課題番号：1-2205

廃棄プラスチックのバイオリサイクル技術の開発

杉森大助（福島大・共生システム理工）

体系的番号　：JPMEERF20221005
重点課題　　：⑥グローバルな課題の解決に貢献する研究・技術開発（海洋プラスチックごみ問題への対応）
行政ニーズ　：非該当
研究実施期間：2022年度～2024年度

【研究体制】

国立大学法人 福島大学 Fukushima University

サブテーマ1
杉森大助（福島大学・共生システム理工学類・教授）
千葉剛大（　　〃　　・博士研究員）

国立大学法人 岩手大学 IWATE UNIVERSITY

サブテーマ2
山田美和（岩手大学・農学部・教授）

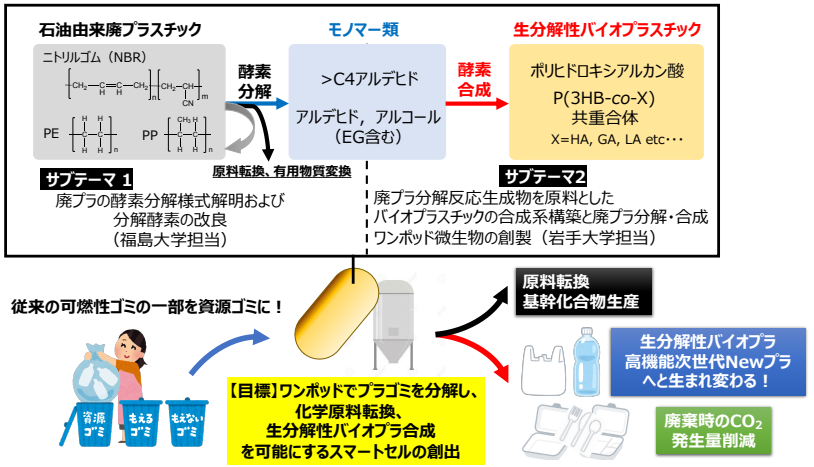
1. 研究背景、研究開発目的及び研究目標

【研究背景】

資源枯渇、地球温暖化、環境汚染の元凶とも言える石油由来プラスチック。現在、使用済みプラスチックの革新的なリサイクル技術およびマイクロプラスチック対策技術の開発が急務の課題となっている。

【研究開発目的】

バイオ法により使用済みプラスチックを高効率分解しつつ、さらにその分解物を原料として生分解性バイオプラスチック等の有用物質を同時に生産する技術開発を行うことを目的とした。



Confidential

1. 研究背景、研究開発目的及び研究目標

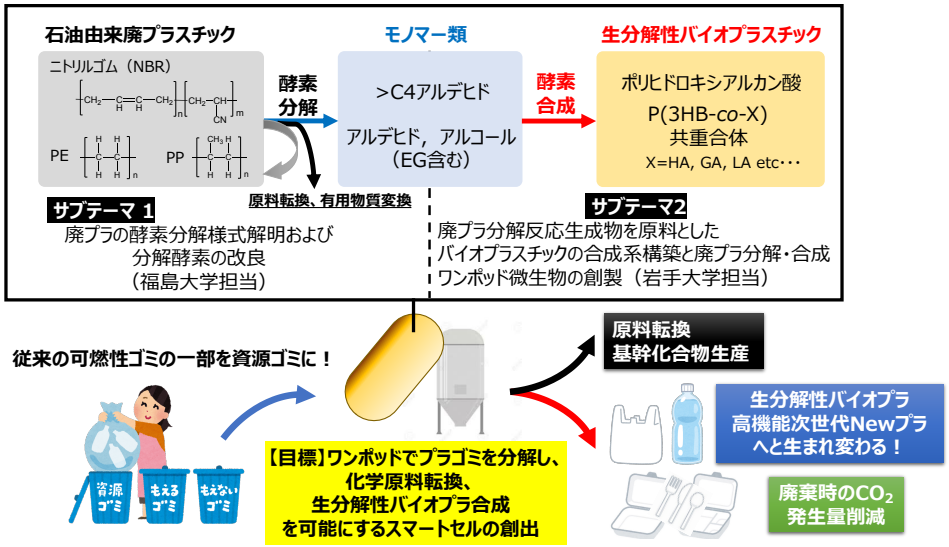
【研究目標（全体目標）】

廃棄プラスチックを原料に酵素分解と人工代謝微生物合成系を利用した有用物質生産技術を確立し、廃棄プラスチック（廃プラ）のバイオリサイクルシステムを開発する。

具体的には、ニトリルゴム（NBR）、ポリプロピレン（PP）、ポリエチレン(PE)の酵素分解メカニズムを明らかにする。さらに、分解酵素遺伝子、分解産物、分解経路を解明、改良し、廃プラ分解速度を増強するとともに、廃プラを原料とした有用物質生産法を確立する。

そのために本研究では、以下について取り組む。

1）廃プラ分解酵素遺伝子の取得、遺伝子改変による分解力の増強
2）廃プラ分解菌を用いた生分解性バイオプラスチック（BDプラ）の直接合成の検討
3）人工代謝経路を導入した遺伝子組換え微生物によるBDプラのワンポット合成法の開発



2. 研究目標の進捗状況
(1)進捗状況に対する自己評価(サブテーマ1)

サブテーマ1:廃棄プラスチックの酵素分解に関する研究(福島大・杉森)

【サブテーマ1の研究目標】

廃棄プラ分解酵素の分解力を飛躍的に増強し、廃棄PP、PE、NBRを高速分解する技術を開発する。当初の分解速度1～10%/d(約50%/55 d)を50%/d以上まで向上させることを目標とする。さらに、酵素分解メカニズム解明を行うとともに有用物質生産の可能性を明らかにする。また、サブテーマ2のBDプラ合成原料として有用性を確認する。

【令和4年度研究計画】

各プラ分解酵素の機能解析、遺伝子取得を行う。酵素分解生成物の有用性を明らかにする。

【令和5年度研究計画】

廃棄プラ分解酵素の遺伝子配置を明らかにし、分解代謝経路を把握する。さらに、サブテーマ2のスマートセルに導入する酵素遺伝子を取得する。また、廃棄プラ分解酵素の改良に着手する。

【令和6年度研究計画】

廃棄プラ分解酵素の改良(AI設計含む)を進め、 分解速度50%/d以上を目指す。同時に、無選別廃プラへの対応、サブテーマ2にフィットした酵素に改変する。

【自己評価】計画以上の進展がある

2. 研究目標の進捗状況
(2)自己評価に対する具体的な理由・根拠と目標達成の見通し(サブテーマ1)

【具体的な理由・根拠】

各プラ分解酵素の機能解析を進め、遺伝子およびその配置を推定した。プラ分解生成物のなかに高付加価値物質が複数種含まれていることを明らかにした。さらに、NBR、PEの表面改質が起こることを発見した。分解菌のなかには、PHA合成能を示す菌株が存在することを明らかにした。廃プラ分解代謝経路の把握を進め、サブテーマ2のスマートセル創製においてキーとなる酵素遺伝子を推定した。

分解酵素
- 遺伝子&配置
- 分解産物
- 表面改質

分解メカニズムを推定
- 代謝経路を推定
- 有用物質生成を確認
- 生分解バイオプラ合成能を確認

分解力向上のために改良すべきターゲット遺伝子を推定
- 有用物質生産に関与する遺伝子を推定

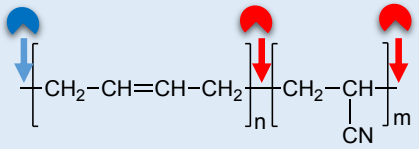
新発見
- NBR表面改質を示唆
- PE同士の強固な接着に成功！

【目標達成の見通し】

「令和5，6年度研究計画」の一部を既に進めることができており、知財確保の可能性も高いことから、全体目標達成の見通しは明るいと考えている。

新産業創出への期待
- サーキュラーエコノミー
- プラ表面改質技術
- プラナノレベル加工
- 酵素/プラ複合材料（分解タイミング制御プラ）創出
- 酵素糊

Confidential



2. 研究目標の進捗状況
NBR分解菌（サブテーマ1）

菌による分解（1週間培養）

分解率：5–11%
分解量：0.3–13 mg

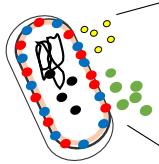
半導体産業
医療、食品関連

廃タイヤ
製造時端材、使用済み廃棄物

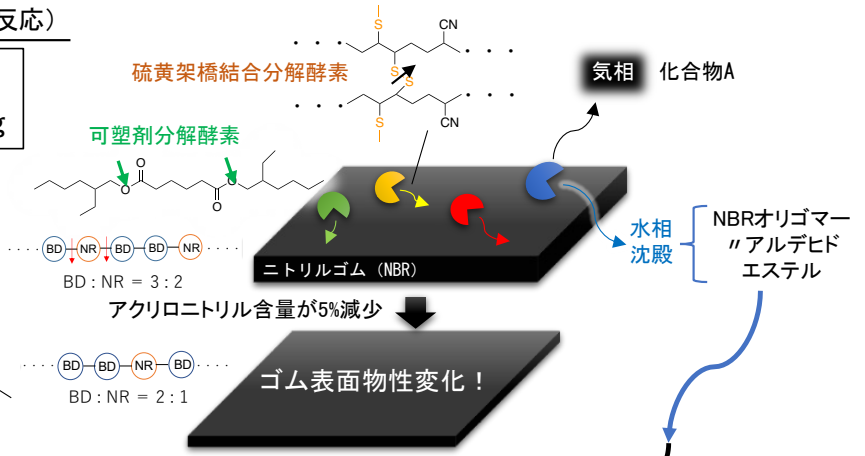
ホース、パッキン類

酵素による分解（24時間反応）

分解率：1–1.7%
分解量：2–5 mg

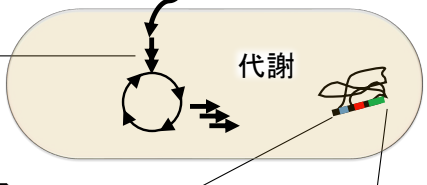


放線菌



- ニトリル化合物
- BDプラ・PHA合成

★ニトリル/アミド変換酵素の発見



生分解性プラスチックPHA合成遺伝子
所持を確認

各種分解酵素遺伝子を推定

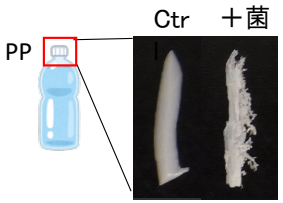
Confidential

2. 研究目標の進捗状況
PP分解菌（サブテーマ1）

分解菌取得&種レベルでの分布を把握 → 酵素局在解明 → 酵素遺伝子推定

菌による分解（2～60日培養）

分解率：18–64%
分解量：0.1～1.6 mg

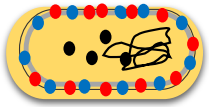


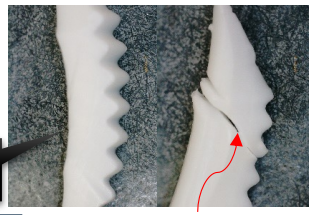
分解菌の分布

- X, Y, Z属の3属に収束
- 種および株レベルにおいて分解活性に差異がミと得られた。
- 分解力がより高い菌株を取得することの重要性を明らかにした。

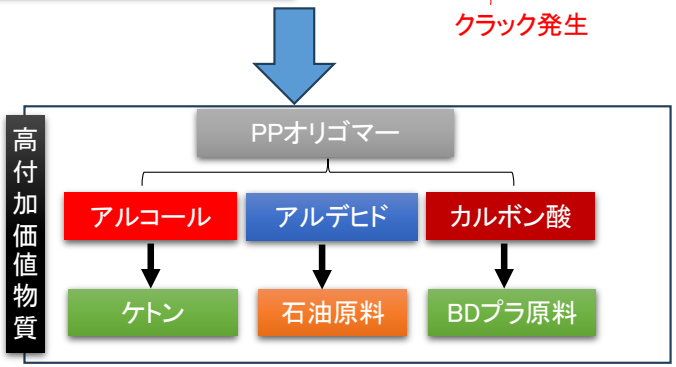
24時間酵素分解

分解率：1～9.5%
分解量：0.3～1.8 mg



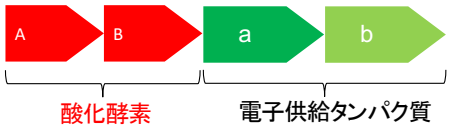


約30 nm薄くなった



PP分解酵素として、以下の2遺伝子群を推定した。

第一候補：酸化酵素A



第二候補： 酸化酵素C

その他

PHA合成律速酵素遺伝子を推定

2. 研究目標の進捗状況
PE分解菌（サブテーマ1）

菌による分解（7日培養）

LDPE分解率：0.1～0.6%
分解量： 0.1～0.4 mg

HDPE分解率：0.2～1.1%
分解量：0.1～0.7 mg

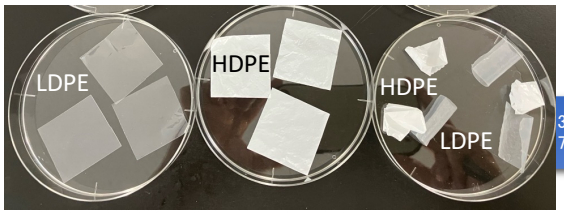
- 分解酵素精製条件検討中
- 分解酵素遺伝子解析進行中
- PHA合成能あり
- 酵素による表面改質

R5年度目標

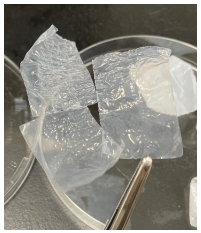
1. PE分解酵素遺伝子の取得
2. PE分解メカニズム解明
3. 分解生成物の構造解析
4. 代謝経路把握

菌なしCtrl

試験サンプル　　滅菌＆振とう後



透明ごみ袋　　レジ袋



LDPE同士の接着

LD&HDPEの接着

PE同士の接着に成功！

- LDPE同士の接着は極めて強固
- LD&HDPE同士の接着は強くない。

表面改質　ナノ加工　酵素糊

PE接着メカニズム解明

2. 研究目標の進捗状況
(1)進捗状況に対する自己評価(サブテーマ2)

サブテーマ2:廃プラ酵素分解反応生成物を原料とした共重合ポリマーの微生物合成系の構築と廃プラ分解・バイオプラ合成ワンポット微生物の創製(岩手大・山田)

【サブテーマ2の研究目標】
- 廃プラ分解と生分解性バイオプラ合成の両能力を兼ね備えた新たなスマートセルを創出する。
- さらに、合成されたバイオプラの材料としての性質(物性)についても明らかとする。
- また、多様な高分子分解物を原料とすることで、既存のバイオプラPHA合成微生物の代謝経路を改良し、新たな物性を有する新規組成のバイオプラ合成に繋げることを目指す。

【令和4年度研究計画】
サブテーマ1で得られる廃プラの酵素分解物を原料としたバイオプラ合成経路のデザインを行う。デザインした代謝系に必要な遺伝子のクローニングを行い、組換え大腸菌に各種遺伝子を導入し、発現検討を行う。さらに、廃プラ分解菌そのものによるバイオプラ合成の可能性についても検討する。

【令和5年度研究計画】
令和4年度に作成した組換え大腸菌を用い、廃プラ分解物を添加した培養条件でバイオプラ合成を試みる。培養時に生育阻害等が確認された場合、阻害物質の特定を行う。また、廃プラ分解菌そのものによるバイオプラ合成が確認された場合は、廃プラ分解菌を利用したバイオプラ合成量向上を目指し、培養条件を検討する。

【令和6年度研究計画】
廃プラ分解とバイオプラ合成を一細胞内で可能なワンポット微生物を創製する。創製したワンポット微生物を大量培養(スケールアップ)試験を行い、バイオプラ生産効率を最大化させる最適培養条件を確立する。さらに、微生物合成バイオプラの物性解析を行い、応用先を考慮する際の基礎データを蓄積する。

【自己評価】計画通り進展している

2. 研究目標の進捗状況
(2)自己評価に対する具体的な理由・根拠と目標達成の見通し(サブテーマ2)

【具体的な理由・根拠】

・本研究では、2つのアプローチによって、廃プラ分解とバイオプラ合成を両立できる微生物(スマートセル)の創製を目指している。サブテーマ1において廃プラ分解酵素の特定と関連代謝経路の解明が難航し、最近、人工代謝経路のデザインを作成したところである(スライド11左図)ことから、大腸菌組換え法は当初の計画よりも進捗がやや遅れている。

・一方で、廃プラ分解菌を用いたアプローチでは、廃プラ分解菌の一部はバイオプラPHA合成能力を有していること、さらにPP分解菌のなかにはPPを分解してPHAを合成できる菌株が存在することを見出した(スライド11右図)。本成果は、自然界から分離した廃プラ分解菌が、廃プラ分解とバイオプラ合成を両立したスマートセルの原石であることを意味し、計画以上の進展があったと言える。

以上より、全体としては計画通り進展していると判断した。

【目標達成の見通し】(スライド12)

一部の廃プラ原料を用いた際は、本研究で目標としている廃プラ分解とバイオプラ合成能力を有しているスマートセル創製の原型は構築できつつある。目標達成に向けて、培養条件の検討や各廃プラ分解菌の遺伝子組換え系を構築することによって、廃プラ分解効率とバイオプラ生産量の向上を達成することは十分可能な範囲と考えている。その後、最終年度に大スケール培養を試み、廃プラを原料として微生物合成したバイオプラPHAの化学構造や物性を明らかにする。
これらの方策によって、サブテーマ2の目標が達成できる見込みである。

Confidential

2. 研究目標の進捗状況
(2)自己評価に対する具体的な理由・根拠と目標達成の見通し(サブテーマ2)

プロジェクト前半までの目標：廃プラ分解とバイオプラ合成を両立できる微生物（スマートセル）の創製

戦略1:組換え大腸菌を宿主とした試み

培養実験の結果、大腸菌は、NBR酵素分解物を成長に利用できないと示唆された。

NBR分解菌のゲノム情報検索　＋　サブテーマ1の成果

NBR分解とNBR分解生成物の代謝に関与する可能性がある酵素群を予測することに成功

戦略２:廃プラ分解菌を宿主とした試み

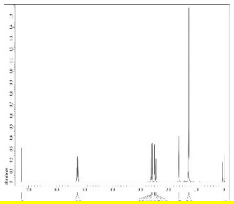
廃プラ分解菌14株

多様な条件で培養

バイオプラであるPHA合成能力の評価

GC分析

^{1}H-NMR分析



成果の一例

PPを主とした培地で培養した菌体から抽出した生分解プラ

PHA共重合体

産業用PHAと同様の組成！

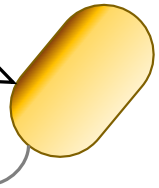
一部の廃プラ分解菌がPHA合成能力を有している（目標のスマートセルの原石である）ことを発見！！

2. 研究目標の進捗状況
(2)自己評価に対する具体的な理由・根拠と目標達成の見通し(サブテーマ2)

今後の予定と目標達成の見込み

戦略1:組換え大腸菌を宿主とした試み

推定した廃プラ分解代謝に関する遺伝子群
＋ バイオプラ合成に関する遺伝子群
の導入



スマートセル大腸菌を構築！

戦略２:廃プラ分解菌を宿主とした試み

PHA合成能を有する廃プラ分解菌の遺伝子組換え系の構築し、PHA合成能を強化する

培養条件の検討＋スケールアップ培養

廃プラ分解効率と
PHA合成量の向上を目指す

合成されたPHAの物性解析

【分析項目】
・モノマーユニット組成
・分子量
・熱的性質
・機械的性質

応用先を考慮する際の
基礎データを蓄積

社会実装に向け、廃プラからバイオプラスチック合成に至るマテリアルフローとトータルコストについて試算

Confidential

3. 研究成果のアウトカム（環境政策等への貢献）

【行政等が活用することが見込まれる成果】

本研究成果は、「革新的なプラスチックリサイクル技術の開発」および「サーキュラーエコノミーおよび新産業創出」につながることが期待でき、世界規模の波及効果も期待できる。

2030年までに廃棄プラスチックの3割を原料転換する目標やCO_2排出量を46%削減（2013年度比）する目標を掲げているものの、革新的技術開発に至っていない現状では達成は極めて困難な状況と言える。さらに、国外では革新的技術開発が次々と発表され、社会実装に至っているケースも出始めており、我が国は世界各国に大きく遅れをとっている現状にある。

本研究成果は、将来的に世界に先駆けた革新的技術開発になる可能性を秘めている。

世界各国で進む技術革新

- 2025年　PETの酵素リサイクルプラント稼働予定
- PE→エチレン、プロピレン

本PJが目指す技術革新

石油代替原料
基幹化学物質
生分解バイオプラ
プラ改質技術
サーキュラーエコノミー
新産業創出

SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS

Confidential

4. 研究成果の発表状況

【誌上発表（査読あり）：1件、執筆中1件】

山田美和、杉森大助、バイオ法によるプラスチックリサイクル技術－その現状と課題、未来－、静電気学会誌, 47(5)印刷中

未だ特筆する成果はないが、特許出願後にはNatureなどのハイインパクトジャーナルへの投稿を目指す。

【口頭発表（学会等）：0件、予定6件】

1. 石油学会（10/27）： 2件発表予定
2. Asian Congress on Biotechnology（10/15～19）2件発表予定
3. 第3回 日本スイスドイツ酵素工学国際会議（9/10～13）：2件発表予定
4. 酵素工学研究会（11/10）：2件発表予定
5. 日本農芸化学会（3月下旬）：2件発表予定

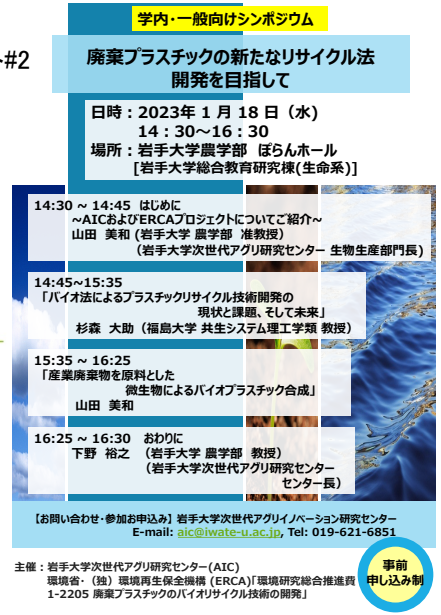
【知的財産権（出願予定）：6件】

1. NBR分解菌
2. 廃プラスチック分解菌
3. NBR分解酵素
4. 廃プラスチック分解酵素
5. NBR改質技術
6. プラスチック改質技術

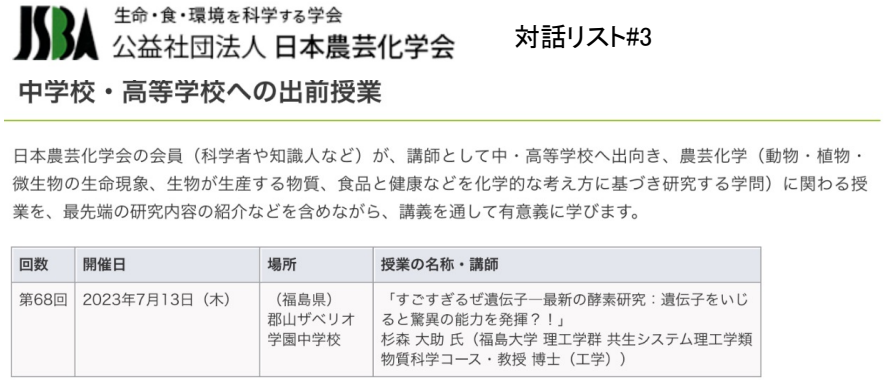
【国民との科学・技術対話：3件】

1. 杉森大助、酵素を利用したプラスチックリサイクルと時限分解の現状、石油学会東北支部講演（2022.12.1、盛岡）一般、高校生含む
2. 杉森大助、山田美和、廃棄プラスチックの新たなリサイクル法開発を目指して（2023.1.18、岩手大）ERCA_PJ研究についても紹介
   一般、高校生含む
3. 杉森大助、日本農芸化学会出前授業、すごすぎるぜ遺伝子（郡山ザベリオ学園中）ERCA_PJ研究についても紹介

対話リスト#2



対話リスト#3



5. 研究の効率性

本研究では
- マンパワー不足を補うためにアルバイト学生雇用や受託分析、装置購入などにより、研究成果をあげるため効果的に研究費を執行できた。
- サブテーマ間で密な情報共有を行い、月１以上の研究打ち合わせ、月次報告書提出など、課題管理も適切に行った結果、効率的に研究が実施できた。

研究の効率性：本来の目標とは、少しずれるがPE酵素接着という画期的な成果を得た点で、効率性が高い取り組みができたことを強調したい。

本研究では将来的に以下の各項目に貢献できる成果が得られた。
1）資源循環
2）CO_2排出削減
3）マイクロプラ対策（プラ寿命制御技術）への応用
4）プラ表面改質への応用
5）サーキュラーエコノミー、新産業創出

プラスチック1トンあたり

重油から生産

10%（3千トン）をリサイクル品
→300億円＋重油代コストダウン

現状の分解率10%での試算
→PP, PE廃棄削減量：50万トン→CO_2排出削減量：150万トン
→ゴム廃棄削減量：1万トン→CO_2排出削減量：3万トン

サーキュラーエコノミー
プラ廃棄削減効果：100億円（廃棄コスト2万円/t）
カーボンブラック（3万t/yr @Jpn）：@¥0.4～1万/kg
有用物質生産（収率1%）：化合物A @¥10,000/mg　半導体材料
化合物B@¥7,000/L　プラ、染料、農薬等
PHA_@¥400～1400/kg
オリゴマー原料、水素

＋ 新産業創出：プラスチック表面改質技術の開発

Confidential