

バンコク地下鉄整備事業に伴う
環境負荷及び便益の評価

平成 20 年 2 月 20 日

京都大学工学部地球工学科土木工学コース

有菌大樹

要 旨

本研究は社会基盤構造物の整備事業が与える環境影響を定量的に予測し、環境影響を考慮した整備事業評価に貢献し得る環境負荷・便益評価手法を提案・構築するものである。さらに、提案・構築した手法をタイ・バンコク地下鉄整備事業に適用し、社会基盤構造物の一つである地下鉄整備事業が及ぼす環境影響を定量的に予測し、その環境負荷および環境便益に関する社会負担を貨幣価値に換算して、内部収益率で評価している。

本研究において得られた成果としては、バンコク地下鉄のライフサイクルにおける環境負荷および環境便益を定量化することができた。さらに、バンコク地下鉄整備事業における環境影響を貨幣換算し、経済的内部収益率（EIRR）に組み込むことによって、地下鉄整備事業の環境影響を経済的な視点からも考慮することができた。

目 次

第 1 章 序 論	1
1.1 背 景	1
1.2 目 的	2
1.3 構 成	3
第 2 章 環境影響評価と環境会計	4
2.1 ライフサイクルアセスメント	4
2.2 環境会計	5
2.3 ベースライン&クレジット	6
第 3 章 環境負荷・便益評価手法の構築	7
3.1 排出係数と環境影響領域の設定	7
3.2 環境影響評価期間の設定	10
3.3 環境影響物質排出量の算定法	10
3.3.1 建設段階	10
3.3.2 操業段階	12
3.4 環境負荷・便益評価における経済学的指標の設定	12
第 4 章 バンコク地下整備事業の環境負荷・便益評価	15
4.1 バンコク地下鉄整備事業	16
4.2 バンコク地下鉄整備事業における建設段階の環境影響	16
4.2.1 建設によるグローバルな環境影響	17
4.2.2 建設におけるローカルな環境影響	18
4.3 バンコク地下鉄整備事業における操業段階の環境影響	19
4.3.1 操業段階におけるグローバルな環境影響	21

4.3.2 操業段階におけるローカルな環境影響	22
4.4 バンコク地下鉄整備事業に伴う内部収益率	23
4.5 考察	25
第5章 結 論	27
5.1 成 果	27
5.2 課 題	28
参考文献	29
謝 辞	30

第1章 序 論

1.1 背 景

近年、環境に対する関心は世界的に高まっており、京都議定書におけるCO₂等の温室効果ガス削減目標等が世界メディアを賑わせている。一方、開発途上国では急激な発展に環境規制が追従できず、大気汚染等の環境悪化が深刻化している。

本研究において対象として取り上げたバンコク地下鉄は、国際協力銀行（JBIC：Japan Bank for International Cooperation）による円借款事業によって建設された社会基盤構造物である。バンコク地下鉄整備事業の背景には、バンコク周辺地域における慢性的な交通渋滞および大規模公共交通施設の欠如等に起因する環境問題が挙げられる。社会基盤構造物の一つである地下鉄は、公共事業として建設ならびに操業されることが多い。その理由の一つとしては、地下鉄整備事業は、国や地方自治体等の公共団体による補助が必要な可能性があるためである。したがって、地下鉄整備に対して公共事業として税金を用いるならば、その事業は納税者へ便益をもたらす必要がある。つまり、事業を実施することによって生じる利益を、より広い範囲において公共利益として考える必要がある。一般的に、民間企業が事業を実施する際、企業における費用および便益が中心に考えられる。しかしながら、地下鉄のような社会基盤構造物は、公共性が高いため地下鉄事業自体に起因する費用および便益のみを評価するのでは不十分である。言い換えれば、周辺環境や周辺社会への影響を考慮して事業を実施する必要があると考えられる。

社会基盤構造物の整備が及ぼす周辺環境や周辺社会への影響の一つとしては、温室効果ガスであるCO₂等の環境影響物質の排出が考えられる。すなわち、社会基盤構造物の整備において環境影響物質を多量に排出すれば、それは将来の社会へ多大な負担を強いる。すなわち、事業実施の意思決定においてはCO₂の排出等で代表される環境影響を考慮する必要がある。また、環境への関心が高い現在では社会基盤構造物の整備事業においても環境影響を定量的に予測し、さらには評価する必要があると考えられる。

現在、環境影響評価には様々な手法が報告・適用されている。例えば、環境影

響評価手法の一つであるライフサイクルアセスメント（LCA：Life Cycle Assessment）手法は、国際標準化機構（ISO：International Organization for Standardization）において 14040 番台が割り当てられており、国際規格化が完了している。LCA とは対象製品における製造段階、使用段階および廃棄段階を含めた、製品の全ての段階「ゆりかごから墓場まで」の環境影響をまとめて評価する特徴を有した手法である。LCA を用いた環境影響評価は、ペットボトルに代表される工業製品について活発に実施されており、ライフサイクルにおける総量の環境負荷を低減する試みが実施されている。しかしながら、国際規格化された LCA の規定はあくまで手順概念を示したものであり、LCA に関する具体的な手順等は示されていない。また、LCA は主に工業製品を対象としたものである。一方、社会基盤構造物はペットボトルのような製品と異なり、一品生産であり、環境影響が発生する要因が多岐にわたる。すなわち、社会基盤構造物に対する環境影響評価の実施は複雑である。そのため、本研究で取り上げる地下鉄等の社会基盤構造物に対する LCA 等を用いた環境影響評価は、十分に普及していないのが現状である。しかしながら、社会基盤構造物整備事業等の事業から発生する環境影響はペットボトルのような個々の製品の環境影響よりも非常に大きい。そのため、社会基盤構造物について環境影響評価を実施することの意義は十分にあると考えられる。

1.2 目 的

本研究は社会基盤構造物の整備事業が与える環境影響を定量的に予測し、環境影響を考慮した整備事業評価に貢献し得る環境負荷・便益評価手法を提案・構築するものである。さらに、提案・構築した手法をタイ・バンコク地下鉄整備事業に適用することで、バンコク地下鉄整備事業に伴う環境影響評価を実施する。

図 1.1 は、本研究の流れを示している。なお、本研究で構築・適用を試みる環境負荷・便益評価手法は、社会基盤構造物の環境影響評価の一つとして位置付けることができる。

1.3 構成

本研究では、社会基盤構造物の一つである地下鉄整備事業が及ぼす環境影響を定量的に予測し、その環境負荷および環境便益に関する社会負担を貨幣価値に換算して評価する。なお、本研究において構築する一連の環境影響評価は地下鉄整備事業に止まることなく、およそ全ての社会基盤構造物の整備事業においても適用することが可能であり、また、整備事業の意思決定に反映させることも可能である。

本論文は、次に示す内容にて構成されている。

第1章では、序論として本研究の背景、目的および論文構成を述べている。

第2章では、環境影響評価に対する既往の研究について述べている。

第3章では、環境負荷・便益評価手法を構築し、環境負荷・便益モデルを用いた環境影響評価手法を述べている。

第4章では、環境負荷・便益評価手法を用いて、バンコク地下鉄整備事業の環境影響評価を実施し、その環境負荷および環境便益に関する社会負担を貨幣価値に換算して評価している。

第5章では、**第3章**ならびに**第4章**で示した環境影響評価の結果からの結論として得られた知見を示す。また、今後の検討課題について言及する。

第2章 環境影響評価と環境会計

2.1 ライフサイクルアセスメント

ライフサイクルアセスメント（LCA：Life Cycle Assessment）¹⁾とは、製品が及ぼす環境影響をライフサイクルの視点から定量的かつ総合的に評価するための手法である。LCAを実施する際には、以下に関して留意しなければならない¹⁾。

- ▶ 製品の特定のプロセスのみの注目するのではなく、ライフサイクル全体の環境負荷に着目する。
- ▶ 製品の特定の環境負荷についてのみ注目するのではなく、総合的に環境影響を評価することで、異なる種類の環境問題に対する影響を合理的に比較統合する。

LCAの一般的手順は、国際標準化機構（ISO：International Organization for Standardization）規定によると以下に示す4段階に大別できる。

- (1) 目的と調査範囲の設定
- (2) インベントリ分析
- (3) 影響評価
- (4) 解釈

(1)では環境影響評価を実施する理由を明確にし、どのように評価結果を利用するのかについて決定する。さらに、調査に含まれる工程や、用いる情報および環境影響評価手法について決定する。

(2)では、環境影響評価期間に含まれるプロセス全体の環境負荷物質排出量を各環境負荷物質で算出する。インベントリの一例としては、温室効果ガスであるCO₂、大気汚染物質であるSO_xおよびNO_x、重金属および燃料等の資源消費量等が考えられる。

(3)では、対象製品のライフサイクルが及ぼす環境影響を評価する。地球温暖化

や大気汚染および資源枯渇といった環境問題ごとに評価を実施するか、あるいはそれらの環境影響を統合化して、単一指標として評価する手順が踏まれる。なお、統合化係数については被害算定型環境影響評価手法（LIME：Life-cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling）等によってまとめられている²⁾。

(4)では、(2)および(3)から得られた結果について解釈を行う。さらに、評価結果にどの程度信頼性や完全性があるのか検証し、目的達成に不十分な情報が含まれている場合は、再度(1)や(2)に戻って繰り返し調査を行う必要がある。

本研究においては(2)および(3)に重点を置いて議論を進めていくものとする。

2.2 環境会計

環境会計³⁾は、アメリカ環境保護庁（USEPA：United States Environmental Protection Agency）によると、「企業に対して、環境コストの全体像を理解し、意思決定に統合することを奨励し、動議付けること」を使命とされている。環境会計は、企業会計と比べて幅広いコスト範囲を対象とするものであり、環境会計が対象とし得るコストの範囲は以下の7つに分類される³⁾。

- (1) 環境保全コスト
- (2) 原材料費・エネルギー費
- (3) 廃棄物に配分される加工費
- (4) 製品に配分される加工費
- (5) 製品使用時に生じるエネルギー費
- (6) 製品の廃棄・リサイクル時に生じるコスト
- (7) 環境負荷としての社会的コスト

上記において、(1)～(4)は企業内部で生じる企業コストであり、(5)および(6)は製品の消費者が製品を使用・廃棄することによって生じる消費者コストである。さらに、(7)は製品やサービスの利用者とは関係のない第三者が被る被害であり、経済学において外部コストと呼ばれるものである。この3分類を図2.1に示す。

環境会計の対象とするコストにおいては、各コストを支出あるいは負担する主

体がそれぞれ異なる。しかしながら、社会および消費者はこれらコストを低減するための余地が小さく、すなわち、製品やサービスの供給者である企業がコスト改善を進めていくことが求められる。

本研究においては、(7)に着目し、地下鉄（製品）がもたらす社会的コストを評価することを試みる。

2.3 ベースライン&クレジット

昨今では、欧州連合（EU：European Union）等で CO₂ の排出権取引が拡大している。CO₂ 排出権取引に関して基本となる概念は、キャップ&トレード（Cap and Trade）およびベースライン&クレジット（Baseline and Credit）⁴⁾ である。この2つの概念を図 2.2 に示す。

本研究では、ベースライン&クレジットの概念を用いることで環境便益を推定する。ベースライン&クレジットとは事業を対象として、その事業を実施しなかった場合を基準として、事業を実施することによる環境負荷の削減量を資産として取得できるものである。本研究ではベースライン&クレジットの概念をバンコク地下鉄に適用し、地下鉄を建設することによって削減できる環境負荷物質排出量を環境便益と定義する。

本研究では、2.1、2.2 および 2.3 で述べた概念を用いることにより、次章の環境負荷・便益評価手法を設定する。

第3章 環境負荷・便益評価手法の構築

本章では、社会基盤構造物の新規建設・整備事業における環境負荷・便益（環境影響）を考慮した事業評価手法（環境負荷・便益評価手法）の提案を行う。

先述したように、近年では地球温暖化に代表される環境問題への世界的な関心が高まっており、様々な分野において温室効果ガスであるCO₂および大気汚染物質であるSO_xならびにNO_x等の排出を抑制する取組みが実施されている。同時に、社会基盤構造物の整備事業に係らず全ての事業実施に際しては、各々事業が環境へ及ぼす影響を定量的に評価する必要がある。しかしながら、環境影響を考慮した事業評価手法（環境負荷・便益評価手法）の構築では、事業全体における環境影響評価の対象期間の設定ならびに事業実施が及ぼす環境影響領域の設定に未確定な要素があり、これらの確定は重要な課題であると考えられる。

図 3.1 は、本研究で構築する社会基盤構造物の環境負荷・便益評価手法の概念を示している。本研究で構築する環境負荷・便益評価手法では、社会基盤構造物の建設・整備事業に着目し、社会基盤構造物のライフサイクル（例えば、建設－操業－維持管理）を考慮した環境影響評価期間を設定する。一方、環境影響領域の設定では、整備事業自体が環境へ直接及ぼす環境影響領域（ローカルな環境影響として呼称する）、ならびに整備事業自体が全産業を網羅した地球規模で捉えられる環境に及ぼす環境影響領域（グローバルな環境影響として呼称する）を、排出係数の概念を用いて各々設定する。同時に、環境影響領域の設定において既往の環境影響評価では、整備事業自体が環境へ及ぼす負の影響（環境負荷）領域を主として評価するものの、本研究では社会基盤構造物の整備事業によって得られる環境への正の影響（環境便益）も環境影響領域の設定に考慮する。

3.1 排出係数と環境影響領域の設定

環境影響を考慮した事業評価手法（環境負荷・便益評価手法）を構築する上で、環境影響物質排出量の推定は必須である。そこで、社会基盤構造物の整備事業に伴う環境影響物質の排出量の推定においては、社会基盤構造物を構成する、また

は関連する各要素の排出係数を用いる。

排出係数とは要素（例えば、資材、燃料あるいは建設機械）の消費量と環境影響物質排出量を関連付ける指標であり、各要素に対して次式(1)で表すことができる。

$$EM = E \times W \quad (1)$$

ここで EM は環境影響物質排出量、 E は排出係数であり、 W は資材や燃料等の使用量である。

現在、様々な機関によって様々な要素の排出係数が整備されており、排出係数の推定方法は「積上げ法」と「産業連関分析法」に大別することができる⁵⁾。

「積上げ法」とは、要素が与える環境影響に関して、要素の製造・流通・消費といった全プロセスを通して各プロセスで詳細に環境負荷量を推定し、それらを足し合わせていくことにより、要素の総合的な排出係数を決定する方法である。積上げ法では、要素の製造・流通・消費の各プロセスにおいて固有の排出係数を求めることができるため、この方法で算出された排出係数は最新技術の動向を反映することが可能であり、また排出係数の信頼性も高い。しかしながら、要素の排出係数の決定に積上げ法を適用するには、要素の製造・流通・消費プロセスにおいて各々担当側からの環境負荷量に関する情報提供が必要不可欠であり、要素の製造・流通・消費プロセスを網羅するような各々情報を蓄積するためには莫大な労力と時間を要する。

一方、「産業連関分析法」とは、産業連関表と呼ばれる一定期間（通常は 1 年間）に行われた国民経済の財貨およびサービスの産業間の取引金額の一覧表を用いて、それらの金額を基準として原材料やエネルギーがどのような過程を経て調査対象物（対象とする要素）に分配されたかを追跡する方法である。産業連関分析法は産業連関表の対象地域をもれなく包括しており、さらには原材料あるいはエネルギーが有する波及効果をも考慮することができる。したがって、産業連関分析法は要素に対して社会全体としての環境負荷量を把握することができる。しかしながら、一部の産業連関分析法では情報が古く、最新の技術動向が反映されない場合が存在する。また、産業区分が大きく金額から物量に換算する過程における解釈次第では、要素の排出係数が変動する可能性がある。なお、本研究にお

ける社会基盤構造物を構成する各要素の排出係数の推定は、日本における 1995 年度の情報を基本とした産業連関分析法を採用している。

産業連関分析法および積上げ法では、要素の排出係数を製造、流通および最終消費の各段階や、国内外の消費支出および資本形成等の影響に分けることができ、要素 i の排出係数を次式(2)のように表すことができる。

$$E_i = \sum e_{ip} \quad (2)$$

ここで、 E_i は要素 i において製造・流通・消費の全プロセスを考慮した排出係数であり、 e_{ip} は要素 i の各段階における排出係数を表す。このように、要素 i の排出係数 E_i は更に要素 i の各プロセスにおいて詳細に区分して考えることができる。

本研究では本点に着目して、社会基盤構造物の環境負荷・便益評価手法における環境影響領域の設定を行う。すなわち、社会基盤構造物を構成する種々の要素 i の排出係数を、それぞれ式(2)で示される E_i レベルで表現する場合はグローバルに捉えられる環境影響領域(グローバルな環境影響領域)を設定することになる。一方、種々の要素 i の使用条件等を考慮して特定の e_{ip} レベルで表現する場合は、社会基盤構造物の整備事業自体が環境へ直接及ぼすローカルな環境影響領域であると定義する。上記の前提として、社会基盤構造物は様々な要素が組み合わさって構成されており、全ての要素の製造、流通および消費段階における環境影響物質排出量を把握しなければならない場合 (E_i レベルで表現) もあれば、例えば建設機械や自動車からの CO_2 排出のような消費段階のみに関する環境影響物質排出量を把握したい場合 (e_{ip} レベルで表現) も存在するためである。本研究における環境負荷・便益評価手法では、社会基盤構造物が環境へ及ぼす影響領域を、各要素の排出係数を E_i もしくは e_{ip} レベルで表現することで変化させることが可能である。

表 3.1^{6),7)}には、本研究で用いる代表的な要素に関する排出係数をまとめている。排出係数の単位としては、例えば CO_2 の排出係数を考えた場合、資材では $\text{t-CO}_2/\text{t}$ や $\text{t-CO}_2/\text{円}$ 、燃料やエネルギーでは $\text{t-CO}_2/\text{MJ}$ 、また自動車走行では $\text{t-CO}_2/\text{km}$ 等がある。

なお、積上げ法および産業連関分析法によって算出される排出係数は、技術革新や経済の変化等により時々刻々と変化していくものであると考えられる。しか

しながら、排出係数は過去の情報等から推定できるものの、排出係数の将来動向を推定することは非常に難しい。そのため、本研究では排出係数は時間に依存しない一定値として仮定する。

3.2 環境影響評価期間の設定

環境負荷・便益評価手法における環境影響評価期間の設定には、システム境界（境界条件を表す指標）を用いる。システム境界とは、対象物（例えば、社会基盤構造物）のライフサイクル（資材の製造・調達段階、建設段階、操業段階および廃棄段階）において、いずれのプロセスまでを掘り下げて検討するかを表すものである。既往の研究において、社会基盤構造物では廃棄段階の環境影響は他の段階の環境影響に比べて相対的に非常に小さいことが明らかにされている。したがって、環境負荷・便益評価手法の構築においても社会基盤構造物の廃棄段階の環境影響は考慮しないものとする。また、構築する環境負荷・便益評価手法では、社会基盤構造物のシステム境界を建設段階および操業段階として設定する。本手法におけるシステム境界の概念を図 3.2 に示す。

本研究で設定する社会基盤構造物のライフサイクルを考慮したシステム境界は、社会基盤構造物の整備事業を実施することによって環境へ排出した物質の総量を、各環境影響領域内（3.1 参照）において把握することが可能である。また、本システム境界において得られる環境負荷・便益評価は、類似事業を実施する際に環境影響を考慮した事業計画立案の一助となると考えられる。

3.3 環境影響物質排出量の算定法

3.3.1 建設段階

社会基盤構造物の建設段階における環境影響物質排出量を定量的に推定する手法として、後述する 2 つの手法が存在する。

(1) 詳細的手法

詳細的手法は、社会基盤構造物の建設において用いられる各資材の使用量およ

び各燃料使用量等を推定し、各資材や各燃料の排出係数（環境影響領域の設定に応じて e_{ip} もしくは E_i ）との積を足し合わせるにより環境影響物質排出量を推定する手法（以下詳細的手法と称す）であり、次式(3)もしくは(4)により表される。

$$EM_1 = \sum_i (e_{ip} \times W_i) \quad (3)$$

$$EM_2 = \sum_i (E_i \times W_i) \quad (4)$$

ここに、 EM_1 および EM_2 は 3.1 で述べたとおり各環境影響領域における環境影響物質の排出量であり、 W_i は各資材および各燃料の使用量を表す。

詳細的手法を用いる際には、各資材および各燃料に関する排出係数、各資材および各燃料の使用量を推定する必要がある。ここで、各資材および各燃料の排出係数（ e_{ip} もしくは E_i ）に関しては、産業連関分析法を用いて推定することができる（3.1 参照）。一方、全ての資材や燃料に対して使用量を推定することは非常に困難である。換言すれば、一般的な社会基盤構造物では基礎構造だけでなく、内装部分等にも様々な資材や燃料が投入されており、それら全ての資材や燃料に対して使用量を推定することには莫大な労力を要する。そこで、本研究では社会基盤構造物の土木建設関連部分に着目し、資材および燃料の使用量に依存した環境影響物質排出量を推定する。具体的には、予算報告書および工事期間等から単位あたりの各資材および各燃料の使用量を求め、それらの総使用量を推定する。

(2)概略的手法

概略的手法は、既に整備された社会基盤構造物を複数の要素の集合体として捉え、その各要素の単位量あたりの排出係数を用いて環境影響物質排出量を推定する手法である。なお、各要素の単位量あたりの排出係数は、環境影響評価に関する既往の研究に基づき推定するものである。表 3.2⁸⁾は概略的評価手法において適用できる各要素（社会基盤構造物）の排出係数を示している。

概略的手法の適用は、環境影響物質排出量を推定する際の情報量や計算量を大幅に削減することが可能である。しかしながら、概略的手法は簡便であるものの、

ある社会基盤構造物に関する既往の環境影響評価事例で設定された環境影響領域と、新たに着目する社会基盤構造物の環境影響評価で考慮する環境影響領域が異なる場合には適応することが困難である。したがって、概略的手法の適用に際しては、要素の排出係数で考慮される環境影響領域の設定の適合性について吟味する必要がある。

3.3.2 操業段階

社会基盤構造物は、操業段階においても燃料や電力等を消費することによって環境影響物質を排出する。一般的に社会基盤構造物は供用年数が長いため、建設段階の環境影響だけではなく、操業段階の環境影響を評価することが重要であると考えられる。しかしながら、将来における燃料や電力の使用量予測には、不確定な要素が多々ある。本研究ではその不確定な要素に留意しつつ、社会基盤構造物の操業段階における環境影響物質排出量を推定する。なお、排出量の推定は建設段階（3.2.1 参照）と同様、詳細的手法ならびに概略的手法が存在する。（表 3.2 参照）

一方、社会基盤構造物は、その操業によって社会システム的な変化、つまり周辺環境に変化をもたらすことが期待できる。本点について、社会基盤構造物の一つである地下鉄を例に挙げて考えてみる。地下鉄が整備・運行されることによって、地下鉄の完成以前までは自動車を利用していただいた人々が地下鉄を利用する、つまり自動車交通から鉄道交通へ移動手段が推移することが考えられる。これによって、自動車交通量は減少し、それに付随して自動車走行速度の上昇が期待できる。すなわち、自動車からの環境影響物質排出量は、対象構造物である地下鉄の周辺において地下鉄の存在する場合（以下、with の場合と称す）が地下鉄の存在しない場合（以下、without の場合と称す）よりも減少することが期待できる。本研究では、このような社会基盤構造物の操業に際して生じる環境影響物質排出量の削減効果を環境便益と呼ぶ。

3.4 環境負荷・便益評価における経済学的指標の設定

3.1 および 3.2 で述べたような環境影響領域および環境影響評価期間の設定の下、

社会基盤構造物の整備事業に伴う環境影響物質の総排出量を把握する。それらの総量を把握するだけでも十分な意義はあるが、定量的に求められた排出量のみでは対象事業における意思決定にうまく反映され難いと考えられる。そこで、構築する環境負荷・便益評価手法では環境影響を貨幣価値に換算することで、貨幣価値によって社会基盤構造物の環境影響を考慮した事業評価も可能にしている。

近年、CO₂の排出権取引に代表されるように、環境影響物質を排出することに対して対価を支払う概念が定着しつつある。環境影響物質を排出することによって、周辺環境に何らかの被害をもたらす可能性があるため、環境影響物質を排出することに対する対価のことを被害費用と呼ぶ。環境影響物質の被害費用については、多くの研究が実施されている⁹⁾。また、企業も様々な研究や排出権取引における価格を参考にして、企業の社会的責任（CSR：Corporate Social Responsibility）を明確にするため、CO₂等の環境影響物質の被害費用を設定している。しかしながら、その価格にはばらつきがあり、また、被害費用がCO₂に代表される温室効果ガスに対しての研究例が多くなっている。表3.3⁹⁾はCO₂等の環境影響物質の被害費用をまとめている。本研究においては、既往の研究や企業の算定した環境影響物質の被害費用を参照し、被害費用に変動幅を設定することによって対象事業の環境影響を貨幣換算することとした。

ここで、対象事業にかかる費用を考えると費用は大きく分けて以下の3種類に分類される。

- (1) 企業の負担する費用
- (2) 消費者の負担する費用
- (3) 社会の負担する費用

これまで、企業等の事業実施主体は、主に(1)および(2)を考慮することによって事業の立案ならびに実行等を行ってきた。これは、(1)および(2)が事業実施主体の収支に大きく影響を与える要因であるからである。しかしながら、環境への関心が高まりつつある昨今、事業実施主体は(3)も考慮して事業を実施する必要があると考えられる。(3)の一つとして、本研究で取り上げている環境影響がある。社会基盤構造物は税金で建設ならびに運営されることも多く、(3)を軽減していく必要が大きいものであると考えられる。

本研究においては環境影響物質の排出による被害費用を推定し、内部収益率（IRR：Internal Rate of Return）に組み込むことによって、IRR の変化を算定する。なお、IRR¹⁰⁾とは投下した資本を事業で生じる便益を用いて返済していく際、一定の年限で返済可能な最大の利率であり、この利率が大きいほど投下資本の回収は早期に行われ、一般に好ましいプロジェクトであると判断される。一般的に、IRR は事業の純現在価値をゼロとする割引率と定義され、次式で表される。すなわち、次式(5)を満たす i をもって IRR を定義する。

$$\sum_{t=1}^n \frac{(b_t - c_t)}{(1+i)^t} = 0 \quad (5)$$

ここに、 t は年次、 b_t は t 年目における便益、 c_t は t 年目における費用、および n はプロジェクトライフである。

IRR には、財務的内部収益率（FIRR：Financial Internal Rate of Return）と経済的内部収益率（EIRR：Economic Internal Rate of Return）に区別される。FIRR とは企業の収支についての内部収益率であり、上記の(1)の費用のみ考慮して算定されるものである。一方、EIRR とは(1)だけでなく、(2)および(3)を加えることによって算定するものである。社会基盤構造物のように公共性の高い事業を実施する際には、(2)および(3)を考慮して事業内容を決定していくことが望ましいと考えられる。

第4章 バンコク地下整備事業の環境負荷・便益評価

本章ではタイ・バンコク地下鉄整備事業に対して、第3章にて構築した環境負荷・便益評価手法を適用し、環境影響評価を実施する。なお、本環境影響評価では環境影響物質として温室効果ガスであるCO₂、大気汚染物質であるSO_xおよびNO_xに着目し、バンコク地下鉄整備事業が及ぼす環境負荷および便益を推定する。

バンコク地下鉄整備事業では、社会基盤構造物としての地下鉄ネットワークを建設および操業するため、資材や燃料を消費することで環境影響物質を排出する（環境負荷）。一方、バンコク地下鉄の操業によっては、自動車交通から鉄道交通へと交通手段の推移をもたらし、結果的に周辺域における自動車交通量の減少および自動車走行速度の増加が期待される。これは環境影響の観点からすれば、バンコク地下鉄が整備された場合では操業段階において、元来自動車交通によって排出されていた環境影響物質の排出を削減することができる。よって、バンコク地下鉄の操業は環境に対して便益を供する（環境影響物質の排出量を削減する）ことが期待できる。なお、上記は2.3で述べた温室効果ガス排出権取引等におけるベースライン&クレジットの概念を用いたものである。本研究ではバンコク地下鉄が整備された場合を **with** と略し、バンコク地下鉄が整備されない場合を **without** と略す。

本環境影響評価では設定した環境影響領域ならびに環境影響評価期間においてバンコク地下鉄整備事業に伴う環境影響物質の排出量を推定する。次に、環境影響物質の排出量を被害費用によって貨幣換算し、バンコク地下鉄整備事業における経済的内部収益率（EIRR）に組み込むことでEIRRの変化を検討する。ここで、本研究で用いるEIRRには費用として、地下鉄建設費用、操業維持管理（O&M：Operation and Maintenance）費用および環境負荷費用を、便益として走行費用削減効果（VOC：Vehicle Operating Cost）、時間短縮効果および環境便益を考慮する。

本環境影響評価では、バンコク地下鉄整備事業のライフサイクルにおける資材や燃料の製造・調達、ならびに建設における環境影響を、3.1で述べた環境影響領域、すなわちグローバルな環境影響およびローカルな環境影響に区別して評価する。

4.1 バンコク地下鉄整備事業

地下鉄が整備される以前、バンコクの交通は 9 割が道路交通に依存しており、バンコクの交通渋滞が深刻なものとなっていた。例えば、ラッシュ時の自動車平均走行速度は時速 8 km まで落ち込み、それによる年間の経済損失はタイの国内総生産（GDP：Gross Domestic Product）の 3 %に相当するとも言われている。また、道路に依存した交通は、多量の石油資源の消費によって深刻な大気汚染を引き起こしており、大気汚染の軽減も大きな課題となっている。さらに、バンコク首都圏の人口は 2000 年度において約 640 万人であり、2020 年までに約 1400 万人に増加することが見込まれている。よって、道路に依存した交通のままでは、問題はより深刻化することが予想され、バンコクにおいては自動車交通に依存した交通問題を抜本的に解決することが急務であった。

上記の問題を解決するための手段として、道路交通の立替となる大量輸送手段整備が考えられる。タイは国家経済社会開発計画として、バンコク首都圏に鉄道ネットワークを整備する方針を固め、その 1 つとして 1996 年にバンコク地下鉄の建設が開始された。バンコク地下鉄整備事業は、国際協力銀行（JBIC：Japan Bank for International Cooperation）によって日本の円借款事業として実施され、2003 年 7 月に地下鉄の運行を開始した。現在、バンコク地下鉄は全長約 20 km、また駅数は 18 駅である。バンコク地下鉄は鉄道ネットワークの一部であり、その所在地を図 4.1 に示す。バンコク地下鉄は主にトンネル部、駅部および車両基地に分けられる。トンネル部はシールド工法で掘削され、駅部は開削工法で掘削された。図 4.2 にバンコク地下鉄整備事業工事概要を示す。

4.2 バンコク地下鉄整備事業における建設段階の環境影響

社会基盤構造物の建設段階における環境影響物質の排出は非常に大きい。そのため、ライフサイクルを通じた社会基盤構造物の環境影響を評価する際、建設段階の環境影響評価を実施することは非常に重要である。なお、バンコク地下鉄の建設段階における環境影響物質の排出量の推定には、グローバルおよびローカルな環境影響を区別して評価するため、3.3.1 で述べた詳細的手法を用いる。さらに、

バンコク地下鉄の建設段階における環境影響は、必要な資材や燃料（各要素）の製造・流通・消費プロセスを考慮して評価されなければならない。そのため、本環境影響評価では、構成各要素の排出係数をプロセス各々において細分化することで、様々な環境影響領域（次項参照）を考慮した環境影響物質の排出量を評価する。

なお、本環境影響評価ではバンコク地下鉄における基礎構造物である地下構造物、地下鉄車両および車両基地の建設のみを対象としている。また、資材や燃料の使用量は、バンコク地下鉄に関する予算報告書および工期日程等から推定する。表 4.1 は、資材および燃料使用量の推定結果を示している。さらに、式(1)を用いて使用量と排出係数の積を足し合わせることによって、バンコク地下鉄建設段階における環境影響物質の排出総量を算定する。

4.2.1 建設によるグローバルな環境影響

本研究で実施する環境影響評価では、社会基盤構造物を構成する各要素の排出係数を製造・流通・消費プロセスにおいて細分化することで、様々な環境影響領域を考慮した環境影響物質の排出量を推定することができる。

本項では、バンコク地下鉄整備事業の建設段階がグローバルな環境影響領域に及ぼす影響を評価する。まず、バンコク地下鉄整備事業において地下構造物の建設に用いられた資材量、燃料量および電力量を推定する（表 4.1 参照）。次に、各要素の E_i レベルにおける排出係数を用いてバンコク地下鉄を建設するまでの環境負荷を推定する。

ここで、資材、燃料および電力の製造および流通段階における環境負荷は、バンコク地下鉄整備事業に直接的に関与し得ないと考えることもできるが、本環境影響領域の設定では LCA の概念に準拠しており、構成各要素の製造・流通・消費といった全プロセスを網羅している。

なお、電力に関して、一般的には生産段階で環境負荷が発生するのみで、流通および消費段階においては環境負荷を発生しない。しかしながら、電力の排出係数には、 e_{ip} レベルとして発電時の直接排出、電力の消費を誘発することによる消費誘発排出、および社会基盤構造物等の資本の形成を誘発することによる資本形成誘発排出に大別される。これら電力の排出係数を図 4.3¹¹⁾に示す。本環境影響領域の設定ではグローバルな環境影響を考えるため、消費および資本形成誘発排

出を含んだ E_i レベルでの排出係数を用いて考える。

上記を踏まえた上、バンコク地下鉄建設における環境影響物質の排出量を推定した結果、 CO_2 ：約 933,000 t- CO_2 、 SO_x ：約 1,030 t- SO_2 、 NO_x ：約 3160 t- NO_2 の環境影響物質が地球規模で捉えるグローバルな環境影響領域へ排出されたこととなる。なお、各資材使用量および環境負荷物質排出量を表 4.2 に示す。これより、バンコク地下鉄の建設によって排出される環境影響物質は、大部分が用いられた資材の製造段階に起因する排出である。換言すれば、グローバルな環境影響領域においてバンコク地下鉄の建設に伴う環境影響を評価すれば、資材製造に伴う環境負荷物質の排出が大部分を占めることになる。よって、バンコク地下鉄整備事業に伴う建設段階の環境負荷を抜本的に低減するためには、資材製造時の環境負荷を低減する努力が不可欠であると考えられる。

4.2.2 建設におけるローカルな環境影響

社会基盤構造物の建設では様々な金銭の流れが存在する。そこで、バンコク地下鉄を整備する際、環境負荷コストは資材、燃料およびエネルギーを購入する資金に含まれていると考えることができる。よって、バンコク地下鉄整備事業に伴う環境影響は、建設現場で発生する環境影響に限定する見解を本研究ではローカルな環境影響と呼ぶものとする。

ローカルな環境影響は、各資材および燃料等の製造および流通段階の環境影響を考慮しないものであり、言い換えれば各資材および燃料等の消費段階のみにおける排出係数を用いる。しかしながら、電力は 4.2.1 で述べたように製造段階において環境影響物質を排出するが、流通および消費段階では環境影響物質を排出しない。だが、本研究で対象としている地下鉄ネットワークは、ライフサイクル全般において多量の電力を消費するものと考えられるので、電力による環境影響をローカルな環境影響において無視することが難しいと考える。よって、電力については例外的にローカルな環境影響を考慮する際においても、電力生産段階における発電時の直接排出係数を用いることよっての環境影響を計上する（図 4.3 参照）。

上記の手法を用いてバンコク地下鉄における建設段階のローカルな環境影響を推定すると、環境影響物質の排出は CO_2 ：約 74,500 t- CO_2 、 SO_x ：約 119 t- SO_2 、 NO_x ：約 472 t- NO_2 と推定される。建設によるローカルな環境影響に対する環境負

荷物質排出量を表 4.3 に示す。これより、ローカルな環境影響領域における環境負荷物質排出量は、4.2.1 で述べたグローバルな環境影響領域における排出量のおよそ 1/10 であり、ローカルな環境影響領域では、バンコク地下鉄の建設現場において直接的に排出される環境影響物質を評価しているためである。換言すれば、バンコク地下鉄の建設に伴う資材消費の環境負荷は相対的に小さい。

4.3 バンコク地下鉄整備事業における操業段階の環境影響

地下鉄の操業に伴い、環境影響として環境負荷および環境便益が発生する。それらを定量的に評価することは、供用年数の長い社会基盤構造物である地下鉄の環境影響評価を実施する上で必須であると考えられる。

操業段階における環境負荷は、主に電力を消費することに起因する。本環境影響評価では、バンコク地下鉄の操業において電力に特化した環境負荷を計上する。ここで、バンコク地下鉄は操業段階において多量の電力を消費しており、例えば 2005 年度における電力消費量は、地下鉄の走行および付帯施設の運行で約 120,000 MWh である⁹⁾。さらに、バンコク地下鉄の電力消費量は今後も、運営本数の増加および車両数の増加等に伴い増加していくことが予測される。本環境影響評価では、電力消費量は今後の運営・維持管理費用の変化と比例関係に変化していくものと仮定し、将来における電力使用量を予測している。

なお、社会基盤構造物である地下鉄は、操業段階において随時維持補修を実施する必要があり、維持補修においても環境影響物質は排出されることが考えられる。しかしながら、本環境影響評価では、近年において整備されたバンコク地下鉄を対象としていることから、維持補修による環境影響は考慮していない。

先述したように、地下鉄ネットワークの整備は、周辺環境において自動車交通から整備された鉄道交通への交通手段の推移をもたらす。よって、環境影響においても with と without では、地下鉄周辺地域における環境影響物質の排出量に差が生じる。そこで、本環境影響評価では with と without において、自動車交通における環境負荷物質排出削減量を環境便益として環境影響評価に組み込むことにする。自動車は走行することによって燃料を消費し、CO₂ 等の環境影響物質を排出する。また、燃料の製造・流通プロセスにおいても環境影響物質は排出される。

自動車走行に起因する環境影響物質の排出量を推定するためには、自動車の走行距離および走行速度と環境影響物質排出量および燃料消費量を関連付ける排出係数が必要である。本環境影響評価では、自動車走行に関連する環境影響としてシャシダイナモ試験から得られた実測データに基づいた排出係数¹³⁾を用い、with および without の自動車燃料消費量を推定した。自動車の燃料消費量と平均走行速度の関係を図 4.4 に示す。また、自動車走行に関連する排出係数から環境影響評価を実施する際、with と without における自動車交通量および自動車走行速度の情報が必要となる。そこで、本環境影響評価では以下の手法を用いることによって自動車交通量および自動車走行速度の情報を得る。

(a) eBUM (eBUM : extended Bangkok Urban Model) シミュレーション

(b) 地下鉄利用者からの推計

(c) 地下鉄整備事業実施前の交通量削減予測

(a)eBUM シミュレーションでは、バンコク市内およびバンコクエリア（バンコク市および周辺の 6 県）の交通容量および交通特性等を考慮して、with の場合でシミュレーションを行い、実際の交通量調査結果との整合性を確認した上で、without の場合を仮定してシミュレーションを実施する。それによって with および without の場合における交通量および平均速度を推定する。このシミュレーション結果と上述した自動車走行の排出係数を用いることで、バンコク地下鉄の操業に伴う自動車走行が及ぼす環境便益を推定する。本シミュレーション結果を表 4.4 に示す。

(b)地下鉄利用者からの推計とは、地下鉄利用者が without の場合、立替手段を用いて移動すると仮定し、立替手段を用いた際の環境影響を地下鉄整備事業に伴う環境便益であると評価するものである。立替手段としては、徒歩、自転車、バス、タクシーおよび乗用車等が考えられるが、それらの比率を適時設定することによって環境便益を推定する。

(c)地下鉄整備事業実施前の交通量削減予測とは、事業者が事業計画段階で予測した地下鉄を整備することによる交通量削減量予測である。これは(a)および(b)から推定される交通量削減量よりも過大評価されていると考えられる。そのため、現況を十分に反映されていないが、地下鉄整備事業が与える最大の環境便益を

推定することが可能であると解釈される。

本環境影響評価において、バンコク地下鉄の操業に伴う環境便益を推定するための基本情報は、(a)eBUMシミュレーション結果（2005年度）、(b)地下鉄利用者数（2004～2006年度）、および(c)交通量削減予測（2004～2033年度）である。したがって、(a)および(b)の情報を用いて、バンコク地下鉄の長期に及ぶ操業段階における環境便益を推計するには、(a)および(b)の情報を基に将来を予測する必要がある。その際、(c)の交通量削減量の変化率を用いることで、(a)および(b)の結果に基づき将来予測を実施した。

4.3.1 操業段階におけるグローバルな環境影響

バンコク地下鉄の操業段階における地球規模のグローバルな環境影響を考慮する際、電力消費に伴う環境影響物質排出量は、電力に関する E_i レベルでの排出係数を用いることができる。すなわち、適用する電力の排出係数は、発電時の直接排出、消費誘発排出および資本形成誘発を網羅した排出係数である（図 4.3 参照）。この E_i レベルでの排出係数と式(4)を用いることによって、電力消費に伴うグローバルな環境影響を評価する。その結果、バンコク地下鉄の操業における電力消費によるグローバルな環境影響物質の排出量は 2005 年度で CO_2 ：約 67,000 t- CO_2 、 SO_x ：約 55 t- SO_2 、および NO_x ：約 74 t- NO_2 であった。よって、グローバルな環境影響領域においてバンコク地下鉄の操業は、建設段階（4.2.1）と比較して環境影響物質を多量に排出している（地下鉄の供用年数を 30 年と仮定した場合）。そのため、供用年数が長期に及ぶバンコク地下鉄で代表される社会基盤構造物の環境負荷を総合的に評価するためには、社会基盤構造物の建設ならびに操業等の各プロセス固有の負荷量の評価に止まることなく、全プロセス（社会基盤構造物のライフサイクル）を網羅した負荷量評価が重要であると考えられる。

一方、バンコク地下鉄が操業されることによってもたらされる周辺環境の変化は、(a)eBUMシミュレーション、(b)地下鉄利用者からの推計および(c)地下鉄整備事業実施前の交通量削減予測の各手法によると、バンコク地下鉄が建設されることによって、環境影響が改善し環境便益が発生すると考えられる。図 4.5 はバンコク地下鉄の操業に伴い発生する環境便益を示している。これより、(a)eBUMシミュレーションおよび(b)地下鉄利用者からの推計から推定される環境便益には、大きな差異が見られなかった。そのため、以下ではグローバルな環境影響を考え

る場合、(a)eBUM シミュレーションおよび(c)地下鉄整備事業実施前の交通量削減予測に基づく環境便益を考慮する。なお、図 4.5 ではバンコク地下鉄の操業が及ぼす環境便益が操業に伴う環境負荷と同程度、もしくは環境便益の方が大きい。すなわち、バンコク地下鉄の操業段階におけるグローバルな環境負荷は環境便益と比較して同程度または小さく、バンコク地下鉄の操業はグローバルな環境に対して負の影響を与えるものではないことが推測される。

4.3.2 操業段階におけるローカルな環境影響

バンコク地下鉄の操業段階におけるローカルな環境影響を評価する際、電力消費に伴う環境影響は e_{ip} レベルの発電時の直接排出時の排出係数を用いる（図 4.3 参照）。

電力消費によるローカルな環境影響物質の排出量は 2005 年度で CO_2 : 約 51,000 t- CO_2 /年、 SO_x : 約 31 t- SO_2 /年、 NO_x : 約 32 t- NO_2 /年であった。これより、バンコク地下鉄の操業におけるローカルな環境負荷は、グローバルな環境影響領域を設定した場合と大きな差異が確認されない。これは、電力に関する消費および資本形成を誘発することによる環境影響物質排出が発電時の直接排出と比較して小さいためである。

周辺環境に及ぼす影響についても 4.3.1 と同じように考える。各予測に基づくローカルな環境便益を図 4.6 に示す。ローカルな環境影響においても(a)eBUM シミュレーションおよび(b)地下鉄利用者からの推計において大きな差異は確認されなかったため、ローカルな環境便益においても以下では(a)eBUM シミュレーションおよび(c)地下鉄整備事業実施前の交通量削減予測に基づいて環境便益を予測するものとする。図 4.6 ではバンコク地下鉄の操業に伴うローカルな環境便益が、グローバルな環境便益と比較して CO_2 排出において大きな差異が確認されないものの、 SO_x および NO_x において大きな減少が確認できる。この要因として、 SO_x および NO_x は自動車燃料の製造および流通段階において多量に排出されるためである。

4.4 バンコク地下鉄整備事業に伴う内部収益率

本節では 4.2 および 4.3 で述べた環境負荷および便益を貨幣換算することによって、バンコク地下鉄整備事業における経済的内部収益率（EIRR）に対して環境影響に関する費用を組み込む。なお、環境影響物質の排出量を貨幣へ換算するため、既往の研究や被害算定型環境影響評価手法（LIME：Life-cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling）²⁾等を参照し、環境影響物質の被害費用を決定した。すなわち、本研究で採用した被害費用は、CO₂に関しては 25～83.6 ドル/t-CO₂⁹⁾、SO_xに関しては 67.3～1,010 千円/t-SO₂ および NO₂ に関しては 73.7～197 千円/t-NO₂¹⁴⁾である。なお、既往の研究における環境影響物質の被害費用にはばらつきがあるため、上記したとおり設定した被害費用にも変動幅を設定している。なお、EIRR に対して環境影響に関する費用（環境コスト）を組み込むためには、バンコク地下鉄整備事業における環境影響物質の排出量を、グローバルおよびローカルな環境影響領域の下、ライフサイクル全般を通して上記した被害費用を用いて時系列で貨幣換算する必要がある。

バンコク地下鉄事業者が事前に算出した EIRR に対して、本環境影響評価の結果として得られた環境コストを加えることで EIRR の変化傾向を評価する。事前に算出された EIRR とは、費用として地下鉄を整備するための費用および運営・維持管理費用を計上し、便益として走行費用削減効果（VOC：Vehicle Operating Cost）および時間短縮効果の便益を計上している。これらを計上することによって地下鉄の建設段階および 30 年間の操業による費用と便益を基に算出された EIRR は 10.72%であった。この EIRR に環境負荷および環境便益の費用を加味することによって、EIRR の変化傾向を検討する。年度毎の費用および便益を計上するが、建設段階の環境影響は建設期間において均等に排出される、操業段階では一年後ごとの環境影響で計上すると仮定した。本仮定の下、以下の Scenario によって EIRR を算出する。

Scenario-1：

Scenario-1 は、建設段階および操業段階ともにグローバルな環境影響領域を想定した場合である。本想定では、本環境影響評価において最大の環境負荷および環境便益を評価することが可能であると考えられる。Scenario-1 によって算出される

環境負荷および便益による被害費用は、図 4.7 に示している。

Scenario-1 における環境影響を EIRR に組み込んだ結果、EIRR は 10.54～10.70% へと変化した。具体的に、Scenario-1 では各環境影響物質の被害費用に関する上限値および下限値に係わらず、バンコク地下鉄操業後の環境コストは正の値、すなわち、総合的に環境に便益をもたらしている。一方、バンコク地下鉄建設段階の環境コストは負の値であり、操業後の正の環境コストと比較して絶対値は僅かに大きい。そのため、バンコク地下鉄整備事業としての EIRR は環境コストを組み込むことで僅かに減少する。

Scenario-2 :

Scenario-2 は、建設段階および操業段階ともにグローバルな環境影響領域を想定するものの、操業段階における環境便益に対してはローカルな環境影響で考えた場合である。本想定では、環境負荷は最大となり、環境便益はバンコク周辺における局所的なものとなる。Scenario-2 によって算出される環境負荷および便益による被害費用を図 4.8 に示す。

Scenario-2 を EIRR に組み込んだ結果、EIRR は 10.52～10.70% へと変化した。Scenario-2 では、Scenario-1 と比べて環境便益の影響領域を狭範囲で想定するため、環境便益コストが低減する。しかしながら、バンコク地下鉄整備事業としての EIRR の変化傾向は、Scenario-1 と同程度である。

Scenario-3 :

Scenario-3 は、建設段階においてグローバルな環境影響領域を想定する一方、操業段階ではローカルな環境影響領域を想定した場合である。Scenario-3 によって算出される環境負荷および便益による被害費用を図 4.9 に示す。

Scenario-3 を EIRR に組み込んだ結果、EIRR は 10.55～10.70% へと変化した。Scenario-3 では、Scenario-2 と比べると操業段階における電力消費分の環境負荷コストが低減されるものの、改善効果は EIRR の指標では確認されない。

Scenario-4 :

Scenario-4 は、建設段階および操業段階ともにローカルな環境影響領域を想定した場合である。Scenario-4 によって算出される環境負荷および便益による被害

費用を図 4.10 に示す。

Scenario-4 を EIRR に組み込んだ結果、EIRR は 10.71～10.76% へと変化した。Scenario-4 では、環境コストを考慮しないバンコク地下鉄整備事業の EIRR と比較して、Scenario-4 で想定される環境コストを考慮することで EIRR の増加が確認できる。これは建設段階の環境コストが Scenario-1～Scenario-3 に比べ小さく、環境コストのみで得られる内部収益率（IRR）が環境コストを考慮しない EIRR よりも大きくなるためである。

図 4.11 は、Scenario-1～Scenario-4 における EIRR の推移を示している。本環境影響評価において算出された EIRR は、いずれの条件においても環境影響（環境コスト）を組み込む前の EIRR と大きな変化が確認されなかった。これは環境影響物質の被害費用が、地下鉄整備事業における費用と比べて相対的に小さいためであると考えられる。

社会基盤構造物の整備事業において、事業者が環境影響を考慮した事業計画ならびに実施を図るためには、事業の対象地域における環境問題に即した環境影響物質排出量を定量化し、環境コストを考慮した EIRR の指標を用いて事業判断を実施する必要があると考える。

4.5 考 察

本章では第 3 章で構築した環境負荷・便益評価手法を用いることで、バンコク地下鉄整備事業における環境影響をグローバルおよびローカルな環境影響から定量的に評価した。

バンコク地下鉄の建設段階において、グローバルな環境影響とローカルな環境影響を比較すると、グローバルな環境影響の方が、資材等の製造過程から考慮するため環境負荷が非常に大きくなっている。よって、環境負荷を低減するためには、資材等の製造過程における環境影響を低減することが重要である。また、資材等の製造過程における環境影響の低減は、バンコク地下鉄整備事業の環境負荷低減に大きく寄与する。一方、地球環境問題を取り扱うスローガンとして「Think Globally, Act Locally」の言葉がある。本スローガンをバンコク地下鉄整備事業へ

適用すれば、建設段階における環境影響の評価では、当初計画においてグローバルな環境影響を考慮し、実際の工法や資材等の決定においてローカルな環境影響を考慮しなければならないことが推測される。なお、上記はバンコク地下鉄整備事業における操業においても同様であると考えられる。

図 4.7～図 4.11 に示した各 scenario における環境コストより、いずれの scenario においても大きな環境コストを生じているとは言い難い。これは、バンコク地下鉄整備事業全体で生じた総事業費が約 900 億 bahts であり、総事業費に対する環境コストの占める割合が小さい結果である。すなわち、バンコク地下鉄整備事業に関する環境コストは事業全体の価値において負の影響を及ぼさない。

なお、環境影響の貨幣換算について、本研究では既往の研究における被害費用を用いた。一方、今後は排出権市場が拡大していくことが考えられ、市場価格等を参考に環境コストを算出することが可能になる。しかしながら、排出量の推定に用いる排出係数は、不確実な要素を多数含んでおり、環境影響物質の排出量の真値を推定することは不可能である。その不確実性を減少させるためには、排出係数の精度を上げることは勿論のこと、確率論等を用いて現在整備されている排出係数を用いて、より精度の高い排出量を推定する必要があると考える。

第5章 結 論

本章では、前章までに示した環境負荷・便益評価手法の構築およびバンコク地下鉄整備事業における適用結果に関する結論を述べる。また、今後の検討課題について言及する。

5.1 成 果

本研究で得られた成果を以下に示す。

- (1) 社会基盤構造物の環境影響評価において、定量的に環境負荷および環境便益を推定する手法を提案した。本手法では、社会基盤構造物が及ぼすグローバルな環境影響領域およびローカルな環境影響領域を考慮することができ、異なるレベルの排出係数を用いることで環境影響を定量化できる。
- (2) 社会基盤構造物の環境影響評価において、定量化された環境負荷および環境便益を対象環境影響物質の被害費用を用いて貨幣換算する方法を提案した。これより、社会基盤構造物の整備事業が及ぼす環境影響を貨幣価値で評価することが可能である。
- (3) 提案した環境負荷・便益モデルをバンコク地下鉄整備事業に適用し、バンコク地下鉄のライフサイクルにおける環境負荷および環境便益を定量化することができた。
- (4) バンコク地下鉄整備事業における環境影響を貨幣換算し、経済的内部収益率（EIRR）に組み込むことによって、地下鉄整備事業の環境影響を経済的な視点からも考慮することができた。

5.2 課 題

今後の検討課題を以下に示す。

- (1) 環境影響領域の設定
- (2) 排出係数の妥当性
- (3) 環境影響物質の被害費用
- (4) 将来予測の不確実性

環境影響領域の設定は、事業に対して環境影響評価を実施する際、事業評価者にゆだねられてしまい、非常に曖昧になってしまいがちである。工業製品等の環境影響評価については、本研究におけるグローバルな環境影響評価を実施することによって製品ごとの環境負荷を低減する試みが行われている。しかしながら、事業の環境影響評価を実施する場合、環境影響領域をどこまでさかのぼるかが非常に重要になってくる。環境影響物質の排出について、各企業および団体等の責任がどこまで及ぶかを明確に定めていく必要があると考えられる。

本研究では排出係数の設定において、1995年度の情報を基本とした産業連関分析法を採用した。しかしながら、バンコク地下鉄整備事業で代表される海外プロジェクト等を対象とする場合は、本研究で設定した排出係数の妥当性ならびに事業現場に即した要素の排出係数を決定する方法を更に検討する必要がある。

また、環境影響物質の排出を貨幣換算する際、本研究では既往の研究を参照した被害費用を用いた。しかしながら、それらの値にはばらつきがあり、環境影響に対する被害費用を一律に算定することは困難である。また、環境影響物質の被害費用は地域や時代によって変化していくものであると考えられる。本研究において、被害費用は一定としてEIRRを算出したが、本来、被害費用は一定でなく、時々刻々と変化するものとして捉えるべきである。今後、CO₂排出権取引に代表される手法等によって環境影響物質の被害費用を確立していく必要がある。

社会基盤構造物は供用年数が長いために、将来における不確実性が大きい。本研究では不確実性をほとんど考慮していない。今後は確率統計等の手法を用いて不確実性を考慮した環境影響評価を実施していく必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 國部克彦・伊坪徳宏・水口剛：環境経営・会計，丸善，pp.81-90，2007
- 2) 伊坪徳宏・稲葉敦：ライフサイクル環境影響評価手法，産業環境管理協会，2005
- 3) 前出 1)，pp.23-29，2007
- 4) 前出 1)，pp.248-252，2007
- 5) 稲葉敦：LCA の実務，産業環境管理協会，pp.30-33，2005
- 6) 井村秀文：建設の LCA，オーム社，pp239-252，2001
- 7) 日本建築学会：建物の LCA 指針，日本建築学会，CD-ROM，2001
- 8) 前出 5)，pp.39，2005
- 9) 道路投資の評価に関する指針検討委員会：道路投資の評価に関する指針（案），日本総合研究所，pp.77-84，1998
- 10) 飯田恭敬：土木系各システム分析-最適化編，森北出版，pp.193-204，1991
- 11) 前出 7)，pp.177，2001
- 12) MRTA Questionnaire for the MRT Blue line Post Evaluation : Appendix A
- 13) 大城温・松下雅行・並河良治・大西博文：自動車走行時の燃料消費率と二酸化炭素排出係数，2001
- 14) 前出 2)，CD-ROM，2005

謝 辞

本論文を締めくくるにあたり、本研究にご協力していただいた方々、お世話になった方々に感謝の言葉を述べたいと思います。

主査を務めていただいた京都大学・大津宏康教授には、普段の打ち合わせ等のときから、時には厳しく、時には丁寧にご指導いただき本当にありがとうございました。心よりお礼申し上げます。

副査を勤めていただいた京都大学・勝見武准教授には、打ち合わせの時等わざわざ吉田から来ていただき、的確なアドバイスをいただきました。心から感謝いたします。

京都大学・塩谷智基准教授は、普段の喫煙室での会話等でも研究のためになるような助言をいただき、常に明るい接し方をしていただきました。心よりお礼申し上げます。

京都大学・稲積真哉助教は、私の遅々として進まない論文作成に当たり、本当にたくさんの打ち合わせ時間を割いてくださり、また、たくさんの励ましをいただきました。心より感謝いたします。

大津研究室の北村瑞絵秘書、先輩方ならびに同回生の方々のおかげで、楽しい、けれども充実した研究生活を送ることができました。本当にありがとうございました。

最後に、大学で勉強する環境を与えていただき、温かく見守ってくれた両親にお礼を申し上げたいと思います。本当にありがとうございました。

表3.1^(6),7) 代表的な要素に関する排出係数

(a) 燃料の排出係数

		排出係数			高位発熱量 (MJ/l)
		生産段階	流通段階	最終消費	
CO ₂ (kg-CO ₂ /MJ)	揮発油	0.0140	0.0020	0.0660	35.16
	軽油	0.0080	0.0010	0.0690	38.51
SO ₂ (g-SO ₂ /MJ)	揮発油	0.0720	0.0050	0.0010	35.16
	軽油	0.0440	0.0020	0.0680	38.51
NO ₂ (g-NO ₂ /MJ)	揮発油	0.0870	0.0130	0.0730	35.16
	軽油	0.0540	0.0060	0.4570	38.51

(b) 資材の排出係数

	資材	合計	生産段階		流通段階		最終消費 段階
			消費支出	資本形成	消費支出	資本形成	
CO ₂ (kg-CO ₂ /kg)	普通鋼形鋼	0.941	0.798	0.005	0.011	0.002	0
	セメント	0.816	0.798	0.005	0.011	0.002	0
	生コンクリート	0.205	0.193	0.005	0.006	0.001	0
SO ₂ (g-SO ₂ /kg)	普通鋼形鋼	1.496	1.426	0.040	0.026	0.004	0
	セメント	0.259	0.199	0.008	0.048	0.004	0
	生コンクリート	0.099	0.082	0.007	0.008	0.002	0
NO ₂ (g-NO ₂ /kg)	普通鋼形鋼	3.376	3.215	0.079	0.073	0.009s	0
	セメント	1.548	1.402	0.015	0.124	0.007	0
	生コンクリート	0.461	0.419	0.014	0.023	0.005	0

注) 国内外波及効果含む

(c) 貨幣価値による排出係数

	CO ₂ (t-CO ₂ /百万円)	SO ₂ (kg-SO ₂ /百万円)	NO ₂ (kg-NO ₂ /百万円)
鉄道車両	4.634	10.025	16.185
鉄道機動建設	4.242	14.401	6.864
非住宅建設(非木造)	2.959	5.556	10.426

表3.2⁸⁾ 地下鉄の概略的排出係数表(炭素重量)

インフラ本体構(建設)	排出係数
シールドトンネル	2.41 t-C/m
開削トンネル	4.48 t-C/m
盛土	1.77 t-C/m
切土	0.88 t-C/m
RC桁用橋脚	35.8 t-C/基
PC桁用橋脚	32.2 t-C/基
RC桁	0.85 t-C/m
PC桁	1.02 t-C/m
インフラ付帯構造(建設)	
スラブ軌道	77.9 kg-C/m
バラスト軌道	87.8 kg-C/m
高架駅	1,040 t-C/駅
地下駅	8,490 t-C/駅
車両基地	1,670 t-C/箇所
走行	
電車電力	0.31 kg-C/車両km
付帯施設電力	0.21 kg-C/車両km

表3.3⁹⁾ 環境影響物質の被害費用

(a) CO₂の被害費用(炭素重量)

研究事例	1991～2000年	2001～2010年	2011～2020年
Nordhaus(1991)	7.3(0.3～65.9)		
Ayres&Walter(1991)	30～35		
Nordhaus(1993)	5.3	6.8	8.6
Cline(1992,1993)	5～145	7～150	9～165
Peck&Teisberg(1992)	10～12	12～14	14～18
Fankhauser(1994)	20.3	22.8	25.3
Maddison(1994)	5.9～6.1	8.1～8.4	11.1～11.5

単位:ドル/t-C

(b) 酸性化による被害費用

酸性化	金銭化		統合化係数 (被害費用)
	社会資産	一次生産	
物質名	円/kg	円/kg	円/kg
SO ₂	60.82	6.53	67.34
NO ₂	43.43	4.66	48.09
NO ₂	43.43	4.66	48.09

(c) 都市大気汚染による被害費用

都市域大気汚染		統合化係数
物質名	排出源	円/kg
NO _x	点源	141.2
	線源	197.2
SO ₂		1014.7

表4.1 資材使用量推定結果

	全長	単位使用量				使用量		
		コンクリート(t/m)	鉄(t/m)	土砂(t/m)	コンクリート(千トン)	鉄(千トン)	掘削土砂(千トン)	
シーールドトンネル部	32003.5 m	12.74	0.88	78.00	408	28.2	2496	
開削トンネル部	1378 m	169.69	15.36	486.37	234	21.2	670	
トラックスラブ	57476 m	3.20	0.06	0.00	184	3.66	0	
駅部	4644.2 m	302.43	27.38	1152.00	1405	127	5350	
合計					2230	180	8517	

表4.2 資材および燃料消費量とグローバルな環境負荷

資材、燃料	使用量(W_i)	排出係数 (E_i)				排出量 ($E_i \times W_i$)				
		CO ₂ (t-CO ₂ /unit)	SO ₂ (t-SO ₂ /unit)	NO ₂ (t-NO ₂ /unit)	CO ₂ (千t-CO ₂)	SO ₂ (t-SO ₂)	NO ₂ (t-NO ₂)	CO ₂ (千t-CO ₂)	SO ₂ (t-SO ₂)	NO ₂ (t-NO ₂)
コンクリート	unit									
	2229946 t	0.205	0.000099	0.000461	457	221	1028			
鉄	t	1.136	0.001806	0.004078	205	325	735			
電力	MWh	0.564	0.000461	0.000615	4.65	3.80	5.07			
燃料	kl	2.88 ~ 3.00	0.00274 ~ 0.0044	0.00608 ~ 0.0199	67.7 ~ 70.5	64.4 ~ 103	143 ~ 468			
sub total					734 ~ 737	614 ~ 653	1911 ~ 2236			

	金額 (W_i)	排出係数 (E_i)				排出量 ($E_i \times W_i$)				
		CO ₂ (t-CO ₂ /百万円)	SO ₂ (t-SO ₂ /百万円)	NO ₂ (t-NO ₂ /百万円)	CO ₂ (千t-CO ₂)	SO ₂ (t-SO ₂)	NO ₂ (t-NO ₂)	CO ₂ (千t-CO ₂)	SO ₂ (t-SO ₂)	NO ₂ (t-NO ₂)
鉄道車両	9671 ~	11605 百万円	4.634	0.008087	0.016185	44.8 ~	44.8	78.2 ~	78.2	156.5 ~
車両基地	14420 ~	17304 百万円	2.959	0.005556	0.010426	66.8 ~	66.8	116.6 ~	116.6	233.4 ~

注1) 貨幣ベースの排出係数では、3.5~4.2(円/Baht)として換算

注2) 排出係数は全てE_iレベルの排出係数を使用

表4.3 資材および燃料消費量とローカルな環境負荷

資材、燃料	使用量(W_i)		排出係数 (e_i)				排出量 ($e_i \times W_i$)				
		unit	CO ₂ (t-CO ₂ /unit)	SO ₂ (t-SO ₂ /unit)	NO ₂ (t-NO ₂ /unit)	CO ₂ (千t-CO ₂)	SO ₂ (t-SO ₂)	NO ₂ (t-NO ₂)			
コンクリート	2229946	t	0	0	0	0	0	0			
鉄	180200	t	0	0	0	0	0	0			
電力	8237.7	MWh	0.424	0.000254	0.000265	3.49	2.09	2.18			
燃料	23505.9	kl	2.88 ~ 3.00	0.0000352 ~ 0.00262	0.00257 ~ 0.0176	54.5 ~ 62.5	0.83 ~ 61.6	60.4 ~ 414			
sub total						58.0 ~ 66.0	2.92 ~ 63.7	62.6 ~ 416			

表4.4 eBUMシミュレーション結果

バンコク市内の日交通量(PCU-km/日)

Year 2005	Withの場合	Withoutの場合
PCU-Km	93,220,433	93,335,548
PCU-Hr	3,671,578	3,682,469
Speed(km/h)	25.39	25.35

バンコクエリアの日交通量(PCU-km/日)

Year 2005	Withの場合	Withoutの場合
PCU-Km	197,033,831	197,419,378
PCU-Hr	7,667,276	7,701,019
Speed(km/h)	25.70	25.64

注1) PCU: Passenger Car Unit

注2) バンコクエリアはバンコク市および周辺6県

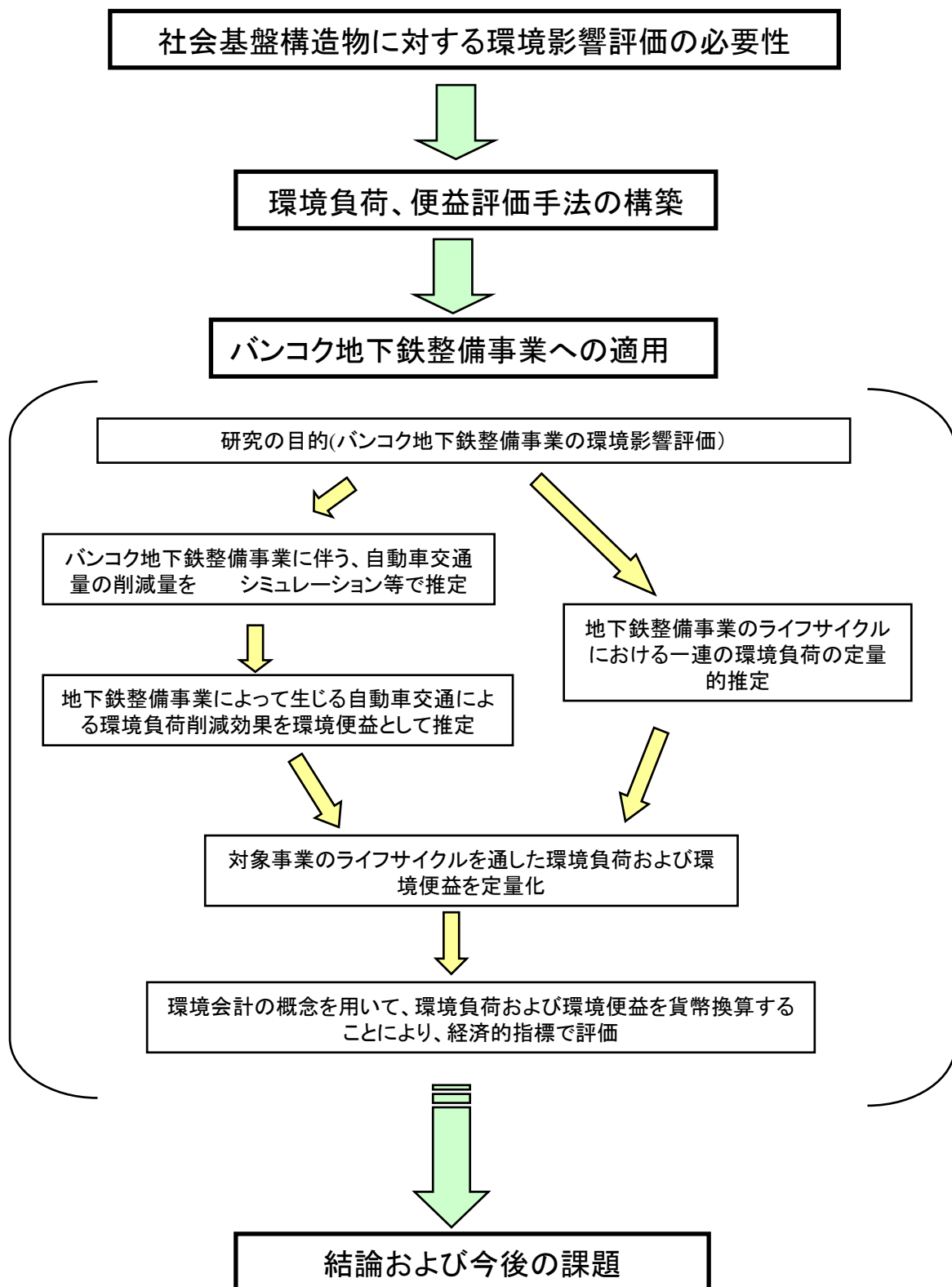


図1.1 本研究における研究フロー

コストの三層構造

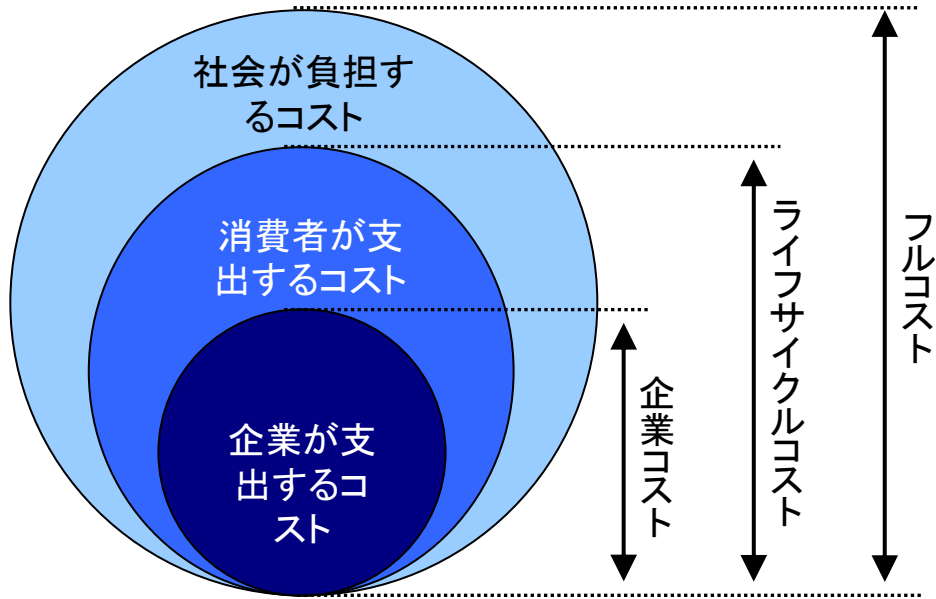


図2.1 環境コストの3分類

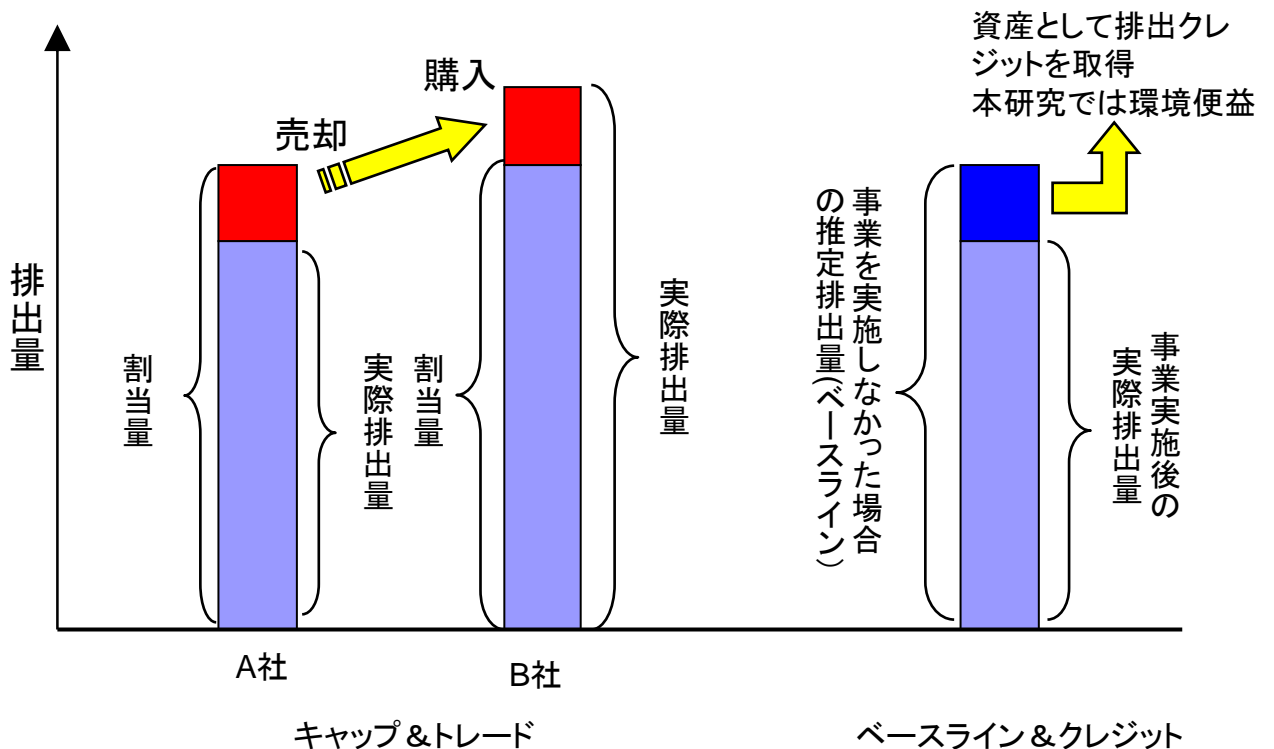


図2.2 キャップ&トレード、ベースライン&クレジットの概念

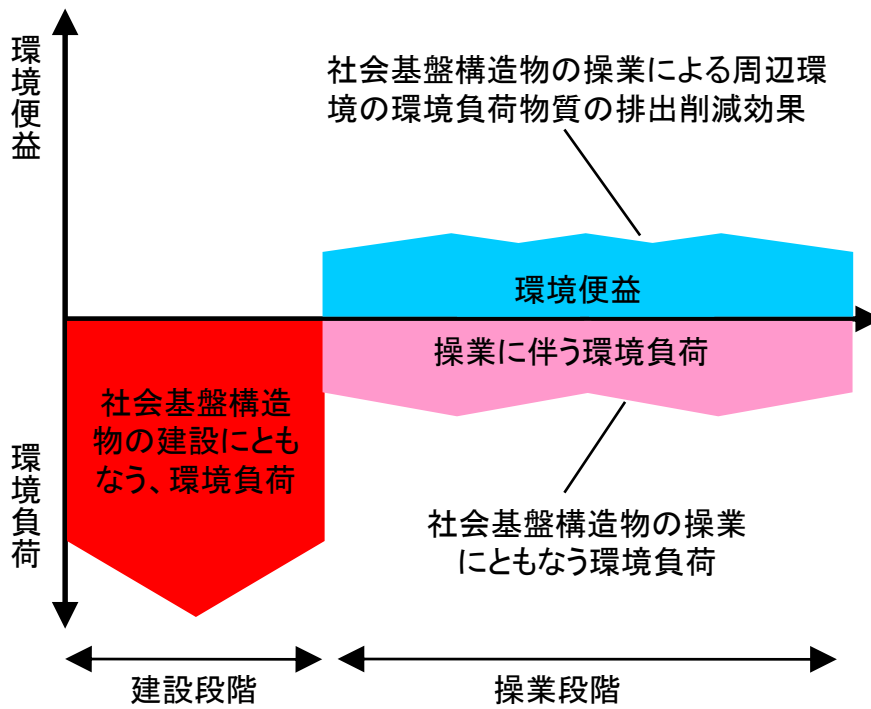


図3.1 環境負荷、便益の概念図

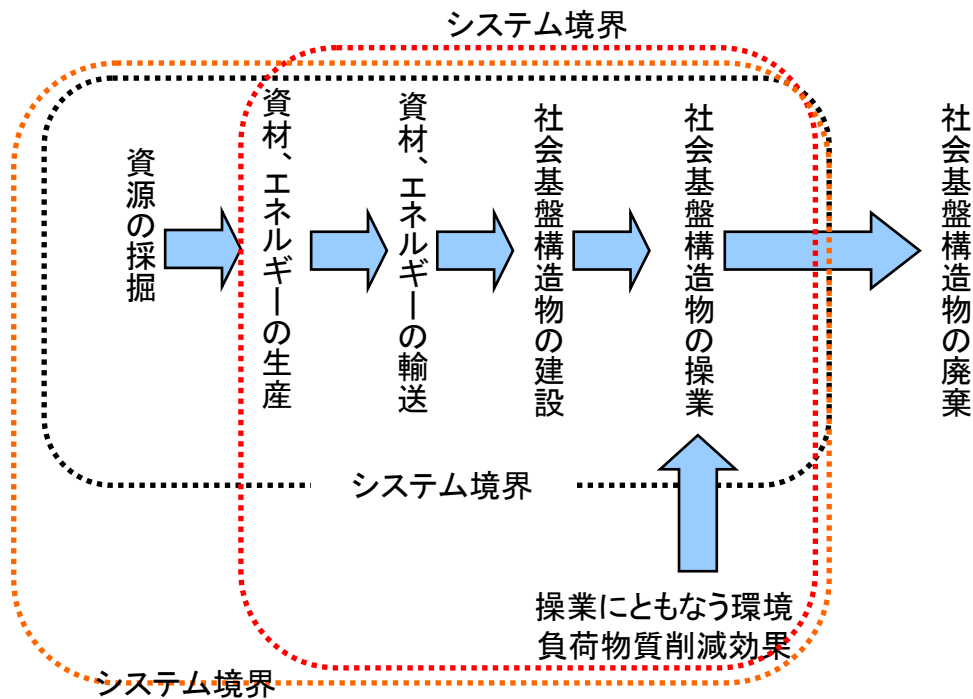


図3.2 システム境界の概念図

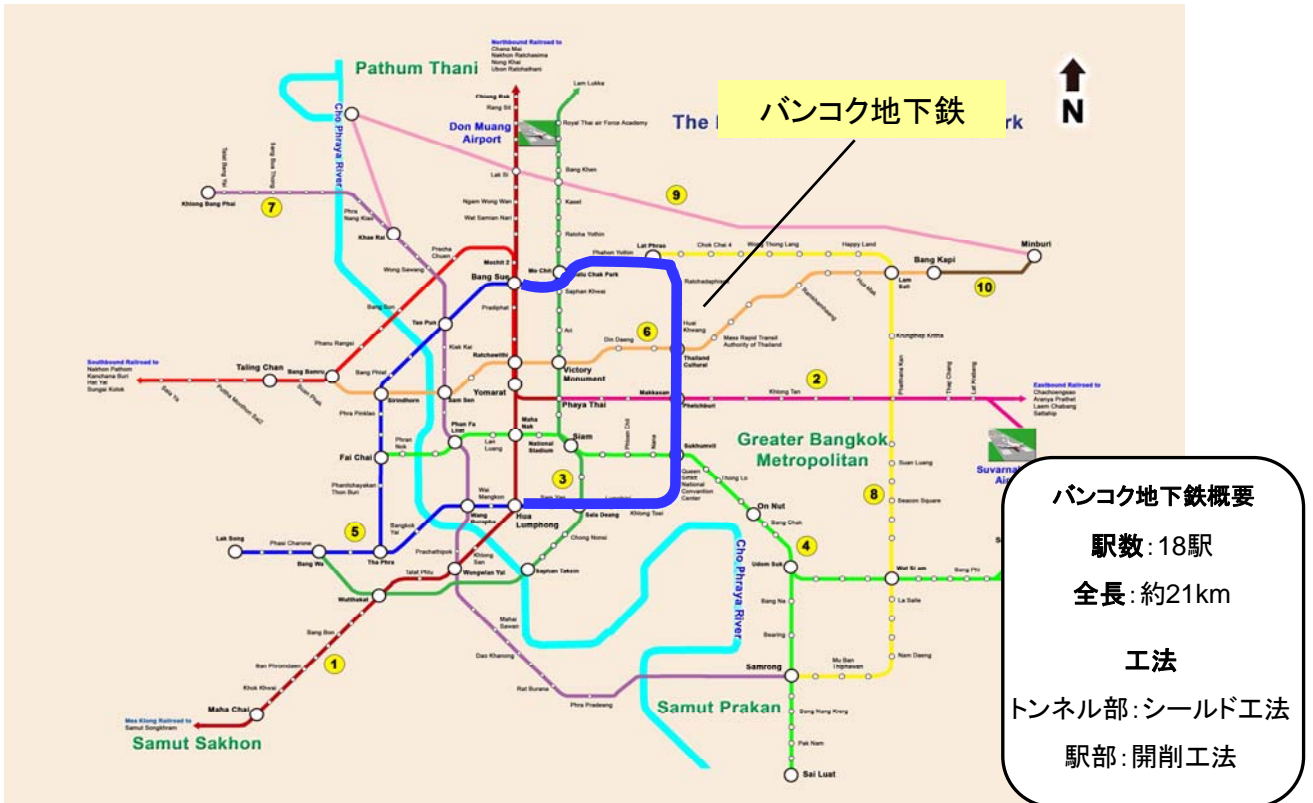


図4.1 バンコク鉄道ネットワークマスタープラン路線図

トンネル部

シールド掘削: Shield-Driven Method (EPB; Earth Pressure Balanced type)



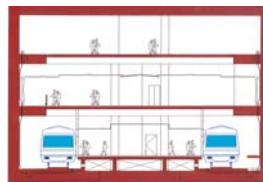
Complete Tunnel



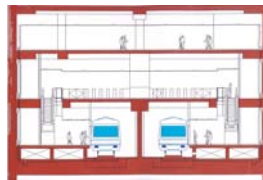
Tunnelling Boring Machine

駅部

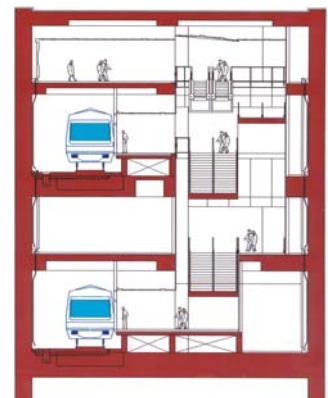
地中連続壁掘削(山留め工) Diaphragm Wall Excavation



Central Platform



Side Platform



Stack Platform

図4.2 バンコク地下鉄整備事業概要

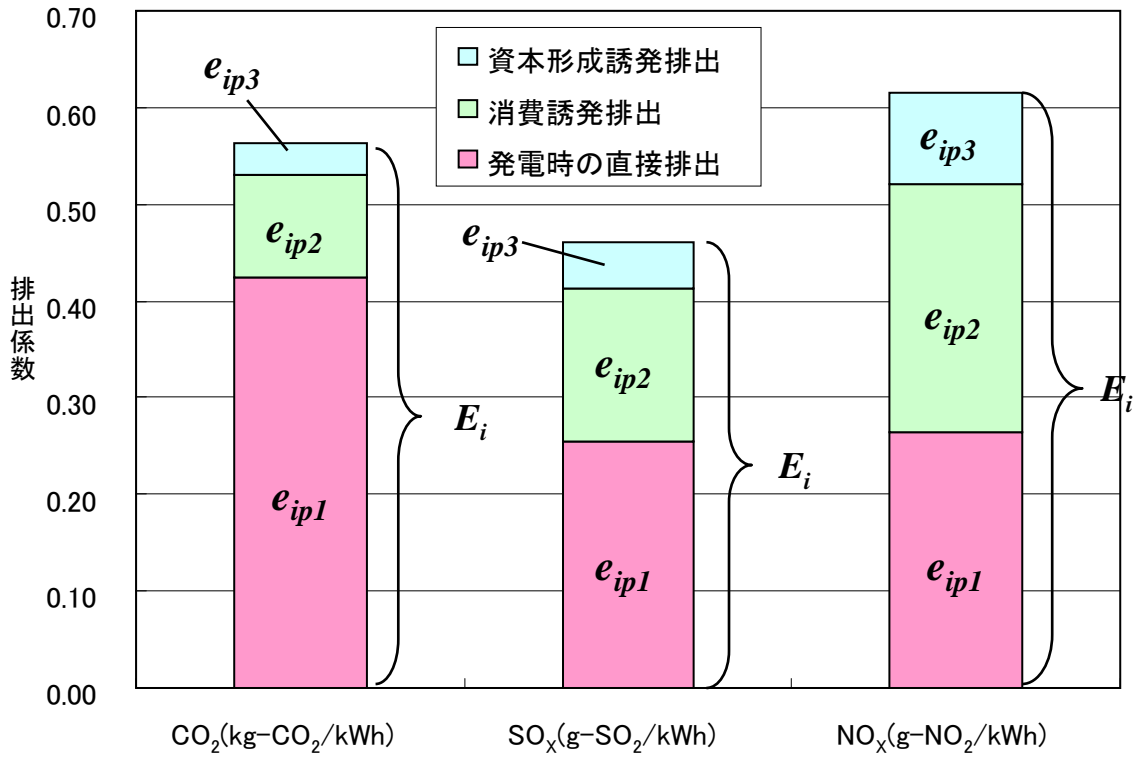


図4.3 電力の排出係数

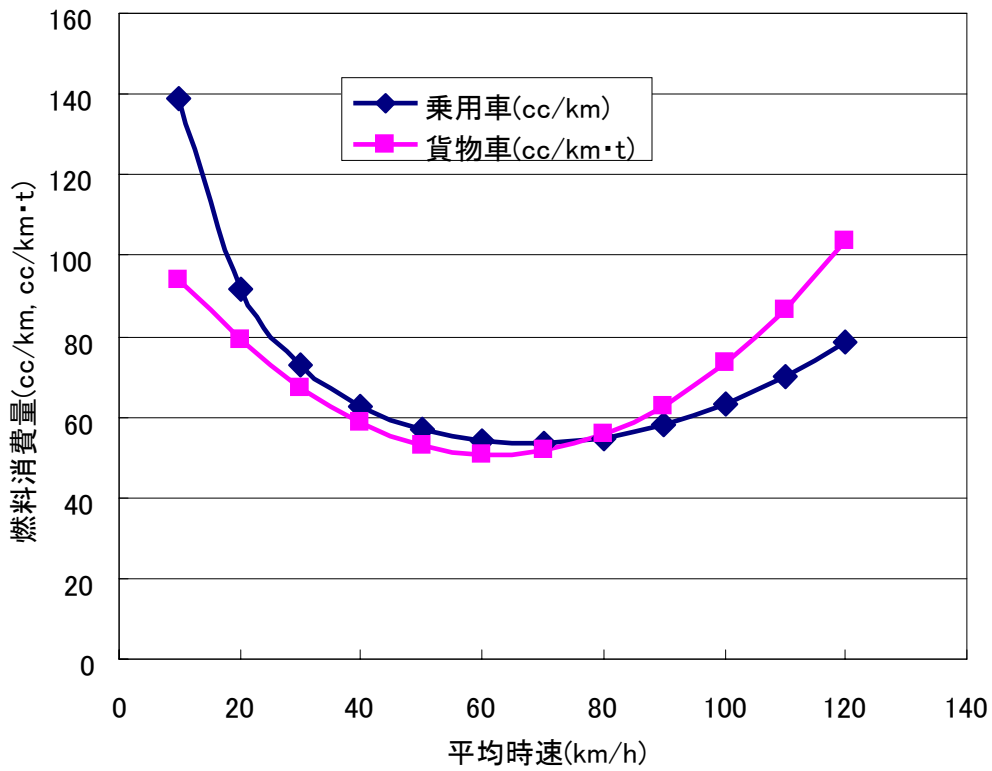


図4.4 自動車の燃料消費量と平均走行速度

環境便益

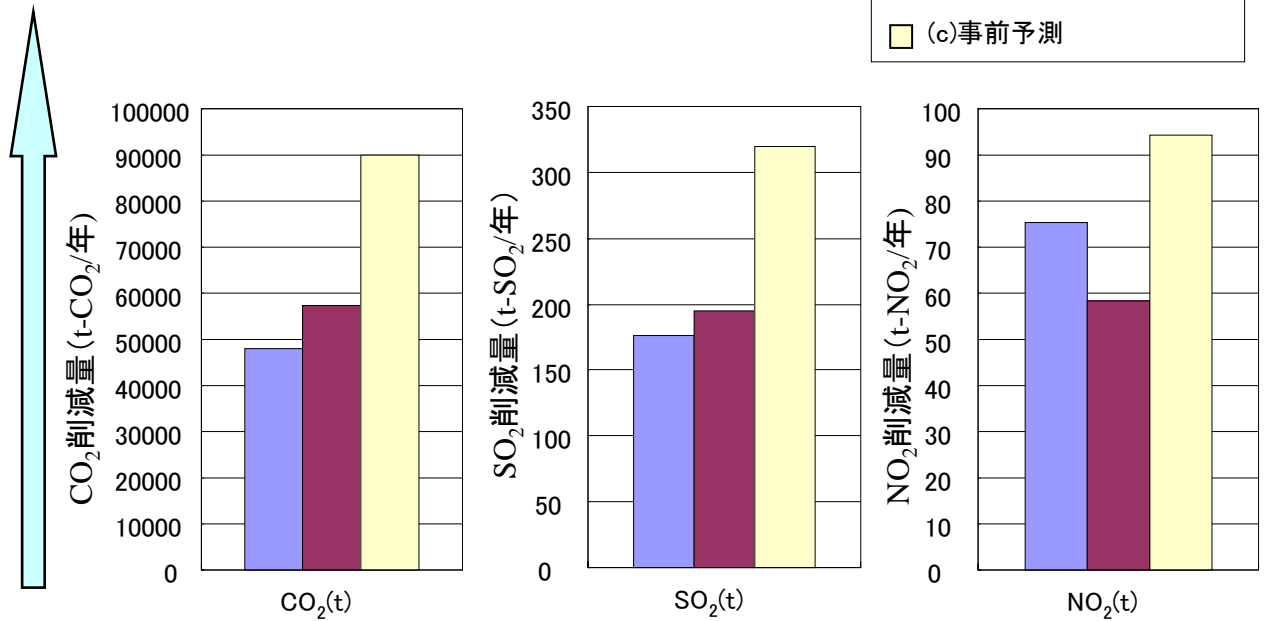


図4.5 グローバルな環境便益(2005年度)

環境便益

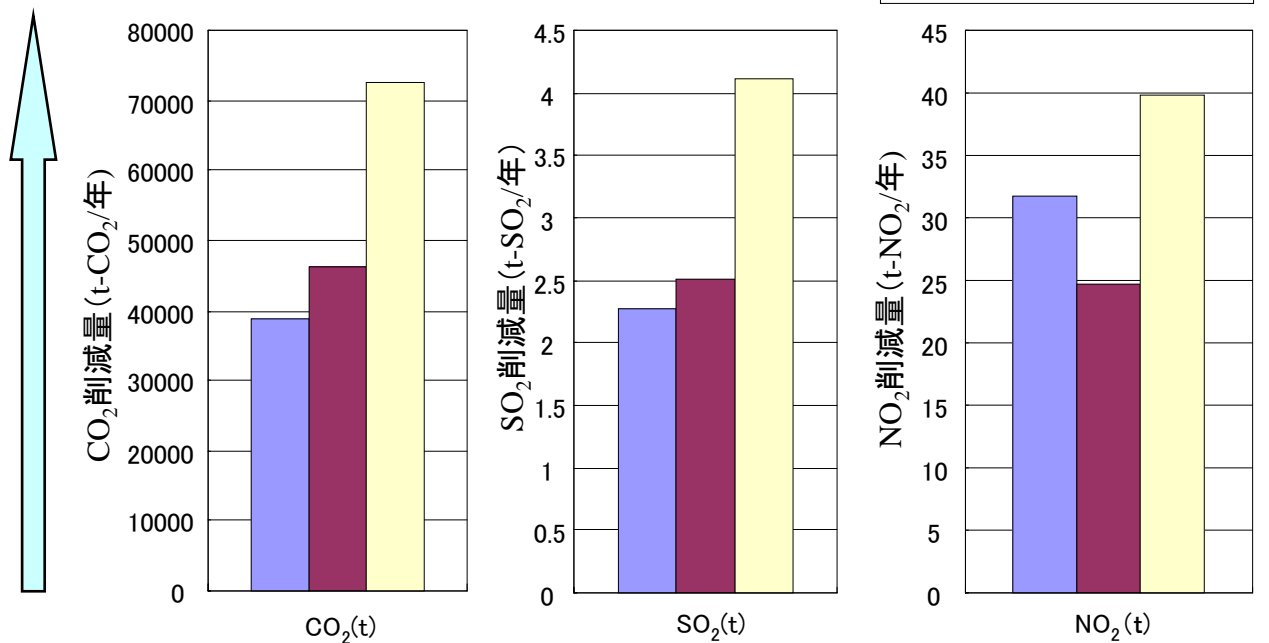
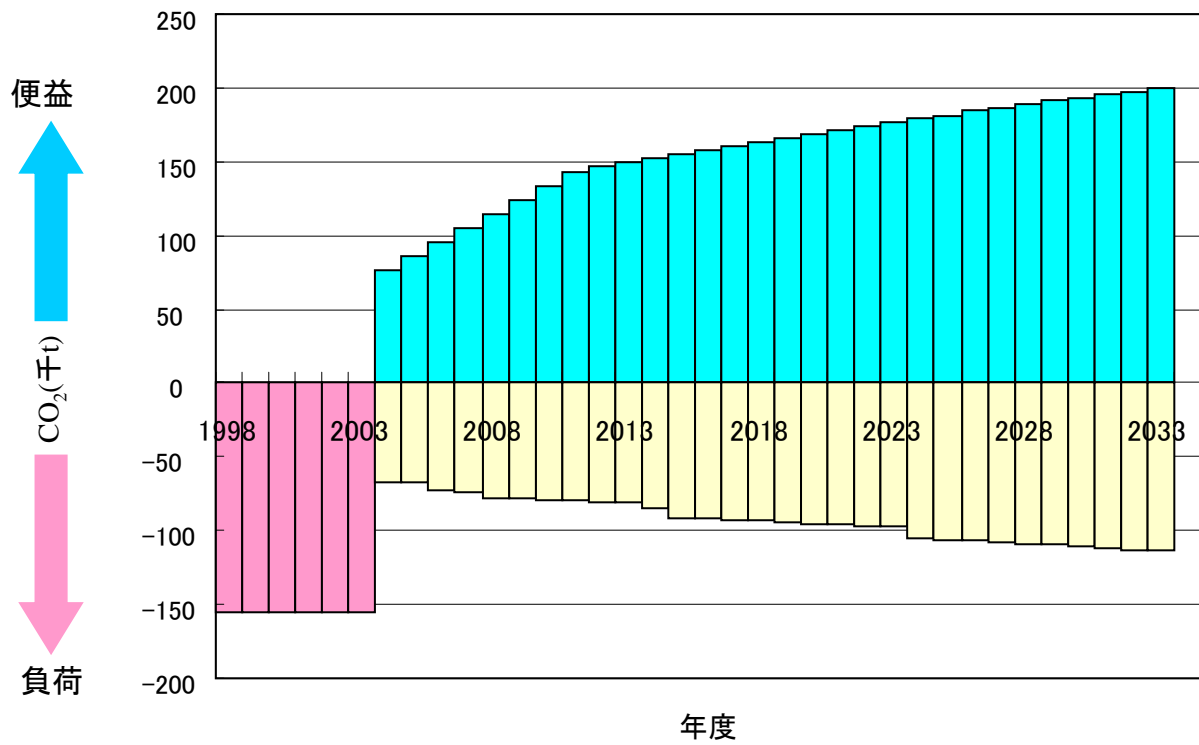
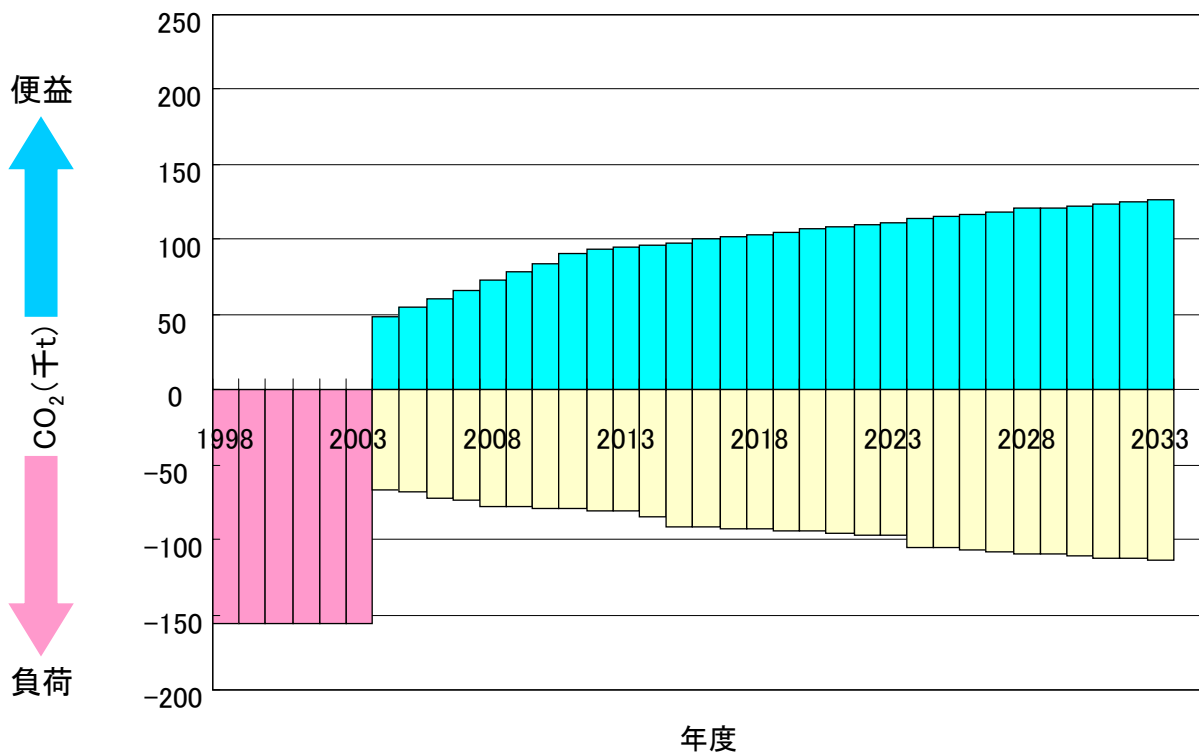
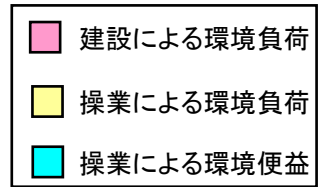


図4.6 ローカルな環境便益(2005年度)

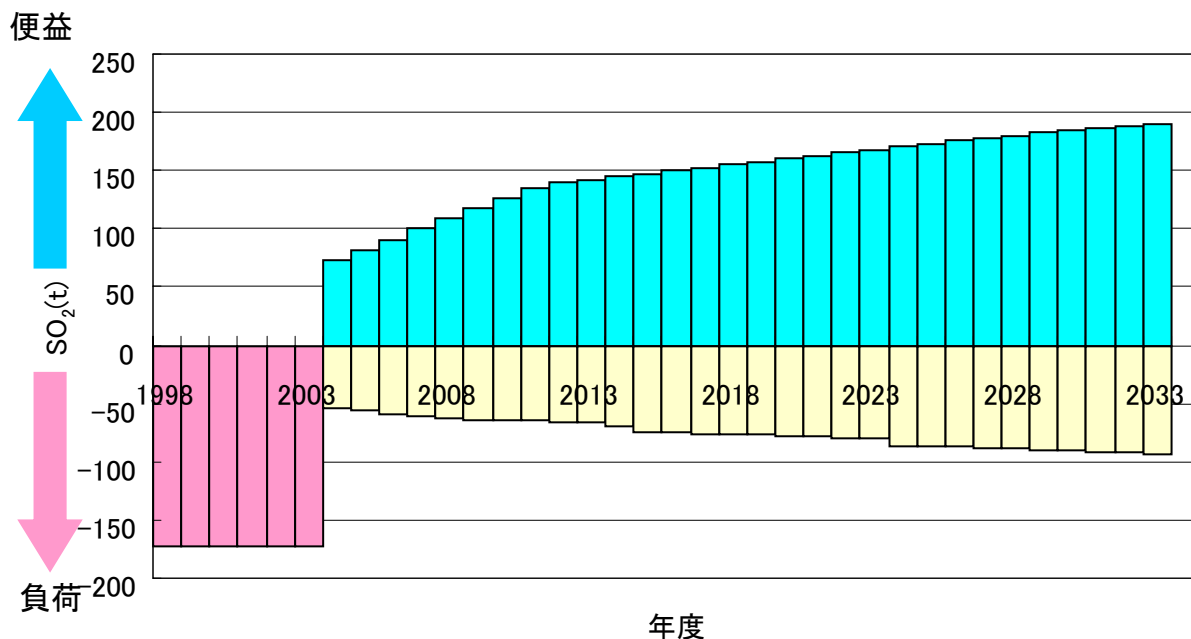


注) 便益は事業実施前の交通量削減予測から推定



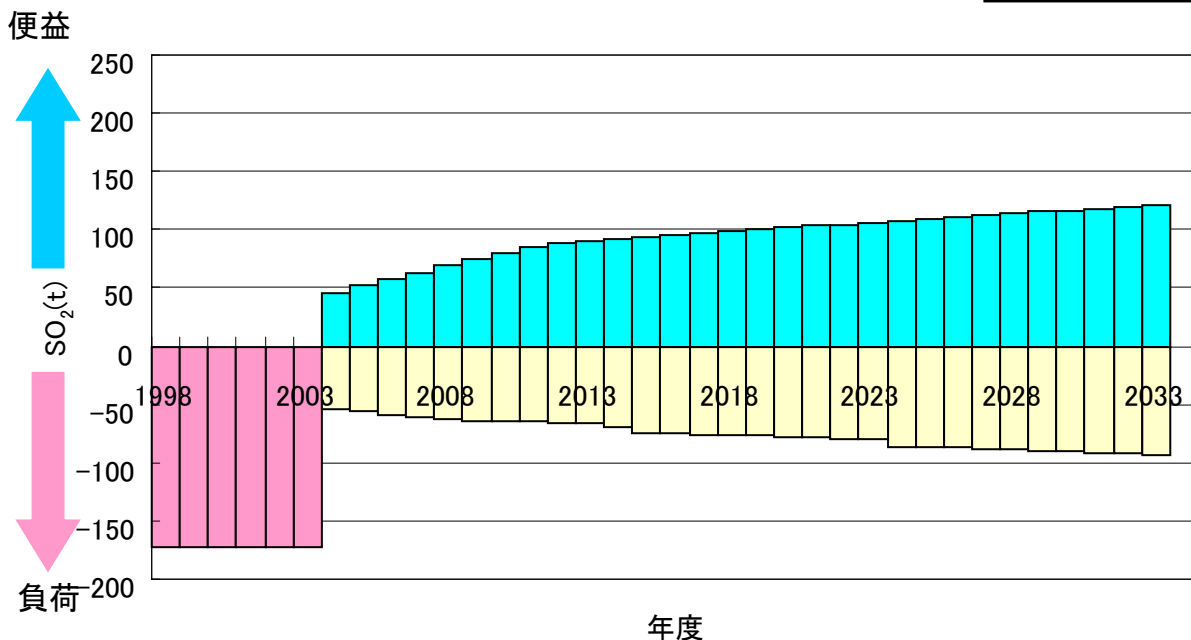
注) 便益はeBUMシミュレーションから推定

図4.7-(a) Scenario-1のCO₂排出量



注) 便益は事業実施前の交通量削減予測から推定

- 建設による環境負荷
- 操業による環境負荷
- 操業による環境便益



注) 便益はeBUMシミュレーションから推定

図4.7-(b) Scenario-1のSO₂排出量

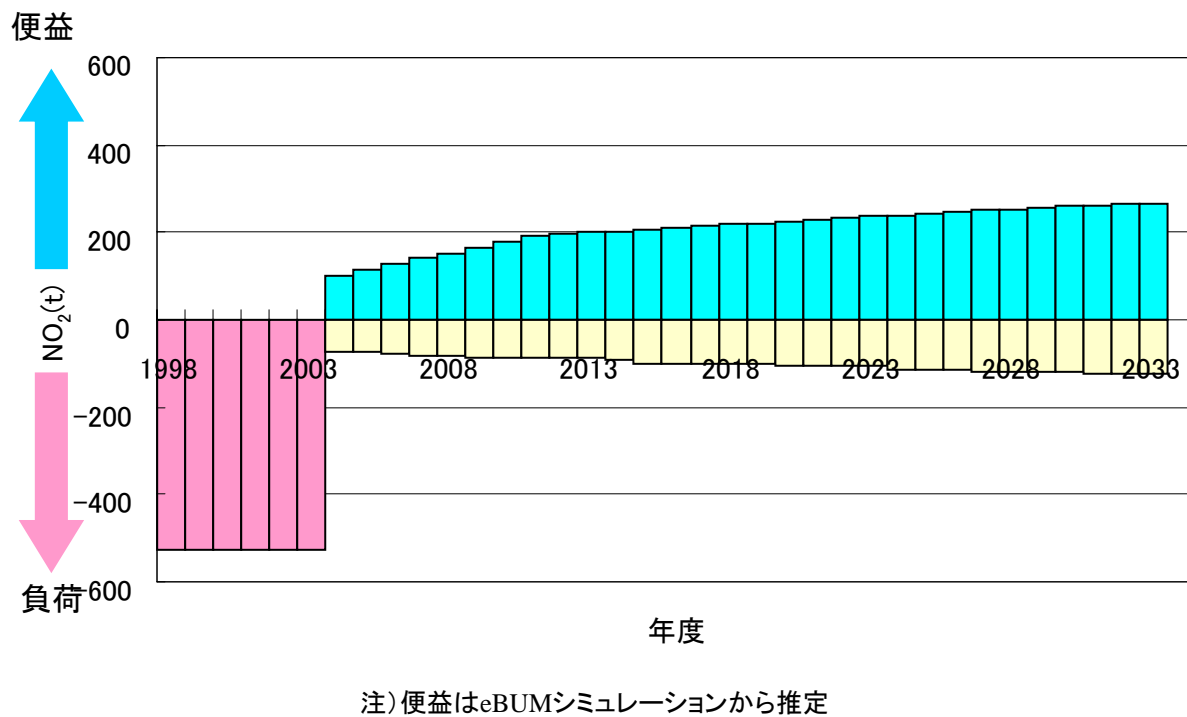
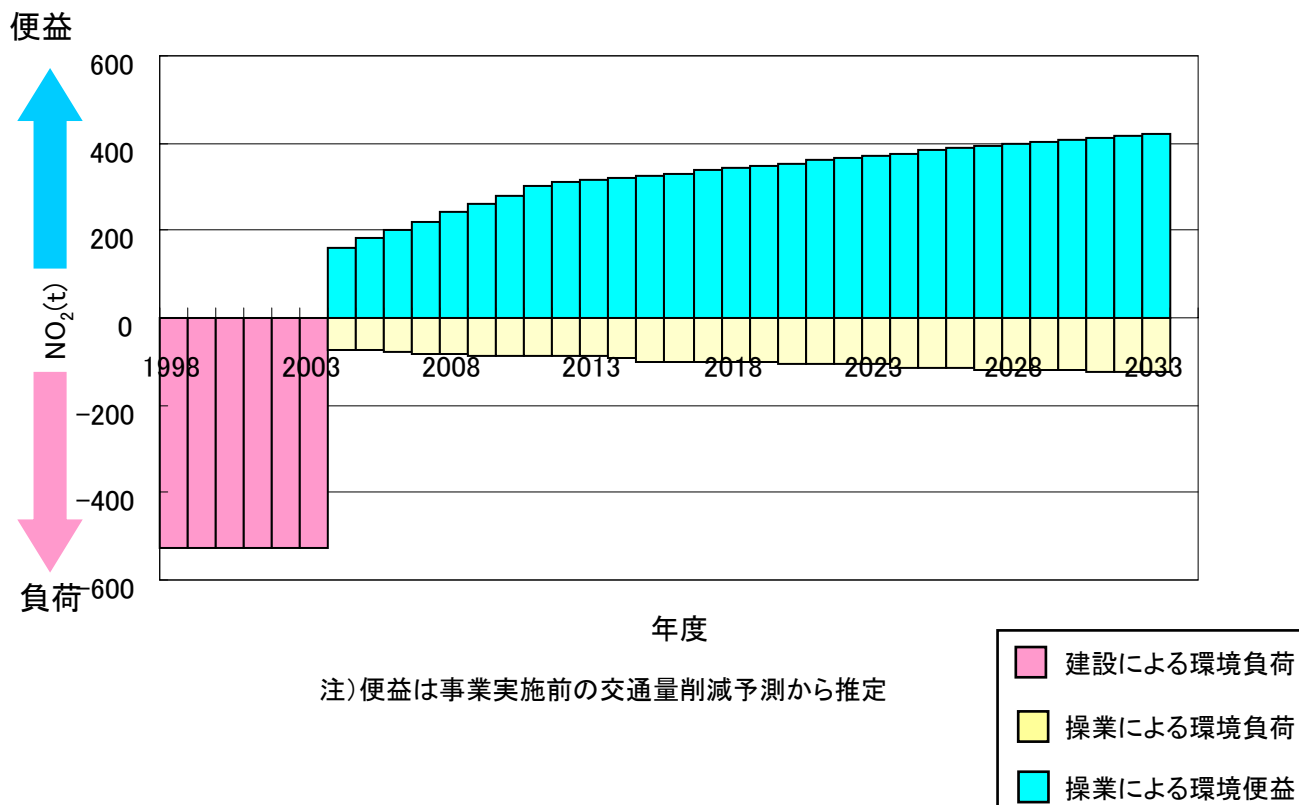
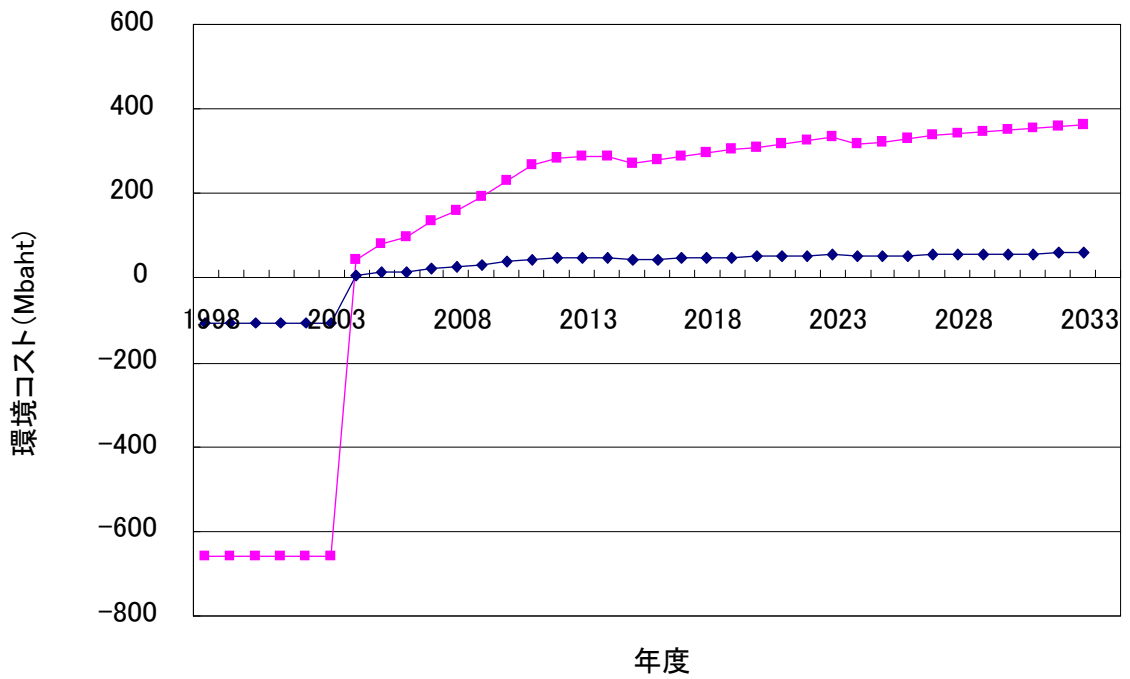
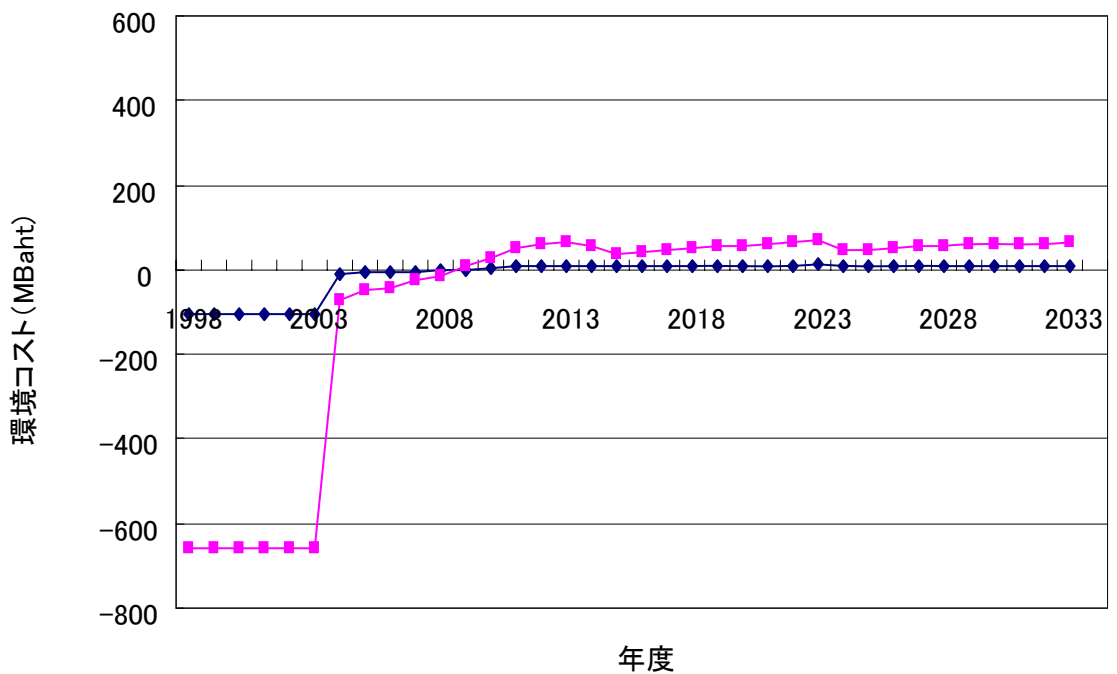
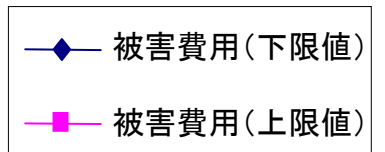


図4.7-(c) Scenario-1のNO₂排出量



注) 便益は事業実施前の交通量削減予測から推定



注) 便益はeBUMシミュレーションから推定

図4.7-(d) Scenario-1の環境コスト

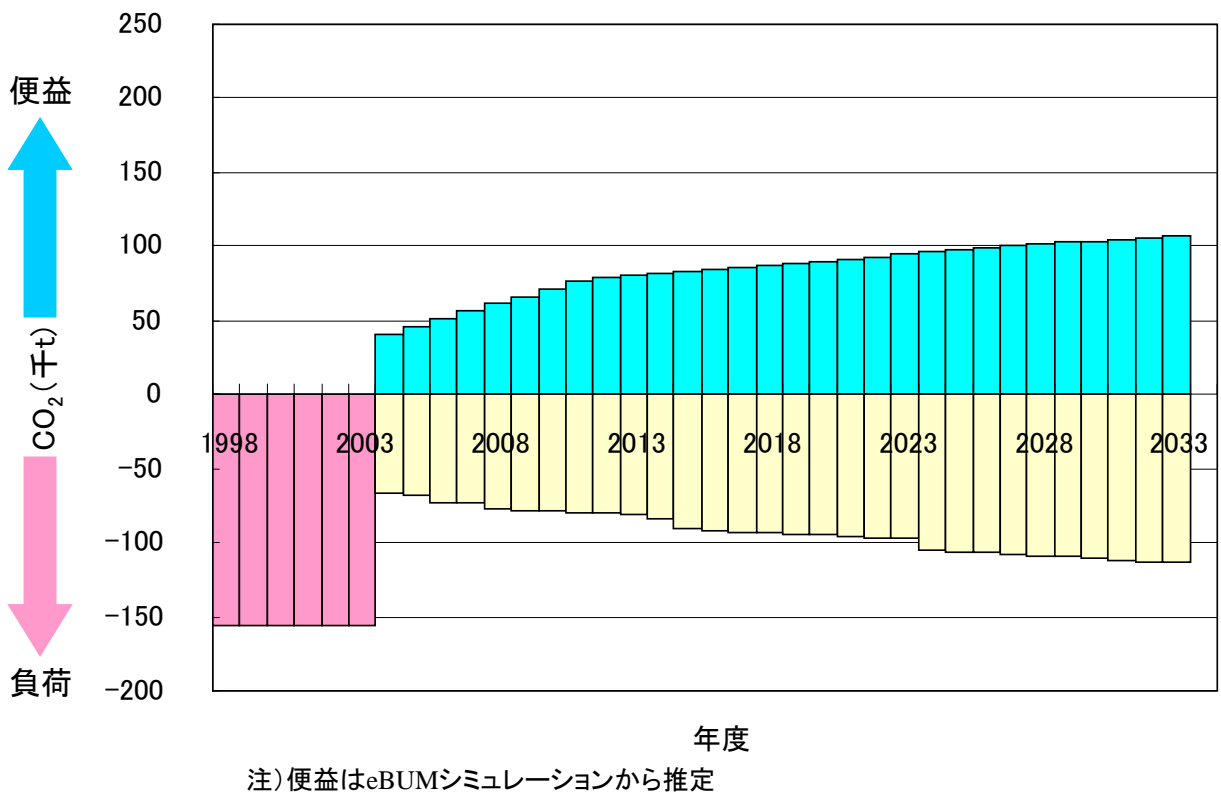
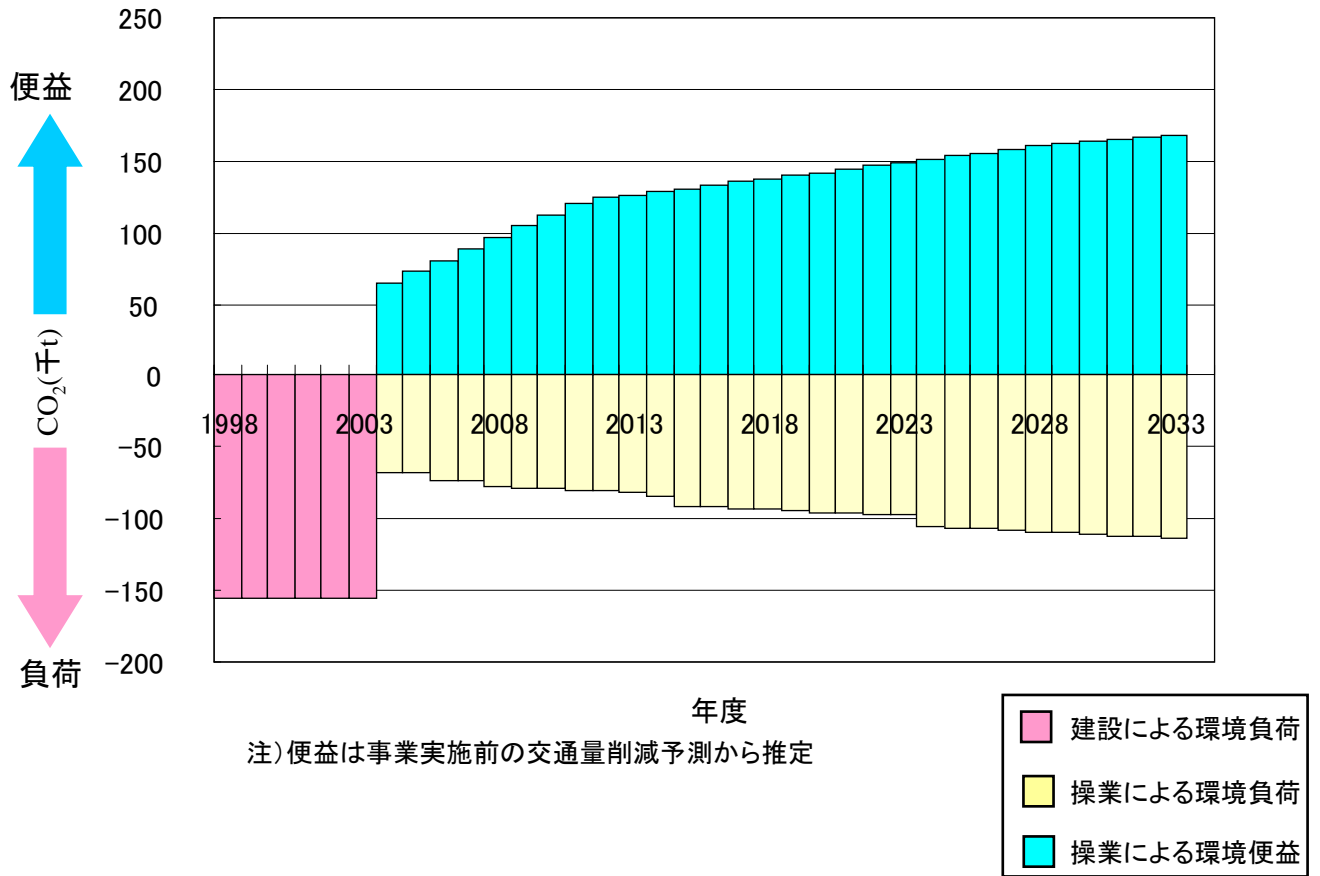


図4.8-(a) Scenario-2のCO₂排出量

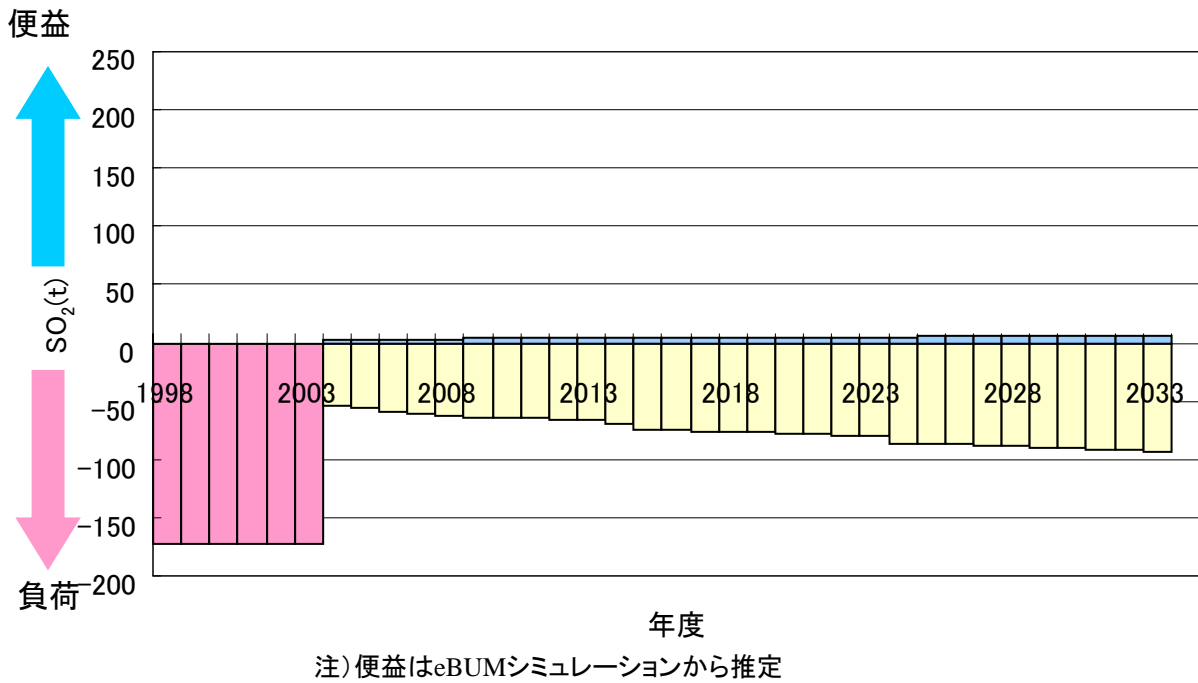
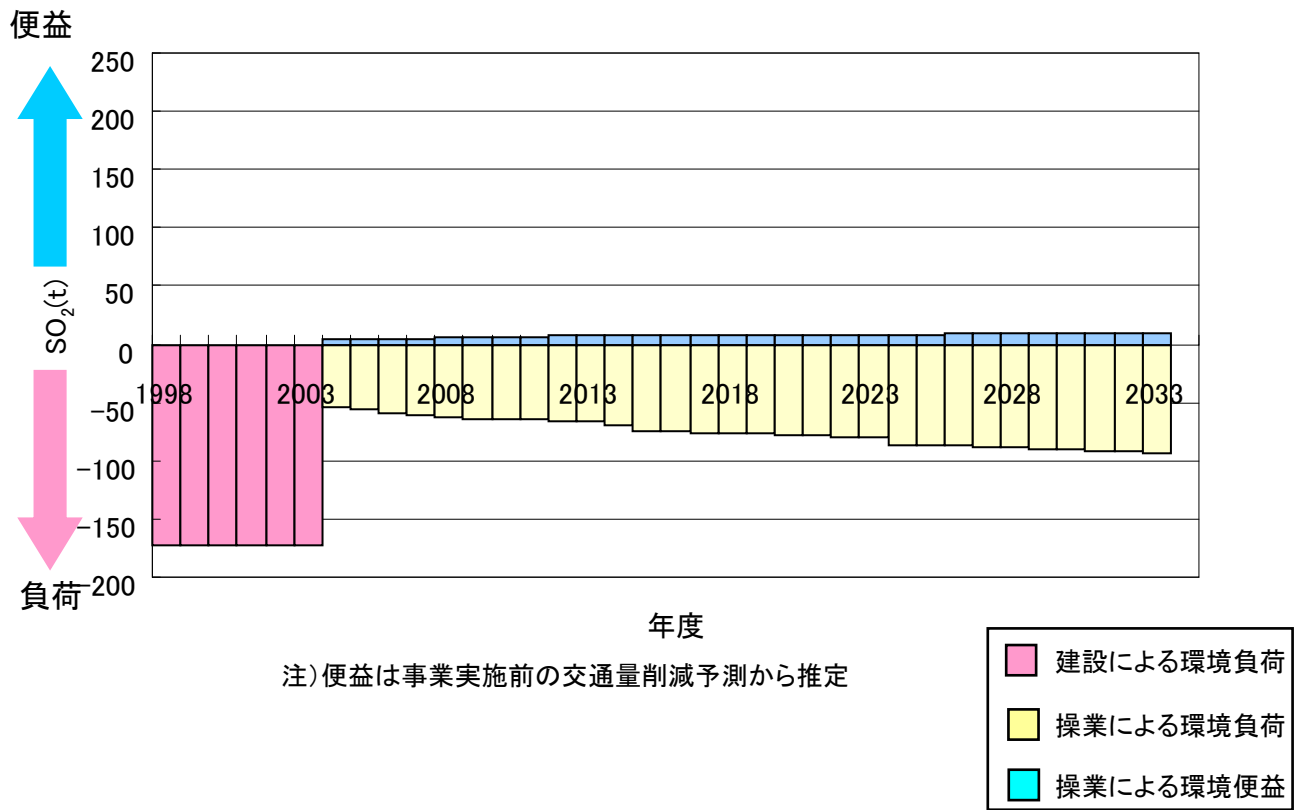


図4.8-(b) Scenario-2のSO₂排出量

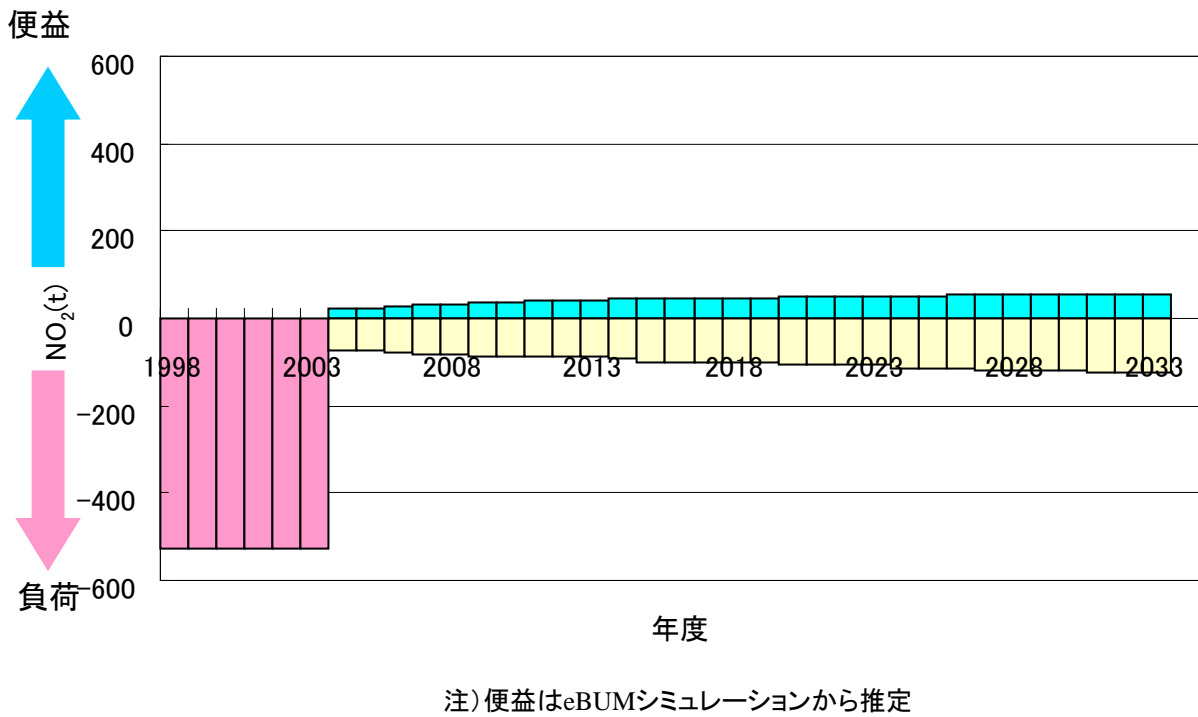
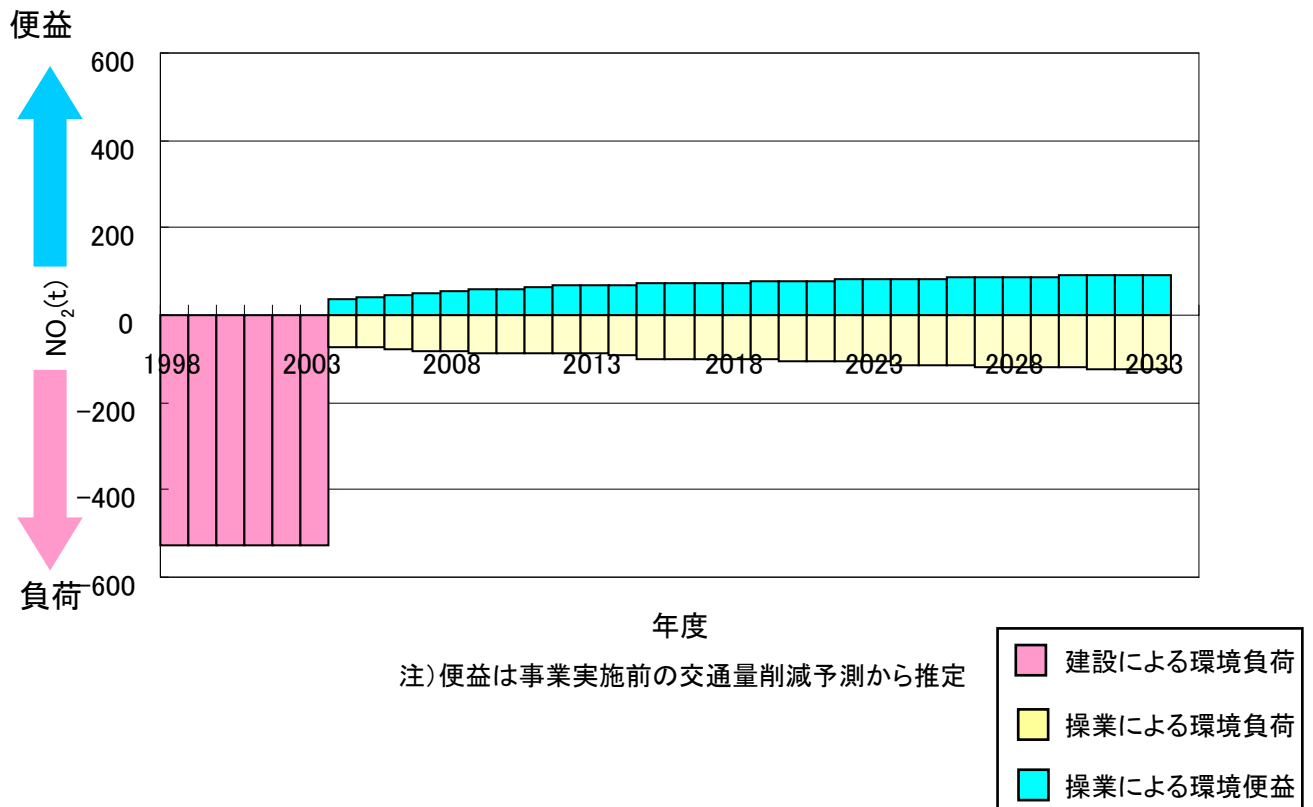
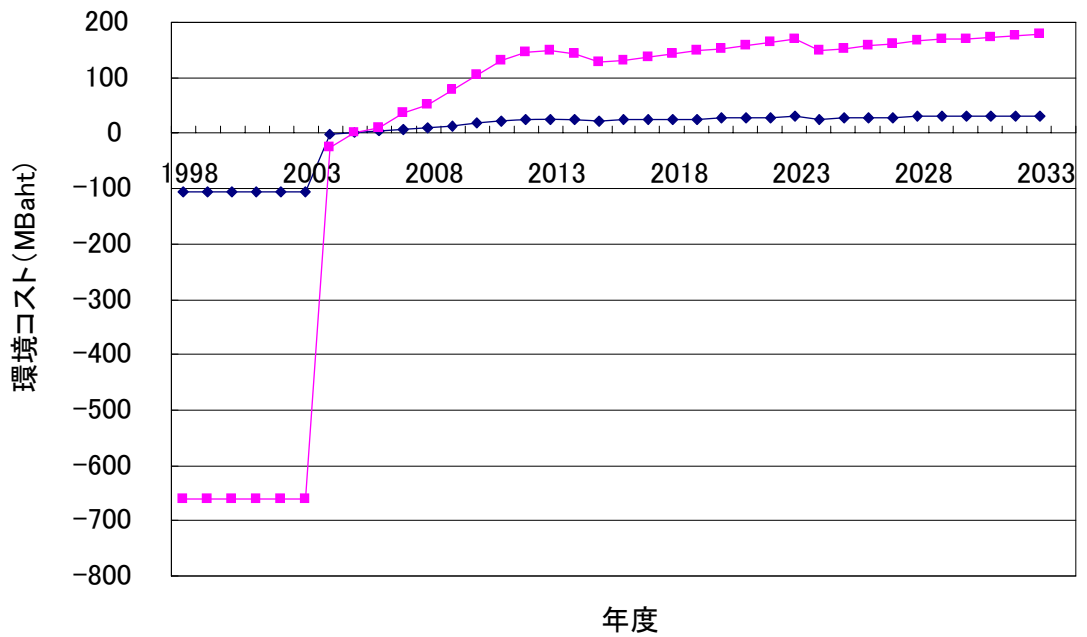
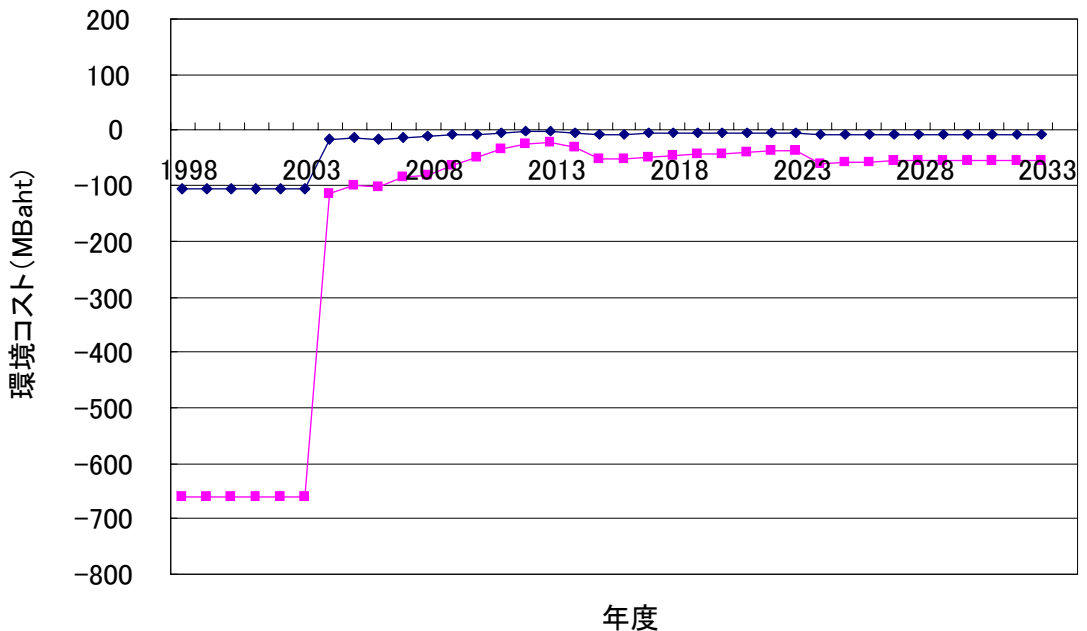
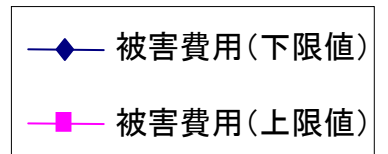


図4.8-(c) Scenario-2のNO₂排出量



注) 便益は事業実施前の交通量削減予測から推定



注) 便益はeBUMシミュレーションから推定

図4.8-(d) Scenario-2の環境コスト

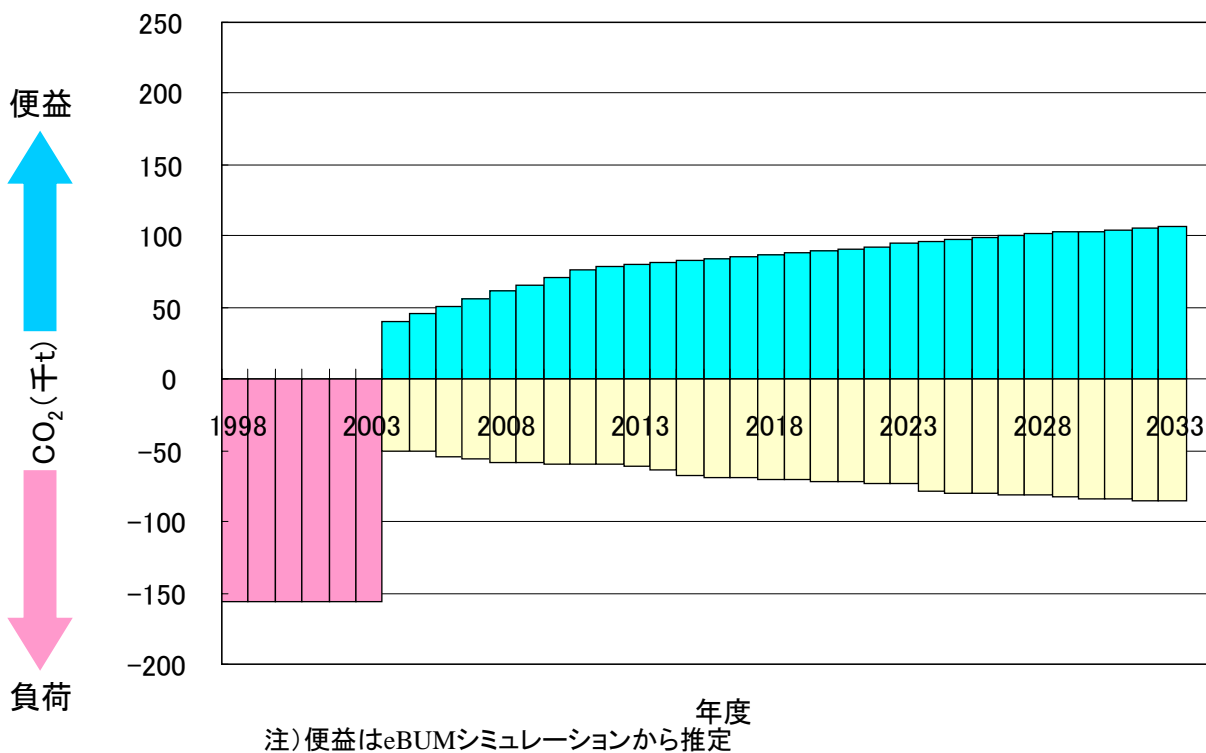
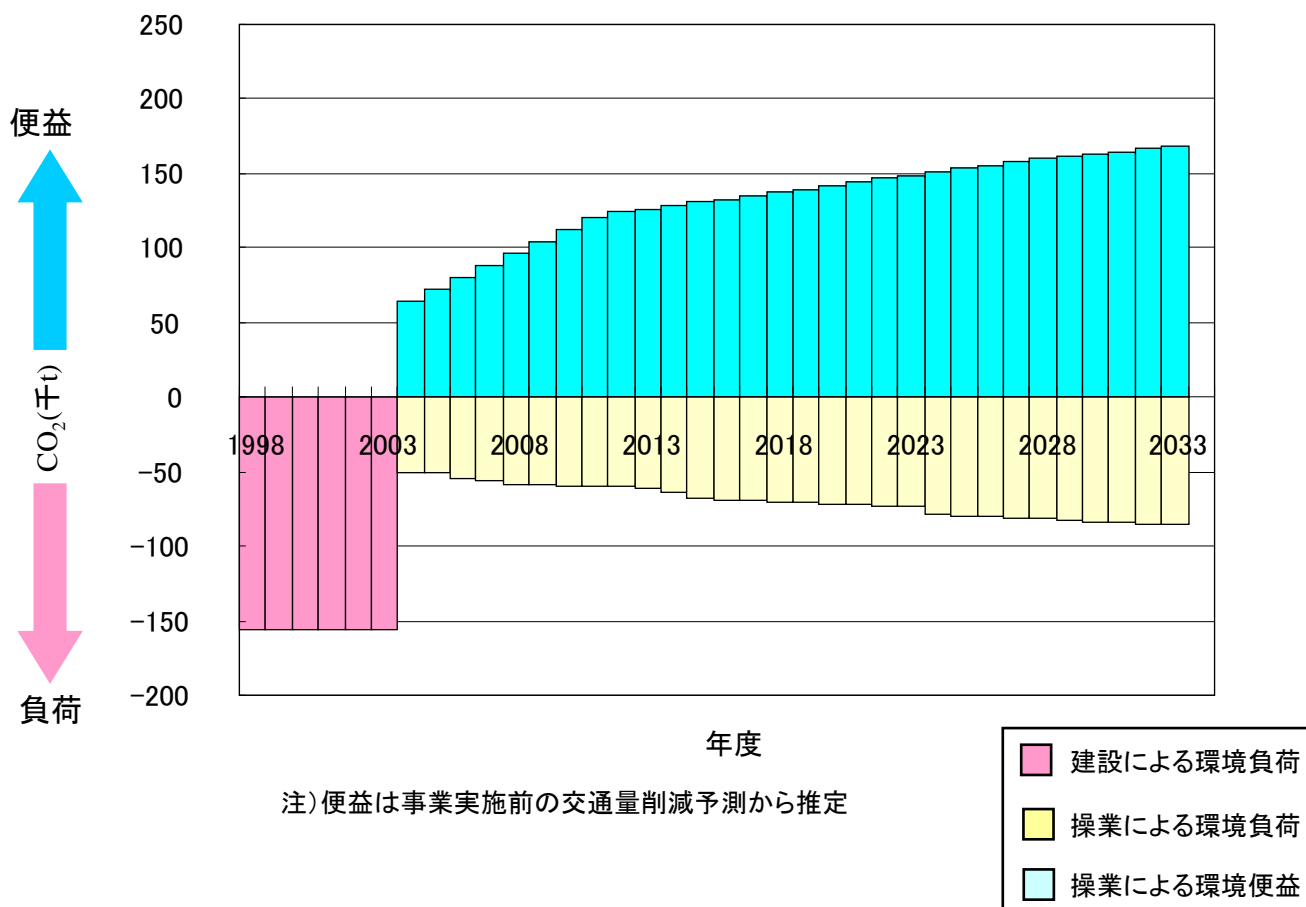


図4.9-(a) Scenario-3のCO₂排出量

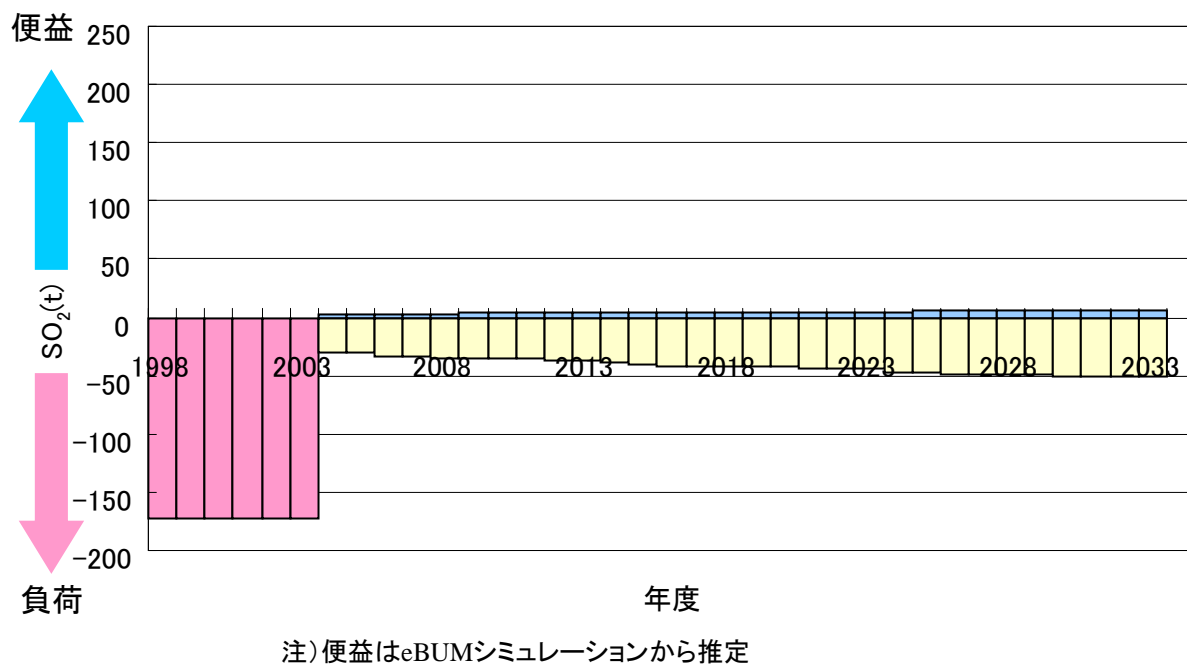
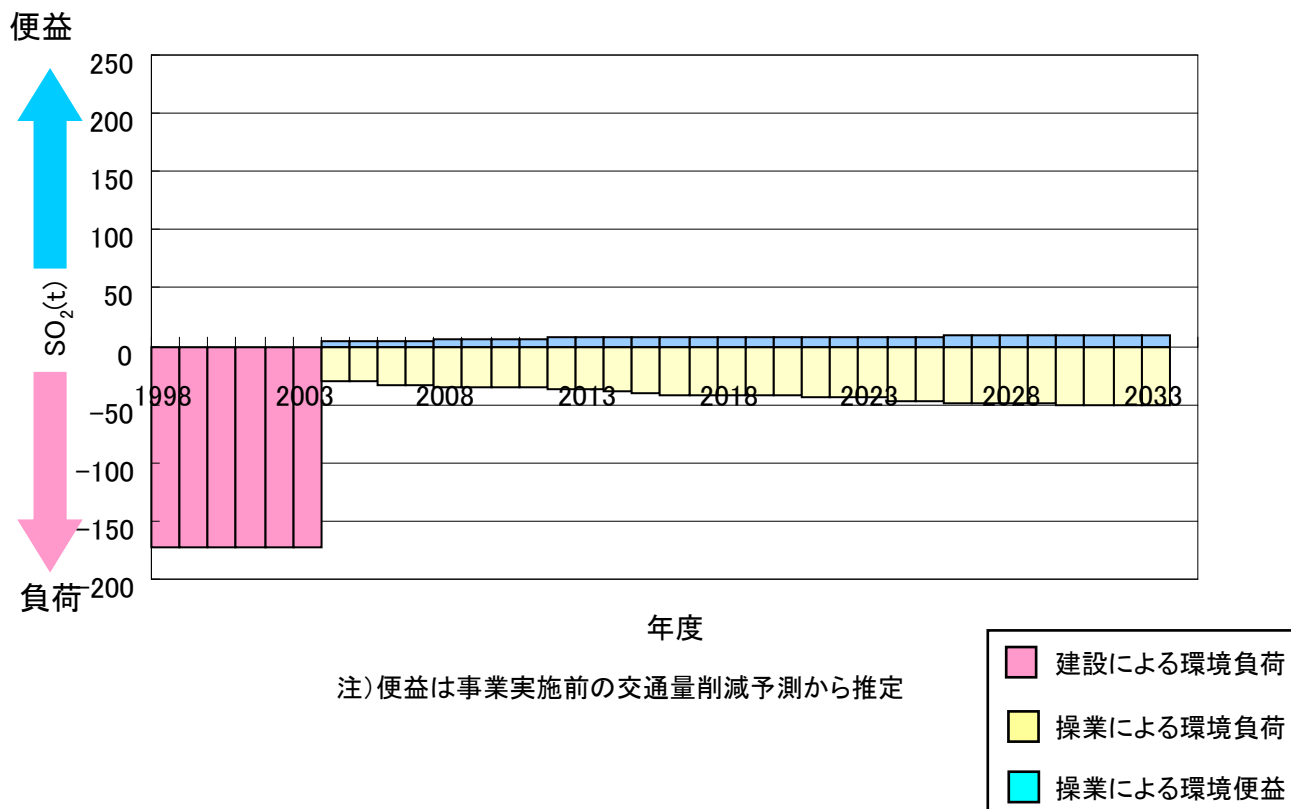


図4.9-(b) Scenario-3のSO₂排出量

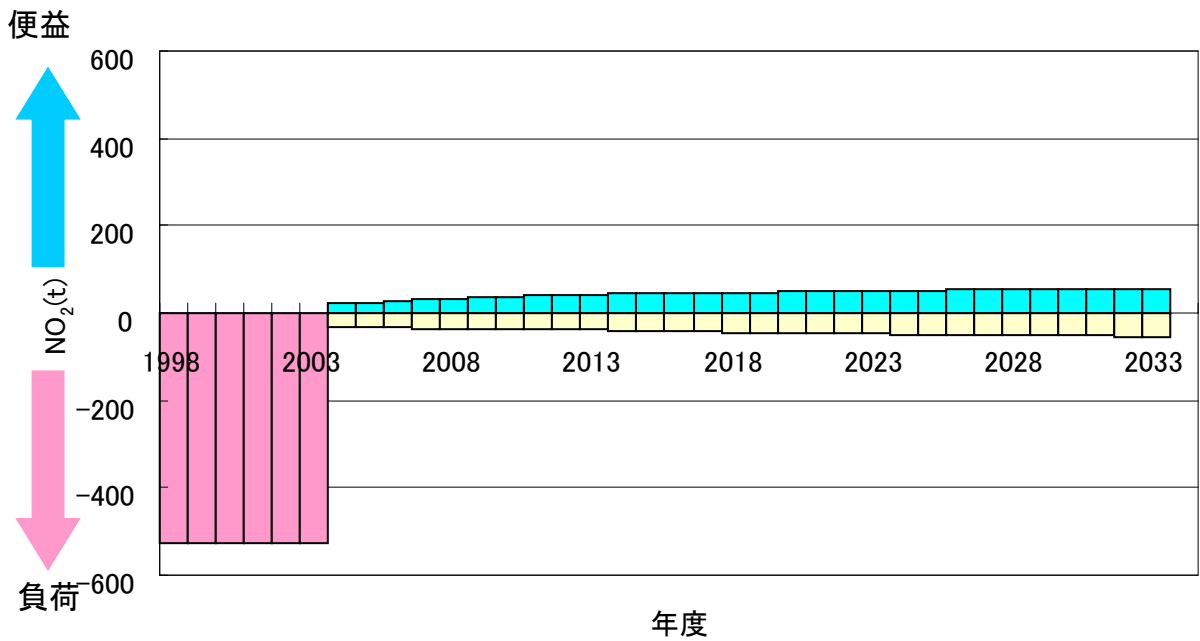
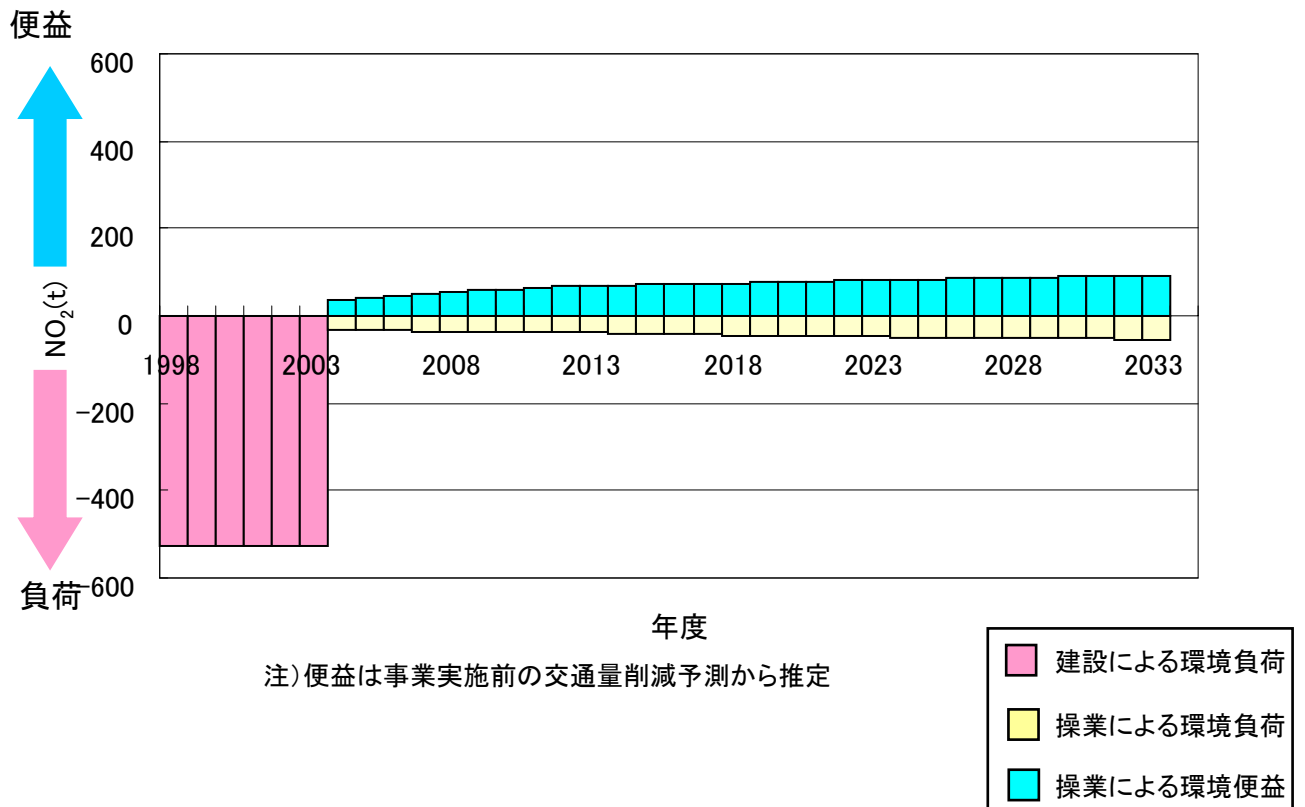
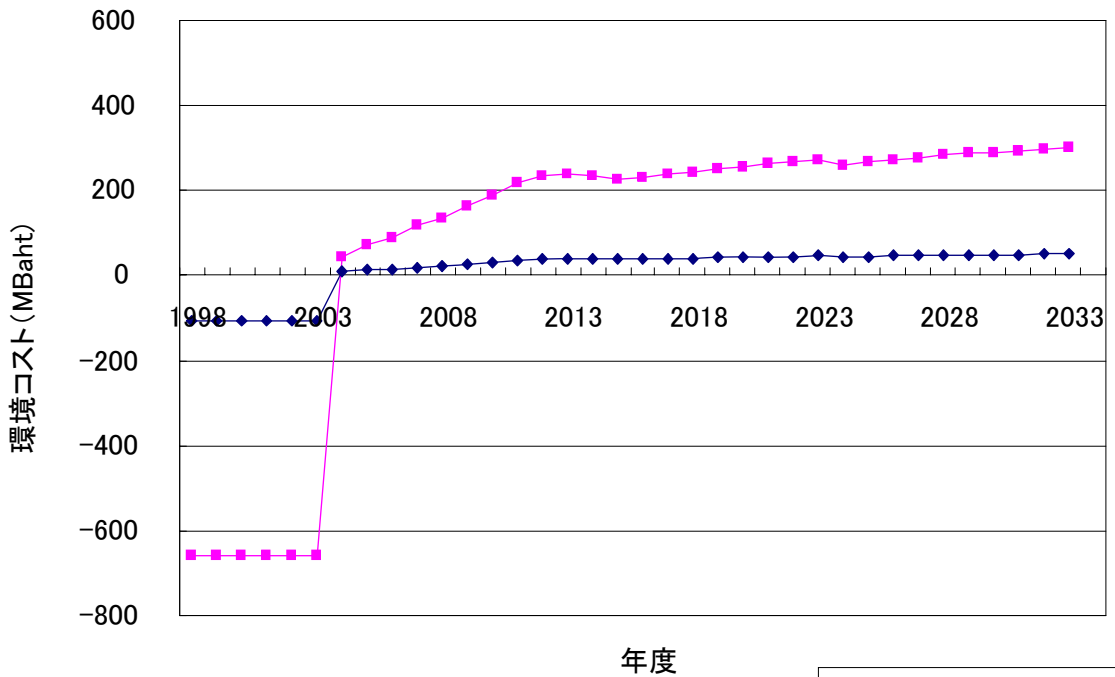
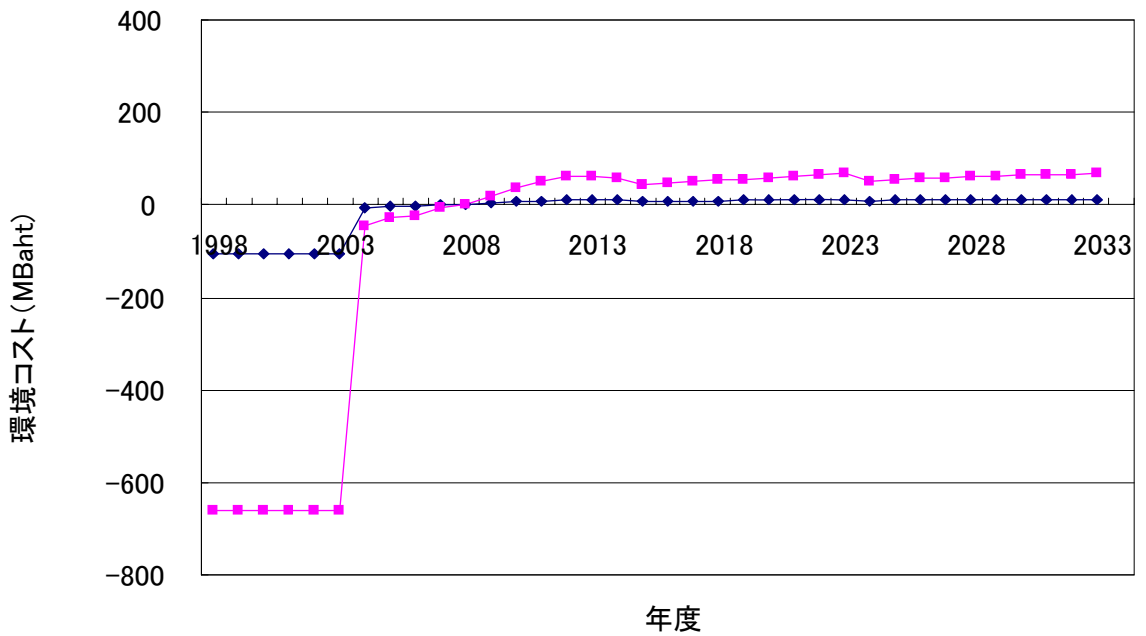
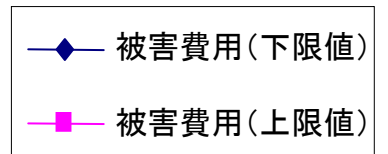


図4.9-(c) Scenario-3のNO₂排出量



注) 便益は事業実施前の交通量削減予測から推定



注) 便益はeBUMシミュレーションから推定

図4.9-(d) Scenario-3の環境コスト

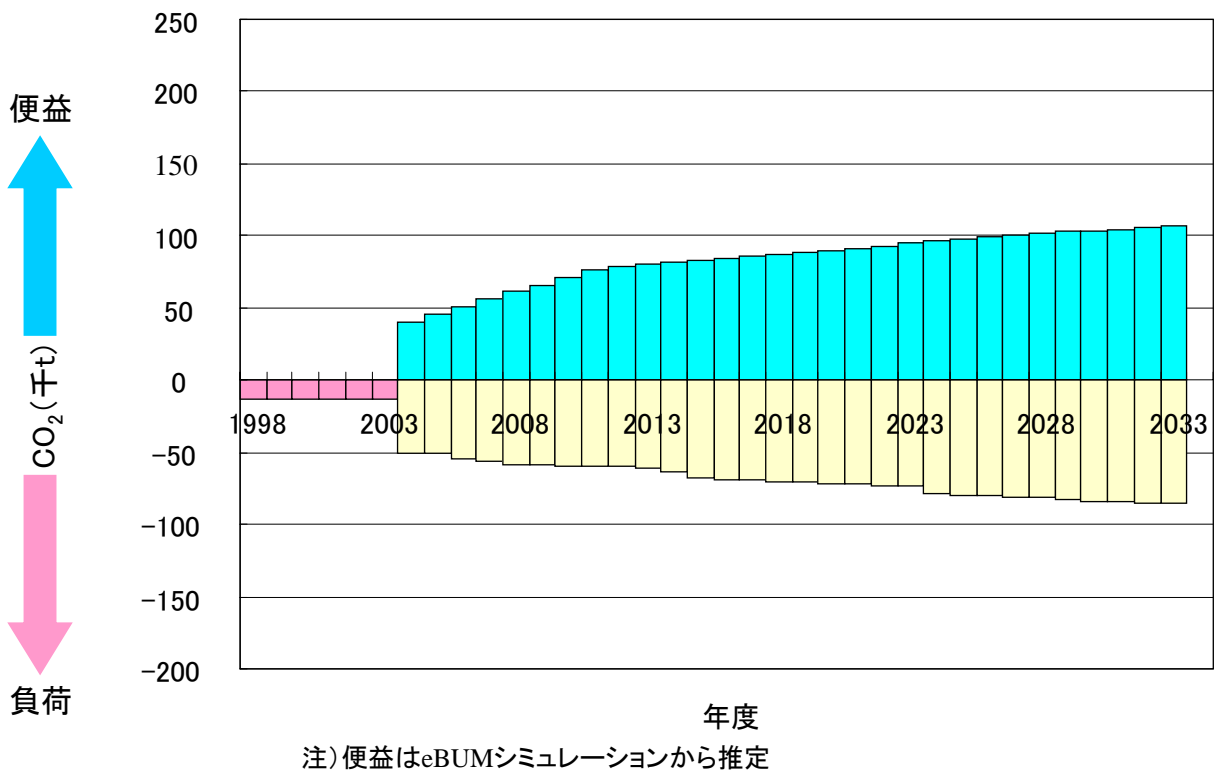
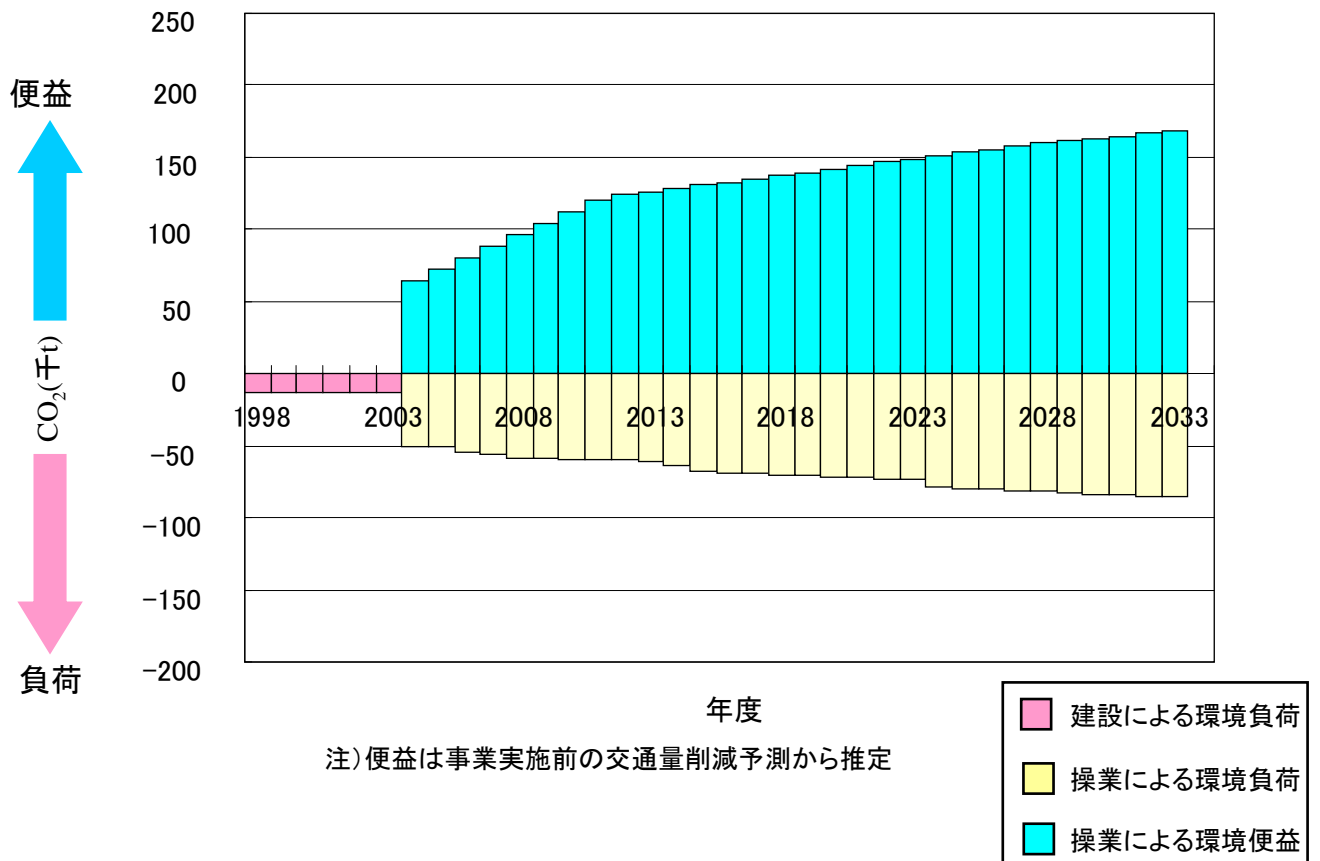


図4.10-(a) Scenario-4のCO₂排出量

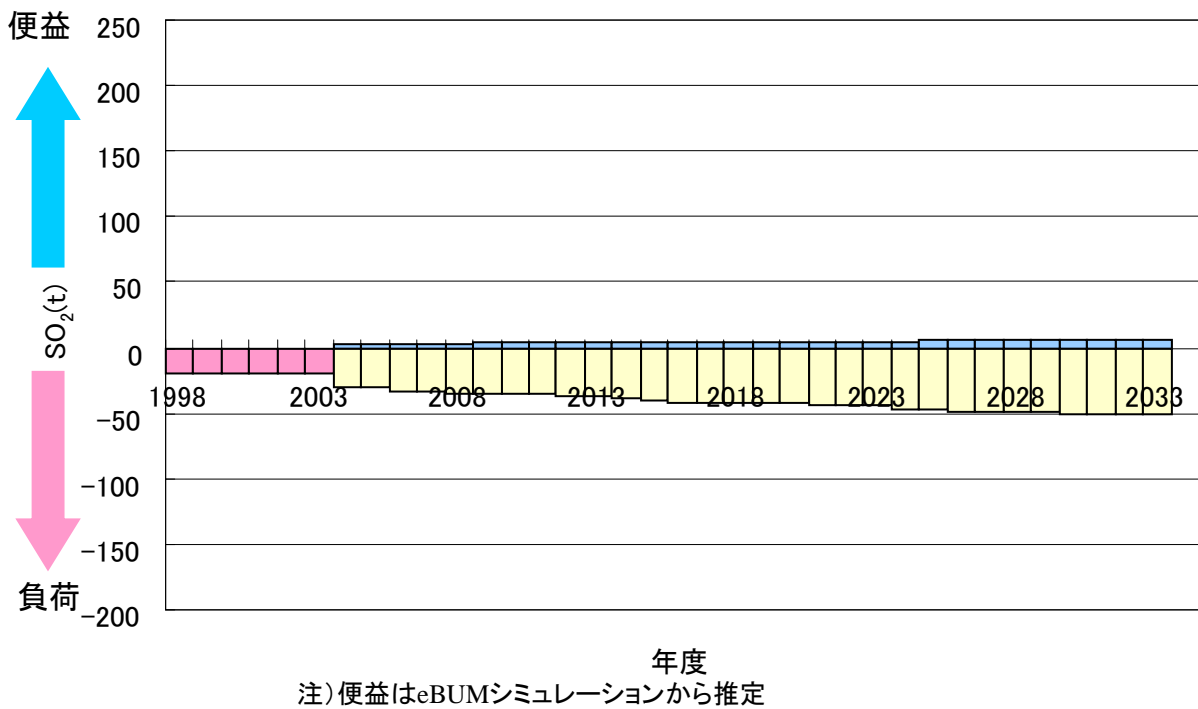
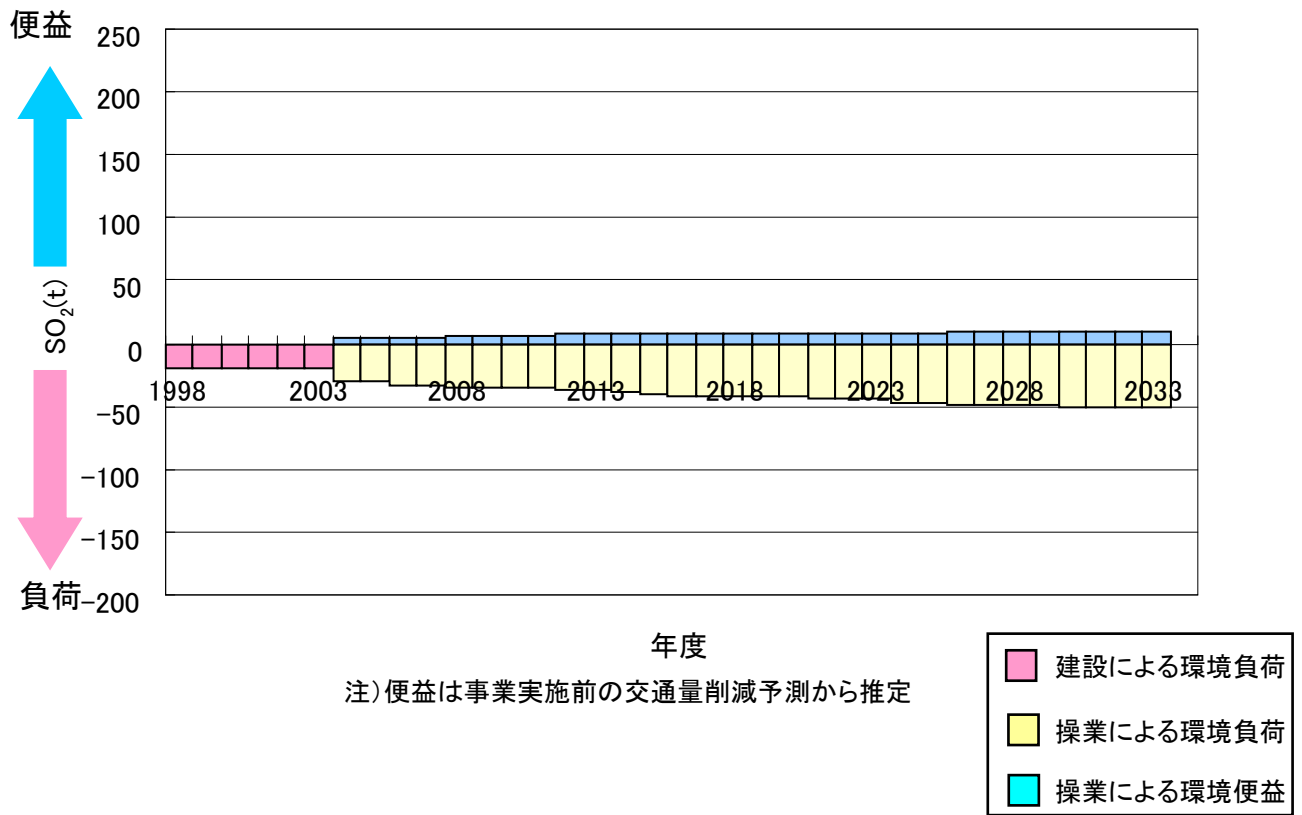


図4.10-(b) Scenario-4のSO₂排出量

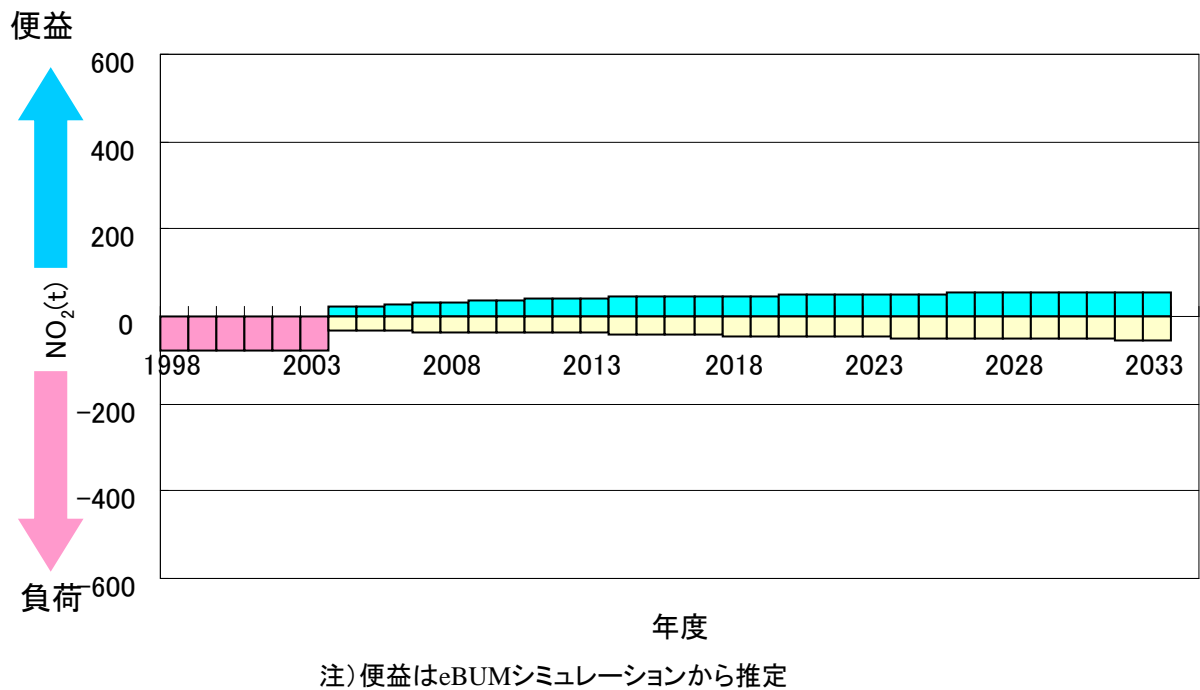
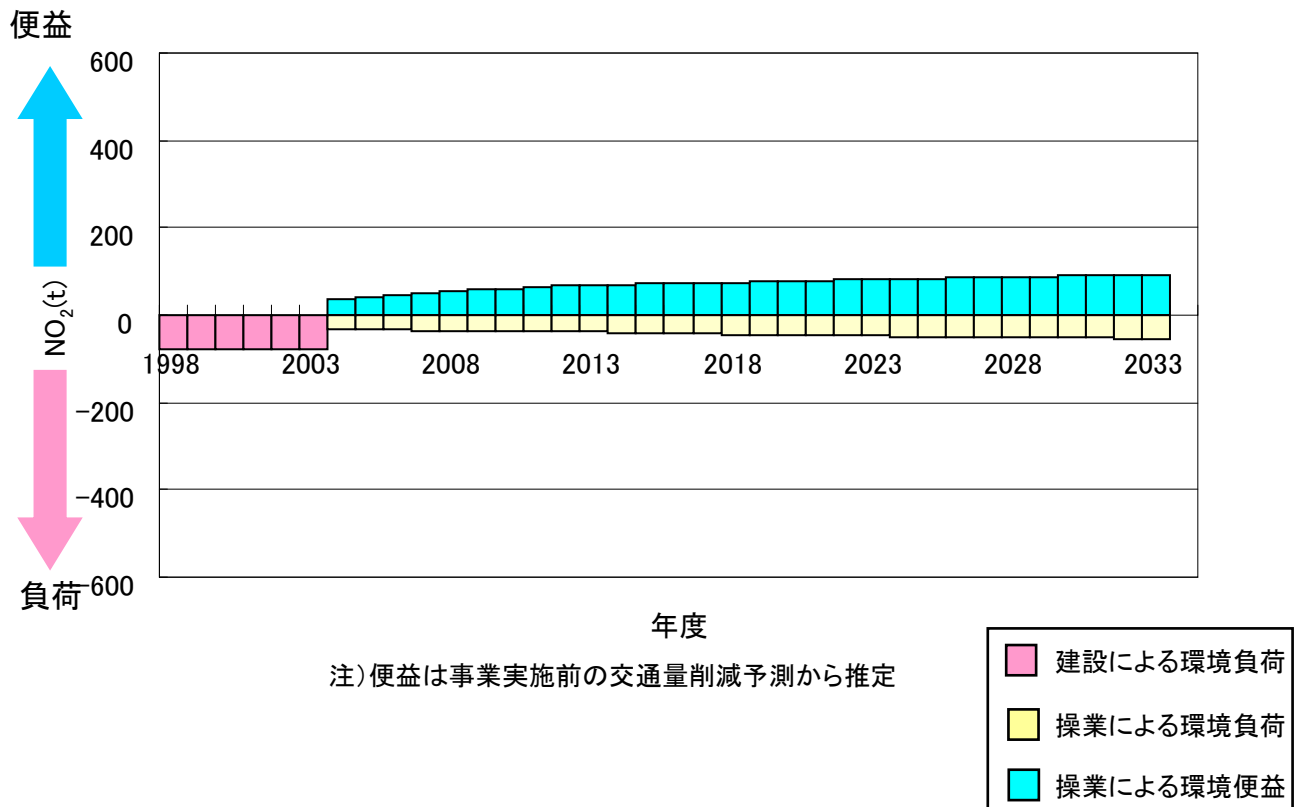
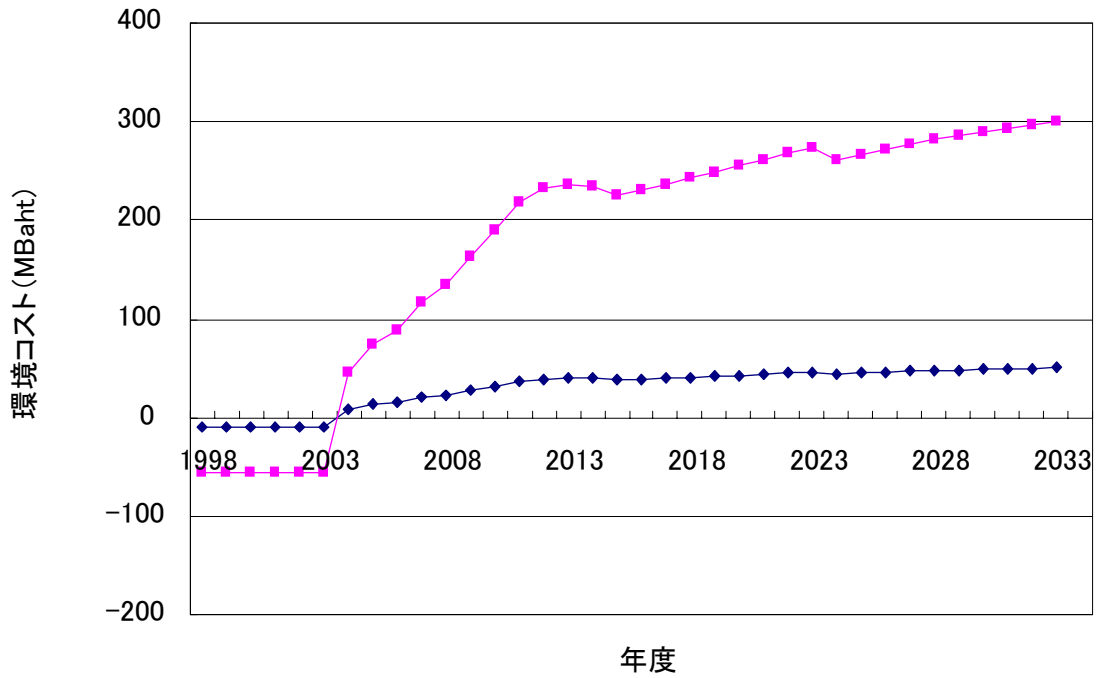
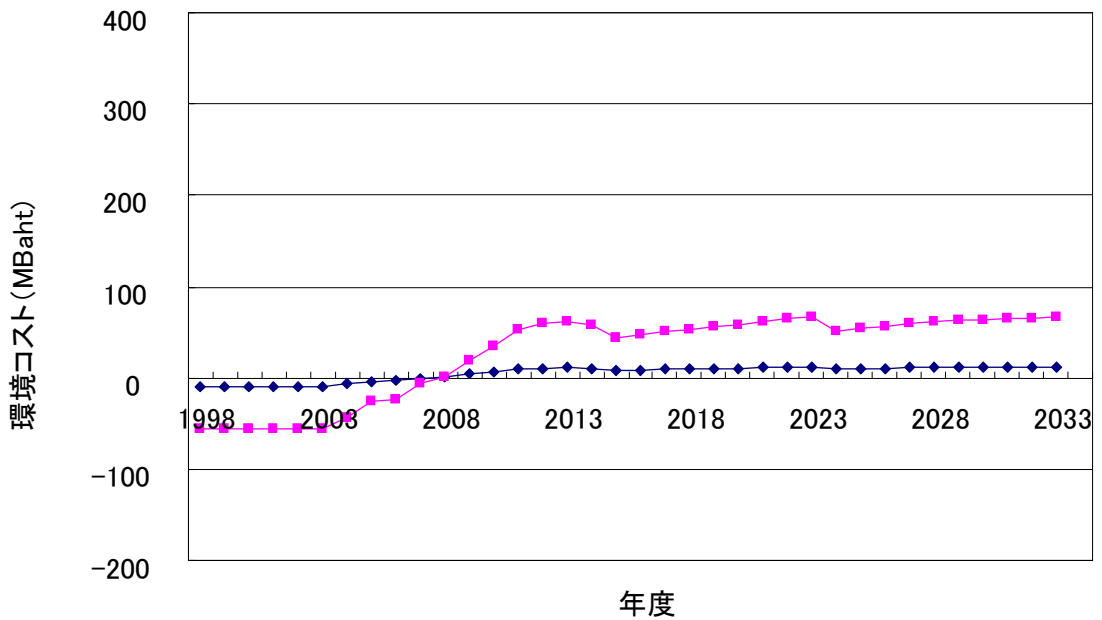
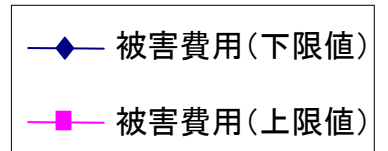


図4.10-(c) Scenario-4のNO₂排出量



注) 便益は事業実施前の交通量削減予測から推定



注) 便益はeBUMシミュレーションから推定

図4.10-(d) Scenario-4の環境コスト

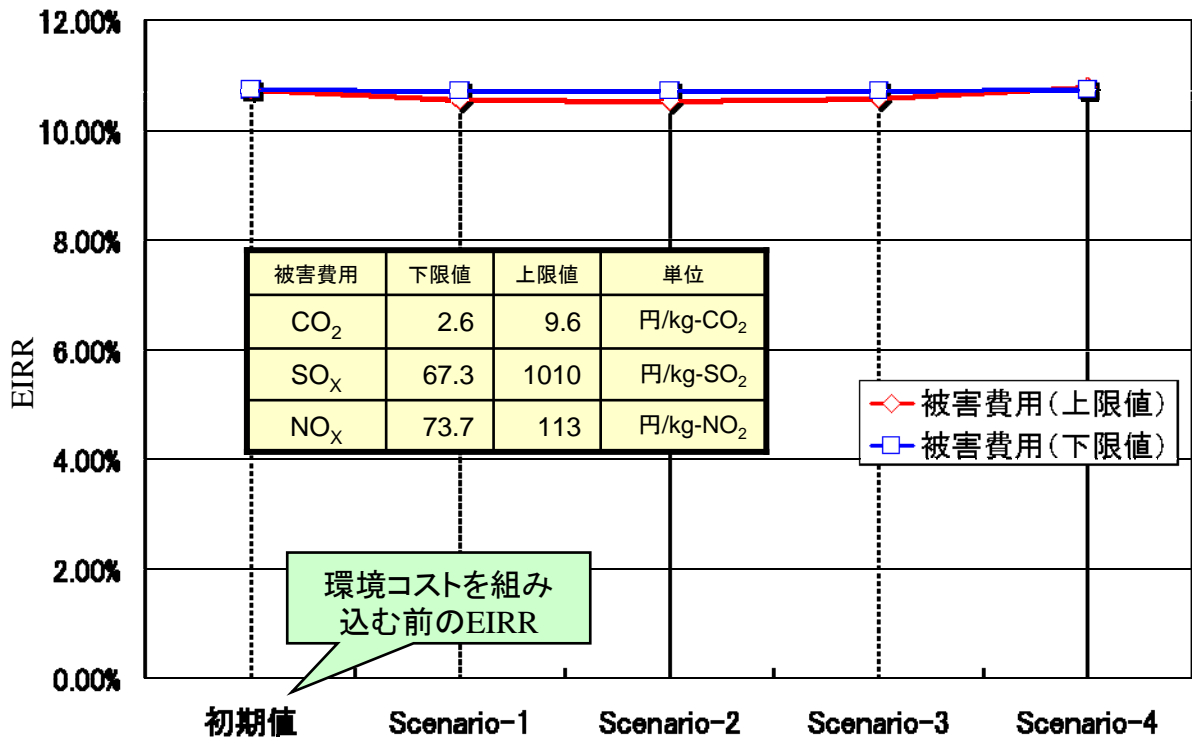


図4.11 EIRRの推移