令和３年度環境省委託業務

令和３年度
脱炭素社会を支えるプラスチック等資源循環システム構築実証事業
（PHA 系バイオプラスチックのライフサイクル実証事業）委託業務
成果報告書

令和４年２月

公益財団法人京都高度技術研究所

実証事業成果の要旨

令和３年度脱炭素社会を支えるプラスチック等資源循環システム構築実証事業
「PHA 系バイオプラスチックのライフサイクル実証事業」

申請法人　　（公財）京都高度技術研究所
共同実施者　（株）カネカ、日立造船（株）

（１）本実証事業の概要

本事業は、脱炭素社会・循環型社会の構築や海洋プラスチック対策の推進に向け、ポリエチレンなどの石油系プラスチックに替え、新たに廃食用油等の国産の循環資源を原料に生分解性プラスチックである PHBH（3-ヒドロキシブチレート-co-3-ヒドロキシヘキサノエート重合体）を製造するものである。PHBH を生ごみ袋に利用し、収集した生ごみとともにバイオガス化してエネルギーを回収する新たな循環型ごみ処理システムを、ライフサイクルでの環境影響やコスト解析も踏まえて構築することを目指している。また、生分解性プラスチック原料を中長期的に確保するために、市民による廃食用油の回収率の更なる向上に向けた取組に加え、廃食用油以外の油脂源としてジャトロファ等の油脂作物の国内での栽培可能性を検討する。さらに生ごみ袋以外にも汚れる用途の食品容器などのプラスチック製品への利用拡大に向けた検討も進める。こうした技術実証とともに、成果を広く市民や事業者に情報発信することで、新たな循環システムの社会実装に取り組むものである。

本事業の概要

（２）本年度の成果

本年度は、廃食用油を用いた PHBH の培養生産技術の改良を図ることでパーム油使用時と同等の PHBH の生産性を達成するとともにポリマーの品質管理基準を満たすように精製処方を改善した。また、実機を用いた廃食用油からの PHBH 製造試験により量産時の生産性・品質を確認し、スケールアップ技術を確立した。さらに廃食用油排出実態調査、廃食用油以外の国産の油脂源の利用可能性に関する検討を行った。地域住民の協力による PHBH 製生ごみ袋を用いた生ごみの分別排出・回収試験を実施し、そこで回収した生ごみを原料としたベンチスケールでのバイオガス化試験を実施した。それらに関するライフサイクルでの CO_2 削減効果及びコスト変化の定量化に向けた検討を行った。

廃食用油を用いた PHBH の培養生産については、不飽和脂肪酸を還元し飽和脂肪酸を生成する酵素（FadH）の強化により、高ヨウ素価の油脂を効率的に資化させることに成功した。本技術により高ヨウ素価廃食用油を工業的に効率的、かつ安定的に PHBH 原料として培養生産することが可能となった。また、劣化が進行した廃食用油を入手して培養試験を実施した結果、酸価、アニシジン価がある値よりも低ければ使用できることが分かり、低ヨウ素価廃油の受入れ基準範囲が拡大できた。さらに高度に劣化が進んだ廃食用油でもブレンドによってその劣化度値を範囲内に収めることで使用可能となる可能性を示せた。

廃食用油前処理検討では、昨年度開発した処方でも YI（Yellow Index）の基準を満足できない廃食用油があることが判明したが、YI に影響を与える要因として着色成分濃度と相関があることを見出し、新たな新処方により低減効果を確認した。

廃食用油の回収効率向上を目指した収集方法の検討については、排出量の多い事業系廃食用油を対象に、IoT を利用した回収計画立案システムのあり方を検討し、その実現に向けて必要となる調査・開発等をロードマップとして示した。

廃食用油以外の国内外の油脂源の利用可能性に関する検討については、令和元年度に京都地域に構築した実証温室と戸外の実証圃において、熱帯油脂作物ジャトロファ（*Jatropha curcas*）の通年の、バイオガス化の消化液を利用した栽培管理方法を検討し、その油脂生産性の評価を行った。その結果、２年生ながら日本の気候を考慮した一樹あたりの種子目標収穫量の 20%を達成した。特に課題となる越冬方法については、適切に潅水すれば周年、葉を落とさず栽培できる一方、冬前に潅水を控え落葉させて、春に潅水を再開することで樹勢を回復できることもできた。加えて、ジャトロファ以外の油脂作物として、菜種の栽培を検討したが、メタン発酵消化液の増施により収量増加が示唆され、米作の裏作としての菜種栽培が期待できることが分かった。

PHBH 製生ごみ袋の製造については、ごみ袋メーカーの量産機で 2 L、5 L、10 L の三種類の生ごみ袋の試作を行い、地域住民の協力のもと、分別排出・回収試験による実用性評価を実施するとともに、アンケート調査を行った。その結果、当初はヒートシール部の強度不足により、液漏れや持ち手接着部のちぎれ等の指摘が多くみられたが、インフレーション製膜条件を調整した改良品と取り替えたところ、これらの不具合は解消されたことから、総じて好評であった。

PHBH 製生ごみ袋を用いた生ごみ収集方法については、分別排出・回収試験結果からは、上記のように実用面での問題はほとんどなく、むしろ生ごみ専用バケツに比べて使いやすいということが確認できた。一方、今回の試験では生ごみ堆肥化事業の参加世帯を対象としており分別精度に問題はなかったが、実際に幅広い市民への実装をするとなると事前に細かな分別ルールの周知・徹底を図り、不適物を混入させない必要がある。また、地域住民からは実用化された時の価格等について不安視する意見や回収拠点が遠く搬入できなかったという意見もあり、生ごみ袋の価格、回収拠点の設置場所

が課題である。

上記 PHBH 製生ごみ袋を用いた分別排出・回収試験によって得られた生ごみを原料にベンチスケール（発酵槽実容量 : 200 L）でのバイオガス化試験を実施した。試験結果としては、定常期間中、安定してバイオガスが発生していることを確認するとともに、引き抜いた消化液のろ過残渣中の未分解 PHBH は投入量の 6 %程度で流失ロス相当であり、十分に分解していることを確認した。ろ過後の消化液が植物の生長へ与える影響をコマツナの栽培試験で検証したところ、見かけの生育の様子や外観からは生育阻害は認められなかった。

生ごみ袋以外の用途の検討にあたっては、「バイオプラスチック導入ロードマップ」に基づき、プラスチックのリサイクル調和性を踏まえ、PHBH の利用適正及び具体的な製品例を整理した。その結果、食品容器・包装用途の PHBH 導入ポテンシャルが大きいことが分かった。

本事業で提案するシステムのライフサイクルでの CO_2 削減効果及びコスト変化の定量化については、PHBH 導入効果を評価するために、最新のインベントリデータを入手しプロセスモデルのブラッシュアップを図るとともに、評価シナリオの設定にジャトロファ等の原料拡大や分別収集、消化液の有効利用等も追加した。京都市をケーススタディとしてシナリオ分析した結果、PHBH 生ごみ袋を用いて生ごみを分別回収し、バイオガス化する本システムは、混合収集して全焼却するベースラインと比較して、ライフサイクル全体においてエネルギー起源 GHG が削減されることを明らかにした。

以上のように、最終年度における各事業の検討課題は計画通りに進捗し、最終目標を達成することができた。すなわち廃食用油を原料とした PHBH の実機製造に目途をつけることができ、試作した PHBH 製の生ごみ袋を用いた生ごみの分別排出・回収試験において、十分に実用性があることが確認された。また、回収された生ごみとともにバイオガス化試験に供された PHBH は十分に分解しており、得られた消化液が肥料として利用できる可能性を示せた。そしてこれらのライフサイクルでの CO2 削減効果及びコスト変化の評価結果からシステムの有効性を示せた。

次年度以降は、本事業の開発成果の普及促進を図るため、社会実装に準じたスケールで、モデル地域における実証試験を実施するとともに、PHBH の特性を活かした生ごみ袋以外の用途開発とその用途に応じたリサイクル方法の検討並びに国産原料開発に中長期的視点で取組み、これらを通じて、PHA 系バイオプラスチックのライフサイクル実証と用途展開システム解析を行うこととしたい。

Summary of the progress of the demonstration project in FY2021

Life cycle demonstration project for PHA-polymers

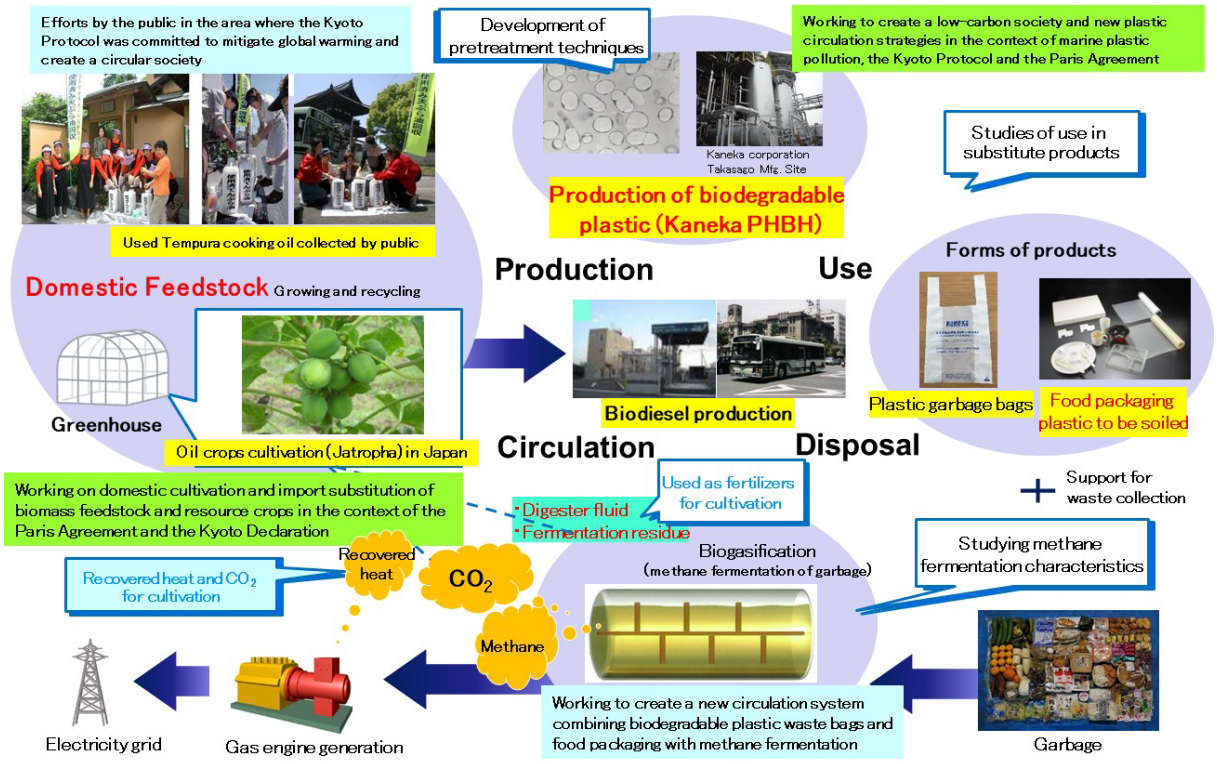
Representative: Advanced Science, Technology & Management Research Institute of KYOTO

Jointly implemented by Kaneka Corporation and Hitachi Zosen Corporation

（１）Outline of the demonstration project

In this project, as a step toward the establishment of a decarbonized society and a sound material-cycle society and reductions in marine plastic pollution, we have started using recycled resources in Japan such as waste cooking oil as feedstock for the manufacture of the biodegradable plastic PHBH (a 3-hydroxybutylate-co-3-hydroxyalkanoate polymer), to be used as a substitute for petroleum-based plastics such as polyethylene. The objective is to use PHBH for garbage bags and create a new circular waste processing system with considerations of life cycle environmental effects and cost analysis. To recover energy, the new system converts the bags together with the collected garbage to biogas.

In order to assure supplies of feedstock for the biodegradable plastic in the medium and long term, as well as working to further improve the efficiency of waste cooking oil collection from the public, we are investigating the cultivation of oil crops such as jatropha (*Jatropha curcas*) to be used as an alternative oil source. We are also pursuing studies into expanding the scope of uses of the biodegradable plastic beyond garbage bags, to applications such as food packaging that is likely to be soiled. Through conducting these technical demonstrations and publicizing the results widely to the public and business, we are working on social implementation of the new circular system.



Outline of the demonstration project

（２）Results from FY2021

This year, by improving the PHBH fermentative production technology that uses waste cooking oil, we achieved yields of PHBH equivalent to yields obtained when using palm oil, and we improved the polymer refining process to satisfy quality management standards. Through tests of PHBH production from waste cooking oil using commercial-scale equipment, we verified yield and quality in mass production and established technologies for scaling up. We surveyed waste cooking oil discharge conditions and investigated possibilities for using oils from domestic sources other than waste cooking oil. With the cooperation of local residents, we conducted food waste separation and collection tests using PHBH garbage bags and, using the collected food waste as feedstock, we conducted laboratory-scale biogasification tests. We conducted a study to quantify lifecycle CO2 reduction effects and cost impacts.

In the fermentative production of PHBH from waste cooking oil, by intensifying an enzyme (FaDH) that reduces unsaturated fatty acids to produce saturated fatty acids, we succeeded in efficiently producing high-iodine-value oil as a useful resource. This technology now makes possible efficient and consistent fermentative production at industrial scale using waste cooking oil with high iodine values as PHBH feedstock. We obtained degraded waste cooking oil and conducted fermentation tests with it. We found that degraded waste cooking oil can be used if the acid value and anisidine value are below certain values, thus extending the range of our standards to include waste cooking oil with low iodine values. We demonstrated the possibility of using even highly degraded waste cooking oil, depending on the blend, by adjusting the degradation levels to within the usable range.

Regarding preprocessing of the waste cooking oil, we found that some waste cooking oil could not meet the yellow index standard with the refining process we developed the previous year. However, we discovered a correlation between the yellow index and a color component concentration that is one factor influencing the yellow index, and we confirmed that this effect is weaker in the new refining process.

In studying collection methods with the aim of improving waste cooking oil collection efficiency, we investigated approaches for a collection planning system that uses IoT (Internet of Things) technology for collections of waste cooking oil from enterprises with large discharge volumes. We presented a roadmap for the research and development that will be necessary to implement this system.

We studied the availability of oil sources in Japan and abroad other than waste cooking oil. Using digester fluid from biogasification for cultivation of the tropical oil crop jatropha (Jatropha curcas), we investigated year-round cultivation management methods in the experimental greenhouse we established in the Kyoto region in FY 2019 and in an open-air experimental field, and we evaluated oil yields from the jatropha. Even in Japan’s climate, we achieved 20% of our target seed yield per plant in the second year. Overwintering was a particular concern. Cultivation through the year without the leaves falling is possible with suitable irrigation, but we were also able to restrict irrigation and let the leaves fall before the winter and then reinvigorate the plants by resuming irrigation in the spring. We studied the cultivation of rapeseed as another oil crop alongside jatropha. We saw indications that increasing application of digester fluid from anaerobic digestion increases the yield and we see prospects for cultivation of rapeseed as an off-season crop in rice cultivation.

We conducted trial manufacturing of PHBH garbage bags in three sizes (2, 5 and 10 L) with mass production equipment at a garbage bag manufacturer. With the cooperation of local residents, we conducted practical evaluations of the PHBH garbage bags in a waste separation and collection test and we conducted a questionnaire survey. The results brought out several issues, such as inadequate strength of heat seals, liquid leakage, and

tearing of handle areas. By adjusting blown film conditions during manufacture, we improved the quality and solved these problems. The bags are now generally well-regarded.

With regard to a food waste collection method using the PHBH garbage bags, the results of waste separation and collection testing show that there were virtually no problems in practice as mentioned above. In fact, it was confirmed that the PHBH garbage bags are more convenient than dedicated food waste bins. However, the participants in the testing were households already participating in food waste composting activities. There were no issues with correct waste separation in this testing, but when a wider range of people become involved, thorough communication will be necessary to ensure prior understanding of specific separation rules to prevent mixing of inappropriate waste. After their experience of the testing, some local residents expressed concern about issues such as pricing and some said they could not carry the waste to distant collection points, highlighting problems with the prices of the garbage bags and the locations of collection points.

Having obtained food waste in the waste separation and collection tests using the PHBH garbage bags, we tested the food waste as feedstock for biogasification at laboratory scale (fermentation vat capacity 200 L). The results of this test show that biogas was produced constantly over consistent periods and that undecomposed PHBH in filter residues of the extracted digester fluid corresponded to washout of around 6% of the inputs, confirming that the PHBH was thoroughly decomposed. We tested the effects of the filtered digester fluid on plant growth in experimental cultivation of komatsuna (Japanese mustard spinach). From growth stages and appearance of the komatsuna, no inhibition of growth was observed.

In studying applications other than garbage bags, we took account of plastic recycling compatibility according to the Ministry of the Environment's "Roadmap for Bioplastics Introduction" and identified examples of specific products suitable for the use of PHBH. Our findings show that PHBH has great potential for use in food containers and packaging.

To evaluate the effects of adopting PHBH by quantifying lifecycle reduction effects and cost impacts of the system proposed in this project, we obtained up-to-date inventory data and refined the process model, adding to the evaluation scenario specifications a wider range of feedstocks such as jatropha, separate collections, and more effective use of digester fluid. The results of a scenario analysis treating Kyoto City as a case study show that, compared to a baseline of mixed collection with incineration of collected waste, our system of separate food waste collection using PHBH garbage bags and biogasification reduces whole-lifecycle greenhouse gas emissions originated from energy.

As described above, the various project studies in the final year progressed according to plan and we reached the final goals. That is to say, we achieved our aims of production of PHBH using waste cooking oil as the feedstock with commercial-scale equipment. Using the prototype PHBH garbage bags in food waste separation and collection tests, we confirmed that the bags are very practical. We showed that the PHBH decomposes well together with collected food waste in biogasification testing and that the obtained digester fluid can be used as a fertilizer. The results of our evaluation of CO2 reduction effects and cost impacts over this lifecycle demonstrate that the system is effective.

From the next fiscal year, in order to spread and promote the development outcomes of this project, we will conduct demonstration testing in model regions at a scale applicable to adoption throughout society. We will work in the medium to long term on developing applications other than food waste bags that can exploit the characteristics of PHBH, on studying recycling methods suitable for those applications, and on developing

domestic feedstocks. As we proceed, we hope to conduct lifecycle demonstration testing of PHA-based bioplastics and system analysis of further applications.

＜　目　次　＞

１．　本実証事業の概要 1

１.１ 実証事業概要 1

１.２ 技術及び社会的意義 1

１.３ 実施体制と実施計画 2

１.４ 将来展望 4

２．　廃食用油及び再生可能資源を原料とした PHBH 製造に関する実証事業（実証事業 1） 6

２.１ 生活系・事業系廃食用油を PHBH 原料に利用するための前処理技術に関する検討 6

２.１.１ 廃食用油を用いた PHBH 培養生産方法の開発 6

２.１.２ 廃食用油の事前精製及びポリマー精製技術の開発 15

２.２ PHBH 原料として利用するための更なる廃食用油の回収率向上を目指した収集方法に関する検討 22

２.３ 廃食用油以外の国内外の油脂源の調達可能性及び食料と競合しないジャトロファ等の油糧植物の国内での栽培と特に国内中山間地（耕作放棄地）での原料栽培の検討 33

２.３.１ ジャトロファ等の油脂植物 33

２.３.２ 廃食用油以外の国内外の油脂源の調達可能性 43

２.４ 原料の切り替えによる CO2 削減効果及びコスト変化に関する検討 46

２.４.１ CO2 削減効果に関する検討 46

２.４.２ コスト変化に関する検討 48

２.５ まとめと課題 51

３．PHBH のごみ袋及びプラスチック代替製品への利用とバイオガス化に関する実証事業（実証事業 2） 53

３.１ バイオガス化プラントでの利用に向けた PHBH 製生ごみ袋の製造に関する検討 53

３.２ PHBH 製生ごみ袋を用いた生ごみの分別方法等に関する検討 62

３.３ PHBH 製生ごみ袋のバイオガス化に関する検討 85

３.３.１ ベンチスケールバイオガス化試験 85

３.３.２ 普及拡大に向けた運転条件の検討 100

３.３.３ 原料に PHBH を含むメタン発酵消化液の栽培影響評価 106

３.４ バイオガス化を見据えた PHBH のプラスチック代替製品への利用可能性の検討 115

３.５ PHBH 製生ごみ袋による CO2 削減効果の定量化に関する検討 121

３.６ まとめと課題 123

４． PHA 系バイオプラスチックのライフサイクルでの環境負荷低減効果に関する実証及びコストの評価（実証事業 3） 125

４.１ 環境負荷低減効果 125

４.２ コスト評価 139

４.２.１ PHBH 製生ごみ袋を導入して分別収集・バイオガス化するシステムのトータルコスト評価 139

４.２.２ 中小自治体におけるバイオガス化施設のフィジビリティスタディ 150

５． まとめと今後の課題 158

５.１ 廃食用油及び再生可能資源を原料とした PHBH 製造に関する実証事業（実証事業 1） 158

５.２ PHBH のごみ袋及びプラスチック代替製品への利用とバイオガス化に関する実証事業（実証事業 2） 160

５.３ PHA 系バイオプラスチックのライフサイクルでの環境負荷低減効果に関する実証及びコストの評価（実証事業 3） 161

＜参考資料＞

１． 実施記録 1

２． アンケート調査票 3

２.１ 第 1 回アンケート調査票 3

２.２ 第 2 回アンケート調査票 7

２.３ 第 3 回アンケート調査票 11

３． 成果（特許、論文、学会発表等） 15

３.１ 特許権 15

３.２ 学会発表 15

３.３ その他 15

４． メディア等掲載実績 16

４.１ ASTEM NEWS No.84 16

1．本実証事業の概要

1.1 実証事業概要

本事業は、脱炭素社会・循環型社会の構築や海洋プラスチック対策の推進に向け、ポリエチレンなどの石油系プラスチックに替え、新たに廃食用油等の国産の循環資源を原料に生分解性プラスチックを製造するものである。この生分解性プラスチックを生ごみ袋に利用し、回収した生ごみとともにメタン発酵（バイオガス化）してエネルギーを回収する新たな循環型ごみ処理システムをライフサイクルでの環境影響やコスト解析も踏まえて構築することを目指している。

また、生分解性プラスチック原料を中長期的に確保するために、市民による廃食用油の回収率の更なる向上に向けた取組に加え、廃食用油以外の油脂源の調達可能性を追求する必要がある。そのため、焼却施設やバイオガス化施設からの排熱、排ガス中の CO_2、メタン発酵消化液等を活用し、ジャトロファ等の油脂作物の温室栽培や耕作放棄地での栽培を検討する。さらに生ごみ袋以外にも使い捨て用途のプラスチック製品や汚れる用途の食品容器などへの利用拡大に向けた検討も進める。こうした技術実証とともに、成果を広く市民や事業者に情報発信することで、新たな循環システムの社会実装に取り組むものである。

1.2 技術及び社会的意義

第 4 次循環型社会形成推進基本計画、プラスチック資源循環戦略及びバイオプラスチック導入ロードマップでは、プラスチックに係る資源循環対策及び CO_2 削減対策として、バイオプラスチックの利用促進が位置付けられている。ただし、我が国では、バイオプラスチック原料に適した糖作物や油脂作物の賦存量が諸外国と比べて少ないため、バイオプラスチックモノマー・ポリマーの大半は海外から輸入されたものである。我が国におけるバイオプラスチック利用促進を本格的に進め、バイオプラスチック関連産業の振興を図るには、国産バイオマスを原料としたバイオプラスチックの製造及びその利用先・市場を拡大することが必要である。

生分解性を有するバイオマスプラスチックのうち PHA[1]系バイオプラスチックは、主に油脂を原料に微生物反応を利用して製造され、他の生分解性プラスチックよりも高い生分解性を有するという特徴があり、海洋に非意図的に排出されたとしても海洋中の微生物によって生分解される等、海洋プラスチックごみ対策としても注目される素材である。これらの背景を受け、本事業では、廃食用油をはじめ多様なバイオマスを原料とした PHA 系バイオプラスチックの国内での製造及びその普及拡大を図るものである。

また、本事業では、生分解性に優れた生ごみ袋による生ごみ収集・バイオガス化モデルの実現性・有効性を実証するとともに、焼却施設やバイオガス化施設からの排熱、排ガス中の CO_2、メタン発酵消化液の活用を図るものであり、今後、生ごみバイオガス化施設の導入を予定する地方自治体への参考事例になることが期待される。さらに、副次的効果として、廃食用油の回収効率の向上や、国内におけるジャトロファの栽培技術の確立も国産バイオマスの製造・利用拡大に貢献すると考えられる。

[1] Polyhydroxyalkanoate（ポリヒドロキシアルカン酸）の略称

1.3 実施体制と実施計画

1.3.1 実施体制

（公財）京都高度技術研究所が申請法人として全体をとりまとめ、廃食用油からの生分解性ポリマーPHBH の製造及び PHBH 製生ごみ袋の製造については（株）カネカ、PHBH 製生ごみ袋等のバイオガス化とコスト評価については日立造船（株）、廃食用油の回収システム検討及びジャトロファ栽培については（株）レボインターナショナル、ベンチスケールバイオガス化試験については（株）バイオガスラボ、生ごみの分別回収試験については（株）エックス都市研究所、PHBH のプラスチック代替製品への利用可能性については三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング（株）、各種分析については（株）島津テクノリサーチ、LCA 解析による循環システム環境負荷低減効果の評価については京都大学がそれぞれ主たる担当として構成メンバーとなり、京都市をフィールドとして、幅広い学識経験者の指導の下、全構成メンバーが協同して効率的かつ効果的に実証事業を遂行できる体制を整えている。

図 1 に実施体制表を示すが、メンバー名の横に、表 1 に示すテーマの中の主たる担当を付記する。

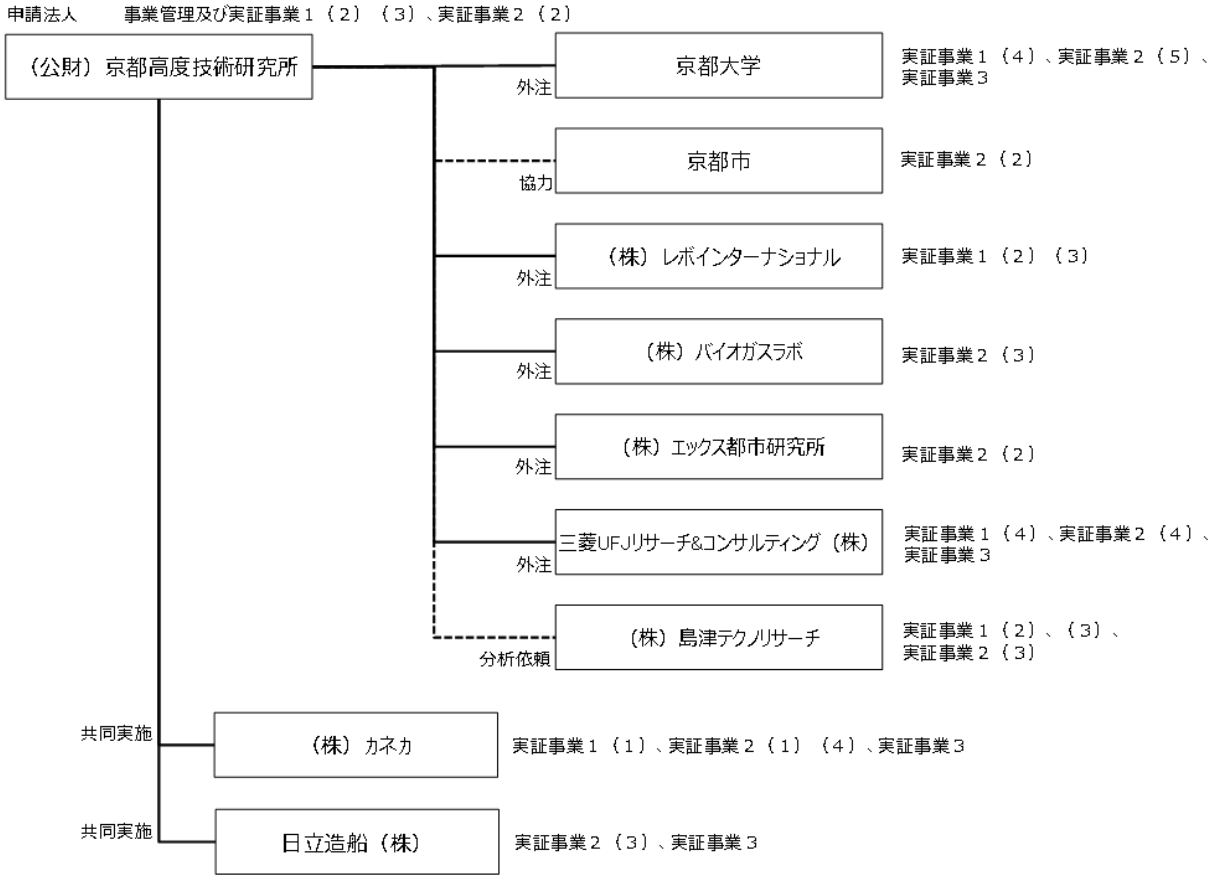


図 1　実施体制表と主たる担当テーマ

1.3.2 実施計画

本事業では、国産バイオマスによるバイオプラスチック製造及びその特性を活かしたごみ処理システムの確立に向け、生分解性バイオマスプラスチックである PHA（ポリヒドロキシアルカン酸）の一種である PHBH（3-ヒドロキシブチレート-co-3-ヒドロキシヘキサノエート重合体）に関して、「廃食用油等からの PHBH 製造」及び「PHBH 製生ごみ袋の利用とバイオガス化」に関する実証を行い、ライフサイクルでの環境負荷低減効果を明らかにすることを目的としている。

本年度は、廃食用油を用いた PHBH の培養生産技術の改良を図ることでパーム油使用時と同等の PHBH の生産性を達成するとともにポリマーの品質管理基準を満たすように精製処方を改善する。また、実機を用いた廃食用油からの PHBH 製造試験により量産時の生産性・品質を確認し、スケールアップ技術を確立する。廃食用油排出実態調査、廃食用油以外の国産の油脂源の利用可能性に関する検討、地域住民の協力による PHBH 製生ごみ袋を用いた生ごみの分別排出・回収試験の実施、そこで回収した生ごみを原料としたベンチスケールでのバイオガス化試験の実施、それらに関するライフサイクルでの CO_2 削減効果及びコスト変化の定量化に向けた検討を行うものである。

実証事業は大きく分けて、3 つの実施課題から構成されており、それぞれの実施課題における最終年度目標と本年度の実施計画を次表に示す。

表 1　最終年度目標と本年度の実施計画

実施課題	最終年度目標	本年度の実施計画
【実証事業 1】 廃食用油及び再生可能資源を原料とした PHBH 製造に関する実証事業	(1)PHBH 製造に向けた廃食用油の前処理技術を開発する。 (2)PHBH 原料として活用することを念頭に置いた効率的な廃食用油の回収システムを提案する。 (3)油脂製造時の副産物及び油糧作物について PHBH 原料としての実現可能性を評価する。 (4)原料切り替え（海外産パームオイル→国内廃食用油）に伴う CO_2 削減効果及びコスト変化を評価する。	(1)低油脂濃度でパーム油使用時と同等の PHBH 生産性を達成し、そのスケールアップ技術を確立する。 (2)生活系及び事業系廃食用油の効率的な回収システムを提案する。 (3)ジャトロファの生産性及び消化液の肥料利用を検討し、廃食用油以外の油脂源の可能性を展望する。 (4)パームから廃食用油への原料切り替えによる CO_2 削減効果及びコスト変化を検討する。
【実証事業 2】 PHBH 製生ごみ袋及びプラスチック代替製品への利用とバイオガス化に関する実証事業	(1)バイオガス化プラントでの利用に向けた PHBH コンパウンドを開発し、廃食用油を原料とした PHBH 製生ごみ袋を試作する。 (2)バイオガス化を見据えた PHBH 製のプラスチック代替製品への利用可能性を検討する。 (3)PHBH 製生ごみ袋のバイオガス化性能に関する基礎実験及びスケールアップに関する検討を行う。 (4) PHBH 製生ごみ袋の実用性試験及び生ごみの収集に関する検討を行う。 (5)PHBH 製生ごみ袋を導入することによる CO_2 削減効果を定量化する。	(1)パームオイルもしくは廃食用油を原料とした PHBH 製生ごみ袋を試作し、地域住民に実際に使ってもらうことで、実用性評価を行う。 (2)PHA 系バイオプラスチックの導入が望ましい用途とその際の機能（生分解性、脱炭素性）の特定。 (3)200L プラントによる PHBH 製生ごみ袋で回収した生ごみの嫌気分解特性評価とスケールアップ性の確認を行う。 (4) 生ごみの分別排出・回収試験により PHBH 製生ごみ袋を用いた分別回収方法の検討を行う。 (5)PHBH 製生ごみ袋を導入することによる CO_2 削減効果及びコスト変化を検討する。
【実証事業 3】 PHA 系バイオプラスチックのライフサイクルでの環境負荷低減効果に関する実証及びコストの評価	(1)国産バイオマスを原料とした PHBH のライフサイクルでの環境負荷低減効果及びコストを定量化し、システム全体での有効性を実証する。	(1)データ源の適正化及び実証結果を踏まえたライフサイクルでの環境負荷低減効果及びコスト変化を算定する。 (2)原料種、ごみ種について将来シナリオを設定した算定・評価を行う。

1.4 将来展望

1.4.1 実証事業後の実証技術の普及と波及効果

PHBH 製生ごみ袋は、生ごみ処理にバイオガス化施設の活用を図ろうとする全国の自治体で採用が可能であり、本事業での成果をもとに、積極的に情報・データの提供等を行っていくとともに、多様な関係者に対し情報提供や要請を行っていく予定である。また、政令指定都市で初めて、焼却施設とバイオガス化施設を併設した京都市をフィールドに検討することにより、生ごみなどの食品廃棄物のバイオガス化によるエネルギー回収と循環利用に取り組む全国の自治体等への普及拡大が期待できる。

さらに、使い捨て用途のプラスチック製品や現状では廃棄後のリサイクルが困難で焼却せざるを得ないプラスチック等、循環利用の観点から廃棄後にバイオガス化することが望ましいプラスチック製品についても検討を行う予定であり、これらの結果に基づき、PHBH の利用が波及していくものと考えられる。

加えて、本事業で明らかにするライフサイクルでの環境負荷低減効果やコスト変化等を示しながら、情報発信や環境教育を行っていくとともに、関連プロジェクト等との連携化を積極的に進める予定であり、これによりカーボンプライシングや炭素税等の社会経済システムの変革の必要性を市民や事業者に理解してもらうことで、従来のオイルリファイナリー社会からバイオリファイナリー社会へと転換することが期待される。

1.4.2 事業による普及量（2025 年、2030 年）

共同実施者である（株）カネカでは、2019 年 12 月に PHBH 製造能力を約 5,000 トン/年に増強しており、さらに、2024 年 1 月までに 20,000 トン/年まで増強予定である。また、市場の動向を踏まえ、2030 年頃までに 200,000 トン/年まで製造能力を拡張する可能性がある。

本事業は京都市をフィールドとした実証事業を実施しているものの、生ごみのバイオガス化を実施する全国の自治体に、嫌気条件下で分解する PHBH 製生ごみ袋を普及させることを目指している。

図 2　PHBH 製造能力の増強及び適用拡大計画（出典：カネカ作成資料）

1.4.3 コスト見通し

現在の PHBH 樹脂価格は代替対象樹脂であるポリエチレン等より高価であり、5,000 トン/年に製造能力を拡大した後も大きくは変わっていない。樹脂価格を下げるには、スケールメリットを活かすだけでなく、製造プロセスの更なる合理化を図る必要があり、今後予定する 20,000 トン/年への能力増強の際、プラント設計の抜本的な見直し等が行われる見込みである。

なお、「プラスチック資源循環戦略」に基づくプラスチック対策が今後進められていく中、従来のオイルリファイナリーからバイオリファイナリーへの社会変革に向けて、将来的なカーボンプライシングや炭素税等の強化、ワンウェイプラスチックへの規制等、代替対象樹脂との価格差を埋める施策の導入も重要と考えられる。本事業では、これらの社会変革の必要性を市民や事業者等に理解してもらえるよう、LCA による環境負荷低減効果の定量化やライフサイクルでのコストの定量化を進め、情報発信を積極的に行っていくこととしている。

２．廃食用油及び再生可能資源を原料とした PHBH 製造に関する実証事業（実証事業 1）

２.１ 生活系・事業系廃食用油を PHBH 原料に利用するための前処理技術に関する検討

２.１.１ 廃食用油を用いた PHBH 培養生産方法の開発

（１）目的

廃食用油を PHBH 原料として利用するための PHBH の培養生産技術の開発検討を目的とした。培養工程においては、特に、品質のバラつきが想定される廃食用油を原料として使いこなす際の、発酵工程及び PHBH 品質に影響を及ぼす要因を洗い出し、未使用の食用油脂同等の生産性、品質を達成するために必要な廃食用油の品質管理基準（受け入れ基準）を明らかにすることを目的とした。

（２）方法

以下に廃食用油利用検討の全体フローを示す。

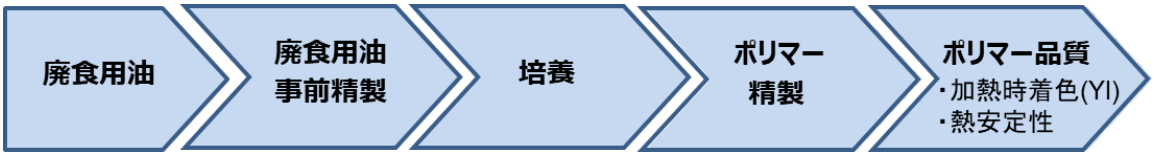


図 3　廃食用油利用検討の全体フロー

培養ステップについては、昨年度までの検討により、日本国内で発生する主な廃食用油は現在の原料であるパーム油よりもヨウ素価が高い大豆、菜種油系の高ヨウ素価油であることが判明したため、高ヨウ素価廃食用油を原料とした PHBH 培養生産技術開発を進めてきた。昨年度の研究において、パーム油と廃食用油ハイブリッド培養方法、及び、油脂濃度を高く維持することで廃食用油を単独で使用する改良培養方法を開発し、PHBH 商業化実証設備培養試験を実施した。その結果、目標生産性を達成したものの、顕著な発泡により不安定な培養となり、実生産においては問題が残されていた。そのため、本年度は、発泡抑制と高生産性の両立を目指し、高いヨウ素価油を原料として低油脂濃度で PHBH 培養生産が可能な技術の開発を引き続き進めることとした。

また、廃食用油としては、上述の高ヨウ素価油の発生量が多いものの、一定量のパーム油系廃食用油も発生するため、廃食用油受け入れ基準の拡大による入手性確保を目的とし、高ヨウ素価油のみならずパーム油系の低ヨウ素価廃食用油の利用可能性検討を追加項目として進めることとした。

（株）カネカにて独自に入手した種々の廃食用油（次表）及び（株）カネカにて開発した PHBH 生産微生物を用い、ラボにて PHBH の生産評価を実施することで廃食用油の油種による生産性、品質の差異を確認した。また、育種した株を用いて、PHBH 商業化実証設備での培養試験も行った。

表 2　検討に使用した廃食用油

廃食用油	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC
酸価	0.2	0.6	2.8	1.3	2.4	2.4	2.2	3.6	8	2	0	1.9	3.3	16.2	0.1	0	88	0.3
ヨウ素価	109	112	108	116	108	102	110	110	112	120	113	105	105	47	39	56	36	57
色味(Gardoner)	4	11	11	8	11	14	11	12	12	12	4	11	13	6	5	4	16	5
PHBH生産性 （対パーム油比）	93	91	93	94	96	93	95	92	90	95	100	93	95	97	100	100	66	100
																	高劣化油	

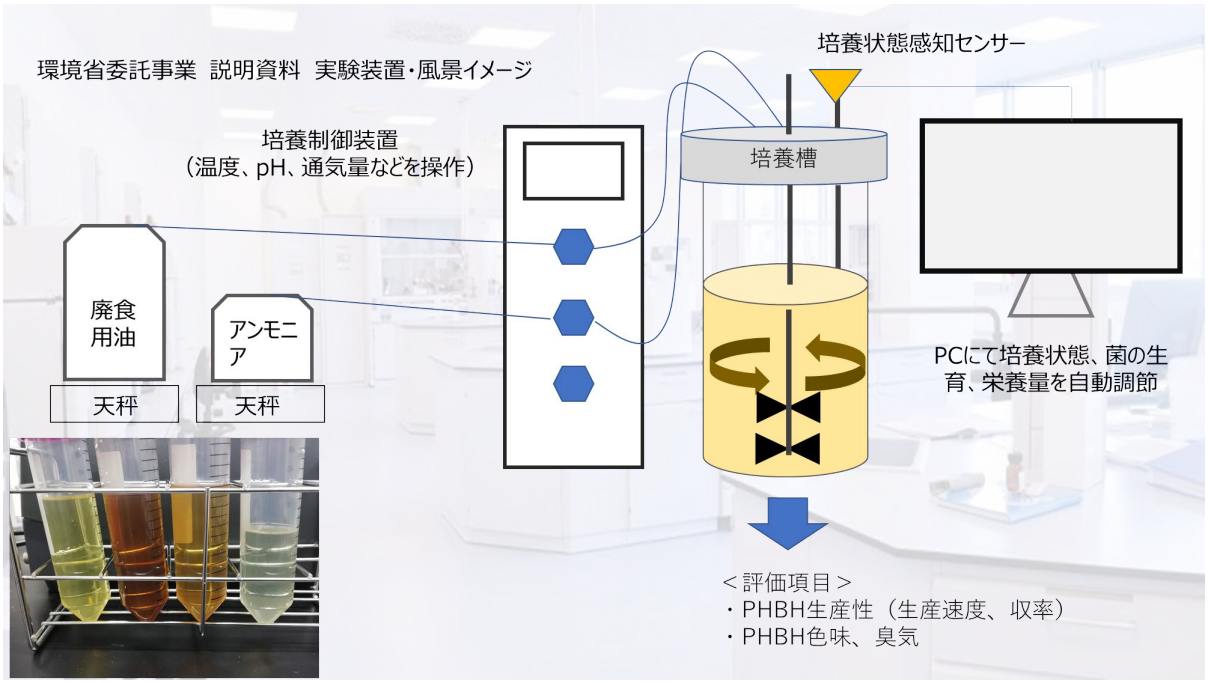


図 4　培養実験のイメージ図

図 5　培養実験装置

図 6　PHBH 商業化実証設備（培養）

（３）結果

1）高ヨウ素価油資化能の向上

高ヨウ素価油における PHBH 培養生産においては、パーム油等の低ヨウ素価油と比較して 2 倍程

度、培養液中の油脂濃度を高くする必要がある。この原因として、不飽和脂肪酸（特にリノール酸、リノレン酸）が微生物により代謝されにくいことが推測された。そこで、微生物による油脂代謝経路（β酸化経路）中で不飽和脂肪酸を還元し飽和脂肪酸を生成する酵素（FadH）の強化を試みた（次図）

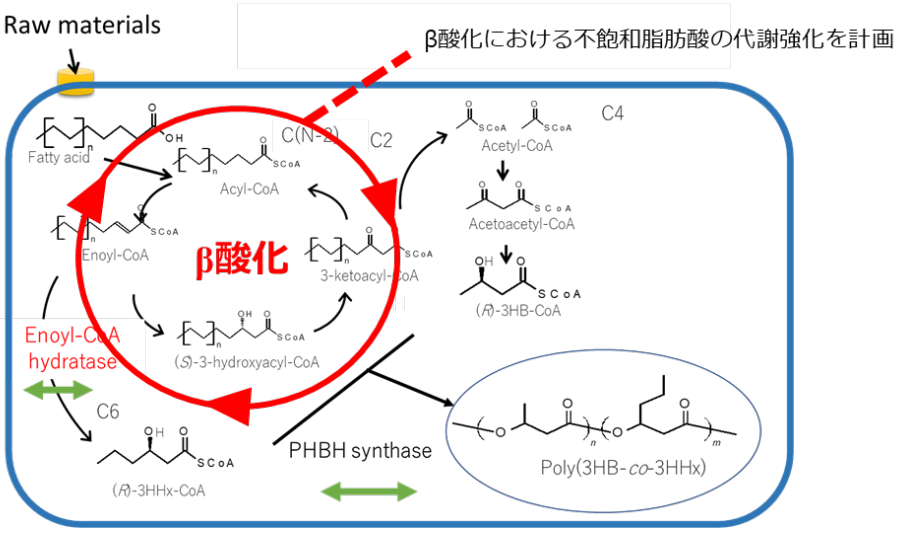


図 7　PHBH の生産経路と鍵なるβ酸化経路

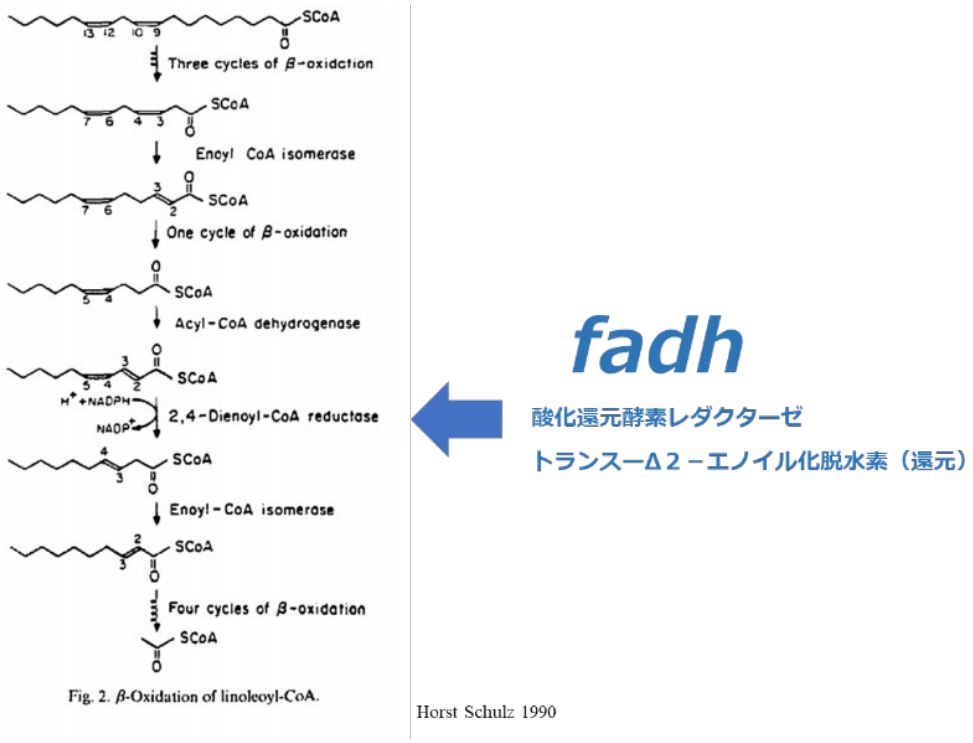


図 8　FadH による不飽和脂肪酸の飽和化反応

検討の結果、*fadH* の過度な強化では生育阻害は発生することが判明したため、強化度の最適化を進めた。次表に示すように、*fadH* を適度に強化することで、油脂濃度を低く維持した条件で 1 割程度 PHBH 生産性を向上することに成功した（特許出願中）。

表 3　*fadH* 強化度を変えた育種株の培養評価結果

プラスミド導入株の検討:①→⑤の順に*fadh*発現量を強化

菌株	番号	*fadh*導入	炭素源	PHBH生産性 (% 対 ①)	3HH (mol%)	炭素源収率 (% 対 ①)
KNK-1株	①	×	高ヨウ素価油 (IV:110)	100	11.4	100
	②	○		110	11.4	103
	③	○		106	10.8	101
	④	○		101	11.2	94
	⑤	○		生育阻害が発生し、培養困難		

ここまでの評価は KNK-1 株で進めていたため、袋用途に対応するため KNK-2 株への適用を進めた。この段階においても、*fadH* の発現強化株 2 種類を育種、評価したところ、より発現強度が低い株において、低ヨウ素価であるパーム油と同等の油脂濃度にて 96%の生産性を達成した。3HH 組成も 6 mol%と規格内であった。次表における KNK-2 株/*fadH*、ゲノム挿入 *fadH* 発現量少の株を以後、KNK-新 2 株として実証試験に使用した。

表 4　KNK-2 株への *fadH* 遺伝子導入効果の検証

菌株	*fadH*発現量	炭素源	PHBH生産性 (% 対パーム油比)	3HH (mol%)
KNK-新2株/*fadH*①	多	高ヨウ素価油 (IV:109)	84	6.8
KNK-新2株/*fadH*②	少		**96**	**6.0**
目標	-	高ヨウ素価 (IV:100) 以上	90% 以上	6±1

KNK-新 2 株の育種に成功したことから、本菌株を用いた PHBH 商業化実証設備培養試験を実施した。

PHBH 商業化実証設備培養試験ではヨウ素価 110 程度、酸価 3 程度、色味 11 程度である実廃食用油を使用した。

その結果、油脂濃度を高く維持した昨年度の PHBH 商業化実証設備培養試験と比較して、培養液中の油脂濃度を低く維持し培養可能であることを確認し、顕著な発泡により培養停止することなく、調達した廃食用油全量を使い切ることに成功した。生産性も目標とした対パーム油比 90%を超え 92%、収率も対パーム油 96%と目標を達成した。PHBH 中の 3HH 組成も 5.5 mol%と袋用途における規格を満足した（次表）。

表 5　廃食用油を用いた PHBH 商業化実証設備培養試験結果

	使用株	PHBH生産性（対パーム油比%)	3HH組成（mol%)	収率
廃食用油	KNK-新2株	90	5.6	96
廃食用油	KNK-新2株/*fadH*②	92	5.5	96
パーム油	KNK-2株	100	6±1	100

FadH 強化効果として、培養初期の酸素消費速度（OUR）の立ち上がりが良くなる点、また、呼吸商（RQ）の低下時期が早くなっている点が確認できている。OUR は菌が酸素を消費する速度であり、高い方がより菌の生育や PHBH の生産速度が高いことを示している。RQ は単位酸素消費量あたりの二酸化炭素排出量を示しており、PHBH 生産が始まるタイミングで低下する値である。

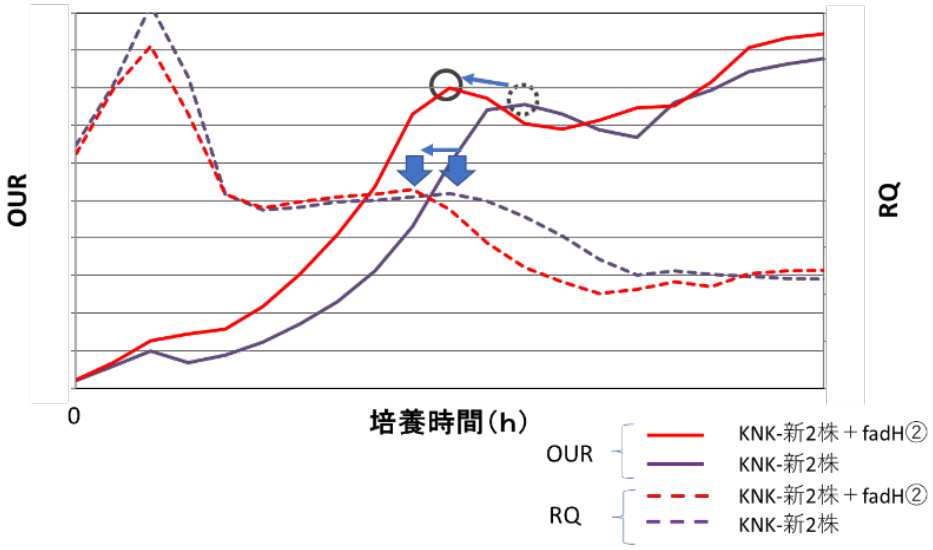


図 9　培養初期の OUR と RQ の推移

今回の PHBH 商業化実証設備培養試験においては、培養中の油脂濃度を前回 PHBH 商業化実証設備培養試験時の 2.5 wt%前後から 1.3 wt%前後へと大幅に低減できることを確認した。その結果、前回試験にて確認された顕著な発泡は低減され、培養工程の安定化が達成された。

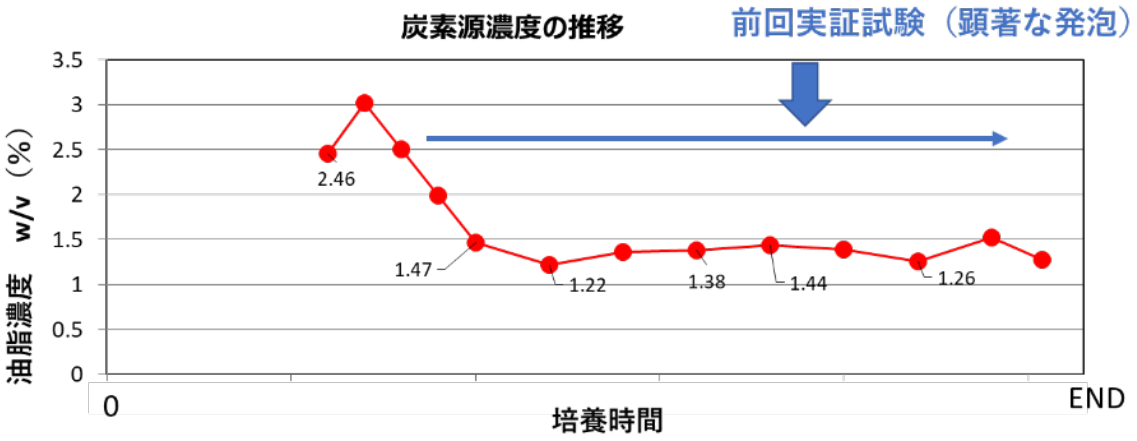


図 10　PHBH 商業化実証設備培養試験における油脂濃度推移

本年度の技術開発の結果、*fadH* 遺伝子の強化により高ヨウ素価の油脂を効率的に資化させることに成功した。本技術によって、高ヨウ素価廃食用油を工業的に効率的、かつ安定的に PHBH 原料として培養生産することが可能となった。

今回の PHBH 商業化実証設備培養試験において、生産性、収率、3HH 組成ともに目標、規格を満足し、発泡に関しても大幅に低減することに成功したが、パーム油等の低ヨウ素価油を用いた培養生産時と比較すると発泡度合いが未だに大きい状態である。今後、さらに安定した工業生産技術を確立するためには、発泡を抑制する技術開発が必要である課題が明らかとなった。

2）廃食用油受け入れ基準の策定

昨年度までの検討により、廃食用油受け入れ管理値として、ヨウ素価、酸価、色味値の 3 項目を設定できることを確認した。本年度はこの受け入れ範囲の拡大を目指した培養評価を進めた。

低ヨウ素価廃食用油の探索の過程で、劣化が極度に進行した廃食用油の入手に成功した。本廃食用油は、ヨウ素価は実績範囲内であるが、酸価が 88、アニシジン価が 191 であり、色味値も 16 と何れも過去に評価したことがない高い値であった。本廃食用油を培養することで、受け入れ範囲のさらなる拡充、精度向上を試みた。

培養評価の結果、生産性はパーム油比 66%、3HH 組成 12.4（規格 11±1 mol%）となり、本廃食用油は PHBH の原料としては使用不可であることが判った。この結果より、高度に劣化が進行した油脂はやはり原料として使用できないことが判った。次に、どの程度の劣化度であれば使用できるのかを確認するため、高劣化廃食用油/パーム油＝1/3 で混合し、評価を実施した。その結果、生産性、3HH 組成ともにパーム油同等となった。この結果により、酸価、アニシジン価がある値よりも低ければ使用できることが明らかとなった。

図 11　高劣化油廃食用油＋パームオイル（左）とパームオイル（右）

表 6　高劣化廃食用油の培養評価結果

脂肪酸（wt %）	パーム油	高劣化廃油	高劣化廃油/パーム油ブレンド1/3
カプロン酸（C6:0）	0	0	0.0
オクタン酸（C8:0）	0	1.9	0.5
カプリン酸 (10)	0	1.6	0.4
ラウリン酸 (12)	0	13.9	3.5
ミリスチン酸 (14)	1	4.7	1.9
パルミチン酸(16)	39.6	36.9	38.9
パルミトレイン酸(16:1)	0.2	0.1	0.2
ステアリン酸(18)	4.4	5.1	4.6
オレイン酸(18:1)	42.7	28.3	39.1
リノール酸(18:2)	11.2	6.4	10.0
リノレン酸(18:3)	0.2	0.2	0.2
アラキジン酸 (20)	0.4	0.3	0.4
エルカ酸(20:1)	0.2	0.1	0.2
(22-24)	0	0.5	0.1
油脂劣化指標	**油脂劣化指標**	**油脂劣化指標**	**油脂劣化指標**
酸価 (mg/g)	0.5	88	30
過酸化物価	18.6	4.6	14
ｱﾆｼｼﾞﾝ価	5.2	191	67
重合物	0.5	0	0
色味（gardner：目視）	**5**	**16**	**14**
ヨウ素価	57	36 （規格外）	**52** **（規格内）**
生産性 3 HH組成		66% （対パーム油） 12.4 (mol%) 規格外	**100%** **11.7 (mol%)** **規格内**

表 7　低ヨウ素価油の受け入れ基準実績範囲（更新後）

指標	小	大
ヨウ素価	43	65
酸価	0	16.9 → 30
色味値	4	5 → 14
過酸化物価	0	18.6
ｱﾆｼｼﾞﾝ価	5.2	40.3 → 67
重合物	0.2	5.4

本年度の検討によって、低ヨウ素価廃食用油の受け入れ基準範囲が拡大できた。また、高度に劣化が進んだ廃食用油でもブレンドによってその劣化度値を範囲内に収めることで使用可能となる可能性を示せたことは大きな進捗である。今後は、さらに多くの廃食用油を用いた使用実績づくりを進め、受け入れ基準の精度向上を進める。

また、高ヨウ素価廃食用油に関しても、昨年度に策定した実績範囲値を用いた本年度の PHBH 商業化実証設備培養試験にて問題無く培養生産が可能であったことから、策定した受け入れ範囲が適用可能であることを実証できた。

（４）まとめと課題

1）本年度の成果

本年度の技術開発の結果、*fadH* 遺伝子の強化により高ヨウ素価の油脂を効率的に資化させることに成功した。本技術によって、高ヨウ素価廃食用油を工業的に効率的、かつ安定的に PHBH 原料として培養生産することが可能となった。

また、本年度の検討によって、低ヨウ素価廃食用油の受け入れ基準範囲が拡大できた。また、高度に劣化が進んだ廃食用油でもブレンドによってその劣化度値を範囲内に収めることで使用可能となる可能性を示せたことは大きな進捗である。

2）課題と今後の検討

培養においては、発泡に関しても大幅に低減することができたが、パーム油等の低ヨウ素価油を用いた培養生産時と比較すると発泡度合いが未だに大きい状態である。今後、さらに安定した工業生産技術を確立するためには、発泡を抑制する技術開発が必要である課題が明らかとなった。さらに、今後は対パーム油比の生産性を 100%に近づけることで廃食用油のメリットを最大化できるよう、来期稼働する廃食用油簡易精製設備を活用し検討を進めるとともに、幅広いグレードへの適用検討も合わせて進める。

2.1.2 廃食用油の事前精製及びポリマー精製技術の開発

（1）目的

廃食用油は一般家庭・食品工場・外食産業等から回収される生活系・事業系廃食用油はパームオイルと比べて性状が不均一であり、また食塩等の調味料、揚げ物のカス等の固形分を含んでいたり、有臭・有色であったり等、PHBH 原料として利用するためには適切な前処理が必要となる。よって、廃食用油を単独またはパーム油に混合して原料として利用する状況を想定し、PHBH 生成菌が効率的に PHBH を生産するために必要な廃食用油の前処理技術の検討を行うこととした。あわせて、排水処理設備での低分子シロキサン除去技術の検討を行うこととした。

2020 年度は、廃食用油を利用するための前処理方法の検討と排水処理設備での低分子シロキサン除去技術の検討および設備設計のための分析、ラボテスト、メーカーテストを実施し、詳細見積りを行った。2021 年度は、廃食用油を PHBH 原料として利用するための実証設備として、廃食用油簡易精製設備と排水 Si 除去設備の取得工事を進めている。また、最終製品の色味に影響を与える因子の分析を行った。さらに、廃食用油を原料とした PHBH 商業化実証設備精製試験を行った。精製試験は PHBH 精製処方に改良を加えることで、廃食用油を主原料とした PHBH 生産における目標品質、生産性確保を目的とした。

（2）方法

以下に廃食用油利用検討の全体フローを示す。このうち、ここでは「前処理」ステップと「ポリマー精製」ステップの検討を行った。

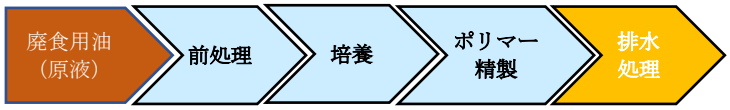


図 12　廃食用油利用検討の全体フロー

1）廃食用油簡易精製設備及び排水 Si 除去設備について

① 廃食用油簡易精製設備

パーム系廃食用油と非パーム系廃食用油はヨウ素価に違いがあり、培養で目標の PHBH 組成を確保するためには、それぞれの廃食用油に適した菌株を使い分ける必要がある。そのため本供給設備ではパーム系、非パーム系それぞれの廃食用油を分けて培養槽に供給可能な仕様とした。

② 排水 Si 除去設備

これまでの廃食用油のサンプル評価により、廃食用油に含まれるシリコン消泡剤が最大 5 mg/L と想定しており、発生するシロキサンが精製工程を経て排水嫌気処理後の排ガス中に全量持ち込まれる前提としている。その場合、排ガス中には最大 3 mg/L のシロキサンが含まれると推定される。（シロキサンのボイラー配管内への蓄積により、燃焼トラブルを引き起こすリスクを懸念）。よってシロキサン最大発生量が除去可能な設備仕様とした。

2）各社廃食用油の適用に向けた精製処方検討

「ポリマー精製」の検討には、受け入れた廃食用油を前処理し培養させた培養後ブロスを用いた。

PHBH は菌体内で生成されるため、培養後ブロスは表面に菌体成分を有していることから、この菌体成分をポリマーから引き剥がした後、洗浄し、不純物の少ない PHBH を得る操作が精製である（次図）。様々な廃食用油を使用した場合でも、不純物が少なく品質規格に合格する PHBH を得るための精製手法の検討を行った。

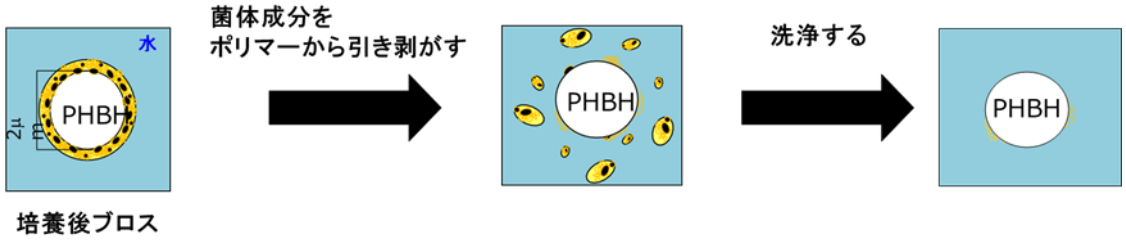


図 13　PHBH 精製フロー（概要）

3）PHBH の色味（YI）に影響を与える廃食用油成分の分析

精製した PHBH を用いて製品化した際に、着色度合いが問題になるため、YI（Yellow Index：ポリマー成型加工時の熱着色の度合い）の基準（社内規定：<20）を設定した。様々な廃食用油を評価した結果、PHBH パウダーの YI にバラツキがあることが分かった。この YI に影響を与える因子を特定することにより、将来的に、精製処方の更なる高度化に繋がると考えている。我々は高 YI 原因物質を特定するために、廃食用油、培養ブロス、パウダーの成分分析を行い、YI との関連性を下記のとおり調査した。

【分析対象】メイラード反応関与成分（糖類、アミノ酸）、着色成分（トコフェロール類等）
【分析方法】糖類・アミノ酸：HPLC（高速液クロ）／LC-MS/MS（液クロ質量分析計）
着色成分：LC-TOF/MS（液クロ飛行時間型質量分析計）

4）PHBH 商業化実証設備精製試験により廃食用油から生産した PHBH の品質評価

ラボで確立した精製処方を用いて、PHBH 商業化実証設備精製試験による品質評価実証を行った。まずパーム系／非パーム系廃食用油を用いて、硬さに特化した製品を対象としたグレード I の PHBH 商業化実証設備精製試験による品質評価を行った。さらに、付加価値の高い柔らかさに特化した製品を対象としたグレードⅡのユーステストを実施した。

（３）結果

1）廃食用油簡易精製設備及び排水 Si 除去設備について

① 廃食用油簡易精製設備

廃食用油簡易精製設備は、原料タンク（38 m3）、供給タンク（38 m3）、及びろ過装置（2 基）を主とした 1 ユニットの設備を 2 系列化し、それぞれのユニットから培養槽に廃食用油を供給することとした。概略を次図に示す。

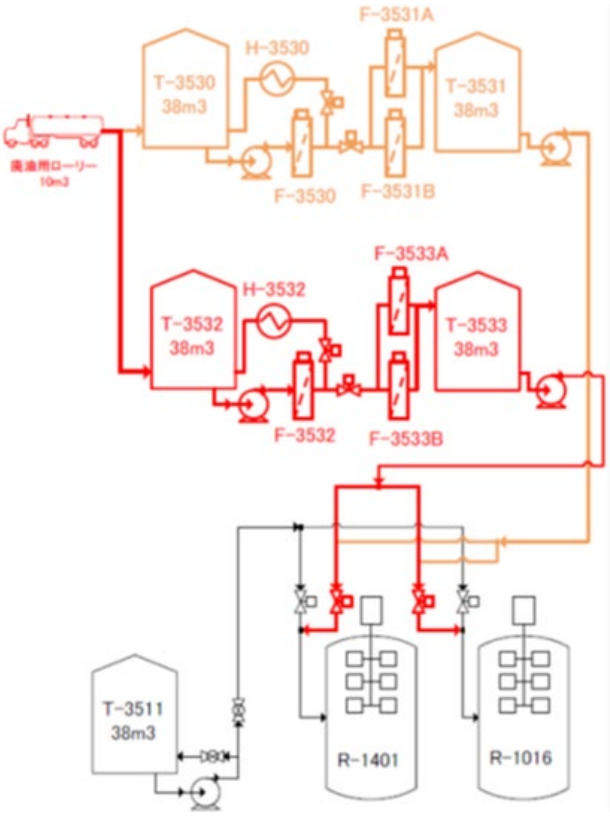


図 14　廃食用油簡易精製設備（概略）

② 排水 Si 除去設備

排水 Si 除去設備は、シロキサン除去のため活性炭 150kg（1 年間有効を想定）が充填された吸着塔 2 基を乾式脱硫とボイラー間の配管にバイパス設置することとした。概略を次図に示す。

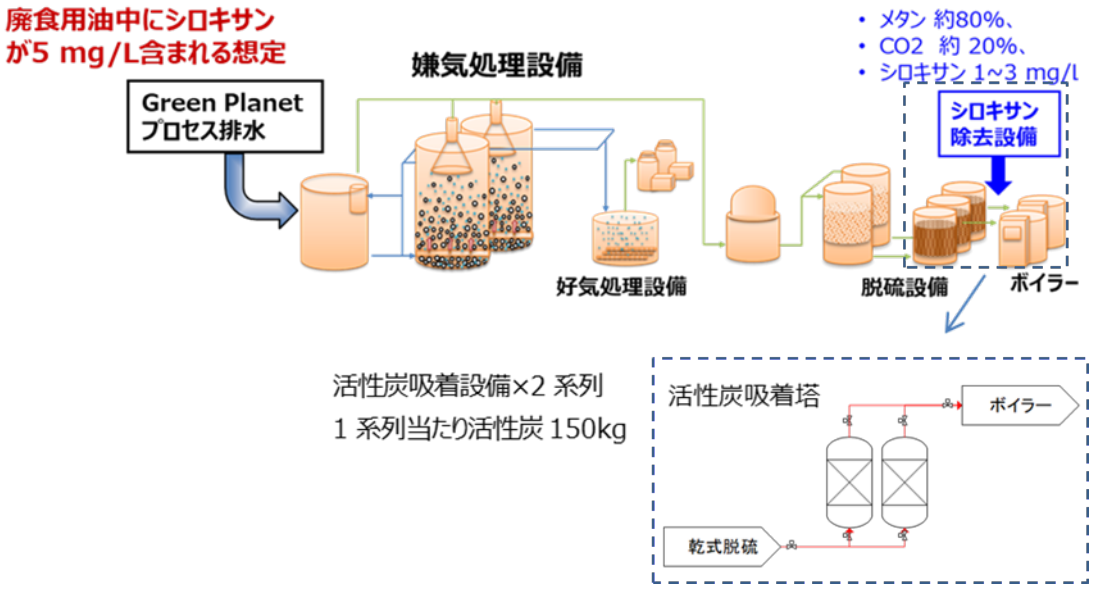


図 15　排水 Si 除去設備（概略）

2）各社廃食用油の適用に向けた精製処方検討

多様な組成からなる廃食用油を適用するにあたり、どのような物質が YI（Yellow Index：ポリマー成型加工時の熱着色の度合い（社内規定：<20））、熱安定性等に影響を与えているかを解明し、将来的に PHBH 商業化実証設備精製試験にて目的品質の PHBH が安定生産できるよう、精製処方の更なる高度化につなげていく計画である。

様々な廃食用油を精製／評価すると、昨年度、確立した新処方 3 においても YI が高い場合があることが分かった。検討を重ね、YI を 20 未満に低減可能とする新処方 4 を確立した（次表）。

表 8　複数の廃食用油による各処方と YI の関係

油種	精製方法	YI
パーム油	従来法	15
廃食用油L	新処方３	17
廃食用油M	新処方３	10
廃食用油N	新処方３	28
	新処方４	19
廃食用油O	新処方３	21
	新処方４	12
廃食用油P	新処方３	23
	新処方４	13

3）PHBH の色味（YI）に影響を与える成分の分析

品質を安定化させるためには、YI に影響を及ぼす因子を特定する必要がある。そこで廃食用油、培養ブロス、PHBH パウダー中に含まれる成分（アミノ酸、糖類、着色物質（トコフェノール類等））の分析を行った。結果、廃食用油、培養ブロス中の成分から YI との関連性を見出すことはできなかったが、PHBH パウダーから検出された着色物質（トコフェロール類等）濃度には YI との相関性が示唆された。また、同じ培養ブロスから得られた PHBH パウダーでも精製処方により着色物質及び YI が低くなったことが確認された。

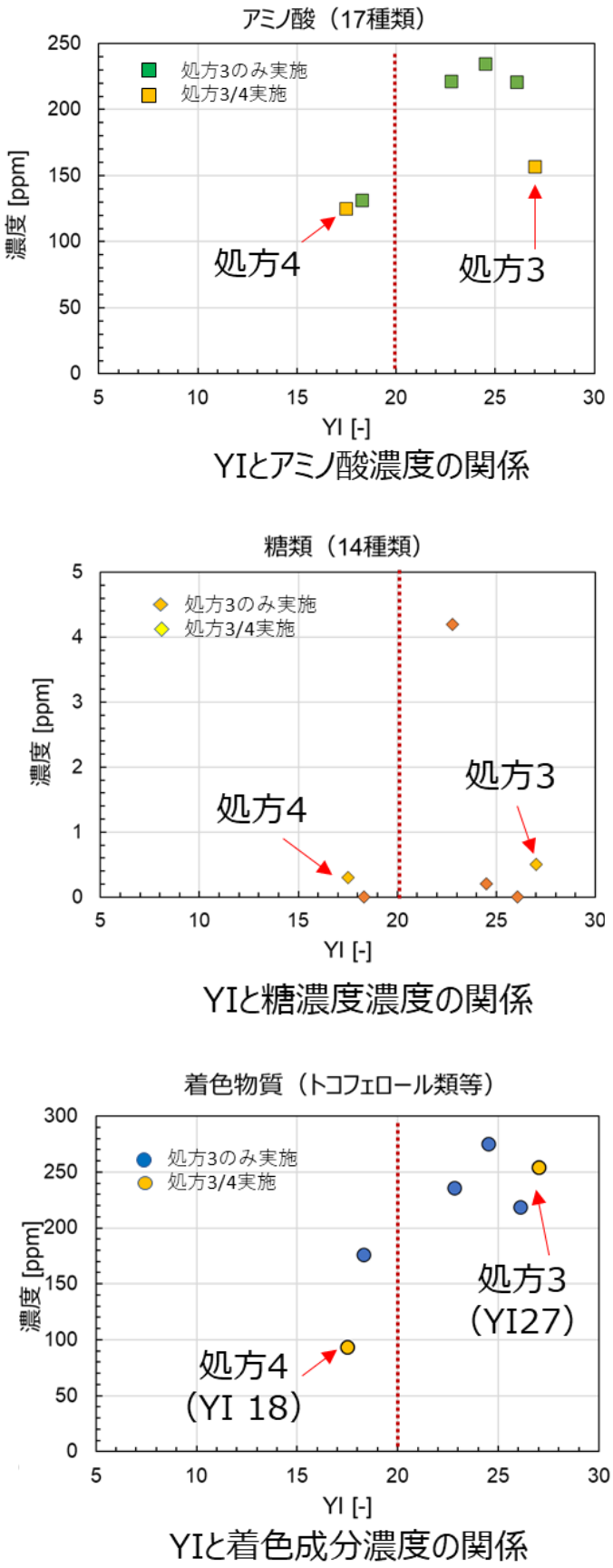


図 16　YI と各分析結果の関係（パウダー分析）

4）PHBH 商業化実証設備精製試験により廃食用油から生産した PHBH の品質評価

まずパーム系廃食油を用いて、硬さに特化した製品を対象としたグレードⅠの PHBH（硬質グレード）で新処方 3 による PHBH 商業化実証設備精製試験を行い、品質評価を行った。結果、パーム油を用いた場合と同様のパウダー品質であることを確認した（次表）。

表 9　パーム系廃食用油を用いた PHBH 商業化実証設備精製試験品質結果（グレードⅠ）

検査項目	単位	目標値	分析結果 (廃食油L)	分析結果 (廃食油S)	識別
残存水分	%	0.3 以下	**0.02**	**0.22**	適合
分子量(Mw)	-	35 万 ～ 50 万	**39 万**	**39 万**	適合
核剤量	wt%	-	**-**	**-**	-
3HH組成	mol%	5.0 ～ 7.0	**5.5**	**5.5**	適合
滞留熱安定性 (Mw保持率)	%	70 以上	**83**	**85**	適合
YI	-	20 以下	**13**	**13**	適合
残タンパク	ppm	2000 以下	**926**	**640**	適合
嵩比重	g/ml	0.40 以上	**0.41**	**0.42**	適合
粒子径	μm	100 以上	**149**	**136**	適合

次に、非パーム系廃食用油を用いた PHBH 商業化実証設備精製試験も実施し、品質に問題ないことを確認した（次表）。

表 10　非パーム系廃食用油を用いた PHBH 商業化実証設備精製試験品質結果（グレードⅠ）

検査項目	単位	目標値	分析結果	識別
残存水分	%	0.3 以下	0.07	適合
分子量(Mw)	-	35 万 ～ 50 万	40 万	適合
核剤量	wt%	-		
3HH組成	mol%	5.0 ～ 7.0		
滞留熱安定性 (Mw保持率)	%	70 以上	86	適合
YI	-	20 以下	13	適合
残タンパク	ppm	2000 以下		
嵩比重	g/ml	0.40 以上	0.42	適合
粒子径	μm	100 以上	148	適合

さらに付加価値の高い、柔らかさに特化した製品を対象としたグレードⅡの PHBH（軟質グレード）においてもユーステストを行った。グレードⅡは、グレードⅠと菌株、培養／精製方法が異なるものであり、YI の社内基準はパーム油由来 PHBH と同等の 30 未満に設定した。結果、新処方 4 の適用により、精製挙動に問題なく、品質 YI も基準達成を確認した（次表）。

表 11　非パーム系廃食用油を用いたユーステスト結果（グレードⅡ）

油種	精製方法	YI
廃食用油R	新処方３	38
	新処方４	26

（４）まとめと課題

廃食用油を用いた PHBH 商業化実証設備精製試験により、運転面・品質面で問題のないことを確認できたことから、ポリマー精製のスケールアップ技術が確立できた。

2.2 PHBH 原料として利用するための更なる廃食用油の回収率向上を目指した収集方法に関する検討

2.2.1 目的

これまで行ってきた廃食用油の回収率向上を目指した回収方法の検討における調査の結果、各事業者はそれぞれの事業形態に合わせた様々な方法で食用油を排出していることが明らかとなった。また、食用油の品質も、事業内容等により異なっていることも明らかとなった。事業系廃食用油は、日々、多量に排出されることから、このような多様な排出形態を踏まえた効率的な回収計画が必要となる。

近年、Internet of Things（IoT）技術の普及・発達により、広域のリアルタイム情報を効率的に収集できるようになっていることを受け、本検討では、IoT 技術を用いた事業者系の廃食用油の排出状況を把握することを前提として、そのようなデータを利用した回収計画立案とシステムのあり方を明らかにすることを目的とする。

2.2.2 方法

これまでの調査結果から、回収計画立案及びシステム化に求められる要件を抽出し、それらを実現するシステム構成を検討した。その上で、システムの主要な構成要素について、その機能と実現に向けた課題について検討した、これらを踏まえたシステムの実現に至るまでに必要となる調査・研究開発等のロードマップを検討した。

2.2.3 結果

（1）京都市周辺の廃食用油の排出状況の推定

1）全国の廃食用油の発生状況

廃食用油の年間消費量は約 248 万 t/年と推定され、外食産業・食品工業から発生する事業系の廃食用油は消費後、42 万 t/年が発生するとされており、その多くは現状では、飼料用か工業用等に利用され、4 万 t/年が再生不能として廃棄されている。一方、一般家庭から発生する廃食用油は、10 万 t/年が発生し、自治体で回収されていないものは廃棄焼却処理されている。

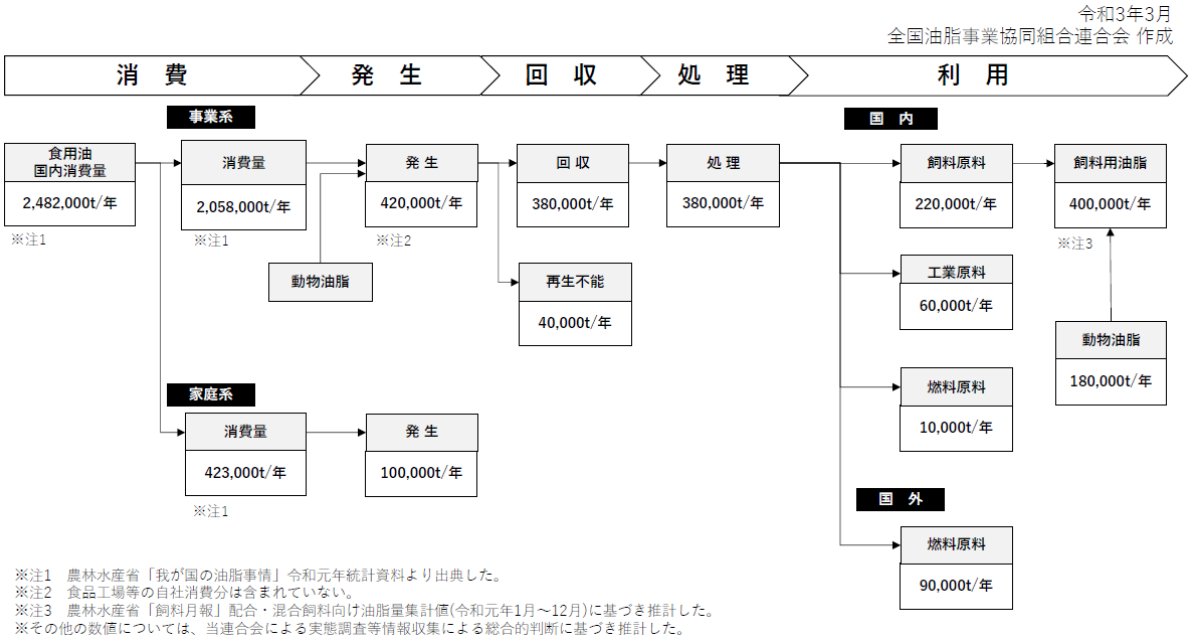


図　17　我が国における廃食用油の流れ

出典：全国油脂事業協同組合連合会 HP（https://zenyuren.or.jp/document/210330_ucorecycleflow_r2.pdf）「UC オイルのリサイクルの流れ図（全国油脂事業協同組合連合会、令和２年版）」

2）京都市の廃食用油の発生状況

京都市の家庭系の廃食用油の回収状況は次に示す状況で、2016 年度をピークとして回収量は減少し、2020 年度の回収量は約 162 t/年となっている。

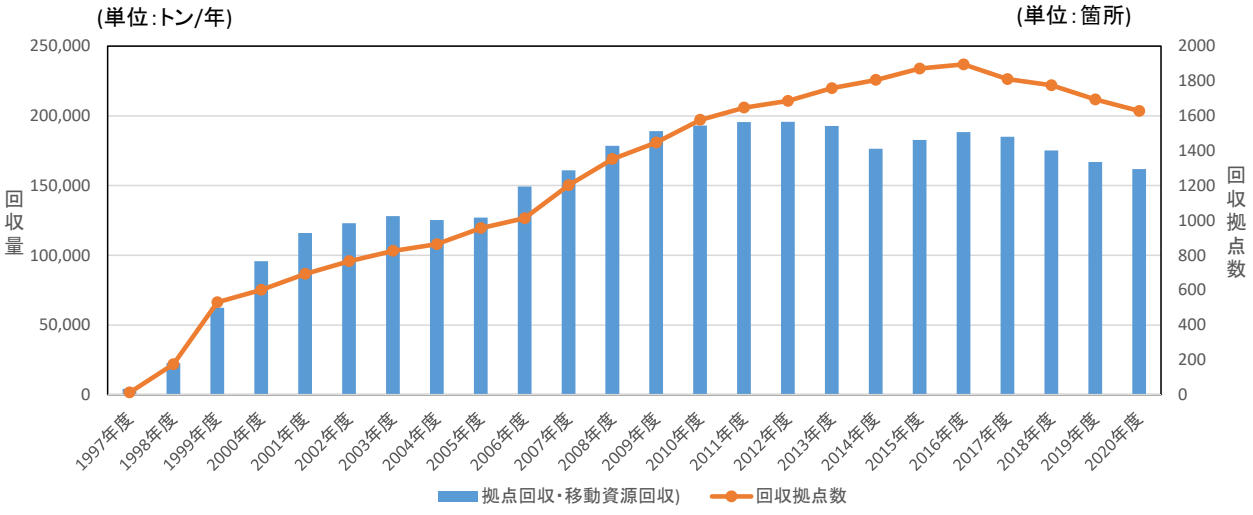


図　18　京都市の家庭系廃食用油回収状況

3）京都府、京都市の廃食用油の発生量

全国の発生状況を元に原単位を想定し、家庭系、事業系の京都府、京都市での発生量を、推定すると、京都府では約 1 万 5 千 t/年、京都市では約 9.3 千 t/年の廃食用油が発生すると考えられる。

表 12　京都府、京都市の廃食用油発生量の想定

単位：t/年

分類	京都府	京都市
家庭系	2,042	1,111
事業系[注)]	13,156	8,184
合計	15,199	9,295

注）事業系は廃食用油の発生量であり、利用されているものも含む

（２）システムの位置づけ

家庭系の廃食用油は、行政により回収方法が概ね確立されているが、事業系については排出形態が様々であり、効率的な回収方法の構築が求められる。また、上記の結果より、事業系が全体量の 9 割近くを占めていることが判明した。以上より、事業系の廃食用油を対象に、排出～回収～加工の一連のプロセスにおける回収計画の立案を自動化するシステムの検討を行った。

ここでいう回収計画とは、PHBH 原料としての廃食用油の需給予測に基づいて、1 日等の単位で作成される回収対象となる排出事業者と個別の回収量、および回収経路のことであり、実際に回収を行う回収事業者がこの計画に基づいて人員やタンクローリー等の輸送車両の手配を行い、計画に従って排出事業者から廃食用油を回収する。

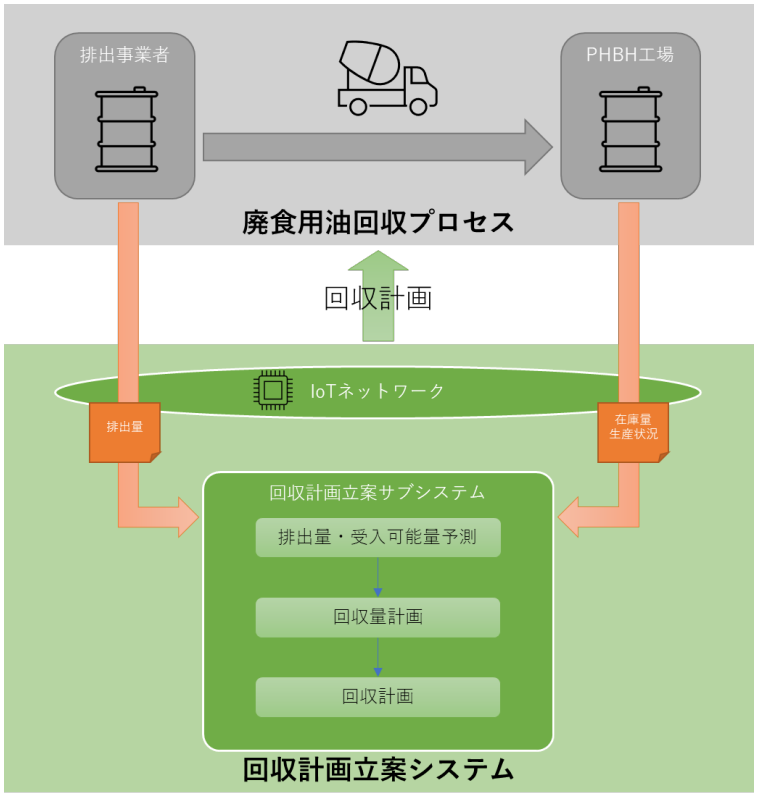


図 19　回収システムの位置づけ

（３）必要とされる機能

これまでの検討結果から、本システムの機能として、以下の各項目が必要と考えられる。

1）廃食用油排出事業者の排出量予測

事業者が排出する廃食用油の量を事前に予測する。事業者が排出する食用油の量は定常性や周期性がある。そのため、家庭から排出される廃食用油に比べ、より事前の排出量予測が可能であると考えられるので IoT 技術等を利用して各事業者の排出状況をリアルタイムで把握し、各事業者の排出量を過去の時系列データから予測モデルを構築するなどにより、事前に正確な排出量予測を行う事により効率化を図る。

2）PHBH 工場の受入可能量予測

一方、PHBH 生産工場の処理能力にも限度があるため、PHBH 生産工場側の受け入れ能力とのバランスをとった回収が求められる。そこで、IoT 技術を利用し、PHBH の原材料である廃食用油の在庫量をリアルタイムで把握し、工場での生産状況を踏まえて新規の受入可能量を予測する。

3）回収量計画の立案

以上の予測に基づき、需給バランスを考慮して回収量の計画を立案する。回収にかかる時間等を考慮すると 1 日等の単位での計画とする。事前予測として何日前までの予測を行うかは、予測精度の評価に加えて、人員や車両等の手配、排出事業者等との調整に要する期間などを考慮する必要がある。

4）回収計画の立案

立案した回収量を、実際の排出事業者から回収するための回収計画を立案する。各排出事業者は、タンクや一斗缶・ペール缶など、それぞれの排出状況に見合った形態で廃食用油を蓄積している。そこで、排出量予測だけではなく、各事業者の蓄積余力を踏まえて、どの排出事業者から、どのような経路で回収するか、最適化すべき評価項目（コスト、環境負荷等）を設定した上で決定する。

5）PHBH 原料の品質管理

排出業者の業種により、質や劣化度の異なる廃食用油があることから、広範な事業者から回収するためには、これらの混合回収の可否についても検討が必要である。そのため、業種や過去の劣化記録、IoT によるリアルタイムの劣化状況などに基づいて、PHBH 原料としての廃食用油の品質管理も可能であることが期待される。

（４）システム構成

想定されるシステム構成を以下に示す。このシステムは、大きく 3 つのサブシステムから構成される。廃食用油量収集サブシステムは、排出事業者側・工場側双方で蓄積している油量をリアルタイムで測定・収集し、時系列データとして蓄積する。このデータに基づき、排出・受入可能量予測サブシステムでは、ある時点から数日後の排出量・受入可能量を予測する。回収計画立案サブシステムは、この予測に基づいて、その日の回収量を決定し、その量をどの排出事業者からどのようにして回収するか、決定する。本システムの出力は、この回収計画となる。

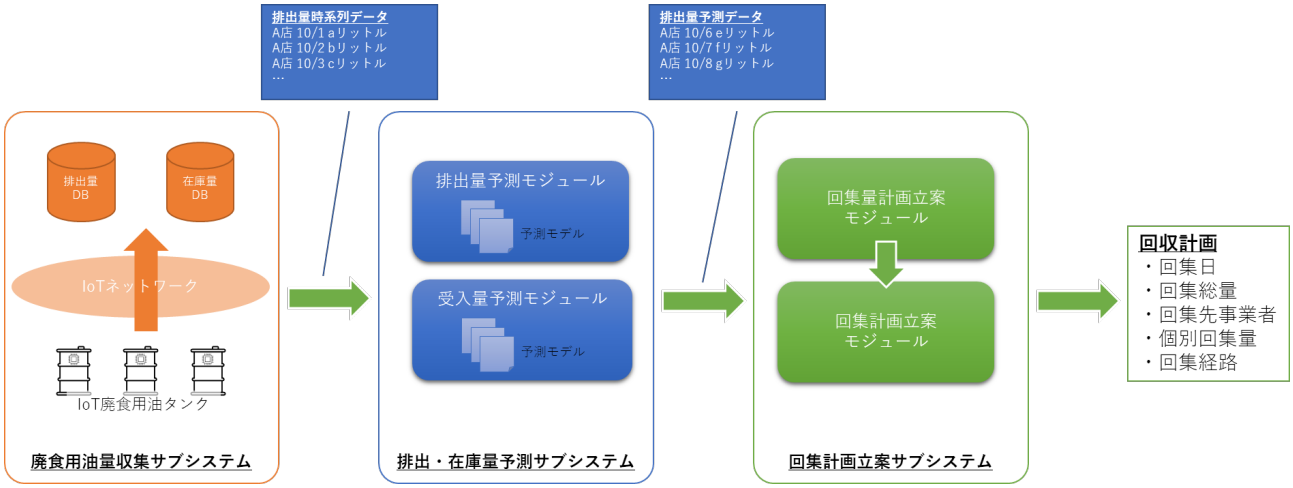


図 20　システム構成図

以下で、個々のサブシステムの構成要素の詳細を述べる。

1）廃食用油量収集サブシステム

① IoT 廃食用油タンク

IoT 化される廃食用油タンクに必要とされる機能は、①事業所の貯蔵タンク内の廃食用油の量をインターネット経由で回収事業者に通知する機能、ならびに②タンク内の廃食用油の劣化度（酸化に加え、過酸化物価、アニシジン価、重合物価など）を継続的に監視し、回収事業者による回収時に通知する機能、の 2 つが考えられる。

廃食用油の量は、食品加工工場等で用いられている大型貯蔵タンクや専用ステンレス製タンクの内部に、液面高を測定するフロート式レベルセンサーを使用することが考えられる。ドラム缶（200 リットル）、ペール缶（27 リットル）、一斗缶（18 リットル）などについては、その重量を測定することでも、廃食用油の量を監視することができる。

また廃食用油の劣化度は、「A.酸化度」については、廃食用油の温度とコンダクタンス（電気抵抗の逆数）、「B.過酸化物価、重合物価」については、極性化合物（TPM）値を測定するセンサ（セラミック基板に串型の導電体によるコンデンサプレートを搭載）を用い、廃食用油の温度とキャパシタンス（電気容量）を計測することで継続的な監視が可能である。これらの廃食用油の「温度」「コンダクタンス」「キャパシタンス」は、組込み計測用途に用いられている安価なマイコン（CPU）で十分な計測精度を達成できると考えられる。

② IoT ネットワーク

前述した事業所で貯蔵している廃食用油について、

「A.量（体積あるいは重量）」をインターネット回線経由で回収事業者に通知、前述の温度やコンダクタンス等から「B. 劣化度」を計算し、回収時に回収事業者に通知する IoT ネットワークを構成することにより廃食用油の回収効率を高めることが可能になる。A.は回収量の予測に使用し、B.は回収時に他の油と混合してよいかの判断に使用する。

この IoT ネットワークについて考えうる構成として

ｉ)廃食用油の「量」「温度」「コンダクタンス」「キャパシタンス」を計測する「廃食用油タンク・センサーモジュール（マイコン内蔵）」

ⅱ)「廃食用油タンク・センサーモジュール」で計測した値に基づき、回収事業者にその値を引き渡す「インターネット接続用モジュール（高性能 MPU 内蔵)」

ⅲ)「廃食用油タンク・センサーモジュール」の値を、回収時に回収事業者に引き渡す「回収時情報収集モジュール（マイコン内蔵)」

を用いた構成が考えうる。

この 3 つのモジュール間の通信については、

A. ⅰ)からⅱ)のモジュールへの情報の転送には BLE (Bluetooth Low Energy) 無線通信
B. ⅱ)から回収事業者への情報の転送には「4G もしくは 5G の携帯回線（モデム)」あるいは光ファイバによる有線インターネット接続
C. ⅲ)から回収事業者への情報（劣化度等）通知には、BLE 無線通信あるいは赤外線通信を使用することが想定される。

なお、詳細な構成については、事業所と回収事業者の回収の方法とその手順を解析し、自動化すべき手順を解析することが必要である。また、事業所の通信環境等、設置環境についても考慮する必要がある。

2）排出・在庫量予測サブシステム

① 排出量予測モジュール

将来の排出量の予測は、過去の排出量の時系列データに基づいて構築される予測モデルを用いて、予測時点で収集されている排出量データを情報として予測する。本システムでは、最終的にどの事業者からどの程度の廃食用油回収を行うか決定する必要があることから、このようなモデルは事業者ごとに構築することが想定される。

この予測モデルとしては、ⅰ)統計モデル、ⅱ)深層学習モデルが考えられる。

i) 統計モデル

自己回帰（AR: Autoregression）モデル部分と移動平均（MA: Moving Average）モデルを組み合わせた自己回帰移動平均（ARMA）モデル、または ARMA モデルにデータ差分を加えた ARIMA モデル、さらに季節変動を加えた SARIMA モデル等から、排出量の傾向を分析し、精度良くフィットするモデルを選択する。

ii) 深層学習モデル

より複雑な時系列での排出パターンを想定して、時系列データを扱う構造を取り込んだ RNN（Recurrent Neural Network）モデルを用いる。モデルの構築は、A) モデルの構造定義と、B) モデルの学習の 2 つのパートからなる。モデルの構造定義では、RNN のネットワーク構造を指定する。具体的には、入力層の性質、出力層の性質、隠れ層の性質、隠れ層のノード数及びノードの性質等を指定する。IoT 技術を利用した過去の排出量時系列データを入力、予測したい時点の排出量予測データを出力と設定して学習を行う。

統計モデルによって一定の精度で排出量を予測できる想定であるが、IoT 技術によって得られる大量のデータを学習させた深層学習モデルを使うことで、複雑なモデルによる高精度な排出量の予測を期待できる。

② 受入量予測モジュール

IoT 技術により把握した現在の在庫量に、予測したい時点までに受け入れる量を加え、予測したい時点までに PHBH 生産により使用した量を引いた量を予測したい時点の在庫量とする。施設の最大受け入れ量から予測したい時点の在庫量を差し引いた量が予測したい時点の受け入れ可能な量となる。将来の受け入れ量は排出量予測モジュールから推定し、PHBH 生産による減少量は工場の生産計画から取得する。

3）回収計画立案サブシステム

以上により予測した排出量・受入量に基づいて、回収計画を立案する。

① 回収量計画立案サブモジュール

まず、想定される受入量をどの事業者に、どの程度割り当てるかを算出する。この算出は、割当量をパラメータとする目的関数を、回収において関係する制約条件の下で最適化する、最適化問題として算出することが想定される。このような目的関数や制約条件として、例えば、以下のような項目が考えられる。

・ 保管可能量（排出事業者）
排出事業者ごとに、回収されなかった場合に保管できる最大量
・ 輸送可能量
回収日に手配可能な輸送車両に積載できる廃食用油の最大量
・ 廃食用油の目標品質

混合回収したときの劣化度の許容品質

② 回収計画立案サブモジュール

次に、このようにして回収対象となった事業者から廃食用油を回収する最適な順序を作成する。特に回収経路の最適化が目的であることから、以下のような項目が目的関数や制約条件として考えられる。

・ 環境負荷（走行距離、輸送量、燃費等）
輸送距離や、輸送量×輸送距離、それに伴う燃料の使用量など、環境負荷に関わる値
・ 回収時間
回収にかけられる時間
・ 回収コスト
回収予算
・ 人員
当日の回収にあてられる人員
・ 輸送車両
当日手配可能な輸送車両数・種別

（５）システム実用化に向けた課題

本システムに想定される構成は以上のようなものであるが、実用的なシステムの展開・運用に向けては、以下のような課題が想定される。

1）IoT 装置

① 装置の設計

屋外のような場所で、かつ、油の多い環境に設置される可能性が高いことから、耐候性等も考慮した装置の設計が必要である。また、電源についても、商用電源が得られない可能性も高く、電池等の利用も想定されることから、省電力化を図る必要がある。

② 測定間隔

精度の高い予測を行うためには、どの程度の間隔で油量測定を行うか、検証する必要がある。測定間隔は、上記の消費電力に直結することから、本システムの目的に照らし合わせて最適な測定間隔を設定する必要がある。

③ 運用体制の構築

長期にわたって安定的に多数の IoT 装置を運用するためには、個々の装置を遠隔モニタリングする仕組みが必要である。特に、故障や電源断によるデータの欠測は予測精度に影響することから、的確な対応がとれる体制の構築が望ましい。

2）予測モデル

① モデルの精度向上

本システムでは、事業者の排出を予測するモデル構築を想定しているが、排出量には一定の周期性・季節性があると予想される。これらを示す十分なデータが得られていない状態では、精度の高いモデル構築は困難であることから、長期的に収集したデータに基づいて、モデルを継続的に改善していくことが期待される。

② 回収実績との乖離

このような十分な精度を達成していない予測モデルの出力と回収実績との乖離がある場合に、関連する各事業者がどのようにこの乖離を吸収するのか、また、どの程度の乖離まで許容できるのかは、実用化にあたっては、あらかじめ取り決めておく必要がある。

3）現実的な回収計画の立案

機械的に生成される回収計画は、経路が複雑すぎたり、極端な割り当てを行ったりするなど、現実的でない計画になる可能性がある。そのため、機械的に生成された回収計画をどう現実的に運用するかについても、考慮する必要がある。なお、計画を生成するアルゴリズムも、特に対象となる排出事業者が増えた場合に、現実的な時間で計算が終了する対処が必要である。

4）システム運用にかかるコスト

広域の IoT システムの運用を安定的に行うためには、通常、多額のコストがかかると考えられることから、実用化に向けては費用対効果の検証が必要であると考えられる。本システムの特性として、定期的に回収担当者が訪問する点があることから、改修担当者に装置のメンテナンスまで担ってもらうなど、コスト削減の方策まで含めて、実証実験段階で検証するなどが考えられる。

（６）システムの実証に向けたロードマップ

ここでは､以上のような IoT を活用した廃食用油回収計画立案システムの実現に向けたロードマップを示す。システムの実証のためには、 前項で述べたような課題について必要な調査を行った上で、実際のフィールドを想定して 5 節で述べたシステムを開発し、実際に展開・運用・評価しなければならない。 ここで示すロードマップでは、これらの調査から運用までのそれぞれについて、実施すべき項目を明らかにする。

ロードマップを下図に示す。

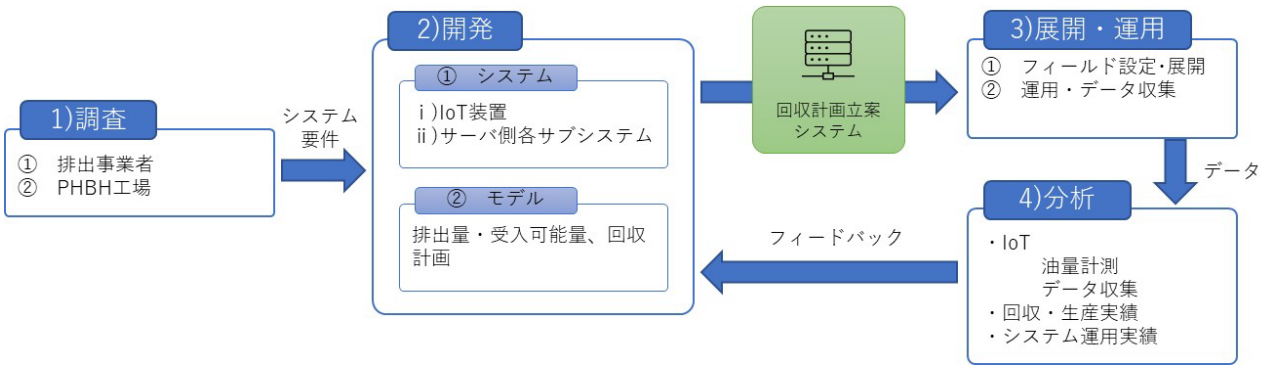


図 21 システム実証のロードマップ

1）調査

排出事業者・工場それぞれについて、システム開発や IoT 装置の製作に必要となる廃食用油の排出・利用状況について、詳細な調査を行う。調査は、現地の視察や事業者らに対するヒアリング、事業者らからの資料提供により行うことが考えられる。これらの結果は、システムの要件となる。

① 排出事業者

事業形態・規模等にバリエーションがあることから、それらのバリエーションの洗い出しも含めた排出状況の調査を行う。以下のような点で、バリエーションが想定される。

- 事業における繁忙期・閑散期
- 排出量の年間での変動
- 排出タイミング
- 廃食用油の保管状況（保管形態、環境など）

② PHBH 工場

PHBH 生産をプラント化した場合に見込まれる廃食用油の消費量と、PHBH の日産量などを想定し、生産規模にあわせた廃食用油の需要量の検討を行う。

2）開発

① システム

本システムは大きく IoT 装置とサーバ側で実行する各サブシステムに分かれている。それぞれの開発の概要は以下の通りと想定される。

i) IoT 装置

設置環境や排出方法に合わせて最適な油量計測 IoT 装置を開発する。多数の拠点に設置するためには、個別の環境に合わせたものを作成するのは困難であることから、例えば以下のような点について類型化を行い、組み替えることで適切な計測が可能なものであることが期待される。

- 計測方式
- 給電方式
- 通信方式

ii) サーバ側各サブシステム

・データベース

IoT 装置で計測したデータを蓄積するデータベース。長期的なデータを蓄積し、予測に利用可能とする。

・ソフトウェア

データベースに蓄積されたデータを使用し、計画を立案するソフトウェア。次項で述べるモデルを実装する。

② モデル

システムのソフトウェアとは別に、廃食用油の供給や需要の予測と、それに基づいた収集計画の立案を行うモデルの構築も行う必要がある。いずれのモデルについても、調査等によって明らかになった排出事業者、工場、および回収事業者のそれぞれの状況を踏まえ、目標とする予測精度や日数などを決定し、それに向けた構築を行う。ロードマップ図に示したように、当初は調査によって得られた情報に基づいて開発することになるが、初期段階ではデータが十分に得られていないことから、精度は限られる。そのため、後述する運用・分析段階で得られたデータ・知見をフィードバックし、随時、モデルの改善を図っていく必要がある。

3）展開・運用

このようにして開発したシステムを実フィールドに展開し、運用する。

① フィールド設定・展開

適切な地域を設定し、開発したシステムを展開する。システムを展開する地域の選定、広さ、参加事業者数等は、工場の生産能力や、回収にかかる労力や環境への負荷等とのバランスから決定する。

② 運用・データ収集

実際にシステムを運用し、PHBH の生産を行う。

先に述べたように、予測・立案モデルの改善には長期的なデータの蓄積が必要である。そのため、実証段階であっても長期にわたる運用が想定される。故障や障害に対して適切に対応可能な体制を整える必要がある。また、当初のモデル構築に必要であれば、IoT による排出量計測のみを先行して行うことも、考慮すべきである。

4）分析

上記の運用段階で得られた IoT データや回収・生産実績、およびシステムの運用実績を分析し、より実情に即したシステムとするためのフィードバックを行う。当初の予測モデルやシステム仕様は、調査段階に作成される要件に従って作成されるが、特に廃食用油を排出する事業者らは、一般に排出量や時期を定量的に把握していないと考えられ、精度は期待できない。IoT を用いた計測の自動化は、このような定量的な把握を容易にし、精度の改善に貢献する。

2.2.4 まとめと課題

本事業におけるこれまでの調査結果を踏まえて、IoT を利用した回収計画立案システムのあり方を検討し、その実現に向けて必要となる調査・開発等をロードマップとして示した。

PHBH 原料としての廃食用油を安定的に供給するためには、広範な排出事業者の廃食用油回収への参加が必要である。そのような回収を支援するシステムは、事業規模・内容が多岐にわたる排出事業者に適応可能でなければならない。まず、IoT システムでは、設置環境の実情に合わせた装置の設計・セットアップが必要となる。これまでの調査で明らかになったように、排出事業者での廃食用油の保管場所・状態は様々であり、これらに対応できる柔軟性が求められる。

また、多数の排出事業者の参加を得ることで、広域かつ多地点でのシステム展開が求められる。システムの実用化にあたっては、地理的に現実的な回収計画の立案に加えて、各排出事業者に分散した IoT デバイスの長期的・持続的な運用体制の構築も考慮する必要がある。これらは、展開地域の地理や交通環境などの制約を踏まえる必要があることから、システムの実証にあたっては、このような制約の影響を評価可能な地域で実験を行うことが望まれる。

一方、多数の排出事業者の参加の下、排出状況のデータを蓄積することにより予測モデルの精度向上が期待できる。特に、事業形態により、排出状況には年単位などでの一定のトレンドがあると考えられることから、長期的なデータを収集することが望ましい。システムの実用化に向けては、このような設置箇所の実態の把握や、長期的なデータ回収、それらに基づいたモデルの改善など、ロードマップに示したサイクルを継続的・長期的に行っていくことが期待される。

2.3 廃食用油以外の国内外の油脂源の調達可能性及び食料と競合しないジャトロファ等の油糧植物の国内での栽培と特に国内中山間地（耕作放棄地）での原料栽培の検討

2.3.1 ジャトロファ等の油脂植物

PHA 系バイオプラスチック原料の多様化の観点から、廃食用油以外の国内外の油脂源として、油脂作物であるジャトロファ（*Jatropha curcas*）等について、その調達可能性に関する検討を行うことを目的とする。具体的には、廃棄物焼却施設やバイオガス化施設からの排熱、排ガス中の CO_2、メタン発酵消化液等を活用した国内中山間地域における温室栽培システムの有効性を検証するとともに、全体経費の低コスト化の可能性を実証することを目指す。

令和３年度は、ジャトロファ栽培については、令和 2 年度までに構築した実証温室を用いた温室栽培と、戸外の実証圃での露地栽培を行い、バイオガス化の消化液を利用した栽培管理方法を検討し、その油脂生産性の評価を行った。その結果、2 年生ながら一樹あたりの国内目標収量の 20%を達成した個体も見出した。ジャトロファ以外の油脂作物として、米作の裏作としての菜種の露地栽培等において消化液を活用して効果的に育成する方法の検討を行った。

（１）方法

1）ジャトロファ

栽培に用いたジャトロファ（*Jatropha curcas*）は、ジャトロファ栽培事業に取り組んでいる（株）レボインターナショナルのベトナムプランテーションから種子と茎片を輸入して京都で発芽させ、また、京都で得られた挿し穂から再生した、純国産である。写真 A は 2021 年 10 月の温室の様子である。2020 年春に温室内土壌に直植えし、2020-21 年の冬を越したジャトロファ２年生の様子で、樹高が 3 m に達した個体もある。写真 B は 2021 年 2 月の温室の様子で 1 年生ジャトロファ樹は全て落葉して越冬中、これらの個体が写真 A のように成長した。温室西側の畑では 2020 年春に植栽したジャトロファは冬に全て枯死したため、2021 年 4 月に再び苗を移植した（写真 C)。

温室土壌で栽培中のジャトロファ２年生の様子
（2021年10月）

温室内で越冬中のジャトロファ１年生の様子
（2021年2月）

温室西側で栽培中のジャトロファ１年生の様子
（2021年11月）

図 22　ジャトロファ栽培の様子

本年度も昨年度に続き温室栽培と露地栽培を検討した。温室栽培では、令和元年度に構築した、京都大学構内の温室に加温器、CO_2 富化装置、センサーを導入した実証用温室を使用し、メタン発酵消化液を肥料として施用した。これは、国内中山間地において、廃棄物焼却施設やバイオガス化施設からの排熱、排ガス中の CO_2、メタン発酵消化液等を活用することを想定した栽培システムとなっている。温室では、温室内の土壌に直接、または土壌を充填した 10 L 容ポットに植えつけ、温室内に置床した。

露地栽培では、上記の京都大学内の実証用温室のすぐ隣に確保した畑（40 m^2）を使用した。これにより、温室栽培と露地栽培において土壌条件を同一にして比較することが可能となる。

図 23　本事業で構築した実証用温室（令和元年度事業報告書より）

2）菜種

修学院離宮の水稲の裏作として菜種（*Brassica rapa L.* cv. *Nanashikibu*、品種名　ナナシキブ）をメタン発酵消化液だけを用いて栽培した。

図 24　収穫時の菜種の様子（2021 年 4 月）

（２）結果

1）ジャトロファの種子生産

2021 年春から越冬したジャトロファに着花／着果が始まり、温室内の土壌に直植えした個体、ポット個体の中には 6 月から 9 月までの間に種子 300 g を生産したものもあった（写真 I）。2020 年には最大の収穫量が個体あたり 50 g だったので個体が成長するに伴って収穫量は順調に増加している。熱帯プランテーションでの平均収穫量は個体あたり 2,500 g と推定されるので、さらに着花数を増やす努力が必要である。写真 E、F、G、H は着花、着果、果実の様子。I は一本のジャトロファ樹で 6 月から 8 月まで着果した種子の総量を示している。

着花

着花

着果

登熟果実

1本の樹から夏の間に採取された種子（約300 g）。
黄緑色は一個の果実で種子3個を内包する。

図 25　ジャトロファ種子生産の様子

2）ジャトロファ種子の生産性と目標収量

ジャトロファ栽培に関する先行事例では、収穫量の記載が不十分である場合や報告方法が統一されていない場合が多く（種子／子実の区別、新鮮重／乾燥重の区別、一樹あたり／面積あたり、一年あたり／一作あたりの記載がない場合が多い)、ジャトロファの種子生産量の採算ラインの設定が難しいが、文献値から推定して、5 年生樹木から構成されるプランテーションでの生産量は、1 ha あたり 2,000 本植栽して種子収穫量 5 トン／年、一樹あたり 2,500 g/年程度と設定した。さらに、日本国内の気候を考慮すると、一樹あたり 1,500 g／年程度が上限と考えられる。

この目標値に対して、令和 2 年度の温室栽培での収穫量は一樹あたり 50 g 程度であったが、本年度は、最大一樹あたり 300g が収穫でき、目標の 20%程度まで到達することができた。今後さらに、樹の齢が更新されると次第に増加することが期待されることに加えて、品種の選定、肥培管理の最適化、剪定方法の改善等によって、収量の向上が可能と考える。

3）ジャトロファ油の組成分析

ポット栽培より得たジャトロファ粗油について、令和 2 年度に脂肪酸組成を分析した結果示す（次表、次図)。本事業で得たジャトロファ粗油の脂肪酸組成は、先行研究で示された組成とほぼ同じであることが確認された。

表 13　ジャトロファ油の脂肪酸組成分析結果

化合物名	慣用名	ジャトロファ油（本事業で収穫）	ジャトロファ油（文献値）
		%	%
C16:0	パルミチン酸	14.88	14.2
C16:1(9c)	パルミトレイン酸	0.77	
C18:0	ステアリン酸	7.86	
C18:1(9c)	オレイン酸	43.98	43.1
C18:1		1.57	
C18:2(9c,12c)	リノール酸	30.54	34.3
C20:0	アラキジン酸	0.23	
C18:3(9c,12c,15c)	α リノレン酸	0.17	
合計		100	98.5

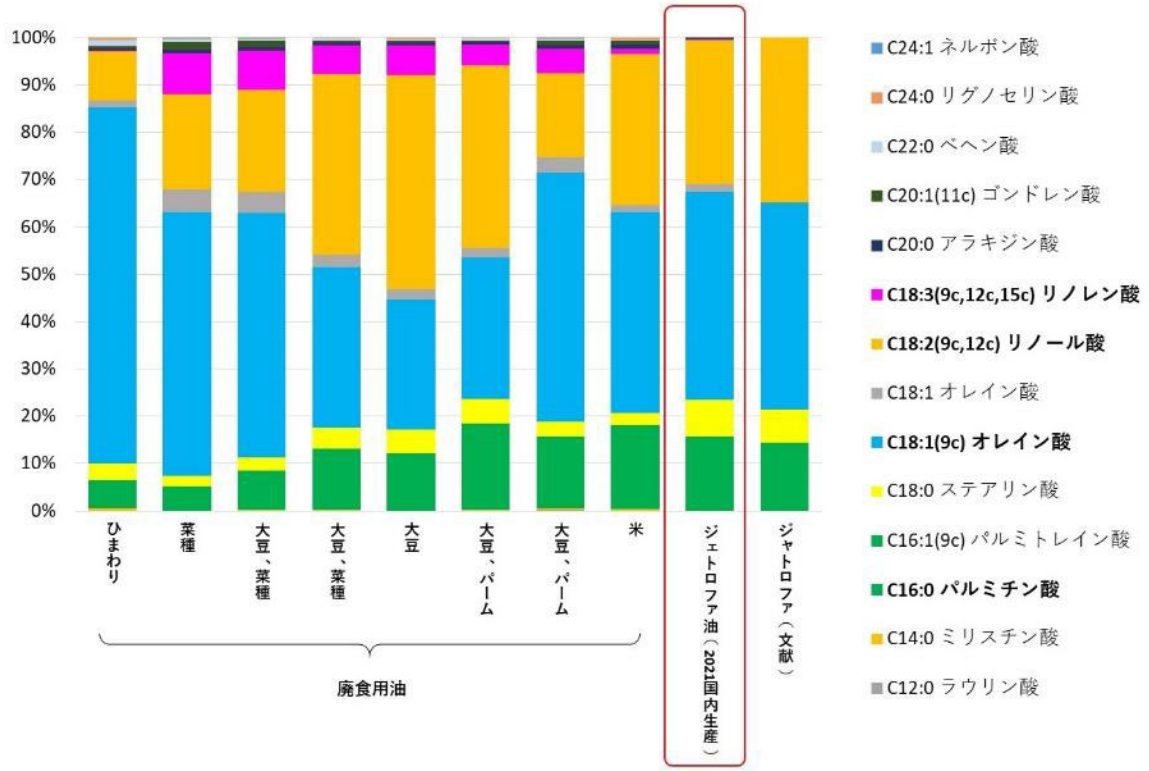


図 26　ジャトロファ油の脂肪酸組成（廃食用油及び文献値との比較）

油糧作物であるジャトロファの油脂の脂肪酸組成は主要な廃食用油にかなり近く、オレイン酸（C18:1）、リノール酸（C18:2）が大半を占めることが分かった。以上より、脂肪酸組成の観点からは、ジャトロファによる PHBH の原料拡大の可能性は十分あると言える。

4）ジャトロファの栽培暦

2021 年 4 月時点で、これまでの試行で 2020 年に温室内に直植えされた 16 個体、ポットで育成された 10 個体が栽培中で、これらの個体を 2021 年度も露地と温室内で栽培した。2021～22 年冬には、温室ではジャトロファの今後の日本国内での栽培拡大を念頭に、冬季も敢えて加温機を作動させなかった。これは 2020～21 年度の越冬試験で、低めの気温設定でも傷害を受けなかったという栽培試験の結果に基づく対応である。各種センサーはジャトロファの遠隔管理のために活用した。本プロジェクトも 3 年目を終了するにあたり、京都で採取した種子を京都で発芽させて個体を育成することまで可能になり、その経験を通して、鳥取大学明石欣也教授の監修のもとでジャトロファの京都での栽培暦を作成した。

① 種子の収穫と保存、育苗

種子は樹上で完熟させ（写真 H）、これを採取して果皮を除き、十分に成長した種子（重量の目安として 700 mg から 1,000 mg／個）をプラスチック袋に脱気封入して-20℃で冷凍保存する。この保存方法で少なくとも 2 年は発芽能力を維持できる（写真 J）。

図 27　ジャトロファ種子の保存方法

種子を冷凍から室温に戻し、殻をペンチで割り、1 時間程度水浸する。この種子を日向土と剪定枝堆肥を 8 : 2 に混和した培土の深さ 2 cm に置床し覆土する。培土は透水性の高いものを選ぶ。ジャトロファは子葉が大きいので発芽時に肥料は必要ない。種子の殻を割っておけば、発芽能力のある種子であれば、1 週間以内に発芽する（写真 K）。子葉が完全に展開すれば移植する。挿し木茎片は上下を間違えないように挿し穂として培土に突き立てる（写真 L）。

種子を適切に保存すれば高い発芽率が得られる。

茎片を挿し穂として大量の苗を調製することができる。

図 28　ジャトロファの育苗方法

② 土壌の調製と施肥

ジャトロファは乾燥には強いが過湿には弱いので水はけのよい土壌が望ましい。石灰や苦土石灰で土壌の酸度を矯正し、栄養成分として化成肥料を与える。メタン発酵消化液も全ての肥効成分が含まれる優れた肥料である。化成肥料 8-8-8 や 14-14-14 などを 1 樹あたり窒素成分が 10 g となる量を、5 月と 7 月に分けて、茎の周りの地表に散布する。ジャトロファは乾燥に強く、春から秋は戸外で雨水だけで生育するが、適宜潅水すると旺盛に生育する。避寒を目的に温室内で栽培する場合、あるいはポット栽培する場合には適切な潅水が必要である。

③ 防除

過湿や潅水が不足した場合、ストレスを受ける。この時、害虫の食害が発生するので、まずは樹体が健全に生育できる環境を整える。稀にアブラムシ、アザミウマ、ダニの食害を受けるので、そ

れぞれ適切な農薬で防除する。

④ 越冬、着花、着果

2020 年春に温室土壌に直植えした個体は 12 月頃から落葉した。温室内直植え個体は、潅水を停止した影響もあって上位葉まで全部落葉した。温室内のポット植え個体に冬季も継続して潅水した場合、下位葉から落葉するものの上位葉は緑色を保って越冬した。葉が残ると翌春の葉の再生が早い。落葉は低温と土壌の乾燥によって起こる。昨年度報告したことであるが、戸外で土壌に直植えした個体、ポット植えで戸外においた個体は落葉せずに緑葉が着生したまま壊死し、その後、株全体が枯死して越冬できなかった。

2021年3月の温室内ジャトロファの様子。1年生の茎1 mを挿し穂として地上部を60 cm出して土壌に挿した。

上記挿し穂の2021年6月の様子. 茎葉が再分化しているが、10月まで開花しなかった。

図 29　挿し穂によるジャトロファの栽培

温室内で越冬させた個体の一部は 3 月に剪定した。切り取った上位の茎は挿し穂として土壌に直植えした。ポット植え個体は戸外に移した。全ての 2 年生個体に 4 月から潅水を再開すると直ちに出葉が始まり、5 月下旬から越冬した茎の頂に着花が始まり、7 月下旬まで着花が続いた。しかし、3 月に剪定した茎から再生した新梢、4 月以降に発芽させた 1 年生個体では 10 月まで着花しなかった。旺盛な着果は２年生から始まる。

温室外で栽培中のジャトロファは 2020-2021 年越冬できずに全て枯死した。そこで 2021-22 年冬は 1 年生個体に大型のプラスチック袋を掛けて越冬を試みている。2022 年 1 月現在、プラスチック袋の中の茎は緑色を保っており、一方、対照区として袋をかけていない個体は枯死した模様で、プラスチック袋によって越冬できる可能性がある。

プラスチック袋で越冬の試行中。

プラスチック袋を掛けなかった1年生個体。
2021年12月の2度の氷点下の夜温で枯死した。

図 30　プラスチック袋によるジャトロファの越冬可能性の検証

ジャトロファを温室内で栽培した場合、ジャトロファ樹の旺盛な生育のため吸水量が多く、根元の土壌は乾いてしまい、さらに日陰になって雑草がほとんど生えなかった。しかし、2020 年、2021 年と修学院、北白川の露地（温室外）でジャトロファを栽培した場合には樹下に雑草が生い茂った。さらに 2020 年冬に越冬できずに枯死したジャトロファ株元には雑草が繁茂し、さらに跡地で野菜を作付けしたところ旺盛に生育した。これらの結果からジャトロファ樹は旺盛な生育ゆえに周りの植物の生育に影響を与えるが、アレロパシー物質の放出や微生物叢の変化を介して他感作用を発揮したり「いや地」を形成するのではないと考えた。

また、ジャトロファなどトウダイグサ科植物はホルボールエステルを含有し、ホルボールエステルはプロテインキナーゼの賦活化を介して発癌を誘導する。さらにジャトロファ種子にはリシンやクルシンが含有されるので食すると中毒を起こし、それゆえにジャトロファ種子は食用に適さないとされているが、これらの有毒物質は種子に含まれるため、毒性を回避するためには、樹の管理よりも搾油粕の管理が大切だと考えた。

5）菜種の栽培

2020 年 11 月に消化液を散布し、その後、菜種（ナナシキブ）を播種、2021 年 4 月に収穫した。設定量が少なかったため、消化液の施肥はムラになり（写真 Q）、その結果が生育のバラツキにつながった。写真 Q は消化液散布直後の様子で、散布予定量が少なく全体に行き渡らなかった。このため、散布後すぐに耕起したが、消化液は土壌と混ざりあわず、菜種の生育は消化液にとてもよく反応するため、消化液の撒かれたところは大きく、行き渡らなかったところは小さかった（写真 R）。これは菜種の生育が消化液によく反応することを示すとともに、均一に散布する方法が高い生産量を得るために必須であることを示している。

菜種（一毛作）の理想的収量は 10 a あたり 200 kg である。 一方、米作との二毛作を行う場合は、イネ栽培のため菜種の栽培期間は短くなり収量は 120 kg/10 a 程度まで低下する。2021 年春の収穫量は 10 a あたり 50 kg で、目標値 120 kg には及ばなかった。そこで 2021 年秋作では消化液の散布方法を工夫した上で消化液散布量を 2 倍に増やした（写真 S）。

2020年11月の菜種向け消化液散布。散布予定量が少なくムラになったため、直ちにトラクタで土壌を混和した。

2021年4月の菜種収穫前の様子。消化液の多少によって生育のムラが顕著で、このことが生産量の低下に繋がった。

2021年秋の消化液散布はより均一になるように工夫した。

図 31　菜種の栽培状況

（3）まとめと課題

3 年間にわたる検討で熱帯油脂作物ジャトロファ（*Jatropha curcas*）を京都で栽培できることを示した。懸案であった越冬だが、樹体をプラスチック袋で覆い一樹ごとにミニビニルハウスを設置することで可能になるかもしれない。残存する問題はジャトロファ樹の種子生産能力の向上である。文献によると、ジャトロファ樹の種子生産量は 5 年生で最大になり、その後 10 年程度維持される。温室内でのヤトロファ樹も樹高 3 m を超え、果実の収穫が困難になりつつある（作業性の悪化）。今後は剪定による矮化を図り、種子採取の効率化を図る。特に越冬させることを考慮すると、樹体を直径 1 m、高さ 2 m くらいの枠に入るように剪定し、冬にはこの枠をビニルハウス骨格として、果実採取の能率向上と越冬を可能にしたい。愛媛県でアブラギリを栽培してきた生産者から、ナンヨウアブラギリ（ジャトロファ）でも生産性を落とさないで樹高を 2 m 程度に抑える剪定方法があることを教えられた。また、温室内ならば加温は必要なく越冬させることができる。今後、温室での栽培と、霜の降りない西南暖地での栽培を検討することが考えられる。

菜種については、メタン発酵消化液を用いた米・菜種の二毛作システムが成立することが本事業で実証された。また、菜種は消化液によく反応するので、消化液使用の対象作物として優秀であることが分かった。これまで消化液は水稲に施用され、秋の対象作物が少なかった。欧州で栽培されている菜種品種は、カタログ値ではあるが、単収が国産菜種品種の 4、5 倍高いことが知られている。今後の収量増に向けて、欧州菜種品種の栽培が表作の水稲の栽培と両立するかを検討することなどが考えられる。

2.3.2 廃食用油以外の国内外の油脂源の調達可能性

（1）目的

PHA 系バイオプラスチック原料の多様化の観点から、廃食用油以外の国内外の油脂源として、油脂製造時の副生成物（ソーダ油滓等）や、油糧作物であるジャトロファ等を想定し、その調達可能性に関する検討を行うことを目的とした。

令和 3 年度は、これまでの油糧作物の国内栽培検討及び油脂製造時の副生成物（ソーダ油滓等）の利用可能性の検討結果を踏まえ、廃食用油以外の国内外の油脂源の調達可能性についての展望を取りまとめた。

（2）原料拡大シナリオの整理枠組み

廃食用油以外の国内外の油脂源を考慮し、PHBH 原料の拡大シナリオを整理する枠組みを作成した。

表 14　原料拡大シナリオの整理枠組み

		製造シナリオ	① 現行	② 全国の生ごみをPHBH袋で回収			③ カトラリー等に用途拡大	④ カネカ2030年目標
		仮定等		• 生ごみ発生量1,300万トン/年 • 生ごみ袋はPHBH 100%製 • 生ごみ重量比0.3%の袋重量			• 全国の使い捨てカトラリー使用量は4.0万トン	• カネカHPより
				• 普及率25%	• 普及率50%	• 普及率100%		
		PHBH製造量	**0.5** 万トン/年	**1** 万トン/年	**2** 万トン/年	**4** 万トン/年	**8** 万トン/年	**10～20** 万トン/年
原料調達シナリオ	賦存量等			製造量拡大				
① パーム油	• (参考)パーム油輸入量:78万トン		0.5	0.5	1.0	2.0	4.0	5 ~ 10
② 事業系廃食用油（カネカ関連）	• 数千トン？ • カネカ自社廃油&納入油	原料拡大	–	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
③ 事業系廃食用油（カネカ以外）	• 年間約40万トン発生 • 主に飼料・工業用途利用		–	–	0.5	1.5	3.5	4.5 ~ 9.5
④ 生活系廃食用油	• 年間約10万トン発生 • 主に焼却処分		–	–	–	–	?	?
⑤ 現在未使用の事業系廃食用油(劣化油、トラップ油等)	• 年間2～4万トン発生(現在、再生利用困難として廃棄)		–	–	–	–	?	?
⑥ 油脂製造時の副生成物(ソーダ油滓等)	• 年間約4万トン		–	–	–	–	?	?
⑦ 国産油脂作物（ジャトロファ、ナタネ等）	• 耕作放棄地の2割を活用した場合、約10万トン/年 • (参考)食用菜種油は約100万トン生産		–	–	–	–	–	?

注) 原料調達量≒PHBH製造量と想定

（3）油脂製造時の副生成物

本事業では、油脂製造時の副生成物であるソーダ油滓について、令和元年度に発生量を約 4 万トンと推計した。また、令和 2 年度には、油脂製造事業者へのヒアリングを行い、排出及び利用実態について把握を行った（詳細非公表）。加えて菜種油由来及び大豆油由来ソーダ油滓サンプルの提供を受け、脂肪酸分離試験を実施し、処理条件の検討を行うとともに、処理後の脂肪酸組成が一般的な廃食用油と一致することが確認された。検討した処理条件をもとにスケールアップ時の処理コストを試算すると、脱色処理ありの場合約 100 円/kg、脱色処理なしの場合約 50 円/kg となった。コスト面での利用可能性はソーダ油滓調達単価に依存するが、パーム油、廃食用油の調達費用との比較で、ソーダ油滓の利用可能性が大きく評価される可能性もある。

なお、PHBH 原料として利用するためには、脱色処理プロセスのコスト低減方法や、ソーダ油滓を脂肪酸分離して得られる油がトリグリセリドではなく遊離脂肪酸であるため培養プロセスにおける使いこなし方法の確立が必要であることが今後のさらなる検討要素として挙げられる。

表 15　油脂生成時の副生成物（ソーダ油滓）の利用ポテンシャル

発生量	調達費用
約 4 万トン	原料調達単価＋処理単価 ＜処理単価＞ 脱色あり：約 100 円/kg 脱色あり：約 50 円/kg

（４）国産油脂作物（ジャトロファ、菜種等）

本事業では、中長期的な国産油脂源の拡大のために、ジャトロファ及び菜種の国内栽培の検討を行った（2.3.1.参照）。本節ではその検討結果を踏まえたポテンシャルの評価を行う。

ジャトロファについては、日本国内の気候を考えると 1,500 g/樹/年程度の種子収量が上限と考えられる。これは、1 ha あたり 2,000 本植栽した場合、面積あたりの種子収量は 3 トン/ha/年となる。また種子中の油脂含量を 30%とすると、0.9 トン/ha/年の油収量に相当する。本事業の検討の結果、1.1.2.に示すとおり、バイオガス化消化液のみを肥料として 300 g-種子/樹/年（0.6 トン-種子/ha/年）の収量を達成した。ジャトロファは耕作放棄地等を生産に活用することを想定している。耕作放棄地は全国に 42.3 万 ha（平成 27 年）[2]あり、それらを活用する最大ポテンシャルを次表のように試算した。

菜種については、一毛作の理想的収量は 200 kg/10 a である。一方、米作との二毛作を行う場合は、イネ栽培のため菜種の栽培期間は短くなり収量は 120 kg/10 a 程度まで低下する。本事業の検討を行った結果、2021 年春の収穫実績は 50 kg/10a となった。本方式での菜種油生産の最大ポテンシャルは、全国の水稲作付面積（146.2 万 ha[3]）を参照し次表のように試算した。

表 16　国内における油脂作物栽培のポテンシャル

	ジャトロファ		菜種	
	現状	目標	現状	目標
想定農地	耕作放棄地		水稲の裏作	
農地面積 （最大ポテンシャル）	42.3 万 ha		146.2 万 ha	
種子収量	0.6 トン/ha/年	3.0 トン/ha/年	0.5 トン/ha/年	1.2 トン/ha/年
種子中の油脂含量	30%		30%	
油脂生産量 （最大ポテンシャル）	約 7.6 万トン/年	約 38 万トン/年	約 22 万トン	約 53 万トン

前表に示すように、ジャトロファ、菜種ともに油脂生産量のポテンシャルは大きく、現在の廃食用油発生量と同等水準の最大ポテンシャルがあることが見込まれた。

一方、PHBH の製造能力は（株）カネカによれば 2021 年現在 5 千トン/年で、2030 年に 20～30 万トン/年に増強することが計画されている。この規模の原料をジャトロファ油や菜種油で賄う場合、

2 農林業センサス

3 農林水産省「令和 2 年産水稲の作付面積及び予想収穫量（10 月 15 日現在）」，https://www.maff.go.jp/j/tokei/kekka_gaiyou/sakumotu/sakkyou_kome/suiriku/r2/yosou/index.html

現在の想定した最大面積の大半に作付を行う規模となる。また、国内のプラスチック消費量の規模はさらに大きく、2020 年の国内樹脂製品消費量は 841 万トン、うち「包装・容器／コンテナ類」だけで 391 万トン[4]にのぼる。PHBH の用途拡大と製造能力の増強、それに合わせた原料調達の拡大を行うためには、油脂作物の収量増に向けた取組や、油脂含量の高い品種の開発などが必要になると考えられる。

（５）まとめと課題

現在パーム油から製造されている PHBH の原料として、廃食用油以外の油脂源の利用可能性の評価を行った。まずは、原料拡大シナリオの整理枠組みを整理し、続いて油脂製造時の副生成物（ソーダ油滓）及び国産油脂作物（ジャトロファ、菜種）について本事業で検討した結果を取りまとめた。

今後、国産油脂原料としてまずは廃食用油の活用が進められるが、その量には限りがあるため、中長期的には油脂製造時の副生成物や国産油脂作物を利用していることが考えられる。将来の原料確保を見据え、PHBH 製造に向けた技術的検討と各原料の調達量の拡大・コスト低減に向けた取組が進むことが期待される。

4 一般社団法人プラスチック循環利用協会「2020 年プラスチック製品の生産・廃棄・再資源化・処理処分の状況」，https://www.pwmi.or.jp/pdf/panf2.pdf

2.4 原料の切り替えによる CO2 削減効果及びコスト変化に関する検討

2.4.1 CO2 削減効果に関する検討

（1）目的

現在の商用生産 PHBH の原料であるパーム油だけでなく、廃食用油やソーダ油滓等の廃棄油脂や油脂作物ジャトロファの国産原料の利用可能性を検討することで、PHBH 利用製品の生産から使用、廃棄・リサイクルによる資源循環の形成が国内、地域スケールで期待される。そのため、PHBH 原料切り替えによる CO_2 削減効果について評価を行うことを目的とした。

（2）方法

2021 年度（令和 3 年度）の事業成果（2.1 節参照）に基づく実証データを用い、パーム油、国内のジャトロファ油もしくは廃食用油を原料とし、PHBH 樹脂を製造するまでの Cradle-to-Gate の温室効果ガス（GHG）排出量を算定した。すなわち、パーム油原料についてはマレーシア産パームの栽培から輸入、ジャトロファ原料については栽培から国内輸送、PHBH 樹脂製造までを、廃食用油については収集から樹脂製造までをシステム境界とした。また、2020 年度時点の解析結果ならびに Amasawa ら（2021）の先行研究、参考として化石 PE 樹脂と比較した。

パーム油を原料とする際の原料栽培～精油については、インベントリデータベース（DB）である GaBi のデータを用いた。パーム油の輸入、廃食用油の収集については昨年度同様の値（97 kg-CO_2eq/t-パーム油、21 kg-CO_2eq/t-廃食用油）を用いた。ジャトロファ油については本事業の収率にも改善の余地があり、また不確実性も高いことから、2020 年度の先行研究に基づくパラメータを用いた。PHBH 製造プロセスについては、ヒアリングにより PHBH 商業化実証設備におけるパーム油原料の運転パラメータを得た。本事業初年度（2019 年度）当初はパーム油に対して廃食用油は 8 割程度の PHBH 生産収率を見込んでいたが、菌株開発などを通じてプロジェクト 3 年目の今年度実証成果として、廃食用油を原料とした収率はパーム油比 96%と設定した。ジャトロファ油はパーム油比 100%とした。投入原料・エネルギー別の CO_2 換算係数は Akiyama ら（2003）や IDEA v2、GaBi の DB の値を用いた。

（3）結果

算定結果と先行研究との比較を次図に示した。輸入パーム由来 PHBH は 2.41 kg-CO_2eq/kg-PHBH に対し、ジャトロファ由来 PHBH は 1.98 kg-CO_2eq/kg-PHBH、廃食用由来 PHBH は 1.54 kg-CO_2eq/kg-PHBH となり、廃食用油を原料とすることで GHG を 36%低減できることが明らかになった。

廃食用油原料の本年度解析結果は 2020 年度解析結果と比べ PHBH 製造段階でも 44%低減される結果となった。2020 年度解析は Akiyama ら（2003）のインベントリデータを元にしており、2000 年初期と比べて相当の技術改善が示唆される。特に収率や消費電力での改善が大きく、電力については Akiyama らの約 6,700 kWh/t-PHBH に対し、本年度解析では約 1,900 kWh/t-PHBH であった。また、廃食用油原料においてもパーム油とほぼ同程度の収率を達成した効果も大きい。

パーム油を原料とした Amasawa ら(2021)の報告では、4.05 kg-CO_2eq/kg-PHBH となり、本研究と大きな差が見られたが、主にパーム栽培の GHG 排出量の差が要因であった。なお、今回比較のため原料栽培段階での CO_2吸収（-2.39 kg-CO_2eq/kg-PHBH）と、製造段階での微生物生代謝由来 CO_2排出（0.31 kg-CO_2eq/kg-PHBH）は含めていない。Amasawa らは原料栽培時の GHG を Baseline, Better, Worse ケースで報告しており、条件によって栽培段階の GHG は大きく異なり、PHBH 樹脂生産の GHG は 0.32-16.5 kg-CO_2eq/kg-PHBH の幅を持つことを指摘している。次図には Baseline ケース（Ecoinvent (“market

for palm oil refined, GLO”)における世界の平均的なパーム油製造データ）の結果を示した。

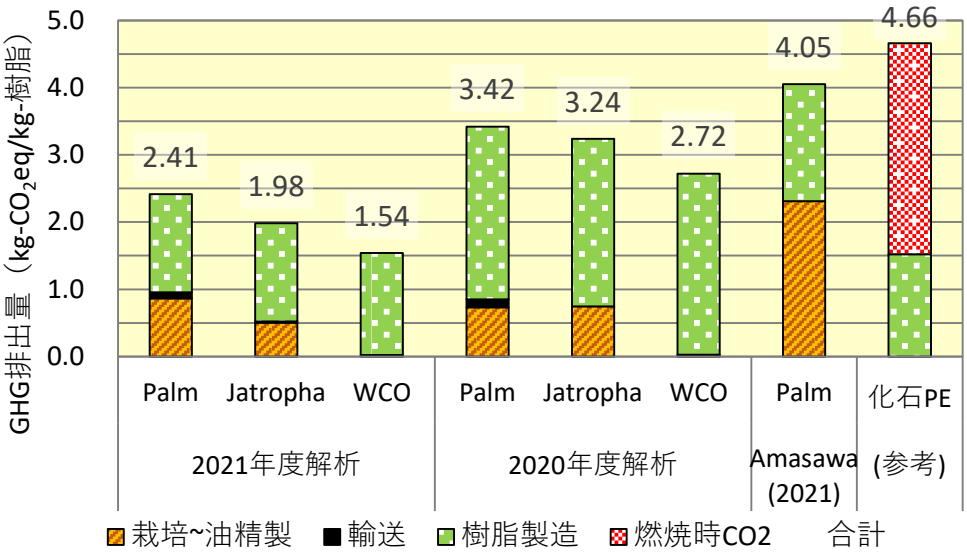


図 32　原料栽培～PHBH 樹脂製造時の GHG 排出原単位推定結果と先行研究比較

（４）まとめと課題

本事業の実証データを用いた PHBH 樹脂製造までの Cradle-to-Gate の GHG 排出原単位を推定し、従前の解析と比べ GHG 排出原単位は大きく改善されていることが明らかになった。また、廃食用油を原料とすることでパーム油と比べて 36%の低減が可能である。輸入パーム油は栽培時の条件によって GHG 排出量が大きな幅を持つ不確実性が先行研究からも指摘されていることも勘案すると、国産原料を用いた PHBH 生産がより望ましい選択肢と考えられる。

参考文献

- Akiyama M., Tsuge T., Doi Y. (2003) Environmental life cycle comparison of polyhydroxyalkanoates produced from renewable carbon resources by bacterial fermentation, Polymer Degradation and Stability, Vol. 80, 183-194
- Amasawa E., Yamanishi T., Nakatani J., Hirao M., Sato S. (2021) Climate Change Implications of Bio-Based and Marine-Biodegradable Plastic: Evidence from Poly(3-hydroxybutyrate-co-3hydroxyhexanoate), Environmental Science and Technology, 55, 3380-3388

2.4.2 コスト変化に関する検討

（1）目的

現在、PHBH の原料として利用されているマレーシア産パームオイルを廃食用油に切り替えた際のコスト変化を定量化することを目的とした。

（2）パーム油の価格推移・見通し

パーム油はこれまで生産量が増え続けており、2020 年には世界で約 73 百万トンが生産されている[5]。価格については、直近の推移及び今後の見通しは次図のとおりであり、直近数年で価格が上がっており、今後も価格が高止まりすることが予測されている。また、持続可能性や人権・労働に配慮することへの要求が高まっていることから、RSPO 等の認証を受けた油への需要が高まっている。認証油の中でもよりトレーサビリティの高い方式が求められる傾向にあり、今後も調達コストは上昇することが見込まれる。

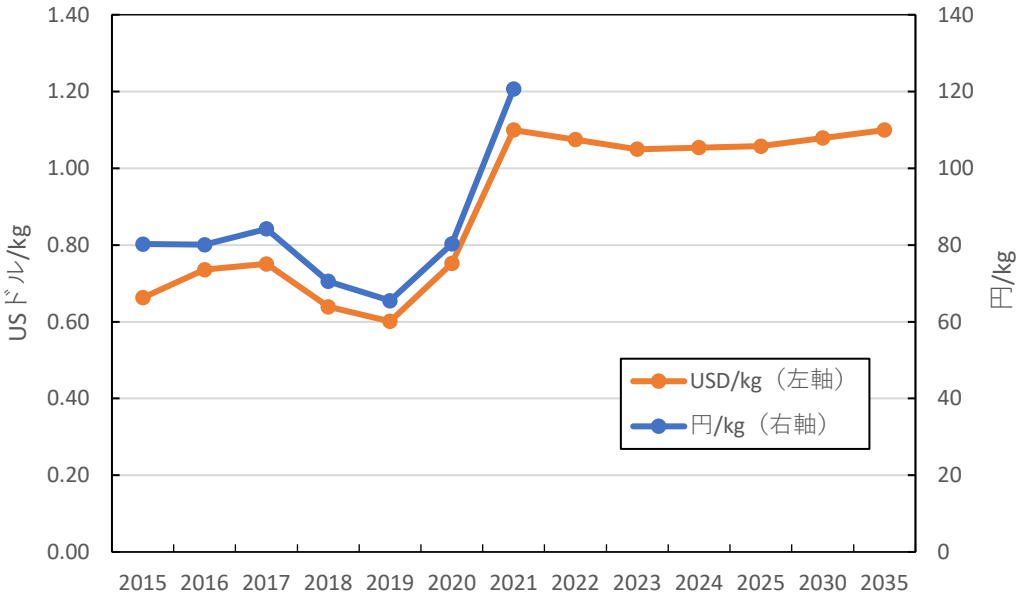


図 33　パーム油価格の推移・見通し[6]

（RBD パーム油のマレーシア港の FOB 価格。金額は名目ベース。2021 年以降は予測。）

（3）廃食用油の価格推移・見通し

一方、本事業で検討する廃食用油は、全国油脂事業協同組合連合会の資料[7]によると年間発生量は計 52 万トン（家庭系 10 万トン、事業系 42 万トン）とされている。また世界では、1,500 万トン程度の回収がされている[8]。パーム油と比べて量が限定的である上、近年はバイオディーゼル、バイオジェット燃料、バイオナフサ等の原料としての需要も世界的に増加している。実際に、国内で発生した廃食用油の海外への輸出量、輸出単価も増加傾向にある（次図）。

---

5 World Bank Commodity Markets Outlook, https://www.worldbank.org/en/research/commodity-markets
6 World Bank Commodity Markets Outlook, https://www.worldbank.org/en/research/commodity-markets
7 全国油脂事業協同組合連合会「UC オイルのリサイクルの流れ図（令和 2 年度版）」, https://zenyuren.or.jp/download/
8 Azahar ら”The potential of Waste cooking oil as bio-asphalt for alternative binder – an overview”, https://journals.utm.my/jurnalteknologi/article/view/8007

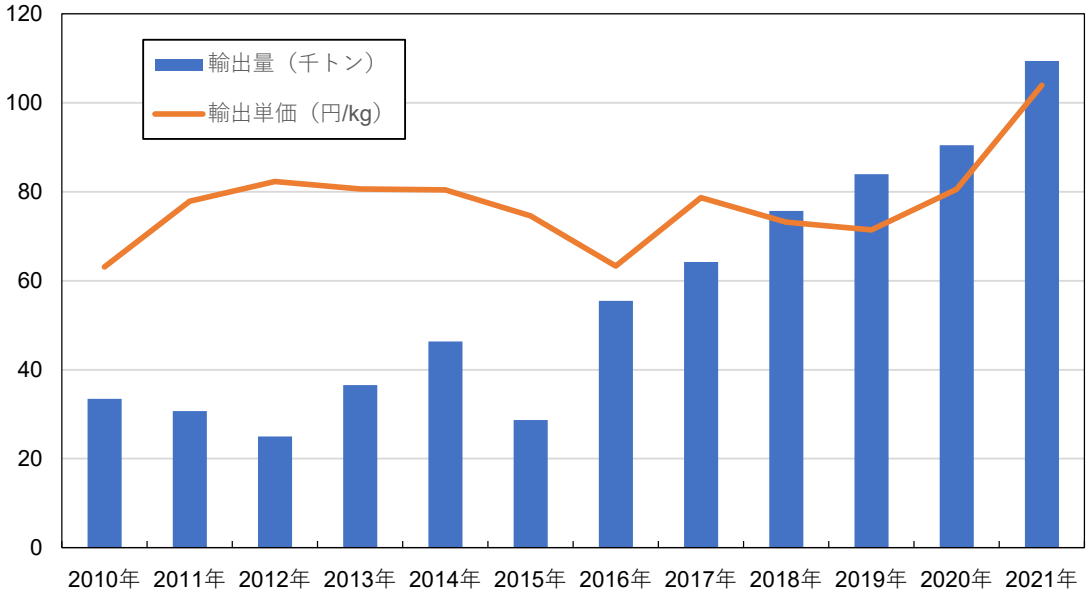


図 34　廃食用油の輸出量、輸出単価の推移（出典：貿易統計）

（４）原料切り替えによる PHBH 製生ごみ袋のコスト変化

PHBH の原料切り替えによる PHBH 製生ごみ袋のコスト評価を行うために、以下のようにシナリオを設定した。（次図）。

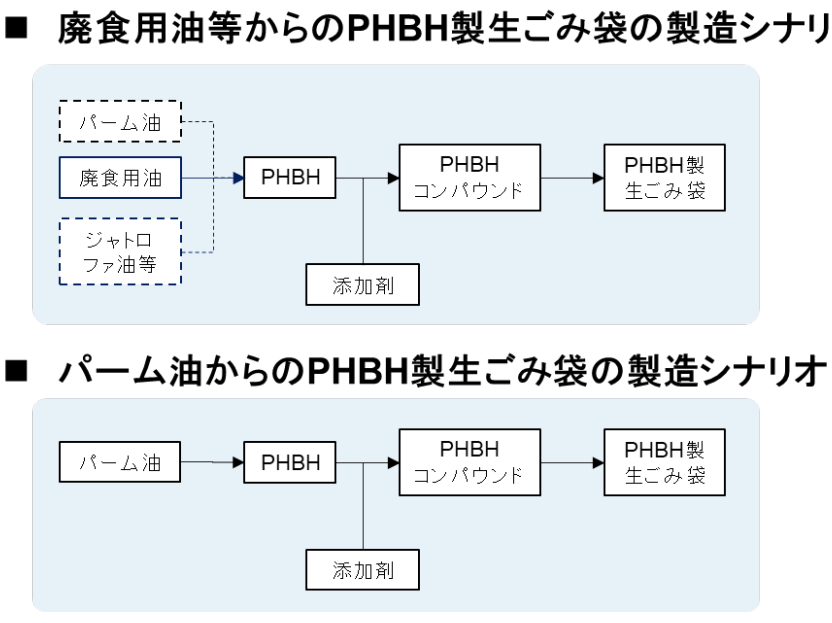


図 35　原料切り替えによるコストの評価システムフロー

PHBH 製生ごみ袋の製造について、以下の仮定をおき、PHBH の原料をパーム油から廃食用油に切り替えた際のコスト変化を試算した（次図）。

＜仮定＞

- 製袋費用は PE 製袋と同等

- 廃食用油を原料とした場合、PHBH 製造収率がパーム油比 0.92、生産性が 0.96 となる（2.1 における廃食用油を用いた実機培養実証データより）
- 廃食用油原料単価には前処理費用も含む

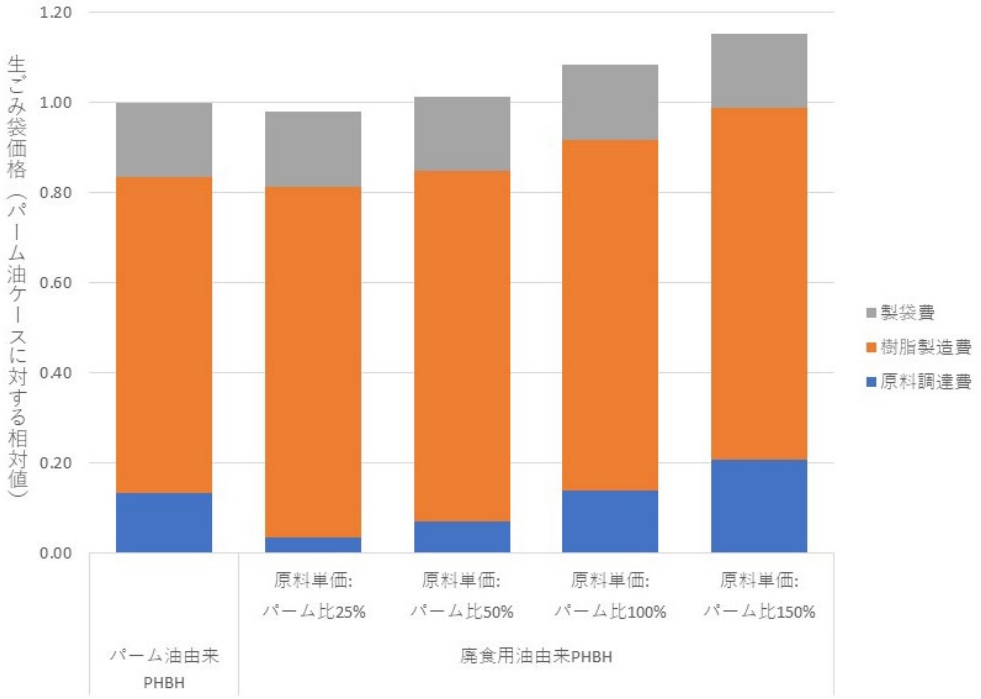


図 36　PHBH 製生ごみ袋の原料変更によるコスト変化試算結果

前述のパーム油価格（マレーシア港 FOB 価格）、廃食用油価格（輸出単価）を比較すると、直近ではともに 100 円/kg を上回っており、両者に大きな差はない。廃食用油単価がパーム油同等とすると、前図より、PHBH 製生ごみ袋の価格はパーム油由来のものに比べて 1.1 倍程度と推計される。

（５）まとめと課題

現在、PHBH の原料として利用されているマレーシア産パームオイルを、廃食用油に切り替えた際のコスト変化の定量化を行った。パーム油、廃食用油ともに直近の価格は上昇基調であり、両者の価格差も大きくはないと見込まれる。廃食用油単価がパーム油同等とすると、PHBH 製生ごみ袋の価格はパーム油由来のものに比べて 1.1 倍程度と試算された。

2.5 まとめと課題

「実証事業 1 : 廃食用油及び再生可能資源を原料とした PHBH 製造に関する実証事業」では、PHBH 原料として国内で調達可能な廃食用油やその他の再生可能資源を利用することを念頭に、生活系・事業系廃食用油を PHBH 原料に利用するための前処理技術に関する検討、PHBH 原料として利用することを念頭に置いた廃食用油の効率的な回収方法の検討、廃食用油以外の国内外の油脂源の調達可能性及び食料と競合しないジャトロファ等の油脂植物の国内での栽培と原料の切り替えによる CO_2 削減効果及びコスト変化に関する検討を行った。本年度の主な検討成果と今後の課題は以下に示すとおり。

（1）生活系・事業系廃食用油を PHBH 原料に利用するための前処理技術に関する検討

廃食用油を原料とする培養方法については、昨年度までの検討により、日本国内で発生する主な廃食用油は現在の原料であるパーム油よりもヨウ素価が高い大豆、菜種油系の高ヨウ素価油であることが判明したため、高ヨウ素価廃食用油を原料とした PHBH 培養生産技術開発を進めてきた。昨年度の研究において、パーム油と廃食用油ハイブリッド培養方法、及び、油脂濃度を高く維持することで廃食用油を単独で使用する改良培養方法を開発し、PHBH 商業化実証設備培養試験を実施した。その結果、目標生産性を達成したものの、顕著な発泡により不安定な培養となり、実生産においては問題が残されていた。そのため、本年度は、発泡抑制と高生産性の両立を目指し、高いヨウ素価油を原料として低油脂濃度で PHBH 培養生産が可能な技術の開発を進めてきた。その結果、不飽和脂肪酸を還元し飽和脂肪酸を生成する酵素（FadH）の強化により、高ヨウ素価の油脂を効率的に資化させることに成功した。本技術により高ヨウ素価廃食用油を工業的に効率的、かつ安定的に PHBH 原料として培養生産することが可能となった。

また、劣化が進行した廃食用油を入手して培養試験を実施した結果、酸価、アニシジン価がある値よりも低ければ使用できることが分かり、低ヨウ素価廃油の受入れ基準範囲が拡大できた。さらに高度に劣化が進んだ廃食用油でもブレンドによってその劣化度値を範囲内に収めることで使用可能となる可能性を示せた。

廃食用油前処理検討では、昨年度開発した処方でも YI（Yellow Index）の基準を満足できない廃食用油があることが判明したが、YI に影響を与える要因として着色成分濃度と相関があることを見出し、新たな新処方により低減効果を確認した。また、廃食用油を利用するための実証設備として、廃食用油簡易精製設備と排水 Si 除去設備の取得工事を進めた。

（2）PHBH 原料として利用するための更なる廃食用油の回収率向上を目指した収集方法に関する検討

家庭系の廃食用油は、行政により回収方法が概ね確立されているが、事業系については排出形態が様々であり、効率的な回収方法の構築が求められる。また、京都府・京都市の調査結果からは事業系が全体量の 9 割近くを占めていることも分かった。

以上より、事業系の廃食用油を対象に、排出～回収～加工の一連のプロセスにおける回収計画の立案を自動化するシステムの検討を行った。

PHBH 原料としての廃食用油を安定的に供給するためには、広範な排出事業者の廃食用油回収への参加が必要である。そのような回収を支援するシステムは、事業規模・内容が多岐にわたる排出事業者に適応可能でなければならない。まず、IoT システムでは、設置環境の実情に合わせた装置の設計・セットアップが必要となる。これまでの調査で明らかになったように、排出事業者での廃食用油の保管場所・状態は様々であり、これらに対応できる柔軟性が求められる。

また、多数の排出事業者の参加を得ることで、広域かつ多地点でのシステム展開が求められる。システムの実用化にあたっては、地理的に現実的な回収計画の立案に加えて、各排出事業者に分散したIoTデバイスの長期的・持続的な運用体制の構築も考慮する必要がある。これらは、展開地域の地理や交通環境などの制約を踏まえる必要があることから、システムの実証にあたっては、このような制約の影響を評価可能な地域で実験を行うことが望まれる。

一方、多数の排出事業者の参加の下、排出状況のデータを蓄積することにより予測モデルの精度向上が期待できる。特に、事業形態により、排出状況には年単位などでの一定のトレンドがあると考えられることから、長期的なデータを収集することが望ましい。システムの実用化に向けては、このような設置箇所の実態の把握や、長期的なデータ回収、それらに基づいたモデルの改善など、ロードマップに示したサイクルを継続的・長期的に行っていくことが期待される。

（３）廃食用油以外の国内外の油脂源の調達可能性及び食料と競合しないジャトロファ等の油糧植物の国内での栽培と特に国内中山間地（耕作放棄地）での原料栽培の検討

廃食用油以外の国内外の油脂源の利用可能性に関する検討については、令和元年度に京都地域に構築した実証温室と戸外の実証圃において、熱帯油脂作物ジャトロファ（*Jatropha curcas*）の通年の、バイオガス化の消化液を利用した栽培管理方法を検討し、その油脂生産性の評価を行った。その結果、2年生ながら日本の気候を考慮した一樹あたりの種子目標収穫量の20%を達成した。特に課題となる越冬方法については、適切に潅水すれば周年、葉を落とさず栽培できる一方、冬前に潅水を控え落葉させて、春に潅水を再開することで樹勢を回復できることもできた。これらの結果から、今後は温室を利用した加温なしでの栽培とともに霜の降りない西南暖地での栽培を検討することが考えられる。

加えて、ジャトロファ以外の油脂作物として、菜種の栽培を検討したが、メタン発酵消化液の増施により収量増加が示唆され、米作の裏作としての菜種栽培が期待できることが分かった。

（４）原料の切り替えによるCO_2削減効果及びコスト変化に関する検討

CO_2削減効果については、実証データを用いたPHBH樹脂製造までのCradle-to-GateのGHG排出原単位を推定し、従前の解析と比べGHG排出原単位は大きく改善されていることが明らかになった。また、廃食用油を原料とすることでパーム油と比べて39%の低減が可能である。輸入パーム油は栽培時の条件によってGHG排出量が大きな幅を持つ不確実性が先行研究からも指摘されていることも勘案すると、国産原料を用いたPHBH生産がより望ましい選択肢と考えられる。

コスト変化については、現在、PHBHの原料として利用されているマレーシア産パームオイルを、廃食用油に切り替えた際のコスト変化の定量化を行った。パーム油、廃食用油ともに直近の価格は上昇基調であり、両者の価格差も大きくはないと見込まれる。廃食用油単価がパーム油同等とすると、PHBH製生ごみ袋の価格はパーム油由来のものに比べて1.1倍程度と試算された。

以上より、「実証事業1：廃食用油及び再生可能資源を原料としたPHBH製造に関する実証事業」については、予定した検討を計画通りに進めることができた。

3．PHBH のごみ袋及びプラスチック代替製品への利用とバイオガス化に関する実証事業（実証事業 2）

3.1 バイオガス化プラントでの利用に向けた PHBH 製生ごみ袋の製造に関する検討

3.1.1 目的

昨年度の取組で見出した改良 PHBH を用いて、以下を実証する。

- 実使用に耐える生ごみ袋の配合方法及び成形条件を見出し、量産技術を確立する。
- 生ごみ袋を試作し、分別・回収試験に供し、実用性の検証をする。

3.1.2 方法

（配合）

廃食用油で生産した PHBH を一部用いる以外は、昨年度報告した PHBH 改良処方を使用した。フィルム物性は問題ないことも（株）カネカのラボで確認した。

（インフレーション量産機、製袋機）

弊社指定のモルダーにて 2 L 袋、5 L 袋、10 L 袋の 3 種類の生ごみ袋の量産試作を行った。

（実用試験）

京都市地域住民による実用試験を行った。また参考として、(株) カネカのラボにて生ごみの代わりに水を一定量（実使用＋α）入れ、袋の破損状態を確認した。

3.1.3 結果

（1）昨年度の成果

昨年度得られたフィルムサンプルの機械特性（引張特性、引裂強度）を次表に示す。インフレーション成形でも MD（機械方向）と TD（直角方向）では機械特性が異なるため、MD 及び TD 方向での測定を行っている。改良 PHBH は、実用特性では、JIS Z 1702（包装用ポリエチレンフィルム）、及び JIS Z 1711（ポリエチレンフィルム製袋）の 1 種 B を満たし、さらに、ごみ袋の規格として多くの自治体で採用されている 2 種 B を概ね満たす生ごみ袋を得ることができた。

改良 PHBH のラボ評価結果が良好であったため、社外の量産機でインフレーション成形を行ったところ、成形可能であり、ごみ袋形状に加工可能、印刷可能であることを確認した。得られたフィルムサンプルの機械特性（引張特性、引裂強度）も次表にまとめた。ヒートシール性、印刷性が問題ないことも確認した。

表 17　インフレーション成形フィルムの機械特性

	単位	方向	ラボ品結果	量産機試作品結果	JIS Z 1702, 1711 1種B	JIS Z 1702, 1711 2種B
平均厚み	μm	—	30	30	27.3~32.7	
引張破断強度	MPa	MD	**28**	**28**	16.7以上	29.4以上
		TD	**30**	**27**	16.7以上	29.4以上
引張破断伸び	%	MD	**260**	**370**	250以上	150以上
		TD	**394**	**371**	250以上	150以上
ヒートシール	N	平	10.8	10.0	6.86以上	21.18以上
	N	ガゼット	11.8	14.3		
ダート試験			70g、0/10		70ｇ、5/10以下	120ｇ、5/10以下
塗膜密着性評価				○		

作成したインフレーション成形フィルムのバイオガス試験の結果、生分解率は PHBH 単独フィルムやセルロースとほぼ同等の結果であった（詳細の試験条件及び生分解率に関するデータは 3.3.3 に記載する）。

以上の結果から、改良 PHBH を用いることで、嫌気生分解性、機械特性を両立できるフィルムが得られる目途を得た。

（２）本年度の結果

上記昨年度の結果に基づき、本年度は、京都市地域住民による実用試験に供する生ごみ袋のインフレーション量産機での試作を行った。

1）予備試作

まずは、次に示す予備試作袋を作成し、実用性を検証する簡易試験を実施した。

図 37　予備試作袋（左から 2 L 袋、5 L 袋、10 L 袋）

簡易試験条件

系列 1：袋に生ごみ（トマト、ブロッコリー、きのこ、魚等）700 g を入れ、袋の上部を軽く縛ってボールに入れた。

系列 2：袋に水 500 ml を入れ、吊り下げた。

簡易試験結果

計 1 週間試験した結果、今回試験した 2 L 袋は生ごみ、水の両方において、明確な破れは認められなかった。しかし、底部からの水の滲み出しが見られた。原因としては、底部両端から 5 cm のマチ折り返し部分のヒートシールの強度不足と考えた。そこで、以降の試作ではヒートシール性の改善を試みた。

	初期	1日後	3日＋18時間経過
写真			
観察状況	目視･監視カメラで観察開始	• 破れ、水漏れ無し。 • 底部ヒートシール部に水の滲みだしあり。(①生ごみのみ)	• 実用的な使用期間を超えた。依然、水漏れ、破れ無し。 • 袋を10回程度上下浸透しても底が抜けるなどの破れも無し。 • ①生ごみに関しては腐敗液が底に立っているが漏れは無し。→滲みだしは確認

	1週間後	試験後の袋に1L程度の水張→観察
写真		• 生ごみを取り出し、袋を洗浄後、1L程度水張して観察（写真）。 • 水だけ張っていた方も水を1L程度に増やして観察
観察状況	• 生ごみ入り袋、水入り袋とも破れることもなく推移。 • 生ごみは相当に腐敗が進み、腐敗液が下部に溜まる状態。 • 袋を上下に10回振っても破れることなくもなく、腐敗液が少しにじみ出る程度。	• 底部の両端から5cmの2箇所からポタポタと水滴が連続的に落ちるが、袋を振っても破れはしない。 • 水だけ張っていたいた方も、底部の一方の端から5cmの箇所から水滴が不連続に落ちる状態。

図 38　予備試作袋の簡易試験結果

2）第 1 回試作

京都市指定の袋サイズ及び印刷仕様を次図に示す。当該袋を得るべくモルダーで試作を実施し、必要量の枚数を得ることができた。また、得られた生ごみ袋を用いて京都市地域住民による実用試験を進めた。結果、概ね順調に生ごみ回収できたものの、一部の住民はごみを袋一杯に入れる傾向が

あり、特に内容量が多い 10 L で取っ手が切れる傾向が見られた。また底部からの滲み出しが見られた。評価試験の結果、ヒートシール強度が低くなっており、そのために取っ手のちぎれや滲み出しが見られていたことが分かった。

3）第 2、3 回試作

続いて、第 2 回試作では、マチ部分のヒートシール強度をさらに改善するべくモルダーでの試作を行った。ヒートシール時の条件については第 1 回試作で最適化を完了していたため、調整余地のあるインフレーションフィルム製膜条件の最適化を行った(PHBH の結晶化度を上げる方向で検討)。その結果、第 1 回試作袋に比べヒートシール強度が大幅に向上することが分かった（次表)。また、（株）カネカのラボでの水を用いた簡易試験でも破れにくいことを確認した。京都市地域住民による実用試験でも、第 1 回試作袋で指摘された取っ手のちぎれや漏れの意見は激減しており、強度改良を実証できた。

第 3 回試作袋は、第 2 回試作袋と同じ成形条件にて作成を行った。

PHBH製生ごみ袋サイズ(2, 5 , 10 L) 単位cm

	A	B	C	D	G
2 L	36	15	5	12	3
5 L	47	20	6	12	3-3.5を目安
10 L	56	25	7	13	3-3.5を目安

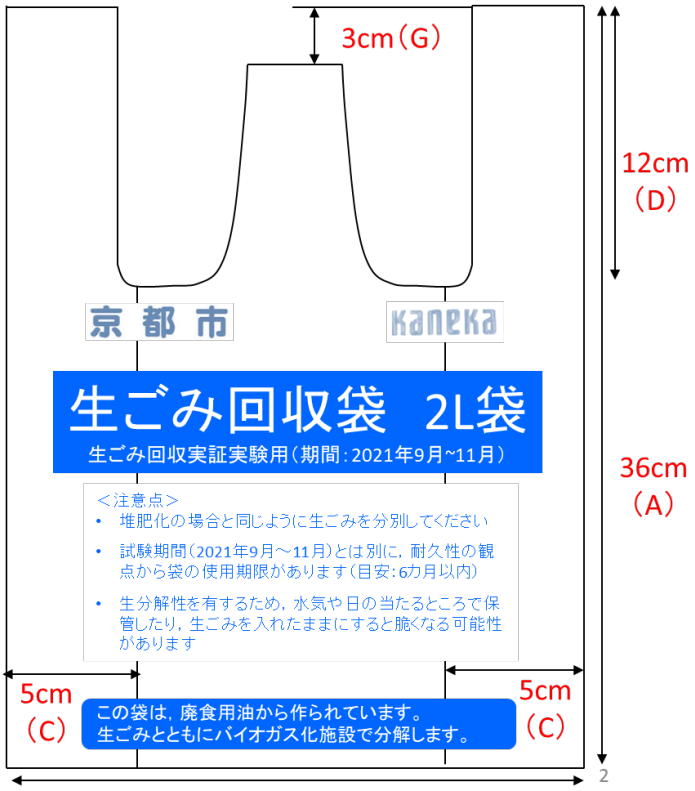


図 39　試作袋のサイズ及び印刷仕様

図 40　第 1 回試作袋

表 18　京都市地域住民による実用試験への試作袋の供給結果

	1回目	2回目	3回目
納品月	8月	9月	9月
PHBHのソース	廃食油/パーム油		
取得枚数	2L; 1,000枚 5L; 400枚 10L; 400枚	2L; 400枚 5L; 600枚 10L; 600枚	2L; 400枚 5L; 400枚 10L; 400枚
回収状況	概ね順調に生ごみ回収できている。 住民の方はゴミをほぼ満タンに入れる傾向あり。 →特に10Lで取っ手が切れる傾向あり。 （原因） 1回目納品袋はヒートシール強度が低い傾向 （対策） インフレーションフィルム製膜の条件を調整することで（結晶化度を上げる方向）、ヒートシール強度が向上することがわかった。→2，3回目納品袋はヒートシール強度が向上した。	1回目同等の回収率で、指摘された取っ手ちぎれや漏れやすい意見は激減 →強度改良が確認できた 10L袋の口がもう少し広いとバケツに被せられるので便利だと改善アイデアを頂いた 総じて一般的な袋よりよく、バケツよりごみを運びやすい意見を頂いた	

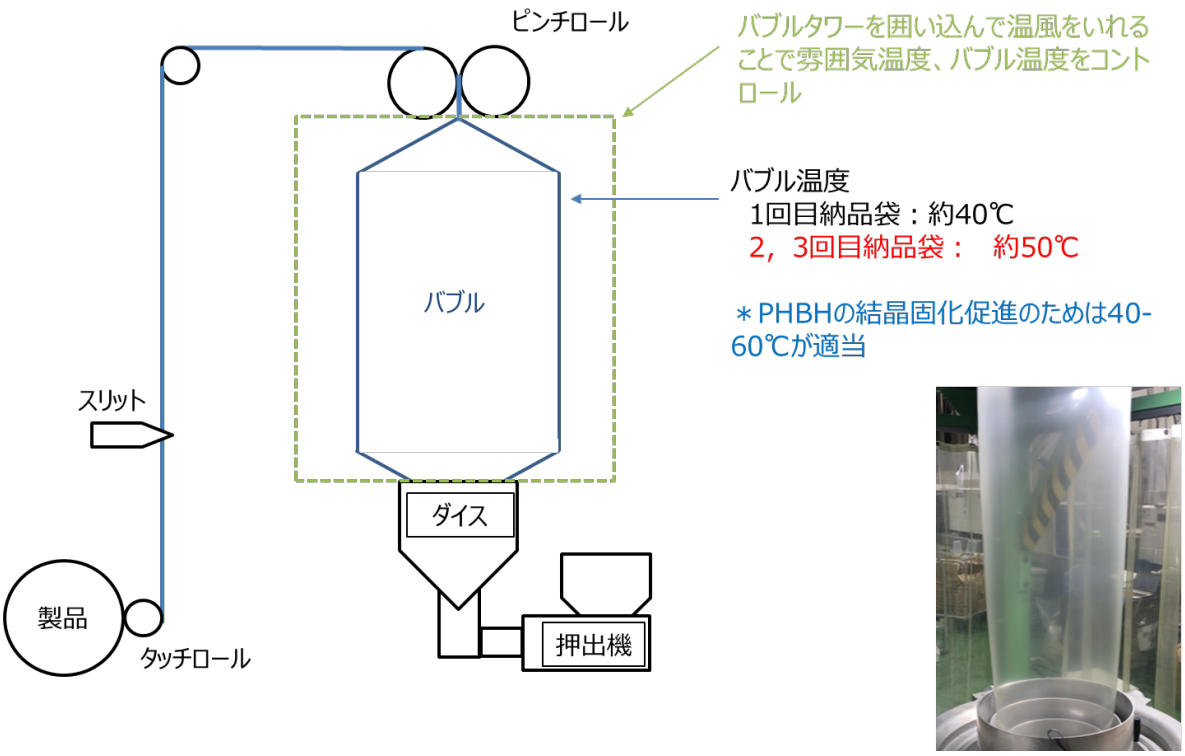


図 41　第 2、3 回試作袋における成形条件の最適化

取っ手部

2Lサイズ	マチL	マチR	平部	備考
Lot 0811	10.1-10.3	9.1-10.3	5.9-6.6	1回目納品
Lot 09/01	13.3	12.0	7.0	2,3回目納品

5Lサイズ	マチL	マチR	平部	備考
Lot 0811	9.7	10.6	5.7	1回目納品
Lot 09/01	14.3	11.2	6.8	2,3回目納品

10Lサイズ	マチL	マチR	平部	備考
Lot 0811	3.8	6.5	4.9	1回目納品
Lot 08/31	12.6	11.7	8.0	2,3回目納品

図 42　試作袋（第 1～3 回）のヒートシール強度（単位：N/15 mm）

水12kg 入れても破れ無し
（1~2kg/小袋を計12kg）
＊1回目納品袋は水4-5kg程度で取っ手がちぎれた

水14kgの満杯状態で底ぬきあり、
ただし持ち手は切れず
（1~2kg/小袋を計12kg+水2kg）

図 43　第 2 回試作袋の簡易試験結果

（追加事業対応）

京都市地域住民より、10 L 袋の口がもう少し広いほうがバケツに被せやすく便利であるとの改善アイデアを頂いた。このような更なる使い勝手改善、及び製袋ロス削減（打ち抜きを無くす）とともに、強度不足の原因となりやすいマチのない平袋の追加試作を実施し、（株）カネカ社内にて使い勝手の調査を実施した。さらには、底漏れ対策のため、従来のヒートシール線 1 本に対して 2 本に増やした袋についても検証を実施した。評価の結果、以下のことが分かった。

・マチ（フィルム四枚重ね）を無くすことで弱い接着点がなくなり、均一的に強いシールができた。
・シール不良（剥離）は発生せず、安全対策の 2 重シールは不要であることがわかった。
・平袋（案 1）は取っ手や打ち抜きなく、バケツの縁やごみと干渉する部分がなく最も使いやすい。

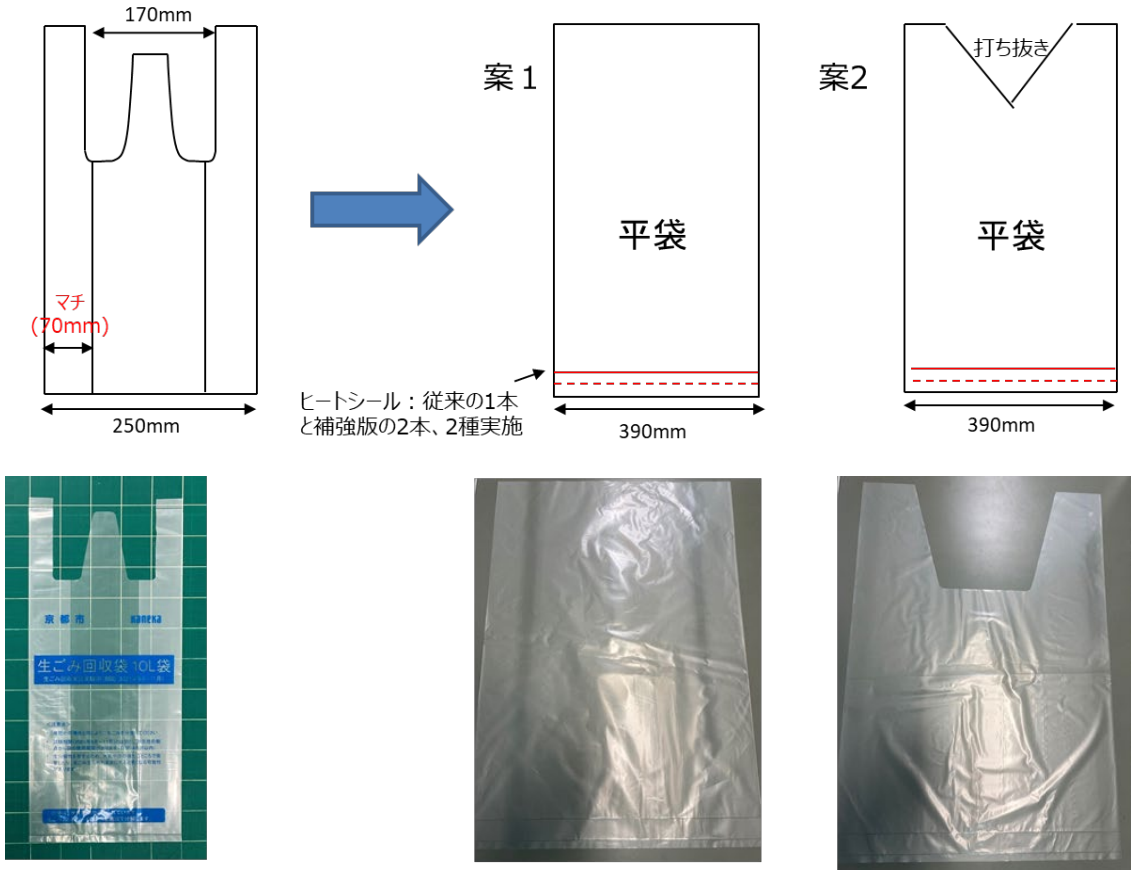


図 44　更なる袋の改善

シール強度N/15mm	平部	マチ3枚目/4枚目	備考
従来最良品	8.0	4.3	21年2,3回納品
今回品	9.5	マチ無し	2月改良検討品

従来最良品

水14kgの満杯状態で底ぬき
（1~2kg/小袋を計12kg+水2kg）

今回品

水14kgでも底ぬきなし（水12kgで床から10cm
ほど離れて連続的に数回落としても割れない）

図 45　追加試作袋の評価結果

3.1.4 まとめと課題

廃食用油を原料とした PHBH を一部用いた PHBH 改良配合によりインフレーション量産機で生ごみ袋を量産可能であり、また生ごみ袋として実使用可能なことを京都市地域住民による実用試験により実証した。また、総じて一般の袋よりも使い勝手がよく、バケツより生ごみを運びやすいとの意見も頂いた。

3.2 PHBH 製生ごみ袋を用いた生ごみの分別方法等に関する検討

3.2.1 目的

次の 2 点を目的とし、PHBH 製生ごみ袋を用いた生ごみの分別方法等に関する実証実験を行った。

① PHBH 製生ごみ袋の実用性

② 検証及びベンチスケール化試験用の PHBH 製生ごみ袋に入った生ごみの回収

また、これらの実証を踏まえ、廃棄物と併せてトータルで分別・収集方法に関する検討を行い、大都市のみならず中小規模の自治体への展開も視野に入れるとともに、消化液の肥料利用に悪影響がないように異物の混入をなくす方法も検討した。

3.2.2 方法

（1）実証地域

京都市京北地区（旧・京北町山国地区）

（2）対象世帯

現在京都市の実施する「生ごみのコミュニティ堆肥化事業（以下、「生ごみ堆肥化事業」という。）」に参加している世帯

（3）実証期間

約 3 カ月（試行期間：2021 年 8 月 23 日～8 月 31 日、本格実証期間：9 月 1 日～11 月 30 日）

（4）実施手法

① 参加世帯を訪問し、PHBH 製生ごみ袋及び実証内容にかかるちらしを配布した。なお、配布するごみ袋は、小袋（2 L）、中袋（5 L）、大袋（10 L）の 3 種類（図 46）。

② 参加世帯は日常的に出た生ごみを PHBH 製生ごみ袋に入れ、回収拠点に持参した（図 47）。回収拠点は生ごみ堆肥化装置が設置されている京北運動公園（図 48）であり、生ごみ堆肥化装置は実証期間中電源を切断した（図 49）。

③ ごみを持参した人は、回収拠点にある計量器でごみの重量を計り、その場にある記録用紙に「持参日」「名前」「ごみの重量」「小袋（2 L）・中袋（5 L）・大袋（10 L）のそれぞれの使用枚数」を記入したのち、生ごみを PHBH 製生ごみ袋ごとストッカーに投入した（図 50、図 51）。

④ 週に 2 回（概ね火・金）、回収担当者が生ごみを回収する。回収した生ごみは（株）バイオガスラボに移送した。

⑤ 9 月、10 月、11 月終了時に全参加世帯を訪問し、アンケート及び追加の PHBH 製生ごみ袋を配布した。アンケート回収箱は回収拠点に設置した。

⑥ 記録用紙、アンケート、ヒアリング結果をもとに実用性を検証した。

図 46　配布した PHBH 製生ごみ袋
（左から小袋（2L）、中袋（5L）、大袋（10L））

図 47　実証実験参加世帯の分布と回収拠点

図 48　回収拠点（京北運動公園）

図 49　回収ボックス及び堆肥化装置

図 50　計量スペース
（計量器、記録用紙、アンケートボックス）

図 51　回収時の様子

（５）実施スケジュール

次のスケジュールのとおり実施した。

日付	内容
8 月 16 日（月）～ 8 月 20 日（金）	・生ごみ袋の配布 ・実証告知用チラシの配布
8 月 23 日（月）～	・生ごみ回収実証実験（試験実施）開始
8 月 30 日（月）～	・生ごみ回収実証実験（本格実施）開始
9 月 28 日（金）	・第 1 回目のアンケートを配布（10 月 8 日締切） ・新たな生ごみ袋の配布
11 月 1 日（月）	・第 2 回目のアンケートを配布（11 月 12 日締切） ・新たな生ごみ袋の配布及びこれまで使用した生ごみ袋の回収
11 月 30 日（金）	・実証実験終了 ・第 3 回目のアンケートを配布（12 月 14 日締切） ・生ごみ袋の回収

（６）アンケート内容

参加世帯に配布した内容は次のとおり。10 月アンケートからは袋の改良の実感を確認するための設問を追加した。

- 9 月アンケート

設問番号	設問の内容
１－（１）	家族（同居人数）の人数
２－（１）	よく使用した袋のサイズ
２－（２）	一般的なごみ袋やレジ袋と比べた感想
２－（３）	生ごみ専用バケツによる運搬と比べた感想
２－（４）	PHBH 製生ごみ袋の不具合
２－（５）	PHBH 製生ごみ袋の使い勝手についての感想
３－（１）	回収拠点に持参した生ごみの割合
３－（２）	回収拠点に持参しなかった生ごみの処理方法及び持参しなかった理由
３－（３）	家庭での PHBH 製生ごみ袋のセット方法
３－（４）	生ごみの持参頻度
３－（５）	PHBH 製生ごみ袋を用いたことによる可燃ごみ量の変化
３－（６）	回収拠点までの運搬方法
３－（７）	回収拠点までの交通手段
４－（１）	実証実験等に関する意見・感想

- 10 月、11 月アンケート

設問番号	設問の内容
１－（１）	家族（同居人数）の人数
２－（１）	新たに配布した袋の使用の有無　**※10 月より追加**
２－（２）	当月によく使用した袋のサイズ
２－（３）	一般的なごみ袋やレジ袋と比べた感想
２－（４）	生ごみ専用バケツによる運搬と比べた感想
２－（５）	当初配布した生ごみ袋との印象の変化　**※10 月より追加**
２－（６）	PHBH 製生ごみ袋の不具合
２－（７）	PHBH 製生ごみ袋の使い勝手についての感想
３－（１）	回収拠点に持参した生ごみの割合
３－（２）	回収拠点に持参しなかった生ごみの処理方法及び持参しなかった理由
３－（３）	家庭での PHBH 製生ごみ袋のセット方法
３－（４）	生ごみの持参頻度
３－（５）	PHBH 製生ごみ袋を用いたことによる可燃ごみ量の変化
３－（６）	回収拠点までの運搬方法
３－（７）	回収拠点までの交通手段
４－（１）	実証実験等に関する意見・感想

3.2.3 結果

（1）ごみ組成分析結果

実証期間中、京北山国地区のごみ組成を調査した。

① 資料採取日

令和 3 年 8 月 26 日

② 採取検体数及び採取量

3 検体　計 21.69 kg

③ 分析結果

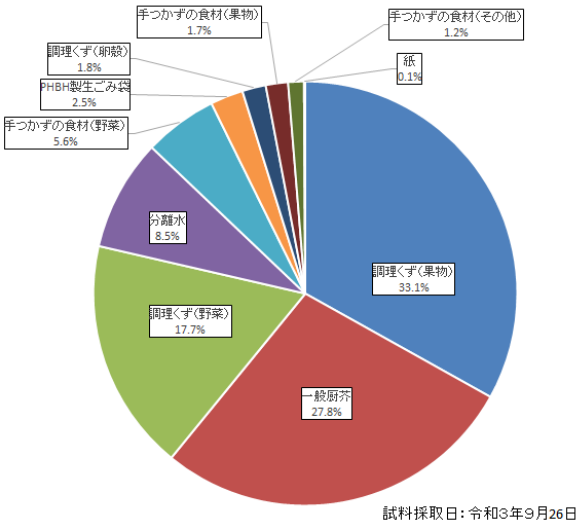


図 52　ごみ種類組成
（3 検体平均湿重量比率）

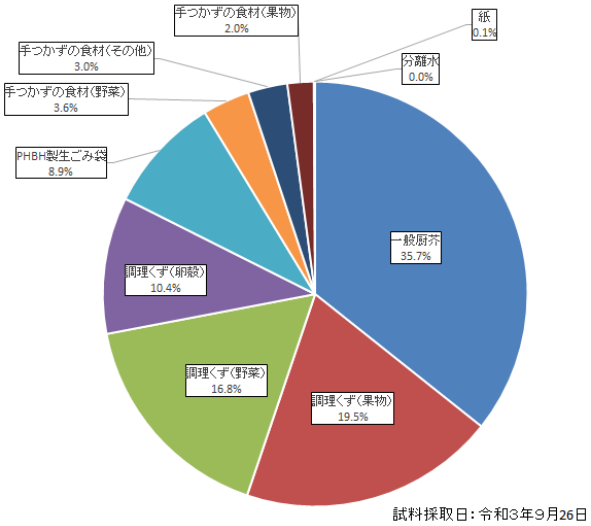


図 53　ごみ種類組成
（3 検体平均乾重量比率）

表 19　種類ごとの 3 成分（3 検体平均）

	湿重量比 (%)	乾重量比 (%)	水分 (%)	灰分 (%)	可燃分 (%)
手つかずの食材(野菜)	5.6%	3.6%	93.1%	0.5%	6.4%
手つかずの食材(果物)	1.7%	2.0%	87.2%	0.5%	12.3%
手つかずの食材(その他)	1.2%	3.0%	72.5%	0.5%	27.0%
調理くず(野菜)	17.7%	16.8%	89.8%	0.9%	9.3%
調理くず(果物)	33.1%	19.5%	93.6%	0.6%	5.8%
調理くず(卵殻)	1.8%	10.4%	36.5%	32.1%	31.4%
一般厨芥	27.8%	35.7%	86.3%	0.8%	12.9%
紙	0.1%	0.1%	87.8%	0.0%	12.2%
PHBH製生ごみ袋	2.5%	8.9%	60.8%	0.4%	38.8%
分離水	8.5%	0.0%	100.0%	0.0%	0.0%
合計	100.0%	100.0%	89.2%	1.2%	9.6%

表 20　発熱量

高位発熱量	2,020～2,170 kJ/kg
低位発熱量	－800～－700kJ/kg

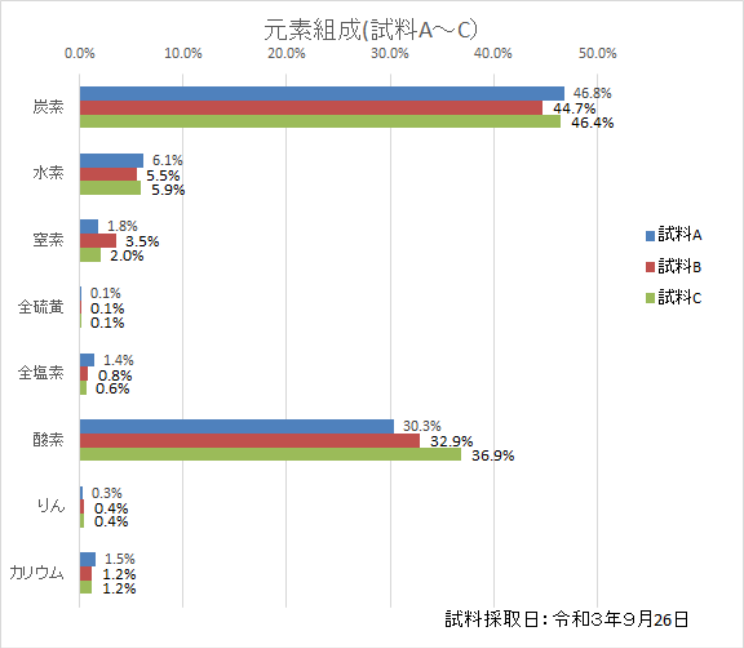


図 54　元素組成

- 重量比率でみると調理くずで約 80%（湿ベース）を占め、そのうち約 6 割程度が果物・野菜であった（図 52、図 53）。
- 回収された生ごみの中に不燃物やプラスチック等の処理不適物の混入はなかった。
- バイオガス化の処理不適物である卵の殻が湿ベースで約 2%（乾ベースで約 10%）の混入が見られたが、堆肥化実証時のままの分別（今回実証時に不適物としてアナウンスしなかった）であったためと思われる。
- 回収した生ごみの水分比率は約 90%で、低位発熱量は計算上マイナスとなり、そのままでは自燃しない状態であることが示唆された。（表 19、表 20）種類組成ごとの水分比率は、調理くず（卵殻）が約 37%、PHBH 製生ごみ袋が約 61%と低いが、それ以外は 86～94%と高い水分比率であった。
- 元素組成では、窒素含有率が 2.8～3.5%、塩素含有率が 0.6～1.4%と比較的高い。なお、ごみの可燃分の元素組成事例でいうと、窒素含有量 0.31～0.66%、塩素含有量 0.13～0.30%程度である [9]。りん含有率は 0.3～0.4%、カリウムの含有量は 1.2～1.5%であった。（図 54）

9 出典：ごみ処理施設整備の計画・設計要領 2017 改訂版　（公社）全国都市清掃会議　平成 29 年 4 月 30 日　「東京都の調査による可燃分の元素組成の 2009～2014 の分析値」

（２）回収結果

生ごみの回収結果は次のとおりであった。

表 21　生ごみ回収結果

	回収結果	
参加世帯数	28	世帯（26 世帯投入）
延べ投入回数	369	回
合計投入量	1230.9	kg
1 回あたりの平均投入量	3.34	kg / 回
日・世帯あたりの生ごみ投入量	473.4	g / 日・世帯
小袋（2 L）使用枚数	359	枚
中袋（5 L）使用枚数	188	枚
大袋（10 L）使用枚数	157	枚

① 参加世帯数

本事業には 28 世帯が参加を表明し、うち 26 世帯が実際に生ごみを回収拠点に持ち込んだ。

当初は 20 世帯程度を想定していたがそれを上回る人数が参加した。また事業のことを聞いて事業途中から参加を申し出た住民が 3 世帯あった。

② 延べ投入回数

本事業期間中に生ごみが投入された回数は延べ 369 回であった。

実証期間はちょうど 100 日間であり、1 日平均約 3.7 回（世帯）が投入したことになる。

③ 合計投入量

本事業期間中に投入された生ごみの量は合計 1,230.9 kg であった。

実証期間はちょうど 100 日間であり、1 日平均約 12.3 kg 投入されたことになる。

④ 1 回あたりの平均投入量

②及び③の結果から、1 回当たりの平均投入量は約 3.34 kg/回であった。

⑤ 1 日 1 世帯あたりの生ごみ投入量

1 日 1 世帯あたりの生ごみ投入量（③÷100 日間÷26 世帯）は約 473.4 g/日・世帯であった。

当初は約 380 g/日・世帯を想定しており、想定よりも約 90 g 多かった。

⑥ 小袋、中袋、大袋使用枚数

各袋の使用枚数は、それぞれ小袋（2 L）が 359 枚、中袋（5 L）が 188 枚、大袋（10 L）が 157 枚であった。

⑦ 1 世帯当たりの投入回数

記録から 1 世帯あたりの投入回数を集計したところ、10～14 回投入が 9 世帯、15～19 回投入したのが 7 世帯、20 回以上投入したのが 5 世帯であり、多くの世帯が実証期間中 10 回以上投入していることがわかった（次図）。

記録用紙への記入を最終日までしていなかった世帯が 1 件あり、そのため「1～4 回」が 1 件計上されているものの、それ以外の世帯は最低でも 5 回以上は投入しており、事業の継続性が見て取れる。

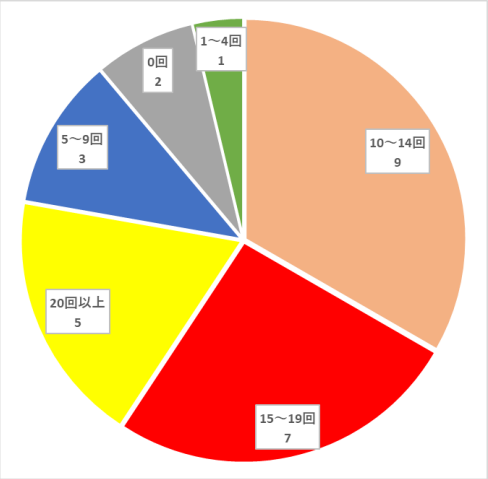


図 55　1 世帯当たりの投入回数

⑧ 世帯ごとの平均ごみ重量

記録から世帯ごとに 1 回あたりの平均ごみ重量を集計したところ、4.3 kg～6.0 kgが 10 世帯、2.1～4.0 kgが 9 世帯、0.1 kg～2.0 kgが 5 世帯であった（次図）。

1 日当たりの重量から換算すると 0.1 kg～2.0 kgとする世帯は週に 2 回程度、2.1～4.0 kgとする世帯は週に 1 回程度、4.3 kg～6.0 kgは 10 日に 1 回程度投入している計算になる。

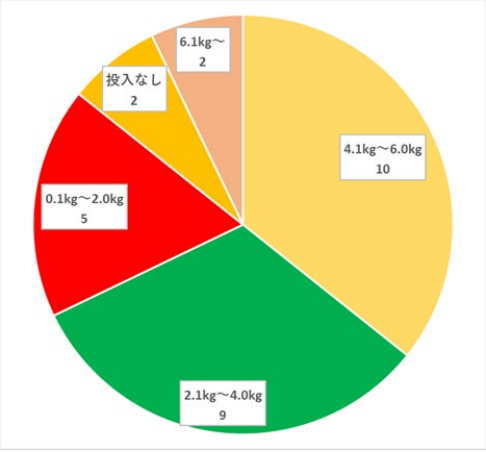
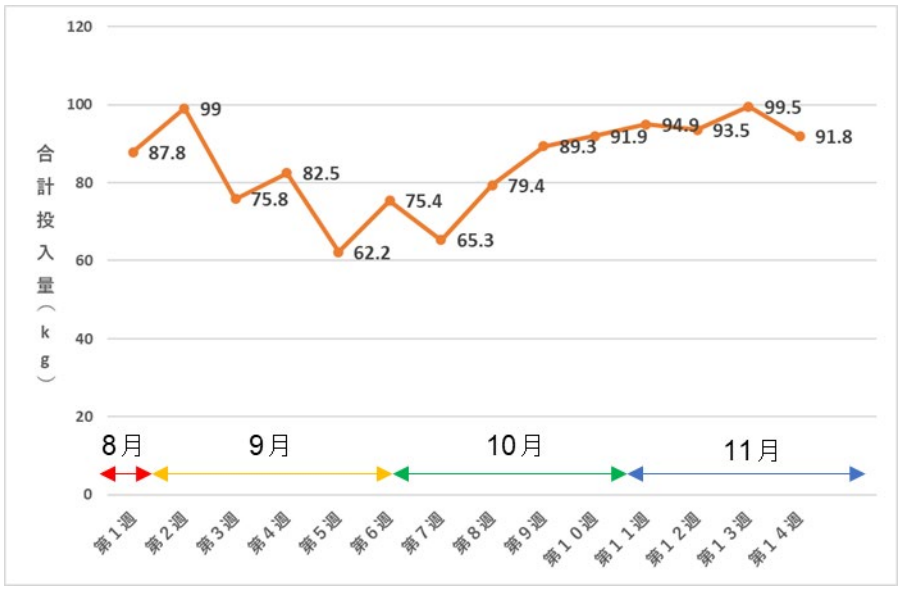


図 56　世帯ごとの平均重量

⑨ 週別投入量の推移

記録から 1 週間ごとの合計投入量を算出し、推移をグラフ化した（次図）。

9～10 月にかけて一旦投入量が落ち込んでいるものの、その後は安定して約 90～100 kg/週が投入されている。



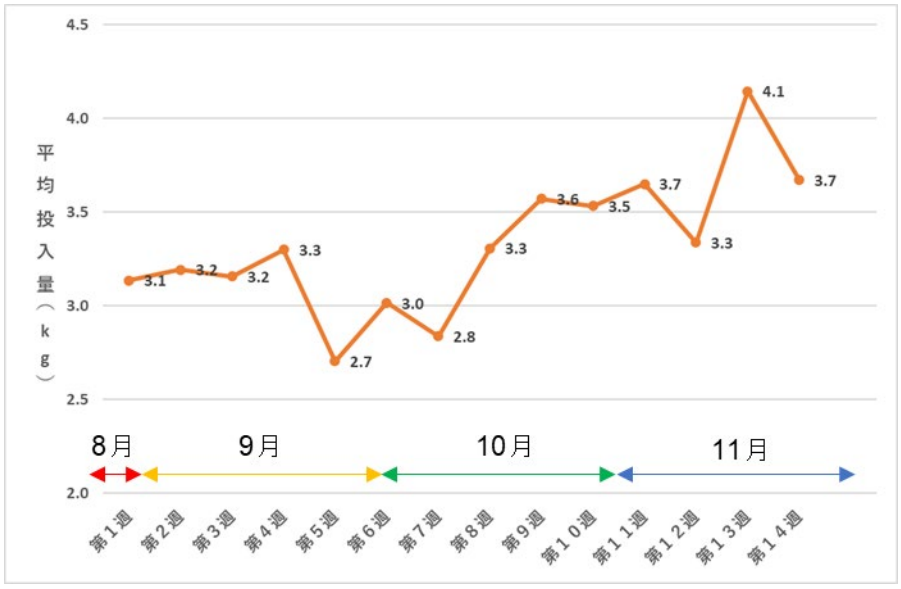
※最終週は 2 日間（11/29，30）しかなかったため除く

図 57　週別投入量の推移

⑩ 1 回あたりの平均投入量の週別推移

記録から 1 回あたりの平均投入量を算出し、週別の推移をグラフ化した（次図）。

当初は 1 回あたり 3.1～3.2 kg程度で推移し、9 月後半に一度落ち込んだ後、10 月からは 1 回あたり約 3.3～4.1 kg程度に上昇した。冬季に入り生ごみの腐敗が進みにくくなったことが原因ではないかと推察される。



※最終週は 2 日間（11/29，30）しかなかったため除く

図 58　1 回あたりの平均投入量の推移

（３）アンケート結果

① アンケート概要

表 22　アンケート概要

	1 回目（9 月）	2 回目（10 月）	3 回目（11 月）
配布日	2021/9/28	2021/11/1	2021/11/30
対象期間	8/23～9/28	9/29～11/1	11/2～11/30
回収/配布世帯数	19 世帯/27 世帯 （回収率 70.4%）	22 世帯/28 世帯 （回収率 78.6%）	19 世帯/28 世帯 （回収率 67.9%）
回答者の 平均世帯人数	3.0 人	2.8 人	2.9 人
ごみ袋の回収等	生ごみ袋は回収せず、口頭で新生ごみ袋を使うよう依頼	前回配布分までの生ごみ袋は基本的に回収又は廃棄依頼	ごみ袋は基本的に回収又は廃棄依頼

アンケートは下記の要領で 3 回実施した。各月末に参加世帯全てにアンケートを配布し、過去 1 か月分を対象とした取組の実施状況についてのみ回答してもらうこととした。

アンケートの回収率は約 7～80%、回収されたアンケートの記載によると、世帯人数の平均は概ね 2.8～3.0 人/世帯であった。

なお、アンケートの配布と合わせて生ごみ袋の配布・回収も行った。当初配布した分はヒートシール部分の接着が弱いものであったため、9 月に改良版の生ごみ袋を配布した。しかし、この時は旧生ごみ袋の回収をしなかったことから、10 月中は両者の使用が混同していたおそれがある。2 回目のアンケート配布時には、それまで配布した生ごみ袋をすべて回収し改良版生ごみ袋を配布したため、11 月時には改良版生ごみ袋にすべて差し変わっているものと思われる。

② アンケート分析結果

i) 投入頻度について

設　問　**生ごみの投入頻度はどれくらいか**

回　答

	9 月	10 月	11 月
ほぼ毎日	0	0	0
2～3日に1回	4	1	2
1週間に1回	8	17	14
その他	7	3	2

※「その他」の内訳
週に 1～2 回（1 名）
4～5 日に 1 回（1 名）
10 日に 1 回（3 名）
2 週間に 1 回（1 名）
10～15 日に 1 回（1 名）
月に 2 回（1 名）

参　考

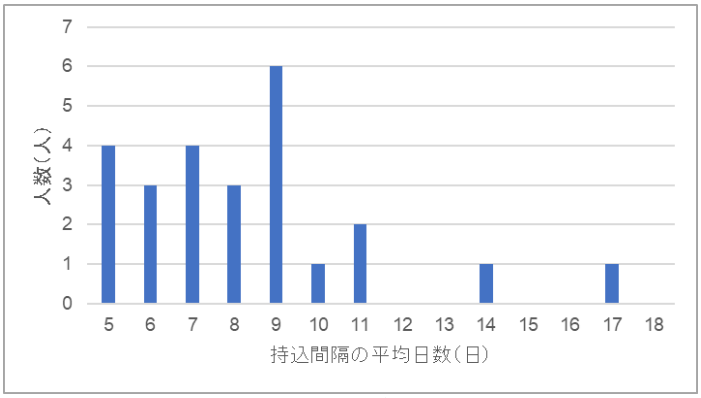


図 59　生ごみの投入頻度（記録より作成）

※（初回投入日から最終投入日までの日数）÷（投入回数）で算出
※　記入忘れで 1 回しか記入していない者（1 名）を除く

総　括

- 投入頻度は 5 日～9 日に 1 回と回答した人が多い。
  すなわち、10 日に 1～2 回が平均投入頻度という計算になる。
- 5 日に 1 回の場合、約 470g/日・世帯×5 日＝約 2.4kg となる。
  これは、小袋 2 枚 or 中袋 1 枚程度に相当する。
- 9 日に 1 回の場合、約 470g/日・世帯× 9 日＝約 4.0kg となる。
  これは、中袋 2 枚 or 大袋 1 枚程度に相当する。
  - 参考：小袋＝1.5kg、中袋＝3.0kg、大袋 4.5kg が目安となる。

ii) 袋種別の使用傾向について

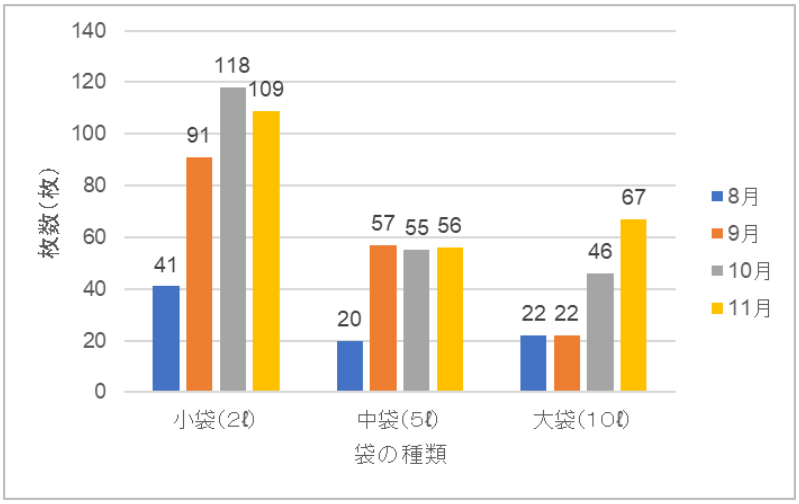
<table>
<tr><td><u>設　問</u></td><td><u>よく使った生分解性生ごみ袋の大きさはどれか</u></td></tr>
<tr><td><u>回　答</u></td><td>
<table>
<tr><th></th><th>9 月</th><th>10 月</th><th>11 月</th></tr>
<tr><td>小袋（2 L）</td><td>8</td><td>10</td><td>6</td></tr>
<tr><td>中袋（5 L）</td><td>6</td><td>10</td><td>6</td></tr>
<tr><td>大袋（10 L）</td><td>4</td><td>4</td><td>10</td></tr>
<tr><td>まんべんなく使う</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td><u>参　考</u></td><td>


図 60　実際に使われた袋の枚数（記録より作成）
※8 月は 1 週間（8/23～31）のみ
</td></tr>
<tr><td><u>総　括</u></td><td>
➢ 小袋（2 L）の使用率が圧倒的に多く、全使用枚数の 50%以上を占める。
➢ 3 回目のアンケートでは大袋（10 L）を使用したという回答が多く、実際の使用枚数を見ても 11 月は中袋よりも多く使用されている。大袋の使用が増加した理由の仮説としては、
① 袋の品質改善により破れにくくなったため
② 季節変化に伴い気温が低くなり腐敗の進行が鈍化し、大袋に貯める傾向に変化したため
の 2 点が考えられる。
</td></tr>
</table>

iii) 袋の使い勝手について

設問１ **PHBH 製生ごみ袋は一般的なごみ袋やレジ袋と比べてどのように感じたか**

回答１

	9 月	10 月	11 月
総じて一般的な袋より良い	5	9	11
手触りがいい	6	8	7
持ち手の強度が弱い	5	7	4
破れやすい	3	1	3
手触りが悪い	1	2	2
袋が小さい（１０ℓ以上の袋が欲しい）	0	0	1
あまり変わらない	2	2	1
その他	2	1	1
漏れやすい	5	2	0
臭いがあり不快	2	2	0
総じて一般的な袋より悪い	0	1	0

- 赤字はポジティブな意見、青字はネガティブな意見

設問２ **最初に配布した袋と比べ変化を感じたか（10 月より追加質問）**

回答２

	10 月	11 月
破れにくくなった	7	7
持ち手の強度が強くなった	4	7
変化を感じられない	7	7
漏れにくくなった	4	6
臭いが良くなった	2	5
持ち手の強度が弱くなった	0	2
手触りが良くなった	1	2
破れやすくなった	0	1
漏れやすくなった	0	0
手触りが悪くなった	0	0
臭いが悪くなった	0	0
その他	0	0

- 赤字はポジティブな意見、青字はネガティブな意見

設問３ **PHBH 製生ごみ袋の使い勝手はどうだったか（自由記述）**

回答３

- 赤字はポジティブな意見、青字はネガティブな意見

【9 月】

- 出かけるついでに生ごみが出せるので便利だが、液漏れするので他のビニール袋で二重にして持っていかないといけないので困る
- 横に大きく間口が広い方が生ごみを入れやすいと思う
- 大袋を使うといっぱいになる頃には臭いがきつくなる
- 生ごみを 10 L まで溜めるより小袋で出す頻度を増やす方が良いと思う
- 何度も生ごみを入れていると、袋の口がやわらかくなって生ごみが入れにくくなる
- 穴があきやすい
- 袋が有料なら利用を考える

<table>
<tr><td></td><td>
➢ 三角コーナーの代替として使ったので2Lの袋でも少し大きいと感じた
➢ 袋のまま投入できるので手が汚れない

【10月】
➢ 袋に「投入してはいけないごみ」の注意書きがあればいい
➢ 新たに配布された袋は手触りも違って丈夫そうに感じた
➢ 以前より液漏れが少なくなった
➢ 良い取組だと考えるが、ごみ袋の製造にどのくらいコストがかかるのか気になる

【11月】
➢ 液漏れがなく良かった
➢ 持ち手の強度が強くなった、改良が感じられる
</td></tr>
<tr><td><u>設問４</u></td><td><u>PHBH製生ごみ袋とバケツはどちらが運びやすいか</u></td></tr>
<tr><td><u>回答４</u></td><td>
<table>
<tr><th></th><th>9月</th><th>10月</th><th>11月</th></tr>
<tr><td>バケツのほうが運びやすい</td><td>2</td><td>4</td><td>2</td></tr>
<tr><td>生分解性ごみ袋のほうが運びやすい</td><td>15</td><td>17</td><td>15</td></tr>
<tr><td>変わらない</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr>
</table>
➢ 赤字はポジティブな意見、青字はネガティブな意見
【「生分解性生ごみ袋のほうが運びやすい」と答えた理由（抜粋）】
➢ 生ごみ袋ごと投入できる（9月）
➢ 生ごみを出した後そのまま仕事に出勤できる（9月）
➢ バケツが汚れにくい、臭わない（9月）
➢ バケツは水切り用の新聞紙などを引いているので重い（9月）
➢ 生ごみ袋は持ち手がついているので運びやすい （10月）
➢ 生ごみ袋はかさばらない （10月）
➢ バケツは投入後少し生ごみが残ってしまう （10月）
➢ バケツは生ごみが残るので洗わないといけない（11月）
➢ 少量ずつでも出せる（11月）
➢ 自分が持てる分だけ持っていける（11月）

【「バケツのほうが運びやすい」と答えた理由（抜粋）】
➢ 生ごみ袋を作るための資源がもったいない（9月）
➢ バケツにはフタがある（9月）
➢ 生ごみ袋もその都度運べるわけではないので、結局溜めておく入れ物が必要になる（10月）
➢ 生ごみ袋は車で運ぶ時に汚れそう（10月）

【「変わらない」と答えた理由（抜粋）】
➢ 生ごみ袋はバケツを洗う必要はないが、液漏れが不安（9月）
➢ 夏場は臭いがあるのでバケツのほうが良いが、通常は生ごみ袋のほうが良い（11月）
➢ バケツに生ごみ袋を入れて運ぶので変わらない（11月）
</td></tr>
<tr><td><u>総　括</u></td><td>
➢ 全体的な印象については、「総じて一般的な袋より良い」「手触りが良い」など全体的に好印象である。
➢ 9月当初は「出かけるついでに生ごみが出せる」「袋のまま投入できる」と便利さを認める一方、「液漏れ」や「強度」を気にする回答が多かったが、10月以降は「破れにくくなった」「強度が強くなった」「漏れにくくなった」などの意見が見られ、品質改善の効果を肌で感じ取れている様子が伺えた。
➢ 使い方について、9月は「大袋を使うと臭いがきつくなる」「小袋で出す頻度
</td></tr>
</table>

	を増やす」という回答が見られたが、季節性のものと思われる。 ➢ バケツとの比較に関する設問では、「生ごみ袋のほうが運びやすい」という意見が圧倒的に多かった。生ごみ袋を支持する意見としては、「袋ごと投入できる」「ついでに投入できる」「バケツは汚れるので洗わなければならない」「自分のペースで投入できる」という意見が多かった。一方、「バケツを支持する」「どちらも変わらない」という意見としては、袋の強度の問題、袋の製造にかかる資源の問題、生ごみ袋でも自分の運用は変わらないという意見があった。 ➢ 袋の改善案として、「間口が広い方が良い」「分別基準を袋に記載してほしい」という意見があった。 ➢ その他の意見として、有料化に対する懸念やごみ袋の LCA に対する意見があった

iv) 袋の不具合について

設　問	**PHBH 製生ごみ袋を使う上でどのような不具合があったか**
回　答	➢ 赤字はポジティブな意見、青字はネガティブな意見 【9 月】 ➢ バケツにためてあった生ごみを水切りして袋に移したところ、すぐに液が漏れた ➢ 10 L、5 L の袋は生ごみを入れると重くなり破れた ➢ 持ち手の接着部が剥がれた ➢ 少しの摩擦で穴があいた ➢ 数日置いておくと液体が漏れた ➢ 計量の時に底が漏れているのがわかり困った ➢ 持ち手の部分がちぎれた 【10 月】 ➢ 2 L、5 L については特に問題がなかった ➢ 持ち手が破れやすかった ➢ 持ち手とは別の袋の口を結ぶところが結んでいる途中で切れた 【11 月】 ➢ すぐに破れることが 2 回ほどあった ➢ 持ち手の接着部がちぎれた
総　括	➢ 9 月は「液漏れ」「持ち手の接着部がちぎれる」「時間経過や摩擦で穴が開く」などの不具合が多数確認できた。「持ち手の結ぶ部分が切れた」という意見や、「何度もごみを入れていると間口の部分がよれる」という意見もあった。 ➢ 10 月以降は改善されたのか、この項目の記述は減少した。

v) 生ごみの持ち込み割合について

<table>
<tr><td><u>設　問</u></td><td><u>生ごみの持ち込み割合は、また持ち込まなかった時の理由と持ち込み場所は</u></td></tr>
<tr><td><u>回　答</u></td><td>【持ち込み割合】
<table>
<tr><td></td><td>9 月</td><td>10 月</td><td>11 月</td></tr>
<tr><td>全て持っていった</td><td>7</td><td>12</td><td>10</td></tr>
<tr><td>ほとんど持っていった</td><td>11</td><td>9</td><td>7</td></tr>
<tr><td>少しだけ持っていった</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr>
</table>
【持ち込まなかった場合の持ち込み場所と理由】
<table>
<tr><th>他の持ち込み場所</th><th>持っていかなかった理由</th></tr>
<tr><td>燃えるごみに出した</td><td>･エビのからや魚の骨などかたいものだった
･他のごみが入ってしまい分別ができなかった
･投入場所に持っていく時間的余裕がなかった
･投入場所に持って行けなかった
･魚の内臓等があった</td></tr>
<tr><td>自宅のコンポスト</td><td>･生野菜が多かった</td></tr>
<tr><td>自宅のコンポスト又は
燃えるゴミに出した</td><td>･生ごみの中に紙類等が混じってしまった
･生っぽくない野菜のガラなどがあった</td></tr>
<tr><td>自宅の畑に入れた</td><td>･分解して土の栄養となる
･用事があった</td></tr>
</table></td></tr>
<tr><td><u>総　括</u></td><td>➢ 家庭から出た生ごみのうちどれくらい持ち込んだかを聞いたところ、「全て」「ほとんど」という回答が半々で、「少しだけ」という回答は 0 件だった。投入する際は家庭から出る生ごみのほとんどを投入していることがわかる。
➢ 持ち込まなかった生ごみをどの様に処理したかを聞いたところ、「燃えるごみ」「コンポスト」「畑」という回答だった。
➢ 持ち込まなかった理由としては、「不純物が入った（紙、殻・骨・内蔵等)」「何かしらの理由で持っていけなかった」「畑の栄養にした」の主に 3 点だった。</td></tr>
</table>

vi) バケツと袋の運用方法について

<table>
<tr><td>設　問</td><td>生ごみバケツと PHBH 製生ごみ袋をどのように運用していたか</td></tr>
<tr><td>回　答</td><td>
<table>
<tr><th></th><th>9 月</th><th>10 月</th><th>11 月</th></tr>
<tr><td>生分解性生ごみ袋に生ごみを直接入れた後、そのごみ袋を生ごみ専用バケツに入れた</td><td>6</td><td>5</td><td>3</td></tr>
<tr><td>生ごみ専用バケツは使わず、生分解性生ごみ袋に生ごみを直接入れた</td><td>3</td><td>6</td><td>7</td></tr>
<tr><td>生ごみ専用バケツは使わず、生分解性生ごみ袋に生ごみを直接入れ、さらにそれより大きな生分解性生ごみ袋に入れた</td><td>2</td><td>3</td><td>1</td></tr>
<tr><td>生ごみ専用バケツに直接生ごみを入れ、生分解性生ごみ袋に移し替えた</td><td>6</td><td>4</td><td>4</td></tr>
<tr><td>生ごみ専用バケツに生分解性生ごみ袋をあらかじめセットし、その中に生ごみを直接入れた</td><td>3</td><td>5</td><td>6</td></tr>
<tr><td>生分解性生ごみ袋に生ごみを直接入れ、そのごみ袋を、生分解性生ごみ袋をセットした生ごみ専用バケツに入れた。</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr>
<tr><td>その他</td><td>2</td><td>2</td><td>0</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td>総　括</td><td>
➢ バケツと生ごみ袋をどのように運用していたかを確認したところ、9 月当初は「生ごみ袋に生ごみを直接入れ、そのごみ袋をバケツに入れた」「バケツに生ごみを入れ、生ごみ袋に移し替えた」などバケツを使っている様子が伺えたが、10 月以降は「バケツを使わず生ごみ袋に生ごみを直接入れた」「バケツに生ごみ袋をセットして生ごみを入れた」など、バケツを使わない、あるいは上手に併用する使い方へと変わっている。
➢ 変化の理由としては、「生ごみ袋のみによる運用に慣れた」、「夏場はバケツにフタをして保管することで臭いを防いだ」の２点が考えられる。
</td></tr>
</table>

vii) 運搬について

設問１　**運搬場所までの交通手段**

回答１

		9 月	10 月	11 月
自家用車		19	22	18
	軽自動車	11	10	8
	普通車	6	4	4
	軽トラック	6	10	8
	その他	0	0	0
自転車		1	2	1
徒歩		0	0	0
その他		0	0	0

設問２　**運搬の際にバケツなどを用いたか**

回答２

	9 月	10 月	11 月
生ごみ専用バケツに生ごみ袋を入れて運んだ	8	14	6
別の容器（生ごみ専用バケツ以外）に生ごみ袋を入れて運んだ	5	2	5
生ごみ専用バケツや別の容器を使わず生ごみ袋をそのまま運んだ	5	5	6
その他	2	0	1

総　括

- 京北は車社会のため、運搬時の交通手段はほとんど自動車である。
- 運搬時は、生ごみ専用袋のみで運搬する人とバケツや他の容器に生ごみ袋をいれて運搬している人に分かれた。運搬の際のバケツの利用には、車の使用の有無や車種等と関係性があると推測される（軽トラや自転車ならば生ごみ袋のみで運搬している可能性が高い等）

viii) 一般可燃ごみ量の変化について

<table>
<tr><td><u>設問１</u></td><td><u>バケツから PHBH 製生ごみ袋に変えたことで、運搬する生ごみ量の変化はあったか</u></td></tr>
<tr><td><u>回答１</u></td><td>
<table>
<tr><td></td><td>9 月</td><td>10 月</td><td>11 月</td></tr>
<tr><td>運搬する生ごみ量が増えた</td><td>2</td><td>5</td><td>2</td></tr>
<tr><td>運搬する生ごみ量が減った</td><td>3</td><td>2</td><td>2</td></tr>
<tr><td>あまり変わらない</td><td>13</td><td>13</td><td>13</td></tr>
</table>
【生ごみ運搬量が増えた】
➢ スイカの皮など大きなものは今まで出していなかったが、この機会から入れて出した。(9 月)
➢ 少量で出せるから（10 月）

【生ごみ運搬量が減った】
➢ 尖ったものを入れると袋が破れる恐れがある（10 月）

【変わらない】
➢ バケツにいっぱいになれば移し替えて運搬するので、量はこれまでと変わらない（9 月）
➢ 同じ方法で生ごみを回収しているので（10 月）
</td></tr>
<tr><td><u>総　括</u></td><td>➢ バケツから生ごみ袋に変更することで生ごみの運搬がしやすくなり、投入する生ごみ量が増えると考えたが、アンケートからは目立った行動変容は得られなかった。</td></tr>
</table>

ix) その他意見・感想（自由記述）

自由記述 （9 月）	➢ 赤字はポジティブな意見、青字はネガティブな意見 ➢ バケツで出すより便利。できればバケツに直接袋をセットして利用したいが液漏れしやすいのでできない。 ➢ ごみを資源として活用する方向は SDGs の世界観の中で大賛成。ただ、バケツを袋にかえることで、より別のエネルギーを使っているのではないか。 ➢ ごみを 1 ヶ所に集めるのは高齢者等住民への拡がりの観点から限界があると思う。拠点を細かくする、収集車を走らせるなど参画し易い工夫があるといい。 ➢ エネルギーの資源化はどんどんすすめていただきたい。 ➢ この実証実験を始めてから水分のあるごみが減り、通常の燃えるごみを出す回数が半分になった。生ごみがバイオガスや堆肥になれば大変素晴らしい。 ➢ 良い実験だと思う。理由は、生ごみを燃やすための化石燃料を減らすことが出来るから。また、ごみの最終処分場を見学した時に限界を感じ、ごみを減らしたいと感じたから。 ➢ 結果を「自治会だより」で広報してほしい。さらに多くの人が認知し、利用できるよう工夫してほしい。 ➢ 夏は腐敗が早くなり臭いもきついので大変。生ごみは屋外に置くと動物に荒らされるので屋内に置くため、フタ付きのバケツなど出来るだけ臭いのしない方法が良いと思う。真冬時の実験もしてほしい。 ➢ 独居なのであまりごみが出ないし、ナマモノは家の近くに田畑に捨てるのでそもそもごみが少ない。 ➢ 運びやすいのでこのまま続けたい。
自由記述 （10 月）	➢ 袋だとバケツを洗う手間がはぶけるので使いやすい。 ➢ SDGs の観点からもより改善・工夫の方途を探ってもらうことは大賛成。利用しやすさを追求するのなら、もう少し回収拠点を増やしてはどうか。 ➢ ごみ袋になってから捨て方が楽になった様に思う。 ➢ 袋に入れて運動公園まで持っていき、計量や袋の枚数を記録するのが少し面倒だった。 ➢ バケツを台所の隅に置いているが、袋に入れた方がニオイが少なく、バケツもきれいに使えると思う。運搬するのも楽になった。 ➢ 生ごみとして出してはいけない物を知りたい（骨や種など）。人によって違った情報がある。 ➢ 生ごみ回収が広がることを望む。そのためには袋の単価も問題になると思う。実験中は無料だが、有料となった時に高価なら回収の輪が広がりにくいと思う。 ➢ 10 L 袋の口がもう少し広いとバケツに被せられるので便利。
自由記述 （11 月）	➢ 袋を使っての投入は箱に入れるだけでいいが、バケツだと、ごみを入れる時に息を止めて入れる。バケツを洗うのも大変なので袋にして欲しい。 ➢ 運動公園から遠いので持ち込んでいない。畑が近くにあるので堆肥化しているが、それができなくなったときのことを考えると、運動公園のような施設がもっと増えてほしい。あるいは回収車が巡回してほしい。様々に試行錯誤していただくことはありがたい。生ゴミといえども有効に使いたい。 ➢ 山国地域という狭い範囲、かつ既に堆肥化装置を利用する人に限られた実験だが、それでもどのような結果が出るのか楽しみである。プラスの効果があればさらに多くの人が利用すると思う。他の地域でも実証したいと思うのではなかろうか。エネルギーになるものは、少々お金がかかっても利用し、研究と実践を重ねていくべきだ。 ➢ 実験とはいえ京北で取組があったことを非常に評価したい。生ゴミ等について資源循環的意識が向上することを望む。 ➢ 夏場は生ごみが腐りやすく、すぐに出せないので困る。 ➢ 袋の方が便利だと感じた。袋に入れて集める方法に慣れたところで終わるのは残念。バケツに直接ごみをためるより、袋に入れた方が臭いがしなかった

	ので袋に入れるほうが良かった。 ➢ ごみ袋の残りを廃棄するのに抵抗があった。実験とはいえ使っていない袋を燃えるごみに出すのは少し今の時代に合わないと思う。今後は袋を配る量を考えてもらいたい。ごみを持って行った時に次の袋を持って変えるようにするとか、無駄のないようにしてもらいたい。 ➢ ぜひこのまま生ごみ袋を使った生ごみ回収を続けてほしい。生ごみバケツの方法はめんどくさい。

（４）実証結果を踏まえた分別方式の検討

バイオガス化施設の処理方式は、湿式と乾式に大別され、湿式では生ごみを、乾式では生ごみと紙ごみを処理対象物としている。バイオガス化施設の処理方式と分別方式の評価・課題は次表に示したとおりであるが、実証実験は、湿式処理による、「生ごみ袋での分別排出（PHBH 素材の場合）」での回収を行った。

実証実験の結果から、これらの課題に対しては次ように考察される。

課題１：PHBH 製生ごみ袋がバイオガス化施設（湿式処理）で分解するという前提で考えると、生ごみ袋で収集した生ごみは、そのまま、または破袋を行うのみでメタン発酵槽に投入できるため袋の選別除去が不要となる。

⇒PHBH 素材のメタン発酵槽での分解は、良好に行えるが、PHBH 製生ごみ袋は、投入前にできるだけ細かく裁断されることが分解の促進に有効であることから、破袋だけでなく、粉砕できるような前処理装置を装備することが必要と思われる。

課題２：メタン発酵槽内に移送された PHBH 製生ごみ袋が分解されれば、消化液に異物が混入する確立は極めて低くなり、バケツなどで生ごみを分別した場合と同等程度の市場性を確保することができる。

⇒課題１と同様、投入前の粉砕工程を付加すれば、バケツで回収した場合と同等の処理が可能と思われ、消化液の市場性は確保されると考えられる。一方、未分解の PHBH が消化液に残留する可能性は排除できないが、PHBH の農作物への影響はないと実証されていることから、市場性の点では、外観上の問題に限られるため、消化液の需要者に対する安全性の周知が必要となる。

課題３：生ごみを専用の袋にて分別して排出する方法は、中規模以上の自治体でも比較的協力を得られやすいと考えられるが、生ごみ袋で分別した生ごみをステーションで集積する方策を検討する必要がある。

⇒実証実験の対象世帯は、既に堆肥化実証によって分別習慣があり、生ごみ袋での収集に移行することが容易で、分別精度の低下も見られなかったが、新たに生ごみの分別を行う場合には、生ごみ分別の習慣化を構築する必要がある。そのためには、小規模のモデル地域で習慣化を確立し、住民のコミュニティによる自主的な相互監視効果を生み出した上で、分別収集対象範囲の拡充を行うといったプロセスが必要になると思われる。

バイオガス化処理方式については、今回実証を行った湿式処理だけでなく、乾式処理もある。

乾式処理においても、事例調査の結果からは、発酵残渣（消化液）の肥料価値は高いと判断できるため、バイオガス化処理方式を生ごみのみを対象とした湿式処理方式だけでなく、紙ごみも併せて処理する乾式処理方式についても検討を行う必要がある。

乾式処理の場合は、対象物を生ごみに紙ごみを加えることになるが、生ごみと紙ごみを合わせた分別を行う場合には分別条件が多くなり、住民協力が得られにくくなる可能性が考えられる。また、乾式処理時の生ごみと紙ごみの混合比率を調整することができないため、バイオガス発生量の変動

が大きくなる可能性があり、バイオガス利用の観点から課題が生じる可能性がある。

そのような課題を踏まえると、生ごみと混合される湿った紙（野菜を包んだ新聞紙やティッシュペーパーなど）のみを PHBH 製生ごみ袋で混合して収集する対象として容認し、それ以外の紙ごみ（菓子箱、乾いた紙ごみ）については、別途分別排出することで、分別精度の向上を図ることができると考えられる。

生ごみと紙ごみを同一の PHBH 製ごみ袋で混合排出する場合の分別精度の向上方法については、さらに検討が必要である。

表 23　バイオガス化施設の処理方式と分別方式の評価・課題

処理方式	対象物	分別方法	評価・課題等
湿式処理	生ごみ	バケツなどへの分別排出	・収集時に袋を使用しないため、収集袋の破袋、選別除去が不要となる。 ・メタン発酵槽内にプラスチック類が混入する確率が極めて少なくなり、消化液の市場価値を高めることが可能となる。 ・生ごみをそのままバケツに排出する方法は、小規模自治体でコミュニティが確立しているところで実施可能であり、中規模以上の自治体では住民協力を得られにくい。
		生ごみ袋での分別排出(従来素材の場合)	・生ごみ袋で収集した生ごみをバイオガス化施設で破袋及び袋の選別除去を行う必要がある。 ・選別除去率によってはメタン発酵槽内にプラスチック類が混入する可能性が高く、消化液の市場価値を高めるためには、後処理での固形分除去等の措置が必要となる。 ・生ごみを専用の袋に分別して排出する方法は、中規模以上の自治体でも比較的協力を得られやすいと考えられるが、生ごみ袋で分別した生ごみをステーションで集積する方策を検討する必要がある。
		生ごみ袋での分別排出(PHBH 素材の場合)	・PHBH 製生ごみ袋がバイオガス化施設（湿式処理）で分解するという前提で考えると、生ごみ袋で収集した生ごみは、そのまま、または破袋を行うのみでメタン発酵槽に投入できるため袋の選別除去が不要となる。 ・メタン発酵槽内に移送された PHBH 製生ごみ袋が分解されれば、消化液に異物が混入する確立は極めて低くなり、バケツなどで生ごみを分別した場合と同等程度の市場性を確保することができる。 ・生ごみを専用の袋にて分別して排出する方法は、中規模以上の自治体でも比較的協力を得られやすいと考えられるが、生ごみ袋で分別した生ごみをステーションで集積する方策を検討する必要がある。
乾式処理	生ごみ・紙ごみ	バケツなどへの分別排出	・メタン発酵槽内へのプラスチック類混入の可能性及び消化液の市場価値については、湿式の場合と同等である。 ・生ごみと資源化できない紙ごみを混合してバケツなどで排出する場合、分別条件が増加するため、プラスチック以外の発酵不適物の混入可能性が増加し、バイオガス化施設での選別負荷が増加する。 ・乾式処理時の適正な紙ごみ混合比率を調整することができないため、バイオガス化施設でのバイオガス量の変動が大きくなる可能性がある。 ・生ごみをそのままバケツに排出する方法は、小規模自治体でコミュニティが確立しているところで実施可能であり、中規模以上の自治体では住民協力を得られにくい。
		生ごみと紙ごみを混合で袋排出(従来素材の場合)	・生ごみと紙ごみを同一の袋で収集した場合、バイオガス化施設で破袋及び袋の選別除去を行う必要がある。 ・選別除去率によってはメタン発酵槽内にプラスチック類が混入する可能性が高く、消化液の市場価値を高めるためには、後処理での固形分除去等の措置が必要となる。 ・乾式処理時の適正な紙ごみ混合比率を調整することができないため、バイオガス化施設でのバイオガス量の変動が大きくなる可能性がある。 ・生ごみ・紙ごみを専用の袋にて分別して排出する方法は、中規模以上の自治体でも比較的協力を得られやすいと考えられるが、分別条件が増加するため、プラスチック以外の発酵不適物の混入可能性が増加し、バイオガス化施設での選別負荷が増加する可能性がある。また、生ごみと紙ごみを分別した袋をステーションで集積する方策を検討する必要がある。
		生ごみと紙ごみを混合で袋排出(PHBH 素材の場合)	・PHBH 製生ごみ袋のバイオガス化施設での破袋選別、消化液の市場性については湿式の場合と同等である。 ・乾式処理時の適正な紙ごみ混合比率を調整することができないため、バイオガス化施設でのバイオガス量の変動が大きくなる可能性がある。 ・生ごみ・紙ごみを専用の袋に分別して排出する方法は、中規模以上の自治体でも比較的協力を得られやすいと考えられるが、分別条件が増加するため、プラスチック以外の発酵不適物の混入可能性が増加し、バイオガス化施設での選別負荷が増加する可能性がある。また、生ごみと紙ごみを分別した袋をステーションで集積する方策を検討する必要がある。 ・紙ごみを生ごみと混合利用する際に袋の破損等を考慮する必要があり、PHBH 素材の強度についての検討が必要である。

3.2.4 まとめと課題

湿式処理における PHBH 製生ごみ袋での分別実証結果をまとめると次のとおりである。

- 本事業は、PHBH 製生ごみ袋の社会実装を目指し、生ごみ袋の実用性の検証と PHBH 製生ごみ袋に入った生ごみの回収を目的として開始した。100 日間の実証実験の結果、28 世帯中 26 世帯が延べ 369 回生ごみを投入し、計 1,230.9 kg の生ごみを回収することができた。ごみの回収量は 1 世帯 1 日あたり 473 g/日・世帯と当初想定より 90 g 程度多く、途中で事業に取り組むのを止めた世帯はなかった。
- 生ごみの内容を見ると、生ごみ堆肥化事業に参加していた世帯を対象としていたためあらかじめ分別の習慣づけがなされており、生ごみの分別精度が非常に高く、事業終了まで維持された。組成は、水分比が約 90%。窒素含有率が 2.8～3.5%、塩素含有率が 0.6～1.4%と比較的高かった。
- ごみの投入頻度は平均すると 10 日に 1～2 回程度であるが、夏季はこまめに出し、冬季はため込む傾向が見て取れた。
- 全体的に小袋（2 L）の使用が多かったが、これは、夏季はこまめに出す傾向が見て取れたほか、まず三角コーナーなどに小袋を入れてごみをため、いくつかの小袋をまとめて中袋（5 L）、大袋（10 L）に入れて廃棄するという傾向もあったためと思われる。大袋は、夏季は利用が少なかったが冬季になるにつれて使用が多くなっており、品質改良もしくは冬季にため込む傾向の影響かと思われる。
- 使い勝手については非常に評価が高く、従来生ごみ堆肥化事業で使用していた生ごみ専用バケツよりも使いやすいという意見が多かった。袋自体も「一般的な袋より良い」という声が多く、当初には「液漏れ」や「持ち手がちぎれる」といった問題点も多かったが、10 月以降は改善している。
- ごみ減量、SDGs、気候変動等の観点から事業を支持する意見も多かった。
- 市民から寄せられた課題感としては、回収拠点に関する問題、生ごみ袋の価格に関する問題等があった。

以上の実証結果から、PHBH 製生ごみ袋による分別排出・回収について、実用面での問題はほとんどなく、むしろ生ごみ専用バケツに比べて使いやすいということが確認できた。

一方、本事業では生ごみ堆肥化事業の参加世帯を対象としており分別精度に問題はなかったが、実際に幅広い市民への実装をするとなると事前に細かな分別ルールの周知・徹底を図り、不適物を混入させない必要があることが想定される。

また、市民からは実用化された時の価格等について不安視する意見や回収拠点が遠く搬入できなかったという意見もあり、生ごみ袋の価格、回収拠点の設置場所が課題であることが予測される。

乾式処理における PHBH 製生ごみ袋での分別排出・回収については、紙ごみの混合収集の是非について、さらに検討が必要と思われるが、乾いた紙ごみなど生ごみと区別しやすいものについては、別途分別品目を追加して、異物の混入を阻止する工夫が必要である。

実証結果では、生ごみ分別の習慣化ができている背景があったため、分別精度に関する問題はほとんど生じていないが、中小自治体で新たに生ごみの分別収集を導入する場合には、習慣化の構築のために、小規模モデル地域から実施し、住民コミュニティを確保した上で、対象範囲を拡充するといった段階的プロセスが求められる。そのためには、バイオガス化施設導入前に、分別習慣構築のための期間を確保する事業スケジュールの検討が必要と思われる。

3.3 PHBH 製生ごみ袋のバイオガス化に関する検討

3.3.1 ベンチスケールバイオガス化試験

（1）目的

PHBH 製生ごみ袋を用いて回収した生ごみを原料として、ベンチスケールバイオガス化試験プラントを用いて分解特性の評価を行い、スケールアップの方法と運転の安定性の確認及び消化液の肥料利用の可能性を調査することを目的とした。

（2）方法

1）試験工程・試験場所

京都市京北地域において PHBH 製生ごみ袋で回収された生ごみを、(株) バイオガスラボに送付し、次表に示す工程にてベンチスケールバイオガス化試験を実施した。引き抜いた消化液を用いて、京都農業の研究所（株）にて栽培試験を行った。

表 24　工程

	8月			9月			10月			11月			12月		
	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30
試験準備	---→														
種汚泥投入→加温		●8/17													
馴養運転（PHBH無）		●8/19	→												
馴養運転（PHBH有）					●9/13	→									
定格運転								●10/11	→						

2）生ごみの展開作業

前述の生ごみについては袋ごとに重量を測定し、次図のように展開作業を実施した。

図 61　生ごみ展開作業

展開作業時に発見された卵殻、大きな外皮、肉・魚の骨など、メタン発酵不適物については都度除去した（次図）。

目視による確認の結果、生ごみの内訳は野菜、果実残さとしての皮などが過半を占め、緑茶や麦茶かす、コーヒーかすも頻繁に見られた。肉・魚、米飯の割合はそれぞれ 10 %にも満たなかった。

図 62 生ごみに含まれていた不適物例

3）生ごみの前処理

投入する生ごみについては発酵槽への投入前に破砕機で破砕前処理を行った。使用した破砕機の仕様は以下のとおり。外形写真、破砕作業の様子、生ごみ破砕物をそれぞれ次に示す。

- 型式：シャッター式チョッパー・HC-2（宝田工業製）
- 能力：500～800 kg/h（AC100V-550 W）

図 63 破砕機外形

図 64　破砕作業

図 65　生ごみ破砕物

4）PHBH 製生ごみ袋の前処理

PHBH 製生ごみ袋は内容物を取り出した後に洗浄し、自然乾燥させた後にはさみによる手作業若しくは簡易シュレッダー（アイリスオーヤマ製・P5GCX）で裁断し、幅 5～10 mm、長さ 30 mm 前後に前処理調製した。

図 66　PHBH 袋裁断物（はさみ使用）

図 67　PHBH 袋裁断物（シュレッダー使用）

5）ベンチスケールメタン発酵試験装置

ベンチスケールメタン発酵試験装置の試験条件、フローシート、外形写真をそれぞれ次に示す。

前処理及び混合調製された生ごみと PHBH 製生ごみ袋を規定量投入口から投入し、その分の消化液を引抜きながら槽内消化液量を一定に保った。

発生したバイオガスは脱硫塔で硫化水素を吸着した後に流量計を通して、実験室換気ファンにより希釈排気された。

流量、槽内ガス圧、槽内水圧（水位換算）、槽内温度についてはデータロガーで自動記録した。

【試験条件】

- 発酵温度：37±0.5℃
- 加温装置：電熱ヒーター・850 W
- 槽容量　：200 L（実容量）※槽容量は約 300 L
- 撹拌　　：機械式・常時・0.1 kW
- 種汚泥　：（株）カネカ提供
- 滞留日数：30 日（定格運転期間）

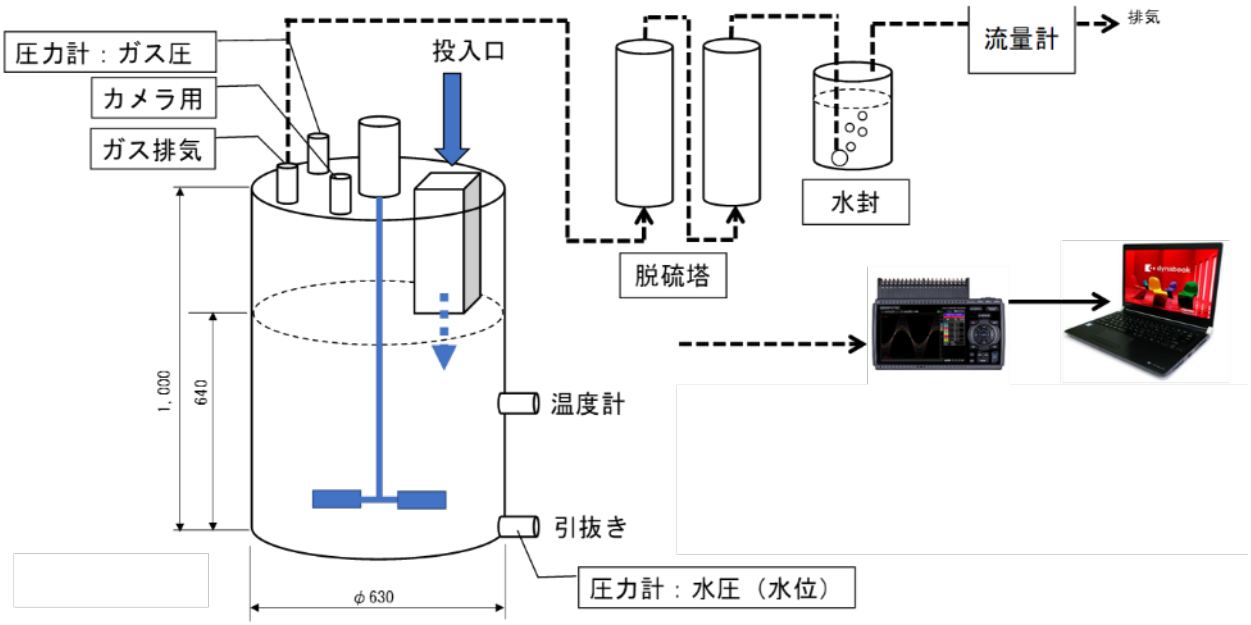


図 68　ベンチスケールメタン発酵試験装置フローシート

図 69　ベンチスケールメタン発酵試験装置外形

6）原料投入

（株）カネカ提供汚泥を種汚泥として投入、加温を開始した 8 月 17 日を第 1 週（W1）として、8 月 19 日から模擬ごみの投入を開始、8 月 23 日から W2 として京都市京北地域で回収した生ごみ（3.2 参照）の投入を開始した。W1 から W4 は汚泥の馴養期間として、PHBH 製生ごみ袋は W5 から投入を開始した。W9 から定格運転を開始し、各項目の測定及び栽培試験用消化液の引き抜きを実施した。次表に原料投入計画を示す。

投入量については、実容量である 200 L を 200 kg として週で定められた滞留日数で除した数値を 1 日あたりとした。

実際、投入は週のうち土日を除く平日 5 日間で実施しており、そのため設定された 1 日あたりの投入量に 7 日を乗じて 1 週分の投入量を算出、それを 5 日で除した数値を実際の投入量とした。

ただ、土日に投入をしないので週明けの再開となる月曜日及び火曜日の負荷を軽減させるため、算出された実際の 1 日あたり投入量を、月曜日は 80 %、火曜日は 90 %、水曜日は 100 %、木曜日は 110 %、金曜日は 120 %に傾斜配分調整して投入した。

祝日がある場合は週の投入量をその日数を減じた数、4 日や 3 日で除して、また同様に負荷の軽減を考慮して週内での投入量を傾斜配分させた。

また、W5 以降の投入量の調整については、滞留日数を 2 週ごとに 5 日ずつ減らして増加させる計画だったが、W6 は祝日が 2 日あり、当該日に投入しなかったことから当該週の負荷量が低く、そのまま W7 で滞留日数を減らすと負荷上昇度が大きくなると予想され、そのまま 40 日で据え置いた。

W8 で 35 日に減らして運転したところ、特に槽内の性状に異状が見られなかったので、経過は 1 週であったが翌 W9 に 30 日へ減らして定格運転を開始させた。

W9 では設定投入量を定格としているが、途中でごみ量が不足して約 1 日分投入量が減り、実際の滞留日数が計画数値より小さくなっている。

なお、PHBH 製生ごみ袋で回収した生ごみについて、ごみ重量及び袋の枚数から有機分重量比を算出したところ、平均で生ごみ : PHBH 製生ごみ袋＝約 19 : 1 となった。そこで、ベンチスケールメタン発酵試験装置への投入混合比率は、生ごみと PHBH 製生ごみ袋の有機分重量比率を 20 : 1 とした。

表 25　原料投入計画

週			滞留日数	生ごみ	PHBH 製生ごみ袋	総投入量	有機物容積負荷
			d	g/d	g/d	g/d	g-VS/(L･d)
W1	8 月 16 日	～ 8 月 22 日		529	0.0	529	
W2	8 月 23 日	～ 8 月 29 日	70.0	2,857	0.0	2,857	1.90
W3	8 月 30 日	～ 9 月 5 日	50.0	4,000	0.0	4,000	2.66
W4	9 月 6 日	～ 9 月 12 日	40.0	5,000	0.0	5,000	3.33
W5	9 月 13 日	～ 9 月 19 日	40.0	4,968	32.3	5,000	3.47
W6	9 月 20 日	～ 9 月 26 日	40.0	4,968	32.3	5,000	3.47
W7	9 月 27 日	～ 10 月 3 日	40.0	4,968	32.3	5,000	3.47
W8	10 月 4 日	～ 10 月 10 日	35.0	5,677	36.9	5,714	3.97
W9	10 月 11 日	～ 10 月 17 日	30.0	6,624	43.0	6,667	4.63
W10	10 月 18 日	～ 10 月 24 日	30.0	6,624	43.0	6,667	4.63
W11	10 月 25 日	～ 10 月 31 日	30.0	6,624	43.0	6,667	4.63
W12	11 月 1 日	～ 11 月 7 日	30.0	6,624	43.0	6,667	4.63
W13	11 月 8 日	～ 11 月 14 日	30.0	6,624	43.0	6,667	4.63
W14	11 月 15 日	～ 11 月 21 日	30.0	6,624	43.0	6,667	4.63
W15	11 月 22 日	～ 11 月 28 日	30.0	6,624	43.0	6,667	4.63

7）消化液のろ過残渣の分析

定格運転期間中に引き抜いたすべての消化液について、14 メッシュ（目開きは 1.0～1.5 mm）の篩でろ過し、ろ過残渣の湿重量及び乾重量を測定した。

また、定格運転期間中の 6 点について、（株）島津テクノリサーチにて、ろ過残渣を生ごみ由来の残渣と未分解 PHBH に選り分け、湿重量及び乾燥重量の測定を行った。乾燥重量の測定にあたっては、未分解 PHBH フィルムを水洗してから乾燥処理を行った（次図）。

このデータをもとに定格運転期間中の PHBH 分解率の評価を行った。

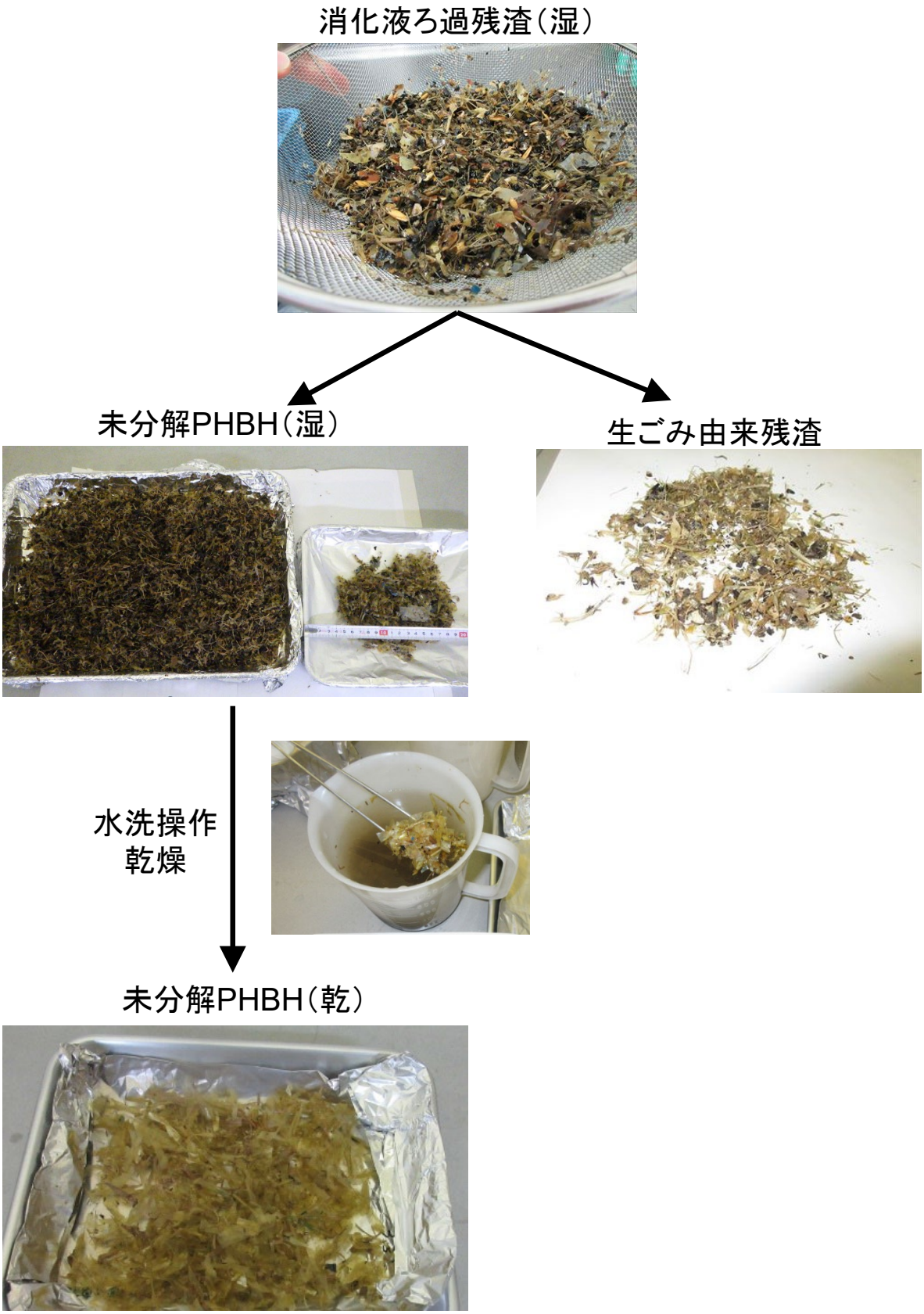


図 70　消化液ろ過残渣の分析

8）消化液を用いた栽培評価試験

加えて、京都農業の研究所（株）にて、引き抜いた消化液を用いてコマツナを用いた植物栽培試験を実施し、PHBH 製生ごみ袋を原料に含むメタン発酵消化液の肥料利用の可能性の評価を行った（3.3.3 (3)参照）。

（３）結果

1）試験結果（原料投入及びバイオガス発生量）

各週の原料投入量と内訳、有機物容積負荷、ガス発生量等の一覧を次表に示す。

W9 より定格運転期間とした。ただし、W9 において、水・木曜日は投入ごみ量不足により半分量負荷で投入しており、週内平均の滞留日数は増、有機物容積負荷は減となった。W13 以降、槽内の有機酸濃度が上昇したため（詳細は後述）、定格運転期間は W9～12 として以降の解析を行った。

表 26　試験結果（原料投入及びバイオガス発生量）

週				滞留日数	生ごみ投入量	PHBH投入量	総投入量	有機物容積負荷	ガス発生量	原単位	
				d	g/d	g/d	g/d	g-VS/(L･d)	NL/d	Nm^3/t	Nm^3/t-VS
W1	8月16日	～	8月22日		529	0.0	529				
W2	8月23日	～	8月29日	71.2	2,807	0.0	2,807	1.85			
W3	8月30日	～	9月5日	53.0	3,771	0.0	3,771	2.58	353		
W4	9月6日	～	9月12日	40.0	5,000	0.0	5,000	3.41	311	62.1	455
W5	9月13日	～	9月19日	40.3	4,968	32.1	5,000	3.19	347	69.9	545
W6	9月20日	～	9月26日	67.1	2,981	19.3	3,000	1.94	304	102.0	782
W7	9月27日	～	10月3日	40.3	4,963	31.5	4,994	3.41	429	86.5	629
W8	10月4日	～	10月10日	35.2	5,677	37.1	5,714	3.84	529	93.1	756
W9	10月11日	～	10月17日	37.2	5,371	34.9	5,406	3.16	572	106.4	903
W10	10月18日	～	10月24日	30.2	6,624	42.9	6,666	4.49	629	94.9	700
W11	10月25日	～	10月31日	30.2	6,624	42.9	6,666	4.35	556	83.9	639
W12	11月1日	～	11月7日	30.2	6,624	42.9	6,667	5.40	620	93.6	574
W13	11月8日	～	11月14日	301.9	662	4.3	667	0.37	280	423.0	3,767
W14	11月15日	～	11月21日	301.9	662	4.3	667	0.42	229	346.4	2,762
W15	11月22日	～	11月28日	-	0.00	0.00	0.00	0.00	122.4	-	-

2）バイオガス発生量

日別の原料投入量及びバイオガス発生量についてそれぞれ以下に示す（定格期間については赤囲みとした）。

定格運転期間のバイオガス発生量については、83.9～106.4 NL/kg、574-903 NL/kg-VS となり、安定してバイオガスが発生した。

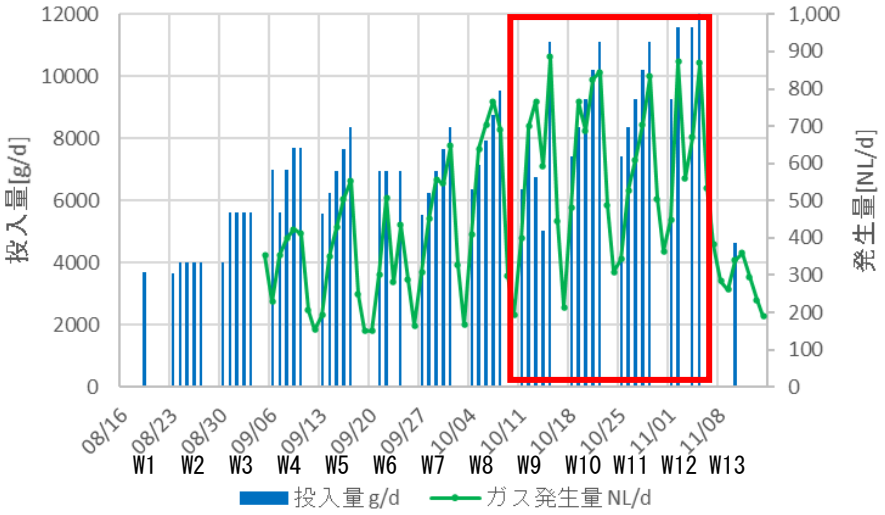


図 71　原料投入量とバイオガス発生量

（赤枠：定格運転期間）

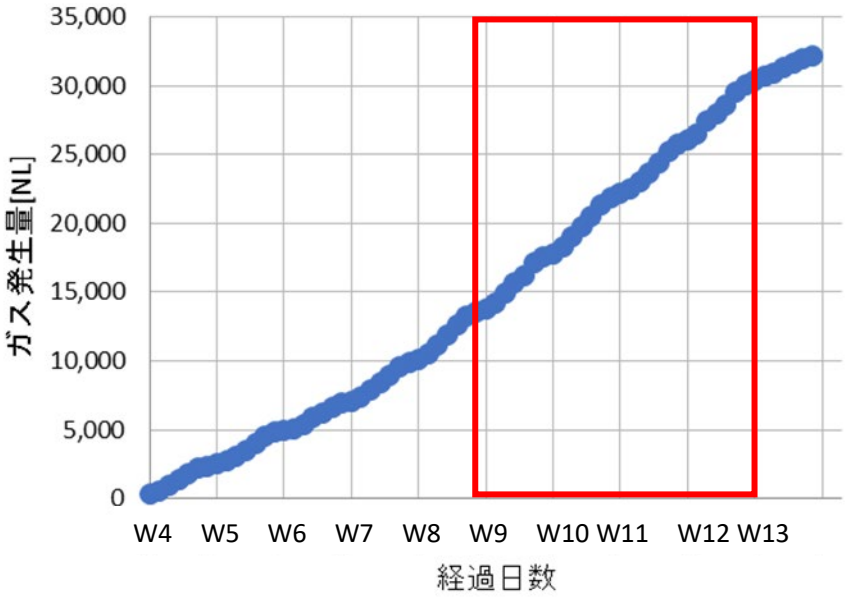


図 72　累積バイオガス発生量

（赤枠：定格運転期間）

3）槽内性状

pH の推移を次図に示す。定格期間中は 7.4～7.6 で安定していた。

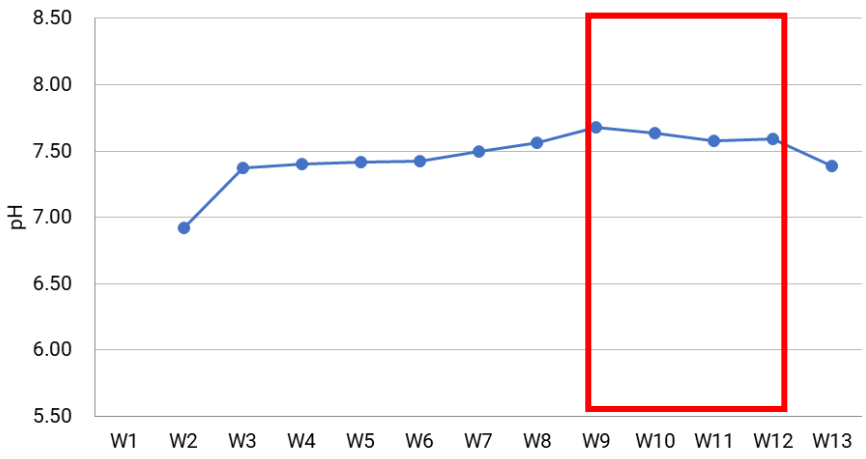


図 73　pH
（赤枠：定格運転期間）

アンモニア性窒素、t-VFA（有機酸濃度）とアルカリ度の推移を次図に示す。アンモニア性窒素については 4,000 mg/kg 超でアンモニア阻害が懸念されるが、定格期間中は 1,000～2,000 mg/kg 前後で安定していた。有機酸濃度及びアルカリ度は定格期間の第 3 週（W11）まで大きな増減がなく安定していた。

定格期間最終週（W12）に有機酸濃度が約 5,000 mg/L まで上昇し、その時点でアルカリ度に対する有機酸濃度の比率は 0.79 となった。安定運転時の目安となる比率は 0.35 未満なので槽内は有機酸過多の状態となった。また、有機酸の内訳を分析したところ、ほとんどが酢酸でプロピオン酸、酪酸などはわずかだった。

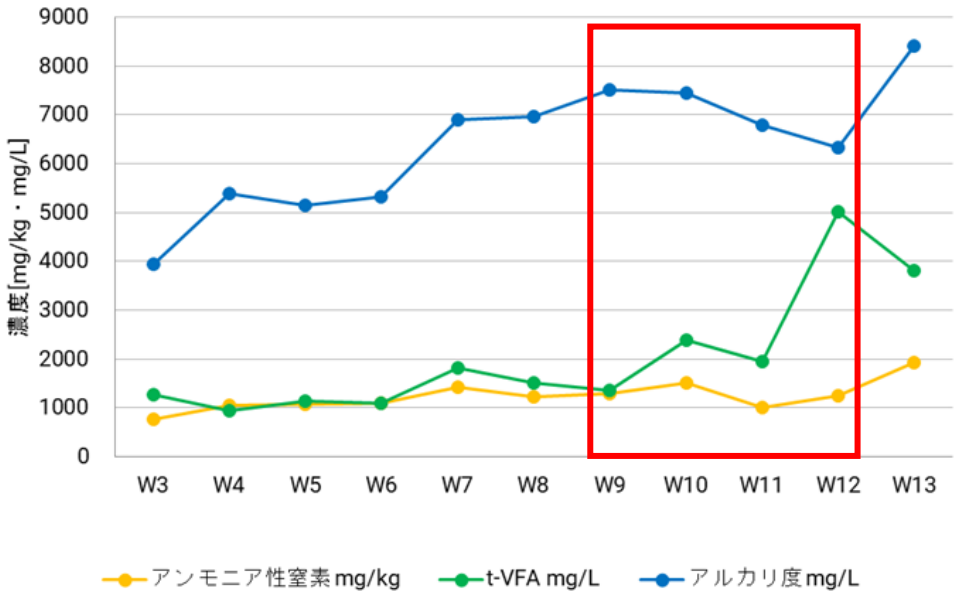


図 74　アンモニア性窒素、t-VFA 及びアルカリ度
（赤枠：定格運転期間）

有機酸は急増したが、当該週を含めて順調にバイオガスが発生し、PHBH の分解も進んでおり、有機酸の急増は W12 における投入原料に要因があると推測された。

4）不調原因について

① VS 負荷

次図に定格期間における投入原料の VS 濃度推移を示す。

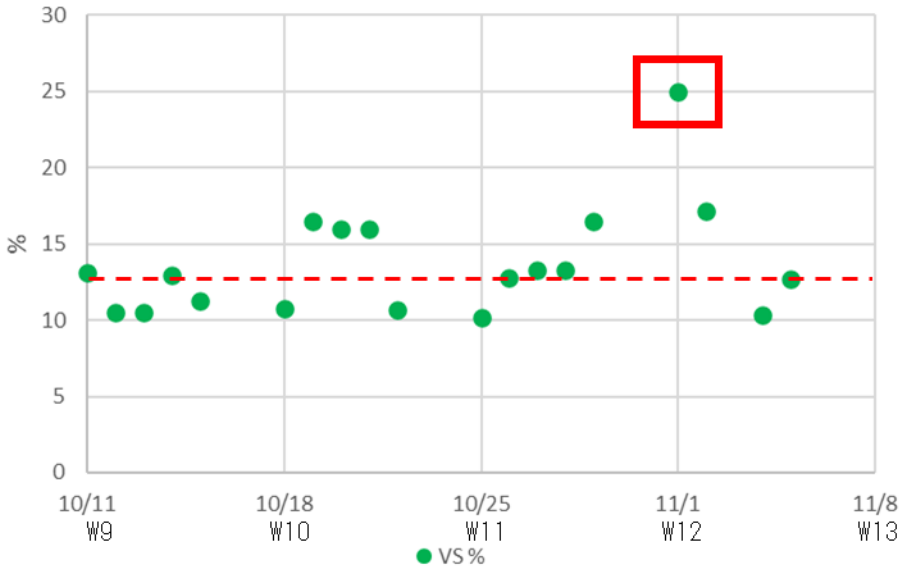


図 75　定格期間における投入原料の VS 濃度

期間中の平均 VS 濃度は 13.1 %（赤点線）であったが、11/1 に投入した生ごみの VS 濃度が 25.0 %（赤囲み）と極めて高かった。

また、通常は 1 週間投入分を土日以外の平日の 5 日に分けて投入しているが、当該週は祝日があり、その日を除いた 4 日に分けて投入したので 1 日あたりでは 1.25 倍の投入量となった。

- 通常週：設定投入量[g/d]×7[d/週]÷5[d/週]…(A)
- 当該週：設定投入量[g/d]×7[d/週]÷4[d/週]…(B)

∴(B)÷(A)＝1.25

よって、当日は 25.0 %÷13.1 %×1.25≒2.4 倍の VS 負荷量となり、発酵過負荷を促すことになったと推測された。

② 阻害物質

保管していた消化液のナトリウム（Na）とノルマルヘキサン抽出物質（Hex ; 具体的には鉱油類、動植物性油脂類、界面活性剤、農薬、染料、石鹸類、アミン類、アルコールなど）を分析した。

- Na…W9：730→W16：2,000 mg/kg
- Hex…W9：390→W16：3,800 mg/L

特定は難しいが、W12 の生ごみ中にナトリウムを多く含むものとして大量の塩分を使用した食品残さ、大量の動植物油脂類かそれらを使用した食品残さが含まれていたことにより阻害要因になった可能性がある。

以上、有機酸濃度の上昇、バイオガス発生量の低下に係るメタン発酵の不調については①②で述べたとおりであり、PHBH 分解過程による阻害は無いものと考えられる。

5）引き抜いた消化液の分析評価

定格運転期間中（W9～W12）に引き抜いた消化液のろ過残渣は、合計で 2,806 g（乾燥重量）となった。また、定格運転期間中の 6 点において、ろ過残渣に含まれる未分解 PHBH の割合を確認すると、2.6%±1.3%となった（次表）。

表 27　消化液のろ過残渣中の PHBH 割合

週	日	ろ過残さ量（湿）	ろ過残さ量（乾）	PHBH 重量（乾）	ろ過残渣中の PHBH 割合（乾）
		g	g	g	%
W10	10 月 20 日	620	141	1.93	1.4
W10	10 月 21 日	680	154	2.40	1.6
W11	10 月 26 日	540	177	3.97	2.2
W11	10 月 27 日	580	139	4.13	3.0
W12	11 月 1 日	560	151	7.53	5.0
W12	11 月 2 日	680	212	5.45	2.6
				平均	2.6
				標準偏差	1.3

6）PHBH 分解率の評価

① PHBH 分解率の算出

以上より、定格運転期間中の発酵槽における PHBH のマテリアルバランスを推計した（次図）。

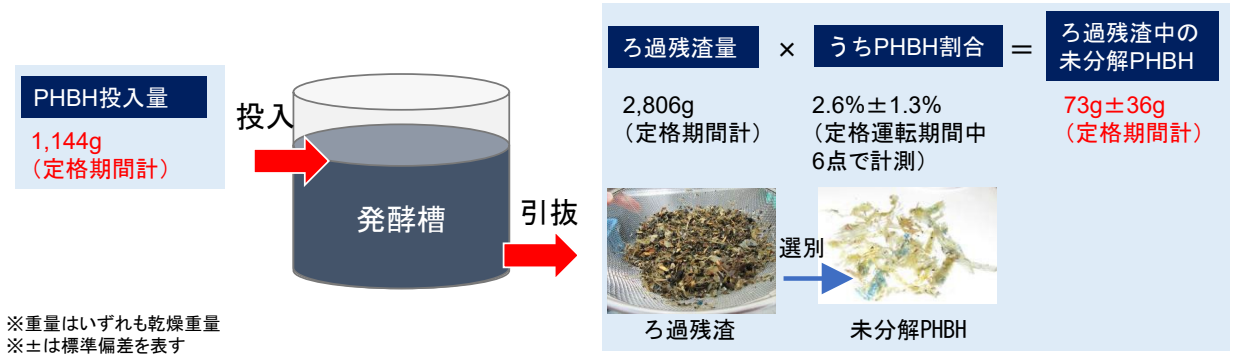


図 76　定格運転期間中のマテリアルバランス

この結果より、定格運転期間中の PHBH 分解率は以下のように計算される。

$$\text{PHBH 分解率} = 1 - \frac{\text{ろ過残渣中の未分解 PHBH}}{\text{PHBH 投入量}} = 1 - \frac{73g \pm 36g}{1{,}144g} = 94 \pm 3\%$$

② 未分解 PHBH 流出効果の推計

連続運転では、発酵槽内の消化液を毎日一定量引き抜く操作を行うため、原料の一部が未分解の

まま流出する（ショートパス）。そこで、未分解 PHBH の流出効果について推計を行った。

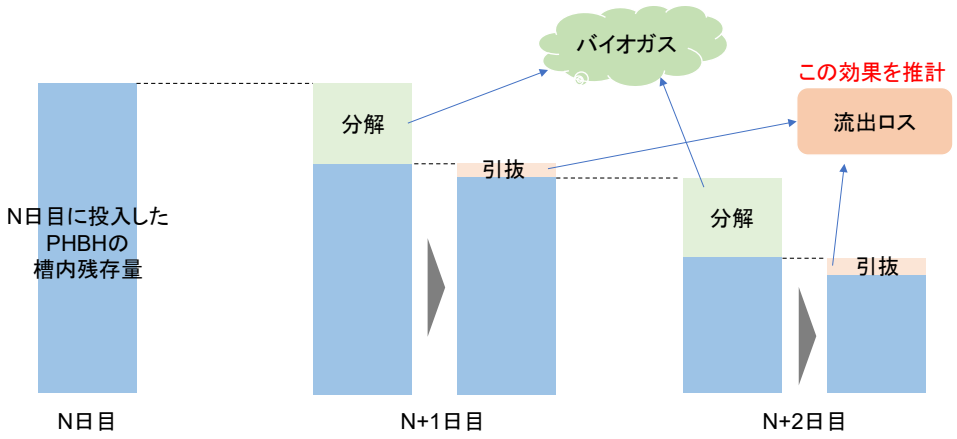


図 77　消化液の引き抜きによる未分解 PHBH の流出イメージ

まず、推計にあたっての仮定を示す。

引抜量は滞留日数の逆数とした。つまり、滞留日数が 30 日の場合は、発酵槽内の液量の 1/30（=3.3%）が毎日引き抜かれるとした。また、消化液はよく攪拌され発酵槽内で均一になっているものとした。

PHBH 分解速度については、簡易計算のために一日当たり残存重量の一定割合が分解していくと仮定し、令和 2 年度のバッチ試験結果より、PHBH の 4 日後の分解率は 64%であったことから、1 日当たり 24%分解するとした。

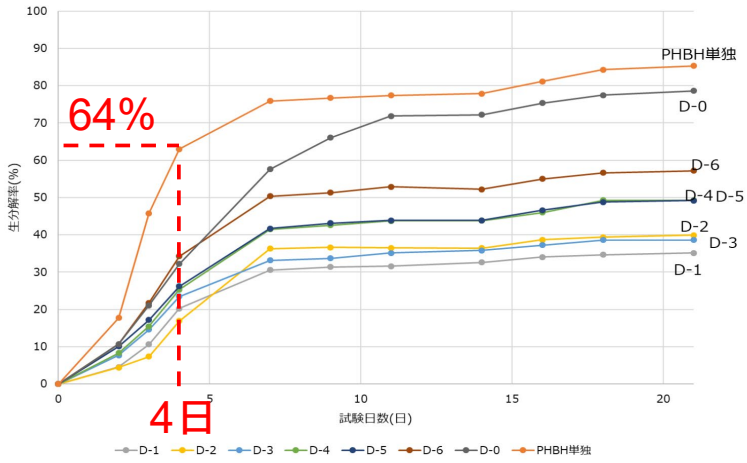


図 78　バッチ試験による PHBH の生分解挙動（令和 2 年度成果報告書より）
（日立造船（株）実施）

推計の結果を次図に示す。消化液の引き抜き操作により未分解の PHBH の流出が生じ、バイオガス発生量（PHBH 分解量）が 90%に低下することが分かった。

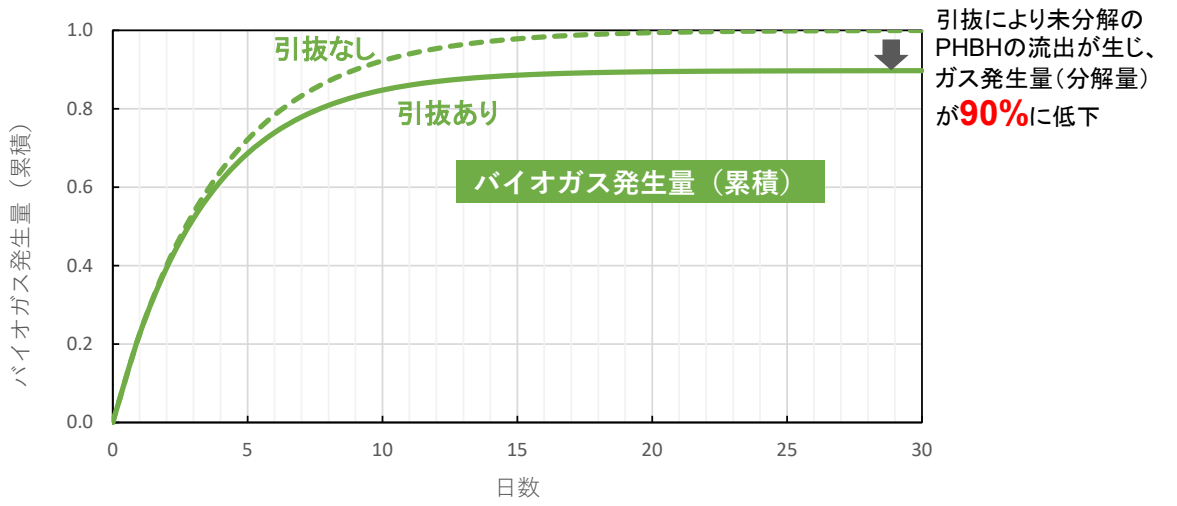


図 79　消化液の引き抜きによる未分解 PHBH の流出効果の推計結果

③ PHBH 分解率のまとめ

上述のとおり、ベンチスケールバイオガス化試験の結果、PHBH 分解率は 94±3%であったが、連続運転では消化液の引き抜きによる流出ロスが 10%程度生じると推計されたため、流出分以外の PHBH はほぼ分解していると評価できる。

7）ガス発生量の理論計算

以下の条件から生ごみのガス発生量を算出した。

- PHBH の CODcr：1,300 g/kg
- PHBH の分解率：94 %
- 定格期間の生ごみ投入量：6,311 g/d
- 同上、生ごみの平均 VS 濃度：13.5 %
- 同上、PHBH の投入量：40.9 g/d
- 同上、ガス発生量：594 NL/d
- バイオガス中のメタン濃度：58.3 %

ごみからのガス発生量原単位は以下式から算出される。

(ごみからのガス発生量[NL/d])
=(全ガス発生量[NL/d])－(PHBH からのガス発生量[NL/d])
=(594[Nl/d]-1,300[g/kg]×94 %×40.9[g/d]×0.35[NL/g-分解 CODcr]÷58.3 %)÷6,311[g/d]
＝89.4 NL/kg→662 NL/kg-VS

「バイオガスを活用した効果的な再生可能エネルギー生産システム導入ガイドライン」（国土技術政策総合研究所）によると、生ごみ（食品製造系地域バイオマス）のバイオガス発生量原単位は 556 NL/kg-VS とされており、算出結果はそれを上回っていることから、投入された生ごみも十分に

分解してバイオガスが発生したものと言える。

（４）まとめと課題

PHBH 製生ごみ袋を用いた分別排出・回収試験によって得られた生ごみを原料にベンチスケール（発酵槽実容量 : 200 L）でのバイオガス化試験を約 3 ケ月に亘り実施した。試験結果としては、4 週間の定格運転中、安定してバイオガスが発生していることを確認するとともに、引き抜いた消化液のろ過残渣中の未分解 PHBH は投入量の 6%程度で流失ロス相当であり、十分に分解していることを確認した。

また、生ごみからも想定規模で安定してバイオガスが発生していたことも確認できた。

課題としては、生ごみ及び PHBH 製袋の前処理が挙げられる。今回はベンチスケールの規模に応じて、生ごみを破砕、PHBH をシュレッダー機で細断した上でメタン発酵槽へ投入していた。実機では今回の試験のような破砕、細断まで行わないことが予想される。よって、メタン発酵の滞留日数に応じて一定以上分解できる大きさを事前試験で確認し、必要な前処理装置を設計・選定する必要がある。

3.3.2 普及拡大に向けた運転条件の検討

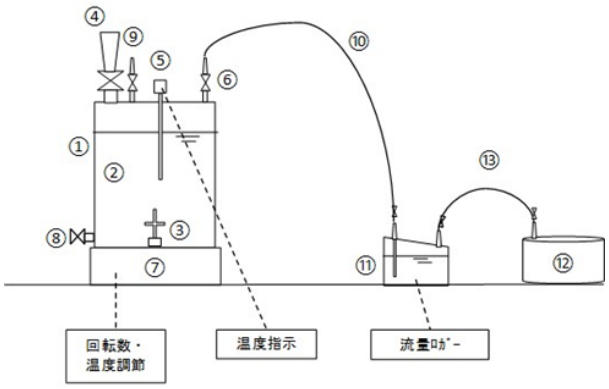
（1）目的

これまで PHBH を嫌気分解するのに(株) カネカの排水処理で用いている種汚泥を使用してきた。今後、普及拡大を図るために、一般的に用いている種汚泥を馴養することで PHBH が分解できることを検証する。また、従来の中温に加えて高温での嫌気分解試験により、分解効率を比較検討する。

（2）方法

試験は（株）バイオガスラボ・中央研究所（石川県能美市）において、2021 年 12 月 14 日～2022 年 2 月 13 日にわたり実施した。

試験装置のフロー及び外形を次図に示す。



①	発酵タンク
②	メタン汚泥
③	撹拌子
④	原料投入口
⑤	温度計
⑥	ガス出口
⑦	ﾎｯﾄｽﾀｰﾗｰ
⑧	ドレン
⑨	窒素ﾊﾟｰｼﾞ口
⑩	ガスチューブ
⑪	ガス流量計
⑫	ガスバッグ
⑬	ガスチューブ

図 80　試験装置フロー

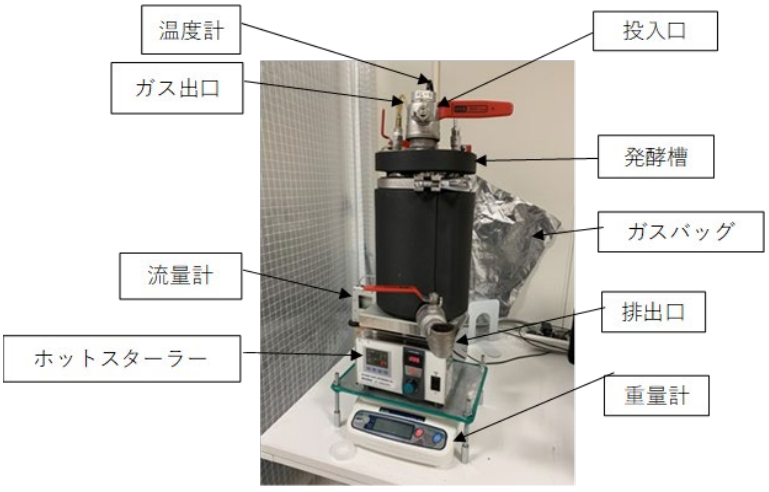


図 81　試験装置外形

4 L（実容量 3.5 L）の発酵タンクに種汚泥を投入、規定温度に昇温、到達後から原料の投入を開始した。発生したバイオガス量を流量ロガーにより毎日計測し、流量ロガー通過後はガスバッグに保管し、適宜メタン濃度を分析した。

また、週に一度の頻度で槽内消化液の pH、TS 濃度、VS/TS、アンモニア性窒素濃度、t-VFA（有機

酸濃度)、アルカリ度を測定し、性状確認を行った。

温度は中温（37℃）と高温（55℃）を設置して、それぞれの種汚泥には中温は（株）バイオガスラボで馴養している消化液、高温は下水処理施設（大阪府）の高温発酵装置消化液を使用した。

投入原料は、模擬ごみは（株）バイオガスラボで調製したもの、PHBH 製ごみ袋は（株）カネカから提供されたサンプルシートをシュレッダーで破砕したものを使用した。

表 28　投入計画一覧

週				滞留日数	模擬ごみ	希釈水	PHBH	希釈倍率	有機物容積負荷
				d	g/d	g/d	g/d	−	g-VS/(L･d)
W1	12月13日	～	12月19日	38.1	54.5	36.4	1.04	1.67	3.26
W2	12月20日	～	12月26日	38.1	54.5	36.4	1.04	1.67	3.26
W3	12月27日	～	1月2日	38.1	54.5	36.4	1.04	1.67	3.26
W4	1月3日	～	1月9日	38.1	54.5	36.4	1.04	1.67	3.26
W5	1月10日	～	1月16日	34.2	60.0	40.0	2.28	1.67	3.91
W6	1月17日	～	1月23日	34.2	60.0	40.0	2.28	1.67	3.91
W7	1月24日	～	1月30日	34.2	60.0	40.0	2.28	1.67	3.91
W8	1月31日	～	2月6日	34.2	60.0	40.0	2.28	1.67	3.91
W9	2月7日	～	2月13日	34.2	60.0	40.0	2.28	1.67	3.91

PHBH の分解を確認するために（株）バイオガスラボの馴養槽をブランクとし、模擬ごみの投入量については馴養槽の希釈率及び有機物容積負荷で算出、適用した。

PHBH については当初は投入原料の有機物重量比を模擬ごみと PHBH が 10：1 となるよう調製し、4 週経過後、PHBH によるバイオガス発生量の差異を明確化させるために 5：1 に変更した。

（３）結果

実際の原料投入量について、週ごとに平均した一覧表を次の表に示す。

表 29　投入量一覧（中温）

週	滞留日数	模擬ゴミ	希釈水	PHBH	希釈倍率	有機物容積負荷 g-VS/(L･d)	
	d	g/d	g/d	g/d	−	模擬ごみ	PHBH含む
W1	46.1	43.6	29.1	0.83	1.67	2.36	2.61
W2	36.7	54.5	36.4	1.04	1.67	3.00	3.31
W3	95.4	21.8	14.5	0.41	1.67	1.16	1.28
W4	63.4	32.7	21.8	0.62	1.67	1.74	1.92
W5	43.4	48.0	32.0	1.82	1.67	2.54	3.07
W6	35.2	60.0	40.0	2.28	1.67	3.16	3.81
W7	35.1	60.0	40.00	2.28	1.67	3.27	3.92
W8	34.9	60.0	40.00	2.28	1.67	3.29	3.94
W9	35.2	60.0	40.0	2.28	1.67	3.26	3.91

表 30　投入量一覧（高温）

週	滞留日数	模擬ゴミ	希釈水	PHBH	希釈倍率	有機物容積負荷 g-VS/(L･d)	
	d	g/d	g/d	g/d	−	模擬ごみ	PHBH含む
W1	48.0	43.6	29.1	0.83	1.67	2.27	2.50
W2	38.4	54.5	36.4	1.04	1.67	2.87	3.17
W3	96.0	21.8	14.5	0.41	1.67	1.15	1.27
W4	64.0	32.7	21.8	0.62	1.67	1.72	1.90
W5	34.3	60.0	40.0	2.28	1.67	3.22	3.88
W6	34.0	60.0	40.0	2.28	1.67	3.27	3.94
W7	34.6	60.0	40.00	2.28	1.67	3.32	3.98
W8	31.8	60.0	49.60	2.28	1.83	3.29	3.94
W9	29.2	60.0	60.0	2.28	2.00	3.27	3.92

先述した比較対照となる馴養槽は槽容量：50 L、模擬ゴミ投入量：857 g/d、希釈倍率：1.67 倍、滞留日数：25 d、模擬ゴミの有機物濃度：19 %なので、有機物容積負荷は 3.26 g-VS/(L･d)となる。

運転初期は年末の祝日、年末年始、1 月の祝日等があったため投入量に変動がある。

W5 から定格量を投入し、模擬ごみの有機物容積負荷を馴養槽のそれとそろえるよう調整を行った。

また、高温については後述のとおり、アンモニア性窒素濃度が上昇したので希釈倍率を途中から増加させた。

ガス発生量原単位の週ごとの推移を中温・高温それぞれ次の図に示す。

中温、高温ともに投入量が安定していなかった年末から年始は数値のばらつきが見られたが、定格期間は安定して増加していたことから試験槽自体の馴養が進み、メタン発酵が安定していたと言える。

また、最後の W8～9 の 2 週において、中温は 150.2～151.4 Nm^3/t と 785.3.～791.6 Nm^3/t-VS、高温は 150.0～155.1 Nm^3/t と 784.3～810.9 Nm^3/t-VS 前後と、ほぼ同じ数値を示していた。

（株）バイオガスラボの馴養槽における原単位は 120 Nm^3/t であり、それを今回の試験槽に適用することとして、定格期間に 60 g/d の模擬ごみを投入していたことから、1 日あたりの模擬ごみ由来のガス発生量は 7.2 NL/d だったことになる。

一方、PHBH は、ベンチスケール試験のところで示したように CODcr：1.3 g/g、分解率：94 %、メタン濃度：55 %、投入量：2.28 g/d の条件から算出することができ、その結果は 1.77 L/d となった。

バイオガスの発生量は最新で 9 L 出ており、先の計算結果を合わせた 7.2＋1.77＝8.97 L/d とほぼ等しくなった。

よって、中温、高温ともに約 1.5 か月を経過して馴養が進み、順調に PHBH の分解が進み、想定量のバイオガスが発生したと考えられる。

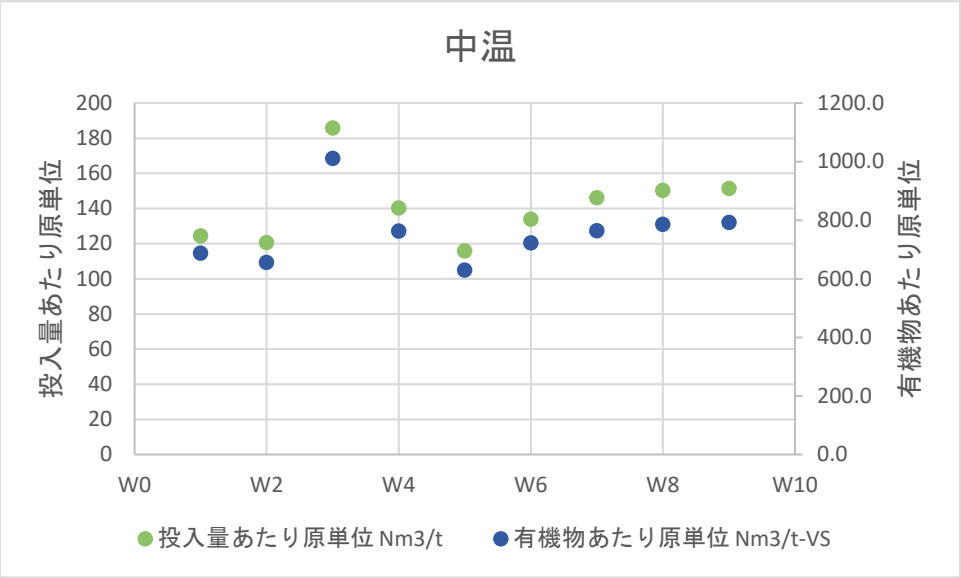


図 82　中温・バイオガス発生量（投入量あたりと有機物あたり）

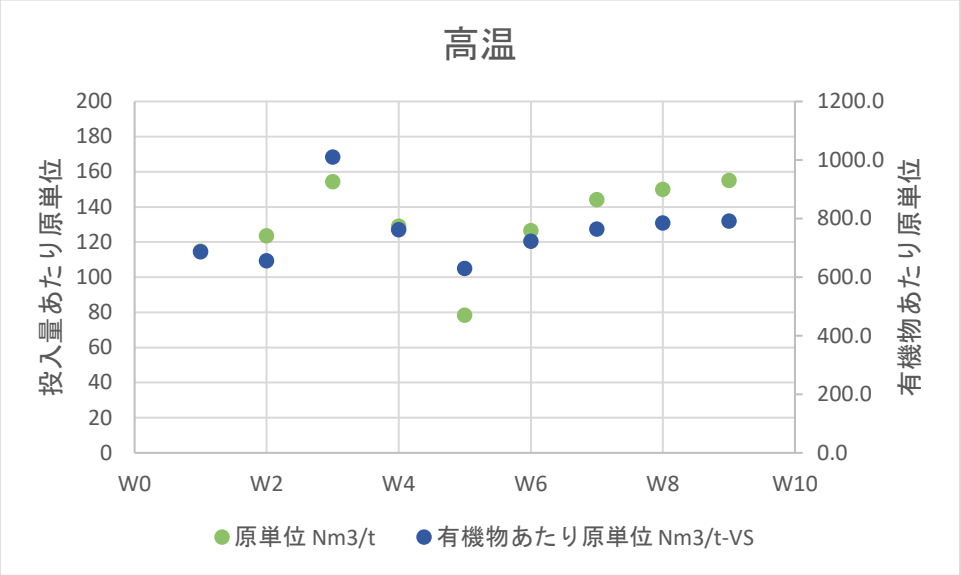


図 83　高温・バイオガス発生量（投入量あたりと有機物あたり）

アンモニア性窒素濃度、t-VFA（有機酸濃度）、アルカリ度について、週ごとの推移を中温、高温それぞれについて次の図に示す。

両温度とも t-VFA、アルカリ度ともに大きな変化は無かった。

アンモニア性窒素濃度については、両温度ともに試験が進むにつれて上昇していき 2500 mg/kg 前後となった。高温発酵においては、2,500～3,000 mg/kg を超えるとアンモニア阻害が発生するとの報告があるので、W9 から希釈水を増やし、希釈率を 1.67 から 2.0 に変更した。

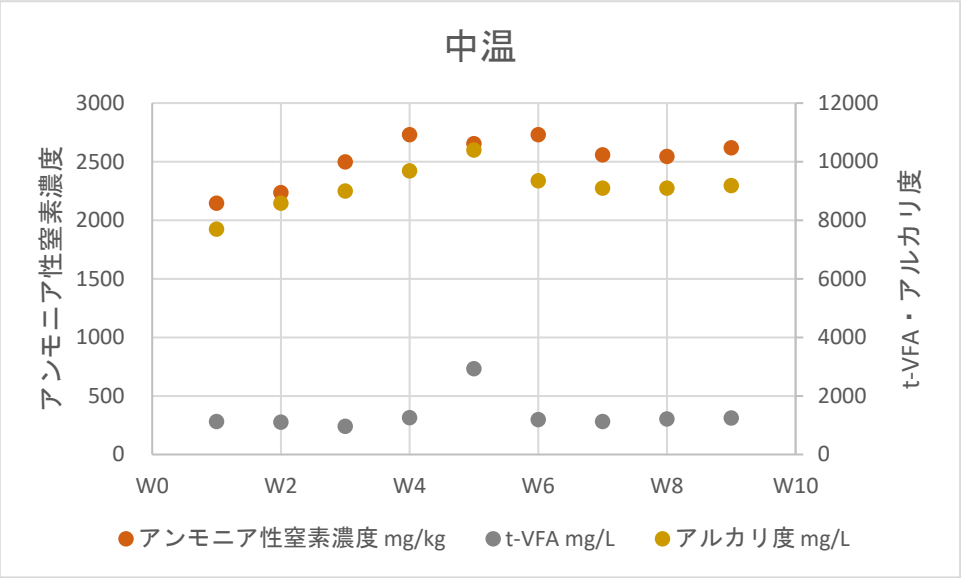


図 84　中温・アンモニア性窒素濃度、t-VFA、アルカリ度の推移

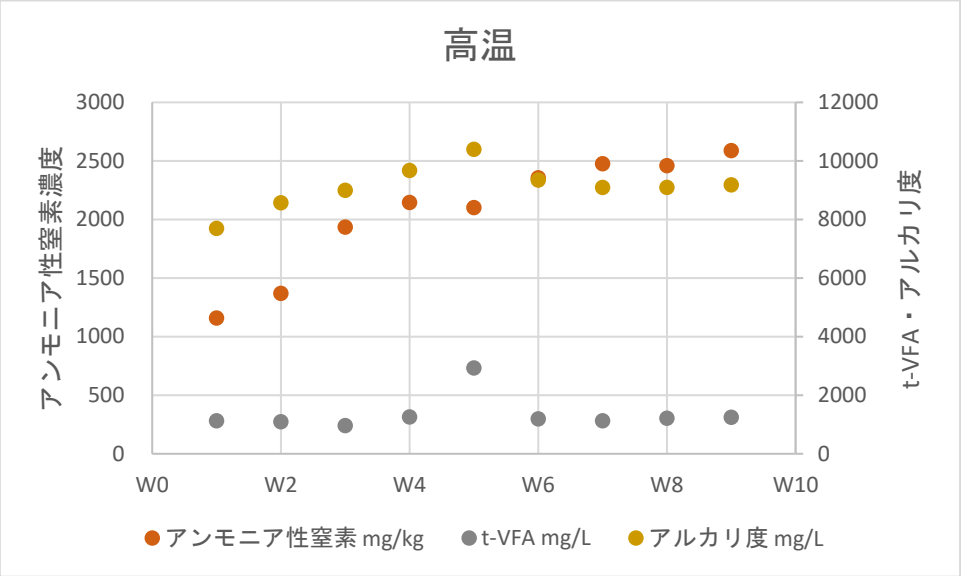


図 85　高温・アンモニア性窒素濃度、t-VFA、アルカリ度の推移

槽内の pH、FOS/TAC（t-VFA とアルカリ度の比）の推移は次の図のとおり。中温発酵では両方とも大きな変化は見られず安定していた。高温発酵では、両方とも上昇しており、pH は 8.0 近く、FOS/TAC は 0.30 近くとなっていた。

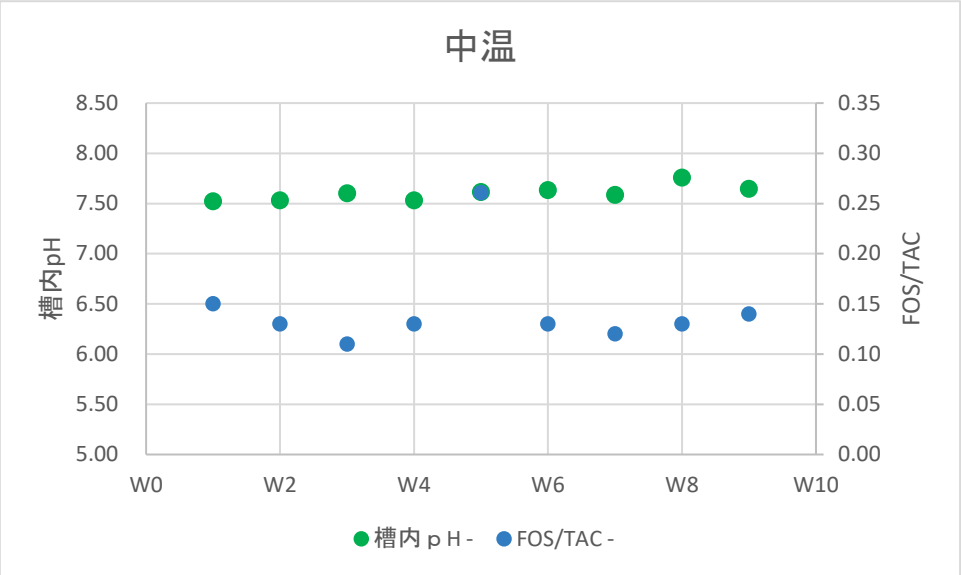


図 86　中温・槽内 pH、FOS/TAC の推移

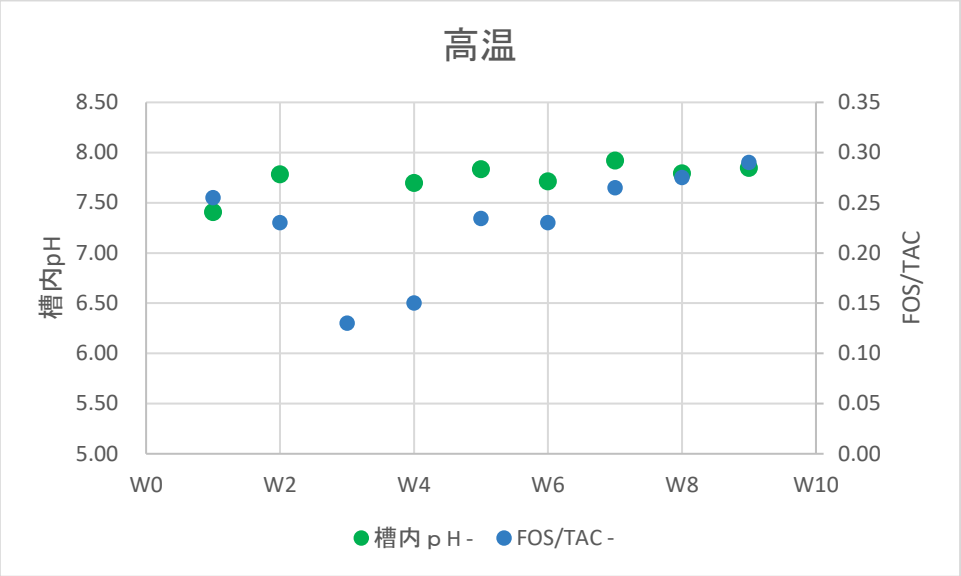


図 87　高温・槽内 pH、FOS/TAC の推移

（４）まとめと今後の課題

普及拡大に向けて、一般的な汚泥を馴養することで PHBH が分解できることを確認するとともに、高温でのメタン発酵により分解効率を比較した。

ガス発生量から推算したところ、中温、高温ともに PHBH が順調に分解していることが確認された。

ガス発生量自体は中温、高温ともに大差は無く、高温発酵による分解の向上は見られなかった。

課題としては、試験期間が 2 か月と短期だったので、3～4 か月で比較確認を行うことが望ましい。また、高温発酵についてはアンモニア阻害が懸念されるので希釈が必要となるが、その適正倍率の確認が必要となる。

3.3.3 原料に PHBH を含むメタン発酵消化液の栽培影響評価

（1）目的

PHBH を原料に含むメタン発酵消化液の肥料利用可能性を評価するため、植物の生長へ与える影響を確認した。

まず、PHBH を過剰量投入したバイオガス化バッチ試験を行い、消化液中に PHBH の分解残渣が残る場合についての栽培影響の確認を行った。続いて、ベンチスケールバイオガス化試験（3.3.1 参照）による連続運転で引き抜かれた消化液を用いて栽培評価試験を行った。

（2）バイオガス化バッチ試験による消化液の分析

1）方法

① 試験概要

試験は①バイオガス化（消化液試料調製）、②栽培試験から構成される（次図）。

バイオガス化（消化液試料調製）では、PHBH あり・なしの消化液試料を調製した。特に、PHBH の分解生成物の影響を確認するために、PHBH ありの系列については完全分解後の消化液試料に加えて、分解途中の消化液試料も調製した。

栽培試験では、消化液を肥料として用いてコマツナの栽培影響評価試験を行い、発芽、生長への影響を確認した。

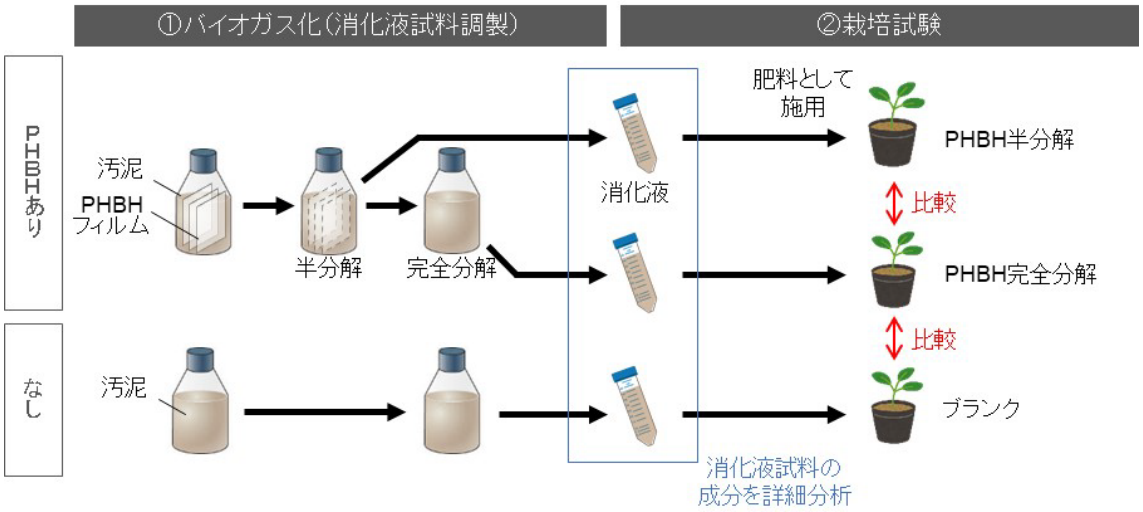


図 88　PHBH を含む消化液の栽培影響評価試験の概要

② バイオガス化（消化液試料の調製）

次表に示す 3 つのメタン発酵消化液試料を作成するためにバイオガス化試験を実施した。

表 31　メタン発酵消化液試料

試料名	模擬生ごみ	PHBH 添加	PHBH の分解停止のタイミング
ブランク	あり	なし	—
半分解	あり	あり	半分解
完全分解	あり	あり	完全分解

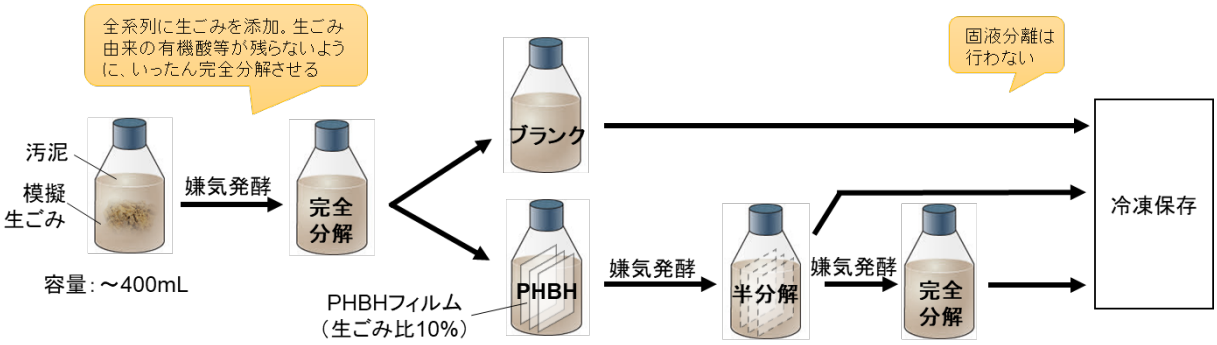


図 89　PHBH を含む消化液試料の調製手順概要

2 L 容量の反応容器に、1.5 kg の中温汚泥を投入し、38℃の恒温槽内に静置してメタン発酵を行った。模擬生ごみを 30 g 投入して混合した。ガス発生を確認し、10 日後に 2 cm 角の従来 PHBH フィルム 10 g を添加した。半分解のサンプルは PHBH フィルム添加から 5 日後にサンプリングした。ブランクサンプルも同様に模擬生ごみ添加 15 日後にサンプリングした。完全分解サンプルは PHBH フィルム添加後 25 日後にサンプリングした。サンプルは-20℃にて冷凍保存した。

③ 栽培試験

PHBH 嫌気発酵消化液を用いた栽培試験においては、畑地土壌を充填した 1 L 容ポットでコマツナを栽培した。日立造船（株）より冷凍試料として送付された PHBH 嫌気発酵消化液を解凍し、含有されるアンモニア態窒素量によって施用量を決定した（次図）。

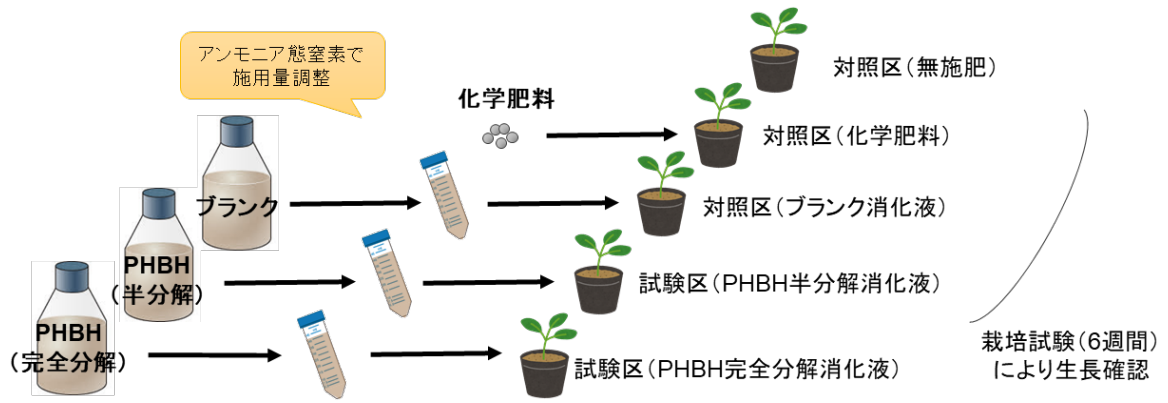


図 90　PHBH を含む消化液試料を用いた栽培試験の概要

栽培試験は 1 L ポット（下穴あり）に 800 g の畑地土壌を充填した。この畑地土壌は花崗岩の風化物を母材とする森林土壌である。別途実施した土壌分析から、この土壌 800 g には有効態リン酸 96 mg と置換性加里 296 mg が含まれていた。また土壌 800 g は 128 g の水分を含んだ状態でポットに充填した。日立造船（株）より提供された 3 種類の消化液、PHBH 完全分解、PHBH 半分解、PHBH なし、にはそれぞれ 1,200 mg/L、1,400 mg/L、1,300 mg/L のアンモニア態窒素が含まれているので、一つのポットあたりのアンモニア態窒素添加量が 50 mg、100 mg となるような消化液量と土壌を混和した。実際の圃場では地表から消化液を施用して直ちに土壌と消化液を混和するが、ポット栽培の場合には消化液と土壌の混和が簡単ではなく、多くの場合地表に滞留してアンモニアの揮散、土壌の目詰まりを起こすため、ポットに混和する土壌と消化液、添加肥料をポリ袋（ジップロック）内で予め混和した（次図）。窒素あり対照区としてアンモニア態窒素が 50、100、150 mg となるように硫酸アンモニウムを与えた。リン酸と加里は土壌にも含まれているが、消化液から持ち込まれるこれらの量が生育試験に影響しないように、各ポットにリン酸として 74 mg、加里として 100 mg をリン酸一水素二カリウムとして添加した。

図 91　消化液と土壌の混合

表 32　栽培試験の試験系列

系列 No.	系列名	アンモニア態窒素 含有量（mg）	硫酸アンモニウム 含有量（mg）	リン酸水素二カリウム 含有量（mg）
1	無施肥	-	-	183
2	消化液： PHBH 完全分解	50	-	183
3		100	-	183
4	消化液： PHBH 半分解	50	-	183
5		100	-	183
6	消化液： PHBH なし	50	-	183
7		100	-	183
8	無機肥料	50	250	183
9		100	500	183
10		150	750	183

※各系列の繰返し数は 3 とした。

2）結果

① バイオガス化（消化液試料の調製）

バイオガス化試験の生分解率を次図に示す。次表にサンプリングしたサンプルのアンモニア態窒素分析結果を示す。

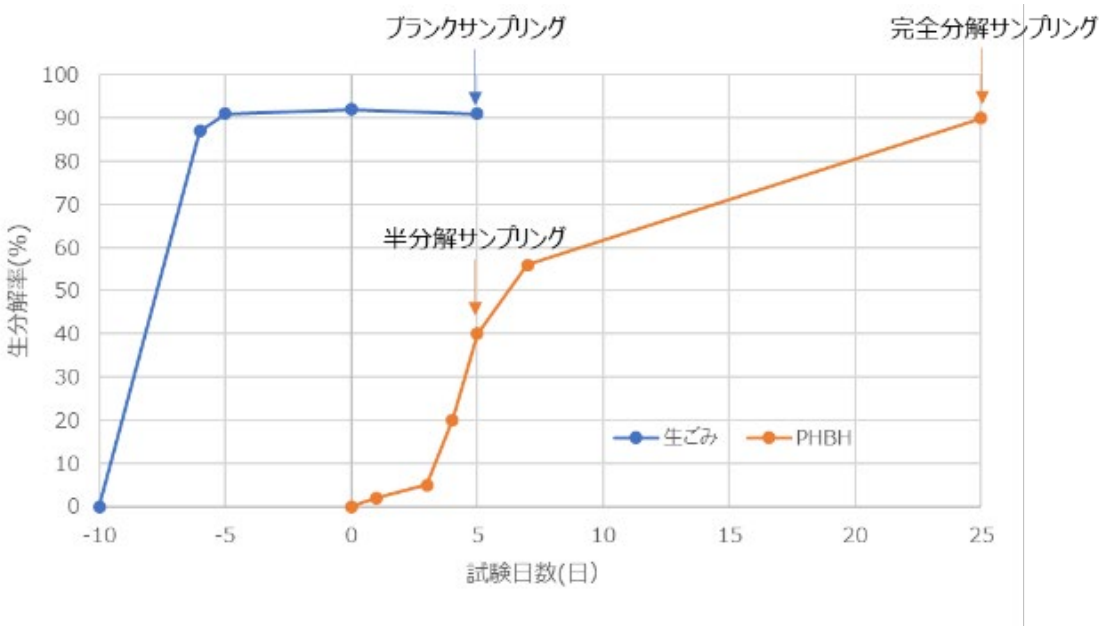
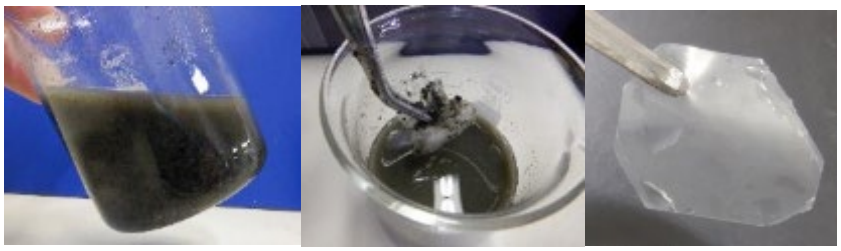


図 92　バイオガス化試験結果（PHBH 添加時を 0 日目とした）

表 33　アンモニア態窒素分析結果

	アンモニア態窒素(mg/L)
ブランク	1,300
半分解	1,400
完全分解	1,200

次図にサンプル写真を示す。



（左：消化液全体、中・右：半分解 PHBH フィルムサンプル）

図 93　調製した PHBH 半分解消化液試料

② 栽培試験

各ポット 6 個の種子を播種し 4 週齢で各ポット 3 個体に間引いた。栽培時の最低気温が 10℃を下回らないようビニルハウスにて栽培し、6 週間後（42 日後）に収穫した。

下図に、栽培試験準備の様子、38 日目の生育の様子を示した。アンモニア態窒素施肥量に応じた生育が見られ、PHBH による生育阻害は見かけの生育の様子や外観からは判別できなかった。今後、収穫したコマツナの乾物重、窒素吸収量を測定した。

図 94　栽培試験の結果

（縦の 3 ポットは繰り返し。写真 4 の括弧内はアンモニア態窒素の施用量）

それぞれの条件で 6 週間栽培した後の乾物生産量と窒素吸収量を示した（次図）。その結果、PHBH を添加していない消化液対照区⑨⑩と PHBH 分解物⑤～⑧の生育量、窒素吸収量に有意差はなく、PHBH 分解物、半分解物によって生育は影響されなかった。硫酸アンモニウムを与えた②～④よりも PHBH 区で生育量、窒素吸収量が上回ったのは、消化液中のアンモニア態窒素に加えて有機態窒素もコマツナに利用されたためと考えた。

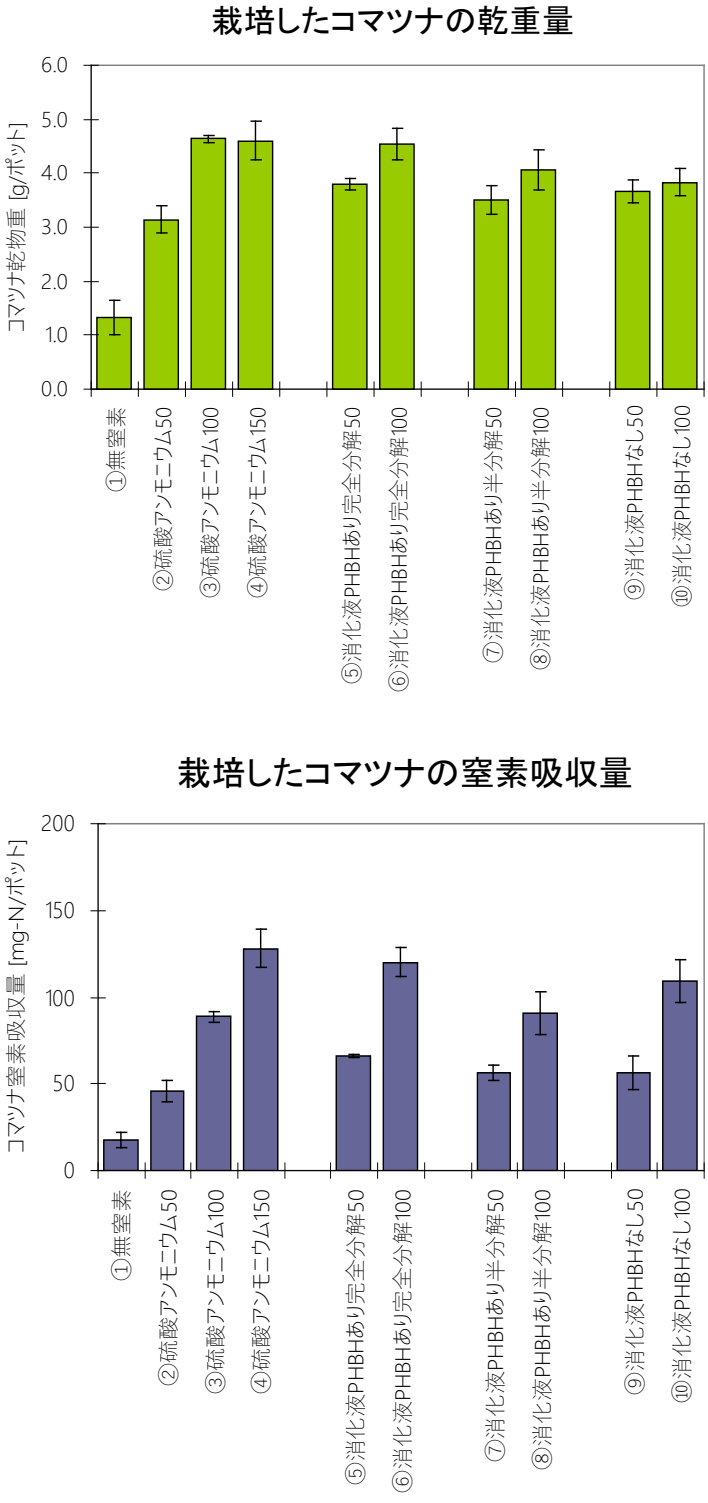


図 95　栽培試験結果

3）まとめと課題

原料に PHBH を含む消化液を調製し、コマツナの栽培試験が植物の生長へ与える影響を検証したところ、見かけの生育の様子や外観からは PHBH による生育阻害効果は認められなかった。

（３）ベンチスケールバイオガス化試験（連続運転）による消化液を用いた栽培試験

1）方法と結果

（株）バイオガスラボから生ごみメタン発酵消化液を受領した。同消化液の組成と、京北町山国地区でこれまで製造されてきた生ごみ由来の堆肥を受領し、肥料成分の含有率を測定した。

表 34　好気発酵-生ごみ堆肥とメタン発酵-生ごみ消化液の肥料要素含有量（現物あたり）

生ごみ処理物	窒素 （うちアンモニア態窒素）	リン	カリウム
	mg/kg	mg/kg	mg/kg
メタン発酵消化液	3,500 （1,300）	570	1,100
好気発酵堆肥	25,000 （測定せず）	1,900	4,500

これらの資材を用いて、800 g の土壌を含む直径 12cm のプラスチックポットを用いてコマツナの栽培試験を行った。写真は収穫直前の 2022 年 1 月 17 日の様子である。奥が PHBH 製生ごみ袋-生ごみ消化液を用いた栽培ポット、手前左側が生ごみ堆肥を用いた栽培ポットである。両者は播種日が違うのでこの写真だけからでは生育比較はできない。

図 96　栽培試験の経過（2022 年 1 月 17 日）

PHBH 製生ごみ袋-生ごみ消化液の施肥対照区として、尿素を窒素源として、ポットあたり窒素が 0、50、100、150 mg となるように与えた。処理試験区として PHBH 製生ごみ袋-生ごみ消化液に含まれるアンモニア態窒素がポットあたり 50、100、150 mg になる量を与えた。なお、窒素の総量ならば、PHBH 製生ごみ袋-生ごみ消化液区の各ポットに与えた窒素量はアンモニア態窒素量の 2.7 倍になる。

リン酸、カリウムは土壌に十分量含まれているため施肥対照区には与えなかったが、処理試験区には生ごみ消化液に含まれるものが持ち込まれた。2021 年 12 月 6 日に播種し 2022 年 1 月 20 日まで栽培した。収穫後、新鮮重を測定し、70℃で恒量になるまで乾燥して乾物重、試料を粉砕して窒素含有率を測定した。結果を次表と次図に示した。

PHBH 製生ごみ袋-生ごみ消化液のアンモニア態窒素の含有率は 1,300 mg / kg だったで、800 g の土壌を含むポットには、各ポットに消化液を 38、77、116 g 与えたことになる。これらの量は、10 a の畑には、おおよそ 5、10、15 トンの消化液を与えることに相当する。生育量のグラフから、この時期のコマツナの生育量は消化液として 100 mg のアンモニア態窒素で飽和しているように見えるので、コマツナの栽培に当たっては、10 a 圃場あたり 10 トンの消化液を撒けば化成肥料は要らないと推定できる。

無施肥対照区に比べて消化液を添加した区では生育が促進され、窒素吸収量も消化液施用量の増加に応じて増加した。窒素吸収量はアンモニア態窒素に相当する量を尿素で与えた対照区よりも生ごみ消化液区で増加していた。生ごみ消化液にはアンモニア態窒素だけでなく有機態窒素も含まれるので、この有機態窒素の一部が土壌中で無機化されて窒素吸収量の増加に貢献したものと推定した。

コマツナの生育は PHBH 製生ごみ袋-生ごみ消化液によって促進されただけでなく、見かけ上の害徴も見られなかった。これらの結果から、PHBH 製生ごみ袋-生ごみ消化液は作物の窒素肥料として使用できるものと結論した。

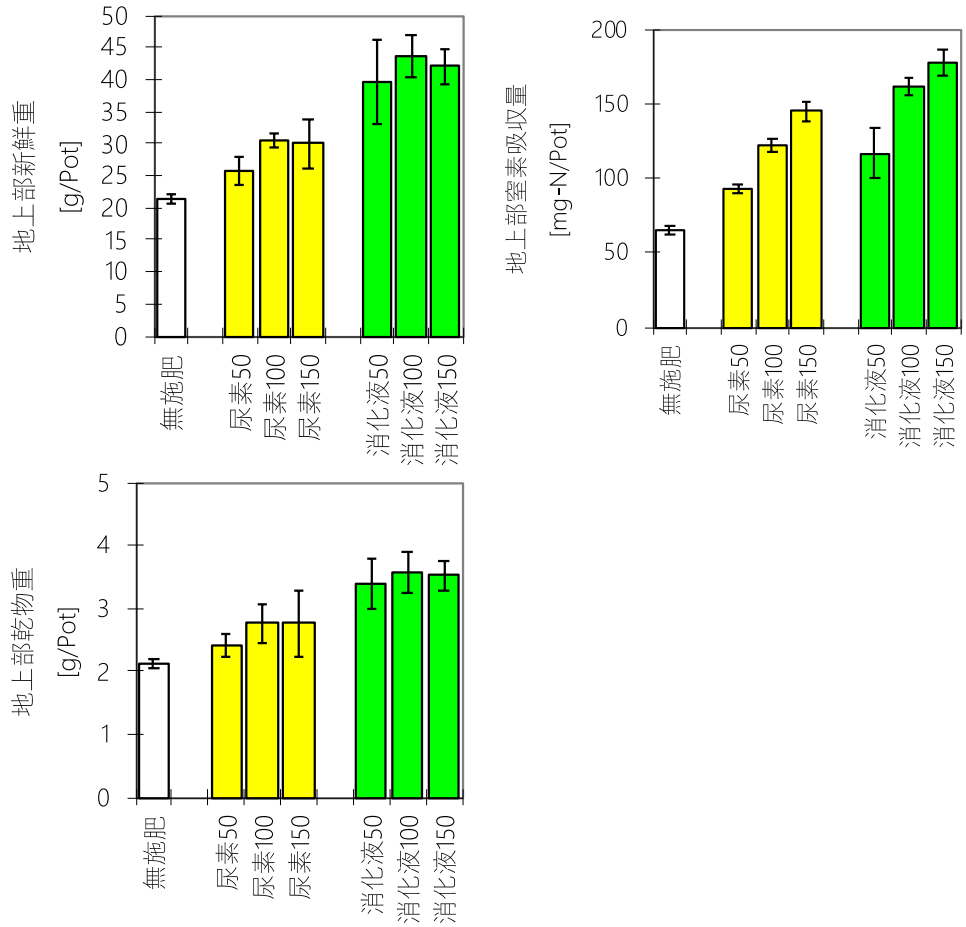


図 97　栽培試験結果

表 35　生ごみメタン発酵消化液を使ったコマツナ栽培の
生育量、乾物生産量、窒素含有率、窒素吸収量

		風袋 [g]	新鮮重（中身のみ秤量） [g]	乾燥＋風袋 [g]	乾燥（引く風袋） [g]	窒素含有率 [%]	地上部 窒素吸収量 [mg-N]
① 無施肥区	0-1	9.869	22.0	12.06	2.20	3.11	68.26
	0-2	9.912	21.3	11.96	2.05	3.04	62.32
	0-3	9.823	20.7	11.91	2.09	3.08	64.28
	平均＋標準偏差		21.3		2.1	3.08	64.95
	標準偏差		0.65		0.08	0.035	3.027
② 尿素区50	尿素50-1	9.885	28.1	12.49	2.61	3.69	96.24
	尿素50-2	9.916	24.2	12.14	2.22	4.15	92.21
	尿素50-3	9.893	24.4	12.28	2.39	3.77	90.10
	平均		25.6		2.4	3.87	92.85
	標準偏差		2.20		0.20	0.246	3.120
③ 尿素区100	尿素100-1	9.856	31.4	12.97	3.12	3.95	123.16
	尿素100-2	9.861	30.5	12.51	2.65	4.40	116.64
	尿素100-3	9.894	29.4	12.42	2.52	4.94	124.54
	平均		30.4		2.8	4.43	121.45
	標準偏差		1.00		0.32	0.496	4.219
④ 尿素150	尿素150-1	9.89	34.0	13.20	3.31	4.60	152.35
	尿素150-2	9.875	29.8	12.59	2.72	5.20	141.34
	尿素150-3	9.96	26.3	12.19	2.23	6.27	140.07
	平均		30.0		2.8	5.36	144.59
	標準偏差		3.86		0.54	0.846	6.753
⑤ 消化液10区50	消10 50-1	9.921	33.5	12.93	3.01	3.69	111.18
	消10 50-2	9.881	46.5	13.67	3.79	3.56	135.00
	消10 50-3	9.977	39.0	13.34	3.37	3.04	102.36
	平均		39.7		3.4	3.43	116.18
	標準偏差		6.53		0.39	0.344	16.885
⑥ 消化液10区100	消10 100-1	9.885	44.0	13.55	3.67	4.52	165.70
	消10 100-2	9.984	40.0	13.19	3.21	4.84	155.22
	消10 100-3	9.841	46.5	13.68	3.84	4.26	163.41
	平均		43.5		3.6	4.54	161.44
	標準偏差		3.28		0.33	0.291	5.510
⑦ 消化液10区150	消10 150-1	9.55	41.5	12.92	3.37	4.97	167.29
	消10 150-2	9.46	45.0	13.26	3.80	4.86	184.63
	消10 150-3	9.556	39.5	12.98	3.42	5.28	180.58
	平均		42.0		3.5	5.04	177.50
	標準偏差		2.78		0.24	0.218	9.071

（4）まとめと課題

ベンチスケールバイオガス化試験におけるろ過後の消化液が植物の生長へ与える影響をコマツナの栽培試験で検証したところ、見かけの生育の様子や植物体の重量、窒素吸収量からは生育阻害は認められず、PHBH 製生ごみ袋-生ごみ消化液は作物の窒素肥料として使用できるものと結論づけた。

3.4 バイオガス化を見据えたPHBHのプラスチック代替製品への利用可能性の検討

3.4.1 目的

PHBHは、生分解性に優れるという特性と、100%バイオマス由来（脱炭素性）であるという2つの特性を備えており、将来的なプラスチックごみの処理効率化やプラスチック由来のCO_2排出量の低減に大いに貢献し得る。ただし、PHBHの生産能力は5千トン/年程度であり、PEやPP等の汎用プラスチックと比べて小規模であり、その特性が活かされる用途に優先的に使用していくことが求められる。

本節では、国内におけるプラスチック製品の使用・廃棄状況を踏まえ、使用後にすぐに捨てられる用途や現状では廃棄後のリサイクルが困難で焼却せざるを得ない用途等、PHBHの導入が社会的・環境的に望ましい用途について検討を行った。また、2050年のカーボンニュートラル社会の達成を見据えて、その用途の中長期的な展望についても検討を行った。

3.4.2 方法

本事業の採択以降、2021年1月に環境省・経済産業省・農林水産省・文部科学省により「バイオプラスチック導入ロードマップ」が発表されたことを受け、同ロードマップに基づきプラスチックのリサイクル調和性を踏まえ、PHBHの利用適性及び具体的な製品例を以下のとおり整理した。

3.4.3 結果

（1）バイオプラスチックの製品への導入状況の整理

バイオプラスチックの製品への導入状況について、各社のホームページ等を参考に以下のとおり業界ごとに整理した。

表 36　各業界におけるバイオプラスチック・代替素材の製品への導入状況

業界	業種	対象製品	使用される素材	
			代替前	代替後
小売	コンビニエンスストア	レジ袋	PE	バイオPE、紙
		レンジアップしない弁当・総菜容器（サラダ、冷やし麺等）	—	バイオPET、PLA
		おにぎりのパッケージ	PE	バイオPE
		おにぎり、パンのパッケージ	石油系インキ	バイオマスインキ
		プライベートブランドのパッケージ	PE等	バイオPE等
		アイスコーヒー容器	PET	紙
	スーパーマーケット	レジ袋	PE	バイオPE
		持ち帰り専用かご	PE	バイオPE
		惣菜容器	―	バイオマスプラスチック
		青果売り場の容器包装、鶏卵パック	―	バイオマスプラスチック
飲食	カフェ・ファストフード・ファミリーレストラン	ストロー	PP	紙、バイオマスプラスチック、生分解性プラスチック
		レジ袋（持ち帰り用）	PE	紙、バイオPE
宿泊	ホテル	ストロー、マドラー、ピック等	PE	紙、木、生分解性素材等
輸送	航空・鉄道	ストロー	PP	バイオプラスチック、紙
		マドラー、カトラリー（ラウンジ）	PP、PS	木
		レジ袋	PE	バイオPE

各業界におけるバイオプラスチック・代替素材の製品への導入状況について（続き）

業界	業種	対象製品	使用される素材	
			代替前	代替後
メーカー	飲料メーカー	ペットボトル	PET	バイオ PET
		ペットボトルのラベル	PE 等	PLA
		ペットボトルのキャップ	PE	バイオ PE
	食品メーカー	調味料容器	PE 等	バイオマスプラスチック
		即席めん容器	PS	バイオマスプラスチック、紙
	化粧品・トイレタリーメーカー	ボトル、パウチ	PE	バイオ PE
	衣料・スポーツ用品メーカー	レジ袋	PE	紙

出典：各社ホームページ等をもとに作成（2022 年 2 月時点）

- バイオプラスチック素材として採用事例が多かったのはバイオ PE・バイオ PET といった、非生分解性の汎用バイオマスプラスチックであった。これらの樹脂は代替前後で素材が同一であり、製造システムを変更せずに導入することが可能であり、また、樹脂供給量が他のバイオプラスチックよりも多く、加えて価格が他のバイオプラスチックよりも低いことが普及の要因と考えられた。
- 代替素材に生分解性プラスチックが使われている事例はあまりなく、レンジアップしない弁当・惣菜容器や、ストロー、ペットボトルのラベル等への採用実績が確認された。ただし、これらのプラスチック製品が廃棄物となった際はいずれも回収・焼却されると考えられるため、必ずしも生分解性が活かされているわけではないと考えられた。
- プラスチック製買物袋（ここではレジ袋と表記）のバイオ PE への代替は業種を問わず広く普及しており、2020 年 7 月から施行されたレジ袋有料化制度の影響が大きかったと推察された。これは、レジ袋向けのバイオ PE のバイオマス度の多くが 25%であったことからも裏付けられる。
- 一部のプラスチック用途については、紙・ラミネート素材や木等の天然素材への代替事例が確認された。

（２）PHBH の特性の整理

PHBH が汎用プラスチックに比べて優れる点と課題について、以下のとおり整理した。

1）PHBH が PP・PE 等の汎用プラスチックに比べて優れる点

- 極めて高い生分解性を有する（土壌分解性・好気性条件下での生分解性だけでなく、嫌気性条件下での生分解性・海洋生分解性を有する）
- 100%バイオマス由来である（廃食用油を原料に製造された PHBH についてはバイオマス由来に加えて循環資源由来という特性も有する）
- 多様な原料から製造するすることが可能である（パーム油以外に、廃食用油やジャトロファ油、菜種油等から製造可能である）

2）PP・PE 等の汎用プラスチックに比べた PHBH の課題

- オープンリサイクルで他のプラスチック種に混合してマテリアルリサイクルされると再生

材の品質が劣化する可能性がある。クローズドリサイクルされた場合、現状では数回程度のマテリアルリサイクルが限界と考えられる。

- 汎用プラスチックと比べると耐加水分解性等の安定性に劣るため、長寿命が求められる用途や長期の保管等が求められる用途には不向きである。
- 製造拠点が１ヶ所かつ当面の供給能力が 5,000 トン/年に限られる。
- 汎用プラスチックよりも価格が高い（バイオプラスチックの中では中程度の価格帯）。

（３）PHBH のプラスチック代替製品への利用の考え方

ワンウェイの容器包装・製品をはじめ、回避可能なプラスチックの使用を合理化し、無駄に使われる資源を徹底的に減らすことを前提に、プラスチックのリサイクル調和性を阻害せずに生分解性・脱炭素性を活用するという観点から、PHBH のプラスチック代替製品への利用の考え方を以下に整理した。

＜PHBH のプラスチック代替製品への利用の考え方＞

- 生分解性プラスチックは堆肥化・バイオガス化プロセスや土中で水と CO_2 に生分解されるが（バイオガス化の場合は CH_4 を経由して CO_2 に酸化）、石油を原料として製造された生分解性プラスチックの場合、当該 CO_2 は地球温暖化に負の影響を与えるため、生分解性が求められるプラスチック用途全般にカーボンニュートラルである PHBH の代替利用が適する。
- 生ごみ袋を PHBH で代替した場合、破袋・除去を行わずにそのまま生ごみ・紙くずと一緒に堆肥化もしくはバイオガス化に供することが可能なことから、堆肥化・バイオガス化インフラの整備を前提としてその利用が推奨される（ただし、生ごみと共に生分解性生ごみ袋を生分解する場合には、生産される堆肥等に未分解のプラスチックが残らないように管理することが求められる。）
- 農業用マルチフィルム等の農業用途については、使用後の徹底した管理のもと、農地へ適切なすき込みを行うことで、回収・処理コストの削減等のメリットがあるため、積極的な利用が推奨される。肥料用被覆材については、使用後は畑地・水田等に被覆材が残留し、また、一部は海洋に流出するため、海洋生分解性プラスチックの利用が適していると考えられ、今後の実用化に向けた検討が期待される。
- 自然環境への非意図的な流出が避けられない用途や漁業用途には、PHBH の海洋生分解性を活かした代替利用が適する。なお、漁業用途については、現状では漁具等水産用生産資材のうち耐久性が求められない用途に限られるため、今後の用途展開に向け、漁具として使用中は必要な物性が保たれるような技術開発が必要である。
- 利用後にオープンリサイクルに仕向けられる用途については、現状では PHBH の選別等のリサイクル技術・プロセスが十分に確立されていないため、汎用プラスチックのマテリアル・ケミカルリサイクルへの影響を確認する必要がある。なお、クローズドリサイクルの場合は、他のプラスチックのマテリアルリサイクルを阻害しないという観点から、PHBH の代替利用が認められる。紙ラミネート等の複合素材のように、リサイクルに不向きで焼却せざるを得ない用途については、カーボンニュートラルである PHBH の代替利用が認められる。
- 長寿命が求められるプラスチック用途については、全般的に生分解性プラスチックの代替利用が向いておらず、PHBH についても同様に不向きであり、今後、製品として使用してい

る間は必要な物性が保たれるような技術開発が必要である。

表 37　プラスチックリサイクルとの調和性を踏まえた PHBH の利用適性

	リサイクル（材料・ケミカル）		堆肥化等の肥料生産に伴う分解	バイオガス化	焼却（熱回収含む）
	複数プラスチック種リサイクル	単一プラスチック種リサイクル			
PHBH	技術・プロセスが未確立でありリサイクルの阻害要因になり得る	技術・プロセスが確立しておりリサイクル可能	適正に分解するので、良い影響を与える		悪影響なし

表 38　生分解性・脱炭素性が活かされる用途の具体的な製品例・年間廃棄量

リサイクル・処理方法等	具体的な製品例	年間廃棄量（推計値）※
堆肥化・バイオガス化	堆肥化用・バイオガス化用ごみ袋、食品容器・包装のうちマテリアルリサイクル・ケミカルリサイクルに不向きなもの	ごみ袋：約20～30万トン 食品容器・包装：約200万トン
農地へのすき込み等	農業用マルチフィルム、肥料に用いる被覆材、その他自然環境で利用される製品	肥料被覆材：1万トン未満 農業マルチフィルム：約4万トン
自然環境に非意図的流出	人工芝、漁具等水産用生産資材のうち耐久性が求められないもの	漁具：数万トン

※ 出典：環境省ホームページ，平成31年度バイオプラスチック導入に向けた調査及びロードマップ作成に係る委託業務 報告書

（4）PHBH の食品容器・包装用途への展開に向けた今後の検討事項

3.4.3 節の整理の結果、食品容器・包装への PHBH 導入ポテンシャルが大きいことが分かったが、汚れの度合いによりマテリアル・ケミカルリサイクルするのか、それとも食品廃棄物と共にバイオガス化するのか分かれるため、両方のシステムに素材として対応する必要あること等、今後の対応課題があることが分かった。以下に PHBH を食品容器・包装用途に展開するための今後の検討事項を整理する。

1）マテリアルリサイクル・ケミカルリサイクルへの対応

- 既存の汎用プラスチックのマテリアル・ケミカルリサイクルに影響しないことの確認
  - バイオプラスチック導入ロードマップは、生分解性プラスチックが既存の汎用プラスチック（PP・PE 等）のリサイクルシステムを阻害しないことを求めているため、「①汎用プラスチックとの分別性」及び「②既存のリサイクルシステムに混入した場合の影響」の確認を行う必要がある。①については、既存のプラスチック選別システムにおける汎用プラスチックと PHBH の分別性の試験・評価が求められる。②については、汎用プラスチックのマテリアルリサイクル・循環型ケミカルリサイクルシステムに PHBH が混入した場合の影響について確認が求められる（例：マテリアルリサイクル・ケミカルリサイクルシステムで許容される混入率の検討等）。
- PHBH のケミカルリサイクル性の確認
  - PHBH を油化した精製油の成分から、PHBH の循環型ケミカルリサイクルシステムへの適性を確認することが考えられる。

2）食品容器・包装に適した物性の開発

- 食品容器・包装に求められる強度・耐熱性・食品安全性等を満たす PHBH の改良、コンパウンド開発
- バイオガス化施設における PHBH 製食品容器・包装の生分解性・残渣物等の確認（ごみ袋よりも厚くなる製品の分解性の検討）

3）リサイクルシステムの検討

- 汚れた PHBH 製食品容器・包装をどのように収集し、生ごみ等とバイオガス化するか、リサイクルシステムの検討。既存のリサイクルシステムとの併用方策の検討

4）ライフサイクルでの温室効果ガス削減効果の定量化・有効性評価

- 汎用プラスチックのマテリアルリサイクル・循環型ケミカルリサイクルシステムと比較した、バイオガス化システムの有効性の検証

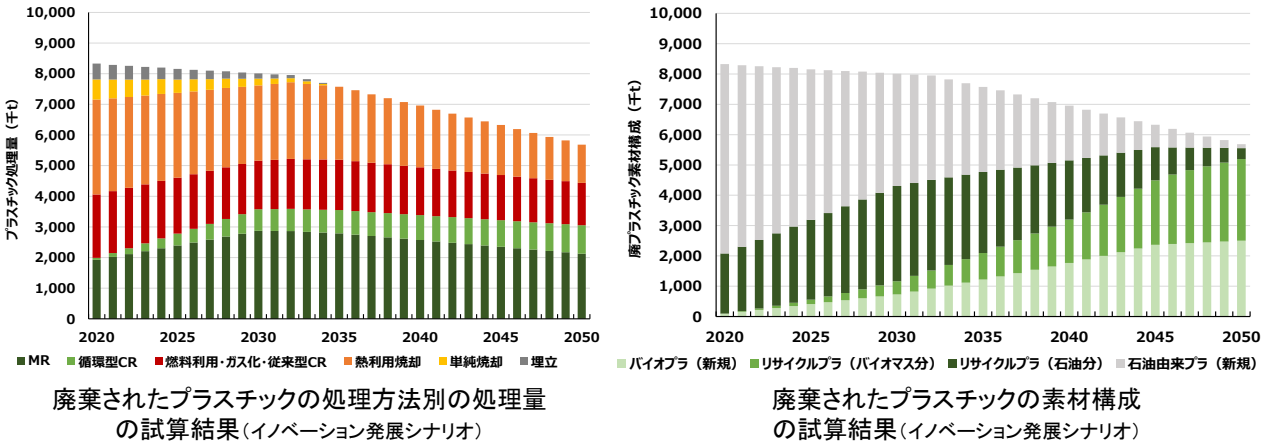
表 39　食品容器・食品包装用途において PHBH の代替利用の対象となる容器・包装のイメージ

分類※1		現状の主な樹脂	内容物、汚れの原因	生分解性バイオマスプラスチック化用途（イメージ）※2
食料品・調味料のプラボトル	食料品・調味料のプラボトル（PET）	PET	ソース、天ぷら油	◎
	食料品・調味料のプラボトル（PET以外）	PE	マヨネーズ、ケチャップ、からし、わさび等	◎
カップ・コップ	食料品カップ・コップ（非発泡）	PE、PP、PET、PS	みそ汁、卵豆腐、ゼリー、プリン、アイス	○
	食料品カップ・コップ（発泡）	PS	ラーメン、うどん、かき氷、どんぶり	○
	発泡魚箱・保冷容器	PS	ー	○（海洋流出がある場合）
パック	卵パック	PET	ー	
	食料品パック（非発泡）	PP、PET	マーガリン、弁当、冷やし麺、キムチ、味噌	○
	食料品パック（発泡）	PS	納豆、弁当	○
トレイ	透明生鮮トレイ	PET、PP等	総菜	○（回収システムが無い場合）
	発泡生鮮トレイ	PS	肉、魚	○（回収システムが無い場合）
	中敷き	PS等	肉、魚	◎
袋	食料品の柄入りのプラ袋	PE、PP	ポテトチップス	○
	無地の食料品小袋	PE、PP	調味料、紅生姜、菓子パン	◎
	食料品の大・中袋	PE	ー	
雑梱包材（あめやおかきの小さな包み）		PE	あめ、アイス	○
ラップ	家庭用ラップ	PVDC、PVC、PE	米、惣菜	○
	スーパー等業務用ラップ	PVDC、PVC、PE	総菜、肉、魚	○

※1：分類は京都市家庭ごみ細組成調査を参考に整理
※2：内容物の種類・汚れの度合いから想定しており、製品に求められる物性への対応については今後の検討が必要

（５）2050 年のカーボンニュートラル社会の達成を見据えた中長期的な展望

中央環境審議会循環型社会部会（第 38 回）は、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（イノベーション発展シナリオ）において、プラスチックの処理方法・プラスチックの素材構成の例を以下のとおり提示している。



廃棄されたプラスチックの処理方法別の処理量の試算結果（イノベーション発展シナリオ）

廃棄されたプラスチックの素材構成の試算結果（イノベーション発展シナリオ）

図 98　2050 年におけるプラスチックの処理方法・プラスチックの素材構成の検討例

左図によると、2050 年時点で、約 40～50%の廃プラスチックはリサイクル（マテリアルリサイクル・ケミカルリサイクル）ではなく、焼却もしくは燃料利用されている。バイオガス化は処理方法として想定されていないが、熱利用焼却及び燃料利用・ガス化・従来型ケミカルリサイクルについては、バイオガス化が可能なプラスチックが一定量含まれると考えられる（汚れた食品容器・包装等）。

右図によると、バイオマスプラスチックをマテリアルリサイクル・ケミカルリサイクルにより循環的に利用することで、焼却・燃料利用される廃プラスチックを起源とする CO2 をカーボンニュートラル化することが想定されている。一方、生分解性バイオマスプラスチックのマテリアルリサイクル・ケミカルリサイクル性は素材や用途に左右されるため、それぞれに応じたリサイクル・処理の仕組みの検討が求められると想定される。

これらより、2050 年に 250 万トンの新規バイオマスプラスチックを導入するには、生分解性を有するものも含めて最大限の導入を図っていく必要があると考えられるが、その際、生分解性バイオマスプラスチックを活用するために、使用後のリサイクル・処理方法に応じた製品ごとのきめ細かなプラスチックの素材選択と使用後のリサイクル・処理が求められると考えられる。

3.4.4 まとめと課題

本節では、生分解性に優れるという特性と、100%バイオマス由来（脱炭素性）であるという 2 つの特性を有する PHBH の特性が活かされる用途について検討を行った。その結果、食品容器・包装への PHBH 導入ポテンシャルが大きいことが分かったが、汚れの度合いによりマテリアル・ケミカルリサイクルするのか、それとも食品廃棄物と共にバイオガス化するのか分かれるため、両方のシステムに素材として対応する必要あること等、今後の対応課題があることが分かった。

今後はマテリアルリサイクル・ケミカルリサイクルへの対応、食品容器・包装に適した物性の開発、リサイクルシステムの検討、ライフサイクルでの温室効果ガス削減効果の定量化・有効性評価等により、PHBH の用途展開が進むことが期待される。

3.5 PHBH 製生ごみ袋による CO2 削減効果の定量化に関する検討

3.5.1 目的

PHBH 製生ごみ袋による CO_2 削減効果の定量化を目的に、2.4.1 節で算定した原料栽培～PHBH 樹脂製造段階の GHG 排出原単位ならびに 3.1 節の PHBH 製生ごみ収集袋試作結果を用いてごみ収集袋製造 1 枚当たりの GHG 排出量を算定した。

3.5.2 方法

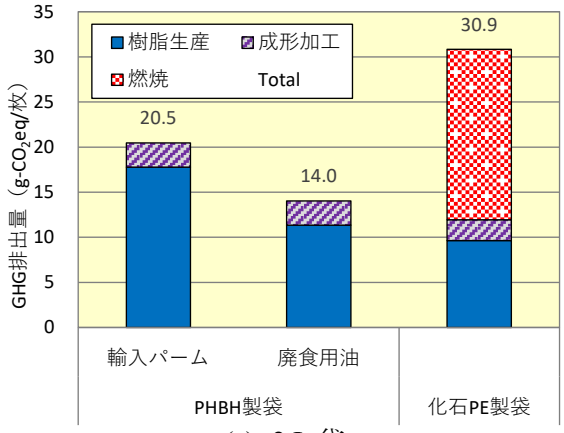
対象製品として 2 L および 10 L サイズの生ごみ収集袋を想定し、LDPE[10]製生ごみ収集袋と比較した。袋重量は、PHBH 製生ごみ収集袋は試作品の 2 L、10 L の袋重量 7.0 g/枚、18.0 g/枚を、LDPE 製生ごみ収集袋については京都市の家庭ごみ収集袋（5 L、10 L、20 L、30 L、45 L）の袋重量を計量し、10 L は 10.8 /枚、2 L は線形回帰によって 6.0 g/枚と設定した。

袋製造（成形加工）工程における歩留まりは袋の素材に依らないとし、ヒアリングにより生産ライン 5 万枚/ロットの 0.95 とし、袋 1 枚当たりの樹脂供給量を計算し、樹脂供給量に 2.4.1 節で算定した原料栽培～PHBH 樹脂製造段階の GHG 排出原単位を乗じて GHG を計上した。なお、袋成形加工工程のロスは主に装置の立ち上げ、立ち下げ時に発生することから、ロット当たりの生産量を増産することで歩留まりは改善される見込みである。また、PE 樹脂を用いた時とほぼ同条件で PHBH 樹脂の成型加工を行うことができたことから、袋製造（成形加工）工程における GHG 排出原単位も袋の素材に依らず一律とし、プラスチック循環利用協会（2020）の報告書からインフレーション成形による LDPE 製透明ごみ袋の 0.3813 t-CO_2eq/t-PE を用いた。

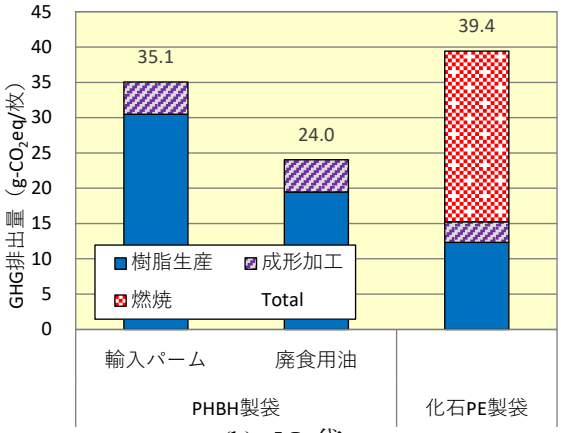
3.5.3 結果

結果は次図に示したとおり、2 L サイズの生ごみ収集袋製造の GHG 排出量は輸入パーム油原料 PHBH 製 20.5 g-CO_2eq/枚、廃食用油原料 PHBH 製 14.0 g-CO_2eq/枚となった。化石 PE 製生ごみ収集袋の燃焼分を除いた GHG は 11.9 g-CO_2eq/枚であり、廃食用油を原料とすれば化石 PE と同程度の GHG 排出量になると期待される。また、いずれの素材においても成形加工よりも樹脂生産の方が寄与は大きい。なお、袋 1 枚当たりの重量はサイズが大きくなるほど PHBH 製の方が重たい傾向を示す。具体的には、10 L サイズの京都市家庭ごみ収集袋は 10.8 g/枚であるのに対し、同サイズの PHBH 製生ごみ収集袋試作品は 18.0 g/枚と 1.67 倍となる。したがって、次図に示したとおり 10 L サイズでは廃食用油でも化石 PE 製（燃焼除くと 21.4 g-CO_2eq/枚）よりも GHG 排出量は大きい結果となった。

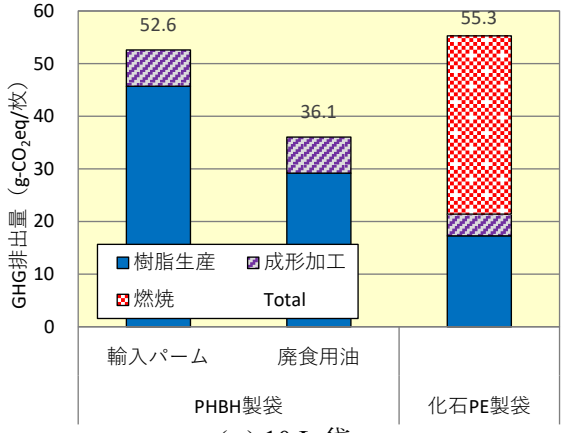
10 低密度ポリエチレン



(a) 2 L 袋



(b) 5 L 袋



(c) 10 L 袋

図 99　素材別の生ごみ収集袋製造時の GHG 原単位算定結果

3.5.4 まとめと課題

PHBH 製生ごみ収集袋製造時の GHG 排出量は 2 L サイズでは化石 PE 製の方が優位ではあるものの、概ね同程度まで低減できることが確認された一方、袋サイズが大きくなるほど化石 PE 製の優位性が強くなる傾向となった。ただし、化石 PE 製生ごみ収集袋の燃焼時の GHG を加味すると 10 L サイズでも依然として優位であり、ライフサイクルで両者を比較することが肝要である。また、成形加工よりも樹脂生産の寄与が大きいことから、本実証で PHBH 樹脂生産段階の GHG 排出量が従前よりも大きく低減できたことは、PHBH 製生ごみ収集袋の GHG 削減にも大きく貢献したといえる。

＜参考文献＞

・　プラスチック循環利用協会（2020）樹脂加工におけるインベントリデータ調査報告

3.6 まとめと課題

実証事業 2：PHBH 製の生ごみ袋の試作からバイオガス化までの実証では、実証事業 1 で開発された廃食用油等を原料として PHBH 製生ごみ袋を試作し、これを用いて京都市の地域住民の協力のもと、分別排出・回収試験を実施した。また、ここで回収された PHBH 製生ごみ袋に入った生ごみを原料としてベンチスケールのバイオガス試験を実施し PHBH が分解することを確認した。PHBH 製生ごみ袋を用いた生ごみの収集方法等に関しては、地域住民へのアンケート調査結果を基に検討した。生ごみ袋以外の用途の検討については、「バイオプラスチック導入ロードマップ」に基づき具体的な製品例を整理した。PHBH 製生ごみ袋による CO_2 削減効果の定量化に関する検討を行った。本年度の主な検討成果は以下に示すとおり。

（1）バイオガス化プラントでの利用に向けた PHBH 製生ごみ袋の製造に関する検討

PHBH 製生ごみ袋については、ごみ袋メーカーの量産機で 2 L、5 L、10 L の 3 種類の生ごみ袋の試作を行い、京都市の地域住民の協力のもと、分別排出・回収試験による実用性評価を実施するとともに、アンケート調査を行った。その結果、当初はヒートシール部の強度不足により、液漏れや持ち手接着部のちぎれ等の指摘が多くみられたが、インフレーション製膜条件を調整した改良品と取り替えたところ、これらの不具合は解消された。この結果、アンケートでも一般の袋よりも使い勝手がよく、バケツよりごみを運びやすいとの意見を多くいただき、実用性が確認できた。

また、10 L 袋の口がもう少し広いほうがバケツに被せやすく便利であるとの改善アイデアも頂いた。このような更なる使い勝手改善、及び製袋ロス削減（打ち抜きを無くす）とともに、強度不足の原因となりやすいマチ（フィルム四枚重ね）のない平袋の追加試作を実施した結果。弱い接着点がなくなり、均一的に強いシールができたことから、剥離も発生せず、安全対策の 2 重シールは不要であることがわかった。

以上の結果から廃食用油を原料とした PHBH を用いた PHBH 改良配合によりインフレーション量産機で生ごみ袋を量産可能であることが確認できた。

（2）PHBH 製生ごみ袋を用いた生ごみの分別方法等に関する検討

PHBH 製生ごみ袋を用いた生ごみ収集方法については、地域住民の協力のもと実施された分別排出・回収試験結果からは、実用面での問題はほとんどなく、むしろ生ごみ専用バケツに比べて使いやすいということが確認できた。一方、今回の試験では生ごみ堆肥化事業の参加世帯を対象としており分別精度に問題はなかったが、実際に幅広い市民への実装をするとなると事前に細かな分別ルールの周知・徹底を図り、不適物を混入させない必要がある。また、地域住民からは実用化された時の価格等について不安視する意見や回収拠点が遠く搬入できなかったという意見もあり、生ごみ袋の価格、回収拠点の設置場所に留意した計画が必要であることが分かった。

今回の実証試験は湿式方式で実施されたが、乾式処理における PHBH 製生ごみ袋での分別排出・回収については、紙ごみの混合収集の是非について、さらに検討が必要と思われるが、乾いた紙ごみなど生ごみと区別しやすいものについては、別途分別品目を追加して、異物の混入を阻止する工夫が必要である。

（3）PHBH 製生ごみ袋のバイオガス化に関する検討

PHBH 製生ごみ袋を用いた分別排出・回収試験によって得られた生ごみを原料にベンチスケール

（発酵槽実容量 : 200 L）でのバイオガス化試験を約 3 ケ月に亘り実施した。試験結果としては、4 週間の定格運転中、安定してバイオガスが発生していることを確認するとともに、引き抜いた消化液のろ過残渣中の未分解 PHBH は投入量の 6%程度で流失ロス相当であり、十分に分解していることを確認した。ろ過後の消化液が植物の生長へ与える影響をコマツナの栽培試験で検証したところ、見かけの生育の様子や外観からは生育阻害は認められなかった。

普及拡大に向けて、一般的な汚泥を馴養することで PHBH が分解できることと合わせて、高温での嫌気分解試験により分解効率を比較した。その結果、ガス発生量からは中温、高温ともに PHBH が順調に分解していることが確認されたが、中温、高温での差は無く、今回の試験では高温発酵による分解効率の向上は確認できなかった。

（４）バイオガス化を見据えた PHBH のプラスチック代替製品への利用可能性の検討

生分解性に優れるという特性と、100%バイオマス由来（脱炭素性）であるという 2 つの特性を有する PHBH の特性が活かされる用途について検討を行った。その結果、食品容器・包装への PHBH 導入ポテンシャルが大きいことが分かったが、汚れの度合いによりマテリアル・ケミカルリサイクルするのか、それとも食品廃棄物と共にバイオガス化するのか分かれるため、両方のシステムに素材として対応する必要あること等、今後の対応課題があることが分かった。

今後はマテリアルリサイクル・ケミカルリサイクルへの対応、食品容器・包装に適した物性の開発、リサイクルシステムの検討、ライフサイクルでの温室効果ガス削減効果の定量化・有効性評価等により、PHBH の用途展開が進むことが期待される。

（５）PHBH 製生ごみ袋による CO_2 削減効果の定量化に関する検討

PHBH 製生ごみ収集袋製造時の GHG 排出量は 2 L サイズでは化石 PE 製と比べて低いことが確認された一方、10 L サイズでは廃食用油を原料としても化石 PE 製の方が優位となった。ただし、化石 PE 製生ごみ収集袋の燃焼時の CO_2 を加味すると 10 L サイズでも依然として優位であり、ライフサイクルで両者を比較することが肝要である。また、成形加工よりも樹脂生産の寄与が大きいことから、本実証で PHBH 樹脂生産段階の GHG 排出量が従前よりも大きく低減できたことは、PHBH 製生ごみ収集袋の GHG 削減にも大きく貢献したといえる。

４．PHA 系バイオプラスチックのライフサイクルでの環境負荷低減効果に関する実証及びコストの評価（実証事業 3）

４.１ 環境負荷低減効果

４.１.１ 目的

京都市の家庭系および事業系一般廃棄物の処理をケーススタディとして、本事業で実証した廃食用油を原料とした PHBH 製ごみ収集袋を用いて厨芥類を分別収集、メタン発酵利用し、発酵残渣を堆肥利用する資源循環システムの GHG 削減効果をライフサイクル分析によって定量化した。

４.１.２ 対象とする PHBH 原料と PHBH 素材使用製品

PHBH 原料は PHBH の商業生産において実用済みのパーム油、原料の国産化を目指して本事業でも検討を進めている廃食用油を対象とした。

対象とする PHBH 素材使用製品としては、ごみ収集袋（以下、「ごみ袋」）を想定することとした。さらに、他の代替製品候補として、ごみ収集袋と性状が比較的近く、家庭で内袋として使用されることもあるレジ袋についても対象とした。化石資源由来 PE 製のごみ袋、レジ袋と同等の強度等の機能を有するためには、実際には他の生分解性樹脂との配合（コンパウンド）も選択肢の 1 つではあるが、本解析においては、素材代替率は 100%（コンパウンドなし）と仮定した。PHBH の原料はパーム油（マレーシア産）もしくは廃食用油（国産）とした。

４.１.３ システム境界と環境影響領域

システム境界は次図のとおり、「原油採掘、原料栽培からの製品（ごみ袋、レジ袋）の製造、輸送及びごみの収集から処理、回収資源・エネルギーの利活用、残渣等の最終処分まで」とした。設備投入やインフラ整備等は対象外とし、対象製品であるごみ袋・レジ袋の使用段階は含めないものとした。

評価する環境影響領域は地球温暖化とした。地球温暖化の特性化係数としては、GWP100 年値を用い、AR4（IPCC 第 4 次報告書（京都議定書第二約束期間における GWP 値）の値に従った。また、バイオマス由来の CO_2 はカーボンニュートラルとして計上していない。

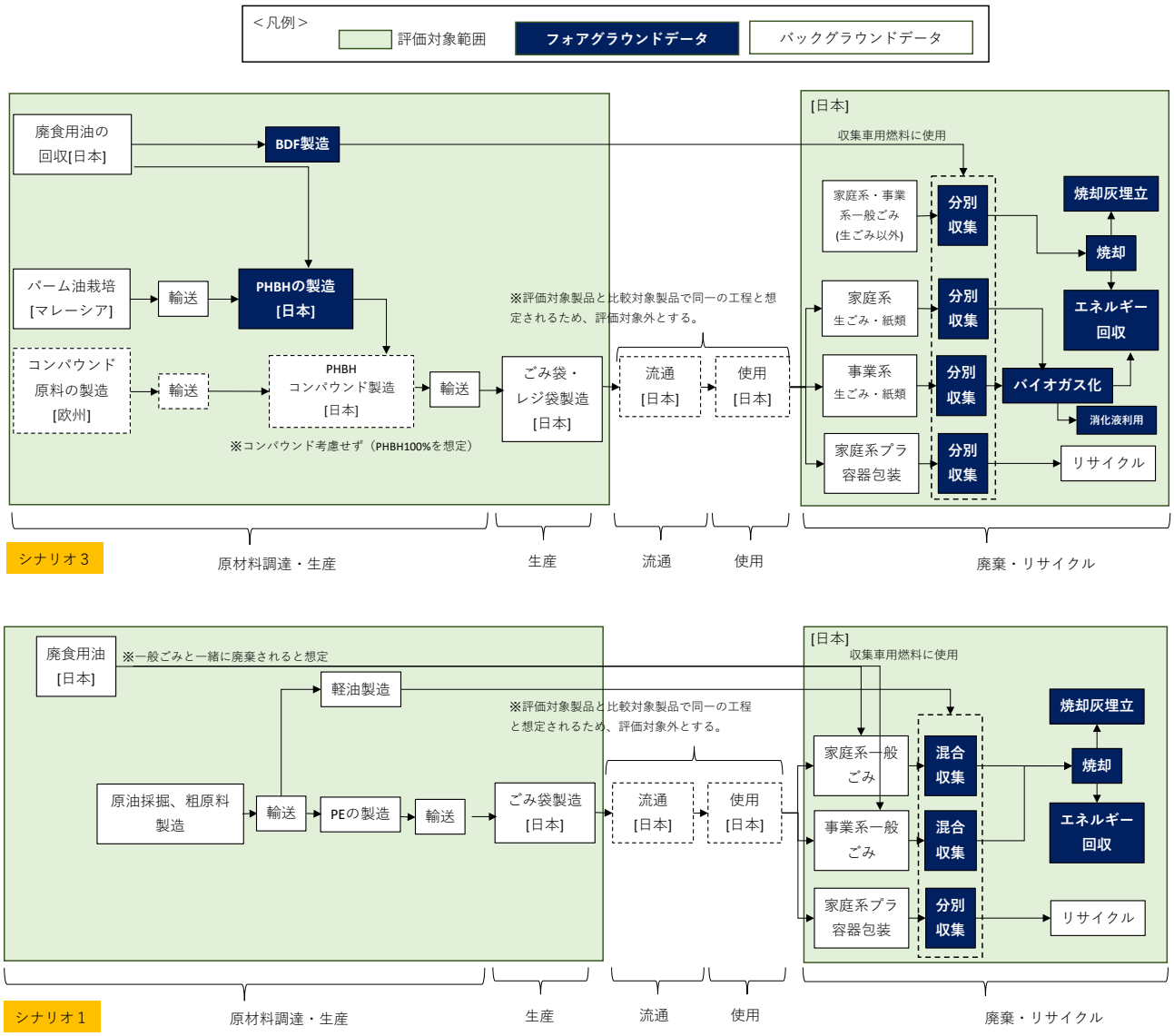


図 100　　システム境界とフロー

4.1.4 機能単位と対象廃棄物、シナリオ設定

本解析で評価する機能単位は、

- 「京都市の家庭ごみ（燃やすごみ、プラスチック製容器包装、缶・びん・PET ボトル）ならびに事業系一般廃棄物の収集」
- 「京都市の家庭ごみのうち、燃やすごみとプラスチック製容器包装の処理、ならびに事業系一般廃棄物の処理」
- 「京都市の家庭系および事業系廃食用油の収集の処理」

とした。すなわち、家庭系については分別収集された缶・びん・PET ボトルの処理・リサイクルについては評価対象外とし、缶・びん・PET ボトルについては収集に必要となるごみ収集袋の提供と収集後の袋の処理までのみを評価対象とした。機能単位を満たすための収集量・処理量は本項の末に示

した。

シナリオは以下の 3 シナリオとし、化石 PE 製のごみ袋を使用する S1 と、PHBH 製ごみ袋を使用し厨芥類および紙類を分別収集、メタン発酵利用する S2、S3 を設定した。

(1) 化石 PE 製ごみ袋利用現状シナリオ S1

一般的な自治体の現状を想定したシナリオとなっている。家庭系ごみは燃やすごみ、プラスチック容器包装、缶びん PET、その他可燃（燃やすごみ）に分別される。事業系は全量燃やすごみとして収集される。分別収集されるプラスチック製容器包装はマテリアルリサイクルもしくはケミカルリサイクルされるとした。なお、缶びん PET については収集までをシステム境界に含め、缶びん PET のリサイクルはシステム境界外である。令和元年度の京都市処理実績に基づき、家庭系プラスチック製容器包装の分別収集率は 32.7%、アルミ缶 90.6%、スチール缶 78.8%、びん 83.1%とした。

いずれの分別区分も使用するごみ収集袋の素材は化石 PE とし、燃やすごみは発電を伴う焼却処理されるとした。また、ごみ収集車用の燃料は軽油とし、廃食用油は全量焼却処理されるとした。

(2) パーム油原料 PHBH 製ごみ袋利用分別収集・メタン発酵利用シナリオ S2

S1 と比べて「厨芥類＋紙類」の分別を追加するシナリオである。分別した厨芥類と紙類はメタン発酵利用され、その他可燃（燃やすごみ）は発電を伴う焼却処理されるとした。なお紙類については、生理用品を除くリサイクル不可能な紙類や使い捨て品を対象とした。厨芥類と紙類は同じごみ収集袋で収集されるとし、分別収集率は 50%とした。

使用するごみ収集袋の素材は、燃やすごみの収集に用いた場合など生分解性の特性は活かせないケースもあるものの、分別区分に依らず袋のすべてパーム油（マレーシア産）由来 PHBH とした。また、また、ごみ収集車用の燃料は廃食用油を原料とした BDF とし、余剰分の廃食用油は焼却処理されるとした。

(3) 廃食用油原料 PHBH 製ごみ袋利用分別収集・メタン発酵利用シナリオ S3

S3 と比べて、国産の廃食用油由来の PHBH 製のごみ収集袋を使用するシナリオとした。ただし、必要な PHBH 製ごみ収集袋を供給するために廃食用油が不足するため、不足分は輸入パーム油で補うものとした。ごみ収集車用の燃料は BDF とし、廃食用油は PHBH 製ごみ袋、レジ袋製造よりも優先して BDF 製造に使用するとした。

家庭ごみ発生量および事業系一般可燃ごみの発生量については京都市の公表データから、組成は家庭ごみ細組成調査報告書、業者収集ごみの組成実態調査報告書から、それぞれ 2019 年度の値を使用した。ここで、ごみ細組成データにはごみ袋（指定ごみ袋）の組成も含まれているが、ごみ収集袋の素材や使用量はシナリオ毎に異なるため、処理されるごみ収集袋量については後述で設定したごみ収集袋量に差し替えた。また、レジ袋についても PE 素材と PHBH 素材で 1 枚当たりの重量が異なるため、シナリオによってレジ袋重量も異なる。

機能単位となるシナリオ別の家庭系・事業系ごみ処理量は表 40 のとおりである。廃食用油の処理量は 2.2 節で推定した賦存量 9,295 t/年（家庭系 1,111 t/年、事業系 8,184 t/年）とした。ごみ袋・レジ袋の処理量の設定過程は次項で述べる。また、家庭系・事業系ごみの組成・性状と PHBH 製ごみ袋・

レジ袋の性状をそれぞれ表 41、表 42、表 43 に示した。PHBH 製レジ袋の性状はごみ袋と同じとした。

表 40　シナリオ毎の燃やすごみ処理量とごみ収集袋使用量 [t-wet/年]

(a) 家庭系

	ごみ全量※	うち、ごみ収集袋	うち、レジ袋	厨芥類	紙類	缶・びん・PET	そのほか
S1	205,849	1,542	2,719	67,617	19,769	13,602	100,600
S2	208,908	3,084	4,237	67,617	19,769	13,602	100,600
S3	208,908	3,084	4,237	67,617	19,769	13,602	100,600

(b) 事業系

	ごみ全量	うち、ごみ収集袋	うち、レジ袋	厨芥類	紙類	そのほか
S1	164,170	1,580	660	80,677	18,088	63,167
S2	166,165	3,207	1,028	80,677	18,088	63,167
S3	166,165	3,207	1,028	80,677	18,088	63,167

※家庭系ごみ全量：分別前のプラスチック製容器包装、缶・びん・PET ボトル含む」

※緑着色部分が PHBH 素材

※厨芥類、紙類、缶・びん・PET は分別収集率を乗じる前のごみ中の組成重量。紙類は分別収集対象のみ（生理用品を除くリサイクル不可能な紙類や使い捨て品）

表 41　家庭ごみのごみ組成・性状

※緑着色の品目：分別収集対象の厨芥類・紙類

大分類			厨芥類				紙類					草木類	木片類
	小分類		調理くず	食べ残し	手つかず	その他	紙おむつ	使捨商品	古紙	容器包装	その他		
ごみ組成		%	17.1%	7.0%	4.9%	3.7%	5.6%	7.9%	8.1%	5.8%	1.7%	2.0%	1.3%
三成分	水分	%	81.1%	78.4%	72.8%	66.0%	78.4%	30.2%	6.3%	5.8%	30.2%	35.0%	35.0%
	可燃分	%-乾重	70.6%	92.7%	94.7%	95.1%	93.8%	89.3%	91.8%	99.8%	89.3%	93.8%	93.8%
	灰分	%-乾重	29.4%	7.3%	5.3%	4.9%	6.2%	10.7%	8.2%	0.2%	10.7%	6.3%	6.3%
元素組成	f-炭素（C）	%-乾重	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	48.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	b-炭素（C）	%-乾重	36.8%	49.0%	47.6%	49.8%	12.7%	42.2%	40.7%	44.4%	42.2%	47.7%	47.7%
	水素（H）	%-乾重	5.1%	6.8%	6.6%	6.9%	6.2%	6.2%	6.0%	7.0%	6.2%	6.0%	6.0%
	窒素（N）	%-乾重	2.8%	3.8%	3.0%	3.3%	0.0%	0.3%	0.4%	0.2%	0.3%	0.8%	0.8%
	酸素（O）	%-乾重	25.5%	32.8%	37.3%	35.0%	24.1%	40.4%	44.7%	48.2%	40.4%	39.0%	39.0%
	元素合計	%-乾重	70.2%	92.3%	94.4%	94.9%	91.1%	89.1%	91.8%	99.8%	89.1%	93.6%	93.6%
LHV		MJ/t-wet	887	2,520	3,460	5,444	3,473	10,937	14,284	16,284	10,937	11,192	11,192

大分類			プラスチック類									
	小分類		PET	食品容器	食品包装	食品トレイ	レジ袋	他容器	他包装	日用品ボトル	指定ごみ袋	その他商品
ごみ組成		%	1.6%	3.8%	2.7%	0.3%	1.3%	1.0%	1.6%	0.9%	1.1%	2.6%
三成分	水分	%	7.7%	7.7%	7.7%	7.7%	7.7%	7.7%	7.7%	7.7%	7.7%	1.0%
	可燃分	%-乾重	97.9%	97.9%	97.9%	97.9%	97.9%	97.9%	97.9%	97.9%	97.9%	95.1%
	灰分	%-乾重	2.1%	2.1%	2.1%	2.1%	2.1%	2.1%	2.1%	2.1%	2.1%	4.9%
元素組成	f-炭素（C）	%-乾重	61.2%	83.6%	74.6%	90.4%	83.9%	82.9%	84.5%	75.5%	83.9%	78.8%
	b-炭素（C）	%-乾重	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	水素（H）	%-乾重	4.1%	9.2%	12.1%	7.5%	14.0%	9.0%	13.2%	10.3%	14.0%	10.3%
	窒素（N）	%-乾重	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	酸素（O）	%-乾重	32.6%	5.1%	0.0%	0.0%	0.0%	6.0%	0.1%	12.0%	0.0%	0.5%
	元素合計	%-乾重	97.9%	97.8%	86.8%	97.9%	97.9%	97.9%	97.9%	97.9%	97.9%	89.6%
LHV		MJ/t-wet	19,712	35,689	36,834	36,599	41,849	35,207	41,168	33,675	41,849	38,796

大分類			ガラス類		金属類			繊維類	その他類		
小分類			びん	その他	アルミ缶	スチール缶	その他		ゴム・皮革	陶磁器	その他
ごみ組成		%	3.7%	0.1%	0.7%	0.7%	2.5%	5.6%	0.8%	0.3%	3.7%
三成分	水分	%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	5.0%	1.0%	0.0%	40.0%
	可燃分	%-乾重	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	97.9%	81.7%	0.0%	67.8%
	灰分	%-乾重	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	2.1%	18.3%	100.0%	32.2%
元素組成	f-炭素（C）	%-乾重	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	25.5%	58.0%	0.0%	0.0%
	b-炭素（C）	%-乾重	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	25.5%	0.0%	0.0%	35.9%
	水素（H）	%-乾重	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	6.6%	6.5%	0.0%	4.6%
	窒素（N）	%-乾重	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	2.9%	1.6%	0.0%	1.8%
	酸素（O）	%-乾重	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	36.9%	12.2%	0.0%	25.2%
	元素合計	%-乾重	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	97.3%	78.3%	0.0%	67.5%
LHV		MJ/t-wet	0	0	0	0	0	19,411	25,836	0	7,739

表 42　事業系一般廃棄物のごみ組成・性状

※緑着色の品目：分別収集対象の厨芥類・紙類

大分類			厨芥類				紙類					草木類	木片類
小分類			調理くず	食べ残し	手つかず	その他	紙おむつ	使捨商品	古紙	容器包装	その他		
ごみ組成		%	23.7%	9.9%	13.3%	2.0%	4.9%	8.5%	6.0%	7.3%	2.5%	0.4%	1.7%
三成分	水分	%	81.1%	78.4%	72.8%	66.0%	78.4%	30.2%	6.3%	5.8%	30.2%	35.0%	35.0%
	可燃分	%-乾重	70.6%	92.7%	94.7%	95.1%	93.8%	89.3%	91.8%	99.8%	89.3%	93.8%	93.8%
	灰分	%-乾重	29.4%	7.3%	5.3%	4.9%	6.2%	10.7%	8.2%	0.2%	10.7%	6.3%	6.3%
元素組成	f-炭素（C）	%-乾重	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	48.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	b-炭素（C）	%-乾重	36.8%	49.0%	47.6%	49.8%	12.7%	42.2%	40.7%	44.4%	42.2%	47.7%	47.7%
	水素（H）	%-乾重	5.1%	6.8%	6.6%	6.9%	6.2%	6.2%	6.0%	7.0%	6.2%	6.0%	6.0%
	窒素（N）	%-乾重	2.8%	3.8%	3.0%	3.3%	0.0%	0.3%	0.4%	0.2%	0.3%	0.8%	0.8%
	酸素（O）	%-乾重	25.5%	32.8%	37.3%	35.0%	24.1%	40.4%	44.7%	48.2%	40.4%	39.0%	39.0%
	元素合計	%-乾重	70.2%	92.3%	94.4%	94.9%	91.1%	89.1%	91.8%	99.8%	89.1%	93.6%	93.6%
LHV		MJ/t-wet	887	2,520	3,460	5,444	3,473	10,937	14,284	16,284	10,937	11,192	11,192

大分類			プラスチック類	PE製				ガラス類		金属類		
小分類			容器包装 レジ袋除く	レジ袋	商品等	指定ごみ袋	その他商品	びん	その他	アルミ缶	スチール缶	その他
ごみ組成		%	8.5%	0.4%	2.5%	1.4%	0.0%	0.1%	0.2%	0.1%	0.1%	1.2%
三成分	水分	%	7.7%	6.6%	1.0%	6.6%	1.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	可燃分	%-乾重	97.9%	97.5%	95.1%	97.5%	95.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	灰分	%-乾重	2.1%	2.6%	4.9%	2.6%	4.9%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
元素組成	f-炭素（C）	%-乾重	80.8%	83.5%	10.3%	83.5%	10.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	b-炭素（C）	%-乾重	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	水素（H）	%-乾重	11.9%	13.9%	0.5%	13.9%	0.5%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	窒素（N）	%-乾重	0.0%	0.0%	10.3%	0.0%	10.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	酸素（O）	%-乾重	1.9%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	元素合計	%-乾重	94.5%	97.5%	21.0%	97.5%	21.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
LHV		MJ/t-wet	38,254	42,169	4,034	42,169	4,034	0	0	0	0	0

大分類			繊維類	その他類		
小分類				ゴム・皮革	陶磁器	その他
ごみ組成		%	2.4%	0.9%	0.0%	2.0%
三成分	水分	%	5.0%	1.0%	0.0%	40.0%
	可燃分	%-乾重	97.9%	81.7%	0.0%	67.8%
	灰分	%-乾重	2.1%	18.3%	100.0%	32.2%
元素組成	f-炭素（C）	%-乾重	25.5%	58.0%	0.0%	0.0%
	b-炭素（C）	%-乾重	25.5%	0.0%	0.0%	35.9%
	水素（H）	%-乾重	6.6%	6.5%	0.0%	4.6%
	窒素（N）	%-乾重	2.9%	1.6%	0.0%	1.8%
	酸素（O）	%-乾重	36.9%	12.2%	0.0%	25.2%
	元素合計	%-乾重	97.3%	78.3%	0.0%	67.5%
LHV		MJ/t-wet	19,411	25,836	0	7,739

表 43　PHBH 製ごみ袋・レジ袋の性状

		大分類	プラ類
		小分類	指定ごみ袋/レジ袋
ごみ組成		%	-
三成分	水分	%	7.7%
	可燃分	%-乾重	97.9%
	灰分	%-乾重	2.1%
元素組成	f-炭素（C）	%-乾重	0.0%
	b-炭素（C）	%-乾重	57.1%
	水素（H）	%-乾重	7.3%
	窒素（N）	%-乾重	0.0%
	酸素（O）	%-乾重	35.6%
	元素合計	%-乾重	100.0%
LHV		MJ/t-wet	23,047

4.1.5 ごみ袋使用枚数の推定

ごみ分別区分毎のごみ密度、ごみ袋サイズと袋 1 枚当たりの充填率、収集頻度からシナリオ別、ごみ分別区分毎のごみ袋使用枚数を推定した。まず、ごみ袋の密度は家庭ごみ細組成調査報告書、業者収集ごみの組成実態調査報告書の 2019 年度の値を用いた。家庭ごみのごみ組成ならびにごみ密度は表 44 に示したとおりである。S1 は京都市の実際の分別区分に準拠しており、家庭ごみ細組成調査報告書の 20L 袋で収集されたごみ袋のごみ密度を用いた。S2, S3 は厨芥類・紙類をさらに分別収集するため、分別収集された厨芥類・紙類と残った燃やすごみのごみ密度を推定する必要がある。家庭ごみ中の厨芥類、紙類の組成はそれぞれ 32.8%、29.1%であり、分別収集率を 50%とすると分別収集される厨芥類・紙類の組成割合は 30.9%となる。厨芥類の密度、紙類の密度はそれぞれ 0.580 t/m^3、0.120 t/m^3 を用い、ごみの湿重量ならびに容積が S1 と等しいと仮定して物質収支式から厨芥類・紙類 0.207 t/m^3、燃やすごみ 0.157 t/m^3 と推定された。

同様に、事業系一般廃棄物についても表 45 のとおり推定した。なお、事業系一般廃棄物中の厨芥類、紙類（分別収集対象のもののみ）はそれぞれ 47.9%、11.1%であり、分別収集率 50%として分別収集される厨芥類・紙類の組成割合は 29.5%となった。

表 44　家庭ごみの分別区分毎のごみ組成とごみ密度

	ごみ分別区分	ごみ組成 [%]	ごみ密度 [t/m^3]	出典
S1	燃やすごみ	90.2%	0.171	家庭ごみ細組成調査報告書（2020）
	プラスチック製容器包装	4.0%	0.043	家庭ごみ細組成調査報告書（2020）
	缶・びん・PET	5.8%	0.067	家庭ごみ細組成調査報告書（2020）
S2, 3	燃やすごみ	59.3%	0.157	推定値
	プラスチック製容器包装	4.0%	0.043	家庭ごみ細組成調査報告書（2020）
	缶・びん・PET	5.8%	0.067	家庭ごみ細組成調査報告書（2020）
	厨芥類・紙類※	30.9%	0.207	推定値

※分別収集率 50%を加味したごみ組成。

表 45　事業系一般可燃物の分別区分毎のごみ組成とごみ密度

	ごみ分別区分	ごみ組成 [%]	ごみ密度 [t/m^3]	出典
S1	一般可燃ごみ	100.0%	0.113	業者収集ごみの組成実態調査報告書（2020）
S2, 3	一般可燃ごみ	76.1%	0.157	推定値
	厨芥類・紙類※	29.5%	0.207	推定値

※分別収集率 50%を加味したごみ組成。

ごみ分別区分毎のごみ湿重量とごみ密度からごみ分別区分毎の容積を推定し、これを袋 1 枚当たりのごみ容積で除することでごみ袋使用枚数を推定した。京都市の家庭ごみ細組成調査において最も多く使用されるごみ袋のサイズは燃やすごみ、プラスチック製容器包装、缶・びん・PET ボトルいずれも 20 L であったことから、これらの収集に使用するごみ袋のサイズは 20 L とした。厨芥類・紙類に使用する袋サイズに関して、3.2 節で報告した京都市京北地区の厨芥類のみを対象とした分別実験では 2 L サイズが最も多く使用されていた。これに紙類（分別収集の対象となるのは生理用品を除くリサイクル不可能な紙類や使い捨て品）を加えることを考慮し、袋サイズは 5 L とした。事業系一般可燃物については、京都市の指定ごみ収集袋のサイズ種類は 45 L、70 L、90 L となっている。業者収集ごみの組成実態調査において実際の袋当たりの容積は 25 L であることから、一般可燃ごみの袋サイズは最も小さい 45 L とした。分別厨芥類・紙類については PHBH 製ごみ袋の実際の試作品はないものの、家庭系と同じサイズでは小さすぎることが予想されたことから 20 L と設定した。次表に袋サイズと充填率、袋重量を整理した。袋重量は京都市指定ごみ収集袋の実物（本事業の試作品含む）がある場合はその重量を、ない場合は線形回帰によって推定し設定した。袋充填率は、袋サイズに対する袋中のごみの容積の割合であり、家庭ごみ細組成調査報告書、業者収集ごみの組成実態調査報告書を元に設定した。3.5 節でも説明したとおり、PHBH 製ごみ袋の方が化石 PE 製ごみ袋よりも 1 枚当たりの袋重量は重い傾向となっている。また、レジ袋については 5 L サイズごみ袋の PE 製/PHBH 製の重量割合比 1.56 を乗じて PHBH 製とした際の重量を設定した。

表 46　ごみ分別区分別の袋サイズと袋重量の設定値

(a) 家庭系

	単位	燃やすごみ	プラスチック製容器包装	缶・びん・PET	厨芥類・紙類
袋サイズ	[L]	20	20	20	5
充填率	[%]	84%	75%	94%	84%※2
袋重量（化石 PE）	[g/枚]	17.0	19.4	19.4	7.7※1
袋重量（PHBH）	[g/枚]	31.8※1	31.8※1	31.8※1	12.0

(b) 事業系

	単位	一般可燃ごみ	厨芥類・紙類
袋サイズ	[L]	45	20
充填率	[%]	56%	84%※2
袋重量（化石 PE）	[g/枚]	27.1	16.0※1
袋重量（PHBH）	[g/枚]	56.2※1	31.8※1

※1：サイズ別重量を元に線形回帰により推定

※2：家庭系燃やすごみと同じと仮定

以上から、推定したシナリオ別のごみ袋使用枚数、使用量をそれぞれ表 47、表 48 に示した。ごみ

袋の重量は、化石 PE 製から PHBH 製に代替し、また厨芥類・紙類を分別収集することで、S2・S3 は S1 より 2.01 倍増加する結果となった。レジ袋については前述のとおり 1.56 倍である。推定されたごみ袋、レジ袋使用量をごみ組成から算定した重量と差し替え、前項で述べた機能単位とした。

表 47　シナリオ別のごみ袋使用枚数推定結果

(a) 家庭系

		合計	燃やすごみ	プラスチック製容器包装	缶・びん・PET	厨芥類・紙類
S1	[百万枚/年]	87.6	65.2	12.8	9.6	-
S2	[百万枚/年]	143.1	46.7	12.8	9.6	74.0
S3	[百万枚/年]	143.1	46.7	12.8	9.6	74.0

(b) 事業系

		合計	一般可燃ごみ	厨芥類・紙類
S1	[百万枚/年]	58.3	58.3	-
S2	[百万枚/年]	62.1	50.6	11.5
S3	[百万枚/年]	62.1	50.6	11.5

表 48　シナリオ別のごみ収集袋およびレジ袋の素材と使用量 [t-wet/年]

(a) ごみ収集袋

	素材	合計	家庭系	事業系
S1	化石 PE	3,123	1,542	1,580
S2	PHBH（パーム油）	6,291	3,084	3,207
S3	PHBH（廃食用油、パーム油）	6,291	3,084	3,207

(b) レジ袋

	素材	合計	家庭系	事業系
S1	化石 PE	3,379	2,719	660
S2	PHBH（パーム油）	5,265	4,237	1,028
S3	PHBH（廃食用油、パーム油）	5,265	4,237	1,028

4.1.6 PHBH 原料消費量の設定

廃食用油の処理量（供給量）は機能単位として示したとおり、2.2 節で推定した賦存量 9,295 t/年（家庭系 1,111 t/年、事業系 8,184 t/年）を全量利用または処理するとした。ごみ収集車で使用する BDF を優先的に製造した後、未利用分については焼却処理（S1, S2）もしくは PHBH 製造（S3）に利用されるとした。表 49 にシナリオ別の処理・利用量内訳を示した。また、表 50 に S2、S3 の PHBH 製ごみ袋、レジ袋の供給に必要なパーム油、廃食用油使用量を整理した。廃食用油を PHBH 原料とする S3 では廃食用油を約 7,500 t/年消費し、不足分はパーム油約 3,900 t/年を充当することで機能単位を満たすよう設定した。

表 49　京都市の廃食用油賦存量と処理・利用内訳 [t/年]

	S1	S2	S3
BDF 製造（ごみ収集車用）	0	1,802	1,802
PHBH 製造	0	0	7,493
焼却処理	9,295	7,493	0
Total	9,295	9,295	9,295

表 50　各シナリオの PHBH 原料使用量 [t/年]

	S2	S3
パーム油	10,742	3,907
廃食用油	0	7,493

4.1.7 単位プロセスモデル作成

単位プロセスの多くは令和 2 年度、令和元年度と同様であるため、詳細は令和 2 年度、令和元年度の報告書を参照のこと。表 51 に変更プロセスの概要をまとめた。原料栽培～PHBH 樹脂製造、袋製造についてはそれぞれ 2.4.1 節、3.5 節で述べたとおりである。なお、結果に大きく影響する焼却プロセス、メタン発酵プロセスについては変更点を中心に以下のとおり再掲する。また、各プロセスの設定パラメータを表 52 にまとめた。

表 51　令和 3 年度解析において追加・更新したプロセス

プロセス	変更点概要
原料栽培～PHBH 樹脂製造	・　本事業実証データを使用。詳細は 2.4 節のとおり。
袋製造	・　今年度より追加 ・　本事業実証データを使用。詳細は 3.5 節のとおり。
メタン発酵（AD）	・　PHBH の分解率について本事業実証データを使用。3.3 節参照。

（1）焼却プロセス

焼却プロセスにおける消費電力原単位は 150 kWh/t とし、ごみ熱量に発電効率を乗じることで発電電力量を算出した。昨年度同様に焼却時の発電効率は厨芥類・紙類の AD を伴わない S1 は全国平均 2018 年度実績値 13.6%、厨芥類・紙類の AD を伴う S2 ならびに S3 については焼却施設も更新されるとして昨年度同様 20%の発電効率とした。なお、消費電力と発電電力由来の GHG 排出・削減効果を識別するため、発電による電力代替効果は「焼却発電」として焼却プロセスとは分けて計上した。

（2）メタン発酵（AD）プロセス

本プロセスでは京都市で導入している乾式高温メタン発酵方式を採用しており、S2 ならびに S3 においてメタン発酵利用される。バイオガス発生量は化学量論式と有機物種ごとに設定した VS 分解率を用いて推定している。PHBH の VS 分解率は昨年度では 87%と設定していたが、3.3 節の今年度検討を元に 90%と設定した。バイオガスのガスエンジン発電効率は昨年度同様 37.3%とした。なお、消費電力と発電電力由来の GHG 排出・削減効果を識別するため、発電による電力代替効果は「AD 発電」として AD プロセスとは分けて計上した。

表 52　プロセス別パラメーター一覧

プロセス	パラメータ		値	単位	出典
収集	S1	軽油	3.90	L/t-wet	京都市ヒアリングおよびグリッドシティモデルを用いて算定
	S2,S3: 燃やすごみ	軽油	5.32	L/t-wet	京都市ヒアリングおよびグリッドシティモデルを用いて算定
	S2,S3:厨芥類・紙類	軽油	3.78	L/t-wet	京都市ヒアリングおよびグリッドシティモデルを用いて算定
焼却		電力	150	kWh/t-wet	酒井（2005）
	Direct GHG	CH_4 排出係数	0.00096	kg-CH_4/t-waste	環境省（2009）
		N_2O 排出係数	0.0565	kg-N_2O/t-waste	環境省（2009）
	焼却灰	主灰割合	90	%	平岡（1994）
		主灰含水率	20	%	村田（2000）
		飛灰含水率	0.80	%	村田（2000）
焼却発電	S1	発電効率	13.6	%	環境省（2020）
	S2, S3	発電効率	20.0	%	設定値
AD	発酵関連	電力	357.5	kWh/t-TS	京都高度技術研究所（2010）
	排水処理	電力	32.5	kWh/t-排水	京都高度技術研究所（2010）
	排水		0.8	t/t-wet	京都高度技術研究所（2010）
	VS 分解率	厨芥類	84	%	全国都市清掃会議（2001）
		紙類	66	%	全国都市清掃会議（2001）
		PHBH	90	%	設定値（3.3 節参照）
	バイオガス	CH4 濃度	57.0	%	厨芥類組成と化学量論式より算定
	発酵残渣	含水率	62	%	設定値
	排水	NH3 移行率	5	%	京都高度技術研究所（2010）
	Direct GHG	CH_4 排出係数（排水）	0.0059	kg-CH4/m^3- 排水	環境省（2006）
		N_2O 排出係数（排水）	0.0045	kg-N2O/t-N	環境省（2006）
ガスエンジン発電		発電効率	37.3	%	京都高度技術研究所（2010）
堆肥化（発酵残渣）		電力	11	kWh/t	京都高度技術研究所（2010）
		軽油	0.3	L/t	田原（2004）
	VS 分解率	厨芥類	50	%	国立環境研究所（2006）
		PHBH	90	%	藤木（2013）
	分解ガス	CH4 割合	0.075	%	酒井（2005）
	N 残存率		87.5	%	酒井（2005）
	N の N_2O 変換率		1.25	%	酒井（2005）
	堆肥	含水率	30	%	平井（2001）
化学肥料製造		CO2 排出係数	2.01	kg-CO_2/kg-N	小林
		N2O 排出係数	0.00018	kg-N_2O/kg-N	Kramer et al. (1999)
BDF 製造		廃食用油	1.042	L/L-BDF	Yano et al. (2015)
		メタノール	0.131	kg/L-BDF	Yano et al. (2015)
		電力	0.184	kWh/L-BDF	Yano et al. (2015)
		灯油	0.027	L/L-BDF	Yano et al. (2015)
		廃グリセリン・含油排水	0.396	L/L-BDF	Yano et al. (2015)
BDF 使用（収集車）	Difect GHG		0.133	kg-CO_2/L-BDF	Yano et al. (2015), BDF 原料のメタノール由来。物質収支から算出
埋立		電力	6.38	kWh/t	土手（1999）

		軽油	0.76	L/t	土手（1999）
	分解ガス化率		73.5	%	松藤（1997）
	埋立ガス	CH4 濃度	5	%	松藤（1997）
共通パラメータ	CO_2 排出係数	電力	0.460	Kg-CO2/kWh	
		軽油	2.83	kg-CO_2/L	
		灯油	2.67	kg-CO_2/L	
		A 重油	3.04	kg-CO_2/L	
		C 重油	3.24	kg-CO_2/L	
		メタノール	1.83	kg-CO_2/kg	
	低位発熱量	軽油	35.5	MJ/L	
		灯油	36.5	MJ/L	
		BDF	32.8	MJ/L	
		CH4	35.9	MJ/Nm^3	
		メタノール	19.7	MJ/kg	
	電力 2 次換算係数		3.6	MJ/kWh	
	GWP100 年値	CH4	25	kg-CO_2/kg-CH_4	
		N2O	298	kg-N_2O/kg-CO_2	

4.1.8 結果

プロセス別のライフサイクル分析結果を図 101 に示した。化石資源由来 PE ごみ収集袋を用いて収集し、焼却処理する S1 では、14.4 万 t-CO_2eq/yr となり、多くは焼却に伴う廃棄物中の化石由来炭素に起因した。ごみ袋、レジ袋製造由来の GHG は 1.3 万 t-CO_2eq/yr であった。一方で、焼却発電により、7.1 t-CO_2eq/yr、プラスチック製容器包装のリサイクルによって 0.9 万 t-CO_2eq/yr の削減効果が期待された。

ごみ袋、レジ袋を PHBH 素材に転換し、生ごみならびに紙類を分別収集、AD 利用、発酵残渣を堆肥化利用する S2 は 9.9 万 t-CO_2eq/yr となった。ごみ袋、レジ袋製造段階の GHG が 3.4 万 t-CO_2eq/yr となり S1 よりも大きかったが、カーボンニュートラルな PHBH 素材に転換したことでごみ袋、レジ袋の焼却由来の GHG が 2.4 万 t-CO_2eq/yr 削減されたこと、ごみ発電の発電効率の改善ならびにバイオガスの GE 発電による電力代替効果が 4.0 万 t-CO_2eq/yr 増加したことで、正味の GHG 排出量は S1 と比べて 4.4 万 t-CO_2eq/yr 削減（31%）された。

PHBH 原料に廃食用油を導入した S3 は S2 とほぼ同じ 9.9 万 t-CO_2eq/y となった。ごみ袋、レジ袋製造段階の GHG は 2.7 万 t-CO_2eq/yr となり S2 よりも小さくなった。しかし、廃食用油の焼却処理時の電力代替効果（0.7 万 t-CO_2eq/y）が失われたため、正味の GHG 排出量は S2 とほぼ同程度となり、S1 と比べて 4.4 万 t-CO_2eq/yr 削減（31%）となった。発酵残渣の堆肥化利用の効果は GHG の観点からは限定的であったが、地域資源を循環利用する観点からは望ましい利用方法といえる。また、本シナリオ分析では S2, S3 の焼却発電効率は S1 の 13.6%と比べ 20%に改善される想定であった。仮に S2, S3 も S1 と同じ発電効率であった場合においても、S2, S3 は S1 と比較してそれぞれ 1.5 万 t-CO_2eq/yr（10.2%）、1.7 万 t-CO_2eq/yr（11.8%）の GHG 削減が期待できる結果であった。この結果は、エネルギー回収が小さいもしくは期待できない中小自治体程、パーム油に代わって廃食用油を原料とする循環システムの GHG 削減効果が大きいことを示唆している。

エネルギー起源別での整理は図 102 に示したとおり、S3 は国内のエネルギー起源 GHG を 3.7 万 t-CO_2eq/yr 削減できる結果となった。

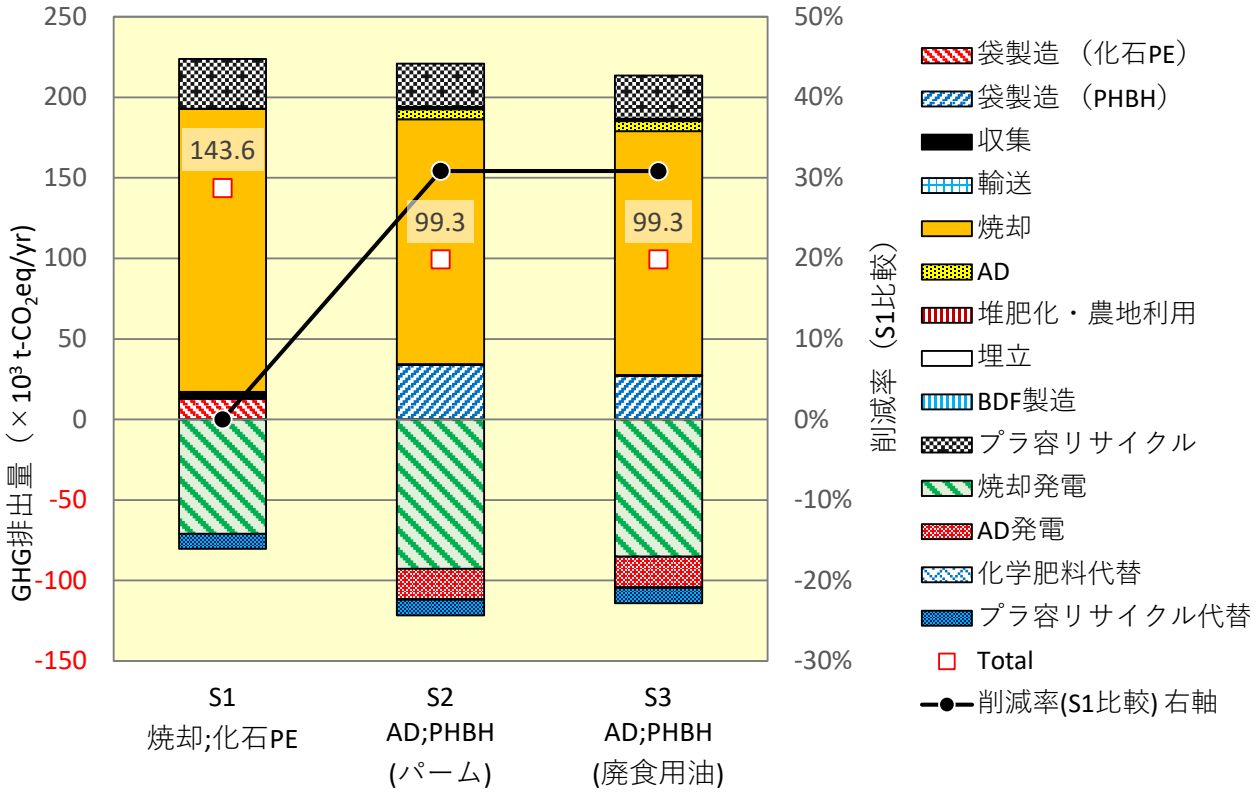


図 101　ライフサイクル分析結果（プロセス別）

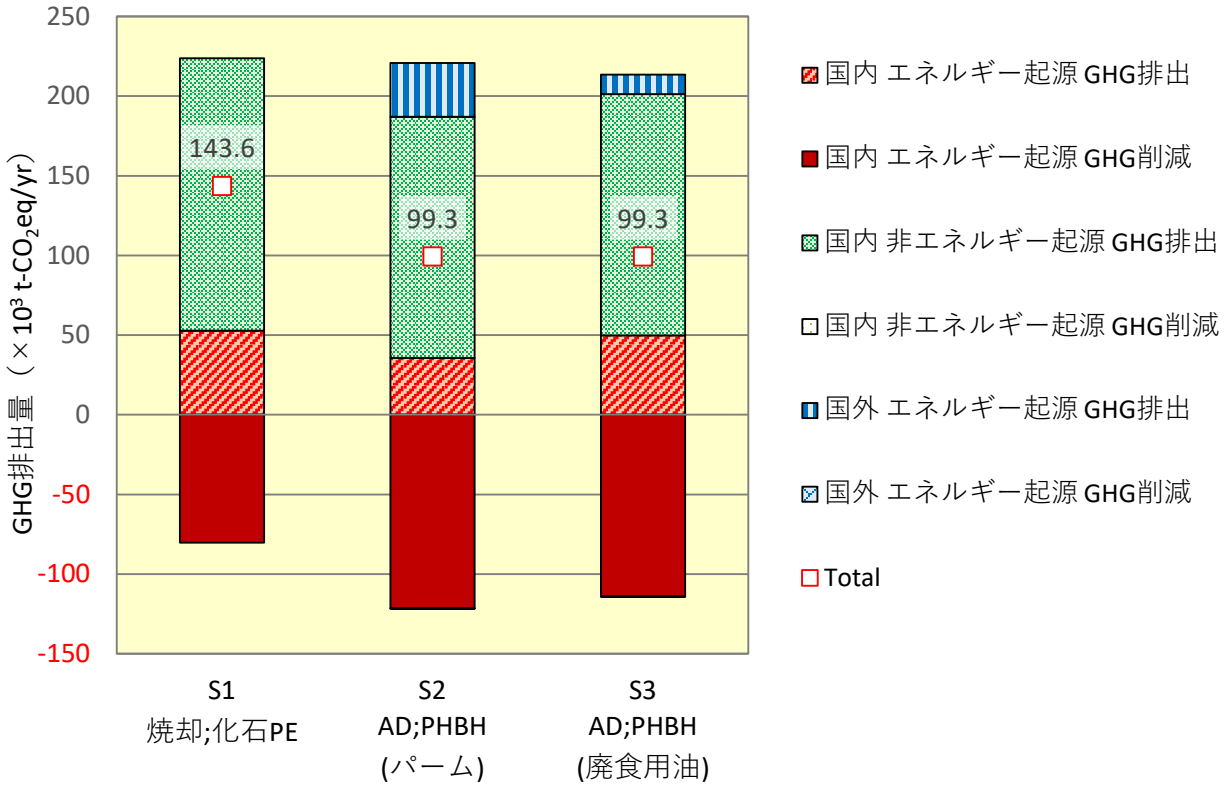


図 102　ライフサイクル分析結果（エネルギー起源別）

４.１.９ まとめと課題

京都市の一般廃棄物の処理をケーススタディとして、廃食用油を原料としたPHBH製ごみ収集袋を用いて厨芥類を分別収集、メタン発酵利用するシステムのGHG削減効果をライフサイクル分析によって定量化した。その結果、国産廃食用油を再利用し、それを原料とするPHBHを用いた資源循環システムはGHGを31%削減できることが明らかとなった。

2.4節ならびに3.5節の原料栽培～PHBH樹脂製造までのGHG排出量、製品（ごみ収集袋）当たりのGHG排出量において、樹脂当たりGHGでは廃食用油原料PHBHは化石PEよりも優位となるものの、製品当たりでは袋のサイズが大きくなるほど化石PE製の方が優位となる傾向であった。また、パーマ油と廃食用油の原料間の比較においては廃食用油を原料とすることの優位性が確認されていた。一方、廃食用油を原料としたごみ収集袋を用いて厨芥類・紙類を分別収集、メタン発酵利用し、残渣を堆肥利用する資源循環システムとしてライフサイクルの視点から評価した本シナリオ解析においてはパーム油（S2）、廃食用油（S3）原料間で同程度のGHG削減効果と算定された。ただし、2.4節でも議論したとおり、パーム油は土地利用変化を含む生産条件によって栽培段階の環境負荷は大きな幅を持ち不確実性が高い。また、S2においては廃食用油の焼却処理時のエネルギー回収（発電代替）効果が寄与してS3と同程度のGHG排出量となっていることから、電源構成の脱炭素化が進む将来の脱炭素社会においては、廃食用油を原料とするS3の優位性が増してくるものと予想され、地域資源を活用し脱炭素に貢献する地域循環共生圏形成の観点からも望ましいシステムと期待される。

本事業ではごみ収集袋を主たるPHBH用途として想定し、本解析では家庭内で内袋としても使用されるレジ袋も対象に含めた。しかし、発生抑制の対象でもあるレジ袋はバイオプラスチック導入ロードマップにおいても生分解性プラスチックの用途対象とはなっていない。生分解性機能を要求される他の用途への展開・開発とその導入効果の定量化が重要といえる。

＜参考文献＞

- Kramer K. J., Moll H. C., Nonhebel S. (1999) Total greenhouse gas emissions related to the Dutch crop production system. Agriculture, Ecosystems and Environment, Vol. 72, No.1, pp.9-16
- Yano J., Aoki T., Nakamura K., Yamada K., Sakai S. (2015) Life cycle assessment of hydrogenated biodiesel production from waste cooking oil using the catalytic cracking and hydrogenation method. Waste Management, Vol. 38, pp.409-423
- 環境省（2006）温室効果ガス排出量算定方法検討会；温室効果ガス排出量算定に関する検討結果
- 環境省（2009）温室効果ガス排出量算定・報告マニュアル ver2.4　第Ⅱ編　温室効果ガス排出量の算定方法
- 環境省（2020）令和2年環境・循環型社会・生物多様性白書
- 京都市環境政策局、平成22年度から令和2年度までのごみ量の推移、https://www.city.kyoto.lg.jp/kankyo/cmsfiles/contents/0000158/158436/R2_gomiryosuii02.pdf　（閲覧日：2022年1月30日）
- 京都市環境政策局（2020）令和元年度家庭ごみ細組成調査報告書
- 京都市環境政策局（2020）令和元年度京都市事業者収集ごみの組成実態調査報告書
- 独立行政法人　国立環境研究所（2006）バイオ資源・廃棄物等からの水素製造技術開発
- 京都高度技術研究所（2010）地球温暖化対策技術開発事業 カーボンフリーBDFのためのグリーンメタノール製造及び副産物の高度利用に関する技術開発成果報告書

・ 小林久：Resources & Environment 地域農業・農村地域と LCA 的思考 －環境保全型農業への LCA 適用試み－ http://www.jiid.or.jp/files/04public/02ardec/ardec24/Resource.htm 【閲覧日 2022 年 1 月 30 日】
・ 酒井伸一、平井康宏、吉川克彦、出口晋吾（2005）バイオ資源・廃棄物の賦存量分布と温室効果ガスの視点から見た厨芥利用システム解析、廃棄物学会論文誌、第 16 巻、第 2 号、pp.173-187
・ 社団法人 全国都市清掃会議：コンポガス式メタン発酵技術 検証・確認報告書（2001）
・ 田原聖隆、稲葉敦、坂根優、小島紀徳（2004）都市ごみ処理における生ごみ分別処理の効果、廃棄物学会論文誌、Vol. 15、No. 4、pp. 276-282
・ 土手裕、倉田幸善、丸山俊朗（1999）一般廃棄物処分場の運用による CO2 排出量に関する研究、第 10 回廃棄物学会研究発表会講演論文集、pp1048-1050
・ 平井康宏、村田真樹、酒井伸一、高月紘（2001）食品残渣を対象とした循環・資源化処理方式のライフサイクルアセスメント、廃棄物学会論文誌、第 12 巻、第 5 号、pp.219-228
・ 平岡正勝・酒井伸一（1994）平岡正勝、酒井伸一：ごみ焼却灰の性状と処理技術の展望、廃棄物学会誌、第 5 巻、第 1 号、pp.3-17
・ 藤木哲也（2013）微生物の産業利用 ：はたらく有用微生物(第 8 回)微生物による生分解性プラスチック製造、日本微生物資源学会誌 、Volume: 29 pp 25-29
・ 松藤康司、立藤綾子（1997）埋立構造の違いによる温室効果ガスの発生と制御、廃棄物学会誌、Vol.8、No.6、pp.438-446
・ 村田真樹（2000）食品残渣の循環処理過程におけるライフサイクルアセスメント、京都大学修士論文

4.2 コスト評価

4.2.1 PHBH 製生ごみ袋を導入して分別収集・バイオガス化するシステムのトータルコスト評価

（1）目的

PHBH 製生ごみ袋を製造し、生ごみの分別収集に用い、生ごみと一緒にバイオガス化するシステムのコストを評価することを目的とした。

（2）シナリオ設定及びシステムフロー

次図に評価対象とした 3 シナリオについてそれぞれシステムフローを示す。システム境界は、「ごみ袋の調達から、ごみ収集、処理、循環利用、最終処分まで」とした。

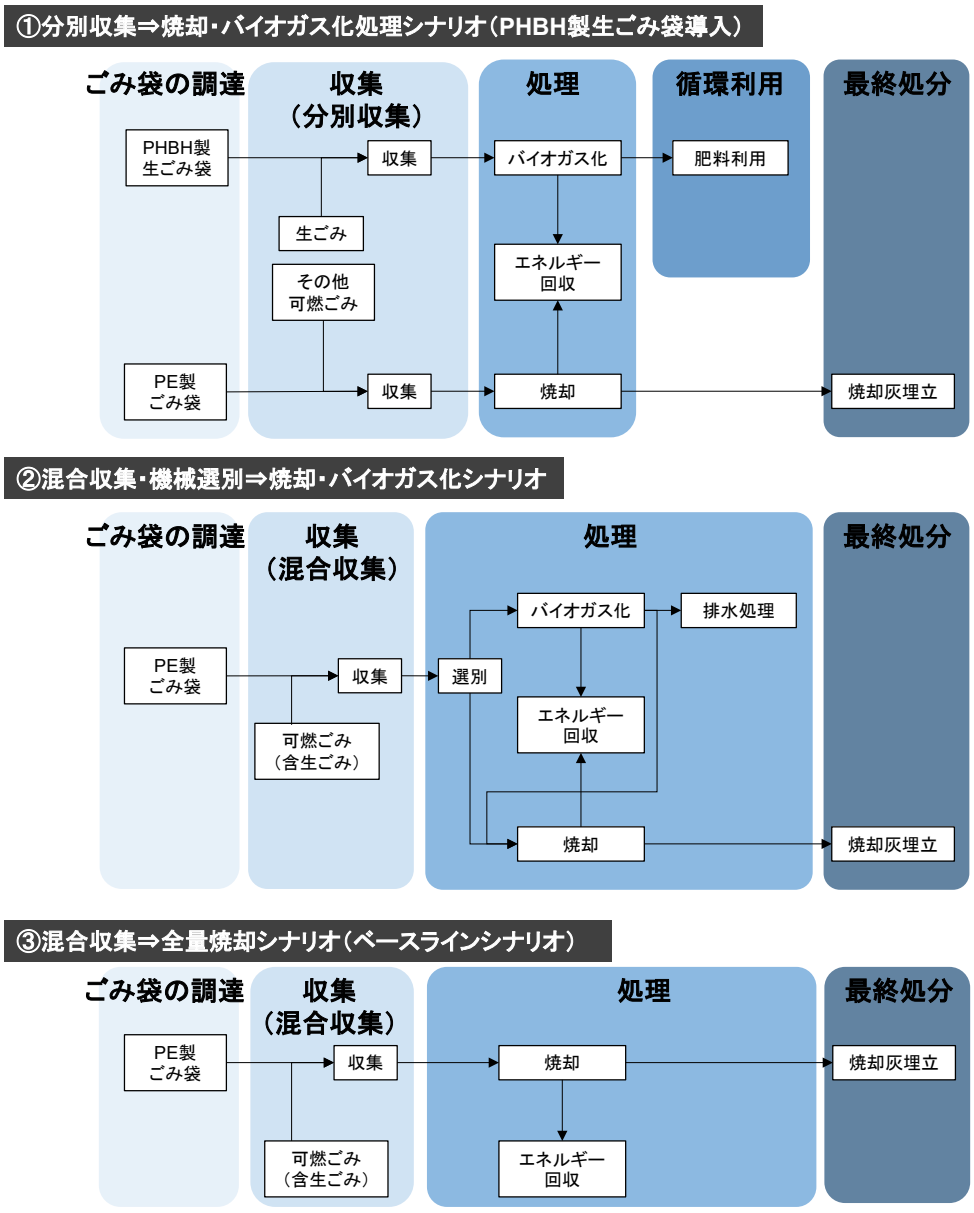


図 103　評価対象シナリオのシステムフロー

評価シナリオは、次の 3 ケースとした。なお、このうちシナリオ①については PHBH 製生ごみ袋を導入するが、シナリオ②・③については PE 製ごみ袋を使用するものとした。

① 分別収集⇒焼却・バイオガス化処理シナリオ（PHBH 製生ごみ袋導入）
② 混合収集・機械選別⇒焼却・バイオガス化シナリオ
③ 混合収集⇒全量焼却シナリオ（ベースラインシナリオ）

（３）機能単位

本事業では、主に中小規模自治体を対象としてコスト評価を行う。環境省委託業務「平成 26 年度廃棄物系バイオマス利活用導入促進事業委託業務」[11]では、穂高広域施設組合のごみ焼却施設を対象として、焼却施設とバイオガス化施設を同時に新設し焼却・バイオガス化コンバインドシステムを構築するケース（機械選別及び分別収集の２ケース）について、全量焼却方式と比較検討がなされている。処理費用の試算にこの結果を活用するため、本検討で評価対象とする地域スケールやごみ組成は同調査に合わせた。

表 53　機能単位及び処理システムの想定規模・組成等

項目	条件
対象人口	約 13 万人
処理対象ごみ	可燃ごみ （家庭系及び事業系の可燃ごみ及びし尿処理施設で発生するし渣とし尿汚泥）
搬入量	32,120 トン／年
可燃ごみ組成	・厨芥類：38.3% ・紙類：28.6% ・その他：33.1%

（４）コスト試算イメージ

次図にコスト試算イメージを示す。

11 環境省委託業務「平成 26 年度廃棄物系バイオマス利活用導入促進事業委託業務」，
http://www.env.go.jp/recycle/waste/biomass/data/report_h26-1.pdf

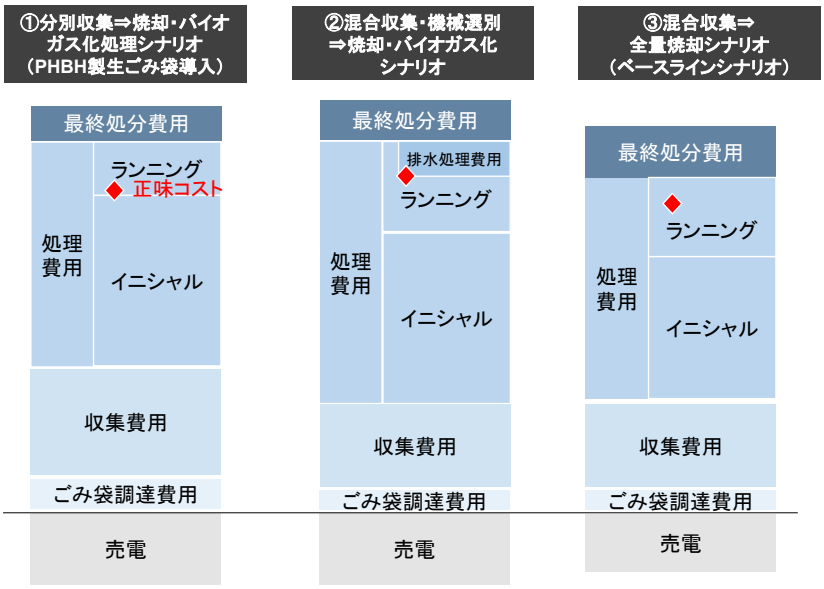


図 104　コスト評価イメージ

（５）コスト試算結果

1）ごみ袋の調達

混合収集（シナリオ②、③）では自治体は PE 製可燃ごみ袋を調達し、分別収集（シナリオ①）では PHBH 製生ごみ袋及び PE 製の可燃ごみ袋を調達する。次表に、両収集方式における自治体のごみ袋調達コストの試算結果を示す。

なお、PHBH 製生ごみ袋は市場価格が存在しないため、本検討にあたっては、2 L 袋の調達単価を PE 製 5 L 袋の調達単価 5.6 円/枚 [12]から、サイズが約半分に小さくなる一方、材料費が約 2 倍にアップすると想定して、5 円/枚と見なして試算を行った。

12 環境省「令和２年度バイオマスプラスチック利活用検討業務報告書」 http://www.env.go.jp/recycle/report/r3-01/r3-01.pdf

表 54　ごみ袋調達コストの推計結果

項目	混合収集（シナリオ②、③）	分別収集（シナリオ①；PHBH 製生ごみ袋導入）		出典・設定根拠等
対象ごみ	可燃ごみ	生ごみ	その他可燃ごみ	－
ごみ搬入量（重量ベース）	32,120 トン/年	12,302 トン/年	19,818 トン/年	・ 文献 1 ・ 生ごみ：32,120 トン／年×38.3% ・ その他可燃ごみ：可燃ごみ－生ごみ
ごみの見かけ比重	0.135 kg/L	0.5 kg/L	0.12 kg/L	・ 文献 2 ・ 見かけ比重とは、ごみ袋中の空間部分を含んだ状態で単位体積当たりの物質重量
ごみ搬入量（体積ベース）	238 百万 L/年	24.6 百万 L/年	165 百万 L/年	・ ごみ搬入量（重量ベース）÷ごみの見かけ比重
ごみ袋種類（サイズ）	PE 製ごみ袋（30 L）	PHBH 製生ごみ袋（2 L）	PE 製ごみ袋（30 L）	・ 簡略化のために袋のサイズは 1 種類のみとした ・ 文献 3 によれば、家庭系可燃ごみ用の指定ごみ袋で販売量の中央値となるサイズは「25～30L 以下」 ・ PHBH 製生ごみ袋は、京都市地域住民による実用試験の結果、2 L 袋がもっとも使用された（3.2 節参照）。
必要ごみ袋量	793 万枚/年	1,230 万枚/年	551 万枚/年	・ ごみ搬入量（体積ベース）÷ごみ袋サイズ
ごみ袋調達単価	8.4 円/枚	5 円/枚	8.4 円/枚	・ PE 製ごみ袋：文献 3 ・ PHBH 製生ごみ袋の単価は概算値
ごみ袋調達費用	67 百万円/年	62 百万円/年	46 百万円/年	・ 必要ごみ袋量×ごみ袋調達単価
		108 百万円/年		
（参考）ごみ袋重量	15 g/枚	7 g/枚	15 g/枚	・ PE 製ごみ袋：文献 3 ・ PHBH 製生ごみ袋：2 L 試作袋（3.1 節参照）の実測値
（参考）必要樹脂量	119 トン-PE/年	86 トン-PHBH/年	83 トン-PE/年	・ 必要ごみ袋量×ごみ袋重量 ・ ごみ袋は樹脂のみで構成されると仮定

・ 文献 1：環境省委託業務「平成 26 年度廃棄物系バイオマス利活用導入促進事業委託業務」[13]
・ 文献 2：札幌市資料[14]
・ 文献 3：環境省「令和２年度バイオマスプラスチック利活用検討業務報告書」[15]

13 http://www.env.go.jp/recycle/waste/biomass/data/report_h26-1.pdf
14 https://www3.city.sapporo.jp/download/shinsei/procedure/00082_pdf/presen_00082_007.pdf
15 http://www.env.go.jp/recycle/report/r3-01/r3-01.pdf

2）収集費用

環境省「生ごみ等の 3R・処理に関する検討会」（第６回）の参考資料[16]に、生ごみ分別収集を実施した際の収集運搬コストの変化事例が示されている。本資料によれば、分別収集前後の全体費用の変化が 3 市について示されており、それぞれ 1.3 倍、0.9 倍、1.0 倍となっている。これらを単純平均すると 1.07 倍となるが、分別収集により排出量の減少により、総費用が減少しているケースもあることから地域差による影響が大きいと考えられる。いずれにせよ、分別収集を導入する際は排出量の変化に応じて収集頻度等を最適化し、総費用の増大を抑えることが重要になると考えられる。

表 55　生ごみ分別収集に伴う収集運搬コストの変化

○　生ごみを分別収集することによる収集運搬コスト及び収集量の変化事例を表８に示す。生ごみの分別収集に伴い、延べ収集回数が２～３回から４回に増加しているため、人員、車両とも増加し、３市のいずれの場合も収集運搬ごみ１ｔあたりの費用は分別収集前に比べて分別収集後の方が増加している。しかしながら、分別収集を行うことによって、約 1/3 の減量が図られている。このため、収集経費全体で見るとＦ市が３割増（２回から４回に収集回数が倍）となっているほかは、同等又は１割減となっている。

表８　生ごみ分別収集に伴う収集量及び収集運搬コストの変化

	分別収集前				分別収集後				分別収集前後 収集量比較 ①'／①	分別収集前後 費用比較 ②'／②	分別収集前後 全体費用比較 ①'×②'／①×②
	収集量① (t/年)	人件費 (円/ごみt)	車両等費用 (円/ごみt)	費用合計② (円/ごみt)	収集量①' (t/年)	人件費 (円/ごみt)	車両等費用 (円/ごみt)	費用合計②' (円/ごみt)			
Ｆ市	13,326	8,050	2,240	10,290	8,337	17,140	4,270	21,410	0.63	2.1	1.3
Ｇ市	8,741	6,200	2,110	8,310	5,694	8,370	2,890	11,260	0.65	1.4	0.9
Ｈ市	6,351	3,380	1,620	5,000	4,078	4,860	3,020	7,880	0.64	1.6	1.0

上記のとおり、分別収集の導入に伴う収集運搬コストの変化は地域差が大きいと考えられるが、ここでは 3 市平均の 1.07 倍を使用して推算を行った。なお、混合収集の収集単価は 20 千円/トンとした。

表 56　収集費用試算結果

	混合収集 （シナリオ②、③）	分別収集 （シナリオ①）
可燃ごみ搬入量	32,120 トン/年	－
ごみ収集単価	20 千円/トン	－
ごみ収集費用	642 百万円/年	687 百万円/年 （混合収集×107%）

16 環境省「生ごみ等の 3R・処理に関する検討会」（第６回）参考資料, https://www.env.go.jp/recycle/waste/conf_raw_g/06/ref01.pdf

3）処理費用（売電を含む）

上述のとおり、環境省委託業務「平成 26 年度廃棄物系バイオマス利活用導入促進事業委託業務」[17]では、穂高広域施設組合のごみ焼却施設を対象として、焼却施設とバイオガス化施設を同時に新設し焼却・バイオガス化コンバインドシステムを構築するケース（機械選別及び分別収集の 2 ケース）について、全量焼却方式と比較検討がなされた。

表 57　既往調査におけるシナリオ及び処理フロー

シナリオ	処理フロー
ケース 1（機械選別）	可燃ごみ収集→機械選別→バイオガス化（乾式）→残渣は脱水し焼却処理、脱水後の脱離液は排水処理
ケース 2（分別収集）	食品廃棄物＋紙ごみ分別収集（残渣焼却）→バイオガス化（乾式）→残渣は脱水し焼却処理、脱水後の脱離液は排水処理
ケース 3（全量焼却）	可燃ごみ収集→焼却

検討システム別の処理規模は次表のとおり。

表 58　既往調査における検討システム別処理規模等

処理対象物		可燃ごみ（家庭系ごみ・事業系ごみ）		
検討システム		乾式メタンコンバインドシステム		全量焼却
搬入量	t/年	32,120		
検討ケース		ケース1	ケース2	全量焼却
		（機械選別）	（分別収集）	―
処理規模	280日	―	―	―
乾式メタン	t/日	49.8	31.6	0
焼却炉	t/日	105.7	102.6	119.6
平均処理量	365日	―	―	―
乾式メタン	t/日	36.7	23.3	0
焼却炉	t/日	77.9	75.5	88.1

比較対象とする全量焼却ケースも含め、3 ケースについて経済性評価が行われた（次表、次図）。その結果、年間の合計費用は、ケース 1（機械選別）で 406,532 千円／年、ケース 2（分別収集）で 366,851 千円／年、全量焼却で 424,777 千円／年となり、ケース 1 で 4.3%、ケース 2 で 13.6%それぞれ安価となり、経済性による優位性が確認された、としている。

17 環境省委託業務「平成 26 年度廃棄物系バイオマス利活用導入促進事業委託業務」，
http://www.env.go.jp/recycle/waste/biomass/data/report_h26-1.pdf

表 59　既往調査における経済性評価結果

項目		ケース1（機械選別）	ケース2（分別収集）	全量焼却
		コンバインド	コンバインド	焼却施設
処理規模		バイオガス化施設50t/日 焼却施設106t/日	バイオガス化施設32t/日 焼却施設103t/日	120t/日
イニシャルコスト				
施設整備費	千円	4,829,000	4,136,000	3,367,000
減価償却費	千円/年	241,450	206,800	168,350
増減率	%	43.4	22.8	―
ランニングコスト				
電力費	千円/年	33,026	29,535	27,764
燃料費	千円/年	6,205	5,844	5,589
上水道費	千円/年	4,789	4,489	4,209
下水道費	千円/年	0	0	0
薬品費	千円/年	57,861	55,038	54,919
最終処分費	千円/年	46,059	45,116	50,367
修繕費	千円/年	207,066	193,336	178,026
計	千円/年	355,005	333,358	320,873
増減率	%	10.6	3.9	―
年間合計費用	千円/年	596,455	540,158	489,223
増減率	%	21.9	10.4	―
収入				
発電	千円/年	189,923	173,307	64,446
増減率	%	194.7	168.9	―
合計費用				
費用	千円/年	406,532	366,851	424,777
増減率	%	-4.3	-13.6	―

※-1施設整備費　50%の交付金を想定
※-2減価償却費　期間20年間
※-3各増減率＝（各ケースー全量焼却）/全量焼却

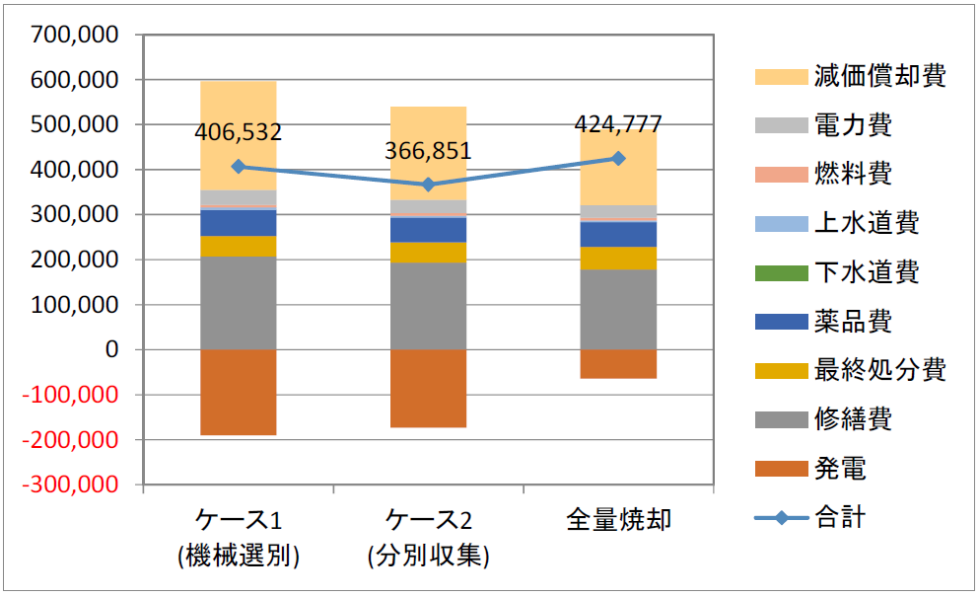


図 105　既往調査における経済性評価結果

以上、既往調査事例を参考としたコスト変化の算定結果を示した。ただし、上記の結果は、施設の人件費が含められていない点に留意が必要である。また、既往調査ではバイオガス化の対象に紙ごみも含めている点や、バイオガス化の方式が乾式となっている点が本事業の初期想定と異なり、また PHBH 製生ごみ袋を用いることで発酵残渣（消化液）を肥料利用でき排水処理が不要になる効果

を考慮できていないことにも留意が必要である。

人件費については、宮城県「みやぎ地域循環資源エネルギー高度利用 モデル作成事業（市町村主体モデル）調査書」に、廃棄物受入量 45 トン/日（内訳は以下のとおり）のバイオガス化施設についての設定条件が示されている。焼却処理＋バイオガス化処理のコンバインド方式を想定すると、追加的に必要になるのは特に「運転」に係る人員であり、計 36,000 千円／年と設定されている。

＜バイオガス化施設の廃棄物受入量＞

生ごみ（家庭） 20 トン/日
生ごみ（事業系） 10 トン/日
下水汚泥 15 トン/日

表 60 バイオガス化施設の事業性評価の設定条件（人件費）

	職位	職務	単価（千円）	人件費（千円/年）
管理	電気主任技術者	法定、兼日勤整備班班長	7,000	7,000
	事務員A	経理関係事務	4,500	4,500
			管理小計	11,500
運転	運転所長		8,500	8,500
	運転班長	交代勤務班長 1人×1班	5,500	5,500
	運転員	4人×1班	4,500	18,000
	日勤整備班		4,000	4,000
			運転小計	36,000
計量	計量員	計量受付，データ集計	3,500	3,500
			計量小計	3,500
受入班	受入班長	受入業務リーダー(非計上)	5,000	0
	プラットホーム要員	車両誘導，清掃，不適物発見	3,500	3,500
			受入班小計	3,500
整備	整備監督	整備計画，設備管理	6,000	6,000
	整備担当	整備現場担当	8,000	8,000
			整備小計	14,000
			人件費総計	68,500

（出典）宮城県「みやぎ地域循環資源エネルギー高度利用 モデル作成事業（市町村主体モデル）調査書」[18]

18 宮城県「みやぎ地域循環資源エネルギー高度利用 モデル作成事業（市町村主体モデル）調査書」，https://www.pref.miyagi.jp/uploaded/attachment/739436.pdf

バイオガス化方式を湿式に見直しすることについては、4.2.2 で実施したフィジビリティスタディの結果、PHBH 製生ごみ袋を用いることで消化液を肥料として有効利用できることで、消化液を排水処理するケースに比べて約 50 百万円/年が削減できることが試算されている。

以上より、先述の穂高広域施設組合の経済性評価結果に人件費の増分と排水処理が不要となることを考慮すると次表のようになる。ケース 1（機械選別）は、全量焼却ケースよりも合計費用が上回ることとなった。一方ケース 2（分別収集）の場合は、全量焼却に比べて依然として経済優位性がみられる。

表 61　焼却＋バイオガス化の事業性評価（人件費増分考慮）（単位：千円/年）

	項目	ケース 1 （機械選別）	ケース 2 （分別収集）	ケース 3 （全量焼却）	出典
A	合計費用 （人件費、排水処理未考慮）	406,532	366,851	424,777	環境省委託業務「平成 26 年度廃棄物系バイオマス利活用導入促進事業委託業務」
B	人件費増分	36,000	36,000	-	宮城県「みやぎ地域循環資源エネルギー高度利用 モデル作成事業（市町村主体モデル）調査書」（2019 年 2 月）
C	排水処理削減分慮後）		▲50,000		4.2.2 フィジビリティスタディ結果
Ð	合計費用 （人件費及び排水処理考慮後）	442,532	352,851	424,777	A+B+C

4）コスト試算結果の評価

① ごみ袋調達費用

混合収集と分別収集で使用する袋の種類・サイズを考慮してごみ袋調達費用の試算を行った。その結果、混合収集から分別収集にすることで、調達するごみ袋の枚数が増えること及び生ごみ袋が PE から PHBH の単価が PE よりも高くなることから、ごみ袋調達費用は増加した。

混合収集の場合、PE 製ごみ袋（30 L 袋）の調達費用は 67 百万円/年と試算された。これに対し、分別収集の場合は、PHBH 製生ごみ袋（2 L 袋）と PE 製のごみ袋（30L 袋）の調達費用総額は 108 百万円/年となった。

② 収集費用

分別収集導入による収集費用の変化について事例を参照し、混合収集に比べ分別収集では 7%増加するという仮定で試算を行った。その結果、混合収集では 642 百万円/年となったのに対し、分別収集では 687 百万円/年となった。

ただし、収集費用は地域差による影響が大きく、試算精度は高くないことに留意が必要である。また、いずれにせよ、分別収集を導入する際は排出量の変化に応じて収集頻度等を最適化し、総費用の増大を抑えることが重要になると考えられる。

③ 処理費用（売電を含む）

処理費用は、環境省委託業務「平成 26 年度廃棄物系バイオマス利活用導入促進事業委託業務」等の結果を活用して試算を行った。

シナリオ②（混合収集・機械選別）は、シナリオ③（全量焼却）よりも合計費用が約 4%上回るこ

ととなった。一方シナリオ①（分別収集）の場合は、シナリオ③（全量焼却）に比べて経済優位性がみられ、合計費用が約 17%下回った。

④ トータルコストの評価

上記のように、シナリオ別にごみ袋調達費用、収集費用、処理費用（売電を含む）の各ステップの費用を試算した。ステップごとに試算の前提条件や計算精度が異なる場合があるため、ここからトータルコストの比較をすることは難しいが、参考のために次表にトータルコストを示す。

この結果、PHBH 製生ごみ袋を導入して分別収集を行うシナリオ①は、PHBH 製生ごみ袋（2 L 袋）の調達価格を 5 円/枚と見なした場合、ベースラインシナリオ（シナリオ③）とほぼ同等のトータルコストとなることが分かった。

表 62　各シナリオにおけるトータルコスト

	シナリオ① 分別収集⇒焼却・バイオガス化処理シナリオ（PHBH 製生ごみ袋導入）	**シナリオ②** 混合収集・機械選別⇒焼却・バイオガス化シナリオ	**シナリオ③** 混合収集⇒全量焼却シナリオ（ベースラインシナリオ）
収集方法	分別収集	混合収集	混合収集
処理方法	焼却・バイオガス化コンバインド	焼却・バイオガス化コンバインド	全量焼却
ごみ袋調達費用	108 百万円/年	67 百万円/年	67 百万円/年
収集費用	687 百万円/年	642 百万円/年	642 百万円/年
処理費用（売電含む）	353 百万円/年	443 百万円/年	425 百万円/年
合計	1,148 百万円/年	1,152 百万円/年	1,134 百万円/年

注）各ステップ（ごみ袋調達、収集、処理（売電含む））において前提条件や計算精度が異なるため本来単純な積み上げは難しいことに留意。

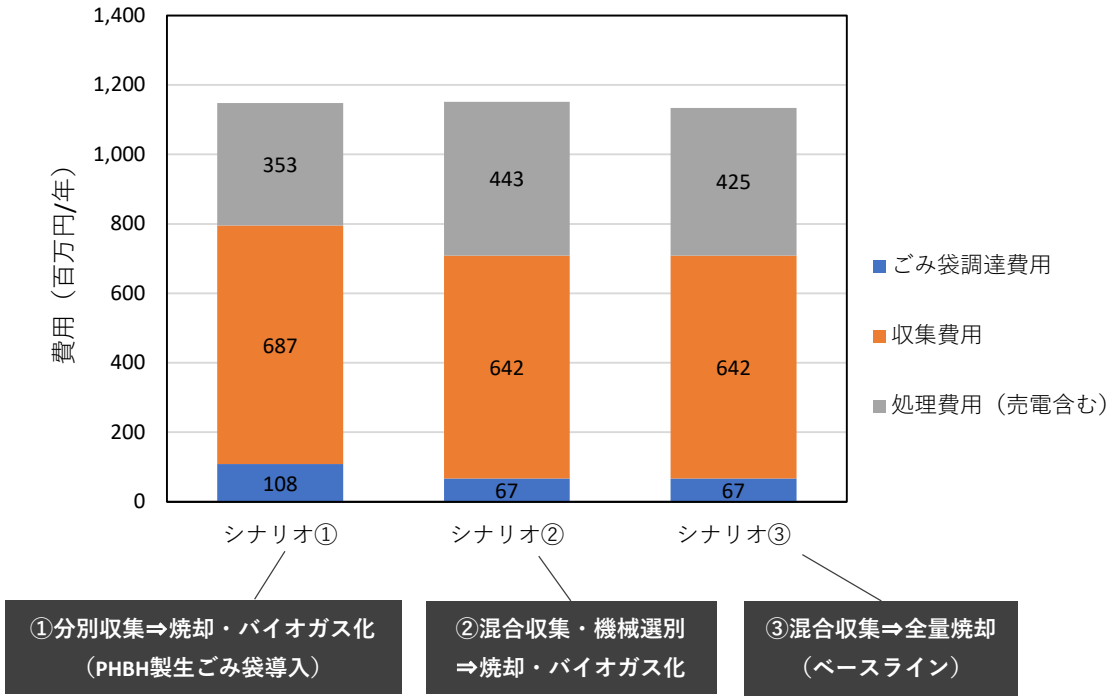


図 106　各シナリオにおけるトータルコスト

注）各ステップ（ごみ袋調達、収集、処理（売電含む））において前提条件や計算精度が異なるため本来単純な積み上げは難しいことに留意。

（６）まとめと課題

PHBH 製生ごみ袋を調達し、生ごみの分別収集に用い、生ごみと一緒にバイオガス化する処理システムのコスト評価に向けて、既存情報及び本実証データを活用してコスト試算を行った。その結果、分別収集しバイオガス化するシナリオでは、ベースラインシナリオの全量焼却ケースと比べ、ごみ袋調達費用及び収集費用が増加するものの、処理コストは低減でき、トータルコストはベースラインシナリオと同等になることが分かった。

今回の試算では、収集コストについて、生ごみ分別収集による費用増を見込んだが、その他可燃ごみの収集回数を減らす等の対策も考えられる。こうした効果も踏まえると、さらにトータルコストを下げられる可能性がある。今後、条件設定を揃えた詳細な検討が必要である。

4.1 節に示すように、本事業で提案するシステムは、システム全体としての GHG 排出抑制効果に優れることが検証された。さらに、本システムは、可燃ごみを全量焼却するベースラインシナリオよりも同等以下のコストで導入・運用できる可能性が示されたことから、今後、全国で本システムの展開が進むことが期待される。

4.2.2 中小自治体におけるバイオガス化施設のフィジビリティスタディ

（1）目的

中小規模における生ごみと PHBH 製生ごみ袋を原料としたバイオガス化施設のフィジビリティスタディすることを目的とした。

（2）方法

次表に示す条件を設定のうえ、バイオガス化の物質収支、設備建設のイニシャルコスト及び 20 年間の運営コストを試算し、結果を評価した。

表 63　バイオガス化システム設計条件

ごみ処理量（施設規模）	10 t/日、15 t/日、20 t/日、30 t/日、50 t/日
ごみ搬入条件 　年間処理量 　対象ごみ 　対象ごみの組成	25 日/月（300 日/年） 　施設規模×t/日×365 日/年 　　分別された生ごみ*＋PHBH 製生ごみ袋（有機分重量比率で 20：1） 　　水分 77%、有機分 20%、灰分 3%
バイオガス化処理条件 　バイオガス発生量	湿式中温メタン発酵（滞留日数 20 日） 　分別された生ごみ VS 分解率　90% 　PHBH 製生ごみ袋 VS 分解率　　94% 約 160Nm3/ｔ投入原料（メタン濃度 60%）
バイオガス利用 　発電時の排熱利用	ガスエンジンで発電し、全量を FIT 制度を利用した売電（39 円/kWh） 発電効率 30%、排熱回収効率 40% 一部は発酵槽の加温に利用
発酵残渣利用	全量肥料としての利用　（施設内で 10 日分程度貯留）

*分別された生ごみとは、一般家庭からの分別された生ごみ、事業系分別された生ごみ（食品小売業、外食産業等）を指す。

主要機器およびシステムフローを次図に示す。

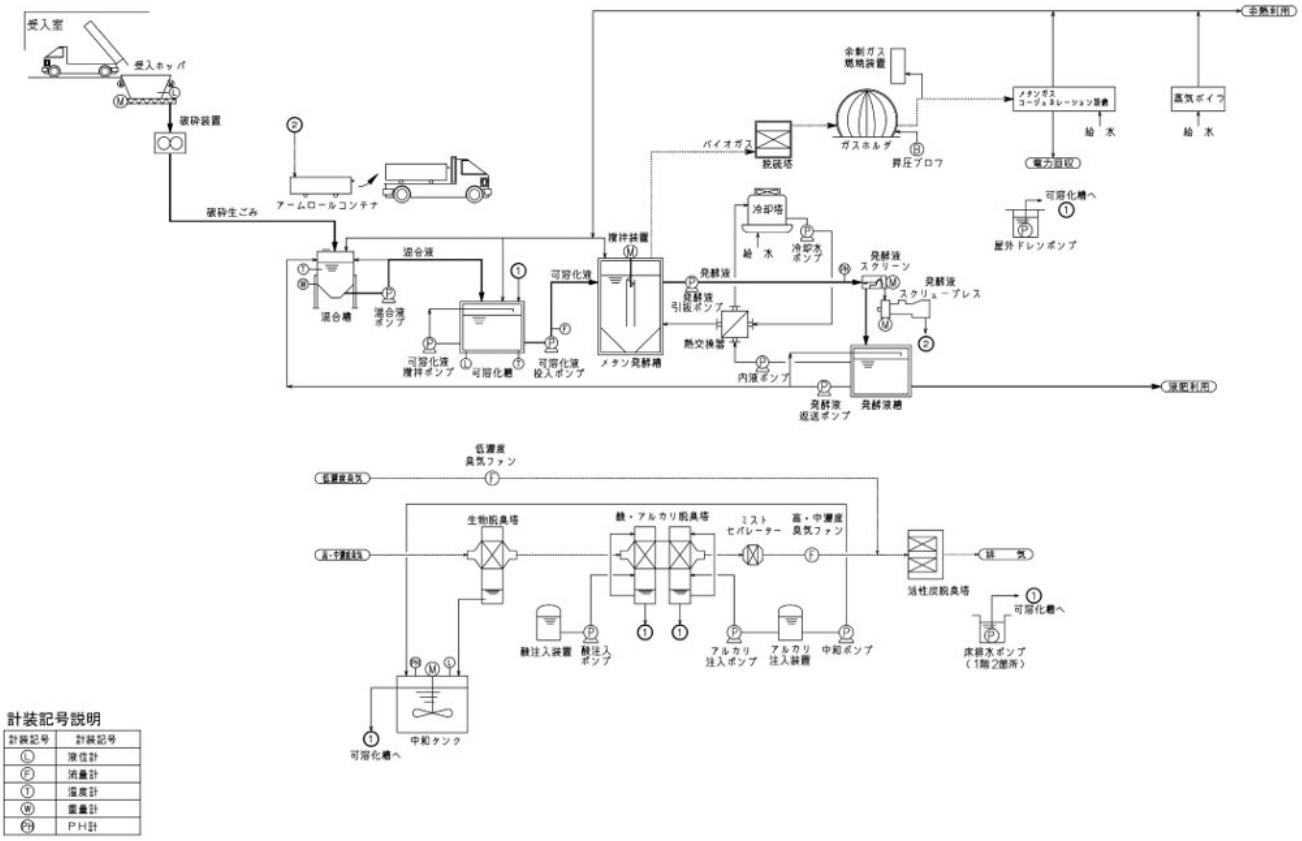


図 107　主要機器及びシステムフロー

（3）結果

1）物質収支、エネルギー収支結果

処理規模別の物質収支結果を次表に示す。プロセス水は脱臭装置、設備洗浄から排出される。残渣量はプロセス水が追加されるため、15 t/日処理規模までは残渣量が増加する結果となった。処理量 10 t/日の場合の物質収支を次図に示す。

表 64　処理規模別物質収支結果

処理規模 （t/日）	生ごみ (t/日)	PHBH 製生ごみ袋 (t/日)	プロセス水 (t/日)	残渣量 （t/日）
10	9.90	0.10	3.00	11.24
15	14.84	0.16	3.00	15.35
20	19.79	0.21	3.00	19.47
30	29.69	0.31	3.00	27.71
50	49.48	0.52	5.00	44.18

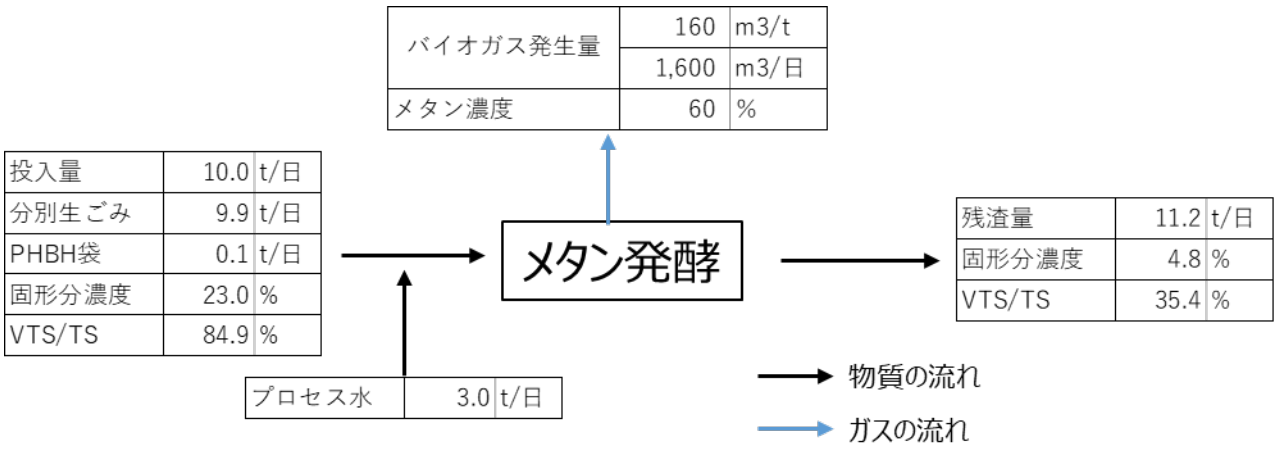


図 108　10 t/日規模の物質収支

施設規模別のバイオガス発生量、発電量及び外部供給可能な熱量を次表に示す。処理量 10t/日の場合のエネルギー収支を次図に示す。バイオガス発電により、バイオガスの持つエネルギーの 30%は電気として、40%は蒸気や温水として回収可能である。回収した熱の大部分は施設内で消費することができず、回収した熱の 80%が余剰な熱として外部供給可能である。これらを無駄にすることなく有効活用するためには、あらかじめ廃熱の利用先を検討しておくことが、エネルギー利用率向上のために重要である。

表 65　処理規模別エネルギー収支結果

処理規模 （t/日）	バイオガス発生量 （m3/日）	発電量 (kWh/日)	回収熱量 （MJ/日）	外部供給熱量 (MJ/日)
10	1,600	2,800	13,500	11,200
15	2,400	4,200	20,200	16,700
20	3,100	5,600	27,000	22,400
30	4,700	8,400	40,500	33,600
50	7,800	14,100	67,500	55,900

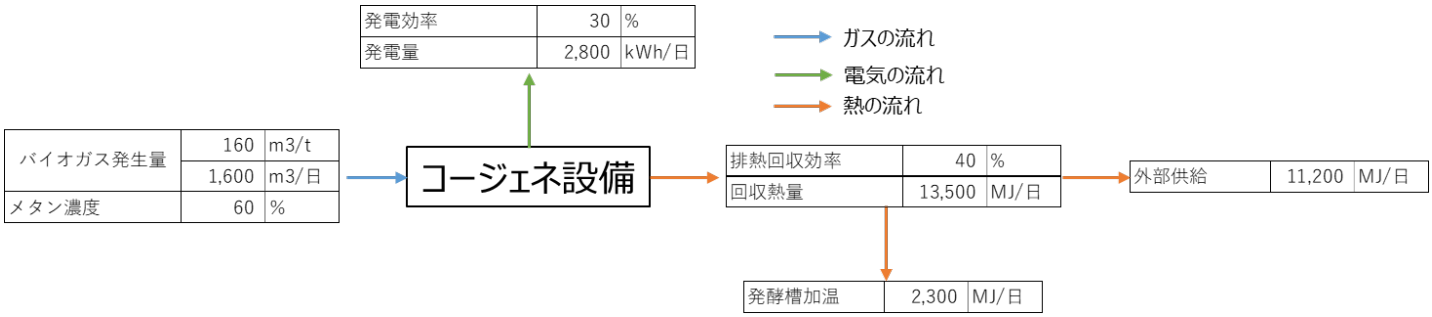


図 109　10 t/日規模のエネルギー収支

2）施設全体配置計画

受入条件は 4 t 車両でのごみの搬入、外周道路有の条件とした。処理規模別の必要敷地面積の試算結果を次表に示す。処理規模 20 t/d の場合の全体配置図を次図に示す。本試算では、発酵残渣である発酵液は液肥として農地還元する計画であり、施設内で 10 日分程度貯留する計画としている。残渣

貯留槽は処理棟内に配置した。液肥利用では、施肥までの期間貯留する必要が生じるため、施設計画時には利用先の確保と施肥計画を立案した上で、施設側で貯留する容量や利用先で貯留する容量を明確にするなど、実現性のある利用計画を策定する必要がある。

表 66　処理規模別の必要敷地面積結果

処理規模	10t/日	15t/日	20t/日	30t/日	50t/日
必要敷地面積	約 2,100m^2	約 2,300m^2	約 2,400m^2	約 2,500m^2	約 3,400m^2
処理系列数	1 系列				2 系列

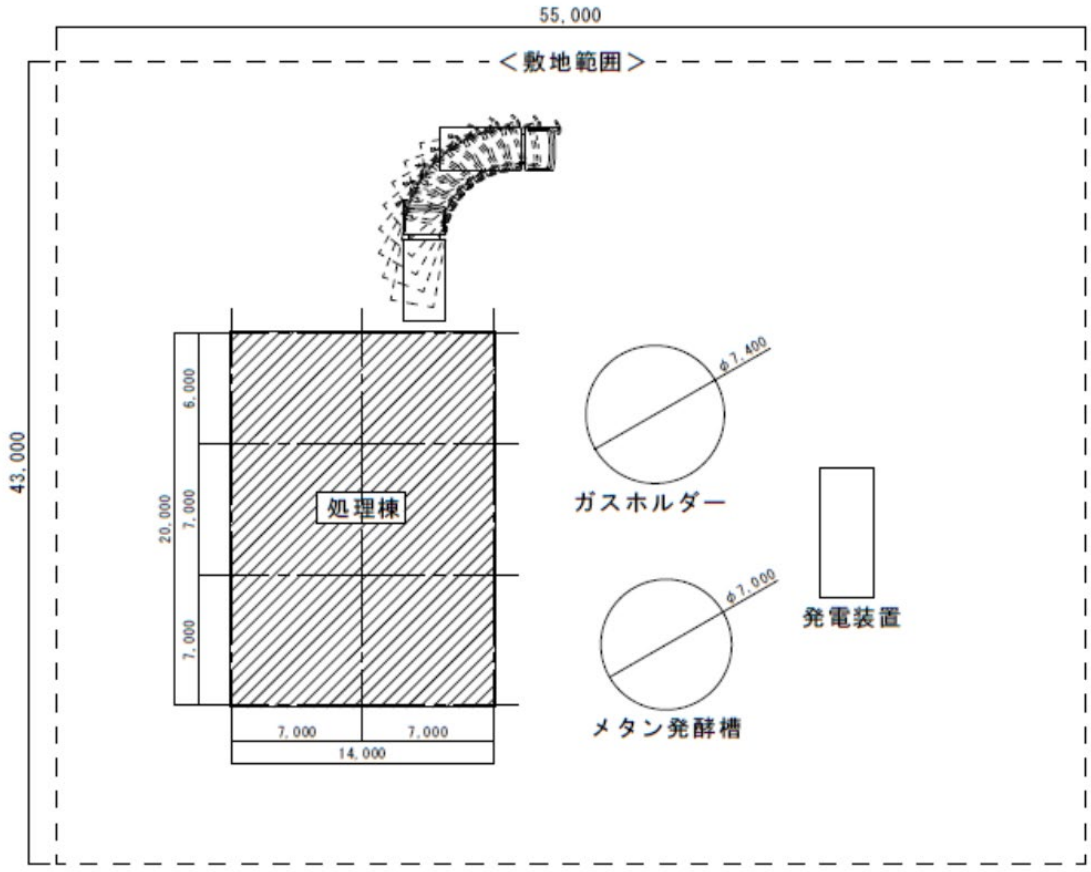


図 110　20t/日規模　全体配置図

3）経済性評価結果

① 液肥利用した場合の経済性評価結果

施設規模別に事業性を評価した。

各設定条件は、以下のとおりである。

固定資産税　　0.6%（減価償却を考慮した 20 年平均）

土地購入費　　30,000 円/m^2

人件費単価　　5,000,000 円/人・年　　賃金上昇率 2.0%/年

管理人員　　10、15t/日：3 人　20t/日：4 人　30t/日：5 人　50t/日：6 人

売電単価　　39 円/kWh

処理単価（収入）　15,000 円/t

20 年間での事業性の評価結果を次表、次図に、20 年間の累計収支を次図に示す。

施設の建設費及び 20 年間の運営費を考慮した事業性評価の結果、20 年経過時点では 15t/日以上の施設規模においてプラスの収支が見込まれる結果となった。処理規模が大きくなるにつれてプラスの収支幅は大きく拡大する一方、10 t/日の処理規模では 20 年経過時点においてはマイナスの収支となった。

表 67　設規模別の 20 年間収支結果（単位:千円）

施設規模（t/日）		10	15	20	30	50
支出	建設費	850,000	1,000,000	1,150,000	1,350,000	1,950,000
	大規模修繕費	425,000	500,000	575,000	675,000	975,000
	修繕費	340,000	400,000	460,000	540,000	780,000
	固定資産税	102,000	120,000	138,000	162,000	234,000
	土地購入費	63,000	69,000	72,000	75,000	102,000
	人件費	364,461	364,461	485,947	607,434	728,921
	残渣処分費	0	0	0	0	0
	維持管理費	233,400	311,200	373,440	508,620	778,000
収入	売電	801,160	1,201,740	1,602,320	2,403,480	4,005,780
	処理費	1,095,000	1,642,500	2,190,000	3,285,000	5,475,000
収支計		-481,701	79,579	537,933	1,770,426	3,932,859

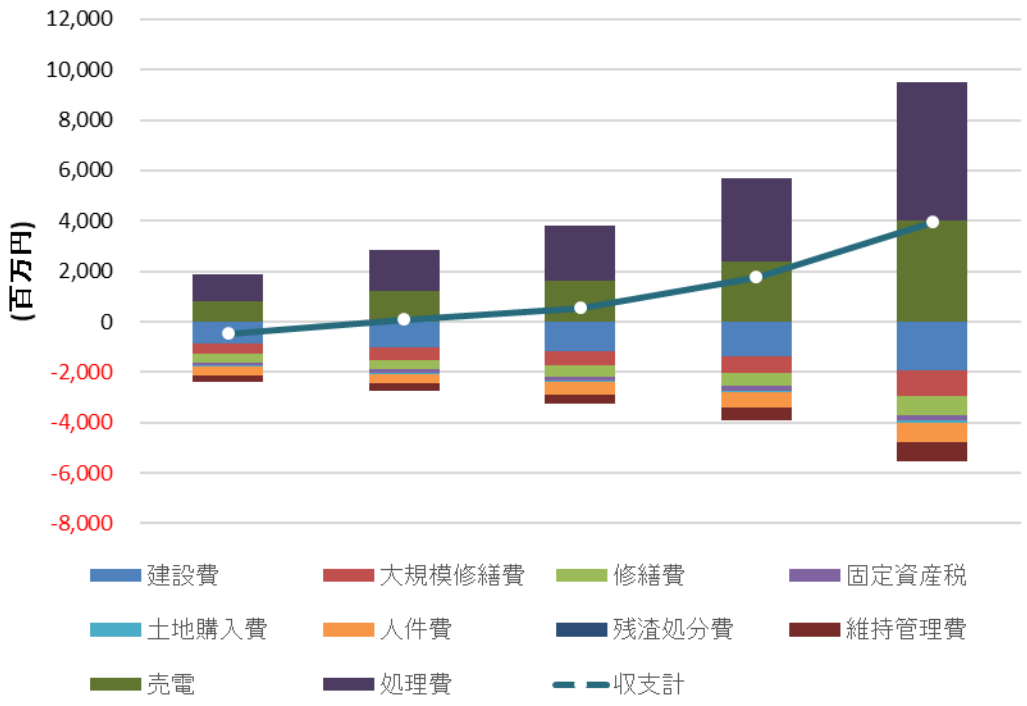


図 111　施設規模別の 20 年間収支結果

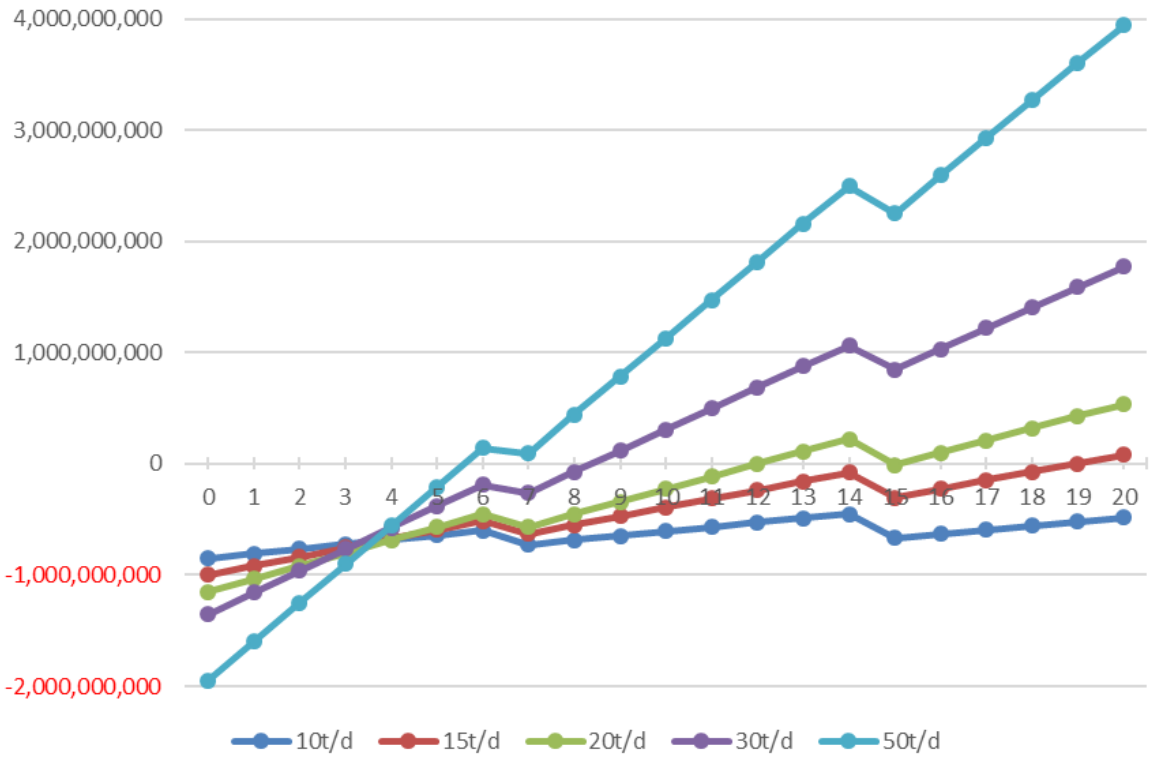


図 112 施設規模別の各年の累計収支

② 排水処理を適用した場合の経済性評価結果

発酵残渣は肥料として有効利用するのではなく、排水処理を適用した場合の試算を実施した。①で検討した設計条件に排水処理工程を追加し、以下の条件で試算した。

・運転管理人員は増加しないものとした。

・脱水汚泥は無償譲渡可能なものとした。（処分費を見込まない）

・敷地面積増加による土地購入費増。

排水処理を適用した場合の事業採算性結果を次表に示す。また、処理量規模ごとの液肥利用と排水処理との比較を次図に示す。排水処理を適用した場合は液肥利用と比べて事業採算性が悪化し、20t/日の施設規模においてもマイナスの収支が見込まれる結果となった。

表 68 排水処理適用した場合の事業採算性（単位：千円）

施設規模（t/日）		10	15	20
支出	建設費	1,105,000	1,260,000	1,414,500
	大規模修繕費	552,500	630,000	707,250
	修繕費	442,000	504,000	565,800
	固定資産税	132,600	151,200	169,740
	土地購入費	69,000	75,000	72,000
	人件費	364,461	364,461	485,947
	残渣処分費	0	0	0
	維持管理費	583500	778,000	933,600
収入	売電	801,160	1,201,740	1,602,320
	処理費	1,095,000	1,642,500	2,190,000
収支計		-1,352,901	-918,421	-553,457

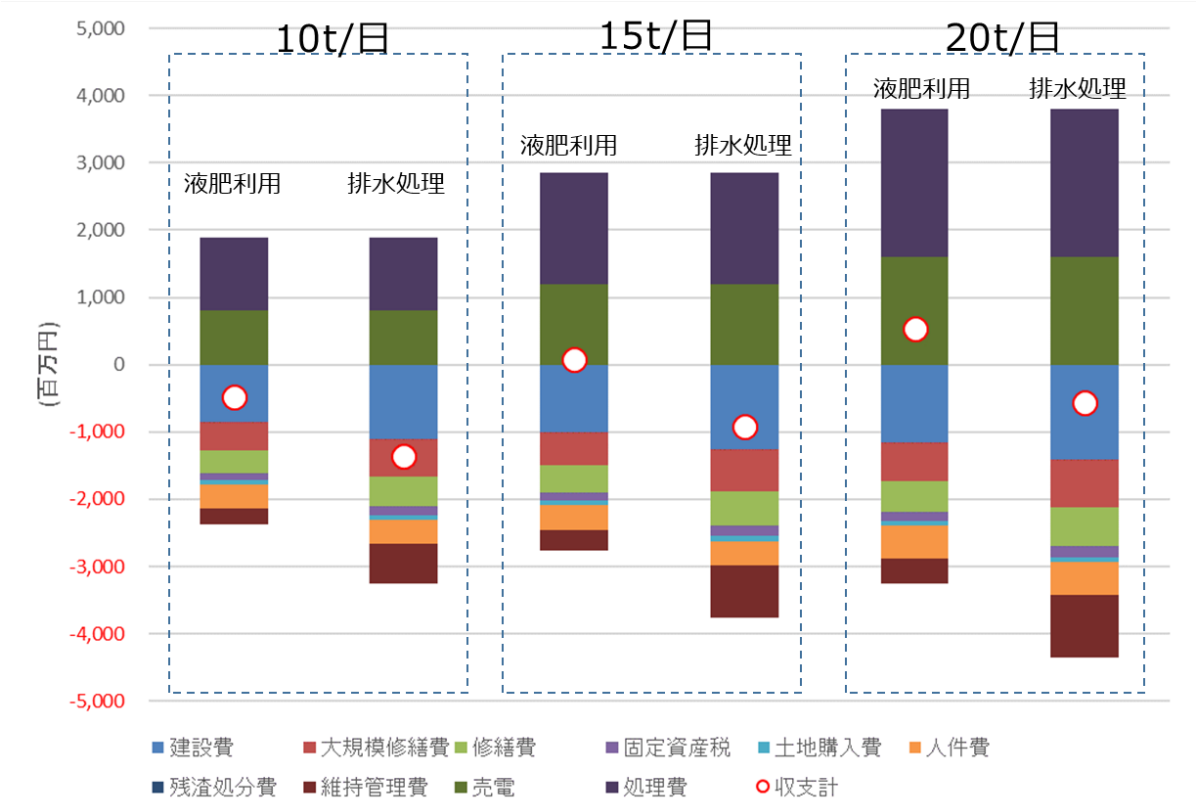


図 113　施設規模別液肥利用と排水処理適用の経済性評価結果

本試算では排出される熱エネルギーについては、有効利用することなく排出している。これらを有効活用し、20 年間の収支を少しでも改善するためには、液肥と合わせた利用先確保として、農作物栽培用温室の加温熱源としての利用や、近隣公共施設への給湯熱源、蒸気用原水の予熱熱源としての利用などが考えられる。蒸気または温水として利用できる外部供給可能な熱量を軽油量(L/日)及びその購入コストに換算すると、次表のとおりに計算される（軽油の低位発熱量：35.77 MJ/L、産業用軽油価格 122.2 円/L にて算出)。余熱利用を行うことで、次表に示す軽油量の代替および、軽油購入コストの削減が可能であることが示される。

表 69　外部供給熱量による軽油代替量の試算

処理規模（t/日）	外部供給熱量(MJ/日)	軽油相当量（L/日）	軽油コスト（円/日）
10	11,200	313	38,262
15	16,700	467	57,052
20	22,400	626	76,524
30	33,600	939	114,787
50	55,900	1,563	190,970

（４）まとめと課題

施設の建設費及び 20 年間の運営費を考慮した事業性評価の結果、20 年経過時点では 15 t/日以上の施設規模においてプラスの収支が見込まれる結果となった。処理規模が大きくなるにつれてプラスの収支幅は大きく拡大する一方、10 t/日の処理規模では 20 年経過時点においてはマイナスの収支となった。

課題としてはバイオガスの利用方法と液肥の利活用があげられる。

本試算のバイオガスの利用方法はガスエンジンによる発電を行い、FIT 制度を利用した売電（39 円/kWh）を行う計画としている。この他のバイオガス利用計画としては、次のような利活用方法が考えられ、今後の検討項目として挙げられる。

- バイオガスは、メタン含有量が約 60%の気体であり、発電以外にも直接燃焼やボイラ燃料などとしても利用可能である。
- バイオガス中の残りの 40%はほぼ二酸化炭素であり、分離技術を用いて二酸化炭素を分離し、ドライアイスの原料としての工業利用や、植物の成長促進としての農業利用も可能である。
- 近年、触媒存在下でバイオガスに水素を加え、バイオガス中の二酸化炭素と水素をメタンへ変換するメタネーション技術も実用化されつつある。

バイオガス中の二酸化炭素はその原料由来から、ガスエンジンによる発電後にそのまま排出しても大部分がカーボンニュートラルである。したがって上記に示したような手法による二酸化炭素の回収・利活用は、さらなる GHG 削減効果が見込める。

事業採算性向上のためには特に中小規模においては液肥利用が必要不可欠である。液肥利用では、施肥までの期間貯留する必要が生じるため、施設計画時には利用先の確保と施肥計画を立案した上で、施設側で貯留する容量や利用先で貯留する容量を明確にするなど、実現性のある利用計画を策定する必要がある。

５．まとめと今後の課題

本年度は、廃食用油を用いた PHBH の培養生産技術の改良を図ることでパーム油使用時と同等の PHBH の生産性を達成するとともにポリマーの品質管理基準を満たすように精製処方を改善した。また、実機を用いた廃食用油からの PHBH 製造試験により量産時の生産性・品質を確認し、スケールアップ技術を確立した。さらに廃食用油排出実態調査、廃食用油以外の国産の油脂源の利用可能性に関する検討を行った。地域住民の協力による PHBH 製生ごみ袋を用いた生ごみの分別排出・回収試験を実施し、そこで回収した生ごみを原料としたベンチスケールでのバイオガス化試験を実施した。それらに関するライフサイクルでの CO_2 削減効果及びコスト変化の定量化に向けた検討を行った。

５.１ 廃食用油及び再生可能資源を原料とした PHBH 製造に関する実証事業（実証事業 1）

（１）生活系・事業系廃食用油を PHBH 原料に利用するための前処理技術に関する検討

廃食用油を原料とする培養方法については、昨年度までの検討により、日本国内で発生する主な廃食用油は現在の原料であるパーム油よりもヨウ素価が高い大豆、菜種油系の高ヨウ素価油であることが判明したため、高ヨウ素価廃食用油を原料とした PHBH 培養生産技術開発を進めてきた。昨年度の研究において、パーム油と廃食用油ハイブリッド培養方法、及び、油脂濃度を高く維持することで廃食用油を単独で使用する改良培養方法を開発し、PHBH 商業化実証設備培養試験を実施した。その結果、目標生産性を達成したものの、顕著な発泡により不安定な培養となり、実生産においては問題が残されていた。そのため、本年度は、発泡抑制と高生産性の両立を目指し、高いヨウ素価油を原料として低油脂濃度で PHBH 培養生産が可能な技術の開発を進めてきた。その結果、不飽和脂肪酸を還元し飽和脂肪酸を生成する酵素(FadH)の強化により、高ヨウ素価の油脂を効率的に資化させることに成功した。本技術により高ヨウ素価廃食用油を工業的に効率的、かつ安定的に PHBH 原料として培養生産することが可能となった。

また、劣化が進行した廃食用油を入手して培養試験を実施した結果、酸価、アニシジン価がある値よりも低ければ使用できることが分かり、低ヨウ素価廃油の受入れ基準範囲が拡大できた。さらに高度に劣化が進んだ廃食用油でもブレンドによってその劣化度値を範囲内に収めることで使用可能となる可能性を示せた。

廃食用油前処理検討では、昨年度開発した処方でも YI（Yellow Index）の基準を満足できない廃食用油があることが判明したが、YI に影響を与える要因として着色成分濃度と相関があることを見出し、新たな新処方により低減効果を確認した。また、廃食用油を利用するための実証設備として、廃食用油簡易精製設備と排水 Si 除去設備の取得工事を進めた。

（２）PHBH 原料として利用するための更なる廃食用油の回収率向上を目指した収集方法に関する検討

家庭系の廃食用油は、行政により回収方法が概ね確立されているが、事業系については排出形態が様々であり、効率的な回収方法の構築が求められる。また、京都府・京都市の調査結果からは事業系が全体量の 9 割近くを占めていることも分かった。

以上より、事業系の廃食用油を対象に、排出～回収～加工の一連のプロセスにおける回収計画の立案を自動化するシステムの検討を行った。

PHBH 原料としての廃食用油を安定的に供給するためには、広範な排出事業者の廃食用油回収へ

の参加が必要である。そのような回収を支援するシステムは、事業規模・内容が多岐にわたる排出事業者に適応可能でなければならない。まず、IoT システムでは、設置環境の実情に合わせた装置の設計・セットアップが必要となる。これまでの調査で明らかになったように、排出事業者での廃食用油の保管場所・状態は様々であり、これらに対応できる柔軟性が求められる。

また、多数の排出事業者の参加を得ることで、広域かつ多地点でのシステム展開が求められる。システムの実用化にあたっては、地理的に現実的な回収計画の立案に加えて、各排出事業者に分散した IoT デバイスの長期的・持続的な運用体制の構築も考慮する必要がある。これらは、展開地域の地理や交通環境などの制約を踏まえる必要があることから、システムの実証にあたっては、このような制約の影響を評価可能な地域で実験を行うことが望まれる。

一方、多数の排出事業者の参加の下、排出状況のデータを蓄積することにより予測モデルの精度向上が期待できる。特に、事業形態により、排出状況には年単位などでの一定のトレンドがあると考えられることから、長期的なデータを収集することが望ましい。システムの実用化に向けては、このような設置箇所の実態の把握や、長期的なデータ回収、それらに基づいたモデルの改善など、ロードマップに示したサイクルを継続的・長期的に行っていくことが期待される。

（３）廃食用油以外の国内外の油脂源の調達可能性及び食料と競合しないジャトロファ等の油糧植物の国内での栽培と特に国内中山間地（耕作放棄地）での原料栽培の検討

廃食用油以外の国内外の油脂源の利用可能性に関する検討については、令和元年度に京都地域に構築した実証温室と戸外の実証圃において、熱帯油脂作物ジャトロファ（*Jatropha curcas*）の通年の、バイオガス化の消化液を利用した栽培管理方法を検討し、その油脂生産性の評価を行った。その結果、２年生ながら日本の気候を考慮した一樹あたりの種子目標収穫量の 20%を達成した。特に課題となる越冬方法については、適切に潅水すれば周年、葉を落とさず栽培できる一方、冬前に潅水を控え落葉させて、春に潅水を再開することで樹勢を回復できることもできた。これらの結果から、今後は温室を利用した加温なしでの栽培とともに霜の降りない西南暖地での栽培を検討することが考えられる。

加えて、ジャトロファ以外の油脂作物として、菜種の栽培を検討したが、メタン発酵消化液の増施により収量増加が示唆され、米作の裏作としての菜種栽培が期待できることが分かった。

（４）原料の切り替えによる CO_2 削減効果及びコスト変化に関する検討

CO_2 削減効果については、実証データを用いた PHBH 樹脂製造までの Cradle-to-Gate の GHG 排出原単位を推定し、従前の解析と比べ GHG 排出原単位は大きく改善されていることが明らかになった。また、廃食用油を原料とすることでパーム油と比べて 39%の低減が可能である。輸入パーム油は栽培時の条件によって GHG 排出量が大きな幅を持つ不確実性が先行研究からも指摘されていることも勘案すると、国産原料を用いた PHBH 生産がより望ましい選択肢と考えられる。

コスト変化については、現在、PHBH の原料として利用されているマレーシア産パームオイルを、廃食用油に切り替えた際のコスト変化の定量化を行った。パーム油、廃食用油ともに直近の価格は上昇基調であり、両者の価格差も大きくはないと見込まれる。廃食用油単価がパーム油同等とすると、PHBH 製生ごみ袋の価格はパーム油由来のものに比べて 1.1 倍程度と試算された。

5.2 PHBH のごみ袋及びプラスチック代替製品への利用とバイオガス化に関する実証事業（実証事業 2）

（1）バイオガス化プラントでの利用に向けた PHBH 製生ごみ袋の製造に関する検討

PHBH 製生ごみ袋については、ごみ袋メーカーの量産機で 2 L、5 L、10 L の三種類の生ごみ袋の試作を行い、京都市の地域住民の協力のもと、分別排出・回収試験による実用性評価を実施するとともに、アンケート調査を行った。その結果、当初はヒートシール部の強度不足により、液漏れや持ち手接着部のちぎれ等の指摘が多くみられたが、インフレーション製膜条件を調整した改良品と取り替えたところ、これらの不具合は解消された。この結果、アンケートでも一般の袋よりも使い勝手がよく、バケツよりごみを運びやすいとの意見を多くいただき、実用性が確認できた。

また、10 L 袋の口がもう少し広いほうがバケツに被せやすく便利であるとの改善アイデアも頂いた。このような更なる使い勝手改善、及び製袋ロス削減（打ち抜きを無くす）とともに、強度不足の原因となりやすいマチ（フィルム四枚重ね）のない平袋の追加試作を実施した結果。弱い接着点がなくなり、均一的に強いシールができたことから、剥離も発生せず、安全対策の 2 重シールは不要であることがわかった。

以上の結果から廃食用油を原料とした PHBH を用いた PHBH 改良配合によりインフレーション量産機で生ごみ袋を量産可能であることが確認できた。

（2）PHBH 製生ごみ袋を用いた生ごみの分別方法等に関する検討

PHBH 製生ごみ袋を用いた生ごみ収集方法については、地域住民の協力のもと実施された分別排出・回収試験結果からは、実用面での問題はほとんどなく、むしろ生ごみ専用バケツに比べて使いやすいということが確認できた。一方、今回の試験では生ごみ堆肥化事業の参加世帯を対象としており分別精度に問題はなかったが、実際に幅広い市民への実装をするとなると事前に細かな分別ルールの周知・徹底を図り、不適物を混入させない必要がある。また、地域住民からは実用化された時の価格等について不安視する意見や回収拠点が遠く搬入できなかったという意見もあり、生ごみ袋の価格、回収拠点の設置場所に留意した計画が必要であることが分かった。

今回の実証試験は湿式方式で実施されたが、乾式処理における PHBH 製生ごみ袋での分別排出・回収については、紙ごみの混合収集の是非について、さらに検討が必要と思われるが、乾いた紙ごみなど生ごみと区別しやすいものについては、別途分別品目を追加して、異物の混入を阻止する工夫が必要である。

（3）PHBH 製生ごみ袋のバイオガス化に関する検討

PHBH 製生ごみ袋を用いた分別排出・回収試験によって得られた生ごみを原料にベンチスケール（発酵槽実容量 : 200L）でのバイオガス化試験を約 3 ケ月に亘り実施した。試験結果としては、4 週間の定格運転中、安定してバイオガスが発生していることを確認するとともに、引き抜いた消化液のろ過残渣中の未分解 PHBH は投入量の 6 %程度で流失ロス相当であり、十分に分解していることを確認した。ろ過後の消化液が植物の生長へ与える影響をコマツナの栽培試験で検証したところ、見かけの生育の様子や外観からは生育阻害は認められなかった。

普及拡大に向けて、一般的な汚泥を馴養することで PHBH が分解できることと合わせて、高温での嫌気分解試験により分解効率を比較した。その結果、ガス発生量からは中温、高温ともに PHBH が

順調に分解していることが確認されたが、中温、高温での差は無く、今回の試験では高温発酵による分解効率の向上は確認できなかった。

（４）バイオガス化を見据えたPHBHのプラスチック代替製品への利用可能性の検討

生分解性に優れるという特性と、100%バイオマス由来（脱炭素性）であるという2つの特性を有するPHBHの特性が活かされる用途について検討を行った。その結果、食品容器・包装へのPHBH導入ポテンシャルが大きいことが分かったが、汚れの度合いによりマテリアル・ケミカルリサイクルするのか、それとも食品廃棄物と共にバイオガス化するのか分かれるため、両方のシステムに素材として対応する必要あること等、今後の対応課題があることが分かった。

今後はマテリアルリサイクル・ケミカルリサイクルへの対応、食品容器・包装に適した物性の開発、リサイクルシステムの検討、ライフサイクルでの温室効果ガス削減効果の定量化・有効性評価等により、PHBHの用途展開が進むことが期待される。

（５）PHBH製生ごみ袋によるCO_2削減効果の定量化に関する検討

PHBH製生ごみ収集袋製造時のGHG排出量は2 Lサイズでは化石PE製と比べて低いことが確認された一方、10 Lサイズでは廃食用油を原料としても化石PE製の方が優位となった。ただし、化石PE製生ごみ収集袋の燃焼時のCO_2を加味すると10 Lサイズでも依然として優位であり、ライフサイクルで両者を比較することが肝要である。また、成形加工よりも樹脂生産の寄与が大きいことから、本実証でPHBH樹脂生産段階のGHG排出量が従前よりも大きく低減できたことは、PHBH製生ごみ収集袋のGHG削減にも大きく貢献したといえる。

5.3 PHA系バイオプラスチックのライフサイクルでの環境負荷低減効果に関する実証及びコストの評価（実証事業3）

（１）環境負荷低減効果

京都市の一般廃棄物の処理をケーススタディとして、廃食用油を原料としたPHBH製ごみ収集袋を用いて厨芥類を分別収集、メタン発酵利用するシステムのGHG削減効果をライフサイクル分析によって定量化した。その結果、国産廃食用油を再利用し、それを原料とするPHBHを用いた資源循環システムはGHGを31%削減できることが明らかとなった。

製品（ごみ収集袋）当たりのGHG排出量に関して、樹脂当たりGHGでは廃食用油原料PHBHは化石PEよりも優位となるものの、製品当たりでは袋のサイズが大きくなるほど化石PE製の方が優位となる傾向であった。また、パーマ油と廃食用油の原料間の比較においては廃食用油を原料とすることの優位性が確認されていた。一方、廃食用油を原料としたごみ収集袋を用いて厨芥類・紙類を分別収集、メタン発酵利用し、残渣を堆肥利用する資源循環システムとしてライフサイクルの視点から評価した本シナリオ解析においてはパーム油（S2）、廃食用油（S3）原料間で同程度のGHG削減効果と算定された。ただし、パーム油は土地利用変化を含む生産条件によって栽培段階の環境負荷は大きな幅を持ち不確実性が高い。また、S2においては廃食用油の焼却処理時のエネルギー回収（発電代替）効果が寄与してS3と同程度のGHG排出量となっていることから、電源構成の脱炭素化が進む将来の脱炭素社会においては、廃食用油を原料とするS3の優位性が増してくるものと予想され、地域資源を活用し脱炭素に貢献する地域循環共生圏形成の観点からも望ましいシステムと期

待される。

（２）コスト評価

PHBH 製生ごみ袋を調達し、生ごみの分別収集に用い、生ごみと一緒にバイオガス化する処理システムのコスト評価に向けて、既存情報及び本実証データを活用してコスト試算を行った。その結果、分別収集しバイオガス化するシナリオでは、ベースラインシナリオの全量焼却ケースと比べ、ごみ袋調達費用及び収集費用が増加するものの、処理コストは低減でき、トータルコストはベースラインシナリオと同等になることが分かった。

今回の試算では、収集コストについて、生ごみ分別収集による費用増を見込んだが、その他可燃ごみの収集回数を減らす等の対策も考えられる。こうした効果も踏まえると、さらにトータルコストを下げられる可能性がある。今後、条件設定を揃えた詳細な検討が必要である。

本事業で提案する PHBH 製生ごみ袋を用いて生ごみを分別収集しバイオガス化するシナリオでは、ベースラインシナリオの全量焼却ケースと比べ、トータルコストは同等になることが示され、一方でシステム全体としての GHG 排出抑制効果に優れることが検証されたことから、本システムの有効性が示せたと言える。今後、全国で本システムの展開が進むことが期待される。

以上のように、最終年度における各事業の検討課題は計画通りに進捗し、最終目標を達成することができた。すなわち廃食用油を原料とした PHBH の実機製造に目途をつけることができ、試作した PHBH 製の生ごみ袋を用いた生ごみの分別排出・回収試験において、十分に実用性があることが確認された。また、回収された生ごみとともにバイオガス化試験に供された PHBH は十分に分解しており、得られた消化液が肥料として利用できる可能性を示せた。そしてこれらのライフサイクルでの CO2 削減効果及びコスト変化の評価結果からシステムの有効性を示せた。

次年度以降は、本事業の開発成果の普及促進を図るため、社会実装に準じたスケールで、モデル地域における実証試験を実施するとともに、PHBH の特性を活かした生ごみ袋以外の用途開発とその用途に応じたリサイクル方法の検討並びに国産原料開発に中長期的視点で取組み、これらを通じて、PHA 系バイオプラスチックのライフサイクル実証と用途展開システム解析を行うこととしたい。

参考資料

１．実施記録

本事業における検討を行うために、以下のとおり検討会・現地視察会を開催した。

表 1　検討会・現地視察会実施記録

会議名	日時	開催場所	開催内容
第 1 回検討会	6 月 29 日 15:00~17:30	Zoom 会議室	(1)　最終目標と本年度の計画 (2)　本年度計画及び進捗状況について ・ 廃食用油を用いた PHBH 培養生産方法の開発 ・ 廃食用油の事前精製及びポリマー精製技術の開発 ・ ジャトロファ等の油脂作物の国内栽培に関する検討 ・ PHBH 製生ごみ袋製造技術の開発 ・ 生ごみ分別回収・バイオガス化試験計画 ・ 消化液の評価と利用に向けた検討 ・ PHBH 製生ごみ袋のバイオガス化に関する検討 ・ PHBH のプラスチック代替製品への利用可能性の検討 ・ 中小自治体におけるバイオガス化施設のフィジビリティスタディ ・ PHA 系バイオプラスチックの LCA に関する検討 (3)　今後の展開について
第 2 回検討会及び現地視察会	10 月 19 日 14:00~17:00	石川ハイテク交流センター会議室及び Zoom 会議室 [現地視察会] （株）バイオガスラボ中央研究所	(1)　これまでの進捗状況について ・ 廃食用油を用いた PHBH 培養生産方法の開発 ・ 廃食用油の事前精製及びポリマー精製技術の開発 ・ ジャトロファ等の油脂作物の国内栽培に関する検討 ・ PHBH 製生ごみ袋製造技術の開発 ・ 生ごみの分別排出回収及びバイオガス化試験実施状況 ・ PHBH のプラスチック代替製品への利用可能性の検討 ・ 中小自治体におけるバイオガス化施設のフィジビリティスタディ ・ PHA 系バイオプラスチックの LCA に関する検討 ・ 最終目標と進捗状況の総括 (2)　今後の展開について
第 3 回検討会	1 月 21 日 13:30~16:00	Zoom 会議室	(1)　これまでの成果について ・ 廃食用油を用いた PHBH 培養生産方法の開発 ・ 廃食用油の事前精製及びポリマー精製技術の開発 ・ ジャトロファ等の油脂作物の国内栽培に関する検討 ・ PHBH 製生ごみ袋製造技術の開発 ・ 生ごみの分別排出回収及びバイオガス化試験実施状況 ・ PHBH のプラスチック代替製品への利用可能性の検討 ・ PHA 系バイオプラスチックの LCA に関する検討 ・ 中小自治体におけるバイオガス化施設のフィジビリティスタディ ・ 最終目標と達成状況の総括 (2)　今後の展開について

また、関係者間での情報共有及び進捗管理等を行うため、以下に示す日程でワーキンググループ会合を実施した。

表 2　ワーキンググループ会合等実施記録

会議名	日時	開催場所	開催内容
第 1 回 WG	6 月 15 日 15:30-16:10	Zoom 会議室	・進捗状況確認（中小規模自治体におけるバイオガス化施設のフィジビリティスタディ）
第 2 回 WG	6 月 22 日 10:00-11:30	Skype for Business 会議室	・進捗状況確認（PHBH 培養製造技術、廃食用油前処理・ポリマー精製、生ごみ袋製造）
第 3 回 WG	9 月 15 日 15:00-16:00	Zoom 会議室	・進捗状況確認（ジャトロファ等栽培） ・専門家からの指導
第 4 回 WG	11 月 10 日 10:00-10:30	（株）バイオガスラボ会議室及び Teams 会議室	・進捗状況確認（バイオガス化試験、中小規模自治体におけるバイオガス化施設のフィジビリティスタディ）
第 5 回 WG	11 月 30 日 16:00-17:00	Zoom 会議室	・進捗状況報告（ジャトロファ等栽培） ・専門家からの指導
第 6 回 WG	1 月 13 日 13:00-14:15	ASTEM 会議室及び Teams 会議室	・LCA 解析に向けた実証データの確認

２．アンケート調査票

京都市地域住民による PHBH 製生ごみ袋の実用試験では、計 3 回のアンケート調査を実施した。以下に実際に使用した調査票を示す。

２.１ 第１回アンケート調査票

生分解性生ごみ袋を用いた生ごみ回収実証実験

ア　ン　ケ　ー　ト

この度は、生分解性生ごみ袋（微生物により分解されるごみ袋）を用いた生ごみ回収実証実験にご協力いただき、誠にありがとうございます。

お配りした生ごみ袋の使い方、使い勝手、生ごみの出し方等に関する動向調査のためアンケートを実施致します。8 月 23 日から今までの実証事業に対してのアンケートですので、ご協力くださいますと幸いです。

締め切り：令和 3 年 10 月 8 日（金）

提出方法：京北運動公園内（生ごみ計量スペース横の回収ボックスに入れてください。）

1　ご家族について

（1）　ご家族（同居人数）は何人ですか。あてはまる項目に○を付けてください。

①　独居　　②　２人　　③　３人　　④　４人　　⑤　それ以上（　　人）

2　生分解性生ごみ袋の使い勝手について

（1）　よく使った袋のサイズはどれですか。あてはまる項目に○を付けてください。

①　小袋（２ℓ）　　②　中袋（５ℓ）　　③　大袋（１０ℓ）　　④まんべんなく使う
⑤　その他（　　）

（2）　生分解性生ごみ袋は、一般的なごみ袋やレジ袋と比べてどのように感じましたか。あてはまる項目すべてに○を付けてください（複数回答可）。

①　破れやすい　　②　漏れやすい　　③持ち手の強度が弱い　　④　手触りがいい
⑤　手触りが悪い　　⑥　臭いがあり不快　　⑦　袋が小さい（１０ℓ以上の袋が欲しい）
⑧　総じて一般的な袋より良い　　⑨　総じて一般的な袋より悪い　⑩　あまり変わらない
⑪　その他（　　）

（3）　生分解性生ごみ袋は、これまでの生ごみ専用バケツによる運搬と比べてどのように感じましたか。あてはまる項目に○を付け、理由（良い点、悪い点など）も記入してください。

①　バケツのほうが運びやすい　　②　ごみ袋のほうが運びやすい　　③　変わらない
理由：

1

（４） これまでに、生分解性生ごみ袋の不具合はありましたか（液体が漏れた、すぐに破れた、穴が開いていたなど）。もしあればどのような不具合だったか記述してください。

（５） 生分解性生ごみ袋の使い勝手について、ご意見、ご感想等を自由に記述してください。

３ 生ごみの出し方等について

（１） 家庭で出た生ごみは、すべて京北運動公園に持っていきましたか。あてはまる項目に○を付けてください。

① 全て持っていった　② ほとんど持っていった　③ 少しだけ持っていった

（２） （１）で②、③と答えた方に質問です。京北運動公園に持っていかなかった生ごみはどこに出しましたか。また、京北運動公園に持っていかなかった理由は何ですか。

京北運動公園以外の搬出場所：（　　）
持っていかなかった理由　：（　　）

（３） 生分解性生ごみ袋での生ごみの出し方についてお伺いします。あてはまる項目に○を付けてください。

① 生ごみ専用バケツは使わず、生分解性生ごみ袋に生ごみを直接入れた。
② 生ごみ専用バケツは使わず、生分解性生ごみ袋に生ごみを直接入れ、さらにそれより大きな生分解性生ごみ袋に入れた。
③ 生ごみ専用バケツに直接生ごみを入れ、生分解性生ごみ袋に移し替えた。
④ 生ごみ専用バケツに生分解性生ごみ袋をあらかじめセットし、その中に生ごみを直接入れた。
⑤ 生分解性生ごみ袋に生ごみを直接入れた後、そのごみ袋を生ごみ専用バケツに入れた。
⑥ 生分解性生ごみ袋に生ごみを直接入れ、そのごみ袋を、生分解性生ごみ袋をセットした生ごみ専用バケツに入れた。
⑦ その他（　　）

※ 説明が難しければご自宅の状況を写真に撮って添付するか、直接見せていただいても構いません。

裏面あり

（4） 生ごみの排出頻度（京北運動公園に持っていく頻度）はどのくらいでしたか。あてはまる項目に○を付けてください。

① ほぼ毎日　② 2～3日に1回　③1週間に1回
④ その他（　　）

（5） 生ごみ専用バケツから生分解性生ごみ袋に変えたことで、生ごみの量は変わりましたか。あてはまる項目に○を付けてください。

① 生分解性生ごみ袋になって、運搬する生ごみ量が増えた
② 生分解性生ごみ袋になって、運搬する生ごみ量が減った
③ あまり変わらない
理由：

（6） 京北運動公園までの運搬方法についてお伺いします。あてはまる項目に○を付けてください。

① 生ごみ専用バケツに生ごみ袋を入れて運んだ
② 別の容器（生ごみ専用バケツ以外）に生ごみ袋を入れて運んだ
③ 生ごみ専用バケツや別の容器を使わず、生ごみ袋をそのまま運んだ
④ その他（　　）

（7） 京北運動公園までの交通手段についてお伺いします。あてはまる項目に○を付けてください。
「①自家用車で運んだ」を選んだ方は、車両の種類も教えてください。

① 自家用車で運んだ（軽自動車 ・ 普通車 ・ 軽トラック ・ その他（　　））
② 自転車で運んだ
③ 徒歩で運んだ
④ その他（　　）

4　その他、ご意見・ご感想

（1）　本実証実験等に関するご意見、ご感想があれば自由に記述してください。

お問い合わせ

実施主体：公益財団法人京都高度技術研究所
実施協力：株式会社エックス都市研究所
株式会社カネカ
京都市 環境政策局 循環型社会推進部 資源循環推進課
問合せ先：公益財団法人京都高度技術研究所　未来プロジェクト推進室　長田
電話：075-366-5331　FAX：075-325-3024
京都市環境政策局循環型社会推進部　資源循環推進課　岡本，増田
電話：075-213-4930　FAX：075-213-0453
緊急連絡先：株式会社エックス都市研究所　青野　電話：070-6563-9590
公益財団法人京都高度技術研究所　長田　電話：090-3082-6074

2.2 第２回アンケート調査票

生分解性生ごみ袋を用いた生ごみ回収実証実験

アンケート（2回目）

この度は、生分解性生ごみ袋（微生物により分解されるごみ袋）を用いた生ごみ回収実証実験にご協力いただき、誠にありがとうございます。

お配りした生ごみ袋の使い方、使い勝手、生ごみの出し方等に関する動向調査のためアンケートを実施致します。今回の実証実験のうち、**９月 28 日から現在までの**状況に対してのアンケートです。ご協力くださいますと幸いです。

締め切り：令和３年 11 月 12 日（金）

提出場所：京北運動公園内（生ごみ計量スペース横の回収ボックスに入れてください。）

注意　今回のアンケートは、９月 28 日に生ごみ袋を追加配布して以降の状況をお尋ねするものです。１回目のアンケート（９月末に実施）からの変化を見るため、以前ご回答された方も、９月 28 日から本日までの印象や動向について改めてご回答をお願いします。

１　ご家族について

（１）　ご家族（同居人数）は何人ですか。あてはまる項目に○を付けてください。

①　独居　　②　２人　　③　３人　　④　４人　　⑤　それ以上（　　人）

２　生分解性生ごみ袋の使い勝手について

（１）　９月に追加配布した生分解性生ごみ袋を使用しましたか。該当する方に○を付けてください。

①　使用した　　②　使用していない

（２）　今月、よく使った袋のサイズはどれですか。あてはまる項目に○を付けてください。

①　小袋（２ℓ）　　②　中袋（５ℓ）　　③　大袋（１０ℓ）　　④まんべんなく使う

（３）　今月、生分解性生ごみ袋について、一般的なごみ袋やレジ袋と比べてどのように感じていますか。あてはまる項目すべてに○を付けてください（複数回答可）。

①　破れやすい　　②　漏れやすい　　③持ち手の強度が弱い　　④　手触りがいい
⑤　手触りが悪い　　⑥　臭いがあり不快　　⑦　袋が小さい（１０ℓ以上の袋が欲しい）
⑧　総じて一般的な袋より良い　　⑨　総じて一般的な袋より悪い　⑩　あまり変わらない
⑫　その他（　　）

1

（４）　今月、生分解性生ごみ袋と生ごみ専用バケツによる運搬とを比べてどのように感じていますか。あてはまる項目に〇を付け、理由（良い点、悪い点など）も記入してください。

①　バケツのほうが運びやすい　　②　ごみ袋のほうが運びやすい　　③　変わらない

理由：

（５）　（１）で「①　使用した」と答えた方へお伺いします。９月に追加配布した生分解性生ごみ袋は、最初にお配りした袋と比べてどのように感じましたか。あてはまる項目すべてに〇を付けてください（複数回答可）。

①　破れやすくなった　　②　破れにくくなった　　③　漏れやすくなった
④　漏れにくくなった　　⑤　持ち手の強度が弱くなった　　⑥　持ち手の強度が強くなった
⑦　手触りが良くなった　　⑧　手触りが悪くなった　　⑨　臭いが良くなった
⑩　臭いが悪くなった　　⑪　変化を感じられなかった
⑫　その他（　　）

（６）　今月、生分解性生ごみ袋の不具合はありましたか（液体が漏れた、すぐに破れた、穴が開いていたなど）。もしあればどのような不具合だったか記述してください。

（７）　今月の生分解性生ごみ袋の使い勝手について、ご意見・ご感想等を自由に記述してください。

３　生ごみの出し方等について

（１）　今月、家庭で出た生ごみは、すべて京北運動公園に持っていきましたか。あてはまる項目に〇を付けてください。

①　全て持っていった　　②　ほとんど持っていった　　③　少しだけ持っていった

（２）　（１）で②、③と答えた方に質問です。京北運動公園に持っていかなかった生ごみはどこに出しましたか。また、京北運動公園に持っていかなかった理由は何ですか。

京北運動公園以外の搬出場所：（　　）
持っていかなかった理由　　：（　　）

裏面あり

（３） 今月、生分解性生ごみ袋での生ごみはどの様に集めていましたか。あてはまる項目に〇を付けてください。

① 生ごみ専用バケツは使わず、生分解性生ごみ袋に生ごみを直接入れた。
② 生ごみ専用バケツは使わず、生分解性生ごみ袋に生ごみを直接入れ、さらにそれより大きな生分解性生ごみ袋に入れた。
③ 生ごみ専用バケツに直接生ごみを入れ、生分解性生ごみ袋に移し替えた。
④ 生ごみ専用バケツに生分解性生ごみ袋をあらかじめセットし、その中に生ごみを直接入れた。
⑤ 生分解性生ごみ袋に生ごみを直接入れた後、そのごみ袋を生ごみ専用バケツに入れた。
⑥ 生分解性生ごみ袋に生ごみを直接入れ、そのごみ袋を、生分解性生ごみ袋をセットした生ごみ専用バケツに入れた。
⑦ その他（ ）

※ 説明が難しければご自宅の状況を写真に撮って添付するか、直接見せていただいても構いません。

（４） 今月、生ごみの排出頻度（京北運動公園に持っていく頻度）はどのくらいでしたか。あてはまる項目に〇を付けてください。

① ほぼ毎日　② ２～３日に１回　③１週間に１回
④ その他（ ）

（５） 今月、生ごみ専用バケツから生分解性生ごみ袋に変えたことで、生ごみの量は変わりましたか。あてはまる項目に〇を付けてください。

① 生分解性生ごみ袋になって、運搬する生ごみ量が増えた
② 生分解性生ごみ袋になって、運搬する生ごみ量が減った
③ あまり変わらない

理由：

（６） 京北運動公園までの運搬方法についてお伺いします。あてはまる項目に〇を付けてください。

① 生ごみ専用バケツに生ごみ袋を入れて運んだ
② 別の容器（生ごみ専用バケツ以外）に生ごみ袋を入れて運んだ
③ 生ごみ専用バケツや別の容器を使わず、生ごみ袋をそのまま運んだ
④ その他（ ）

（7） 京北運動公園までの交通手段についてお伺いします。あてはまる項目に○を付けてください。
「①自家用車で運んだ」を選んだ方は、車両の種類も教えてください。

① 自家用車で運んだ（軽自動車 ・ 普通車 ・ 軽トラック ・ その他（ ））
② 自転車で運んだ
③ 徒歩で運んだ
④ その他（ ）

4 その他、ご意見・ご感想

（1） 本実証実験等に関するご意見、ご感想があれば自由に記述してください。特に、前回アンケート時点から取り組み方や考え方の変化があれば記述してください。

お問い合わせ

実施主体：公益財団法人京都高度技術研究所
実施協力：株式会社エックス都市研究所
株式会社カネカ
京都市 環境政策局 循環型社会推進部 資源循環推進課
問合せ先：公益財団法人京都高度技術研究所 未来プロジェクト推進室 長田
電話：075-366-5331 FAX：075-325-3024
京都市環境政策局循環型社会推進部 資源循環推進課 岡本，増田
電話：075-213-4930 FAX：075-213-0453
緊急連絡先：株式会社エックス都市研究所 青野 電話：070-6563-9590
公益財団法人京都高度技術研究所 長田 電話：090-3082-6074

2.3 第３回アンケート調査票

生分解性生ごみ袋を用いた生ごみ回収実証実験

アンケート（最終）

この度は、8 月中旬より実施した生分解性生ごみ袋（微生物により分解されるごみ袋）を用いた生ごみ回収実証実験に長期間ご協力いただき、誠にありがとうございました。

お配りした生ごみ袋の使い方、使い勝手、生ごみの出し方等に関する動向調査のため最終アンケートを実施致します。今回の実証実験のうち、**11 月１日から現在まで**の状況に対してのアンケートですので、ご協力くださいますと幸いです。

締め切り：令和３年 12 月 14 日（火）

提出場所：京北運動公園内（生ごみ計量スペース横の回収ボックスに入れてください。）

注意　今回のアンケートは、11 月１日に生ごみ袋を追加配布して以降の状況をお尋ねするものです。２回目のアンケート（11 月１日に実施）からの変化を見るため、以前ご回答された方も、11 月１日から本日までの印象や動向について改めてご回答をお願いします。

1　ご家族について

（１）　ご家族（同居人数）は何人ですか。あてはまる項目に〇を付けてください。

①　独居　　②　２人　　③　３人　　④　４人　　⑤　それ以上（　　人）

2　生分解性生ごみ袋の使い勝手について

（１）　今月、追加配布した生分解性生ごみ袋を使用しましたか。該当する方に〇を付けてください。

①　使用した　　②　使用していない

（２）　今月、よく使った袋のサイズはどれですか。あてはまる項目に〇を付けてください。

①　小袋（２ℓ）　　②　中袋（５ℓ）　　③　大袋（１０ℓ）　　④まんべんなく使う

（３）　今月、生分解性生ごみ袋について、一般的なごみ袋やレジ袋と比べてどのように感じていますか。あてはまる項目すべてに〇を付けてください（複数回答可）。

①　破れやすい　　②　漏れやすい　　③持ち手の強度が弱い　　④　手触りがいい
⑤　手触りが悪い　　⑥　臭いがあり不快　　⑦　袋が小さい（１０ℓ以上の袋が欲しい）
⑧　総じて一般的な袋より良い　　⑨　総じて一般的な袋より悪い　⑩　あまり変わらない
⑫　その他（　　）

1

（４）　今月、生分解性生ごみ袋と生ごみ専用バケツによる運搬とを比べてどのように感じていますか。あてはまる項目に〇を付け、理由（良い点、悪い点など）も記入してください。

①　バケツのほうが運びやすい　　②　ごみ袋のほうが運びやすい　　③　変わらない

理由：

（５）　（１）で「①　使用した」と答えた方へお伺いします。今月追加配布した生分解性生ごみ袋は、以前にお配りした袋と比べてどのように感じましたか。あてはまる項目すべてに〇を付けてください（複数回答可）。

①　破れやすくなった　　②　破れにくくなった　　③　漏れやすくなった
④　漏れにくくなった　　⑤　持ち手の強度が弱くなった　　⑥　持ち手の強度が強くなった
⑦　手触りが良くなった　　⑧　手触りが悪くなった　　⑨　臭いが良くなった
⑩　臭いが悪くなった　　⑪　変化を感じられなかった
⑫　その他（　　）

（６）　今月、生分解性生ごみ袋の不具合はありましたか（液体が漏れた、すぐに破れた、穴が開いていたなど）。もしあればどのような不具合だったか記述してください。

（７）　今月の生分解性生ごみ袋の使い勝手について、ご意見・ご感想等を自由に記述してください。

３　生ごみの出し方等について

（１）　今月、家庭で出た生ごみは、すべて京北運動公園に持っていきましたか。あてはまる項目に〇を付けてください。

①　全て持っていった　　②　ほとんど持っていった　　③　少しだけ持っていった

（２）　（１）で②、③と答えた方に質問です。京北運動公園に持っていかなかった生ごみはどこに出しましたか。また、京北運動公園に持っていかなかった理由は何ですか。

京北運動公園以外の搬出場所：（　　）
持っていかなかった理由　　：（　　）

裏面あり

（3） 今月、生分解性生ごみ袋での生ごみはどの様に集めていましたか。あてはまる項目に〇を付けてください。

① 生ごみ専用バケツは使わず、生分解性生ごみ袋に生ごみを直接入れた。
② 生ごみ専用バケツは使わず、生分解性生ごみ袋に生ごみを直接入れ、さらにそれより大きな生分解性生ごみ袋に入れた。
③ 生ごみ専用バケツに直接生ごみを入れ、生分解性生ごみ袋に移し替えた。
④ 生ごみ専用バケツに生分解性生ごみ袋をあらかじめセットし、その中に生ごみを直接入れた。
⑤ 生分解性生ごみ袋に生ごみを直接入れた後、そのごみ袋を生ごみ専用バケツに入れた。
⑥ 生分解性生ごみ袋に生ごみを直接入れ、そのごみ袋を、生分解性生ごみ袋をセットした生ごみ専用バケツに入れた。
⑦ その他（ ）

※ 説明が難しければご自宅の状況を写真に撮って添付するか、直接見せていただいても構いません。

（4） 今月、生ごみの排出頻度（京北運動公園に持っていく頻度）はどのくらいでしたか。あてはまる項目に〇を付けてください。

① ほぼ毎日　② 2～3日に1回　③1週間に1回
④ その他（ ）

（5） 今月、生ごみ専用バケツから生分解性生ごみ袋に変えたことで、生ごみの量は変わりましたか。あてはまる項目に〇を付けてください。

① 生分解性生ごみ袋になって、運搬する生ごみ量が増えた
② 生分解性生ごみ袋になって、運搬する生ごみ量が減った
③ あまり変わらない

理由：

（6） 京北運動公園までの運搬方法についてお伺いします。あてはまる項目に〇を付けてください。

① 生ごみ専用バケツに生ごみ袋を入れて運んだ
② 別の容器（生ごみ専用バケツ以外）に生ごみ袋を入れて運んだ
③ 生ごみ専用バケツや別の容器を使わず、生ごみ袋をそのまま運んだ
④ その他（ ）

（7） 京北運動公園までの交通手段についてお伺いします。あてはまる項目に○を付けてください。
「①自家用車で運んだ」を選んだ方は、車両の種類も教えてください。

① 自家用車で運んだ（軽自動車 ・ 普通車 ・ 軽トラック ・ その他（ ））
② 自転車で運んだ
③ 徒歩で運んだ
④ その他（ ）

4 その他、ご意見・ご感想

（1） 本実証実験等に関するご意見、ご感想があれば自由に記述してください。特に、前回アンケート時点から取り組み方や考え方の変化があれば記述してください。

本実証実験は 11 月末を持って一旦終了となります。
12 月以降は以前のとおり堆肥化装置に生ごみを投入してくださいますようお願い致します。

お問い合わせ

実施主体：公益財団法人京都高度技術研究所
実施協力：株式会社エックス都市研究所
株式会社カネカ
京都市 環境政策局 循環型社会推進部 資源循環推進課
問合せ先：公益財団法人京都高度技術研究所 未来プロジェクト推進室 長田
電話：075-366-5331 FAX：075-325-3024
京都市環境政策局循環型社会推進部 資源循環推進課 岡本，増田
電話：075-213-4930 FAX：075-213-0453
緊急連絡先：株式会社エックス都市研究所 青野 電話：070-6563-9590
公益財団法人京都高度技術研究所 長田 電話：090-3082-6074

3．成果（特許、論文、学会発表等）

3.1 特許権

出願日	出願番号	発明の名称	出願人
令和 2 年 10 月 12 日	特願 2020-171770	ポリ（３－ヒドロキシアルカノエート）の製造方法	（株）カネカ
令和 3 年 9 月 30 日	特願 2021-160749	微生物の培養方法、形質転換微生物、及びポリ（３－ヒドロキシアルカノエート）の製造方法	（株）カネカ

3.2 学会発表

発表日	学会	発表番号	タイトル	発表者
10 月 25 日	第 32 回廃棄節資源循環学会研究発表会（岡山コンベンションセンター）	B5-2-O	PHBH 製ごみ収集袋を用いた資源循環システムのライフサイクル分析	京都大学 矢野順也

3.3 その他

種類	日付	内容	発表者等
講師	4 月 26 日（月）	東京大学大学院新領域創成科学研究科「海洋学際教育プログラム」講義	（株）カネカ　福田竜司
講師	6 月 25 日（水）	「【第 1 回［関西］サステナブル マテリアル展】 専門セミナー」（主催：リード エグジビション ジャパン(株)）	（株）カネカ　福田竜司
講師	6 月 30 日（水）	「海洋プラスチックに関する意見交換会」（主催 : 和歌山県環境生活部環境政策局循環型社会推進課）	（株）カネカ　福田竜司
講師	7 月 13 日（火）	「第 111 回　ニューフロンティア材料部会　講演会」（主催：一般社団法人大阪工研協会）	（株）カネカ　福田竜司
講師	8 月 6 日（金）	「環境循環型社会に向けた製造業の新たな取り組み【Live 配信・WEB セミナー】」（主催：（株）AndTech）	（株）カネカ　福田竜司
講師	8 月 19 日（木）	「バイオプラスチック学習会」Zoom によるオンライン開催（主催： NPO 法人コンシューマーズ京都）	（株）カネカ　福田竜司
講師	9 月 10 日（金）	講演会「脱炭素社会実現に向けた化学技術の最新動向」（主催：日本化学会関東支部）	（株）カネカ　福田竜司
講師	9 月 17 日（金）	「イノベーションを牽引する創造型企業の経営幹部による朝食交流会」（主催：全日本科学技術協会）	（株）カネカ　福田竜司
講師	12 月 10 日（金）	「サステナブル マテリアル展東京展】セミナー」（主催 : RX Japan（株））	（株）カネカ　福田竜司
講師	1 月 13 日（木）	「日本材料学会高分子材料セミナー」（主催 : 日本材料学会）	（株）カネカ　福田竜司
講師	3 月 26 日（土）	ビタミン･バイオファクター協会市民公開講演会（主催 : 公益社団法人ビタミン・バイオファクター協会）	（株）カネカ　福田竜司
講師	12 月 21 日（火）	「生分解性プラスチック」 WEB 講座（主催：（株）AndTech）	（株）カネカ　福田竜司
講師	3 月 4 日（金）	関西コンバーティングものづくり研究会（KCM）定例会（主催：関西コンバーティングものづくり研究会）	（株）カネカ　福田竜司
スピーカー	12 月 22 日（水）	日本の部品素材分野の国際競争力強化ラウンドテーブル（主催：ジェトロ）	（株）カネカ　藤田かおる
インタビュー記事	掲載日未定	朝日新聞特集コーナー「SDGs で変える」	（株）カネカ　田中社長

４．メディア等掲載実績

４．１ ASTEM NEWS No.84

循環型社会システムに向けた研究と政策展開による持続社会の形成

酒井　伸一　（公財）京都高度技術研究所　理事・副所長／京都大学名誉教授／大阪工業大学客員教授

Profile

専門	環境工学
研究分野	循環型社会形成に関するシステム研究、廃棄物の循環処理方策、残留性化学物質の生成と制御
主な委員等（※2022（令和4）年2月現在）	・中央環境審議会委員、循環型社会部会長（環境省） ・バイオマス産業都市選定委員会委員（農林水産省） ・京都府審議会委員、廃棄物・循環型社会形成部会長（京都府） ・京都市廃棄物減量等推進審議会会長（京都市） ・温室効果ガス排出量算定方法検討会委員（環境省）

海洋環境に甚大な影響を与えるプラスチック問題が顕在化

プラスチック素材はこれまで多岐にわたる製品、産業に用いられてきました。しかし現代、この素材の悪影響が指摘されるようになり、その取扱いが見直されつつあります。背景にある問題の一つは、海洋プラスチックごみです。

国際社会でプラスチックごみの問題が顕著になってきたのは、10年ほど前のことです。日本でも、以前から各地の海岸に流れ着いた大量のプラスチック製品の漂着ごみが問題になっていました。国際的な関心の高まりを受け、日本では2018(平成30)年頃から本格的な議論が始まりました。

海洋プラスチックごみは、海の生態系を含めた海洋環境に甚大な影響を及ぼします。数年前にウミガメの鼻にプラスチックストローが詰まった映像が報道され、世界に衝撃を与えましたが、その他にもクジラの胃から大量のビニール袋が発見されるなど、海洋生物への被害は後を絶ちません。海だけでなく陸上でも、奈良公園に生息する鹿の胃から軟質のプラスチック素材が見つかるなど、多様な生物に被害が及んでいます。

プラスチックのやっかいなところは、一度捨てられると、ほとんど分解されず、いつまでも残存することです。海中に長期間放置され、細かく砕けたマイクロプラスチックは回収することもできず、生態系への影響が懸念されています。その他、船舶航行を妨げたり、海洋汚染が観光や漁業、あるいは沿岸地域の居住環境に悪影響を及ぼすなど、我々人間にも被害をもたらします。

私自身が廃プラスチック問題を改めて強く意識したのは、2018(平成30)年のことです。テレビの報道番組で、偶然、インドで撮影された、川を埋め尽くした膨大なプラスチックごみの報道写真を目にして、衝撃を受けました。これが当時引き受けていた、環境省中央環境審議会の循環型社会部会での政策議論に本格的に参加するきっかけになりました。

AFP＝時事

2018年5月にインドのラジャスタン州アジュメールで撮影された、プラスチックごみであふれる川の様子。

プラスチックごみの焼却に伴う温室効果ガス排出量が問題

もう一つ、プラスチックごみの問題は、**温室効果ガス**対策との関わりにおいても極めて重要です。国連気候変動に関する政府間パネル（IPCC：Intergovernmental Panel on Climate Change）の2021(令和３)年の報告によると、地球の温度上昇は、温室効果ガスの累積排出量にほぼ比例して進んでおり、一度ある程度上がってしまったら、再び温度を下げることは困難だといわれています。2021(令和３)年５月に開かれた主要７カ国（G7）の気候・環境相会合では、2015(平成27)年のパリ協定を受け、産業革命前に比べた気温上昇を1.5℃以下に抑えることで各国が合意しました。

この目標を達成するためには、CO_2排出量の猶予はあとどのくらいあるのか。最近、目標達成までに排出できるCO_2の総量として「**炭素予算（カーボンバジェット）**」という指標が重視されるようになっています。これによると全世界の「炭素予算」は、2020(令和２)年から数えて10年分しか残っていないとの見通しが示されています。しかし日本には、さらに厳しい数値が突きつけられています。日本でのCO_2の年間排出量は、約11億トン。気温上昇1.5℃以下の目標を達成す

るための炭素予算は、わずか6-7年分しかないと推定されています。加えて2020(令和2)年に菅前首相は、2050年までに**カーボンニュートラル**(CO_2の排出実質ゼロ)を目指すことを宣言しました。これを達成するためには、今後30年間のCO_2総排出量を160億トンに抑えなければならない計算になり、いっそう大幅な削減が必要になります。これほど切迫した状況だということは、社会にあまり認識されていません。

こうした温室効果ガスの排出削減とプラスチックは、実は密接に関わり合っています。その一つが、廃棄物の焼却に伴う温室効果ガスの問題です。日本では、一般家庭や産業分野から排出される廃棄物の約80%は焼却処分されており、廃棄物焼却に伴う温室効果ガスの排出量は、年間約3000万トンCO_2(2019年度)にも及びます。そのうちの50%にあたる約1470万トンが、プラスチック類から排出されているのです。その意味では、廃棄物の焼却に伴う温室効果ガスの排出を削減する上で、プラスチックごみの削減は極めて重要な課題といえます。

プラスチック資源循環に向けさまざまな政策を実行

プラスチックによる海洋汚染や温室効果ガスの排出を防ぐとともに、資源を有効利用するために、この間、政府においても「プラスチック資源循環」を目指したさまざまな政策が策定、実行されてきました。

まず2019(令和元)年、環境省や経済産業省など9つの省庁が合同で、「**プラスチック資源循環戦略**」を策定しました。この戦略に沿って、「2030年までにワンウェイプラスチックを累積25%排出抑制」や「2025年までにリユース・リサイクル可能なデザインに」、「2030年までにバイオマスプラスチックを約200万トン導入」など、マイルストーンとして6つの野心的な数値目標的な数値が掲げられています。

この戦略に基づいて、これまでにさまざまな施策が打ち出されてきました。2020(令和2)年7月に始まった「レジ袋有料化」もその一つです。その他、市町村での分別収集・再商品化の促進や、プラスチックを使用した製品廃棄物の分別回収、プラスチック製品の自主回収・再資源化など、リサイクルの試みや環境に配慮した素材への転換を促す製品設計などに向けて、2021(令和3)年には「プラスチックに係る資源循環の促進等に関する法律」が交付され、2022(令和4)年4月に施行される予定です。

「プラスチック資源循環戦略」における6つのマイルストーンの中でもとりわけ注目したいのが、「より持続可能性の高いバイオマスプラスチックへの転換」です。2021(令和3)年1月、環境省と経済産業省、農林水産省、文部科学省が合同で「**バイオプラスチック導入ロードマップ**」を発表。マイルストーンで掲げられた「2030年までにバイオマスプラスチック約200万トン導入」を実現するための道筋が、具体的な取組とともに示されました。

プラスチック資源循環に向けた戦略マイルストーンと循環促進法の要点

プラスチック素材の使用と廃棄の経緯　1900年代初頭のプラスチック素材開発、世界の生産量は1950年の200万トンから2015年の3.8億トンへ増加、うちリサイクルは18%のみで58%は埋立か投棄

課題

- 海洋プラスチック問題
  - 海洋生態系や陸上生物への影響
  - 漁業、観光などへの社会的影響
- 資源・廃棄物問題
  - 枯渇性資源の利用
  - アジア諸国の輸入規制
- 温室効果ガス問題
  - 焼却によりCO_2発生
  - GHG負荷は2050年には15%

施策　(プラスチック資源循環戦略からプラスチック資源循環促進法まで) 2019~2021年

1. リデュース・リユース
   - レジ袋有料化
     不必要な使用・廃棄を抑制、消費者のライフスタイルを変革
   - 特定プラスチック使用製品指定
     その他のワンウェイプラスチックのリデュース
2. リサイクル
   - 市町村の分別収集・再商品化促進
     容器包装に加えてプラスチック使用製品廃棄物の分別回収
   - 製造・販売事業者による製品の自主回収・再資源化
     使用抑制を果たした後の本格的な素材再使用を支える工程
3. 素材転換と製品設計
   - 環境配慮設計に関する指針の策定
   - 認定製品の国の率先調達(グリーン購入上の配慮)
   - バイオプラスチック導入ロードマップ(2021年1月策定)
4. 海洋プラスチックの回収など
   - マイクロプラスチックの流出抑制
   - 海洋漂着物の回収処理
   - バーゼル条約対応など

目標

プラスチック資源循環戦略マイルストーン

①2030年までにワンウェイプラスチックを累積25%排出抑制
②2025年までにリユース・リサイクル可能なデザインに
③2030年までに容器包装の6割をリユース・リサイクル
④2035年までに使用済プラスチックを100%有効利用
⑤2030年までに再生利用を倍増
⑥2030年までにバイオマスプラスチックを約200万トン導入

大阪ブルー・オーシャン・ビジョン
- 2050年に新たな汚染ゼロ

パリ協定
- 今世紀後半に世界全体でのカーボンニュートラル

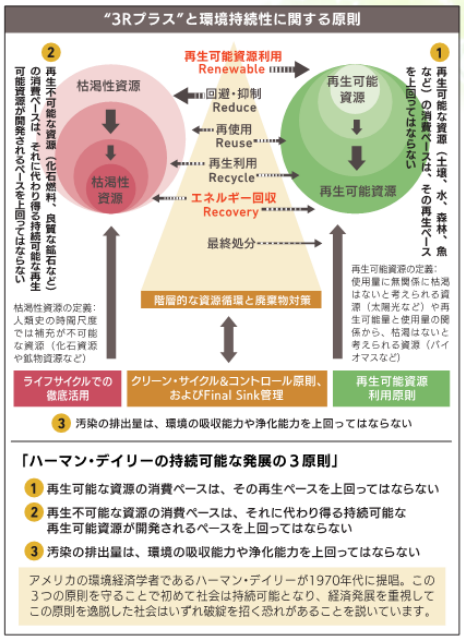
重要なのはライフサイクルを通じ「3Rプラス」で循環フローを描くこと

これまでプラスチックの原料は、ほとんどすべて原油や天然ガス、石炭といった化石系資源に依存してきました。化石系プラスチック素材は、PE、PET、PPをはじめ多岐にわたります。さらにそのプラスチック素材を使った化石系プラスチック製品も容器・包装から家電製品、自動車部品や建築資材まで、ありとあらゆる分野に及びます。現在、化石系資源に代わって、糖質やデンプン、油糧など植物由来の再生可能な原料への置き換えが進んでいますが、そこには数多くの技術課題が残っており、一朝一夕には解決できません。

加えてプラスチック素材の削減を困難にしているのは、それが自動車や建築材料といった長寿命の製品にも使われていることです。たとえ今後、2050年までに化石系プラスチックの製造量をゼロにできたとしても、いますでに存在するプラスチック製品をいかに廃棄するかという問題は依然として残ります。つまりプラスチック素材の原料の調達から製造・流通、使用・消費を経て使い終わった後の廃棄を減らすことも含めて、循環フローを描く必要があります。

そこで登場したのが、**"3R"、リデュース**（Reduce：**回避・抑制**）、**リユース**（Reuse：**再使用**）、**リサイクル**（Recycle：**再生利用**）という考え方です。世界的にごみ問題が顕在化したのは今から30年ほど前のことでした。日本でもごみの不法投棄が問題になり、その対策を考えられる中で"3R"の原則が打ち立てられました。2004（平成16）年に開催されたG8サミットで、当時の小泉首相が3Rを通じて循環型社会の構築を目指す「3Rイニシアティブ」を提案。それが今日まで国際社会に根づいてきました。

廃棄物処理においては、リデュースを最優先に、リユース、リサイクルの順に段階的に取り組むことが望ましいとされています。近年は、化石資源の保全と有効利活用も考慮に入れ、**リニューアブル**（Renewable：**再生可能資源利用**）の視点も求められるようになり、３つの段階的廃棄物対策にリニューアブルを追加した「**3Rプラス**」原則が唱えられています。化石資源は一度使ってしまうと、人類の時間軸では二度と補完できない枯渇性資源です。これを太陽光やバイオマスといった再生可能資源に置き換えるとともに、"3R"を実践することで、徐々に廃棄物量を減らしていくことが重要です。私はこの「プラス」にリニューアブルだけでなく、有効なエネルギー回収や海洋からのプラスチック回収を含めて「リカバリー（Recovery）」の観点も必要であると提言しています。



企業と自治体を結びつけ資源循環システムの構築に挑む

ASTEMは環境省の委託を受け、2019（令和元）年から３年にわたって「**PHA系バイオプラスチックのライフサイクル実証事業**」に取り組んできました。化石系プラスチックを生分解性のバイオプラスチックに置き換えるとともに、使用後のエネルギー回収までを組み込み、ライフサイクルを通じた資源循環システムの構築を目指しています。この事業は、政府の取組と足並みを揃え、まさに「3Rプラス」原則を通じた資源循環を可能にするチャレンジングな試みです。

それに加えて本事業の特長は、ASTEMを介して民間事業者の技術と自治体の政策をつなげ、官民一体で進めるところにあります。企業の技術開発力なくして持続的な資源循環を実現することは不可能です。ASTEMには、これまで数多くの企業と関係を築き、事業創成や技術開発を後押ししてきた実績があります。こうしたネットワークやコーディネート力を活かすことも重要な役割だと認識しています。

資源循環の問題はプラスチックだけに留まりません。食品などの有機性資源や、道路や建築物に用いられている土石系資源、さらに多くの製品に使われている金属系資源も、プラスチック同様「3Rプラス」原則に則って利活用していくことが求められています。引き続き、環境省や京都市、民間事業者等と協力しながら、多様な資源循環の問題の解決にも挑戦していきたいと考えています。

1 持続可能な循環型社会の実現を目指す

PHA系バイオプラスチックのライフサイクル実証事業

（環境省　脱炭素社会を支えるプラスチック等資源循環システム構築実証事業）

石油等の化石資源を原料としたプラスチックを、より持続可能性が高いバイオプラスチックへ代替することを目指し、環境省の「脱炭素社会を支えるプラスチック等資源循環システム構築実証事業」の受託事業として、「PHA系バイオプラスチックのライフサイクル実証事業」に取り組んできました。

■ 再生可能な資源を原料としたバイオプラスチックの活用によって、新しい資源循環システムを構築する

CO_2排出量の増加、廃プラスチックによる海洋汚染など、世界が直面する環境・資源問題を解決し、脱炭素社会・循環型社会の実現を目指す「プラスチック資源循環戦略」（2019（令和元）年５月策定）に基づき、枯渇していく石油等の化石資源を主な原料としてきた従来のプラスチック製品について、循環資源を原料とした再生可能なプラスチック製品への代替が推進※されています。

ASTEMでは、2019（令和元）年度から３年間にわたって、京都市や京都大学、民間企業と連携し「PHA系バイオプラスチックのライフサイクル実証事業」を実施しました。本事業は、植物由来の生分解性プラスチック（バイオプラスチック）製の生ごみ袋を活用し、回収した生ごみをバイオガス化することで、エネルギーを回収・利活用する「循環型ごみ処理システム」の構築を目指すものです。

※2021（令和３）年に環境省、経済産業省、農林水産省、文部科学省が合同で策定した「バイオプラスチック導入ロードマップ」では、プラスチック製品メーカーやプラスチック製品を利用する事業者等へ向けて、バイオプラスチックの導入方針と導入に向けた国の施策が示されています。2022（令和４）年４月には、「プラスチックに係る資源循環の促進等に関する法律」が施行される予定です。

従来のプラスチックの課題
- 原料である化石資源は地球上から枯渇していく
- 焼却処分される場合は温室効果ガスが発生する
- ごみとして環境中に残り続けたプラスチックは小さく砕かれて海に流れ込み、海洋プラスチック問題となっている

実証① 植物由来の原料によるバイオプラスチックの製造

使用済み天ぷら油などの廃食油から、微生物の働きを利用した PHA 系の生分解性プラスチックを製造しました。また、中期的に得られる国内産の原料として、油糧作物であるジャトロファ等の栽培について検証しました。

実証② 生分解するごみ袋を活用した生ごみ回収・処理実験

①の生分解性プラスチック製の生ごみ袋で生ごみを回収し、メタン発酵によりバイオガスを生成する実験や検証を行いました。

国産の循環資源として活用することで、地域で取り組めるローカルな資源循環システムを構築

将来的に…… バイオガス化が可能な生ごみ袋で回収した生ごみや、バイオガス化に適した生分解性プラスチック容器等の分別収集によって、都市部及び中山間地域におけるバイオガス化や発電を行い、その電力や発酵残さを地域で活用することが可能な「資源循環システム」として成立させることを目指しています。

実証③ ライフサイクルシステムの効果と有効性を評価

②で得られたバイオガスをエネルギーとして発電に利用するほか、排出された発酵残さ（消化液）を①のジャトロファ等の栽培へ活用するなど、全体の環境負荷低減効果及びコストを定量化し、システム全体での有効性を評価しました。

実施体制
- 代表者：ASTEM
- 共同実施者：㈱カネカ、日立造船㈱
- 協力事業者・自治体：京都大学、京都市、㈱レボインターナショナル、㈱島津テクノリサーチ、㈱KRI、㈱バイオガスラボ、㈱エックス都市研究所、三菱 UFJ リサーチ & コンサルティング㈱

バイオプラスチックとは　バイオマスプラスチックと生分解性プラスチックの総称。

バイオマスプラスチック	原料として植物などの再生可能な有機資源を使用するプラスチック素材。［バイオ PE、バイオ PET 等］
植物由来かつ分解する［PHA※、PLA（ポリ乳酸）等］	※PHA（ポリヒドロキシアルカン酸）は微生物がエネルギー貯蔵物質として体内に蓄積するポリエステルです。生分解性や生体適合性などの特性を持つことから、化石資源を原料としたプラスチックの代替材料として注目を集めています。
生分解性プラスチック	プラスチックとしての機能や物性に加えて、ある一定の条件の下で自然界に豊富に存在する微生物などの働きによって分解し、最終的には二酸化炭素と水にまで変化する性質を持つ。［PBAT、PBS、PETS 等］

※イラスト出典：ハイムーン工房（https://highmoonkobo.net/）

topic 01 廃食油から生分解性プラスチックを製造

生分解性プラスチックは、化石資源を原料としたプラスチックとは異なり、燃やすことなく水と二酸化炭素に分解され、自然界に戻る循環型の資源です。カネカが開発した「カネカ生分解性ポリマーGreen Planet®（PHBH）」（以下、PHBH）はPHAの一種で、微生物が植物油を摂取し、ポリマーとして体内に蓄えたものを取り出した植物由来の材料です。土の中だけではなく、海水の中でも生分解されるのが大きな特長の一つです。PHBHは、主に東南アジア等で生産されたパームオイルを原料として製造されてきましたが、本事業では、より環境負荷を低減するため、使用済みてんぷら油などの廃食油等を原料としてPHBHの改良を行いました。

微生物体内に蓄積されたPHBH
（電子顕微鏡写真）

PHBHのライフサイクル：原料は100%植物由来で、微生物を培養して生産され、微生物によって生分解されます。

画像提供：㈱カネカ

topic 02 生分解性プラスチック製の生ごみ袋への利活用

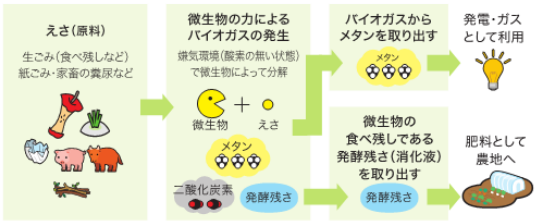
分解する生分解性プラスチックは、バイオガス化用の生ごみ袋などに利活用することが可能です。本事業では、製造した生分解性プラスチック製の生ごみ袋を試作し、京都市内で生ごみの堆肥化事業に従来から参加されている地域住民のご協力を得て、2021（令和３）年９月から３ヵ月間、生分解性プラスチック製の生ごみ袋を使った生ごみ回収の実証実験を行いました。これまでバケツ等で回収してきた生ごみをごみ袋に入れて回収することで、住民の負担軽減や回収作業の効率化等の効果を確認することができました。協力地域住民等のご意見をもとに、強度や形状などにさらなる改良を加えるとともに、量産化に向け、製造技術の確立を進めました。

実証実験で使われた生ごみの回収ボックス

試作した生分解性プラスチックPHBH®製の生ごみ袋

topic 03 微生物の力によって発生するバイオガスの活用

生分解性プラスチック製の生ごみ袋に入った生ごみを微生物の働きにより丸ごと分解し、メタン等の燃えやすい気体を発生させるバイオガス化を検証しました。生ごみや生分解性プラスチックをバイオガス化することで、ごみの焼却量を減らし、さらに発生したバイオガスをガスエンジン発電などに利用するほか、バイオガス化の過程で排出される発酵残さを農地の肥料として活用することを想定しています。日立造船が有する基礎技術を活用し、バイオガス化施設での実証実験を行い、より効率的な分解条件を導き出すための検討を重ねました。



バイオガス化とその利用方法

topic 04 原料となる油糧植物の国内栽培を検証

温室および露地でジャトロファ等の油糧植物を栽培し、効果的かつ経済合理性のある栽培システムを模索しました。バイオガス化で排出される発酵残さを作物の成長促進に活用するなど、油糧植物の栽培システムの構築を目指しました。

ジャトロファ
（別名：ナンヨウアブラギリ）

中南米を原産地とする落葉低木で、種子の油分が石鹸、ロウソクなどの原料として利用されてきました。食用にならず、荒地でも生育可能であることから、食料の供給を圧迫しないバイオ原料として注目されています。

実効性のある資源循環システムを目指して

それぞれの実証の取組を総括し、循環システム全体の環境負荷低減効果など、ライフサイクル全体の有効性評価を行いました。今後は、PHBHを材料として、生ごみ袋以外の用途開発など、本事業で培った技術を用いて新たな展開に取り組むほか、システム全体を最適化し、経済合理性・実効性のある資源循環システムの確立を進めます。将来は、生分解性プラスチック製の生ごみ袋を用いた生ごみの分別収集やバイオガス化を提案するなど、地域で実現する循環システムの社会実装を目指します。

（左から）未来プロジェクト推進室長 井上 博史、副所長 酒井 伸一、プロジェクト推進部 資源循環研究企画担当部長 長田 守弘、脱炭素研究企画担当部長 髙橋 正光