

地域特性に応じた低炭素型都市-産業代謝
システムの構築

平成 28 年 3 月

和歌山大学大学院システム工学研究科

中尾 彰文

Development of Low-carbon Urban and
Industrial Metabolism considering Regional
Characteristics

March 2016

Graduate School of Systems Engineering
Wakayama University

Akifumi Nakao

概要

本研究は人口減少という成長制約の中での低炭素社会実現に向けた、グリーン・イノベーションの推進を支援するために必要な知見を得ることを目的とした地域特性に応じた低炭素型都市-産業代謝システムのモデルを構築した。本研究は9章の構成となっている。

第1章では、都市代謝施設の更新戦略の方向性を提示し、代謝システムの基盤としての進化の必要性を論じた。また、GHG 排出抑制対策が遅れがちな農山村地域での低炭素設備の導入支援の必要性を論じ、本研究で取り扱う研究範囲を明確にするとともに、各章の構成を記した。

第2章では、都市代謝施設における整備の現状と人口減少下での整備のあり方や自立分散型エネルギーシステムの形成に向けた望ましい低炭素技術の導入支援の課題を整理し、グリーン・イノベーション推進に向けた研究課題を述べた。

第3章では、大都市の下水処理場の施設更新・再編シナリオを設計した。その結果、汚泥処理施設に低炭素技術を導入することで、LCE、GHG 排出削減効果を得ることが可能となった。また、施設再編には、現有施設の過剰能力を解消させることも効果的であるが、複数稼働する現有施設の更新需要を見極めたうえで再編を検討する必要があることが示された。

第4章では、地方都市の下水処理場の施設更新・再編シナリオを設計した。その結果、汚泥処理を集約化させてスケールメリットを高める戦略が有効であることが明らかとなった。さらに、集約拠点での施設更新の際に低炭素技術を導入することで、LCE、GHG 排出量ともに削減効果が高まることが明らかとなった。

第5章では、人口減少社会における下水汚泥処理計画を立案するため都市代謝施設の統合と連携モデルを構築した。その結果、施設間の廃棄物処理システムの統合や連携を視野に入れた総合的な将来計画の立案が有効的であることがわかった。

第6章では、農山村地域における施設園芸の低炭素化を図るときに栽培管理プロセスのGHG 排出抑制が重要であることがわかった。そのため、このプロセスで用いられる加温設備に地域未利用バイオマスを利用する技術を導入することで、従来技術に対して最大64%のGHG 削減効果を得ることができる結論を得た。

第7章では、バイオマス技術を普及させるため、国などからの補助金や制度を活用した際の経済性の評価を行った。その結果、バイオマス技術の導入には、国の補助金などを利用して投資回収に最短で19年要することが明らかとなった。さらに、提示した代替技術オプションが地域未利用バイオマスを活用した際の導入可能性を検討し、バイオマスの需要端と供給端に着目した都市部と農山村地域の連携によって形成される低炭素型都市を構想した。農山村地域の施設園芸を需要端とすると、都市部の下水処理場に集約される廃棄物系バイオマスである下水汚泥よりも、農山村地域に広く薄く分布する木質系バイオマスを優先的に取り組むことが有効であることが明らかとなった。そのことから都市部は都市代謝施設を核とした低炭素型都市の形成を、農山村地域は地域に賦存する木質系バイオマスを軸とした都市の形成を考える必要性が示唆された。

第8章では、事業者による過去のCO₂削減努力の違いが、炭素クレジット制度を活用した設備更新で得られる金銭メリットに与える影響を分析した。その結果、過去のCO₂努力に配慮しない制度設計では、設備更新を自主的・積極的に行っていなかった事業者が経済的に有利に働くことがわかった。すなわち、事業者が経済的合理的に判断を下せば、最も削減効果の小さい低炭素技術が選択されることになる。

最後に、第9章において結論として、本研究において得られた知見と今後の課題を整理した。

Abstract

The aims of this research are to develop a model of low-carbon urban and industrial metabolism considering regional characteristics to promote a green innovation of the existing environmental facilities under population decline. This research consists of 9 chapters.

Chapter 1: We indicated the direction of the renewal strategy of urban environmental facility in the future. In addition, it was discussed that to support the introduction of low-carbon equipment in a rural area is required because of delayed implementation of GHG emission control measures.

Chapter 2: We clarified the current development situation of urban environmental facilities and preferred way to renew these facilities under the declining population, and the policy issues to support the introduction of appropriate low-carbon technologies for a sustainable energy system. Based on these findings, we mentioned the research agenda to promote a green innovation of environmental facilities.

Chapter 3: We developed future renewal scenarios of sewage sludge treatment facilities in Osaka City considering changes in population and sewage sludge generation in 2010-2040. As a result, the centralized scenario, in order to eliminate the excess capacity of the sewage sludge treatment plant, it was effective to integrate the sludge treatment. Ahead of schedule the introduction of low-carbon technologies is effective. However, such a case there is a need restructuring in consideration of the update time.

Chapter 4: We developed future renewal scenarios of sewage sludge treatment facilities in Wakayama City considering changes in population and sewage sludge generation in 2010-2040. As a result, the centralized treatment of sewage sludge improves capacity utilization rate of facilities, and then brings the enhancement of scale effects in energy saving and GHG reduction. To discontinue operation of incinerators with low efficiency of energy as soon as possible enhances the reduction effects of centralized treatment. To make a transition to centralized treatment and introduce a low-carbon technology can reduce GHG, compared with usual incineration and renewal.

Chapter 5: We developed integration and collaboration scenarios of sewage sludge and domestic waste incineration facilities in Wakayama City considering future population decline in 2010-2040. As a result, Co-combustion of sewage sludge in waste incineration facilities brings energy saving and GHG reduction compared to centralized treatment of sludge. In the co-combustion scenario, the utilization of exhaust heat recovered from waste incineration facility to dry the sewage sludge improves the reduction effects of environmental burdens.

Chapter 6: The energy and material flows in the glasshouse horticulture of flowers and ornamental plants were identified based on the field and interview survey at a specific site located in Arida district of Wakayama Prefecture, Japan. We developed seven alternative options of heating equipment used in glasshouse horticulture and then evaluated GHG emissions reduction potential through introducing low-carbon equipments in substitution for conventional oil boiler and utilizing woody and waste biomass for fuel based on the result of LCA. As a result, the installation of wood chip boilers into glasshouse horticulture plant and promotion of woody biomass utilization can reduce GHG emissions by 64%, compared with conventional oil combustion.

Chapter 7: We evaluated the economics in the case of update equipment by utilizing subsidies and carbon credit scheme. As a result, the monetary value of carbon credits earned by installing wood chip boilers into glasshouse horticulture plant is estimated at about 36 thousand yen per year if the domestic market price of credits is 1.5 thousand yen per ton CO₂. In addition, we planned low-carbon urban in inter-regional cooperation between urban and rural areas that focuses on the supply-side and demand-side of the biomass considering Regional Characteristics. As a result, In rural areas it is important to take full advantage of the forest biomass in rural areas than using waste biomass in urban areas.

Chapter 8: We evaluated effects of the early action to reduce CO₂ emissions in greenhouse horticulture on benefits from utilization of carbon credit scheme. As a result, for farmers who have made less efforts in CO₂ reduction, replacing oil boilers to energy-efficient oil boilers is the most cost-effective to recover their investment costs, but this option has less effect on CO₂ emissions reduction than other technology options developed in this research.

Chapter 9 : As a conclusion, we organized the newly gained knowledge and the future subject in this study.

第1章 序論	1
1.1. 研究の背景	1
1.2. 研究の目的	3
1.3. 論文の構成	3
第2章 低炭素社会の実現に向けたグリーン・イノベーション推進のための施策の展開	7
2.1. 緒言	7
2.2. グリーン・イノベーション推進に向けて	7
2.2.1. グリーン・イノベーション推進を巡る議論	7
2.2.2. グリーン・イノベーションの推進における低炭素技術の導入の論点	8
2.3. 都市代謝施設整備の現状と人口減少下での整備のあり方	12
2.3.1. バイオマス利活用戦略の進展と再生可能エネルギー拠点としての下水処理場	12
2.3.2. 都市代謝施設の現状と人口減少社会における整備の課題	13
2.3.3. 都市代謝施設の更新に関する技術選択や将来シナリオ設計の論点	16
2.4. 自立分散型エネルギーシステムの形成に向けた望ましい低炭素技術の導入支援	20
2.4.1. 農業分野における温室効果ガスの排出抑制に向けた対策の状況	20
2.4.2. 地域特性に応じたバイオマスの活用や低炭素技術の導入を支援する政策の論点	22
2.4.3. 施設園芸での GHG 排出抑制に関する論点	23
2.4.4. 炭素クレジット制度活用による低炭素技術の導入支援に関する論点	25
第3章 大都市における下水汚泥処理施設での設備更新と処理形態再編シナリオの設計・評価	31
3.1. 緒言	31
3.2. 下水汚泥発生量の推計	32
3.2.1. ケーススタディ対象地の概要	32
3.2.2. 将来人口や下水汚泥発生量の推計	35
3.3. 更新シナリオの設計	43
3.4. 更新計画による GHG 削減効果	46
3.4.1. 使用データ	46
3.4.2. LCE の推計結果	47
3.4.3. GHG 排出量の推計結果	48
3.5. 本章の結論	49

第4章 地方都市における下水汚泥処理施設での設備更新と処理形態再編シナリオの設計・評価 **51**

4.1. 緒言	51
4.2. 下水汚泥発生量の推計	52
4.2.1. ケーススタディ対象地の概要	52
4.2.2. 将来人口や公共下水道人口の推計方法	54
4.3. 更新シナリオの設計	57
4.4. 更新計画による GHG 削減効果	60
4.4.1. 推計方法	60
4.4.2. 推計結果	65
4.5. 本章の結論	68

第5章 ごみ焼却施設と下水汚泥処理施設の連携を視野に入れた将来シナリオの構築 **71**

5.1. 緒言	71
5.2. 下水汚泥発生量およびごみ焼却量の将来推計	72
5.2.1. ケーススタディ対象地の概要	72
5.3. 将来の汚泥発生量およびごみ焼却量の推計	74
5.3.1. 将来人口の推計方法	74
5.3.2. 脱水汚泥発生量の推計方法	74
5.3.3. 将来のごみ焼却量の推計方法	75
5.4. 都市代謝施設の統合・連携シナリオ	77
5.5. 更新計画による GHG 削減効果	80
5.5.1. 推計方法	80
5.5.2. LCE の推計結果	84
5.5.3. GHG の推計結果	86
5.6. 本章の結論	89

第6章 施設園芸での低炭素技術選択による GHG 削減効果の推計 **92**

6.1. 緒言	92
6.2. 対象地域および調査対象施設	93
6.2.1. 調査対象地	93
6.2.2. 調査対象施設	94
6.3. エネルギー・物質フローと GHG 排出量の推計	96
6.3.1. 把握方法	96

6.3.2. システムの把握範囲	96
6.3.3. 栽培状況の基礎情報	97
6.3.4. プロセスごとの投入量	97
6.3.5. エネルギー・物質フローの推計	105
6.3.6. GHG 排出量の推計	107
6.4. 設備更新による GHG 排出量の推計	109
6.4.1. 比較ケースの設定	109
6.4.2. 算定方法	111
6.4.3. 算定結果	113
6.5. 本章の結論	116
第 7 章 施設園芸での低炭素技術選択による炭素クレジット創出ポテンシャルの評価	118
7.1. 緒言	118
7.2. 炭素クレジット売却益や補助金を考慮した投資分析	120
7.2.1. 分析方法	120
7.2.2. 分析結果	122
7.3. 地域内の未利用バイオマス賦存量の分析	126
7.3.1. 地域循環可能な未利用バイオマスの検討方法	126
7.3.2. 木質系バイオマス資源の賦存量	126
7.3.3. 廃棄物系バイオマス資源の賦存量	129
7.4. 本章の結論	133
第 8 章 施設園芸農家による過去の CO₂ 削減努力が炭素クレジット制度活用時の便益に及ぼす影響の分析	137
8.1. 緒言	137
8.2. 設備更新パターン別の CO ₂ 排出量の設定	140
8.2.1. 対象とするモデル施設	140
8.2.2. 更新パターンの概要	140
8.2.3. 推計方法	141
8.2.4. 推計結果	142
8.3. 更新パターン別・ケース別クレジット認証量およびエネルギーコスト削減額の推計	143
8.3.1. 更新ケースの設計	143
8.3.2. 推計方法	144
8.4. 早期実施者に配慮した補助条件の概括的把握	150

8.5. 本章の結論	152
------------	-----

第9章 総括	154
---------------	------------

9.1. 緒言	154
9.2. 本研究の総括	154
9.3. 本研究より得られた知見と今後への提言	157
9.3.1. 本研究で得られた知見	157
9.3.2. 環境政策についての提言	160
9.4. 今後の課題	162

第1章 序論

1.1. 研究の背景

我が国は現在、世界に先駆けて人口減少・超高齢化社会を迎えており、さらに経済のグローバル化の進展に伴う社会情勢の変化や財政制約の中で、様々な経済・社会的課題に直面している。こうした経済・社会的課題は、環境問題とも密接に関係しており、また複合性を有していることから、環境的側面、経済的側面、社会的側面を統合的に向上させる必要がある。特に環境政策は、国が抱える経済的・社会的側面からの深刻な課題に対応するための効果的なアプローチとして期待されつつある¹⁾。また、個別分野の環境政策を統合・連携して展開することで、環境、経済、社会の統合的向上の実現を目指す必要がある。そのためには、エネルギーの安定確保と両立した低炭素社会の実現と気候変動への対応、そして、人口減少への対応が極めて重要となる。それは、中長期的には日本のみならず世界的に深刻かつ重大な問題となることが予想されるため、世界の共通課題に対し、先駆けて人口減少を迎えた日本が人口減少という成長制約の中での低炭素社会の実現に向けて、積極的に取り組まなくてはならない。

低炭素社会の実現を目指しつつ、エネルギーを安定的に供給、確保するためには、革新的な再生可能エネルギーの開発と普及の拡大、分散エネルギーシステムの構築、強靱な社会インフラの整備などを速やかに進めることが重要となる。こうした観点から、日本では環境・エネルギーを対象とする「グリーン・イノベーションの推進」を将来にわたる成長と社会の発展を実現するための主要な柱の一つとして位置付け、科学技術イノベーション政策を戦略的に展開している²⁾。グリーン・イノベーションを強力に推進させるために、安定的なエネルギー供給と低炭素化の実現、エネルギー利用の高効率化およびスマート化、社会インフラのグリーン化の3つの重要課題が設定されている。

そのような中、再生可能エネルギーの一つであり、カーボン・ニュートラルとされるバイオマス資源の利活用と、それによる化石燃料代替の促進に対する期待が高まっている。都市系廃棄物バイオマスの代表とされる下水汚泥は、建築資材や堆肥としての資源化のほか、バイオガス発電、固形燃料化、生成ガス回収などのエネルギー・資源転換技術や熱分解化技術から派生したバイオオイル生成技術などの新技術の開発も試みられている^{3,4)}。このような低炭素技術の選択・導入を通じて社会インフラのひとつである下水処理場のグリーン化を図ることは、再生可能エネルギー分野と水分野からのイノベーションで低炭素社会の構築に向けた政策課題の一つに挙げられる⁵⁾。また、木質系バイオマスに着目すると、自立分散型エネルギーシステムの形成に向け、農山村地域で広く薄く地域に賦存するバイオマスを活用した、熱電併給システムなどの整備および木質チップやペレットを用いるボイラなどの普及を進めるとともに新たな熱需要の開発や、地域における再生可能エネルギーの供給拡大などの取り組みがなされている⁶⁾。バイオマス資源を利用する際は、資源需給の地域特性に応じて地域内あるいは

は地域間で連携を図りつつ、適正な規模の循環圏を構築することが重要課題とされる^{7,8)}。

再生可能エネルギー以外にも、エネルギー多消費産業の工場排熱や清掃工場のごみ焼却排熱など、地域には未利用エネルギーが賦存する。これらを施設間で相互に融通し、エネルギーの面的な利用を拡大することも、低炭素型都市の形成において期待されている⁹⁾。

一方、環境政策の中核として進めている低炭素社会、循環型社会を具現化するにあたり、下水処理場や清掃工場に代表される都市代謝施設を、バイオマス転換・エネルギー供給拠点へと機能転換させていくことが望まれる。しかし、都市代謝施設の整備は通常長い年月を要する。そのため、人口減少が進行する現在、従来どおりの人口増加を前提とした都市代謝施設の整備のあり方をそのまま適用することは根本的な誤りを犯すことになるため、問題が生じてからの対応では遅い。さらに、高度経済成長期を中心に整備が進められてきた都市代謝施設の多くが、今後更新の時期を迎えることもあり、迅速な対応が求められている¹⁰⁾。くわえて、国・地方自治体の財政難や本格化する人口減少に対応した規模、形態への転換が求められることなどを鑑みて、事業主体である地方自治体は時代の要請に合った適切な維持管理・更新を早急に計画しなくてはならない¹¹⁾。人口減少に対応した規模、形態へと都市代謝施設を転換することにより、新設に係る費用と維持管理費を抑制することが可能となるため、計画では中長期的な視点に立った都市代謝施設の更新の検討以外にも能力余剰な施設の廃止・縮小・統合を検討することや、更新する場合には、低炭素技術を積極的に導入することが重要である。したがって、人口減少に対応した都市代謝施設のグリーン化を図ることが、低炭素型社会、循環型社会の構築に向けた一つの政策課題である。

さらに、人口と建物が相当程度集中する都市の低炭素化を進めることが求められており、下水処理場の下水汚泥エネルギー化や清掃工場の廃熱利用といった、再生可能・未利用エネルギーの積極的なシステム構築が期待されている¹²⁾。すなわち、都市代謝施設は低炭素型都市の代謝システムの基盤としての進化も求められている。

また、都市基盤である都市代謝施設のように政策的に強力に推進されている分野がある一方で、農山村地域では、温室効果ガスの排出抑制に向けた対策が遅れている状況にあり、今後バイオマスを利用した自立分散型エネルギーシステムの形成に向けた低炭素設備の導入を支援する政策も必要である。その際には、地域特性に応じたバイオマス資源を最大限に活用することや、エネルギー供給拠点へと機能転換した都市代謝施設との農山村地域間の連携によって形成される低炭素型都市の構想も必要となる。

以上に論じた背景をもとに、本論文では、グリーン・イノベーションを推進する上で、都市基盤となる都市代謝施設の更新の方策、農山村地域における自立分散型エネルギーシステムの形成に向けた低炭素設備の普及や促進が、喫緊の課題として位置づけられ、本研究で取り扱う主題とした。

1.2. 研究の目的

本研究では、人口減少という成長制約の中での低炭素社会実現に向けた、グリーン・イノベーションの推進を支援するために必要な知見を得ることを目的とした、地域特性に応じた低炭素型都市-産業代謝システムのモデルを構築する。その際、都市代謝施設の進化、農山村地域での低炭素設備の普及や設備投資の促進など、地域のグリーン・イノベーションを支える制度的枠組みを検討し評価することとした。

1.3. 論文の構成

本論文は全9章で構成されている（図 1-1）。

第1章では、都市代謝施設の更新戦略の方向性を提示し、代謝システムの基盤として進化の必要性を論じた。また、GHG 排出抑制対策が遅れている農山村地域での低炭素設備の導入支援の必要性に論じ、本論文で取り扱う研究範囲を明確にするとともに、各章の構成を記した。

第2章では、グリーン・イノベーションの推進に関連した既往研究の成果に基づいた筆者の着眼点について記述し、本研究のアプローチを示す。そして、本研究の分析対象となる施設・設備に関する現状の政策的動向と既往研究について整理する。具体的には、都市代謝施設における整備の現状と人口減少下での整備のあり方や自立分散型エネルギーシステムの形成に向けた望ましい低炭素技術の導入支援を整理し、そして、それらのグリーン・イノベーション推進に向けた研究課題を述べる。

第3章から第5章まではこれらの背景に基づき、下水処理場を分析対象として取り上げ、都市規模の異なるケーススタディを通じて汚泥処理施設の更新シナリオを設計し、評価する。異なる都市規模を取り上げる理由は、下水道インフラ成熟度が都市規模によって異なるため、更新シナリオの描き方に変化が見られると考えたからである。

第3章では、下水道インフラが早い段階に整備されている大都市において、人口減少および低炭素社会への移行に向けた汚泥処理施設の更新・再編シナリオの設計を行う。そのケーススタディは大阪市を対象とする。そして、行政人口の将来変化を考慮した上で、既存インフラの処理能力に応じた設備利用率を踏まえ、インフラの更新シナリオを描く。その際、インフラ更新時には低炭素技術の導入や汚泥処理の集約化を想定し、エネルギー消費量（LCE: Life Cycle Energy consumption）、温室効果ガス（GHG: Greenhouse Gas）排出量の分析を行う。

第4章では、下水道インフラの整備が現在も進展する地方都市において、人口減少および低炭素社会への移行に向けた汚泥処理施設の更新・再編シナリオの設計を行う。そのケーススタディは和歌山市とする。そして、行政人口、下水道利用人口の将来変化を考慮した上で、既

存インフラの処理能力に応じた設備利用率を踏まえ、インフラの更新シナリオを描く。その際、インフラ更新時には低炭素技術の導入や汚泥処理の集約化に加え早期の更新判断を想定し、LCE、GHG 排出量の分析を行う。

第 5 章では、ごみ焼却施設と汚泥処理施設との統合・連携を視野に入れた汚泥処理計画を立案するためのモデルを構築する。そのケーススタディは和歌山市とする。そして、下水汚泥とごみの将来変化を考慮した上で、都市代謝施設に低炭素技術の導入を図る。低炭素技術の代替技術オプションとしては、汚泥処理施設には燃料転換技術を、ごみ焼却施設にはごみ・汚泥混焼の技術とする。また、ごみ・汚泥混焼の技術には、ごみ焼却施設の廃熱で下水汚泥を乾燥させて効率的な混焼を可能とするシステム検討も含める。更新計画シナリオの評価は、LCE、GHG 排出量の 2 指標を用いて行う。

第 6 章から第 8 章は、すでに示した背景に基づき、施設園芸を分析対象として取り上げ、GHG 排出抑制に効果的なプロセスを明らかとする。その上で、低炭素設備の導入による GHG 削減効果や投資効果を分析する。また、これまでの成果をモデルとして、低炭素設備の導入を支援する制度が抱える課題を明らかにする。

第 6 章では、農山村地域で温室効果ガス対策が進んでいるとはいえ農業分野に着目し、農作物の生産に係る施設園芸におけるエネルギー・マテリアルフロー分析を行い、農業分野の低炭素化に重要なプロセスを解明する。そのケーススタディは、有田川町の施設園芸を対象とする。そして、解明されたそのプロセスに優位性が高いと選定した代替技術オプションに基づいて更新した場合の効果を分析する。代替技術オプションはエネルギー利用の効率化に加え地域特性に応じたバイオマスの利活用も構想する。導入効果の分析については、GHG 排出量を用いて行う。

第 7 章では、農業分野のグリーン化のためには、低炭素型設備を導入することが有効であるため、その導入設備の投資に対する費用便益を分析する。そのケーススタディは、第 6 章で得られた施設園芸での成果をモデル施設として設定する。そして、投資効果の分析には、国などからの設備導入費の支援制度や炭素クレジット制度を活用した場合に投資回収年数の変化を分析する。また、設備更新に適用した代替技術オプションには、バイオマス燃料を使用する技術も検討し、その地域でのバイオマス調達可能量の推計を行う。

第 8 章では、過去の CO₂ 削減努力の違いが炭素クレジット制度を活用して低炭素設備に更新した際に得られる金銭メリットに与える影響を分析する。そのケーススタディは、第 6 章と第 7 章で得られた施設園芸での成果をモデル施設として設定する。そして、解明された早期実施者に配慮した制度設計に向けた示唆を得るために、設備の更新パターンが最も設備更新に消極的なパターンに対して不利にならない措置を概括的に把握する。

最後に第 9 章では、論文全体の分析結果を総括し、本論文で得られた成果と今後の研究課題について整理する。

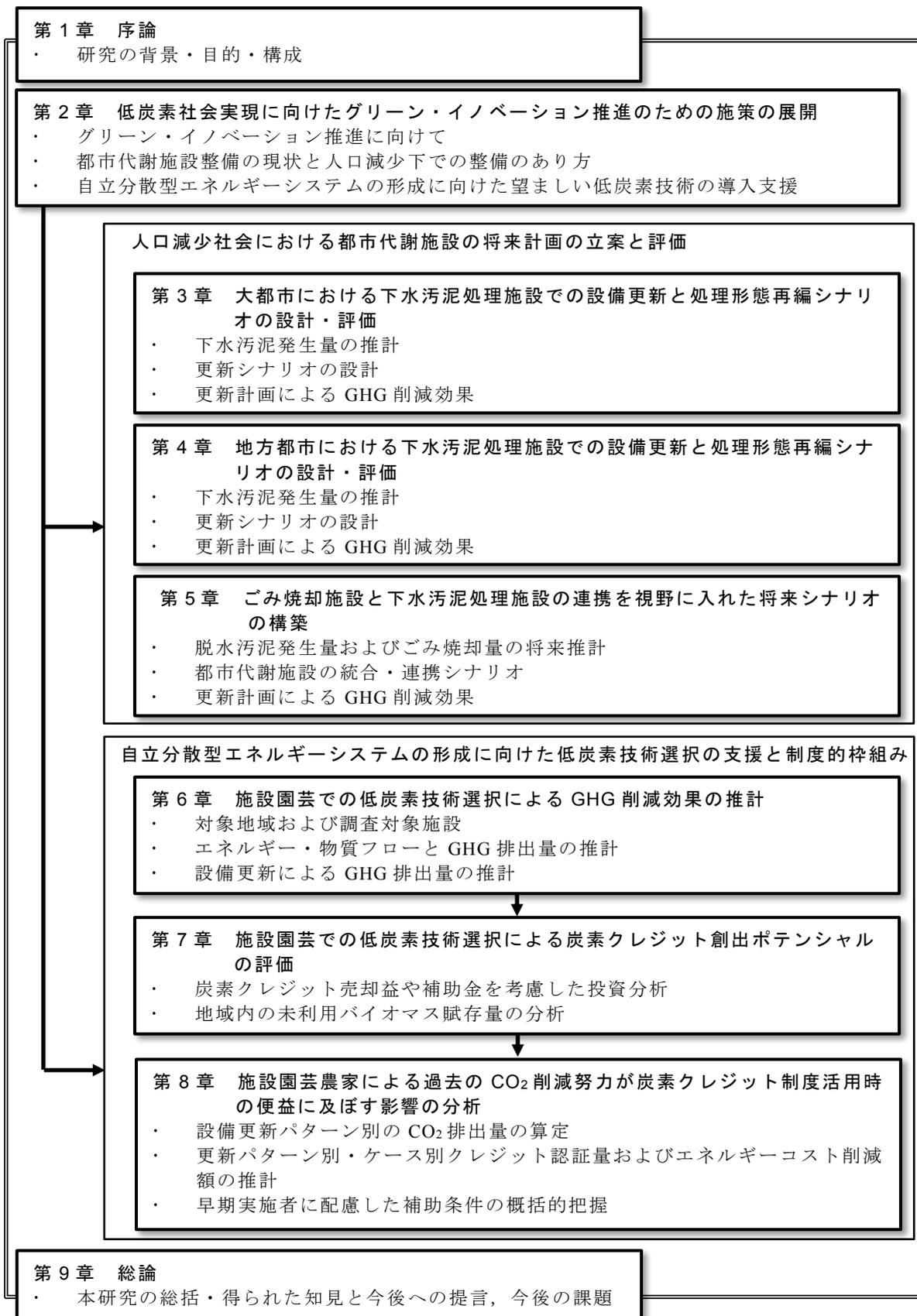


図 1-1 本論文の構成

第 1 章の参考文献

- 1) 環境省：平成 27 年度版 環境・循環型社会・生物多様性白書，2015 年。
- 2) 内閣府：科学技術基本計画 平成 23 年 8 月 19 日閣議決定，2011 年（参照元：<http://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/index4.html>，最終閲覧：2015 年 9 月 28 日）。
- 3) 国土交通省：下水汚泥エネルギー化技術ガイドライン-改訂版-，2015 年。
- 4) 国土技術政策総合研究所：地域における資源・エネルギー循環拠点としての下水処理場の技術ポテンシャルに関する研究，2013 年（参照元：<http://www.nilim.go.jp/lab/ecg/gaiyou/tiiki.pdf>，最終閲覧：2015 年 9 月 28 日）。
- 5) 環境省：グリーン成長の実現と再生可能エネルギーの飛躍導入に向けたイニシアティブ，2012（参照元：<http://www.gov-online.go.jp/info/fusho/env/201209.html>，最終閲覧：2015 年 9 月 28 日）。
- 6) 環境省：2013 年以降の対策・施策に関する報告書（地球温暖化対策の選択肢の原案について），2012（参照元：<http://www.env.go.jp/earth/report/h24-03/main.pdf>，最終閲覧：2015 年 9 月 28 日）。
- 7) 環境省：第三次循環型社会形成推進基本法，2013 年（参照元：<http://www.env.go.jp/recycle/circul/keikaku.html>，最終閲覧：2015 年 9 月 28 日）。
- 8) 環境省：地域循環圏形成推進ガイドライン，2012 年（参照元：<http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=15533>，最終閲覧：2015 年 9 月 28 日）。
- 9) 経済産業省：まちづくりと一体となった熱エネルギー有効利用に関する研究会（中間とりまとめ），2011（参照元：<http://www.mlit.go.jp/common/000221986.pdf>，最終閲覧：2015 年 9 月 28 日）。
- 10) 丹保憲仁：人口減少下の社会資本整備 拡大から縮小への処方箋，2004 年。
- 11) 国土交通省：第 3 次社会資本整備重点計画，2012 年（参照元：<http://www.mlit.go.jp/common/000221986.pdf>，最終閲覧：2015 年 9 月 28 日）。
- 12) 国土交通省：都市の低炭素化の促進に関する基本的な方針，2012 年（参照元：<http://www.mlit.go.jp/common/000231744.pdf>，最終閲覧：2015 年 9 月 28 日）。

第2章 低炭素社会の実現に向けたグリーン・イノベーション推進のための施策の展開

2.1. 緒言

近年、日本では人口減少という成長制約の中での低炭素社会実現に向けて、グリーン・イノベーションの推進を強力に進めてきた。特に、再生可能エネルギーのひとつであるバイオマス資源の利活用は、低炭素社会の実現のみならず循環型社会を具現化するにあたり、最重要課題と位置づけられている。都市基盤である都市代謝施設は、バイオマスが集積するという事業の特性があることから、バイオマス活用拠点への進化が期待されている。また、農山村地域では、バイオマス資源が豊富に存在しており、地域の特性に応じたバイオマス資源を最大限に利活用するシステムの構築が待望されている。

本章ではこうしたグリーン・イノベーション推進のための政策の展開をまずマクロ的な視点で概説するとともに、筆者の着眼点を示す。ついで、都市基盤となる都市代謝施設整備の現状と人口減少下での整備のあり方や、農山村地域に賦存するバイオマスを活用した自立分散型エネルギーシステムの形成に向けて望ましい低炭素技術の導入や支援の動向を整理する。

2.2. グリーン・イノベーション推進に向けて

2.2.1. グリーン・イノベーション推進を巡る議論

地球温暖化や資源希少化、生物多様性の喪失など地球規模での環境問題が、世界が直面する環境制約になるとの考えが国際的に共有化されたことを背景に、グリーン・イノベーションは世界各国の政府が重点戦略として位置づけられている。各国の政府や企業にとってこれまでにない新たな市場やビジネスへの期待感が、官民あわせてのグリーン・イノベーション待望論につながっている。そのため、グリーン・イノベーションに対する期待から各国で政策や事業として実現されつつある。そこでは、個別技術のイノベーションにとどまらず、インフラや制度などの社会の仕組みを構築することを含む統合的なシステム・イノベーションを目指す点が共通している¹⁾。グリーン・イノベーションについては、個々の施策や事業がすでに展開されており、それぞれの内容に応じた既往研究はあるが、マクロ的な視点でグリーン・イノベーションについて取り上げたものは多くない。概説したものをいくつか取り上げて課題を整理したい。

藤田¹⁾は、日本における近年の環境都市の取り組みを概観し、グリーン・イノベーションについての議論を紹介した上で、環境都市における技術と社会イノベーションの展望を議論している。そこではグリーン・イノベーションを理念から環境都市での政策や事業を段階に進めるために、将来の環境社会ターゲットの設計、環境技術イノベーションの推進、環境技術社

会システム・イノベーションの計画，社会実証モデルを通じて制度，社会変革に展開する階層プロセスと4つの方策を総合的に推進することが提案されている。松橋²⁾は，グリーン・イノベーションの成功例や将来有望な例について概説したのちに，これらのグリーン・イノベーションを成功させるための条件を抽出したうえで，エネルギー環境分野でのグリーン・イノベーションを成功に導くためには複数のイノベーションを適切に組み合わせでシナジー効果を発揮させることが必要であると考えている。村上ら³⁾は，環境技術については，最終的なユーザーが多種多様であり，幅広く成果が普及しなければイノベーションとしては成立しないと指摘したうえで，環境持続性と経済成長をうまく組み合わせるためには，経済と環境，社会政策上の目的を効果的に統合し，包含的かつ一貫した政策が必要であるとしている。また，市場の不完全性を補完するための政府の役割が重要であるが，技術開発への投資誘導と同時に市場拡大のための需要の刺激策をより重要視し，改善していく努力が必要であるとしている。加えて，グリーン・イノベーションに関する政策の企画・推進を行うための基盤を整備することが肝心であるとしている。

このように，グリーン・イノベーションを推進する場合には，個別技術のイノベーションを部分的に進めることにとどまらず，制度やインフラなどの社会基盤整備の仕組みを含むいくつかのイノベーションを組み合わせでシナジー効果を発揮する統合的なシステム・イノベーションを目指す必要があるといえる。

2.2.2. グリーン・イノベーションの推進における低炭素技術の導入の論点

先にも述べたが国が，グリーン・イノベーションの推進するなかでも，実施主体が低炭素技術を積極的に導入し，低炭素設備が社会に普及するためには，解決すべき課題が現実的に多くある。実施主体による財政的な課題は言うまでもない。この課題に対しては，環境政策のなかで技術導入に対して財政的支援がなされている。しかし，実施主体が担う行為プロセスの実施主体が単一の組織であった場合，意思決定は比較的容易であるが，実施主体において低炭素技術の導入によってもたらされるインセンティブが主体の期待を超えなくては，技術導入の意思決定は遅延するものと考えられる。そのため，実施主体が設備投資する場合には，財政的な支援を含む更なるインセンティブを見出すことが重要であると考えられる。

また，低炭素技術のなかでも第1章で着目したバイオマス資源を活用する技術の導入には，実施主体が需要端と供給端との双方の意思決定を必要とする。そのため，主体間でのシステム構想が重要となり，実施主体が位置する地域特性に応じた設計が求められるため，財政的支援があつたとしても社会実装までに時間を要する。特に，実施主体の行為プロセスが実施主体とそのほかの主体間ですでにシステム形成されている場合や，実施主体が所属する組織の上位階層が投資の意思決定をもつ構造である場合には多様な課題が複雑に絡みあうため，低炭素技術の導入が前者よりもさらに遅れると考えられる。この場合には，実施主体間とそのほかの

主体間で共有する現状の課題解決のために、自主的かつ積極的に低炭素技術の導入を検討するか、事業主体が所属する組織の上位階層が低炭素社会の構築に向けて英断する必要がある。

換言すれば、実施主体が個別に技術導入を検討・計画する時代から、主体間の連携によって導入可能となる低炭素技術導入や、需要端と供給端との空間的な条件の上で成立する技術導入も含めたシステム構築を検討・計画する時代に突入したといえる。このように、低炭素技術導入にあたっては、事業主体が単に設備・施設を更新することで効率を向上させるだけでなく、事業主体が制度やインフラなどの社会基盤整備の仕組みを含むいくつかのイノベーションを組み合わせたシステムを積極的に構築することが求められる。また、実施主体が公共主体か民間主体と異なることで、主体間のシステム連携の容易さやシステム拡張の容易さが異なる。加えて、施設・設備間の空間的な配置や地域特性に応じたバイオマス資源の分布や賦存量などもシステムを構想するうえで重要なポイントとなる。

本論文での着眼点を整理すると、低炭素技術を施設や設備に導入することで、エネルギー消費の削減、GHG 排出抑制などの効果を得ることができるが、これまでの技術導入は実施主体のみで意思決定がなされてきたため、実施主体のみだと成立しない技術システムの積極的な導入や普及が進んでいるとは言えない。また、グリーン・イノベーション推進の鍵となるバイオマス資源を活用したシステム構築が重要となることが指摘されているが、すでに述べた課題などが制約となり技術の導入や普及が進んでいるとは言いがたい。そのため、空間的に関与した主体間の相互作用や技術導入による効果を評価するシステム構想の議論が必要であるといえる。これについては、いくつかのアプローチが考えられるが、本研究では図 2-1、図 2-2 のように想定した。ここでは、グリーン・イノベーションを実現させるためのシステムに関し、以下の 4 つの視点を用いて考察をする。

1 点目は、実施主体の役割が各主体で違うため、低炭素技術の導入目的が異なる観点である。一般的に施設・設備更新は実施主体により計画が立案される。主体が公共か民間かによって既存施設・設備を更新する契機が老朽化に伴うものによる更新か、経済的な利益の獲得を目指したものか、主体組織の上位計画を反映させるための投資判断かなど、そのあり方は異なる。そのため、主体が違えば施設・設備更新の計画立案や戦略は当然変化するといえる。また、実施主体が組織体制面において近接した組織である場合や主体間の連携または統合が可能な場合には、施設・設備更新の方法や採用する技術の幅もさらに広がると考えられる。

2 点目は、バイオマス資源を利活用する際には、バイオマス種の分布や賦存量が異なる都市部と農山村部の関係や、バイオマス利活用形態の集中・分散の度合いや、エネルギーの需要端とバイオマス供給端の位置関係というような次元の組み合わせによる異なる空間的なものを考慮したうえで導入技術を選択する必要があるという観点である。

3 点目は、施設・設備が導入する低炭素技術の種類や、先に述べた主体と空間の関係によって実現するシステム間連携や導入可能となる技術の幅が広がるという観点である。

最後に 4 点目として、3 つの階層を踏まえたうえで人口減少という制約条件下でのグリー

ン・イノベーションの推進を支援するための政策誘導を検討する。

以上のように、本研究ではこのような点に着目したうえで、主体が異なる施設・設備における低炭素技術の導入や設備更新による効果を定量的に分析し、地域特性に応じた低炭素型都市-産業代謝システムのモデル構築をする。また、人口減少という制約条件下で中長期のあるべき社会像にむけて政策誘導させるという点について、新たな知見を提供することが重要であると筆者は考えた。

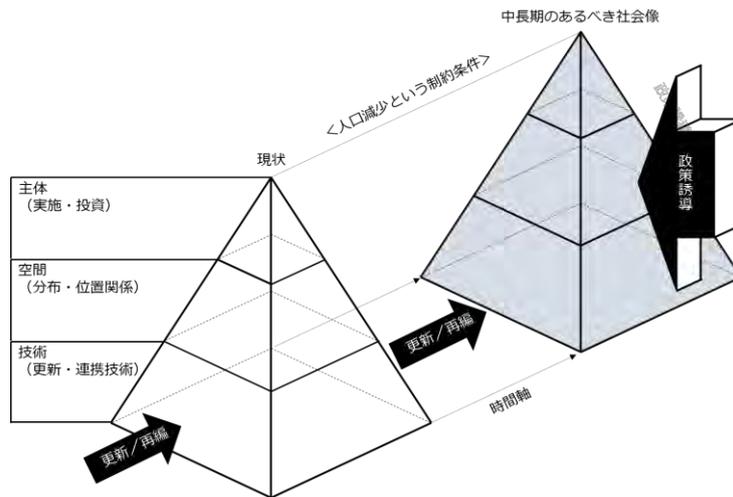


図 2-1 グリーン・イノベーションを実現させるためのシステム概要

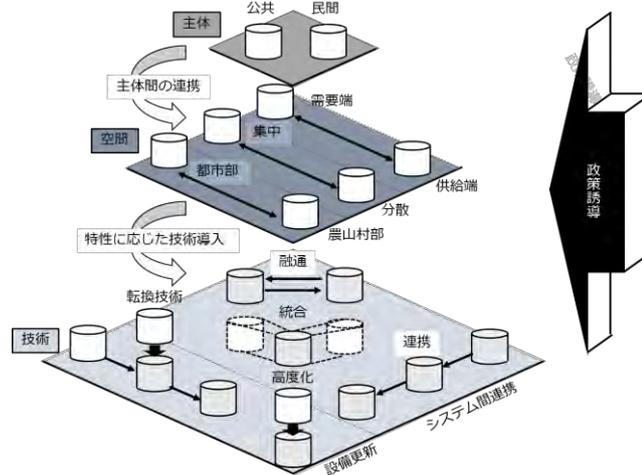


図 2-2 グリーン・イノベーションを実現させるためのシステム階層構造

本研究では設定したシステム階層構造を基に、実施主体の異なる施設・設備の更新を対象とし、第 1 章で述べた研究目的に応じて都市代謝施設の進化、農山村地域での低炭素設備の普及や設備投資の促進に焦点をあて主体、空間、技術の 3 つの階層が異なる複数の事例を取り

上げて分析する。

主体としては、一つは前章で述べた都市代謝施設のなかでも下水処理場を対象事例として取り上げ、その中から実施主体の規模が異なる地方自治体を選択する。そして、人口減少に対応した都市代謝施設のグリーン化を図るという観点から施設更新の将来シナリオを描き、低炭素技術導入による環境負荷低減効果に関する分析を行う。ここで言うシナリオの最終目的は、将来を正確に導き出すことではなく、望ましい社会に向けての意思決定の実現に向けた新しい知見を得ることにある。

もう一つは、主体として農山村地域における民間主体を選択し、バイオマスを利用した低炭素設備の導入による環境負荷低減効果に関する分析と、低炭素設備導入の支援策の活用による投資効果に関する分析を行う。また、バイオマスを利用した低炭素技術が成立するために、その地域におけるバイオマス賦存量を空間的に把握し、供給端と需要端のシステム構想を行う。そこでは、廃棄物系バイオマスを取り扱う都市代謝施設のグリーン化によって連携が可能となりうる技術や農山村地域に広く薄く賦存する森林系バイオマスとの連携を取り上げる。その上で、地域特性に応じた低炭素型都市の構築のために重要となりうる新しい知見を得る。

そして、最後に国などによる設備導入に係る財政支援制度などが抱える課題である早期の自主的な取り組みの有無が制度活用時にどのくらい効果の違いとして現れるのかという、いわば生じる不公平な状況やその程度を明らかとする分析をする。

2.3. 都市代謝施設整備の現状と人口減少下での整備のあり方

2.3.1. バイオマス利活用戦略の進展と再生可能エネルギー拠点としての下水処理場

バイオマス利活用戦略として、国は2002年にバイオマス・ニッポン総合戦略を閣議決定し、目指すべき「バイオマス・ニッポン」の姿およびその進展シナリオを示している。この総合戦略では、2010年度を目処とする具体的な目標が設定され、その実現に向けて、国、地方公共団体およびバイオマス供給・利用者などにおいて、それぞれの役割に応じた取り組みが進められてきた⁴⁾。しかし、この総合戦略の評価と課題として、未利用バイオマスの利用や、各地域のバイオマスタウン構想に基づく実際の取り組みが十分に進んでいないことが、今後の課題とされた。

このような中、2009年にバイオマス活用推進基本法が制定され、基本法に基づきバイオマス活用推進基本計画が策定された。基本計画では、今後取り組むべき施策を基本的な方向性を示している。基本的な方針は、バイオマスをエネルギー源または資源として利用することで、地球温暖化の防止や循環型社会の形成に大きく貢献し、農山漁村に豊富に存在するバイオマスを活用することによる農山漁村の活性化などの効果が期待され、その活用の推進に関する施策の更なる加速化が求められている。また、その活用の推進にあたっては、バイオマスの発生から利用までを効率的なプロセスで結ばれる総合的な活用システムの構築が推進されていることや、循環型社会の形成に向けて、持続的に再生可能な資源であるバイオマスの活用を加速化させることにより、循環型社会への移行も加速させること、地域のバイオマス賦存状況、エネルギーやバイオマス製品の需要などの自然的・経済的・社会的諸条件に適応したバイオマスの活用に向けた取り組みを促進させることなどが、基本的視点として掲げられている⁵⁾。さらに、基本計画ではバイオマスの活用が進んだ将来像を実現する観点から、2020年において達成すべき数値目標が設定されている（表2-1）。

表2-1 バイオマスの利用率目標⁵⁾

バイオマスの種類	現在の年間発生量 [万 t]	現在の利用率 [%]	2020年の目標 [%]	
家畜排せつ物	約 8,800	約 90%	約 90%	
下水汚泥	約 7,800	約 77%	約 85%	
黒液	約 1,400	約 100%	約 100%	
紙	約 2,700	約 80%	約 85%	
食品廃棄物	約 1,900	約 27%	約 40%	
製材工場等残材	約 340*	約 95%	約 95%	
建設発生木材	約 410	約 90%	約 95%	
農作物非食用部	約 1,400	約 90%	約 85%	約 45% 約 90%
		(すき込みを除く)	(すき込みを含む)	
林地残材	約 800*	ほとんど未利用	約 30%**	

* 黒液、製材工場等残材、林地残材については乾燥重量。ほかのバイオマスについては湿潤重量。

**数値は現時点の試算値であり、今後「森林・林業再生プラン」（2009年12月25日公表）に掲げる木材自給率50%達成に向けた具体的施策とともに検討し、今後策定する森林・林業基本計画に位置づける予定。

なかでも下水汚泥は、年間発生量約 7,800 [万 t]のうち 77 %が有効利用されており、その主な用途は建設資材利用である。下水汚泥に含まれる有機物エネルギー利用割合は約 13 %に止まっていることから、今後さらにバイオガス化や固形燃料化などによるエネルギーとしての利用を推進することで、2020 年の約 85 %の達成を目指している。

2012 年にはバイオマス利用技術とバイオマスの選択と集中などによるバイオマスを活用した事業化を重点的に推進し、地域におけるグリーン産業の創出と自立分散型エネルギー供給体制の強化を実現していくための指針として、バイオマス事業戦略⁹⁾が策定されている。ここでは、事業化推進に重点的に活用する技術として、メタン発酵・堆肥化、直接燃焼、固形燃料化、液体燃料化が挙げられている。また、重点戦略として、都市部の下水汚泥、食品廃棄物、木質、農村部では、木質、家畜排せつ物、食品廃棄物の徹底的な利用が推進されている。なかでも、都市部で代表的なバイオマス種となる下水汚泥は、主にエネルギー消費が多い都市部で発生し、有機分が多く生分解性に優れるため、エネルギー利用価値が高く、かつ発生量が安定し下水処理場に集積するという特徴を有しており、事業化にとって有利な条件を備えた非常に貴重なバイオマスである。このため、国の政策として、下水処理場を地域のバイオマス活用拠点（再生可能エネルギー供給拠点）と位置づけ、下水汚泥のメタン発酵によるバイオガス化と固形燃料化などによるエネルギー利用を強力に推進している。

2.3.2. 都市代謝施設の現状と人口減少社会における整備の課題

下水処理場や清掃工場に代表される都市代謝施設は低炭素社会、循環型社会への移行の中で、効率的・効果的な維持管理や計画的な整備・更新を進めると同時に、都市代謝施設に低炭素技術を積極的な導入することが求められている。

下水処理場の現状と動向に着目すると、下水処理場では集約性・安定性に優れたバイオマスである下水汚泥が多量に発生する。この下水汚泥はエネルギーとしての潜在的なポテンシャルが高く、ガス発電や固形燃料化などに代表される下水汚泥エネルギー化技術を採用する処理場が、都市部を中心に増加傾向にある。しかし、こうした取り組みは下水道整備が概ね達成し、比較的大規模な施設を保有している地方自治体や、地域の低炭素化を積極的に推進する地方自治体の一部に限られる。

また、下水処理場の多くは高度経済成長期の都市の拡大や人口集中に呼応して整備が進められ、21 世紀前半から中盤にかけて更新時期を迎える。しかも計画的に維持管理されてこなかったため、老朽化が顕著となっており、早急な改築・更新が必要な状況にある^{7,8)}。しかし、事業主体である地方自治体は、本来下水道整備の進展に伴う設備増強や、老朽化した設備の更新の必要性に応じて維持管理経費を増加させなくてはならないが、財政難で厳しい予算制約下にあるため、むしろその費用は削減傾向にある。そのため、適切かつ費用効率的な施設設備の更新の計画立案が今後ますます重要となる。そうした課題に対応するためには、複数の施設

を統廃合し集約化したり、複数の施設間で機能や役割を見直したりするなど、戦略的な施設整備が求められている。そうした施設整備の方向性は、2つに大別される。一つ目は、複数の施設で汚泥を単独処理する形態から、1箇所に集約し汚泥を処理する形態に切り換える戦略である⁹⁾。二つ目は、汚泥焼却を下水処理場側から清掃工場側に移管し、清掃工場でごみと下水汚泥を混焼する戦略である。なお、下水汚泥の発生量が少ない下水処理場では建設費・維持管理費が割高になるため、ごみ・汚泥混焼システムは、そうした課題の解決策のひとつとなる。

それぞれ代表的な事例を挙げると、京都市¹⁰⁾では汚泥処理施設の整備や改築・更新費用が過大とならないように、適正な施設規模に応じた施設への集約処理を図っている。具体的には、設備の更新に合わせて個別分散型の処理を集約処理にシフトし、維持管理費の縮減を実現している。また、金沢市¹¹⁾では、下水処理場に隣接したごみ焼却施設で下水汚泥の混焼システムを採用している。具体的には、ごみ焼却施設の廃熱で汚泥を乾燥させた後に、ごみと混焼するもので、施設の処理能力の余力と廃熱を効率的に利用することで、経済的に処理している。このような事例からも、将来的には汚泥処理施設の集約化やごみ焼却施設でのごみ・汚泥混焼がさらに進むことが予想される。

一方で、下水処理場はエネルギー多消費型のインフラであり、温室効果ガスを大量に排出する事業として地球温暖化対策の必要性が年々増している。その対策としては、ポンプ場を含む下水処理場における総GHG排出量の約60%を占める汚泥処理プロセスでの排出抑制が重要である^{9),12)}。その汚泥処理プロセスでの排出抑制の一つとして、京都議定書目標達成計画の策定以後、汚泥焼却設備への高温焼却技術の導入が進められてきた。高温焼却は、通常の焼却温度である800[°C]より高い850[°C]で焼却することによって、汚泥焼却量あたりの一酸化二窒素(N₂O)排出量を約6割削減可能となる。2010年までに日本国内で該当する汚泥焼却設備すべてで導入され約130[万t-CO₂]削減が見込まれている¹²⁾。しかし、汚泥焼却設備への高温焼却技術の導入が進んだ現在、高温焼却するための補助燃料の追加投入が課題とされており、運転管理の工夫による省エネルギー化やGHG排出削減対策が重要である¹³⁾。今後、更なる下水処理場のグリーン化を進めるには下水汚泥エネルギー化技術の導入が期待されるが、事業主体である地方自治体では、財政難で厳しい予算制約化にあることや、人口増加を前提とした下水道整備の見直しが遅れていることもあり、すべての下水処理場に導入することは困難であると考えられる。そのため、人口減少および環境・財政制約下における下水処理場の更新・再編と同時にすでに述べた下水汚泥エネルギー化技術のような低炭素技術の導入を検討する必要がある。

清掃工場の現状と動向に着目すると、近年廃棄物発電が注目されている。2013年度末での全国の清掃工場1,189施設のうち発電設備を保有する施設は、328施設で全体の28%である。しかし、大規模な施設ほど廃棄物発電を導入している割合が高く、処理能力ベースでは約62.7%となる。総発電能力は1,770[MW]で、総発電電力量実績は7,966[GWh/y]となり、大きなポテンシャルを有している¹⁴⁾。

一方、各地域の清掃工場は下水処理場と同様に老朽化の進行という課題を抱えている。多くの施設が更新の時期を迎えつつあり、施設更新時には改良・改造による施設の長寿命化を進める必要がある¹⁴⁾。こうした背景を踏まえ、清掃工場は、高効率にエネルギーを回収して利用するエネルギー回収型施設としての更新が期待され、廃棄物系バイオマスの活用の拠点としての施設整備が推進されている。加えて、第三次循環型社会形成推進基本計画では、2030年頃までに、各地域のバイオマス系循環資源のエネルギー利用などにより自立・分散型エネルギーによる地域づくりを進めるとともに、清掃工場が熱や電気などのエネルギー供給センターとしての役割を果たすことが求められている¹⁵⁾。すなわち、地域特性に応じた低炭素型都市の核としての進化が期待されているともいえる。

しかし、基本計画に基づくごみの減量化対策の推進に加えて、人口減少によるごみ排出量の減少に伴う影響で、これまでの人口増加を前提とした施設整備を継続して進めることは、施設の建設・運営面を考慮すると現実的に困難である。このため、一部の地方自治体では、広域化の視点を踏まえた清掃工場の再編や、地方自治体が保有する複数の清掃工場の統廃合を進めている。また、清掃工場だけの再編や統廃合を進めるだけではなく、そのほかの都市代謝施設との連携を試みた戦略が存在する。こうした戦略では、清掃工場やそのほかの都市代謝施設の更新時期との兼ね合いやその地域に賦存するバイオマス種の特성에依じて複数の技術の組み合わせが存在する。

事例を挙げると、南但広域行政事務組合では、ごみ処理広域化を進めるにあたり清掃工場に新たな施設を整備した。この施設は、工場内に高温乾式メタン発酵によるバイオガス化施設とごみ焼却による熱回収設備の乾式メタンコンバインドシステムを、全国の地方自治体に先駆けて導入したものとなる^{16) 17)}。そこでは低炭素技術のひとつである乾式メタンコンバインドシステムを清掃工場に導入し、高効率な発電を実現している。また、し尿処理施設から発生する汚泥をバイオガス化施設の余熱を乾燥熱源として、乾燥処理しごみ焼却施設で焼却している¹⁸⁾。防府市では、可燃ごみから選別された厨芥類などのごみを下水汚泥やし尿汚泥などとともに清掃工場の焼却施設に併設したバイオガス化施設でメタン発酵処理し、発生したメタンガスをごみ焼却施設でのごみ焼却によって得られた蒸気の過熱に利用することで高効率な廃棄物発電を実現させている^{19) 20)}。また、先にも述べたが金沢市では、1982年より清掃工場が可燃ごみと下水汚泥の混焼が継続されており、様々なトラブルを経験しながらも2012年に清掃工場を更新し、あたらしい混焼システムに切り替わっている。このシステム技術では蒸気式間接過熱乾燥機により含水率45%に調整した下水汚泥をごみホッパへ分散投入し、焼却処理するシステムとなっており、これまでの過去のトラブルや知見などを参考にして設計されている。通常、混焼システムはごみ、下水汚泥などの質・量の変化やさまざまな技術的な課題に対応しなくてはならないが、これらの課題に対応したこのシステムを採用することで安定した焼却処理を実現している^{11) 21)}。

このように、清掃工場ではごみ焼却施設更新のタイミングで、広域化の視点を踏まえた清掃

工場の再編や統廃合を進めることや、そのほかの都市代謝施設が従来处理を担ってきたバイオマスを受け入れ可能とする低炭素技術の導入を進めることで、エネルギー供給センターとして進化を試みている。

2.3.3. 都市代謝施設の更新に関する技術選択や将来シナリオ設計の論点

下水汚泥エネルギー化技術を採用する下水処理場は、社会基盤が整った都市で下水道整備が概ね達成している地方自治体などの一部に限られることはすでに述べた。下水汚泥エネルギー化技術を採用する地方自治体の財政状況や社会的事情など地域特性に応じた事情はあるものの、都市の人口集積規模や都市計画の開発、熟度によっては、下水処理場を再生可能エネルギー供給拠点として進化させる以外にも、地域特性に応じて清掃工場との連携や統合も含めた下水処理場の更新計画を議論する必要があるといえる。

この項では下水汚泥エネルギー化技術を概説するとともに都市代謝施設の更新に関連した先行研究を整理したうえで、本研究の取り扱う範囲を明確にする。まず、下水汚泥エネルギー化技術の概要について整理しておく。下水汚泥エネルギー化技術ガイドライン改訂版²²⁾では、固形燃料化の2技術、バイオガス化の6技術、熱分解ガス化の1技術、焼却廃熱発電の2技術の合計11技術を取り上げている(表2-2)。ガイドラインではエネルギー化技術導入の意義として、3つの意義があるとしている。一つ目は、下水汚泥のバイオマスとしての長期的かつ安定的な有効利用、二つ目は、エネルギー価値を利用した技術による経営改善、最後はGHG排出量の削減である。

表 2-2 下水汚泥エネルギー化技術²²⁾

エネルギー化技術区分	検討対象技術
固形燃料化	汚泥炭化技術、汚泥乾燥技術
バイオガス利用技術	バイオガス化回収技術、バイオガス発電技術、自動車燃料利用技術 ガス導管直接注入技術、都市ガス供給・都市ガス原料供給技術、ガス運搬技術
熱分解ガス技術	ガス化炉
焼却廃熱発電技術	蒸気タービン発電、バイナリー発電
そのほかの関連技術	複合バイオマス受入技術、消化促進技術

ガイドライン²²⁾を参考にしながら、下水汚泥エネルギー化技術を個別に取り上げ整理する。固形燃料化は、汚泥炭化技術と汚泥乾燥技術に大別される。炭化技術は汚泥を熱分解させて燃料化汚泥を製造する技術で、一般的に炭化温度によって製品発熱量などの正常が異なる品質の炭化物が生成される。汚泥乾燥技術は、造粒乾燥と油圧減圧式乾燥、改質乾燥などがある。なお、固形燃料化技術はJIS化(下水汚泥固形燃料JIS規格「JIS Z7312」)され製品の品質の安定化と信頼性が確立されている。

バイオガス利用技術は、消化槽から発生したバイオガスを利用する技術として、バイオガス

発電、バイオガス自動車燃料、ガス管直接注入などがある。これらの技術を下水処理場に導入するためには、前段のプロセスに消化槽を設置する必要がある。また、バイオガスの発生量を増大させる技術として、後述で述べる複合バイオマス受入技術や消化促進技術がある。熱分解ガス化技術は、下水汚泥のガス化反応、改質反応により発生した可燃性ガスを汚泥の乾燥と発電に用いることで、高温焼却に比べ、特に N_2O の大幅な削減を図ることが可能となる技術である。焼却廃熱発電技術は、蒸気タービン発電とバイナリー発電があり、前者は蒸気タービンに発電機を連結して電気を得る方式で、後者は中・低温廃熱源などの加熱源により沸点の低い作動媒体を加熱し蒸発させた蒸気によってタービンを回して発電する方式である。そのほかの関連技術としては、複合バイオマス受入技術や嫌気性消化技術、消化促進技術がある。複合受入技術は、消化槽を設置する下水処理場が下水道以外で発生するバイオマスを受け入れて共同処理する技術である。受け入れバイオマスとしては、し尿や浄化槽汚泥、生ごみなどがあり、地域の廃棄物処理を統合することでコスト削減できることや、バイオマス発生量を増加させることでガス発電量や利用量を増加させることなどが可能となる。また、消化促進技術にはいくつかの技術が存在するが、現在実証段階のものが多い。近年は、これらのいくつかある技術のなかでも特に固形燃料化技術を採用する地方自治体が増加傾向にある。

下水処理場での汚泥処理に関連した先行研究は、大きく分けると下水汚泥エネルギー化技術を含む汚泥処理の技術比較に着目したものと、都市代謝施設の更新計画の立案やシステム構築に着目したのものがある。技術比較に関する先行研究として、惣田ら²³⁾は下水処理場の濃縮、嫌気性消化、脱水、焼却、熔融などプロセスで構成される下水汚泥処理システムのエネルギー消費量の原単位を作成し、この原単位を組み合わせたエネルギー解析モデルを用いて、汚泥処理システムのエネルギー消費量および GHG 排出量を評価している。そこでは、汚泥処理量が多いほど各処理プロセスのエネルギー消費量原単位が減少することが確認されている。すなわち、汚泥の処理規模が原単位に与える影響は大きく、汚泥処理を集約化し処理量を増加させるほど処理効率が向上するといえる。ただし、汚泥焼却プロセスについては従来技術に比べて補助燃料の追加投入を必要とする高温焼却技術が普及する前の汚泥焼却設備を対象として分析しているものであるため、今後は補助燃料による影響も分析する必要がある。内田²⁴⁾は、消化工程の有無と代替燃料化（中温炭化、低温炭化、改質乾燥、造粒乾燥）、ガス化、焼却技術の処理方式を対象として、消費エネルギー、生成燃料の持つエネルギー、処理工程で発生する N_2O などについて、既往情報やメーカーアンケートをもとにして比較検討し、処理方式別エネルギー収支などを定量的に評価している。そこでは、燃料化技術がエネルギー収支、GHG 排出削減量の収支ともに有利ということが確認されている。なお、ここでは燃料代替技術によって生成される代替燃料の輸送プロセスが試算対象に含まれていないため、実際に技術導入する場合や比較検討する場合には運搬方法による影響も考慮する必要があるといえる。木室ら²⁵⁾は、焼却、固形燃料化、部分燃焼ガス化、消化技術を対象とし、複数の下水汚泥エネルギー利用システムを設計し、エネルギー収支と GHG 排出量、経済性を比較評価している。

そこでは、これまで多くの下水処理場に採用されてきた焼却技術システムに代えて、炭化やガス化システムを導入することが GHG 排出量を大きく削減できるとしている。木下ら²⁶⁾は、従来の焼却方式、乾燥燃料化、中温炭化、低温炭化の3つの代替燃料化方式、発電付焼却方式について、異なる処理規模においてフイージビリティ・スタディを行い、ユーティリティコストおよび GHG 排出量を比較評価している。その結果、代替燃料化方式である乾燥燃料化と低温炭化が最も GHG 削減効果が大いとしている。代替燃料は下水処理場の外部にある石炭火力発電所で使用されることが前提での比較評価であるため、石炭代替効果分が GHG 排出削減量として計上されているが、システム境界を処理場のみで閉じた場合には、GHG 排出量が最も小さくなるのは発電付焼却方式であるとしている。また、新たな下水汚泥エネルギーの利用方法として、一定処理規模以上の処理場においては、発電システムを備えた焼却方式は一つの検討項目として有益性があるものと結論づけている。

施設更新計画やシステム構築の立案に関する先行研究として、石井ら²⁷⁾は、都市における廃棄物処理および CO₂ 排出の戦略的削減のための厨芥類利用とエネルギー回収に着目し、下水処理場に仮想的に導入したバイオガス施設で、分別回収した食品廃棄物を受け入れた場合のエネルギー回収量および CO₂ 削減効果を推計している。また、都市レベルで厨芥類の賦存量およびエネルギー需要を推定する方法を確立している。その方法論は都市における空間的偏りを考慮した輸送や需給バランスを検討することが可能となっている。高久ら²⁸⁾は、株式会社荏原製作所が開発・実証を進めてきた内部循環型流動床ガス化炉 (ICFG: Internally Circulating Fluidized-Bed Gasifier)²⁹⁻³¹⁾の技術を応用した、内部循環型流動床方式による急速熱分解オイル化技術に着目し、廃棄物の空間的な発生分布を把握するデータベースを構築するとともに、オイル化や炭化などの転換技術の導入や一般廃棄物、下水汚泥の地域循環システムの代替案を構築している。代替システムではディスパーザーが最大源普及した場合を想定しているが、ディスパーザー導入を 100%に近づけることが可能な都市は全国の下水道整備状況からすると多くはないため、人口が集積していない地域ではシステム構築によって得られるメリットが少ないことを指摘している。なお、オイル化技術は開発・実証段階にあり、実用化の事例は存在しないが、高温焼却と同じく下水汚泥の焼却時に発生する N₂O 排出量も大幅に削減可能となる³²⁾ことに加えて、産業全般で主要な燃料として幅広く利用されている重油に代替可能な再生燃料を生成することができるため、用途幅が広く可搬性に優れたオイルを生成することができる点が最大の特徴である。すなわち、産業全般と親和性の高い代謝システムの構築に有効な技術のひとつといえる。オイル化プロセスの詳細な想定フローについては文献 33)を参照されたい。また、山本ら³⁴⁾は、このオイル化技術に着目し、まずライフサイクル視点から環境負荷を定量的に分析している。その上で、対象地域内での汚泥処理施設や汚泥焼却炉の統廃合に関する中長期計画を策定し、地域レベルでオイル化技術が下水処理場に適用された場合の GHG 削減効果を定量的に明らかとしている。そして、オイル化技術を導入する戦略は GHG 削減ポテンシャルが大いとしている。また、オイル化技術は下水処

理場を低炭素インフラへと転換させるとともに、資源回収・転換拠点から空間的に離れた需要家への液体燃料供給を可能とし、バイオマス利用をさらに拡大させることに貢献できるとしている。三島ら³⁵⁾は、清掃工場の焼却熱由来の発電電力を活用した下水汚泥のバイオオイル化システムを検討し、エネルギー消費および GHG 排出の削減効果を定量的に評価している。その結果、清掃工場からのごみ焼却廃熱を活用した下水処理場に導入したオイル化システムが有効としている。また、研究で用いた原単位は、下水処理場における処理量あたりのエネルギー消費量および GHG 排出量は、処理場の処理規模が小さくなると原単位は大きくなると指摘し、その影響については今後検討する必要があると指摘している。中久保ら³⁶⁾や管ら³⁷⁾は、厨芥・下水汚泥の混合消事業、一般廃棄物・脱水汚泥の混合焼却事業を取り上げ、下水処理場と清掃工場の連携型更新計画を評価している。ただし、これらは下水処理場の消化槽への厨芥受入を介した、汚泥処理事業とごみ焼却事業とが連携した更新計画を評価しているため、消化槽を有していない下水処理場と清掃工場との連携は今後評価する必要がある。

このように、先行研究の多くは下水汚泥エネルギー化技術を含む汚泥処理技術の導入効果の分析に関する研究や施設更新計画やシステム構築に関する研究が中心である。人口減少社会における中長期的な更新計画の設計や評価を試みた研究はほとんど見当たらない。また、技術比較で今後検討する必要があるものとして、先行研究では明らかとなっていない、補助燃料の追加投入が必要となる高温焼却技術での汚泥焼却量の変化に伴うエネルギー消費量と GHG 排出削減原単位の影響がある。加えて、オイル化技術を取り扱った先行研究はいくつかあるが、2.3.2.で取り上げたごみ・汚泥混焼システムや燃料転換技術システムを比較した研究は管見の限り見当たらない。

先行研究を踏まえ、本研究では人口減少社会における都市代謝施設での設備更新と処理形態の再編・統合の将来シナリオの設計という点に関し、以下の 2 つに焦点を当てることとした。一つ目は、都市規模が異なる都市における下水汚泥処理施設での更新計画、二つ目は、都市代謝施設の統合と連携を含めた汚泥処理施設の将来計画とし、人口減少という制約条件下でのシナリオ分析を組み込むことで、これまでほとんど研究されてこなかった側面からのアプローチを試みた。

そこで、本稿の第 3 章、第 4 章では、事業化にとって有利な条件を備える下水汚泥が集積する下水処理場の汚泥処理施設の設備更新と処理形態の再編の将来シナリオを設計する。その際、下水処理場の整備状況が都市規模や地域特性に応じて異なることから、都市規模や地域特性の異なる大阪市と和歌山市を取り上げ、汚泥処理施設に技術導入したときの環境負荷量を推計する。また、第 5 章では都市代謝施設の統合と連携を含めた汚泥処理の将来計画を立案し、技術導入したときの環境負荷量を推計する。以上より、人口減少社会における都市代謝施設の将来計画の立案と評価を行う。

2.4. 自立分散型エネルギーシステムの形成に向けた望ましい低炭素技術の導入支援

2.4.1. 農業分野における温室効果ガスの排出抑制に向けた対策の状況

近年、原油や天然ガスなどの化石燃料の価格高騰は、わが国の産業活動全体に影響を及ぼしている。重油や軽油などにエネルギー源を依存する農林水産業も例外ではなく、エネルギーコスト増加によって生産者の利益が圧迫されている³⁸⁾。これは、第一次産業経営の存立基盤に関わる問題である。特に農業は人間の生存に必要な食料を生産・供給する存在であるため、エネルギー供給不安に備えて農業生産におけるエネルギー安全保障を確保することは、健全な地域・都市生活を営む上で重要である。2011年に発生した東日本大震災の際、流通網の途絶や生産設備の被災などによって、農業生産への化石燃料の円滑な供給が困難となったことは記憶に新しい。こうした経験からも、南海トラフ巨大地震などの予想される大規模災害を見据えて、安定的かつ自立可能な地域エネルギー供給のシステムづくりを検討しておく必要がある。

一方、地球温暖化対策を背景とした省エネルギー対策の面では、第二次産業に比べると、第一次産業におけるエネルギー使用の合理化は進んでいるとは言い難い。この理由としては、農業生産の担い手の減少や高齢化が着実に進行³⁹⁾し、農業経営の体質強化を図る取り組みが困難な状況にあること、農業生産者にとって設備の初期費用が負担⁴⁰⁾となり、低炭素設備や省エネルギー技術の導入が十分に進んでいないことなどが挙げられる。したがって、農業分野における温室効果ガスの排出量は産業全体から見れば多くないものの、高い改善ポテンシャルを有していると考えられる。日本国温室効果ガスインベントリ報告書⁴¹⁾によると、2005年度における国内の農林水産業由来のCO₂排出量は1,364[万 t-CO₂]で、そのうち農林業由来は864[万 t-CO₂]である。この報告結果をもとに、及川⁴²⁾は施設園芸分野の排出量を611[万 t-CO₂]と推計し、施設園芸分野の占める割合が高いことを明らかにしている。施設園芸を採用する栽培品目の中では、特に花卉・花木類のエネルギー消費およびCO₂排出原単位がそのほかの農作物品目に比べて大きい(図2-3)。

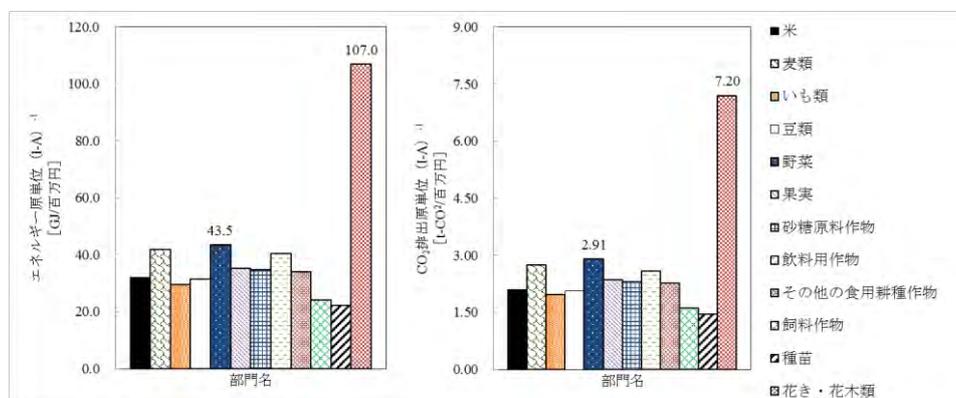


図 2-3 農作物品目別の環境負荷原単位⁴³⁾

施設園芸の現状について整理すると、生産面では国の農業産出額の約4割を園芸作物である野菜、果樹、花卉が占めている。また、消費面では国民消費生活上重要な品目であるため、消費者ニーズに応じるために施設園芸による周年安定供給が必須要件となる。つまり、これを実行するためには、寒冷期には園芸施設に重油を投入して、野菜や花卉などを加温栽培する必要がある。また、野菜、花卉、果樹を含めた施設園芸の栽培延べ面積は、2004年の70.53 [千ha]をピークにしてその後減少傾向にある（図2-4）。2009年には2004年から8.34 [千ha]の減少となる。これは、2009年比で約8%減である。

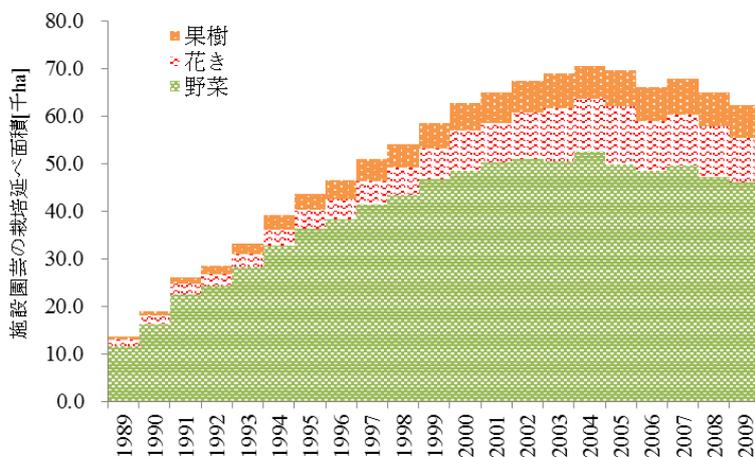


図 2-4 施設園芸の栽培延べ面積の推移⁴⁴⁾

この要因には、経営者の高齢化による後継者不足や近年の燃料価格高騰による農業経営の圧迫、自然災害からの復旧の経済的な困難に伴う栽培放棄が挙げられる。このままでは、施設園芸による農作物生産が構造的に下降線をたどるのではないかと懸念されている。それゆえ、継続的な農作物生産を可能とするために、経営基盤の強化が期待されている。

こうした燃料価格高騰による農業経営の圧迫を解消するために、国は2010年以降、施設園芸農業者の安定的、継続的な経営が困難な状況を改善すべく、燃料価格高騰への緊急対策を実施してきた。この対策の政策目標は、施設園芸分野における省エネルギー型の経営構造への転換を掲げ、主要な施設園芸産地における重油使用量の15%削減を目指している³⁸⁾。政策目標達成のための具体的な策は、施設園芸省エネルギー設備のリース導入支援と施設園芸セーフティネットの構築による支援である。前者は、農業従事者の初期投資の負担を大幅に削減するリース方式による、ヒートポンプ、木質系バイオマス利用の加温設備などの施設園芸用省エネルギー設備の導入支援である。この支援は、産地ぐるみの省エネルギー化を集中的・計画的に行うものである。后者は、農業従事者と国の拠出により、施設園芸用の燃料価格が一定以上に上昇した場合に補填金を交付するセーフティネットの構築を支援するものである。このほかにも、

先進的な省エネルギー型のハイブリッド加温設備や木質系バイオマス利用加温設備などの設備導入を支援するために、導入・更新費用の3分の1ないし2分の1が国や地方自治体から補助されている^{38,45)}。このように、経営健全化のための支援がなされているが、率先して設備導入を図る農業従事者は、大規模農家などの経営基盤が頑強な一部の農家に限定される。

2.4.2. 地域特性に応じたバイオマスの活用や低炭素技術の導入を支援する政策の論点

2012年に第四次環境基本計画が策定され、長期的な目標として2050年までに80%のGHG排出削減を目指し、その推進を図っている⁴⁶⁾。この目標達成のためには、大幅な省エネルギーと再生可能エネルギーの最大限の導入が必要不可欠である。しかし、全国に賦存する再生可能エネルギーを生み出された地域内のみで活用したとしても、GHG排出量の大幅な削減は困難と考えられている。その要因は、大都市圏のように人口が集中する地域とそうではない地域におけるエネルギー需要に差が生じるため、エネルギー需要の多い地域では地域内の再生可能エネルギーでその需要を賄うことが難しい。そのため、特性の異なる地域間が相互に連携し、エネルギーの余剰を発生させないように、需要の少ない地域から需要の多い地域にエネルギーを供給することが、国全体でのGHG排出量の大幅な削減に繋がると考えられている。また、地域内の域際収支を見ると、各地域内総生産（GRP）の1割弱の資金が、エネルギーの使用に伴い域外に流出している。域外流出資金のうち、海外への化石燃料への流出が約5.9%となる。再生可能エネルギーの潜在供給量の高い地域が、その地域のエネルギー消費を化石燃料から再生可能エネルギーにシフトすることで、域際収支を改善することができるという結果がある¹⁴⁾。また、高潜在供給量地域からエネルギー需要が高い地域へとエネルギー供給するためには、再生可能エネルギーのなかでも、特にバイオマスはそのほかの再生可能エネルギーとは異なり、技術開発が進み燃料転換技術が確立していることもあって、特性の異なる地域間連携を容易する上で重要な鍵となる。バイオマスを最大限に利用することこそが、GRPの域外流出を改善することにつながり、地域のグリーン・イノベーションを促進させて持続可能な地域循環圏が形成できると考えられる。

こうしたことから、バイオマスを活用した地域間連携を進めていくために、地域特性に応じたバイオマスを最大限活用するエネルギー需要端やエネルギー供給端のシステム構想が必要となる。そのため、農山村地域では、バイオマスボイラやバイオマス発電所などの整備を進めることも必要であるが、都市基盤であるバイオマス転換・エネルギー供給拠点に機能転換した都市代謝施設との連携システムを検討することが求められる。

一方で、地球温暖化対策のなかでも横断的な施策の一つとして、これまでGHG排出削減が進んでこなかった中小企業のほか、農林業やサービス業などの幅広い分野での排出削減を促進する国内排出量取引制度がある。この制度は国内クレジット制度といい、中小企業などが省エネルギー設備の導入により削減したCO₂を炭素クレジット化（権利化）し、大手企業など

に売却することができる。この制度を活用することにより、事業者の設備導入費の負担を軽減することが可能となる。すなわち、経営基盤が強靱ではないために、低炭素技術の導入が遅れている農山村地域の産業分野においても、設備導入を促す契機となることや、炭素クレジット売却単価によっては、最大限の支援となる制度ともいえる。

このように、地域特性に応じたバイオマスの活用や低炭素技術の導入を支援する政策が存在するが、先進的な取り組みは一部の事業者に限定される。そのため、従前の初期投資を負担する政策に加えて、クレジット制度を活用しても取り組みが広がっていない原因を明らかとすることや、設備導入における投資効果を費用と収益の観点から経済的に評価することが必要となる。

2.4.3. 施設園芸での GHG 排出抑制に関する論点

施設園芸での低炭素設備や省エネルギー技術の導入が、大規模農家などの経営基盤が頑強な一部の農家に限定的であることはすでに述べた。農山村地域で農業を営む施設園芸が、低炭素社会実現に向けた取り組みをするためには、使用設備の高効率化や地域特性に応じたバイオマス燃料を利用する技術の積極的な導入やバイオマスを最大限活用するエネルギーシステムの構築が必要となる。そのために、まずは低炭素化技術設備への更新による効果を議論する必要がある。

この項では施設園芸での省エネルギー化技術（低炭素技術）を概説するとともに先行研究を整理したうえで、本研究で取り扱う範囲を明確にする。まず施設園芸での低炭素技術の概要について整理しておく。

JA 全農が取りまとめている資料⁴⁷⁻⁴⁹⁾では、施設園芸の省エネルギー対策として加温設備の更新や適正温度管理や作物の生理特性に合わせた時間によって変温管理する方法などが提案されている。また、後述の 2.4.4. で述べるが、国内クレジット制度を活用し導入した設備の投資回収期間の短縮につなげていく方法についても提言されている。

資料⁴⁷⁻⁴⁹⁾によると、加温設備の更新として、ヒートポンプや木質系バイオマスを活用した加温設備を導入する方法がある。ヒートポンプは、少ない投入エネルギーで高効率にエネルギーを利用可能とする技術である。施設園芸分野においては、従来の重油焚き加温設備との併用が主流になっており、運転コストの安いヒートポンプを優先的に運転し、ヒートポンプのみでは室温維持が困難となる温度帯に従来型の加温設備と併用運転することで、燃料費の削減が可能となる。近年、作目品目のなかでも花き類から普及しつつあり、果菜類や果樹などは現地試験が実施されつつある。木質系バイオマスを活用した加温設備は、重油の代わりに木質系バイオマスである木質ペレットや木質チップなどを燃料としており、最大限の GHG 排出削減効果を発揮することができる。しかし、設備の導入費用が高価であるため、導入費用削減策が検討されている。また、燃料となる木質系バイオマスは、従来使用していた燃料と比較した場合にランニングコストの削減効果を得られなくなる可能性がある。また、この設備を導入する場

合には、燃料となる木質系バイオマスの確保や供給体制の構築が重要となる。そのため、設備導入時にはこうしたことにも検討が必要である。

適正温度管理による方法は、省エネルギーや燃料費削減に対応する温度管理をする方法である。具体的には、適正温度を守りながら燃料を節約、加温設備の設定温度を下げた低温管理栽培への切り替え、作型変更による暖房期間の短縮、低温管理対応型作目や品種への切り替えなどが挙げられる。作物の生理特性に合わせた時間によって変温管理による方法は、施設内の気温を昼夜とも恒温に保つのではなく、作物の生理特性に合わせて時間によって変温する方法である。近年、いくつかある方法のなかでも特に加温設備の更新は、省エネルギー対策の中軸を担うものといえる。

施設園芸の低炭素化技術に関連した研究は、大きく分けて加温設備への代替技術導入に着目したもの、加温設備の温度管理技術に着目したものがある。前者については、ヒートポンプと石油燃焼式加温設備の併用^{50,51)}、バイオマス燃焼ボイラの導入^{52,53)}などを扱ったものがある。馬場⁵⁰⁾は、加温設備メーカーからの視点で、既設のハウスにヒートポンプを追加導入することで、エネルギーコスト削減に加えて夜冷や除湿などの多目的利用が可能であるとしている。また、ヒートポンプハイブリッド方式（以後、「ハイブリッド方式」という）の加温システムでヒートポンプを優先的に運転することで、石油燃焼式加温設備に比べ20～40%程度のCO₂排出量削減が期待されるとしている。佐藤ら⁵¹⁾は、ヒートポンプと重油式温風機のハイブリッド運転により、重油式温風暖房機単体での利用に比べエネルギー投入量を46%、CO₂排出量も39%削減可能としている。その上で、ハイブリッド方式は今後の施設園芸用設備として普及が期待できることを明らかにしている。

山口⁵²⁾は、高知県、山形県、北海道、静岡県での木質ペレット焚き加温設備の導入事例を紹介している。ここでは、導入事例や燃料費削減実績を紹介しているが、CO₂排出量や投資回収効果といった経済性は明らかとしていない。また、木質ペレットの特徴として、木質チップに比べてハンドリングが良いバイオマス資源としながら、ペレット製造所が遠隔地にある場合は、消費地までの輸送コストの比重が大きく、輸送過程でのCO₂排出量を考慮する必要があるとしている。薬師堂⁵³⁾は、施設園芸に導入可能なバイオマス技術（ペレットを除く）を紹介している。薪焚き加温設備の特徴は、安価で潤沢な薪燃料を入手可能としながらも、薪の投入に人が必要となることから、重油消費量を軽減する目的で設備を設置する場合には人件費も含めて検討すべきとしている。また、木質チップボイラの主な用途は温泉施設や施設暖房への温湯供給などであり、大型のものが多くとしている。そして、チップ燃料は木質ペレットに比べ、チップの加工工程が少ないため安価に購入することが可能だが、設備の構造上不均一なチップを供給した場合にトラブルが多いため、チップ燃料の品質確保と安定供給可能なシステムを検討すべきとしている。その上で、バイオマス資源の種類は地域ごとにその種類や賦存量が異なっていることを指摘している。

木質系バイオマスを燃料としたガス化コージェネレーション技術を対象とした研究⁵⁴⁾では、

施設園芸のエネルギー需要を文献およびヒアリングに基づいて設定し、施設園芸への技術適用の可能性を分析している。しかし、1～5 [ha]程度の施設面積を想定した技術であり、平均作付面積が約 0.5 [ha]とされるわが国の施設園芸で適用できる範囲は限られるであろう。また、鈴木ら⁵⁵⁾や永野ら⁵⁶⁾は、地域に賦存する未利用資源を活用することで、施設園芸経営の高度化・合理化を図る地域循環システムを提案している。ただし、これらは経済性の仮想的な簡易シミュレーション、あるいは全国での導入事例の紹介に主眼が置かれており、実効的な GHG 削減ポテンシャルは明らかにされていない。

一方、加温設備の温度管理技術に着目した研究^{57, 58)}では、施設を変温管理することで品質を維持できるとし、シミュレーションでの試算から燃料消費量が約 15～30 %抑えられることを明らかにしている。しかし、全育成ステージを取り扱ったものではないことや特定の品種のみが対象となっていることから、すべての品種に適用可能なものとはなっていない。道園ら⁵⁹⁾は、人工気象器を用いた制御管理化において、園芸施設内の夜間設定温度を低下させることにより、加温設備の省エネルギーを実践している。著しい生育不良の生じない最低気温 13 [°C]程度の温度域内で活用することにより、最低気温 18 [°C]条件と比較して収穫物の品質低下を最小限に留めることが可能であるとしている。しかし、これも特定の品種のみでの実証結果であり、すべての品種に対応できるかは明らかとなっていない、今後そのほかの品種に適用していくことが期待される。

先行研究の多くは大規模な施設である 50 [a]規模以上の事例を対象としているが、国内の施設園芸規模に着目すると、その規模の経営体が全体に占める割合は 11.3 %と小さい⁶⁰⁾。中小規模な施設である 50 [a]規模未満の経営体は、全体の 88.7 %と大部分であり、特に野菜、花卉では、1 戸あたりの平均面積が 15～18 [a]規模である⁶¹⁾。こうした中小規模施設における実態的な研究が期待され、削減効果が高い省エネルギー対策の提案や、エネルギー消費量削減、GHG 排出削減ポテンシャルの定量評価が望まれている。また、バイオマス燃料を使用する場合には、地域特性に応じたバイオマス種の選定や輸送過程をシステム境界に含めた GHG 排出量も考慮した分析が期待されている。

2.4.4. 炭素クレジット制度活用による低炭素技術の導入支援に関する論点

地球温暖化対策の支援策の一つである国内クレジット制度を活用することで、事業者の設備導入費の負担を軽減することが可能となることはすでに述べた。2008 年制度開始から 2012 年度の制度終了までの期間において、承認された 1,466 事業によって、175.3 [t-CO₂]の削減見込量である。期間内で創出されたクレジット量は、目標値の 182 [万 t-CO₂]に対して 150.4 [万 t-CO₂]となり約 83 %を達成している⁶²⁾。なお、国内クレジット制度は 2013 年度からオフセット・クレジット制度と発展的に統合されて J-クレジット制度として運用が開始されている⁶³⁾。

農業分野に着目した上で、全国の事例を見ると地球温暖化対策支援と経営健全化の支援な

どの制度を複数組み合わせることで低炭素設備の導入を図る先進的な取り組みが、一部の農業従事者によって実施されている。具体的な事例として、大分県のバラ農園では園芸施設内の暖房をヒートポンプ主体に切り替え、重油焚き加温設備を一部併用するハイブリッド運転により、重油の使用量を 88 %、暖房経費を 44 %、年間の CO₂ 排出量を 986 [t-CO₂/y] から 577 [t-CO₂] へと 59 % 削減している^{64, 65)}。これは国内クレジット制度で農業分野初の案件であり、制度を活用して経営の効率化と CO₂ 削減に成功した事例といえる。山梨県南アルプス市のさくらんぼ農家では、市からの提案で山形県の企業から無償でペレットボイラを借用し、2011 年 1 月から使用した。その結果、3.5 ヶ月で重油の使用量を約 6.0 [kl] 削減し、CO₂ 排出量を約 16 [t-CO₂] 削減している⁶⁶⁾。さらに田原市などにおける国内クレジット制度の利活用による実態調査⁶⁷⁾では、大葉、菊、バラ、胡蝶蘭の施設園芸において重湯焚き加温設備からヒートポンプに更新した事例や、菊の施設園芸における照明設備を白熱球から LED に更新した事例が紹介されている。これらの事例の多くは大規模施設園芸または複数の農家が団体に申請しており、地域レベルで制度を活用しようとしている。これらのことから、特に施設加温用の燃料購入費用を含めた光熱動力費が農業経営費の約 2 割を占める⁴²⁾といわれる施設園芸分野では、事例で紹介したような先進的な取り組みが業界全体に普及・拡大することによる省エネルギー効果や GHG 削減効果は大きいと期待される。

他方で、国内クレジット制度では、クレジット認証量は設備更新前後の実質的な CO₂ 削減量ではなく、既設設備の初期性能値を基準にして求めた CO₂ 削減量に沿って算定される枠組みとなっている。したがって、直近の設備更新の時期や設備性能によって認証量に差が生じるため、過去に自主的な設備更新に取り組んできた事業者ほど、削減クレジットが小さく見積もられることになる。この制度では、2008 年 4 月 1 日以降同年 10 月 20 日までに開始された排出削減事業もクレジット認証対象とする配慮がなされた⁶⁸⁾ものの、その期間は限定的であり、それ以前の早期実施者への配慮はなされなかった。この点に関しては、J-クレジット制度の規程案に対するパブリックコメント⁶⁹⁾でも、こうした早期実施者（アーリーアクション事業者）が市場競争で不利にならないように配慮すべきとの意見が出されている。

既設設備の扱いに関する同様の議論は再生可能エネルギーの固定価格買取制度（FIT: Feed-in Tariff）の設計の際にもなされ、例えば「（事業者の）先行導入努力を評価し、何らかの救済措置を講ずべき」⁷⁰⁾との意見も出された。最終的に移行や買取に条件がつけられたものの、再生可能エネルギー発電設備導入の早期実施者にも配慮した設備認定基準が設けられるに至っている。今後、中長期的な温暖化対策として低炭素設備・機器の普及をより一層推し進めなければならない中で、こうした議論は関連制度の設計に際してこれからも起こりうることである。しかし、国内クレジット制度や FIT に関する先行研究の多くは、枠組みの解説や事例紹介にとどまっており、早期の自主的な取り組みの有無が制度活用時にどのくらい効果の違いとして現れるのかという、いわば生じうる不公平な状況やその程度を定量的に明らかにした研究は見られない。

そこで、本稿の**第6章**では、農山村地域に位置する小規模分散型のエネルギー需要端となる施設園芸を取り上げ、実態調査を通じて、詳細な管理データを把握した上で、エネルギー・物質フローを推計し、LCA（Life Cycle Assessment）の手法に基づいて、低炭素型設備の導入によるGHG削減ポテンシャルを定量的に明らかとする。**第7章**では、**第6章**で低炭素設備の代替技術オプションに基づいて、設備更新するにあたり投資に対する費用便益を分析する。また、適用した代替技術オプションの原料となる地域循環可能な未利用バイオマスの賦存量を分析する。**第8章**では、過去のCO₂削減努力の違いが炭素クレジット制度を活用して低炭素型設備に更新した際に得られる金銭メリットに与える影響を分析する。

第2章の参考文献

- 1) 藤田壮：グリーン・イノベーションを推進する環境都市システム，環境情報科学，Vol.40，No.3，p.46-51，2011年。
- 2) 松橋隆治：グリーンテクノロジーの開発と普及に向けて グリーンイノベーション，グリーン成長を推進する事業体構想，環境情報科学，Vol.42，No.3，pp.31-36，2011年。
- 3) 村上博美，角南篤：日本の環境技術の国際競争力とグリーン・イノベーション，環境情報科学，Vol.42，No.3，pp.37-48，2011年。
- 4) 農林水産省：バイオマス・ニッポン総合戦略，2006年（参照元：http://www.maff.go.jp/j/biomass/pdf/h18_senryaku.pdf，最終閲覧：2015年9月29日）。
- 5) 農林水産省：バイオマス活用推進基本計画，2010年（参照元：http://www.maff.go.jp/j/shokusan/biomass/b_kihonho/pdf/keikaku.pdf，最終閲覧：2015年9月29日）。
- 6) バイオマス活用推進会議：バイオマス事業化戦略～技術とバイオマスの選択と集中による事業化の推進～，2012年（参照元：<http://www.maff.go.jp/j/press/shokusan/bioi/pdf/120906-02.pdf>，最終閲覧：2015年9月29日）。
- 7) 日本総合研究所：平成22年度「今後の社会資本ストックの戦略的維持管理等に関する調査」結果～企画財政編～，2010年（参照元：<http://www.jri.co.jp/page.jsp?id=18826>，最終閲覧：2015年9月29日）。
- 8) 日本総合研究所：平成22年度「今後の社会ストックの戦略的維持管理等に関する調査」～地方自治体企画財政部局編～，2010年（参照元：<http://www.jri.co.jp/MediaLibrary/file/pdf/company/release/2010/101108/101108.pdf>，最終閲覧：2015年9月29日）。
- 9) 国土交通省：パイオソリッド利活用基本計画（下水汚泥処理総合計画）策定マニュアル（案），2003年（参照元：<http://www.mlit.go.jp/crd/city/sewerage/info/biosolid/030829.pdf>，最終閲覧：2015年9月29日）。
- 10) 京都市：広報資料 下水汚泥集約化事業の供用開始について，2013年（参照元：<http://www.city.kyoto.lg.jp/suido/page/0000147128.html>，最終閲覧：2014年3月14日）。
- 11) 社団法人日本下水道協会：事例紹介（参照元：<http://www.jswa.jp/energy/index03.html>，最終閲覧：2015年3月18日）。
- 12) 京都議定書目標達成計画の進捗状況，2013年（参照元：<http://www.kantei.go.jp/jp/singi/ondanka/kaisai/dai26/sintyoku.pdf>，最終閲覧：2015年9月29日）。
- 13) 国土交通省：下水道における地球温暖化防止推進計画策定の手引き，2009年（参照元：<http://www.mlit.go.jp/common/000036176.pdf>，最終閲覧：2015年9月29日）。
- 14) 環境省：平成27年度版 環境・循環型社会・生物多様性白書，2015年。
- 15) 環境省：循環型社会形成推進基本計画，2013年（参照元：https://www.env.go.jp/ recycle/circul/keikaku/keikaku_3.pdf，最終閲覧：2015年9月29日）。
- 16) 高岡好和，河村公平，角田芳忠：南但地域における可燃ごみのバイオガス化と焼却のコンバインドシステム，廃棄物資源循環学会誌，Vol.25，No.1，pp.36-42，2014年。
- 17) エンジニアリング協会：平成26年度エンジニアリングアプローチを用いた地域産業の活性化に関する調査報告書，2015年。
- 18) 南但広域行政事務組合：一般廃棄物（ごみ）処理基本計画書，2007年（<http://www.nantan.hyogo.jp/pdf/nantankihon.pdf>，最終閲覧：2015年12月8日）。
- 19) 川崎重工業株式会社：防府市向けごみ焼却・バイオガス化複合施設を納入，2014年（参照元：http://www.khi.co.jp/news/detail/20140328_1.html，最終閲覧：2015年12月8日）。
- 20) 防府市：防府市クリーンセンター整備・運営事業について，2011年（<https://www.city.hofu.yamaguchi.jp/soshiki/16/seibi-unei.html>，最終閲覧：2015年12月8日）。
- 21) 田所伸悟：金沢市西部環境エネルギーセンター運転報告ー下水汚泥混焼についてー，タクマ技法，Vol.20，pp.14-19，2012年。
- 22) 国土交通省：下水汚泥エネルギー化技術ガイドライン-改訂版-，2015年。
- 23) 惣田訓，岩井良真，清和成，下田吉之，池道彦：処理規模を考慮したエネルギー解析モデルによる様々な下水汚泥処理システムのエネルギー消費量の比較評価，用水と廃水，Vol.51，No.3，pp.50-60，2009年。
- 24) 内田賢治，下水汚泥のガス化，燃料化等についての必要エネルギー等に関する研究，下水道機構情報，Vol.3，No.9，2009年。
- 25) 木室洋介，古林敬頭，中田俊彦：下水汚泥エネルギー利用システムのインベントリ分析による性能

- 評価, 日本エネルギー学会誌, Vol.90, No.3, pp.247-257, 2011年.
- 26) 木下和徹, 高岡昌輝, 水野孝昭: 下水汚泥処理における焼却廃熱を利用した発電システムの検討, 土木学会論文集 G (環境), Vol.68, No.7, pp.III_317-III_324, 2012年.
 - 27) 石井暁, 花木啓祐: 川崎市下水処理場における有機性食品廃棄物を利用したエネルギー回収および二酸化炭素削減ポテンシャルの推定, 環境システム研究論文集, Vol.34, pp.443-453, 2006年.
 - 28) 高久慎太郎, 山本祐吾, 東海明宏, 吉田登, 盛岡通: 地域で発生する厨芥類・下水汚泥を対象とした循環利用システムの導入効果の評価, 環境システム研究論文集, Vol.38, pp.421-428, 2010年.
 - 29) 松永康平, 井原貴行, 松岡慶, 蟬谷健一, 長谷川竜也, 河岸孝昌: 流動床ガス化技術による廃棄物からのエネルギー回収, エバラ時報, No.217, pp.17-21, 2007年.
 - 30) 甲斐正之, 浅野哲: 内部循環流動床ガス化技術とその利用可能性, エバラ時報, No.217, pp.36-40, 2007年.
 - 31) 株式会社荏原製作所: 内部循環型流動床ガス化炉及び流動床ボイラシステム, JEFMA, No.57, pp.47-49, 2009年.
 - 32) 粕谷誠, 坂中謙一: バイオガスによる反応タンク用送風機の直接駆動に関する開発, 東京都下水道局技術調査年報 2006, 2006年.
 - 33) 井原貴行, 吉田登, 盛岡通: 下水汚泥からのバイオオイル製造, 日本機会学会第18回環境工学総合シンポジウム 2008 講演論文集, pp.166-167, 2008年.
 - 34) 山本祐吾, 古野間達, 吉田登, 盛岡通: 下水汚泥処理における技術選択と施設更新による温室効果ガス削減効果のライフサイクル評価, 土木学会論文集 G (環境), Vol.68, No.5, pp.I_137-I_146, 2012年.
 - 35) 三島一仁, 山本祐吾: ごみ焼却熱由来の発電電力を活用した下水汚泥バイオオイル化による温室効果ガス削減効果の評価, 土木学会論文集 G (環境), Vol.68, No.6, pp.II_245-II_253, 2012年.
 - 36) 中久保豊彦, 東海明宏, 大野浩一: 下水処理場とごみ焼却場の連携を軸とした静脈系社会資本更新計画の立案と評価, 土木学会論文集 G (環境), Vol.68, No.2, pp.152-171, 2012年.
 - 37) 菅洋輔, 中久保豊彦, 東海明宏: 消化槽熱需要の季節変動を踏まえた下水処理施設・ごみ焼却施設の連携型更新計画の評価, 土木学会論文集 G (環境), Vol.69, No.6, pp.II_283-II_291, 2013年.
 - 38) 農林水産省: 燃料価格高等緊急対策 (参照元: http://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/engei/kenyu/pdf/pr_h25nov.pdf, 最終閲覧: 2014年2月11日).
 - 39) 農林統計協会: 平成23年度食料・農業・農村白書 農林水産省編, 2012年.
 - 40) 農林水産省: 平成21-24年度予算概算決定の概要 (参照元: <http://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/ondanka/index.html>, 最終閲覧: 2014年2月11日).
 - 41) 国立環境研究所: 日本国温室効果ガスインベントリ報告書, 2012年 (参照元: http://www.gio.nies.go.jp/aboutghg/nir/2012/NIR-JPN-2012-v3.0-J_web.pdf, 最終閲覧: 2014年2月11日).
 - 42) 及川仁: 施設園芸における省エネの取り組みの推進など地球温暖化への対応, 施設と園芸, No.138, pp.4-12, 2009年.
 - 43) 地球環境研究センター: 産業連関表による環境負荷原単位データブック (3EID) -LCAのインベントリデータとして- (参照元: <http://www.cger.nies.go.jp/publications/report/d031/jpn/datafile/index.htm>, 最終閲覧: 2014年2月11日).
 - 44) 農林水産省: 園芸施設及び農業用廃プラスチックに関する調査 園芸用施設の設置実面積及び栽培延べ面積の推移 (参照元: <http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/Xlsdl.do?sinfid=000009719334>, 最終閲覧: 2014年2月11日).
 - 45) 愛知県: 平成20年度石油価格等高騰対策技術指針 (改訂) (参照元: http://www.pref.aichi.jp/nogyo-keiei/top_pdf/20gijyututisisin.pdf, 最終閲覧: 2014年2月11日).
 - 46) 環境省: 第四次環境基本計画, 2012年 (参照元: http://www.env.go.jp/policy/kihon_keikaku/plan/plan_4/attach/ca_app.pdf) 最終閲覧: 2015年9月29日).
 - 47) JA 全農: 施設園芸省エネルギー対策の手引き, 2008年.
 - 48) JA 全農: 施設園芸省エネルギー対策のポイント 2009改訂版, 2009年.
 - 49) JA 全農: 施設園芸省エネ対策-2013年度版-, 2014年.
 - 50) 場勝: ヒートポンプを組み合わせた新暖房システムによる石油節減効果, 施設と園芸, No.138, pp.13-17, 2007年.
 - 51) 佐藤展之, 守谷栄樹, 安井清登, 野々下知泰: 空気熱源式ヒートポンプと燃焼式温風暖房機とのハイブリッド運転によるバラ栽培の暖房費削減効果, 植物環境工学, Vol.25, No.1, pp.19-28, 2013年.
 - 52) 山口智治: 木質ペレット利用によるハウス暖房とその評価, 施設と園芸, No.146, pp.10-15, 2009年.
 - 53) 薬師堂謙一: バイオマスのガス化・燃焼による施設園芸への利用, 施設と園芸, No.146, pp.16-2

- 0, 2009年.
- 54)上平田潤, 堂脇清志: 園芸施設におけるバイオマスガス化+燃料電池 CGS のシステム分析, 日本エネルギー学会誌, Vol.88, No.6, pp.492-499, 2009年.
 - 55)鈴木保志, 山根信三, 宮内樹代史: ビニールハウスにおける木質チップボイラの燃焼実験と加温作物への効果, 平成19年度高知大学農学部学部長裁量経費成果報告書, 2008年.
 - 56)永野正展, 永野正朗, 久須美雅昭: 「グリーン・エネルギープロジェクト in 高知」推進のシナリオ, 高知工科大学紀要, Vol.8, No.1, pp.159-163, 2011年.
 - 57)川西孝秀, 島浩二, 矢部泰弘: 花きの品質・スプレーギクの冬季栽培における省エネ型温度管理, 和歌山県農業試験場ニュース第122号 (参照元: http://www.pref.wakayama.lg.jp/prefg/070109/news/001/documents/114_6.pdf, 最終閲覧: 2014年2月11日).
 - 58)川西孝秀, 島浩二, 林寛子, 道園美弦, 久松完: 日没の時間帯からの短時間の昇温処理がスプレーギクの生育, 開花および切り花品質に及ぼす影響, 園芸学研究, Vol.11, No.2, pp241-249, 2012年.
 - 59)道園美弦, 久松完, 大宮あけみ, 市村一雄, 柴田道夫: 低温期のスプレーギク施設栽培における EOD-heating の有効性, 園芸学研究, Vol.11, No.4, pp505-513, 2012年.
 - 60)農林水産省: 農林業センサス報告第4巻 農業経営体調査報告書 - 農業経営部門別編 第2集 - (参照: <http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/Xlsdl.do?sinfid=000012667893>, 最終閲覧: 2015年9月24日).
 - 61)日本施設園芸協会: 五訂版施設園芸ハンドブック, 2003年.
 - 62)国内クレジット認証委員会: 第32回 国内クレジット認証委員会 配布資料, 2013年 (参照元: http://jcdm.jp/committee/haihu_130709.html, 最終閲覧: 2014年2月11日).
 - 63)経済産業省, 環境省, 農林水産省: J-クレジット制度 (参照: <http://japancredit.go.jp/index.html>, 最終閲覧: 2014年3月3日).
 - 64)日本経済団体連合会: 農林業等の活性化に向けた取組に関する事例集～“元気なふるさと創り”に向けた日本経団連会員企業・団体等の取り組み～, 2011年 (参照元: <https://www.keidanren.or.jp/policy/2013/067.html>, 最終閲覧: 2013年2月11日).
 - 65)日本経済団体連合会: 農林業等の活性化に向けた取組に関する事例集～“元気なふるさと創り”に向けた経団連会員企業・団体等の取り組み～, 2013年 (参照元: <https://www.keidanren.or.jp/policy/2013/067.html>, 最終閲覧: 2014年2月11日).
 - 66)環境省: カーボン・オフセット活用ガイドブック 2012, 2012年.
 - 67)東三河地域研究センター: 国内クレジット制度の利活用による施設園芸実態調査業務 (田原市低炭素施設園芸づくり協議会), 2012年 (参照元: http://www.hrrc.jp/pdf/04/h24/itaku_08.pdf, 最終閲覧: 2014年1月28日).
 - 68)経済産業省, 環境省, 農林水産省: 国内クレジット制度 (参照: <http://jcdm.jp/index.html>, 最終閲覧: 2015年9月24日).
 - 69)経済産業省, 環境省, 農林水産省: 新クレジット制度の在り方について (取りまとめ) (案) についてのパブリックコメント募集結果 (参照: https://www.env.go.jp/press/file_view.php?serial=20444&hou_id=15547, 最終閲覧: 2015年9月24日).
 - 70)総合資源エネルギー調査会: 再生可能エネルギーの全量買取制度における詳細制度設計について 買取制度小委員会報告書 (案), 2010年.

第3章 大都市における下水汚泥処理施設での設備更新と処理形態再編シナリオ の設計・評価

3.1. 緒言

環境政策の中核として進められている低炭素社会、循環型社会を具現化するにあたり、下水処理場から排出される廃棄物系バイオマスである下水汚泥の利活用に対する期待が高まっている。そして、下水処理場はバイオマスエネルギー供給拠点・資源循環拠点へと進化させていくことが望まれる。また、その進化によりエネルギー消費の削減と GHG 排出抑制効果を実現できる。

一方、下水処理場は、高度経済成長を支え都市人口の急増に対応して整備が進められてきたが、その多くが 21 世紀前半から中盤に更新の時期を迎えることになる。特に西日本最大の都市である大阪市は全国でも早くから下水道事業に着手しており、多くの下水処理場で老朽化が顕著となっている。しかし、処理施設を新たに建設する用地を確保することは困難であり、現在使用している敷地を活用した改築・更新を計画する必要がある。その際、大都市とはいえ将来的な人口減少は避けられないと予想されている²⁾ため、人口増加や都市化の進展を前提としたこれまでの整備を見直し、人口減少および低炭素・循環型社会への移行に対応した適正な規模・形態へと処理施設を更新、再編すべきである。

本章では、下水道インフラが早い段階に整備された大都市の代表として、大阪市をケーススタディの対象地として取り上げ、将来の人口と下水汚泥発生量の変化を考慮した汚泥処理設備の更新シナリオを設計する。評価期間は 2010～2040 年の 30 年間とする。また、更新する汚泥焼却設備にエネルギー・資源転換技術を導入したときの GHG 排出削減効果を定量的に評価する。その際、比較する技術オプションとして単純焼却（多段炉）、熔融、高温焼却、オイル化を設定し、それぞれの LCE および GHG 排出量の削減効果を把握する。以上を通じて、施設更新と低炭素技術選択による GHG 削減効果を明らかにすることをめざす。

本章の構成は次のとおりである。第 2 節では、大都市における将来の下水汚泥発生量の変化を推計する。第 3 節では、下水汚泥処理施設での設備更新と処理形態の再編シナリオを設計する。シナリオの設計にあたっては下水汚泥発生量の将来変化、汚泥処理施設の規模や利用率、更新時期などを考慮し、7つのシナリオを設計する。第 4 節では、シナリオの算定結果を示す。そして、第 5 節に本章で得られた結論を示す。

3.2. 下水汚泥発生量の推計

3.2.1. ケーススタディ対象地の概要

(1) 公共下水道事業の概要

大阪市の下水処理場の位置関係を図3-1に、公共下水道事業計画の概要を表3-1、表3-2に示す。大阪市の公共下水道事業はすでに全体計画の264.5万人に達しており、2010年度における処理人口普及率は99.9%⁴⁾となる。大阪市では、12ヶ所の下水処理場と汚泥処理のみを担う処理場が1ヶ所ある。下水処理場は、1940年に津守下水処理場と海老名下水処理場が供用を開始し、その後数次にわたる下水道整備計画を策定しながら整備が進められ、1972年までに12ヶ所の下水処理場が供用を開始している。12ヶ所の下水処理場のなかでも平野下水処理場（STP:Sewage treatment plant）では、下水処理に加えて汚泥処理も行っている。また、汚泥処理のみを担う処理場である舞洲スラッジセンター（SC: Sludge center）は、2004年に供用を開始し汚泥の集中処理している。このように、大阪市は全国でも早くから下水道整備を進めてきたこともあり、下水処理場や下水管などの下水道インフラの老朽化が進んでいるため、今後の投資計画と効率化計画を提示している。今後の投資計画では、老朽化施設の改築更新、合流式下水道の改善、浸水対策の3つを掲げている¹⁾。効率化計画では、汚泥処理の集約化などによる事業の効率化、建築コストの削減のための優先順位を厳しく見つめ直した事業の選択と集中などを設定している。



図 3-1 大阪市の下水処理場位置図³⁾

表 3-1 大阪市における公共下水道事業計画の概要⁴⁻⁶⁾

計画内容	全体処理区
全体計画処理人口[人]	2,645,307
事業計画処理人口[人]	2,645,307
計画処理能力*[m ³ /日]	2,270,000
現有処理能力*[m ³ /日]	2,270,000

表 3-2 下水処理区別の公共下水道事業計画の概要⁴⁻⁶⁾

計画内容	津守処理区	海老江処理区	中浜処理区	市岡処理区
全体計画処理人口[人]	255,400	149,000	292,500	123,900
事業計画処理人口[人]	255,400	149,000	292,500	123,900
計画処理能力*[m ³ /日]	360,000	245,000	290,000	110,000
現有処理能力*[m ³ /日]	363,000	326,000	288,000	120,000
汚泥処理方式	濃縮-消化-送泥 (舞洲 SC で溶融)	濃縮-消化-送泥 (舞洲 SC で溶融)	濃縮-消化-送泥 (平野 STP で処理)	生分離送泥 (舞洲 SC で溶融)
処理開始年次[年度]	1940	1940	1960	1961

計画内容	千鳥処理区	住之江処理区	今福処理区	放出処理区
全体計画処理人口[人]	98,400	353,100	313,900	153,100
事業計画処理人口[人]	98,400	353,100	313,900	153,100
計画処理能力*[m ³ /日]	85,000	280,000	230,000	152,000
現有処理能力*[m ³ /日]	79,000	220,000	320,000	154,000
汚泥処理方式	生分離送泥 (舞洲 SC で溶融)	濃縮-消化-送泥 (舞洲 SC で溶融)	生分離送泥 (平野 STP で処理)	濃縮-消化-脱水-送泥 (平野 STP で処理)
処理開始年次[年度]	1963	1964	1966	1967

計画内容	大野処理区	此花処理区	十八番処理区	平野処理区
全体計画処理人口[人]	247,800	82,900	216,400	450,100
事業計画処理人口[人]	247,800	85,900	246,400	450,100
計画処理能力*[m ³ /日]	240,000	102,000	180,000	312,000
現有処理能力*[m ³ /日]	280,000	168,000	203,000	322,700
汚泥処理方式	濃縮-消化-送泥 (舞洲 SC で溶融)	生分離送泥 (舞洲 SC で溶融)	生分離送泥 (舞洲 SC で溶融)	濃縮-脱水-焼却 濃縮-脱水-溶融
処理開始年次[年度]	1967	1968	1970	1972

* 日最大処理能力

汚泥処理の方式は、12ヶ所の下水処理場のうち、臨海部の8ヶ所で発生する下水汚泥は舞洲SCで集約処理し、内陸部の4ヶ所で発生する下水汚泥は平野STPで処理を集約している。また、大阪市では、合流下水道の改善などによって、今後発生量の増加が見込まれる汚泥をより効率的に処理し、汚泥の有効利用を図るため、すべての処理場は従来型の輸送方式であるトラック輸送から、汚泥パイプ輸送へと切り替わっている。これにより、汚泥処理の集約化とネットワーク化が実現されている（図3-2）。



図 3-2 大阪市の汚泥パイプ輸送図⁷⁾

(2) 下水汚泥焼却設備の概要

大阪市の下水処理場が有する汚泥処理設備を表3-3に示す。大阪市では、汚泥処理設備を有している処理場が2ヶ所ある。臨海部の処理を担う舞洲SCは溶融炉を6基での処理を計画しているが、現在は5基である。内陸部の処理を担う平野STPは、多段炉を1基と溶融炉を1基の計2基保有しているが、多段炉は老朽化が進んでいることもあり、固形燃料化施設を整備する計画が策定され、石炭代替燃料の有効利用を通じたGHG削減を目指している。

また、溶融炉で発生する溶融スラグは、一般的にコンクリート骨材などの建築資材として有効利用される。大阪市では、この溶融スラグを改良土に混合させた製品の製造に限定して販売している。舞洲 SC 稼動前は大部分が埋立処分されていたこともあり、汚泥の有効利用率は14.2%であったが、舞洲 SC が稼動したことにより、2010年度末で72.7%と大幅に向上している⁸⁾。

表 3-3 大阪市の汚泥処理設備⁶⁾

処理場名	焼却炉型／熔融炉型	全体計画	処理能力 [t/d]	現有	設置年度 [年度]
		[基]		平均運転時間* [hr/d・基]	
舞洲 SC	旋回熔融炉	6	150×5 基	11	2004
平野 STP	多段焼却炉	-	200×1 基	20	1981
	旋回熔融炉	-	150×1 基	21	1999

*平均運転時間は 2010 年度の実績値

3.2.2. 将来人口や下水汚泥発生量の推計

(1) 区別人口

国立社会保障・人口問題研究所の人口推計結果⁹⁾を用い、2010～2040年の人口推移を大阪市24区別に推計した。同推計値は5年ごとに算出されているため、5年間の変化量を各年に按分することで、30年間の将来人口を求めた。

大阪市全体の将来人口の変化を図3-3に、24区別の将来人口の変化を図3-4～図3-6に示す。2010年の総人口は約270万人であるが、2040年には約37万人の減少となる。これは2010年比で約14%の減少である。大阪市24区のうち、西区、天王寺区、鶴見区、北区の4つの区では2010～2025年で人口が増加するものの、2025～2040年にはすべての区で人口減少に転じると推計される。2040年の人口が、2010年時に比べ増加となるのはこの4つの区だけである。また、2040年までに最も人口増加となるのは北区であり、2010年比で約10.4%（約11,533人）となる。そのほかの20区では減少傾向が続く。特に西成区では、30年間に約46%（約66,000人）の人口減少になると推計される。

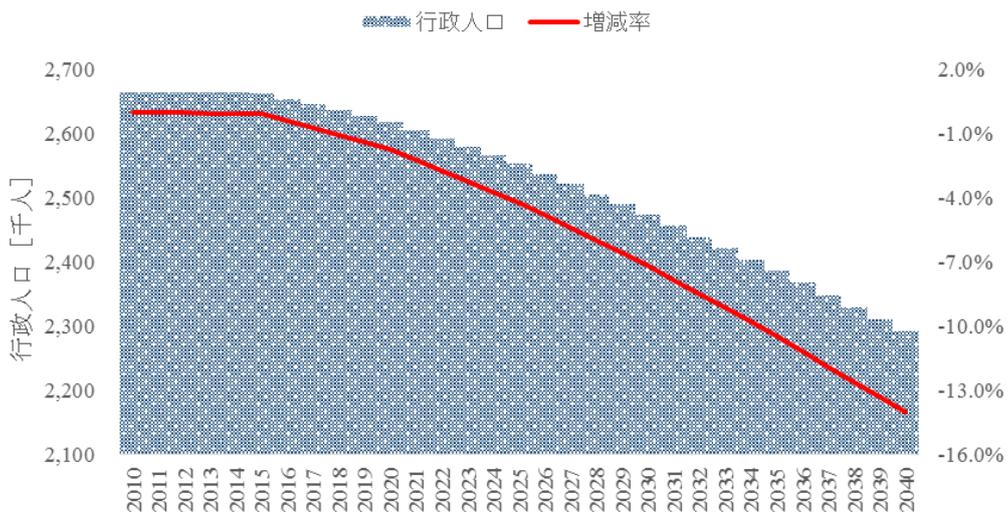
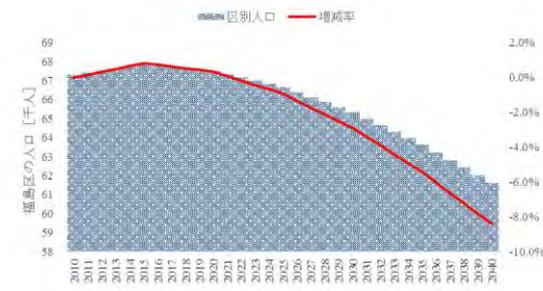
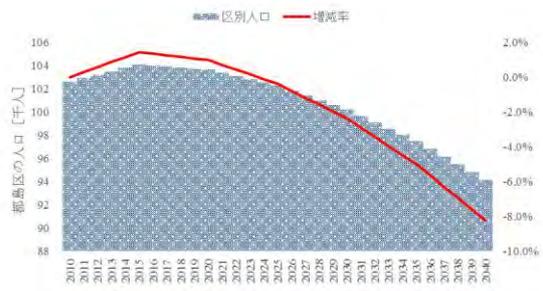
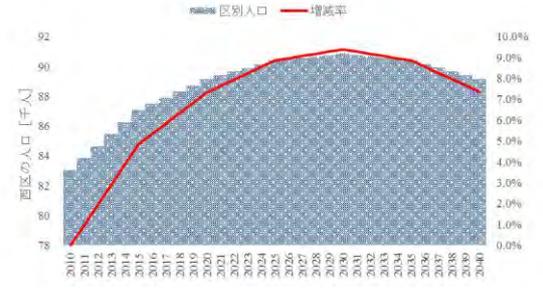
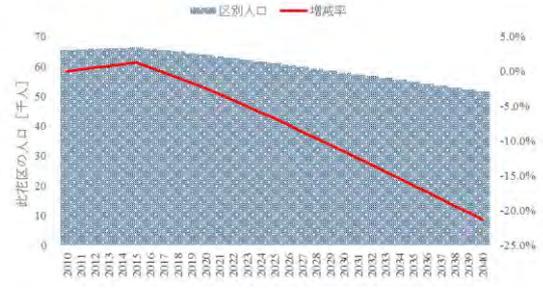


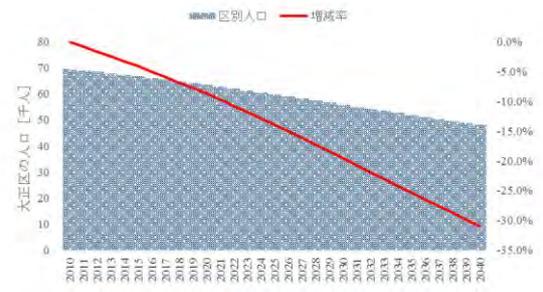
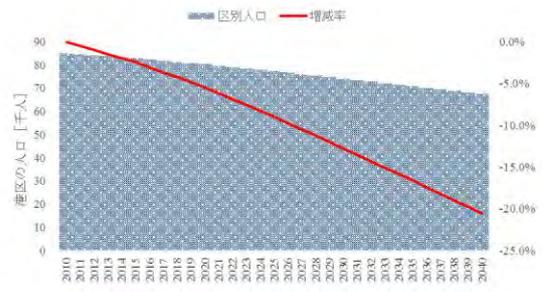
図 3-3 大阪市の将来人口変化



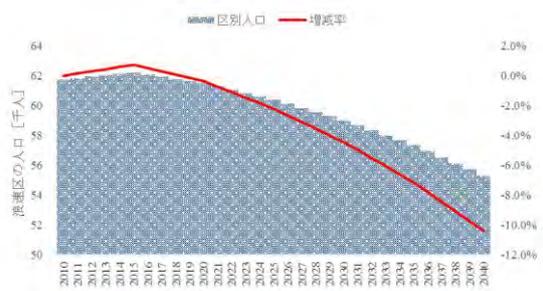
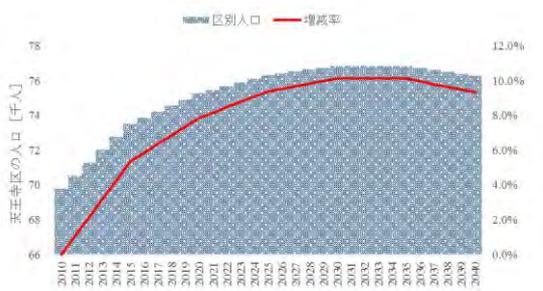
<左図：都島区／右図：福島区>



<左図：此花区／右図：西区>

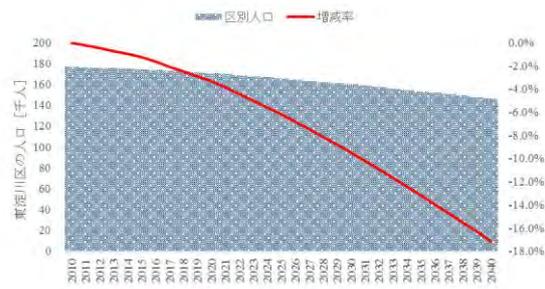
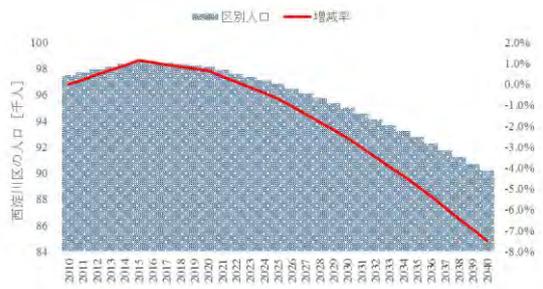


<左図：港区／右図：大正区>

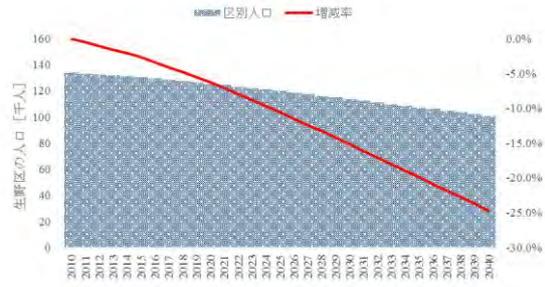
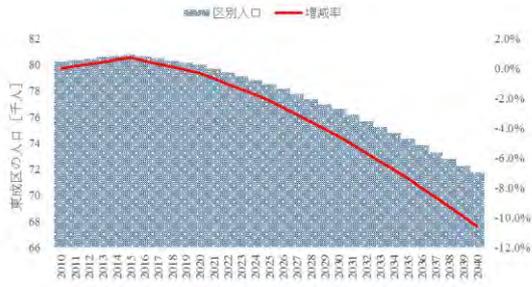


<左図：天王寺区／中図：浪速区>

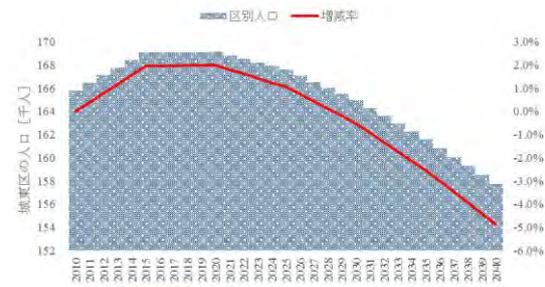
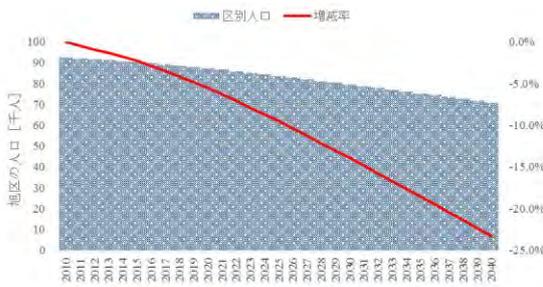
図 3-4 区別人口の将来変化 (1)



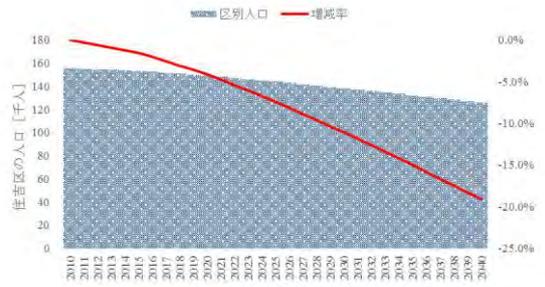
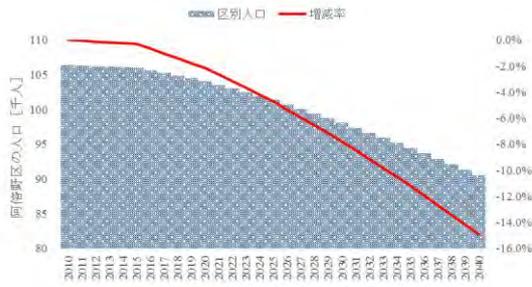
<左図：西淀川区／右図：東淀川区>



<左図：東成区／右図：生野区>



<左図：旭区／右図：城東区>

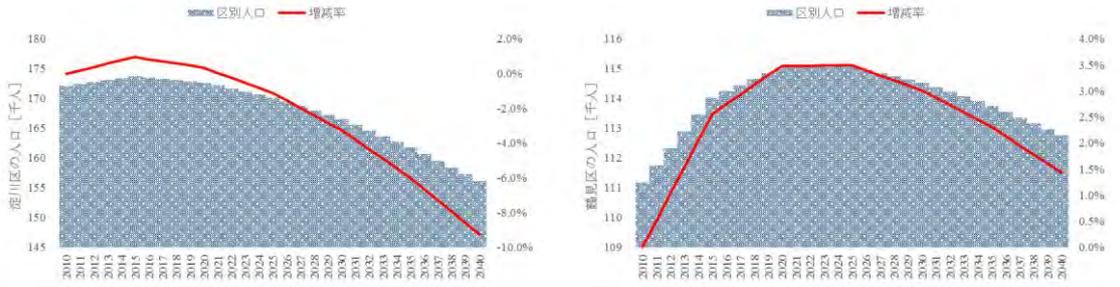


<左図：阿倍野区／右図：住吉区>

図 3-5 区別人口の将来変化 (2)



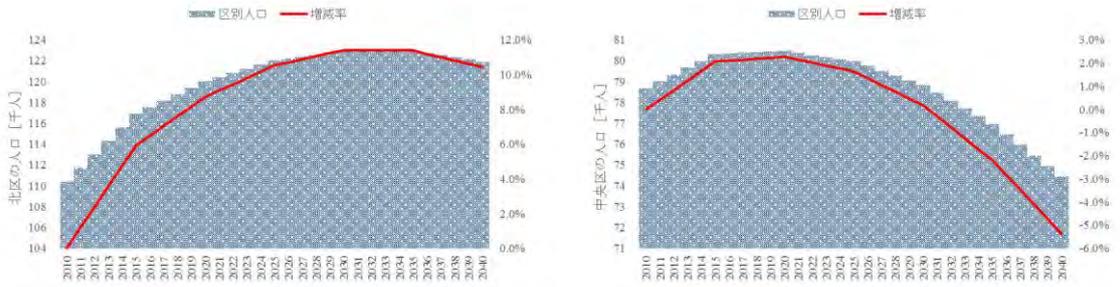
<左図：東住吉区／右図：西成区>



<左図：淀川区／右図：鶴見区>



<左図：住之江区／右図：平野区>



<左図：北区／右図：中央区>

図 3-6 区別人口の将来変化 (3)

(2) 汚泥処理区別人口

汚泥処理区別人口を図 3-7 に示す。これは、図 3-8 に示す行政区と下水処理区の関係を参考に、前段の将来の行政区別人口を処理区別人口に集計し直したものである。

なお、本章では下水処理区域と汚泥処理区域の現状の処理形態に準じ、臨海部を担当する舞洲 SC は津守処理区、市岡処理区、千鳥処理区、住之江処理区、海老江処理区、大野処理区、此花処理区、十八条処理区の計 8 区を、内陸部を担当する平野 STP は中浜下処理区、今福処理区、放出処理区、平野処理区の計 4 区で発生する汚泥の処理をするものとした。

舞洲 SC が処理する下水汚泥は増加することなく、2040 年まで減少となる。平野 STP では 2015 年までは微増するが、その後減少となる。これは、将来人口が増加する下水処理区は存在するが、それ以上に減少する処理区の人口が多く、汚泥処理区域の人口で見ると全体として減少傾向となることを示している。

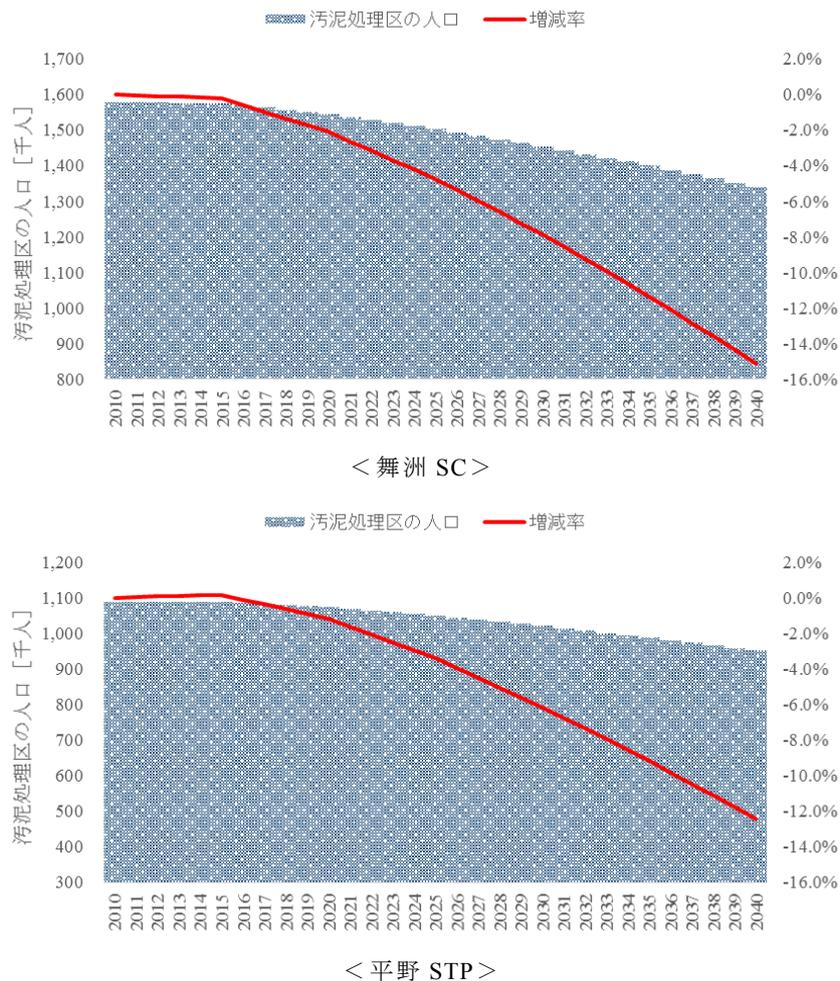


図 3-7 大阪市の汚泥処理施設別の将来人口変化

行政区と下水処理区の関係（相関表）

行政区	下水処理区												浸水対策施設（例）			
	1 大野	2 十八条	3 市島	4 海老江	5 此花	6 夕陽	7 放出	8 中浜	9 平野	10 住之江	11 千鳥	12 津守	天王寺 弁天	なにわ 堀	新寺里 寺田	
1 西淀川	○															
2 淀川		○														
3 東淀川																
4 港			○													
5 西																
6 中央																
7 北																
8 福島				○												
9 此花				○	○											
10 船																
11 鶴見																
12 鶴見																
13 城東																
14 東成																
15 生野																
16 天王寺																
17 東住吉																
18 平野																
19 浪速																
20 住吉																
21 阿倍野																
22 西成																
23 住之江																
24 大正																

舞洲S.C.（此花区）で汚泥処理
 平野下水処理場（平野区）で汚泥処理
 処理場所在行政区

行政区と下水処理区の関係（市域模式図）



行政区と下水処理区の関係（ダイアグラム）

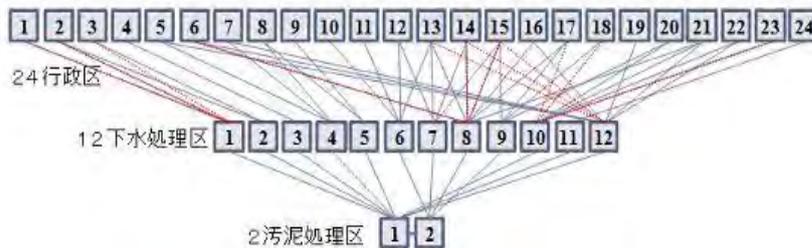


図 3-8 大阪市の行政区と下水処理区と汚泥処理の関係図¹⁰⁾

(3) 脱水汚泥発生量

大阪市の区別に年間脱水汚泥発生量を求めた。なお、大阪市の下水道普及率はすでに99.9%⁴⁾に達しているため、ここでは下水道整備人口は行政人口と同じとし、前段で得られた人口推計値を用いた。

$$Q_{i,t} = P_{i,t} \times q_{i,2010} \quad (3-1)$$

$Q_{i,t}$: t年におけるi処理区の年間脱水汚泥発生量 [t-DS/y]

$P_{i,t}$: t年におけるi区の人口推計値 [人]

q_{2010} : 大阪市における2010年の一人あたり脱水汚泥発生原単位 [t-DS/人/y]

$$q_{2010} = Q_{i,2010} \div P_{i,2010} \quad (3-2)$$

q_{2010} : 大阪市における2010年の一人あたり脱水汚泥発生原単位 [t-DS/人/y]

$Q_{i,2010}$: 大阪市における2010年の年間脱水汚泥発生量 [t-DS/y]

$P_{i,2010}$: 大阪市における2010年の公共下水道人口 [人]

脱水汚泥発生量の推計結果を図3-9に示す。将来の人口減少に伴い、2040年の汚泥発生量は2010年比べて約14%（約25,000 [t/y]）減少すると推計された。

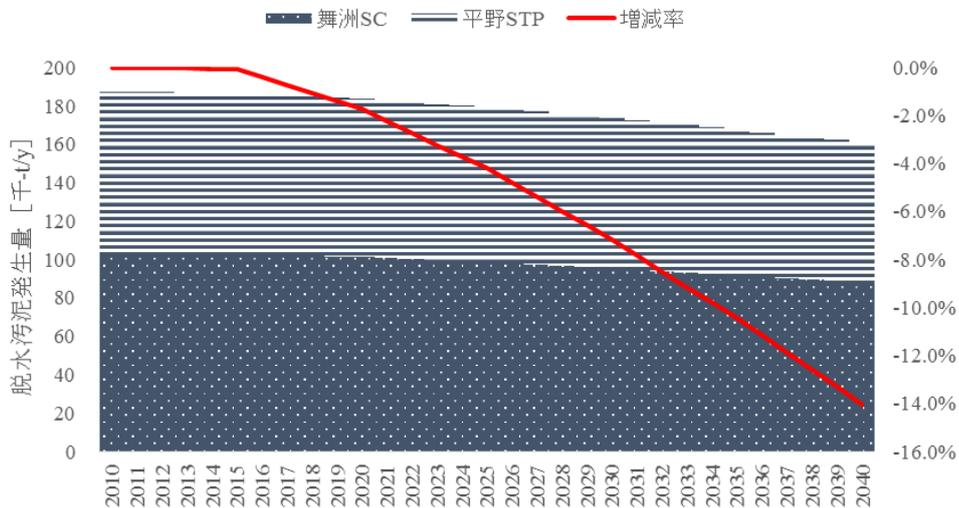


図 3-9 汚泥処理施設別の脱水汚泥発生量

(4) 汚泥処理設備の設備利用率

大阪市における2010～2040年の脱水汚泥発生量に基づいて、汚泥処理設備である溶融炉と多段炉の処理能力に対する実際の処理量、すなわち現有設備の設備利用率を算定した(表3-4)。なお、現有設備の処理能力には2010年現在の数値を用い、想定される年間稼働日数は大阪府内のそのほかの市データ⁶⁾を参考に、舞洲SC：320 [d/y]、平野STPの多段炉：283 [d/y]、溶融炉：320 [d/y]と設定している。

大阪市全体における2010年の汚泥焼却設備の処理能力は344,600 [t/y]であり、設備利用率は55%に満たない。将来的な人口減少に伴って汚泥発生量も減少するため、2040年には設備利用率が50%を下回ってしまう。つまり、市全体で見ると現有設備で過剰能力が生じている。特に舞洲SCの溶融炉の設備利用率は、2010年現在で5割にも達していない(図3-10)。したがって、将来的には設備の過剰な処理能力解消のために施設規模でのダウンスケールを図るために、舞洲SCか平野STPのどちらか一方に集約化を図ること、また設備利用率を向上させるために一方の施設に優先して処理を担当させることなど、人口減少社会に適した規模や形態に再編する必要があるといえる。

表 3-4 処理場別の汚泥焼却設備の稼働率 (2010年)

	脱水汚泥量 [t/y]	処理能力 [t/y]	稼働率 [%]
舞洲 SC	103,171	240,000	43.0
平野 STP	83,939	10,4600	80.2
市全体	181,110	344,600	54.3

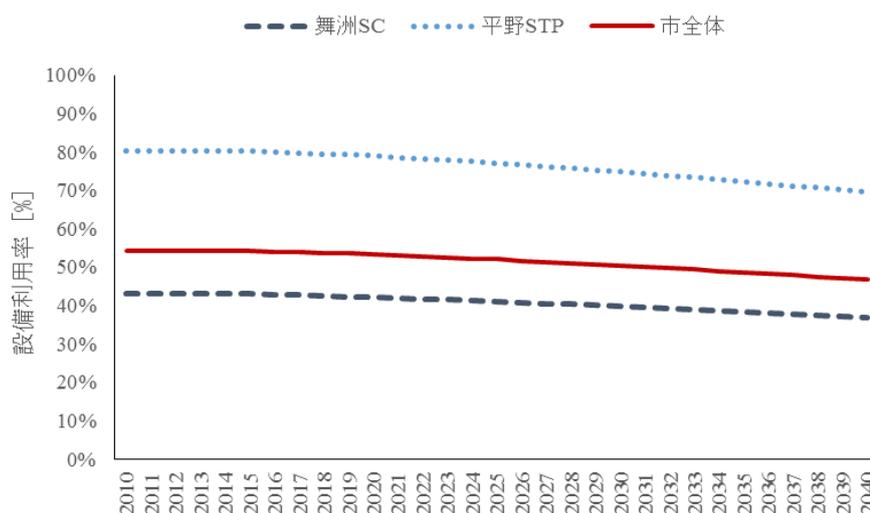


図 3-10 泥焼却設備における設備利用率の変化

3.3. 更新シナリオの設計

耐用年数を焼却炉：25年¹¹⁾、溶融炉：23年¹²⁾と設定した上で、脱水污泥発生量の将来変化、焼却炉の規模や設備利用率、更新時期を考慮して、污泥処理設備の更新シナリオを7つ設計した。シナリオの概要を表3-5に示す。これら更新シナリオは、基本的に2つの方向に大別される。一つは個別集約化、もう一方は大規模集約化での污泥処理である。個別集約化のシナリオでは、設定した耐用年数を迎える時期にサイトの施設ごとに更新する。大規模集約化のシナリオでは、現有溶融炉の過剰能力が生じていることや新設する用地がすでに確保されていることなどから、舞洲SCが集約拠点となって平野STPが担っていた処理をすべて受け入れる。舞洲SCの溶融炉は、現有施設が耐用年数を迎える時期に、新設または更新する。

更新時期を迎える污泥処理設備の順番を整理すると、まず、平野STPの多段炉はすでに更新時期を超えて運転しており、早急な更新が必要となる。シナリオでは更新時期を2014年と設定する。次に、平野STPの溶融炉が2023年に更新時期を迎える。そして、舞洲SCで現在稼働している溶融炉5基中の3基（1～3号炉）が2028年に、続いて1基（4号炉）が2031年、最後に1基（5号炉）が2034年に更新時期を迎える。これらの更新時期に、施設ごとに低炭素技術の導入や大規模集約化を図ることによるエネルギー消費の改善や、技術導入の効果を含めて分析する。ここでは、低炭素技術として高温焼却およびオイル化技術を取り上げた。前者は、下水道分野におけるGHG削減対策の一つとして、一般的な下水污泥の高温焼却によるN₂O削減である。この対策は、污泥焼却炉の焼却温度を通常の800℃から高温焼却となる850℃に上昇させることで、污泥焼却量あたりのN₂O排出量を約6割減少させることを可能とする¹³⁾。このため、2005年に京都議定書目標達成計画で污泥焼却炉への高温技術導入が盛り込まれて以降、現有炉の高温焼却への改造や施設更新時での技術導入が進み大幅なN₂O削減がもたらされている¹⁴⁾。後者は、急速分解オイル化技術でその特徴は2.3.3.でも述べたが、高温焼却と同じく下水污泥の焼却時に発生するN₂O排出量も大幅に削減可能となる¹⁵⁾ことに加えて、下水污泥から可搬性に優れたオイルを生成することができる点が、この技術の特徴である。なお、焼却代替となる低炭素技術には、オイル化以外にもガス化や炭化などがある。オイル化技術は、理論的にはガス化よりもエネルギー収率が高いとされ、かつ搬送可能なオイル形態で回収されるため、ガス化技術のようにオンサイト利用に限定されることはない¹⁶⁾。炭化技術によって生成される石炭代替燃料の用途は石炭火力発電所などに限定されるのに対し、オイル化は産業全般で主要な燃料として幅広く利用されている重油に代替可能な再生燃料を生成することができる。本章では、こうした優位性を持つオイル化技術に着目した。

表 3-5 更新シナリオの概要

汚泥処理設備	更新シナリオ						
	現状処理 従来技術	個別集約化			大規模集約化		
		平野 STP 高温焼却	平野 STP 多段炉のみ オイル化	平野 STP オイル化	各サイト オイル化	舞洲 SC 従来技術	舞洲 SC オイル化
	0	1	2	3	4	5	6
更新/新設	○	○	○	○	○	○	○
舞洲 (溶融炉)	(5 基/2 基)	(5 基/2 基)	(5 基/2 基)	(5 基/2 基)	(5 基/1 基)	(5 基/4 基)	(5 基/0 基)
舞洲 技術導入					○		○
S (オイル化)					(0 基/1 基)		(0 基/4 基)
C 送泥				*2	*2	○	○
休廃止	*1	*1	*1	*1	*1	*1	*1
更新	○	○	○	○			
(多段炉)	(1 基/1 基)	(1 基/0 基)	(1 基/0 基)	(1 基/0 基)			
平野 更新	○	○	○	○			
野 (溶融炉)	(1 基/1 基)	(1 基/1 基)	(1 基/1 基)	(1 基/0 基)			
S 技術導入		○					
T (高温焼却)		(0 基/1 基)					
P 技術導入			○	○	○		
(オイル化)			(0 基/1 基)	(0 基/2 基)	(0 基/2 基)		
送泥						*3	*3

(n₁ 基/n₂ 基) : n₁ は 2010 年の稼働台数, n₂ は 2040 年の稼働台数.

*1 汚泥量に応じて現有溶融炉の稼働台数を調整.

*2 平野 STP に送泥.

*3 舞洲 SC に送泥.

・ シナリオ 0 : 現状処理・従来技術

各処理場の汚泥処理設備が耐用年数に達したときに現有の焼却技術に更新する。更新時期は、平野 STP の多段炉は 2014 年、平野 STP の溶融炉は 2023 年である。それぞれの施設で翌年に現有の処理技術に更新する。舞洲 SC は溶融炉の耐用年数が 2028 年、2031 年、2034 年と段階的に更新時期を迎えるため、順次現有の処理技術に更新する。本章では、これを比較評価の基準シナリオとする。

・ シナリオ 1 : 個別集約化・平野 STP 多段炉のみ・高温焼却

平野 STP の多段炉が 2014 年に更新時期を迎えるため、高温焼却を採用した焼却炉に更新する。平野 STP の溶融炉、舞洲 SC の溶融炉はそれぞれ耐用年数に達する時期に現有の焼却技術に更新する。

・ シナリオ 2 : 個別集約化・平野 STP 多段炉のみ・オイル化

シナリオ 1 に対して、2014 年に平野 STP の多段炉を更新する際、高温焼却技術ではなくオイル化技術を導入する。

・ シナリオ 3 : 個別集約化 : 平野 STP・オイル化

平野 STP の多段炉は 2014 年にオイル化技術へ更新し，溶融炉は耐用年数に達する 2023 年にオイル化技術を導入する．平野 STP に導入したオイル化炉に過剰な処理能力を生じさせないために，舞洲 SC から汚泥を一部受け入れる．舞洲 SC の溶融炉は更新時期にあわせて順次炉を停止するが，汚泥処理量に応じて溶融炉の新設や更新を行う．

・ シナリオ 4 : 個別集約化 : 各サイト・オイル化

平野 STP の多段炉と溶融炉は，それぞれの更新時期 2014 年と 2023 年にオイル化技術を導入する．舞洲 SC の溶融炉は 2028 年に 3 基一斉に更新時期を迎えるため，このタイミングにあわせてオイル化炉に更新する．ただし，全体計画で導入が予定されている溶融炉 1 基（6 号炉）は新設する．また，平野 STP に導入したオイル化施設に過剰な処理能力を生じさせないために，舞洲 SC から汚泥を一部受け入れる．

・ シナリオ 5 : 大規模集約化 : 舞洲 SC・従来技術

平野 STP の多段炉と溶融炉は，それぞれの更新時期 2014 年と 2023 年のタイミングにあわせて順次，汚泥を舞洲 SC に送泥し，汚泥処理を舞洲 SC に大規模集約化させる．舞洲 SC の溶融炉は，汚泥処理量に応じて溶融炉の新設や更新を行う．

・ シナリオ 6 : 大規模集約化 : 舞洲 SC・オイル化

シナリオ 5 に対して，舞洲 SC の溶融炉が 2028 年に 3 基一斉に更新時期を迎えるため，このタイミングにあわせてオイル化炉 2 基を新設する．残された溶融炉 2 基は 2031 年と 2034 年にそれぞれオイル化炉に更新する．

3.4. 更新計画による GHG 削減効果

3.4.1. 使用データ

表3-6, 表3-7にシナリオ別のLCEとGHGの推計に使用した原単位をそれぞれ示す。低炭素技術として取り上げた高温焼却, オイル化の原単位は, 脱水汚泥の乾燥重量あたり環境負荷原単位^{16, 17)}をもとに, 含水率を78%として湿潤重量ベースに換算した。なお, 平野STPの多段炉と溶融炉, 舞洲SCの溶融炉の焼却・溶融プロセスにかかわる原単位は, 大阪市建設局への調査で得た2010年度の実績値を基に作成した。焼却・溶融以外のプロセスについては, 先行研究¹⁶⁾における計算条件に沿って, 別途推計した。

表 3-6 脱水汚泥量あたりのエネルギー消費原単位

[単位: GJ/t]	舞洲 SC			平野 STP		
	溶融炉	オイル化	多段炉	溶融炉	高温焼却	オイル化
電力(水処理)	4.31	4.31	4.31	4.31	4.31	4.31
電力(濃縮)	0.450	0.450	0.450	0.450	0.450	0.450
電力(脱水)	0.416	0.416	0.416	0.416	0.416	0.416
電力(焼却・溶融・転換)	1.84	1.24	0.604	2.95	1.31	1.24
燃料(水処理)	0.162	0.162	0.162	0.162	0.162	0.162
燃料(焼却・溶融)	1.31	0.00	1.37	2.29	1.07	0.00
薬品・水	0.346	0.346	0.346	0.346	0.519	0.346
埋立, 補修	0.0366	0.0558	0.0841	0.0366	0.0711	0.0558
原料輸送	0.764	0.358	0.620	1.00	0.631	0.358
有効利用	-0.0754	-1.47	0.00	-0.0721	0.00	-1.47
再生資源輸送	0.0134	0.0094	0.00	0.0129	0.00	0.0094
合計	9.58	5.87	8.36	11.90	8.94	5.87

表 3-7 脱水汚泥量あたりの GHG 消費原単位

[単位: t-CO ₂ /t]	舞洲 SC			平野 STP		
	溶融炉	オイル化	多段炉	溶融炉	高温焼却	オイル化
電力(水処理)	0.156	0.156	0.156	0.156	0.156	0.156
電力(濃縮)	0.0163	0.0163	0.0163	0.0163	0.0163	0.0163
電力(脱水)	0.0150	0.0150	0.0150	0.0150	0.0150	0.0150
電力(焼却・溶融・転換)	0.0665	0.0447	0.0218	0.107	0.0473	0.0447
燃料(水処理)	0.0112	0.0112	0.0112	0.0112	0.0112	0.0112
燃料(焼却・溶融)	0.0674	0.00	0.0930	0.117	0.0742	0.00
薬品・水	0.0129	0.0129	0.0129	0.0129	0.0218	0.0129
埋立, 補修	0.0024	0.0049	0.0087	0.0024	0.0070	0.0049
原料輸送	0.0462	0.0224	0.0373	0.0605	0.0382	0.0224
有効利用	-0.0027	-0.106	0.00	-0.0026	0.00	-0.106
再生資源輸送	0.0009	0.0019	0.00	0.0009	0.00	0.0019
CH ₄	0.0361	0.0361	0.0363	0.0361	0.0361	0.0361
N ₂ O(焼却)	0.129	0.0554	0.273	0.129	0.155	0.0554
N ₂ O(その他)	0.0970	0.0970	0.0970	0.0970	0.0970	0.0970
合計	0.6540	0.3680	0.7783	0.7585	0.6748	0.3680

3.4.2. LCE の推計結果

各シナリオにおけるエネルギー消費量の推計結果を図3-11に示す。基準シナリオと比較するとシナリオ1～6では、それぞれ7.4%、13.5%、20.9%、24.9%、6.7%、18.2%のエネルギー削減効果が得られることが明らかとなった。

各サイトの施設にオイル化技術を導入するシナリオ4と、平野STPの全施設にオイル化を導入するシナリオ3の削減効果が大きく、いずれの削減率も20%を超えることがわかった。これは、舞洲SCの熔融炉に比べ平野STPの多段炉、熔融炉の両施設とも耐用年数を迎える時期が早く、オイル化による汚泥焼却時の重油消費量の削減や生成されるオイルの有効利用がそのほかのシナリオに比べ早い段階でもたらされるからである。また、施設の能力過剰状態を回避させるために平野STPからの汚泥を受け入れることも効果的であることがわかった。

個別集約化でオイル化技術を段階的に導入するシナリオ2、3、4を比較すると、オイル化技術を採用する施設が増えるにつれてその削減効果は大きくなっている。大規模集約化でオイル化技術導入するシナリオ6では、削減率は18.2%にとどまることが明らかとなった。更新シナリオで大別される個別集約化と大規模集約化での削減効果を比較すると、個別集約化のほうが大規模集約化に比べ削減効果が高い傾向にあった。また、技術間の比較として、平野STPの多段炉の更新時に高温焼却、オイル化を採用するシナリオ1、2で確認すると、削減率はそれぞれ7.4%と13.5%となり、オイル化技術の導入が有効であることがわかった。

以上から、シナリオ0のように低炭素型技術を導入せずに、更新時に従来技術を継続して採用することはエネルギー消費の面で非効率であるだけでなく、エネルギーとして潜在的なポテンシャルの高い下水汚泥の有効利用が図れていない。また、シナリオ1やシナリオ5のように、下水汚泥からエネルギーを創出することができない従来型の処理技術は、低炭素型技術の導入に比べ大幅なエネルギー消費抑制には繋がらない。

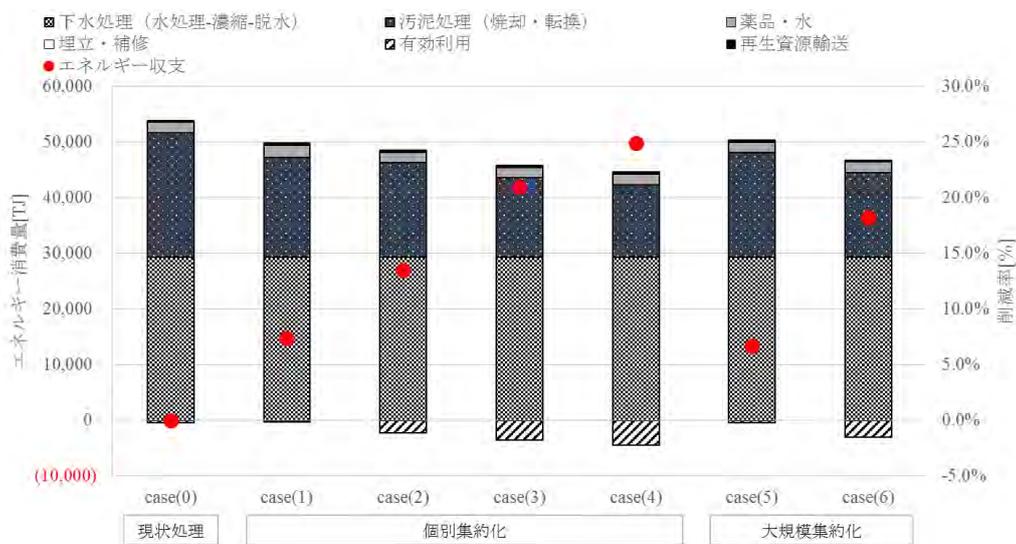


図 3-11 シナリオ別 LCE の推計結果 (2010～2040 年)

3.4.3. GHG 排出量の推計結果

各シナリオにおけるGHG排出量の推計結果を図3-12に示す。基準シナリオと比較するとシナリオ1～6では、それぞれ4.4%、14.7%、22.4%、27.0%、6.0%、19.5%のGHG削減効果が得られることが明らかとなった。エネルギー消費量の結果と同様、各サイトの施設にオイル化技術を導入するシナリオ4と、平野STPの全施設にオイル化を導入するシナリオ3の削減効果が大きく、いずれの削減率も22%を超えることがわかった。これは、舞洲SCの溶融炉に比べ平野STPの多段炉、溶融炉の両施設とも耐用年数を迎える時期が早く、オイル化による汚泥焼却時の重油消費量の削減、生成されるオイルの有効利用に加えてN₂O排出抑制がそのほかのシナリオに比べ早い段階でもたらされるからである。また、平野STPからの汚泥を受け入れることも効果的であることがわかった。

個別集約化でオイル化技術を段階的に導入するシナリオ2、3、4を比較すると、オイル化技術を採用する施設が増えるにつれてその削減効果は大きくなっている。それに対して、大規模集約化でオイル化技術導入するシナリオ6では、削減率は19.5%にとどまることが明らかとなった。更新シナリオで大別される個別集約化と大規模集約化での削減効果を比較すると、個別集約化のほうが大規模集約に比べ削減効果が高い傾向にあった。また、技術間の比較として、平野STPの多段炉の更新時に高温焼却、オイル化を採用するシナリオ1、2で確認すると、削減率はそれぞれ4.4%と14.7%となり、オイル化技術の導入が有効であることがわかった。

以上から、シナリオ0のように低炭素型技術を導入せずに、従来技術を継続して更新時に採用することはGHG排出抑制の面で非効率であるだけでなく、カーボン・ニュートラルなエネルギーとして潜在的なポテンシャルの高い下水汚泥の有効利用が図れていない。

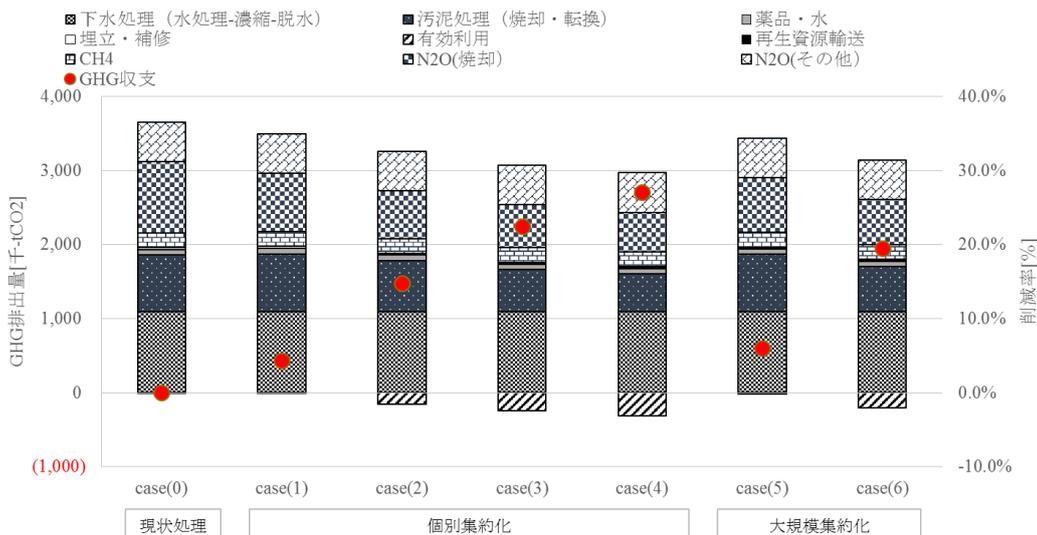


図 3-12 シナリオ別 GHG 排出量の推計結果 (2010～2040年)

3.5. 本章の結論

本章では、大阪市をケーススタディの対象地として、将来の人口と下水汚泥発生量の変化を考慮し、汚泥処理設備の更新シナリオを設計した。その上で、現有の汚泥焼却炉の代替技術として高温焼却、オイル化技術を導入したときのエネルギー消費量、GHG排出量の削減効果を、シナリオ別に定量評価した。本章で得られた主要な結果をまとめると、以下のとおりである。

- ・ どのシナリオ内においても、オイル化技術を導入するケースでLCE、GHGともに削減効果が最大となる。特に、早期に更新時期を迎える汚泥設備から順次、従来技術や高温焼却ではなく下水汚泥からエネルギーを創出可能なオイル化技術を採用することが、高い削減ポテンシャルを有する。
- ・ オイル化技術導入時には、設備に過剰な処理能力を生じさせないために、そのほかの処理区の汚泥を受け入れて処理することで、技術的優位性がさらに増す。
- ・ 個別集約化と大規模集約化間のシナリオを比較すると、個別集約化を図る計画のほうが、舞洲SCで大規模集約処理するよりもLCE、GHG排出削減効果が高いということが、このケーススタディでは結果に現れている。しかし、これは、個別集約化が有効な計画ということが結果に反映されているのではない。むしろ、大規模集約化の拠点として設定した舞洲SCが現有する熔融炉は、そのほかの処理技術に比べるとエネルギー多消費型の技術であるため、稼働の長期化や更新時期が先送りになればなるほど不利になるという条件が結果に反映されている。すなわち、エネルギー多消費型技術を保有する施設では、更新時期の前倒しなどを含め積極的な設備導入を図ることで、環境負荷低減効果が大きくなる。
- ・ 汚泥処理を集約化する際には、現有設備の過剰な処理能力を解消させるためにそのほかの処理設備への送泥または受け入れも検討すること、都市が保有する設備の更新の優先順位を決定すること、集約拠点の現有設備は計画を前倒してでも更新することや休廃止も検討すること、将来の人口減少に対応した処理規模や形態への再編を地域ごとに現有技術の特徴を考慮して計画することが重要である。

第3章の参考文献

- 1) 大阪市：下水道事業の現状と課題，2005年（参照：<http://www.city.osaka.lg.jp/shiseikaikakushitsu/cmfiles/contents/0000010/10312/c-34.pdf>，最終閲覧：2015年9月23日）。
- 2) 大阪市：下水道整備の推進～これからの下水道～（参照：<http://www.city.osaka.lg.jp/kensetsu/page/000007890.html>，最終閲覧：2015年9月23日）。
- 3) 大阪市：下水処理区と下水処理場（参照：<http://www.city.osaka.lg.jp/kensetsu/page/0000012066.html>，最終閲覧：2015年9月23日）。
- 4) 大阪府：平成22年度末大阪府下水道統計，2010年。
- 5) 公共投資ジャーナル社：「下水処理場ガイド2010 データ版（西日本編）」，2010年。
- 6) 日本下水道協会：「平成22年度版下水道統計」，2012年。
- 7) 大阪市：大阪市の汚泥パイプ輸送図（参照：<http://www.city.osaka.lg.jp/kensetsu/page/0000007936.html#shori>，最終閲覧：2015年9月23日）。
- 8) 大阪市：下水処理施設 舞洲スラッジセンター（参照：<http://www.city.osaka.lg.jp/kensetsu/page/0000010364.html>，最終閲覧：2015年9月23日）。
- 9) 国立社会保障・人口問題研究所：日本の市区町村別人口推計（平成25年3月推計）（参照：<http://www.ipss.go.jp/pp-shicyoson/j/shicyoson13/3kekka/Municipalities.asp>，最終閲覧：2015年9月23日）。
- 10) 大阪市：24区と下水道～下水道と地域のかかわり～（参照：<http://www.city.osaka.lg.jp/kensetsu/page/0000194685.html>，最終閲覧：2015年9月23日）。
- 11) 国土交通省：処理場等施設管理計画について，下水道施設のストックマネジメント手法に関する検討委員会・第3回委員会資料，2010年（参照：http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/crd_sewera_ge_tk_000087.html，最終閲覧：2015年9月23日）。
- 12) 富山県：小矢部川・神通川左岸流域下水道 機械・電気設備長寿命化計画（長期計画），2014年（参照：http://www.pref.toyama.jp/cms_pfile/00014730/00731190.pdf，最終閲覧：2015年9月23日）。
- 13) 国土交通省：下水道における地球温暖化防止推進計画策定の手引き，2009年（参照元：<http://www.mlit.go.jp/common/000036176.pdf>，最終閲覧：2015年9月23日）。
- 14) 地球温暖化対策推進本部：京都議定書目標達成計画の進捗状況，2014年（参照元：<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/ondanka/kaisai/dai28/siryou.pdf>，最終閲覧：2015年9月23日）。
- 15) 粕谷誠，坂中謙一：バイオガスによる反応タンク用送風機の直接駆動に関する開発，東京都下水道局技術調査年報2006，2006年。
- 16) 山本祐吾，古野間達，吉田登，盛岡通：下水汚泥処理における技術選択と施設更新による温室効果ガス削減効果のライフサイクル評価，土木学会論文集 G（環境），Vol.68，No.5，pp.I_137-I_146，2012年。
- 17) 三島一仁，山本祐吾：ごみ焼却熱由来の発電電力を活用した下水汚泥バイオオイル化による温室効果ガス削減効果の評価，土木学会論文集 G（環境），Vol.68，No.6，pp.II_245-II_253，2012年。

第4章 地方都市における下水汚泥処理施設での設備更新と処理形態再編シナリオの設計・評価

4.1. 緒言

下水処理場の多くは計画的に維持管理されてこなかったため、老朽化が顕著となっており、早急な改築・更新が必要である^{1,2)}。しかし、事業主体である地方自治体は、本来下水道整備の進展に伴う設備増強や、老朽化した設備の更新の必要性に応じて維持管理経費を増加させなければならないが、財政難で厳しい予算制約下にあるため、むしろその費用は削減傾向にある。そのため、適切かつ費用効率的なインフラ・設備の更新計画の立案が、今後ますます重要となる。

第2章でも述べたが、維持管理費削減の方向性として、従来の水処理・汚泥処理一体の下水道システムから、水処理と汚泥処理を切り離し、汚泥についてはある程度集約し広域的に一括処理することが経済的に有利である³⁾。また、地方自治体が複数保有する下水汚泥処理施設で実施している個別処理を、老朽化に伴う更新にあわせて一括処理に転換することが合理的である。今後、本格的な人口減少社会を迎えることになるわが国では、処理規模の将来変化を見据えながら、オーバースペックの見直しや汚泥処理の集約化などの施設更新・再編を計画的に進めていくことがより一層求められる。そのため、将来の人口変化や下水道整備状況、汚泥処理の広域化または集約化、施設更新のタイミング、さらには低炭素技術の選択などを計画変数として扱いながら、人口減少および環境・財政制約下における下水処理場の更新・再編を検討する必要がある。

本章では、下水道インフラの整備が現在も進展する地方都市の代表として、和歌山市をケーススタディの対象地として取り上げ、将来の人口と下水汚泥発生量の変化を考慮した下水汚泥焼却炉の更新シナリオを設計する。評価期間は2010～2040年の30年間とする。また、汚泥処理の集約化によるスケール効果を組み込んで、汚泥焼却炉の処理規模に応じた更新シナリオのエネルギー消費量およびGHG排出量を定量的に明らかにする。加えて、更新する汚泥焼却炉にエネルギー・資源転換技術を導入したときの効果も比較評価する。その際、技術オプションとして高温焼却、オイル化を設定する。これらを通じて、汚泥処理の集約化を含めた施設更新と、低炭素技術の選択を併せた将来計画の立案に資する知見を得ることを目指す。

本章の構成は次のとおりである。第2節では、地方都市における将来の下水汚泥発生量の変化を推計する。第3節では、下水汚泥処理施設での設備更新と集約化シナリオを設計する。シナリオの設計にあたっては下水汚泥発生量の将来変化、汚泥処理施設の規模や利用率、更新時期などを考慮する。第4節では、シナリオの算定結果を示す。そして、第5節に本章で得られた結論を示す。

4.2. 下水汚泥発生量の推計

4.2.1. ケーススタディ対象地の概要

(1) 公共下水道事業の概要

和歌山市における公共下水道事業の全体計画人口は32.8万人であり、和歌川、中央、北部の3つの処理区で整備が進められている。それぞれの処理区の下水処理は、和歌川終末処理場（和歌川STP）、中央終末処理場（中央STP）および北部終末処理場（北部STP）の3箇所でおこなわれている（表4-1）。和歌山市における現在の下水処理システムの概要を図4-1に、下水処理場の位置関係を図4-2に示す。

和歌山市の2010年度の行政人口36.9万人に対し、整備人口は12.7万人であり、下水道普及率は34.4%にとどまる。全国平均の下水普及率75.1%（2010年度）に及ばず、人口が同規模の都市（30～50万人）における平均下水道普及率の82.0%にも大きく遅れをとっている⁷⁾。こういった実情を踏まえ、市では2020年度の下水普及率を70.9%にまで向上させることを目標として掲げ、整備をおこなっている段階である。こうした政策動向は、下水道普及率が低い地方都市では一般的である。

表 4-1 和歌山市における公共下水道事業計画の概要⁴⁻⁶⁾

計画内容	全体処理区	和歌川処理区 (和歌川 STP)	中央処理区 (中央 STP)	北部処理区 (北部 STP)
全体計画処理人口[人]	328,000	29,000	171,000	128,000
事業認可処理人口[人]	178,400	29,000	107,600	41,800
計画処理能力*[m ³ /日]	241,200	50,500	120,600	70,100
現有処理能力*[m ³ /日]	154,300	50,500	80,400	23,400
汚泥処理方式	-	濃縮-脱水-焼却 (流動床炉)	濃縮-脱水-焼却 (流動床炉)	濃縮-脱水-場外搬出 (中央 STP で焼却)
処理開始年次[年度]	-	1984	1987	2001

*日最大処理能力

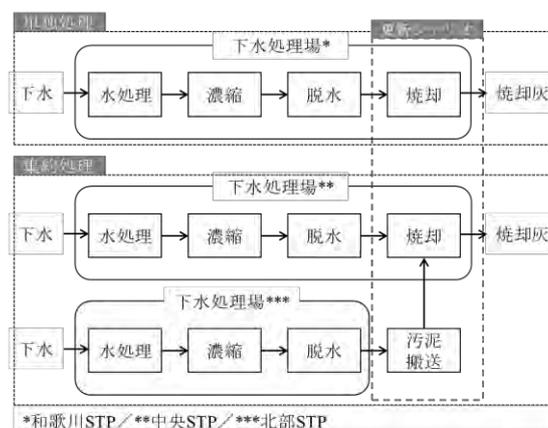


図 4-1 下水処理システムの概要（2010 年度）

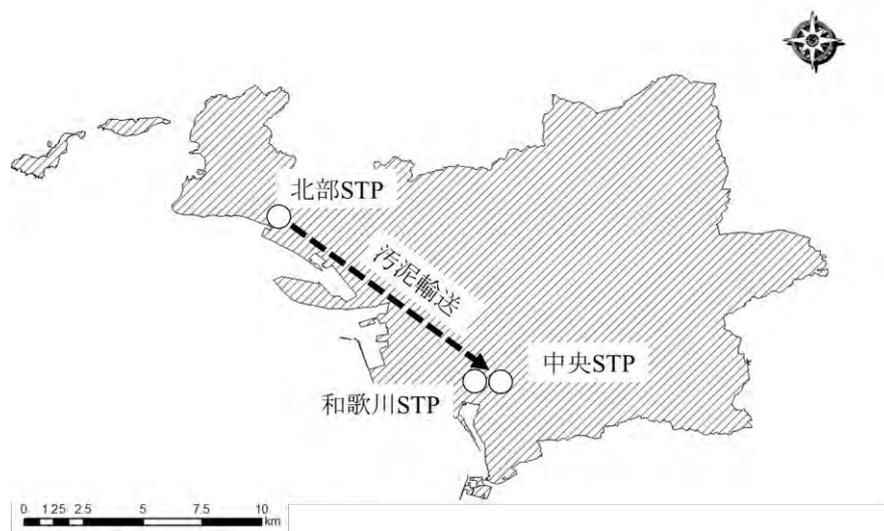


図 4-2 和歌山市の下水処理場位置図

(2) 下水汚泥焼却設備の概要

和歌山市の下水処理場が有する下水汚泥焼却設備を表4-2に示す。汚泥焼却設備を有しているのは、和歌川STPと中央STPの2箇所である。2001年に供用を開始した北部STPは整備過程にあるため、現有処理能力は全体処理計画の1/3である。このため、2010年度現在、汚泥焼却設備を場内に保有しておらず、下水汚泥は中央STPにトラック搬送・集約され、焼却処理されている⁶⁾。

汚泥焼却設備の稼働状況は、和歌川STPの稼働日数が少なく、147 [d/y]である。汚泥発生量に合わせた焼却処理をおこなっていると推察される。それに対して、中央STPの稼働日数は、北部STPの汚泥を受け入れるなどして、ある程度まとまった量の汚泥を処理するため、240 [d/y]と多い。なお、中央STPでは、国土交通省が実施する「下水道革新的技術実証事業（B-DASHプロジェクト）」の一環として、下水道における省エネルギー・創エネルギー効果の増大や下水道施設のライフサイクルコストの低減を目的に、バイオマスである下水汚泥の燃焼による発電技術システムについて実証が進められている^{9, 10)}。

表 4-2 和歌山市における汚泥焼却設備の概要^{4, 8)}

処理場名	焼却炉型式	全体計画 [基]	現有		
			処理能力 [t/d]	稼働日数* [d/y]	設置年度 [年度]
和歌川 STP	流動床炉	1	60×1 基	147	2,004
中央 STP	流動床炉	2	45×1 基	240	1,991
北部 STP	流動床炉	2	-	-	-

*稼働日数は 2010 年度の実績値

4.2.2. 将来人口や公共下水道人口の推計方法

(1) 将来人口の推計

国立社会保障・人口問題研究所の人口推計結果（2013年）¹¹⁾に基づき、2010～2040年の人口推移を推計した。同統計値は5年ごとに推計されているため、5年間の人口増減を各年に按分することで、30年間の将来人口を求めた。和歌山市全体の将来推計人口を図4-3に示す。2010年の人口は約37万人であるが、2040年には約9万人の減少となる。これは、2010年比で約24%減である。

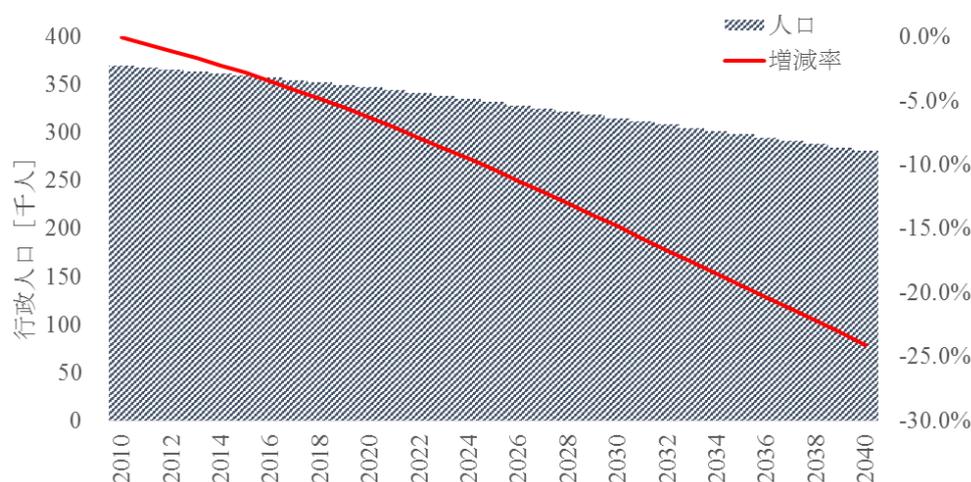


図 4-3 和歌山市の将来推計人口

(2) 公共下水道人口の推計方法

前段の将来推計人口に和歌山市の生活排水処理基本計画⁶⁾で見込まれている将来の処理形態別人口の割合を乗じ、2010～2040年までの将来値を求めた。この処理形態別人口には、公共下水道人口が含まれる。なお、同計画の目標は2020年度までであるため、計画内で設定されている公共下水道人口の伸び率が2021年度以降も一定であると仮定し、推計した。

和歌山市の将来処理形態別人口の推計結果を図4-4に示す。公共下水道人口は2040年までは増加するが、行政人口自体は2040年まで減少傾向が続くと推計された。なお、和歌山市の公共下水道事業は、2028年度の下水道人口32.8万人を全体完了目標としているが、本章の推計では全体計画処理人口が2040年度においても18.5万人であり、和歌山市の計画人口を達成するものとはなっていない。これは、先述した2021年度以降の公共下水道人口の伸び率の設定による。和歌山市における公共下水道全体計画の完了目標（2028年度）を達成するには、2021年度以降の伸び率を年平均12.3%にする必要がある。しかし、2016～2020年度の年平均伸び率が2.2%

で計画されていることを鑑みると、この実現は極めて困難と考えられる。そのため、本章では2021年度以降の伸び率を一定と仮定した。

また、後段で汚泥発生量を下水処理場別に算出するために、2040年まで推計した公共下水道人口に2010年度の処理区別処理人口の割合を乗じることで、2010～2040年までの処理場別の計画人口も推計した。ただし、処理区の計画処理人口に達した場合は、その年度以後の公共下水道人口の増加を考慮せず、残る処理区の人口増加に割り振り、全体の公共下水道人口に一致するように求めた。

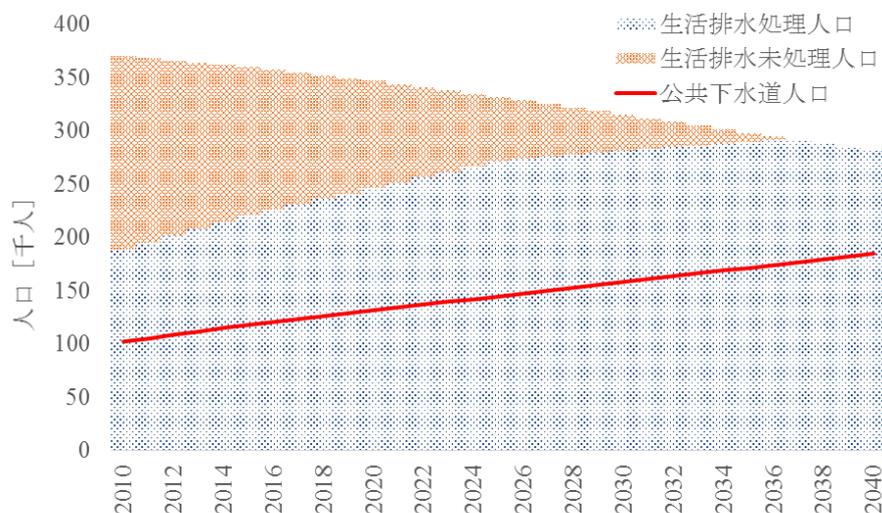


図 4-4 和歌山市の将来処理形態別人口

(3) 脱水汚泥発生量の推計方法

和歌山市における処理区別の年間脱水汚泥発生量を推計した。具体的には、2010年度版の下水道統計⁴⁾から下水処理場別に下水処理人口一人あたりの脱水汚泥発生原単位を作成し、これに2010～2040年度の公共下水道人口を乗じることで求めた。

なお、本推計に用いた原単位は公共下水道人口を分母にとっているが、分子にとった脱水汚泥発生量はこの下水道人口が直接関係する生活污水以外に、公共下水道が受け入れている営業污水や工場排水を含む事業場排水に起因する汚泥の発生量も含めたものとなっている。和歌山市の下水道が受け入れている事業場からの流入量や水質の実態データが公表されていないため、本章では今後も現状と同じ割合で下水処理場が事業場排水を受け入れると仮定した。ただし、長期的な排出量を予測する場合には、人口動態や産業立地などの変化による影響を受け、この原単位は変動しうるものである。そのときには、公共下水道人口の予測に加えて、産業活動の縮小や撤退、あるいは工場誘致といった産業構造変化の将来シナリオを描き、事業場排水の量や質の変化も考慮する必要があると考えられる。

$$Q_{i,t} = P_{i,t} \times q_{i,2010} \quad (4-1)$$

$Q_{i,t}$: t年におけるi処理区の年間脱水汚泥発生量 [t-DS/y]

$P_{i,t}$: t年におけるi処理区の公共下水道人口 [人]

$q_{i,2010}$: i処理区における2010年の一人あたり脱水汚泥発生原単位 [t-DS/人/y]

$$q_{i,2010} = Q_{i,2010} \div P_{i,2010} \quad (4-2)$$

$q_{i,2010}$: i処理区における2010年の一人あたり脱水汚泥発生原単位 [t-DS/人/y]

$Q_{i,2010}$: i処理区における2010年の年間脱水汚泥発生量 [t-DS/y]

$P_{i,2010}$: i処理区における2010年の公共下水道人口 [人]

図4-5に脱水汚泥発生量の推計結果を示す。下水道普及率の向上に伴い、2040年の脱水汚泥発生量は2010年と比べて69.9% (1,741 [t-DS/y]) 増加する。和歌山市は下水道普及率が高い大都市とは異なり、今後も普及向上に取り組む計画である。そのため、すでに人口減少にはあるものの、将来的に汚泥発生量の増加が見込まれる。また、和歌川STPでは、2025年に計画処理人口 (1,428 [t-DS/y]) に達すると推計される。

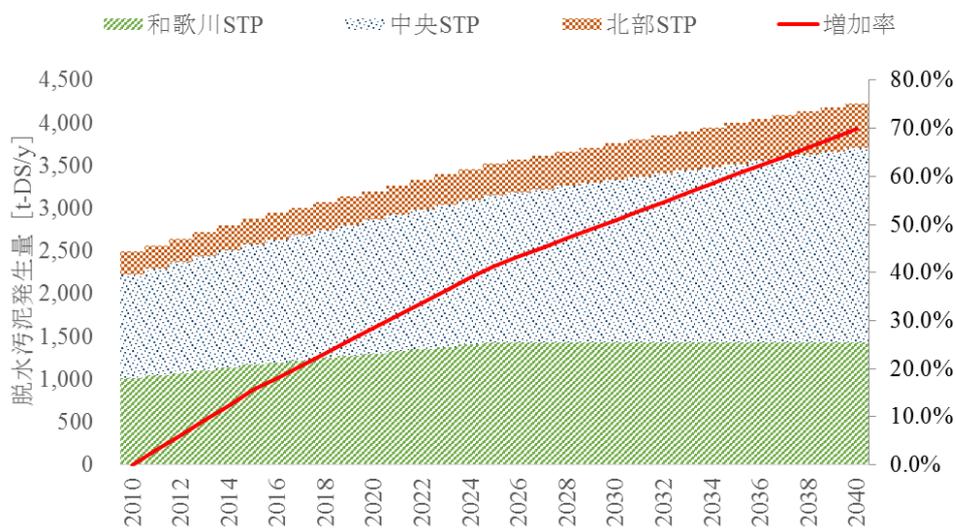


図 4-5 和歌山市の脱水汚泥発生量の将来変化

(4) 汚泥焼却設備の設備利用率

和歌山市における2010～2040年の脱水汚泥発生量に基づいて、汚泥焼却設備の設備利用率を算定した(図4-6)。ここでは、汚泥焼却設備の年間処理能力に対する実際の年間処理量を設備利用率と定義した。また、汚泥焼却設備の年間稼働日数は文献¹²⁾を参考に283 [d/y] (年間設

備利用率の標準：75～80%）と設定した。

2010年度における汚泥焼却設備全体の処理能力は29,702 [t/y]であり、利用率は45%に満たない。しかし、将来の公共下水道人口の増加により、2040年には76.1%となる。ただし、中央STPは2032年に設備利用率が100%を超えるため、汚泥焼却設備の増設などの対応が必要となる。つまり、市全体では汚泥焼却設備は過剰な処理能力を有しているといえるが、処理場別にみると段階的な設備増設や設備利用率の向上などを要するところもある。したがって、設備更新時期にあわせて処理規模を増強することや、汚泥焼却処理を和歌川または中央STPのどちらか一方に集約する形態に再編するといった将来計画の立案が必要であるといえる。

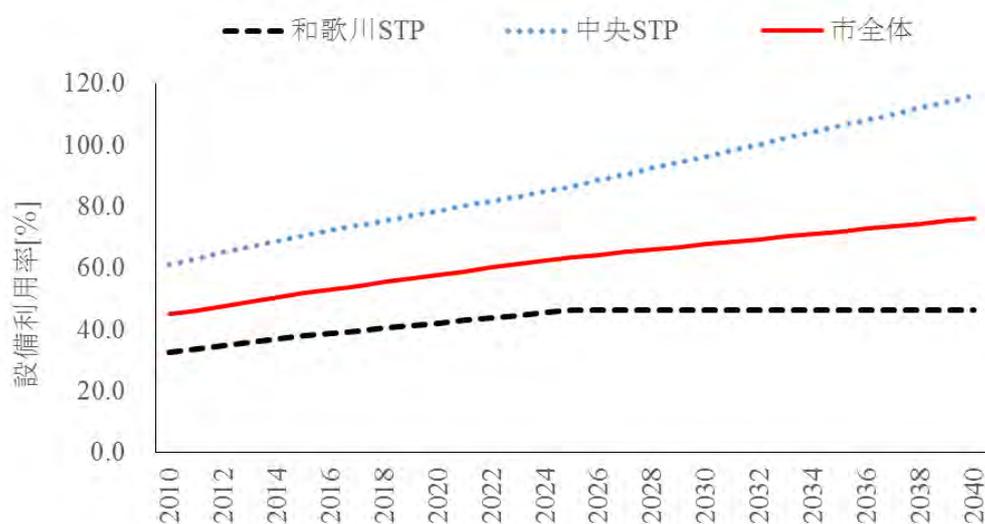


図 4-6 汚泥焼却設備における設備利用率の変化

4.3. 更新シナリオの設計

汚泥焼却設備の耐用年数を25年^{13,14)}とした上で、脱水汚泥発生量の将来変化、焼却設備の規模や利用率、更新時期を考慮し、7つの更新シナリオを設計した（表4-3）。これらの更新シナリオは、基本的に2つの方向に大別される。一つはそれぞれの下水处理場で汚泥処理を個別に行う単独処理、もう一方は、2箇所以上の下水处理場の汚泥を集約処理するものである。集約化するシナリオでは、投入汚泥量の拡大や設備利用率の向上に伴う処理量あたりエネルギー消費の改善や、低炭素技術の導入効果を含めて分析する。ここでは、低炭素技術として高温焼却およびオイル化技術を取り上げた。

表 4-3 更新シナリオの概要

汚泥焼却設備		更新シナリオ							
		現状	単独	段階的集約		早期集約 A		早期集約 B	
		処理	処理	処理	利用	処理	利用	処理	利用
		0	1	2	3	4	5	6	7
和歌川 STP	更新	2029-	2029-			2019-[u]	2019-		
	集約化					2016-	2016-	2016-2018	2016-2018
	汚泥輸送			2029-**	2029-**			2019-**	2019-**
	新技術						2019-		
	休廃止			2029-	2029-			2019-	2019-
中央 STP	更新	2016-	2016-[d]	2016-[u]	2016-			2019-[u]	2019-
	集約化	2010-	2010-2015	2010-	2010-	2010-2015	2010-2015	2010-2015	2010-2015
	汚泥輸送					2016-*	2016-*	2016-2018*	2016-2018*
	新技術				2016-				2019-
	休廃止					2016-	2016-	2016-2018	2016-2018
北部 STP	新設		2016-					2010-2015**	2010-2015**
	汚泥輸送	2010-**	2010-2015**	2010-**	2010-**	2010-2015**	2010-2015**	2016-2018*	2016-2018*
						2016-*	2016-*	2019-**	2019-**

汚泥搬送先：*和歌川 STP/**中央 STP
更新：[u]スケールアップ/[d]スケールダウン

・ シナリオ 0：現状処理・従来技術

汚泥焼却設備を保有している 2 つの処理場で、焼却炉が耐用年数に達したときに現有の焼却技術に更新する。更新時期は、中央 STP は 2016 年、和歌川 STP は 2029 年である。北部 STP で発生する下水汚泥は、従来どおり中央 STP に搬送する。本章では、これを比較評価の基準シナリオとする。

・ シナリオ 1：単独処理・従来技術

中央および和歌川 STP では、それぞれ焼却炉が耐用年数に達する 2016 年、2029 年に現有の焼却技術に更新する。北部 STP では、2016 年の中央 STP の更新と同じ時期に汚泥焼却炉を新設し、単独処理に転換する。そのため、中央 STP で更新する炉は、現状よりもスケールダウンさせる。

・ シナリオ 2：段階的集約処理・従来技術

和歌川 STP の汚泥焼却設備が耐用年数に達する 2029 年に焼却炉を廃止し、中央 STP に集約化する。中央 STP の汚泥焼却設備は、2016 年に将来の汚泥処理量の増加を見据えた規模にスケールアップし、現有の焼却技術に更新する。2029 年以降は市内すべての汚泥処理を中央 STP に集約化する。

・ シナリオ 3 : 段階的集約利用・新技術

シナリオ 2 に対して、2016 年に中央 STP の焼却設備を更新する際、現有の焼却技術ではなくオイル化技術を導入する。

・ シナリオ 4 : 早期集約処理 A・従来技術

中央 STP の汚泥焼却設備が耐用年数に達する 2016 年以降、中央および北部 STP の下水汚泥は和歌川 STP に搬送して集約処理し、中央 STP の焼却炉は廃止する。和歌川 STP では 2019 年に現有設備の処理能力を超えることになるため、耐用年数に達する前に現有の焼却技術に更新するとともに、処理能力のスケールアップを図る。

・ シナリオ 5 : 早期集約利用 A・新技術

シナリオ 4 に対して、2019 年に和歌川 STP の焼却設備を早期更新する際、現有の焼却技術ではなくオイル化技術を導入する。

・ シナリオ 6 : 早期集約処理 B・従来技術

中央 STP の汚泥焼却設備が耐用年数に達する 2016 年から、中央および北部 STP の下水汚泥は和歌川 STP に搬送して集約処理し、中央 STP の焼却炉は休止する。2019 年に和歌川 STP での処理量が現有処理能力を超える時期にあわせて、中央 STP の焼却設備をスケールアップさせながら現有の焼却技術に更新し、集約処理の拠点をそこに移行する。和歌川 STP の焼却炉は、耐用年数に達する前に廃止する。

・ シナリオ 7 : 早期集約利用 B・新技術

シナリオ 6 に対して、2019 年に中央 STP の焼却設備を更新する際、現有の焼却技術ではなくオイル化技術を導入する。

4.4. 更新計画による GHG 削減効果

4.4.1. 推計方法

(1) 処理規模に応じた原単位

先行研究¹⁵⁾においても、汚泥焼却の投入量増加に伴ってエネルギー消費、GHG 排出原単位が低減することが明らかにされている。しかし、これは従来の焼却技術に比べて補助燃料の追加投入を必要とする高温焼却技術が普及する前の焼却設備を対象にして、分析したものである。そこで本章では、汚泥焼却設備の高温焼却運転実績を含んだ最新の統計データを用いて、処理規模に応じたエネルギー消費および GHG 排出原単位を導出した。

具体的には、下水道統計⁴⁾に記載されている全国の汚泥焼却設備から、燃料種別の使用量や汚泥投入量が確認できる 72 設備を取り上げた。焼却炉型式の内訳は、93%が流動床焼却炉であり、残りの 7%が多段式焼却炉などである。

これらの設備に投入される燃料種別使用量に、各燃料の単位あたりエネルギー消費および GHG 排出原単位(表 4-4)を乗じ、設備ごとのエネルギー消費量および GHG 排出量を算定した。その上で、これらを設備ごとに投入されている汚泥量で除して、投入汚泥量あたりの原単位を作成した。その結果を図 4-7、図 4-8 に示す。汚泥焼却炉の型式、処理能力、設備利用率の差や、設備の経年劣化などを考慮した分析には至っていないが、スケールメリットが得られるという基本的な傾向については概ね良好な結果を得ることができたといえる。本章では、焼却設備の新設または更新を伴うシナリオを評価する際にこの関数を用いる。なお、設備に投入される燃料は、下水道統計⁴⁾で把握されている補助燃料を含むすべての燃料種を取り扱った。

表 4-4 エネルギー消費・GHG 排出原単位(汚泥焼却)^{16, 17)}

投入燃料	単位	単位あたりのエネルギー消費原単位	単位あたりの GHG 排出原単位
		[GJ/単位]	[t-CO ₂ /単位]
特 A 重油	[kl]	39.1	2.92
A 重油	[Kl]	39.1	2.92
灯油	[Kl]	36.7	2.61
プロパンガス	[t]	50.8	1.81
都市ガス	[千 m ³]	45.6	2.75

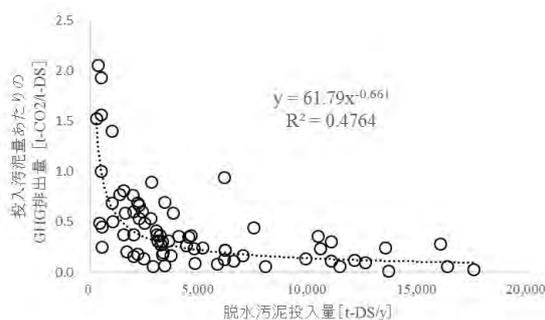
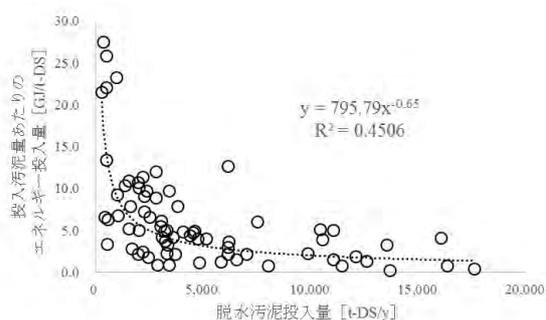


図 4-7 汚泥焼却プロセスのエネルギー消費原単位 図 4-8 汚泥焼却プロセスの GHG 排出原単位

ここで、2010年度の実績値から求められる処理場別の投入汚泥量あたりエネルギー消費・GHG排出原単位との比較を通じて、得られた原単位の精度を検証した。その結果、実績値に対してエネルギー消費原単位は和歌川STP：-131%，中央STP：-36%，GHG排出原単位では和歌川STP：-60%，中央STP：-32%となり、いずれも過小評価となった。特に和歌川STPの推計された原単位が、実績値に比べ小さい。その要因としては、実際の処理量が少なく定格処理能力に対し軽負荷となり、運転効率が低下している可能性が考えられる。さらに、設備利用率の低さ、つまり年間稼働日数が少ないことで連続操業が難しい状況に陥る。それらの要因が重なり、安定的なプラント運転ができず、投入汚泥量あたりの補助燃料消費が多くなることも考えられる。この過小評価を避けるため、現有焼却炉の計算に適用する際には、図4-7および図4-8に示した関数が2010年度の実績値に適合するように補正（平行移動）した式を用いることとする。

(2) 下水・汚泥処理の環境負荷

下水および下水汚泥処理プロセスでは、使用される燃料、薬品および電力などに係るエネルギー消費量、GHG排出量を計上した。具体的には、まず2010年度の下水道統計⁴⁾より把握したエネルギー・物質投入量に、エネルギー消費およびGHG排出原単位（表4-5）を乗じた。また、汚泥焼却、排水処理に伴うGHG排出量は表4-6の原単位を用いて算定した。次に、同年度の脱水汚泥処理量あたりエネルギー消費およびGHG排出原単位を作成した。それぞれの原単位を表4-7、表4-8に示す。ここでは、高温焼却技術とオイル化技術の原単位のシステム境界を合わせるため、高温焼却の電力、燃料（水処理）薬品およびN₂O（焼却）以外のプロセスは、先行研究^{20, 28)}を参考にした。また、オイル化技術によって生成したガスとオイルについては、具体的な利用先や利用方法を想定せず、それぞれ有効利用に伴うエネルギー消費量、GHG排出量をマイナス計上する形としている。また、これらの高温焼却技術やオイル化技術は、従来の焼却技術の代替である。よって、導入技術間で値が異なるプロセスは、汚泥処理（焼却・転換）、有効利用、再生資源輸送、汚泥搬送（処理場間）となる。いずれの技術も下水処理プロセスに

違いはない。

その上で、これらの原単位に4.2.2.で求めた2010～2040年の脱水汚泥発生量を乗じることで、各年のエネルギー消費量、GHG排出量を推計した。その際、前段で導出した関数に基づいて、汚泥投入量に応じたスケールメリットを考慮した。

表 4-5 エネルギー消費・GHG 排出原単位（下水処理）¹⁷⁻²⁰⁾

投入資源	単位	単位あたりの エネルギー消費原単位 [GJ/単位]	単位あたりの GHG 排出原単位 [t-CO ₂ /単位]
電力	[MWh]	9.63	0.559
次亜塩素ナトリウム	[t]	11.8	0.417
高分子凝集剤	[t]	220	6.50

表 4-6 下水処理に伴う GHG 排出原単位²¹⁾

対象となる排出活動	単位	単位あたりの GHG 排出原単位
汚泥焼却（高温）に伴う N ₂ O 排出量	[t-CO ₂ /t]	0.200
排水処理に伴う CH ₄ 排出量	[t-CO ₂ /千 m ³]	0.0185
排水処理に伴う N ₂ O 排出量	[t-CO ₂ /千 m ³]	0.0496

表 4-7 脱水汚泥量あたりエネルギー消費原単位^{22, 23)}

[単位：GJ/t-DS]	高温焼却 (和歌川 STP)	高温焼却 (中央 STP)	焼却無 (北部 STP)	オイル化 (共通)
電力(水処理)	59.180	31.057	40.784	****
電力(濃縮)	6.179	3.243	4.253	****
電力(脱水)	5.715	2.999	3.939	****
電力(焼却・転換)	16.970	8.906	0	5.604
燃料(水処理)	1.090	1.086	0.258	****
燃料(焼却)	20.963***	8.906***	0***	0.00
薬品・水	3.869	2.528	1.690	3.351
埋立, 補修	0.397	0.397	0.397	0.438
原料輸送 *	2.861	2.861	2.861	1.596
有効利用	0	0	0	-6.975
再生資源輸送**	0	0	0	0.125
合計	117.225	62.079	54.187	-

* 資源採掘から国内までの燃料の輸送

** 重油代替として, 下水処理場の近くに立地するガラスびん工場(日生産量: 100 [t/d]以上)へ輸送する設定

*** 処理量に応じた原単位(4.4.1.(1)参照)

**** 導入先にあわせて変化

表 4-8 脱水汚泥量あたり GHG 排出原単位^{22, 23)}

[単位：t-CO ₂ /t-DS]	高温焼却 (和歌川 STP)	高温焼却 (中央 STP)	焼却無 (北部 STP)	オイル化 (共通)
電力(水処理)	3.435	1.803	2.367	**
電力(濃縮)	0.359	0.188	0.247	**
電力(脱水)	0.332	0.174	0.229	**
電力(焼却・転換)	0.985	0.517	0	0.151
燃料(水処理)	0.076	0.075	0.018	**
燃料(焼却)	1.045*	0.624*	0*	0
薬品・水	0.123	0.083	0.055	0.220
埋立, 補修	0.036	0.036	0.036	0.027
原料輸送	0	0	0	0.100
有効利用	0	0	0	-0.500
再生資源輸送	0	0	0	0.009
CH ₄ (水処理)	0.157	0.208	0.094	**
N ₂ O(焼却)	0.440	0.440	0	0.440
N ₂ O(水処理)	0.421	0.560	0.251	**
合計	6.365	4.083	3.297	-

* 処理量に応じた原単位(4.4.1.(1)参照)

** 導入先にあわせて変化

(3) 処理場間の汚泥輸送の環境負荷

汚泥を集約処理する際, 各処理場間の輸送に伴うエネルギー消費量, GHG排出量に計上する必要がある。そこで, 一般的な下水汚泥運搬モデル²⁴⁾として10トントラックでの運搬を想定し, 輸送回数あたりのエネルギー消費量, GHG排出量を算定した(表4-9)。

表 4-9 汚泥輸送に伴うエネルギー消費および GHG 排出量

汚泥輸送間	輸送回数あたりのエネルギー消費量	輸送回数あたりの GHG 排出量
	[MJ/回]	[CO ₂ /回]
北部 STP－中央 STP	0.381	0.028
北部 STP－和歌川 STP	0.344	0.025
中央 STP－和歌川 STP	0.050	0.004
和歌川 STP－中央 STP	0.050	0.004

具体的な手順としては、まずインターネット上のオンライン地図サービスのgoogleマップを利用し、各処理場の住所情報⁸⁾から輸送距離を求めた。それぞれの処理場間の輸送距離は、北部STP－中央STP間：14.6 [km]，北部STP－和歌川STP間：13.2 [km]，和歌川STP－中央STP間：1.9 [km]である。また、トラックの燃費は2.89 [km/l]²⁵⁾，トラック燃料である軽油の発熱量は37.7 [GJ/kl]¹⁶⁾，軽油のGHG排出係数は0.0726 [t-CO₂/GJ]¹⁷⁾とした。

$$HV_i = T_i \times R \times 2 \div M \times 10^{-3} \times HV \quad (4-3)$$

HV_i : i 処理場間の輸送に伴うエネルギー消費原単位 [GJ/回]

T_i : i 処理場間の輸送距離 [km/回]

R : 処理場間の往復回数 [回]

M : トラック燃料の軽油消費量 [km/l]

HV : トラック燃料の発熱量 [GJ/kl]

$$EM_i = HV_i \times CF \quad (4-4)$$

EM_i : i 処理場間の輸送に伴うGHG排出量 [t-CO₂/回]

HV_i : i 処理場間の輸送に伴うエネルギー消費原単位[GJ/回]

CF : 軽油のGHG排出原単位 [t-CO₂/GJ]

さらに、2010～2040年の各推計年度における処理場間の輸送回数は次式より求め、これに輸送回数あたりのエネルギー消費およびGHG排出量を乗じて、輸送に伴うエネルギー消費量、GHG排出量を推計した。なお、トラックの平均積載重量は参考資料²⁵⁾より8.0 [t]を設定した。

$$t_i = S_i \div M_c + r \quad (4-5)$$

t_i : i 処理場間の輸送回数 [回/y]

S : 下水汚泥輸送量 [t/y]

M_c : トラックの平均積載重量 [t/回]

r : 端数処理に伴う補正值

4.4.2. 推計結果

(1) エネルギー消費量

各シナリオにおけるエネルギー消費量の推計結果を図4-9に示す。基準シナリオと比較すると、シナリオ1～7ではそれぞれ-1.3%、2.8%、15.3%、-1.6%、19.6%、6.2%、19.6%のエネルギー削減効果が得られることが明らかとなった。

新技術としてオイル化技術を導入する段階的集約利用（シナリオ3）、早期集約利用A（シナリオ5）、早期集約利用B（シナリオ7）の削減効果が大きく、いずれの削減率も15%を超えることがわかった。また、段階的集約利用に比べ、早期集約利用をすることで19.6%の削減効果を得られることがわかった。

これに対して、削減効果が小さいシナリオは、単独処理（シナリオ1）と早期集約処理A（シナリオ4）であり、エネルギー消費量が微増する結果となった。これは、シナリオ1では中央STPおよび北部STPが集約処理から単独処理に切り換わることによって、集約化によるスケールメリットが失われたことによる。シナリオ4については、和歌川STPを拠点とした集約処理により、スケールメリットを発揮するが、現有焼却炉のエネルギー消費効率が悪く、その効果を打ち消す結果となっている。これらのことから、集約化と現有焼却炉のエネルギー消費効率を総合的に勘案した集約拠点の選択が重要ということが示唆された。

一方、処理設備をスケールアップさせて従来どおりの焼却技術に更新する段階的集約処理（シナリオ2）と早期集約処理（シナリオ6）では、それぞれ2.8%、6.2%の削減となる。中央STPの設備更新が早期に行われ、現有に比べエネルギー消費効率が大幅に改善されることや、集約化による投入汚泥量の増加が更なる効果をもたらしている。

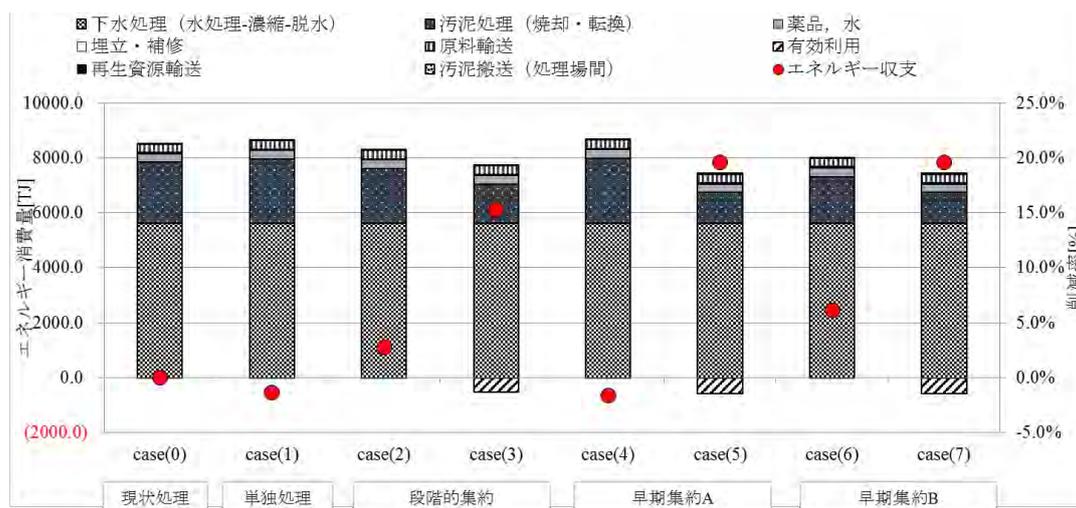


図 4-9 各シナリオにおける LCE 算定結果 (2010-2040 年)

(2) GHG 排出量

各シナリオにおけるGHG排出量の推計結果を図4-10に示す。基準シナリオと比較すると、すべてのシナリオでGHG排出量が削減されることが明らかになった。シナリオ1～7ではそれぞれ0.6%、2.2%、17.2%、0.1%、19.2%、3.0%、19.2%のGHG削減効果が得られる。

新技術としてオイル化技術を導入する段階的集約利用（シナリオ3）、早期集約利用A（シナリオ5）、早期集約利用B（シナリオ7）の削減効果が大きく、いずれの削減率も17%を超えることがわかった。また、段階的集約利用に比べ、早期集約利用することで19.2%の削減効果が得られることがわかった。

これに対して、削減効果が小さいシナリオは、単独処理（シナリオ1）と早期集約処理A（シナリオ4）であり、GHG排出量が微減する結果となった。エネルギー消費量と同様に、集約処理から単独処理への転換によってスケールメリットが低下したことによる。シナリオ4については、和歌川STPを拠点とした集約処理により、スケールメリットを発揮するが、現有焼却炉のGHG排出原単位が大きく、削減効果を引き下げている。これらのことから、集約化効果を最大限に得るためには、現有焼却炉のGHG排出原単位に着目した集約拠点の選択が重要であることが示された。

一方、処理設備をスケールアップさせて従来どおりの焼却技術に更新する段階的集約処理（シナリオ2）と早期集約処理A（シナリオ4）、早期集約処理（シナリオ6）はそれぞれ、2.2%、0.1%、3.0%削減となる。中央STPの設備更新が早期に実施され、現有設備に比べGHG排出原単位が改善されることや、集約化による投入汚泥量の増加が更なる効果をもたらしている。

また、プロセスに着目すると、汚泥処理（焼却・転換）における環境負荷が全体に占める割合が最も高く、基準シナリオではエネルギー消費量で26%、GHG排出量で20%となる。このことから、下水処理システムの低炭素化に向けた将来計画では、汚泥処理の集約化や設備更新を含めた低炭素化技術の導入を通じてこのプロセスの環境負荷をいかに削減するかが重要であることがわかる。

設備更新の導入技術について考察すると、現有の焼却技術を採用するならば、早期に集約処理することで、エネルギー消費量、GHG排出削減効果を得ることができる。逆に集約化がもたらす環境負荷として、汚泥輸送が増加することとなるが、汚泥輸送に伴う負荷量が最大となるシナリオにおいても、それが全体の負荷量に占める割合は1%にも満たない。オイル化技術を採用すれば、汚泥処理（焼却・転換）の環境負荷が大幅に削減され、さらにオイル化による有効利用効果もたらされる。なお、再生資源輸送プロセスの負荷が最大となるシナリオにおいても、それが全体の負荷量に占める割合は1%にも満たない。

以上のことから、導入技術間の比較をすると、オイル化技術を導入することは、現有している焼却技術と同じものに置き替えるよりも有効である。また、集約化の時期に着目すると、段階的な集約処理よりも早期集約処理の削減効果のほうが大きい。

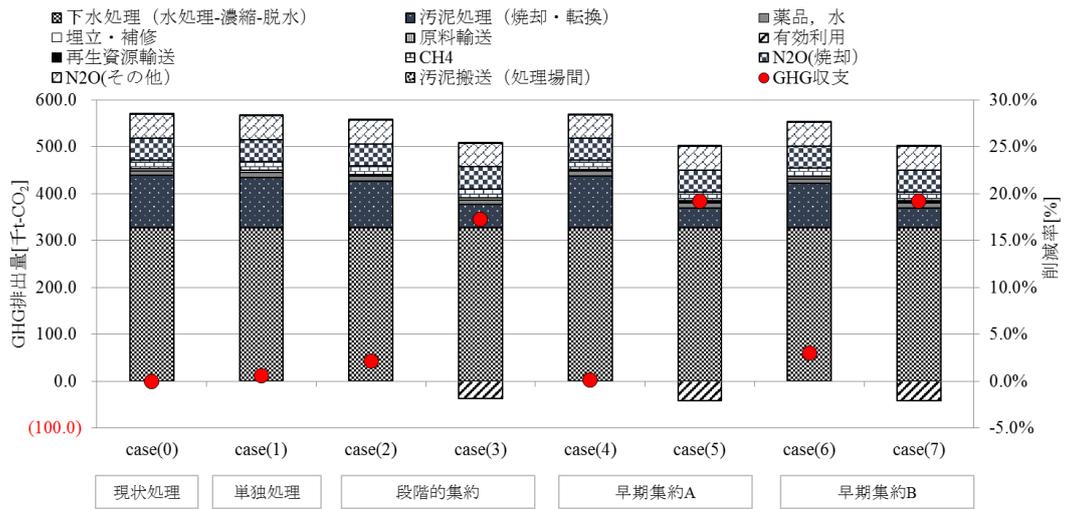


図 4-10 各シナリオにおける GHG 算定結果 (2010-2040 年)

4.5. 本章の結論

本章では、将来人口が減少する一方で、今後も下水道整備が進展する和歌山市をケーススタディの対象地として、処理規模の将来変化に応じた下水汚泥処理設備の更新シナリオを設計した。その上で、汚泥処理を集約化してスケール効果を高める再編と、焼却代替を図る設備更新時の低炭素技術選択とを統合した施設マネジメントによるエネルギー消費量、GHG排出量の削減効果をシナリオ別に定量評価した。本章で得られた主要な結果をまとめると、以下のとおりである。

- ・ 下水道普及率が低い地方都市においては、すでに人口減少下にあるものの、将来的には汚泥発生量の増加が見込まれる。その対策として個々の汚泥処理設備ごとに対応するということはエネルギー消費量、GHG排出量の面から見ても適当でない。都市レベルでの合理的な処理方策の検討が必要である。
- ・ 汚泥処理を集約化し、汚泥処理量を増加させることでスケールメリットを高める戦略は、エネルギー消費およびGHG排出削減に有効である。
- ・ 集約化の効果を最大限に引き出すならば、エネルギー消費、GHG排出原単位が低い現有焼却炉を集約拠点とさせることが重要である。
- ・ 汚泥処理を集約化しつつ設備更新時に大規模化を図り、スケールメリットを活かすという戦略に加えて、更新の際に低炭素技術としてのオイル化を導入することで、エネルギー消費量、GHG排出量ともに削減効果がさらに高まる。特に、従来の焼却技術からオイル化技術に置き換える場合、より早期に集約化して処理量を増加させる計画が有効である。

第4章の参考文献

- 1) 日本総合研究所：平成22年度「今後の社会資本ストックの戦略的維持管理等に関する調査」結果～企画財政編～，2010年（参照元：<http://www.jri.co.jp/page.jsp?id=18826>，最終閲覧：2014年3月14日）
- 2) 日本総合研究所：平成22年度「今後の社会ストックの戦略的維持管理等に関する調査」～地方自治体企画財政部局編～，2010年（参照元：<http://www.jri.co.jp/MediaLibrary/file/pdf/company/release/2010/101108/101108.pdf>，最終閲覧：2014年3月14日）
- 3) 国土交通省：バイオソリッド利活用基本計画（下水汚泥処理総合計画）策定マニュアル（案），2003年（参照元：<http://www.mlit.go.jp/crd/city/sewerage/info/biosolid/030829.pdf>，最終閲覧：2014年3月14日）
- 4) 社団法人日本下水道協会：平成22年度版下水道統計，2010年
- 5) 和歌山市：和歌山市の下水道（参照元：http://www.city.wakayama.wakayama.jp/gesuidoubu/02/si_gesuidou.htm，最終閲覧：2014年3月14日）
- 6) 和歌山市：和歌山市一般廃棄物処理基本計画【生活排水処理基本計画編】，2011年（参照元：http://www.city.wakayama.wakayama.jp/menu_3/gomi/pdf/kihonkeikaku/haisui.pdf，最終閲覧：2014年3月14日）
- 7) 国土交通省：平成24年度末の汚水処理人口普及状況について（参照元：http://www.mlit.go.jp/report/press/mizukokudo13_hh_000216.html，最終閲覧：2014年3月14日）
- 8) 公共投資ジャーナル社：下水処理場ガイド2010（データ版），2010年
- 9) 和歌山市：下水道革新的技術事業（参照元：<http://www.city.wakayama.wakayama.jp/gesuidoubu/b-dash/b-dash.htm>，最終閲覧：2014年3月14日）
- 10) 日本下水道事業団：記者発表資料「下水道革新的技術実証事業（B-DASH プロジェクト）」，2013年（参照元：<https://www.jswa.go.jp/kisya/h25pdf/0521kisya.pdf>，最終閲覧：2014年3月14日）
- 11) 国立社会保障・人口問題研究所：日本の地域別将来推計人口－平成22（2010）～52（2040）年－，2013年（参照元：<http://www.ipss.go.jp/pp-shicyoson/j/shicyoson13/6houkoku/houkoku.asp>，最終閲覧：2014年3月14日）
- 12) 日本下水道協会：下水道施設計画・設計指針と解説2009年版（後編），2001年
- 13) 国土交通省：処理場等施設管理計画について，下水道施設のストックマネジメント手法に関する検討委員会・第3回委員会資料，2010年（参照元：http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/crd_sewerage_tk_000087.html，最終閲覧：2014年3月14日）
- 14) 高橋隆一，桐原隆，津田伸夫，舛岡秀一，小林修，仲元寺宣明：下水道主要設備機能診断に関する研究，下水道新技術研究所年報（2/2巻），下水道新技術推進機構，pp.191-196，2002年
- 15) 惣田訓，池道彦：処理規模を考慮したエネルギー解析モデルによるさまざまな下水汚泥処理システムのエネルギー消費量の比較評価，用水と廃水，Vol.51，No. 3，pp.50-60，2009年
- 16) 経済産業研究所：総合エネルギー統計の解説／2010年度改訂版，2012年（参照元：<http://www.rieti.go.jp/users/kainou-kazunari/download/pdf/2010EBXIGRF.pdf>，最終閲覧：2014年3月14日）
- 17) 産業環境管理協会：カーボンフットプリントコミュニケーションプログラム 基本データベース ver.1.01（国内データ）（参照元：https://www.cfp-japan.jp/calculate/verify/xls/CO2basic_data_ver101_20130212.xls，最終閲覧：2014年3月14日）
- 18) 環境省：平成22年度の電気事業者ごとの実排出係数・調整後排出係数等の公表について，2012年（参照元：<http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=14702>，最終閲覧：2014年3月14日）
- 19) 大阪大学：高効率熱分解バイオオイル化技術による臨海部都市再生産業地域での脱温暖化イニシアティブ実証事業2007～2009年度，2010年
- 20) 国土交通省：下水道における地球温暖化防止推進計画策定の手引きについて，2009年（参照元：<http://www.mlit.go.jp/common/000036176.pdf>，最終閲覧：2014年3月14日）
- 21) 環境省・経済産業省：温室効果ガス排出量算定・報告マニュアル，2014年（参照元：<http://ghg-sant-eikohyo.env.go.jp/manual>，最終閲覧：2014年3月14日）
- 22) 山本祐吾，古野間達，吉田登，盛岡通：下水汚泥処理における技術選択と施設更新による温室効果ガス削減効果のライフサイクル評価，土木学会論文集G（環境），Vol.68，No.5，pp.I_137-I_146，2012年
- 23) 三島一仁，山本祐吾：ごみ焼却熱由来の発電電力を活用した下水汚泥バイオオイル化による温室効果ガス削減効果の評価，土木学会論文集G（環境），Vol.68，No.6，pp.II_245-II_253，2012年
- 24) 日本産業廃棄物処理振興センター：日本産業廃棄物処理振興センター（参照元：<http://www.jwnet.or>

- jp/jwnet/pdf/gyouseihoukoku_jyuuryoukanzankeisuu.pdf, 最終閲覧：2014年3月14日)
- 25) 環境省：サプライチェーンを通じた組織の温室効果ガス排出等の算定のための排出原単位データベース (ver.2.0), 2013年 (参照元：http://www.env.go.jp/earth/ondanka/supply_chain/comm_rep/unit201203v2-02.pdf, 最終閲覧：2014年3月14日)

第5章 ごみ焼却施設と下水汚泥処理施設の連携を視野に入れた将来シナリオの構築

5.1. 緒言

下水処理場や清掃工場に代表される都市代謝施設は低炭素社会、循環型社会への移行の中で、効率的・効果的な維持管理や計画的な整備・更新を進めていくことが期待されている。その上で、人口減少社会に対応した都市代謝施設の施設整備が重要である。

第2章でも述べたが、下水汚泥エネルギー化技術を採用する下水処理場が、都市部を中心に増加傾向にある。しかし、こうした取り組みは下水道普及率をほぼ達成し、比較的大規模な施設を保有している地方自治体や、地域の低炭素化を積極的に推進する一部の地方自治体に限られる。多くの地方自治体は財政難で厳しい予算制約下にあるため、施設の膨大な更新費用の捻出は難しい状況にあり、すべての施設を更新することは困難である。それゆえ、複数の施設を統廃合し集約化したり、複数の施設間で機能や役割を見直したりするなど、戦略的な施設整備が求められている。そうした施設整備への対応策として複数の施設で汚泥を単独処理する形態から、1箇所に集約し汚泥を処理する形態に切り換える戦略¹⁾や汚泥焼却を下水処理場側からごみ処理場側に移管し、清掃工場でごみと下水汚泥を混焼する戦略がある。下水道普及率が低い下水処理場では汚泥焼却施設の建設費・維持管理費が割高になるため、ごみ・汚泥混焼システムは、そうした課題の解決策のひとつとなる。そこで、汚泥処理の集約化や燃料転換技術の導入の効果を比較するとともに、ごみ焼却施設でのごみ・汚泥混焼を含めた汚泥処理の将来計画の立案に資する知見を得ること目的とした。

本章では、下水道インフラの整備が現在も進展する地方都市の代表として、和歌山市をケーススタディの対象地として取り上げ、将来の人口、下水汚泥発生量およびごみ焼却量の変化を考慮した下水汚泥焼却施設と清掃工場の都市代謝施設における統合と連携シナリオを設計する。評価期間は2010～2040年の30年間とする。また、汚泥処理の集約化によるスケール効果を組み込んで、汚泥焼却炉の処理規模に応じた更新シナリオのエネルギー消費量およびGHG排出量を定量的に明らかにする。加えて、更新する汚泥焼却炉にエネルギー・資源転換技術を導入したときの効果も比較評価する。その際、技術オプションとして高温焼却、オイル化を設定する。これらを通じて、汚泥処理の集約化を含めた施設更新と、低炭素技術の選択を併せた将来計画の立案に資する知見を得ることを目指す。

本章の構成は次のとおりである。第2節では、地方都市における将来の下水汚泥発生量およびごみ焼却量の変化を推計する。第3節では、都市代謝施設の統合と連携でシナリオを設計する。シナリオの設計にあたっては下水汚泥発生量とごみ焼却量の将来変化、都市代謝施設の規模や利用率、更新時期などを考慮する。第4節では、シナリオの算定結果を示す。そして、第5節に本章で得られた結論を示す。

5.2. 下水汚泥発生量およびごみ焼却量の将来推計

5.2.1. ケーススタディ対象地の概要

(1) 公共下水道事業の概要

和歌山市における公共下水道事業の全体計画人口は32.8万人であり、3つの処理区で整備が進められている²⁾。それぞれの処理区の下水処理場は、和歌川終末処理場（和歌川STP）、中央終末処理場（中央STP）、北部終末処理場（北部STP）である（図5-1）。

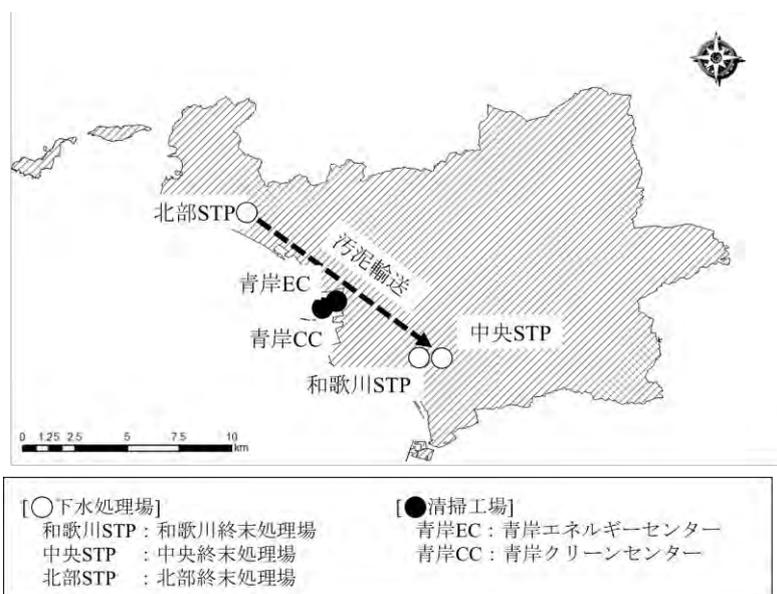


図 5-1 下水処理場および清掃工場の位置図

汚泥焼却設備を有しているのは和歌川STPと中央STPの2箇所である（表5-1）。北部STPは全体計画では2基設置する予定であるが、下水道整備段階ということもありそのほかの処理場のようにある程度まとまった汚泥発生量とはなっていない。このため、汚泥焼却設備は未設置であり、下水汚泥は中央STPにトラック搬送・集約し焼却処理されている。稼働状況については、和歌川STPの稼働日数は143 [d/y]と少なく、中央STPは北部STPの汚泥を受け入れている影響もあり稼働日数は255 [d/y]と多い。

表 5-1 和歌山市における汚泥処理施設の概要²⁻⁴⁾

施設名	和歌川 STP	中央 STP	北部 STP
汚泥処理方式	濃縮-脱水-焼却	濃縮-脱水-焼却	濃縮-脱水-場外搬出
全体計画	1[基]	2[基]	2[基]
現有 処理能力	60 [t/d]× 1[基]	45 [t/d]×1 [基]	-
焼却炉型式	流動床炉	流動床炉	-
稼働日数*	143 [d/y]	255 [d/y]	-
投入汚泥量	5,347 [t/y]	8,360 [t/y]	-
含水率	81.8 [%]	81.0 [%]	-
設置年度	2004	1991	-

* 2010 年度の実績値

(2) 清掃工場の概要

和歌山市の一般廃棄物処理は、青岸地区に立地する青岸エネルギーセンター（青岸EC）、青岸クリーンセンター（青岸CC）の2つの清掃工場が担っている（表5-2）。それぞれの清掃工場では、ごみ焼却により発生する熱を有効利用するため、蒸気タービン発電機を設置し、発電した電力を施設内で利用している。青岸ECでは、隣接している市の関連施設（し尿処理場）にも電力を供給している。なお、両施設とも余剰電力は電力会社に売電している。

稼働状況については、効率的に余熱を利用できるように、2施設へのごみ投入量を調整している。ただし、2010年度については、青岸ECの稼働日数は173 [d/y]と少なく、青岸CCは226 [d/y]と多い。これは、青岸ECで工事の為に炉を停止していた影響によるものである⁵⁾。

表 5-2 清掃工場の設備概要^{5, 6)}

施設名	青岸 EC	青岸 CC
処理能力	200 [t/24h]×2 [基]	160 [t/24h]×2 [基]
処理方法	全連続燃焼焼却炉 (ストーカー式)	全連続燃焼焼却炉 (流動床式)
年間処理量*	69,271 [t/y]	72,451 [t/y]
稼働率**	173 [d/y]	226 [d/y]
発電能力	3,000 [kW]	3,500 [kW]
発電効率*	10.10 [%]	9.00 [%]
総発電量*	18,327 [MWh/y]	17,167 [MWh/y]
うち外部供給量*	4,835 [MWh/y]	4,626 [MWh/y]
1tあたりの発電量	265 [kWh/t]	237 [kWh/t]
使用開始年度	1986	1998

* 2010 年度の実績値

** (年間処理量÷日処理能力) が処理能力からみた稼働率に相当すると考えた場合

5.3. 将来の汚泥発生量およびごみ焼却量の推計

5.3.1. 将来人口の推計方法

将来人口は、国立社会保障・人口問題研究所の人口推計結果⁷⁾を用いて、2040年までの人口推移を推計した。同推計値は5年ごとの推計であるため、単年値は5年間の人口増減を各年に按分し、30年間の将来人口を求めた。推計結果に基づき2010年に約37万人、2040年に約28万人へと変化すると設定した。これは、2010年比で約24%減である。

5.3.2. 脱水汚泥発生量の推計方法

まず、公共下水道人口を推計するために、前項の将来推計人口に和歌山市の生活排水処理基本計画⁸⁾で見込まれている将来の処理形態別人口の割合を乗じ、30年間の将来下水道利用人口（水洗化人口）を求めた。

その上で、4.2.2と同様の手順で、下水処理場から発生する年間脱水汚泥発生量を求めた（図5-2）。具体的には、2010年度版の下水道統計³⁾から処理場別に下水処理人口一人あたりの脱水汚泥発生原単位を作成し、これに2010～2040年度の下水道利用人口を乗じることで求めている。なお、この原単位の設定の際、下水処理場が受け入れている営業污水や工場排水などの事業場排水を、今後も現状と同じ割合で受け入れるという仮定を置いている。しかし、現実的には人口や産業構造の変化が将来の原単位に影響する。本章ではその影響を十分に考慮するには至っておらず、今後の課題である。

和歌山市では、人口減少にあるものの、公共下水道の整備や接続率の向上により、下水道利用人口が2010年の約10万人から2040年には約19万人となる。これは2010年比で約81%増である。そのため、2040年の脱水汚泥発生量は2010年に比べて69.9%増加する。

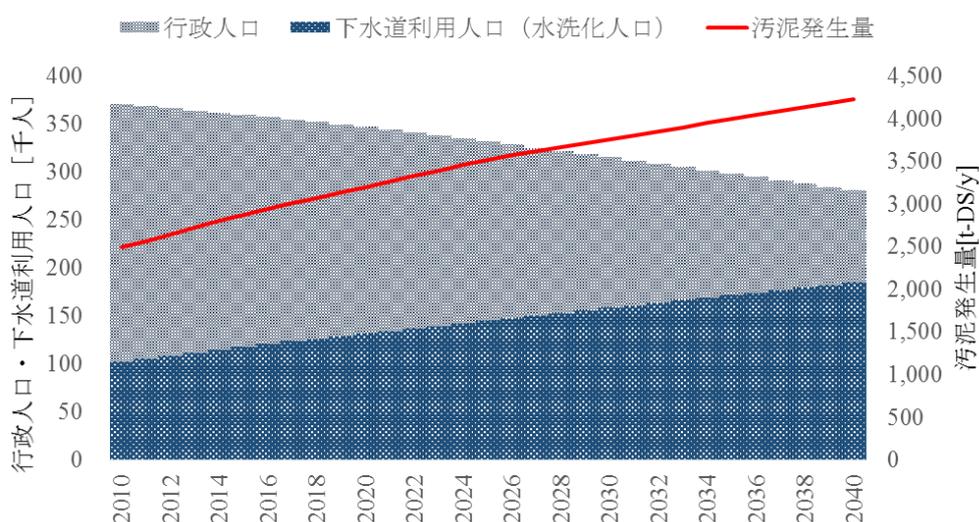


図 5-2 行政人口，下水道利用人口，汚泥発生量の将来変化

5.3.3. 将来のごみ焼却量の推計方法

(1) ごみ焼却量の推計方法

まず、環境省の一般廃棄物処理実態調査⁶⁾の実績データを用いて、2010～2012年の一人あたりのごみ排出量の原単位を算定した。実績データが存在しない2013年以後の原単位については、地方自治体のごみ処理政策により、将来のごみ発生量とごみ質が変化すると考え、現状水準で推移とごみ減量化の施策を考慮した2つのケースを設定して推計した。

一つ目は、現状維持ケースとして、過去3年間（2010年～2012年）の実績値から求めた原単位の平均値を2040年まで適用した。二つ目は、ごみ処理政策の目標達成ケースとして、和歌山市の一般廃棄物処理基本計画など^{5,9)}のごみ排出量予測を参考に原単位を作成した。なお、計画では目標達成年次とした2020年までに資源化が見込める紙・布・プラスチック類などの分別収集と、生ごみの減量化に取り組むこととしている。この目標を達成させるためには、資源化・減量化が見込まれるものの約半分の削減が必要である。2020年まではこの計画によるごみ削減効果を原単位に反映させた。2021年以降はそれまでの取り組みが継続すると仮定し、削減効果を原単位に組み込んだ。2031年以降は、資源化・減量化を見込めるものがなくなるため、2030年時の原単位を固定した。これらの2つのケースごとに設定した1人あたりのごみ排出原単位に前項の将来推計人口を乗じ、2010年～2040年までの将来値を求めた（図5-3）。なお、和歌山市の場合は自家処理人口がゼロであるため、計画収集人口は行政人口と同じとなる。2つのケースともに、減少幅は異なるものの将来的にはごみ処理量は減少する。

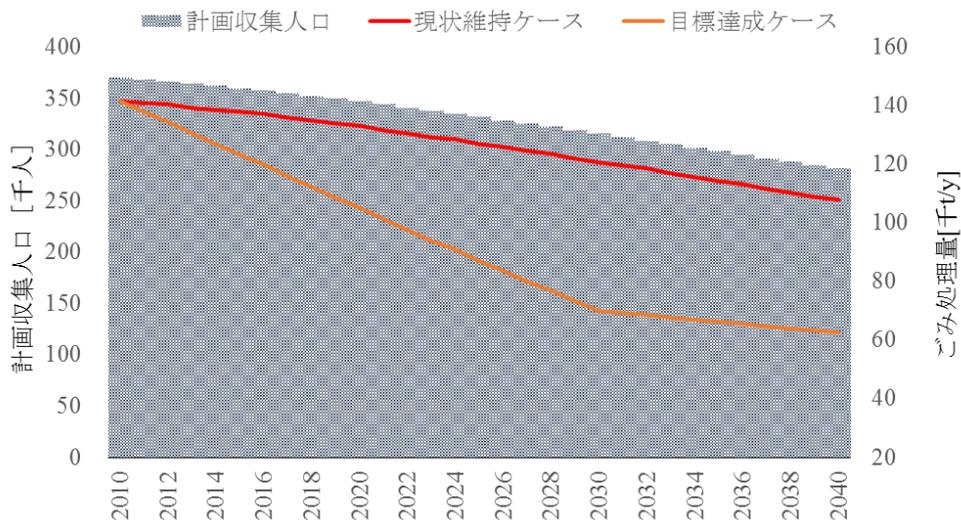


図 5-3 計画収集人口とごみ処理量の将来変化

(2) ごみ発電量の推計方法

4年間（2006～2009年度）の実績平均値⁵⁾に基づいて、前項で求めたごみ処理量のうち、55%を青岸ECが担い、残る45%を青岸CCで処理すると設定した。なお、2010年度は青岸ECでは2号炉が工事で停止され、処理量が少ない状況であったため除外した。

次に、清掃工場ごとのごみ処理量に発電効率を乗じて、将来のごみ発電量を推計した。発電効率は、実績平均値より青岸EC：229 [kWh/t-ごみ]、青岸CC：245 [kWh/t-ごみ]と設定した。なお、青岸ECでは発電効率が283 [kWh/t-ごみ]に施設整備される計画があるため、2015年以降の発電量はこの数値を用いた。

ただし、実際には発電効率は、ごみ量、ごみ質、運転管理に影響される。ごみ量の減少に伴って、これまでと同じ条件下での運転が困難になると予測されるため、発電効率の低下が見込まれる。ごみ処理政策による可燃物の減少、厨芥類の減量化がもたらすごみ質の変化が、発電効率に影響を与えうる。また、運転管理では、これまでの運転状況に比べ施設能力の余剰を生じるが、投入量に応じた効率的な負荷調整運転に改善することで、発電効率の低下を抑えることができる。本章では、これらの変化が発電効率にもたらす影響の程度を明らかにできていないため、過去の実績値と計画値の発電効率が維持されると仮定した。さらに精緻に将来のごみ発電量を予測する場合には、こうした影響を考慮する必要がある。

また、外部に供給可能な余剰電力量は次式から求めた。購入電力量は、施設の運用に一定量が必要と仮定し、実績平均値より設定した。清掃工場ごとの所内消費電力量は、実績平均値より青岸EC：129 [kWh/t-ごみ]、青岸CC：190 [kWh/t-ごみ]と設定した。また、目標達成ケースにおいては、2028年に青岸CCが供用30年となる時点で両施設の稼働日数が110日程度となる。このため、青岸CCを廃止し青岸ECの1箇所での処理体制に切り替える。

$$EL_{S,t} = EL_{W,t} + EL_{U,t} - EL_{C,t} \quad (5-1)$$

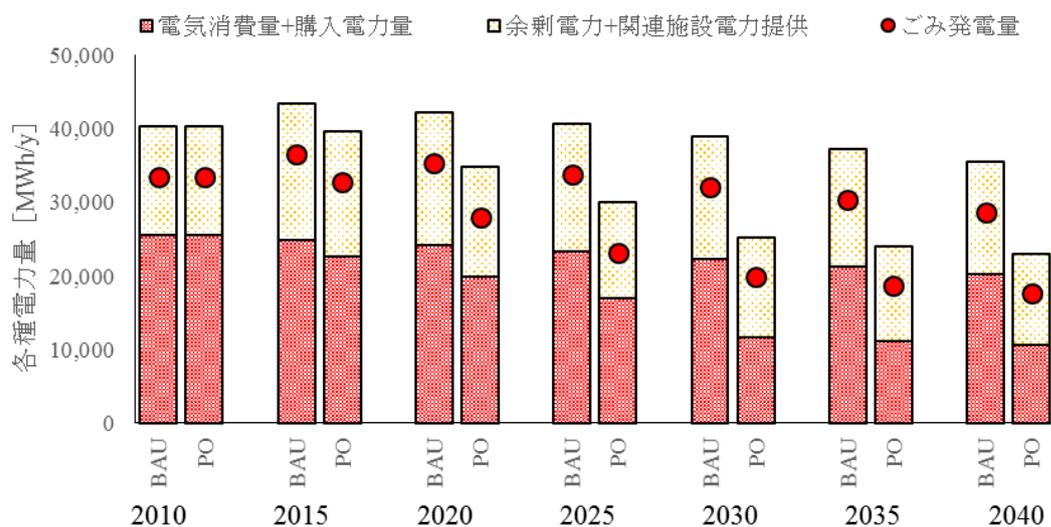
$EL_{S,t}$ ：t年における余剰電力 [kWh/y]

$EL_{W,t}$ ：t年におけるごみ発電量 [kWh/y]

$EL_{U,t}$ ：t年における購入電力量 [kWh/y]

$EL_{C,t}$ ：t年における所内消費電力量 [kWh/y]

以上から推計された両施設全体でのごみ発電量などの将来変化を図 5-4 に示す。2015 年以降は発電整備に伴いごみ発電量が増加するが、両ケースともごみ発生量が減少傾向となるため、2040 年のごみ発電量は 2010 年比で現状維持ケース 14%減、目標達成ケースで 47%減と推計される。



BAU：現状維持ケース／PO：目標達成ケース

図 5-4 ごみ発電量などの将来変化

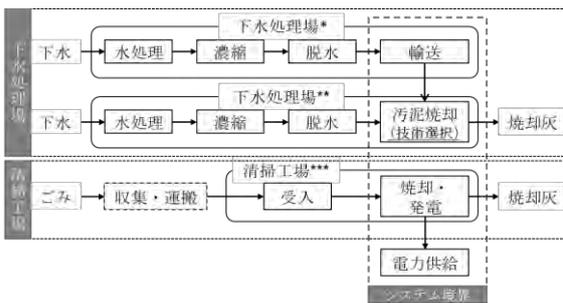
5.4. 都市代謝施設の統合・連携シナリオ

まず、都市代謝施設の耐用年数を汚泥焼却設備：25年^{10,11)}、ごみ焼却施設：30年¹²⁾と設定した。次に、脱水汚泥発生量、ごみ発生量の将来変化、焼却設備の規模や設備利用率、更新時期を考慮し、5つの将来シナリオを設計した（表5-3）。これらのシナリオは大きく分けると2つの流れが存在する。一つは従来どおり汚泥とごみの処理をそれぞれの施設が担う場合である。具体的には、汚泥は拠点となる処理場に集約し、施設の設備利用率向上に伴うスケール効果や燃料転換技術の導入によるエネルギー消費の改善、GHG排出量の削減を図る。ごみは清掃工場これまでの処理を現状継続する。もう一方は、汚泥処理施設の更新時期に合わせて清掃工場が汚泥を受け入れて混焼する技術を導入し、システム全体での負荷低減を図る。また、本章では、先進事例で導入されていた脱水汚泥を乾燥させるための廃熱の利用方策^{13, 14)}にも着目した。これらのシナリオにおけるシステム境界を図5-5、図5-6に示す。

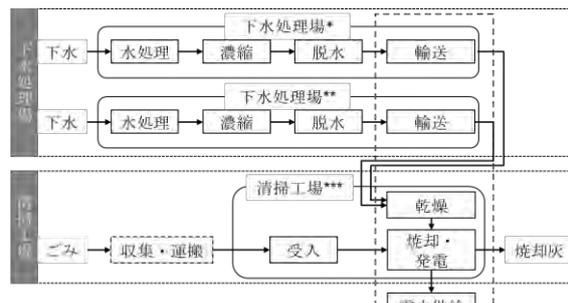
表 5-3 統合・連携シナリオの概要

シナリオ		現状	集約 (段階的)	集約 (早期)	連携 (段階的)	連携 (早期)	連携 (早期)
		処理	処理・利用	処理・利用	処理	処理	利用
		0	1	2	3	4	5
和歌川 STP	更新	2029-					
	集約化			2016-2018			
	汚泥輸送		2029-**	2019-**	2029-***	2016-***	2016-***
	技術選択						
	休廃止		2029-	2019-	2029-	2016-	2016-
	更新	2016-	2016-	2019-			
中央 STP	集約化	2010-	2010-	2010-2015 2019-	2010-2015	2010-2015	2010-2015
	汚泥輸送			2016-2018*	2016-***	2016-***	2016-***
	技術選択****		2016-	2019-			
	休廃止			2016-2018	2016-	2016-	2016-
	更新	2010-	2010-	2010-2015**	2010-2015**	2010-2015**	2010-2015**
	汚泥輸送	2010-**	2010-**	2016-2018* 2019-**	2016-***	2016-***	2016-***
北部 STP	更新	2016-	2016-	2016-	2016-	2016-	2016-
	機能統合				2016-	2016-	2016-
	廃熱利用						2016-
清掃工場	更新	2028-	2028-	2028-	2028-	2028-	2028-
	廃止	(2028-)	(2028-)	(2028-)	(2028-)	(2028-)	(2028-)

汚泥搬送先：*和歌川 STP/**中央 STP/**青岸 EC
 技術選択****：[u]高温焼却（スケールアップ）/[d]造粒乾燥/[c]低温炭化/[o]オイル化
 （ ）：目標達成ケースの場合は廃止。



*北部STP / **和歌川STP・中央STP ***青岸EC・青岸CC



*北部STP / **和歌川STP・中央STP ***青岸EC・青岸CC

図 5-5 技術選択におけるシステム境界

図 5-6 焼却機能統合におけるシステム境界

- ・ シナリオ 0：現状処理・連携なし

和歌川および中央STPでは、それぞれ焼却炉が耐用年数に達する2016年、2029年に現有の焼却技術に更新する。北部STPでは現状どおり中央STPで集約し焼却する。青岸ECおよび青岸CCでは耐用年数に達する2016年、2028年に設備更新をする。本章では、これを比較評価の基準シナリオとする。

- ・ シナリオ 1：段階的集約利用・連携なし

和歌川STPの汚泥焼却設備が耐用年数に達する2029年に焼却炉を廃止し、中央STPに集約化する。中央STPの汚泥焼却設備は、2016年の更新時に将来の汚泥量増加を見据えた規模に更新する。2029年以降は市内すべての汚泥処理は中央STPに集約化されることになる。

- ・ シナリオ 2：早期集約処理・連携なし

中央STPの汚泥焼却設備が耐用年数に達する2016年から、中央STPで処理していた下水汚泥を和歌川STPに搬送して処理し、中央STPの焼却炉は休止する。2019年に和歌川STPの現有処理能力を超える時期にあわせて、中央STPの焼却設備をスケールアップさせながら更新または低炭素技術を導入する。

- ・ シナリオ 3：段階的機能統合・連携あり

和歌川および中央STPのそれぞれ焼却炉が耐用年数に達する2016年、2029年に焼却炉を廃止し、処理を青岸ECに移管する。

- ・ シナリオ 4：早期機能統合・連携あり

中央STPの汚泥焼却設備が耐用年数に達する2016年から、すべての処理場の下水汚泥は青岸ECに搬送し混焼処理する。中央STPの焼却炉を廃止し、和歌川STPの焼却炉は耐用年数に達する前に廃止する。

- ・ シナリオ 5：早期機能統合・連携あり

シナリオ4に対して、2016年に青岸ECで混焼を開始する際に、清掃工場のごみ焼却廃熱で汚泥乾燥する技術を導入する。

5.5. 更新計画による GHG 削減効果

5.5.1. 推計方法

(1) 下水処理場

汚泥焼却・燃料転換に使用される燃料および電力などに係るエネルギー消費量、GHG排出量を計上した。具体的には、先行研究^{3, 15-18)}より脱水汚泥処理量あたりのエネルギー消費量を把握した後に、エネルギー消費およびGHG排出原単位（表5-4）を乗じた。また、汚泥焼却および燃料転換に発生するN₂O排出量は表5-5の排出係数を用いて算定した。次に、同年度の脱水汚泥処理量あたりのエネルギー消費およびGHG排出原単位を作成し、前節で推計した脱水汚泥量を乗じることで算定した。

表 5-4 単位あたりのエネルギー消費・GHG 排出原単位（燃料および電力）^{19, 20, 21)}

投入燃料	エネルギー消費原単位	GHG 排出原単位
電力	9.63 [GJ/MWh]	0.559 [t-CO ₂ /MWh]
石炭	38.2 [GJ/t]	0.092 [t-CO ₂ /GJ]
A 重油	39.1 [GJ/kl]	2.92 [t-CO ₂ /kl]
灯油	36.7 [GJ/kl]	2.61 [t-CO ₂ /kl]
プロパンガス	50.8 [GJ/t]	3.57 [t-CO ₂ /t]
都市ガス	45.6 [GJ/千 m ³]	2.72 [t-CO ₂ /千 m ³]

表 5-5 汚泥焼却に伴う N₂O 排出係数²²⁻²⁴⁾

処理技術	排出係数	
高温焼却	0.645	kg-N ₂ O/t-wet
造粒乾燥	0.000	kg-N ₂ O/t-wet
炭化	0.030	kg-N ₂ O/t-wet
オイル化	0.964	kg-N ₂ O/t-wet
汚泥乾燥	0.0095	kg-N ₂ O/t-wet

表5-6、表5-7にそれぞれ技術別エネルギー消費、GHG排出原単位を示す。従来技術の高温焼却については、4.4.1.で導出された関数に基づいて、処理規模（汚泥投入量）を考慮したスケールメリットによるエネルギー消費量、GHG排出量の削減効果を組み込んだ。また、低炭素技術によって生成された固形燃料とオイルの輸送に使うタンクローリーの諸元を表5-8に示す。利用先や利用用途を次のように想定した。輸送先として技術導入する下水処理場に近い石炭火力発電所²⁵⁾に造粒乾燥および炭化生成物を、オイル化は施設に最も近い重油火力発電所で混焼させると設定した（図5-7）。なお、輸送距離はインターネット上のオンライン地図サービスを利用して、各処理場の輸送先までの距離を求めた。

表 5-6 脱水汚泥量あたりのエネルギー消費原単位

[単位：GJ/t-DS]	従来技術		低炭素技術	
	高温焼却 (和歌川/中央)	造粒乾燥 (共通)	炭化 (共通)	オイル化 (共通)
電力(焼却・転換)	16.970/8.906	2.883	2.364	5.604
燃料(焼却・転換)	20.963/9.002*	15.693	3.411	0.00
有効利用	-/-	-20.783	-8.640	-6.975
再生資源輸送**	-/-	0.340	0.183	0.006
合計	37.933/17.908	-1.868	-2.681	-1.365

* 処理量に応じた原単位

表 5-7 脱水汚泥量あたりの GHG 排出原単位

[単位：t-CO ₂ /t-DS]	従来技術		低炭素技術	
	高温焼却 (和歌川/中央)	造粒乾燥 (共通)	炭化 (共通)	オイル化 (共通)
電力(焼却・転換)	0.985/0.517	0.167	0.137	0.151
燃料(焼却・転換)	1.272/0.672*	1.172	0.245	0
有効利用	-/-	-1.916	-0.797	-0.500
再生資源輸送	-/-	0.025	0.013	0.000
N ₂ O(焼却・転換)	0.440/0.440	0.000	0.047	0.440
合計	2.697/1.629	-0.552	-0.345	0.091

* 処理量に応じた原単位

表 5-8 再生資源輸送の諸元

項目	代替燃料		
	造粒乾燥	炭化	オイル化
積載量	15 [t]	12 [t]	8 [kl]
燃費		2,500 [km/kl]	
軽油発熱量		38.2 [GJ/kl]	
輸送距離	150 [km]	150 [km]	6.8 [km]
輸送先	石炭火力発電所	石炭火力発電所	重油火力発電所

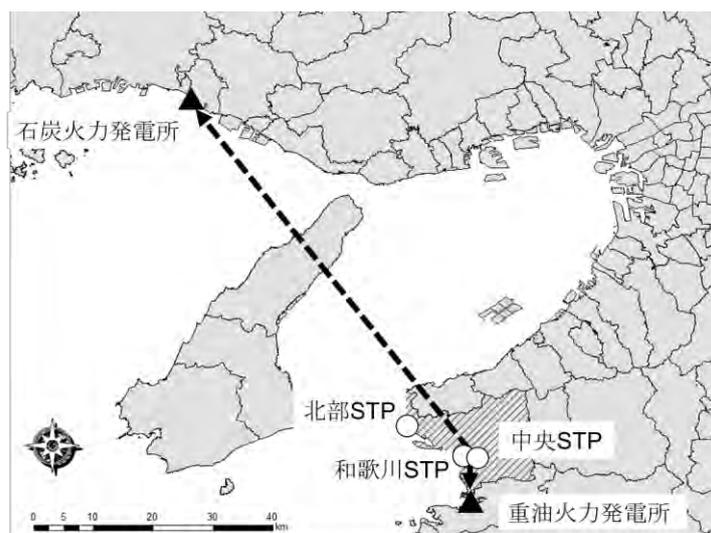


図 5-7 下水処理場と代替燃料輸送先の位置図^{4, 25)}

(2) 清掃工場

ごみ焼却に使用される燃料，薬品および電力などに係るエネルギー消費量，GHG排出量を計上した．具体的には，まず先行研究^{5, 26)}よりごみ処理量あたりのエネルギー・物質投入量を把握した後に，エネルギー消費およびGHG排出原単位（表5-4，表5-9）を乗じた．また，電気消費量に伴うGHG排出量は，前節で得られたごみ発電量を計上した．なお，ごみ発電で得られた余剰電力や市の関連施設に供給している電力はマイナス計上した．

さらに，ごみ焼却に伴うGHG排出量は，表5-10の原単位を用いて推計した．なお，設定した将来のごみ焼却量で想定した2つのケースのうち，現状維持ケースはプラスチック類の組成割合を一定としたが，ごみ処理政策の目標達成ケースについては，目標達成の前提条件となっているプラスチック類の分別収集による削減効果を組み込んだ．

表 5-9 単位あたりのエネルギー消費・GHG 排出原単位（薬品）^{27, 28, 29)}

投入燃料	エネルギー消費原単位	GHG 排出原単位
活性炭	64.96 [GJ/t]	9.770 [t-CO ₂ /kl]
苛性ソーダ	9.86 [GJ/t]	1.330 [t-CO ₂ /t]
消石灰	2.23 [GJ/t]	1.390 [t-CO ₂ /t]

表 5-10 ごみ焼却に伴う GHG 排出係数²⁰⁾

項目	単位	排出係数
一般ごみ焼却に伴う CH ₄ 排出量	0.00000095	t-CH ₄ /t-ごみ
一般ごみ焼却に伴う N ₂ O 排出量	0.0000567	t-N ₂ O/t-ごみ
プラスチック焼却に伴う CO ₂ 排出量	2.77	t-CO ₂ /t-ごみ

$$PW_{i,t} = W_{i,t} \times (1 - M_{i,2010}) \times PR_{i,2010} \quad (5-2)$$

$PW_{i,t}$: t年におけるi処理場のプラスチック焼却量 [t/y]

$W_{i,t}$: t年におけるi処理場のごみ焼却量 [t/y]

$M_{i,2010}$: i処理場に投入される2010年のごみ含水率 [%]

$PR_{i,2010}$: i処理場に投入される2010年のプラスチック組成割合 [%]

(3) ごみ焼却施設での乾燥用熱需要

汚泥焼却をごみ焼却施設に移管するシナリオ3～5では、汚泥乾燥に伴うエネルギー消費量、GHG排出量を計上した。具体的には、先進事例¹³⁾で報告されている乾燥汚泥の含水率45%に対する蒸発水分量を計算し、蒸発潜熱から水分蒸発必要熱量を推計した。蒸発潜熱は2,500 [MJ/t]とした。なお、乾燥汚泥の低位発熱量は7.5 [GJ/t]¹³⁾となり、清掃工場で焼却されているごみと同水準（2006～2010年度の平均値：7.3 [GJ/t]⁶⁾）となる。

$$HD = EW \times LH \times 10^{-3} \quad (5-3)$$

HD : 水分蒸発必要熱量 [GJ/y]

EW : 蒸発水分量 [t/y]

LH : 蒸発潜熱量 [MJ/t]

汚泥乾燥するシナリオ3, 4では、清掃工場に下水汚泥を搬送した後に、汚泥乾燥機による乾燥処理を想定した。ここでは、水分蒸発必要熱量を乾燥機の効率と燃料発熱量で除し、汚泥乾燥に必要な燃料消費量を求めた。なお、乾燥機の熱効率は80%³⁰⁾とし、燃料である重油の発熱量を39.1[GJ/kl]²⁰⁾と設定した。

$$SD = HD \div DF \div HV_o \quad (5-4)$$

SD : 汚泥乾燥に必要な燃料消費量 [kl/y]

HD : 水分蒸発必要熱量 [GJ/y]

DF : 乾燥機の熱効率 [%]

HV_o : 乾燥機に投入する燃料の発熱量 [GJ/kl]

一方、シナリオ5では、下水汚泥を受け入れた後に、ごみ焼却施設の余熱を乾燥熱源として利用することを想定した。余熱利用可能量の原単位は、3年間（2011～2013年度）の実績平均値⁶⁾より0.263 [GJ/t-ごみ]と設定した。次に、ごみ焼却量に余熱利用可能量の原単位を乗じて、余熱利用可能量を推計した。また、余熱利用可能量が乾燥用熱需要を下回った場合は、前者の汚泥乾燥機を用いることとし、追加的に必要となるエネルギー量を計上した。

(4) 処理場間の汚泥輸送

各処理場間の汚泥輸送に伴うエネルギー消費量，GHG排出量を計上した．一般的な下水汚泥の運搬の手段として，最大積載重量10トンのトラックによる運搬を想定した．各処理場間の輸送距離はGoogle社から提供されているインターネット上のオンライン地図サービスのGoogleマップを利用し求めた（表5-11）．そして，2010～2040年の各推計年度における処理場間の汚泥輸送が必要となる回数と，処理場間の輸送距離（往復を考慮）から，汚泥の年間輸送距離を算出した．次に年間輸送距離にトラックの燃費を乗じて燃料消費量を求め，それにGHG排出係数を乗じることで，エネルギー消費量，GHG排出量を算出した．なお，トラックの平均積載重量は参考資料³¹⁾より8.0 [t/台]とし，燃費は2.89 [km/l]³²⁾，燃料である軽油の発熱量は37.7 [GJ/kl]²⁰⁾，軽油のGHG排出係数は2.619 [t-CO₂/kl]²⁷⁾とした．

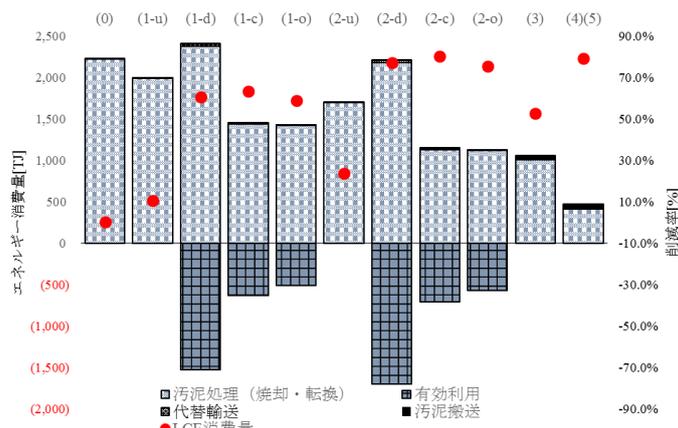
表 5-11 処理場間の輸送距離

焼却・転換場所	汚泥発生場所		
	和歌川 STP	中央 STP	北部 STP
和歌川 STP	-	1.9[km]	13.2[km]
中央 STP	1.9[km]	-	14.6[km]
青岸 EC	5.8[km]	7.3[km]	9.7[km]

5.5.2. LCE の推計結果

(1) 汚泥処理施設

各シナリオにおける汚泥処理施設でのエネルギー消費量の推計結果を図5-8に示す．基準シナリオと比較すると，シナリオ1(1-u), (1-d), (1-c), (1-o)では，それぞれ10.5%，60.5%，63.2%，58.9%の削減となる．シナリオ2(2-u), (2-d), (2-c), (2-o)では，それぞれ23.5%，77.1%，80.1%，75.3%削減できる．シナリオ3，4，5では，それぞれ52.4%，79.0%，79.0%のエネルギー消費量の削減効果が得られる．シナリオ1，2では，段階的に集約するよりも早期に集約することで削減効果が大きくなることが明らかとなった．また，燃料転換技術間で比較すると，炭化，造粒乾燥，オイル化の順となり，早期に集約した場合75%以上の削減効果を得ることが可能となる．それに対して，従来技術は早期集約した場合でも24%程度の削減に留まる．これらのことから，早期の集約化とそこに燃料転換技術を導入することがエネルギー消費効率の改善に繋がることが示された．



技術選択：[u]高温焼却（スケールアップ）/[d]造粒乾燥/[c]低温炭化/[o]オイル化

図 5-8 汚泥処理施設における LCE 算定結果

(2) ごみ焼却施設

各シナリオにおけるごみ焼却施設でのエネルギー消費量の推計結果を図5-9に示す。基準シナリオと比較すると、現状維持ケースのシナリオ3, 4, 5では18.9%, 23.4%, 8.1%増加となる。目標達成ケースのシナリオ0~2, 3, 4, 5では2.6%, 21.5%, 26.0%, 11.9%増加することが確認された。これらにより、ごみ焼却施設では将来の処理量の減少に伴いごみ処理プロセスのエネルギー消費量は低下するが、ごみ発電によって得られる余剰電力が減少するため、全体としてはエネルギー消費量が増加傾向となる。汚泥混焼により処理量が増加するシナリオ3, 4, 5においてもエネルギー消費量の増加傾向は変わらないが、汚泥乾燥の熱源に廃熱を利用することで、増加分を小さくすることが可能となる。これらのことから、ごみ・汚泥混焼によって、追加的にエネルギー消費量を増加させることになるが、ごみ処理量の低下に伴う発電量の減少量を小さくすることができることが明らかとなった。

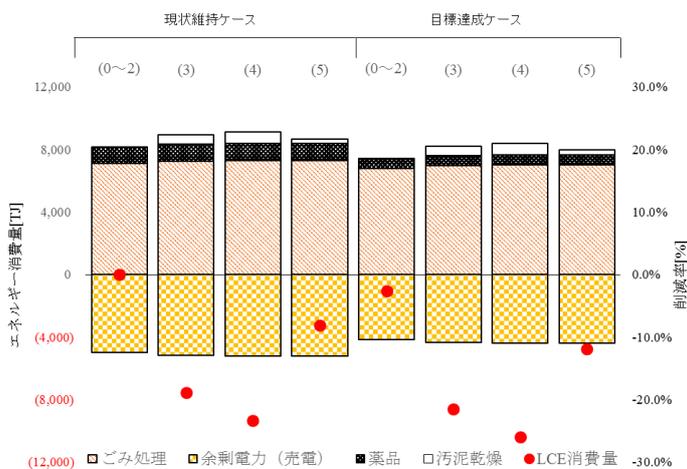
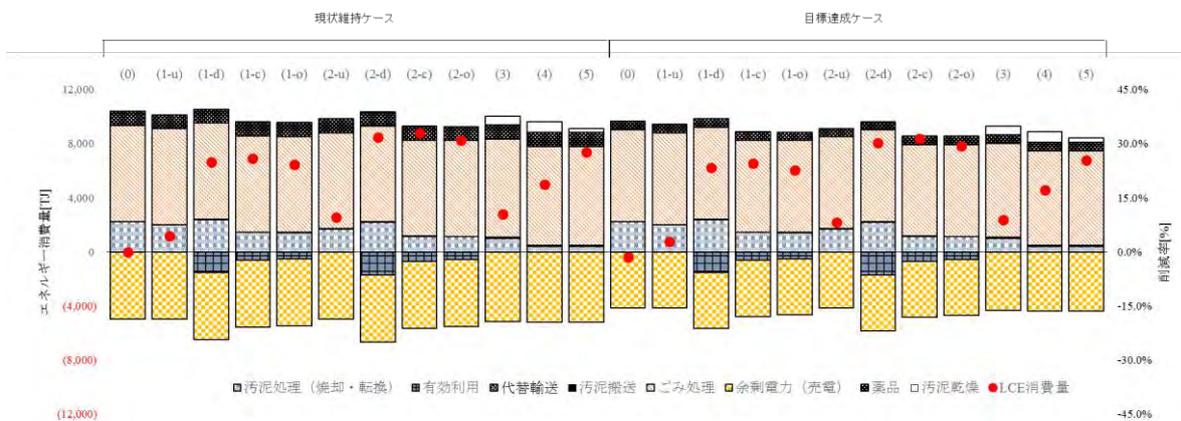


図 5-9 ごみ焼却施設における LCE 算定結果

(3) シナリオ間の比較

各シナリオにおけるエネルギー消費量の推計結果を図5-10に示す。最もエネルギー消費量を削減できるシナリオは、現状維持ケースのシナリオ2-cであり、次いでシナリオ2-d、シナリオ2-oで31%以上の削減を実現しうる。これは早期に燃料転換技術を導入することによる削減効果である。ごみ・汚泥混焼（廃熱利用）を早期に実施したシナリオ5では現状維持ケースで28%削減となり、段階的集約のシナリオ1の燃料転換技術の導入よりも削減効果が大きい。この一因としては、廃熱回収による汚泥乾燥熱源の確保や混焼によるごみ発電量の増加効果が挙げられる。



技術選択：[u]高温焼却（スケールアップ）/[d]造粒乾燥/[c]低温炭化/[o]オイル化

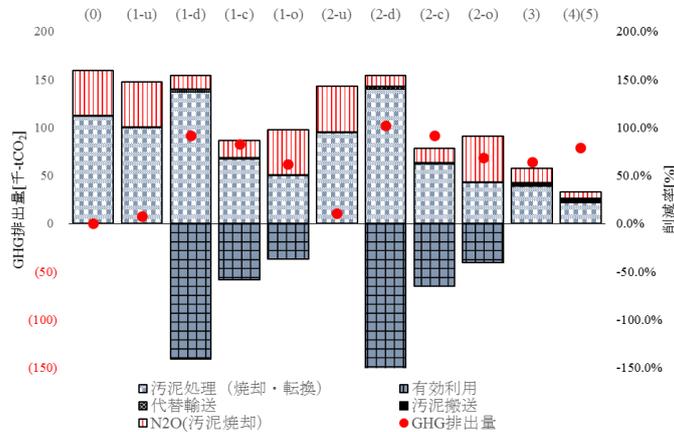
図 5-10 各シナリオにおける LCE 算定結果

5.5.3. GHG の推計結果

(1) 汚泥処理施設

各シナリオにおけるGHG排出量の推計結果を図5-11に示す。基準シナリオと比較すると、シナリオ1(1-u), (1-d), (1-c), (1-o)では、それぞれ7.7%, 91.5%, 82.4%, 61.9%削減となる。シナリオ2(2-u), (2-d), (2-c), (2-o)では、それぞれ10.6%, 101.9%, 91.7%, 68.9%削減できる。シナリオ3, 4, 5では、それぞれ64.1%, 79.3%, 79.3%のGHG排出抑制効果を得られる。シナリオ1, 2では、エネルギー消費量の推計結果と同様に、早期に集約することで削減効果が大きくなることが明らかとなった。また、燃料転換技術間で比較すると、造粒乾燥、炭化、オイル化、従来焼却の順となり、早期に集約した場合には68%以上の削減効果を得ることが可能となる。それに対して、従来技術は早期に集約した場合でも10%程度の削減に留まる。また、造粒乾燥技術はN₂O排出をそのほかの技術と比べても大幅に削減可能となる。これらのことから、早期の集約化と、集約拠点に燃料転換技術を導入することがGHGの排出抑制に寄与

することが示唆された。なお、燃料転換技術を比較した場合、造粒乾燥が最も高い削減効果を得ることが可能となる。



技術選択：[u]高温焼却（スケールアップ）/[d]造粒乾燥/[c]低温炭化/[o]オイル化

図 5-11 汚泥処理施設における GHG 算定結果

(2) ごみ焼却施設

各シナリオにおけるごみ焼却施設でのGHG排出量の推計結果を図5-12に示す。基準シナリオと比較すると、現状維持ケースのシナリオ3, 4, 5では4%程度の増加となるが、目標達成ケースのシナリオ0~2, 3, 4, 5では、それぞれ42.3%, 39.1%, 38.4%, 40.6%削減することがわかった。これは、GHG排出量の大半をプラスチック類の焼却に伴うCO₂の排出量が占めているため、ごみ処理量が減少すれば、それに比例してGHG排出削減となるという傾向が確認された。ただし、本章で想定した2つのケースでは将来におけるごみ質の変化を考慮していないが、GHG排出量削減の傾向を把握することはできたといえる。

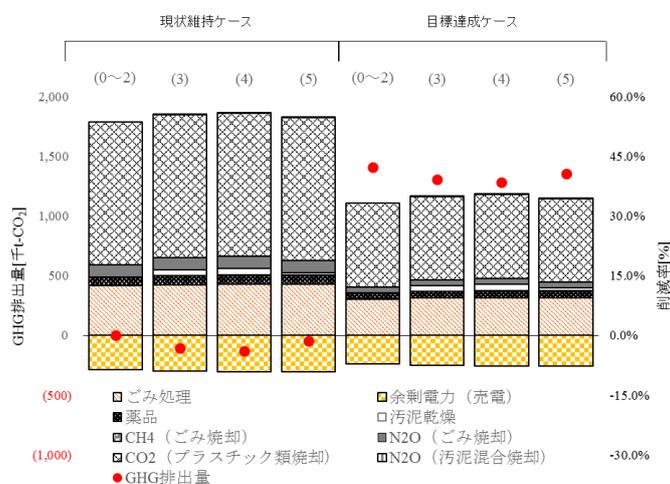
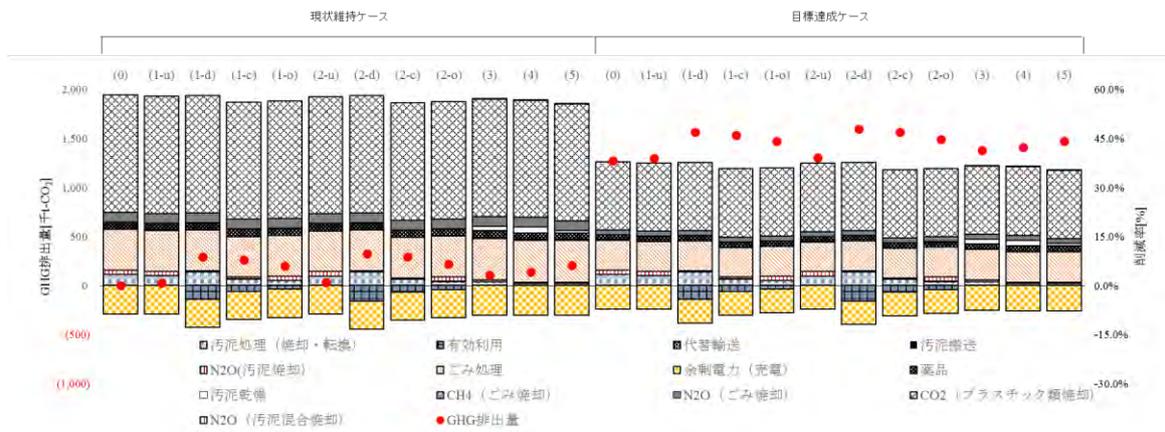


図 5-12 ごみ焼却施設における GHG 算定結果

(3) シナリオ間の比較

各シナリオにおけるGHG排出量の推計結果を図5-13に示す。最もGHGを排出抑制できるシナリオは目標達成ケースのシナリオ2-dで、48.0%の削減となる。そのほかのシナリオにおいても38%以上の削減を実現しうる。これはプラスチック焼却に伴うCO₂排出量が占める割合が大きいためである。このため、現状維持ケースでは最大の削減効果を得るシナリオでも10%程度に留まる。GHG排出量の削減においては、汚泥処理施設に燃料転換技術の導入することに加えて、ごみ処理量（プラスチック類の焼却量）の削減が大きな効果をもたらした。



技術選択：[u]高温焼却（スケールアップ）/[d]造粒乾燥/[c]低温炭化/[o]オイル化

図 5-13 各シナリオにおける GHG 算定結果

5.6. 本章の結論

本章では、汚泥処理の集約化に併せて導入される低炭素技術の選択と、ごみ焼却施設でのごみ・汚泥焼却も含めた汚泥処理の将来シナリオを立案し、和歌山市を対象としてエネルギー消費量、GHG排出量を定量的に評価した。本章で得られた主要な結果をまとめると、以下のとおりである。

- ・ 下水道整備が遅れている地方都市では、今後整備の進行に伴い下水汚泥発生量の増加が予想される。このため、現有施設の処理能力を上回り、施設の新設や増強が必要となる。また、ごみ焼却施設では人口減少に伴いごみ発生量の減少が見込まれ、施設の設備利用率や発電量の低下に加えて処理能力を大幅に下回る非効率な運転状況に陥ることになる。その対策として、個々に対応するということは、既存ストックの有効活用といった面でもエネルギー消費量、GHG排出量の面から見ても適当でない。都市代謝施設間における廃棄物処理システムの統廃合を視野に入れた総合的な将来計画が有効である。
- ・ 燃料転換技術を早期に導入することによって、エネルギー消費量、GHG排出量の削減効果がさらに高まる。特に、固形燃料化技術はオイル化技術に比べ代替される燃料の生成量が多く、エネルギー消費量、GHG排出量の削減効果が大きい。最大で80.1%のエネルギー消費削減と101.9%のGHG排出抑制となる。
- ・ ごみ焼却施設で早期に汚泥混焼する場合は、未利用な廃熱を汚泥の乾燥熱源として有効利用することで、システム全体でのエネルギー消費量を削減することが可能となり、最大で27.7%の削減効果が見込まれる。
- ・ ごみ焼却施設では、ごみの減量化に伴い処理そのものに必要な消費エネルギーは削減されるが、余剰電力の低下がそれを上回る。その結果、焼却全体としてのエネルギー消費量は増加する。その一方で、プラスチック類の焼却に伴うCO₂排出量が削減可能となる。

以上から、人口減少社会における汚泥処理の将来計画を考えた場合、清掃工場でのごみ・汚泥混焼も有効な整備策のひとつとして考えられる。

第 5 章の参考文献

- 1) 国土交通省：バイオソリッド利活用基本計画（下水汚泥処理総合計画）策定マニュアル（案），2003年（参照元：<http://www.mlit.go.jp/crd/city/sewerage/info/biosolid/030829.pdf>，最終閲覧：2015年3月18日）。
- 2) 和歌山市：和歌山市の下水道（参照元：http://www.city.wakayama.wakayama.jp/gesuidoubu/02/si_gesuidou.htm，最終閲覧：2015年3月18日）。
- 3) 社団法人日本下水道協会：平成22年度版下水道統計，2010年。
- 4) 公共投資ジャーナル社：下水処理場ガイド2010（データ版），2010年。
- 5) 和歌山市：和歌山市一般廃棄物処理基本計画【ごみ処理基本計画】，2011年（参照元：http://www.city.wakayama.wakayama.jp/menu_3/gomi/pdf/kihonkeikaku/all.pdf，最終閲覧：2015年3月18日）。
- 6) 環境省：一般廃棄物処理実態調査結果（参照元：http://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/ippan/index.html，最終閲覧：2015年3月18日）。
- 7) 国立社会保障・人口問題研究所：日本の地域別将来推計人口－平成22（2010）～52（2040）年－，2013年（参照元：<http://www.ipss.go.jp/pp-shicyoson/j/shicyoson13/6houkoku/houkoku.asp>，最終閲覧：2015年3月10日）。
- 8) 和歌山市：和歌山市一般廃棄物処理基本計画【生活排水処理基本計画編】，2011年（参照元：http://www.city.wakayama.wakayama.jp/menu_3/gomi/pdf/kihonkeikaku/haisui.pdf，最終閲覧：2015年3月18日）。
- 9) 和歌山市：和歌山市 循環型社会形成推進地域計画，2013年（参照元：http://www.env.go.jp/recycle/waste/3r_network/5_region/project_list/30_wakayama/01_wakayama_h22.pdf，最終閲覧：2015年3月18日）。
- 10) 国土交通省：処理場等施設管理計画について，下水道施設のストックマネジメント手法に関する検討委員会・第3回委員会資料，2010年（参照元：http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/crd_sewerage_tk_000087.html，最終閲覧：2015年3月18日）。
- 11) 高橋隆一，桐原隆，津田伸夫，舛岡秀一，小林修，仲元寺宣明：下水道主要設備機能診断に関する研究：下水道新技術研究所年報（2/2巻），下水道新技術推進機構，pp.191-196，2002年。
- 12) 環境省：廃棄物処理施設長寿命化計画作成の手引き（ごみ焼却施設編），2010年（参照元：http://www.env.go.jp/recycle/waste/3r_network/7_misc/gl-ple_prov.pdf，最終閲覧：2015年3月18日）。
- 13) 田所伸悟：金沢市西部環境エネルギーセンター運転報告－下水汚泥混焼について－，タクマ技法，Vol.20，pp.14-19，2012年。
- 14) 社団法人日本下水道協会：事例紹介（参照元：<http://www.jswa.jp/energy/index03.html>，最終閲覧：2015年3月18日）。
- 15) 山本祐吾，古野間達，吉田登，盛岡通：下水汚泥処理における技術選択と施設更新による温室効果ガス削減効果のライフサイクル評価，土木学会論文集 G（環境），Vol.68，No.5，pp.I_137-I_146，2012年。
- 16) 三島一仁，山本祐吾：ごみ焼却熱由来の発電電力を活用した下水汚泥バイオオイル化による温室効果ガス削減効果の評価，土木学会論文集 G（環境），Vol.68，No.6，pp.II_245-II_253，2012年。
- 17) 三野禎男，國木政徳，北野徳之：下水汚泥のバイオソリッド燃料化，廃棄物学会第19回廃棄物学会発表会，2008年。
- 18) 大同特殊鋼株式会社：下水汚泥低温炭化システムによる温室効果ガス削減効果，JEFMA，No.57，pp.68-70，2009年。
- 19) 経済産業研究所：総合エネルギー統計の解説／2010年度改訂版，2012年（参照元：<http://www.rieti.go.jp/users/kainou-kazunari/download/pdf/2010EBXIGRF.pdf>，最終閲覧：2015年3月18日）。
- 20) 環境省・経済産業省：温室効果ガス排出量算定・報告マニュアル Ver.3.5，2015年（参照元：<http://ghg-santeikohyo.env.go.jp/manual>，最終閲覧：2015年3月18日）。
- 21) 環境省：平成22年度の電気事業者ごとの実排出係数・調整後排出係数等の公表について，2012年（参照元：<http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=14702>，最終閲覧：2015年3月18日）。
- 22) 日本下水道事業団編集，財団法人下水道業務管理センター：下水汚泥固形燃料化システムの技術評価に関する報告書，2008年。
- 23) 国土交通省：下水汚泥エネルギー化技術ガイドライン（案），2011年。
- 24) 財団法人下水道新技術推進機構：汚泥焼却炉からのN₂O低減技術マニュアル，2012年。
- 25) 国土交通省：国土数値情報ダウンロードサービス 発電施設（参照元：<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-P03.html>，最終閲覧：2015年3月18日）。

- 26) 北海道大学廃棄物処分工学研究室：一般廃棄物全連続式焼却施設の物質収支・エネルギー収支・コスト分析，2012年（参照元：<http://labs.eng.hokudai.ac.jp/labo/waste/wp-content/uploads/2014/03/report1.pdf>，最終閲覧：2015年3月18日）。
- 27) 産業環境管理協会：カーボンフットプリントコミュニケーションプログラム 基本データベース ver.1.01（国内データ）（参照元：https://www.cfp-japan.jp/calculate/verify/xls/CO2basic_data_ver101_20130212.xls，最終閲覧：2015年3月18日）。
- 28) 鶴巻峰夫，野池達也：LCA手法を用いた排水処理の評価手法に関する研究，土木学会論文集，No.643/VII-14，pp.11-20，2000年。
- 29) 松藤敏彦，田中信壽：一般廃棄物処理システムのコスト・エネルギー消費量・二酸化炭素排出量評価手法の提案，土木学会論文集，No.678/VII-19，pp.49-60，2001年。
- 30) 山本一郎，吉田剛士：コンパクトで低コストな汚泥・廃液乾燥機カラカラ DD&MDD，産業と環境，Vol.41，No.2，pp.77-81，2012年。
- 31) 日本産業廃棄物処理振興センター：日本産業廃棄物処理振興センター（参照元：http://www.jwnet.or.jp/jwnet/pdf/gyouseihokoku_jyuuryoukanzankeisuu.pdf，最終閲覧：2015年3月18日）。
- 32) 環境省：サプライチェーンを通じた組織の温室効果ガス排出等の算定のための排出原単位データベース（ver.2.0），2013年（参照元：http://www.env.go.jp/earth/ondanka/supply_chain/comm_rep/unit201203v2-02.pdf，最終閲覧：2015年3月18日）。

第6章 施設園芸での低炭素技術選択による GHG 削減効果の推計

6.1. 緒言

近年、原油や天然ガスなどの化石燃料の価格高騰は、農業活動に深刻な影響を及ぼし、農業生産者の利益を圧迫している。しかし、農業生産の担い手の減少や高齢化が着実に進行¹⁾し、農業経営の体質強化を図る取り組みが困難な状況にある。そのため、生産者にとって設備の初期費用が負担²⁾となり、低炭素設備や省エネルギー技術の導入が十分に進んでいない。また、第2章でも述べたが、農業分野におけるGHG排出量は産業全体から見れば多くないものの、高い改善ポテンシャルを有していると考えられる。その理由としては、2005年度における国内の農林業由来は864 [万t-CO₂]³⁾であり、施設園芸分野の排出量は611 [万t-CO₂]⁴⁾と施設園芸分野の占める割合が高い。また、施設園芸における栽培品目の中では、特に花卉・花木類のエネルギー消費およびCO₂排出原単位がそのほかの農作物品目に比べて大きい⁵⁾ことから特に高い改善ポテンシャルを有していると考えられる。

本章では、花卉・花木類を栽培する施設園芸農家の実態調査を通じて詳細な栽培管理データを把握し、農作物生産におけるエネルギー・物質フローを推計する。その上で、LCA手法に基づいて、省エネルギー設備の導入によるGHG削減ポテンシャルと経済性を定量的に明らかにする。ここでは、重油焚き加温設備の代替技術として、ヒートポンプやバイオマス利用加温設備などを取り上げる。以上を通じて、施設園芸における低炭素化と経営基盤の強化に効果的かつ効率的な技術選択に関する知見を得ることを目的とする。また、特に本章では、森林資源や果樹剪定枝などケーススタディ対象地で利用可能性が高いと思われるバイオマスの活用を想定すること、比較的小規模な施設でも導入可能な代替技術オプションを設定すること、および実態的な栽培管理データを調査することで、より対象地域や施設園芸の実態に即したGHG削減および炭素クレジット創出のポテンシャル評価を目指す。

本章の構成は次のとおりである。第2節では、実態調査を行った対象地域および調査対象施設の概要を述べた。第3節では、施設園芸農家の実態調査を通じて詳細な栽培管理データを把握し、農作物生産におけるエネルギー・物質フローを推計する。第4節では、LCA手法に基づいて、省エネルギー設備の導入によるGHG削減ポテンシャルを定量的に明らかにする。ここでは、重油焚きボイラの代替技術として、ヒートポンプやバイオマス利用加温設備などを取り上げる。そして、第5節に本章で得られた結論を示す。

6.2. 対象地域および調査対象施設

6.2.1. 調査対象地

和歌山県の花弁生産は施設園芸の基幹品目として定着しており、重要な位置を占めている。和歌山県では、気候条件を活かして花卉産地を拡大してきた歴史がある。特に1987年から1991年にかけて花卉生産が急増し、1994年には140 [億円]の産出額となったが、その後は価格低迷、生産者の高齢化、そのほかの品目への転換などにより減少し、2008年には71 [億円]となっている。このような環境変化を踏まえ和歌山県では、和歌山県花き振興計画⁶⁾を策定し花ブランドの確立と産地の体質強化を図っている。この計画では2008年の作付面積862 [ha]、産出額71 [億円]に対し、2015年度目標は900 [ha]、75 [億円]とし作付面積の拡大、産出額の増加を目指している。一方、品目別の生産状況は、特に切り花が占める割合が高く2008年度の出荷生産額では、切り花69%、鉢物3%、花壇苗4%、花木類23%、地被植物類1%となっている。全国レベルで見ると花卉出荷量の約8割を占める切り花類のうち、キクは最も需要量大きい品種である⁷⁾。そして、キクのなかでもスプレーギク (*Chrysanthemum*) は、有田地方、那賀地方を中心に40 [ha] (2009年度) 栽培され斬増傾向となっているが、燃料価格の高騰による低温期の生産コスト増加の懸念や、近年はマレーシアからの輸入量増加に伴い、年間を通じ輸入に負けない高品質安定生産が課題となっている。そのため、主要振興方策として、省エネルギー栽培技術の開発と普及を、品目別方策として、周年を通じた計画的安定出荷耐性の実現のため、生産面積の拡大が図られている。しかし、周年栽培で良質な切り花を生産するためには、日最低気温を14~18 [°C]に維持する必要があるとされており、冬季には施設園芸内の加温による生産コストが多くなる。近年では、スプレーギク産地における冬季の加温コストは、生産費の約4割を占めるまでに至っている⁸⁾。こうした状況のなかで、花卉生産が盛んな有田地方にある、ありだ農業協同組合 (JAありだ) では、第2次農業振興計画⁹⁾を策定し、周年を通じた計画的安定出荷体制実現のため、生産面積の拡大を図っている。

これらのことから、和歌山県の有田地方である有田市、有田川町、湯浅町、広川町の1市3町をケーススタディ対象地とした (図6-1)。そして、地域における花卉作付面積の約55%を占める主要な産品であるスプレーギクの施設園芸に焦点を当てエネルギー投入量の分析を行う。また、スプレーギクは、日本で施設栽培されるキク科キク属の多年草で、一般的に認知されている輪菊と異なり一茎多花咲である。単位面積当たりの収穫本数が大きく、窒素吸収量が小さい傾向にあり¹⁰⁾、窒素吸収量が少ない反面、品質を担保するために施肥が多くなりがちなのが指摘されている¹¹⁾。施肥によりアンモニウムイオンが発生し、好気条件下でそのアンモニウムイオンが硝酸態窒素に酸化される過程でN₂Oが発生する。そのため、エネルギー投入量の把握のみならず施肥に伴うN₂O排出量も含め分析対象とする。

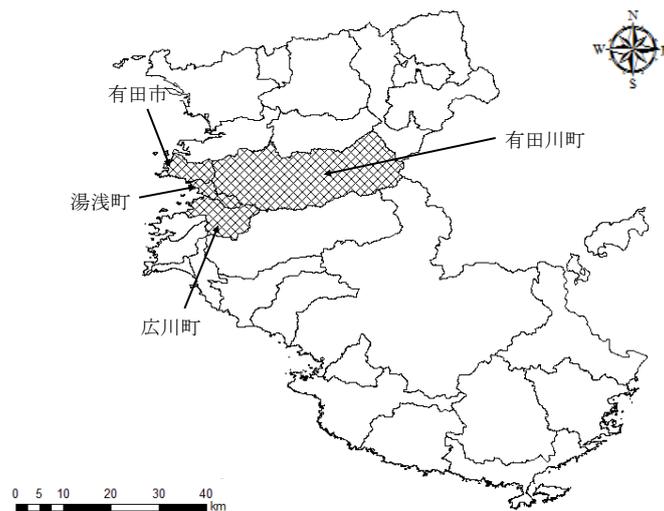


図 6-1 調査対象地

6.2.2. 調査対象施設

調査は、対象地内に存在するNサイトとKサイトの2ヶ所を対象とした。なお、Kサイトには2施設が併設しているため、ここではそれぞれをA区画とB区画とする。その基礎データの概要を表6-1に示す。施設規模の代表性については、全国平均の1棟あたりの施設面積¹²⁾が、プラスチックハウス 4.2 [a]、ガラス室 5.8 [a]に対し、調査対象施設は、それぞれ3.5 [a]と4.4 [a]と概ね代表的な規模である。

表 6-1 調査対象サイトの基礎データの概要

サイト	施設面積 [a]	棟数	1棟あたりの面積 [a]	構造
Nサイト	6.9	2	3.5	P
Kサイト A区画	7.1	2	3.6	G
Kサイト B区画	10.5	2	5.3	G
P 平均 ¹²⁾	6.9	2	3.5	
G 平均 ¹²⁾	8.8	2	4.4	

注) P：プラスチックハウス，G：ガラス室

また、サイトごとの主な付帯設備を表6-2に示す。対象施設では、移動式の土壤消毒機を保有しており、各サイトにて消毒する際に利用している。化学薬品消毒は消毒後2～3週間の期間を必要とするが、土壤消毒は直ぐに定植することが可能となる¹²⁾。このため、年間作付け回数を増やし出荷量を増加させることができる。しかし、蒸気を得るために重油を多量に投入するため、追加的なエネルギーコストを要する。これらのことに留意し、実態調査をする必要があ

る。そのほかの付帯設備は、花卉栽培の施設園芸施設としては、一般的な装備で、加温設備、照明設備、循環扇、天窓自動開閉装置は施設ごとに設置されている。貯水設備および灌水ポンプは、サイトごとに設けられているが、Nサイトについては、一部の灌水はサイト外から供給を受けている。

表 6-2 調査サイトの主な付帯設備

項目	N サイト	K サイト	
		A 区画	B 区画
区分	プラスチックハウス	ガラス室	ガラス室
土壌消毒機 [kW]		313 (1 基)	
燃料種類		A 重油	
加温設備 [kW]	116 (1 基)	91.1 (1 基)	145 (1 基)
燃料種類	A 重油	A 重油	A 重油
重油タンク	1 基		1 基
照明設備 [W]	1,892 (85 個)	1,712 (76 個)	2,737 (119 個)
循環扇 [W]	100 (2 基)	200 (4 基)	100 (2 基)
天窓自動開閉装置	1 式	1 式	1 式
貯水設備 (貯水槽)	1 槽		1 槽
灌水ポンプ	サイト内 (1 台) サイト外 (1 台)		サイト内 (1 台)

6.3. エネルギー・物質フローと GHG 排出量の推計

6.3.1. 把握方法

エネルギー・物質フローを把握する上で、対象システムに關与するプロセスの実測データを使用することが重要であるが、実際には実測値を揃えることは困難である場合が多く、参考値などを用いた簡便な把握となることが多い。また、農作物生産におけるデータ収集が短期的な作付けの栽培期間のみを対象として行われる場合、その期間の天候や季節、生育状況によって得られるデータにばらつきが生じてしまう。

本章では、システムへの關与が大きいプロセスをより詳細に抽出するため、年間を通じたデータを収集する。具体的には、研究協力農家の施設の現地調査をおこない、エネルギー消費設備の種類や数、仕様、稼働実績などを把握する。さらに、必要に応じてインタビュー調査や根拠資料の査閲も実施する。以上に基づいて、農作物生産におけるエネルギー・物質フローを明らかにする。

6.3.2. システムの把握範囲

本章では、原材料調達段階および生産段階を中心に、施設園芸に投入されるエネルギー・物質フローを対象とした。図 6-2 に、本章で設定したシステム境界を示す。原材料調達段階では、生産段階の栽培関連プロセスへの投入物である種苗、肥料を取り上げる。生産段階の土壤管理プロセス（苗植え付け前）では土壤消毒への投入物である重油を、栽培管理プロセス（苗植え付け後から収穫まで）では加温・電照栽培時に投入する重油、電気および施肥された肥料に含まれる投入窒素量を把握する。出荷準備プロセスについては、投入物である電気を対象として取り上げる。その上で、各プロセスに係る投入物ごとに GHG 排出量を算定した。

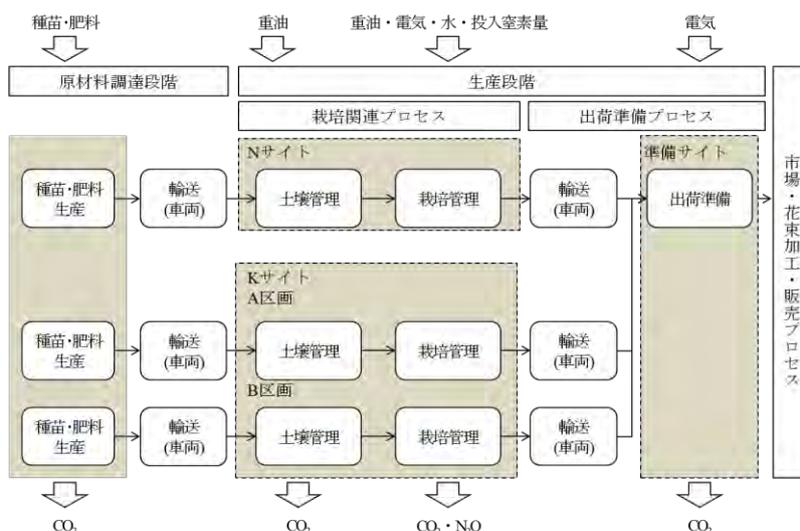


図 6-2 システム境界

6.3.3. 栽培状況の基礎情報

表 6-3 に調査対象サイトにおける栽培状況の基礎情報を示す。作付け回数は、営農者からインタビュー調査により把握した。出荷本数については、出荷資料から推計により得た。具体的には、出荷資料は出荷日と出荷箱数とで管理されていたため、出荷箱数に出荷時の等級また規格に応じた一箱あたりの出荷本数を乗じ総出荷本数を求めた。その上で、営農記録より、サイトごとの出荷時期と照合し、それぞれの出荷本数を求めた。

表 6-3 栽培状況の基礎情報

サイト	施設面積 [a]	作付け回数 [回/y]	出荷本数 [本/y]
N サイト	6.9	4	111,780
K サイト A 区画	7.1	3	92,210
K サイト B 区画	10.5	4	148,550
合計	24.5	11	352,540

6.3.4. プロセスごとの投入量

プロセスごとの投入量データの収集期間としては、2012 年における実績データを基本とし、研究協力農家より収集した。データ収集、把握する方法およびモニタリング方法は、それぞれの投入物に対する燃料供給会社または資材販売会社などが計測した値を納品書などから把握することを基本として行った。実績データとなる根拠資料が不十分である場合、また営農ノウハウ上公開しづらいものについては、JA が公開している経営試算表⁹⁾の農業経営モデル指標に記載ある一般的な数値や営農者からヒアリング情報をもとに推計し投入量を把握した。

(1) 種苗投入量

種苗の投入量は、資料⁹⁾の経営試算表「種苗費：10 [a]あたり984,750 [円]（年3回切り）」をもとに施設面積と年間作付け数で比例配分し、作付け回数あたりの種苗投入量32.8 [千円/a/回]を得た。これにサイト別の施設面積と年間作付け数を乗じることで、サイトごとの種苗投入量を推計した（表6-4）。

$$Seed_{種苗} = P_{種苗} \times A_{サイト} \times P_{回数} \quad (6-1)$$

$Seed_{種苗}$ ：種苗投入量 [千円/y]

$P_{種苗}$ ：作付け回数あたりの種苗投入量 [千円/a/回]

$A_{サイト}$ ：サイトの施設面積 [a]

$P_{回数}$ ：年間作付け回数 [回/y]

表 6-4 各サイトの種苗投入量

種苗生産 プロセス	種苗投入量 [千円/y]	単位面積あたり [千円/a/y]	出荷本数あたり [円/本/y]
N サイト	904	131	8.1
K サイト A 区画	702	98	7.6
K サイト B 区画	1,372	131	9.2
合計	2,978	122	8.4

(2) 肥料投入量

営農者は、経験則に基づき作付け回数あたりに使用する肥料投入量を管理していた。そのため、作付け回数あたりの投入量にサイト別の年間作付け数を乗じることで、サイトごとの肥料投入量を推計した。

具体的には、N サイトは作付け 1 回に対して基肥 120 [kg]、ペレット状の追肥を 100 [kg]投入すると設定した (表 6-5)。K サイトは作付け 1 回に対して基肥を 120 [kg]とし、追肥は A 区画では液体状のものを 40 [kg]、B 区画ではペレット状のものを 100 [kg]投入するものとした (表 6-6、表 6-7)。K サイト A 区画は、そのほかのサイトに比べて単位面積・出荷本数あたりの肥料投入量が少ない。これは、追肥に液体状肥料を投入していることが影響している。

$$Fertilizer_{肥料} = P_{回数} \times P_{肥料} \quad (\text{基肥または追肥}) \quad (6-2)$$

$Fertilizer_{肥料}$: 土壤管理プロセスにおける肥料投入量 [kg/y]

$P_{回数}$: 年間作付け回数 [回/y]

$P_{肥料}$: 作付け回数あたりの肥料投入量 [kg/回]

表 6-5 N サイトの肥料投入量

肥料生産プロセス	肥料投入量 [kg/y]	単位面積あたり [kg/a/y]	出荷本数あたり [g/本/y]
基肥	480	70	4.3
追肥 (ペレット状)	400	58	3.6
合計	880	128	7.9

表 6-6 K サイト A 区画の肥料投入量

肥料生産プロセス	肥料投入量 [kg/y]	単位面積あたり [kg/a/y]	出荷本数あたり [g/本/y]
基肥	360	51	3.9
追肥 (液体状)	120	17	1.3
合計	480	67	5.2

表 6-7 K サイト B 区画の肥料投入量

肥料生産プロセス	肥料投入量 [kg/y]	単位面積あたり [kg/a/y]	出荷本数あたり [g/本/y]
基肥	480	46	3.2
追肥 (ペレット状)	400	38	2.7
合計	880	84	5.9

(3) A 重油消費量

サイトごとに重油タンクが存在しており、納入業者からの購買代金請求書に納品量が記録されていた。そのためサイトごとの重油使用量が把握可能であるが、土壌管理プロセス（蒸気消毒）と栽培管理プロセス（加温）に分けて把握することはできない。そこで、蒸気消毒における重油消費量は、営農者から作付けあたりに使用する重油量をヒアリングし、年間作付け数を乗じることでサイトごとに推計した。

$$Fuel_{\text{蒸気消毒}} = P_{\text{回数}} \times P_{\text{重油}} \quad (6-3)$$

$Fuel_{\text{蒸気消毒}}$: 蒸気消毒プロセスの重油投入量 [kl/y]

$P_{\text{回数}}$: 年間作付け回数 [回/y]

$P_{\text{重油}}$: 作付け回数あたりの重油投入量 [kl/回]

それぞれ設定した作付けあたりの重油投入原単位は、N サイト : 0.4 [kl/回], K サイト A 区画 : 0.4 [kl/回], K サイト B 区画 : 0.5 [kl/回] である。ただし、K サイトについては、区画ごとの重油投入量を把握するために、出荷本数で配分して求めた。さらに、サイトごとで把握可能な重油投入量の総量から、各サイトの蒸気消毒における重油投入量を差し引くことで、加温設備における重油投入量を推計した（表 6-8～表 6-10）。

$$Fuel_{\text{加温}} = Fuel_{\text{total}} - Fuel_{\text{蒸気消毒}} \quad (6-4)$$

$Fuel_{\text{加温}}$: 加温プロセスの重油投入量 [kl/y]

$Fuel_{\text{total}}$: 重油年間購入量 [kl/y]

$Fuel_{\text{蒸気消毒}}$: 蒸気消毒プロセスの重油投入量 [kl/y]

表 6-8 N サイトの重油投入量

プロセス	重油投入量 [kl/y]	単位面積あたり [kl/a/y]	出荷本数あたり [l/本/y]
土壌管理（蒸気消毒）	1.6	0.2	0.01
栽培管理（加温）	7.7	1.1	0.07
合計	9.3	1.3	0.08

表 6-9 K サイト A 区画の重油投入量

プロセス	重油投入量 [kl/y]	単位面積あたり [kl/a/y]	出荷本数あたり [l/本/y]
土壌管理（蒸気消毒）	1.2	0.2	0.01
栽培管理（加温）	7.8	1.1	0.08
合計	9.0	1.3	0.10

表 6-10 K サイト B 区画の重油投入量

プロセス	重油投入量 [kl/y]	単位面積あたり [kl/a/y]	出荷本数あたり [l/本/y]
土壌管理（蒸気消毒）	2.0	0.2	0.01
栽培管理（加温）	11.2	1.1	0.08
合計	13.2	1.3	0.09

(4) 電気消費量

サイトごとの用途別に電気事業者と契約されており、請求書や使用実績照会書類に消費電力量の数値が記録されている。契約形態によって、サイト別・用途別に消費電力量を把握することができる。ただし、N サイトの栽培管理プロセスでは、投入される水の一部をサイト外の施設から調達している。この調達水を得るために必要とされる灌水ポンプの電気消費量を取り上げなければ、投入量の計上漏れが生じることとなる。そこで、K サイトにおける灌水ポンプの電気使用量から 1 m³ の水投入量あたりの電気消費量を求め、それに N サイトで投入されるサイト外からの調達水量を乗じることで、サイト外における灌水ポンプの電気消費量を推計した（表 6-11）。

また、K サイトの栽培管理プロセスについては、照明用途の電気使用量は A 区画、B 区画それぞれに把握することが可能であったが、循環扇・天窓自動開閉装置など、および灌水ポンプはサイトで統合した契約形態であった。そのため、各区画の出荷本数で配分して求めた（表 6-12、表 6-13）。

準備サイトにおいては、研究協力農家は施設園芸以外の品目を作付けしていることから、このサイトすべてで電力消費量を対象とすると過剰な計上となる。そこで、スプレーギクとそのほかの作付け品目をそれぞれの出荷金額で配分し、評価対象品目の電気消費量を算定した（表 6-14）。

$$Electricity_{\text{サイト外}} = Water_{K \text{ サイト}} \times Electricity_{\text{ポンプ}} \quad (6-5)$$

$Electricity_{\text{サイト外}}$: サイト外のほか施設における灌水ポンプの電気消費量
[kWh/y]

$Water_{K \text{ サイト}}$: K サイトあたりの水投入量 [m³/y]

$Electricity_{\text{ポンプ}}$: 水投入量あたりの電気消費量 [kWh/m³]

表 6-11 N サイトの栽培管理プロセス電気消費量

栽培管理プロセス	電力消費量 [kWh/y]	単位面積あたり [kWh/a/y]	出荷本数あたり [Wh/本/y]
照明	1,215	176	11
循環扇・灌水ポンプ等	3,511	510	31
サイト外灌水ポンプ	1,039	151	9
合計	5,765	837	52

表 6-12 K サイト A 区画の栽培管理プロセス電気消費量

栽培管理プロセス	電力消費量 [kWh/y]	単位面積あたり [kWh/a/y]	出荷本数あたり [Wh/本/y]
照明	1,244	175	13
循環扇・天窓自動開閉装置等	818	115	9
灌水ポンプ	1,241	174	13
合計	3,304	463	36

表 6-13 K サイト B 区画の栽培管理プロセス電気消費量

栽培管理プロセス	電力消費量 [kWh/y]	単位面積あたり [kWh/a/y]	出荷本数あたり [Wh/本/y]
照明	2,335	223	16
循環扇・天窓自動開閉装置等	1,319	126	9
灌水ポンプ	2,000	191	13
合計	5,653	541	38

表 6-14 準備サイトの電気消費量

プロセス	電力消費量 [kWh/y]	出荷本数あたり [Wh/本/y]
出荷準備	1,026	3

(5) 水投入量

サイトごとに水道メーターが設置されており、水道局からの請求書および使用実績の照会書類に使用量の数値が記録されている。しかし、Nサイトでは上水以外に施設外調達水が投入されており、その使用量を把握することが困難であった。そのため、Kサイトの総水投入量（1,341 [m³]）をKサイト総施設面積で除し、施設面積あたりに必要な水投入量（76.2 [m³/a]）を算出した上で、それにNサイトの施設面積に乗じることで、Nサイトで必要な水投入量を推計した。さらに、上水投入量の実績値を差し引くことで、施設外調達水を推計した（表6-15）。

なお、この推計の際には、サイトごとの土壌の保水性や排水性、加温による湿度管理の条件などを考慮することが望ましい。しかし、本章ではそれらの定量データを把握するには至っておらず、今後の課題である。ただし、すべてのサイトでスプレーギクのみが栽培されており、基本的な栽培条件は同じであること、栽培管理における温度設定も同一であること、各サイトからの排水もないこと、さらにサイト間で作付け時期や栽培期間やローテーションしているため、年間で見たときに特定のサイトのみで単位水投入量が多くなることはないことなどから、推計結果に及ぼす影響は小さいと考えられる。

$$Water_{N \text{ サイト}} = W_{\text{必要量}} \times A_{N \text{ サイト}} \quad (6-6)$$

$Water_{N \text{ サイト}}$: Nサイトにおける必要な水投入量 [m³/y]

$W_{\text{必要量}}$: 施設面積あたりに必要な水投入量 [m³/a]

$A_{N \text{ サイト}}$: Nサイトの施設面積 [a]

$$Water_{N \text{ サイト雨水}} = Water_{N \text{ サイト}} - Water_{N \text{ サイト上水}} \quad (6-7)$$

$Water_{N \text{ サイト雨水}}$: Nサイトにおける雨水投入量 [m³/y]

$Water_{N \text{ サイト}}$: Nサイトにおける必要な水投入量 [m³/y]

$Water_{N \text{ サイト上水}}$: Nサイトにおける上水投入量 [m³/y]

Kサイトでは、上水以外にサイト内に設置されている雨水貯水タンクから雨水が投入されているが、使用量が確認可能となるようなメーターが設置されておらず、投入量の把握が困難であった。そのため、営農者へのヒアリングから使用量の情報を得た。その結果、過去2年間の農業記録簿で把握可能な水を投入した日と回数に、経験則から得られた1回あたりに各区画で投入される水量の把握が可能とわかった。それらに乗じることで、区画ごとの雨水投入量を推計した（表6-16、表6-17）。投入回数は、過去2年間の投入実績値の平均値、A区画：104[回]、B区画：72[回]を設定した。それぞれの区画ごとに設定した1回あたりに投入する雨水の原単位は、A区画：6[m³/回]、B区画：10[m³/回]である。A区画の雨水投入回数がB区画に比べて多いのは、液体肥料を使用していることが要因と考えられる。なお、この液体肥料は水で希釈され、施設内に設置されている点滴チューブから土壌に投入される。

$$Water_{\text{雨水}} = P_{\text{回数}} \times W_{\text{雨水}}$$

(6-8)

$Water_{\text{雨水}}$: 栽培管理プロセスの雨水投入量 [m³/y]

$P_{\text{回数}}$: 雨水投入回数 [回数]

$W_{\text{雨水}}$: 1回あたりの雨水投入量 [m³/y]

表 6-15 N サイトの水投入量

栽培管理プロセス	水消費量 [m ³ /y]	単位面積あたり [m ³ /a/y]	出荷本数あたり [m ³ /本/y]
上水	38	5	0.0003
雨水	0	0	0.0000
施設外調達水	488	71	0.0044
合計	525	76	0.0047

表 6-16 K サイト A 区画の水投入量

栽培管理プロセス	水消費量 [m ³ /y]	単位面積あたり [m ³ /a/y]	出荷本数あたり [m ³ /本/y]
上水	154	22	0.0017
雨水	467	65	0.0051
合計	621	87	0.0067

表 16-17 K サイト B 区画の水投入量

栽培管理プロセス	水消費量 [m ³ /y]	単位面積あたり [m ³ /a/y]	出荷本数あたり [m ³ /本/y]
上水	248	24	0.0017
雨水	472	45	0.0032
合計	720	69	0.0048

(6) 施肥に伴う投入窒素量

栽培管理プロセスでは、肥料を投入することでアンモニウムイオンが発生し、好気条件下でそのアンモニウムイオンが硝酸態窒素に酸化される過程で N₂O が発生する。農用地土壌への合成肥料の施用に伴う N₂O 排出量の算定には、用地土壌に施用された合成肥料に含まれる窒素量（単位：[kg-N]）が必要³⁾であることから、原材料調達段階で計上した肥料投入量をもとに、窒素成分量を推計した。具体的には、投入された肥料に含まれる窒素含有量を実態調査から得たデータを元にした。窒素含有量は基肥と液肥それぞれの種類別に、基肥の有機配合肥料：7.87%，液体状の追肥：10%，ペレット状の追肥：5%であった。これに投入量を乗じ、肥料起源の投入窒素量を推計した（表 6-18～表 6-20）。

$$Fertilizer \text{ 窒素量} = Fertilizer \text{ 肥料} \times Fertilizer \text{ 成分量}$$

(6-9)

$Fertilizer \text{ 窒素量}$: 施肥に伴う投入窒素量 [kg-N]

$Fertilizer \text{ 肥料}$: 土壌管理プロセスにおける肥料投入量 [kg]

$Fertilizer \text{ 成分量}$: 肥料に含まれる窒素含有率 [%]

表 6-18 N サイトの投入窒素量

栽培管理プロセス	投入窒素量 [kg-N/y]	単位面積あたり [kg/a/y]	出荷本数あたり [N-g/本/y]
基肥	38	5	0.34
追肥 (ペレット状)	20	3	0.18
合計	58	8	0.52

表 6-19 K サイト A 区画の投入窒素量

栽培管理プロセス	投入窒素量 [kg-N/y]	単位面積あたり [kg/a/y]	出荷本数あたり [N-g/本/y]
基肥	28	4	0.31
追肥 (液体状)	12	2	0.13
合計	40	6	0.44

表 6-20 K サイト B 区画の投入窒素量

栽培管理プロセス	投入窒素量 [kg-N/y]	単位面積あたり [kg/a/y]	出荷本数あたり [N-g/本/y]
基肥	38	4	0.25
追肥 (ペレット状)	20	2	0.13
合計	58	6	0.39

6.3.5. エネルギー・物質フローの推計

実態調査に基づいて、プロセスごとの投入量が把握された。このデータより解析されたエネルギー・物質フローを図 6-3 に示す。N サイトは、施設面積 6.9 [a] で K サイト A 区画の面積 7.1 [a] と同規模であるが、A 区画の方がエネルギー・物質の投入量が少ない。これは、N サイトの年間作付け回数が 4 回に対し、A 区画は 3 回と作付け回数異なるためである。また、K サイト B 区画の施設面積は 10.5 [a] とそのほかのサイトに比べて大きく、作付け回数も年間 4 回と多いため、出荷本数が多くなるとともにエネルギー・物質投入量が増加することがわかる。それぞれ、栽培面積と出荷本数ごとに確認する（図 6-4、図 6-5）。栽培面積あたりの投入量をみると、栽培管理（蒸気消毒）および栽培管理プロセスへの重油投入量はすべて同じ値となっている。そして、出荷本数あたりの投入量をみると、栽培管理（蒸気消毒）および栽培管理プロセスへの重油投入量は概ね同じ値となっている。以上より、実態調査で正確なデータを得ることができたといえる。

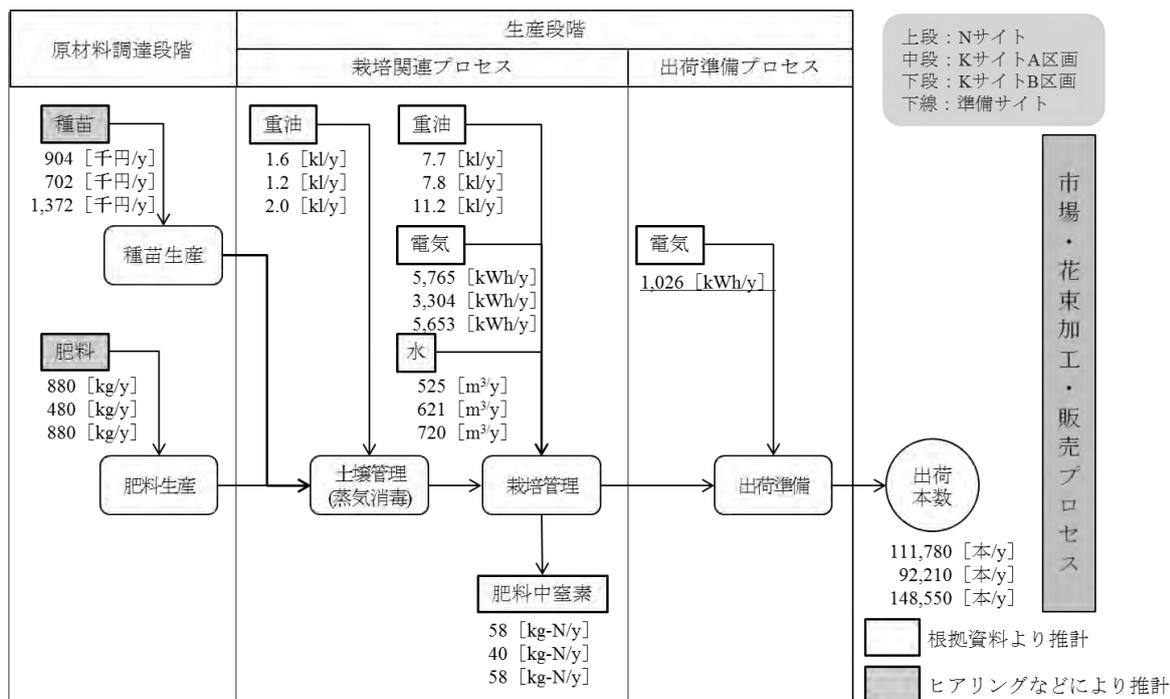


図 6-3 施設園芸の調査サイトにおけるエネルギー・物質フロー（投入量ベース）

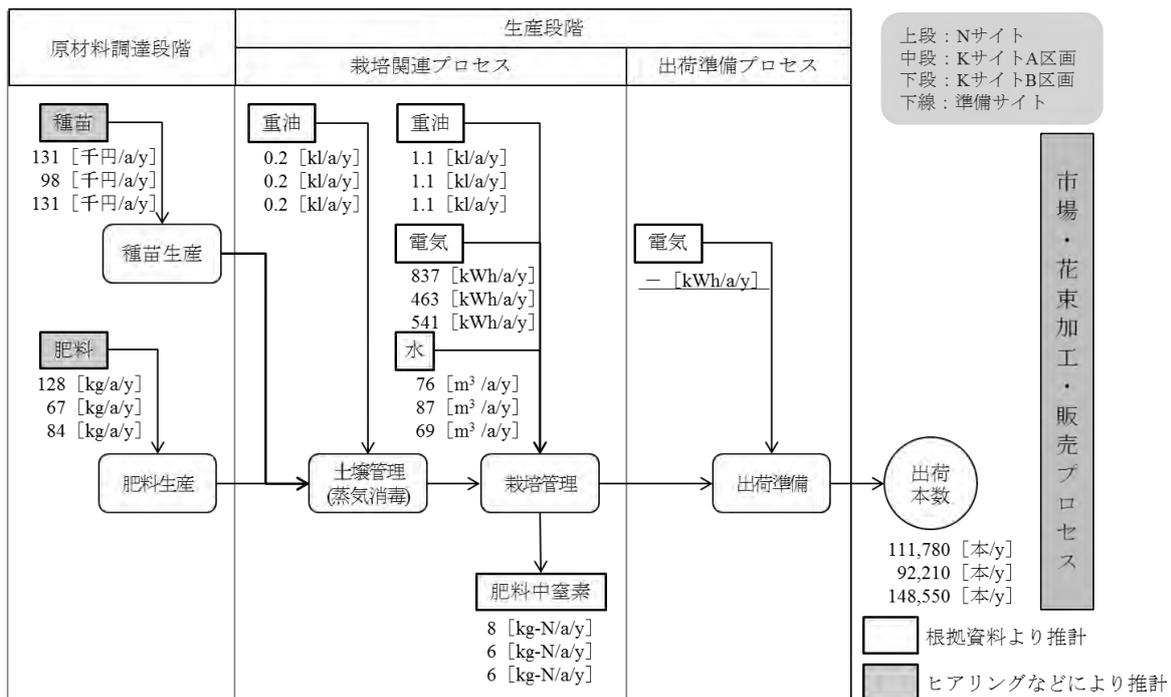


図 6-4 施設園芸の調査サイトにおけるエネルギー・物質フロー（栽培面積ベース）

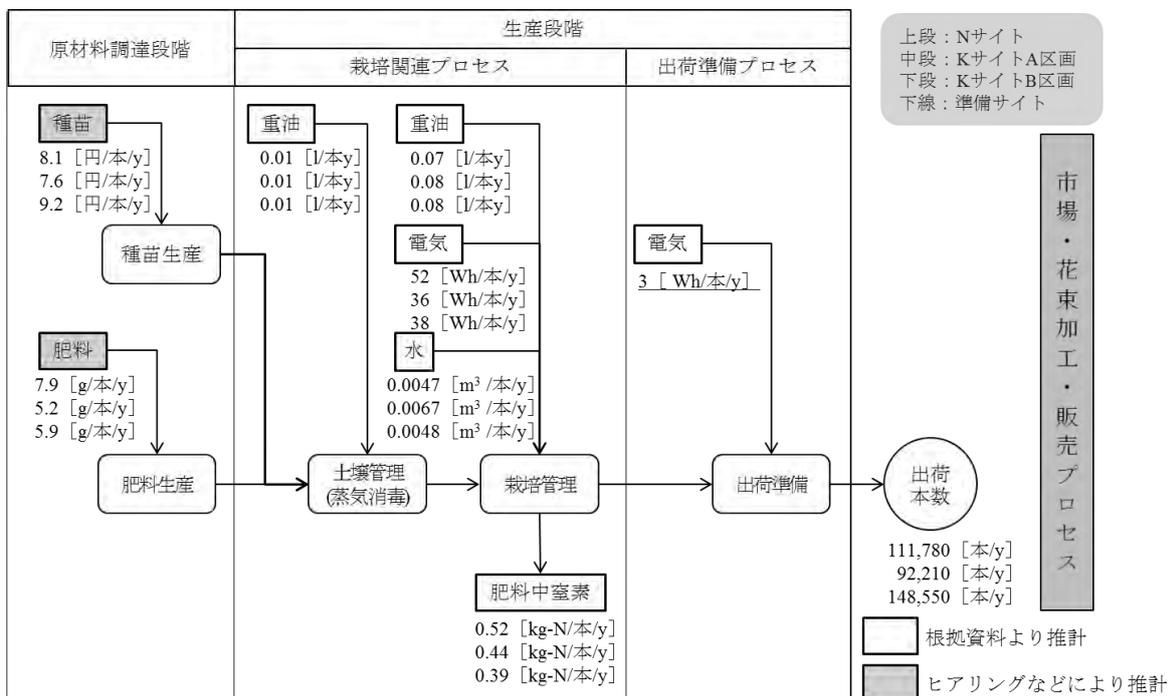


図 6-5 施設園芸の調査サイトにおけるエネルギー・物質フロー（出荷本数ベース）

6.3.6. GHG 排出量の推計

現地調査で得られたプロセスごとの投入量に、単位あたりのエネルギー消費および GHG 排出原単位を乗じ、施設園芸における GHG 排出量を推計した。算定に用いた原単位を表 6-21、表 6-22 に、サイト別 GHG 排出量の算定結果を図 6-6、表 6-23 に示す。なお、施肥による N₂O 発生時の排出原単位：3.02 [kg-CO₂e/kg-N]は、次の手順で設定されている。日本国温室効果ガスインベントリ報告書³⁾より、農作物用の土壌（その他作物）への肥料施用に伴う N₂O 排出係数：6.20×10⁻³ [kg-N₂O-N/kg-N]から、9.74×10⁻³ [kg-N₂O/kg-N]を求め、これに地球温暖化係数：310³⁾を乗じ、肥料施用による N₂O 発生あたりの GHG 排出量としている。

$$GHG \text{ 排出量}_{i,BL} = \text{活動量}_{i,BL} \times \text{排出原単位}_{i,BL} \quad (6-10)$$

GHG 排出量_{i,BL} : i プロセスにおける GHG 排出量 [kg-CO₂/y]

活動量_{i,BL} : i プロセスに投入される資源量 [単位]

排出原単位_{i,BL} : i プロセス単位あたりの GHG 排出量 [kg-CO₂/単位]

表 6-21 エネルギー消費原単位

投入資源	単位	単位あたりエネルギー消費量 [GJ]	参考文献
A 重油	[kl]	39.1	13)
電力	[kWh]	3.6	13)

表 6-22 GHG 排出原単位

投入資源	単位	単位あたり GHG 排出量 [kg-CO ₂ e/単位]	システム境界 (原単位の評価範囲)	参考文献
種苗	[円]	0.00165	購入した製品 (購入者価格ベース (内生部門計; 輸送除く))	14)
配合肥料	[kg]	0.589	原料採取～原材料製造～反応・混合	14)
液肥	[kg]	1.17	原材料採取～製品生産	15)
A 重油	[l]	2.92	原油採取～分留～石油精製～A 重油のボイラでの燃焼	14)
電力	[kWh]	0.479	原料採取～発電～受電端	15)
水	[m ³]	0.348	取水～浄水～給水	15)
肥料施用による N ₂ O 発生	[kg-N]	3.02	当該プロセスのみ (原材料の投入含まず)	14)

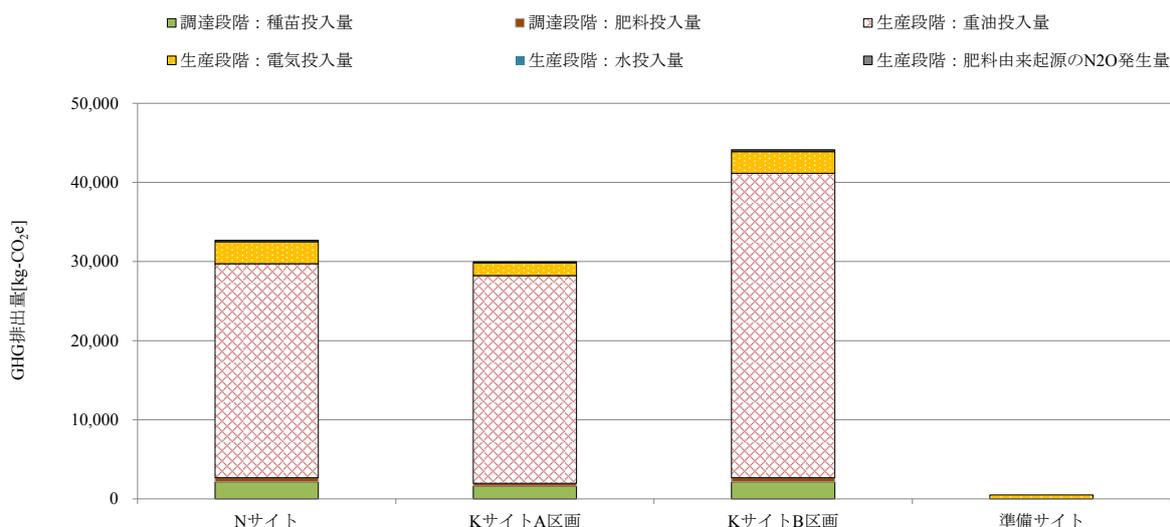


図 6-6 サイト別の GHG 排出量

表 6-23 GHG 排出原単位

ライフサイクル段階	GHG 排出量 [kg-CO ₂ e/y]	比率 [%]	単位面積あたり [kg-CO ₂ e/a/y]	出荷本数あたり [kg-CO ₂ e/本/y]
原材料調達段階	7,333	7	300	0.021
種苗生産	5,944	81	243	0.017
肥料生産	1,389	19	57	0.004
生産段階 (栽培関連プロセス)	99,454	93	4,065	0.282
重油投入量	91,778	92	3,752	0.260
電気投入量	7,052	7	288	0.020
水投入量	153	0	6	0.000
肥料由来起源の N ₂ O 発生量	471	0	19	0.001
生産段階 (出荷準備プロセス)	491	0	20	0.001
合計	107,278	100	4,385	0.304

生産段階におけるエネルギー投入（重油・電気）に起因する GHG 排出がすべてのサイトで支配的であり、ライフサイクル全体の GHG 排出量に占める割合は 93 %となった。どのサイトでも 91 %を占め、施設園芸が化石燃料に依存していることがわかり、農業分野における GHG 排出量の占める割合に大きく影響することが伺える。

さらに、栽培管理プロセス（加温）の重油焚きに投入される A 重油に伴う GHG 排出量は、サイトごとにみると N サイトで 83 %、K サイト A 区画で 88 %、K サイト B 区画で 87 %を占めている。すべてのサイトにおける総排出量の 86 %を占めることがわかった。このプロセスで用いる化石燃料を使用した加温設備を高効率エネルギー利用技術や再生可能エネルギーであるバイオマス資源利活用技術などの低炭素技術を導入することが重要であることが明らかとなった。

6.4. 設備更新による GHG 排出量の推計

6.4.1. 比較ケースの設定

前節から、各サイトの低炭素化を図るとき、栽培管理プロセス（加温）でのエネルギー起源 GHGの排出抑制が重要となることが明らかになった。そこで、加温設備更新による栽培管理プロセスの省エネルギー化および低炭素化に関して、代替技術オプションを検討した。その際、すでに国内で実用化されている技術を基本に据えた。ただし、従来の設備を継続利用した上で、燃料を非化石由来のもので代替する技術オプションも含める。

従来の重油焚き加温設備に代わる技術の方向には、重油焚き加温設備そのものの高効率化と重油からの燃料転換の大きく分けて2つがあると考えられる。燃料転換はさらに、そのほかの化石燃料への転換（電化）と非化石燃料への転換（バイオマス利用）に分けられる。前者については、エネルギー効率が低いヒートポンプ技術の開発、実用化が進んでおり、また施設園芸でヒートポンプと石油燃焼式加温設備を併用する事例もある^{16, 17)}。後者のバイオマス利用では、未利用バイオマスや廃棄物系バイオマスが燃料になると考えられる。特に、チップ化やペレット化した木質系未利用バイオマスを代替燃料として利活用するバイオマス燃焼ボイラは、すでに多くの導入事例が報告されている^{18, 19)}。他方、廃棄物系バイオマスを利用したものは、管見の限りでは見当たらない。しかし、下水汚泥を原料として、重油代替となるバイオオイルを生成する技術の開発が進められている^{20, 21)}。以上から、本章では化石燃料利用の高効率化技術、ヒートポンプ技術、地域バイオマス資源を代替燃料として利活用する技術を取り上げ、合計7つの比較ケースを設定した（図6-7、表6-24）。

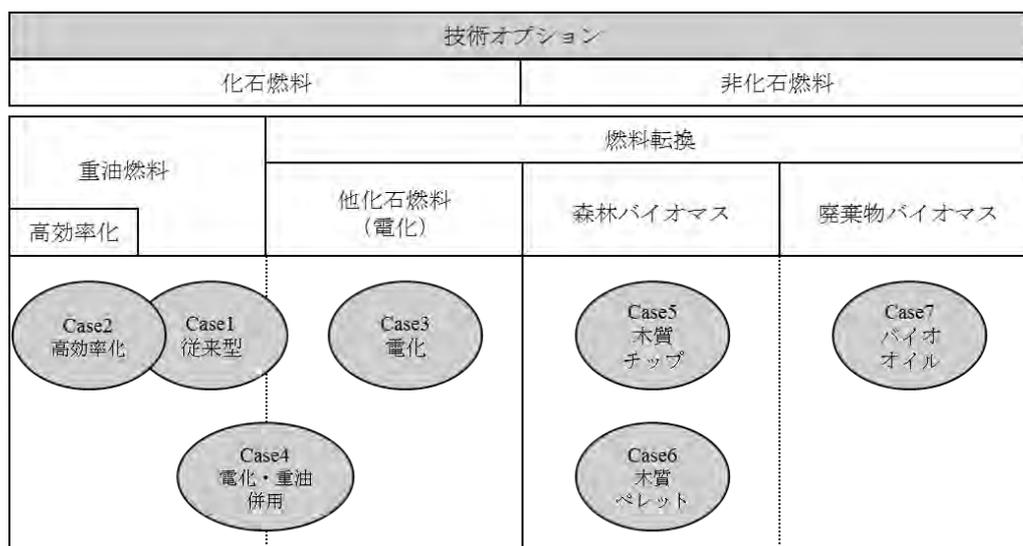


図 6-7 代替技術オプションの概念図

表 6-24 比較ケースの概要

case	導入技術		成績 係数 [%]	参考 文献
	代替技術オプション	システム		
0	-	従来型重油焚き	80.0	22)
1	高効率化	高効率重油焚き	84.1	23)
2	電化	ヒートポンプ	488.7	24)
3	電化・重油併用	ヒートポンプハイブリッド方式	488.7	24)
4	木質バイオマス	木質チップ焚き	80.0	22)
5	木質バイオマス	木質ペレット焚き	86.0	22)
6	廃棄物バイオマス	バイオオイル焚き	84.1	23)

・ **case0 : 従来型重油焚き**

従来燃料を使用する重油焚き加温設備を今後も継続使用する。

・ **case1 : 高効率重油焚き**

従来燃料を使用する最新鋭の高効率な重油焚き加温設備に更新する。

・ **case2 : ヒートポンプ**

消費した電力に対して数倍の熱を利用できる高効率なヒートポンプに更新する。

・ **case3 : ハイブリッド方式**

追加でヒートポンプを導入し、優先的にヒートポンプを稼働させ、加温能力が不足した場合に、従来燃料を使用する重油焚き加温設備を併用する。

・ **case4 : 木質チップ焚き**

木質チップ代替燃料として使用する加温設備に更新する。

・ **case5 : 木質チップ焚き**

木質ペレットを代替燃料として使用する加温設備に更新する。

・ **case6 : バイオオイル焚き**

case1 で用いた高効率重油焚き加温設備に更新した上で、下水汚泥由来のバイオオイルを代替燃料として使用する。

本章では、case0を基準ケースとし、そのほかのケースの設備更新によるGHG排出削減ポテンシャルを比較評価する。なお、ここでは技術更新によるGHG削減ポテンシャルを比較評価

することに主眼を置いているため、対象地域におけるバイオマス資源の現実的な調達および利用可能性はケース評価のシステム境界外とする。

6.4.2. 算定方法

算定には、表6-25、表6-26に示した単位あたりのエネルギー消費およびGHG排出原単位を用いた。なお、バイオマス燃料であるチップ、ペレット、バイオオイルは、設備で燃焼時のCO₂排出量はカーボン・ニュートラル（炭素中立）性に鑑みゼロとみなした。ただし、これらのGHG排出原単位は、システム境界（原単位の評価範囲）がそれぞれ異なる対象地におけるケーススタディから得られたものであり、原単位のシステム境界が必ずしも一致しないことに注意を要する。そのため、分析の精緻化を図る場合には、本章の対象地で同一のシステム境界を設定して原単位を得ることも必要となろう。

$$GHG \text{ 排出量}_{i,BL} = \text{活動量}_{i,BL} \times \text{排出原単位}_{i,BL} \quad (6-11)$$

*GHG 排出量*_{i,BL} : iプロセスにおける GHG 排出量 [kg-CO₂/y]

*活動量*_{i,BL} : iプロセスに投入される資源量 [単位]

*排出原単位*_{i,BL} : iプロセス単位あたりの GHG 排出量 [kg-CO₂/単位]

表 6-25 比較ケースにおけるエネルギー消費原単位

投入資源	単位	単位あたりエネルギー消費量 [GJ]	参考文献
A 重油	[kl]	39.1	13)
電力	[kWh]	3.6	13)
木質チップ	[t]	7.0	25)
木質ペレット	[t]	17.6	25)
バイオオイル	[kl]	30.1	26)

表 6-26 比較ケースにおける GHG 排出原単位

投入資源	単位	単位あたり GHG 排出量 [kg-CO ₂ e/単位]	システム境界 (原単位の評価範囲)	参考 文献
種苗	[円]	0.00165	購入した製品（購入者価格ベース（内生部門計；輸送除く））	5), 14)
配合肥料	[kg]	0.589	原料採取～原材料製造～反応・混合	15)
液肥	[kg]	1.17	原材料採取～製品生産	14)
A 重油	[l]	2.92	原油採取～分留～石油精製～A 重油のボイラでの燃焼	15)
電力	[kWh]	0.479	原料採取～発電～受電端	15)
水	[m ³]	0.348	取水～浄水～給水	15)
肥料施用による N ₂ O 発生	[kg-N]	3.02	当該プロセスのみ（原材料の投入含まず）	14)
チップ	[GJ]	13.4	原料採取～燃料製造～製品輸送	22)
ペレット	[GJ]	26.4	原料採取～燃料製造～製品輸送	22)
バイオオイル	[l]	1.96	原料採取（下水処理含む）～燃料製造～製品輸送	26)

比較ケースごとの加温設備の熱効率には、表6-24の成績係数欄に示した値を使用した。case3のハイブリッド方式ではヒートポンプと従来重油焚きを併用運転させるため、それぞれの設備の運転割合を設定する必要がある。運転割合はハウスの構造などの施設内環境に依存するため、一概に設定することはできない。ここでは、設備メーカーがある条件下の施設にヒートポンプを1台設置した際をシミュレーションした結果²⁴⁾で採用された値を用いた。具体的な負担割合は、従来型重油焚きが48%を、ヒートポンプが52%を賄う。なお、この運転割合は、通常、ヒートポンプの設置する台数が増加すれば、得られる熱量が増加するため、優先的に稼働するヒートポンプの稼働割合が高くなるものであるが、本章においては設置台数に変化に伴う稼働割合を考慮しない。

case1~6で加温設備に投入されるエネルギー量は、熱量換算したcase0のA重油投入量に一致するよう、次式で求めた。

$$Q_{PJ} = Q_{BL} \times \varepsilon_{BL} \div \varepsilon_{PJ} \quad (6-12)$$

Q_{PJ} ：設備更新後(case1~6)のエネルギー投入量 [GJ/y]

Q_{BL} ：設備更新前(case0)のエネルギー投入量 [GJ/y]

ε_{BL} ：設備更新前(case0)の熱効率 [%]

ε_{PJ} ：設備更新後(case1~6)の熱効率 [%]

GHG 排出量は、まず熱量ベースのエネルギー投入量から各燃料の投入量を求め、表 6-26 に示した GHG 排出原単位を乗じることで算定した。なお、バイオオイル生成に伴う GHG 排出原単位は、先行研究²⁶⁾では投入汚泥量（乾燥重量）あたりで算定されている。そこで、次の

手順でバイオオイル生成量あたりの GHG 排出原単位に換算した。まず、この先行研究におけるバイオオイル収量は、投入汚泥量（乾燥重量）20 [t-DS/d]に対して 7.04 [kl/d]、つまり 2.84 [t-DS/kl]である。これに投入汚泥量あたりの GHG 排出量原単位：0.69 [t-CO₂/t-DS]を乗じ、バイオオイル生成量あたりの GHG 排出原単位を設定した。

6.4.3. 算定結果

(1) ケース別 GHG 排出量

ケース別の GHG 排出量の算定結果を図 6-8 に示す。設備導入により GHG 排出量が最も削減できるケースは木質チップ焚きであり、次いでヒートポンプ、木質ペレット焚きとなる。木質チップ焚きについては、木質バイオマスで従来燃料を代替するため、燃焼に伴う GHG 排出量はカーボン・ニュートラルによって計上されない。その結果、case0 の栽培関連プロセス総 GHG 排出量に対して 64 %の大幅な排出削減を実現しうる。また、木質バイオマスのなかでも、チップ焚きとペレット焚きで GHG 排出量に差が生じている。これは、木質チップ製造工程に比べ、木質ペレット製造工程は多くのエネルギー投入を必要とすることによる。

ヒートポンプについては、消費電力の数倍の熱を暖房に利用可能となる。このため、そのほかのケースでは熱効率が 80 %程度であるが、ヒートポンプは 450 %以上と効率に優れ、case0 の栽培関連プロセス総 GHG 排出量に対して削減率が 55 %となる。

ハイブリッド方式に関しては、優先的にヒートポンプを稼働させ、加温能力が不足した場合に補助として従来型重油焚きが運転させるため、運転割合が削減効果に大きく影響する。設定上、ヒートポンプの運転割合 52 %を賄うことで、case1 に対して削減率は、ヒートポンプの削減率の概ね半分の 27 %となった。

また、下水汚泥由来のバイオオイルを使用する case6 は、case0 の栽培関連プロセス総 GHG 排出量に対して削減率 13 %に留まった。

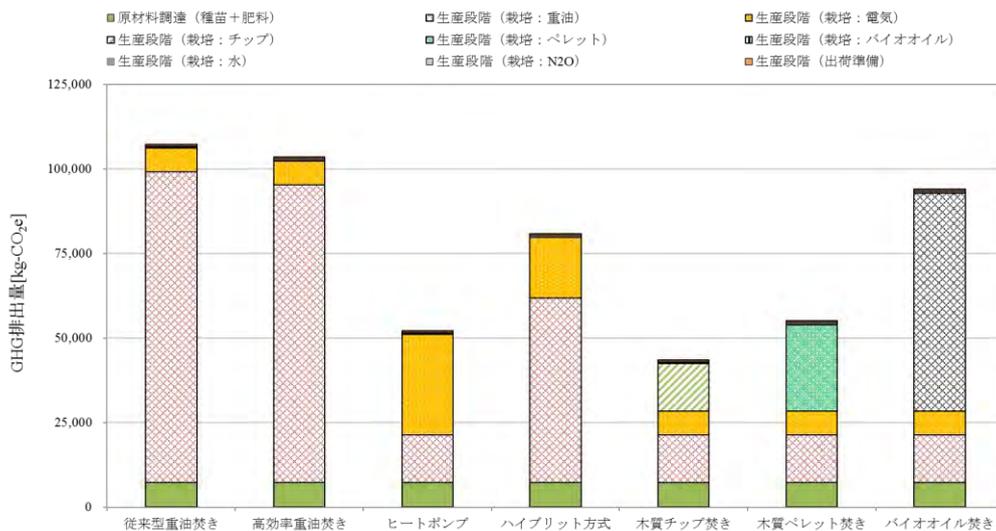


図 6-8 更新ケース別の GHG 排出量

(2) ケース別の出荷本数あたり GHG 排出量

出荷本数 1 本あたりの GHG 排出原単位を比較ケース別に求めた (表 6-27)。従来型重油焚き：304 [g-CO₂e/本]に対し、木質チップ焚きは 123 [g-CO₂e/本]，ヒートポンプは 148 [g-CO₂e/本]，木質ペレット焚きは，156 [g-CO₂e/本]という結果が得られた。設備を従来型重油焚きから森林バイオマスの木質チップ焚きとペレット焚き，ヒートポンプに置き換えることで，従来型重湯焚きに対して約 50 %以上の削減となる。

表 6-27 出荷本数あたりの GHG 排出量

[単位：g-CO ₂ e/本]	従来型 重油焚き	高効率 重油焚き	ヒート ポンプ	ハイブリ ッド方式	木質 チップ 焚き	木質 ペレット 焚き	バイオ オイル 焚き
原材料調達段階	21	21	21	21	21	21	21
種苗生産量	17	17	17	17	17	17	17
肥料生産量	4	4	4	4	4	4	4
生産段階 (栽培関連プロセス)	282	271	126	207	101	134	245
重油投入量	260	250	40	154	40	40	40
電気投入量	20	20	84	51	20	20	20
チップ投入量	0	0	0	0	40	0	0
ペレット投入量	0	0	0	0	0	73	0
バイオオイル投入量	0	0	0	0	0	0	183
水投入量	0	0	0	0	0	0	0
肥料由来起源の N ₂ O 発生量	1	1	1	1	1	1	1
生産段階 (出荷準備プロセス)	1	1	1	1	1	1	1
合計	304	294	148	229	123	156	267
削減率	-	4%	51%	25%	59%	49%	12%

(3) 地域スケールに展開した場合の GHG 排出量

検討した代替技術オプションを地域レベルに水平展開した場合の GHG 排出量を算定した。具体的な手順は次のとおりである。JA ありだ第 2 次農業振興計画⁹⁾では、2013 年の目標として生産量 10,810 [千本]を掲げている。この生産量に、表 6-27 に示した出荷本数あたりの GHG 排出量原単位を乗じることで、設備更新による地域での GHG 削減効果を算定した。

その結果を図 6-9 に示す。従来型重油焚きで 3,290 [t-CO₂e/y]，最大削減ケースとなる木質ペレット焚きで 1,335 [t-CO₂e/y]となることがわかった。地域内の従来型重油焚きすべてを置き換えることで 1,955 [t-CO₂e/y]となり 64 %削減可能となる。今後、地域からの出荷本数が増加することを前提とすれば、更なる削減効果が得られることになる。

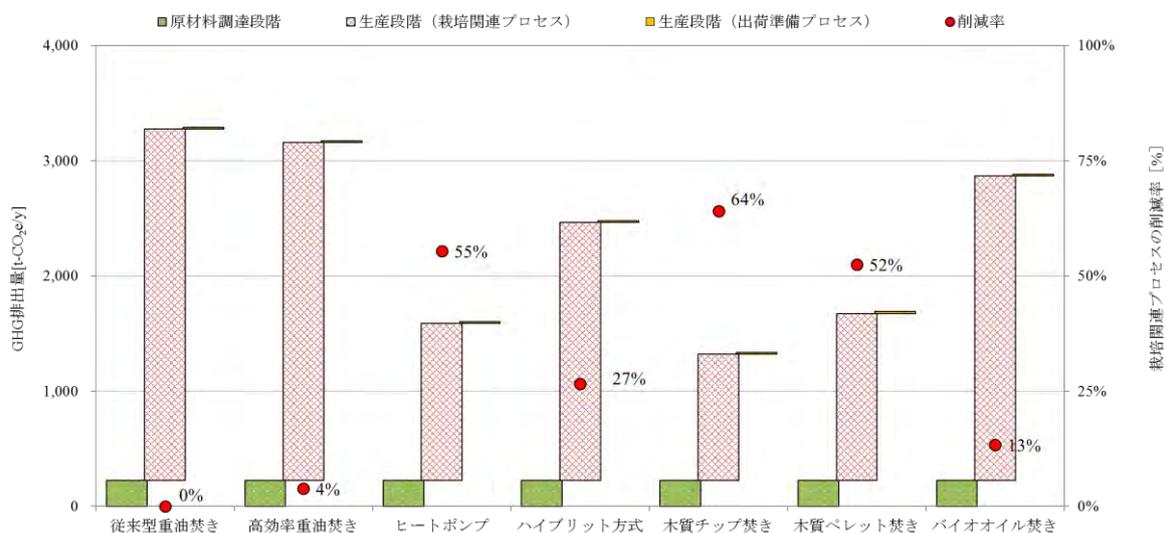


図 6-9 更新ケース別の GHG 排出量

6.5. 本章の結論

本章では、中小規模な施設園芸による花卉栽培が盛んな和歌山県中部の有田地域を対象として取り上げ、実態的なエネルギー管理やGHG排出に大きく寄与する物質投入について詳細な調査を実施した。その調査結果をもとに、花卉栽培におけるエネルギー・物質フローを把握した上で、LCA手法を用いてGHG排出量を推計した。

最もGHG排出量に与える影響が大きいプロセスを明らかとし、そのプロセスの省エネルギー化および低炭素化に関して代替技術オプションを提案した。本章で得られた主要な結果をまとめると、以下のとおりである。

- ・ 施設園芸の花弁生産に伴うライフサイクルGHG排出量は、生産段階におけるエネルギー投入量に起因するGHG排出量が支配的であり、ライフサイクル全体の総排出量に占める割合は93%となった。特に栽培管理プロセス（加温）に投入される重油に伴うGHG排出量が総排出量の86%を占めることが明らかとなった。
- ・ 栽培管理プロセスの加温設備更新に関して7つの比較ケースを設定し、設備更新とバイオマス資源利用によるGHG削減ポテンシャルを評価した結果、最新の高効率技術や地域未利用バイオマスを燃料として利用する技術に更新することにより、最大で64%のGHG削減効果が得られることがわかった。その結果、栽培管理プロセスにおける施設加温でのエネルギー起源GHGの排出抑制が重要となること、GHG排出量削減では地域バイオマス資源の燃料利用が効果的であることを明らかとした。

第 6 章の参考文献

- 1) 農林統計協会：平成 23 年度食料・農業・農村白書 農林水産省編，2012 年。
- 2) 農林水産省：平成 21-24 年度予算概算決定の概要（参照元：<http://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyoo/danka/index.html>，最終閲覧：2014 年 2 月 11 日）。
- 3) 国立環境研究所：日本国温室効果ガスインベントリ報告書，2012 年（参照元：http://www-gio.nies.go.jp/aboutghg/nir/2012/NIR-JPN-2012-v3.0-J_web.pdf，最終閲覧：2014 年 2 月 11 日）。
- 4) 及川仁：施設園芸における省エネの取り組みの推進など地球温暖化への対応，施設と園芸，No.138，pp.4-12，2009 年。
- 5) 地球環境研究センター：産業連関表による環境負荷原単位データブック（3EID）－LCA のインベントリデータとして－（参照元：<http://www.cger.nies.go.jp/publications/report/d031/jpn/datafile/index.htm>，最終閲覧：2014 年 2 月 11 日）。
- 6) 和歌山県：和歌山県花き振興計画 平成 23 年度～27 年度，2011 年（参照元：http://www.pref.wakayama.lg.jp/prefg/070300/keikaku/documents/kaki_keikaku_h23.pdf，最終閲覧：2014 年 2 月 11 日）。
- 7) 農林水産省花き産業振興室：花きをめぐる情勢，2011 年（参照元：<http://www.maff.go.jp/j/seisan/kaki/flower/pdf/meg231.pdf>）最終閲覧：2014 年 2 月 11 日）。
- 8) 川西孝秀，島浩二，林寛子，道園美弦，久松完：日没の時間帯からの短時間の昇温処理がスプレーギクの生育，開花および切り花品質に及ぼす影響，園芸学研究 11(2)，pp.241-249，2012 年。
- 9) ありだ農業協同組合：JA ありだ第 2 次農業振興計画－勝ち組産地を目指して－。
- 10) 農林水産省：都道府県施肥基準等（参照元：http://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyoo/hozen_type/h_sehi_kizyun/，最終閲覧：2014 年 2 月 11 日）。
- 11) 西尾道徳：施設菊農家の肥料投入行動とその技術的意識（参照元：<http://lib.ruralnet.or.jp/nisio/?p=1455>，最終閲覧：2014 年 2 月 11 日）。
- 12) 日本施設園芸協会：五訂版施設園芸ハンドブック，2003 年。
- 13) 経済産業研究所：総合エネルギー統計の解説／2007 年度改訂版，2009 年（参照元：<http://www.rieti.go.jp/users/kainou-kazunari/download/pdf/2007EBXIGRF.pdf>，最終閲覧：2013 年 2 月 11 日）。
- 14) 産業環境管理協会：カーボンフットプリントコミュニケーションプログラム利用可能データ（国内）ver.1.03（参照元：http://www.cfp-japan.jp/calculate/verify/xls/CO2available_data_20121126.xls，最終閲覧：2013 年 3 月 17 日）。
- 15) 産業環境管理協会：カーボンフットプリントコミュニケーションプログラム基本データベース ver.1.01（国内データ）（参照元：http://www.cfp-japan.jp/calculate/verify/xls/CO2basic_data_ver101_20130212.xls，最終閲覧：2013 年 3 月 17 日）。
- 16) 馬場勝：ヒートポンプを組み合わせた新暖房システムによる石油節減効果，施設と園芸，No.138，pp.13-17，2007 年。
- 17) 佐藤展之，守谷栄樹，安井清登，野々下知泰：空気熱源式ヒートポンプと燃焼式温風暖房機とのハイブリッド運転によるバラ栽培の暖房費削減効果，植物環境工学 25(1)，pp.19-28，2013 年。
- 18) 山口智治：木質ペレット利用によるハウス暖房とその評価，施設と園芸，No.146，pp.10-15，2009 年。
- 19) 上平田潤，堂脇清志：園芸施設におけるバイオマスガス化＋燃料電池 CGS のシステム分析，日本エネルギー学会誌，Vol.88，No.6，pp.492-499，2009 年。
- 20) Shen, L. and Zhang, D. K.: An experimental study of oil recovery from sewage sludge by low-temperature pyrolysis in a fluidised-bed, *Fuel*, Vol.82, pp.465-472, 2003 年。
- 21) 井原貴行，吉田登，盛岡通：下水汚泥からのバイオオイル製造，日本機械学会第 18 回環境工学総合シンポジウム 2008 講演論文集，pp.166-167，2008 年。
- 22) 株式会社森のエネルギー研究所：木質バイオマス LCA 評価事業報告書，2012 年（参照元：http://www.mori-energy.jp/pdf/lca_hokokusho.pdf，最終閲覧：2014 年 2 月 11 日）。
- 23) 株式会社ネポン：施設園芸用温風暖房機 ハウスカオンキ 27V 型（参照元：<https://www.nepon.co.jp/pdf/nk/hk27.pdf>，最終閲覧：2014 年 2 月 11 日）。
- 24) 株式会社ネポン：施設園芸用ヒートポンプ グリーンパッケージ（参照元：<https://www.nepon.co.jp/pdf/nk/gp1010.pdf>，最終閲覧：2013 年 3 月 17 日）。
- 25) 宮崎県：宮崎県木質バイオマス活用普及指針（参照元：http://www.pref.miyazaki.lg.jp/contents/org/kankyoo/moku_zai/biomass_vision/page00060.html，最終閲覧：2014 年 2 月 11 日）。
- 26) 山本祐吾，古野間達，吉田登，盛岡通：下水汚泥処理における技術選択と施設更新による温室効果ガス削減効果のライフサイクル評価，土木学会論文集 G（環境），Vol.68，No.5，pp.I_137-I_146，2012 年。

第7章 施設園芸での低炭素技術選択による炭素クレジット創出ポテンシャルの評価

7.1. 緒言

循環型社会と低炭素型社会を形成するにあたりバイオマスの利活用が国の政策として進められている。そのため、バイオマス利活用技術に対して、国や地方自治体の支援で設備導入費用の補助がなされている。しかし、バイオマスの利活用においては、優れた技術でも地域外から得ることのできるエネルギーおよびマテリアルであれば、リーケージの問題が生じ結果として、環境負荷低減が思ったほど得ることができない可能性がある。そのため、地域に賦存する利活用可能なバイオマス選定し適切な圏域で循環させる必要がある。また、地域循環が可能なエネルギー・マテリアルがどの程度の循環圏で形成されるかは、地域の特性に応じて変化する。そこで、低炭素型社会に向けた移行段階のなかでも、低炭素設備への投資が遅延している小規模分散型のエネルギー需要端となる施設園芸での設備更新を取り上げて、設備に対する費用便益や地域に賦存する未利用バイオマスの調達可能量を推計する。

第6章で得られた施設園芸での設備更新によるGHG排出量の推計から、木質バイオマスの利用が特にGHG排出抑制の観点で有効なことが明らかとなっている。本章では、低炭素型設備への投資に対する公的補助金の有無や、設備更新プロジェクトによって創出された炭素クレジットの売却益を加味し、各ケースの費用便益を算定する。その上で、投資判断の一つの基準となる法定耐用年数：15年を上回るケースに着目して、公的補助金の補助率や炭素クレジットの売却単価の違いに対する投資回収年数の変化を分析することを通じて、投資回収年数が15年以下となる条件を明らかにする。また、設備更新の代替技術オプションの一つとして、非化石燃料への転換（バイオマス利用）技術を取り上げた。しかし、木質チップやペレットの原料となる木質系未利用バイオマス、および廃棄物系バイオマスである下水汚泥の種類や賦存量、有効利用可能量の把握には至っていないことから、地域に賦存する未利用バイオマスの賦存量を推計する。特に先行研究での下水汚泥は、バイオガス化技術による有効利用可能量を推計しているため、第3章～第5章でも取り上げた下水汚泥から産業全般でも主要な燃料として幅広く利用されている重油に代替可能な再生燃料を生成可能なオイル化技術による有効可能量は明らかとなっていない。このため産業と親和性が高い技術といえるオイル化技術が下水処理場に導入された場合に、地域の代謝システムの構想にどのような影響を与えるかも明らかとする必要がある。

以上を通じて、施設園芸における低炭素化と経営基盤の強化に効果的かつ効率的な技術選択、および制度設計に関する知見を得ることを目指す。

本章の構成は次のとおりである。第2節では、バイオマスなどの設備導入をする際に、国などの補助にあわせて炭素クレジットによる支援を考慮した投資効果の比較する。第3節で

は、地域に賦存する未利用バイオマスの賦存量を推計し、比較検討した代替する技術オプションを導入した際に、供給可能なバイオマスかどの程度供給可能となりうるかの定量分析を行う。そして、**第 4 節**に本章で得られた結論を示す。

7.2. 炭素クレジット売却益や補助金を考慮した投資分析

7.2.1. 分析方法

(1) バウンダリーの設定

第4章では、設備更新によるGHG排出量の推計から、木質バイオマスの利用が特にGHG排出抑制の観点で有効なことが明らかとなった。ここでは、低炭素型設備への投資に対する公的補助金の有無や、設備更新プロジェクトによって創出された炭素クレジットの売却益を加味し、各ケースの費用便益を算定する。その上で、投資判断の一つの基準となる法定耐用年数：15年²⁾を上回るケースに着目して、公的補助金の補助率や炭素クレジットの売却単価の違いに対する投資回収年数の変化を分析することを通じて、投資回収年数が15年以下となる条件を明らかにする。

国内クレジット制度では、特定の設備更新事業に関する削減量を算定（プロジェクトベース）し、国内クレジット認証委員会の認証を受けて、炭素クレジットを創出することができる。ここでは、設備更新プロジェクトのバウンダリーを、従来型の加温設備または代替技術オプションで検討された6ケースで利用される代替機器いわゆる加温設備によって栽培管理（加温）プロセスに熱供給される範囲と設定した。

(2) 炭素クレジットの算定方法

6.4.2.に示した手順に沿って推計したケース別のエネルギー投入量に、表7-1に示す排出係数を乗じて、炭素クレジット（排出削減量）を算定した。森林バイオマスである木質チップ、木質ペレットについては、制度と同様にカーボン・ニュートラルを適用し燃焼時のCO₂を実質的に排出しないものとしゼロとみなした。廃棄物バイオマスのバイオオイルについてもカーボン・ニュートラル性を考慮した。

表 7-1 低炭素クレジットにおける排出係数

投入資源	単位	単位あたり CO ₂ 排出量 [t-CO ₂]	参考文献
A 重油	GJ	0.0693	3)
電力	kWh	0.000429	3)
木質チップ	t	0.0	-
木質ペレット	t	0.0	-
バイオオイル	kl	0.0	-

$$ER = EM_{BL} - (EM_{PJ} + LE) \quad (7-1)$$

ER : CO₂ 排出削減量 [t-CO₂/y]

EM_{BL} : 設備更新前(case0)における CO₂ 排出量 [t-CO₂/y]

EM_{PJ} : 設備更新後(case1~6)における CO₂ 排出量 [t-CO₂/y]

LE : 炭素リーケージ排出量(LE=0) [t-CO₂/y]

ただし、case 4~6 における木質・廃棄物バイオマスの利用には、いわゆる炭素リーケージの課題が伴う。炭素リーケージとは、更新プロジェクトのバウンダリーの外で逆に炭素排出が増加してしまうことである。本章の範囲で例えるならば、バウンダリー内のバイオマス燃料の燃焼に伴う CO₂ 排出量は、カーボン・ニュートラルによりゼロといえるが、バウンダリー外となる燃料輸送プロセスや更新に伴い追加で必要となる乾燥設備関連プロセスによる CO₂ 排出量が増大することを指す。

国内クレジット制度の方法論では、炭素リーケージ排出量が排出削減量の 5% に満たないと認められる場合は、リーケージ排出量を考慮する必要はない³⁾とされている。本章では、バイオマス原材料供給元などを把握した上で、当該プロジェクト以外での CO₂ 排出量を定量的に算出する段階には至っていないため、炭素リーケージ排出量は考慮していない ($LE=0$)。この点は今後の改善課題である。

また、炭素クレジットの売却価格は、クレジット保有者と購入者との相対取引⁴⁾であり、決められた価格は存在しない。プロジェクト案件ごとに需給を勘案した相対取引を原則とし、個別交渉によって決定されているため、情報公開されていない。そこで、本章では、国内クレジット制度を活用した CO₂ 排出削減見込み量に応じて低炭素型設備の導入に助成金を支給する制度⁵⁾で実績のある、クレジット 1 t あたりの助成金額を参考にした。この事業では、2010~2012 年度の 3 年間継続的に実施され、助成金額が 1,500 [円/t-CO₂]⁶⁾、3,000 [円/t-CO₂]⁷⁾、4,000 [円/t-CO₂]⁸⁾と年度によって異なる。また、2013 年取りまとめられた国内クレジット制度に関する報告書⁹⁾ではクレジット単価が 1,000 [円/t-CO₂]での記載も確認されたため、本章ではそれぞれをクレジット売却単価として設定した。

(3) 投資回収年数の算定方法

ケース別に想定した設備投資額は、データが入手できたものについて表 7-2 に示す値を設定した。高効率重油焚きの設備投資額は、営農者が設備更新を検討する際に用いたメーカー資料などより得た。エネルギーコストの単価に関しては、A 重油単価は石油製品価格調査¹²⁾の小型ローリー納入価格(2012 年実績：近畿)の年間平均額である 84.2 [円/l]を用いた。電気単価は、関西電力の低圧電力契約¹³⁾を参考に 11.3 [円/kWh] (その他季)と設定し、基本料金を含め算定した。木質チップは 10 [円/kg]¹⁴⁾、木質ペレットは 36.6 [円/kg]¹⁴⁾とした。なお、バイオオイルについてはデータ取得上の制約から、算定対象外とした。これはバイオオイルを扱った先行研究¹⁵⁾はライフサイクル的視点で環境負荷を定量化したものであり、コスト分析は実施されていないこと、実用化・商用化されている技術ではないため、そのほかの文献や資料か

ら販売価格データを得ることも困難であったことによる。

投資回収年数は、算定したケース別エネルギー投入量を表 6-25 で示したエネルギー消費原単位で除し、ケース別投入資源量を推計した後、次式から求めた。

表 7-2 各代替技術オプションの設備投資額

case	導入技術		設備投資額 [千円]	参考 文献
	代替技術オプション	システム		
0	-	従来型重油焚き	-	-
1	高効率化	高効率重油焚き	1,322	-
2	電化	ヒートポンプ	4,000	10)
3	電化・重油併用	ハイブリッド方式	4,000	10)
4	木質バイオマス	木質チップ焚き	15,000	11)
5	木質バイオマス	木質ペレット焚き	6,180	11)
6	廃棄物バイオマス	バイオオイル焚き	1,322	-

$$PT = IC \div (EC_{PJ} - EC_{BL}) \quad (7-2)$$

PT : 投資回収年数 [年]

IC : 設備投資額 [千円]

EC_{PJ} : 設備更新後(case1~6)におけるエネルギーコスト [千円/y]

EC_{BL} : 設備更新前(case0)におけるエネルギーコスト [千円/y]

7.2.2. 分析結果

(1) 炭素クレジット

炭素クレジットの算定結果を表7-3に示す。カーボン・ニュートラルとなるバイオマスの木質チップ焚き、木質ペレット焚き、バイオオイル焚きの削減量が大きく、24.1 [t-CO₂/y]となった。続いて、ヒートポンプが17.3 [t-CO₂/y]、ハイブリッド方式が8.3 [t-CO₂/y]という結果が得られた。高効率重油焚きは1.2 [t-CO₂/y]と最も少ない削減量となった。

木質チップ焚き、木質ペレット焚き、バイオオイル焚きの炭素クレジット売却益は、最大でそれぞれ 24,053 [円/y] (単価: 1,000 [円/t-CO₂])、36,080 [円/y] (単価: 1,500 [円/t-CO₂])、72,160 [円/y] (単価: 3,000 [円/t-CO₂])、96,213 [円/y] (単価: 4,000 [円/t-CO₂]) となること明らかになった。

表 7-3 炭素クレジット算定結果

区分	CO ₂		炭素クレジット売却益[円/y]			
	排出量	削減量	単価：1,000	単価：1,500	単価：3,000	単価：4,000
	[t-CO ₂ /y]	[t-CO ₂ /y]	[円/t-CO ₂]	[円/t-CO ₂]	[円/t-CO ₂]	[円/t-CO ₂]
従来型重油焚き	24.1	0.0	0	0	0	0
高効率重油焚き	22.9	1.2	1,172	1,758	3,515	4,687
ヒートポンプ	6.8	17.3	17,282	25,923	51,845	69,127
ハイブリッド方式	15.8	8.3	8,295	12,443	24,886	33,181
木質チップ焚き	0.0	24.1	24,053	36,080	72,160	96,213
木質ペレット焚き	0.0	24.1	24,053	36,080	72,160	96,213
バイオオイル焚き	0.0	24.1	24,053	36,080	72,160	96,213

(2) 投資回収年数

投資回収年数の算定結果を表 7-4、図 7-1 に示す。ヒートポンプの投資回収年数が最も短く、補助金なしで 7 年、補助金あり（補助率：1/2）で炭素クレジット売却益（単価：4,000 [円/t-CO₂]）を加味すると 3 年となることがわかった。一方、ヒートポンプ以外の技術は、補助金なしという条件下では投資回収年数が 15 年を超えてしまう。

図 7-2、図 7-3 は、比較ケース別に補助金の補助率率と炭素クレジット売却単価の違いによる投資回収年数の変化を分析した結果である。木質ペレット焚きを例としてあげると、補助金なしで 84 年、補助金あり（補助率：1/2）と炭素クレジット売却益（単価：4,000 [円/t-CO₂]）を考慮すると 19 年となることがわかった。また、投資回収年数が 15 年以下となる条件は、補助金あり（補助率：1/2）でかつ炭素クレジット売却単価：6,000 [円/t-CO₂]以上であることが明らかになった。

表 7-4 補助金および炭素クレジット売却益を考慮した投資回収年数

区分	エネルギーコスト		投資回収年数			炭素クレジットを加味した 投資回収年数 (単価：4,000 [円/t-CO ₂])		
	[円/y]	削減量 [y]	補助金	補助金	補助金	補助金	補助金	補助金
			なし	あり	あり	なし	あり	あり
			[年]	1/3	1/2	[年]	1/3	1/2
[年]	[年]	[年]	[年]	[年]	[年]	[年]	[年]	
従来型重油焚き	747,219	0	-	-	-	0	0	0
高効率重油焚き	710,817	36,402	37	-	-	33	22	17
ヒートポンプ	190,711	556,508	7	5	4	7	4	3
ハイブリッド方式	486,516	260,703	16	11	8	14	9	7
木質チップ焚き	495,842	251,377	62	41	31	44	30	22
木質ペレット焚き	671,431	75,788	84	56	42	37	25	19

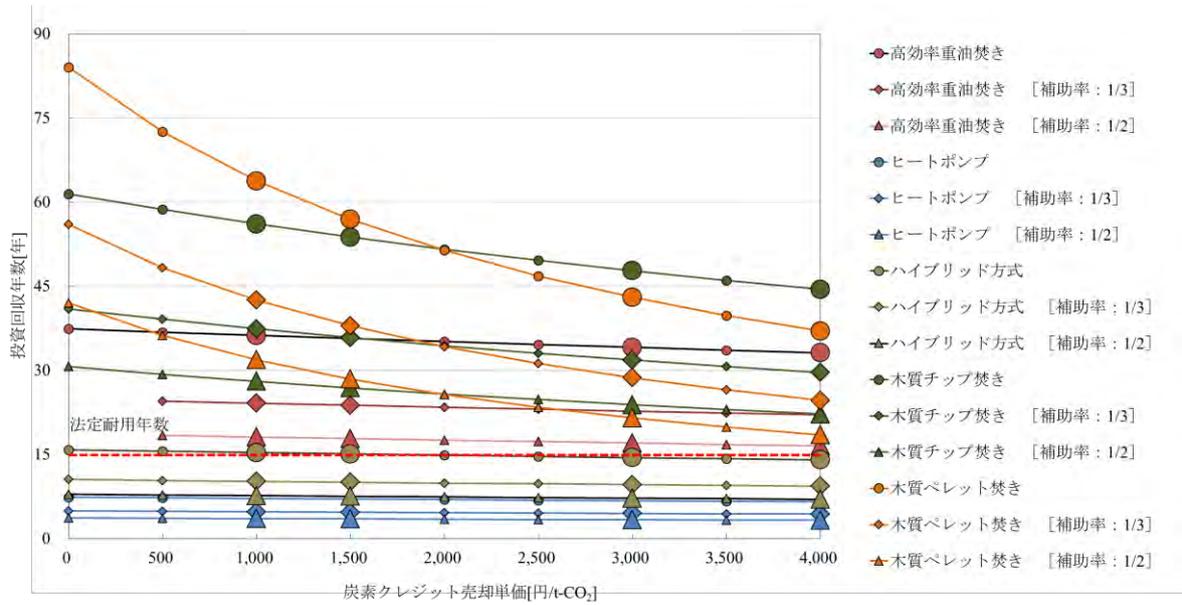
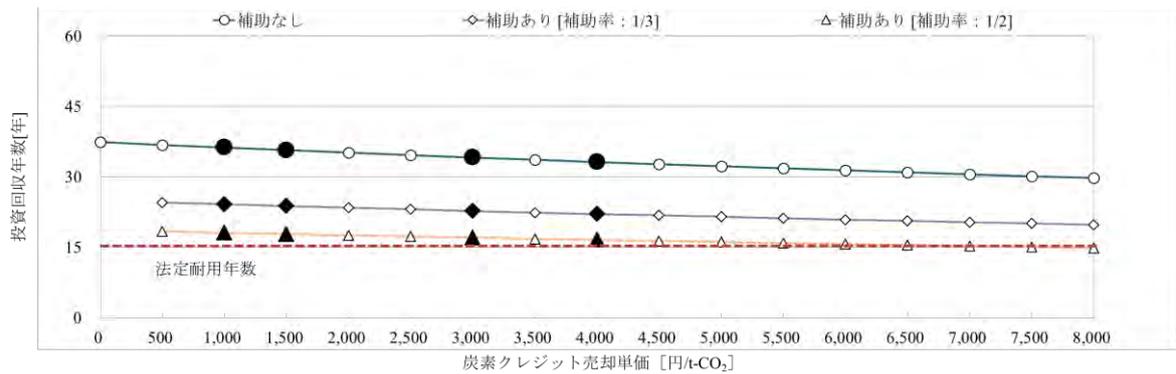
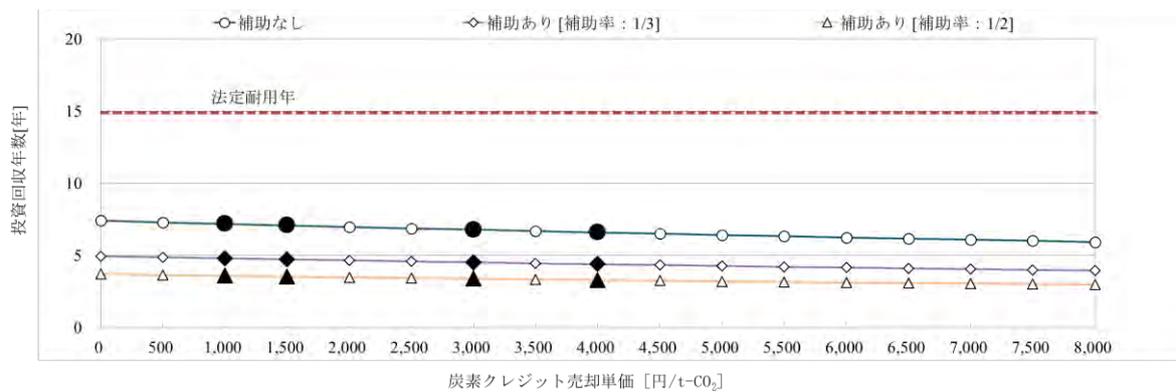


図 7-1 炭素クレジット売却単価に対する投資回収年数

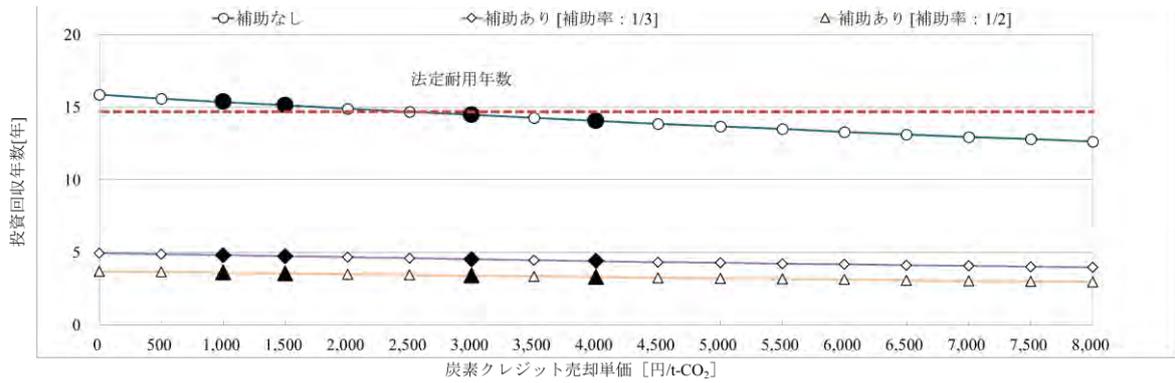


< case1 : 高効率重油焚き >

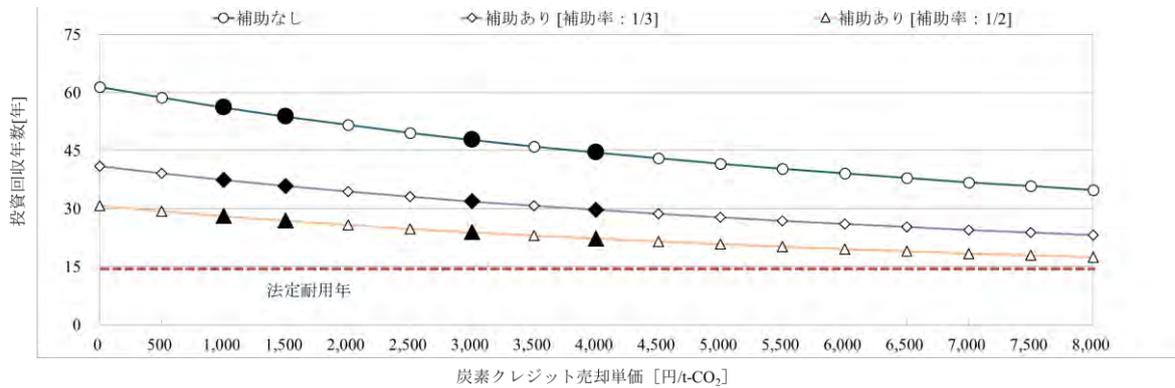


< case2 : ヒートポンプ >

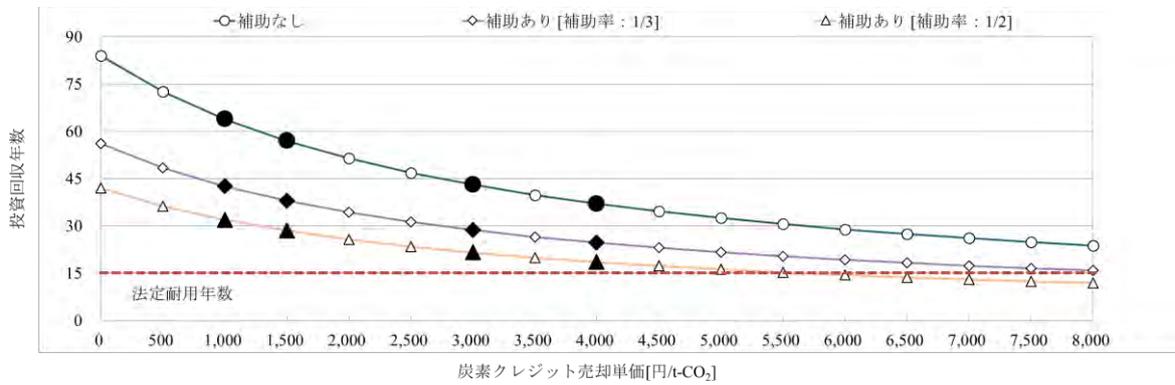
図 7-2 炭素クレジット売却単価に対する投資回収年数（比較ケース別）



< case3 : ハイブリッド方式 >



< case4 : 木質チップ焚き >



< case5 : 木質ペレット焚き >

図 7-3 炭素クレジット売却単価に対する投資回収年数 (比較ケース別)

7.3. 地域内の未利用バイオマス賦存量の分析

7.3.1. 地域循環可能な未利用バイオマスの検討方法

第6章では、加温設備更新の代替技術オプションの一つとして、非化石燃料への転換（バイオマス利用）技術を取り上げた。しかし、木質チップやペレットの原料となる木質系未利用バイオマス、および廃棄物系バイオマスである下水汚泥の種類や賦存量、有効利用可能量の把握には至っていない。一方で、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構は、国内各地域における各種バイオマスの賦存量を把握した上でエネルギー利用を促進することを目的として、賦存量などの推計結果¹⁾を公開している。これは、農林水産省統計や地域統計データを用いて簡易的な把握は可能であるが、推計の過程で全国一律とした原単位を用いている場合もあり、バイオマス種によっては、過大評価または過小評価される可能性がある。また、7.1.でも述べたが、特に下水汚泥はバイオガス化技術による有効利用量は明らかとなっているが、オイル化技術による有効可能量は明らかとなっていない。

そこで、最新の統計値や対象地域に応じた原単位を反映した精緻な推計をおこない、地域内の原料供給の可能性を考察する。

7.3.2. 木質系バイオマス資源の賦存量

(1) 地域内利用の優先度が高いバイオマス種の選定

比較ケースで設定した case4：チップ燃料，case5：ペレット燃料の主原料には、木質系バイオマスのなかでも未利用系資源に分類される林地残材，切捨間伐材，果樹剪定枝，タケの4種類と，廃棄物系資源に分類される国産製材廃材，外材製材廃材，建築廃材，新・増築廃材，公剪定枝の5種類の，合わせて9種のバイオマスが想定される¹⁾（図7-4）。本章の対象地域である有田圏域を対象に，バイオマス賦存量などの公開データ¹⁾を用いて地域内利用の優先度が高いバイオマス種を検討した（図7-5，図7-6）。

未利用系資源
・木質系バイオマス：林地残材，切捨間伐材，果樹剪定枝，タケ
・農業残渣：稲わら，もみ殻，麦わら，その他の農業残渣
・草本系バイオマス：ススキ，ササ

廃棄物系資源
・木質系バイオマス：国産材製材廃材，外材製材廃材，建築解体，新・増築廃材，公園剪定枝
・畜産ふん尿，汚泥：乳用牛，肉用牛，豚，採卵鶏，プロイラー，下水汚泥（濃縮汚泥），し尿・浄化槽余剰汚泥，集落排水汚泥
・食品系バイオマス：食品加工廃棄物，家庭系厨芥類，事業系厨芥類

図 7-4 バイオマス種の概要

■切捨間伐材 ■果樹剪定枝 ■プロイラーふん尿
■家庭系厨芥類 □その他

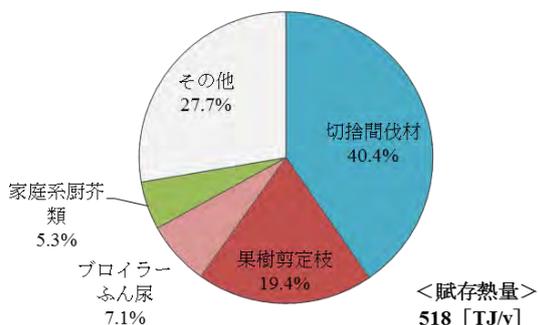


図 7-5 域内のバイオマス賦存熱量

■果樹剪定枝 ■家庭系厨芥類 ■タケ ■事業系厨芥類 □その他

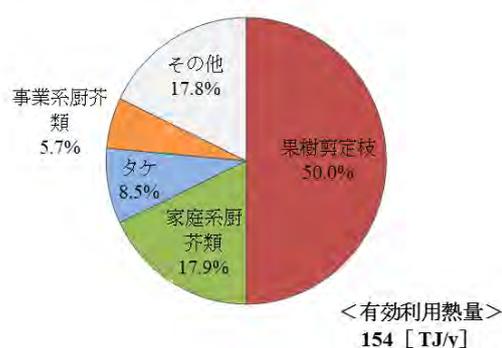


図 7-6 域内のバイオマス有効利用可能量

バイオマス資源としての利用の可否に関わらず、理論上 1 年間に発生する量、いわゆるバイオマス賦存量は域内全体で 518 [TJ/y]となった。そのうち切捨間伐材が全体の 40.4 %を占め、次に果樹剪定枝が 19.4 %となる。しかし、賦存量からすでにエネルギー利用などがなされている量を除き、さらに収集などの経済性を考慮した量（有効利用可能量）に着目すると、域内全体で 154 [TJ/y]となる。そのうちの 50.0 %を果樹剪定枝が占め、次にくるタケは 8.5 %にとどまる。切捨間伐材の賦存量が高いにも関わらず、有効利用可能量が低いのは、経済性を考慮すると収集可能な材が域内に多くは存在しないことが要因である。

したがって、域内で木質チップやペレットを製造する際に利用可能なバイオマス資源として、果樹剪定枝のポテンシャルが高いと考えられる。域内の果樹園内では、果樹剪定枝が野積みされている現状も確認されている。そこで、本節では果樹剪定枝に着目し、域内賦存量を詳細に推計する。

(2) 果樹剪定枝の賦存量の推計方法

剪定枝賦存量の推計に用いた域内の栽培面積（2011 年度）¹⁶⁾ を表 7-5 に示す。その他に分類される品目については、詳細情報の把握が困難であったため、推計からは除外している。この栽培面積に栽培面積あたりの果樹剪定枝発生原単位（温州みかん：4.1 [t/ha/y]，中晩柑：3.8 [t/ha/y]，うめ：2.8 [t/ha/y]）¹⁷⁾ を乗じ、発生量（湿潤重量）を推計した。さらに、この値に含水率：50 %¹⁸⁾ を適用して、乾物重量ベースの発生量を求めこれを賦存量とした。

次に、果樹剪定枝賦存量に利用可能率を乗じることで、利用可能量を算定した。先行研究¹⁾では全国 5 事例から得られた平均値：76.4 %を利用可能率としているが、本章では和歌山県の事例に基づいた原単位：90.0 %¹⁹⁾ と設定した。

賦存熱量は、賦存量に低位発熱量 11.5 [GJ/t]²⁰⁾ を乗じて求めた。その上でこれに利用可能率を乗じ、利用可能熱量を推計した。

表 7-5 果樹栽培面積および主要品目割合

品目	栽培面積 [ha]	割合 [%]
温州みかん	3,893	76
中晩柑	461	3
うめ	51	1
その他	717	14
合計	5,122	100

(3) 推計結果

果樹剪定枝の品目別バイオマス賦存量および有効可能利用量の推計結果を図 7-7 示す。

柑橘類由来の果樹剪定枝をバイオマス資源として有効利用できる量は、8,035 [DW-t/y]で、熱量換算すると 92,401 [GJ/y]となった。この剪定枝をエネルギー利用することを想定する場合は、ボイラなどの熱効率を考慮する必要がある。施設園芸で利用されている加温設備の熱効率を 80%²¹⁾としてエネルギー利用可能熱量を推計すると 73,921 [GJ/y]となった。地域内の施設園芸における栽培面積あたりの必要熱量を 42.8 [GJ/a/y]とすると、果樹剪定枝によって 1,729 [a]分の熱需要を賄える。これは、域内の花卉類栽培面積 (3,150 [a])²²⁾の 55%に相当する。なお、栽培面積あたりに必要な熱量は、第 6 章で得られた実態調査結果に基づいて、園芸施設 3 箇所の平均値：1.1 [kl/a/y]に重油発熱量 39.1 [GJ/kl]²³⁾を乗じて求めた。

果樹剪定枝の利用をスプレーギクの施設園芸に限定すれば、2009 年における栽培面積は 900 [a]²²⁾192%分の熱量を供給可能であるとわかった。

以上のことから、域内の果樹剪定枝をバイオマス燃料化できれば、域内の花卉施設園芸を賄うことが可能であることが明らかになった。

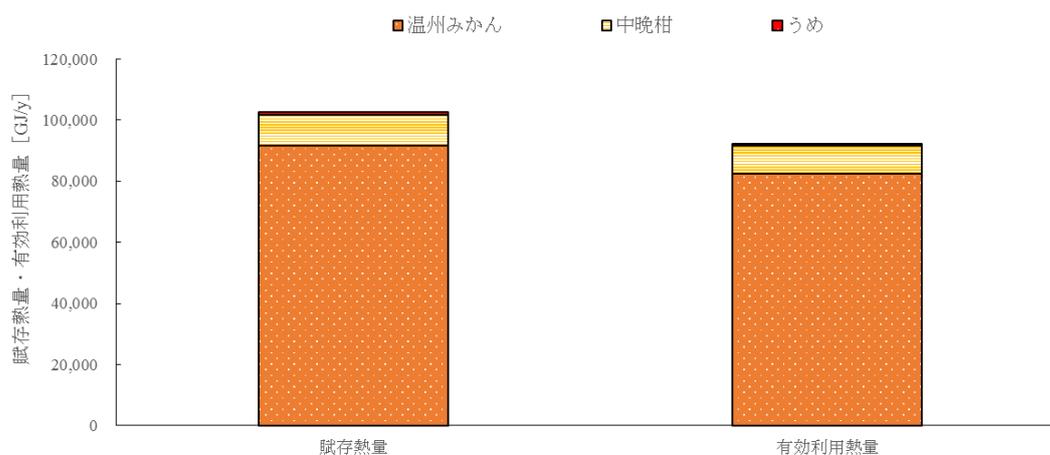


図 7-7 域内果樹剪定枝のバイオマス賦存熱量・有効利用可能熱量

7.3.3. 廃棄物系バイオマス資源の賦存量

(1) 地域内利用の優先度が高いバイオマス種の選定

6.4.1.の比較ケースで設定した case6：バイオオイル燃料の原料には、都市系廃棄物バイオマスである下水汚泥を想定している。前項と同様に、本章の対象地域である有田圏域を対象とし、公開データ¹⁾を用いて、地域内利用の優先度が高いバイオマス種を検討した。その結果、下水汚泥は賦存熱量、利用可能熱量ともに 21.6 [GJ/y]となった。これは、域内の全バイオマス賦存熱量：518 [TJ/y]の 0.1 %に満たない。ただし、使用した公開データは 2009 年度の下水汚泥発生量データをもとに推計されていることもあり、下水道普及率の向上に伴う将来の下水汚泥発生量増加を考慮したポテンシャル評価ができていない。また、すでに述べたが先行研究ではバイオガス化技術によって得られる熱量を賦存熱量としているため、この熱量をエネルギー利用する場合には、エネルギー需要側もバイオガス利用型の設備を導入する必要がある。施設園芸では重油焚き加温設備が一般的であるため、ガス利用型設備の導入事例は少ない。そのため、全産業で汎用性が高いバイオオイルと施設園芸の重油焚き加温設備の親和性が高いことからオイル化技術に着目する。

まず、下水処理場がオイル化技術を導入した場合のエネルギー利用可能量を推計する。下水汚泥のオイル化技術は、中小規模を含めたすべての下水処理場が個々にその導入を進めることは現実的ではないといわれている¹⁵⁾。域内の下水処理場は、特定環境保全公共下水道の広港浄化センターと 2009 年に供用開始された単独公共下水道の吉備浄化センターで、処理人口はそれぞれ 340 人、4,470 人となり小規模なものとなる。そのため、域内の下水処理場ではバイオオイルの生成は見込めないため、和歌山県内で代表的な都市部となる和歌山市の下水処理場を取り上げた。すなわち、都市部から農山村部である有田圏域の施設園芸へのバイオオイル供給可能量（バイオオイル生成可能量）を推計する。その際、地方都市では下水道インフラの整備が現在も進んでいるため、今後下水道の普及率が向上に伴って下水汚泥の増加が見込まれる影響を考慮したうえで、将来のオイル生成可能量を推計する。

なお、表 6-26 で用いた case6：バイオオイルの GHG 排出原単位は、輸送プロセスを含んだシステム境界である。この原単位は、バイオオイル生成拠点となる下水処理場とオイル輸送先の施設間距離 17 [km]、44 [km]、58 [km]の 3 箇所の消費先への運搬を考慮した前提条件となっている¹⁵⁾。ここでは和歌山市の下水処理場を取り上げているが、和歌山市（代表地：北部 STP）と有田川町（代表地：有田川町役場）の距離は最大でも 25 [km]であり、原単位の評価範囲の前提条件を満たすものである。（図 7-8）施設間の距離は、インターネット上のオンライン地図サービスの google マップを利用し、各施設間の住所情報²⁴⁾、²⁵⁾から距離を求めた。

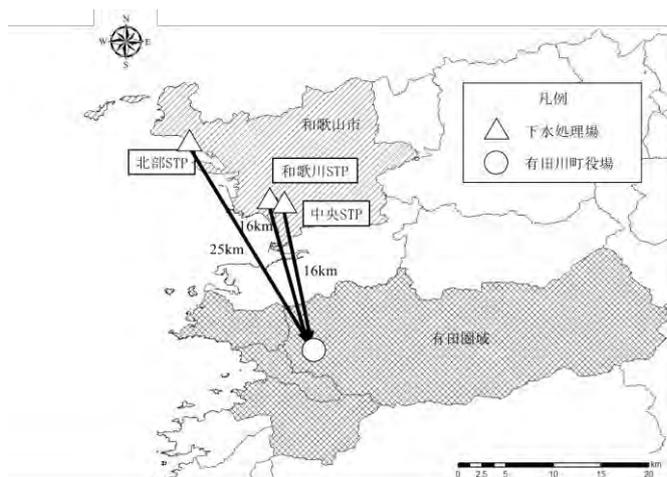


図 7-8 下水処理場とオイル供給先地域の位置関係

(2) 推計方法

1) 和歌山市の下水処理場の概要

和歌山市では、和歌川 STP、中央 STP および北部 STP の 3 箇所の下水処理場で下水処理している。下水処理場のなかでも、和歌川終末処理場は、工場からの汚水受入割合が高いという下水整備の特徴がある²⁶⁾。推計する際にはこの点に留意する必要がある。

和歌山市の生活排水基本計画²⁷⁾の中で計画・予測されている 2020 年までの公共下水道人口を図 7-9 に示す。2010 年の行政人口 36 万 9,400 人が 2020 年に 34 万 2,720 人となり、7.22% 減少する。生活排水処理率では、2010 年に 50.9% だったものが 2020 年には 70.9% に達し、公共下水道人口は 2010 年の 10 万 2,290 人に対し 2020 年に 13 万 104 人となり、27.2% 増加する計画である。つまり、行政人口は減少するが、公共下水道人口が増加することを踏まえて推計する必要がある。

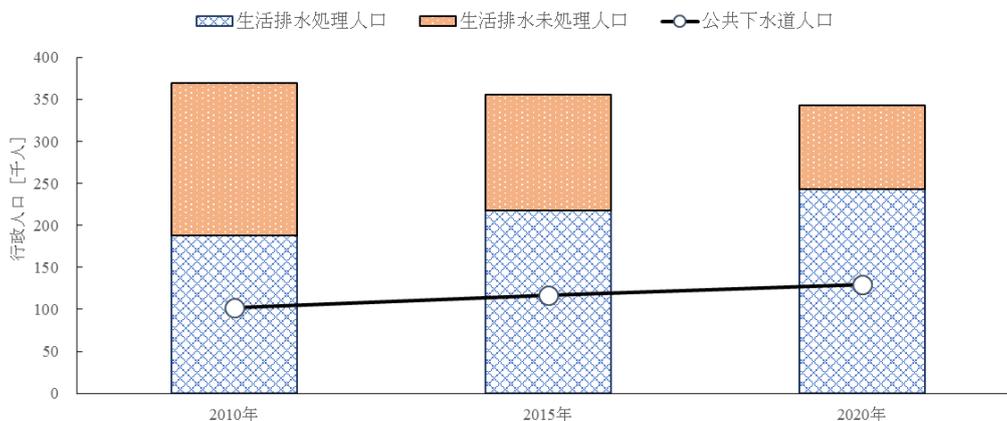


図 7-9 公共下水道人口の推移

2) 脱水汚泥量の推計方法

脱水汚泥量の基本的な推計方法として、一人あたりの脱水汚泥発生原単位を作成し、これに処理人口を乗じて求める。しかし、和歌山市の場合は、工場からの汚水受入割合が和歌川 STP で高く、原単位を用いた推計方法では高い値となる可能性がある。そこで、生活由来と工場由来の脱水汚泥発生量にわけて、以下のように推計した。

生活由来の脱水汚泥発生量は、2010 年度版の下水道統計²⁸⁾から和歌山市における公共下水道人口一人あたりの脱水汚泥発生原単位 (1.69×10^{-2} [t-DS/人/y]) を作成し、これに 2010~2020 年度の公共下水道人口²⁷⁾ を乗じることで求めた。原単位の作成には、工場排水の受入割合が高い和歌川 STP を除いた中央 STP と北部 STP の統計値を用いた。工場由来の脱水汚泥発生量については、先行研究²⁹⁾に基づき、和歌川 STP で処理されている工場などからの流入水が今後も一定量流入すると仮定して、2009 年の値 740 [t-DS/y]を用いた。

$$q = Q_{2010} \div P_{2010} \quad (7-3)$$

q : 一人あたりの脱水汚泥発生源単位 [t-DS/y/人]

Q_{2010} : 2010 年における年間脱水汚泥発生量 [t-DS/y]

P_{2010} : 2010 年における i 処理区の人口推計値 [人]

$$Q_t = P_t \times q \quad (7-4)$$

Q_t : t 年の年間脱水汚泥発生量 [t-DS/y/人]

P_t : t 年の公共下水道人口 [人]

q : 一人あたりの脱水汚泥発生源単位 [t-DS/y/人]

(3) バイオオイル生成可能量の推計方法

バイオオイル生成量は、生活由来と工場由来の脱水汚泥発生量の和にバイオオイル回収原単位 : 0.230 [kl/DS-t] を乗じて推計した。次に利用可能熱量は、バイオオイル回収量に低位発熱量 30.1 [GJ/kl]²⁹⁾ を乗じて求めた。

$$P_{bio-oil} = (Q_t + Q_{industry}) \times Unit_{bio-oil} \quad (7-5)$$

$P_{bio-oil}$: バイオオイル生成可能量 [kl/y]

Q_t : t 年の年間脱水汚泥発生量(生活由来) [t-DS/y]

$Q_{industry}$: t 年の年間脱水汚泥発生量(工場由来) [t-DS/y]

$Unit_{bio-oil}$: バイオオイル回収量 [kl/t-DS]

$$\text{利用可能熱量} = P_{bio-oil} \times H_{MV_{bio-oil}} \quad (7-6)$$

利用可能熱量 : バイオオイル利用可能熱量 [GJ/y]

$P_{bio-oil}$: バイオオイル生成可能量 [kl/y]

$HMV_{bio-oil}$: バイオオイル発熱量 [Gj/kl]

(4) 推計結果

バイオオイル生成可能量の推計結果を表 7-6 に示す。下水汚泥由来のバイオオイルの回収可能量は、下水道の普及率の向上に伴い、2010 年から 2020 年にかけて 19 %増加となる。また、2020 年の脱水汚泥発生量は 2,944 [t-DS/y]、利用可能熱量は 20,381 [GJ/y]となった。このバイオオイルをエネルギー利用することを想定する際には、ボイラなどの熱効率を考慮する必要がある。施設園芸で利用されている加温設備の熱効率：80 %²¹⁾ としてエネルギー利用可能熱量を推計すると、16,305 [GJ/y]となった。地域内の施設園芸における栽培面積あたりの必要熱量を 42.8 [GJ/a/y]とすると、381[a]分の熱需要を賄うことが可能となる。これは、域内の花卉類栽培面積 (3,150 [a])²²⁾ の 12 %に相当する。

バイオオイルの利用をスプレーギクの施設園芸に限定すれば、2009 年における栽培面積は、900 [a]²²⁾ の 42 %分の熱量を供給可能であることがわかった。

以上のことから、バイオオイルを都市域から農山村地域である対象地域へ供給可能となったとしても、域内の花卉施設園芸すべてを賄うことは困難であることが明らかになった。

表 7-6 バイオオイル生成可能量の推計結果

項目		2010 年	2015 年	2020 年
脱水汚泥発生量(生活由来)	[t-DS/y]	1,733	1,979	2,204
脱水汚泥発生量(工場由来)	[t-DS/y]	740	740	740
総脱水汚泥発生量	[t-DS/y]	2,473	2,719	2,944
バイオオイル生成可能量	[kl/y]	569	625	677
バイオオイル利用可能熱量	[GJ/y]	17,119	18,823	20,381

7.4. 本章の結論

本章では、施設園芸で最もGHG排出量に与える影響が大きいプロセスを明らかとし、そのプロセスの省エネルギー化および低炭素化に関して代替技術オプションを提案した。そして、代替する技術オプションごとにおけるGHG削減ポテンシャルを明らかとした上で、国などからの補助金や制度を活用した際の経済性評価を行った。さらに、地域資源活用ポテンシャルの観点から、代替技術オプションで提示したバイオマス技術の導入可能性について検討し、施設園芸における低炭素化と経営基盤の強化に効果的かつ効率的な技術選択、および制度設計に関して総合的に考察した。本章で得られた主要な結果をまとめると、以下のとおりである。

- ・ 国などからの補助金制度などを活用し、最新の高効率技術であるヒートポンプへ更新する方策が最も投資効率に優れる一方、地域未利用バイオマスを利用する技術では、補助金制度の活用や炭素クレジット売却益を加味しても投資回収に最短で19年を要することが明らかとなった。また、投資回収が15年以下となるには、設備投資額の半分以上が補助され、かつ炭素クレジット売却単価が6,000 [円/t-CO₂]以上に設定される必要があることも判明した。
- ・ 地域内の果樹剪定枝をバイオマス資源としてのエネルギー利用可能熱量は73,921[GJ/y]となった。これによって、域内の花卉施設園芸面積の55 %相当を賄える。近郊都市部の下水汚泥をバイオマス資源としてのエネルギー利用可能熱量は16,305[GJ/y]となり、域内の花卉施設面積の12 %相当を賄える。
- ・ 木質・廃棄物バイオマスを用いた導入技術の燃料として、最も優先的に取り組むべきバイオマス種は果樹剪定枝である。今後、果樹剪定枝を燃料源としてチップ化またはペレット化する中間処理工場が域内に設置され、農山村地域のエネルギー拠点として政策的に位置づけられることが望まれる。また、この地域では柑橘類の栽培を核とした花卉栽培との複合経営が多いことから、農業従事者が自己所有する果樹園から発生する剪定枝をチップ化またはペレット化し、花卉栽培の施設園芸に投入するといったこともこの地域では実現可能と考えられる。
- ・ 中小規模の下水処理場へのオイル化技術の導入が現実的ではないため、農山村地域においては、近郊都市部の下水処理場で生成されたバイオオイルを受け入れたとしても、地域内のすべてのエネルギー需要を賄うことは困難である。すなわち、バイオオイルを介した都市部と農山村部との連携システムを検討するよりも、農山村地域の地域特性に応じた森林系バイオマスを最大限に活用するシステム構築を検討することが重要である。そのことから都市部は都市代謝施設を核とした低炭素型都市の形成を、農山村地域は地域に賦存する木質系バイオマスを軸とした都市の形成を考える必要性が示唆された。
- ・ 炭素クレジット売却益や補助金を考慮した投資効果の分析結果も含めて考察すると、地域バイオマス資源を燃料として利用する技術への更新は、温暖化対策面では効果的であるこ

とが明らかとなったが、経済面では投資回収が長期化するため、現実的には投資回収することが困難である。しかし、炭素クレジットの市場価値が高まり、売却単価が上昇すれば、経済的な実行可能性も改善することとなる。また、域内循環可能なバイオマス資源を燃料にして生産された農作物に対する価格プレミアムが、消費者に積極的に認知・評価されれば、施設園芸における低炭素投資も促進され、経営基盤の安定と強化が図られると期待される。今後、こういった点に踏み込んだ制度設計や政策誘導が必要となる。

なお、明日香³⁰⁾によると、脱炭素社会や発展途上国の持続的発展への貢献など、プロジェクトの種類や炭素クレジットがもつ「質」にこだわるという考え方は根強くあり、まだ規模は小さいものの、高価格・高品質のプレミアム商品も市場に出始めているとしている。例えば、環境NGOであるWWF（自然保護基金）は、ゴールド・スタンダードという独自のクレジット評価の基準^{31) 32)}を設定しており、ゴールド・スタンダードの「お墨付き」をもらったクレジットを市場価格よりも高値で取引された実績がある。このような、炭素クレジットが持つ質が、価格プレミアムとしてクレジット価格に影響するよう今後の更なる市場の活性化が期待される。

第 7 章の参考文献

- 1) 新エネルギー・産業技術総合研究機構：バイオマス賦存量・有効利用可能量の推計（参照元：<http://app1.info.nedo.go.jp/biomass/>，最終閲覧：2014年2月11日）。
- 2) 東京都主税局：別表第1 機会及び装置以外の有形減価償却資産の耐用年数表：（参照：http://www.tax.metro.tokyo.jp/shisan/info/hyo01_01.pdf，最終閲覧：2015年9月25日）。
- 3) 経済産業省，環境省，農林水産省：国内クレジット制度（国内排出削減量認証制度） 排出削減方法論について（参照元：http://jcdm.jp/process/data/methodology_v8.pdf，最終閲覧：2014年2月11日）。
- 4) 経済産業省，環境省，農林水産省：国内クレジット制度（国内排出削減量認証制度）（参照元：<http://jcdm.jp/>，最終閲覧：2014年2月11日）。
- 5) 低炭素投資促進機構：温室効果ガス排出削減量連動型中小企業グリーン投資促進事業（参照元：http://www.teitanso.or.jp/green_top，最終閲覧：2014年2月11日）。
- 6) 低炭素投資促進機構：平成23年度温室効果ガス排出削減連動型中小企業グリーン投資促進事業 公募要領（参照元：http://www.teitanso.or.jp/resource/1360632161000/docsGreenH23HPResource/h23_koboyouryou.pdf，最終閲覧：2014年1月27日）。
- 7) 低炭素投資促進機構：平成22年度温室効果ガス排出削減連動型中小企業グリーン投資促進事業 公募要領（1次公募）（参照元：http://www.teitanso.or.jp/resource/1346309373000/docsGreenH22HPResource/h22_koboyoryo1.pdf，最終閲覧：2014年2月11日）。
- 8) 低炭素投資促進機構：平成24年度温室効果ガス排出削減連動型中小企業グリーン投資促進事業 公募要領（2次公募）（参照元：http://www.teitanso.or.jp/resource/1354083787000/docsGreenH24_01_HPResource/h24_niji_koboyouryou.pdf，最終閲覧：2014年2月11日）。
- 9) みずほ情報総研株式会社：平成25年グリーン貢献量認証制度等基盤整備事業（国内クレジット制度等に係る制度運営事業）事後報告書，2014年（参照元：http://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2014fy/E004192.pdf，最終閲覧：2015年9月24日）。
- 10) 千葉県：施設栽培におけるヒートポンプの利用について（参照元：<http://www.pref.chiba.lg.jp/ninaite/network/h21-fukyuu/heatpump.html>，最終閲覧：2014年2月11日）。
- 11) 宮城県登米市：登米市地域新エネルギー重点ビジョン報告書，2011年（参照元：<http://www.city.tome.miyagi.jp/kankyo/documents/shinenejyutenhonpen.pdf>，最終閲覧：2014年2月11日）。
- 12) 経済産業省資源エネルギー庁：石油製品価格調査（参照元：<http://www.enecho.meti.go.jp/info/statistics/sekiyukakaku/sekiyukakaku3.htm>，最終閲覧：2014年2月11日）。
- 13) 関西電力株式会社：主な電気料金メニュー 低圧電力（参照元：<http://www1.kepco.co.jp/ryoukin/teitsuu.html>，最終閲覧：2013年3月17日）。
- 14) 株式会社森のエネルギー研究所：木質バイオマスボイラー導入指針（参照元：http://www.mori-energy.jp/pdf/lca_boilershishin.pdf，最終閲覧：2014年2月11日）。
- 15) 山本祐吾，古野間達，吉田登，盛岡通：下水汚泥処理における技術選択と施設更新による温室効果ガス削減効果のライフサイクル評価，土木学会論文集 G（環境），Vol.68，No.5，pp.1_137-1_146，2012年
- 16) 和歌山県：和歌山の果樹 果樹農業のすがた（参照元：http://www.pref.wakayama.lg.jp/prefg/070300/kajupanf/documents/h25kaju_zentai.pdf，最終閲覧：2014年2月11日）。
- 17) 佐野貴司・三浦秀一：木質バイオマスエネルギーの地域別利用可能性に関する研究 第 22 回エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集.p329-334，2003年。
- 18) 山下茂樹ほか：果樹剪定枝のバイオマス利活用事業構想検討.農業土木学会大会講演会講演要旨集.2006.400-401，2008年。
- 19) 和歌山県：和歌山県木質系バイオマスエネルギー利用調査 報告書，2005年。
- 20) 高月紘：都市内分散型エネルギー需給技術の温暖化抑制効果と都市環境影響に関する研究平成 11 年度報告書，1999年。
- 21) 株式会社森のエネルギー研究所：木質バイオマス LCA 評価事業報告書，2012年（参照元：http://www.mori-energy.jp/pdf/lca_hokokusho.pdf，最終閲覧：2014年2月11日）
- 22) ありだ農業協同組合：JA ありだ第 2 次農業振興計画 一勝ち組産地を目指してー
- 23) 経済産業研究所：総合エネルギー統計の解説／2007年度改訂版，2009年（参照元：<http://www.rieti.go.jp/users/kainou-kazunari/download/pdf/2007EBXIGRF.pdf>，最終閲覧：2013年2月11日）
- 24) 国土交通省：国土数値情報ダウンロードサービス下水道関連施設データ（昭和 62 年度 地域 5035，5135）（参照元：<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>，2014年2月11日）。
- 25) 国土交通省国土制作局国土情報課：国土数値情報ダウンロードサービス公共施設データ（昭和 62 年度 地域 5035，5135）（参照元：<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>，2014年2月11日）。

- 26) 和歌山市：和歌山市の終末処理場（参照元：<http://www.city.wakayama.wakayama.jp/gesuidoubu/02/shorijyou/shorijyou.htm>，最終閲覧：2014年2月11日）。
- 27) 和歌山市：和歌山市一般廃棄物処理基本計画（生活排水処理基本計画編）（参照元：http://www.city.wakayama.wakayama.jp/menu_3/gomi/pdf/kihonkeikaku/haisui.pdf，最終閲覧：2014年2月11日）。
- 28) 社団法人日本下水道協会：平成22年度版下水道統計，2012年。
- 29) 三島一仁，山本祐吾：ごみ焼却熱由来の発電電力を活用した下水汚泥バイオオイル化による温室効果ガス削減効果の評価 土木学会論文集 G（環境）Vo.68, No.6, pp.II_245-II_253, 2012年。
- 30) 明日香壽川：地球温暖化対策におけるクリーン開発メカニズムの現状および2013年以上の将来枠組みにおける役割，環境情報科学，Vol.34, No.3, pp.37-48, 2005年。
- 31) 大沼あゆみ，山本雅資：プレミアムつきのカーボンクレジットについて -WWFのゴールド・スタンダードとカーボンマーケット，環境情報科学，Vol.36, No.3, pp.55-60, 2007年。
- 32) WWF：ゴールド・スタンダード（参照：<http://www.wwf.or.jp/activities/climate/cat1297/cat1299/>，最終閲覧：2015年12月11日）。

第8章 施設園芸農家による過去の CO₂ 削減努力が炭素クレジット制度活用時の便益に及ぼす影響の分析

8.1. 緒言

地球温暖化防止に向けて、低炭素型設備に対する投資の促進が政策課題の一つになっている。京都議定書目標達成計画や自主行動計画などに基づいて、主に大企業では低炭素設備の導入が前進している。それに対して、大企業に比べるとこれまで温暖化対策に取り組む機会が少なかった中小企業や農家などでは、低炭素投資による CO₂ 削減ポテンシャルは大きいとされている¹⁾。中小企業などで温暖化対策が進みづらい主な理由に、投資費用が大きいことや費用削減につながらないことなど、資金面での制約が挙げられており¹⁾、その対応として国内クレジット制度²⁾や J-VER 制度³⁾、中小企業グリーン投資促進事業⁴⁾などの政策的支援がなされてきた。

この国内クレジット制度や J-VER 制度は、CO₂ 削減対策に遅れが見られる中小企業などの事業者に対して、省エネルギー設備の導入や森林吸収プロジェクトなど、温室効果ガスの排出削減や吸収を行う事業の初期投資などの費用を補助するとともに、削減もしくは吸収された CO₂ 排出量をクレジットとして権利化し、大企業などに売却できるようにするものである。これら 2 つの制度（以下、「旧制度」という）は 2012 年度末をもって運用を終了しており、2013 年度以降は旧制度を統合して利便性の向上を目指す J-クレジット制度⁵⁾の運用が開始されている。

第 2 章でも述べたが国内クレジット制度では、クレジット認証量は設備更新前後の実質的な CO₂ 削減量ではなく、既設設備の初期性能値を基準にして求めた CO₂ 削減量に沿って算定される枠組みとなっている。したがって、直近の設備更新の時期や設備性能によって認証量に差が生じるため、過去に自主的な設備更新に取り組んできた事業者ほど、削減量が小さく見積もられることになる。この制度では、2008 年 4 月 1 日から同年 10 月 20 日までに開始された排出削減事業もクレジット認証対象とする配慮がなされた²⁾ものの、その期間は限定的であり、それ以前の早期実施者への配慮はなされなかった。この点に関しては、J-クレジット制度の規程案に対するパブリックコメント⁶⁾でも、こうした早期実施者が市場競争で不利にならないように配慮すべきとの意見が出されている。

また、既設設備の扱いに関する同様の議論としては、再生可能エネルギーの固定価格買取制度（FIT：Feed-in Tariff）の設計の際にもなされている。例えば「（事業者の）先行導入努力を評価し、何らかの救済措置を講ずべき」⁷⁾との意見も出された。最終的に移行や買取に条件がつけられたものの、再生可能エネルギー発電設備導入の早期実施者にも配慮した設備認定基準が設けられるに至っている。今後、中長期的な温暖化対策として低炭素設備・機器の普及をより一層推し進めなければならない中で、こうした議論は関連制度の設計に際してこれから

も起こりうることである。

しかし、国内クレジット制度や FIT に関する先行研究の多くは、枠組みの解説や事例紹介にとどまっており、早期の自主的な取り組みの有無が制度活用時にどのくらい効果の違いとして現れるのかという、いわば生じうる不公平な状況やその程度を定量的に明らかにした研究は見られない。

本章では、施設園芸農家における加温設備の更新を対象に、過去の自主的な CO₂ 削減努力の違いが、クレジット制度を活用して設備を更新した際に得られる経済的なメリットに及ぼす影響を定量化し、早期実施者に配慮した制度設計の基礎的知見を得ることを目的とする。図 8-1 に本章の枠組みを示す。

具体的には、CO₂ 削減の取り組み方として、1965～1995 年の期間における重油焚き加温設備への更新パターンを複数作成する。その上で、そこで必要となる熱量と燃料消費量に基づいて、2009 年までの累積 CO₂ 排出量を推計する。次に、すべてのパターンが 2010 年にクレジット制度を活用して設備更新を行うものとして、その際の代替技術オプションとしてヒートポンプやバイオマス利用加温設備などを設定する。本章ではこの技術選択を更新ケースとし、ケースごとに CO₂ 削減量、エネルギーコスト削減額、投資回収年数を算定する。以上から、過去の CO₂ 削減努力の違いによる影響を比較評価する。

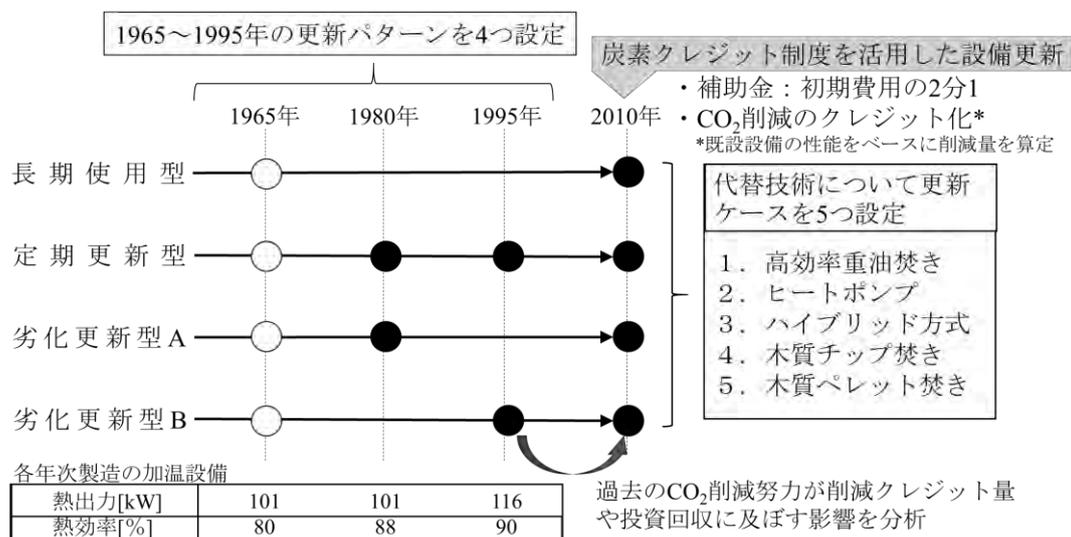


図 8-1 本章の枠組み

最後に、早期実施者に配慮した制度の設計に向けた示唆を得るために、各更新パターンが最も設備更新に消極的なパターンに比して不利とならない措置を概括的に把握する。ここでは、初期費用の補助額および削減クレジットの取引単価を政策変数として扱い、投資回収年数が同

一になる条件を導出する。

なお、本章では、利潤最大化を基本的な行動原理とする経済主体である施設園芸農家を対象としているが、その事業者による設備更新の第一義的な目的が収益性の向上にあるのか、CO₂削減にあるのかは問わない。これは、例えば FIT の設備認定において、それが経済的な利得の獲得を狙ったものであるのか、環境貢献意識に基づくものであるのかを区別しない（できない）のと同じ理由による。国内の炭素クレジット制度では所定の要件を満たす事業であれば審査・認証の対象とされるが、そこに環境貢献意識の有無や多寡は含まれていないことから、設備更新の目的を考慮しないことは制度上の課題を分析、議論することを妨げるものではないといえる。

本章の構成は次のとおりである。第 2 節では、第 6 章と第 7 章で得られた施設園芸での成果モデル施設を設定し、設備の更新パターンを設計する。第 3 節では、更新パターンと更新ケース別に炭素クレジット認証量およびエネルギーコスト削減額を推計する。更新ケースとして、重油焚き加温設備の代替技術であるヒートポンプやバイオマス利用加温設備などを取り上げる。第 4 節では、早期実施者が不利を被らないようにするためには、どの程度の追加補助が必要となるか把握する。そして、第 5 節に本章で得られた結論を示す。

8.2. 設備更新パターン別の CO₂ 排出量の設定

8.2.1. 対象とするモデル施設

本章では、第 6 章でエネルギー管理の実態を把握したスプレーギクの園芸農家をモデル施設として設定し、そこで設備更新が行われるものとする。表 8-1 にモデル施設の諸元を示す。国内の施設園芸では、施設面積が 50 [a]未満の中小規模な経営体が全体の 88.7%と大部分を占めており⁸⁾、特に野菜や花卉の 1 戸あたり平均面積は 4.4~5.8 [a]である⁹⁾。モデル施設が有する 3 つのサイトの平均値をとると、その施設面積は 8.2 [a]と全国平均よりやや大きくなるが、すべてのサイトが二棟であることを考慮すると、一棟あたりの施設面積はおよそ 4.1 [a]である。したがって、施設面積に着目すれば、モデル施設は一般的であると位置づけることができる。また、そこで使用されている重油焚き加温設備は累積販売台数で全国シェアの約 70%を誇るメーカー製であり、かつ冬期（主に 11 月~3 月末頃）のハウス加温に稼働させるといった、ごく一般的な使用状況である。つまり、加温設備の種類や使用状況においても、モデル施設は同規模のそのほかの施設を代表しうるものである。

表 8-1 モデル施設の諸元

モデル施設	棟数	施設面積 [a]	作付け回数 [回/y]	出荷本数 [本/y]	A重油投入量（加温） [kL/ y]
Nサイト	2	6.9	4	111,780	7.7
KサイトA区画	2	7.1	3	92,210	7.8
KサイトB区画	2	10.5	4	148,550	11.2

8.2.2. 更新パターンの概要

1965年から重油焚き加温設備の運用を開始し、法定耐用年数である15年¹⁰⁾ごと、すなわち1980年と1995年に設備更新の機会があると仮定して、計4つの更新パターンを設計した（表 8-2）。それぞれの年に導入するのは、その年に製造された重油焚き加温設備とする。

更新パターンの第一は、1980年にも1995年にも設備更新せず、1965年に導入した設備を使い続ける「長期使用型」である。第二には、1980年と1995年の両方に設備更新を行う「定期更新型」である。第三、第四の更新パターンは、1980年にのみ設備更新する「劣化更新型A」と、1995年にのみ設備更新を行う「劣化更新型B」とした。

表 8-2 更新パターンの分類

更新パターン	1965 年	1980 年	1995 年
長期使用型	導入	更新なし	更新なし
定期更新型	導入	更新あり	更新あり
劣化更新型 A	導入	更新あり	更新なし
劣化更新型 B	導入	更新なし	更新あり

8.2.3. 推計方法

設計した更新パターンごとに、1965～2009 年までの累積 CO₂ 量を算出する。表 8-3 に、モデル施設における各サイトの燃料使用量および必要熱量の平均値を、表 8-4 に製造年度別の加温設備の性能を示す。性能はメーカーが公表している製造年度別の性能一覧¹⁴⁾に基づいて、モデル施設の規模に対応したものを記載している。

過去の CO₂ 削減努力の違いを累積 CO₂ 排出量として定量的に把握するために、加温設備の経年劣化を考慮する。表 8-5 に示した 2013 年における製造年度別の熱効率変化¹⁴⁾を用いて、製造年度ごとの劣化関数を表す近似直線を求めた（図 8-2）。この表 8-5 の値は、製造年度から 2013 年まで継続使用した場合の経年劣化を示している。例えば、1965 年で 69.5%となっているのは、1965 年当時は 80%だった熱効率が、経年劣化により 2013 年度では 69.5%まで性能が落ちているということを表している。得られた近似式は、式(8-1)、(8-2)、(8-3)のとおりである。

表 8-3 モデル施設の燃料投入量および必要熱量

A重油の年間投入量 [kl/y]	年間必要熱量 [GJ/y]
8.9	347.1

表 8-4 加温設備の性能表¹¹⁻¹³⁾

製造年度	熱出力 [kw]	熱効率 [%]	燃料種
1965	101	80	A重油
1980	101	88	
1995	116	90	

表 8-5 2013 年における製造年度別の熱効率変化

2013 年における熱効率[%]								
1965 年 製造	1966 年 製造	1967 年 製造	1979 年 製造	1980 年 製造	1981 年 製造	1995 年 製造	1996 年 製造	1997 年 製造
69.5	69.7	69.9	80.5	80.8	81.0	86.1	86.3	86.5



図 8-2 加温設備の経年劣化

$$Te_{1965} = -0.22 \times Py + 80 \quad (8-1)$$

$$Te_{1980} = -0.23 \times Py + 88 \quad (8-2)$$

$$Te_{1995} = -0.22 \times Py + 90 \quad (8-3)$$

Te : 加温設備の熱効率 [%]

Py : 使用年数 [年]

8.2.4. 推計結果

表8-6に推計結果を示す。CO₂削減量および削減率は、長期使用型を基準にしている。累積のCO₂排出量は、設備更新の回数が一番多い更新パターンである、定期更新型で最小となった。また、更新回数が同じ1回である劣化更新型Aと劣化更新型Bでは、更新時期の早い劣化更新型Aのほうが小さくなった。これは、表8-4に示したように、1980年から1995年の熱効率変化に比べて、1965年から1980年の変化が大きいことに起因する。つまり、劣化更新型の中では、結果的に技術進化が大きかった早期に設備更新するパターンのほうが低炭素化の面で優位となった。

以上から、過去のCO₂削減努力が大きい更新パターンは、定期更新型、劣化更新型A、劣化更新型B、長期使用型の順となることが明らかになった。

表8-6 更新パターン別の累積CO₂削減量

更新パターン	累積CO ₂ 排出量 [t-CO ₂]	CO ₂ 削減量 [t-CO ₂]	CO ₂ 削減率 [%]
長期使用型	1,153.33	—	—
定期更新型	1,028.39	124.94	12.15
劣化更新型A	1,050.51	102.82	9.79
劣化更新型B	1,078.09	75.24	6.98

8.3. 更新パターン別・ケース別クレジット認証量およびエネルギーコスト削減額の推計

8.3.1. 更新ケースの設計

次に、すべての更新パターンで、2010年にクレジット制度を活用して設備更新を行うものとして、CO₂削減量、エネルギーコスト削減額および投資回収年数を更新パターン別に算定した。制度による支援の内容は、補助金：初期費用の2分の1¹⁵⁾、CO₂削減のクレジット化（クレジット単価は、同制度で実績のある1,000円/t-CO₂¹⁶⁾と設定）による売却益とした。

また、設備更新の際の技術選択に関する更新ケースとして、高効率重油焚き、ヒートポンプ、ハイブリッド方式、木質チップ焚き、木質ペレット焚きの5種類を設定した。これらは、第6章でも取り上げた重油焚き加温設備そのものの高効率化と、重油からの燃料転換という技術代替案である。更新ケースの諸元を表8-7に示す。高効率加温設備の熱効率は、1995年製と比べて変化していない。実際に市販されている加温設備の性能に基づいた数値であることから、1995～2010年の間に突出した技術革新が起きていないことが伺える。そのため、1995年に設備更新を行った定期更新型と劣化更新型B型のパターンでは、このケースは厳密には高効率重油焚き加温設備への置き換えを意味しない。

表8-7 更新ケース別の諸元

case	導入技術	熱効率 [%]	燃料種	本体価格 [万円]
1	高効率焚き	90 ¹⁷⁾	A重油	133 ¹⁷⁾
2	ヒートポンプ	489 ¹⁸⁾	電気	400 ²⁰⁾
3	ハイブリッド方式	489 ¹⁸⁾	A重油+電気	400 ²⁰⁾
4	木質チップ焚き	80 ¹⁹⁾	木質チップ	1,500 ²¹⁾
5	木質ペレット焚き	86 ¹⁹⁾	木質ペレット	618 ²¹⁾

8.3.2. 推計方法

(1) 更新パターン別・ケース別の CO₂ 削減量，コスト削減額および投資回収年数

CO₂削減量とエネルギーコスト削減額は式(8-4)と式(8-5)を，投資回収年数は式(8-6)を用いて推計する．本章では，次の2つの方法でCO₂削減量を求めることとする．1つは，国内クレジット制度での算定方法に準じて，更新前の加温設備のカタログ性能値を使用して算出した値（対策を実施しなかった場合の想定CO₂排出量）を $EN_{BL,1}$ として，クレジット認証量を算定する方法である．これは，更新前の加温設備の経年劣化を考慮しないことと同義である．この場合，認証量は必ずしも正味のCO₂削減量とは一致しない．もう一方は， $EN_{BL,2}$ として2009年のCO₂排出量を採用し，設備更新前後での実質的なCO₂削減量を算定する方法である．この場合は，前節で述べたように更新前の加温設備の経年劣化を考慮することになる．そのため，自主的・積極的な設備更新に取り組んできた更新パターンほど，クレジット認証量の面でさらに不利になると予想される．

エネルギーコストについては，設備更新による正味の削減額を求めたいので， EC_{BL} には経年劣化を考慮した2009年の熱効率を使用して燃料費を計上した．ただしヒートポンプについては，燃料費のほかに電力会社が公表している基本料金²²⁾も加味している．

$$ER = EN_{BL} - EN_{PJ} \quad (8-4)$$

ER : CO₂ 削減量 [t-CO₂/年]

EN_{BL} : 更新前の CO₂ 排出量 [t-CO₂/年]

EN_{PJ} : 更新後の CO₂ 排出量 [t-CO₂/年]

$$EC = EC_{BL} - EC_{PJ} \quad (8-5)$$

EC : エネルギーコスト削減額 [万円/年]

EC_{BL} : 更新前のエネルギーコスト [万円/年]

EC_{PJ} : 更新後のエネルギーコスト [万円/年]

$$IC = (li - Su) \div (EC + ER \times CS) \quad (8-6)$$

IC : 投資回収年数 [年]

li : 初期投資費用 [万円]

Su : 補助金（初期投資費用の2分の1） [万円]

EC : エネルギーコスト削減額 [万円/年]

ER : CO₂ 削減量 [t-CO₂/年]

CS : クレジット売却単価 [万円/t-CO₂]

(2) 更新ケース別エネルギーコストと CO₂ 排出量

更新ケース別のCO₂排出量とエネルギーコストは、式(8-7)～(8-12)を用いて推計した。なお、ハイブリッド方式の高効率重油焚きとヒートポンプの稼働割合は、設備メーカーがある条件下の園芸施設にヒートポンプを1台設置した際をシミュレーションした結果¹⁸⁾で採用された値を用いた。具体的な負担割合は、高効率重油焚き48%を、ヒートポンプが52%を賄う。

$$EN_{PJ} = Q_{fuel} \times CU \times 44 \div 12 \quad (8-7)$$

EN_{PJ} : 更新後の CO₂ 排出量 [t-CO₂/年]

Q_{fuel} : 燃料使用量 [GJ/年 又は kWh/年]

CU : 炭素排出係数 [t-C/GJ 又は t-C/kWh]

< 高効率重油焚きの場合 >

$$EC_{PJ, \text{高効率重油焚き}} = Q_{heat} \div HV_{A \text{ 重油}} \times A \text{ 重油価格} \quad (8-8)$$

< ヒートポンプの場合 >

$$EC_{PJ, \text{ヒートポンプ}} = Q_{heat} \div \text{単位換算} \times \text{電気料金} + (\text{基本料金} \times 12 \text{ ヶ月}) \quad (8-9)$$

< ハイブリッド方式の場合 >

$$EC_{PJ, \text{ハイブリッド方式}} = (EC_{BL, \text{高効率重油焚き}} \times 0.52) + (EC_{BL, \text{ヒートポンプ}} \times 0.48) \quad (8-10)$$

< 木質チップ焚きの場合 >

$$EC_{PJ, \text{木質チップ焚き}} = Q_{heat} \div HV_{\text{木質チップ焚き}} \times \text{木質チップ価格} \quad (8-11)$$

< 木質ペレット焚きの場合 >

$$EC_{PJ, \text{木質ペレット焚き}} = Q_{heat} \div HV_{\text{木質ペレット焚き}} \times \text{木質ペレット価格} \quad (8-12)$$

EC_{PJ} : 更新後のエネルギーコスト [万円/年]

Q_{heat} : 必要熱量 [GJ/年]

HV : 単位あたりのエネルギー消費量 [GJ/kl 又は GJ/t]

使用した燃料価格と炭素排出係数を表8-8に、更新ケースごとの必要熱量および単位あたりエネルギー消費量を表8-9に示す。燃料価格は、国内クレジット制度の算定方法にのっとり、設備更新の1年前である2009年の値とした。また、カーボン・ニュートラルの考え方に基づいて、バイオマス利用加温設備の燃料となる木質バイオマスの炭素排出係数は0とした。なお、本章ではバイオマス輸送時のCO₂排出量に関しては考慮していない。

表 8-8 燃料価格と炭素排出係数

製品形式	燃料価格	炭素排出係数
A 重油	6.17 [万円/kl] ²³⁾	0.0189 [t-C/GJ] ²⁵⁾
電力	16.82 [円/kWh] ²⁴⁾	1.17×10 ⁻⁴ [t-C/kWh] ²⁵⁾
木質チップ	1.00 [万円/t] ¹⁹⁾	0
木質ペレット	3.60 [万円/t] ¹⁹⁾	0

表 8-9 更新ケースごとの必要熱量，単位あたりエネルギー消費量

更新ケース	導入技術	必要熱量	エネルギー消費量
		[GJ/年]	[GJ/単位]
case1	高効率重油焼き	309	39.1 [kl] ²⁵⁾
case2	ヒートポンプ	57	3.6 [kWh] ²⁵⁾
case3	ハイブリッド方式	178	case1 と case2 の両方
case4	木質チップ焼き	347	7.0 [t] ²⁶⁾
case5	木質ペレット焼き	323	17.6 [t] ²⁶⁾

(3) 更新パターン別・ケース別の推計結果

表8-10に，設備更新前のCO₂排出量とエネルギーコストを更新パターン別に示す。2010年の更新時に製造年度の新しい加温設備を使用しているパターンほど， EN_{PJ} と EC_{PJ} の値が小さくなることわかる。表8-11は，更新ケース別に算出したCO₂排出量とエネルギーコストである。ハイブリッド型では，既設設備の製造年度によってCO₂排出量とエネルギーコストが変わる。

表 8-10 更新パターン別更新前の CO₂ 排出量とエネルギーコスト

更新パターン	CO ₂ 排出量		エネルギーコスト [万円/年]
	[t-CO ₂ /年]		
	劣化あり	劣化なし	
長期使用型	27.34	24.05	62.24
定期更新型	22.13	21.38	50.37
劣化更新型 A	23.69	21.87	53.92
劣化更新型 B	22.13	21.38	50.37

表 8-11 設備更新後の CO₂ 排出量とエネルギーコスト

更新ケース	CO ₂ 排出量		エネルギーコスト [万円/年]
	[t-CO ₂ /年]		
	劣化あり	劣化なし	
高効率重油焼き	21.38		46.92
ヒートポンプ	6.77		27.77
ハイブリッド方式（1965 製と併用）	17.47	15.76	44.53
ハイブリッド方式（1980 製と併用）	15.57	14.32	40.36
ハイブリッド方式（1995 製と併用）	14.75	14.37	38.58
木質チップ焼き	0		49.58
木質ペレット焼き	0		66.04

1) CO₂削減量

加温設備の経年劣化を考慮しない場合、すなわち国内クレジット制度の算定方法に沿った推計の結果を図8-3に示す。技術選択に関する更新ケースを比較すると、すべての更新パターンでバイオマス利用加温設備、ヒートポンプ、ハイブリッド方式、高効率重油焚き加温設備の順に削減量が大きくなった。バイオマス利用加温設備を除くと、熱効率の高い代替技術の順になっている。更新パターン間の比較では、削減量はどのケースでも長期使用型が最も多く、1995年に設備を置き換えた定期更新型と劣化更新型Bで最小となる。つまり、2010年の設備更新時に性能の低い加温設備を使用しているパターンほど、多くのクレジット認証量を得られることになる。過去の設備更新の頻度や時期によって、クレジット制度活用時の効果に差が生じることがわかる。ヒートポンプを例にとると、その差は最大で2 [t-CO₂/年]であり、単価を1,000 [円/t-CO₂]としたときのクレジット認証量に換算すると、2,000 [円/年]となる。ただし、性能劣化を考慮しなければ、定期更新型と劣化更新型Bにおける高効率重油焚き加温設備への更新ケースではCO₂削減を見込むことができないため、実際にはクレジット制度の適用対象にはならないことに留意されたい。

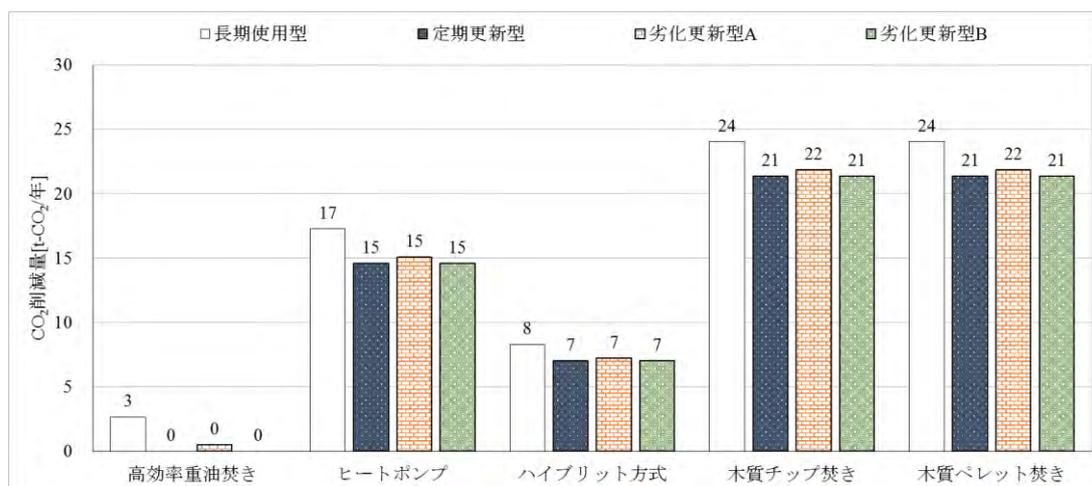


図 8-3 経年劣化を考慮しないときの CO₂削減量

一方、加温設備の経年劣化を考慮したときのCO₂削減量を図8-4に示す。同じ設備を長く使用するほど性能が劣化し、2010年の更新時点でのCO₂排出量が多くなるため、長期使用型と劣化更新型Aにおける削減幅が大きくなった。ここでも、特に長期使用型のクレジット認証量が最も多く見積られることになる。したがって、仮にクレジット認証量が実質的なCO₂削減量に基づいて算定されることになれば、過去のCO₂削減努力が小さい事業者が、クレジット制度活用の際にますます有利になる。

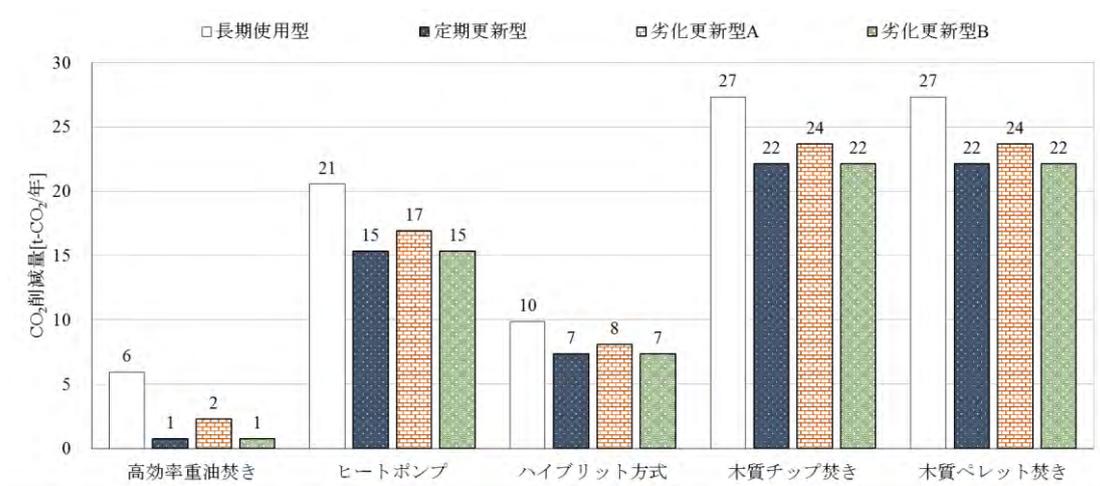


図 8-4 経年劣化を考慮したときの CO₂ 削減量

2) エネルギーコスト削減額

算出したエネルギーコスト削減額を図8-5に示す。削減額は、すべての更新パターンでヒートポンプ、ハイブリッド方式、高効率重油焚き、木質チップ焚き、木質ペレット焚きの順に大きくなった。2つのバイオマス利用加温設備の削減額が小さいのは、表8-8に示した燃料単価および発熱量から求められる金額あたり発熱量が、電気や重油といった化石燃料に比べると小さいため、同じ必要熱量を賄うために多くの木質バイオマス燃料を必要とすることに起因する。特に木質ペレット焚きでは、従来の重油以上に燃料代がかかることになるため、すべての更新パターンでエネルギーコストが増大する結果となった。バイオマス利用加温設備以外は、CO₂削減量の結果と同様、熱効率の高い代替技術の順になっている。エネルギーコスト削減が最大となるヒートポンプの場合、更新パターン間の差は最大で34 [万円/年]となる。

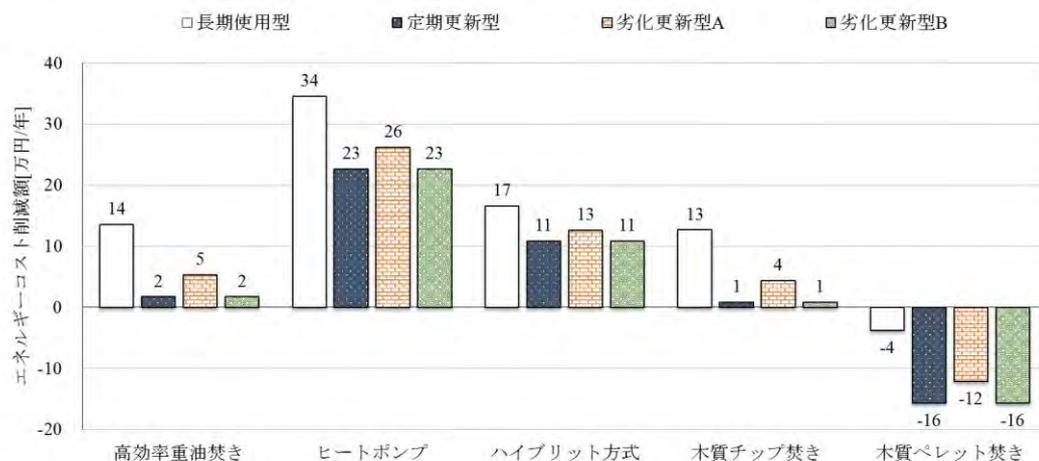


図 8-5 エネルギーコスト削減額

3) 投資回収年数

まず、経年劣化を考慮しない場合の投資回収年数の算定結果を図8-6に示す。数値がマイナスになっているのは、投資回収できないことを意味している。更新パターンごとに見ると、長期使用型では高効率重油焚き、ヒートポンプ、ハイブリッド方式、木質チップ焚き、木質ペレット焚きの順に、定期更新型と劣化更新型Bではヒートポンプ、ハイブリッド型、高効率焚き、木質チップ焚き、木質ペレット焚きの順に、劣化更新型Aではヒートポンプ、高効率焚き、ハイブリッド方式、木質チップ焚き、木質ペレット焚きの順に投資回収年数が短くなること明らかになった。高効率重油焚きはそのほかの更新ケースと比べて初期費用が小さいため、エネルギーコスト削減額が小さくても投資回収年数が短くなることもわかった。

更新ケース間で投資回収年数を比較すると、すべてのケースで1965～2009年の累積CO₂排出量が最も多い長期使用型が有利となり、それに劣化更新型A、定期更新型・劣化更新型Bが続く結果となった。しかも、長期使用型のパターンでは、更新ケースの中でCO₂削減効果が最小である高効率重油焚きへの更新が、最も早く投資回収できることが明らかになった。つまり、過去のCO₂削減努力に配慮しない制度では、設備更新を自主的・積極的に行ってこなかった事業者が経済的に有利になるばかりでなく、その事業者がクレジット制度活用時に経済合理的に判断を下せば、最も低炭素効果の小さい技術が選択されることになる。過去に最もCO₂削減に努めてきた定期更新型と、最も消極的であった長期使用型の投資回収年数を比較すると、ヒートポンプへの更新の場合は2年の差だが、高効率重油焚きだと34年もの差が生じる。

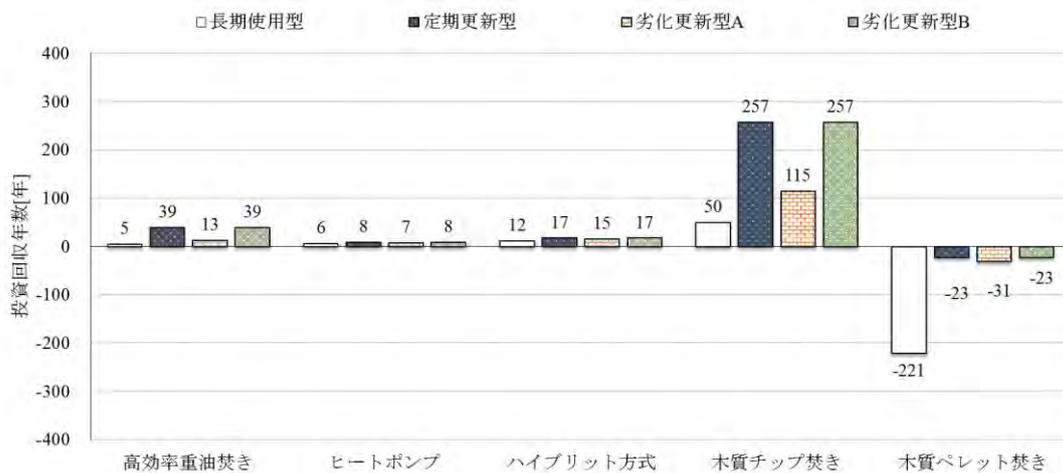


図 8-6 経年劣化を考慮しないときの投資回収年数

次に、経年劣化を考慮した場合の投資回収年数の算定結果を図8-7に示す。加温設備の熱効率低下を考慮すれば、当然ながら設備更新によるエネルギーコスト削減額とクレジット認証量も大きくなるので、経年劣化を考慮しない場合よりも投資回収年数は短くなった。特に、法定耐用年数を超えて1965年製の重油焚き加温設備を使い続ける長期使用型と、1980年製の設備を継続使用する劣化更新型Aにおいて、投資回収年数の短縮幅が大きくなる。

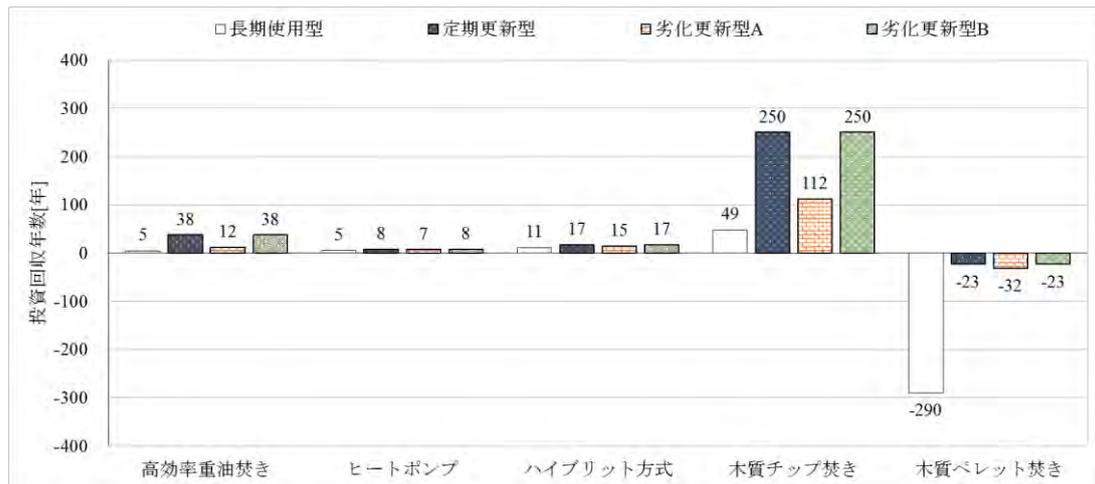


図 8-7 経年劣化を考慮したときの投資回収年数

8.4. 早期実施者に配慮した補助条件の概括的把握

以上の算定結果から、クレジット制度を活用して設備を更新する際、それまでに設備更新を通じて自主的にCO₂削減に取り組んできた事業者と、逆に取り組みに消極的であった事業者との間に生じる便益の差が定量的に明らかになった。本章では、この差を埋めることで早期実施者が不利を被らないようにするためには、どの程度の追加補助（優遇措置）が必要になるかを把握した。具体的には、過去にCO₂削減に取り組んできた定期更新型、劣化更新型AおよびBにおける各更新ケースの投資回収年数が、最もCO₂削減に消極的であった長期使用型のそれに等しくなる補助条件を導出した。ここでは、初期費用に対する補助金を増額する場合と、クレジット取引単価を向上させる場合で条件を求めた。なお、本章における算定の初期条件は、それぞれ初期費用の2分の1、1,000 [円/t-CO₂]である。

その結果を表8-12、表8-13に示す。それぞれの表中の数値は、初期条件からの変化分を表している。初期費用の補助額（表8-12）を見ると、最も積極的にCO₂削減に取り組んできた定期更新型では、高効率重油焚きで約58 [万円]、ヒートポンプおよびハイブリッド方式で約68 [万円]を初期費用の半額補助に追加することで、各技術の投資回収年数が長期使用型のそれに等しくなることがわかる。高効率重油焚き、ヒートポンプ、ハイブリッド方式、木質チップ焚き

の初期費用に対する補助の総額は、表8-7に示した設備本体の価格のそれぞれ89%、67%、67%、90%である。つまり、高効率重油焚きと木質チップ焚きは初期費用の補助率を現行の50%から約90%に、ヒートポンプとハイブリッド方式では約70%に高めることで、早期実施者が不利を被らない状況をつくり出すことができる。

一方、クレジット単価の補助条件（表8-13）から、定期更新型では高効率重油焚きで約17 [万円/t-CO₂]、ヒートポンプおよびハイブリッド方式で8,100 [万円/t-CO₂]程度、木質チップ焚きでは5,600 [万円/t-CO₂]の単価上昇が必要になることが明らかになった。木質チップ焚きやヒートポンプに更新する場合は、1,000 [万円/t-CO₂]としたクレジット単価を6.6～9.1倍にまで高める必要がある。また、高効率重油焚きで必要となる単価上昇が大きくなったのは、長期使用型における同技術への更新ケースが、全更新パターン・更新ケースの中で最も投資回収年数が短いことによる。

ただし、この試算はあくまで必要となる補助の規模や水準を概括的に理解することが狙いであって、その実現性や制度上の適切さ、適合性を厳密に論じるものではない。実際の制度提案につなげてゆくには、どのような比率で補助に差を設けるか、どの時点をベースラインに置くか、何年前までの取り組みに遡って優遇措置の対象とするか、クレジット保有者と購入者との相対取引でクレジット単価が決定されるメカニズムにどう組み込むか、などが明らかにされる必要がある。例えば補助率で言えば、過去のCO₂排出総量という責任に応じて違いを設ける、あるいは事業者のCO₂削減費用が等しくなるように設定するなど、いかなる制度設計手法が望ましいかを検討しなければならないと考えられる。

表 8-12 長期使用型の投資回収年数に等しくなるために必要な初期費用補助額

更新ケース	定期更新型 [万円]	劣化更新型 A [万円]	劣化更新型 B [万円]
高効率重油焚き	58.18	40.76	58.18
ヒートポンプ	67.81	47.45	67.81
ハイブリッド方式	67.89	47.56	67.89
木質チップ焚き	606.21	424.72	606.21

*クレジット単価はいずれのケースも 1,000 [万円/t-CO₂]

表 8-13 長期使用型の投資回収年数に等しくなるために必要なクレジット単価

更新ケース	定期更新型 [万円/t-CO ₂]	劣化更新型 A [万円/t-CO ₂]	劣化更新型 B [万円/t-CO ₂]
高効率	16.62	3.86	16.62
ヒートポンプ	0.81	0.51	0.81
ハイブリッド方式	0.81	0.51	0.81
木質チップ焚き	0.56	0.37	0.56

*いずれのケースも初期費用の2分の1を補助。

8.5. 本章の結論

本章では、施設園芸農家による過去のCO₂削減努力の違いが、炭素クレジット制度を活用して加温設備を更新した際に得られる金銭メリットに与える影響を分析するために、過去の設備更新に関する4つのパターンと、2010年における技術選択に関する5つのケースを設計した上で、CO₂削減量とエネルギーコスト削減額、投資回収年数を比較した。本章で得られた主要な結果をまとめると、以下のとおりである。

- ・過去の設備更新の頻度や時期によって、炭素クレジット制度を活用したときに得られる便益に差が生じる。
- ・長期間にわたって設備更新してこなかった事業者が経済的に有利となる一方、過去に自主的・積極的な設備更新に取り組んできた事業者ほど、制度活用時の便益が小さくなる。
- ・設備更新の回数が同じであっても、それが技術進化の大きかった時期かどうかによって、便益に違いが現れる。
- ・現行のクレジット制度では、クレジット認証量は既設設備の初期性能値を基準にして算定されている。もし経年劣化による設備の熱効率の低下を考慮し、実質的なCO₂削減量に基づいて認証量が算定されることになれば、過去のCO₂削減努力が小さい事業者が制度活用の際にますます有利になる。
- ・クレジット制度を活用するときの技術選択では、ヒートポンプへの更新が最も投資効率に優れる一方、バイオマス利用加温設備はほとんどの場合、耐用年数期間内に投資回収できない。
- ・また、長期間にわたって設備更新してこなかった場合には、CO₂削減効果が最小である高効率重油焚きへの更新が、最も早く投資回収できることになる。つまり、過去のCO₂削減努力に配慮しない制度では、設備更新を自主的・積極的に行ってこなかった事業者が経済的に有利になるばかりでなく、その事業者が経済合理的に判断を下せば、最も低炭素効果の小さい技術が選択されることになる。
- ・過去に最もCO₂削減に取り組んできた定期更新型の投資回収年数が、最もCO₂削減に消極的であった長期使用型のそれに等しくなるためには、ヒートポンプの場合は初期費用の補助率を現行の50%から約70%に高めるか、クレジット取引単価を1,000 [円/t-CO₂]から9,100 [円/t-CO₂]にする政策的支援が必要となる。

第 8 章の参考文献

- 1) 中小企業庁：中小企業白書（2010 年度版），中小企業庁，2010 年。
- 2) 経済産業省，環境省，農林水産省：国内クレジット制度（参照：<http://jcdm.jp/index.html>，最終閲覧：2015 年 9 月 24 日）。
- 3) 環境省：J-VER 制度（参照：<http://www.j-ver.go.jp/index.html>，最終閲覧：2015 年 9 月 24 日）。
- 4) 一般社団法人低炭素投資促進機構：平成 24 年度 温室効果ガス排出削減量連動型中小企業グリーン投資促進事業公募要領（参照：http://www.teitanso.or.jp/green_h24_koubo_uyouryou，最終閲覧：2014 年 3 月 14 日）。
- 5) 経済産業省，環境省，農林水産省：J-クレジット制度（参照：<http://japancredit.go.jp/index.html>，最終閲覧：2014 年 3 月 3 日）。
- 6) 経済産業省，環境省，農林水産省：新クレジット制度の在り方について（取りまとめ）（案）についてのパブリックコメント募集結果（参照：https://www.env.go.jp/press/file_view.php?serial=20444&hou_id=15547，最終閲覧：2015 年 9 月 24 日）。
- 7) 総合資源エネルギー調査会：再生可能エネルギーの全量買取制度における詳細制度設計について買取制度小委員会報告書（案），2010 年。
- 8) 農林水産省：農林業センサス報告第 4 巻 農業経営体調査報告書－農業経営部門別編 第 2 集－（参照：<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/Xlsdl.do?sinfid=000012667893>，最終閲覧：2015 年 9 月 24 日）。
- 9) 日本施設園芸協会：五訂版施設園芸ハンドブック，2003 年
- 10) 東京都主税局：別表第 1 機会及び装置以外の有形減価償却資産の耐用年数表：（参照：http://www.tax.metro.tokyo.jp/shisan/info/hyo01_01.pdf，最終閲覧：2015 年 9 月 25 日）。
- 11) 株式会社ネポン：施設園芸用温風暖房ハウスカオンキ 1 型（参照：http://new.nepon.co.jp/upload_files/2011/06_b5d941dfea192356ee4184fde728.pdf，最終閲覧：2014 年 3 月 3 日）。
- 12) 株式会社ネポン：施設園芸用温風暖房機 ハウスカオンキ 5 型（参照：http://new.nepon.co.jp/upload_files/2011/06/6b_c0b5d941d_fea192356ee4184fde728.pdf，最終閲覧：2014 年 3 月 3 日）。
- 13) 株式会社ネポン：施設園芸用温風暖房機 ハウスカオンキ 22 型（参照：<https://www.nepon.co.jp/pdf/nk/hk27.pdf>，最終閲覧：2014 年 3 月 3 日）。
- 14) 株式会社ネポン：施設園芸用温風暖房機 ハウスカオンキ全形式（参照：http://new.nepon.co.jp/upload_files/2011/06/0cb0fabcee85889e0f79410c04cc1df01.pdf，最終閲覧：2014 年 3 月 3 日）。
- 15) 経済産業省，環境省，農林水産省：平成 22 年度国内クレジット制度各種支援施策（参照：http://jcdm.jp/committee/data/haifu_12/sanko-5.pdf，最終閲覧：2015 年 9 月 24 日）。
- 16) 経済産業省，環境省，農林水産省：国内クレジット制度の総括について（参照：http://jcdm.jp/committee/data/haifu_32/03_v2.pdf，最終閲覧：2015 年 9 月 24 日）。
- 17) 株式会社ネポン：施設園芸用温風暖房機 ハウスカオンキ 27V 型（参照：http://new.nepon.co.jp/upload_files/2011/06/0c_b0fabcee85889e0f04cc1df01.pdf，最終閲覧：2014 年 3 月 3 日）。
- 18) 株式会社ネポン：施設園芸用ヒートポンプグリーンパッケージ（参照：<https://www.nepon.co.jp/pdf/nk/gp1010.pdf>，最終閲覧：2013 年 3 月 17 日）。
- 19) 株式会社森のエネルギー研究所：木質バイオマス LCA 評価事業報告書，2012 年（参照元：http://www.mori-energy.jp/pdf/lca_hokokusho.pdf，最終閲覧：2015 年 9 月 24 日）。
- 20) 千葉県：施設栽培におけるヒートポンプの利用について（参照：<http://www.pref.chiba.lg.jp/ninaite/network/h21-fukyu/heatpump.html>，最終閲覧：2015 年 9 月 24 日）。
- 21) 宮城県登米市：登米市地域新エネルギー重点ビジョン報告書，2011 年（参照：<http://www.city.tome.miyagi.jp/kankyo/documents/shinenejyutenhonpen.pdf>，最終閲覧：2015 年 9 月 24 日）。
- 22) 関西電力：電気供給約款（参照：<http://www.kepco.co.jp/home/ryoukin/contract/pdf/change/apply01.pdf>，最終閲覧：2014 年 3 月 6 日）。
- 23) 一般財団法人日本エネルギー経済研究所石油情報センター：産業用価格 A 重油（参照：<https://oil-info.ieej.or.jp/price/price.html>，最終閲覧：2014 年 3 月 6 日）。
- 24) 日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット編：EDMC エネルギー・経済統計要覧，省エネルギーセンター，2012 年
- 25) 経済産業省，環境省，農林水産省：購入電力の排出係数の改定について（参照：http://jcdm.jp/committee/data/haifu_27/01_v2.pdf，最終閲覧：2015 年 9 月 24 日）。
- 26) 宮城県：宮城県木質バイオマス活用普及指針の策定について資料編 1（参照：<https://www.pref.miyazaki.lg.jp/parts/000141336.pdf>，最終閲覧：2014 年 10 月 8 日）。

第9章 総括

9.1. 緒言

第3章から第8章まで、グリーン・イノベーションを推進する上で、都市基盤となる都市代謝施設の更新の方策、農山村地域における自立分散型エネルギーシステムの形成に向けた低炭素設備の普及や促進という主題に基づき、主体、空間、技術の3つの階層が異なる複数の事例を取り上げて分析した。本章では、これらの分析結果より得られた成果を再度整理し、総括するとともに、新たに得られた知見を踏まえて環境政策に関する提言を試みる。まず、第2節で、これまで各章で行った分析結果と成果の概要を示す。第3節では、本研究で得られた知見を取りまとめ、その結果に基づいて、今後の環境政策について提言する。そして、第4節に今後の課題を述べる。

9.2. 本研究の総括

本研究で重点的に分析した、都市基盤となる都市代謝施設の更新の方策、農山村地域における自立分散型エネルギーシステムの形成に向けた低炭素設備の普及や促進に関し、得られた成果を述べる。

第1章では、人口減少という成長制約の中での低炭素社会実現に向けた、グリーン・イノベーションの推進を支援するために必要な知見を得るために、地域特性に応じた低炭素型都市代謝システムのモデル構築の必要性を論じた。そして、人口減少による影響が表面化している都市代謝施設においてバイオマス転換・エネルギー供給拠点への移行に向けた基盤施設の更新・再編方針の策定と、農山村地域の産業分野においても低炭素設備の導入支援を促す制度や枠組みの策定が重要であり、技術オプションの比較評価や投資効果の経済性評価を通じた、地域特性に応じたシステム構築・政策支援モデルの開発の意義を論じた。そして、本論文の構成を示した。

第2章では、低炭素社会実現に向けたグリーン・イノベーションの推進に関する政策の展開を整理した。その上で、人口減少社会における都市代謝施設の更新計画の方向性の提示と農山村地域に賦存するバイオマスを活用した自立分散型エネルギーシステムの形成に向けた低炭素技術の導入支援に関する研究課題を論じ、本研究の新規性を明確にした。

第3章では、大都市といえども人口減少が進展し、従来どおりの汚泥処理設備の更新計画では設備に過剰能力を生じることや施設の遊休化が生じる可能性があることを指摘した。このため、大都市は既存の下水道インフラを最大限に活かしながら、人口減少および低炭素社会への移行に対応した汚泥処理設備の更新シナリオを設計し、大阪市に適用した。その結果、汚泥処理設備を更新する際には、下水汚泥からエネルギー創出可能な低炭素技術を導入するこ

とで高い LCE, GHG 排出削減効果を得ることができる。特に、大都市圏での特徴として、汚泥処理がすでにネットワーク化され集約化が行われていることが多く、汚泥の有効利用を最大限に引き出すことが可能な環境は整っている。このため、送泥パイプラインを最大限に活用し、現有施設の過剰能力を解消させること、大規模集約化にあわせて低炭素技術を導入することがエネルギーの削減, GHG 排出の抑制に繋がると予想された。しかし、送泥する側の現有設備よりも集約拠点側の現有設備の方が、更新までの期間を要する場合には、個別集約化でも設備更新時に低炭素技術を導入したほうが有効となることが明らかとなった。これは、既存インフラが整備され過剰能力を生じている場合、すでに策定された施設の整備計画に則って更新を進めていくことは、省エネルギー, GHG 抑制面で大きな課題となりうることを示している。よって、個々の既存インフラ施設の過剰能力を解消させることを目的とした大規模集約化は、すでに策定された整備計画の内容によっては有効な策とはならない。むしろ、汚泥処理区全体における必要な施設の処理能力を時間軸で分析し、前倒しを含め積極的な設備更新や休廃止を含むダウンスケールを将来計画に組み込むことが効果的であることを示している。

第 4 章では、人口減少が進展する地方都市の下水道は、地方自治体の財政状況が厳しく整備が遅れがちにあるため、下水道普及率が低く将来的には人口減少傾向と逆トレンドに整備を進めることになる可能性を指摘した。そのため、汚泥処理の集約化を含めた将来計画を立案するためのモデルを構築し、和歌山市に適用した。その結果、汚泥処理設備ごとに汚泥の発生量に応じて個別処理することは、省エネルギー, GHG 排出抑制の面から見ても適当ではない。そのため、都市レベルでの合理的な処理方策の検討が必要であるといえる。また、下水汚泥を個別処理するのではなく、集約化させてスケールメリットを高める戦略が有効であることが明らかとなった。また、その際にはエネルギー消費, GHG 排出原単位が低い現有の焼却炉を早期に更新させて集約処理の拠点とする整備が有効である。さらに、集約拠点となる施設には、汚泥処理を集約しつつ設備更新時に大規模化を図り、スケールメリットを活かす戦略に加えて、更新の際に低炭素技術を導入することでエネルギー消費量, GHG 排出量ともに削減効果がさらに高まる。

第 5 章では、下水処理場や清掃工場に代表される都市代謝施設は低炭素社会、循環型社会への移行の中で中長期的な視点に立った施設更新と低炭素技術の積極的な導入が期待されている。しかし、財政難で厳しい予算制約下にある地方都市では複数の施設の統廃合や集約、施設間で機能や役割を見直したりするなどの戦略的な施設整備が求められている。そのため、都市代謝施設の統合や連携を視野に入れた汚泥処理の将来計画を立案するためのモデルを構築し、和歌山市に適用した。その結果、下水道整備が遅れている地方都市では、今後整備の進行に伴い下水汚泥発生量の増加が予想される。このため、現有施設の処理能力を上回り、施設の新設や増強が必要となる。また、ごみ焼却施設では人口減少に伴いごみ発生量の減少が見込まれ、施設の設備利用率や発電量の低下に加えて処理能力を大幅に下回る非効率な運転状況に陥ることになる。それらの対策として、都市代謝施設間における廃棄物処理システムの統廃合

を視野に入れた総合的な将来計画が有効である。また、燃料転換技術を早期に導入することによって、エネルギー消費量、GHG 排出量の削減効果がさらに高まる。特に、固形燃料化技術はオイル化技術に比べ代替燃料の生成量が多く、エネルギー消費量、GHG 排出量の削減効果が大きい。最大で 80.1 %のエネルギー消費削減と 101.9 %の GHG 排出抑制となる。そして、ごみ焼却施設で早期に汚泥混焼する場合は、未利用な廃熱を汚泥の乾燥熱源として有効利用することで、システム全体でのエネルギー消費量を削減することが可能となり、最大で 27.7 %の削減効果が見込まれる。しかし、ごみ焼却施設では、ごみの減量化に伴い処理そのものに必要な消費エネルギーは削減されるが、余剰電力の低下がそれを上回る。その結果、焼却全体としてのエネルギー消費量は増加するため留意が必要なるが、ごみ減量化によってプラスチック類の焼却に伴う CO₂ 排出量の大幅な削減が実現可能となる。

第 6 章では、エネルギー使用合理化および地球温暖化対策が進んでいるとはいいがたい農山村地域の施設園芸を対象として、農業生産におけるエネルギー・物質フロー分析を行った。その結果、農業の低炭素化を図るとき栽培管理プロセスの GHG 排出抑制が重要となることが明らかとなった。また、このプロセスで用いられる加温設備を最新の高効率技術や地域未利用バイオマス燃料として利用する技術に更新することにより、従来技術に対して最大で 64 %の GHG 削減効果を得ることができる結果を得た。

第 7 章では、地域未利用バイオマス燃料として利用する技術導入を普及させるため、施設園芸を対象として、経済性の評価を行った。その結果、国などからの補助金や制度を活用し、最新の高効率技術であるヒートポンプへ更新する方策が最も投資効率に優れる一方、地域未利用バイオマスを利用する技術では、補助金制度の活用や炭素クレジット売却益を加味しても投資回収に最短で 19 年を要することが明らかとなった。また、投資回収が 15 年以下となるには、設備投資額の半分が補助され、かつ炭素クレジット売却単価が 6,000 [円/t-CO₂]以上に設定される必要があることも判明した。また、提示した地域未利用バイオマスを活用した際の導入可能性を検討し、バイオマスの需要端と供給端に着目した都市部と農山村地域の連携によって形成される低炭素型都市を構想した。農山村地域の施設園芸を需要端とすると、都市部の下水処理場に集約される廃棄物系バイオマスである下水汚泥よりも、農山村地域に広く薄く分布する木質系バイオマスを優先的に取り組むことが有効であることが明らかとなった。そのことから都市部は都市代謝施設を核とした低炭素型都市の形成を、農山村地域は地域に賦存する木質系バイオマスを軸とした都市の形成を考える必要性が示唆された。

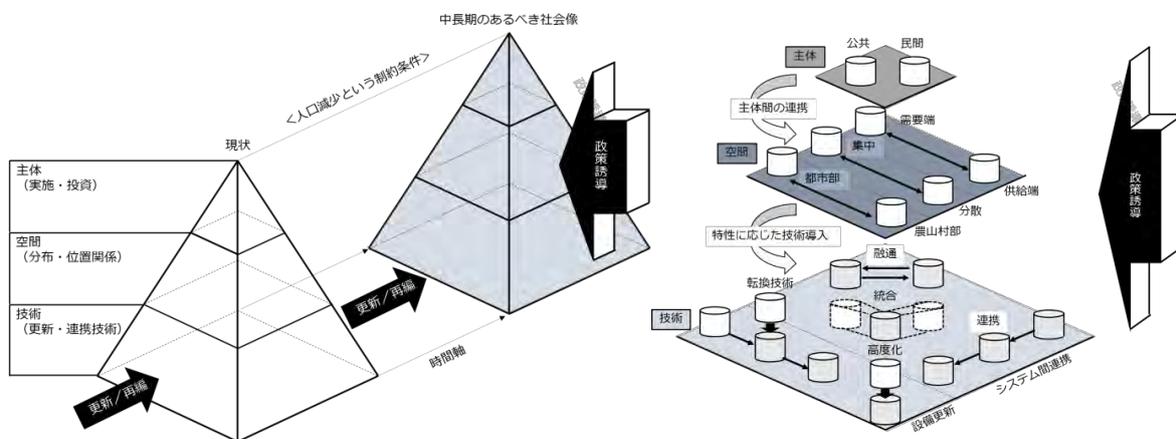
第 8 章では、施設園芸農家による過去の CO₂ 削減努力の違いが、炭素クレジット制度を活用して加温設備を更新した際に得られる金銭メリットに与える影響を分析するために、過去の設備更新のパターンと、技術選択に関するケースを設計した上で、CO₂ 削減量とエネルギーコスト削減額、投資回収年数を比較した。その結果、過去の設備更新や時期によって炭素クレジット制度を活用した時に得られる便益に差を生じることや、長期間にわたって設備更新しなかった事業者が経済的に有利となる一方、過去に自主的・積極的な設備更新に取り組ん

できた事業者ほど、制度活用時の便益が小さくなることがわかった。また、過去の CO₂ 削減努力に配慮しない制度設計では、設備更新を自主的・積極的に行ってこなかった事業者が経済的に有利に働くばかりでなく、その事業者が経済合理的に判断を下せば、最も低炭素効果の小さい技術が選択されることになる。過去に最も CO₂ 削減に取り組んできた定期更新型の投資回収年数が、最も CO₂ 削減に消極的であった長期使用型のそれに等しくなるためには、ヒートポンプの場合は初期費用の補助率を現行の 50%から約 70%に高めるか、クレジット取引単価を 1,000 [円/t-CO₂]から 9,100 [円/t-CO₂]にする政策的支援が必要となることも判明した。

9.3. 本研究より得られた知見と今後への提言

9.3.1. 本研究で得られた知見

筆者は図 9-1 に示すようにグリーン・イノベーションを実現させるためのシステム概要を想定した。そして、主体が異なる施設・設備における低炭素技術の導入や設備更新による効果を定量的に分析し、地域特性に応じた低炭素型都市-産業代謝システムのモデルを構築することで、人口減少という制約条件下において、中長期のあるべき社会像に向けて誘導させるという点について、新たな知見を提供することが重要であると述べた。



<左図：システム概要図／右図：システム階層図>

図 9-1 グリーン・イノベーションを実現させるためのシステム概要（再掲）

本研究では想定したシステム概要に基づいて重点的に取り上げた、都市代謝施設の進化と農山村地域での低炭素設備の普及や設備投資の促進に焦点を当て主体、空間、技術の 3 つの階層が異なる複数の事例を取り上げて分析した結果、新たに得ることができた知見として、次のようなものがある。

・ 地域特性に応じた低炭素型都市-産業代謝システムの構築に関する知見

人口減少という成長制約の中で都市代謝施設を、低炭素型都市の基盤としてバイオマス転換・エネルギー供給拠点へと機能転換し、またそれに呼応して適正な規模の循環圏での産業代謝システムを構築する必要がある。そのシステム構築にあたっては、都市代謝施設の低炭素化を進めると同時に、人口減少に対応した施設更新や処理形態の再編を地域特性に応じて将来構想し、さまざまな主体間や地域間での連携を検討したうえで、中長期のあるべき社会の実現に向けた望ましい技術選択を誘導する支援策が必要となることが明らかとなった。

都市規模の異なるケーススタディを通じて明らかとなったことは、人口増加に呼応して下水道インフラが早い段階に整備された大都市の場合は、人口減少に対応した汚泥処理を立案する際に、すでに整備されている送汚パイプラインや汚泥処理集約化システムを最大源に活用し、現有の汚泥処理施設の設備利用率を高める戦略が有効である。

大都市に比べて下水道インフラの整備が遅延している地方都市の場合には、人口減少の傾向と公共下水道人口の増加傾向が逆トレンドとなりえるため、厳しい財政制約のなかで個々の施設ごとに汚泥処理することは合理的ではないことから、処理を集約化させてスケールメリットを高める戦略が重要となる。そのほかの戦略として、これまで下水処理場が担ってきた汚泥処理を下水処理場以外の都市代謝施設である清掃工場で処理することも効果的である。すなわち、既存インフラの成熟度が低い都市では、都市代謝施設間における廃棄物処理システムの統合を視野に入れた統合的な将来計画の立案が有効であることを示している。加えて、都市代謝施設を対象としたすべてのケーススタディを通して、明らかとなったことは、低炭素技術を早期に導入することで、LCE、GHG 排出削減効果を高めることが可能となるが、さらにその削減効果を高めるには、施設の統合や連携を戦略的に検討することが求められる。その場合には、時間軸を考慮した上で統合や連携拠点を決定し、積極的に低炭素技術を導入することが重要となる。本研究で取り扱った低炭素技術の中でも下水汚泥エネルギー化技術である固形燃料化技術は、石炭の代替燃料を生成するため、その代替燃料の利用先は石炭火力発電所や自家発電所などを保有する一部の産業セクターに限定されるが、LCE、GHG 排出削減量を最大限に引き出すことが可能となる。しかし、供給端となる下水処理場と需要端となる産業セクターとの輸送距離によっては、輸送に伴う環境負荷が増加するため有効な技術となり得ない可能性も含む。その一方でオイル化技術は、産業との親和性が高い重油代替燃料（バイオオイル）を生成可能となるため、下水処理場が位置する地域特性によっては効果的な選択となりうる。

また、農山村地域では下水処理場が小規模であるため、下水汚泥エネルギー化技術のなかでも、固形燃料化技術やオイル化技術の導入が現実的ではない。オイル化技術は産業との親和性が高く、都市と農山村との地域間連携において農山村地域での利用が可能となるが、農山村地域に広く薄く分布するバイオマスエネルギー以上の有効策とはなり得ない。

すなわち、バイオオイルを介した都市部と農山村部との連携システムを検討するよりも、農山村地域の地域特性に応じて森林系バイオマスを最大限に活用するシステム構築を検討することが重要である。

それらのことから、都市部は都市代謝施設を核とした低炭素型都市の形成を、農山村地域は地域に賦存する木質系バイオマスを軸とした低炭素型都市の形成を地域の特性に応じて考える必要性が示唆された。

・ 人口減少社会に対応した都市代謝施設の将来計画に関する知見

都市代謝施設のなかでも下水処理場では、人口減少社会に対応した将来汚泥処理計画を策定する必要がある。その場合には、汚泥処理システムの現状把握、汚泥処理施設の稼働状況、現有設備の過剰な処理能力を解消させるためにそのほかの処理設備への送泥も検討すること、都市が保有する設備の更新の優先順位を決定すること、集約拠点の現有設備は計画を前倒してでも更新することや休廃止も検討すること、将来の人口減少に対応した処理規模や形態への再編にはシナリオ分析を行うことなどが重要であることが示唆された。また、システム境界を下水汚泥処理システムの境界で閉じず、ごみ処理システムの境界やそのほかのシステムにまで拡張したうえで、シナリオ分析することも有効であることが明らかとなった。

ただし、このような汚泥処理施設と清掃工場の連携・統合のような都市代謝施設の進化を具現化するにあたり、廃棄物処理法に基づく一般廃棄物と産業廃棄物処理の権限による垣根を超えて取り組むことが必要不可欠となる。その際には、市町村などの地方自治体が定める廃棄物処理基本計画の上位計画や関連計画との整合を得ることが最重要となる。

・ 地域のグリーン・イノベーションを支える制度的枠組みの検討に向けた知見の整理

農山村地域においては、地域未利用バイオマスを燃料として利用する技術の導入が普及すれば、GHG 排出抑制を最大に発揮することが可能となることを示した。しかし、経済面では投資回収が長期化するため、現実的には投資回収することが困難である。その対応として、炭素クレジットの市場価値が高まり、売却単価が上昇すれば、経済的な実行可能性も改善することとなる。さらに、域内循環可能なバイオマス資源を燃料にして製品や生産物に対する価格プレミアムが、消費者に積極的に認知・評価されれば、農山村のような地域で小規模分散する事業者でも低炭素投資が促進され、経営基盤の安定と強化が図られると期待される。

また、過去の CO₂ 削減努力の違いが、過去の設備更新や時期によって炭素クレジット制度を活用した時に得られる便益に差を生じることや、長期間にわたって設備更新してこなかった事業者が経済的に有利となる一方、過去に自主的・積極的な設備更新に取り組んできた事業者ほど、制度活用時の便益が小さくなることを示した。過去の CO₂ 削減努力に配

慮しない制度設計では、設備更新を自主的・積極的に行ってこなかった事業者が経済的に有利に働くばかりでなく、その事業者が経済合理的に判断を下せば、最も低炭素効果の小さい技術が選択されることになる。実際の制度提案につなげてゆくには、どのような比率で補助に差を設けるか、どの時点をベースラインに置くか、何年前までの取り組みに遡って優遇措置の対象とするか、クレジット保有者と購入者との相対取引でクレジット単価が決定されるメカニズムにどう組み込むか、などが明らかにされる必要がある。例えば補助率で言えば、過去の総 CO₂ 排出量という責任に応じて違いを設ける、あるいは事業者の CO₂ 削減費用が等しくなるように設定するなど、いかなる制度設計手法が望ましいかを検討しなければならないと考えられる。以上のような点に踏み込んだ制度設計や政策誘導の必要性が示唆された。

9.3.2. 環境政策についての提言

本研究で重点的に分析した、都市基盤となる都市代謝施設の更新の方策、農山村地域における自立分散型エネルギーシステムの形成に向けた低炭素設備の普及や促進に関して得られた知見に基づいて提言を行う。

・ グリーン・イノベーションを実現させるためのシステム支援策

再生可能エネルギーのなかでもバイオマス資源の最大限の導入を進めるためには、実施主体は地域の多様な主体とのシステム間連携と低炭素技術の導入の可能性を探索する必要があるため、国はそのようなシステム間連携と低炭素技術の導入を支援するツールを提供する必要があると考えられる。そして、システム間連携と低炭素技術の導入によって、GHG 排出削減量を最大限に引き出すことを実現できた主体には、早期実施者が不利を被らないような優遇措置やクレジット価値のような価値プレミアムを付与させるようなことも必要であると考えられる。また、このような措置は、低炭素投資を早期実施すると特をするという経済的な実行力に対してのドライビングフォースとなることだろう。

・ 人口減少社会に対応した都市代謝施設へと進化させるための支援策

都市代謝施設の整備には、国の補助金などにより建設費用の一部が補助されている。そのために、施設の更新時期を前倒しする場合や施設を早期に廃止する場合には、補助金などの交付の目的に反する可能性がある。その際には、補助金を返還する義務があるため、施設の更新時期を早めるという判断は実質困難である。このような課題が障壁となり、低炭素社会の実現に向けた対策が遅れることはあってはならないため、代謝施設のライフサイクルを考慮した上で、GHG 排出削減量が相当程度多い対応策となるのであれば、障壁を引き下げようとする政策も必要となるだろう。

たとえば、早期の対策や前倒しの施設更新によって得られる GHG 排出削減量を、炭素ク

クレジット価値で見た時に、補助金の返還義務分に相当する場合には、返還要件の緩和や補助金の返還を不要にするなどといったことが、検討すべき支援策のひとつとしてあげられる。

・ **地域のグリーン・イノベーションを支える制度的枠組みの検討に向けた支援策**

地域特性に応じたバイオマス資源を利用した技術の導入を実現するためには、中長期的なビジョンを提示するとともに、設備・施設の転換速度などを踏まえてバックキャスト的に取り組むべき課題を整理する必要がある。そのうえで、GHG 排出量を増加させるおそれのある設備・施設に対して、投資効果の大きい対策を優先的に展開することが重要であるが、地域の特性に応じてその対応策は異なる。それは、地域に賦存するバイオマス種・分布・賦存量などや供給拠点となる施設の整備状況により、合理的に実行可能な方策が変化するからである。そのため、地域の実情に応じたエネルギーシステムの形成を支援するような政策も必要となるだろう。

また、地域特性に応じた支援以外にも、分野横断的な支援として、設備投資を後押しする制度（炭素クレジット制度）の更なる強化が求められる。そこでは、経済的な実行可能性を改善させるために、早期実施者が不利を被らないように優遇措置を導入や、クレジット価値を向上させる政策誘導も必要となるだろう。クレジット価値のような価値プレミアムを向上させる策としては、法的規制手法（キャップ・アンド・トレード）、税制優遇手法（寄付金：ふるさと納税制度スキーム）、期待手法（環境保全活動に活用・貢献）などが考えられる。そのような策を講じることにより、都市から農山村または経営基盤が頑強な事業者から脆弱な事業者へと炭素クレジットを媒介して、グリーン・イノベーションの推進が強化されるということも実現しうる。

9.4. 今後の課題

本論文では、グリーン・イノベーションの推進を支援に向けて、地域特性に応じた低炭素型都市-産業代謝システムの構築モデルの改良にむけた研究課題を示す。

- ・ **都市規模に応じた都市代謝施設の統合・連携の条件に関する分析の必要性**

本研究では、都市規模の異なる大阪市と和歌山市のケーススタディを実施することで、有用な知見を得ることができたが、そのほかの都市でもケーススタディを行うことで、地域特性に応じた更新計画と技術選択の基本方針を明らかにする必要がある。また、都市代謝施設の統合・連携が成立する条件を明らかにする必要があると同時に、地域特性に応じた望ましい都市代謝施設の進化を支援する政策支援ツールを開発する必要がある。

- ・ **都市代謝施設における更新時期の設定に関する分析の必要性**

本研究では、都市代謝施設の性能劣化の有無を考慮せずに、一律の耐用年数を設定した更新シナリオの条件下での、早期更新によるエネルギー消費量、GHG 排出の削減効果は明らかとしている。しかし、実際には、投資した設備費、減価償却費、維持・修繕費などの経済面の観点も含めた、更新時期の見極めが必要となる。

- ・ **大都市における下水処理場の更新シナリオ設計の改善**

下水道インフラが早い段階に整備された大都市では、汚泥の集約処理がネットワーク化により実現されており、下水処理場間の送泥が可能となっている。大規模集約化させる場合には、送泥ポンプの送泥能力や送泥管の容量などによって各処理場間の送泥能力が制限されるため、能力の限界を考慮した送泥計画を立てる必要がある。しかし、本研究では、こうした送泥能力の限界をシナリオ設計に組み込んでいないため、設計したシナリオのような処理形態は、現有の送泥システムでは現実的ではなく、システム実現のためには追加的な送泥施設の整備が必要となる可能性も含んでいる。また、環境負荷量の推計では、送泥プロセスをシステム境界に含んでおらず、送泥プロセスの負荷が全体に及ぼす影響が大きければ、結果にどの程度影響するかを明らかにする必要がある。

- ・ **公平なクレジット制度の設計に係るベースライン設定の影響に関する分析の必要性**

実際のクレジット制度において、1965年や1980年の設備更新にまで遡って適用対象とすることは考えにくい。実際の制度提案につなげてゆくには、どのような比率で補助に差を設けるか、どの時点をベースラインに置くか、何年前までの取り組みに遡って優遇措置の対象とするか、クレジット保有者と購入者との相対取引でクレジット単価が決定されるメカニズムにどう組み込むか、などが明らかにされる必要がある。過去のCO₂削減努力を考慮

した公平な炭素クレジット制度の設計や運用方法の具体的な検討, 提案は, 今後の研究課題
としたい.

研究業績一覧

I. 全文査読付き学術論文

- 1) 中尾彰文, 山本祐吾, 吉田登: 人口減少社会における静脈系インフラの統合・連携と技術選択の評価, 土木学会論文集 G (環境), Vol.71, No.6, pp.II_475-II_486, 2015年.
- 2) 館林香菜, 松井孝典, 大場真, 町村尚, 谷佑亮, 中尾彰文, 山本祐吾: 炭素化のための木材生産・利用システムの最適化モデルの開発, 土木学会論文集 G (環境), Vol.71, No.6, pp.II_297-II_308, 2015年.
- 3) 谷佑亮, 中尾彰文, 山本祐吾, 吉田登: 施設園芸農家による過去のCO₂削減努力が炭素クレジット制度活用時の便益に及ぼす影響の分析, 環境共生, Vol.26, pp.9-20, 2015年.
- 4) 中尾彰文, 山本祐吾, 吉田登: 処理規模の変化に応じた下水汚泥処理施設更新の将来計画ー和歌山市におけるケーススタディー, 土木学会論文集 G (環境), Vol.70, No.6, pp.II_381-II_392, 2014年.
- 5) 中尾彰文, 山本祐吾, 松井孝典, 志賀俊成, 吉田登: 施設園芸での設備更新とバイオマス燃料利用による炭素クレジット創出ポテンシャルの評価, 土木学会論文集 G (環境), Vol.69, No.6, pp.II_371-II_382, 2013年.
- 6) 志賀俊成, 松井孝典, 町村尚, 中尾彰文, 山本祐吾: 施設園芸栽培管理におけるバイオマス供給生態系サービスとGHG削減の相乗便益モデルの開発, 土木学会論文集 G (環境), Vol.69, No.6, pp.II_189-II_197, 2013年.

II. 国際会議発表論文 (Abstract 査読)

- 1) Akifumi NAKAO, Yugo YAMAMOTO, Noboru YOSHIDA: Design and evaluation of low carbon strategy for restructuring sewage sludge and municipal waste treatment facilities under population decline: A case study of Wakayama City, Japan, Proceedings of the 9th International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing 2015, pp.1093-1097, December 2015.
- 2) Kana TATEBAYASHI, Takanori MATSUI, Makoto OOBA, Takashi MACHIMURA, Yusuke TANI, Akifumi NAKAO, Yugo YAMAMOTO: Optimizing the Timber Production and Utilization System for Low Carbon Regions, International Symposium on EcoTopia Science 2015, CD-ROM, November 2015.
- 3) Noboru YOSHIDA, Toyohiko NAKAKUBO, Yugo YAMAMOTO, Akifumi NAKAO, Taira OZAKI, Hiroki OGAWA: Energy Recovery from Biomass Waste by Collaboration of Environmental Infrastructures, Proceedings of the 8th Biennial conference of the International Society for Industrial Ecology, p.523, July 2015.
- 4) Kana TATEBAYASHI, Makoto OOBA, Takanori MATSUI, Takashi MACHIMURA, Yusuke TANI, Akifumi NAKAO, Yugo YAMAMOTO: Demand matching of woody biomass by forest ecosystem model - A case study of Arida and Hidaka river basin, Japan-, Proceeding of the International symposium on Agricultural Meteorology 2015, p.190, March 2015.
- 5) Yugo YAMAMOTO, Akifumi NAKAO, Takanori MATSUI, Toshinari SHIGA, Noboru YOSHIDA: Analysis of material flow and GHG reduction potential in greenhouse cultivation for regional low-carbon development: Case study of Arida district in Wakayama, Japan, Proceedings of the 23rd Pacific Conference of the Regional Science Association International and the 4th Indonesian Regional Science Association, pp.144-145, July 2013.

- 6) Toshinari SHIGA, Takanori MATSUI, Takashi MACHIMURA, Akifumi NAKAO, Yugo YAMAMOTO: Co-benefit Approach between Biomass Provisioning Ecosystem Services and GHG Emissions Reduction in Greenhouse Horticulture Plant, Proceedings of the 23rd Pacific Conference of the Regional Science Association International and the 4th Indonesian Regional Science Association, p.146, July 2013.

Ⅲ. 国内会議発表論文（査読なし）

- 1) 山本祐吾, 中尾彰文, 吉田登：将来人口の変化を考慮した環境インフラ更新・再編の方向性, 環境科学会 2015 年会プログラム講演要旨集, pp.120-121, 2015 年.
- 2) 中尾彰文, 山本祐吾, 吉田登：地方都市における静脈系インフラの集約と連携のシナリオ構築 —和歌山市を対象として—, 第 26 回廃棄物資源循環学会研究発表会論文集, pp.107-108, 2015 年.
- 3) Kana TATEBAYASHI, Takanori MATSUI, Makoto OOBA, Takashi MACHIMURA, Yusuke TANI, Akifumi NAKAO, Yugo YAMAMOTO : Optimizing the Balance of Biomass Provisioning and Carbon Sequestration Services of Forest Ecosystem, 日本景観生態学会第 25 回全国大会北九州大会講演要旨集, p.53. 2015 年 6 月.
- 4) 谷佑亮, 中尾彰文, 山本祐吾, 吉田登：施設園芸農家による過去の CO₂ 削減努力が炭素クレジット制度活用時の便益に及ぼす影響の分析, 第 17 回日本環境共生学会学術大会発表論文集, pp.51-60, 2014 年.
- 5) 中尾彰文, 吉元剛, 山本祐吾, 吉田登：西宮市を対象とした汚泥と厨芥類の嫌気性消化技術導入による CO₂ 排出削減ポテンシャルの推計, 第 25 回廃棄物資源循環学会研究発表会論文集, pp.83-84, 2014 年.
- 6) 山本祐吾, 芳元恭大, 中尾彰文, 吉田登：泉州地域の産業工場におけるエネルギー需要を考慮した下水汚泥処理の技術選択, 第 25 回廃棄物資源循環学会研究発表会論文集, pp.85-86, 2014 年.
- 7) 山本祐吾, 高橋宙, 中尾彰文：大阪市における将来人口の変化を考慮した下水汚泥処理施設の更新シナリオの設計とその評価, 第 21 回地球環境シンポジウム講演論文集, pp.135-141, 2013 年.

謝辞

本論文は和歌山大学大学院システム工学研究科・システム工学専攻、博士後期課程における研究成果を学位請求論文として取りまとめたものであります。本論文の筆をおくにあたり、ご指導・ご協力・ご支援いただきました多くの方々に、この場を借りてお礼申し上げます。

本論文の作成にあたり、指導教員である和歌山大学工学部環境システム学科の吉田登教授に深大なる謝意を表します。吉田教授には、投稿論文および博士論文の執筆における研究指導を通じて、常に暖かく、時には勇ましい激励を交えつつご指導いただき、枝葉に惑わされがちな私の研究を適切な方向へ導いていただきました。また、研究プロジェクトを通じた研究の場も提供いただき、一流の研究者の方々と出会う機会をいただきました。そして、その出会いにより一流の研究者の方々から数々の知見を学ぶ機会を得ることができました。このように博士後期課程の在学期間を短縮して学位請求論文をまとめることができたのは、吉田教授の熱意あるご指導のおかげであり、深く御礼申し上げます。

本論文を査読頂いた和歌山大学工学部環境システム学科の江種伸之教授には、本論文全体に対して非常に幅広く、そして細やかなご助言・ご指導いただいたことを深謝致します。

同じく査読をしていただきました和歌山大学工学部環境システム学科の山本祐吾准教授には、計量証明事業所に勤めていた時分から、突然訪問した私を快く迎えていただき、博士前期課程から博士後期課程の4年間における研究指導を通じて常に温かく、時に厳しくご指導いただきました。ここに記して深謝致します。

また、和歌山大学工学部環境システム学科の金子泰純教授からは、廃棄物処理システムの構築と地方自治体における政策動向など、廃棄物処理システムの将来計画を評価する上で検討すべき事項についてご指導いただきました。深く御礼申し上げます。

筆者の力量不足により、副査を努めて頂いた先生方々のご助言の全てを反映させるにはいたりませんでした。今後の研究生活に活かさせていただきたいと考えております。

大阪大学大学院工学研究科の松井孝典助教には、筆者が博士前期課程から本論文に関する議論をはじめ、公私において様々な相談にのっていただきました。ここに謝意を表します。

本論文の成果の一部は、研究プロジェクト関係者の方々の多大なご支援を受けて行われました。プロジェクトを通して筆者に指導してくださいましたお茶の水女子大学大学院人間文化創成科学研究科の中久保豊彦助教、関西大学環境都市工学部の尾崎平助教に感謝いたします。

また、本論文を作成する上で、研究活動から日常の生活にまで様々な面でご協力・ご支援頂いた、山本祐吾研究室の同輩、後輩に深く感謝いたします。なかでも、谷佑亮氏には、良き相談相手として筆者の研究活動を支えて頂きました。和歌山大学大学院在学時には、研究室は違えど、現在は株式会社タクマの丸山裕嗣氏には、私が研究で行き詰ったときに相談にのって頂きました。ここに謝意を表します。

筆者が計量証明事業所に勤務していた際の同僚であり、現在は一般社団法人産業環境管理協会製品環境部門 LCA 事業推進センターLCA 事業室の仲井俊文室長には、本研究を遂行する上で、温かい励ましや LCA 手法やエネルギー・物質フローの分析結果の評価と解釈で行き詰った場面で相談にのって頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

そして最後に、筆者の研究生活を温かく見守り、支えてくださった両親に心より感謝いたします。

2016 年 3 月

中尾 彰文