

# プラスチック廃棄物の有用製品への Upcycling\* (アップサイクリング)

\*アップサイクル：創造的再利用、つまり副産物、廃棄物、無用または不要な製品を、より良い品質と環境価値の新しい材料または製品に変換するプロセス。

©リンダ・ワン (Nien-Hwa Linda Wang)

マキシム スペンサー ニコルス 教授

(Maxine Spencer Nichols Professor)

パデュー大学 デビットソン化学工学スクール

(Davidson School of Chemical Engineering Purdue University)

2020年10月31日 エール大学での講演資料

# 目次

- 序論
  - プラスチック汚染問題
  - 3つの重要課題:
    1. 2050年の地球は居住可能でしょうか？
    2. 我々は海洋や埋立地をきれいにできるでしょうか？
    3. 我々は地球を時間内に救うことはできるでしょうか？
- パデュー大学「廃プラスチック・アップサイクル技術」の特徴  
(Purdue plastic waste upcycling technologies)
  - 選択的連続抽出・吸着(Selective Sequential Extraction and Adsorption) "SSEA"
  - 水熱処理 (Hydrothermal Processing) "HTP"
- 結論

# 序 論



# 1. 2050年の地球は居住可能でしょうか？

“人類に残された時間は100年しかなく、さもないと滅びるだろう。”

-スティーブン・ホーキング, 2017年



写真 ©Geoff Robinson

- 要因
  - 地球温暖化
  - 人口過剰
  - パンデミック
  - 核戦争
- これら以外
  - プラスティック汚染

本当にあと100年もあるのでしょうか？

# 1. 2050年の地球は居住可能でしょうか？

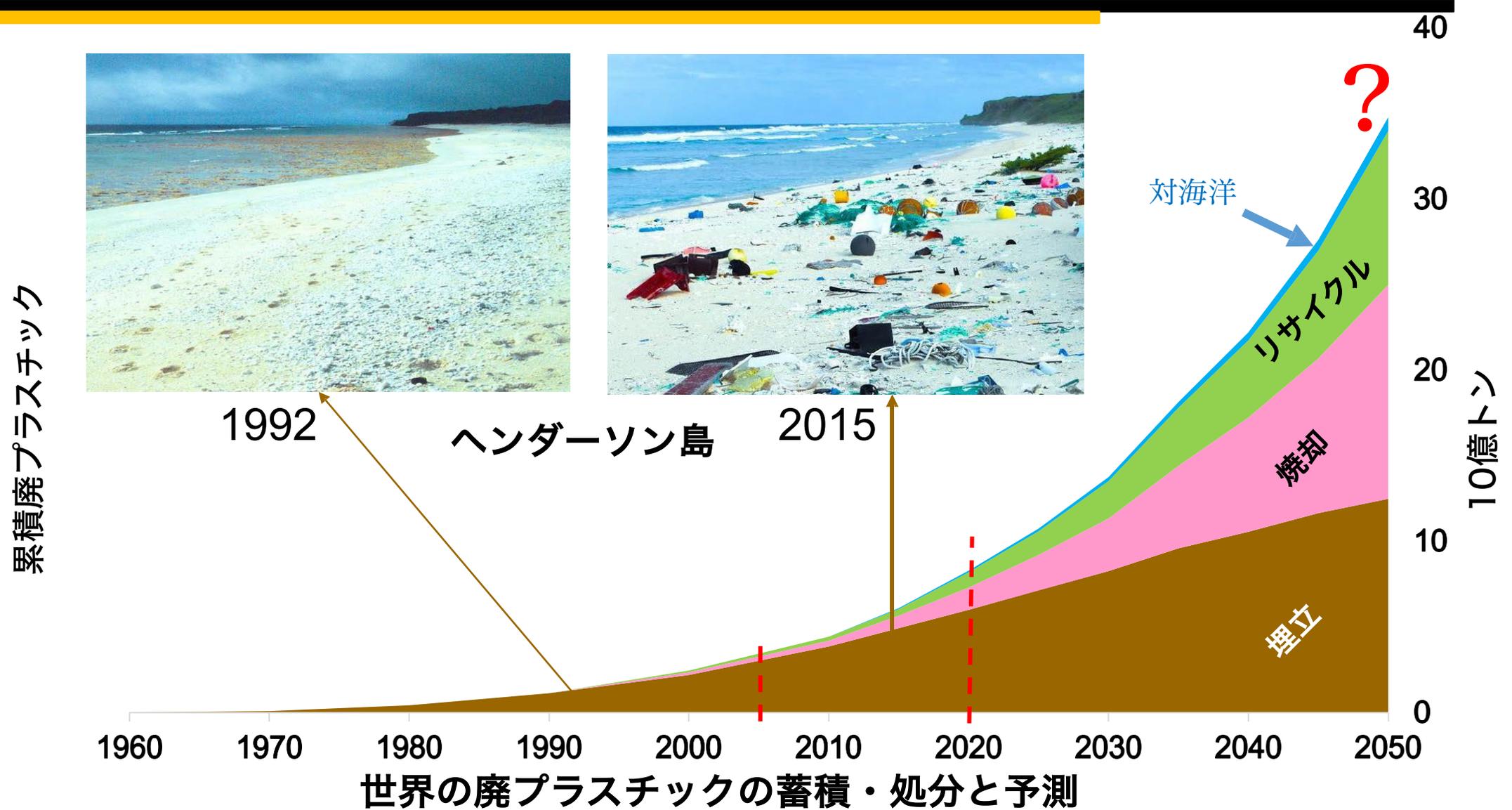


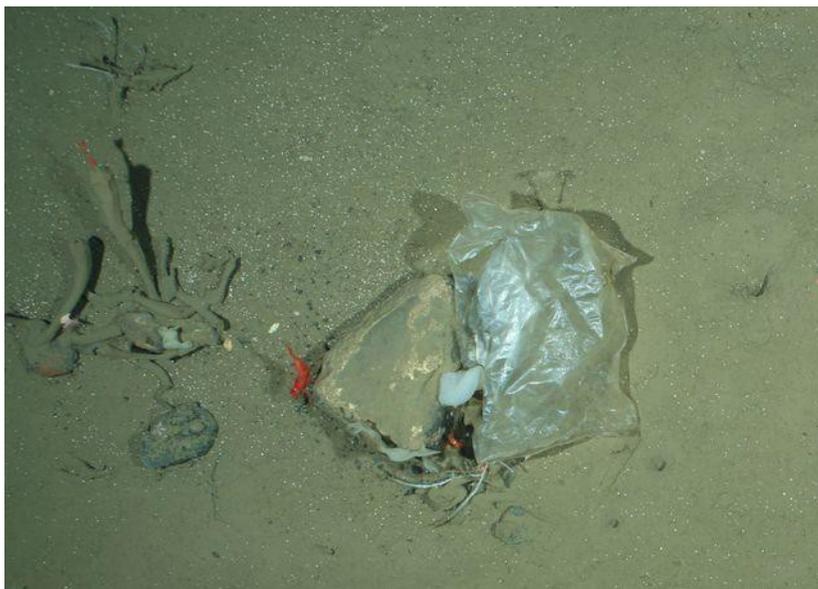
写真: ©Marshall Weisler (1992), Jennifer Lavers (2015)

# マリアナ海溝, 海底11km



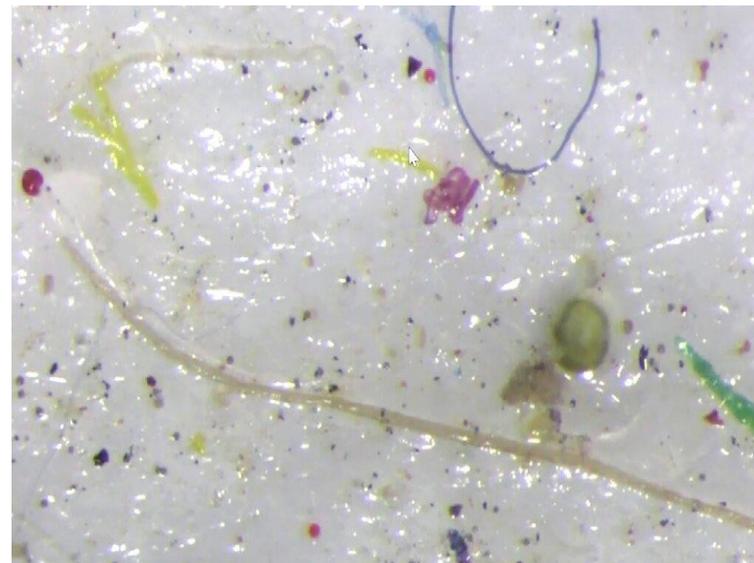
写真: ©NOAA(アメリカ海洋大気庁) Office of Ocean Exploration and Research (2019)

# プラスチックとマイクロプラスチック- アルプスから北極海へと、ゆっくりと環境を劣化



ビニール袋 北極海の海底 2.5km

写真 ©Alfred-Wegener-Institut/Melanie Bergmann/  
OFOS, 2017



アルプスから北極海の雪に含まれるマイクロプラスチック

写真 ©Bergmann et al, Sci. Advances, 2019

# どこにでもあるマイクロプラスチック-陸・淡水・海洋



## 2.我々は海洋や埋立地をきれいにできるでしょうか？

- **\$1.0/kg** 埋立地からプラスチック廃棄物を回収するためのコスト
  - 低コストで生産されたバージンプラスチック
- **\$0.003/ガロン** 地球には $3.5 \times 10^{20}$  ガロンの海水
  - **$\$10^{18}$**  (世界的なGDPの1万倍)
- 生態系への不可逆的なダメージ
- 水、食糧供給、人間の健康への避けられない影響

# プラスチック廃棄物削減のための方法

---

- 焼却 (12%)

大気汚染、低エネルギーリターン、費用(tipping fees )が必要

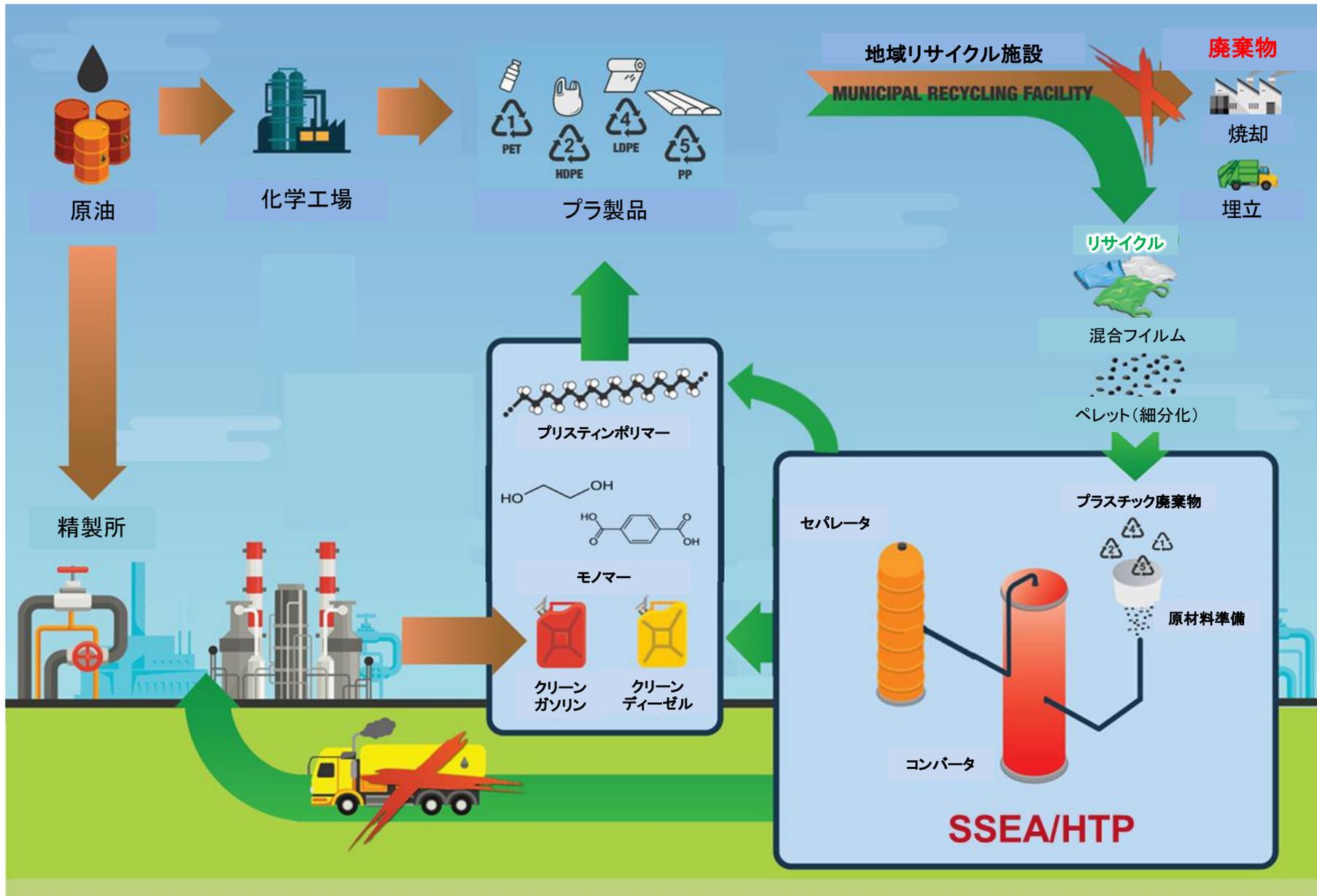
- 機械的なりサイクル (分別された廃棄物の 9%未満)

- 熱分解 (開発中)

- 触媒変換 (研究中)

- 生分解 (研究中)

# 廃プラスチックをポリマー、燃料、モノマーにアップサイクル



# 選択的連続抽出・吸着(SSEA)

分別された廃棄物をプリステイン（天然）ポリマーへと処理



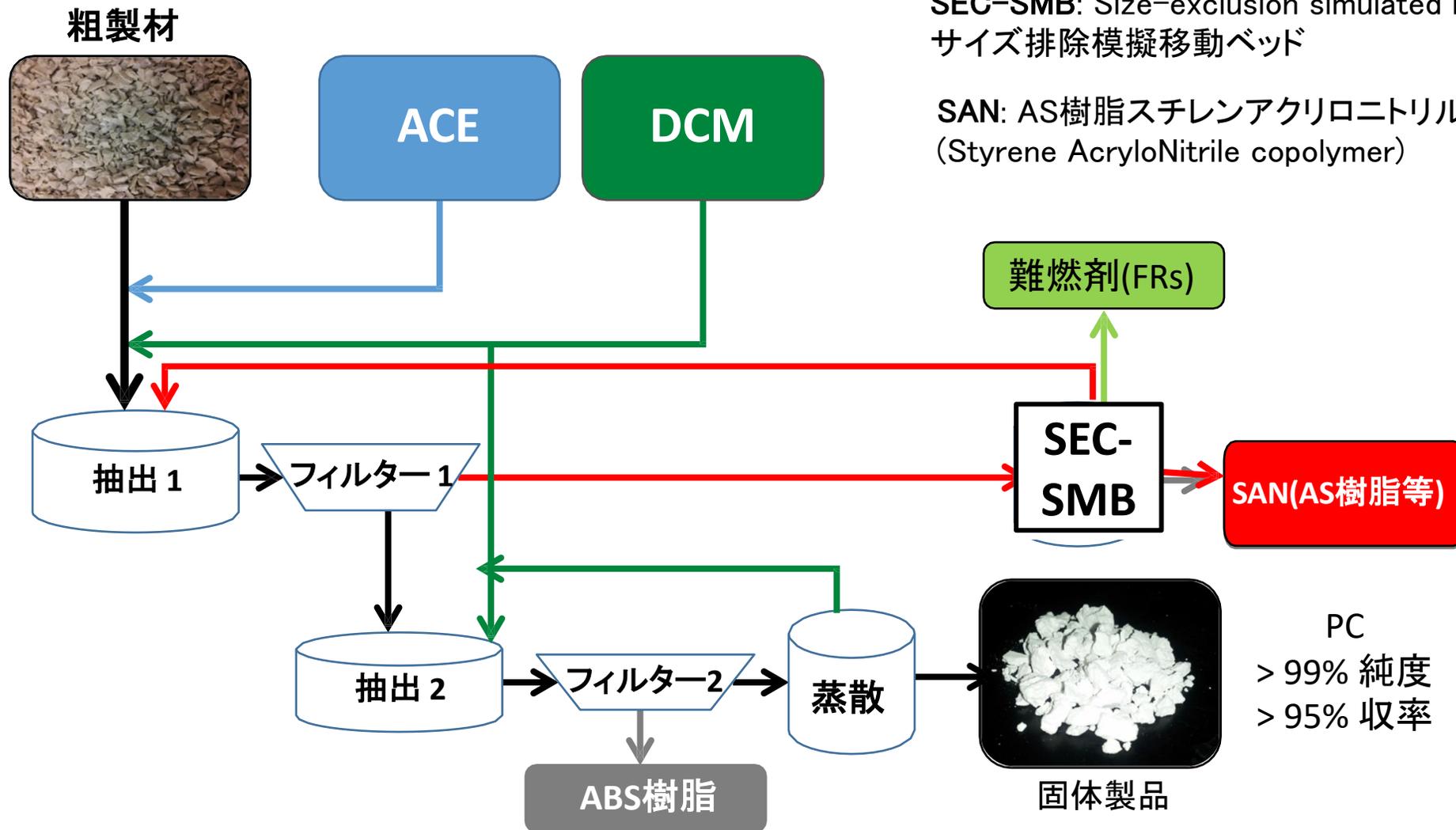
# 分別廃棄物をプリステイン・ポリマーに変換するSSEA技術 (タイプ II, IV, V, VI, and PC)



## プラスチックのタイプ(US)

- 1: PETまたはPETE  
(ポリエチレンテレフタレート)
- 2: HDPE(高密度ポリエチレン)
- 3: PVC(ポリ塩化ビニル)
- 4: LDPE(低密度ポリエチレン)
- 5: PP(ポリプロピレン)
- 6: PS(ポリスチレン)
- 7: その他

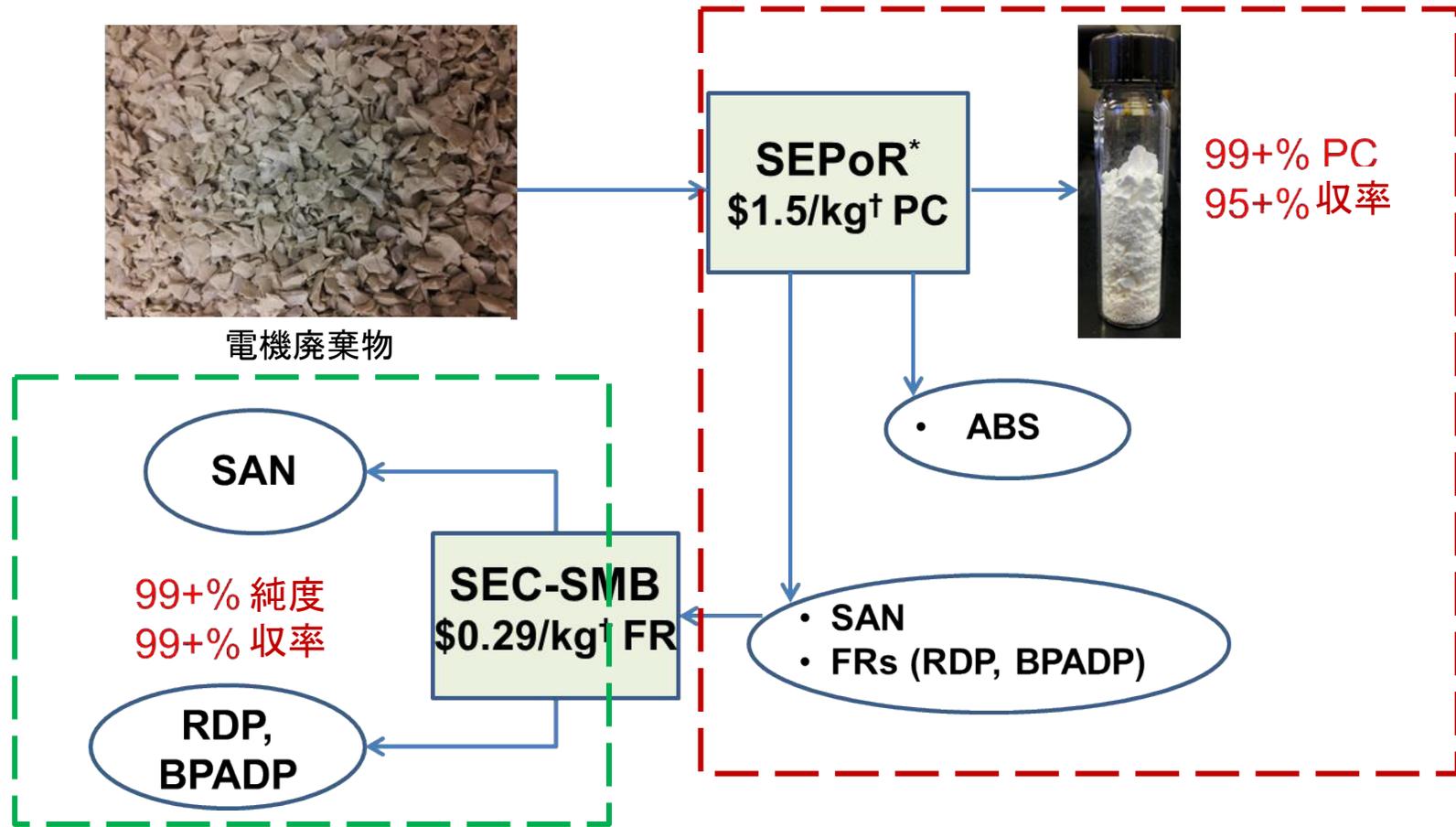
# PC, 難燃剤, and AS樹脂を回収するSSEA技術



SEC-SMB: Size-exclusion simulated moving beds  
サイズ排除模擬移動ベッド

SAN: AS樹脂スチレンアクリロニトリルコポリマー  
(Styrene AcryloNitrile copolymer)

# 連続抽出とSMB分離



\*Weeden et al.,  
*Environ. Sci. Technol.*  
**49**, 2425–2433 (2015)

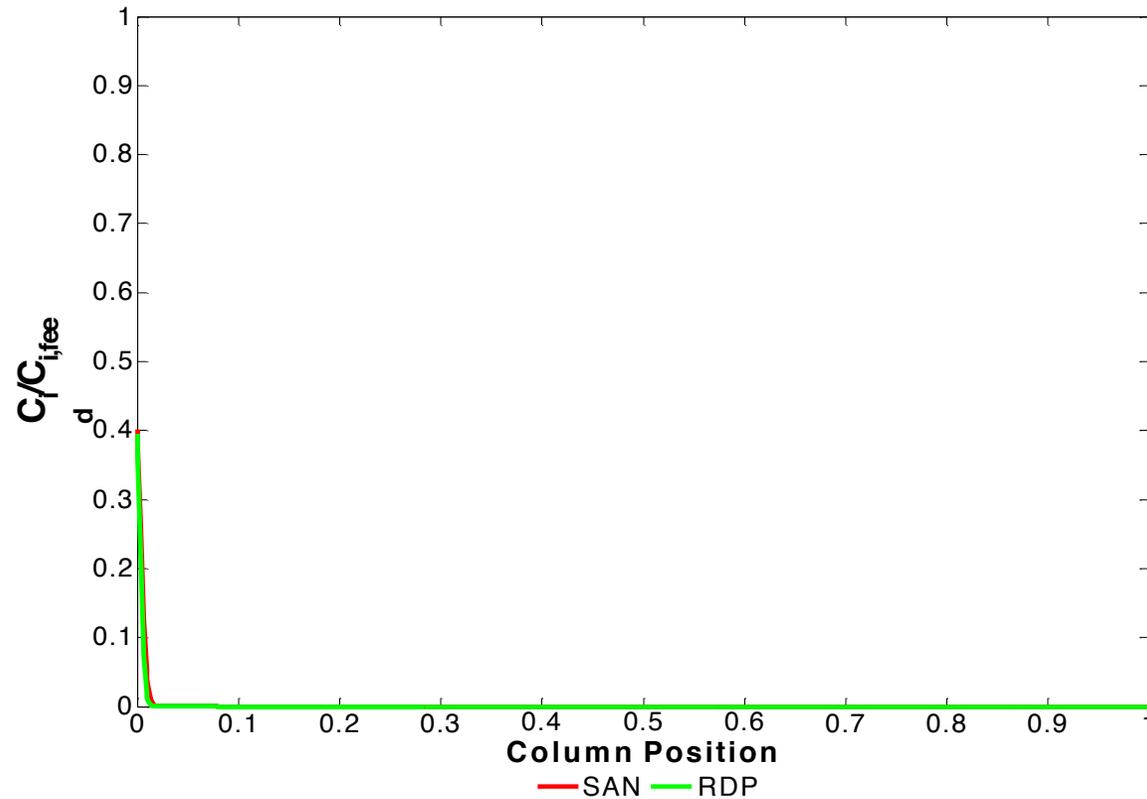
SAN: AS樹脂スチレンアクリ  
ロニトリルコポリマー  
(Styrene AcryloNitrile  
copolymer)

FR: 難燃剤リン酸エステル類  
レゾルシノールビス-ジフェニ  
ルホスフェート(RDP)

Weeden and Wang, *J. Chromatogr. A* **1418**, 54-76 (2015)  
Weeden et al., *J. Chromatogr. A* **1422**, 99-116 (2015)

# AS樹脂から難燃剤を分離するサイズ排除溶出技術

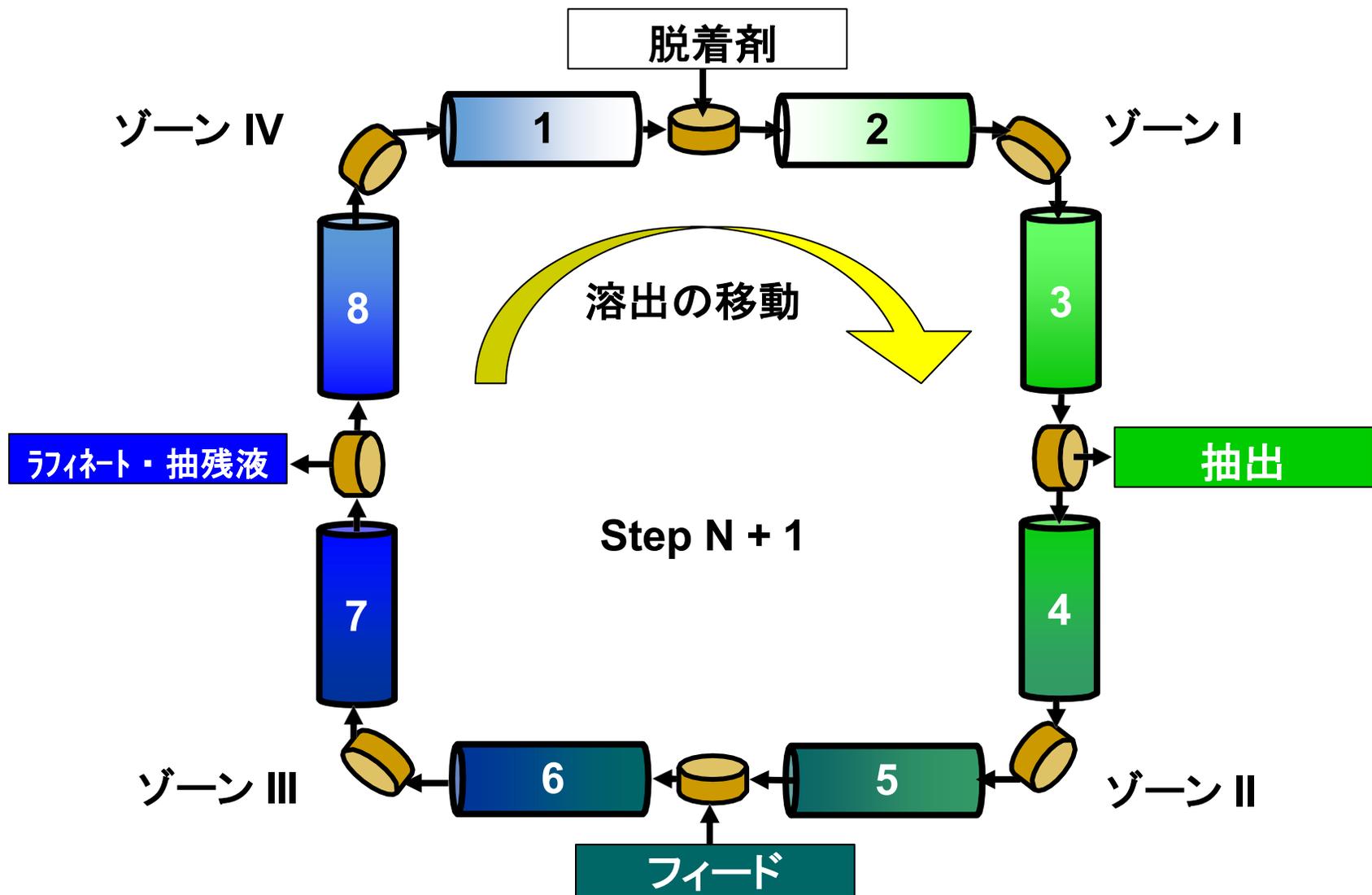
## AS樹脂からRDPの溶出



### 課題

- 製品の希釈
- 低い吸着生産性
- 溶剤の消費量

# AS樹脂から難燃剤を分離するSEC-SMB技術



吸収(absorption)

吸収(absorption)

別の相(吸収媒と)

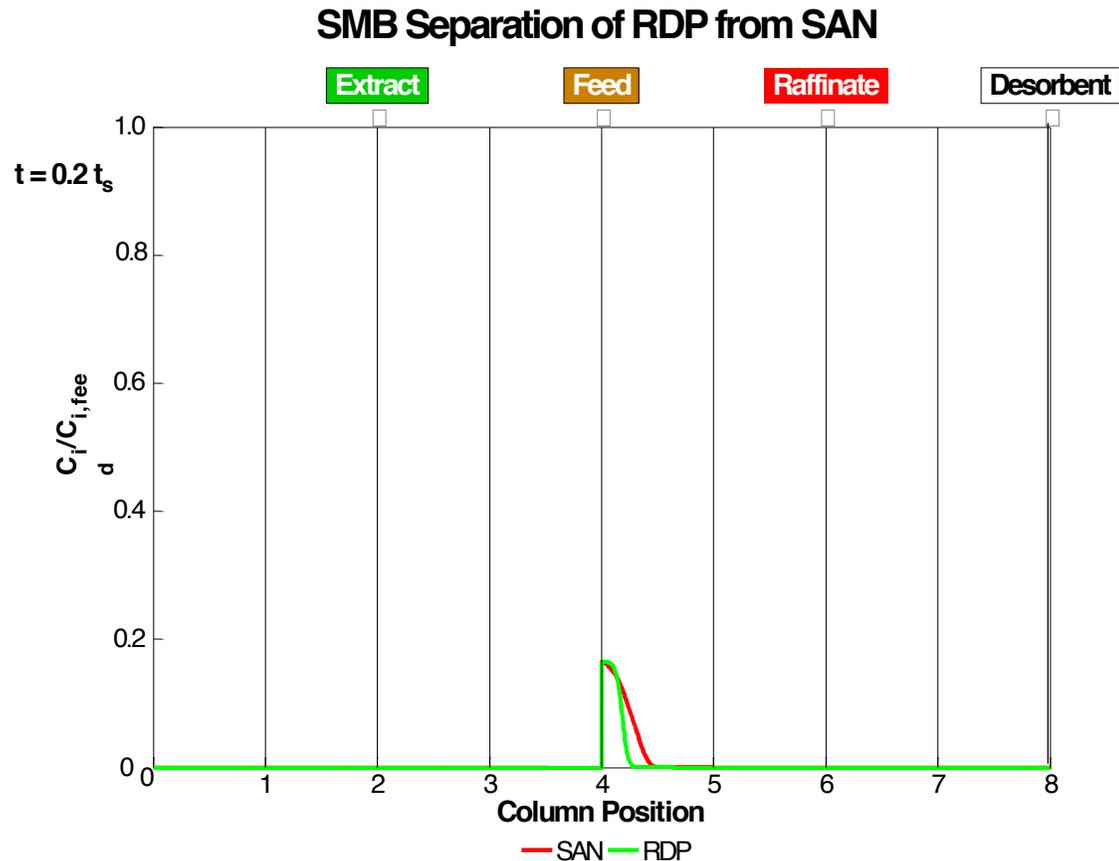
語幹のabは「～か

吸収は物理吸収

スポンジが水を吸

水分を吸収する

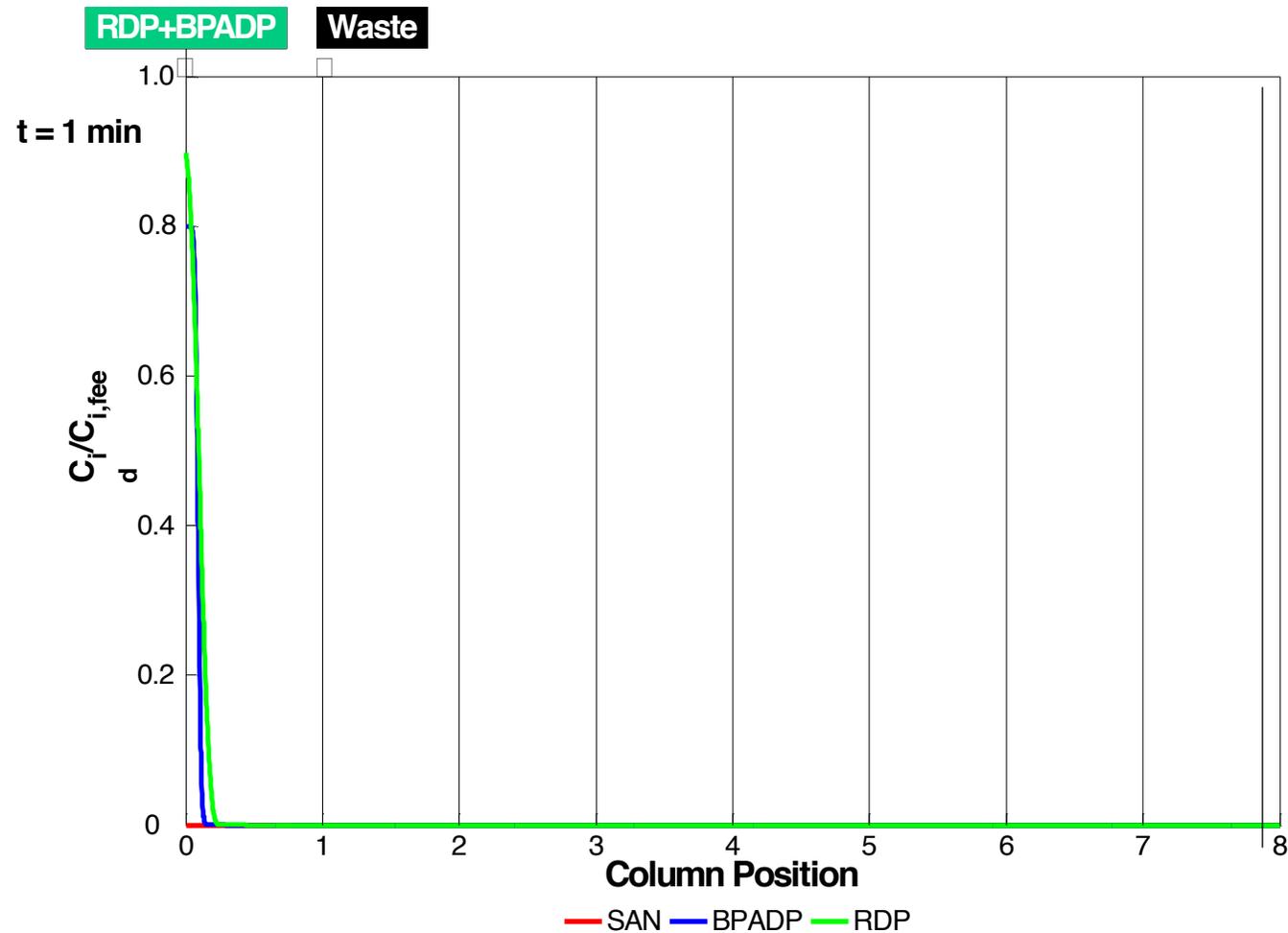
# AS樹脂から難燃剤を分離するSEC-SMB技術

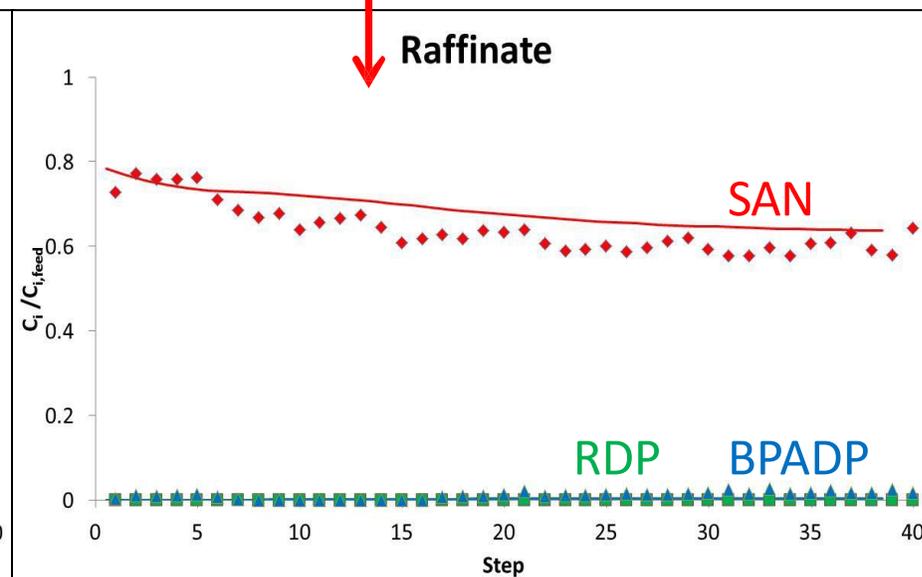
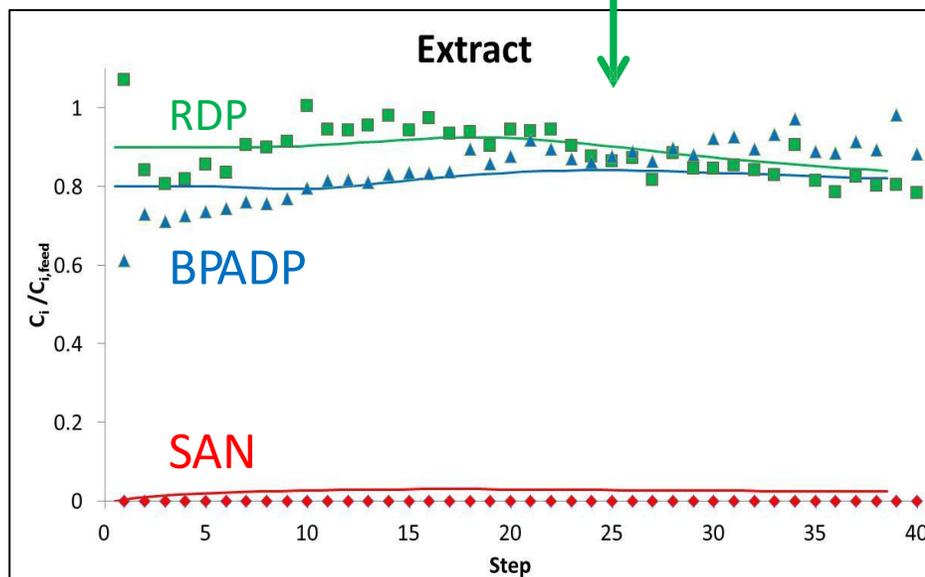
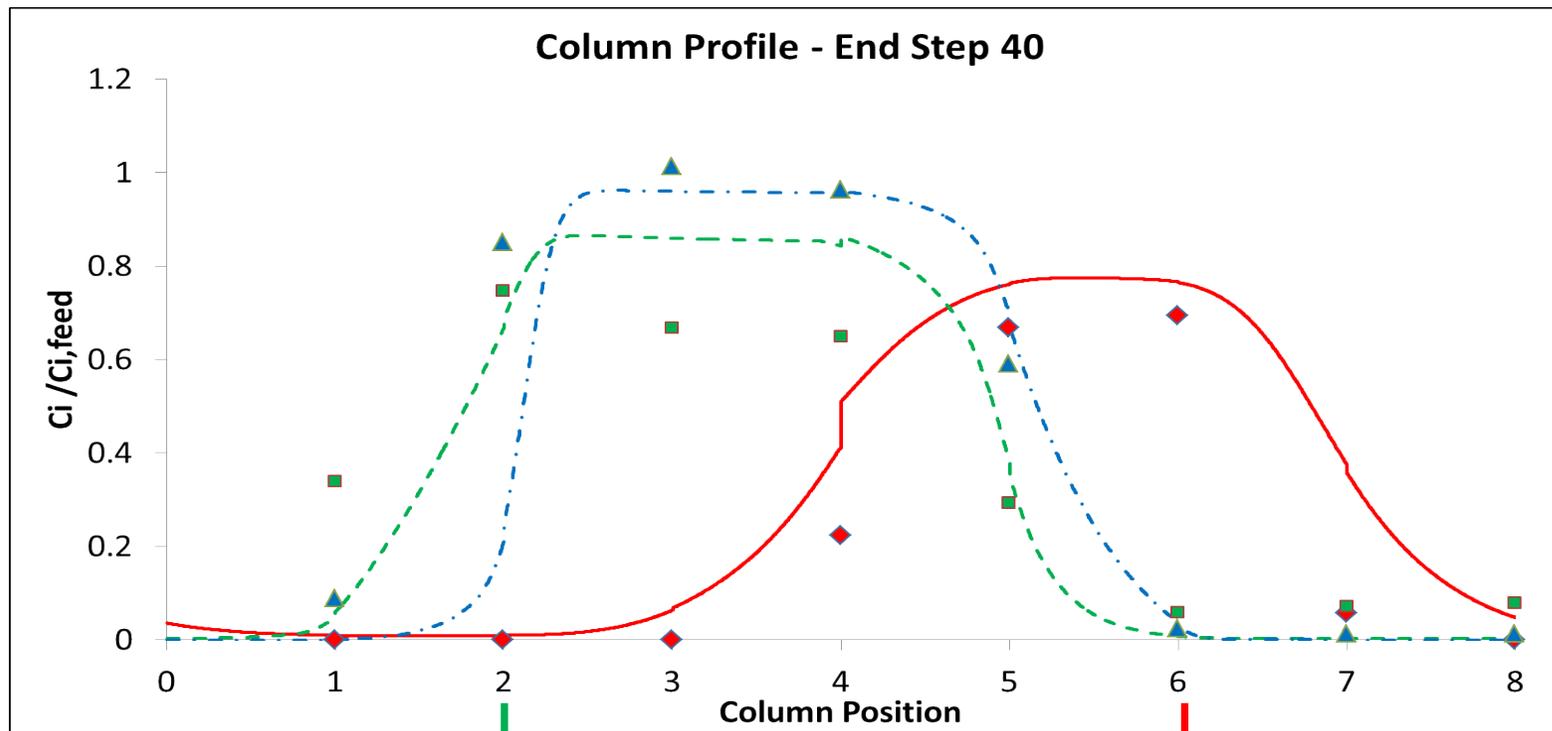


Parameter (99% Purity & Yield) (10,000 tonnes FR/year)	Batch SEC	Optimized SEC-SMB
Feed Concentration (wt.% FR)	10	10
Product conc./Feed conc.	0.17	0.83
Equipment cost (\$/kg FR)	0.14	0.04
Solvent cost (\$/kg FR)	2.23	0.18
Sorbent cost (\$/kg FR)	1.59	0.07
<b>Total cost (\$/kg FR)</b>	<b>3.96</b>	<b>0.29</b>

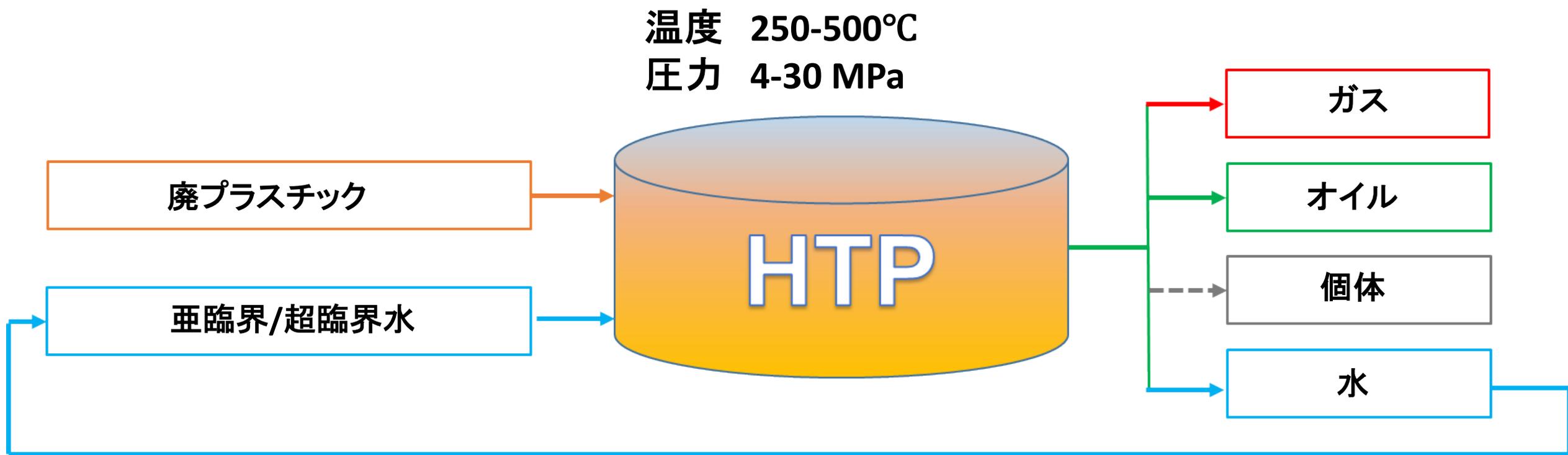
# RDP, BPADP と SAN を迅速に分離する SEC-SMB 技術

## Preloading of RDP & BPADP





# プラスチック廃棄物の燃料への水熱処理技術 (HTP)



# 廃棄物のガソリン・ディーゼルへの変換

(a)



HTPガソリン



市販ガソリン

(b)



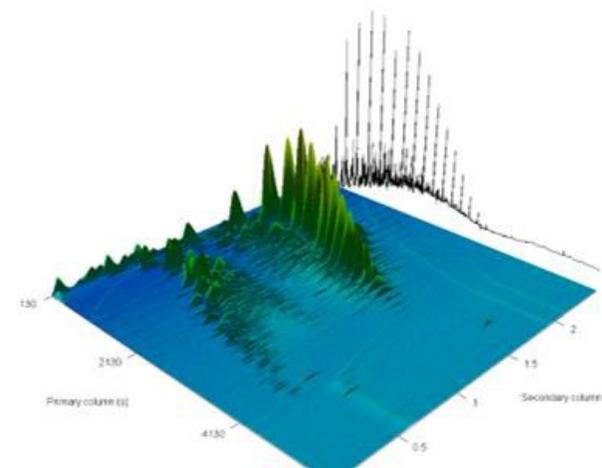
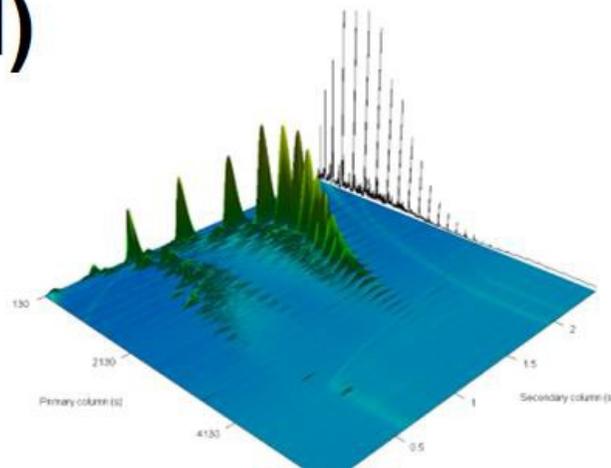
HTPディーゼル 市販ディーゼル

(c)

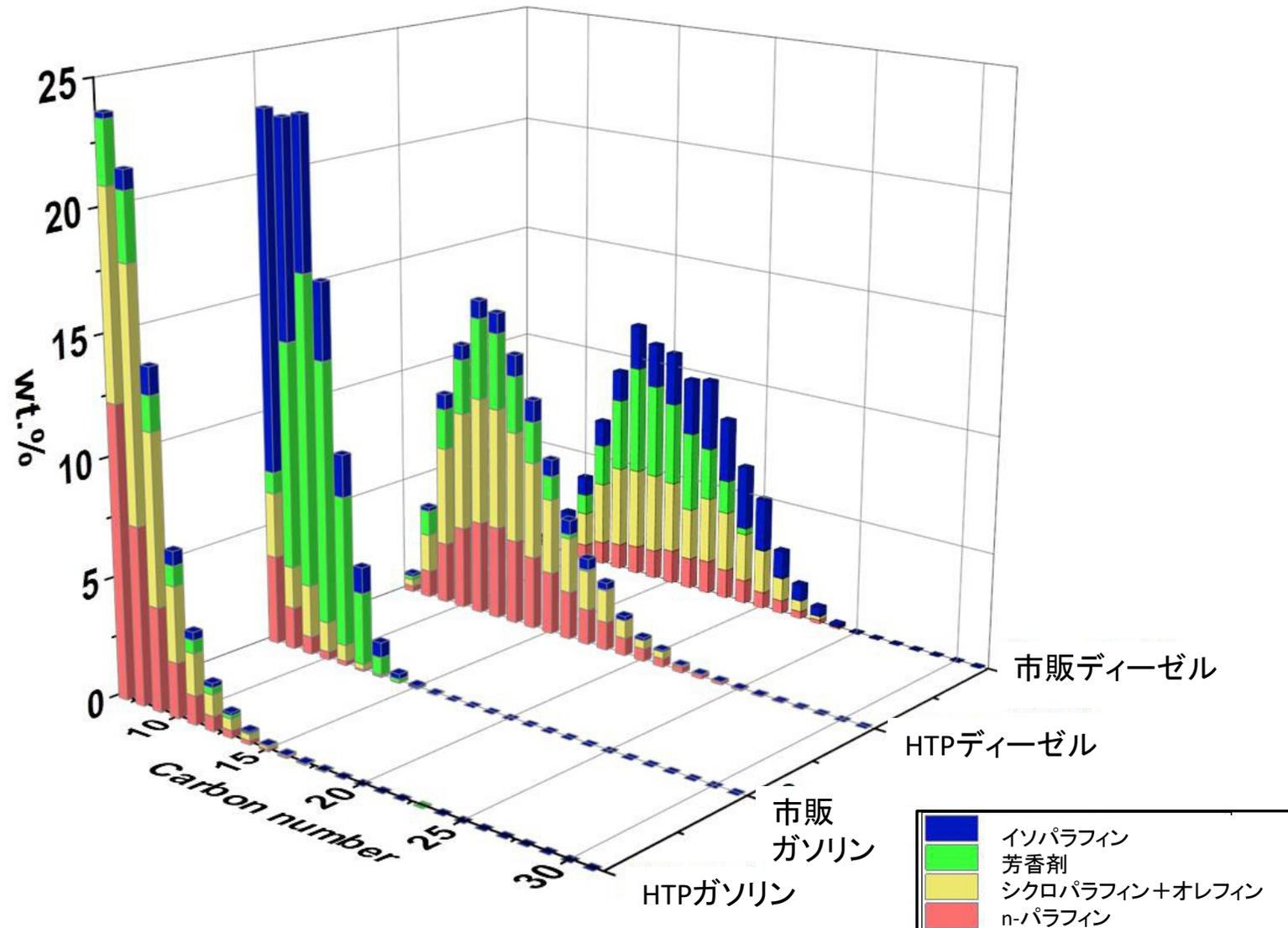


HTP重油

(d)

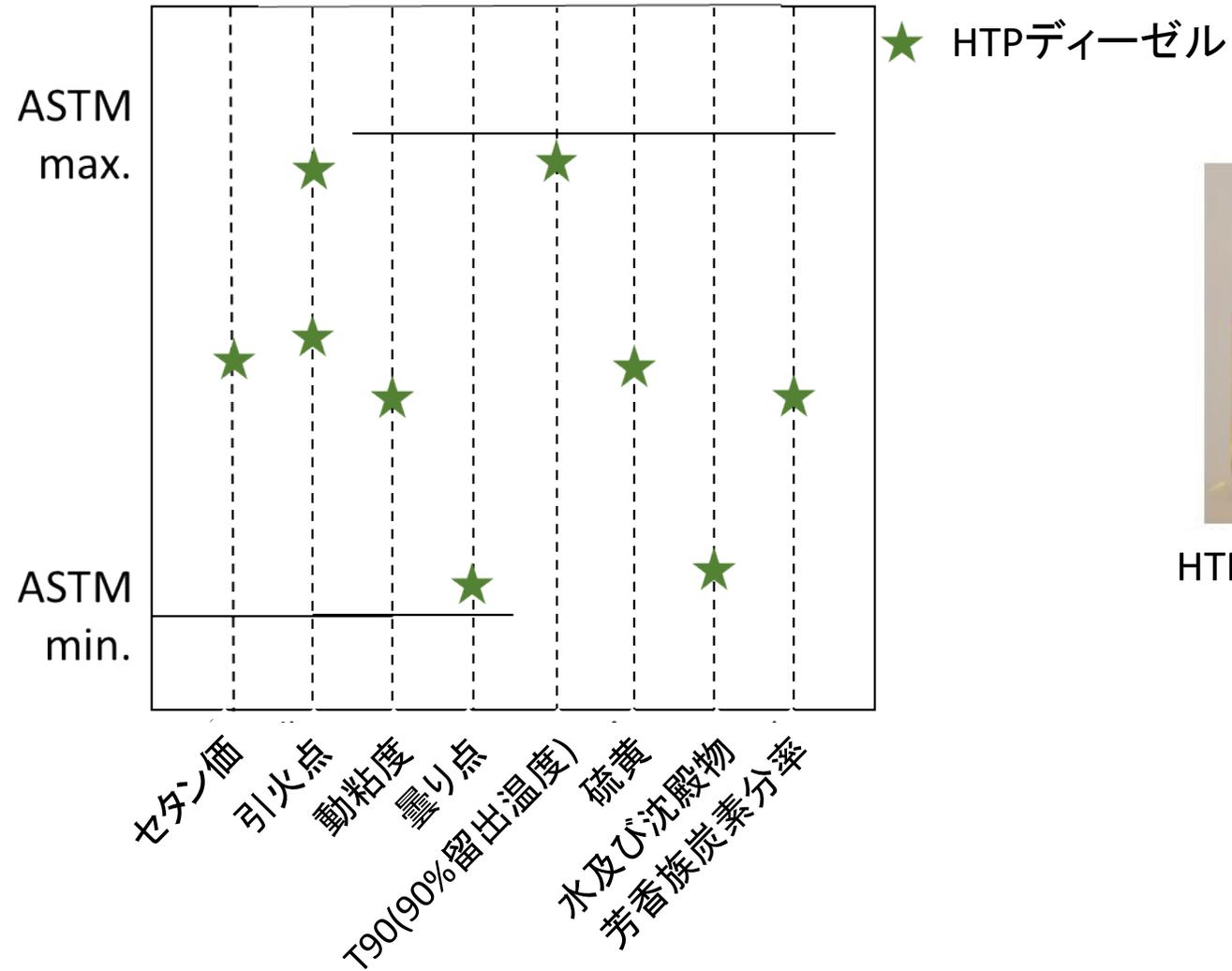


# PE廃棄物のガソリン・ディーゼルへの変換



# PEによるディーゼル燃料の品質

超低硫黄軽油No.1-D

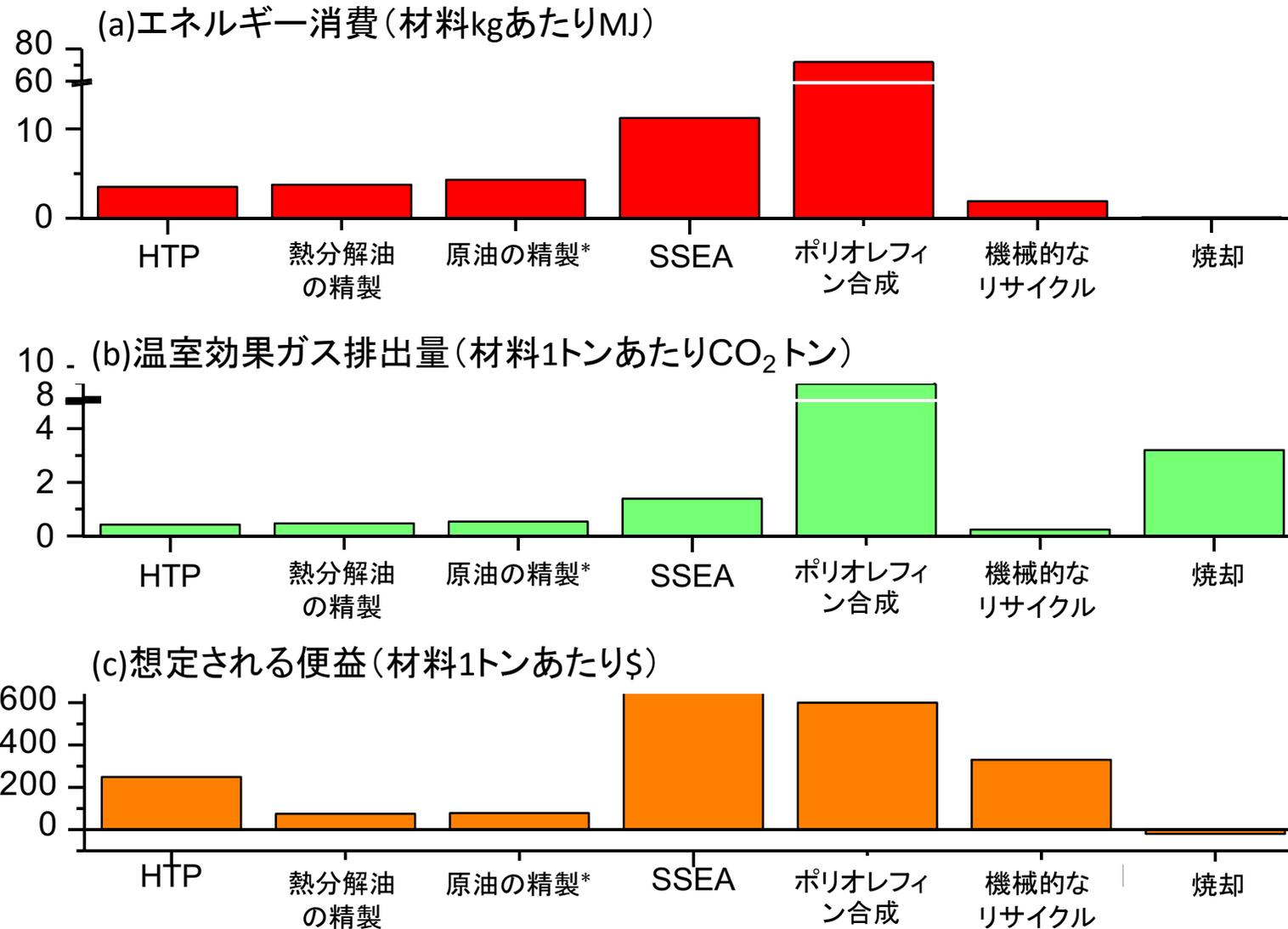


HTPディーゼル



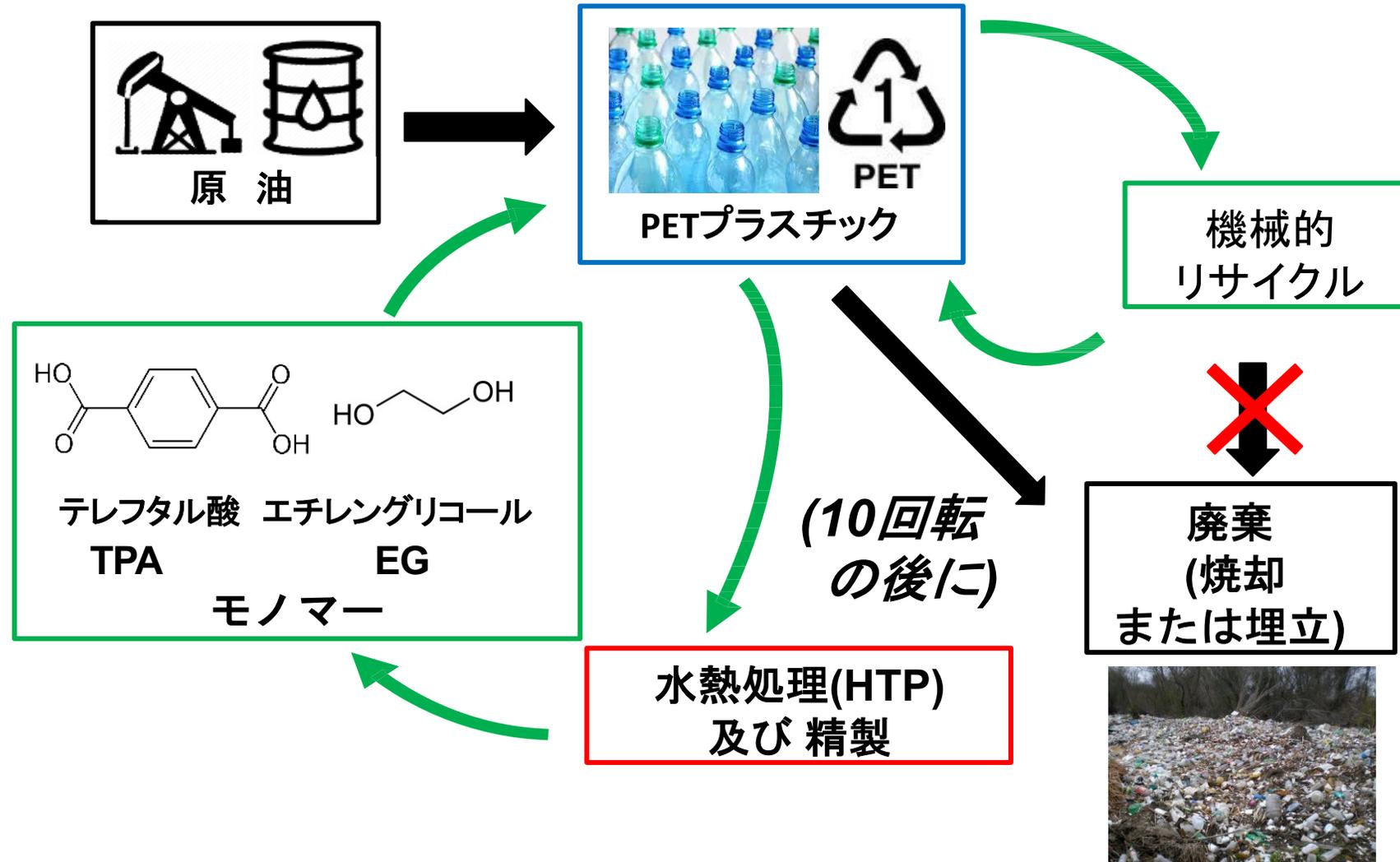
市販ディーゼル

# エネルギー消費, 温室効果ガス排出量, 及び効果

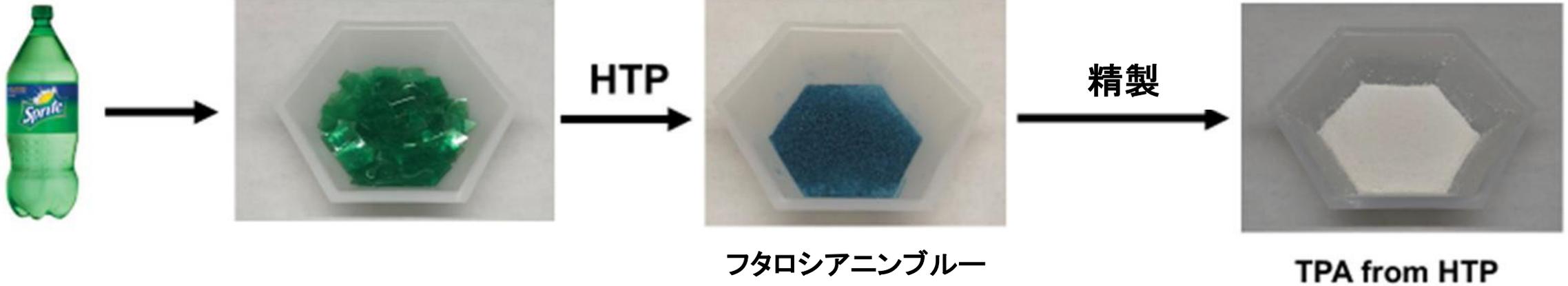


\*文献から得られたデータ

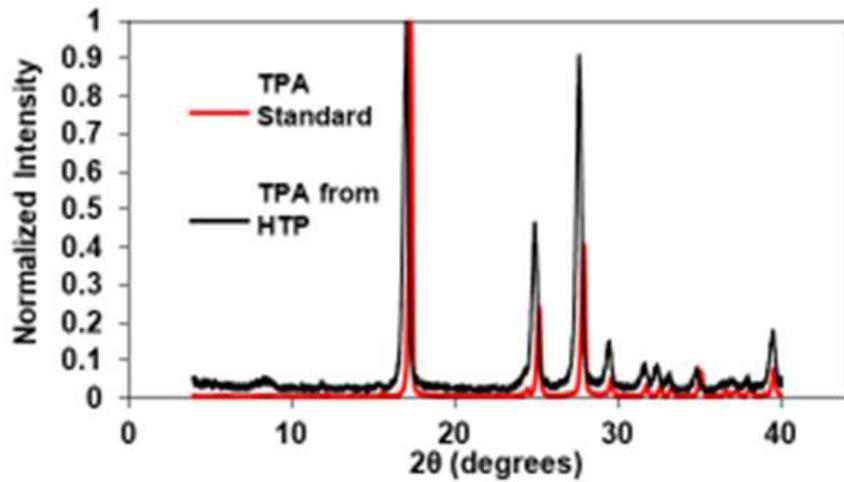
# ポリエチレン・テレフタレート (PET, タイプ 1) のモノマー (テレフタル酸とエチレングリコール)へのHTPによる変換



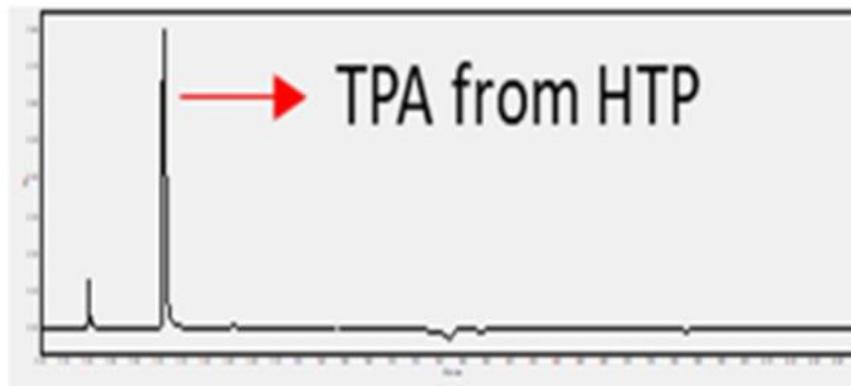
# PETボトルのモノマーへのHTP変換



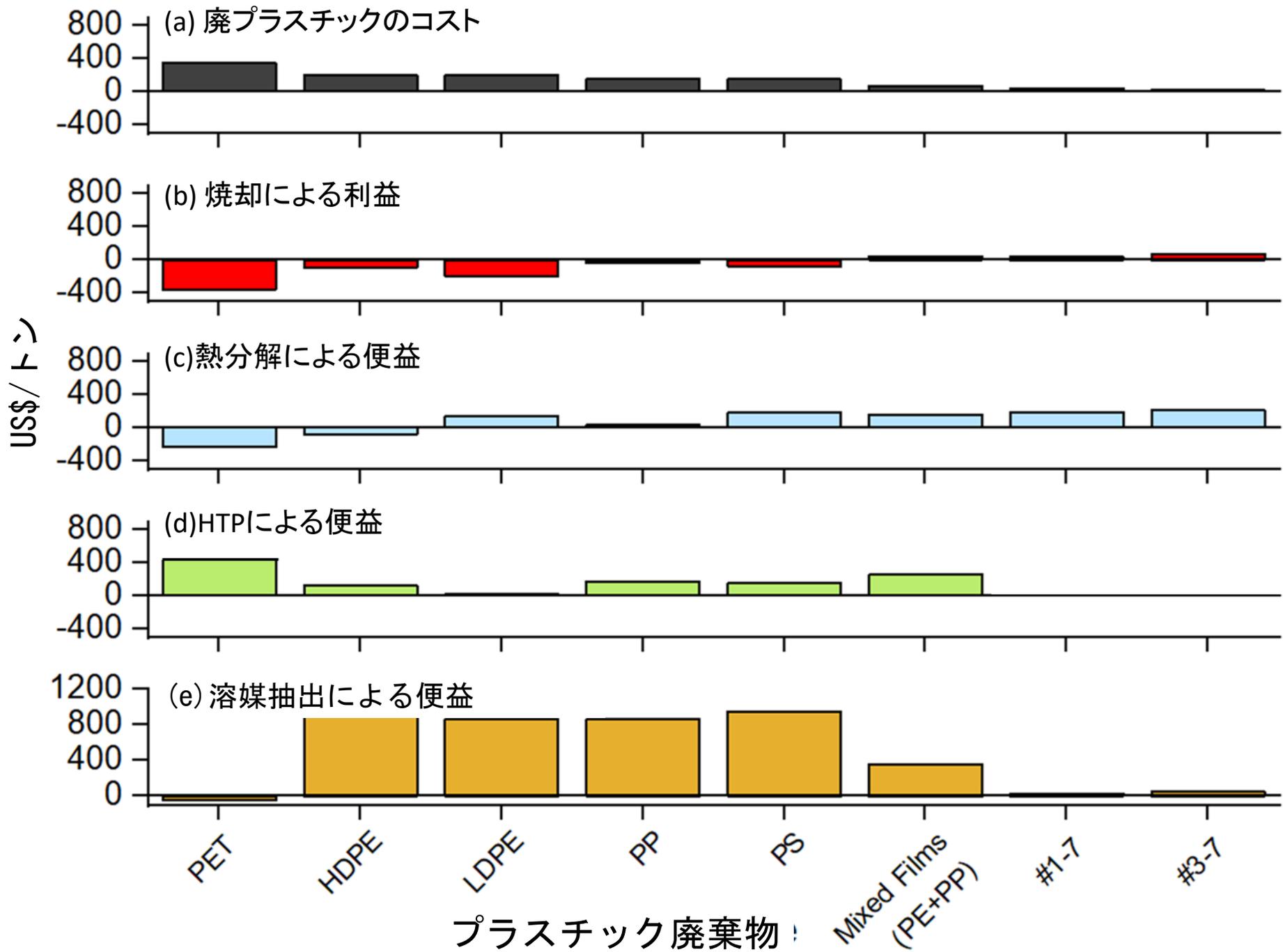
## X線回析



## 高速液体クロマトグラフィー



TPA標準品, 99+%



- プラスチックのタイプ(US)
- 1: PETまたはPETE (ポリエチレンテレフタレート)
  - 2: HDPE(高密度ポリエチレン)
  - 3: PVC(ポリ塩化ビニル)
  - 4: LDPE(低密度ポリエチレン)
  - 5: PP(ポリプロピレン)
  - 6: PS(ポリスチレン)
  - 7: その他

# 廃プラスチックのリサイクルの他のメリット

---

これらによるコスト削減

-環境の清掃費用

-生態系の回復費用

-医療費

# 想定されるインパクト

- プラスチック廃棄物の60～80%を有用な製品に変換する
- 1年間に回収できるのは、
  - 2,000億ドル相当の天然ポリオレフィン
  - 1000億ドル相当のガソリン/ディーゼル燃料
  - 140億ドルのPETモノマー
- 1トンのプラスチック廃棄物から1～6トンのCO<sub>2</sub>排出量を削減
- 原油消費量の削減
- 材料の循環利用
- 環境と人の健康に対するプラスチック汚染のリスクを低減

### 3.我々は地球を時間内に救うことはできるでしょうか？

できます！！

You can help!

- 置き換え (Replace)
- 削減 (Reduce)
- リサイクル (Recycle)
  - 回収率を14%から80%以上に向上させる
  - プラスチックとゴミを混ぜない
  - 清潔で分別されたプラスチック廃棄物が最高の利益を生む
- メッセージを広める

# チーム



**L. Wang**  
Chemical  
Engineering  
Conversion  
Separation



**G. Kilaz**  
Engineering  
Technology  
Catalysis, Fuels



**W.T. Chen**  
Plastic Eng., UML  
Polymer Processing  
Characterization



**P. Vozka**  
Chemistry &  
Biochem, CSU, LA  
Fuels, Analysis



**K. Jin**  
Engineering  
Technology



**C. Gentilcore**  
Chemical  
Engineering



**Y. Xiao**  
Chemical  
Engineering  
Reaction  
Engineering



**L. Dahmen**  
Managing Director  
Center of the  
Environment

# 刊行物

- 特許

- Chen, W. T.; Wang, N.-H. L.; Jin, K. US20190322832A1 - Method of converting plastic waste into useful stock. Oct 24, 2019. <https://patents.google.com/patent/US20190322832A1/en>.

- **SSEA**

- Weeden, G. S.; Soepriatna, N. H.; Wang, N.-H. L. Method for Efficient Recovery of High-Purity Polycarbonates from Electronic Waste. *Environ. Sci. Technol* 2015, 49, 46. <https://doi.org/10.1021/es5055786>.
- Weeden, G. S.; Ling, L.; Soepriatna, N. H.; Wang, N. H. L. Size-Exclusion Simulated Moving Bed for Separating Organophosphorus Flame Retardants from a Polymer. *J. Chromatogr. A* 2015, 1422, 99–116. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2015.09.064>.
- Weeden, G. S.; Wang, N. H. L. Speedy Standing Wave Design of Size-Exclusion Simulated Moving Bed: Solvent Consumption and Sorbent Productivity Related to Material Properties and Design Parameters. *J. Chromatogr. A* 2015, 1418, 54–76. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2015.08.042>.

- **HTP**

- Chen, W. T.; Jin, K.; Linda Wang, N. H. Use of Supercritical Water for the Liquefaction of Polypropylene into Oil. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 2019, 7 (4), 3749–3758. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b03841>
- Jin, K.; Vozka, P.; Kilaz, G.; Chen, W. T.; Wang, N.-H. L. Conversion of Polyethylene Waste into Clean Fuels and Waxes via Hydrothermal Processing (HTP). *Fuel* 2020, 273 (117726). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117726>.

# Questions? Discussion?

---

*Thank  
You*