

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

楊 翠芬¹・田畑 智博²・井原 智彦³・玄地 裕⁴

¹非会員 研究員 産業技術総合研究所（〒305-8569 つくば市小野川16-1）

E-mail:yang.cuifen@aist.go.jp

²正会員 研究員 産業技術総合研究所（〒305-8569 つくば市小野川16-1）

³非会員 研究員 産業技術総合研究所（〒305-8569 つくば市小野川16-1）

⁴非会員 主任研究員 産業技術総合研究所（〒305-8569 つくば市小野川16-1）

環境負荷、コストの少ないごみ処理システムを提案するためには、千葉県南房総地域におけるごみ処理システムを事例に、LCA手法を用いてGHG排出量、コスト、埋立処分量を検討した。また、中規模の焼却施設への集約、大規模ガス化溶融施設の導入などのシナリオを設定し、GHG排出量、コストが最小となるごみ処理広域化システム案の検討を行った。さらに、CO₂削減コスト、最終処分場の社会コストを経済コストとして内部化し、各シナリオの経済コストとの合計コストを試算した。その結果、流動床式ガス化溶融施設を導入するというごみ処理システムは、合計コストが少なく、望ましいごみ処理広域化システム案になると提案された。

Key Words : *life cycle assessment (LCA) , greenhouse gas (GHG) , final disposal, total cost, waste treatment system*

1. はじめに

循環型廃棄物処理システムの構築が望まれている現在、自治体は、ごみの排出抑制、収集運搬及び処理・処分に関する計画を定めるとともに、大規模処理施設の整備に努め、環境への負荷低減、埋立処分量の低減、コストの削減できるごみ処理システムを設計するための検討を行っている。

一方、厚生省は、リサイクルの推進及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。この通知に沿って、各自治体が市町村の範囲を越えた広域的な処理を推進し、資源・エネルギー回収の効率化向上のための広域化計画の策定を目指している。

しかしながら、広域化計画を策定するにあたって、①広域ブロック区割りに向けて行政の合意と住民の合意の形成、②施設の更新時期が異なり、広域化予定施設の整備年度の調整や統廃合の困難、③広域化施設の立地場所及びごみ輸送範囲の設定、④自治体（広域組合）におけるごみ処理システムへの環境影響、コストの算定の不十分、などの問題点が挙げられている。広域化の取組状況から見れば、現段階では、ほとんどの自治体では広域化検討委員会が設置されていた。広域

化の内容については、ブロック区割り、ダイオキシン類の削減、ごみの減量化などの検討を行っているが、多くの自治体では、都市規模によるブロック区割りの段階にとどまる。

ごみ処理広域化に関する研究が数多く報告されてきた。一般的なモデルを用いたごみ処理の広域化の評価に関わる研究は多いが¹⁾²⁾、これらはいずれも輸送段階、処理段階に重点を置いて評価したものである。ごみ処理システムを設計する際には、ライフサイクル視点からごみの発生、収集・輸送段階、処理段階、最終処分及び資源利用の各段階を検討する必要があると考えられる。また、ほとんどの既存研究は、仮想都市を対象としたシナリオ比較が主体であるため、対象地域の地域属性を反映した評価・適正化案の提示が難しい。具体的な対象地域におけるごみ発生分布、処理施設の規模・立地などを考慮した広域化の検討としては、限定的であるが、佐々木ら³⁾は一般廃棄物処理広域化の評価モデルを用いた環境・コスト両面検討している。荒井ら⁴⁾の整数計画法による広域化の最適化、田畑ら⁵⁾の遺伝的アルゴリズムを用いた適正配置の研究なども実施されている。しかしながら、ある地域を対象とし、ごみ発生量、ごみ処理・処分施設の構成・規模、道路距離など地域属性を考慮し、地域の広域化処理計画への

検討はあまり行われていない。

このような背景から、本研究では、ライフサイクル視点からごみ発生量・分布や処理施設分布・処理状況、輸送条件などの地域属性を考慮し、環境負荷の低減、コストの削減できるごみ処理広域化システム案を提案することを目的とする。まず、千葉県南房総地域におけるごみ処理システムを環境面、経済面から評価する。次いで、小規模分散処理施設から中規模集約処理施設への転換、及び大規模ガス化溶融施設の導入などのシナリオを設定し、環境負荷排出量、コストが最小となる場合の環境負荷排出量、コスト、埋立処分量、処理施設の立地場所、ごみ・処理残さの輸送経路などを算出する。最後に、環境負荷削減コスト、最終処分場の社会コストなどの外部コストと経済コストとの合計コストを通じて、望ましいごみ処理広域化システム案について検討する。今後のこの地域のごみ処理広域化計画を検討する際に材料を提供する。

2. 対象地域

本研究では、ごみ処理システムの評価対象地域として千葉県の南房総地域を選定した。千葉県は平成11年3月に、サーマルリサイクルの推進、ごみ処理に伴うダイオキシン類の発生防止、ごみ処理コストの削減を図るとともに、焼却灰などの有効利用による最終処分場に依存しないごみ処理システムを構築することを目的

に、「千葉県ごみ処理広域化計画」を策定した。この計画では、南房総地域は、二つのブロックに分けられており、広域化施設の種類・規模・立地場所、ごみ輸送計画、処理計画などの検討が進んでいる。しかしながら、既に市町村合併の進歩に伴う広域化計画とグルーピングの齟齬の存在や、ごみ処理事業に係る財政力の不足などから、新たなごみ処理広域化計画の検討を進めることが行政課題となっている。また、ごみ処理施設の老朽化、最終処分場の逼迫、エネルギー回収効率の低下などの問題を解決するためには、ごみ処理施設の統廃合、施設更新への対応が求められる。

南房総地域は、2005年において人口が約23万人で、3市13町1村より構成される。2005年度排出されるごみは約10万tで、そのうち、一般系ごみが全体の約7割を占めている⁶⁾。現在各自治体の責任において適正処理が行われており、約79%が直接焼却、7%が直接資源化、5%が埋立処分されている。

図-1に南房総地域における焼却施設、粗大ごみ処理施設の立地場所及び焼却処理範囲（同じ網掛けは焼却処理の範囲を示す）を示す。表-1に処理施設の保有状況及び処理状況を示す（下線付きの市町村については、施設が建てられている市町村を示す）。2005年度3月末現在においては、焼却施設の9施設、粗大ごみ処理施設の2施設、最終処分場の6施設が稼働している。A市、B市、C市、Q町、P町は単独で焼却処理を行っている。一方、G町とF町、M町、N町とO町、I町、J町、K町とL村、D町、E町とH町は、清掃事業組合を形成して焼却処理を

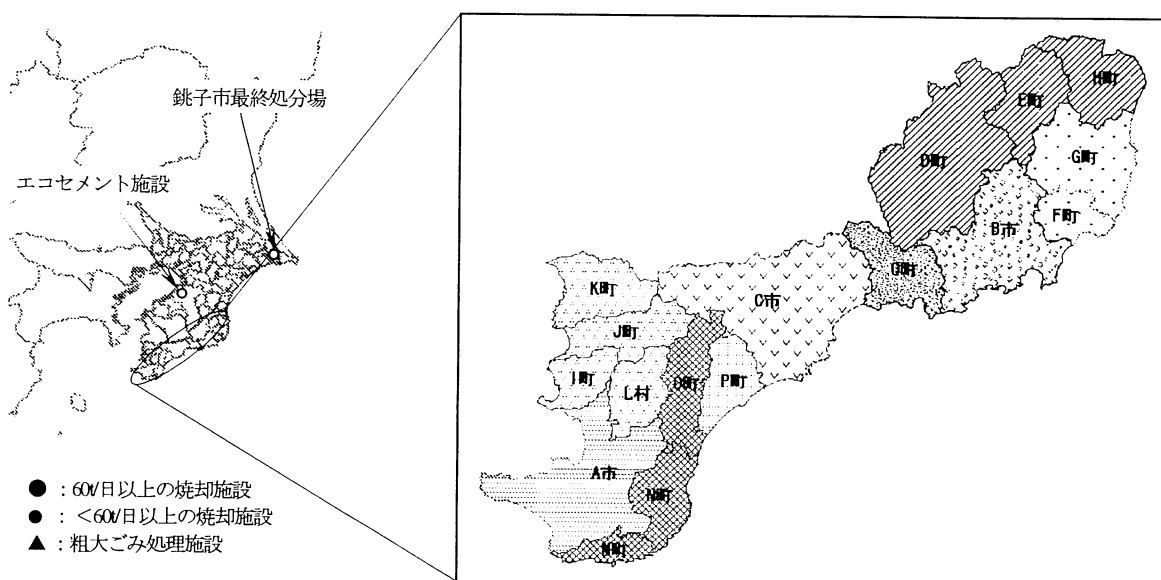


表-1 中間処理施設及び最終処分場の概況

	中間処理施設種類 (方式_処理能力)	処理範囲(市町村)	稼働年度 (年)	年間処理量 (t)	焼却灰のエコ セメント(t)
焼却処理	ストーカ式准連 100t/d	A市	1984	20,370	3,131
	流動床式准連 35t/d	B市	1985	8,220	
	流動床式准連 69t/d	C市	1986	11,404	842
	ストーカ式准連 32.5t/d	G町,F町	1984	9,244	
	ストーカ式准連 60t/d	M町,N町,O町	1983	8,286	779
	ストーカ式バッチ 20t/d	Q町	1978	3,231	
	ストーカ式准連 80t/d	I町,J町,K町,L村	1983	8,042	1,248
	ストーカ式バッチ 16t/d	P町	1980	1,362	
	ストーカ式バッチ 32t/d	D町,E町,H町	1994	7,928	
粗大ごみ処理	破碎・圧縮 50t/d	A市,C市,I町,J町,K町,L村,M町,N町,O町,P町,Q町	1985	2,118	-
	破碎・圧縮 10t/d	B市,D町,E町,F町,G町,H町	1984	92	-
	最終処分場施設	処理範囲(市町村)	稼働年度 (年)	埋立実績 (m ³ /年)	埋立完了予定 (年)
最終処分場	館山市一般廃棄物最終処分場	A市	1985	952	2005
	天津小湊一般廃棄物最終処分場	Q町,B市	1998	408	2011
	大原町一般廃棄物最終処分場	D町,E町,H町,F町,G町	1983	266	2005
	千倉町一般廃棄物最終処分場	M町,N町,O町	1998	1,193	2012
	青木山一般廃棄物最終処分場	I町,J町,K町,L村	2000	849	2015
	和田町一般廃棄物最終処分場	P町,C市	1998	543	2012

行っている。焼却施設の処理能力は16-100t/日で、小規模、准連続・バッチ式の焼却施設が多い。また、粗大ごみについては、二つの広域市町村圏組合で処理を行っている。焼却施設から排出される焼却灰は、地域内の最終処分場で埋立処分されているほか、市原エコセメント施設でセメントの原料として利用されたり、銚子市最終処分場で埋立処分されたりしている。焼却処理施設の更新時期の逼迫に伴い、今後は中規模施設への集約、大規模施設の導入による施設数が減少することが見込まれる。

3. 方法

(1) 解析方法と最適化ツール

環境負荷、コストの少ないごみ処理広域化システム案（以下、代替システム案）を検討するためには、現状のごみ処理システムと代替システム案の環境負荷排出量及びコストを比較することが必要である。また、地域におけるごみ処理システムを検討するには、目的に応じた処理技術の選択、施設立地場所の選定及びごみ、処理残さの輸送経路の選定が必要である。本研究では、志水ら⁷⁾の研究を参考に、代替システム案の検討を行った。

システム検討では、対象地域を設定し、現状のごみ処理システムと代替システム案を検討するために、ごみ処理システムの評価モデルを整理し、複数のシナリ

オを作成した。対象地域のごみ発生量、道路距離データは地域属性データとして量と分布情報を持ったデータを整理し、地域の特徴をシナリオ検討に反映させた。また、最適化計算を用いた解析を行うことで、目的に応じた処理技術の選択、施設立地場所の選定及びごみ、処理残さの輸送経路の選定を行った。最適化計算には、線形計画法、整数計画法、混合整数計画法を用いた計算から技術選択や輸送経路選択、施設配置問題の解析が可能な解析ソフト⁸⁾（以下、RCACAO）を用いた。RCACAOは、各種制約条件下で目的に応じた最適化計算を行うことができる。すなわち、ごみ処理システムの評価モデルと対象地域の地域環境データを整備することで、地域的な制約条件を考慮しながら環境負荷排出量やコストの最小化などを目的としたごみ処理施設の設定場所・設置数、ごみ・処理残さの輸送経路、ごみ処理システムの環境負荷排出量及びコストを把握することができる。これによって、環境負荷、コストの少ないごみ処理システムの具体的な代替システム案を検討できると考えた。

(2) シナリオの設定

ごみ処理の対策は、発生・排出抑制、再利用・再活用、熱回収、適正処分を取組の優先順位として、環境への負荷低減に配慮しつつ、資源循環型社会の構築を目指し推進している。この対策及び南房総地域におけるごみ処理現状を踏まえ、小規模・更新時期が迫る焼却施設を閉鎖させ、中規模の焼却処理施

設への集約、及び大規模ガス化溶融施設の導入のシナリオを考えた。また、最終処分場の不足の緩和のため、焼却灰のセメント原料の有効利用を視野に入れて、表-2のように4つのシナリオを作成した。またシナリオ1、シナリオ2、シナリオ3に対して、それぞれコストを最小化した場合（図表ではシナリオ1_minCost、シナリオ2_minCost、シナリオ3_minCostとする）、とGHG排出量を最小化した場合（図表ではシナリオ1_minGHG、シナリオ2_minGHG、シナリオ3_minGHGとする）の解析を行う。設定したシナリオを組合せて、計7案による評価を行う。

現状のごみ処理（以下、シナリオ0）では、アンケート調査から把握したごみ・残さの処理量、輸送ルート、処理施設の立地場所・処理量、処理範囲を既存のごみ処理現状を反映させて設定した。

シナリオ1では、ごみ焼却施設型式、処理能力、使用年数を考慮し、バッチ式焼却施設の3施設の中には使用年数が30年以上を超えるQ町とP町の焼却施設を閉鎖すると設定した。焼却施設が閉鎖されるQ町、P町で排出されるごみは、ほかの7焼却施設でほかの市町村と共同処理されるとした。この場合、7施設の焼却施設の処理能力では南房総地域の全ての可燃ごみの処理に対応できると確認した。また、焼却灰の処分・利用方法は現状処理と同様に、地域内の最終処分場、銚子市最終処分場、市原エコセメント施設を利用すると設定した。ただし、現状のごみ処理システムと比較するためには、シナリオ1では、焼却灰のセメント原料の利用量、及び銚子市最終処分場への輸送量の上限がないと設定した。市原エコセメント施設では年間約62万tの焼却灰、28万tの産業廃棄物が処理できる。H15年度では千葉県内から約6万tの焼却灰を受け入れ、これを主原料として約8万tのエコセメントを製造し、ブロックなどのコンクリート製品として道路や工事に使用されている。一方、H15年度南房総地域では約1万tの焼却灰が排出され、そのうち約6千tがエコセメント施設で再利用されている。エコセメント施設の処理能力及び対象地域の

焼却灰の排出量からみれば、焼却灰のセメント原料の利用量の上限がないという設定が適切だと考える。

シナリオ2、シナリオ3では大規模ガス化溶融施設を導入すると設定した。千葉県で稼働しているシャフト式直接溶融施設と流動床式ガス化溶融施設へのアンケート調査データしか入手していないため、本研究では、シャフト式直接溶融施設と流動床式ガス化溶融施設を導入するとした。また、粗大ごみ処理施設及び最終処分場は現状と同様であると設定した。粗大ごみ施設で発生する不燃残さ、可燃残さはガス化溶融施設で処理されるとした。南房総地域でのごみ発生量を考慮し、現状の焼却施設をすべて閉鎖し、シナリオ2は250t/日のシャフト式ガス化溶融施設（稼働日数330日/年）、シナリオ3は250t/日の流動床式ガス化溶融施設（稼働日数330日/年）を導入すると設定した。また、ガス化溶融施設から排出される溶融スラグは南房総地域内で路盤材として利用し、溶融飛灰のセメント原料の利用量の上限がないと設定した。

以上の各シナリオの制約条件をモデルに与え、コストの最小化、環境負荷排出量の最小化を目的関数とする解析を行うことにより、各シナリオの環境負荷排出量、コスト、埋立処分量及びごみ・処理残さの輸送経路が求められる。

(3) 評価対象・評価範囲

ライフサイクル視点からごみ処理システムを評価する際、処理段階だけではなく、ごみ収集・輸送から中間処理、埋立処分（資源利用）までの各段階を考慮する。図-2に各シナリオのごみ処理に関わるプロセスを取り上げ、評価範囲（点線内）を設定した。対象とするごみは、可燃ごみ、粗大ごみ、不燃ごみである。リサイクル業者による再資源化プロセスは、今回のアンケート調査では把握が困難であったため、資源ごみが評価対象外とした。対象とするプロセスは、輸送（ごみ、処理残さ）、中間処理（焼却・溶融処理、粗大ごみ処理）、最終処分及び資源利用である。また、

表-2 シナリオの設定

シナリオ	可燃ごみ			粗大ごみ 処理施設	処理残さ 最終 処分場	目的関数
	焼却(溶融)施設	発電の有無	焼却残さの処理利用			
シナリオ0 (現状)	9施設	無	・地域内の最終処分場 ・銚子市最終処分場 ・セメント原料	2施設	6施設	
シナリオ1 (集約)	7施設	無	・地域内の最終処分場 ・銚子市最終処分場 ・セメント原料			①コスト最小化
シナリオ2 シャフト式直接溶融	1施設	有		2施設	6施設	②GHG最小化
シナリオ3 流動床式ガス化溶融	1施設	有				

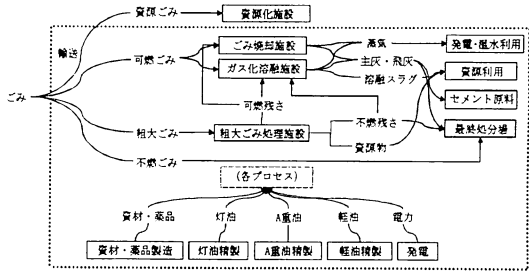


図-2 評価範囲

評価では、各プロセスの運用段階だけではなく、収集・輸送車両の製造段階、施設の導入段階、消費される電力や燃料、資材・薬剤の製造段階も考慮した。ただし、本研究では、南房総地域内のごみ処理システム案を検討することを目的とするため、南房総地域外の市原エコセメント施設及び銚子市最終処分場の導入段階が考慮されていない。

(4) 評価項目

環境負荷項目としては、地球温暖化影響に係る温室効果ガス（以下、GHG）のCO₂、CH₄、N₂O、及び埋立処分量を考慮した。また、これらのGHGについて温暖化ポテンシャル係数（GWP100）を用いた特性化評価を行った。ただし、廃棄物由来CO₂と化石燃料由来CO₂をしないものとした。コストは、輸送車両購入費・施設別物質として取り扱い、廃棄物由来CO₂は温暖化に影響建設費、維持補修費、処理費、輸送費、人件費を対象とする。廃棄物処理施設を建設する際に、「補償費・迷惑料」の支払いが必要であるが、これらのデータの入手が困難であるため、本研究では計上されていない。

4. 使用データ

解析で必要とされるデータは、主にプロセスに関するインベントリ・コストデータと、ごみ発生量・分布、処理施設の処理量・立地場所、輸送距離などの地域属性データに分けられる。本研究では、2007年1月-6月に実施した千葉県のごみ収集・輸送状況、稼働している中間処理施設、最終処分場へのアンケート調査結果（対象年度2005年）をもとに、単位処理量（1t-ごみ）あたりのエネルギー、資材・薬品、産出物、環境負荷物質の入出力データ及びコストデータを整備した。

(1) プロセスインベントリ・コストデータ

a) 輸送

アンケート調査結果からごみ・処理残さの輸送車種・車両台数、年間輸送距離、輸送費、人件費を把握した。輸送車両の製造時の環境負荷排出量は、車両購入費から求めた減価償却費（定額法、耐用年数7年）に、環境負荷排出原単位⁹⁾を乗じて算出した。車両購入費は商業用トラック製造会社のカタログ値を参考とした。輸送車両走行時の環境負荷排出量は、輸送車両の台数、輸送距離、環境負荷排出原単位¹⁰⁾を用いて算出した。

b) 中間処理・埋立処分

アンケート調査より中間処理施設、最終処分場に関

わる建設費、用役費、人件費、及び電力、燃料、資材、薬品などの使用量を把握した。施設建設費から求めた減価償却費（定額法、耐用年数20年）を単年度あたりの固定費とした。また、人件費、用役費、及び整備修繕費（減価償却費の10%と仮定）の合計値を運用費とした。

減価償却費、整備修繕費にそれぞれの環境負荷原単位⁹⁾を乗じて整理し、施設の処理規模で除して施設導入段階の環境負荷排出量を算出した。処理段階のデータについては、施設へのアンケート調査から得られた単位処理量あたりエネルギー・資材・薬品などの消費量に、環境負荷原単位¹⁰⁾を乗じて処理段階の環境負荷量を算出した。

南房総地域ではシャフト式直接溶融施設、流動床式ガス化溶融施設などのガス化溶融施設が設置されていないため、千葉県で稼働している直接溶融施設及び流動床式溶融施設へのアンケート調査結果を用いて、インベントリ・コストデータを作成した。算出方法は上述の焼却施設と同様である。また、焼却施設と同様に、対象地域における粗大ごみ処理施設、最終処分場へのアンケート調査結果を用いてインベントリ・コストデータを整備した。

c) 資源利用

焼却施設からの焼却灰の排出量、セメント原料への利用量、溶融スラグの排出量などをアンケート調査結果より把握した。エコセメント施設まで灰はタンブ車、飛灰はジェットバック車で輸送されると設定した。輸送車両製造時の環境負荷排出量の算出はごみ収集車両と同様である。輸送時の環境負荷排出量は、焼却施設からエコセメント施設までの輸送距離、セメント原料の利用量、車両台数、環境負荷排出原単位¹⁰⁾を用いて算出した。また、セメント原料利用によって代替される主原料である石灰石製造時の環境負荷量の削減分⁹⁾を計上した。1tのセメントを製造する際に石灰石1.1t、粘土0.2t、珪石0.07t、鉄原料0.03tを使用する¹¹⁾。また1tのエコセメントを製造する際に焼却灰0.6t、石灰石0.8t、その他鉄原料等の調整原料微量が必要となる¹¹⁾。焼却灰を利用することにより、石灰石、粘土と珪石が削減されるが、粘土、珪石の環境負荷削減原単位の入手が困難であるため、本研究では石灰石の代替分のみ考慮し、焼却灰1kgは石灰石1kgを代替するとした。エコセメント施設への処理委託費、輸送費については、焼却灰の種類ごとに単価が異なるが、各焼却施設の実績値を使用している。

ガス化溶融施設から排出される溶融スラグの有効利用率は100%とし、溶融スラグの利用によって路盤材の製造時の環境負荷量の削減分⁹⁾を計上した。ただし、有

価物としての販売収入は僅少であるため計上されていない。また、ガス化溶融施設での発電量に電力生産時の環境負荷削減原単位⁹⁾を乗じて環境負荷量の削減分を算出した。売電収益については施設の実績値を用いた。ガス化溶融施設から排出される金属の回収量、販売収益データが入手できないため、本研究で考慮されていない。

(2) 地域属性データ

地域的なごみ処理システムを検討するためには、対象地域のごみ発生量・分布、処理施設の位置・処理量、処理残さの処分・利用先などを考慮する必要がある。また、ごみの発生場所とごみ処理施設、最終処分場などを結ぶ輸送活動が必要となり、輸送距離を整理する必要がある。そこで、対象地域の地域属性データとしては、ごみの発生量、処理・処分・資源利用施設の位置・処理量、市町村間の道路距離、市町村と処理施設の距離などを GIS (Geographic Information System : 地理情報システム) を用いて整備した。

ごみ発生量、中間処理施設・最終処分場・エコセメント施設の位置、処理量をアンケート調査結果より把握し、GIS上に整備した。また、千葉県デジタル道路データ¹²⁾を用いて市町村代表点間の最短道路距離を市町村間の輸送距離として算出した。なお、市役所もしくは町役場を代表点とした。各市町村内の輸送距離は、三次メッシュ重心から役場までの加重平均距離と設定した。また、市町村代表点から中間処理施設・最終処分場まで、中間処理施設から最終処分場・エコセメント施設までの道路距離を算出した。

5. 結果及び考察

(1) シナリオ別の施設の立地場所

図-3 に、コスト及び GHG 排出量を最小とする場合の各シナリオのごみ処理施設の立地場所、ごみ処理広域圏、焼却灰の輸送経路を示す (同じ網掛けは焼却処理範囲を示す)。

シナリオ 1_minCost では、Q 町と C 市、P 町と M 町、N 町、O 町と共同処理するという結果が得られた。また、A 市、C 市、N 町、J 町の焼却施設から排出される焼却灰はセメント原料として利用され、B 市、E 町、F 町の焼却施設から排出される焼却灰は銚子市最終処分場で埋立処分される結果になった。それに対して、シナリオ 1_minGHG では、Q 町と C 市、P 町と A 市と共同処理し、各焼却施設から排出される焼却灰の全量をセメント原料として利用する結果が得られた。シナリ

オ 2 では処理能力 250t/日のシャフト式直接溶融施設、シナリオ 3 では処理能力 250t/日流動床式ガス化溶融施設を導入するような設定で、対象地域に 1 基を導入して集約処理するという解が得られた。シナリオ 2_minCost では南房総地域の中心地に相当する Q 町にシャフト式直接溶融施設を導入し、各市町村から排出されるごみを Q 町の施設で処理する結果になった。シナリオ 2_minGHG では A 市に導入するという結果が得られた。シナリオ 3_minCost では、ガス化溶融施設の立地場所は P 町になり、各市町村から排出されるごみを P 町の施設で処理する結果になった。これに対して、シナリオ 3_minGHG では施設の立地場所は A 市であった。シナリオ 2、シナリオ 3 ともにコスト最小化の場合は溶融飛灰を地域内の最終処分場で埋立処分し、GHG 最小化の場合は溶融飛灰をセメント原料として利用するという結果になった。粗大ごみ処理施設からの処理残さがガス化溶融施設で処理できることにより、地域内の最終処分場では溶融飛灰のみ埋立処分し、地域内の最終処分場の埋立容量が余剰するため、銚子市最終処分場を利用しない結果になった。

(2) シナリオ別の埋立処分量

表-3 に各シナリオから排出される焼却灰の埋立処分量、セメント原料の利用量などを示す。

シナリオ 1_minCost では、焼却施設焼却施設から排出された焼却灰約 9,679t で、そのうち 6,673t はセメント原料として利用され、残りの 3,006t の焼却灰と粗大ごみ処理施設からの 4,432t の不燃残さは、地域内での最終処分場と地域外の銚子市最終処分場で埋立処分される結果が得られた。シナリオ 1_minGHG では、焼却処理施設から約 9,728t の焼却灰が排出され、すべてセメント原料として利用される結果になった。各焼却施設の焼却灰の排出率が異なるため、コストを最小とする場合では、焼却灰の排出量の少ない施設が選択され、GHG 排出量を最小とする場合では、焼却灰の排出量の多い施設が選択された。シナリオ 1_minCost では焼却灰が最終処分場で埋立処分されたのに対して、シナリオ 1_minGHG では、焼却灰の全量をセメント原料として利用するという結果になった。また、シナリオ 0 に比べ、埋立処分量は、シナリオ 1_minCost では 11%、シナリオ 1_minGHG では 47%減少した。

シナリオ 2 のシャフト式直接溶融の場合では、コークス、石灰石を使用するため、溶融スラグ排出率 (約 11%) が高く¹³⁾、約 9,030t の溶融スラグと 2,460t の溶融飛灰が排出される結果となった。シナリオ 2_minCost では、発生した溶融飛灰が地域内での最終処分場で埋立処分され、シナリオ 2_minGHG では、溶融飛灰がセメ

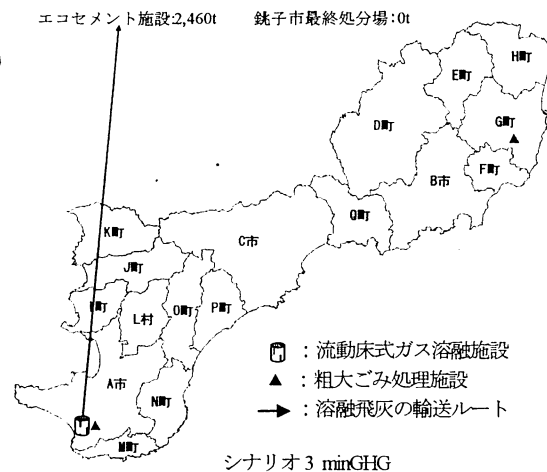
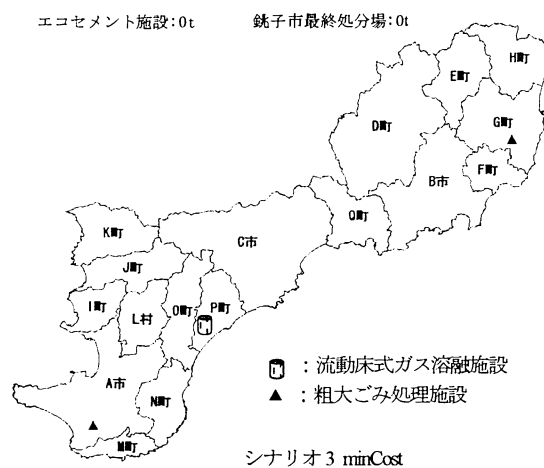
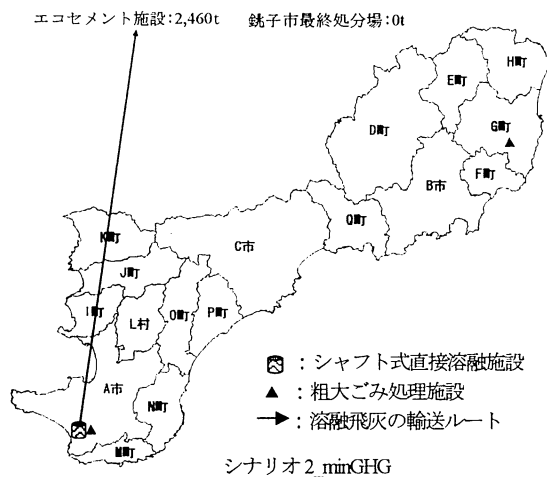
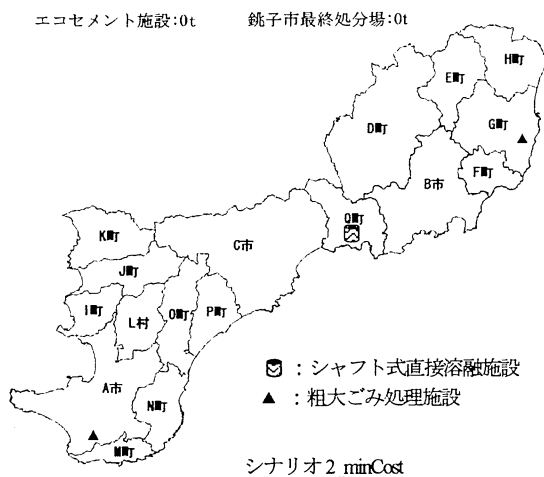
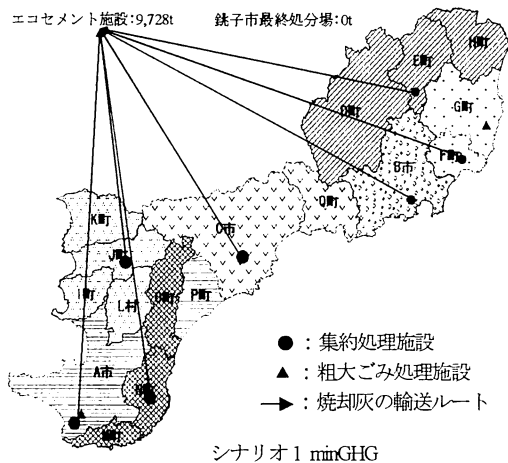
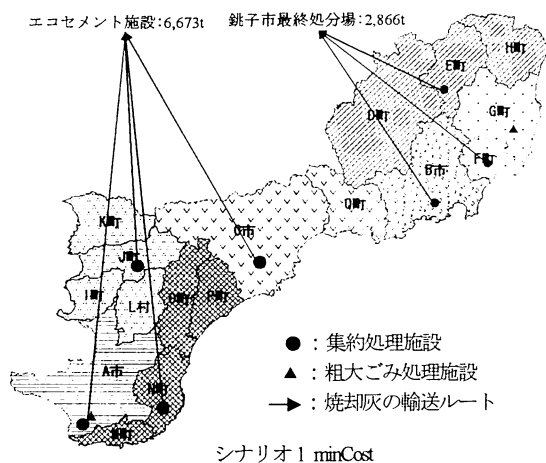


図3 シナリオ別の処理施設の立地場所

表-3 シナリオ別の残さ・埋立量

項目(単位)	シナリオ0	シナリオ1_minCost	シナリオ1_minGHG	シナリオ2_minCost	シナリオ2_minGHG	シナリオ3_minCost	シナリオ3_minGHG
ごみ処理量(1)	77,650	77,650	77,650	82,082	82,082	82,082	82,082
焼却灰発生量(2)=(3)+(4)	9,924	9,679	9,728	2,462	2,462	2,462	2,462
主灰発生量(3)	9,635	9,369	9,439	0	0	0	0
飛灰発生量(4)	289	310	289	2,462	2,462	2,462	2,462
粗大・不燃ごみ処理量(5)=(6)+(7)	5,276	5,276	5,276	5,276	5,276	5,276	5,276
不燃残さ発生量(6)	4,432	4,432	4,432	4,432	4,432	4,432	4,432
可燃残さ発生量(7)	844	844	844	844	844	844	844
セメント原料利用量(8)	6,000	6,673	9,728	0	2,462	0	2,462
溶融スラグ発生量(9)	0	0	0	9,029	9,029	3,283	3,283
地域内の埋立量(10)	3,594	3,594	3,455	2,462	0	2,462	0
地域外の埋立量(11)	4,761	3,844	977	0	0	0	0
総埋立量(12)=(10)+(11)	8,355	7,438	4,432	2,462	0	2,462	0

ント原料に利用されると結果になった。シナリオ0に比し、シナリオ2_minCostでは埋立処分量は70%減少した。また、シナリオ2_minGHGでは溶融飛灰の全量をセメント原料に利用し、埋立処分量はゼロになった。

シナリオ3の流動床式ガス化溶融では、コークス、石灰石などの副資材を使用しないため、シナリオ2のシャフト式直接溶融より溶融スラグ発生率(約4%)が低く¹³⁾、約3,280tの溶融スラグ、約2,460tの溶融飛灰が排出された。また、シナリオ0に比べ、埋立処分量はシナリオ3_minCosでは70%減少し、シナリオ3_minGHGではゼロであった。

以上のように、コスト最小化場合は、焼却灰(溶融飛灰)を埋立処分する結果であったのに対して、GHG最小化の場合は、焼却灰(溶融飛灰)をセメント原料に利用する結果になった。これは、エコセメント施設への焼却灰(溶融飛灰)の処理費が埋立処分費より高く、また、焼却灰(溶融飛灰)のセメント原料利用によるGHG削減効果が大きいことが原因だと考えられる。

(3) シナリオ別のコスト

図-4に各シナリオのコストを収集輸送、中間処理、残さ輸送、埋立処分及び資源利用に分けて示す。

シナリオ1では、可燃ごみを7ヶ所の焼却施設で集約処理すると設定したため、施設固定費が7%減少すると推計された。また、集約処理によって可燃ごみ輸送にかかる費用が増加した。しかしながら、焼却灰のセメント原料への利用量の増加により銚子市最終処分場への輸送量が減少するため、処理残さの輸送費が大幅に低減し、総輸送費が減少する結果になった。シナリオ2では施設固定費が13%減少した。また、1ヶ所の溶融施設で集約処理するため、可燃ごみの輸送費がシナリオ0

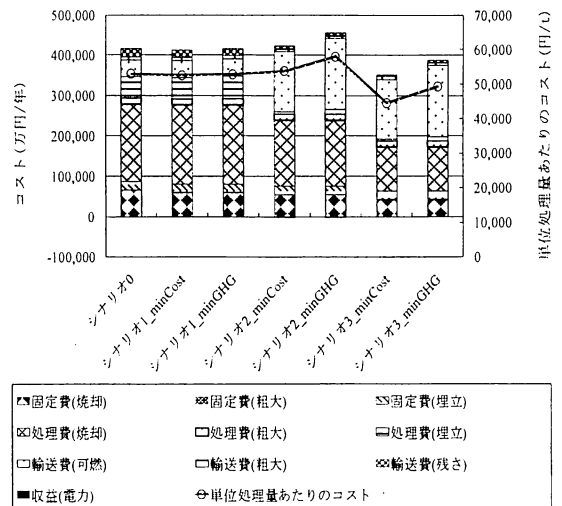


図-4 シナリオ別のコスト

より260-330%増大する結果になった。シナリオ3では施設固定費が27%減少した。可燃ごみの輸送費が259-330%増加した。また、処理効率化向上のため、処理費はシナリオ2では27-29%、シナリオ3では48-50%減少する結果になった。

コストから見ると、シナリオ0と比べ、シナリオ1の集約焼却処理の場合では約79,298万円、シナリオ3の流動床ガス化溶融の場合では約64,882-27,518万円減少した。シナリオ2のシャフト直接溶融の場合では約6,407-39,663万円増加した。プロセス別で見ると、焼却・溶融の処理段階はシナリオ間の平均で約40%と高い割合を占めている。シナリオ0に比し、各シナリオとも、ごみが焼却・溶融施設に集約処理されたため、可燃ごみ輸送にかかる費用が増大する結果になった。特に、シナリオ2とシナリオ3では1ヶ所のガス化溶融施設に集約処理するため、可燃ごみの輸送費が割高であった。

(4) シナリオ別のGHG排出量

図-5にシナリオ別のGHG排出量を施設導入段階、運用段階、輸送段階、削減分に分けて示す。図-5に示すように、各シナリオとも、焼却・溶融の処理段階でのGHG排出量は全体の56%-87%を占めている。

シナリオ0に比べ、シナリオ1では小規模・バッチ式施設を閉鎖させ、可燃ごみは7ヶ所の焼却施設に集約処理されると設定したため、施設導入段階でのGHG排出量が約9.8%減少した。また、シナリオ2とシナリオ3では、施設導入段階でのGHG排出量がそれぞれ約30.4%、35.5%減少した。バッチ式の焼却施設では、起動

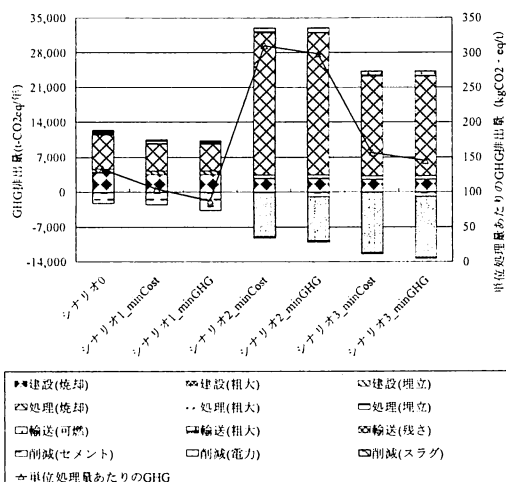


図-5 シナリオ別のGHG排出量

時に重油などの燃料が必要となり、燃料由来のCO₂排出量が大いいため、シナリオ1ではバッチ式施設の閉鎖により処理段階でのGHG排出量は減少した。シナリオ2のシャフト式直接溶融では、コークス、石灰石を使用するため、処理段階でのGHG排出量がシナリオ0より312%増加する結果になった。また、シナリオ3の流動床式ガス化溶融では、溶融用熱源供給のための電力・燃料使用量が大いいため、処理段階でのGHG排出量が大きく、シナリオ0より188%増加するという結果が得られた。

シナリオ2、シナリオ3では、1ヶ所のガス化溶融施設の集約に伴い、輸送段階からのGHG排出量はシナリオ0より122-160%増加する結果になった。また、シナリオ1の集約焼却では、焼却灰のセメント原料利用量が増えたため、セメント原料利用によるGHG削減効果が見られた。シナリオ2、シナリオ3では発電によるGHG削減量が見られた。シナリオ0に比べ、GHG排出量は、シナリオ1の集約焼却では約2,200-3,510t-CO₂eq減少したが、シナリオ2では約12,860-13,760t-CO₂eq、シナリオ3では約900-1,810t-CO₂eq増加した。

(5) 代替システム案の検討

以上のように、シナリオ0と比較し、シナリオ3_minCostではコストはもっとも低かった。しかしながら、GHG排出量はシナリオ1_minGHGではもっとも少なかった。また、埋立処分量から見れば、シナリオ2とシナリオ3の優位性が見られた。コスト、GHG排出量、埋立処分量の単位が異なり、どの代替システム案がよいのかという総合的な評価が困難である。そこで、ごみ処理システムが望ましいものか総合的に判断するた

めに、経済コスト（内部コスト）を網羅しつつ、環境コスト・便益（外部コスト）まで包括的に検討する必要がある。本研究では、GHGの環境影響及び埋立量の減少による処分場の延命効果などを貨幣化して外部コストとして算出し、内部コストに加えて合計コストで評価を行う。

GHG排出量に、GHG排出に伴う環境への影響を考えた外部コスト単価（以下、CO₂削減コスト）を乗じて環境コストを算出する。CO₂削減コストについては、分析方法によって219-53,212円/t-CO₂の文献値があるが¹⁴⁾、本研究では国立環境研究所の値を使用している¹⁵⁾。国立環境研によれば日本のCO₂排出をほぼ1990年の水準とするには、いろいろな省エネ技術やリサイクル技術を導入しなければならない。これらの技術を導入してCO₂排出量を削減し、1990年の目標を達成するためには、少なくとも3万円（二酸化炭素1tあたり）が必要となる。また、世界の9つの経済モデルにより、日本のCO₂削減コストは2010年時点でおおよそ100-500\$/t-CO₂の範囲にあると算定された¹⁵⁾。そこで、本研究ではCO₂削減コストを3万円/t-CO₂とした。

埋立処分に関わる外部コストについては、最終処分場の新規立地の社会コストと埋立量の減量による処分場の延命化の便益（マイナスコスト）の合計値を栗島らの研究結果¹⁶⁾を用いて算出する。各シナリオの埋立処分量に、最終処分場の新規立地の社会コスト単価を乗じて最終処分場の新規立地の社会コストを算出した。栗島らの研究¹⁶⁾によれば千葉市の最終処分場の新規立地の社会コスト単価が1,210円/t-ごみとなる。本研究では対象地域の最終処分場の新規立地の社会コスト単価は千葉市と同様であると設定し、この値を用いている。以下は埋立量の減少による最終処分場の延命化の便益の算出について述べる。まず、各シナリオの埋立量、南房総地域の最終処分場の平均残余容量（現状のごみ処理の実績値）、埋立ごみの容積（0.8163t/m³と設定）を用いて、各シナリオの最終処分場の平均残余年数を推計した。そして、シナリオ1-シナリオ3の最終処分場の平均残余年数と現状のごみ処理の残余年数の差をシナリオ1-シナリオ3の最終処分場の先延ばし年数として算出した。現状のごみ処理の0年の延命化の便益を0円とし、算出された先延ばし年数を用いて、最終処分場延命化の便益の計算式¹⁰⁾よりシナリオ1-シナリオ3の最終処分場の延命化の便益が求められた。ただし、極大となる便益の先延ばし年数が13年であるため¹⁰⁾、13年を超える場合の最終処分場の延命化の便益は13年の延命化の便益の31,000万円を使用している。

図-6に各シナリオの経済コスト（内部コスト）と外部コストの和である合計コストを示す。合計コストは

はシナリオ 1 とシナリオ 3 では減少したが、シナリオ 2 では増加した。シナリオ 0 に比べ、シナリオ 1_minCost では 7.7%、シナリオ 1_minGHG では 8%、シナリオ 3_minCost は 20.6%、シナリオ 3_minGHG は 12.8%減少した。シナリオ 2_minCost は 3.6%、シナリオ 2_minGHG は 10.4%増加した。経済コスト、GHG 排出量、埋立処分量の総合的な観点から見ればシナリオ 3 の流動床式ガス化溶融は価値がある処理システムといえる。

表 4 に各シナリオの経済コスト、GHG 排出量、埋立処分量、及び合計コストを示す。経済コストから見れば、シナリオ 1_minCost はシナリオ 1_minGHG より 2,900 万円減少した。しかしながら、GHG の環境影響及び最終処分場の社会コスト・延命効果などを考慮した合計コストから見ると、シナリオ 1_minCost はシナリオ 1_minGHG より 1,400 万円増加することが示された。経済コストだけではなく、環境負荷排出量、最終処分場などからごみ処理システムを評価することが重要であると考える。

以上の評価より、南房総地域のごみ処理システムから排出される GHG を低減するには、バッチ式焼却施設

を閉鎖させ、地域内で発生するごみを中規模の焼却処理施設で集約処理し、焼却灰をセメント原料として利用することが有効であると考えた。また、ガス化溶融施設は埋立処分量の低減策として期待できた。ただし、ガス化溶融施設の導入を検討する際、ガス化溶融施設の種類を検討する必要である。本研究の計算条件では、流動床式ガス化溶融施設がシャフト直接溶融施設より GHG 排出量が少なく、コストが安かった。CO₂削減コストや最終処分場の延命効果などから見れば、流動床式ガス化溶融施設を導入し、発生した溶融飛灰を地域内の最終処分場で埋立処分するというごみ処理システムは（シナリオ 3_minCost）、合計コストが小さく、よい代替システム案になると考える。また、この場合の流動床ガス化溶融施設の導入先は南房総地域の P 町が候補になると考える。ただし、本研究では、市町村のごみ発生量、市町村間の道路距離、市町村内の道路距離の具体的な立地場所については、地形・地質、土地利用離を考慮して市町村単位の立地を検討するため、施設状況などの地域特性及び住民の意見を考慮しながら検討しなければならない。

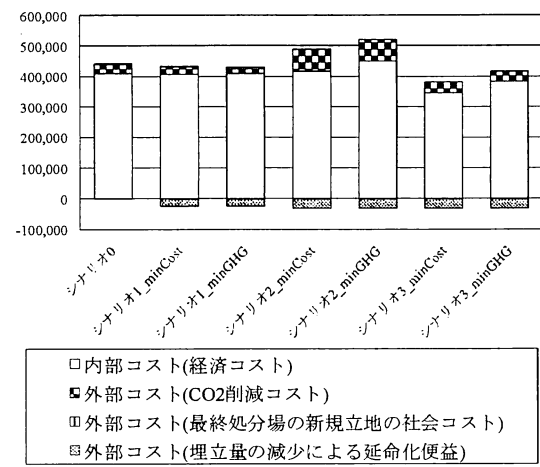


図6 シナリオ別の合計コスト

表 4 各シナリオのまとめ

項目	シナリオ0	シナリオ1_minCost	シナリオ1_minGHG	シナリオ2_minCost	シナリオ2_minGHG	シナリオ3_minCost	シナリオ3_minGHG
経済コスト(万円)	411,157	408,173	411,078	417,564	450,791	346,275	383,639
GHG排出量(t)	10,321	8,120	6,808	24,085	23,179	12,132	11,225
埋立処分量(t)	8,355	7,438	4,432	2,462	0	2,462	0
合計コスト(万円)	443,131	409,223	407,828	459,109	489,318	351,961	386,303

6. まとめ

南房総地域のごみ発生量、処理施設種類・規模・運転方式・立地場所などを踏まえ、小規模・バッチ炉を閉鎖し、中規模焼却施設への集約処理、及び大規模ガス化溶融施設の導入を想定した場合、GHG 排出量、コストが最小となるごみ処理広域化計画、新規施設の立地場所・設置数、ごみ・処理残さ輸送経路などの検討を行った。また、ごみ処理システムを総合的に評価するためには、GHG 排出量、最終処分場の新規立地の社会コスト、埋立処分量の減少による最終処分場の延命効果を経済コストとして内部化して合計コストを算出した。結果としては、南房総地域の P 町に流動床式ガス化溶融施設（250t/日）を導入し、各市町村から排出されるごみをガス化溶融施設で集約処理し、溶融スラグを地域内で有効利用し、溶融飛灰を地域内の最終処分場で埋立処分するというごみ処理システムが望ましいごみ処理広域化システムになると提案できた。本研究で提示した手法を用いることで、地域の状況や施策目的に応じたごみ処理計画を策定できる。今後、処理規模の変化に対応した処理施設の技術特性データを整理するとともに、GHG 以外の環境負荷物質を考慮することが必要であると考える。

謝辞：千葉県環境生活部、各施設の関係各位には、各

種資料の提供や実態調査のご協力を頂いた。上記関係各位に対しここに深く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 中野加都子, 三浦浩之, 安田安彦, 谷口正修: 広域ごみ処理システムの導入による環境負荷低減に関する研究, 廃棄物学会論文誌, No.13, pp.351-360, 2002.
- 2) 小笠原洋介, 辻岡信也, 森杉雅文, 井村秀文: 一般廃棄物の広域処理のコストと環境負荷に関する研究, 第 30 回環境システム研究論文発表会講演集, pp.259-264, 2002.
- 3) 佐々木努, 藤原健史, 松岡譲: 環境負荷と費用からみた廃棄物処理広域化の規模に関する研究, 環境システム研究論文集, No.31, pp.277-285, 2003.
- 4) 荒井康裕, 稲員とよの, 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, No.31, pp.267-276, 2003.
- 5) 田畑智博, 後藤尚弘, 藤江幸一, 井村秀文, 薄井智貴: 発生源空間分布から見た廃棄物輸送・再資源化施設の適正配置に関する研究, 環境システム研究論文集, No.30, pp.315-322, 2002.
- 6) 千葉県: 平成 17 年度清掃事業の現況と実績, pp.420, 2005.
- 7) 志水章夫, 楊翠芬, 井原智彦, 玄地裕: ライフサイクルを考慮した家畜排せつ物の地域内処理システム設計手法, 環境システム研究論文集, No.33, pp.241-248, 2005.
- 8) 産業技術総合研究所: Regional Circulation And Capacity Optimizer (RCACAO) ver.0.9
- 9) 松藤敏彦: 都市ごみ処理システムの分析・計画・評価, 技報堂, 2005.
- 10) 産業環境管理協会: “JEMALCA Pro ver.2” LCA 日本フォーラム: LCA データベース, 2005.
- 11) 太平洋セメント株式会社: 焼却残渣のエコセメント資源化に関する調査委託報告書 (平成 14 年)
- 12) 財団法人日本デジタル道路地図協会: 千葉県デジタル道路データ (平成 14 年度)
- 13) 楊翠芬, 田畑智博, 菱沼竜男, 玄地裕: 廃棄物由来 CO2 排出量を考慮した焼却施設の LCA 手法の検討-千葉県を事例に-, 都市清掃, No.283, pp.23-29, 2008.
- 14) 望月俊哉, 細江宣裕: リサイクル政策の経済評価について - 一般廃棄物セメント資源化の費用便益分析, GRIPS Discussion Paper No. 07-02, GRIPS, 2007.
- 15) 甲斐沼美紀子: 地球温暖化対策立案のための政策分析ツールの開発, 地球環境研究センターニュース Vol.10, No.4, 1999.
- 16) 栗島英明, 楊翠芬, 田畑智博, 玄地裕: 表明選好法を用いた処分場の社会コストと延命化の評価: 千葉県千葉市の事例, 環境情報科学論文集 22, No.22, pp.67-72, 2008.

THE DESIGN OF WASTE TREATMENT SYSTEM IN CONSIDERATION OF LIFE CYCLE THINKING AND WASTE GENERATION AND DISPOSAL

Cuifen YANG, Tomohiro TABATA, Tomohiko IHARA and Yutaka GENCHI

We evaluated GHG emission, cost and final disposal amount of waste treatment system using life cycle assessment (LCA) and cost analysis with optimization software and database construction on geographic information system (GIS) in order to propose waste treatment optimization system for Minamiboso area in Chiba. Also, when batch-type incinerators were closed and large-scale gasification melting plants were introduced, the waste treatment and utilization system that GHG emission minimization and cost minimization were approached. Moreover, CO₂ reduction cost and benefit of landfill's life prolongation were converted to economic cost and total costs of these waste treatment systems were calculated respectively. The total cost of the fluidized bed type gasification melting system was found to be lower than other treatment systems.