環境問題対応型研究（資源循環領域）3-1801

先端的な再生技術の導入と動脈産業との融合に向けたプラスチック循環の評価基盤の構築

体系的番号：JPMEERF20183001

重点課題：3Rを推進する技術・社会システムの構築

行政ニーズ：プラスチックの3R高度化に向けたシステム最適化に関する研究

研究期間：2018～2021年度

研究代表者：中谷 隼（東京大学）

研究組織

✓ サブテーマ①　【東京大学】

- 中谷 隼　（都市環境工学）
  - ➢ 研究代表者
  - ➢ サブテーマリーダー
- 村上 進亮　（資源経済学・社会システム評価）
- 森口 祐一　（産業エコロジー）

✓ サブテーマ②　【東北大学】

- 福島 康裕　（化学システム工学）
  - ➢ サブテーマリーダー
- 大野 肇　（資源循環学）
- 吉岡 敏明　（リサイクル工学）
- 熊谷 将吾　（環境化学）
- 齋藤 優子　（環境政策）

✓ サブテーマ③　【国立環境研究所】

- 小口 正弘　（環境工学）
  - ➢ サブテーマリーダー
- 梶原 夏子　（環境化学）
  - ➢ 研究協力者

✓ サブテーマ④　【富山大学】

- 山本 雅資　（環境経済学）
  - ➢ サブテーマリーダー
- 一ノ瀬 大輔　【立教大学】
  - ➢ 再委託

1. 研究背景（提案・申請時点）

家庭から一般廃棄物として排出されるか，オフィスなどから事業系一般廃棄物または産業廃棄物として排出される容器包装・製品プラスチック

✓ 生活系プラスチック

1. プラスチック製容器包装：分別収集（回収量，市町村数）が 頭打ちの傾向
2. プラスチック製容器包装：材料リサイクル が落札で 優先される根拠 の不足
3. プラスチック製容器包装：市町村と再商品化事業者における 選別の非効率
4. 製品プラスチック とプラスチック製容器包装の 混合収集・循環利用 の提案
5. 市町村の分別収集の費用負担の大きさと 経済効率的な回収方法 の必要性
6. ペットボトル：国内資源循環の観点から 国外流出（2017年まで）への懸念

自動車，家電（パソコンを含む），小型家電など，家庭やオフィス，産業において使用された機器の樹脂部品として排出されるプラスチック

✓ 機器系プラスチック

7. 自動車：バンパーの塗膜の混入などによる 再生樹脂の品質 への影響
8. 自動車：ASRの削減 のための廃プラスチックのリサイクル促進の必要性
9. 蓄積した家電・小型家電の循環利用への 合成樹脂添加剤 のリスクの懸念

10. 中国の 輸入停止 による廃プラスチックの 国内処理量や質の変動 への懸念

2. 研究開発目的 / 3. 研究目標

✓ 研究開発目的

- 先端的な再生技術 の導入と 動脈産業との融合 によるプラスチック資源循環の高度化を志向した，10～20年後を見据えた 循環シナリオの設計のための評価基盤の構築 を目的とした。
  - ➢ 実現性の高い再生技術（選別およびリサイクルを含む）と 動脈産業における利用ポテンシャル を特定・分析し …
  - ➢ 循環利用にかかる制約要因として 排出量 の変化や，樹脂製品に含有される 化学物質（添加剤） の再生品への混入などを考慮して …

↓ 達成目標は …

✓ 研究目標（全体目標）

- 動的な 物質フロー分析，再生技術 のフィージビリティ分析，合成樹脂添加剤 のフロー分析，回収制度の理論・実証分析 を通した 評価基盤の構築 と …
- 生活系および機器系プラスチック の 循環シナリオのオプション の提示を目標とする。

4. 研究開発内容

✓ サブテーマ①

- 物質フロー分析 による生活系プラスチックの利用量・排出量と樹脂組成の推計
- 光学自動選別機による容器包装プラスチックの 選別実証試験
- 物質フロー分析と選別実証試験に基づく 回収・選別シナリオの設計
- 自動車由来プラスチック の循環フローおよび受入可能性の調査と循環シナリオの設計

✓ サブテーマ②

- 国内外における フィードストックリサイクル の研究開発動向調査
- 廃プラスチックの 化学組成分析法の確立
- 選別実証試験における選別物の組成を再現したサンプルの 熱分解試験
- トップダウン法による 炭素フロー とリサイクルの環境負荷削減効果の可視化
- 熱分解試験に基づく 製油所を介したプラスチック地域循環 のシナリオ設計とフィージビリティ評価

4. 研究開発内容

✓ サブテーマ③

- 電気電子機器（EEE）由来プラスチックの 添加剤含有データの整理
- EEE由来プラスチック のフロー推計
- EEE由来プラスチックのフローに伴う 臭素系難燃剤 フローの推計
- EEE由来プラスチックの 処理・リサイクルに伴う臭素系難燃剤のフロー推定 とシナリオ分析

✓ サブテーマ④

- 経済理論 の文献レビューと現状の制度設計における課題の抽出
- 制度変更を要因とした 生活系プラスチックの回収および排出行動への影響
- 経済活動を考慮した 産業系プラスチックの排出量変化の要因分解

5-1. 研究成果の概要：サブテーマ①

✓ 物質フロー分析 による生活系プラスチックの利用量の推計

- 産業連関表を用いて，国内の生活系プラスチックの物質フローを推計した。
- 容器包装：① どのような樹脂種類 の ② どのような加工形態 の容器包装が，③ どういった製品の梱包 に利用され，④ どういった需要部門 で廃棄されるか，⑤ 2000～2015年の経年変化 を含めた五次元で利用量・廃棄量を推計した。
  - ➢ 以上の研究成果は，*PNAS* [IF：9.412] に論文掲載された。

✓ 容器包装プラスチックの 選別実証試験

- プラスチック製容器包装の組成を樹脂種類・形状・色による30分類で調査して，消費者が分別できる可能性などを考慮した複数の 組成パターン を設定した。
- 光学自動選別機 を導入している材料リサイクル事業者の 選別パターン（選別順序）を再現して，それぞれの組成パターンのサンプルを投入した。
- 選別物および残渣の組成を調べることで，樹脂種類や形状・色ごとの選別割合と選別物の純度の両面から，組成パターンごとに選別精度を分析した。

5-1. 研究成果の概要：サブテーマ①

✓ 物質フロー分析と選別実証試験に基づく 回収・選別シナリオ

- 物質フロー分析 による排出量の推計結果と，選別実証試験 による選別精度の分析結果に基づき，マテリアルリサイクル志向の回収・選別シナリオを設計した。
- プラスチック製容器包装の分別パターンと選別パターンの組み合わせについて，選別物の品質別の回収・選別量を算定した。
- 光学選別と比重選別を駆使すれば，最大100万t の選別物が得られ，分別収集の対象を透明硬質系の容器包装に絞れば，高品質の選別物が得られる。

✓ 自動車由来プラスチック の循環フローおよび受入可能性

- シンクタンクの報告書やリサイクルに関する実証分析のデータなどから，自動車由来プラスチックのフローのボトムアップ推計も実施した。
- 回収ポテンシャルの推計の結果，PP，ABS，PEのみが回収できたとして 22万t 程度が上限だと考えられ，自動車リサイクルからのプラスチック回収を推進する際に，かなり野心的なシナリオでも，水平リサイクルによる供給能力は需要側の推計結果 82万t の 27%程度でしかない。

産業連関表を用いた物質フロー分析

需要先の内訳（内円）

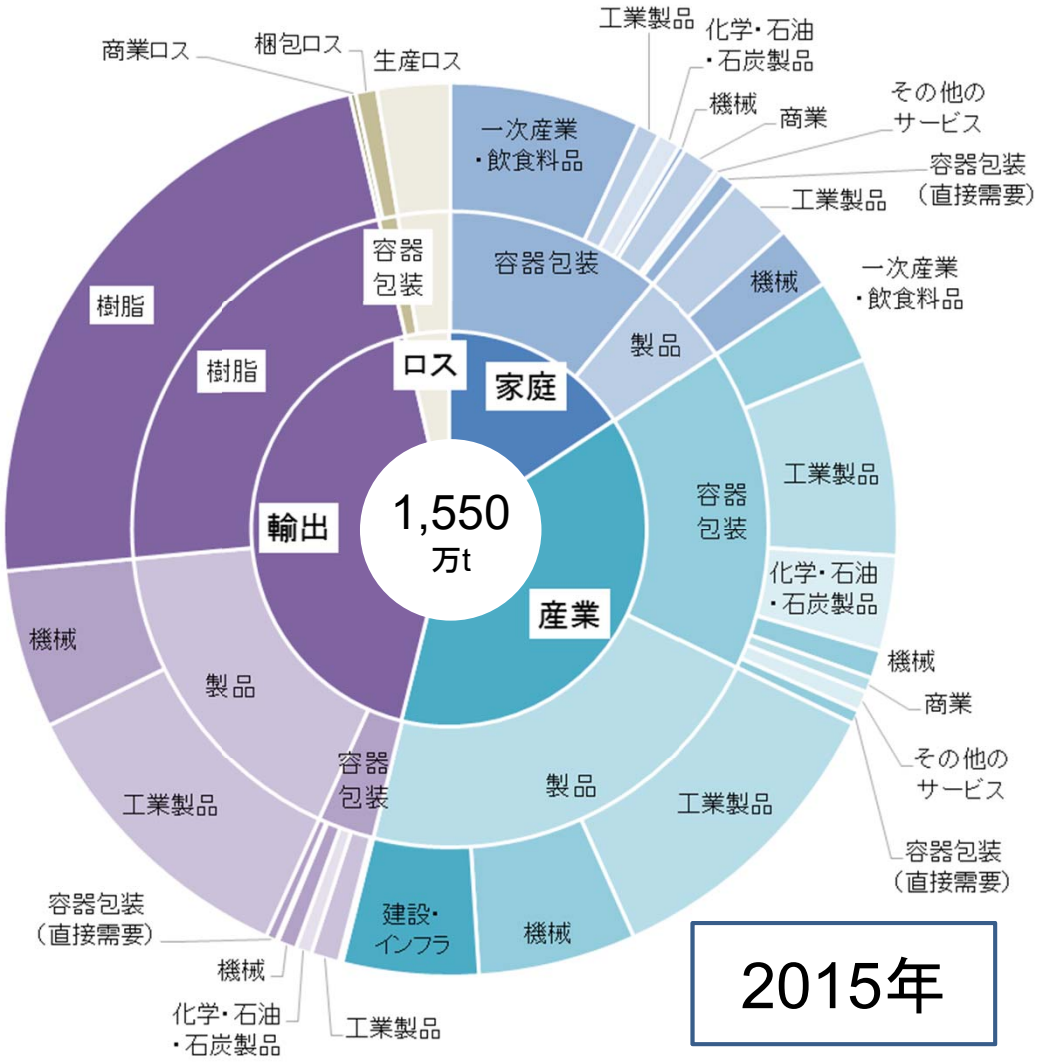
- 樹脂・製品・容器包装の 輸出 が需要（ロスを含む）の 42%
- 産業 が国内需要の 71%

容器包装の割合（中円）

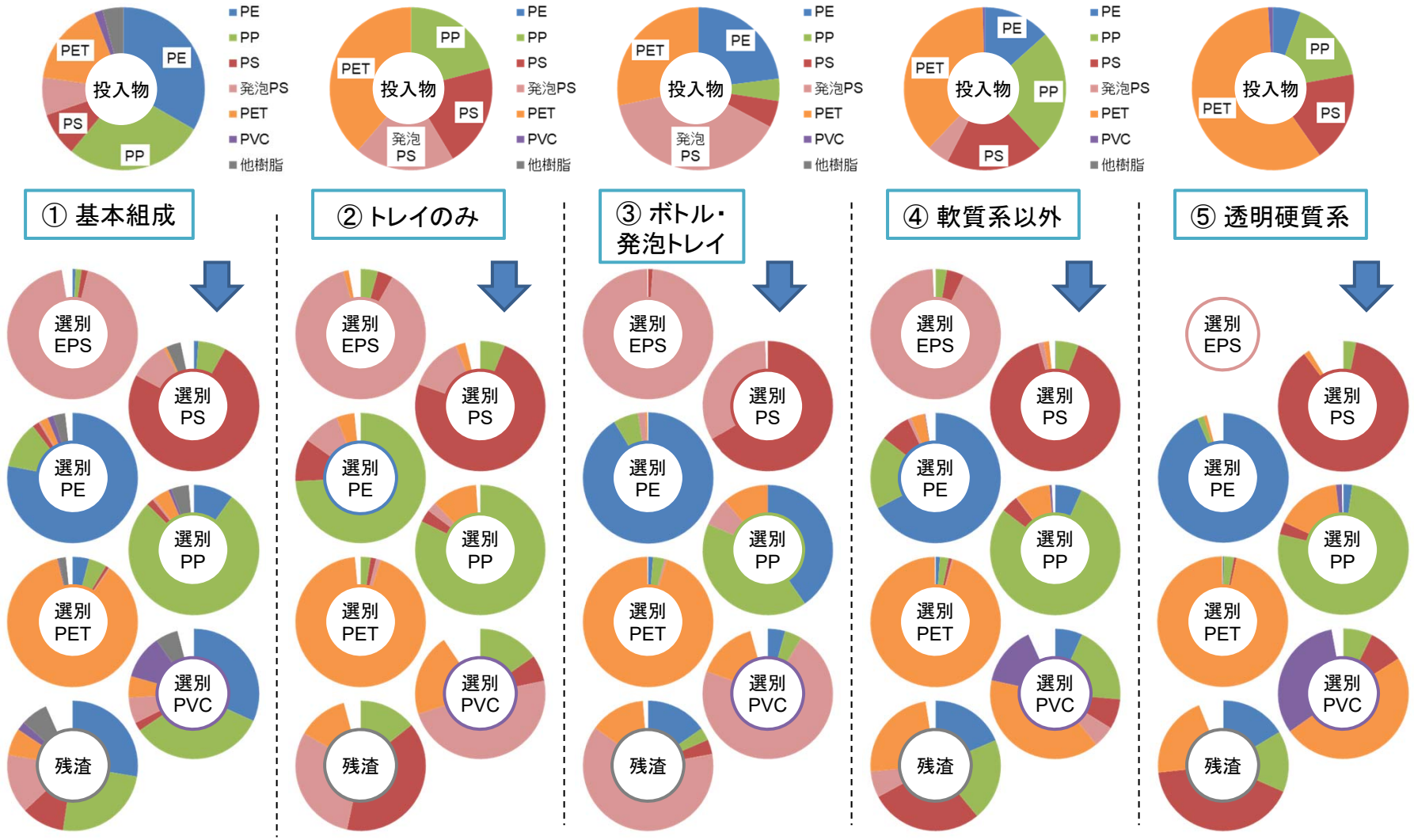
- 国内需要の 51% が容器包装（直接需要を含む）
  - ✓ 家庭 は容器包装が 70%
  - ✓ 産業 は容器包装が 43%

利用製品の内訳（外円）

- 容器包装を利用した製品は …
  - ✓ 飲食料品 が家庭の 67%
  - ✓ 工業製品 が産業の 45%

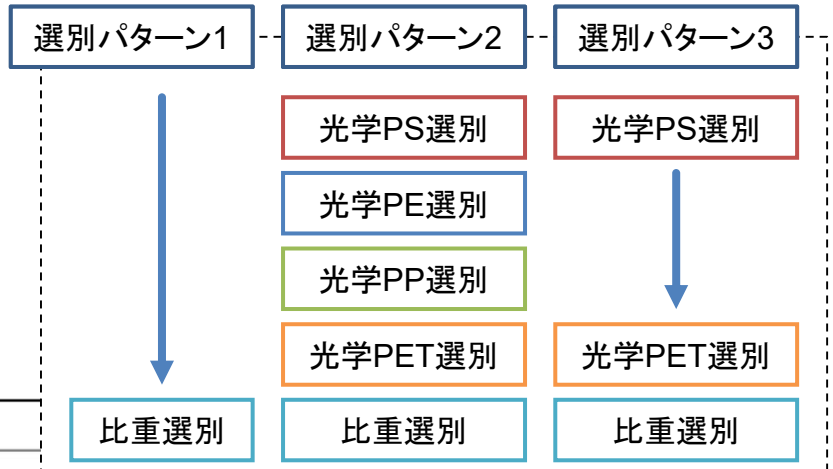


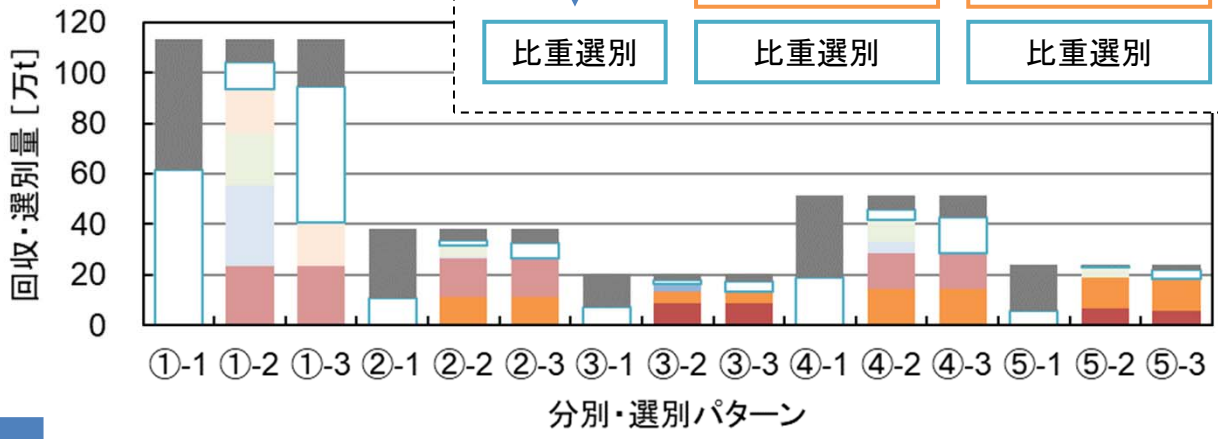
光学自動選別機による選別実証試験

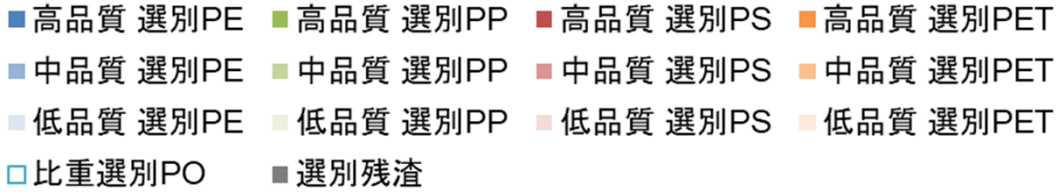


容器包装の回収・選別シナリオ

- ✓ 選別物の 量 を志向するなら …
  - ① 全て分別収集 ⇒ 選別パターン2
    - ➢ 光学選別 94万t, 比重選別 11万t
- ✓ 選別物の 質 を志向するなら …
  - ⑤ 透明硬質系
    ⇒ 選別パターン2
    - ➢ 光学選別
      高品質 19万t
      低品質 4万t
    - ➢ 比重選別 1万t







2015年

品質	純度
高	95%以上
中	90～95%
低	90%未満

自動車由来プラスチックのフローと回収ポテンシャル

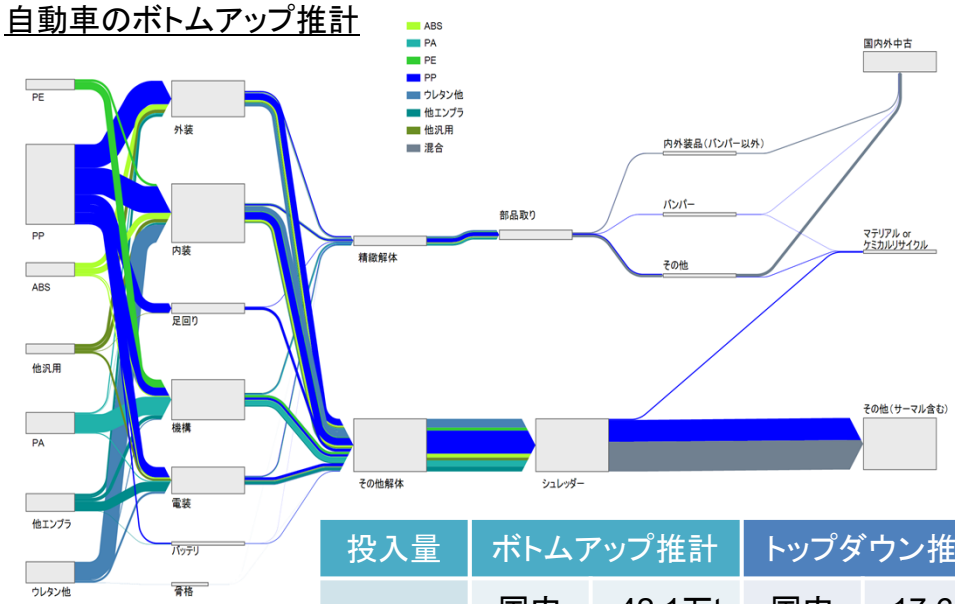
現状フローの推計

ボトムアップ推計の方法（自動車の例）

- 生産側：資料から自動車への資源投入量，ヒアリング調査から組成
- 回収側：コンパウンドメーカーなどへのヒアリング調査（阻害要因も）

✓ 産業連関表を用いたトップダウン推計の結果は過小評価の可能性

自動車のボトムアップ推計



投入量	ボトムアップ推計		トップダウン推計	
乗用車	国内	42.1万t	国内	17.6万t
	輸出	39.7万t	輸出	21.1万t
家電4品目	国内	32.2万t	国内	13.7万t
	輸出	7.7万t	輸出	1.2万t

回収ポテンシャルの推計

段階（容易順）		部品	[万t]
①	部分実施	バンパー PP	2.64
②	精緻解体	ピラー PP	0.50
		サイドシルガーニッシュ PP	0.33
		カウルトップ PP	0.33
		ドアトリム PP	0.33
		インパネ周り PP	1.49
		ピラー類 ABS	0.17
		インパネコア ABS	1.32
		センタークラスター ABS	0.66
		燃料タンク PE	1.65
③	ポストシュレッダーを含む	その他の全て PP	11.55
		その他の全て ABS	0.66
		その他の全て PE	0.66
④	最終段階	その他の全て	17.16

①② 9.4万t　①～③ 22.3万t　①～④ 39.4万t

5-1. 研究成果の概要：サブテーマ②

✓ 国内外の フィードストックリサイクル の研究開発動向調査

- 熱分解法によるポリオレフィンの化学原料化・燃料化が研究の多勢を占めた。
- ➢ ポリオレフィンの熱分解法に関する1980～2020年の世界の学術論文を整理し，*Journal of the Japan Petroleum Institute* に総合論文として発表

✓ 廃プラスチックの 化学組成分析法の確立

- 精度の高いマテリアルバランスが得られる元素分析のメソッドを確立した。
- RPF原料となる混合プラスチックを例とした熱分解分析により，樹脂種や不純物を推定可能であることを確認した。

✓ 選別物の組成を再現したサンプルの 熱分解試験

- サブテーマ①の 選別実証試験 で得られた選別物のうち，PE，PP，PS含有量の高い選別物の組成を再現した試料から，90%以上の液体生成物を回収した。
- 循環シナリオの設計に利用可能な 熱分解法の収率と液体生成物の組成情報を取得した。

化学原料化技術の世界的な技術開発動向

熱分解法および加溶媒分解法の研究開発動向調査

<u>熱分解法および加溶媒分解法（モノマー回収）の世界の学術論文調査・整理</u>

- 熱分解法によるポリオレフィンの化学原料化・燃料化に関する研究が多勢を占める。
- *Journal of the Japan Petroleum Institute* に研究開発動向調査を発表した。
  - ➢ Latest Trends and Challenges in Feedstock Recycling of Polyolefinic Plastics

以下の項目の調査結果を整理：

- プラスチックへの伝熱効率改善のための反応器設計
- 液化のための触媒熱分解法
- ガス化および炭素繊維製造のための触媒熱分解法
- 石油精製設備を活用したケミカルリサイクルの可能性
- ポリオレフィンの発生源

例）<u>液化条件一覧表の抜粋</u>

(continued from previous page)

Entry	Year	Plastics (values: wt%)	Reactor	React. mode	Catalyst	Temperatures (pyro. and catal. reactors)	References
21	2011	MP (40 PE, 35 PP, 18 PS, 4 PET, 3 PVC)	Semi-batch (plastic was pyrolyzed with catal.)	Semi.	NH_4/ZSM-5 (Si/Al = 50, at. ratio), red mud[a] (Fe_2O_3, Al_2O_3, TiO_2, etc.)	Pyro. and catal.: 20 °C/min → 440-500 °C	López *et al.*[79]
22	2012	LDPE, HDPE, PP	FBR	Semi.	Commercial Ziegler-Natta ($TiCl_4/MgCl_2$, $TiCl_4$ = 5-16 wt%)	Pyro. and catal.: 500, 650 °C	Donaj *et al.*[91]
23	2012	LDPE	Autoclave	Batch	Ni/*h*-beta zeolite (Si/Al = 25, at. ratio, Ni = 7 wt%)	Pyro.: 250-350 °C (1.5 barr N_2) Catal.: 310 °C (5-40 bar H_2)	Escola *et al.*[86]
24	2013	LDPE	Two-stage FxBR (1st: plastic pyro., 2nd: catal. bed)	Semi.	H-GaMFI (Si/Ga = 22.5, at. ratio), Ga/HZSM-5 (Si/Al = 15, at. ratio, Ga = 2 wt%)	Pyro.: 455 °C Catal.: 525 °C	Uemichi *et al.*[80]
25	2015	LDPE	Microwave (pyro.) + FxBR (catal.)	Semi.	ZSM-5	Pyro.: 480 °C Catal.: 250-450 °C	Zhang *et al.*[81]
26	2017	HDPE	Semi-batch (plastic was pyrolyzed with catal.)	Semi.	Fe_2O_3, CoO, ZnO, MnO_2 and NiO impregnated waste brick kiln dust (metal = 2 wt%)	Pyro. and catal.: 350 °C	Ahmad *et al.*[93]
27	2017	LDPE	Microwave (pyro.) + FxBR (catal.)	Semi.	MgO	Pyro.: 350-550 °C Catal.: 350-550 °C	Fan *et al.*[95]
28	2017	MP (42 HDPE, 35 PP, 18 PS, 5 PET)	Semi-batch (plastic was pyrolyzed with catal.)	Semi.	Al-, Fe-, Ti-, and Zr-pillared bentonite	Pyro. and catal.: 40 °C/min → 300 °C → 10 °C/min → 500 °C	Li *et al.*[92]
29	2017	HDPE	Two-stage FxBR (1st: plastic pyro., 2nd: catal. bed)	Semi.	ZSM-5 (Si/Al = 20), MCM-41 (Si/Al = 4, at. ratio)	Pyro.: 40 °C/min → 500 °C Catal.: 500 °C	Ratnasari *et al.*[82]
30	2018	wPE	Semi-batch (plastic was pyrolyzed with catal.)	Semi.	Fly ash catalyst (SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, etc.)	Pyro. and catal.: 500-800 °C	Gaurh and Pramanik[94]
31	2018	wPE, wPP, wPE PP mixtures	Cont. reactor (plastic/catal. simultaneously feed)	Cont.	USY zeolite (Si/Al = 15, at. ratio)	Pyro. and catal.: 500 °C	Kassargy *et al.*[83]
32	2019	LDPE	Microwave (pyro.) + FxBR (catal.)	Semi.	NiO, HY zeolite (Si/Al = 5.1, at. ratio)	Pyro.: 450-600 °C Catal.: 350-500 °C	Ding *et al.*[85]
33	2019	HDPE	Semi.[67] with distil. column (plastic	Semi.	HZSM-5 (Si/Al = 15, at. ratio)	Pyro. and catal.: 400-500 °C	Santos *et al.*[88]

RPF原料を例とした廃プラスチックの熱分解の分析方法の確立

RPF原料となる
混合プラスチック

元素分析
・ICP-MS

熱重量分析

熱分解/熱脱着-GC/MS

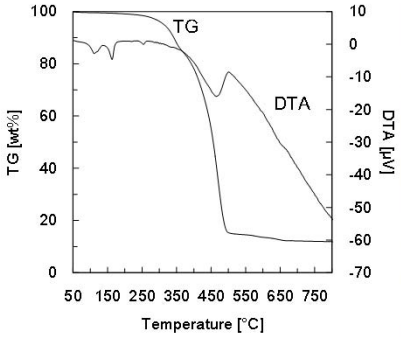
樹脂種・不純物分析

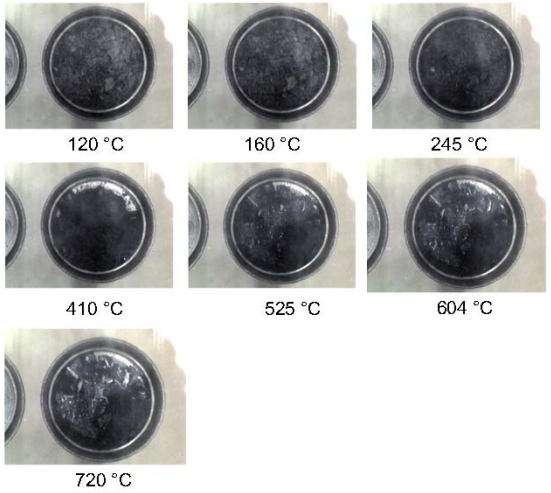
有機・無機元素組成

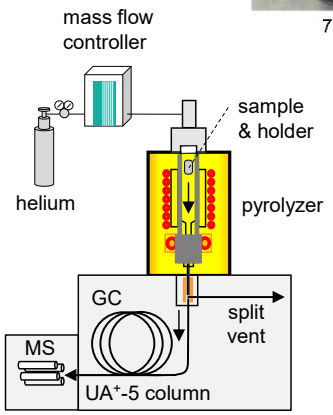
Sample	Element																				
	C	H	N	S	Cl	Br	F	B	Na	Mg	Al	Si	P	K	Ca	Ti	Fe	Ni	Zn	O*	Ash
Mixed plastics	66.8	6.3	-	+	1.0	-	-	0.3	0.2	+	0.3	0.9	+	0.1	0.2	+	0.1	0.2	+	23.6	3.5

-: not detected, +:<0.05 wt%, *balance

熱分解挙動・写真撮影







容器包装プラスチックの熱分解試験

5-1. 研究成果の概要：サブテーマ②

✓ 炭素フロー とリサイクルの環境負荷削減効果の可視化

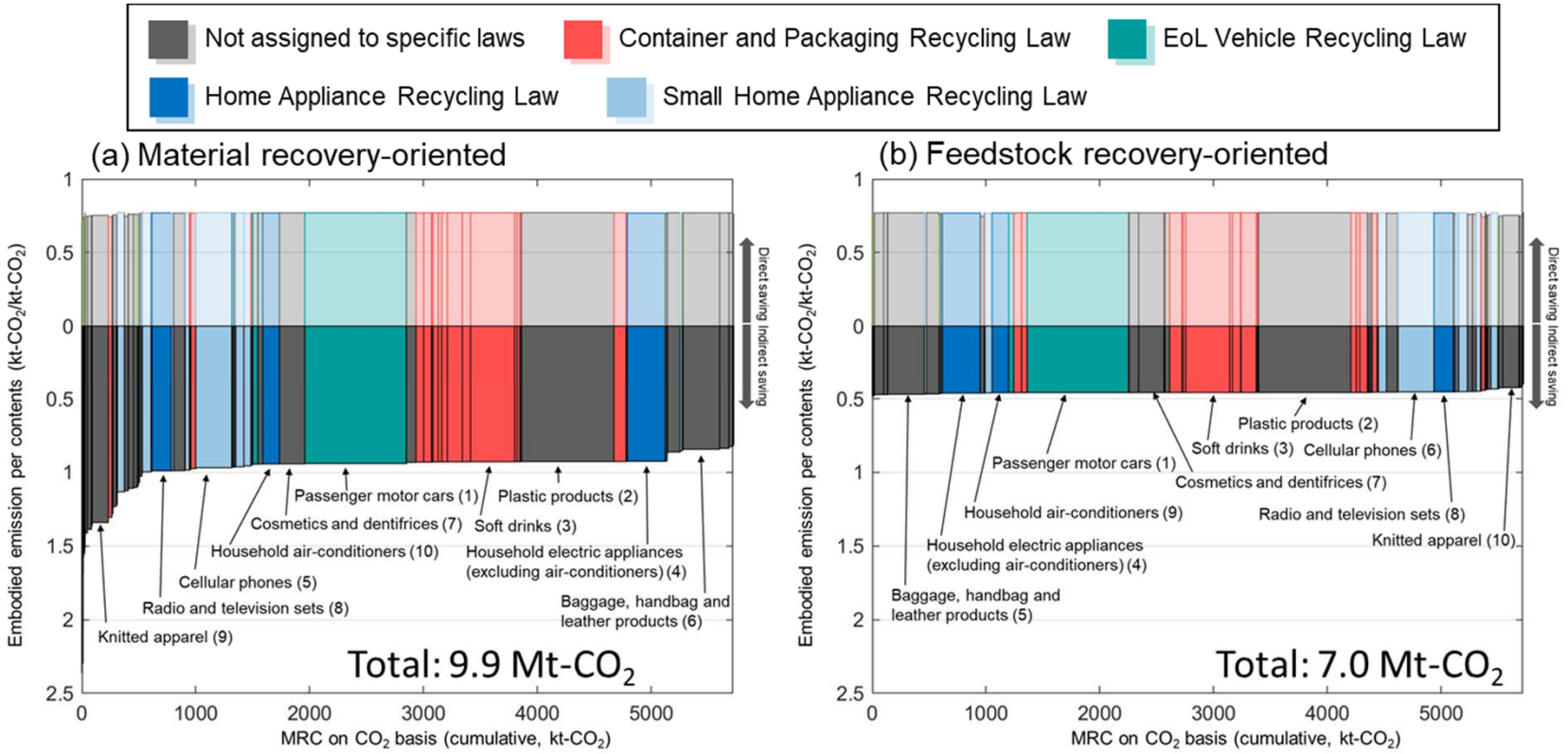
- トップダウン法により，プラスチックを介した炭素フローを分析した。
- Iceberg 図の作成により，プラスチックリサイクルの直接・間接の CO_2排出削減効果 を可視化した。
  - ➢ 以上の研究成果は，*Resources, Conservation and Recycling*［IF：8.086］に論文掲載された。

✓ 製油所を介したプラスチック地域循環 のシナリオ設計

- Google Map API を用いて，市町村のプラスチック製容器包装の保管施設をマッピングした。
- 仙台製油所を事例として，道のり距離100 km圏内の回収可能施設を特定した。
- 熱分解試験 の結果に基づく 廃プラスチックの 選別～油化シナリオを作成した。
- Break-even 解析により，廃プラスチックの焼却発電に対して 50%排出削減を達成するための技術要件を評価した。

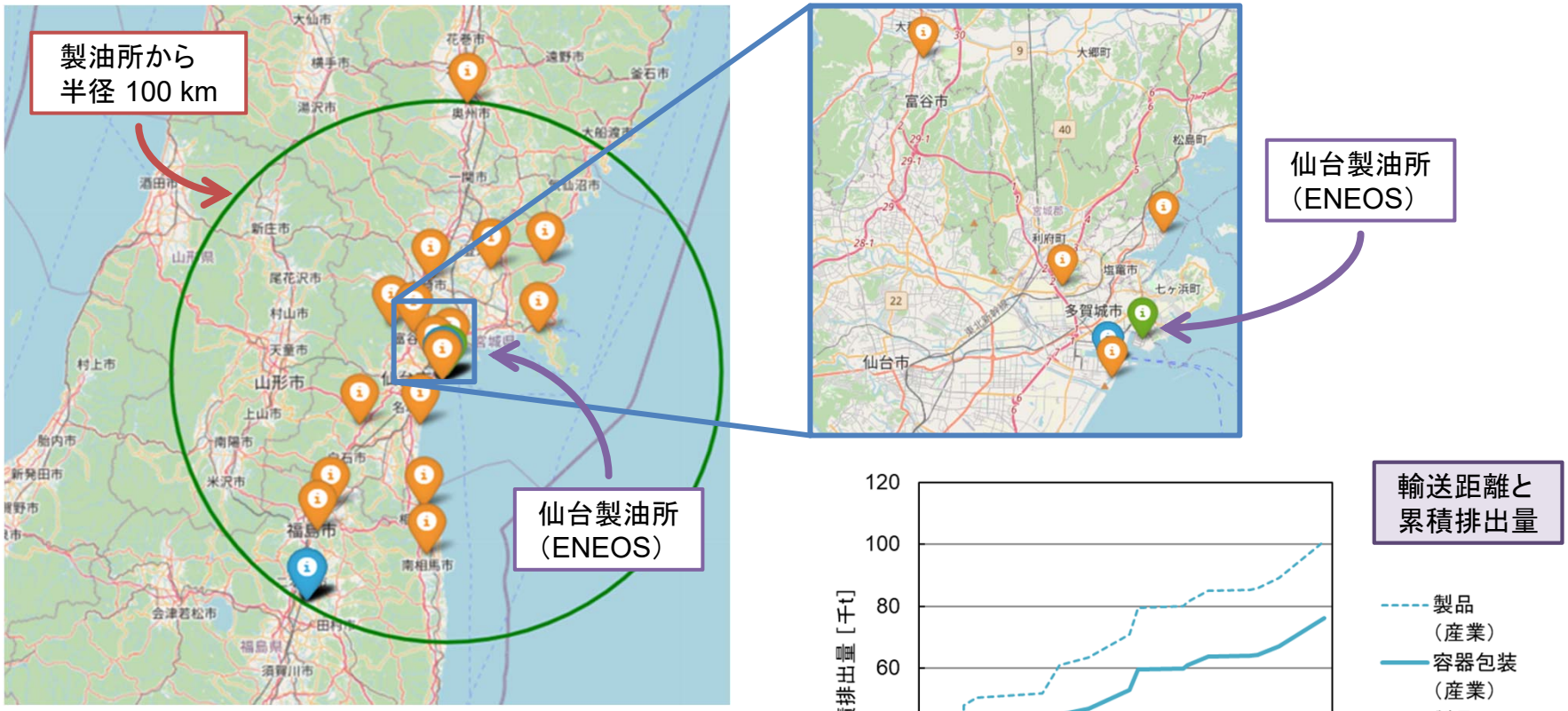
Iceberg Diagram：製品中のプラスチックのリサイクル効果を直接・間接別に可視化

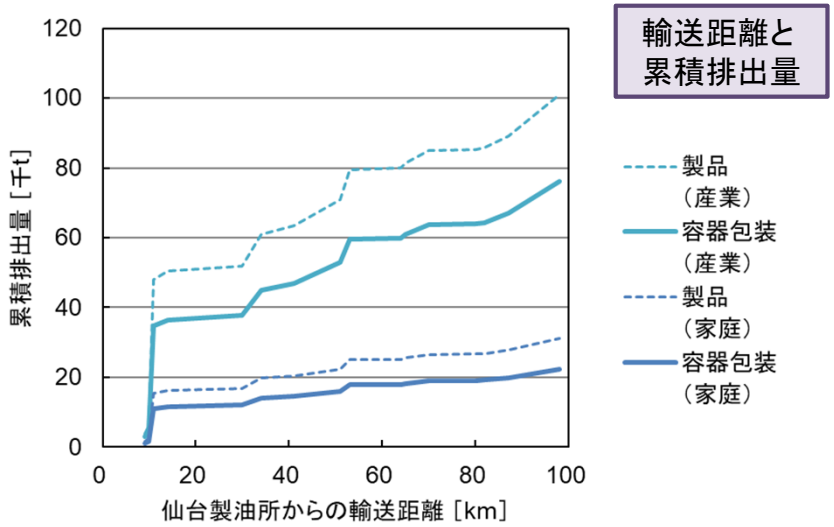
✓ 面積が大きいほどCO_2排出回避可能量が大きい。⇒ 回収強化の対象となる。



- 現行リサイクル法の対象外の製品中のプラスチック（灰色）の Iceberg面積が 40%
- フィードストックリサイクルの Iceberg面積 がマテリアルリサイクルより小さいのは …
  - ➢ 石油化学基礎製品の排出係数 < 合成樹脂の排出係数
- リサイクル工程のCO_2排出係数が Icebergの高さ + 深さ 以内なら炭素収支プラス

地域循環シナリオの設計





- ✓ 周辺市町村から分別回収した 生活系プラスチック を …
  - ➢ 製油所 でフィードストックリサイクル

製油所を介した地域循環シナリオのフィージビリティ

5-1. 研究成果の概要：サブテーマ③

✓ EEE由来プラスチック のフロー推計

- 2017年度には，総発生量の13%が国内マテリアルリサイクル，31%が熱回収・焼却，40%強が混合プラスチックや雑品スクラップとしての輸出と推計した。

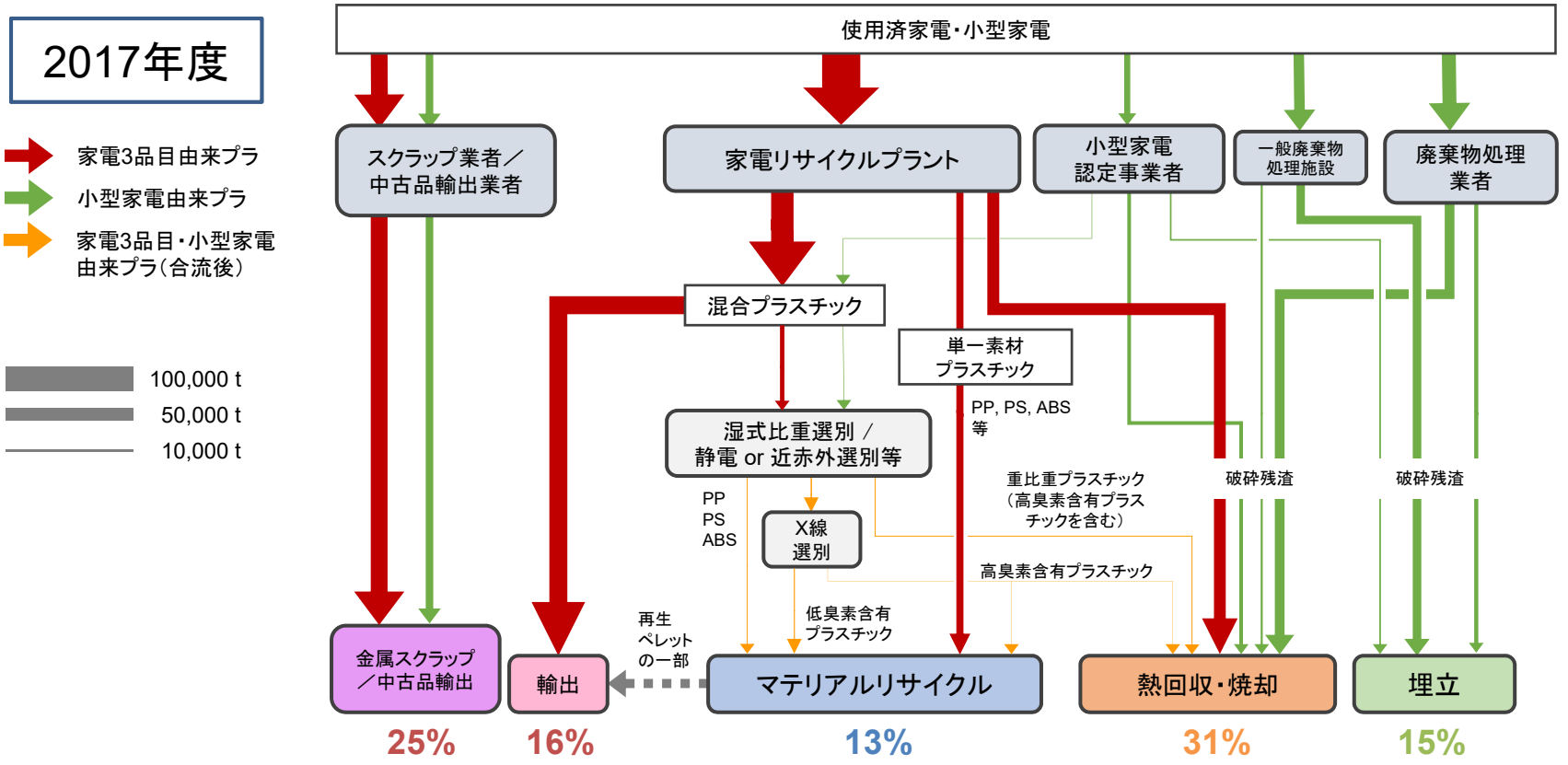
✓ EEE由来プラスチックに伴う 臭素系難燃剤 フローの推計

- 混合プラの選別におけるプラとの分配挙動の違いにより，臭素系難燃剤は国内の資源化で大部分（75%程度以上と推計）が除去されていることを明らかにした。
- 2017年度にはEEE由来プラに含有される臭素難燃剤の総量の50%強が混合プラスチックまたは雑品スクラップとしての輸出フローであった。

✓ 処理・リサイクルに伴う臭素系難燃剤フロー のシナリオ分析

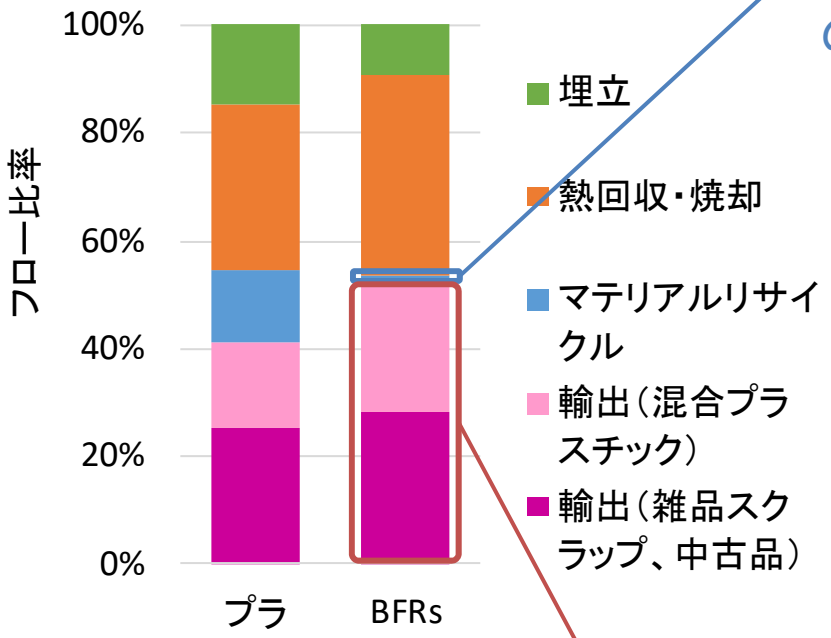
- 中国の廃プラスチック輸入禁止やバーゼル条約による混合プラ輸出規制強化，日本の雑品スクラップ輸出規制によって，臭素系難燃剤の大部分（80%強）は国内での熱回収・焼却へ移行すると推計され，これらの規制強化は結果的に，国内での臭素系難燃剤の適正管理の促進に寄与していると考えられた。

電気電子機器由来プラスチックのフローの推計結果



- 電気電子機器（EEE）由来プラスチックは，国内では大部分が混合プラスチックか破砕残渣として回収され，マテリアルリサイクル向けは総量の1割強と推計
- 総量の4割強が混合プラスチック，雑品スクラップとして輸出されていたと推計

臭素系難燃剤のフローの推計結果



2017年度

国内でマテリアルリサイクル向けに回収されるプラスチックへ混入する臭素系難燃剤（BFRs）の割合は小さい。

➔ 混合プラスチックの比重選別プロセスにおいて，臭素系難燃剤の大部分（75%程度以上）が重比重プラの画分へ分配するため。

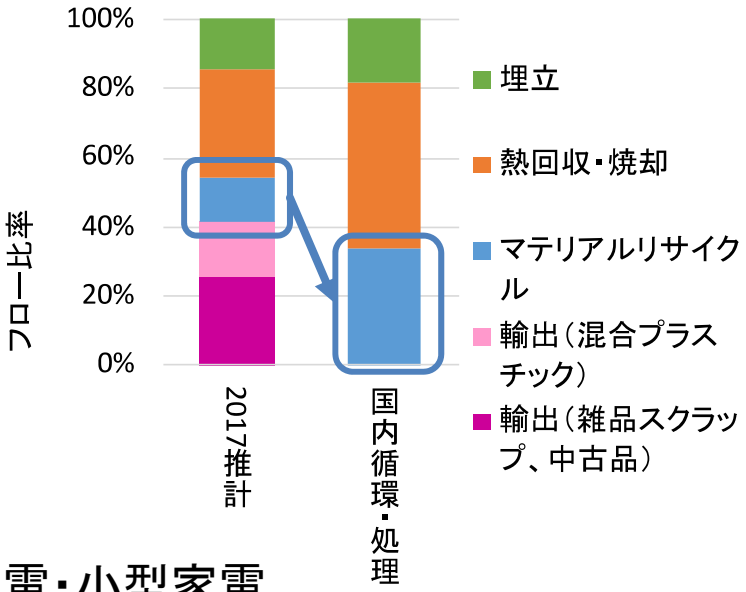
➔ 国内では，現状のプロセスにおいてもプラスチックの循環から適切に排除されている。

臭素系難燃剤（BFRs）の半分は混合プラ または金属スクラップに含まれて輸出されていた。

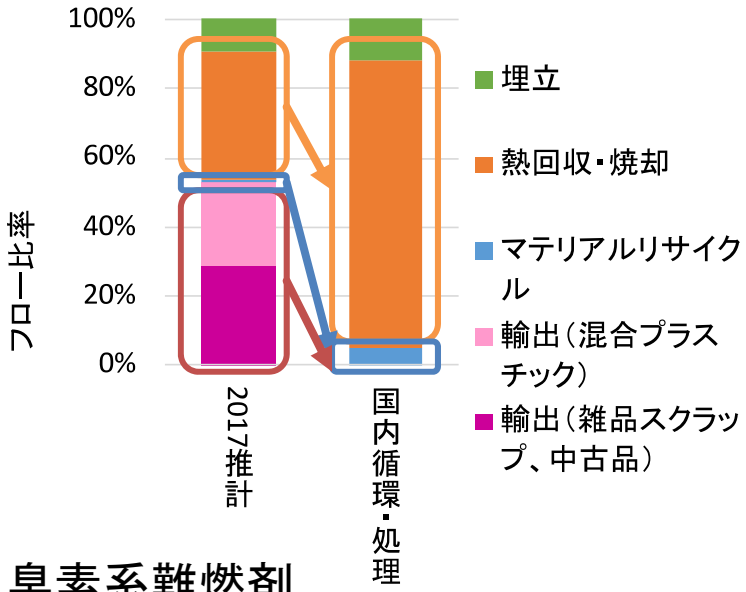
➔ 輸出先（主に中国）での管理状況は不明。

中国の輸入禁止と国内の雑品輸出の規制強化の影響

輸出されていたスクラップ，破砕混合プラスチックが全て国内処理にシフトしたと仮定（国内循環・処理シナリオ），同じパラメータを使用して最終仕向先別の割合）を計算



家電・小型家電由来プラスチック



臭素系難燃剤

- 国内でマテリアルリサイクル向けに回収されるプラスチックの増加（13%⇒35%超）

- 輸出（管理状況が不明なフロー）がなくなり，焼却・熱回収の割合が増加（80%超）
- ➢ 規制強化は結果的に国内循環増加，臭素系難燃剤の国内適正管理促進に寄与

5-1. 研究成果の概要：サブテーマ④

✓ 経済理論 の文献レビューと現状の制度設計の課題抽出

- 回収量の拡大を目指すスキームと，確実な処理を目指すスキームは分けて考える必要性が示唆された。
- 処理効率を高めるためには，個別の使用済製品のリサイクル採算性ではなく，経済全体で最終処分単価との比較によって判断することが求められる。

✓ 制度変更の 生活系プラスチックの回収・排出行動への影響

- 生活系ごみ有料化の効果は，既存研究では過大評価されている可能性がある。
- 新たな分別基準を設けるなら，相応のインセンティブが回収責任を持つ主体に提供される必要があることが示された。

✓ 経済活動を考慮した 産業系プラスチック排出の要因分解

- 過去15年間で製造業が実質31%増加する中で廃プラスチックの排出量は18%減少し，この効果の9割以上が技術進歩（排出原単位の改善）に起因することが分かった。

分別収集による費用増加の分析

2000年にプラスチック製容器包装の分別収集・リサイクルを開始した人口15万人以上の市町村を対象

Estimates:

	Bandwidth	Observations	Estimate	Std. Error	z value
LATE	6.266	222	8.098	3.130	2.5871
Half-BW	3.133	157	3.456	3.845	0.8988
Double-BW	12.531	222	7.930	3.500	2.2658

評価したい効果：$\hat{\tau}_{SRD} = \hat{\mu}_+ - \hat{\mu}_-$

最大 25.5%程度，費用を引き上げたと推計

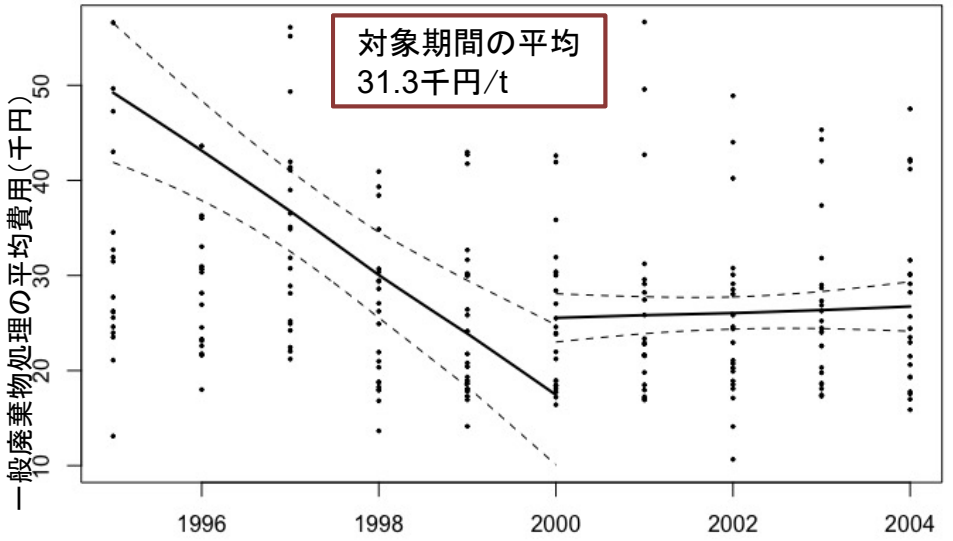
$$\hat{\mu}_+ = \lim_{x \to 0_+} = \hat{\alpha}_+(0) \quad \text{and} \quad \hat{\mu}_- = \lim_{x \to 0_-} = \hat{\alpha}_-(0)$$

$$\left(\hat{\alpha}_-(0), \hat{\beta}_-(0)\right) = \arg\min_{\alpha,\beta} \sum_{i=1}^{N} \mathbf{1}(X_i < 0)(Y_i - \alpha - \beta X_i) \cdot K\left(\frac{X_i - 0}{h}\right)$$

$$\left(\hat{\alpha}_+(0), \hat{\beta}_+(0)\right) = \arg\min_{\alpha,\beta} \sum_{i=1}^{N} \mathbf{1}(X_i \geq 0)(Y_i - \alpha - \beta X_i) \cdot K\left(\frac{X_i - 0}{h}\right)$$

ただし，Y は平均費用，X は時間，K ( ) はカーネル関数である。

h はバンド幅で，Imbens & Kalyanaraman（2012）の定義した MSE (h) を最小化することで推定した。



プラスチック資源の回収に新たな分別区分を設けるなら，相応のインセンティブが必要

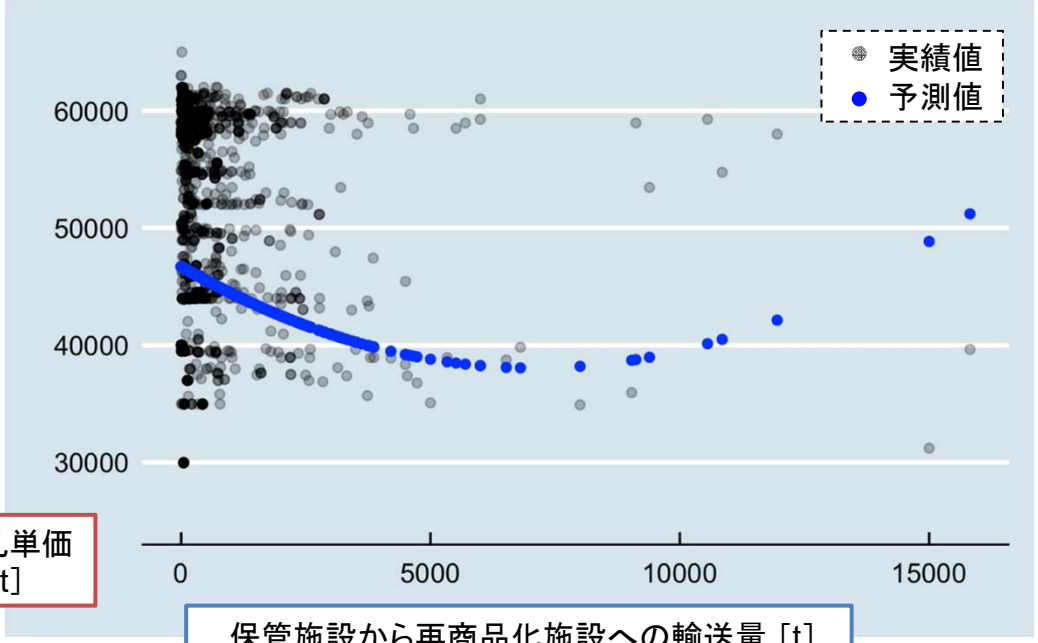
再商品化費用の要因分析

距離:	正に有意
距離の二乗項:	負に有意
海上輸送ダミー:	正に有意

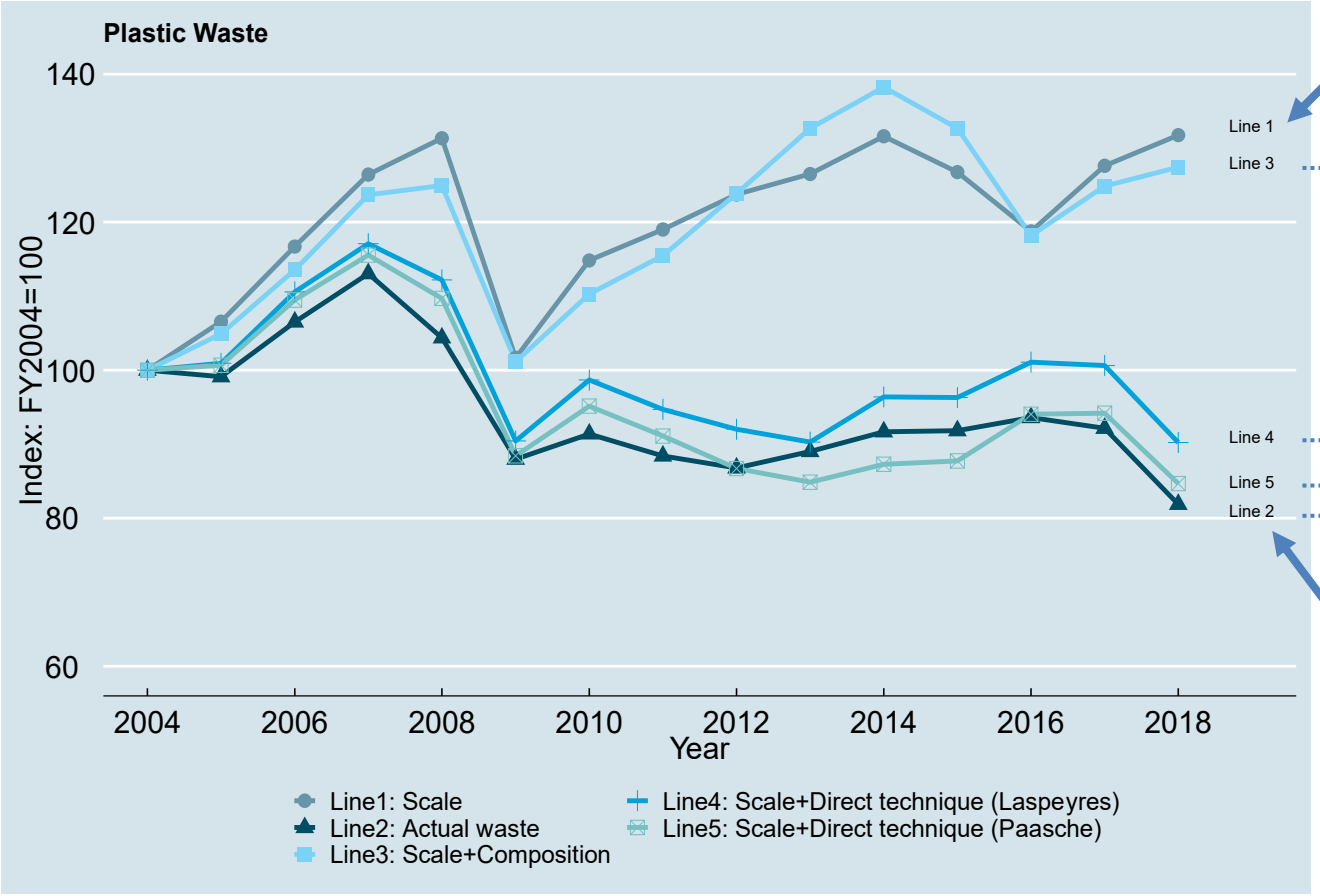
```
Coefficients:
                      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)          4.671e+04  1.604e+03  29.123  < 2e-16 ***
amount              -2.442e+00  1.230e+00  -1.985   0.0474 *
amount2              1.724e-04  1.340e-04   1.286   0.1986
distance             9.615e+01  1.161e+01   8.281  3.7e-16 ***
distance2           -1.452e-01  1.686e-02  -8.608  < 2e-16 ***
ship.dummy           1.721e+05  1.099e+04  15.659  < 2e-16 ***
Quality.Total.Dummy -7.394e+03  4.876e+03  -1.516   0.1297
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

- ✓ 落札単価が最小化 される輸送量は 7,500 t/年 程度と推計された。
- ✓ 輸送量の二乗項の係数は有意とならなかった。
  - ➢ 処理施設の立地制約の影響 …？

2018年度の落札結果の回帰分析



産業系プラスチック排出の要因分解



製造業は31%増加

直接技術効果

同種の既存研究に較べ大きい

代替効果

産業系プラの排出は18%減少

- 製造業の廃プラスチック排出の減少は，8～9割程度が技術効果（排出原単位の改善）に依拠している。

5-2. 環境政策への貢献

✓ プラスチック資源循環戦略の マイルストーン達成 への道筋

- 物質フロー分析の推計結果から，容器包装プラスチックのリユース・リサイクル目標の達成には，排出量が多い特定の産業部門からの回収 に加えて …
- 特定品目の部門横断的な回収 などの回収戦略が欠かせないことが示された。

✓ 光学選別 によって得られる選別物の量・質のポテンシャル

- 消費者が見分けられる形状・色による収集区分でも，選別技術との組み合わせによって高品質なマテリアルリサイクルが実現できる 可能性が示された。
- ただし，選別物の質の向上と量の拡大の間にはトレードオフの関係がある。

✓ 光学選別 と 熱分解技術 の組み合わせによる循環シナリオ

- 光学選別によって熱分解技術に適した樹脂種類の割合を高め，それを熱分解に投入することで，より効率的なフィードストックリサイクルが実現できる。
- PET や PVC を選別除去すると液体生成物の収率は 90%を超え，石油原料を代替する炭化水素油となることも確認された。

5-3. 研究目標の達成状況

サブテーマ①：目標	達成状況
生活系プラスチックは収集区分の変更や高度選別施設の導入を想定，機器系プラスチックは動脈産業との融合と制約要因としての合成樹脂添加剤のフローを考慮し，それぞれ実現可能性のある循環シナリオを設計する。	【目標を上回る成果をあげた】物質フロー分析によるプラスチックの利用実態の解明が PNAS に掲載されるなど，評価基盤の構築が達成された。物質フロー分析と選別実証試験の結果は，サブテーマ①と②におけるシナリオ設計に活用され，その有用性も示された。さらに，資源循環政策に直接的に活用できるような結果も多く得られた。

サブテーマ②：目標	達成状況
動脈産業における廃プラスチックの利用ポテンシャルの推計結果や先端的な化学原料化技術などの技術開発動向の調査結果を基盤とし，特定地域における動脈産業と融合したサーカムスタンス適応型の循環シナリオを設計する。	【目標を上回る成果をあげた】再生技術と物質フローの評価基盤を構築した上で，選別実証試験および熱分解試験の結果を反映した Break-even解析によって，製油所を介した地域循環の実現可能性について現実的な検討を可能にした。

5-3. 研究目標の達成状況

サブテーマ③：目標	達成状況
機器系プラスチックに含有される添加剤が，どのような製品として社会に戻るか難燃剤を事例として分析し，循環の制約となりうる箇所を明らかにする。	【目標どおりの成果をあげた】電気電子機器由来プラスチックの処理・リサイクルに伴う臭素系難燃剤のフローを推計して，国内循環促進の制約・課題を考察した。
サブテーマ④：目標	**達成状況**
生活系プラスチックの回収対象が，法制度や経済主体の判断で区切られていることの経済的影響を定量的に分析する。	【目標どおりの成果をあげた】容器包装リサイクル法の制度変更による費用増加が無視できない水準であることを実証した。
全体目標	**達成状況**
評価基盤の構築と，生活系および機器系プラスチックの循環シナリオのオプションの提示を達成目標とする。	【目標を上回る成果をあげた】評価基盤の構築として，物質フロー分析，再生技術のフィージビリティ，添加剤のフロー推計，制度の理論・実証分析は，研究目標を十分に達成し，さらに循環シナリオの設計で連携した。

6. 研究成果の発表状況

✓ 査読付論文

- Nakatani, J., Maruyama, T. & Moriguchi, Y.: “Revealing the intersectoral material flow of plastic containers and packaging in Japan,” *PNAS* 117 (33), pp. 19844–19853 (2020)
- 河合萌子・中谷隼・栗栖聖・森口祐一：「再生処理能力と再生樹脂利用の制約に基づくペットボトル循環利用シナリオの提案」，廃棄物資源循環学会論文誌 30，pp. 80–94（2019）
- 中谷隼：「プラスチック資源循環と海洋プラスチック問題」，環境経済・政策研究 12 (2)，pp. 81–84（2019）
- Ohno, H., Shigetomi, Y., Chapman, A. & Fukushima, Y.: “Detailing the economy-wide carbon emission reduction potential of post-consumer recycling,” *Resources, Conservation and Recycling* 166, p. 105263 (2021)
- Lu, J., Borjigin, S., Kumagai, S., Kameda, T., Saito, Y., Fukushima, Y., & Yoshioka, T.: “Practical dehalogenation of automobile shredder residue in NaOH/ethylene glycol with an up-scale ball mill reactor,” *Journal of Material Cycles and Waste Management* 22 (5), pp. 1620–1629 (2020)
- Kumagai, S., Nakatani, J., Saito, Y., Fukushima, Y., & Yoshioka, T.: “Latest trends and challenges in feedstock recycling of polyolefinic plastics,” *Journal of the Japan Petroleum Institute* 63 (6), pp. 345–364 (2020)
- Shigetomi, Y., Ohno, H., Chapman, A., Fujii, H., Nansai, K., & Fukushima, Y.: “Clarifying demographic impacts on embodied and materially retained carbon towards climate change mitigation,” *Environmental Science & Technology* 53(24), pp. 14123–14133 (2019)
- 寺園淳・小口正弘：「廃プラスチックと雑品スクラップの国内資源循環に向けた課題」，環境経済・政策研究 12(2)，pp. 84–88（2019）
- トラン ディン トゥン・山本雅資：「中国による使用済みプラスチック輸入禁止後のベトナムにおける現状と課題」，環境経済・政策研究 12(2)，pp. 62–65（2019）