年現在で施設数1,200施設、処理能力240千トン/日を超えている¹⁾。ごみ焼却施設の供用年数は、橋梁等の他の基盤施設と異なり 25年前後と短い。低炭素社会への移行ならびに人口減少への対応の観点からも効率的なごみ焼却施設の更新が求められる。

まず、通常の施設更新では、建設後15年頃を過ぎ20年に近づく際に、これまでの基幹改修や維持管理の経験に基づきつつ、一般には、平成10年頃に全国的に採用された広域化計画に沿って、共同して運営する市町村との協議で具体化する。維持管理の経年変化と長寿命化を想定したプラントの維持方法に関しては、すでに環境システム研究で報告²⁾した。

さらに、現在では、以前のダイオキシン対策を終えて、施設整備の力点が、施設の部分負荷運転による効率の低下に対して適正な施設規模を探索する事に置かれ、あるいは人口減少と廃棄物量の減少を見据えて施設の有効で

効率的な利用を求めて広域処理を求める動きが一般になりつつある。さらに、3.11以降は、都市自らの再生可能エネルギー供給・活用手段として廃棄物発電が注目されている。

そこで、本研究では、第一に、地方自治体の廃棄物管理の責任者が将来社会をシナリオとして描く想定のもとで、循環型社会形成促進(循環と略称)、温暖化対策をすすめて地域の低炭素化に貢献する(低炭素と略称)、市町村財政のうちで廃棄物処理(公営企業会計の下水道、病院等への視野も共有し)にかかる経費を削減して財政基盤を強化する(財政強化と略称)の政策目標を有するものと解釈した。

その上でこれらの循環、低炭素、財政強化の目標を指標で表現して、それを達成するべく、将来の一般廃棄物処理の基本構想をシナリオとともに描くのを支援し、かつ中核施設としての焼却施設の維持・更新・建替え・集約等の基本デザインを検討することを支援するプラットフォームをPC上に開発することを目的とする。

第二には、兵庫県を対象に、ごみ焼却施設の更新に際して広域化及び発電量の増加を目指した高効率化によって得られる効果を、コスト、二酸化炭素排出量、総発電

量、リサイクル率、最終処分量の5つの指標を用いて評価し、この開発したプラットフォームの有効性を確認し、さらに改善すべき点を明らかにすることを目的とする。

先行研究事例としては、ライフサイクル及びごみ排出・処理状況を考慮したごみ処理広域化システムに関する検討³⁾やごみ排出特性および処理状況を考えた広域化シナリオと処理システムの設計案を提示する思決定支援ツールの開発⁴⁾、また、既存インフラを考慮した将来ストックの推計と維持・更新のコストや環境負荷からライフサイクル的視点で評価する研究⁵⁾等がなされている。

本研究の特徴は、人口減少および低炭素社会への移行の中で、ごみ焼却施設を更新していくシナリオに基づき、ごみの収集運搬ならびにごみ焼却施設の運転・更新に関わる循環、低炭素、財政強化の指標を算定・評価する政策支援型のモデルを構築すること。また、兵庫県をケーススタディとし、いわゆる3R施策が強調され、一人当たり廃棄物発生量の削減、それに資源化重視の政策の推進が進められた結果、焼却施設の定格処理量を下回る廃棄物の受け入れが予想、あるいは現実のものとなっている現状において、収集輸送のモデルを含むシナリオ・デザインのツールを使えば、その傾向を先取りして、更新の際にはより広い地域空間で一体的に施設を運用し、広域化を図る過程で3Rに加えて低炭素社会への移行を積極的に図っていくことの効果を検証することである。

2. 更新シナリオデザイン手法の全体構成

本手法は、将来に人口減が進む社会において、循環形成でごみ量の減少に適応し、財政状況の悪化が予想される中で費用効果的な代替案を希求し、複数のごみ焼却施設を統合して、収集・輸送と施設立地の広域化も含めて施設を更新、管理する方策を組み立て、かつ、循環、低炭素、財政の各指標から評価することを可能とするものである。意思決定者に対して政策決定を支援システムとして開発した手法の全体像を図-1に示す。

(1) 枠組みの設定

ごみ焼却施設の更新シナリオ作成全体の枠組みを決める。基準年、目標年、シナリオ数、パフォーマンス指標等である。ごみ焼却施設の更新のため目標年の設定は、これまでの実績等⁶⁾も勘案し、20~30年後が妥当である。それよりも相当に短ければ、稼働後の年数の浅い施設群の既定の操業を大胆に変更（廃止等）することを余儀なくされ、社会的な犠牲が大きくなる。逆に、相当に長ければ、高効率発電の高圧・高温・コンバインド等の運転に耐える材料・装置の技術開発を的確に予想できなくなり、見通しに余りにも不確定項が色濃くなる。

図-1 更新シナリオデザインの手法の全体像

(2) シナリオのデザイン

将来社会のシナリオ研究では、複数のシナリオを立案し、それらを比較することがあり、政策の意思決定者に利用される⁶⁾。この手法は、将来の社会像と社会要素（技術、制度、価値意識等）の不確実性に対して、複数のシナリオと対策のオプションを描き、また重要な仮定に対して感度分析を行うことで、将来の社会変数の変化とその影響を推定し、比較検討することにも用いられる。

本研究でも、一般廃棄物の処理と管理に関して、複数の将来シナリオを設定し、代替的な選択がもたらす廃棄物管理の費用対効果を考察する。まず、シナリオデザインの段階では将来イメージを定性的に記述し、考慮すべきオプションおよびパラメータ、パフォーマンス評価指標等を抽出する。

シナリオデザインの基本的な方向性は、国の循環型社会形成推進基本計画や地域の一般廃棄物処理基本計画の方向性を基本としつつ、時にはそれを先取りする知見を基に行政、学識経験者、各種団体が共同で探索する過程で明らかになる。

(3) 各種計画・施策および技術・社会情報の収集

目標年に導入可能と思われる施策ならびにごみ焼却施設の技術対策に関する情報を収集する。

施策情報は、分別収集によるごみ組成の変化量や有料化によるごみ発生抑制量、資源ごみの増加量等である。

技術に関しては、これまでの焼却、排ガス対策技術に加え、低炭素化技術として、特にごみ焼却施設の高効率発電（エネルギー回収法と発電効率）、省エネルギー（省エネ率）、あるいは施設の長寿命化に関する技術が考えられる。また、ごみ焼却施設は運営時にも多大な費用がかかることから施設の運営方式に関しても、これまでの公設公営形態以外に公設民営（DBO(Design Build Operate)、長期包括的運営）、PFI（Private Finance Initiative）

(BOO(Build Own Operate), BOT(Build Operate Transfer), BTO(Build Transfer Operate)) に関する情報を収集する。

(4) 対策の設定と主要変数の確定

収集した対策・技術の情報をもとに、比較衡量すべき施策と技術を選択する。それらの代替案の効果を左右する変数、すなわち、ごみの発生抑制率、回収率および発電効率、費用関数等の政策的、技術的な変数の想定しうる範囲を得る係数を定める。大規模施設への更新には施設の規模効果の関数形、広域化には距離の増大に伴う費用（犠牲）効果の関数形、発電便益には施設規模の関数形等が大きな役割を果たす。

(5) パフォーマンス指標の推定

後述の開発したシミュレータを用いて、ごみ焼却施設に関わる循環（最終処分量、リサイクル率）、低炭素（GHG排出量、総発電量）、財政（総費用）の各指標の値を算定する。収集・運搬、中間処理、施設更新の各ユニットのシナリオ別、エリア別、経過時間別の変数値ならびに対象期間中の総量等の予測値を得る。

(6) 評価・提案

(5) で推定されたごみ焼却施設の空間配置、処理能力、ごみ処理量、総発電量、必要人員数、費用等をもとに、意思決定者は、(4) で設定した施策と技術の効果を評価し、代替案同士の比較、目標値との比較を通し、あるいは得られる複数の指標の動向から総合的な判断を行う。施策の取り上げに見直しが必要と判断する場合は、政策や技術対策の設定（データセット）を変更し、再度、パフォーマンス指標の推定を行う。

3. パフォーマンスを算定するシミュレータ

(1) シミュレータの全体構造

図-2に開発したシミュレータの構造を示す。本シミュレータは、7つのデータベース、5つのサブモデルから構成している。

(2) シミュレータの入力項

インプットは7つのデータベース（DB）からなる。このうち、不要物発生量は、一般廃棄物処理実態調査結果に基づき、市区町単位でのごみの排出量を利用する。また、ごみの排出は、1人1日排出量に基づき、1kmグリッドのGISで勘定し得るようになっている。施設DBはGISを用いて、空間情報ならびに施設の諸元（供用開始年度や処理能力等）を整理している。また、エリア境界DBは広域化などの管理運営をオペレーションの空間単位の変更を容易にするための機能を有す。

(3) ごみ排出量勘定モデル

人口減等の活動の変化および収集方式と分別類型の変更に従って、ごみの成分、量、排出量が変化する。1kmグリッド毎の人口とごみ排出量は、次のように配分し直し、現状の総量で一致するように配分する。人口は、2005年の国勢調査データをベースとし、グリッド毎の人口比率を設定する。

比率を設定するにあたり、2010年以降の将来人口の分布の推定では、①国勢調査時のメッシュ間の比率を用いる方法（各メッシュの増減率は一律であると仮定）と②時間経過による人口変化率（例えば、2005年と2010年の比）より、メッシュ毎に人口増減率を設定（各メッシュの過疎化と集約化を考慮）し、配分する方法が候補となる。本研究では①の2005年の国勢調査時の比率を用いる

図-2 ごみ焼却施設更新シミュレータの全体構造

方法を採用した。また、ごみ量は実績値を、ごみ質は既往研究⁹⁾を参考に設定した。これらは変更も可能である。

(4) 収集・運搬距離の勘定モデル

焼却施設への収集・運搬では、1kmグリッドを経由する直線距離に一定の増加率⁹⁾を乗じて距離を算定し、収集区分毎（可燃、不燃、粗大、資源等）に収集するものとし、積み込み作業の作業時間、収集頻度を考慮し、作業人員、往復回数、収集距離、人件費等を算定する。収集車両の燃料消費率、価格、整備費等は既往研究^{8),10)}を参考に設定し、原単位法により合計を算出した。

(5) 中間ごみ処理量勘定モデル

中間ごみ処理量は、収集されたごみの流れを受け止める変数である。収集ごみは①直接焼却処理、②焼却以外の中間処理（粗大ごみ処理、資源化等を行う施設等）、③直接資源化、④直接最終処分各プロセスユニットへと流れる。基本的に可燃ごみは直接に焼却され、不燃、粗大ごみは選別施設、資源ごみは資源化施設を経る。不燃、粗大、資源ごみの一部は選別・資源化のあとで焼却され、焼却残渣として一部は埋立処分される。これらの量は、実績値¹¹⁾をもとにプロセス毎（①～④）のごみの配分比を設定し算定する。

(6) 中間処理施設運転勘定モデル

焼却施設の焼却規模、焼却量に基づき、施設運転に必要な人員数、光熱・薬剤量、エネルギー回収量等を算定し、人件費、施設保全費、光熱薬剤費ならびにCO₂排出量を算定する。また、施設の建て替えに伴うコスト、CO₂排出量の算定も行う。算定式、設定値は既往研究^{8),10)}をもとに設定した。

(7) 中間処理施設の統廃合モデル

平成10年頃に検討された広域化計画あるいは、その後に見直しが行われた広域化計画をベースとし、広域化を行う空間単位の設定、施設立地の設定、処理方式・規模の設定を行う。

広域化の空間単位は、地域の歴史的な経緯や関わりを踏まえ設定することが妥当である。その枠組みの例としては、県民局や県政局等の範囲が候補となる。それらは、エリア毎に行政の支所等があり、広域的な地域振興計画や地域計画の際に、一単位として利用されてきた。

また、処理規模の設定は、ごみ量の代理指標として広域化によって集約される人口により判断する関数を設定した（図-3）。

建替時の費用を算定するには、廃棄物・3R研究財団発行の「ごみ焼却施設台帳 全連続燃焼方式編 平成21年度版」¹²⁾より、1990年以降の建設、焼却方式がストー

カ炉、ガス冷却方式が全ボイラあるいは半ボイラ形式で、かつ処理能力が200トン/日以上、900トン/日以下の施設を選び費用関数を設定した（図-4、対象施設数は33）。

また、小規模施設（80～200トン/日）に関しても、建設時期、焼却方式、ガス冷却方式が同条件として費用関数を求め比較した（対象施設数6）。その結果、大規模施設の費用関数により算定した結果は、小規模施設の費用関数の結果と比べて、200トン/日の施設で約4%、100トン/日の施設で約12%費用が安価となる差異が見られた。

全連続炉運転の施設更新は、図-4で設定した大規模施設の費用関数を用いて求める。全連続運転以外の運転方式（准連続、バッチ等）のものについては、現状施設の処理能力当たりの費用原単位（実績値）より算定する。

また、全連続運転炉において、発電効率は、年代を追う毎に上昇してきている¹³⁾。400トン/日の焼却規模でみた場合、1990年代の発電効率は8%程度であったが、2000年代は15%程度に達している。また、現在の主流である蒸気条件が3MPaG×300℃方式の場合では15%を超え、近年採用されつつある4MPaG×400℃方式では、20%に達している。このように技術発展と施設の大規模化により、発電効率は上昇している。そのため、本モデルでは、施設更新に伴い、高効率ごみ発電施設整備マニュアル¹³⁾を参考に高い発電効率の技術水準を選択できるものとした。

図-3 処理規模の設定時に使用した収集人口と必要処理能力の関係

図-4 処理施設の更新時に用いた費用関数(全連続運転炉)

4. シミュレータの兵庫県地域への適用

(1) 対象地域の特徴

本研究では、兵庫県を対象地域とする。兵庫県は、10の県民局、41市町(2010年)で構成されており、面積が約8,396km²、その中にゴミ焼却施設が43施設、RDF化施設が2施設ある(図-5、現状)。環境省のゴミ処理状況データベース¹¹⁾(平成21年度)に基づく計画収集人口は5,607千人、1人1日あたりゴミ排出量は1,049g/人・日である。全国の1人1日あたりゴミ排出量が994g/人・日の平均よりも排出量が多いエリアである。

(2) 枠組みの設定

枠組みの設定は、兵庫県および県下5市の循環計画担当課および広域処理の担い手の財団法人の参加でワークショップを開催し、また広域化が検討されている地域の自治体や廃棄物技術開発を担う全国組織へのヒヤリングを通して、シナリオの基本方向を得た。

基準年は、統計値が比較できる近年として2010年とし、目標年は、現状施設の更新時期を考慮し、20年後の2030年とした。シナリオは、処理の空間的単位の指向性の軸(分散型、広域型)と廃棄物処理方針の軸(3R推進、エネルギー回収)の2軸でデザインすることとした。

(3) シナリオのデザイン

シナリオを区分する第一軸である処理の空間的単位としては、処理の単位をこれまでの基礎自治体とする「分散型」と、人口減に対応し廃棄物処理の費用負担を軽減する観点から、施設の集約化を図ることにより効率化を目指す「広域型」に分けた。

第二軸の処理方針は、これまでの循環社会形成の基本方針であるとして「3R推進型」と、ゴミ焼却施設をドイツ等の諸外国で見られるエネルギー拠点施設¹³⁾へと変容させることを想定した「エネルギー回収型」にわけた。

そのため本研究では、この2軸の組み合わせから4つのシナリオ(A1、B1、A2、B2)毎に、ゴミ焼却施設の更新に伴うコスト、二酸化炭素発生量、総発電量、リサイクル率、最終処分量を算出し、2010年から2030年まで5年毎の勘定値を得た。

(4) シミュレーションで設定した条件

a) 人口の予測

人口予測は、兵庫県が2008年に実施したコーホート要因法による推計した出生率で低位、純移動率でトレンド収束型の結果¹⁴⁾を用いた。人口は全シナリオ共通である。

b) ゴミ減量対策

処理の方針軸(3R、エネルギー)に影響を与えるのはゴミ量、ゴミ質である。本研究では、既存の兵庫県の

一般廃棄物基本計画(2012年度に改訂予定で審議中)を参考にしつつ、ゴミ量、ゴミ質に影響を与える施策として、ゴミ収集の有料化、その他プラやその他紙の分別収集、事業系古紙のリサイクル促進等を取り上げた。

ゴミ収集の有料化、事業系古紙のリサイクル促進は、全シナリオ共通で実施するとした。その他プラ、その他紙の分別収集は、3R推進型であるA1、A2シナリオでは、実施し、エネルギー回収型であるB1、B2シナリオでは実施しないとした。その他プラ、その他紙は、月2回それぞれ別々に収集するものとした。

これらの施策の導入によるゴミ減量効果の推定方法には、所得や世帯構成等を変数とした推定式を用いる方法等が提案されているが、ここでは、単純に有料化、分別収集、事業系古紙のリサイクルの効果として、厨芥類、紙類、プラ類に全市町一律の低減率(-0.5~1%/年)を設定し求めた。ここでの低減率は、想定値ではあるが、2015(平成27)年の兵庫県の一人一日当たりゴミ排出量の目標値(923g)を達成しつつ、2030年のゴミ排出量が、現状(2010年)のから判断して、実現不可能ではない(少なくともかなりすぎない)値とした。設定値を表-1に示す。

図-5 各シナリオにおける2030年のゴミ焼却施設配置(分散型シナリオ(A1,B1)と広域化シナリオ(A2,B2))

表一 各シナリオのごみ減量対策に伴う低減率と2030年における一人一日当たりごみ排出量の推定値

	ごみ組成	Aシナリオ	Bシナリオ
厨房		-0.5%	-0.5%
紙類	新聞紙	-0.5%	-0.5%
	雑紙	-0.5%	-0.5%
	上質紙	-1.0%	-1.0%
	飲料用紙パック	-1.0%	-0.5%
	包装紙	-1.0%	-0.5%
プラ類	PET以外のボトル	-1.0%	-0.5%
	カップ、トレイ	-1.0%	-0.5%
	ブラ袋	-0.5%	-0.5%
2030年における県全体の一人一日ごみ排出量		857g/人・日	867g/人・日

表二 統廃合の検討対象の判断指標と得点化

得点 評価項目		3	2	1
供用年数		25年以上	20年以上	20年未満
施設の位置づけ		右以外	第二母施設	母施設
炉形式		バッチ式	準連続式	全連続式
施設規模	(A2, B1の場合)	80トン/日未満	80トン/日以上	100トン/日以上
	(B2の場合)	100トン/日未満	100トン/日以上	400トン/日以上

c) 収集・運搬

収集は、ごみ処理の広域化が行われた場合、変更されることも考えられるが、一方で、ごみ処理は広域化を行うが、収集・運搬については、各市町が行うことも考えられる。ここでは、後者を採用し、収集区分、回数については、現行の市町の条件が継続されると想定した。

また、粗大ごみ、資源ごみに関しては、粗大・資源化施設に運搬されるが、本研究では、可燃ごみに比べて、その量が相対的に多くないことから、それらの収集物もごみ焼却施設（同じグリッド）へ運搬されるものと仮定し計算した。そのため、施設の広域化がなされるとすべての収集物が、広域化後の位置（グリッド）に運搬される条件にて計算を行った。なお、本研究では、粗大・資源化施設の更新に関する事項は評価対象にしていない。

d) ごみ焼却施設の統廃合条件と基準

ごみ焼却施設の統廃合については、複数の代替案によって廃棄物処理のパフォーマンスが変化するので、より広域化や発電促進を強化するか否かの効果を比較可能なようにシミュレーションの手法を開発した。

統合を進めることが是と判断される場合を示すランキングを行い、統合の優先度の高いケースを3点とし、次いで2点、統合の優先度の相対的に低いケースを1点とした。そこで採用した指標は4つである。本4項目に関して表二に示す点数付けを行い、統廃合の検討対象の判断

指標とした。なお、本研究では、施設を立地させるには現状の位置から選び、施設更新に伴い、建て替える施設と廃止する施設をシナリオに応じて設定している。

第一は供用年数である。供用年数が25年以上経過していると統廃合の対象となるのは当然である。また、集約化して施設を廃止、あるいは他施設のごみを受け入れのために大規模化、高効率発電を行い、効率的運営を進めるための検討対象として、「供用開始20年」を設定した。

第二は広域化のエリア内（本研究では県民局）における施設の位置づけである。母施設とは、広域化のエリア内で最大の処理能力を有する施設を意味し、第二母施設とは、エリア内において、母施設に次いで大きな処理能力を有する施設を意味する。

このような設定を行ったのは、ひとつに、施設規模の大きい施設にごみを集約化の方が合理的であること（小さい施設にごみを集約しても処理できない）、二つに、収集運搬の相対的な効率性を向上させる目標に合致しているからである。すなわち、現有の施設規模が大きいということはその収集範囲の人口規模が大きいことを意味する。人口規模の小さい都市から大きい都市へ運搬した方が、収集運搬の往復回数が少なく、移動距離が短くなることから、相対的に効率は良くなる。本研究では、A2, B1シナリオは、収集効率を考え、エリア内に最低2施設（母施設と第二母施設）は有することとし、B2シナリオでは、最低1施設（母施設）は有することとした。

第三は炉形式である。炉形式がバッチ式であれば効率が低く、他の施設更新に相乗し共同化することが選好され、そのため統廃合の対象となる。炉形式が全連続運転炉でない場合には、供用年数の多少にかかわらず、エリア内の母施設あるいは第二母施設に集約化を図る案を代替案とする。

第四は施設規模である。処理規模が80トン/日未満の施設において、発電を行うことは現実的ではない（実績並びにプラントメーカーへのヒアリング結果より）。発電によるエネルギー回収を前提とするならば、100トン/日以上施設の規模を維持することが望ましい。一方、施設の集約化を図り、大規模化し、発電効率を高めることは可能であるが、過度の集約化は収集コストの増加を招く。

意思決定者の判断基準により、集約の単位が異なってくると考えられる。すなわち、収集に伴うコストの増大に配慮しつつ、発電ができる程度の規模までの集約化を図るという選択肢と、可能な限り広域化を図り発電量を多くするという選択肢を想定しうる。

そのため、本研究では80トン/日以下の施設は、廃止の対象とし、また、統合化の際には100トン以上となることを一つの目安とした。さらに、大都市においては、処理規模が400トン/日を超える施設が広域化の検討エリ

ア内に複数立地している事実がある。蒸気条件として4MPaG×400℃方式で発電を行えば発電効率は20%に達し、十分独立して運営することが可能であり、逆に、そのような大規模施設を一つに集約化すると、収集運搬の効率が悪くなることから、廃止しないケースを標準とした（廃止するケースも比較可能）。なお、統合化の際に必要な処理規模の判断には人口規模より（図-3）判定した。また、運営方式は公設公営方式（従来型）とした。

e) シナリオによる設定の違い

上記に示した条件設定も含め、評価指標に影響を与えるシナリオ間の差異を以下に示す。

- ① 人口：シナリオ間による差はなし（全シナリオ共通）。
- ② ごみ排出量：Aシナリオ(A1,A2)とBシナリオ(B1,B2)において異なる。表-1に示した分別収集の実施の有無により、ごみ排出量の低減率が異なるため、Aシナリオの方が、Bシナリオよりも総ごみ排出量が少ない。これにより、収集距離に差が生じ、結果として、コスト、CO₂排出量に差が生じる。また、リサイクル率、最終処分量に差が生じる。
- ③ 収集・運搬：Aシナリオは、その他プラとその他紙の分別収集を行い、Bシナリオは、それらの分別収集は行わない。回収率は、既往研究⁹⁾に基づき全シナリオ共通とした。すなわち、Aシナリオでは、その他プラとその他紙を分別収集するため、必要な車両台数、人員、輸送距離等が増大し、結果として、コスト、CO₂排出量に差が生じる。
- ④ ごみ焼却施設の更新：先に示した本節のd)にて示した条件により、施設の統廃合を行い、施設数、施設規模が各シナリオにより異なる。詳細は後述(5章(1))する。
- ⑤ 焼却施設の規模：シナリオによりごみ焼却施設の施設規模が異なる。これに伴い、発電効率ならびに強熱減量が異なり、結果として、総発電量、最終処分量に差が生じる。

5. シナリオに沿った施設更新の推計結果

各シナリオの2030年での施設配置の空間分布を図-5に、各シナリオの各時間断面のごみ焼却施設の施設数を図-6に、また、各指標の比較結果を図-7に示す。なお、図-6は、各時間断面での施設数を意味する。

図-6 各シナリオにおける施設数の変化

図-7 各シナリオのパフォーマンス値の比較

(1) 施設数と施設の処理能力

現状延長型Bau(A1)の施設数は45施設である。広域化シナリオであるA2、B2シナリオでは、時間経過の度に施設数が減少する。B2シナリオの2015年の施設数がB1、A2シナリオより多いのに、2030年にはB2シナリオが最少となる理由は、制約条件として、B2シナリオでは県民局当たり最低1施設、B1、A2シナリオでは最低2施設と設定しているためである。すなわち、B1、B2シナリオでは、母都市あるいは母都市に次ぐ施設のいずれかへの集約化が図りうる。一方、B2シナリオでは、母都市のみへの集約となるため、母都市施設の供用年数が若く、処理能力に余裕がない場合、集約化が図れず、建替時期（供用20年以降）まで、現状の施設を運用する経過となる。その結果、2020年以降、多くの施設が建替時期を迎えるときに集約化が進む。

(2) コスト

20年間の総費用の比較の結果、各シナリオ間の差は±2%程度と、ほとんど見られない。ただし、図-7の結果には、発電による売電収入による費用は含んでいない。なお、売電収入は総費用の約4～5%程度であり、その扱いについてはのちに述べる。

費用の中で収集の人件費の割合が最も高く、分散型シナリオで約45%、広域化シナリオで50%を占めている。一般的に広域化を進める場合には、収集コストの増加が

懸念される。本研究においても広域化（A2, B2）シナリオは、収集関連（人件費・燃料費・車両整備費・購入費）コストが10～15%程度増加する。しかし、一方で、施設の集約化による施設関連（建設費、人件費、施設保全費、光熱薬剤費）コストが10～15%低減できる。その結果、総費用に関して差はほとんどない。

当初のシミュレーションでは、施設の運転管理の人件費と収集の人件費の費用単位は同額として計算を行った。この両者の費用単価が変われば、人件費総額が変化しシナリオ間に差が生じる。また、収集運搬の効率化は、収集部分の費用と輸送部分の費用を別に計算するルールを作ると、第一に輸送作業の効率化を図り、「積替え施設建設による大型車搬送」か「既存収集車利用の場合は輸送時運転手1人体制へ切り替え」等で、広域化による輸送距離の増加分による費用増加を打ち消すことは可能との簡易計算を得ている。

第二には、廃棄物発生密度がそれほど変わらない（人口減があったとしても回収作業の空間密度と作業工程は大きく変化しない）とみられる収集作業の効率化では、不燃物や資源物の回収の頻度や時間帯を変えるオプション、あるいは収集時の人口あたりの作業オペレーションのさらなる効率化のオプション等を想定しないと、分別の強化や資源回収の強化がコスト増加につながるジレンマを脱することができないことが追加的簡易シミュレーションで得られている。

すなわち、収集運搬時の人員数、単価が結果に大きく影響をきたすため、費用低減のためには収集運搬の効果的なマネジメントが重要となる。

また、売電収入を考慮したとしても、各ケースとも、全連続運転炉の更新後は高効率発電を行うとしたため、現状の売電価格(8円/kwh)によるB2シナリオのコストの削減効果は0.5%しかない。また、廃プラ分の熱量（約40%）を除いたごみ成分にて発電した場合、現状の売電価格では、A1とB2シナリオの総コストに差はない。すなわち、現行の売電価格では、経済的合理性が得られない。また、売電価格を仮に42円/kWh（廃プラ分を除いた発電価格を25円/kWh）以上とした時、その効果による影響は3%程度見込むことができる。

(3) CO₂排出量

CO₂排出量は、エネルギー回収シナリオ（B1,B2）が1.03～1.05倍程度増加する。ただし、ここではコストと同様に発電によるエネルギー回収による機会便益（費用）的な意味でのCO₂削減量を計上していない。

エネルギー回収シナリオにおいて、CO₂が増大する要因は可燃ごみ中のその他容器プラスチック量の差である。今回の計算において、CO₂排出量のうち、約75%は可燃ごみ中のプラスチック類の燃焼に起因する。そのため、

その他プラ類を収集する3Rシナリオと収集しないエネルギー回収シナリオにおいて差が生じた。分別収集することにより、収集運搬にかかるCO₂はわずかに増えるが、プラ類の燃焼に比べるとその量はわずかである。

また、発電に伴うエネルギー回収をCO₂削減効果として計上すると、B1シナリオは、A1シナリオとほぼ同等であるが、広域化シナリオであるA2, B2シナリオでは、A1シナリオよりも5%程度多くCO₂排出量を削減できる。

(4) 総発電量

エネルギー回収シナリオのB1, B2の総発電量は、A1シナリオと比べ、それぞれ1.12倍, 1.21倍増加する。A1シナリオにおいても、全連続運転炉として更新時には高効率発電を行うとしているが、それでも広域化し、処理規模の大きい施設にて発電を行うシナリオの方が発電効率が高いため、その差は明確にあらわれ大きい。

また、2010年と2030年の総発電量を比較した場合、A1シナリオで1.5倍、B2シナリオでは1.9倍と、更新時に高効率発電を導入することにより、現状の1.5～2倍近い発電が可能である。

(5) リサイクル率

リサイクル率は、日本の一般廃棄物（環境省）の定義に従い、（資源化量+集団回収量）/（ごみ総量+集団回収量）にて算定した。その結果、現状の19%から3Rシナリオ（A1,A2）で22%、エネルギー回収シナリオ（B1,B2）で21%とわずかに増加する。リサイクル率は資源ごみの排出時の回収率および選別時の選別率に起因するため、より高い目標を掲げて将来を検討するには収集の分別強化とコミュニティの各種主体による回収の促進策の効果を表すサブモデルの開発が必要であることが再認識できた。

(6) 最終処分量

最終処分量に関して、3R推進型のAシナリオの場合、リサイクル量が増加するため、最終処分量はBシナリオよりも少なくなる。また、B2シナリオ（広域・エネルギー回収型）の場合、広域化により、施設規模が大きくなることから、強熱減量が大きくなり、最終処分量の減少効果が見られる。そのため、B1シナリオ（分散・エネルギー回収型）の最終処分量が最も多く、次いでB2, A1, A2シナリオの順になるが、今回の設定条件では、総ごみ排出量に対して、その他プラ、その他紙の排出量が相対的に少ないため、シナリオ間の差は極めて小さい。

6. まとめ

本研究では、人口減少および低炭素社会への移行の中で、基本的な社会基盤であるごみ焼却施設を更新していくシナリオを構築し、広域化とエネルギー回収を評価する手法を開発し、兵庫県に適用した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) Bauシナリオ (A1) と広域化シナリオ (A2, B2) の比較より、広域化を進めた場合、収集にかかる費用 (人件費・燃料費・車両整備費・車両購入費) は、増大するものの、施設にかかる費用 (建設費・人件費・保全費) を低減できるため、20年間の総費用の増加率はBauシナリオの1.01~1.02倍と大差は見られなかった。また、発電による売電効果として売電価格を8円/kWhとして試算すると広域化シナリオの方が費用面でやや有利になることが判明した。
- 2) 一方、CO₂排出量の観点からは、その影響因子が可燃ごみ中のプラスチック類の燃焼にあることから、3Rシナリオにより、その他プラ類を分別収集することにより減少させるというメリットが見られた。しかし、ごみ発電によるグリーン電力をCO₂の削減効果として計上した場合、その他プラ類の分別収集よりも広域化を図り、発電した方が、その削減効果が大きくなるという結果を得た。
- 3) 施設更新時に高効率発電を導入することにより、1.5~2倍近い発電量を生み出すことが可能であることを示した。特に広域化シナリオにおいては、現状の2倍近い発電量が得られ、地域エネルギー供給施設として位置づけられるポテンシャルがあることから、エネルギー回収、拠点施設としてごみ焼却施設が都市未来の革新の対象として大きな可能性を有していることが示唆された。

また、モデル構築に関して、本研究で構築したごみ焼却施設の更新モデルには、高効率発電にその他プラスチック等を分別してマテリアルリサイクルしていくサブ代替案、水分の多い生ごみ等を分別して湿式資源回収方式を併用するサブ代替案、汚れたプラスチック等の分別の手間を考えて一括して熱エネルギーとして回収するサブ代替案の比較評価や、埋立地に投入されている破碎残渣、焼却残渣 (飛灰を含む) 等の流れに代案を設定して、トータルでの環境性能を比較評価するという境界領域を拡大して代替案を比較することはできていない。アセット・マネジメントに関しても、特定の施設を対象とした考察であり、施設規模やごみ量の減少割合の違いによる管理手法の比較までは至っていない。この点は今後、改良が必要な点である。

このような限界のある研究ではあるが、2030年までの一般廃棄物のうちの可燃分を中間処理に供する焼却炉

を更新する際に、より広域的単位で焼却して発電エネルギーとして回収することは、3R政策に抵触せず、むしろ低炭素社会の形成を促進する点で効果的であることが確認できた。

謝辞：調査に際し貴重なデータをいただいた関係者各位に深く御礼申し上げます。本研究は得られたデータを基に筆者らが独自に行ったものであり、兵庫県の取り組みとは無関係である。なお、本研究は平成23年度環境研究総合推進費補助金 (K2317, 研究代表者：盛岡 通) および平成24年度環境研究総合推進費 (E-1202, 研究代表者：北詰恵一) の助成を得て行った研究の一部であり、関西大学 先端科学技術推進機構 低炭素社会技術システム研究グループの活動の一環である。

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：廃棄物処理施設長寿命化計画作成の手引き (ごみ焼却施設編), 2010.
- 2) 盛岡通, 尾崎平, 北詰恵一, 山本司：ごみ焼却施設の設備・機器部材単位の施設保全勘定モデルの構築, 土木学会論文集 G (環境), Vol.67, No.6 (環境システム研究論文集 第39巻), pp.II-481-II-488, 2011.
- 3) YANG Cuifen, 田畑智博, 井原智彦, 玄地裕：ライフサイクル及びごみ排出・処理状況を考慮したごみ処理広域化システムの設計, 環境システム研究論文集, Vol.37, pp.357-367, 2009.
- 4) 田畑智博, 井原智彦, 中澤廣, 玄地裕：一般廃棄物処理システムの設計における評価と意思決定の支援を志向した LCA 手法の適用, 日本 LCA 学会誌, Vol.5, No.1, pp.54-67, 2009.
- 5) 田畑智博, 井村秀文, Moon DaMi：ライフサイクルの視点を考慮した一般廃棄物処理事業の事業評価に関する検討, 土木計画学研究・講演集, Vol.35, ROMBUNNO.257, 2007.
- 6) IPCC Working Group III: Special Report Emissions Scenarios, 2000.
- 7) Greater London Authority: The London climate change adaptation strategy, 2008.
- 8) 松藤敏彦：都市ごみ処理システムの分析・計画・評価—マテリアルフロー・LCA 強化プログラム—, 技報堂出版, 2005.
- 9) 高久慎太郎, 山本祐吾, 東海明宏, 吉田登, 盛岡通：地域で発生する厨芥類・下水汚泥を対象とした循環利用システムの導入効果の評価, 環境システム, Vol.38, pp.21-428, 2010.
- 10) 松藤敏彦, 田中信寿：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, No.678/VII-19, pp.49-60, 2001.
- 11) 環境省：廃棄物処理技術情報, http://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/ippan/index.html
- 12) (公社)廃棄物・3R研究財団：ごみ焼却施設台帳 全連続燃焼方式編 平成21年度版(CD-ROM), 2011.
- 13) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部廃棄物対

策課：高効率ごみ発電施設整備マニュアル,平成 22 年 3 月改訂版, 2010.

- 14) 兵庫県：兵庫県将来推計人口について,兵庫県企画
県民部, 2008.

(2012.8.9 受付)

DEVELOPMENT OF SIMULATION MODEL TO EVALUATE ENERGY RECOVERY AND TREATMENT PERFORMANCE OF RENOVATED INCINERATION PLANTS IN REGION-WIDE SOLID WASTE MANAGEMENT

Tsukasa YAMAMOTO, Tohru MORIOKA, Taira OZAKI and Keiichi KITAZUME

A simulation model to account for the total cost, the total CO₂ emission, the energy recovery in terms of electricity, the recycling rate and final disposal amount, is developed for evaluating incineration plants renovation programs and region wide solid waste management. The authors applied the model to the pilot study in Hyogo prefecture and estimate the performances of those indicators in the period of 2010 - 2030. The total cost in the region-wide solid waste management (RWM) scenario shows little difference from that in the business as usual (Bau) scenario, in spite of increasing garbage collection/transpot distance in the RWM scenario, because of falling off in the construction-and-operation cost of enlarged highly-efficient incineration plants. Furthermore, the total amount of CO₂ emission in the RWM scenario is less than in the Bau scenario, when considering the reduction effect of embodied CO₂ volume or social cost equivalent to the energy recovery by boiler and power-generating system. Especially, the amount of electricity production in the RWM scenario is almost twice of the amount in the Bau scenario. This simulated performance indicates that the incineration plants are to serve as energy supply facilities in the region-wide area.