

川崎エコタウンでの都市・産業共生の展開 に向けての技術・政策評価システム

藤田 壮¹・長澤 恵美里²・大西 悟²・杉野 章太²

¹正会員博(工)(独)国立環境研究所 環境技術評価システム研究室(〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)

東洋大学 工学部環境建設学科 教授 E-mail:fujita77@nies.go.jp

²学生会員 東洋大学大学院 工学研究科 環境・デザイン専攻(〒350-8585 埼玉県川越市鯨井2100)

循環型社会の実現に向けての方策として、地域に立地する製造業施設と都市活動主体の連携を通じて環境効率を向上する産業共生のアプローチに注目する。循環型の生産施設の技術インベントリを企業調査に基づいて定式化し、廃棄物の処理削減効果と受け入れ企業の生産プロセスにおける新規資源代替効果を含む環境改善効果の評価手法を提案した。具体的には川崎エコタウンを対象として、循環型のセメント製造施設、製鉄施設、ステンレス製造施設を対象とした廃棄物受け入れの現状の循環事業の環境改善効果を算定するとともに、統合的な廃棄物政策の推進によって約80万tのCO₂削減効果があることを明らかにした。

Key Words : *industrial symbiosis , recycling facility , carbon dioxide emissions , Kawasaki Eco-town*

1. 研究の背景と目的

地球温暖化の顕在化や自然環境資源の希少化などの制約下で世界的な経済成長を確保するために、循環型の産業システム構築がより重要な課題となりつつある。企業間の資源循環を促進する「産業共生 (Industrial symbiosis)」は、地域に立地する企業間で副産物の相互間連携が自然発生的に行われたデンマークのカルンボー (Kalundborg) を初期モデルとして、循環型の都市産業システムを実現する理念として位置づけられてきた。

この「カルンボー型」の産業共生モデルは個々の企業の余剰エネルギーや、排水、廃棄物を企業間や周辺の農地や都市セクターとの連携で循環利用することによって、地域にとっての環境負荷の削減と企業にとっての費用削減を実現することができる。米国のエコインダストリアルパークやわが国のエコタウン事業、中国の工業生態特区は、この「カルンボー型」の産業共生を、持続可能な発展の具体モデルとして実現することによって、地域産業の活性化や競争力の高い産業集積を目指している。

しかし、都市活動主体や都市のインフラ施設と連携する「産業共生」は、化学コンビナートに見られるような資源流通を最適化した装置を基盤として整備することから始まる企業間連携とは異なる。産業共生の実現には、循環利用する資源や物質の転換が必要であることや、長期的な多主体間の連携を促す社会制度が存在していないことなどの難しさがあり、個別の事例を見ると必ずしも

円滑に発展してきたとはいえない状況にもある。

産業共生をめざす国内でのエコタウン事業は 1997 年に経済産業省 (当時通産省) と環境省 (当時厚生省) によって開始された。産業共生の理念に加え、国際連合大学 ZERI が提唱してきたゼロ・エミッション構想がその理念的な背景となって事業化されてきた。初年度事業から 2006 年度で 10 年という節目を迎えて、26 カ所 56 施設が指定されたなかで、環境産業政策、都市環境政策のなかでの新しい方向性を見出すことの議論が活発となっている。たとえば、エコタウン事業を通じて全国の各地で構築された、循環型施設と官民が協働する枠組みを中核として、経済と環境が両立する都市と産業の共生システムを実現する方策を具体化することの重要性の議論などが始まっている¹⁾。一方で、エコタウン事業で整備された施設を国土の資源循環の広域の拠点と位置づける「原料および製品の広域化」の検討が進められている²⁾。エコタウン事業の集積を活かした地域政策、国土政策への統合的な視点からの設計と評価がより重要性を増している。

筆者らは、2004 年にエコタウン立地企業で構成される NPO 法人産業・環境創造イノベーションセンターと協働で産業共生立地調査に着手してきた。企業調査結果に基づく、川崎エコタウン地区内における循環型産業施設間の物質循環フロー分析の基礎的調査 (藤田ら (2004)³⁾) を行い、具体的な循環型産業施設として循環セメント製造施設について、技術インベントリを定量的に明らかにする

とともに、GIS データベースと組み合わせて現状の環境改善効果と将来的な技術・政策シナリオのシミュレーション評価を行った（大西・藤田ら（2005）⁴⁾）。また、鉄鋼産業における廃プラスチック受け入れの技術インベントリを構築して、その技術政策シナリオの設計と定量的評価を行なっている（大西・藤田（2006）⁵⁾）。さらに、ステンレス工場の循環事業の効果算定を報告している（杉野・藤田ら（2006）⁶⁾）。

並行して、川崎市内の企業を対象としてインターネット上の地域データベース（WebGIS）を設計して、Web 上での循環型産業施設の技術インベントリ入力システムと廃棄物発生企業の情報入力の基本形を構築している（栗原・藤田ら（2005）⁷⁾）。循環産業の技術インベントリと GIS を用いて、地域循環型の施策の効果を定量的に評価できる機能を Web 上でユーザーが利用できる「地域循環支援システム」として構築して、川崎市内の企業の利用に提供した結果の基本解析を終えている（村野・藤田ら（2007）⁸⁾）。

本研究では、環境調和型産業を柱として都市と産業の共生システムを設計するための「技術政策の設計と評価システム」を提案する。現実のエコタウン事業における循環型産業での廃棄物の循環利用の効果を定量的に明らかにするとともに、より一層の環境産業の拡大や都市環境政策と循環型産業の連携を含む将来シナリオの評価手法を提供することを目的とする。

具体的には、①主体間における物質フローと環境改善効果を算定し、関係する主体への環境改善効果の帰属を明らかにすることのできる分布型地理情報データベースの構築と、②エコタウンにおける循環型産業の環境技術インベントリを定量的に明らかにして、現状の資源循環の環境改善効果と将来的な技術政策シナリオの定量的な設計に活用する手順を用意すること、さらに、③川崎市を対象として、エコタウンを含む地域の特性に応じた、技術・政策の代替的な将来シナリオを具体的に設計してその環境改善効果を定量的に評価する。

2. 都市産業共生システムの既存研究の調査

産業共生システムと国内のエコタウン事業を比較した調査研究として、藤田・盛岡ら（2000）⁹⁾ は国内外における循環型産業集積を対象とし、デンマークのカルンボー、米国メリーランド州の Fairfield Ecological Business Park、国内の北九州エコタウンについて、それぞれの地域内外からの物質代謝と主体間連携について比較評価を行った。循環型の産業では地域の「自立性（Closedness）」と循環産業の階層性に注目して、各産業共生集積を分類して

それぞれの特性を明らかにするとともに、主体間連携の課題と展開フレームを提示した。

久保（2003）¹⁰⁾ は循環型産業として有効であるとされる鉄鋼業、セメント業が臨海部に集中していることに注目し、海上輸送を利用した静脈物流を提案、CO₂ を指標として陸運輸送との比較を行っている。また、静脈産業の実現に向けた課題点と特徴を、動脈産業と比較し、静脈産業は、需要に応じて市場が変動する動脈産業と異なり、廃棄物の発生量によって処理工場の設置上限が限られる、地域を含めた広域循環の実現には住民への配慮と廃棄物の移動に関する法律の整備が今後の焦点としてあげられる、ことを示した。

静脈産業の拠点として機能を期待されるエコタウン研究では、技術や政策を代替的な将来的シナリオ設計によって評価する研究として、大西・藤田ら（2005）⁴⁾ は、川崎エコタウンの将来施策オプションを加えた定量的評価を目的として、セメント産業の CO₂ を指標とした環境負荷削減効果の評価を行った。廃棄物をセメント生産工程の資源とする現状の「資源循環型生産システム」について、新規資源のみに依存する「非循環型生産システム」との比較により、その環境改善効果を算定することに特徴がある。さらに、地域の産業廃棄物と一般廃棄物の発生分布データをもとに、循環生産機能を将来的に発展することの環境改善効果のシナリオ分析を行った。

また、大西・藤田（2006）⁵⁾ では、循環型鉄鋼産業を対象とし、地域拡大のオプションを加えた同様な算定・評価を行った。それぞれの特徴として、廃棄物循環システムの環境改善効果を非循環型と比較する形で評価を行った事と、将来的な政策の見込んだケースの設定を行い、地域におけるポテンシャルを明らかにしたことが挙げられる。また、静脈産業を対象としたマテリアルフローを明らかにし、システム境界を構築している。

松本ら（2005）¹¹⁾ による、北九州エコタウンを対象とした研究では、マテリアルフロー分析と、LCA を用いたエコタウン全体の評価モデルの構築を行っている。構築したモデルをもとに、実データを用いたシナリオ分析として、鶴田・松本ら（2007）¹²⁾ は北九州エコタウンに立地する 22 社のうち 11 社のマテリアルフロー調査によって MFA、LCA の評価を行った。LCA では、輸送、リサイクル処理、廃棄物処理による効果を CO₂ 排出量を指標として、評価している。MFA では循環資源率と再生資源率を算出し、静脈産業としての利益率を算定し、コスト換算している。また、都市の有機性廃棄物の処理を対象とした松本ら（2005）¹³⁾ の研究では、廃棄物処理インフラに対して、現状維持、従来型リサイクル、生ゴミマテリアル循環、生ゴミエネルギー化、従来型リサイクル+利便性向上の 5 シナリオを設定し、主要なデータ

を組み込んだ変数による感度分析を、LCA による評価モデルで構築した。

その他に、許ら (2007)¹⁴⁾ は、実際の鉄鋼メーカーの施設導入に関する評価を、コストと環境影響からシナリオ分析した。シナリオ設定では、時間を固定し、環境効率分析の特徴であるコストや貨幣化環境影響、環境効率などをそれぞれ組み合わせる方法を導入した研究がある。

本研究は循環型産業の廃棄物利用に関する複数の技術インベントリを一般化することに特徴がある。エコタウンの循環型産業施設を中核とする技術インベントリの定量的な解析の方法を提案するとともに、地域の産業廃棄物と一般廃棄物の立地分布と組み合わせ、循環産業施設の環境改善効果を定量的に評価する方法を提示するとともに、都市と産業施設の連携を進める将来シナリオを設計した上でその将来的な効果の推定を行っている。

3. 評価システムのフレーム

(1) 地域廃棄物データ

川崎市内企業の産業廃棄物処理計画実施状況報告書をもとに、業者別の排出量分布データを地理情報データベースに転換して算定に用いる。この報告書は、前年度の産業廃棄物の年間排出量が 1,000t 以上の事業所に対して提出が義務づけられており、廃棄物種別ごとに、廃棄物の発生量、事業所内中間処理量、事業所内残渣発生量、委託中間処理量、売却量のデータを含む。

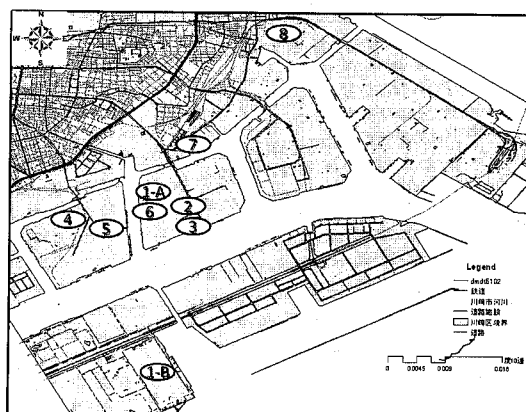
また、川崎市内の一般廃棄物情報については、収集区域と発生量、生活環境事業所所在地と収集量、焼却センター所在地と焼却量、埋立事業所所在地と埋立量を算定に用いた。算定に用いたデータの詳細については栗原・藤田ら (2005)⁷⁾ に記述している。

(2) 技術インベントリデータ

川崎市臨海部では 6 施設のエコタウン補助事業をはじめとして、廃棄物の循環利用による生産活動を推進する施設が集中して立地している⁴⁾ (図-1)。立地企業へのヒアリング調査を整理して、企業が地域の産業廃棄物と一般廃棄物を受け入れる川崎エコタウンの「産業共生」システムの現状の資源フローを図-2 に示す。

本研究では廃棄物の受け入れにより生産を行う循環型施設の技術インベントリを定量的に調査することによって、その環境改善効果とともに、これらの循環型生産技術を核とする将来的な都市・環境政策シナリオの評価、を可能にする。

具体的には循環セメント製造施設、循環鉄鋼製造施設、循環ステンレス製造施設を取り上げて、①新規原料とそ



エコタウン補助対象事業		エコタウン補助対象外事業	
1-A	廃プラスチック高炉原料化施設 (一機) 年間処理能力 : 50,000t/y	6	家電リサイクル施設 年間処理能力 : 1,300,000台/y
1-B	廃プラスチック高炉原料化施設 (産廃) 年間処理能力 : 50,000t/y	7	循環セメント工場施設 年間処理能力 : 310,000t/y
2	廃プラスチック製コンクリート型枠製造施設 年間処理能力 : 20,000t/y	8	循環ステンレス工場施設 年間処理能力 : 190,000t/y
3	難再生古紙リサイクル施設 年間処理能力 : 81,000t/y		
4	廃プラスチックアンモニア原料化施設 年間処理能力 : 65,000t/y		
5	ペットボトルリサイクル施設 年間処理能力 : 27,500t/y		

図-1 川崎エコタウン循環拠点施設立地分布と処理能力

の代替原料の投入割合、②製造プロセスとエネルギー投入量、について調査を行った。そのうえで技術インベントリを定量的に解析する。

(3) 技術・政策の評価システム

循環型産業施設における廃棄物受け入れの環境改善効果を算定するためには、循環企業の受け入れスペックに合致させるための廃棄物発生企業での分別や梱包等のプロセスに伴って発生する環境負荷を、廃棄物量の焼却等の処理に伴う環境負荷と合わせて算定する必要がある。加えて、循環型産業施設で廃棄物が受け入れることによる新規資源の消費削減効果も算定する。

これらの算定方法は、個別の製品 LCA が単独のライフサイクルを対象とすることに対して、複数の生産工程のライフサイクルを評価対象とすることになる。地域循環にかかわる複数の主体間での環境負荷とその削減効果の帰属については論理的な寄与原則を構築することが必要となるが、自然資源の代替効果を算定対象とすることによって地域循環の環境改善効果をより合理的に評価できるものとなる。

この場合の環境負荷及びその削減効果が、製品 LCA と異なりどちらの生産セクターに帰属するかの論理が必ずしも社会的に明示的に議論されていないことに留意す

4. 循環拠点施設の技術インベントリ

(1) 川崎エコタウンにおける「産業共生」システム

本研究で対象とする3施設の特徴を以下に述べる。

循環セメント製造施設では、川崎エコタウン内立地企業から発生する産業廃棄物を受け入れているほか、難再生古紙リサイクル施設から発生するペーパースラッジを受け入れている。

循環製鉄施設では、川崎エコタウン内立地企業から発生する産業廃棄物系廃プラスチックを受け入れるほか、川崎市から発生する一般廃棄物系廃プラスチックを受け入れる可能性を有している。また、同じ敷地内に立地する家電リサイクル施設で前処理された廃プラスチックおよび鉄くずを利用している。

循環ステンレス製造施設では、川崎市内から発生するAプレスやCプレスを受け入れているほか、川崎エコタウン内立地企業から発生するステンレススクラップを受け入れている。

(2) 循環型の製造システム

a) 循環型のセメント製造システム

①循環型の製造プロセスの概要

循環型のセメント製造プロセスを図-4に示す。普通

ポルトランドセメントは主に石灰石、粘土、石炭の3原料から製造されている。原料は、ロータリーキルンで焼成され、クリンカになった後、ミルにおいて乾燥、成形される。そして、成分調整工程を経て最終製品となる。

原料のうち石灰石は、貝殻などの食品廃棄物等で代替し、粘土は、汚泥、瓦礫類、燃え殻、瓦礫、陶磁器類、鉱さいなどの産業廃棄物で代替し、石炭は、廃プラスチックや廃タイヤ、木くずなどで代替する技術が開発されている⁴⁾。

本研究では、粘土を汚泥で代替し、石炭を廃プラスチックで代替する技術をモデル化する。廃プラスチックの利用に際しては、不純物を取り除くための分別工程、一定の大きさにする破碎工程の2種類の前処理工程を想定する。

②最大受け入れ可能性と現状での受け入れ状況

粘土原料は、理論的にも実証的にもほぼ100%を廃棄物で代替可能であり、現状でもすでに100%代替している。ただし、廃棄物の収集範囲は広域にわたっており、今後、より近い地域からの廃棄物受け入れが期待される。

石炭原料は、ヒアリング調査の結果から、重量比で40%を最大受け入れ可能性として設定した。現状では、重量比で約10%を代替しているため、今後受け入れ拡大が見込まれる⁴⁾。

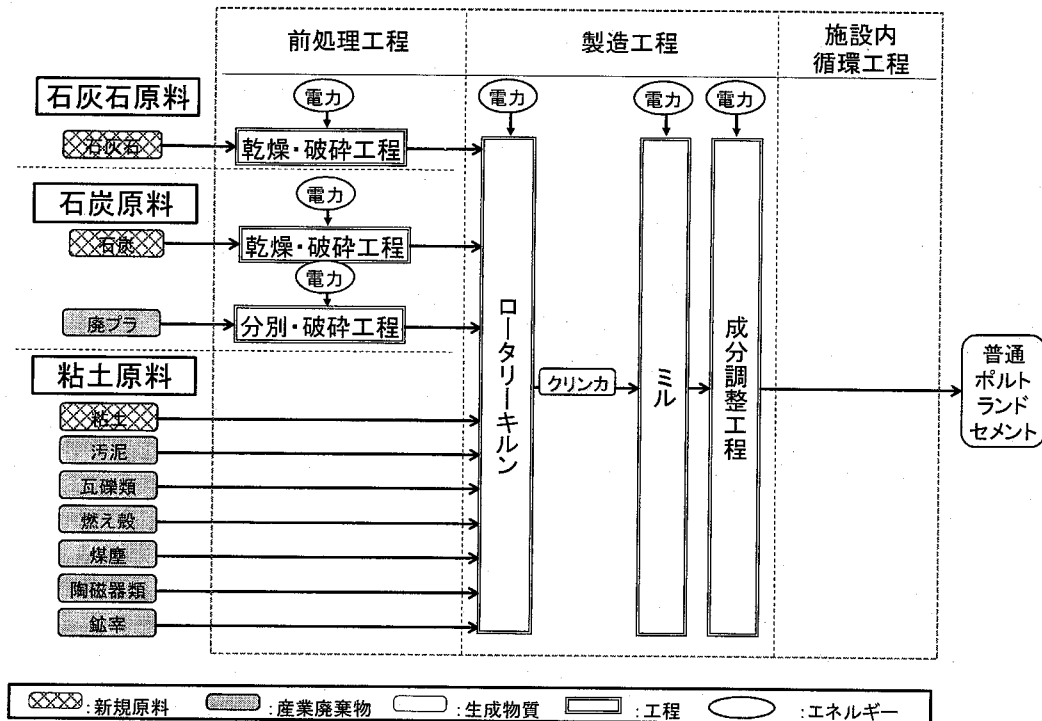


図-4 循環型のセメント製造プロセス

b) 循環型の製鉄システム

①循環型の製造プロセスの概要

循環型の製鉄プロセスを図-5に示す。鉄鋼は、通常、焼結石を製造するための鉄鉱石および石灰、コークスを製造するための原料炭、微粉炭を製造するための一般炭を原料としている。コークス炉および高炉からは、それぞれコークスガス（COG）および高炉ガス（BFG）が発生し、その熱を利用して施設内で自家発電が行われている⁵⁾。製鉄プロセスにおける廃棄物の循環利用技術としては、コークス炉原料化技術および高炉原料化技術の2種類が存在する。

対象施設では、産業廃棄物系廃プラスチックおよびその他プラスチック製容器包装を、コークスおよび微粉炭の代替物として原料利用している。廃プラスチックは前処理として、フィルム状のプラスチックは切断・熔融固化して粒状化し、固形プラスチックは粉碎して粒度調整を行い、高炉傍らに設置された吹き込みタンクに輸送され羽口から吹き込まれる⁹⁾。

②最大受け入れ可能量と現状での受け入れ状況

対象施設における廃プラスチックの最大受け入れ量は、産業廃棄物系廃プラスチック、一般廃棄物系廃プラスチックともに年間5万tである。理論的には、より多量のコークスを代替することは可能であるが、高炉の安定操業等の観点から、本研究では、高炉原料化施設のキャパ

シティを循環型の製鉄プロセスにおける最大受け入れ量と想定している。

現状では、産業廃棄物、一般廃棄物ともに最大受け入れ量に達していないうえに、地域内での廃プラスチックの分別収集が行われていないため広域から収集されており、今後、受け入れ拡大と輸送距離の縮小が見込まれる。

c) 循環型のステンレス製造システム

①循環型の製造プロセスの概要

循環型のステンレス製造プロセスを図-6に示す。ステンレスは、ニッケル分、クロム分、鉄分を原料として製造される。ステンレスは電気炉における再融解によって循環可能な特徴を持つ素材であり、ステンレススクラップおよび鉄スクラップを大量に受け入れることができる。

対象施設は電気炉を保有した施設であり、外部からのスクラップを受け入れに加えて、製造時に発生するスラグを工場内で循環利用する工程を開発している。

②最大受け入れ可能量と現状での受け入れ状況

理論的には、全量をスクラップで代替可能であるが、ニッケル原料およびクロム原料に関しては、品質の確保、入手コストの問題等から、現状程度の受け入れ可能量を設定した。

現状では、鉄原料は、全量スクラップで代替しており、ステンレススクラップは、年間約100,000t受け入れられている。

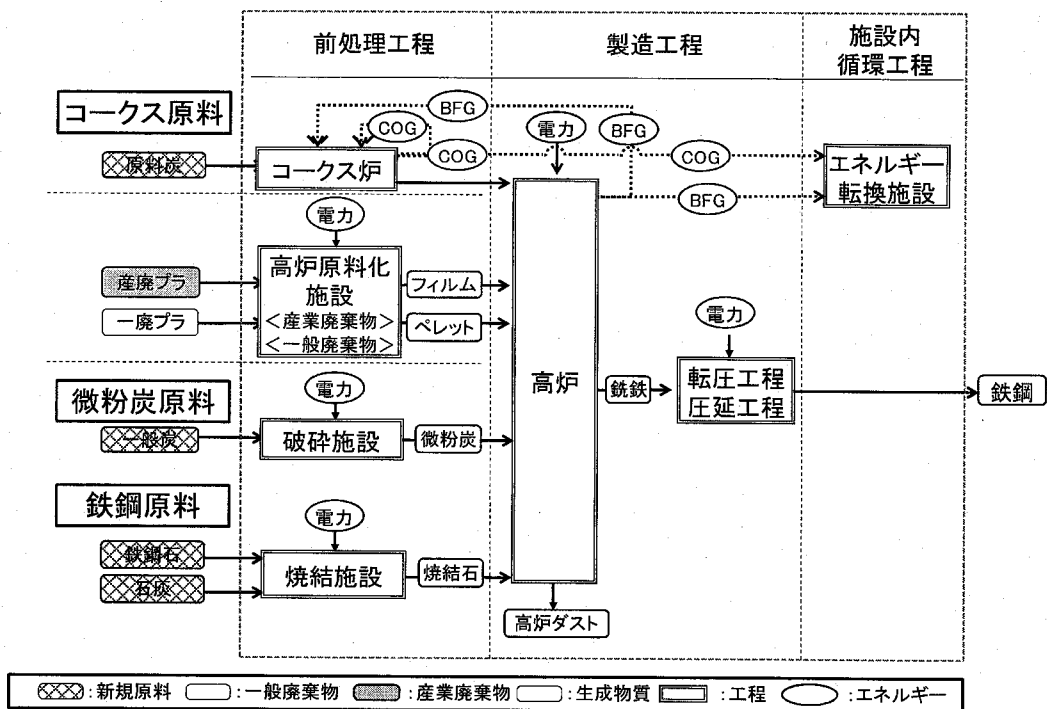


図-5 循環型の製鉄プロセス

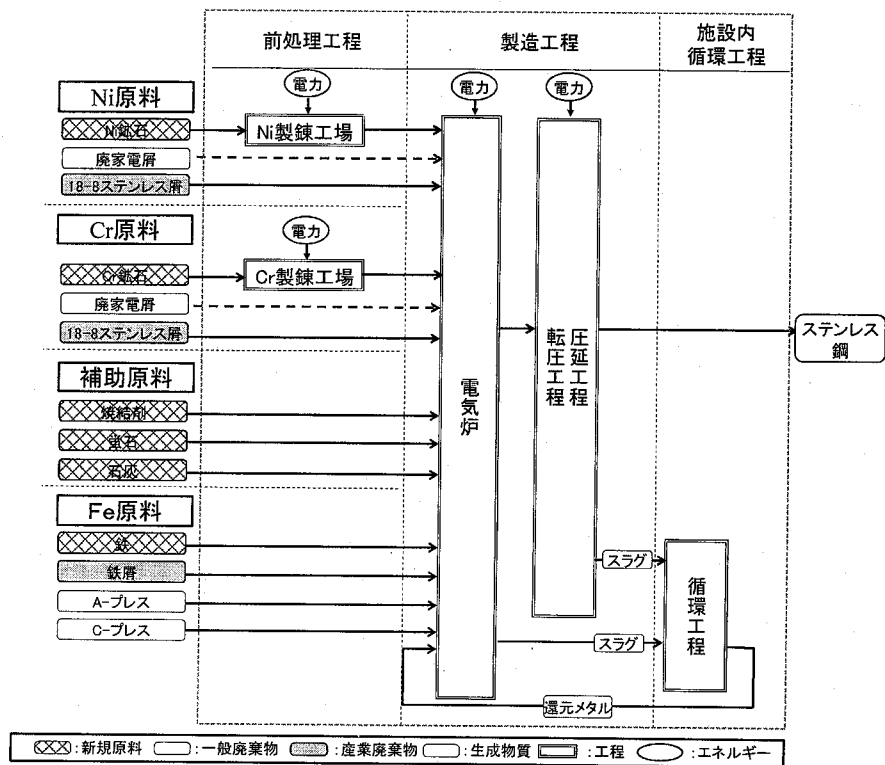


図-6 循環型のステンレス製造プロセス

(3) 技術インベントリの一般化

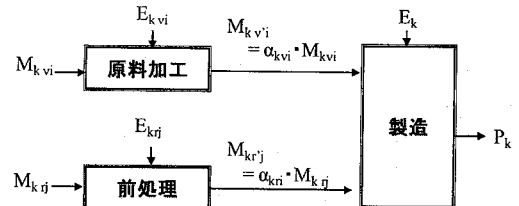
a) 技術インベントリの一般式

i 種類の新規原料 v_i を原料加工工程に投入し、中間原料 v_i を得る。また、j 種類のリサイクル原料 r_j を前処理工程に投入して中間原料 r_j を得る。それぞれの工程では、電力 E_{kvi} , E_{krj} がかかり、歩留まりは α_{kvi} , α_{krj} となる。製造工程に投入される中間原料 v_i と r_j は、循環資源代替割合 α_{kj} を用いた関数によって定まる。製造工程では、電力 E_k を使い、製品 k を製造する (図-7)。

新規原料と代替原料の種類を特定し、それぞれの属性変数である歩留まり、電力使用量を同定することで、技術インベントリの一般化を行う (表-1)。ここでは、各施設 ($k=1$: セメント, $k=2$: 鉄鋼, $k=3$: ステンレス) の新規原料と代替原料の投入量、中間原料量、エネルギー使用量の総量を算定に用いた。

技術インベントリの定式化にあたり、川崎市の「NPO 法人 産業・環境創造リエゾンセンター」と川崎市の支援を受けて行った「産業共生立地調査」の結果にもとづいて作成した。また、対象とした施設のヒアリング調査については、既報論文^{4, 5, 6)}を詳述している。

原料加工工程および前処理工程の原料投入量と、そこで生成される中間原料の総量の比から歩留まり率を算定した。



変数	定義
M_{kvi}	製品 k を製造するのに必要な新規原料 v_i の重量
E_{kvi}	製品 k を製造するのに必要な新規原料 v_i を加工するのに必要な電力量
M_{kvi}	製品 k を製造するのに必要な新規原料 v_i を加工した中間原料 v_i の重量
α_{vi}	製品 k を製造するのに必要な新規原料 v_i の加工工程の歩留まり
M_{krj}	製品 k を製造するのに必要な代替原料 r_j の重量
E_{krj}	製品 k を製造するのに必要な代替原料 r_j を前処理するのに必要な電力量
M_{krj}	製品 k を製造するのに必要な代替原料 r_j を前処理した中間原料 r_j の重量
α_{rj}	製品 k を製造するのに必要な代替原料 r_j の前処理工程の歩留まり
P_k	製品 k の製造量
E_k	製品 k を製造するのに必要な電力量

図-7 一般化した技術インベントリ

表-1 循環型の生産施設における新規原料とリサイクル原料の投入量と中間原料量

循環型の生産施設 k	$\Sigma Mkvi$	$\Sigma Mkvi$	$\Sigma Mkij$	$\Sigma Mkij$	$\Sigma Ekij$	$\Sigma Ekvi$	ΣEk
	新規原料 合計	新規中間 原料合計	代替 原料合計	代替 中間原料 合計	原料加工工程 エネルギー 投入量	前処理工程 エネルギー 投入量	製品製造工程 エネルギー 投入量
k=1 セメント施設	1,000,000	1,000,000	260,000	260,000	0	2,700	33,202
k=2 製鉄施設	8,500,000	7,400,000	66,000	65,000	435,803	19,680	4,784,952
k=3 ステンレス製造施設	720,000	180,000	120,000	120,000	339,712	0	268,968
単位	t/y				MWh/y		

ただし、ケース設定による総量を対象としているため、新規原料・代替原料の変化に連動して歩留まり率も変化する。

さらに、原料加工、前処理、製品製造の各工程で使用するエネルギー原料は LNG・LPG・A 重油・C 重油・原油を対象とし、使用量に原単位を乗じて電力量に換算した。換算に用いた原単位を表-2 に示す。

(4) 循環型の産業施設における歩留まり率の同定

a) 循環型のセメント製造プロセス

新規原料は加工工程が乾燥・破碎のみであり、全量、製造工程で使用されるため、歩留まりは 100% である。

粘土代替原料である汚泥は前処理工程を持たないと仮定している。石炭代替原料は前処理工程で廃プラスチック中の不純物および塩ビを取り除く。粘土代替原料と石炭代替原料の歩留まりはそれぞれ 100%、95% となる。

セメントを製造する際には、シリカ、カルシウムといった元素の割合が一定になることが求められるが、ここでは汚泥の組成が粘土と同じであると仮定し、含水比を考慮した重量比により、粘土と代替資源である汚泥との代替割合を算定した。

燃料である石炭とリサイクル資源である廃プラスチックの代替割合は、それぞれの熱量の比から算定している

b) 循環型の製鉄プロセス

新規原料の鉄鉱石は、石灰とともに焼結過程を経る⁴⁾。また、一般炭は破碎され微粉炭となり、原料炭は、コークス炉を経てコークスに加工される。加工工程の歩留まりはそれぞれ 89%、61%、72% である。

代替原料は、不純物を取り除くための工程を含むため、

産業廃棄物系廃プラスチック、一般廃棄物系廃プラスチックの歩留まりがそれぞれ 99%、75% となる。

廃プラスチックは、コークスまたは微粉炭を代替するが、その代替割合は、原料の属性と高炉の操業状況によって定まる。大西・藤田ら (2006)⁵⁾ では、高炉の操業モデルである Rist モデルを用いて、3 つの原料の投入割合を求め割合を求めている。

c) 循環型のステンレス製造プロセス

新規原料のニッケル、クロム鉱石は製錬され、それぞれフェロニッケル、フェロクロムになる。ニッケル鉱石の歩留まりは 10% となる。代替原料の鉄スクラップ、ステンレススクラップは、原料の劣化に関わらず電炉に直接投入するため、歩留まりは 100% となる。

中間原料のフェロニッケル、フェロクロムの Ni、Cr 含有割合は 20%、60% であり、代替原料のステンレススクラップは、全て 18-8 ステンレス、つまり、Ni、Cr 含有量が 18%、8% であると仮定し、代替割合を算定している⁶⁾。

5. 川崎市における政策評価ケーススタディ

(1) 循環型産業の政策シナリオのケース設計

循環型の産業施設の現状での環境改善効果を算定することと合わせて代替的な将来シナリオを設計して比較評価を行う。具体的には、川崎市内の産業廃棄物を生産施設での受け入れを促進する政策シナリオ、川崎市内の家庭系、事業系からの一般廃棄物を生産施設の技術的な許容量を考慮しつつ、受け入れを想定する政策シナリオについての環境改善効果の算定を行う。

技術インベントリを明らかにした 3 つの循環型生産施設を対象に、政策シナリオのケースを設計する。非循環型生産をベースラインの「ケース 0」として、現状の部分的な資源循環の状況を「ケース 1」とする。市内の産業廃棄物の発生分布をもとに、3 つの循環型生産施設での受け入れ可能廃棄物について、これらの施設に優先的に配分する、産業廃棄物の地域循環「ケース 2」を設ける。さらに、製造製品の品質と生産効率を低減しない水準を考慮した施設の技術的な受け入れ可能量を

表-2 電力量換算に用いた原単位

項目	数値	単位	出典
原油 1L あたりの電力量換算原単位	10757.75	kwh/l	15, 16)
LPG の単位あたりの電力換算原単位	13.9556	Kwh/kg	15, 16)
LNG の単位あたりの電力換算原単位	15.151	Kwh/kg	15, 16)
A 重油の単位あたりの電力換算原単位	10.8698	Kwh/l	15, 16)
C 重油の単位あたりの電力換算原単位	11.5926	Kwh/l	15, 16)
都市ガスの単位あたりの電力換算原単位	11.4258	Kwh/Nm ³	15, 16)

各生産施設に設定した上で、市内の一般廃棄物をこれらの生産施設に配分する一般廃棄物の地域循環「ケース3」を設定する。ケース3では川崎市内でのその他プラスチックの分別は行われていないことから、容器包装リサイクル法対応の廃プラスチックの生産施設での受け入れを設定する。

(2) CO₂を指標とした環境改善効果の算定方法

一般廃棄物については、集積場から最終処分場での処理までのプロセス、産業廃棄物については、事業所立地地点での発生から最終処分場での処理までプロセスについてを評価対象とする。一方で、自然資源を用いた非循環型の生産システムについては新規資源の資源調達、輸送、製品の製造までを評価対象とする。

廃棄物を従来の焼却等の処理施設から循環型の生産システムの原料へ移行することにより、新規資源の代替的な削減による環境負荷削減と廃棄物処理に伴う環境負荷削減を算定の対象とする。それぞれのプロセスについては発生地点から、加工、生産、処理の地点までの輸送に伴う環境負荷も算定する。

①新規資源の調達過程

資源採掘に関するCO₂排出原単位を総資源調達量に乗じることで算出した。

②新規資源の輸送過程

資源調達場所から循環拠点施設までの陸上および海上輸送距離に、CO₂排出原単位を乗じて算出した。

海上輸送は、海外からは10万tバルカーを使用し、国内では内航輸送手段を使用すると仮定している。また、陸上輸送は10tトラックと設定している。

③製造過程

原料の燃焼、消費に伴うCO₂排出原単位を用いるほか、投入エネルギーによるCO₂排出原単位を設定し、乗じて算出した。さらに、セメント製造工程では、石灰石の脱炭酸プロセスに係るCO₂排出原単位を乗じて、加算した。

④廃棄物原料の輸送過程

廃棄物発生地点から処理場までの距離にCO₂排出原単位を乗じて算出した。ただし、陸上輸送のみとし、すべて10tトラックと設定している。

⑤廃棄物の処理過程

廃プラスチックは焼却処理とし、処分量に燃焼に伴うCO₂排出原単位を乗じて算出した。産業廃棄物は埋め立て処理されたとした。

⑥廃棄物の最終処分過程

最終処分場までの輸送距離に、残量とCO₂排出原単位を乗じて算出した。

これらの手法を用いてCO₂排出量を算定する際に使

用した評価原単位を表-3に示す。算定方法については既報を参照されたい^{4) 5) 6)}。

(3) 評価ケースの算定

それぞれのケースにおける3つの循環型生産施設ごとの新規原料投入量と、発生エリア別の受入廃棄物の量を産業廃棄物と一般廃棄物について表-4に示す。

a) 循環型のセメント製造施設

循環セメント施設でリサイクル原料となる廃プラスチックは、投入量を技術者との議論から上限を熱量源投入量の4割と設定して、現状水準の1割からの増加を、ケース2、ケース4で設定した。

その結果、廃プラスチックで代替可能な新規原料である石炭の投入量がケース0では、140千tyであるので対して、ケース1、2、3では120、110、70千tyと減少している。

特にケース3では、一般廃棄物に分類される容器包装プラスチックが循環利用されることで、年間40千tyの新規原料の消費削減が期待できる。

ケース0で関東圏から搬入する260千tyの粘土原料を循環型のプロセスに転換するケース1、2、3では、100%の粘土が廃棄物原料に代替できることから貢献が大きく、代替物としては現状で技術限界水準であるため、ケース2、3では地域内の発生物の有効利用を優先し、輸送距離の削減効果をみている。

表-3 算定に用いた原単位と設定値

項目	値	単位	出展
フェロニッケル製造に伴うCO ₂ 排出量原単位	5,77	t-CO ₂ /t	17)
10,000tセメントの単位あたり燃料消費量	17	t-Fuel/day/隻	18)
100,000tセメントの単位あたり燃料消費量	42	t-Fuel/day/隻	18)
10,000tセメントの平均速度	578	km/day	18)
100,000tセメントの平均速度	489	km/day	18)
10tトラックのCO ₂ 排出量原単位	0,078	kg-CO ₂ /t-km	19)
20tトラックのCO ₂ 排出量原単位	0,062	kg-CO ₂ /t-km	19)
A重油消費に伴うCO ₂ 排出量原単位	2,71	t-CO ₂ /kt	20)
LPG消費に伴うCO ₂ 排出量原単位	3,00	t-CO ₂ /t	20)
電力消費に伴うCO ₂ 排出量原単位	0,38	t-CO ₂ /MWh	21)
内航輸送におけるCO ₂ 排出原単位	0,04	t-CO ₂ /tkm	22)
燃料(C重油)消費に伴うCO ₂ 排出量	2,98	t-CO ₂ /t-Fuel	23)
10,000tセメントの平均速度	578	km/day	24)
10,000tセメントの平均速度	489	km/day	24)
ガソリン利用に伴うCO ₂ 排出量原単位	2,36	t-CO ₂ /kt	25)
石炭燃焼の伴うCO ₂ 排出量原単位	2,64	t-CO ₂ /t	26)
廃プラスチックの燃焼に伴うCO ₂ 原単位	2,6	t-CO ₂ /t	27)
石灰石の脱炭酸化に伴うCO ₂ 排出原単位	0,44	t-CO ₂ /t	26)
LNGによる発電に伴うCO ₂ 排出量原単位	0,0348	t-CO ₂ /t	28)
バルカーの単位あたり燃料消費量	30,88	t-Fuel/day/隻	18)
LNG火力発電由来電力の使用に伴うCO ₂ 排出量原単位	0,608	kg-CO ₂ /kWh	29)

b) 循環型の製鉄プロセス

製鉄施設で高炉還元剤として利用される廃プラスチックは、施設最大稼働による受入れを想定し、受入れ量の増加による環境改善効果を算定する。製鉄施設における新規原料の大半を占める鉄の主原料の鉄鉱石は、

廃棄物での代替は行われていない。

ケース0、1、2、3で新規原料の大幅な削減は見られないが、石炭に比べ燃焼効率の高い廃プラスチックで高炉還元剤を代替する地内循環を促進するケース2、3での社会的貢献は大きい。

表-4 ケースごとの新規資源消費量と廃棄物受け入れ量

千t/y						
施設	種別	調達地	ケース0	ケース1	ケース2	ケース3
			投入量	投入量	投入量	投入量
循環セメント製造施設	新規資源	日本国外	140	120	110	70
		日本国内	900	900	900	900
		関東圏	260	0	0	0
		神奈川県	0	0	0	0
		川崎市内	0	0	0	0
		小計	1,300	1,000	1,000	970
循環鉄鋼製造施設	新規資源	日本国外	8,300	8,200	8,200	8,200
		日本国内	980	980	980	980
		関東圏	0	0	0	0
		神奈川県	0	0	0	0
		川崎市内	0	0	0	0
		小計	9,300	9,200	9,200	9,200
循環スチール製造施設	新規資源	日本国外	280	160	160	160
		日本国内	29	29	29	29
		関東圏	0	0	0	0
		神奈川県	0	0	0	0
		川崎市内	0	0	0	0
		小計	310	190	190	190
総計			11,000	10,000	10,000	10,000

			千t/y							
施設	種別	調達地	ケース0		ケース1		ケース2		ケース3	
			循環資源受 入量	処分量	循環資源受 入量	処分量	循環資源受 入量	処分量	循環資源受 入量	処分量
循環セメント製造施設	産業廃棄物	国内	0	130	130	0	40	85	40	85
		関東	0	48	48	0	0	48	0	48
		神奈川県	0	57	57	0	0	57	0	57
		川崎市	0	220	28	190	220	0	220	0
		小計	0	450	260	190	260	189	260	190
	一般廃棄物	国内	0	0	0	0	0	0	0	0
		関東	0	0	0	0	0	0	0	0
		神奈川県	0	0	0	0	0	0	0	0
循環鉄鋼製造施設	産業廃棄物	川崎市	0	22	0	22	0	22	22	0
		小計	0	22	0	22	0	22	22	0
		国内	0	8	8	0	8	0	8	0
		関東	0	3	3	0	3	0	3	0
		神奈川県	0	43	5	38	5	38	5	38
	一般廃棄物	川崎市	0	7	2	5	7	0	7	0
		小計	0	61	18	43	23	38	23	38
		国内	0	18	18	0	18	0	0	18
		関東	0	7	7	0	7	0	0	7
		神奈川県	0	53	23	30	23	30	28	25
循環ステンレス製造施設	産業廃棄物	川崎市	0	22	0	22	0	22	22	0
		小計	0	100	48	52	48	52	50	50
		国内	0	0	0	0	0	0	0	0
		関東	0	0	0	0	0	0	0	0
		神奈川県	88	0	190	0	190	0	190	0
	一般廃棄物	川崎市	1	0	1	0	2	0	2	0
		小計	96	0	190	0	190	0	190	0
		国内	0	0	0	0	0	0	0	0
		関東	0	0	0	0	0	0	0	0
		神奈川県	0	0	0	0	0	0	0	0
総計			96	630	520	310	520	300	550	280

c) 循環型のステンレス製造施設

循環ステンレス施設で利用されるステンレスの主成分である鉄くずとステンレくずは、現状で鉄スクラップを川崎市内から受け入れており、地域循環を促進するケース 2、3 で際立った受け入れ廃棄物量の増加は見られなかった。

(4) ケーススタディの算定結果

ケース 0 を基準とする各ケースでの CO₂ 削減効果を図-8 に示す。

非循環であるケース 0 をベースラインとして、現状の廃棄物受入を算定したケース 1 で、年間約 60 万 t の CO₂ 削減効果があることが分かった。これは川崎エコタウンにおいて、現時点での温暖化対策についての産業セクターの貢献があると解釈することができる。

さらに、川崎市の産業廃棄物を優先的に循環型の産業施設で受け入れるように誘導することを設定したケース 2 では、年間約 67 万 t の削減が見込まれることがあきらかになった。これは、都市内の循環型産業施設の産業廃棄物受け入れ基盤としての活用を政策的に誘導することにより、地域内での廃棄物循環利用が促されて、遠隔地からの廃棄物受け入れと代替する能力を示している。

川崎市の一般廃棄物を優先的に受け入れるケース 3 では、地区内で循環利用できる廃棄物量が増えることによって、年間約 80 万 t の削減効果が見込まれる事が分かった。特に、一般廃棄物の中の廃プラスチックを高炉還元剤、燃料原料として利用することで得られる削減量は、大きいことが分かった。

川崎市の 2000 年時点での CO₂ 排出量は、26,700 千 t-CO₂/y であった¹⁶⁾。そのうち、産業部門が占める割合は約 92% とその大半を占め、さらに部門中の製造業が 81% であった。

本研究で対象とした 3 施設は製造業に分類され、現状での CO₂ 排出量の合計は 7,000 千 t-CO₂/y であり、川崎市製造業全体の約 35% に相当することが明らかとなった。

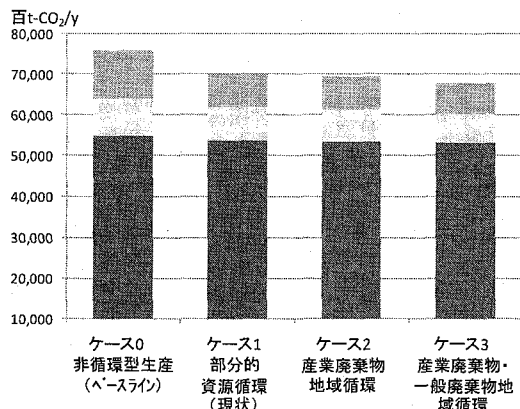


図-8 3施設合計のケースごとの CO₂ 削減効果算定結果

3 施設合計の現状での CO₂ 排出量は、新規原料のみに依存した生産に比べ、8% の削減効果が得られていた。また、ケース 2 で示した産業廃棄物の地域内循環を積極的に行った場合は 9%、ケース 3 で示した一般廃棄物の受入シナリオでは 10% の削減率であった。すなわち、廃棄物の利用促進によって、廃棄物の収集・運搬による CO₂ 排出量を加味しても、現状の約 1.25 倍の環境改善効果が得られる事が明らかとなった。

さらに結果として、対象とした 3 施設の CO₂ 排出量の占有率は川崎市の産業の 1/4 を占めているが、既存の技術の活用のみによって CO₂ 排出量の削減と、新規原料の使用抑制が行えることから、循環型の生産施設の有用性が評価できたといえる。

6. おわりに

本研究では、川崎エコタウンにおける循環型の生産施設の技術インベントリを企業調査を通じて定式化した。そのうえで、排出企業の廃棄物の処理・循環利用プロセスと受け入れ企業の新規資源代替プロセスを含む評価手法を提示することによって、地域資源循環の環境改善効果を算定し、将来的な政策展開のシナリオ設計と評価手法を構築した。

川崎エコタウンを対象として、循環型のセメント製造施設、製鉄施設、ステンレス製造施設を対象として廃棄物受け入れの現状の循環事業の環境改善効果を算定するとともに、統合的な廃棄物政策の推進の効果を定量的に算定することができた。

環境調和産業政策、廃棄物政策の動向に基づく施策シナリオのフィージビリティをふまえた統合型の都市産業共生施策の立案にむけて個別の技術、政策要素についての感度分析等に基づくシナリオ立案システムの構築に取り組むこと、及び廃棄物循環からエネルギー循環、水系循環を含む広義の環境循環を促進することによる高環境効率都市の設計と評価、を今後の課題としてあげたい。

謝辞：本研究は NPO 法人産業・環境創造リエゾンセンターと川崎市と協力して実施している産業共生立地調査の一部を紹介するものである。本研究は文部科学省私立大学研究高度化資金産学連携研究および環境省廃棄物科学研究費補助金の一部として行われた。

参考文献

- 1) 経済産業省 環境まちづくり研究会：今後の地域の環境まちづくりのあり方 pp.1-pp.28, 2005
- 2) 経済産業省：原料及び製品の広域連携マッチング一覧, 2006
- 3) 藤田壮, Wong Looi Fang, 栗原圭充；FRAMEWORK OF ENVIRONMENTAL EVALUATION OF INDUSTRIAL

- ESTATES,第32回環境システム研究論文発表会講演集,pp.75-80,2004
- 4) 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-環境システム研究論文集,vol.133,2005
 - 5) 大西悟,藤田壮:川崎エコタウン内鉄鋼産業における廃プラスチックの地域循環システムの評価,第34回環境システム研究論文集,pp.395-404,2006
 - 6) 杉野章太,大西悟,長澤恵美里,藤田壮:川崎エコタウン産業共生立地調査における非鉄金属循環拠点施設の環境改善効果の算定,第34回環境システム研究論文発表会講演集,pp.141-144,2006
 - 7) 栗原圭充,藤田壮,村野昭人,大西悟:川崎市臨海部における物質循環評価データベースシステムの構築,第33回環境システム研究論文発表会講演集,pp.7-14,2005
 - 8) 村野昭人,藤田壮,長澤恵美里:エコタウンでのWebGISデータベースを用いた地域循環支援システムの提案,第35回環境システム研究論文集,2007(印刷中)
 - 9) 藤田壮,盛岡通,大石晃子:循環型の産業集積開発事業の計画と評価についての調査研究,環境システム研究論文集,Vol.28,pp.285-293,2000
 - 10) 久保正義:我が国の産業構造変化と静脈産業について,日本造船学会誌第8873号,pp.13-16,2003
 - 11) 鶴田直,松本亨,柴田学,垣迫裕俊,篠原弘志:環境会計とLCAの連携による地域資源循環施策の評価手法の開発,環境システム研究論文集,Vol.32,pp.223-228,2004
 - 12) 鶴田直,勝原英治,松本亨:北九州エコタウンにおける静脈産業集積の環境評価システムの構築,第2回日本LCA学会研究発表会講演集,pp.220-221,2007
 - 13) 松本亨,左健:有機性廃棄物再資源化を組み込んだ都市静脈システムの評価モデル構築,第1回日本LCA学会研究発表会講演集,pp.216-217,2005
 - 14) 許峰旗,福島康裕:シナリオ分析と環境効率分析の藤堂利用に関する研究,第2回日本LCA学会研究発表会講演集,pp.26-27,2007
 - 15) 独立行政法人 国立環境研究所:産業連関表による環境負荷原単位データブック(3EDI)-LCAのインベントリデータとして-,p.19
 - 16) 資源エネルギー庁長官官房総合政策課:総合エネルギー統計,平成16年版
 - 17) 産業構造審議会:総合資源エネルギー調査会自主行動計画フォローアップ合同小委員会資料,2004
 - 18) 財団法人 シップ・アンド・オーシャン財団:平成12年度船舶から温室効果ガス(CO₂等)の排出削減に関する調査研究報告,pp.136,2001
 - 19) 社団法人 産業環境管理協会: LCAソフト「JEMAI-LCA」
 - 20) 環境省:事業者からの温室効果ガス排出量算定方法ガイドライン(試案 Ver1.6),pp.2-4,2003
 - 21) 環境省:事業者からの温室効果ガス排出量算定方法ガイドライン(試案 Ver1.6),pp.2-7,2003
 - 22) 国土交通省:平成15年度国土交通白書,2002
 - 23) 独立行政法人 国立環境研究所:産業連関表による環境負荷原単位データブック(3EDI)-LCAのインベントリデータとして-,p.22
 - 24) 財団法人 シップ・アンド・オーシャン財団:平成12年度船舶からの温室効果ガス(CO₂等)の排出削減に関する調査研究報告書,p.25,2001
 - 25) 独立行政法人 建築研究所:建築研究報告 NO.140 木造建築物の再資源化資源循環化技術の開発,p.116
 - 26) 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,2002
 - 27) 独立行政法人 建築研究所:建築研究報告 NO.140 木造建築物の再資源化資源循環化技術の開発
 - 28) 群馬県地球温暖化計画推進計画 HP
(<http://www.pref.gunma.jp/d01/co2plan/tani.html>)
 - 29) 環境省地球環境局:事業者からの温室効果ガス排出量算定方法ガイドライン試案 ver.1.6
 - 30) 川崎市:地球温暖化対策地域推進計画(改訂版) pp.23,2004

Evaluation System for Policy Scenario of Industrially Symbiotic Technologies in Kawasaki Eco-town

Tsuyoshi FUJITA, Emiri NAGASAWA, Satoshi ONISHI, and Shota SUGINO

Industrial symbiotic approach has been applied for integrative urban waste management policies in Kawasaki Eco-town, which is recognized as one of the most innovative practices in Japan. Technology inventory data were surveyed and quantitatively identified through company survey for recycle oriented cement company, waste plastic utilization in blast furnace factory, and stainless plant in the coastal area of Kawasaki Eco-town. Four scenario cases are designed to implement industrial symbiosis effects in Kawasaki environmental policy, where case 1 defines the current circulation system which adopt solid wastes from farer places, case 2 defines the regional circulation collaboration among local industries, and case 3 provides the effects for integrative waste management among urban households and industrial plants, while case 0 identifies the non circulation situations. The results show that as much as 230 thousand reduction in CO₂ tons are expected in the most symbiotic approach.