

中国大連市の一般廃棄物管理施策を対象とした 循環経済社会シナリオの設計と評価

橋本 禪¹・若林 諒²・孫 穎³・陳 旭東⁴・藤田 壮⁵・耿 涌⁶

¹非会員 講師 京都大学 大学院農学研究科 (〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)

E-mail: hash@kais.kyoto-u.ac.jp

²非会員 東洋大学 大学院工学研究科 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井2100)

³非会員 NIESポスドクフェロー 国立環境研究所 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)

⁴非会員 NIESアシスタントフェロー (独) 国立環境研究所 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)

⁵正会員 室長 (独) 国立環境研究所 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)

⁶非会員 Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Science (Liaoning Province 110016, PR China)

本研究では、循環経済のモデル都市である中国大連市を事例に、同市における一般廃棄物処理行政を中心に据えた循環経済シナリオの設計と評価を行なった。評価を行う循環経済シナリオは、廃棄物焼却発電施設の建設の有・無ならびに市内で操業するセメント産業との連携による廃棄物資源の循環利用の有・無を考慮する計4つのシナリオから構成される。本研究ではこれら4つのシナリオの下で実現される年間のCO₂排出量及び最終処分量について算定・評価を行った。算定の結果、現在検討が進められている廃棄物の焼却・発電施設の建設は最終処分量の大幅削減(約53~56万トン)を可能とする一方で、年間約41~62万トンのCO₂の排出増加をもたらす結果となった。本研究で提示する枠組みに基づく評価では、CO₂排出削減と最終処分削減は基本的にトレードオフの関係にある。これは、大連市にとっての望ましい循環経済社会像は、市政府が廃棄物処理の効率化と温室効果ガスの排出削減のどちらを優先するかにより代わりうる事を示唆している。

Key Words : circular economy, MSW (Municipal Solid Wastes), co-processing, waste-to-energy plant

1. はじめに

(1) 中国における循環経済の展開と大連市の取組み

中国政府は2006年からの第11次5カ年計画において、資源の節約を国策とし、循環型の経済を発展させ、生態系保護や環境配慮型社会の構築推進を明確に打ち出した。2008年8月には第11期全国人民代表大会で、生産、流通、消費等の全プロセスにおける資源や廃棄物の減量化、再利用、資源化を進めることを目的とする「循環経済促進法」が承認された¹⁾。同法は2009年1月から施行されるが、今後は地方行政や企業において循環経済法の理念をどう具体化・実現するかが課題である。

本研究が対象とする遼寧省大連市は、遼東半島の先端に位置する中国の産業拠点都市の一つである。同市はこれまでに、製造業を中心に740を超えるクリーンプロダクションのモデル事業を推進してきた。市内に位置する国内第2位の経済規模を誇る大連経済開発区は、循環経済の理念をその建設指針としており、2004年には国家環境保護総局から生態工業園区の実証地区に指定されて

いる。大連市政府は循環経済を推進すべく、2006年に大連経済発展改革委員会に循環経済室を設け大連市循環経済発展計画を作成した。計画では、水や資源、エネルギー等の利用効率の改善と、廃棄物等の再利用やリサイクル、再資源化の推進が目論まれている。しかしながら、その取組は諸にわたっており、未だ十分な成果は得られていない²⁾。

(2) 既往研究のレビュー

一般廃棄物等の処理施策がもたらす環境影響に関する研究、特に温室効果ガスの排出量の変化をも視野に入れた研究は、先進国で多く行われているものの、開発途上国ではあまり行われていない³⁾。日本国内では、松本ら(2003)が⁴⁾、家庭系厨芥類の循環利用について、2020~2050年の期間の人口増加や住宅開発地区へのディスパーザー等を考慮した3つのシナリオを策定し、メタン発酵やコンポスト、生分解性プラスチック等の転換技術の導入とその組合せによるエネルギー消費、CO₂排出量の評価を実施している。Wongら(2007)は⁵⁾、川崎市を事例

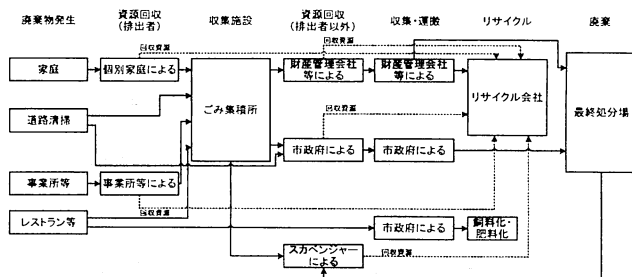
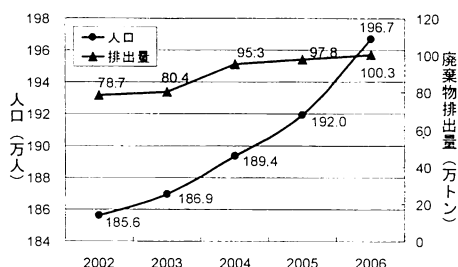


図-1 大連市の人口及び廃棄物発生量の推移

注) 排出量は市政府による推定値で、家庭廃棄物、事業系廃棄物(事業所、レストラン・食堂等)、道路清掃廃棄物等を含む。

図-2 大連市における一般廃棄物ストリーム

注) 大連理工大学による市政府担当者へのヒアリング調査及び現地調査に基づき作成

として、都市内で発生する一般廃棄物の一部を市臨海部に立地する循環型産業施設に循環させる都市・産業共生シナリオを設計し、それぞれのシナリオのもとで実現されるCO₂排出量ならびに最終処分量を算定した。

海外では、Sonessonら(2000)が、ウプサラ(スウェーデン)を対象に、高含水有機廃棄物および固形廃棄物を統合的に処理することによる環境および経済への影響についてLCAをベースとした評価を実施している⁶⁾。また、Thomeloeら(2002)⁷⁾、米国を対象に1974年をベースラインとして、ごみの組成、処理技術やリサイクル施策の変化を踏まえ一般廃棄物処理起源のCO₂排出量の変化をLCA手法を用いて過去25年にわたり算定した。開発途上国を対象とした研究事例としてはMendesら(2004)によるサンパウロ(ブラジル)を対象とした研究⁸⁾やLiamsanguanとGheewala(2008)によるブーケット(タイ)を対象とした研究⁹⁾が挙げられる。中国を対象とした研究は、焼却施設による大気汚染や最終処分場からの埋立浸出水による環境影響に関する研究は比較的多く見られるものの^{10,12)}、一般廃棄物処理施策全体を視野に入れた環境影響評価は比較的近年までは行われてこなかった^{13,14)}。

(3) 研究の目的

本研究では、大連市を事例地区とし、同市の一般廃棄物（ごみ）処理行政を中核とした循環経済社会について代替的なシナリオを設計し、各シナリオ下で実現される環境改善効果の定量評価を目的とする。評価する環境改善効果は、大連市における喫緊の課題である一般廃棄物の最終処分量に加え、廃棄物処理及び循環利用に伴うCO₂排出量とした。

論文中で用いる大連市の人口及び廃棄物に関わる統計情報及び市政府の一般廃棄物行政に関する情報は、大連理工大学と共同で実施した現地調査ならびに文献調査に基づくものである。なお、大連市は、6区（中山区、西岗区、沙河口区、甘井子区、金州区、旅順口区）、3市

(瓦房店市, 普兰店市, 庄河市), 1県(長海县)から構成されるが, 市政府が直接的に所管する一般廃棄物は, 市中心に位置する中山区, 西岗区, 沙河口区, 甘井子区の4区で排出されるものに限定されている。したがって, 市政府の報告書や統計情報として記録・管理される一般廃棄物の発生量やごみ組成の情報もこれら4区を対象とするものに限定される。本論文中に記載される一般廃棄物施策及び排出実績等の情報は, これら4区を対象とした統計及びその他報告書に記載される情報に基いている。本稿では特に断りのない限り「大連市」という表記はこれら4区を指すものとする。

以下では、第2章で大連市における一般廃棄物の現状と展望について述べる。これを踏まえ、つづく第3章で、本研究で評価を行う大連市を対象とした循環経済シナリオの設計の論理とシナリオの構成について説明する。第4章では、各シナリオの下で実現される環境改善効果の算定の結果とその考察を行ない、第5章で本研究の結論を述べることにする。

2. 大連市における一般廃棄物管理の現状と展望

(1) 一般廃棄物の発生状況と現行の処理体制

大連市における一般廃棄物の年間発生量は、2002年から2006年までの過去5年間で約21万トン増加している（図-1）。なお、この排出量は市政府による推定値であり、家庭廃棄物、事業系廃棄物（事業所、レストラン・食堂等）、道路清掃廃棄物等を含んでいる。一方、大連市の人口はこの間に186万人から197万人に増加しており、一人当たりのごみの年間排出量でみると、424kg（2002年）から510kg（2006年）に増加したことになる。

大連市で発生する一般廃棄物の収集、運搬及び処理は、市政府の都市建設管理局環境衛生部（以下、環境衛生部）により所管される。図-2は、大連市で発生する一般廃棄物のストリームを、排出、集積、収集・運搬、廃棄段階に分節化し表示したものである。図-2では、排出主

体及び排出主体以外による資源回収ならびにリサイクルの実施を位置づけ、廃棄物の流れを実線で、回収資源の流れを破線で表示した。家庭系ならびに事業系のごみは基本的に、排出主体の手によりごみ集積場に出され、これを市政府が収集・運搬し、最終処分場へと運搬するという手順になる。現在大連市内には1,414の集積場がある。資源回収は集積場に運ばれる前に排出主体により、またその後は住区の財産管理会社や市政府、スカベンジャー等の手で行われる。レストラン・食堂等から排出される厨芥類は市政府の手で回収され、畜産用飼料として利用されている。基本的には、回収された廃棄物（循環資源）は、回収主体によりリサイクル会社に売却される。いわゆる「インフォーマルセクター」であるスカベンジャー（くず屋、街路清掃人とも呼ばれる）は、集積所や集積所に集まったごみの中から有価物を抜き出してリサイクル会社に売却し、生計を立てている。

中山区、西岗区、沙河口区、甘井子区の4区で排出・収集されたごみは、市北東部に位置する金州区に建設された毛茛子処分場に運搬、処分される。毛茛子処分場は総容量400万トン、日処理量1,800トンの嫌気性埋立地である。処分場の表面は遮水シートと粘土層で遮水され、浸出水の集排水設備を備えているが、処理施設は整備されていない。本処分場は2000年7月から稼動しているが、近年、その残余容量が深刻な問題となりつつある。

(2) 今後予定される廃棄物処理体制の変更

市政府は、最終処分場の拡張や新規建設によりこの問題に対処しようとしているが、既存の埋立て処分場では可燃性ガスの発生や浸出水の問題が顕在化しており、市政府の方針として市民の理解が得られにくい状況である。

こうした問題は、大連市だけで起こっている問題ではない。経済発展の著しい臨海部の大都市では特に、地域住民の環境への関心の高まりを背景に、既存の埋立処分場の管理のあり方と新規処分場の建設が重要な政策課題になりつつある¹⁵⁾。このような社会的課題を背景に、2005年2月に制定された中国再生可能エネルギー法では、一般廃棄物焼却発電を再生可能エネルギーのひとつとして位置づけ、廃棄物焼却発電施設で発電された電力の売電価格にインセンティブ付与する枠組みを提供している¹⁵⁾。また、2006年から始まった国の第11次5カ年計画では、廃棄物焼却施設の建設が予算計上されており、今後5年間に中国全土に73の焼却施設が建設されることとなっている。中国には2005年度時点で一般廃棄物焼却施設が63施設あり、合計日処理量は約4万トンにのぼる¹⁵⁾。

大連市政府はPFIの一形態であるBOT（Build Operate

Transfer）により、石炭混焼型の一般廃棄物焼却発電施設の建設を予定している。建設される焼却発電施設は日処理量500トンの荏原製作所製の流動床式焼却炉3基であり、施設の建設、維持管理および運用は荏原製作所と大連重工起重集団との共同で実施される。大連市政府の発表によると、本焼却炉は発電施設を備え、年間223,000[MWH]の電力を発電し、うち145,000[MWH]が売電される予定である¹⁶⁾。本施設は2006年3月から建設が始まり2008年末の稼動を予定していたが、周辺住民の反対運動にのため未だ運用が始まっていない。

先に述べた中国再生可能エネルギー法では、流動床式の焼却発電施設について、重量換算で総焼却量の20%までの新規燃料（通常は石炭）の投入を認めている¹⁵⁾。導入が予定されている施設の日処理量は1,500トンであるから、本施設では最大250トン/日の石炭の投入が許されていることになる。年間稼働日数を280日と仮定すると、年間の石炭投入量は70,000トンである。ただし、新規燃料の実際の投入量は、当該施設で処理される一般廃棄物が持つ発熱量に依存して決まる。焼却処理される廃棄物発熱量が低ければ、それだけ多くの新規燃料の投入が必要となる。

3. 大連市を対象とする循環経済シナリオの設計と評価の枠組み

(1) 大連市循環経済シナリオの設計の枠組

大連市における将来の循環経済社会像を検討するに当たり、次の2つの観点を考慮に入れた。第1は、一般廃棄物処理施設の建設に関わる観点であり、①予定通り焼却・発電施設を建設・運用する方針、②施設建設を取りやめ現在の最終処分場を拡張するなどし継続利用する方針で構成される。第2は、一般廃棄物の処理体制に関する観点である。こちらは、①市政府単独での一般廃棄物の処理を継続する方針、②市内に立地し、廃棄物を燃料・原料代替として受け入れるポテンシャルを有する産業と連携し、一般廃棄物の処理を分担する方針である。

産業との連携について本稿では、市政府の連携相手としてセメント産業を考慮に入れる。セメント産業は、さまざまな廃棄物を新規原料・燃料の代替物として受入れることが可能であり¹⁷⁾、その特性から産業部門におけるスカベンジャーと呼ばれることもある¹⁸⁾。セメントや鉄鋼や電力等のエネルギー集約型産業で廃棄物を原料・燃料代替として利用することはコ・プロセッシングと呼ばれる^{19,20)}。大連市では、(株)太平洋セメントの子会社である大連小野田水泥有限公司が操業し、年間約137万トンの

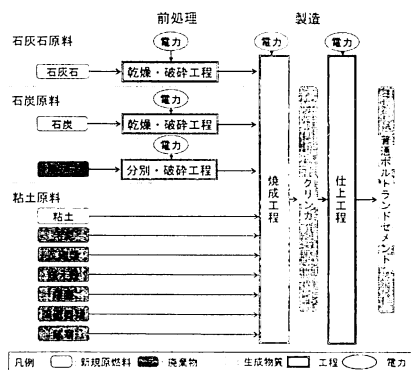


図-3 循環型セメント製造システムフロー

注) 石膏原料は仕上工程でクリンカと仕上ミルに投入される

表-1 シナリオの設計・評価に用いる機能単位		
カテゴリ	量	単位
一般廃棄物処理量	100	10,000 tons/year
セメント製造量	137	10,000 tons/year
発電量 (売電電力)	145,000	MWH

セメントを生産している²¹⁾。本研究では、大連小野田水泥有限公司のセメント製造施設が、現在わが国で稼動するセメント製造施設と同等の技術水準を持つ製造施設に転換されたことを想定する。図-3は、本稿で想定するセメント製造施設²²⁾による普通ポルトランドセメント製造のシステムフローである。

(2) シナリオの構成

上記の枠組に基づき、本研究では以下4つのシナリオを設計した(図4)。

a)シナリオ1 (傾向延長)

シナリオ1では、市内で発生する一般廃棄物の全量が毛茛子処分場に運ばれる現状の廃棄物処理体制を想定している。シナリオ1では、焼却発電施設は建設されない。本シナリオは、他3つのシナリオを評価するためのレファレンスとして機能する。

b)シナリオ2 (廃棄物焼却発電施設導入)

シナリオ3では、市政府が導入を予定している一般廃棄物の焼却発電施設の建設が進み、運用されることを想定する。ここでは、市内で発生する一般廃棄物は全量が本施設に輸送され、焼却後に最終処分場に輸送されると仮定した。

c)シナリオ3 (コ・プロセッシング)

本シナリオでは、市政府がセメント製造企業と連携し、市内で発生するプラ系の一般廃棄物を分別回収し、セメント燃料として代替利用することを想定する。本シナ

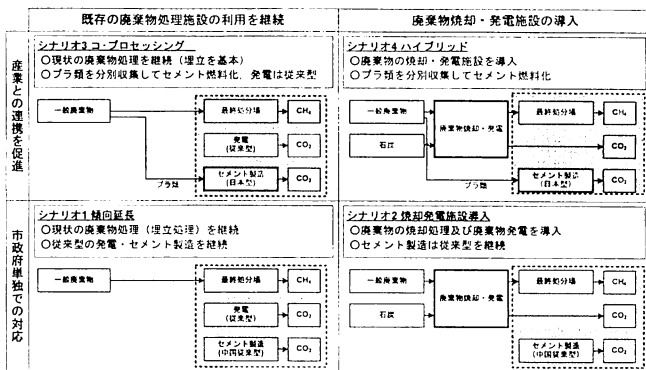


図-4 大連市循環経済シナリオの構成と評価の範囲

オでは、セメント製造施設が、新規資源(原燃料)のみに依存した生産を行う中国の従来型の製造施設から、循環型のセメント製造施設へと転換されることを想定する。なお、シナリオ2もシナリオ1と同様、一般廃棄物焼却発電施設は建設されない。

d)シナリオ4 (ハイブリッド)

市政府が一般廃棄物焼却・発電施設の導入を進めると共に、廃棄物処理についてセメント製造企業との連携を進めるシナリオを想定した。本シナリオはシナリオ2及びシナリオ3の特徴を兼ね備えている。

(3) 評価の範囲

本研究では各シナリオのもとで、一般廃棄物の焼却処理、セメント生産及び電力供給に伴う、ある時間断面における年間CO₂排出量ならびに最終処分量を算定した。シナリオの評価に当たり、各シナリオにおける一般廃棄物の処分量、セメントの製造量、発電量(売電電力)を表-1のように統一した。ここで、一般廃棄物の処理量は市政府の統計(表-1)から設定(後述)、セメント製造量は2007年の大連小野田水泥有限公司の実績値²¹⁾、発電(売電)量は大連市政府の公表値¹⁶⁾に基づき設定した。

CO₂排出量の評価範囲を図示すると図-4の網掛け部分のようになる。なお、データ取得の限界から、一般廃棄物の収集・運搬時および焼却発電施設建設時のCO₂排出は算定対象から除外した。

(4) 評価の前提条件

a) 発電

一般廃棄物の焼却発電施設の建設を想定しないシナリオ1, 3では、表-1に示される電力が中国東北地方の平均的な火力発電所により供給されると仮定した。

表-2 大連市のごみの組成 (%) (湿ベース)

厨芥類	プラ類	繊維類	紙類	その他
24.4	20.6	14.2	16.8	24.0

注) 2003 年度に大連市の環境衛生部が実施した複数のサンプル調査の平均値。本研究では「その他」を金属類や瓦礫類等の無機物と仮定した。

表-3 大連市のごみの元素組成 (乾ベース)

ごみ分類	元素組成割合			
	C	H	O	S
厨芥類	35.5	5.4	15.7	0.26
プラ類	80.9	10.8	2.0	0.04
繊維類	52.5	5.4	19.8	0.37
紙類	34.4	5.3	34.4	0.28

注) 2003 年度に大連市の環境衛生部の報告に基づく。

b) 一般廃棄物の処理量

各シナリオにおける一般廃棄物の組成別処理量は、表-2に示すごみの組成割合に、2006年度の大連市の一般廃棄物の年間排出量の値に乗じて求めた。ただし、表-2に示されるごみの組成のうち、「その他」については、詳細な内訳が把握されていない。本研究では、後述する発熱量の計算に、ごみ組成の具体的情報が必要となるため、大連市で焼却処理される廃棄物は、厨芥類、プラ類、繊維類、紙類と設定した。「その他」は、焼却施設が建設される場合でも直接埋立て処理されると仮定した。

シナリオ1ではこれら廃棄物の全量が埋立処理される。シナリオ2では「その他」が直接埋立て処理され、それ以外は焼却後埋立て処理されるとした。セメント製造業との連携を想定するシナリオ3およびシナリオ4においては、市内で発生するプラ系の一般廃棄物を分別回収し、セメント燃料として代替利用することを想定する。この際に、プラ類の総排出量の3割(約62,000トン)が分別回収され、セメント製造における代替燃料として利用される。残り7割は埋立処理(シナリオ3)、焼却処理(シナリオ4)されると仮定した。なお、プラ類を除くごみの扱いはシナリオ1、シナリオ2と同様である。

c) 焼却発電施設で混焼される石炭量

一般廃棄物の焼却発電施設の建設を想定するシナリオ2およびシナリオ4では、収集された廃棄物と共に混焼される石炭の量を求める必要がある。本研究ではまず、表-2に示す大連市のごみ組成および表-3に示す元素組成をもとに、次に示すScheurer-Kestnerの式

$$Hh = 339.4 \times (c - 3 \times \alpha/4) + 1435.1 \times h + 94.3 \times s + 104.8 \times 3 \times \alpha/4 \quad (1)$$

を用いてごみの単位あたりの高位発熱量(kJ/kg)を求め、その算定結果を次式

$$HI = Hh - 25 \times (9 \times h + W) \quad (2)$$

により低位発熱量(kJ/kg)に換算した。ここで、

HI : 低位発熱量(kJ/kg)
Hh : 高位発熱量(kJ/kg)

表-4 廃棄物の種類ごとの分解率、排出係数および算定期間におけるLFG排出量

	分解率	固形分割合	排出係数(ton-CH ₄ /t)	LFG排出量(ton-CH ₄)
			CH ₄ /t	
厨芥類	1/10	0.25	0.1430	19,000
繊維類	1/21	0.80	0.1380	8,100
紙類	1/21	0.80	0.1490	20,700

注) 分解率、固形分割合および排出係数は環境省・経済産業省：温室効果ガス排出量算定・報告マニュアル Ver. 2.4, 環境省・経済産業省, 2009に基づく。

表-5 中国のセメント製造インベントリデータ²⁴⁾

区分	品目	入・出力量	単位
原料	石灰石	1.239231	ton
	粘土	0.242096	ton
	鉄原料	0.031780	ton
投入	石膏	0.040010	ton
	石炭	0.154000	ton
	コークス	0.000000	ton
燃料	電力(購入)	0.121580	MWH
	セメント	1.000000	ton
産出 製品			

表-6 ポルトランドセメント製造によるCO₂排出量

	中国型技術	日本型技術
原料起源 (t-CO ₂ /t-cement)	0.5487	0.5098
燃料起源 (t-CO ₂ /t-cement)	0.5168	0.3977
合計 (t-CO ₂ /t-cement)	1.0656	0.9075

c : 炭素成分比
o : 酸素成分比
h : 水素成分比
s : 硫黄成分比
W : 水分割合 (%)

である。算定に当たり水分割合Wは大連市の環境衛生部担当者へのヒアリングに基づき40%と設定した。

算定の結果、大連市のごみの低位発熱量はシナリオ2の場合9,010kJ/kg、シナリオ4の場合8,085kJ/kgとなった。シナリオ2とシナリオ4で発熱量が異なるのは、シナリオ4ではプラ類が分別回収されたためである。

本結果を元に、次式により焼却発電施設への石炭投入量を算定した。

$$K = (3.6 \times G) / (Ee \times L - (I \times J) / L) \quad (3)$$

ここで、

K : 石炭の投入量(t/y)
G : 発電出力(kWh)
Ee : 発電効率(%)
L : 石炭の低位発熱量(MJ/t)
I : 廃棄物の焼却量(t/y)
J : 廃棄物の低位発熱量(MJ/t)

である。

発電出力は大連市政府の公表値である223,000MWHを用いた。発電効率は、わが国で1996年～現在までに使用開始された流動床式焼却発電施設(計18施設)の平均値である10.3%と設定した²⁵⁾。また、石炭の低位発熱量は

表-7 各シナリオの資源投入・産出量一覧

	単位	シナリオ1 傾向延長	シナリオ2 焼却発電導入	シナリオ3 コ・プロセッシング	シナリオ4 ハイブリッド
廃棄物処理	焼却・埋立	ton	0	761,900	665,700
	直接埋立	ton	1,002,500	240,600	240,600
	石炭混焼 (焼却発電)	ton	0	43,000	0
電力供給	従来型発電	MWh	145,000	0	145,000
	焼却発電	MWh	0	145,000	0
セメント製造	新規原料	ton	1,697,700	1,697,700	1,577,200
	石灰石	ton	430,000	430,000	9,100
	その他	ton	0	0	34,800
	代替原料	ton	0	0	428,000
	石灰石系*	ton	0	0	175,000
	粘土系*	ton	0	0	131,200
	その他*	ton	0	0	1,000
	新規燃料	ton	211,000	211,000	1,000
	石炭	ton	0	0	43,000
	その他	ton	0	0	126,400
	自家発電	MWh	0	0	34,300
	買電	MWh	166,600	166,600	27,700
代替燃料	廃プラ類	ton	0	0	1370,000
	その他*	ton	0	0	1370,000
	ポルトランドセメント	ton	1370,000	1370,000	1370,000

*1) 鉱滓、汚泥等、*2) 汚泥、煤塵、燃え殻、建設発生土等、*3) 石膏、珪石等、*4) 燃え殻、汚泥等である。なお、シナリオ3、4で利用が想定されるこれら代替原料・代替燃料は産業廃棄物が主体である（（株）デイ・シー担当者へのヒアリングに基づく）。

表-8 CO₂排出量の算定に用いた排出係数

プロセス	排出係数	出典
廃棄物焼却	一般廃棄物焼却	2.51 ton-CO ₂ /ton (28)
	合成繊維	2.29 ton-CO ₂ /ton (28)
	プラ類燃焼	2.55 ton-CO ₂ /ton (28)
発電	中国東北地方	1.1983 t-CO ₂ /MWh (29)
	石炭燃焼	2.41 ton-CO ₂ /ton (28)
	石灰石焼成	0.44 ton-CO ₂ /ton (30)
	石炭燃焼	2.41 ton-CO ₂ /ton (28)
セメント製造	プラ類燃焼	2.55 ton-CO ₂ /ton (28)
	都市ガス (自家発電)	0.0028 ton-CO ₂ /1,000m ³ (28)
	軽油 (自家発電)	2.62 t-co2kl (28)

20934MJ/tonを用いた²⁴⁾。算定の結果、焼却発電施設で混焼される石炭の量はシナリオ2では43,074トン、シナリオ4では100,968トンとなった。シナリオ4で必要とされる石炭の量は、2. (2) に述べた中国再生可能エネルギー法で規定される混焼式焼却発電施設における燃料投入量の値を約3万トン上回る結果となった。

d) 埋立ガス (CH₄)

埋立ガス (CH₄) は、次式のように、廃棄物の種類ごとに、最終処分場に埋立された廃棄物の算定期間における分解量に、排出係数を乗じて求めた²⁵⁾。

$$CH_4 = \sum_i dw_i \cdot ef_i \quad (4)$$

ただし、

i : 廃棄物の種類

dw_i : 最終処分場に埋立された廃棄物の算定期間における分解量 (t)

ef_i : 単位分解量あたりの排出量 (tCH₄/t)

である。

算定期間は、毛茣子処分場が供用開始となった2000年度から2006年度までとした。算定期間の各年度における

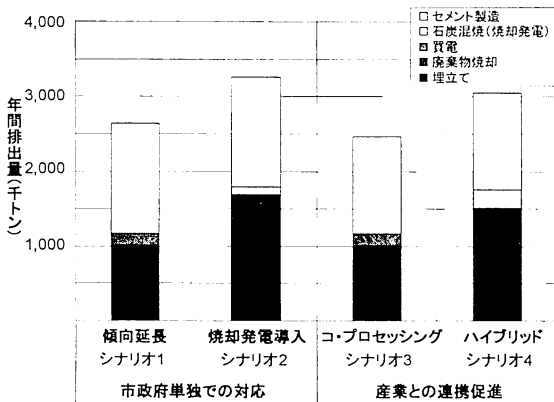
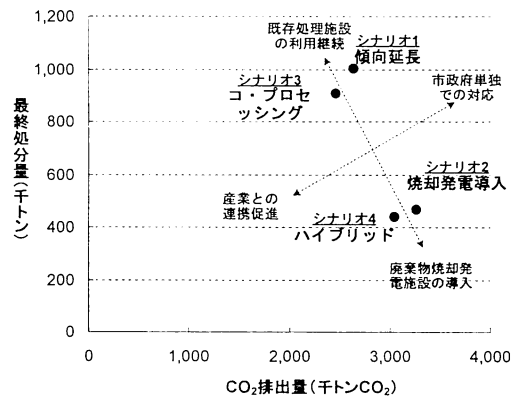
廃棄物の種類ごとの排出量は、大連市政府が2003年度に実施した調査結果 (表-2) から求め、また繊維類の5割を天然繊維と仮定した。ごみの分解量は、それぞれのごみの重量に固形分割合と分解率を乗じることで求められる。ここで、処分場の稼働は2000年7月からであるため、2000年度の廃棄物の分解量については当年度の分解量を8/12し、年度末まで8ヶ月間の分解量とした。算定の結果、期間中の埋立ガスCH₄の発生量は47,800 ton-CH₄、CO₂換算で1,003,800 ton-CO₂である。

e) セメント製造の技術水準

プラ系の一般廃棄物の分別回収およびセメント製造における循環利用を想定するシナリオ3 (コ・プロセッシング) ならびにシナリオ4 (ハイブリッド) では、セメント製造施設が中国の従来型の施設から日本型の施設にされることを想定する。中国型のセメント製造のLCIデータについては大連小野田水泥有限公司の実績値が得られないため、表-4に示すShigenら (2008) ²⁶⁾の値を用いた。この値は、新型の乾式キルンを備えるセメント製造のインベントリデータである。エネルギー効率の良い乾式キルンで製造されるセメントは中国における全生産量の約5%を占めるに過ぎないが²⁷⁾、大連小野田水泥有限公司が日本のセメント製造企業の子会社であることならびに日本のセメント製造施設の全てが乾式キルンを用いていることをから、同社におけるセメント製造が乾式キルンによるものと仮定することが妥当と考えられる。日本型のセメント製造のLCIデータは、川崎エコタウンで操業するセメント製造会社である(株)デイ・シー (同じく(株)太平洋セメントグループ) の2007年度実績値を用いる。データは同社のセメント生産を所掌する担当者へのヒアリング調査により入手したものである。ただし、LCIデ

表-9 各シナリオにおけるプロセス別 CO₂排出量及び総埋立量

			シナリオ1	シナリオ2	シナリオ3	シナリオ4
			傾向延長	焼却発電導入	コ・プロセッシング	ハイブリッド
廃棄物処理	焼却処理	ton-CO ₂ /year	0	689,600	0	514,900
	埋立	ton-CO ₂ /year	1,003,800	1,003,800	1,003,800	1,003,800
発電	買電	ton-CO ₂ /year	173,800	0	173,800	0
	石炭混焼（焼却発電）	ton-CO ₂ /year	0	103,800	0	243,300
セメント製造	石灰石焼成	ton-CO ₂ /year	751,800	751,800	698,400	698,400
	燃焼（石炭）	ton-CO ₂ /year	508,500	508,500	316,100	316,100
	燃焼（プラ）	ton-CO ₂ /year	0	0	87,300	87,300
	電力消費	ton-CO ₂ /year	199,600	199,600	182,700	182,700
総 CO ₂ 排出量			2,637,500	3,257,100	2,462,100	3,046,500
最終処分量			1,002,500	469,200	906,300	440,300

図-5 シナリオ別の年間CO₂排出量の内訳図-6 CO₂排出量と最終処分量の関係

ータの非公開を前提とする調査であるため、本稿にはLCIデータから算出した燃料起源、原料起源および全体でのCO₂排出量を示すに留める（表-6）。

以上を踏まえ、本研究で評価を行なう大連市を対象とした4つの循環経済シナリオの資源投入及び産出量の一覧を示すと表-7のようになる。CO₂排出量の算定に用いた排出係数を表-8に示した。排出係数の入手の限界から、中国東北グリッドによる発電の除きわが国の値を用いた。

4. 結果

各シナリオのもとで実現されるCO₂排出量の算定結果のグラフを図-5に示した。図はセメント製造、廃棄物焼却処理、発電及び石炭混焼の別に積み上げ表示している。より詳細なプロセス別のCO₂排出量および最終処分量の算定結果を表-9に示す。

今回の評価範囲では、総CO₂排出量への寄与は、セメント製造（42%～55%）、埋立ガス（31%～41%）、廃棄物焼却処理（0～21%）の順に大きい。ただし、ここで評価されている埋立ガスはの発生量（約100万トン）は、2000年7月から2007年3月までに埋立られたごみの分

解に起因するものであり、全シナリオで同じ値である（表-9）。シナリオ間でのCO₂排出量の差異は、買電、焼却施設の導入、焼却施設での石炭混焼、セメント製造技術の転換、の4つの要因により生じている。

傾向延長であるシナリオ1に比べ、一般廃棄物の焼却発電施設の導入を仮定するシナリオ2（焼却発電導入）及びシナリオ4（ハイブリッド）は、年間約62万トン、41万トンのCO₂排出量の増加をもたらす。これは化石系のごみの焼却に由来するものであり、その割合は総排出量のそれぞれ21.2%、16.9%を占めている。シナリオ4（ハイブリッド）では、プラ類の一般廃棄物の分別回収が行なわれるため、焼却処理される廃棄物の発熱量が低下し、その結果、焼却施設で混焼される石炭の量を、4.3万トン（シナリオ2）から10.1万トン（シナリオ4）へと約2.3倍に増加する。混焼する石炭量の増加に起因するCO₂排出は約14万トンである。ただし、シナリオ4はシナリオ2に比べ焼却ごみに含まれているプラ類は減少しており、ごみの焼却処理に由来するCO₂排出は約17.5万トン減少する。

CO₂排出量の削減という観点では、今回の評価の枠組みにおける最良の選択は市内のセメント産業との連携を

進め、廃棄物の循環利用を進めるシナリオ3（コ・プロセッシング）である。これは、セメント製造プロセスの転換により、石灰石投入の削減が可能となり焼成プロセスからのCO₂排出削減と燃料起源（石炭、プラ類及び電力消費）のCO₂排出削減が実現されたことによる（約17万5千トン）。しかしながら、最終処分量をみるとシナリオ3（コ・プロセッシング）は、シナリオ1（傾向延長）に比べ約9.6万トンの最終処分量を削減するに留まっており、市政府の喫緊の課題である最終処分量の削減の特効薬にはならない。最終処分量の大幅削減の実現という観点では、廃棄物焼却施設の導入を想定するシナリオ2（焼却発電導入、53万トン削減）及びシナリオ4（ハイブリッド、56万トン削減）が有効である。ただしこれは既に述べたとおり、CO₂排出量の増加をもたらす。図-6に示すシナリオ別のCO₂排出量と最終処分量の関係からもわかるとおり、CO₂排出削減と最終処分削減は基本的にトレードオフの関係にある。

CO₂排出削減と最終処分削減をバランス良く進めるという意味では、廃棄物焼却発電施設の導入とセメント産業との連携による廃棄物資源の循環利用を同時に進めるシナリオ4（ハイブリッド）が最も有効である。この場合、CO₂排出量はシナリオ1（傾向延長）よりも約41万トン増加するが、約56万トンの最終処分量削減が実現される。

5. まとめ

本研究では、循環経済のモデル都市である中国大連市を事例に、同市における一般廃棄物処理行政を中心に据えた循環経済シナリオの設計と評価を行なった。評価を行う循環経済シナリオは、廃棄物焼却発電施設の建設の有・無ならびに市内で操業するセメント産業との連携による廃棄物資源の循環利用の有・無を考慮する計4つのシナリオから構成される。本研究ではこれら4つのシナリオの下で実現されうる年間のCO₂排出量及び最終処分量について算定・評価を行った。算定の結果、現在検討が進められている廃棄物の焼却・発電施設の建設は最終処分量の大幅削減（約53～56万トン）を可能とする一方で、年間約41～62万トンのCO₂の排出増加をもたらす結果となった。本研究で提示する枠組みに基づく評価では、CO₂排出削減と最終処分削減は基本的にトレードオフの関係にある。これは、大連市にとっての望ましい循環経済社会像が、市政府が喫緊の課題である最終処分量の削減と温室効果ガスの排出削減のどちらを優先するかにより代わりうる事を示唆している。

シナリオによる操作対象外の要因であるが、本研究の評価範囲においては、総CO₂排出に締める埋立ガスの寄

与は31%～41%であった。大連市における温室効果ガスの排出削減という観点からは、最終処分場から排出される埋立ガスへの対処も極めて重要な課題と指摘できる。

最後に、本研究では、データ取得の限界から、中国東北グリッドによる発電の除き、わが国の排出係数を用いてCO₂排出量の評価を実施している。排出源単位は、評価対象の炭素含有量のみならず、その国のエネルギー構成や産業構造、技術水準等の様々な要因の影響を受けて定まるものであり、中国と日本とでその値に差異が生じる点に注意をする必要がある。

本稿は2009年3月に開かれた日本LCA学会での発表要旨内容を基本としつつ、分析に用いる日・中のセメント産業のLCIデータの更新とそれに基づく環境改善効果の計算の詳細化、改善を行い、本文に大幅に加筆・修正を行ったものである。

謝辞：本研究は環境省環境技術開発等推進費「水・物質・エネルギー統合解析によるアジア拠点都市の自然共生型技術・政策シナリオの設計・評価システム」の一環として実施された。

参考文献

- 1) 土屋春明：中国政府、資源の保護と総合利用を推進 - 「第11次5ヵ年計画」期の資源の総合利用に関するガイダンス、金属資源レポート、2007、37(2)、95-101
- 2) Geng, Y., Zhu, Q., Doberstein, B. and Fujita, T. Implementing China's circular economy concept at the regional level: A review of progress in Dalian, China. *Waste Management* (2008), doi:10.1016/j.wasman.2008.06.036.
- 3) Wei Zhao, Ester van der Voet, Yufeng Zhang, Gjalt Huppes. Life cycle assessment of municipal solid waste management with regard to greenhouse gas emissions: Case study of Tianjin, China. *Science of the total environment* 407 (2009) 1517-1526.
- 4) 松本亨・石崎美代子・左健・島岡隆行：「家庭系食品廃棄物の再資源化技術導入シナリオへのライフサイクルシミュレーションの適用」、土木学会環境システム研究論文集、Vol.31, pp.125-132, (2003).
- 5) Looi-Fang WONG, Tsuyoshi FUJITA, Naoko YANAGI, Erika TSUCHIDA. Evaluation system of environmental impacts for policy scenarios of municipal solid waste recycling in Kawasaki city, 土木学会環境システム論文集, Vol. 35 pp431-440.2007.
- 6) Sonesson, U., Bjorklund, A., Carlsson, M., Dalemo, M. Environmental and economic analysis of management systems for biodegradable waste. *Resource, Conservation and Recycling* 28(2000), 29-53.
- 7) Weitz K.A., Thomeloe SA, Nishtala SR, Yarkosky S, Zannes M. The impact of municipal solid waste management on greenhouse gas emissions in the United States. *Journal of Air & Waste Management Association*, 52 (2002), 1000-1011.
- 8) MendesMR, Aramaki T, Hanaki K. Comparison of the environmental impact of incineration and landfilling in São Paulo City as determined by LCA. *Resour Conserv Recycl* 2004, 41(1):47-63.
- 9) Liamsanguan G, Gheewala SH. The holistic impact of integrated solid waste management on greenhouse gas emissions in Phuket. *J Clean Prod*

- 2008, 16(17):1865–71.
- 10) Pin-Jing Hea, Hua Zhang, Can-Gang Zhang, Duu-Jong Lee.
Characteristics of air pollution control residues of MSW incineration plant in Shanghai. *Journal of Hazardous Materials B* 116 (2004) 229–237.
 - 11) S.C. Zou, S.C. Lee, C.Y. Chan, K.F. Ho, X.M. Wang, L.Y. Chan, Z.X. Zhang: Characterization of ambient volatile organic compounds at a landfill site in Guangzhou, South China, *Chemosphere* 51 (2003) 1015–1022.
 - 12) DING Zhen-hua, TANG Qing-he, LIU Cai-e, WANG Wen-hua, ZHUANG Min, LIN Yi-ming: Distribution and ecological effect of mercury in Laogang landfill, Shanghai, China, *Journal of Environmental Sciences* 19 (2007) 200–204.
 - 13) R.J. Hong, G.F. Wang, R.Z. Guo, X. Cheng, Q. Liu, P.J. Zhang, G.R. Qian: Life cycle assessment of BMT-based integrated municipal solid waste management: Case study in Pudong, China, *Resources, Conservation and Recycling* 49 (2006) 129–146.
 - 14) Wei Zhao, Ester van der Voet, Yufeng Zhang, Gjalte Huppes: Life cycle assessment of municipal solid waste management with regard to greenhouse gas emissions: Case study of Tianjin, China. *Science of the total environment* 407 (2009) 1517–1526.
 - 15) Yongfeng NIE, Development and prospects of municipal solid waste (MSW) incineration in China, *Front. Environ. Sci. Engin. China* 2008, 2(1): 1–7
 - 16) 大连市, http://dlhw.dl.gov.cn/info/157680_160150.htm
 - 17) Hendrik G. O. Padovani A. Cement Manufacture and the Environment: Part I: Chemistry and Technology. *J of Ind Ecol* 2002; 6(1): 89–105.
 - 18) Lucas R. The Cement Industry as a Scavenger in Industrial Ecology and the Management of Hazardous Substances, *J of Ind Ecol* 2007; 11(3): 15–25.
 - 19) Holcim and GTZ. Guidelines on co-processing Waste Materials in Cement Production, 2006.
 - 20) FHfW and Geopartner. Co-Processing Waste Material in Energy-Intensive Industries (EII), 2007.
 - 21) 唐兴国：高压变频器在水泥行业中的应用，*数字水泥网*, 2008.
 - 22) 大西悟，藤田壮，長澤恵美里，村野昭人：循環型産業システムの計画とその環境改善効果の算定—川崎エコタウンにおける循環型セメント事業のケーススタディー，*土木学会環境システム研究論文集*, Vol.33, pp.367–pp.376, 2005.
 - 23) 環境省：一般廃棄物処理実態調査平成18年度調査結果，環境省 (http://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/jippan/index.html)
 - 24) Liu Guanping, Zhang Xiaojin and Wang Hongtao. Research on Energy Depletion Potential in China for LCIA China Life Cycle Management Conference, Chengdu, Oct. 20th, 2008.
 - 25) 環境省・経済産業省：温室効果ガス排出量算定・報告マニュアル Ver. 2.4, 環境省・経済産業省, 2009.
 - 26) Dong Shigen, Li Xiaodong & Zhang Zhihui. (2008). Life cycle assessment on new dry method of cement production. *Environmental Protection* (10):39–42 [in Chinese].
 - 27) Battelle, Toward a Sustainable Cement Industry Substudy8: Climate Change, (2002).
 - 28) 環境省：算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧，環境省, 2008.
 - 29) 環境省・（財）地球環境センター：平成18年度CDM/JI事業調査CDM/JIホスト国基礎情報, 2008.
 - 30) 国土交通省：平成14年度温室効果ガス排出量算定方法検討会，国土交通省, 2002.

Circular Economy Scenarios of Municipal Solid Waste Management for Dalian, China

Shizuka HASHIMOTO, Ryo WAKABAYASHI, Ying SUN, Xudong CHEN, Tsuyoshi FUJITA and Yong Geng

Alternative circular economy scenarios were designed and evaluated to explore desirable circular economy society for the city of Dalian, China. Four circular economy scenarios were constructed considering the two axes: construction of a waste-to-energy plant and cooperation with a local cement producer as alternative management strategies. Life cycle approach was employed to numerically evaluate the amount of CO₂ emissions and the volume of final landfill disposal of each scenario. Our analysis revealed that the operation of the waste-to-energy plant inevitably increase annual CO₂ emissions by about 410 to 620 thousand tons while decreasing annual final landfill disposal by around 530 to 560 thousand tons. The analysis illuminated that there is trade-off between the reduction of CO₂ emissions and the amount of final landfill disposal. This fact implies that desirable circular economy society could alter depending on which policy target, either the reduction of CO₂ emissions or the volume of landfill disposal, would be prioritized by the city government.