

## 生分解開始スイッチ機能を有する海洋分解性プラスチックの研究開発

PM：粕谷健一  
国立大学法人群馬大学 教授  
PJ参画機関：群馬大学、東京大学、東京工業大  
学、理化学研究所、海洋研究開発機構

# プロジェクト名：生分解開始スイッチ機能を有する 海洋分解性プラスチックの研究開発

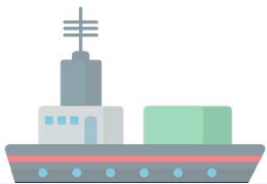


プロジェクトマネージャー（PM）：国立大学法人群馬大学 粕谷健一

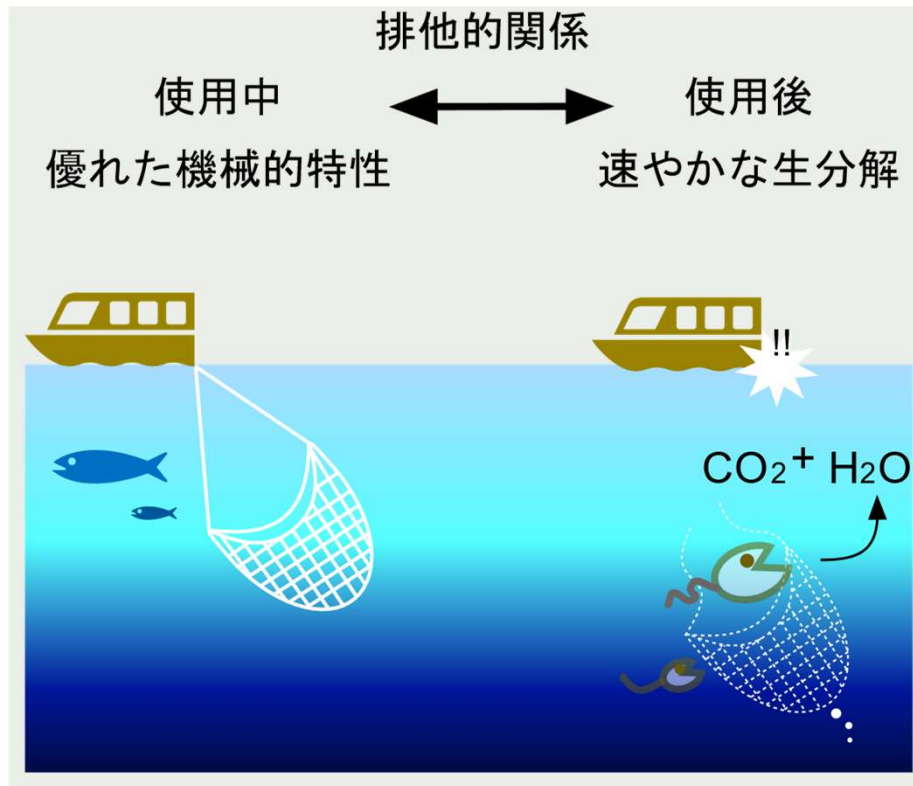
参画機関：



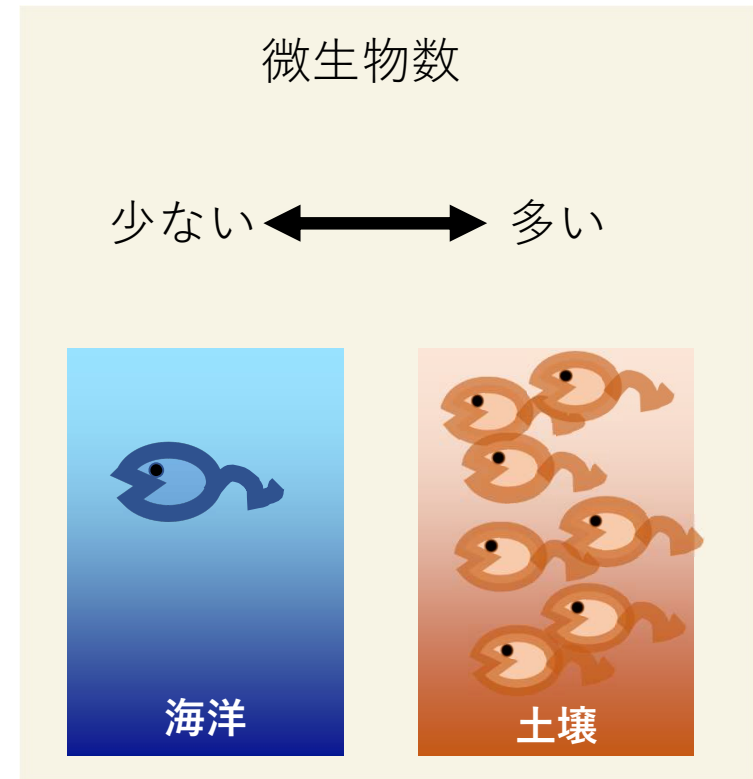
実施期間： 2020 – 2029年度



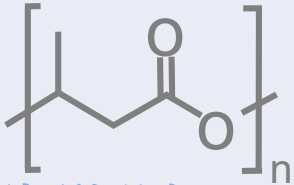
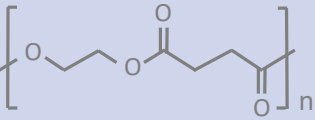
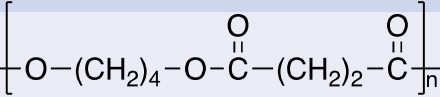
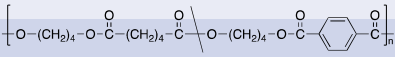

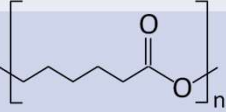
# a. プロジェクト研究開発背景ー2つの問題



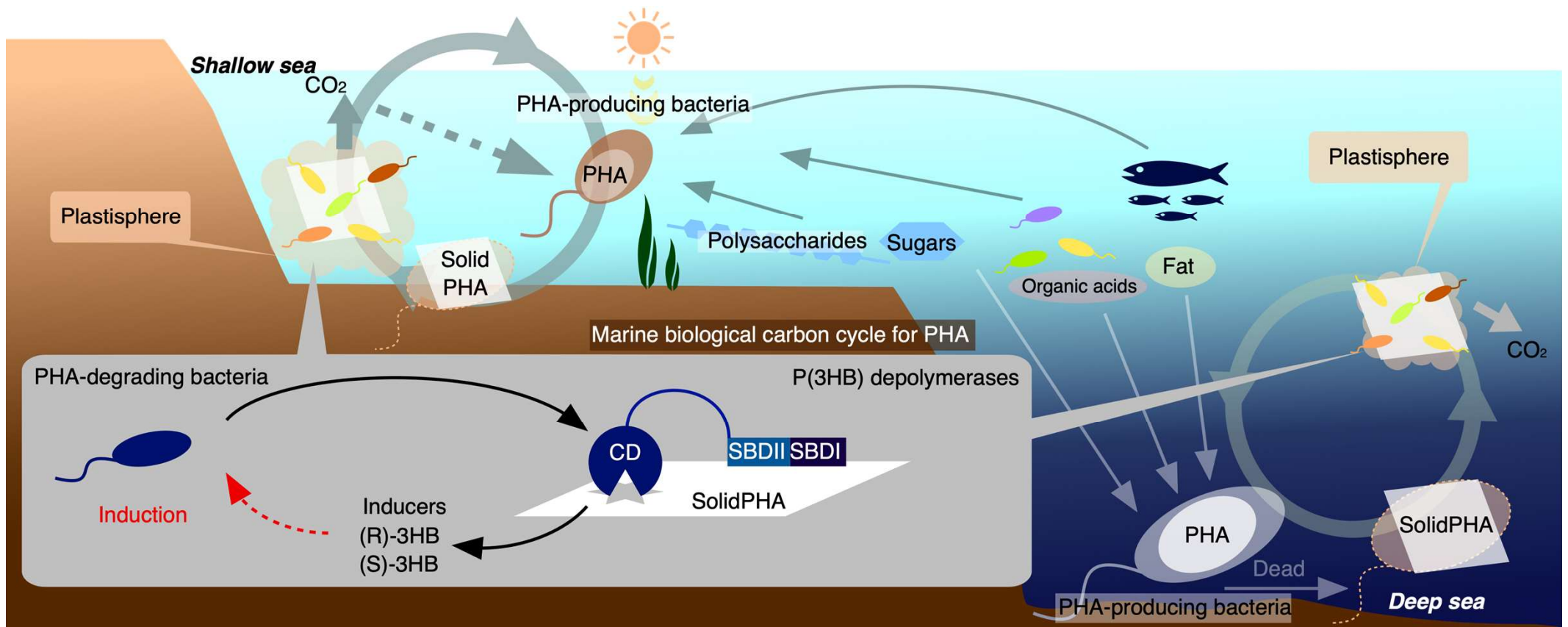
+



# a. プロジェクト研究開発背景—海洋生分解性プラは少ない

| 生分解性プラスチック  | 環境分解性  |       |                  |
|---|--|-------|------------------|
|   | 分解する   | 場所による | 分解しない            |
| <b>PHAs</b><br><br><b>海洋分解 OK</b>  | 土壌<br>淡水<br>汽水<br><b>海洋</b><br>活性汚泥<br>嫌気汚泥<br>コンポスト | -     | -                |
| PESu<br>                           | 土壌<br>淡水<br>コンポスト<br>活性汚泥                            | -     | 海洋               |
| PBSu<br>                           | コンポスト  | 土壌    | 海洋<br>活性汚泥<br>淡水 |
| PBAT<br>                         | コンポスト  | 土壌    | 淡水<br>海洋         |
| PLA<br>                          | コンポスト  | 土壌    | 海洋               |
| <b>PCL</b><br><br><b>海洋分解 OK</b> | 土壌<br>淡水<br><b>海洋</b><br>コンポスト                       | -     | -                |

# a. プロジェクト研究開発背景—PHAは海洋で分解する。



*Polym J* 53, 47–66 (2021)

PHAは海洋で生産され、生分解される。海洋での生物学的な炭素サイクルが成立している。

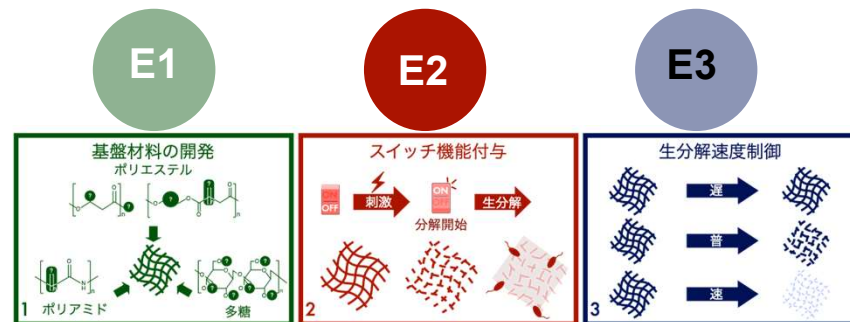
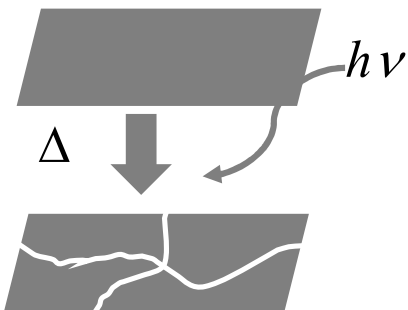
# a. プロジェクト研究開発背景—生分解の仕組みと開発戦略

0. インタクト

1. 生物劣化, 非生物劣化  
Abiotic and biotic

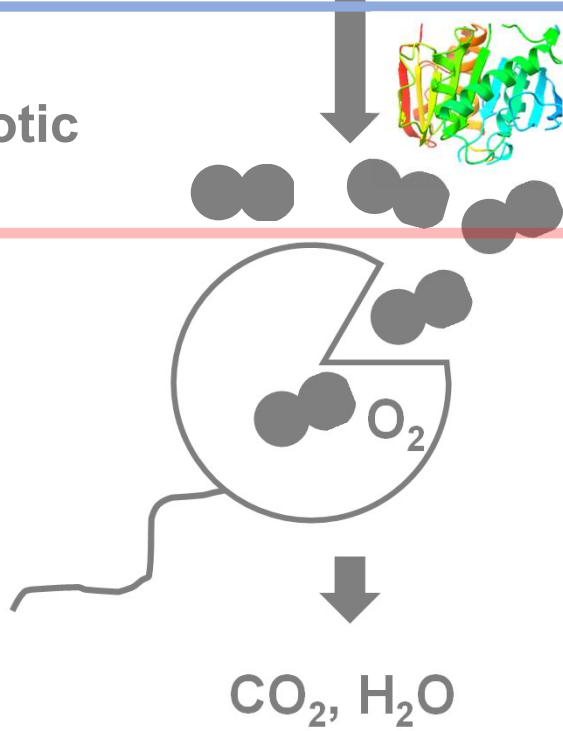
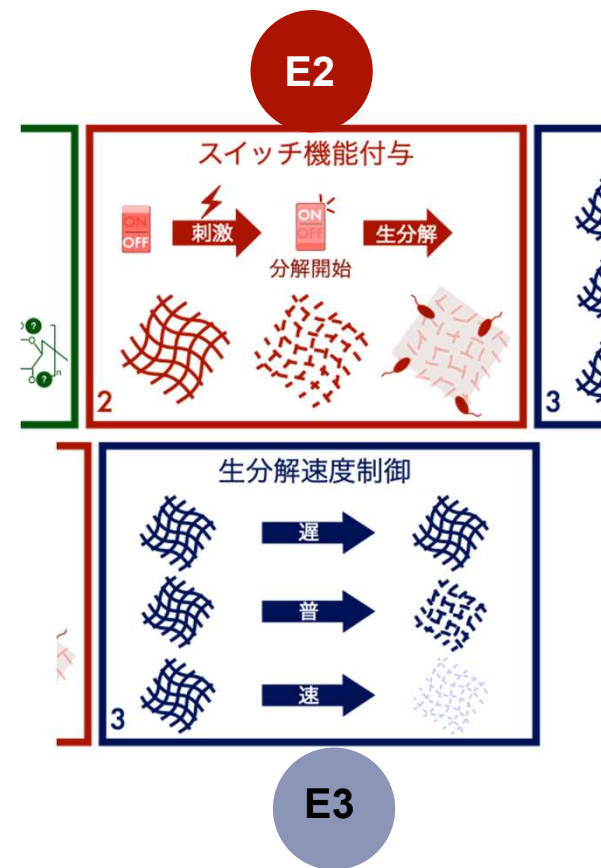
2. 低分子量化  
Abiotic and biotic

3. 無機化  
Microbial

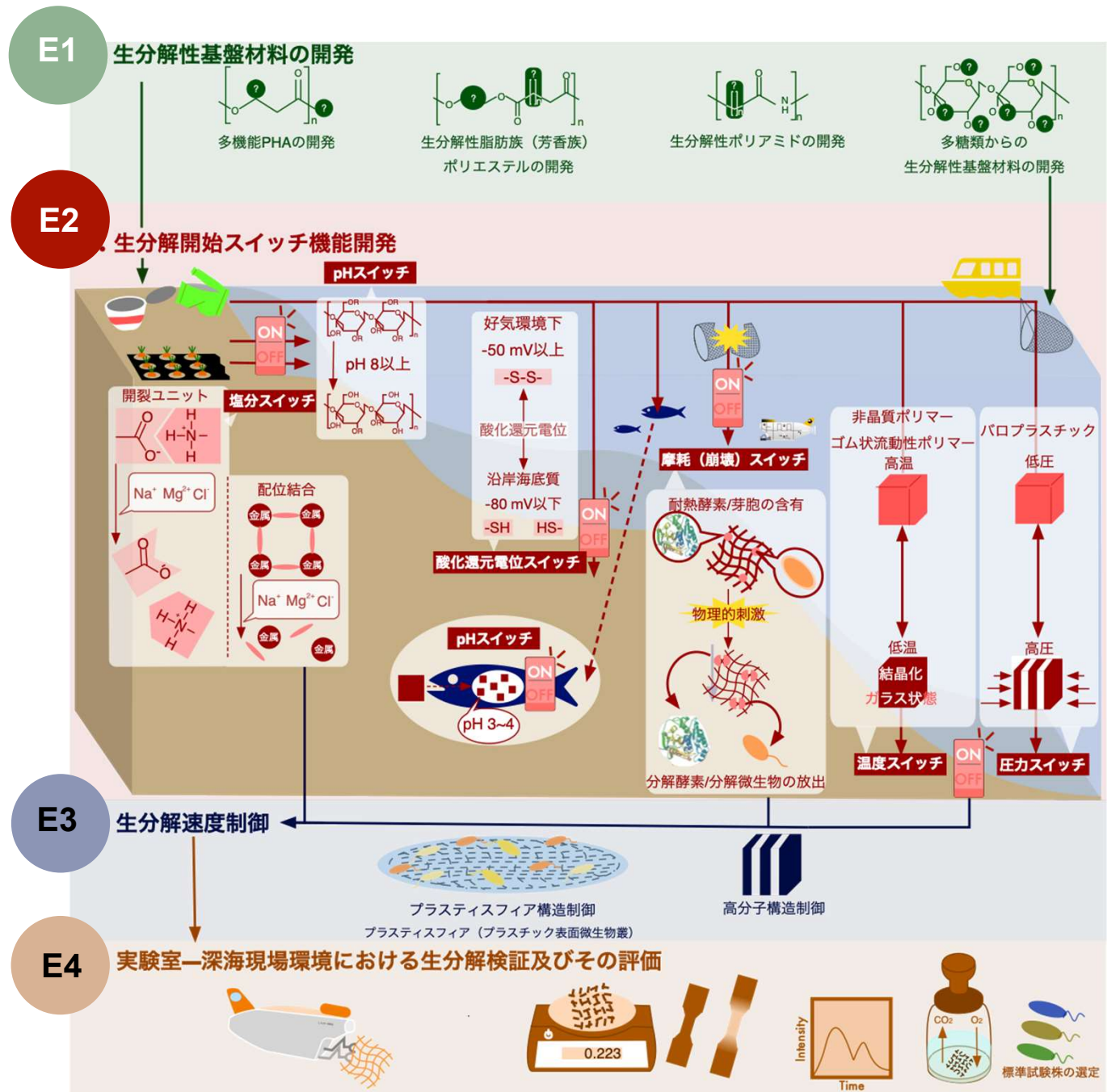


STEP1

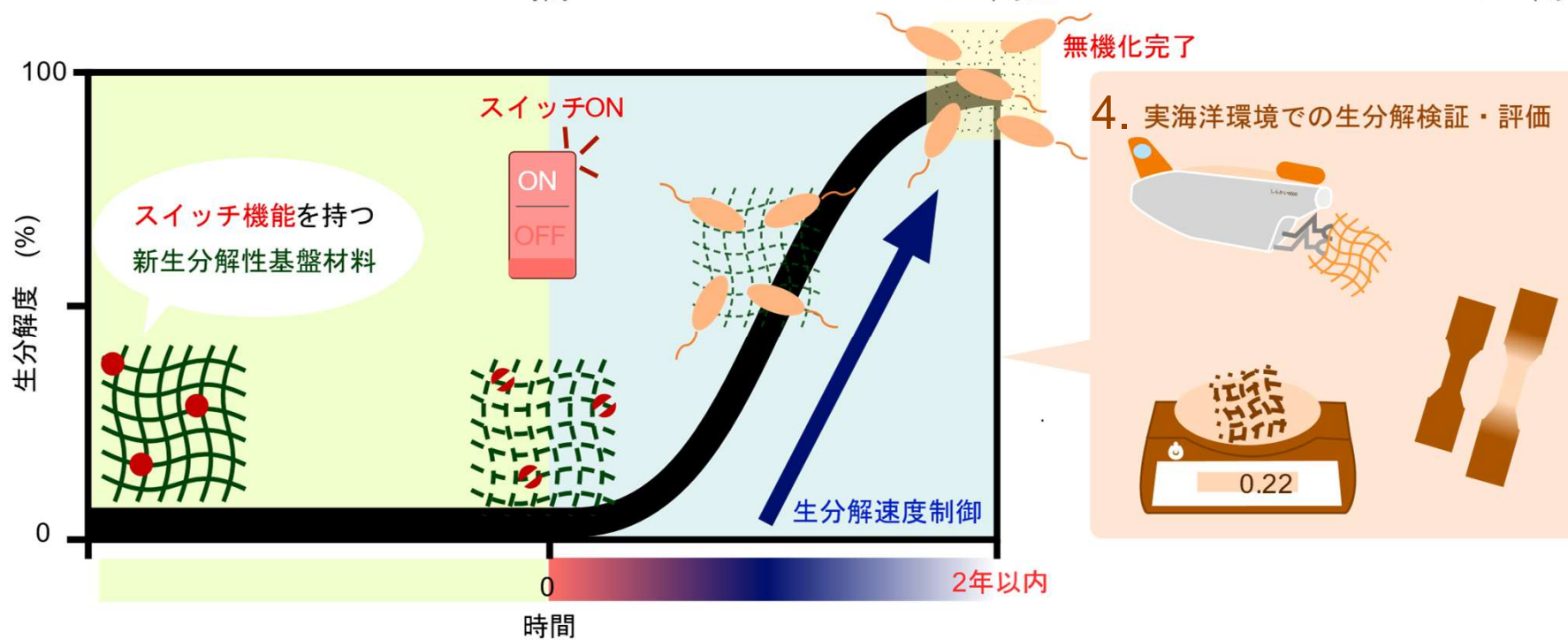
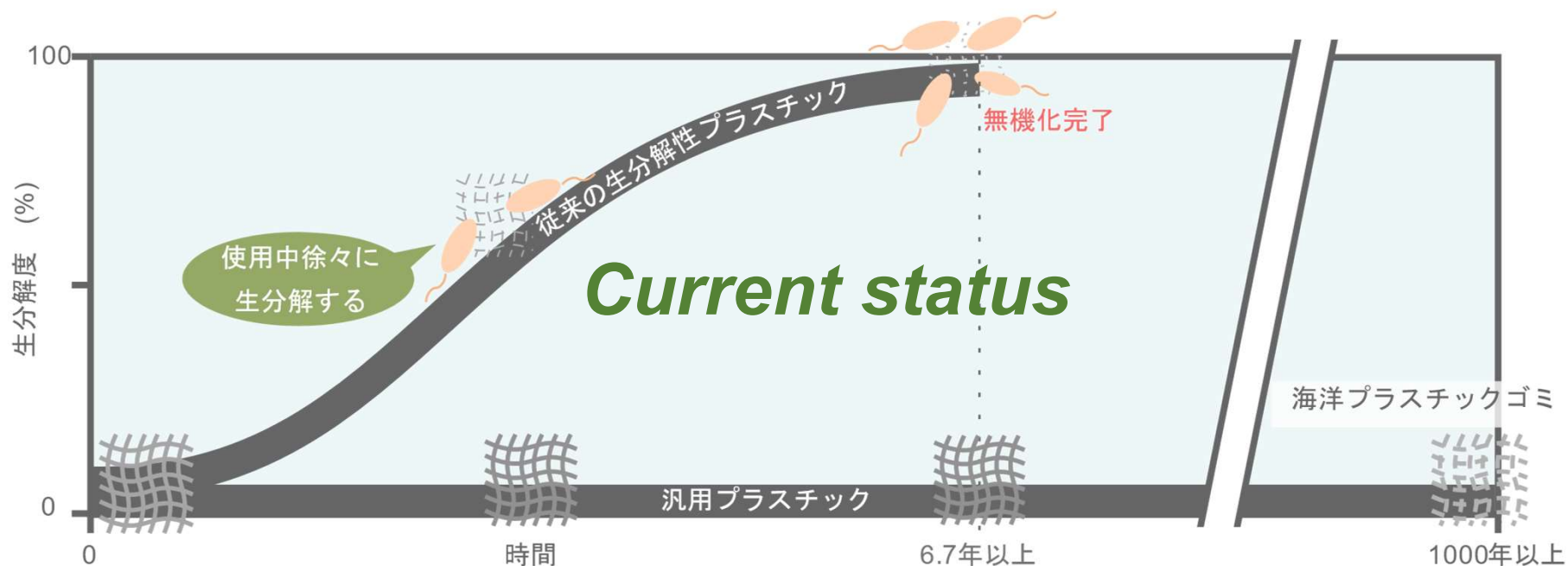
STEP2



# 1. プロジェクト研究開発項目 (E1, E2, E3, E4)



## 2. プロジェクトが目指す未来像





# 3. プロジェクト実施体制

**nite** National Institute of Technology and Evaluation  
独立行政法人 製品評価技術基盤機構



E1 E2 E3 E4

E1 E2 E3 E4



E1 E2 E3 E4



E1 E2 E3 E4



PM 群馬大学 粕谷健一



E1 E2 E3 E4



E1 E2 E3 E4



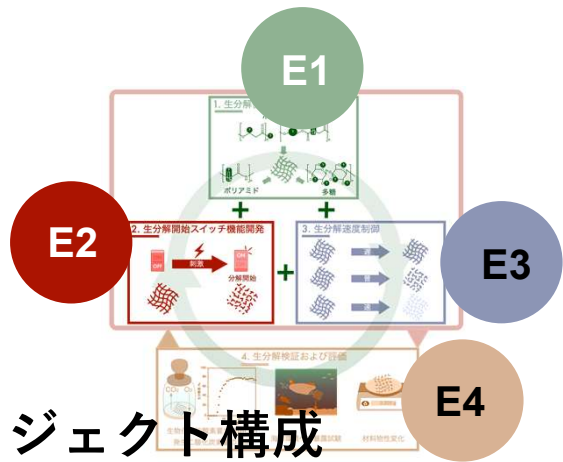
E1 E2 E3 E4



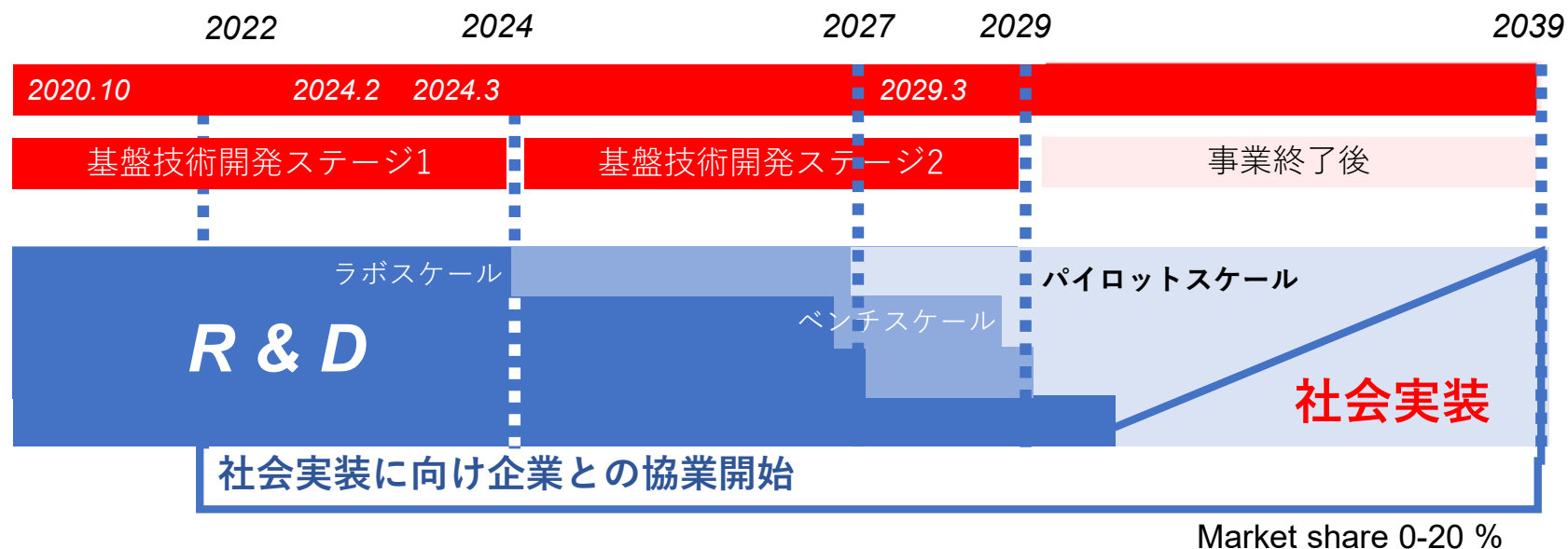
E1 E2 E3 E4



E1 E2 E3 E4

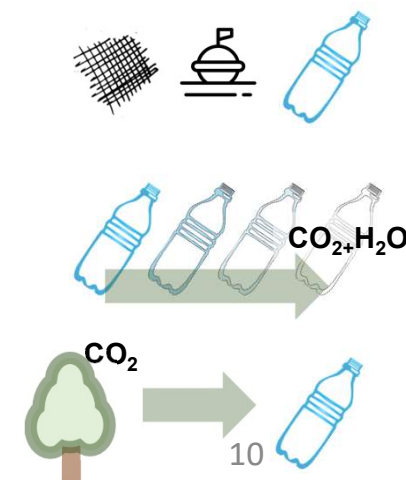


## 4. 開発スケジュール

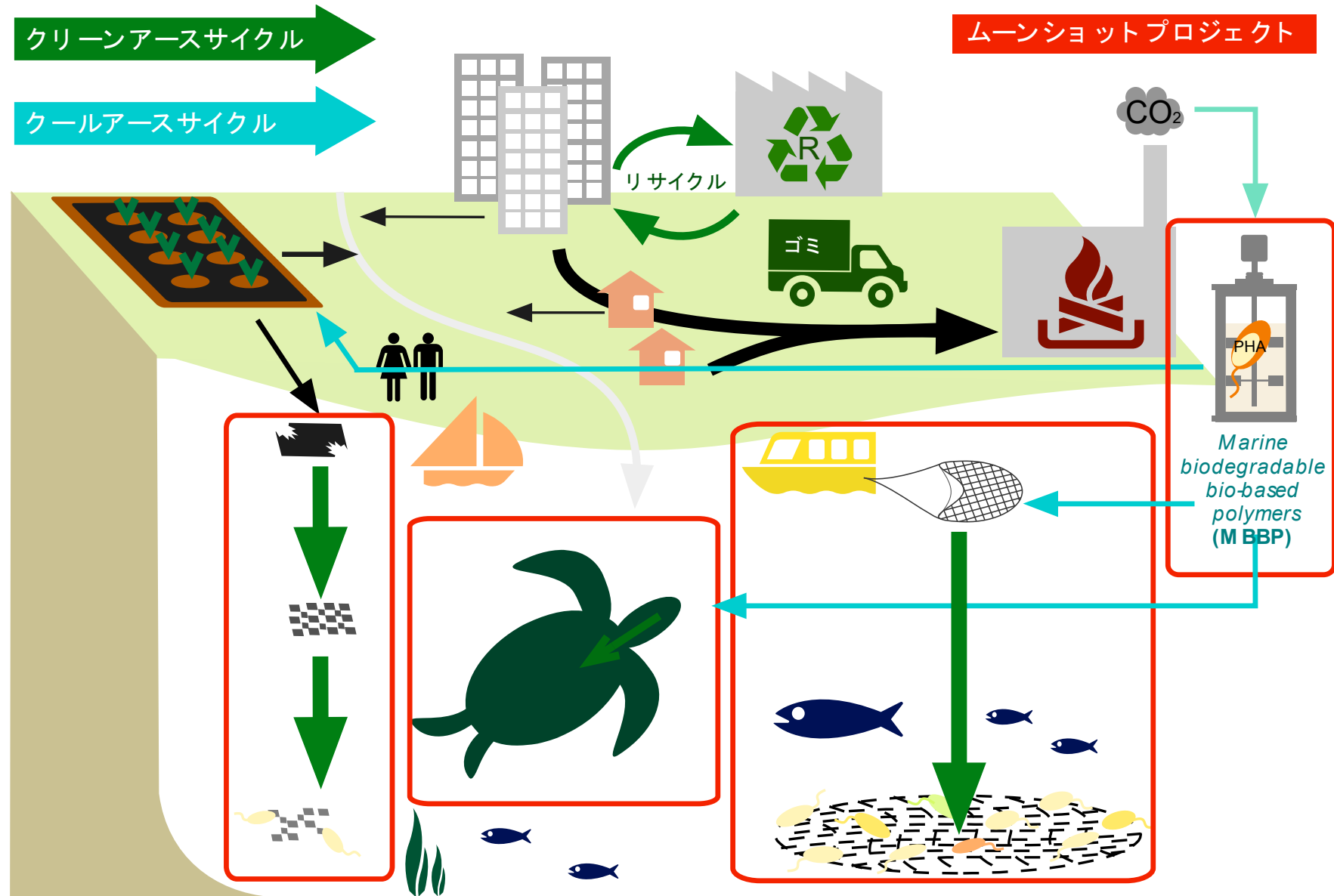


## 5. 最終開発目標（2029年度）

- ① スイッチング機能が発現した後、30°Cの海水において、半年で90%程度の生分解性能を有する新たな海洋生分解性プラスチック材料を、3種類以上創出する。
- ② 上記条件を満たすスイッチ機能を有する新規海洋生分解性プラスチックの深海を含む実海洋環境での生分解性を実証する。
- ③ バイオマス、二酸化炭素を主原料とした新規海洋生分解性基盤材料を創出する。



## 6. 社会実装のイメージ



# 7. 現時点の主な成果

## 海洋生分解性基盤素材の開発 (E1)



E1: 基盤樹脂開発

PHA

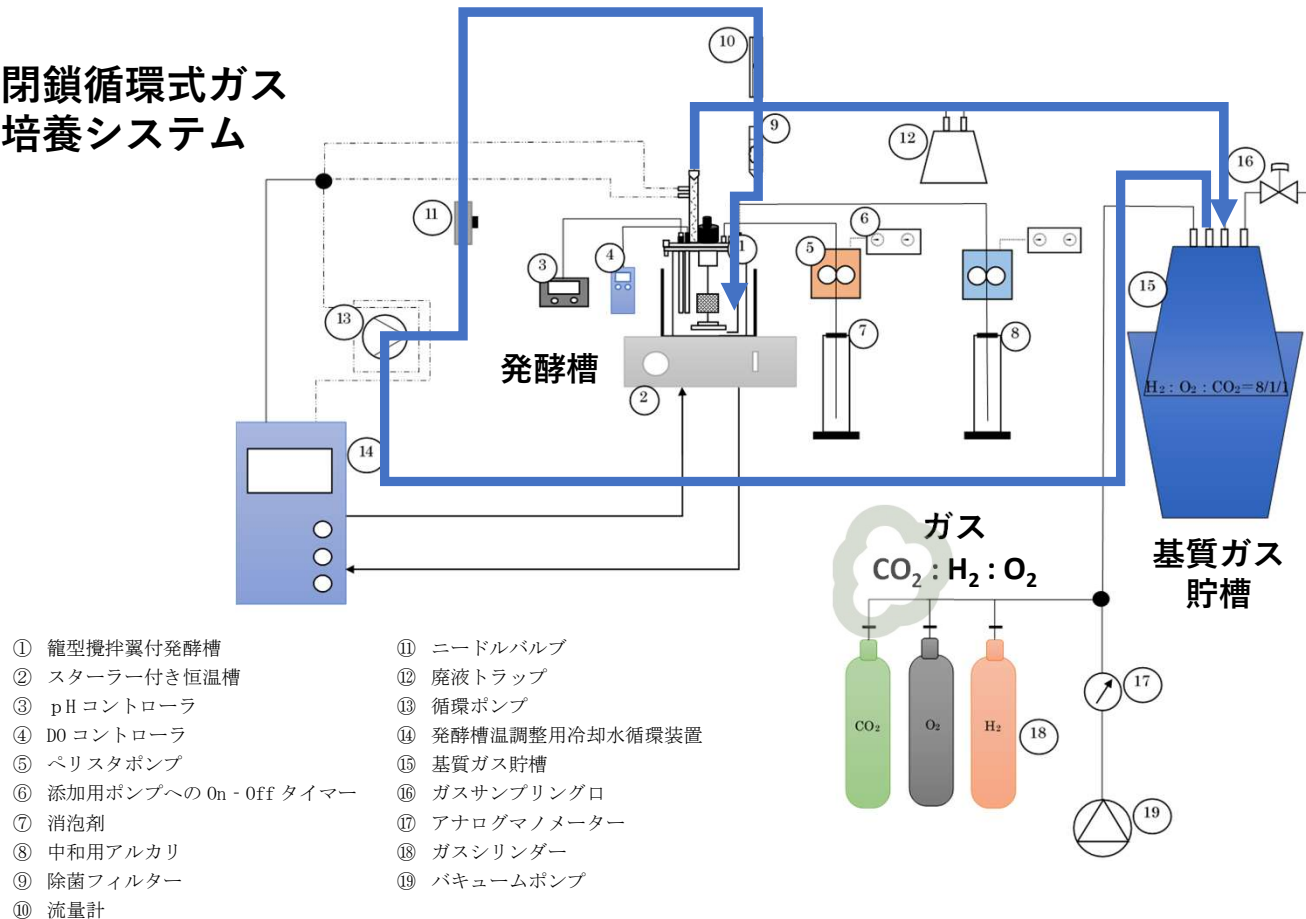
機能化  
強靱化  
CO<sub>2</sub>固定

多糖

可塑化/生分解性  
強靱化 (成形性向上)

合成高分子

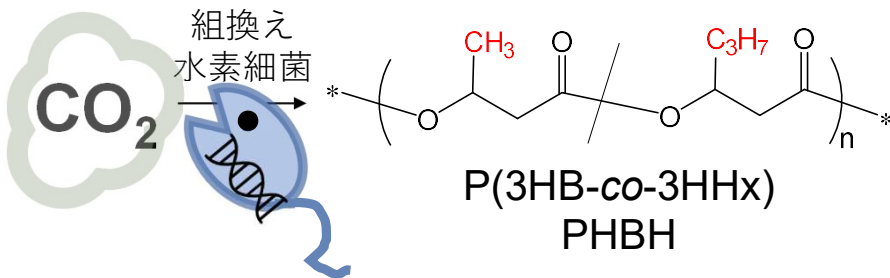
生分解性ビルディングブロック  
ブロックポリマー

閉鎖循環式ガス  
培養システム

ガス培養の様子

## 組換え水素細菌の培養結果 (204時間後)

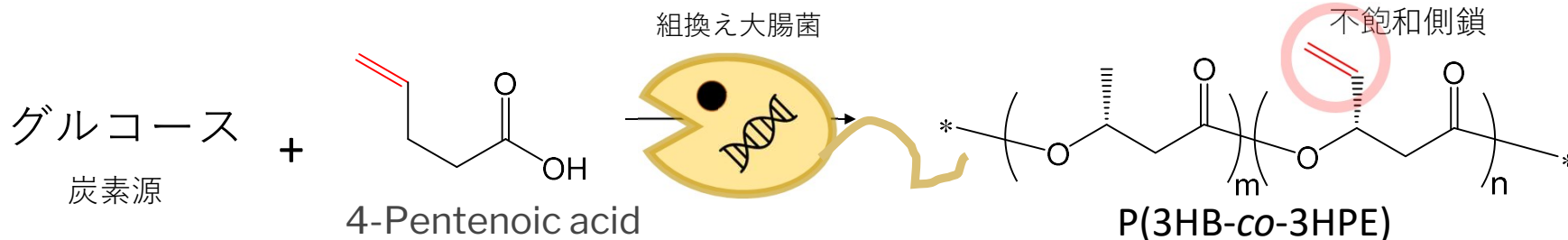
| 乾燥菌体量<br>(g/L) | PHBH生成量<br>(g/L) | PHBH含率<br>(wt%) | 3HHx分率<br>(mol%) |
|----------------|------------------|-----------------|------------------|
| 61.4           | 51.5             | 83.9            | 5.4              |



## 新規PHA基材の開発

スイッチ機能  
組み込み材料

クールアースサイクル



合成条件： LB培地 + 4-ペンテン酸 (0.5 g/L) + グルコース (20 g/L) + 1 mM IPTG, 30°C, 72 h

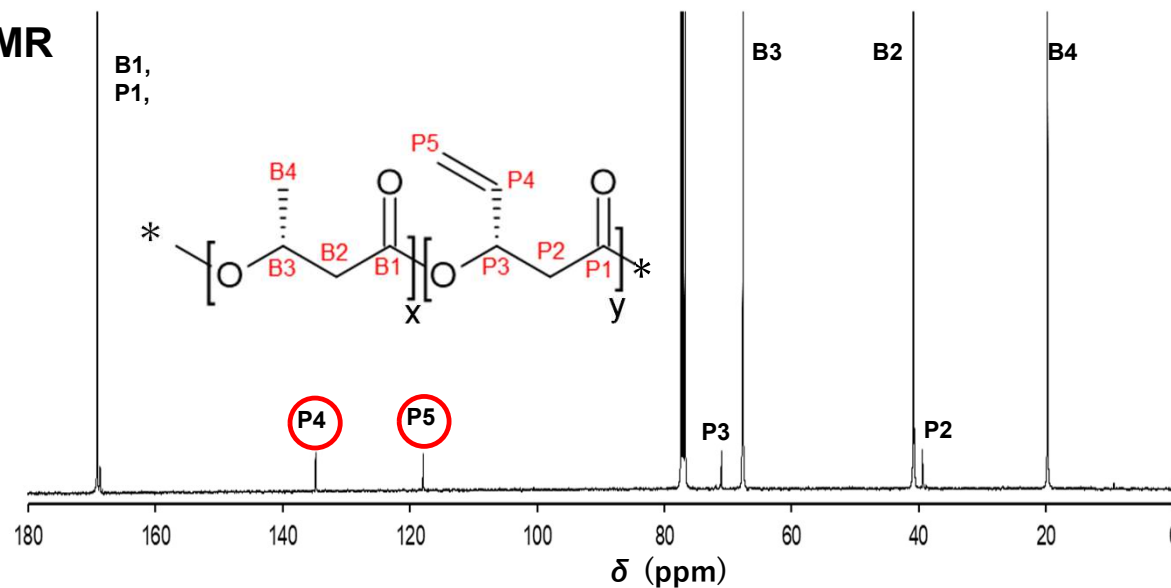
大型  
フラスコ  
培養  
(2L)



精製



$^{13}\text{C}$  NMR



大量培養により、  
2 or 10 mol% 3H4PEポリマーを  
**120 g以上合成**

→ スイッチ導入

社会実装に不可欠な高い加工性を達成するため、成形・加工技術を改良し完全にセルロースのみを用いたより大きなサイズ・より複雑な形状の部材の調製に成功した。



透明性と強度を維持したまま  
スマホサイズまで大型化



一体成形で  
より複雑な形状に



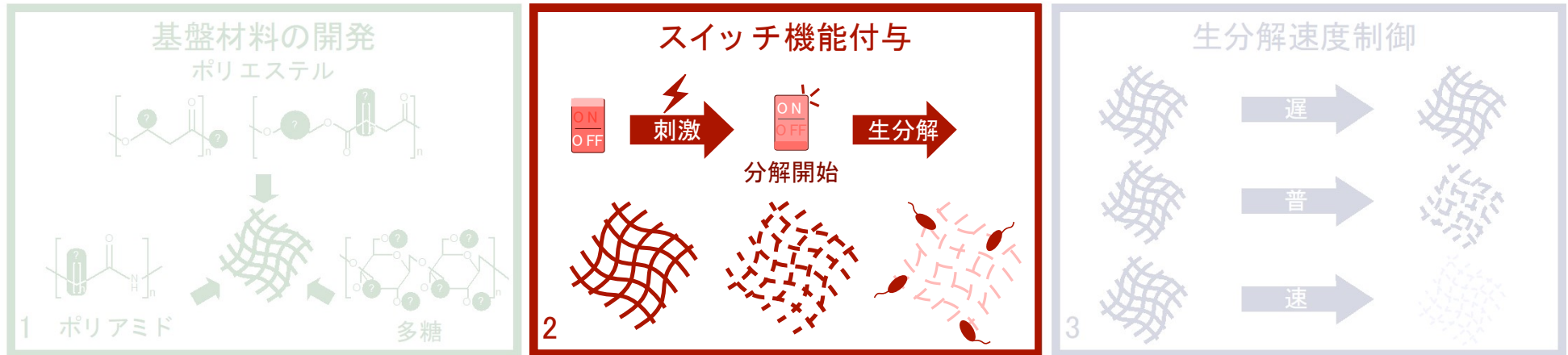
しなやか

一体成形で立体的な形状に加工。

しなやかなセルロースのみからなる透明プラスチック代替素材ができた。

# 7. 現時点の主な成果

## 生分解開始スイッチ機能の開発 (E2)



E2：スイッチ機能開発

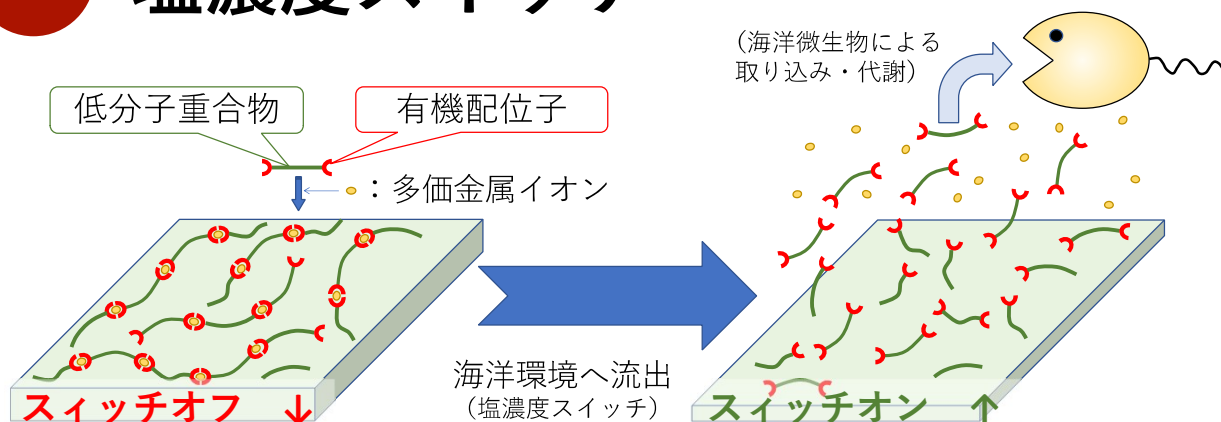
pH  
塩濃度  
酸化還元電位  
圧力  
温度  
摩耗



# 塩濃度スイッチ

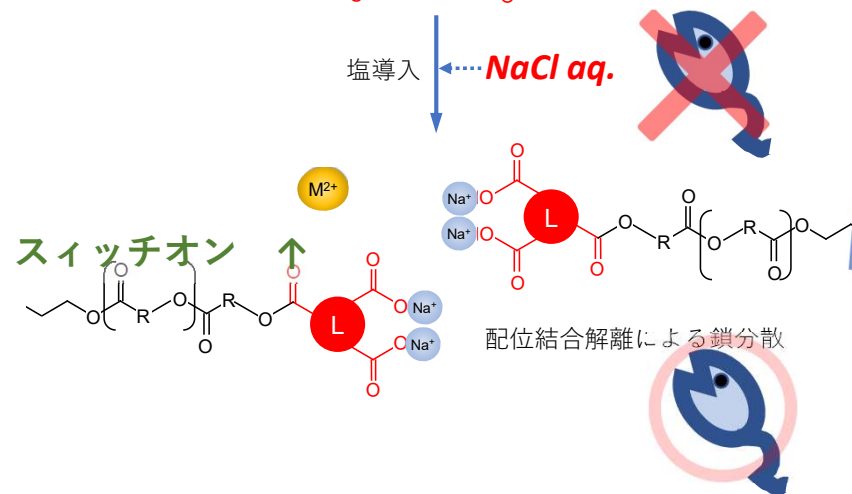
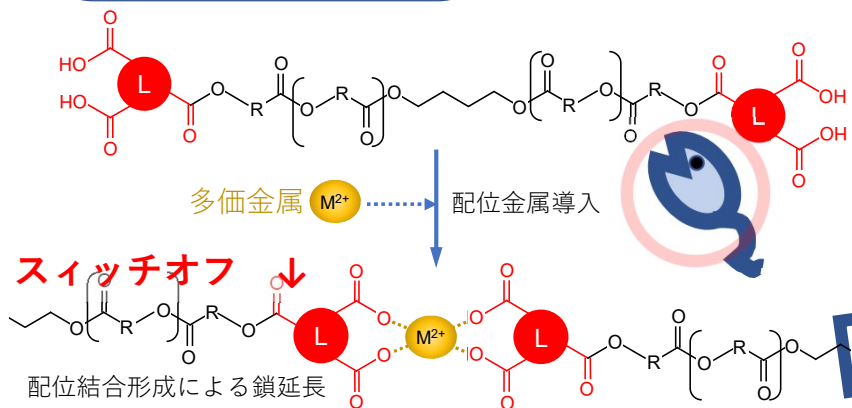
海に流れ込むと  
分解が始まる

クリーンアースサイクル

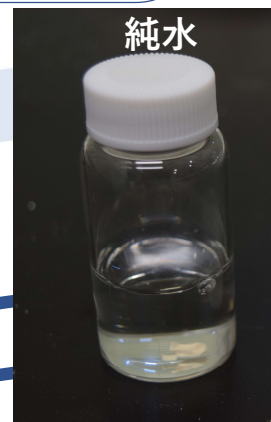
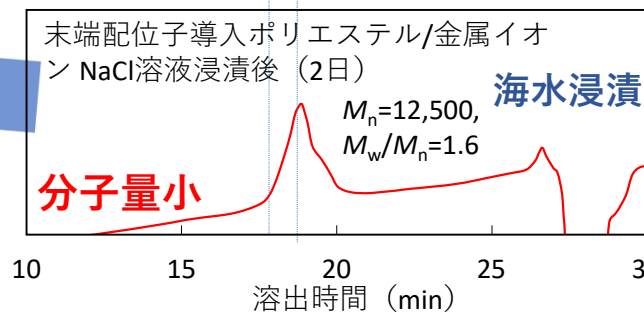
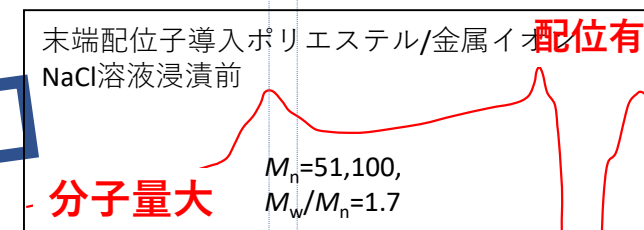
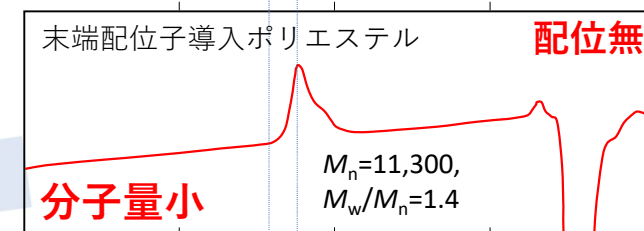


高分子量化により  
細胞取り込み或いは分解抑制

低分子量化により  
細胞取り込み或いは分解加速



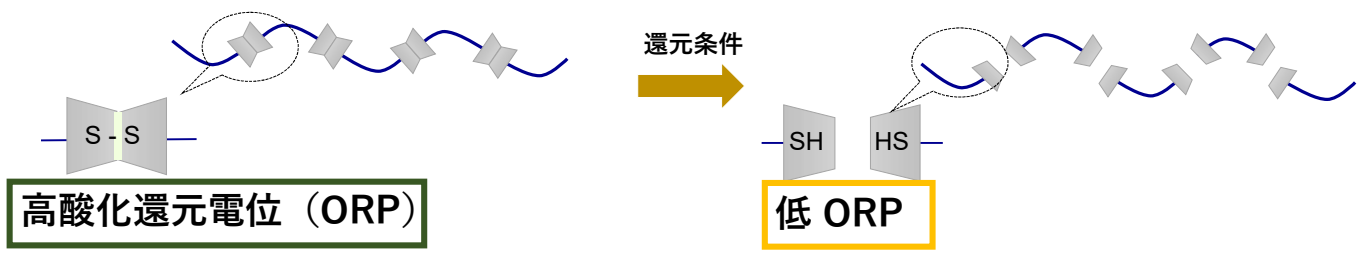
## 分子量変化



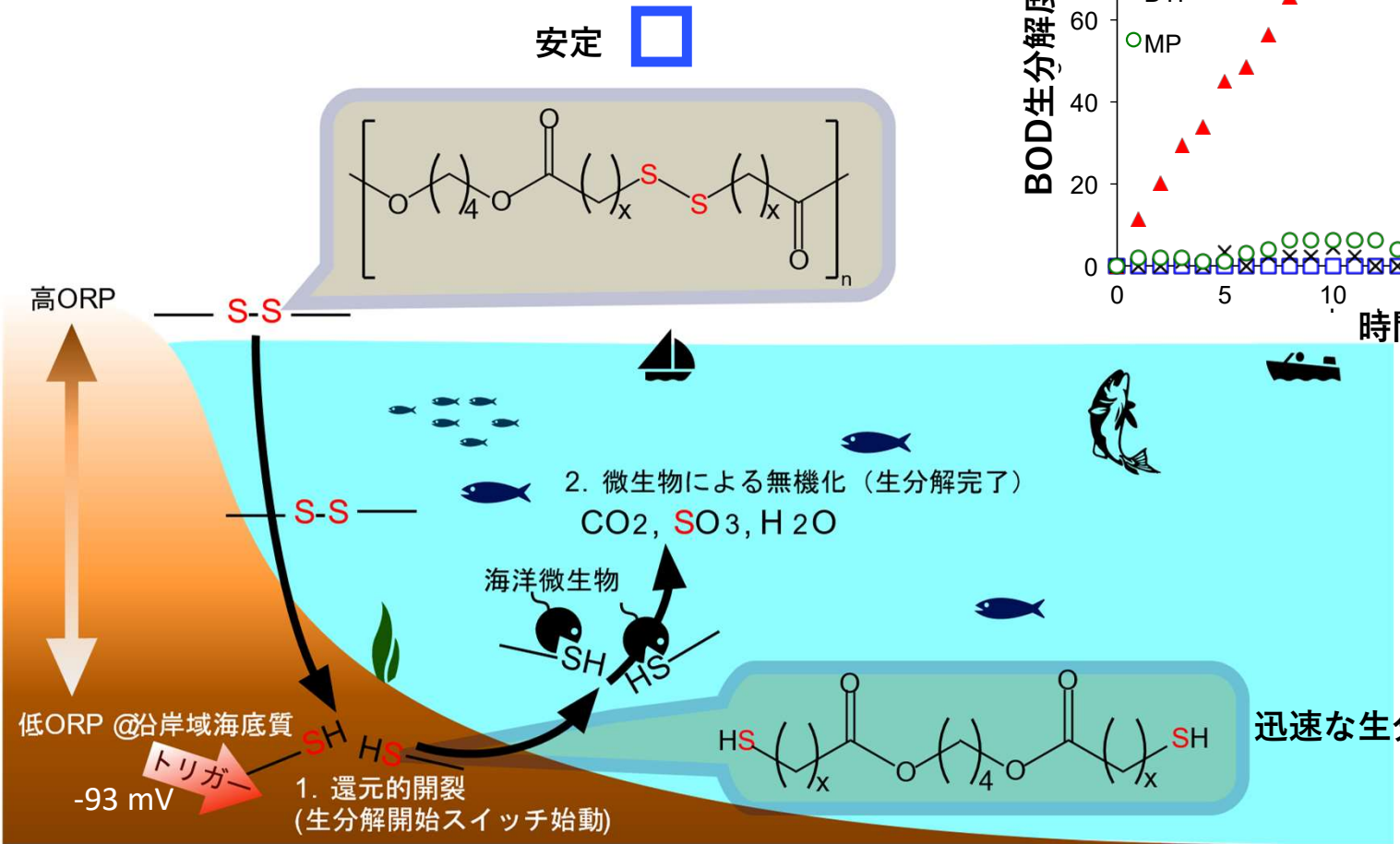
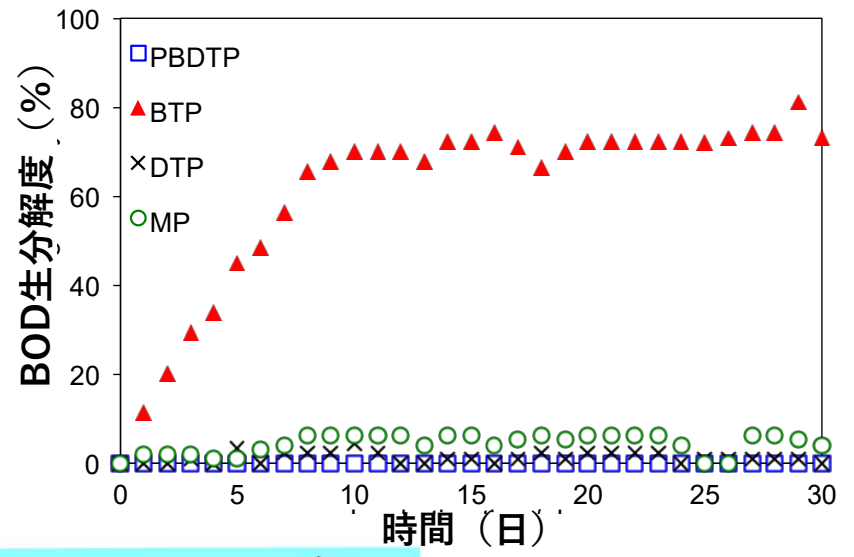
# 酸化還元スイッチ

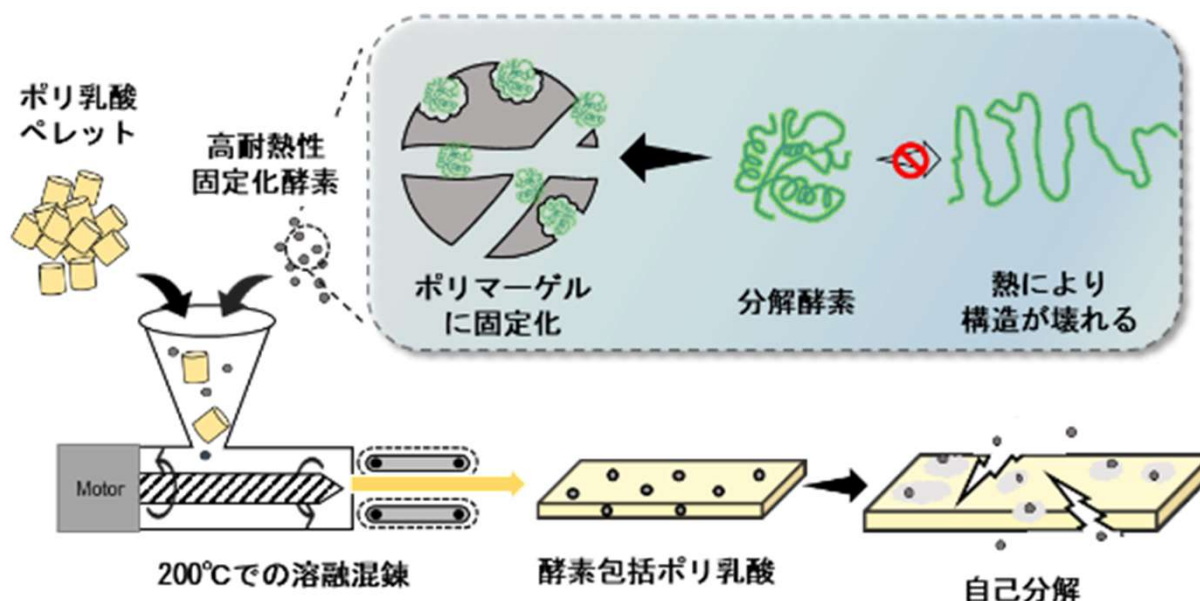
海底に到着すると分解が始まる

クリーンアースサイクル

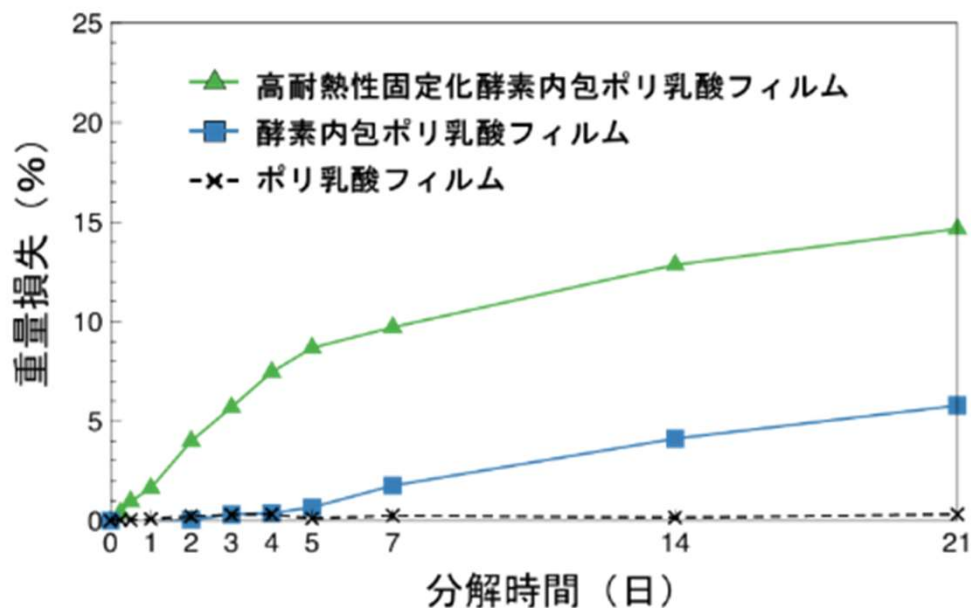


スイッチ原理





- ポリ乳酸を分解するプロテナーゼ-Kを高分子ゲルに固定化し、高耐熱性固定化酵素の作製に成功
- 200°Cでの溶融混練に成功し、熱プレスフィルムの作製に成功



- 酵素内包フィルムが効率的に分解されることを確認
- 本技術を、PBS、PBSA、PCLへも展開
- 酵素内包フィルムを、岸壁および深海に設置

# 7. 現時点の主な成果

## 生分解速度制御技術の開発 (E3)



E3：生分解速度制御技術

加速

生物環境制御

高分子構造制御

減速

高分子構造制御

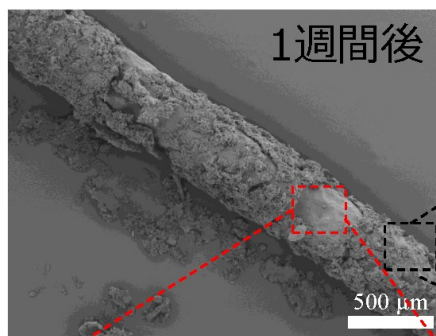
# PHA高強度・高弾性率繊維（微結晶核延伸法）

## Mechanical properties

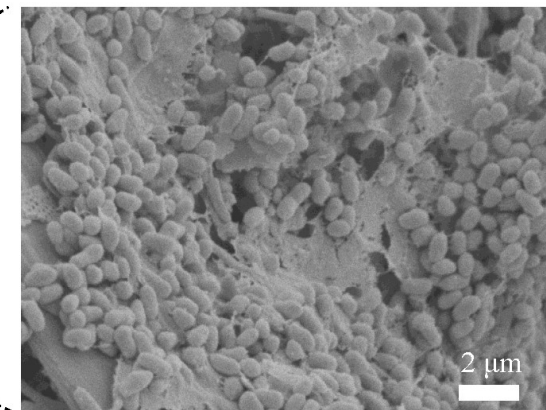
| Microbial polyester fibers | Tensile strength<br>/MPa | Young's modulus<br>/ GPa | Elongation at break<br>/ % |
|----------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|
| P(3HB)                     | 1320                     | 18.1                     | 35                         |
| P(3HB-co-8 mol%-3HV)       | 1065                     | 8.0                      | 40                         |
| P(3HB-co-9 mol%-3HH)       | 552                      | 3.8                      | 48                         |

思いっきり引張っても切れない

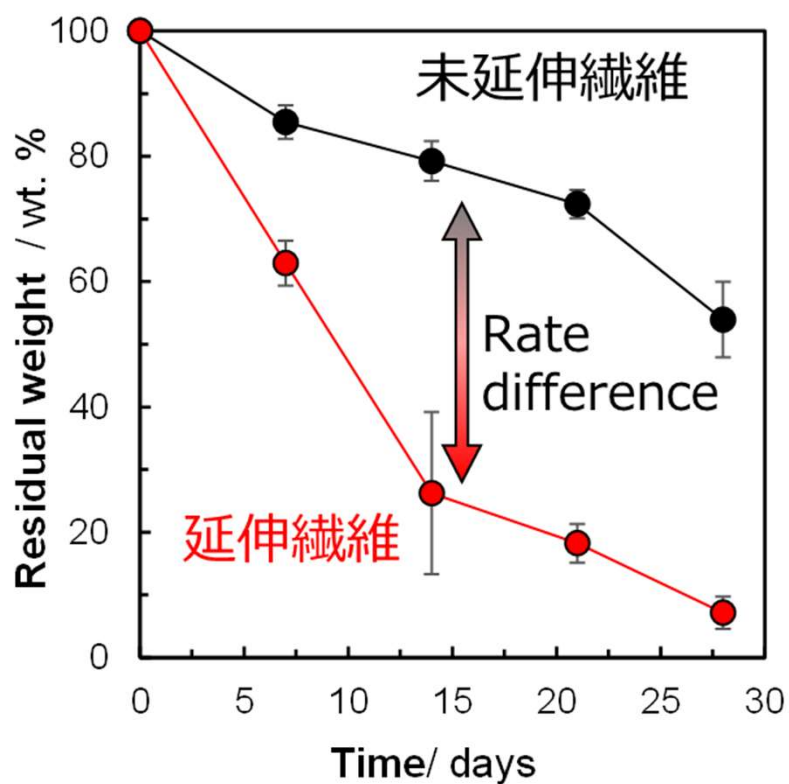
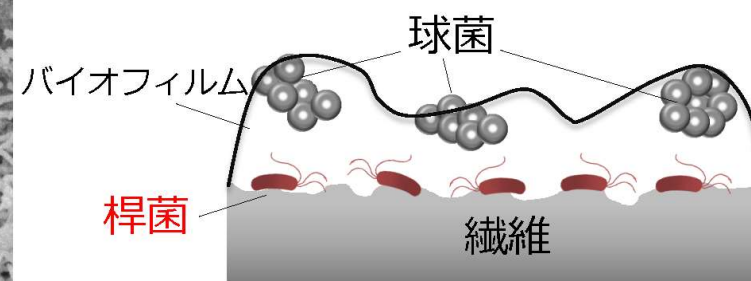
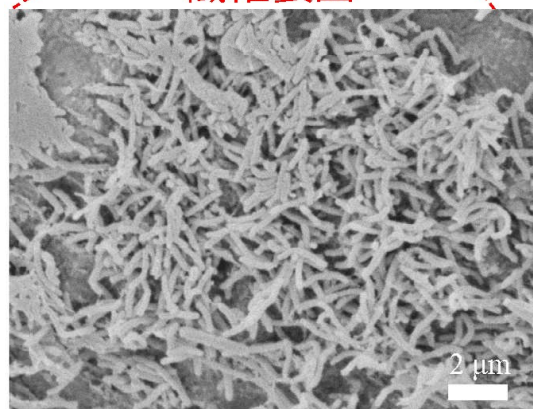
## 高強度繊維の海水分解試験



バイオフィルム内



繊維表面

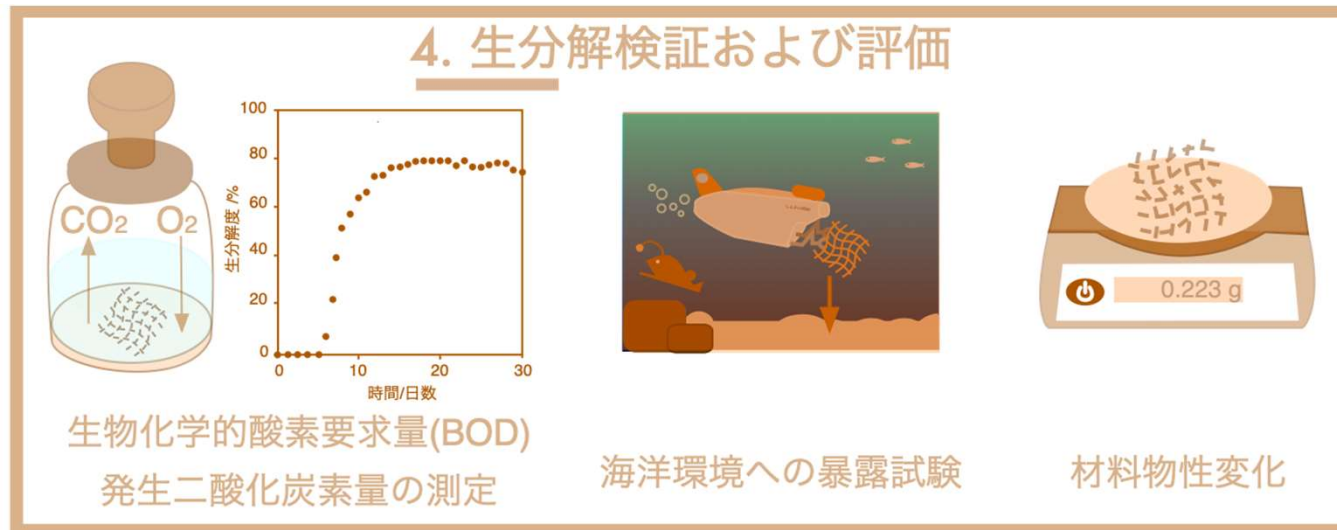


繊維表面近傍に存在する桿菌が主に酵素分解をしている可能性

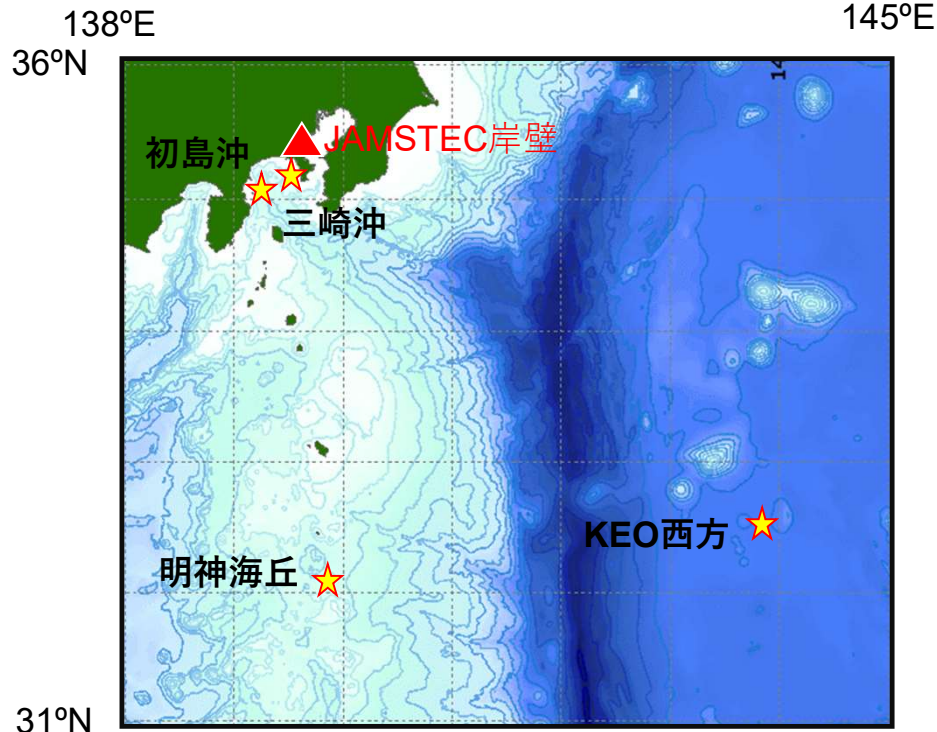
- 延伸倍率により分解速度制御可能
- 射出成型品と結晶化度—分解速度の関係は逆・結晶形態に関連する可能性

## 7. 現時点の主な成果

### 海洋生分解性の試験と評価 (E4)



|                |             |                      |
|----------------|-------------|----------------------|
| E4：海洋生分解性試験と評価 | <b>実験室内</b> | BOD試験系<br>人工海洋環境系    |
|                | <b>海洋環境</b> | 沿岸海域<br>深海海域<br>表層海域 |



- ・相模湾初島沖（水深854m）：  
既設サイト
- ・相模湾三崎沖（水深757m）：  
多量の大型ごみが蓄積
- ・深海平原のKEO西方（水深5502m）：  
海底の70%の面積を占める深海平原の代表
- ・明神海丘熱水噴出域（水深1294m）：  
加速試験場として有効
- ・JAMSTEC岸壁（水深0-5m）：  
光、波の影響を見られる他、実験期間を柔軟に設定可能



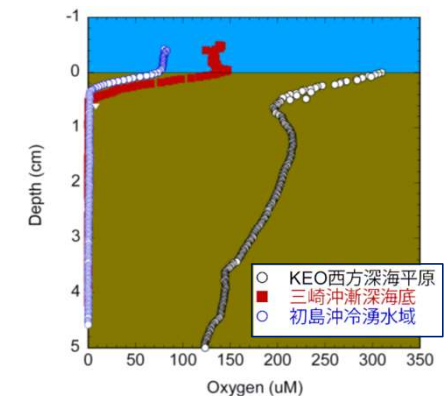
① チャンバー内に封入した多量の生分解性プラスチック候補素材



② 有人潜水船しんかい6500に搭載



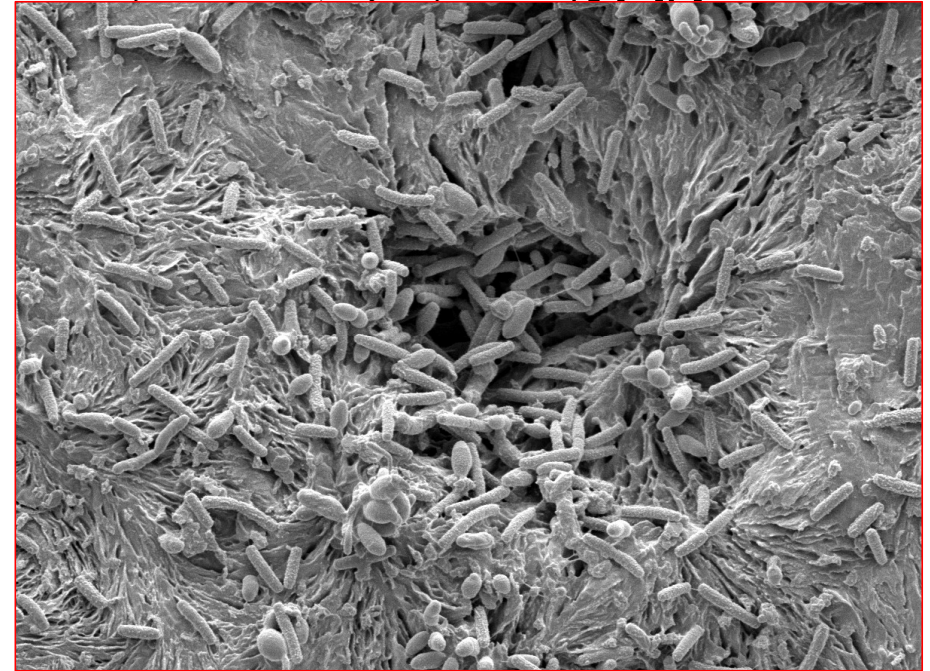
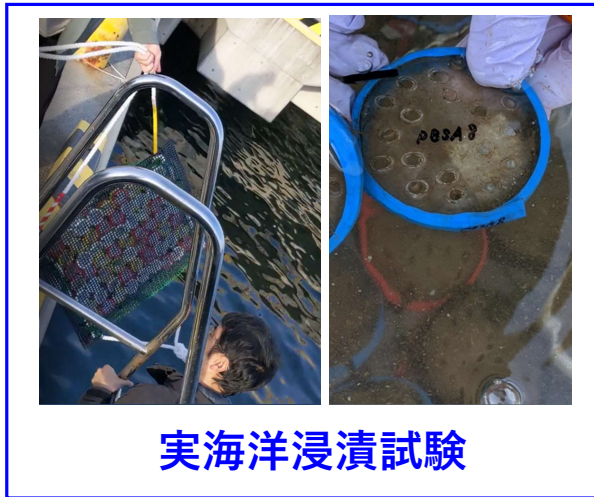
③ しんかい6500により深海底に設置、および環境試料採取



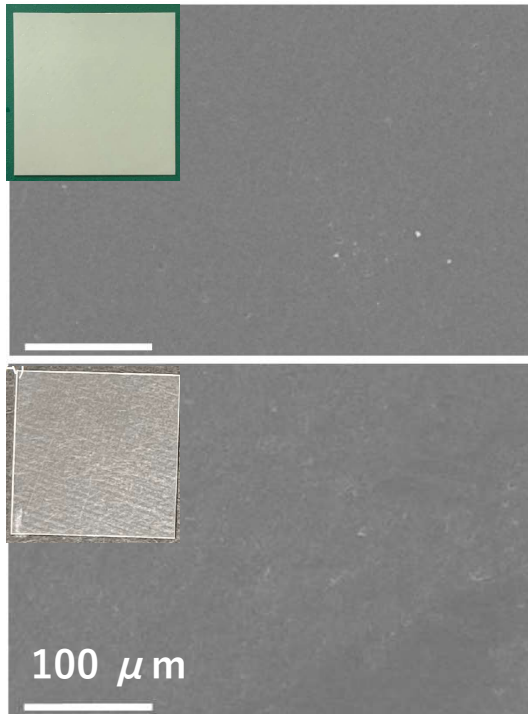
④ 海水一堆积物の環境計測（水温、塩分、溶存酸素、酸化還元電位、pHなど）



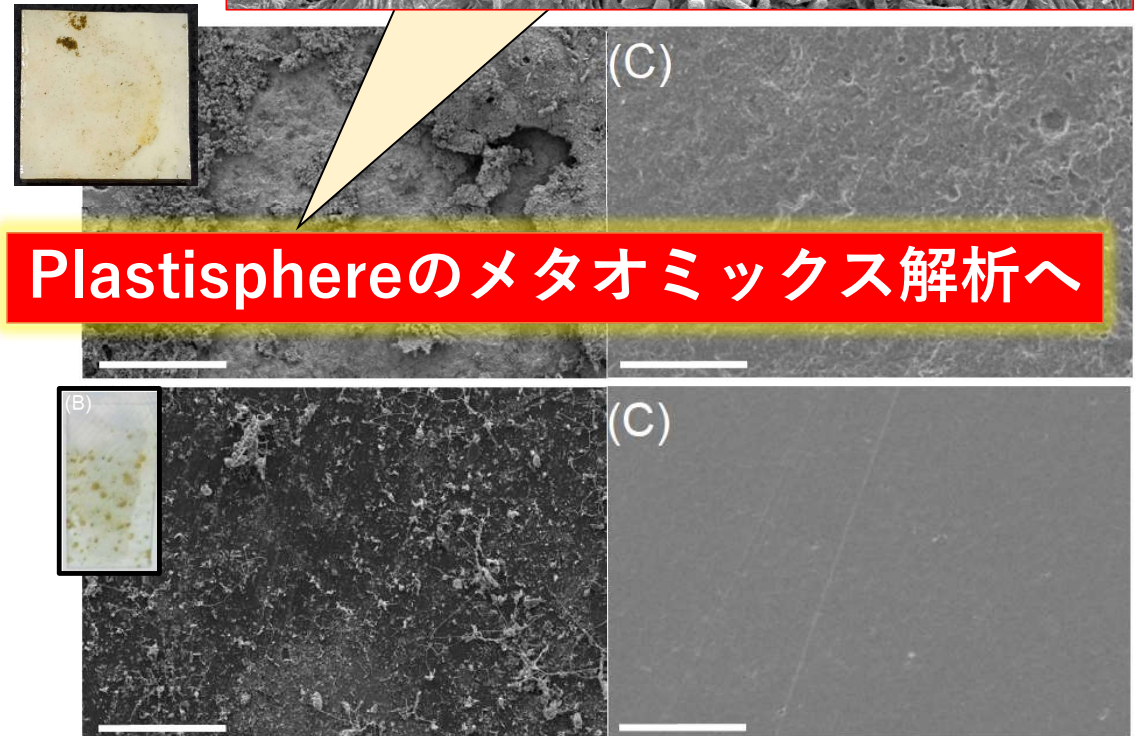
# 生分解を引き起こす微生物叢のメタオミックス解析



海洋分解性プラスチック



海洋非分解性プラスチック

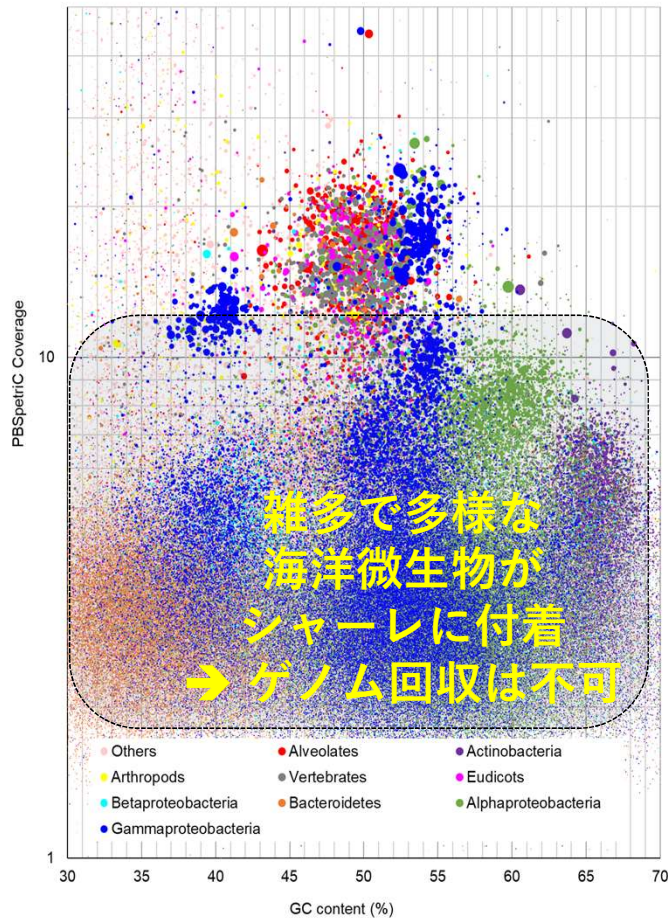


# 生分解を引き起こす微生物叢のメタオミックス解析

海洋**非**分解性プラスチック  
に付着した微生物叢

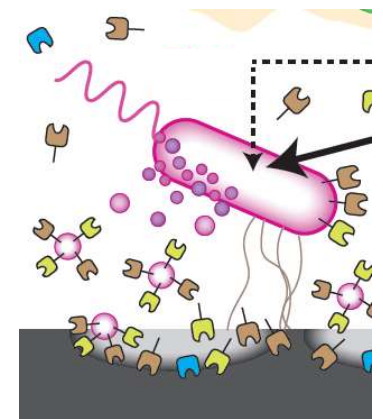
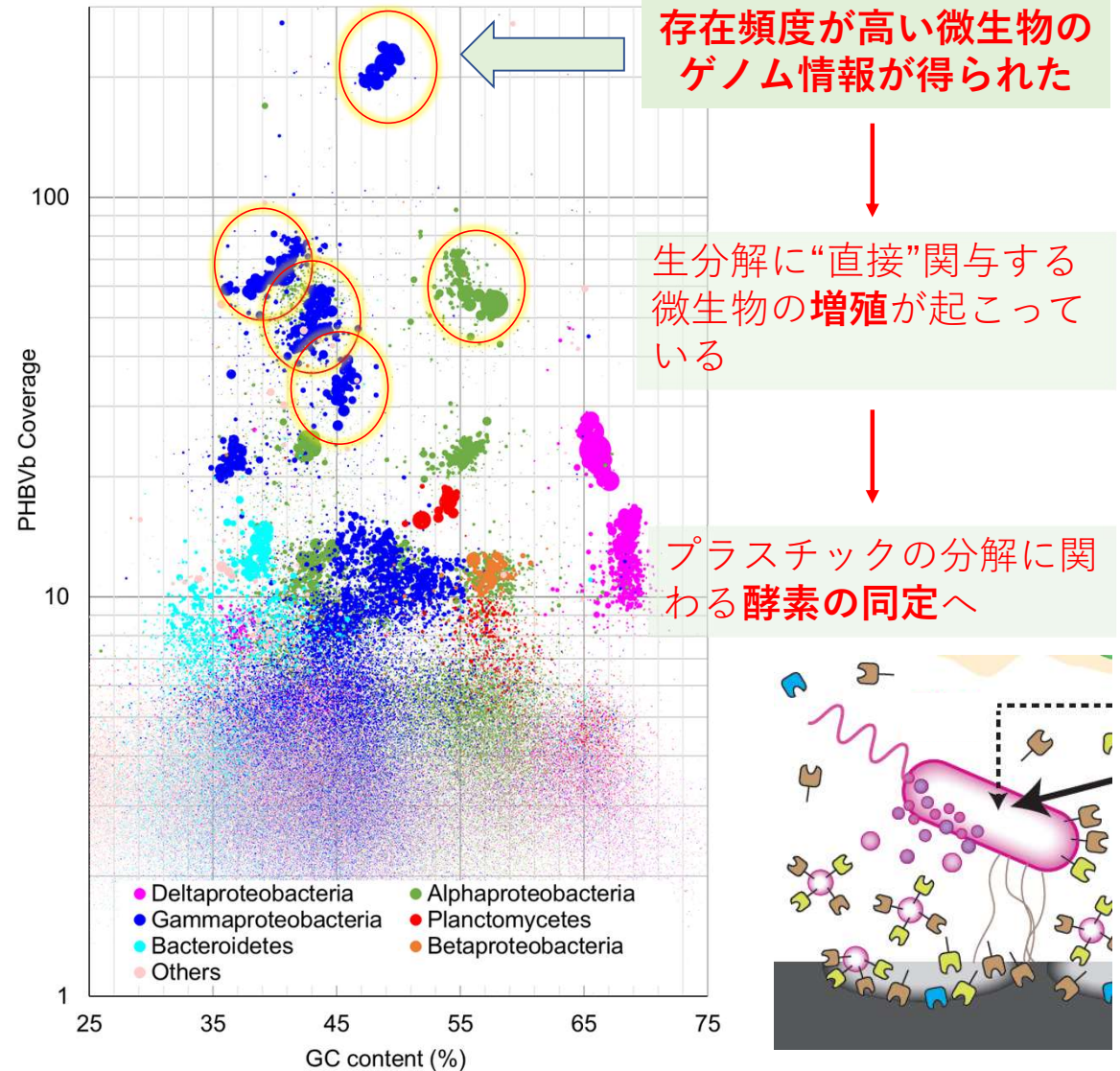
海洋分解性プラスチック  
に付着した微生物叢

多  
存在頻度



雑多で多様な  
海洋微生物が  
シャーレに付着  
→ ゲノム回収は不可

GC含量は微生物株に固有



# 8. クリーンアースな未来のために

クリーンアースサイクル  
クールアースサイクル



