

環境研究総合推進費補助金
循環型社会形成推進研究事業
総合研究報告書

将来の社会・技術変化を見据えた静脈系インフラの連携によるエネルギー回収
(3K143006)

平成 26 年度～平成 28 年度

Study on Energy Recovery in Collaborating with Venous
Infrastructures through Changes in Future Society and Technology

平成 29 年 5 月

和歌山大学 吉田 登

将来の社会・技術変化を見据えた静脈系インフラの連携によるエネルギー回収
(3K143006)

I. 成果の概要	..... i
1. はじめに (研究背景等)	
2. 研究目的	
3. 研究方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた主な成果	
6. 研究成果の主な発表状況	
7. 研究者略歴	
II. 成果の詳細 要旨	..... 1
1. はじめに	..... 1
2. 研究目的	..... 2
3. 研究方法	..... 2
4. 結果及び考察	..... 6 2
5. 本研究により得られた成果	..... 1 0 1
6. 国際共同研究等の状況	..... 1 0 4
7. 研究成果の発表状況	..... 1 0 4
8. 引用文献	..... 1 0 8
研究概要図	..... 1 1 6
英文概要	..... 1 1 7

補助事業名 環境研究総合推進費補助金循環型社会形成推進研究事業（平成 26 年度～平成 28 年度）

所管 環境省

研究課題名 将来の社会・技術変化を見据えた静脈系インフラの連携によるエネルギー回収

課題番号 3K143006

研究代表者名 吉田登（和歌山大学）

国庫補助金 37,701,000 円（うち平成 28 年度：11,035,000 円）

研究期間 平成 26 年 5 月 30 日～平成 29 年 3 月 31 日

本研究のキーワード エネルギー回収、廃棄物バイオマス、連携、環境インフラ、温室効果ガス

研究分担者 中久保豊彦（お茶の水女子大学）
山本祐吾（和歌山大学）
小川宏樹（徳島大学）
尾崎平（関西大学）

研究概要

1. はじめに（研究背景等）

ごみと汚泥は、生活空間から安定的に生じる再生可能資源であり、これらを集約処理する清掃工場や下水処理場（汚泥処理施設を含む）の静脈インフラは資源循環拠点かつ低炭素社会を支える未利用エネルギー供給センターとして重要な役割を担っている。現在、国内約 1,200 の清掃工場、約 2,200 の下水処理場、約 170 の汚泥焼却場の多くが更新時期を迎えており、脱温暖化と循環を支える静脈インフラ将来像の提示と社会実装が急務である。

静脈インフラからのエネルギー回収の最大化を図る上では、各施設間、各静脈インフラ間、さらに産業インフラとの連携が欠かせない。そこで、研究代表らは積み重ねた基礎的な研究の知見をふまえ、分散－広域、3R 資源循環－エネルギー回収、延命化－技術革新の軸をもとに、包括的な静脈インフラ連携モデルを構築する。

2. 研究目的

本研究は、低炭素社会や人口減少などの将来社会制約下で静脈インフラ連携により、廃棄物からのエネルギー回収最大化をめざす連携モデルを構築することを目的とする。具体的には、分散－広域、3R 資源循環－エネルギー回収、延命化－技術革新の軸をもとに、都市規模とインフラ条件に応じて静脈インフラ連携の視点からの類型化と連携方策を検討する全体テーマのもと、静脈インフラ間の連携（ST2）、動脈系インフラと静脈系インフラとの連携（ST3）、静脈インフラの維持・更新をふまえた連携（ST4）、人口動態変化をふまえた静脈インフラ連携（ST5）、静脈系インフラ再構築の社会展開（ST1）の 5 つのサブテーマを組み合わせ、包括的な静脈インフラ連携モデルを構築することを目的とする。

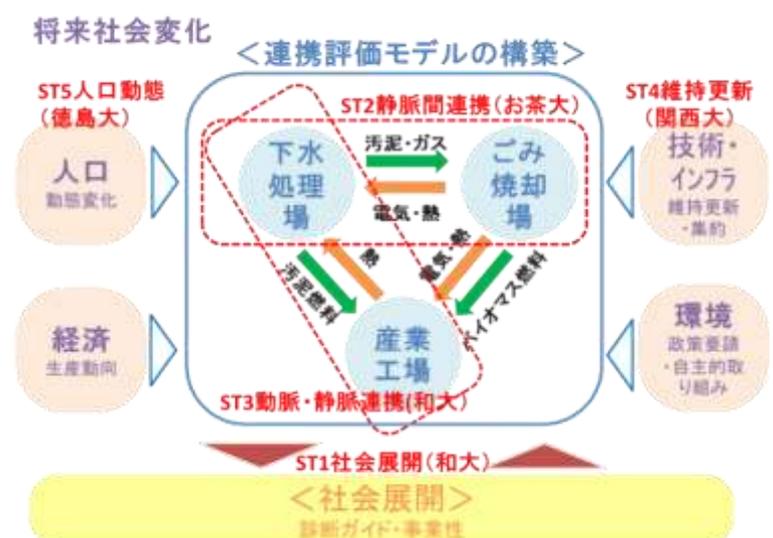


図 1 研究開発目的と研究フレーム

3. 研究方法

本研究が構築をめざす、静脈系インフラを中心とした連携モデル研究は、まず初めにエネルギー回収が遅れている、下水処理場のインフラを軸として、下水処理場と動脈系、静脈系との各連携モデルについてそれぞれ分析を行った。すなわち、

(1) 動脈系インフラと静脈系インフラの連携⇒ (ST3)

(2) 静脈系インフラ間の連携⇒ (ST2)

をもとに各連携モデルにおける多様な技術オプション、シナリオからなる代替案の事例分析を行った (GHG 削減効果の高い連携は動脈系の石炭燃料代替であることから、最終報告会における構成と同じく、ST3 の動脈・静脈間連携の検討を先とし、ST3、ST2 の順に配置している)。

次に、ST2 と ST3 をふまえて、これらと同様の連携モデルが全国的にみてどの程度の連携可能性及び GHG 削減効果を有するのかについて、

(3) インフラ間連携の全国展開ポテンシャル⇒ (ST1 の一部)

を分析した (これは、申請時の 2 次ヒアリングで受けた指摘をもとに追加した解析である)。

さらに、ST2 と ST3 で構成される連携モデルに影響を与える要因、すなわち研究課題名にある、“将来の社会・技術変化” について、施設の維持・更新に伴う施設統合の影響や人口動態変化に関する考察として、

(4) 静脈系インフラの維持・更新をふまえた連携⇒ (ST4)

(5) 人口動態変化をふまえた静脈系インフラの連携⇒ (ST5)

に対する検討を行った (ただし、これらの将来社会・技術変化については、ST2 や ST3 でも事例分析に即して扱っている。例えば評価対象年は将来社会変化をふまえて 2030 年とし、ST2 では処理機能の集約、ST3 では産業活動の将来変化などを含めて検討している)。

最後に、以上で検討された連携モデルを社会に展開していくうえで、インフラ連携に関する事業主体の受容性、事業性、そして静脈系主体の連携指針となるガイド集成をあわせて、

(6) 静脈インフラ連携の社会展開⇒ (ST1 の一部)

について検討を行った。

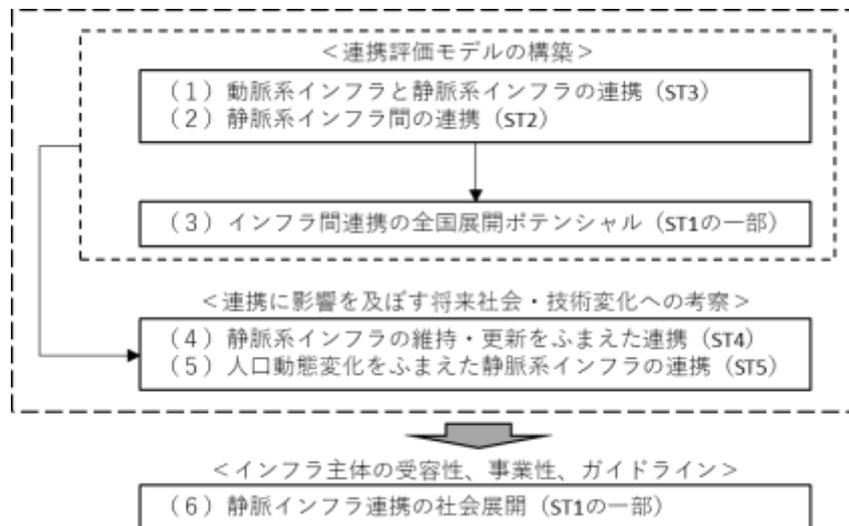


図2 各節(1)~(6)とサブテーマ(ST1~5)との関係

以下に、(1)~(6)の各節における、具体的研究方法を述べる。

(1) 動脈系インフラと静脈系インフラの連携

1) セメント産業との連携モデル

兵庫県臨海地域をケーススタディの対象として取り上げ、セメント生産インフラを活用した下水汚泥固形燃料化システムのエネルギー・物質フロー推計し、下水汚泥固形燃料の需給ポテンシャルと技術導入に伴う GHG 排出削減効果を定量的に把握した。ここでは、2010 年から 2040 年の社会的・経済的な変化も考慮した。将来の人口減少は、下水汚泥固形燃料の供給ポテンシャルに影響を及ぼす。また、経済活動の縮小によって固形燃料

の受け皿となる産業が減産となれば、固形燃料に対する需要ポテンシャルも低減する。こうした将来変化をシナリオとして描き、供給側と需要側それぞれの活動を予測・評価することで、中長期的にも維持・継続できる汚泥燃料化システムかどうかを明らかにした。

2) 紙パルプ産業との連携モデル

関西、中国、四国地方をケーススタディ対象地域として取り上げて、紙・パルプ生産インフラを活用した下水汚泥固形燃料化システムのエネルギー・物質フロー推計し、下水汚泥由来燃料の需給ポテンシャルと代替燃料化技術導入に伴う GHG 排出削減効果を定量的に把握した。前項と同様、2010 年から 2040 年の社会的・経済的な変化も考慮した。単一の産業工場（セメント）を受け入れ拠点とし、その受入容量のみから需給バランスを考えた前項を発展させ、本項では紙・パルプ生産インフラの立地特性および燃料消費形態に応じた下水汚泥燃料化システムの需給バランスを把握するとともに、その評価方法や手順を構築した。

3) さらなる GHG 削減に向けた複合的な連携モデル

次節では、静脈インフラ間の連携を高めて汚泥燃料生成の熱源を地域内で確保することで、より効率的な汚泥燃料化システムを構築できることが明らかにされている。この成果を受けて、本項では、動脈－静脈インフラの連携をさらに効果的、効率的に促進する複合的な連携モデルを評価した。具体的には、関連する施設の立地が充実し、先導的設備を導入している北九州市をケーススタディの対象地として、下水汚泥処理から汚泥の燃料利用までのプロセスが異なるケースを設定し、下水汚泥の燃料利用と他のエネルギー回収設備を併せた総合的なエネルギー回収システムの温室効果ガス（GHG）削減効果を定量的に明らかにした。

(2) 静脈系インフラ間の連携

1) 大都市における静脈系インフラ間の連携

下水処理事業が単独で脱水汚泥のエネルギー化を図る場合、炭化や乾燥造粒に代表される固形燃料化、あるいは廃熱発電付きの汚泥専用焼却炉の整備が、現状における技術オプションとなる。ここで、固形燃料化の成立要件として、汚泥由来の固形燃料の受け手（石炭火力発電所、セメント工場などの石炭消費産業）の確保が必須となる。また、汚泥焼却・廃熱発電システムを導入する場合、焼却対象とする脱水汚泥は直接脱水汚泥に限定され、消化脱水汚泥のエネルギー利用はできないという課題がある。

そこで本研究では、脱水汚泥のエネルギー化に向けた静脈系インフラ間の連携モデルとして、下水処理施設とごみ焼却施設の連携型更新計画を取り上げた。具体的には、ごみ焼却施設で消化脱水汚泥を受け入れ、ごみ廃熱発電システムの抽気を活用して脱水汚泥を効率的に乾燥する更新計画を解析対象とした。更新ケース一覧を表 1 に示す。ケース C がごみ焼却施設での汚泥混焼ケースであり、ケース D は静脈・動脈系の全ステークホルダー（下水処理施設、ごみ焼却施設、石炭火力発電所）による連携が実現したケースとして位置付けた。

本研究における評価法の特徴として、ごみ焼却施設（ストーカ炉＋ボイラ・タービン発電）においてタービン抽気を活用した汚泥乾燥システムの導入効果を評価するための熱収支解析モデルを構築した。これにより、これまで精緻な解析が行われていなかった、ごみ焼却施設で脱水汚泥を乾燥・混合焼却する施策のエネルギー収支、温室効果ガス排出量を推計するための方法論を開発した。開発した解析モデルを用い、神戸市を対象としたケーススタディを行った。

表 1 静脈系インフラ連携に係る更新ケースの設定

		2015年		2030年			
		Base 2015	Base 2030	連携型更新ケース			
				A	B	C	D
消化槽の 活用	濃縮汚泥	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	事業系厨芥			✓	✓	✓	✓
脱水汚泥の 資源化	汚泥単独での高温焼却	✓	✓	✓			
	低温炭化				✓		
	ごみ焼却施設での乾燥・ ごみ焼却炉での混焼					✓	
	ごみ焼却施設での乾燥・ 石炭火力発電所での混焼						✓

2) 地方都市における静脈系インフラ間の連携

し尿処理施設更新時の意思決定が地方都市や農村域における低炭素化・資源循環のドライビングフォースとして着目される。近年、し尿処理施設の機能を縮小（または廃止）し、し尿・浄化槽汚泥の処理機能を下水処理施設やごみ焼却施設に統合化する事例がいくつかの自治体で展開されている。そうした静脈系インフラ間の連携を支援するための技術マニュアルの作成が必要視される。そこで本研究では、同技術マニュアルを作成し、群馬県を対象としたケーススタディを行う。

群馬県におけるごみ処理広域化計画を踏まえ、ごみ処理広域ブロック毎のごみ量を推計し、各ブロックをボイラ・タービン発電導入地区（ごみ焼却施設の次期新設時の処理能力が 100 t/日以上を充たす地区）、ならびにメタン発酵導入地区（同条件を満たさず、広域化しても処理能力が 100 t/日以下となる地区）に分類した。ボイラ・タービン発電導入地区の代表として太田館林ブロックを、メタン発酵導入地区の代表として吾妻ブロックを選定した。

ボイラ・タービン発電導入地区では、し尿処理施設で発生する脱水汚泥をごみ焼却施設で乾燥・混合焼却する計画（混焼連携ケース）を立案した。また、メタン発酵導入地区では、有機性廃棄物を融通して下水処理施設、ごみ焼却施設の双方でメタン発酵事業を行う計画（融通連携ケース）を設計した。以上を踏まえ、それら静脈系インフラ連携型の更新計画の導入による温室効果ガス排出削減効果を評価した。

(3) インフラ間連携の全国展開ポテンシャル

(1) 及び (2) をふまえ、下水処理場と産業工場（動脈系インフラと静脈系インフラの連携：ST3）、下水処理場とごみ焼却場（静脈系インフラ間の連携：ST2）の各インフラ間連携による、全国規模での GHG 削減効果とその影響要因について分析した。

まず、全国の下水処理場における未利用汚泥量の分布と下水汚泥固形燃料の受け皿となる全国の産業工場における受入可能な容量を把握した。次に国内における下水汚泥燃料利用の事例や文献を整理し、各汚泥燃料化技術の GHG 収支をもとに汚泥燃料の産業工場、ごみ焼却場への配分（連携）ルールを設定した。現状では炭化など固形燃料化施設を有する下水処理場はごく僅かしか存在しないが、このような促進施策により今後、下水処理場での固形燃料化施設導入が拡大することを前提に、もし全国各下水処理場で汚泥燃料化や混合焼却の導入が可能と仮定した場合の、下水汚泥の燃料利用による全国レベルでの GHG 削減ポテンシャルを推計した。さらに、連携が難しいと判断された未配分の汚泥量分布を明らかにするとともに、産業側での連携の制約となっている汚泥燃料の混焼比率が変化した場合の、GHG 排出削減量変化について解析して、インフラ連携拡大の鍵となる要因とその影響について考察した。

(4) 静脈系インフラの維持・更新をふまえた連携

1) 地方都市における下水処理施設とごみ処理施設との連携による効果の推定

人口減少社会に突入し、施設の老朽化、更新が求められる現在において、下水道と廃棄物の連携は、個々の施設、技術の効率化を追求する方法と併せて検討がなされるべきだと考えられる。また、財政的に厳しい状況を迎えるのは都市部よりも地方部であり、特に、過去に小さな下水処理場を多く建設した地域では、その建て替え更新に併せてどのような意思決定を行うのかは重要な問題である。

本研究では、2010 年における人口が約 8.5 万人の地方都市を対象に、下水処理と廃棄物処理施設は連携せずに下水汚泥を堆肥化し、ごみ発電を実施しない場合と、施設更新時に下水処理と廃棄物処理が連携し、下水の脱水汚泥を廃棄物処理施設で混焼し、かつ高効率発電を導入した場合を比較評価した。

2) 将来人口減少下での静脈系インフラの更新・再編と GHG 削減効果

近年では、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。それに対して清掃工場では、ごみ焼却時に高効率な発電を実施し省エネルギー・創エネルギー化を進め、地域の廃棄物処理システム全体でのエネルギー消費を低減させる施設整備を図っている。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の一部に限られる。一方で、下水処理場は老朽化が顕著となっており、早急な既存施設の改築・更新が必要な状況にある。しかし、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。

本研究では、人口減少社会における地方都市の污泥処理計画で重要となる維持・更新を踏まえた静脈系連携として、污泥焼却の統廃合やごみ焼却施設での污泥混焼に関するシナリオを設計した。和歌山市を対象とし、污泥処理の集約化や現有焼却炉代替の高温焼却および污泥燃料化技術の導入に加え、ごみ焼却施設での混焼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評価した。

(5) 人口動態変化をふまえた静脈系インフラの連携

現在、地方自治体で立地適正化計画が進められており、一定区域に都市機能や居住を集約するためのエリア設定が行われている。土地利用や人口の集約が必要なことから、既存インフラの活用を図りながら集約範囲を設定することが求められている。

そこで本研究では、静脈系インフラである下水道に着目し、下水道が整備された認可区域よりも未整備の計画区域が多く残る和歌山市を対象とした。下水道普及率が極端に低い都市を対象にすることで、既存インフラの活用と新設コストの抑制に寄与する市街地集約エリアの設定について検討する。立地適正化計画等による市街地集約に向けた動きがなされている点や、今後人口の減少が予測されている点についても、本研究の対象として選定した理由である。

研究の流れは、まず、和歌山市の小地域単位での人口分布や推計人口等の人口動態を分析し、人口動態および下水道計画をベースに、交通インフラを加味した市街地集約の方針（集約条件や範囲）を検討する。さらに、方針を元に具体的な市街地集約エリアについて検討・評価を行い、人口予測と下水道計画を踏まえた市街地集約のあり方について考察した。

(6) インフラ連携の社会展開

(1)～(5)の検討をふまえて、廃棄物バイオマスからのエネルギー回収のための静脈インフラ連携の社会に展開してゆくために重要と思われる、インフラ主体の受容性、インフラ連携の事業性、インフラ連携のガイドラインに関する検討を行った。

1) インフラ連携の受容性

環境インフラ連携に関する現状と将来の意向を把握するため、全国の下水处理場を管理する自治体の計画主体（約1,700箇所）、ごみ焼却場を管理する自治体の計画主体（約1,700箇所）を対象として、受容性調査を実施した。

2) インフラ連携の事業性

インフラ連携の代表例として、下水污泥のごみ焼却場での混焼を取り上げ、インフラ連携の事業性を分析した。インフラ連携の事業性評価フローを構築し、そのフローに基づき、追加的な費用増加及び費用削減項目の算定方法、係数を整理し、事業収支を推計した。

3) インフラ連携のガイドライン

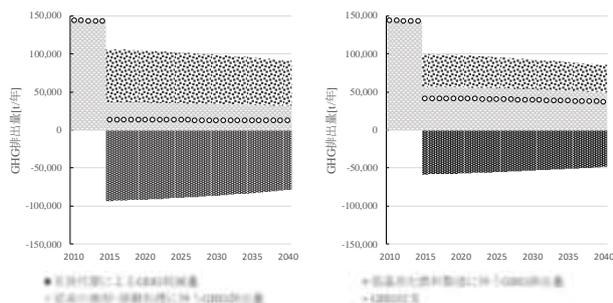
(1)～(5)の分析を行う中で抽出された、様々なインフラ連携の事例に対して、GHG削減の観点から、地域の特性（主体：周辺に連携を想定しうる主体が存在するか、装置：連携に活用しうる既存装置があるか、技術：適用可能な連携技術オプションの提示）に応じて、選択可能な技術オプションの類型を意思決定樹木図（Decision Tree）の形で表現した。

4. 結果及び考察

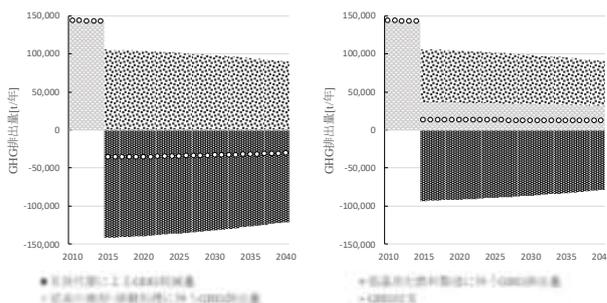
(1) 動脈系インフラと静脈系インフラの連携

1) セメント産業との連携モデル

2010～2040年のGHG排出量の推計結果を図3、図4に示す。ここでは、炭化技術の導入時期は2015年と設定し、2015年までは従来处理に伴うGHG排出量のみを算定している。また、石炭代替によるGHG削減量は、マイナス計上している。2040年まで従来の焼却・溶融処理を継続した場合のGHG排出量と比較した2015～2040年のGHG総削減量は成長ケースと慎重ケースの技術展望オプションが最も大きく、次いで低成長ケースの技術展望オプションと慎重ケース・成長ケースの基本オプション、低成長ケースの基本オプションの順となった。25年間の総削減量は3,460千t-CO₂、2,266千t-CO₂、1,409千t-CO₂となり、それぞれの削減率は、125.4%、90.6%、70.3%となった。



<左図：慎重ケース・成長ケース／右図：低成長ケース>
 図3 基本オプションにおけるGHG排出量

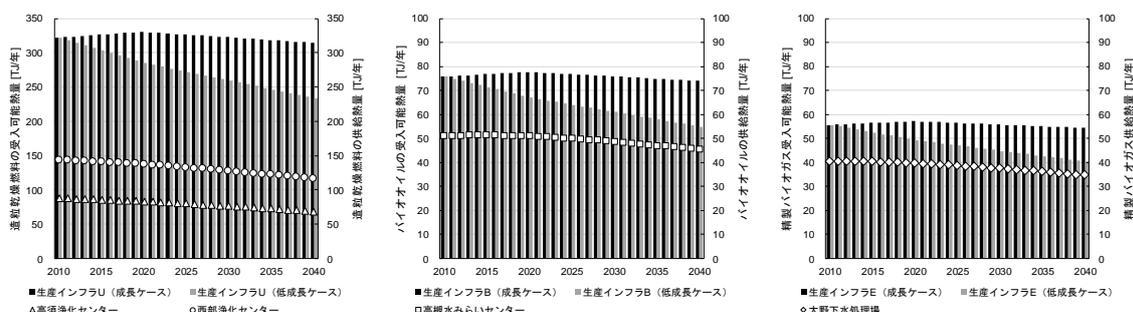


<左図：慎重ケース・成長ケース／右図：低成長ケース>
 図4 技術展望オプションにおけるGHG排出量

2) 紙パルプ産業との連携モデル

中期的な需給ポテンシャルから、代替燃料の供給パターンを推計した(図5、表2)。5つの紙・パルプ生産工場と7つの下水処理場との連携が可能となること明らかになった。下水汚泥の集約処理が進んでいる大阪府や兵庫県の下水汚泥処理施設は高い供給ポテンシャルを有する一方、都市域に立地する紙・パルプ工場の多くは生産規模が大きい。そのため、紙・パルプ工場の代替燃料受入可能量が周辺の汚泥処理施設の供給可能量を大きく下回ることが多く、動脈・静脈インフラの連携が成立しづらい状況が確認できた。こうした都市域の汚泥処理施設では、郊外の大規模な紙・パルプ工場や他産業インフラとの連携を模索する必要があるといえる。他方、農村・地方域の汚泥処理施設は、地域全体では高い供給ポテンシャルを有するものの、一つ一つの施設が小規模・分散型であるため、燃料化技術が導入可能な規模に至らないことが多い。生産規模の大きな紙・パルプ工場を地域内に有しながらも、汚泥処理施設が代替燃料の生産・供給拠点にならず、ここでも需給ギャップに直面することが明らかになった。

この供給パターンに基づいて、代替燃料化技術の導入に伴うGHG排出量(2010~2040年)を推計した。その結果を図6に示す。代替技術の導入時期は2020年とし、それまでは従来処理に伴うGHG排出量のみを算定している。代替技術導入後の2020年から2040年までの総排出量は696.2千t-CO₂で、2040年まで従来の焼却・溶融処理を継続した場合のGHG排出量と比較すると、71.2%の削減が可能となる。



<左図：造粒乾燥技術／中図：バイオオイル化技術／右図：バイオガス精製技術>
 図5 代替燃料化技術別の各生産インフラへの供給パターン

表2 各供給パターンによるシステムの連携状態

紙・パルプ生産インフラ	連携の軸となる燃料化技術	下水処理場・下水汚泥処理施設
生産インフラQ(広島県)	造粒乾燥技術	東部浄化センター(広島県)
生産インフラU(愛媛県)	造粒乾燥技術	高須浄化センター(高知県), 西部浄化センター(愛媛県)
生産インフラB(滋賀県)	バイオオイル化技術	高槻水みらいセンター(大阪府)
生産インフラE(大阪府)	バイオガス精製技術	大野下水処理場(大阪府)
生産インフラK(兵庫県)	バイオガス精製技術	高砂浄化センター(兵庫県), 伊保浄化センター(兵庫県)

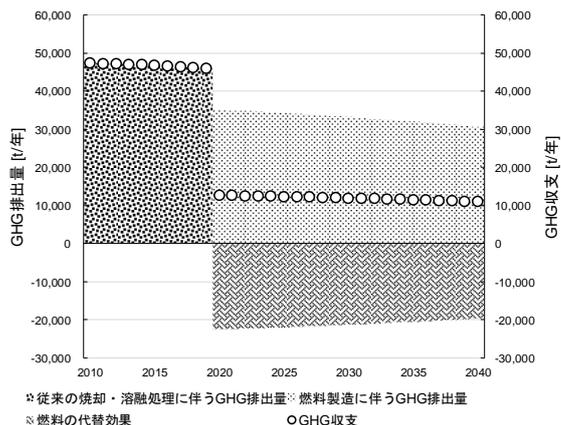


図6 2010～2040年のGHG排出量

3) さらなるGHG削減に向けた複合的な連携モデル

設定したケース別のGHG排出量の推計結果を図7に示す。case0では、下水汚泥は脱水した後に汚泥焼却炉で焼却処分し、各清掃工場ではごみ焼却発電をおこなう。北九州市で過去に実施されていた汚泥とごみの混焼事業をcase1、現在の固形燃料化事業をcase2、さらに熱利用の異なる比較ケースをcase3、4としている。

case0と比較すると、case1～4はそれぞれ16%、42%、40%、33%の削減となった。脱水汚泥を造粒乾燥するcase2～4はいずれも、清掃工場で混焼・発電するcase1よりもGHG削減効果が高い結果となった。下水汚泥の処理方式において、造粒乾燥物による一般炭代替のGHG削減効果が高いといえる。最もGHG削減効果が大きいcase2と次点のcase3を比較すると、清掃工場の蒸気タービン発電と消化ガス発電の総発電量に差がある。発電効率は消化ガス発電のほうが高いが、case3は間接熱交換型の汚泥乾燥を想定しているため、case2より多量の熱を乾燥に消費する。そのため、case2の発電量がcase3を上回る結果となった。

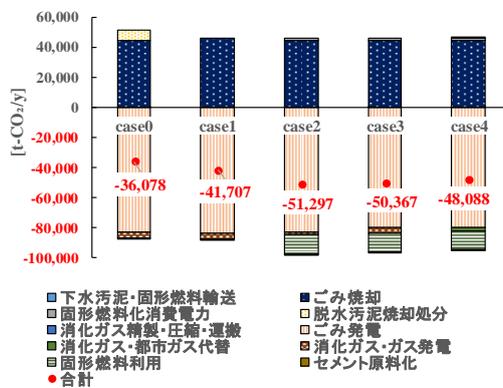


図7 ケース別GHG排出量

(2) 静脈系インフラ間の連携

1) 大都市における静脈系インフラ間の連携

温室効果ガス排出量（GHG）での評価結果を図8に示す。ケースBとケースCについては、Base 2030と比較してそれぞれ25%、26%のGHG排出削減が図れる結果となった。ケースBにおいては、低温炭化炉における脱水汚泥の変換プロセスで N_2O 排出量が非常に小さいこと、生成した炭化物を石炭火力発電所において高い効率で利用できることが削減に大きく寄与する。また、ケースCにおいては、ごみ廃熱発電システムの抽気を活用して脱水汚泥を効率的に乾燥できることが CO_2 排出量の削減効果に反映される。ケースBの導入には、固形燃料の受入先（石炭火力発電所）の確保が必須となる。一方、ケースC（ごみ焼却施設による脱水汚泥の受入、乾燥・混合焼却）でもケースBと同レベルのGHG排出削減効果が得られた。よって、固形燃料の受入先が確保できない場合は、ごみ焼却施設との連携が脱水汚泥のエネルギー利用に向けて有効な選択肢となることが示された。

ケースDでは、Base 2030と比較して34%のGHG排出削減が図れる評価結果となった。ごみ廃熱発電システムの抽気を活用することにより脱水汚泥を効率的に乾燥できるケースCの長所、固形燃料（乾燥汚泥）を石炭火

力発電所で用いることにより高い発電効率でエネルギー利用できるケース B の長所、その両方を活かすことができる。よって、静脈系・動脈系の全ステークホルダー（下水処理施設、ごみ焼却施設、石炭火力発電所）による連携が成立した場合、より一層の GHG 排出削減効果が期待できることを明らかにした。

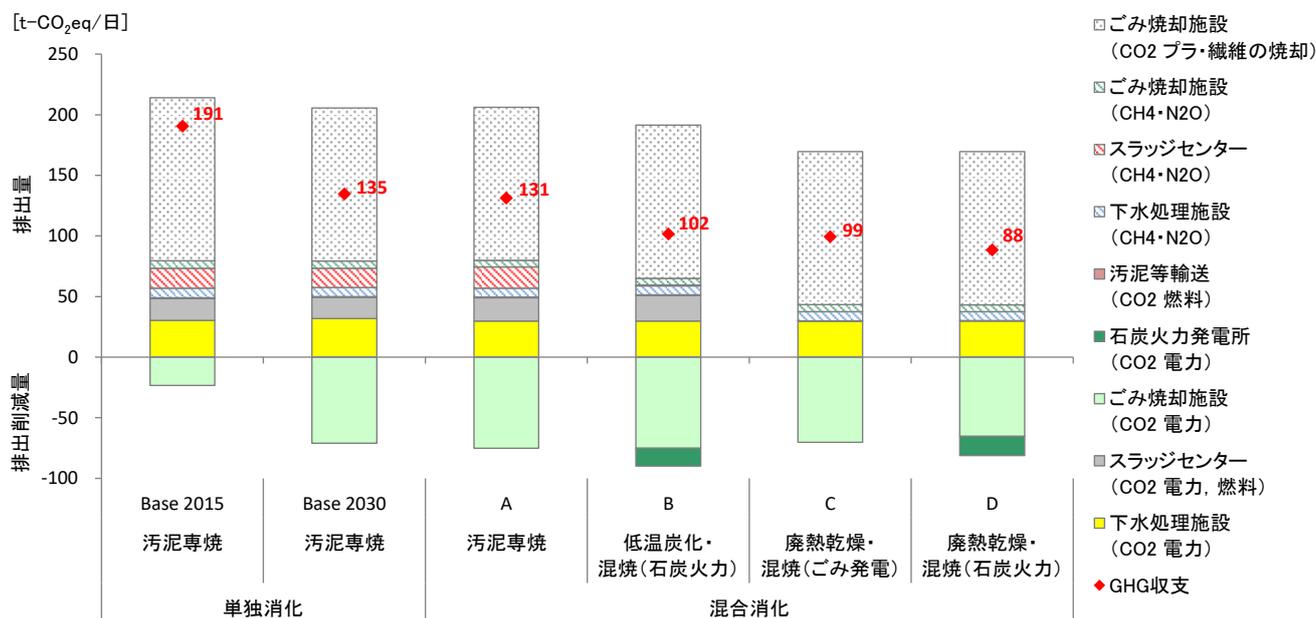


図 8 温室効果ガス排出量での評価結果（神戸市を対象としたケーススタディ）

2) 地方都市における静脈系インフラ間の連携

技術単体での導入効果を評価したケースが、それぞれの地区の熱回収ケース（ごみ焼却施設におけるボイラ・タービン発電の導入）、ガス回収ケース（ごみ焼却施設における乾式メタン発酵の導入）である。本研究では、技術単体の効果に対し、ごみ焼却施設との連携によるし尿処理施設の焼却炉の廃止を混焼連携ケース、ごみ焼却施設・下水処理施設との連携によるし尿処理施設の完全廃止を混焼連携ケースとして扱い、それによる温室効果ガス排出削減効果分を評価することを狙いとした。

温室効果ガス排出量を指標とした評価の結果、ボイラ・タービン発電導入地区（太田館林ブロック）では、混焼連携ケースの導入により、熱回収ケースと比較して 13% の GHG 排出量を削減できる可能性を示した。メタン発酵導入地区（吾妻ブロック）では、融通連携ケースの導入により、ガス回収ケースと比較して 15% の GHG 排出削減効果が得られた。

(3) インフラ間連携の全国展開ポテンシャル

(1) 及び (2) をふまえた、全国の未利用汚泥のうち回収可能な汚泥量による GHG 削減量を図 9 に示す。

輸送範囲を一般に汚泥燃料が輸送されている最長ケースの距離水準にほぼ相当する 150km 以内とした場合、未利用汚泥量の約 85% に相当する 5,270 千 t-wet (80%) / y の汚泥からのエネルギー回収が可能となり、GHG 削減量は 679 千 t-CO₂/y となる結果を得た。輸送範囲を 200km 以内としても 150km の場合と比較して配分される汚泥量及び配分先の構成に変化はない。これは、都市域に位置する政令市や中核市の汚泥は 150km 圏内で全て連携先があり配分される一方、地方域も含めて多様な地域特性をもつ流域下水道の場合、汚泥量全体の約 3 分の 1 に相当する下水処理場は 150km から 200km 圏内に輸送範囲を拡大しても受入量に余裕のある産業工場や発電設備を有するごみ焼却場（同一市町村内）が存在しないことによるものと考えられる。専らこれらの未配分汚泥の燃料利用を図ることを目的に、下水処理場の近隣に産業工場の立地を誘導することは難しい。

他方で、例えば同じ流域下水処理計画区域内の市町村のごみ焼却場が連携して下水汚泥を受入可能とする柔軟な制度設計や、乾式メタン発酵のように発電設備を有しないごみ焼却場においてもエネルギー回収可能な技術の導入施策等が期待される。さらには、燃料利用以外の資源化施策の検討も考えられる。

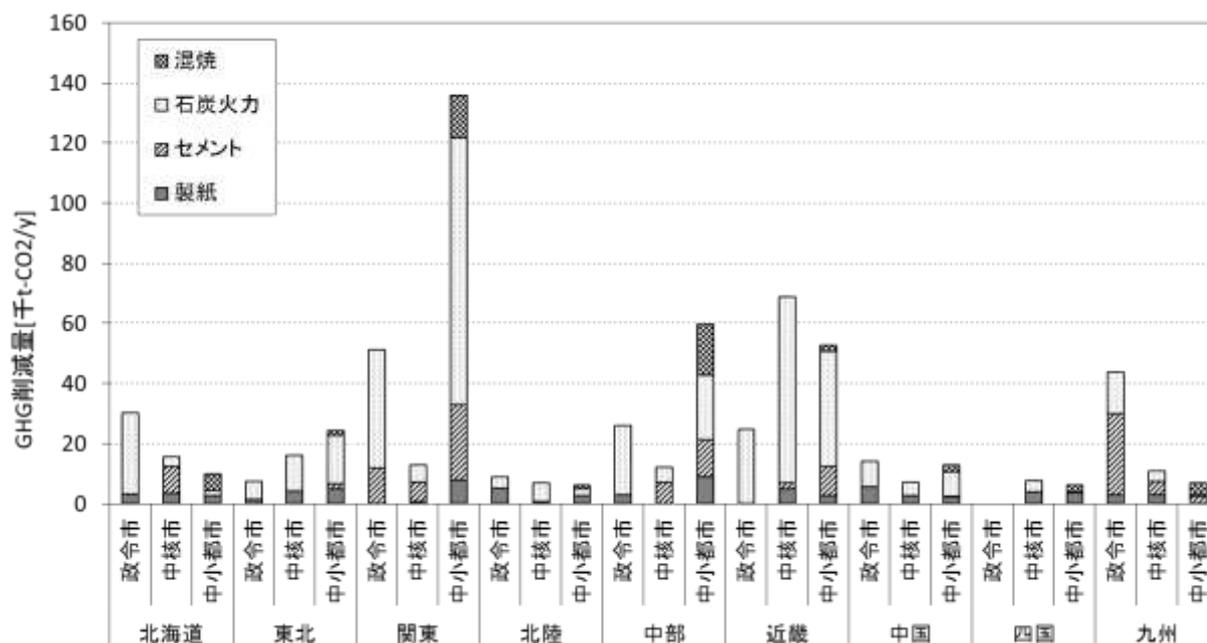


図9 地域別都市規模別のGHG削減量（輸送範囲150km以内）

また、混焼比の変化による各地域のGHG削減量（表3）をみると、石炭消費熱量に対して製紙工場の混焼可能割合が熱量比で5%まで向上した場合の全国のGHG排出削減量は、現状の混焼比1%の679千t-CO₂/yに比べ、2割を上回る増加の843千t-CO₂/y、10%まで上昇した場合は4割を上回る増加の963千t-CO₂/yとなる。地域別にみるとGHG削減量が多い地域は、関東、近畿であり、それぞれ5%時点で213千t-CO₂/y、159千t-CO₂/y、10%時点で244千t-CO₂/y、181千t-CO₂/yである。一方、北陸、中国では削減量は大きくないが、混焼率の変化によりGHG削減量の増加率が高く、北陸で混焼比1%時点の場合と比べ削減量は5%時点で約2.3倍、10%時点で2.9倍の削減量となる。中国では5%時点で1.9倍、10%時点で約2倍となる。このように混焼率拡大がエネルギー回収に大きな影響を及ぼすことが分かる。

表3 製紙工場における造粒乾燥汚泥混焼率変化に伴うGHG排出削減量変化

地域	[単位]	全国			北海道			東北			関東			北陸		
混焼比	[%]	1	5	10	1	5	10	1	5	10	1	5	10	1	5	10
GHG排出削減量	[千t-CO ₂ /y]	679	843	963	56	78	81	48	69	83	200	213	244	22	50	63
増加率	[%]	-	24.2	41.9	-	41.1	45.2	-	45.3	74.2	-	6.5	22.1	-	127.5	187.5
地域	[単位]	中部			近畿			中国			四国			九州		
混焼比	[%]	1	5	10	1	5	10	1	5	10	1	5	10	1	5	10
GHG排出削減量	[千t-CO ₂ /y]	98	111	128	146	159	181	34	64	69	14	22	23	61	77	91
増加率	[%]	-	13.4	31.2	-	8.8	23.7	-	86.1	101.0	-	64.0	67.0	-	24.7	48.6

（4）静脈系インフラの維持・更新をふまえた連携

1) 地方都市における下水処理施設とごみ処理施設との連携による効果の推定

エネルギー消費量の推計結果を図10に、GHG排出量の推計結果を図11に示す。

エネルギー消費の面では、高効率ごみ発電を導入することにより、エネルギー回収（発電）量が大幅に見込める結果となった。一方で、ごみ量に比べて、脱水汚泥量は少ないため、全体に占める割合は小さいが、汚泥の混焼部分のみに着目すると、混焼によるエネルギー消費量はやや増加することが示された。GHG排出量の面においても、エネルギー消費量と同様の傾向であり、高効率発電の導入によるGHG排出削減効果は大きい、脱水汚泥の混焼部分のみに着目すると、逆にGHG排出量は数パーセント増加する結果となった。

下水処理施設と廃棄物処理施設は連携せずに下水汚泥を堆肥化し、ごみ発電を実施しない場合（ケース1）と施設更新時に下水処理と廃棄物処理が連携し、下水の脱水汚泥を廃棄物処理施設で混焼し、かつ高効率発電を導入した場合（ケース2）を比較し、ケース2の方が優位であることを示した。

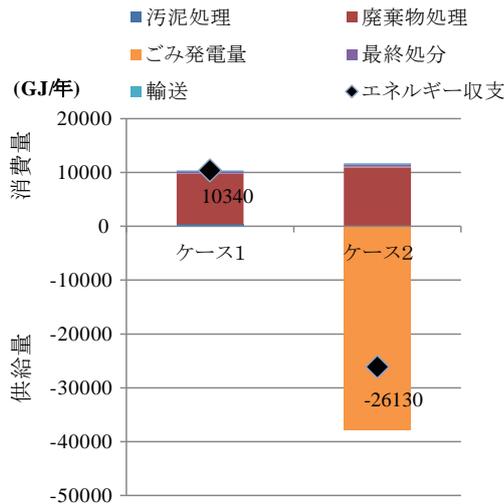


図 10 エネルギー消費量の推計結果

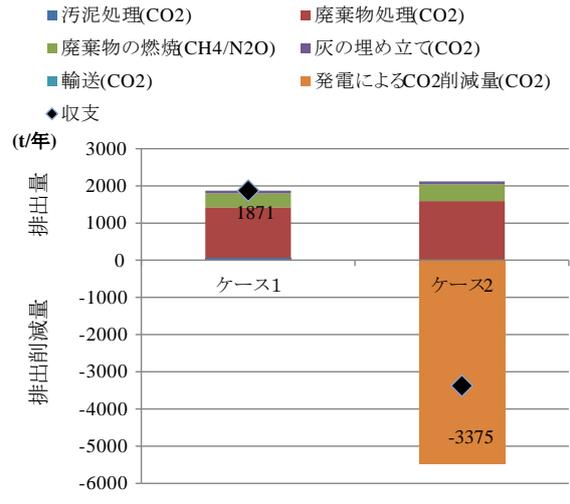


図 11 GHG 排出量の推計結果

2) 将来人口減少下での静脈系インフラの更新・再編と GHG 削減効果

設定したケース別の GHG 排出量の推計結果を図 12、図 13 に示す。ごみ焼却施設に下水汚泥の焼却機能を統合することは、汚泥焼却の集約化を図る計画よりも環境負荷低減効果が高いことが明らかとなった。また、ごみ焼却施設での焼却機能統合に併せて廃熱回収による汚泥乾燥熱源の確保することで、さらに環境負荷低減効果が高まることや、汚泥処理の集約化と汚泥処理施設への汚泥燃料化技術の選択によって、エネルギー消費および GHG 排出量がそれぞれ最大で 80.1%、101.9%削減可能となることなどが明らかになった。

今回設定したような下水道整備が遅れている地方都市では、下水道整備の進展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、施設の稼働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や GHG 排出量の面から見ても適当でないことから、廃棄物処理システムの統廃合を視野にいたった総合的な将来計画を検討することの有効性が明らかとなった。

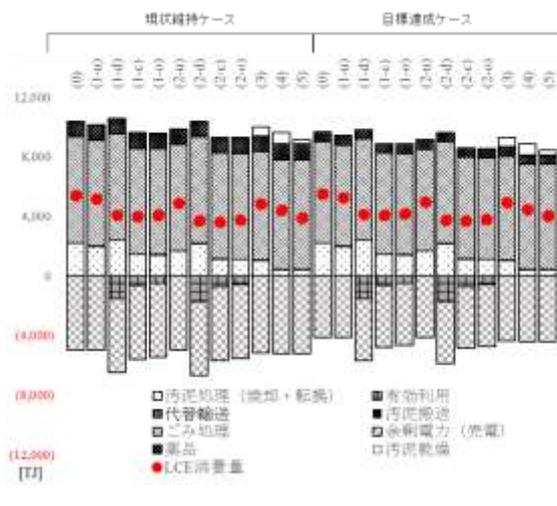


図 12 各シナリオにおける LCE 算定結果

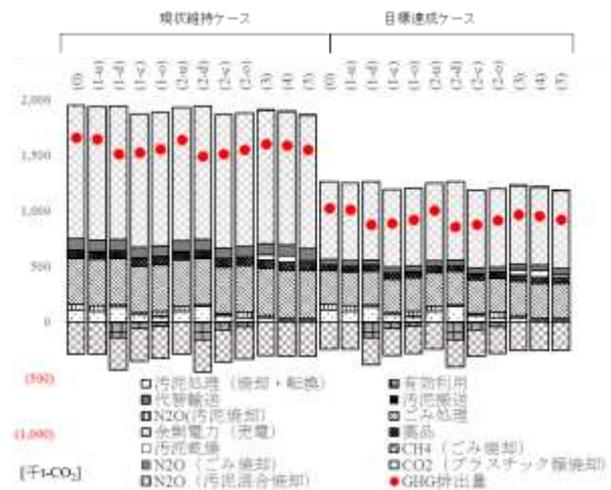


図 13 各シナリオにおける GHG 算定結果

(5) 人口動態変化をふまえた静脈系インフラの連携

市街地集約範囲を下限の下水道認可区域（下水道整備済エリア）から、上限の下水道計画区域（市街化区域における下水道未整備エリアに相当）に設定し、交通インフラの条件を加えて市街地集約エリアについて検討・評価を行った結果、図 14 に示す知見を得た。実現可能性がある集約パターンとして、既存の下水道認可区域に

市街地集約を図る「既存インフラ活用型」、下水道計画区域のうち鉄道駅と幹線道路の両条件の整った「交通結節点型」、同区域の鉄道駅周辺に集約を図る「公共交通指向型」が得られた。

以上の結果から、和歌山市では、市街地集約を行わず、さらに決定区域まで下水道整備を進めると、2050年には計画区域の2/3程度がDID密度以下となり、現状の人口趨勢や都市政策下においては事業実現性が乏しい計画であると言える。そのため、各種集約パターン検討の結果、決定区域まで下水道を整備する必要はなく、既成市街地と既存の交通インフラを活用し市街地集約を図ることによる効果が検証できた。これにより、コンパクトな都市構造が構築でき、さらにインフラコストの低減にもつながると言える。

今回は、地方都市の現状や将来人口を踏まえた市街地集約のあり方として、下水道計画を軸に検討を行った。そして和歌山市のような、下水道普及率が低く人口減少が予想される地方都市において、立地適正化計画等の都市政策とインフラの維持を関連させて市街地集約を検討することの有効性が明らかとなった。

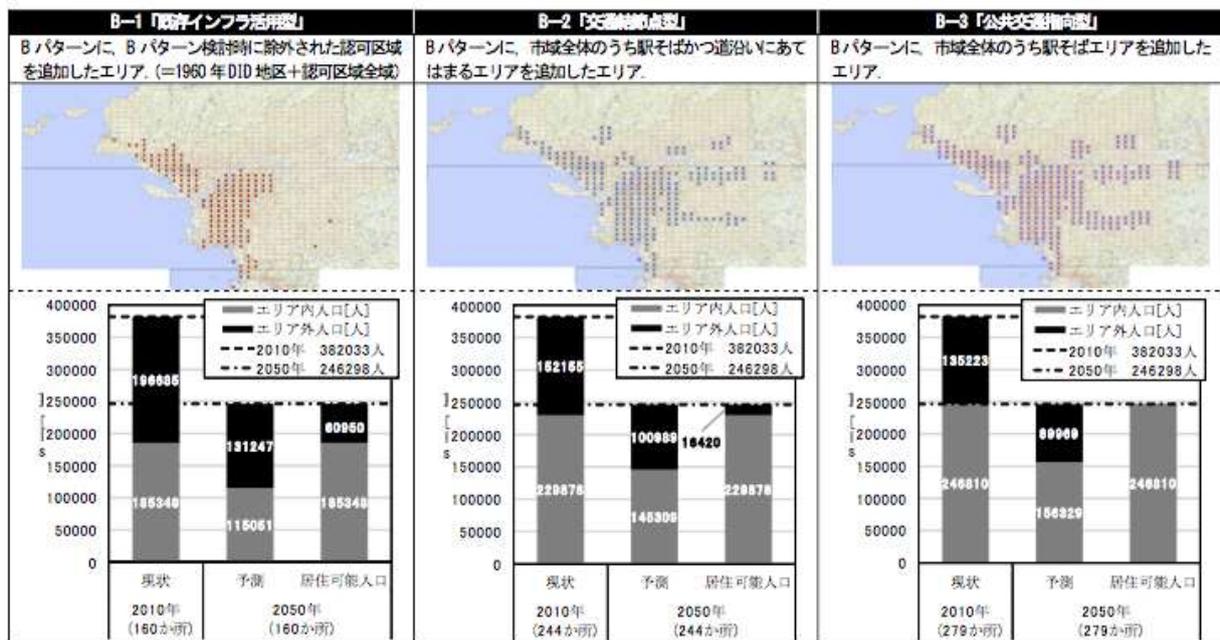


図 14 集約エリアパターンの検討結果

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

将来社会変化をふまえたインフラ連携やさらに高度化したインフラ連携による GHG 削減効果評価手法の構築

動脈・静脈インフラの連携による下水汚泥燃料化システムの需給ポテンシャル、エネルギー回収効果を評価するモデルを構築した。特に、①動脈産業側の燃料種別消費量や汚泥由来燃料への需要量などの実態が既存統計等では把握できない中、それを推計する手順を整備した点、②将来の人口変化や生産見通しを踏まえた汚泥由来燃料の中期的な需給バランスを把握・予測し、連携可能性を評価可能とした点、③静脈インフラ間の連携を高度化した上で動脈・静脈インフラの連携を図ることで、さらに効果的、効率的にエネルギー回収を促進する複合的な連携モデルを構築し、それによる GHG 削減効果を評価し、科学的な知見を提供した。

また、静脈系インフラの維持・更新をふまえた連携では、更新時期に応じた技術オプションの立案を行い、堆肥化、脱水汚泥の混焼、高効率発電のインベントリー分析からエネルギー消費量、GHG 排出量を算定するモデルを構築した。これによりエネルギー消費量、GHG 排出量の削減・抑制効果を算定することが可能となった。

汚泥のごみ混焼効果を評価するための熱収支解析モデルの構築

静脈系インフラ間の連携については、ごみ焼却施設（ストーカ炉＋ボイラ・タービン発電）においてタービン抽気を活用した汚泥乾燥システムの導入効果を評価するための熱収支解析モデルを構築した。これにより、これまで精緻にエネルギー収支の評価が行われていなかった、ごみ焼却施設で脱水汚泥を乾燥・混合焼却する施策のエネルギー消費量、温室効果ガス排出量を推計するための方法論を開発した。

※なお、本熱収支解析モデルの開発に対しては、9th i-CIPEC (International Conference on: Combustion, Incineration/Pyrolysis, Emission and Climate change) でポスター発表賞を受賞。

環境インフラを考えた立地適正化に関する科学的知見の提供

現在、地方自治体で立地適正化計画が進められており、本論で提示した市街地集約エリアは、立地適正化計画における都市機能誘導区域と居住誘導区域に相当する。2050年推計人口に基づくDID地区以上の人口密度が維持される区域、下水道計画における下水道認可区域をベースに、既成市街地（都市施設）や交通インフラ（鉄道駅および幹線道路）の整備状況を定量的に測定し、自治体の恣意性を排除して市街地集約エリアを提示したことに意義がある。

（2）環境政策への貢献

＜行政が既に活用した成果＞

汚泥のごみ混焼を検討する自治体での基礎資料としての活用

下水汚泥のごみ混焼を検討する自治体との意見交換の会議において、汚泥のごみ混焼モデルのGHG削減効果分析結果や質問紙によるインフラ連携の意向調査結果等の知見を提供し、検討の基礎資料として活用された。（鎌倉市環境部 2015. 8. 26、和歌山市中央下水処理場：2015. 11. 27）

＜行政が活用することが見込まれる成果＞

再生利用及び熱回収の効率化等のための廃棄物処理施設と他のインフラとの連携を具体化する知見

環境省「廃棄物の減量その他その適正な処理に関する施策の総合的かつ計画的な推進を図るための基本的な方針」（2016. 1. 21）における、「再生利用及び熱回収の効率化等のための廃棄物処理施設と他のインフラとの連携」を具体化する知見として活用が期待される。自治体における連携方策の検討を支援する技術資料・マニュアル、受容性、事業性を含むガイドラインとしての活用が期待される。

地方自治体へのインフラ連携の先導的取り組みや意向に関する情報提供

全国の下水処理場やごみ焼却場において明確には把握されていなかったインフラ連携への意向、促進要因を質問紙調査により明らかにした。結果として、全国のごみ焼却場の10%、下水処理場の4%が連携しうる可能性があるとの意向を示していることを明らかにした。また、質問紙調査をもとに、連携に必要な要件を抽出することができた。また、エネルギー回収に向けたインフラ連携の技術オプションを体系的に整理した。推進費の支援を得た調査報告書として、これらの成果を全国の地方自治体に情報発信しており、今後、具体的なインフラ連携を検討する際の基礎情報として活用が期待される。

将来社会変化をふまえたインフラ連携に関する計画ニーズや技術の情報提供

多くの自治体が財政制約下での環境インフラ・施設の更新を迎えるなかで、今後の人口減少および低炭素社会に適したインフラ・技術システムの計画立案に対して基本的な考え方や手順、具体的な選択肢を提供できる。人口や産業活動の縮小に伴って財政的課題が深刻化する地方自治体、特に過疎地域では、環境インフラを単独で建設・維持管理することが極めて困難となるところも多く現れると予想される。そうした自治体が動脈・静脈インフラの連携を通じて費用対効果をふまえて効果的なエネルギー回収の可能性を検討するツールとして本モデルやガイドを活用することが見込まれる。

6. 研究成果の主な発表状況

（1）主な誌上発表

＜査読付論文＞

- 1) 中尾彰文, 山本祐吾, 吉田登: 土木学会論文集 G (環境), Vol.70, No.6, pp.11_381-11_392, (2014) 「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—和歌山市におけるケーススタディー—」
- 2) 中尾彰文, 山本祐吾, 吉田登: 土木学会論文集 G (環境), Vol.71, No.6, pp.11_475-11_486, (2015) 「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」
- 3) 伊川純慶, 中久保豊彦, 東海明宏: 土木学会論文集 G (環境), Vol.71, No.6, pp.11_253-11_262, (2015) 「レジリエンス特性を踏まえた災害廃棄物（可燃系廃棄物）処理の対策効果分析—近畿圏における広域連携を対象として—」
- 4) Hiroki O., Madoka C.: International Conference of Asian-Pacific Planning Societies Hand Book & Proceeding, pp.121-124, Taipei Taiwan, August, 2016. "Pilot Programs for Town Management Utilizing the Unused Facilities -Case studies in Wakayama city-"
- 5) 松田雄太郎, 中尾彰文, 山本祐吾, 吉田登: 土木学会論文集 G (環境), Vol.70, No.6, pp.11_37-11_78, (2016) 「セメント生産インフラを活用した下水汚泥固形燃料化システムのエネルギー・物質フロー推計」

- 6) 奥田拓也, 中尾彰文, 山本祐吾, 中久保豊彦, 吉田登: 土木学会論文集 G (環境), Vol.70, No.6, pp.II_57-II_66 (2016)「産業・環境インフラと連携した下水汚泥の燃料利用が GHG 削減に及ぼす効果」
- 7) 中久保豊彦, 小林緑: 土木学会論文集 G (環境), Vol.71, No.6, pp.II_45-II_56 (2016)「地方都市・農村域における汚泥処理機能の統合化による温室効果ガス排出削減効果の解析—群馬県を対象としたケーススタディー」
- 8) 鶴巻峰夫, 久保朱里, 山本祐吾, 吉田登: 土木学会論文集 G (環境), Vol.71, No.6, pp.II_23-II_34 (2016)「過疎地域での生活排水と可燃ごみの連携処理による温室効果ガス削減について」
- 9) 長曾我部まどか, 小川宏樹: 都市計画論文集, Vol.51, No.3, pp.972-978 (2016)「郊外共同住宅居住者の住宅ニーズとまちなかへの転居の住環境条件に関する研究」

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

(2) 主な口頭発表 (学会等)

- 1) 中久保豊彦: 平成 26 年度土木学会全国大会研究討論会「都市の代謝機能の将来」(2014)「下水処理場とごみ焼却場の連携システムの可能性」
- 2) 藪口京介, 中久保豊彦, 東海明宏: 第 25 回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2014)「農村域における乾式メタン発酵・消化槽でのバイオガス回収計画の比較評価: 兵庫県但馬地域を対象として」
- 3) 尾崎平, 盛岡通: 第 25 回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2014)「ごみ焼却施設 (全連続式ストーカ方式) の維持・更新に関する実態調査」
- 4) 奥田拓也, 吉田登, 金子泰純, 山本祐吾, 小川宏樹: 第 25 回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2014)「清掃工場への乾式メタン発酵導入によるエネルギー回収可能量の基礎的検討—和歌山県を対象として—」
- 5) 菅洋輔, 中久保豊彦, 東海明宏: 第 25 回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2014)「下水処理施設・ごみ焼却施設間連携での温暖化対策に向けた都市類型の基礎的研究」
- 6) 山本祐吾, 芳元恭大, 中尾彰文, 吉田登: 第 25 回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2014)「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」
- 7) 中尾彰文, 吉元剛, 山本祐吾, 吉田登: 第 25 回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2014)「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」
- 8) Akifumi N., Yugo Y., Noboru Y.: the 9th International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, Tokyo, Japan (2015). “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”
- 9) Noboru Y., Toyohiko N., Yugo Y., Taira O., Hiroki O.: International Conference on Green Energy & Expo Orlando, USA (2015). “Biomass energy recovery by linkage of waste incinerators and sewage treatment plants”
- 10) Noboru Y., Toyohiko N., Yugo Y., Akifumi N., Taira O., Hiroki O.: the 8th Biennial conference of the International Society for Industrial Ecology, Guildford, UK 2015. “Energy Recovery from Biomass Waste by Collaboration of Environmental Infrastructures”
- 11) 奥田拓也, 吉田登: 廃棄物資源循環学会平成 27 年度春の研究発表会 (2015)「産業・環境インフラ連携による下水汚泥からのエネルギー回収可能量に関する基礎的検討」
- 12) 山本祐吾, 中尾彰文, 吉田登: 環境科学会 2015 年会 (2015)「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」
- 13) 中久保豊彦, 菅洋輔, 東海明宏: 環境科学会 2015 年会 (2015)「下水処理施設とごみ焼却施設の連携を対象とした環境性評価」
- 14) 吉田登, 奥田拓也: 環境科学会 2015 年会 (2015)「インフラ連携による廃棄物エネルギー回収の可能性と受容性」
- 15) 中久保豊彦, 伊川純慶, 東海明宏: 第 26 回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2015)「近畿圏での広域連携による災害廃棄物 (可燃系廃棄物) 処理の対策効果分析」
- 16) 奥田拓也, 吉田登: 産業・第 26 回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2015)「環境インフラの連携による下

水汚泥からのエネルギー回収に関する研究」

- 17) 中尾彰文, 山本祐吾, 吉田登: 第 26 回廃棄物資源循環学会研究発表 (2015) 「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—」
- 18) 尾崎平, 盛岡通: 環境科学会 2015 年会 (2015) 「更新時期を踏まえたごみ焼却施設の連携・再編によるエネルギー回収の評価」
- 19) 中久保豊彦, 伊川純慶, 東海明宏: 第 43 回環境システム研究論文発表会 (2015) 「レジリエンス特性を踏まえた災害廃棄物 (可燃系廃棄物) 処理の対策効果分析—近畿圏における広域連携を対象として—」
- 20) Nakakubo, T.: 9th International Conference on: Combustion, Incineration/Pyrolysis, Emission and Climate change (9th i-CIPEC 2016), Kyoto Research Park, Kyoto, Japan (2016). “Analysis of reduction effect of greenhouse gas by introducing collaborative updating plan for sewage treatment and waste incineration plants”
- 21) Nakakubo, T. and Yoshida, N.: The Joint Socio-Economic Metabolism conference and Asia-Pacific conference of the International Society for Industrial Ecology (2016 ISIE SEM & AP), Nagoya University, Nagoya, Japan (2016). “Design and evaluation of a collaborative updating plan for sewage treatment and waste incineration plants: urban typology and collaboration effect analysis”
- 22) Yoshida, N., Okuda, T., Nakao, A., Yamamoto, Y., and Nakakubo, T.: The Joint Socio-Economic Metabolism conference and Asia-Pacific conference of the International Society for Industrial Ecology (2016 ISIE SEM & AP), Nagoya University, Nagoya, Japan (2016). “Reduction of GHG Emission with Sewage Sludge Fuels Utilization by Nation-Wide Collaboration of Industrial and Environmental Infrastructures”
- 23) 中久保豊彦, 小林緑: 平成 28 年度 廃棄物資源循環学会 春の研究発表会 (2016) 「浄化槽汚泥処理機能の統合化による温室効果ガス排出削減効果の解析: 群馬県を対象として」
- 24) 荒木浩太郎, 中尾彰文, 山本祐吾, 吉田登: 第 27 回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2016) 「GHG 削減を最大とする下水汚泥燃料の産業などへの配分に関する研究」
- 25) 山本祐吾, 新垣亜以, 中尾彰文, 吉田登: 第 27 回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2016) 「地方中小都市における汚水適正処理計画の目標達成状況の点検・評価—和歌山県を対象として—」
- 26) 中尾彰文, 中林佑太, 山本祐吾, 吉田登: 第 27 回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2016) 「清掃工場を中核施設とした地域エネルギー供給システムに対応した都市集約の評価—和歌山市におけるケーススタディー—」
- 27) 尾崎平, 盛岡通: 第 27 回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2016) 「ごみ焼却施設の更新を踏まえた連携施策による低炭素効果」
- 28) 尾崎平, 盛岡通: 第 27 回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2016) 「地方都市におけるごみ焼却施設と下水処理施設の連携による効果の推定」
- 29) 中久保豊彦, 小林緑: 第 44 回環境システム研究論文発表会 (2016) 「地方都市・農村域における汚泥処理機能の統合化による温室効果ガス排出削減効果の解析—群馬県を対象としたケーススタディー—」
- 30) 小川宏樹, 櫻井祥之, 伊勢昇: 2016 年度日本都市計画学会第 14 回関西支部研究発表会 (2016) 「都市機能や都市生活の快適性に関する評価指標を用いた都市構造の類型化—都市構造の特性を踏まえた中心市街地活性化施策のあり方 その 1」
- 31) 櫻井祥之, 小川宏樹, 伊勢昇: 2016 年度日本都市計画学会第 14 回関西支部研究発表会 (2016) 「都市機能や都市生活の快適性による都市構造類型からみた中心市街地活性化施策の評価—都市構造の特性を踏まえた中心市街地活性化施策のあり方 その 2」
- 32) 中久保豊彦: 国立環境研究所 資源循環・廃棄物研究センター 内部セミナー (2016) 「2030 年に向けたごみ焼却施設の機能変化: 汚泥混焼の可能性」
- 33) 中久保豊彦, 小池夏帆: 第 12 回日本 LCA 学会研究発表会 (2017) 「セメント直接原料化の見直しに向けた脱水汚泥資源化オプションの比較評価」
- 34) 田代颯馬, 松田雄太郎, 中尾彰文, 山本祐吾, 吉田登, 轟巻峰夫: 第 12 回日本 LCA 学会研究発表会 (2017) 「都市規模やインフラ条件に応じて適用可能なエネルギー回収型廃棄物処理システムの評価フレームの構築」

7. 研究者略歴

研究代表者：吉田 登

大阪大学工学部卒業、博士（工学）、現在、和歌山大学システム工学部教授

研究分担者

1) 中久保 豊彦

大阪大学大学院工学研究科博士後期課程修了、博士（工学）、現在、お茶の水女子大学助教

2) 山本 祐吾

大阪大学大学院工学研究科博士後期課程修了、博士（工学）、現在、和歌山大学准教授

3) 小川 宏樹

三重大学大学院工学研究科博士後期課程修了、博士（工学）、現在、徳島大学理工学部教授

4) 尾崎 平

関西大学工学部卒業、博士（工学）、現在、関西大学環境都市工学部准教授

3K143006 将来の社会・技術変化を見据えた静脈系インフラの連携によるエネルギー回収**[要旨]**

本研究は、低炭素社会や人口減少などの将来社会制約下で静脈インフラ連携により廃棄物からのエネルギー回収最大化をめざす連携モデルを構築する研究である。都市規模とインフラ条件に応じて、動脈インフラと静脈系インフラとの連携、静脈インフラ間の連携、施設維持補修・更新をふまえた連携、人口動態変化をふまえたインフラ連携、さらにインフラ連携の社会展開の5つのサブテーマを組み合わせ、包括的な静脈インフラ連携モデルを構築することを目的として実施した。

最も GHG 削減効果の高い動脈インフラと静脈系インフラの連携では、下水汚泥を燃料化し、セメント・紙パルプ工場での石炭代替燃料として活用する動脈・静脈インフラの連携可能性を評価するモデルを構築した。特に将来の人口変化や生産見通しをふまえた汚泥燃料の中期的な需給バランスを予測し、静脈インフラ間の連携で石炭代替燃料を低 GHG 排出で生成し動脈インフラで活用する、インフラ連携の upgrade システムの有効性を示した。

次いで、静脈インフラ間の連携では、大都市では下水脱水汚泥のごみ焼却場での混焼、地方都市ではし尿・浄化槽汚泥の処理機能を下水処理施設やごみ焼却施設に統合化する連携の有効性を評価するモデルを構築した。

これらをふまえて、全国ベースで未利用汚泥量の 85%からエネルギーを回収しうるインフラ連携ポテンシャルとその具体的な連携の組合せを導出し、回収が課題とされる残り 15%の地域分布を明らかにした。

さらに人口減少をみすえ地方都市の下水処理場とごみ焼却場の連携に施設更新が及ぼす影響について GHG 排出量等をもとに定量的に把握するとともに、人口減少に対応して立地適正化計画が進む中、既存下水道インフラの活用とコスト抑制に着眼した市街地集約エリアの設定について検討し、静脈インフラ系都市施設計画をふまえた立地適正化の必要性を明らかにした。

以上をもとに、インフラ連携の社会展開へ向け、静脈インフラ連携の意向調査を実施し、報告書をまとめて全国の下水処理場やごみ焼却場に提供するとともに、エネルギー回収に向けたインフラ連携のガイドラインとなるよう、可能な技術オプションについて意思決定樹木図を用いて体系的に整理した。

1. はじめに

パリ協定が発効し、日本の 2030 年度の温室効果ガス排出量を 2013 年度比-26.0%とする約束草案が提示された。また東日本大震災以降、日本のエネルギー政策は国民的緊急課題であり、特に再生可能エネルギーの利活用が極めて重要となっている。再生可能エネルギーの導入比率を、日本では 2030 年までに概ね 3 割、EU では 2020 年までに 20%、米国では 2025 年までに 25%（電力供給）とするなど、国内外で高い水準での再生可能エネルギー導入目標設定が定まりつつある。

ごみと汚泥は、生活空間から安定的に生じる再生可能資源であり、これらを集約処理する清掃工場や下水処理場（汚泥処理施設を含む）の静脈インフラは資源循環拠点かつ低炭素社会を支える未利用エネルギー供給センターとして重要な役割を担っている。現在、国内約 1,200 の清掃工場、約 2,200 の下水処理場、約 170 の汚泥焼却場の多くが更新時期を迎えており、脱温暖化と循環を支える静脈インフラ将来像の提示と社会実装が急務である。

静脈インフラからのエネルギー回収の最大化を図る上では、各施設間、各静脈インフラ間、さらに産業インフラとの連携が欠かせない。そこで、研究代表らは積み重ねた基礎的な研究の見解をふまえ、分散－広域、3R 資源循環－エネルギー回収、延命化－技術革新の軸をもとに、包括的な静脈インフラ連携モデルを構築する研究を着想した。人口減少や低炭素社会などの将来社会を見通す包括的な静脈インフラ連携の研究例はなく、国際産業エコロジー学会（ISIE）の産業共生（Industrial Symbiosis）等に関連する研究と位置付けられる。

2. 研究目的

本研究は、低炭素社会や人口減少などの将来社会制約下で静脈インフラ連携により、廃棄物からのエネルギー回収最大化をめざす連携モデルを構築することを目的とする。具体的には、分散－広域、3R 資源循環－エネルギー回収、延命化－技術革新の軸をもとに、都市規模とインフラ条件に応じて静脈インフラ連携の視点からの類型化と連携方策を検討する全体テーマのもと、静脈インフラ間の連携（ST2）、動脈系インフラと静脈系インフラとの連携（ST3）、静脈インフラの維持・更新をふまえた連携（ST4）、人口動態変化をふまえた静脈インフラ連携（ST5）、静脈系インフラ再構築の社会展開（ST1）の5つのサブテーマを組み合わせ、包括的な静脈インフラ連携モデルを構築することを目的とする。

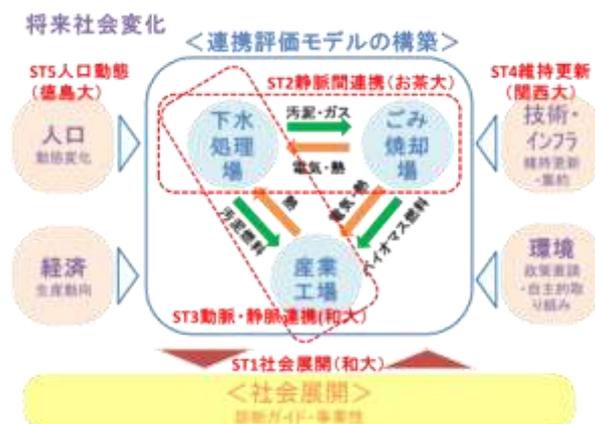


図 2-1 本研究の開発目的と研究フレーム

3. 研究方法

図 2-1 に示すように、本研究が構築をめざす、静脈系インフラを中心とした連携モデル研究は、まず初めにエネルギー回収が遅れている、下水処理場のインフラを軸として、下水処理場と動脈系、静脈系との各連携モデルについてそれぞれ分析を行った。すなわち、

(1) 動脈系インフラと静脈系インフラの連携⇒ (ST3)

(2) 静脈系インフラ間の連携⇒ (ST2)

をもとに各連携モデルにおける多様な技術オプション、シナリオからなる代替案の事例分析を行った（GHG 削減効果の高い連携は動脈系の石炭燃料代替であることから、最終報告会における構成と同じく、ST3 の動脈・静脈間連携の検討を先とし、ST3、ST2 の順に配置している）。

次に、ST2 と ST3 をふまえて、これらと同様の連携モデルが全国的にみてどの程度の連携可能性及び GHG 削減効果を有するのかについて、

(3) インフラ間連携の全国展開ポテンシャル⇒ (ST1の一部)

を分析した（これは、申請時の2次ヒアリングで受けた指摘をもとに追加した解析である）。

さらに、ST2とST3で構成される連携モデルに影響を与える要因、すなわち研究課題名にある、“将来の社会・技術変化”について、施設の維持・更新に伴う施設統合の影響や人口動態変化に関する考察として、

(4) 静脈系インフラの維持・更新をふまえた連携⇒ (ST4)

(5) 人口動態変化をふまえた静脈系インフラの連携⇒ (ST5)

に対する検討を行った（ただし、これらの将来社会・技術変化については、ST2やST3でも事例分析に即して扱っている。例えば評価対象年は将来社会変化をふまえて2030年とし、ST2では処理機能の集約、ST3では産業活動の将来変化などを含めて検討している）。

最後に、以上で検討された連携モデルを社会に展開していくうえで、インフラ連携に関する事業主体の受容性、事業性、そして静脈系主体の連携指針となるガイド集成をあわせて、

(6) 静脈インフラ連携の社会展開⇒ (ST1の一部)

について検討を行った。以上の各節及びサブテーマの構成を、図3-1に示す。以下、3.と4.では、この(1)～(6)の順に述べることとする。

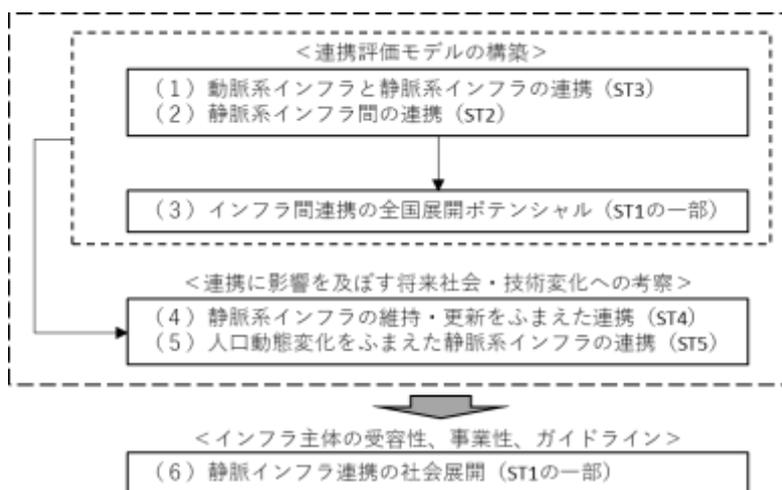


図 3-1 各節及びサブテーマの構成

(1) 動脈系インフラと静脈系インフラの連携

ここでは GHG 削減効果の高い、動脈系の石炭燃料代替を含んだ連携オプションを有する、動脈系インフラと静脈系インフラの連携（ST3）に関する連携評価モデル構築をめざす方法論について述べる。

1) セメント産業との連携モデル

兵庫県臨海地域をケーススタディの対象として取り上げ、セメント生産インフラを活用した下水汚泥固形燃料化システムのエネルギー・物質フロー推計し、下水汚泥固形燃料の需給ポテンシャルと技術導入に伴う GHG 排出削減効果を定量的に把握した。

ここでは、2010 年から 2040 年の社会的・経済的な変化も考慮している。将来の人口減少は、下水汚泥固形燃料の供給ポテンシャルに影響を及ぼす。また、経済活動の縮小によって固形燃料の受け皿となる産業が減産となれば、固形燃料に対する需要ポテンシャルも低減する。こうした将来変化をシナリオとして描き、供給側と需要側それぞれの活動を予測・評価することで、中長期的にも維持・継続できる汚泥燃料化システムかどうかを明らかにした。

a. 下水汚泥処理量とセメント生産にかかる石炭消費量の将来推計

i. ケーススタディ対象地域の概要

対象地域の下水処理場では下水汚泥の処理を広域化・集約化するシステムが構築され、いくつかの汚泥処理施設で焼却・溶融処理されている。そのため、今後従来型の処理から下水汚泥エネルギー化への移行が進むことを想定すると、これらの集約処理拠点は下水汚泥固形燃料化技術の高い導入ポテンシャルを有すると考えられる。また、地域の沿岸部には阪神工業地帯を有し、セメント工場、製鉄所、発電所、製紙工場などエネルギーを大量に消費する産業インフラが多く立地している。

なかでもセメント工場は石炭を多量に消費する一方で、燃焼に伴って発生する石炭灰を原料として利用できるという特徴を持っている。さらに近年では、脱水汚泥の製造プロセスへの受け入れや、下水汚泥固形化燃料の自家発電設備への受け入れが行われるなど、下水汚泥を資源・エネルギーとして捉えた事業を展開している。これらから、固形燃料の有効利用先としてのポテンシャルが高いと考えられる。そこで、兵庫県臨海地域の下水汚泥処理施設に固形燃料化技術を導入し、対象地域内に立地するセメント生産インフラ（実在する A 工場）で固形燃料を有効利用するシステムを構想する。

対象地域に位置する下水汚泥処理施設は 6 箇所あり、23 箇所の下水処理場から発生する下水汚泥を受け入れ、その処理を担っている。そのすべての施設を固形燃料の生産拠点候補と設定した。

ii. 下水汚泥処理施設別の下水汚泥処理量の推計

・ 公共下水道の概要

2012 年度の下水道統計¹⁾や兵庫県の下水道事業管理年報など²⁻⁴⁾を参考とし、複数の下水処理場をまたぐ下水汚泥処理の現状や関係する市町村を把握した（表 3-1）。関連する市町村は 19 市 2 町となり、下水処理場は流域下水道：6 箇所、単独公共下水道：35 箇所となる。

・ 施設別の下水汚泥処理量の推計

表 3-1 対象地域における公共下水道の概要（2012年）

市町村等	下水処理人口 [千人]	下水道普及率 [%]	流域下水道	単独公共下水道
神戸市	1,535.2	98.7	武庫川上流浄化センター，加古川上流浄化センター	ポートアイランド処理場，東灘処理場，鈴蘭台処理場，西部処理場，垂水処理場，玉津処理場
姫路市	492.3	90.5	揖保川浄化センター	中部終末処理場，東部終末処理場，大塩終末処理場，清水苑*，城山浄化センター*，家島浄化センター*
尼崎市	467.6	100.0	原田処理場**，武庫川下流浄化センター	
明石市	294.5	99.3		二見浄化センター，船上浄化センター*，大久保浄化センター*，朝霧浄化センター*
西宮市	480.3	99.9	武庫川上流浄化センター	鳴尾浜浄化センター，枝川浄化センター，甲子園浜浄化センター
芦屋市	96.5	100.0	武庫川下流浄化センター	芦屋下水処理場，南芦屋浜下水処理場
伊丹市	201.2	100.0	原田処理場**，武庫川下流浄化センター	
加古川市	241.9	89.0	加古川下流浄化センター	
西脇市	36.0	83.2	加古川上流浄化センター	黒田庄浄化センター*
宝塚市	230.7	98.6	原田処理場**，武庫川下流浄化センター	
三木市	70.0	86.4	加古川上流浄化センター	吉川浄化センター*
高砂市	87.3	92.2	加古川下流浄化センター	高砂浄化センター*，伊保浄化センター*
小野市	43.2	85.9	加古川上流浄化センター	
三田市	99.2	86.4	武庫川上流浄化センター	
加西市	27.2	58.2	加古川上流浄化センター	
宍粟市	22.9	54.7	揖保川浄化センター	ちくさ高原浄化センター*，千種中央浄化センター*，神戸浄化センター*，染河内浄化センター*，戸倉浄化センター*，原浄化センター*，鹿伏浄化センター*，道谷浄化センター*，波賀中央浄化センター*
加東市	32.9	82.4	加古川上流浄化センター	せせらぎ東条*
たつの市	71.8	89.5	揖保川浄化センター	
稲見町	25.3	79.4	加古川下流浄化センター	
播磨町	33.5	96.5	加古川下流浄化センター	
太子市	34.6	99.9	揖保川浄化センター	

*下水汚泥の処理を全てまたは一部を民間に業務委託 **対象地域以外の下水処理場

下水汚泥処理施設別の下水汚泥処理量の推計は、図 3-2 に示す手順に従った。まず、2012 年の兵庫県統計書より市町村別に下水道普及率⁴⁾を把握した。次に、2010 年～2040 年の市町村別の将来推計人口⁵⁾に市町村別の下水道普及率を乗じることで、市町村別の公共下水道人口を得た。なお、推計に用いる市町村別の将来人口推計値は 5 年ごとで把握されているため、5 年間の変化量を各年に按分することで、30 年間の将来人口を算出した。また、下水道普及率は、下水道整備が進む兵庫県では 2012 年の実績値から今後大幅に進展することはないものと仮定した。

下水処理場別の下水処理人口を求めるためには、市町村別の各下水処理場への人口配分比を把握する必要がある。その人口配分比は図 3-3 に示す考え方に基づいて求めた。具体的には、流域下水処理場および市町村別単独下水処理場の下水処理人口を把握し、市町村別の各下水処理場の処理人口を市町村における総下水処理人口で除したものを、市町村別の各下水処理場への人口配分比とし、市町村における総下水処理人口は市町村内の各下水処理場の処理人口の総数とした。また、各流域下水処理場の市町村別の下水処理人口については、兵庫県統計書における市町村別の処理区人口を用いた。下水処理場別の下水汚泥発生量原単位は、表 3-2 のとおりである。

以上によって得られた下水処理場別の下水処理人口に下水汚泥発生量原単位を乗じて、下水処理場別の下水汚泥発生量を求めた。

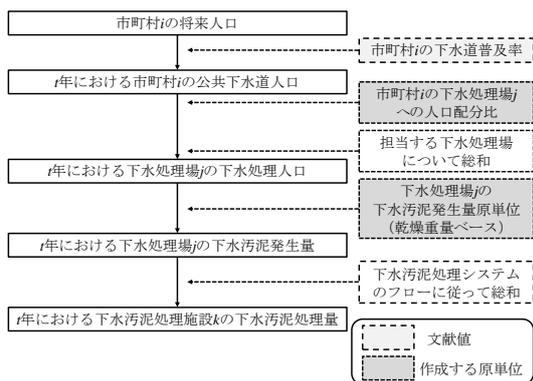


図 3-2 下水汚泥発生量の推計手順

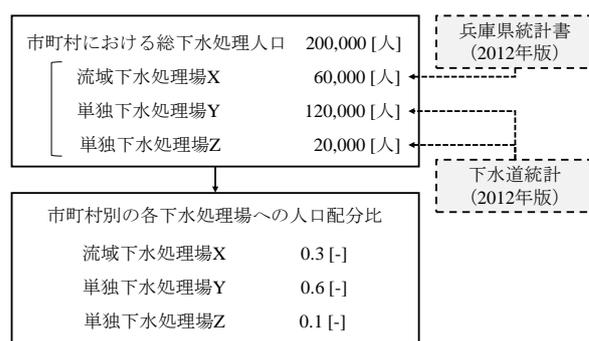


図 3-3 市町村別の各下水処理場への人口配分

表 3-2 下水処理場別の下水汚泥発生量原単位

下水処理場	下水汚泥発生量原単位 [t-DS/人・年]	下水処理場	下水汚泥発生量原単位 [t-DS/人・年]
武庫川上流浄化センター	0.0146	玉津処理場	0.0096
武庫川下流浄化センター	0.0205	船上浄化センター	0.0220
北部浄化センター	0.0147	二見浄化センター	0.0102
東部浄化センター	0.0256	朝霧浄化センター	0.0157
西宮市単独下水処理場	0.0198	大久保浄化センター	0.0201
芦屋下水処理場	0.0165	加古川上流浄化センター	0.0192
南芦屋浜下水処理場	0.0141	加古川下流浄化センター	0.0182
東灘処理場	0.0138	揖斐川浄化センター	0.0308
ポートアイランド処理場	0.0452	中部終末処理場	0.0212
鈴蘭台処理場	0.0178	東部終末処理場	0.0301
西部処理場	0.0079	大塩終末処理場	0.0147
垂水処理場	0.0157		

iii. セメント生産にかかる石炭消費量の推計

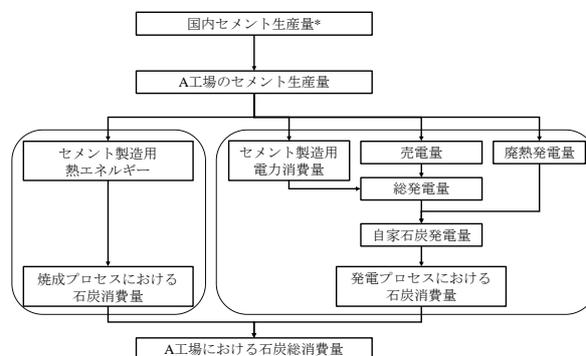
・セメント生産工場の概要

関西地方唯一のセメント工場であり、瀬戸内海に面した自治体の臨海部に位置する。自家発電設備によって工場内の全電力を賄い、余剰分を電力会社に売却している。

A工場では、環境省が推進する廃棄物処理施設における温暖化対策事業の支援を受けて、2008年9月に脱水有機汚泥の乾燥・燃料化設備を竣工した。その設備で燃料化された乾燥汚泥は、キルンの仮焼炉へと吹き込まれ、セメント製造用の燃料として活用されている⁶⁾。また、2014年4月より、国内で初めて自家用火力発電設備の燃料として、下水汚泥固形燃料の使用が開始される⁷⁾など、下水汚泥を含めたバイオマスの利活用を積極的に行っている。このように、先進的な技術を積極的に導入することで、下水汚泥の受け入れを率先して行うセメント工場の一つと言える。

・石炭消費量の推計手順

A工場における石炭消費量の推計フローを図3-4に示す。A工場における石炭消費量は、



*国内のセメント生産量の将来見通しを考慮

図 3-4 石炭消費量の推計手順

焼成プロセスと発電プロセスに分けて求めた。焼成プロセスにおける石炭消費量は、セメント生産量に基づきセメント製造に必要な熱エネルギー量を求め、それを石炭消費量に換算して推計した。発電プロセスにおける推計については、まず、A工場における発電方法と電力用途を整理した。A工場では自家石炭火力発電と廃熱発電が行われており、発電した電力はセメント製造と売却に充てられている。そのため、A工場における自家石炭発電量は、セメント製造用電力量と売電量の和から廃熱発電量の差を取ることで求められる。以上から、自家石炭発電量に相当する熱量を換算することで、発電プロセスにおける石炭消費量を推計した。

・セメント生産量の推計

国内セメント生産量の将来見通しとして、エネルギー・環境に関する選択肢のシナリオ詳細データ⁸⁾で提示されている慎重、成長、低成長の3つのケースを設定した。ここでは、2010年までの実績と2020年、2030年の推計値が示されているため、10年間の変化量を各年に按分することで、2030年までの国内のセメント生産量を推計した。2030年以降については、2020年～2030年までの傾向が2040年まで続くものと仮定した（図3-5）。

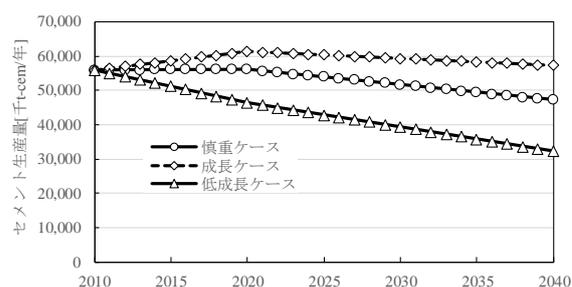


図 3-5 ケース別セメント生産量の推移

セメントハンドブック 2013 年度版⁹⁾をもとに、全国の工場ごとのクリンカ製造能力（2013 年）を把握し、A工場のクリンカ製造能力（3,504 千 t）を全国のセメント工場の総クリンカ製造能力で除すことよって、国内のクリンカ製造量に占める A 工場のクリンカ製造能力の割合を得る。今後この値は変わらないと仮定し、A 工場におけるセメント生産量を求めた。

・焼成プロセスにおける石炭消費量

セメントの生産量の変動にかかわらず、セメント産業の努力によって廃棄物燃料を除いたセメント製造用熱エネルギー原単位は改善されてきたが、近年では、ほぼ横ばいに推移している¹⁰⁾。そこで、2012 年における廃棄物燃料を除いたセメント製造用熱エネルギー原単位¹¹⁾である 2,434 GJ/千 t-cem が、今後も変化しないと仮定し、製造に必要な化石燃料由来の熱エネルギー量を求めた。

その上で、セメント製造に必要な化石燃料由来の熱エネルギー量を石炭の単位発熱量¹²⁾である 25.97 [GJ/t]で除すことよって、製造に必要な熱エネルギーを得るための石炭消費量を算出した。

・発電プロセスにおける石炭消費量

セメント産業年報アプローチ 2013 年版¹³⁾に 5 年間分（2008～2012 年）のセメント製造用電力消費量原単位が記されている。そこで、5 年間の平均値である 105.58 MWh/千 t-cem を用いて、セメント製造用電力消費量を推計した。

また、A 工場を所有する S 社の CSR 報告書 2014 年版¹⁴⁾をもとに、S 社の全工場における売電量 1,027,000 MWh/年を各工場が保有する自家発電設備の能力^{15,16,17)}で比例配分し、工場ごとの売電量を求めた。次に、全工場におけるセメント総生産量 10,815 千 t-cem/年を各工場のセメント生

産能力¹⁴⁾に従って配分し、工場ごとのセメント生産量を求めた。最後に、求められた A 工場の売電量を A 工場のセメント生産量で除すことで、セメント生産 1 千 t あたりの売電量原単位 116.34 MWh/千 t-cem を得る。この原単位をセメント生産量に乗じることで売電量を推計した。ここでは、A 工場における発電は内部利用が主目的であるため、セメント製造に必要な電力に応じて一定の余裕を見込んで発電されると考えられることから、売電量がセメント生産量に比例すると仮定を置いた。

廃熱発電量の推計に関しては、生産技術専門委員会報告 T-22¹⁸⁾によれば、クリンカ製造 1 千 t あたりの廃熱発電量原単位は 35~40 MWh/千 t-cli とされている。ここでは、その原単位の平均値である 38 MWh/千 t-cli を用いた。ただし、この原単位を利用するためには、セメントの中間製造品であるクリンカ生産量を把握しなければならない。そこで、全国のセメントとクリンカの総生産量を把握し、クリンカ生産量をセメント生産量で除すことによって、セメント生産量に占めるクリンカ生産量の割合（クリンカ・セメント比）を得た。なお、5 年間分（2008~2012 年）のセメント、クリンカ生産量がセメント産業年報アプローチ 2013 年版¹³⁾に記されているため、5 年間の平均値である 0.844 を用いる。これらの値から、A 工場のクリンカ生産量と廃熱発電量を求めた。

A 工場ではセメント製造で消費される電力がすべて工場内で発電されており、余剰電力は売電されていることから、A 工場の総発電量はこれらの和で求めた。この総発電量から廃熱発電量を引くことにより、自家石炭火力発電量が求められるので、セメント産業における自家火力発電での 1MWh あたりに必要な熱エネルギー原単位¹⁰⁾の 10.889 GJ/MWh と石炭の単位発電量¹²⁾の 25.97 GJ/t から、発電プロセスにおける石炭消費量を算出した。

b. 固形燃料の需給バランスと GHG 排出量の将来推計

i. 下水汚泥固形燃料化技術の選定

生成した固形燃料の受け入れ先として設定した A 工場では、セメント生産にかかる設備であるボイラやバーナーで石炭を消費するために、石炭を破砕ミルによって粉状の微粉炭に加工する作業が行われている。固形燃料を混焼するためには、固形燃料も破砕できる石炭と同等もしくはそれに近い破砕性を有していなければならない。

固形燃料化技術は、大別すると乾燥と炭化の 2 種類がある。乾燥技術は下水汚泥の性状が保たれるため、炭化技術に比べ難破砕性が高く、追加の加工プロセスが必要となる可能性がある。一方、炭化技術は石炭に近い破砕性を有している。炭化技術には中温炭化、低温炭化技術などいくつかの種類が存在するが、近年では低温炭化燃料を石炭火力発電所で利用する事例¹⁹⁻²¹⁾が増加している。そこで、下水汚泥処理施設に導入する固形燃料化技術は低温炭化とした。

ii. 低温炭化燃料の需給と供給パターンの推計

・低温炭化燃料の受け入れ可能熱量の推計

製品化比などの下水汚泥性状別低温炭化燃料の諸元を表 3-3 に示す。製品化比は、実証データにおける脱水汚泥の投入量に対する低温炭化製品の生成量の比である。炭化設備への下水汚

表 3-3 低温炭化燃料の諸元²²⁾

項目	単位	未消化汚泥	消化汚泥
含水率	[%]	78	80
脱水汚泥の投入量	[kg-wet/h]	125	125
低温炭化製品の生成量	[kg-wet/h]	20.4	21.5
低温炭化燃料の含水率	[%]	2	2
製品化比	[-]	0.1632	0.172
高位発熱量*	[GJ/t]	19.507	15.321
低位発熱量*	[GJ/t]	18.293	14.4

*発熱量は dry ベース

泥投入量は、実証データにおける汚泥性状の設定に基づき、乾燥重量から湿潤重量に換算した。また、下水汚泥処理施設別の低温炭化燃料の発熱量は、施設別の低温炭化燃料の生成量に単位発熱量を乗じることにより推計した。

・低温炭化燃料の受け入れ可能熱量の推計

a. iii で求めた石炭消費量の一部を低温炭化燃料で代替する際、石炭との混焼率を次のように設定した。自家石炭火力発電所では、石炭と固形燃料の混焼率は 5%（熱量ベース）まで可能と先行研究²³⁾で明らかとされているため、発電プロセスにおける石炭との混焼率は 5%とした。

焼成プロセスにおいては、キルン排熱を活用した下水汚泥の燃料化物を 10%（熱量ベース）まで混焼することが可能であることが NEDO の実証実験²⁴⁾で確認されている。そこで、焼成プロセスに関しては、基本オプションとして混焼率 5%、技術展望オプションとして混焼率 10% を設定した（表 3-4）。

A 工場における低温炭化燃料の受け入れ可能熱量は、セメント製造に係る各プロセスに

必要な熱量に各オプションの混焼率を乗じることによって推計した。

表 3-4 各オプションにおける混焼率

項目	石炭との混焼率	
	発電プロセス	焼成プロセス
基本オプション	5 [%]	5 [%]
技術展望オプション	5 [%]	10 [%]

・低温炭化燃料の供給パターン

本項では、下水汚泥処理施設と単一のセメント生産インフラとの連携システムを想定しているが、セメント工場の受け入れ可能量を超過する分の汚泥を下水汚泥処理施設で従来型の焼却・熔融処理をしようとする、焼却・熔融設備と低温炭化設備の併設が必要となる。下水汚泥処理施設別の維持管理などの負担増加や敷地制約の観点から、そのような事態を避けるため、下水汚泥は全量炭化するという条件を置く。

各下水汚泥処理場で生成する低温炭化燃料は、A 工場までの直線距離に基づいて受け入れる。受け入れ順位が高い処理場から整理すると、兵庫西流域下水汚泥広域処理場（21.7 km）、加古川下流浄化センター（41.2 km）、二見浄化センター（47.2 km）、加古川上流浄化センター（52.7 km）、東部スラッジセンター（83.6 km）、兵庫東流域下水汚泥広域処理場（92.8 km）となる。直線距離の算出には、インターネット上のオンライン地図サービスの Google Maps を利用した。

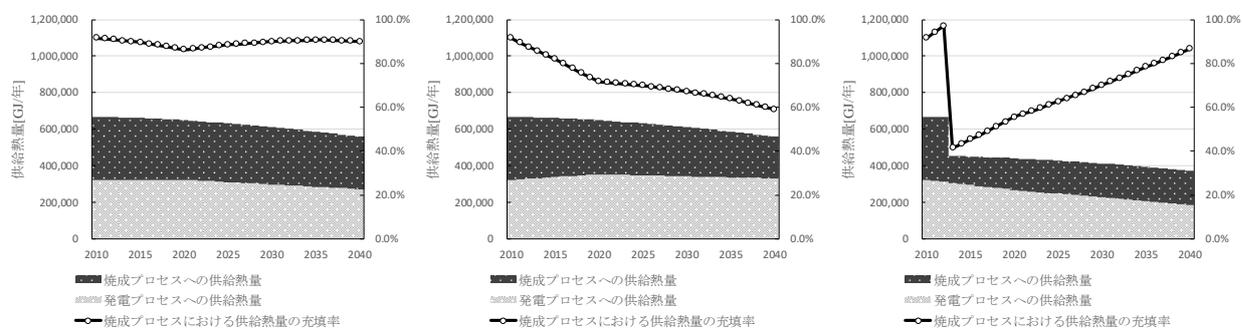
セメント産業は業界をあげて GHG 排出削減に努めているが、2012 年における自家火力発電比率は 1990 年に比べ上昇している¹⁰⁾。したがって、発電プロセスにおいても GHG 排出削減対策が検討されるべきである。また、セメント産業が独立系発電事業者として、あるいは余剰電力の売却を通じて、周辺地域の電力供給の一翼を担う事例¹⁴⁾もある。つまり、売電を行う自家発電設備には、セメント生産動向に直接的に連動しない安定した燃料需要があると考えられる。さらに、下水汚泥固形燃料化事業が概ね 20 年計画であり、供給側は安定した固形燃料の需要を確保しなければならない。このような需給の安定性の観点から、ここでは発電プロセスへの燃料供給を優先させる。

各プロセスへの炭化燃料の供給方法については、まず発電プロセスの需要を満たし、供給量に余剰が生じた場合は焼成プロセスに回す。ただし、もしある処理施設からの低温炭化燃料を全て

受け入れると焼成プロセスの需要量を超過してしまう場合には、その処理施設で低温炭化を行わないものとする。

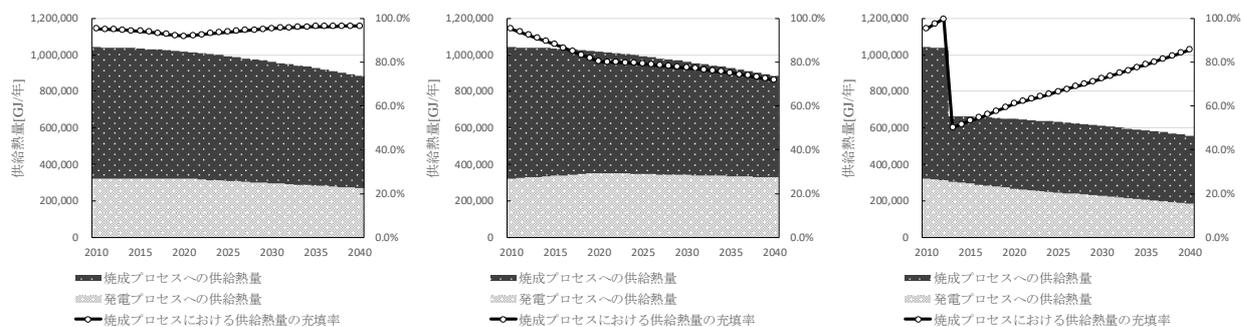
以上の手順に従って低温炭化燃料の供給パターンを明らかにした。セメント生産量予測3ケースと焼成プロセスの各オプションに応じた低温炭化燃料の供給パターンを図3-6、図3-7に示す。なお、図中の焼成プロセスにおける供給熱量の充填率は、焼成プロセスに供給した低温炭化燃料の熱量を、焼成プロセスに受け入れ可能な低温炭化燃料の熱量で除したものを指す。

低温炭化燃料の供給が余剰とならない程度となる汚泥処理施設数を見ると、基本オプションの低成長ケース以外では5施設分の低温炭化燃料を受け入れることができる。基本オプションの低成長ケースについては、2010年～2013年の期間では、兵庫県東流域下水汚泥広域処理場を除く5施設、2014年以降は兵庫東流域下水汚泥広域処理場と東部スラッジセンターを除く4施設の低温炭化燃料を全量受け入れることが可能となる。



<左図：慎重ケース／中図：成長ケース／右図：低成長ケース>

図3-6 基本オプションにおける低温炭化燃料の供給パターン



<左図：慎重ケース／中図：成長ケース／右図：低成長ケース>

図3-7 技術展望オプションにおける低温炭化燃料の供給パターン

iii. 低温炭化技術導入に伴うGHG排出量の推計

供給パターンにおいて低温炭化燃料を供給しない下水汚泥処理施設では、従来の汚泥の焼却・溶融処理が継続されるものとする。また、低温炭化技術の導入に伴うGHG排出量の推計は、従来の焼却・溶融処理に伴うGHG排出量、低温炭化燃料製造に伴うGHG排出量、低温炭化燃料の石炭代替によるGHG削減量の3項目で行う。

・従来の焼却・溶融処理に伴う GHG 排出量原単位

まず、下水道統計²¹⁾に基づき、焼却・溶融処理にかかる燃料種別のエネルギー消費量を把握した。その後、エネルギー消費量に相当する燃料種別の CO₂ 排出量を算定し、それを下水汚泥処理施設別の処理汚泥量（乾燥重量）で除すことにより、原単位を作成した（表 3-5）。また、N₂O の排出量原単位は、参考文献^{26,27)}により把握した値を CO₂ 換算した。

・低温炭化燃料の製造に伴う GHG 排出量原単位

使用する燃料を A 重油と設定した場合における低温炭化燃料製造に伴う GHG 排出量原単位を表 3-6 に示す。

・石炭代替による GHG 削減量原単位

輸入一般炭の発熱量 25.97 MJ/kg に炭素排出係数 24.42 g-C/MJ¹²⁾と CO₂ 換算係数 3.667 を乗じることで、輸入一般炭の CO₂ 排出係数 2.325 t-CO₂/t を得る。この値を石炭代替による GHG 削減量原単位とした。

2) 紙パルプ産業との連携モデル

関西、中国、四国地方をケーススタディ対象地域として取り上げて、紙・パルプ生産インフラを活用した下水汚泥固形燃料化システムのエネルギー・物質フロー推計し、下水汚泥由来燃料の需給ポテンシャルと代替燃料化技術導入に伴う GHG 排出削減効果を定量的に把握した。前項と同様、2010 年から 2040 年の社会的・経済的な変化も考慮している。

紙・パルプ産業は、低炭素化を図るために重油消費設備の廃止や低炭素燃料への転換を積極的に行ってきた。近年では、木質バイオマスの利活用に必要な設備の導入を積極的に進めている。しかし、木質バイオマスの調達他他の産業セクターや用途との間で今後ますます競合することが推察され、将来にわたる安定的な資源確保が困難になる可能性がある。そのため、木質バイオマスに代わる低炭素資源として下水汚泥の利用拡大を図るべく、固形燃料化した下水汚泥を紙・パ

表 3-5 施設別の汚泥処理に伴う GHG 排出量原単位²⁵⁻²⁷⁾

下水汚泥処理施設	汚泥処理方式	脱水汚泥含水率 [%]	電気消費に伴う CO ₂ 排出量原単位 [t-CO ₂ /t-DS]	燃料消費による CO ₂ 排出原単位 [t-CO ₂ /t-DS]	脱水汚泥 1t 投入あたりの N ₂ O 排出原単位* [kg-CO ₂ /t-脱水汚泥]
兵庫東流域広域汚泥処理場	焼却	73.7	0.364	0.165	199.95
東部スラッジセンター	焼却	76.0	0.177	0.160	199.95
二見浄化センター	焼却	79.4	0.586	0.290	199.95
加古川上流浄化センター	焼却	80.5	0.472	0.301	199.95
加古川下流浄化センター	焼却	81.9	0.430	0.212	468.1
兵庫西流域広域汚泥処理場	焼却/溶融	76.8	0.632	0.586	273.42/129.27

* CO₂ 換算値

表 3-6 低温炭化燃料の製造に伴う GHG 排出量原単位²²⁾

項目	単位	未消化汚泥	消化汚泥
含水率	[%]	78	80
電力消費に伴う CO ₂ 排出量	[kg-CO ₂ /t-脱水汚泥]	47	47
A 重油消費に伴う CO ₂ 排出量	[kg-CO ₂ /t-脱水汚泥]	224	252
炭化処理に伴う N ₂ O 排出量*	[kg-CO ₂ /t-脱水汚泥]	9	9
総 CO ₂ 排出量	[kg-CO ₂ /t-脱水汚泥]	280	308

*CO₂ 換算値

ルプ生産インフラで利活用する実証実験が進められている。こうした紙・パルプ生産インフラと連携した下水汚泥燃料利用の社会展開を考える際には次のような点に留意し、システムを構築することが肝要となる。

一つは、都市域や地方域の立地に影響を受け、製品の生産種類や生産規模、周辺環境への配慮、燃料供給ルートなどの違いが生じ、工場ごとに消費する主な燃料種が多様な点である。したがって、下水汚泥を固体、液体、気体のいずれの燃料に転換することが望ましいかは、地域ごとに画一的でない。もう一つは、生産規模の大きな工場ほど地方域に立地し、逆に都市域に立地している工場は古紙を原料としたリサイクルを中心として、木材を原料とする地方域の工場よりも生産量が比較的小規模な点である。そのため、都市域に比べて人口規模が小さく下水汚泥発生量の少ない地域ほど汚泥由来燃料に対する需要が大きいという、需給のミスマッチが生じる可能性がある。このギャップは、将来の人口変化や経済・産業の動向によっても大きく変化する。

そこで、単一の産業工場を受け入れ拠点とし、その受入容量のみから需給バランスを考えた前項を発展させ、本項では紙・パルプ生産インフラの立地特性および燃料消費形態に応じた下水汚泥燃料化システムの需給バランスを把握するとともに、その評価方法や手順を構築した。

a. ケーススタディ対象地域の概要

大阪府や兵庫県臨海地域では下水汚泥の集約処理システムが確立され、大規模な設備で焼却・熔融処理されている。関西の他府県でも下水汚泥の流域処理事業が展開され、汚泥の集約処理がなされている。しかし、エネルギー化技術の導入は一部の処理施設にとどまっており、下水汚泥燃料化システム導入に大きなポテンシャルを有すると考えられる。また、関西の沿岸部には阪神工業地帯を有し、中国・四国地方の瀬戸内にはいくつものコンビナートや港湾工業地帯を有している。そこには、化石燃料を大量に消費する素材生産インフラであるセメント工場、製鉄所、紙・パルプ工場や発電所などが多く立地している。なかでも、石炭や重油、都市ガスなどの化石燃料を多量に消費する紙・パルプ工場は、バイオマスの利活用推進や積極的な低炭素行動に努めてきた。さらに近年では、下水汚泥固形化燃料の発電・蒸気生産設備への受け入れが行われ、下水汚泥を資源・エネルギーとして捉えた事業に着手していることから、代替燃料の有効利用のポテンシャルが高いと考えられる。

b. 下水汚泥処理量・消化ガス有効利用可能熱量の推計

代替燃料の供給可能量を把握するために必要な下水汚泥発生量と、消化ガス有効利用可能量を推計した。消化ガスは従来、消化槽の加温熱源、汚泥焼却炉の補助燃料などに有効利用されるほかは、焼却処分されている。連携システムの構築にあたっては、消化ガスを精製し、メタンガスの純度を高めた精製バイオガスを都市ガス代替として利用する。この精製バイオガスの供給可能量を推計するにあたり、消化ガスの有効利用可能熱量を把握した。なお、本研究で消化ガスの有効利用は消化槽の加温熱源のみとする。

i. 対象地域の下水処理インフラの整理

2014年度の下水道統計¹⁾や各都道府県の下水道事業管理年報などを参考に、複数の下水処理場をまたぐ下水汚泥処理の現状や関係する市町村を把握した。対象地域の関連する下水処理場・下

水汚泥処理施設は流域下水処理場：53 箇所、単独公共下水処理場：565 箇所、広域汚泥処理施設：5 箇所の計 623 箇所となる。

ii. 施設別の下水汚泥処理量の推計

下水汚泥処理施設別の下水汚泥処理量及び消化ガス有効利用可能熱量の推計フローを構築した(図 3-8)。市町村別の将来人口に基づいた下水処理場別の下水処理人口や、汚泥処理施設別の下水汚泥処理量等の推計方法は、前項に示したとおりである。

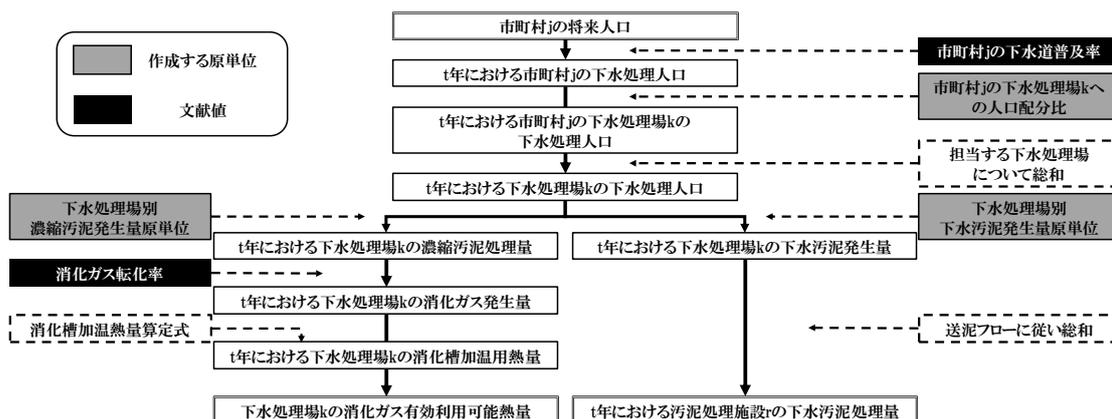


図 3-8 下水汚泥処理量と消化ガス有効利用可能熱量の推計手順

iii. 施設別の消化ガス有効利用可能熱量の推計

消化槽に投入した汚泥濃縮汚泥中の有機物を分解し消化ガスが発生することから、その発生量は下水処理場別の濃縮汚泥の固形物量 (VS) に汚泥の有機分率と消化ガス転化率を乗じることで求められる。濃縮汚泥発生量原単位の作成や発生量は、前項の手順に沿って推計した。

下水処理場別の消化ガス保有熱量は、下水処理場別の消化ガス発生量に消化ガスの低位発熱量を乗じることで求めた。消化ガスの低位発熱量は、消化ガス中のメタン以外は非燃焼であると仮定し、メタン低位発熱量にメタンガス体積濃度を乗じることで求めた。消化槽加温用消化ガス熱量の推計式は李ら²⁹⁾を参考にし、表 3-7 に示す数値を算定に用いた。

表 3-7 消化ガス発生と消化槽加温熱量の諸元^{12,28,29)}

項目	単位	設定値
濃縮汚泥の有機分率	[%]	60
ガス転化原単位	[千 m ³ /t-VS]	0.55
メタン低位発熱量	[GJ/千 m ³]	33.1
消化ガス中メタン濃度	[%-vol]	60
消化ガス低位発熱量	[GJ/千 m ³]	19.8
消化槽保温温度	[°C]	40
濃縮汚泥温度	[°C]	18
消化槽加温温度	[°C]	22
汚泥比熱	[MJ/t・°C]	1

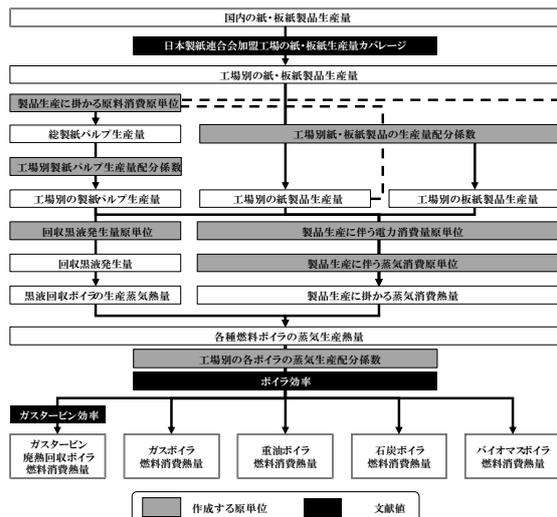
c. 紙・パルプ生産インフラにおける化石燃料消費熱量の推計

i. 対象地域の紙・パルプ産業・生産インフラの概要

日本製紙連合会加盟の紙・パルプ生産インフラは全国に 85 箇所にある。対象地域に立地する紙・パルプ生産インフラは 31 企業、28 箇所である。地域別には関西地方：14 箇所、中国地方：7 箇所、四国地方：7 箇所となる。関西地方ではガスボイラ、ガスタービン廃熱回収ボイラが整備され、都市ガスなどの気体燃料を主燃料としている。また、四国地方では重油ボイラ、石炭ボイラが整備され、重油、石炭などの炭素排出係数の高い化石燃料が主燃料となっている。そして、中国地方では多様なボイラが整備されており、各生産インフラや周辺環境などに対応した様々な燃料を消費している。

ii. 工場別の化石燃料消費熱量の推計手順

工場別の化石燃料消費熱量の推計フローを図 3-9 に示す。具体的には、まず工場別の製品生産量を求めた。次に、製品生産量に基づき製品生産に必要な電力量、乾燥用蒸気熱量を算出した。そして、生産に伴う回収黒液による蒸気生産熱量を明らかにし、製品生産に必要な生産蒸気熱量と回収黒液による蒸気生産熱量の差を取り、黒液回収ボイラを除く化石燃料ボイラの生産蒸気熱量を推計した。工場別の化石燃料消費熱量は、生産蒸気熱量をボイラ効率で除して求めた。



*国内の紙・板紙製品生産量の将来見通しを考慮

図 3-9 工場別の化石燃料消費熱量の推計手順

iii. 工場別の紙・板紙製品生産量の推計

前項と同様、国内の紙・板紙製品生産量の将来見通しとして、エネルギー・環境に関する選択枝のシナリオ詳細データ⁸⁾で提示されている成長、低成長の2つのケースを設定した(図 3-10)。2030 年以降については、2020 年～2030 年までの傾向が 2040 年まで続くものと仮定している。ただし、本項で対象とする紙・パルプ生産インフラは日本製紙連合会に加盟している工場であり、その製品生産量の総計は全国の紙・板紙生産量とは一致しない。加盟工場の紙・板紙製品生産量は、全国の紙・板紙製品生産量に占める加盟工場の生産割合：88.1% (2015 年実績、将来にわたり一定と仮定)³⁰⁾を各ケースにおける製品生産量に乗じることで求めた。

次に 2015 年の経済産業省生産動態統計年報³¹⁾を参考に、紙・板紙製品生産量を紙製品生産量、板紙製品生産量に配分する生産比率を求めた。これを加盟工場の紙・板紙製品生産量に乗じることで、紙製品生産量、板紙製品生産量が求められる。各生産比率は紙製品：0.565、板紙製品 0.435[-]と算定された。

そして、紙パルプ企業工場データブック³²⁾をもとに、2015 年における全国の工場ごとの製品の抄紙能力(製造能力)を把握し、紙・板紙製品別に抄紙能力の総和を求めた。これを全国

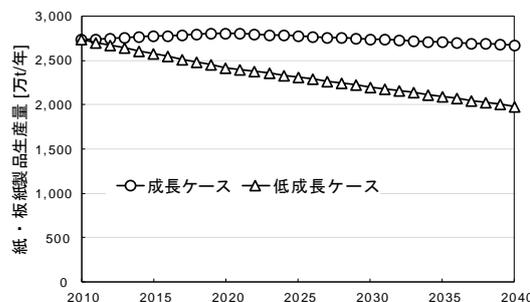


図 3-10 ケース別紙・板紙製品生産量の推移

の紙・板紙製品別の抄紙能力計で除すことによって、工場別の製品配分比を得る。この値によって紙・板紙製品がそれぞれ配分されるので、今後この値が変化しないとし、工場別の紙・板紙製品生産量を求めた。

iv. 工場別の製紙パルプ生産量の推計

まず各製品生産に必要な原料消費量を求め、原料消費量中の製紙パルプ割合を用いて製紙パルプ消費量を明らかにした。そして、製紙パルプの生産工場の生産能力に従って配分することで、工場別の製紙パルプ生産量を求めた。推計に用いる算定式および各原単位等の値を表 3-8 に示す。ただし、経産省生産動態統計年報に把握されている生産用製紙パルプの消費量（製品時）と生産用製紙パルプの消費量（原材料時）では、含水率等の影響から統計量に差が生じている。推計では製品時の製紙パルプ量を把握するため、製紙パルプ消費量（製品時）で（原料時）除した換算係数を用いた。

表 3-8 製紙パルプ生産量推計に用いる算定式及び各原単位等の算定値^{31,32)}

算定項目	対象	算定式及び算定値
製品生産に掛かる原料消費量	紙製品	$MC_{p,i,t} = P_{p,i,t} \times mc_p$ (21) $MC_{p,i,t}$: t年における工場 i の紙製品生産に掛かる原料消費量 [t/年] mc_p : 紙製品生産に掛かる原料消費量原単位 [t/t-paper]
	原単位	$mc_p: 0.504$ [t/t-paper]
	板紙製品	$MC_{pb,i,t} = P_{pb,i,t} \times mc_{pb}$ (22) $MC_{pb,i,t}$: t年における工場 i の板紙製品生産に掛かる原料消費量 [t/年] mc_{pb} : 板紙製品生産に掛かる原料消費量原単位 [t/t-paperboard]
原単位	$mc_{pb}: 1.022$ [t/t-paperboard]	
製品生産に掛かる製紙パルプの原料割合	紙製品	$cpl_p = CP_p / MCP_{total}$ (23) cpl_p : 紙製品生産に掛かる製紙パルプの原料割合 [-] CP_p : 紙製品生産に掛かる製紙パルプ総消費量 [t-pulp/年] MCP_{total} : 紙製品生産に掛かる原料総消費量 [t-pulp/年]
	原料割合	$cpl_p: 0.214$ [-]
	板紙製品	$cpl_{pb} = CP_{pb} / MCPB_{total}$ (24) cpl_{pb} : 紙製品生産に掛かる製紙パルプの原料割合 [-] CP_{pb} : 紙製品生産に掛かる製紙パルプ総消費量 [t-pulp/年] $MCPB_{total}$: 紙製品生産に掛かる原料総消費量 [t-pulp/年]
原料割合	$cpl_{pb}: 0.034$ [-]	
製品生産に掛かる製紙パルプ消費量	紙製品	$CPL_{p,i,t} = P_{p,i,t} \times cpl_p$ (25) $CPL_{p,i,t}$: t年における工場 i の紙製品生産に掛かる製紙パルプ消費量 [t-pulp/年]
	板紙製品	$CPL_{pb,i,t} = P_{pb,i,t} \times cpl_{pb}$ (26) $CPL_{pb,i,t}$: t年における工場 i の板紙製品生産に掛かる製紙パルプ消費量 [t-pulp/年]
	総消費量	$CPL_{total,t} = \sum_i CPL_{p,i,t} + \sum_i CPL_{pb,i,t}$ (27) $CPL_{total,t}$: 日本製紙連合会加盟工場の製紙パルプ総消費量 [t-pulp/年]
工場別の製紙パルプ生産量配分係数		$pc_{pl,i} = PC_{pl,i} / \sum_i PC_{pl,i}$ (28) $pc_{pl,i}$: 工場 i の製紙パルプ生産量配分係数 [-] $PC_{pl,i}$: 工場 i の製紙パルプ製品生産能力 [t/h]
	原料消費製紙パルプ量・製品製紙パルプ量換算係数	$PPL_{i,t} = CPL_{total,t} \times pc_{pl,i} \times conv_{pl}$ (29) $PPL_{i,t}$: t年における工場 i の製紙パルプ生産量 [t-pulp/年] $conv_{pl}$: 原料消費製紙パルプ量・製品製紙パルプ量換算係数 [-]
換算係数		$conv_{pl}: 3.746$ [-]

v. 工場別の回収黒液保有熱量の推計

回収黒液は、製紙パルプの一種であるクラフトパルプ生産の副産物となる。そのため、製紙パルプ生産量からクラフトパルプ生産量を推計した。まず、紙パルプ企業・工場データブックより各工場のクラフトパルプと製紙パルプ生産能力を把握し、クラフトパルプ生産能力を製紙パルプ生産能力で除することによって、工場別のクラフトパルプ生産量配分係数を算定した。そして、得られた配分係数に製紙パルプ生産量を乗じることで、工場別のクラフトパルプ生産量を求めた。

その上で、2015年の石油等消費動態統計³³⁾より回収黒液発生量を把握し、これを2015年のクラフトパルプ生産量で除すことで回収黒液の発生原単位：1.509 t-dry/t-kpを得た。また、回収黒液発生量に回収黒液の低位発熱量：11.9 GJ/t-dryを乗じることで、回収黒液保有熱量を求めた。

vi. 工場別の製品生産用電力仕向蒸気消費量の推計

製品生産に係る電力消費量を製品生産量で除した原単位を、製品別に表3-9に示す。

まず、製品生産量に各工場の製品別生産量を乗じ、さらにこの電力消費量原単位を乗じることで、工場別の製品生産に係る電力消費量を求めた。次に、算定された工場別の製品生産用電力量を総和したものと、蒸気タービン効率：0.85³⁵⁾(各工場共通、今後とも変化しないと仮定)から、この電力量を得るために必要な蒸気熱量、つまり製品生産用電力仕向蒸気熱量を算定した。

表 3-9 各種電力消費原単位とジュール換算係数^{31,33,34)}

項目	単位	統計値
紙製品生産	[kWh/t-paper]	833.3
板紙製品生産	[kWh/t-paperboard]	905.1
製紙パルプ生産	[kWh/t-pulp]	518.6
排水処理	[kWh/t]	24.5
臭気処理	[kWh/t]	5.6
排ガス処理	[kWh/t]	7.9
冷暖房	[kWh/t]	8.2
照明	[kWh/t]	11.8
用水利用	[kWh/t]	18.5
ジュール換算係数	[GJ/kWh]	0.000278

vii. 工場別の製品生産に掛かる蒸気消費量の推計

製品生産に係る蒸気消費量に生産蒸気保有熱量原単位：2.765 GJ/t-steam³⁶⁾を乗じ、それを製品生産量で除した原単位を表3-10に示す。これに工場別の製品生産量を乗じることで、工場別・製品別蒸気消費熱量を求めた。

表 3-10 各種蒸気消費原単位^{31,33,36)}

項目	単位	統計値
紙製品生産	[GJ/t-paper]	6.874
板紙製品生産	[GJ/t-paperboard]	6.055
製紙パルプ生産	[GJ/t-pulp]	3.923

viii. 工場別の黒液回収ボイラ生産蒸気熱量の推計

回収黒液はクラフトパルプ生産に伴って生じる廃棄物燃料であるため、すべての工場が黒液回収ボイラの能力に見合う範囲で黒液を全量利活用すると仮定した。その回収黒液ボイラの工場別生産可能蒸気熱量は、各工場の黒液回収ボイラの蒸気生産能力に生産蒸気保有熱量原単位、ボイラ稼働時間(24 h/日³⁷⁾、ボイラ年間稼働日数(330日/年³⁷⁾)を乗じて求めた。これにボイラ効率を乗じることで、工場別の回収黒液ボイラ生産蒸気熱量(黒液全燃焼時)を推計した。ボイラ効率は各工場共通で0.85とし³⁸⁾、今後とも変化しないと仮定した。

ix. 回収黒液を除く工場別のボイラ蒸気生産熱量の推計

黒液回収ボイラを優先的に稼働させ、保有する他のボイラは不足する蒸気熱量分を賄うと仮定した。工場で発生する回収黒液から生産可能な蒸気熱量が製品生産に係る蒸気消費熱量を上回る場合は、必要な蒸気熱量分だけ黒液回収ボイラを運転するものとし、回収黒液を除くボイラの蒸気生産熱量は0 GJ/年とした。

x. 工場別の燃料種別ボイラの化石燃料消費熱量の推計

回収黒液を除く工場別ボイラ蒸気生産熱量に工場別・燃料種別ボイラの蒸気配分係数を乗じ、これをボイラ効率で除することで求めた。ただし、ガスタービン廃熱回収ボイラの燃料消費量に関しては、ガスタービン効率を考慮しなければならない。そのため、工場別・ボイラ種別の蒸気生産能力を工場別の総蒸気生産能力で除して求めた工場別・ボイラ種別の蒸気生産配分係数を工場別の総蒸気消費量に乘じ、それをガスタービン効率（各工場共通で 0.75²⁸⁾、今後も変化しないと仮定）で除すことで、ガスタービン廃熱回収ボイラの燃料消費熱量を求めた。

d. 代替燃料の需給バランスと GHG 排出量の将来推計

i. 下水汚泥燃料化技術の設定

固形燃料化に関しては、乾燥技術による燃料化物を紙・パルプ工場で利活用する事例はあるが³⁹⁾、炭化技術による燃料化の事例は管見の限りない。また、乾燥技術には造粒乾燥、乾燥造粒、表面固化技術などいくつかの種類が存在する。近年では造粒乾燥技術による燃料化物を石炭火力発電所やセメント工場等で利用する事例が増加している一方、他の技術は日本国内では実証実験レベルにとどまっている。そこで、下水汚泥処理施設に導入する固形燃料化技術を造粒乾燥技術とした。このほかに、液体燃料化技術としてバイオオイル化、気体燃料化技術としてバイオガス精製を取り上げた。

次に、下水汚泥燃料化技術の導入が可能な施設を選定した。具体的には、燃料化施設の汚泥処理規模に着目して、実際の燃料化技術の導入事例における年間汚泥処理量（乾燥重量）の最小値を導入可能規模とした（表 3-11）。これらの条件を対象地域に適用すると、623 箇所の下水処理場・下水汚泥処理施設のうち、造粒乾燥技術導入可能な規模の施設は 35 箇所、バイオオイル化技術導入可能な規模の施設は 15 箇所となる。なお、バイオガス精製技術の導入にあたっては、すでに消化ガス発電設備を導入している下水処理場や、固形燃料化技術の導入をすでに計画中の汚泥処理施設は対象外とした。

表 3-11 造粒乾燥・バイオオイル化技術導入可能な下水汚泥処理施設規模^{39,40)}

造粒乾燥技術			バイオオイル化技術		
	単位	計画値		単位	計画値
生産能力 （湿潤重量）	[t-wet/日]	30	生産能力 （湿潤重量）	[t-wet/日]	100
脱水汚泥の含水率	[%]	80	脱水汚泥の含水率	[%]	80
脱水汚泥処理量（湿潤重量）	[t-wet/年]	9,000	脱水汚泥処理量（湿潤重量）	[t-wet/年]	30,800
稼働日数	[日/年]	300	稼働日数	[日/年]	308
脱水汚泥処理量（乾燥重量）	[t-dry/年]	1,800	脱水汚泥処理量（乾燥重量）	[t-dry/年]	6,160

ii. 代替燃料の需給と供給パターンの推計

まず、施設別の各代替燃料の生産量に単位発熱量を乗じることにより、各代替燃料の供給可能熱量を推計した（表 3-12）。次に、工場別の代替燃料の受入可能熱量を推計した。その際、石炭火力発電所における造粒乾燥燃料の石炭との混焼率を 5%⁴¹⁾、バイオオイルは重油との混焼率を 5%⁴²⁾、精製バイオガスの混焼率もこれらと同じく 5%（いずれも熱量ベース）とした。各ボイラの燃料消費熱量に各混焼率を乗じることにより、混焼可能熱量が推計できる。なお、バイオマスボイラでは木質バイオマスや廃棄物燃料、石炭などが利用されているが、ここでは石炭が総消費燃料の 28.6%（熱量ベース）を占める^{43,44)}仮定した。

表 3-12 各代替燃料の供給可能熱量の推計に係る算定式

燃料化技術	算定項目	算定式
造粒乾燥	造粒乾燥燃料の製品化比	$pd = PPD / SV_{wet}$ (40) pd : 造粒乾燥燃料の製品化比 [-] PPD : 造粒乾燥製品の生成量 [kg-wet/h] SV_{wet} : 脱水汚泥の投入量 [kg-wet/h]
	造粒乾燥燃料の生成量	$PPD_{wet,r,t} = \{SV_{dry,r,t} / (1 - wcs_r \times 10^{-2})\} \times pd$ (41) $PPD_{wet,r,t}$: t年における下水汚泥処理施設 r の造粒乾燥燃料の生成量 [t-wet/年] $SV_{dry,r,t}$: t年における下水汚泥処理施設 r の下水汚泥処理量 (乾燥重量) [t-dry] wcs_r : 下水汚泥処理施設 r における造粒乾燥設備に投入する汚泥の設定含水率 [%]
	造粒乾燥燃料の発熱量	$CHV_{pd,r,t} = PPD_{wet,r,t} \times (1 - wccf_r \times 10^{-2}) \times LHV_{pd,r}$ (42) $CHV_{pd,r,t}$: t年における下水汚泥処理施設 r の造粒乾燥燃料の供給可能熱量 [GJ/年] $wcpd_r$: 下水汚泥処理施設 r における造粒乾燥燃料の設定含水率 [%] $LHV_{pd,r}$: 下水汚泥処理施設 r における造粒乾燥燃料の低位発熱量 [GJ/t-dry]
バイオオイル化	バイオオイルの製品化原単位	$bo = PBO / SV_{dry}$ (43) bo : バイオオイルの製品化原単位 [kl/t-dry] PBO : バイオオイルの生成量 [kl/d] SV_{dry} : 脱水汚泥の投入量 [t-dry/d]
	バイオオイルの生成量	$PBO_{r,t} = \{SV_{dry,r,t} / (1 - wcs_r \times 10^{-2})\} \times bo$ (45) $PBO_{r,t}$: t年における下水汚泥処理施設 r のバイオオイルの生成量 (湿潤重量) [kl/年] $SV_{dry,r,t}$: t年における下水汚泥処理施設 r の下水汚泥処理量 (乾燥重量) [t-dry] wcs_r : 下水汚泥処理施設 r におけるオイル化設備に投入する汚泥の設定含水率 [%]
	バイオオイルの発熱量	$CHV_{bo,r,t} = PBO_{r,t} \times LHV_{bo,r}$ (46) $CHV_{bo,r,t}$: t年における下水汚泥処理施設 r のバイオオイルの供給可能熱量 [GJ/年] $LHV_{bo,r}$: 下水汚泥処理施設 r におけるバイオオイルの低位発熱量 [GJ/kl]
バイオガス精製	バイオガス精製比	$conv_{b-gas} = PVBG / SV_{dry}$ (47) $conv_{b-gas}$: バイオガス精製比 [-] $PVBG$: バイオガス精製量 [m ³ /h] VDG : 消化ガスの投入量 [m ³ /h]
	精製バイオガス量	$PVBG_{k,t} = CHV_{VDG,k,t} \times conv_{d-gas}$ (48) $PVBG_{k,t}$: t年における下水汚泥処理施設 k の精製バイオガス量 [GJ/年]
	精製バイオガス保有熱量	$CHV_{VBG,k,t} = PVBG_{k,t} \times LHV_{d-gas}$ (49) $CHV_{VBG,k,t}$: t年における下水汚泥処理施設 k の精製バイオガス保有熱量 [GJ/年] LHV_{b-gas} : バイオガス低位発熱量 [GJ/千 m ³]

3) さらなる GHG 削減に向けた複合的な連携モデル

次節（サブテーマ 2）では、静脈インフラ間の連携を高めて汚泥燃料生成の熱源を地域内で確保することで、より効率的な汚泥燃料化システムを構築できることが明らかにされている。この成果を受けて、本項では、前項、前々項のような動脈－静脈インフラの連携をさらに効果的、効率的に促進する複合的な連携モデルを評価した。具体的には、関連する施設の立地が充実し、先導的設備を導入している北九州市をケーススタディの対象地として、下水汚泥処理から汚泥の燃料利用までのプロセスが異なるケースを設定し、下水汚泥の燃料利用と他のエネルギー回収設備を併せた総合的なエネルギー回収システムの温室効果ガス（GHG）削減効果を定量的に明らかにした。

北九州市では過去に、市内の清掃工場で乾燥汚泥と一般廃棄物を混焼し、廃棄物発電を行い、その際脱水汚泥の乾燥には清掃工場の焼却排熱の一部が使用されていた。また現在、下水汚泥処理場内の汚泥燃料化施設で造粒乾燥による固形燃料化を実施しており、乾燥用熱源として処理場内で発生した消化ガスを利用している。下水汚泥の乾燥熱源となる消化ガスや清掃工場の排熱は、乾燥以外でのエネルギー回収にも利用ができ、乾燥に利用するか否かで、そのシステム全体におけるエネルギー回収量も変化する。すなわち、下水汚泥の燃料化において、燃料の生成プロセスから利用に至るまでの一連のシステムでエネルギー効率のより良いものを選択することにより、GHG 削減効果の向上が見込める。

a. ケーススタディ対象地域の概要

2014年度末時点における北九州市の行政区域内人口は971,795人で、そのうち下水道処理人口は969,477人、下水道普及率は99.8%に達している⁴⁵⁾。市内には5つの下水処理区域（皇后崎、日明、新町、北湊、曾根）があり、それぞれの処理区に下水汚泥処理場が1つ設けられている。日明の下水汚泥処理場は清掃工場と隣接立地しており、過去の混焼事業での汚泥集約・乾燥拠点であった。また、現在実施されている固形燃料化事業における造粒乾燥設備⁴⁶⁾を有し、処理場内で回収した消化ガスを乾燥用燃料として利用している。造粒乾燥時のコンデンサ排水（排熱）を消化槽の加温に利用し、エネルギーの有効利用を促進している。

市内の一般廃棄物処理施設のうち、下水汚泥処理の一端を担っていた日明、皇后崎工場は蒸気タービン発電の設備を有する。なかでも皇后崎工場はガスタービン発電の排熱により蒸気温度を高め、蒸気タービン発電の効率を向上させるスーパーごみ発電システムを備えている。本項では、この2つの清掃工場を対象として取り上げる。

また、地域内には3つのセメント工場が立地している。セメント原料として脱水汚泥を受け入れる施設として位置づけることができる。(図3-11)



図3-11 北九州市における関連施設の位置

b. 比較ケースの設定

下水汚泥と消化ガス、ごみ焼却排熱の利用方法が異なる5つの比較ケースを設定した(図3-12)。case0では、下水汚泥は脱水した後に汚泥焼却炉で焼却処分し、各清掃工場ではごみ焼却発電をおこなう。北九州市で過去に実施されていた汚泥とごみの混焼事業をcase1、現在の固形燃料化事業をcase2、さらに熱利用の異なる比較ケースをcase3、4とした。

case3では、case2で固形燃料化の乾燥熱源にしていた消化ガスを全量ガス発電に利用する。下水汚泥の乾燥熱源は、清掃工場の焼却排熱を利用する。case4では、case3でガス発電に利用していた消化ガスを、消化槽の加温とスーパーごみ発電のガス発電に必要な都市ガスの一部代替として利用する。

c. 下水汚泥・ごみ処理量の推計

下水道統計⁴⁷⁾の最新版である2014年度を基準年度とし、その他の資料も年度を統一する。

下水汚泥処理量について、case0、1は、北九州市で2015年9月まで実施された方式を想定しているため、脱水汚泥の配分量は下水道統計に記されている値を使用した。なお、下水道統計には清掃工場及びセメント工場に搬送する場合の受け入れ先となる工場名は記されておらず、環境省が公表する一般廃棄物処理実態調査⁴⁷⁾には清掃工場での乾燥した脱水汚泥の処理量が記されていない。そのため、日明工場での年間処理量127,987 t/yのうち、一般廃棄物以外の割合5.46%が脱水汚泥であると仮定した。セメント工場への搬送量は、日明浄化センターにヒアリング調査をした際に提供を受けた、1日あたりの脱水汚泥配分量の資料をもとに、各施設への配分量を設定した(図3-13)。

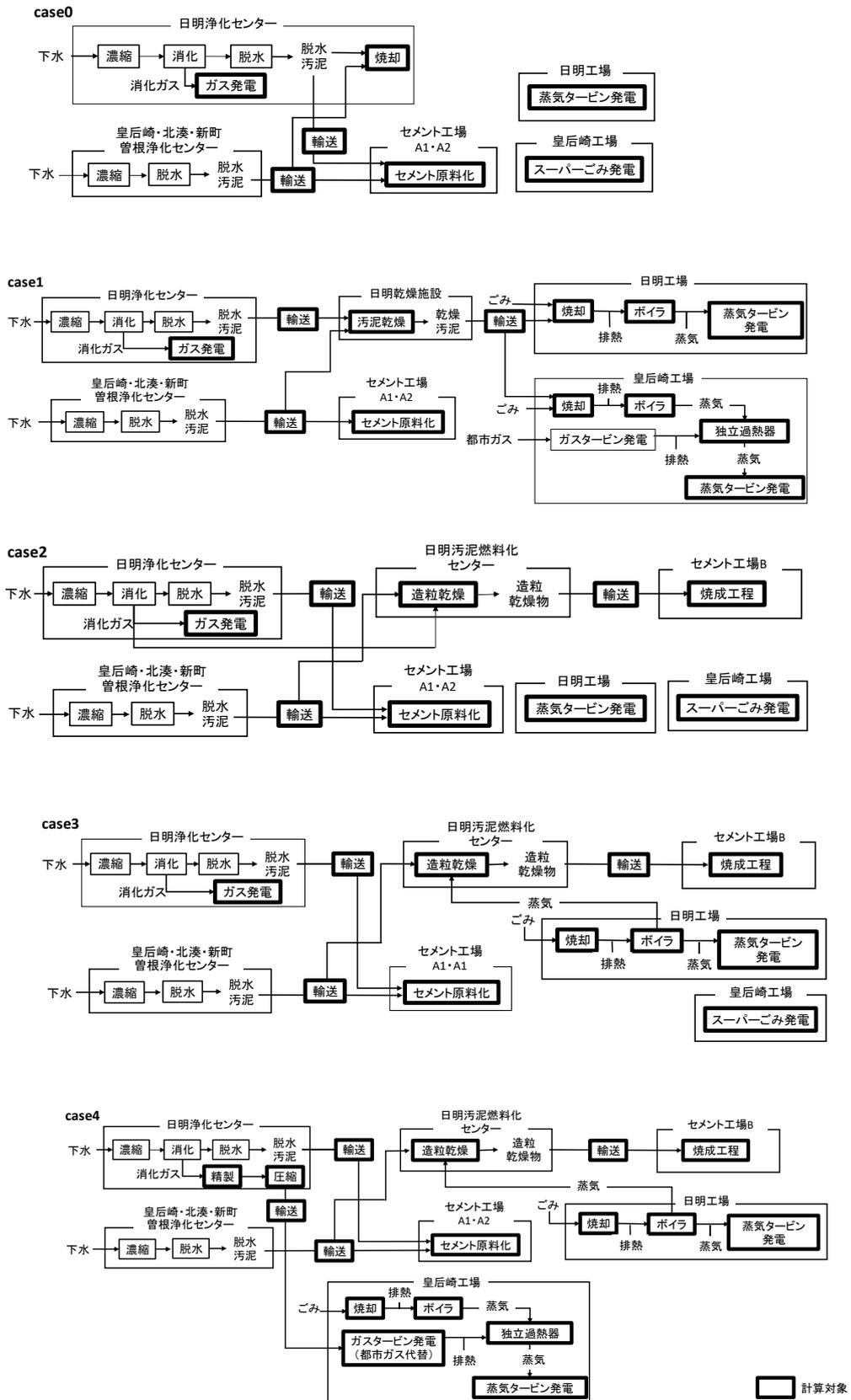


図 3-12 各ケースにおけるシステム境界

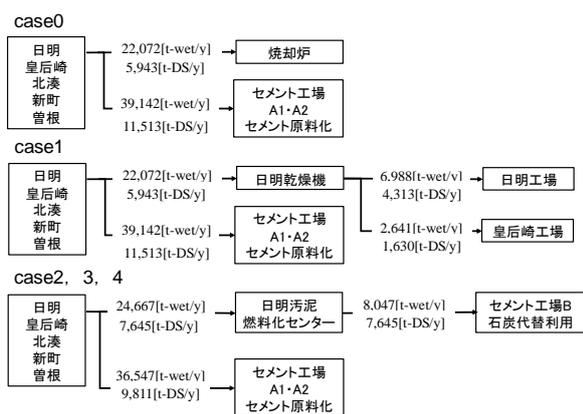


図 3-13 脱水処理後の汚泥の配分量¹⁾

表 3-13 ごみ処理量⁴⁷⁾

ケース	施設名	年間ごみ処理量 [t/y]
0,1	日明工場	127,987
	皇后崎工場	193,860
2,3,4	日明工場	120,999
	皇后崎工場	191,219

ごみ処理量に関しては、case0、1では、環境省の一般廃棄物処理実態調査結果より処理量を設定した。case2、3、4では清掃工場の汚泥処分をしないため、case0、1の処理量から汚泥処理量を減じた値を用いた。(表 3-13)

d. 温室効果ガス排出量・削減量の推計

i. 脱水汚泥・固形燃料の運搬

輸送トラックは最大積載量を 10 t-wet/台とし、使用燃料は軽油を想定した。施設間の距離は Google マップより求めた(表 3-14)。日明の汚泥乾燥機と造粒乾燥設備は、日明浄化センター内に備えられているものとした。運搬時の燃費を 2,890 km/kl⁴⁸⁾、非運搬時の燃費を 9,320 km/kl⁴⁸⁾、軽油の CO₂ 排出係数を 2,585 t-CO₂/kl⁴⁸⁾とし、運搬による CO₂ 排出量を算出した。

ii. ごみ焼却

日明工場と皇后崎工場では、全連続燃焼式焼却を採用している。この燃焼方式による一般廃棄物 1tあたりの CH₄ 排出係数を 0.00095 kg-CH₄/t⁴⁹⁾、N₂O 排出係数を 0.0567 kg-N₂O/t⁴⁹⁾を年間処理量に乗じて、廃棄物燃焼による CO₂ 排出量を算出した。電力使用による CO₂ 排出量は、年間処理量に電力消費原単位：182.3 kWh/t⁵⁰⁾と CO₂ 排出係数：0.000598 t-CO₂/kWh⁵¹⁾を乗じることで求めた。

表 3-14 施設間の距離

単位[km]	日明浄化センター	セメント工場 A1	セメント工場 A2	セメント工場 B
皇后崎浄化センター	17.1	0.67	35.2	-
日明浄化センター	-	15.3	21.2	3.4
新町浄化センター	10.7	-	22.8	-
北湊浄化センター	11.3	12.3	-	--
曾根浄化センター	19.4	-	8.9	-
日明工場	0.7	-	-	-
皇后崎工場	15.9	-	-	-

用役使用による CO₂ 排出量に関しては、先行研究^{50,52}よりごみ焼却の用役使用料原単位を引用した。ごみ焼却の燃料消費原単位は 52.6 MJ/t とし、使用燃料としては A 重油を想定した。また、用役の単位あたり CO₂ 排出係数は産業環境管理協会⁵³と先行研究^{54,55}より引用した。(表 3-15)

表 3-15 用役使用量・用役の CO₂ 排出係数^{50, 52-55}

項目	単位	[単位/t]	[kg-CO ₂ /単位]
A 重油	kl	0.001345	2,710
消石灰	kg	2.3	1.39
アンモニア	kg	0.2	1.05
水酸化ナトリウム	kg	2.2	0.671
塩酸(35%)	kg	0.2	3.01
キレート剤	kg	0.4	2.66
活性炭	kg	0.64	9.77

iii. 固形燃料化の電力使用

脱水汚泥 1t を造粒乾燥する際の使用電力：309 MJ/t-wet⁵⁶、造粒乾燥する脱水汚泥量：24,667 t-wet/y (図 3-13)、および電力の CO₂ 排出係数を用いて、固形燃料化の電力使用による CO₂ 排出量を算出した。

iv. 消化ガスの精製・圧縮・運搬

case4 では、消化ガス発生量から消化槽加温利用分を差し引いたガス量を、都市ガス代替に利用する。消化ガスを遠方に運搬して都市ガス代替として利用する際、消化ガスの不純物を除去する精製と、運搬用のトレーラーに搬入する際の圧縮が必要となるため、それらに伴う電力使用由来の CO₂ 排出量を次のように算定した。

消化槽加温必要熱量は、消化ガス発生量を 3,360 千 Nm³/y⁵⁷、消化槽温度を 35°C、2014 年における八幡（小倉の観測データがないため）の平均気温（＝投入汚泥温度）を 16.3°C⁵⁸として、花木ら⁵⁹による推計式を用いて求めた。また、消化ガスのメタン濃度：58.8 %⁵⁷、メタンガスの低位発熱量：35.74 MJ/Nm³²⁸を用い、消化ガス 1 Nm³あたりの低位発熱量を算出した。以上から、都市ガス代替となる消化ガス量を算出した。

消化ガスの精製による CO₂ 排出量は、消化ガス 1 Nm³の精製に使用する電力量：0.3 kWh/Nm³²⁸と電力の CO₂ 排出係数から求めた。その上で、春名の既報⁶⁰に基づいて精製後のメタン回収率を 93.6%、精製ガスのメタン濃度を 90%として、精製後のガス量を算出した。この精製後ガスの圧縮による CO₂ 排出量は、精製後ガス 1 Nm³の圧縮に必要な電力量：0.3 kWh/Nm³²⁸と電力の CO₂ 排出係数から求めた。

精製後ガスの運搬に関しては、精製ガス運搬トレーラーの容量を 720 Nm³/回²⁸、運搬トラックの燃費を 5,000 km/kl²⁸（軽油）として CO₂ 排出量を算出した。

v. 脱水汚泥の焼却

表 3-16 の値を用いて算出した。

表 3-16 高温焼却のエネルギー消費・N₂O 排出

原単位 ^{49, 61}		
項目	単位	原単位
電力	[MWh/t-wet]	0.086
A 重油	[kl/t-wet]	0.016
N ₂ O	[t-N ₂ O/t-wet]	0.000645

vi. 固形燃料利用

セメント製造工程には原料のクリンカの焼成があり、石炭を燃料にしている。下水汚泥由来の造粒乾燥物は、石炭の代替物としての役割を果たす。固形燃料の乾燥重量を 7,645 t-DS/年] (図 3-13)、造粒乾燥物の乾燥重量 1 t-DS の低位発熱量を 18.063 GJ/t-DS⁵⁶、一般炭 1t の発熱

量を 25.7 GJ/t⁴⁹⁾、一般炭の CO₂ 排出係数を 2.33 t-CO₂/t⁴⁹⁾とし、固形燃料利用による CO₂ 削減量を算出した。

vii. セメント原料化

セメント原料化した下水汚泥の発熱量分の石炭を代替するもの考えた。消化の有無によって脱水汚泥の発熱量が異なるため、消化汚泥および未消化汚泥の含水率（表 3-17）、脱水汚泥可燃分の元素組成と汚泥中のその割合（表 3-18）を用いて、脱水汚泥の低位発熱量推計式⁶²⁾からセメント原料化する脱水汚泥の低位発熱量をそれぞれ算出した。これにセメント原料化脱水汚泥量と一般炭の CO₂ 排出係数を乗じたものを、一般炭の発熱量で除し、セメント原料化による CO₂ 削減量を算出した。

表 3-17 セメント原料化脱水汚泥の含水率

ケース	含水率[%]	
	消化汚泥	未消化汚泥
case0,1	78.11	69.40
case2,3,4	78.10	69.59

表 3-18 脱水汚泥の可燃分⁵⁶⁾

項目	単位	消化汚泥	未消化汚泥
炭素	%	37.3	46.7
水素	%	5.2	6.6
酸素	%	23.4	29.2
窒素	%	5.7	5.1
全硫黄	%	1.23	0.8
汚泥中	%	72.83	88.4
可燃分割合			

viii. 消化ガス利用

・ガス発電（case0、1、3）

ケース 0、1、3 では、発生する消化ガス全量をガス発電に利用する。発電機の発電効率が 32.0%⁶³⁾、熱回収率は 52.0%⁶³⁾で、熱回収分は消化槽加温に利用する。消化ガス発生量：3,360 千 Nm³/y⁵⁷⁾、消化ガスのメタン濃度：58.8%⁵⁷⁾、メタンガスの低位発熱量：35.74 MJ/Nm³²⁸⁾、電力の CO₂ 排出係数を用いて、CO₂ 削減量と熱回収量を算出した。

・汚泥乾燥熱源とガス発電（case2）

図 3-13 より、各処理場から固形燃料化に使われる脱水汚泥と造粒乾燥物のそれぞれの含水率から、蒸発水分量は 16,358 t/y となる。この蒸発水分量、蒸発潜熱：2,454 MJ/t、熱損失率：10%から乾燥必要熱量を求めた。その上で、消化ガス発生量、消化ガスのメタン濃度、メタンガスの低位発熱量の積で乾燥必要熱量を除すことで、乾燥消化ガス利用量を得た。これにより、ガス発電による CO₂ 削減量を算出した。

・都市ガス代替（case4）

算出された都市ガス代替となる精製ガス量は 1,333 千 Nm³/y、メタン濃度は 90%である。メタンガスの低位発熱量、都市ガスの発熱量：44.8 MJ/Nm³⁴⁹⁾、都市ガスの CO₂ 排出係数：0.223 t-CO₂/Nm³⁴⁹⁾から、消化ガスの都市ガス代替利用による CO₂ 削減量を算出した。

ix. ごみ発電

各ケースの清掃工場における発電量は、中久保ら⁶⁴⁾による熱収支解析のための算定式をもとに算出した（表 3-19）。算出で必要となる項目の数値は環境省⁴⁷⁾より引用した。清掃工場から外部に供給されている蒸気量については把握することができなかつたため、算定式より算出した発電

表 3-19 ごみ発電量

施設名	単位	case0	case1	case2	case3	case4
日明工場	MWh/y	35,554	34,928	35,554	30,073	30,073
皇后崎工場	MWh/y	103,514	105,271	103,514	103,514	103,514

仕向け蒸気量から実際の発電に用いられている蒸気量（実績値）⁴⁷⁾を差し引いて求め、この値が各ケースにおいて一定であると仮定した。その上で、年間発電量と電力のCO₂排出係数から、ごみ発電によるCO₂削減量を算出した。

(2) 静脈系インフラ間の連携

サブテーマ2では、ごみ焼却施設での熱利用による汚泥乾燥を軸とした更新計画を解析対象とした。解析の枠組みとして、大都市、地方都市のそれぞれについて、静脈系インフラ間の連携を論じることとした。

本節では、1)ならびに2)で大都市における連携、3)ならびに4)で地方都市における連携に関する研究方法を取りまとめた。

1) 大都市における下水汚泥エネルギー化戦略の類型

大都市における下水汚泥のエネルギー利用を論じるにあたり、各都市を対象とした下水汚泥の物質フローを有機物量ベースで解析した。人口90～100万人を超える特別区・政令指定都市を対象とし、具体的には札幌市、仙台市、さいたま市、千葉市、東京都区、横浜市、川崎市、名古屋市、京都市、大阪市、神戸市、広島市、北九州市、福岡市を取り上げることとした。下水処理施設について、仙台市、さいたま市、千葉市では流域下水道として管轄される処理場も対象に含めた。設定根拠は2点あり、1点目は該当する処理場の計画処理人口に占める市からの委託人口の割合が半数以上であること、2点目は該当する処理場が市内に立地していることである。以上のバウンダリーに基づき、全体で下水道人口3,163万人（日本の人口の約25%）に該当する下水汚泥フローを定量化した。

下水汚泥フローの整理は、「下水道統計・2013年度データ」⁶⁵⁾をベースに行った。補足情報として、「焼却・溶融等施設実態調査・2011年度データ」⁶⁶⁾を用いた。東日本大震災の影響で、焼却灰の処理・資源化経路を場内ストック（または埋立）に一次的に変更した都市（仙台市、さいたま市、千葉市、東京都区部、川崎市、横浜市）については、「下水道統計・2010年度データ」⁶⁷⁾で確認できる資源化経路を踏まえて修正した。脱水汚泥のエネルギー化事業については、2016年8月時点で事業が開始されている、横浜市・南部汚泥資源化センターでの低温炭化事業、名古屋市・空見スラッジリサイクルセンターでの廃熱発電付き焼却事業、大阪市・平野下水処理場での低温炭化事業、北九州市・日明浄化センターでの造粒乾燥事業を反映させた。

下水汚泥フローの取り方として、最初に、下水道統計より得られる各処理施設での混合生汚泥（初沈汚泥と終沈汚泥の和）の発生量を、含水率を踏まえ固形物量ベースで整理した。汚泥の固形物中に含まれる有機物含有率 [%-VTS] については、濃縮汚泥の性状に関する報告値を用いた。濃縮汚泥を消化する下水処理施設では、一律に汚泥中の有機物量の50%が分解すると設定した⁶⁸⁾。汚泥中の有機物の処理・資源化オプションについて、濃縮汚泥の消化槽での分解量、脱水汚泥の固形燃料化量、焼却量（廃熱発電利用）、緑農地利用量、直接セメント原料化量（キルン内燃焼量）、溶融量、焼却量を対象とした。下水汚泥エネルギー化率 [%] は、「バイオガス利用された有機物量＋固形燃料利用された有機物量＋焼却廃熱として有効利用された有機物量」を「濃縮汚泥の有機物量」で除した値として定義される⁶⁹⁾。本研究では、濃縮汚泥の消化槽での分解量、ならびに脱水汚泥の固形燃料化量、焼却量（廃熱発電利用）の3オプションを、含有有機物がエネルギー利用される用途と定義し、各都市でのエネルギー化率を算出した。

以上の下水汚泥のエネルギー利用状況に関する物質フロー解析結果を踏まえ、大都市における静脈系インフラ連携の適合性を解析する。適合性の指標を式 (ST2-1) ならびに (ST2-2) に示す。

$$\text{消化されている濃縮汚泥の割合}[\%] = \frac{\sum_i \text{消化槽に投入される濃縮汚泥の量}_i}{\sum_i \text{濃縮汚泥の発生量}_i} \times 100 \quad (\text{ST2-1})$$

$$\text{エネルギー利用されている脱水汚泥の割合}[\%] = \frac{\sum_i \text{エネルギー回収技術に投入される脱水汚泥の量}_i}{\sum_i \text{脱水汚泥の発生量}_i} \times 100$$

(ST2-2)

式 (ST2-1) では、消化されている濃縮汚泥の割合を評価する。同値が高いほど、下水処理施設による消化槽を活用した食品廃棄物の受入ポテンシャルが高いことを指す。また、同値が高いほど、脱水汚泥中の有機物含有率 [%-VTS] が低く、廃熱発電付きの汚泥単独焼却の選択が困難となる。そのため、脱水汚泥のごみ焼却施設での汚泥混焼に対するインセンティブが高まると判断した。

式 (ST2-2) では、エネルギー利用されている脱水汚泥の割合を評価する。大都市においては、多くの自治体で汚泥単独での焼却炉が導入されており、汚泥焼却炉の更新と合わせて、新たな施策が検討されることとなる。汚泥の単独焼却に続く施策として、各都市でどの程度、脱水汚泥をエネルギー化できる技術設備への転換が図れているかを分析するための指標であり、転換を図れていない場合、脱水汚泥のごみ焼却施設での汚泥混焼を行う余地が残っているという特徴を評価した。

2) 静脈系インフラ連携計画の設計と評価－神戸市を対象としたケーススタディー

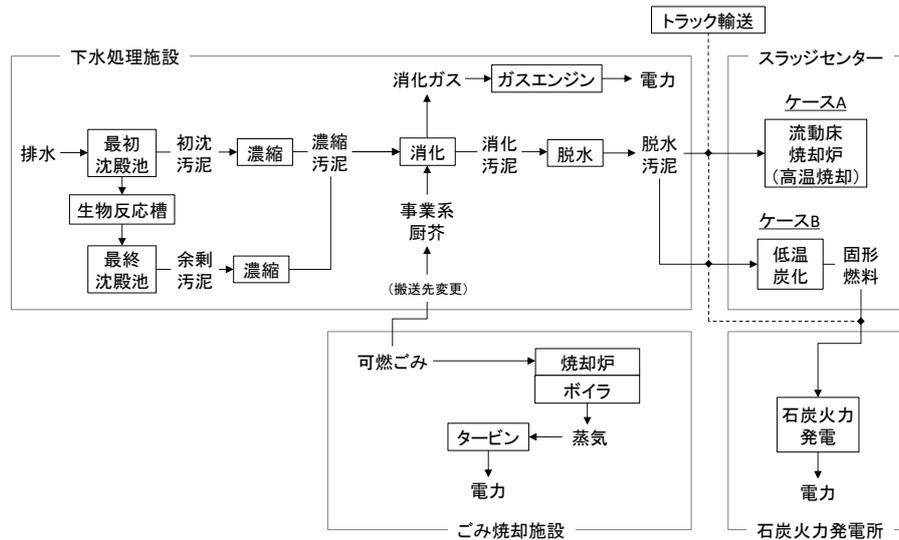
発生する濃縮汚泥の全量が消化されており、現状、汚泥焼却炉による汚泥専焼を継続している神戸市を対象として、下水処理施設での事業系厨芥の受入、ごみ焼却施設での脱水汚泥の受入を対象とした更新計画を設定した（表 3-20）。下水処理施設は垂水処理場ならびに玉津処理場を、ごみ焼却施設は西クリーンセンターを対象とし、西クリーンセンターにおけるごみ焼却炉の更新に合わせた連携施策を検討した。脱水汚泥の単独焼却は東部スラッジセンターで行われるとし、石炭火力発電所による固形燃料の受入を想定するケースでは、高砂火力発電所への利用委託が行われるとした。

表 3-20 静脈系インフラ連携に係る更新ケースの設定

		2015年	2030年				
		Base 2015	Base 2030	連携型更新ケース			
				A	B	C	D
消化槽の 活用	濃縮汚泥	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	事業系厨芥			✓	✓	✓	✓
脱水汚泥の 資源化	汚泥単独での高温焼却	✓	✓	✓			
	低温炭化				✓		
	ごみ焼却施設での乾燥・ ごみ焼却炉での混焼					✓	
	ごみ焼却施設での乾燥・ 石炭火力発電所での混焼						✓

Base 2015 ならびに Base 2030 は、現状の技術設備を踏まえたケースであり、下水処理施設での消化は濃縮汚泥のみを対象とし、脱水汚泥は汚泥単独で高温焼却（850 °C 焼却）される。2015 年に対し、2030 年には処理計画人口が 5.9%減少し、垂水処理場の反応タンクは標準活性汚泥法から嫌気好気活性汚泥法（AO 法）に更新されるとした。なお、玉津処理場は嫌気無酸素好気法（A₂O 法）が継続して用いられるとした。

■ 更新ケース A、B



■ 更新ケース C、D

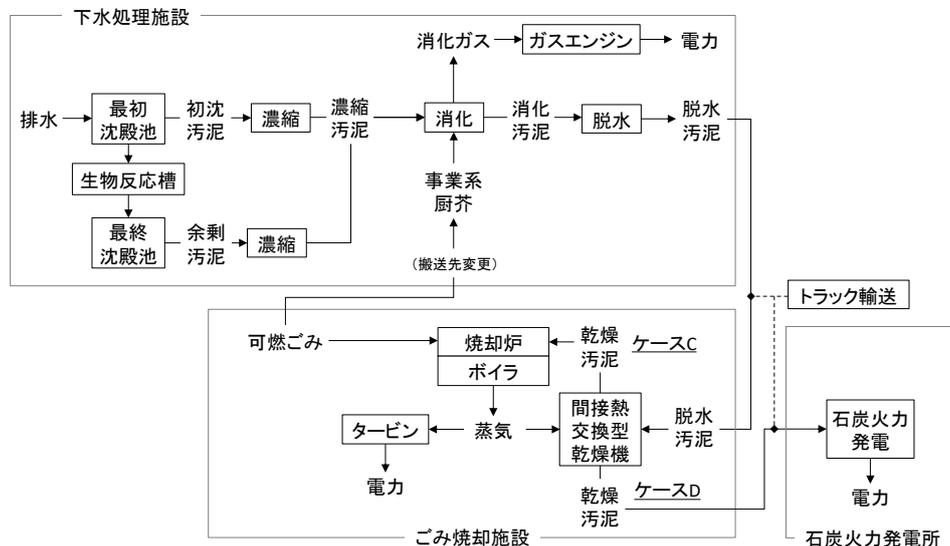


図 3-14 更新ケースのバウンダリー

連携型更新ケース（A、B、C、D）では、下水処理施設における事業系厨芥の混合消化が行われるとした。混合消化のみの効果を分析するため、ケース A では継続して脱水汚泥は単独で高温焼却される。ケース B では、スラッジセンターが垂水処理場に隣接され、低温炭化炉で固形燃料

(炭化物)に変換される。炭化物は石炭火力発電所で発電に用いられ、発電端効率は低位発熱量基準で41.5%とした。

ケースCならびにDでは、脱水汚泥はごみ焼却施設に搬送される。蒸気の一部を用いて脱水汚泥を乾燥させ、エネルギー利用が図られる。ケースCでは、脱水汚泥を含水率40%まで乾燥し、乾燥汚泥をごみ焼却炉で混合焼却させるケースとした。固形燃料化は、石炭火力発電所やセメント工場に代表される、石炭消費産業による固形燃料の受入が必要条件となる。ケースC(ごみと汚泥の混焼)は、受入先が確保できない場合における選択肢を増やすという観点での、静脈系インフラ間連携事業として位置付けた。

ケースDでは、ごみ焼却施設で脱水汚泥を含水率10%まで乾燥させる。生成した固形燃料を石炭火力発電所に搬送し、石炭火力発電所で発電利用するとした。ケースDは、静脈系・動脈系の全ステークホルダー(下水処理施設、ごみ焼却施設、石炭火力発電所)による連携が実現したケースとして位置付けた。

サブテーマ2では、ごみ焼却施設における汚泥の乾燥、エネルギー利用を精緻に解析するための、熱収支解析を開発した。ごみ焼却施設で脱水汚泥を受け入れた場合、タービン抽気を活用した間接熱交換型の乾燥機で汚泥を乾燥させるシステムを対象とした。そのプロセスモデル、ならびに技術パラメータ値は図3-15に示す。表3-21-1~3には、各プロセスにおいて熱収支をとるための推計式を整理した。

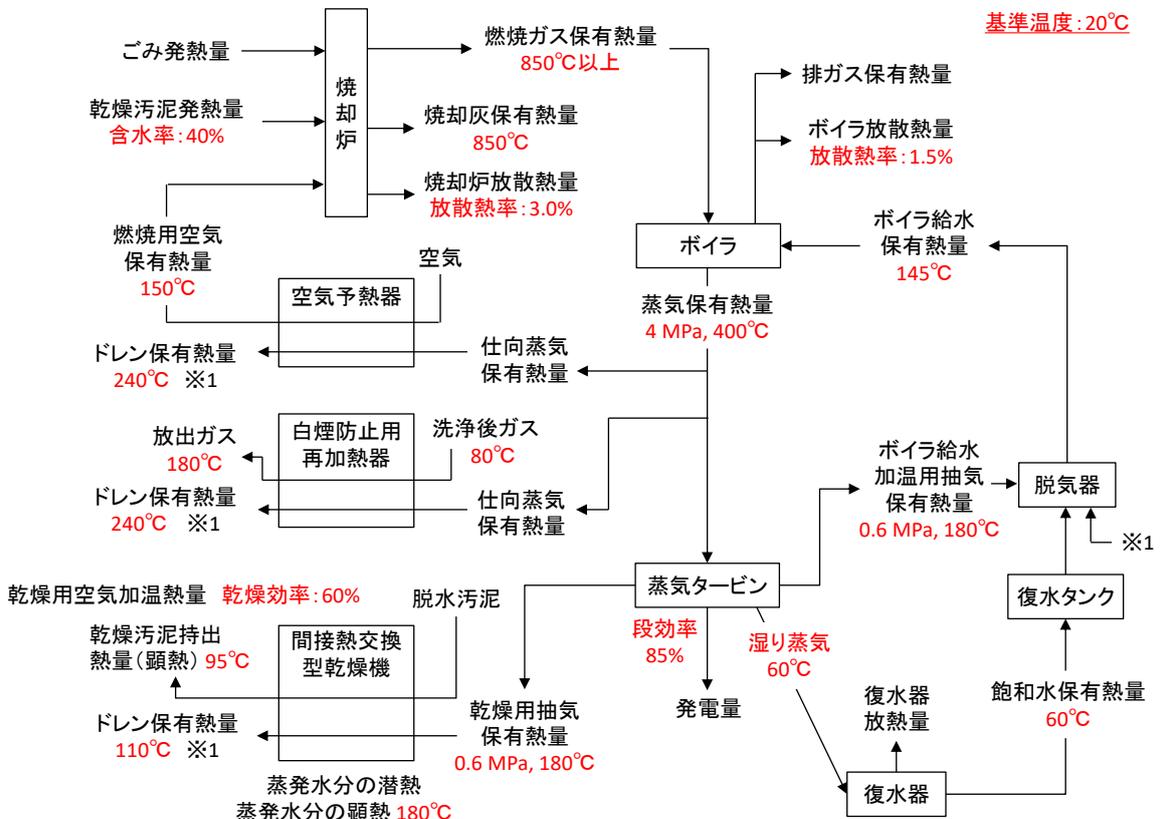


図 3-15 ごみ焼却施設における汚泥混焼のエネルギー収支解析の枠組み

表3-21-1 ごみ焼却施設における汚泥混焼のエネルギー収支解析（その1）

プロセス	項目	算定式	備考
焼却炉	入熱量	ごみ発熱量 [MJ/h] = ごみ投入量 [kg/h] × 低位発熱量 [kJ/kg] / 10 ³	低位発熱量は Steuer の式を適用
		乾燥汚泥発熱量 [MJ/h] = 乾燥汚泥投入量 [kg/h] × 低位発熱量 [kJ/kg] / 10 ³	
		焼却用空気保有熱量 = 焼却用空気量 [Nm ³ /h] × 空気平均比熱 [kJ/Nm ³ /°C] × (空気温度 - 基準温度) [°C] / 10 ³	空気平均比熱: 1.30, 空気温度: 150°C, 基準温度: 20°C.
	出熱量	焼却ガス保有熱量 [MJ/h]: 入熱量 = 出熱量より算出 焼却灰保有熱量 [MJ/h] = 焼却灰量 [kg/h] × 灰平均比熱 [kJ/kg/°C] × (焼却灰温度 - 基準温度) [°C] / 10 ³ 焼却炉放散熱量 [MJ/h] = 入熱量 [MJ/h] × ストーカ炉の放散熱率 [-]	灰平均比熱: 0.84, 焼却灰温度: 850°C. 放散熱率: 0.030
係数	<ul style="list-style-type: none"> ・ 低位発熱量 [kJ/kg] = B × { 33,940 × (C - 3/8 × O) + 23,880 × 3/8 × O + 144,560 × (H - 1/16 × O) } - 2,500 × (9 × B × H + W) ・ 焼却用空気量 [Nm³/h] = 焼却用空気必要量 [Nm³/kg] × { ごみ投入量 [kg/h] + 乾燥汚泥投入量 [kg/h] } ・ 焼却用空気必要量 [Nm³/kg] = 0.367 × 低位発熱量 [MJ/kg] + 1.21 	B [-]: 可燃分比, W [-]: 水分比, C, H, O [-]: 可燃分中の炭素, 水素, 酸素比.	
ボイラ	入熱量	焼却炉からの入熱量: 焼却炉の出熱より入力 ボイラ給水保有熱量 [MJ/h] = 給水量 [kg/h] × 圧縮水の比エンタルピー h_1 [kJ/kg] / 10 ³	h_1 : 611 (145°C)
		蒸気保有熱量 [MJ/h] = 蒸気量 [kg/h] × 蒸気の比エンタルピー h_2 [kJ/kg] / 10 ³ 排ガス保有熱量 [MJ/h] = 湿りガス量 [Nm ³ /h] × ガス平均比熱 [kJ/Nm ³ /°C] × (湿りガス温度 - 基準温度) [°C] / 10 ³ ボイラ放散熱量 [MJ/h] = 蒸気保有熱量 [MJ/h] × ボイラの放散熱率 [-]	h_2 : 3,214 (4 MPa, 400°C) ガス平均比熱: 1.38, 湿りガス温度: 220°C 放散熱率: 0.015
	連立式	入熱量 = 出熱量 [MJ/h], 給水量 = 蒸気量 [kg/h] に基づき算定	
	係数	<ul style="list-style-type: none"> ・ 湿りガス量 [Nm³/h] = 湿りガス量発生量 [Nm³/kg] × { ごみ投入量 [kg/h] + 乾燥汚泥投入量 [kg/h] } ・ 湿りガス量発生量 [Nm³/kg] = 0.339 × 低位発熱量 [MJ/kg] + 2.35 	
	空気予熱器	仕向蒸気保有熱量 [MJ/h] = 仕向蒸気量 [kg/h] × 蒸気の比エンタルピー h_2 [kJ/kg] / 10 ³ 出熱量 焼却用空気保有熱量: 焼却炉の入熱より入力 ドレン保有熱量 [MJ/h] = ドレン量 [kg/h] × ドレンの比エンタルピー h_3 [kJ/kg] / 10 ³	h_2 : 3,214 (4 MPa, 400°C) h_3 : 1,038 (240°C)
連立式	入熱量 = 出熱量 [MJ/h], 仕向蒸気量 = ドレン量 [kg/h] に基づき算定		

表3-21-2 ごみ焼却施設における汚泥混焼のエネルギー収支解析（その2）

プロセス	項目	算定式	備考
白煙防止用 再加熱器	入熱量	仕向蒸気保有熱量 [MJ/h] = 仕向蒸気量 [kg/h] × 蒸気の比エンタルピー h_2 [kJ/kg] / 10^3	h_2 : 3,214 (4 MPa, 400°C)
	出熱量	排ガス再加熱用顕熱量 [MJ/h] = 洗浄後ガス量 [Nm ³ /h] × ガス平均比熱 [kJ/Nm ³ /°C] × (再加熱後温度 - 再加熱前温度) [°C] / 10^3	再加熱後温度: 180°C 再加熱前温度: 80°C
		ドレン保有熱量 [MJ/h] = ドレン量 [kg/h] × ドレンの比エンタルピー h_3 [kJ/kg] / 10^3	h_3 : 1,038 (240°C)
	連立式	入熱量 = 出熱量 [MJ/h], 仕向蒸気量 = ドレン量 [kg/h] に基づき算定	
間接熱 交換型 乾燥機	入熱量	乾燥用抽気保有熱量 [MJ/h] = 仕向抽気量 [kg/h] × 抽気の比エンタルピー h_4 [kJ/kg] / 10^3	h_4 : 2,799 (0.6 MPa, 180°C)
	出熱量	蒸発水分の潜熱量 [MJ/h] = 蒸発水分量 [kg/h] × 水の蒸発潜熱 r [kJ/kg] / 10^3	r : 2,454 (20°C 基準)
		蒸発水分の顕熱量 [MJ/h] = 蒸発水分量 [kg/h] × 蒸発水分の比熱 c_e [kJ/kg/°C] × (乾燥温度 - 基準温度) [°C] / 10^3	c_e : 1.886 (0 - 180°C), 乾燥温度: 180°C
		乾燥汚泥持出熱量 [MJ/h] = 乾燥汚泥中固形物量 [kg/h] × 固形物の比熱 c_s [kJ/kg/°C] × (乾燥汚泥温度 - 基準温度) [°C] / 10^3 + 乾燥汚泥中水分量 [kg/h] × 水の比熱 c [kJ/kg/°C] × (乾燥汚泥温度 - 基準温度) [°C] / 10^3	c_s : 1.670, c : 4.186, 乾燥汚泥温度: 95°C.
		乾燥用空気加温熱量 [MJ/h] = (蒸発水分の潜熱量 [MJ/h] + 蒸発水分の顕熱量 [MJ/h] + 乾燥汚泥持出熱量 [MJ/h]) × (1/乾燥効率 - 1)	乾燥効率: 0.60
		ドレン保有熱量 [MJ/h] = ドレン量 [kg/h] × ドレンの比エンタルピー h_5 [kJ/kg] / 10^3	h_5 : 461 (110°C)
	連立式	入熱量 = 出熱量 [MJ/h], 仕向蒸気量 = ドレン量 [kg/h] に基づき算定	
水分量	蒸発水分量は脱水汚泥の含水率 81%, 乾燥汚泥の含水率 40% (ケース C), 含水率 10% (ケース D) に基づき算定		
復水 タンク・ 脱気器	入熱量	ボイラ加温用抽気保有熱量 [MJ/h] = 仕向抽気量 [kg/h] × 抽気の比エンタルピー h_4 [kJ/kg] / 10^3	h_4 : 2,799 (0.6 MPa, 180°C)
		飽和水の保有熱量 [MJ/h] = 飽和水量 [kg/h] × 飽和水の比エンタルピー h_6 [kJ/kg] / 10^3	h_6 : 251 (60°C)
		Σ ドレン保有熱量 [MJ/h]: 空気予熱器, 白煙防止用再加熱器, 間接熱交換型乾燥機の出熱より入力	
	出熱量	ボイラ給水保有熱量 [MJ/h]: ボイラの入熱より入力	
連立式	入熱量 = 出熱量 [MJ/h], 仕向抽気量 + 飽和水量 + Σ ドレン量 = ボイラ給水量 [kg/h], に基づき算定		

表3-21-3 ごみ焼却施設における汚泥混焼のエネルギー収支解析（その3）

プロセス	項目	算定式	備考
蒸気タービン	出熱量	発電量 [MJ/h] = 発電用蒸気仕向量 [kg/h] × (蒸気の比エンタルピー h_2 - 湿り蒸気の比エンタルピー h_6) [kJ/kg] / 10^3 × タービン段効率 [-] + 抽気量 [kg/h] × (蒸気の比エンタルピー h_2 - 抽気の比エンタルピー h_4) [kJ/kg] / 10^3 × タービン段効率 [-]	h_2 : 3,214 (4 MPa, 400 [○] C) h_6 : 2,231 (60 [○] C, 乾き度: 0.840 [-]) h_4 : 2,799 (0.6 MPa, 80 [○] C)
	蒸気量	発電用蒸気仕向量 [kg/h] = 飽和水量 [kg/h] 抽気量 [kg/h] = 間接熱交換型乾燥機への抽気供給量 [kg/h] + 脱気器への抽気供給量 [kg/h]	
復水器	出熱量	復水器放熱量 [MJ/h] = 発電用蒸気仕向量 [kg/h] × 蒸気の比エンタルピー h_2 / 10^3 + 抽気量 [kg/h] × (蒸気の比エンタルピー h_2 - 抽気の比エンタル ピー h_4) [kJ/kg] / 10^3 - 発電量 [MJ/h] - 飽和水の保有熱量 [MJ/h]	h_2 : 3,214 (4 MPa, 400 [○] C), h_4 : 2,799 (0.6 MPa, 80 [○] C), h_6 : 251 (60 [○] C).
		飽和水の保有熱量 [MJ/h] = 飽和水量 [kg/h] × 飽和水の比エンタルピー h_6 / 10^3	

3) 地方都市における静脈系インフラ連携に係るごみ処理広域ブロックの類型—群馬県を対象として—

廃棄物分野における温室効果ガス排出削減対策として、下水処理施設やごみ焼却施設に設置されたメタン発酵槽で尿・浄化槽汚泥の処理機能を統合化する事例が石川県珠洲市や新潟県長岡市、栃木県鹿沼市などで見られる。これらの事例はし尿処理施設の更新に係る政策判断の結果として新規事業が展開されており、し尿処理施設更新時の意思決定が地方都市や農村域における低炭素化・資源循環のドライビングフォースとして着目される。1998年度より、し尿処理施設を資源循環型へ変身させる国庫補助事業として汚泥再生処理センターの整備が進められている。汚泥再生処理センターの基本構想は、し尿処理施設側が家畜ふん尿や厨芥を受け入れ、し尿・浄化槽汚泥と合わせて資源化（メタン発酵、堆肥化など）を図るものである。一方で、珠洲市、長岡市、鹿沼市の事例は、し尿処理施設側の機能を縮小（または廃止）し、し尿・浄化槽汚泥の処理機能を下水処理施設やごみ焼却施設に統合化する事例であり、そうした静脈系インフラ間の連携を支援する技術マニュアルの必要性が指摘される。そこで、サブテーマ2では、静脈系インフラ間の連携によりし尿・浄化槽汚泥の処理機能を統合化する施策を、解析対象として取り上げた。

静脈系インフラ間の連携にあたり、ごみ焼却施設の更新に係る政策判断においては、2005年度に発足した「循環型社会形成推進交付金制度」が重要な意味を持つ。「高効率ごみ発電施設」及び「高効率原燃料回収施設」に対し、関連事業費を国が2分の1交付するというものである（認定されない場合は3分の1の交付率）。同交付金制度は2009～2013年までの時限措置として終了したものの、内容をそのまま踏襲する形で「エネルギー回収型廃棄物処理施設の認定事業」が2014年度より開始された。同制度では「高効率ごみ発電施設」が「エネルギー回収率 24.5%相当以上

のごみ焼却施設」、「高効率原燃料回収施設」が「メタンガス化施設」に該当し、交付対象がより具体化されている。現状技術では約 70 t/日未満の施設ではボイラ・タービン発電の設置自体が困難であり、エネルギー回収率 24.5%相当以上を充たす電力生産・熱利用を確保するには 70 t/日に余裕を持たせた処理能力が必要となる。そこで本研究では、ボイラ・タービン発電の採用基準を処理能力 100 t/日以上とし、認定制度を踏まえた今後のごみ焼却施設の更新について、各広域ブロックで新設時の設計能力が 100 t/日以上を充たすブロックはボイラ・タービン発電の導入、満たさないブロックはメタン発酵の導入が検討されるとした。

・群馬県を対象としたごみ処理広域ブロックの類型化

「群馬県一般廃棄物処理マスタープラン」⁷⁰⁾において策定されている9つのブロック（前橋、渋川、伊勢崎、高崎安中、藤岡富岡、吾妻、利根沼田、太田館林、桐生みどり）を分類対象とする。ごみ焼却炉の更新に係る分析期間は2010年～2030年とした。

類型の第1指標として、ごみ焼却施設の炉の処理能力の将来推計値を取り上げる。1箇所のごみ焼却施設で100 t/日以上のごみを集められるかが発電方法の選択につながることから、同指標を採用した。処理能力の推計値（2030年値）に対し、ボイラ・タービン発電を導入できるか（処理能力100 t/日以上）、メタン発酵の導入を進めるか（同100 t/日未満）を分類の基準とした。

類型の第2指標として、し尿・浄化槽汚泥等の処理機能の統合化を検討するにあたり、し尿処理施設への依存度を測る指標を設定する。下水道と農業集落排水施設の接続人口を除き、合併処理浄化槽人口ならびに単独処理浄化槽人口、一般廃棄物処理基本計画に沿って設置されるコミュニティプラントの区域人口、非水洗化人口については、発生する汚泥はし尿処理施設での処理対象廃棄物となる。単独処理浄化槽人口と非水洗化人口は将来減少すること、群馬県でのコミュニティプラント人口比率が低いことを踏まえ、合併処理浄化槽人口の割合を類型の第2指標とした。

・ごみ焼却施設の処理能力の将来推計手法

将来人口は国立社会保障・人口問題研究所（2013）⁷¹⁾による推計人口 $POP_{m,t}$ （ m : 市町村、 t 年）を用いることとした。将来のごみ（生活系ごみ、事業系ごみ）の発生量 MSW_m は、1人1日あたりのごみ排出量 $Specific\ MSW_m$ に将来人口を乗じて推計する（ $MSW_{m,t} = POP_{m,t} \times Specific\ MSW_m$ ）。群馬県下の各市町村のごみ排出原単位は2012年値⁴⁷⁾を採用することとした。発生するごみのうち、資源化されずに焼却炉に仕向けられる比率 $Ratio\ INC_m$ について、同様に2012年値を採用した。なお、群馬県下で現在稼働しているRDF施設については、交付率1/2対象事業にRDFが含まれていない点や、新設するごみ焼却施設の設計処理能力を高めることを考慮し、本研究ではRDF施設への配分比も廃炉後は焼却に仕向けられる比率として計上した。以上より、各ブロック n のごみの焼却量 $MSW\ INC_n$ は式（ST2-3）に基づき推計する。

$$MSW\ INC_{n,t} = \sum_m MSW_{m,t} \times Ratio\ INC_m \quad (ST2-3)$$

各ごみ焼却施設 p が保有する炉の処理能力 $CAP_{p,t}$ について、広域ブロック内での処理能力の総和（ $\sum_p CAP_{p,t}$ ）が炉の寿命に伴い $MSW\ INC_{n,t}$ を下回った際、焼却炉の新設が行われるとした。炉の寿命は30年を目安とし、各ごみ焼却施設の炉の更新年次は±5年単位で適宜操作した。新設させる焼却施設の処理能力 $NCAP_{p,t}$ は、該当施設へのごみ配分率 AR_p を踏まえ、交付金申請に係る設計指

針⁷²⁾に基づき更新年次 t' 年のごみ量に対し、年間実稼働日数280日、稼働日調整分稼働率96%で設計されるとした(式(ST2-4))。

$$NCAP_{p,t} = MSW INC_{n,t'} \times AR_p \times \frac{365}{280} \times \frac{1}{0.96} \quad (ST2-4)$$

・生活排水処理方式別人口の将来推計手法

群馬県(2015)⁷³⁾より各市町村の下水道人口、農業集落排水人口、コミュニティプラント人口を、環境省(2015)⁴⁷⁾より合併処理浄化槽人口、非水洗化人口を採用し、全人口とそれらの人口との差を単独処理浄化槽人口として、生活排水処理方式別人口の経年変化(1998~2012年)をブロック毎に整理した。下水道、農業集落排水、コミュニティプラント、合併処理浄化槽の4つの方式を汚水処理人口と定義し、単独処理浄化槽、非水洗化の2つを未処理人口と定義する。

汚水処理方式 q に対する t 年の人口比率 $Ratio ST_{q,t}$ をブロック n 毎に整理し、4つの方式の総和から成る全汚水処理人口比率 $Ratio ST_{total,t}$ について、1998~2012年にかけての各年の変化率の中央値を、全汚水処理人口比率増加率 $Trend_n$ として採用し、2010年を基準として5年ごとの予測値を算定した(式(ST2-5))。

$$Ratio ST_{total,t+5} = Ratio ST_{total,t} \times (1 + Trend_n)^5 \quad (ST2-5)$$

次に、全汚水処理人口比率の増加分をそれぞれ下水道人口比率、農業集落排水人口比率、合併処理浄化槽人口比率に振り分ける。なお、コミュニティプラント人口は処理人口に占める割合が小さく、振り分けにおいて除外した。1998年と2012年の全汚水処理人口比率の増分(全汚水処理人口比率_{2012年値} - 全汚水処理人口比率_{1998年値})と、1998年と2012年の下水道人口比率の増分(下水道人口比率_{2012年値} - 下水道人口比率_{1998年値})の比率をとり、過去における全汚水処理人口比率の増加に対し、どの方式がその増加に寄与していたかを分析した。同様に算出される各方式の寄与度 $CR_{q,n}$ を踏まえ、汚水処理方式 q 別の人口比率の将来値を式(ST2-6)より算定した。

$$Ratio ST_{q,t+5} = Ratio ST_{q,t} + (Ratio ST_{total,t+5} - Ratio ST_{total,t}) \times CR_{q,n} \quad (ST2-6)$$

最後に、ブロック n ごとの推計人口 $POP_{n,t}$ に汚水処理方式 q 別の人口比率 $Ratio ST_{q,t}$ を乗じることで汚水処理方式別人口を算定した。未処理人口比率(単独処理浄化槽人口比率、非水洗化人口比率)の推計についても同様のアプローチを用いた。

4) 地方都市における汚泥焼却計画の設計と評価—群馬県を対象として—

ブロック類型結果(詳細は4.(2)3)に示す)を踏まえ、太田館林ブロック(ボイラ・タービン発電導入地区)、吾妻ブロック(メタン発酵導入地区)を評価対象地域として選定した。

・ボイラ・タービン発電導入地区での計画(太田館林ブロック)

太田館林ブロックにおいて分析するケースを図3-16に示す。2010年は現状を指し、2030年に熱回収ケースと混焼連携ケースを設けた。

現状においては、し尿処理施設が5施設、ごみ焼却施設が4施設ある。し尿処理施設での水処理は高負荷脱窒素処理に統一し(吾妻も同様)、すべての施設で乾燥・焼却されると設定とした。ごみ焼却施設は更新前であり、ボイラ・タービン発電の導入は行われていない。

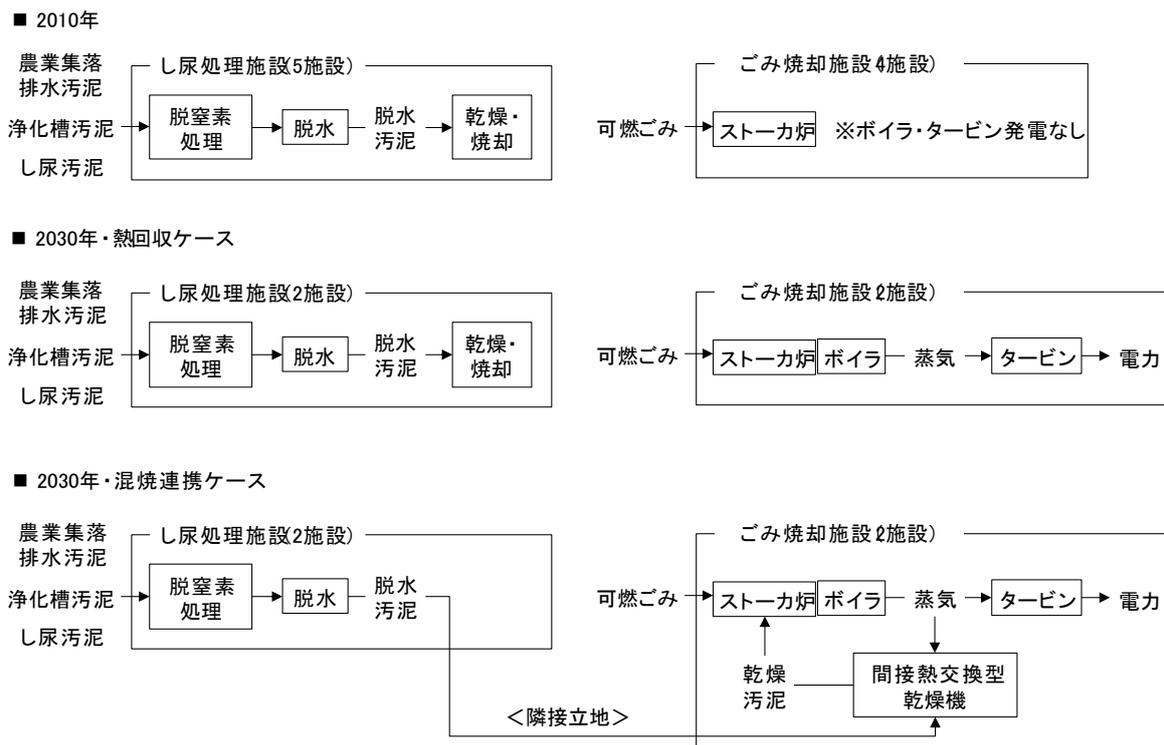


図 3-16 太田館林ブロックにおける更新計画の設計

2030年の熱回収ケースでは、し尿処理施設が2施設、ごみ焼却施設が2施設にそれぞれ集約される。し尿処理施設では水処理と脱水汚泥の乾燥・焼却が継続され、ごみ焼却施設ではボイラ・タービン発電が導入され、それぞれの施設で焼却事業が行われるとした。一方、混焼連携ケースでは、し尿処理施設、ごみ焼却施設が隣接した状態で2施設に集約される。し尿処理施設では水処理、汚泥の脱水までを行う形で機能を縮小し、ごみ焼却施設で汚泥の乾燥と混焼が行われるとした。ごみ焼却施設の処理能力は館林市広域ごみ処理施設が130 t/日、新太田市清掃センターが335 t/日とし、処理能力に応じてごみ量・脱水汚泥量を配分するとした。

太田館林ブロックでボイラ・タービン発電、汚泥の間接熱交換型乾燥機を導入するごみ焼却施設における熱収支解析のための算定式は、図3-15に示したプロセスモデル、表3-21-1～3に示した熱収支を踏まえて推計した。脱水汚泥の含水率は85%とし、乾燥させた後の汚泥の含水率は40%とした。

・メタン発酵導入地区での計画（吾妻ブロック）

吾妻ブロックにおいて分析するケースを図3-17に示す。吾妻では、し尿処理施設の廃止に向け、下水処理施設側で消化槽が導入されている草津下水処理場も含め、汚泥処理機能の統合化を計画することとした。

2030年のガス回収ケースでは、ごみ焼却施設が1施設に集約され、ごみ焼却施設で乾式メタン発酵設備とガスエンジン発電が導入されるとした。また、現状、草津下水処理場での消化は無加温で行われているが、ガス回収ケースでは鋼板製消化槽が導入されるとした。

融通連携ケースでは、核となる導入技術はガス回収ケースと同じであるが、し尿処理施設は廃止され、汚泥処理機能が統合化される。農業集落排水汚泥については、農業集落排水汚泥施設で

濃縮・脱水が行われ、脱水汚泥がごみ焼却施設の乾式メタン発酵槽で受け入れられる。浄化槽汚泥とし尿汚泥については、草津下水処理場での受入が行われる。また、草津下水処理場でのマイクロガスタービンの導入に向け、ごみ焼却施設に回収される厨芥のうち、事業系厨芥の回収先を変更し、草津下水処理場で消化される計画とした。

ごみ焼却施設でのメタン発酵の導入にあたっては、本研究では乾式メタン発酵（コンポガス方式）を取り上げることとする。その理由として、厨芥と紙ごみからのバイオガス回収が可能である点、発酵プロセスが発酵しないごみ（プラ類など）の混入に強く収集した可燃ごみの機械選別での運用が可能である点、発酵残渣を焼却炉で処理できる点、などの技術特性を考慮した。ガス回収、融通連携ケースにおいて導入する乾式メタン発酵については、兵庫県の南但ごみ処理施設が導入している技術仕様（コンポガス方式、55°C 高温発酵、固形物濃度 20~30%）を想定した。ごみ焼却施設での機械選別率（資源ごみを除く可燃ごみに対し、選別ごみとして発酵槽側に振り分けられる割合）は、メーカーによる選別実験値（厨芥：99%、紙ごみ：38%、繊維類：12%、プラ類：27%、不燃ごみ：71%）を適用した（入江ら、2007）⁷⁴。本方式は投入ごみをブレードにより破碎し、スクリーン径以下のものを選別ごみとして選別する方式である。

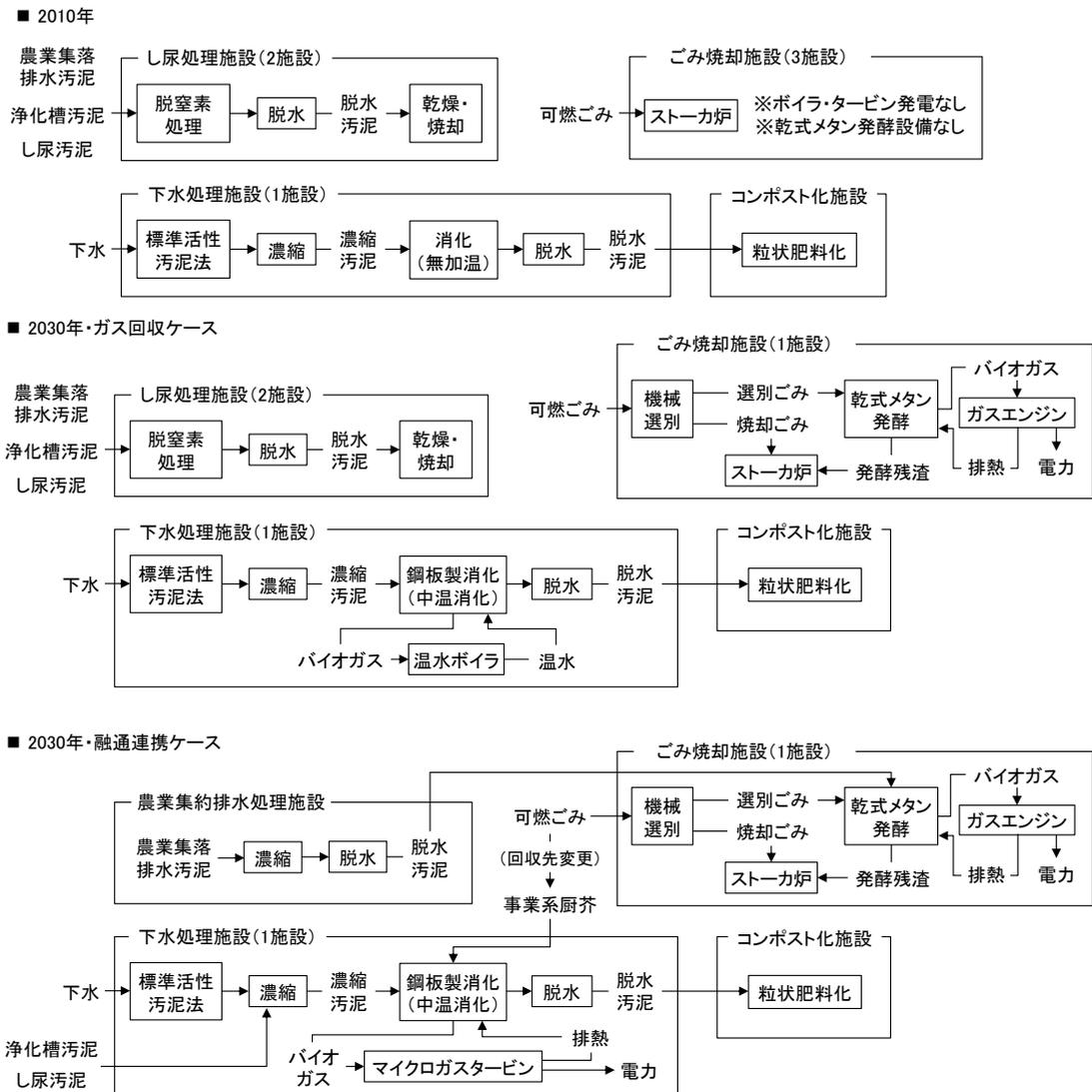


図 3-17 吾妻ブロックにおける更新計画の設計

(3) インフラ間連携の全国展開ポテンシャル

ここでは、(1) 及び (2) をふまえ、下水処理場と産業工場（動脈系インフラと静脈系インフラの連携：ST3）、下水処理場とごみ焼却場（静脈系インフラ間の連携：ST2）の各インフラ間連携による、全国規模での GHG 削減効果とその影響要因について分析する。

まず、全国の下水処理場における未利用汚泥量の分布と下水汚泥固形燃料の受け皿となる全国の産業工場における受入可能な容量を把握する。次に国内における下水汚泥燃料利用の事例や文献を整理し、各汚泥燃料化技術の GHG 収支をもとに汚泥燃料の産業工場、ごみ焼却場への配分ルールを設定する。現状では炭化など固形燃料化施設を有する下水処理場はごく僅かしか存在しないが、前述のような促進施策により今後、下水処理場での固形燃料化施設導入が拡大することを前提に、もし全国各下水処理場で汚泥燃料化や混合焼却の導入が可能と仮定した場合の、下水汚泥の燃料利用による全国レベルでの GHG 削減ポテンシャルを推計する。分析フローを図 3-18 に示し、具体的な分析の方法や手続きを以下に示す。

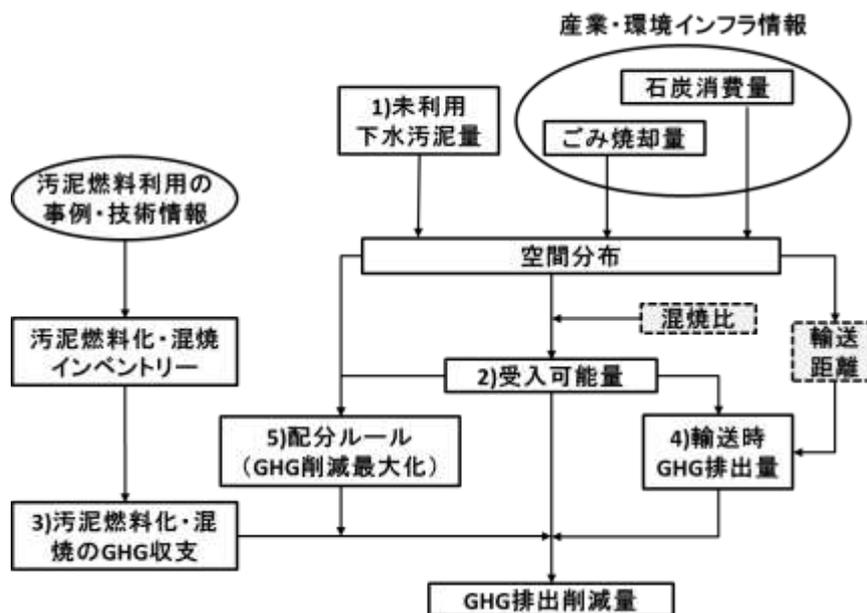


図 3-18 分析フロー

1) 未利用下水汚泥量

下水道統計⁶⁵⁾において、全国 2,089 の下水処理施設から排出される汚泥のうち溶融スラグ、コンポスト、固化汚泥（建設資材）、その他性状（炭化汚泥を含む）のマテリアル等として有効利用されている汚泥を除く最終処分汚泥量 1,239 千 t-DS/y（DS：Dry Sludge）をエネルギー利用可能な未利用汚泥量として設定した。

2) 産業・環境インフラでの汚泥燃料等の受入可能量

現在、下水汚泥固形燃料の利用実績がある産業は製紙工場、セメント工場、石炭火力発電所の 3 業種である。固形燃料は石炭代替となるため、まず各産業施設の石炭消費量を把握する必要がある。石炭消費量に混焼率を考慮して汚泥燃料の受入可能量を算出する。パルプ・紙・板紙工業の石炭消費量⁷⁶⁾は 5,418 千[t]であり、消費量を各製紙工場における紙・板紙の生産高⁷⁷⁾に応じて按分することで各工場の石炭消費量を算出し、これに石炭の発熱量（26.0[GJ/t]）を乗じて各工場

の需要熱量を推計する。製紙工場は全国に 120 施設あり、位置情報は日本製紙連合会のホームページ⁷⁸⁾より取得する。

窯業・土石製品工業の石炭消費量⁷⁹⁾は 9,817 千[t]であり、石炭消費量を各セメント工場のクリンカ生産高に応じて按分し、石炭発熱量を乗じて各工場の需要熱量を推計する。全国に 30 施設ある各工場のクリンカ生産高はセメント年鑑より引用し、位置情報はセメント協会ホームページ⁸⁰⁾より取得する。ただし、ここで用いる窯業・土石製品工業の石炭消費量には石灰製造などセメント製造以外の産業も含まれているため、実際のセメント工場での石炭消費量よりも過剰推計となっていることに留意する必要がある。

全ての石炭火力発電所を網羅する石炭消費量の統計は確認できなかったため、石炭消費量が把握できた一般電気事業者 10 社と卸売電気事業者 1 社の石炭消費量⁸¹⁾を目的変数、各社の発電所の最大出力⁸²⁾を説明変数として回帰分析を行い ($y = 2068.8x$ 、 $R^2=0.9004$ y :石炭消費量[千 t/y]、 x :最大出力[千 kW])、この式を用いて石炭消費量が把握できない発電所の石炭消費量を推計する。

一般電気事業者、卸電気事業者、及び共同火力その他の発電所を含む石炭火力発電所計 50 の位置情報は国土数値情報ダウンロードサービス⁸³⁾により得る。受入可能量は石炭消費量（熱量ベース）に混焼率を乗じて算定する。技術的な側面から実証実験において石炭消費量に対して熱量比で造粒乾燥汚泥が利用可能な製紙工場において 1%、炭化汚泥が利用可能なセメント工場、石炭火力発電所においては 5%では問題が生じないと報告⁸⁴⁾されており、これを混焼率とした。産業施設における混焼技術の向上により今後、石炭との混焼比は現状より向上する可能性もある。また、下水処理施設で生成した固形燃料は輸送を伴うため施設間距離といった下水処理施設と産業施設の空間的な分布が GHG 収支に影響を及ぼすと考えられる。混焼率や輸送距離の変化が GHG 削減量に及ぼす影響については、後で詳細に検討する。

ごみ焼却施設にて脱水汚泥を受入れる際、焼却ごみと汚泥とのバランスを考慮することが重要である。含水率の高い汚泥は乾燥工程を設け、一般ごみと同程度の含水率まで調整後ごみと併せて焼却する必要がある。また汚泥焼却量のごみ焼却量に対して多量となった場合、ごみ焼却施設としての機能を十分に果たせなくなる可能性があるために焼却施設の焼却能力と現状のごみ焼却量からみた余力をもとに汚泥投入量を決定する必要がある。乾燥後の汚泥の受入可能量は一般廃棄物処理実態調査結果⁴⁷⁾の各施設の年間ごみ焼却量に対し重量比で上限を設ける。事例では下水汚泥やごみの発生状況により、混焼比は約 4%から約 6%の範囲でばらつきがある⁸⁵⁾ため、本研究では 5%の上限を設ける。また、5%の受入れ汚泥により全焼却量が焼却施設の処理能力を超過する場合は余剰能力まで受け入れ可能とする。余剰能力は各施設の処理能力に年間稼働日数 280 日⁸⁶⁾を乗じて年間処理能力を算出し、年間処理能力から年間処理量を差し引いた値とする。発電可能なごみ焼却施設 1,221 の位置情報を国土数値情報ダウンロードサービス⁸³⁾より取得する。

3) 汚泥の固形燃料化とごみ混焼の GHG 排出量

まず汚泥の固形燃料化に伴う GHG 排出量は、固形燃料製造時の投入エネルギー量・生成エネルギー量に GHG 排出原単位を乗じて算出する。投入エネルギー量・生成エネルギー量は、下水汚泥エネルギー化技術ガイドライン等²⁸⁾を参考に電力および燃料の投入に伴う脱水汚泥（含水率 80%）あたりのエネルギー消費原単位、固形燃料生成における脱水汚泥（含水率 80%）あたりの固形燃料物生成原単位、固形燃料物あたりのエネルギー生成原単位を作成し、これに含水率 80%

換算した汚泥量を乗じることで算出する（表 3-22）。なお造粒乾燥法は間接加熱方式（熱媒油により加温された伝熱盤上で脱水汚泥の乾燥及び造粒を同時に行う方式）であり、炭化に比べて生成燃料の含水率に差がある（消化汚泥由来の場合、低温炭化汚泥の含水率は 0～1%、造粒乾燥汚泥の含水率は 10%未満）。またガイドラインに提示された発熱量は幅をもっているため、その平均値を採用している（消化汚泥由来の場合、低温炭化汚泥の発熱量は 13～16MJ/kg-DS、造粒乾燥汚泥の発熱量は 12～16MJ/kg-DS）。これらの要因により、消化汚泥の低温炭化燃料と造粒乾燥汚泥では収率が同等、かつ発熱量は低温炭化が僅かながら高い値を示している。消化汚泥由来の GHG 排出原単位は環境省・経済産業省の温室効果ガス排出量算定・報告マニュアル⁸⁷⁾より引用する。なお、生成エネルギー量に係る GHG 排出量は石炭代替燃料利用に伴う GHG 削減量と想定し、マイナス計上する。

表 3-22 下水汚泥の固形燃料化技術のエネルギー投入及び生成原単位

工程	固形燃料化技術		中温炭化	低温炭化	造粒乾燥	
		[単位]	(未消化)	(消化)	(未消化)	(消化)
投入	電力	[GJ/t-wet(80%)]	0.46	0.46	0.22	0.22
	燃料	[GJ/t-wet(80%)]	1.32	3.00	3.11	3.11
生成	生成量	[t - (固形燃料) /t-wet(80%)]	0.07	0.16	0.22	0.16
	発熱量	[GJ/t-(固形燃料)]	17.0	14.5	19.0	14.0

汚泥のごみ混焼に伴う GHG 排出量はごみ焼却施設における混焼に伴う投入エネルギー量・生成エネルギー量に GHG 排出原単位を乗じた値とごみ焼却時に焼却炉から発生する GHG 排出量を合計して算出する。ごみ焼却炉の投入エネルギー量はごみ焼却施設におけるごみ処理時の電力および燃料の投入に伴うごみあたりのエネルギー消費原単位に脱水汚泥（含水率 45%）量を乗じることで算出する。汚泥のごみ混焼導入実績⁸⁸⁾によると、含水率 45%の脱水汚泥はごみと同程度の含水率であり、その発熱量は 45%脱水汚泥トンあたり 7.5GJ である。混焼においてごみ焼却炉投入前に脱水汚泥を 45%の含水率まで乾燥させる必要があるため、生成エネルギー量は脱水汚泥（含水率 45%）の発熱量と乾燥工程に必要なエネルギー量の差とする（式(1)(2)）。乾燥工程においてはごみ焼却排熱を利用し、その必要エネルギー量は蒸発潜熱 2.5GJ/t、熱損失率 10%、ごみ焼却施設排熱損失率 22.3%を用いる⁸⁹⁾。GHG 排出原単位は前述の環境省・経済産業省の温室効果ガス排出量算定・報告マニュアルの値を用いる。生成エネルギー量に係る GHG 排出量は電力代替として用いられるとし、GHG 削減量としてマイナス計上とする。また、処理プロセスの GHG 排出量は CO₂ 排出原単位 0.19 [t-CO₂/t-wet(45%)] に乾燥後の汚泥量を乗じて算出する。

$$EPs = Bp \times Sp - LH \times (1 + Hloss1) \times (Sa - Sp) / (1 - Hloss2) \quad (1)$$

$$Sp = Sa \times (100 - w1) / (100 - w2) \quad (2)$$

ここで、

Eps: 生成エネルギー量 [GJ]
 Bp: 乾燥後の汚泥発熱量 7.5 [GJ/t-wet(45%)]
 Sp: 乾燥汚泥量 [t-wet(45%)]
 LH: 蒸発潜熱 2.5 [GJ/t]
 Hloss1: 乾燥工程における熱損失率 10 [%]
 Sa: 乾燥前の汚泥量 [t-wet]
 Hloss2: ごみ焼却排熱損失率 22.3 [%]
 w1: 乾燥前の汚泥含水率 [%]
 w2: 乾燥後の汚泥含水率 45 [%]

4) 汚泥燃料及び脱水汚泥輸送時の GHG 排出量

下水処理施設から各連携先に固形燃料または脱水汚泥を輸送するため、輸送に伴う GHG 排出量を計上する必要がある。輸送には 10 トンダンプ車での施設間の運搬を想定し、式(3)(4)(5)を用いて施設間の輸送に伴うエネルギー消費量を算出する。施設間の輸送距離は、施設の住所から緯度経度を求め、ヒュベニの公式を用いて求める⁹⁰⁾。トラックの積載量 10[t]、燃費 2.89[km/l]⁹⁷⁾、トラック燃料である軽油の発熱量は 0.038[GJ/l]とする。エネルギー消費量に軽油の CO₂ 排出原単位⁴⁸⁾ 0.069[t-CO₂/GJ]を乗じることで GHG 排出量を算定する。

$$ET = HV \times 2 \times t \dots\dots\dots (3)$$

$$HV = Hlo / M \times R \dots\dots\dots (4)$$

$$t = Bx \times Sa / 10 \dots\dots\dots (5)$$

ここで、

ET: 輸送に伴うエネルギー消費量 [GJ]
 HV: 施設間輸送に伴うエネルギー消費原単位 [GJ/回]
 t: 施設間の輸送回数 [回]
 Hlo: 軽油の低位発熱量 0.038 [GJ/l]
 M: トラック燃費 2.89[km/l]
 R: 施設間の輸送距離 [km/回]
 Bx: 輸送物の生成量原単位 [t/t-wet(80%)]
 (Bx は輸送物により決定、固形燃料の場合は表 3-22 参照、脱水汚泥の場合は Bx = 1 とする)
 Sa: 汚泥量 [t-wet(80%)]

5) GHG 削減に向けた下水汚泥燃料の配分ルール

一般に下水汚泥燃料や脱水汚泥の供給量、また産業工場やごみ焼却場における受入可能量は各地域により異なり、需給バランスを考慮した汚泥の配分が重要となる。ここでは処理施設等の実情を考慮しつつ GHG 削減に向けた下水汚泥燃料の配分ルールを設定する（配分ルールをフローチャートとして図 3-19 に示す）。

受入可能な産業工場やごみ焼却場に対して複数の下水処理場からの供給が可能な場合は輸送に伴う GHG 削減（及び輸送費用削減）の点から輸送距離が最も短い連携での汚泥配分を優先する。受入可能な最短輸送距離にある産業工場やごみ焼却場での受入量最大に達した場合には、次に輸送距離の短い需要地点への汚泥配分を行う。その際、輸送距離には輸送の人件費等を考慮して輸送可能な最大輸送距離の制約を設けることとし、これを「輸送範囲」と定義する。そして後述するように、輸送範囲を変化させた場合の、下水汚泥燃料の産業工場等への配分への影響について考察する。

まず、GHG 削減効果の高い固形燃料化技術を優先して産業施設に汚泥を優先的に配分する。その際、スケールメリットの働かない小規模な固形燃料化施設を中小自治体が導入することは現実的には困難と思われる。そこで固形燃料化施設の導入については、政令市、中核市の下水処理場、に加え中小都市については流域下水処理施設のみを対象とする。

ごみ焼却施設における混焼については、下水処理施設の規模による制約は設けないこととする。法制度からみると下水汚泥は産業廃棄物であり、原則として産業廃棄物処分施設で処理する必要があるが、「廃棄物の処理および清掃に関する法律第 11 条第 2 項」にて、「市町村が処理することが必要であると認める産業廃棄物」については一般廃棄物処分施設であるごみ焼却施設での混焼が認められ、混焼は「あわせ産廃処理」と位置づけられる。これには一般廃棄物処理施設の設置許可の変更が必要となるため、市町村によっては条例の改正を伴う必要がある。そのため現状では当該自治体外での「あわせ産廃処理」は大変困難と考えられる。そこで、下水処理施設の所在地の同一自治体内に発電能力を有するごみ焼却施設が存在している場合にのみ、汚泥混焼が可能であるとする。ごみ処理広域化の場合、複数の自治体にまたがりごみ処理を実施している焼却施設が存在するが、ごみ焼却施設の所在する自治体の所管と設定する。

なお、この配分ルールは GHG 削減量の最大化問題に対する近似解を与えるルールではあるが、必ずしも下水汚泥燃料の配分にかかる総輸送距離の最小化や総 GHG 削減量の最大化を保証するものではないことに留意する必要がある。厳密に GHG 削減の最大化を図るには、線形計画問題や最小費用流問題として定式化を行い、計画問題をモデル化して解く必要がある。

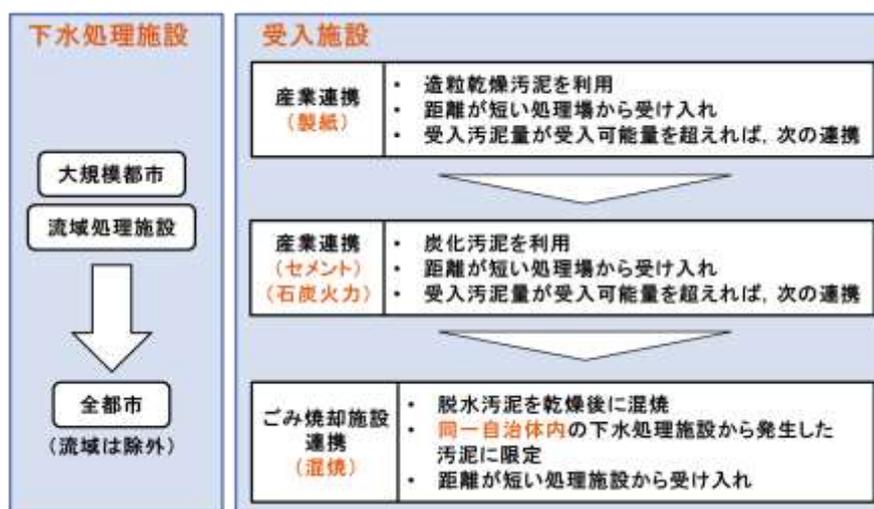


図 3-19 GHG 削減に向けた下水汚泥エネルギー回収のためのインフラ連携の配分ルール

(4) 静脈系インフラの維持・更新をふまえた連携

この節では、インフラ連携モデルに影響を与える要因である“将来の社会・技術変化”について、施設の維持・更新に伴う施設統合の影響について考察する。

1) 地方都市における下水処理施設とごみ処理施設との連携による効果の推定

a) 検討の位置づけ

社会基盤施設のストック量は増大しており、維持管理・更新の時期を迎えている。特に下水道のストックは管渠の総延長が約 44 万 km、処理場数は約 2,200 箇所となっている。下水道施設は昭和 40 年代から平成 10 年代に集中的に整備されてきた。そのため、更新時期も集中する恐れがあり、効率的な維持管理・更新が求められる。一方で、社会的には人口減少化にあり、使用料収入の減少が見込まれ、財政状況は逼迫化している。

また、廃棄物処理施設の内、ごみ焼却施設は約 1,200 箇所のストックを抱えており、人口減少に伴う税収の減少が影響を与える。静脈系インフラである下水処理施設、廃棄物処理施設は、処理プロセスの環境条件が厳しいことから、他のインフラ施設に比べて、更新頻度が多い傾向にある。自治体の財政状況が厳しい状況下において、財政面、環境面の両面において下水処理、廃棄物処理の効率化は喫緊の課題である。

両施設は、焼却施設や水処理施設等、互いに補完し合う機能や下水汚泥、生ゴミ・し尿・浄化槽汚泥などのメタン発酵など共通の機能を有している。しかし、下水道、廃棄物のそれぞれの所轄官庁は国土交通省と環境省であり、根拠法は、下水道法と廃棄物の処理及び清掃に関する法律（いわゆる廃掃法）のため、互いに補完・共通の機能があるにも関わらず、個別に計画、処理がなされてきた。

近年では珠洲市バイオマスメタン発酵施設（生ゴミ、下水汚泥、し尿、浄化槽汚泥、農集排汚泥）でのバイオガス利用や兵庫県高砂市や石川県金沢市においてごみと脱水汚泥を混焼し、発電する連携が実施されている。

人口減少社会に突入し、施設の老朽化、更新が求められる現在において、下水道と廃棄物の連携は、個々の施設、技術の効率化を追求する方法と併せて検討がなされるべきと考えられる。

既往研究において生ゴミの消化槽受け入れ効果に関する検討⁸⁹⁾や、焼却工場の排熱由来の電力を活用した下水汚泥のバイオオイル化の検討⁹¹⁾、下水汚泥処理施設に厨芥や剪定枝を投入した場合の効果の推定がなされている⁵²⁾が、いずれも大阪市や神戸市などの数十万人以上規模の大都市を対象とした事例である。

財政的に厳しい状況を迎えるのは都市部よりも地方部であり、特に、過去に小さな下水処理場を多く建設した地域では、その建て替え更新に併せてどのような意思決定を行うのかは重要な課題である。

本研究では、2010 年における人口が約 8.5 万人の地方都市を対象に、下水処理と廃棄物処理施設は連携せずに下水汚泥を堆肥化し、ごみ発電を実施しない場合と、施設更新時に下水処理と廃棄物処理が連携し、下水の脱水汚泥を廃棄物処理施設で混焼し、かつ高効率発電を導入した場合を比較評価した。

b) 対象地域の概要

本研究では、A 市を対象に、施設更新時期に応じた下水処理施設とごみ焼却施設の連携による効果をエネルギー消費量、GHG 排出量の面から評価した。なお、評価期間は 2010 年～2040 年の

30年間とした。A市の基準年（2010年）における人口は約8.5万人であり、2040年の人口は6.2万人（国立社会保障・人口問題研究所の推計）と推計されている。

下水処理施設について、A市には10箇所の小規模下水処理施設が点在している（表3-23）。このうち、a処理場が同市内の最大処理規模の施設であり、他の施設はいずれも計画処理能力が10,000m³/日未満と非常に小規模である。また、現状の汚泥処理は、a施設は濃縮→消化→脱水→乾燥のプロセスをとり、i施設は濃縮のみ行い、その後g施設へ輸送される。aとi施設以外はすべて濃縮→脱水まで各処理場で実施され、その後、車両輸送によりa施設へ搬入される。乾燥汚泥は、民間業者に輸送され、堆肥化されている。

ごみ焼却施設について、1箇所のごみ焼却施設があり、2010年において供用開始後20年が経過しており、更新時期を迎えつつある。現状の処理能力は140t/日、炉形式はストーカ炉、運転方法は全連続運転方式である。同施設は2016年に建て替え更新の計画がなされている。

表 3-23 対象都市における下水処理場の概要

	計画処理能力(m ³ /日)	現有処理能力(m ³ /日)	供用年度
a	21,000	21,000	1982
b	6,000	4,500	2000
c	6,600	8,900	2003
d	3,300	3,300	1995
e	3,000	2,550	1997
f	5,300	5,300	1998
g	1,310	1,310	1999
h	1,200	900	2001
i	1,170	1,170	2002
j	4,600	2,300	2002

c) 各種の推計方法

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(2013)⁷¹⁾にもとづき、2010年～2040年の人口推移を推計した。2010年の人口は約8.5万人に対し、2040年の人口は約6.2万人であり、約27%減である。

脱水汚泥発生量の推計は、処理区別の年間脱水発生汚泥量を、2012年度版の下水道統計から処理場別に下水処理人口一人当たりの脱水汚泥発生源単位を作成し、各年度の人口を乗じて求めた。

ごみ焼却量の推計は、年間ごみ焼却量を処理人口で割り、一人当たりのごみ焼却原単位を求め、各年度の人口を乗じて算定した。

脱水汚泥、ごみ焼却量ともに時代の変化に応じて原単位は増減する恐れはあるが、本研究では簡易的に、現状の原単位を用いた。

d) 評価ケース

本研究では、現状システムである下水処理施設、ごみ焼却施設を単独運営し、汚泥処理も堆肥化を継続するケース（ケース1）と、両施設が連携し、ごみ焼却施設の更新時期に、下水汚泥を堆肥化せず、ごみ焼却施設で焼却し処分するケース（ケース2）を比較した。本来であれば、焼

却灰をセメント原材料として再資源化することが考えられるが、ここでは埋立処分とした。各ケースのシステム構成の模式図を図 3-20 に示す(各ケースにおいて共通項目は計算対象外とした)。

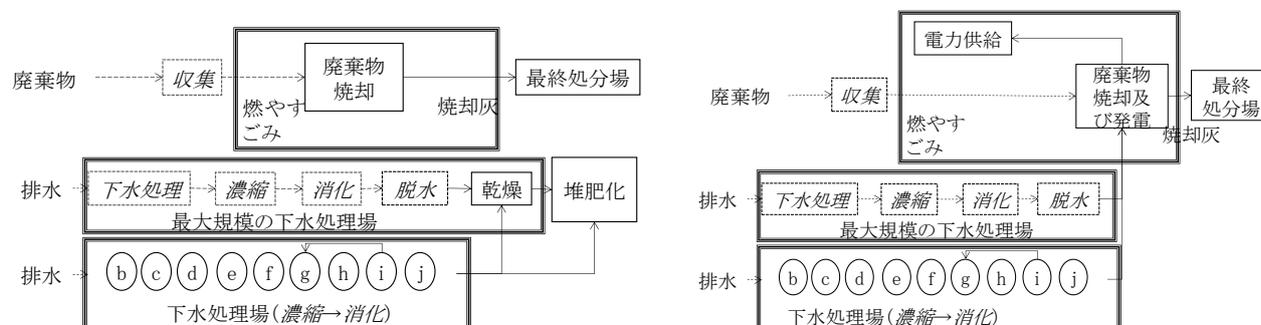


図 3-20 評価ケースのシステム構成 (左：ケース 1 (連携なし)、右：ケース 2 (連携あり))

具体的には、ケース 1 における廃棄物処理プロセスは、廃棄物発電はなされず(発電なし)、焼却灰は最終処分場で処理するとし、下水処理プロセスは、最大規模の下水処理場に汚泥が集約(トラック輸送)され、乾燥後、民間施設に輸送され堆肥化するとした。

堆肥化の課題は、重金属や化学物質などを含む点以外にも、肥料の需要時期が限定的であることや高齢化に伴う農業規模の縮小による需要量が減少していること等が上げられる。そのため、現状の堆肥化からごみ焼却施設で混焼する場合をケース 2 とした。ケース 2 における廃棄物処理プロセスは、燃やすごみと脱水汚泥を混焼し、建て替え時に高効率ごみ発電を導入することで発電によりエネルギー回収を図った。また、下水処理プロセスでは、堆肥化のために乾燥を行っていたが、ごみ焼却施設で混焼するため、廃止とした。

e) 環境負荷の算定方法

エネルギー消費量の算定について、使用した各プロセスにおけるエネルギー、薬品の消費原単位を表 3-24 に示す。各プロセスに対する投入量および埋め立て量に消費原単位を乗じて、エネルギー・薬品の消費量を推計する。また、発電時の低位発熱量の算定は、既往研究⁹²⁾を参考とした。汚泥の輸送は中久保ら⁵²⁾の研究を参考とした。

表 3-24 エネルギー・薬品の消費原単位

プロセス	製品	消費原単位	単位	出所
堆肥化	電力	187.5	kWh/t	経産省 ⁶⁾
ごみ焼却	電力	120	kWh/t-DM	MiLCA ⁷⁾
	消石灰	2.3		
	アンモニア	0.2		
	水酸化ナトリウム	2.2		
	塩酸	0.2		
	キレート剤	0.4		
埋立	電力	59	kWh/t-Ash	MiLCA ⁷⁾
	軽油	24	MJ/t-Ash	
	苛性ソーダ	5.3	Kg/t-Ash	
	塩化第二鉄	2.1		

GHG 排出量の算定は、燃料、薬品の消費量に CO₂ 排出原単位を乗じて推計する。エネルギーに関し、軽油:68.6g-CO₂/MJ、A 重油 69.3 g-CO₂/MJ、都市ガス:50.6 g-CO₂/MJ とし⁴⁹⁾、系統電力は

関西電力の値 145 g-CO₂/MJ (522g-CO₂/kWh)⁹⁴⁾を用いる。薬品の CO₂ 排出原単位は MiLCA⁹⁵⁾を用いた。

ごみの焼却、汚泥の焼却に伴う CH₄、N₂O の排出量は投入量に排出係数⁴⁹⁾ (ごみ焼却の CH₄ : 0.96g-CH₄/t、N₂O : 56.5g-N₂O/t、汚泥焼却の CH₄ : 9.7g-CH₄/t、N₂O : 882g-N₂O/t) を乗じて算定した。また、埋立に伴う排出係数は 0.133t-CH₄/t を用いた。なお、CH₄ と N₂O の換算はそれぞれ 1t-CH₄=21t-CO₂eq、1t-N₂O=310t-CO₂ eq で換算する⁴⁹⁾。

2) 将来人口減少下での静脈系インフラの更新・再編と GHG 削減効果

a. 検討の位置付け

下水処理場や清掃工場に代表される静脈系インフラは低炭素社会・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。このため、中長期的な視点に立った静脈系インフラの更新と低炭素技術の積極的な導入が重要である。静脈系インフラ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等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。それに対して清掃工場では、ごみ焼却時に高効率な発電を実施し省エネルギー・創エネルギー化を進め、地域の廃棄物処理システム全体でのエネルギー消費を低減させる施設整備を図っている。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地方自治体の一部に限られる。

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 (GHG : Greenhouse Gas) 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。この分野における GHG 削減対策の一つとして、汚泥の高温焼却による N₂O 削減がある。この対策は、汚泥焼却炉の焼却温度を通常 800℃ から高温焼却となる 850℃ に上昇させることで、汚泥焼却量あたりの N₂O 排出量を約 6 割減少させることを可能とする⁹⁶⁾。このため、2005 年に京都議定書目標達成計画で汚泥焼却炉への高温技術導入が盛り込まれて以降、導入が進み大幅な N₂O 削減がもたらされた⁹⁷⁾。しかし、汚泥焼却設備への高温焼却技術導入は補助燃料の追加投入が課題とされ、運転管理の工夫による省エネルギー化や GHG 排出削減対策は急務である。

また、下水汚泥エネルギー化技術の中でも燃料転換技術は、GHG 削減対策の一助を担うものと期待されている。この技術は、代替燃料製造時のエネルギー投入量が増加するが、生成される代替燃料を使用することで、従来の焼却処理に比ベシステム全体でのエネルギー消費量の抑制が可能となる。そして、エネルギー消費の削減のみならず N₂O の発生量を大きく削減できる。加えて、代替燃料はカーボンニュートラルなエネルギーなため、化石燃料由来の GHG 排出削減にも効果的である。燃料転換技術の種類としては、固形燃料化やオイル化技術などがある。固形燃料化は、乾燥および炭化技術によって石炭代替を製造する技術である。近年、汚泥処理施設にこの技術を採用する地方自治体が増えつつあるものの、その用途は石炭火力発電所や石炭焚プラントを有する製紙工場のほか、バイオマス発電所などに限定される^{28),98)}。

オイル化は内部循環型流動床ガス化炉 (ICFG: Internally Circulating Fluidized-Bed Gasifier)⁹⁹⁾⁻¹⁰¹⁾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技術である。この技術は開発・実証

段階にあり、実用化の事例は存在しないが、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、今後の開発が期待されている。なお、このオイル化プロセスの詳細な想定フローについては既往文献¹⁰²⁾を参照されたい。

一方で、下水処理場は老朽化が顕著となっており、早急な既存施設の改築・更新が必要な状況にある^{103),104)}。しかし、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¹⁰⁵⁾。二つ目は、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¹⁰⁶⁾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^{88),107)}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が採用されている。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。

下水汚泥の燃料転換技術に関連した研究には、固形燃料化におけるエネルギー消費量やGHG排出量を定量的に比較した報告¹⁰⁸⁾がある。そこでは、燃料代替技術によって得られる代替燃料の輸送が試算対象に含まれていない。オイル化技術を取り扱った先行研究^{91),109)}では、技術導入によるエネルギー消費量やGHG排出量の削減効果を定量的に分析している。しかし、比較対象は従来の焼却や高温焼却技術で、固形燃料化技術との比較はなされていない。また、先に取り上げた燃料転換技術システムとごみ・汚泥混焼システムとを比較した研究は管見の限り見当たらない。

以上を踏まえ、本研究では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。

対象地域は、現在、汚泥処理を1箇所に集約しておらず、今後下水普及率の向上に伴い汚泥発生量が増加傾向にある和歌山市とした。評価期間は2010～2040年の30年間とする。また、集約化によるスケール効果や燃料転換技術の導入、そして、ごみ焼却施設でのごみ・汚泥混焼によるエネルギー回収能力の増強効果を組み込んだシナリオを設計し、エネルギー消費量（LCE: Life Cycle Energy consumption）およびGHG排出量を定量的に評価する。

b. 対象地域の概要

i. 下水処理場および汚泥焼却設備の概要

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¹¹⁰⁾。それぞれの処理区の下水処理施設は、和歌川（和歌川 SC）、中央（中央 SC）

および北部終末処理場（北部 SC）である（図 3-21）。汚泥焼却設備を有しているのは和歌川 SC と中央 SC の 2 箇所である（表 3-25）。北部 SC は全体計画では 2 基設置する予定であるが、下水道の整備段階ということもあり他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 SC 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 SC の稼働日数は 143[d/y]と少なく、中央 SC は北部 SC 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。



図 3-21 下水処理場および清掃工場の位置図

表 3-25 和歌山市における汚泥処理施設の概要¹⁸⁻²⁰⁾

施設名	和歌川 SC	中央 SC	北部 SC
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

ii. 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 3-26、図 3-21）。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。

表 3-26 清掃工場の設備概要^{21, 22)}

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

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¹¹²⁾。

c. 推計方法

i. 将来の汚泥発生量の推計

・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⁵⁾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。

・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¹¹³⁾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、先行研究¹¹⁴⁾を参考に、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 3-22）。具体的には、2010年度版の下水道統計⁶⁷⁾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。

本研究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。

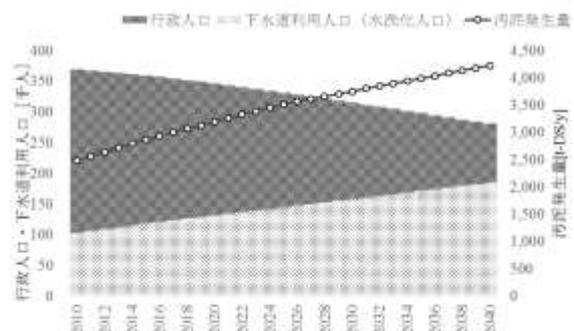


図 3-22 行政人口，下水道利用人口，汚泥発生量の将来変化

ii. 将来のごみ焼却量の推計

・ごみ焼却量の推計方法

環境省の一般廃棄物処理実態調査⁴⁷⁾の実績データ（2010年～2012年）を用いて、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¹¹³⁾、¹¹⁵⁾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3-23)。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。

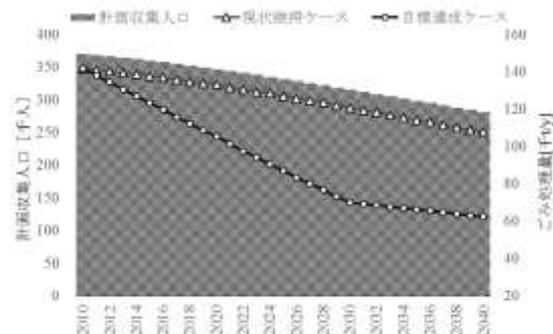


図 3-23 計画収集人口とごみ処理量の将来変化

・ごみ発電量の推計方法

4年間(2006～2009年度)の実績平均値¹¹³⁾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。本研究では、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。

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

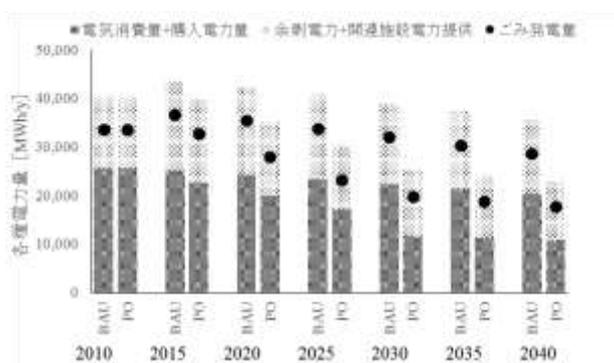
$EL_{S,t}$: t年における余剰電力 [kWh/y]

$EL_{W,t}$: 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 3-24 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 3-24 ごみ発電量などの将来変化

d. 将来シナリオの設計（評価ケース）

まず、静脈系インフラの耐用年数を汚泥焼却設備：25年^{116),117)}、ごみ焼却施設：30年¹¹⁸⁾と設定した。つぎに、脱水汚泥発生量、ごみ発生量の将来変化、焼却設備の規模や稼働率、更新時期を考慮し、5つの将来シナリオを設計した（表3-27）。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、施設の稼働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。ごみは清掃工場で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、本研究では、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⁸⁸⁾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3-25、図3-26に示す。

表 3-27 将来シナリオの概要

将来シナリオ	現状 従来技術	集約化					ごみ・汚泥混焼	
		従来技術と燃料転換技術			混焼技術		混焼技術 (廃熱利用) 早期	
		段階的	早期	段階的	早期			
0	1	2	3	4	5			
和歌川 SC	更新	2029-	-	-	-	-	-	
	集約化	-	-	2016-2018	-	-	-	
	汚泥輸送	-	2029-**	2019-**	2029-***	2016-***	2016-***	
	休廃止	-	2029-	2019-	2029-	2016-	2016-	
	中央 SC	更新	2016-	2016-	2019-	-	-	-
		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 休廃止		-	2016-	2019-	-	-	-	
北部 SC	汚泥輸送	2010-**	2010-**	2010-2015** 2016-2018* 2019-**	2010-2015** 2016-***	2010-2015** 2016-***	2010-2015** 2016-***	
	青岸 EC	更新	2016-	2016-	2016-	2016-	2016-	2016-
汚泥受入		-	-	-	2016-	2016-	2016-	
廃熱利用		-	-	-	-	-	2016-	
青岸 CC	更新	2028- (2028-)	2028- (2028-)	2028- (2028-)	2028- (2028-)	2028- (2028-)	2028- (2028-)	
	廃止	-	-	-	-	-	-	

汚泥搬送先：*和歌川 SC/**中央 SC/**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。

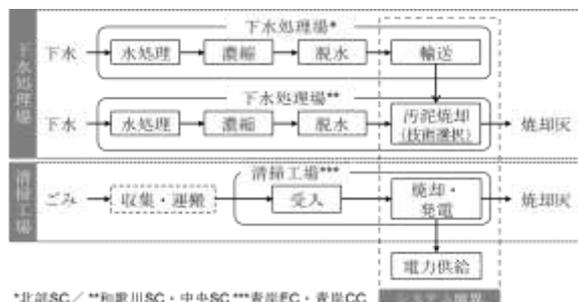


図 3-25 集約化におけるシステム境界

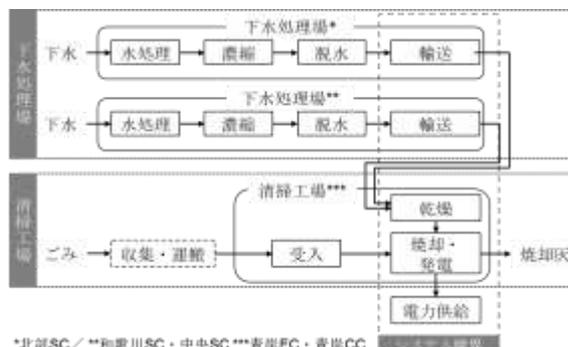


図 3-26 ごみ・汚泥混焼におけるシステム境界

・シナリオ0：現状処理

和歌川および中央SC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SCでは現状どおり中央SC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。本研究では、これを比較評価の基準シナリオとする。

・シナリオ1：集約化（段階的）

和歌川SC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SCに集約化する。中央SC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SCに集約化されることになる。

・シナリオ2：集約化（早期）

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

・シナリオ3：ごみ・汚泥混焼（段階的）

和歌川および中央SC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：ごみ・汚泥混焼（早期）

中央SC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SCの焼却炉を廃止し、和歌川SCの焼却炉は耐用年数に達する前に廃止する。

・シナリオ5：ごみ・汚泥混焼：廃熱利用（早期）

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。

e. 環境負荷の算定方法

i. 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^{67),91),119),120)}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3-28）を乗じた。また、汚泥焼却および燃料転換時に発生するN₂O排出量は表3-29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、将来推計した脱水汚泥量を乗じることで算定した。

表 3-28 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^{27),121),122)}

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（一般炭）	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 3-29 汚泥焼却および燃料転換に伴う N₂O 排出係数

(28),49),98),123)

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3-30、表3-31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、先行研究¹¹⁴⁾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。

表 3-30 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		燃料転換技術	
	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²⁵⁾

表 3-31 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		燃料転換技術	
	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²⁵⁾

また、燃料転換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 3-32 に示す。利用先を次のように想定した。固形燃料は、下水処理場に近い石炭火力発電所に、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 3-27）。なお、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、各処理場の輸送先までの距離を求めた。

表 3-32 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 3-27 下水処理場と代替燃料輸送先の位置図^{111) 124)}

ii. 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^{112, 125)}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3-28、表3-33）を乗じた。また、電力消費に伴うGHG排出量は、既に求めた将来の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。

表 3-33 単位あたりのエネルギー消費・GHG 排出原単位（薬品）

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]

さらに、ごみ焼却に伴うGHG排出量を表3-34の原単位を用いて推計した。一般廃棄物中のプラスチック類の量は式(2)により求めた。プラスチック組成比率と含水率は、5年間（2006～2010年度）の実績平均値¹¹²⁾を用いた。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 3-34 ごみ焼却に伴う GHG 排出係数

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-焼却ごみ
一般ごみ焼却に伴う N ₂ O 排出量	0.0000567	t-N ₂ O/t-焼却ごみ
プラスチック焼却に伴う CO ₂ 排出量	2.770	t-CO ₂ /t-焼却プラ

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

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

・ ごみ焼却施設での乾燥用熱需要

汚泥焼却を下水処理場から清掃工場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⁸⁸⁾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]⁸⁸⁾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]⁴⁷⁾）となる。

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

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および燃料発熱量で除し、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%¹²⁹⁾とし、燃料である重油の発熱量を39.1[GJ/kl]¹²¹⁾と設定した。

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

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場合を想定した。余熱利用可能量は、3年間（20011～2013年度）の実績平均値より0.263 [GJ/t-ごみ]と設定した。次に、ごみ焼却量にごみ焼却量あたりの余熱利用可能量を乗じて、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上回った場合は、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。

・ 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3-35）。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、エネルギー消費量を、さらにそれにGHG排出係数を乗じることで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¹³⁰⁾より8.0 [t/台]とし、燃費は2.89 [km/l]⁴⁸⁾、燃料である軽油の発熱量は37.7 [GJ/kl]¹²¹⁾、軽油のGHG排出係数は2.619 [t-CO₂/kl]¹²⁶⁾とした。

表 3-35 処理場間の輸送距離

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

(5) 人口動態変化をふまえた静脈系インフラの連携

(4) と同じく、インフラ連携に影響を与える“将来の社会・技術変化”について、ここでは、人口動態変化に関する考察を行う。

1) 本サブテーマの背景

近年のコンパクトシティ形成に向けた取り組みにおいて、居住機能や都市機能の立地や公共交通の充実等に関し、公共施設の再編と国公有財産の最適利用等の様々な関係施策との連携を図り、総合的に検討することが必要とされている。そこで、一体的な施策を推進するための方策として、平成 26 年 8 月の改正都市再生特別措置法により、立地適正化計画が制度化された。これは、都市計画法を中心とした従来の土地利用計画に加えて、居住機能や都市機能の誘導により、コンパクトシティ形成に向けた取り組みを推進するものである¹³¹⁾。立地適正化計画では、居住機能や都市機能の、一定区域への誘導が行われるが、公共交通沿線や災害リスクの低い地域への誘導が目指されている。特に居住機能を誘導する区域については、防災施策との連携により、河川や下水道等の整備による災害リスクの軽減が目指されている。

一方、高度経済成長期以降の急激な都市拡大に伴い、特に地方都市において、市街地の低密度化や環境負荷の増大等の問題が発生している。対して都市郊外部では人口増加に伴い、都市施設の維持管理費用は増大している。

都市施設の一つである下水道を取り上げると、平成 27 年度末時点で、国全体における下水道処理人口普及率(以下、下水普及率)は 77.8%とされ、前年度に比べて 0.2 ポイント増加している¹³²⁾。そのような中、下水道事業予算はピーク時の平成 9 年に比べて 2 分の 1 未満にまで減少している¹³³⁾。また総務省によると、我が国は平成 20 年をピークに人口減少傾向に転じ、50 年後にはピーク時の約 7 割にまで人口が減少すると予測されている。加えて、国・地方公共団体の財政事業は更に厳しさを増しており、下水道の整備・管理に対しても深刻な影響を及ぼすものと思われる¹³⁴⁾。このような状況下でも、持続的に適切な下水道整備・維持管理を実施できるよう、下水道計画を行なう必要がある。また、衛生面・防災面等から、下水道未普及地域に対する早期普及を進める必要性を鑑み、従来の下水道計画の見直しや、下水道が真に必要な区域の絞り込み等を実施する必要がある。

以上の背景から、本研究の視点は 1)人口減少下における市街地集約のあり方、2)下水道未普及地域の対する普及向上や、維持管理を鑑みた下水道計画のあり方の 2 点である。そこで、この 2 点に関連づけ、人口減少下における市街地集約と、下水道計画のあり方について検討することを、本研究の目的とする。具体的には和歌山市を対象として、約 30 年後の人口予測を踏まえ、居住人口の集約と下水道の整備・維持管理に効果的な市街地集約エリアを検討する。

2) 本サブテーマの既往研究の整理

まず、コンパクトシティに関連する研究として、都市内の拠点集約(コンパクト化)と公共交通の関係に着目した橋本ら¹³⁵⁾は、予定調和的な関連性(公共交通が存在すれば人口密度が高まる)の妥当性についての検討を行い、公共交通が備わっているために、人口密度が高密度化または維持できるという状況には必ずしもなっていないことを示した。また牧野ら¹³⁶⁾は、コンパクトシティ施策が都市構造や交通環境負荷に及ぼす影響を定量的に明らかにすることを目的とし、コン

コンパクトシティ施策の実施は地方都市における公共交通事業者の収益改善をもたらす可能性があることを示した。

その他、コンパクトシティの効果を定量的に検証した研究として、高橋ら¹³⁷⁾はコンパクトシティ政策を費用と便益の両面から定量的に分析できる手法を開発することを目的とした。また佐藤ら¹³⁸⁾は、都市のコンパクト化を行った場合の都市施設の維持管理費用を実際の都市をモデルに算出し、削減効果を比較・検討を行うことを目的とした。

このように、都市内の拠点集約による効果・影響を検証したものが多数存在する。立地適正化計画において設定される「都市機能誘導区域」は、公共交通で結ばれたコンパクトなまちの形成を目指すことから、鉄道駅などの周辺区域に設定される。しかし肥後ら¹³⁹⁾は、立地適正化計画において都市機能誘導区域が指定されることについて、自治体が恣意的に集約拠点を設定できる制度を導入することは、市街地の拡散を進展させることになりかねないと指摘している。また、集約化のための関連制度は多く考察されているが、「拠点到どう集約するか」ではなく「拠点をどう絞り込むか」という方法論は示されていないと述べている。一方、都市機能誘導区域を核として、その周辺に設定される居住誘導区域の設定方法について言及した研究は少ない。

以上のような既往研究や研究背景から、本研究は以下のような特徴を持つ。

- ①集約拠点の核(都市機能誘導区域)だけでなく、市街地全体の集約エリア(居住誘導区域)に着目した点
- ②市街地の集約エリア(面)に着目し、面的都市施設である下水道の整備計画に関連付けて分析した点

3) 本サブテーマの研究の流れ

本研究では、下水道整備率が低く、下水道未普及地域が多く残る和歌山県和歌山市を対象とする。また、立地適正化計画等による市街地集約に向けた動きがなされている点や、今後人口の減少が予測されている点についても、本研究の対象都市として選定した理由である。平成27年度末時点で、和歌山市の下水道人口普及率は38.9%に留まっており、県庁所在地の中では2番目に低い水準となっている。処理区は中央・和歌川・北部の3地区に分かれ、全処理区で328,000人の計画人口となっており、和歌山市民の9割近くをカバーする計画となっている。しかし、整備率が一番高い和歌川処理区で85.1%であるのに対し、北部処理区は19.5%に留まっているなど、処理区で偏りがある。

和歌山市では平成29年3月に立地適正化計画が策定¹⁰⁾され、日常生活サービス機能を維持・誘導する区域と、当該区域に維持・誘導する施設が設定された(都市機能誘導区域の設定)。また、平成29年度末には、人口密度を維持する区域(居住誘導区域)が設定される予定である。和歌山市の人口は昭和60年頃をピークに減少し続けており、都市サービス維持のためにも都市の活力低下に歯止めをかける必要がある。そのため、中心市街地への高次都市機能の誘導、鉄道駅周辺への生活利便施設の維持・誘導を行い、公共交通によりそれらの地区に便利にアクセスできるなど、福祉や交通なども含めて都市全体の構造を見直し、「コンパクトシティ・プラス・ネットワーク」の考え方で街づくりを進めていくことが考えられている。立地適正化計画では、「若年層から選ばれるまち」「生活サービスが維持・強化されたまち」「時代にあった高次都市機能サービスが提供

されるまち」を実現するための計画の考え方、都市機能誘導区域設定、誘導施設の設定について示されている。

研究の流れは、まず、①和歌山市の小地域単位での人口分布や推計人口等の人口動態を分析し、②人口動態および下水道計画をベースに、交通インフラを加味した市街地集約の方針（集約条件や範囲）を検討する。さらに、方針を元に具体的な③市街地集約エリアについて検討・評価を行い、④人口予測と下水道計画を踏まえた市街地集約のあり方について考察する。

(6) 静脈インフラ連携の社会展開

ここでは、(1)～(5)の検討をふまえて、廃棄物バイオマスからのエネルギー回収のための静脈インフラ連携の社会に展開してゆくために重要と思われる、インフラ主体の受容性、インフラ連携の事業性、インフラ連携のガイドラインについての研究方法を述べる。

1) インフラ連携の受容性

環境インフラ連携に関する現状と将来の意向を把握するため、全国の下水处理場を管理する自治体の計画主体（約 1,700 箇所）、ごみ焼却場を管理する自治体の計画主体（約 1700 箇所）を対象として、受容性調査を実施した。

調査方法：質問紙を郵送

調査期間：2014年2月～3月

有効回答：下水处理場 905件（回答率 約53%）、ごみ焼却場 965件（回答率 約56%）

調査項目：表 3-36 のとおり

表 3-36 質問紙調査項目
(下水处理場)

設問 No.	アンケート内容
問 1	現在、消化槽を設置しているか
問 2	消化ガス発電を導入しているか、生ごみの混合消化について知っているか又導入するか
問 3	消化槽を設置するか、また設置しない理由
問 4	下水汚泥をごみ焼却施設で混焼したことがあるか
問 5	混焼を行っている理由
問 6	混焼が上手く実施できる要因
問 7	将来、混焼を行うならどんな条件が必要か
問 8	生ごみと汚泥の混合消化を一部で行われていることを知っているか、また導入するか
問 9	将来このような廃棄物バイオマスの受け入れするとするなら
問 10	現在環境に関する政策で下水处理施設を対象とした取り組みが位置付けられているか
問 11	将来、下水处理施設と、ごみ焼却施設が隣接され連携していく可能性について
問 12	その他、自由記入

(ごみ焼却場)

設問 No.	アンケート内容
問 1	現在、ごみ発電を行っているか
問 2	一般ごみと下水汚泥との混焼を行ったことがあるか
問 3	混焼を行っている理由、また混焼がうまく実施できている要因について
問 4	将来、混焼を行うならどんな条件が必要か
問 5	現在、一般ごみ、下水汚泥以外にどんな廃棄物バイオマスの受け入れを行っているか
問 6	将来、どのような廃棄物バイオマスの受け入れの可能性があるか
問 7	循環型社会形成推進交付金制度において交付の対象となる「メタンガス化施設」について知っているか、また導入するか
問 8	将来、メタンガス化施設を導入し、一般ごみから積極的にエネルギーを回収する可能性について
問 9	生ごみと汚泥の混合消化を一部で行われていることを知っているか、また導入するか
問 10	現在、自治体の環境に関する計画の中にごみ処理場を対象とした取り組みが位置づけられているか
問 11	将来的なごみ焼却排熱の有効利用の見通しについて
問 12	将来、ごみ焼却施設と下水処理場を隣接され連携していく可能性について
問 13	ごみ処理の広域化を実施・検討したことがあるか
問 14	その他、自由記入

2) インフラ連携の事業性

インフラ連携の代表例として、下水汚泥のごみ焼却場での混焼を取り上げ、インフラ連携の事業性を分析する。事業性評価分析のフローを図 3-28 に示す。

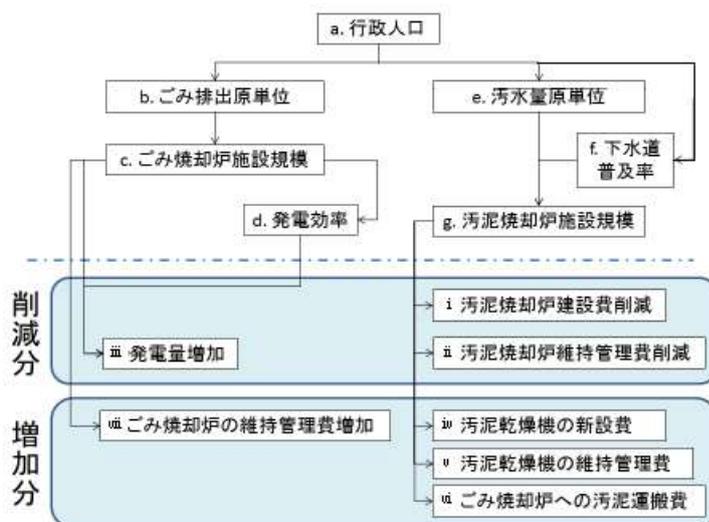


図 3-28 インフラ連携の事業性評価フロー（下水汚泥のごみ混焼）

各項目について、以下のとおり設定する。

まず、費用の削減・増加分を算定する基礎となる各係数 **a.** ～ **g.** は以下のとおりである。

a. 行政人口

374,314 [人] (2015年度和歌山市行政人口により設定)

b. ごみ排出原単位

2015年度和歌山市年間ごみ排出量 [t/年] $\times 100,000 \div 365 \div 2015$ 年度和歌山市人口 [人]
=1058.8 [g/人・日]

c. ごみ焼却炉施設規模

青岸エネルギーセンター400[t/日]+青岸クリーンセンター320[t/日]=720[t/日]

d. 発電効率

9.8 [%] (一般処理廃棄物実態調査により設定)

e. 汚水量原単位

水処理施設・年間処理水量 [m³/年] $\times 1,000 \div$ 水処理施設処理人口 [人] $\div 365 = 509.9$ [L/人・日]
(2013年度全国下水道統計データより和歌山市のデータを用いて算出)

f. 下水道普及率

38.9% (2015年度和歌山市下水道普及率)

g. 汚泥焼却炉施設規模

人口[人] \times 下水道普及率 $\div 100 \times$ 汚水量原単位[L/人・日] \times SS濃度[mg/L] $\div 109 \div$ (1-脱水汚泥含水率)
 \div 稼働率=24.70[t/日]

次に、費用の削減・増加分の各要素 **i.** ～ **vii.** を以下のとおり算出する。

i. 汚泥焼却炉建設費削減

汚泥焼却炉建設費削減 = { 1.888 \times 汚泥焼却炉施設規模^{0.597} \times デフレター10年 + 0.726 \times 汚泥焼却炉施設規模^{0.539} \times デフレター15年 + (1.361 \times 汚泥焼却炉施設規模^{0.38} + 2.426 \times 汚泥焼却炉施設規模^{0.094}) \times デフレター50年 } $\times 100 = 201.41$ [百万円/年]

デフレター: $I + I \div \{(I+1)^n - 1\}$ I; 利子率, n; 耐用年数

ii. 汚泥焼却炉維持管理費削減

汚泥焼却炉維持管理費削減 = 0.287 \times (汚泥焼却施設規模 $\times 365 \times$ 稼働率)^{0.673} = 122.68 [百万円/年]

iii. 発電量増加

発電量増加に伴い売電による削減費用 = 汚泥由来の発電量 [kwh/年] \times 電力単価 [円/kwh]
 $\div 10^6 = 33.00$ [百万円/年]

ここで、

汚泥由来の発電量 = 汚泥焼却施設規模 [t/日] $\times 365 \times$ 稼働率 $\times 1,000 \times$ 汚泥低位発熱量[MJ/kg-wet]
 \times 発電効率 $\div 100 \div 3.6 = 2356920.38$ [kwh/年]

汚泥低位発熱量 [MJ/kg-wet] = (高位発熱量 - (可燃分元素割合 $\div 100 \times 9 \times$ 汚泥中可燃物割合 $\div 100) \times 2.5) \times (1 - \text{脱水汚泥含水率} \div 100) - \text{脱水汚泥含水率} \div 100 \times 2.5 = 10.67$ [MJ/kg-wet] (未消化汚泥)

汚泥高位発熱量[MJ/kg-DS] = 4.186 \times ((58.3 \times 脱水汚泥可燃分割合) - 193) = 20.77 [MJ/kg-wet]
(未消化汚泥)

iv. 汚泥乾燥機設置費用

汚泥乾燥機設置費用 = $\{25.3 \times (\text{汚泥焼却施設規模} \div 65 \div 2)^{0.6} \times \text{デフレター} 20 \text{年}\} \times 100 = 58.79$ [百万円/年]

v. 汚泥乾燥機の維持管理費

汚泥乾燥機の維持管理費 = $1.7 \times \text{汚泥焼却施設規模} \div 65 \div 2 \times 100 = 32.30$ [百万円/年]

vi. ごみ焼却炉への汚泥運搬費

ごみ焼却炉への汚泥運搬費 = $\text{汚泥運搬費単価}(10 \text{ k m})[\text{万円/t}] \times \text{汚泥焼却施設規模} \times 365 \times \text{稼働率} \div 100 = 81.13$ [百万円/年]

vii. ごみ焼却炉の維持管理費増加

ごみ焼却炉の維持管理費増加 = $\text{ごみ焼却炉維持管理費単価} \times \text{汚泥焼却施設規模} \times 365 \times \text{稼働率} \div 10^3 = 20.28$ [百万円/年]

ごみ焼却率維持管理費単価 ; 2.5[千円/t]

3) インフラ連携のガイドライン

(1) ~ (5) の分析を行う中で抽出された、様々なインフラ連携の事例に対して、GHG削減の観点から、地域の特性(主体・装置・技術)に応じて、選択可能な技術オプションの類型を意思決定樹木図(Decision Tree)の形で表現した。

主体 周辺に連携を想定しうる主体が存在するか？

装置 連携に活用しうる既存装置があるか？

技術 適用可能な連携技術オプションの提示

4. 結果及び考察

(1) 動脈系インフラと静脈系インフラの連携

1) セメント産業との連携モデル

図 4-1 は、下水汚泥処理施設別の汚泥処理量を推計した結果である。総処理量は 79,026 t-DS/年（2010 年）から 67,257 t-DS/年（2040 年）へと、約 15%減少する。加古川下流浄化センターの処理量の減少率が最も高く、約 22%となった。また、兵庫東流域下水汚泥広域処理場、兵庫西流域下水汚泥広域処理場の処理量の減少率は約 12%となった。

A 工場のケース別の石炭消費量の推計結果を図 4-2 に示す。慎重ケースの石炭消費量では、発電プロセスは 2010 年の 248 千 t に対して 2040 年には 209 千 t となり、焼成プロセスは、2010 年の 291 千 t に対して 2040 年には 245 千 t となる。

両プロセスともに、2040 年には 2010 年に比べて石炭消費量が約 15.7%減少する結果となった。成長ケースでは、2040 年に発電プロセスは 254 千 t となり、焼成プロセスは 298 千 t となる。両プロセスとも、2040 年においても 2010 年の石炭消費量を下回らない結果となった。一方、低成長ケースでは、2040 年の発電プロセスの石炭消費量は 143 千 t、焼成プロセスでは 168 千 t となる。両プロセスともに、2040 年には 2010 年の石炭消費量の約 58%にまで減少することが明らかとなった。

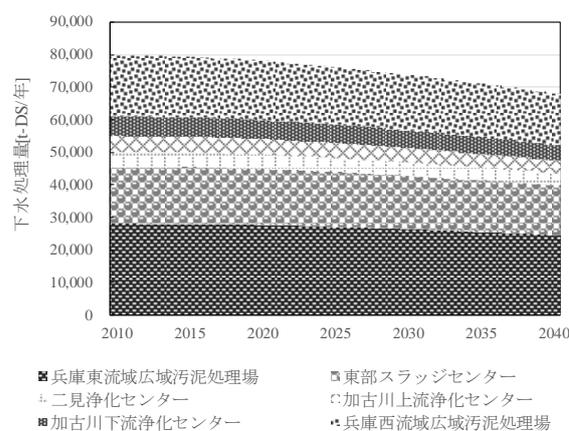
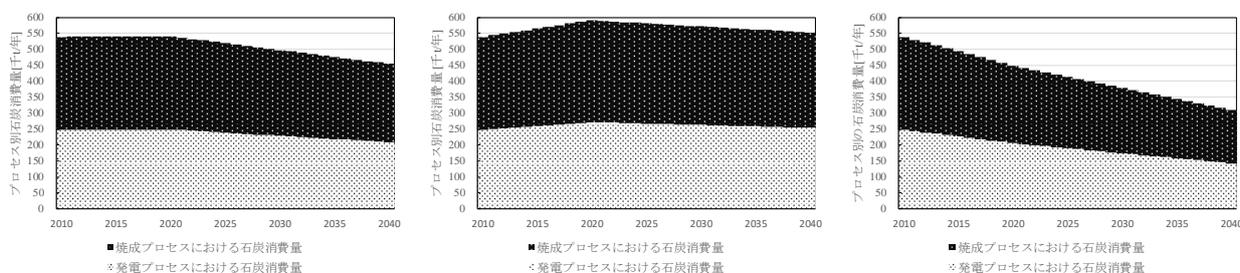


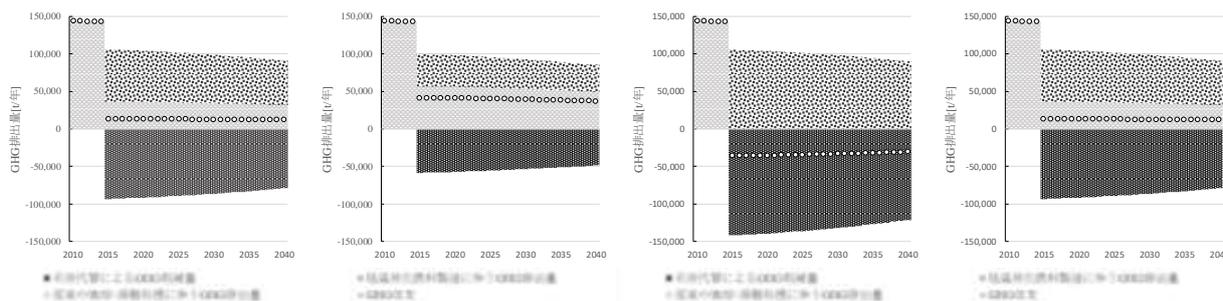
図 4-1 施設別の下水汚泥処理量の推計結果



<左図：慎重ケース／中図：成長ケース／右図：低成長ケース>

図 4-2 石炭消費量の推計結果

図 4-3、図 4-4 は、2010～2040 年の GHG 排出量の推計結果である。ここでは、炭化技術の導入時期は 2015 年と設定し、2015 年までは従来処理に伴う GHG 排出量のみを算定している。また、石炭代替による GHG 削減量は、マイナス計上している。2040 年まで従来の焼却・溶融処理を継続した場合の GHG 排出量と比較した 2015～2040 年の GHG 総削減量は成長ケースと慎重ケースの技術展望オプションが最も大きく、次いで低成長ケースの技術展望オプションと慎重ケース・成長ケースの基本オプション、低成長ケースの基本オプションの順となった。25 年間の総削減量は 3,460 千 t-CO₂、2,266 千 t-CO₂、1,409 千 t-CO₂ となり、それぞれの削減率は、125.4%、90.6%、70.3%となった。

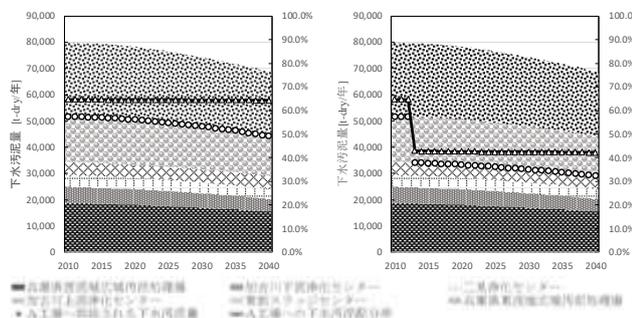


<左図：慎重ケース・成長ケース／右図：低成長ケース> <左図：慎重ケース・成長ケース／右図：低成長ケース>

図 4-3 基本オプションにおける GHG 排出量

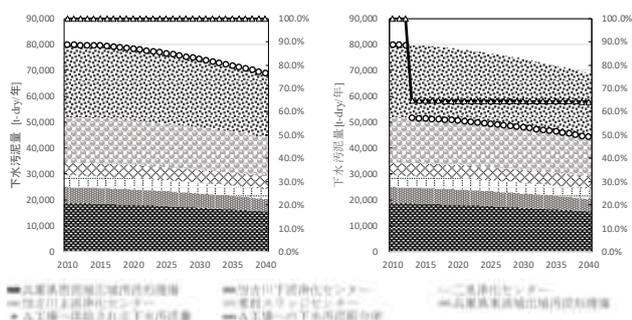
図 4-4 技術展望オプションにおける GHG 排出量

なお、A 工場における各下水汚泥処理施設からの受入汚泥量は、図 4-5、図 4-6 のとおりである。



<左図：慎重ケース・成長ケース／右図：低成長ケース>

図 4-5 基本オプションにおける A 工場への下水汚泥供給量の推計結果



<左図：慎重ケース・成長ケース／右図：低成長ケース>

図 4-6 技術展望オプションにおける A 工場への下水汚泥供給量の推計結果

以上の結果をまとめると、次のとおりである。

- 基本オプションでは、慎重ケースと成長ケースで将来的に兵庫東流域下水汚泥広域処理場または東部スラッジセンターを除く 5 施設分、低成長ケースで、兵庫東流域下水汚泥広域処理場および東部スラッジセンターを除く 4 施設分の炭化燃料を全量受け入れ可能と判明した。また、

技術展望オプションでは、将来的に兵庫東流域下水汚泥広域処理場を除く 5 施設分の炭化燃料が全量受け入れ可能であることが分かった。

- ・ セメント産業の成長かつ焼成プロセスで 10%混焼が可能であれば、兵庫東流域下水汚泥広域処理場から生成される炭化燃料を供給可能となる。セメント生産の将来動向と混焼技術の進化に供給の可能性が左右されるため、そのほかの産業との連携も視野に入れる必要があると示唆された。
- ・ セメント生産インフラと連携して下水汚泥由来の固形燃料を有効活用するシステムは GHG 削減ポテンシャルが高く、中長期的にみても域内の多量の下水汚泥の受け入れに加え、システム全体で GHG 削減効果を高めることができる。2015～2040年の 25 年間における GHG 削減量は、最大で 3,460 千 t-CO₂ (削減率 125.4%) となる。

2) 紙パルプ産業との連携モデル

下水汚泥処理施設別の下水汚泥処理量の推計結果を図 4-7 に示す。総処理量は 487,274 t-dry/年 (2010 年) から 411,189 t-dry/年 (2040 年) へと 15.6%減少する。地域別に 30 年間の汚泥処理量をみると、関西地方：11,872 千 t-dry、中国地方：1,665 千 t-dry、四国地方：634 千 t-dry となった。対象地域全体の処理量の 83.8%を占める関西地方の中でも、大阪府と兵庫県がそのうちの 68.7%を占め、固形・液体状の代替燃料供給のポテンシャルが高い。図 4-8 は、下水処理場別の消化ガス有効利用可能熱量の推計結果である。総有効可能熱量は 52,898 GJ/年 (2010 年) から 44,801 GJ/年 (2040 年) へと 15.3%減少する。ここでも関西地方が対象地域全体の有効利用可能熱量の 68.7%を占める。特にそのうちの 95.3%を占める大阪府、兵庫県、京都府では、気体状の代替燃料の供給ポテンシャルが高い。

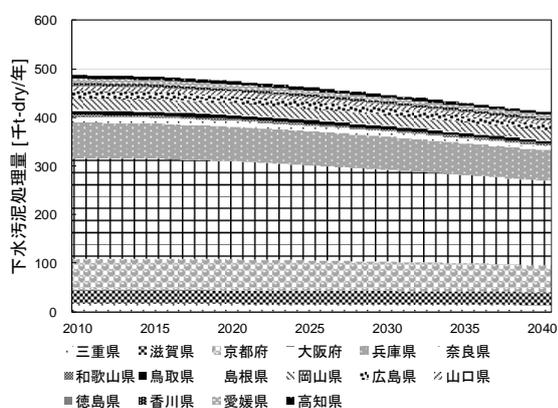


図 4-7 都道府県別の下水汚泥処理量

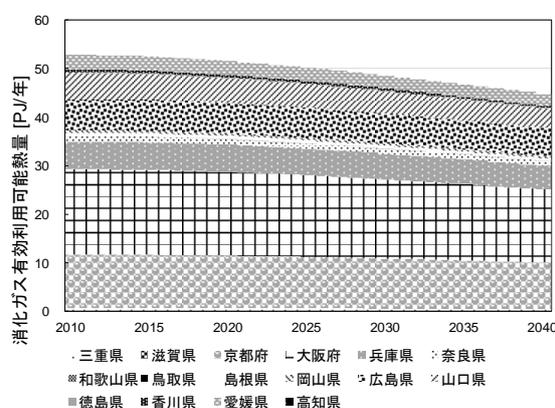
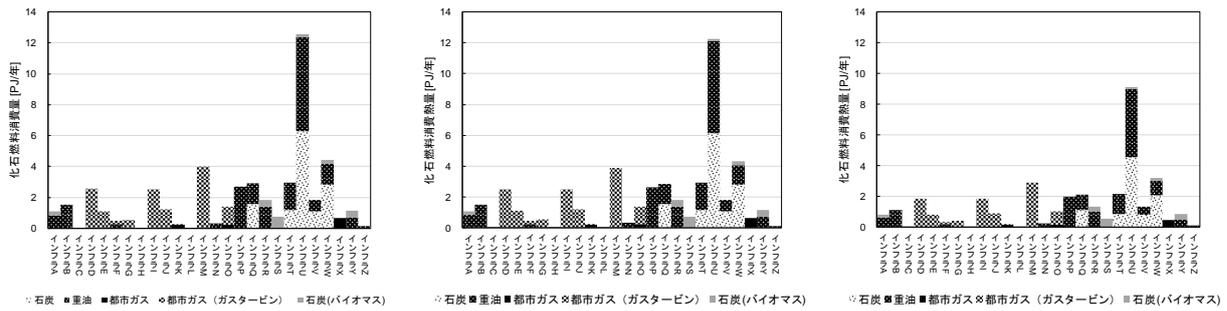


図 4-8 都道府県別の消化ガス有効利用可能熱量

一方、代替燃料の供給先となる紙・パルプ工場の工場別化石燃料消費熱量を成長ケースごとに推計し、図 4-9 の結果を得た。2010 年の総燃料消費熱量：48.8 PJ/年に対して、成長ケースでは 2040 年に 49.8 PJ/年となり、産業の成長に併せて燃料消費熱量が 2.2%増加する。低成長ケースでは 2040 年に 37 PJ/年となり、減産によって燃料消費熱量が 24.1%減少する。また、2010 年の総燃料消費熱量の内訳をみると、関西：31.2%、中国：20.3%、四国：48.6%となる。特に四国地方における代替燃料の受入ポテンシャルが高く、固体・液体の代替燃料の需要が大きいことがわかった。

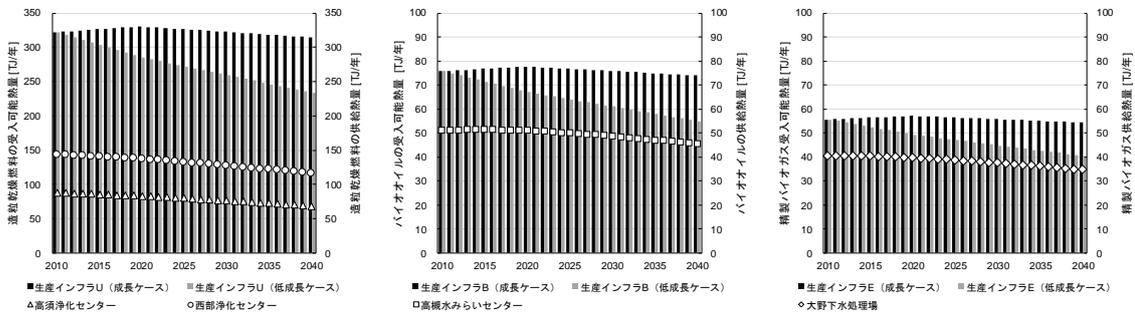


＜左図：成長・低成長ケース 2010 年／中図：成長ケース 2040 年／右図：低成長ケース 2040 年＞

*紙・パルプ生産インフラ A～M までは関西地方，N～S は中国地方，T～Z は四国地方に立地している。

図 4-9 対象地域における紙・パルプ生産インフラ別の化石消費熱量

以上の中期的な需給ポテンシャルから、代替燃料の供給パターンを推計した(図 4-10、表 4-1)。5 つの紙・パルプ生産工場と 7 つの下水処理場との連携が可能となることが明らかになった。なお、紙・パルプ工場の受入可能量を超過する汚泥を下水汚泥処理施設で従来型の焼却・溶融処理をすることになると、焼却・溶融設備と燃料化設備の併設が必要となる。こうした下水汚泥処理施設側の維持管理などの負担増加や敷地制約を避けるため、燃料化技術を導入する場合には下水汚泥全量を代替燃料化するという条件を置いている。ただし、ある汚泥処理施設からの代替燃料をすべて受け入れると紙・パルプ工場の需要量を超過してしまう場合には、その汚泥施設では代替燃料化を行わず、従来の汚泥の焼却・溶融処理が継続されるものとしている。



＜左図：造粒乾燥技術／中図：バイオオイル化技術／右図：バイオガス精製技術＞

図 4-10 代替燃料化技術別の各生産インフラへの供給パターン

表 4-1 各供給パターンによるシステムの連携状態

紙・パルプ生産インフラ	連携の軸となる燃料化技術	下水処理場・下水汚泥処理施設
生産インフラ Q (広島県)	造粒乾燥技術	東部浄化センター (広島県)
生産インフラ U (愛媛県)	造粒乾燥技術	高須浄化センター (高知県), 西部浄化センター (愛媛県)
生産インフラ B (滋賀県)	バイオオイル化技術	高槻水みらいセンター (大阪府)
生産インフラ E (大阪府)	バイオガス精製技術	大野下水処理場 (大阪府)
生産インフラ K (兵庫県)	バイオガス精製技術	高砂浄化センター (兵庫県), 伊保浄化センター (兵庫県)

下水汚泥の集約処理が進んでいる大阪府や兵庫県の下水汚泥処理施設は高い供給ポテンシャルを有する一方、都市域に立地する紙・パルプ工場の多くは生産規模が大きくない。そのため、紙・

パルプ工場の代替燃料受入可能量が周辺の汚泥処理施設の供給可能量を大きく下回ることが多く、動脈・静脈インフラの連携が成立しづらい状況が確認できた。こうした都市域の汚泥処理施設では、郊外の大規模な紙・パルプ工場や他産業インフラとの連携を模索する必要があるといえる。他方、農村・地方域の汚泥処理施設は、地域全体では高い供給ポテンシャルを有するものの、一つ一つの施設が小規模・分散型であるため、燃料化技術が導入可能な規模に至らないことが多い。生産規模の大きな紙・パルプ工場を地域内に有しながらも、汚泥処理施設が代替燃料の生産・供給拠点にならず、ここでも需給ギャップに直面することが明らかになった。

下水汚泥の集約処理が進んでいる大阪府や兵庫県の下水汚泥処理施設は高い供給ポテンシャルを有する一方、都市域に立地する紙・パルプ工場の多くは生産規模が小さくない。そのため、紙・パルプ工場の代替燃料受入可能量が周辺の汚泥処理施設の供給可能量を大きく下回ることが多く、動脈・静脈インフラの連携が成立しづらい状況が確認できた。こうした都市域の汚泥処理施設では、郊外の大規模な紙・パルプ工場や他産業インフラとの連携を模索する必要があるといえる。他方、農村・地方域の汚泥処理施設は、地域全体では高い供給ポテンシャルを有するものの、一つ一つの施設が小規模・分散型であるため、燃料化技術が導入可能な規模に至らないことが多い。

生産規模の大きな紙・パルプ工場を地域内に有しながらも、汚泥処理施設が代替燃料の生産・供給拠点にならず、ここでも需給ギャップに直面することが明らかになった。

さらに、この供給パターンに基づいて、代替燃料化技術の導入に伴う GHG 排出量（2010～2040年）を推計した。その結果を図 4-11 に示す。代替技術の導入時期は 2020 年とし、それまでは従来処理に伴う GHG 排出量のみを算定している。代替技術導入後の 2020 年から 2040 年までの総排出量は 696.2 千 t-CO₂ で、2040 年まで従来の焼却・溶融処理を継続した場合の GHG 排出量と比較すると、71.2%の削減が可能となる。

3) さらなる GHG 削減に向けた複合的な連携モデル

各ケースの下水汚泥処理場、清掃工場、セメント工場におけるそれぞれの GHG 排出・削減量の推計結果を図 4-12～図 4-14 に示す。

下水汚泥処理施設では、case0 と比較すると、case1～4 はそれぞれ 240%、102%、191%、24% の GHG 削減となった。中でも脱水汚泥の焼却処理を清掃工場に移し、消化ガスを全量発電に利用できる case1 の GHG 削減効果が最も大きくなった。脱水汚泥を造粒乾燥する case2～4 を比較すると、消化ガスの利用方法が異なるため GHG 収支に差が生じている。case2 は乾燥に使用した消化ガスの余剰分を発電に利用し、case4 は都市ガス代替にするため、バイオガス発電は実施しない。そのため、発電に利用可能な消化ガスの量が多いケースほど GHG 削減効果が大きくなった。

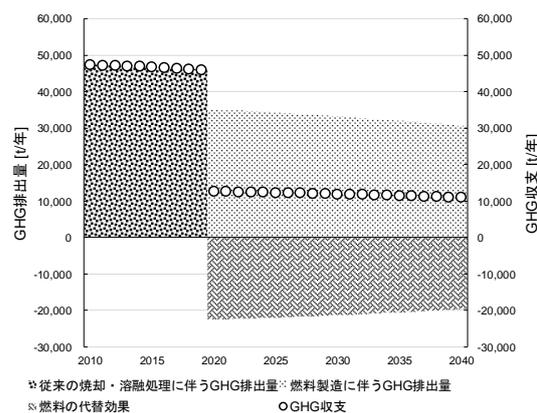


図 4-11 2010～2040 年の GHG 排出量

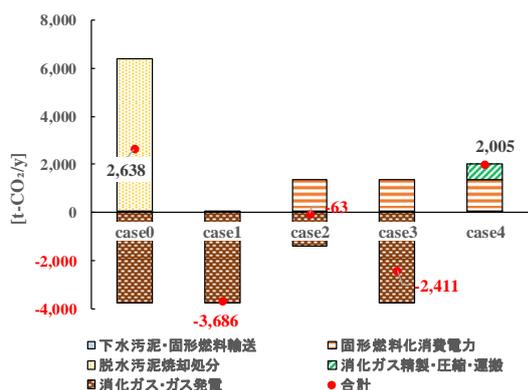


図 4-12 下水汚泥処理場の GHG 排出量

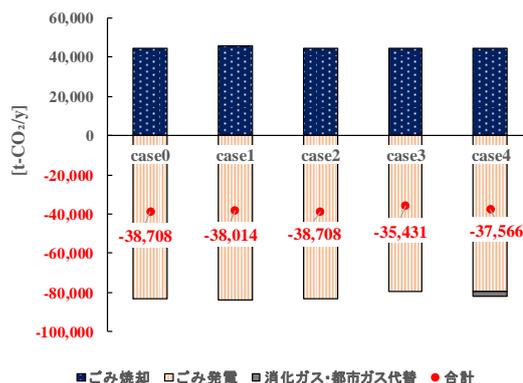


図 4-13 清掃工場の GHG 排出量

清掃工場では、case0 と case2 の GHG 削減効果が最も大きくなった。case0 および 2 のごみ発電による GHG 削減量は 83,163 t-CO₂/y で、汚泥とごみを混焼する case1 の 83,839 t-CO₂/y よりも少なくなった一方、ごみ焼却による GHG 排出量は case0、case2 とともに case1 よりも少なく、清掃工場全体で最も高い削減効果となった。

セメント工場での GHG 排出量は、脱水汚泥および造粒乾燥物の石炭代替によるものである。発熱量でみると脱水汚泥より造粒乾燥物が高いため、case2~4 は造粒乾燥物の石炭代替利用によって case0 および 1 と比較して 1,555% の GHG 削減効果が得られた。

各ケースにおける GHG の排出量・削減量の推計結果を図 4-15 に示す。case0 と比較すると、case1 ~4 はそれぞれ 16%、42%、40%、33% の削減となった。脱水汚泥を造粒乾燥する case2~4 はいずれも、清掃工場で混焼・発電する case1 よりも GHG 削減効果が高い結果となった。下水汚泥の処理方式において、造粒乾燥物による一般炭代替の GHG 削減効果が高いといえる。最も GHG 削減効果が大きい case2 と次点の case3 を比較すると、清掃工場の蒸気タービン発電と消化ガス発電の総発電量に差がある。発電効率は消化ガス発電のほうが高いが、case3 は間接熱交換型の汚泥乾燥を想定しているため、case2 より多量の熱を乾燥に消費する。そのため、case2 の発電量が case3 を上回る結果となった。

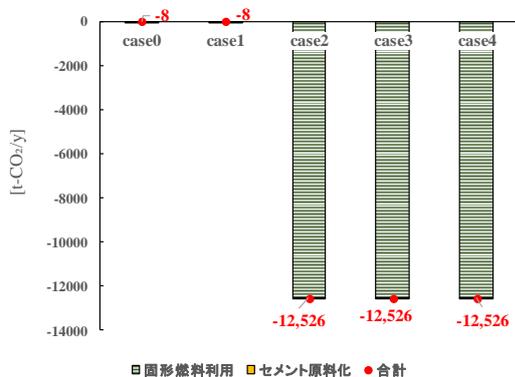


図 4-14 セメント工場の GHG 排出量

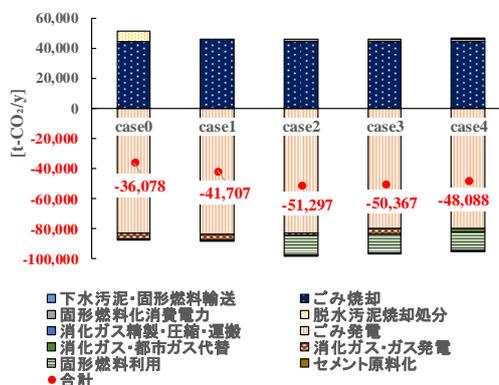


図 4-15 ケース別 GHG 排出量

4) まとめ

以上の1)～3)を踏まえると、動脈・静脈インフラ連携の特徴や基本的な方向性は、動脈産業の業種ごとに表4-2のように整理することができる。

表4-2 業種に応じた動脈・静脈インフラ連携の特徴

	石炭火力	セメント	紙・パルプ
潜在的な受入可能量	◎受入可能量は大きく、将来的にも安定した需要も、立地が限定される。 (エネルギー基本計画上の位置づけ)	○石炭火力に次いで受入可能量は多いが、生産見通しにより需要変動。	△受入可能量は小さい。石炭代替燃料を使用する工場数は、限定的かつ地域的偏在あり。生産見通しにより需要変動。
燃料	炭化物 (粉碎性では木質より炭化物が有利。腐食性が高いため、混焼率を高めることが困難)	炭化・乾燥物 (除去設備の設置によって、微量物質への対応が完了)	乾燥物+α (ただし、固形燃料以外にも多様な燃料形態で受け入れ可能)
技術(受入装置)	○石炭ボイラ (既存設備で混焼可能)	○複数の生産プロセス (プレヒーター、キルン、自家火力発電設備で受入可能)	△固形燃料ボイラ (既存設備を改造して混焼可能に)
政策	改正省エネ法への対応 (既存設備では、実質的にバイオマス燃料の混焼以外では対応が困難)	低炭素実行計画への対応 (エネルギー代替廃棄物の受入拡大と、自家発電熱エネルギーを増強)	低炭素実行計画への対応 (削減効果の高い低炭素燃料への転換を継続または受入拡大)
受容性	企業ビジョンによって志向性が異なる。 (海外木質ビジネス志向、汚泥活用公民連携志向)	事業の成立性に依存 (既に廃棄物燃料の受け入れ拠点)	継続的に調達可能な代替燃料の候補 (オイルレス化・木質バイオマス調達の競合回避を業界として推進)

(2) 静脈系インフラ間の連携

1) 大都市における下水汚泥エネルギー化戦略の類型

有機物量ベースでみた下水汚泥のエネルギー利用状況の分析結果を図4-16に示す。図の読み方の一例として、神戸市においては処理場全体で発生する濃縮汚泥の全量が消化されているため、汚泥中の有機物の50%がバイオガスとして回収され、脱水汚泥に残った有機物の50%が焼却されている。

横浜市、京都市、大阪市、神戸市、福岡市においては、濃縮汚泥の全量が消化されている。一方で、札幌市、川崎市、名古屋市においては、すべての下水処理施設(または汚泥資源化施設)において消化槽は導入されていない。2015年度の段階では、高温焼却炉の更新期を迎えていない都市が多く、既に脱水汚泥の固形燃料化を展開している都市は、仙台市、東京都区、横浜市、大阪市、広島市、北九州市に留まっている。廃熱発電付きの汚泥専焼炉の導入が既に行われている都市についても、現状では東京都区、名古屋市の2都市に留まる。

次に、静脈系インフラ連携の適合性指標(式(ST2-1)、(ST2-2))を踏まえた都市間比較結果を図4-17に示す。

横軸(消化されている濃縮汚泥の割合)より、横浜市、京都市、大阪市、神戸市、福岡市の5都市については、濃縮汚泥の全量が消化されている特性を持ち、すなわち、食品廃棄物の消化槽での受入、脱水汚泥のごみ焼却施設での受入に関するインセンティブが高いことを指す。その5都市のうち、縦軸(エネルギー化されている脱水汚泥の割合)の観点では、京都市、神戸市、福岡市の3都市で値が0となった。これら3都市では汚泥専焼炉の更新期を迎えておらず、エネルギー化に向けた技術設備の更新が行われていないため、ごみ焼却施設での汚泥混焼を行う余地が残っていると評価した。

以上より、下水処理施設における濃縮汚泥と事業系厨芥の混合消化、ごみ焼却施設におけるごみと汚泥の混合焼却について、京都市、神戸市、福岡市の3都市が、最もその適合性が高い都市であると位置付けられる。本研究では、その中で神戸市をケースステディの対象とした。

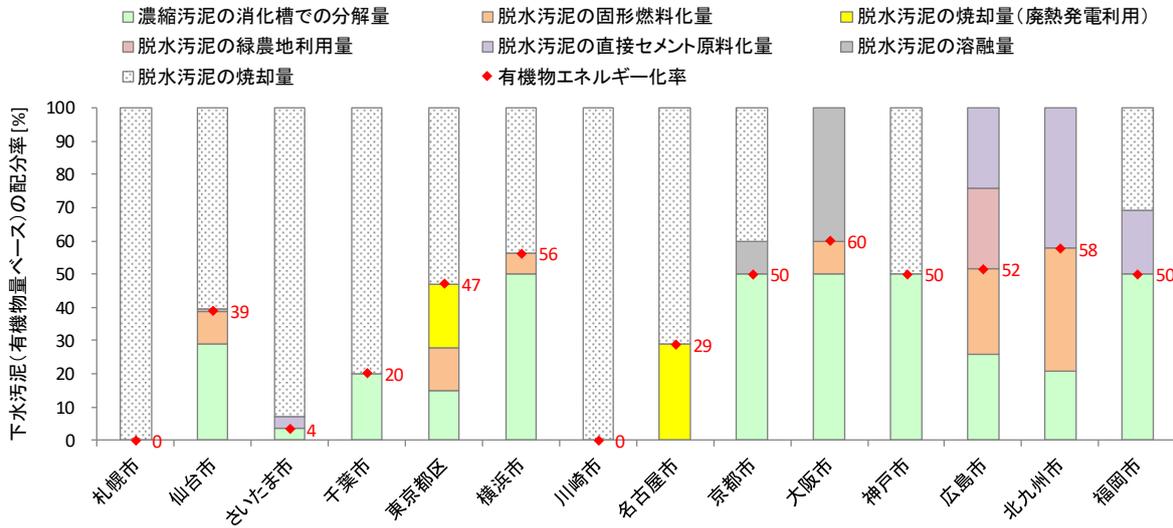


図 4-16 有機物量ベースでみた下水汚泥エネルギー化の都市間比較結果

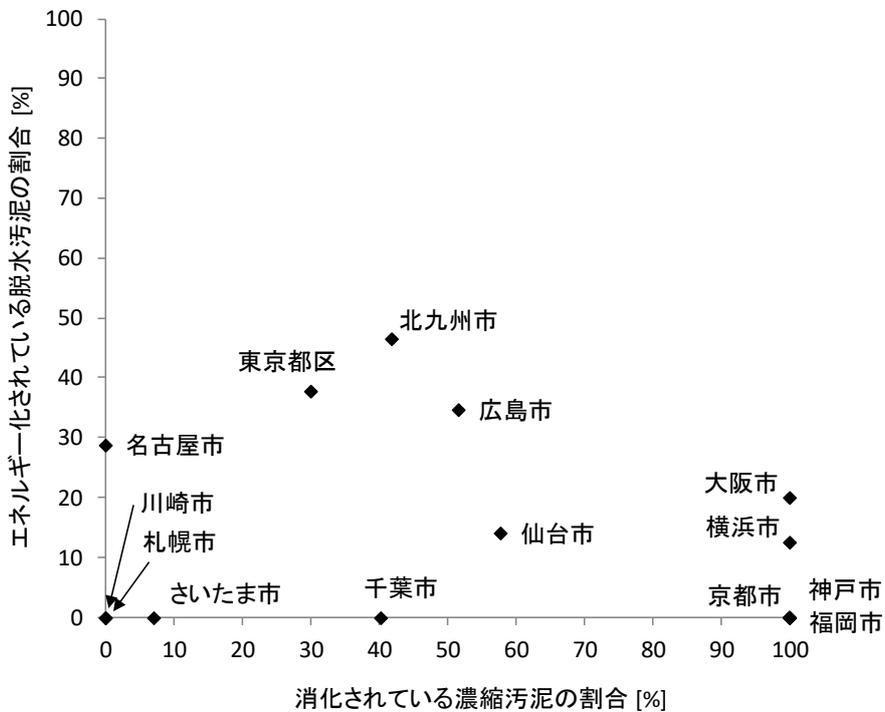


図 4-17 大都市を対象とした下水汚泥のエネルギー利用状況の類型結果

ケース D では、Base 2030 と比較して 34% の GHG 排出削減が図れる評価結果となった。ごみ廃熱発電システムの抽気を活用することにより脱水汚泥を効率的に乾燥できるケース C の長所、固形燃料（乾燥汚泥）を石炭火力発電所で用いることにより高い発電効率でエネルギー利用できるケース B の長所、その両方を活かすことができる。よって、静脈系・動脈系の全ステークホルダー（下水処理施設、ごみ焼却施設、石炭火力発電所）による連携が成立した場合、より一層の GHG 排出削減効果が期待できることが明らかとなった。

・ごみ焼却施設での熱収支解析結果

サブテーマ 2 では、汚泥の乾燥・混合焼却に関わるごみ焼却施設での熱収支を精緻に解析するための手法の開発に力点を置いた。熱収支解析のためのプロセスモデルを適用し、ケース C における熱収支を解析した結果を図 4-19 に示す。

汚泥の乾燥に用いるための熱量は 12,307 MJ/h であり、同値は抽気の配分量（14,734 MJ/h）とドレン保有熱量（2,427 MJ/h）の差により算出できる。乾燥用熱量（12,307 MJ/h）は、ごみ廃熱によりボイラで産出される過熱蒸気の熱量（161,186 MJ/h）の 8% に相当する。すなわち、汚泥乾燥により生じる熱量の損失は限定的である。ケース C におけるごみ焼却施設の発電効率は 19.1%（発電量 28,614 MJ/h を投入熱量 140,268 + 9,387 MJ/h で除した値）と算定される。ごみ焼却施設による脱水汚泥の受入を行わないケース B での発電効率 20.8%（推計値）と比較し、1.7% 効率が低下するが、発電効率の観点でも汚泥乾燥により生じる効率の低下は限定的であると言える。

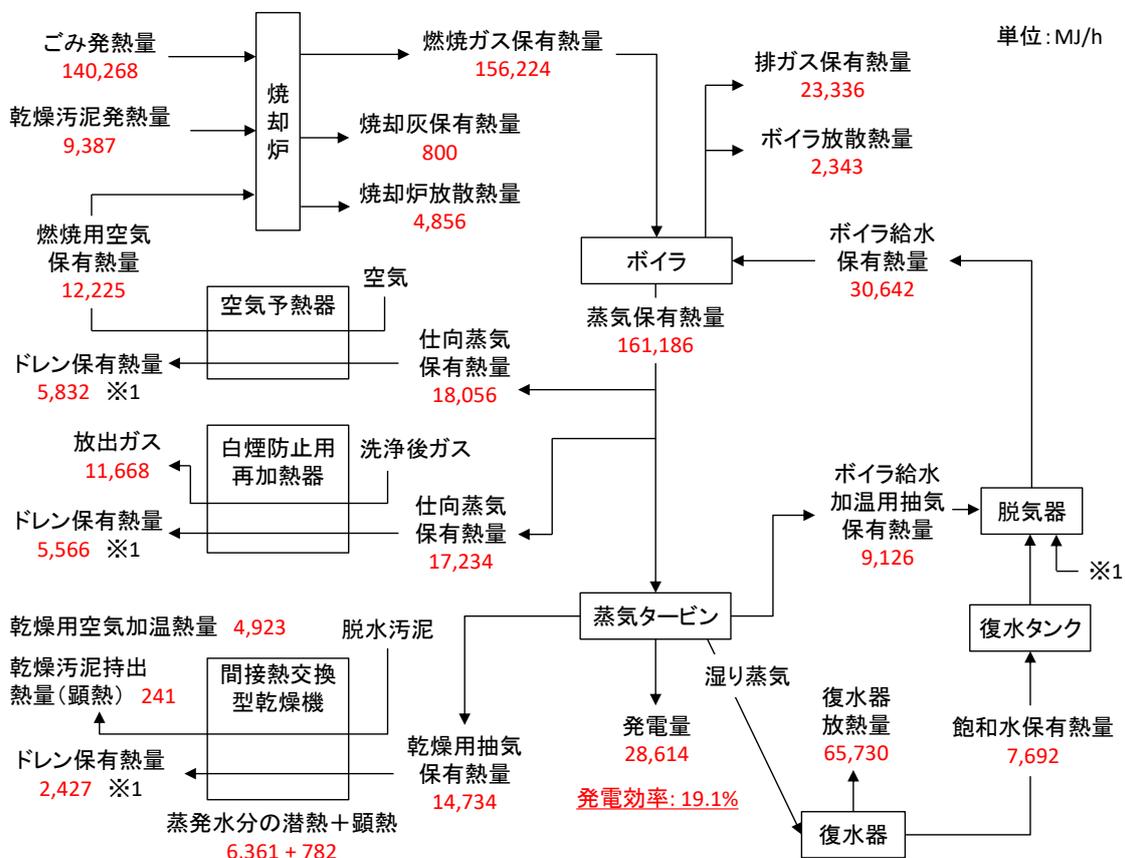


図 4-19 ごみ焼却施設における汚泥混焼のエネルギー収支解析結果（ケース C：汚泥混焼）

3) 地方都市における静脈系インフラ連携に係るごみ処理広域ブロックの類型－群馬県を対象として－

群馬県のごみ処理広域ブロックを対象とし、縦軸に第1指標（ごみ焼却施設の処理能力の将来推計値）、横軸に第2指標（合併処理浄化槽人口の割合）をプロットした類型結果を図4-20に示す。

縦軸より、人口規模が主要因となり利根沼田、吾妻ではごみ処理区域を広域化しても処理能力が100 t/日未満となり、メタンガス化施設を検討すべきブロックとして分類された。それ以外の7つのブロックでは、ごみ処理広域化を進めることでボイラ・タービン発電が導入可能であることが推計された。

横軸の合併処理浄化槽人口の割合について、県内で比較して比率が高いブロックとして藤岡富岡、太田館林、吾妻、伊勢崎、渋川が抽出された。これらのブロックは、し尿・浄化槽汚泥等の処理機能の統合化を大規模に展開する可能性を有している。とりわけ太田館林は、人口規模が大きいかに関わらず、前橋や高崎安中と比較して合併処理浄化槽人口の割合が高い地方都市としての特徴を持つ。

以上のブロック類型結果を踏まえ、本研究では、太田館林ブロック（ボイラ・タービン発電導入地区）、吾妻ブロック（メタン発酵導入地区）を評価対象地域として選定した。

参考に、ブロック類型、ならびにケースステディに用いた生活排水処理方式別人口の推計結果を図4-21に示す。

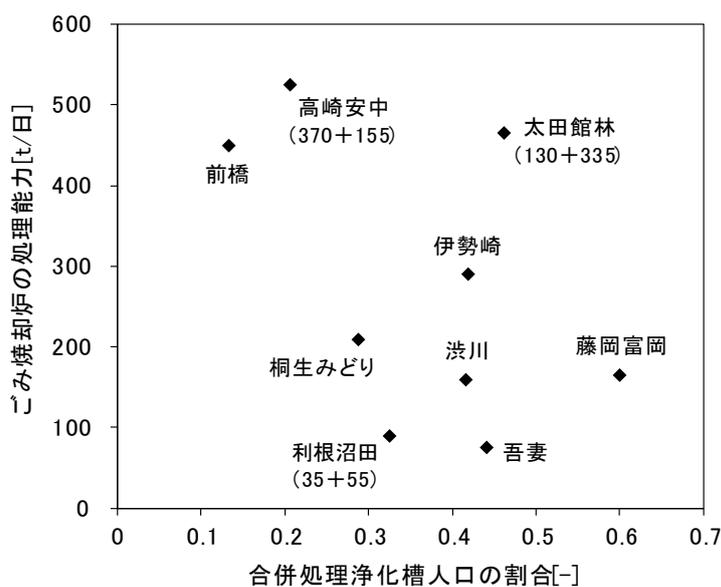


図 4-20 群馬県を対象としたごみ処理広域ブロックの類型結果

注：() 内はブロックで2施設の更新が必要な場合におけるそれぞれのごみ焼却炉の処理能力値であり、() が記載されていないブロックについてはブロックで1施設の更新となった。

本研究における推計では、汚水処理人口の増加に対する寄与率のうち、合併処理浄化槽の寄与が高い予測モデルを採用した。これは、過去の普及傾向を将来推計に反映させたためである。よ

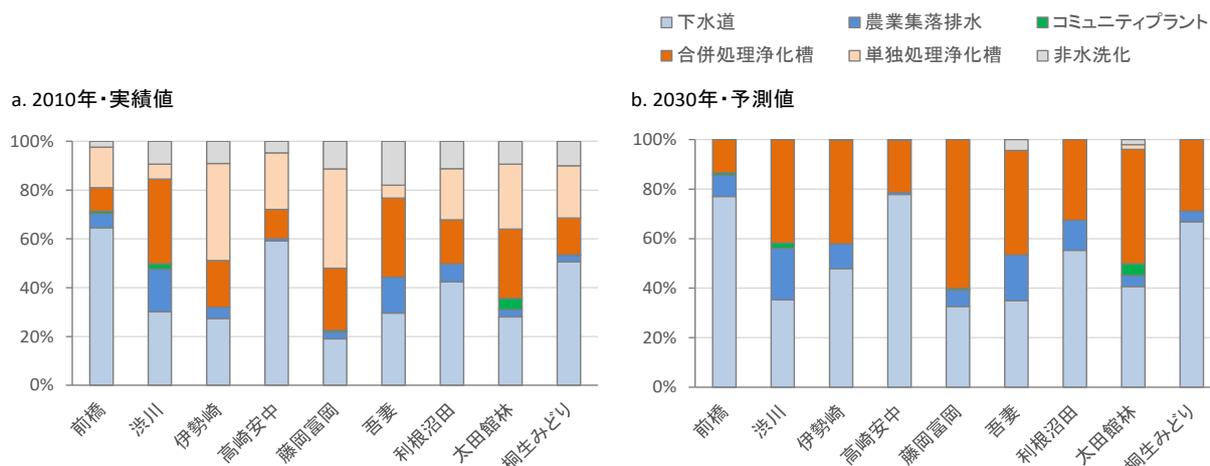


図 4-21 群馬県を対象とした生活排水処理方式別人口の推計結果

って、群馬県（2008）⁷⁵⁾に掲載されている汚水処理計画を反映した生活排水処理方式別人口（計画値）と本研究の推計値は異なる。

具体的には、計画値では下水処理人口の比率がより高いのに対し、本研究推計値は合併処理浄化槽人口の比率をより高く推計した。汚水処理適正化構想を踏まえ、市街化区域は下水道を拡張する前提で汚水処理計画が立てられているが、今後は、都市計画側での立地適正化計画を踏まえ、住居誘導区域外（市街化区域であるが誘導区域ではない地区）における汚水処理計画の見直しに迫られることとなる。住居誘導区域外は浄化槽整備に変更される可能性もあり、そうした将来要素を考慮し、本研究独自の生活排水処理方式別人口（推計値）を採用した。

4) 地方都市における汚泥焼却計画の設計と評価－群馬県を対象として－

- ・ボイラ・タービン発電導入地区での計画（太田館林ブロック）

太田館林ブロックでの温室効果ガス排出量の評価結果を図 4-22 に示す。

2010 年の排出量 173.5 t-CO₂eq と比較して、2030 年・熱回収ケースの排出量は 95.8 t-CO₂eq となり、ごみ焼却施設でのボイラ・タービン発電の導入による削減効果が得られた。し尿処理施設での脱水汚泥の乾燥・混焼を撤退させる混焼連携ケースでは、GHG 排出量は 83.7 t-CO₂eq となり、熱回収ケースに対し 13%削減される評価結果となった。これは、熱回収ケースと混焼連携ケースを比較し、混焼連携ケースにおけるし尿処理施設での削減量 16.0 t-CO₂eq（電力・A 重油消費の回避の効果）が、ごみ焼却施設での排出量の増加 3.9 t-CO₂eq（脱水汚泥受入によるごみ廃熱発電システムの効率低下による影響）より大きいためである。

太田館林ブロックでのごみ焼却施設における脱水汚泥の乾燥・混焼については、新設される施設（ごみ焼却量 208.5 t/日、脱水汚泥受入量 22.1 t/日）での事業を想定した。脱水汚泥を受け入れる混焼連携ケースにおいて、汚泥の乾燥に用いる蒸気保有熱量は、過熱蒸気の生産量の約 4%に該当する。発電効率については、熱回収ケースでの推計値 19.1%に対し、混焼連携ケースでは 17.9%に低下する結果となった。そのため、蒸気タービンでの発電に与える影響は限定的なものであると言える。

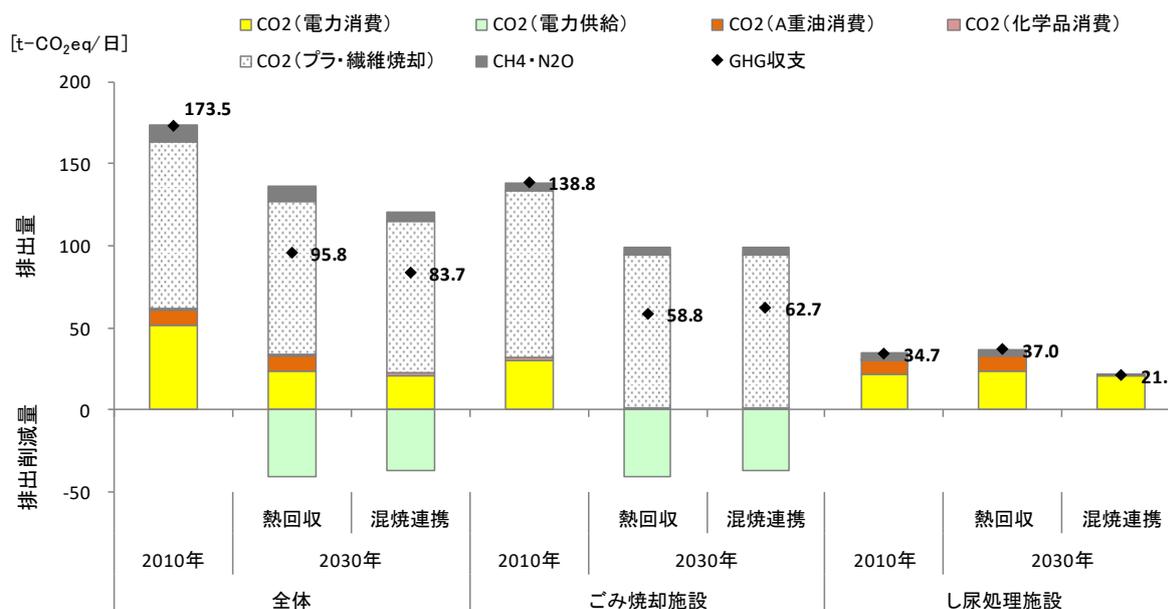


図 4-22 温室効果ガス排出量の評価結果（太田館林ブロックを対象としたケースステディ）

・メタン発酵導入地区での計画（吾妻ブロック）

吾妻ブロックでの温室効果ガス排出量の評価結果を図 4-23 に示す。

2010 年の排出量 34.1 t-CO₂eq と比較して、2030 年・ガス回収ケースの排出量は 23.6 t-CO₂eq となり、これは、人口減少やごみ焼却施設での乾式メタン発酵の導入効果に起因する。融通連携ケースでの排出量は 20.2 t-CO₂eq となり、ガス回収ケースに対し 15%削減される評価結果となった。ガス回収ケースと融通連携ケースを比較し、GHG 排出削減の要因はし尿処理施設の撤退に伴う削減量 4.8 t-CO₂eq（し尿処理施設・農業集落排水施設の差 5.4-0.6 t-CO₂eq）であり、同削減量が汚泥処理機能の統合化による下水処理施設やごみ焼却施設での排出増加分を上回ったためである。

バイオガス発生量を指標とした導入要件⁷⁷⁾は、マイクロガスタービンで 500~2,000 Nm³/日、ガスエンジンで 2,000 Nm³/日以上を確保することが目安となる。また、発電出力として求められる範囲は、マイクロガスタービンが 30~95 kW、ガスエンジンが 25~1,000 kW である⁷⁸⁾。吾妻ブロックでのバイオガス産出量の評価結果を表 4-3 に示す。なお、吾妻ブロックでは、下水処理施設、ごみ焼却施設、それぞれ 1 施設でメタン発酵事業が行われる。

下水処理施設における消化槽でのバイオガス回収については、バイオガス産出量の確保のため、融通連携ケースでは下水処理施設での事業系厨芥の受入が行われる。融通連携ケースでは、バイオガス産出量が 623 Nm³/日、発電出力が 38 kW と推計され、マイクロガスタービンの導入要件（500 Nm³/日以上、30 kW 以上）を満たしている。バイオガス産出量を熱量ベースでみると、13.2 GJ のうち 5.4 GJ（41%）が事業系厨芥受入によるガス回収量にあたる。一方、ガス回収ケースでは、草津下水処理場においてマイクロガスタービンの導入要件が満たせない結果となった。有機物分解率の高い厨芥を下水処理施設側で受け入れて混合消化する施策は、人口規模の小さいブロックにおいてマイクロガスタービンの導入を検討するにあたり、重要な鍵となる。

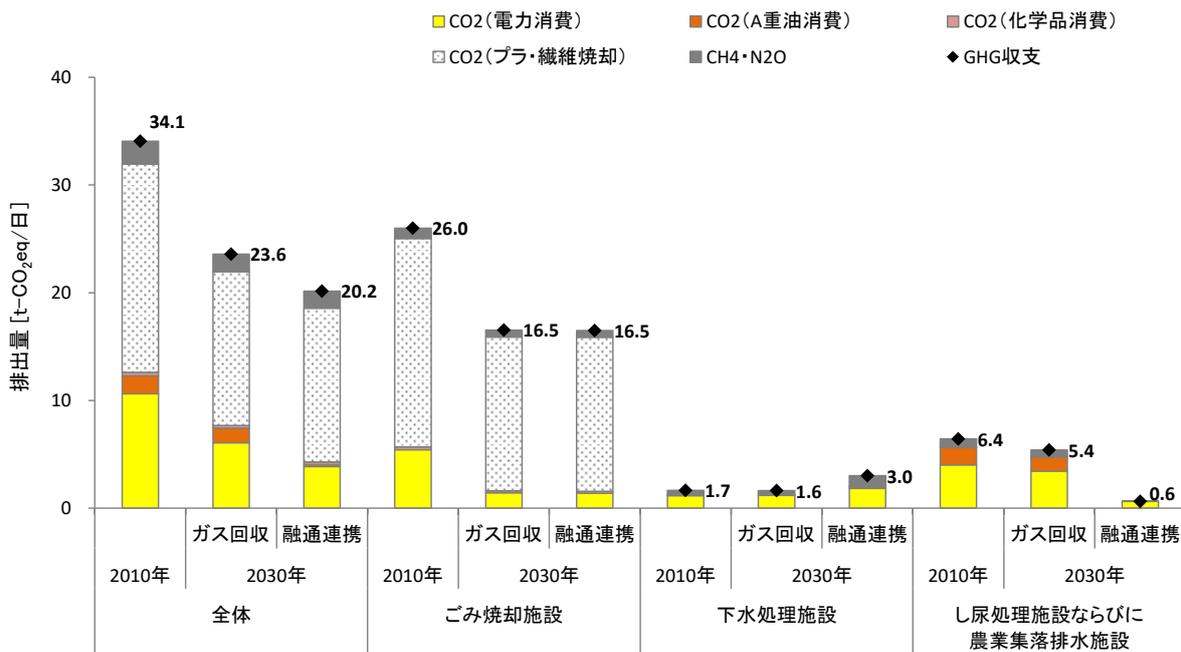


図 4-23 温室効果ガス排出量の評価結果 (吾妻ブロックを対象としたケースステディ)

なお、ごみ焼却施設における乾式メタン発酵でのバイオガス産出については、ガス回収、融通連携ケースの両方においてガスエンジンの導入要件を満たしている。ごみ焼却施設での乾式メタン発酵では、紙ごみからのバイオガス回収が確保できるため、融通連携ケースにおいて事業系厨芥からのバイオガス回収が減少した場合においても、ガスエンジンの導入要件を十分に満たす結果となった。

表4-3 吾妻ブロックでのバイオガス産出量の評価結果

		下水処理施設		ごみ焼却施設	
		ガス回収	融通連携	ガス回収	融通連携
バイオガス 産出量	Nm ³ /日	168	623	3,347	3,134
	GJ/日	3.6	13.2	65.8	61.9
(バイオガス産出量の内訳)					
濃縮汚泥	GJ/日	3.6	3.6		
浄化槽汚泥			3.9		
し尿汚泥			0.3		
厨芥			5.4	24.7	19.0
紙ごみ				41.1	41.1
農集排汚泥					1.7
発電量					
発電量	GJ/日	—	3.3	23.0	21.7
発電出力	kW	—	38	267	251

(3) インフラ連携の全国展開ポテンシャル

1) 汚泥燃料利用の GHG 収支

GHG 削減量の最大化をめざしたインフラ連携による下水汚泥のエネルギー回収を考える際、まず汚泥燃料利用の GHG 収支を把握することが重要である。どのような汚泥燃料でどの化石燃料と代替するかによって GHG 削減量が異なるからである。複数の既往文献ををもとに、同じ設定条件（含水率 80%汚泥換算での処理能力 90t/d、施設稼働率 80%、連携先への輸送距離 50km、ごみ混焼の場合の発電効率 13%）のもとでの GHG 収支を計算した。各汚泥燃料利用の GHG 収支を図 4-24 に示す。図中の全ての燃料利用が現状の汚泥高温焼却に比べて GHG 削減効果をもたらしている。未消化汚泥を造粒乾燥する場合のみ、純 GHG 収支がマイナスであり、本当の意味での GHG 削減という結果となっている。また、炭化及び造粒乾燥において「燃料」（燃料製造過程での燃料利用）の GHG 排出が大きい。特に消化汚泥では、ほぼ「生成」（石炭代替による GHG 削減）の効果を相殺する排出量である。また、汚泥のごみ混焼では汚泥乾燥熱源としてごみ焼却排熱を用いるために脱水汚泥の状態のままごみ焼却場へ運ぶ設定としている。そのため、炭化及び造粒乾燥での「輸送」の GHG 排出量と比較すると、「輸送」の GHG 排出量が大きい。汚泥のごみ混焼では、GHG 削減の点で下水処理場とごみ焼却場との近接性が重要であることが分かる。

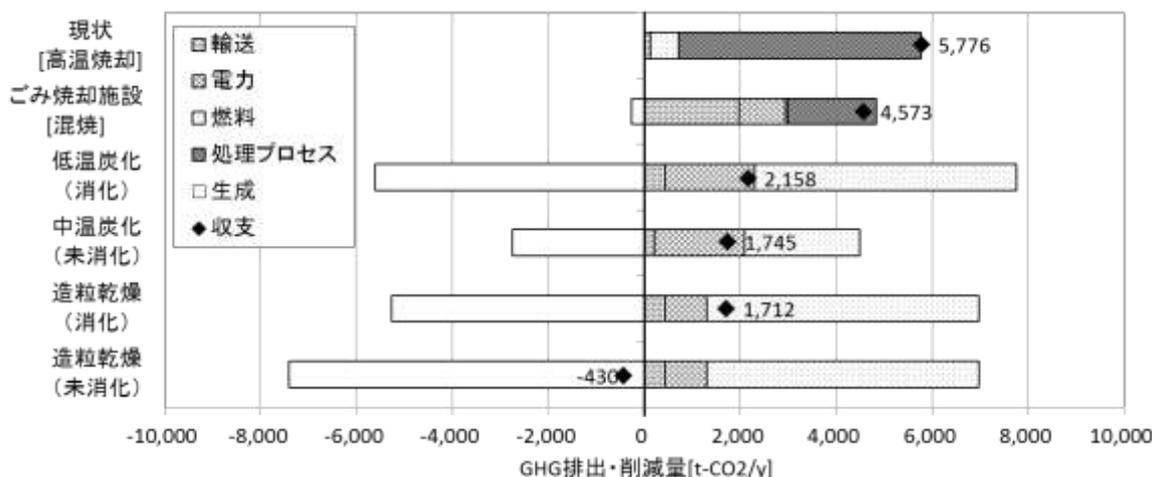


図 4-24 各汚泥燃料利用技術の GHG 収支

2) 未利用汚泥とインフラ連携主体の受入可能量

次にインフラ連携の対象となる、全国各地域別の未利用汚泥量と産業工場・ごみ焼却場での受入可能量とを比較した結果をそれぞれ図 4-25（熱量ベース）、図 4-26（汚泥量ベース）に示す。受入れの際の性状（炭化汚泥、造粒乾燥汚泥、乾燥汚泥）を考慮し、産業工場（静脈・動脈間連携）の受入可能量と対比する場合には未利用汚泥量を炭化汚泥、造粒乾燥汚泥の熱量として表し、ごみ焼却場（静脈間連携）の受入可能量と対比する場合には、未利用汚泥量を乾燥汚泥重量として示す。

産業工場に汚泥固形燃料として供給する場合、汚泥中の有機分をより燃料中に賦存できる造粒乾燥汚泥のほうが供給可能熱量は大きいですが、受け皿となる製紙工場の受入可能熱量は全国各地域とも造粒乾燥汚泥の供給可能熱量に比べ小さい。炭化汚泥の場合、全国的に見て石炭火力発電所

での受入可能量が卓越していることが明瞭である。産業ごとにみるとセメント工場では中国や九州地域、石炭火力発電所では東北、中部、九州での受入可能量が大きい。炭化汚泥や造粒乾燥汚泥は一般に有価物として取引されるため、地域を越えた連携が可能である。例えば関東地域の下水汚泥を燃料化して東北地域の石炭火力へ供給するという地域を越えた静脈・動脈間の連携は、現在でもすでに取り組まれているが、さらに推進しうる余地があることが供給量と受入可能量のバランスから読み取れる。

乾燥汚泥とごみ焼却施設とのバランスをみると、関東、中部、近畿の大都市圏での未利用汚泥量が多い。政令市では北海道と九州の汚泥量も多い。また、関東と中部で流域下水道を導入している中小都市での未利用汚泥量が卓越している。流域下水道では一般的に比較的大きな処理規模で汚泥処理を行っており、現状では焼却処分が主流であるが、未利用汚泥からのエネルギー回収を図る上で、今後はこれら大量に賦存する流域下水汚泥への対応が重要と考えられる。

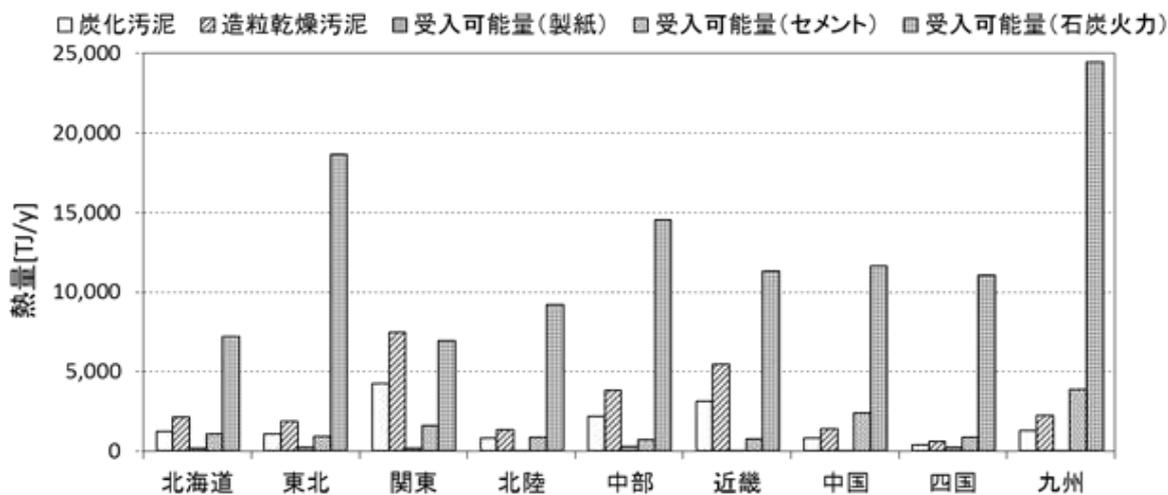


図 4-25 地域別の汚泥燃料と産業工場での受入可能量（熱量ベース）

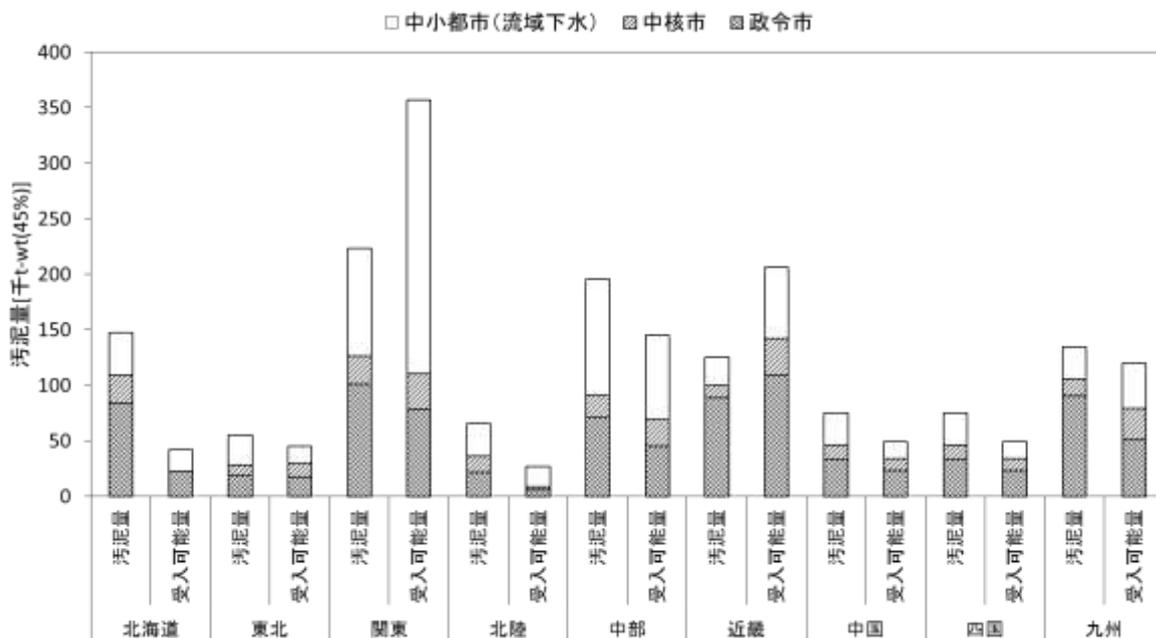


図4-26 地域別の未利用汚泥量とごみ焼却場での受入可能量（乾燥汚泥量ベース）

3) 産業・環境インフラと連携した汚泥の燃料利用によるGHG削減効果

先に示した配分ルールにもとづき、産業工場（静脈・動脈間連携）、ごみ焼却場（静脈間連携）との各インフラ連携を行った場合の汚泥配分量を輸送しうる距離を変化させて分析した結果を図4-27に示す。現在稼働中の各自治体の下水汚泥燃料化事業をまとめた文献²⁶⁾によると平成26年12月時点で稼働中の施設は8件で、輸送距離の最短は10km（宮城県南浄化センター→製紙工場）、最長は200km（熊本市南部浄化センター→電源開発松浦火力発電所）、平均は約100kmであった。輸送範囲を最長ケースの距離水準にほぼ相当する150km以内とした場合、未利用汚泥量の約85%に相当する5,270千[t-wet(80%)/y]の汚泥からのエネルギー回収が可能となり、GHG削減量は679[千t-CO₂/y]となる結果を得た。輸送範囲を200km以内としても150kmの場合と比較して配分される汚泥量及び配分先の構成に変化はない。これは、都市域に位置する政令市や中核市の汚泥は150km圏内で全て連携先があり配分される一方、地方域も含めて多様な地域特性をもつ流域下水道の場合、汚泥量全体の約3分の1に相当する下水処理場は150kmから200km圏内に輸送範囲を拡大しても受入量に余裕のある産業工場や発電設備を有するごみ焼却場（同一市町村内）が存在しないことによるものと考えられる。専らこれらの未配分汚泥の燃料利用を図ることを目的に、下水処理場の近隣に産業工場の立地を誘導することは難しい。他方で、例えば同じ流域下水道計画区域内の市町村のごみ焼却場が連携して下水汚泥を受入可能とする柔軟な制度設計や、乾式メタン発酵のように発電設備を有しないごみ焼却場においてもエネルギー回収可能な技術の導入施策等が期待される。さらには、これらの未配分汚泥については、燃料利用以外の資源化施策の検討も考えられる。

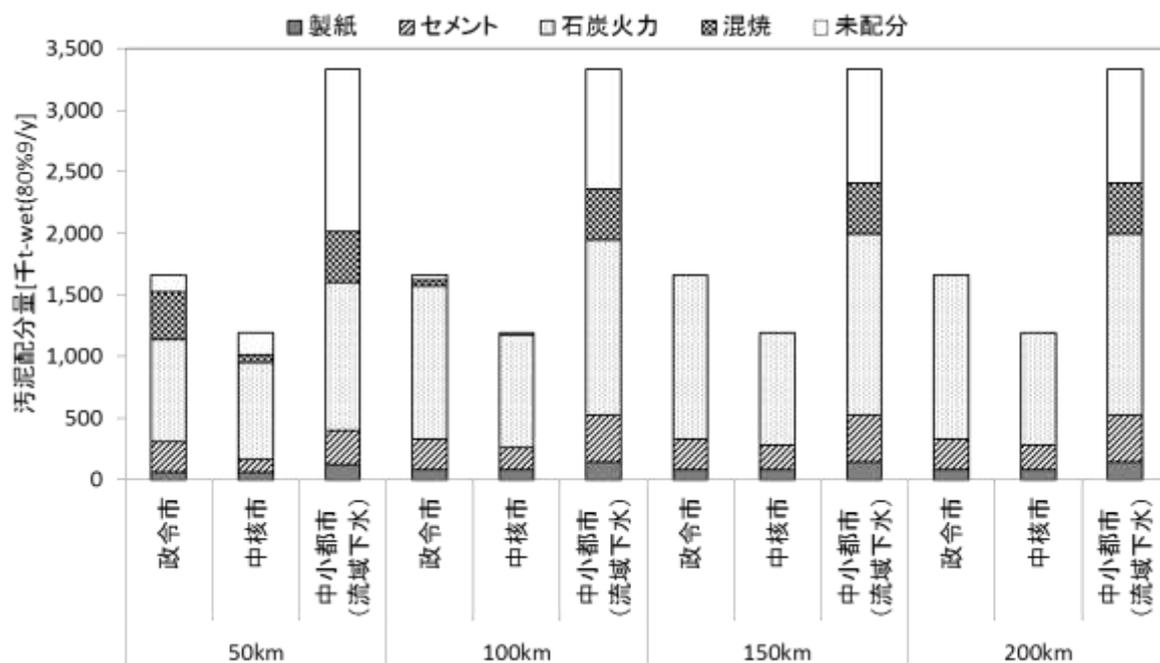


図4-27 各輸送範囲における未利用汚泥の配分量

さらに各地域の都市規模別のGHG削減量を図4-28に示す。同一の都市規模であってもその連携は地域により差が生じることがわかる。削減効果が最も高いのは関東の中小都市で136[千t-CO₂/y]の排出削減であり、次に近畿の中核市で69[千t-CO₂/y]である。両地域とも石炭火力発電所による

効果が大きい。セメント工場との連携による削減効果は九州の政令市、関東の中小都市で顕著に示されている。また、製紙工場との連携による排出削減量は全国で161[千t-CO₂/y]で、セメント工場との連携による排出削減量238[千t-CO₂/y]、石炭火力発電所との連携による排出削減量857[千t-CO₂/y]に比べて小さく、製紙工場での受入拡大が期待される結果となった。このように地域ごとに特徴的な連携のポテンシャルに関する情報が明らかにされることは、どのようなインフラとの連携を促進するかを検討する際に資するものと考えられる。

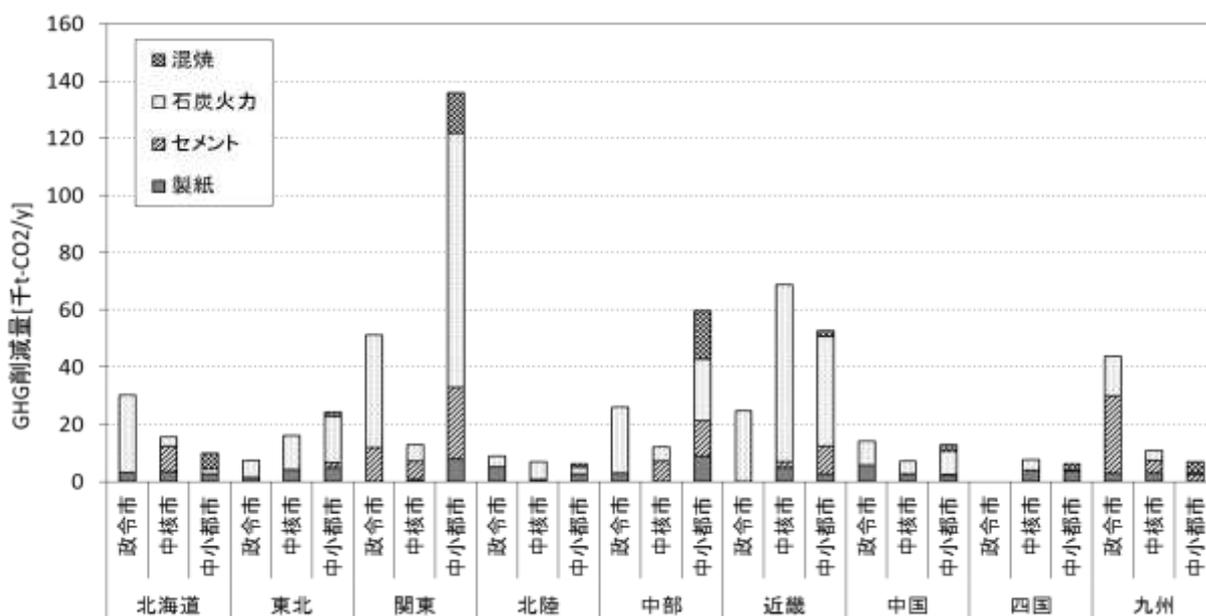


図 4-28 地域別都市規模別の GHG 削減量 (輸送範囲 150km 以内)

4) 技術変化 (製紙工場の混焼率変化) が GHG 削減に及ぼす影響

3) において、静脈・動脈間インフラ連携の連携先となる産業工場の中では石炭火力発電所の受入可能量が高いことが示された。一方、GHG削減効果や下水汚泥燃料JIS化で重視されている発熱量の観点からは造粒乾燥汚泥が注目されるが、製紙工場での混焼率が低いために相対的に削減効果が小さい結果となっている。造粒乾燥汚泥の製紙工場の自家発電用石炭ボイラでの混焼に関する実証試験報告では、混焼率の拡大に伴う石炭ボイラに与える影響について長期的に検討すべき課題²⁷⁾とされているが、例えば製紙用ボイラでは不純物混入や発熱量の安定しない廃棄物燃料の投入が珍しくないのに対して、より慎重な操業が求められる石炭火力発電の発電用ボイラにおいて重量比2% (熱量比に換算して約1.3%) の造粒乾燥汚泥の混焼でもボイラや環境への影響がみられないことが確認されていることから²⁶⁾、製紙用の石炭ボイラにおいても混焼率拡大の可能性が考えられる。そこで、産業施設の技術革新が進むことで、石炭消費量に対して造粒乾燥汚泥燃料の混焼比が現状より高くなる場合に各地域の連携に与える影響を考察する。石炭火力発電所における炭化汚泥の混焼比は変化させず、製紙工場における混焼比を石炭消費熱量に対して熱量比で1%、5%、10%の範囲で変化させて、先と同じ連携ルールのもと、各下水処理場と産業工場、ごみ焼却場との連携に伴うGHG排出削減量を分析する。なお、3) の考察をふまえて輸送距離は150kmとする。

表4-4に示すように、製紙工場の混焼比が拡大すると製紙工場への配分汚泥量も増大する。特に、関東、近畿、中国において増加割合が高い。これは混焼比が向上したことで、混焼比1%時に連携していない施設と新たに連携し、連携施設の選択肢が増えたためだと考えられる。

混焼比の変化による各地域のGHG削減量をみると、石炭消費熱量に対して製紙工場の混焼可能割合が熱量比で5%まで向上した場合の全国のGHG排出削減量は、現状の混焼比1%の679[千t-CO₂/y]に比べ、2割を上回る増加の843[千t-CO₂/y]、10%まで上昇した場合は4割を上回る増加の963[千t-CO₂/y]となる。地域別にみるとGHG削減量が大きい地域は、関東、近畿であり、それぞれ5%時点で213[千t-CO₂/y]、159[千t-CO₂/y]、10%時点で244[千t-CO₂/y]、181[千t-CO₂/y]である。一方、北陸、中国では削減量は大きくないが、混焼率の変化によりGHG削減量の増加率が高く、北陸で混焼比1%時点の場合と比べ削減量は5%時点で約2.3倍、10%時点で2.9倍の削減量となる。中国では5%時点で1.9倍、10%時点で約2倍となる。このように混焼率拡大がエネルギー回収に大きな影響を及ぼすことが分かる。

表4-4 製紙工場における造粒乾燥汚泥混焼率変化に伴うGHG排出削減量変化

地域	[単位]	全国			北海道			東北			関東			北陸		
混焼比	[%]	1	5	10	1	5	10	1	5	10	1	5	10	1	5	10
GHG排出削減量	[千t-CO ₂ /y]	679	843	963	56	78	81	48	69	83	200	213	244	22	50	63
増加率	[%]	-	24.2	41.9	-	41.1	45.2	-	45.3	74.2	-	6.5	22.1	-	127.5	187.5
地域	[単位]	中部			近畿			中国			四国			九州		
混焼比	[%]	1	5	10	1	5	10	1	5	10	1	5	10	1	5	10
GHG排出削減量	[千t-CO ₂ /y]	98	111	128	146	159	181	34	64	69	14	22	23	61	77	91
増加率	[%]	-	13.4	31.2	-	8.8	23.7	-	86.1	101.0	-	64.0	67.0	-	24.7	48.6

(4) 静脈系インフラの維持・更新をふまえた連携

1) 地方都市における下水処理施設とごみ処理施設との連携による効果の推定

a. エネルギー消費量の算定結果

人口減少に伴い脱水汚泥の発生量は、約 2,420t (2010 年) から 1,760t (2040 年) に、ごみ発生量は約 24,920t から 18,080t と、約 25%の減少となった。

エネルギー消費量の推計結果を図 4-29 に示す。各ケースにおけるエネルギー消費量は、廃棄物処理 (ごみ焼却) プロセスでの割合が高い。この理由は、本検討では下水処理プロセスのうち、水処理、濃縮、消化、脱水まではケース間で同じであるため、それらの工程のエネルギー消費量を含んでいないためである。下水処理プロセスのみに着目すると、両ケースの比較において、下水汚泥の堆肥化 (ケース 1) のための乾燥プロセスでのエネルギー消費量が大きいため、混焼する方 (ケース 2) がエネルギー消費量は 360GJ/年程度削減される。

一方、廃棄物処理プロセスでは、脱水汚泥を混焼するため約 1,700GJ/年ほど増加する。次に、ごみ焼却施設の更新時に高効率発電を導入することで、発電によるエネルギー回収量 (供給量) が大幅に見込める。エネルギー収支で見ると、供給量が消費量を上回る結果となった。ただし、両ケースにおいて共通プロセスである水処理・濃縮・脱水に要するエネルギー消費量は含んでいないため、発電により全プロセスに必要なエネルギー量の全量を賄えるわけではない。また、下水汚泥の混焼によるエネルギー回収量の増加分は数パーセント程度 (約 750GJ/年) に留まる。

以上よりエネルギー消費量の面では、高効率ごみ発電を導入することにより、エネルギー回収 (発電) 量が大幅に見込める結果となった。一方で、ごみ量に比べて、脱水汚泥量は少ないため、全体に占める割合は小さいが、汚泥の混焼部分のみに着目すると、混焼によるエネルギー消費量はやや増加することが示された。

b. GHG 排出量の算定結果

GHG 排出量の推計結果を図 4-30 に示す。収支をみると、ケース 1 では 1,870t/年に対し、ケース 2 では-3,375t/年となっており、ごみ焼却施設の更新時に高効率発電を導入 (ケース 2) することにより GHG 排出量は大きく削減される結果となった。高効率発電導入前のケース間の比較をプロセス単位で見ると、下水処理では、混焼により、汚泥乾燥のプロセスを必要としないため、約 70t/年の削減効果が見込まれる。一方、廃棄物処理プロセスでは、脱水汚泥の投入により、総焼却量が増加するため、約 310t/年の増加となる。また、ごみ発電による混焼分の発電による GHG 排出削減量は 130t/年程度である。

以上より GHG 排出量の面においても、エネルギー消費量と同様の傾向であり、高効率発電の導入による GHG 排出削減効果は大きい。脱水汚泥の混焼部分のみに着目すると、逆に GHG 排出量は数パーセント増加する結果となった。

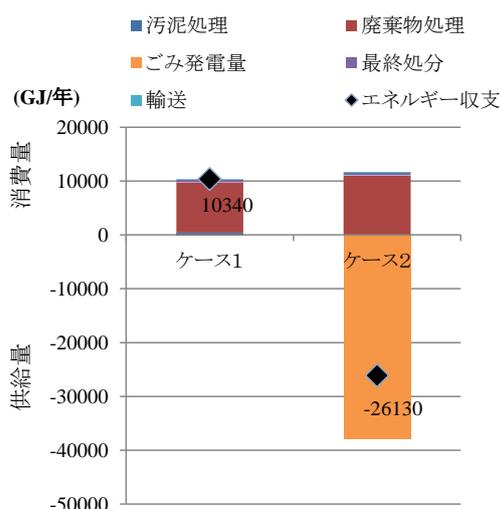


図 4-29 エネルギー消費量の推計結果

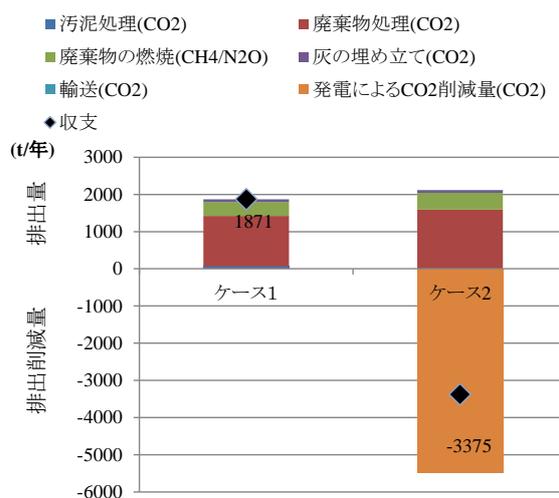


図 4-30 GHG 排出量の推計結果

c. 考察

これまでの地方都市のごみ焼却施設では、適正処理が最優先であり、ごみ発電は、発電効率の悪さからあまり導入されていなかった。近年では、技術革新により小規模施設でも高効率発電ができるようになり、適正処理からエネルギー回収へと選択オプションが増えつつある。今回、2010年における人口が約 8.5 万人であり、2040 年の人口が 6.2 万人と推計されている地方都市を対象に、下水処理施設と廃棄物処理施設は連携せずに下水汚泥を堆肥化し、ごみ発電を実施しない場合と、施設更新時に下水処理と廃棄物処理が連携し、下水の脱水汚泥を廃棄物処理施設で混焼し、かつ高効率発電を導入した場合を比較評価した。

その結果、8 万人程度の地方都市においても、更新時期を考慮した下水処理施設と廃棄物処理施設の連携として、脱水汚泥と可燃ごみを混焼し、高効率発電によりエネルギー回収を行うケースの方が有用であることを示した。本結果は、静脈系インフラが更新時期を迎えるなかで、特に 10 万人未満の地方都市の更新計画の立案を支援する知見となりうることを示した。

2) 将来人口減少下での静脈系インフラの更新・再編と GHG 削減効果

a. エネルギー消費量の算定結果

i. 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4-31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)、(4)、(3)、(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。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、早期の集約化と集約拠点に燃料転換技術を選択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。

ii. 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 4-32 に示す。基準シナリオと比較すると、シナリオ 3、4、5 の現状維持ケースでは、それぞれ 18.9%、23.4%、8.1%増加となる。シナリオ 0~2、3、4、5 の目標達成ケースでは、それぞれ 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。

iii. 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4-33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。これは早期の燃料転換技術導入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

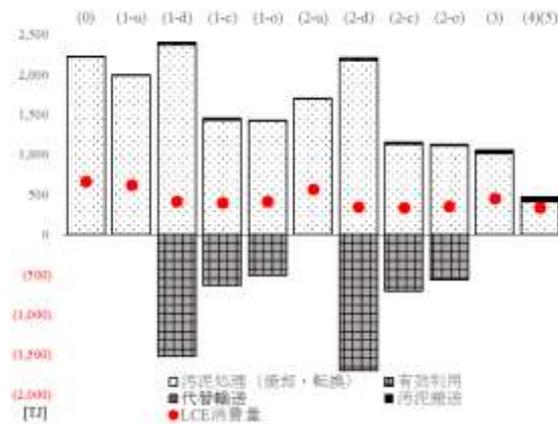


図 4-31 汚泥処理施設における LCE 算定結果

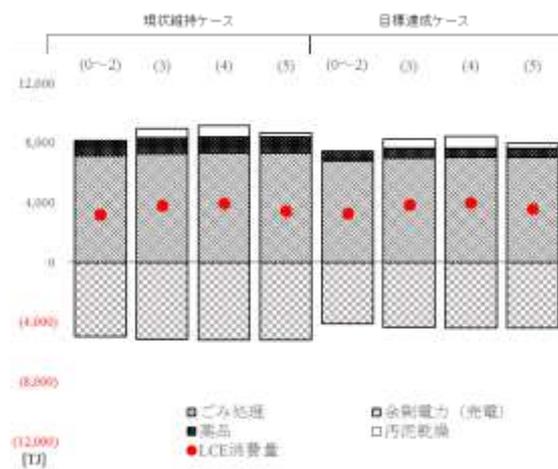


図 4-32 ごみ焼却施設における LCE 算定結果

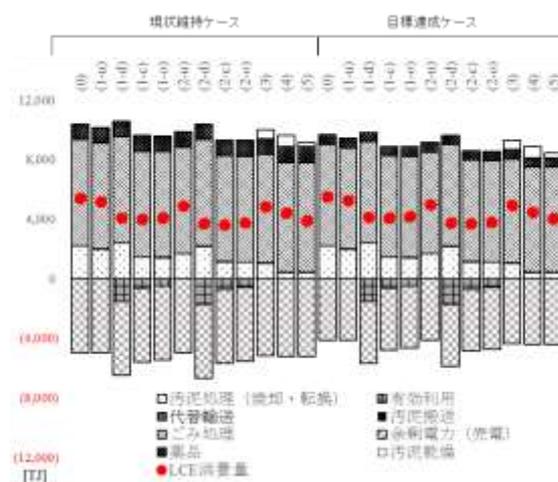


図 4-33 各シナリオにおける LCE 算定結果

約のシナリオ1の燃料転換技術の導入よりも削減効果大きい。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。

b. GHG 排出量の算定結果

i. 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4-34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、4)、3)、(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事が明らかとなった。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排出を他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到燃料転換技術を選択することが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。

ii. 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4-35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%、3.91%、38.4%、

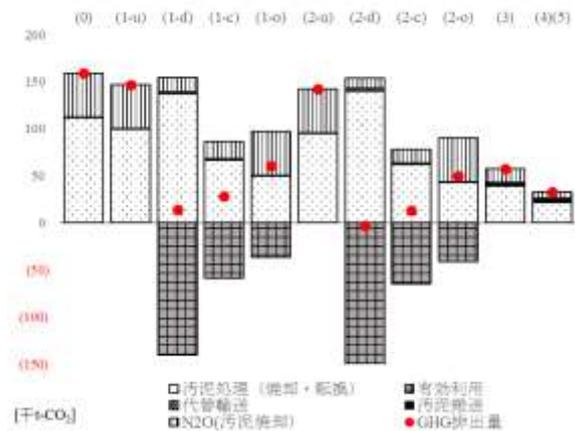


図 4-34 汚泥処理施設における GHG 算定結果

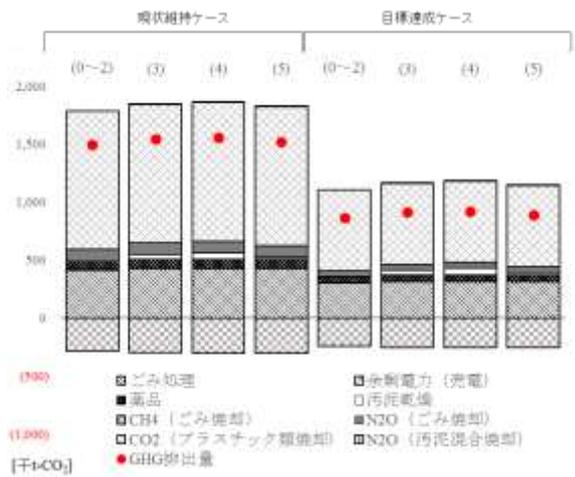


図 4-35 ごみ焼却施設における GHG 算定結果

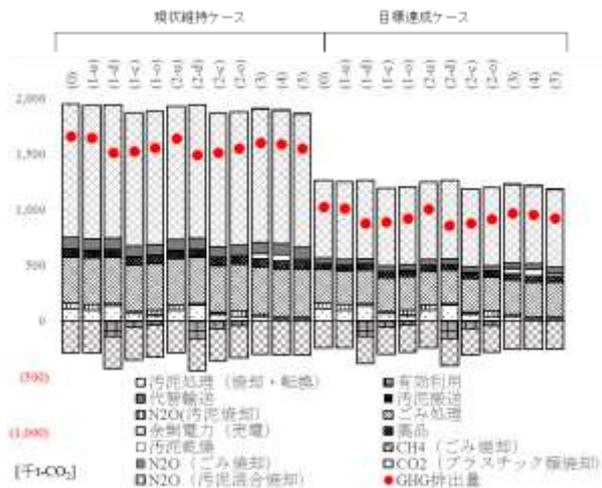


図 4-36 各シナリオにおける LCE 算定結果

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、本研究で想定した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排出削減の傾向を把握することはできたと言える。

iii. 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4-36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。その他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、汚泥処理施設への燃料転換技術導入に加えて、ごみ処理量（プラスチック類の焼却量）の削減が大きな成果をもたらした。

c. 考察

本研究では、汚泥処理の集約化に併せて導入される燃料転換技術の選択と、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。本研究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、施設の稼働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。静脈系インフラ間における廃棄物処理システムの統廃合を視野にいたっ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。

(5) 人口動態変化をふまえた静脈系インフラの連携

1) 和歌山市の人口動態および人口予測

500m メッシュ単位での詳細将来人口を把握するため、GIS を用いた。使用データは、2050 年推計人口が属性に含まれている、国土数値情報「将来推計人口メッシュ(国政局推計)」¹⁴¹⁾とした。また、現状の人口は 2010(H22)国勢調査「500m メッシュ人口(境界データ、統計データ)」¹⁴²⁾を用いた。なお、将来推計人口メッシュは、1km メッシュ単位での人口であるため、500m メッシュ単位(以下、4 次メッシュ)での人口を算出する必要がある。図 4-37 に示す方法で、4 次メッシュ単位での 2050 年の人口を算出した後、2010 年および 2050 年の DID 地区にあたるメッシュを地図上に示すと、図 4-38 のようになる。DID 地区は 40 人/ha 以上の地区としたが、これを 4 次メッシュあたりに換算すると 1,000 人/メッシュとなることから、1 メッシュあたり 1,000 人以上居住しているメッシュが DID 地区となる。なお、60 人/ha=1,500 人/メッシュ、80 人/ha=2,000 人/メッシュとなる。



図 4-37 2050 年 DID 地区の算出イメージ

図 4-38 2010-2050 年における DID 地区の変化

算出の結果、2010 年 DID 地区は 160 地区が該当し、1 メッシュあたり平均 3,999 人が居住していた。これに対し、2050 年 DID 地区は 81 が該当し、1 メッシュあたり平均 3,015 人が居住していた。DID 地区の消滅と低密度化が進行する一方、2010 年から 2050 年にかけて、新たに DID 地区となったメッシュはなかった。

これらデータを用い、2010 年から 2050 年にかけての人口密度の変化を分析した(図 4-39、図 4-40)。

その結果、人口 0 人のメッシュ数は 2010 年から 2050 年にかけてほぼ変化しないことが明らかとなった。これに対し DID 地区に該当するメッシュ数は、2010 年で 160 メッシュあったが、2050 年では 81 メッシュとなり、その数が半減することが明らかとなった。また、メッシュごとの人口増減をみると(図 4-41)、和歌山大学前駅周辺のメッシュで増加傾向がみられ(最大 126 人/1 メッシュ増加)たが、それ以外のメッシュでは減少傾向にあることが明らかとなった(最大 975 人/メッシュ減少)。また、増減なしのメッシュは 335 か所あり、図 4-38 および図 4-39 で人口 0 人のメッシュにほぼ該当するため、山林や農地、水面等の非可住地区である。したがって、現行の都市政策下では、今後も低密市街地が増加する一方、人口 0 人のメッシュ(人口が消滅するメッシュ)の数は増加しない。

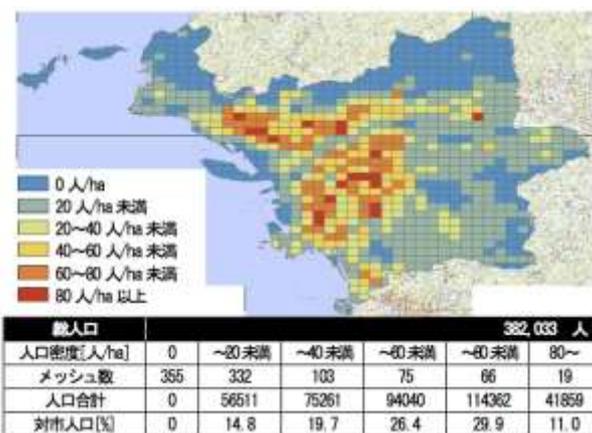


図 4-39 人口密度分布(2010)

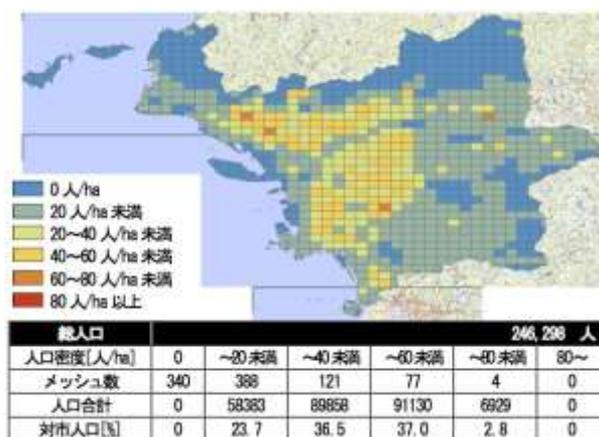


図 4-40 人口密度分布(2050)

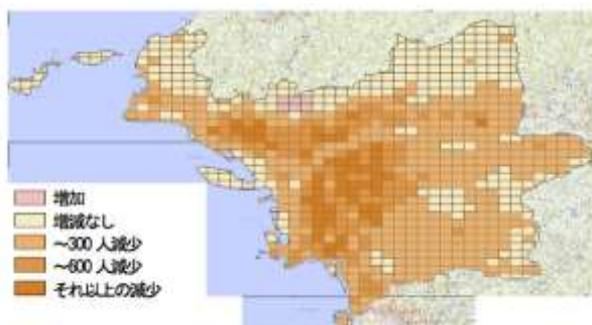


図 4-41 人口増減(2010-2050 比)

2) 和歌山市

a. 和歌山市の下水道計画

和歌山市の下水道(汚水)計画¹⁴³⁾は、市街化区域のほとんどで整備が都市計画決定されている(以下、決定区域)。そのうち、6割程度の区域で事業が認可され(以下、認可区域)ている。各区域の位置は図 4-42 の通りである。



図 4-42 和歌山市下水道整備計画

(左：計画区域、右：認可区域、各図の点は 2050 年 DID メッシュ重心)

b. 下水道計画区域と 2050 年人口密度の関係

決定区域および認可区域と 2050 年 DID の関係を図 4-42 に示した。さらに 2050 年 DID に該当するメッシュについてはメッシュ重心を図示した。

図 4-42 左で決定区域にあたる 234 メッシュのうち、2050 年 DID に該当するものは 75 か所に留まり、区域の 2/3 程度が DID 密度以下となる。また、図 4-42 右より認可区域は 142 メッシュが該当するが、142 か所のうち 2050 年 DID に該当するものは 43 か所と 3 割程度に留まる。以上から、下水道整備は認可区域に一定の条件に合う区域を加え、人口や都市機能の配置状況等を勘案した下水道整備区域の設定が必要であると考えられる。

3) 人口集約エリアの検討

a. 集約のための要素の整理

立地適正化計画等コンパクトシティ施策との整合性を考慮した市街地集約エリア(以下、集約エリア、またはエリア)を検討するため、先に示した既往研究を参考に、3つの市街地集約のための指標となる要素(以下、集約要素)を整理した。集約要素の観点、各該当区域を表 4-5 に示す。

表 4-5 集約要素の整理

集約要素	既存市街地 (1960 年 DID 地区)	駅そば (駅半径 800m 圏)	道沿い (幹線道路片側 400m 圏)
観点	既存インフラの活用	立地適正化での コンパクトネットワーク	地方都市の特性(自動車交通を加味した立地適正化)
データ元	国土数値情報 DID 人口集中地区 ¹⁴⁾	国土数値情報 鉄道データ ¹⁵⁾	国道・県道ほか幹線道路(片側 2 車線以上)を GIS に描画 ¹⁶⁾
該当区域			

b. 集約エリアの目安となる範囲(上限・下限)の検討

3つの集約要素を組み合わせ、A・Bの集約パターンにおける居住可能人口を検討した(表 4-6)。各パターンに該当する 4 次メッシュの抽出には GIS を用いた。またパターンの検討には、認可区域(下水道が整備済みの地区)からの連続性を考慮し、整備済の地区を除いては独立したメッシ

ユ重心（以下、Point）が存在しないよう考慮した。表 4-6 では、各パターンに該当する Point を示しており、青は 1960 年 DID 地区、赤は 1960 年 DID 地区外である。

表 4-6 集約エリアの上限（A パターン）と下限（B パターン）の検討



続いて図 4-43 では、各パターン(該当する Point を星印で表示)と、2010 年・2050 年の人口密度メッシュの関係を示している。また、2010 年時点で居住している人口および 2050 年予測人口も示している。ここで、各パターンにおける区域内への居住可能人口（人口が過密にならない程度で、集約の目安となる人口）を 2010 年人口としたとき⁽¹⁾、図中のグラフで 2010 年(現状)人口・2050 年予測人口との関係を示している。なお居住可能人口は、人口密度×該当 Point 数で算出した。

図 4-43 のグラフをみると、A パターンのエリア内は、このままいくと 2050 年で市民の約 65.8% が居住することとなるが、市街地集約をかけることにより 254,697 人(2010 年人口と同程度)は居住可能な人口容量があることから、A パターンエリア内に全人口が居住可能である。しかしながら、全市民をエリア内に居住させることは現実的ではなく、例えば目指すエリア内の対市人口比率を 80% とすれば、A パターンの範囲まで下水道整備を拡大する必要性には疑問が生じる。対して B パターンでは、このままいくと 2050 年には市民の約 43% がエリア内に居住することとなるが、市街地集約をかけたとしても 171,893 人までしか居住できる容量がないと考えられ、何等かの集約条件を追加して、エリアを広げることを検討する必要がある。

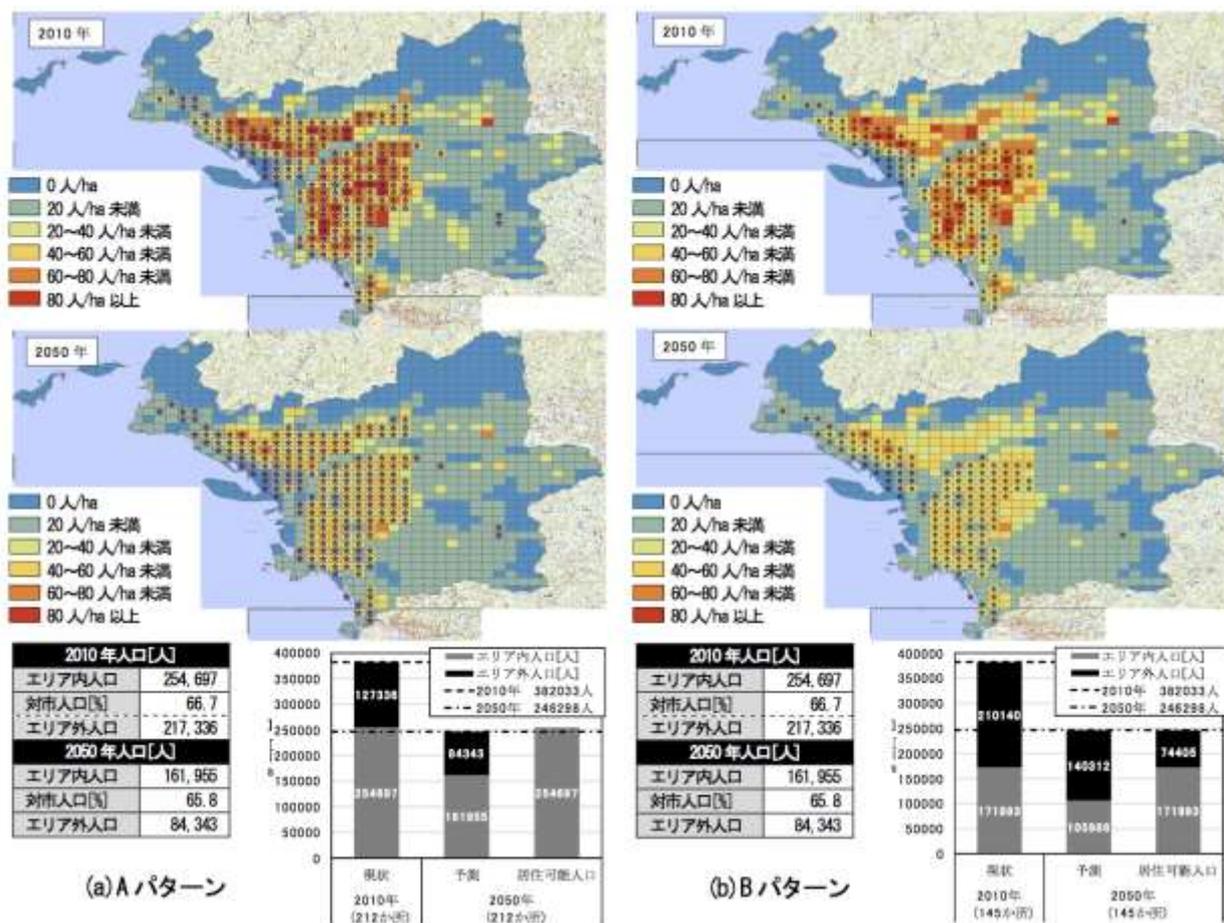


図 4-43 集約エリア上限 (A パターン)・下限 (B パターン) と人口動態から見た居住可能人口の検討

4) 人口予測と下水道計画を踏まえた市街地集約のあり方

a. 集約パターンの検討

本研究では、「下水道普及率」を「市人口に対する集約エリアに居住する人口の割合」に置き換えて考えるものとし、この割合を下水道普及率の全国平均値の約 80%を目安に、集約パターンの妥当性の検証を進めるものとする。

集約条件として A パターンより B パターンの方が厳しい。そのため集約エリア下限の B パターンでは、人口の 8 割近くを集約エリアに集めるだけの人口容量はない。したがって本章では、B パターンに何等かの集約条件を追加し、そのエリアへの 2050 年居住可能人口 (人口が過密にならない程度で、集約の目安となる人口) を検討することとする。なお本研究では先述したように、2010 年の集約エリア内人口を、2050 年の集約エリア内における居住可能人口とする。

B パターンへ集約条件を追加し、B-1~B-3 までの 3 パターンを検討することとした。追加条件はこれまでと同様に下水道計画や整備状況、立地適正化計画等コンパクトシティ施策との整合性を加味し、表 4-5 に示した集約要素を用いて検討した。図 4-44⁽³⁾に、各パターンの集約条件と ArcGIS で算出した該当するエリア (Point データ) および 2010 年 (現状) 人口・2050 年予測人口・居住可能人口のグラフを示す。

b. 各集約パターンの妥当性の検証

各集約パターンの特徴、下水道の新設や維持管理にかかるコスト、市街地誘導にかかるコストを検証した結果、以下のような結論を得た。

i. B-1 パターン「既存インフラ活用型」

居住可能人口は 185,348 人であり、2050 年人口の約 75.3%がエリア内に収まる容量である。下水道普及率の全国平均の 80%にはやや及ばないが、当該エリアにおいて 2010 年人口密度を維持するよう市街地を集約すれば、現状で全国の下水道普及率に近づくものと思われる。また、集約エリア上限の A パターンよりもかなり狭いエリアであり、ほぼ認可区域に該当するため、下水道の新設および維持管理コストも低減できる。

ii. B-2 パターン「交通結節点型」

居住可能人口は 229,878 人であり、2050 年人口の約 93.3%がエリア内に収まる容量である。全国の下水道普及率を上回り、当該エリアにおいて 2010 年人口密度を維持するよう市街地を集約すれば、現状で全国の下水道普及率を上回るものと思われる。しかし、該当する Point 数は 244 か所あり、A パターンの 212 か所を上回るため、決定区域よりも広範囲での整備が必要となってしまうことから、更なる集約エリアの絞り込みについて考える余地がある。

iii. B-3 パターン「公共交通指向型」

居住可能人口は 246,810 人であり、2050 年人口の 100%がエリア内に収まる容量である。2010 年人口密度を維持するよう市街地を集約してしまうと、エリア外に居住する人がいなくなる計算となってしまうため、現実的ではない。また、下水道の整備範囲も広範囲に及ぶため、このエリアでの下水道整備の必要性はないと言える。

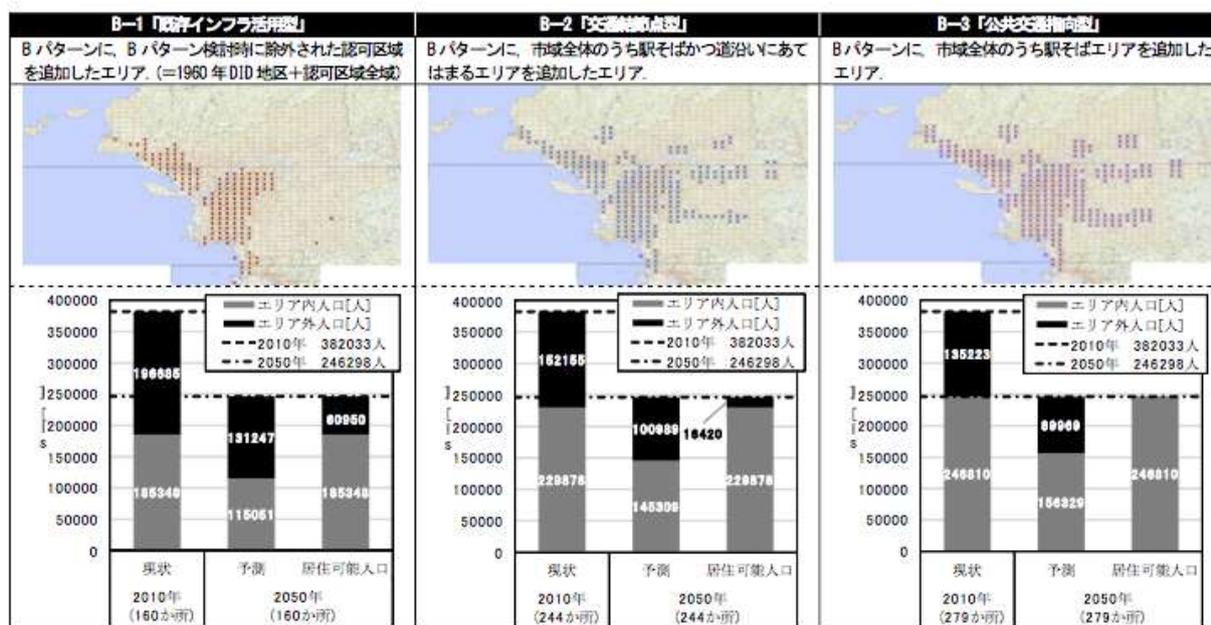


図 4-44 集約エリアパターンの検討結果

【補注】

- (1) 居住可能人口をこのように設定したのは、集約エリア内の人口密度が低下してきており、今後とも低下が予想されることから、都市計画運用指針による 60 人/ha の人口密度を目指さずに、現状より人口密度を低下させず、ひいては 40 人/ha を下回らないように集約をかけることを想定したためである。
- (2) 駅そば圏の設定は、都市構造の評価に関するハンドブック¹⁴⁶⁾を参考とした。また、道沿い圏は、歩行速度を 4km/h とした場合に 5 分あれば余裕をもって道路に辿り着ける距離として 400m とした。対象とした道路は幹線道路で、自動車交通はもとよりバス路線になっている場合があるためである。
- (3) 各パターンとも、図 4-43 のように人口密度地図と重ね合わせて分析を実施したが、ここでは人口密度地図は表示を割愛している。

(6) 静脈インフラ連携の社会展開

1) インフラ連携の受容性

a. 下水汚泥のごみ混焼の実施状況と理由

下水処理場主体に、下水汚泥のごみ混焼の有無とその理由を尋ねた結果を、図 4-45 に示す。

下水汚泥のごみ混焼を行っている割合は全体の 7%に及んでおり、GHG 削減の理由もあるが大半はコスト削減が実施の大きなインセンティブとなっている様子が見られる（特に政令市は明確に意思表示している）。

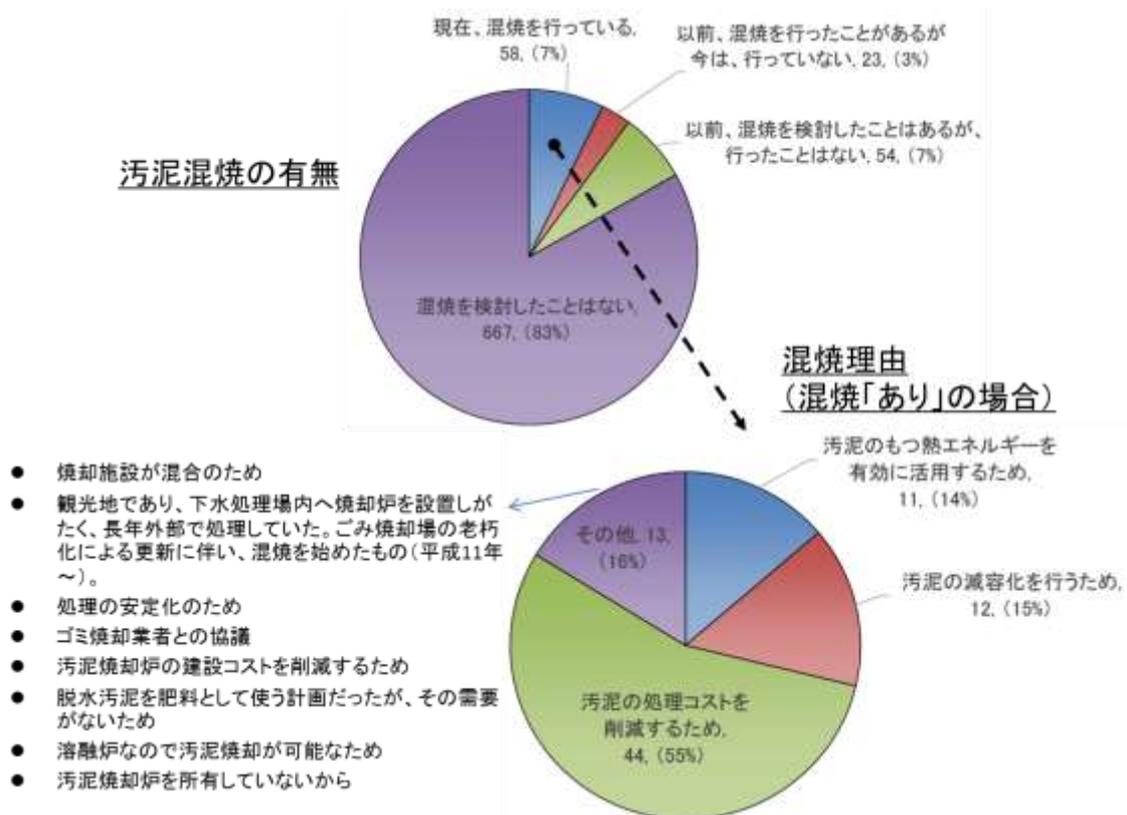


図 4-45 下水汚泥のごみ混焼の実施状況と理由

b. 下水汚泥のごみ混焼に対する受容性

下水処理場主体に対して、「下水汚泥からのエネルギー回収を行うため、汚泥焼却炉に替わり、さまざまな技術が導入されています。その中で、既存の環境インフラであるごみ焼却炉を活用してエネルギー回収を行う、混焼も行われています。将来、下水処理場での汚泥焼却炉建設を行わず、もし、ごみ焼却場で混焼を行う可能性があるとするれば、どのような条件が整うことが必要とお考えでしょうか」と伺った回答結果を図 4-46 に示す（複数回答可）。

「ごみ処理計画の中に下水汚泥の混焼を積極的に位置づけてもらえる」が最も多く（27%）、計画での位置づけが重要であることが分かる。また「交付金や固定買取制度の適用条件の優遇により、コスト面で有利になる」と「所管省庁（国土交通省と環境省）の連携により、混焼に伴う事務手続きが簡素化される」がそれぞれ 23%、「下水処理場とごみ焼却場とが計画的に隣接立地され汚泥の運搬が容易となる」が 19%あり、複数の要素がうまく機能することが重要であると考えられる。

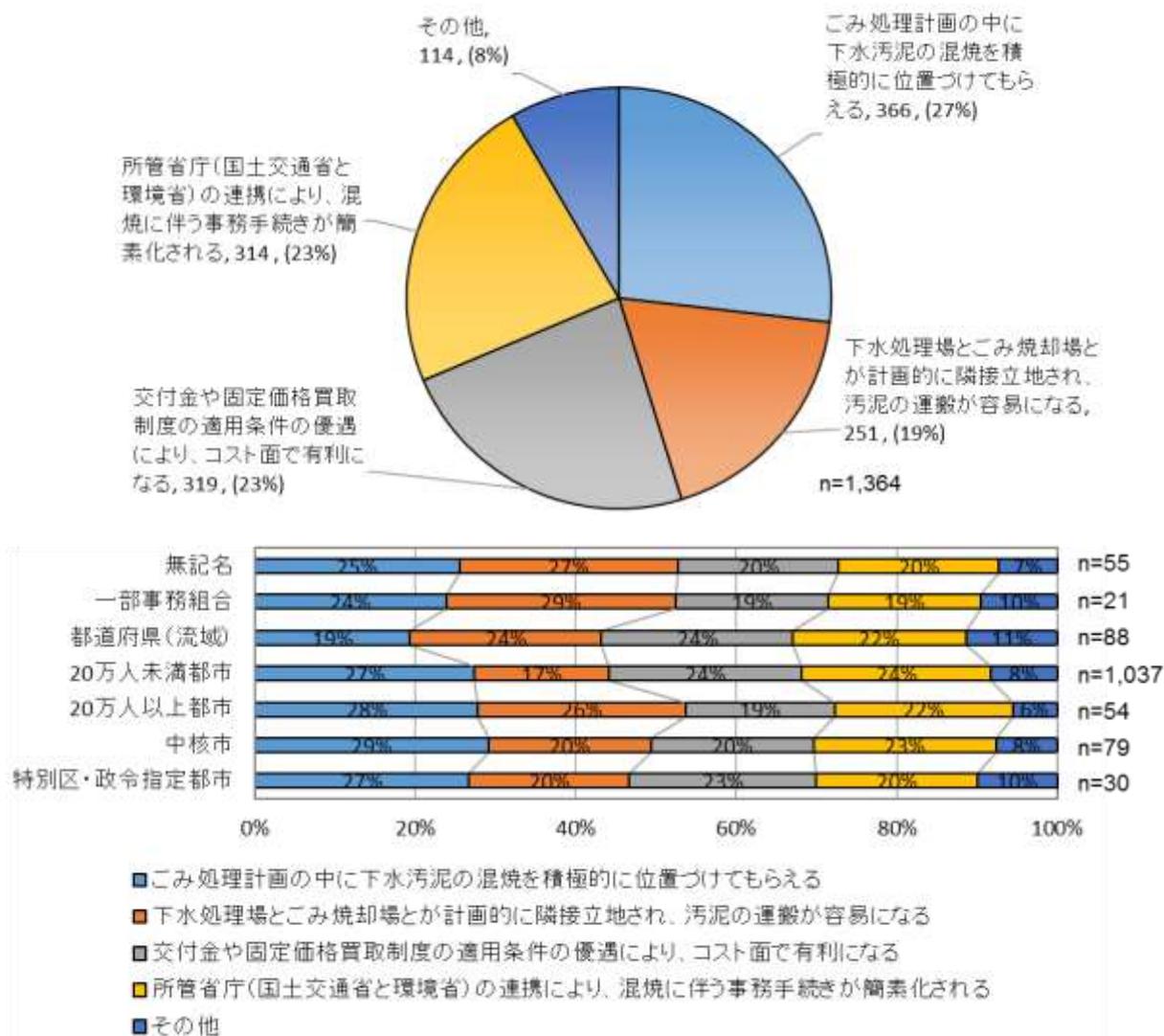


図 4-46 下水汚泥のごみ混焼に対する受容性

c. 下水処理場とごみ焼却場の計画的な隣接立地の可能性

汚泥のごみ混焼など連携によるエネルギー回収を進めるには、下水処理場とごみ焼却場との計画的な隣接立地が有効である（北九州市などで隣接立地がみられる）。将来の隣接立地の可能性について、下水処理場主体、ごみ焼却場主体に尋ねた結果を図 4-47 に示す。下水処理場主体の 4%、ごみ焼却場主体の 10%において可能性を示唆する回答が寄せられている。規模別には特に中核市において、他の規模の都市よりも可能性を示唆する回答の割合が高かった。

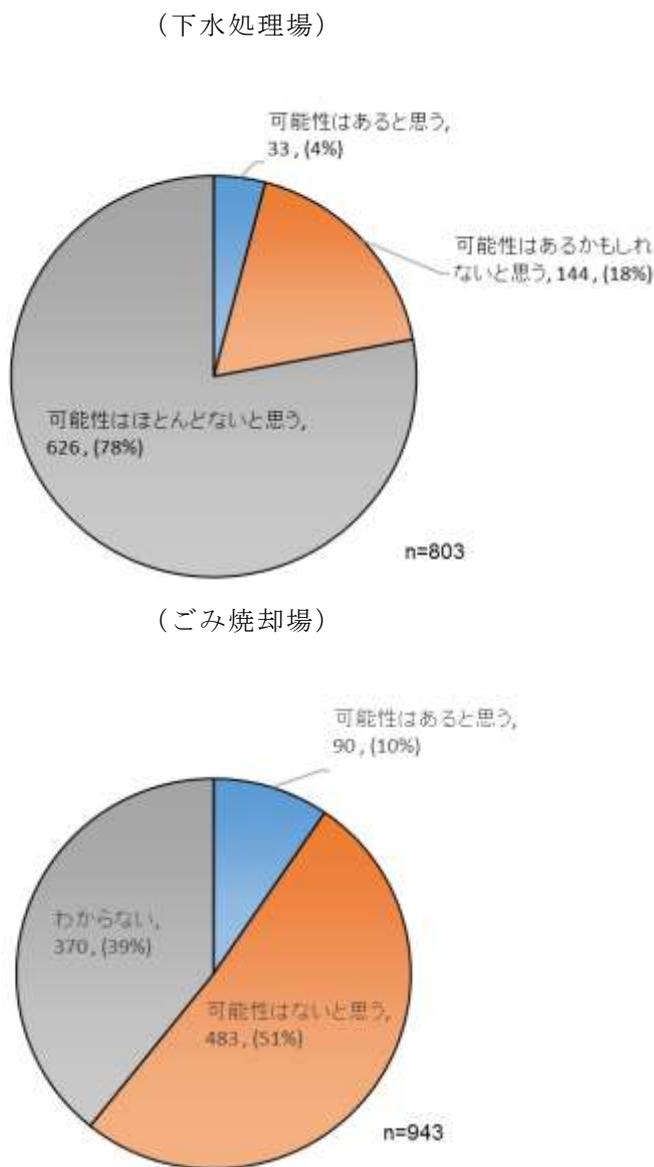


図 4-47 下水処理場とごみ焼却場の計画的な隣接立地の可能性

2) インフラ連携の事業性

現状の汚泥処理（各下水処理場で汚泥焼却）を行うものを基本ケースとし、これに対して、近年 B-DASH 事業等で技術実証されている汚泥焼却炉での廃熱発電を行うケースと汚泥をゴミ混焼するケースとを比較した。結果を図 4-48 に示す。

分析の結果、現状の汚泥焼却よりも、下水汚泥のゴミ混焼を行うほうが 3 割近い削減効果もたらされることが分かった。一方で、現状、適用されているバイオマス発電への固定価格買い取り制度適用を考えた場合、各下水処理場の汚泥を集約し、廃熱発電を行うほうが経済的には得策であることが示された。

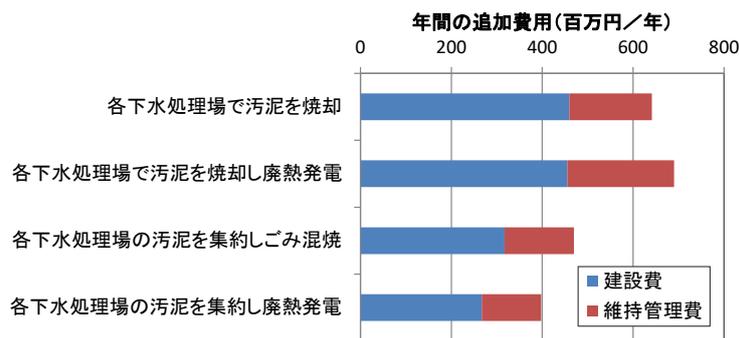


図 4-48 下水汚泥のゴミ混焼の年間費用 (他の代替案との比較)

既存インフラを有効活用する場合には、下水汚泥のゴミ混焼が有効である。さらに、下水汚泥のゴミ混焼において、都市規模を変化させた場合の費用対効果について分析した結果を図 4-49 に示す。数十万人規模の都市において収支はプラス（費用削減になる）との結果を得た。一方で、汚泥運搬費用等により規模が一定以上に大きくなると収支が悪化することも示された。これは、費用の削減要因である汚泥焼却炉建設費を削減できる効果に対して、汚泥を運搬による費用の増加要因が大きく寄与するものと考察される。



図 4-49 都市規模からみた下水汚泥のゴミ混焼の事業性評価

3) インフラ連携のガイドライン

地域の特性（主体・装置・技術）に応じて、選択可能な技術オプションの類型を意思決定樹木図（Decision Tree）の形で表現した。

- 主体 周辺に連携を想定しうる主体が存在するか？
- 装置 連携に活用しうる既存装置があるか？
- 技術 適用可能な連携技術オプション

図 4-50 には下水処理場からみた連携の Decision Tree を、図 4-51 にはごみ焼却場からみた連携の Decision Tree を表現している。各処理場は、自らの周辺にある連携可能な主体や連携に活用しうる装置の状況をふまえて、適用可能な連携技術オプションの候補を抽出することができる。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

・ 動脈系インフラと静脈系インフラの連携

動脈・静脈インフラの連携による下水汚泥燃料化システムの需給ポテンシャル、エネルギー回収効果を評価するモデルを構築した。特に、①動脈産業側の燃料種別消費量や汚泥由来燃料への需要量などの実態が既存統計等では把握できない中、それを推計する手順を整備した点、②将来の人口変化や生産見通しを踏まえた汚泥由来燃料の中期的な需給バランスを把握・予測し、連携可能性を評価可能とした点、③静脈インフラ間の連携を高度化した上で動脈・静脈インフラの連携を図ることで、さらに効果的、効率的にエネルギー回収を促進する複合的な連携モデルを構築・評価した点で、科学的な成果をあげることができた。

・ 静脈インフラ間の連携

静脈系インフラ間の連携を対象としたサブテーマ2では、ごみ焼却施設（ストーカ炉＋ボイラ・タービン発電）においてタービン抽気を活用した汚泥乾燥システムの導入効果を評価するための熱収支解析モデルを構築した。これにより、これまで精緻にエネルギー収支の評価が行われていなかった、ごみ焼却施設で脱水汚泥を乾燥・混合焼却する施策のエネルギー消費量、温室効果ガス排出量を推計するための方法論を開発した。

※本方法論の開発に対しては、9th i-CIPEC (International Conference on: Combustion, Incineration/Pyrolysis, Emission and Climate change) でポスター発表賞が贈られた。

・ 地方都市における下水処理施設とごみ処理施設との連携による効果の推定

静脈系インフラの維持・更新をふまえた連携では、更新時期に応じた技術オプションの立案を行い、堆肥化、脱水汚泥の混焼、高効率発電のインベントリー分析からエネルギー消費量、GHG 排出量を算定するモデルを構築した。これによりエネルギー消費量、GHG 排出量の削減・抑制効果を算定することが可能となった。

・ 人口動態変化をふまえた静脈系インフラの連携

現在、地方自治体で立地適正化計画が進められており、本論で提示した市街地集約エリアは、立地適正化計画における都市機能誘導区域と居住誘導区域に相当する。2050年推計人口に基づく DID 地区以上の人口密度が維持される区域、下水道計画における下水道認可区域をベースに、既成市街地（都市施設）や交通インフラ（鉄道駅および幹線道路）の整備状況を定量的に測定し、自治体の恣意性を排除して市街地集約エリアを提示したことに意義がある。

・ インフラ連携の社会展開

全国の下水处理場やごみ焼却場において明確には把握されていなかったインフラ連携への意向、促進要因を質問紙調査により明らかにした。結果として、全国のごみ焼却場の 10%、下水処理場の 4%が連携しうる可能性があるとの意向を示していることを明らかにした。また、質問紙調査をもとに、連携に必要な要件を抽出することができた。また、エネルギー回収に向けたインフラ連携の技術オプションを体系的に整理した。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

下水汚泥のごみ混焼を検討する自治体との意見交換の会議において、汚泥のごみ混焼モデルのGHG削減効果分析結果や質問紙によるインフラ連携の意向調査結果等の知見を提供し、検討の基礎資料として活用された。(鎌倉市環境部 2015.8.26、和歌山市中央下水処理場：2015.11.27)

<行政が活用することが見込まれる成果>

○動脈系インフラと静脈系インフラの連携

多くの自治体が財政制約下での環境インフラ・施設の更新を迎えるなかで、今後の人口減少および低炭素社会に適したインフラ・技術システムの計画立案に対して基本的な考え方や手順、具体的な選択肢を提供できる。人口や産業活動の縮小に伴って財政的課題が深刻化する地方自治体、特に過疎地域では、環境インフラを単独で建設・維持管理することが極めて困難となることも多く現れると予想される。そうした自治体が動脈・静脈インフラの連携を通じてエネルギー回収に貢献しようとするときに、動脈インフラの立地、燃料消費形態、需給ポテンシャルを踏まえて、①動脈インフラとの連携はせず、小規模分散型のエネルギー回収を志向する、②周辺自治体との共同で、燃料化技術の導入が可能な規模まで下水汚泥処理を集約化する、③それらが難しい場合には、動脈インフラが汚泥の乾燥・燃料化プロセスを内部化する可能性を模索する、といった具体的な検討のツールとして本モデルを活用することが見込まれる。また、下水汚泥処理という自治体経営の観点からもパリ協定の達成に向けた低炭素社会実行計画の観点からも、動脈インフラとの連携による下水汚泥のエネルギー回収は、中長期的に見て安定的に継続しうる事業であることが求められる。そうした視座に立ち、将来の人口変化だけでなく、汚泥由来燃料の受け皿となる産業の生産動向や生産技術変化も見据えたシステム構築、技術選択を支援することにもつながると期待される。

○静脈インフラ間の連携

- ・ 大都市における静脈系インフラ間の連携に関する研究において、脱水汚泥を固形燃料化するケース B と、ごみ焼却施設で脱水汚泥を乾燥・混焼するケース C を温室効果ガス排出量で比較し、両ケースでほぼ同じ温室効果ガス排出削減効果が得られることを示した(ケース B：25%、ケース C：26%)。ケース B では、固形燃料の受入先(石炭火力発電所)の確保が成立要件となる。固形燃料の受入先が確保できない場合は、ごみ焼却施設との連携が、脱水汚泥のエネルギー利用に向けて有効な選択肢となることを政策提言した。
- ・ 同じく大都市における静脈系インフラ間の連携に関する研究において、ケース D (ごみ廃熱発電システムの抽気を活用することにより脱水汚泥を効率的に乾燥し、乾燥汚泥を石炭火力発電所で用いることにより高い発電効率でエネルギー利用するケース)を解析対象とした。ケース D では、基準ケースと比較して34%の温室効果ガス排出削減が図れる評価結果が得られた。静脈系・動脈系の全ステークホルダー(下水処理施設、ごみ焼却施設、石炭火力発電所)による連携が成立した場合、より一層の温室効果ガス排出削減効果が期待できることを政策提言した。
- ・ 地方都市における静脈系インフラ間の連携に関する研究においては、ボイラ・タービン発電導入地区を対象に混焼連携計画(し尿処理施設で発生する脱水汚泥をごみ焼却施設で乾燥・混合焼却するケース)を導入することで、温室効果ガスを13%削減できることを示した(連

携のない熱回収ケースとの比較値)。また、メタン発酵導入地区を対象に融通連携計画（有機性廃棄物を融通して下水処理施設、ごみ焼却施設の双方でメタン発酵事業を行うケース）を導入することで、温室効果ガスを 15%削減できることを示した（連携のないガス回収ケースとの比較値）。加えて、そうしたし尿・浄化槽汚泥の処理機能を下水処理施設やごみ焼却施設に統合化する更新計画の策定を支援するマニュアルを、査読付き論文として取りまとめた（土木学会論文集 G（環境）、72, 6, II_45-II_56 (2016)）。

○地方都市における下水処理施設とごみ処理施設との連携による効果の推定

静脈系インフラの維持・更新をふまえた連携では、8 万人程度の地方都市において、更新時期を考慮した下水処理と廃棄物処理施設の連携として、汚泥の堆肥化から脱水汚泥の混焼に技術転換を行った場合、高効率発電を併せて導入することが重要であることを示した。静脈系インフラが更新時期を迎えるなかで、特に 10 万人未満の地方都市の更新計画の立案を支援する知見となりうる。

○人口動態変化をふまえた静脈系インフラの連携

平成 28 年度末までに立地適正化計画を策定した札幌市、花巻市、箕面市、熊本市や、計画策定中の自治体の例を見ると、国土交通省が作成した「立地適正化計画の手引き（2016）」や「都市構造の評価に関するハンドブック（2014）」等を参照し、都市機能誘導区域については、中心市街地や鉄道駅を核とする区域に設定されている。

さらに、居住誘導区域については、市街地の人口密度が高い（市街化区域全域が DID 地区：40 人/ha）となっている自治体では、自然災害リスクの高い区域を除いた市街化区域全域が居住誘導区域に設定されている。一定区域への大規模な土地利用や人口の集約が不要なため、居住誘導区域の設定が比較的容易に進む。一方で、市街地の人口密度が低く、市街地集約が必要な自治体では、都市機能誘導区域周辺部のどの範囲を居住誘導区域に設定するかで違いが見られる。一律に一定距離圏内（例えば 500m 圏等）とする例、幹線道路や鉄道等の境界等で設定する例、市街地の状況に応じて設定する例等、様々である。一部に市町村合併前の旧役場周辺や、高度成長期に開発された郊外住宅団地等、市街地集約の見込みのない区域も恣意的に居住誘導区域に組み込む運用が散見される。

本論では、2050 年推計人口や下水道認可区域をベースに、既成市街地や交通インフラの整備状況を定量的に測定し、目指すべき都市像に合わせて集約条件を選択しながら最小限の面積となるよう市街地集約エリアを設定した。さらに 2050 年推計人口を用いて、市街地集約エリアの居住人口や総人口に対する割合を算出し、居住目安人口を検証している。これにより、適切な規模の市街地集約エリアを設定することが可能となっている。

また、下水道が既に整備されている認可区域を市街地集約エリアの軸にした点で、既存インフラの活用や維持管理コストの削減のみならず、静脈系インフラの連携に有効であると言える。加えて、公共施設の最適化、空き家・空き店舗の、郊外住宅団地の再編等、建築・都市計画分野における各種課題に寄与できるものと考えている。

○インフラ連携の社会展開

環境省「廃棄物の減量その他その適正な処理に関する施策の総合的かつ計画的な推進を図るための基本的な方針」（2016.1.21）における、「再生利用及び熱回収の効率化等のための廃棄物処理施設と他のインフラとの連携」を具体化する知見として活用が期待される。

自治体における連携方策の検討を支援する技術資料・マニュアル、受容性、事業性を含むガイドラインとしての活用が期待される。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

< 論文 (査読あり) >

- 1) 中尾彰文, 山本祐吾, 吉田登: 土木学会論文集 G (環境), Vol.70, No.6, pp.II_381-II_392, (2014)
「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－和歌山市におけるケーススタディー」
- 2) 中尾彰文, 山本祐吾, 吉田登: 土木学会論文集 G (環境), Vol.71, No.6, pp.II_475-II_486, (2015)
「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」
- 3) 伊川純慶, 中久保豊彦, 東海明宏: 土木学会論文集 G (環境), Vol.71, No.6, pp.II_253-II_262, 2015年10月.
「レジリエンス特性を踏まえた災害廃棄物 (可燃系廃棄物) 処理の対策効果分析－近畿圏における広域連携を対象として－」
- 4) Hiroki O., Madoka C.: International Conference of Asian-Pacific Planning Societies Hand Book & Proceeding, pp.121-124, Taipei Taiwan, August, 2016
“Pilot Programs for Town Management Utilizing the Unused Facilities -Case studies in Wakayama city-“
- 5) 松田雄太郎, 中尾彰文, 山本祐吾, 吉田登: 土木学会論文集 G (環境), Vol.70, No.6, pp.II_37-II_78, (2016)
「セメント生産インフラを活用した下水汚泥固形燃料化システムのエネルギー・物質フロー推計」
- 6) 奥田拓也, 中尾彰文, 山本祐吾, 中久保豊彦, 吉田登: 土木学会論文集 G (環境), Vol.70, No.6, pp.II_57-II_66 (2016)
「産業・環境インフラと連携した下水汚泥の燃料利用が GHG 削減に及ぼす効果」
- 7) 中久保豊彦, 小林緑: 土木学会論文集 G (環境), Vol.71, No.6, pp.II_45-II_56 (2016)
「地方都市・農村域における汚泥処理機能の統合化による温室効果ガス排出削減効果の解析－群馬県を対象としたケーススタディー」
- 8) 鶴巻峰夫, 久保朱里, 山本祐吾, 吉田登: 土木学会論文集 G (環境), Vol.71, No.6, pp.II_23-II_34 (2016)
「過疎地域での生活排水と可燃ごみの連携処理による温室効果ガス削減について」
- 9) 長曾我部まどか, 小川宏樹: 都市計画論文集, Vol.51, No.3, pp.972-978 (2016)
「郊外共同住宅居住者の住宅ニーズとまちなかへの転居の住環境条件に関する研究」

< 査読付論文に準ずる成果発表 >

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 猪瀬紋花, 長曾我部まどか, 小川宏樹: 都市計画報告集, No.14, pp.351-354 (2016)
「郊外の賃貸共同住宅居住者を対象とした転居意向に関する研究—和歌山市を事例として—」
- 2) 杉本紗季, 長曾我部まどか, 小川宏樹: 都市計画報告集, No.14, pp.383-386 (2016)
「地区レベルにおける共同住宅の空き家率の推計に関する研究—和歌山市を事例として—」
- 3) 中久保豊彦: 再生と利用, 41, 155 (2017) 印刷中
「研究紹介 都市域における下水処理場とごみ焼却場の連携」

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) 中久保豊彦: 平成 26 年度土木学会全国大会研究討論会「都市の代謝機能の将来」(2014)
「下水処理場とごみ焼却場の連携システムの可能性」
- 2) 藪口京介, 中久保豊彦, 東海明宏: 第 25 回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2014)
「農村域における乾式メタン発酵・消化槽でのバイオガス回収計画の比較評価: 兵庫県但馬地域を対象として」
- 3) 尾崎平, 盛岡通: 第 25 回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2014)
「ごみ焼却施設（全連続式ストロカ方式）の維持・更新に関する実態調査」
- 4) 奥田拓也, 吉田登, 金子泰純, 山本祐吾, 小川宏樹: 第 25 回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2014)
「清掃工場への乾式メタン発酵導入によるエネルギー回収可能量の基礎的検討—和歌山県を対象として—」
- 5) 菅洋輔, 中久保豊彦, 東海明宏: 第 25 回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2014)
「下水処理施設・ごみ焼却施設間連携での温暖化対策に向けた都市類型の基礎的研究」
- 6) 山本祐吾, 芳元恭大, 中尾彰文, 吉田登: 第 25 回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2014)
「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」
- 7) 中尾彰文, 吉元剛, 山本祐吾, 吉田登: 第 25 回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2014)
「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」
- 8) Akifumi N., Yugo Y., Noboru Y.: the 9th International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, Tokyo, Japan (2015)
“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”
- 9) Noboru Y., Toyohiko N., Yugo Y., Taira O., Hiroki O.: International Conference on Green Energy & Expo Orlando, USA (2015)
“Biomass energy recovery by linkage of waste incinerators and sewage treatment plants”
- 10) Noboru Y., Toyohiko N., Yugo Y., Akifumi N., Taira O., Hiroki O.: the 8th Biennial conference of the International Society for Industrial Ecology, Guildford, UK 2015
“Energy Recovery from Biomass Waste by Collaboration of Environmental Infrastructures”
- 11) 奥田拓也, 吉田登: 廃棄物資源循環学会平成 27 年度春の研究発表会 (2015)
「産業・環境インフラ連携による下水汚泥からのエネルギー回収可能量に関する基礎的検討」
- 12) 山本祐吾, 中尾彰文, 吉田登: 環境科学会 2015 年会 (2015)
「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」
- 13) 中久保豊彦, 菅洋輔, 東海明宏: 環境科学会 2015 年会 (2015)
「下水処理施設とごみ焼却施設の連携を対象とした環境性評価」

- 14) 吉田登, 奥田拓也: 環境科学会 2015 年会 (2015)
「インフラ連携による廃棄物エネルギー回収の可能性と受容性」
- 15) 中久保豊彦, 伊川純慶, 東海明宏: 第 26 回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2015)
「近畿圏での広域連携による災害廃棄物 (可燃系廃棄物) 処理の対策効果分析」
- 16) 奥田拓也, 吉田登: 産業・第 26 回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2015)
「環境インフラの連携による下水汚泥からのエネルギー回収に関する研究」
- 17) 中尾彰文, 山本祐吾, 吉田登: 第 26 回廃棄物資源循環学会研究発表 (2015)
「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—」
- 18) 尾崎平, 盛岡通: 環境科学会 2015 年会 (2015)
「更新時期を踏まえたごみ焼却施設の連携・再編によるエネルギー回収の評価」
- 19) 中久保豊彦, 伊川純慶, 東海明宏: 第 43 回環境システム研究論文発表会 (2015)
「レジリエンス特性を踏まえた災害廃棄物 (可燃系廃棄物) 処理の対策効果分析—近畿圏における広域連携を対象として—」
- 20) Nakakubo, T.: 9th International Conference on: Combustion, Incineration/Pyrolysis, Emission and Climate change (9th i-CIPEC 2016), Kyoto Research Park, Kyoto, Japan (2016)
“Analysis of reduction effect of greenhouse gas by introducing collaborative updating plan for sewage treatment and waste incineration plants”
- 21) Nakakubo, T. and Yoshida, N.: The Joint Socio-Economic Metabolism conference and Asia-Pacific conference of the International Society for Industrial Ecology (2016 ISIE SEM & AP), Nagoya University, Nagoya, Japan (2016)
“Design and evaluation of a collaborative updating plan for sewage treatment and waste incineration plants: urban typology and collaboration effect analysis”
- 22) Yoshida, N., Okuda, T., Nakao, A., Yamamoto, Y., and Nakakubo, T.: The Joint Socio-Economic Metabolism conference and Asia-Pacific conference of the International Society for Industrial Ecology (2016 ISIE SEM & AP), Nagoya University, Nagoya, Japan (2016)
“Reduction of GHG Emission with Sewage Sludge Fuels Utilization by Nation-Wide Collaboration of Industrial and Environmental Infrastructures”
- 23) 中久保豊彦, 小林緑: 平成 28 年度 廃棄物資源循環学会 春の研究発表会 (2016)
「浄化槽汚泥処理機能の統合化による温室効果ガス排出削減効果の解析: 群馬県を対象として」
- 24) 荒木浩太郎, 中尾彰文, 山本祐吾, 吉田登: 第 27 回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2016)
「GHG 削減を最大とする下水汚泥燃料の産業などへの配分に関する研究」
- 25) 山本祐吾, 新垣亜以, 中尾彰文, 吉田登: 第 27 回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2016)
「地方中小都市における汚水適正処理計画の目標達成状況の点検・評価—和歌山県を対象として—」
- 26) 中尾彰文, 中林佑太, 山本祐吾, 吉田登: 第 27 回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2016)
「清掃工場を中核施設とした地域エネルギー供給システムに対応した都市集約の評価—和歌山市におけるケーススタディー」
- 27) 尾崎平, 盛岡通: 第 27 回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2016)
「ごみ焼却施設の更新を踏まえた連携施策による低炭素効果」
- 28) 尾崎平, 盛岡通: 第 27 回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2016)
「地方都市におけるごみ焼却施設と下水処理施設の連携による効果の推定」
- 29) 中久保豊彦, 小林緑: 第 44 回環境システム研究論文発表会 (2016)
「地方都市・農村域における汚泥処理機能の統合化による温室効果ガス排出削減効果の解析—群馬県を対象としたケーススタディー」

- 30) 小川宏樹, 櫻井祥之, 伊勢昇: 2016 年度日本都市計画学会第 14 回関西支部研究発表会 (2016)
「都市機能や都市生活の快適性に関する評価指標を用いた都市構造の類型化—都市構造の特性を踏まえた中心市街地活性化施策のあり方 その 1」
- 31) 櫻井祥之, 小川宏樹, 伊勢昇: 2016 年度日本都市計画学会第 14 回関西支部研究発表会 (2016)
「都市機能や都市生活の快適性による都市構造類型からみた中心市街地活性化施策の評価—都市構造の特性を踏まえた中心市街地活性化施策のあり方 その 2」
- 32) 中久保豊彦: 国立環境研究所 資源循環・廃棄物研究センター 内部セミナー (2016)
「2030 年に向けたごみ焼却施設の機能変化: 汚泥混焼の可能性」
- 33) 中久保豊彦, 小池夏帆: 第 12 回日本 LCA 学会研究発表会 (2017)
「セメント直接原料化の見直しに向けた脱水汚泥資源化オプションの比較評価」
- 34) 田代颯馬, 松田雄太郎, 中尾彰文, 山本祐吾, 吉田登, 轟巻峰夫: 第 12 回日本 LCA 学会研究発表会 (2017)
「都市規模やインフラ条件に応じて適用可能なエネルギー回収型廃棄物処理システムの評価フレームの構築」

(3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 一般公開シンポジウム 第 4 回『花王“いっしょに eco”フォーラム』(主催: 花王株式会社、2014 年 11 月 4 日、ダイワロイネットホテル和歌山、観客約 300 名)において、パネルディスカッション『変わりつつある地球』への対応』のパネリストとして、環境インフラ連携について話題提供
- 2) 環境科学会 2015 年会シンポジウム 3「環境インフラの連携による廃棄物からのエネルギー回収」(主催: 環境科学会, 2015 年 9 月 7 日, 阪大北千里キャンパス, 聴講者約 20 名)にて中間成果の報告
- 3) 平成 28 年度環境保全セミナー(主催: 瀬戸内海環境保全知事・市長会議、2016 年 7 月 15 日、聴講者 110 名)において、県民等を対象に「下水汚泥からのエネルギー回収の最前線」と題して研究成果をもとに講演
- 4) 「第 85 回わだい浪切サロン」(主催: 和歌山大学、2016 年 9 月 21 日、岸和田浪切ホール、聴講者一般市民 55 名)において、一般市民を対象に「生ごみや下水汚泥からのエネルギー回収を考える」と題して本推進費の研究成果にもとづき講演
- 5) 土木学会第 44 回環境システム研究論文発表会にて企画セッション「廃棄物からの高効率なエネルギー回収を目指す技術やインフラの提案」(主催: 土木学会環境システム委員会, 2016 年 10 月 22 日, 首都大学東京南大沢キャンパス, 聴講者約 50 名)にて成果報告
※推進費研究 3K143016 (研究代表: 国環研藤井実) と共同で企画提案, 実施
- 6) 中久保豊彦: 2030 年に向けたごみ焼却施設の機能変化: 汚泥混焼の可能性, 国立環境研究所 資源循環・廃棄物研究センター 内部セミナー「2030 年の社会変化への対応と廃棄物処理施設の在り方」, 国立環境研究所, 2016 年 11 月

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

- 1) Award for outstanding poster presentation (9th International Conference on: Combustion, Incineration/Pyrolysis, Emission and Climate change, 2016年9月)

受賞者：中久保豊彦

Title: Analysis of reduction effect of greenhouse gas by introducing collaborative updating plan for sewage treatment and waste incineration plants

- 2) 環境システム優秀論文賞（土木学会・環境システム委員会より、2016年10月）

受賞者：伊川純慶、中久保豊彦、東海明宏

受賞論文：レジリエンス特性を踏まえた災害廃棄物（可燃系廃棄物）処理の対策効果分析－近畿圏における広域連携を対象として－（土木学会論文集 G（環境）、71, 6, II_253-II_262 (2015)）

8. 引用文献

- 1) 公益社団法人日本下水道協会：平成24年度版下水道統計，第69号（2014）
- 2) 神戸市：平成27年度事業概要（2015）（参照：<http://www.city.kobe.lg.jp/information/about/construction/3000/27jigyougaiyou.pdf>，最終閲覧：2016年2月10日）
- 3) 明石市：平成24年版 明石の下水道（2014）（参照：<http://www2.city.akashi.lg.jp/gesuidou/gesui/pdf/akashinogesuidou/24akashinogesuidou.pdf>，最終閲覧：2016年2月10日）
- 4) 兵庫県：兵庫県統計書平成24年 15 エネルギー・水エクセルシート（参照：<https://web.pref.hyogo.lg.jp/kk11/oshirase-sougoude-ta/documents/t2415energy-mizu.xls>，最終閲覧：2016年2月10日）
- 5) 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）（参照：<http://www.ipss.go.jp/pp-shicyoson/j/shicyoson13/6houkoku/houkoku.pdf>，最終閲覧：2016年2月10日）
- 6) 住友大阪セメント株式会社：赤穂工場にて脱水有機汚泥乾燥設備が竣工（2008）（参照：http://www.soc.co.jp/wp-content/uploads/2013/09/20081027_News_Release.pdf，最終閲覧：2016年2月10日）
- 7) 住友大阪セメント株式会社：赤穂工場自家用火力発電にて下水汚泥固形燃料の使用を開始，（2014）（参照：<http://www.soc.co.jp/wp-content/uploads/2014/05/1b159d3b1eee5fe0a47799e0737c4785.pdf>，最終閲覧：2016年2月10日）
- 8) 環境省：中央環境審議会地球環境部会第111回 参考資料2 エネルギー・環境に関する選択肢 シナリオの詳細データ（2012.9）（参照：<http://www.env.go.jp/council/06earth/y060-111/ref02.pdf>，最終閲覧：2016年2月10日）
- 9) 一般社団法人セメント協会：セメントハンドブック 2013年度版（2013）
- 10) 経済産業省：地球環境小委員会 製紙・板ガラス・セメント等のワーキング・グループ第1回 配布資料 5-1 セメント産業における温暖化対策の取り組み，参照：http://www.jcassoc.or.jp/cement/4pdf/jj3c_07.pdf，最終閲覧：2016年2月10日）2013年
- 11) 一般社団法人日本経済団体連合会：環境自主行動計画（温暖化対策編）-2013年度フォローアップ調査結果（2012年度実績）-<個別業種版>（2014）（参照：http://www.keidanren.or.jp/policy/2013/101_kobetsu.pdf，最終閲覧：2016年2月10日）

- 12) 戒能一成：エネルギー源別標準発熱量・炭素排出係数の改定案について－2013年度改定標準発熱量炭素排出係数表－（2014）（参照：<http://www.rieti.go.jp/jp/publications/dp/14j047.pdf>，最終閲覧：2016年2月10日）
- 13) 株式会社セメント新聞社：セメント産業年報 アプローチ 第47集（2013）
- 14) 住友大阪セメント株式会社：CSR レポート 2014（2014）
- 15) 一般社団法人セメント協会：ニッポン・セメント工場訪問 住友大阪セメント株式会社赤穂工場，セメント・コンクリート，No.826，pp.6-9（2015）（参照：http://www.jcassoc.or.jp/cement/4pdf/jg3_19.pdf，最終閲覧：2016年2月10日）
- 16) 一般社団法人セメント協会：ニッポン・セメント工場訪問 住友大阪セメント株式会社高知工場，セメント・コンクリート，No.809，pp.4-7（2014）
- 17) 一般社団法人セメント協会：Dream Factory 21世紀 循環型社会の未来を支えるセメント工場 32 住友大阪セメント株式会社栃木工場，セメント・コンクリート，No.742，pp.4-7（2014）
- 18) 一般社団法人セメント協会：生産技術専門委員会 T-22 省エネルギー・省資源に関する報告書（2002）（参照：http://www.jcassoc.or.jp/cement/4pdf/jj3c_07.pdf，最終閲覧：2016年2月10日）
- 19) 電源開発株式会社：広島市西部水資源再生センター下水汚泥燃料化事業の概要（参照：http://www.jpowers.co.jp/news_release/pdf/news100310-2.pdf，最終閲覧：2016年2月11日）
- 20) 熊本市：熊本市南部浄化センター 下水汚泥固形燃料化施設（パンフレット）
- 21) 大阪市：大阪市平野下水処理場汚泥固形燃料化事業（PFI事業）（参照：<http://www.city.osaka.lg.jp/kensetsu/page/0000325106.html>，最終閲覧：2016年2月11日）
- 22) 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－別添資料－（2008）
- 23) 村木謙吾：日本エネルギー学会誌，Vol.87，No.5，pp.337-339（2008）
「汚泥炭化燃料の発電利用について」
- 24) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構：バイオマスの高効率セメント燃料化技術の開発（2008）
- 25) 環境省：地球温暖化対策の推進に関する法律に基づく地方公共団体の事務及び事業に係る実行計画策定マニュアル及び温室効果ガス総排出量算定方法ガイドライン（2011）（参照：<http://ghg-santeikohyo.env.go.jp/manual>，最終閲覧：2016年2月10日）
- 26) 大阪市：温室効果ガス排出量の算定について（2009）（参照：http://www.city.osaka.lg.jp/kankyo/cmsfiles/contents/0000195/195082/haisyuturyo_santeihouhou.pdf，最終閲覧：2016年2月10日）
- 27) 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：<http://ghg-santeikohyo.env.go.jp/manual>，最終閲覧：2016年2月10日）
- 28) 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-（2014年）（参照：<http://www.mlit.go.jp/common/001083170.pdf>，最終閲覧：2016年3月15日）
- 29) 李炫倅，花木啓祐，栗栖聖，中谷隼：下水道協会誌，Vol.48，No.587，PP101-PP109（2011）
「仮想的下水処理場における下水汚泥と厨芥の混合硝化がエネルギー収支と水処理系にもたらす効果」
- 30) 一般社団法人日本経済団体連合会：低炭素社会実行計画－2015年度フォローアップ結果（2014年度）－＜個別業種版＞，2016年3月（参照：http://www.keidanren.or.jp/policy/2015/102_kobetsu.pdf，最終閲覧日：2017年3月15日）

- 31) 経済産業省：平成 27 年－2015－経済産業省生産動態統計年報 紙・印刷・プラスチック製品・ゴム製品統計編，2016 年 6 月
- 32) 株式会社テックタイムス：紙パルプ企業・工場データブック 2016 (2016)
- 33) 経済産業省：平成 27 年－2015 年石油等消費動態統計年報 (2016)
- 34) 紙パルプ協会エネルギー委員会：紙パ技協誌，Vol.55，No.6，pp737-763 (2001)
「第 7 回エネルギー実態調査報告 (その 2)」
- 35) 中久保豊彦，小林緑：土木学会論文集 G (環境)，Vol.72，No.6，II_45-II_56 (2016)
「地方都市・農村域における汚泥処理機能の統合化による温室効果ガス排出削減効果の解析－群馬県を対象としたケーススタディー」
- 36) 経済産業省：平成 25 年度 エネルギー消費統計調査 蒸気の換算方法 (参照：http://www.enec.ho.meti.go.jp/statistics/energy_consumption/ec001/h25/pdf/kinyu_yoryo_all.pdf，最終閲覧日：2017 年 3 月 15 日)
- 37) 社団法人地球環境資源センター：バイオマス利活用技術情報データベース Ver2.1 (参照：<http://www2.jarus.or.jp/biomassdb/>，最終閲覧日：2017 年 3 月 15 日)
- 38) 2013 年公益社団法人空気調和・衛生工学会：第 13 版空気調和・衛生工学便覧 2 汎用機器・空調機器篇 (2001 年)
- 39) 独立法人新エネルギー・産業技術総合開発機構：平成 18 年度－平成 20 年度成果報告書 新エネルギー技術フィールドテスト事業 地域バイオマス熱利用フィールドテスト事業 造粒乾燥法による脱水汚泥燃料化システムを活用した熱利用フィールドテスト事業 (2009)
- 40) 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－別添資料－ (2008)
- 41) 循環型社会に向けたバイオガス輸送システムの開発，JFE 技報，No.32，pp.96-97 (2013)
- 42) 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温暖化イニシアティブ実証事業に関する技術開発 成果報告書 (2008)
- 43) 塚本圭祐，渡邊茂治，石川栄司：バイオマス発電設備－日本製紙(株)勿来工場 ICFB－，エバラ時報 No.208，pp.32-36 (2005)
- 44) 古川勝也：紙パ技協誌，Vol.60，No.4，pp.81-89，(2006)
「勿来工場バイオマスボイラーの概要と操業経験」
- 45) 北九州市上下水道局：下水道の普及状況 (2015) (参照：<http://www.city.kitakyushu.lg.jp/suidou/s01100015.html>，最終閲覧日：2017 年 2 月 15 日)
- 46) 新日鉄住金エンジニアリング：新日鉄住金エンジニアリング技法 Vol.6 下水汚泥固形燃料化システム「ジェイコンビ」(2015) (参照：https://www.eng.nssmc.com/business/catalog/pdf/vol06_14.pdf，最終閲覧日：2017 年 2 月 15 日)
- 47) 環境省：廃棄物処理技術情報 一般廃棄物処理実態調査結果 (参照：http://www.env.go.jp/recycle/waste_tech/ippan/，最終閲覧日：2017 年 2 月 15 日)
- 48) 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.2.1) (参照：http://www.env.go.jp/earth/ondanka/supply_chain/comm_rep/unit201203v2-02.pdf，最終閲覧日：2017 年 2 月 15 日)
- 49) 環境省：温室効果ガス排出量算定・報告マニュアル Ver.4.2 (2016) (参照：<http://ghg-santeikohyo.env.go.jp/manual>，最終閲覧日：2017 年 2 月 15 日)
- 50) 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)

- 51) 環境省：電気事業者別の CO2 排出係数 2014 年度実績（2015）（参照：<http://www.env.go.jp/press/files/jp/28621.pdf>, 最終閲覧日：2017 年 2 月 15 日）
- 52) 中久保豊彦, 東海明宏, 大野浩一：土木学会論文集 G（環境）, Vol.68, No.2, 152-171（2012）
「下水処理場とごみ焼却の連携を軸とした静脈系社会資本更新計画の立案評価」
- 53) 一般社団法人産業環境管理協会：カーボンフットプリント制度施行事業 CO2 換算量共通原単位データベース ver.4.01（国内データ）
- 54) 高久慎太郎, 山本祐吾, 東海明宏, 吉田登, 盛岡通：環境システム研究 Vol.38（2010）
「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」
- 55) 井上陽仁, 松藤敏彦：土木学会論文集 G（環境）, Vol.69, No.1, pp.37-45（2013 年）
「未利用廃棄物系バイオマスの総合的な地域内利活用による温室効果ガス排出削減効果」
- 56) 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－別添資料－（2008）
- 57) 北九州市上下水道局：平成 26 年度 下水道管理年報（2015）
- 58) 国土交通省気象庁：過去の気象データ・ダウンロード（参照：<http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/>, 最終閲覧日：2017 年 2 月 15 日）
- 59) 花木啓介, 栗栖聖：下水道協会誌, pp_101-109（2011）
「仮想的下水処理場における下水汚泥と厨芥の混合消化がエネルギー収支と水処理系にもたらす効果」
- 60) 春名一生：真空, Vol.43, No.12（2000）
「圧縮変動吸着法（PSA 法）によるガス分離技術」
- 61) 国土交通省 国土技術政策総合研究所：B-DASH プロジェクト No.10 下水道バイオマスからの電力創造システム導入ガイドライン（案）（2015）（参照：<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryoutnn/tnn0860.htm>, 最終閲覧日：2017 年 2 月 15 日）
- 62) 国土交通省 国土技術政策総合研究所：B-DASH プロジェクト No.9 脱水・燃焼・発電を全体最適化した革新的下水汚泥エネルギー転換システム導入ガイドライン（案）（2015）（参照：<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryoutnn/tnn0859.htm>, 最終閲覧日：2017 年 2 月 15 日）
- 63) YANMAR：25kW 級・バイオガス発電（消化ガス用）について,（参照：https://www.yanmar.com/jp/energy/renewable_energy/digestion_gas/, 最終閲覧日：2017 年 2 月 15 日）
- 64) 中久保豊彦, 小林緑：土木学会論文集 G（環境）, Vol.72, No.6, pp.45-56（2016）
「地方都市・農村域における汚泥処理機能の統合化による温室効果ガス排出削減効果の解析－群馬県を対象としたケーススタディー」
- 65) 公益社団法人日本下水道協会：下水道統計 平成 25 年度版（2015）
- 66) 公共投資ジャーナル社：焼却・溶融等施設実態調査 2011 年度版（2011）
- 67) 公益社団法人日本下水道協会：下水道統計 平成 22 年度版（2012）
- 68) 国土交通省・日本下水道協会：バイオソリッド利活用基本計画策定マニュアル（2004）
- 69) 公益社団法人日本下水道協会：下水汚泥有効利用促進マニュアルー持続可能な下水汚泥の有効利用を目指してー（2015）
- 70) 群馬県：群馬県一般廃棄物処理マスタープラン（県広域化計画）（2008）

- 71) 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 25 年 3 月推計）10. 群馬県。（2013）
<<http://www.ipss.go.jp/pp-shicyoson/j/shicyoson13/3kekka/Municipalities.asp>> (2015.5.20 閲覧)
- 72) 全国都市清掃会議：ごみ処理施設整備の計画・設計要領 2006 改訂版（2006）
- 73) 群馬県：汚水処理施設の普及状況（2015）
<<http://www.pref.gunma.jp/06/h6610008.html>> (2015.5.20 閲覧)
- 74) 入江直樹, 岩崎大介, 久堀泰佑：タクマ技報, Vol.15, No.2, pp.175-185（2007）
「乾式メタン発酵に適したごみ選別システムの開発」
- 75) 下水道新技術推進機構：下水処理場へのバイオマス（生ごみ）受け入れマニュアル（2011）
- 76) 総務省統計局：日本統計年鑑 平成 27 年第 10 章エネルギー・水, 2015（参照元 <http://www.stat.go.jp/data/nenkan/10.htm>, 最終閲覧：2015 年 8 月 1 日）
- 77) 日本製紙連合会：:紙・板紙統計年報平成 26 年度版, 2015
- 78) 日本製紙連合会：製紙工場所在地一覧（参照元：<http://www.jpa.gr.jp/about/member/factory/index.html>, 最終閲覧：2016 年 2 月 1 日）
- 79) セメント新聞社：セメント年鑑第 66 巻, 2014
- 80) 一般社団法人セメント協会：セメント産業の概要（参照元：<http://www.jcassoc.or.jp/cement/ljpn/jc.html>., 最終閲覧：2016 年 2 月 1 日）
- 81) 経済産業省資源エネルギー庁：電力調査統計/汽力発電, 2012 年（参照元：http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/electric_power/ep002/results.html#headline4, 最終閲覧：2016 年 2 月 1 日）
- 82) 電気事業連合会統計委員会編：電気事業者便覧, 2014
- 83) 国土交通省：国土数値情報ダウンロードサービス（参照元：<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>, 最終閲覧：2016 年 2 月 1 日）
- 84) 日本下水道事業団技術評価委員会：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（参照元：<https://www.jswa.go.jp/g/g4/g4g/pdf/gihyo24.pdf>, 最終閲覧：2016 年 2 月 1 日）
- 85) 公益社団法人日本下水道協会：下水汚泥エネルギー利用調査報告書（参照元：<http://www.jswa.jp/energy/index02.html>, 最終閲覧：2016 年 2 月 1 日）
- 86) 社団法人全国都市清掃会議：ごみ処理施設整備の計画・設計要領 2006 改訂版, 2006 年
- 87) 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(Ver4.0), 2015 年（参照元：<http://ghg-santeikohyo.env.go.jp/manual>, 最終閲覧 2016 年 2 月 1 日）
- 88) 田所伸悟：タクマ技報, Vol20, No.2, 2012
「金沢市西部環境エネルギーセンター運転報告書 -下水汚泥混焼について-」
- 89) 菅洋輔、中久保豊彦、東海明宏：土木学会論文集 G（環境）, Vol. 69, No.6, pp.II_283-II_291(2013)
「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」
- 90) 森田匡俊・鈴木克哉: Theory and Applications of GIS, Vol. 22, No.1, 1- 7（2014）
「日本の主要都市における直線距離と道路距離との関係に関する実証的研究」
- 91) 山本祐吾、三島一仁：環境システム研究論文集, Vol.40, II.245-II.253（2012）
「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」

- 92) 松藤敏彦：都市ごみ処理システムの分析・計画・評価、技報堂（2005）
- 93) 経産省：再生利用困難な食品廃棄物のバイオマス燃料化（2007）（参照元：http://www.meti.go.jp/policy/recycle/main/data/research/h18fy/180403-87_cjc/180403-87e.pdf、最終閲覧 2015.11.4）
- 94) 環境省：電気事業者別の CO₂ 排出係数-2013 年度実績-（2015）
（参照元：<http://www.env.go.jp/press/files/jp/27846.pdf>、最終閲覧 2015.11.4）
- 95) MiLCA（産業環境管理協会が提供する LCA ソフトウェア）
- 96) 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）（参照元：<http://www.mlit.go.jp/common/000036176.pdf>、最終閲覧：2015 年 3 月 18 日）。
- 97) 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）（参照元：<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/ondanka/kaisai/dai28/siryou.pdf>、最終閲覧：2015 年 3 月 18 日）。
- 98) 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）
- 99) 松永康平、井原貴行、松岡慶、蟬谷健一、長谷川竜也、河岸孝昌：エバラ時報，No.217，pp.17-21，（2007）
「流動床ガス化技術による廃棄物からのエネルギー回収」
- 100) 甲斐正之、浅野哲：エバラ時報，No.217，pp.36-40（2007）
「内部循環流動床ガス化技術とその利用可能性」
- 101) 株式会社荏原製作所：JEFMA，No.57，pp.47-49，日本環境衛生施設工業会（2009）
「内部循環型流動床ガス化炉及び流動床ボイラシステム」
- 102) 井原貴行、吉田登、盛岡通：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，日本機械学会（2008）
「下水汚泥からのバイオオイル製造」
- 103) 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）（参照元：<http://www.jri.co.jp/page.jsp?id=18826>、最終閲覧：2015 年 3 月 18 日）。
- 104) 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）（参照元：<http://www.jri.co.jp/MediaLibrary/file/pdf/company/release/2010/101108/101108.pdf>、最終閲覧：2015 年 3 月 18 日）
- 105) 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）（参照元：<http://www.mlit.go.jp/crd/city/sewage/info/biosolid/030829.pdf>、最終閲覧：2015 年 3 月 18 日）。
- 106) 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）（参照元：<http://www.city.kyoto.lg.jp/suido/page/0000147128.html>、最終閲覧：2014 年 3 月 14 日）。
- 107) 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）。
- 108) 内田賢治：下水道機構情報，vol.3，No.9（2009）
「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」
- 109) 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。
- 110) 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）。

- 111) 公共投資ジャーナル社：下水処理場ガイド 2010（データ版）（2010）
- 112) 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）（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）。
- 113) 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）（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）。
- 114) 中尾彰文、山本祐吾、吉田登：土木学会論文集 G（環境），Vol.70，No.6，pp.II_381-II_392（2014）
「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－和歌山市におけるケーススタディー」
- 115) 和歌山市：和歌山市 循環型社会形成推進地域計画（2013）（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）。
- 116) 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/seweraage/crd_seweraage_tk_000087.html，最終閲覧：2015年3月18日）。
- 117) 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）
「下水道主要設備機能診断に関する研究」
- 118) 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）（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）。
- 119) 三野禎男、國木政徳、北野徳之：廃棄物学会第19回廃棄物学会発表会（2008）
「下水汚泥のバイオソリッド燃料化」
- 120) 大同特殊鋼株式会社：JEFMA，No.57，pp.68-70，日本環境衛生施設工業会（2009）
「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」
- 121) 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）
- 122) 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）（参照元：<http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=14702>，最終閲覧：2015年3月18日）
- 123) 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）
- 124) 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）。
- 125) 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）（参照元：<http://labs.eng.hokudai.ac.jp/lab/waste/wp-content/uploads/2014/03/report1.pdf>，最終閲覧：2015年3月18日）。
- 126) 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）。
- 127) 鶴巻峰夫、野池達也：土木学会論文集，No.643/VII-14，pp.11-20（2000）
「LCA手法を用いた排水処理の評価手法に関する研究」

- 128) 松藤敏彦、田中信壽：土木学会論文集，No.678/VII-19，pp.49-60（2001）
「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」
- 129) 山本一郎、吉田剛士：産業と環境，Vol.41，No.2，pp.77-81（2012）
「コンパクトで低コストな汚泥・廃液乾燥機カラカラ DD&MDD」
- 130) 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：2015年3月18日）。
- 131) 国土交通省都市局都市計画課：立地適正化計画作成の手引き、平成28年4月11日改訂、（参照元：<http://www.mlit.go.jp/common/001127170.pdf>，最終閲覧2017年3月15日）
- 132) 国土交通省：平成27年度末の下水道処理人口普及状況について、（参照元：http://www.mlit.go.jp/report/press/mizukokudo13_hh_000312.html，最終閲覧2017年3月14日）
- 133) 国土交通省近畿地方整備局：最近の下水道事業の情勢について～未普及対策に関連して～、（参照元：<http://www.pref.wakayama.lg.jp/prefg/081000/shin/documents/01jousei.pdf>，最終閲覧2017年3月15日）
- 134) 公益社団法人日本下水道協会：人口減少下における下水道計画手法のあり方について、平成20年6月（参照元：<http://www.mlit.go.jp/common/001119904.pdf>，最終閲覧2017年3月15日）
- 135) 橋本晋輔、谷口守、松中亮治：都市計画論文集、44-1、117-123（2009）
「公共交通整備状況と地区人口密度からみた都市拡散の関連分析」
- 136) 牧野夏樹、中川大、松中亮治、大庭哲治：都市計画論文集、44-3、739-744（2009）
「コンパクトシティ施策が都市構造・交通環境負荷に及ぼす影響に関するシミュレーション分析」
- 137) 高橋美保子、出口敦：都市計画論文集、42-3、487-492（2007）
「コンパクトシティ形成効果の費用便益システムに関する研究」
- 138) 佐藤晃、森本章倫：都市計画論文集、44-3、535-540（2009）
「都市コンパクト化の度合に着目した維持管理費の削減効果に関する研究」
- 139) 肥後洋平、森英高、谷口守：都市計画論文集、49-3、921-926（2014）
「「拠点へ集約」から「拠点を集約」へ-安易なコンパクトシティ政策導入に対する批判的検討-」
- 140) 和歌山市立地適正化計画、平成29年3月、（参照元：http://www.city.wakayama.wakayama.jp/_res/projects/default_project/_page_/001/014/259/ritteki2.pdf，最終閲覧2017年3月15日）
- 141) 国土数値情報：将来推計人口メッシュ(国政局推計)
（参照元：<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gmlold/meta/suikai.html>，最終閲覧2017年3月14日）
- 142) e-Stat 政府統計の総合窓口（参照元：<https://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/toukeiChiri.do?method=init>，最終閲覧2017年3月14日）
- 143) 和歌山市：和歌山市の下水道（参照元：http://www.city.wakayama.wakayama.jp/kurashi/sumai_jyousesuidou/1001111/1009521/index.html，最終閲覧2017年3月14日）
- 144) 国土数値情報：人口集中地区データ（参照元：<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-A16.html>，最終閲覧2017年3月14日）
- 145) 国土数値情報：鉄道データ（参照元：http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-N02-v2_3.html，最終閲覧2017年3月15日）
- 146) 国土交通省都市局都市計画課：都市構造の評価に関するハンドブック、（参照元：<http://www.mlit.go.jp/common/001104012.pdf>，2014.8公表，最終閲覧2017年3月15日）

[英文概要]

Study on Energy Recovery in Collaborating with Venous Infrastructures through Changes in Future Society and Technology

Principal Investigator: Noboru YOSHIDA
Institution: Faculty of Systems Engineering, Wakayama University
Sakaedani 930, Wakayama City, Wakayama 640-8510, JAPAN
Tel: +81-73-457-8348 / Fax: +81-73-457-8335
E-mail: yoshdia@sys.wakayama-u.ac.jp

Cooperated by: Department of Human Environmental Sciences, Ochanomizu University
Department of Science and Technology, Tokushima University
Department of Civil, Environmental and Applied System Engineering, Kansai University

[Abstract]

Key Words: Energy recovery, Waste biomass, Collaboration, Environmental infrastructure, GHG

This study aims to enhance biomass energy recovery from waste by collaboration of sewage sludge treatment plants and municipal waste incinerators under future society constraints, such as low-carbon society and population decline in Japan.

In this study, two types of collaboration were proposed for energy recovery. One is collaboration between up-stream and down-stream infrastructures (Sub-Theme 3), such as utilization of sewage fuel at cement factories. The other is that between down-stream infrastructures (ST2), such as co-incineration of sewage sludge at garbage incineration plants. Aggregation of infrastructures coping with future population decline (ST4), and inducing of urban functions to proper locations (ST5) were also discussed for urban redevelopment.

In ST2, the effects of introducing various collaborative systems were evaluated when updating existing sewage treatment plants (STPs) and municipal solid waste incineration plants (MSW-IPs). Several cases were proposed and compared with a base case. Relative to the base case, GHG emissions were reduced by 25% and 26% in case B (Low temperature carbonization) and C (Dried sludge fuel), respectively. A similar level of GHG reduction can also be achieved by introducing a co-combustion system in a MSW-IP, even if there is no production of solid fuel to use in collaboration with coal-fired power plants.

In ST3, the potentials of demand and supply were estimated in sewage sludge fuelization system utilizing a cement production infrastructure in Hyogo coastal region, and paper and pulp production infrastructures in Kansai, Chugoku and Shikoku area between 2010 and 2040. We also estimated GHG emissions changes brought by the introduction of these systems. GHG reduction effects of energy recovery systems were also evaluated in consideration of sewage sludge fuel utilization, low-temperature

heat source for drying sewage sludge, and collaboration of environmental infrastructures, as a case study in Kitakyushu City.

ST4 clarified that strategic aggregation of sewage sludge disposal plants and introduction of sludge fuel technology were effective to mitigate disadvantage following future population decline.

In ST5, we discussed about resizing urban areas and energy recovery from sewage sludge. It would be effective to set resized urban areas in concert with existing sewerage areas from the viewpoint of maintenance cost reduction and energy recovery. As a result of a case study in Wakayama City, we clarified that the resized urban areas in concert with existing sewerage areas could sustain the estimated future population in this area in 2050.

In conclusion we clarified that strategic collaboration as well as technology innovation were effective to improve efficiency of energy recovery with consideration of future population decline.