

## 環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

研究区分 : 環境問題対応型研究（カーボンニュートラル枠）

研究実施期間 : 2022（令和4）年度～2024（令和6）年度

課題番号 : 3CN-2202

体系的番号 : JPMEERF20223C02

研究課題名 : プラスチック等脱炭素広域循環経済と食品廃棄物地域循環による環境・経済効果の最大化

Project Title : Maximizing Environmental and Economic Effects Through Wide-area Carbon Neutral Circular Economy of Combustible Waste Including Plastics and Regional Circulation of Food Waste

研究代表者 : 藤井 実

研究代表機関 : 国立環境研究所

研究分担機関 : 一般財団法人日本環境衛生センター、日本通運株式会社、株式会社エックス都市研究所、株式会社グーン、名古屋大学、立命館大学

キーワード : プラスチック、食品廃棄物、石油化学コンビナート、循環経済、熱利用

注：研究機関等は研究実施期間中のものです。また、各機関の名称は本報告書作成時点のものです。

令和7（2025）年11月



環境研究総合推進費  
Environment Research and Technology Development Fund



独立行政法人  
環境再生保全機構  
ERCA Environmental Restoration and Conservation Agency

## 目次

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書 .....	<b>1</b>
研究課題情報 .....	<b>3</b>
<基本情報> .....	3
<研究体制> .....	3
<研究経費の実績> .....	5
<研究の全体概要図> .....	6
1. 研究成果 .....	<b>7</b>
1. 1. 研究背景 .....	7
1. 2. 研究目的 .....	7
1. 3. 研究目標 .....	7
1. 4. 研究内容・研究結果 .....	9
1. 4. 1. 研究内容 .....	9
1. 4. 2. 研究結果及び考察 .....	18
1. 5. 研究成果及び自己評価 .....	40
1. 5. 1. 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献 .....	40
1. 5. 2. 研究成果に基づく研究目標の達成状況及び自己評価 .....	43
1. 6. 研究成果発表状況の概要 .....	46
1. 6. 1. 研究成果発表の件数 .....	46
1. 6. 2. 主要な研究成果発表 .....	47
1. 6. 3. 主要な研究成果普及活動 .....	48
1. 7. 國際共同研究等の状況 .....	48
1. 8. 研究者略歴 .....	48
2. 研究成果発表の一覧 .....	<b>49</b>
(1) 産業財産権 .....	49
(2) 論文 .....	49
(3) 著書 .....	50
(4) 口頭発表・ポスター発表 .....	50
(5) 「國民との科学・技術対話」の実施 .....	56
(6) マスメディア等への公表・報道等 .....	56
(7) 研究成果による受賞 .....	56
(8) その他の成果発表 .....	56
権利表示・義務記載 .....	<b>57</b>

Abstract

## 研究課題情報

## &lt;基本情報&gt;

研究区分 :	環境問題対応型研究（カーボンニュートラル枠）
研究実施期間 :	2022（令和4）年度～2024（令和6）年度
研究領域 :	資源循環領域
重点課題 :	【重点課題10】地域循環共生圏に資する廃棄物処理システムの構築に関する研究・技術開発 【重点課題7】気候変動の緩和策に係る研究・技術開発
行政ニーズ :	(3-3) 地域特性に合わせた廃棄物分別・回収システム構築及びモデル化
課題番号 :	3CN-2202
体系的番号 :	JPMEERF20223C02
研究課題名 :	プラスチック等脱炭素広域循環経済と食品廃棄物地域循環による環境・経済効果の最大化
研究代表者 :	藤井 実
研究代表機関 :	国立環境研究所
研究分担機関 :	一般財団法人日本環境衛生センター、日本通運株式会社、株式会社エックス都市研究所、株式会社グーン、名古屋大学、立命館大学
研究協力機関 :	

注： 研究協力機関は公開の了承があった機関名のみ記載されます。

## &lt;研究体制&gt;

サブテーマ1 「カーボンニュートラルなプラスチック循環経済を支える技術提案と評価」

<サブテーマリーダー（STL）、研究分担者、及び研究協力者>

役割	機関名	部署名	役職名	氏名	一時参画期間
リーダー	国立環境研究所	社会システム 領域システム イノベーション研究室	室長	藤井実	
分担者	国立環境研究所	社会システム 領域システム イノベーション研究室	主任研究員	牧誠也	
分担者	国立環境研究所	資源循環領域 資源循環社会 システム研究室	主任研究員	河井紘輔	
分担者	国立環境研究所	福島地域協働 研究拠点地域 環境創生研究	主任研究員	大西悟	

		室			
--	--	---	--	--	--

## サブテーマ2 「自治体の廃棄物処理システムの転換方策の検討」

&lt;サブテーマリーダー (STL)、研究分担者、及び研究協力者&gt;

役割	機関名	部署名	役職名	氏名	一時参画期間
リーダー	一般財団法人日本環境衛生センター	総局資源循環 低炭素化部 企画・再生可能 エネルギー事業課	課長	溝田健一	2022年4月～ 2023年6月
リーダー	一般財団法人日本環境衛生センター	総局資源循環 低炭素化部 企画・再生可能 エネルギー事業課	主任	西畠俊太朗	2023年6月～
分担者	一般財団法人日本環境衛生センター	総局資源循環 低炭素化部 企画・再生可能 エネルギー事業課	係長	渡邊明日美	2023年6月～

## サブテーマ3 「石化コンビナート向け循環型燃料の長距離・高効率輸送の検討」

&lt;サブテーマリーダー (STL)、研究分担者、及び研究協力者&gt;

役割	機関名	部署名	役職名	氏名	一時参画期間
リーダー	日本通運株式会社	インダストリアルマテリアル営業部新エネルギー・建設	次長	村上正樹	
分担者	日本通運株式会社	資源循環営業部	次長	萬代俊郎	
分担者	日本通運株式会社	資源循環営業部	専任部長	森健二	2023年度～
分担者	株式会社エックス都市研究所	事業開発関連部門	主任研究員	土井麻記子	
分担者	株式会社エックス都市研究所	サステナビリティデザイン部門	主任研究員	坪内崇	2022年度～ 2023年度
分担者	株式会社エックス都市研究所	環境エンジニアリング部門	主席研究員	吉川克彦	
分担者	株式会社エックス都市研究所	事業開発関連部門	研究員	錢塔娜	2024年度～
分担者	株式会社グーン	ブルーエコノミー研究所	所長	池田桂太朗	2022年度～ 2023年度
分担者	株式会社グーン	ブルーエコノミー研究所	主席研究員	小西武史	2024年度～

分担者	株式会社グーン	ブルーエコノミー研究所	チーフ	北井俊樹	
-----	---------	-------------	-----	------	--

## サブテーマ4 「有機系資源の循環経済の将来シナリオに関する検討」

&lt;サブテーママリーダー（STL）、研究分担者、及び研究協力者&gt;

役割	機関名	部署名	役職名	氏名	一時参画期間
リーダー	名古屋大学	大学院環境学 研究科	教授	谷川寛樹	
分担者	名古屋大学	大学院環境学 研究科	助教	山下奈穂	2022年11月～ 2024年7月
分担者	名古屋大学	大学院環境学 研究科	助教	長谷川正利	2024年7月～
分担者	立命館大学	理工学部	教授	橋本征二	

## &lt;研究経費&gt;

&lt;研究課題全体の研究経費（円）&gt;

年度	直接経費	間接経費	経費合計	契約上限額
2022	27,689,834	8,330,488	36,020,322	39,935,997
2023	30,507,530	9,151,355	39,658,885	39,827,885
2024	30,222,198	9,059,802	39,282,000	39,282,000
全期間	88,419,562	26,541,645	114,961,207	119,045,882

&lt;研究の全体概要図&gt;

## 課題名：プラスチック等脱炭素広域循環経済と食品廃棄物地域循環による

環境・経済効果の最大化

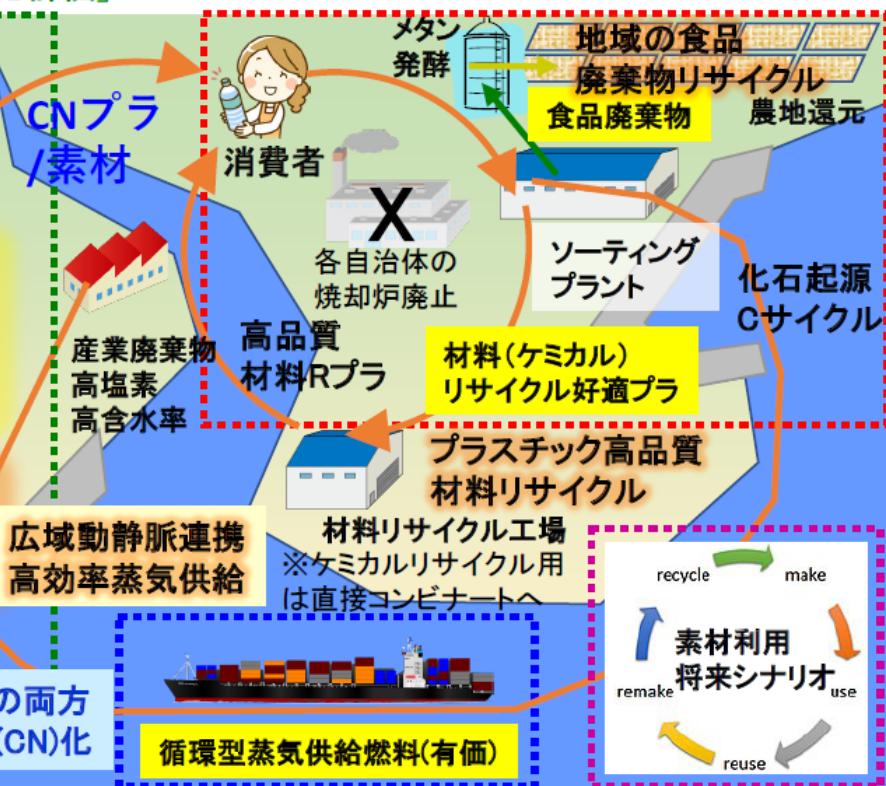
代表者：藤井実（国立環境研究所）

**概要：**プラスチックを含む有機系廃棄物のカーボンニュートラルな循環経済の実現を強力に推進し得る、経済的にも合理的なシステムを提案。自治体は焼却施設を廃止してソーティングプラントを運用し、材料・ケミカルリサイクル向けプラスチックと、地域で循環利用する食品廃棄物に選別し、残りの可燃廃棄物を循環型蒸気供給燃料として、広域から石化コンビナートに集約して、プラスチックの製造エネルギーとして利用するシステムを想定。効果の評価を将来変化も踏まえて実施し、関係者と事業化の手順や課題を整理してロードマップを示す。2030年に約200万t/年、2040年に自治体の半数の移行で約1000万t/年のCO<sub>2</sub>削減の目途と、社会コストの低減を両立する仕組みの提示を目指す。

## サブ1：国立環境研究所「カーボンニュートラルなプラスチック循環経済を支える技術提案と評価」



## サブ2：日本環境衛生センター「自治体の廃棄物処理システムの転換方策の検討」

サブ3：日本通運・グーン・エックス  
都市研究所「石化コンビナート向け循環型燃料の長距離・高効率輸送の検討」

## サブ4：名古屋大学・立命館大学「有機系資源の循環経済の将来シナリオに関する検討」

想定するアウトプット：

- CNなプラスチック製造を経済面からも支える循環型燃料による、石化コンビナートへの高効率蒸気供給を核とするシステムの提案と評価
- 同時に自治体の処理システムのCN化とコスト削減が可能な仕組みと、その移行手順の提示。
- 石化コンビナート向け循環型燃料を広域から高効率に輸送して集約する技術の提案と評価。
- 有機系資源の循環経済の将来シナリオ。

期待されるアウトカム(長期的視点)：

- 廃棄物を適材適所で効率的に利用する複合的な循環圏の創出。
- CO<sub>2</sub>排出量の制約や人口減少などの社会情勢の変化に対してもレジリエントな廃棄物リサイクル・処理システムの導入。
- 素材産業からのCO<sub>2</sub>排出の大幅な削減を経済的に実現する仕組みの実現。

## 1. 研究成果

### 研究成果

#### 1. 1. 研究背景

カーボンニュートラルの早期の実現と循環経済への移行が重要な課題となっている。そのためには、特にプラスチックや食品廃棄物を高効率に循環利用する仕組みの確立が鍵となる。しかし、PETボトル以外の容器包装プラスチックの材料リサイクルは、半分近くが残渣として焼却処理されており、再生樹脂の品質も低下しがちである。ケミカルリサイクルであれば樹脂の品質は新品同等に再生されるが、炭素収率の低さが大きな課題となる。また、食品廃棄物もその多くが焼却処分されているのが現状である。一部の廃棄物の焼却処分は今後も避けられないと思われるが、廃棄物焼却発電の発電効率は最大でも25%程度に留まり、最新のガス火力発電の発電効率である60%の半分未満である。廃棄物焼却発電の更なる高効率化が進められているが、再生可能な電力が主流化すると、日中の接続制限などにより、発電のCO<sub>2</sub>排出削減効果や経済性が低下することになる。また、将来の人口減少と、プラスチックの消費削減や分別向上に伴う焼却対象廃棄物の発生量やその発熱量の減少は、焼却施設の稼働率低下やエネルギー回収効率の低下に拍車を掛けることにもなる。このように、従来のリサイクルの延長ではカーボンニュートラル化が困難である一方、廃棄物焼却のエネルギー効率の向上や、排出されるCO<sub>2</sub>に対しても抜本的な対策が必要である。また、低位発熱量の低い食品廃棄物の焼却は、エネルギー効率改善や肥料分の有効利用等の観点で削減させることが望ましい。本研究においては、これらの課題に抜本的に対応して、カーボンニュートラルを実現可能な技術・システムの提案・評価を行うとともに、その社会実装を推進するために関係者との連携体制を構築し、検討を開始することとした。この研究は、行政ニーズである「地域特性に合わせた廃棄物分別・回収システム構築及びモデル化」にも寄与するものであり、従来にない効率的なシステムの構築に繋がることが期待される。

#### 1. 2. 研究目的

リサイクル困難な低品位廃プラスチックを含む炭化水素系の廃棄物を対象に、廃棄物の特性に合わせた地域内と広域のリサイクルを適切に組み合わせた、効率的かつ将来の変化に対してもレジリエントな処理・リサイクルシステムを提案し、その実現可能性や費用対効果を評価することを目的とする。特に、プラスチックのカーボンニュートラルな資源循環と社会的コスト低減の両立を実現可能な仕組みの提示に重点を置く。加えてそのようなシステムの社会実装を推進するため、関連する自治体や企業との協力体制を構築し、リアリティの高いシステムの設計と評価を行うと共に、事業化を行う上での課題の整理を行う。

提案するシステムは、廃棄物を分別した後にリサイクル困難な廃棄物を、現在の焼却炉の位置で中継して化学コンビナートのようなプラスチック製造拠点に広域から集約して焼却し、化学品製造プロセスに大規模に蒸気供給を行う仕組みである。加えて、将来の廃棄物発生状況の変化を踏まえると共に、グリーン水素の普及と価格低下に合わせて、焼却により発生するCO<sub>2</sub>を回収して水素と反応させ、プラスチックを製造するカーボンリサイクルの仕組み（ライフサイクルカーボンニュートラル：LCCNと呼ぶこととする）に徐々に移行することを想定する。これにより、CO<sub>2</sub>排出の削減が困難とされる化学産業からの大幅な削減と将来のカーボンニュートラルの実現が期待される。また、焼却廃棄物を長距離輸送することになるため、低位発熱量が低い食品系の廃棄物は、メタン発酵等によって地域で利用・循環する仕組みの併用を検討する。これらを構成するシステムの技術的な検討を行ってその有効性を示すとともに、社会実装を行う際の課題や解決策を整理する。更に、実装のための体制構築を行った上で実現可能性調査等を実施することを目的とする。

#### 1. 3. 研究目標

<全体の研究目標>

研究課題名	プラスチック等脱炭素広域循環経済と食品廃棄物地域循環による環境・経済効果の最大化
全体目標	資源循環分野におけるカーボンニュートラルの実現に向けて、プラスチックを含む有機系廃棄物の処理・リサイクルの仕組みを、カーボンニュートラルに適したものに転換するとともに、化学産業の製造工程の大幅なCO <sub>2</sub> 排出削減が可能な、セクター横断的なシステムを提示し、その費用対効果及び便益の評価を行って導入の可否を判断する。システムの構成要素となる選別や蒸気供給（サブテーマ1）、輸送の各プロセスのモデル化（サブテーマ3）を行うと共に、大都市や地方都市など、異なる条件の自治体や産廃事業者を対象としたケーススタディを実施する（サブテーマ3）。プロセスモデルとケーススタディに基づいて全国規模でのCO <sub>2</sub> 排出削減ポテンシャルや費用対便益を推計する（サブテーマ1）。その際、将来の有機系素材（プラスチック、紙、木材）の使用や資源循環に関するシナリオ分析を行って、発生する廃棄物の変化を踏まえ

	<p>たシステム分析となるようにする（サブテーマ4）。</p> <p>各サブテーマの成果を併せた検討により、個別地域での焼却処理への依存度が大きなこれまでのリサイクル・処理の仕組みから、少子高齢化等に伴う社会の変化にも柔軟に対応し得る、廃棄物と地域の特性に最適化された、有機系資源のカーボンニュートラルの実現と社会コストの低減にも繋がる新たな地域循環共生圏の姿を提示する。加えて、システムの社会実装に向けて、化学メーカー、自治体、処理業者等と協力して、実現に向けて課題を整理した上で、ロードマップを提示する。</p>
--	--

## &lt;サブテーマ1の研究目標&gt;

サブテーマ1名	カーボンニュートラルなプラスチック循環経済を支える技術提案と評価
サブテーマ1実施機関	国立環境研究所
サブテーマ1目標	<p>カーボンニュートラルなプラスチックの合理的な製造方法として、廃棄物から選別された循環型燃料を、石油化学コンビナートの熱需要に合わせて焼却して利用する循環型蒸気供給プラント（装置構成は廃棄物焼却施設に準じるもの）及び蒸気供給のための付帯設備の仕組みを想定・モデル化し、その費用対効果を示す。また、従来の石油を原料とするプロセスに加えて、バイオマス原料、ケミカルリサイクル原料によるプラスチック製造、循環型蒸気供給プラントの燃焼排ガスからCO<sub>2</sub>を回収して原料として供給するプラスチック製造の各プロセスについて、文献情報やヒアリング等から、物質、エネルギー収支を推計し、費用対効果を大まかに把握する。</p> <p>また、各サブテーマの成果を集約して、自治体等での一般廃棄物の発生段階から、分別収集、選別、輸送、利用の段階を、将来の条件変化も踏まえて総合的に評価し、提案する方法でカーボンニュートラルなプラスチックの循環型製造・リサイクル・処理を実施した場合のCO<sub>2</sub>削減効果及び経済性の概略を評価する。産業廃棄物については、RPF（固体燃料）としての利用も困難な、低品位な廃棄物を積極的に収集、利用してCO<sub>2</sub>排出削減効果の底上げを図る。自治体、化学産業を合わせた合計としての社会コスト削減と、2030年に約200万t/年、2040年に自治体の半数の提案システムへの移行で約1000万t/年のCO<sub>2</sub>削減に繋がる計画実現の目途を示す。</p>

## &lt;サブテーマ2の研究目標&gt;

サブテーマ2名	自治体の廃棄物処理システムの転換方策の検討
サブテーマ2実施機関	一般財団法人日本環境衛生センター
サブテーマ2目標	各自治体で焼却中心の処理方法を改め、廃棄物の特性及び地域の特性に合わせて廃棄物を分別・回収し、それぞれ適切な循環圏の空間スケールで合理的に利用する方法を提案し、その実現可能性を評価する。従来の容器包装リサイクル及び新法の下で回収される材料・ケミカルリサイクル好適プラスチック、地域でエネルギーや肥料に利用する食品廃棄物、全国で6カ所程度の石油化学コンビナートに広域から集約・燃焼してプラスチック製造工程等に蒸気供給を行う循環燃料に選別する（瓶、缶、古紙等は従来通りの回収・リサイクルを想定）ソーティングプラントの機能を設定し、それぞれを高効率に利用するシステムの詳細なプロセスの検討・評価を行う。今後の廃棄物発生量や組成の変化、再生可能な電力の供給状況の変化も踏まえて、従来の焼却・発電を中心とするシステムと比較して、費用・効果の変化を評価する。また、提案するシステムの周知を兼ねた自治体へのアンケートやヒアリング調査を通じて、実現に向けた課題を整理し、システム転換のロードマップを示す。

## &lt;サブテーマ3の研究目標&gt;

サブテーマ3名	石化コンビナート向け循環型燃料の長距離・高効率輸送の検討
サブテーマ3実施機関	日本通運株式会社、株式会社エックス都市研究所、株式会社グーン
サブテーマ3目標	各自治体による焼却発電を中心としたエネルギー回収の仕組みから、石化コンビナートに蒸気供給用循環型燃料を集約して、カーボンニュートラルなプラスチック製造のためのエネルギー源として活用する、広域利用の仕組みの実現を可能にする、安全、効率的な輸送方法を提示する。地理的に有利な自治体から優先的に全国の半数程度の自治体が提案する仕組みに参加した場合の、輸送に掛かる費用を概算してその実現可能性を評価する。石化コンビナートは臨海部に立地することから、循環型燃料の効率的輸送の観点と、コンビナートの周辺道路に多数のトラックが集中する事態を避ける観点から、海上輸送を検討対象に含める。日本通運（株）は鉄道や船舶などの輸送手段の検討、（株）グーンは輸送の荷姿の検討、（株）エックス都市研究所は輸送費や輸送に関わるインベントリ調査を主に担う。

## &lt;サブテーマ4の研究目標&gt;

サブテーマ4名	有機系資源の循環経済の将来シナリオに関する検討
サブテーマ4実施機関	名古屋大学、立命館大学
サブテーマ4目標	提案するプラスチックを含む有機系廃棄物のカーボンニュートラルな製造、リサイクル、処理の仕組みを検討する際の、社会背景についての分析を行う。将来の有機系素材（プラスチック、紙、木材等）の生産、利用、ストック、排出、循環利用に関わるシナリオを提示する。また、本課題で提案する、極めて高効率にエネルギー回収・利用する方法を選択肢として持つことが、素材の循環利用に与える影響も考察する。これらの検討を通して、提案するシステムが廃棄物の発生状況等の社会情勢の変化に対してレジリエントなシステムとなり得るかを評価する。

## 1. 4. 研究内容・研究結果

## 1. 4. 1. 研究内容

## (1) 研究内容の概要

リサイクル困難な炭化水素系の混合廃棄物（分別されなかった低品位混合廃プラスチック、繊維、雑紙、厨芥類等）を、化学コンビナートや大規模化學工場または製紙工場等に集約し、蒸気を製造プロセスに高効率に利用するとともに、焼却に伴って排出されるCO<sub>2</sub>をCCU（Carbon Capture and Utilization：二酸化炭素の回収・利用）によってプラスチック等の化学品に再生する仕組みと、食品系廃棄物を地域で活用する仕組みを併用するシステムを提案した。これにより、廃棄物からのエネルギー回収の効率を最大化し、カーボンリサイクルの効率性と経済性も飛躍的に高めることで、リサイクルを補完してカーボンニュートラルの実現を容易にするシステムとなることが期待され、本研究においてその効率性を評価し、実現に向けた課題を整理するとともに、社会実装に向けて行動を行ってきた。

サブテーマ1ではライフサイクルカーボンニュートラル（LCCN）に到達する前段階としてのLCCN Readyの仕組みについて、廃棄物焼却施設から製造工場に蒸気を大規模に安定、効率的に供給する方法を提案し（特許申請中）、熱力学的な解析によってその効率性を評価した。また、蒸気供給と組み合わせたCCUによって、基礎化学原料として汎用性の高いメタノールを製造するプロセスについて、プラスチックのケミカルリサイクル（ガス化）を行う場合と、その効率性を比較して有効性を示した。また、国内の3地域と、インド及びインドネシアの化学コンビナートで、研究成果に基づいて社会実装に向けた活動を、他のサブテーマとも協力して実施することができた。国内での水平展開やアジアの他地域への展開に向けて準備を進めるとともに、一般社団法人LCCN推進研究会を設立し、社会実装を推進するための産官学の連携体制を整え、活動を開始した。

サブテーマ2では自治体の廃棄物処理について、現在の処理状況の調査に基づき、LCCNへの移行を前提として、分別方法の変更についての想定を行い、サブテーマ4の検討結果を踏まえた上で焼却対象となる廃棄物組成の変化を検討し、焼却量や低位発熱量の推計を行った。また、中継輸送及びメタン発酵等に必要な施設のインベントリを調査した。また、移行シナリオを検討し、自治体関係者へのヒアリング等を通じて課題の整理を実施した。

サブテーマ3では、サブテーマ2で推計された化学コンビナートに輸送する廃棄物量やその性状を踏まえた上で、広域輸送を効率的かつ安全・衛生的に実施する方法を検討した。実際に業務で廃棄物の長距離輸送を担当しているメンバーの知見も活用しつつ、焼却対象廃棄物を船舶や鉄道も用いて一部では国境を越えて輸送している海外事例も調査して、広域輸送を適切に実行し得ることを確認した。また、コンビナートへの輸送に関わるシナリオを設定した上で、各サブテーマの成果を総合して、提案するシステムによるエネルギー消費及びCO<sub>2</sub>削減効果と経済性の評価を行い、LCCNが環境と経済の両面で有効な手段となることを示した。

サブテーマ4では、今後の炭化水素系の廃棄物に関わるマテリアルフロー分析を実施し、社会でのストック量も踏まえた上で今後の発生量について、シナリオ別に推計した。この成果を踏まえた上で、LCCNで活用する廃棄物の想定を行った。また、サブテーマ3で実施したLCCNシステムへの移行に関する全国版での評価に加えて、堺コンビナートを対象にして、サブテーマ1～3の成果を踏まえて周辺自治体から広域で低品位廃棄物をコンビナートに集積し、LCCNのシステムで活用するケースを詳細に評価し、CO<sub>2</sub>排出量の大幅な削減が可能であることを確認した。

サブテーマ間の連携について図1に示す。LCCNへの移行による効果と移行シナリオを示すとともに、成果に基づいて社会実装に向けた様々な活動を実施することができた。なお、サブテーマ1、2、4では、国全体のポテンシャルの評価（サブテーマ1ではCCUの導入を含む）を実施した。実現可能性の高いと思われる、約半数の自治体がLCCNへの移行するシナリオを設定した上で、広域輸送のシミュレーション結果を踏まえたLCCN ReadyのCO<sub>2</sub>削減と経済性の評価は、サブテーマ3に記載した。

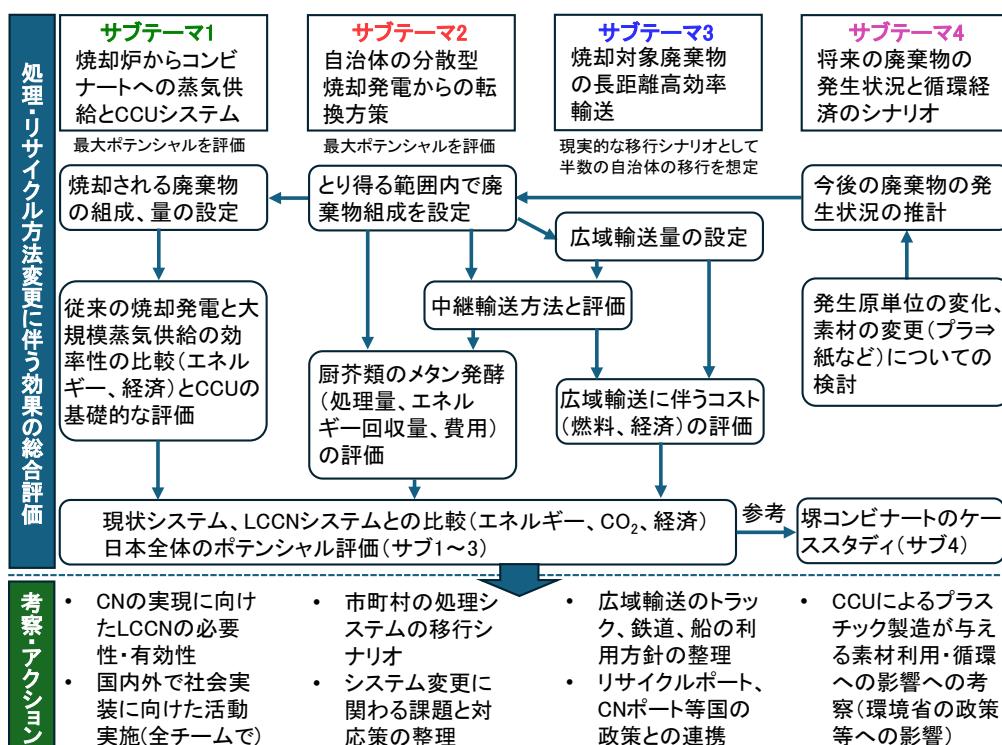


図1 研究課題におけるサブテーマ間の連携

### (1) サブテーマ1：カーボンニュートラルなプラスチック循環経済を支える技術提案と評価

#### Sub1-1 大規模化学工場等に蒸気を大規模・安定供給するシステム

カーボンニュートラル(CN)の推進が急務だが、一部の廃プラスチックや雑紙類等を含めて、リサイクル困難な廃棄物は今後も排出されることが想定される。これらの廃棄物からは従来は焼却して発電する形でエネルギー回収が行われてきたが、廃棄物に含まれる塩素分が主な障害となって焼却炉ボイラで蒸気温度を高くすることが難しく、規模の小ささも相まって発電効率が低い。その効率は火力発電所の半分程度となる。しかし、焼却炉で製造される蒸気（産廃中心の廃棄物で3MPa、300°C程度、一般廃棄物では6MPa、450°C程度）は、化学工場の生産プロセスで利用することができる。これにより焼却発電と比較して現状で2倍程度、再生可能エネルギー（再エネ）による電力の利用が主流化する将来においては、4倍程度の効率向上が

期待されることになる。

システムの提案と評価に当たって、国内外の複数の化学コンビナートにおいて、蒸気利用状況の調査を行った。蒸気の受け入れは、コジェネレーションによる電熱併給を含め、化学工場内の現在の熱需給バランスを崩す可能性があるが、今後再生可能な電力の利用を増やすことを想定すれば、電力は再エネ電源、プロセスに必要な蒸気は廃棄物焼却施設から供給できることが理想的である。しかし、再エネ電力を大規模に安定的に利用できるようになるには、社会システムの変革に時間を要すると考えられることから、特にコジェネレーションが可能な温度・圧力の蒸気供給を安定して供給できることは、特に蒸気供給量を大規模にする場合、過渡的には重要な要求事項となる。廃棄物の組成が安定しないことに加えて、コンビナートのエネルギー源として、不安定な再エネとの併用が避けられないことから、蒸気をその時々のエネルギーバランスに合わせて調整できる仕組みも必要となる。そこで、焼却炉ボイラに独立した過熱器を設置し、天然ガスや将来はグリーン水素等で昇温する仕組みとし、更に加熱量を調整することで蒸気供給量をコントロールする仕組みを提案し、エネルギーバランスを算定してその効果を評価した。このような仕組みにより、一般廃棄物に対して独立過熱器で2割ほどの燃料で追い炊きすることで、15MPa、550°C程度までの蒸気供給をコントロールできると考えられる（特許出願中）。

#### Sub1-2 LCCNによる基礎化学原料製造プロセスの評価

カーボンニュートラルを達成するためには、廃棄物焼却時に発生するCO<sub>2</sub>を回収してプラスチック製造の炭素源として利用することが不可欠になると考えらえる。現状のように小規模分散した焼却施設では、CO<sub>2</sub>の効率的な活用は困難であり、結果的に廃プラスチックの焼却に由来のするCO<sub>2</sub>も回収されないまま大気に放出されてしまい、化学産業のCNの実現を困難にする。化学工場の近隣で焼却した場合、CO<sub>2</sub>をその場で原料に転換することが容易になる。CCUは一見すると非効率に見えるが、蒸気供給によって燃料用の水素（アンモニア）を効率的に節約できるため、総合効率ではプラスチックのケミカルリサイクルに遜色ない効率でプラスチック製造を行える可能性がある。本研究においては、分別回収された廃プラスチックのケミカルリサイクル（ガス化に相当するプロセス）と、廃棄物の焼却・蒸気供給とCCUによる基礎化学品（メタノール）製造に関わるエネルギー効率の比較を、物質、エネルギー収支分析に基づいて行い、LCCNの効率性について評価した。また、LCCNの経済性に関する基礎的な分析を実施した。

#### Sub1-3 プラスチック生産への木材利用に関わる分析

プラスチックの原料をバイオマスに切り替えれば、焼却によってCO<sub>2</sub>が排出されても、カーボンニュートラルが達成できると考える向きもある。しかし、バイオマスがカーボンニュートラルであるかどうかは、バイオマスの炭素収支を時間軸に沿って分析を行い、確認する必要がある。国内で豊富なバイオマス資源としては、森林バイオマスが挙げられ、化学産業も原料としての利用を検討している。しかし、木の成長には数十年の時間を要するため、2050年までといった残り少ない期間では、石油からプラスチックを生産する以上にCO<sub>2</sub>排出量が一時的に増加する可能性がある。更に、国内の人工林は高齢化が進んでいるため、伐採による森林からの炭素蓄積量の減少が、化学産業のカーボンバジエット（化学品の焼却分を含む現在の排出量が2050年のゼロエミッションに向けてリニアに減少すると仮定した場合の、現在から2050年までの累積排出量）を上回る可能性もある。本研究では、木の伐採とその後の植林・成長のサイクルと、木材を利用した化学品製造プロセスにおける炭素フローの評価から、総合的なCO<sub>2</sub>排出量の評価を経年的にシミュレーションし、バイオマス利用時に注意すべき点を考察した。

#### Sub1-4 社会実装に向けた活動

各サブテーマの分析により、低品位廃棄物を化学コンビナート等に集積して焼却し蒸気供給を行う仕組み（LCCN Ready）は、大きなCO<sub>2</sub>排出削減効果が得られると同時に、経済的にも処理費用の削減に繋がるメリットが存在することが明らかとなった。更に焼却により発生するCO<sub>2</sub>を回収してプラスチックを製造するLCCNの仕組みは、ケミカルリサイクルに匹敵するエネルギー効率が得られることが示された。このように、LCCNは非常に有効なシステムになることが期待されるが、そのポテンシャルが社会で認識されていない。一般的に焼却炉は建設後少なくとも25～30年程度は稼働することになるため、今から建設される焼却施設は2050年にも稼働している可能性が高い。LCCNの仕組みを早期に導入する働きかけが必要である。

国内には9地域の化学コンビナートが存在するが、そのうち3地域においてLCCN Readyの実現に向けた検討を、蒸気のオフティカーとなる化学メーカー等の製造事業者と、廃棄物処理に関わる産廃事業者や自治体との協力体制の下で開始することが出来た。また、インド共和国及び、インドネシア共和国において、環境省及び経済産業省の事業支援も受けて、実現可能性調査を実施することが出来た。また、LCCNの社会への普及を加速するため、一般社団法人LCCN推進研究会を2024年12月に設立し、産官学連携による活動を開始した。図2は、普及を図るために作成したLCCNの概念図である。従来のリサイクルを補完する形で、リサイクル困難な廃棄物を有効活用し、カーボンニュートラルを実現する仕組みを表現している。



図2 LCCN（ライフサイクルカーボンニュートラル）の概念図

## (2) サブテーマ2：自治体の廃棄物処理システムの転換方策の検討

### Sub2-1 自治体処理システムの転換イメージの概念整理

従来の自治体の廃棄物処理は、各自治体における焼却中心の処理であり、少子高齢化に伴う担い手の不足や建設・運営コストの増大が課題となっている。また、地域の成長戦略として地域脱炭素が求められていることから、新システムの転換方策の検討には、社会的コストの削減及びシステム全体におけるCO<sub>2</sub>排出量の削減が重要なポイントとして挙げられる。

自治体における廃棄物処理システムの対象とする廃棄物は、地域から排出される一般廃棄物中の可燃ごみとし、可燃ごみの分別の対象としては、材料・ケミカルリサイクル好適プラスチックと厨芥類（食品廃棄物）とした。近年、輸入肥料の高騰等を背景に「みどりの食料システム戦略」（農林水産省）等においても化学肥料の低減策が推進されており、国内肥料生産及び地域内利用の需要が高まっている。そこで新システムでは、地域資源循環の仕組みとして、農業利用のポテンシャルが高い地域においては、メタン発酵による食品廃棄物由来の堆肥、液肥等による農業利用、エネルギー回収を検討し、地域内で循環利用ができないものは中継施設による中間処理により蒸気供給プラントへ循環型燃料として供給する仕組みとした。

以上を踏まえ、自治体の新しい廃棄物処理システムの全体像について検討した。従来システムから新システムへの転換に当たっては、収集運搬から最終処分までの一連の処理システムにおいて大幅な変革が必要となることになり、自治体の新たな処理システムへの転換イメージの概念整理、システムにおける影響要素を整理した。

### Sub2-2 食品廃棄物の地域循環可能性及びソーティングプラント（選別・中継施設）の機能設定

現在、自治体の厨芥類は焼却処理が中心であり、自治体における焼却処理において必ずしも分別が必要ではないこと、追加で厨芥類の収集が必要になること、農業部門の需要との連携が必要となること等の理由があり、分別収集・資源化は一部の市町村を除き、全国的には進んでいない。一方で、厨芥類は資源化可能であり、含水率が高い厨芥類を輸送・焼却することは効率的ではないことを鑑みると、地域において資源利用することが望ましい。ただし、食品廃棄物由来の堆肥、液肥は、塩分含有量が高い等の特性を有し、利用への課題がある。また、需要との連携については、農業における需要ポテンシャルを推計することで、需要ポテンシャルが高い地域では、厨芥類の資源化を実施できる可能性がある。以上のことから、本研究では、食品廃棄物由来の堆肥、液肥の特性や農業利用の考え方、需要ポテンシャルを推計する方法を検討した。

新システムでは従来焼却処理を行っていた可燃ごみ（主に有機系ごみ）を循環型燃料として供給する選別・中継施設を焼却施設に代えて整備・運営する必要がある。選別・中継施設の機能の検討のため、可燃ごみの中継施設、選別プロセスについて国内事例、海外事例の情報収集を行った。

国内事例は、選別・中継施設の基本的な機能となる中継機能について、国内中継施設の施設規模や形式、輸送距離を整理し、可燃ごみの選別プロセスについては、機械選別及びメタン発酵施設を焼却施設と併設している市町村を対象にヒアリングを実施し情報収集を実施した。海外事例については、欧州の国（都市）について文献およびWebから情報収集を行い、その中で、可燃ごみを他の廃棄物と混合した状態で回収し、選

別施設において機械選別している事例について詳細な情報を調査した。

### Sub2-3 分別回収・選別・処理のモデル化、フロー、自治体処理システムの転換シナリオの検討

Sub2-1、Sub2-2の結果を踏まえ、また、サブテーマ3における輸送方法の検討と連携して、選別・中継機能としては、中継施設では選別機能は持たないことにし、中継施設においては、可燃ごみを循環燃料としてバーナー化を実施する機能としモデル化を実施した。LCCNへ参画し焼却施設を廃止するシナリオとして、焼却施設を廃止するタイミングで中継施設へ転換することを条件とした。

既存焼却施設の廃止の構想に参画する場合は、厨芥を分別せず、可燃ごみを循環燃料として、中継施設を経由させ集約型の焼却施設へ搬出するケース、厨芥を分別し、厨芥を除いた可燃ごみを循環燃料として中継施設を経由させ、集約型の焼却施設へ搬出するケースを設定した。分別を実施した場合には、厨芥は地域においてメタン化を実施することとした。

製品プラスチックの分別収集については、現在、容器包装プラスチックの分別回収を実施している市町村は一括回収のスキームにより、追加の分別収集コストが大きく発生しないと考えられることから、製品プラスチックの分別を実施すると設定した。

厨芥の分別収集については、一定の農地面積が存在する市町村は、厨芥分別、資源化後の堆肥等の需要ポテンシャルが見込まれることから、可燃ごみ中の厨芥割合が高く、農地面積が大きい市町村が分別回収を実施することとした。農地面積は農林水産関係市町村別統計の耕地面積（田耕地+畑耕地）とし、厨芥進展1

（農地面積1,000ha以上かつ厨芥割合15%以上の市町村が分別）、厨芥進展2（農地面積100ha以上かつ厨芥割合15%以上の市町村が分別）、全市町村（条件無しで全市町村が分別）の3シナリオを設定した。

### Sub2-4 モデルによる全国規模での経済性のポテンシャルの検討及び自治体処理システム転換に係るロードマップの作成、課題の整理

LCCN構想の実現により、日本全体での焼却施設の建設・運営費用が大幅に削減されることが予測される。現状の各市町村において廃棄物焼却施設の建設・運営を実施するスキーム及びLCCNへ参画する場合のコスト評価を実施した。廃棄物の広域的な処理や輸送について、広域化の制度や、制度に対する現状の廃棄物行政における適応性、課題を検討し、それらを踏まえ、LCCN構想に対する市町村のニーズや受容性等をヒアリングにより調査し、実現可能性を検討した。

コスト評価の実施に際しては、①現状の焼却施設の稼働年数等により、全国の焼却施設別の構想への参画有無の設定、②全国市町村別の製品プラスチック、厨芥分別の設定、③将来的な循環燃料のごみ量、組成、低位発熱量の試算を実施した上で、現状のスキーム、LCCNへ参画するスキームの比較評価を実施した。

#### ①構想への参画有無の設定方法

以下の3ステップで実施した。

Step1：環境省が毎年度実施している一般廃棄物処理実態調査（以下、「実態調査」という。）における焼却施設票（令和3年度実績）を基に、各焼却施設は竣工後35年又は基幹改良実施の場合は、改良後10年で廃止とし廃止年度を設定した。全国の焼却施設の更新計画等の情報を収集し、各焼却施設の廃止時期の整理を行い、将来的に基幹改良実施予定の場合は反映させ、廃止施設がLCCN構想へ参画することとした。

Step2：各焼却施設からの最終処分場の廃止年度が取得可能なものは取得し、処分場廃止年度がStep1の廃止年度よりも直近のものは、焼却施設の廃止年度を処分場廃止年度と設定した。

Step3：上記Stepで設定した廃止年度で、焼却施設を廃止し、次期の焼却施設を建設する代替として、中継施設を建設すると設定し、2040年時点、2050年時点の参画施設を設定した。

#### ②製品プラスチック、厨芥分別の設定

実態調査においては焼却施設別のごみ質（ごみ焼却施設の「ごみ組成分析結果」および「三成分」）が存在するが、ごみ分別等の廃棄物施策や将来人口等は市町村別の情報となる。そこで、分別の設定及び将来循環燃料量等の試算のため、市町村および組合等のごみ焼却施設と市町村を接続し、全国の市町村別のごみ組成、低位発熱量を算定した。

対象市町村は、実態調査において直接焼却量が存在する自治体とし、東京23区は実態調査では区ごとの状況が存在しないため、東京都（東京都環境局、令和3年度実績）及び東京二十三区清掃一部事務組合（東京二十三区清掃一部事務組合、令和3年度）が公表している資料より、焼却施設別・区別の搬入量の情報を得て、直接焼却量有りとして対象とした。対象焼却施設は実態調査の焼却施設票における施設の内、ごみ焼却施設であり令和3年度の処理量の数値が存在する施設を対象とした。なお、焼却施設票のごみ質の数値には、ばらつきが存在することから、各施設の組成及び水分より、各組成における外れ値を異常値とし、組成データが無回答及び異常値と判断された施設については、有効データによる加重平均値を採用した。

市町村と施設の接続については、次に示す方法で施設の組成等情報と市町村を接続した。

Step1：市町村直営の施設は、施設を市町村に接続した。

Step2：組合等の施設は、実態調査結果の「（ごみ処理に係る）市町村分担金」の市町村別の比率を用いて接続した。東京23区は東京都（東京都環境局、令和3年度実績）及び東京二十三区清掃一部事務組合（東京

二十三区清掃一部事務組合、令和3年度）が公表している資料より、焼却施設別・区別の搬入量を用いて接続した。

Step3：上記で接続できない市町村は、市町村のHP等より、ごみ処理状況を確認し、処理先の市町村および組合等施設を確認し接続した。

Step4：民間施設（第3セクター含む）を利用していると判明した市町村、確認できる情報がなかった市町村は接続不可となり、加重平均によるごみ質を適用した。

上記手順により接続し、市町村別のごみ組成、水分率を算定したうえで、「平成15年2月13日 資源エネルギー庁省エネルギー・新エネルギー部長通知」において示される以下式を用いて低位発熱量を算定した。

$$H_l = (16000x_{pa} + 17300x_{ga} + 17900x_{wo} + 18100x_{cl} + 36000x_{pl}) \times (1-w) - 2500w$$

$x_{pa}$	: 紙類の重量比	$w$	: 全体の水分比率
$x_{ga}$	: 廉介類の重量比	$x_{cl}$	: 布類の重量比
$x_{wo}$	: 草木類（木・竹・わら類）の重量比		
$x_{pl}$	: プラスチック類（ビニール、合成樹脂、ゴム・皮革類）の重量比		

なお、該当市町村に複数施設がある場合は、施設の各組成別の重量、水分量を合算し加重平均した組成比、水分比を該当市町村の組成情報とした。

分別収集については、市町村別に以下の式で製品プラスチック、厨芥分別回収量を算定した。

可燃ごみ中の製品プラスチック比率は、環境省循環利用量調査（環境省、令和6年）における直近3か年の数値の平均とした。なお、既に製品プラスチックの分別を実施している市町村も存在するがここでは考慮せず、現状厨芥を分別している市町村は今回の分別設定からは除外することとした。

可燃ごみから抜ける製品プラ量=生活系可燃ごみの搬入量×製品プラ比率2.1%×分別協力率40%

可燃ごみから抜ける厨芥量=乾ベース厨芥量×分別協力率80%+水分量

### ③将来的な循環燃料の量、組成、低位発熱量の試算

その上で、市町村別のごみ組成、低位発熱量に対して、市町村別のごみ組成及び水分率は上記の算定結果と同様とし、ごみ量について将来の人口予測（国立環境研究所、2021）より、市町村別に2020年比の2040年の人口割合を乗じることで、2040年、2050年時点における市町村別のごみ量等を算定し、日本全体での焼却施設もしくは中継施設へ仕向けられる循環燃料の低位発熱量を算定した。

以上を踏まえ、厨芥進展2シナリオにおいて、2050年までに日本全国で現状の廃棄物処理体制を維持した場合（各焼却施設が廃止年度で新設）に発生する建設費、運営費とLCCN構想に参加する場合の建設費、運営費を試算し、LCCN構想が実現した場合のコスト削減効果の評価を実施した。なお、構想へ参加するに際し、厨芥類の分別収集を実施する場合は、中継施設の必要規模が小さくなる一方で、メタン化施設の建設、運営費用が発生することも含めコスト試算し、食品廃棄物地域循環として、各地域でのメタン発酵を実施することになる処理量、エネルギー回収量等の効果算定を実施した。

また、社会実装に向けた従来システムからの転換条件について、現状の法制度、通知や自治体における廃棄物処理の委託処理の動向の情報収集、整理を行い、その上で広域的な処理も伴うLCCN構想への参画に向けた移行の考察を実施し、自治体処理システム転換に係るロードマップの作成、課題の整理及び対応策の検討を実施した。特に可燃ごみの委託処理については、プラスチック資源化におけるスキームを参考とし、自治体関係者への意見徴収も踏まえ、対応策の検討を行った。

### (3) サブテーマ3：石化コンビナート向け循環型燃料の長距離・高効率輸送の検討

サブテーマ3では、LCCNを活用した熱利用スキームの全国展開を想定し、約半数の自治体が移行するとして、輸送設計・費用試算・削減効果を一体的に評価した。その結果、輸送コスト増加は年700億円規模に留まり、正味では1,500億円/年程度、CO<sub>2</sub>は600万t-CO<sub>2</sub>/目年程度の削減効果が得られることが確認された。本報告書は、広域連携型のCN戦略における、熱利用インフラの構築可能性を定量的に裏付けるものである。

#### Sub3-1 研究手順の概要

本検討では、サブテーマ1、2と連携して、国内外の広域輸送等の事例収集及びシミュレーション条件の決定を行った。LCCNな廃棄物処理システムにおいて、広域利用の仕組みの実現を可能にする、安全、効率的な輸送方法を提示する。研究手順の概要を年度別に示す（図3）。

令和4年度には、国内外の広域輸送実例とWaste to Steamの事例を現地調査及び公表情報から収集した。原単位、中継輸送の荷姿とモードについて実態データを取得し、傾向を整理した。その上で、国内で実施可能な効率輸送の方法を分類し、提案した。

令和5年度には、環境省の施設整備情報をベースに施設整備計画の情報を収集し、輸送評価のための情報を

整備した。全国で6カ所の石化コンビナートに廃棄物を集約する輸送設計を行った。サブテーマ1、2の検討成果と連携して、輸送設計の妥当性を高めた。

令和6年度には、前2年度の成果をもとに石化コンビナートの運用モデルを設定し、輸送シナリオを設計し、輸送費用等を試算と実装までの課題整理を明示して、最終成果物にまとめた。本サブテーマでの研究構造を下図に示す。



図3 サブテーマ3の研究構造

図注：本研究におけるサブテーマ3の全体構成図。広域輸送の評価を中心に、国内外の実例調査、輸送シナリオ設計、コスト・環境評価、制度的課題の抽出までを一連の流れとして統合的に位置づけている。

### Sub3-2 国内外の中継輸送及び Waste to Steam 事例観察

国内外の中継輸送及び Waste to Steam (WtS) に関する事例を視察し、情報整理した上で傾向を把握した。その上で、国内における効率輸送方法の提案を行った。

中継輸送は、香川県三豊市の発酵乾燥後の廃棄物の圧縮梱包、川崎市王善寺と梶ヶ谷貨物ターミナル駅間の中継輸送や鉄道輸送、横浜市保土ヶ谷中継施設での焼却炉施設のピットを活用した積替え輸送、熊本市の災害廃棄物、株式会社グーン（サブテーマ3メンバー）による廃プラの圧縮梱包と海上輸送や木くずのトラック輸送、三光株式会社の圧縮梱包、大栄環境株式会社の災害廃棄物の海上コンテナ輸送、ヘルシンボリ市 NSR 社の廃棄物鉄道輸送、ロンドン Cory 社の水上輸送等。これら、輸送に関する視察は、株式会社エコマスター、新明和工業株式会社、株式会社グーン、株式会社オガワエコノス、新明和工業株式会社、三光株式会社、大栄環境株式会社、カナデビア株式会社（旧、日立造船株式会社）、福岡大学名、安養大学のコーディネートや事例提供の協力による。

Waste to Steam 事例は、ドイツ Pre Zero 社、KAVG 社、スウェーデン NSR 社、Vasyd 社、スイス Renergia 社を視察した。また、焼却発電であるが大規模な焼却炉事例としてイギリス Cory 社、ドバイの WMMC 社を視察した。施設視察や情報は、カナデビア株式会社、JFE エンジニアリング株式会社、三菱重工環境・化学エンジニアリング株式会社の協力による。

### Sub3-3 荷姿別の LCA の算定

効率輸送時の荷姿となる、コンテナ積載及びペール化による圧縮梱包について、株式会社グーン社での設備稼働条件実データを利用して、製造時の CO<sub>2</sub> 排出量を算定した。

### Sub3-4 焼却施設集約シナリオの作成

以下の将来像を達成しうるシナリオを作成した。

2030 年には、1~2 カ所の LCCN Ready が生まれており、2040 年頃には、6~8 カ所程度に LCCN Ready が広がっており、全国の半分くらいのごみが、コンビナートで処理されている。

LCCN への廃棄物集約シナリオを下図に示す。現在存在する 1000 程度の一廃焼却施設が、時期施設整備計画に基づき更新される場合と、未計画で耐用年数を迎えるとともに廃止していく場合とが混在しつつ、2040 年、2050 年を迎えることとした。廃止されたプラントは中継施設となり、コンビナート内に建設される新たな LCCN(大規模 WtS 施設)への集約に貢献する。廃棄物集約先となる熱需要エリアを全国に 8 カ所想定し、集約量 7 千 t/d かつ都市部では 100km 圏内までを上限として近隣から順に集約することとし、概ね半数量が集約されるものとした。廃止されるが、LCCN に集約されない施設エリアの廃棄物は、別途地方の大規模な焼却施設へ集約される。ただし本シナリオ上ではその設定までは、行わなかった。

データベースは、環境省統計で公開される焼却施設データのエクセルファイルに、循環型社会形成推進交付金の内示データから各地方公共団体の施設整備情報を把握し、2040 年、2050 年時点の施設状況の情報を追加した。その上で、LCCN シナリオにおける廃棄物輸送の広域化に伴う焼却施設件数と処理量を集計した。

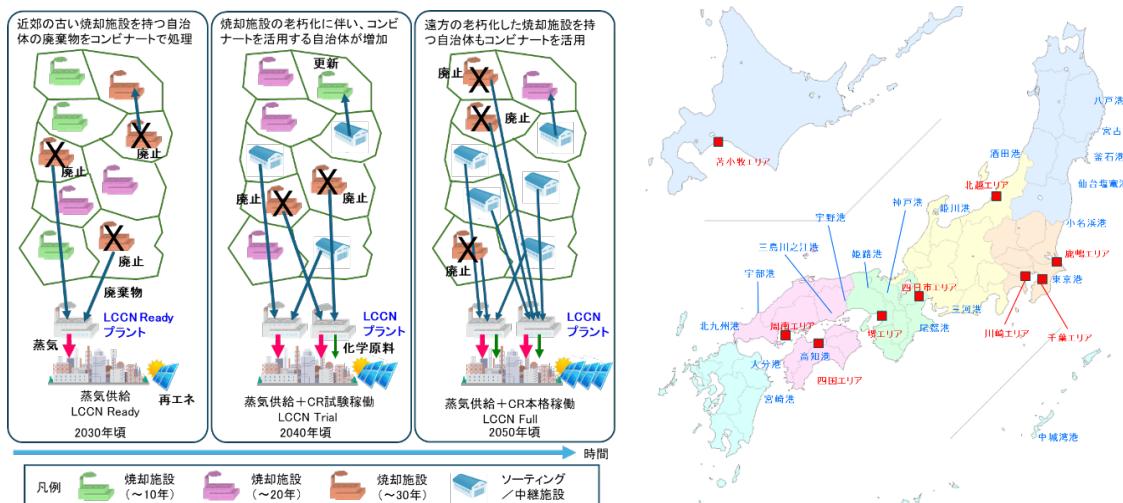


図4 廃棄物集約シナリオと需要エリアマップ (LCCN シナリオ)

出典：左図の集約シナリオはサブテーマ1研究代表藤井作成、日本地図は購入画像を本研究チームで加工

データベースで集計した LCCN 拠点への集約量を表1に示す。

表1 LCCN 拠点（熱需要地）への集約量

LCCN 拠点名	2040年		2050年	
	t/日	%	t/日	%
苫小牧	1,129	3%	1,103	3%
北越	880	2%	1,029	3%
鹿島	707	2%	752	2%
千葉	7,719	22%	6,500	18%
川崎	5,821	16%	6,397	18%
四日市	5,763	16%	7,270	20%
堺	7,889	22%	7,226	20%
四国	3,289	9%	3,330	9%
周南	2,701	8%	2,682	7%
合計	35,898	100%	36,288	100%

上記で作成したデータベースを基に、廃棄物集約先での集約量 7 千 t/d かつ都市部では 100km 圏内までを上限として近隣から順に集約することとし、概ね、廃棄物の半数量が集約されるよう調整した。中継輸送の出発地と目的地の定義を図5に示す。OD の設定は GIS ベースの最短ルート計算に基づいて行った。

ルートには陸路と海路があり、海路用に利用港湾及び航路計画を日本通運株式会社による専門知見をもとに選定した。以上、施設配置、集約先、集約ルートを得て、これらを GIS 上でマップ化し、集約イメージを視覚化した。



図5 中継輸送の出発地と目的地の定義

注釈：出発地は今の焼却炉であり、将来は中継地として利用される想定とした。陸路のみ、陸路と海路の2パターン設定し、最短距離となるルートを特定した。その上で、集約上現実的ではないルートについては、第2位、第3位を任意で選定した。

### Sub3-5 輸送コストに関する検討

ここまで計算で、ルートと量が決定したことから、輸送コストを算出した。

## ①コスト

陸送には輸送モード別運賃も把握可能な NIPPON EXPRESS 「ワンストップナビ」ツールを活用し、広域輸送技術を適用した場合の料金想定で輸送コストを設定した。

海上輸送に関しては、本サブテーマメンバーである日本通運社が担当し、具体的な操業計画を作成した上で積算した。海路は実運用ベースから 10 年後のレートを踏まえて、トラック運賃は標準運賃の 2 割増しとした。

### 陸送コスト計算ツール

ワンストップナビ [https://www.nittsu.co.jp/logistics\\_solution/it/onestop-navi/](https://www.nittsu.co.jp/logistics_solution/it/onestop-navi/)

## ②燃費

陸送の燃費は経産省・国交省・一般社団法人日本自動車工業会が規定する燃費情報から採用し、海上輸送での船舶の燃費は実績値から計算し、以下とした。航海時だけでなく停泊時もエンジンを稼働させていることから、稼働時の燃費も計算に含めた。

### (4) サブテーマ4：有機系資源の循環経済の将来シナリオに関する検討

将来の有機系資源（プラスチック、紙、木材等）の生産、利用、ストック、排出、循環利用に関わるシナリオを提示し、提案するシステムによるカーボンニュートラル実現への貢献量を定量評価するという目標に基づき、有機系素材のフロー・ストック分析の基盤となるデータベースを整備し、将来の有機系資源の生産、利用、ストック、排出、循環シナリオを評価した。これらの分析に先立ち、国内の有機系素材の現状の利用傾向の調査及びカーボンニュートラルの実現に向けたシナリオを整理した。また、これらに加え、産業施設への大規模熱供給に関するケーススタディを実施し、その有効性を検討した。

#### Sub4-1 有機系素材の利用・廃棄傾向の調査と将来シナリオの検討

将来のシナリオについて検討するため各素材（プラスチック、紙、木材等）の利用・廃棄に関わるデータの整理を行うとともに、各素材に関わる既存の定量目標を整理した。定量目標については、地球温暖化対策計画、循環型社会形成推進基本計画、プラスチック資源循環戦略、製紙業界一地球温暖化対策長期ビジョン 2050、森林・林業基本計画、バイオマス活用推進基本計画、建築物における木材の利用の促進に関する基本方針、経団連自主行動計画等から抽出した。これらをもとに、将来の各素材の利用、循環経済に関わるシナリオの選択肢を設定した。

#### Sub4-2 有機系素材のストック・フロー分析

日本のストック・フローに関する研究は個別の素材や対象物ごとに行われているものの、社会に蓄積されるストック量を網羅的に把握することは困難であり、簡易的な係数を用いて暫定的に推計する研究は少なくない。特に、単位あたり（建築物の床面積や製品個数など）に必要な資材投入量を乗じて都市構造物や耐久消費財などのストック量を推計する場合、推計結果はこれら資材投入原単位に大きく依存する。有機系素材（プラスチック、紙、木材等）は様々な形で都市構造物や耐久消費財に投入・蓄積されており、これらストック量の詳細な把握は将来の廃棄・循環利用のシナリオに影響するため、原単位の精緻化による推計精度の向上が有益である。そこで、建築物の資材投入量の多くを占めていると考えられる①構造材、②内装材、③家財の3種類について、原単位の精緻化を行った。具体的には、統計調査およびウェブ調査により、地域別・使途別・構造別・年代別の構造材、9種の内装材、28品目の家財に対し、原単位の整備を行なった。さらに、内装材・家財原単位について、既存研究で示された構造材原単位と比較し、内装材、家財がどの程度蓄積されているかを明らかにした。以上により、ストック・フロー分析の基盤となるデータベースの構築を行った。

#### Sub4-3 2050年に向けた有機系廃棄物からのエネルギー回収ポテンシャルの算定

将来人口を駆動力として将来の一般廃棄物量を推計するとともに、1) で抽出した既存の定量目標等に基づく30程度の対策メニュー（対策シナリオ）の組合せによる、将来の一般廃棄物フローを推計するモデルを作成した。また、推計した一般廃棄物フローをもとに、その中に含まれる有機系廃棄物（プラスチック、紙、木材等）からのエネルギー回収ポテンシャル及び廃棄物処理に関わるGHG排出量を推計した。各対策メニュー（対策シナリオ）の影響は、廃棄物量などの活動量と、単位活動量あたりの排出係数で反映した。なお、作成したモデルの妥当性の検証のため、環境省「廃棄物・資源循環分野における2050年温室効果ガス排出実質ゼロに向けた中長期シナリオ検討業務報告書」（2022）に示されたいくつかのシナリオにおけるGHG排出量の計算結果の再現を試みた。

#### Sub4-4 産業施設への大規模熱供給に関するケーススタディ

一般廃棄物の広域収集を行い、石油化学コンビナートに熱供給することを想定し、その効果を定量的に評価するケーススタディを行った。堺・泉北臨海工業地帯に着目し、周辺6自治体もしくは26自治体の可燃ごみを収集し、各自治体の焼却施設を積み替え保管場所に転換して、広域収集を行うこととした。焼却ごみ量について(a)現状維持(BAU)シナリオと(b)ごみ減少シナリオ、将来の廃棄物処理について(1)施設建て替えケース(建替ケース)、(2)施設統合熱供給ケース(統合ケース)を設定し、各シナリオにおけるCO<sub>2</sub>排出量および事業コストを定量的に比較検証した。CO<sub>2</sub>排出量については、施設の建設・補修、輸送、電力消費、焼却による排出と、エネルギー回収による削減を対象とし、事業コストについては、初期費用(建設、その他)、保管費用、輸送費用、焼却費用、エネルギー回収による売上を対象とした。

#### 1. 4. 2. 研究結果及び考察

##### (1) サブテーマ1：カーボンニュートラルなプラスチック循環経済を支える技術提案と評価

###### Sub1-1 大規模化学工場等に蒸気を大規模・安定供給するシステム

従来の廃棄物焼却発電から、化学工場への蒸気供給に切り替えることによるCO<sub>2</sub>排出削減効果と、エネルギー費用の変化について概算した。効果は廃棄物の焼却規模と低発熱量に比例する。焼却炉の建設費は規模の効果により大型化するほど処理規模当たりの費用が安くなり（過去の実績からは建設費は規模の0.77乗に比例）、運転に関わる人件費も効率化されると思われるが、蒸気供給の熱効率については、100t/日といった一定規模以上になれば大きな差は生じないと考えられるため、ここでは単純な比例計算とする。焼却施設と化学工場との距離によって、蒸気配管からのエネルギーロスが異なるが、建設位置が不明な段階では、送気ロスを無視する。費用は、建設費や運転費用については今後FSの中で詳細化する必要があるため、ここではエネルギー消費に関わる原価の部分を抽出して評価する。電力も熱と同様に原価で評価するため、発電原価及び送電費用のみを考慮した。

図6に示すように、2つのケースについて評価を行った。図中では変化する部分のみ抜き出して示しており、化学工場の蒸気供給が全て焼却炉で置き換わるという意味ではない。Case 1は低圧蒸気を化学工場に送る場合である。化学工場側でコジェネレーションになっていると、外部から蒸気供給を受けた分だけ、ボイラの出力を低減させることになり、結果的に発電量が低下することになる。BAU（現状）シナリオで焼却発電によって得られていた発電量も含めて、不足する電力は系統（ガス火力を想定）から購入する想定とした。また、廃棄物の焼却量はシナリオ間で等量であるため、焼却に伴うCO<sub>2</sub>排出は相殺される。Case 2では、コジェネレーションに利用可能な高圧蒸気を送るか、もしくは低圧蒸気を供給してもコンビナート側の発電に影響がない場合に相当する。焼却炉で追い炊きの燃料が必要になるが、計算上はそれと等量の燃料が化学工場側で削減されることになり、燃料が無駄に消費される訳ではない。計算の諸条件を図7に示す。

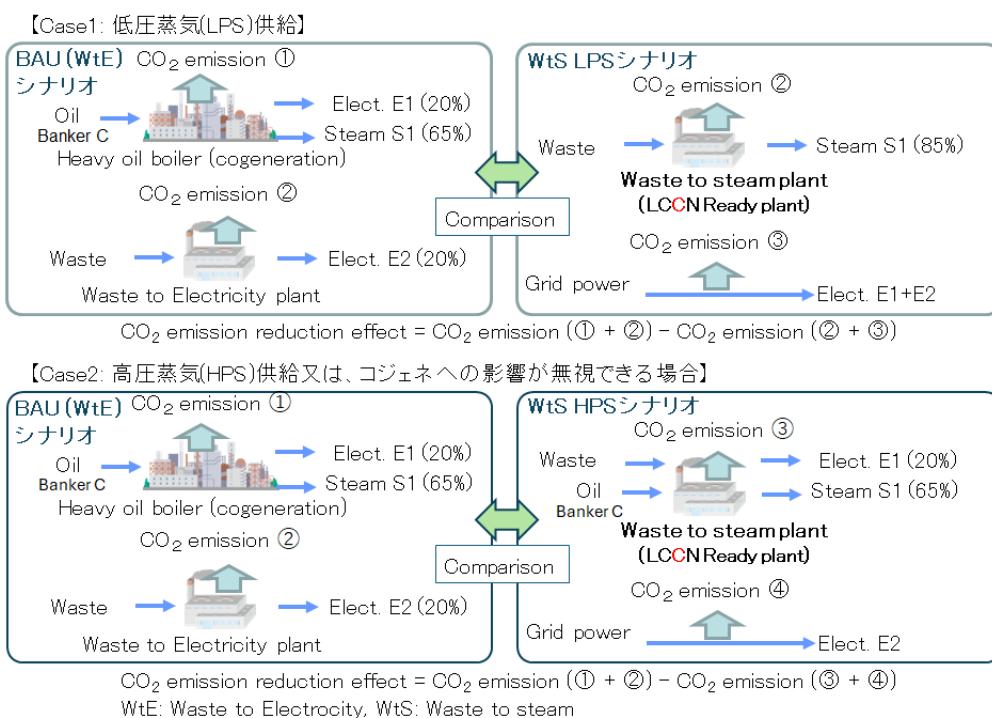


図6 焚却発電を基準とした蒸気供給のCO<sub>2</sub>排出量とエネルギー費用のシステム比較

(シナリオ間の差が焼却発電からのCO<sub>2</sub>排出削減効果あるいはエネルギー費用削減効果)

計算に使用した諸条件
蒸気供給によって低下する発電量を補うための系統電力(ガス火力)(CO <sub>2</sub> 排出係数:0.33t-CO <sub>2</sub> /MWh <sup>1)</sup> 、発電原価:10,700円/MWh <sup>2)</sup> +送電単価:3,000円/MWh)
C重油の低位発熱量:39.7GJ/KL <sup>3)</sup> 、価格:80,000円/kL
焼却炉稼働日数:330日/年
1) <a href="https://asuene.com/media/356/">https://asuene.com/media/356/</a>
2) <a href="https://www.kepco.co.jp/siteinfo/faq/energy/9098895_10614.html">https://www.kepco.co.jp/siteinfo/faq/energy/9098895_10614.html</a>
3) <a href="https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/pdf/stte_028.pdf">https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/pdf/stte_028.pdf</a>

図7 蒸気供給によるCO<sub>2</sub>排出削減量の算定条件

評価結果を表2に示す。焼却対象廃棄物の低位発熱量が10GJ/tで、仮に8000t/日の規模で化学コンビナートに集約することができれば（多くの化学コンビナートでは蒸気を全量受け入れ可能な十分な需要が存在する）、廃棄物1トン当たり（低位発熱量が10GJ/tの場合）では、追加的なCO<sub>2</sub>排出削減効果はCase1と2で0.56t-CO<sub>2</sub>/tとなる。エネルギー利用効率が高い高压蒸気供給と、低压蒸気供給との間でCO<sub>2</sub>削減量にほとんど差がないのは、補完的に購入する電力として高効率なガス火力を仮定しているためである。エネルギー費用については、Case 1で8,800円/t、Case 2で12,600円/tの削減となり、費用面では高压蒸気供給にメリットが出る。つまり、独立過熱のために消費した燃料以上のエネルギー節約効果が得られることになる。ただし、Case 2の焼却施設の建設費は、独立過熱器の設置やボイラの耐圧性能、耐腐食性能の向上のために同規模でもCase 1よりも高額となるが、コンビナート側でボイラが不要になるメリットも大きい。また、上述のエネルギー費用削減効果は社会全体としての費用削減効果であり、廃棄物の供給側、蒸気の需要側、外部の電力会社等の各ステークホルダーの利益等を踏まえたときに、この削減分をどのように配分するかが課題となる。なお、関連成果は査読付国際学術誌に掲載された（成果10）。

表2 廃棄物焼却発電から蒸気供給（LCCN Ready）への切り替えによる追加的効果

各セルの上段：エネルギー消費削減効果、中段：CO<sub>2</sub>排出削減効果、下段：エネルギー費用(原価)削減効果  
(いずれも焼却発電を行う場合からの削減効果の増分値)

#### 【Case1: 低圧蒸気(LPS)供給】

規模(t/日)	単位	LHV (GJ/t)		
		8	10	12
2000	TJ/年	2,840	3,550	4,260
	t-CO <sub>2</sub> /年	297,000	371,000	445,000
4000	百万円/年	4,650	5,810	6,980
	TJ/年	5,680	7,100	8,520
8000	t-CO <sub>2</sub> /年	594,000	742,000	890,000
	百万円/年	9,300	11,600	14,000
	TJ/年	11,400	14,200	17,000
	t-CO <sub>2</sub> /年	1,190,000	1,480,000	1,780,000
	百万円/年	18,600	23,200	27,900

#### 【Case2: 高圧蒸気(HPS)供給又は、コジェネへの影響が無視できる場合】

規模(t/日)	単位	LHV (GJ/t)		
		8	10	12
2000	TJ/年	3,520	4,400	5,280
	t-CO <sub>2</sub> /年	301,000	376,000	451,000
4000	百万円/年	6,630	8,290	9,940
	TJ/年	7,040	8,800	10,600
8000	t-CO <sub>2</sub> /年	602,000	752,000	902,000
	百万円/年	13,300	16,600	19,900
	TJ/年	14,100	17,600	21,100
	t-CO <sub>2</sub> /年	1,200,000	1,500,000	1,800,000
	百万円/年	26,500	33,200	39,800

蒸気の安定供給方法についても提案した。独立過熱器では配管の腐食の少ない燃料で追い炊きする。コジェネ用発電機の蒸気条件に合わせて昇温する機能に加えて、エネルギーの需給状況に合わせて独立過熱量を調整することにより、廃棄物発熱量の変動に合わせて蒸気供給量を安定化させることや、再エネ電力の利用可能量に合わせて発電量を調整することなど、不安定なエネルギーを利用する上で有効な手段を提供する。上述のように、独立過熱器で消費した燃料分以上にエネルギーを節約できる点も特長である。

#### Sub1-2 LCCNによる基礎化学原料製造プロセスの評価

廃棄物から、化学的に安定な物質であるCO<sub>2</sub>を経由するCCUによるプラスチック製造は、エネルギー効率の観点で不利であるとする意見が多い。しかし「ヘスの法則」によると、化学反応の反応熱は反応前後の状態にのみ依存して決まり、途中の反応経路には依存しない。従って、反応プロセスにおけるロスを最小化することができれば、CCUによるプラスチック製造も効率的なものに出来ることが期待される。従来の廃棄物焼却発電では、発電効率が低いためにロスが大きかったが、LCCNでは廃棄物の焼却熱が化学工場側のボイラと

遙色ない効率で利用されるため、実質的なロスが存在しない。 $\text{CO}_2$ の分離回収やメタノール合成に一定のエネルギーを要するが、合成時の発熱も化学プロセス等で有効利用することが可能である。今回の評価には含めていないが、CCUで必須となるグリーン水素を輸入に頼らずに再エネ電力で製造した場合、負極側で水素が発生するのと同時に、正極では酸素が発生する。この酸素で廃棄物を燃焼すれば $\text{CO}_2$ 濃度の濃い燃焼排ガスが得られるため、 $\text{CO}_2$ の分離回収に関わるエネルギーと設備投資を最小化することができる。

LCCNの効率性を評価するため、LCCNによるメタノール製造と（LCCNシナリオ）、分別回収されたプラスチックのケミカルリサイクル（CRシナリオ）との比較を行った。CRシナリオでは、合成ガスを生成する熱分解・水蒸気改質の方法を想定し、メタノールを合成するプロセスとした。一般的にケミカルリサイクルにおける、廃プラスチックから基礎化学品あるいは化学品へ転換する際の炭素収率の低さが大きな課題となるが（化学工学会, 2025）、ここでは炭素収率が高いプロセスを想定した。2050年に向けて化学産業は原料、燃料の双方がカーボンニュートラル化する前提とし、各シナリオにおいて投入する廃棄物と、産出される蒸気（発電+熱供給に利用）及びメタノールの量を揃えた上で、必要な水素量を比較した。しかし、CRシナリオでは廃プラスチックが投入されるが、LCCNでは低品位な混合廃棄物を利用するため、完全に入力条件を揃えることはできない。そこで、投入される廃棄物の低位発熱量を27TJ/日に揃えた（プラスチック投入量：760t/日、混合廃棄物投入量：3050t/日）。CRシナリオ及びLCCNシナリオのエネルギー及び物質収支の比較を図8に示す。同等の産出を得るために、LCCNシナリオでは水素を20t/日多く消費するが、LCCNではバイオマス由来の廃棄物の焼却に伴う $\text{CO}_2$ も一部メタノールに転換されるため、カーボンネガティブになる。結果的に $\text{CO}_2$ の発生量はCRシナリオよりも570t/日少くなることが示された。理想的な条件では、1molの $\text{CO}_2$ （44g）から1molのメタノールを製造するためには、3molの水素（6g）を消費するため、重量比では水素の7.3倍の $\text{CO}_2$ が利用される計算だが、その点も踏まえて評価を行うと、LCCNはケミカルリサイクルと同等か、若干それを上回るエネルギー効率で化学プロセスへのエネルギーと基礎化学原料であるメタノールの供給が行えることになる。混合廃棄物やリサイクル残渣を活用するLCCNにおいて、このように高い効率で資源利用が行えることは、今後のカーボンニュートラル及び循環経済の達成に向けた選択肢を検討する上で、非常に重要な知見となる。

究極的なポテンシャルとして、仮に一般廃棄物、産業廃棄物を併せて将来3000万t/年（現在の一般廃棄物の焼却量に相当）の廃棄物をLCCNで処理した場合、LCCN Readyではコンビナート等に低品位廃棄物を集約するために広域輸送費が掛かることを踏まえても、トータルでは2500億円/年の節約になる一方、CCUのための $\text{CO}_2$ 回収に500億円/年、グリーン水素の購入（20円/ $\text{Nm}^3$ の場合）に7000億円/年が必要である。一方現在の価値でもCCUの製品となるエチレン・プロピレンが7000億円/年（580万t/年）生産され、水素の調達費と同程度の価値をもつ産出が見込まれる。CCUのための施設の建設・運転経費を今後精査する必要があるが、LCCN Readyへの移行で節約できる費用（2500億円/年）で貢えれば、現在と同等の処理費用で、廃棄物セクターとしては300万t- $\text{CO}_2$ /年のカーボンネガティブ（化学産業側からは、該当するプラスチック生産についてカーボンニュートラル）を達成できる可能性がある。

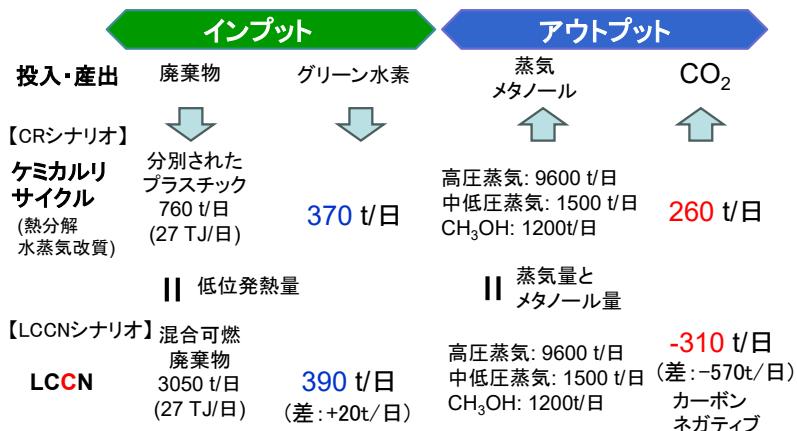


図8 プラスチックのケミカルリサイクル（ガス化）と低品混合廃棄物のLCCNのエネルギー効率の比較

### Sub1-3 プラスチック生産への木材利用に関する分析

国内のバイオマス資源としてポテンシャルが大きな、木材を利用して化学品を製造するケースを想定して、森林の炭素蓄積の変化も踏まえた上で、大気への $\text{CO}_2$ 排出量の正味の変化をシミュレートした。ここではバイオマスの炭素をニュートラルとして一律に扱うのではなく、吸収と排出をそれぞれカウントする。バイオマスの利用には準備期間が必要なことから、仮に2030年から木の利用を開始するものとした。国内人工林が高齢化していることを踏まえて、2030年時点での樹齢70年の木を、その年に対象地域の1/40の面積で伐採し始めるものとし、伐採後は植林・育林を行い、収穫量を概ね最大化できる40年周期で伐採する。これを順

次1/40の面積で繰り返して、40年で一巡するケースを想定した。伐採した木の半分は木材として70年間建築物等にストックされるものとし、残りの半分をポリエチレンの生産に用いることとした。建築ストックは70年後に解体されて燃料として利用され、CCUS付きのボイラ等で化石燃料消費を代替するものとし、CO<sub>2</sub>排出が相殺される前提とした。プラスチック生産に関わるインベントリは、文献 (Kikuchi et al., 2017) を参考した。建築廃木材の利用に伴うCO<sub>2</sub>排出が相殺されるという、バイオマス利用には有利な仮定になっているが、それでも図9の灰色の線（トータルのCO<sub>2</sub>排出）が示すように、石油からプラスチックを製造し続けるよりも、2070年過ぎ頃までいったん大気へのCO<sub>2</sub>排出がむしろ増加する。つまり、2050年のカーボンニュートラル達成に対しては、木材の利用では却って事態を悪化させることになる。その後はトータルでのCO<sub>2</sub>排出が減少に転じて、その時点では森林の吸収と、CO<sub>2</sub>排出が均衡する定常状態（＝カーボンニュートラルな状態）が達成される。しかし一方で、高齢の炭素蓄積量の大きな木が、本来であれば更に成長して蓄積量を増していたのに対し、若い炭素蓄積量の少ない木に入れ替わることで、森林の炭素蓄積量が大きく減少する（最終的に200t-CO<sub>2</sub>/ha相当を失う）。国内の人工林面積はおよそ1000万haであるが、化学産業が今後放出してよいCO<sub>2</sub>排出量は、仮に現在のCO<sub>2</sub>排出量が2050年に向けてリニアに減少すると想定すると、15億t-CO<sub>2</sub>程度になる。化石資源の消費もすぐには削減されないことを踏まえると、森林バイオマスの活用（木の炭素ストックの減少）は、例えば5億t-CO<sub>2</sub>程度に抑制しなければならないこととなる。これに対応する木材の利用は、250万ha程度であり、伐採後に植林・育林を繰り返すのであっても、過度な木材の利用は控えるか、排出されるCO<sub>2</sub>を貯留するといった対策が求められる。グリーン水素を投入してバイオマス炭素の転化率を高めることや、早生樹への切り替えも、高齢樹木の伐採量を抑制する上では有効である。

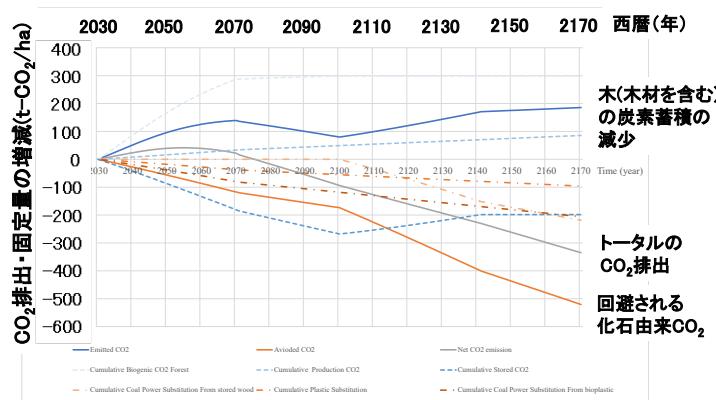


図9 ポリエチレンの原料を石油から木へ変更した場合のCO<sub>2</sub>排出量の変化

#### Sub1-4 社会実装に向けた活動

CO<sub>2</sub>からのCCUによる化学原料の製造は、グリーン水素の価格が高く供給体制も確立されていない現在の状況で、すぐにフルスケールで実施することは難しい。当初はリサイクル困難な低品位廃棄物を化学コンビナート等に集積し、製造プロセスに蒸気供給を行うLCCN Readyから開始し、水素の供給体制が整うにつれてCCUの実施量を増やすことを想定している。国内では、9地域のコンビナートのうち3地域で、本研究課題のメンバーの一部が企画する形で事業化に向けた検討を開始しており、仮に実現すれば初期段階の施設規模でも30万t-CO<sub>2</sub>/年程度の削減効果が得られる可能性がある。県の協力で開催した勉強会や個別訪問を通じて自治体の関心も高まっており、焼却対象となる一般廃棄物のコンビナートへの集約が進めば、大きな削減効果が得られる可能性がある。更に、他の地域のコンビナートへの水平展開も図っている。他のアジアでは、プラスチックの材料リサイクルや厨芥類の分別処理は進んでいるが、残渣となる低品位混合廃棄物の埋立が多大な環境、衛生、安全面等での影響を与えており、近年、中国や韓国で焼却炉の建設が大きく進んだが、高額な焼却施設の導入はアジア全体では限定的であり、建設された焼却施設が適切に運用されないために、稼働が継続しないケースも散見される。一部の可燃廃棄物の固形燃料化は進んでいるが、かなりの割合で残渣が発生することや、燃料を利用するセメント工場等での排ガス処理が不十分なため、環境負荷の面でも課題が多い。化学コンビナートに焼却施設を建設するLCCN Readyでは、焼却炉側に発電施設が不要なこと、工場地帯に設置するためプラントを覆う建屋が必要なことなどで建設費の抑制が可能であり、発電に比べてエネルギー販売収益が大きくなることと、彼らにとっても重要課題である産業からのCO<sub>2</sub>排出の効率的な削減に繋がることなどから、経済面でもメリットが大きい。更に、石油、化学メーカー等が焼却炉を自身のエネルギー供給施設として運転することで、適切に管理することが期待される。インドでの事業化に向けた協議や、インドネシアでの実現可能性調査が進んでおり、現地関係者の関心や意欲も高いため、大きなポテンシャルがあると考えられる。今後更に他のアジア地域にも展開を図る予定である。

特別区長会調査研究機構による、特別区におけるCO<sub>2</sub>の地産地消に向けて～清掃工場のCO<sub>2</sub>分離・活用と23区の役割～（東京二十三区清掃一部事務組合提案）の研究リーダーを研究代表者の藤井実が務め、本研究の

成果も活用する形で取りまとめを実施した。23区の清掃工場にはCO<sub>2</sub>を回収できる十分な土地もないことから、化学産業等と連携して廃棄物を活用することの重要性も示された。

また、LCCNの周知や事業化を加速するため、一般社団法人LCCN推進研究会（代表理事：藤井実）を2024年12月に設立して活動を開始したが、これまでに自治体、プラントメーカー、化学メーカー、産廃事業者、小売り事業者、調査機関等が参加している。

## (2) サブテーマ2：自治体の廃棄物処理システムの転換方策の検討

### Sub2-1 自治体処理システムの転換イメージの概念整理

廃棄物の特性及び地域の特性に合わせた地域内循環を行い、利用ができないものは蒸気供給プラントへ循環燃料として供給する新しい廃棄物処理システムにおいて、自治体の一般廃棄物処理事業の視点では、可燃ごみの中間処理を行う焼却施設の代替として中継機能を有する選別・中継施設を整備することとした。

分別・選別された厨芥類は堆肥化又はメタン化が実施される。その他可燃ごみは各市町村の選別・中継施設から、石化コンビナートに隣接する焼却施設に搬出され、エネルギー回収（蒸気供給）が行われる。この選別・中継施設運用による処理システムの流れを図10で示す。

このシステムが実現すると、各市町村が焼却施設を整備・運営を行う現在の処理システムと比較して、市町村におけるごみ処理コスト低減や日本全体でのエネルギー回収量（CO<sub>2</sub>排出削減効果）の増加が見込まれる。また、従来のシステムと比較し、選別・中継施設から大規模焼却施設への輸送が必要となるため、効率的な輸送が望ましく、単純な中継機能だけでなく、機械選別を伴うメタン発酵、生物乾燥等を行うことにより輸送効率が向上、また含水率の低下により、さらなる焼却施設におけるエネルギー回収率が向上すると考えられる。

従来の処理システムでは、原則として各市町村において収集、中間処理、最終処分までの一連の処理が行われている。図14で示すとおり、新しいシステムに転換すると、各市町村における焼却施設は廃止されることで施設の建設費用、運営費用等のコストは削減され、また、各市町村において課題となっている最終処分場のひっ迫も回避できると考えられる。しかし、熱回収施設としての売電収入や地域への熱供給による住民還元、さらには災害時のエネルギー拠点としての役割や災害廃棄物への対応といった社会的サービスは失うことになる。一方で、新しい処理システムにおいては、社会的コストの削減と脱炭素の観点から、有機性廃棄物は地域内で資源化し、それ以外の焼却せざるを得ない廃棄物は蒸気供給プラントにおいて焼却処理が行われることから、焼却される廃棄物（循環燃料）は複数自治体を経由してプラントまで運ばれることとなる。市町村をa市、b市、c市の3分類とすると以下の役割分担となる。

a市：積出し港を持たない自治体。農業利用の需要があれば食品廃棄物地域循環を実施。

b市：積出し港を持つ自治体。b市の港にヤードを設置し、c市に船で輸送。

c市：臨海コンビナートが存在する自治体であり、b市からの船便の循環型燃料を下す港にヤードを設置。

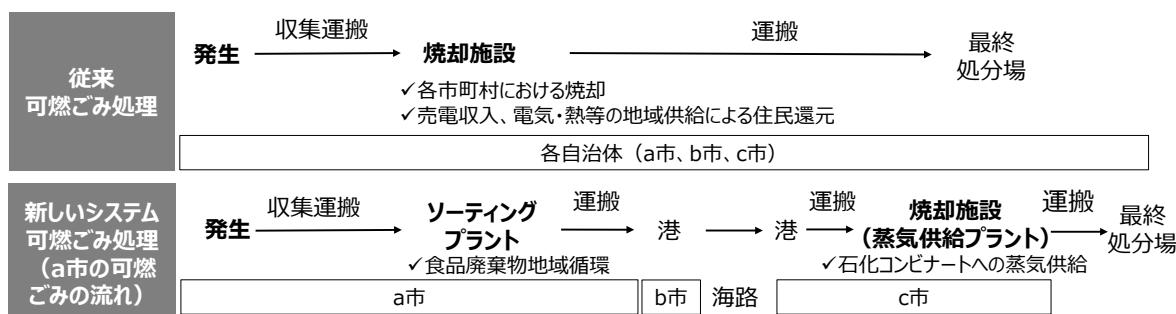


図10 自治体における新しい処理システムの転換イメージ

### Sub2-2 食品廃棄物の地域循環可能性及びソーティングプラント（選別・中継施設）の機能設定

#### ① 食品廃棄物の地域循環可能性、農業利用の考え方

食品廃棄物由来の堆肥及び液肥の農業利用の特性（需要ポテンシャル推計に必要と考えられる要素）は表3のとおりである。

表3 堆肥及び液肥の特性

	堆肥	液肥
施用対象	田、畑、樹園地、牧草地等	田、畑、樹園地、牧草地、施設園芸（固形分を高度に分離）等

施用目的	土壤改良又は肥料	肥料
肥効率	30%程度（連用により高まる）	化学肥料と同等程度
窒素・リン酸・カリ含有量	化学肥料と比較してはるかに少ない	
運搬車両	トラック等	バキューム車
利用方法	手撒き又は堆肥散布機で散布	専用の散布車で撒く 冠水状態の水田では灌漑水とともに流し込む
留意点	<ul style="list-style-type: none"> <li>・流通には肥料登録が必要</li> <li>・食品廃棄物由来の堆肥、バイオ液肥は塩分含有量が高い可能性がある</li> </ul>	

農業利用の考え方としては、堆肥や液肥の成分は、栽培しようとする作物の栄養要求水準と完全には一致しないので、足りない成分は、化学肥料（単肥：特定成分が入っている肥料）で補うことになる。

需要ポテンシャルは、耕地面積、作物（作目）、施肥基準によって決まる。施肥基準とは10a当たりに施用する窒素の量（リン酸やカリに対しても計算すれば、より精度が高まる）であり、作目によって要求する肥料成分の量（施肥基準）が異なる。その窒素量を含有する堆肥または液肥の量がポテンシャルとなる。ある市町村の需要ポテンシャルは作目別の農地面積×施用量となり、施用量は、次式となる。

堆肥の施用量 (t/10a) =

施肥基準 (kg/10a) × 代替率 (%) / 100 × 100 / 堆肥の窒素成分含有率 (%) × 100 / 肥効率 (%) / 1000

ただし、施肥基準は土壌の性質等により地帯毎に異なる基準が存在（農林水産省）しているが、作目別の農地面積の統計値は都道府県レベルであることから市町村別の需要ポテンシャルの標準化は困難であると判明した。そこで、一定の農地面積を有する市町村がポテンシャルを有すると仮定し、厨芥の分別収集を実施することとした。

## ②ソーティングプラント（選別・中継施設）の機能設定

日本国内の中継施設は、国内50施設が稼働しており、50施設のうち37施設がおおむね中継量20～300t/日、輸送距離10～50kmと幅広い運用がなされ、コンテナに圧縮し搬出するコンパクタ・コンテナ方式が主流となっている（原・井上, 2022）。また、既存の焼却施設を活用したピットアンドクレーン方式も出てきており、焼却施設をピットアンドクレーン方式による選別・中継施設へリプレイスすることが可能と考えられた。

可燃ごみを対象とした機械選別及びメタン発酵については、自治体ヒアリングにより、機械選別、メタン発酵のみを自治体で実施する場合、現在は脱水し排水処理を行い、脱水後残渣については焼却処理を実施している発酵残渣への対応が必要となること、また、残渣は脱水後も含水率80%程度であり外部搬出は困難との結果が得られた。発酵残渣の農業利用についても、プラスチックの破片等が混入しており、実現可能性は高くなかったという状況であった。

海外事例については、混合廃棄物から厨芥類を機械選別している可能性のある事例として、ラハティ（フィンランド）及びローマ（イタリア）を抽出し、詳細を調査した。ラハティにある選別施設においては、破碎機を通過したごみはドラムスクリーンに運ばれバイオ廃棄物が除去される。その後残渣物はバリスティック選別機、磁選機、風力選別機を経て金属が除去され、最後に光学選別機により繊維及びプラスチック等のリサイクルできるものを選別していた（Salpakierto Oy, 2017）。なお、選別したバイオ廃棄物は隣接するバイオガス・堆肥化施設に運ばれ、肥料、土壌として有効活用されている状況であった（PHJ, 2018）。ローマにあるMBT施設においては、トロンメルによりバイオ廃棄物と他のごみに選別し、バイオ廃棄物はコンポスト化、その他のごみは風力選別後、磁選機、アルミニウム選別機によって鉄とアルミニウムを除去後、光学選別機によりプラスチックとPETを分離、残渣はフラフRDF化され再利用されていた。

上記のように厨芥類等を機械選別している事例がある一方で、欧州においては2023年末までに食品廃棄物は分別排出が義務付けられていることもあり（the European Parliament and of the Council, 2008）、今回調査した範囲では、ほとんどの地域において厨芥類は排出時に分別されていた。なお、ノルウェーやスウェーデンにおいては食品廃棄物を色付きのビニール袋に入れることにより、他の廃棄物と一緒に収集運搬し、選別施設において光学選別している事例も確認した（プラスチック容器包装リサイクル推進協議会, 2022, AVFALL SVERIGE, 2020）。

文献調査からは、欧州では機械選別後に肥料、土壌利用しているとの記載がある一方で実態としての利用状況まで把握することができず、日本においての適用可能性が低いと考えられることから、可燃ごみの機械選別、メタン発酵の組合せによる農業利用は実施せず、家庭での分別収集後の可燃ごみの中継を実施する機能とした。

## Sub2-3 分別回収・選別・処理のモデル化、フロー、自治体処理システムの転換シナリオの検討

各市町村での焼却施設に代えて、選別機能は有しない中継施設を整備し、中継施設においては循環燃料のベール化を実施することとし、LCCNへ参画し焼却施設を廃止するシナリオとしては、焼却施設を廃止するタイミングで中継施設へ転換することとした（図11）。製品プラスチックの分別を適用した上で、可燃ごみを循環燃料として、中継施設を経由させ集約型の焼却施設へ搬出するケース、農業利用のポテンシャルが高い場合、厨芥を分別し、厨芥を除いた可燃ごみを循環燃料として中継施設を経由させ、集約型の焼却施設へ搬出するケースを設定した。分別を実施した場合には、厨芥は地域においてメタン化を実施することとした。

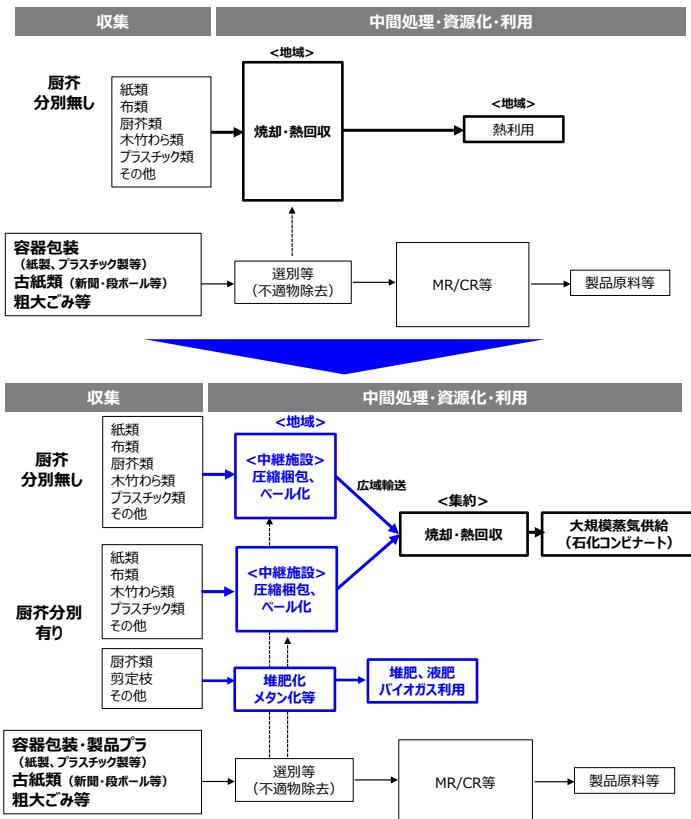


図11 現状の可燃ごみ処理フロー及び転換後のモデル

## Sub2-4 モデルによる全国規模での経済性のポテンシャルの検討及び自治体処理システム転換に係るロードマップの作成、課題の整理

構想への参画有無は設定に基づき焼却施設別のデータベースを作成し、日本全体における914施設の参画年度は表4の結果となった。

分別の設定として、現状の焼却施設のごみ組成情報より、対象焼却施設は実態調査の焼却施設票における1,060施設の内、ごみ焼却施設であり令和3年度の処理量の数値が存在する910施設及び今後整備が計画されている4施設の合計914施設を対象として、市町村のごみ組成情報を作成した。

なお、焼却施設票のごみ質の数値には、ばらつきが存在することから、図12に示す各施設の組成及び水分より、各組成における外れ値を異常値とし、組成データが無回答及び異常値と判断された施設については、表5に示す有効データ（該当735施設）による加重平均値を採用した。

表4 焼却施設の構想参画年

参画対象年	対象焼却施設数
2021～2030	392
2031～2040	323
2041～2050	33

表5 有効735施設の加重平均によるごみ組成、水分率

組成項目	単位：%
紙・布類	49.5
ビニール、合成樹脂、ゴム、皮革類	25.1
木、竹、わら類	9.6
ちゅう芥類	10.5
不燃物類	2.3
その他	3.1
水分	43.8

農地面積は農林水産関係市町村別統計の耕地面積（田耕地+畑耕地）とし、厨芥の分別を実施していない市町村について、厨芥進展1（農地面積1,000ha以上かつ厨芥割合15%以上）、厨芥進展2（農地面積100ha以上かつ厨芥割合15%以上）、厨芥全市町村実施の該当有無は図13の結果である。

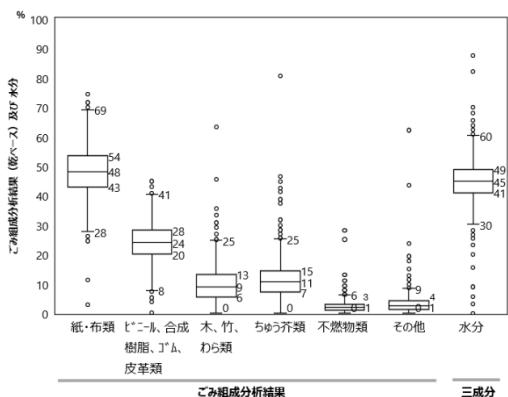


図12 実態調査における焼却施設の回答値

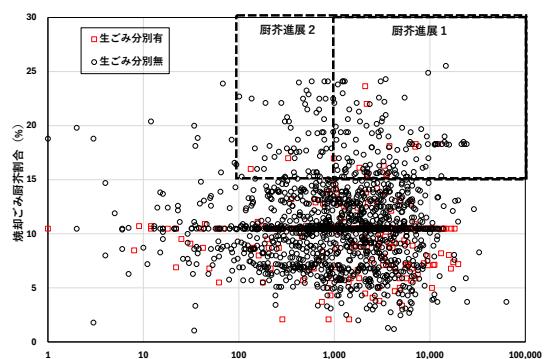


図13 市町村別の農地面積及び厨芥割合

分別を実施すると設定した市町村の可燃ごみから抜ける量（分別回収される量）について、製品プラスチックの分別対象は1,157市町村であり、11万7千tが資源化へ仕向けられることになり、厨芥分別のシナリオ別の市町村数及びメタン発酵処理量（分別される厨芥量）は表6のとおりであった。なお、厨芥量の水分率は環境省循環利用量調査（環境省、令和6年）より75%としている。

分別変化無しの焼却ごみ量を実態調査における焼却処理量とし、製品プラスチックの分別を適用したうえで、厨芥分別のシナリオを適用し、市町村別に焼却ごみ量、低位発熱量を算定した。全市町村合計の結果は表7に示すとおりである。

表6 焼却ごみより分別される量

厨芥分別シナリオ	対象市町村数	厨芥分別量 (t)
厨芥進展1	118	639,588
厨芥進展2	184	1,083,044
厨芥全市町村	1,514	5,784,580

表7 焼却ごみ量、低位発熱量の推計結果（全市町村合計）

	分別変化無し	製品プラ分別	厨芥進展1	厨芥進展2	厨芥全市町村
焼却ごみ量 (千t/年)	32,140	32,023	31,383	30,940	26,238
低位発熱量kJ/kg加重平均	10,379	10,285	10,445	10,559	12,013
総カロリー TJ/年	333,591	329,362	327,795	326,709	315,190

人口変化に伴う将来推計としては、市町村別のごみ組成等は上記の算定結果と同様とし、ごみ量について将来の人口予測（国立環境研究所、2021）より、市町村別に2020年比の2040年の人口割合を乗じることで、

2040年時点における市町村別のごみ量を算定した。全市町村合計の焼却ごみ量、低位発熱量等の結果は表8に示すとおりである。

表8 2040年における焼却ごみ量、低位発熱量の推計結果（全市町村合計）

	分別変化無し	製品プラ分別	厨芥進展1	厨芥進展2	厨芥全市町村
焼却ごみ量 (千t/年)	28,227	28,124	27,583	27,172	23,023
低位発熱量kJ/kg加重平均	10,408	10,314	10,469	10,590	12,057
総カロリー TJ/年	293,773	290,078	288,753	287,745	277,580

上記、焼却施設別の構想参画年、廃棄物発生量、組成情報に基づき、廃棄物処理施設の建設、運営に関して2050年までに累計で発生する費用を、製品プラスチックは分別した上で厨芥を分別する厨芥進展2シナリオ（農地面積100ha以上かつ厨芥割合15%以上）で算定した結果は表9のとおりである。焼却施設は公表されている市町村の実績情報、中継施設は事業者ヒアリングで得られた情報、メタン化施設は文献情報（柚山・生村・小原・小林・中村、2006）よりメタン発酵は全量液肥利用できるケースで作成した。

表9 2050年までに累計で発生する費用の評価

2050年までに累積で発生する費用	現状の体制 (兆円)	厨芥進展2 (兆円)
焼却施設建設費	8.52	0
焼却施設運営費	9.16	3.16
参画に伴う中継施設建設費	-	0.52
参画に伴う中継施設運営費	-	2.66

参画に伴うメタン化施設建設費	-	0.11
参画に伴うメタン化施設運営費	-	0.01
合計	17.68	6.46

LCCN構想を実現することで、日本全体では市町村の建設費は2050年までに7.89兆円（ $7.89 = (8.52 - (0.52 + 0.11))$ ）の削減、運営費は2050年までに3.33兆円（ $3.33 = (9.16 - (3.16 + 2.66 + 0.01))$ ）（年平均1,110億円）の削減が可能となる評価結果となった。

また、厨芥進展2シナリオの場合の2050年までの日本全体のLCCN参画施設数や各対象年時点の日本全体の可燃ごみに占めるLCCN参画による蒸気供給プラントにおける処理率等を示したロードマップは表10のとおりである。メタン発生量は（谷川・古市・石井・西上, 2008）を参考に80Nm<sup>3</sup>/tとした。

表10 2050年までのLCCN構想参画施設数等のロードマップ

対象年までの累積	2030年	2040年	2050年
LCCN参画施設数(中継施設ヘリプレイス)	392	715	748
各市町村等における焼却施設数	522	199	166
新設メタン化施設数	56	108	119
対象年の評価			
日本全体発生量に占める蒸気供給プラント処理率(%)	31.6	73.5	83.7
日本全体発生量に占めるメタン化施設処理率(%)	1.32	2.59	2.91
メタン化によるメタン発生量(万Nm <sup>3</sup> /年)	3,161	5,768	5,923

従来システムからの転換条件について、市町村に共通すると想定される変更点やシステム展開の障壁となり得る課題及び検討事項を整理した結果は以下のとおりである。

- ・ 焼却施設廃止後の地域の環境学習拠点の位置づけ
- ・ 市町村における災害時の廃棄物処理に関する蒸気供給プラントとの協定
- ・ 港が所在する市町村の生活環境に支障が生じない輸送計画の検討と事前協議
- ・ 可燃ごみ委託処理の実施
- ・ 蒸気供給プラントにおいて適正処理がなされていることの市町村の確認方法
- ・ 蒸気供給プラントにおける事故や災害による処理の停止・停滯が起きた場合の対応の協議と契約・協定事項への反映、そのうえで適切な対応がなされない場合の別の委託先の検討

対応策としては、環境学習拠点については市町村単位で整備するのではなく、都道府県に1施設設置するなど、都道府県もしくは国が主体的に整備を進めることで、各地域における学習機会は確保されるものと考える。災害時や輸送計画等は事前協議が必要になるが、実施を進めることは可能であると考えられ、蒸気供給プラントの事故等については、LCCN構想の進展により蒸気供給プラントは増えていくこと、一定の焼却施設は各地域に残ることにより対応が可能であると考える。

可燃ごみの委託処理については、例えば、市町村における委託処理等に関連するものとしては、以下の通知が存在する。

- ・ 平成20年6月19日付け廃対課長通知（6.19通知）「廃棄物の処理及び清掃に関する法律第6条第1項の規定に基づくごみ処理基本計画の策定に当たっての指針について」
- ・ 平成26年10月8日付け廃リ部長通知（10.8通知）「一般廃棄物処理計画を踏まえた廃棄物の処理及び清掃に関する法律の適正な運用の徹底について（通知）」

一方で、明文化されたLCCN構想への参画を阻害する制度等は確認ができず、恒常的に委託処理を実施している市町村を複数確認することができておらず、また、自治体関係者へのヒアリングにおいてもLCCN構想の制度的な障害は出てこない結果であった。

適正処理の確認方法については、「プラスチックに係る資源循環の促進等に関する法律に係る再商品化計画の認定申請の手引き（1.1版）」（環境省）において、再商品化実施状況把握のため、市町村が現地確認を1年に1回以上実施することや、帳簿、書類等を検査すること等が示されており、LCCN構想へ参画する市町村における、蒸気供給プラントの管理・監督方法の参考情報となると考えられた。従って、管理・監督方法を明確化して市町村へ示していくことが、LCCN構想実現への必要事項であると考える。

今後の社会実装に向けたロードマップとしては、表10に示したように焼却施設の更新をするタイミングで参画していくことで、2050年までには8割程度の廃棄物がLCCN構想へ参画可能となることが示唆された。従って、蒸気供給プラントの確保及び参画へ向けた市町村の手続き等の整備が今後必要であると考える。また、地域における食品廃棄物資源循環としてのメタン発酵は、小規模プラントが市販されていることもあり、農業における需要が存在する場合には、地域における焼却施設の廃止に合わせ、検討を進めていくことが望ま

しいと考えられた。

### (3) プテーマ3：石化コンビナート向け循環型燃料の長距離・高効率輸送の検討

#### Sub3-1 国内外の事例収集・整理

##### ① 国外のWtS（焼却熱の蒸気利用）事例

海外の産業集積地には、域内に廃棄物焼却炉を設置し、焼却熱を用いて複数の工場へ蒸気供給しているスキームネットワークが導入されている例が複数ある。この仕組みを動かすための廃棄物収集は広域的に行われている。海外のWtS (Waste to Steam) 事例としては、韓国、欧州各国において、域内に設置された廃棄物焼却炉から発生する蒸気を、化学工場、製油所、製紙工場、地域暖房システムなどに供給するスキームが複数存在する。これらの施設の多くは、日量1,000トン前後の処理能力を持ち、蒸気供給量としては100～200トン/時程度に達している。

特に、ベルギー・アントワープでは6つの化学工場に対し年間3,000トン超の処理能力をもつ施設が140t/hの蒸気を供給しており、ドイツ・ベルンブルクでは1,500t/日の焼却施設が225t/hの蒸気を製造しソーダ工場に供給している。スイス・ヴァインフェルデンでは2022年から、製紙工場等へ約210t/hの蒸気供給を開始した事例も確認されている。これらは、いずれも産業用熱需要を満たす広域的な循環モデルの一端を担っており、LCCNの将来的な展開に資する事例として参考となる。

大規模焼却施設としては、上海の老港焼却施設9,000 t/日、ドバイのワルサン廃棄物処理施設5,666 t/日、シンガポールの第6焼却施設3,600 t/日等があるが、これらはいずれも焼却熱で発電しており産業への蒸気供給ではない。大規模な焼却事業には、このスケールを安定的に支える広域輸送や効率輸送が存在する。下表には管理運営する民間事業者を記載しており、株主が地方公共団体で、公民連携の形態をとる場合や、廃棄物処理会社と化学工場との共同出資で民間事業として実施している場合、等がある。

##### ② 一般廃棄物の広域輸送

ストレッチフィルム包装の一般廃棄物輸送技術の例では、密閉性、貯留保管に優れており実用化されている（図14）。一般廃棄物を圧縮梱包したペール化燃料の長期保管安定性についての論文が出ている。欧州や韓国では、埋立を回避し、焼却施設ができるまで貯留保管するために、1995年頃から都市ごみに適用され始めた<sup>1</sup>。これらは熱利用を行うまでの一時保管の目的でも利用されている。

過去の複数研究により、ペール形状での保管においてガス発生は抑制されていることが確認されている。



圧縮梱包廃棄物前の廃棄物  
ごみ貯留ピット

実験対象の圧縮梱包廃棄物



図14 ペール内部の安定性に関するメカニズム

図注：生活ごみを圧縮梱包したペール内部における、微生物活動とガス発生の抑制メカニズムの概念図。圧縮直後はCO<sub>2</sub>が発生するが、酸性化によって嫌気性微生物の活動が停止し、長期的にはメタン等の生成が抑制される。

出典：写真は韓国安養大学李南薰教授及びエコウィル社による提供

<sup>1</sup> Ismail OzbayIsmail, OzbayErtan Durmusoglu, Energy content of municipal solid waste bales, Waste Manag Res. 2013 Jul;31(7):674-83. doi: 10.1177/0734242X13485866.

現地視察を通して収集した事例を基に、廃棄物性状と貯留性をベースに荷姿をマッピングし、傾向を可視化した（図 15）。



図 15 廃棄物性状と荷姿事例のマップ

図注：現地調査をもとに作成した廃棄物の含水率・安定性と荷姿（輸送形態）の関係マップ。乾燥ごみは簡易な梱包で対応可能である一方、高含水ごみには密閉型輸送が求められる。

廃棄物が乾燥状態であれば、臭気は緩和され、水分の漏えいはないため、ブロックとして固めてワイヤー等で固定するレベルの荷姿で扱うことが出来る。近年の欧州では、リサイクル可能な資源をドライウェイストとして回収し、その後分別する仕組みが浸透しており、これはアジアエリアでも広く見られ、ウェットウェイストと区別される。

水分を含有する廃棄物の場合でも、密閉性の高いコンテナを使った輸送や、ポリエチレンフィルムで梱包して輸送される。コンテナの場合、輸送後は即日で焼却炉の貯留ピットに投入されるが、圧縮梱包されたペール品は長期的に保管される場合に有用である。少量しか発生しない廃棄物を貯留しておき、大量輸送することが出来れば、効率的な輸送が可能となる。

### Sub3-2 国内に適用する輸送方法の提案

次に、一般廃棄物の輸送モードについて条件と特徴の整理結果を示す（図 16）。トラック輸送は少量輸送も対応可能であることや初期投資が少なくて済む。船舶や鉄道はインフラ整備が必要であり初期投資の規模が大きいが大規模輸送が可能であり、海外では広域輸送時の輸送モードとして汎用されている。モード事例は、東京二十三区清掃一部事務組合で行われている不燃物水運やドイツの圧縮積載型の鉄道コンテナ、災害時の廃棄物鉄道輸送の例など複数ある。これらの情報から、国内でLCCNを展開する際の荷姿を設定した。日本に適用しうる一般廃棄物の広域輸送適用技術を下図に示す。集約にあたっては、船舶を利用することにより、一般道路を回避して搬入することが可能となる。地域住民への配慮に繋がることから、船舶利用の活用も採用することとした。



図 16 日本に適用しうる一般廃棄物の広域輸送適用技術

図注：日本国内における一般廃棄物の広域輸送に適用可能な梱包・輸送技術の例を示す。ストレッチフィルムやコンテナ輸送を活用することで、中継輸送・船舶利用が可能となる構成。

出典：サブテーマ3 研究チームにより作成

### Sub3-3 焼却施設数の変化と集約量

LCCN シナリオにおける廃棄物輸送の広域化に伴う焼却施設件数と処理量の集計結果を表 11 に示す。廃棄物の量は、サブテーマ 2 で算出した将来推計結果を利用した。2050 年は、2040 年より 1 割ほど減少している。沖縄を除外して集計することとし、2021 年には 903 件であるものが、2040 年には、274 件、2050 年には 181 件まで減少する結果となった。LCCN を推進し、そのまま施設更新する選択をしなければ、加速的に減少する。

表 11 LCCN シナリオにおける廃棄物輸送の広域化に伴う焼却施設件数と処理量の集計結果

焼却施設の処理能力(t/日)	施設件数と割合			日処理量(t/d)と割合		
	2021	2040	2050	2021	2040	2050
100トン以下( $0 \leq x \leq 100$ )	●	391	106	67	10,004	2,809
300トン以下( $100 < x \leq 300$ )	●	374	106	67	36,671	11,362
600トン以下( $300 < x \leq 600$ )	●	119	41	25	32,265	10,551
1,000トン以下( $600 < x \leq 1000$ )	●	15	3	3	6,736	1,202
2,000トン以下( $1000 < x \leq 2000$ )	●	4	0	0	2,961	0
Other Option ( $x > 1,500 t/d$ )	●	0	10	11	0	22,460
LCCN join (2000t/d < x)	▲	0	8	8	0	36,870
合計		903	274	181	98,014	28,525
				年間	33,194,724	29,912,108
						27,385,409

● Other option (継続利用)

● Other option (集約する新施設)

▲ LCCN Join

### Sub3-4 焼却施設からの集約先の設定とマップ化

集約マップを以下に示す。このように、将来の施設配置と集約のイメージを可視化することができた（図 17）。このような可視化のアプローチは、今後の 2 県以上を跨ぐ広域収集について可能性を検討する際の叩き台となり、このアイデアをより多くの方と共有する際のツールとしてのデータが得られた。各都道府県や圏域で LCCN を今後の廃棄物処理施設整備の検討メニューとして加えていただけるよう、資料として活用可能である。



図17 LCCN集約ルートマップ

図注:LCCNシナリオに基づく全国の集約輸送ルートを可視化したマップ。集約先は仮に設定したもの。将来的な施設整備や広域化検討において、政策判断の材料となる空間設計ツールとして活用可能である。

### Sub3-5 輸送コストとCO<sub>2</sub>排出量の計算

LCCN対象廃棄物は、2040年は36,870 t/日、12,167,197 t/年であり、2050年は、36,645 t/日、12,092,899 t/年であった。この廃棄物量の輸送コストとCO<sub>2</sub>排出量を計算した。表12に示す。

表12 LCCN Readyでの日・年間処理量

LCCN対象廃棄物	2021年	2040年	2050年	単位
日処理量 (LCCN Ready)	0	36,870	36,645	t/日
日処理量 (ALL)	98,014	85,255	78,072	t/日
年処理量 (LCCN Ready)	0	12,167,197	12,092,899	t/年
年処理量 (ALL)	33,194,724	29,912,108	27,385,409	t/年
LCCN参加率	0	43.25	46.94	%

表注:処理量は2021年の施設整備統計データからサブ2で提示された将来推計値を適用。ただし、研究プロセスの都合で対象とする施設数の違いで数量が異なる。

#### ① 荷姿別のLCA算定

中継施設での梱包（コンテナ積載/フラフ製造）におけるCO<sub>2</sub>排出量推計結果を表13に示す。この結果はサブテーマ2の地域での算定量に含める結果として示す。フラフ製造には、コンテナ積載の約14.5倍の排出が伴う。

コンテナ積算 : 5.3 kg-CO <sub>2</sub> /t	フラフ製造 : 76.7 kg-CO <sub>2</sub> /t
------------------------------------	------------------------------------

本算定に対し、LCCN対象の廃棄物量は、2040年では1,218万t/年、2050年では1,210万t/年であり、これに荷姿別の原単位を乗じた。中継地でのCO<sub>2</sub>排出量推計結果を下表に示す。フラフ製造の原単位は、コンテナ充填の14.5倍であった。排出量が多くなるものの、臭気や帰り便の活用可能性を考えると、国内での一廃輸送においては、コンテナ充填での輸送よりも、フラフ状にした廃棄物のほうが、輸送インフラとして受け入れやすいと判断し、シミュレーションではフラフ製造を採用することとした。

表13 中継施設での梱包（コンテナ積載/フラフ製造）におけるCO<sub>2</sub>排出量推計結果

荷姿	原単位(t-CO <sub>2</sub> /t)	2040年(t-CO <sub>2</sub> /年)	2050年(t-CO <sub>2</sub> /年)
①コンテナ充填	0.0053	64,486	64,092
②フラフ製造	0.0767	933,224	927,525

③比率 (②)/(①)	14.5倍
表注:株式会社グーン社の実プラント値から原単位を求めたもの。	

## ②輸送コスト及びCO<sub>2</sub>排出削減量の算出

輸送コスト計算の結果、輸送コストは2040年で720億円/日、2050年で700億円/日と推計できた。20億円の減少は、2050年のLCCNへの集約量が2%ほど下がることと陸送が増えることに由来する。

輸送燃料量の合計値及びCO<sub>2</sub>排出量は、2040年、2050年共に年間約1億トン程度となった。輸送による追加コスト及びCO<sub>2</sub>排出量を表14に示す。

20t超トラクタ	輸送燃費	2.32 km/L (重量車燃費基準、軽油)
499船	航海燃費	0.23 km/h (日本通運株式会社による実測値、A重油)
	停泊燃費	0.035 km/h (日本通運株式会社による実測値、A重油)

表14 中継輸送による追加コスト及びCO<sub>2</sub>排出量

項目	単位	2040年	2050年
CO <sub>2</sub> 排出削減量	t-CO <sub>2</sub> /年	111,624	106,931
輸送による追加コスト	百万円/年	77,409	75,516

## ③分散立地の焼却発電とLCCN-Readyでのコスト比較

サブテーマ1で算出した分散立地の焼却発電とLCCN-Readyでの処理コスト比較のうち、高圧蒸気供給、廃棄物熱量10GJの場合の原単位を把握し、これに、各年の廃棄物量を乗じて、LCCNの導入による分散立地焼却発電との削減コストを表15に示す。

表15 年間処理量に対するLCCN効果

項目	環境性		経済性	
モデル (2000t/d)	-376,000 t-CO <sub>2</sub> /年		-8,290 M円/年	
原単位	-0.570 t-CO <sub>2</sub> /年		-0.0125 M円/年	
年	2040年	2050年	2040年	2050年
年間数量 (原単位×廃棄物量)	-6.9 Mt-CO <sub>2</sub> /年	-6.9 Mt-CO <sub>2</sub> /年	-1.528 億円/年	-1.519 億円/年

注釈:廃棄物量は表12に示す。

## Sub3-6 LCCN-Ready移行の事業性評価

次に、原単位から、CO<sub>2</sub> 1トン当たりの削減コストを表16に示す。上記、Sub3-5①～③を合計し、2040年、2050年での輸送にかかるコストを算出した(表17)。分散した焼却発電からLCCN Readyへの移行で、以下の効果が得られることが分かった。

- 施設運営では、2040年時点でCO<sub>2</sub>削減量は年間約589万t、年間約1,500億円が削減できる。
- CO<sub>2</sub>削減単価は約-2万5,500円/t-CO<sub>2</sub>であり、CO<sub>2</sub>削減により経済的効益が得られる。
- 施設建設では、2050年までに約4兆4千億円が削減できる。
- LCCN Readyは、他の脱炭素施策に比して極めて優位であることが分かった。
- LCCNは単なる技術モデルではなく、制度やインフラの改革を促す構造転換の核となる可能性がある。

表16 CO<sub>2</sub>削減効果原単位まとめ (2040年)

2040年 原単位				
対象年		環境性	経済性	CO <sub>2</sub> 削減コスト (参考)
		t-CO <sub>2</sub> /t	円/t	円/t-CO <sub>2</sub>
①焼却転換	燃料差分	-0.570	-12,561	22,048
	運営差分	-	-11,411	-
②メタン化		-	457	
③中継	フラフ製造	0.0767	5,186	67,611
	輸送	0.00917	6,362	693,477

表17 LCCN Ready (Waste to Steam)を実施した場合の処理コスト

運営費				
評価	環境性(Mt-CO <sub>2</sub> /年)		経済性(億円/年)	
対象年	2040年	2050年	2040年	2050年

①焼却転換	1) 燃料費差分	-6.93	-6.89	-1,528	-1,519
	2) 運営費差分	-	-	-1,388	-1,380
②メタン化		-	-	1.70	1.98
③中継	1) フラフ製造	0.933	0.928	631	654
	2) 輸送費用	0.112	0.107	774	755
合計		-5.89	-5.85	-1,510	-1,488
C <sub>0</sub> <sub>2</sub> 削減コスト 円/ t-CO <sub>2</sub>	2040年 25,651	2050年 25,419		平均 25,535	
建設費 2050年までの積算(兆円)					
施設の種類	WtE	LCCN Ready	差分		
①焼却施設	4.77	0.00	-4.77		
②メタン化施設	-	0.29	0.29		
③中継施設	-	0.06	0.06		
合計	4.77	0.35	-4.41		

表注：LCCNフラフ製造にかかる費用は、LCCNでの処理・輸送料金に含まれるとした。

これは削減すればするほど利益が生まれることを意味する。一般的な脱炭素手法（例：再生可能エネルギーや省エネ設備）の多くが追加的な支出を要する中で、LCCNは排出削減と同時に費用も削減できる極めて優れた施策であり、JCMやEU-ETSと比較しても圧倒的な費用対効果を持つ。

### Sub3-7 まとめ

本研究では、国内外の事例を収集整理し、国内に適用可能性の高い輸送方法を提案した。焼却施設のデータベースを構築し、集約ルート及び集約時期を具体的に設定するとともに、政策判断や住民説明にも活用可能な可視化資料を整備した。廃棄物を熱需要地に集約し、LCCN Readyプラントで安定的な蒸気供給を行うモデルにより、従来の分散立地型焼却発電と比較して、環境性・経済性とともに優れた効果が得られるこことを示した。

特に2040年の試算では、C<sub>0</sub><sub>2</sub>削減量は年間約590万t、費用削減は年間約1,510億円に達し、C<sub>0</sub><sub>2</sub>削減単価は-13,285円/t-CO<sub>2</sub>と、削減と同時に経済的利益が得られる点で他の脱炭素施策に比して極めて優位であることが分かった。また、荷姿別のLCA、中継輸送、広域施設集約などの要素を統合的に評価し、社会実装に必要な制度的論点も抽出した。LCCNは、単なる技術モデルではなく、制度やインフラの改革を促す構造転換の核となる可能性を有している。

### Sub3-8 制度的・政策的課題

本提言では、この実証的成果をもとに、LCCNを脱炭素と地域経済の両立を図る新たな基幹インフラとして制度化・実装する方策を提起する。

#### ①LCCNを脱炭素・GX政策の基幹インフラとして明示的に位置づけること

LCCNは、従来型の分散処理と比較してC<sub>0</sub><sub>2</sub>排出量・費用の両面で優位性があり、1トンあたりのC<sub>0</sub><sub>2</sub>削減コストは13,284円/t-CO<sub>2</sub>と、JCMやEU-ETSと同等またはそれ以下の水準である。これを脱炭素戦略の一環として制度的に明示し、広域的な熱利用インフラとして戦略的に整備すべきである。

#### ②LCCN Ready施設を制度上明確に定義し、インセンティブの対象とすること

熱需要地での大規模処理を前提とし、中間処理やフラフ製造を必要最小限とする設計とすることで、C<sub>0</sub><sub>2</sub>と費用の双方の追加負荷を抑えられる。これに基づき、LCCN Readyの要件を示したうえで、補助金等の交付対象として明記することが望ましい。

#### ③船舶輸送を含む広域輸送インフラの整備と、地理情報を活用したルート最適化の推進

中継輸送・海上輸送を活用することで、一般道路負荷や住民合意のハードルを回避できる一方、港湾設備の整備や輸送スケジュール管理に課題がある。GIS等を活用したルート最適化の仕組みとあわせて、広域収集に対応する運用モデルの確立が求められる。

#### ④ペール形状ごみによる広域輸送の実証と、施設削減型の輸送モデルの検証

国内では、ペール化された一般廃棄物を長距離輸送する実績はまだないが、これを実証することで、施設建設を回避しつつ資源循環を実現する新たな手法が提示できる。技術的・非技術的課題を整理し、輸送モデルとして確立すべきである。

#### ⑤自治体規模に応じた広域計画の再構築と、県域・ブロック単位での支援強化

広域連合の解体などにより小規模自治体の処理能力が縮小している現状を踏まえ、300t/日以下の施設に

依存する体制に陥らないよう、広域処理メニューとしてLCCNの提示ができるような資料整備や、圏域設計の見直しが必要である。

#### ⑥災害時の処理連携も含めた設計思想への統合

LCCNによる基幹施設の整備は、平時のみならず災害時においても他自治体からの広域搬入を受け入れる拠点機能を持ち得る。これを設計思想にあらかじめ組み込むことで、レジリエンスの高いインフラとしての価値を発揮できる。

#### ⑦産業廃棄物との統合的運用を見据えた事業モデルへの展開

今後は、一般廃棄物にとどまらず、熱利用可能な産業廃棄物や廃プラ等との混焼・集約処理を想定した事業モデルへの展開も視野に入れることで、広域的なカーボンニュートラル戦略との統合が進む。

以上、本研究の成果は、LCCN構想の社会実装に向けた政策検討のたたき台として、広域自治体や関係省庁にとって実務的な示唆を与えるものである。

#### ⑧評価・計画支援ツールの制度的活用と維持体制の構築

本研究で構築したLCCN評価モデルおよび可視化ツールは、自治体における施設整備方針の立案や、広域調整に向けた合意形成支援ツールとしての実用性が高い。特に、災害時の代替処理計画や港湾インフラを含む中継輸送設計、施設整備基本方針（環境省）の件数管理指標等と連動した運用が期待される。これらの活用を可能とするためには、施設情報や輸送経路、熱需要地等のデータベースを継続的に更新・整備する仕組みと、それを支える制度的・財政的措置が不可欠である。国家的な計画支援インフラとしての位置づけと、国による維持体制の構築が望まれる。

### Sub3-9 今後の課題

本研究により、LCCNシナリオの有効性は定量的に示されたが、社会実装に向けては以下の点が今後の課題として挙げられる。

#### ①港湾インフラの整備とGISによるルート最適化の深化

輸送効率向上には、港湾設備の増強、複数日を跨ぐ運用設計、GISを活用した輸送ルートの継続的見直しが必要である。

#### ②ベール形状ごみによる輸送実証と施設回避型モデルの構築

国内における一般廃棄物のベール輸送実績が乏しいため、地方自治体での実証と課題整理が望まれる。これにより施設新設を回避する持続可能な輸送モデルが構築可能となる。

#### ③LCCNを選択肢として提示する資料整備と普及支援

都道府県や市町村が施設整備を検討する際に、LCCNの導入可能性を比較検討できるよう、視覚化された資料やモデル事例を整備・提供する必要がある。

#### ④産業廃棄物との統合的処理モデルの設計

今後は産廃や廃プラ等との混焼も視野に入れた設計とすることで、より広域での循環経済型モデルへの拡張が可能となる。

#### ⑤災害時の連携処理設計との統合

LCCN拠点を平時のみならず災害時の広域搬入先として位置づけ、レジリエンス向上を図る設計思想への統合が求められる。

以上の観点を踏まえ、LCCNの社会実装を進めることで、処理システムの世代交代とともに、環境・経済・社会の三側面で効果的な循環型インフラの構築が期待される。

### (4) サブテーマ4：有機系資源の循環経済の将来シナリオに関する検討

#### Sub4-1 有機系素材の利用傾向の調査と将来シナリオの検討

収集した各素材（プラスチック、紙、木材等）のデータのうち、ここではプラスチックの発生量・循環利用量の結果を図18に示す。（a）プラスチックの発生量のうち、一般廃棄物の発生量は2010年度にかけて減少し、その後は概ね横ばいの傾向、産業廃棄物の発生量はやや増加傾向にあること、また、（b）プラスチックの循環利用量については、産業廃棄物の循環利用量が増加傾向にあること等が見られた。

また、各素材に関わる既存の定量目標のうち、ここではプラスチックに関わる主要な定量目標を表18に示す。各素材のシナリオ分析を行う際に、これらの定量目標を参照した。

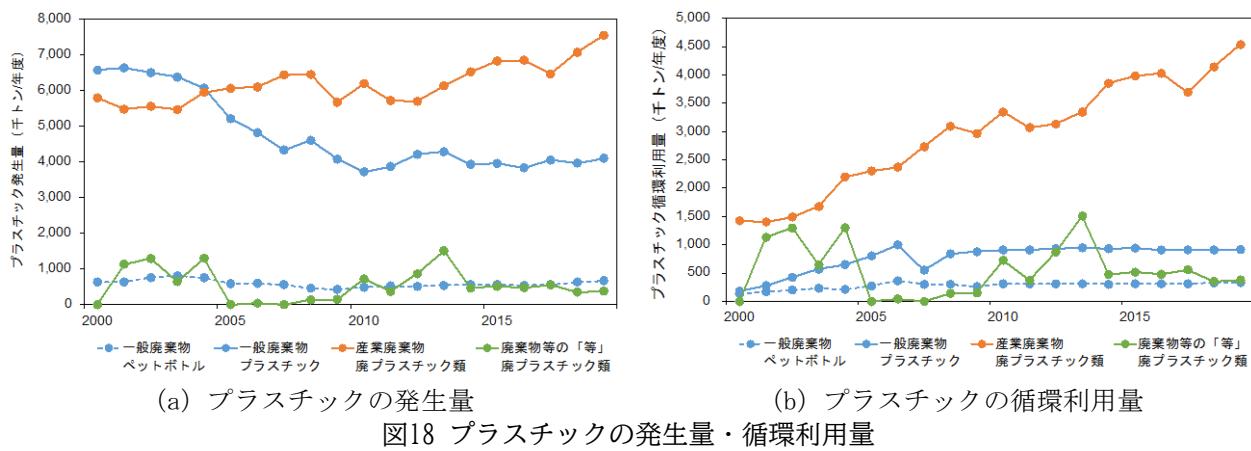


表18 プラスチックに関する既存の主要な定量目標

出典	取組	目標設定の対象	現行値	目標値
地球温暖化対策計画	03. 省エネルギー性能の高い設備・機器等の導入促進(鉄鋼業)	廃プラケミカルリサイクル量	40万t	2013年度 100万t 2030年度
	20. 廃棄物処理における取組	プラスチック製容器包装廃棄物の分別収集量	66万t	2013年度 73万t 2030年度
		RPF製造量	914万t	2013年度 1500万t 2030年度
	51. バイオマスプラスチック類の普及	バイオマスプラスチック国内出荷量	7万t	2013年度 197万t 2030年度
第四次循環基本計画	52. 廃棄物焼却量の削減	廃プラスチックの焼却量	515万t	2013年度 278万t 2030年度
	持続可能な社会づくりとの統合的取組	バイオマスプラスチック国内出荷量	8万t	2017年度 197万t 2030年度
		一廃のプラスチック類の焼却量	240.4万t	2019年度 245.8万t 2030年度
プラスチック資源循環戦略	リデュース	ワンウェイプラスチックの累積排出抑制率		25% 2030年
	リユース・リサイクル	プラスチック容器包装廃棄物のリユース・リサイクル率		60% 2030年
		使用済プラスチックのリユース・リサイクル・熱回収による有効利用率		100% 2035年
廃プラスチックのケミカルリサイクルに対する化学産業のあるべき姿	再生利用・バイオマスプラスチック	廃プラスチックの再生利用量		200% 2030年
		バイオマスプラスチック導入量		約200万t 2030年
		循環型ケミカルリサイクル処理量	23万t	2018年 150万t 2030年 250万t 2050年
		マテリアルリサイクル処理量	208万t	2018年 300万t 2030年 350万t 2050年

## Sub4-2 有機系素材のストック・フロー分析

有機系素材（プラスチック、紙、木材等）は様々な形で都市構造物や耐久消費財に投入・蓄積されており、これらストック量の詳細な把握は将来の廃棄・循環利用のシナリオに影響するため、原単位の精緻化による推計精度の向上が有益である。建築物の資材投入量の多くを占めていると考えられる①構造材、②内装材、③家財の3種類について、原単位の精緻化を行った（図19）。

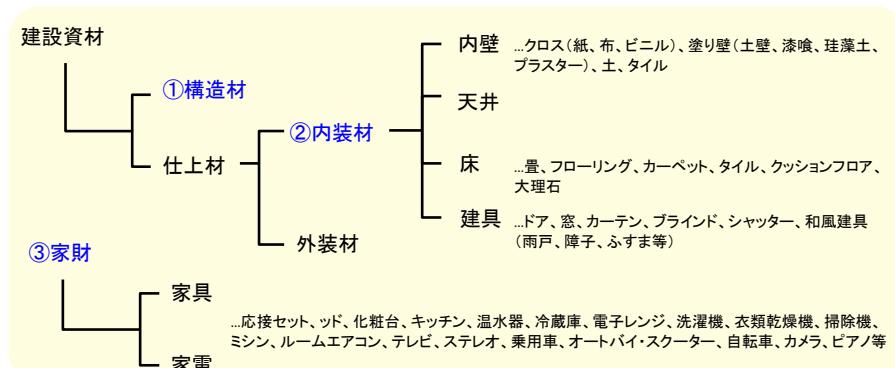


図19 建築物の主な構成要素

## ① 構造材原単位の精緻化

国土交通省が公開する建設資材・労働力実態調査を元に、全国10地域別・使途別（5分類）・構造別（5分類）・年代別（12ヵ年）に詳細化した木材の資材投入原単位を整備した（図20、表19）。これにより、地域や使途を考慮した木材ストックの推計精度の向上が可能となる。

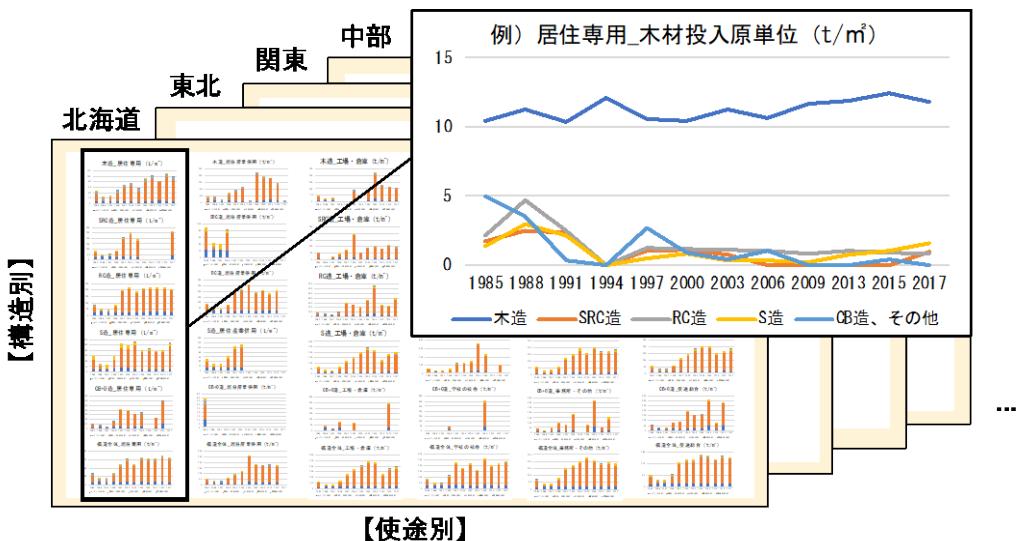


図20 建築物の木材投入原単位データベース

表19 対象とする原単位の詳細分類

	対象とする分類
対象年	1985、1988、1991、1994、1997、2000、2003、2006、2009、2013、2015、2017
地域（10地域）	北海道、東北、関東、北陸、中部、近畿、中国、四国、九州、沖縄
使途（5種類）	居住専用、居住産業併用、工場・倉庫、学校の校舎、事務所・その他
構造（5種類）	木造、鉄骨鉄筋コンクリート造、鉄筋コンクリート造、鉄骨造、補強コンクリートブロック造・その他

## ② 内装材・家財原単位の精緻化

建築物の内装材は建具、床材等様々であり、サッシや壁紙、フローリング、障子・ふすま等にはプラスチックや紙、木材等の有機系素材が使用されている。これらは維持補修や解体を通して廃棄・循環利用フローに影響することから、内装材に含まれる有機系素材のストック量を把握することは重要である。各種統計データや既往の研究から、各品目における単位重量（kg/個, kg/m<sup>2</sup>）と1世帯あたりの保有数（個/世帯, m<sup>2</sup>/世帯）を住宅の全国平均延床面積（m<sup>2</sup>/世帯）収集し、これらを用いて内装材原単位（kg/m<sup>2</sup>）を導出した（表20）。作成した内装材原単位を用いて都道府県別の内装材・家財ストックを推計した結果、日本全国で内装材約52Mtが蓄積していると推計された（図21）。

家具や家電には多くのプラスチックや木材が使用されているものの、これら家財に含まれる有機系素材のストック量を全国で包括的に把握する研究は少ない。家財については、オンラインショッピングサイト等から単位重量データをサンプルとして取り出し、平均を出すことで家財の単位重量に、内閣府消費動向調査と総務省全国消費実態調査の1世帯あたり保有数を乗じることで、家財の世帯あたりの保有重量を算出した。1世帯あたりのストック量を日本サッシ協会「住宅用建材使用状況調査」の平均延床面積で除し、1m<sup>2</sup>あたり家財原単位（kg/m<sup>2</sup>）を算出した（表17）。作成した家財原単位を用いて都道府県別の家財ストックを推計した結果、日本全国には家財約35Mtが蓄積していると推計された（図22）。さらに、内装材・家財原単位を、東岸ら（2008）が整備した構造材原単位（木造2×4工法：457.8～480.3kg/m<sup>2</sup>）と比較すると、約3%～6%に相当することが明らかとなった。

表20 1m<sup>2</sup>あたり内装材・家財ストック（原単位）まとめ

建て方	世帯別	内装材（kg/m <sup>2</sup> ）	家財（kg/m <sup>2</sup> ）	全体（kg/m <sup>2</sup> ）
戸建て住宅	2人以上	12.4	6.5	18.8
	単身	12.4	4.2	16.6
集合住宅	2人以上	10.8	19.6	30.5
	単身	10.8	12.7	23.5

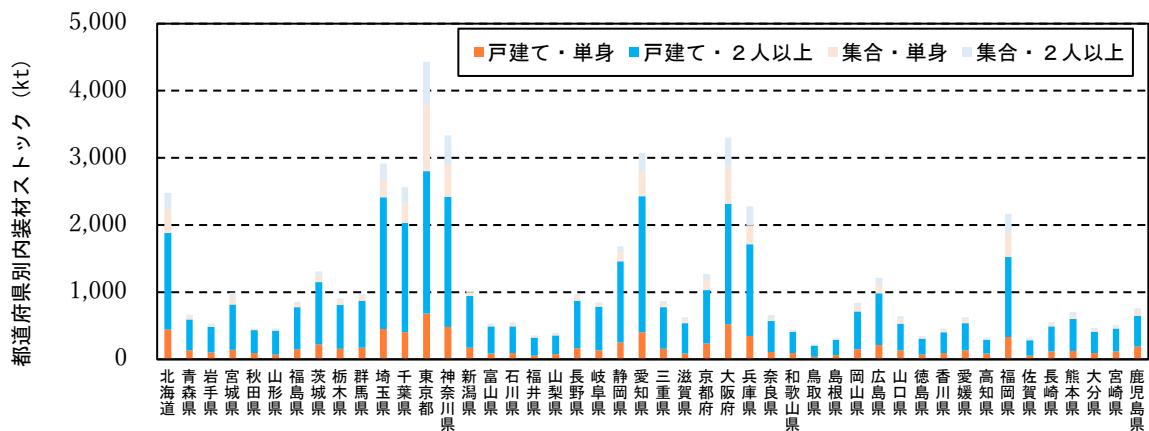


図21 都道府県別内装材ストック

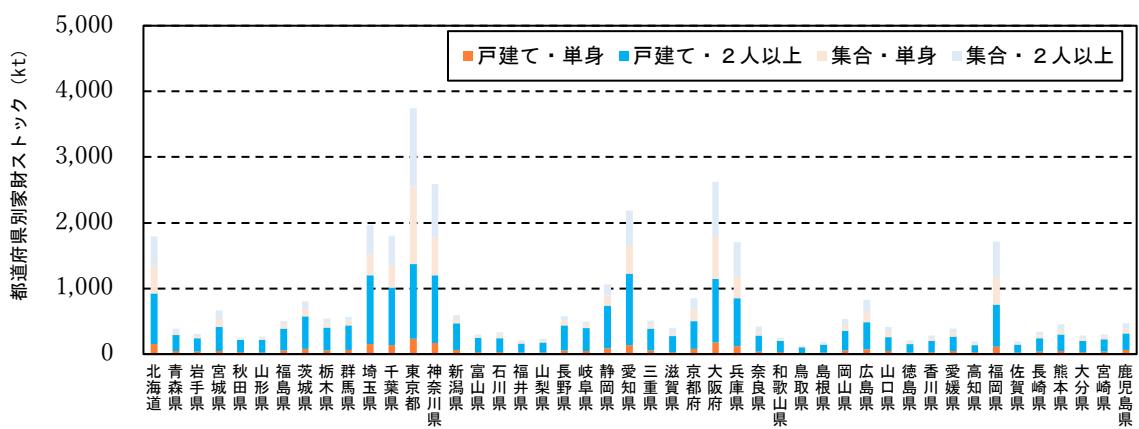


図22 都道府県別家財ストック

### Sub4-3 2050年に向けた有機系廃棄物からのエネルギー回収ポテンシャルの算定

一般廃棄物に関する推計フローを図23に示す。このモデルでは、将来人口を駆動力として将来の成りゆきシナリオにおける廃棄物量を推計するとともに、上述の表18に示すような定量目標を対策シナリオとして想定した場合の廃棄物量が推計できる。また、対策シナリオとしてのプラスチック（廃タイヤを含む）や紙おむつのバイオマス化率の想定のもと、各素材の排出係数を設定でき、最終的には、活動量としての廃棄物量と排出係数を乗じて将来的GHG排出量を推計するものである。本モデルでは、環境省「廃棄物・資源循環分野における2050年温室効果ガス排出実質ゼロに向けた中長期シナリオ検討業務報告書」（2022）に示された表21のような4つのシナリオについて、一般廃棄物フロー及びGHG排出量を推計できるようにした。具体的には、上述の表18に示すような定量目標をもとに設定した30程度の対策シナリオの組合せの影響を評価できるようにした。なお、モデル妥当性の検証のため、同報告書に示された計算結果と比較し、概ね再現できることを確認した。

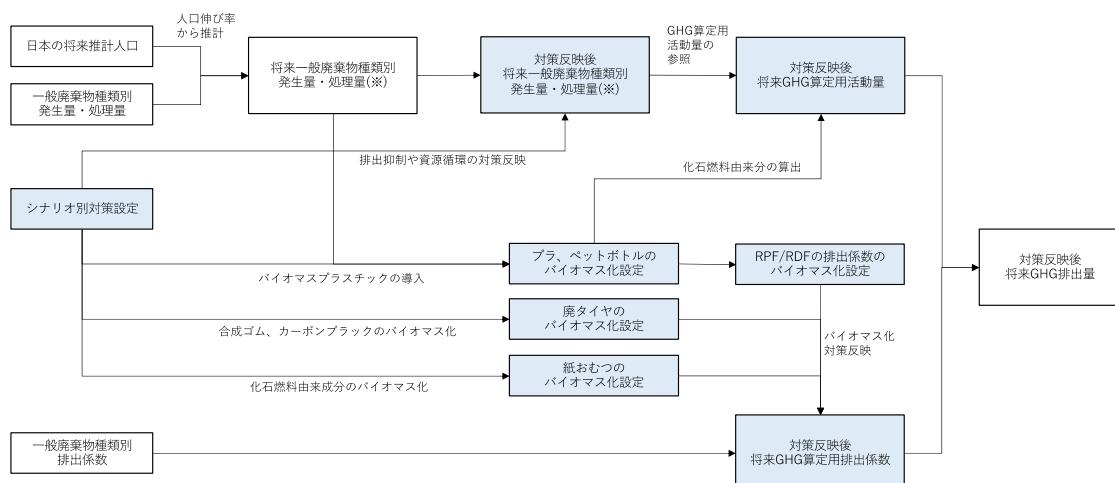


図23 一般廃棄物に関する推計フロー

表21 シナリオの概要

番号	シナリオ名	シナリオの概要
0	BaUシナリオ	環境省中長期シナリオ検討業務より、現況年度（2019年度）付近の対策のまで2050年まで推移することを想定したシナリオ。
1	計画シナリオ	環境省中長期シナリオ検討業務より、地球温暖化対策計画、プラスチック資源循環戦略、バイオプラスチック導入ロードマップ、プラスチック資源循環促進法等のGHG削減・資源循環に資する既存の計画・法制度や、業界団体等の目標値に基づき対策導入量を想定するシナリオ。
2	拡大計画シナリオ	環境省中長期シナリオ検討業務より、計画シナリオに加え、廃棄物処理施設や収集運搬車両等におけるエネルギー起源CO <sub>2</sub> 対策を計画シナリオの対策導入強度に準じて導入するシナリオ。
3	イノベーション実現シナリオ	環境省中長期シナリオ検討業務より、拡大計画シナリオをベースに、現状の技術開発動向等を踏まえ、各重点対策領域におけるGHG削減技術のイノベーションによる削減量の深掘りを見込むシナリオ。
4	イノベーション発展シナリオ	環境省中長期シナリオ検討業務より、イノベーション実現シナリオをベースに、現状の技術水準や技術開発動向では必ずしも十分に担保されない水準まで対策導入量の深掘りを見込むシナリオ。

本モデルを用いて将来の廃棄物フローを推計した結果を図24に示す。表21に示すとおり、既存の計画に基づくシナリオが計画シナリオであり、他はそれらを拡張したシナリオとなっている。特に、2つのイノベーションシナリオは最大限まで対策を盛り込むものであり、循環利用量が大きく増加し、焼却処理量を減らすシナリオとなっている。本研究で対象としている有機系素材（プラスチック、紙）の焼却量もこれらのシナリオで大きく減少する想定となっている。

(a) 循環利用量

(b) 焼却処理量

(c) 焼却処理量（ペットボトル及びプラスチック） (d) 焼却処理量（紙）  
図24 将来の廃棄物フローの推計結果

BaUシナリオとイノベーション発展シナリオについて、石油化学コンビナートを有する各府県のエネルギー回収ポテンシャルを推計した結果（2050年度）を図25に示す。地域により発生する一般廃棄物量及び焼却ごみ量が異なるが、各シナリオにおいてエネルギー回収（主に発電）を行う予定の焼却ごみも含め、一定程度の熱供給のポテンシャルがあるものと推計された。例えば、大阪の石油化学コンビナートにおける200～500℃の熱需要は、現時点で約20PJと推計されるが、これに対しプラスチック、紙、木材のエネルギー供給ポテンシャルは2050年度で8～10PJと推計された。石油化学コンビナートの全エネルギー需要を賄える量で

はないものの、半分程度のエネルギー需要を満たすことでも大きなCO<sub>2</sub>削減効果が見込めると考えられ、これについて以下の(4)で検証した。なお、2050年度における石油化学コンビナートの熱需要にも不確実性があることに留意する必要がある。

図25 石油化学コンビナートを有する各府県のエネルギー回収ポテンシャルの推計結果（2050年度）

#### Sub4-4 産業施設への大規模熱供給に関するケーススタディ

このケーススタディでは、広域的な廃棄物の収集を、堺・泉北コンビナート近隣の6市で行う場合（以下、地域1）と、コンビナートの熱需要に合わせて、さらに収集範囲を拡大した26市で行う場合（以下、地域2）を対象として分析を行った。なお、地域2には地域1の自治体も含まれる。

また、将来の焼却ごみ量のシナリオと廃棄物処理のケースを設定した。その概要を表22、評価のバウンダリーを図26に示す。焼却ごみ量のシナリオは以下の2つである。

- (a) 現状維持(BAU)シナリオ：1人あたりの焼却ごみ量が変化せず、人口減少のみを考慮したシナリオ。
- (b) ごみ減少シナリオ：対象自治体のごみ減量目標値を達成することを考慮したシナリオ。

また、将来の廃棄物処理のケースは以下の2つである。

- (1) 施設建て替えケース(建替ケース)：従来通りの焼却施設で焼却ごみを処理し、ごみ発電によりエネルギーを回収するケース。
- (2) 施設統合熱供給ケース(統合ケース)：石油化学コンビナートの近隣に焼却施設を建設し、対象地域の焼却ごみ全てを当該焼却施設に搬入し、石油化学コンビナートへの熱供給によりエネルギーを回収するケース。

表22 焚却ごみ量のシナリオと廃棄物処理のケース

対象地域	6自治体(地域1)				26自治体(地域2)			
	焼却ごみ量シナリオ		BAU	ごみ減少	BAU		ごみ減少	
廃棄物処理ケース	建替	統合	建替	統合	建替	統合	建替	統合

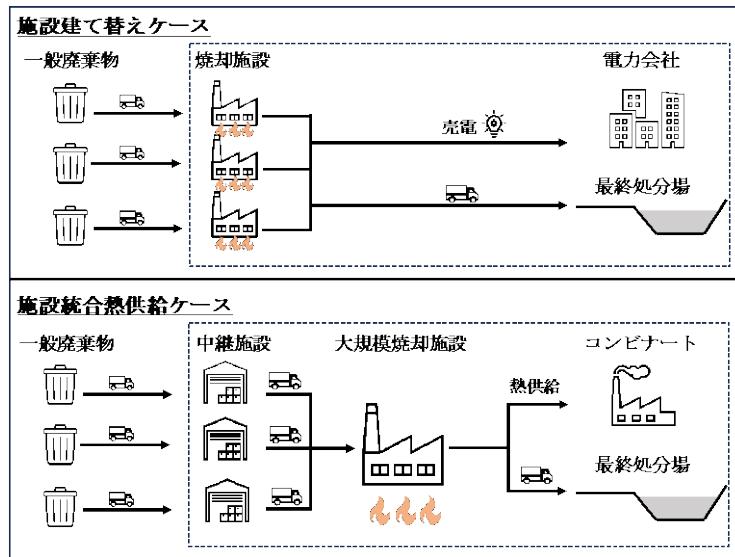
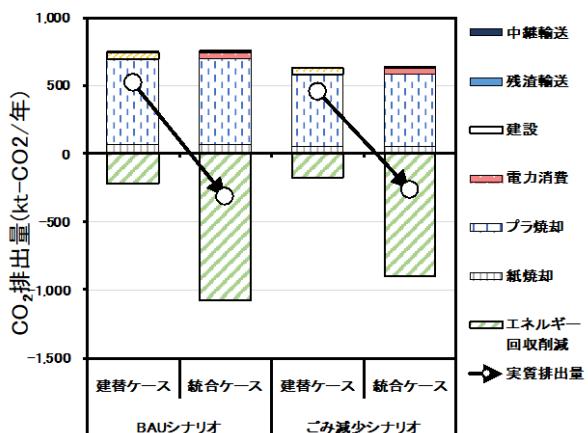


図26 評価バウンダリー

これらのシナリオにおけるCO<sub>2</sub>排出量および事業コストを推計し、定量的に比較検証した。CO<sub>2</sub>排出量については、施設の建設・補修、輸送、電力消費、焼却による排出と、エネルギー回収による削減を対象とし、事業コストについては、初期費用（建設、その他）、保管費用、輸送費用、焼却費用、エネルギー回収による売上を対象とした。

2035年におけるCO<sub>2</sub>排出量の推計結果を図27に示す。地域1、地域2いずれにおいても、統合ケースでは、中継輸送と電力消費を伴うことでCO<sub>2</sub>排出量が増加するが、熱供給によるC重油使用量の削減により全体のCO<sub>2</sub>排出量は大幅に削減される結果となった。統合ケースの中継輸送によるCO<sub>2</sub>排出量は、いずれの地域でも極めて小さかった。また、建替ケースでは、各焼却施設に最新の発電設備が設置されることによって、焼却施設の総発電量は増加するが、統合ケースでは、焼却熱の供給により更に大きなエネルギー回収によるCO<sub>2</sub>削減があると推計された。また、残渣輸送によるCO<sub>2</sub>排出量は、統合ケースの排出量が建替ケースの排出量を若干下回った。統合ケースで新設する焼却施設の場所が、最終処分場に近いことが寄与した。CO<sub>2</sub>排出量全体を見ると、統合ケースではいずれの地域とシナリオに関しても実質排出量がマイナスとなった。なお、CO<sub>2</sub>排出量の大部分をビニールの焼却が占めており、CO<sub>2</sub>排出量をさらに削減するためには、二酸化炭素を回収し、カーボンリサイクルにより石油化学製品等の原料として利用することが有効と考えられる。CO<sub>2</sub>回収の化学吸着法については、脱着温度の低温化が進められているが、コンビナートのような場所であれば、脱着に廃熱を利用し得ることも利点となる。

事業コストについては、地域1、地域2いずれにおいても、統合ケースの中継施設や中継輸送に係るコストは増加するが、焼却施設の建設費や補修費が削減されるとともに、エネルギー回収による売上が建替ケースに比べ約1.8倍増加し、全体の事業コストは大きく削減される結果となった。なお、蒸気価格により事業の収益性は大きく影響を受けることになるが、具体的な事業にあたっては、公共の施設として、どのような考え方で蒸気価格を設定するかも重要な論点である。



(a) 地域1

(b) 地域2

図27 CO<sub>2</sub>排出量の推計結果

## 参考文献

- AVFALL SVERIGE (2020). “Swedish Waste Management 2019” Consolidated text: Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives (Text with EEA relevance). CL2008L0098EN0030020.0001\_cp 1..1 (europa.eu)
- Kikuchi, Y., Oshita, Y., Mayumi, K., Hirao, M., 2017. Greenhouse gas emissions and socioeconomic effects of biomass-derived products based on structural path and life cycle analyses: A case study of polyethylene and polypropylene in Japan. J. Clean. Prod. 167, 289-305.
- PHJ (2018). Waste Management in Lahti Region. Salpakierito Oy, LATE Sorting Plant Virtual Tour, February 6th, 2017, LATE Sorting Plant Virtual Tour – YouTube.
- 化学工学会, 地域連携カーボンニュートラル推進委員会, 2025. カーボンインディペンデンス（炭素自立）ビジョン 2.0 : CO<sub>2</sub>排出削減が困難な産業の循環経済への変革
- 環境省 令和5年度廃棄物の広域移動対策検討調査及び廃棄物等循環利用量実態調査報告書（廃棄物等循環利用量実態調査編） <https://www.env.go.jp/content/000213550.pdf>
- 国立環境研究所 日本版SSP別人口シナリオ第2版（2021年7月8日版）におけるSSP2

- <https://adaptation-platform.nies.go.jp/socioeconomic/population.html>
- ・ 谷川昇・古市徹・石井一英・西上耕平 生ごみバイオガス化施設におけるメタン回収量、環境保全性、経済性の検討 廃棄物学会論文誌, Vol. 19, No. 3, pp. 182-190, 2008
  - ・ 東京都環境局：東京都区市町村清掃事業年報（令和3年度実績）  
[https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/resource/general\\_waste/survey\\_results](https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/resource/general_waste/survey_results)
  - ・ 東京二十三区清掃一部事務組合：清掃事業年報（東京23区）別冊（令和3年度リサイクル編）  
<https://www.union.tokyo23-seisou.lg.jp/somu/koho/toke/nakami/>
  - ・ 農林水産省：都道府県施肥基準等  
[https://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/hozon\\_type/h\\_sehi\\_kizyun/](https://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/hozon_type/h_sehi_kizyun/)
  - ・ 原嘉章, 井上護, 廃棄物の広域処理を支える中継輸送システムの役割, 廃棄物資源循環学会誌, Vol. 33No. 2, pp. 115-123, 2022
  - ・ プラスチック容器包装リサイクル推進協議会(2022). 「分別収集したプラスチック資源の機械選別・リサイクルに関する実証検討報告書」
  - ・ 柚山義人・生村隆司・小原章彦・小林久・中村真人：バイオマス再資源化技術の性能・コスト評価, 農業工学研究所技報, 204, 2006

## 1. 5. 研究成果及び自己評価

### 1. 5. 1. 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献

＜得られた研究成果の学術的意義＞

#### 廃棄物焼却施設からの蒸気供給制御方法

一般的に廃棄物焼却によるエネルギー回収は、廃棄物組成が一様でないために変動が大きい。各焼却炉メーカーが人工知能等を用いて安定燃焼させる仕組みを開発しているが、完全ではない。本研究では、独立過熱器における燃料消費を調整することで、化学コンビナートの蒸気需要の変化や、再エネ電力の発電状況等に合わせて、高圧と中・低圧の蒸気供給量を制御する仕組みを提案し、その効果を評価した。本成果は特許申請を行っている。

#### LCCN（廃棄物焼却・蒸気供給+CCU）のケミカルリサイクルに匹敵する効率性

プラスチックの材料リサイクル及びケミカルリサイクルを補完する、LCCNによる化学コンビナートへの蒸気供給及びCCUによる基礎化学原料製造の仕組みは、ケミカルリサイクルに匹敵する高いエネルギー効率を達成し得ることを示した。熱力学的な理想状態では、ヘスの法則により反応熱は反応の途中経路に依存しないため、ケミカルリサイクルでも、安定な物質であるCO<sub>2</sub>を経るCCUでも、エネルギー効率は同じになるのだが、実際には様々なロスが生じるため、CCUが不利である場合が多く、またそのような先入観を持たれる場合多かった。しかし、従来の焼却発電では発電時のエネルギーロスが非常に大きかったのに対し、LCCNでは蒸気供給を行うために実質的なロスが生じない（工場側のボイラと効率に差がない）ことから、ケミカルリサイクルに匹敵する効率を達成できることを理論的に示すことができた。この成果は、資源循環の最適化を考える研究を実施する上で、重要な知見となる。

国産バイオマス資源として豊富な、木材をプラスチック製造に用いるケースについて、石油からプラスチックを製造し続けた場合と比較して、大気への正味のCO<sub>2</sub>排出がどのように変化するかについて、経年的にシミュレートするモデルを作成し、評価を行った。国内の人工林が高齢化していることから、樹齢70年の木を伐採し、その後は植林して40年周期で伐採するケースを想定した。この場合、原料として木材のみを用い、水素を利用しない場合には、2070年頃まではむしろCO<sub>2</sub>排出を増加させる可能性があることを示した。その後は減少に転じ、将来時点ではカーボンニュートラルに寄与するが、森林の炭素蓄積が失われるため、化学産業のカーボンバジエットに整合する森林資源の活用方法等について考察した。一般的なLCAではバイオマスは単にカーボンニュートラルとして扱われる場合が多く、バイオマス由来のCO<sub>2</sub>排出が過少評価されがちであるが、本研究によって正味で大気へのCO<sub>2</sub>排出削減に繋がるバイオマスの活用方法が明らかとなつた。

#### 焼却施設別の廃棄物情報と市町村の接合と地域特性に合わせた厨芥類分別の可能性の提示

焼却施設別に存在している廃棄物の組成情報を市町村を接合させることにより、市町村における分別施策に伴う廃棄物組成等の変化を全国の市町村で算定可能とし、分別収集や人口変化に応じた将来の廃棄物量、低位発熱量を算定した。また、全国市町村の農地面積及び市町村別の厨芥類の組成情報をより、全国の市町村において、厨芥類の資源利用可能な市町村を定量的に示した。これらの結果は将来の廃棄物処理・資源循環の評価を行うための基礎情報として役立つ結果である。

### 廃棄物輸送の荷姿別のLCA・GIS分析

廃棄物処理の空間スケールを広域に再設計し、分散型から集約型への転換を通じて、脱炭素と資源循環を同時に実現するLCCNモデルの具体化を目指した点において、従来の都市ごみ研究とは一線を画す新たな知見を提供している。とりわけ、荷姿別のLCA（ライフサイクル評価）、GISを活用した集約ルート設計、施設整備計画との統合的検討を通じて、技術・制度・空間の3要素を俯瞰的かつ定量的に分析した点に学術的な独自性がある。また、海外のWaste to Steam (WtS) 事例の系統的整理により、日本国内の適用可能性を実証的に評価した点も、比較制度研究としての価値を有する。

有機系素材（プラスチック、紙、木材等）は様々な形で都市構造物や耐久消費財に投入・蓄積されており、これらのストックの解体時まで見越した効率的な資源管理を行うことが重要である。近年は、循環経済の実現に向けた建築物に関する取組として、建築物を一時的な建材の保管庫（マテリアル・バンク）と捉え、建材における材料や重量、寸法などの情報をデジタル上で記録・管理する考え方である「ビルディング・アズ・マテリアル・バンク（Building as Material Bank, BAMB）」という新たな考え方ヨーロッパで広まってきている。ヨーロッパを中心にリサイクル材がどこにどれだけあるかを把握する動きが広まっている一方で、日本において住宅の内装材・家財のストック量の把握については、運用上の課題や検討の余地が多く残されている。こうした、データの一元管理を基本としたシステムを実装する上で、基礎データの整備が重要であり、特に原単位の精緻化による推計精度の向上が有益である。本研究では、建築物の「構造材」だけでなく、ストック推計において未だ十分考慮されていない「内装材・家財」に焦点を当て、内装材・家財原単位の拡張を行った。本研究成果は、これまで十分に考慮されなかった「内装材・家財」のデータ拡張を行なった点で新規性がある。

### 焼却施設別廃棄物情報と市町村の接合

焼却施設別に存在している廃棄物の組成情報と市町村を接合させることにより、市町村における分別施策に伴う廃棄物組成等の変化を全国の市町村で算定可能とし、分別収集や人口変化に応じた将来の廃棄物量、低位発熱量を算定した。

### 全国市町村での地域特性に合わせた厨芥類分別の可能性の提示

全国市町村の農地面積及び市町村別の厨芥類の組成情報より、全国の市町村において、厨芥類の資源利用可能な市町村を定量的に示した。

### <環境政策等へ既に貢献した研究成果>

#### 自治体の計画策定への貢献

ある都道府県の協力により、都道府県内の自治体を集めて、LCCNに関する勉強会を研究班の複数のメンバーによって年2回程度の頻度で開催しており、次第に参加自治体も増えてきた。焼却施設の更新計画を検討する際に、LCCN Readyを選択肢の1つとして検討する自治体も出てきた。今後も勉強会を継続的し、LCCNの普及に努める予定である。

特別区長会調査研究機構による、特別区におけるCO<sub>2</sub>の地産地消に向けて～清掃工場のCO<sub>2</sub>分離・活用と23区の役割～（東京二十三区清掃一部事務組合提案、2023年度）の研究リーダーを研究代表者の藤井実が務めた。本研究の成果も踏まえて、CCUによるCO<sub>2</sub>の活用方法を整理した。研究成果は報告書の形で公表されており、23区の清掃工場にはCO<sub>2</sub>を回収できる十分な土地もないことから、化学産業等と連携して廃棄物を活用すること（LCCN）の重要性も示された。

### 国の環境政策への貢献

環境省の環境審議会・循環型社会部会（研究分担者の橋本が委員）における廃棄物処理施設整備計画、廃棄処理法に基づく基本方針、循環型社会形成推進基本計画の検討において、本研究での検討・成果をベースとした意見を提示し、これらの計画・方針の文言として盛り込まれた。具体的には、「必要に応じて2以上の都道府県の区域における広域化・集約化（整備計画p.6、基本方針p.39）」「都道府県域を越える広域的な廃棄物処理体制の構築（整備計画p.15）」「供給可能な蒸気条件に応じ、産業施設における大規模熱利用（整備計画p.11）」「産業施設における大規模熱利用や農業、商業施設との連携（基本計画p.41）」「廃棄物エネルギーの需要を踏まえた立地（整備計画p.12、基本方針p.37）」等である。これまでの広域化よりは一步踏み込んだより広範囲での広域化を目指す表現となり、エネルギー需要の観点からの施設立地にも触れられた。

### 自治体の事業化に向けた検討の支援

周南市が主催する周南コンビナート脱炭素推進協議会（会長：周南市長）及び千葉県が主催する京葉臨海コンビナートカーボンニュートラル推進協議会（会長：千葉県知事）に研究代表者の藤井実が参画し、本課題の成果であるLCCNの有効性についても情報提供を行った。

インド共和国やインドネシア共和国においても、LCCN Readyを実施することを前提に、日本の環境省や経産省等の支援を受けて実現可能性調査を実施した。事業の実現に向けて検討を継続している。インドネシア共和国の環境副大臣とも面談し、廃棄物処理問題の効率的かつ迅速な解決に向けて今後も協力することを確認した。

### <環境政策等へ貢献することが見込まれる研究成果>

#### 2050年までに想定される廃棄物焼却施設整備・運営費用及びシステム転換後費用等の定量的評価

各市町村又は一部事務組合等を主体とした現状の可燃ごみ処理の体制が2050年まで維持された場合に、想定される焼却施設整備費用、運営費用を算定した。その上で、システム転換後に必要となる、施設整備費用、運営費用を算定し、現状の体制が維持された場合との比較評価を実施した。

廃棄物焼却施設の費用高騰等も踏まえ、環境省からは廃棄物焼却施設に係る交付金制度の見直しに係る通知（令和6年3月29日付通知環循適発第24032921号「一般廃棄物焼却施設の整備に際し単位処理能力当たりの交付対象経費上限額（建設トン単価上限値）の設定による施設規模の適正化について（通知）」、令和6年3月29日付通知環循適発第24032920号「循環型社会形成推進交付金等に係る施設の整備規模について（通知）」）が発出されており、費用削減が今後の政策課題の一つと考えられることから、本研究の評価結果は、今後の我が国の廃棄物処理体制の構築に向けた検討に資する情報となると思われる。

#### 分別収集の進展、人口変化を考慮した全国ベースの市町村別廃棄物発生量、低位発熱量の算定

プラスチック資源循環促進法を受けたプラスチックごみの分別収集や地域特性に合わせた厨芥の分別収集が進展した場合の市町村における可燃ごみ発生量、低位発熱量の変化を全国市町村で評価した。

環境省が毎年度実施している一般廃棄物処理実態調査では低位発熱量は焼却施設別でしか存在していない。本研究においては、市町村別の低位発熱量等のデータベースを全国規模で作成したことにより、将来の広域化や施設構想の検討を都道府県単位や全国規模で実施することが可能になる。分別収集に伴う廃棄物発生量、低位発熱量等の変化は各市町村における施策検討において個別に算定されるものであるが、全国市町村で定量的に評価することにより、環境省等の国全体での施策検討における基礎情報としての活用が可能であると考えられる。

また、市町村と焼却施設情報の接続を作成したことから、市町村別の施策導入等の変化より各焼却施設や中継施設におけるごみ量、質の変化を算定することも可能となり、各地域における検討においては、市町村が保有する情報等により各種変数を設定することにより、地域特性を含めたより詳細な検討が可能となる。

#### 自治体の可燃ごみ処理政策、自治体間連携に向けた新たな選択肢の提示

本研究は、個々の自治体単位での焼却処理を中心とした従来型の処理システムから転換し、地域での資源化処理と広域での焼却処理及び高効率エネルギー利用を組み合わせたシステムを実現するための課題と道筋を示すものである。人口減少・財政縮小が進む基礎自治体においては、地域脱炭素や財政負担軽減を図りつつ地域づくりを進めていく必要があり、本研究の成果は、自治体における一つの有効な選択肢となることが期待される。

環境省による広域処理の推進施策により、全国自治体で焼却施設の集約化が進む一方、自治体間の調整に難航する事例も多い。本研究では、資源化可能ごみの地域利用と燃料用ごみの高効率エネルギー利用を目指した新たな自治体間連携の進め方を検討するものであり、その成果は自治体における今後の新たな視点となることが期待される。

#### 自治体の廃棄物処理計画策定に資するデータやツールの提供

従来の分散立地型焼却発電に対して、LCCN Readyプラントによる集約処理が、2040年時点で年間約589万トンのCO<sub>2</sub>削減と約1,510億円の費用削減を可能とし、CO<sub>2</sub>削減単価-25,535円/t-CO<sub>2</sub>という極めて高い費用対効果を示した。

GISを用いた施設配置・輸送ルートのマップ化は、複数自治体を跨ぐ広域連携の検討に際し、政策判断・住民説明に資するツールとなる。とくに、災害時の受け入れ体制や中継施設の活用設計においても汎用性が高い。また、LCCN Readyの明確な定義づけ、フラフ製造・ベール輸送の評価、港湾インフラ整備への言及な

ど、次期交付金設計やGX政策への統合可能性を含んだ制度的示唆を得た。

本研究では、LCCN Readyプラントの導入判断を支援する評価モデルおよび可視化ツールを構築した。焼却施設の廃止時期・熱需要地との距離・集約量制限等を組み込んだフローにより、施設の特定から効果試算までを一貫して行うことが可能である。特に、輸送手段別の排出原単位やコスト構造を反映し、政策的制約に応じた廃棄物集約シナリオの評価にも対応可能な設計とした点において、施設整備計画の立案・検証に資する実務性と、制度設計への応用可能性の両面において有用である。

### 将来の廃棄物処理計画策定に資する貢献

本研究では、石油化学コンビナートを有する各府県の将来のエネルギー回収ポテンシャルを推計した結果、各シナリオにおいて一定程度の熱供給のポテンシャルがあることを示した。石油化学コンビナートの全エネルギー需要を賄える量ではないものの、石油化学コンビナートの今後の熱需要にも不確実性があることを考慮すると、一定程度のエネルギー需要を満たすことで、一定のCO<sub>2</sub>削減効果が見込める。こうした情報を今後の廃棄物処理計画・広域化計画の策定に活用することが期待される。

また、大阪の堺・泉北コンビナートを対象としたケーススタディでは、周辺市町村の一般廃棄物を広域収集し、産業施設への大規模熱供給を行うことで、CO<sub>2</sub>削減効果、事業コストの削減効果が見込まれることを示した。こうした結果も、各自治体において更なる広域化を検討する際に活用することが期待される。

#### 1. 5. 2. 研究成果に基づく研究目標の達成状況及び自己評価

<全体達成状況の自己評価> · · · ·

#### 2. 目標を上回る成果をあげた

「プラスチック等脱炭素広域循環経済と食品廃棄物地域循環による環境・経済効果の最大化」（国立環境研究所、藤井 実）

全体目標	全体達成状況
資源循環分野におけるカーボンニュートラルの実現に向けて、プラスチックを含む有機系廃棄物の処理・リサイクルの仕組みを、カーボンニュートラルに適したものに転換するとともに、化学産業の製造工程の大幅なCO <sub>2</sub> 排出削減が可能な、セクター横断的なシステムを提示し、その費用対効果及び便益の評価を行って導入の可否を判断する。	リサイクル困難な低品位廃棄物の サブテーマ1～4が連携して、当初の目標を上回る成果を上げることができた。サブテーマ4で将来の廃棄物の発生状況を推計し、その範囲内でサブテーマ2では厨芥の分別・メタン発酵を含む自治体の廃棄物処理の変更について評価した。そのうちLCCNに向かう低品位混合廃棄物について、サブテーマ3でその広域輸送を評価し、サブテーマ1で得られる化学コンビナートでの活用の効果と併せて、提案するLCCNへの移行についてシナリオを作成し、達成されるCO <sub>2</sub> 排出削減や経済的な効果を評価した。
システムの構成要素となる選別や蒸気供給（サブテーマ1）、輸送の各プロセスのモデル化（サブテーマ3）を行うと共に、大都市や地方都市など、異なる条件の自治体や産廃事業者を対象としたケーススタディを実施する（サブテーマ2）。プロセスモデルとケーススタディに基づいて全国規模でのCO <sub>2</sub> 排出削減ポテンシャルや費用対便益を推計する（サブテーマ1）。その際、将来の有機系素材（プラスチック、紙、木材）の使用や資源循環に関するシナリオ分析を行って、発生する廃棄物の変化を踏まえたシステム分析となるようにする（サブテーマ4）。	サブテーマ1では、廃棄物焼却熱を利用して化学コンビナート等に大規模に安定して、コジェネレーションに利用可能な高圧蒸気を供給するシステムを提案し、その効果を評価した。当初の目標を超えて、特許申請も実施した（成果1）。また、LCCN（焼却・蒸気供給+CCUによるプラスチック製造）は、ケミカルリサイクルに匹敵する効率性を有することを確認し、学術的にも重要な知見を提供した（図8）。
各サブテーマの成果を併せた検討により、個別地域での焼却処理への依存度が大きなこれまでのリサイクル・処理の仕組みから、少子高齢化等に伴う社会の変化にも柔軟に対応し得る、廃棄物と地域の特性に最適化された、有機系資源のカーボンニュートラルの実現と社会コストの低減にも繋がる新たな地域循環共生圏の姿を提示する。加えて、システムの社会実装に向けて、化学メーカー、自治体、処理業者等と協力して、実現に向けて課題を整理した上	サブテーマ2では、LCCNへの移行に関わる市町村の廃棄物処理の移行過程について、自治体関係者等へのヒアリングも実施しながら、詳細に調査し描出し、その影響・効果を評価することが出来た（成果55）。

で、ロードマップを提示する。	<p>来た（成果57）。また、LCCNへの移行プロセスを描出した。</p> <p>サブテーマ4では、将来の有機系素材の利用や廃棄状況について、詳細な推計を実施することができた（成果18）。また、堺コンビナートを対象とするケーススタディも実施した（成果80）。</p> <p>各サブテーマで協力して、LCCNが炭化水素系の資源のカーボンニュートラルの達成に不可欠で、少子高齢化に伴う廃棄物発生量や廃棄物組成の変化に対しても柔軟に対応できる合理的なシステムとなることを示すことができた。</p> <p>研究成果を実際に社会に実装するための活動も、当初の想定以上に実施することが出来た。国内の3地域のコンビナートにおいて、産官学の連携体制の下に、将来のCCUの導入も見据えたLCCN Ready（蒸気供給）の事業化に向けた検討を実施している。また海外ではインド、インドネシアでも事業化に向けた活動を産官学の連携体制を構築して実施することができた。更に、一般社団法人LCCN推進研究会を設立し、活動を開始した。LCCNの導入によって高い環境・経済両面の効果が期待できることを踏まえて、行政の環境政策にも複数の具体的貢献をすることが出来た。</p>
----------------	---

## &lt;サブテーマ1 達成状況の自己評価&gt; ······ 2. 目標を上回る成果をあげた

「カーボンニュートラルなプラスチック循環経済を支える技術提案と評価」（国立環境研究所、藤井実）

サブテーマ1目標	サブテーマ1達成状況
<p>カーボンニュートラルなプラスチックの合理的な製造方法として、廃棄物から選別された循環型燃料を、石油化学コンビナートの熱需要に合わせて焼却して利用する循環型蒸気供給プラント（装置構成は廃棄物焼却施設に準じるもの）及び蒸気供給のための付帯設備の仕組みを想定・モデル化し、その費用対効果を示す。</p> <p>また、従来の石油を原料とするプロセスに加えて、バイオマス原料、ケミカルリサイクル原料によるプラスチック製造、循環型蒸気供給プラントの燃焼排ガスからCO<sub>2</sub>を回収して原料として供給するプラスチック製造の各プロセスについて、文献情報やヒアリング等から、物質、エネルギー収支を推計し、費用対効果を大まかに把握する。</p> <p>また、各サブテーマの成果を集約して、自治体等での一般廃棄物の発生段階から、分別収集、選別、輸送、利用の段階を、将来の条件変化も踏まえて総合的に評価し、提案する方法でカーボンニュートラルなプラスチックの循環型製造・リサイクル・処理を実施した場合のCO<sub>2</sub>削減効果及び経済性の概略を評価する。産業廃棄物については、RPF（固形燃料）としての利用も困難な、低品位な廃棄物を積極的に収集、利用してCO<sub>2</sub>排出削減効果の底上げを図</p>	<p>複数の化学・製紙メーカー等の協力により、コンビナートでの蒸気の利用状況の調査した上で、廃棄物焼却施設からの蒸気供給について、実現可能性の高いシステムを提案し、その効果について評価することができた。独立過熱器を用いたシステムで蒸気供給を制御することで、コンビナート側でコジェネレーションを行えるレベルの高圧蒸気を、廃棄物の発熱量や再エネの発電状況にも対応しながら需給をバランスさせるシステムを設計し、成果は計画を超えて特許申請（成果1）に繋げることができた。</p> <p>LCCNによってリサイクル困難な低品位廃棄物から基礎化学原料となるメタノールを製造するプロセスについては、廃プラスチックのケミカルに匹敵する効率で実現可能であることを明らかにした。これは学術と政策の両面で大きなインパクトのある成果であると評価している（成果8）。</p> <p>また、森林炭素蓄積量の経年的な変化も踏まえて、バイオマスプラスチック製造に関わる正味のCO<sub>2</sub>排出量の変化をシミュレートし、2050年時点では国産バイオマス原料への転換では、むしろCO<sub>2</sub>排出の増加をもたらす可能性があり、グリーン水素を投入してバイオマス中炭素の転化率を高めるなどの対策が必要であることを明らかにしたことは、学術的な意義の大きな成果である。</p>

る。自治体、化学産業を合わせた合計としての社会コスト削減と、2030年に約200万t/年、2040年に自治体の半数の提案システムへの移行で約1000万t/年のCO<sub>2</sub>削減に繋がる計画実現の目途を示す。

LCCNの実装によるCO<sub>2</sub>排出削減効果については他のサブテーマと連携して算出したが、コンビナートで代替される燃料として石炭ではなく重油を想定したことや、当初の想定より焼却廃棄物が減る評価となつたため、約半数の自治体が新たなシステムに移行するとした場合、LCCN Readyだけでは目標の1000万t-CO<sub>2</sub>/年には満たない600万t-CO<sub>2</sub>/年程度の削減に留まることが明らかになった。ただし、将来CCUを付隨させることで、LCCNで処理される廃棄物については、-100万t-CO<sub>2</sub>/年程度のカーボンネガティブが達成されることになる。

社会実装に向けた検討を、国内外の複数のコンビナートで実施し、現在も継続している。化学メーカー、製紙メーカー、自治体、産廃処理事業者、プラントメーカー等の関心や期待は非常に高く、詳細な検討が進んでいる。国内で検討中の3地域で実現すれば事業初期のスケールでも30万t-CO<sub>2</sub>/年の削減が期待される。設立した（一社）LCCN推進研究会の活動への関心も高く、参加自治体の増加による処理規模の増加や、他のコンビナートへの水平展開で大幅に効果を拡大できる可能性も大きい。

### <サブテーマ2達成状況の自己評価> ······ 3. 目標どおりの成果をあげた

「自治体の廃棄物処理システムの転換方策の検討」（日本環境衛生センター、溝田健一）

サブテーマ2目標	サブテーマ2達成状況
各自治体で焼却中心の処理方法を改め、廃棄物の特性及び地域の特性に合わせて廃棄物を分別・回収し、それぞれ適切な循環圏の空間スケールで合理的に利用する方法を提案し、その実現可能性を評価する。	適切な循環圏の空間スケールで各自治体で合理的に資源を利用する方法として、肥料需要が存在すると考えられる農業地域においては厨芥の分別収集を実施、容器包装プラスチックの分別収集を実施している地域では製品プラスチックを分別収集した上で、焼却施設更新のタイミングでLCCNへ参画する方法を提案した。
従来の容器包装リサイクル及び新法の下で回収される材料・ケミカルリサイクル好適プラスチック、地域でエネルギーや肥料に利用する食品廃棄物、全国で6カ所程度の石化コンビナートに広域から集約・燃焼してプラスチック製造工程等に蒸気供給を行う循環燃料に選別する（瓶、缶、古紙等は従来通りの回収・リサイクルを想定）ソーティングプラントの機能を設定し、それぞれを高効率に利用するシステムの詳細なプロセスの検討・評価を行う。	ソーティングプラントについては、地域で食品廃棄物資源循環を実施するためには、発生源での分別の必要性が高いことから、機能としては可燃ごみを中継する施設と設定した（図11）。
今後の廃棄物発生量や組成の変化、再生可能な電力の供給状況の変化も踏まえて、従来の焼却・発電を中心とするシステムと比較して、費用・効果の変化を評価する。	以上を踏まえ、分別収集や人口変化を考慮し、全国の将来の廃棄物発生量、ごみの低位発熱量を算定し（表8）、各施設の更新情報をもとに、システム転換に係る費用、メタン発酵によるエネルギー回収等の変化の評価を実施した（表9）。
また、提案するシステムの周知を兼ねた自治体へのアンケートやヒアリング調査を通じて、実現に向けた課題を整理し、システム転換のロードマップを示す。	廃棄物の広域処理や委託処理に係る既存の法制度や通知等の情報収集・整理を実施し、課題整理を実施した上で、ある都道府県及び一部の構成市町村と意見交換を実施した成果も踏まえ、システム転換のロードマップを示した。

## &lt;サブテーマ3達成状況の自己評価&gt; ······ 3. 目標どおりの成果をあげた

「石化工場コンビナート向け循環型燃料の長距離・高効率輸送の検討」（日本通運、村上正樹）

サブテーマ3目標	サブテーマ3達成状況
<p>各自治体による焼却発電を中心としたエネルギー回収の仕組みから、石化工場コンビナートに蒸気供給用循環型燃料を集約して、カーボンニュートラルなプラスチック製造のためのエネルギー源として活用する、広域利用の仕組みの実現を可能にする、安全、効率的な輸送方法を提示する。</p> <p>地理的に有利な自治体から優先的に全国の半数程度の自治体が提案する仕組みに参加した場合の、輸送に掛かる費用を概算してその実現可能性を評価する。</p> <p>石化工場コンビナートは臨海部に立地することから、循環型燃料の効率的輸送の観点と、コンビナートの周辺道路に多数のトラックが集中する事態を避ける観点から、海上輸送を検討対象に含める。日本通運（株）は鉄道や船舶などの輸送手段の検討、（株）グーンは輸送の荷姿の検討、（株）エックス都市研究所は輸送費や輸送に関わるインベントリ調査を主に担う。</p>	<p>各自治体による焼却発電を中心としたエネルギー回収の仕組みから、石化工場コンビナートに蒸気供給用循環型燃料を集約して、カーボンニュートラルなプラスチック製造のためのエネルギー源として活用する、広域利用の仕組みの実現を可能にする、安全、効率的な輸送方法を提示できた。</p> <p>地理的に有利な自治体から優先的に全国の半数程度の自治体が提案する仕組みに参加した場合の、輸送に掛かる費用を概算してその実現可能性を評価した。</p> <p>石化工場コンビナートは臨海部に立地することから、循環型燃料の効率的輸送の観点と、コンビナートの周辺道路に多数のトラックが集中する事態を避ける観点から、海上輸送を検討対象に含めた。日本通運（株）は鉄道や船舶などの輸送手段の検討、コスト計算、燃料消費量を計算した。（株）グーンは輸送の荷姿、圧縮梱包に関わるCO<sub>2</sub>排出量の原単位の作成、（株）エックス都市研究所は輸送費や輸送情報、及び、自治体の施設整備計画をデータベース化し、インベントリ調査を主に担った。各分担で協力し、サブテーマ3の研究成果として取りまとめた。</p>

## &lt;サブテーマ4達成状況の自己評価&gt; ······ 3. 目標どおりの成果をあげた

「有機系資源の循環経済の将来シナリオに関する検討」（名古屋大学、谷川寛樹）

サブテーマ4目標	サブテーマ4達成状況
<p>提案するプラスチックを含む有機系廃棄物のカーボンニュートラルな製造、リサイクル、処理の仕組みを検討する際の、社会背景についての分析を行う。将来の有機系素材（プラスチック、紙、木材等）の生産、利用、ストック、排出、循環利用に関わるシナリオを提示する。また、本課題で提案する、極めて高効率にエネルギー回収・利用する方法を選択肢として持つことが、素材の循環利用に与える影響も考察する。これらの検討を通して、提案するシステムが廃棄物の発生状況等の社会情勢の変化に対してレジリエントなシステムとなり得るかを評価する。</p>	<p>本サブテーマでは、3年間の研究計画に沿って国内外の有機系素材の現状の利用傾向の調査を行うとともに、廃棄物・資源循環に関わるGHG削減効果を推計するモデルの作成、有機系素材に着目したストック・フロー分析のためのデータ整備を行った。加えて、作成したモデルを用いて、将来の有機系素材の利用シナリオによる資源循環への影響及びシステムの評価を行った。本サブテーマの研究成果は、計画時に設定した「サブテーマ4目標」とも整合しており、加えて、現時点の行政等が既に活用した成果も存在している。このことから、研究全体として目標どおりの成果をあげたと自己評価する。</p>

## 1. 6. 研究成果発表状況の概要

## 1. 6. 1. 研究成果発表の件数

成果発表の種別	件数
産業財産権	1

査読付き論文	6
査読無し論文	10
著書	1
「国民との科学・技術対話」の実施	10
口頭発表・ポスター発表	62
マスコミ等への公表・報道等	0
成果による受賞	2
その他の成果発表	0

### 1. 6. 2. 主要な研究成果発表

成果番号	主要な研究成果発表 (「研究成果発表の一覧」の査読付き論文又は著書から10件まで抜粋)
5	S He Z., Sun L., Hijioka Y., Nakajima K., Fujii M. (2023) Systematic review of circular economy strategy outcomes in the automobile industry. Resources, Conservation and Recycling, 198 <a href="http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107203">http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107203</a>
6	牧誠也, 大西悟, 藤井実, 河井紘輔, 後藤尚弘 (2024) 焼却施設の廃棄物組成と家計消費額のデータ結合による全国レベルでの家計消費額当たり組成別廃棄物発生量原単位推計法の開発. 環境科学会誌, 37(1), 1-14 <a href="https://doi.org/10.11353/sesj.37.1">https://doi.org/10.11353/sesj.37.1</a>
9	Chen W., Wei C., Sun L., Dong H., Hijioka Y., Nakajima K., Fujii M. (2024) Carbon-neutral heat supply strategies for industrial decarbonization: A critical and systematic literature review. Cleaner and Responsible Consumption, 15 <a href="https://doi.org/10.1016/j.clrc.2024.100244">https://doi.org/10.1016/j.clrc.2024.100244</a>
10	Chen W., Ohnishi S., Maki S., Kawai K., Sun L., Dong H., Dong L., Dou Y., Qian T., Hijioka Y., Nakajima K., Fujii M. (2025) Industrial heat defossilization: A comparative analysis of waste incineration and clean energy scenarios. Journal of Cleaner Production, 491 <a href="https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.144802">https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.144802</a>
11	He Z., Sun X., Nakajima K., Murakami S., Hijioka Y., Fujii M., Sun L. (2025) Rapid vehicle electrification reduces carbon benefits but increases resource savings in circular automobile transitions. Environmental Research Infrastructure and Sustainability, 5, 015010
18	太田裕也, 山下奈穂, 蝶田有希, 白川博章, 谷川寛樹: 都市構造物を対象とした世代間の同一性判定による建設資材ストック・フロー推計, 環境情報科学論文集, Vol.37, Pp.195-201(2023).
20	藤井実 (2023) 4.3.2 廃棄物エネルギー利用の高度化と展望. 日本エネルギー学会編, 廃プラスチックの現在と未来 - 持続可能な社会におけるプラスチック資源循環 -, コロナ社

注：この欄の成果番号は「研究成果発表の一覧」と共通です。

### 1. 6. 3. 主要な研究成果普及活動

本研究の成果であるLCCNのコンセプトの普及と社会実装に向けて、産官学の多くの関係者との意見交換や事業化に向けた検討の場を持った。他の予算を使って実施された会合もあるので、厳密に成果を配分することは難しいが、国内では少なくとも80社の民間企業、30の自治体や公的機関、海外では30以上の企業や政府機関等と会合をもち、そのうちの複数社・機関とは事業化に向けた打ち合わせを継続している。また、大学、研究機関とは国内外の約25機関と連携している。これらの研究成果普及活動を通して、その意義が多くの人々に理解され、事業化について真剣に検討する関係者の輪が広がっている。この流れを加速したい。

### 1. 7. 国際共同研究等の状況

<国際共同研究の概要>

<相手機関・国・地域名>

機関名（正式名称）	(本部所在地等の)国・地域名
特に記載する事項はない。	

注：国・地域名は公的な表記に準じます。

### 1. 8. 研究者略歴

<研究者（研究代表者及びサブテーマリーダー）略歴>

研究者氏名	略歴（学歴、学位、経歴、現職、研究テーマ等）
藤井実	研究代表者及びサブテーマ1リーダー 東京大学大学院工学系研究科化学システム工学専攻で博士（工学）を取得後、同専攻で助手、国立環境研究所研究員、名古屋大学エコトピア科学研究所講師、国立環境研究所主任研究員等を経て、現在は同研究所社会システム領域システムイノベーション研究室・室長 専門は化学工学、カーボンニュートラル社会、資源循環 (一社) LCCN推進研究会・代表理事、高度資源循環・デジタル化推進協議会・会長
溝田健一	サブテーマ2リーダー（2022年度から2023年度6月まで。体調不良による長期休業のため交代。） 横浜国立大学教育学部卒業後、 一般財団法人日本環境衛生センター入所 総局 資源循環低炭素化部 企画・再生可能エネルギー事業課 課長 専門は環境工学
西畠俊太朗	サブテーマ2リーダー（2023年度6月から。） 京都大学工学部卒業後、 一般財団法人日本環境衛生センター入所 総局資源循環低炭素化部企画・再生可能エネルギー事業課 主任 専門は環境工学、廃棄物処理、資源循環
村上正樹	サブテーマ3リーダー 中央大学文学部卒 資源循環営業部（復興）にて福島復興事業に従事。県内仮置き場から中間貯蔵施設向け輸送を計画、実施した。現在はインダストリアルマテリアルセールス部（石油・新エネルギー）に所属し、木質ペレット等のバイオマス固形燃料、ブラックペレット、バイオフューエル、S A F等の新エネルギーの利用拡大と安定流通にむけた営業取組を継続している。
谷川寛樹	サブテーマ4リーダー 九州大学工学部卒業、博士（工学） 現在、名古屋大学環境学研究科 教授 ISIE (International Society of Industrial Ecology) Board、 環境情報科学会 理事、環境科学会 理事、土木学会環境システム委員会 委員兼幹事 専門は土木環境システム工学

## 2. 研究成果発表の一覧

### (1) 産業財産権

成果番号	出願年月日	発明者	出願者	名称	出願以降の番号
1	2025年2月	藤井実	国立環境研究所	排熱利用装置及び蒸気の利用方法	特願2025-26578

### (2) 論文

&lt;論文&gt;

成果番号	発表年度	成果情報	主たるサブテーマ	査読の有無
2	2023	藤井実 (2023) 廃棄物処理・リサイクルにおけるカーボンニュートラルの実現に向けた取り組みと課題. 都市清掃, 76 (374), 9-16	1	無
3	2023	藤井実 (2023) 持続可能でカーボンニュートラルな素材の生産と利用方法に関する考察. 公益財団法人自動車リサイクル促進センター ARCIPレポート	1	無
4	2023	藤井実 (2023) 2050年CNを踏まえた廃棄物資源循環分野の役割. INDUST (全国産業資源循環連合会) , 432, 2-7	1	無
5	2023	He Z., Sun L., Hijioka Y., Nakajima K., Fujii M. (2023) Systematic review of circular economy strategy outcomes in the automobile industry. Resources, Conservation and Recycling, 198 <a href="http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107203">http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107203</a>	1	有
6	2024	牧誠也, 大西悟, 藤井実, 河井紘輔, 後藤尚弘 (2024) 焼却施設の廃棄物組成と家計消費額のデータ結合による全国レベルでの家計消費額当たり組成別廃棄物発生量原単位推計法の開発. 環境科学会誌, 37(1), 1-14 <a href="https://doi.org/10.11353/sesj.37.1">https://doi.org/10.11353/sesj.37.1</a>	1	有
7	2024	藤井実 (2024) プラスチックの生産・廃棄をカーボンニュートラルにする仕組み（その1）. I産廃振興財団 WEB JOURNAL 2024年夏号	1	無
8	2024	藤井実 (2024) プラスチックの生産・廃棄をカーボンニュートラルにする仕組み(その2). 産廃振興財団 WEB JOURNAL 2024年秋号	1	無
9	2024	Chen W., Wei C., Sun L., Dong H., Hijioka Y., Nakajima K., Fujii M. (2024) Carbon-neutral heat supply strategies for industrial decarbonization: A critical and systematic literature review. Cleaner and Responsible Consumption, 15 <a href="https://doi.org/10.1016/j.clrc.2024.100244">https://doi.org/10.1016/j.clrc.2024.100244</a>	1	有
10	2024	Chen W., Ohnishi S., Maki S., Kawai K., Sun L., Dong H., Dong L., Dou Y., Qian T., Hijioka Y., Nakajima K., Fujii M. (2025) Industrial heat defossilization: A comparative analysis of waste incineration and clean energy scenarios. Journal of Cleaner Production, 491 <a href="https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.144802">https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.144802</a>	1	有
11	2025	He Z., Sun X., Nakajima K., Murakami S., Hijioka Y., Fujii M., Sun L. (2025) Rapid vehicle electrification reduces carbon benefits but	1	有

		increases resource savings in circular automobile transitions. Environmental Research Infrastructure and Sustainability, 5, 015010		
12	2024	土井麻記子「産業の脱炭素化モデルとネットゼロにむけた国際的な産業クラスターのイニシアチブ」日本LCA学会誌, 2024, 20巻, 2号, p. 68-76、2024年4月	3	無
13	2022	土井麻記子、「韓国埋立場循環利用整備事業における廃棄物圧縮梱包～日本に適用可能な一般廃棄物の広域輸送技術の検討～」都市と廃棄物、第53巻、第12号、pp47-56、2022年12月	3	無
14	2022	土井麻記子、「廃棄物焼却熱の産業利用と広域輸送の実現に向けて」都市と廃棄物、第53巻、第7号、pp. 42-58、2022年7月	3	無
15	2022	永田聰太、蛭田有希、白川博章、谷川寛樹：災害被害削減・GHG排出削減の住宅ストック更新からの検討、環境システム研究論文発表会講演集, 50, 43-48(2022).	4	無
16	2022	太田裕也、蛭田有希、白川博章、谷川寛樹：日本全国における建築物と土木構造物を対象とした建設活動由来のCO <sub>2</sub> 排出量推計、環境システム研究論文発表会講演集, 50, 73-78(2022).	4	無
17	2023	太田裕也、山下奈穂、蛭田有希、白川博章、谷川寛樹：都市構造物を対象とした世代間の同一性判定による建設資材ストック・フロー推計、環境情報科学論文集, Vol.37, Pp.195-201(2023). <a href="https://doi.org/10.11492/ceispapers.ceis37.0_195">https://doi.org/10.11492/ceispapers.ceis37.0_195</a>	4	有

## (3) 著書

&lt;著書&gt;

成果番号	発表年度	成果情報	主たるサブテーマ
18	2023	藤井実 (2023) 4.3.2 廃棄物エネルギー利用の高度化と展望. 日本エネルギー学会編, 廃プラスチックの現在と未来 - 持続可能な社会におけるプラスチック資源循環 -, コロナ社	1

## (4) 口頭発表・ポスター発表

&lt;口頭発表・ポスター発表&gt;

成果番号	発表年度	成果情報	主たるサブテーマ	査読の有無
19	2022	Fujii M. (2022) Promotion of carbon neutral plastic circular economy through collaboration between the waste sector and the material industry. ISIE-SUS Virtual Seminar on Cities and Circular Economy (June 3rd, 2022), -	1	無
20	2022	藤井実 (2022) 化学等の素材産業のカーボンニュートラル化に向けた廃棄物及び再生可能エネルギーの有効利用. 水島から考える脱炭素－中小企業が立てるべき事業戦略とは－	1	無
21	2022	藤井実 (2022) 化学・製紙産業等のカーボンニュートラル化に向けた廃棄物の適材適所での高効率利用. YUSA廃棄物部会 第2回勉強会 「廃棄物焼却熱の有効利用から産業の脱炭素化へ」	1	無
22	2022	牧誠也, 大西悟, 藤井実 (2023) LSTM法とテキスト分析による工場名称からの蒸気需要業種工場の	1	無

		分類法の開発. 情報処理学会 第85回全国大会		
23	2022	竇毅, 大西悟, 藤井実, 菊池康紀 (2023) 地理情報に基づいた産業排熱交換のための廃棄物焼却施設の立地選定. 第39回エネルギー・システム・経済・環境コンファレンス, 講演論文集, 212-215	1	無
24	2022	大西悟, 藤井実, 牧誠也, DouYi, 土井麻記子, 菅原日奈, 塚本祐樹 (2022) 産業団地の熱電エネルギー需要の推計手法の開発と福島県地域でのケーススタディ. 第50回環境システム研究論文発表会講演集, 同予稿集, 127-134	1	無
25	2022	牧誠也, 藤井実, 村崎充弘, 太田垣貴啓, 真鍋和俊 (2022) 収集車両の経路ログデータを用いた各ごみステーションのごみ収集量推計による収集運搬計画提案ツールの開発. 第50回環境システム研究論文発表会, 第50回環境システム研究論文発表会講演集, 50, 115-120	1	無
26	2023	Fujii M. (2023) Systems for Carbon-Neutral Plastic from Non-Recyclable Waste. 2023 ULSAN INTERNATIONAL SYMPOSIUM FOR CARBON NEUTRALITY, -	1	無
27	2023	藤井実 (2023) ライフサイクルカーボンニュートラル (LCCN) の実現に向けて. 令和5年度第1回CARDワーキンググループ	1	無
28	2023	Maki S., Ohnishi S., Fujii M., Goto N. (2023) Development classification Model of Demand-Place Industries by Text Analysis Using Company Names and Estimated of Spatial Heat Supply Potential from Waste for Circular Economical Potential Evaluation -Case Study on Steam Supply-. International Society for Industrial Ecology LEIDEN, -	1	無
29	2023	牧誠也, 大西悟, 藤井実, 後藤尚弘 (2023) 電話帳データの企業名を用いたテキスト分析による蒸気需要業種工場の分類モデルの開発および空間蒸気需要の推定. 第42回エネルギー・資源学会研究発表会, 第42回エネルギー・資源学会研究発表会, 45, 145-146	1	無
30	2023	大西悟, 倉持秀敏, 小林拓朗, 中村省吾, 藤井実, 五味馨 (2023) 浜通り産業団地における木質・廃棄物系コンバインドシステムの適用による脱炭素効果と経済性推計. 第12回環境放射能除染研究発表会, 同予稿集	1	無
31	2023	牧誠也, 大西悟, 藤井実, 後藤尚弘, 河井紘輔 (2023) 空間的な家計消費推計の時系列分析による家庭部門の活動量の将来推計及び空間推定アルゴリズムの検討. 環境科学会2023年会, 環境科学会2023年会講演要旨集	1	無
32	2023	Maki S., Ohnishi S., Fujii M., Goto N. (2023) Development Method for Spatial Recyclable Resources Demand-Supply Potential by Text Mining and Consideration for Data Structure: Case Study on Industrial Steam Demand Estimation. Ulsan International Symposium for Carbon Neutrality, -	1	無

33		大西悟, 藤井実, 牧誠也, 中村省吾, 越智裕士, 藤原宏太 (2023) 中小規模工場のカーボンニュートラルにむけて-産業種別エネルギー第51回環境システム発表会, 第51回環境システム発表会予稿集	1	無
34	2023	藤井実 (2024) プラスチック等のLCCN(ライフサイクルカーボンニュートラル)の実現に向けて. 日本LCA学会／環境研究総合推進費3CN-2202】共催セミナー「2050年化学・製紙産業のカーボンニュートラルの姿」	1	無
35	2023	牧誠也, 大西悟, 藤井実, 後藤尚弘 (2024) 循環資源利用の効率化のための空間需要推計法およびデータフォーマットの検討 一焼却場からの蒸気利用研究例を対象としてー. 第19回日本LCA学会研究発表会, 第19回日本LCA学会研究発表会講演要旨集, 19(2-D4-04)	1	無
36	2023	He Z., Hijioka Y., Fujii M., Nakajima K. (2024) Driving Towards Net-Zero: Assessing GHG Emission Reduction Potential Through Low-carbon Energy Technology and Circular Economy Strategies in China and Japan's Passenger Vehicle Sector. The 19th Meeting of the Institute of the Life Cycle Assessment, -	1	無
37	2023	He Z., Fujii M., Hijioka Y., Nakajima K. (2024) Driving Towards Net-Zero: Assessing GHG Emission Reduction Potential Through Circular Economy Strategies in China and Japan's Passenger Vehicle Sector. The 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management, -	1	無
38	2023	藤井実 (2024) CNなプラスチックの製造・廃棄を見据えた廃棄物資源循環の考え方とLCCNの導入に向けて. CLOMA第5回技術セミナー「国際的なプラスチック問題から考える日本の廃棄物有効活用とCEへのシステム転換」	1	無
39	2024	Fujii M. (2024) Life Cycle Carbon Neutral: Carbon neutral production, consumption and disposal of all materials. The 19th International Conference on Waste Management and Technology, -	1	無
40	2024	Fujii M. (2024) Life Cycle Carbon Neutral: Reducing industrial emissions through clean and efficient waste utilization. Unlocking finance to support climate and clean air solutions in India, -	1	無
41	2024	藤井実 (2024) リサイクル困難な廃棄物の高効率なエネルギー活用とカーボンニュートラル化. 日本機械学会 2024年度年次大会, -	1	無
42	2024	Maki S., Ohnishi S., Fujii M., Goto N. (2024) Consideration of industrial database format for the resource recycling and for matching recyclable resources using between industries. The 19th International Conference on Waste Management and Technology, -	1	無
43	2024	Maki S., Ohnishi S., Fujii M., Goto N. (2024) Consideration of industrial database format	1	無

		for the resource recycling and for advanced matching recyclable resources using between industries by using Semantic WEB approach. 19th Conference on sustainable development of energy, water and environment systems, -		
44	2024	藤井実（2024）プラスチックのライフサイクルでのカーボンニュートラルの達成に向けて。環境研究環境研究シンポジウム 第6回環境研究機関連絡会研究交流セミナー，-	1	無
45	2024	藤井実（2024）動・静脈産業連携によるプラスチックのカーボンニュートラル化。中国地区化学工学懇話会 2024年度セミナー「脱炭素社会を支えるカーボンニュートラルとバイオマス技術」，-	1	無
46	2024	牧誠也，大西悟，藤井実，後藤尚弘，河井紘輔（2024）深層学習を用いた家計消費品目分類における時空間自動推計法の開発. 52回環境システム研究論文発表会，第52回環境システム研究論文発表会講演集，52, 104	1	無
47	2024	Maki S., Ohnishi S., Fujii M., Goto N. (2024) A consideration of data-format and utilization of spatial demand estimation method for efficient use of recyclable resources. The 16th Biennial International Conference on EcoBalance 2024, -	1	無
48	2024	牧誠也，大西悟，藤井実，後藤尚弘，河井紘輔（2024）用途分類における空間家計消費推計の自動・時系列推計計算アルゴリズムの開発及びサブモデル分割による拡張法の提案. 2024年度環境情報科学研究発表大会 第21回環境情報科学ポスターセッション，-	1	無
51	2024	藤井実（2025）LCCN (Life Cycle Carbon Neutral) の社会実装に向けた取組み- 循環経済とカーボンニュートラルの両立-. 第5回 循環経済生産性ビジネス研究会，-	1	無
52	2024	藤井実（2025）特別区の廃棄物のカーボンリサイクルと素材産業との連携の可能性. 東京二十三区清掃一部事務組合 第25回技術発表会，-	1	無
53	2024	牧誠也，大西悟，藤井実，後藤尚弘，河井紘輔（2025）空間家計消費推計値を用いた時空間における世帯特性を考慮した家庭活動からの環境影響量推計. 第20回LCA学会研究発表会，-，	1	無
54	2024	藤井実（2025）廃棄物の熱エネルギー高効率利用と化学産業のカーボンニュートラル化. 2024年度第2回エネルギー高度利用セミナー	1	無
55	2023	西畠俊太朗、立尾浩一、藤井実「蒸気供給プラントへの集約に向けた自治体の廃棄物処理システムの転換シナリオ」廃棄物資源循環学会 関東支部研究発表会（2024.3.1）（ポスター発表）	2	無
56	2024	西畠俊太朗、立尾浩一、大西悟、藤井実「製品プラスチック、厨芥類の分別に伴う焼却ごみ量、発熱量の全国推計」第46 回全国都市清掃研究・事例発表会（2025.2.7）	2	無
57	2025	土井麻記子、錢塔娜、村上正樹、北井俊樹、牧誠也、藤井実「ライフサイクルカーボンニュートラル（LCCN）コンセプトに基づく一般廃棄物の広域輸送	3	有

		「シミュレーション」第46回全国都市清掃研究・事例発表会、2025年2月（富山）		
58	2024	Makiko Doi、「Wide-area transportation and carbon neutrality in waste treatment in Japan」The 19th International Conference on Waste Management and Technology, Subforum 4、2024年5月（杭州）	3	有
59	2023	Makiko DOI, Katsuhiko YOSHIKAWA, Takashi TSUBOUTI, Masaki MURAKAMI, Toshiro BANDAI, Keitaro IKEDA, Toshiki KITAI, Minoru FUJII、「Analysis of efficient waste transportation methods to enable incineration heat supply to Japan's chemical industry」11TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL ECOLOGY (Netherland, Liden) Special Session: Trans-continental research agenda for inclusive circular urban industrial innovation systems (Part 1)、2023年7月（ライデン）	3	有
60	2022	谷川寛樹：ストック型社会の構築に向けた地域の建設系物質代謝、公益社団法人環境科学会 2022年会（オンライン開催）。	4	無
61	2022	山下奈穂、加用千裕、谷川寛樹：木造住宅と森林の木材需給を考慮した炭素ストックのシナリオ分析、環境科学会 2022年会（オンライン開催）。	4	無
62	2022	藤川奈々、山下奈穂、蛭田有希、白川博章、谷川寛樹：滞留年数の延長による将来ストック・フロー及びCO <sub>2</sub> 排出量への影響評価—道路におけるケーススタディー、公益社団法人環境科学会 2022年会（オンライン開催）。	4	無
63	2022	松代竜毅、山下奈穂、蛭田有希、白川博章、谷川寛樹：日本版SSPシナリオに基づく人口変化に伴う下水道ストックの将来推計、公益社団法人環境科学会 2022年会（オンライン開催）。	4	無
64	2022	K. KHUMVONGSA, J. GUO, S. THEEPHARAKSAPAN, H. SHIRAKAWA, H. TANIKAWA: Sustainability challenge of transportation infrastructure development in Bangkok from material stock viewpoint, the 14th ISIE Socio-Economic Metabolism section conference, Vienna, Austria.	4	無
65	2022	太田裕也、蛭田有希、白川博章、谷川寛樹：日本全国における建築物と土木構造物を対象とした建設活動由来のCO <sub>2</sub> 排出量推計、第50回環境システム研究論文発表会（ハイブリット開催）(2022)。	4	無
66	2022	永田聰太、蛭田有希、白川博章、谷川寛樹：災害被害削減・GHG排出削減の住宅ストック更新からの検討、第50回環境システム研究論文発表会（ハイブリット開催）(2022)。	4	無
67	2022	藤川奈々、山下奈穂、蛭田有希、白川博章、谷川寛樹：滞留年数の延長による資源循環及び気候変動緩和への影響評価—道路構造物のケーススタディー、2022年度環境情報科学 研究発表大会（オンライン開催）(2022)。	4	無
68	2023	H. TANIKAWA, H. SHIRAKAWA, Y. HIRUTA, N. YAMASHITA, I. DAIGO, I. MARUYAMA, N.	4	無

		HIRAKYAMA, S. IZUKA: Impact Projection of Climate Change Adaptation Measures for Sustainable Urban Built Environment, 11th International Conference on Industrial Ecology, Leiden, the Netherlands, 2023.		
69	2023	N. YAMASHITA, T. FISHMAN, C. KAYO, Y. HIRUTA, H. SHIRAKAWA, H. TANIKAWA: The impacts of combined forest management and wooden construction on carbon fixation in Japan , 11th International Conference on Industrial Ecology, Leiden, the Netherlands, 2023.	4	無
70	2023	喜古響, 蛭田有希, 山下奈穂, 白川博章, 谷川寛樹: 日本の道路インフラに関するマテリアルストックの空間分布の変化について, 公益社団法人環境科学会 2023年会 (2023).	4	無
71	2023	榎原誠人, 山下奈穂, 蛭田有希, 白川博章, 谷川寛樹: 地理的・社会的要因が住宅の更新状況に及ぼす影響評価—福岡県北九州市におけるケーススタディー, 第51回環境システム研究論文発表会 (2023).	4	無
72	2023	太田裕也, 山下奈穂, 蛭田有希, 白川博章, 谷川寛樹: 都市構造物を対象とした世代間の同一性判定による建設資材ストック・フロー推計, 2023 年度環境情報科学 研究発表大会 (2023).	4	有
73	2023	中川岳, 橋本征二:産業施設での大規模熱利用に向けた一般廃棄物焼却処理のシナリオ分析, 第19回日本LCA学会研究発表会 (2024) .	4	無
74	2024	Ge, Y., 橋本征二:都市ごみ焼却施設からの温室効果ガス排出削減シナリオ～自治体間の比較, 第19回日本LCA学会研究発表会 (2024) .	4	無
75	2024	Nakagawa, G. and S. Hashimoto: Scenario analysis on the utilization of heat from a large-scale municipal solid waste incinerator for an industrial facility, 2024 Joint ISIE Socio-Economic Metabolism and Asia-Pacific Conference, 2024.	4	無
76	2024	林優輝, 長谷川正利, 白川博章, 谷川寛樹: 住宅における内装材・家財ストック量の推計, 公益社団法人環境科学会 2024年会 (2024).	4	無
77	2024	中川岳, 大西悟, 藤井実, 橋本征二:産業施設における大規模焼却熱利用に関するシナリオ分析, 第35回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2024) .	4	無
78	2024	林亮介, 橋本征二:森林等の炭素蓄積変化を考慮した木材の建築材利用とエネルギー利用によるGHG排出削減効果の評価, 2024年度環境情報科学 研究発表大会 (2024)	4	無
79	2024	林優輝, 長谷川正利, 白川博章, 谷川寛樹: 住宅の内装材・家財を考慮した資材投入原単位の拡張に関する研究, 2024 年度環境情報科学 研究発表大会 (2024).	4	無
80	2024	中川岳, 大西悟, 藤井実, 橋本征二:産業施設への大規模焼却熱利用に関するシナリオ分析～CCU導入と電力排出係数変化の影響～, 第20回日本LCA学会研究発表会 (2025) .	4	無
81	2024	神田橋幸也, 橋本征二:焼却熱の産業利用に向けた廃棄物焼却施設の統合手順の検討, 第20回日本LCA	4	無

		学会研究発表会（2025）.		
82	2024	林亮介, 橋本征二:森林の炭素蓄積変化を考慮した木材利用によるGHG排出削減効果の評価, 第20回日本LCA学会研究発表会（2025）.	4	無

## (5) 「国民との科学・技術対話」の実施

成果番号	発表年度	成果情報	主たるサブテーマ
83	2022	環境省こどもエコクラブ ステークホルダーミーティング 2022での講演（2023年1月18日）（参加者：20名程度）	1
84	2022	公益社団法人化学工学会特別シンポジウム（一般公開）「2050年カーボンニュートラルへの道」での講演（2023年3月14日）（参加者：100名以上）	1
85	2023	国際社会の資源循環に関する講演会を開催（2023年9月28日）（参加者：10名程度）	4
86	2023	日本LCA学会による一般向けセミナーでの講演（2024年2月29日）（参加者：60名程度）	2
87	2023	兵庫県立兵庫高校での授業（オンライン）（2024年3月6日）（参加者：40名程度）	1
88	2023	岡山大学カーボンニュートラル拠点事業シンポジウムでの講演（2024年3月28日）（参加者：300名以上）	1
89	2024	日本学術会議, 安全工学シンポジウム2024での講演（2024年6月26日）（会場参加者：20名程度、オンライン参加者：不明）	1
90	2024	持続可能なプラントEXPO2024での講演（2024年7月24日）（参加者：100名程度）	1
91	2024	CLOMAフォーラム2024での講演（2024年9月3日）（参加者：300名以上）	3
92	2024	第6回環境研究機関連絡会研究交流セミナーでの講演（2024年11月28日）（参加者：50名程度）	1

## (6) マスメディア等への公表・報道等

成果番号	発表年度	成果情報	主たるサブテーマ
		特に記載する事項はない。	

## (7) 研究成果による受賞

成果番号	発表年度	成果情報	主たるサブテーマ
93	2022	2022年度環境情報科学研究発表大会 事務局長賞	4
94	2023	公益社団法人環境科学会2023年会 優秀発表賞富士電機賞	4

## (8) その他の成果発表

成果番号	発表年度	成果情報	主たるサブテーマ
		特に記載する事項はない。	

## 権利表示・義務記載

この研究成果報告書の文責は、研究課題に参画した研究者にあります。

この研究成果報告書の著作権は、引用部分及びERCAのロゴマークを除いて、原則的に著作者に属します。

独立行政法人環境再生保全機構（ERCA）は、この文書の複製及び公衆送信について許諾されています。

**Abstract****[Project Information]**

Project Title :	Maximizing Environmental and Economic Effects Through Wide-area Carbon Neutral Circular Economy of Combustible Waste Including Plastics and Regional Circulation of Food Waste
Project Number :	JPMEERF20223C02
Project Period (FY) :	2022-2024
Principal Investigator :	Fujii, Minoru
(PI ORCID) :	ORCID0000-0002-6930-5115
Principal Institution :	National Institute for Environmental Studies Tsukuba City, Ibaraki, JAPAN Tel: +81-29-850-2447 E-mail: m-fujii@nies.go.jp
Cooperated by :	Japan Environmental Sanitation Center, Nippon Express, Ex Research Institute, Guun, Nagoya University, Ritsumeikan University
Keywords :	Plastic, Food waste, Petrochemical complex, Circular economy, Heat utilization

**[Abstract]**

Toward the realization of carbon neutrality and the creation of a circular economy, we proposed a system called LCCN (Life Cycle Carbon Neutral), in which low-grade waste that is difficult to recycle is collected in a chemical complex, incinerated to supply steam to a chemical process, and plastics are manufactured from the resulting CO<sub>2</sub> by CCU (carbon capture and utilization). We also evaluated the environmental and economic effects of LCCN. We also assumed that some municipalities would carry out methane fermentation of food waste in conjunction with the wide-area transportation of waste for incineration. In sub-theme 1, we proposed a system to supply steam from incinerators to chemical plants on a large scale in accordance with demand, at temperatures and pressures that can also be used for cogeneration and demonstrated its effectiveness. We also demonstrated that the system of producing basic chemical raw material (methanol) via CO<sub>2</sub> using LCCN has high energy efficiency comparable to that of producing methanol through chemical recycling of plastics, because there is virtually no loss in steam supply from incineration. In sub-theme 2, we examined in detail the transition of municipal waste treatment systems and demonstrated that wide-area treatment using LCCN brings great economic benefits. In sub-theme 3, we investigated and proposed a system to transport waste for incineration to a chemical complex safely, hygienically, and efficiently through case studies both in Japan and abroad. In sub-theme 4, we evaluated the future waste generation situation of hydrocarbon materials and the potential for resource utilization. A comprehensive evaluation of the results of the four sub-themes showed that with the participation of approximately half of the municipalities in Japan, LCCN Ready (steam supply) can reduce emissions by 7 million t-CO<sub>2</sub>/year and reduce economic costs, and that LCCN can achieve carbon negativity. Based on the

research results, we were able to vigorously carry out activities both domestically and overseas toward the social implementation of LCCN.

This research was performed by the Environment Research and Technology Development Fund (JPMEERF20223C02) of the Environmental Restoration and Conservation Agency provided by Ministry of the Environment of Japan.