タイにおける廃棄物処理に対する環境影響評価に関する研究

平成 **23** 年 **3** 月 **4** 日

京都大学大学院 工学研究科 都市社会工学専攻

谷澤　勇気

要旨

途上国では廃棄物が何の中間処理もされず最終処分場に埋め立てられるケースが多い。そのため､最終処分場周辺の環境汚染や膨大な温室効果ガス排出などが問題となっている。世界的な環境に対する意識の向上を考慮して処理コストだけではなく環境影響にも考慮した廃棄物処理システムが求められる。しかし、資金および技術不足により途上国における廃棄物処理システムの構築が不可能である場合が多い。そこで、先進国が資金および技術援助することで解決を図ることが必要である。

資源分別処理、焼却処理、メタン回収の 3 つの廃棄物処理を行うことで発生する処理コストと環境影響を定量的に算出して、現状と比較検討を行い、処理コストと環境影響の 2 つに関して同時に評価する廃棄物処理システム評価モデルを構築する。特にメタンは既往の研究から地球温暖化にかなりの影響をあたえることがわかっているので、各年における発生量を FOD 法と Sheldon Arleta モデルを組み合わせて、より現状に即するように算出した。

そして、構築したモデルをタイ王国の大規模都市（バンコク首都圏)、中規模都市（ウドーンターニー)、および小規模都市（サムットソンクラーム）に適用することで、それぞれの都市における最適な廃棄物処理システムの決定と詳細検討を行う。

最後にこの結果を参照して、タイ王国においてどの都市に廃棄物処理システムを優先的に構築するべきかを環境会計的に判断し、先進国が途上国のどの都市を優先的に資金面・技術面で援助するべきかといった指針を示すものである。

第 1 章　序論 1
1.1　研究の背景 1
1.2　研究の目的 1
1.3　既往の研究 2
1.4　本研究の内容と構成 2
第 2 章　環境対策と廃棄物処理問題 4
2.1　途上国における環境問題と環境対策 4
2.2　コベネフィット型温暖化対策・CDMプロジェクト 4
2.3　廃棄物処理システムのCDMプロジェクト 6
第 3 章　廃棄物処理システム評価モデルの構築 8
3.1　廃棄物処理シナリオの設定 8
3.2　価格原単位ならびに排出原単位の設定 13
3.3　処理コストの算出 14
3.4　二酸化炭素排出量の算出 17
3.5　メタン発生量の算出 19
3.6　二酸化炭素貨幣価値原単位 22
3.7　費用便益分析 22
第 4 章　廃棄物処理システム評価モデルの適用と評価検討 25
4.1　タイ王国の概要 25
4.2　バンコク首都圏への適用 26
4.2.1　バンコク首都圏の概要 26
4.2.2　マスタープランに基づく回帰分析によるバンコク首都圏の廃棄物発生量予測 . 28
4.2.3　バンコク首都圏における廃棄物処理コストの検討 30
4.2.4　バンコク首都圏における廃棄物処理に伴う環境負荷の検討 35
4.2.5　環境影響を含めたシナリオ間比較 41
4.2.6　廃棄物発生量、二酸化炭素貨幣価値原単位および評価期間による感度分析 44
4.3　ウドーンターニーへの適用 49
4.3.1　ウドーンターニーの概要 49
4.3.2　ウドーンターニーにおける回帰分析による廃棄物発生量予測 50
4.3.3　ウドーンターニーにおける廃棄物処理コストの検討 51
4.3.4　ウドーンターニーにおける廃棄物処理に伴う環境負荷の検討 55
4.3.5　環境影響を含めたシナリオ間比較 61
4.4　サムットソンクラームへの適用 63

4.4.1 サムットソンクラームの概要 63
4.4.2 回帰分析によるサムットソンクラーム廃棄物発生量予測 65
4.4.3 サムットソンクラームにおける廃棄物処理コストの検討 65
4.4.4 サムットソンクラームにおける廃棄物処理に伴う環境負荷の検討 69
4.4.5 環境影響を含めたシナリオ間比較 75
第 5 章 3 都市間の比較検討 78
5.1 処理コストにおける都市間比較 78
5.2 環境負荷における都市間比較 79
5.3 トータルコストにおける都市間比較 80
5.4 環境影響指標における都市間比較 81
第 6 章 結論 83
6.1 本研究の成果 83
6.2 本研究の課題 84
参考文献 85
謝辞 87

第1章　序論

1.1　研究の背景

世界中で環境問題が深刻なものとなってきている。急激な都市化による公害、森林破壊、土壌汚染など世界中が対策に追われている。このような環境問題対策のひとつとして 1997 年に第三回気候変動枠組条約締約国会議（COP3）で採択された京都議定書がある。具体的に約束期間と削減目標を設定したものであり、先進国全体で 2008 年から 2012 年までで 1990 年比 5%の温室効果ガスの削減が義務付けられている。また、一昨年開催された COP15 では京都議定書の効力が切れる 2013 年以降の各国の削減目標とその枠組みを盛り込んだ法的拘束力のある一つの合意に向けて議論が行われたが、先進国のみが削減義務を負う京都議定書の単純延長とアメリカならびに新興国に別の枠組みを設ける二本立ての枠組み、および途上国も平等に削減義務を負う新たな議定書の採択と 3 つの枠組みで争った結果、合意は保留となった。去年の COP16 においても同様の議論が行われたがまたもや 2013 年以降の新たな枠組みの合意は保留となった。このように地球温暖化の問題に対して長く議論されてきた。

日本国内でも同様に環境問題の対策が行われている。例えば家電エコポイント制度の制定が挙げられる。この制度は、消費電力の少ないグリーン家電を購入した際に家電エコポイントを取得でき、そのエコポイントを使用して商品券や地域特産品などの様々な商品への引き換えを行うものである。この制度を制定することで、古くて消費電力の多い家電からグリーン家電への買い替えを図ろうとするものである。電力使用量を抑えられるため、発電に必要な二酸化炭素排出量が抑えられる。

一方、途上国においては環境に対する対策は十分だとは言えない。もちろん、環境に対する意識は COP に参加しているように高いのだが、技術や資金が不足しているため環境問題の対策が遅れてしまう。そこで先進国において社会基盤整備が環境影響を用いて評価されるように、途上国における社会基盤整備の環境影響について定量的に評価し、優先すべき開発を決定し発展させるための指針を示すことが重要である。

途上国で最も深刻な環境問題のひとつとして廃棄物処理の問題が挙げられる。これは全ての途上国において起こり得る問題であり、特にフィリピンやインドネシアのような高温多湿な島国では、最終処分場の不足および周辺環境の汚染と 2 つの全く異なった問題で側面を持つ問題を抱える。

1.2　研究の目的

本研究では、廃棄物処理システム評価手法モデルを作成し、中間処理および最終処分場において廃棄物にどのような処理を施せば費用と環境の両方に対して効率が良いかを複数のシナリオ間で比較し、評価検討しようというものである。そして、廃棄物処理に関して周辺環境の悪化などの様々な問題を抱えている発展途上国の地域に適用することで、これ

らの問題の解決に向けての提言を行おうとするである。

1.3 既往の研究

これまでも社会基盤整備に対する環境評価を行った研究がある。

加藤ら[1)]は都市や社会資本、交通を対象としたライフサイクルアセスメント（以下 LCA と表記する）の現状と課題について整理し今後の研究課題を明確にした。具体的な現状は、まず建築物に関してライフサイクルコスト分析が用いられ、これに環境の観点を加えるために LCA が導入されてきた。土木構造物に関しても同様に研究が進められてきており、土木学会による二酸化炭素排出原単位の学会推奨値が整備されている。今後の社会システムの LCA に関してライフタイム、正確なインベントリ分析、社会システムの波及効果、経年変化の予測の不確実性、環境の貨幣価値換算などを課題として挙げている。

柴原ら[2)]は、LRT（Light Rail Transit）と BRT（Bus Rapid Transit）の建設段階と操業段階の CO_2 排出量を様々な不確実要素（排出係数、交通システムの変化、ライフタイム、および計測範囲）を考慮して算出し、累計 CO_2 排出量チャート比較などの評価法を提案している。

堺らは[3)]、交差点の渋滞解消を目的に建設された地下道について、地下道建設段階の環境負荷を積上げ法に基づく排出係数を用いて資材製造、輸送、および施工の 3 段階に分類して算出した。さらに、自動車交通量変化による環境便益に関して、地下道建設前と後の CO_2、NO_2、および SO_2 排出量を各々比較している。最終的には、地下道建設による環境負荷および自動車交通量変化による環境便益が将来的に何年で相殺されることができるかを分析することによって地下道の環境便益評価を実施した。

稲積ら[4)]は中間処理過程で未処理、資源分別、焼却処理の 3 つのシナリオを設定し、廃棄物処理コストと環境影響を長期的に評価する廃棄物処理システム評価モデルを作成してバンコク首都圏に適用している。そして、3 つのシナリオのうちどのシナリオが最適であるかの比較検討を行った。

本研究では単一の中間処理におけるシナリオだけでなく最終処分場にメタン利用施設を建設したシナリオを追加することで複数の処理施設の組み合わせについての検討、過去の研究からメタンの影響が大きいことが判明しているのでメタン排出量の算定方法見直し、そしてバンコク首都圏だけでなく他地域への評価モデルの適用を行い、どの地域に廃棄物処理システムを導入するかを検討する。

1.4 本研究の内容と構成

1 章では本研究における背景・目的を述べる。

2 章では途上国における環境問題、特に廃棄物問題について現状と対策を述べる。

3 章では本研究で構築した廃棄物処理システム評価モデルの計算の詳細と使用する値の検討を行う。

4 章では **3 章**で構築した廃棄物処理システムを大規模都市（バンコク首都圏）、中規模都

市（ウドーンターニー）および小規模都市（サムットソンクラーム）について適用し、それぞれの地域についてどのシナリオが費用と環境に効率的なのかを検討する。

5 章では **4 章**で算出した値についてタイ王国の規模の異なる 3 都市間の比較を行う。

6 章では本研究で得られた成果と課題について述べる。

第2章　環境対策と廃棄物処理問題

2.1　途上国における環境問題と環境対策

ここで途上国において特に問題となっている大気汚染・水質汚濁・廃棄物処理問題についてアジアにおける具体例[5)]をいくつか挙げる。

・中国

黄河や長江は甘粛省などの上流側の貧しい工業地帯において工業生産と不適切な処理が原因となった大気汚染と水質汚濁が問題となっており、その影響が下流域まで及んでいる。

・インドネシア

家庭等から排出される廃棄物の量が増加しているために多くの地方自治体で廃棄物処理にかかる費用の増加が問題となっている。さらに、廃棄物処分場での人身事故も多い。

・フィリピン

排気性能の低い乗合バスが原因であるマニラ都市圏での大気汚染が深刻な問題となっている。日本の ODA による公共交通機関を含む交通網の整備事業により多少渋滞が緩和されてはいるものの、依然としてこの問題は解決しているとは言えない状況である。

・ベトナム

都市部への急激な人口流入による生活排水や工業からの産業排水の増加が原因となる地下水汚染が深刻な問題となっている。そのため、下水道や下水処理施設が整備されていない地域においては洪水時には汚水が水路からあふれ出て衛生状態が悪化するといった問題もある。

これらの環境問題に対して早急に対策を行うことで周辺の環境を改善する必要がある。本研究で行う廃棄物処理システム評価モデルは、環境問題対策の中でも環境汚染対策と同時に温室効果ガス削減可能な事例である。このような事業をコベネフィット型対策プロジェクトという。

2.2　コベネフィット型温暖化対策・CDMプロジェクト

まずは二酸化炭素排出量の取引制度について述べる。二酸化炭素排出量削減活動による削減量を取引することで二酸化炭素排出量削減活動に対して最適な投資を行うことができる。二酸化炭素排出量取引制度がいくつか存在する。

排出量取引制度における削減量の算定方法は２種類[6)]に大別される。

(i)キャップアンドトレード型

(ii)ベースラインクレジット型

キャップアンドトレード型とは、決められた排出量の目標値（排出枠）に対して実際の排出量の差を、排出枠を達成するために売買する仕組みである。つまり、目標値より実際の排出量が多ければ排出枠を購入し、逆に目標値より実際の排出量が少なければ排出枠を

売却することができる。

一方、ベースラインクレジット型とは、排出量削減活動によって排出量が減少したときにその減少分をクレジットとして付与する仕組みである。つまり、排出量削減活動をとらなかった場合の排出量を基準排出量（ベースライン）と比べてどれだけ削減したかを算定するものである。

このうち、ベースラインクレジット型に属しているCDM[7)]に着目する。CDMとは先進国が途上国における温室効果ガス排出量削減プロジェクトを実施し、削減量に応じてクレジット（CER）が発行され京都議定書で定められた削減目標の達成に活用できるという制度である。国内で温室効果ガスを削減することが困難な国がCDMを利用することで、効率よく温室効果ガスを削減できる。CDMの中で最も重要なのは追加性の証明である。追加性の証明とはクレジットの認証が行われなかった場合に二酸化炭素排出量削減が当該量行われなかったであろうということを証明することである。審査の最後に追加性の証明を行わなければならない。CDMは次の3つの条件を満たせば追加性が証明される。

- 排出削減事業の実施は法的な要請に基づくものではない
- 設備更新を行わなかった場合、既存設備は継続して利用できる
- 投資回収年数が適切に計算されており、普及している設備より長い

図 2-1にCDMの流れを示す。このようにCDMの計画からCERが活用できるまで多くの手続きを踏まなければならない。

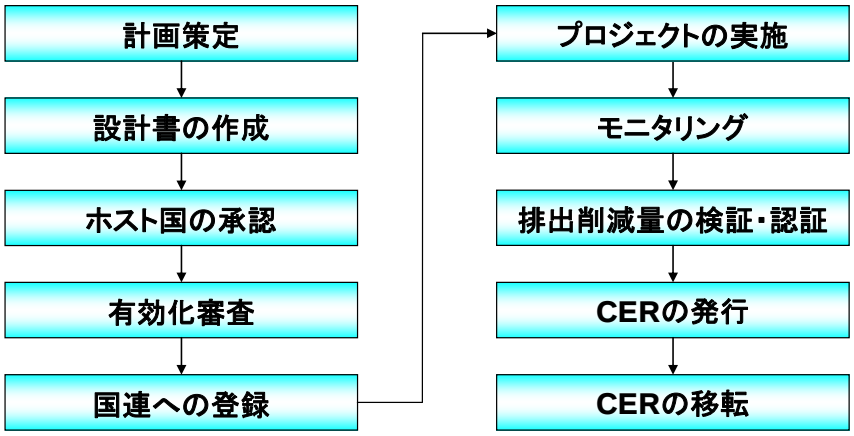

図 2-1　CDMの流れ

CDMプロジェクトは2004年に初めて登録されて以来2010年6月時点で2247件[8)]のプロジェクトが登録されている。その中でも廃棄物管理・処理プロジェクトはCDMプロジェクト全体の約22%を占めており、再生可能エネルギー利用プロジェクトの次に多い。

民間資金による途上国への援助を目的としたコベネフィット型温暖化対策・プロジェクトをコベネフィット型CDM[5)]とする。環境問題への対策と同時に温室効果ガスの削減を行

うことができるコベネフィット型対策・プロジェクトCDMの実施を推進することにより途上国における効果的な温暖化対策を促進することが可能となる。

またコベネフィット型対策・プロジェクトを実施する長所は主に 4 つ挙げられる。1 つ目は先進国で開発された優れた環境技術により途上国の環境対策に活用することが期待されるだけでなく先進国の国際貢献を前面に打ち出すことができる。2 つ目は途上国側の短中期的な環境汚染対策に加えて、今後長期的な視点から取り組む必要のある温暖化対策を同時進行することができる。3 つ目は温暖化対策と都市開発が同時に成立するという考えを持たせることで京都議定書の次期枠組に途上国の実効的な参加を促進することができる。最後にこれまで両立し得なかったODAやCDMなどの異なる事業計画の連携が図れることで途上国への支援が充実することができる。

しかし、コベネフィット型・対策プロジェクトには課題も存在している。コベネフィット型・対策プロジェクトは CDM および ODA で実施されてきたが、CDM 事業は温室効果ガスの削減を目的としたものであり、ODA は環境汚染対策が主な目的であるので目的が異なっている。そこで環境汚染対策と温室効果ガスが同時に達成可能であることを認識させ、CDM と ODA を組み合わせたプロジェクトとすることが考えられる。それによって CDM 事業の中で環境改善に必要なコストが高額な際に ODA の公的資金が受けられることでコベネフィット型・対策プロジェクトがより幅広く展開可能となる。また、途上国においては社会情勢が不安定なところもあり、途上国特有のカントリーリスクの問題がある。このリスクを回避するためには、途上国と先進国の連携を強めることでリスクに関する情報を得たり、過去の成功事例を参照してプロジェクトを展開していくことが重要である。

これらの課題を克服して日本がコベネフィット型温暖化対策･CDM を実施した事例について述べる。エジプトの首都カイロから南東約 220km、紅海沿岸のザファラーナ地区に出力 120MW の風力発電所（日本最大規模の宗谷風力発電所の約 2 倍）を建設した。2007 年に CDM 登録が完了しているが、これは世界初の CDM と ODA が組み合わさったプロジェクトである。これにより温室効果ガスが年間約 25t 削減できる。このように CDM と ODA を組み合わせることについて事例は少ないものの可能である。

2.3 廃棄物処理システムのCDMプロジェクト

廃棄物処理における CDM は主にバイオガスプロジェクトとメタン利用施設の 2 つに分けられる。ここでは特に本研究でも検討するメタン利用施設について述べる。メタン利用施設を CDM プロジェクトとして実施する際の長所は主に 3 つ挙げられる。1 つ目はメタン削減量の算出方法の充実である。過去の事例の積み重ねにより、対象地域の気候や立地条件に応じて、より現状に即したメタン排出量を予測できる。2 つ目はメタンの削減量を確実に証明できるので CER が発行される。3 つ目はメタンの地球温暖化に対する影響が高いために、二酸化炭素を削減する事業に比べてメタンを削減する事業のほうが CER を多く獲得できる。

しかし、いくつか課題もある。1 つ目はメタン排出量の予測の難しさである。メタンは分解に時間が必要なため、過去にどこにどれだけ、またどのような組成の廃棄物が埋め立てられたかがわからないと正確な値を予測できない。2 つ目は CER の評価の低さである。初期に予測した FOD 法の曖昧さや既存のデータの曖昧さから実際に獲得した CER が予定よりも 50%にも満たない事例もあった。

アルメニアのヌバラシェンにおいて実施された CDM プロジェクトでは、廃棄物の自然発火や廃棄物から発生する悪臭などが問題となっていたが、環境が改善される。また、温室効果ガス削減量は 14 年 5 ヶ月で 52 万 t-CO_2 を予定している。その上、技術移転・人材育成・雇用促進など一定の効果が見込めることがわかっている。

以上に挙げたように少し課題があるものの CDM や ODA を利用することに途上国における廃棄物処理システムを導入することができる。これらの課題を克服するためには、廃棄物処理システムを導入した際のメタン排出量などを正確に算出する必要がある。そこで、本研究ではこれらの値を定量的に算出する廃棄物処理システム評価モデルを構築し、様々な地域に適用することでどの都市にどの廃棄物処理システムを導入することが環境負荷を効率よく削減できるかを示す。さらに、適用結果から先進国の支援を方向付けるものである。

第3章　廃棄物処理システム評価モデルの構築

3.1　廃棄物処理シナリオの設定

廃棄物の処理フローは収集、中間処理、運搬、および最終処分の４過程に区分される。通常、当該廃棄物処理フローには２つのケースが考えられる。すなわち、(i)都市圏すべての廃棄物を収集して中間基地施設まで輸送し、中間処理を施したのち中継基地施設に輸送するケースと、(ii)都市圏すべての廃棄物を中継施設まで輸送し、それぞれの処理施設へと輸送するケースである。最終処分量が多いと最終処分場の飽和により最終処分場が別の箇所に移る可能性があるので、中間処理施設の位置が最適化されない。そこで中間処理施設の位置が必ず最適化されるように最終処分場が遠距離にあっても対応できる後者のケースを仮定している。**図 3-1** は廃棄物の処理フローのイメージ図である。

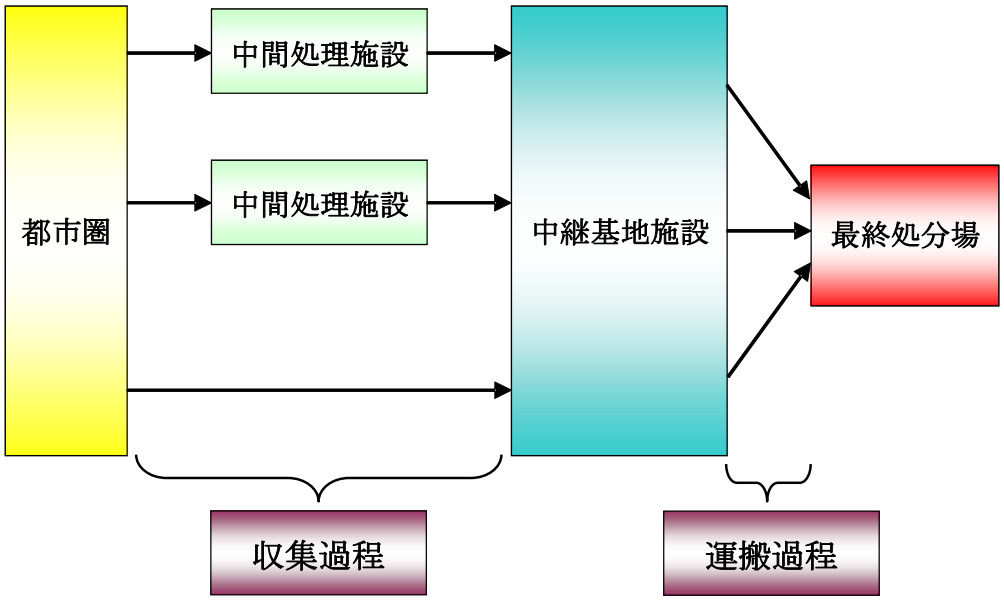

図 3-1　廃棄物流れイメージ図

本研究では現状の廃棄物処理フローをモデル化したベースラインシナリオとベースラインシナリオに対して何らかの廃棄物処理を施した 5 種類のシナリオについて廃棄物処理システム評価手法を作成する。**表 3-1** に本研究で比較するシナリオを示す。

表 3-1　廃棄物処理シナリオ

処理過程	中間処理	中継	最終処分場
ベースライン	未処理	中継基地	オープンダンピング・覆土
シナリオ１	資源分別	中継基地	オープンダンピング・覆土
シナリオ２	焼却	中継基地	オープンダンピング・覆土
シナリオ３	未処理	中継基地	オープンダンピング・覆土、メタン利用施設
シナリオ４	資源分別	中継基地	オープンダンピング・覆土、メタン利用施設
シナリオ５	焼却	中継基地	オープンダンピング・覆土、メタン利用施設

以下に各過程の説明と処理コスト、環境負荷を算出するのに必要な資源使用量や施設人員などの求め方 [9]を示す。ここで挙げる数値はあくまでデフォルトであり、必要に応じて変える必要がある。しかし、過去の研究にて十分に検証されているので本研究ではこれらの値を用いて処理コスト・環境負荷を算出している。

a)　収集過程

収集過程では廃棄物処理システム評価の適用地域内における廃棄物を各収集地点から収集および運搬する過程である。収集車両が満杯になった地点で中間処理施設および中継基地施設に運ばれる。

必要収集車両台数 F_C（台）以下の**式　3-1** で算出される。

$$F_C = t_C / t_d \tag{3-1}$$

ここで、t_c：廃棄物収集時間（時間/日）、t_d：一日の作業時間（5 時間/台・日）である。なお、小数点以下は四捨五入して求める（以下、車両台数・必要人員は同様に小数点以下を四捨五入して求める）。

収集車両運転人員 N_{PD}（人）と収集人員 N_{PC}（人）は以下の**式 3-2**,**3-3** で算出される。

$$N_{PC} = b_1 F_C (1 + a_1) \tag{3-2}$$

$$N_{PD} = F_C (1 + a_1) \tag{3-3}$$

ここで b_1：収集車１台あたりの収集人員（2 人/台）、a_1：予備人員率（0.16）である。

収集車両の燃料使用量 U_{OC}（L/年）は以下の**式 3-4** で算出される。

$$U_{OC} = b_2 D_C \tag{3-4}$$

ここで b_2：収集車の燃料使用量（0.3L/km）、D_C：収集車の年間走行距離（km/年）であ

る。

b)　中間処理過程

中間処理過程は、収集された廃棄物に対して減量化および安定化を目的として何らかの処理を行う過程である。中間未処理（中継基地施設のみ)、資源分別処理施設建設および焼却処理施設建設の 3 種類のシナリオを考える。資源分別処理は運び込まれた廃棄物の中でリサイクル可能な紙類・ペットボトル・ビン・鉄類・アルミニウムに対してリサイクルを行い、資源売却によって利益をあげることができる。焼却処理施設は搬入された廃棄物を燃焼させることで最終処分量の大幅な削減（これにより最終処分場建設費が削減される）とメタンガスとなるはずの炭素原子をより地球温暖化に対する影響が低い二酸化炭素として変換することができる。

資源分別施設における必要人員 N_{PR}（人）は以下の**式 3-5** で算出される。

$$N_{PR} = N_{PR0} + b_3 S_R \tag{3-5}$$

ここで N_{PR0}：基準人員（5 人)、b_3：施設規模当たりの手選別人員（0.4 人/（t/日))、S_R：資源分別施設規模（t/日）である。

資源分別施設における電力使用量 U_{ER}（kWh/年）以下の**式 3-6** で算出される。

$$U_{ER} = b_4 Q \tag{3-6}$$

ここで Q：廃棄物発生量（t/年)、b_4：搬入量当たりの電力消費量（13kWh/t）である。

資源分別施設における燃料使用量 U_{OR}（L/年）は以下の**式 3-7** で算出される。

$$U_{OR} = b_5 Q \tag{3-7}$$

ここで b_5：搬入量当たりの重油使用量（1.6L/t）である。

焼却処理施設における必要人員 N_{PB}（人）は以下の**式 3-8** で算出される。

$$N_{PB} = N_{PB0} + b_6 S_B \tag{3-8}$$

ここで N_{PB0}：基準人員（40 人)、b_6：施設規模当たりの追加人員（人/（t/日))、S_B：焼却処理施設規模（t/日）である。

焼却処理施設における燃料使用量 U_{OB}（L/年）は以下の**式 3-9** で算出される。

$$U_{OB} = b_7 a_2 Q_B \tag{3-9}$$

ここで b_7：焼却灰処理に必要な重油使用量（250L/t）、a_2：焼却残渣量における集塵灰の割合（0.1）、Q_B：焼却残渣量（t/年）である。

c)　運搬過程

運搬過程は中継基地施設から最終処分場まで廃棄物および廃棄物処理残渣を運搬する過程である。ここでは同時に全シナリオ共通である中継基地における資源使用量や施設人員なども算出する。

必要運搬車両台数 F_T（台）以下の**式 3-10** で算出される。

$$F_T = (t_T + t_L) / t_d \tag{3-10}$$

ここで、t_T：廃棄物運搬時間（時間/日）、t_L：廃棄物積み込み時間（時間/日）、t_d：一日の作業可能時間（7 時間/台・日）である。

運搬車両運転人員 N_{PT}（人）は以下の**式 3-11** で算出される。

$$N_{PT} = F_T (1 + a_1) \tag{3-11}$$

運搬車両の燃料使用量 U_{OT}（L/年）は以下の**式 3-12** 算出される。

$$U_{OT} = b_2 D_T \tag{3-12}$$

ここで D_T：運搬車の年間走行距離（km/年）である。

中継基地必要人員 N_{PT}（人）は以下の**式 3-13** で算出される。

$$N_{PT} = N_{PT0} + b_8 S_T \tag{3-13}$$

ここで N_{PT0}：基本人員（4 人）、b_8：中継基地施設規模当たりの追加人員（3 人/（t/日））、S_T：中継基地施設規模（t/日）である。

中継基地における電力使用量 U_{ET}（kWh/年）は以下の**式 3-14** で算出される。

$$U_{ET} = b_9 S_T \tag{3-14}$$

ここで b_9：中継基地施設規模当たりの電力使用量（6,200kWh/（t/日）・年）である。

d)　最終処分過程

最終処分過程は廃棄物または廃棄物残渣量を搬入する過程である。オープンダンピング、およびオープンダンピング＋メタンガス利用施設建設の２種類のシナリオを考える。オープンダンピングはいわゆる野積みのことであり、廃棄物浸出水などの管理をすることはない。しかし、オープンダンピングのシナリオにおいてはタイ王国における環境に対する意識の向上を考えて、最終処分場が飽和した際には覆土工事を行うことする。メタンガス利用施設は最終処分場から発生する温室効果ガスを回収・燃焼し、発電することで売電収入を得るとともに本来大気中に放出されるメタンガスを二酸化炭素に変換することができる。

最終処分場における必要人員 N_{PD}（人）は以下の**式 3-15** で算出される。

$$N_{PD} = b_{10}(Q_D / Q_0)^{0.7} \tag{3-15}$$

ここで b_{10}：基準埋立量当たり人員（5 人）、Q_D：埋立廃棄物量（t/年）Q_0：基準埋立廃棄物量（10,000t/年）である。0.7：スケールメリットである。

必要人員が基準人員に比べて大きくなるとき、必要な人員はそれに比例するわけではない。スケールメリットとはそれを表す数値であり、一般的には 0.7 乗則に従うものとされているので、本研究でもこの値を採用した。

最終処分場における必要重機台数 M_B（台）は以下の**式 3-16** で算出される。

$$M_B = Q_D / b_{11} \tag{3-16}$$

ここで b_{11}：ブルドーザーの作業能力（3,600t/年・台）である。

最終処分場における重機の燃料使用量 U_{OD}（L/年）は以下の**式 3-17** で算出される。

$$U_{OD} = b_{12} Q_D \tag{3-17}$$

ここで b_{12}：廃棄物埋立量 1t 当たりの軽油使用量（0.62L/t）である。

メタン利用施設における必要人員 N_{PM}（人）は以下の**式 3-18** で算出される。

$$N_{PM} = b_{13}(Q_D / Q_0)^{0.7} \tag{3-18}$$

ここで b_{13}：基準廃棄物埋立量当たりの人員（5 人）である。

メタン利用施設における発電量 W_M（kWh/年）は以下の**式 3-19** で算出される。

$$W_M = W_{M0} M_E (1 - a_3)(1 - a_4) t_W \tag{3-19}$$

ここで W_{M0}：発電設備１台当たりの発電容量（kWh）、M_E：発電設備の数（3 台）、a_3：発電設備補機損失（0.05）、a_4：事故率（0.05）、t_w：発電時間（時間）である。

3.2　価格原単位ならびに排出原単位の設定

廃棄物処理コストと環境負荷を算出するために用いる最も重要な要素として原単位が挙げられる。価格原単位とは材料や製品、および土木・建築工事などの単位量に対して必要な価格である。

廃棄物処理コストを算出するために価格原単位を用いる。価格原単位は地域ごとに値が異なってくるので適用地域によって調査する必要がある。廃棄物処理システム評価手法をタイ王国に適用するのでタイの現状に即した原単位を用いる必要があるが、現状の日本での値をデフォルトとし、適用対象地域における原単位とかけ離れている場合にその値を用いる。本研究では以下の**表 3-2** の値を用いて各処理コストを算出する。

表 3-2　タイ王国における価格原単位

項目	単位	記号	価格原単位(円)	参考
電力	円/kWh	X_1	20	都市ゴミ処理システムの分析・計画・評価[9]
重油	円/L	X_2	34	同上
軽油	円/L	X_3	96	Changes in Bangkok Retail Oil Prices
人件費	円/人・年	X_4	720,000	タイにおける廃棄物メタン利用事業に関するプロジェクト設計書作成調査[10]
重機および車両整備補修費	円/台	X_5	1,000,000	都市ゴミ処理システムの分析・計画・評価[9]
重機購入費	円/台	X_6	32,000,000	同上
収集車購入費	円/台	X_7	600,000	同上
運搬車購入費	円/台	X_8	10,000,000	同上
焼却施設基準建設費	円/10t-日廃棄物	X_9	500,000,000	同上
資源分別施設基準建設費	円/10t-日廃棄物	X_{10}	200,000,000	同上
中継基地施設基準建設費	円/10t-日廃棄物	X_{11}	10,000,000	同上
メタン利用施設基準建設費	円/10t-日廃棄物	X_{12}	3,170,000	タイにおける廃棄物メタン利用事業に関するプロジェクト設計書作成調査[10]
埋立処分地基準建設費	円/10000m^2-処分地面積	X_{13}	200,000,000	都市ゴミ処理システムの分析・計画・評価[9]

二酸化炭素排出量を算出するために二酸化炭素排出量原単位を用いる。電力や軽油、および重油の使用量に二酸化炭素排出量原単位（**表 3-3** 参照）を乗ずることによって算出することができる。積み上げ法と産業連関分析法の２種類の算出方法があるが、積み上げ法はひとつひとつの値をそれぞれの製造から資源採取まで遡って設定しなければならず、作

業量が膨大なものとなってしまう。

そこで、本研究では産業連関分析を用いて算出した値を用いる。「温室効果ガスの排出・吸収に関する国家目録作成のための IPCC ガイドライン（IPCC：Intergovernmental Panel on Climate Change，1996 年改定）」[11)]の中ではエネルギー原料に対して、その使用用途基づく排出係数のデフォルト値を定めている。その値を基に産業界の生産活動に伴う取引金額をまとめた産業連関表を分析することで環境負荷物質の排出原単位が求められる。

産業連関表[12)]とは国内で生産された財・サービスといった生産物がどのような産業間の取引を通じて生産されたかを行列の形で表示したものである。この行列は３つの部分にわけることができる。産業部門間の中間財の取引を示す内生部門、産業部門別の国内生産と輸入からどれだけ国内最終需要と輸出に向けられたかを示す最終需要部門、そして生産活動に投入した生産要素に対する付加価値の発生を示す付加価値部門である。最も重要になってくるのが内生部門である。このように算出された値は直接的な二酸化炭素排出量だけでなく、各部門の誘発二酸化炭素も含んでおりマクロ的な評価検討が可能である。

二酸化炭素排出量原単位も地域によって異なってくる。本研究ではタイの産業連関表から推測した値を用いる。森泉ら[13)]はタイの産業連関表とエネルギーバランス表を用いて二酸化炭素原単位を推計している。算出された値の単位は全て kg-CO_2/円となっているので、先に挙げたそれぞれの価格原単位を乗ずることで以下の**表 3-3** の通りに求められる。タイの産業連関表は 4 年ごとに算出されるが、本研究では 2001 年の値を用いている。

これまで挙げた原単位は時々刻々と変化していくものである。最新の値を使用することが望ましいが、あくまで本研究の目的はシナリオ間および都市間の比較である。この章で挙げた値を用いること同条件の下で計算し比較することでシナリオの優位性をマクロ的に判断する。

表 3-3　タイ王国における二酸化炭素排出量原単位

項目	記号	単位	価格原単位
電力	Y_1	kg-CO_2/kWh	71.07
重油	Y_2	kg-CO_2/L	3.08
軽油	Y_3	kg-CO_2/L	2.70

3.3　処理コストの算出

表 3-4 に各過程において算出する処理コストを示す。処理コストは施設建設費や埋立地建設費などのイニシャルコストと人件費や燃料費などのランニングコストに分けられる。イニシャルコストは評価を始めた年と耐用年数後、および最終処分場が飽和した年に計上される。ランニングコストは評価期間中には常に計上されるものである。なお、評価期間は施設の耐用年数である 20 年としている。

表 3-4　各過程において算出する処理コスト

	赤字：処理費用、緑字：処理便益
収集・運搬過程	
収集・運搬	車両購入費 人件費、燃料費、車両整備補修費
中間処理過程	
焼却処理施設 分別処理施設	施設建設費 人件費、燃料費、施設整備補修費 施設建設費 人件費、電力費、燃料費、施設整備補修費 資源売却費
中継基地施設	施設建設費 人件費、電力費、施設整備補修費
最終処分過程	
メタン利用施設	施設建設費 人件費、施設整備補修費 売電費
埋立処分地	埋立地建設費、最終覆土費、重機購入費 人件費、電力費、施設整備補修費

これらの算出式を以下に示す。

a) 収集過程

収集過程におけるイニシャルコスト C_{CI}（円）は以下の**式 3-20** で算出される。

$$C_{CI} = (1 + a_5)F_C(1 + a_6)X_7 \tag{3-20}$$

ここで a_5：収集車両の積載量による購入費用付加係数（積載量が多いと購入費用が高額になる。2t 車のとき 0，3t 車のとき 0.2，4t 車のとき 0.4 であり、本研究では 0.4 とした）、a_6：予備車率（0.12）である。

収集過程におけるランニングコスト C_{CR}（円/年）は以下の**式 3-21** で算出される

$$C_{CR} = (N_{PC} + N_{PD})X_4 + U_O X_3 + F_C(1 + a_6)X_5 \tag{3-21}$$

b）中間処理過程

資源分別施設におけるイニシャルコスト C_{RI}（円）は以下の**式 3-22** で算出される。

$$C_{RI} = X_9(S_R / S_{RC0})^{0.7} \tag{3-22}$$

資源分別施設におけるランニングコスト C_{RR}（円/年）は以下の**式 3-23** で算出される。

$$C_{RR} = N_{PR}X_4 + U_{ER}X_1 + U_{OR}X_2 + b_{13}C_I \tag{3-23}$$

ここで b_{13}：資源分別施設の建設費に対する整備補修費の割合（0.02）である。

資源分別施設で分別された資源を売却することによって得られる利益 C_{BR}（円/年）は以下の**式 3-24** で算出される。

$$C_{BR} = Z_1Q_p + Z_2Q_G + Z_3Q_{PT} + Z_4Q_M \tag{3-24}$$

ここで Z_1：紙類の売却単価（2,400 円/t）、Q_P：紙類の回収量（t/年）、Z_2：ガラス類の売却単価（600 円/t）、Q_G：ガラス類の回収量（t/年）、Z_3：プラスティック類の売却単価（9,600 円/t）、Q_{PT}：プラスティック類の回収量（t/年）、Z_4：鉄類の売却単価（4,500 円/t）、Q_M：鉄類の回収量（t/年）である。

焼却処理施設におけるイニシャルコスト C_{BI}（円）は以下の**式 3-25** で算出される。

$$C_{BI} = X_8(S_B / S_{BC0})^{0.7} \tag{3-25}$$

焼却処理施設におけるランニングコスト C_{BR}（円/年）は以下の**式 3-26** で算出される。

$$C_{BR} = N_PX_4 + U_OX_2 + b_{14}C_{BI} \tag{3-26}$$

ここで b_{14}：焼却処理施設の建設コストに対する整備補修費の割合（0.02）である。

c)　運搬過程

運搬過程におけるイニシャルコスト C_{TI}（円）は以下の**式 3-27** で算出される。

$$C_{TI} = (1+a_5)F_T(1+a_6)X_8 + X_{11}(S_T / S_{T0})^{0.7} \tag{3-27}$$

ここで S_{T0}：中継基地施設の基準稼動規模（t/日）である。

運搬過程におけるランニングコスト C_{TR}（円/年）は以下の**式 3-28** で算出される。

$$C_{TR} = (N_{PD} + N_{PT})X_4 + U_{ET}X_1 + U_{OT}X_3 + F_T(1+a_5)X_5 + a_7C_T \tag{3-28}$$

ここで a_7：中継基地施設の建設費に対する整備補修費の割合（0.02）、C_T：中継基地施設の建設費である。

d)　最終処分過程

最終処分過程におけるイニシャルコスト C_{DI}（円）は以下の**式 3-29** で算出される。

$$C_{DI} = X_{13}(1+a_8)\sum(q_{nd}/\rho_n)/(h_d a_9) + c_D A_L + M_B X_6 \tag{3-29}$$

ここで a_8：ごみに対する覆土容積（0.2）、q_{nd}：組成ごとの廃棄物搬入量（t/年）、h_d：平均埋立深さ（10m）、ρ_n：組成ごとのかさ密度、a_9：最終処分場の有効利用率（0.7）、c_D：最終覆土工事単価（2,000 円/m^2）

最終処分過程におけるランニングコスト C_{DR}（円/年）は以下の**式 3-30** で算出される。

$$C_{DR} = N_P X_4 + U_{OD} X_3 + M_B X_5 \tag{3-30}$$

メタン利用施設におけるイニシャルコスト C_{MI}（円）は以下の**式 3-31** で算出される。

$$C_{MI} = X_{12}(S_M / S_{MC0})^{0.7} \tag{3-31}$$

ここで S_M：メタン利用施設の施設規模（700t/日）S_{MC0} はメタン利用施設の基準施設規模（t/日）である。

メタン利用施設におけるランニングコスト C_{MR}（円/年）は以下の**式 3-32** で算出される。

$$C_{MR} = N_P X_4 + c_E W_M \tag{3-32}$$

ここで c_E：発電施設メンテナンス費（円/kWh）である。

メタン利用施設において売電収入によって得られる利益 B_M（円/年）は以下の**式 3-33** で算出される。

$$B_M = W_M(1-a_{10})(1-a_{11}) \tag{3-33}$$

ここで a_{10}：埋立地ガス回収設備損失（0.05）、a_{11}：送電ロス（0.02）である。

3.4　二酸化炭素排出量の算出

廃棄物の処理フロー中には様々な場面で二酸化炭素が排出される。そのため二酸化炭素の影響領域を考える必要がある。廃棄物の収集から埋立までの活動で直接的および間接的な二酸化炭素排出が考えられる。たとえば直接的な二酸化炭素排出とは電力使用に伴う二酸化炭素排出である。このような各過程において発生する二酸化炭素排出量を**表 3-5** に示す。

表 3-5　各過程における二酸化炭素排出源

収集・運搬過程	
収集・運搬	燃料使用に伴うCO_2排出
中間処理過程	
焼却処理施設	廃棄物燃焼時のCO_2排出、燃料使用に伴うCO_2排出
資源分別施設	電力使用に伴うCO_2排出、燃料使用に伴うCO_2排出
中継基地施設	電力使用に伴うCO_2排出
最終処分場	
メタン利用施設	電力使用に伴うCO_2排出
埋立処分地	燃料使用に伴うCO_2排出

これらの算出式を以下に示す。

a)収集過程

収集過程における二酸化炭素排出量 G_G（t/年）は以下の**式 3-34** で算出される。

$$G_G = U_{OC} Y_3 \tag{3-34}$$

b)中間処理過程

資源分別施設における二酸化炭素排出量 G_R（t/年）は以下の**式 3-35** で算出される。

$$G_R = U_{ER} Y_1 + U_{OR} Y_3 \tag{3-35}$$

焼却処理施設における二酸化炭素排出量 G_B（t/年）は以下の**式 3-36** で算出される。なお、焼却処理施設には焼却熱を利用した発電装置が設置しており、電力使用に伴う二酸化炭素排出量は廃棄物を燃焼した際に発生する二酸化炭素として計上されているので電力使用に伴う二酸化炭素排出量は算出する必要がない。

$$G_B = U_{OB} Y_3 + \frac{44}{12} \sum q_{nc} \varepsilon_C \times 1000 \tag{3-36}$$

ここで q_{nc}：バイオマス由来以外の廃棄物量（t）、ε_C：炭素含有率（布類：0.393%、プラスティック類：0.552%、ゴム・革類：0.517%）である。

c)運搬過程

運搬過程における二酸化炭素排出量 G_T（t/年）は以下の**式 3-37** で算出される。

$$G_T = U_{ET} Y_1 + U_{OT} Y_3 \tag{3-37}$$

d)最終処分過程

最終処分過程における二酸化炭素排出量 G_D（t/年）は以下の**式 3-38** で算出される。

$$G_D = b_3 U_{OD} + \frac{44}{12} \sum q_{nc} \varepsilon_C \times 1000 \tag{3-38}$$

ここで b_3：廃棄物 1t あたりの軽油使用量（0.62L/t）である。

メタン利用施設における二酸化炭素排出量は焼却処理施設と同様に発電装置で自施設の使用電力を賄っているため。電力使用に伴う二酸化炭素排出量は廃棄物を燃焼した際に発生する二酸化炭素として計上されているので電力使用に伴う二酸化炭素排出量は算出する必要がない。

3.5 メタン発生量の算出

最終処分場から発生するメタンは中間処理を行わない場合には膨大な量である。メタン発生量の算出は非常に重要である。一般的な手法として IPCC ガイドライン [10)]に示されている手法がある。最終処分場からのメタンガス発生量 G_{MG}（t/年）は次の**式 3-39** で算出される。なお、廃棄物に含まれる炭素原子は分解するのに時間を要するため最終処分場においてのみメタンが発生するものとする。

$$G_{MG} = R_\chi \times MCF \times DOC \times DOC_F \times F_{MG} \times \frac{16}{12} \tag{3-39}$$

ここで R_χ：廃棄物投棄量（t/年）、MCF：メタン補正係数（管理方法によって決定される係数であり、本研究では１とした）、DOC：分解性有機炭素、DOC_F：不同 DOC 係数（最終処分場内の温度Ｔで表される関数で本研究ではＴ＝35℃のときの 0.77 としている）、F_{MG}：埋立地ガス中の CH_4 体積分率（0.5）である。

また、DOC は以下の**式 3-40** で示される。

$$DOC = 0.4A + 0.17B + 0.15C + 0.3D \tag{3-40}$$

ここで A：紙，布類の炭素成分比、B：食物以外の腐敗しやすい有機物の炭素成分比、C：食物の炭素成分比、D：植物の炭素成分比である。途上国の中にはこれらの値を算出するための廃棄物組成がわからない可能性もあるためメタン排出量を算出できないのが欠点である。

期間を考慮せず全体量を算出するのであればこれで問題ないのだが、本研究ではメタンを回収するため、炭素原子の分解期間を考慮して 1 年ごとに発生するメタン排出量を算出する必要がある。IPCC ガイドラインには一次減衰モデルを使用するが、実際は炭素原子の分解に時間がかかる。そこで Sheldon Arleta モデル [14)]を用いる。

このモデルは、下水汚泥の嫌気性消化実験の結果に基づいて考えられたもので、無次元化した時間とガス量の関係がガス化曲線で与えられている。全分解期間の 35%の時点でガス発生量が最大かつ半値時としている。このモデルでは、当該廃棄物からのメタン発生量の半値時と分解期間に基づいてメタン生成速度が設定され、その速度を積分することにより、各年度の分解率を算定できる。

メタン発生量の半値時と分解期間は、各廃棄物について**表 3-6** のように設定されている。木くず中の炭素原子はメタンとなるまでかなりの年月を要することがわかる。

表 3-6　各廃棄物ごとの半減期および炭素原子分解時間

廃棄物の種類	半減期	分解期間
食物くず	3年	10年
紙・繊維くず	7年	21年
木くず	36年	103年

以下の**図 3-2～3-4** にそれぞれの廃棄物の種類ごとの具体的な分解率の推移を示す。

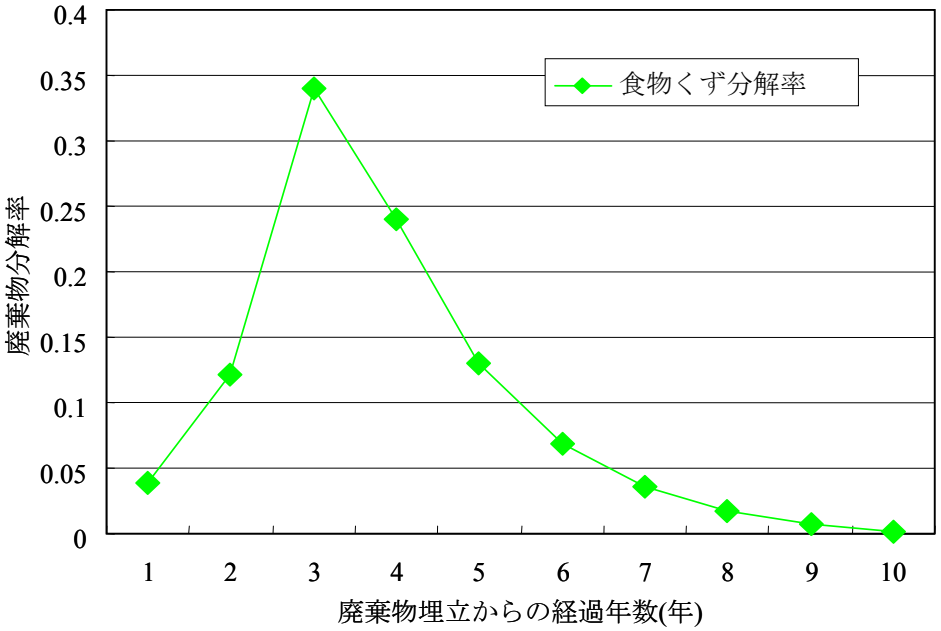

図 3-2　食物くず分解率推移

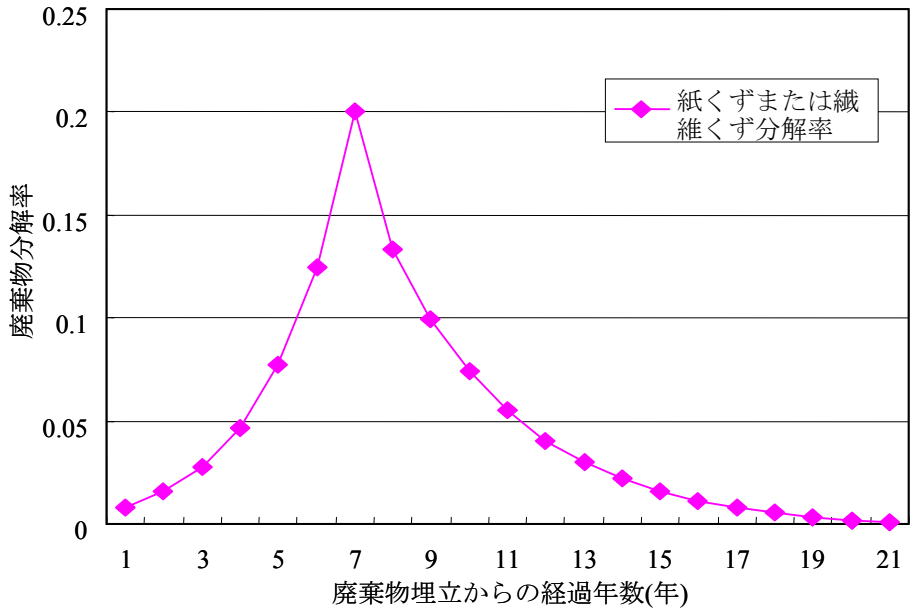

図 3-3　紙くずまたは繊維くず分解率

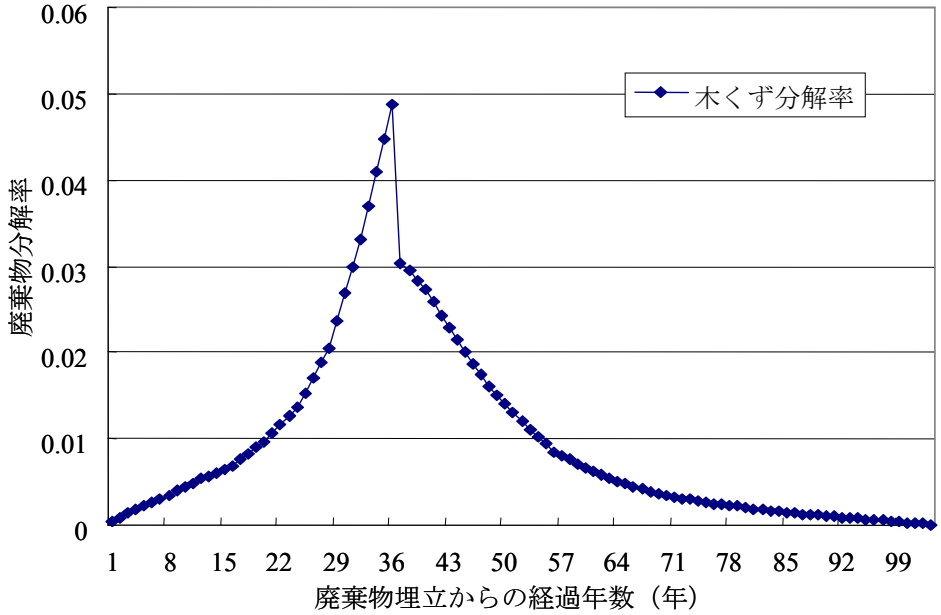

図 3-4　木くず分解率推移

これらの分解率を考慮し、各年に埋め立てられた廃棄物の評価期間内におけるメタン排出量を算出する。メタン利用施設ではメタンガスを全量回収することは難しいため、算出した値の 50%を回収できるものとした。

二酸化炭素とメタンを個々に考えると評価方法が難しくなる。メタンは同重量の二酸化炭素と比較して温暖化に対する効果が 21 倍であるとされている。そこで、本研究ではメタン 1kg につき二酸化炭素 21kg として二酸化炭素排出量に加えることで環境負荷という 1 つの指標で評価を行う。

3.6　二酸化炭素貨幣価値原単位

１章で述べたように本研究では費用便益と環境負荷についての評価を行うものである。しかし、環境負荷は実際に目に見える値ではないため、どれほど環境に配慮した技術であっても費用が高額であれば途上国にとっては全く無意味な技術と言わざるを得ない。そこで、環境負荷を目に見える形にするために二酸化炭素貨幣価値原単位を用いる。二酸化炭素貨幣価値原単位は、ここまで算出してきた環境負荷に乗じることで二酸化炭素排出量を貨幣換算することができる。こうして算出された値を本研究では環境コストと呼ぶこととする。

二酸化炭素貨幣価値原単位は３つの手法[15), 16)]で算出される。それぞれの特徴とともに以下に示す。

(i)　被害費用に基づく計測

環境の悪化による被害を、実際の被害額や支払意志額によって把握する方法である。政策動向の影響を受けにくく、外部要因に対しても比較的安定であり、且つ国際的な公平性にも配慮できる計測である。既往の研究により多くの推定事例が存在している。その中の103個の事例のうち中間値（446円/t-CO_2）と平均値（2,967円/t-CO_2）がかけ離れている、つまり推定された値にはかなりばらつきがあるということである。

(ii)　対策費用に基づく計測

環境を維持・向上するための対策費用によって、環境の価値を把握する方法である。削減目標および削減手法の設定によって数値に幅が生じている。さらに京都議定書以降の各国の目標設定に原単位が大きく依存する可能性があり、技術革新によっても対策費用は変化するため、中長期的に外部要因の影響を受けやすい。こちらも既往の研究により多くの推定事例が存在しており、少し高めの設定となる傾向がある。

(iii)　排出権取引価格に基づく設定

排出権取引市場における取引価格を評価値とする方法である。市場の成熟度に大きく依存するが、現時点では市場が成熟しているとは言えないと多くの組織が指摘している。既往の研究もあまり多くは扱われていない。

平成19年に設置された「公共事業評価手法に関する検討会」において検討されてきた結果10,600（円/t-C）とすることが提案された。本研究においては、その値を二酸化炭素に換算した二酸化炭素原単位2,890（円/t-CO_2）を用いる。

3.7　費用便益分析

ここまで算出してきた処理コストの分析を行う際、全ての費用便益を年度ごとの費用便益を現在価値に統一しなければならない。現在価値とは未来の費用便益について割引率を用いて現時点の価値に割り引いたものである。割引率の設定は地域ごとに異なっており、例えば日本では 4%、東南アジア諸国では 12%のように設定されている。

費用便益分析 [17] は、主として純現在価値（NPV）、費用便益費（CBR）、および内部収益率（IRR）の評価指標によって具体化される。

NPV とは便益の総現在価値と費用の総現在価値の差であり以下の**式 3-41** で表される。

$$NPV = \sum_{t=0}^{n} \frac{b_t}{(1+r)^t} - \sum_{t=0}^{n} \frac{c_t}{(1+r)^t} \tag{3-41}$$

ここで、n：プロジェクトライフ、b_t：年次 t の便益、c_t：年次 t の費用、r：社会的割引率を表している。これが 0 以上であれば採算性がとれると判断でき、この事業を行う価値があるということである。異なった事業の間でも NPV を最大にする事業を選択することで社会的便益が最大化される。プロジェクトの対費用の有効性が判断できないために異なった規模のプロジェクトを比較することができない。

CBR とは便益の総現在価値と費用の総現在価値の比であり以下の**式 3-42** で表される。

$$CBR = \sum_{t=0}^{n} \frac{b_t}{(1+r)^t} \Big/ \sum_{t=0}^{n} \frac{c_t}{(1+r)^t} \tag{3-42}$$

これが 1 以上であれば採算性が取れると判断でき、この事業を行う価値があるということである。CBR が大きければ収益率がよく、特に予算の制約があるときには CBR を用いて事業を評価する。環境影響を費用と考えるのか負の便益として考えるのかによっても数値が違ってくる。

IRR とは費用と便益の現在価値等しくする r のことであり、以下の**式 3-43** の r のことである。

$$\sum_{t=0}^{n} \frac{b_t - c_t}{(1+r)^t} = 0 \tag{3-43}$$

IRR は投下した資本を期間内の便益で返済する際、返済が可能な最大の利率であり、IRR が地域ごとに設定されている社会的割引率を上回っていれば、当該事業は採算が採れると判断され、実施する価値があることを意味する。よって、IRR は社会的利益率を判断する指標のため、規模の異なる事業間の比較が容易である。負の便益が存在する際には複数個存在する可能性がある。

本研究では NPV を用いる。ただし、本研究の目的は処理コストの比較検討なので、本来の NPV では処理便益をプラス、処理コストをマイナスとするところを、本研究では処理コストをプラス、処理便益をマイナスとして算出する。つまり-NPV を算出しシナリオ間の

比較を行うものである。

第4章　廃棄物処理システム評価モデルの適用と評価検討

4.1　タイ王国の概要

本研究はタイ王国をこれまで作成した評価モデルの適用対象としている。タイ王国[10)]は面積約 51.4 万 km^2（**図 4-1**）と日本の約 1.5 倍である。

図 4-1　タイ王国

人口は約 6,800 万人と東南アジアの中ではインドネシア（約 2 億 3,000 万人）、フィリピン（約 9,200 万人）、ベトナム（約 8,700 万人）に次いで 4 番目に人口の多い国である。バンコク首都圏にはそのうちの約 1/10、つまり約 600 万人が集中している。しかし、地方からの出稼ぎ者が多く、実際には 800～900 万人いるのではないかとも言われている。

季節は雨季（5 月～10 月）、寒気（11 月～2 月）、暑気（3 月～4 月）にわけられる。雨季には季節風の影響を受けることで毎日のように 1～2 時間程度の激しいスコールが降るためオープンダンピングで埋め立てられた最終処分場が崩壊する恐れがある。また、暑気には最高気温が 40 度近くに達することもあり、最終処分場内の廃棄物が自然発火して大火災となる可能性もある。そのため廃棄物処理もしくは管理を行うことで大火災に対して対応できる。

タイ王国は 1992 年に気候変動枠組条約に署名し、1999 年には京都議定書にも署名して

いる。温室効果ガス排出量の削減義務を負わない非付属書 I 国である。そのため、CDM 事業のホスト国となることができる。削減義務は負わないものの、年々増加する廃棄物に対応するため焼却施設の導入、衛生埋立の増設、さらにリサイクルを国家施策のひとつとして推進してきた。特にリサイクルのキャンペーン活動を行い、そのコンセプトは徐々に国民に浸透してきたのだが、ごみの分別基準のあいまいさや回収システムの分別への不対応などの理由により回収された廃棄物のうちリサイクルされた割合は 2000 年で 7%（2000 年時点で日本は 14.3%、欧州は 50%以上の国もある）とかなり苦慮している。廃棄物の管理は中央政府が技術・資金面でサポートしながら地方行政機関が行っている。国家施策としては 1975 年に国家環境保全法が制定されたが、十分に機能せず 1992 年に廃止された。同年、新たに国家環境保全推進法が制定され、現在は環境基本法に相当する国家環境質向上法の下で環境問題に関する規制が定められている。

4.2　バンコク首都圏への適用

4.2.1　バンコク首都圏の概要

まず、3 章で作成した廃棄物処理システム評価モデルをバンコク首都圏に適用する。バンコク首都圏とは、バンコク首都圏都にサムットプラーカーン、パトンタニ、サムットサコン、ナコンパトム、およびノンタブリーの周辺 5 県を加えた地域の総称（**図 4-2**）である。

図 4-2　バンコク首都圏

バンコク首都圏では廃棄物のうち約 98%～99%が回収されている。交通渋滞を避けるために午後 6 時以降に回収は行われている。ただし、バンコク首都圏には小道や行き止まりが多く収集効率は悪い。さらに、収集作業員が副収入として収集作業時に廃棄物の中から有価物として取引されるリサイクル可能物を回収するのでとても作業効率が悪くなっている。現在のバンコク首都圏の廃棄物の流れを**図 4-3** に示す。バンコク首都圏で収集された

廃棄物は中継基地であるオンヌット、ノンケン、ターランに運ばれ、パノムサーラカームおよびカンペンセン衛生埋立地で処理されている。

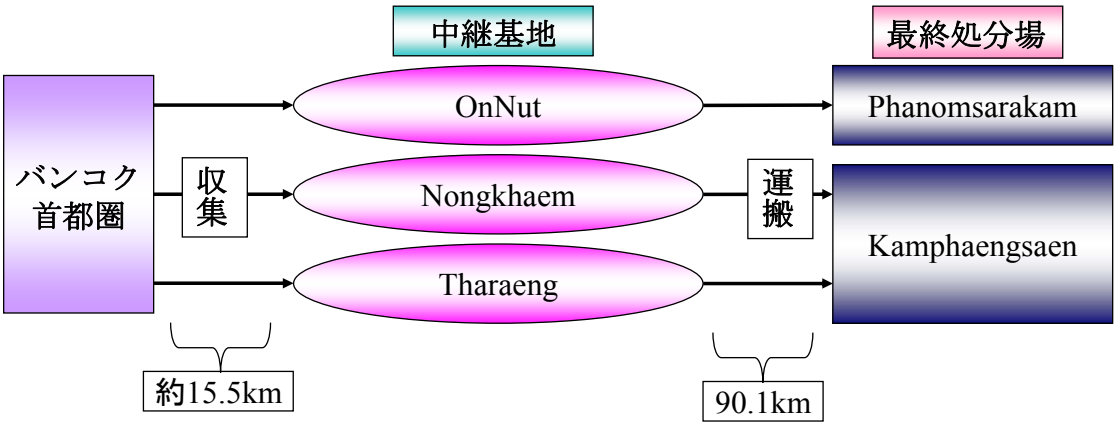

図 4-3　バンコク首都圏における廃棄物流れ

3.5 で述べたが、廃棄物処理システム評価手法を適用するのに重要な要素のひとつとしてとして廃棄物組成がある。バンコクにおける廃棄物組成[18)]を**図 4-4** 示す。後で他都市の廃棄物組成を示すが、他都市と比較してプラスティック類の割合が高い。そのため、プラスティック類に含まれる炭素原子由来の二酸化炭素排出量およびメタン排出量が多い。なお、長期間による評価を行うものの、バンコク首都圏における経済の安定状況から評価期間中は廃棄物組成を一定とした。

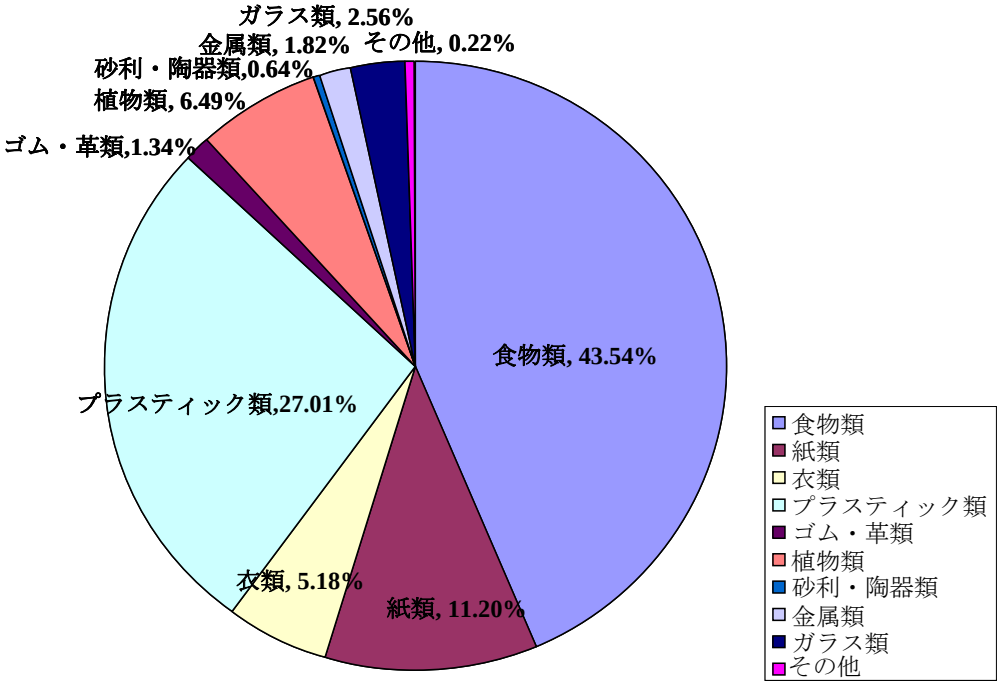

図 4-4　バンコク首都圏における廃棄物組成

4.2.2　マスタープランに基づく回帰分析によるバンコク首都圏の廃棄物発生量予測

バンコク首都圏における廃棄物の発生量 Q（t/日）を本研究では以下の**式 4-1** で算出する。

$$Q = Q_P P \times 1000 \tag{4-1}$$

ここで Q_P：一人当たりの廃棄物発生量（kg/人・日）、P：人口（人）である。

まずは一人当たりの廃棄物発生量を推測する。タイの環境保全及び推進の指針・枠組みを示すものとして、国家環境委員会（National Environmental Board）により内閣に提案され、1996 年 11 月に承認された国家環境質向上政策・計画（Enhancement and Conservation of National Environmental　Quality Policy and Plan）における一般廃棄物に関する目標・指針（マスタープラン）が挙げられている [19]。**表 4-7** はタイの廃棄物に関するマスタープランをまとめたものである。

表 4-7　タイ王国における廃棄物処理に関する国家政策・指針（マスタープラン）

目標	指針
バンコク首都圏における一般廃棄物の発生量を1.0kg/person/day以下とする。	収集･運搬・処理・処分を含む効率的な一般廃棄物管理体制の確立。
バンコク首都圏における一般廃棄物のリサイクル率を15%以上にする。	廃棄物発生率の管理、リサイクルと再利用の促進。
バンコク首都圏における一般廃棄物を全て管理する。市外での未処理廃棄物を10%以下にする。	一般廃棄物処理のインフラ建設・運営の民間活力の促進。
各県で衛生的な一般廃棄物管理のマスタープランの策定を確実にし、適切な処理を有する。	一般廃棄物監視に民間や市民の参加の促進。

このプラン一つとして上に挙げたように「一般廃棄物の発生量を 1.0kg/person/day 以下とする」という目標がある。しかし、2009 年時点では約 1.6（kg/人・日）と未達成である。この目標が評価期間（2010～2029 年）の 20 年の間に達成するよう、2010 年の一人当たりの廃棄物発生量を約 1.6kg、2029 年の一人当たりの廃棄物発生量を 1.0kg として 1 年ごとに一定量ずつ廃棄物量減少させるように設定する（**図 4-5**）。

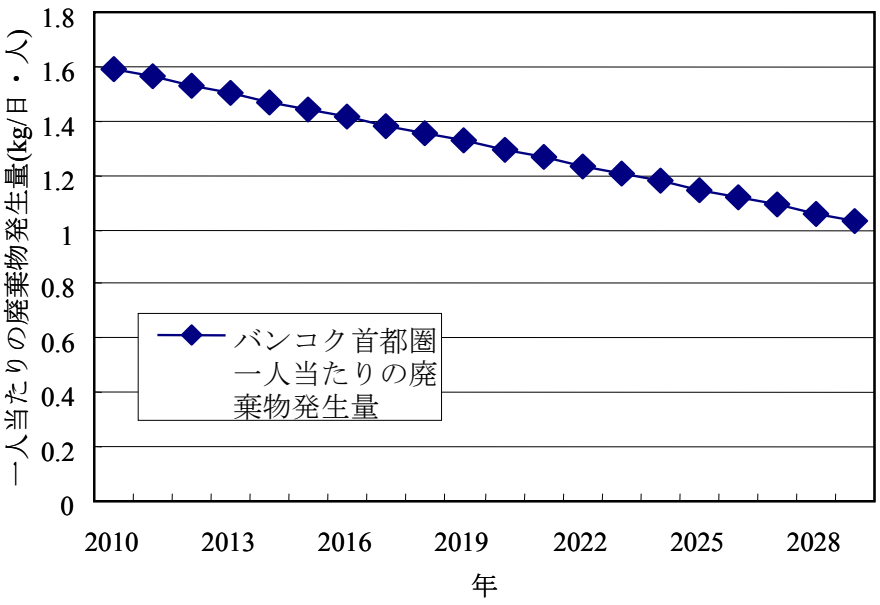

図 4-5　バンコク首都圏における一人当たりの廃棄物発生量

次にバンコク首都圏の人口推移を算出する。1950、1960、1970、1980、1990、2000 年の人口がそれぞれ判明している（**表 4-8**）。これらの数値から将来の人口推移を回帰分析によって算出する。実測値からわかるように 1960 年から 1990 年まで人口が約 2.6 倍となっているが、1990 年から 2000 年まで人口が 1.05 倍になっているということで安定に向かっているとしてよい。そこで、回帰分析には様々な種類があるが、本研究では人口が安定に向かうという性質を表現できる対数回帰を使用する。

表 4-8　バンコク首都圏における人口推移実測値

年	1960	1970	1980	1990	2000
人口(人)	2,126,453	3,077,361	4,711000	5,546,937	5,844,607

実測値と回帰分析で算出した人口の将来予測を以下に示す。実際に用いた対数回帰式は以下の**式 4-2** の通りである。

$$P = 1796404.396 + 966650\ln(X - 1959) \qquad (4\text{-}2)$$

ここで X は西暦（年）である。

図 4-6 に示している通り、回帰分析による人口の将来予測はバンコク首都圏の安定に向かっている傾向を表せている。

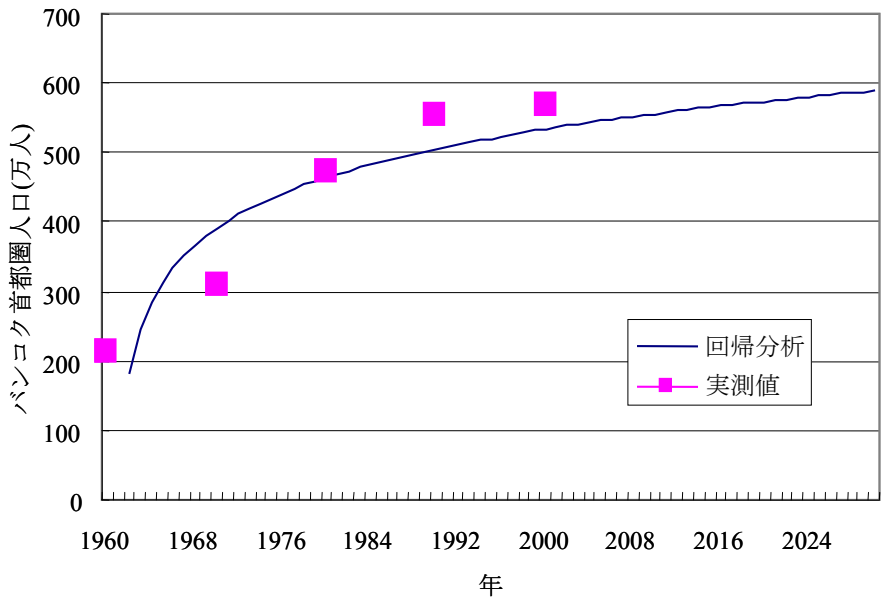

図 4-6　バンコク首都圏における人口将来予測

最後にこの２つの値を掛け合わせることでバンコク首都圏の廃棄物発生量の予測を行うことができる。**図 4-7** に予測した推移を示す。人口は緩やかに増加しているものの、一人当たりの廃棄物発生量が減少しているので結果的にバンコク首都圏廃棄物発生量は減少している。

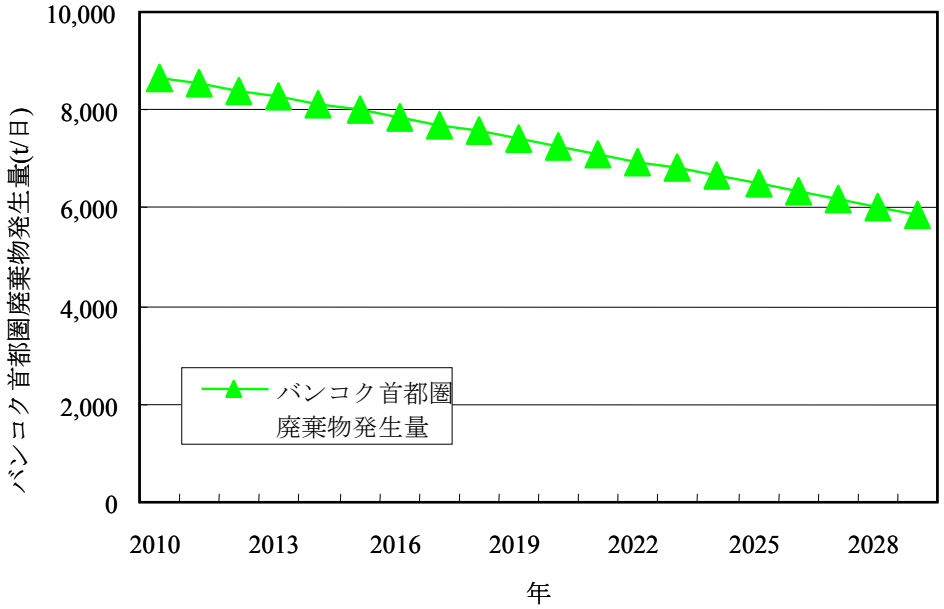

図 4-7　バンコク首都圏における廃棄物発生量予測

4.2.3　バンコク首都圏における廃棄物処理コストの検討

4.1、4.2 節で挙げた値をインプットとして廃棄物処理コストの推移をシナリオごとに算

出する。

収集過程における処理コストは全シナリオ一定であり、その値はイニシャルコスト約 26 億円、ランニングコストが 20 年間で約 410 億円であった。

中間処理過程における処理コストは資源分別施設と焼却処理施設の処理コストである。それぞれのシナリオにおける処理コスト推移を**図 4-8** に示す。20 年間の処理コストのうちかなりの部分がイニシャルコストで占められていることがわかる。焼却処理施設建設費用が資源分別施設建設費用に比べて高額である。

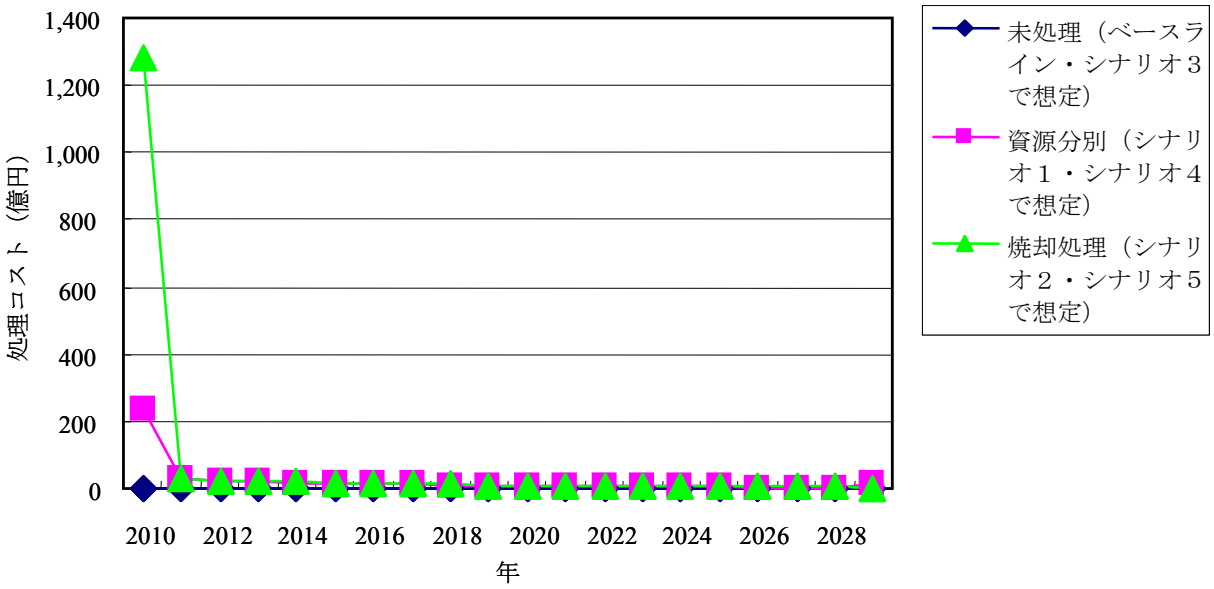

図 4-8　バンコク首都圏の中間処理過程における処理コスト推移

一日当たりの廃棄物運搬量と運搬過程における処理コストと一日当たりの運搬量の推移を中間処理ごとに**図 4-9** に示す。運搬過程における処理コストは廃棄物量もしくは廃棄物の残渣量によって決まる。**図 4-10** に示す一日当たりの廃棄物運搬量からわかるように特に焼却処理のシナリオでは廃棄物残渣量が少ないので（20 年間の合計でベースラインの約 8%）、運搬車購入費や使用燃料費が抑えられるので処理コストが低くなる。2017 年、2024 年で少し上がっているのは運搬車の購入費用によるものである。

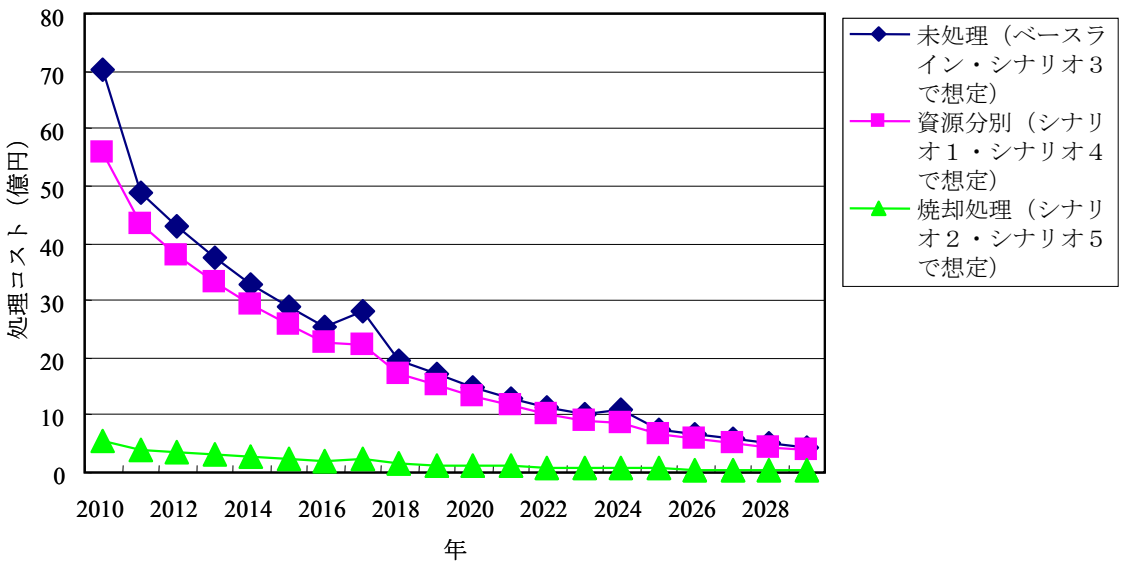

図 4-9　バンコク首都圏の運搬過程における処理コスト推移

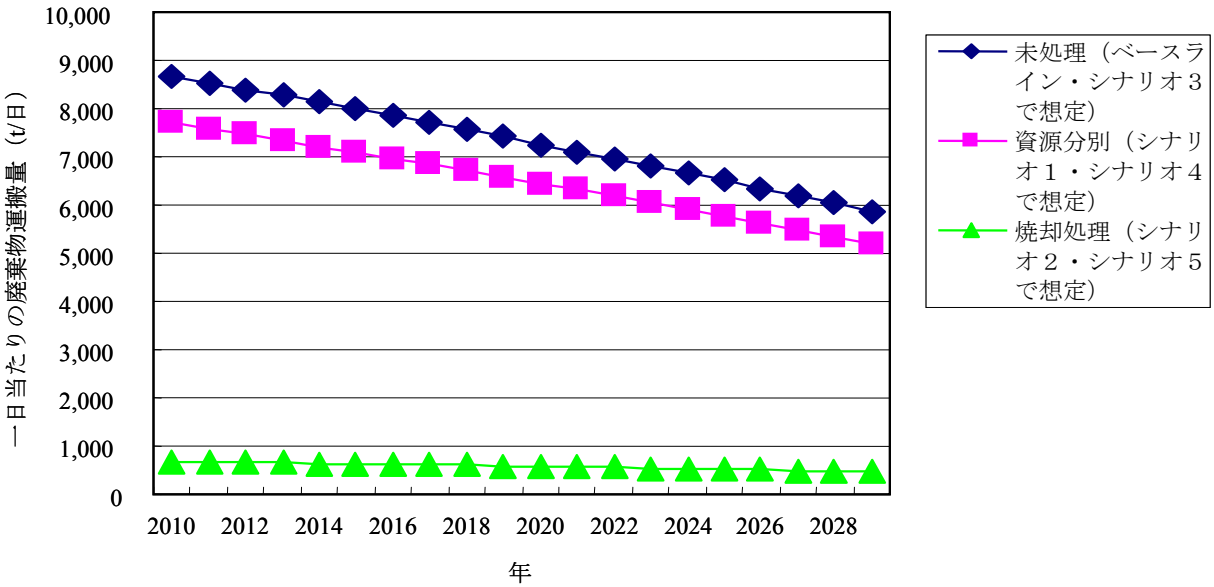

図 4-10　バンコク首都圏における廃棄物運搬量推移

最終処分過程における処理コスト推移を各シナリオごとに**図 4-11** に示す。焼却処理によって最終処分量が大幅に減少しているので焼却処理（シナリオ２・５）によって新たな最終処分場の建設費がなく処理コストを抑えられる。それ以外のシナリオは最終処分場が 3 年で飽和するので 3 年目に覆土工事費、4 年目に新規最終処分場の建設費が必要である。覆土工事費と新規最終処分場の建設費が社会的割引率によって現在価値となっているので年が経過するにつれて費用が小額になっていくことがわかる。メタン利用施設は工事費が安価なため中間処理施設が同じであれば、ほぼ同等の処理コストとなっていることがわかる。

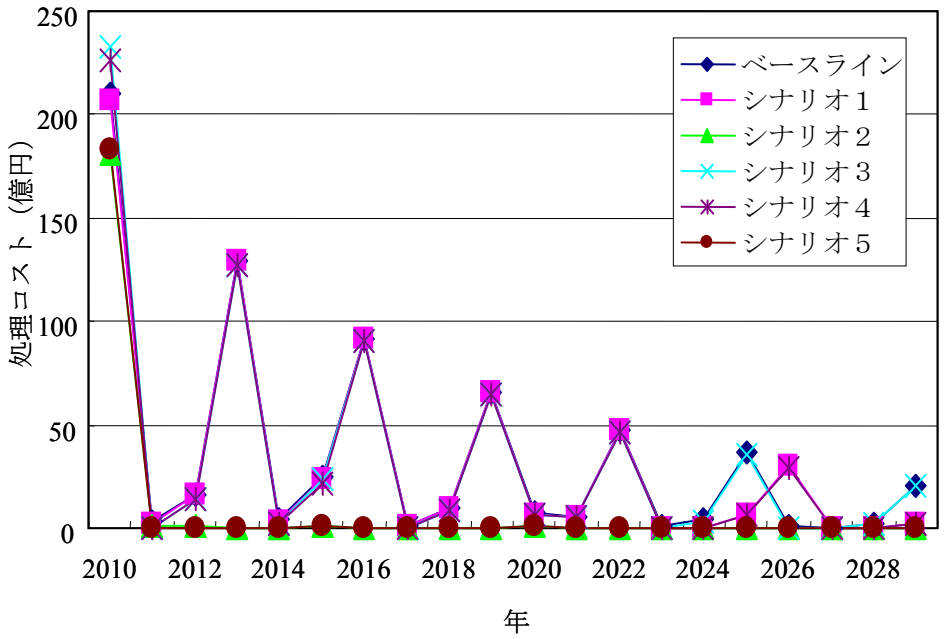

図 4-11　バンコク首都圏の最終処分過程における処理コスト推移

最後にこれまで算出した値を各シナリオごとに合計したものの推移（**図 4-12**）と累積（**図 4-13**）、そしてその内訳（**図 4-14**）を以下に示す。累積処理コストは約 1,100～1,700 億円であった。処理コストの推移と累積からイニシャルコストの影響がかなり大きいことがわかる。その中でも特に焼却処理施設を建設したシナリオ２・５におけるイニシャルコストが処理コスト全体に対して高額であることがわかる。これは焼却処理施設の建設費用が非常に高額であることと、評価期間の後半で高額な費用を要する新たな最終処分場建設費が社会的割引率によって現在価値として低く評価されることが原因である。それは累積処理コストで評価期間の前半においてベースラインシナリオ・シナリオ１・３・４では値が増え続けているが、評価期間後半になるにつれて徐々にその増分が緩やかになっていくということからもわかる。また、処理コストの内訳から焼却処理施設を建設したシナリオ２・５においては最も中間処理過程における割合が高かったが、その他のシナリオにおいては最終処分過程における割合が高いことからも焼却処理施設の建設費用が高額であることと、最終処分場の新規工事が高額であるということがわかる。途上国はこの結果を参考にして最も処理コストが安価なベースラインシナリオを最適なシナリオとして選ぶ可能性が高い。なぜなら、廃棄物運搬のために運搬車から発生する二酸化炭素排出や最終処分場において発生するメタン排出など、実際に存在しないものについては途上国によって考慮されることが少ないためである。そこで次節で環境影響を定量的に評価し、シナリオ間で比較検討する。

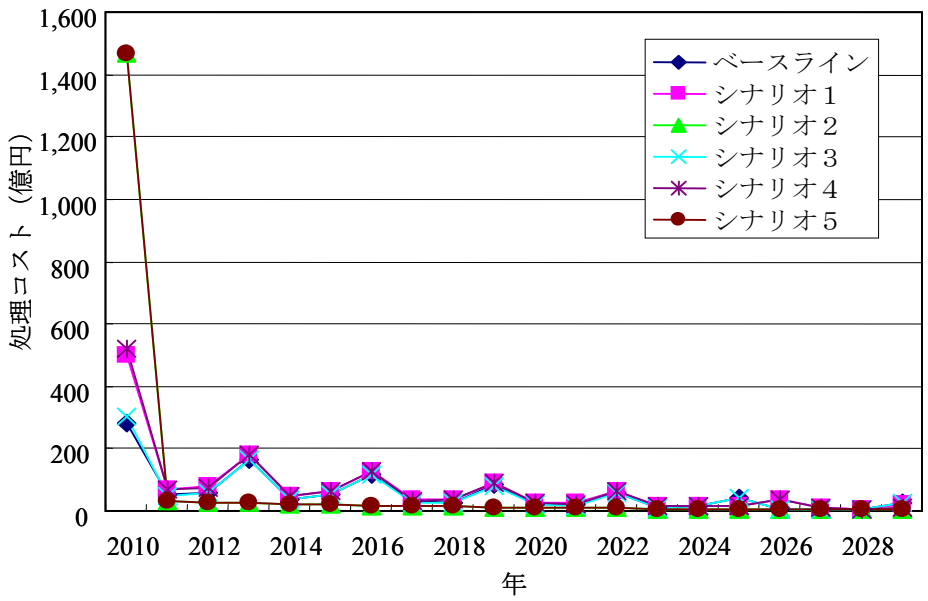

図 4-12　バンコク首都圏における処理コスト推移

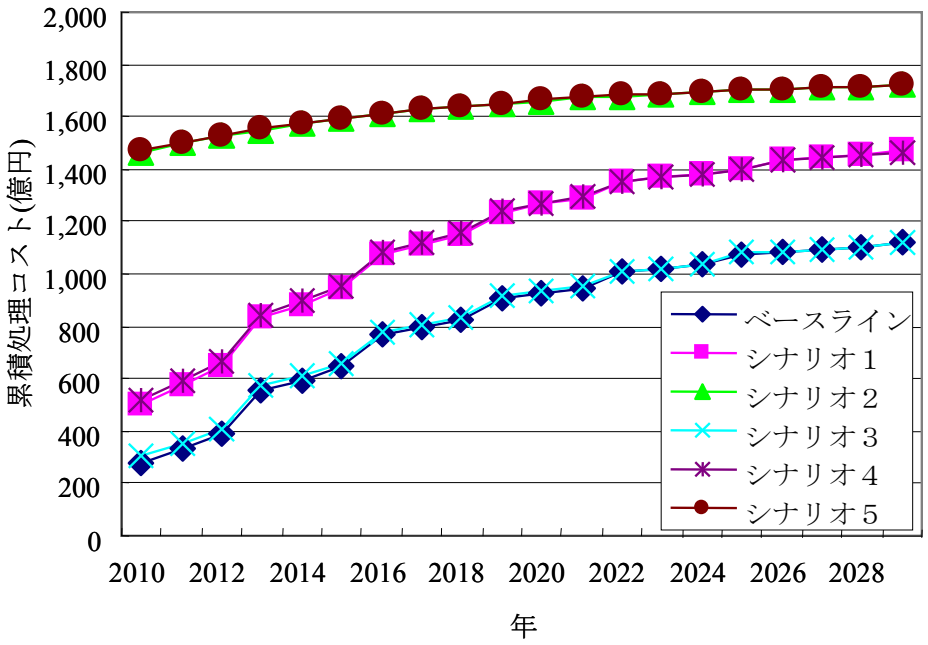

図 4-13　バンコク首都圏における累積処理コスト

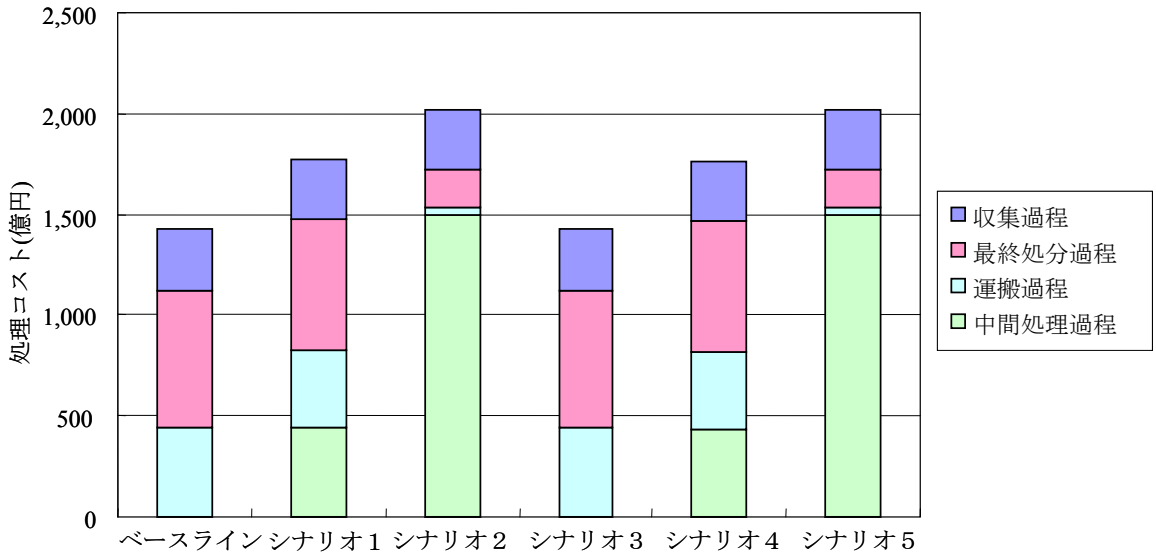

図 4-14　バンコク首都圏における過程別処理コスト内訳（20 年間の合計）

4.2.4　バンコク首都圏における廃棄物処理に伴う環境負荷の検討

4.2.3 節と同じく 4.2.1、4.2.2 節で挙げた値をインプットとして二酸化炭素排出量とメタン排出量の推移をシナリオごとに算出する。

収集過程における二酸化炭素排出量は全シナリオ一定であり、その値は 20 年間で 6 億 t であった。

中間処理過程における二酸化炭素排出量の推移を**図 4-15** に示す。どちらの施設においても廃棄物処理量が少なければ二酸化炭素発生量が減少するので、二酸化炭素排出量が年々減少する結果となった。焼却処理施設においては最終処分場でメタンに変化する炭素原子を中間処理過程で二酸化炭素に変換しているので、施設運用に必要な分が計上される資源分別施設に比べて多く計上されている。

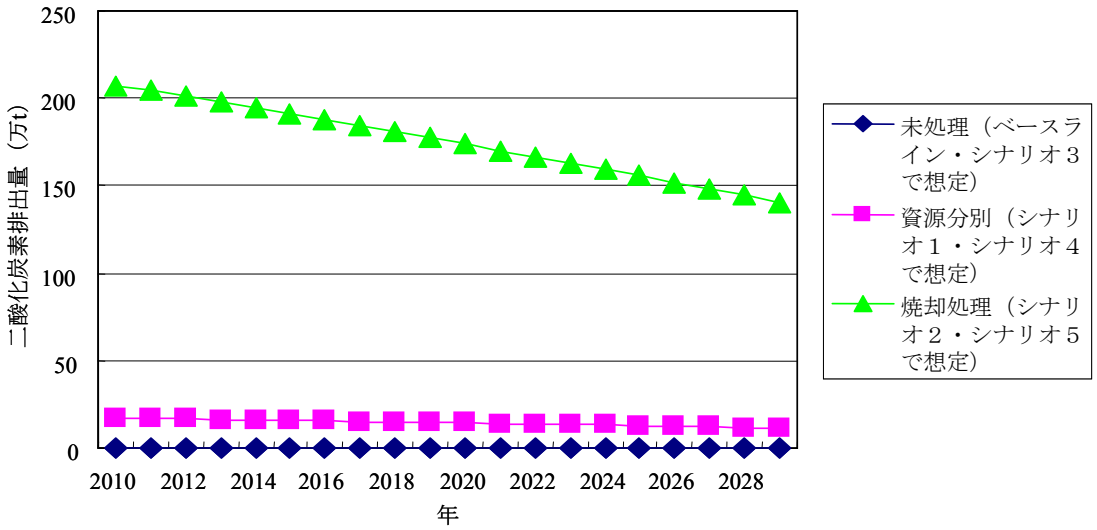

図 4-15　バンコク首都圏の中間処理過程における二酸化炭素排出量推移

運搬過程における二酸化炭素排出量の推移を**図 4-16** に示す。二酸化炭素排出量は廃棄物運搬に伴う燃料使用量のみで処理コストと同様に廃棄物量もしくは廃棄物の残渣量によって決定される。廃棄物発生量が減少しているのでそれに伴い二酸化炭素排出量が減少していくことがわかる。特に焼却処理のシナリオでは廃棄物残渣量が少なく、燃料使用量が抑えられるので二酸化炭素排出量も少ない。

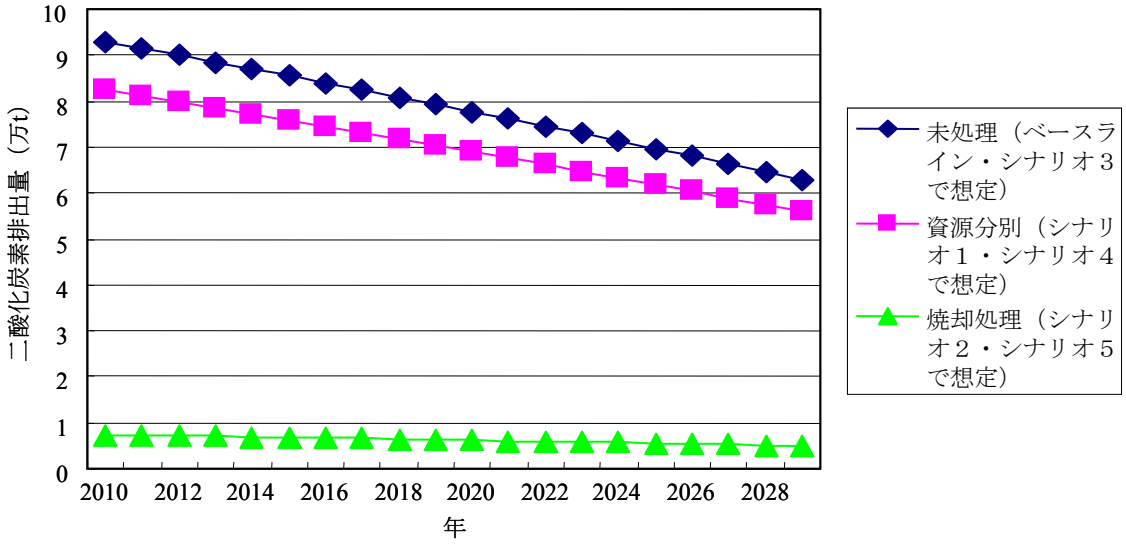

図 4-16　バンコク首都圏の運搬過程における二酸化炭素排出量推移

最終処分場におけるメタン排出量の推移を以下に示す。図 4-17 はベースラインにおける各年に埋め立てられた廃棄物からのメタン排出量推移を 5 年分示したものである。例えば､濃青色の推移は 2010 年に埋め立てられた廃棄物からのメタン排出量推移を表している。山が２つできているのは食物類の半減期（3 年）と紙・繊維類の半減期（7 年）が山のところにあるためである。バンコク首都圏では食物類の割合が紙・繊維類の割合に比べ大きいので山が大きくなっている。また、廃棄物埋立量が年々減少しているのでメタン排出量も同様に減少しているのが山の大きさからもわかる。**図 4-18** は**図 4-17** に示したメタン発生量を各年ごとにも合計したものである。焼却処理を行ったシナリオ２・５ではほとんどメタンが排出されない｡埋め立て開始後に発生するメタンは少量であるが年々増加していく。しかし、ある時点を境（例えばベースラインシナリオでは 12 年を境目）に少しずつメタン排出量は減少していく。その境目で最も排出されるメタンが多い理由としては、次に示す 2 つの要因が重なったためと考えられる｡1 つ目は､評価期間の最初のほうに埋め立てられた廃棄物から発生するメタン排出量が時間の経過につれて少なくなっていく。そして 2 つ目は、廃棄物埋立量が徐々に減少するために、メタン発生量自体が減少していくということである。

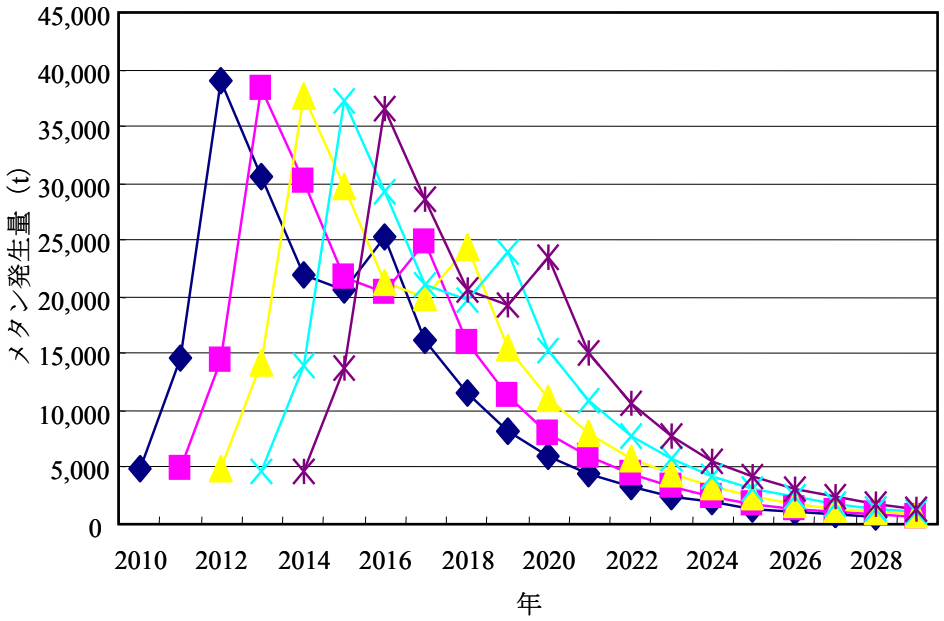

図 4-17　バンコク首都圏の最終処分場における各年のメタン排出量推移（5 年分）

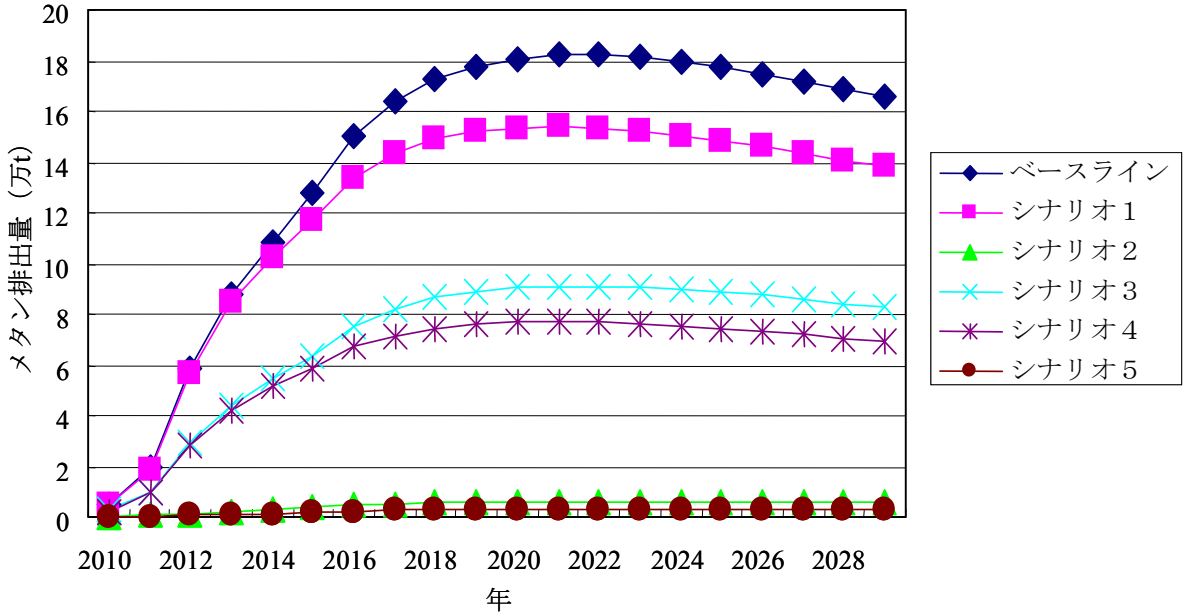

図 4-18　バンコク首都圏の最終処分場におけるメタン排出量推移

ここで算出されたメタン発生量は 3.5 節で述べたようにメタン 1kg につき二酸化炭素 21kg として二酸化炭素排出量に加える。以下、この量を等価二酸化炭素排出量とする。各シナリオの等価二酸化炭素排出量推移を**図 4-19** に示す。最終処分場から排出される二酸化炭素量は、ベースラインにおいて 20 年で約 1,730 万 t と他の過程と比較しても大量に放出されているが、それ以上にメタン排出量の影響が大きいことが**図 4-18** で示したメタン排出量推移に類似していることからわかる。つまり、バンコク首都圏における廃棄物処理システムの中で最終処分場からのメタン排出量は地球温暖化に大きな影響を与えていると

いうことである。

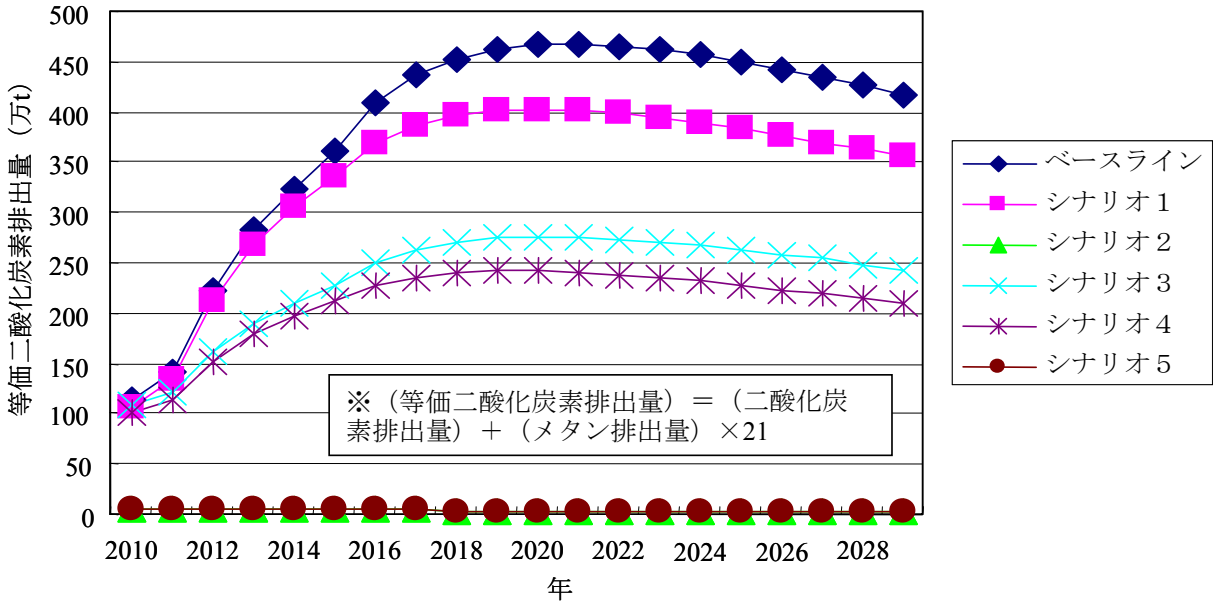

図 4-19　バンコク首都圏の最終処分場における等価二酸化炭素排出量推移

これまで算出してきた等価二酸化炭素変換排出量の推移（**図 4-20**）と累積（**図 4-21**）を以下に示す。

等価二酸化炭素排出量の推移からベースラインシナリオが最も等価二酸化炭素排出量が多く、シナリオ５が最も少ないことがわかる。メタンは分解に時間がかかるために初年度はどのシナリオにおいても全体的に等価二酸化炭素排出量は少なかったが、時間の経過とともに焼却処理を行ったシナリオ以外は 3 倍以上に増加した。シナリオ２と５の等価二酸化炭素排出量にあまり差がない原因は、廃棄物を焼却することによって最終処分場でメタンに変換される炭素原子の大部分が二酸化炭素に変換されているからである。一方、ベースラインシナリオとシナリオ１では最終処分場におけるメタン排出量が環境負荷の大部分を占めているため、シナリオ３と４でメタンを二酸化炭素に変換することで二酸化炭素排出量が約 6 割に抑えられる。また、累積等価二酸化炭素排出量から、処理コストのような社会的割引率を設定していないのでどのシナリオにおいても評価期間中増え続けていることがわかる。

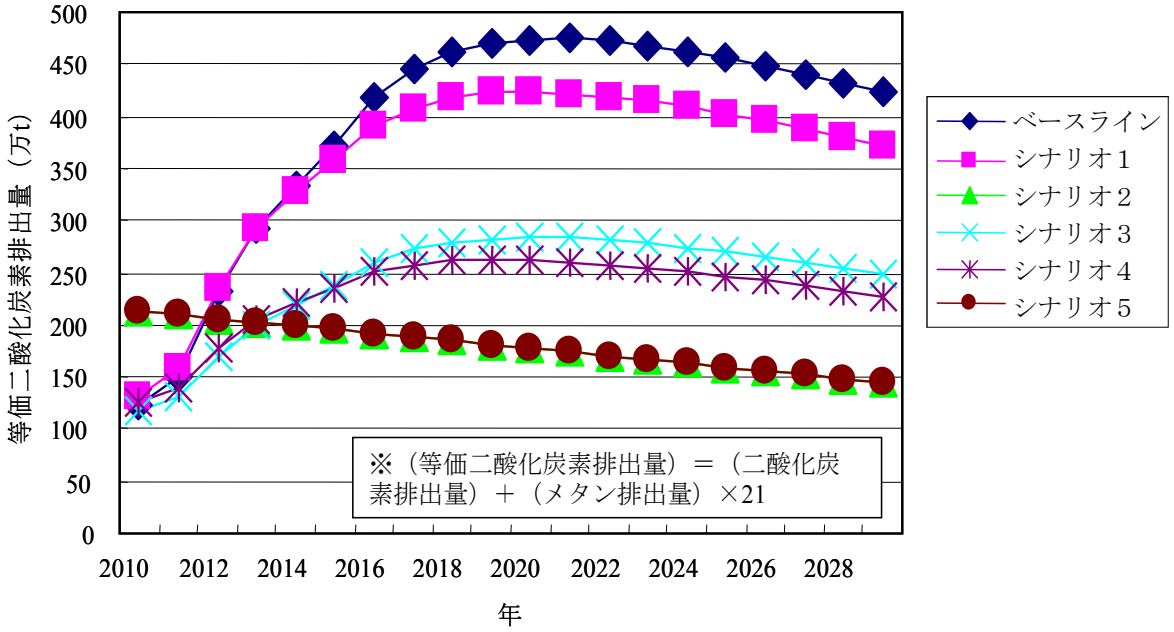

図 4-20　バンコク首都圏における等価二酸化炭素排出量推移

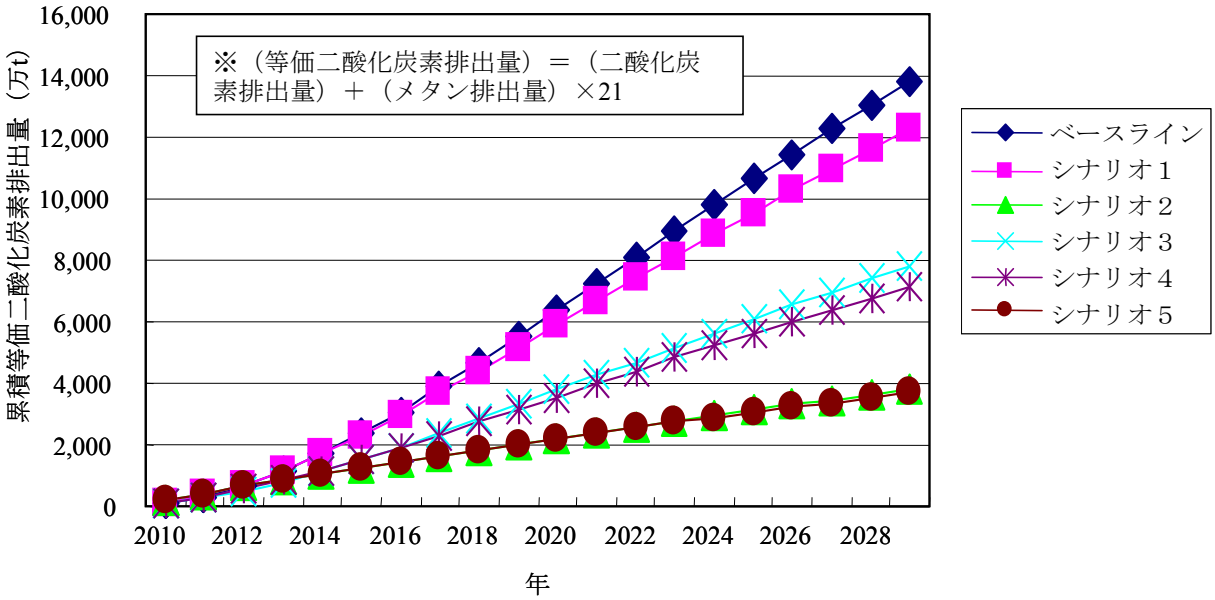

図 4-21　バンコク首都圏における累積等価二酸化炭素排出量

等価二酸化炭素排出量における二酸化炭素・メタンの内訳（**図 4-22**）と各過程の内訳（**図 4-23**）を以下に示す。シナリオ２・５における等価二酸化炭素排出量の大部分は中間処理過程におけるものであること、その他のシナリオにおける二酸化炭素排出量の大部分は最終処分場における二酸化炭素排出もしくはメタン排出によるものであるということがわかる。つまり、等価二酸化炭素排出量は廃棄物に含まれる炭素原子による要因が大部分を占めており、処理を施すために必要な電力および燃料からの二酸化炭素排出量はそれほど多くないということである。

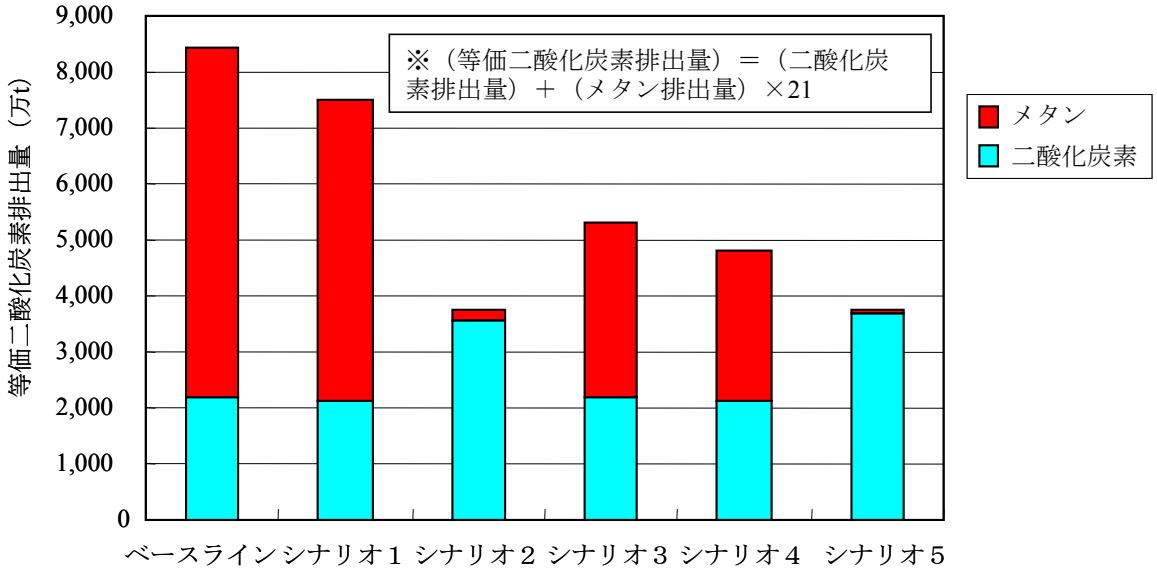

図 4-22　バンコク首都圏における等価二酸化炭素排出量内訳（20 年分）

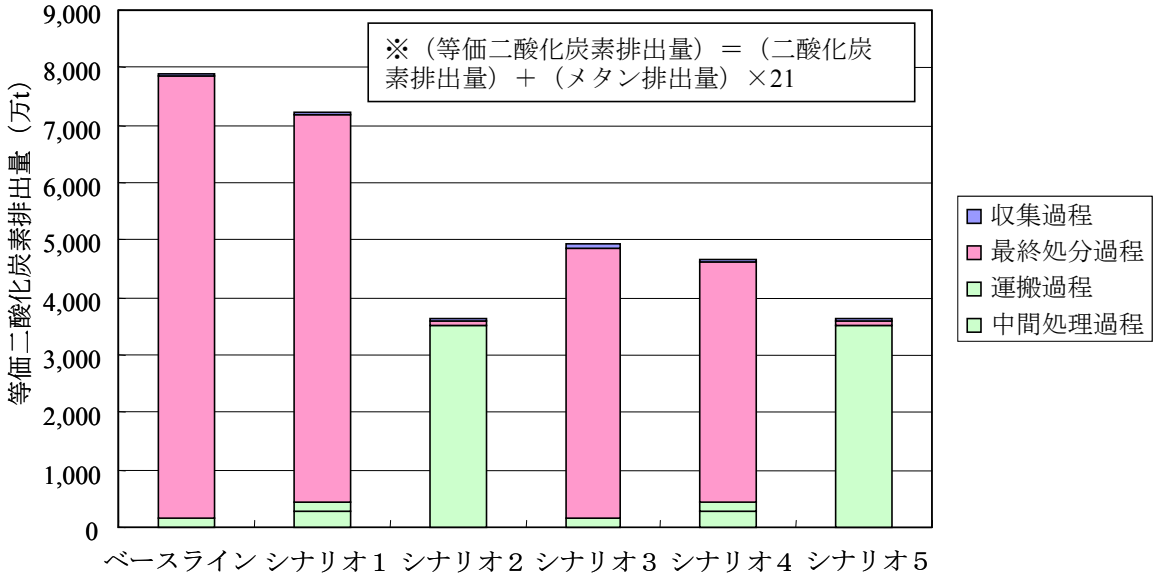

図 4-23　バンコク首都圏における二酸化炭素排出量過程別内訳（20 年分）

最後に 3.6 節で述べたように二酸化炭素排出量を貨幣換算することで目に見えなかった二酸化炭素排出量を途上国にとって価値のあるものにする。これを本研究では環境コストとした。**図 4-20** のバンコク首都圏等価二酸化炭素排出量推移と**図 4-21** のバンコク首都圏累積等価二酸化炭素排出量に二酸化炭素貨幣価値原単位を乗じたものを**図 4-24** と**図 4-25** に示す。4.3 で算出した処理コストは 30 年間で約 1,100～1,700 億円（**図 4-13** 参照）だったのでほぼ同等の値であり、処理コストと環境コストともに減らすべき値であることがわかる。

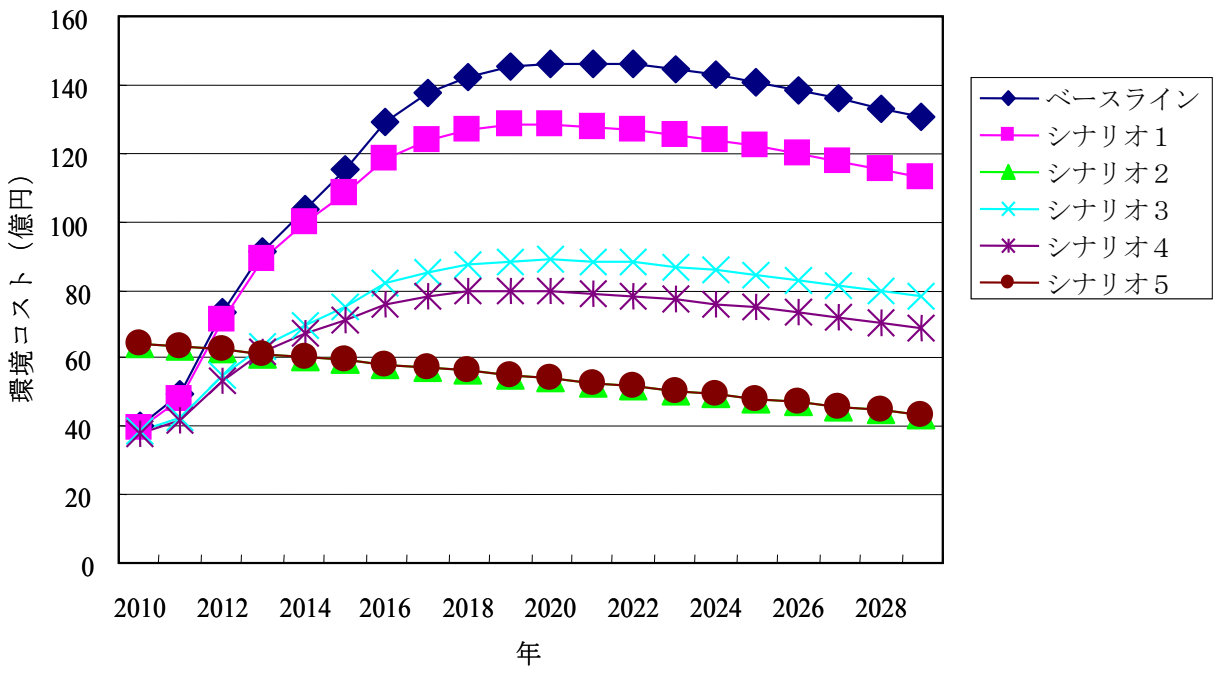

図 4-24　バンコク首都圏における環境コスト推移

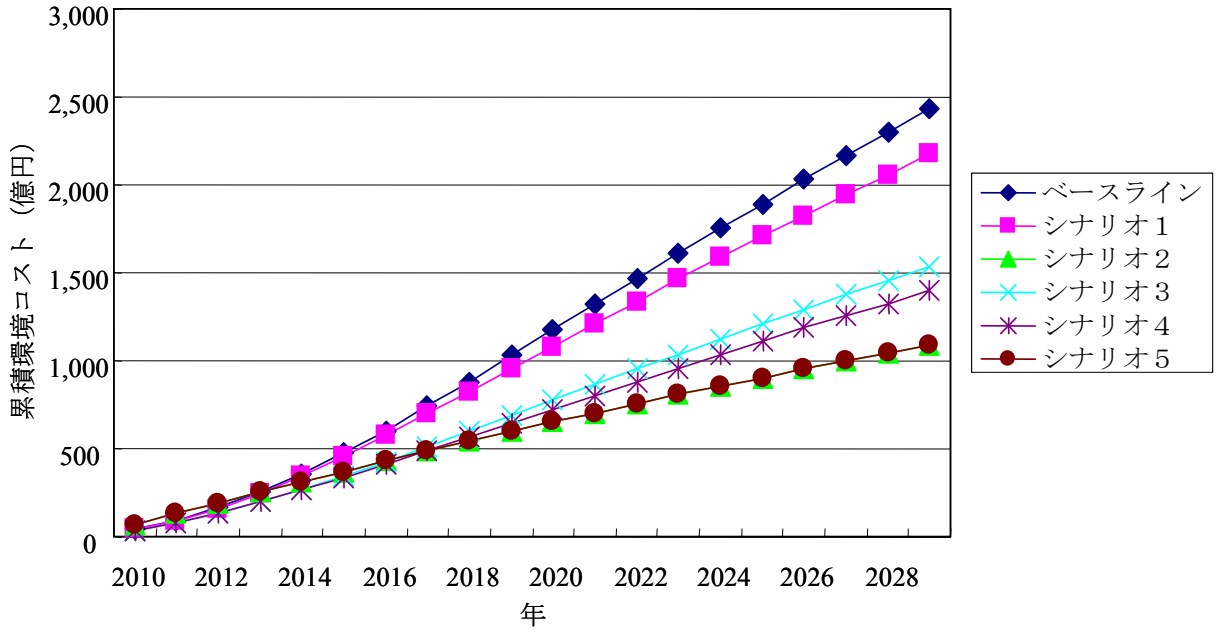

図 4-25　バンコク首都圏における累積環境コスト

4.2.5　環境影響を含めたシナリオ間比較

4.2.3、4.2.4 で算出した処理コストおよび環境コストを用いて環境影響を含めた新たな廃棄物処理手法評価を行う。

まずは処理コストと環境コストを単純に足し合わせたもので評価を行う。二つの合計という意味で本研究ではトータルコストとする。トータルコストを最も少なく抑えることができるシナリオが費用面にも環境面にも優れているということである。最もトータルコス

トが低いシナリオはシナリオ３で約 2,700 億円であった。逆に最もトータルコストが高かったのはベースラインシナリオで約 3,600 億円であった。つまり、バンコク首都圏では現状何も処理していない状態では処理コストが低いものの、環境影響を含めて考えると非常に効率が悪いことがわかる。トータルコストの推移（**図 4-26**）および累積（**図 4-27**）を以下に示す。

トータルコストの推移から高額な焼却処理施設の建設によりシナリオ２・５では約 1,500 億円のトータルコストが一年目に計上されているが、それ以降はずっと他のシナリオに比べて低いことがわかる。一方、ベースラインシナリオ・シナリオ１・３・４では一年目はそれほど高額でないものの､それ以降はずっとシナリオ２・５に比べて高いことがわかる。累積トータルコストからベースラインシナリオとシナリオ１のトータルコストが評価開始から 13 年目でシナリオ２・５のトータルコストを超えることがわかる。

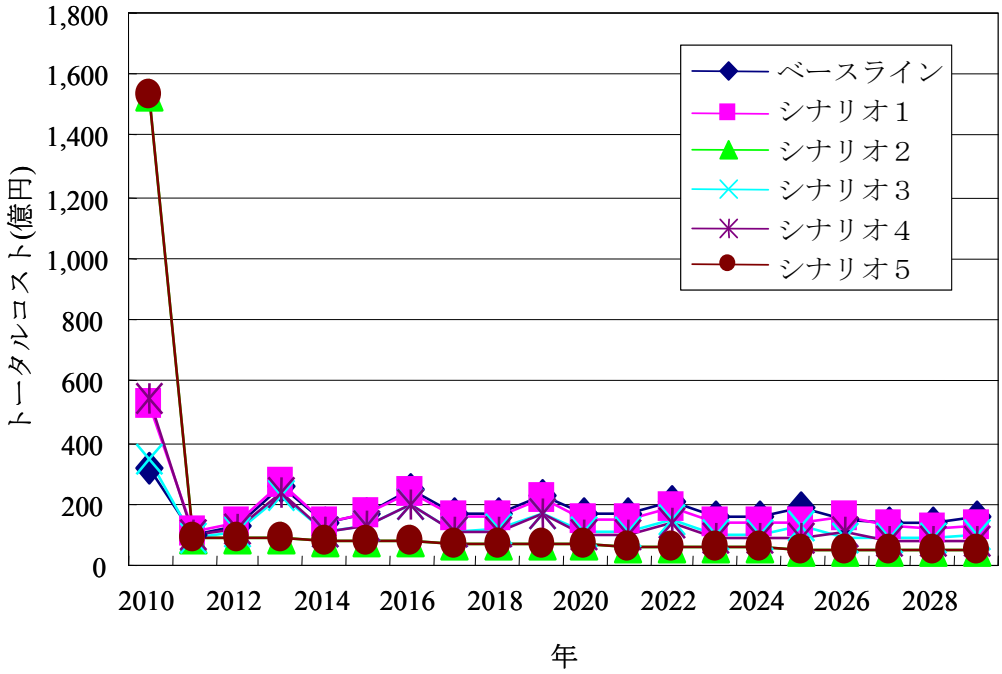

図 4-26　バンコク首都圏におけるトータルコスト推移

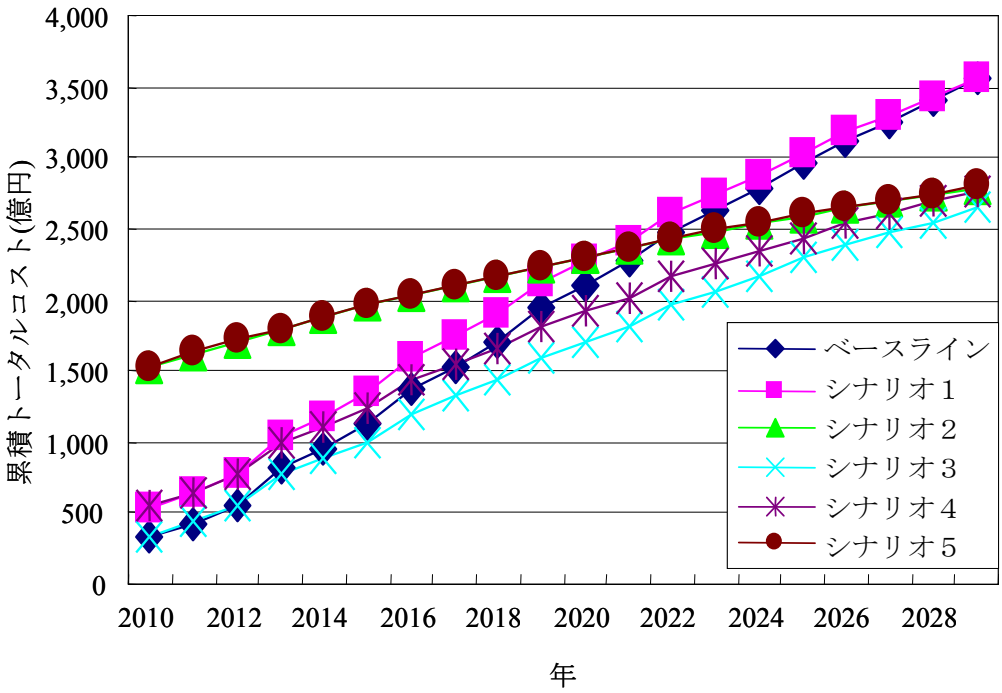

図 4-27　バンコク首都圏における累積トータルコスト

図 4-28 は各シナリオの環境および処理コストの内訳を表している。ここからもベースラインシナリオにおいては環境に対する影響が最も大きいとわかる。一方、シナリオ３は費用・環境に対して最も効率がいいことがわかる。

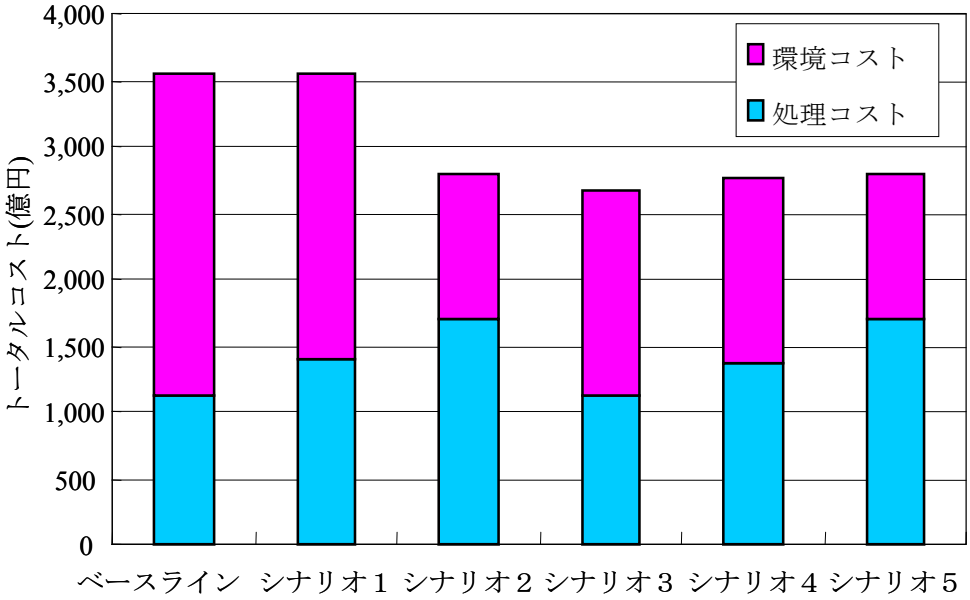

図 4-28　バンコク首都圏におけるトータルコスト内訳（20 年分）

もう一つの環境影響を含めた評価方法として環境影響指標 E_F を用いる。これはベースライン以外のシナリオに適用可能な指標であり、以下の**式 4-3** で算出される。

$$E_F = \frac{\Delta C_E}{\Delta C_D} \tag{4-3}$$

ここで ΔC_Eはベースラインシナリオにおける環境コストと評価するシナリオにおける環境コストの差の絶対値、ΔC_Dはベースラインシナリオにおける処理コストと評価するシナリオにおける処理コストの差の絶対値である。これまで示してきたように普通はベースラインシナリオの処理コストが最も小さく、環境コストが最も大きいのでΔC_Eが大きく、ΔC_Dが小さければ少ない投資費用で環境を改善できているということなので効率がよいといえる。つまり、環境影響指標は大きければ環境効率がよいということである。

バンコク首都圏における環境影響指標を環境コスト差および処理コスト差とともに**表 4-9** に示す。

シナリオ３における環境コスト差は他のシナリオほど大きくはないが、処理コスト差が少ないために環境効率がかなり高くなっていることがわかる。これは売電収入と安価な施設建設費のためである。

表 4-9　バンコク首都圏における環境影響指標

	ベースラインとの環境コスト差	ベースラインとの処理コスト差	環境影響指標
シナリオ１	25,982,360,796	35,032,187,052	0.741671103
シナリオ２	134,639,640,315	59,544,151,642	2.261173207
シナリオ３	90,202,057,247	177,616,534	507.8471884
シナリオ４	103,698,835,507	34,036,878,321	3.046661169
シナリオ５	134,645,279,929	59,605,803,551	2.258929029

以上、本研究でシナリオ間比較を行った結果、トータルコストおよび環境影響指標の両方でバンコク首都圏ではシナリオ３が最も環境効率がよいということがわかった。

4.2.6　廃棄物発生量、二酸化炭素貨幣価値原単位および評価期間による感度分析

ここからは既往の研究から処理コストと環境コストに大きな影響を与えると思われる廃棄物発生量、二酸化炭素貨幣価値原単位、および評価期間について感度分析を行い結果の違いを検討する。

まずは廃棄物発生量を変化させる。本研究では廃棄物発生量の予測は対数回帰式で算出したが、ここでは幾何ブラウン運動を用いて複数の廃棄物発生量推移を予測し評価を行う。以下、ブラウン運動の数理モデルから幾何ブラウン運動までの流れを説明する[20)]。

幾何ブラウン運動の起源はノーバート・ウィーナーが示したウィーナー過程である。ウ

ィーナー過程には、以下に示す 4 つの特徴がある。

1) $W_0 = 0$

2) W_t は連続

3) $W_{s+t} - W_t = N(0, s)$

4) W_t は独立増分

ここで、$N(\mu,\sigma^2)$は期待値 μ，分散 σ の正規分布、W_t は無作為変数、t は時間である

独立増分とは $W_{t+\Delta t}$ は W_t の影響を受けるが、その他の影響はまったく受けずに独立しているということである。

式 4-4 のように、ある量 M_t は平均 μ，分散 σ をもつ確率変数 η_t で表されるとする。

$$M_t = \eta_1 + \eta_2 + \cdots + \eta_t \tag{4-4}$$

ここで η_t は分布の次元から見ると $\mu+\sigma\varepsilon_t$ なので M_t の分布は**式 4-5** で表される。

$$M_t = t\mu + \sigma(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \cdots + \varepsilon_t) \tag{4-5}$$

ここで、ε_i は標準正規分布から無作為に選び出した値である。ε_i の分布は 3)より、$W_i - W_{i+1}$ と等しいので以下の形で表される一般的なブラウン運動の**式 4-6** が求められる。

$$M_t = t\mu + \sigma W_t \tag{4-6}$$

幾何ブラウン運動は M_t を比率で考えたものである。比率をとると μ は Δt 倍，σ は $\sqrt{\Delta t}$ 倍となることに注意すると、以下の**式 4-7** のように表せる。

$$\frac{\Delta M_t}{M_t} = \mu\Delta t + \sigma\varepsilon\sqrt{\Delta t} \tag{4-7}$$

ウィーナー過程より ΔW_t と $\varepsilon_t\sqrt{\Delta t}$ の分布が等しい。よって幾何ブラウン運動は以下の**式 4-8** で表され、幾何ブラウン運動は非負であることが理解できる。

$$\frac{dM_t}{M_t} = \mu dt + \sigma dW_t \tag{4-8}$$

つまり、幾何ブラウン運動過程の変化率は正規分布に従い、絶対変化量は対数正規分布に従うということである。この微分方程式を解くことで以下の式が得られ、$M_0, M_1, \cdots, M_t$

が不確実性を考慮した値（**式 4-9**）で得られる。

$$M_t = M_{t-1}\exp(\mu + \sigma\varepsilon_t) \tag{4-9}$$

ここで、μ：平均的変動（以下トレンド）、σ：平均的変動周りの変動（以下ボラティリティ、ε_t：標準正規分布から無作為に選び出した値（標準正規乱数）である。この式ではM_tが過大評価されてしまうので以下の**式 4-10**[21] を用いる。

$$M_t = M_0 \exp\left\{\left(\mu - \frac{\sigma^2}{2}\right)t + \sigma\varepsilon\right\} \tag{4-10}$$

トレンドとボラティリティは過去の傾向から算出される。バンコク首都圏の廃棄物量が2004～2009 年までわかっているので、その 6 年間の平均と分散を算出し、**図 4-29** のように 100 通りの廃棄物量推移を算出した。

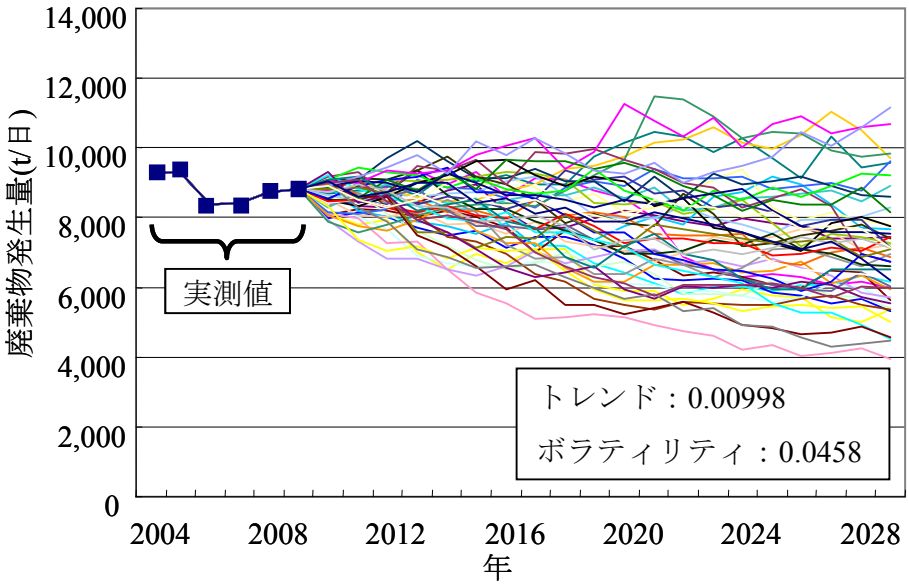

図 4-29　幾何ブラウン運動による廃棄物発生量推移

この 100 通りの推移において、ベースラインシナリオにおける評価期間 20 年の処理コストと環境コストを廃棄物発生量以外は条件を同じにして算出した。その結果を以下に示す。**図 4-30** は処理コストにおける頻度分布である。処理コストは約 1,000～1,250 億円のばらつきがあった。**図 4-31** は環境コストの頻度分布である。環境コストは約 3,850～4,200 億円のばらつきがあった。特に環境コストにおいては処理コストの約 3 倍の値が算出されているだけに、ばらつきが処理コストより当然大きくなる。どちらのコストにも廃棄物発生量は結果に大きな影響を与えることがわかる。

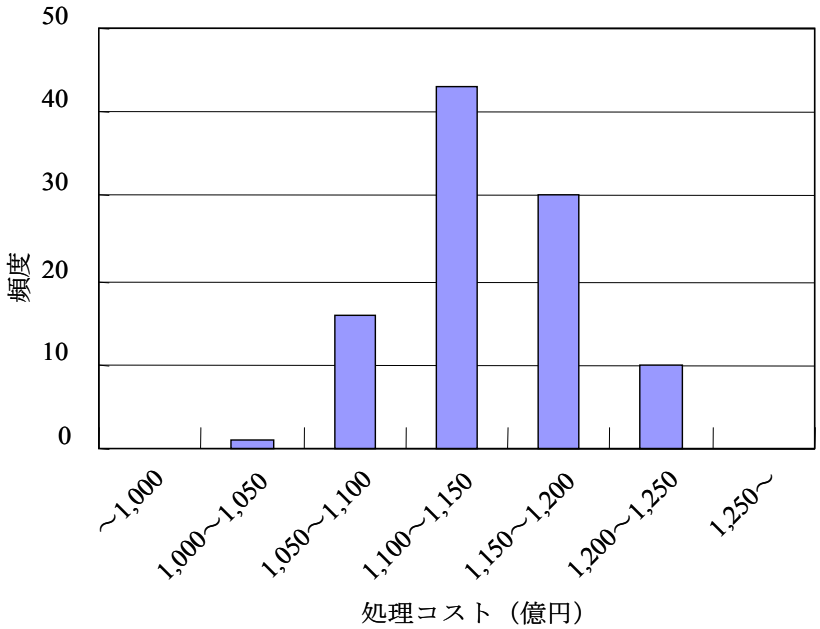

図 4-30　ベースラインシナリオにおける処理コスト頻度分布

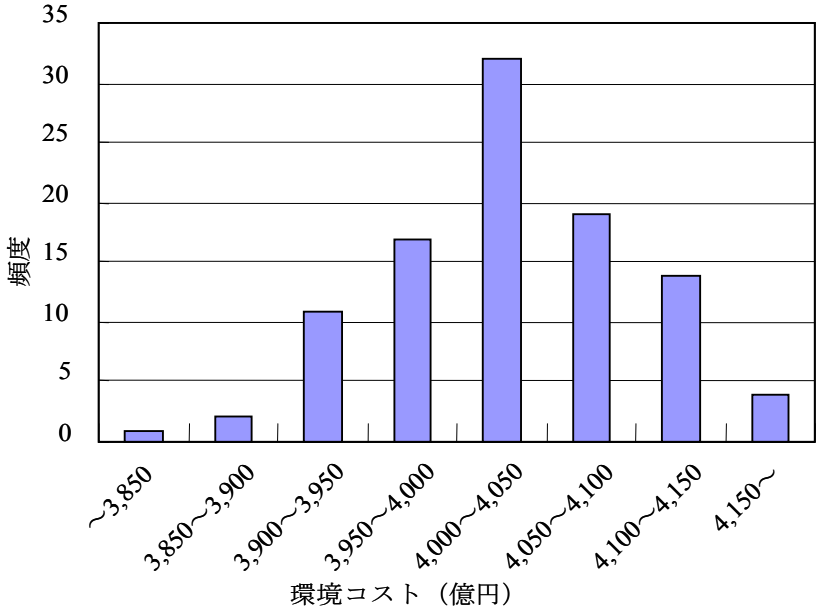

図 4-31　ベースラインシナリオにおける環境コストの頻度分布

次に、二酸化炭素貨幣価値原単位について感度分析を行う。ここでは 2.1 で述べた CDM 事業において取引される CER 価格の推移に注目した。2005～2009 年の間では CER は約 5～21 ユーロ [22)]で取引されている。そこで、ユーロ・円相場の変動も考えて幅広く 600～3,000 円/t-CO_2 で環境コストの感度分析を行った。その結果を**図 4-32** に示す。二酸化炭素排出量に二酸化炭素貨幣価値原単位を乗じて環境コストを算出しているので、環境コストが二酸化炭素貨幣価値原単位に比例して増加する。環境コストが最も高いベースラインシナリオ

では約 830～4,140 億円と廃棄物発生量による感度分析より大きなばらつきが見られる。つまり、二酸化炭素貨幣価値原単位は廃棄物発生量以上に環境コストに影響を与えることがわかる。

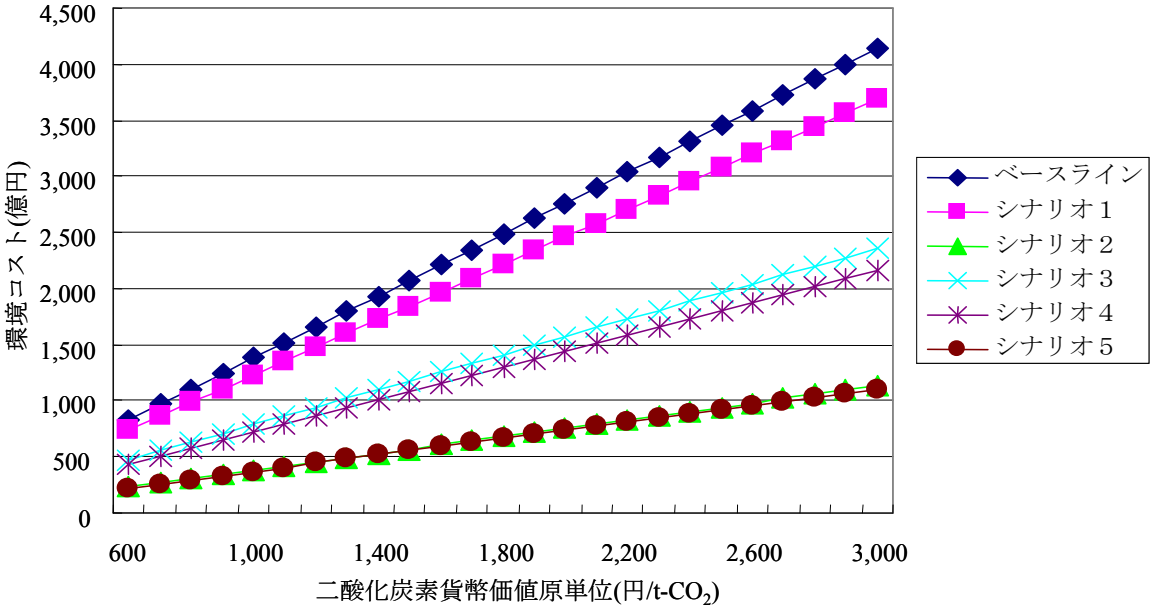

図 4-32　CER 取引価格に基づくバンコク首都圏における環境コスト感度分析

最後に評価期間について感度分析を行う。**図 4-27** から年の経過につれて、イニシャルコストが高いシナリオ２・５が、ランニングコストおよび新規最終処分場の建設費などが高額なその他のシナリオよりトータルコストが低くなる可能性が表されているので、評価期間が非常に重要であると考えた。これまでの評価では、全ての施設が耐用年数 20 年と設定している。しかし、一般的に社会基盤構造物の耐用年数は 40～50 年であるとも言われている。そこで耐用年数を 50 年まで延ばした場合の感度分析を行った。評価期間 20 年以降は一人当たりの廃棄物量を 1kg に設定し、人口は対数回帰式をそのまま用いた。廃棄物組成は評価期間 20 年と同様で変化しないとした。その結果を**図 4-33** に示す。50 年で最もトータルコストが低いシナリオはシナリオ２で約 4,200 億円、また最も高いシナリオはシナリオ１であった。シナリオ２・５は環境コストが低く抑えられるのでトータルコストが少ない。つまり、評価期間が長ければ有利であることがわかる。シナリオ１はリサイクル可能な物資が少なく、メタンガス排出源のうち多くを占める食物くずを減らせないので環境コストもベースラインとほぼ変わらず、施設の建設費や整備補修費が必要なためベースラインよりトータルコストが高くなった。評価期間 20 年で最もトータルコストが低かったシナリオ３は 2034 年（19 年目）でシナリオ２が抜いて最も低くなっている。つまり、評価期間も結果に大きく影響を与えることがわかる。

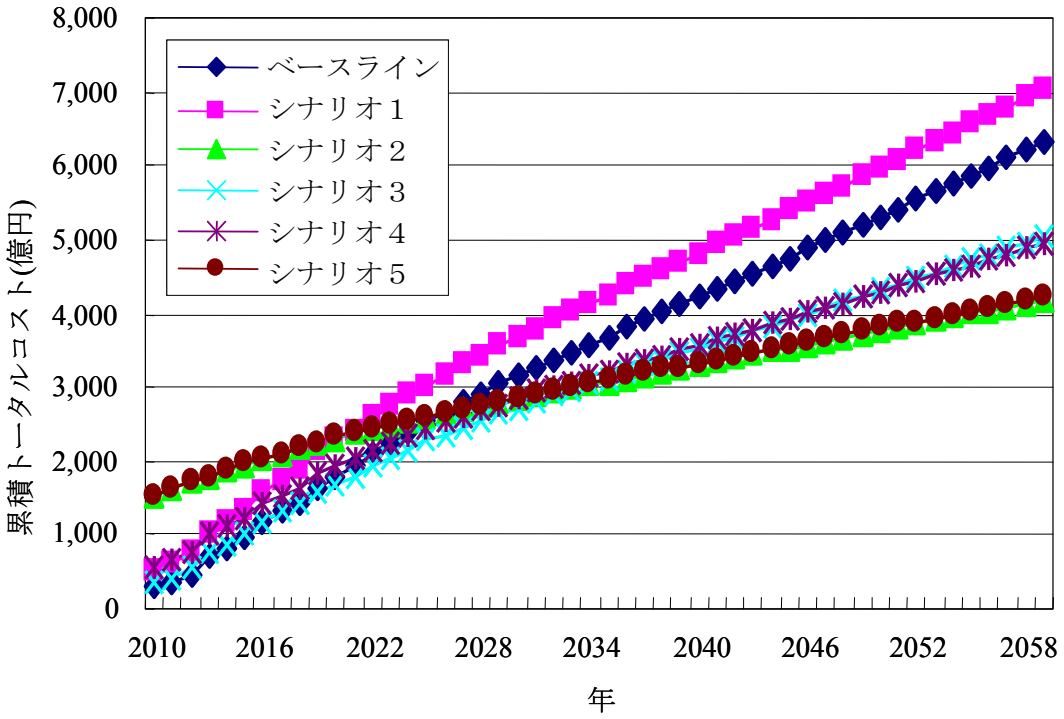

図 4-33　評価期間に基づくバンコク首都圏における累積トータルコスト感度分析

4.3　ウドーンターニーへの適用

4.3.1　ウドーンターニーの概要

ウドーンターニーはタイ北東部の県（**図 4-34**）である。人口約 150 万人、面積約 11,700 km^2、廃棄物排出量約 980 (t/日)の中規模の県である。廃棄物処理はバンコク首都圏と同様に中間処理が行われていない。廃棄物回収率はバンコク首都圏より低く 80%程度である。

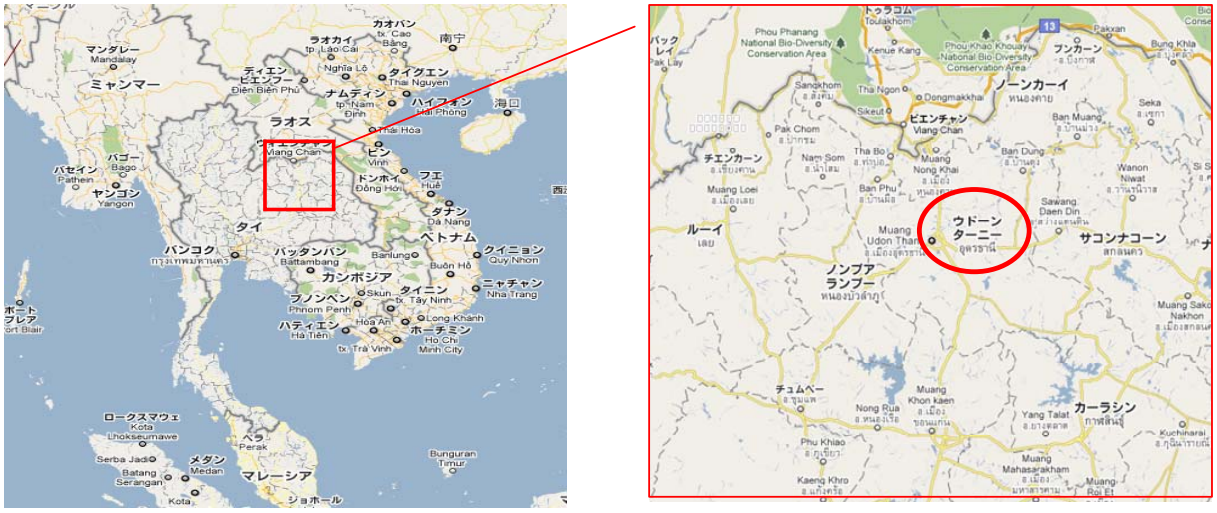

図 4-34　ウドーンターニー県

Pollution Control Department に示されているウドーンターニーの廃棄物組成を**図 4-35** に

示す。他地域に比べ紙類と植物類、およびガラス類の割合が多く、食物類の割合が少ない。そのため食物由来のメタン排出量が少ない。

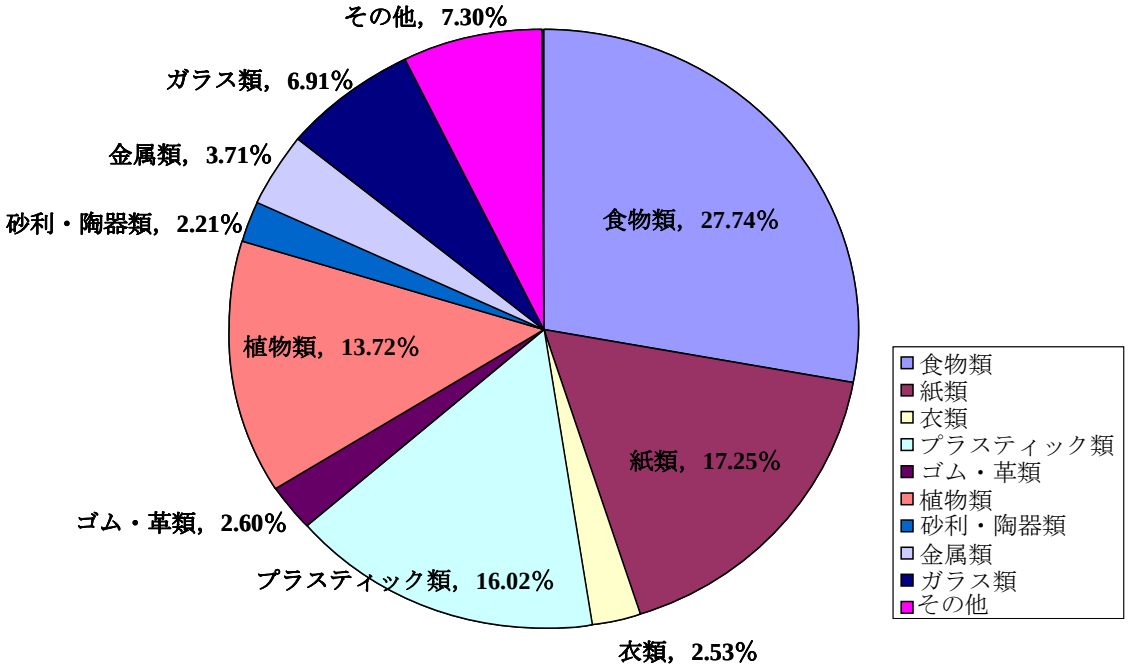

図 4-35　ウドーンターニーにおける廃棄物組成

4.3.2　ウドーンターニーにおける回帰分析による廃棄物発生量予測

バンコク首都圏における廃棄物排出量は一人当たりの廃棄物排出量に人口を乗じて算出した。しかし、2010 年時点でウドーンターニーにおける一人当たりの廃棄物発生量は約 0.64kg であり、バンコク首都圏の半分以下であるので一人当たりの廃棄物排出量の目標を定める必要がないためバンコク首都圏のような一人当たりの廃棄物排出量の目標がない。そこで、ウドーンターニーにおいては Pollution Control Department, Ministry of Natural Resources and Environment と National Statistical Office, Thailand に示されている 2005～2008 年の実測値の対数回帰（バンコク首都圏と同様に廃棄物排出量が安定するように設定する）を行った。**式 4-11** に使用した式を示す。さらに**図 4-36** に回帰分析で算出したウドーンターニー廃棄物量推移を示す。評価期間 20 年間における廃棄物発生量の合計はバンコク首都圏の約 0.17 倍であった。

$$Q = 746.62 + 104.31\ln(X - 2004) \qquad (4\text{-}11)$$

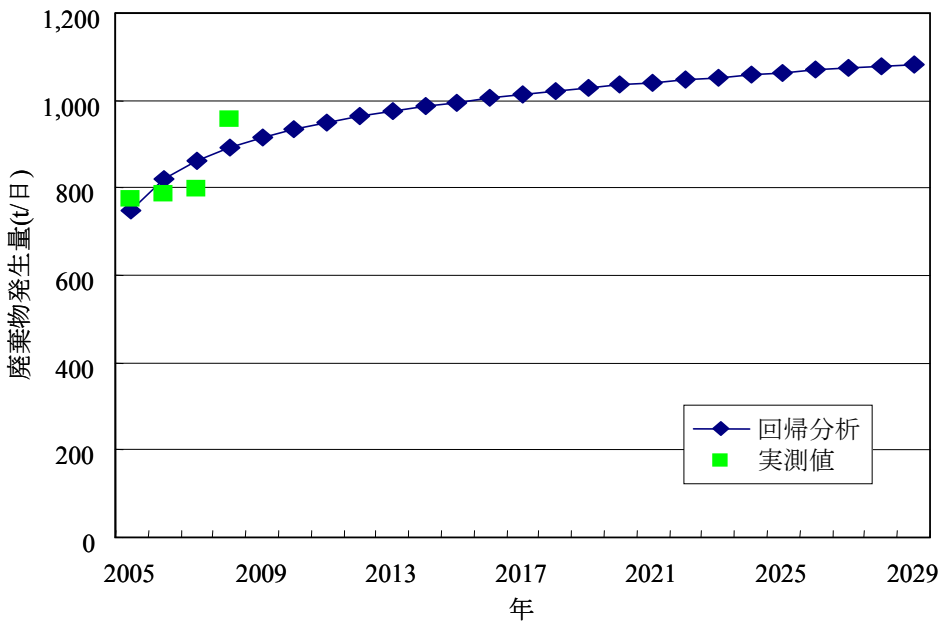

図 4-36　ウドーンターニーにおける廃棄物発生量

4.3.3　ウドーンターニーにおける廃棄物処理コストの検討

4.3.1、4.3.2 で挙げた値をインプットとして廃棄物処理コストの推移をシナリオごとに算出する。なお人口は 2010 年における値を 20 年間そのまま使用している。

収集過程における処理コストは全シナリオ一定であり、その値はイニシャルコスト約 4 億円、ランニングコストが 20 年間で約 70 億円であった。

中間処理過程におけるそれぞれのシナリオにおける処理コスト推移を**図 4-37** に示す。バンコク首都圏と同様に 20 年間の処理コストのうちかなりの部分がイニシャルコストで占められていることがわかる。しかし、廃棄物発生量がバンコク首都圏と比べて少ないので施設規模が小さい。よって、イニシャルコストはそれぞれバンコク首都圏の約 1/4 であった。

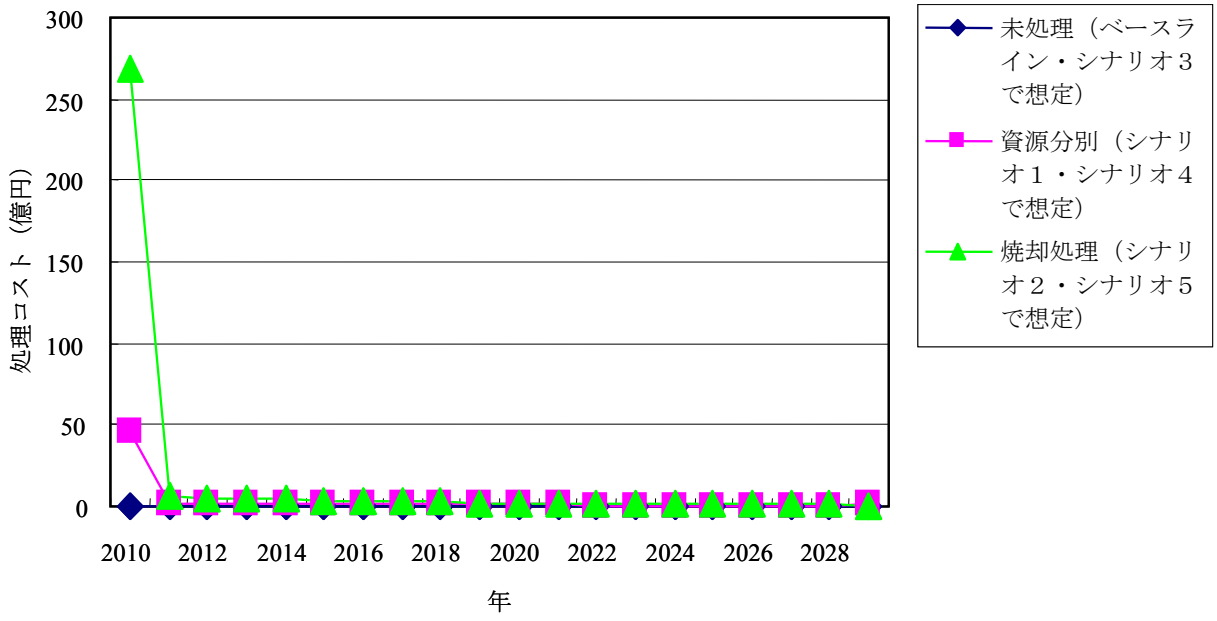

図 4-37　ウドーンターニーの中間処理過程における処理コスト推移

運搬過程における処理コストの推移を中間処理ごとに**図 4-38** に示す。運搬過程における処理コストは運搬する廃棄物量もしくは廃棄物の残渣量（**図 4-39**）によって決定される。廃棄物運搬量は 20 年間でバンコク首都圏の約 0.14 倍であり、それに伴い処理コストも約 0.14 倍と小さくなる。

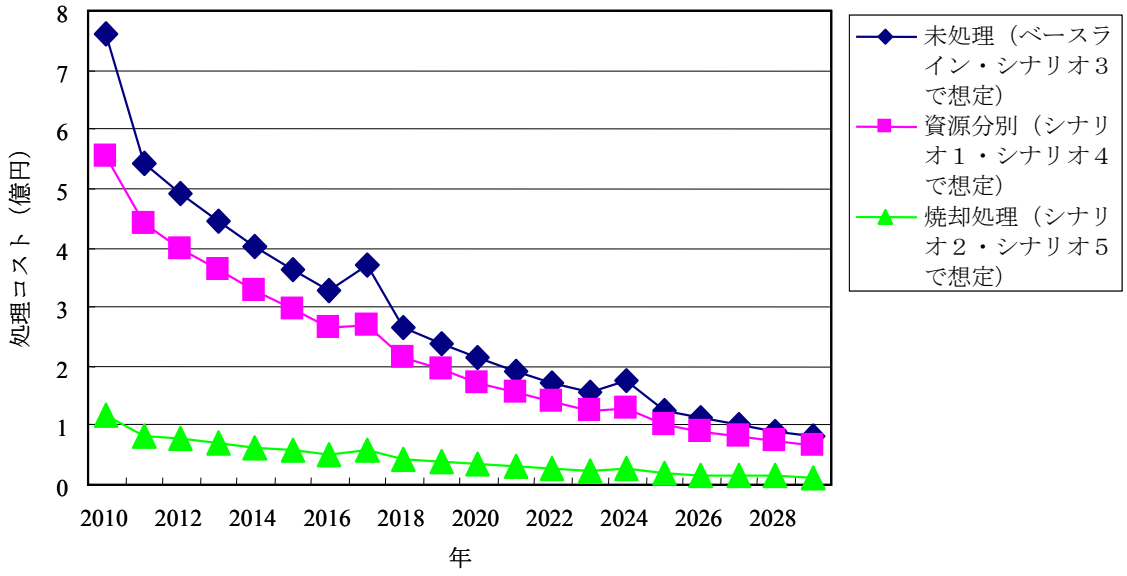

図 4-38　ウドーンターニーの運搬過程における処理コスト推移

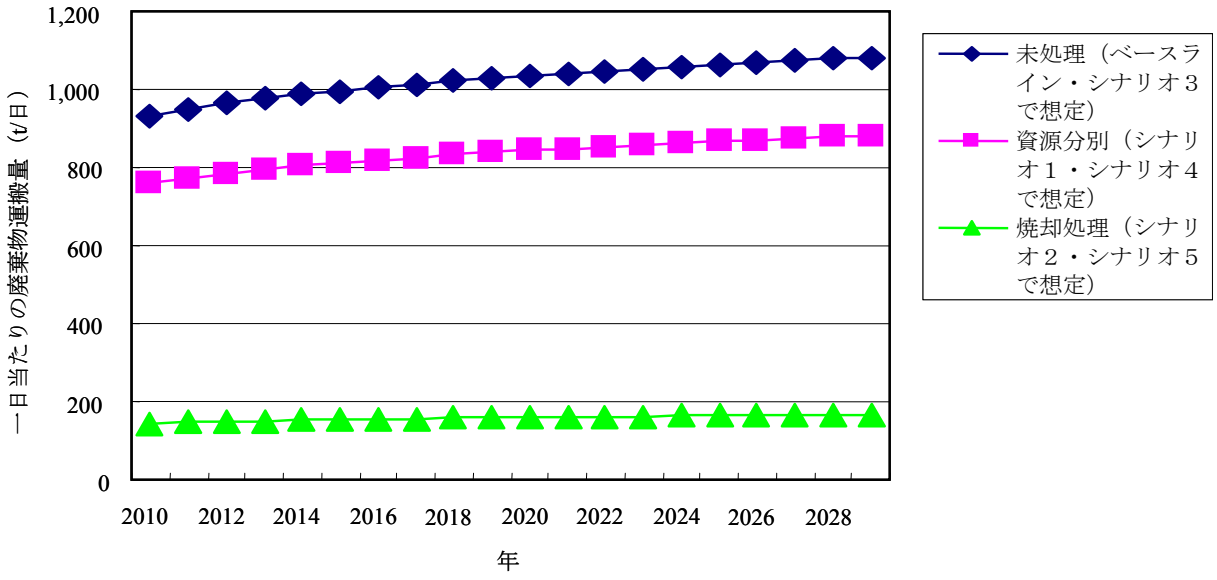

図 4-39　ウドーンターニーにおける廃棄物運搬量推移

最終処分過程における処理コスト推移を各シナリオごとに**図 4-40** に示す。全てのシナリオでほぼ同様の値が算出された。これはどのシナリオも最終処分場が 20 年で飽和しなかったため、処理コストの中で最も大きなウエイトを占めている最終処分場の建設費がシナリオ間で違いがほとんど生じなかったからである。

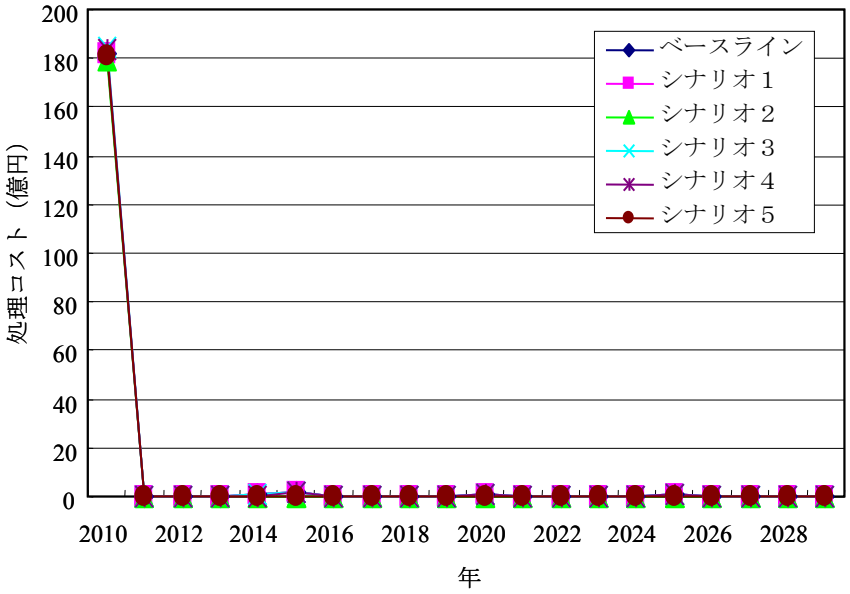

図 4-40　ウドーンターニーの最終処分過程における処理コスト推移

最後にこれまで算出した値を各シナリオごとに合計したものの推移（**図 4-41**）と累積（**図 4-42**）、および過程別の内訳（**図 4-43**）を以下に示す。処理コストは 20 年間で約 240～500 億円であった。処理コストはバンコク首都圏と違いシナリオ３が最も少なかった。バンコ

ク首都圏ではメタン利用施設の建設費用などの処理コストが売電収入による便益を上回っていたが、ウドーンターニーでは売電収入による便益がメタン利用施設の建設費用などの処理コストを上回っているためである。処理コスト推移から処理コストはバンコク首都圏ほどシナリオ間で差はなかったことがわかる。その理由としては中間処理過程で施設規模が小さいことと、新規最終処分場の建設費用が必要ないからである。同様の理由から処理コストの累積からイニシャルコストからほとんど変わらないことがわかる。処理コストの内訳からバンコク首都圏ではあまり多くを占めていなかった最終処分過程がどのシナリオでも多くの部分を占めるようになったことがわかる。

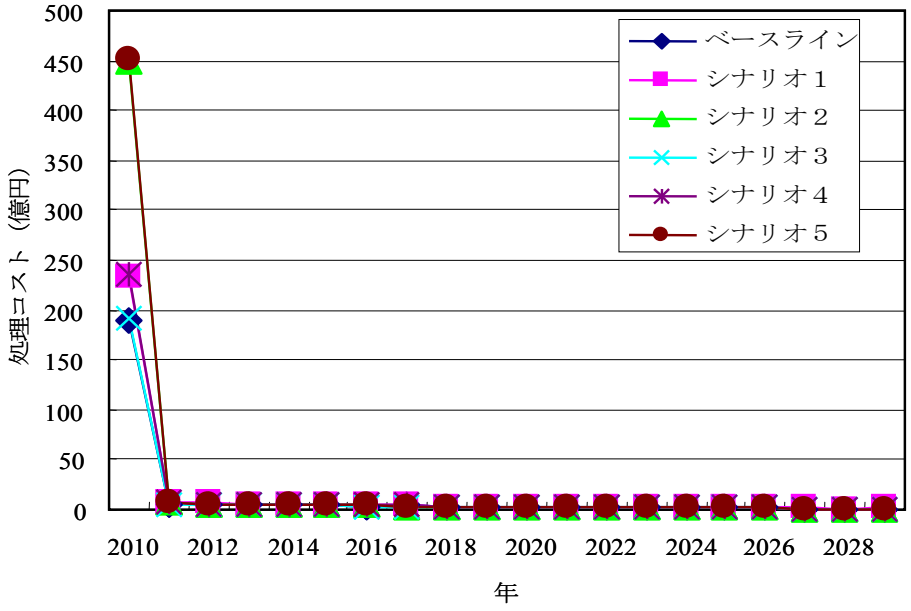

図 4-41　ウドーンターニーにおける処理コスト推移

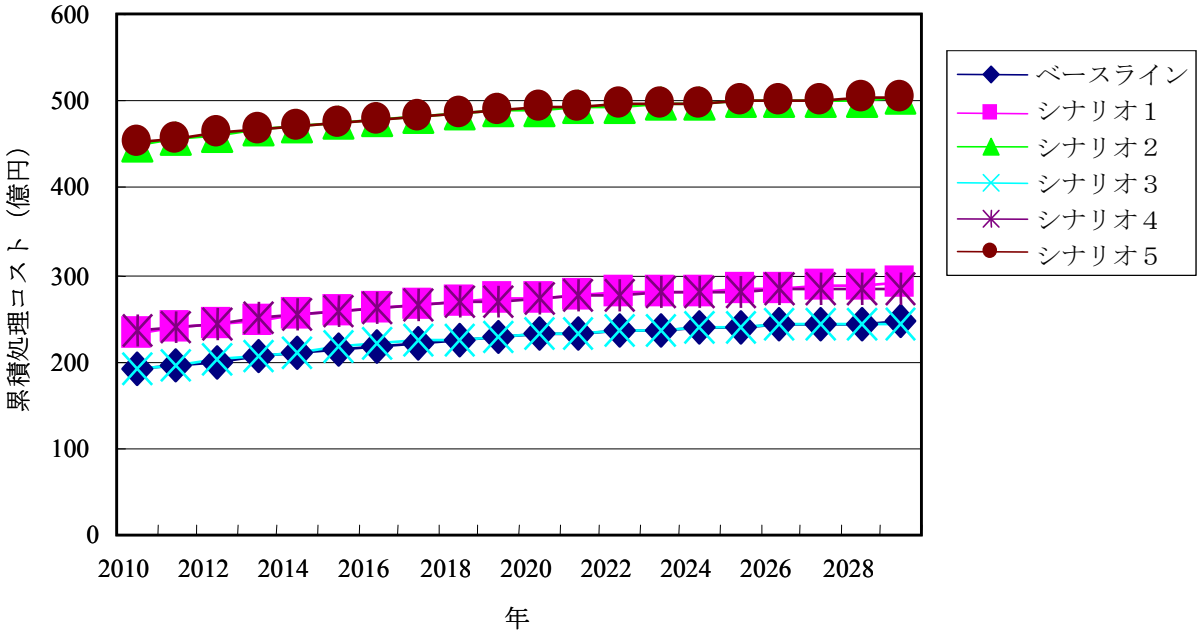

図 4-42　ウドーンターニーにおける累積処理コスト

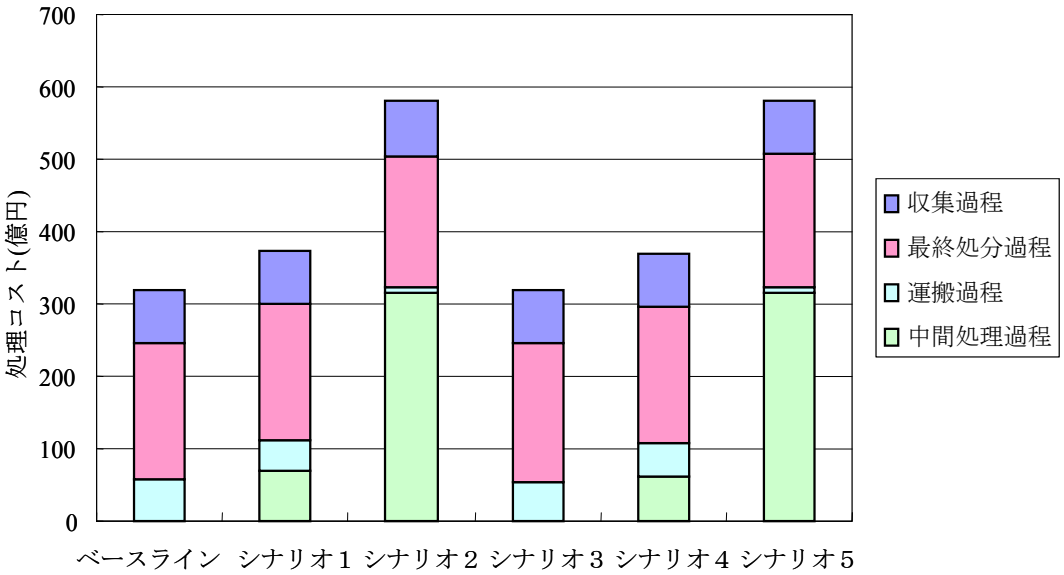

図 4-43　ウドーンターニーにおける過程別処理コスト内訳（20 年分）

4.3.4　ウドーンターニーにおける廃棄物処理に伴う環境負荷の検討

4.3.3 節と同じく 4.3.1、4.3.2 で挙げた値をインプットとして二酸化炭素排出量とメタン排出量の推移をシナリオごとに算出する。

収集過程における二酸化炭素排出量は全シナリオ一定であり、その値は 20 年間で 9,400 万 t であった。

中間処理過程における二酸化炭素排出量の推移を**図 4-44** に示す。廃棄物排出量が少しずつ増加していくので、それに応じて二酸化炭素排出量が増加していく。焼却処理施設における二酸化炭素排出量は 20 年でバンコク首都圏の約 1/10 であった。

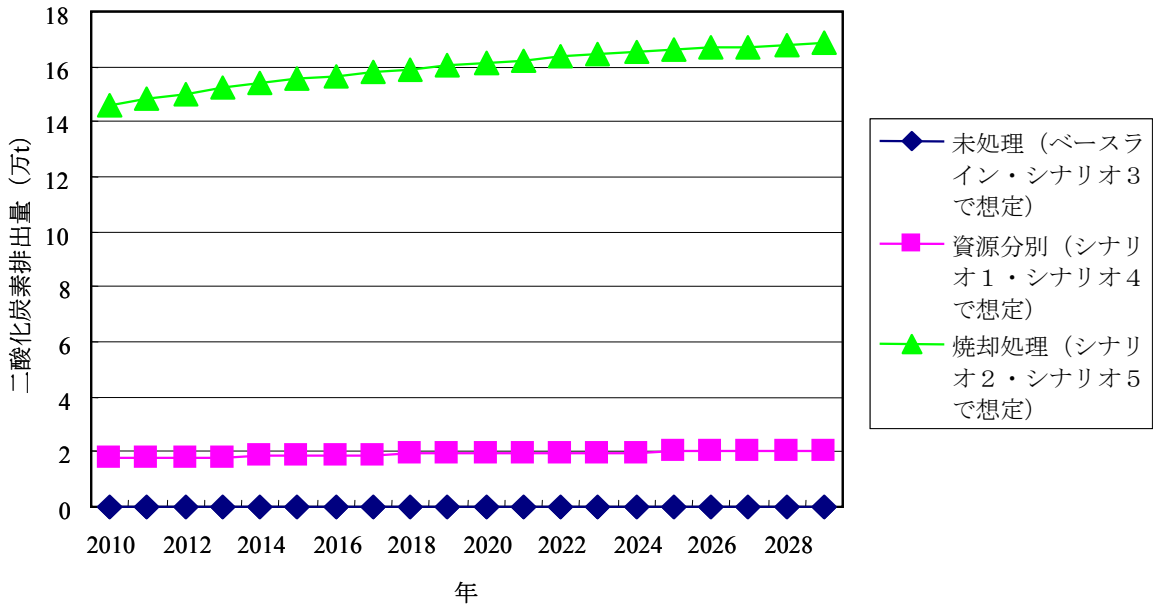

図 4-44　ウドーンターニーの中間処理過程における二酸化炭素排出量推移

運搬過程における二酸化炭素排出量の推移を**図 4-45** に示す。二酸化炭素排出量は処理コストと同様に廃棄物量もしくは廃棄物の残渣量によって決定される。廃棄物発生量が増加しているのでそれに伴い二酸化炭素排出量が増加していく。

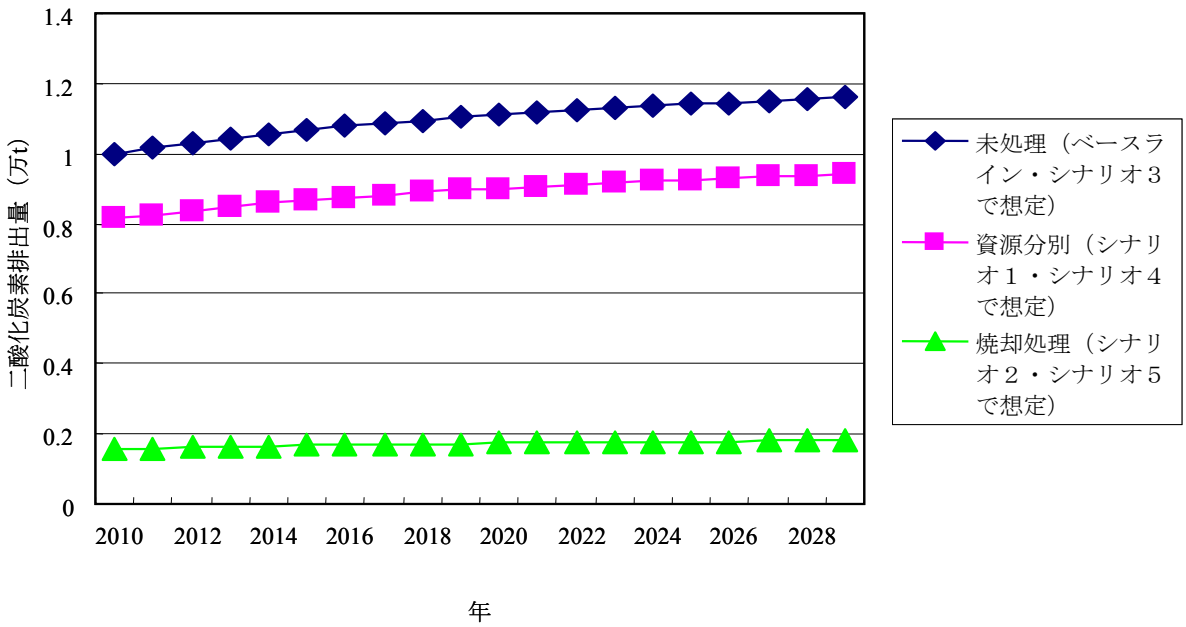

図 4-45　ウドーンターニーの運搬過程における二酸化炭素排出量推移

最終処分場におけるメタン排出量の推移を以下に示す。**図 4-46** はベースラインにおける各年に埋め立てられた廃棄物からのメタン排出量推移を 5 年分示したものである。バンコク首都圏よりも食物くずの組成が少ないので、相対的に紙類・衣類の半減期である 7 年目の山が大きくなっている。**図 4-47** はメタン発生量を各年ごとにも合計したものである。廃棄物排出量が年の経過とともに増加するのでメタン排出量も増加している。7 年目から排出されるメタン排出量が、それ以前よりも大きく増加している。

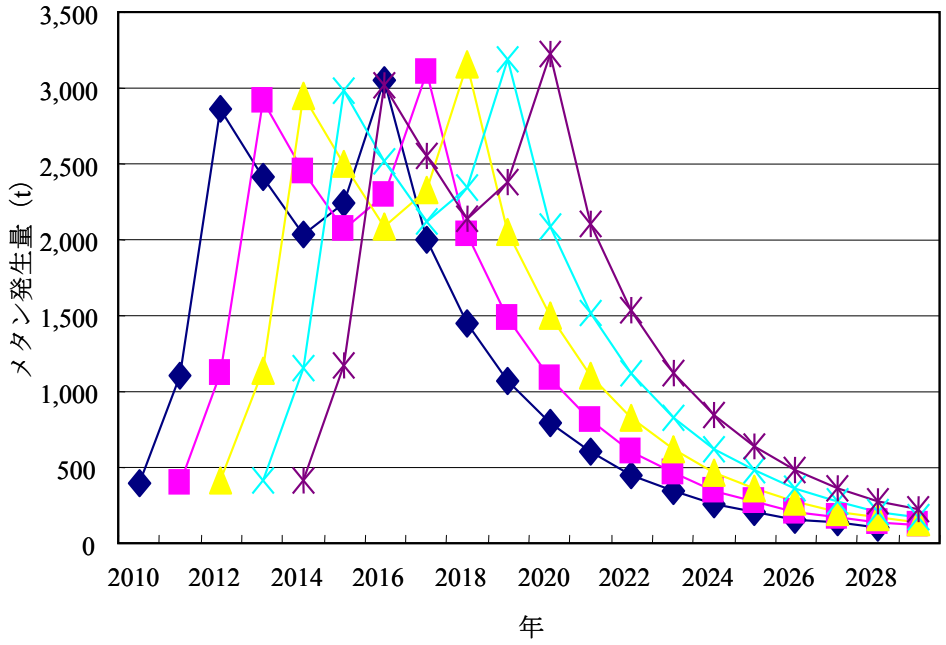

図 4-46　ウドーンターニーにおける各年メタン排出量推移（5 年分）

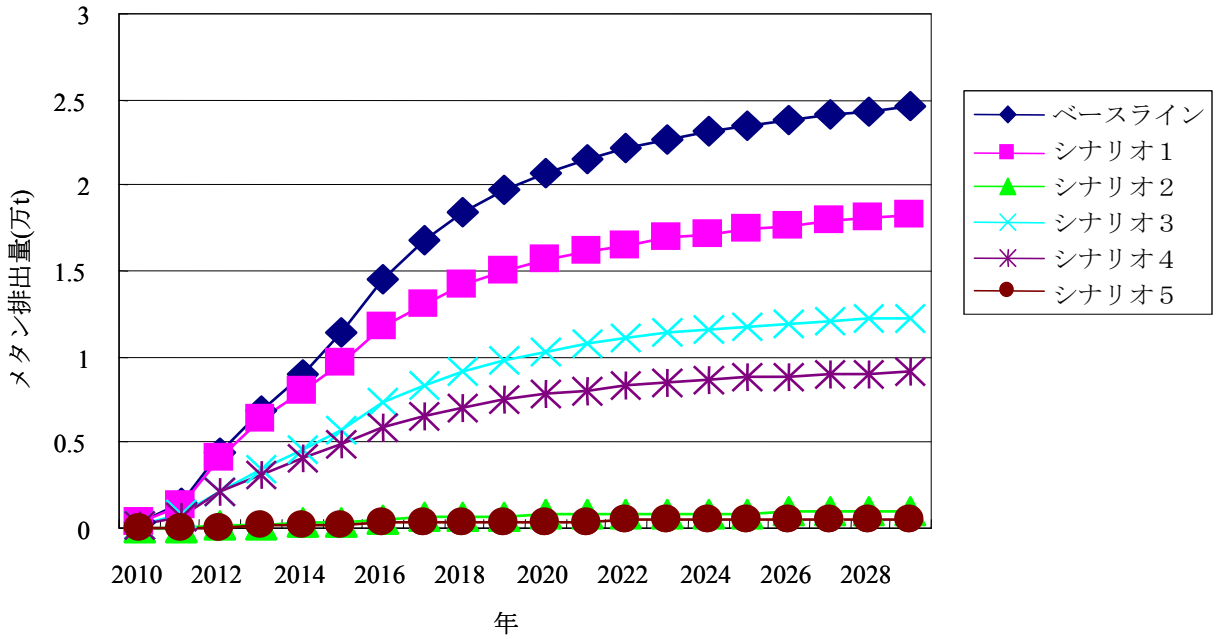

図 4-47　ウドーンターニーにおけるメタン排出量推移

メタン排出量を含めた各シナリオの等価二酸化炭素排出量推移を**図 4-48** に示す。バンコク首都圏と同様に最終処分場から排出される等価二酸化炭素排出量は、ベースラインにおいて 20 年間で約 150 万 t と他のシナリオと比較しても大量に放出されているが、それ以上にメタン排出量の影響が大きいことが**図 4-47** で示したメタン排出量推移に類似していることからわかる。つまり、ウドーンターニーにおける廃棄物処理システムの中で最終処分場からのメタン排出量はバンコク首都圏と同様、地球温暖化に大きな影響を与えている

ということである。

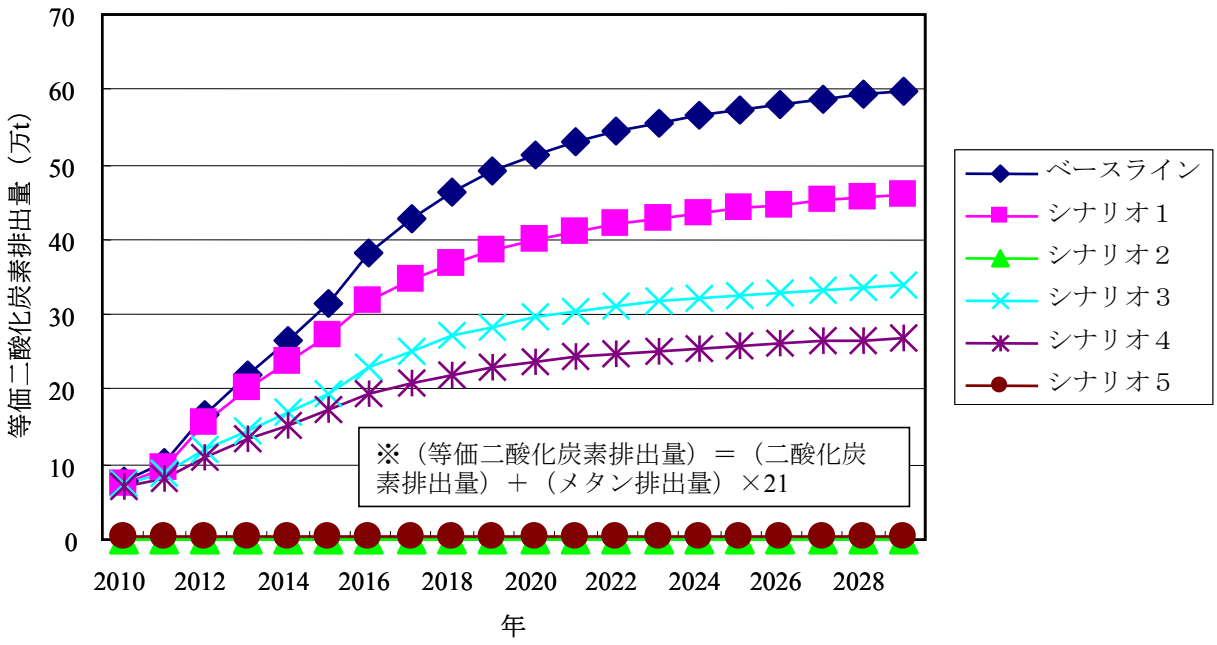

図 4-48　ウドーンターニーの最終処分場における等価二酸化炭素排出量推移

これまで算出してきたメタンの二酸化炭素変換排出量を含めたシナリオごとの全過程の等価二酸化炭素排出量累積値推移（**図 4-49**）とその累積（**図 4-50**）を以下に示す。

二酸化炭素排出量の推移からバンコク首都圏と同様にベースラインシナリオが最も二酸化炭素排出量が多く、シナリオ５が最も二酸化炭素排出量が少なかった。最終処分量が増加し続けるのでバンコク首都圏のように途中で二酸化炭素排出量が減少することはなかった。また、二酸化炭素排出量の累積が、どのシナリオも二酸化炭素排出量が増加し続けるのでバンコク首都圏より増加率が高い。

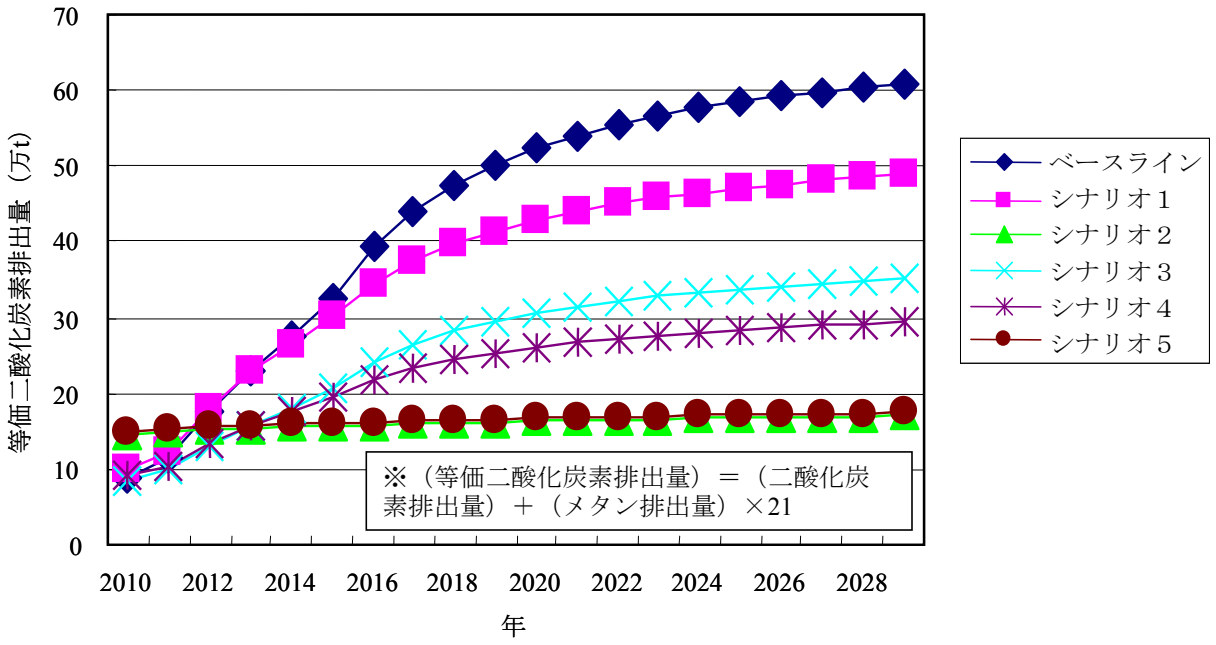

図 4-49　ウドーンターニーにおける等価二酸化炭素排出量推移

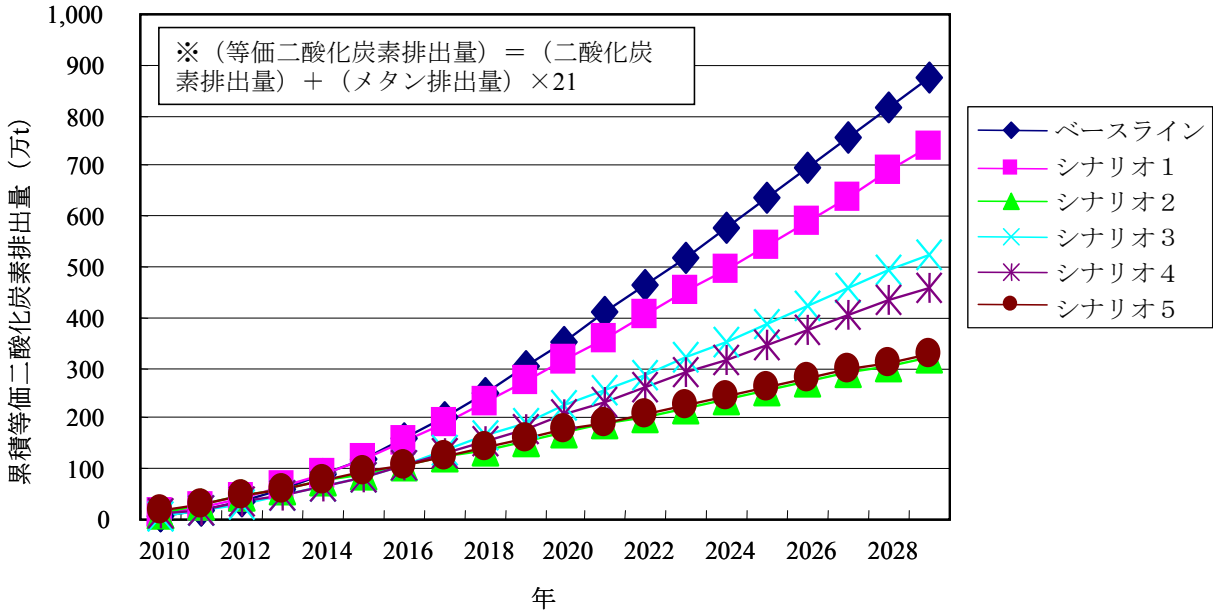

図 4-50　ウドーンターニーにおける累積等価二酸化炭素排出量

二酸化炭素排出量における二酸化炭素･メタンの内訳（**図 4-51**）と各過程の内訳（**図 4-52**）を以下に示す。バンコク首都圏と同様にシナリオ２・５における二酸化炭素排出量の大部分は中間処理過程におけるものであること、その他のシナリオにおける二酸化炭素排出量の大部分は最終処分場における二酸化炭素排出もしくはメタン排出によるものであるということがわかる。つまり、ウドーンターニーにおいても二酸化炭素排出量は廃棄物に含まれる炭素原子による要因が大部分を占めており、処理を施すために必要な電力および燃料

からの二酸化炭素排出量は多くないということである。しかし、廃棄物発生量はバンコク首都圏より少ないために二酸化炭素排出量はベースラインで約 1/10 であった。

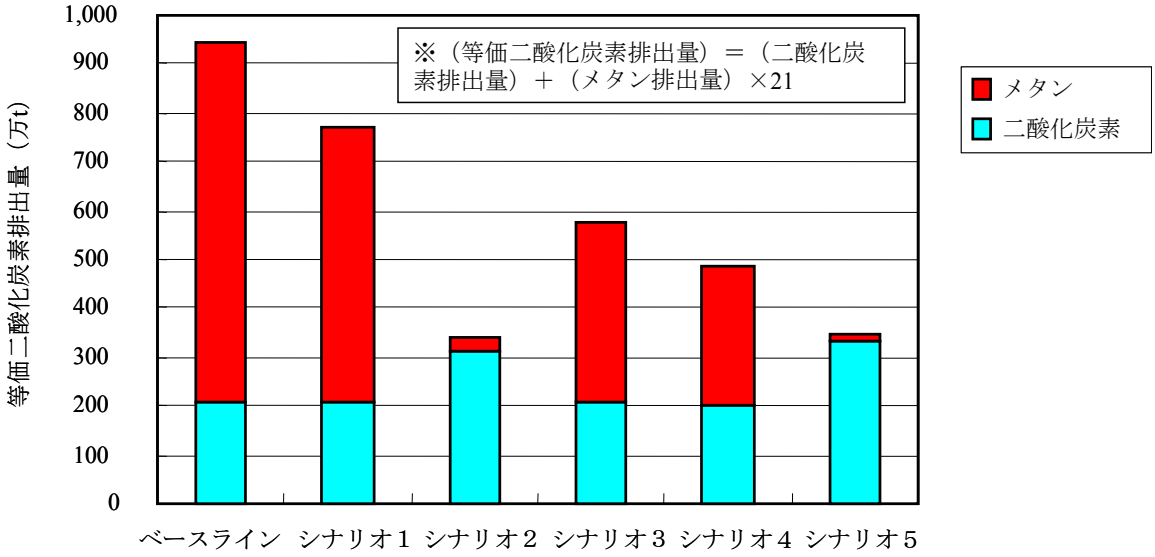

図 4-51　ウドーンターニーにおける等価二酸化炭素排出量内訳（20 年分）

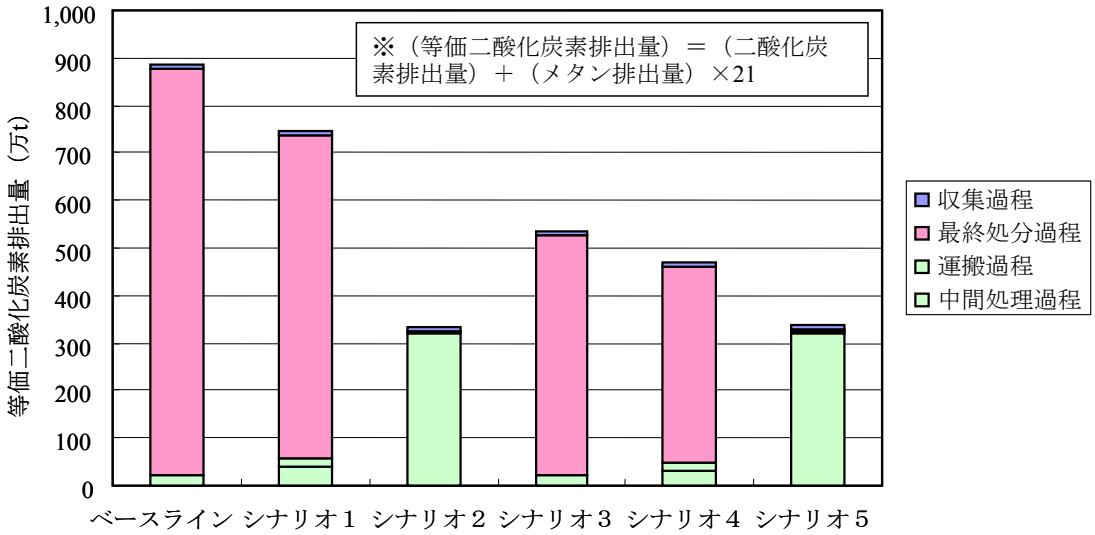

図 4-52　ウドーンターニーにおける二酸化炭素排出量過程別内訳（20 年分）

ウドーンターニーにおける環境コストの推移（**図 4-53**）と累積（**図 4-54**）を以下に示す。環境コストは約 98～270 億円であった。バンコク首都圏よりは環境コストは低く抑えられていた。処理コストは約 240～500 億円であり、環境コストはその約半分に抑えられている。

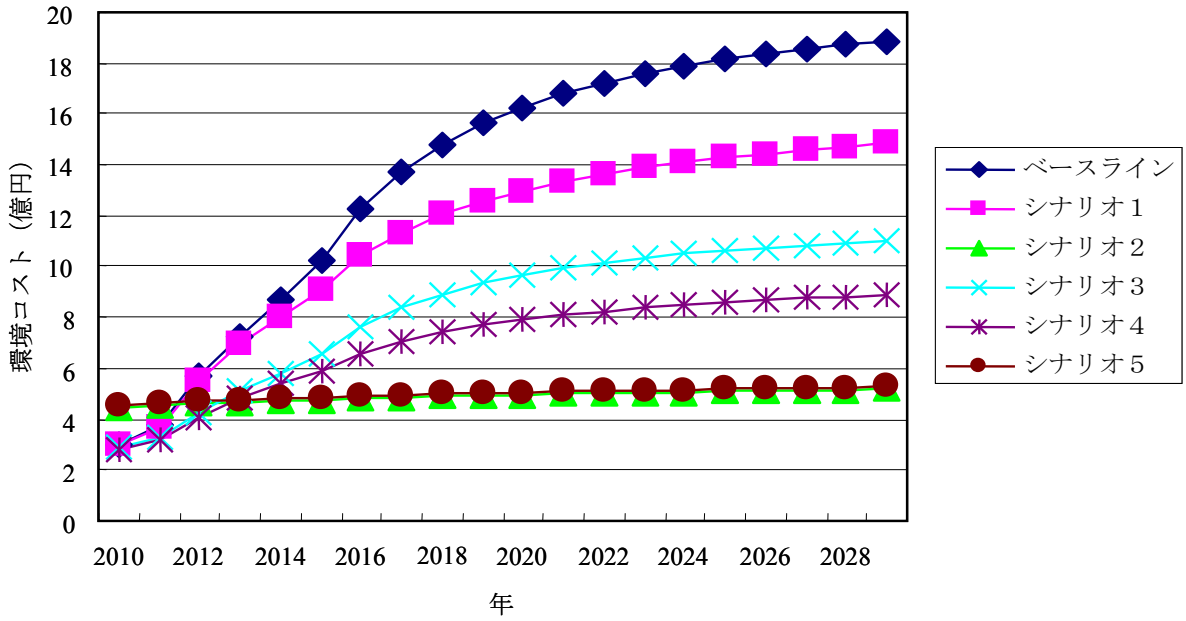

図 4-53　ウドーンターニーにおける環境コスト推移

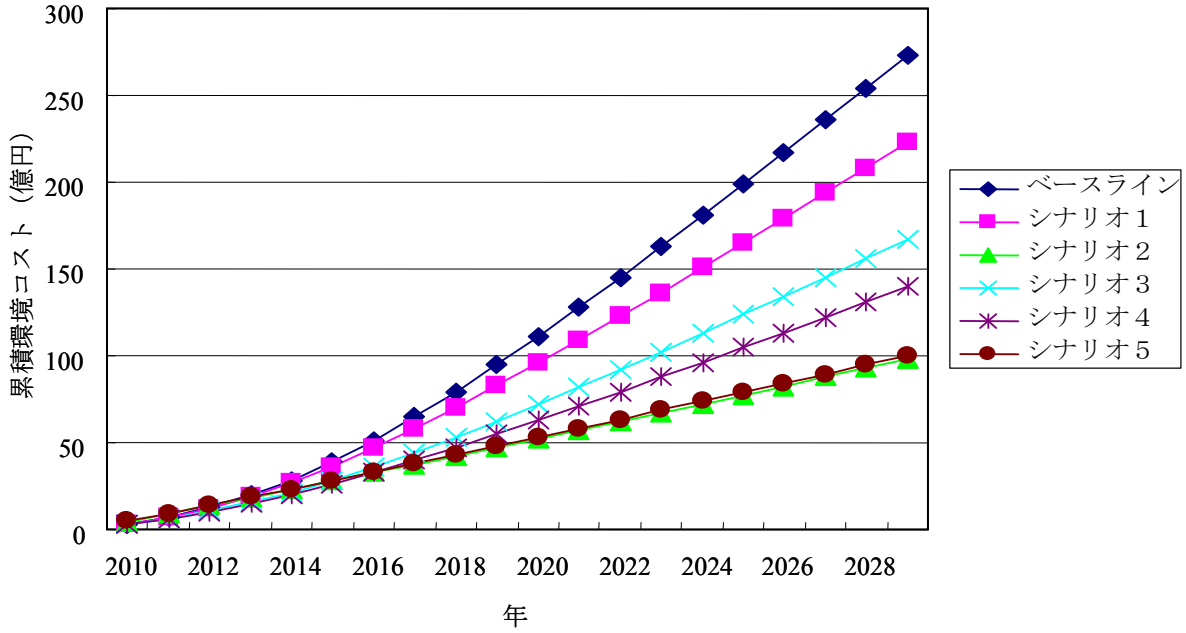

図 4-54　ウドーンターニーにおける累積環境コスト

4.3.5　環境影響を含めたシナリオ間比較

4.3.3、4.3.4 項で算出した処理コストおよび環境コストを用いてトータルコストを算出する。**図 4-55** はトータルコストの推移である。トータルコストが最も低いのはシナリオ３でバンコク首都圏と同様であったが、最も高いのはシナリオ５であった。バンコク首都圏と比べて廃棄物排出量が少ないために環境コストが処理コストに対して少なかったのがベースラインのトータルコストが低い原因である。**図 4-56** は累積トータルコストである。バンコク首都圏と同様にイニシャルコストが高く、それ以降は新たな最終処分場の建設が

ないということもあり、ずっと低かったことがわかる。

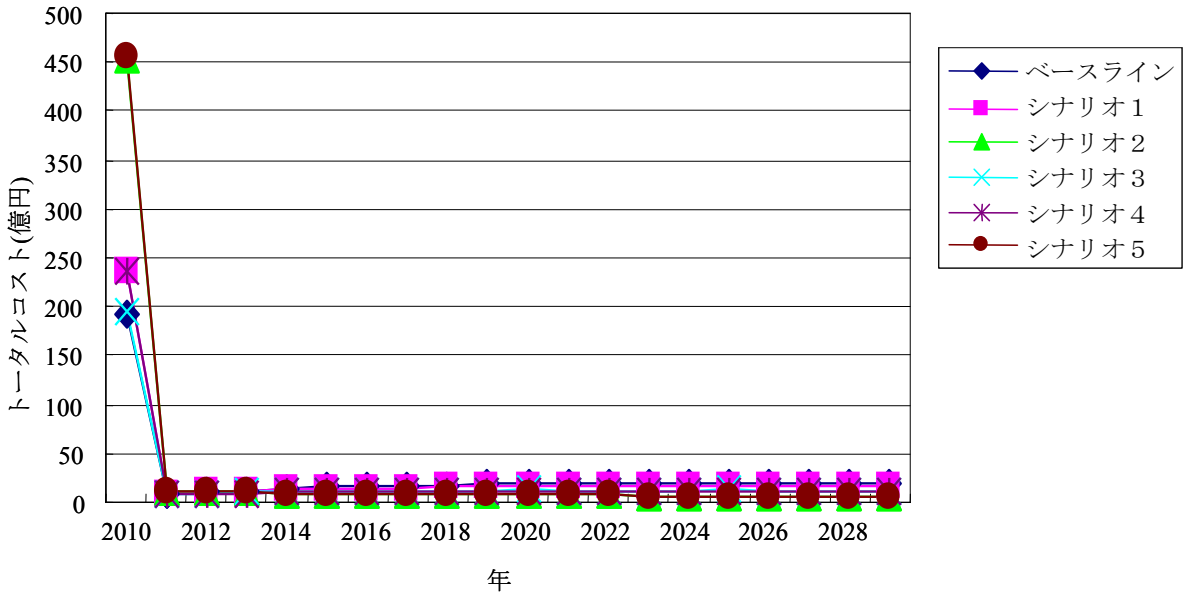

図 4-55　ウドーンターニーにおけるトータルコスト推移

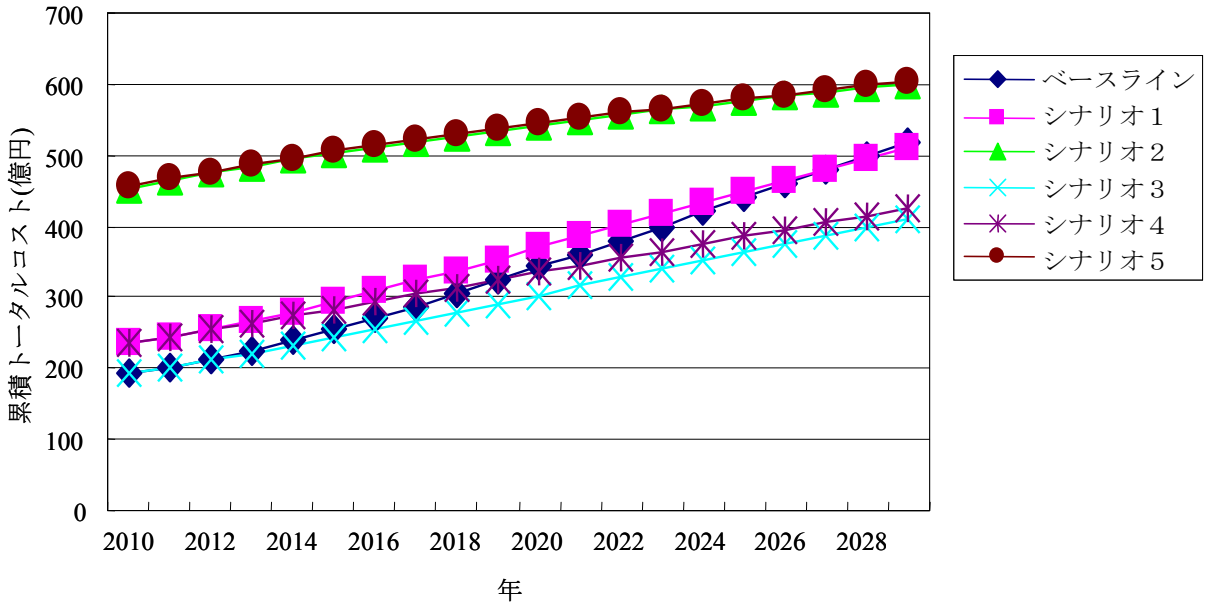

図 4-56　ウドーンターニーにおける累積トータルコスト

図 4-57 は各シナリオの環境および処理コストの内訳を表している。ここからも廃棄物排出量が少ないために環境コストが処理コストに対して低いことがわかる。ウドーンターニーにおいてもシナリオ３は費用・環境に対して非常に効率が良いことがわかる。

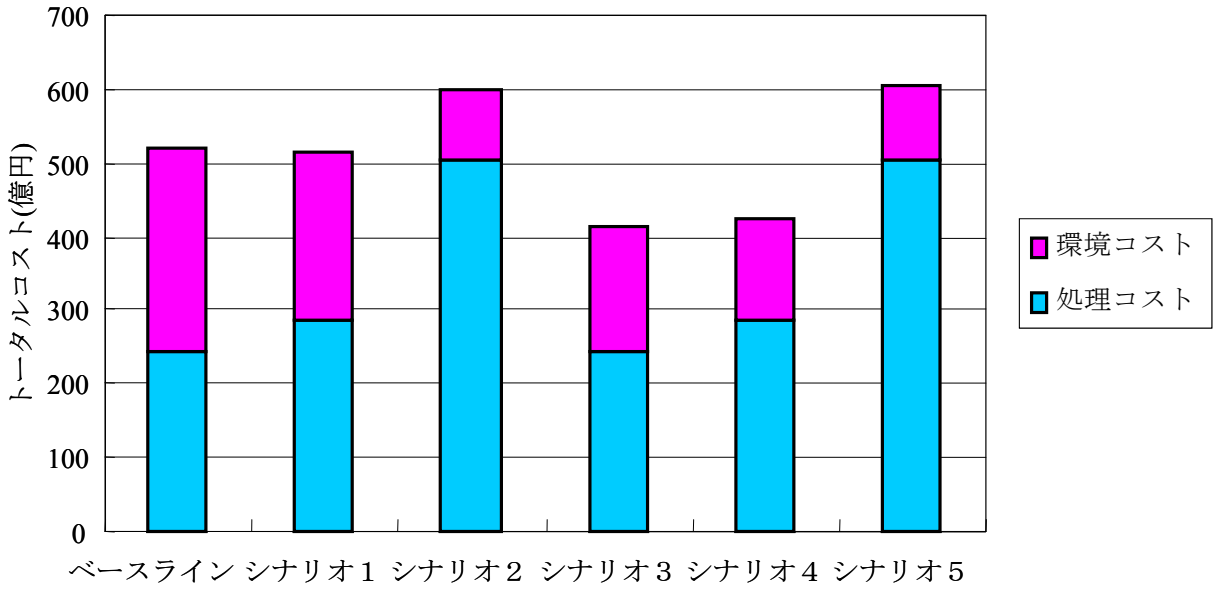

図 4-57　ウドーンターニーコストにおける内訳（20 年分）

ウドーンターニーにおける環境影響指標を環境コスト差および処理コスト差とともに**表 4-10** に示す。

シナリオ３における処理コスト差が少ないために環境効率がかなり高くなっていることがわかる。

表 4-10　ウドーンターニーにおける環境影響指標

	ベースラインとの環境コスト差	ベースラインとの処理コスト差	環境影響指標
シナリオ１	4,031,536,275	5,472,163,442	0.736735355
シナリオ２	15,998,960,009	26,037,344,596	0.614462045
シナリオ３	10,116,111,202	60,787,290	166.4181971
シナリオ４	12,001,067,840	5,083,152,720	2.36094969
シナリオ５	15,798,858,769	26,128,881,609	0.604651167

以上、本研究でシナリオ間比較を行った結果、トータルコストおよび環境影響指標の両方でウドーンターニーでもシナリオ３が最も環境効率がよいということがわかった。

4.4　サムットソンクラームへの適用

4.4.1　サムットソンクラームの概要

サムットソンクラームは中央部の県であり、バンコク首都圏の西方約 72km（**図 4-58**）にある。人口約 20 万人、面積約 420km^2、廃棄物排出量約 109 (t/日)の小規模の県である。

廃棄物処理はバンコク首都圏と同様に中間処理が行われていない。廃棄物回収率はバンコク首都圏より低く 80%程度である。

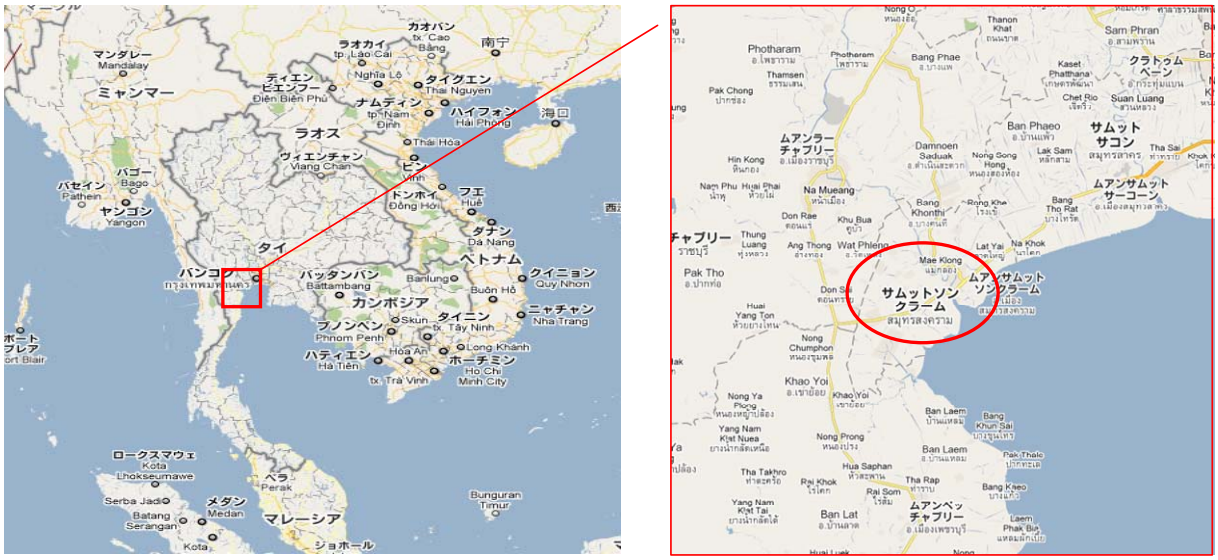

図 4-58　サムットソンクラーム県

Pollution Control Department に示されているサムットソンクラームの廃棄物組成を**図 4-59** に示す。他地域に比べ食物類とゴム・革類の割合が多く、食物由来のメタン排出量が多い。

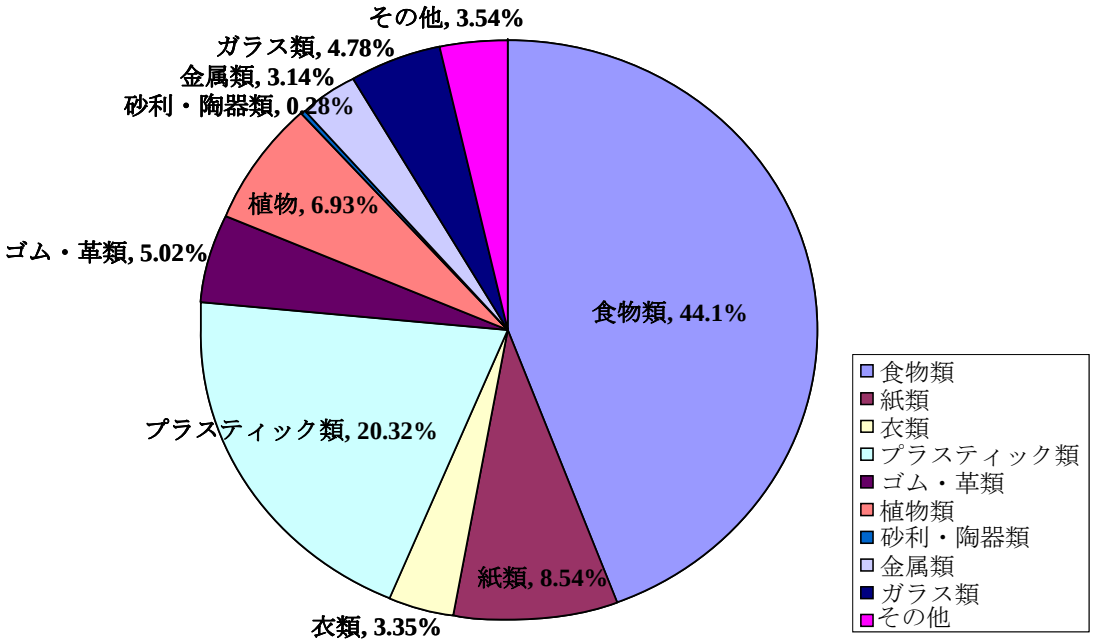

図 4-59　サムットソンクラームにおける廃棄物組成

4.4.2　回帰分析によるサムットソンクラーム廃棄物発生量予測

サムットソンクラームにおける廃棄物発生量をウドーンターニーと同様に Pollution Control Department, Ministry of Natural Resources and Environment と National Statistical Office, Thailand に示されている 2005～2007 年の実測値の対数回帰（バンコク首都圏・ウドーンターニーと同様に廃棄物排出量が安定するように設定する）を行った。**式 4-12** に対数回帰式を示す。回帰分析で算出したウドーンターニー廃棄物量推移を**図 4-60** に示す。サムットソンクラームにおける廃棄物発生量は評価期間 20 年でバンコク首都圏の約 1/400 であった。

$$Q = 126.56 + 8.5528\ln(X - 2004) \qquad (4\text{-}12)$$

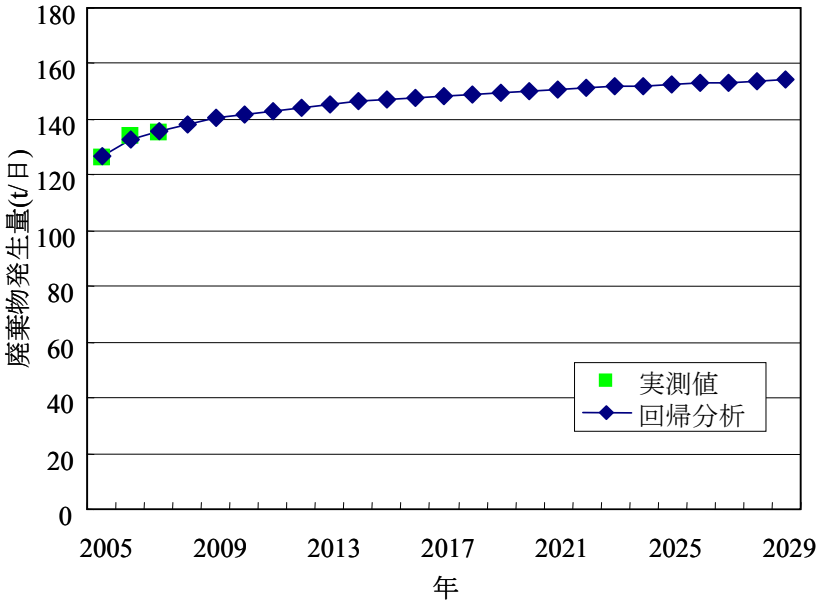

図 4-60　サムットソンクラームにおける廃棄物発生量

4.4.3　サムットソンクラームにおける廃棄物処理コストの検討

4.4.1、4.4.2 項で挙げた値をインプットとして廃棄物処理コストの推移をシナリオごとに算出する。なお人口は 2010 年における値を 20 年間そのまま使用している。

収集過程における処理コストは全シナリオ一定であり、その値はイニシャルコスト約 5,000 万円、ランニングコストが 20 年間で約 8 億円であった。

中間処理過程におけるそれぞれのシナリオにおける処理コスト推移を**図 4-61** に示す。他の都市と同様に 20 年間の処理コストのうち多くの部分がイニシャルコストで占められていることがわかる。しかし、廃棄物発生量がバンコク首都圏と比べて少ないので施設規模が小さい。よって、イニシャルコストはそれぞれバンコク首都圏の約 1/20 であった。

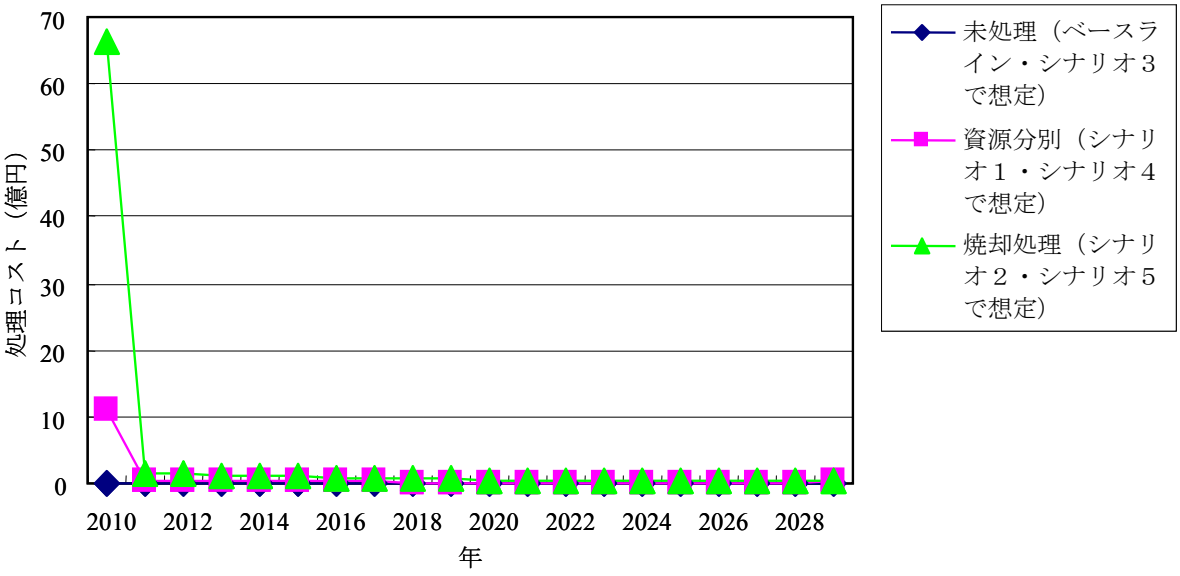

図 4-61　サムットソンクラームの中間処理過程における処理コスト推移

運搬過程における処理コストの推移を中間処理ごとに**図 4-62** に示す。運搬過程における処理コストは廃棄物量もしくは廃棄物の残渣量（**図 4-63**）によって決まる。廃棄物運搬量は 20 年間でバンコク首都圏の約 0.14 倍であり、それに伴い処理コストも約 0.14 倍と小さくなる。

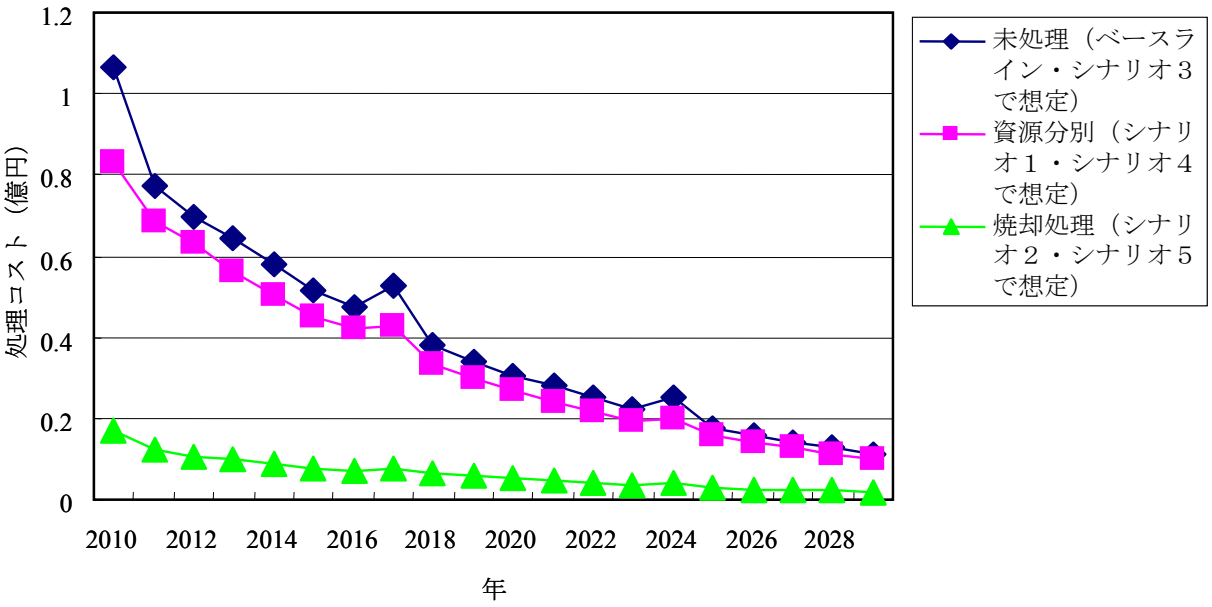

図 4-62　サムットソンクラームの運搬過程における処理コスト推移

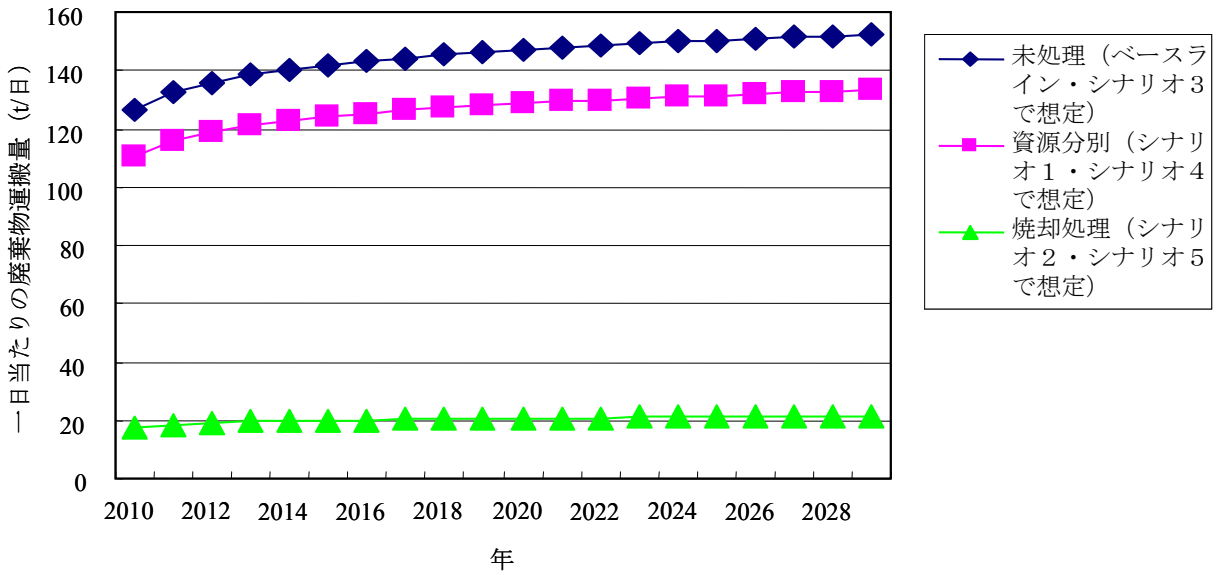

図 4-63　サムットソンクラームにおける廃棄物運搬量推移

最終処分過程における処理コスト推移を各シナリオごとに**図 4-64** に示す。ウドーンターニーと同様に全てのシナリオでほぼ同様の値が算出された。これは、どのシナリオも最終処分場が 20 年で飽和しなかったため、処理コストの中で最も大きなウエイトを占めている最終処分場の建設費がシナリオ間で違いがほとんど生じなかったからである。

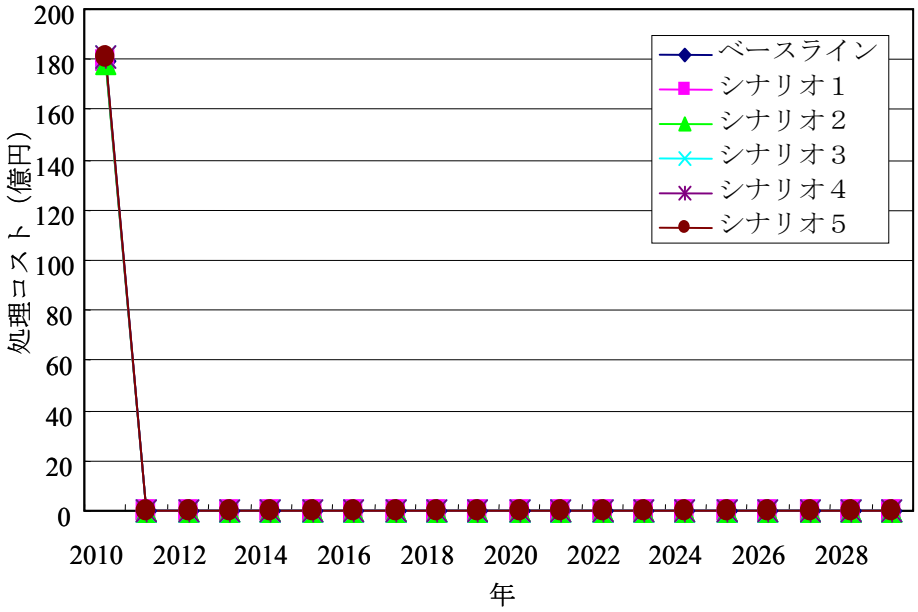

図 4-64　サムットソンクラームの最終処分過程における処理コスト推移

最後にこれまで算出した値を各シナリオごとに合計したものの推移（**図 4-65**）と累積（**図 4-66**）、および過程別の内訳（**図 4-67**）を以下に示す。処理コストは約 190～260 億円でバンコク首都圏ほどシナリオ間に違いはなかった。バンコク首都圏と同様にベースラインシ

ナリオが最も少なかった。処理コスト推移から処理コストはバンコク首都圏ほどシナリオ間で差はなかったことがわかる。その理由としては中間処理過程で施設規模が小さいことと、新規最終処分場の建設費用が必要ないからである。同様の理由で処理コストの累積からイニシャルコストからほとんど変わらない。処理コストの過程別の内訳からウドーンターニーと同様に最終処分過程がどのシナリオでも多くの部分を占めることがわかる。

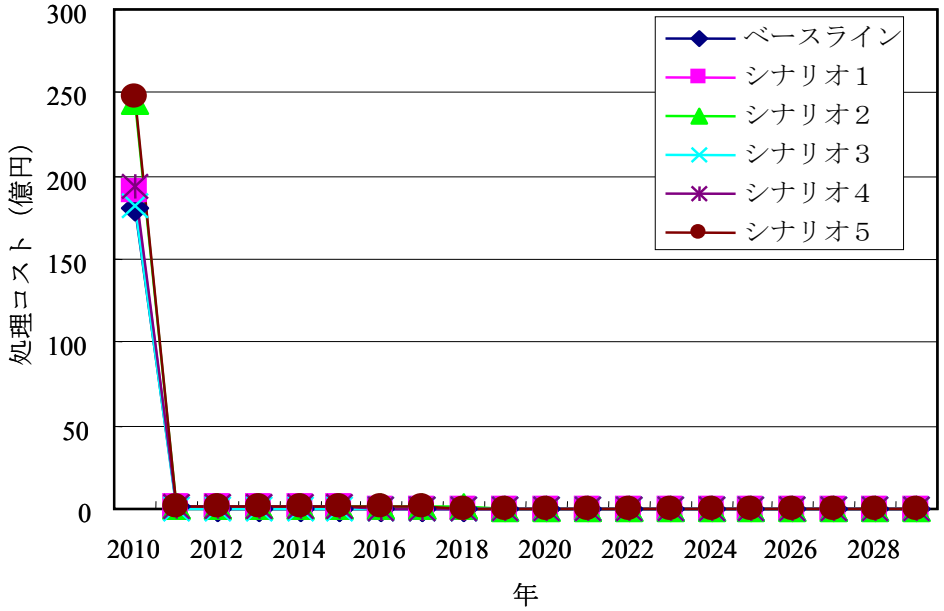

図 4-65　サムットソンクラームにおける処理コスト推移

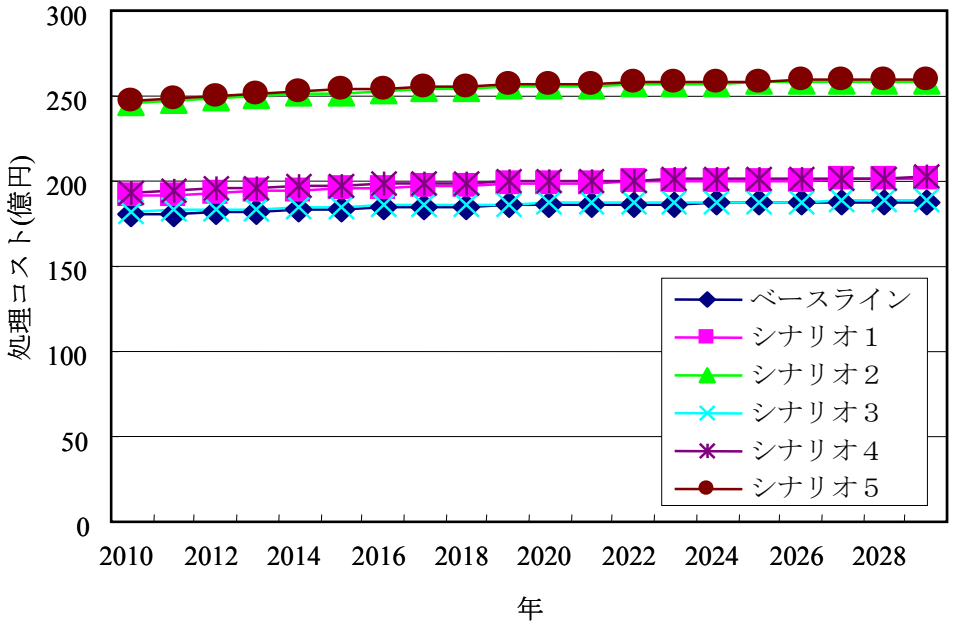

図 4-66　サムットソンクラームにおける累積処理コスト

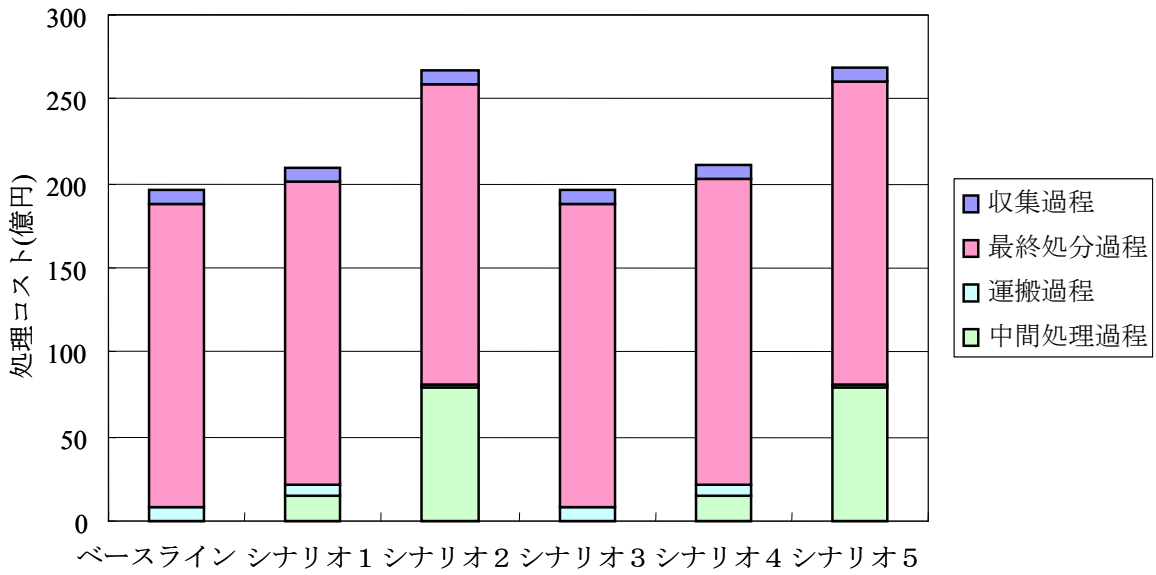

図 4-67　サムットソンクラームにおける過程別処理コスト内訳（20 年分）

4.4.4　サムットソンクラームにおける廃棄物処理に伴う環境負荷の検討

4.4.3 節と同じく 4.4.1、4.4.2 で挙げた値をインプットとして二酸化炭素排出量とメタン排出量の推移をシナリオごとに算出する。

収集過程における二酸化炭素排出量は全シナリオ一定であり、その値は 20 年間で約 9,500t であった。

中間処理過程における二酸化炭素排出量の推移を**図 4-68** に示す。廃棄物排出量が少しずつ増加していくので、それに応じて二酸化炭素排出量が増加していく。焼却処理施設における二酸化炭素排出量は 20 年でバンコク首都圏の約 1/58 と少なかった。

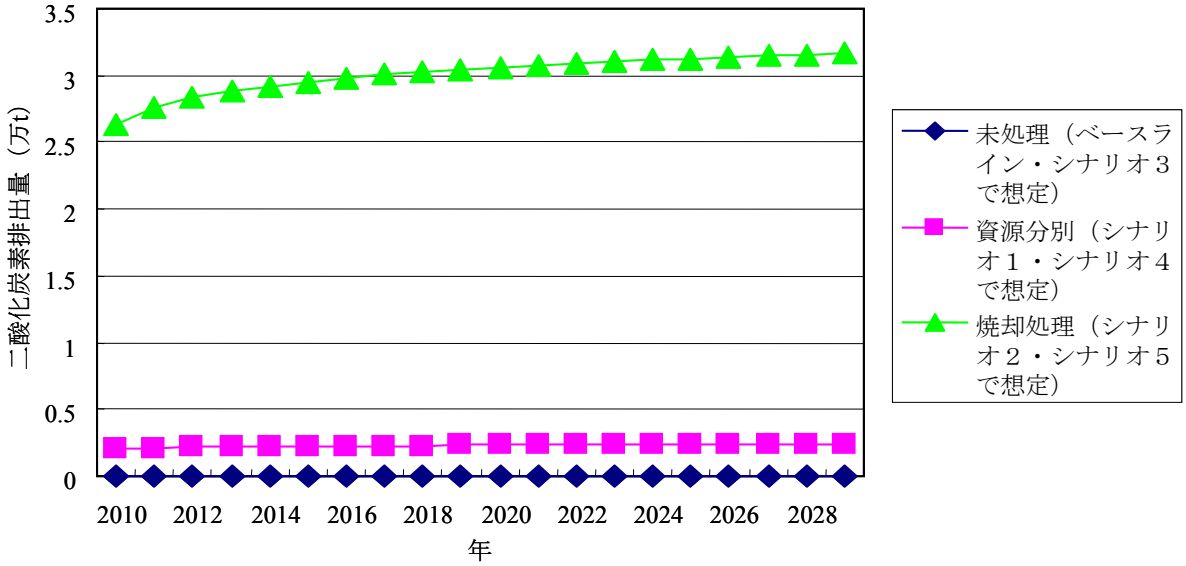

図 4-68　サムットソンクラームの中間処理過程における二酸化炭素排出量推移

運搬過程における二酸化炭素排出量の推移を**図 4-69** に示す。数年ごとに少しずつ二酸化炭素排出量が増加しているが、これは廃棄物増加のために必要な運搬車両が増加しているからである。この増加率はかなり小さいために中規模以上の都市の図には表れなかった。

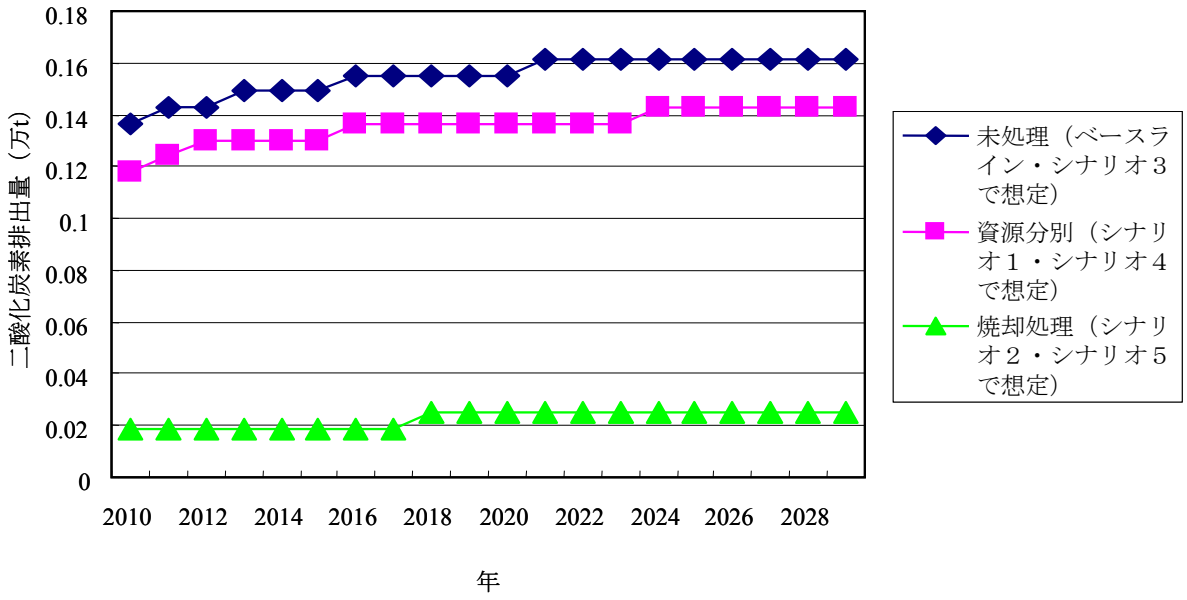

図 4-69　ウドーンターニーにおける運搬過程二酸化炭素排出量推移

最終処分場におけるメタン排出量の推移を以下に示す。**図 4-70** はベースラインにおける各年に埋め立てられた廃棄物からのメタン排出量推移を 5 年分示したものである。バンコク首都圏と同様に食物くずの組成の割合が多いので、7 年目の山が小さくなっている。**図 4-71** はメタン発生量を各年ごとにも合計したものである。廃棄物排出量が年の経過とともに増加するのでメタン排出量も増加している。

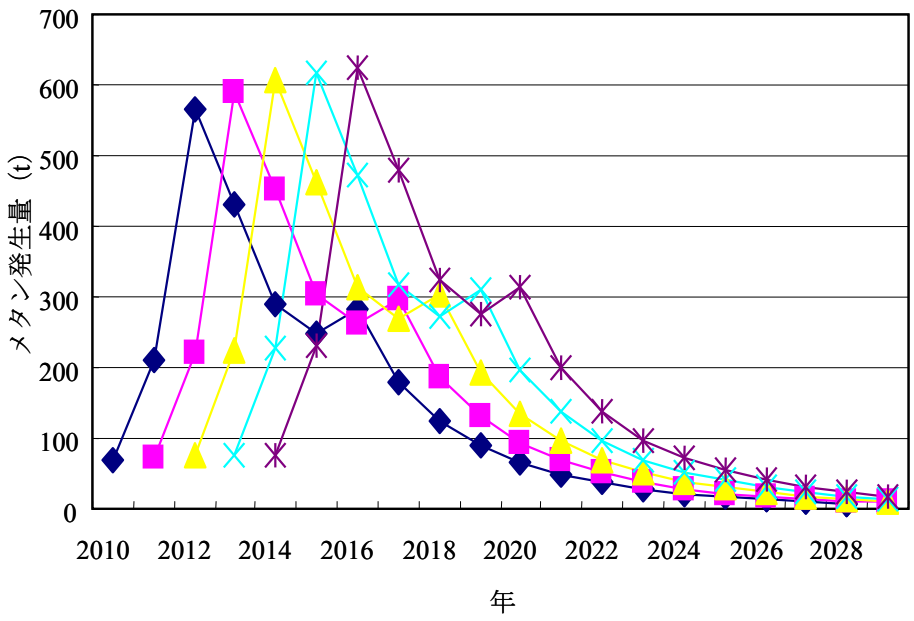

図 4-70　サムットソンクラームにおける各年メタン排出量推移（5 年分）

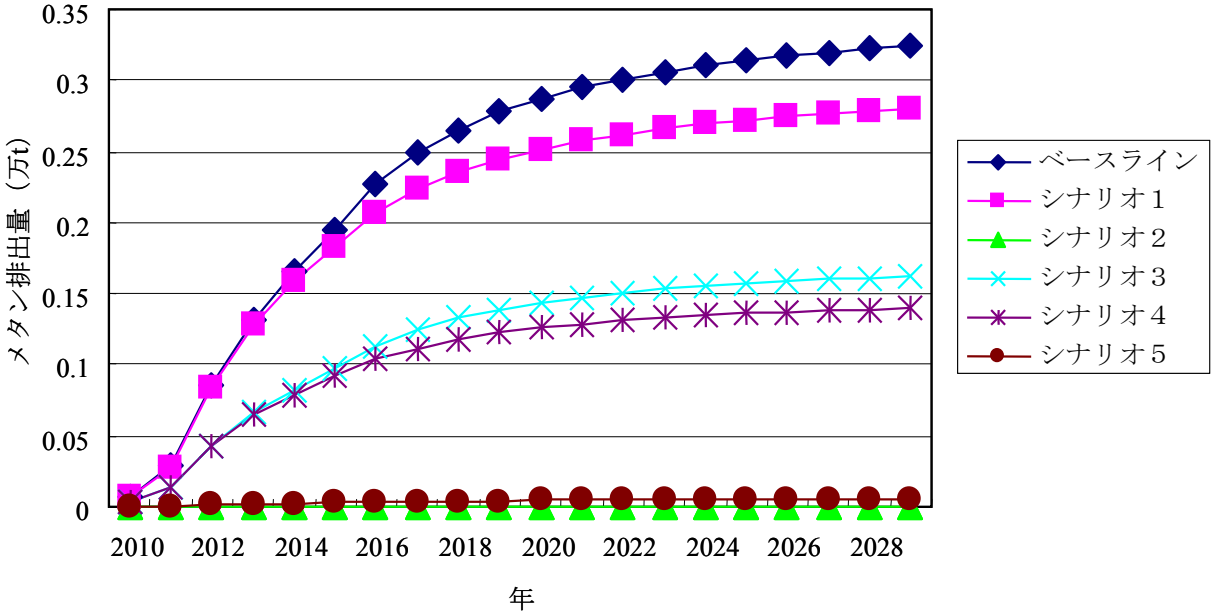

図 4-71　サムットソンクラームにおけるメタン排出量推移

メタン排出量を含めた各シナリオの等価二酸化炭素排出量推移を**図 4-72** に示す。バンコク首都圏と同様に最終処分場から排出される二酸化炭素量は、ベースラインにおいて 20 年で約 32 万 t と他の過程と比較しても大量に放出されているが、それ以上にメタン排出量の影響が大きいことが**図 4-71** で示したメタン排出量推移に類似していることからわかる。つまりサムットソンクラームにおける廃棄物処理システムの中で最終処分場からのメタン排出量も他地域と同様、地球温暖化に大きな影響を与えているということである。

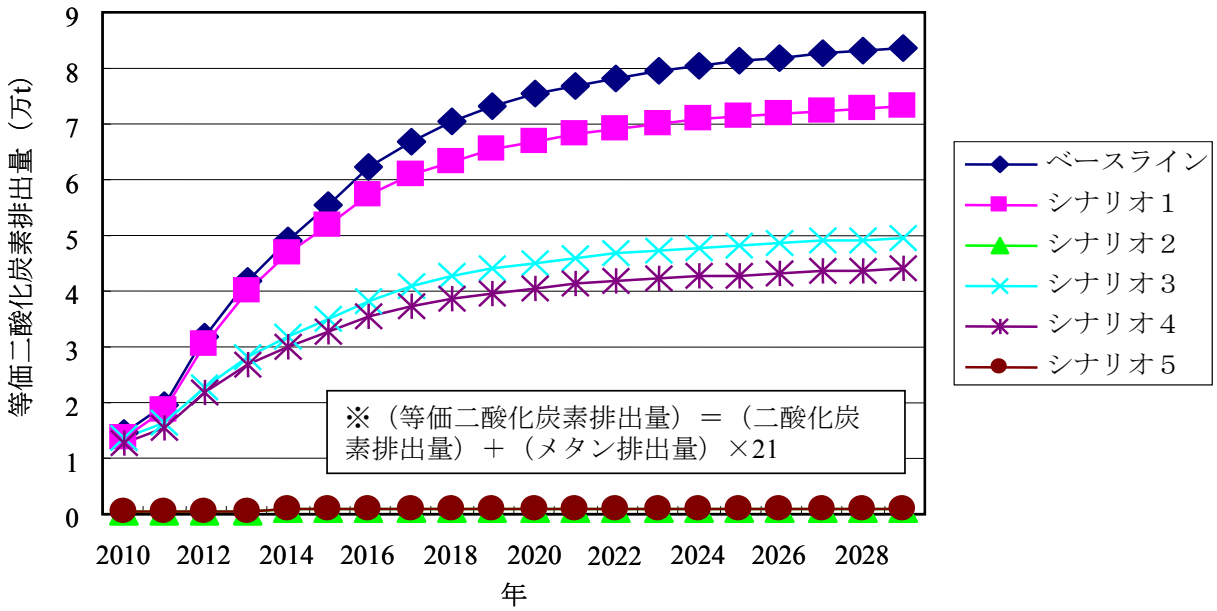

図 4-72　サムットソンクラームの最終処分場における等価二酸化炭素排出量推移

これまで算出してきた全過程の等価二酸化炭素排出量合計の推移（**図 4-73**）と累積（**図 4-74**）を以下に示す。

等価二酸化炭素排出量の推移からバンコク首都圏と同様にベースラインシナリオが最も等価二酸化炭素排出量が多く、シナリオ５が最も等価二酸化炭素排出量が少なかった。最終処分量が増加し続けるのでバンコク首都圏のように途中で等価二酸化炭素排出量が減少することはなかった。また、等価二酸化炭素排出量の累積から、どのシナリオも等価二酸化炭素排出量が増加し続けるのでバンコク首都圏より増加率は大きい。

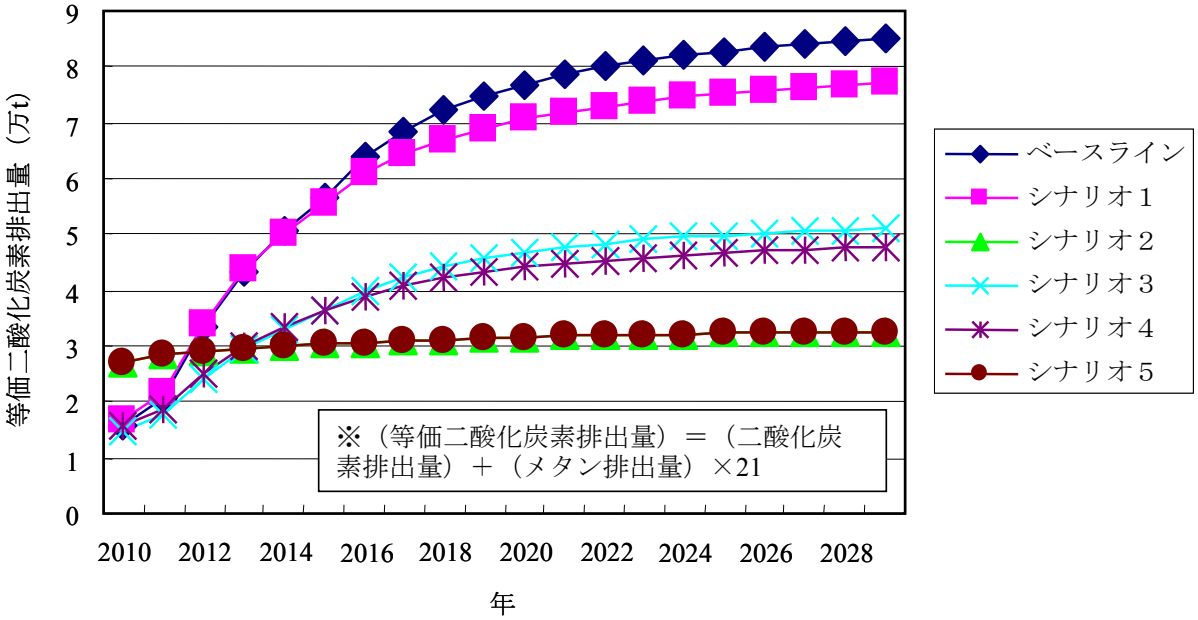

図 4-73　サムットソンクラームにおける等価二酸化炭素排出量推移

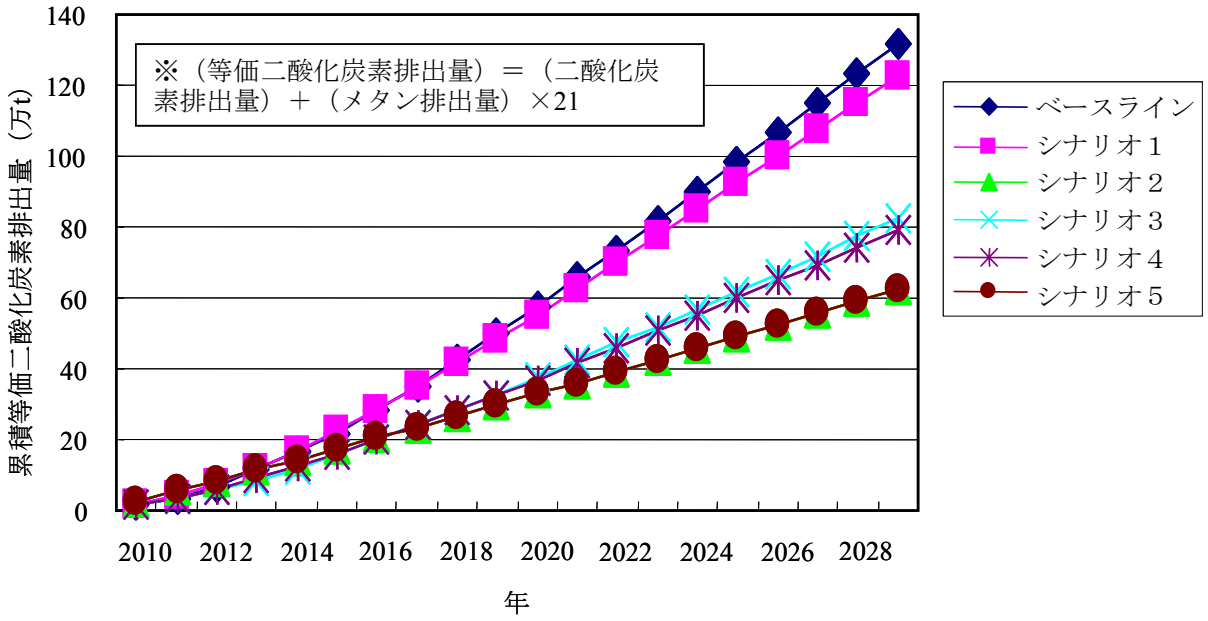

図 4-74　サムットソンクラームにおける累積等価二酸化炭素排出量

等価二酸化炭素排出量における二酸化炭素・メタンの内訳（**図 4-75**）および各過程の内訳（**図 4-76**）を以下に示す。小規模都市地域においては等価二酸化炭素排出量は廃棄物に含まれる炭素原子による要因が大部分を占めており、処理を施すために必要な電力および燃料からの二酸化炭素排出量は多くないということが顕著に表れている。廃棄物発生量がバンコク首都圏より少ないために等価二酸化炭素排出量はベースラインでバンコク首都圏の約 1/60 とかなり少なかった。

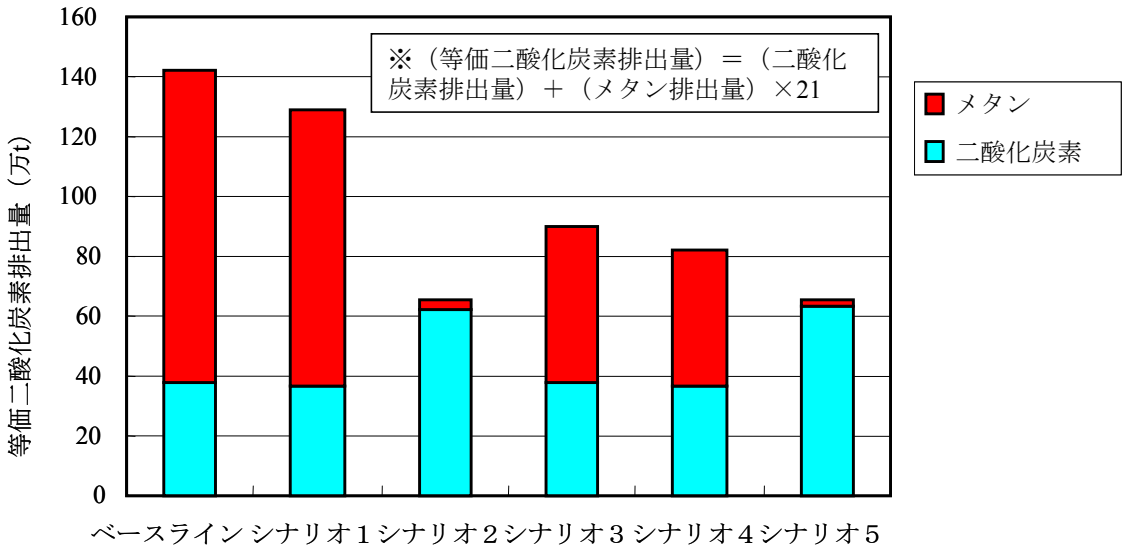

図 4-75　サムットソンクラームにおける等価二酸化炭素排出量内訳（20 年分）

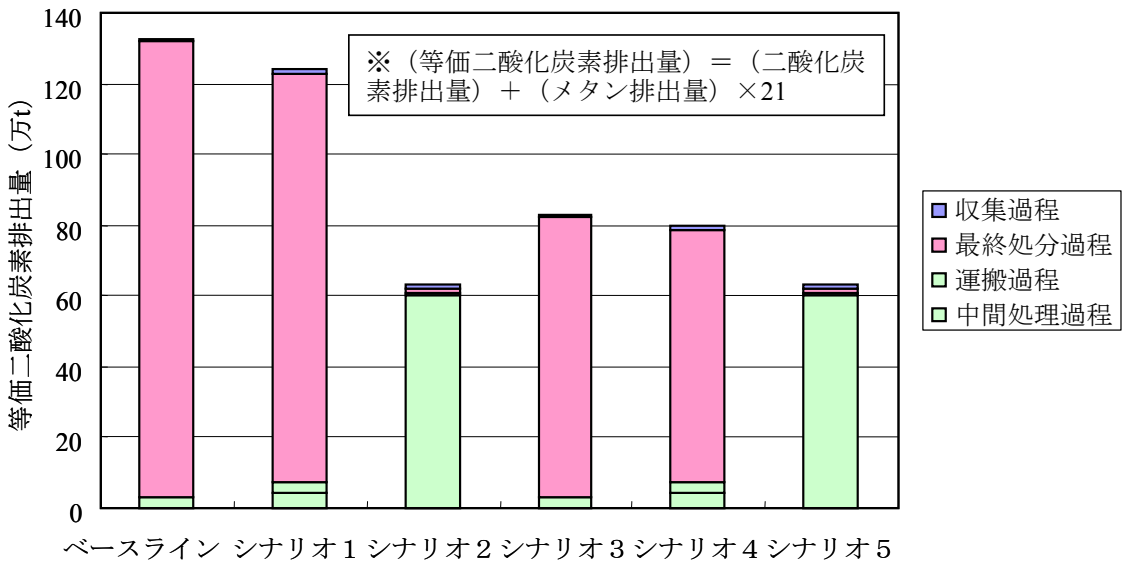

図 4-76　サムットソンクラームにおける二酸化炭素排出量過程別内訳（20 年分）

サムットソンクラームにおける環境コストの推移（**図 4-78**）と累積（**図 4-79**）を以下に示す。環境コストは評価期間 20 年間で約 19～41 億円であった。処理コストは約 190～260 億円に比べて少ない。

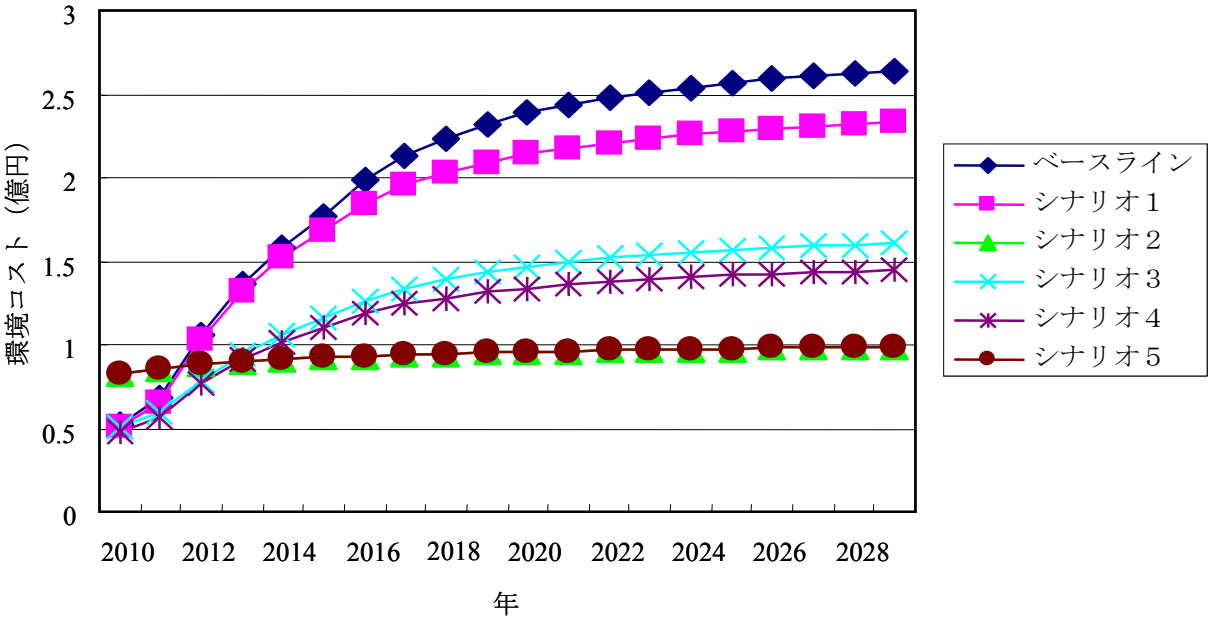

図 4-78　サムットソンクラームにおける環境コスト推移

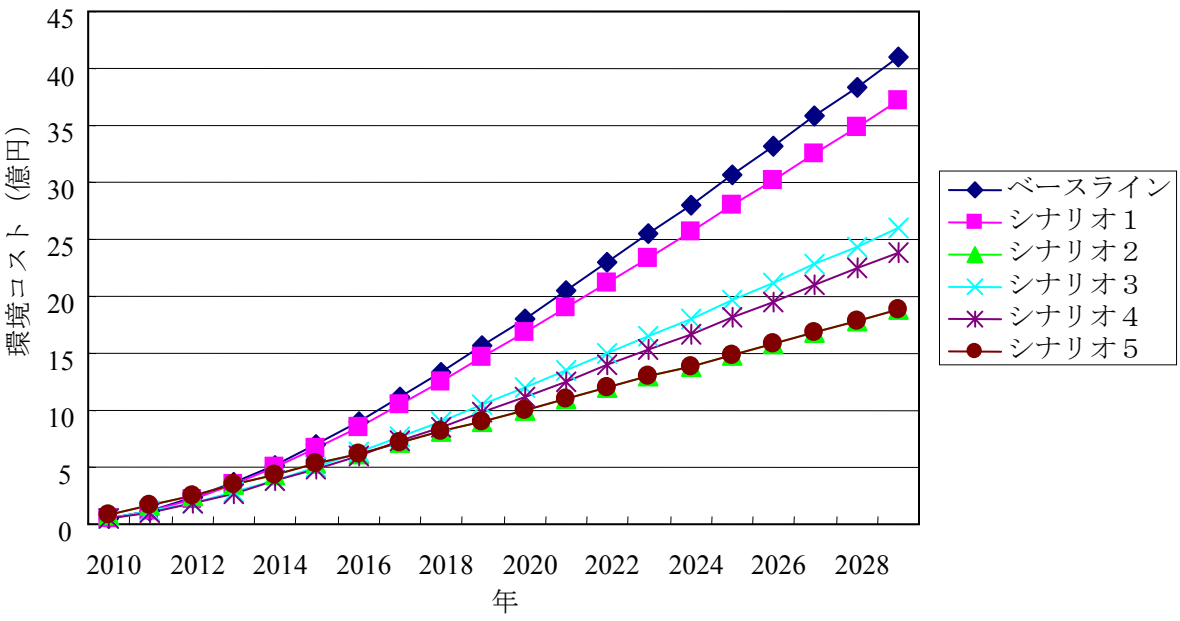

図 4-79　サムットソンクラームにおける累積環境コスト

4.4.5　環境影響を含めたシナリオ間比較

4.4.3、4.4.4 項で算出した処理コストおよび環境コストを用いて環境影響を含めた廃棄物処理手法評価を行う。

まずはトータルコストを算出する。**図 4-80** はトータルコストの推移である。トータルコストが最も低いのはシナリオ３でバンコク首都圏と同様であったが、最も高いのはシナリオ５であった。バンコク首都圏と比べて廃棄物排出量がかなり少ないために環境コストが処理コストに対して少なかったのがベースラインのトータルコストが低い原因である。**図 4-81** はトータルコストの累積である。ほとんどトータルコストが変わらないのはウドーンターニーと同様にイニシャルコストが高く、それ以降は新規の最終処分場の建設費が必要なかったからである。

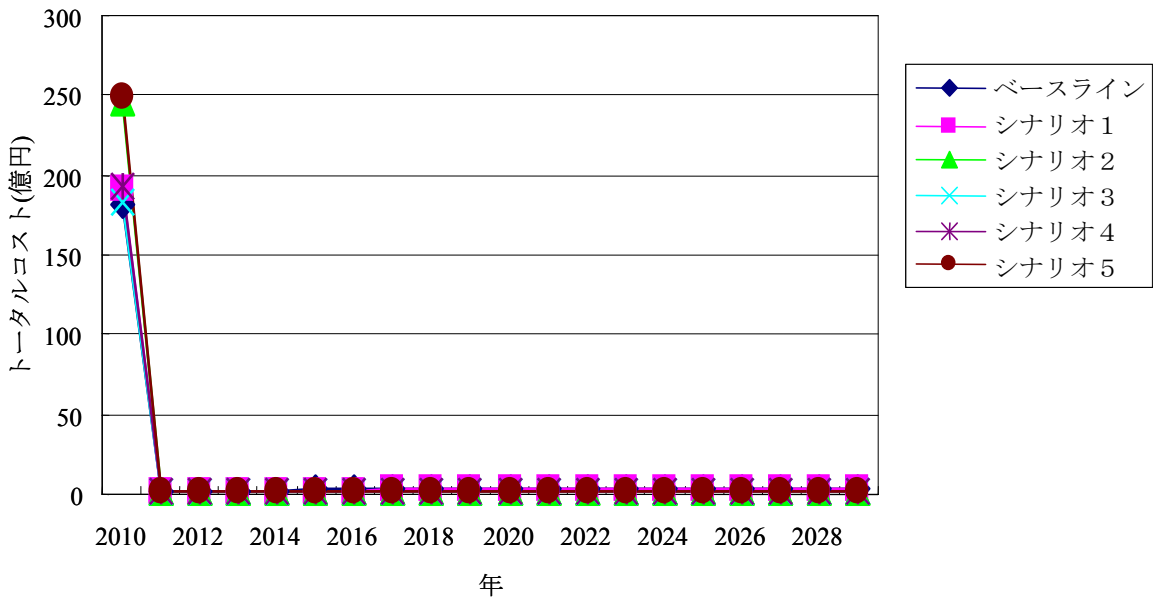

図 4-80　サムットソンクラームにおけるトータルコスト推移

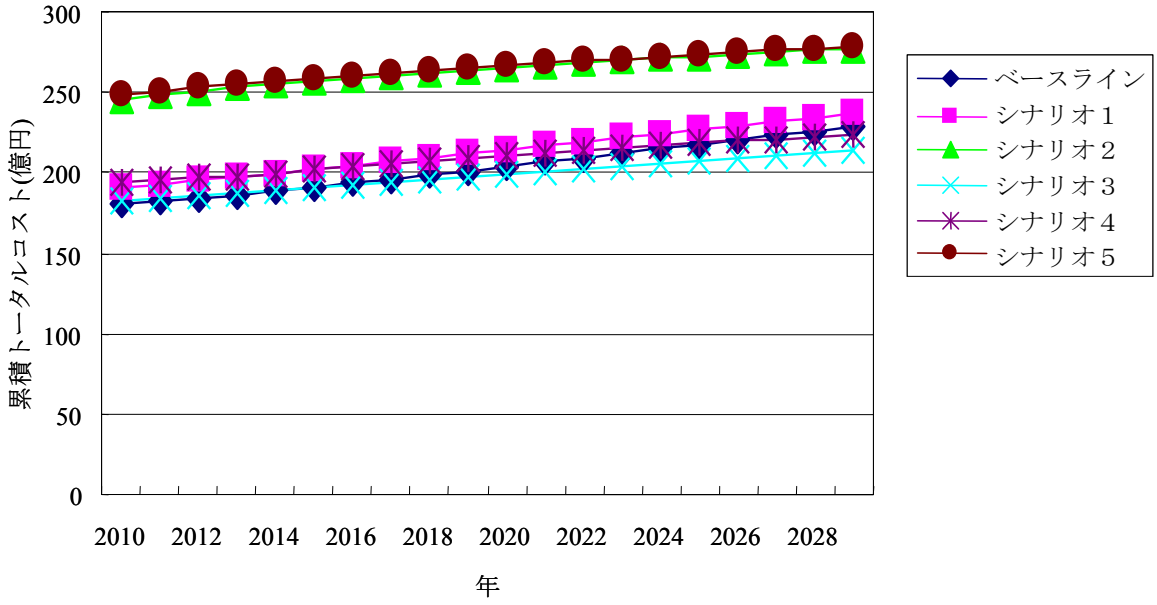

図 4-81　サムットソンクラームにおける累積トータルコスト

図 4-82 は各シナリオの環境および処理コストの内訳を表している。廃棄物排出量が少ないために環境コストが処理コストの割合が高い。つまりタイの小規模都市では特に処理を行わなくても環境に対する影響が大規模もしくは中規模都市に比べて少ないということである。

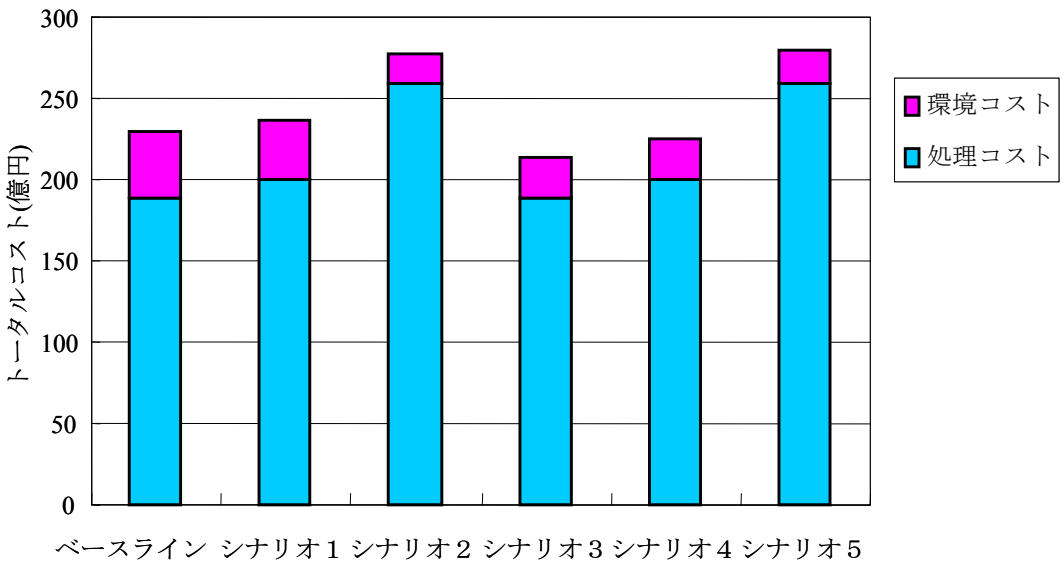

図 4-82　サムットソンクラームにおけるトータルコスト内訳（20 年分）

サムットソンクラームにおける環境影響指標を環境コスト差および処理コスト差とともに表 4-11 に示す。

シナリオ３における処理コスト差が少ないために環境効率がかなり高くなっていることがわかる。

表 4-11　サムットソンクラームにおける環境影響指標

	ベースラインとの環境コスト差	ベースラインとの処理コスト差	環境影響指標
シナリオ１	262,192,004	1,340,226,101	0.195632665
シナリオ２	2,016,955,703	7,095,247,369	0.284268553
シナリオ３	1,435,032,826	52,950,295	27.10150762
シナリオ４	1,531,916,972	1,420,626,779	1.078338797
シナリオ５	2,016,955,703	7,201,439,402	0.280076744

以上、本研究でシナリオ間比較を行った結果、トータルコストおよび環境影響指標の両方でサムットソンクラームでもシナリオ３が最も環境効率がよいということがわかった。

第5章　3 都市間の比較検討

最後に 3 都市で算出した処理コスト、環境コスト、トータルコスト、および環境影響指標の比較検討を行い、タイ王国の大規模都市（バンコク首都圏）、中規模都市（ウドーンターニー）、そして小規模都市（サムットソンクラーム）の廃棄物処理に関してどのような傾向があるのかを考察し、どの都市を優先して廃棄物処理システムを確立させていくべきかを考える。大規模都市で処理コスト、環境コスト、およびトータルコストが高いのは当然であり、単純比較に意味はないのでそれぞれ一人当たりの値を比較する。なお 4 章でバンコク首都圏における廃棄物発生量が他の 2 都市と算出方法が違っているので、比較のために過去の廃棄物発生量から以下の対数回帰式（**式 5-1**）で求めた廃棄物発生量推移（**図 5-1**）を使用している。

$$Q = 3451223 - 153440\ln(X - 2001) \tag{5-1}$$

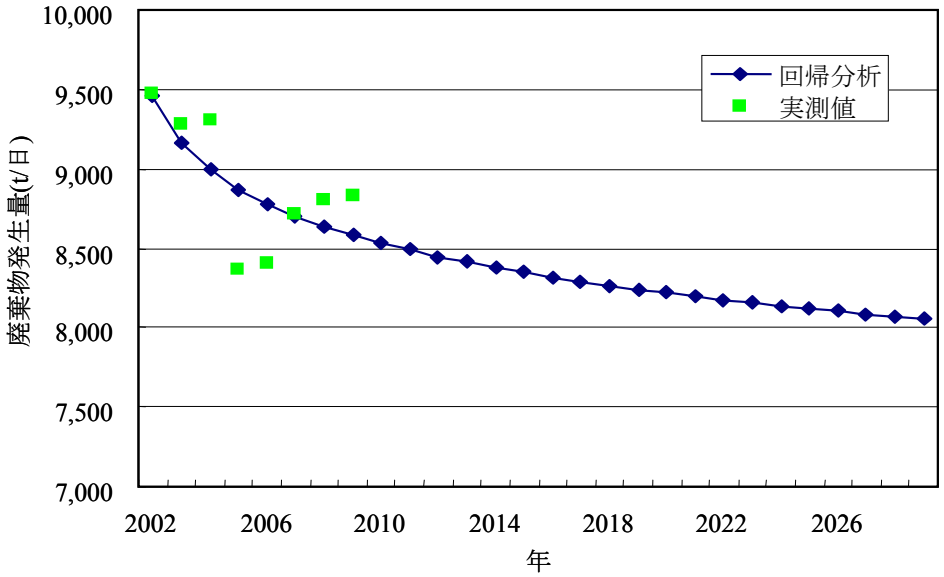

図 5-1　バンコクにおける廃棄物発生量予測（過去の廃棄物発生量から）

5.1　処理コストにおける都市間比較

まずは処理コストの比較を**図 5-2** に示す。3 都市全てのシナリオにおいて横軸に一人当たりの廃棄物発生量を、縦軸に一人当たりの廃棄物処理における処理コストをとった。小規模都市から大規模都市になるにつれて一人当たりの廃棄物発生量が増加していく。小規模都市では施設建設にかかる費用が一人当たり高額なために、一人当たりの処理コストが最も高く、中規模都市と大規模都市における一人当たりの処理コストがほぼ同様の値で低かった。小規模都市では廃棄物処理を行うと一人当たりに必要な処理コストがかなり多いことがわかる。

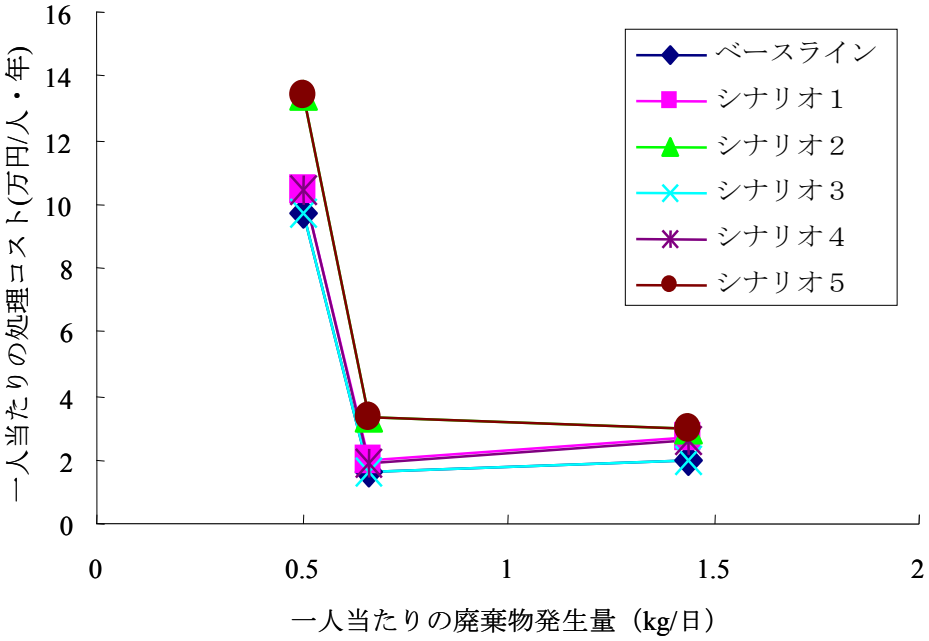

図 5-2　一人当たりの処理コスト比較

5.2　環境負荷における都市間比較

次に環境負荷の比較を以下に示す。**図 5-3** は 3 都市全てのシナリオにおいて横軸に一人当たりの廃棄物発生量を、縦軸に一人当たりの廃棄物処理における等価二酸化炭素排出量をとったものである。中規模都市における一人当たりの廃棄物処理における等価二酸化炭素排出量が最も少ない。大規模都市のように一人当たりの廃棄物発生量が多ければ、特に廃棄物から発生する二酸化炭素とメタンが多いために一人当たりの等価二酸化炭素排出量も多くなるが、小規模都市のように一人当たりの廃棄物発生量が少なすぎても収集・運搬において排出される一人当たりの二酸化炭素排出量が多いために、一人当たりの等価二酸化炭素排出量が多くなる。また、**図 5-4** は 3 都市全てのシナリオにおいて横軸に一人当たりの廃棄物発生量を、縦軸に一人当たりのメタン排出量をとったものである。シナリオ２・５は中間処理において二酸化炭素としてほとんどが大気中に排出されているためにかなり小さな値となっている。それ以外のシナリオでは、**図 5-3** に比べ都市間をつなぐ直線が緩やかになっている。中規模都市の廃棄物処理システムにおける等価二酸化炭素排出量のうちメタン排出量が少ないということである。これには廃棄物組成が大きくかかわってきている。中規模都市において、他の都市と比較して廃棄物組成のうち植物の割合が大きく、植物内の炭素原子がメタンとなる割合が高いため、植物由来のメタン排出量が多いからである。

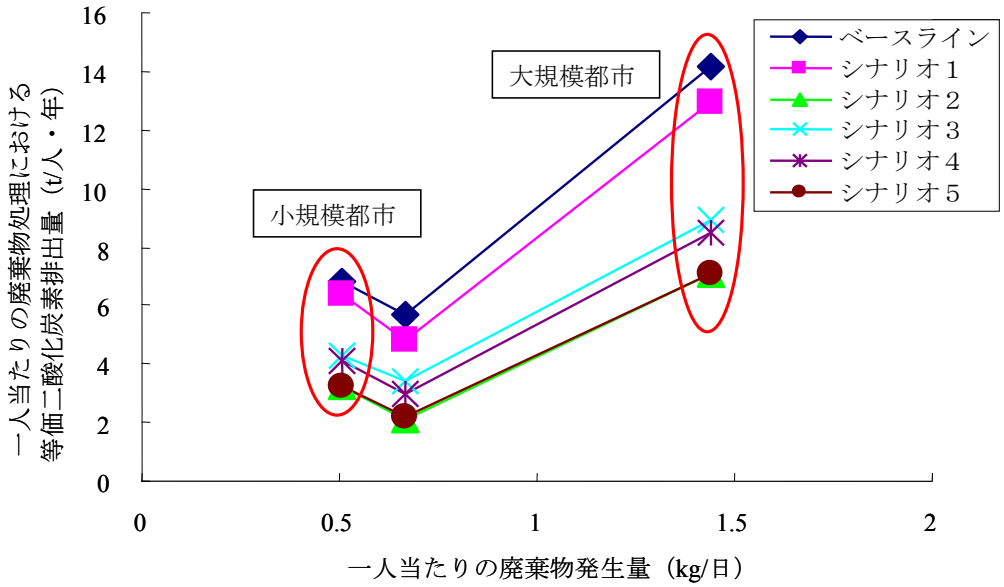

図 5-3　一人当たりの等価二酸化炭素排出量比較

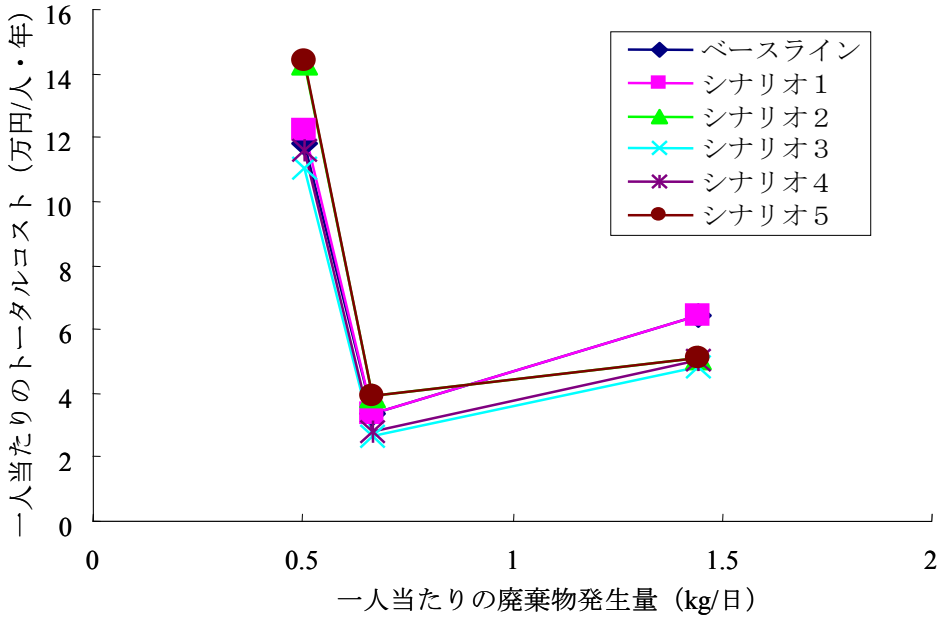

図 5-4　一人当たりのメタン排出量比較

5.3　トータルコストにおける都市間比較

次にトータルコストの比較を以下に示す。**図 5-5** は 3 都市全てのシナリオにおいて横軸に一人当たりの廃棄物発生量を、縦軸に一人当たりのトータルコストをとった。小規模都市における一人当たりのトータルコストが最も高く、中規模都市における一人当たりのトータルコストが最も低かった。**図 5-2** に示したように小規模都市においては一人当たりの処理コストが高く、**図 5-3** に示したように大規模都市においては一人当たりの等価二酸化炭素排出量が多いからである。

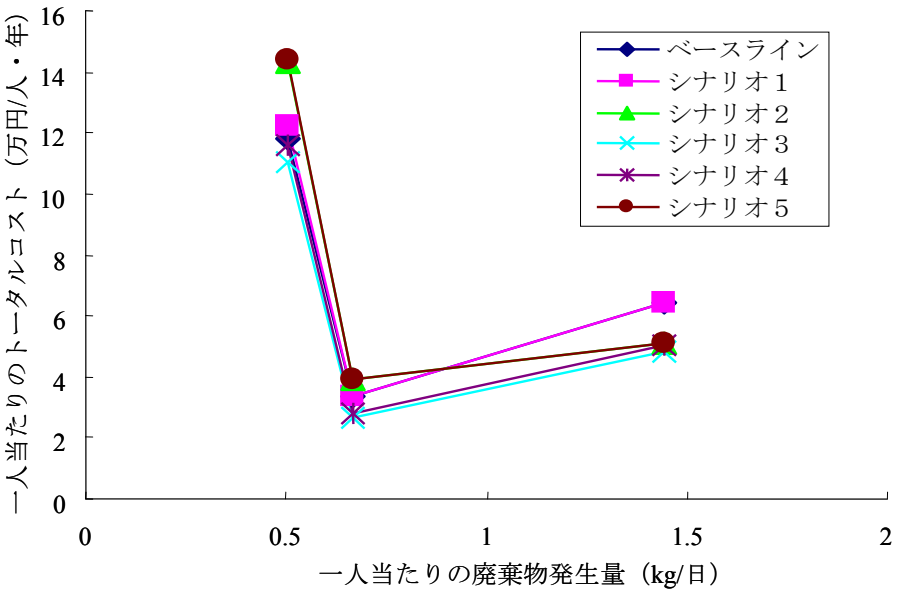

図 5-5　一人当たりのトータルコスト比較

5.4　環境影響指標における都市間比較

最後に環境影響指標の比較を以下に示す。**図 5-6** は横軸に一人当たりの処理コストを、縦軸に環境影響指標をとったことで、処理コストにどの程度費用をかけることで環境負荷を現状から効果的に抑えることができるかを表した図である。シナリオ３に関しては他のシナリオに比べて値が大きかったので別に**図 5-7** で示す。小規模都市から大規模都市になるにつれて一人当たりの処理コストが減っていき、環境影響指標が大きくなることがわかる。

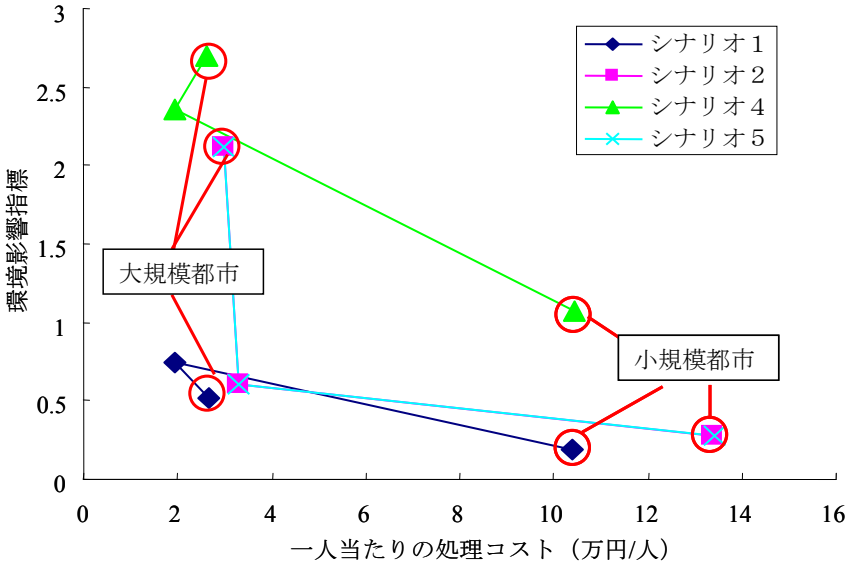

図 5-6　環境影響指標比較

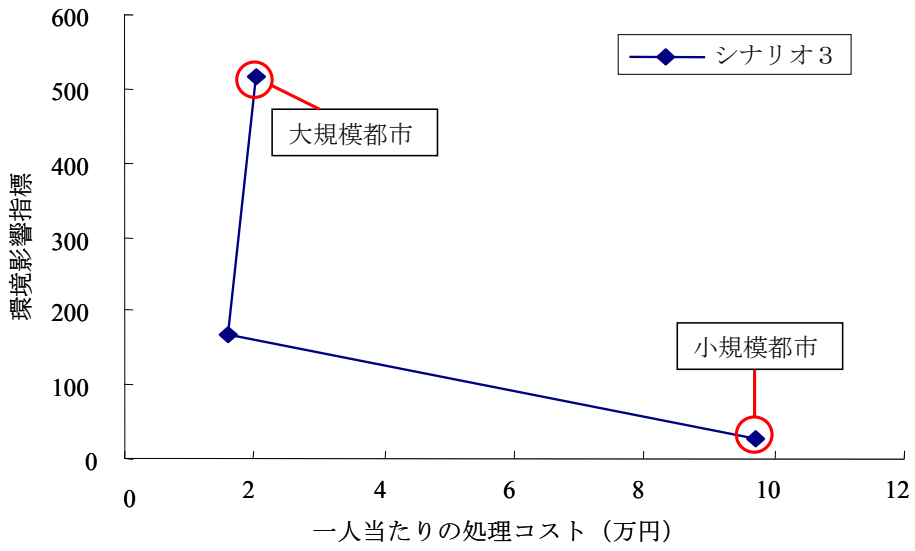

図 5-7　環境影響指標比較

以上のデータから大規模都市から優先して廃棄物処理システムを確立することが費用にも環境にも効率的であることがわかる。

第6章　結論

6.1　本研究の成果

タイ王国の大規模都市、中規模都市そして小規模都市において廃棄物処理の手法によって異なる処理コストと環境負荷を評価期間 20 年において算出し、二酸化炭素貨幣価値原単位を用いて環境負荷を環境コストとして環境負荷の内部化を行った。その結果、バンコク首都圏における処理コストは**図 4-13** から現状が最も低く、焼却処理施設とメタン利用施設を建設したシナリオが最も高かったことがわかる。一方、環境負荷は**図 4-21** から焼却処理施設とメタン利用施設を建設したシナリオが最も低く、現状が最も高かったことがわかる。**図 4-14** から処理コストは焼却処理施設の建設が行われるシナリオ２と５では焼却処理施設の建設費用が高いために中間処理過程の割合が高く、それ以外のシナリオでは新規の最終処分場建設費が高いために最終処分過程の割合が高かったことがわかる。**図 4-23** から環境負荷のうち、焼却処理を行うシナリオでは廃棄物を焼却した際に発生する二酸化炭素排出量が多いが、焼却処理を行わないシナリオではほとんどは最終処分場に埋め立てられた廃棄物から発生する二酸化炭素とメタンガスで占められており、廃棄物処理を行う過程で発生する二酸化炭素量は最終処分場から発生するものと比べて少なかったことがわかる。トータルコスト（図 4-27）と環境影響指標（表 4-9）の 2 つの評価方法で各手法の比較検討を行い、どの手法が処理コストと環境負荷の双方に対して効率よく低く抑えることができるかを検討した結果、メタン利用施設を建設することが最も効率がいいことがわかった。また、バンコク首都圏における感度分析を行ったところ、**図 4-30**～**図 4-33** から廃棄物発生量、二酸化炭素貨幣価値原単位、および評価期間でどの要素についても結果にかなりのばらつきが見られることを示した。さらに、**図 5-2**～**図 5-7** から 3 都市間の処理コスト、環境負荷、トータルコスト、および環境影響指標に関して比較検討を行った結果、バンコク首都圏のような大規模都市の優先順位が高いということがわかった。

これらの結果から、日本がコベネフィット型温暖化対策・CDM をタイ王国で行う際には優先順位が高いバンコク首都圏周辺の最終処分場を対象とした CDM プロジェクトを行い、メタン利用施設を建設するという意思決定が成される。また、現状では京都議定書の第一約束期間以降は CER の活用が保障されていないために、長期間に渡って二酸化炭素排出量が削減される巨大プロジェクトは避けられる傾向があるが、CER がそれ以降も活用できるように決定されると、これまでより多くの巨大なプロジェクトが CDM 事業として認定される可能性もある。バンコクにおける評価期間の感度分析の結果、長期間において最もトータルコストが安価であった焼却処理施設建設のシナリオがこの場合注目されるのではないだろうか。

さらに、本研究で構築した廃棄物処理システム評価モデルは廃棄物発生量、廃棄物組成、人口などをインプットとしているため、これらを全て調査することで様々な国に適用でき、

CDM プロジェクトを優先的に展開できる国の意思決定を成すことができる可能性を示せたのではないかと考えている。

6.2 本研究の課題

本研究ではベースライン以外に 5 つのシナリオの比較検討を行ったが、実際の廃棄物処理システムでは収集、中間処理、運搬、最終処分場において様々な技術を導入することができる。また、中間処理過程で複数の中間処理を行うことが考えられるが本研究では単一の処理のみしか考えていない。しかし、途上国において先進国の技術を導入しようとする際には単一の技術の導入になる可能性があるので、本研究における考察は全く無意味ではない。

また、本研究では二酸化炭素を貨幣換算できることを利用して環境負荷とコストを合わせて検討できるようにしたが、環境負荷にも様々な種類があり貨幣換算することができないものもある。今後廃棄物による土壌汚染や水質汚濁など環境負荷に対して世界的に共通な貨幣換算法が確立されたときに再検討することが望まれる。

参考文献

1)　加藤博和, 柴原尚希 : 土木計画へのライフサイクルアセスメント適用に関する諸課題, 第 3 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集，pp72-73，2008.2

2)　柴原尚希・加藤博和 : 交通システムの LCA における将来の不確実性の考慮に関する検討，土木計画学研究・講演集，pp39，2009

3)　堺孝司・小嶋克宏・草薙悟志・入谷祥王：交通渋滞交差点における鉄筋コンクリート地下道建設による環境便益評価に関する研究，土木学会論文集 G，Vol63，No.1，pp40-50，2007

4)　稲積真哉・大津宏康・塩谷智基・勝見武・藤田洋平：温室効果ガスの排出量予測に基づくバンコク首都圏の廃棄物処理に関する研究

5)　環境省 : 開発途上国の環境対策を実現するコベネフィット型温暖化対策・CDM の促進に向けて，2008

6)　日本スマートエナジー：排出権取引の基本と仕組みがよ～くわかる本，pp.88-103，秀和システム，2008

7)　小圷一久・水野勇史：クリーン開発メカニズム（CDM）の仕組みと現状，廃棄物資源循環学会誌，Vol.20，No.4，pp149-157，2009

8)　京都メカニズム情報プラットフォーム事務局／社団法人海外環境協力センター（OECC) : 京都メカニズム情報プラットホームメールマガジン京メカ Express 第 22 号, 2010

9)　松藤敏彦：都市ごみ処理システムの分析・計画・評価―マテリアルフロー・LCA 評価プログラム―，2005

10)　株式会社大林組・日立造船株式会社：平成 16 年度ＣＤＭ／ＪＩ事業調査 タイにおける廃棄物メタン利用事業に関するプロジェクト設計書作成調査報告書, ppⅡ=11-14, 2005

11)　Intergovernmental Panel on Climate Change: Revised 1996 IPCC Guideline for National Greenhouse Gas Inventories, NGGIP Publications, 1997

12)　吉岡完治・大平純彦・早見均・鷲津明由・松橋隆治：環境の産業連関分析，2003

13)　森泉由恵、本藤祐樹：タイの産業連関表を用いた CO_2 原単位の推計，エネルギー・資源，Vol29，No.4，pp1-7，2008

14)　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，pp2=47，2003

15)　社団法人　日本下水道協会 : 下水道事業における費用効果分析マニュアル, pp11-12, 2008

16)　Tol，R.S.J.：The marginal damage costs of carbon dioxide emissions：an assessment of the uncertainties，Energy Policy,Vol.33, pp.2064-2074

17)　パシフィックコンサルタンツ株式会社：社会基盤投資における便益計測手法に関する調査，pp.9-14，2002

18) Division of Policy and Planning, Department of Environment, Bangkok

19) S.Muttamara and Shing Tet Leong, Chairat Somboonjaroensri and Wicha Wongpradit:The Evolution of Solid Waste Management in Bangkok, Thammasat Int. J. Sc. Tech., Vol.9, No.1, 2004.

20) 高橋一：文系出身者のための数理ファイナンス入門，第 4 章，2005

21) 辻村元男・大西匡光：幾何ブラウン運動の最適インパルス制御について，数理解析研究所講究録 1194 巻，pp225-232，2001

22) 国際協力銀行：排出権市場動向レポート 2010，2010

謝辞

本研究にあたり私の研究面や生活面で支えとなった研究室の皆様やお世話になった方々に感謝の意を表して本研究を締めくくりたいと思います。

京都大学大学院工学研究科大津宏康教授にはこの研究室生活の 3 年間本当にお世話になりました。中間ゼミにおいては、私の研究に対し的確なアドバイスを頂きました。おかげさまで素晴らしい論文に仕上げることができました。パワーポイント作成に関しても何を人に伝えたいためにその資料を作っているのか、そしてどのように発表することで自分の伝えたいことが伝えられるのかなどアドバイスをいただき、発表に関しても成長できたと思います。また、中間ゼミではゼネコンで働いていらっしゃったときの話やゼネコンの現状の話もして頂き、聞いていてすごく面白く、私がゼネコンを志望するきっかけになりました。心から御礼申し上げます。

京都大学大学院工学研究科塩谷智基准教授には研究室にきて私たち学生に話しかけていただき研究室での生活をより楽しくしていただきました。飲み会の席では海外での仕事やお酒のお話などお聞かせいただきまして、楽しい時間を過ごさせていただきました。心より御礼申し上げます。

京都大学大学院工学研究科稲積真哉助教授には卒業論文から修士論文まで面倒見ていただき、本当に感謝しています。研究の流れが定まらず迷走していた私ですが、ミーティングで議論し、なんとか論文が形になりました。ミーティングから就活のアドバイスまで学生の中で一番長く話をさせていただきました。未熟な私でしたが、私がここまで成長できたのは稲積先生のおかげだと思います。心より御礼申し上げます。

京都大学大学院工学研究科伊東宏美秘書、北村瑞絵元秘書には事務からの連絡や書類のやり取りなど行っていただき、研究室生活に欠かせない存在でした。北村さんには秘書を辞められてからも飲み会に来ていただきました。心より御礼申し上げます。

京都大学大学院工学研究科大津研究室・河合啓介君、幹拓也君、米澤裕之君とはこの研究室生活で最も長く時間を共にしました。共に遊びに行ったり、共に学んだりかけがえのない時間を過ごせました。河合君とは学部時代から同じクラスであり、授業や論文で夜遅く残っているときにもお互い励ましあい、意見を出し合って成長していくことができました。幹君とも学部時代から同じクラスであり、共に成長していくことができました。特に夏休みには九州旅行の企画･幹事をやってもらい､楽しい時間を過ごさせてもらいました。米澤君とは修士からの付き合いであり、最初はあまり話さなかったけれど、話してみるとすごくユニークで面白く､また私の研究室でメインとなる研究を担当するほど聡明であり、学ばせてもらうことが多かったです。これからも 4 人お互い連絡を取り合い切磋琢磨していきたいと思います。本当にありがとう。そしてこれからもよろしくお願いします。

京都大学大津研究室の Chaleiwchalard Nipawan さん、大川淳之介君、川合良治君、後藤基芳君、磯田隆行君、岩本勲哉君、太田康貴君、木許翔君、古賀博久君には野球大会や研究室飲み会で楽しい時間を過ごさせてもらいました。特に Nipawan さんには私の研究の対象地域であるタイの資料を探していただいたおかげで研究がはかどりました。研究室の皆様、本当にありがとうございました。

最後になりましたが、ここまで私を育ててくれた両親に改めて御礼を申し上げます。本当にありがとうございました。