

Final Research Report of the Environment Research and Technology Development Fund

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（一般課題）

研究実施期間 : 2022（令和4）年度～2024（令和6）年度

課題番号 : 3-2201

体系的番号 : JPMEERF20223001

研究課題名 : カーボンニュートラル目標と調和する日本の物質フロー構造の解明

Project Title : Material Flow Structures in Japan in Harmony with a Carbon Neutrality Target

研究代表者 : 南齋 規介

研究代表機関 : 国立環境研究所

研究分担機関 : 京都大学、パシフィックコンサルタンツ株式会社

キーワード : 物質バジエット、物質フロー指標、循環経済ビジネス、副産物利用、ごみ処理広域化、食品ロス削減、CCUS、炭素需給、空間的マッピング

2025（令和7）年5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

研究課題情報		3
<基本情報>		3
<研究体制>		3
<研究経費>		4
<研究の全体概要図>		5
1. 研究成果		6
1. 1. 研究背景		6
1. 2. 研究目的		6
1. 3. 研究目標		7
1. 4. 研究内容・研究結果		8
1. 4. 1. 研究内容		8
1. 4. 2. 研究結果及び考察		18
1. 5. 研究成果及び自己評価		35
1. 5. 1. 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献		35
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		38
1. 6. 研究成果発表状況の概要		42
1. 6. 1. 研究成果発表の件数		42
1. 6. 2. 主要な研究成果発表		43
1. 6. 3. 主要な研究成果普及活動		43
1. 7. 国際共同研究等の状況		44
1. 8. 研究者略歴		44
2. 研究成果発表の一覧		45
(1) 研究成果発表の件数		45
(2) 産業財産権		45
(3) 論文		47
(4) 著書		47
(5) 口頭発表・ポスター発表		53
(6) 「国民との科学・技術対話」の実施		53
(7) マスメディア等への公表・報道等		53
(8) 研究成果による受賞		54
(9) その他の成果発表		54
権利表示・義務記載		54

Abstract

研究課題情報

<基本情報>

研究区分 :	環境問題対応型研究（一般課題）
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11】ライフサイクル全体での徹底的な資源循環に関する研究・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 :	(2-6) 循環経済（サーキュラーエコノミー）への移行による脱炭素社会の実現に向けたシナリオ分析の高度化
課題番号 :	3-2201
体系的番号 :	JPMEERF20223001
研究課題名 :	カーボンニュートラル目標と調和する日本の物質フロー構造の解明
研究代表者 :	南齋 規介
研究代表機関 :	国立環境研究所
研究分担機関 :	京都大学、パシフィックコンサルタンツ株式会社
研究協力機関 :	なし

<研究体制>

サブテーマ1 「日本版物質フロー・ネクサスモデルの開発」

<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	資源循環領域	領域長	南齋規介	
分担者	国立環境研究所	資源循環領域	主任研究員	渡 卓磨	
分担者	国立環境研究所	資源循環領域	主任研究員	小出 瑠	

サブテーマ2 「静脈フローモデルの開発」

<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	京都大学	環境安全保健 機構環境管理 部門	教授	平井康宏	
分担者	京都大学	環境安全保健 機構環境管理 部門	准教授	矢野順也	
分担者	国立環境研究所	資源循環領域	主任研究員	河井紘輔	
分担者	国立環境研究所	社会システム 領域	研究員	牧 誠也	

サブテーマ3 「資源循環CCUS技術のカーボンニュートラル評価」

<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	パシフィックコ ンサルタンツ株 式会社	社会イノベー ション事業本 部GX推進部	部長	井伊亮太	
分担者	パシフィックコ ンサルタンツ株 式会社	社会イノベー ション事業本 部GX推進部	技術課長	山本 圓	
分担者	パシフィックコ ンサルタンツ株 式会社	社会イノベー ション事業本 部GX推進部	主任	長野尚也	2022年度～ 2024年8月
分担者	パシフィックコ ンサルタンツ株 式会社	社会イノベー ション事業本 部GX推進部	主任	永友 佑	
協力者	パシフィックコ ンサルタンツ株 式会社	社会イノベー ション事業本 部GX推進部	主任	高木寛人	2024年度
協力者	パシフィックコ ンサルタンツ株 式会社	社会イノベー ション事業本 部環境共生部	主任	猪狩浩介	2022年度～ 2023年度

<研究経費>

<研究課題全体の研究経費（円）>

年度	直接経費	間接経費	経費合計	契約上限額
2022	30,224,520	8,397,115	38,621,635	39,416,000
2023	31,091,159	7,927,961	39,019,120	39,499,000

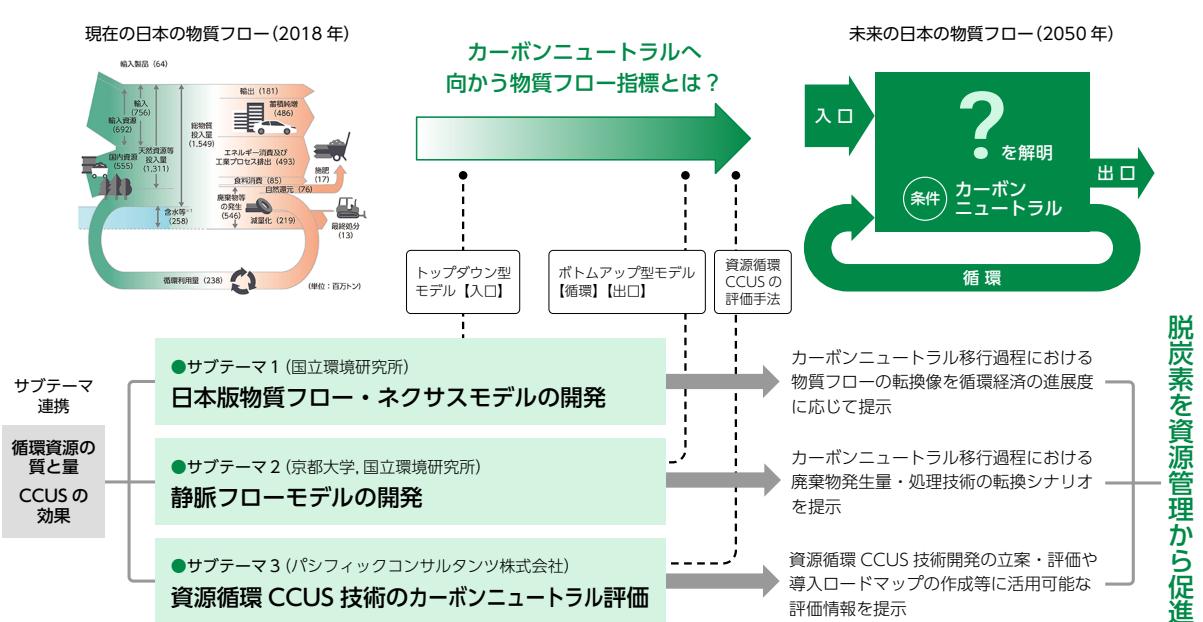
2024	31,778,797	9,017,851	40,796,648	39,081,000
全期間	93,094,476	25,342,927	118,437,403	117,996,000

<研究の全体概要図>

研究課題名：カーボンニュートラル目標と調和する日本の物質フロー構造の解明

【目標】 2050 年カーボンニュートラル社会と調和する日本の物質フロー構造を解明し、その科学的知見と数値情報の提供により、物質フローの転換を担う多様なステークホルダーが「カーボンニュートラル先導型の循環経済へ移行するための物質フロー管理」を実践することを支援。

【研究代表機関】
国立環境研究所



1. 研究成果

1. 1. 研究背景

UNEP国際資源パネル（UNEP-IRP）の推計によれば、天然資源の採掘から加工までに排出される温室効果ガス（GHG）は世界のGHG排出量全体の約30%を占める。そして、脱炭素社会の実現にはエネルギー技術の進化だけでなく、物質の利用効率を飛躍的に高め、経済成長と天然資源消費との徹底的なディカッピング（分離）が不可欠と指摘する。2019年の日本のCO₂排出量のうち、25%は素材を生産する産業部門からの排出であるが、電化が困難なプロセスが多く、太陽光や風力発電等の普及促進では素材製造の排出削減は進まない。日本が2050年にカーボンニュートラル社会を実現するには、UNEP-IRPの指摘のように、日本の生産と消費の両面において物質の利用構造を大きく変革する必要がある。日本における物質利用の全体像は「循環型社会形成推進基本計画（循環基本計画）」に基づく物質フローの観測で把握される。そして、物質フローの「入口」「循環」「出口」に注目した4つの物質フロー指標を規定し、各指標には2025年度の目標値が設定（研究開始時の第4次循環基本計画における目標年度、現在の第5次では2030年度）されている。

しかし、現在の目標値は日本が2050年カーボンニュートラル社会を宣言する前に定められている。カーボンニュートラルの実現には革新的な物質フローの転換の必然性を鑑みると、カーボンニュートラルと物質フロー目標の整合性を検証し、今後の目標設定の考え方を深化させることが求められる。また、物質フローの転換の要となる生産活動と消費形態を明確にすることが、企業レベルでの具体的な対策や目標づくりに有益であるが、循環基本計画による現在の物質フロー指標にはその解像度がない。

1. 2. 研究目的

本研究では、GHG排出量を経済社会における物質のフロー、ストック、循環、廃棄の動態変化を基礎に算定するモデルを新たに開発し、2050年カーボンニュートラル社会と整合する日本の物質フロー構造を解明することを目的とする。この目的は、行政ニーズ「（2-6）循環経済（サーキュラーエコノミー）への移行による脱炭素社会の実現に向けたシナリオ分析の高度化」に対応する。

本研究の全体目標は、物質のフローとストックの変化に応じたGHG排出量の増減を推計する数理モデルの開発を通じ、2050年カーボンニュートラル（CN）社会と調和する日本の物質フロー構造をシナリオ分析に基づき解明することである。その科学的知見と数値情報の提供により、物質フローの転換を担う多様なステイクホルダーが「CN先導型の循環経済へ移行するための物質フロー管理」を実践することを支援する。

サブテーマ1は、物質フローを入口からトップダウンに捉え、日本国内の物質フローとストックの変化に応じたGHG排出量の増減を推計する動的最適化モデルを開発する。金属、土石、バイオマス資源、プラスチックを主対象とし、二次資源利用、素材代替、寿命延長等の循環経済オプションによるGHG排出削減効果をモデルに組み込む。また、国内の物質フローの変化と対応する消費形態についても分析する。

サブテーマ2は、物質フローの循環と出口に着目し、廃棄物処理・リサイクル工程からのGHG排出量を算定するボトムアップ型のモデルを開発する。変化する製造業の物質フローと家計消費と整合する産業廃棄物と一般廃棄物の発生量および組成を推定するとともに、これらを処理・利用する静脈プロセスをモデル化し、炭素制約に適合する静脈フローを同定する。

サブテーマ3は、注目される循環経済オプションである資源循環CCUS（二酸化炭素回収・有効利用・貯留）を対象に2050年CN社会との整合性を踏まえたライフサイクル評価手法を開発する。加えて、国内で整備開発が進む資源循環CCUS技術を中心対象にインベントリデータを収集し、事例研究を通じて評価手法の妥当性と有効性を検証する。

以上の研究からCNに向けたGHG排出制約の下、日本の物質フローの入口、循環、廃棄の断面に要求される変化を包括的に明らかにし、循環基本計画の物質フロー指標目標の検証と産業界における物質フローの目標設定に貢献することで、脱炭素社会作りを資源管理から促進する。

1. 3. 研究目標

<全体の研究目標>

研究課題名	カーボンニュートラル目標と調和する日本の物質フロー構造の解明
全体目標	<p>本研究の全体目標は、物質のフローとストックの変化に応じたGHG排出量の増減を推計する数理モデルの開発を通じ、2050年カーボンニュートラル社会と調和する日本の物質フロー構造をシナリオ分析に基づき解明することである。その科学的知見と数値情報の提供により、物質フローの転換を担う多様なステークホルダー（関係主体）が「カーボンニュートラル先導型の循環経済へ移行するための物質フロー管理」を実践することを支援する。これにより、脱炭素社会づくりを資源管理から促進する。</p> <p>モデル開発は日本の物質フローを入口から捉えるトップダウン型のフロー・ストックモデルと循環・出口の物質フローを実態調査データから組み上げるボトムアップ型モデルを軸として行い、循環基本計画に基づく物質フロー指標の目標設定に利用可能な解像度を付与する。同時に、資源循環CCUS（二酸化炭素回収・利用・貯留）技術のライフサイクル評価手法を開発し、廃棄物処理CCUS 技術を上記モデルに搭載するための論理基盤を強化する。</p> <p>3つのサブテーマは物質フローの特に循環段階においてモデル構造と出入力を密接に関連づけていく。また、2050年に向けた人口変化、電力供給と輸送に関するGHG排出原単位の将来変化と炭素貯留量の見込み等を外生シナリオとしてサブテーマ間で共有し、物質利用に許容されるGHG排出量に関する整合性をサブテーマ間で担保する。</p>

<サブテーマ1の研究目標>

サブテーマ1名	日本版物質フロー・ネクサスモデルの開発
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	日本国内の物質フローとストックの変化に応じたGHG排出量の増減を推計する動的最適化モデルを開発し、カーボンニュートラルに向かうGHG排出制約下で利用可能な物質量（物質バジエット）を算定する。さらに、二次資源利用、素材代替、寿命延長等の循環経済オプションによるGHG排出削減効果をモデルに組み込み、物質バジエットへの影響を定量化する。得られる知見を総括し、カーボンニュートラル移行過程における物質フローの転換像を循環経済の進展度に応じて提示する。

<サブテーマ2の研究目標>

サブテーマ2名	静脈フローモデルの開発
サブテーマ2実施機関	京都大学、国立環境研究所
サブテーマ2目標	CE（サーキュラーエコノミー）&CN（カーボンニュートラル）社会における将来の廃棄物発生量を推計する。家計消費と一般廃棄物発生量の結合モデルを開発・拡張し、CE&CN社会における消費行動と廃棄行動のあり方を提

	示する。さらに、カーボンニュートラルを見据えた素材産業の生産技術変化を踏まえた廃棄物処理・リサイクル工程のボトムアップ型プロセスモデル群を開発し、カーボンニュートラル移行過程における廃棄物発生量・処理技術の転換シナリオを提示する。
--	---

<サブテーマ3の研究目標>

サブテーマ3名	資源循環CCUS技術のカーボンニュートラル評価
サブテーマ3実施機関	パシフィックコンサルタンツ株式会社
サブテーマ3目標	資源循環分野へ導入するCCUS (Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage) 技術を対象に、2050年カーボンニュートラル目標を達成する物質・エネルギー・システムの将来シナリオへの適合性を踏まえたライフサイクル評価を実施する論理的枠組を提案し、複数種類の技術で試算・適用することで、関連技術開発の立案・評価や導入口ードマップの作成等での活用を念頭において評価情報を提示する。

1. 4. 研究内容・研究結果

1. 4. 1. 研究内容

本研究では、GHG排出量を経済社会における物質のフロー、ストック、循環、廃棄の動態変化を基礎に算定するモデルを新たに開発し、2050年カーボンニュートラル社会と整合する日本の物質フロー構造を解明することを目的として、「日本版物質フロー・ネクサスモデルの開発」、「静脈フローモデルの開発」および「資源循環CCUS技術のカーボンニュートラル評価」をサブテーマとして構成し、以下に記述する研究を実施した。

【サブテーマ1】日本版物質フロー・ネクサスモデルの開発

サブテーマ1の目標である日本国内の物質フローとストックの変化に応じたGHG排出量の増減を推計する動的最適化モデルの開発として、金属資源（鉄鋼部門）、土石資源（セメント・コンクリート）の国内モデルを開発し、炭素排出制約下での利用可能な物質量（物質バジエット）を推計した。加えて、これら資源の世界全体での将来動態を確認するため物質バジエットの世界モデルを開発し、国内の位置付けと整合性の確認を行なった。バイオマス資源を対象としたモデル開発として、一般住宅の建築材料としての木材に注目し、脱炭素化経路の解明を行なった。一方、日本の物質フロー指標の変化要因を生産者と消費者、その間をつなぐサプライチェーンに着目し、各要素の影響を定量化した。さらに、カーボンニュートラルと調和する物質フロー目標を探査するモデルを開発し、物質利用の効率化から脱炭素社会へ移行するための物質フローの目標値を導出した。また、消費者への脱物質化戦略によるGHG削減効果を算定するツール開発として、循環型ビジネスモデルを事前評価するモデルの開発を行なった。以下、各研究項目の背景と方法を記述する。

・国内資源供給部門のカーボンニュートラル経路の探索

国内鉄鋼部門（金属資源）

電力部門や運輸分野では、再生可能エネルギーの導入や電気自動車の普及など、既に商業ベースで利用可能な脱炭素技術が存在する一方、世界のCO₂排出量の約7%を占める鉄鋼産業においては、同様の商業規模

の解決策が確立されていない。鉄鋼生産プロセスでは鉄鉱石の還元にコークスを使用し、そのプロセスで不可避的なCO₂排出が生じることから、「脱炭素化困難（hard-to-abate）」産業の一つとされている。

このような特徴を持つ鉄鋼産業の脱炭素化に関する科学的議論は、主に統合評価モデルをはじめとしたエネルギー・システムモデルを用いた分析に依拠してきた。しかし既存モデルを鉄鋼産業に適用する際には2つの大きな課題が存在する。第一に、多くの既存モデルでは鉄鋼需要が外生的に与えられるため、排出削減戦略は主に炭素回収・貯留（CCS）や水素還元製鉄（H₂-DRI）といった革新的（あるいは投機的）な生産技術に依存することである。第二に、既存モデルは鋼材を単一の均質な製品として扱っており、異なる品質の鋼材製品を区別していない点である。実際には、鋼材製品は形状や仕様が多岐にわたり、生産プロセスや最終用途も大きく異なる。

近年、マテリアルフロー分析（MFA）に基づく研究が、こうした知識のギャップを補完している。最近の研究では、鉄スクラップ中の不純物が将来的な鉄鋼リサイクルの制約となる可能性が指摘されており、仮に炭素制約を加味しない場合でも、リサイクル鋼材から不純物の許容限界が高い高品質鋼材（例：深絞り用鋼板）を製造することは、今後ますます困難になると考えられている。一方、既存研究の課題は、将来の鉄鋼需要が制約なく拡大することを前提としている点にある。すなわち、厳格な炭素排出許容量の制約が、さまざまな品質の鋼材製品生産に如何なる影響を与えるのかは明らかになっていない。このため、国際的な気候目標と整合する炭素制約のもとで、どの種類の鋼材製品をどの程度生産・利用できるのかが不明確なままである。この知識の欠如は、仮に革新的な生産技術が時間内に大規模展開できなかった場合の代替戦略の検討を困難にしている。本研究の目的はこの乖離を埋めることにある。

炭素制約下での将来の鉄鋼フロー変化は、本研究で新規に開発した「物質バジェットモデル」を用いて解析した。本モデルは、炭素排出制約の下で社会に蓄積される鋼材製品の量を最大化するための鉄鋼フロー構造を導出する。生産技術の変化はあくまで業界のロードマップや実際の建設計画に沿ってのみ進展することを想定しており、必ず所与の需要を満たすように生産技術が変革されることを想定する既存モデルとは本質的な考え方異なる。炭素制約は日本政府の長期戦略に基づき、2030年までに2013年比で46%削減、2050年までにカーボンニュートラルを達成することを前提とした。生産技術や循環経済に関して、本研究では以下に示す3つのシナリオを試行した。

- [1] 対策なし：すべてのモデルパラメータを現状維持とし、技術革新やリサイクル率の向上を想定しないシナリオ。本シナリオは各種介入策の影響を評価するための基準となる。
- [2] 技術革新シナリオ：現在検討されている生産技術が業界ロードマップに沿って導入されることを想定したシナリオ。BF/BOFおよびEAFのエネルギー効率改善や、水素還元製鉄（H₂-DRI）、CCS導入、電力供給の脱炭素化などを考慮する。
- [3] 循環経済シナリオ：鉄鋼の長寿命化およびリサイクル率の向上を想定したシナリオ。老廃スクラップの回収率改善や、製品寿命の延長（再利用、修理、再製造）を考慮する。

国内セメント・コンクリート部門（土石資源）

鉄鋼と同様に、セメント・コンクリート産業もまた脱炭素化困難な産業である。その主な要因は、セメントの原料となるクリンカの製造工程において、石灰石の脱炭酸反応によって不可避的にCO₂排出が生じること、そして電化が困難な領域の高温熱供給が必要であるためである。こうした課題に対して、既存の研究では、エネルギー効率の向上や、クリンカ・セメント比の低減、低炭素燃料の利用、代替バインダーによるセメント代替、CCS、炭素回収・利用（CCU）など、さまざまな供給側の対策による排出削減の可能性が個別で示されてきた。さらに近年の研究では、建設物の効率的設計や長期利用などを含む需要側の対策に大きな排出削減の可能性があることが指摘されている。しかし既存研究では、さまざまな対策の排出削減効果を個別に検討するにとどまっており、1.5~2°Cの気候目標を達成するために不可欠な今世紀半ばまでの脱炭素化への具体的な道筋が示されていない。すなわち、如何なる対策の組み合わせによってセメント・コンクリート産業の脱炭素化が達成可能なのかが不明確なままである。そこで本研究では、物質フローモデルを、各プロセスからのCO₂排出量を算出するLCAモデル、そしてコンクリートの炭酸化によるCO₂吸収量を定量化する物理化学モデルと統合化することで、日本におけるセメント・コンクリート産業の脱炭素化経路を探査した。

脱炭素経路の解析は、セメント・コンクリートを供給する側における対策（供給側）と、構造物の設計や建設、利用、解体時にセメント・コンクリートを需要する側における対策（需要側）の可能性を調査し、物質フローモデルの変数・パラメータに反映させることで実施した。具体的には、エネルギー効率改善や燃料転換、セメント原料代替、低炭素型セメント、炭素回収利用技術（CCU）等の供給側での計9対策、素材を過剰に利用する設計の回避や、建設物の長期利用、共有化、都市機能の集約化、解体部品の再利用等の需要側での計7対策を考慮し、各対策のCO₂排出削減効果を定量的に解析した。

世界全体の鉄鋼・セメント部門

日本を対象に実施した鉄鋼・セメント・コンクリート部門の物質バジェット分析をさらに発展させ、国際的な議論へと昇華させることを目的とし、世界規模での解析を試みた。既存の物質バジェットモデルを基礎としつつ、革新的な生産技術の導入度合いを左右するインフラ整備の不確実性を明示的に考慮したモデルを構築した。確率的に入力データをサンプルし、それに基づいて線形最適化を繰り返すことで、供給可能量の不確実性範囲を導出するというアプローチである。インフラ整備の不確実性は、IEAのシナリオ、実際の導入規模、および将来の導入計画をもとに設定した。

世界的な鉄鋼・セメント部門の炭素制約については、世界の平均気温上昇を1.5°Cおよび2°C以内に抑えるための炭素バジェットに基づいて設定した。まず、全産業で達成すべき排出削減率を決定し、それを鉄鋼・セメント部門に割り当てることで、これら部門で達成すべき脱炭素経路を求めた。すなわち、これらの産業が他の産業と同等の年率で排出削減を進めるという仮定に基づく。

推定される2050年までの鉄鋼・セメントの物質バジェット（炭素予算内での将来の供給可能量）と各材料に対する将来需要量を比較することで、どの程度現状より少ない材料利用量で同レベルのサービス提供を達成すべきかを明らかにした。比較対象となる需要は3つのパターンを用意した。介入を行わない成り行きシナリオ、緩やかな需要削減戦略が導入されるシナリオ、そして既存の文献で最も野心的な需要削減戦略が実施されるシナリオである。

国内建築材料部門（バイオマス資源）

本研究では、日本全国の建築物を対象に、木造建築の拡大が建築材料の生産に伴う炭素排出や、森林の炭素吸収に与える影響を解析した。手法的特徴は、材料生産、コンクリート炭酸化、伐採木材製品使用、森林成長など、建築物と森林に関連する炭素フローを包括的に考慮している点にある。なお、CCSやグリーン水素の利用は考慮せずに、あくまで現在利用可能な技術のみで建築材料の脱炭素経路を示す。

まず、主要な建材である鉄鋼、コンクリート、木材に着目し、政府統計や産業報告書を基に建築物の基礎、床、壁、屋根、階段などの構造要素ごとの利用量を推定した。また、材料の生産過程で発生するCO₂排出量を評価するために、前述のLCAモデルを拡張し、複数素材の生産に伴う燃料消費や電力使用量、化学的プロセスに関するデータを整備した。なお、ここでは材料の輸送による排出のうち、製造施設までの移動に伴うものは含めるが、建設現場や解体現場への輸送は考慮していない。コンクリートの炭酸化によるCO₂吸収量に関しても同様に、前述の物理化学モデルを用いて推定を行なった。木材製品（HWP：Harvested wood products）による炭素貯蔵については、日本の国家インベントリで報告されている「生産法」を採用し、国内で生産された木材に蓄積される炭素量を評価した。この方法では、輸入材の影響を考慮しない。

建築材料として木材を使用することで、森林から都市への炭素移動が生じる。そこで、森林・都市・大気間の炭素の流れをモデル化し、森林の年間炭素吸収量の変化を分析した。推計には、樹種別および年齢別の森林データを活用し、森林面積や樹齢ごとの成長量、木材密度、炭素固定率を基に、主要樹種（スギ、ヒノキ、カラマツ）に対する伐採と再造林の影響を評価した。なお、本研究では、森林残渣や建築廃棄物のエネルギー回収による炭素クレジットは考慮していない。これは、システム境界の一貫性を保つための措置であり、廃棄物に含まれる炭素は大気中に放出されるものと仮定した。

建築材料の脱炭素化に資する6つの対策としては、[1] 脱炭素電力の利用、[2] 低炭素鋼材の利用、[3] 低炭素コンクリートの利用、[4] 木造建築の拡大、[5] 設計の最適化、[6] 建築物の長寿命化を考慮した。[1] 脱炭素電力の利用：電力供給の完全な脱炭素化を想定する。電力供給の脱炭素化は、材料の生産過程における電力使用量の割合に応じて、各建材の排出量に異なる影響を与える。例えば、現在のEAF（電炉）鋼

の炭素排出量の約70%は電力使用に起因しているが、BOF（転炉）ではこの割合は5%未満であり、コンクリートでは10%未満である。木材生産の排出量の約20%は電力使用に由来するため、電力の脱炭素化は木材使用における排出削減にも寄与する。

[2] 低炭素鋼材の利用：鋼材製品の生産において、EAF鋼の比率を最大限に引き上げる。現在、棒系製品の94%、板系製品の30%、管製品の95%がEAFで生産されているが、これを100%にすることを目指す。この移行において課題となるのは、不純物の管理である。特に高品質の板系製品では、不純物要件が厳しく、現在のプロセスでは対応が難しい。しかし、製品設計の最適化や高度な選別技術、破碎・加工プロセスの改善等によって、EAF鋼の適用範囲を拡大することが可能であると指摘する文献は多く存在する。

[3] 低炭素コンクリートの利用：コンクリートの製造プロセスにおいて、エネルギー効率の向上と材料配合の最適化を実施する。具体的には、熱エネルギー効率を3GJ/t-クリンカ、電気エネルギー効率を85kWh/t-セメントに向上させ、燃料の排出原単位を89kg-CO₂/MJに低下させる。また、セメント中のクリンカ含有率を現在の83%から世界平均の72%に引き下げ、コンクリート中のセメント使用量を15%削減する。これらの対策はコンクリートの強度要件を満たした上で実現可能である。

[4] 木造建築の拡大：建築物の木造比率を大幅に引き上げる。住宅用途では木造率を約90%、非住宅用途では60%に増加させることを目標とする。これは、低層から高層の住宅建築、および低層から中層の非住宅建築において木造建築を積極的に導入することを意味する。また、過去20年間の傾向に基づき国内の木材供給率も上昇することを想定する。

[5] 設計の最適化：建築物の設計を見直し、必要な構造強度を維持しながら使用材料を削減する。具体的には、既存研究を参考に構造体に使用される鋼材の量を25%、コンクリートの量を13%削減することを想定する。この削減は、安全性や耐久性を損なうことなく実現可能である。

[6] 建築物の長寿命化：新築建築物の平均寿命を100年に延ばす。この戦略は日本で現在推進されている法律とも整合的であり、新規に建設される建築物が長寿命化することを想定する。この取り組みにより、新規建築の頻度を抑えることが可能となる。

・物質フロー指標の変化要因とカーボンニュートラル化への目標設定

物質フロー指標の変動要因解析

日本は循環型社会推進基本計画に基づき4つの物質フロー指標を設定し、国内の資源利用の全体像を管理している。指標の改善は資源消費の効率化と循環型社会への転換に貢献してきた。一方で、これらの物質フロー指標の改善を駆動する経済的・技術的な要因が、同時に脱炭素社会への転換にも整合的に貢献しているかは不明確である。

本研究では、生産側で生じる物質消費を家計消費等の最終需要のマテリアルフットプリント（サプライチェーンを通じて誘引される物質消費）として勘定する産業連関モデルを開発し、物質フローの変動要因を消費、サプライチェーン、生産の要因に着目して同定した。具体的には、循環基本計画に基づく4つの物質フロー指標（資源生産性: RP、最終処分量: FD、入口側循環利用率: CU_{in}、出口側循環利用率: CU_{out}）の変化に着目し、産業連関表の発行された2011年から2015年に掛けて各指標値が改善した要因を特定した。同時に、その要因が日本のGHG排出量に対して増加または減少要因であったかを判別し、物質フローとGHG排出量の両者の改善に対して整合的であったかを検証した。

カーボンニュートラル化を先導する物質フロー指標の目標値

そこで本研究は、素材生産の革新的技術の普及を前提としない場合、日本における2050年CN社会の達成に向けて要求される物質フローの構造変化を明らかにした。固定資本内包型産業連関モデルを拡張した二次計画法動学最適化モデルを開発し、現在の家計消費構造への影響を最小にしつつ、物質消費の削減と循環によってCN社会に到達する条件をシナリオ別に特定した。

シナリオは、将来の人口予測のみを反映した成り行きシナリオに加え、国内への総物質投入量を削減する物質削減目標を有する3つのシナリオを設定した。3つの物質削減シナリオでは、エネルギー部門の脱炭素戦略として、2050年には100%の電力が脱炭素化されると仮定した。加えて、循環型社会推進基本計画に基づいて設定される物質フロー指標の目標値と整合する総物質投入量（国内資源+輸入資源+国内循環資源）

の削減目標を年率2%と設定した。さらに、野心的な年率3%、4%の削減目標を設定した。3つの物質削減シナリオの具体的な設定は以下のとおりである。

[1] 需要調整シナリオ

導入する戦略を物質削減目標とエネルギー脱炭素化戦略のみとし、需要調整により物質削減目標を達成するシナリオ。

[2] 物質フロー転換シナリオ

国際資源パネルが、物質由来の温室効果ガス排出を削減するための主要セクターとして自動車および住宅を強調した物質効率化戦略に基づき、以下の戦略を想定。

- 1) 次世代型自動車に対する物質効率化戦略の導入
- 2) 建築物（住宅および非住宅）の寿命延長
- 3) 循環利用率の向上

[3] 革新的技術普及シナリオ

物質生産部門に革新的な脱炭素技術が普及することを仮定したシナリオである。具体的には、GHGの直接排出量の多い鉄鋼部門・セメント部門・化学製品部門・製紙部門における生産当たりのGHG排出量が2050年には半減する程度、革新的技術が普及することを仮定。

・循環型ビジネスモデルの戦略性に関する事前評価モデルの開発

急速な拡大を見せる循環型ビジネスモデルに対し、早期の意思決定を支援するために環境面と循環性を事前に評価することが求められている。すなわち、「循環型ビジネスモデルの普及に効果的なサービス設計や施策は何か？」「循環型ビジネスモデルを環境的に持続可能に導入するための条件は何か？」という2つの問い合わせに一貫して答えられる手法が必要とされている。しかしながら、多様な消費者行動の特徴を踏まえ、製品ライフサイクルにわたる環境影響と循環性を事前に評価する手法は確立されていなかった。例えば、環境影響を定量化するライフサイクルアセスメント（LCA）、物質の流れを定量化する物質フロー分析（MFA）では、一般に過去のデータに基づき、平均的な消費者を仮定した後ろ向きの評価を中心であり、消費者行動の多様性や将来へのダイナミックな行動変容を考慮した環境影響を前向きにすることは困難であった。

本研究では、数千以上の消費者や製品をコンピュータ上に再現する「エージェントベースモデル（ABM）」を7種類のCE戦略に適用するモデル開発を行った。この手法では、個々の消費者を自律的に意思決定を行うエージェントとしてボトムアップにモデル化し、消費者どうしや循環形態の異なる個々の製品との相互作用を踏まえた社会全体への循環型ビジネスモデルの普及とそれによる環境影響および循環性の変化を動的にシミュレーションする。タイムステップは1ヶ月単位であり、耐久消費財の寿命を考慮してシミュレーション期間は数十年間とした。

製品循環に関しては、製造、購入、使用、廃棄から循環までの製品ライフサイクル全体を対象とし、消費者によって異なる製品の使用期間や廃棄理由、製品が稼働していない待機期間、使用済みの製品を廃棄せずに世帯で一定期間保管される退蔵などの特徴をモデルに反映した。特に、製品の陳腐化（使用中止）に関しては部品故障による絶対的陳腐化と、社会的・経済的な理由による相対的陳腐化を考慮し、それぞれワイルド分布を用いてモデル化した。対象とするサーキュラーエコノミー戦略はシェアリング、レンタル、リース、リユース、リファービッシュ、機能アップグレード、リペアの7種類とし、1つの戦略のみならず、リファービッシュ品のレンタルサービスのような複数の戦略を組み合わせたビジネスモデル、リユースとシェアリングのような戦略間の比較を対象とした。

【サブテーマ2】静脈フローモデルの開発

サブテーマ2の目標であるカーボンニュートラル社会における将来の廃棄物発生量の推計として、家計消費に基づく一般廃棄物発生量と組成の将来推計を実施し、家庭系食品ロスの発生可能量推定、によって、カーボンニュートラル社会における消費行動と廃棄行動のあり方を提示した。また、廃棄物発生量や処理施設

立地の空間分布に関し、廃棄物系バイオマスのバイオメタン化および発酵残渣の農地還元に係る都道府県別インベントリ評価、ならびに、ごみ処理広域化における最適施設配置を検討した。これらの検討内容を踏まえて、3R+施策のGHG削減効果推定を実施し、カーボンニュートラル移行過程における廃棄物発生量・処理技術の転換シナリオを提示した。さらに、カーボンニュートラルを見据えた素材産業の生産技術変化を踏まえた廃棄物処理・リサイクル工程のボトムアップ型プロセスモデル群の開発として、電力・鉄鋼・セメント産業の脱炭素化と副産物利用について検討した。以下、各研究項目の背景と方法を記述する。

・廃棄物発生量と抑制可能量の推定

家計消費に基づく一般廃棄物発生量と組成の将来推計

家庭からの廃棄物発生量を組成別・空間的に把握するため、家計消費の空間推計値と一般廃棄物調査実態調査(以下、実態調査)に記載された環政95号基準における廃棄物組成を連結させて、空間的な組成別廃棄物発生量を推計するモデルの開発を行った。また、このモデルを時系列的に分析可能な形にし、単位当たり廃棄物発生量の推計や細分類調査データとの連結を可能にするモデルの改良を進めた。さらに、家庭からの環境影響を空間的に把握するため、総務省が提供している政府統計E-statのAPI機能を活用し、時系列的な空間家計消費推計値を自動計算するアルゴリズムを開発し、将来的な経済項目等の高度な予測モデルを開発した際に変換が可能なサブシステムモデルの構築を行った。本モデルでは、将来の人口分布として国立社会保障・人口問題研究所「日本の地域別将来推計人口（平成30（2018）年推計）」を用い、家計消費のデータとして各都道府県の用途分類における「家計調査」の結果を用いた。また、経済指標として連続的にデータが存在する「県民経済統計」の課税所得の値を同様にAPIで自動取得できるシステムの構築を行った。

家庭系食品ロスの発生抑制可能量推定

家庭系食品ロスは、消費者が日々の食品の購入、保存、調理、廃棄といった場面で生まれるものであり、これを削減するためには、消費者の行動変容が不可欠である。そこで、食品ロス発生に影響を及ぼす消費者行動を特定し、その影響を定量化した。具体的には、まず、消費者を対象とするアンケート調査を実施し、世帯属性や消費者行動を説明変数として、食品ロス発生頻度を推定する順序付きロジットモデルを構築した。次に、食品ロスの発生頻度と食品ロス重量との関係を検討するため、2015年から2017年の京都市家庭ごみ細組成調査における食品ロスの発生実態調査の元データを解析した。この発生実態調査では、家庭から排出された計884個の「燃やすごみ」の袋をサンプリングし、各ごみ袋に含まれる「手つかず食品（期限切れ廃棄に相当）」を取り出し、品目や重量を記録したものである。発生実態調査における手つかず食品の出現率（調査をした袋数に対する、手つかず食品が出現した袋数の割合）は、平均で54.4%であり、アンケート調査において1週間以内に期限切れ廃棄を経験した回答者割合は20.1%であった。両者のギャップを説明するため消費者が食品ロスを出したと認識する閾値（最小の認識上ロス重量）があるとし、閾値以上を「認識上の食品ロス」、閾値未満を「認識外の食品ロス」と区分した。消費者行動によって削減できるのは認識上のロスのみであると仮定した。食品ロス削減に資する消費者行動が現状のままであるケースと、最大限の取り組みを実施したケースにおける食品ロス発生量を2050年までを対象に推計した。

・廃棄物発生利用と処理施設立地の空間分布

廃棄物系バイオマスのバイオメタン化および発酵残渣の農地還元に係る都道府県別インベントリ評価

廃棄物系バイオマスを原料としてメタン発酵し、メタン濃度を高めたバイオガス（以下、「バイオメタン」という。）は、天然ガスおよび都市ガスを代替し、脱炭素社会におけるエネルギー源として需要が高まることが予想される。一方、廃棄物系バイオマスのメタン発酵では発酵残渣が生じ、資源循環の観点からは、農地還元することが有効である。そこで、廃棄物系バイオマスのバイオメタン化および発酵残渣の農地還元に関するシナリオを提案し、都道府県別のインベントリ情報を収集、整理した上で、バイオメタンによる都市ガスの代替可能性や、発酵残渣の農地還元の可能性を都道府県別に評価した。

バイオメタン化の原料となる廃棄物系バイオマスの排出量（家畜ふん尿（乳用牛、肉用牛、豚）、下水汚泥、し尿・浄化槽汚泥、食品残渣（食品加工残渣、家庭系厨芥類、事業系厨芥類））ならびに、それら廃棄物系バイオマスを全量用いた際の、バイオガス、発酵残渣、液肥、堆肥の最大生成量を都道府県別に推計し

た。次に、液肥の施肥に適した耕地として水田および牧草地、堆肥の施肥に適した耕地として牧草地以外の畑を選定し、それらの耕地面積をもとに、液肥及び堆肥の最大施肥可能量を都道府県別に推計した。また、都市ガス消費量に対するバイオメタン最大生成量の割合を都市ガス代替率、液肥あるいは堆肥の耕地への施肥可能量に対する液肥あるいは堆肥の最大生成量の割合を農地還元率と定義し、これらを都道府県別に求めた。

ごみ処理広域化における施設最適配置

将来にわたる持続可能な適正処理を確保するための方策として、廃棄物処理の長期広域化・集約化計画の策定が進められている。広域化を阻む要因として、1) ごみ輸送コストの増加、2) 集約化対象の処理施設間の更新時期の不一致が指摘されている。輸送コストの増加への対応としては、中継施設の導入が、更新時期の不一致に関しては、既存焼却施設の基幹改良による延命化での更新時期の調整が有効と期待される。そこで本研究では、ごみ処理広域化・集約化に関し、2025年から2050年までの複数期間を対象として、中継施設や基幹改良を考慮したコスト最適化モデル（動的モデル）を構築し、京都府を対象としたケーススタディを実施した。また、中継施設が処理施設の集約化に効果的である条件を検討するため、2050年の1年間のみを対象とした簡略化モデル（静的モデル）により、47都道府県を対象としたケーススタディを実施した。

ごみ処理広域化・集約化にかかる多期間の施設最適配置問題は、混合整数計画問題として定式化した。目的関数は、計画開始年から計画終了年までのごみ処理に関するコストとした。具体的には各年における処理施設の建設・運転・基幹改良・解体費用、中継施設の建設・運転費用、廃棄物の収集・運搬費用の合計から計画終了年における処理施設の残存価値を差し引いた値とした。処理施設の残存価値は、毎年一定額が減価償却され、処理施設の耐用年数（25年）が過ぎると0円になるとした。制約条件としては、ごみの発生地点から中継施設を介した処理施設に至るまでのフローに関する制約や、処理施設の建設・基幹改良・解体と処理施設能力との関係などを設定した。処理施設の解体には1年間、建設には4年間を要するとし、この間は処理能力はゼロになるとした。基幹改良は、処理施設を稼働したまま1炉毎に1年間かけて実施されると想定し、N炉の施設では、N年間にわたって処理能力がN-1炉分に減少して運転されたとした。

動的モデルでの可燃ごみ発生量は小学校区ごとに市町村別原単位と将来予測人口を用いて設定した。焼却施設の候補地は京都府で稼働中の13施設に旧京都市西部クリーンセンターを加えた14施設とした。計画開始時点における既存処理施設の処理規模および残り耐用年数は、各施設の長寿命化計画等を参照して設定した。中継施設の候補地は、2012年に所在した一般廃棄物処理関連施設と下水道処理関連施設144地点をk-means法でクラスタリングした36地点とした。中継施設の最小施設規模は、20 ton/日とした。

評価対象とするシナリオとして、1) 現状維持、2) 地域ブロック別最適化、3) 全体最適化、4) 基幹改良抑制、の4シナリオを設定した。現状維持シナリオでは、2024年時点で稼働中の13施設とごみ発生地点との関係が固定され、既存施設が稼働中に同一地点（隣地）に必要な規模の処理施設を建設可能とした。地域ブロック別最適化では、京都府を3ブロックに分割し、各ブロック内で最適化が実施されたとした。全体最適化シナリオでは、京都府全体での最適化計算を実施した。基幹改良抑制シナリオでは、評価開始年においてすでに基幹改良工事を実施中であるものを除き、それ以降は基幹改良を実施しないとした。

静的モデルでのごみ発生地点、中継施設候補地、焼却施設候補地は、動的モデルでの設定と同様に47都道府県分を対象とした。

・廃棄物発生量・処理技術の転換シナリオ

3R+施策のGHG削減効果推定

(a) 家庭ごみ発生抑制によるGHG削減効果推定

廃棄物の発生抑制によるGHG削減効果をライフサイクルアセスメント（以下、LCA）の手法を用いて推定するモデルを開発し、全国での発生抑制可能量およびGHG排出削減効果を検討した。廃棄物種別ごとに発生抑制の手法を設定し、GHG削減原単位を推定した。2023年の全国での家庭ごみ排出量および2019年の京都市家庭ごみ細組成調査における品目別の組成別重量割合から抑制可能廃棄物量を推定し、50%削減の場合の廃棄物およびGHG排出量の削減ポテンシャルを推定した。GHG排出量の算定範囲としては、発生抑制

対象廃棄物の製造、使用、廃棄段階におけるGHG排出量が削減されることを仮定した。また、レジ袋の発生抑制にマイバッグを利用する場合のように、発生抑制に代替製品が必要な場合は、代替製品の製造、使用、廃棄段階におけるGHG排出量を発生抑制時に増加するGHGとして推定した。

(b) 再資源化や発生抑制等の対策を組み合わせたシナリオ別GHG削減効果推定

(a)で作成した廃棄物ごとのGHG排出量算定モデルを拡張し、日本全体での事業系ごみも含めた一般廃棄物の焼却、再資源化、埋立によるGHG排出量を推定した。なお、廃棄物の収集・運搬過程は推定の対象外とした。処理手法ごとの対象廃棄物処理量・再資源化量は、環境省一般廃棄物処理実態調査および循環利用量実態調査をもとに設定した。本解析で考慮した再資源化対象廃棄物は18種類であり、これらで処理実態調査で報告されたリサイクル量の90%をカバーした。

廃棄手法別のGHG排出原単位は次のように推定した。焼却時および埋立時のGHG排出原単位は、廃棄物組成ごとに設定した三成分および元素組成から推定した。再資源化時のGHG排出原単位は、再資源化を行う場合（リサイクルシステム）のGHG排出原単位から再資源化を行わず焼却を行う場合（オリジナルシステム）のGHG排出原単位を差し引くことで推定した。再資源化プロセスにおけるGHG排出原単位や新規製品の生産・最終処分によるGHG排出原単位を主にLCIデータベースであるIDEA v3.3から入手した。IDEA v3.3において提供されていないプロセスについては、文献調査やメーカー・業界へのヒアリングに基づいて推定した。

本解析では、現状シナリオ（2023年）、2030シナリオ、2050シナリオ、2050+施策シナリオを設定した。

発電時GHG排出原単位は、現状 0.423 kg-CO₂eq/kWh、2030年 0.250 kg-CO₂eq/kWh、2050年 0 kg-CO₂eq/kWhとした。一般廃棄物発生量は、2023年比で2030年0.97、2050年0.81とした。2050+施策シナリオでは、

- ・食品ロス削減（家庭系・事業系ともに2000年度比75%減）
- ・衣類廃棄物削減（2020年度比家庭からの衣類廃棄物25%減）
- ・プラスチック容器包装再資源化率向上（再資源化率60%）

の追加対策により、一般廃棄物発生量は2023年比で0.75となるとした。

・素材産業の生産技術変化を踏まえたモデル群の開発

電力・鉄鋼・セメント産業の脱炭素化と副産物利用

電力、鉄鋼およびセメントは、2020年度の日本のCO₂排出量の過半を占め、2050年カーボンニュートラル達成に向けて、これらの部門からの排出を抑えることは非常に重要である。これら3部門は副産物利用という観点で深いかかわりを持ち、石炭火力発電から発生する石炭灰や、鉄鋼製造より生じる高炉スラグなどの副産物・廃棄物は、セメント製造における混合材やクリンカ製造原料として利用されており、セメント製造からのCO₂排出削減対策としての効果も大きい。しかし、2050年のカーボンニュートラル達成に向けてこれらのプロセスが構造転換していく中では、こうした副産物原料の需給関係に大幅な変化が生じる可能性がある。そこで本研究では、日本においてこれら3部門がそれぞれ脱炭素社会に向けた動きを進めていく上で生じうる部門間の相互影響を明らかにすることを目的とした。具体的には、石炭火力発電、鉄鋼製造、セメント製造の3プロセスを対象にモデル化し、副産物の供給元である石炭火力発電と鉄鋼製造、受入先であるセメント製造、およびその両方がカーボンニュートラルを達成した際の各プロセスにおける投入物および排出物のフロー変化を算定した。各プロセスへの投入物・産出物は、元素組成を明示的に扱い、元素ごとの物質収支を確保した。特に、セメント製造において重要な元素（Ca, Si, Fe, Mg, Al）や石炭火力での脱硫工程に関する元素（S）を重視し、GHG排出量に関する炭素はバイオマス由来と化石由来とを区別した。

石炭火力発電プロセスでは、電力生産量を入力として、これに必要となる石炭の投入量、石炭灰の発生量、排煙の脱硫・脱硫に伴う投入・産出を計算した。鉄鋼製造プロセスは、鋼材生産量を入力として、鉄鉱石を原料とした高炉・転炉による製鋼における投入、産出を計算した。計算の対象は、焼結設備による焼結鉱製造、コークス炉によるコークス製造、高炉還元、転炉での精錬、铸造圧延工程、およびそれらの間での副生ガスの発生と利用である。高炉スラグおよび転炉スラグの発生量は、単位生産量あたりの原単位を用いて算出した。セメント製造プロセスは、セメント生産量および廃棄物・副産物の種類別利用可能量を入力と

し、原料工程から、焼成工程、仕上工程までにおける投入物及び産出物を計算した。廃棄物・副産物は、仕上工程での混合材、焼成工程でのクリンカ原料または熱エネルギー源として利用可能とした。生産するセメント種類として、普通ポルトランドセメント、高炉セメント、フライアッシュ（石炭灰）セメント、および、LC3セメントの4種類を想定した。LC3セメントは、混合材として焼成粘土を用いてクリンカ比率を下げたセメントであり、今後の普及が期待されている。セメント製造における投入物量の決定は、線形最適化問題として定式化した。目的関数は、セメント製造工程での投入原料・副産物・燃料からの化石由来CO₂の直接排出量および、投入原料・副産物の製造にかかる上流工程におけるGHG排出量の合計とし、これを最小化した。制約条件として、4種類のセメント生産量の合計がセメント生産量（モジュールへの入力値）と一致すること、仕上げ工程での混合材利用を踏まえたクリンカの需給制約、クリンカ原料およびクリンカ中のCa, Si, Al, Feに関する物質収支制約、クリンカ中のCa, Si, Al, Feの濃度が元素毎に設定された許容範囲内であり、それらの相対比率も許容範囲内であること、原料工程・焼成工程に投入される化石燃料・廃棄物・副産物の投入熱量がクリンカ製造に必要な熱量に一致すること、とした。

3部門それぞれに現状推移であるBaU（Business as Usual）ケースと脱炭素ケースとを設定し、それらの組み合わせとして4シナリオ（3部門全てBaUケースのベースシナリオ、石炭火力と鉄鋼のみ脱炭素化する石鉄-CN（Carbon Neutral）シナリオ、セメントのみ脱炭素化するセ-CNシナリオ、3部門全てで脱炭素化する石鉄セ-CNシナリオ）を評価した。2020年の石炭火力発電量は年間総発電量に石炭火力発電の電源構成比率（32%）を乗じて設定した。2030年、2050年の年間発電量は人口に比例すると仮定した。電源構成比はBaUケースにおいて2020年のまま一定とし、脱炭素ケースにおいては（成果番号1）を参照し、2030年に4%、2050年に0%とした。セメント生産量は（成果番号1）を、転炉鋼・電炉鋼生産量は（成果番号2）を参照した。

【サブテーマ3】資源循環CCUS技術のカーボンニュートラル評価

サブテーマ3の目標である廃棄物・資源循環分野へ導入するCCUS（Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage）技術の評価枠組みの提案・試算及び評価情報の提示のため、国内外のカーボンニュートラルシナリオの中でのCCUSの位置付け等を整理し、評価関連ガイドラインや研究事例・国際標準化動向、資源循環CCUS技術の調査・整理を実施した。その上で、カーボンニュートラルシナリオに調和したCCUS技術の評価指標の枠組案の作成と評価の試算を実施した。また、廃棄物・資源循環分野以外の炭素源も含めた炭素循環システムにおいて、廃棄物・資源循環分野のCCUS技術導入の在り方を定量的に導出する理論的枠組みの開発や炭素の排出源／需要先の施設規模や立地を考慮した空間的な需給分析モデルの開発を行った。以上の研究内容のうち資源循環CCUS技術の評価試算及び空間的な炭素需給について本分野でのCCUS技術開発を進めている廃棄物処理プラントメーカーへ説明を実施し、妥当性・有用性について意見交換した。以下、各研究項目の背景と方法を記述する。

・国内外の文献レビューに基づく資源循環CCUS技術の意義と研究課題の提示

国内外のカーボンニュートラルシナリオ等の動向調査に基づく資源循環CCUS技術の意義の整理

国内の省庁及び産業界（鉄鋼、石油・化学、セメント・コンクリート、製紙、電力、ガス）による公表資料より、カーボンニュートラル実現に向けたCCUSの位置付け・規模等を調査・整理した。また、国際エネルギー機関（IEA）、EU、英国気候変動委員会及びフランス環境連帯移行省によるカーボンニュートラルシナリオより、廃棄物の取扱いに留意しながらCCUSの位置付け・規模を調査・整理した。加えて、廃棄物を対象としたCCUSの意義等の観点を念頭に、EUにおける関連政策文書や廃棄物処理を含む多様なCO₂排出源からのCO₂分離回収の環境優位性を評価した研究事例、GHG算定の国際的なデファクト標準の内容を確認した。以上の調査結果を踏まえ、資源循環CCUS技術の意義をまとめた。

評価関連ガイドラインや研究事例、廃棄物・資源循環分野でのCCUS技術の調査・整理

国際的に活動しているGlobal CO₂ Initiativeの評価ガイドライン及び米国エネルギー省の評価ガイドランスより、CCUのLCAを実施する場合の基本的な考え方や論点を整理した。

先行研究として熱処理（主に焼却処理）にCO₂分離回収を組み合わせた場合のLCAによる評価事例を主に

レビューした。評価時の比較対象やバウンダリ、外部条件（外部電力や熱など）を中心に整理し、研究間の差異や課題を抽出した。特にCCUを取り扱った論文について、被代替物（CO₂由来の燃料品や化学品の製造によって回避される化石資源由来製品）の製造回避による影響の考え方を確認した。

資源循環CCUS技術について、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（案）」で示された廃棄物中間処理技術とCCUS技術の組合せ及びその後に開始されたグリーンイノベーション基金での関連プロジェクトも踏まえ、焼却・ガス化・メタン発酵の各処理方式における国内外実証プロジェクトの動向を調査・整理した。

・廃棄物・資源循環分野におけるCCUS技術を対象とした評価

カーボンニュートラルシナリオに調和した資源循環CCUS技術の評価の枠組案の作成及び評価の試行

カーボンニュートラル社会では、例えばエネルギー起源CO₂排出量がゼロに近づくとの前提に立つと、低炭素化効果をCO₂排出量の多寡で評価する現在の手法では評価が困難になる面があると考えられる。そこで、カーボンニュートラル実現における炭素・エネルギー面の主要な制約に着目した評価手法・指標を検討した。

そして、廃棄物の中間処理技術として焼却処理・ガス化処理・メタン発酵の3種類を、炭素固定・利用の形態としてメタネーション・コンクリートCO₂利用の2種類を取り上げ、それぞれの技術の効率やその他のパラメータを収集・整理し、それらの組合せ（3×2=6方式）を対象として提案した指標を計算できるモデルを構築して、評価を試行した。電力のCO₂排出係数及び一次エネルギー算係数を、現状値を基準として削減率を変化させることで、エネルギーシステムのカーボンニュートラル化による変化を把握した。

・廃棄物・資源循環分野以外の炭素排出源も考慮した評価

複数の炭素発生源・需要先の組合せの数理最適化モデルの作成とCO₂削減度に応じた分析

廃棄物・資源循環分野以外でもCCUSへの言及・関心が高まっている中、環境省「廃棄物・資源循環分野における温室効果ガス排出実質ゼロに向けた中長期シナリオ（案）」において示されている廃棄物・資源循環分野でCCUS技術を導入することの意義をCO₂排出量変化（=排出削減効果）等の観点で改めて確認・整理するとともに、他の排出源・吸収源の状況を踏まえても廃棄物・資源循環分野でCCUS技術を導入することが有効であることを定量的に示すことが求められる。

化石由来と生物由来の炭素が混在する廃棄物は、CO₂発生源とネガティブエミッション技術の双方の機能を発揮し得るため、廃棄物以外の炭素発生源や吸収源とも競合・相補の関係が生じ得る。そこで、本研究では、廃棄物以外の炭素源も含めた炭素循環システムにおいて、カーボンニュートラルの条件下で廃棄物分野のCCUS技術導入の在り方を定量的に導出する理論的枠組みを開発し、その分析を通じて、CCUSを前提とする廃棄物処理施設整備の考え方を提示することを目指した。

廃棄物・資源循環分野へのCCUS技術の導入の在り方を定量的に導出する理論的枠組みとして、①「廃棄物の処理」と「カーボンニュートラル」を数理最適化の制約条件として扱えること、②多様な在り方が存在し得る廃棄物・資源循環分野へのCCUS導入について、任意の指標を最大化・最小化する状態を一意に導きうること、を狙いとして数理最適化による定式化を行った。その上で、廃棄物以外の炭素発生源を考慮した仮想的な炭素循環システムを想定し、廃棄物処理の中間処理としては焼却処理・ガス化処理・メタン発酵の3種類を、炭素固定・利用の形態としてはメタネーション・コンクリートCO₂利用の2種類を対象に、総システムコスト最小化の最適化計算を実施した。

異なる将来シナリオに対する空間的な炭素需給マッチングの評価

CCUS技術の本格的な導入に当たっては、マクロな炭素需給バランスだけでなく、炭素の供給地点（排出源）と需要地点（炭素含有製品の製造施設等）の施設単位での輸送距離や量的バランスが重要になると考えられる。さらに、化石由来の炭素をCCUによって燃料に変換した場合、最終的にはCO₂として大気に放出されることを踏まえると、トランジション段階でのCO₂削減には寄与するものの、カーボンニュートラル社会においては非化石炭素の重要性が現状よりも増すものと考えられ、2050年においても一定程度の必要量が見込まれる廃棄物処理施設は貴重な非化石炭素供給源の一つとして注目されている。一方で、廃棄物処理施

設は小規模分散という特徴を有し、大規模排出源と比較するとその炭素供給可能量は小さいことなどから、既存の分析では排出源として考慮されておらず、炭素需給システムの中で廃棄物処理施設が果たし得る役割は明らかになっていない。

本研究では、炭素需給のマッチングモデルを構築し、日本における将来的なCCUSの導入を見据えて、全国の主要なCO₂排出源や炭素の需要先を網羅し、施設の立地・規模と将来シナリオを考慮した分析を実施した。その中で、施設種ごとのマッチングの特徴や、特に一般廃棄物焼却施設が2050年においてCO₂供給源として果たし得る役割について明らかにした。

将来的なCO₂分離・回収技術等の導入可能性がある施設をCO₂供給施設、CO₂の利用（又は貯留）可能性がある施設をCO₂需要施設とし、CO₂の供給施設と需要施設間のCO₂の輸送効率を表す指標として「CO₂輸送密度（= CO₂輸送量/輸送距離）」という概念を導入した。その上で、廃棄物処理施設を含む主要産業の施設立地及び将来のCO₂供給可能量・CO₂需要可能量を整理・推計し、CO₂輸送密度が大きい組合せから順番にCO₂のマッチングが成立するというアルゴリズムで分析を行った。分析ケースは以下のとおりである。

- [1]2050年Baseケース：日本の代表的な統合評価モデルの分析結果等を参考に、2050年カーボンニュートラル達成状況下での各産業の活動量や対策導入量を想定したケース
- [2]ReducManuケース：サブテーマ1の研究成果を参考に、鉄鋼分野やセメント・コンクリート分野でのカーボンニュートラル達成に向けた需要側対策を含む物質フロー転換（[1]を超える直接排出の低減）を想定したケース
- [3]MSWaggケース：サブテーマ2の研究成果を参考に、一般廃棄物処理施設の大幅な広域化・集約化の進展を想定したケース
- [4]RM & Magケース：[2],[3]の変化が同時に発現したケース

・廃棄物処理プラントメーカーとの意見交換

廃棄物処理に関するCCUSの技術開発を進めている廃棄物処理プラントメーカー4社それぞれと意見交換を実施した。意見交換実施時点における資源循環CCUS技術の評価試算及び空間的な炭素需給について研究内容と評価結果を御説明し、結果の妥当性・有用性や留意点について意見をいただくとともに、廃棄物・資源循環分野においてCCUS技術の開発、実装に取り組む上での課題について示唆をいただいた。

1. 4. 2. 研究結果及び考察

【サブテーマ1】日本版物質フロー・ネクサスモデルの開発

・国内資源供給部門のカーボンニュートラル経路の探索

国内鉄鋼部門（金属資源）（成果番号2）

炭素制約下における鋼材生産量（物質バジエット）を時系列で算定した結果を図1に示す。2050年脱炭素社会における鋼材生産可能量は、技術開発が計画通りに進展した場合でも、再生エネルギー電力・水素・鉄スクラップの供給制約のために、現在の半分程度となる可能性が示唆された。これは特に高級鋼材（薄板や高張力鋼など）を多く利用する自動車産業への影響が大きい。鉄スクラップを許容限界の高い建設材料にダウンサイクルするという現在の慣習が今後も続く場合、自動車産業が2050年に利用可能な鋼材は現在の約40%のレベルに留まると推計された。このような供給制約の影響により、社会に蓄積される鋼材ストック（すなわち、製品やインフラとして使用される鋼材量）も、2050年には現在よりも大幅に減少する。これは、社会全体が現在よりも少ない鋼材利用量で生活する方向へと移行する必要性を示唆する。

現在、脱炭素化のための中心的対策として議論されているCCS等の、いわゆる革新的な生産技術は特に経済的、社会的な課題を抱えており、大規模な導入には至っていない。そして、これらの技術を利用するためには必要な再エネや水素等の供給可能性は非常に不確実であるのが現状である。つまり、これらの技術に依存した脱炭素化計画は、産業の操業可否や安定的な地球への転換を、不確実かつ将来世代の多大な努力が必要な技術に委ねていることを意味する。本研究が示唆する最も大事な点は、革新的な生産技術に依存しない脱炭素化計画を同時に持つことの重要性である。そのためには以下の2点を鉄鋼産業と需要側産業が協働的に進めることが肝となる：

- (1) スクラップで高級材を生産するアップサイクルの確立
- (2) 現状より少ない鋼材利用量でサービス提供を可能とする新規ビジネスモデルへの転換

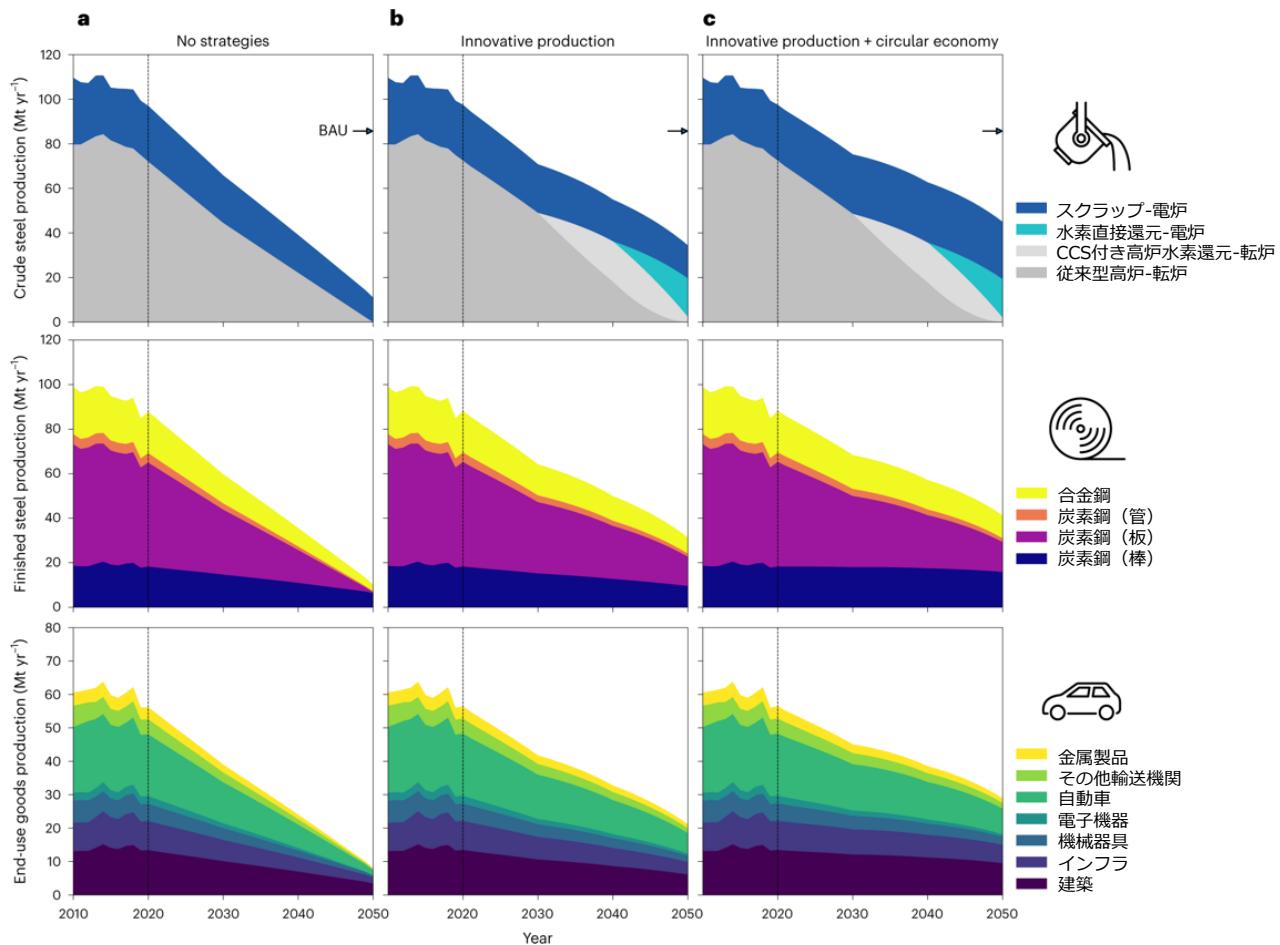


図1：カーボンバジェットと整合的な日本の鉄鋼生産と利用の推移

(上段は粗鋼生産、中段は鋼材生産、下段は製品生産を示す。a (No strategies) は生産技術および循環型経済にいかなる進展もない場合、b (Innovative production) はエネルギー効率改善、高炉におけるコークスの一部水素代替、炭素回収貯蔵 (CCS) 、水素直接還元製鉄が導入される場合、c (Circular economy) は国内リサイクル能力の拡大、および製品の長寿命化（リユース等を含む）が進む場合。

国内セメント・コンクリート部門（土石資源）（成果番号1）

図2はセメント・コンクリート部門における対策（供給側）と、構造物の設計や建設、利用、解体時ににおける対策（需要側）を合わせた計16の対策のCO₂削減可能量を時系列で定量化した結果である。たとえ炭酸化によるCO₂吸収効果を加味したとしても、供給側（青と緑色系）の対策だけではカーボンニュートラルの達成は困難である可能性がある。具体的には、エネルギー効率改善や燃料転換、セメント原料代替、低炭素型セメント、炭素回収利用技術 (CCU) 等の供給側での対策（計9つ）を最大限に実施した場合でも、カーボンニュートラル達成に必要な排出削減量には約20%（約400万トン CO₂）届かない。

しかし、素材を過剰に利用する設計の回避や、建設物の長期利用、共有化、都市機能の集約化、解体部品の再利用等の需要側（赤色系）での対策（計7つ）を早急に実施することで、2050年カーボンニュートラルの達成が実現すると示された。一連の結果より、セメント・コンクリート部門の2050年カーボンニュートラル化に必要な行動は以下の3点に集約される：

- (1) 需要側の対策をカーボンニュートラル戦略の中心の一つに位置付けること
- (2) カーボンニュートラル目標と整合的な物質利用の計画・数値目標を設定すること
- (3) コンクリートの炭酸化やCCUによるCO₂吸収量の国家排出インベントリへの位置付けや勘定方法を早急

に議論し合意すること。

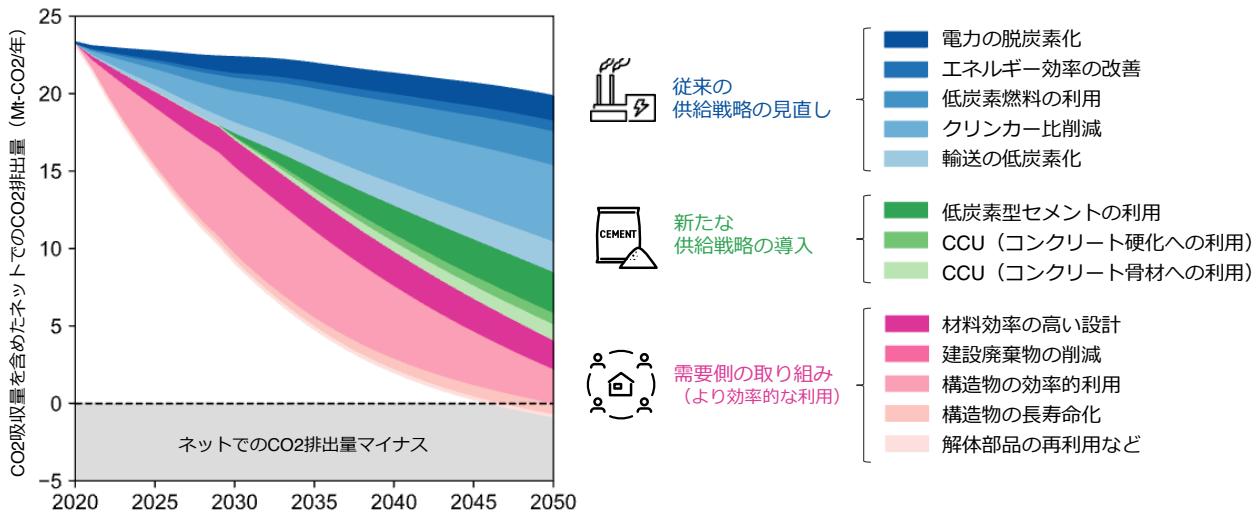


図 2：日本におけるセメント・コンクリート部門を対象とした供給側（青・緑）と需要側（赤）の組み合わせによるカーボンニュートラル達成経路

世界全体の鉄鋼・セメント部門（成果番号5）

他産業と平等な削減率の下で割り当てたカーボンバジェットの中での鉄鋼・セメントの供給可能量は、世界的な需要に対して不足する可能性が高い。具体的には、1.5°C目標と整合的なカーボンバジェットでの供給可能量は、2050年の成り行き需要と比較して、鉄鋼で58～65%、セメントで22～56%（四分位範囲）に留まる。仮に需要が比較的低位に抑えられた場合でも、供給不足の傾向は変わらず、既存文献の中で最も野心的な需要削減戦略を想定したシナリオのみ供給が需要を上回る結果となった。一方、2°C目標と整合的なカーボンバジェットでの供給可能量は成り行き需要には及ばないものの、一定程度の需要削減を実施したシナリオに対しては需給の乖離は生じなかった。また、セメントの供給可能量は鉄鋼のそれよりも不確実性が大きいこと分かる。これは、鉄鋼が老廃スクラップのリサイクルによって一定の供給を確保できるのに対し、セメントはリサイクルが困難であること、CCSへの依存度が高いこと、そしてそのインフラ整備が不確実であることを反映する。

上記の結果は、鉄鋼やセメントといった社会基盤材料が、将来的には豊富かつ安価に入手できなくなる可能性を示唆するとともに、CCSやグリーン水素の活用のみに依存した脱炭素計画の危険性を浮き彫りにするものである。こうした知見は日本を対象とした解析とも整合的であり、鉄鋼・セメント産業の脱炭素化を実現するためには、関連インフラの整備を進めるとともに、世界的な供給不足に社会全体で備える必要がある。

国内建築材料部門（バイオマス資源）（成果番号6）

現状のままでは建築材料の2030年の46%削減目標および2050年のカーボンニュートラル達成は困難であるが、電力供給の脱炭素化に加えて、低炭素鋼材および低炭素コンクリートの利用を拡大することで2030年の46%削減は達成可能であることが分かった（図 3参照）。しかし、2050年のカーボンニュートラルには必要な削減量の約60%しか達成できない。一方、木造建築の拡大、設計の最適化、建築物の長寿命化を含む6つの対策を全て実施することで、2050年のカーボンニュートラルが実現可能であることが明らかとなった。

建築材料としての木材利用は、必ずしも炭素貯蔵量や吸収量の増加に直結するわけではなく、その影響を正しく評価するためには、森林の炭素吸収への影響も考慮する必要がある。樹種別・樹齢階級別の詳細な森

林統計を基に、木造建築の拡大が森林の炭素吸収に与える影響を推定した結果、木造建築の拡大が森林の炭素吸収量を増加させる可能性がある。特に、木造建築の拡大とともに再造林率を100%まで向上させた場合、現状のまま伐採面積の3割未満しか再造林が行われないケースと比較し、2050年までに最大で60%の炭素吸収増加が見込まれる。この増加の主な要因は、森林の若返りにある。成長初期の若い樹木は、成熟した樹木と比べてCO₂の吸収速度が高い。しかし、日本の森林はすでに高齢化が進んでおり、炭素吸収能力が低下している。したがって、高齢化した樹木を建築材料として活用し、伐採後に再造林を行うことで、森林の炭素吸収能力を高めることが可能である。これにより、建築材料の脱炭素化と森林の炭素吸収強化の両立が実現できる。ただし、このプロセスを成功させるためには、国産材の供給拡大と再造林の推進が不可欠である。木造化、国産材利用、再造林を一体的に進める政策が求められる。

本研究の分析により、2050年カーボンニュートラル達成には、国産木材の利用拡大、供給体制の強化、および人工林の再生が極めて重要であることが明らかとなった。これらの対策はすでに広く検討されているが、その徹底が不可欠である。特に、木材利用の拡大が単に炭素貯蔵の増加をもたらすのではなく、森林の炭素吸収能力向上と密接に関連している点を考慮する必要がある。

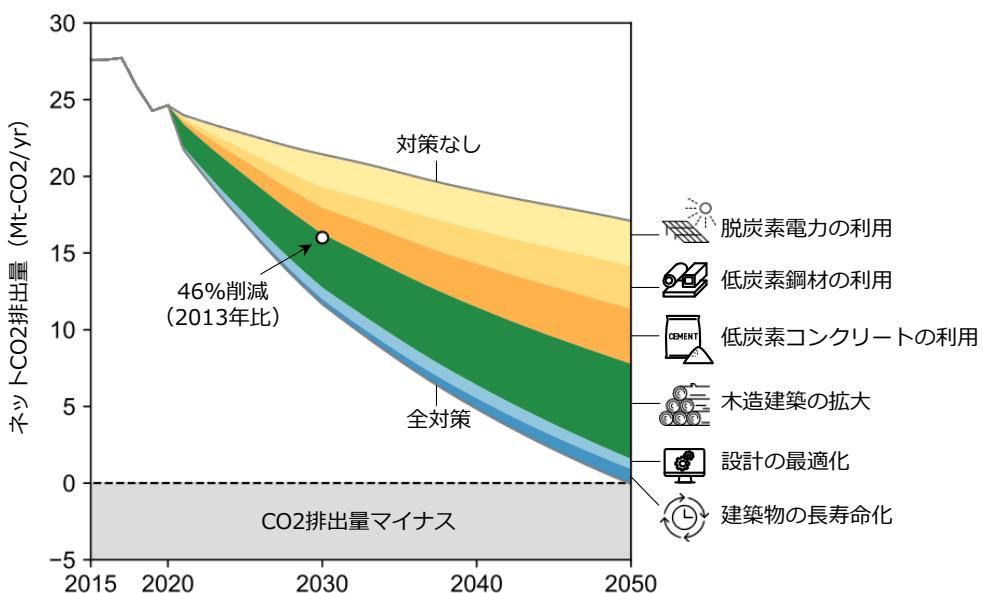


図 3：建築材料の 2050 年カーボンニュートラル達成に向けたシナリオ分析

・物質フロー指標の変化要因とカーボンニュートラル化への目標設定

物質フロー指標とGHG排出量の共通要因解析（成果番号9）

図 4に、日本の4つの物質フロー指標（資源生産性、最終処分量、入口側循環利用率、出口側循環利用率）のサプライチェーンから見た変動要因（2011年から2015年）を同定した結果を示す。物質フロー指標は全て改善していたが、その改善は特定の要因の変化に依存したものではなく、経済・技術的要因の変化が複雑に作用したものであることが分かった。例えば、資源生産性においては単位生産あたりの化石燃料の利用強度(R_{FOS})、家計消費需要(y_{house})、サプライチェーン構造(L)の変化が指標の改善（青色）に貢献した一方で、付加価値率(v)の変化は指標の悪化（赤色）に寄与した。また、すべての物質フローに共通する経済的要因であるサプライチェーン構造(L)や家計消費や輸出などの各最終需要(y)は、ある指標を改善する一方で他の指標の悪化をもたらす効果があり、各物質フロー指標に対する寄与の特性に注視する必要がある。具体的には、サプライチェーン構造(L)の変化は資源生産性と最終処分量を改善した一方で、入口側・出口側循環利用率を悪化させた。他方で、輸出需要(y_{export})はすべての指標を悪化させており、物質依存度の低い輸出への転換が物質フロー指標改善の鍵となることも確認された。

また、「物質フロー指標を改善したが、GHG排出增加を招いた」または「物質フロー指標を悪化させたが、GHG排出量の低減に寄与した」、つまり物質フローとGHG排出の同時管理の観点から“不整合”となっ

た産業部門が多い指標を確認した。全体的に、こうした不整合の割合が大きい指標は、資源生産性や循環率であった。つまり、この二つの物質フロー指標を向上させる各産業の変化は必ずしもGHG排出の削減を同時にたらさない特性がある。この不整合性は、サプライチェーンにおけるスコープ1と2では比較的小小さく、すべての指標で30%未満である。一方、スコープ3は生産と固定資本の2種類共に不整合性の比率が高く、30%から70%の産業部門が該当する。特に、入口側・出口側循環利用率の指標は不整合性が60%を超える。とりわけ、固定資本を形成するサプライチェーン（カテゴリー2）はスコープ3の中でも不整合性が高く、固定資本形成に伴う物質消費の抑制とGHGの排出削減を同時に達成することが、将来のカーボンニュートラル社会に向けた物質フロー管理において優先すべき課題と示唆する。

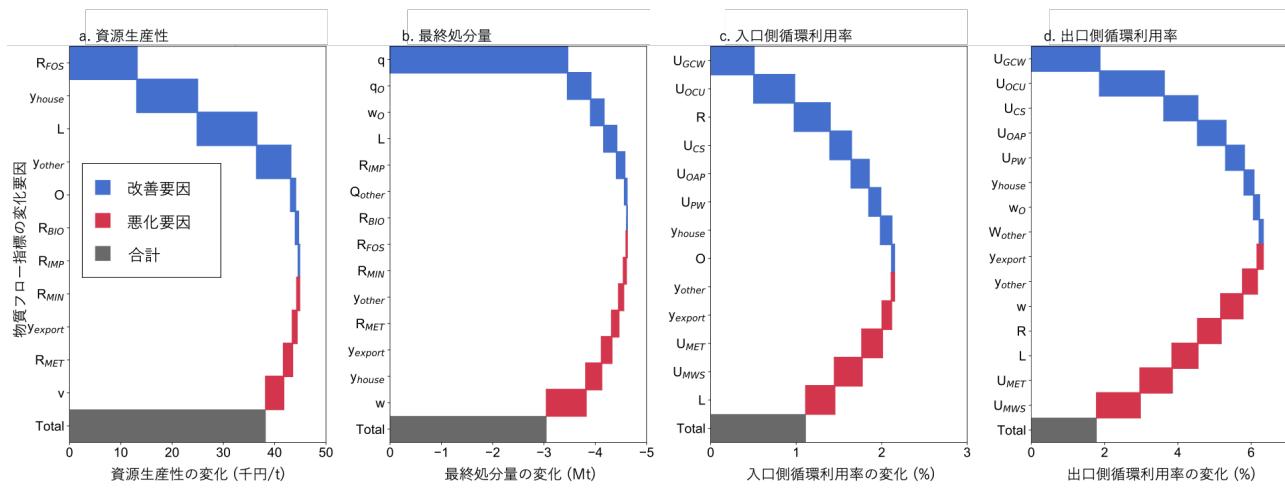


図 4: 4つの物質フロー指標の変化（2011年から2015年）に対する経済的および技術的要因の寄与

カーボンニュートラル化を先導する物質フロー目標（成果番号10）

本研究では、総物質投入量（国内資源+輸入資源+国内循環資源）に対する削減目標（年率2、3、4%）の有無と物質利用効率と生産技術の脱炭化のオプションを組み合わせた合計6つのシナリオを策定し、2050年カーボンニュートラル（CN）化の可否と達成する物質フローの構造を同定した。図5に成り行きシナリオを含む結果を示す。

人口の変動（2015年の1.2億人から2050年に約1億人に減少）を考慮した成り行きシナリオでも、GHG排出の減少は10%にも達しない。さらに、電力が100%脱炭素化した成り行き+エネルギー脱炭素化シナリオ（図5の緑色の折れ線）でも2050年におけるGHG排出削減量は3億t CO₂-e程度であり、依然として2015年の63%に相当する7.3億t CO₂-eのGHGが排出される。これは日本の2030年の達成目標（2013年の排出量対比で46%の排出削減）にも及ばず、再生可能エネルギーの普及等による電力の脱炭素化だけでは、CNの水準には届かないことを示唆する。

続いて、物質削減目標を年率2%、3%、4%で設定した需要調整シナリオ（図1のオレンジ色の折れ線）の結果から、年率4%の削減目標を達成した場合にGHG排出量がカーボンニュートラルの水準（図5のグレーの領域）に到達可能であることが明らかとなった。

上記の結果は、2050年カーボンニュートラルの水準にGHG排出量を到達させるためには、100%脱炭素の電力の導入を進めると共に、年率4%という高水準な物質削減目標と現状の2倍に相当する循環利用率の改善目標を持つことが有効であることを意味する。この目標の達成により、素材産業における「革新的脱炭素技術」の普及に依存しなくても、CN社会を達成することが可能となる。一方で、年率4%の物質削減を実現するには、使用可能な1年間の物質の総量を現在の約25%に抑えること、つまり、物質の利用効率を4倍に向上せざるを得ない。具体的には、移動や居住など生活に必要なサービスの提供方法を変え、提供に要する鉄やセメントなどあらゆる物質の量を約4分の1にまで抑える必要がある。

日本が目標とする2050年CN社会までに残された時間は25年となった。これまで通り革新的な素材生産に

おける脱炭素技術の開発と普及に傾注するのか、製品や固定資本の形で物質を使用するすべての産業の物質効率を飛躍的に改善し、その変化に順応可能なビジネススタイルやライフスタイルへの転換を促進する技術や政策を優先していくのかについて、今一度検討すべき時期にある。

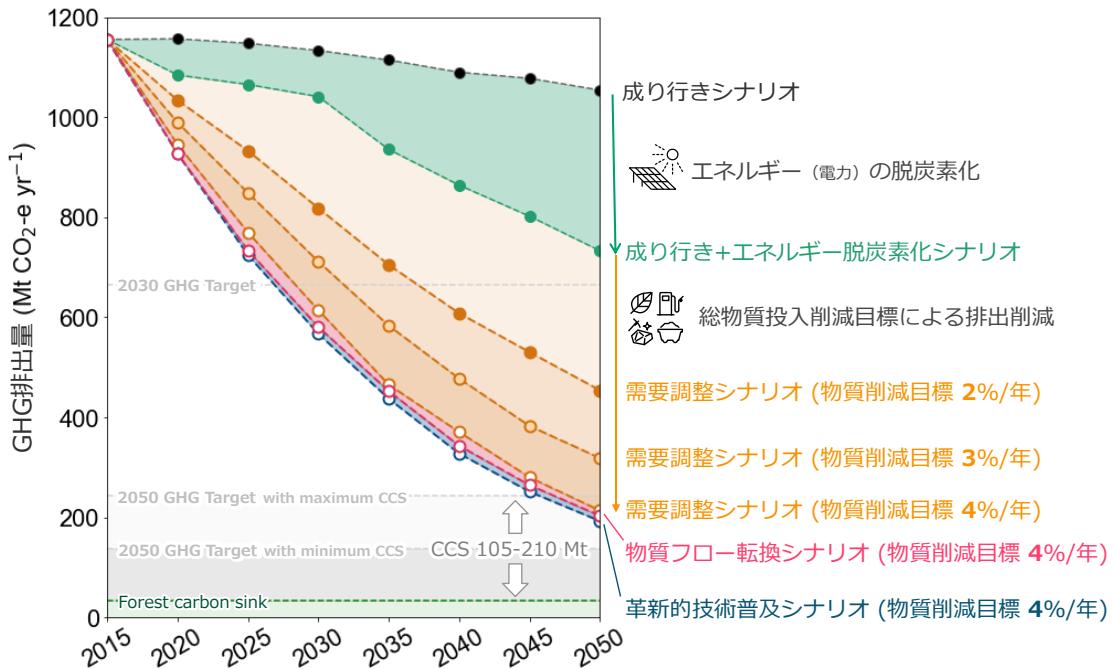


図 5：総物質投入削減目標による国内の GHG 排出量の変化

・循環型ビジネスモデルの戦略性に関する事前評価モデルの開発（成果番号11）

循環型ビジネスモデルの事前評価に向けて開発した消費者行動シミュレーションモデルを用い、複数の循環戦略の組み合わせ（リファービッシュ製品のリースサービス導入）と比較（リユース、レンタル、シェアリングの比較）に関する数値例を用いたシミュレーション実験を行った。

具体的には、企業などをモデルの利用者として想定し、循環戦略の組み合わせ（大型家電のリファービッシュ製品のリースサービス）に関し、これを普及するための普及策の比較を行った。図 6に示す通り、広告施策はより早期の普及（当初の20年間）に貢献するが、サービス水準の改善の効果が現れるには時間要する（後半の10年間）など、循環型ビジネスモデルの普及に要する期間を明らかにした。また、価格、広告、サービス改善の施策を組み合わせた場合の効果は、それぞれの施策の個別導入に関する単純な足し合わせを上回っており、複数の施策を組み合わせることによる相乗効果が示された。環境影響に関しては、図 7に示す通り、すべての促進策を組み合わせることができれば、現状維持（BaU）シナリオと比較してGHG 排出量が約10%削減できるが、促進策を考慮せずにリファービッシュ品のリース戦略を導入した場合の排出削減量は限定的であった。また、シミュレーション期間の終盤においては、回収された製品の不足がリファービッシュ製品の普及のボトルネックとなることが確認された。このように、30年間のシミュレーション期間にわたる施策の効果をダイナミックな手法により検討できることが確認された。

開発した製品循環・消費者行動モデルを用いたシミュレーション実験を通じて、さまざまなシナリオを想定することで、循環型ビジネスモデルの促進策（価格、広告、サービス水準など）やボトルネック（消費者選好の偏りなど）、リバウンド効果（新製品の製造や輸送の増加による温室効果ガス排出量の増加など）を定量的に事前に検討できることが可能となった。

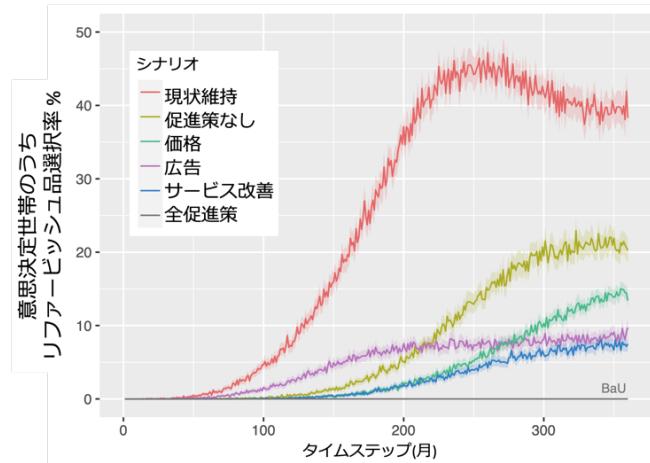


図 6：促進策の導入による循環型ビジネスモデルの普及率（数値例1）

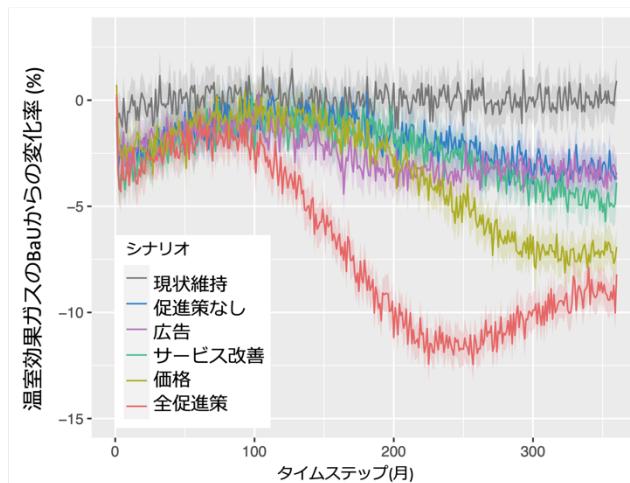


図 7：リファービッシュ戦略によるライフサイクル GHG 排出量の削減（数値例1）

【サブテーマ2】静脈フローモデルの開発

・廃棄物発生量と抑制可能量の推定

家計消費に基づく一般廃棄物発生量と組成の将来推計（成果番号13）

家計消費に基づく一般廃棄物発生量と組成の将来推計においては、600種を超える家計消費の分類を24種の品目に整理し、これを説明変数として、環整95号基準における6種類のごみ組成を推定する回帰式を得た。この回帰式で推定された原単位をもとに、ESRI社の1 kmメッシュごとの品目別推計消費額に原単位の数値を入力することで各組成別の空間的な発生量を全量及び1人当たり発生量を空間的に推計した。図8は「**プラ類(ビニール、合成樹脂、ゴム、皮革類)**」に該当)を対象に空間発生量を推計した結果である。

この回帰式を用いた廃棄物発生量の時空間分布を推定可能とするため、1 kmメッシュごとの家計消費額を時系列データとして算定する計算プログラムおよび関連データ（将来推計人口、家計調査結果、県民経済統計の課税所得）をE-statから自動取得するプログラムを開発した。本推定モデルは、将来シナリオの検討に際して基盤となるデータを提供するものである。

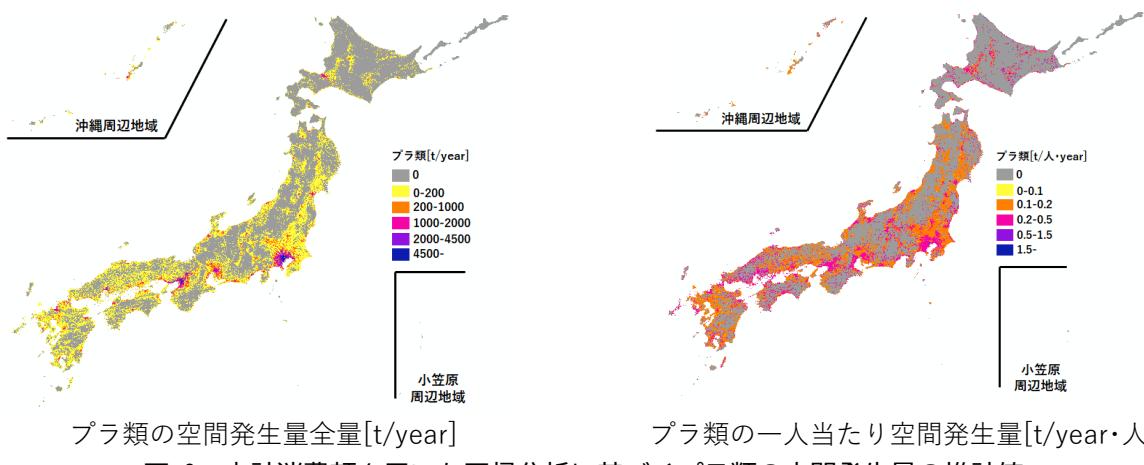


図 8：家計消費額を用いた回帰分析に基づくプラ類の空間発生量の推計値

家庭系食品ロスの発生抑制可能量推定（成果番号56）

回帰分析結果を用いて、消費者全員が食品ロス削減行動を最大限行う状況を仮定し、取り組み強化前後の食品ロス発生頻度を比較した結果を図9に示す。取り組み後の1人あたり食品ロス発生頻度は取り組み前と比較して、期限切れ廃棄が62%、作りすぎ・作り置き廃棄が63%、食べ残し廃棄が50%、全体で58%削減された。特に削減効果の高い行動（図10）として「買い物前に冷蔵庫を確認する」「お店に行くまでに買うものを決める」「セール品を衝動買いしない」が挙げられた。「買い物前に冷蔵庫を確認する」は、係数の絶対値が大きく、「お店に行くまで買うものを決める」「セール品を衝動買いしない」は実施率が低い。

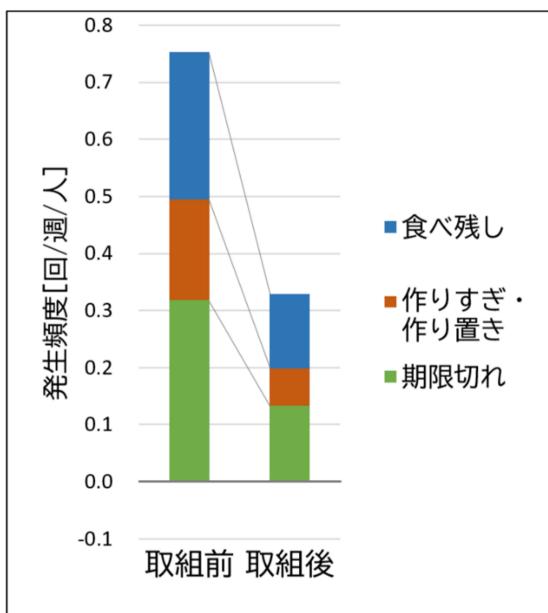


図 9：取り組み前後の食品ロス発生頻度の削減可能性

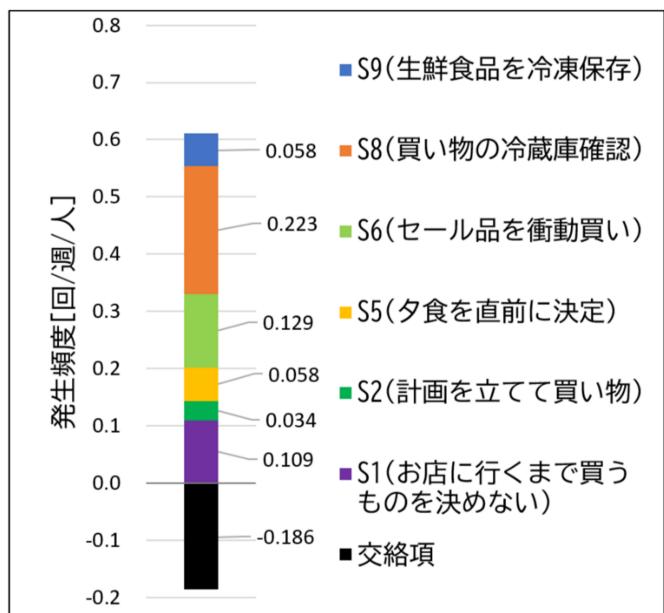


図 10：行動別食品ロス発生頻度削減効果

ごみ組成調査による袋ごとの手つかず食品重量の調査結果（発生実態調査）とアンケート調査結果をもとに、最小の認識上の食品ロス重量を求めたところ558[g/週]であった。これを閾値とすると、発生実態調査における認識上のロスの総量は318[kg/週]、認識外のロスの総量は56[kg/週]となり、認識上のロス総発生量は全体の約85%と算出された。これらの結果をもとに、2050年までの食品ロス発生量で推定したところ、取組みを強化しない場合、人口減少により2050年には2024年比で食品ロスが13%減少し、取り組みを強化した場合、2050年の食品ロス発生量は2024年比で最大56%削減される可能性があることが示された。この結果を踏まえ、2030年に2000年比で食品ロス発生量を半減としている目標をさらに引き上げ、2050年

に2000年比で食品ロス発生量を75%削減する目標を設定することを提案した。

・廃棄物発生利用と処理施設立地の空間分布

廃棄物系バイオマスのバイオメタン化および発酵残渣の農地還元に係る都道府県別インベントリ評価（成果番号60）

バイオメタン生成量は北海道が最も多く、生成量の33%は乳用牛由来であった。東北では豚由来、九州では肉用牛および豚由来のバイオメタン生成量の割合が多くかった。中部では食品加工残渣由来のバイオメタン生成量の割合が多くかった。北海道、栃木県、宮崎県、鹿児島県における都市ガス代替率は100%を超え、都市ガスを代替するだけのバイオメタンを供給することが可能である。特に鹿児島県、宮崎県ではそれぞれ215%、231%となり、家畜ふん尿の寄与が大きいと言える。一方、人口密集地域では、都市ガス消費量が多く、バイオメタンを最大限生成したとしても都市ガス代替効果は限定的である（東京都の都市ガス代替率は10%、大阪府の都市ガス代替率は9%）。

液肥の最大生成量と施肥可能量を比較した結果、液肥の農地還元率が100%を下回ったのは、水稻および麦の栽培が盛んな秋田県、山形県、福島県、新潟県、富山県、福井県の6県で、県内で液肥を施肥することが可能であった。一方、人口密集地域では、液肥の施肥可能量は極めて限定的で、そのような地域では発酵残渣を液肥として農地還元できる余地が乏しい。一方、堆肥は牧草地以外の畑で施肥するが、多くの道府県で堆肥の農地還元率が100%を下回り、発酵残渣を堆肥化することによって農地還元することができる。東京都、神奈川県、滋賀県、大阪府、兵庫県、福岡県では堆肥の農地還元率が100%を上回るが、液肥の供給過多と比較すると緩やかである。

ごみ処理広域化における施設最適配置（成果番号73）

2050年の47都道府県を対象とした静的モデルの検討結果によれば、2023年度に全国で約1000施設ある焼却施設は、中継施設なしで422施設に、中継施設ありで264施設に集約されると推定された。人口密度の低い都道府県において中継施設導入の効果が大きい傾向にあったが、本研究では海路を考慮していないため、人口密度が低い都道府県であっても、離島が多い場合などには、中継施設による集約化効果は小さかった。

2025年から2050年までの京都府を対象としたシナリオ別の処理施設能力の推移を図11に示した。

現状維持シナリオにおいては、ごみ処理広域化が現状から進展せず中継施設の導入もないとしており、処理施設数は2025年の13施設から2050年の12施設へと1施設のみの減少にとどまった。2025年から2050年までの累積の総処理費用は、3275億円と推定された。

ブロック別シナリオにおいては、3ブロック別に最適化がされ、処理施設数は2050年に6施設と現状に比べ約半減すると推定された。人口の少ない京都府北部の「丹後・中丹」ブロックでは5施設から1施設にまで集約が進み、京都府中部の「南丹・京都市」ブロックでは4施設から3施設に、京都府南部の「山城」ブロックでは4施設から2施設に集約された。焼却施設の集約化が進展したことで、ごみの輸送距離が長くなり、中継施設を含む広義のごみ輸送費用は92億円増加するが、焼却施設の集約化・大規模化によるスケールメリットにより、焼却施設の建設・運営にかかる費用は347億円減少した。累積の総処理費用は3043億円であり、現状維持シナリオに比べて232億円（7%）の削減が見込まれた。

全体最適化シナリオでは、ブロック内で処理するとの制約をかけず京都府全体を対象として最適化しており、2050年に5施設となって、ブロック別よりもさらに集約が進むと推定された。2040年から2047年にかけて、京都府南部の「山城」ブロックの処理能力はゼロとなるが、ブロック間での処理能力が融通されるため、ごみ処理能力に不足が生じることはない。累積の総処理費用は2937億円となり、ブロック別最適化に比べ106億円（3.5%）の追加的な削減が見込まれた。

基幹改良抑制シナリオにおいては、2050年に4施設にまで集約化され、基幹改良を制約しない全体最適化シナリオよりも処理施設の集約化が進んだ。基幹改良抑制シナリオの累積総費用は2952億円であり、全体最適化シナリオよりも15億円（0.5%）多いが、その差はわずかであった。基幹改良による既存施設の延命は、集約化対象の処理施設間の更新時期の違いを吸収し処理施設の集約化を進めるとは限らないことが明らかにされた。

本モデルは、各都道府県でのごみ処理広域化計画の策定や、中継輸送や基幹改良に対する補助金政策が広

域化・集約化に与える影響の検討などに活用されることが期待される。

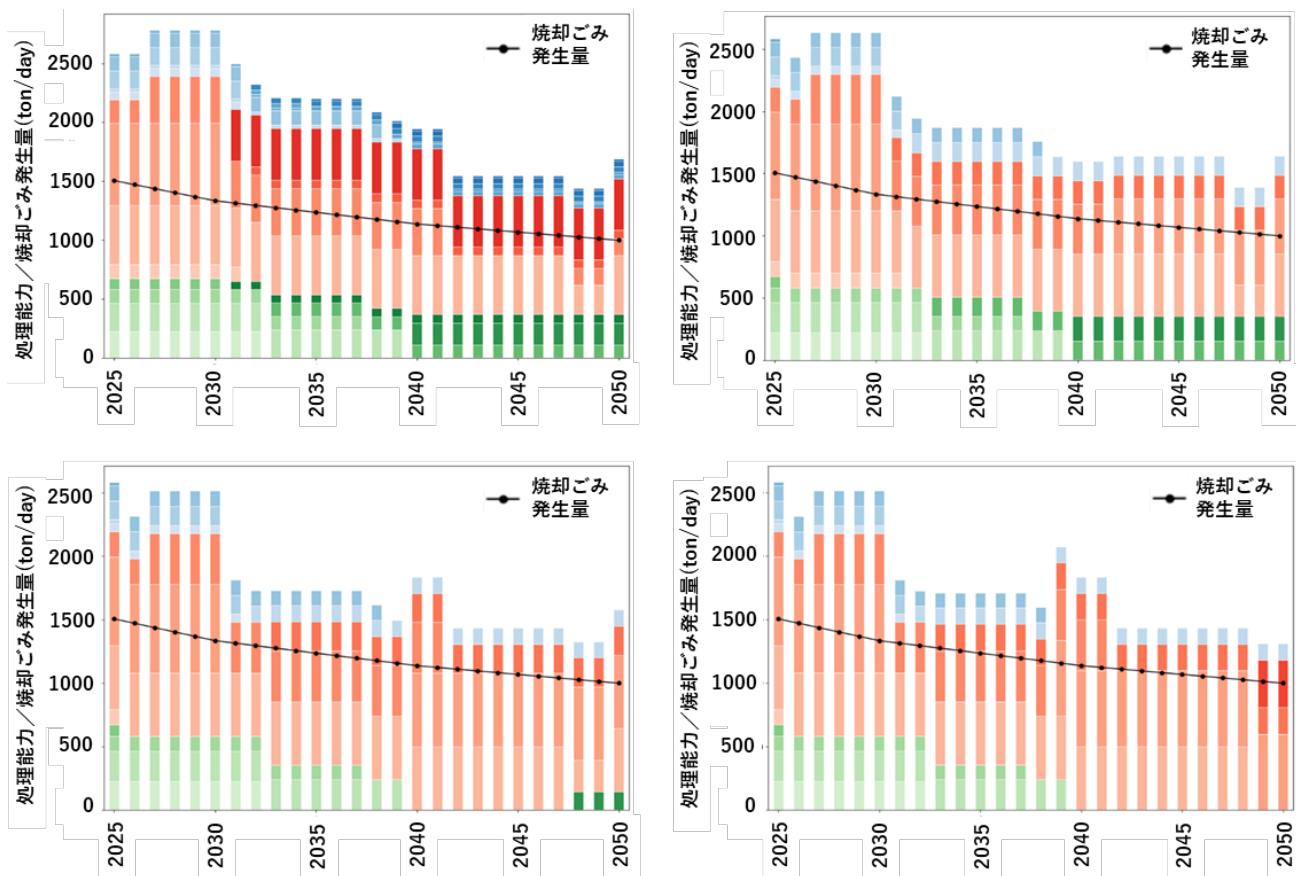


図 11：2025 年から 2050 年までの京都府におけるごみ処理施設別能力（トン/日）の内訳の推移

注) 左上は現状維持シナリオ、右上はブロック別シナリオ、左下は全体最適化シナリオ、右下は基幹改良抑制シナリオの結果。棒グラフの青系統は京都府北部「丹後・中丹」ブロックを、赤系統は京都府中部「南丹・京都市」ブロックを、緑系統は京都府南部「山城」ブロックを表す。黒色の折れ線は、焼却ごみ発生量（トン/日）を表す。年間280日の運転を想定するため、処理能力合計は、焼却ごみ発生量よりも多い。

・廃棄物発生量・処理技術の転換シナリオ

3R+施策のGHG削減効果推定

(a) 家庭ごみ発生抑制によるGHG削減効果推定（成果番号12）

使い捨て商品の使用削減などのごみ発生抑制行動15行動の対象は、家庭ごみ全体の約46%を占めると推定された。15行動を4類型に分類した際の寄与は、使い捨て商品等の削減19%、食品ロス削減13%、容器包装削減10%、リユース4.4%であった。また、日本全国での家庭ごみ発生抑制行動によるGHG削減効果を、1) 化石由来廃棄物の焼却回避によるGHG排出の削減、2) 製品製造の回避による生産工程からのGHG排出量の削減、3) 従来の焼却処理でのごみ発電量の減少によるGHGの増加に区分すると、1) によるGHG削減は450万ton-CO₂eq/年、2) の生産工程でのGHG削減が1,800万ton-CO₂eq/年と大半を占め、3) のごみ発電減少によるGHG增加は150万ton-CO₂eq/年であった。

(b) 再資源化や発生抑制等の対策を組み合わせたシナリオ別GHG削減効果推定

一般廃棄物処理からのシナリオ別GHG排出量推定結果を図 12に示した。現状シナリオにおける正味GHG排出量は554万ton-CO₂eq/yearであった。焼却および焼却残渣埋立に伴う非エネルギー起源GHGが大部分を占めた。GHG削減効果としては、再資源化による寄与が最も大きく、ごみ発電も一定の寄与を示した。

2030シナリオ、2050シナリオでは、電力の脱炭素化が進み、ごみ発電や再資源化でのGHG削減効果が小さくなり、正味GHG排出量が増加する傾向であった。金属類のマテリアルリサイクルによるGHG削減効果

は、現状シナリオで212万ton-CO₂eq/yearのところ、2050シナリオでは40万ton-CO₂eq/yearにとどまる。

2050+施策シナリオでは、食品ロス削減、衣類廃棄物削減、プラスチック再資源化率向上により、正味GHG排出量が-1,326万ton-CO₂eq/yearまで削減された。食品ロス削減・衣類廃棄物削減ともにライフサイクルの観点で大きなGHG削減効果を示し、特に食品ロス対策の効果が大きかった。また、プラスチック容器包装再資源化率向上については、再資源化量の増加によるGHG削減効果が208万ton-CO₂eq/yearを示し、焼却削減による効果が237万ton-CO₂eq/yearであった。2050+施策シナリオで設定した施策はいずれも大きな効果を示し、これらの施策を実現することで、電力の脱炭素化を想定する場合であっても、2050年の廃棄物処理に関連する分野でカーボンニュートラルを達成しえることが示唆された。

ただし、これらのGHG排出量や削減量は、国外での排出/削減量や廃棄物分野以外での削減効果等が含まれている。廃棄物分野のGHG排出量として、焼却・残渣埋立および直接埋立に伴うエネ起・非エネ起GHG排出量に限定すると、現状シナリオの1718万ton-CO₂eq/yearから2050シナリオの1205万ton-CO₂eq/yearへと減少し、さらに2050+施策シナリオでは957万ton-CO₂eq/yearとなるものの、狭義の廃棄物分野のみではカーボンニュートラルには至らないことが示された。

本解析の結果から、2050年までの人口減少や脱炭素化電力のみを考慮すると、国内全体の廃棄物処理によるGHG排出量は増加傾向にあるという推定結果であった。脱炭素化電力による廃棄物焼却時のごみ発電によるGHG削減効果が小さくなることが主な要因であった。発生抑制や再資源化率向上等の施策を考慮したシナリオでは、食品や衣類の生産回避、容器包装プラスチック再資源化量増加・焼却量減少によってGHG排出量が大幅に削減すると推定された。一方、廃棄物分野からのGHG排出量に着目すると、発生抑制や再資源化率向上による廃棄物焼却量減少を考慮した場合においても、957万ton-CO₂eq/yearのGHG排出量が残存した。

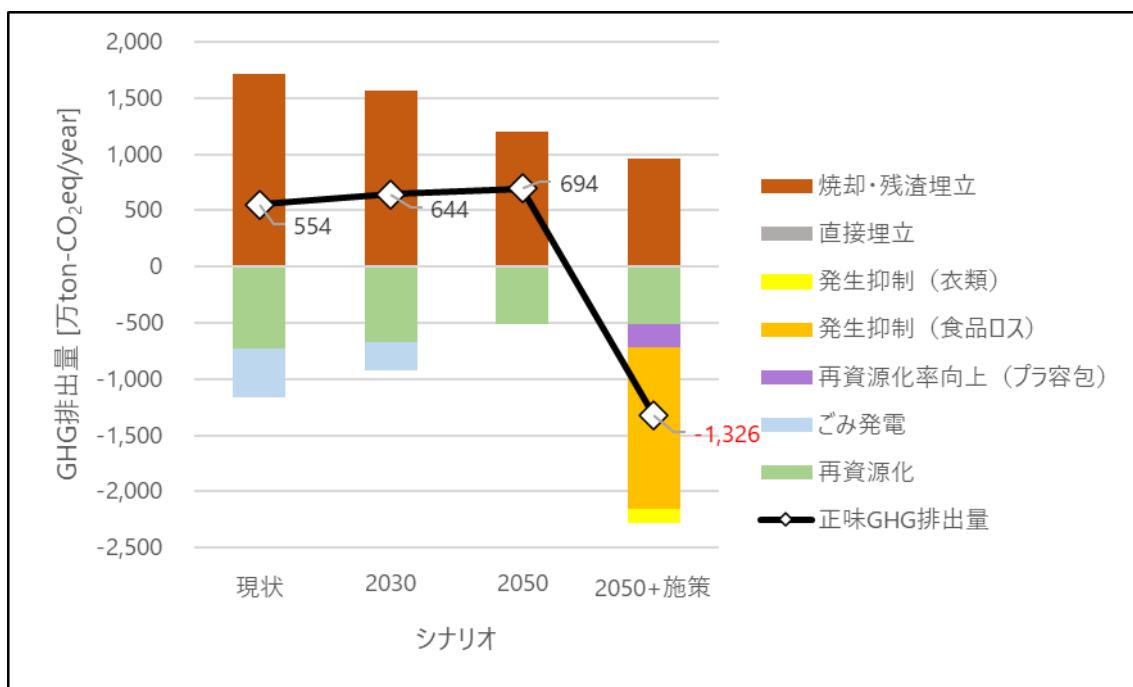


図 12：全国での一般廃棄物処理 GHG 排出量推定結果（プロセス別）

・素材産業の生産技術変化を踏まえたモデル群の開発

電力・鉄鋼・セメント産業の脱炭素化と副産物利用）（成果番号65）

図 13にセメント産業での石灰石、石炭灰、高炉スラグの消費量・利用量を示した。石炭灰・高炉スラグについては、石炭火力発電・鉄鋼製造での発生量も示し、セメント産業での利用量との差を余剰量とした。

石炭灰供給量（利用量+余剰量）は、石炭火力発電量を反映し、石鉄CNおよび石鉄セCNシナリオでは、2030年にベースおよびセCNシナリオの約1/8となり、2050年にはゼロとなった。同様に、高炉スラグ供給量は、転炉鋼生産量を反映し、石鉄CNおよび石鉄セCNシナリオでは、2030年にベースおよびセCNシナリ

オより約3割少なく、2050年には1/30程度に減少すると推定された。これら副産物は、セメント産業をはじめ土木建築分野での利用や海外輸出がされている。セメント産業での脱炭素化が進むシナリオ（セCN）では、原料である石灰石とともに、副産物の需要量も減少し、石炭灰・高炉スラグの余剰量が増加する。ベースシナリオに比べた副産物の余剰量の増加は、2030年に石炭灰210万トン、高炉スラグ281万トンであり、2050年には石炭灰404万トン、高炉スラグ338万トンが追加的な余剰となる。

一方、電力や鉄鋼での脱炭素化が進むシナリオ（石鉄CN）では、副産物の供給量が減少し、セメント産業での原料不足が生じる。2030年石鉄CNシナリオでは石炭灰の全量がセメント産業で利用されており、石炭灰の不足を、供給に比較的余裕のある高炉スラグで補っている（ベースに比べ石鉄CNの高炉スラグ利用量は388万トン増加）。2050年石鉄CNシナリオでは石炭灰・高炉スラグの供給がさらに減少するため、これら副産物の不足を補うべく、一次資源である石灰石の消費量が増加している（ベースに比べ石鉄CNの石灰石消費量は514万トン増加）。

このように、セメント産業でのみ脱炭素化がすすむ場合は、副産物の追加的な余剰が生じ、その処理が必要となること、石炭火力発電と鉄鋼製造でのみ脱炭素化がすすむ場合は、セメント産業において原料となる副産物・廃棄物が不足し、一次資源の消費増加を招くことが分かった。これに対し、副産物の需要側・供給側の両面で脱炭素化が進む場合（石鉄セCN）には、これらの影響は少なかった。総じて、2050年に向けてカーボンニュートラルの達成を目指す上では、関連する産業部門との協調や連携が重要となる。

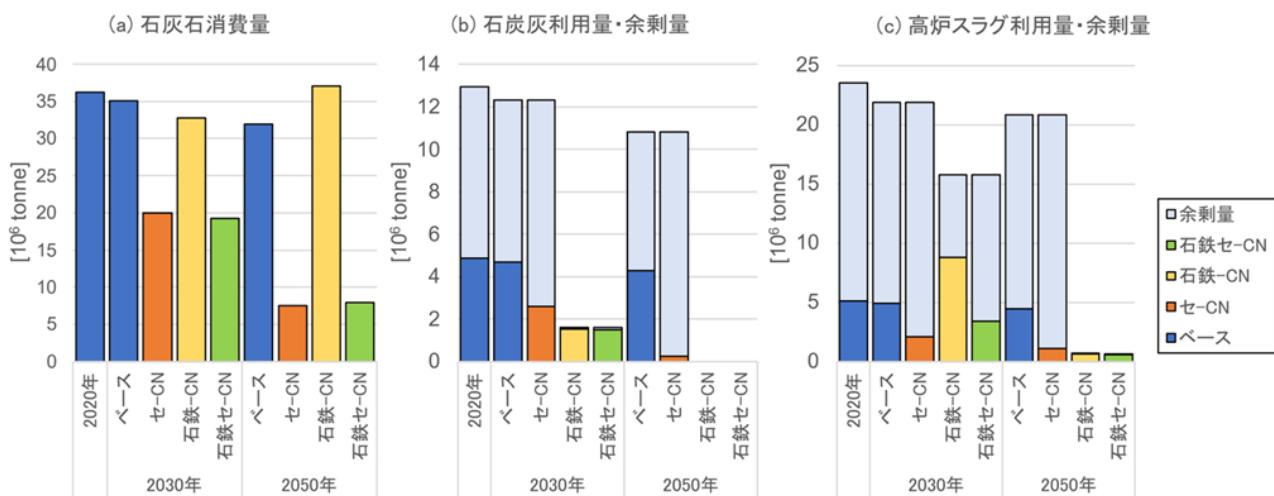


図 13：セメント産業での石灰石・石炭灰・高炉スラグの消費量等の将来推定結果

【サブテーマ3】資源循環CCUS技術のカーボンニュートラル評価

・国内外の文献レビューに基づく資源循環CCUS技術の意義と研究課題の提示

国内外のカーボンニュートラルシナリオ等の動向調査に基づく資源循環CCUS技術の意義の整理

日本における2050年のCCUS導入量は、経済産業省による「CCS長期ロードマップ」(2023年3月)「カーボンサイクルロードマップ」(2023年6月)に示された規模は同程度であり、単純に合算すると220～440MtCO₂となる。これを2050年将来推計人口(国立社会保障・人口問題研究所令和5年推計)一人当たりに換算すると2.1～4.2tCO₂/人年となるが、これは後述するIEAや欧州のCNシナリオと比べてかなり大きい。ただし、このうちCCUはCCU製品に対応する量でありCO₂分離回収地点は不明であるため、CCSだけに限定して比較すれば下限値(120MtCO₂/年)は1.1tCO₂/人年であり同程度の範囲にあるともいえる。

資源循環分野では環境省の「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(案)」(2021年8月)は、2050年に6MtCO₂のCCUSができれば当該分野のCNが達成され、最大で16MtCO₂のCCUSのポテンシャルがあると示している。上記の全国数値に比べると小さいが、日本全体のCCUSに関する政府の上記のような量的見通しの中でバイオマス炭素、とりわけ廃棄物由来の位置付けは現時点では不明確と見られる。なお、最新の第7次エネルギー基本計画の策定に際して参考されたRITEのシ

ナリオ分析結果（2024年12月）ではCO₂回収量のうちバイオマス火力由来量は示されている。

国際エネルギー機関（IEA）、欧州、イギリス・フランスのカーボンニュートラルシナリオの事例におけるCCUSの位置付けでは（Error! Reference source not found.）、一人当たりCO₂分離回収量はフランスを除き1tCO₂前後で同程度である一方、CCSとCCUの比率はかなり異なる。特に廃棄物の関連では、バイオマスにおける廃棄物の比率の高さやバイオマス炭素が炭素貯留・利用で果たしている役割の大きさが注目される。具体的には、IEAのネットゼロシナリオ（IEA, 2021）では、バイオマス中の廃棄物の比率が現状よりも大きく増大する想定となっている中で、バイオマス起源CO₂がCCS向けに加え航空機向け等の合成燃料の原料に想定されている。欧州（EC, 2018）では、分離回収されるCO₂の2/3強がバイオマス・DAC（直接空気回収技術）であり、合成燃料・合成材料用途である。バイオマスエネルギーの供給内訳は廃棄物由来が1/3程度となり重要な割合を占める。イギリスのCNシナリオ（CCC, 2020）では2050年までに全ての廃棄物焼却施設(WTE)にCO₂分離回収を導入する想定である。量的には14MtCO₂と環境省の中長期シナリオ（案）と同程度の想定がなされている。廃棄物中バイオマス分と他のBECCS（CCS付バイオエネルギー）・DACを加えた非化石炭素のCCSで全CCS導入量104Mt-CO₂の半分を占める。

表1：国外のCNシナリオでのCCUSの概要（2050年時点の数値。一人当たりは本研究での独自試算値）

	国際機関	欧州※1	英国	フランス
参照文献	IEA, 2021	欧州委員会, 2018	気候変動委員会, 2020	環境連帯移行省, 2020
CO ₂ 分離回収量	7.6 GtCO ₂ (0.79 tCO ₂ /人年)	1281～606 MtCO ₂ (0.63～1.4 tCO ₂ /人年)	(記載を確認できない)	(記載を確認できない)
CCS 導入量	7.2 GtCO ₂ (0.75 tCO ₂ /人年)	80～298 MtCO ₂ (0.18～0.67 tCO ₂ /人年)	104 MtCO ₂ (1.5 tCO ₂ /人年)	16 MtCO ₂ (0.23 tCO ₂ /人年)
炭素源内訳 (一部抜粋)	CCS の内訳として バイオ 1.3 GtCO ₂ DAC 0.6 GtCO ₂	バイオ 276～84 MtCO ₂ DAC 210～123 MtCO ₂	廃棄物 CCS 14 MtCO ₂ (化石 7, バイオ 7) その他 BECCS 45 MtCO ₂ DAC 5 MtCO ₂	BECCS 10 MtCO ₂
CCS 貯留量	7.2 Gt-CO ₂		104 Mt-CO ₂	
CCU:合成燃料	0.5 Gt-CO ₂ ※2	227～154 Mt-CO ₂		
CCU:合成材料		80～47 Mt-CO ₂		

※1 参照文献のうち2つの1.5°Cシナリオ（2050年GHG実質排出ゼロ）を示した。なお、人口予測は出典に記載がなく別途Eurostat(2023)を参照したため、一人当たりはGHG推計対象国と一部不一致による誤差が含まれると考えられる。

※2 IEAシナリオでのCO₂からの合成燃料（航空機等）0.5 GtCO₂の炭素源は（合計が一致しないが）バイオマス由来0.07 GtCO₂、DAC由来0.35 GtCO₂と読み取れる。

以上に加えその他の資料なども参考とすれば、資源循環CCUSの意義は、①排出回避困難な分野としての削減対策、②廃棄物中のバイオマス炭素を活用した大気中炭素除去、③燃料・化学品の原料炭素（特にバイオマス炭素）を供給する役割を担う、と集約され、本分野のCCUS技術評価において特に考慮すべき観点と考えられる。なお、①及び②の関連では、IPCC第六次評価報告書第三作業部会報告書では、廃棄物の由来によってはWTEにCCSを組み合わせることで、ネットゼロさらにネットネガティブのエネルギー源になりうるとの記載も見られる。

評価関連ガイドラインや研究事例、廃棄物・資源循環分野でのCCUS技術の調査・整理（成果番号75）

CCUの評価について調査したガイドラインのうち、“Techno-Economic Assessment & Life Cycle Assessment Guidelines for CO₂ Utilization”(Langhorst, 2022)においては、CCUによる製品と化石炭素源の製品の比較などが最も多く研究課題とした上で、CCU技術はエネルギーや水素のような高エネルギーの反応物質を用いることが多いことが大きな環境影響につながり、これが主要な変数となるため、バックグラウンドのシナリオの移行を考慮しなければならず、そのために現状、完全に脱炭素化された将来及び移行シナリオを定義しなければならないとしていた。

廃棄物焼却を中心とする熱処理施設へのCCUS導入については、既に多数のLCA研究事例があった。CO₂

の分離回収のみならず、CCSまでを評価対象範囲とした事例は比較的多い一方で、CCUを含む事例は少なかった。また、本研究で着目している異なる廃棄物の処理方式（焼却、ガス化、メタン発酵等）を横断的に比較した事例は確認できなかった。

これらの中には、CCSの評価研究では外部電力などCO₂排出原単位の変動を考慮した研究もあった（ただし4論文のうち3つは同一の研究グループ）一方で、CCUの評価研究（異なる燃料・化学品を製造対象として比較評価した論文や焼却の脱炭素化オプションをCCUSに加えてガス化技術等も含めて評価した報告）においては、被代替物の製造に係るCO₂排出量の将来的変化は考慮されていなかった。

このように、CCSのみならずCCUを含めて廃棄物処理技術を評価する上では、評価研究事例の蓄積に加えて、エネルギー・システムの脱炭素化の影響（例えば中長期シナリオ案でも「2050年CNに向けた廃棄物・資源循環分野の基本的考え方」において「廃棄物発電・熱利用は当面拡充していくが、電気の実質排出ゼロ化の進展とともに、計算されるGHG削減効果は減少する」とされている。）にとどまらず、CCUによる被代替物の生産等の過程の脱炭素化の考慮が課題ということができ、さらには被代替物の炭素源のCN化（バイオマス化など）も将来シナリオとして想定しうる。

しかしながら、（de Leeuw & Koelemeijer, 2022）も述べているように、将来社会のCN化を前提とするならば、代替されるエネルギー・材料の生産過程もCNになっているはずなので、代替効果がゼロになるとという計算結果となる場合も考え得る。他方で、太陽光や風力など再エネ発電あるいは原子力発電導入によるCO₂排出量削減効果も同様の計算ではゼロになりえるが、そのため、これらのCN電源が将来不要になるというエネルギー・システムのCN化将来シナリオは、まず見かけない。すなわち、2050年CNを前提にした場合には、現在と同様にCO₂排出量を指標とすることの有効性も課題となるといえる。

・廃棄物・資源循環分野におけるCCUS技術を対象とした評価

カーボンニュートラルシナリオに調和した資源循環CCUS技術の評価の枠組案の作成及び評価の試行（成果番号79）

本研究では、廃棄物処理へのCCUS導入の意義を踏まえ、3つの指標（GHG純除去量、エネルギー純供給量、CN炭素純供給量）に基づく評価手法を提案した。この3指標（いずれも正值の方向へ増加すればCN化に向けて良い方向になるよう定義）は、日本においてエネルギー・炭素循環システムをCN化する上で主要な制約と想定される条件に対応させることを意図した。すなわち、GHG純除去量は実質排出ゼロ（排出量はCCSなど除去量の範囲に留める必要）、エネルギー純供給量はCN電気やCN水素の供給の範囲で需要を賄う必要、非化石炭素純供給量は持続可能なバイオマスや空気中炭素等で炭素需給を成立させる必要（最終的に大気放出される非循環性炭素分はGHG除去で相殺される必要）という制約に、それぞれ対応している。GHG純除去量とCN炭素純供給量は上述の廃棄物処理へのCCUS導入の意義に直接対応している。エネルギー純供給量は、現状の中間処理は熱回収が主体である一方で、新たな原燃料化が想定される中では炭素化合物の有するフィードストックエネルギーの違いも考慮できることが有用と考えた。

3つの処理技術と2つの炭素利用用途の組合せの6方式に対する乾燥ベースごみ1t当たりの3指標の計算結果の一部を図14に示す。図の横軸は現状の系統電力のCO₂排出係数・一次エネルギー換算係数の低下率を示し、それに伴う指標値の変化が縦軸で表される。

コンクリート利用では、焼却処理との組合せ（IC）は現在の電気のCO₂排出係数でもGHG除去技術として有効であり、メタン発酵との組合せ（AC）ではGHG除去効果は小さいもののエネルギー供給効果・CN炭素供給効果があり、今の時点からCN化のために導入する意義が相対的に高いことが示唆された。ただし、本研究での試算内容の技術パラメータの正確性や（性能目標数値を設定した部分での）実現性の検証の必要性以外にも、1か所当たりのコンクリート利用で固定できるCO₂の量的制約面から実施設の規模では焼却排ガス全量へのCO₂分離回収との組合せの実現性にも十分な検討が必要となる。

メタネーション技術はCN炭素純供給量が大きいが、熱処理（焼却・ガス化）との組合せよりも、メタン発酵との組合せ（AM）が、他の2指標の観点で相対的に優れていることから、メタン発酵を対象に導入開始することが、廃棄物処理へのCCUS導入の意義の観点から有望であることが示唆された。GHG純除去やエネルギー純供給の観点でみれば、電力系統の脱炭素化が進み（または必要エネルギーを追加的再エネ導入で供給）、廃棄物炭素がCN化（バイオマス化）することでメタネーション技術の有効性が発揮されると考え

られるため、社会実装に向けては、まずは再エネ大量導入などの外部条件を整備していく必要があると考えられる。なお、ガス化により得られる合成ガスをコンクリートに固定し残余をメタネーションできるとした場合（GMC）は、仮想的な技術システムであるが、CN炭素純供給量を除く二つの指標で合成ガス全量をメタネーションするよりも大幅に指標値が優れており、メタン発酵とメタネーションの組合せと同程度であった。 CO_2 からよりもCOから合成する方が必要な水素量が少なく、なつかつ廃棄物中の水素を用いることの効果が示されたと考えられる。

以上は、メタン発酵が生ごみ1tを対象とした評価であるため、廃棄物処理システム全体としての比較のために、3指標（分別前のごみ1t（乾燥重量）あたり）について、「メタン発酵+焼却」での値と「（全量）焼却」での値を比較した。コンクリート固定の場合は、厨芥類中の炭素の一部をメタンとして回収することでGHG除去量が低下し、エネルギー・非化石炭素供給量が増加するトレードオフ関係がみられ、優劣の判定には他の方式を含むトレードオフ関係の比較などが必要となる。一方、メタネーションの場合にはメタン発酵を導入した方が優れた指標値又は同等の結果となり、バイオメタンを得る目的ではメタン発酵を優先して導入すべきとの結論がより明確化された。

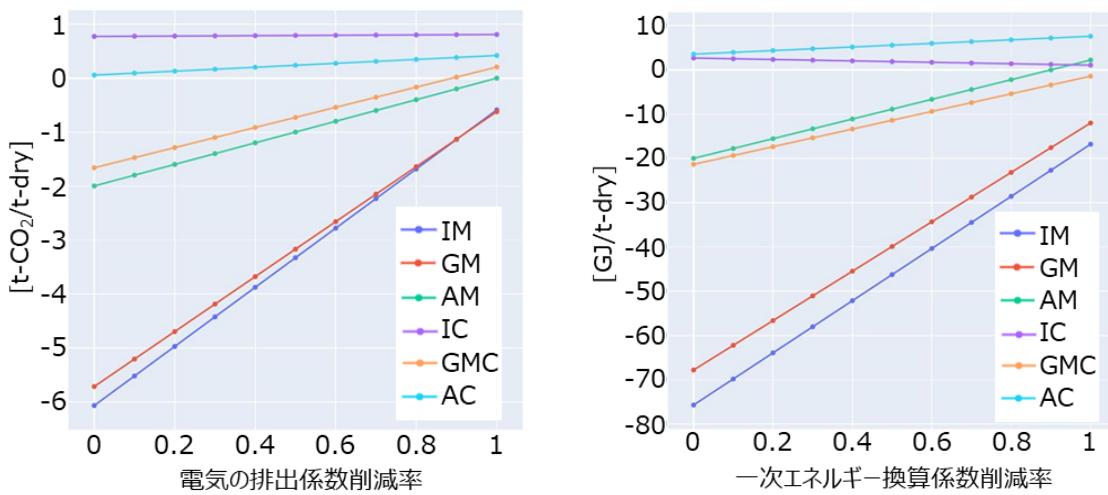


図 14：CN性能評価指標に基づく資源循環CCUS技術の試行的評価

（左：GHG 純除去量、右：エネルギー純供給量）

図注1）電気の係数（ CO_2 排出係数、一次エネルギー換算係数）の現状からの低減に伴う変化（感度解析結果）を示す。

図注2）（技術の略号）処理：I=焼却、G=ガス化、A=メタン発酵。／利用：M=メタネーション、C=コンクリート利用。

・廃棄物・資源循環分野以外の炭素排出源も考慮した評価

複数の炭素発生源・需要先の組合せの数理最適化モデルの作成と CO_2 削減度に応じた分析（成果番号78）

仮想的な炭素循環システムでカーボンニュートラルを制約にコスト最適化計算結果では、焼却施設において発生した生物起源 CO_2 と一部の化石起源 CO_2 はそのまま大気に放出され、化石起源 CO_2 のほとんどが分離・回収されてコンクリートに固定される結果となっており、焼却施設における CO_2 の回収率は53%程度であった。また、メタン発酵施設からのバイオメタンが他の CO_2 発生源に供給され、他の発生源のうち CO_2 の分離・回収が可能な発生源ではバイオメタン中の炭素を更に回収してメタネーションすることで循環利用されていた。 CO_2 の分離・回収が不可能な発生源では、メタン発酵により発生したバイオメタン（本モデルでは、メタン発酵直後のバイオメタンとバイオメタンの燃焼後に回収した CO_2 による合成メタンの区別はしていない。）が供給された一方で、化石燃料の使用が僅かに残っていた。

廃棄物処理施設は2050年のカーボンニュートラル達成以前に、日々発生する廃棄物を処理するという社会的要請があり、現在から将来に至る連続性が重要であることを踏まえ、 CO_2 排出削減率の制約（100%の場合がカーボンニュートラル）をパラメータとした感度解析を実施した。感度解析によって確認した CO_2 分離・回収技術の導入量と CO_2 の利用量の分析結果（図 15）から、 CO_2 排出削減率が低い場合には、メタン発酵により発生したバイオガスから CO_2 を分離してコンクリートに固定するオプションから優先的に選択される様子が確認された。これは、バイオガス中の CO_2 が高濃度（40%程度）であり、 CO_2 濃度が高いほど

CO₂分離・回収コストが低下することや、コンクリート固定に水素が不要であることが要因と考えられる。なお、本研究では、生物起源のCO₂をコンクリートに固定することをネガティブエミッションと評価しているが、コンクリート原料であるセメント製造時の脱炭酸によるCO₂排出の状況は考慮していない。

以上の解析結果から、廃棄物・資源循環分野のカーボンニュートラル化を目指す上での将来の廃棄物処理施設整備の方向性として、メタン発酵による生物処理は、バイオガスを都市ガス原料に利用している事例も既に見られるところ、カーボンニュートラル化の観点から今後も積極的に整備していくべき技術であることが示唆された。焼却排ガスと比較して、バイオガスからの（生物由来の）CO₂回収は高効率でありえ、コンクリート工場等と連携して分散型のCCUシステムを構築し得る可能性があるためである。焼却処理では、廃棄物分野だけのカーボンニュートラルが課題ならば、全量のCO₂回収は必ずしも必要ではない可能性がある。ガス化改質は、合成ガスが直接得られる点で有用と思われたが、現状の技術水準ではエネルギーを含めたランニングコストに課題があり、本分析では選択されない結果となり、今後の技術開発が期待される。

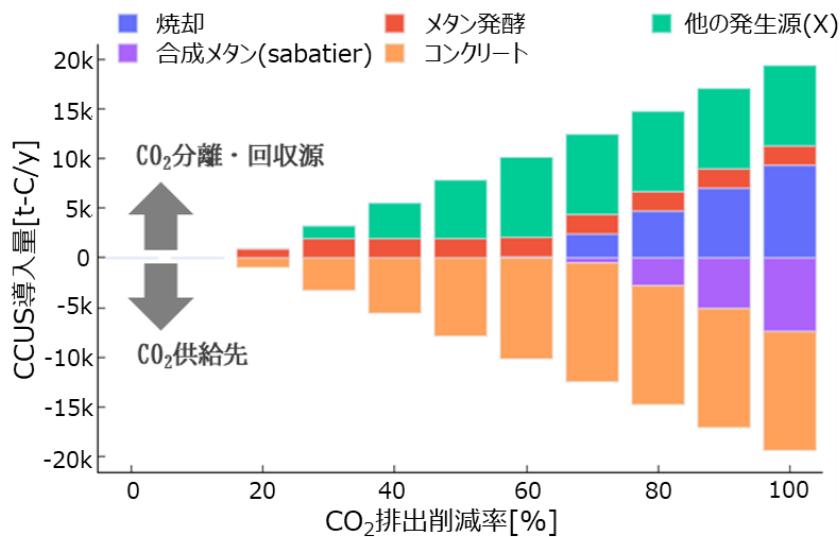


図 15 : CO₂ 分離・回収量と利用用途 (感度解析結果)

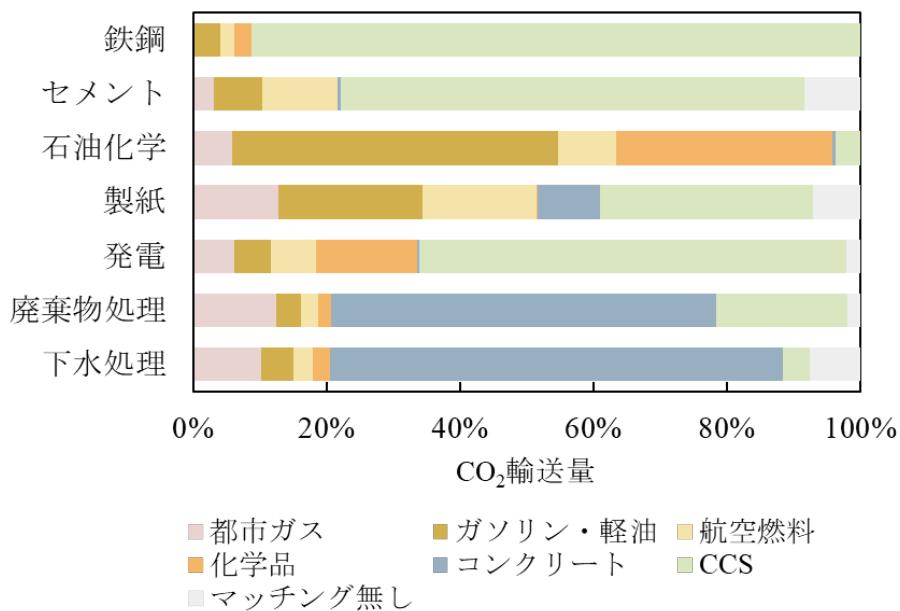
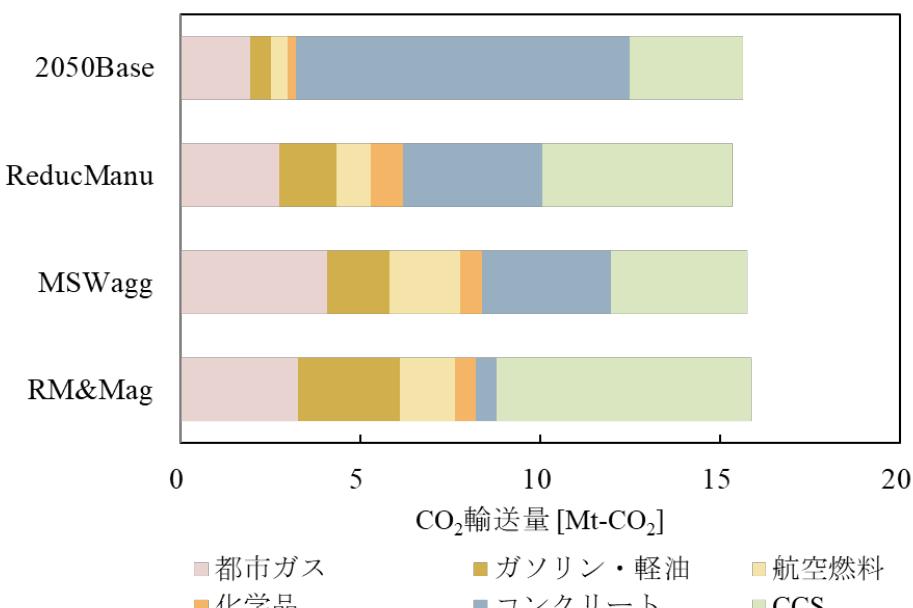
異なる将来シナリオに対する空間的な炭素需給マッチングの評価（成果番号80）

2050Baseケース（廃棄物処理施設の立地は現状、発電及び産業では一定のCO₂分離回収によりカーボンニュートラル化）における産業別の供給先（CO₂の用途）の割合を図 16 に示す。鉄鋼は90%以上がCCSとのマッチングであったほか、セメントや発電も大部分がCCSとマッチングしており、国の計画や多くの研究で想定されている大規模排出源とCCSの組合せが、CO₂輸送密度の観点からも効率的であることが示唆された。石油化学では、CCSの割合が小さい代わりに合成燃料製造や化学品製造の割合が高いなど、分野内でのCCUが大部分を占めていた。これは、本分析において製油所をCO₂供給施設とCO₂需要施設の両方に設定しており、輸送距離が0kmの組合せ（CO₂輸送密度が著しく大きい組合せ）が一定数存在していたためであると考えられる。廃棄物処理施設及び下水処理施設は、小規模分散という特徴を持つためCO₂輸送密度は小さいが、同じく分散的に立地しているコンクリート工場への供給割合が高いことが特徴的であった。本分析は2050年を想定したものであるが、コンクリートへのCO₂固定化には水素が不要であることを踏まえると、当該技術の早期導入は合理的な可能性がある。なお、下水処理については、下水汚泥の嫌気性消化によりCH₄とCO₂が主成分であるバイオガスが得られるため、CO₂の除去やメタネーションによってバイオメタンを製造し、都市ガスの代替として活用することが検討されているが、本研究においては下水処理由來の炭素の都市ガス製造への利用割合は9%程度にとどまっていた。これは、本研究では既存の都市ガス工場を需要場所として設定しており、下水処理施設にてオンサイトでバイオメタンを製造することは想定していないためであると考えられる。

次に、異なる将来想定に対応した4ケースにおける廃棄物処理施設から発生するCO₂の供給量とその供給先（用途）を図 17 に示す。ReducManuケース（CCUSに大きく依存しない素材対策）及びMSWagg（廃棄物処理施設の大幅な広域化・集約化）ケースのいずれにおいても、2050Baseケースと比較してコンクリ

ートへの供給割合の減少が確認され、代わりに燃料製造やCCSの割合が増加していた。ReducManuケースにおいては、鉄鋼やセメントでのCO₂排出量が大幅に減少することにより、製油所やCCSにおいて廃棄物処理施設のCO₂を受け入れる余地が増加したことが要因であると考えられる。また、MSWaggケースにおいては、廃棄物処理施設の小規模分散という特徴が薄れることによって、コンクリート工場よりも大規模にCO₂を受け入れることが可能な製油所やCCSとの組合せにおけるCO₂輸送密度が大きくなつたことが要因であると考えられる。RM&Maggケースでは、動脈側と静脈側の変化が同時に発現することによって、廃棄物処理施設からコンクリートへの供給割合の更なる減少や、それに伴つて燃料製造やCCSといった集約的なCO₂需要の割合の増加が確認された。

以上の結果から、廃棄物・資源循環分野のカーボンニュートラル達成を見据えた上で、今後の廃棄物処理施設整備方針を検討する際には、廃棄物処理施設そのものの立地や規模、広域化・集約化の程度に加えて、周辺に立地する他のCO₂排出源の産業構造変化やCCUS技術の開発の見通しも踏まえ、CCUSの連携先や実現可能性を考慮することが重要であると言える。

図16：供給施設別の供給先(CO₂の用途)割合図17：廃棄物処理施設から発生するCO₂の供給量と供給先の内訳

・廃棄物処理プラントメーカーとの意見交換

廃棄物処理でのCCUSについての技術開発を進めている複数のプラントメーカーよりいただいた意見や示唆を表2のとおりまとめた。本表は要約版であり、異なる開発者の意見を一つの箇条にまとめている場合がある。なお、意見交換は研究期間の途中で実施しており、意見交換時の情報提供内容については本報告書の記載内容とは評価結果等が異なっている部分がある。

3指標による評価の枠組みと試算結果については、計算内容自体は理解できるとする一方、各種の将来想定の可能性や考慮できていないCO₂輸送の重要性、コンクリート利用での性能パラメータ等の妥当性について意見・指摘をいただいた。なお、意見交換においては各種技術の性能パラメータについての意見も頂戴しており、そのうちのいくつかは本報告書での試算に反映済みである。

空間的需給マッチングについては、このような分析は重要とする意見が複数の開発者から得られた一方で、分析に基づくコーディネーター役の必要性、他の発生源と比べても焼却施設のCO₂排出量は比較的多い部類だが動脈側での取組と分断されていること、そのような中で現実には個別の取組先行で進んでいることなどの意見・指摘をいただいた。

また、必ずしも評価手法にとどまる課題ではないが、資源循環CCUSの社会実装に向けた課題の指摘を多くいただいた。それらをまとめると、次のようになる。「技術開発成果は出せるが、市場（社会）導入は開発より難しい問題。日本は技術先行だがルール・方針がない中では先行者が不利になりかねず、ターゲット（供給用途）が決まらない中で同時開発しなければならない負担がある状況。社会実装のハードルのうち、コストは技術面で対応しても、制度が必要。現状の廃棄物発電はCO₂排出源になっていることの理解普及が必要であるが、自治体がCCUSに取り組むインセンティブやルールがない。」

表2：プラントメーカーへのインタビュー結果の概要（発言者を統合した要約版）

3指標による評価の枠組みと試算結果について
<ul style="list-style-type: none"> 計算すれば、（おおむね）こうなると思われる。 コンクリート固定がここまで有利なのか。規模とCO₂輸送の考慮が気になる。 メタネーションはまだ先で、その前にCCSと思っている。どういう状況でメタネーションが有利か示せるとよい。水素の影響が大きい。ごみ中のプラスチックが全て化石燃料のままという仮定は環境省の中長期シナリオ（案）の将来想定とも異なる。 プラスチックの分別が進む将来想定では、カロリー低下でガス化はしんどくなるのではないか。 輸送が問題。ガス化してアルコール製造すると液体なので運搬が有利。一方で立地は化学工場の近くなどに限られるので、コンクリート固定などうまくすみ分けられるとよい。
空間的需給マッチング（現状値での分析）について
<ul style="list-style-type: none"> まず現状※を把握する意味で重要。施策による変化が示されるとよい。（※この時点では現状の炭素排出状況だけでの分析。意見交換後に将来を想定した炭素発生源・利用先での評価を実施した。） 政策立案者には合理的な判断材料となりうるものであり、こういう分析結果をもとに、誰かがコーディネーターとなる必要がある。関東地域くらいの範囲でどうするか考えていく必要があるのではないか。一方で、現実は早い者勝ちとなっている。 分離回収装置を付けて意味のあるような発生源は意外と数が少なく、廃棄物焼却施設（年間10万tCO₂規模）は排出源として多く出している部類。 欧州と異なり日本は動脈と静脈を別に分けるという思想があり、このままでは静脈側だけで広域化して対応するしかない。 コストを念頭に進めていく必要があるが何がブレイクスルーになるのかは分かっていない。

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>

【サブテーマ1】日本版物質フロー・ネクサスモデルの開発

サブテーマ1ではGHG排出量の大きい鉄鋼、セメント・コンクリート、バイオマス資源の有効な利用先である建築材料を例に物質フロー・ストックモデルを開発した。一般的なエネルギー・システムモデルが将来の

材料需要を所与として、コスト最適化に基づいて生産技術を選択するのとは異なり、本研究で開発した物質バジェットモデルは生産技術の変化を所与として必要な材料フロー構造の変化を特定する。すなわち、生産技術の変化はあくまで業界のロードマップや実際の建設計画に沿ってのみ進展することを想定しており、必ず所与の需要を満たすように生産技術が変革されることを想定する既存モデルとは本質的な考え方方が異なる。これにより、仮に革新的な生産技術が時間内に大規模展開できない場合の代替戦略の検討を可能とする点に学術的意義を有する。建築材料の脱炭素化に関する既存研究の多くは、材料生産やコンクリートの炭酸化、伐採木材製品の使用、森林成長などを個別で検討する傾向がある。これに対して、本研究は建築物と森林に関連する炭素の流れを包括的に評価した上で、木造化、国産材供給、再造林を同時に推進する取り組みの重要性を定量的に示した点に既存研究と比較した優位性および環境政策への貢献が見込まれる。

また、日本の4つの物質フロー指標とGHG排出量の変化を一体的に捉え、物質フロー指標の変化の要因を着目する要素別に分解する手法論を開発した。これは従来の産業連関分析モデルによる構造分解分析では、サプライチェーンの内部に分解要素が定義できなかった課題を克服し、分解要素の柔軟な設定を可能とした学術的貢献は大きい。加えて、カーボンニュートラルへの経路を物質フローの変化を基に探索する動学モデルの開発と事例研究は先行研究がなく、素材の革新的脱炭素技術の不確実性に対してカーボンニュートラル社会を超高効率の物質利用から考えるシステム研究を始動する点で学術的意義は高い。

開発した循環型ビジネスモデルに関する消費者行動シミュレーションモデルは、平均的な消費者行動を仮定した従来手法とは異なり、消費者同士の相互作用や意思決定の変化を通じ、普及率が徐々に上昇する過程を再現したものである。また、特定の時点における複数のサービスによる環境影響の比較のみならず、複数の循環戦略を組み合わせた循環型ビジネスモデルやこれを普及するマーケティング施策の導入に伴う社会全体における経時的な環境影響の変化を推定することを可能とし、学術面でも実用面でも斬新的な成果と考える。

【サブテーマ2】静脈フローモデルの開発

食品ロス発生量と消費者の食品の購入・保存・調理・廃棄行動との関係については、多くの調査が実施されているが、食品ロス発生量を実際に計量した調査は、その測定の困難さから限られており、調査対象サンプル数も小さい傾向にある。本研究は、実施時期は異なるものの、計884個のごみ袋サンプルに含まれる手つかず食品の重量分布の実測調査結果と、1746名のアンケート調査結果とを用いて、消費者の行動変容による食品ロス発生抑制可能量を推定した実証研究であり、食品ロス発生量を大規模に実測した貴重な研究といえる。また、認識上の食品ロスと認識外の食品ロスという概念を提案し、一見矛盾するアンケート調査結果と食品ロスの実測調査結果とを整合的に解釈する枠組みを提示した。今後、この概念を用いて食品ロスに関する分析が深化することが期待され、発展性がある。

カーボンニュートラル移行過程における廃棄物発生量・処理技術の転換シナリオを提示した先行事例としては、第38回環境省中央環境審議会循環型社会部会で提示された「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（案）」がある。この中長期シナリオ案では、素材産業でのリサイクル材利用による原材料削減等を通じた他分野の脱炭素化への貢献については、リサイクル材を利用しない場合であっても素材産業が何らかの方法で脱炭素化する点も踏まえ、評価の在り方を検討する必要があるとして、削減効果の計上は見送られた。特に、食品ロス削減については、コラムでLCAによる削減効果評価事例を紹介するにとどまり、すべてのシナリオにおいて一律に2000年比半減との2030年目標が設定され、2050年に向けたさらなる目標の深堀りによる削減効果の検討はされていなかった。本研究では、3R+施策のGHG削減効果推定において、素材産業でのリサイクル材利用や廃棄物の発生抑制による生産回避の効果について、エネルギー起源GHG排出量と非エネルギー起源GHG排出量とを区別し、前者は電源の脱炭素化等の進展によって減少していくものの、後者は脱炭素化が困難であり再資源化や発生抑制の効果が維持されると仮定し、削減効果の計上を試みた。前述の家庭系食品ロスの発生抑制可能量推定の結果も踏まえ、2050年に食品ロスを2000年比75%削減とした場合の生産回避によるGHG削減効果は1400万トンCO₂eq/年と評価した。食品ロス削減対策の重要性を明確にしており、環境政策への貢献が見込まれるとともに、エネルギー分野での脱炭素化が進む中での廃棄物発生抑制効果の評価のあり方を提示した点でも学術的意義が高い。

また、本研究においては、ごみ処理広域化・集約化に関し、ごみの中継輸送施設と、基幹改良による延命化を考慮した、2025年から2050年までの多期間にわたる動的最適化モデルを開発した。これまでのごみ処理広域化に関する研究においても、多期間にわたる動的最適化モデルは存在するが、静的モデルに比べて変数の数が多く、実際の適用例においては、対象施設数や処理能力規模の設定の柔軟性、時間軸方向の解像度などが限られていた。本研究においては、制約条件の簡潔な定式化やブロック別の最適結果を全体最適化の初期解として用いるなどの工夫により、都道府県レベルで2050年までの実用的な解を得ることに成功した。2024年環境省通知の要求に応えうる実用的なモデル実装を提供した点で、有用性が高い研究であるといえる。また、従来研究は、一部の都道府県・地域での事例研究にとどまるなか、本研究では47都道府県全てを対象に中継施設の導入を考慮した処理施設配置を示し、それらの傾向を分析したことは、既往研究にはない新たな知見を提供している。

【サブテーマ3】資源循環CCUS技術のカーボンニュートラル評価

2050年にカーボンニュートラルが実現しており、エネルギー・システムが脱炭素化されていることを前提とした場合には、電気や水素のCO₂排出原単位がゼロ化すると考えられるため、従来のCO₂を指標としたLCA手法の計算ではCCUS技術の評価が困難となることが想定される。これに対して本研究では、カーボンニュートラル実現に向けた資源循環CCUS技術の3つの意義・役割を示し、物質・エネルギー・システムの観点でカーボンニュートラル実現に必要な条件に対応した3指標で評価する手法を提案し、3種類の技術により評価結果を示した。そして、複数種類の資源循環CCUS技術について比較することで、当面有望となる処理技術とCCUS用途の組合せを示した。

また、廃棄物処理以外のCO₂排出源もある中では、他分野と比べて廃棄物処理へのCCUS導入の優先性について議論が提起されやすいと考えられる。これに対して、火力・鉄鋼・セメントなどの少数の大規模CO₂発生源のみならず、廃棄物処理施設や下水処理施設などの分散型発生源を考慮し、また利用用途としてもコンクリート製造などの分散的な用途を含めて全国スケールでのCO₂の炭素需給の将来可能性を定量的に提示したことは日本を対象とした評価として既往研究成果のない初めての知見を提示したものと考える。

<環境政策等へ既に貢献した研究成果>

【サブテーマ1】日本版物質フロー・ネクサスモデルの開発

環境研究推進費2024年パンフレット（P8）に記載した研究成果である「サーキュラーエコノミー（循環経済）の取り組みを事前評価する消費者行動シミュレーションモデルを開発」の記事を令和8年度環境省重点施策集の資料作成において引用したいとの依頼が環境省からあった。

【サブテーマ2】静脈フロー・モデルの開発

京都府を対象としたごみ処理広域化・集約化の静的モデルの初期評価結果を、サブテーマ2の分担研究者が学識経験者として参画した京都府におけるごみ処理広域化プランの検討会（第4回今後のごみ処理のあり方に関する検討会 2023年3月28日開催）において紹介した。また、47都道府県を対象とした静的モデルの評価結果および京都府を対象とした動的モデルの結果は、環境省・廃棄物資源循環学会が主催した「一般廃棄物処理分野における資源循環・脱炭素化に係るシンポジウム」（2025年2月2日開催）においてサブテーマ2の分担研究者が「ごみ処理広域化・集約化に関する動向と最適化の事例研究」として報告しており、多数の自治体関係者に共有された。本シンポジウムの報告内容について、環境省主催のブロック会議で説明を受け、その内容に興味を持った島根県の担当者から、県内の広域化・集約化計画を考える上で、ぜひ参考にしたいとの依頼があり（2025年4月9日）、評価結果の詳細情報を提供した。

【サブテーマ3】資源循環CCUS技術のカーボンニュートラル評価

特筆する事項はない。なお、サブテーマ3の分担研究者は、本研究開始後において、政府のグリーンイノベーション基金事業における環境省環境再生・資源循環局廃棄物適正処理推進課による「廃棄物・資源循環分野におけるカーボンニュートラル実現」プロジェクトの研究開発・社会実装の検討（産業構造審議会 グ

リーンイノベーションプロジェクト部会 グリーン電力の普及促進等分野ワーキンググループ）、東京都の特別区長会調査研究機構による「特別区におけるCO₂の地産地消に向けて～清掃工場のCO₂分離・活用と23区の役割～」（提案区：東京二十三区清掃一部事務組合）の研究、川崎市環境局による廃棄物処理施設における脱炭素化・整備構想策定に向けた検討などを本研究の遂行を通じて得た資源循環CCUSに関する知見や考察の深まりも踏まえて支援してきた。

<環境政策等へ貢献することが見込まれる研究成果>

【サブテーマ1】日本版物質フロー・ネクサスモデルの開発

物質バジェット研究の成果の一部は国連環境計画の国際資源パネルによる新レポートでも活用される見込みであり、G7やG20など国際的なハイレベル会合においても本研究の成果を還元できる見込みである。

物質フロー指標の改善とGHG削減に対する貢献度を産業種別に同定したことは、循環経済政策と脱炭素政策の相乗効果とトレードオフ構造の理解を支援するだけでなく、各産業が物質フロー改善とGHG排出削減の背反点を探査し、改善する動機づけとなることも期待できる。さらに、具体的な成果として、革新的な素材生産の脱炭素技術に依存しない場合、CN社会を達成するのに必要となる数値的な物質目標（物質効率4倍、循環利用率2倍）を提示した。循環型社会の推進を通じた脱炭素戦略の有効性を示すものであり、今後の循環経済政策立案と産業戦略の策定の参考値として参照されることが期待される点は環境政策と環境産業にも貢献すると期待できる。

加えて、循環型ビジネスモデルの事前評価モデルは、循環戦略の導入に伴う環境影響や循環性を施策実施前の早い段階で把握し、効果的な施策、リバウンド効果が生じるリスク、普及を妨げるボトルネックを特定することができる。カーボンニュートラル目標と調和する物質フローを製品レベルで明らかにすることで、脱炭素化に資する循環型ビジネスモデルの設計やこれを後押しする政策立案に活用する可能性を開くことが見込まれる。

【サブテーマ2】静脈フローモデルの開発

ごみ処理広域化における最適施設配置の研究成果については、環境省請負業務「令和7年度廃棄物・資源循環分野における2050年カーボンニュートラル実行計画等検討業務」における検討に提供され、活用予定である。この請負業務においては、2050年カーボンニュートラルに向けた廃棄物処理施設の在り方に関して施設更新需要の検討や令和6年3月29日に発出されたごみ処理の広域化及び処理施設の集約化についての通知の検証等を行うとともに、令和3年8月に中央環境審議会循環型社会部会にて公表された「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(案)」を具体的に実行するために必要な事項を整理して「廃棄物・資源循環分野における2050年カーボンニュートラル実行計画」の素案を検討する。

【サブテーマ3】資源循環CCUS技術のカーボンニュートラル評価

サブテーマ3の分担研究者らは、上記環境省請負業務「令和7年度廃棄物・資源循環分野における2050年カーボンニュートラル実行計画等検討業務」に従事中であり、サブテーマ3を含む本推進費で開発された成果のうち関連性・有効性のあるものを必要に応じて反映させて参りたい。サブテーマ3の研究結果からの知見として具体的には、資源循環CCUS技術について意義・役割を踏まえたカーボンニュートラル実現の必要条件の観点からの試行的評価と空間的な炭素需給マッチングの評価結果とが挙げられ、それらの結果から廃棄物処理技術とCCUS用途の組合せについて時間軸と空間的な特性を踏まえた開発技術導入の適性を示唆していると見込んでいる。

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> · · · ·

1. 目標を大きく上回る成果をあげた

「カーボンニュートラル目標と調和する日本の物質フロー構造の解明」（国立環境研究所、南齋 規介）

全体目標	全体達成状況
<p>本研究の全体目標は、物質のフローとストックの変化に応じたGHG排出量の増減を推計する数理モデルの開発を通じ、2050年カーボンニュートラル社会と調和する日本の物質フロー構造をシナリオ分析に基づき解明することである。その科学的知見と数値情報の提供により、物質フローの転換を担う多様なステークホルダー（関係主体）が「カーボンニュートラル先導型の循環経済へ移行するための物質フロー管理」を実践することを支援する。これにより、脱炭素社会づくりを資源管理から促進する。</p> <p>モデル開発は日本の物質フローを入口から捉えるトップダウン型のフロー・ストックモデルと循環・出口の物質フローを実態調査データから組み上げるボトムアップ型モデルを軸として行い、循環基本計画に基づく物質フロー指標の目標設定に利用可能な解像度を付与する。同時に、資源循環CCUS（二酸化炭素回収・利用・貯留）技術のライフサイクル評価手法を開発し、廃棄物処理CCUS技術を上記モデルに搭載するための論理基盤を強化する。</p> <p>3つのサブテーマは物質フローの特に循環段階においてモデル構造と入出力を密接に関連づけていく。また、2050年に向けた人口変化、電力供給と輸送に関するGHG排出原単位の将来変化と炭素貯留量の見込み等を外生シナリオとしてサブテーマ間で共有し、物質利用に許容されるGHG排出量に関する整合性をサブテーマ間で担保する。</p>	<p>掲げた全体目標である「物質のフローとストックの変化に応じたGHG排出量の増減を推計する数理モデルの開発を通じ、2050年カーボンニュートラル社会と調和する日本の物質フロー構造をシナリオ分析に基づき解明すること」は以下の研究成果を得たことで達成できたと考える。モデル開発については、物質フローの入口側（トップダウン）、出口側（ボトムアップ）共に新しい視点でカーボンニュートラル社会における物質利用と循環の姿を描くことに成功した。例えば、入口側のモデルでは、GHG集約的な生産である素材産業に焦点を当て、2050年に向けた革新技術に依存しないシナリオの導出を行った。一方、出口側では、入り口側の出力を参照し、カーボンニュートラルを見据えた電源の脱炭素化による石炭火力発電の減少、鉄鋼製造やセメント製造などの素材産業における生産技術変化を踏まえた副産物需給の変化に注目したシナリオ分析を行った。加えて、資源循環CCUS技術の特性を踏まえたライフサイクル評価手法と指標を開発し、現状で見込まれる技術の評価を実施した。</p> <p>目標を超える成果として、入口側のモデルから循環基本計画の物質フロー指標の変化とGHG排出との整合性を産業部門レベルで確認する手法論を開発したこと、2050年にカーボンニュートラル化に導く指標の目標値を具体的に導出したことが挙げられる。さらに、出口側のモデルでは、廃棄物処理の広域化・集約化に関し、2024年に広域化通知が発出されたことも踏まえて、中継施設や基幹改良の影響を考慮可能な動的最適化モデルにも展開した。加えて、得られた将来の廃棄物処理システムの広域化・集約化シナリオを元に、CCUS技術の空間的需給に与える変化についてもサブテーマ間の迅速な連携により定量化を達成した。</p> <p>目標を大きく上回る成果として、革新的脱炭素技術に依存しないカーボンニュートラル化には需要側の変革が重要になることを踏まえ、期待されるシェアリング等の循環型ビジネスのライフサイクル事前評価モデルの開発にも成功したことが挙げられる。消費者の多様性を踏まえることができるエージェントベースモデルであり、今後の環境産業での活用が期待できる。一方、資源循環CCUSの知見はいち早くプラントメーカーへ還元し、実社会の反応を研究成果の解釈に考慮した点も目標以上の活動である。</p> <p>最後に、限られた二次資源を含む物質バジェットの利用を考える上で気づきを得て、重要な課題と認識した「脱炭素社会への移行における資源利用の公平性」について国民との対話としてワーク</p>

	<p>ショップも開催したことを上げる。今後の循環経済推進において同時に考えるべき先手を打った政策課題にも展開を図った。なお、この政策課題は新たに獲得したR7文科省科研費基盤A（脱炭素社会における資源消費の衡平性に関する概念設計）を通じて研究を進展させる。</p> <p>以上のように、独自のモデルと評価手法の開発を通じて全体目標を達成した上、早期の国際学術論文や学会発表での精力的な成果発信と報道発表、さらには循環経済に関する新たな論点提示を国民との対話の一環として行なったことを踏まえ、「目標を大きく上回る成果をあげた」と自己評価する。</p>
--	---

<サブテーマ1達成状況の自己評価> ······ 1. 目標を大きく上回る成果をあげた

「日本版物質フロー・ネクサスモデルの開発」（国立環境研究所、南齋規介）

サブテーマ1目標	サブテーマ1達成状況
日本国内の物質フローとストックの変化に応じたGHG排出量の増減を推計する動的最適化モデルを開発し、カーボンニュートラルに向かうGHG排出制約下で利用可能な物質量（物質バジェット）を算定する。さらに、二次資源利用、素材代替、寿命延長等の循環経済オプションによるGHG排出削減効果をモデルに組み込み、物質バジェットへの影響を定量化する。得られる知見を総括し、カーボンニュートラル移行過程における物質フローの転換像を循環経済の進展度に応じて提示する。	日本国内の物質フローとストックの変化に応じたGHG排出量の増減を推計する動的最適化モデルの開発に成功し、金属資源、土石資源、バイオマス資源を対象としたカーボンニュートラルに向かうGHG排出制約下で利用可能な物質量（物質バジェット）の算定に関する事例研究を積み上げた。二次資源利用、素材代替、寿命延長等の循環経済オプションを既存文献から収集して積み上げ、GHG排出削減効果を時系列で算定し、各種組み合わせによるカーボンニュートラル化の達成条件と物質バジェットを明らかにし、研究目標を達成した。さらに、カーボンニュートラル移行過程における物質フローの転換像の導出を物質フロー指標の高い目標値の設定から探索することを達成し、その過程の厳しさを鑑みれば、脱物質化への急速な移行を支援する技術開発と政策を強化する喫緊性を論証するまでに至った。

	考えれば十分に影響力のある成果と言える。加えて、成果の一部は国連環境計画の国際資源パネルによる新レポート（天然資源利用に関する科学的目標）でも活用される見込みであり、G7やG20など国際的なハイレベル会合においても本研究の成果を還元できる素地を作ったことも、「目標を大きく超える成果を上げた」と自己評価する根拠となっている。
--	--

<サブテーマ2達成状況の自己評価> ······ 2. 目標を上回る成果をあげた

「静脈フローモデルの開発」（京都大学、平井康宏）

サブテーマ2目標	サブテーマ2達成状況
CE（サーフィラーエコノミー）&CN（カーボンニュートラル）社会における将来の廃棄物発生量を推計する。家計消費と一般廃棄物発生量の結合モデルを開発・拡張し、CE&CN社会における消費行動と廃棄行動のあり方を提示する。さらに、カーボンニュートラルを見据えた素材産業の生産技術変化を踏まえた廃棄物処理・リサイクル工程のボトムアップ型プロセスモデル群を開発し、カーボンニュートラル移行過程における廃棄物発生量・処理技術の転換シナリオを提示する。	カーボンニュートラル社会における将来の廃棄物発生量の推計として、家計消費額に基づいて、環整95号における6種類の廃棄物組成の空間分布と時系列分布を推定するモデルの開発に成功した。また、食品ロス発生抑制を実現する食品の購入・保管・調理・廃棄行動を明らかにすることで、カーボンニュートラル社会における消費行動と廃棄行動のあり方を提示した。さらに、サブテーマ1の成果も活用して、カーボンニュートラルを見据えた電源の脱炭素化による石炭火力発電の減少、鉄鋼製造やセメント製造などの素材産業における生産技術変化を踏まえた副産物需給の変化に焦点をあてた分析を実施し、これら3部門の協調した取り組みが重要であることを明らかにした。このようにして設定した将来の複数の廃棄物発生量に対し、処理・資源化での対応を組みあわせたシナリオを設定し、ボトムアップ型のプロセスモデル群により、シナリオ別のGHG排出量・削減可能量を算定し、カーボンニュートラル移行過程における廃棄物発生量・処理技術の転換シナリオを提示した。特に、中長期シナリオ案において評価が不十分であった食品ロス削減対策のGHG削減効果を定量的に評価し、その重要性を示すことができた。また、当初目標には明示していなかった、廃棄物処理の広域化・集約化に関し、2024年に広域化通知が発出されたことも踏まえて、研究を加速し、中継施設や基幹改良の影響を考慮可能な動的最適化モデルを開発し、その成果を環境省主催のセミナーで報告した。複数の府県に対し、広域化計画の策定に資する情報を提供し、環境政策に貢献するに至ったことを踏まえ、「目標を上回る成果をあげた」と自己評価した。

<サブテーマ3達成状況の自己評価> ······ 2. 目標を上回る成果をあげた

「資源循環CCUS技術のカーボンニュートラル評価」（パシフィックコンサルタント株式会社、井伊亮太）

サブテーマ3目標	サブテーマ3達成状況
資源循環分野へ導入するCCUS (Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage) 技術を対象に、2050年カーボンニュートラル目標を達成する物質・エネルギー・システムの将来シナリオへの適合性を踏まえたライフサイクル評価を実施する論理的枠組を提案し、複数種類の技術で試算・適用することで、関連技術開発の立案・評価や導入口一ドマップの作成等での活用を念頭において評価情報を提示する。	資源循環分野へ導入するCCUS (Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage) 技術を対象に、2050年カーボンニュートラル目標を達成するまでの物質・エネルギー・システムの観点からの意義を整理した上で、カーボンニュートラル目標の達成に必要な条件に対応した3つの指標 (GHG純除去量、エネルギー純供給量、非化石炭素純供給量) によりライフサイクル評価を実施する枠組を提案した。グリーンイノベーション基金で技術開発が開始された3つの処理技術 (CO ₂ 分離回収を伴う焼却、ガス化改質、バイオメタネーション) を念頭に評価計算に必要なパラメータ情報を収集及び計算モデルを構築し、3指標による評価を試行して、将来のエネルギー・システムの脱炭素化に応じた変化も踏まえて各技術の特性を提示できた。加えて、廃棄物処理以外のCO ₂ 発生源も含めてCO ₂ の空間的な需給マッチングを定量化し、さらにサブテーマ1の示す革新的な生産技術への依存を中心としない素材の脱炭素シナリオ下と、サブテーマ2で定量化された将来の廃棄物処理システムの広域化・集約化シナリオ下においては、空間的需給にどのような変化が生じうるかを示すことができた。これらの結果について同基金で技術開発を開始したプラントメーカー4社に情報提供を行い、技術性能についての情報の収集とともに評価の内容や活用について意見交換したことを踏まえ、「2.目標を上回る成果を上げた」と自己評価する。

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	0
査読付き論文	15
査読無し論文	0
著書	0
「国民との科学・技術対話」の実施	4

口頭発表・ポスター発表	6 5
マスコミ等への公表・報道等	7
成果による受賞	1
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)
1	Watari T., Cao Z., Hata S., Nansai K., (2022) Efficient use of cement and concrete to reduce reliance on supply-side technologies for net-zero emissions. <i>Nature Communications</i> , 13, 4158.
2	Watari T., Hata S., Nansai K., Nakajima K., (2023) Limited quantity and quality of steel supply in a zero-emission future. <i>Nature Sustainability</i> , 6, 336-343
3	Watari T., Cao Z., Serrenho A., Cullen J., (2023) Growing role of concrete in sand and climate crises. <i>iScience</i> , 26, 5, 106782
4	Watari T., Serrenho A., Gast L., Cullen J., Allwood J., (2023) Feasible supply of steel and cement within a carbon budget is likely to fall short of expected global demand. <i>Nature Communications</i> , 14, 7895
6	Watari T., Yamashita N., Serrenho A., (2024) Net-zero embodied carbon in buildings with today's available technologies. <i>Environmental Science & Technology</i> , 58, 1793-1801
7	Watari T., McLellan B., (2024) Global demand for green hydrogen-based steel: Insights from 28 scenarios. <i>International Journal of Hydrogen Energy</i> , 79, 19, 630-635
8	Watari T., McLellan B., (2024) Decarbonizing the global steel industry in a resource constrained future—a systems perspective. <i>Philosophical Transactions of the Royal Society A</i> , 382, 2284
9	Hata S., Nansai K., Nakajima K. (2023) Supply Chain Factors Contributing to Improved Material Flow Indicators but Increased Carbon Footprint. <i>Environmental Science & Technology</i> , 57, 34(12713–12721)
10	Hata S., Nansai K., Shigetomi Y., Kito M., Nakajima (2025) Material efficiency and circularity goals to achieve a carbon-neutral society by 2050. <i>Environmental Science & Technology</i> , 59, 12, 6025–6036
11	Koide R., Yamamoto H., Nansai K., Murakami S. (2023) Agent-based model for assessment of multiple circular economy strategies: Quantifying product-service diffusion, circularity, and sustainability. <i>Resources, Conservation and Recycling</i> , 199, 107216

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

本研究課題での成果普及活動は、合計で4件行った。そのうち、特に重要な活動として「脱炭素社会への移行における資源消費の公平性に関するワークショップ」を仙台国際センターにて2024年11月3日に開催し

た。更に、エコバランス2024国際会議において本研究課題による特別セッション（カーボンニュートラルと物質フロー構造）を開催し（2024年11月4日、仙台国際センター）、3つのサブテーマの成果報告を行なった。

1. 7. 国際共同研究等の状況

国際共同研究を実施していない

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）
南齋規介	研究代表者及びサブテーマ1リーダー 京都大学大学院エネルギー科学研究科修了 博士（エネルギー科学） 国立環境研究所 ポスドクフェロー、主任研究員、室長を経て、 現在、同所 資源循環領域 領域長 中央環境審議会 臨時委員 専門は環境システム学、研究テーマは生産と消費の持続可能性
平井康宏	サブテーマ2リーダー 京都大学大学院工学研究科修了 博士（工学） 国立環境研究所 JSPSポスドク、任期付研究員、京都大学 助教授、准教授を経て、 現在、京都大学環境安全保健機構環境管理部門 部門長・教授 専門は廃棄物工学
井伊亮太	サブテーマ3リーダー 京都大学大学院工学研究科修了 修士（工学） パシフィックコンサルタンツ株式会社 技師、主任、課長補佐、技術課長、技術次長、室長を経て、 現在、同社 社会イノベーション事業本部 G X推進部長 環境省「二酸化炭素の資源化を通じた炭素循環社会モデル構築促進事業連絡会議」 委員（平成31年度～令和6年度） 専門は環境システム工学、業務テーマは廃棄物処理システムの地球温暖化対策

2. 研究成果発表の一覧

(1) 研究成果発表の件数

成果発表の種別	件数
産業財産権	0
査読付き論文	15
査読無し論文	0
著書	0
「国民との科学・技術対話」の実施	4
口頭発表・ポスター発表	65
マスコミ等への公表・報道等	7
成果による受賞	1
その他の成果発表	0

(2) 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
	特に記載する事項はない。				

(3) 論文

<論文>

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
1	2022	Watari T., Cao Z., Hata S., Nansai K., (2022) Efficient use of cement and concrete to reduce reliance on supply-side technologies for net-zero emissions. <i>Nature Communications</i> , 13, 4158	1	有
2	2023	Watari T., Hata S., Nansai K., Nakajima K., (2023) Limited quantity and quality of steel supply in a zero-emission future. <i>Nature Sustainability</i> , 6, 336-343	1	有

3	2023	Watari T., Cao Z., Serrenho A., Cullen J., (2023) Growing role of concrete in sand and climate crises. <i>iScience</i> , 26, 5, 106782	1	有
4	2023	Watari T., Giurco D., Cullen J., (2023) Scrap Endowment and inequalities in global steel decarbonization. <i>Journal of Cleaner Production</i> , 425, 139041	1	有
5	2023	Watari T., Serrenho A., Gast L., Cullen J., Allwood J., (2023) Feasible supply of steel and cement within a carbon budget is likely to fall short of expected global demand. <i>Nature Communications</i> , 14, 7895	1	有
6	2024	Watari T., Yamashita N., Serrenho A., (2024) Net-zero embodied carbon in buildings with today's available technologies. <i>Environmental Science & Technology</i> , 58, 1793-1801	1	有
7	2024	Watari T., McLellan B., (2024) Global demand for green hydrogen-based steel: Insights from 28 scenarios. <i>International Journal of Hydrogen Energy</i> , 79, 19, 630-635	1	有
8	2024	Watari T., McLellan B., (2024) Decarbonizing the global steel industry in a resource constrained future—a systems perspective. <i>Philosophical Transactions of the Royal Society A</i> , 382, 2284	1	有
9	2023	Hata S., Nansai K., Nakajima K. (2023) Supply Chain Factors Contributing to Improved Material Flow Indicators but Increased Carbon Footprint. <i>Environmental Science & Technology</i> , 57, 34(12713–12721)	1	有
10	2024	Hata S., Nansai K., Shigetomi Y., Kito M., Nakajima (2025) Material efficiency and circularity goals to achieve a carbon-neutral society by 2050. <i>Environmental Science & Technology</i> , 59, 12, 6025–6036	1	有
11	2023	Koide R., Yamamoto H., Nansai K., Murakami S. (2023) Agent-based model for assessment of multiple circular economy strategies: Quantifying product-service diffusion, circularity, and sustainability. <i>Resources, Conservation and Recycling</i> , 199, 107216	1	有
12	2023	Yano J., Yanagawa R., Koshiba J., Hirai Y., Sakai	2	有

		S. (2023): Greenhouse gas reduction potential by household waste prevention. <i>Journal of Material Cycles and Waste Management</i> , 25, 4, 1792-1806		
13	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. <i>環境科学会誌</i> , 37, 1, 1-14	2	有

(4) 著書

<著書>

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。		

(5) 口頭発表・ポスター発表

<口頭発表・ポスター発表>

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
16	2023	Watari T., Gast L, Serrenho A., (2023) Bulk Materials Supply in a Zero-Emission Future with Uncertain Technology Adoption. 11th International Conference on Industrial Ecology.	1	無
17	2023	渡卓磨 (2023) カーボンニュートラルの実現に向けた素材利用の将来像. 土木学会「コンクリート技術を活用したカーボンニュートラルの実現に向けて」に関する講習会	1	無
18	2023	Watari T., (2023) Limited quantity and quality of steel supply in a zero-emission future. IOP Publishing Environmental Research 2023	1	無
19	2023	渡卓磨 (2023) 産業エコロジーから脱炭素を考える. 土木学会 構造工学委員会 技術融合による新たな土木技術検討小委員会	1	無
20	2023	渡卓磨 (2023) 日本と世界の鉄鋼フロー構造. CEN (気候非常事態ネットワーク) 設立3周年記念シンポジウム	1	無
21	2023	渡卓磨 (2023) カーボンニュートラル社会への移行は日本の鉄鋼生産/鉄スクラップ利用をどのように変えるのか. 株式会社JEMSセミナー	1	無

22	2024	Watari T., (2024) Decarbonising the global steel industry in a resource-constrained future – a systems perspective. The Royal Society Scientific Meeting (Sustainable metals: science and systems)	1	無
23	2024	渡卓磨 (2024) 産業部門の脱炭素化において鍵となる対策は何か?. サステナブル・インフラ研究会 (SIX研究会)	1	無
24	2024	Watari T., (2024) Life Cycle Assessment in the Circular Economy: Case Studies. Advancing responsible minerals for the energy transition	1	無
25	2024	渡卓磨 (2024) 鍵を握る木造化、国産材供給、再造林. 木材利用システム研究会サステナビリティ部会	1	無
26	2025	渡卓磨 (2025) 金属の資源循環を測る：世界はどれだけ循環型なのか?. プロセスマタラジー研究会 第2回研究会 第3分科会 (資源・環境関連技術)	1	無
27	2022	Hata S., Nansai K., Nakajima K. (2022) Discovering fixed-capital categories resulting in significant material and carbon footprints. The 28th International Input-Output Association Conference, Abstracts	1	有
28	2022	Hata S., Nansai K., Nakajima K. (2022) Time series analysis of capital-embodyed material footprint in Japan towards a material flow management in a carbon-neutral society. The 15th Biennial International Conference on EcoBalance, Abstracts	1	有
29	2022	畠 奨, 南齋 規介, 中島 謙一 (2023) カーボンニュートラルに向けた物質管理指標の役割. 第18回日本LCA学会研究発表会, 第18回要旨集	1	無
30	2022	畠 奨, 南齋 規介, 中島 謙一 (2023) 日本の物質フロー指標の改善とGHG排出削減の両立への課題. 第18回日本LCA学会, 共催企画セッション	1	無
31	2023	Hata S., Nansai K., Nakajima K. (2023) The role of material flow indicators in reducing carbon emission in Japan. The 29th International Input-Output Association Conference, Abstracts	1	有
32	2023	Hata S., Nansai K., Nakajima K. (2023) Coexistence of improving material flow indicators and reducing carbon emission in Japan. 11th International Conference on Industrial Ecology in Leiden, Abstracts	1	有
33	2023	畠 奨, 南齋 規介, 中島 謙一 (2024) “カーボンニュートラル社会を先導する物質フロー目標の探索”, 第19回日本LCA学会, 共催企画セッション	1	無

34	2023	南齋 規介, 畑 奨 (2024) “ヘルスケアシステムの脱炭素化に向けたカーボンフットプリント解析”, 第19回日本LCA学会研究発表会, 第19回要旨集	1	無
35	2024	Hata S., Nansai K., Nakajima K. (2024) Investigating dematerialization pathways towards a carbon-neutral society. The 10th 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management, Abstracts	1	有
36	2024	Watari T., Hata S. (2024) Material Systems Analysis for a Sustainable Future. The 16th Biennial International Conference on EcoBalance, Abstracts	1	無
37	2024	Hata S., Nansai K., Nakajima K. (2024) Dematerialization pathways towards a carbon-neutral society, The 16th Biennial International Conference on EcoBalance, Abstracts	1	有
38	2024	畠 奨, 南齋 規介, 中島 謙一 (2025) 脱炭素と脱物質を先導する地域経済サプライチェーンの変革要因の探索. 第20回日本LCA学会研究発表会, 第20回要旨集	1	無
39	2024	Koide R., Murakami S., Yamamoto H., Nansai K., Quist J. (2024) Empirical agent-based modelling of circular business models: incorporating dynamic LCA and MFA from a consumption perspective. International Industrial Ecology Day 2024.	1	無
40	2024	Koide R., Murakami S., Yamamoto H., Nansai K. (2024) Bringing Life Cycle Thinking to Social Simulation: Empirical Agent-based Simulation of the Sustainable Diffusion of Circular Business Models. Social Simulation Conference, Proceedings.	1	有
41	2023	Koide R., Yamamoto H., Nansai K., Murakami S. (2023) Empirically-grounded agent-based simulation of circular economy: Exploring scenarios towards sustainability. Social Simulation Conference 2023, Abstracts	1	有
42	2023	Koide R., Yamamoto H., Nansai K., Murakami S. (2023) Empirically grounded agent-based simulation of circular economy strategies: product circularity, consumer behavior, and environmental consequences. 11th International Conference on Industrial Ecology (ISIE2023), Abstracts	1	有
43	2023	Koide R., Yamamoto H., Nansai K., Murakami S. (2023) Agent-based simulation for circularity assessment of consumer durables: consequential environmental impacts, product flow and stock, and user behaviours. The 5th International Product Lifetimes and the Environment (PLATE) Conference, Proceedings	1	有
44	2023	小出瑠, 山本悠久, 木見田康治, 西野成昭, 村上	1	無

		進亮 (2023) サーキュラーエコノミーにおける製品入手選択の階層ベイズ選択型コンジョイント分析. 日本マーケティング・サイエンス学会第113回研究大会, 同予稿集		
45	2022	Koide R., Murakami S., Yamamoto H., Nansai K. (2022) Agent-based modeling of consumer behavior and product circulation for ex-ante assessment of emerging circular economy strategies. The 15th Biennial International Conference on EcoBalance, Abstracts	1	有
46	2022	Koide R., Murakami S., Yamamoto H., Nansai K. (2022) Consumer Behavior and Product Circulation Simulation of Emerging Circular Economy Strategies: An Agent-Based Model for Sustainability and Circularity Assessment. Social Simulation Conference 2022, Abstracts., 44	1	有
47	2022	小出瑠, 山本悠久, 南齋規介, 村上進亮 (2023) エージェント・ベース・シミュレーションを用いた サーキュラーエコノミー戦略の帰結的環境影響・循環性評価. 第18回日本LCA学会研究発表会, 同予稿集, 3-C3-02	1	有
48	2022	小出瑠, 山本悠久, 南齋規介, 村上進亮 (2023) サーキュラーエコノミーにおける耐久消費財の製品循環と消費者行動のエージェントベースモデル開発. 計測自動制御学会 第31回社会システム部会研究会, 同予稿集, 91-96	1	有
49	2022	小出瑠, 山本悠久, 村上進亮 (2022) サーキュラーエコノミーにおける製品サービスの選択行動のコンジョイント分析とエージェントベースシミュレーション. 日本マーケティング・サイエンス学会第112回研究大会, 同予稿集	1	無
50	2022	小出瑠, 山本悠久, 村上進亮, 南齋規介 (2022) 持続可能なサーキュラーエコノミー戦略をどのように導入するか? 温室効果ガス削減のリバウンド効果とエージェントベースシミュレーションによる事前評価. エコデザイン・プロダクト&サービスシンポジウム 2022, 同予稿集, 52-55	1	無
51	2022	牧誠也 (2022) 家計消費から推計する廃棄物の組成毎発生量の空間分布. 第33回廃棄物資源循環学会研究発表会	2	無
52	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, 同講演要旨集	2	無
53	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, 同講演集, 52, 104.	2	無
54	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	2	無

		科学研究発表大会、ポスターセッション。		
55	2025	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	2	無
56	2025	Nakahama M., Hirai Y., Yano J. (2025) Estimating the reduction effects of household food waste through changes in consumer behavior. The 11th 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management (3RINCs2025)	2	無
57	2022	河井紘輔 (2022) 将来の可燃ごみ組成の変化と処理方法の選択. 第33回廃棄物資源循環学会研究発表会	2	無
58	2022	Kawai K. (2023) Drafting the grand desings and scenarios for decarbonization of waste-based biomass in Japan. 2023 Spring Scientific Conference by Korea Society of Waste Management. 18–19 May 2023. Busan, Korea.	2	無
59	2024	Kawai K., Hirai H., Ishiketa K., Kobayashi Y., Kuramochi H., Osako M. (2024) Biomethanation of biomass waste and its demand for the products by province in Japan. 10th International Symposium on Energy from Biomass and Waste (VENICE 2024)	2	無
60	2024	河井紘輔, 小林拓朗, 倉持秀敏, 大迫政浩, 平井宏明, 石桁主喜 (2024) 廃棄物系バイオマスのバイオメタン化および発酵残渣の農地還元に係る都道府県別のインベントリ評価. 第35回廃棄物資源循環学会研究発表会	2	無
61	2022	矢野順也 (2022) 家庭ごみの発生抑制によるGHG削減の可能性. 第34回廃棄物資源循環学会研究発表会	2	無
62	2023	Yano J., Yanagawa R., Koshiba J., Hirai Y., Sakai S. (2023) Estimation of Greenhouse Gas Reduction Potential - Case study of Household Waste Prevention at Kyoto City-. The 9th 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management (3RINCs 2023)	2	無
63	2023	矢野順也 (2023) プラスチックの素材代替が家庭ごみ処理のGHGに与える影響. 第34回廃棄物資源循環学会研究発表会	2	無
64	2024	Koshiba J., Yano J., Hirai Y., Okamoto K., Onuma Y., Sakai S. (2024) Comparison of life-cycle greenhouse gas emission between reusable tumblers and single-use cups considering attached lids and straws. The 10th 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management (3RINCs2024)	2	無
65	2023	平井康宏 (2023) 電力と素材産業の脱炭素化に対応する資源循環システムの設計. 第18回日本LCA学会研究発表会	2	無

66	2023	平井康宏 (2023) 脱炭素にむけた電力・鉄鋼・セメント部門における生産量と副産物利用の変化. 第34回廃棄物資源循環学会研究発表会	2	無
67	2023	平井康宏, 牧野斗威, 矢野順也 (2023) ごみ処理広域化における最適施設配置の検討:2050年京都府の事例研究. 第34回廃棄物資源循環学会研究発表会	2	無
68	2024	Hirai Y., Yano J. (2024) Optimization of Wide-Area Treatment of Municipal Solid Waste in Japan toward 2050. The 10th 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management (3RINCs2024)	2	無
69	2024	平井康宏, 吉田悠樹 (2024) 廃棄物広域処理における施設建設の多期間最適化. 第24回環境技術学会年次大会	2	無
70	2024	吉田悠樹, 平井康宏, 矢野順也 (2024) 中継施設の導入を考慮したごみ焼却施設の最適配置 -2050年京都府を対象として-. 第35回廃棄物資源循環学会研究発表会	2	無
71	2024	Hiari Y., Yoshida Y., Yano J. (2024) Optimization of wide-area treatment of municipal solid waste with waste compaction and transfer stations toward 2050: Case study in Kyoto Prefecture, Japan. The 16th Biennial International Conference on EcoBalance	2	無
72	2024	Yoshida Y., Hirai Y., Yano J. (2024) Optimal location of incineration facilities considering multiple periods: A case study of Kyoto city. 10th International Symposium on Energy from Biomass and Waste (VENICE 2024)	2	無
73	2025	平井康宏 (2025) ごみ処理広域化・集約化に関する動向と最適化の事例研究, 廃棄物資源循環学会令和6年度シンポジウム「一般廃棄物処理分野における資源循環・脱炭素化に係るシンポジウム」	2	無
74	2025	Hirai Y., Yoshida Y., Yano J. (2025) Optimal Location of Waste Transfer and Incineration Facilities for All 47 Prefectures in Japan toward 2050. The 11th 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management (3RINCs2025)	2	無
75	2023	永友佑 (2023) 資源循環CCUS技術の導入意義の検討と焼却処理を対象とした評価研究のレビュー. 国立環境研究所・第18回日本LCA学会研究発表会 共催シンポジウム「TNFD対応における研究者との協働ポイントを知る」	3	無
76	2023	長野尚也 (2023) 資源循環CCUS技術の環境性能及び経済性の試行的評価:廃棄物処理施設を対象として. 国立環境研究所・第18回日本LCA学会研究発表会 共催シンポジウム「TNFD対応における研究者との協働ポイントを知る」	3	無
77	2023	長野尚也, 直井宏樹, 永友佑, 山本圓, 井伊亮太 (2023) 廃棄物処理施設へのCCUS技術導入の理論枠組みとしての数理最適化モデルの提案. 第34回廃棄物資源循環学会研究発表会	3	無

78	2024	長野尚也, 永友佑, 山本圓, 井伊亮太 (2024) 廃棄物処理施設を核とする炭素循環システムの数理最適化モデルの開発及び分析. 第40回エネルギー・システム・経済・環境コンファレンス	3	無
79	2024	Ii R., Nagano N., Nagatomo Y., Yamamoto M. (2024) Study on Assessment Method for CCUS in Waste Treatment Towards A Carbon Neutral Society. The 16th Biennial International Conference on EcoBalance	3	無
80	2025	永友佑, 長野尚也, 井伊亮太 (2025) 2050年における日本のCCUSポテンシャルの空間的需給分析. 第20回日本LCA学会研究発表会	3	無

(6) 「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
81	2023	畠 奨 (2024) サーキュラーエコノミーと脱炭素、両立のジレンマをどう克服するか? Circular X 特別編, Circular Economy Hub	1
82	2024	畠 奨 (2025) 地球温暖化をとめるために私たちができることは? ~未来(あす)につながるゼロカーボンアクション. こどもと大人の井戸端会議, 令和6年度第23回草津市こども環境会議	1
83	2024	脱炭素社会への移行における資源消費の公平性に関するワークショップ(仙台国際センター, 2024年11月3日)	1
84	2024	エコバランス2024国際会議における特別セッション(カーボンニュートラルと物質フロー構造)の開催(仙台国際センター, 2024年11月4日)	1

(7) 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
85	2022	セメント・コンクリート部門のカーボンニュートラル達成方法を解明～供給側と需要側の一体的対策が必要～, 筑波研究学園都市記者会, 環境省記者クラブ, 環境記者会同時配布(プレスリリース)	1
86	2023	カーボンニュートラル社会への移行は日本の鉄鋼生産・利用をどのように変えるのか. 筑波研究学園都市記者会, 環境省記者クラブ, 環境記者会同時配布(プレスリリース)	1
87	2023	カーボンニュートラル社会での材料供給は世界的に不足の可能性～資源効率性の向上が急務～. 筑波研究学園都市記者会, 環境省記者クラブ, 環境記者会同時配布(プレスリリース)	1
88	2024	建築材料のカーボンニュートラル達成に必要な対策を解明－木造化・国産材供給・再造林の同時推進が鍵に－. 筑波研究学園都市記者会, 環境省記者クラブ, 環境記者会同時配布(プレスリリース)	1
89	2023	国立環境研究所報道発表「物質フロー指標の改善と温室効果ガス排出削減が両立しないサプライチェーンの要因を特定」	1
90	2023	国立環境研究所報道発表「サーキュラーエコノミー(循環経済)の取り組みを事前評価する消費者行動シミュレーションモデルを	1

		開発」	
91	2025	国立環境研究所報道発表「「高度物質効率化」で導く2050年カーボンニュートラル～物質利用効率4倍、循環利用率2倍を目標に～」	1

(8) 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
92	2023	日本マーケティング・サイエンス学会 ベストプラクティス賞	1

(9) 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

特に記載する事項はない。

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:	Material Flow Structures in Japan in Harmony with a Carbon Neutrality Target
Project Number:	JPMEERF20223001
Project Period (FY):	2022-2024
Principal Investigator:	Nansai Keisuke
(PI ORCID):	ORCID 0000-0002-2449-1874
Principal Institution:	National Institute for Environmental Studies, Japan 16-2, Onogawa, Tsukuba, Ibaraki, JAPAN Tel: +81 29-850-2314 E-mail: nansai.keisuke@nies.go.jp
Cooperated by:	Kyoto University, Pacific Consultants Co., Ltd.
Keywords:	Material budgets, material flow indicators, circular economy business, by-product utilisation, broad-scale waste management, food loss reduction, CCUS, carbon supply and demand, spatial matching.

[Abstract]

Japan has set material flow indicators with targets to promote a sound material-cycle society. Japan has also declared the realization of a carbon-neutral society by 2050, and therefore aligning decarbonisation and material flow targets is essential. There is therefore an urgent need to accumulate scientific knowledge to support these goals. The aim of this research project is to develop a new model to calculate GHG emissions based on the dynamics of material flows, stocks, circulation and disposal in the economy and society, and to identify the material flow structure in Japan that is consistent with a carbon-neutral society in 2050. As a methodology, two models were developed: a top-down material flow/stock model that captures material flows in Japan from the economy-side perspective and a bottom-up model that assembles material flows in circulation and disposal based on actual survey data. In addition, a review of previous studies on CCUS (Carbon Capture, Utilisation and Storage) technology for waste treatment was performed and a life cycle assessment method on the CCUS were developed.

Based on the findings of this research project, we made the following nine policy proposals on material flow management toward a carbon-neutral society.

1. Proposal for carbon neutrality in material use without reliance on innovative decarbonization technologies for materials
2. Proposal for a method for structural understanding of material flows leading to carbon neutrality and setting long-term goals

3. Proposal of a preliminary evaluation method for the environmental impacts and effectiveness of circular business models
4. Proposal of collaborative initiatives for the utilisation of by-products in the materials industry
5. Proposal of a cost optimization model for large-scale and integrated waste treatment
6. Proposal for halving food waste and reducing life cycle GHG emissions through changes in consumer behaviour
7. Proposal of the significance and challenges of CCUS technology for waste management
8. Proposal of decarbonization assessment indicators for CCUS technology for waste management
9. Proposal for the installation of facilities for CCUS technology for waste management

This research was performed by the Environment Research and Technology Development Fund (JPMEERF20223001) of the Environmental Restoration and Conservation Agency provided by Ministry of the Environment of Japan.