

## 4. 都市更新にともない発生する環境負荷のライフサイクル評価に関する研究

Life-Cycle Estimation of Environmental Emission from Urban Development Process

藤田 壮\*・中原智哉\*\*・鈴木 斉\*\*\*・盛岡 通\*

Tsuyoshi Fujita, Tomoya Nakahara, Hitoshi Suzuki, Tohru Morioka

**ABSTRACT**; Urban development causes various environmental cost, such as carbon dioxide emission, solid waste, and resource consumption. While life cycle analysis studies are attempted, their interactive linkage with social policy elements are seldom analyzed. In this paper, firstly, environmental emission structure from urban development projects are generally discussed. Secondly, the scheme of estimation program is shown, which has multi-system structure. Thirdly, estimation process is presented. Finally, case study is done in Nakanoshima District, in the Osaka City downtown, Japan. The following are found, (1) operation process counts for a large part of carbon dioxide emission in the urban facility life cycle. (2) denser building location cause carbon dioxide emission increase from the district. (3) combination of facility-scale and district-scale improvement can be effective countermeasures for environmental load reduction.

**KEYWORDS**; Urban Development, Life Cycle Analysis, Strategic Plan, CBD, Osaka City

### 1. はじめに

21世紀にむけて、地球環境への負荷の小さい持続可能な都市圏づくりが緊急の課題とされるものの、「持続可能な」都市のあり方を具体的に検討してその実現に向けての方策に対する幅広い都市環境政策の領域での体系的な取り組みについての議論は未だ端緒についたばかりといえる。都市集積の整備や更新で建築物や都市インフラの建設にともなう資材の生産と輸送、施工の段階、さらに都市活動やサービスを生産する過程でのエネルギーや資源の消費だけでなく、施設更新にともなう建設廃材など、さまざまな環境への負荷が発生する。さらに、それらの環境への影響は地区および近隣する地区に限定されるものから、都市スケール、また大都市圏域のスケールに及ぶもの、二酸化炭素のように地球規模への影響を考慮する必要があるものまで多岐にわたる。

ライフサイクル・アナリシス (Life-cycle Assessment) の手法は主に工業製品のもたらす環境負荷を原料採取から生産、流通、消費、廃棄に至る製品のライフサイクルを通じて定量的に評価する手法であり、<sup>1)</sup> その手法を建築施設から広く社会資本建設への適用して、都市施設から発生する環境負荷をライフサイクルで評価する研究が国内外で多く行われている<sup>2), 3) 4)</sup>。これらの研究を通じて、各種の施設や構造物を単体で取り上げてそのストックとしての環境負荷を定量化するケーススタディを通じて建築施設や土木構造物の建設と更新に伴って発生する環境負荷を定量的に評価するための二酸化炭素を初めとする環境負荷の原単位の整備や計算のためのインベントリーの体系化は進んできた。一方で、その分析から得られた結果をどのように社会環境システムに反映して、環境負荷の小さい持続可能な循環代謝社会を構築していくことへの展開にむけて検討している研究は着手されたばかりであり、LCAによる都市構造物分析を都市環境政策に展開するための課題を以下のように整理する。①評価対象領域の設定；都市空間における循環代謝は建物やインフラ施設など物理的基盤に関わるエネルギーや物質の流れとともにそこでおこなわれる生産や消費、移動などの人の活動にともなうエネルギーと物質の流れがある、さらに、都市空間で消費される物質やエネルギーの製

\*；大阪大学大学院工学研究科環境工学専攻 Dept. of Environmental Eng., Graduate School of Eng. Osaka-Univ, \*\*；科学技術振興事業団 Japan Science and Technology Co., \*\*\*；長崎大学経済学部 Faculty of Economics, Nagasaki Univ.

造地点は通常、都市集積からの遠隔地や海外であることが多く、評価の領域の境界を論理的な必然性をもって設定することは困難である。②環境改善施策の評価；都市空間で発生する環境負荷を LCA で評価した結果は通常、集計的な値として取り扱われることが多い。このような評価プロセスによって、経済的な環境改善施策や生産主体に対する物質使用規制等の一律的な環境改善施策の効果を評価することは可能となるが、都市計画や地域環境計画などの空間マネジメント施策の効果を定量的に評価することは困難である。都市計画や環境計画に関わる改善施策をあらかじめ戦略的に用意して、その物質およびエネルギーの循環構造への影響を内部化する評価プロセスを構築しておくことが必要である。③環境負荷評価の総合化；都市環境の改善施策はさまざまな環境負荷への同時に影響をもたらすため、環境負荷の評価と都市環境政策の設計に反映させるためには、物質やエネルギーの消費や炭酸ガス、廃棄物の発生など、都市空間から発生するさまざまな環境負荷物質を総合的に評価することが求められる。

本研究ではLCAの手法を用いて、都市更新や都市開発にともなって発生する環境負荷を定量化することの論理を体系的に整理した上で、その評価システムの構築を試みた。すなわち、都市構造物のデータ入力サブシステムと環境負荷評価サブシステム、さらに環境負荷を低減する代替計画案を更生するサブシステムなどから構成される「環境負荷算定システム」を設計してそのプロトタイプの概要について報告する。さらに、大阪市の中之島地区を対象に行ったケーススタディを通じて得られた結果についての議論を紹介する。

2. 環境負荷の評価の基本フレーム

都市空間における循環代謝のフローは「都市活動」に起因するものと、「都市構造物」に起因するものから構成される。都市活動とは工場における生産活動やオフィスビルなどにおける業務活動やサービス生産、商業施設等における販売活動や居住に関連する行動を含む。都市構造物は業務や住宅、商業施設などの都市に立地する建物とともに、交通施設、道路、上下水道などにインフラ施設を意味する。都市からの環境負荷としては、都市基盤の建設にともなって直接発生するもの（区分1）と、基盤の建設の為の資材の生産や調達にともなう環境負荷（区分2-a）、基盤の建設にともなって発生する炭酸ガスや廃棄物などの環境負荷（区分2-b）がある。さらに基盤上でおこなわれる都市活動にともなう環境負荷（区分3）や、そのために必要な資材生産や廃棄物発生などの環境負荷を考慮する必要がある。（図1、表1）

建設活動から直接的に発生する環境負荷については、その負担責任を都市更新の関係主体に帰属する社会的な合意を形成することが比較的容易であることが予想されるものの、一方で、建設の場所から遠隔の資材生産の主体で発生する炭酸ガスや廃棄物など、都市更新にともなう間接的に発生する環境負荷は、必ずしも構造物の立地する地点に帰属することにはならない。その定量化によって派生的な環境負荷総量を計測する試みは社会的に重要な示唆を与えるものの、地球温暖化抑制のための現実的な都市政策をデザインする上では、ライフサイクルの環境負荷を集計的に取り扱うこ

表1 環境負荷の定義

|       |                                                                 |
|-------|-----------------------------------------------------------------|
| 区分1   | 施工の現場から直接排出される廃棄資材や建設活動にともなう施工機械からの炭酸ガスの発生など、建設工事から直接排出される環境負荷。 |
| 区分2-a | 建築物や土木構造物の資材の調達およびその施工現場までの運搬の過程で発生する環境負荷                       |
| 区分2-b | 建設構造物を解体し、廃棄する過程で発生する環境負荷。                                      |
| 区分3   | 建築物や土木インフラ施設を利用しておこなわれる都市活動やサービス財の生産にともなって発生する環境負荷。             |
| 区分4   | 都市活動、サービス生産をおこなうための資材生産や廃棄物発生などの環境負荷。                           |

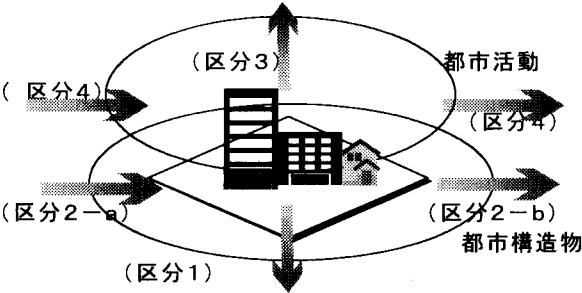


図1 都市空間から発生する環境負荷の分類

と合わせて、発生する環境負荷構造を分節化して評価することによって環境負荷削減の施策の対応する空間領域や対象主体を設定することが重要となる。

本研究では都市基盤となる建設構造物のライフサイクルの環境負荷に注目する。建築構造物、土木構造物の類型をおこない、それぞれの構造、工法、規模ごとに単位構造物量あたりの環境負荷原単位を算定して建物のライフスタイル環境負荷を評価する方法を採用する。すなわち、建築物や土木基盤構造物について、資材調達、資材運搬、施工、運用、保守、大規模更新、廃棄の7つのステージに分割して、それぞれのステージで発生する環境負荷を、「個別積み上げ方式」と「産業連関方式」を併用した「組み合わせ方式」を用いて算定する。環境負荷区分と各ステージ毎の算定項目との関係を以下に示す。また、算定対象は発生炭酸ガスと、廃棄物とする。建造物の建設や廃棄、更新にともなう環境負荷は必ずしも施工の現場で発生するものではなく、鉄鋼やセメントは地域県外から国土スケールにその調達先はおよぶ。鉄鉱石や石油などについてはさらに海外からの輸入に依存する。資材の運搬にともなって発生する環境負荷のうち、騒音や振動は資材調達地点から施工地点に至るまでの広い範囲に影響をもたらす。施工、運用についての負荷は建設の場所で発生するがそれを支えるエネルギー供給については発電所で発生する環境負荷など広い範囲に及ぶ。施設運用期間における保守や大規模更新にともなって資材が必要になり、その調達は施工時と同じく広域に及ぶ。建物老朽化や更新にともなう廃棄物は建造物の立地点で発生して、その処分については広く圏域内の埋め立て地まで運搬されることに留意する。

### 3. 都市更新に伴う環境負荷算定システムの概要

#### 3.1 システムの基本構造

建築構造物や土木構造物の集積する地区で、施設更新や都市再開発などの都市構造物の更新に伴って発生する環境負荷と、都市基盤に支えられた都市活動によって発生する環境負荷を評価するシステムを、都市構造物の建設から利用と廃棄までの各ステージ毎に消費される資材やエネルギーのインベントリをライフサイクルで算定する「都市構造ライフサイクル・インベントリ算定サブシステム」と、算定されたマテリアル・インベントリに基づいて発生する環境負荷を評価する「ライフサイクル都市環境負荷評価サブシステム」から構成す。さらに、都市構造物の集積地区における現状分析を踏

まえて構造物の更新のプロセスから発生する環境負荷を低減する計画シナリオを構築する「戦略的代替計画案策定サブシステム」を合わせて中核システムと位置づける（図2）。都市更新に起因する環境負荷を戦略的に低減するための計画シナリオをインベントリ算定や都市環境負荷評価などのサブシステムに反映することによって計画シナリオの効果を客観的に評価することを可能にする。

建築物、土木基盤施設など都市構造物について、用途、構造特性、規模、竣工時期情報、工法等についての特性データを入力する。建築物を例にすると、街区番号や建物番号などの用途については事務所、ホテル、商業施設、住宅、工場などの用途分類、S造やRC、SRCなどの構造特性、竣工年数、延べ床面積、地上階数を入力する。建物の運用期間は建物構造に応じて一意的に与える。情報入力はいち自治体で整備する建物

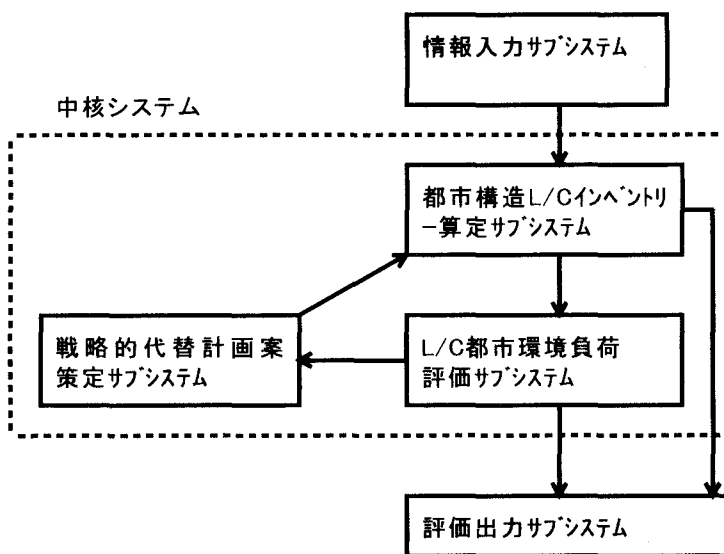


図2 環境負荷評価システムの基本フレーム

情報データベースやデジタル化された住宅地図や、航空写真の情報を利用する入力プロセスの省力化や分析結果の出力の地図情報化やビジュアル化も研究の視野に入れる。

### 3.2 インベントリ算定サブシステム、環境負荷評価サブシステム

計算の基本単位として建築物および土木構造物の用途、構造の種類別に「算定ユニット (estimation unit)」を設定する。個々の建物や街区や地域ごとに計算対象のデータをマトリックス (data matrix) として用意する。個々の算定ユニットに対しては資材生産から、資材運搬、現場施工、運用稼働、保守、大規模更新、廃棄までの7段階の「ステージ (estimation stage)」ごとに消費する資材やエネルギーの量の原単位マトリックス (マテリアル・マトリックス, material inventory unit matrix) を用意する。各資材毎に、二酸化炭素や廃棄物の発生量や、エネルギー消費量などの環境負荷の原単位マトリックス (環境負荷マトリックス, article matrix) を用いて、建物床面積などの構造物の物量変数との演算により環境負荷を算定する。計算のフレームを図3に示す。マテリアル・マトリックスと環境負荷マトリックスは基本数値の組み合わせを用意するとともに、研究の目的に応じた原単位マトリックスの利用を外生的に変更することが可能となるようにシステムを設計する。

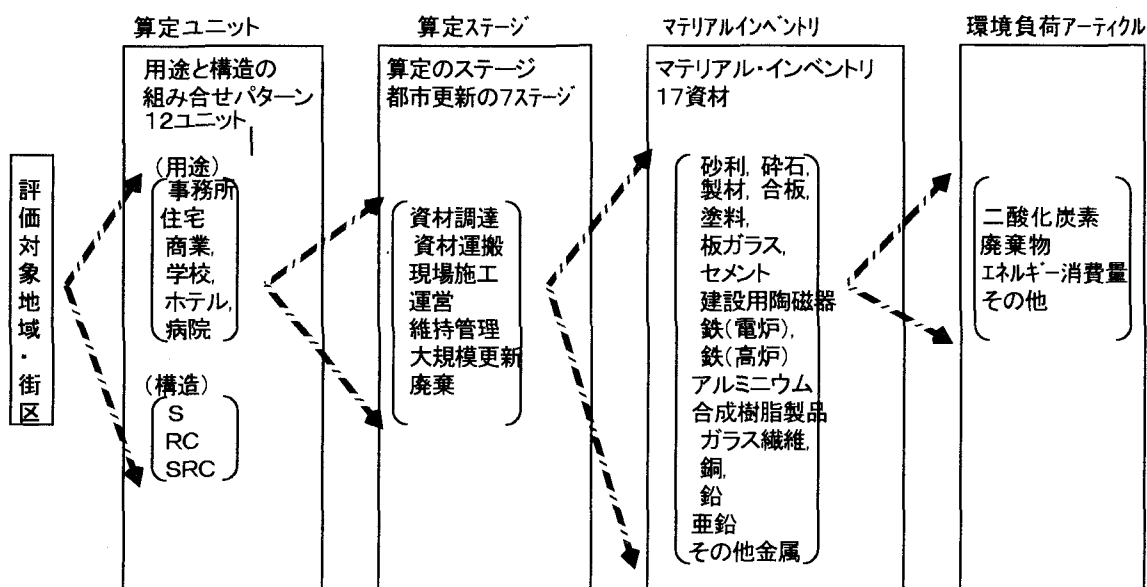


図3 建築構造物の算定ユニット、ステージ、インベントリ、環境負荷計算プロセス

### 3.3 環境負荷低減の代替計画案策定サブシステム

都市集積地域におけるライフサイクルのマテリアル・インベントリ分析および発生する二酸化炭素などの環境負荷の現状分析を下に、都市更新に起因する環境負荷の発生を低減する都市環境政策を戦略的にデザインするサブシステムを設計する。代替計画案の効果を定量化するためには、計画変数やシナリオの操作をライフサイクル・インベントリの算定やライフサイクル環境負荷の評価のサブシステムに操作情報として伝達する仕組みを持つものとする。

都市集積から発生する環境負荷を低減する都市環境政策のシナリオとしては、都市構造物の更新のプロセスをマネジメントする環境政策のシナリオのグループと、都市活動をマネジメントするシナリオのグループから構成される。前者は第2節で述べた区分1、区分2を対象とするシナリオであり、後者は区分3、区分4を取り扱う。さらに、それぞれのシナリオ群は都市集積の立地する地区や街区内の都市更新や都市活動の仕組みを改善する「地区内のシナリオ」の他に、都市集積の更新に伴う地区外部からの物質やエネルギーの搬入や地区外への廃棄物の搬出など都市更新と都市活動を支える、地区外からの物質エネルギーの循環の流れをマネジメントする「地区外のシナリオ」を視野に入れることが求められる。前者は2節で述べ

た区分1，区分3を対象とする環境負荷削減の計画シナリオでありであり，後者は区分2，区分4を対象とする計画代替案となる。

ケーススタディを通じて実際の都市集積における環境負荷排出特性の分析と，都市更新スケジュールを設定した上での21世紀半ばまでの都市更新のシミュレーション分析を踏まえて，環境負荷低減に効果の大きい戦略的な計画シナリオを選択する。表4に評価システムで取り扱う戦略的なは取り扱う代替計画シナリオの例を示す。ここでは，都市のマテリアルフローをマネジメントする政策シナリオ，都市の空間構造を対象とする計画シナリオ，都市の基盤のマネジメントを対象とする計画シナリオの例を示す。

表2 環境負荷削減のシナリオ

|                            | 地区内            | 地区外                                                                                                   |                                                       |
|----------------------------|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| マテリアル・<br>マネジメント<br>シナリオ   | 資源消費構造の改善      | ・エコマテリアルへの転換<br>・資源節約型施工法                                                                             | ・資材製造拠点の近接立地<br>・エコマテリアル製造                            |
|                            | 廃棄物再利用         | ・地区内でのコンクリート廃材のリサイクル利用(需給バランスの制約)                                                                     | ・コンクリート廃材のリサイクル利用拠点と利用のネットワークシステムの整備                  |
| 空間<br>マネジメント<br>シナリオ       | 都市更新<br>マネジメント | ・計画的な都市更新<br>スケジュール管理<br>・街区の一体的開発<br>・建物形態規(高度, 斜線他)                                                 |                                                       |
|                            | エネルギー消費構造の改善   | ・分散型エネルギーシステム<br>(コジェネレーション, 地冷)<br>・都市型エネルギー施設<br>(地下発電, 地下蓄熱他)                                      | ・圏域エネルギー供給拠点の<br>高効率化<br>・エネルギー資源の転換                  |
| ライフライン基盤<br>マネジメント<br>シナリオ | 排熱の再利用         | ・都市熱源の有効利用<br>(河川水, 下水)                                                                               |                                                       |
|                            | モビリティシステムの改善   | (旅客)<br>・地区内交通の自動車から他<br>モードへの転換<br>・歩行者ルートの整備に伴う集<br>中発生自動車トリップ数の低減<br>(貨物)<br>・個別集配型から一括集配型<br>への転換 | (旅客)<br>・地区内への鉄道交通アクセス<br>の整備<br><br>(貨物)<br>・モーダルシフト |

#### 4. 中之島西部地区におけるケーススタディ

##### 4.1 評価対象地

ライフサイクル環境評価システムのプロトタイプモデルを用いて，大阪市北区の中之島西部地区を対象にして現状の都市集積についてのライフサイクル環境負荷分析と，都市更新スケジュールを仮定した上で，環境負荷低減のシナリオの効果について分析をおこなった。

評価の対象は大阪市の都心部に位置して堂島川と土佐堀川にはさまれた中之島の西部地区であり約33haの面積を持ち，その内の24haが宅地として利用されている。業務施設を中心にホテルや文化施設が立地するが，大阪大学医学部の跡地を始め，駐車場や空地が街区内に目立ち，いくつかの再開発計画が現在，構想，計画されている。1997年時点での都市集積は建築施設が延べ床面積778,500㎡，主な土木基盤施設としては遊歩道や高速道路を含めた道路が総延長9.2km，街区を取り巻く河川護岸が延長2.8kmがある。

##### 4.2 都市集積の現状施設のライフサイクル環境負荷の評価

建築物については標準的な評価ユニット毎に標準的な建物仕様を設定してマテリアル・インベントリの原

単位を算定した。土木構造物については対象地の施設の形状と構造から積み上げ方式で算定を行った。ライフサイクルの二酸化炭素排出量を算定した結果、建築物に起因する排出量が土木構造物の6倍を上回ることが明らかになった(図4)。

### 4.3 環境負荷低減シナリオ

環境負荷低減シナリオをデザインするためにについて①建設資材のエコマテリアル化、②ビル運用段階での省エネルギー化、③構造物の廃棄段階で発生する建設廃材の碎石としてのリサイクル利用、④新たな都市再開発建築物の高さ規制、⑤隣接する建物の一体的な更新、の対策シナリオについてそのライフサイクル発生に酸化炭素の発生量の低減効果を明らかにしたうえで(図5)で、それらのシナリオを組み合わせた環境負荷削減政策の効果を比較した(図6)。Bauシナリオは現状の建築物の集積に加えて、空地や駐車場などの低利用敷地で標準的な法定容積率600%で開発が進んだ際のライフサイクル炭酸ガスである。図4でケース①はビル単位の省エネルギーを30%実現した際の二酸化炭素排出量であり、ケース②は省エネルギーの達成率を15%と設定した上でシナリオ①、②、③、④、⑤をあわせて実施した際の算定結果である、二つのケースではほぼ同じライフサイクル二酸化炭素の効果を得られる。

### 5. おわりに

環境負荷削減のシナリオを評価するためのデータの整備、環境負荷の評価値の計画策定プロセスへの内部化、評価対象を一般化するためのシステム整備を今後の課題とする。

本研究は、科学技術団戦略的基礎研究推進事業(CREST)「社会実験地での循環複合体のシステム構築と環境調和技術の開発」(研究代表：盛岡通)の助成を受けて行われた。

### 参考文献

- 1)土木学会環境システム委員会；環境システムその理念と基礎手法，pp.35-pp.48，共立出版，1997。
- 2)酒井他；建築物のライフサイクル二酸化炭素排出量とその抑制方策に関する研究，日本建築学会計画理論文集，pp.105-112，1996。
- 3)Morioka et al.; Application of Life Cycle Assessment to Urban Renewal Projects, CIB World Congress, 1988
- 4)土木学会地球環境委員会環境負荷検討小委員会；土木建設業における環境負荷研究，土木学会調査研究報告書，1996。

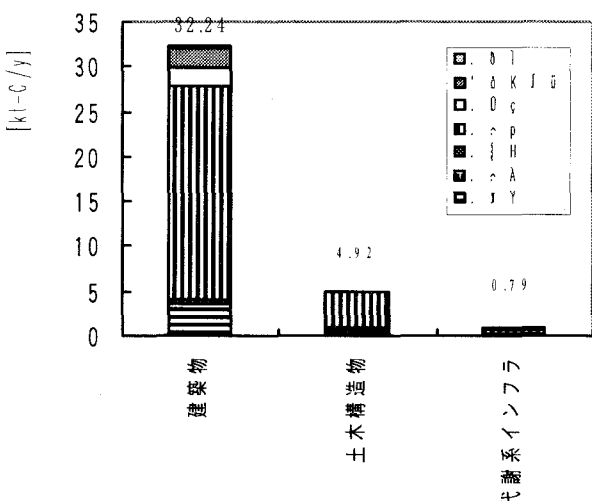


図4 都市構造物のライフサイクル炭酸ガス排出量

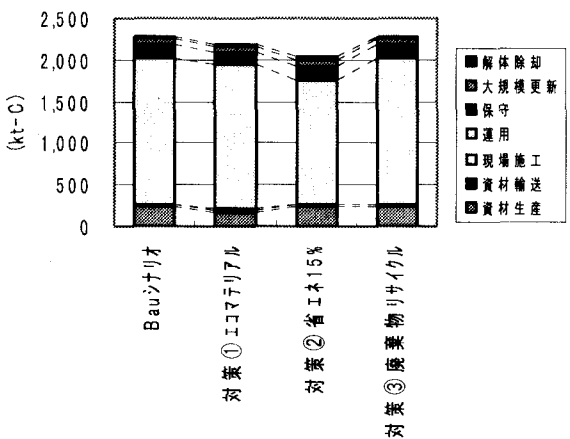


図5 環境負荷削減シナリオの効果の比較例

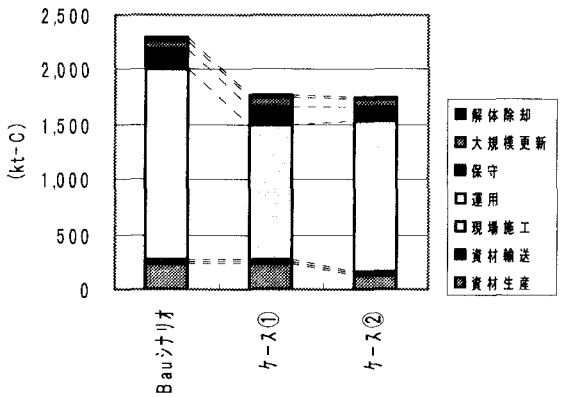


図6 環境負荷削減のシナリオの組み合わせ