

# 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 -

大西 悟<sup>1</sup>・藤田 壮<sup>2</sup>・長澤 恵美里<sup>3</sup>・村野 昭人<sup>4</sup>

<sup>1</sup>学生会員 東洋大学 工学部環境建設学科 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井2100)  
E-mail: ohnishi@kanbun.org

<sup>2</sup>正会員 東洋大学教授 工学部環境建設学科 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井2100)  
E-mail: fujita@eng.toyo.ac.jp

<sup>3</sup>学生会員 東洋大学 工学部環境建設学科 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井2100)  
E-mail: tc010048@toyonet.toyo.ac.jp

<sup>4</sup>正会員 東洋大学 地域産業共生研究センター (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井2100)  
E-mail: murano@eng.toyo.ac.jp

産業共生(Industrial symbiosis)の理念および川崎エコタウンの調査に基づき、循環型事業の計画手法を提案し、環境改善効果を算定するための枠組みを提示した。次に、川崎エコタウンを対象とし、セメント工場を核とした循環型事業を計画し、その LCCO<sub>2</sub> を算定した。その結果、廃棄物を利用しないケース(ベースライン)と比較して、現状での循環型事業では、約 3.6 万 t-CO<sub>2</sub>/y の削減効果があることが示された。また、川崎市内から排出される産業廃棄物、さらに川崎市内から排出される産業廃棄物および一般廃棄物を利用した循環型事業では、それぞれ約 3.8 万 t-CO<sub>2</sub>/y, 13.7 万 t-CO<sub>2</sub>/y の削減効果があることが示された。

*Key Words : Life cycle assessment, Industrial symbiosis, recycling cement facility, Kawasaki Eco town*

## 1. はじめに

21 世紀に入り温暖化や資源の枯渇、廃棄物の大量発生は地球的な環境問題として、大きく世界中の関心を集めている。持続可能な環境低負荷型社会を構築するには、個別産業ごとの産業活動の最適化を実現するだけでなく、産業間が連携して物質・エネルギー循環を行う「循環複合」の形成をめざすことが必要である<sup>1)</sup>。

産業共生(Industrial symbiosis, 以下 IS)は、産業エコロジーの理念を実践し、産業ネットワークにおける「循環複合」の形成を目指す実際的な方法論として近年注目を集めている。デンマークの Kalundborg やアメリカの Eco-Industrial Parks プロジェクトはその代表的なモデルである。また、国際連合大学 ZERI が提唱し、現在世界的に取り組みが行われているゼロ・エミッション構想も、産業組織や地域内部の最終排出量の最小化という側面において IS と一致する実証計画であり、より規範的なアプローチとしてとらえることができる<sup>2)</sup>。日本では、ゼロ・エミッション構想に基づき、1997 年以降、経済産業省と環境省が共同してエコタウン事業を進め、23 ヶ所

(2005 年 3 月現在)で IS の形成を推進している。

川崎エコタウンは、1997 年のエコタウン事業認証以降、多くの循環拠点技術が建設されたほか、既存の工場群においても循環拠点技術の整備が進むなど、高度な集積が見られる。さらに、首都圏を含む都心地域との近接性を持つ立地特性から、新たな循環複合を持つ、より発展した IS モデルの形成に展開することが期待されている。

一方、IS に関する既存研究では、発展モデルに関する理論的枠組みが進展し、IS の成功が企業の集約的な環境影響の改善をもたらすと主張されてきた<sup>3)</sup>。だが、データの入手が困難なことから、IS における新たな循環モデルの計画およびそれに伴う環境改善効果を定量的に算定する実証研究はほとんど行われていない<sup>4)</sup>。

本研究では、IS における循環型事業の計画手法を提案するとともに、廃棄物の処理フローも含めたライフサイクル CO<sub>2</sub> 排出量を算定するための枠組みを提示した。さらに、川崎エコタウンの地域循環情報をもとに、セメント工場を核とした循環型事業を計画し、その環境改善効果を算定した。

## 2. 産業エコロジーの理念とIS研究のレビュー

### (1) 産業エコロジーの理念

産業エコロジーは、「人類が経済的、文化的、また技術的に引き続き進展していくことを前提に、積極的に望ましい環境容量または地球の収容力に向けて、理性をもってアプローチしてそれを維持する方法論と定義される。すなわち、産業エコロジーは天然資源から原材料へ、さらに部品と製品を通じて使用済みの製品から最終廃棄処分までの物質循環のサイクルを最適にする社会のプロセスを見出すことといえる<sup>5)</sup>」と定義される。

Dara等<sup>6)</sup>は、産業を環境と共生させようという概念は、1970年代にすでに存在していたと指摘する。例えば、「the closing circle(Commoner, 1971)」では近代産業活動と生態学の関連を指摘し、「我々が、経済学的にも、生物学的にも生き残っていききたいのならば、産業、農業、交通を生態系の要求に十分に則ったものにしないといけないだろう」としている。また、Cloud(1977)は、「経済システムにおいて、物質とエネルギーは熱力学によって調整される相互依存のフィードストックである。」と指摘し、産業エコシステムの概念を提示した<sup>8)</sup>。さらに、1989年 Frosh等<sup>9)</sup>は、「従来型の産業活動、つまり個々の製造プロセスがバージン原料を用いて、製品を販売すると同時に廃棄物を排出する産業活動から、より統合されたモデル、産業エコシステムに移行する必要がある。そのようなシステムでは、エネルギーと物質の消費が最適化され、廃棄物は最小化される。そして、あるプロセスの排出物が他のプロセスの原料になる。」と指摘している。

産業エコシステムのコンセプトを具象化した初期モデルは、デンマークの Kalundborg であり、The Kalundborg companies は自らのシステムを「産業共生(IS)」として次のように定義している<sup>10)</sup>。「産業共生は、異なる産業間の協働であり、それは互いの存在が他方の活力または経済的便益を増加させることによって、そして社会の資源保護、環境保護の要求を考慮することによってなされる。共生とは、一般に、異なる有機組織体が相互に有益であるという関係性をもって共存することを意味する。ここでは、相互に余剰生産物を使用する産業間の協働関係として用いている。」

米国では、PCSD(President Council for Sustainable Development)の答申を受けた環境保護庁とエネルギー省の主導により、エコ・インダストリアル・パーク(EIP)の開発に向けて調査と計画を開始した。そこでは、EIPを産業共生の実証地として次のように定義している<sup>11)</sup>。「エコ・インダストリアル・パークは、製造業とサービス産業の企業が構成するコミュニティである。環境およびエ

ネルギーや水、物質といった資源のマネジメントの協働を通じ、パーク内の企業は、集積の利益を追求するとともに、その個々の利益を最大化する。ISの目的は、環境負荷を最小化しつつ、参画する企業の経済パフォーマンスを向上することにある。」

日本では、1997年、経済産業省(当時通産省)と環境省(当時厚生省)が協同して、エコタウン事業を開始した<sup>12)</sup>。エコタウン事業は、ゼロ・エミッション構想すなわち「ある産業から出るすべての廃棄物を新たに他の分野の原料として活用し、あらゆる廃棄物をゼロにすることをめざすことで新しい資源循環型の産業社会の形成をめざす構想」を推進することを目的としている。2005年3月現在、計23地域がエコタウン事業の承認を受け、事業が展開している。

### (2) ISに関する既存研究の整理

Côté等<sup>13)</sup>は、ISに関する事例調査を通じてその発展段階を次のようにまとめている。①単一の副産物の交換やネットワーク、②リサイクルビジネスクラスター(資源修復、リサイクル企業等)、③環境配慮型技術を有する企業の集積、④グリーン製品を生産する企業の集積、⑤一つのテーマによりデザインされた産業団地、⑥環境配慮型のインフラや建設物を持つ団地、⑦ミックスドユースの開発(産業、商業、住居)。また、Chertow<sup>14)</sup>は、ISを、①廃棄物の交換を通じて、②企業・事業所内で、③EIP内に立地する企業間で、④EIP内に立地していない企業間で、⑤広域における企業間で、“バーチャルに”循環するものに分類している。

ISの実施事例に関する研究は、Kalundborg<sup>15)16)17)</sup>、北米のEIPs<sup>18)19)</sup>、オランダのIESP(Industrial EcoSystem Project)<sup>20)</sup>、アジア地域のEIPs<sup>21)</sup>、日本のエコタウン<sup>22)23)24)</sup>について行われている。

ISに関する定量的評価も近年いくつか行われている。日本のエコタウンについては、盛岡等<sup>22)</sup>が、北九州エコタウンのマテリアルフローの把握およびプラスチック類のマテリアルリサイクル、ケミカルリサイクル、サーマルリサイクルによる効果を評価している。経済産業省<sup>23)</sup>は、川崎エコタウン(難再生古紙リサイクル化施設)、山口エコタウン(焼灰炭セメント原料化施設)、秋田エコタウン(非鉄金属回収施設)の個別施設について、その必要性、効率性、有効性について算定し、評価を行っている。鶴田等<sup>24)</sup>は、環境会計とLCAとを連携させた評価フレームを提示し、北九州エコタウンを対象に、経済部門(エコタウン内相互連携、再生資源の産出、エコタウンへの物質の投入等)、非経済部門(環境教育等)、環境部門(燃料消費、バージン資源採掘等)の評価をしている。

### 3. 川崎エコタウンにおける循環型事業の調査

#### (1) 川崎エコタウンの概要と転換技術

川崎エコタウンとは、川崎エコタウン構想に基づき指定された川崎市臨海部地域（2800ha）を指し、2003年時点で、0.9ha以上の事業者が71社立地している。川崎エコタウン構想の目的は、川崎市の臨海部における高い企業集積と環境技術の蓄積を活かし、相互間の排出資源及び市内で発生する廃棄物を、立地する企業間で循環し有効に活用することである。基本方針として、企業自身がエコ化を推進すること、企業間の連携で地区のエコ化を推進すること、環境を軸とし持続的に発展する地区の実現に向けた研究を行うこと、企業・地区の成果を情報化し、社会・途上国に貢献していくことを掲げている。

川崎エコタウンは、1997年7月、長野県飯田市、岐阜県可児市、北九州市とともに日本で初めてエコタウン事業の承認を受けた。その後、エコタウン事業を活用し、廃プラスチック高炉還元施設、廃プラスチック製コンクリート型枠用パネル製造施設、難再生古紙リサイクル工場、廃プラスチックアンモニア原料化施設、ペットtoペットリサイクル施設等が整備された。

また、川崎エコタウンには、エコタウン事業の補助を受けて新規に建設された施設のほかに、株式会社デイ・シーや株式会社 YAKIN 川崎のように既存の製造プロセスにおいて廃棄物の受入技術を開発した企業も存在する。これらの施設も含めた川崎エコタウンに立地する循環拠点施設を表1に整理した。

#### (2) 川崎エコタウンにおける物質フローの調査

川崎エコタウンに立地する循環拠点施設のうち、ゼロ・エミッション工業団地、廃プラスチック高炉還元施設、廃プラスチック製コンクリート型枠用パネル製造施設、循環セメント工場、循環特殊金属製造工場を対象に物質フロー調査を行った。その結果、次のように特徴を整理した。

##### a) 川崎エコタウンにおける複数の企業間の連携

新たに立地したリサイクル施設と既存の企業の間で廃棄物を原料化するなど、相互利用が進んでいる。また、各循環拠点施設における廃棄物の排出品目と廃棄物の受入品目のマッチングにより、物質循環の可能性が存在する。

##### b) 川崎エコタウン外との物質循環

川崎エコタウン全体では、多量のバージン原料や再資源化原料を地区外から受け入れ、多量の廃棄物を地区外へ排出している。

##### c) 川崎エコタウンでの廃棄物の受入可能余地

川崎エコタウンでは、循環拠点技術の整備が進むなど高度な集積が見られるが、最大受入可能量に達していない施設も多い。

以上の特徴から、川崎市内から発生する廃棄物を出来るだけ川崎エコタウン内の循環拠点施設で受入れることによって更なる環境改善効果が見込まれる。

表-1 川崎エコタウンに立地する循環拠点施設の転換技術

|       | エコタウン事業補助対象施設                                                          |                                                                                           |                                                                                           |                                                           |                                                   | エコタウン事業対象外施設                                                                  |                                                                        |                                                                                       |
|-------|------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|       | 1                                                                      | 2                                                                                         | 3                                                                                         | 4                                                         | 5                                                 | 6                                                                             | 7                                                                      | 8                                                                                     |
| 施設名   | 廃プラスチック高炉還元施設                                                          | 廃プラスチック製コンクリート型枠用パネル製造施設                                                                  | 難再生古紙リサイクル施設                                                                              | 廃プラスチックアンモニア原料化施設                                         | PET to PETリサイクル施設                                 | 家電リサイクル施設                                                                     | 循環セメント工場施設                                                             | 循環特殊金属工場施設                                                                            |
| 事業主体  | JFEスチール(株)(旧日本鋼管(株))                                                   | JFEスチール(株)(旧日本鋼管(株))                                                                      | 環境事業団、コアレックスグループ                                                                          | 昭和電工(株)                                                   | (株) ペットリパース                                       | JFEアーバンリサイクル(株)                                                               | (株) デイ・シー                                                              | (株) YAKIN川崎                                                                           |
| 概要    | 使用済みプラスチックから製鉄用高炉原料を製造している。製鉄用高炉原料は、高炉内に吹き付けられ、還元剤および燃料としてケミカルリサイクルする。 | 廃プラスチックをマテリアルリサイクルし、型枠用パネルを製造する施設。木質合板の代替品として利用される。また、製品として使用された型枠は、回収され、製鉄原料としてリサイクルされる。 | 原料として使用される回収紙は、一般家庭やオフィスのものに加え、機密書類、電車の切符や飲料水の容器など様々な材料が含まれる。生産プロセスで排出される物質もそれぞれ再利用されている。 | 使用済みプラスチックをガス化技術を用いてケミカルリサイクルし、アンモニア等の化学原料を製造する水素を製造している。 | 廃PETボトルをケミカルリサイクルし、バージンのPET樹脂と同等の品質のPET樹脂を製造している。 | 使用済み家電を冷媒フロン回収、破碎、分別等の工程を経て、鉄、非鉄金属は、製鉄プロセスで利用し、プラスチックは高炉原料化施設にて高炉原料として再利用される。 | セメント製造工程で用いられる1450℃を超える高温焼成技術でベースに、産業廃棄物・副産物を再利用している。                  | ステンレスの製造工程において、鉄・Cr・Niを含む金属くずをリサイクル資源として使用している。自社内から発生するスラグ等もリサイクル還元炉にて循環資源化し、使用している。 |
| 受入可能量 | 廃プラスチック処理量：25,000t/y                                                   | 廃プラスチック処理量：20,000t/y                                                                      | 古紙処理能力：81,000t/y                                                                          | 廃プラスチック処理量：65,000t/y                                      | 廃PETボトル処理量：27,500t/y                              | 使用済み家電：1,300,000台/y                                                           | 産業廃棄物（汚泥、燃え殻、鉱さい、ばいじん、がれき類）処理量：250,000t/y、廃プラスチック処理量（サーマル利用）：60,000t/y | 自動車スクラップ、Cプレス、ステンレスくず、使用済みパチンコ台等                                                      |

### (3) 循環型事業の計画と評価システムの枠組み

川崎エコタウン内の循環拠点施設を核とした循環型事業の計画と評価システムの枠組みを図1に示す。具体的には、次の手順で行う。

#### a) 地域循環情報データ

循環型事業の計画と評価を行うために、エコタウン内循環拠点施設とエコタウン内および川崎市内の廃棄物に関するデータを入手する。循環拠点施設については、立地情報、廃棄物の受入状況と受入可能性に関する情報および製造工程のマテリアル・フローのデータを、廃棄物については、廃棄物の発生量、発生位置のデータを入手する。

#### b) 循環型事業の計画

地域循環情報データをもとに、廃棄物のマッチングを行い、複数の循環型事業を計画する。具体的には、従来型の製造工程（廃棄物の原料利用なし）と従来型の廃棄物処理を想定したケース、川崎エコタウンの現状での廃棄物受入状況を想定したケース、川崎市内の産業廃棄物の受入量拡大を想定したケース、さらに川崎市内の産業廃棄物に加え、川崎市内の一般廃棄物の受入量拡大を想定したケースを計画する。

#### c) 環境改善効果の算定

循環型事業の環境改善効果を行う指標として、LCCO<sub>2</sub>、最終処分量の減少量を算定する。

## 4. セメント工場を核とする循環型事業システムの計画と評価

本研究では、ケーススタディとして、エコタウン内の循環拠点施設のうち、循環セメント工場施設の普通ポルトランドセメントの製造工程に着目し、循環型事業の計画と評価を行った。廃棄物のデータを入手する周辺地域は、川崎市内を想定した。また、環境改善効果を行う指標として、LCCO<sub>2</sub>を用いた。

### (1) 循環セメント工場施設の概要

従来の普通ポルトランドセメントの製造工程では、石灰石、粘土、石炭、ケイ石をバージン原料として用いていた。だが、近年の再資源化技術の向上により、セメント産業では、廃棄物の受入能力は大幅に増加した。対象となる循環セメント工場では、2002年度の実績として、産業廃棄物を年間約25万トン循環資源として受入れている<sup>25)</sup>。具体的には、粘土系原料の代替物として、汚泥、燃え殻、鉾さい、ばいじん、がれき類等であり、燃料原料として、廃プラスチック、木くず等を受入れている。そして、粘土系および燃料系原料は、それぞれ最大で100%、40%まで廃棄物により代替可能である<sup>26)</sup>。本研究

では、これら粘土系原料および燃料系原料の代替を対象とし、循環型事業を計画した。

図2は、2002年度の実績値に基づくマテリアルフローである<sup>25)</sup>。粘土系原料に関しては、ほぼ最大限廃棄物を受入れているが、遠方から発生する廃棄物が多い。また、燃料原料に関しては、現状では10%の受入状況であるが、転換技術の開発により40%までが期待されており、受入余地が残されている。

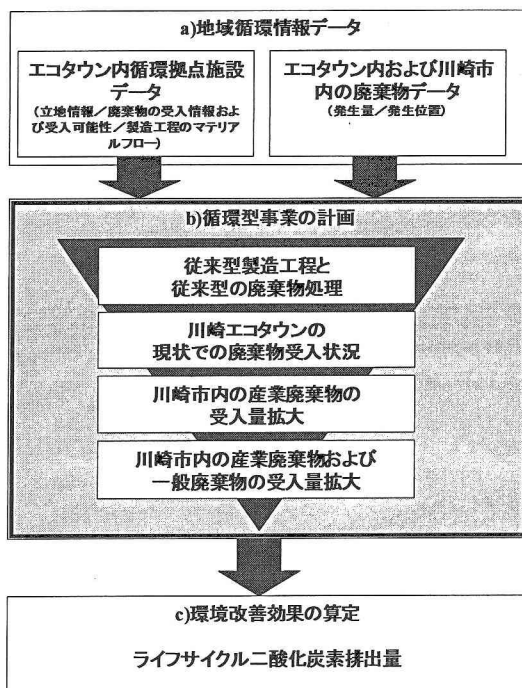


図-1 循環型事業の計画と評価システム

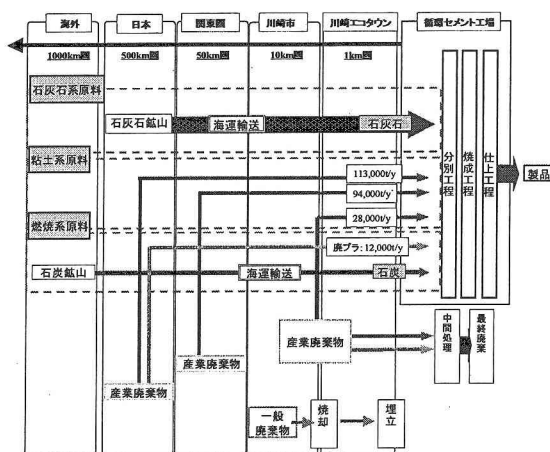


図-2 対象セメント工場のマテリアルフロー

## (2) 川崎市から発生する廃棄物のデータ

### a) 産業廃棄物

循環資源として利用する産業廃棄物のデータは、平成14年度多量排出事業者報告書を用いた。多量排出事業者は、廃棄物処理法において1,000t/y以上の産業廃棄物を排出する事業所と定義され、排出量計画及び前年度の実績値を報告することが定められている。川崎市では、134事業所が対象となる。表2に、種類別の廃棄物の重量を示す。

本研究では、これらのデータを、廃棄物種類別にGIS化したデータベースを利用し、循環利用する産業廃棄物の発生状況の空間情報を把握した。

### b) 一般廃棄物

川崎市内の一般廃棄物に関するデータは、川崎市環境局が毎年調査・公表している資料を利用した<sup>27)28)29)</sup>。データの項目は、収集区域ごとの発生量、生活環境事業所所在地と収集量、焼却施設の所在地と焼却量、埋立事業所所在地と埋立量、そして一般廃棄物の組成比率である(表3)。図3に、一般廃棄物の収集・処理状況のフローを示す。

## (3) セメント工場を核とした循環型事業の計画

循環セメント工場を核とした循環型事業においては、粘土系原料を川崎市内から発生する廃棄物に代替すること、また、燃料系原料の代替量を増加させることで、輸送および廃棄物処理に伴うCO<sub>2</sub>排出量の削減や最終処分量の減少といった環境改善効果が見込まれる。

以上の検討により、セメント工場を核とした循環型事業として、次の4ケースを計画した。各ケースにおける製造工程で使用する廃棄物および処理される廃棄物に関する重量情報、空間情報は、表4に示す通りである。なお、燃料系原料の熱量は、石炭6,000kcal/t、廃プラスチック10,000kcal/tと想定している<sup>26)</sup>。

### a) ケース1：生産工程・廃棄物処理完全分離型

廃棄物の循環利用はなく、全てバージン原料によりセメントを製造する従来型の製造工程を想定する。また、廃棄物は、処理され、最終処分場で埋め立てられる。処分される廃棄物は、他のケースで循環利用される全ての廃棄物を対象とする。処分される廃棄物の輸送距離は、現状における循環利用廃棄物のセメント工場までの重量平均輸送距離と同等であると仮定する(他のケースも同様の仮定をする)。

### b) ケース2：産業廃棄物一部受入型(現状)

現状での廃棄物受入状況で、セメントを製造する。また、残りの廃棄物は、処理され、最終処分場で埋め立てられる。

### c) ケース3：川崎市内産業廃棄物受入型

川崎市内から発生する産業廃棄物のうちセメント代替

可能な廃棄物を選定し、循環原料として利用する。粘土系原料に関しては、ケース2ですでに廃棄物が最大限循環原料として利用されているが、ケース3では、全量を川崎市内の産業廃棄物で代替する。また、燃料系原料に関しては、ケース2で受入れている産業廃棄物に加え、川崎市内の産業廃棄物(廃プラスチックに限定)を循環原料として利用する。また、残りの廃棄物は、処理され、最終処分場で埋め立てられる。

### d) ケース4：川崎市内産業および一般廃棄物受入型

川崎市内から発生する産業廃棄物および一般廃棄物を循環原料として利用する。粘土系原料に関しては、ケース3と同じ想定をする。燃料系原料に関しては、ケース3で用いたものに加え、川崎市内の一般廃棄物(廃プラスチック)を最大限利用する。なお、川崎市内の廃プラスチックは全量分別収集されると仮定する。

表-2 川崎市内の産業廃棄物排出量  
(平成14年度多量排出事業者報告書より)

|         | 種類      | 発生量            |
|---------|---------|----------------|
| 粘土系原料代替 | 汚泥      | 2,031,377(t/y) |
|         | 銕さい     | 385,605(t/y)   |
|         | がれき類    | 46,559(t/y)    |
|         | 燃え殻     | 10,448(t/y)    |
|         | ばいじん    | 282,304(t/y)   |
| 燃料系原料代替 | 陶器くず    | 9,785(t/y)     |
|         | 廃プラスチック | 7,380(t/y)     |

表-3 川崎市発生一般廃棄物の組成比(2002年)

| 項目      | 紙類       | プラスチック | ガラス類      | 金属類      | 厨芥類  | 繊維類 |
|---------|----------|--------|-----------|----------|------|-----|
| 組成比率(%) | 32.8     | 14.0   | 4.9       | 3.5      | 35.7 | 1.3 |
| 項目      | 木片・草木材料類 | ゴム・皮革類 | 陶磁器・土・石塊類 | 流出水分・その他 | 合計   |     |
| 組成比率(%) | 3.3      | 0.3    | 0.2       | 4.0      | 100  |     |

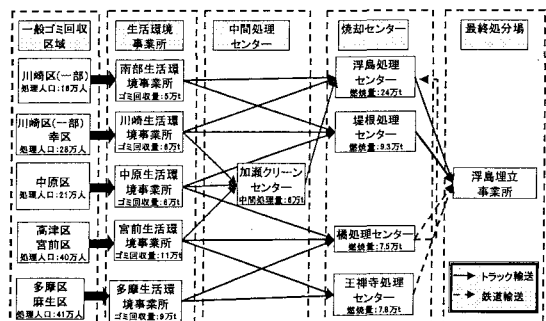


図-3 川崎市における一般廃棄物の収集・処理フロー

表ー4 各ケースにおける製造工程で使用する廃棄物および処理される廃棄物に関する重量情報、空間情報

|              |       | 廃棄物受入量(t/y)              |        |        |         | 輸送距離<br>(km) | 廃棄物転換率<br>(重量%) | 最大廃棄物<br>転換率<br>(重量%) |              | 産業廃棄物<br>処理量(t/y) | 輸送距離<br>(km) | 一般廃棄物処<br>理量(t/y) | 輸送距離<br>(km) |
|--------------|-------|--------------------------|--------|--------|---------|--------------|-----------------|-----------------------|--------------|-------------------|--------------|-------------------|--------------|
|              |       | 川崎市内                     | 神奈川県   | 関東圏    | 関東圏外    |              |                 |                       |              |                   |              |                   |              |
| 粘土系原料代替産業廃棄物 | ケース 1 | 0                        | 0      | 0      | 0       | 0            | 0%              | 100%                  | 処理され<br>る廃棄物 | 490,000           | 52           | 0                 | 0            |
|              | ケース 2 | 28,000                   | 54,000 | 50,000 | 113,000 | 52           | 100%            |                       |              | 245,000           | 52           | 0                 | 0            |
|              | ケース 3 | 245,000                  | 0      | 0      | 0       | 1.5          | 100%            |                       |              | 245,000           | 52           | 0                 | 0            |
|              | ケース 4 | 245,000                  | 0      | 0      | 0       | 1.5          | 100%            |                       |              | 245,000           | 52           | 0                 | 0            |
| 燃料系原料代替廃棄物   | ケース 1 | 0                        | 0      | 0      | 0       | 0            | 0%              | 40%                   |              | 19,380            | 50           | 18620             | 5.4          |
|              | ケース 2 | 0                        | 0      | 0      | 12,000  | 50           | 10%             |                       |              | 7,360             | 50           | 18620             | 5.4          |
|              | ケース 3 | 7,360                    | 0      | 0      | 12,000  | 31           | 14.6%           |                       |              | 0                 | 0            | 18620             | 5.4          |
|              | ケース 4 | 19,380(産廃)<br>18,620(一廃) | 0      | 0      | 0       | 5.0          | 40%             |                       |              | 0                 | 0            | 0                 | 0            |

## 5. 循環型事業による環境改善効果の定量化ーセメント工場を核とした循環型事業におけるケーススタディー

### (1) 環境改善効果の算定

セメント工場を核とする4ケースの循環型事業について、LCCO<sub>2</sub>排出量を算定し、川崎エコタウンにおける循環型事業の環境改善効果を比較、評価した。

バウンダリは、セメント製造工程に着目した原料および廃棄物原料の調達→輸送→製造のプロセスとともに、廃棄物の収集→輸送→処理→最終処分のプロセスを対象とした(図4)。算定に使用したCO<sub>2</sub>排出量原単位は表5の通りである。

#### a) 原料調達

バージン原料の採掘・現地輸送等に関する研究は進んでいるが、ここでは、ケース間で同一と仮定して、算定対象から外している。

#### b-1) バージン原料の輸送

石炭、石灰石、粘土の輸送は、それぞれ100,000トンクラスタンカー、10,000トンクラスタンカー、1,000トンタンカーが用いられていることと仮定した。算定式を式(1)に示す。

$$QV_{ti} = \frac{\alpha_1 \beta C_i \cdot d_{ci}}{100,000 \cdot v_1} + \frac{\alpha_2 \beta L_i \cdot d_{li}}{10,000 \cdot v_2} + \alpha_3 S_i d_{si} \quad (1)$$

ただし、

QV<sub>ti</sub>:ケースiにおけるバージン原料の輸送に伴うCO<sub>2</sub>排出量(t-CO<sub>2</sub>/y)

α<sub>1</sub>:100,000 トンタンカーの単位あたり燃料消費量

(t-Fuel/day/隻)

α<sub>2</sub>:10,000 トンタンカーの単位あたり燃料消費量(t-Fuel/day/隻)

α<sub>3</sub>:内航輸送におけるCO<sub>2</sub>排出量原単位(t-CO<sub>2</sub>/t/km)

β:燃料(C重油)消費に伴うCO<sub>2</sub>排出量(t-CO<sub>2</sub>/t-Fuel)

v<sub>1</sub>:100,000 トンタンカーの平均速度(km/day)

v<sub>2</sub>:10,000 トンタンカーの平均速度(km/day)

C<sub>i</sub>:ケースiにおける石炭重量(t/y)

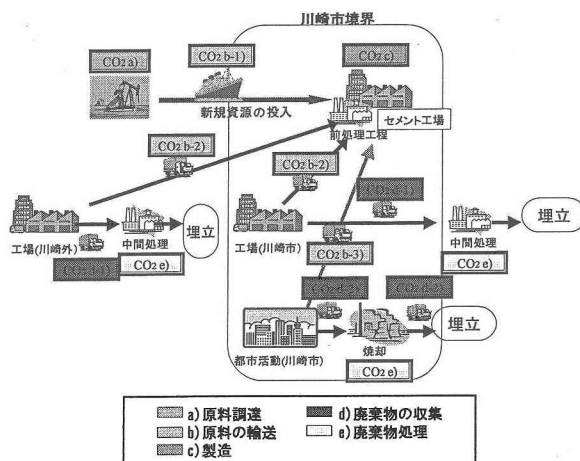
L<sub>i</sub>:ケースiにおける石灰石重量(t/y)

S<sub>i</sub>:ケースiにおける粘土重量(t/y)

d<sub>ci</sub>:ケースiにおける石炭の輸送距離(km)

d<sub>li</sub>:ケースiにおける石灰石の輸送距離(km)

d<sub>si</sub>:ケースiにおける粘土の輸送距離(km)



図ー4 バウンダリ設定

#### b-2) 廃棄物原料の輸送（産業廃棄物）

産業廃棄物の輸送は、全て 10t トラックを利用すると仮定した。輸送距離は、廃棄物発生場所から、循環セメント工場までの直線経路と仮定した。算定式を式(2)に示す。

$$QWt_i = \gamma \cdot (W_{si} \cdot ds_i + W_{ci} \cdot dc_i) \quad (2)$$

ただし、

$QWt_i$ : ケース i における廃棄物原料の輸送（産業廃棄物）に伴う CO<sub>2</sub> 排出量(t-CO<sub>2</sub>/y)

$\gamma$ : 10t トラックの CO<sub>2</sub> 排出量原単位(t-CO<sub>2</sub>/t/km)

$W_{si}$ : 粘土代替産業廃棄物の重量(t/y)

$ds_i$ : 粘土代替産業廃棄物の重量平均輸送距離(km)

$W_{ci}$ : 燃料代替産業廃棄物の重量(t/y)

$dc_i$ : 燃料代替産業廃棄物の重量平均輸送距離(km)

#### b-3) 廃棄物原料の輸送（一般廃棄物）

一般廃棄物は、各区域内から生活環境事業所までの収集に伴う CO<sub>2</sub> 排出量および各生活環境事業所から循環セメント工場への輸送に伴う CO<sub>2</sub> 排出量を算定対象とした。各区域内から生活環境事業所までの収集に伴う CO<sub>2</sub> 排出量は、川崎市温暖化ガス排出量算定業務報告書に示されている収集車（パッカー車）ごとの燃料使用量から算定した<sup>29)</sup>。また、各生活環境事業所から循環セメント工場への輸送は、全て 10t トラックを利用すると仮定した。算定式を式(3)に示す。

$$QWh_i = \eta G_i + \gamma Wh_i \cdot dh_i \quad (3)$$

ただし、

$QWh_i$ : ケース i における廃棄物原料の輸送（一般廃棄物）に伴う CO<sub>2</sub> 排出量(t-CO<sub>2</sub>/y)

$\eta$ : ガソリンの使用に伴う CO<sub>2</sub> 排出量原単位(t-CO<sub>2</sub>/kl)

$G_i$ : ケース i における収集車のガソリン使用量(ld/y)

$\pi$ : 一般廃棄物における廃プラスチックの重量比

$\gamma$ : 10t トラックの CO<sub>2</sub> 排出量原単位(t-CO<sub>2</sub>/t/km)

$Wh_i$ : ケース i における循環利用する一般廃棄物（廃プラスチック）の重量(t/y)

$dh_i$ : ケース i における循環利用する一般廃棄物廃棄物の重量平均輸送距離(km)

#### c) 製造工程

製造工程においては、前処理工程（ケース 2～4 のみ）、原料工程・焼成工程・仕上げ工程に使用される電力使用、燃料の燃焼、石灰石の脱炭酸化プロセスに伴う CO<sub>2</sub> を算定対象とした。電力使用に関しては、自家発電で使用する LNG 重量から算定した。また、ケース 2,3,4 における廃棄物の前処理工程により使用する LNG 重量は、ケース 1

と比較して 5%増加すると仮定した。算定式を式(4)に示す。

$$QP_i = \Phi W_{lng} (1+0.05k_i) + (\omega_1 C_i + \omega_2 W_{ci} + \omega_2 W_{hi}) + \omega_3 L_i \quad (4)$$

ただし、

$QP_i$ : 製造工程に伴う CO<sub>2</sub> 排出量(t-CO<sub>2</sub>/y)

$\Phi$ : LNG による発電に伴う CO<sub>2</sub> 排出量(t-CO<sub>2</sub>/t)

$W_{lng}$ : ケース 1 において発電に使用する LNG 重量(t/y)

$k_1=0, k_{2,3,4}=1$

$\omega_1$ : 石炭の燃焼に伴う CO<sub>2</sub> 排出量原単位(t-CO<sub>2</sub>/t)

$\omega_2$ : 廃プラスチックの燃焼に伴う CO<sub>2</sub> 排出量原単位(t-CO<sub>2</sub>/t)

$\omega_3$ : 石灰石の脱炭酸化プロセスに伴う CO<sub>2</sub> 排出量(t-CO<sub>2</sub>/t)

#### d-1) 処理される産業廃棄物の輸送

循環利用されずに処理される産業廃棄物の輸送に伴う CO<sub>2</sub> 排出量を算定した。輸送に際しては、全て 10t トラックを利用すると仮定した。

$$QWt'_i = \gamma Wt'_i \cdot dt'_i \quad (5)$$

ただし、

$QWt'_i$ : ケース i における処理される産業廃棄物の輸送に伴う CO<sub>2</sub> 排出量(t-CO<sub>2</sub>/y)

$\gamma$ : 10t トラックの CO<sub>2</sub> 排出量原単位(t-CO<sub>2</sub>/t/km)

$Wt'_i$ : ケース i における処理される産業廃棄物の重量(t/y)

$dt'_i$ : ケース i における処理される産業廃棄物の重量平均輸送距離(km)

#### d-2) 処理される一般廃棄物の収集

循環利用されずに処理される一般廃棄物の輸送に伴う CO<sub>2</sub> 排出量(=QWh<sub>i</sub>)を算定した。川崎市温室効果ガス排出量算定業務報告書の算定結果を利用した<sup>29)</sup>。

#### e) 廃棄物処理

循環利用されずに処理される産業廃棄物および一般廃棄物の処理に伴う CO<sub>2</sub> 排出量を算定した。ただし、廃棄物の処理に伴う CO<sub>2</sub> は、廃プラスチックの燃焼に伴う CO<sub>2</sub> のみであると仮定した。算定式を式(6)に示す。

$$QWb_i = \omega_2 Wt'_i + \omega_2 W_{hi} \quad (6)$$

ただし、

$QWb_i$ : ケース i における廃棄物処理に伴う CO<sub>2</sub> 排出量(t-CO<sub>2</sub>/y)

$W_{hi}$ : ケース i における処理される一般廃棄物の重量(t/y)

以上(1)~(6)の算定式から、各ケースのCO<sub>2</sub>排出量(=Q<sub>e</sub>)を求めた。算定式を式(7)に示す。

$$Q_e = QVt_i + QWt_i + QWhi + Q_{pi} + QWt_i' + QWhi' + QWbi \quad (7)$$

## (2) 算定結果と考察

各ケースのライフサイクルCO<sub>2</sub>の算定結果は、ケース1と比較して、ケース2~4はそれぞれ35,600t-CO<sub>2</sub>/y、37,800t-CO<sub>2</sub>/y、137,000t-CO<sub>2</sub>/yの減少であった(図5)。このことから、次のことがいえる。

- 現状において、セメント工場が廃棄物を受入れていることで、35,600t-CO<sub>2</sub>/yの温暖化ガス削減に寄与している。川崎エコタウン内の産業廃棄物を受入れることで、更に1,800t-CO<sub>2</sub>/y温暖化ガスの削減効果が見込める。川崎市内一般廃棄物を受入れることで、さらに101,000t-CO<sub>2</sub>/yの削減効果が見込める。
- 全体のCO<sub>2</sub>排出量の中で、燃焼による排出量が占める割合が大きく、輸送による排出量の寄与が小さい事が分かった。計画した各ケースでの削減効果は、主に廃プラスチックによる石炭の代替効果であったといえる。

## 6. 結論と課題

本研究ではISでの、循環拠点施設および廃棄物の発生状況をデータベース化することで、循環型事業を計画す

表-5 算定に使用した二酸化炭素排出量原単位一覧

|            | 項目                        | 値      | 単位                        | 出典  |
|------------|---------------------------|--------|---------------------------|-----|
| $\alpha_1$ | 100,000t タンカーの単位あたりの燃料消費量 | 17     | t-Fuel/day/隻              | 30) |
| $\alpha_2$ | 10,000t タンカーの単位あたりの燃焼消費量  | 42     | t-Fuel/day/隻              | 30) |
| $\alpha_3$ | 内航輸送における二酸化炭素排出原単位        | 0.04   | t-CO <sub>2</sub> /t/km   | 31) |
| $\beta$    | 燃料(C 重油)消費に伴う二酸化炭素排出量     | 2.98   | t-CO <sub>2</sub> /t-Fuel | 32) |
| $v_1$      | 100,000t タンカーの平均速度        | 578    | km/day                    | 33) |
| $v_2$      | 10,000t タンカーの平均速度         | 489    | km/day                    | 33) |
| $\gamma$   | 10 tトラックの二酸化炭素排出原単位       | 0.078  | t-CO <sub>2</sub> /t/km   | 34) |
| $\eta$     | ガソリン利用に伴う二酸化炭素排出原単位       | 2.36   | t-CO <sub>2</sub> /kl     | 34) |
| $\omega_1$ | 石炭燃焼の伴う二酸化炭素排出原単位         | 2.64   | t-CO <sub>2</sub> /t      | 35) |
| $\omega_2$ | 廃プラスチックの燃焼に伴う二酸化炭素原単位     | 2.6    | t-CO <sub>2</sub> /t      | 36) |
| $\omega_3$ | 石灰石の脱炭酸化に伴う二酸化炭素排出原単位     | 0.44   | t-CO <sub>2</sub> /t      | 35) |
| $\phi$     | LNG による発電に伴う二酸化炭素排出原単位    | 0.0348 | t-CO <sub>2</sub> /t      | 37) |

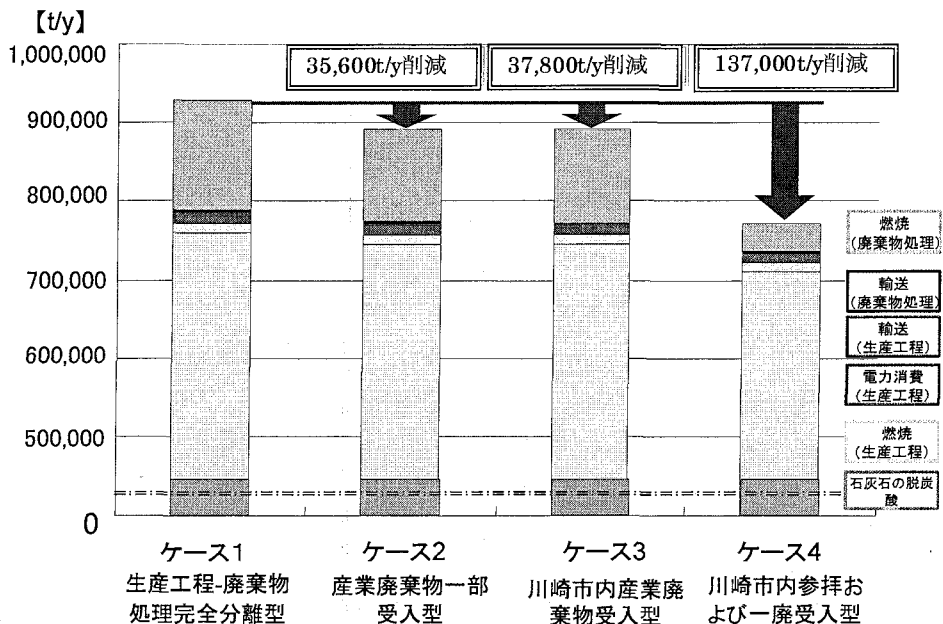


図-5 各ケースにおける LCCO<sub>2</sub> 排出量の算定結果



るとともに、その環境改善効果を算定する枠組みを構築した。さらに、川崎エコタウンを対象としセメント工場を核にした循環型事業の計画とその環境改善効果の評価により、その有効性が確認できた。

今後の課題を次に示す。

- a) 複数の副産物循環利用に伴う環境改善効果の算定システムの構築
- b) 取引コストを含めた循環型事業の経済評価システムの構築および環境効率(eco-efficiency)の算定
- c) 研究成果を循環型事業の実現化へと導くための意思決定支援システムの開発

## 7. 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経済局・環境局・総合企画局のご協力をいただき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。また、研究データの収集に当たっては株式会社デイ・シイの皆さんには数度の調査にご協力いただいた。ここに記して謝意を表す。また、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同科学研究補助金基盤 (B) の一部として行われた。

## 参考文献

- 1) 盛岡通 編者,「産業社会は廃棄物ゼロをめざす」, 森北出版, 1998.
- 2) 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, Vol.28, 2000.
- 3) Hanne Siikavirta and Lassi Linnanen, industrial ecology and greenhouse gas control. Helsinki university of technology Lahti center.2002.
- 4) Hanne Siikavirta and Lassi Linnanen, industrial ecology and greenhouse gas control. Helsinki university of technology Lahti center.2002.
- 5) Gradel, T.E., Allenby, B.R. 共著 後藤典弘訳,「産業エコロジー」, トッパン, 1996.
- 6) Dara O'Rourke, Llyoyd Connelly and Catherine Koshland. Industrial ecology: A critical Review. international journal of environment and pollution, Vol.6, 1996.
- 7) Commoner, B. The Closing Circle, Bantam books, 1971.
- 8) 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, Vol.28, 2000.
- 9) Frosch, R.A., "Strategies for Manufacturing," Readings from Scientific American: Managing Planet Earth, 1989.
- 10) Kalundborg Companies. Industrial Symbiosis (<http://www.symbiosis.dk/>)
- 11) President's Council on Sustainable Development (PCSD). Eco-Industrial Park Workshop Proceedings. 1997.
- 12) 経済産業省, HP (<http://www.meti.go.jp/>)
- 13) Raymond P. Côté, E. Cohen-Rosenthal, Designing eco-industrial parks: a synthesis of some experiences, J. Cleaner Production, 1998.
- 14) Chertow, M. Industrial symbiosis: Literature and taxonomy. Annual Review of Energy and Environment, 2000
- 15) N. Gertler, Industrial Ecosystems: Developing Sustainable Industrial Structures, M.S. Thesis, M.I.T. 1995.
- 16) H. Grann, The Industrial Symbiosis at Kalundborg, Denmark, in The Industrial Green Game, D.J. Richards (ed.), National Academy Press, Washington, 1997.
- 17) Christensen, J. Christensen, Proceedings of the Industry & Environment Workshop, held at the Indian Institute of Management, Ahmedabad, India, 1999.
- 18) Côté, Raymond P., Robert Ellison, Jill Grant, Jeremy Hall, Peter Klynstra, Michael Martin and Peter Wade. 1994. Designing and Operating Industrial Parks as Ecosystems. School for Resource and Environmental Studies. Dalhousie University, Halifax, Nova Scotia, Canada.
- 19) Raymond P. Cote, E. Cohen-Rosenthal, Designing eco-industrial parks: a synthesis of some experiences, J. Cleaner Production, 1998.
- 20) R.R. Heeres, W.J.V. Vermeulen, F.B. de Walle, Eco-industrial park initiatives in the USA and the Netherlands: first lessons, J. Cleaner Production, 2004.
- 21) UNEP-DTIE and Institute for the Communication and Analysis of Science & Technology, Environmental management for industrial estate-information and training resources, 2001
- 22) 盛岡通, 今堀洋子, 向井肇. 北九州エコタウンにおける循環複合形成の評価に関する研究. 第9回地球環境シンポジウム講演論文集, 2001.
- 23) 経済産業省. エコタウン補助事業に関する事後評価書. 2003.
- 24) 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. Vol.32. 2004
- 25) 株式会社デイ・シイ提供資料
- 26) 株式会社デイ・シイへのインタビュー結果
- 27) 川崎市環境局, 平成14年度事業系ごみ排出実態調査事業報

- 告書,2002
- 28) 川崎市環境局,平成 12 年度市民ごみ排出実態調査報告書,2000
- 29) 川崎市環境局,川崎市温室効果ガス排出量算定業務報告書,2002
- 30) 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(CO<sub>2</sub> 等)の排出削減に関する調査研究報告 p.136,2001
- 31) 国土交通省:平成 15 年度国土交通白書,2002
- 32) 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
- 33) 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(CO<sub>2</sub> 等)の排出削減に関する調査研究報告書,p.25,2001
- 34) 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
- 35) 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
- 36) 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
- 37) 群馬県地球温暖化計画推進計画 HP (<http://www.pref.gunma.jp/d/01/co2plan/tani.html>)

## Method of Planning and Evaluation of Industrial Symbiosis Projects: Case study on the projects utilizing the recycling cement facility in Kawasaki Eco-town

Satoshi ONISHI, Tsuyoshi FUJITA, Emiri NAGASAWA and Akito MURANO

This study proposed a planning method of Industrial Symbiosis (IS) projects and an evaluation method to calculate LCCO<sub>2</sub> of the project based on the theory of IS and the survey on Kawasaki eco-town. Secondly we planned four cases of IS projects utilizing the recycling cement facility in Kawasaki eco-town and estimated the amounts of LCCO<sub>2</sub> in each case. The results of CO<sub>2</sub> emission reduction were 36 thousands t-CO<sub>2</sub>/y ( "actual situation" ), 38 thousands t-CO<sub>2</sub>/y ( "local industrial wastes recycling" ) and 137 thousands t-CO<sub>2</sub>/y ( "local industrial and general wastes recycling" ) compared with "without any waste recycling (baseline)"