

# 中国浦江県（都市農村混在型地域）の 生活ゴミ処理システムの炭素排出に関する計量評価

張 沖・千 曠娥・李 游・周 瑋生

## Quantitative Assessment of Carbon Emissions from Household Waste Treatment System in Pujiang County, China: A Case Study of Urban-Rural Mixed Areas

Chong ZHANG, Kyungah CHEON, You LI, Weisheng ZHOU

### Abstract

The increasing national consumption level and demand have resulted in a surge in household waste. A large amount of waste hinders the process of urbanization, causing serious environmental pollution and other problems. Therefore, this study focuses on verification research to evaluate the carbon dioxide emissions resulting from the segregated treatment of household waste in Pujiang County, a representative mixed urban-rural region in China. Utilizing the life cycle assessment (LCA) method, this study systematically quantified the carbon footprint of waste collection, treatment, and recovery processes in Pujiang County by integrating its household waste treatment model. The study categorized Pujiang County's waste treatment into three modes: non-separated landfill, non-separated incineration, and separated resource treatment. The IPCC model was used to calculate the carbon footprints of greenhouse gas emissions at four stages: waste collection, transfer stations, transport, and landfill/incineration. The analysis revealed significant differences in carbon emissions among the three treatment modes. In the county with a daily waste treatment capacity of approximately 600 tons, mixed collection (without waste separation) and landfill (Mode 1) resulted in an annual carbon emission of 385,500 tons, while mixed collection (without waste separation) and incineration (Mode 2) resulted in an annual carbon reduction of 48,100 tons. Separated collection, on-site treatment of household waste, direct recycling of recyclable materials, and incineration of other waste (Mode 3) resulted in an annual carbon reduction of 259,100 tons. In Mode 3, where the treatment process included the incineration of some waste, carbon emissions from electricity accounted for only 4.25% of the total carbon footprint, and the impact of the low carbonization of the electricity grid on the Mode 3 carbon footprint was limited. Despite an increase in carbon emissions with changes in scenario settings, the total remained negative, with Mode 3 having the lowest carbon emissions of the three modes. Finally, waste separation is recognized as an incremental process, and progress at the municipal level varies under the nationwide waste separation policy. While Pujiang County serves as a pioneering region in waste separation, the predominant waste disposal methods in most cities still involve landfill and incineration. In comparison, separated collection coupled with waste resource utilization is considered to have a greater potential for carbon reduction effects. According to the results of analysis, this study aims to accelerate urbanization progress and proposes appropriate solutions for household waste management based on the Pujiang County waste recycling processing model, which is an example of the situation in China.

## 要旨

国民の消費水準と需要の増加により、家庭廃棄物が急増している。大量のゴミは都市化の進行を妨げ、深刻な環境汚染やその他の問題を引き起こす。そこで本研究では、中国の代表的な都市部と農村部の混合地域である浦江県における生活ゴミの分別処理に伴う二酸化炭素排出量を評価する実証研究に焦点を当てた。本研究は、LCA手法を活用し、炭素排出量を体系的に定量化し、生活ゴミ処理モデルを統合することで、浦江県の廃棄物収集、処理、回収プロセスのフットプリントを計量化した。この研究では、浦江県の廃棄物処理を非分別埋立、非分別焼却、分別資源処理の3つのモードに分類した。IPCCが提唱する方法を用いて、温室効果ガス排出量を廃棄物収集、中継所、輸送、埋め立て/焼却の4つの段階で計算した。分析の結果、3つの処理モード間で炭素排出量に大きな違いがあることが明らかになった。浦江県の1日のゴミ処理能力は約600トンであり、混合収集（廃棄物の分別なし）と埋め立てにより年間385,500トンの二酸化炭素排出量が発生し、混合収集（廃棄物の分別なし）と焼却により年間48,100トンの二酸化炭素削減が達成された。分別収集、家庭廃棄物の現場処理、材料の直接リサイクル、その他の廃棄物の焼却により、年間259,100トンの炭素削減に貢献した。モード3では、処理プロセスに一部の廃棄物の焼却が含まれており、電気からの炭素排出量は二酸化炭素の総排出量の4.3%のみを占め、モード3の二酸化炭素排出量における電力ネットワークの低炭素化の影響は限定的であった。モード3は3つのモードの中で二酸化炭素排出量が最も低くなる。最後に、廃棄物の分別は段階的なプロセスとして認識されており、自治体レベルでの進捗状況は全国的な廃棄物分別政策によって異なる。浦江県はゴミ分別の先駆的な地域だが、ほとんどの都市農村混在地域では依然として埋め立てと焼却が主流のゴミ処理方法を採用している。これに比べて、分別収集と廃棄物資源の利用は、より大きな炭素削減効果が得られると考えられる。本研究は、農村から都市化が加速している今の中国において浦江県の廃棄物リサイクル処理モデルは今後の適切な生活ゴミ処理ソリューションの提示に寄与できると考える。

キーワード：都市農村混在型地域、生活ごみ、LCA、カーボンフットプリント（CFP）、中国

## 1. はじめに

近年、中国の消費需要は所得水準のさらなる上昇に伴って発生する生活ゴミの量が大幅に増加傾向にある。大量に排出される生活ゴミは地域内の環境汚染問題と生態系を含めた深刻な都市環境の悪化や機能の低下などの問題を引き起こす。特に生ごみ（生活ゴミの一部で食物残渣、有機廃棄物など水分を多く含む腐るゴミ）を含めた生活ゴミの処理は重大な課題となっている。中国国内の都市生活ゴミ処理によるGHG排出量は2006年の3,924万トンから2019年には12,881万トンに増加し<sup>2)</sup>、廃棄物処理分野は温室効果ガス排出源の4番目となっている。2019年の生活ゴミの輸送量は1949年の30倍の2.42億トンに達し、都市の3分の2以上が、いわゆる「ゴミ包囲」（都市がゴミに包囲される）問題に悩まされており<sup>3, 4)</sup>、毎年、多くの土地がゴミに浸食されている。

一方、中国は広大な農村地域を有し、その中、都市と農村が混在している地域は2000以上もある。農村地域の生活ゴミのほとんどは経済格差（相対的貧困）、生活慣習、環境意識の欠如などが原因であり、不法投棄や埋

立などによって処理され、大きな環境問題となっている。近年は、各村町で分散した管理が実施されるようになったが、ゴミ処理システムを断片化し、統合的な計画と協力の不足によって、効果的な資源回収と排出の削減が妨げられている。さらに、ゴミの分別意識が薄く、有効な教育の普及が不足しているため、ゴミ分別に対する住民参加が低く、リサイクルの潜在力が十分に発揮されていない。そして焼却や埋め立てなどの伝統的なゴミ処理手法が依然として続いており、環境汚染や資源浪費などの問題が顕在化している。さらに、農村の場合、ゴミ処理施設が不足しているため、増加する生活ゴミに対応できず、環境衛生と公共衛生の面から潜在的なリスクを抱えている。

生活ゴミからの温室効果ガス排出は主にメタン(CH<sub>4</sub>)、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)、亜酸化窒素(N<sub>2</sub>O)を含んでおり、ゴミによる汚染問題は地域の環境を破壊し、人々の健康被害と生活水準にも影響を与えるため、生活ゴミの安全で効率的な処理方式は、中国が都市化を進める過程で重要な課題となっている。2017年、中国政府は、生活ゴミ分別の質を高め、資源の循環利用率を向上する

ために「生活ゴミ分別制度実施案」を発表し<sup>7)</sup>、生活ゴミの分別回収処理は環境汚染を防止するために有効な解決方策として提示された。さらに、都市部における生活ゴミの資源循環利用を高め、新たな経済性を追求するように求められた<sup>8, 9)</sup>。現在、中国国内で行われている主なゴミ処理方式は、埋立処理と焼却処理であるが、これらの処理方式は生態環境の破壊、土地資源の浪費、ダイオキシンなどの有毒な環境汚染物質の発生などの問題がある。同時に、収集されたゴミの運搬と埋立、焼却の過程で大量のGHGが排出され、これらの問題は資源を浪費するだけでなく、地球温暖化にも繋がる。そのため、生活ゴミの利用価値に応じてゴミ分別を行い、資源化することによって土地資源の節約とGHGの低減が期待できる<sup>5, 6)</sup>。しかし、現在農村部または都市農村混在型地域的生活ゴミを有効に処理できるシステムはできていない。

有機系廃棄物や無機系廃棄物など、リサイクル処理のプロセスごとに、人や環境への影響の面で異なる結果が出ており、分別と回収過程での電力の間接消費は、生活ゴミ処理過程での温室効果ガス排出を間接的に増加させることになるため、生活ゴミ処理のプロセスの評価は重要である。

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) は、2006年、廃棄物部門からの温室効果ガス (GHG) 排出を算定する方法として『国別 GHG インベントリ、及びそのガイドライン』を提案した。その中で廃棄物は国レベルのGHG排出量を報告する5つの主要部門の1つと分類された<sup>1)</sup>。都市の固体廃棄物管理システムのアップグレードを目指すためにはコスト削減、エネルギー消費および経済的な要因が重要になっているが、カーボンフットプリント (CFP: Carbon Footprint of Products) 排出基準はまだ重要な要素にはなっていない。現在、中国における単一的生活ゴミ処理<sup>13, 15, 16)</sup>は、廃プラスチック処理のような一部の生活ゴミのカーボンフットプリントを評価している状況にあり<sup>17)</sup>、とりわけ、実際の県域生活ゴミ処理に関するLCA (Life Cycle Assessment) によるカーボンフットプリントの計算は行われていない。一般的に、生活ゴミ処理に関する研究結果として、生活ゴミの焼却による発電は経済性があり、低炭素フットプリント (発電電力による排出削減効果) の処理方式であることが強調され<sup>3, 15, 18)</sup>、生活ゴミの分別回収処理は比較的高い経済的な効果と炭素排

出削減効果を持っていると考えられている。しかし、生活ゴミ分別プロセスの中で消費するエネルギーは間接的に生活ゴミ分別回収処理のカーボンフットプリントを増加させる<sup>6, 13)</sup>。そこで本研究では、ゴミ処理過程におけるエネルギー消費、特に電力消費のカーボンフットプリントの計算を行った<sup>19)</sup>。

中国は高度経済成長により、現在、急激な電力の需要は上昇傾向にある。中国の電力使用量は2010年の約41923億kWhから2022年の約86369億kWhまでに増加し、全国の電力需給は全体的にタイトである。通年の社会全体の電力需要の伸び率は6%前後で、一部地域の時間帯の電力需給はタイトになる見通しである。こうした状況は、今後も電力需要が増加することを示しており、中でも電力部門が全国の石炭供給総量の50%以上を消費し、CO<sub>2</sub>排出量は年間45億トンに達している<sup>21)</sup>。現在のエネルギー需要は主に石炭、石油、天然ガスなどの化石燃料であるが、新エネルギーの割合が次第に高まるにつれ、石炭火力は徐々に減少していく。その中で、段階的に系統調整性電源へとモデルチェンジし、電源の多様化は電力システムの安全運行が信頼できる保障となっている<sup>22, 23)</sup>。

中国の都市農村混合地域的生活ゴミの分類作業は依然として試行・推進の段階にあり、都市農村混合地域生活ゴミ処理システムにおける温室効果ガス排出の定量分析が急務で、都市生活ゴミ処理方式の選択にデータサポートを提供する必要があると考えられる。

そこで、本研究は、著者 (張沖) が開発・経営・運営している都市農村混合地域浦江県における生活ゴミの分類と資源化利用システムを取り上げ、生活ゴミ処理方式を非分別埋立、非分別焼却、分別資源処理の3つのモードに分けて、LCA手法を通じて、カーボンフットプリントを算出し、生活ゴミの処理と資源化利用が炭素排出削減に与えるプラスとマイナスの効果を分析する。その上、電力網のデータ<sup>24, 25)</sup>を利用して異なる電力システムの脱炭素シナリオから、都市農村混合地域的生活ゴミ処理のカーボンフットプリントの排出状況について分析する。同時に今後も中国の都市化が加速する中、中国の実情に適した都市農村混合型地域的生活ゴミ処理システムを提案する。

## 2. 浦江県の生活ゴミ分別処理システム 「浦江モデル」

### 2.1. 浦江県における生活ゴミ分別システムの概要

浦江県は中国浙江省金華市に属し、面積は920平方キロメートル、人口は56.3万人（2022年12月現在、外来人口約10万人を含む）で、7つの鎮（鎮、区）、5つの郷、3つの街道、409の行政村、20の社区（住宅団地）を管理している。「浦江県2022年国民経済・社会発展統計公報」によると、2022年の県全体の総生産（GDP）は5465億円であり、前年比2.6%増となった。そのうち、第1次産業の付加価値は234億円で2.5%増加し、第2次産業の付加価値は2447億円で2.4%増加した。第3次産業の付加価値額は2.8%増の2784億円であった。常住人口で計算された全県の1人当たり域内総生産は118万円に達し、前年比2.5%増となった。

2017年まで、県内には42794戸の「各種市场主体制度」によって登録されており、前年比13.9%増となっている。そのうち、企業は10685戸、個人事業主は31590世帯で

ある。農民専門協同組合は519戸で、都市化率は約60%（中国平均）であり、都市・農村二元混合構造という都市・農村混合型の特徴を持つ中国の代表的な地域である。

2019年末までに、浦江県の12の郷鎮と3つの街において16か所に生ごみ生態処理センターが建設され、有機ゴミの生物発酵処理設備が83ユニットが投入された。毎年処理される生ごみの累計は6万トンを超え、収集された生ごみの処理利用率は100%であり、有機肥料の原材料として1.5万トンを超え、その生ごみの肥料転化率（資源化率）は約30%、有機肥料の原材料はすべて周辺の農家に無料で提供され、主に有機肥料として農業栽培に還元されている。栽培作物はブドウ、キウイなどの果樹、野菜、緑化、花などを含み、最終的に産出される還元畑の資源化利用率は100%に達している。

2020年から2022年までの浙江省生態環境公衆満足度調査結果によると、浦江県は3年連続で浙江省各県の生態環境公衆満足度の上位7位を占めた。また、生態環境公衆満足度の得点は2015年の79.3点から91点に11ポ



図1 生活ゴミ処理センターの分布図

イントも上昇した。県全体の生活ゴミ総量は数年連続でマイナス成長（浙江省で唯一マイナス成長の県）を実現し、2021年にはマイナス0.7%であった。都市部の生活ゴミの分別カバー範囲は100%に達し、生活ごみの資源化率は60.3%、生ごみの資源化率は100%に達し、目標値をはるかに上回った。生ゴミの無害化処理率は常に100%を維持しており、5年連続で浙江省農村生活ゴミ分別事業の優勝県を獲得している。浙江省の「ゴミ分別活動」の人々の満足度ランキングでは、浦江県が96.6点の高得点を獲得し、2年連続で同評価の全省の中で一位となった。

表1は浦江県の生活ゴミの構成を示したものである（このデータは多数のゴミのサンプルを取り、平均値を取ったものである）。浦江県における生ごみの回収処理は、県全域をカバーし、回収・資源化が全面的に行われ、生ごみの無害化処理が実現されている。2021年には生ごみ5万トン余りを資源化処理し、有機肥料を約1.3万トンを生産した。その他のゴミ約28.8万トン（埋め立てされていた生活ゴミも含む）を焼却し、13371万キロワットを発電した。また、毎年全県の粗大ゴミは約2万件と、建築ゴミ約340万トン余りの資源化処理（レンガ、砂の製造）を行った。

そして、再生資源回収処理においてはほとんどの都市部と農村部の再生資源回収ネットワークのフルカバーが実現されている。県全域の再生資源の中で生活ゴミの資源化率は100%に達し、建築ゴミ資源化率は95.11%、粗大ゴミの収集率はほぼ100%に達している。その他の排出物においては、生態工業園区の建設、循環化改造の展開を通じて、全面的にクリーン生産などの一連の措置が推進され、全県の主要汚染物のうち一般工業固形廃棄物の総合利用率は99.7%に達した、危険廃棄物の無害化利用処理率は99.2%、都市部下水処理場の汚泥無害化処理率は100%に達している。浦江県の生活ゴミ処理システムは、「浦江モデル」と称されている。

## 2.2. 「浦江モデル」の特徴

生活ゴミ分別処理において、都市農村混合地域の代表

的な「浦江モデル」は、政府、企業、住民と党员（共産党）が参画・協働しており、循環型社会を構築した中国の生活ゴミ処理モデルの一つとされている。

### 2.2.1. 浦江県の生活ゴミ分別処理システム

浦江県政府は、生活ゴミのパイロットモデル事業から、県への全面普及を経て、「応分尽分、応収尽収、応用尽用、日産日清（分別率・収集率・再生利用率の最大化と当日のゴミは当日に清掃する）」を目標として掲げ、この地域の生活ゴミの中で生ごみの割合が高いという特徴を活かし、「党建+」制度（共産党员がゴミ分別の指導と監督を担当する制度）を設けた。各ゴミ箱には住民の番号と監督責任者である党员の連絡用番号が明記されており、適切な分別ができなかったと判断された場合、番号で追跡し投棄責任と監督責任をそれぞれ追及する。こうした県のゴミ処理システムに民間企業と提携して、生ごみの資源化処理を中心とするゴミ分別排出、分別収集処理の一つのゴミ処理モデルを構築した。一般的に、中国の都市部（都市部での生活ゴミは、資源ゴミ、有害ゴミ、生ごみとその他のゴミの四種類に分別される）、又はいわゆる環境先進国では、ゴミ分別の品目が多く、その品目も細かく指定されているが、このような仕組みをゴミ分別の経験の無い農村部への導入は難しいと判断し、浦江県は「4種2分、4種類のゴミ・2次分別」というシンプルでわかりやすいゴミ分別排出・収集方法を考案した。4種類とは、①生ごみ（腐るごみ）、②腐らないゴミ（生ごみ以外のゴミ）、③売れるゴミ（資源ゴミ）と、④売れないゴミ（埋立ゴミと有害ゴミ）のことを示している。2次分別とは、住民による1回目の分別と保潔員<sup>i</sup>による2回目の分別を指す。

まず、浦江県住民は、家庭ゴミを「生ごみ」と「生ごみ以外のゴミ」の2種類に分けて出す。その分けられたゴミを保潔員が収集する。保潔員は回収した生ごみの中に、他のゴミが混ざっていないかを確認し、生ごみの分別遵守率を村の管理委員会に報告する。その後、分別された生ごみを生ごみ中継ステーションに運び、集められた生ごみを生ごみ処理センターに転送する。そこで有機

表1 浦江県の生活ゴミの構成

構成	生ごみ類	プラ類	織物類	紙類	木竹類	ガラス類	金属類	その他
比率/%	44.9	16.8	3.4	7.7	3.4	0.65	0.45	19.6

肥料化し、生産した有機肥料は無料で県内の農家に提供するという仕組みである。次に、「生ごみ以外のゴミ」は普通のゴミ中継ステーションに運ばれ、保潔員によって資源ゴミ、埋立ゴミ、有害ゴミの3種類に分けられてそれぞれの処理場所に運ばれる。その他の資源ゴミは資源ゴミ再生利用会社に売られる。

一方、再生利用コストが高く、必要とされないものは政府の資源ゴミ回収センターに送られる。有害ゴミは無害化処理会社に、埋立ゴミは埋立処分場にそれぞれ運ばれる。こうしてゴミ分別・収集処理によって再生・利用できるゴミは可能な限り回収され、埋立ゴミの量を減らすことに成功している。

## 2.2.2. 政府の役割

浦江モデルにおいて、政府は、まず、公共事業分野におけるゴミ処理の関連政策としての制度の設定・改善・対策を講じる。次に、政府はPPP (Public Private Partnership、官民が連携して公共サービスの提供を行うスキーム) 事業として、ゴミ処理事業者を選定・契約し、委託運営費用を業者(民間企業)に前払いとして全額支払う。政府は、民間企業に経営・管理・運営を委託するものの、民間企業に対する監督と「党建+」制度というゴミ分別管理責任制度(中国の特色ある制度)の下で、党员と県住民が協力(住民に対するゴミ分別の指導・広報・教育など)し、ゴミ分別遵守率を上げるように指導する。政府は、以上のプロセスと内容を公開(浦江県統計年鑑)し、信頼性と透明性の向上を図っている。

## 2.2.3. 企業の役割

浦江県住民によって分別・排出された生活ゴミの回収・運搬と、保潔員による2次分別、そして排出された生ごみの資源化と最終処分場までのゴミの運搬など、一般的なゴミ処理を委託された民間企業は、浦江県に適したゴミ処理システムを企画・提案し、関連技術を開発して経営に成り立つビジネスモデルを適用・運営する。以上の過程の中での試行錯誤で得た経験とデータを利用し、新たなゴミ処理に関する政策と関連技術を利用するなど、改めて政府に提案する。また、ゴミ処理管理・運営に関するデータと情報は常に公開(企業のホームページ)され、政府と地域住民の信頼を得るように努力している。

## 2.2.4. 住民の役割

浦江県住民は、党员の指導・監督の下で、生活ゴミを分別して投棄する。農家は、自ら投棄した生ごみによって資源化された有機肥料(無料提供)を利用して有機栽培をし、農産物を生産・消費する。また、有機農産物として販売する<sup>34, 35)</sup>。

## 3. 生活ゴミ処理及び資源化炭素排出計算モデル

### 3.1. ライフサイクル炭素排出量評価と炭素排出量システムの境界

#### 3.1.1. 生ごみ処理モード

本研究では、簡易なLCA評価方法を用いて、炭素排出量が環境に及ぼす潜在的な影響について分析した。そして、CFPは、各エネルギー物質、または消費物質がライフサイクルの過程で発生する炭素排出量のこと、CFPがわかると炭素排出量を直接計算することができる。本論文の二酸化炭素排出量単位はt-CO<sub>2</sub>(二酸化炭素換算トン)である。

従来の生ごみ処理のシステムは、図2に示すように、生ごみの収集、ゴミ中継ステーション、運搬、埋立地+焼却場の4つの段階を含んだ全工程(生ごみの集荷から埋立・焼却まで)からの炭素排出である。本研究はゴミの分類が炭素排出及び資源化利用の炭素排出削減効果に与える影響について、以下の3つの処理モードを用いて比較し分析した。

- (1) 混合収集(分別無し)+全量埋立処分
- (2) 混合収集(分別無し)+全量焼却処理
- (3) 分別回収+生ごみの近場堆肥<sup>ii</sup>+リサイクル可能なゴミ(瓶・缶・紙)の回収+その他のゴミ焼却

生活ゴミの分別資源化処理のシステム境界は、生活ゴミの収集、輸送、分別、資源化処理の4つの段階に分けられる。生活ゴミの分別・資源化は伝統的な生活ゴミ処理から、ゴミの分別処理によってプロセスが増加され、廃プラスチック、古紙、廃織物の分別後の2次回収・利用及び生ごみの堆肥処理による製品の製造過程での炭素排出を減少させる。

また、本研究では、埋立地においてメタン回収と再利用ができず、埋立過程では生分解性の含有量が高かったため、メタン酸化効果が低いことを考慮した上で算定した。

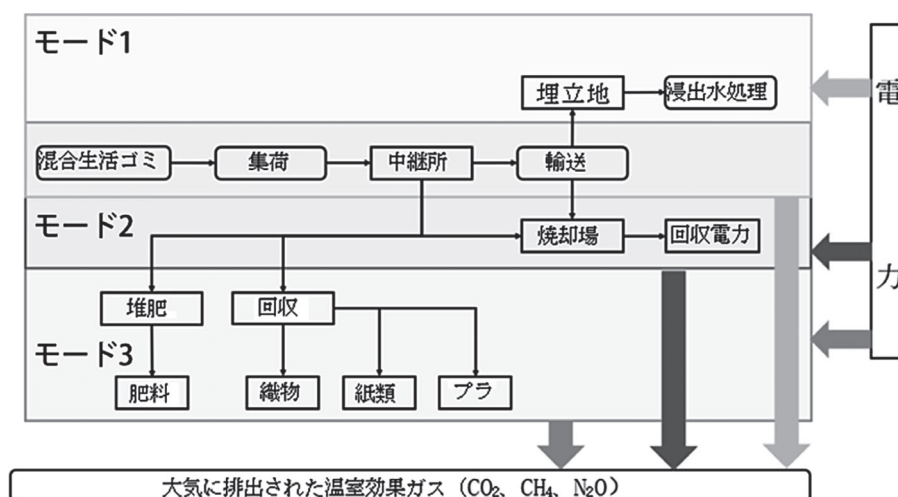


図2 3つの生活ゴミ処理モードのシステム境界図

### 3.1.2. データソース

本研究の対象地域である中国浙江省・浦江県における生活ゴミの1日平均・発生量は600トンであり、生活ゴミ分別の実施前の処理方式は主に埋立と焼却であった。生活ゴミ分別の実施後は、毎日200トン前後の生ゴミが資源化（好気性堆肥）されている。また、約88トンの廃プラスチックと、約30トンの廃織物、約35トンの古紙類など、リサイクル可能な資源ゴミが回収・処理されている。残りのゴミは焼却処理されている。

本研究は、LCAはISO-14040シリーズ<sup>28, 29)</sup>のライフサイクル評価国際標準を基にした。またEU製品環境フットプリント(PEF)<sup>30)</sup>の技術規範に適合<sup>iii)</sup>し、評価対象システムに関連する物質の背景データはencoinventV3.7データベース<sup>iv)</sup>から得られる。

本研究の実際のデータは、浦江県の生活ゴミ処理モデルに基づき、IPCC法を用いて、埋立・焼却処理における温室効果ガス排出量を推定したものである。本論文で選択する排出係数はゴミの種類とゴミの組成に基づいて決定したため、廃材と新製品の間の環境利益分配に適合している。

### 3.2. 各種生活ゴミ処理モードにおける温室効果ガス排出量の計算

生活ゴミ処理に関連するGHG排出は、直接排出、間接排出および炭素排出削減の3つに分類される。その中、生活ゴミ処理過程の直接GHGには主にゴミの埋立、焼却、堆肥などの過程における直接CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>Oの排出を含む。間接的な炭素排出には、廃棄物の積み替え

過程でのエネルギー消費による炭素排出、積み替えステーション、焼却場、埋立場の運転過程で投入される電力とエネルギーによる炭素排出が含まれる。炭素排出削減はゴミ焼却発電が火力発電を主とする電力網発電過程のGHG排出を回避できることと、古紙、廃織物、廃プラスチックなどの回収可能な資源ゴミを資源採掘から消費までのプロセスでGHG排出を削減することができる。

$$GHG(n) = GHG_{\text{direct}}(x) + GHG_{\text{indirect}}(y) - GHG_{\text{avoid}}(z) \quad (1)$$

GHG(n)は、様々なモデルプロセスの温室効果ガスの総排出量

$$n = [\text{モード1, モード2, モード3}]$$

GHG<sub>direct</sub>はプロセスGHG直接排出量である。

$$x = [\text{埋立, 焼却, 堆肥}];$$

GHG<sub>indirect</sub>はプロセスGHG間接排出量である。

$$y = [\text{積み替えエネルギー消費量, 積み替えステーションの稼働, 焼却場の稼働, 埋立場の稼働}];$$

GHG<sub>avoid</sub>は資源化プロセスの排出削減量である。

$$z = [\text{焼却による電力回収, 古紙回収, 廃織物回収, 廃プラスチック回収, 堆肥・肥料回収}];$$

#### 3.2.1. 直接炭素排出の計算方法

①埋立過程：埋立過程の温室効果ガスの直接排出は主に

CH<sub>4</sub>であり、ここで IPCC が推奨する質量平衡法に基づいて測定する。

$$ECH_4 = (\text{MSWT} \times \text{MSWF} \times L_0 \cdot R) \times (1 - \text{OX}) \quad (2)$$

$$L_0 = \text{MCF} \times \text{DOC} \times \text{DOCF} \times F \times 16/12 \quad (3)$$

ECH<sub>4</sub> は埋立地からのメタン排出量であり、t/a；

MSWT は都市生活ゴミの発生量、t/a；

MSWF は都市生活ゴミの埋立処分の割合、%；

L<sub>0</sub> は都市生活ゴミ埋立地のメタン生成ポテンシャル、t/t；

MCF は都市生活ゴミ埋立地のメタン補正因子；

DOC は都市生活ゴミの埋立地で処理されたゴミ中の分解可能な有機炭素含有量、t/t；

DOCF は分解性有機炭素の割合、%；

F はゴミ埋立ガス中の温室効果ガス（メタン）の割合、%；

R は温室効果ガス（メタン）回収量、t/a；

OX は酸化因子 0.1；

16/12 は CH<sub>4</sub>/C 分子量比

## ②焼却過程：

$$\text{ECO}_2 = \sum (\text{MSWi} \times \text{CCWi} \times \text{FCFi} \times \text{EFi} \times 44/12) \quad (4)$$

ECO<sub>2</sub> は都市生活ゴミの焼却過程から発生する二酸化炭素排出量であり、t/a；

i は各都市の生活ゴミの成分；

MSWi は第 i 成分の焼却量、t/a；

CCWi は第 i 成分中の炭素含有量の割合であり、t/t；

FCFi は第 i 種成分中の鉱物炭素含有量の割合であり、t/t；

EFi は第 i 成分焼却炉の完全燃焼効率であり、%；

44/12 は CO<sub>2</sub>/C 分子量比

## ③生ごみ堆肥再利用のための炭素排出量算出方法：

生ごみの好気性堆肥化過程で排出される温室効果ガスは主にメタンと亜酸化窒素である。強制換気による静的好気性堆肥化の過程では、生ごみの大部分の分解性有機炭素が二酸化炭素と亜酸化窒素に変換され、二酸化炭素の発生はバイオマス炭素に由来するため、温室効果ガスの総量にはカウントされない。堆肥化処理によるメタン排出量と亜酸化窒素排出量は、次のデフォルトの方法

を用いて推定することができる。

$$\text{ECH}_4 = \text{MSWp} \times \text{EFc} \times 10^3 \quad (5)$$

ECH<sub>4</sub> はメタン排出量、t/a；

MSWp は堆肥処理された生ごみの総量、t/a；

EFc は堆肥処理のメタン排出因子、g/kg

$$\text{EN}_2\text{O} = \text{MSWp} \times \text{EFN} \times 10^3 \quad (6)$$

EN<sub>2</sub>O は亜酸化窒素排出量、t/a；

MSWp は堆肥処理された生ごみの総量、t/a；

EFN は堆肥処理の亜酸化窒素排出因子、g/kg

## 3.2.2. 間接炭素排出の計算方法

間接的な炭素排出には、生ごみの転送過程でのエネルギー消費による炭素排出、転送ステーション、焼却場、埋立場の運転過程で投入される電力とエネルギーによる炭素排出が含まれる。

### ①生ごみ転送プロセスのエネルギー消費炭素排出量：

$$\text{Ea} = \text{MSW} \times \text{Et} \times \rho \times \text{EF}_1 \quad (7)$$

Ea はエネルギー消費炭素排出量（CO<sub>2</sub>換算）kg；

MSW はゴミの総量、t；

Et は単位エネルギー消費量（軽油 / ゴミ換算）、L t<sup>-1</sup>、実測値 1.76L t<sup>-1</sup> とする；

ρ は軽油密度で 0.83kg L<sup>-1</sup>；

EF<sub>1</sub> は軽油燃焼炭素排出係数（CO<sub>2</sub>/軽油換算）で 0.87kg · kg<sup>-1</sup>

### ②生産設備の運転中の電力消費による炭素排出量：

$$\text{E}_{\text{CO}_2\text{-power}} = \text{Pt} \times \text{EF}_2 \quad (8)$$

CO<sub>2</sub>-power は電力消費炭素排出量（CO<sub>2</sub>換算）、kg；

Pt は総消費電力、kW · h；

EF<sub>2</sub> は電力消費炭素排出因子（CO<sub>2</sub>換算）であり、0.94kg (kWh)<sup>-1</sup> とした。



### 3.2.3. 炭素排出削減の計算方法

炭素排出削減は、ゴミ焼却発電が火力発電を中心とした電力網の発電過程で GHG 排出を回避できることと、古紙、織物、廃プラスチックなど、回収可能な物質の回収物が資源の採掘から消費までの段階まで温室効果ガス排出を減らすことに関連している。

#### ①焼却発電用炭素貯蔵装置：

$$Ecs-power=MSW \times N \times EF2 \quad (9)$$

MSW はゴミの総量、t；

N はゴミ 1 トン当たりの発電量 kWh；

EF2 は電力消費炭素排出因子（CO<sub>2</sub> 換算）、0.94kg（kWh）- 1 とした。

#### ②生ごみ堆肥の炭素貯蔵：

$$Ecs-bio= MSW \times n \times 4 \quad (10)$$

MSW はゴミの総量、t；

n はゴミ 1 トン当たりに生成できる肥料、kg；

4 は肥料 1kg 当たりの炭素貯蔵係数

#### ③リサイクル可能な生活ゴミ資源化炭素排出削減量：

$$ERi= Mi \times EFi \quad (11)$$

ERi は回収ゴミ成分 i の炭素貯蔵量（CO<sub>2</sub> 換算）、kg；

Mi は成分 i の質量、kg；

EFi は、回収可能成分 i の炭素排出係数

### 3.3. 電力システムの脱炭素シナリオ分析

廃棄物処理において電力消費が必要な場合、電力由来のカーボンフットプリントは発電に使用するエネルギーの組み合わせによって影響を受ける<sup>31)</sup>。したがって、電力消費による間接排出量は、化石エネルギーの発電量次第で、発電量当たりの GHG 排出量が再生可能エネルギーよりも多くなり、技術の性能にも依存する。中国は 2060 年にカーボンニュートラルを実現する目標を掲げている。送電網の構造によって、電力由来のカーボンフットプリントを計算できる。今後、中国の電力網構造は、再生可能エネルギー発電の割合が増大するほか、残

りの火力発電は CCUS（Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage、炭素の分離・回収・貯留・利用技術）と結合し、電力コストの削減と炭素排出量の削減を同時に実現すると考えられる<sup>24, 25)</sup>。

本研究では電力網の低炭素化シナリオと電力網の低炭素化 + CCUS 技術における 2030-2060 年中国電力網電力カーボンフットプリントを使用し、三つの異なる生活ゴミ処理モードの炭素排出と脱炭素シナリオを分析した。

## 4. 計算結果と分析

### 4.1. 異なる生ごみ処理モードのカーボンフットプリント算出

ここでは、気候変動影響モデル（IPCC GWP100）を用いた。三つの生ごみ処理モードによる年間処理量 21900 トンの場合のカーボンフットプリントを計算し、表 2 に示している。

表 2 のデータを見ると、3 つの処理モードで炭素排出量に大きな差があることがわかる。EU の PEF(Product Environmental Footprint) 法に基づき、回収製品を再生可能な材料として考慮し、相殺計算すると、混合収集（ゴミ分別無し）と全量埋立の方式で発生した炭素排出量は 38.5 万トン / 年に達し、混合収集と全量焼却では 4.6 万トン / 年の炭素削減が実現できた。そして、生ごみを分別収集して、その場で処理を行い、回収可能なゴミを直接回収利用し、その他のゴミを焼却するモードでは 21.3 万トン / 年の炭素削減が実現可能であるが、炭素削減額の能力を持つ処理モードでは大気中の GHG を吸収、または固定できるわけではない。埋立地はメタン収集と再利用を実現できておらず、その高い GHG 排出は、主に生分解可能なゴミの含有量が高く、メタンガスの酸化効果が低いことに由来している。一方、混合収集ゴミの

表 2 モード別での炭素排出量インベントリの結果 (t-CO<sub>2</sub>/a)

	モード 1	モード 2	モード 3
直接炭素排出量	375623.3	12269.5	17010.3
間接炭素排出量	9874.9	14383.2	11928.7
炭素排出削減	/	-72196.6	-242082.0
純炭素排出量	385498.2	-45544.0	-213143.1

焼却が実現したカーボンニュートラルは、主にゴミに含まれる廃プラスチックなどの有機成分の含有量とカロリーが高く、熱転化効率が高いなどの特徴がある。

#### 4.2. 電力網の脱炭素化による生活ゴミ処理モデルのライフサイクルカーボンフットプリント

生活ゴミ処理とは異なる形態の中で、電力消費に関わるプロセスとは、中継所、焼却場、埋立地の運転、焼却場の廃棄物発電のプロセスである。そこで、本研究では電力網データに基づいて、これらの過程の電力由来のカーボンフットプリントに置き換え、電力網状況下でのカーボンフットプリント排出状況を分析した。電力網の低炭素化シナリオによると、火力発電の割合の低下に伴い、2030、2040、2050、2060年の電力由来のカーボンフットプリントは基準年2020年（華東地区〔上海市、江蘇省、浙江省〕）の電力カーボンフットプリントは0.74686kg CO<sub>2</sub>-eq/kWhよりそれぞれ37.0%、25.1%、22.1%、18.2%に低下する。電力網の低炭素化シナリオにおける生活ゴミ処理の炭素排出の異なるモード結果を表3に示す。3つのモードのうち、カーボンフットプリントの変化が最も顕著なのはモード2で、モード2の処理方式は非分別焼却発電である。この過程の温室効果ガスは主にゴミの焼却処理過程から得られており、炭素排出削減効

果は焼却発電から得ている。しかし、電力のカーボンフットプリントの低下に伴い、その焼却発電による排出削減エネルギーが減少することで、全体のカーボンフットプリント排出量は2060年には負の値から正の値に変化し、107.41%に増加する。すなわち、モード2の混合焼却発電方式は電力網の脱炭素化により炭素排出削減の効果が薄くなる。最終的には削減効果がなくなること、焼却処理が生活ゴミ処理の長期的なシナリオに相応しくないことを示している。モード1の場合、全体的なカーボンフットプリント排出量の減少は、プロセスの電力消費による間接的な排出量の減少によるものである。3つ目のモードであるゴミの分別と回収については、基準年2020年から2060年までの間にプロセスによるカーボンフットプリントは5.5%増加するが、マイナスにとどまる。モード3の過程でカーボンフットプリントが増加するのは、一部のゴミ焼却処理による発電から炭素削減効果が低下し、電力の脱炭素による間接的な炭素排出量を上回るからである。

表4は「電力網の低炭素化シナリオにおける炭素排出結果」、表6は「電力網の低炭素化 + CCUS技術における炭素排出の結果」を示している。火力発電の割合が減少し、クリーンエネルギーの割合が増加することによって、CCUS技術を組み込んだ火力発電の電力網構造が

表3 電力網の低炭素化シナリオにおける2030-2060年中国電力網の電力カーボンフットプリント

年	電力カーボンフットプリント (kg CO <sub>2</sub> -eq/kWh)
2030	0.348153
2040	0.235953
2050	0.209391
2060	0.17164

出典：XUE N, LU J, GU D, et al. Carbon footprint analysis and carbon neutrality potential of desalination by electrodialysis for different applications

表5 電力網の低炭素化 + CCUS技術シナリオにおける2030-2060年中国電力網の電力カーボンフットプリント

年	電力カーボンフットプリント (kg CO <sub>2</sub> -eq/kWh)
2030	0.2801134
2040	0.1518506
2050	0.1155988
2060	0.0907918

出典：K. Xiao, B. Yu, L. Cheng, F. Li, D. Fang. The effects of CCUS combined with renewable energy penetration under the carbon peak by an SD-CGE model: Evidence from China

表4 電力網の低炭素化シナリオにおける炭素排出の結果 (t-CO<sub>2</sub>/a)

シナリオ分析 (1)	基準年2020年	2030年	2040年	2050年	2060年
モード1	385498.2	380960.1	380102.5	379899.5	379611.0
モード2	-45544.0	-7692.1	-539.2	1154.2	3560.8
モード3	-213143.1	-204145.5	-202447.2	-202046.7	-201476.6

様々な生活ゴミ処理プロセスの炭素排出結果に与える影響を示している。モード2の電力のカーボンフットプリントは、単独の電力網における低炭素化の結果と比べて、より顕著に低下する。これは、火力発電プロセスがCCUSを統合した後、その発電プロセスのカーボンフットプリントがより多く低下するためである。基準年2020年（華東区の電力カーボンフットプリントは0.74686kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh）から2030年、2040年、2050年、2060年までに電力のカーボンフットプリントはそれぞれ29.7%、16.1%、12.3%、9.6%に低下した。モード1の結果の変化傾向と一致して、モード2ではプロセスによるカーボンフットプリントが最も大きく変化し、モード1ではわずかに低下する。一方、モード3ではプロセスカーボンフットプリントがわずかに増加する。しかし、3つのモードではカーボンフットプリントの変化量が大きくなる。モード2では、2040年には100%を超え、2060年には118.12%になる。モード1は2060年のカーボンフットプリントを1.7%削減し、モード1よりも617.8t/a多く削減する。モード3のプロセスについてのカーボンフットプリントは2060年に6.0%程度増加するが、依然としてマイナスである。これら3つのモードの結果は、3つ目のモードの炭素排出削減効果が最も高く、また将来の電力脱炭素シナリオに対応する場合、モード3においては焼却発電処理のモード2よりもカーボンフットプリント変化の安定性が高いことを示している。

電力網の脱炭素化による生活ゴミ処理モデルのライフサイクルカーボンフットプリントはモード別での炭素排出量の結果（表2）、電力網の低炭素化モード（表3）と電力網の低炭素化 + CCUS技術（表6）の炭素排出量の結果により、生活ゴミ非分別埋立のモード1では全体の排出量が一番高い。しかも電力網の低炭素化シナリオなどへの影響が少なく、生活ゴミ非分別焼却のモード2では電力網の脱炭素化により炭素排出削減の効果が薄くなる。最終的には削減効果がなくなり、逆に多く排出することになる。炭素排出削減の視点から非分別焼却処

理モード2は生活ゴミ処理の長期的な対策としては相応しいモードでないことが明らかになった。生活ゴミ分別資源処理のモード3では炭素排出量をもっとも多く、しかも、電力網の低炭素化シナリオと電力網の低炭素化 + CCUS技術を進めても同じく最適な炭素排出量が期待される。本研究の試算により、生活ゴミ分別資源処理のモード3は3つの処理モードで最も炭素排出削減効果のある処理方法となる。将来、電力脱炭素化が進んでも、最適な炭素排出量の削減効果が期待できる。

#### 4.3. 感度分析

ISO標準では、仮定が最終結果に与える影響を判断するために、感度分析が必要とされている。本研究で考慮した想定は、電力消費量、ゴミ焼却発電量、プラスチック含有量である。電力による間接排出は、電力網のエネルギー構造だけでなく、処理過程の消費電力とも密接に関連しており、感受性分析過程では電力消費量を感受性分析の1つの変数とする。図3に示すように、消費電力量は処理過程のカーボンフットプリントに比例する。そのうち、モード2は電力消費量の変化が最も顕著であり、電力消費量は1%増加し、カーボンフットプリントは0.29%増加する。モード1とモード3については、電力消費量が1%増加した仮定の下で、カーボンフットプリントがそれぞれ0.03%と0.05%変化した。異なるシナリオの中でも、モード2とモード3は焼却発電である。特にモード2の全量焼却処理は、その焼却発電量によるカーボンフットプリントの効果が70.9%であり、焼却発電量が2%増加すると、カーボンフットプリントは3.4%増加した。モード3の過程では、一部のゴミのみを焼却処理し、焼却発電量の1%の変化が0.12%のカーボンフットプリントの変化をもたらす、発電量の変化とカーボンフットプリントの変化は正の相関を示した。モード2とモード3のプラスチック含有量の増加は、生活ゴミの埋立量の増加とプラスチックゴミ焼却量の増加による余分な温室効果ガス排出に起因する処理過程

表6 電力網の低炭素化 + CCUS技術における炭素排出の結果 (t-CO<sub>2</sub>/a)

シナリオ分析 (2)	基準年 2020 年	2030 年	2040 年	2050 年	2060 年
モード1	385498.1	380440.0	379459.7	379182.6	378993.0
モード2	-45543.9	-3354.4	4822.4	7133.4	8714.9
モード3	-213143.0	-203124.4	-201182.7	-200635.3	-200261.4

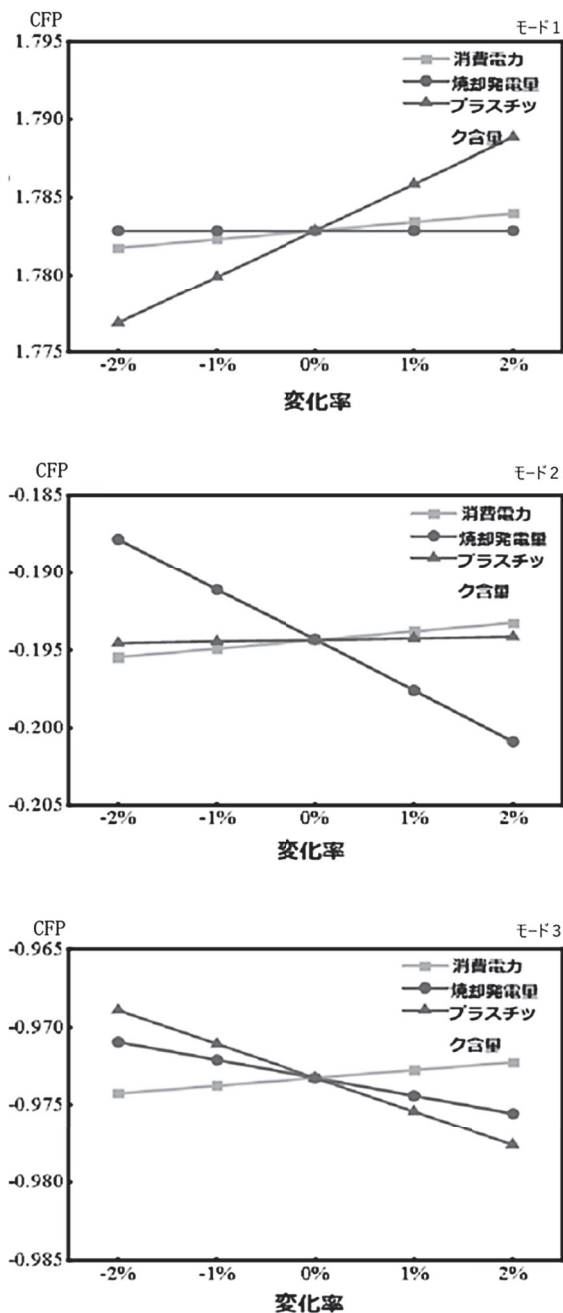


図3 3つの生活ゴミ処理モードのカーボンフットプリント感度分析

でのカーボンフットプリントの増加を引き起こしているが、焼却による発電削減量は焼却炭素排出量よりも低く、処理過程でのカーボンフットプリントの増加をもたらしている。モード3では、プラスチックの含有量が増加することにより、プラスチック回収量と、プラスチック処理による排出削減量が増加し、全体のカーボンフットプリント量が減少する。モード1はプラスチック含有量の変化に対する感受性が電力消費量の変化よりも高

く、モード2のカーボンフットプリントはプラスチック生産量は電力消費量とプラスチック含有量の変化より反応しやすい。モード3のカーボンフットプリントは、プラスチック含有量の変化に伴う傾向が焼却生産量の変化の傾向よりも速いことがわかった。そのため、今後、生ごみの割合が低下し、生活ゴミのカロリー値が増加すると考えられる。そして焼却熱転換効率が変化する状況に対して、モード3の生ごみの分別回収処理方式は、明らかに優位性があると考えられる。

## 5. おわりに

本研究の分析結果は次のようにまとめることが出来る。まず、3つの生活ゴミ処理モードによる炭素排出量には大きな差異があることがわかった。1日平均ゴミ処理量が約600トンの県レベルにおいて、混合収集（ゴミ分別無し）と全量埋立処分の方式により炭素排出量は年間38.5万トンに達し、混合収集（ゴミ分別無し）と全量焼却処理により年間4.8万トンのカーボン削減が実現できる。次に、分別収集による生活ゴミの現地処理、リサイクル可能な部分の直接リサイクル、他のゴミの焼却による方式は、年間25.9万トンのカーボン削減が実現できた。モード3で処理過程が一部のゴミの焼却を含むため、電力由来のカーボン排出は全体のカーボン排出の4.3%しか占めておらず、電力ネットワークの低炭素化がモード3のカーボンフットプリントに与える影響は限定的である。状況設定の変化に伴い炭素排出量は増加するものの、その合計量は依然として負の値であり、3つのモードの中で最も低い炭素排出量を持つモードとなった。

シナリオの差異化の研究において、モード1では、電力変動が多様な場合の消費に主に関連しており、電力生産部分には関連していないことがわかった。分析した結果、グリッドの低炭素化がモード1のカーボンフットプリントに与える影響はほとんどないと考えられる。また、2020年から2060年までの変動は、主に電力網の低炭素化後の電力由来のカーボンフットプリントの低下に起因している。一方、モード2のカーボンフットプリントは、元の負の値から正の値に変換される。この転換は、主に電力網の低炭素化による焼却が発電部分の炭素排出削減効果を減少させたことに起因する。一方、電力網の脱炭素化が続くにつれ、モード2のカーボンフット

プリントがマイナスからプラスに転換する転換年限もそれに応じて早まった。この現象は、将来的にゴミの焼却処理方式が廃棄物処理の最適な選択肢ではなくなる可能性を示唆しており、UNEPの廃棄物焼却削減勧告<sup>33)</sup>と整合的すると、廃棄物における焼却処理の割合を減らすべきであることを示している。モード3については、その処理過程が一部のゴミの焼却に関わるため、電力が関わるカーボンフットプリントは総カーボンフットプリントの4.3%しか占めていない。そのため、電力網の低炭素化がモード3のカーボンフットプリントに与える影響は限定的である。状況による設定の変化に伴い、炭素排出量が多少上昇したものの、その総量は依然として負の値であり、3つのモードの中で炭素排出量が最も低い。

中国の多くの都市部では、主に焼却中心のゴミ処理を行っているが、こうした生ごみの資源化はより大きな炭素排出削減効果を持つと考えており、電力網の低炭素化によるクリーンエネルギー使用の増加はゴミ分別後のゴミの資源化に大きな潜在力をもたらすと言える。しかし、焼却処理による電力の出力は将来のシナリオで優位性を低下させ、資源回収産業の大規模な増加を促進する可能性があると考えられる。現在、中国における生活ゴミ分別は初期段階であり、全国レベルの生活ゴミ分別政策の下、各県レベルの都市の進捗状況は異なっている。浦江県の場合、生活ゴミを分別し、生ごみを資源化（堆肥化）した先行地域であるが、中国の大多数の都市の生活ゴミ処理方式は、埋立処分と焼却処理を中心に行っている。浦江県のゴミ処理システムである分別収集＋生ごみの資源化（堆肥化＋回収可能なゴミのリサイクル＋他のゴミの焼却）は、より大きなカーボン削減効果を持つ可能性が高いと考えられる。

最後に、この研究の意義においては次のようにまとめることができる。まず、第1に、現在、中国の主なゴミ処理方式は埋立中心である中で、中国浙江省・浦江県は、生ごみを資源化した循環型社会の成功モデルとして中国の模範県となった地域であること、第2に、中国の都市生活ゴミ処理において炭素削減に関する定量分析、とりわけ、中国農村都市混合地域の生ごみ処理モデルの定量分析を行った研究はいまだ見当たらないこと、第3に、浦江県は中国の代表的な農村都市混合地域であり、同様の特徴を持つ中国の2,000以上の地域に適用可能であると考えられる。そのため、こうした都市と農村の混合型

地域である浦江県の事例研究は、今後、中国人の生活向上によるゴミ排出量の増加が予想される中、より適した中国の生活ゴミ処理方案について提示することができると考えられる。

## 注

- <sup>i</sup> 主に家庭から出るゴミを収集・運搬する作業員を指す。
- <sup>ii</sup> 近場堆肥とは排出された腐るゴミを最も近い処理センターで処理された堆肥。
- <sup>iii</sup> EUは2023年10月からEUに輸出する企業は製品の排出量(CFP)を報告する義務を負う。また、2024年から、販売する電気自動車(EV)の蓄電池のカーボンフットプリント(製造・廃棄時)を開示するようにメーカーに義務付ける。
- <sup>iv</sup> ecoinvent Databaseは、多様な国と部門を網羅した汎用性の高いデータベースであり、科学的に正確で透明性が高い国際的なインベントリデータを提供することを目的として開発され、複数の専門家のレビューを受ける等、信頼性が高く、欧米を中心に広く使われている。

## 参考文献

- [1] CHANGE IPCC. 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [J]. 2019.
- [2] KANG Y, YANG Q, WANG L, et al. China's changing city-level greenhouse gas emissions from municipal solid waste treatment and driving factors [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, 180: 106168.
- [3] ZHAO X-G, JIANG G-W, LI A, et al. Economic analysis of waste-to-energy industry in China [J]. *Waste Management*, 2016, 48: 604-18.
- [4] 吕崇宾. 城市生活垃圾垃圾分类现状与优化对策思考 [J]. *清洗世界*, 2023, 39 (06): 154-6.
- [5] LIU J, ZHENG L. Structure characteristics and development sustainability of municipal solid waste treatment in China [J]. *Ecological Indicators*, 2023, 152: 110391.
- [6] ZHANG C, DONG H, GENG Y, et al. Carbon neutrality prediction of municipal solid waste treatment sector under the shared socioeconomic pathways [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, 186: 106528.
- [7] CHINA N D A R C M O H A U-R D O T P S R O. Implementation plan of household waste classification system [J]. 2017.
- [8] ZAHARUDIN Z A, BRINT A, GENOVESE A, et al. A spatial interaction model for the representation of user access to household waste recycling centres [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 168: 105438.
- [9] CHEN L, GAO M. Predictive modeling for behavioral evolution of municipal household waste classification and recycling [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 78: 103659.
- [10] YUAN Y, LI T, ZHAI Q. Life Cycle Impact Assessment of Garbage-Classification Based Municipal Solid Waste Management Systems: A Comparative Case Study in China [J/OL] 2020, 17 (15):10.3390/ijerph17155310
- [11] LIU M, TAN Z, FAN X, et al. Application of life cycle assessment for municipal solid waste management options in Hohhot, People's Republic of China [J]. *Waste Management & Research*, 2020, 39 (1): 63-72.
- [12] CHEN S, HUANG J, XIAO T, et al. Carbon emissions under different domestic waste treatment modes induced by garbage classification: Case study in pilot communities in Shanghai, China [J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 717: 137193.
- [13] MALAKAHMAD A, ABUALQUMBOZ M S, KUTTY S R M, et al. Assessment of carbon footprint emissions and environmental concerns of solid waste treatment and disposal techniques; case study of Malaysia [J]. *Waste Management*, 2017, 70: 282-92.
- [14] ABDALLAH M, ELFEKY A. Impact of waste processing byproducts on the carbon footprint of integrated waste-to-energy strategies [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 280: 111839.
- [15] LUI S PADILHA J, LUIZ AMARANTE MESQUITA A. Waste-to-energy effect in municipal solid waste treatment for small cities in Brazil [J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 265: 115743.
- [16] MARIA C, GóIS J, LEITÃO A. Challenges and perspectives of greenhouse gases emissions from municipal solid waste management in Angola [J]. *Energy Reports*, 2020, 6: 364-9.
- [17] KUMAR A, SINGH E, MISHRA R, et al. Global trends in municipal solid waste treatment technologies through the lens of sustainable energy development opportunity [J]. *Energy*, 2023, 275: 127471.
- [18] ZHAO Y, CHANG H, LIU X, et al. Climate Change Impact of the Development in Household Waste Management in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56 (12): 8993-9002.
- [19] INSTITUTE E R. National Development and Reform Commission China 2050 High Renewable Energy Penetration Scenario and Roadmap Study [J]. 2015.
- [20] COUNCIL C E. Annual Development Report of China's Power Industry 2023 [J]. 2023.
- [21] COUNCIL C E. Annual Development Report of China's Power Industry 2021 [J]. 2021.
- [22] ZOU P, CHEN Q, YU Y, et al. Electricity markets evolution with the changing generation mix: An empirical analysis based on China 2050 High Renewable Energy Penetration Roadmap [J]. *Applied Energy*, 2017, 185: 56-67.

- [23] LI H, CUI X, HUI J, et al. Catchment-level water stress risk of coal power transition in China under 2° C/1.5° C targets [J]. *Applied Energy*, 2021, 294.
- [24] LU J, TANG J, SHAN R, et al. Spatiotemporal analysis of the future carbon footprint of solar electricity in the United States by a dynamic life cycle assessment [J]. *iScience*, 2023, 26 (3): 106188.
- [25] XUE N, LU J, GU D, et al. Carbon footprint analysis and carbon neutrality potential of desalination by electro dialysis for different applications [J]. *Water Research*, 2023, 232: 119716.
- [26] HUNT R G, FRANKLIN W E, HUNT R G. LCA — How it came about [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 1996, 1 (1): 4-7.
- [27] HELLWEG S, MILÀ I CANALS L. Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment [J]. *Science*, 2014, 344 (6188): 1109-13.
- [28] 14040:2006 I. Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework [Z]. 2006
- [29] 14067:2018 I. Greenhouse gases — Carbon footprint of products — Requirements and guidelines for quantification [J]. ISO 14067:2018, 2018.
- [30] UNION E. Product Environmental Footprint (PEF) Guide [J]. 2012.
- [31] ZUBELZU S, ÁLVAREZ R. A simplified method to assess the influence of the power generation mix in urban carbon emissions [J]. *Energy*, 2016, 115: 875-87.
- [32] FAN J-L, XU M, LI F, et al. Carbon capture and storage (CCS) retrofit potential of coal-fired power plants in China: The technology lock-in and cost optimization perspective [J]. *Applied Energy*, 2018, 229: 326-34.
- [33] UNEP. Second Session of the Intergovernmental Negotiating Committee on Plastic Pollution [J]. 29 May - 2 June 2023.
- [34] 千 曠娥・俞 紅珍・張 沖・周 瑋生・仲上 健一 (2019) 「官民連携による中国農村都市の生活ゴミ処理システムに関する研究：浦江県新型 PPP モデル事業を事例として」『立命館大学政策科学会』第 27 巻第 1 号、57-77 頁
- [35] 張 沖 (2017) 「土壌修復を中心とした循環型農業の事例研究」『立命館大学政策科学会』第 24 巻第 3 号、353-364 頁
- [36] 徐林、凌卯亮、盧旭傑 (2017) 「都市住民のゴミ分別に関する影響要因に関する研究」[J] 『公共管理学報』4 (1): 142-153 頁
- [37] 趙磊、陳德珍、劉光宇等 (2010) 「ゴミ熱転換利用プロセスでの炭素排出の計算方法」[J] 『環境科学学報』30 (8): 1634-1641 頁
- [38] IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories [J]. 2006, Chapter 3: Solid Waste Disposal
- [39] XUE N, LU J, GU D, et al. Carbon footprint analysis and carbon neutrality potential of desalination by electro dialysis for different applications [J]. *Water Research*, 2023, 232: 119716.
- [40] K. Xiao, B. Yu, L. Cheng, F. Li, D. Fang, The effects of CCUS combined with renewable energy penetration under the carbon peak by an SD-CGE model: Evidence from China. *Applied Energy* 321, 119396 (2022).

