

令和 7 年度脱炭素型循環経済システム構築促進事業
(うち、プラスチック等資源循環システム構築実証事業)

小型家電由来の資源プラスチックの水平利用プロセスの確立
委託業務成果報告書

令和 8 年 3 月
三菱電機株式会社

要旨

本実証事業は、従来、金属回収を主目的として運用されてきた小型家電リサイクルにおいて、十分に活用されてこなかった樹脂資源に着目し、樹脂資源の高品位な回収と家電製品への水平利用を可能とする処理技術及びプロセスを確立することを目的として実施したものである。あわせて、再資源化の高度化を通じた脱炭素化の促進及び、将来的な横展開を見据えた事業性の検証を目的とした。

本事業の1年目にあたる令和7年度は、対象5品目の小型家電を対象に、集積・仕分け、解砕、選別、再利用検証までの一連のプロセスについて検証した。まず、手解体による組成分析を実施し、製品ごとのプラスチック構成及び小型家電認定事業者の現状プロセスを把握するとともに、その結果を基に水平利用に適した仕分けロジック案を整理した。

次に、複数の解砕機を用いた比較試験を実施し、処理精度、処理能力及びコストの観点から製品特性に応じた解砕条件を整理した。さらに、比重選別及び静電選別等の既存技術を組み合わせた実証により、ポリプロピレン(PP)及びアクリロニトリル・ブタジエン・スチレン(ABS)について高純度回収の可能性が示された。さらに、回収した再生材の物性評価を実施し、小型家電及び家電4品目における再利用可能な製品・部位候補の整理に向けた基礎データを取得した。

また、デジタルシステムを活用した収集量の見える化及びトレーサビリティの運用検証を行い、回収から再資源化までの工程情報をデジタル上で接続する仕組みについて、実運用上の課題と対応策を整理した。これらの結果を基に、リサイクルスキーム全体のコスト構造を整理し、事業性評価の枠組みを構築した。

あわせて、工程ごとの歩留まりデータを反映したマテリアルフローを整理し、本事業で検討した解砕及び選別等のプロセスについてフォアグラウンドデータを整備した。一部工程については実設備仕様を参照し、その他の工程については公開情報等から得られる参考値を用いてLCA評価を実施した。

処理量は、家電量販店由来の使用済小型家電に含まれるプラスチック量を基に設定し、工程間の歩留まりについては本実証結果を基に整理したモデル値を採用した。これにより、本プロセス全体におけるCO₂排出量及び削減効果について、一定の前提条件のもとで定量的評価を実施した。

本年度の検証を通じて、小型家電由来プラスチックの水平利用に向けた技術的成立性及び今後の課題が明確化された。本成果は、小型家電リサイクル法認定事業者等への横展開及び次年度以降のプロセス高度化に向けた基礎的知見として位置づけられる。

Summary

This project was implemented to establish processing technologies and an integrated system that enable high-quality recovery of plastic resources from small waste electrical and electronic equipment (WEEE), which has traditionally been operated primarily for metal recovery in Japan. The project focused on plastic fractions that have not been sufficiently utilized and aimed to promote decarbonization through advanced recycling, while also assessing business feasibility with a view toward broader deployment.

In the first year of the project (FY2025), demonstration activities were conducted for five target categories of small WEEE, covering the entire process from collection and sorting to shredding, separation, and reuse verification. Composition analyses through manual disassembly were first carried out to identify resin compositions by product type and to understand the current operational processes of certified operators under Japan's Small Home Appliance Recycling Act. Based on these findings, a sorting scheme suitable for closed-loop recycling was developed.

Comparative tests using multiple shredding machines were then conducted to identify appropriate processing conditions according to product characteristics, considering processing accuracy, capacity, and cost. Furthermore, demonstration trials combining existing technologies such as density separation and electrostatic separation indicated the feasibility of achieving high-purity recovery of PP and ABS suitable for closed-loop applications. Physical property evaluations of the recovered recycled materials were also performed, providing fundamental data for identifying potential products and components suitable for reuse in small WEEE and in the four designated home appliance categories under Japan's Home Appliance Recycling Law (televisions, air conditioners, refrigerators, and washing machines).

In addition, digital systems were utilized to visualize collection volumes and to verify the operation of a traceability framework. Operational challenges and corresponding measures were identified for digitally linking process

information from collection through material recycling. Based on these results, the overall cost structure of the recycling scheme was analyzed, and an evaluation framework for business feasibility was developed.

Material flows reflecting yield data at each processing stage were organized, and foreground data were prepared for the shredding and separation processes examined in this project. For certain processes, actual equipment specifications were referenced, while for others, publicly available data were used as reference values to conduct a life cycle assessment (LCA) in accordance with defined system boundaries and assumptions.

Processing volumes were established based on estimated plastic content contained in used small WEEE collected through electronics retailers. Inter-process yields were modeled using values derived from the demonstration results. Under clearly defined assumptions, quantitative evaluation of total CO₂ emissions and potential reduction effects across the entire process was conducted.

Through this year's demonstration, the technical feasibility of closed-loop recycling of plastics derived from small WEEE, as well as remaining challenges, were clarified. The outcomes of this project provide foundational knowledge for broader deployment to certified operators under the Small Home Appliance Recycling Act and for further process optimization in subsequent years.

目次

要旨	1
Summary	2
目次	4
図目次	5
表目次	9
背景・目的・事業概要	11
(0) 全体目標	20
(1) 水平利用プロセスの確立	22
(1) ①集積・仕分けプロセスの整備・検証	22
(1) ②解砕機（分離）の活用検証	32
(1) ③高純度プラスチック選別・活用検証	47
(1) ④グレーディングの整理・再利用検証	78
(2) デジタル活用による回収状況の見える化	103
(2) ①使用済小型家電収集量の見える化システムの活用検証	103
(2) ②トレーサビリティシステムの活用検証	114
(2) ③ビジネスモデル具体化・検証	128
(3) LCA の検証・評価	133
総合整理・横展開に向けた示唆	137

図目次

図 1 小型家電由来プラスチックの課題.....	11
図 2 技術開発全体像（俯瞰図）	15
図 3 実施体制図.....	16
図 4 実証事業の実施スケジュール	18
図 5 組成分析結果（対象 5 品目に含まれる樹脂種）	26
図 6 組成分析の結果（品目別）	27
図 7 組成分析結果（外部・内部別）	28
図 8 解砕後のプラスチック片（インパクトクラッシャ）	40
図 9 解砕後のプラスチック片（ハンマークラッシャ）	41
図 10 解砕後のプラスチック片（二軸破碎）	41
図 11 プラフレーク分析（炊飯器）	42
図 12 プラフレーク分析（掃除機）	42
図 13 プラフレーク分析（空気清浄機）	43
図 14 プラフレーク分析（扇風機）	43
図 15 プラフレーク分析（ラジオ、電話機）	44
図 16 前処理工程	47
図 17 粒径ヒストグラム	50
図 18 粒径の平均値.....	51
図 19 目視分類時の結果の例（サンプル：炊飯器）	52
図 20 目視分類結果	53
図 21 摩擦帯電列	54
図 22 静電選別の原理.....	54
図 23 比電荷分布と落下分布の関係.....	55
図 24 5 品目の組成分析結果（重量比%）	57

図 25 炊飯器サンプルの比電荷分布	58
図 26 炊飯器サンプルの落下分布	58
図 27 炊飯器サンプルのプラスチック種ごとの落下分布予測	59
図 28 掃除機サンプルの比電荷分布	60
図 29 掃除機サンプルの落下分布	60
図 30 掃除機サンプルのプラスチック種ごとの落下分布予測.....	61
図 31 扇風機サンプルの比電荷分布	62
図 32 扇風機サンプルの落下分布	62
図 33 扇風機サンプルのプラスチック種ごとの落下分布予測	63
図 34 空気清浄機サンプルの比電荷分布	64
図 35 空気清浄機サンプルの落下分布	64
図 36 空気清浄機サンプルに含まれる ABS の比電荷と、 スチレン/アクリロニトリルピーク強度比(FT-IR)の関係	65
図 37 空気清浄機サンプルのプラスチック種ごとの落下分布予測	65
図 38 ラジオ・電話機サンプルの比電荷分布	66
図 39 ラジオ・電話機サンプルの落下分布	66
図 40 ラジオ・電話機サンプルのプラスチック種ごとの落下分布予測	67
図 41 使用した静電選別機の構成	68
図 42 静電選別事前検証と静電選別機の落下分布の比較.....	69
図 43 使用サンプル	73
図 44 空気清浄機マイナス帯電品に対する近赤外ソーター適用机上検討結果まとめ .	74
図 45 空気清浄機のプラス帯電品および中間物混合物の組成分析結果	75
図 46 空気清浄機のプラス帯電品および中間物混合物の比電荷分布	76
図 47 空気清浄機のプラス帯電品および中間物混合物の落下分布.....	76
図 48 空気清浄機サンプルの静電選別 2 回目投入時の推定結果.....	77

図 49 衝撃値と曲げ弾性の関係性	85
図 50 小型家電のグレーディング	86
図 51 炊飯器由来リサイクル PP の選別工程と評価した材料	87
図 52 炊飯器由来リサイクル PP のペレット	91
図 53 炊飯器由来リサイクル PP の ISO ダンベル試験片	91
図 54 金網メッシュ交換 1 回当たりのペレットの回収量	92
図 55 引張試験の結果（応力-伸び線図）	95
図 56 曲げ試験の結果（応力-変位線図）	95
図 57 DSC 測定結果（静電選別品、比重/浮上品）	96
図 58 DSC 測定結果（比重/沈降品）	97
図 59 炊飯器由来リサイクル PP（静電選別品）の FT-IR スペクトル	98
図 60 炊飯器由来リサイクル PP（比重/浮上品）の FT-IR スペクトル	98
図 61 炊飯器由来リサイクル PP（比重/沈降品）の FT-IR スペクトル	98
図 62 炊飯器由来リサイクル PP の分子量分布測定の結果	100
図 63 使用済小型家電の回収構造と量販店チャネルの位置付け	105
図 64 入荷登録（入荷テンプレートの選択）	109
図 65 入荷登録（入荷日付・入荷元・品目）	110
図 66 入荷登録（重量・ロット番号）	110
図 67 対象工程フローおよびデータ接続概念図	115
図 68 トレーサビリティ閲覧画面（閲覧対象の選択）	117
図 69 トレーサビリティ閲覧画面（回収）	118
図 70 トレーサビリティ閲覧画面（解砕前の部品取り外し）	120
図 71 トレーサビリティ閲覧画面（解砕～手選別）	121
図 72 トレーサビリティ閲覧画面（プラスチック微粉碎・選別）	122
図 73 トレーサビリティ閲覧画面（静電選別）	123

図 74 トレーサビリティ閲覧画面（比重選別）	124
図 75 トレーサビリティ閲覧画面（比重選別後の材料の詳細）	125
図 76 水平利用量の算定	125
図 77 水平利用プロセスに伴う追加コスト計	131
図 78 評価範囲およびマテリアルフロー	134

表目次

表 1 型式調査及びタイプ分類結果	25
表 2 認定事業者における小型家電処理フローの比較	29
表 3 解砕方式の選定	34
表 4 取り外し部品・製品の一覧	35
表 5 事前処理結果	37
表 6 解砕機の投入重量	38
表 7 解砕後の回収重量	39
表 8 解砕処理時間	46
表 9 投入サンプル内容と微粉碎・1 次選別結果	49
表 10 5 品目の組成分析結果（重量比%）	57
表 11 品目ごとの静電選別仕切り最適位置	67
表 12 静電選別機での選別で各回収容器に入った選別物の重量	70
表 13 水比重選別結果	71
表 14 各品目の回収量に対する高純度 PP 回収量	72
表 15 空気清浄機サンプルの ABS および PS に対する近赤外識別結果	74
表 16 標準化データ	82
表 17 各サンプル間の相関係数による評価	83
表 18 各 PP サンプル間のユークリッド距離	84
表 19 炊飯器由来リサイクル PP の測色結果と色見本	92
表 20 炊飯器由来リサイクル PP の物性評価の結果	94
表 21 炊飯器由来リサイクル PP の灰分測定結果	99
表 22 炊飯器由来リサイクル PP の分子量分布測定の結果	100
表 23 家電製品への再利用検証項目と検証結果	101
表 24 評価対象製品シナリオの CO ₂ 排出量	134

表 25	ベースラインシナリオの CO ₂ 排出量	135
表 26	本事業での CO ₂ 削減量	135

背景・目的・事業概要

制度背景

エアコン、テレビ、冷蔵庫、洗濯機といった家電 4 品目については、リサイクル制度の下で処理フローや品質管理の仕組みが整備され、プラスチックにおいても一定の再利用が進められている。

一方、使用済小型家電については、製品種類が多岐にわたることや部品構成が多様であることから、水平利用を前提としたプラスチックの選別・回収・再資源化の取組は限定的であり、金属回収を中心とした処理が主流となっている。



図 1 小型家電由来プラスチックの課題

小型家電由来プラスチックの課題と解決目標

使用済小型家電由来のプラスチックについては、従来、金属資源の回収を主目的としたリサイクルプロセスの中で副次的に取り扱われてきた。その結果、プラスチックの水平利用を前提とした回収・処理・品質設計は十分に行われておらず、実装に向けたいくつかの構造的課題が存在する。

課題（１）と解決目標：小型家電の分解作業の効率化

小型家電リサイクルの現場において、手解体が実施されているのは、パソコン、携帯電話、スマートフォン、タブレット端末等に代表される、高品位小型家電に分類される精密機器が中心である。これらの製品は、価値の高い金属資源を多く含むことから、手作業による分解を行っても一定の採算性が確保されている。

それ以外の多くの使用済小型家電については、手解体による分解作業を実施した場合、処理コストが回収価値を上回ることから、経済合理性の観点で課題がある。このため、低品位と位置づけられる小型家電については、発火可能性のあるリチウムイオン電池（LiB）等の危険物を除去した後、大型破砕機による一括処理を行い、金属回収を主体としたリサイクルプロセスが採用されているのが一般的である。

このような処理フローにおいては、分解・前処理工程の効率性が金属回収を前提に最適化されており、プラスチックの材質別分離や高品位回収を目的とした前処理は限定的である。また、低品位小型家電に含まれるプラスチックは、メーカーごとで種類や製品形状などが異なることで、手解体を適用すること自体が現行の運用では採算面を阻害する要因となっている。

現行の手解体を中心とした分解作業においては、製品構成や作業条件にもよるが、時間当たり 2～10 台/人程度の処理能力にとどまる場合が多いため、低品位小型家電を対象とした場合、手解体を前提とする分解・前処理プロセスでは、処理能力および経済性の両面で制約が大きい。

これらの課題に対しては低品位小型家電についても適用可能な分解・前処理プロセスの高度化を図り、時間当たり 50 台程度の分解処理能力を確保することを解決目標とする。具体的には、解砕機の導入等による分解工程の効率化を通じて、処理能力の向上および人手作業の削減を実現し、分解・前処理に係るコストの低減を目指したプロセスを検証する。

課題（２）と解決目標：再生プラスチックの純度向上

大型破砕機により一括処理されたプラスチックは複数の樹脂が混在した状態で回収されることが一般的であり、再生後の樹脂純度は概ね 80～85%程度にとどまる場合が多い。

また、金属回収後の残渣からプラスチックを回収するプロセスにおいて、大型破砕機によりプラスチック表面の摩耗や微細化が生じやすく、物性低下につながる可能性や金属、ゴム、基板片等の異物が混入するリスクも高まり、再生材としての品質安定化が困難となる。このように家電製品への水平利用に求められる品質要件を満たすことが難しく、破砕・回収の工程構成そのものが、高

純度プラスチックの回収を阻害する要因となっている。

特に主要プラスチックである PP や ABS 等において、より高い純度での分離・回収が不可欠である。

これらの課題に対しては、前述の解砕機の導入と併せて、プロセス全体の順序を見直すことが有効である。具体的には、従来の一括破碎を前提とした処理ではなく、解砕により製品の筐体を叩き割ることで、モーター等に含まれる銅を中心とした金属部品を効率的に回収しつつ、同時にプラスチックを回収する工程構成へと転換することで、破碎前段階において質の高いプラスチックを確保することが可能となる。

さらに、回収対象を雑多にするのではなく、樹脂組成や製品特性に近い小型家電を一定の単位でグルーピングし、選択的に処理することで、後段の選別工程における負荷低減および選別効率の向上が期待される。これにより、比重選別や静電選別等の選別技術を効果的に組み合わせることが可能となり、水平利用に適した高純度プラスチックの安定的な回収につながると考えられる。

工程順序の見直しおよび選択的回収・選別技術の高度化を通じて、PP および ABS について、純度 98%以上の再生プラスチックを安定的に回収することを解決目標とする。

課題（3）と解決目標：品質規格の整理と導入支援

使用済小型家電由来のプラスチックについての水平利用を想定した品質基準を満たすための品質基準や活用指針が十分に整理されていないことが、再利用拡大に向けた課題となっている。特に、プラスチック純度、物性、異物混入レベル等に関する要求水準が明確に共有されておらず、再生材の評価や用途判断が個別案件ごとに行われる傾向にある。

このような状況下では、リサイクル事業者側において再生材の設計方針や処理条件の最適化が難しく、結果として品質の安定性や継続的な供給に支障をきたす。また、製品設計側においても、再生プラスチックの適用可否を判断するための客観的な指標が不足しており、水平利用に向けた検討が進みにくい要因となっている。

さらに、小型家電は製品種類が多岐にわたることから、回収されるプラスチックの組成や添加剤構成にもばらつきが生じやすい。このばらつきを前提とした品質区分やグレーディングが整理されていないため、用途に応じた使い分けが十分に行われていない。

この結果、高純度な再生プラスチックが得られた場合であっても、その品質特性に応じた最適な

用途へと結び付けるための判断基準が不十分であり、水平利用の実装が限定的となるため品質基準および活用指針の未整理は、技術的な成立性に加え、事業としての継続性や横展開を阻害する要因の一つとなっている。

これらの課題に対して使用済小型家電由来のプラスチックにおいて、家電製品への水平利用を想定した品質基準および活用指針の整理を行うことを解決目標とする。具体的には、樹脂純度、物性特性、異物混入レベル等の観点から再生材のグレーディングを整理し、家電や小型家電等に適用可能な品質水準を明確化する。

これにより、リサイクル事業者および製品設計側双方にとって、再生プラスチックの評価・活用に関する共通認識を形成し、小型家電由来プラスチックの水平利用に向けた実装可能性を高めることを目指す。また、これらを補完するためにはトレーサビリティが必要であるため活用について検証する。

課題（４）とコスト目標：事業成立性を左右する横断的課題

以上の各課題に加え、使用済小型家電由来のプラスチックの水平利用を実装する上では、

分解・選別・再利用の各工程を通じたトータルコストが、事業成立性を左右する重要な要素となる。特に低品位小型家電を対象とする場合、処理能力の低さや手作業への依存度の高さは、分解・前処理コストの増加につながり、再生プラスチックの利用拡大を阻害する要因となる。

これらの課題を解決するため分解・前処理工程の効率化や選択的回収・グルーピングによる選別効率の向上を通じて、再生プラスチックの品質確保とあわせて、水平利用が成立し得るコスト水準の実現可能性を検証する必要がある。なお、図 1 に示すとおり、本事業では水平利用の実装を見据え、一定のコスト水準を目標として設定しているが、本章ではこれを達成すべき前提条件として位置づけ、具体的な検証結果については後章において整理する。

本実証事業の目的

従来金属回収が主目的とされていた小型家電リサイクルにおいて高純度プラスチックの回収と家電製品(小型家電を含む)としての水平利用を可能とする処理技術・プロセスを確立し、業界全体での再資源化の高度化と脱炭素化を促進することを目的とする。

技術開発全体像（俯瞰図）

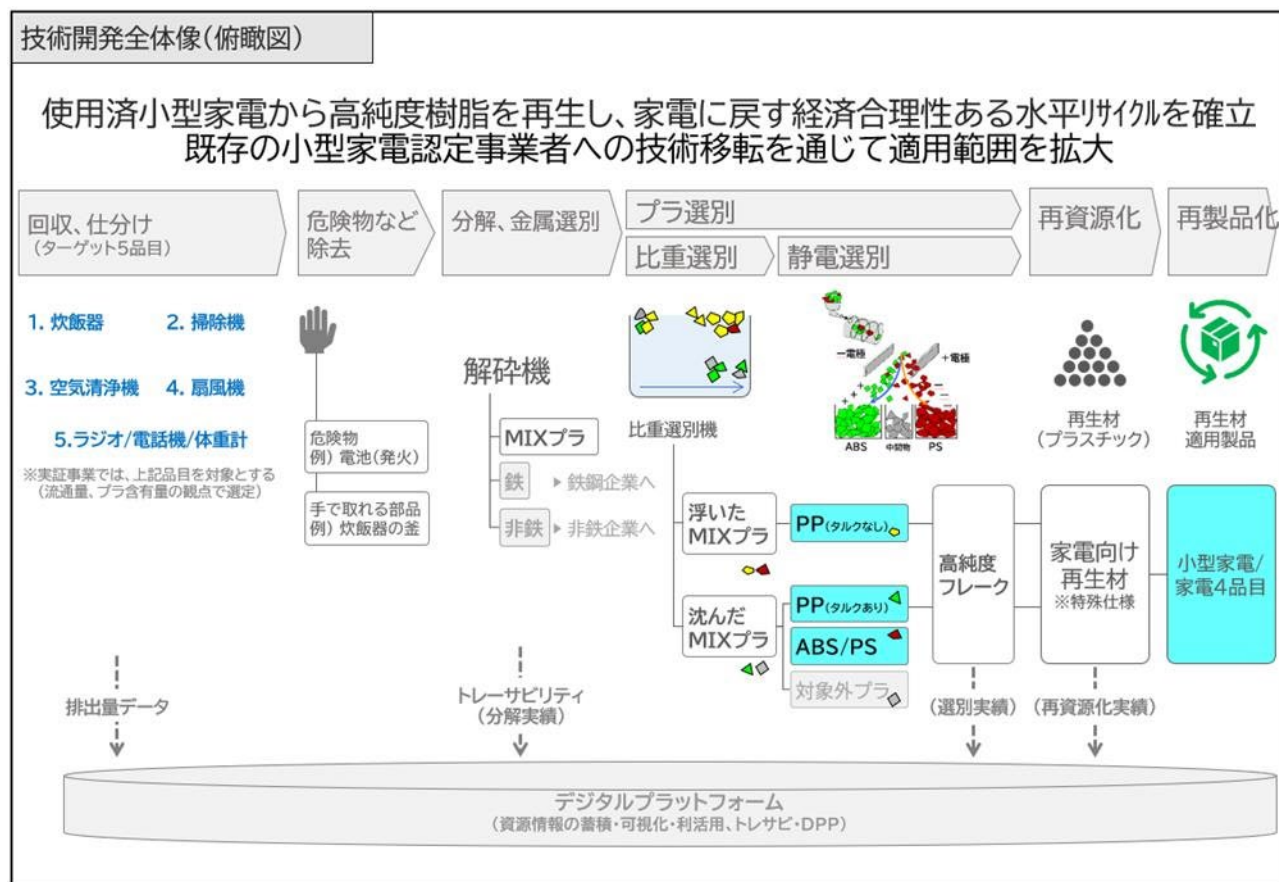


図 2 技術開発全体像（俯瞰図）

本実証事業における技術開発全体像を図 2 に示す。使用済小型家電から高純度プラスチックを回収・再生し、再び家電製品へと利用する経済合理性のある水平リサイクルプロセスの確立を目指し、回収から再製品化に至る一連の工程を対象として技術検証を実施する。

対象とする使用済小型家電は、炊飯器、掃除機、空気清浄機、扇風機、ラジオ・電気機器・体重計等の 5 品目とし、回収・仕分け工程において対象製品を選定した後、危険物の除去および手作業による一部前処理を実施する。その後、解砕機を活用した分解および金属選別工程を経て、プラスチックを含む混合物（MIX プラスチック）を回収する構成としている。

回収された MIX プラスチックは、比重選別および静電選別を組み合わせたプラスチック選別工程を適用し、PP および ABS／ポリスチレン(PS)を中心としたプラスチック別分離により、従来の金属回収主体プロセスでは困難であった高純度プラスチックの回収を可能とし、再資源化工程において高純度フレークとして再生することを目指す。

再資源化された高純度フレークは、家電製品への適用を想定した再生材として評価を実施

し、特定用途への適用可能性を検証するとともに、小型家電および家電 4 品目への展開を見据えた再製品化の可能性について整理する。

また、各工程で得られる分解実績、選別実績、再資源化実績等のデータの活用を通じて、トレーサビリティの確保および将来的な DPP（デジタルプロダクトパスポート）への活用を見据え、基盤整備に向けた課題の抽出および対策の整理を実施する。

このように、本実証事業は、単一技術の検証にとどまらず、回収・分解・選別・再資源化・再製品化を一体のプロセスとして整理し、既存の小型家電認定事業者への技術移転や横展開を見据えた技術開発全体像の構築を目的とする。

実施体制

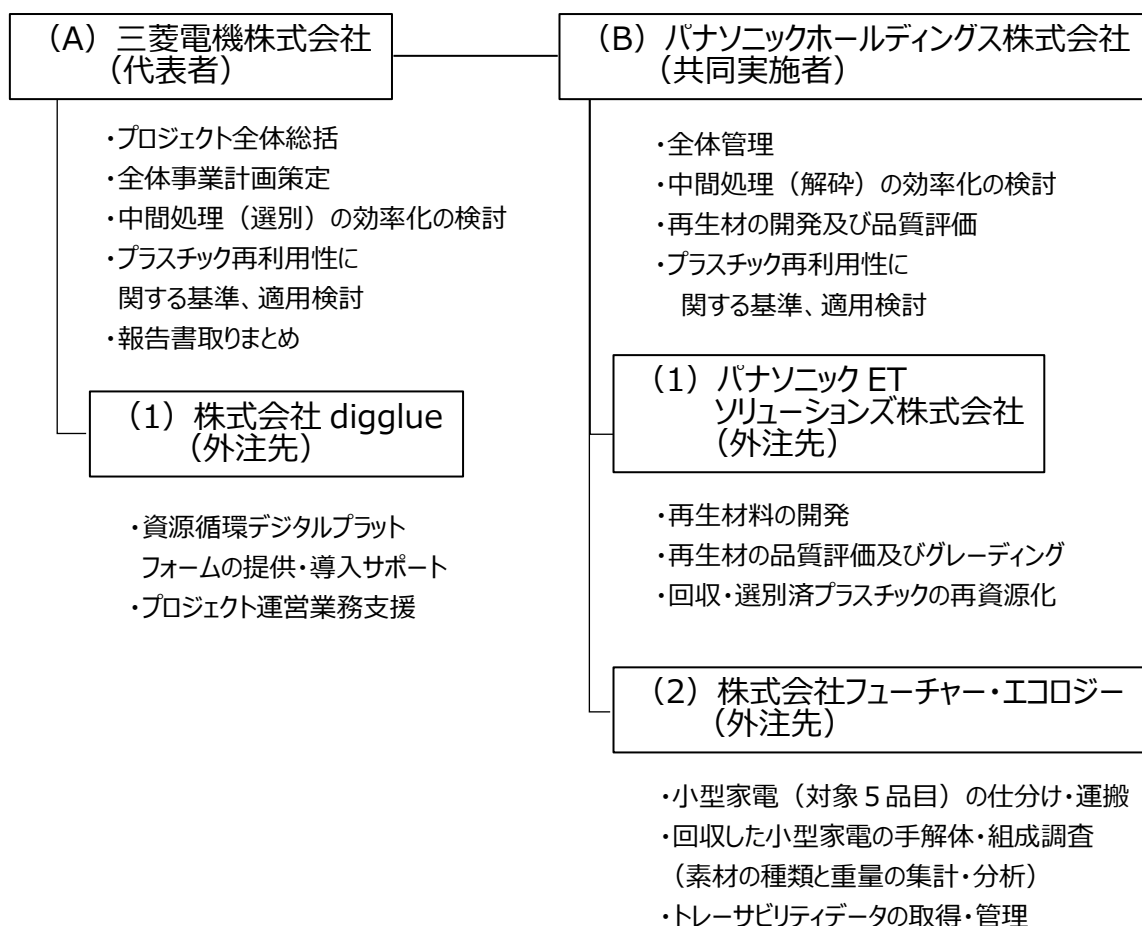


図 3 実施体制図

本実証事業における実施体制を図3に示す。代表事業者および共同実施者を中心に、外注先を含む複数主体が役割分担のもとで連携し、技術検証および評価を実施する体制とする。

代表事業者である三菱電機株式会社は、本事業全体の統括を担い、実証計画の策定、進捗管理および成果の取りまとめ及び中間処理（選別）工程の効率化検討や、プラスチックの再利用性に関する基準および適用検討を担当する。

共同実施者であるパナソニックホールディングス株式会社は、全体管理の一翼を担うとともに、中間処理（解砕）工程の効率化検討、再生材の開発および品質評価、ならびにプラスチック再利用性に関する基準・適用検討を担当する。

外注先として、株式会社 digglue は、資源循環デジタルプラットフォームの提供および導入支援や、実証におけるデータの取得・管理およびプロジェクト運営に係る業務支援を担当する。また、パナソニック ET ソリューションズ株式会社は、再生プラスチックの開発・品質評価およびグレーディング整理、回収・選別済プラスチックの再資源化を担当する。さらに、株式会社フューチャー・エコロジーは、小型家電（対象 5 品目）の仕分け・運搬、手解体および組成調査、ならびにトレーサビリティデータの取得・管理を担当する。

このように、本実証事業では、分解・選別・再資源化・品質評価・データ管理といった各工程において、専門性を有する主体が役割を分担し、相互に連携する体制を構築することで、使用済小型家電由来プラスチックの水平利用に向けた実証を効率的かつ多面的に実施する体制を構築する。

実証事業の実施スケジュール

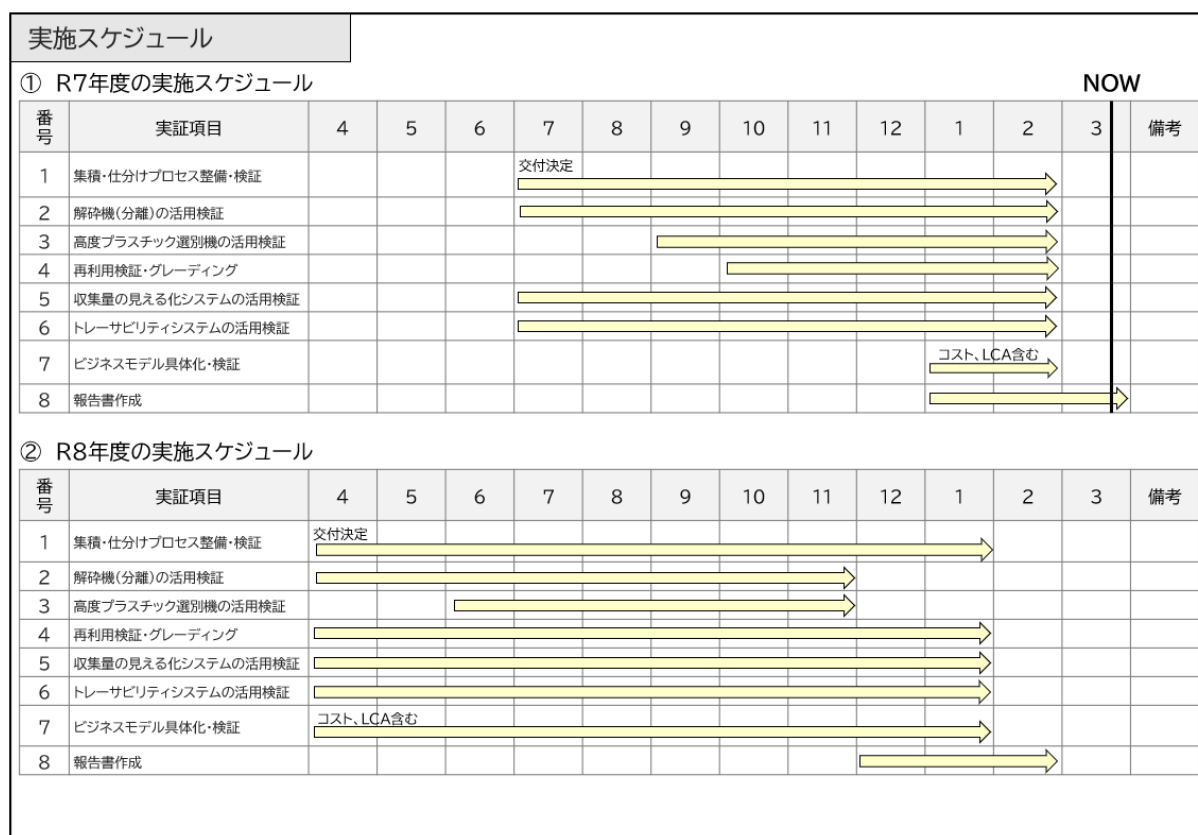


図 4 実証事業の実施スケジュール

実証事業の実施スケジュールを図 4 に示す。本実証事業では、令和 7 年度および令和 8 年度の 2 か年を通じて、集積・仕分け、分解・選別、再資源化、デジタル活用、評価・整理といった各工程を段階的に実施する計画とする。

令和 7 年度は、水平利用プロセスの成立性を検証するための実証フェーズと位置づけ、各技術要素の検証および基礎データの取得を主目的として業務を実施する。具体的には、集積・仕分けプロセスの整備・検証、解砕機（分離）の活用検証、高純度プラスチック選別機の活用検証、再利用検証およびグレーディング整理を中心に、工程ごとの技術的成立性を確認する。

あわせて、収集量の見える化システムおよびトレーサビリティシステムの活用検証を通じて、実証により得られるデータの取得・整理により、ビジネスモデルの具体化・検証および LCA 評価に向けた基礎情報の蓄積を進める。

令和 8 年度は、令和 7 年度の実証結果を踏まえたプロセスの深化および横展開フェーズと位置づけ、各工程の高度化および適用範囲の拡大を図る計画とする。

集積・仕分け、解砕・選別、高純度プラスチック回収、再利用検証については、引き続き検証を

踏まえた工程条件の精緻化および安定運用に向けた検討を進める。

また、収集量の見える化およびトレーサビリティに関するデジタル活用は、実運用を想定した検証によりビジネスモデルの具体化および LCA 評価を含めた総合的な評価を実施する。

(0) 全体目標

0.1 本事業における全体目標の位置づけ

小型家電リサイクルにおいては、制度創設以降、金属回収を主目的とした処理が進められてきた一方で、使用済小型家電に含まれるプラスチックについては、材質が多様であることや選別が困難であることから、水平利用に向けた回収・再利用が十分に進展していない状況にある。特に、低品位小型家電については、経済合理性の観点から手解体が適用されにくく、結果としてプラスチックはサーマルリサイクル等に供されるケースが多い。

こうした背景を踏まえ、本事業では、使用済小型家電由来プラスチックについて、金属回収を前提としつつも、家電製品への再利用を可能とする品質水準での回収・再生を目指し、経済合理性を確保した水平利用プロセスの成立可能性を検証することを全体目標として設定した。

本章では、別表に示す個別目標を統合した形で、本事業全体として目指す到達点および令和 7 年度における検証範囲を整理し、本実証事業の位置づけを明確化する。

0.2 全体目標の内容

本事業の全体目標は、使用済小型家電から回収されるプラスチックについて、PP および ABS 等の主要プラスチックを対象に、家電用途への再利用を想定した品質水準での回収・再生が可能となる水平利用プロセス構築に向けた技術的成立性を検証することにある。

具体的には、低品位小型家電にも適用可能な分解・前処理・選別工程を組み合わせ、従来の金属回収主体プロセスでは困難であった高純度プラスチック回収の可能性を明らかにするとともに、処理効率、品質水準およびコストの観点から、実運用を見据えた課題および改善余地を整理することを目的とした。

また、技術検証にとどまらず、回収量、処理量、品質、コスト等の情報を整理することで、既存の小型家電認定事業者が水平利用に取り組む際の検討材料として活用可能な知見を蓄積し、将来的な横展開を見据えた基礎情報の整備を図ることも全体目標の一部として位置づけた。

0.3 別表目標との対応関係

本事業の全体目標は、別表「本技術開発（実証研究）の目標」に示す個別目標を相互に関連づけ、統合することで構成されている。

具体的には、集積・仕分けプロセスの整備・検証、解砕機（分離）の活用検証、高純度プラスチック選別・活用検証、再利用検証およびグレーディングの整理といった各技術要素を、水平利用プロセスの構成要素として位置づけ、それぞれの成立性および課題を検証することにより、全体目標の達成を図る構成とした。

各個別目標の詳細な検証内容および結果については、以降の各章において工程ごとに整理し、本章では全体目標との関係性を示すにとどめる。

0.4 令和 7 年度における到達目標および検証範囲

令和 7 年度は、水平利用プロセスの社会実装に向けた初期段階として位置づけ、技術的成立性の検証および課題整理を主目的として検証した。

具体的には、各工程における処理能力、品質水準および運用上の制約条件を把握し、水平利用を阻害している要因および改善の方向性を明確化することを到達目標とした。

なお、本検証は、特定条件下での試行・評価を中心としており、量産運用や恒常的な商用運転の成立については、次年度以降の検討課題として整理する方針とした。

0.5 全体目標に対する成果の概要

本検証により、低品位小型家電を含む使用済小型家電から、家電用途への再利用を見据えた高純度プラスチック回収の可能性が示唆された。また、分解・選別工程の構成や処理順序の見直しにより、従来プロセスでは困難であった品質水準への到達可能性および工程上の課題が明確となった。

これらの成果は、既存の小型家電リサイクル事業者が水平利用に取り組む際の検討材料として活用可能な知見であり、次年度以降のプロセス高度化および横展開に向けた基礎情報として位置づけられる。

(1) 水平利用プロセスの確立

本章では、使用済小型家電由来プラスチックの水平利用を実現するための一連の技術プロセスについて整理し、その整備および検証結果を示す。

従来の小型家電リサイクルは金属回収を主目的とした処理フローが中心であり、プラスチックは混合状態で回収・処理されることが多かった。一方で、水平利用を実現するためには、再生材として求められる品質水準や用途要件と整合した工程設計が不可欠である。

すなわち、上流の集積・仕分け工程のみを高度化しても、出口側の品質要求と整合していなければ、過剰な仕分けや過度な選別を招き、工程効率および経済性の観点で合理性を欠く可能性がある。そのため、再利用先における品質要求を起点とする「出口要求整合型プロセス設計」の考え方を整理し、その設計思想に基づき各工程の検証を実施した。

具体的には、以下の4つの工程区分に沿って検討を行った。

- ① 集積・仕分けプロセスの整備・検証
- ② 解砕機（分離）の活用検証
- ③ 高純度プラスチック選別・活用検証
- ④ グレーディングの整理・再利用検証

本章では、各工程を個別に検証するのみならず、工程間の連続性を踏まえ、再利用品質の確保と処理効率の両立可能性について整理する。

特に、出口側の品質要求と整合した仕分け単位および選別水準の設定が、過剰選別の回避および工程合理化に資するという仮説のもと、統合的視点から検証を行った。

(1) ①集積・仕分けプロセスの整備・検証

①-1 目的

本項では、小型家電由来プラスチックの水平利用を実現する上での前提条件となる「集積・仕分けプロセス」について、その考え方および検証方針を整理することを目的とする。

本実証事業では、後段の分解・選別・再利用工程における検証を有効に進めるための前提として、対象とする小型家電の範囲を整理した上で、品目特性や樹脂組成を考慮した集積・仕分けの考え方を明確化する。

また、本プロセスは、全体目標である「使用済小型家電由来プラスチックの水平利用プロセスの

確立」に対し、品質確保および工程効率化の両立を図る基盤的要素として位置づけられる。特に、初期段階において対象範囲や仕分け単位を適切に設定することが、以降の実証結果の解釈性および再現性を高める上で重要である。

このため、本実証事業では、まず集積・仕分けプロセスに着目し、実証に供する条件整理を行った。

①-2 方法

①-2-1 対象とした小型家電の範囲

本実証事業における対象品目は、炊飯器、掃除機、空気清浄機、扇風機、ラジオ・電話機・体重計の 5 品目とし、各品目 300 台、合計 1,500 台を対象として検証した。具体的な対象品目の選定にあたっては、通年販売であり回収量が多い、製品構成の一般性、ならびに樹脂使用量の観点を考慮している。

また、対象品目の整理にあたっては、高品位小型家電については、従来から手解体が行われ、一定の資源回収が成立している一方で、低品位小型家電については、経済性の制約から一括破碎処理が主流となっている。

特に、低品位小型家電に含まれる小型家電について、プラスチック回収の可能性を検証する観点から、手解体による詳細な組成把握を行うこととした。

①-2-2 除外品とその考え方

なお、本実証事業では、実証の目的を明確化し、検証条件のばらつきを抑制する観点から、製品構成や安全管理上の条件が大きく異なる一部の小型家電については、あらかじめ除外対象として整理した。除外の考え方および対象は以下のとおりである。

炊飯器、掃除機

これらの品目については、構造および構成部材が比較的安定しており、本実証の検証目的に照らして特段の除外対象は設定していない。

扇風機

ハンディタイプのサーキュレーターについては、リチウムイオン電池（LiB）を内蔵する場合が多く、加えて製品サイズが小さいことから、分解・前処理に要する手間に対して得られる出来高が限

定的となるため、検証の対象外とした。

空気清浄機

冷却機能を備え、フロン類を使用している製品については、フロン回収・処理工程が別途必要となり、他の対象品目と同一条件での実証が困難であることから、検証の対象外とした。

体重計

天板にガラス材を使用している製品については、解砕工程においてガラスの飛散による安全上のリスクが想定される。このため、作業安全性の確保の観点から、ガラス天板を有する体重計は検証の対象外とした。

このように、除外品の考え方をあらかじめ整理・明示することで、実証条件を一定に保ち、後段における組成分析結果や選別結果の解釈性を確保している。

①-2-3 集積・仕分けプロセスの整備・検証方法・結果

①-2-3-1 回収スキーム

本検証における集積対象は、家電量販店における下取り回収品とし、当該回収品を小型家電リサイクル認定事業者である株式会社フューチャー・エコロジーが引き取った。

①-2-3-2 型式調査およびタイプ分類

まず、各品目について市場に流通している型式の把握を目的として、メーカーおよび型式に関する調査を実施した。その上で、外観形状や構造的特徴等に基づきタイプ分類を行った

型式調査およびタイプ分類結果を 表 1 型式調査及びタイプ分類結果 に示す。

表 1 型式調査及びタイプ分類結果

製品カテゴリ	調査台数 (台)	製品タイプ分類	製品タイプ別 台数(台)	品目別 割合(%)
炊飯器	135	圧力 IH	58	43
		IH	48	36
		マイコン	29	21
掃除機	140	キャスター型	80	57
		スティック型	60	43
		ロボット型	0	0
扇風機	120	全体がメタル	1	1
		羽カバーがメタル	93	77
		羽カバーがプラ	23	19
		サーキュレーター	3	3
空気清浄機	14	空気清浄機（単機能）	3	21
		加湿空気清浄機（ヒート機能）	11	79
		除湿空気清浄機（コンプレッサー）	0	0
		ハイブリッド式（加湿・除湿機能あり）	0	0
ラジオ/ 電話機/ 体重計	100	ラジオ	2	2
		電話機（FAX あり）	1	1
		電話機（FAX なし）	91	91
		体重計（天板がプラ）	2	2
		体重計（天板がガラス）	4	4

調査の結果、各品目において主流タイプが明確に確認された。

炊飯器は圧力 IH および IH が約 8 割を占め、基本構造の共通性が高い。空気清浄機も加湿機能付きが約 8 割を占め、構造傾向は一定である。これらは品目単位での集積が合理的である可能性が高い。

掃除機はキャスター型とスティック型で約 6:4 に分布し、構造差が大きい。扇風機は羽カバー金属型が多数を占めるが、プラスチック製も一定割合存在する。これらはタイプ単位での仕分け管理が処理効率および金属混入率低減に寄与する可能性が示唆される。

いずれの品目も市場主流タイプが十分数含まれており、後段の組成分析および解砕・選別実証に対する代表性は確保されていると評価される。

以上より、本型式調査結果は、品目単位またはタイプ単位での仕分け設計を行うための基礎

データとして妥当である。

①-2-3-3 樹脂判別および組成把握

各品目別のタイプ分類結果を踏まえ、代表性を確保する観点から各品目につき約 10 台を抽出し、手解体を実施した。手解体により分解された各部品は資源区分ごとに分類し、プラスチック部品についてはプラスチック判別用ハンディセンサーを用いて材質を特定した。さらに、各部品の重量を計測し、樹脂種別情報と重量データを統合することで、品目別のプラスチック組成を定量的に把握した。

分析の結果、対象 5 品目に含まれる単一プラスチック部品は合計 26 種類確認されたものの、重量ベースで評価すると、ABS、PP、PS の 3 樹脂が全体の大部分を占めることが確認された。(図 5 組成分析結果(対象 5 品目に含まれる樹脂種))

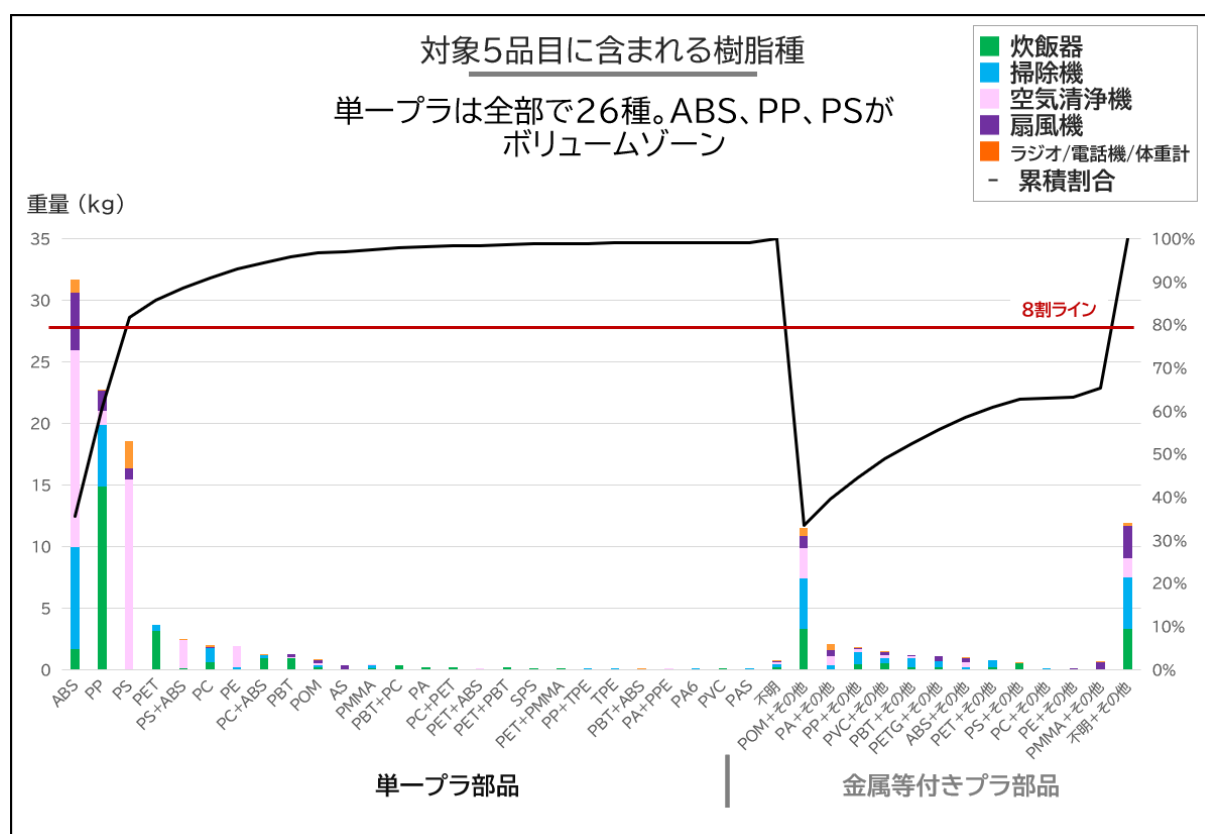


図 5 組成分析結果(対象 5 品目に含まれる樹脂種)

手解体および組成分析の結果から、品目ごとに樹脂構成の傾向が異なることが明らかとなった。

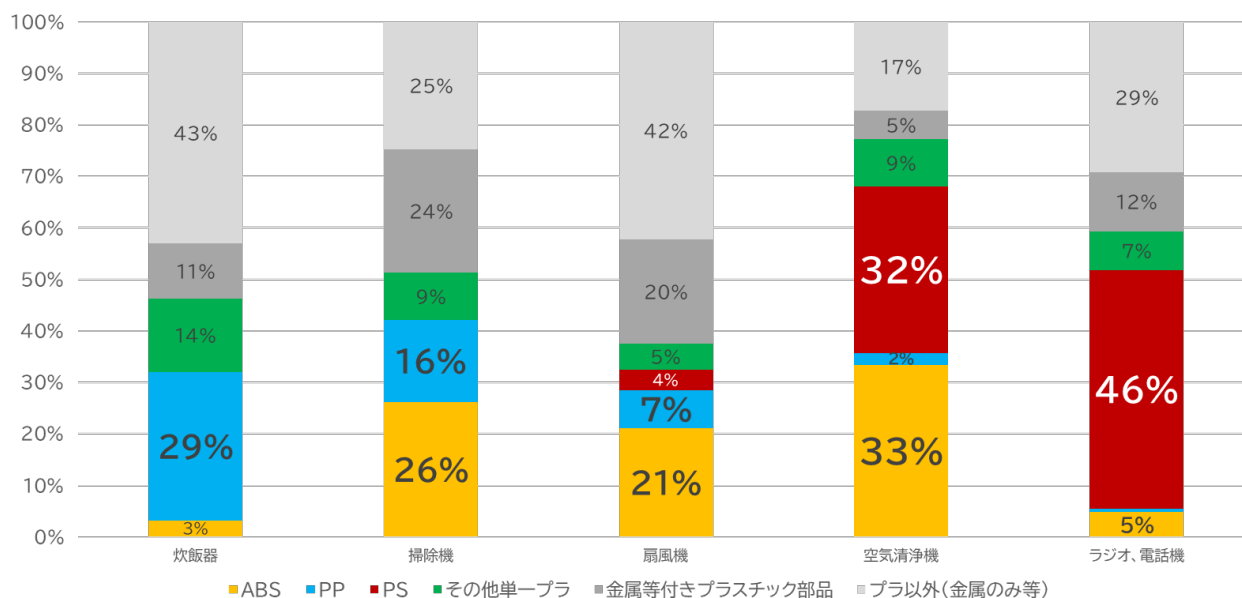


図6 組成分析の結果（品目別）

炊飯器については、PPを主体とする構成が多く確認され、外装部材および内部構造部材の双方にPPが広く使用されていた。掃除機および扇風機では、PPとABSが主要樹脂として確認され、用途や部位に応じて両樹脂が使い分けられている傾向が見られた。一方、空気清浄機ならびにラジオ・電話機・体重計においては、ABSおよびPSを主体とする構成が確認され、小型部品や外装部材にこれらのプラスチックが多く使用されている傾向が認められた。

また、分析の過程で、ターゲットのプラスチックであるABSおよびPPは筐体部材のみならず、内部構造部材にも一定量存在することが確認された。このことは、回収対象を外装部材に限定せず、製品全体を対象とした回収設計を行うことの有効性を示唆する結果である。

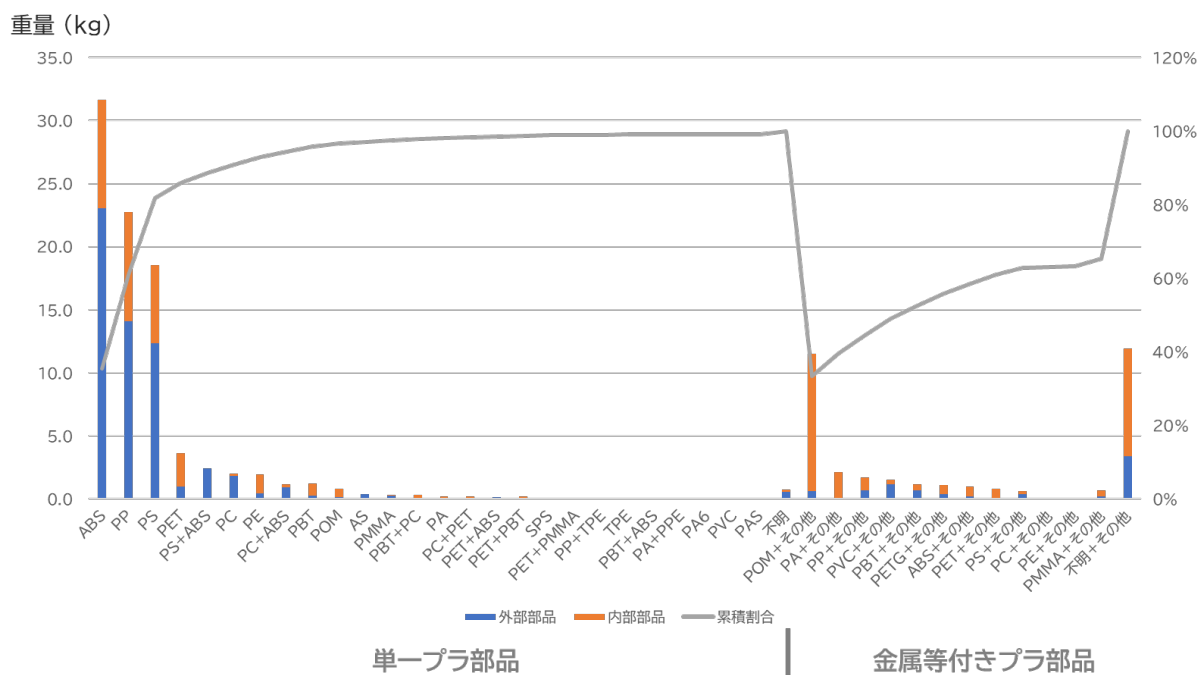


図7 組成分析結果（外部・内部別）

以上の結果は、後続の解砕条件設定および選別工程設計における基礎データとして位置付けられるものである。

① -2-3-4 他社認定事業者への現地視察

あわせて、株式会社フューチャー・エコロジー以外の小型家電リサイクル認定事業者 3 社を対象に、現行の回収・仕分けプロセスに関する現地視察を実施し、回収後の処理フローおよび仕分けの実態について確認を行った。認定事業者 3 社の処理フロー比較を以下に示す。

表 2 認定事業者における小型家電処理フローの比較

プロセス	事業者 A	事業者 B	事業者 C
危険物除去	実施	実施	実施
品目別仕分け	一部実施 (炊飯器・掃除機等)	実施せず	実施せず
解砕	一部実施	実施せず	実施せず
金属選別	実施	実施	実施
プラスチック選別	実施せず (RPF 化)	実施	実施せず

視察の結果、危険物除去および金属選別については 3 社すべてで実施されていた。一方、品目別仕分けおよび解砕方法、プラスチック選別の実施状況には差異が確認された。

事業者 A では、銅含有量の高い炊飯器および掃除機等の一部品目について、ピッキングによる品目別仕分けを行った上で解砕処理を実施していたが、プラスチックは主に RPF 原料として取り扱われていた。

事業者 B では、危険物除去後に大型破砕機による一括破砕を行い、金属選別を経た残渣からプラスチック選別を実施していた。具体的には、比重選別、風力選別、光学選別等を組み合わせることで純度向上に取り組んでいることが確認された。

一方で、投入原料が混合状態であるため、プラスチック組成や付着物のばらつきが生じ得る。このため、工程を重ねることで一定の純度向上は図り得るものの、原料特性に起因して純度向上には一定の制約が生じ得る構造であることが示唆された。

事業者 C では、一括破砕および金属選別を中心とした運用が採用されており、プラスチック選別は行っていない。

以上より、現行の認定事業者における運用は、

- ・金属回収を主目的とするプロセス設計
- ・一括破砕を前提とした後段選別型
- ・プラスチック別回収を主目的としない構造

であることが確認された。

特に、事業者 B のように後段で高度な選別工程を組み合わせる事例は確認されたものの、投入段階において品目別の管理は行われていない運用であった。このため、選別工程は混合原料を前提とした設計となっていることが確認された。

①-2-3-5 仕分けグルーピング方針の整理

本実証事業における集積・仕分けプロセスの検証結果を踏まえ、対象とする小型家電のグルーピング方針について整理を行った。本整理は、単一の指標に基づく分類ではなく、複数の観点を組み合わせた初期方針（Ver.0）として位置づけるものである。

上流工程での仕分けは、基本的に品目単位で実施することを前提とする。一方、解砕後のプラスチック選別工程設計においては、プラスチック組成の類似性に基づくグルーピングを行うことで、処理設計の合理化を図る方針とした。

仕分けロジックの整理にあたり、以下の観点を統合的に考慮した。

第一に、製品に含まれる主要プラスチック（PP、ABS、PS）の含有傾向である。手解体および組成分析の結果、これら 3 種のプラスチックが重量ベースで大部分を占めることが確認されており、含有率が一定水準以上であることを一つの判断軸とした。具体的には、PP・ABS・PS のいずれかの含有率が概ね 30%以上であることを目安とした。

第二に、製品サイズおよび構造に起因する解砕性である。製品サイズが小さいものについては、解砕後に破片が過度に細くなる傾向があり、プラスチックのピッキング効率や金属との分離性に影響を与える可能性がある。このため、一定サイズ未満の製品については本ロジックの対象から除外する方針とした。なお、具体的な定量閾値については今後の検証課題とする。

第三に、静電選別等の適用を想定した場合のプラスチック選別性である。プラスチック組成の近似性に基づきグルーピングすることで、後段の選別工程における処理設計の効率化および純度向上への寄与可能性を検証することを目的とした。

第四に、将来的な家電製品への適用可能性を見据えた再利用性である。再生材としての用途展開を前提とした場合、物性安定性や品質確保の観点から評価が必要となるため、今後の検証項目として位置づけた。

以上の観点を踏まえ、対象とした 5 品目については、プラスチック組成の類似性を基軸として以下の 3 群に整理した。

- ・PP を主体とする品目群（例：炊飯器）
- ・PP および ABS を主体とする品目群（例：掃除機、扇風機）
- ・ABS および PS を主体とする品目群（例：空気清浄機）

本方針は、上流では品目単位で管理しつつ、選別設計上は 3 グループで整理する二層構造を採用する初期案である。

本グループ方針は、解砕・選別・再利用効率の向上を目的とした上流工程での仕分けロジックの初期案（Ver.0）として位置づけるものであり、現時点では仮説段階にある。今後は、選別実証結果および再生材評価の結果を踏まえ、各観点の妥当性検証および閾値条件の精緻化を進め、実運用に即した仕分けロジックへと発展させていく必要がある。

①-2-4 考察

プラスチック構成の種類を限定するため、まず小型家電を品目ごとに分けて処理条件を整理した上で処理を行うことで、後工程におけるプラスチック純度の向上につながる可能性が示唆された。特に、静電選別を適用する場合、プラスチック種ごとの帯電傾向の違いを利用して選別を行うが、プラスチック種が多様に混在した状態では、それぞれの帯電量が相互に影響し、十分な選別効果が得られないケースが確認された。

一方で、プラスチック組成が類似した品目群ごとに処理を行った場合には、帯電特性の差異が明確となり、純度向上に寄与する結果が得られた。このことから、品目ごとの分別や、グループと選別性能との間には一定の関係性があると考えられる。

また、本実証では、従来のように複数品目を混合して処理するのではなく、まず品目ごとに分けて検証したことで、プラスチック純度や異物混入の要因を明確に把握することが可能となった。この点は、検証アプローチとして有効であったと評価できる。

(1) ②解砕機（分離）の活用検証

小型家電由来プラスチックの水平利用を実現するためには、集積・仕分け工程で整理された対象物を、後段の選別工程へ品質を維持した状態で引き渡す中間工程の設計が重要となる。

小型家電には、モーターやハーネス等の銅部品をはじめとする高付加価値金属が含まれており、これらはリサイクル工程全体の収益性を支える重要な資源である。一方で、これらの部品が破碎・混在した状態で後段工程へ流入した場合、選別工程における異物混入や処理負荷の増大を招く要因となる。

このため、銅部品等の高付加価値資源を適切な段階で分離・回収しつつ、プラスチックを後段工程に適した状態で供給する工程が、水平利用プロセス全体の成立性を左右する要素となる。

本実証事業では、集積・仕分け工程と選別工程の間に位置するプロセスとして解砕・分離工程に着目し、その役割および処理特性を整理した上で、実務適用を見据えた検証を行うこととした。

(1) ②-1 目的

本項では、小型家電の分解作業における処理効率の向上と資源回収価値の最大化を両立する観点から、解砕・分離プロセスの有効性を検証することを目的とする。

小型家電に含まれるモーター等の銅部品は資源価値が高く、破碎後に機械選別で回収する場合と比較して、解砕後の段階で部品単位として回収（ピッキング）することで、銅の純度を高められるという利点がある。一方、従来の手解体中心の処理では、作業負荷が高く、処理量や経済性の観点から課題があった。

本実証事業では、筐体を解砕することにより内部構造を開放することで、以下の 2 点が実現可能かを検証する。

- ・ 銅部品等の高付加価値金属を効率的にピッキング回収すること
- ・ 同工程でのピッキング対象としてプラスチック片を加えることで、プラスチックリッチな資源を抽出すること

特に、銅部品のピッキングに加えてプラスチック片のピッキングを行うことで、後段の選別工程における異物（金属・ハーネス等）の混入リスクを低減しプラスチック純度の向上および水平利用可能性の拡大に寄与するという仮説を設定し、その成立性を実証的に評価する。

本章では、集積・仕分け工程で整理された品目およびグルーピングを前提として、異なる解砕

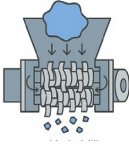
機を用いた解砕実証およびその後の銅部品ピッキング、プラスチック片のピッキングの実施結果を整理し、工数、処理効率、回収資源の重量・性状の観点から、解砕・分離プロセスの実務的有効性を検証する。

(1) ②-2 解砕・分離プロセスの検証方法・結果

②-2-1 解砕方式の選定

解砕では、モーターやハーネス等の有価性が高い部品やプラスチック片の回収を目的としており、部品やプラスチック片が分離しつつ、ピッキング可能なサイズにすることが重要である。その検討内容を表3に示す。その結果、大きく3方式（インパクトクラッシャ、ハンマークラッシャ、二軸破砕）を選定した。

表 3 解砕方式の選定

分類	方式		判断	選定結果
	概要	イメージ		
インパクト	インパクトクラッシャ ・勢いをつけて、 固定板へ衝突破砕		破砕対象の衝突スピードを調整することで、部品ごとに分離する可能性があると判断	○
	ハンマークラッシャ ・回転体による粉砕		回転速度および時間を調整することで、部品ごとに分離する可能性があると判断	○
	ジョークラッシャ ・2枚刃による挟み込み		破砕サイズが小さくなり、部品およびプラスチック片の回収が困難であると判断	×
せん断式	二軸破砕 ・二軸の破砕刃による切断		二軸の間隔を広げることで、部品ごとに分離する可能性があると判断	○
	一軸破砕 ・一軸の破砕によるすり潰し	—	破砕サイズが小さくなり、部品およびプラスチック片の回収が困難であると判断	×

②-2-2 解砕前の事前処理

解砕・分離プロセスの検証にあたっては、作業安全性の確保、解砕機の安定稼働、および後工程であるピッキング効率の確保を目的として、一部部品および製品の事前取り外しを実施した。

具体的には、「容易に取り外しが可能な部品」および「解砕時に発火・絡まり・異物混入等のリスクが高い部品」を中心に、製品カテゴリごとに除外対象を整理した。事前除外の対象および理由、ならびに各解砕における実施状況は表 4 に示すとおりである。

表 4 取り外し部品・製品の一覧

製品カテゴリ	取り外す部品・製品	取り外し理由
炊飯器	リール式電源コード	有価物かつ、解碎片に絡みピックアップ効率悪化の為
	お釜	有価物かつ、他の解砕を阻害する為
掃除機 (キャスター型)	リール式電源コード	有価物かつ、解碎片に絡みピックアップ効率悪化の為
	ホース	解碎片に絡みピックアップ効率が悪化の為
	集塵袋	汚れが飛散し、回収対象に付着する為
掃除機 (スティック型)	バッテリー	発火の恐れがある為
	リール式電源コード	有価物かつ、解碎片に絡みピックアップ効率悪化の為
	集塵ボックス	汚れが飛散し、回収対象に付着する為
空気 清浄機	電源コード	有価物かつ、解碎片に絡みピックアップ効率悪化の為
	フィルターカバー	フィルターを除去する際に取り外す為
	フィルター	汚れが飛散し、回収対象に付着する為
	リモコン	発火の恐れがある為
	フロン入り空気清浄機	フロンが大気へ開放される為
扇風機	電源コード	有価物かつ、解碎片に絡みピックアップ効率悪化の為
	羽カバー（金属）	有価物かつ、解碎片を巻き込みピックアップ効率悪化の為
	台座部品	他の解砕を阻害する為
	リモコン	発火の恐れがある為
	バッテリー	発火の恐れがある為
ラジオ、 電話機 (混合)	電源コード	有価物かつ、解碎片に絡みピックアップ効率悪化の為
	カセットテープ（ラジカセ）	解碎片に絡みピックアップ効率悪化の為
	本体と受話器を繋ぐコード	解碎片に絡みピックアップ効率悪化の為
	子機の電池	発火の恐れがある為
	インクリボン	解碎片に絡みピックアップ効率悪化の為
	リモコン	発火の恐れがある為
	ブラウン管電話機	有害物質が飛散する恐れがある為
体重計	プラ含有量も台数も少ないため、解砕実証対象外に変更	

安全面の観点では、バッテリー、リモコン等の電池内蔵部品について、解砕時の発火・発熱リスクを回避するため、原則として事前取り外しの対象とした。特に、リチウムイオン電池を内蔵する部品については、発火リスクが高いことから注意が必要である。

また、リール式電源コード、ホース、集塵袋、カセットテープ等の部品については、解砕後に破砕片へ絡まりやすく、後工程のピッキング作業の効率を著しく低下させる、あるいは回収物への異物付着を助長することが確認された。このため、簡易的に取り外しが可能な範囲で、解砕前に取り外しする運用を採用した。

なお、事前除外の具体的な実施範囲については、各実証先における設備構成や安全管理体制、既存の前処理工程の違いを踏まえ、一部差異が生じている。これらの事前処理は、解砕・分離工程そのものの性能を評価するための前提条件として設定したものであり、解砕工程の処理能力や回収効率を単純比較するための条件統一を目的としたものではない。

各家電カテゴリ（炊飯器、掃除機、空気清浄機、扇風機、ラジオ&電話機）100 台を解砕方式毎に事前処理を実施し、取り外した材料の重量を計測した結果を表 5 に示す。大きく分類として、本事業で着目しているプラスチックとその他の 2 分類で整理している。

傾向として、衝撃を与えるインパクトクラッシャとハンマークラッシャは、絡まった場合にせん断することができないため、事前処理での回収重量が大きくなっている。一方で、二軸破碎では、絡まる前にせん断することが可能なため、投入可能な領域が広いため、事前処理での回収物が小さくなっている。

表 5 事前処理結果

製品カテゴリ	事前取り外し材料	インパクトクラッシャ	ハンマークラッシャ	二軸破碎
炊飯器	プラ重量(kg)	13	1	0
	その他重量 (kg)	79	80	70
掃除機	プラ重量(kg)	0	4	0
	その他重量 (kg)	103	155	24
空気 清浄機	プラ重量(kg)	87	95	0
	その他重量 (kg)	147	74	48
扇風機	プラ重量(kg)	34	27	0
	その他重量 (kg)	85	43	64
ラジオ、 電話機	プラ重量(kg)	1	4	0
	その他重量 (kg)	77	22	6

この事前処理を実施した上で、解砕機に投入するサンプルを準備した。各家電カテゴリでの解砕方式毎の重量を表 6 に示す。同じ家電カテゴリでの違いは、事前処理での内容違いやメーカーやモデル違いの回収物の違いの両方を含んでいる。これらのサンプルを用いて、解砕検証を実施した。

表 6 解砕機の投入重量

製品カテゴリ	インパクトクラッシャ	ハンマークラッシャ	二軸破碎
炊飯器 (kg)	403	330	350
掃除機 (kg)	156	206	276
空気清浄機 (kg)	740	711	951
扇風機 (kg)	341	304	341
ラジオ&電話機 (kg)	194	68	144

②-2-3 解砕検証

品質の良いプラスチックを回収できるかを検証するために、事前処理済みの投入サンプルに対して、解砕処理およびピッキング作業を実施し、プラスチックの回収を行った。ピッキング作業は、手でピッキング可能なプラスチックを対象としている。ただし、設備およびライン構成として、回収が可能な磁性体や銅部品がある場合は、併せて回収している。ピッキングされなかったものは、その他として整理している。

解砕後の回収物について、各解砕方式での結果を表 7 に示す。ここで、注意が必要なのは、異なる処理ラインでの検証なので、コンベア上でのピッキングと解砕後のコンテナでのピッキングが混在しており、単純な解砕方式での重量比較はできない点である。各方式ともプラスチック片のピッキングが可能であることを確認できた。

表 7 解砕後の回収重量

製品カテゴリ	回収物	インパクトクラッシャ	ハンマークラッシャ	二軸破碎
炊飯器	プラ(kg)	68	48	83
	磁性片(kg)	121	-	72
	導線等 (kg)	53	-	-
	その他	160	282	215
掃除機	プラ(kg)	46	68	78
	磁性片(kg)	18	-	2
	導線等 (kg)	41	-	-
	その他	54	138	186
空気 清浄機	プラ(kg)	397	362	565
	磁性片(kg)	50	-	16
	導線等 (kg)	120	-	-
	その他	180	349	270
扇風機	プラ(kg)	51	55	88
	磁性片(kg)	115	-	93
	導線等 (kg)	81	-	-
	その他	87	249	194
ラジオ &電話機	プラ(kg)	39	12	32
	磁性片(kg)	66	-	14
	導線等 (kg)	16	-	-
	その他	78	56	98

今回の解砕検証では、人手での回収が可能なサイズでの解砕が3つの解砕方式で実施できたことを確認できた。炊飯器での実際のプラスチックを回収したものを図8、図9、図10に示す。こ

これらのプラスチック片を観察すると、ねじやはめ込みなどの締結箇所に力が作用し、解碎されていることがわかった。つまりは、プラスチック部品を大きな塊として回収できていることがわかる。ただし、締結部のねじ等が残っている場合があるため、それらを取り除く必要がある。また、回収されたプラスチックを高度選別し、特性の検証が必要である。



図8 解碎後のプラスチック（インパクトクラッシャ）



図 9 解砕後のプラスチック（ハンマークラッシャ）



図 10 解砕後のプラスチック（二軸破碎）

解砕方式（一次破碎、ハンマークラッシャ、インパクトクラッシャ）の違いが、解砕後プラスチックフレークのサイズ分布に及ぼす影響を把握することを目的として、各対象機器ごとにフレーク形状の分析を行った。具体的には解砕後のプラスチック片について、サンプルをピックアップし、長辺と短辺を計測した。その結果を家電カテゴリごとに示す。（図 11、図 12、図 13、図 14、図 15）

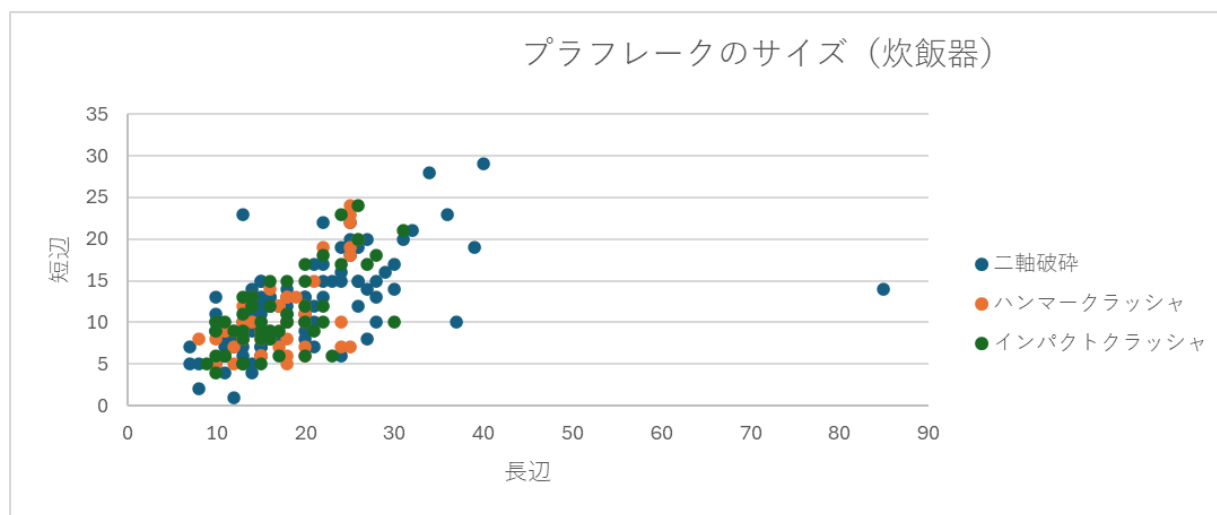


図 11 プラフレーク分析（炊飯器）

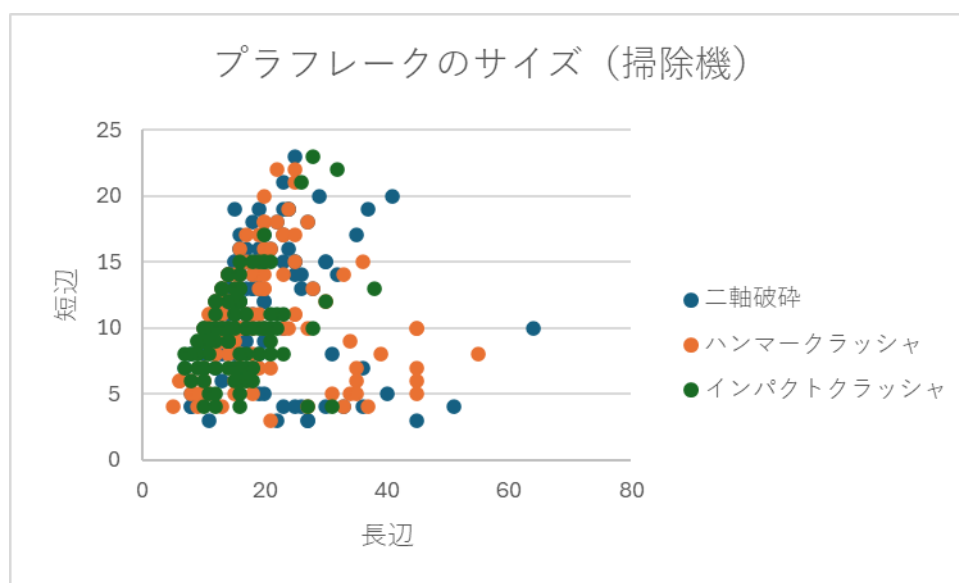


図 12 プラフレーク分析（掃除機）

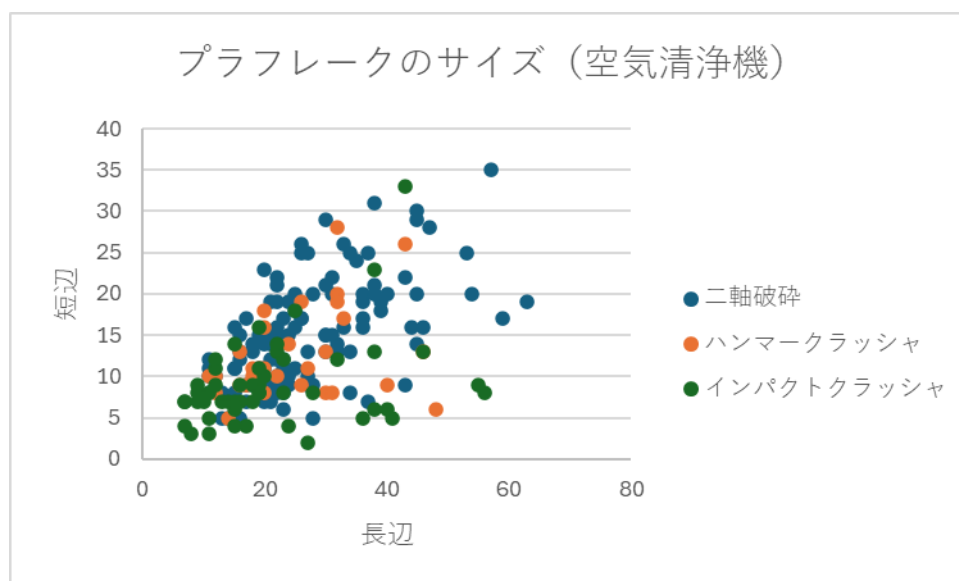


図 13 プラフレーク分析（空気清浄機）

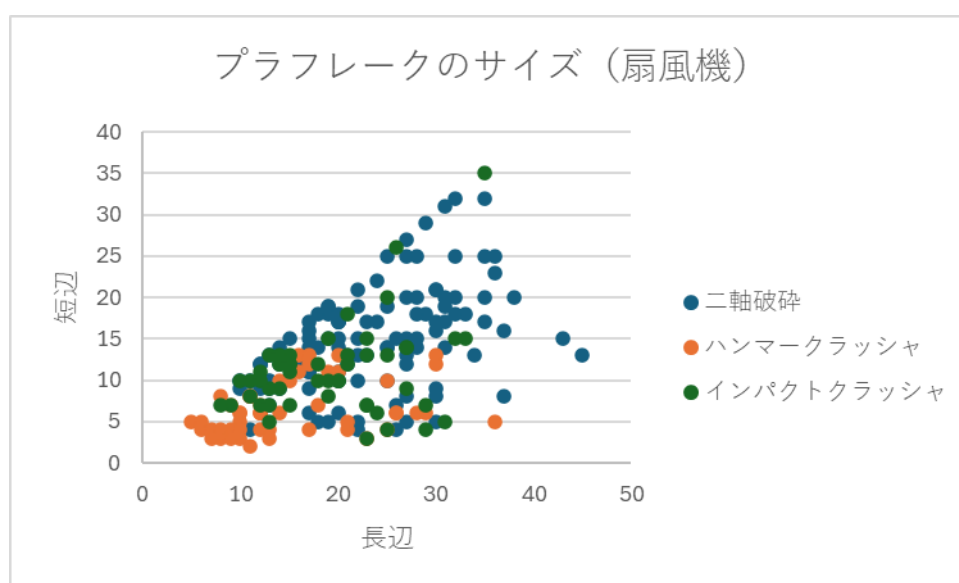


図 14 プラフレーク分析（扇風機）

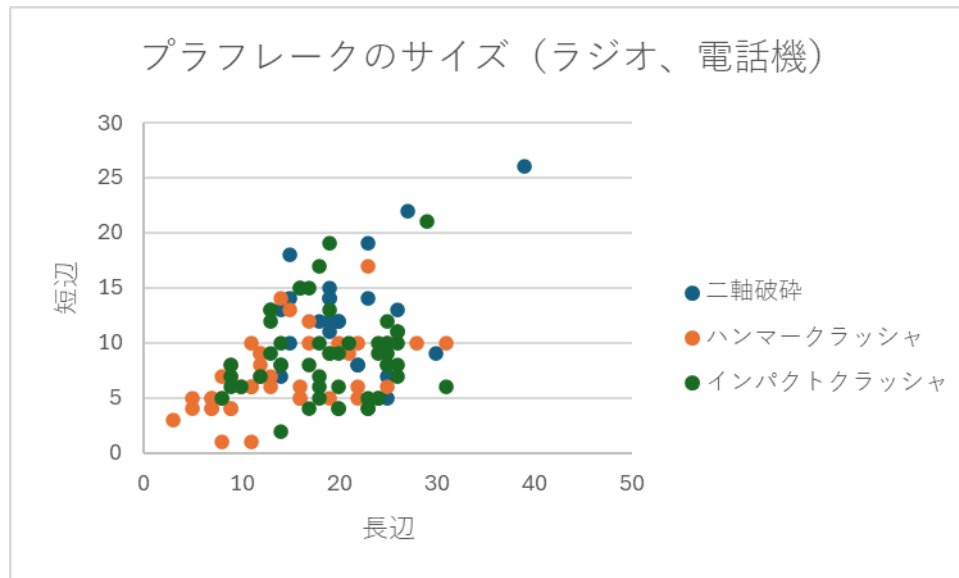


図 15 プラフレーク分析（ラジオ、電話機）

■ 炊飯器由来プラフレーク

炊飯器由来のプラフレークでは、全体として長辺 10～30 cm、短辺 5～20 cm 程度の範囲に分布が集中する傾向が確認された。

方式別に見ると、一次破碎では、比較的長辺・短辺ともに大きなフレークが多く、サイズ分布のばらつきも大きい。ハンマークラッシャでは、分布がやや小粒化し、短辺方向のばらつきが抑制される傾向である。インパクトクラッシャでは、長辺・短辺ともに比較的均一な分布を示す

■ 掃除機由来プラフレーク

掃除機由来プラフレークでは、他機器と比較して長辺方向の分布幅が広い傾向が見られた。特に一次破碎では、長辺 40 cm を超えるフレークも一部確認され、粗破碎状態の影響が大きいことが示唆される。一方で、インパクトクラッシャを用いた場合には、長辺 20 cm 前後に分布が集中し、サイズの均一化が進む傾向が確認された。

■ 空気清浄機由来プラフレーク

空気清浄機由来のプラフレークでは、全体として長辺 20～50 cm、短辺 10～30 cm 程度の比較的大きなフレークが多く分布した。

これは、筐体部材の肉厚や構造的強度の影響により、解砕後も一定サイズを保持しやすいことが要因と考えられる。方式別では、インパクトクラッシャ使用時において、短辺方向のばらつきが比較的抑えられる傾向が確認された。

■ 扇風機由来プラフレーク

扇風機由来のプラフレークでは、一次破碎において長辺・短辺ともに比較的大きなサイズが多く残存する傾向が見られた。

一方、ハンマークラッシャおよびインパクトクラッシャを適用することで、フレークサイズは小粒化し、特にインパクトクラッシャでは、長辺 15～30 cm、短辺 5～15 cm 程度の範囲に分布が集中する傾向が確認された。

■ ラジオ・電話機由来プラフレーク

ラジオおよび電話機由来のプラフレークでは、他機器と比較して全体的に小粒なフレークが多い結果となった。

方式別の差は相対的に小さいものの、一次破碎では一部で長辺 30 cm を超えるフレークが確認されたのに対し、インパクトクラッシャでは分布がより狭い範囲に集中する傾向が見られた。

以上の結果から、階差方式の違いは、破碎後プラフレークのサイズ分布に明確な影響を及ぼすことが確認された。

■ 一次破碎

粗粒フレークが多く残存し、サイズ分布のばらつきが大きい

■ ハンマークラッシャ：

フレークの小粒化が進み、短辺方向のばらつきが抑制される

■ インパクトクラッシャ：

長辺・短辺ともに分布が集中し、粒径の均一化効果が高い

各解砕方式について、処理の時間測定も実施している。その結果を表に示す。ここでは、解砕・ピッキングの時間だけではなく、事前処理に必要な時間も整理を行っている。ただし、あくまで、実施した設備・ライン構成での時間なので、最適化された工程ではない点は注意する必要がある。ここで、目標処理能力の 50 台/hour については、ハンマークラッシャだと一部達成をしている。次年度では、回収された樹脂特性を考慮しつつ、各家電カテゴリで目標処理能力を達成するために、事前処理および解砕・ピッキングの最適な工程を検討予定である。

表 8 解砕処理時間

解砕 方式	製品カテゴリ	事前処理時間 (min)	解砕・ピッキング (min)	合計 (hour)	処理能力
インパクト クラッシャ	炊飯器	120	342	7.7	18 台/hour
	掃除機	120	378	8.3	13 台/hour
	空気清浄機	360	829	19.8	7 台/ hour
	扇風機	60	245	5.1	25 台/ hour
	ラジオ&電話機	120	157	4.6	35 台/hour
ハンマー クラッシャ	炊飯器	40	134	2.9	45 台/hour
	掃除機	312	124	7.3	51 台/hour
	空気清浄機	120	656	12.9	9 台/hour
	扇風機	96	142	4.0	43 台/hour
	ラジオ&電話機	90	138	3.8	25 台/hour
二軸破碎	炊飯器	207	700	15.1	9 台/hour
	掃除機	281	330	10.2	19 台/hour
	空気清浄機	69	1,670	29.0	4 台/hour
	扇風機	91	685	12.9	9 台/hour
	ラジオ&電話機	15	280	4.9	17 台/hour

(1) ③高純度プラスチック選別・活用検証

③-1 目的

回収プラスチックの再利用に向けては、様々なプラスチック種が混ざっている状態から、種類ごとに選別・単一材化し、対象となるプラスチック種を高純度化する必要がある。選別する方法としては、近赤外線を用いたソーターが広く普及しているが、濃色プラスチックは選別できない。一方、プラスチック種ごとの帯電特性の差を利用して選別する静電選別では、プラスチックの色を問わず選別することができる。

今回、小型家電由来のプラスチックには濃色プラスチックが多く含まれていることから、静電選別を主とした選別を試みた。解砕後のサンプルに対する静電選別機での選別トライアルを通じて、必要な選別工程・処理能力等を整理し、純度向上に向けた対策を具体的に示すことを目的とした。

③-2 微破碎および一次選別（前処理工程）

③-2-1 目的

選別の前処理として、金属および軽量物の除去、粒度の統一、単一材化を目的として、微破碎および一次選別を行った。その後、各破碎方法のサンプルで違いがあるか粒径や異物量の観点で確認した。

③-2-2 方法

解砕後のサンプルに対して、図 16 に示すフローにて金属付きプラスチックの粉碎・選別を実施した。サンプルは、製品カテゴリごとに、破碎方法を区別したまま表 9 の順でラインに投入した。サンプル切り替え時のライン内清掃は行わなかったが、樹脂組成におけるコンタミを極力抑えるために、PP 主体の炊飯器、PP および ABS を主体とする掃除機および扇風機、ABS および PS を主体とする空気清浄機およびラジオ・電話機の投入順とした。

▼投入(金属付きプラ)

▼混合プラ破碎片

破碎 30Φ

高磁力選別

アルミ選別

微粉碎 12Φ

風力選別

金属検出器

図 16 前処理工程

微破碎および一次選別後のサンプルの粒径確認については、カメラで撮像した画像に対して、画像解析を行うことで、平均粒径を確認した。

異物量確認については、各サンプルから 100 片をランダムサンプリングし、目視で、単一プラ/金属付きプラ/プラ以外の 3 種に分類し、破碎方式による違いが無いかを確認した。

③-2-3 結果と考察

表 9 に微破碎および一次選別により回収された各成分の重量を示す。プラスチック回収率は全体を通して 80%前後の水準であった。

表9 投入サンプル内容と微粉碎・1次選別結果

製品 カテゴリー	No.	解砕 方式	解砕・処理 実績 (kg)	プラ微粉碎・1次選別実績 (kg)				プラ 回収率 (%)	製品カテゴリごとの MIX プラフレーク (kg)
			プラ破片 (手選別後 ・事前取外し プラ)	MIX プラ フレーク	磁力選 別異物	アルミ選 別異物	風力選 別異物		
炊飯器	1	二軸破碎	83	73	3.52	0.46	4.06	88	183
	2	インパクト クラッシャ	69	58	1.9	0.34	3.42	84	
	3	ハンマー クラッシャ	61	52	0.98	0.32	4.18	85	
掃除機	4	二軸破碎	78	53	4.1	0.34	4.36	68	149
	5	インパクト クラッシャ	49	40	1.84	0.32	3.96	82	
	6	ハンマー クラッシャ	68	56	2.4	0.38	4.54	82	
扇風機	7	二軸破碎	88	79	2.48	0.42	4.24	90	218
	8	インパクト クラッシャ	78	64	1.14	0.34	3.2	82	
	9	ハンマー クラッシャ	89	75	1	0.36	3.88	84	
空気清 浄機	10	二軸破碎	565	497	16.14	1.12	22.3	88	1,338
	11	インパクト クラッシャ	492	434	9.84	0.94	20.62	88	
	12	ハンマー クラッシャ	449	407	6.24	0.94	14.64	91	
ラジオ、 電話機	13	二軸破碎	32	28	0.88	0.34	1.1	88	77
	14	インパクト クラッシャ	42	38	1.06	0.32	1.06	90	
	15	ハンマー クラッシャ	13	11	0.04	0.28	0.44	85	

各サンプルの粒径確認の結果を図 17 および図 18 に示す。平均粒径は 8.5～9.5 mm 程度であった。解砕方式の違いによる差は最大 1 mm 程度でばらつきと比べて小さく、製品カテゴリごとの傾向も一定でないため、異なる解砕方式のサンプルを混合して静電選別試験に供しても問題ないと判断した。

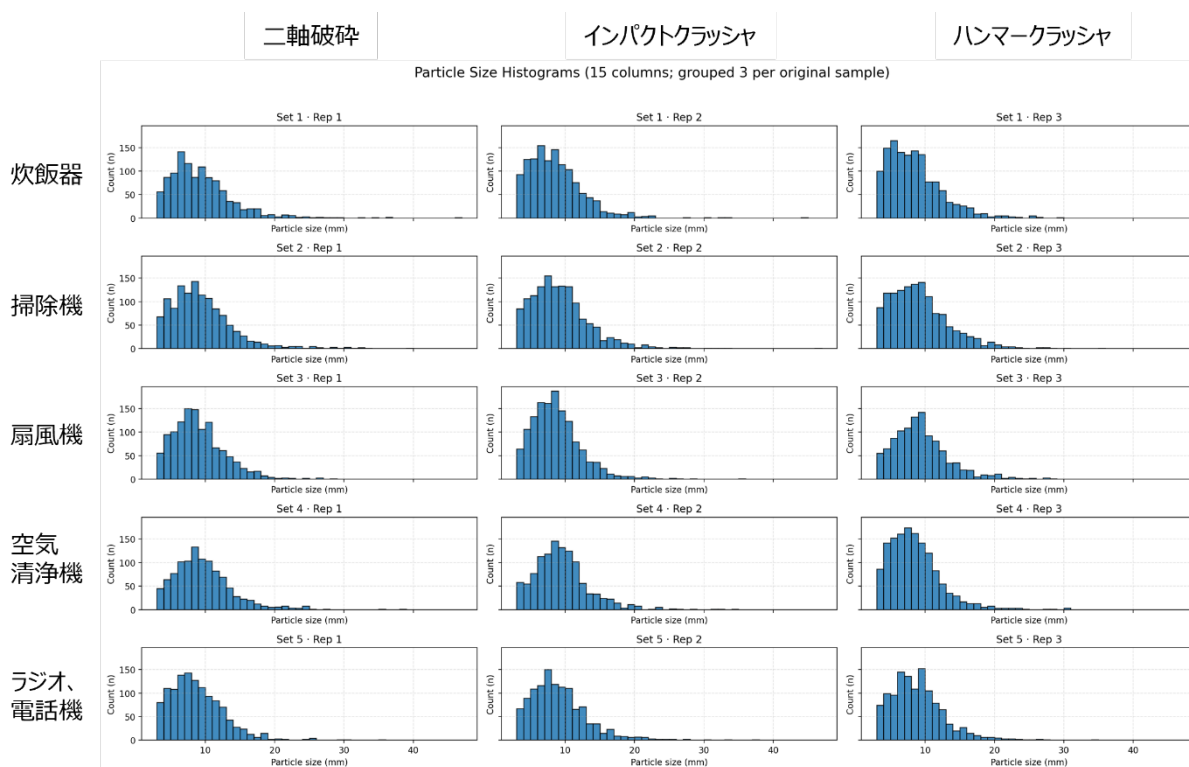


図 17 粒径ヒストグラム

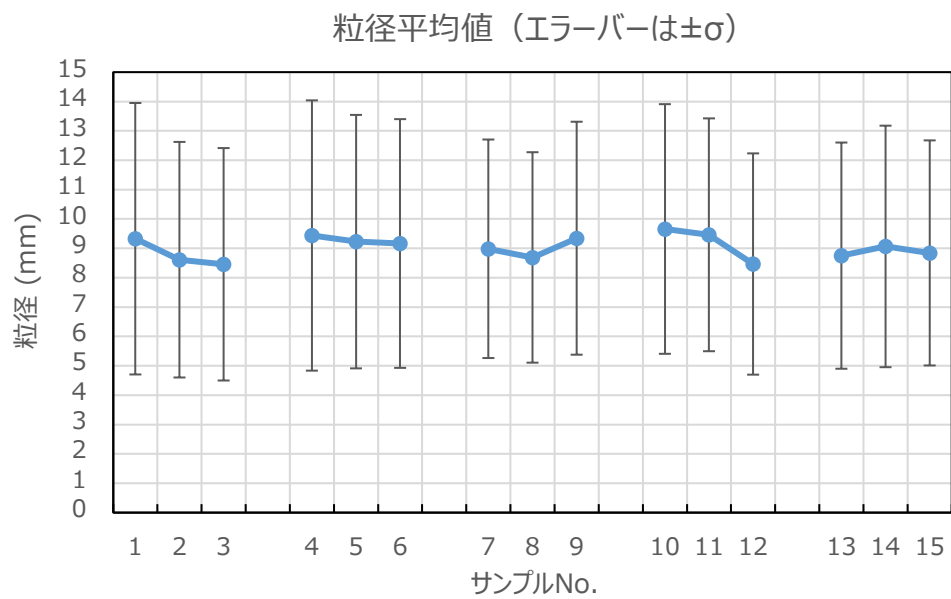


図 18 粒径の平均値

目視分類の結果を図 19 および図 20 に示す。いずれのサンプルもほぼ単一プラスチックであり、異物混入量は少ない。このことから、静電選別への投入が可能な品質であることを確認した。



図 19 目視分類時の結果の例（サンプル：炊飯器）

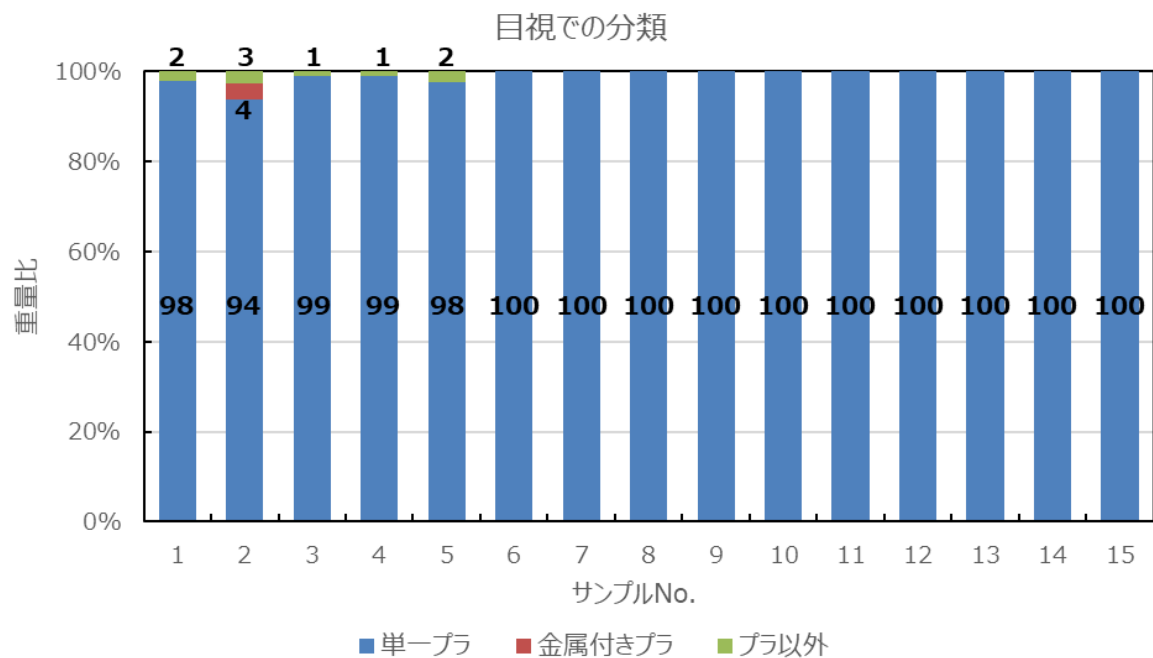


図 20 目視分類結果

③-3 静電選別事前検証

③-3-1 目的

静電選別試験に向けて、微破碎および一次選別後のサンプルの帯電特性や選別状態を確認することで、静電選別機での選別条件を設定することを目的とした。

③-3-2 方法

はじめに静電選別の原理について説明する。今回用いる摩擦式静電選別では、種類が異なるプラスチック同士が接触・摩擦することで、摩擦帯電列（図 21）に従い一方がプラス、他方がマイナスに帯電する性質を利用して、帯電させたプラスチック片を高電界中に落下させクーロン力で軌道を曲げることで選別する。静電選別機の選別後の回収容器は、2 枚の仕切り板で 3 区域に分離されている。選別状況に応じて、仕切り板の位置を調整することで、純度や回収率を高めることができる（図 22）。

比電荷により、選別電極間を通過した後の樹脂の落下位置が決まる。
(比電荷分布と落下分布には相関が有る)

比電荷：樹脂帯電量[nC] / 樹脂重量[g]

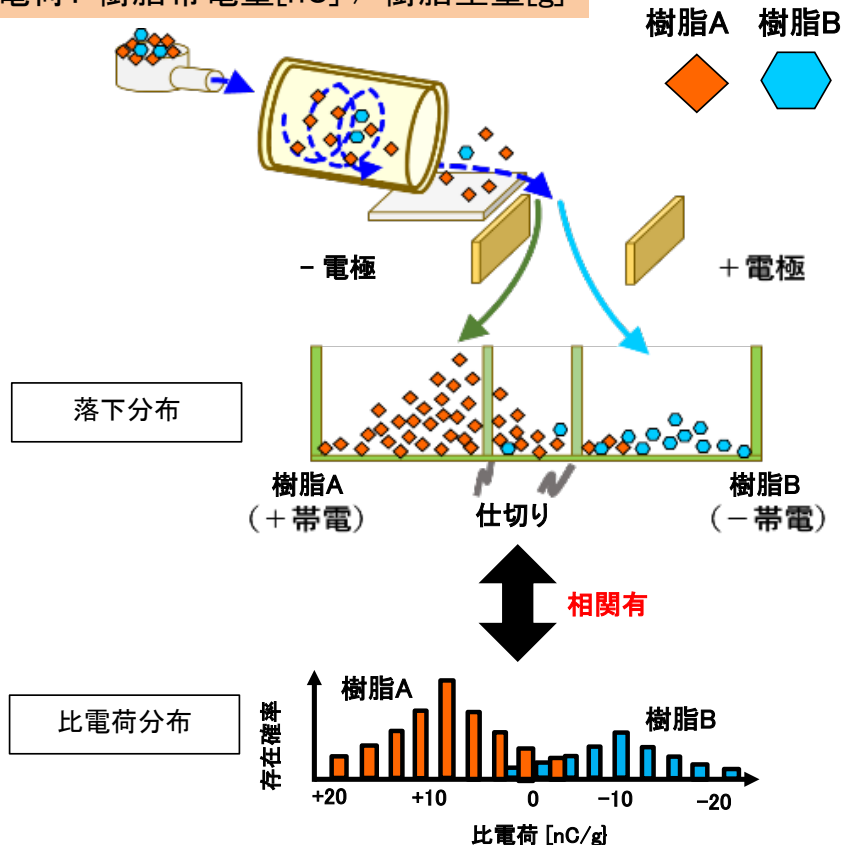


図 23 比電荷分布と落下分布の関係

本節での主な使用装置は下記の4つである。

- ・ 静電選別要素試験機（三菱電機 先端技術総合研究所に設置）
- ・ フーリエ変換赤外分光（FT-IR）装置（プラスチック種の識別で使用）
- ・ 帯電ドラム（プラスチックどうしの摩擦で使用）
- ・ 帯電量測定機

サンプルについては、以降、前節の結果を受けて、静電選別機への投入量を確保するために、解砕方式は区別せずに品目のみでの区別とし、解砕方式が異なるサンプルを混合して試験に供した。混合時には、前節での解砕方式ごとの回収量比と同比率で混合した。

以下に静電選別事前検証の手順を示す。はじめに各サンプルの組成を、各サンプルから 100 片ずつランダムサンプリングし、FT-IR の全反射（ATR）法でプラスチック種を調べ、重量を計測することで調査した。

静電選別事前検証では、後述の帯電ドラムでの摩擦帯電に適したサンプル量として、試験 1 回につき 1 kg のサンプルを用いた。帯電しやすくするために、80℃の乾燥炉で 1 時間乾燥させた後に試験に供した。帯電は、帯電ドラムにサンプルを投入し密封状態にし、回転攪拌することで行った。帯電後に、100 片ランダムサンプリングし、帯電量を測定した。帯電量測定済みのプラスチック片に対して、FT-IR によるプラスチック種分析と、重量測定を行うことで、比電荷分布グラフを作成した。また、帯電させた残りのプラスチック片から 300 g ほど抜き取り、静電選別要素試験機の電極部に投入することで、静電選別時の落下分布を得た。落下分布における落下位置は振動フィーダ端を 0 mm、プラス電極側（マイナス帯電側）をプラスの座標とした。

その後、比電荷分布と落下分布の結果から、プラスチック種ごとの落下分布を推定した。

③-3-3 結果と考察

③-3-3-1 組成分析結果

表 10 および図 24 に組成分析結果を示す。タルク入り PP (PP-TD) は、FT-IR スペクトルにおいて、 3000 cm^{-1} 付近のピーク（C-H 伸縮ピーク）強度よりも 1000 cm^{-1} のピーク（Si-O ピーク）強度が高いものを PP-TD とした。また、扇風機サンプルで見られた ABS+PP および PS+PP は、数 μm の PP フィルム付きの ABS および PS である。炊飯器が PP リッチ、掃除機が PP と ABS リッチ、空気清浄機ならびにラジオ・電話機は ABS および PS リッチという傾向は、事前の組成分析と一致していた。一方、扇風機については、事前の組成分析では ABS と判定されていたものの 3/4 ほどが、ABS+PP であることが判明した。FT-IR が、近赤外線を用いるハンディセンサーと比べて、より表面敏感な分析手法であることに起因する差異と考えられる。

表 10 5 品目の組成分析結果（重量比%）

製品 カテゴリ	PP	ABS	PS	PP-TD	PE	PET	PMMA	ABS +PP	PS +PP	POM	other
炊飯器	64.0	4.7	-	14.3	-	7.6	-	-	-	-	9.3
掃除機	32.5	47.8	3.2	-	-	-	10.0	-	-	-	6.5
扇風機	46.9	12.4	-	-	-	-	-	33.3	5.3	-	2.1
空気清 浄機	3.7	45.4	42.2	-	5.9	-	-	-	-	-	2.7
ラジオ・ 電話機	-	23.3	61.0	-	-	-	-	-	-	4.3	11.4

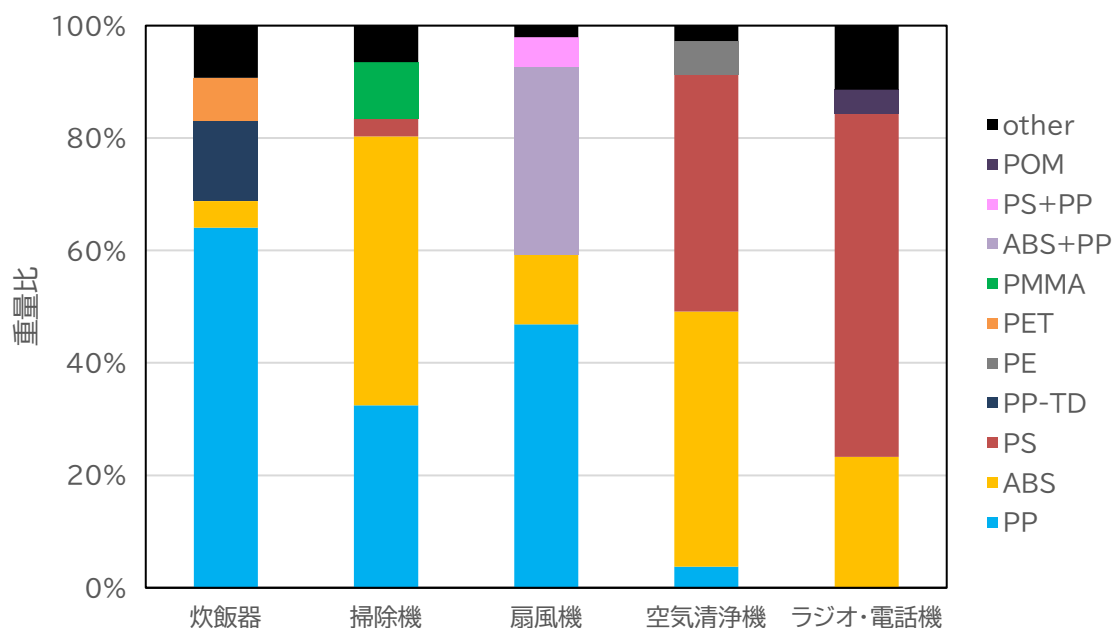


図 24 5 品目の組成分析結果（重量比%）

③-3-3-2 炊飯器

炊飯器サンプルにおける比電荷分布を図 25 に、落下分布を図 26 に示す。比電荷分布では PP が 0 からマイナス側、PP-TD が更にマイナス側に帯電し、他のプラスチック種はプラス側に帯電しており、PP および PP-TD と、それら以外で明確に分離されていた。図 27 に比電荷分布と落下分布の結果から予測した炊飯器サンプルのプラスチック種ごとの落下分布を示す。この図から、プラス電極側の仕切りは図中で最も右側、マイナス電極側も最も右側が良いと判断した。

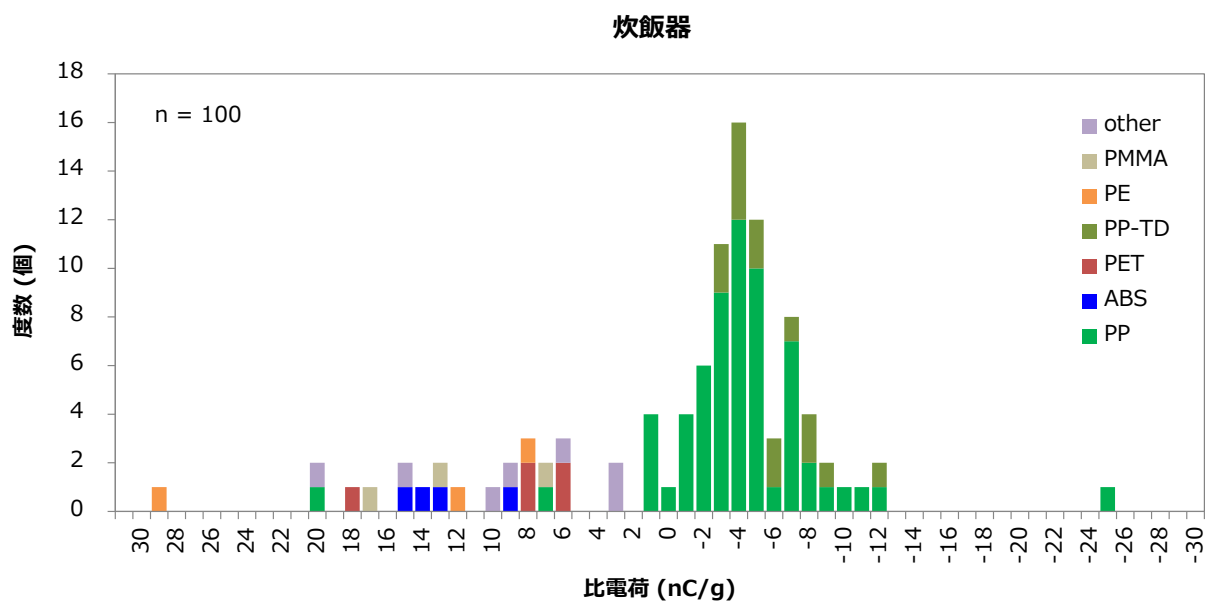


図 25 炊飯器サンプルの比電荷分布

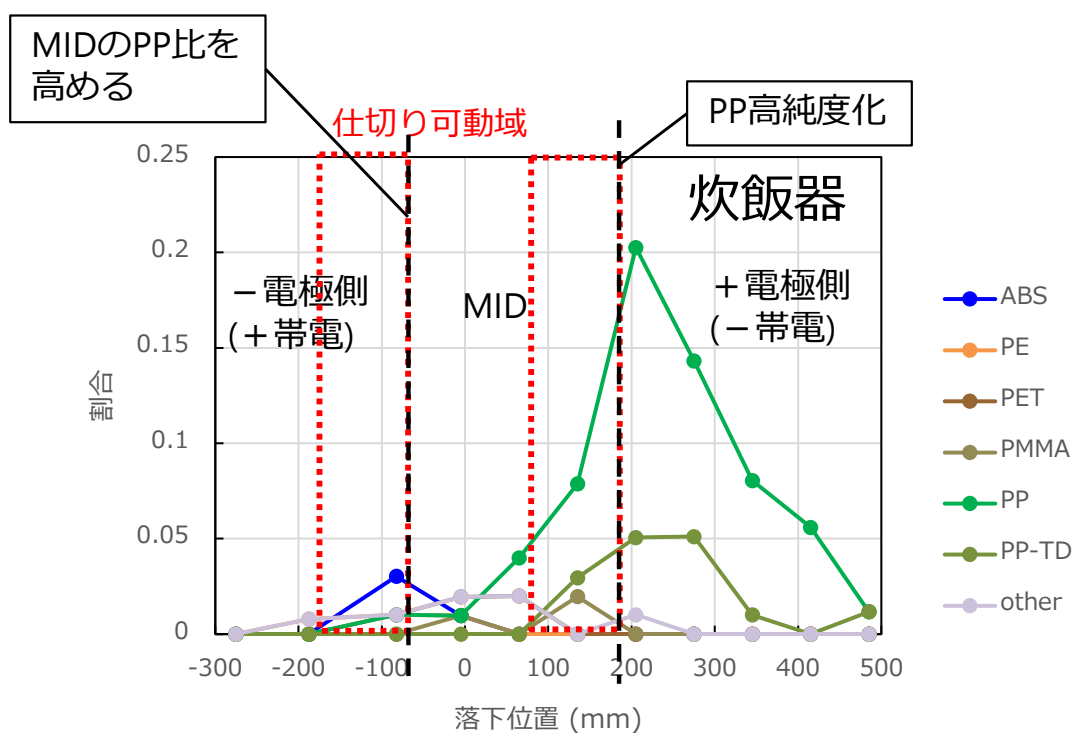


図 26 炊飯器サンプルの落下分布

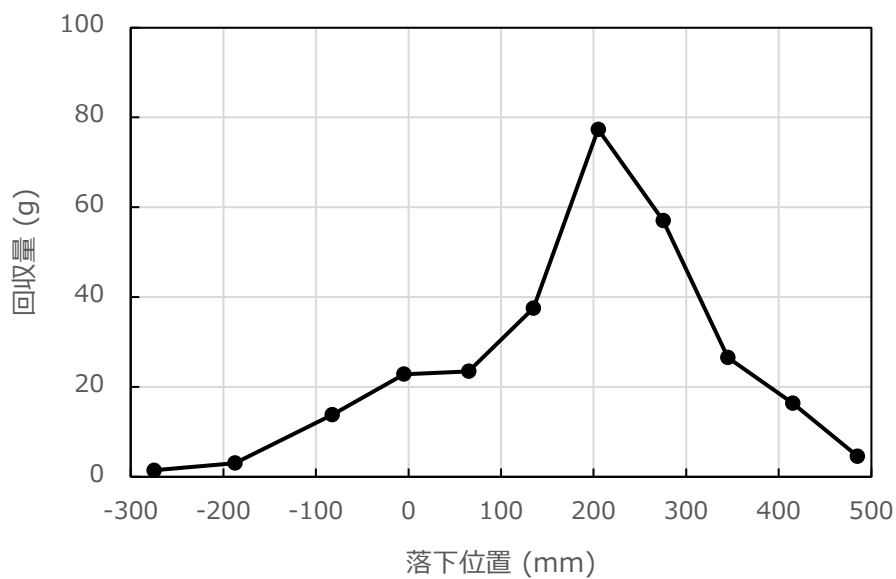


図 27 炊飯器サンプルのプラスチック種ごとの落下分布予測

③-3-3-3 掃除機

掃除機サンプルにおける比電荷分布を図 28 に、落下分布を図 29 に示す。比電荷分布では、ABS がプラス側、PP がマイナス側に帯電しており、両社は分離されているが、ABS には PMMA 等の重複が見られた。図 30 に比電荷分布と落下分布の結果から予測した掃除機サンプルのプラスチック種ごとの落下分布を示す。この図から、プラス電極側の仕切りは図中で最も右側、マイナス電極側も最も右側が良いと判断した。

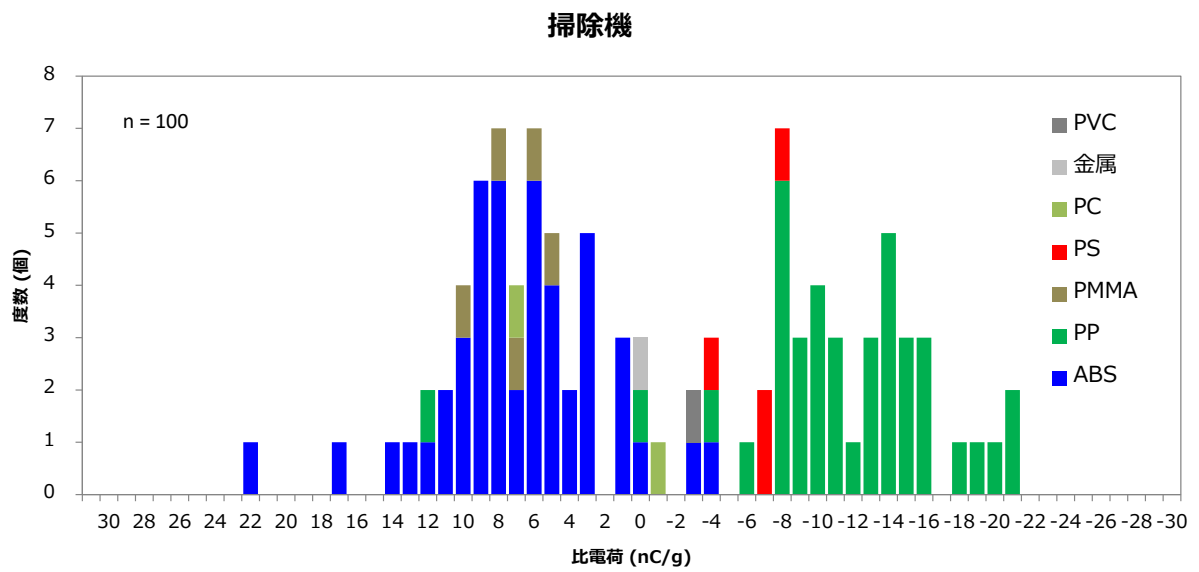


図 28 掃除機サンプルの比電荷分布

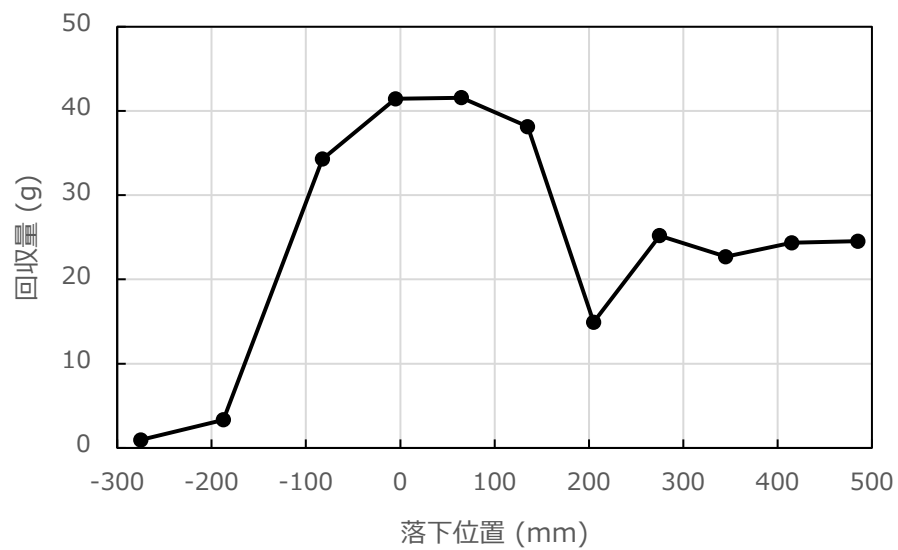


図 29 掃除機サンプルの落下分布

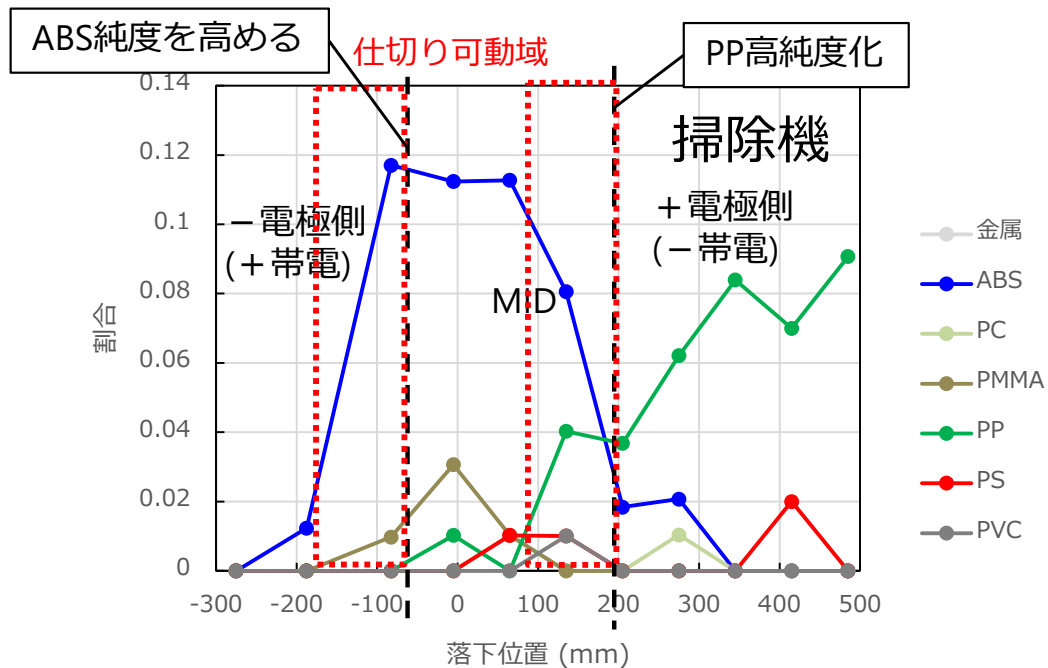


図 30 掃除機サンプルのプラスチック種ごとの落下分布予測

③-3-3-4 扇風機

扇風機サンプルにおける比電荷分布を図 31 に、落下分布を図 32 に示す。比電荷分布では、全体的に帯電が小さく、プラスチック種ごとの分離が生じていなかった。原因は、PP と ABS の中間の帯電特性を示すと推定される PP フィルム付き ABS (ABS + PP) が含まれているためと考えられる。図 33 に比電荷分布と落下分布の結果から予測した扇風機サンプルのプラスチック種ごとの落下分布を示す。この図から、プラス電極側の仕切りは図中で最も右側、マイナス電極側も最も右側が良いと判断した。

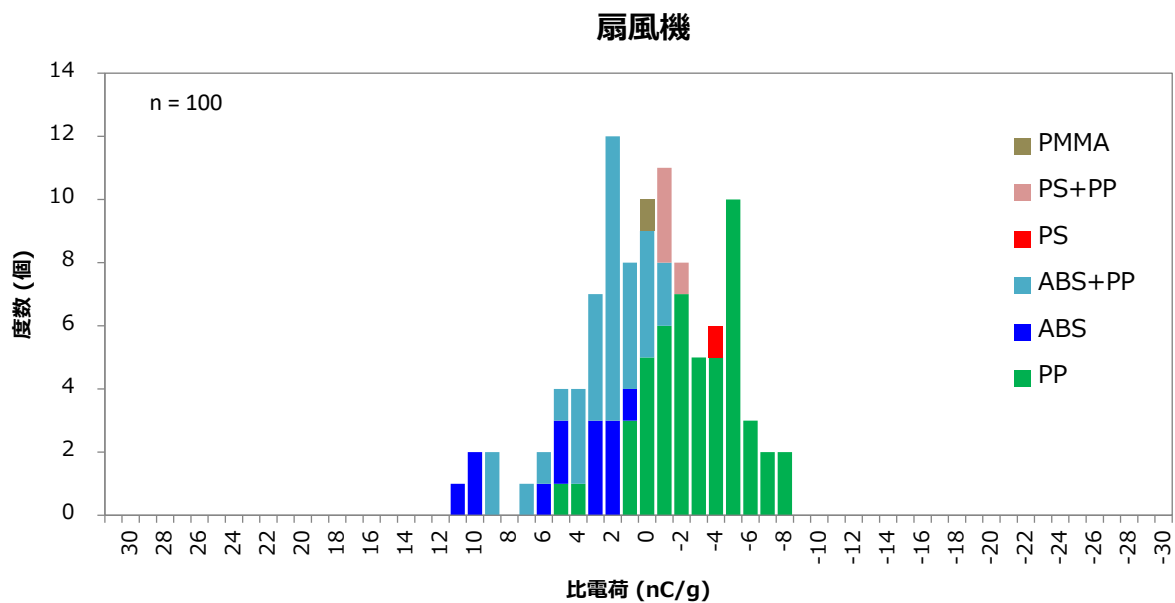


図 31 扇風機サンプルの比電荷分布

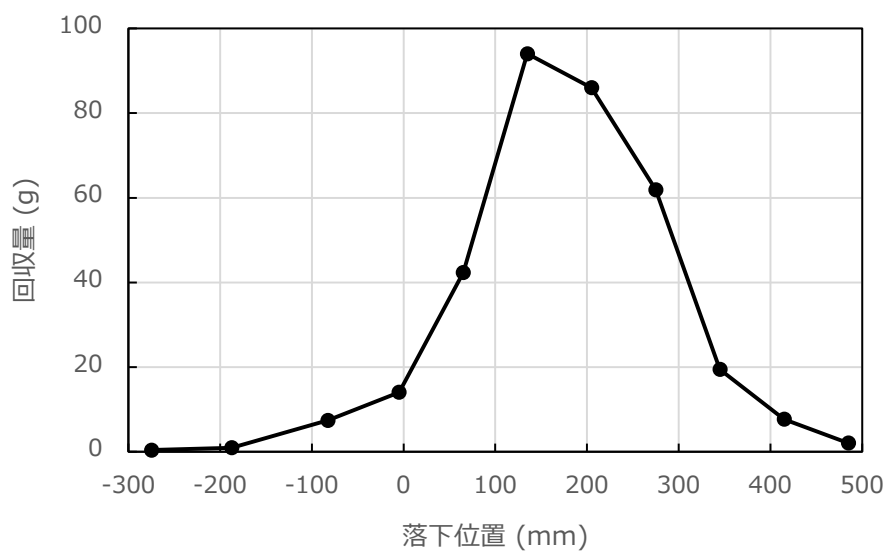


図 32 扇風機サンプルの落下分布

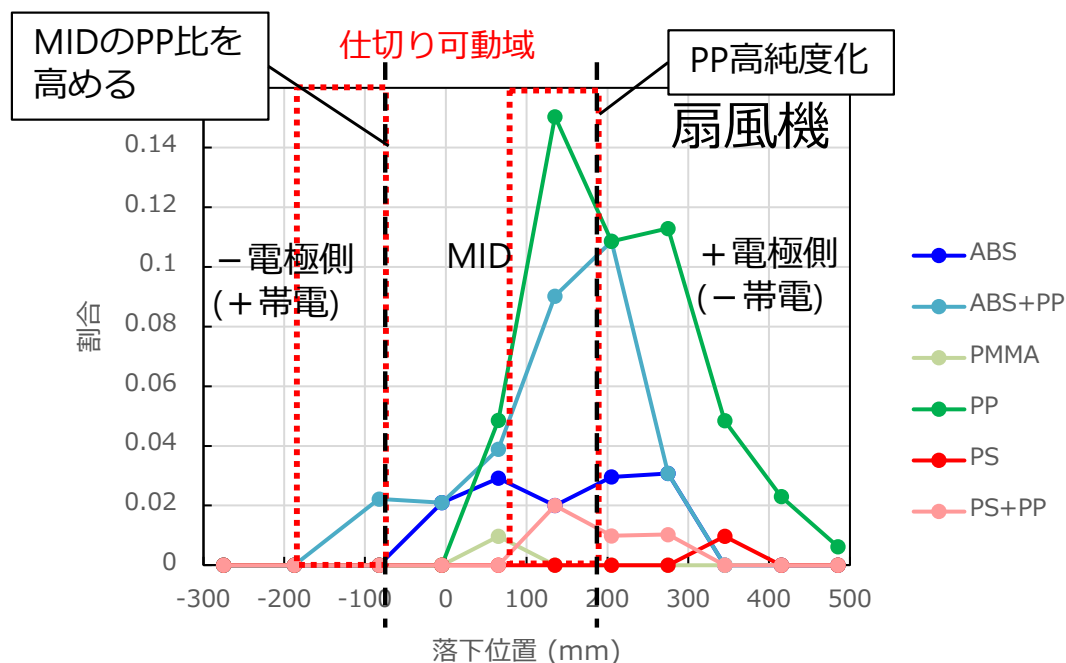


図 33 扇風機サンプルのプラスチック種ごとの落下分布予測

③-3-3-5 空気清浄機

空気清浄機サンプルにおける比電荷分布図 34 に、落下分布を図 35 に示す。比電荷分布では、ABS がプラス帯電側、PS がマイナス帯電側という点は、摩擦帯電列通りであるが、PS の分布に、ABS の重なりが見られた。図 36 の通り、ABS の比電荷と、FT-IR スペクトルにおけるスチレンピーク(700 cm^{-1})とアクリロニトリルピーク(2240 cm^{-1})の強度比の関係を確認すると、スチレン/アクリロニトリルピーク強度比が高い ABS では、比電荷がマイナス側となっていることが分かった。このことから、スチレン比の高い ABS は、PS との分離が難しいことが示唆される。図 37 に比電荷分布と落下分布の結果から予測した空気清浄機サンプルのプラスチック種ごとの落下分布を示す。この図から、プラス電極側の仕切りは図中で最も左側、マイナス電極側は最も右側が良いと判断した。

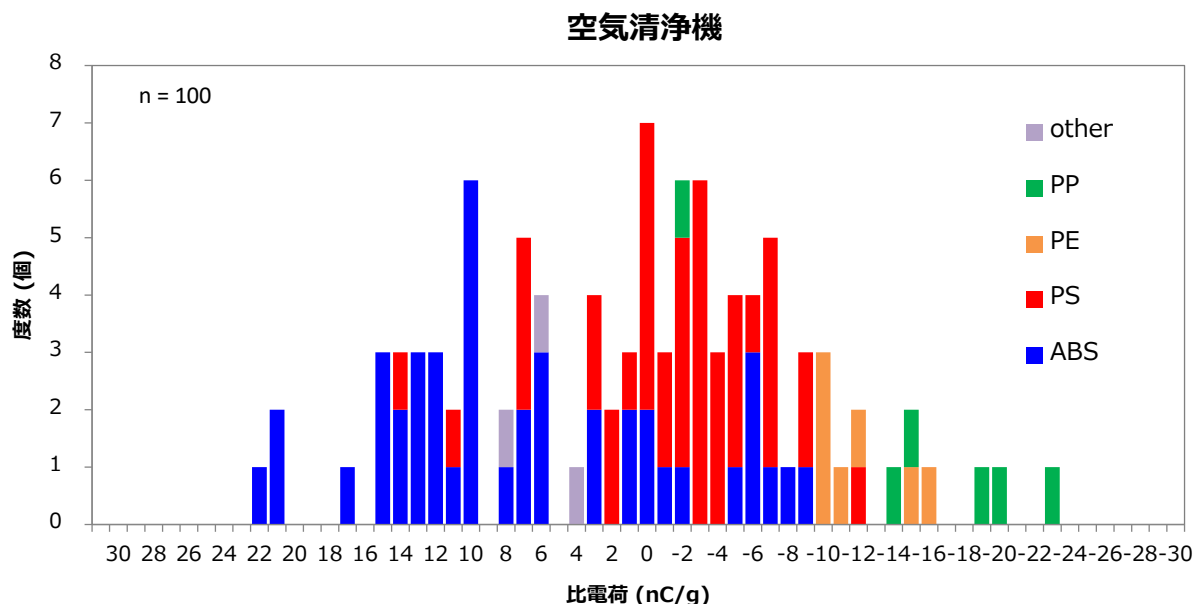


図 34 空気清浄機サンプルの比電荷分布

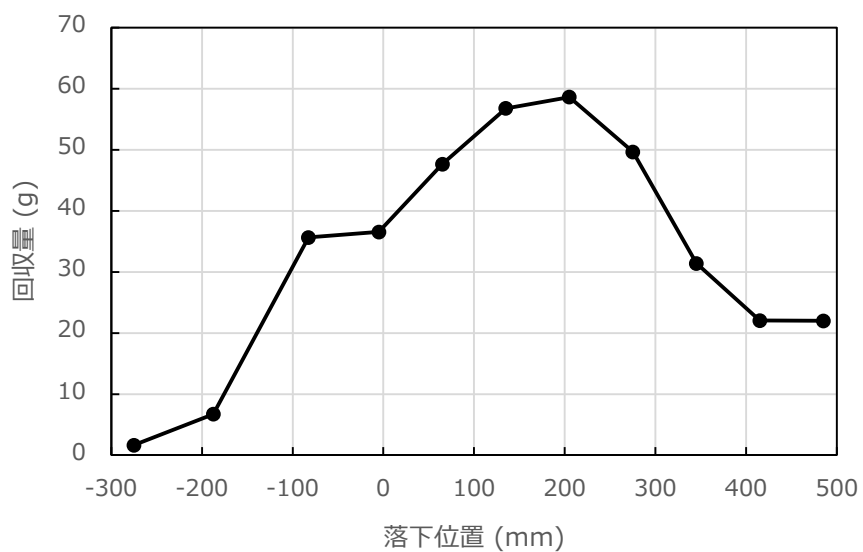


図 35 空気清浄機サンプルの落下分布

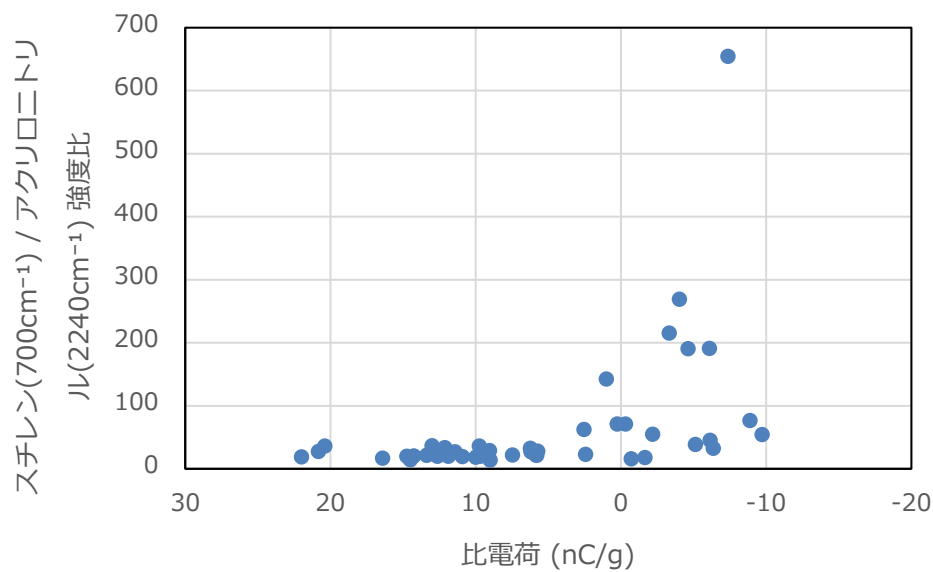


図 36 空気清浄機サンプルに含まれる ABS の比電荷と、
スチレン/アクリロニトリルピーク強度比(FT-IR)の関係

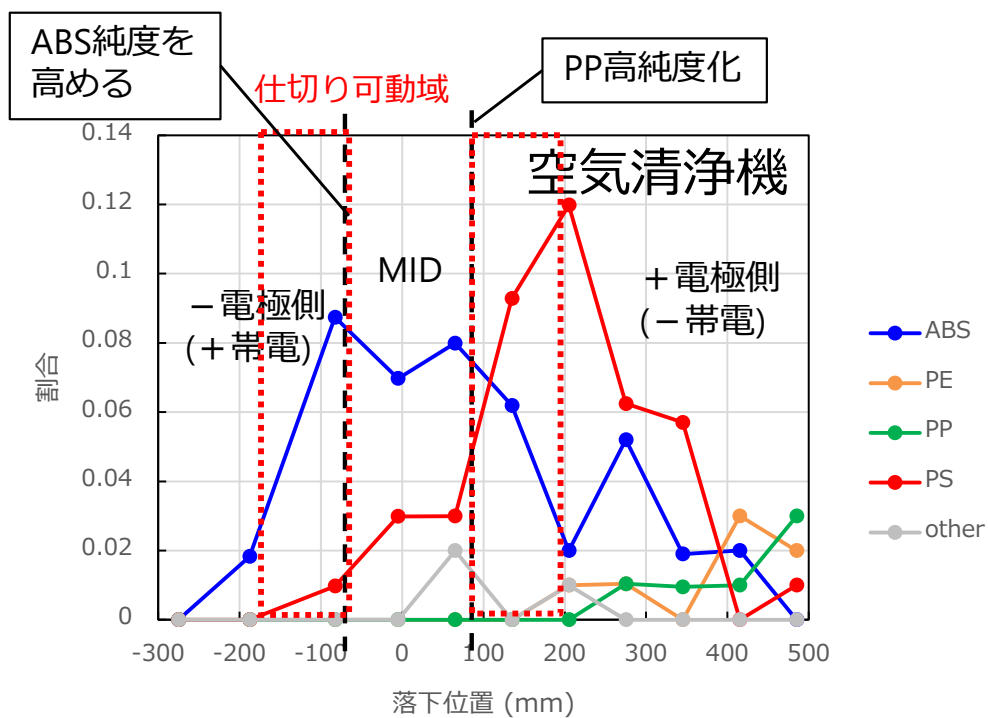


図 37 空気清浄機サンプルのプラスチック種ごとの落下分布予測

③-3-3-6 ラジオ・電話機

ラジオ・電話機における比電荷分布を図 38 に、落下分布を図 39 に示す。比電荷分布では、ABS がプラス側、PS がマイナス側の傾向が確認された。図 40 に比電荷分布と落下分布の結果から予測したラジオ・電話機サンプルのプラスチック種ごとの落下分布を示す。この図から、プラス電極側の仕切りは図中で最も右側、マイナス電極側も最も右側が良いと判断した。

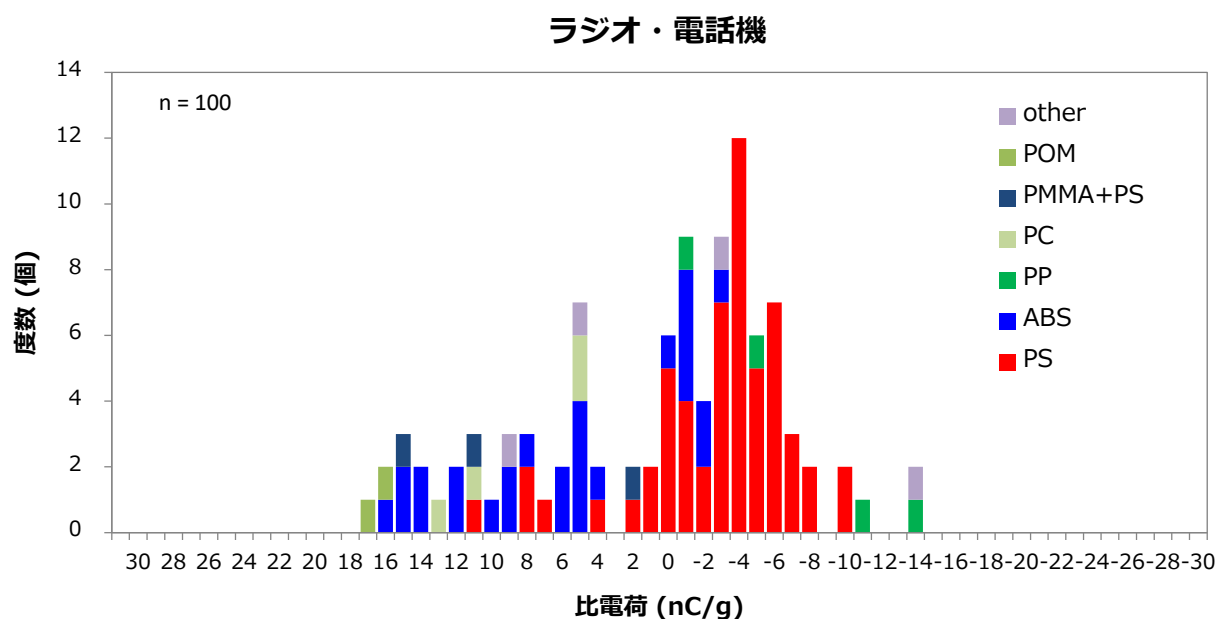


図 38 ラジオ・電話機サンプルの比電荷分布

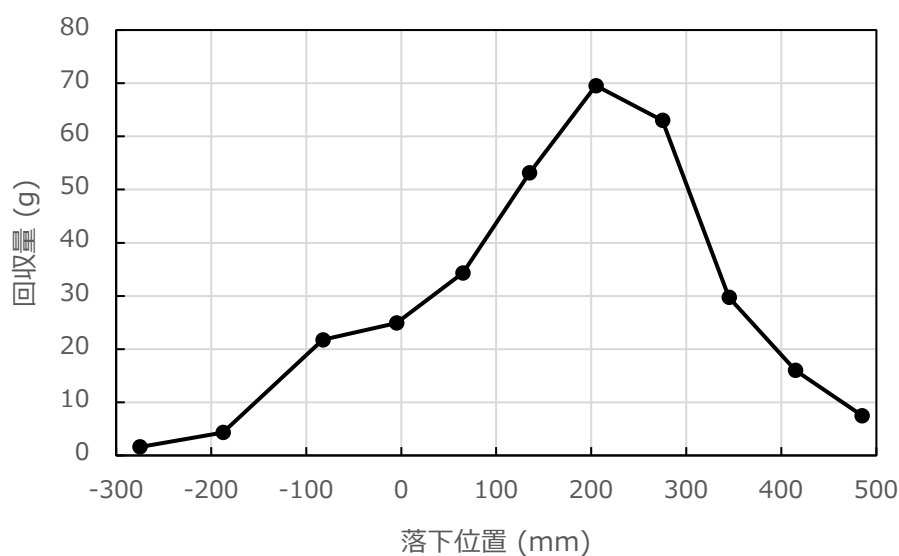


図 39 ラジオ・電話機サンプルの落下分布

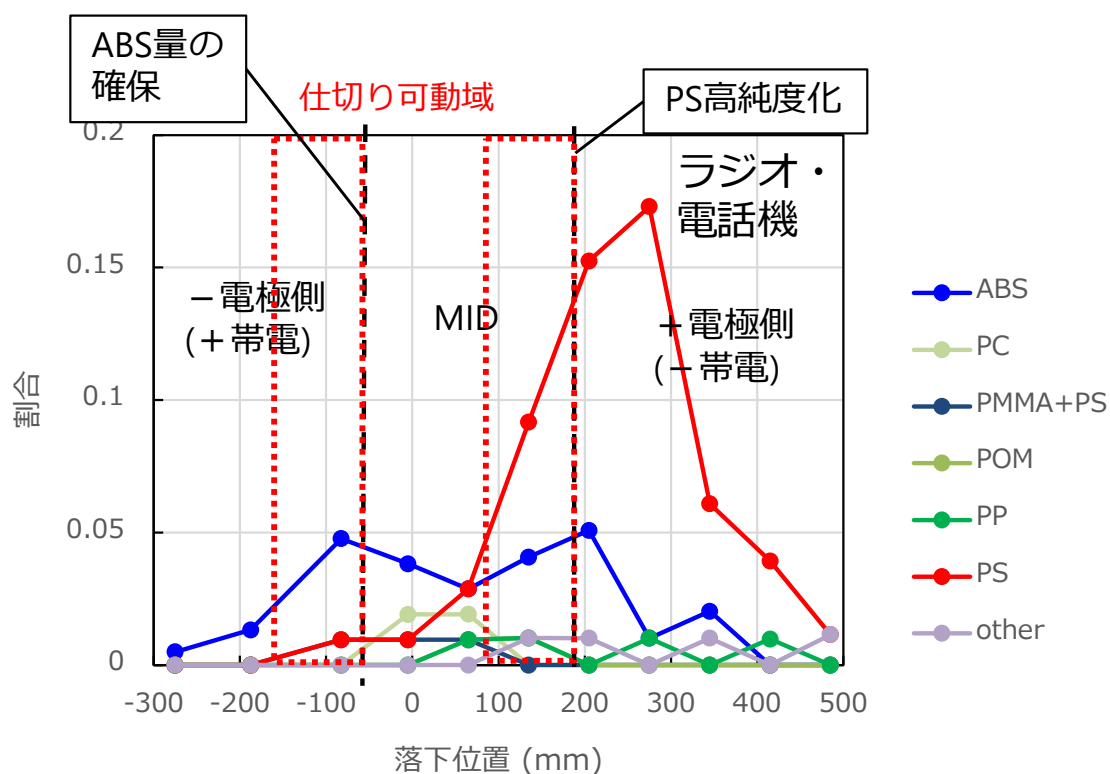


図 40 ラジオ・電話機サンプルのプラスチック種ごとの落下分布予測

③-3-3-7 総括

以上の結果より、静電選別事前検証と静電選別機の落下分布が同等であると仮定した場合、表 11 に示す仕切り位置が最適と考えられる。

表 11 品目ごとの静電選別仕切り最適位置

製品カテゴリ	マイナス電極側	プラス電極側
炊飯器	最も中央側	最もプラス電極側
掃除機	最も中央側	最もプラス電極側
扇風機	最も中央側	最もプラス電極側
空気清浄機	最も中央側	最も中央側
ラジオ・電話機	最も中央側	最もプラス電極側

③-4 静電選別試験

③-4-1 目的

先述の微破碎および一次選別を行った小型家電由来のプラスチック破砕片に対して、製品カテゴリごとに区別したまま、実規模の静電選別機で選別した場合に、得られる純度・回収率を見積もることを目的として、静電選別機での選別を行った。

③-4-2 方法

今回用いた静電選別機では、選別開始から選別状況が安定するまで 10 分ほどの時間が掛かるため、サンプル量が 100 kg 未満の場合には、不安定な状態での選別品の割合が高くなってしまう。そのため、本来の選別結果を得るには、投入サンプルは最低 100 kg が必要となるので、100 kg に満たないラジオ・電話機は静電選別機での選別の対象外とした。

静電選別機投入前のサンプル乾燥は、付帯している熱風乾燥機を用いて 80℃で 1 時間乾燥した。摩擦帯電は、帯電ドラムを回転させて実施した。図 41 に今回用いた静電選別機の構成概要を示す。

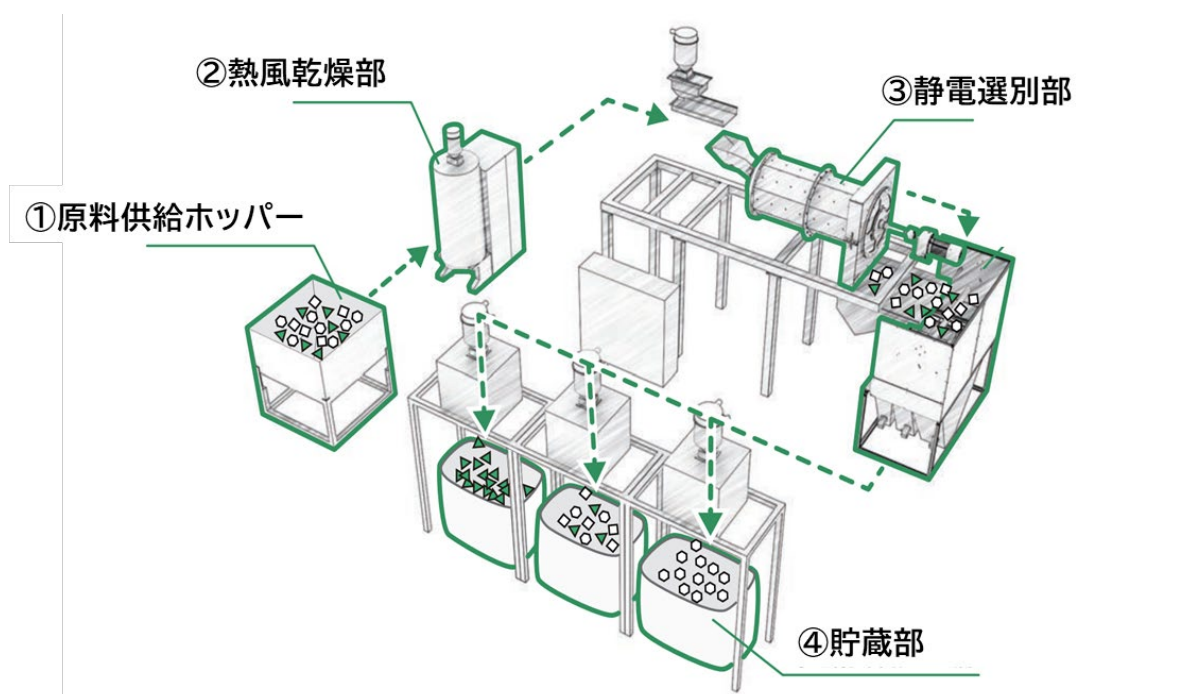


図 41 使用した静電選別機の構成

はじめに、静電選別事前検証で確認した仕切り位置を、静電選別機でそのまま用いて良いかを確認するために、静電選別機における炊飯器サンプルの落下分布を得ることで、炊飯器サンプルでの静電選別事前検証と静電選別機の落下分布を比較した。

静電選別機での選別後は、各回収容器に入った選別物の重量を計測した。その後、高純度が見込まれる選別物については、100 片のランダムサンプリングによる FT-IR でのプラスチック種識別と重量計測により、純度を分析した。その他の主要な選別物については、③-3 と同様に比電荷分布と落下分布から、プラスチック種ごとの落下分布を推定し、純度を推定した。

③-4-3 結果と考察

③-4-3-1 炊飯器サンプルにおける落下分布

炊飯器サンプルにおける、静電選別機で取得した落下分布と、静電選別事前検証で取得した落下分布の比較図を図 42 に示す。静電選別機の方が若干分布の広がりが見られるが、およそ一致していると判断した。そのため、静電選別機での選別においては、静電選別事前検証での試験結果から決めた仕切り位置を用いることとした。

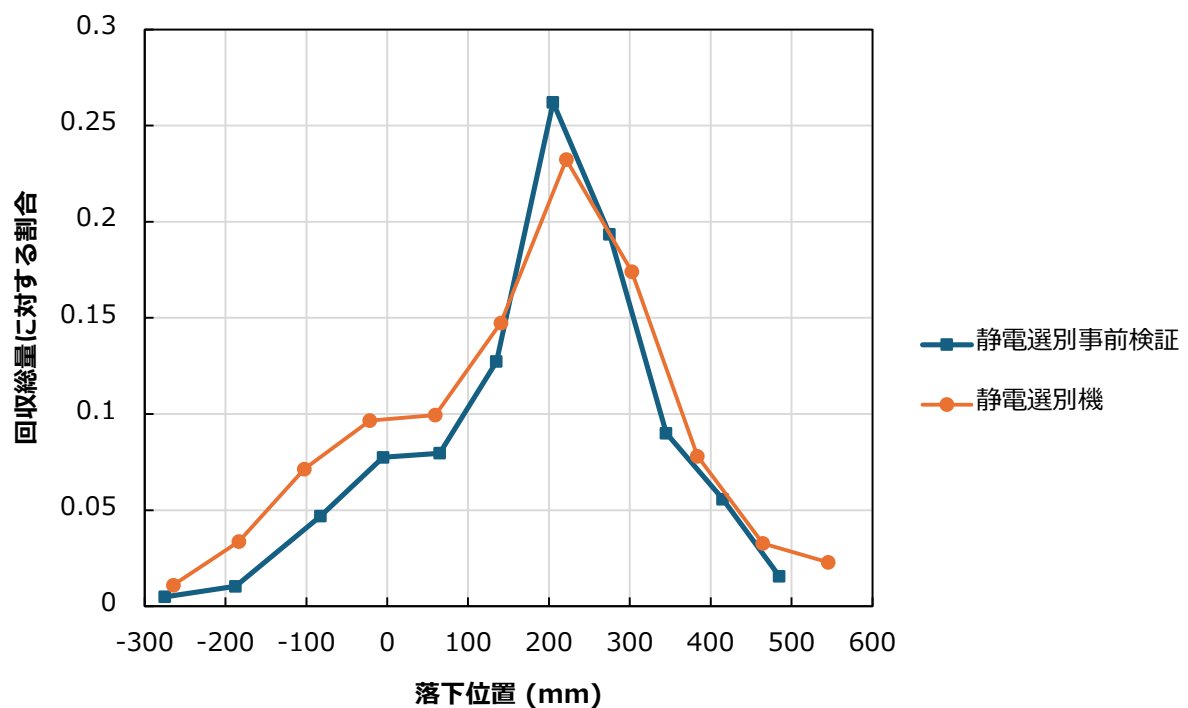


図 42 静電選別事前検証と静電選別機の落下分布の比較

③-4-3-2 静電選別機での選別結果

静電選別機での選別で各回収容器に入った選別物の重量と純度は、表 12 の通りであった。

表 12 静電選別機での選別で各回収容器に入った選別物の重量

製品 カテゴリ	主成分	投入量 (kg)	選別後重量 (kg)		純度(%)
炊飯器	PP	147	+ 電極側 (－帯電)	74	PP 94 (うち 15%は PP-TD)
			ミドル	59	-
			－ 電極側 (＋帯電)	7	-
掃除機	PP、 ABS	113	+ 電極側 (－帯電)	31	PP 74 (うち 5%は PP-TD)
			ミドル	73	ABS 70 (推定値)
			－ 電極側 (＋帯電)	6	-
扇風機	PP、 ABS	152	+ 電極側 (－帯電)	40	PP 64 (うち 1%は PP-TD)
			ミドル	108	ABS 51 (うち 37%は ABS+PP) (推定値)
			－ 電極側 (＋帯電)	1	-
空気 清浄機	PS、 ABS	732	+ 電極側 (－帯電)	435	PS 52
			ミドル	267	ABS 58
			－ 電極側 (＋帯電)	36	

③-5 水比重選別

③-5-1 目的

PP が主成分である炊飯器、掃除機、扇風機のマイナス帯電品について、PP 純度を高めるために、水を用いた比重選別を行った。

③-5-2 方法

水比重選別では、バケツに水道水を入れて、対象サンプルを投入し、浮くものと沈むものに分けて回収した。回収物の PP 純度は、ランダムサンプリングした 100 片の FT-IR 分析および重量測定により確認した。

③-5-3 結果と考察

表 13 に水比重選別結果を示す。炊飯器、掃除機サンプルについては、水浮き品において、一部 PP-TD を含むものの、PP 純度が 100%であることを確認した。扇風機サンプルの水浮き品については、PP フィルム付きの ABS や PS が混入しており、PP 純度 100%には到達しなかった。

表 13 水比重選別結果

製品カテゴリ	投入量 (kg)	選別後重量 (kg)		割合(%)	PP 純度(%)
炊飯器	43	水浮き品	31	72	100 (うち 3%は PP-TD)
		水沈み品	12	28	-
掃除機	20	水浮き品	17	85	100 (うち 1%は PP-TD)
		水沈み品	3	15	-
扇風機	19	水浮き品	12	63	91 (うち 1%は PP-TD)
		水沈み品	7	37	-

③-6 本節のまとめ

③-6-1 回収量ポテンシャル

表 14 に各製品カテゴリの回収量に対する、選別後の高純度 PP の回収量を示す。尚、各工程間において一定量サンプルを抜き取り、分析に使用している。各工程間で炊飯器ではプラ微破碎・選別後の PP 含有量の 55%が純度 100%で得られた。掃除機では、プラ微破碎・選別後の PP 含有量の 81%が純度 100%で得られた。扇風機では、プラ微破碎・選別後の PP 含有量の 34%が純度 91%で得られた。

表 14 各品目の回収量に対する高純度 PP 回収量

製品 カテゴリ	回収 ・仕分け後	危険物取外し ・解砕 ・プラ手選別後	プラ微破碎・一次選別				静電選 別後	水比重選別後	
	総量 (kg)	MIX プラ量 (kg)	MIX プラ 量 (kg)	PP 量 (kg)	PS 量 (kg)	ABS 量 (kg)	対象 回収物 (kg)	PP 量 (kg)	PP 純度 (%)
炊飯器	1398	213	183	117	-	-	89 (PP)	64 (117kg の 55%)	100 (うち 3%は PP-TD)
掃除機	939	195	149	48	-	72	39 (PP)	33 (48kg の 81%)	100 (うち 1%は PP-TD)
扇風機	1237	255	218	102	-	100	56 (PP)	35 (102kg の 34%)	91 (うち 1%は PP-TD)
空気清 浄機	2872	1506	1338	-	562	602	553 (ABS)	-	-

③-6-2 純度・回収率向上のための選別フロー

③-6-2-1 近赤外線ソーター(NIR)を用いた空気清浄機マイナス帯電品からの PS、ABS 回収検討

空気清浄機サンプルの静電選別機での選別では、マイナス帯電品が最も多く回収されたが、PS が 62%、ABS が 8%と低純度であった。そこで更に近赤外ソーターを使用することで高純度 PS および ABS が回収できないかを机上で検討した。

③-3 で用いた 100 片（図 43）に対して、近赤外線を使用したプラスチック種識別センサーであるシステムエンジニアリング製 PLASCAN : model:C を用いて、プラスチック種を識別した。

その結果を表 15 および図 44 に示す。ABS の 40%、PS の 24%は濃色プラスチックのため識

別不可であった。また、ABS は 12%が PS と誤判定され、PS は 24%が ABS と誤判定された。それでも ABS の 49%と PS の 51%は正しく識別され、このことから、静電選別のマイナス帯電品に近赤外ソーターを使用することで、静電選別原料の ABS および PS 量に対して、37%および 17%程度回収できるポテンシャルがあると思込まれる。



図 43 使用サンプル

表 15 空気清浄機サンプルの ABS および PS に対する近赤外識別結果

フーリエ変換赤外分光 (FTIR)検出	近赤外線ソーター (NIR)検出	割合(%)
ABS 43 個	ABS 21 個	49
	PS 5 個	12
	測定不可 17 個	40
PS 41 個	ABS 10 個	24
	PS 21 個	51
	測定不可 10 個	24

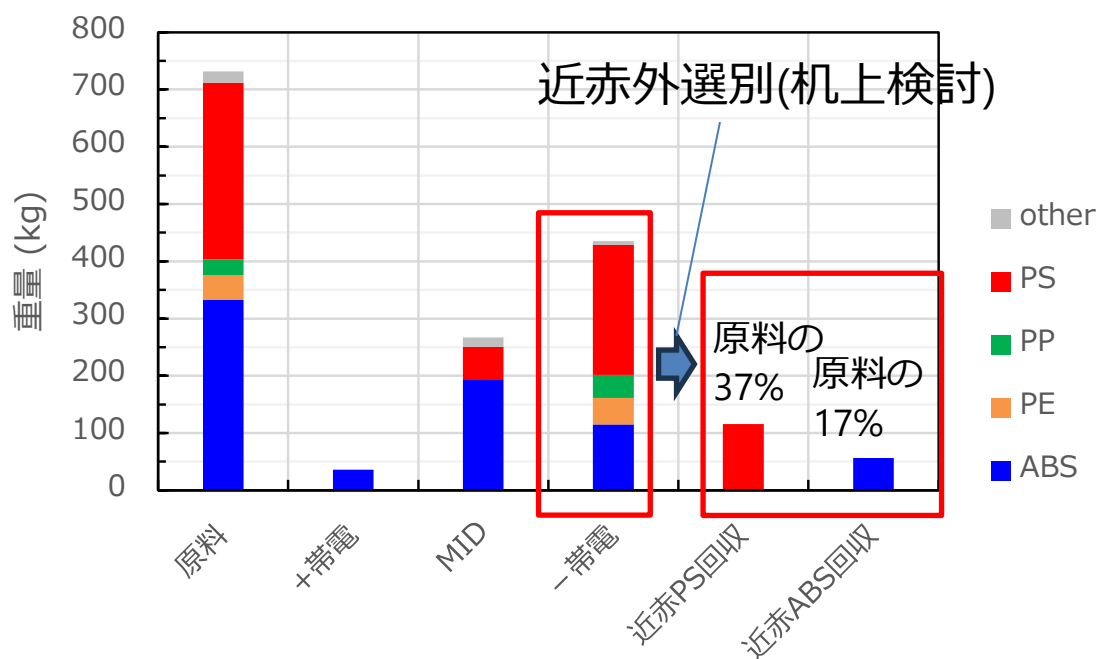


図 44 空気清浄機マイナス帯電品に対する近赤外ソーター適用机上検討結果まとめ

③-6-2-2 空気清浄機サンプルの静電選別 2 回実施検討

空気清浄機のプラス帯電品および中間物（MID）には ABS が多く含まれるが、低純度である。そこで両者を混合し、再度静電選別に投入することで、高純度 ABS を多く得られないかを確認するために、静電選別事前検証を行った。

プラス帯電品と中間物を混合した後に、100 片抜き取って行った組成分析の結果は、図 45 の通りで、ABS 純度は 58%であった。

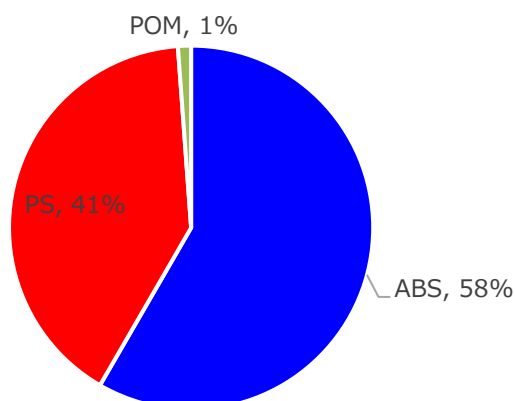


図 45 空気清浄機のプラス帯電品および中間物混合物の組成分析結果

同サンプルで取得した、比電荷分布を図 46 に、落下分布を図 47 示す。これらの結果から、③-3 と同様にプラスチック種ごとの落下分布を推定した結果を図 48 に示す。プラス帯電側を回収することで、2 回目投入原料に含まれる ABS のうちの 32%を、純度 86%で得られる見込みが得られた。

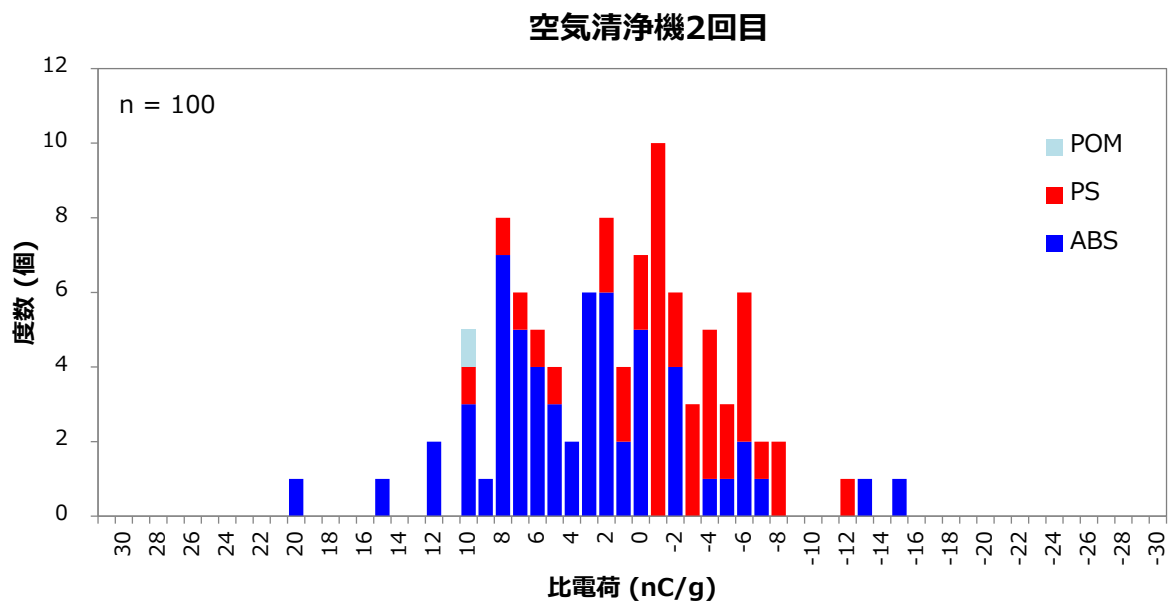


図 46 空気清浄機のプラス帯電品および中間物混合物の比電荷分布

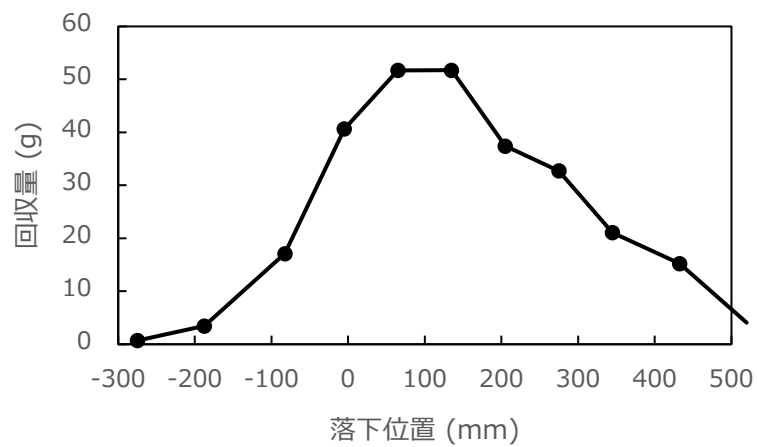


図 47 空気清浄機のプラス帯電品および中間物混合物の落下分布

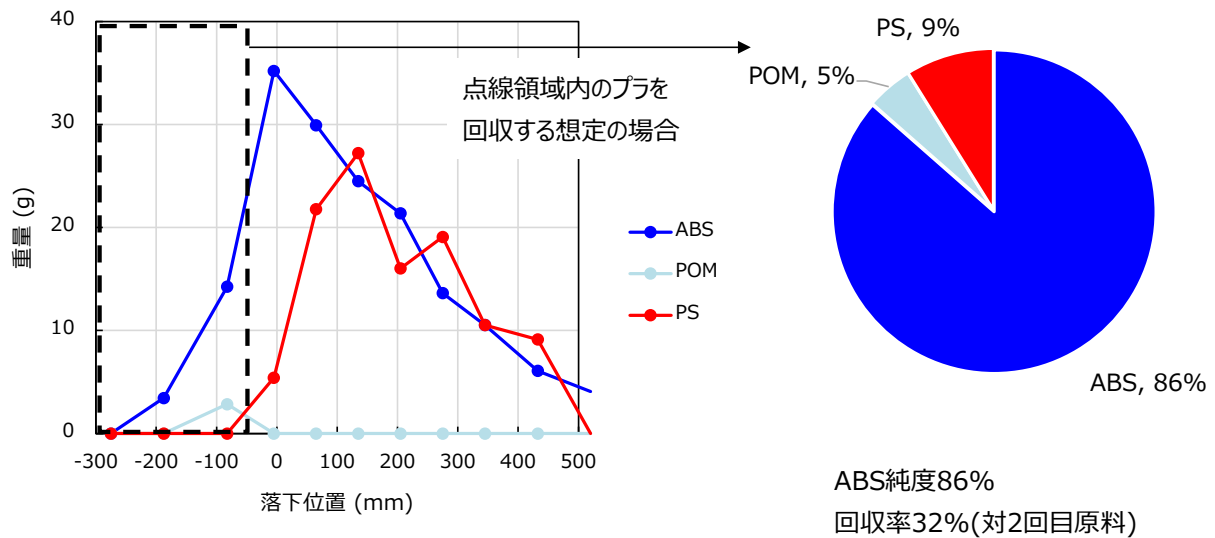


図 48 空気清浄機サンプルの静電選別 2 回目投入時の推定結果

③-6-2-3 空気清浄機以外の品目の選別フロー改善案

次年度では、各製品カテゴリで目標純度を達成するために、下記等の選別工程を検討予定である。

炊飯器は、初めに比重選別をすることを検討する。比重 1 に満たない PP-TD の除去には、X 線選別の使用を検討する。

掃除機は、先に比重選別をして浮いたものを PP として回収し、沈んだものを更に比重閾値 1.05 程度の比重選別に掛けることで ABS および PS とし、その後静電選別に投入することで高純度 ABS が得られる可能性がある。

扇風機は、PP フィルムの存在により静電選別での分離が困難となっているため、研磨等により PP フィルムを事前に除去することを検討する。

空気清浄機は、近赤外ソーター併用や、複数回の静電選別投入による ABS および PS の高純度化を検討する。

(1) ④グレーディングの整理・再利用検証

④-1 グレーディングの整理

④-1-1 グレーディングの考え方

近年、再生樹脂の適用拡大に向けて、回収由来材料や使用用途の異なる樹脂材料について、単一の物性値のみならず、複数の物性を総合的に評価し、材料間の類似性や差異を定量的に把握することの重要性が高まっている。

特に、再生材や用途別回収材においては、「どの材料同士が近い特性を有するのか」「どの材料が明確に異なる設計思想を持つのか」を整理することが、材料選定や今後の設計検討において有効な知見となる。

今回は、小型家電から回収された再生 PP 樹脂の 4 サンプルについて、評価した各種物性データを基に、以下の項目の検証を行った

- ・ サンプル間の類似傾向
- ・ グループINGの可能性

ここで注意が必要なのは、あくまで、令和 7 年度時点での選別実証で回収したサンプルの物性値なので、今後の工程最適化により、結果が変化する可能性を含んでいる。

④- 1 - 2 物性評価の項目

分析対象とした物性項目は以下の 11 項目である。

- ・ 引張強さ（降伏応力）
- ・ 引張降伏ひずみ
- ・ 引張破壊応力
- ・ 引張破壊呼びひずみ
- ・ 規定たわみ応力
- ・ 最大応力
- ・ 曲げ弾性率
- ・ シャルピー衝撃値
- ・ 荷重たわみ温度
- ・ MFR
- ・ 密度

これらは力学特性、耐熱特性、成形特性、材料構成を反映する指標であり、材料の性質を多面的に捉えるために十分な情報を含んでいる。以下に、各物性試験の条件を記載している。

■引張試験

試験方法：JIS K 7161-1, -2 準拠

測定項目：引張強さ、引張伸び

試料形状：JIS K 7161-2 タイプ A1

試験条件：試験速度；50 mm/min、チャック間距離；115 mm、測定数；n=5

試験環境：(23±2)℃・(50±10)%RH

測定装置：万能材料試験機 5566 型（インストロン社製）

■ 曲げ試験

試験方法：JIS K 7171 準拠

測定項目：曲げ強さ、弾性率

試料形状：短冊 80×10×4 (mm)

試験条件：試験速度；2 mm/min、圧子および支持台半径；5 mm

支点間距離；64 mm、測定数；n=5、たわみ測定；タイプⅢ

試験環境：(23±2)℃・(50±10)%RH

測定装置：万能材料試験機 5969 型（インストロン社製）

※弾性率のたわみはクロスヘッド変位に機械コンプライアンス補正をして測定した。

■ シャルピー衝撃試験

試験方法：JIS K 7111-1 準拠

試験項目：シャルピー衝撃強さ（ノッチ付き）

試料形状：JIS K 7111-1 A ノッチ付き r=0.25

※多目的試験片平行部より切出し、ノッチ加工を行った。

加工装置；ノッチングツール 型式 A-4（株東洋精機製作所製）

試験条件：方向；エッジワイズ、公称振り子エネルギー；0.5 J

持上げ角度；150.0°、空振り角度；147.9°、試験数；n=10

試験環境：(23±2)℃・(50±10)%RH

測定装置：デジタル衝撃試験機 DG-UB 型（株東洋精機製作所製）

■ 荷重たわみ温度測定

試験方法：JIS K 7191-2 準拠

試料寸法：80×10×t4(mm) ※多目的試験片平行部より切出した。

試験条件：試験片の方向；フラットワイズ、曲げ応力；0.45 MPa

支点間距離；64 mm、昇温速度；120 °C/min、規定たわみ；0.34 mm

熱媒体；シリコンオイル、測定数；n=2

測定装置：HDT テスター 3M-2V（株東洋精機製作所製）

■ MFR 測定

試験方法：JIS K 7210-1 準拠

試料形状：ペレット形状

乾燥：80 °C×6 h 以上

試験条件：予熱時間；5 分、試験温度；230 °C、荷重；2.16 kgf、測定数；n=3

測定装置：メルトインデックサ F-01（株東洋精機製作所製）

■ 密度測定

試験方法：JIS K 7112-1 準拠

試料寸法：約 25×20×t4(mm)

※多目的試験片から切削加工したつかみ部を使用した。

試験条件：A 法（水中置換法）、測定数；n=3

試験環境：(23±2)°C・(50±5)%RH

測定装置：電子天びん XS205 Dual Range（メトラー・トレド社製）

④- 1 -3 物性データの標準化

上記の評価方法を基に、4 サンプルでの分析を行った。ここで、各物性項目は単位や数値レン

ジが大きく異なる（例：MPa、%、℃、g/cm³など）ため、このまま比較を行うと、数値レンジの大きい項目（例：曲げ弾性率）が評価を支配してしまう。そのため、本分析では Z スコア標準化を行った。

$$Z = \frac{\text{各値}-\text{平均値}}{\text{標準偏差}}$$

これにより、各項目は「平均との差」を基準とした無次元量となり全項目を同等の重みで比較することが可能となる。その結果を 16 に示す。

表 16 標準化データ

評価項目	扇風機由来 PP	掃除機由来 PP	炊飯器由来 PP	炊飯器由来 PP-TD
引張強さ	-0.31	-0.32	-0.31	-0.32
引張降伏ひずみ	-0.36	-0.37	-0.36	-0.34
引張破壊応力	-0.34	-0.33	-0.33	-0.32
引張破壊呼びひずみ	-0.32	-0.35	-0.34	-0.34
規定たわみ応力	-0.30	-0.30	-0.30	-0.30
最大応力	-0.28	-0.29	-0.28	-0.30
曲げ弾性率	3.16	3.16	3.16	3.16
シャルピー衝撃	-0.37	-0.36	-0.37	-0.35
荷重たわみ温度	-0.16	-0.13	-0.17	-0.23
MFR	-0.35	-0.33	-0.33	-0.33
密度	-0.37	-0.37	-0.37	-0.35

④- 1 -4 類似性の検証

作成した標準化データを用いて、各サンプルの相関係数を分析することで、サンプル間で物性の「増減傾向」がどの程度一致しているかを評価した。ここでは、値が 1 に近いほど、全体的な傾向

が類似していることを示す。

相関係数からの評価結果を表 17 に示す。評価結果である相関係数行列を見ると、以下の3つの特徴が確認できた。

■ ① 扇風機 PP と ② 掃除機 PP

- ・相関係数が高く、複数の物性項目において増減傾向がよく一致
- ・力学特性、成形特性ともに類似した挙動を示す

■ ③ 炊飯器 PP

- ・①扇風機 PP と②掃除機 PP と一定の相関を示すが、完全一致ではない
- ・一部項目で高めの傾向

■ ④ 炊飯器 PP-TD

- ・他サンプルとの相関が相対的に低い
- ・物性の変動パターン自体が異なることを示唆

よって、相関係数の観点からは、①扇風機 PP と②掃除機 PP が最も近く、④炊飯器 PP-TD が明確に異なる構図が読み取れる。

表 17 各サンプル間の相関係数による評価

	①扇風機 PP	②掃除機 PP	③炊飯器 PP	④炊飯器 PP-TD
①扇風機 PP	1	0.999905	0.999969	0.99965
②掃除機 PP	0.999905	1	0.999942	0.999513
③炊飯器 PP	0.999969	0.999942	1	0.999746
④炊飯器 PP-TD	0.99965	0.999513	0.999746	1

④- 1 -5 グルーピングの検証

次に、ユークリッド距離を評価し、グルーピングの可能性を検証した。ユークリッド距離の評価結果を表 18 に示す。ここで、標準化データを用いたユークリッド距離では、サンプル間の「総合的な近さ」が数値として示される。この結果から、以下の特徴が確認できた。

■ ①扇風機 PP-②掃除機 PP 間の距離

- ・全ペアの中で最小
- ・両者が最も類似した物性バランスを有することを定量的に示す

■ ③炊飯器 PP-①扇風機 PP／②掃除機 PP 間の距離

- ・①扇風機 PP-②掃除機 PP よりは大きい、④炊飯器 PP-TD との距離よりは小
- ・同一系統内での性能差と解釈可能

■ ④炊飯器 PP-TD と他サンプルの距離

- ・いずれも最大

よって、ユークリッド距離の観点からは、①扇風機 PP と②掃除機 PP と③炊飯器 PP が同一グループであり、④炊飯器 PP-TD が別グループということが明確となった。

表 18 各 PP サンプル間のユークリッド距離

	①扇風機 PP	②掃除機 PP	③炊飯器 PP	④炊飯器 PP-TD
①扇風機 PP	0	0.045661	0.025932	0.087767
②掃除機 PP	0.045661	0	0.035627	0.103491
③炊飯器 PP	0.025932	0.035627	0	0.074692
④炊飯器 PP-TD	0.087767	0.103491	0.074692	0

④-1-6 グレーディングの検証

①～③はいずれも、密度や MFR など材料系指標が近い範囲にあり、特に①扇風機 PP と②掃除機 PP は、曲げ弾性率や応力特性がほぼ同等であり、実質的に同系統材料と見なすことが可能である。③は、上記と同じグループに属しつつも、強度がやや高く、高性能材料と解釈できる。

④は、密度が大きく異なり、曲げ弾性率・耐熱性が突出して高い一方で、衝撃値は低いという特徴を持つ。これは、相関・距離の両面から見ても、④は他サンプルとは明確に分離される。

ここで、グレーディングとして、①～③と④の 2 グレードは異なるグレードとして切り分けることができる。また、①～③の中でのグレーディングを細分化する際には、物性の重みづけをしなかった場合は、①、②と③に切り分けることが可能である。

ただし、着目する物性の重みづけがある場合は、この通りにはならない。例えば、シャルピー衝撃値と曲げ弾性は、一般的にトレードオフの関係性がある。この 2 物性を着目して、グラフ上に整理した結果を、図 49 に示す。ここでは、①～③と④は異なるグレードに整理することが可能であることを示している。ただし、①～③の中でのグレーディングになると、②掃除機のシャルピー衝撃値が突出して見えており、高性能材料と解釈することができる。よって、物性の重みづけについては、課題として残った。

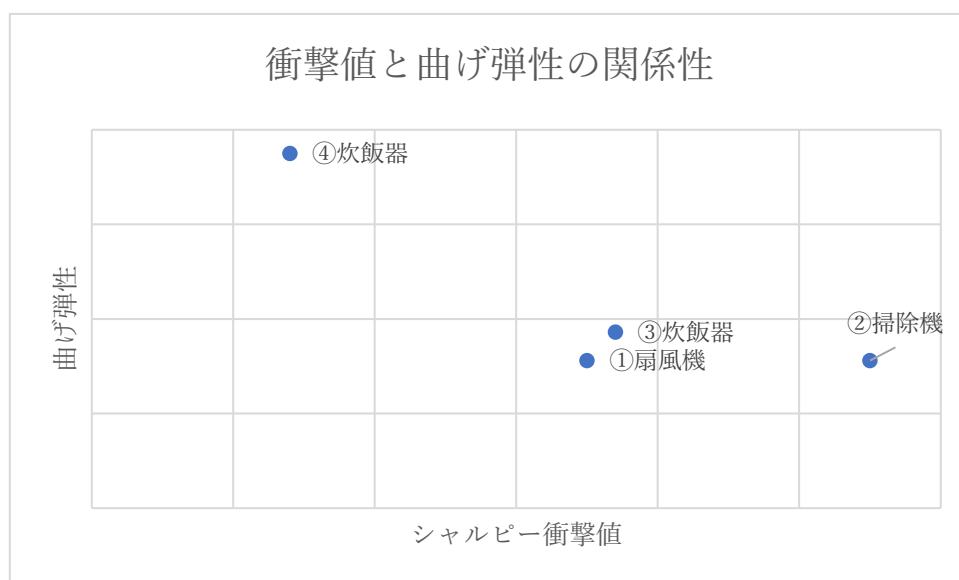


図 49 衝撃値と曲げ弾性の関係性

次に、グレーディングの掲示方法について、検討を行った。グレーディングを掲示する際に、再生樹脂の物性値以外に、生産していく上では、どれくらい供給できるかのポテンシャル情報も重要である。ポテンシャル情報から一旦、シャルピー衝撃値と曲げ弾性に着目したグレードでの整理を行った。ここでは、ポテンシャル情報として、各家電の市場販売台数を基に、本年度での対象樹脂の回収率を反映させることで、供給ポテンシャルと仮定した。その結果を、バブルチャートとして整理した図 50 に示す。ここでは、各樹脂の物性値でプロットしつつ、バブルの大きさが 供給ポテンシャルを表している。これにより、どの物性値のモノがどのくらい供給できそうかを、メーカー側が判断することが可能である。

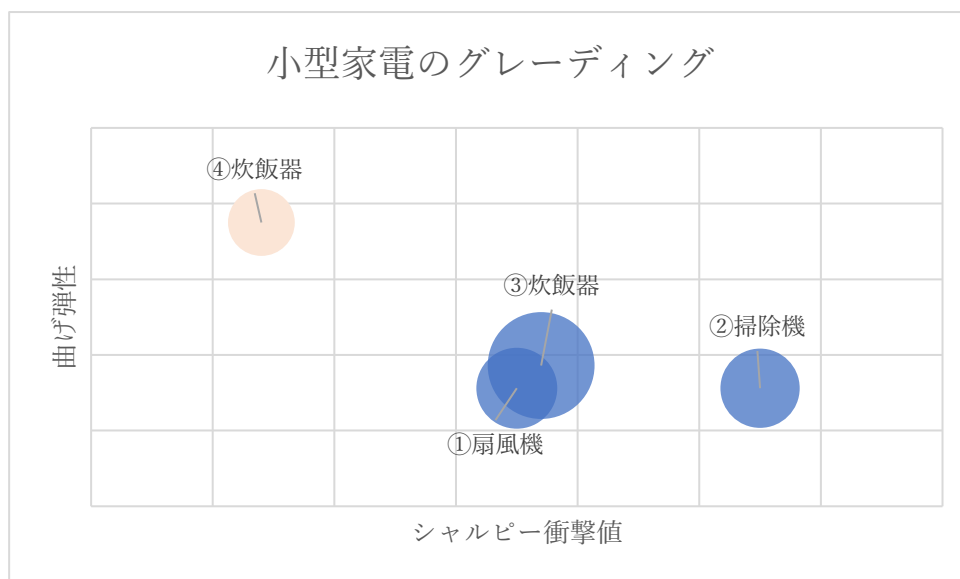


図 50 小型家電のグレーディング

以上より、小型家電のグレーディング方法を整理することができた。ただし、どの物性に着目するかで、グレーディング結果が変化することから、物性の重みづけについては、来年度での検討とする。

④-2 再利用検証

④-2-1 目的

前項で選別回収した炊飯器由来リサイクルPPについて、今回は、家電製品への再利用検証を行うために、生産性評価、初期物性評価、不純物の同定、劣化度合の確認を行った。なお、

ここでの家電製品への再利用検証とは、家電製品への適用に最低限必要な物性値等を有するかを判断するものであり、満足するから、すぐに家電製品への適用が可能ではないことを、断っておく。家電製品への再利用検証は、最後の項で述べる。

④-2-2 実験材料及び実験方法

④-2-2-1 実験材料及び評価試験片の準備

今回評価した材料である炊飯器由来リサイクル PP の選別工程を図 51 に示す。回収した炊飯器由来リサイクル PP フレークは、淡色系および濃色系フレークが混在した混色系フレークであり、静電選別品、比重選別/浮上品（以下、比重/浮上品とする）、比重選別/沈降品（以下、比重/沈降品とする）ともに、外観上で大きな差異は確認できなかった。

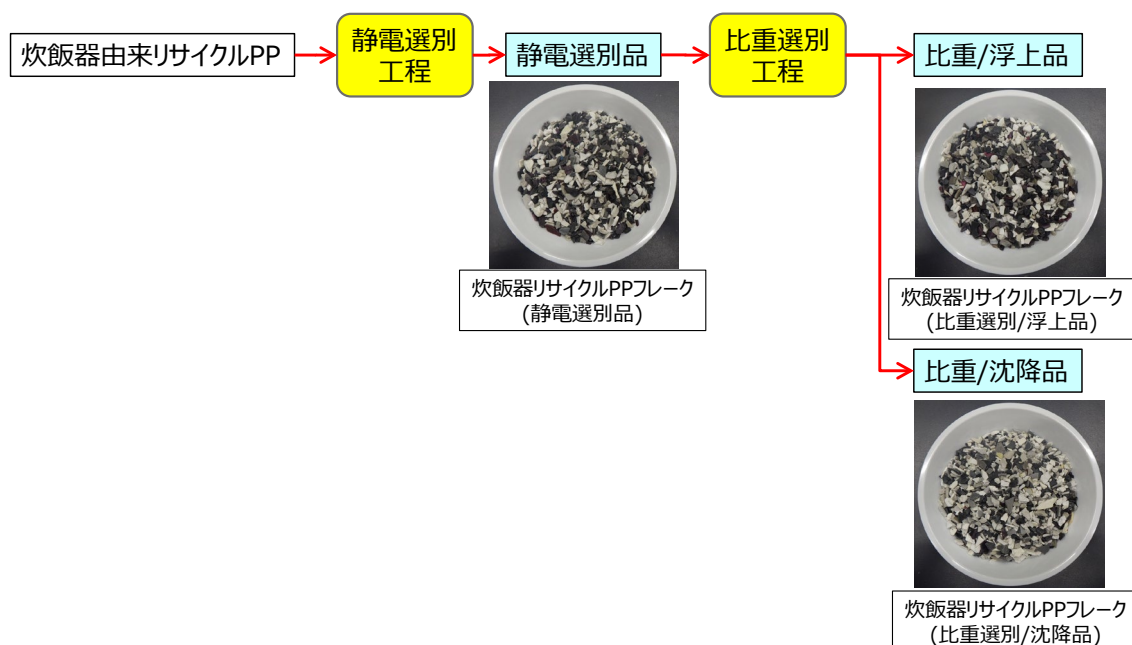


図 51 炊飯器由来リサイクル PP の選別工程と評価した材料

当該フレークの機械的物性値等を求めるために、フレークの素材化（ペレット化）を行った。素材化には、炊飯器由来リサイクル PP フレークについて、二軸押出機（φ26mm、L/D = 64、TEM-26SX-16、芝浦機械株式会社）を用いて、220℃、スクリー回転数 120rpm の条件で、熔融混練を行い、均質化して、リサイクル PP ペレットを得た。その折、フレークに含まれる異物除去を行うために、ステンレス製の金網メッシュによるフィルタリングを行った。金網メッシュによるフィルタリングとは、樹脂の熔融混練時に不溶物を除去するものであり、メッシュサイズにより除去できる異物のサイズが異なる。今回は、#120 メッシュ（目開き：0.132mm）および#60 メッシュ（目開き：0.273mm）の2種類の検討を行った。なお、異物が多いと、金網メッシュが目詰ま

りを起こすため、メッシュの交換が必要となる。ペレットの生産性の観点から、メッシュの交換回数は、重要であり、1 回のメッシュ交換当たりの回収量が多いほど、ロスの少ない材料であると言える。よって、金網メッシュ交換 1 回当たりのペレットの回収量を計測することで、生産性を比較することにした。

評価に用いた試験片は、電気式横型射出成形機（NEX110-IV-9E、日精樹脂工業株式会社）により、ISO ダンベル試験片形状（ISO3167 タイプ A）に作製した。評価試験片射出の成形条件は、樹脂温度 210℃ 金型温度 50℃とし、射出率 49cm³/sec とした。

④-2-2-2 測色方法および色差の求め方

評価試験片の測色方法は、JIS Z8722¹⁾に準拠する方法で行い、分光測色計（CM-700d、コニカミルタ株式会社）を用いて、L*a*b*表色系の色空間座標を 10°視野、光源 D65 の条件で測定した。なお、L*a*b*表示系では、明度を示す L*、色相と彩度を示す色度である a*、b*（a*、b*は、色の方向を示しており、a*は赤方向、-a*は緑方向、そして b*は黄方向、-b*は青方向を示す）を求めた。なお、今回は、実際の色味の評価に有効で、試験片の表面状態の影響が少なく、正反射光を含めて色を測る SCI（Specular Component Include）方式を採用した。

④-2-2-3 機械的物性評価

機械的物性評価について、引張試験、曲げ試験、シャルピー衝撃試験を行った。詳細な試験方法について、以下に示す。

引張試験は、JIS K7161-1²⁾に準ずる方法で行い、オートグラフ試験機 AG-X 20kN（島津製作所株式会社）を用いて、試験速度 50 mm/min で行い、引張降伏強さおよび引張破断伸びを求めた。なお、引張破断伸びとは、オートグラフのクロスヘッドの移動距離を ISO ダンベル試験片の平行部の長さ（80mm）で除したものと定義した。

曲げ試験は、JIS K7171³⁾に準ずる方法で行い、オートグラフ試験機 AG-X 20kN を用いて、試験速度 2 mm/min で行い、曲げ弾性率および曲げ強さを求めた。

シャルピー衝撃試験は、JIS K7111-1⁴⁾に準ずる方法で行い、デジタル衝撃試験機 DG-U 型（株式会社東洋精機製作所）を用いて、ノッチありおよびなしの場合について行い、ノッチありおよびノッチなしシャルピー衝撃強さを求めた。

④-2-2-4 MFR (Melt mass-flow rate) および密度の測定

MFR の測定は、JIS K7210-1⁵⁾に準ずる方法で行い、メルトインデクサーTP-401 (テスター産業株式会社) を用いて、230℃、荷重 2.16kg の条件で行った。

密度の測定は、JIS K7112-1⁶⁾に準拠する方法で、電子比重計 ED-120T (ミラージュ貿易株式会社) を用いて、測定を行った。

④-2-2-5 荷重たわみ温度の測定

荷重たわみ温度の測定は、JIS K7191-1⁷⁾および JIS K7191-2⁸⁾に準拠する方法で行い、自動 HDT 試験機 6A-2V (株式会社東洋精機製作所) を用いて、試験片：フラットワイズ、荷重 0.45MPa (B 法) の条件で行った。

④-2-2-6 DSC 測定

炊飯器由来リサイクル PP に含まれる不純物を同定するために、示差走査熱量測定装置 (DSC : Differential Scanning Calorimeter) を用いた融点の測定を行った。融点の測定は、JISK7121⁹⁾に準拠する方法で、NEXTA DSC600 (株式会社日立ハイテクアナリシス) を用いた。なお、測定条件は、測定温度範囲が 20～250℃、昇温速度 10℃/min とした。

④-2-2-7 顕微 FT-IR 分析

炊飯器由来リサイクル PP に含まれる不純物を同定するために、フーリエ変換赤外分光分析法 (FT-IR : Fourier Transform Infrared Spectroscopy) を行った。FT-IR は、フーリエ変換赤外分光光度計 (Nicolet iS50/continuum、Thermo Fisher Scientific 株式会社) を用いて、下記の条件で、測定を行った。

＜分析条件＞

測定方法：顕微透過法、検出器：MCT-A、分解能：4 cm⁻¹

④-2-2-8 灰分の測定

炊飯器由来リサイクル PP に含まれる無機物の含有量を測定するために、熱重量分析（TGA : Thermal Gravimetric Analysis）を行い、灰分量を求めた。TGA 測定は、熱重量分析装置（STA7200、株式会社日立ハイテックアナリシス）を用いた。なお、測定条件は、測定温度範囲が 20～800℃、昇温速度 10℃/min とした。

④-2-2-9 分子量分布の測定

分子量分布の測定条件は、以下に示す条件で測定を行い、数平均分子量（Mn）、重量平均分子量（Mw）、分散度（Mw/Mn）を求めた。測定サンプルの準備は、測定対象物の ISO ダンベル試験片から、サンプル約 20mg を切り出し、移動相 20ml を加えて、145℃で振とう、溶解させた。この溶解液を PTFE 製メンブランフィルター（孔径 0.1μm）で熱時濾過して、濾液を測定に用いた。

<測定条件>

- ・ 装置 : GPC-IR 型 高温ゲル浸透クロマトグラフ (Polymer Char)
- ・ 検出器 : IR6 型 MCT 赤外線検出器 (Polymer Char)
- ・ カラム : TSKgel GMH6-HT×2 本 + TSKgel GMH6-HTL×2 本 (東ソー株式会社)
- ・ カラム温度 : 140℃、カラム校正 : 単分散 PS (TSKgel 標準ポリスチレン、東ソー株式会社)
- ・ 移動相 : o-ジクロロベンゼン (0.025wt% BHT 含有)、移動相流量 : 1.0ml/min

④-2-3 実験結果および考察

④-2-3-1 生産性評価

図 51 に示す炊飯器由来リサイクル PP フレークを素材化して得られたペレットを図 52、ISO ダンベル試験片を図 53 に示す。

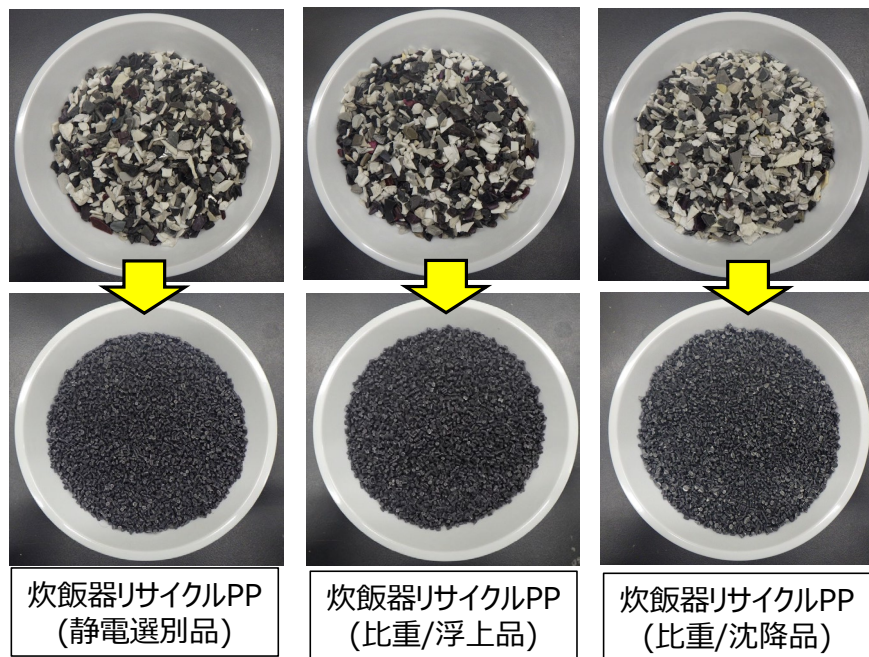


図 52 炊飯器由来リサイクル PP のペレット



図 53 炊飯器由来リサイクル PP の ISO ダンベル試験片

この結果、炊飯器由来リサイクル PP の 3 種類（静電選別品、比重/浮上品、比重/沈降品）の材料について、 $\phi 2 \sim 3 \text{ mm}$ の円筒状のペレットが得られ、また、射出成形において、問題なく、評価用の ISO ダンベル試験片が得られた。

図 53 に示す ISO ダンベル試験片の測色結果および色見本を表 19 に示す。

この結果、炊飯器由来リサイクル PP の 3 種類（静電選別品、比重/浮上品、比重/沈降品）の材料は、黒色に近い色の材料であり、互いに大きな差異がないことがわかった。

表 19 炊飯器由来リサイクル PP の測色結果と色見本

材料	測色結果(SCI)			色見本
	L*	a*	b*	
静電選別品	38.2	0.6	-3.9	
比重/浮上品	37.6	1.2	-4.0	
比重/沈降品	38.9	-0.2	-3.3	

次に、炊飯器由来リサイクル PP の 3 種類（静電選別品、比重/浮上品、比重/沈降品）の材料について、異物のフィルタリングに用いた金網メッシュサイズの #120 メッシュおよび #60 メッシュ処理品における金網メッシュ交換 1 回当たりのペレットの回収量を図 54 に示す。

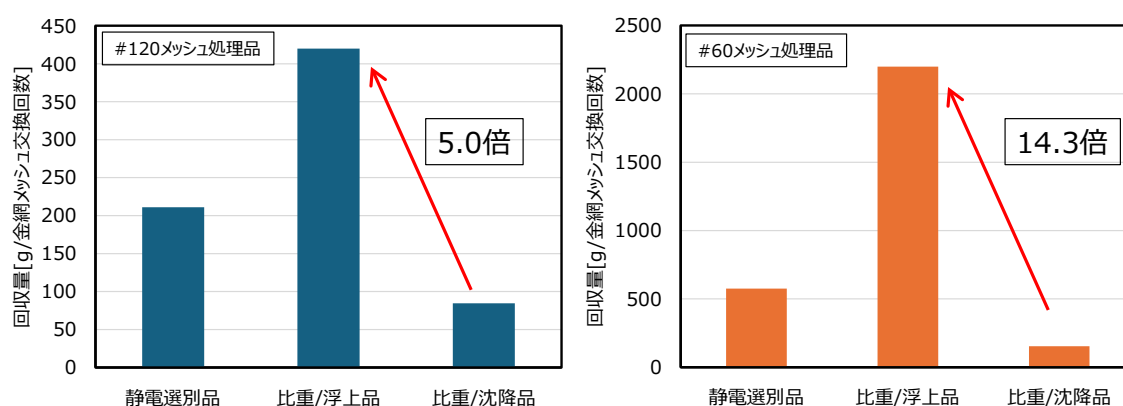


図 54 金網メッシュ交換 1 回当たりのペレットの回収量

この結果、#120 メッシュ処理品および#60 メッシュ処理品ともに、金網メッシュ交換 1 回当たりのペレットの回収量は、比重/浮上品が最も多いことがわかった。なお、比重/浮上品は、比重/沈降品に比べて、120 メッシュ処理品で 5.0 倍、#60 メッシュ処理品で 14.3 倍回収量が多いことがわかった。

④-2-3-2 初期物性評価

炊飯器リサイクル PP の物性評価結果を表 20 に示し、引張試験の結果（応力-伸び線図）を図 55、曲げ試験（応力-変位線図）の結果を図 56 示す。

表 20 炊飯器由来リサイクル PP の物性評価の結果

材料 物性項目	炊飯器由来リサイクル PP					
	静電 選別品	比重/ 浮上品	比重/ 沈降品	静電 選別品	比重/ 浮上品	比重/ 沈降品
MFR[g/10min]	20	22	17	20	21	17
密度[g/cm ³]	1.004	0.948	1.169	0.996	0.947	1.166
引張降伏強さ[MPa]	33	33	33	33	33	33
引張破断伸び[%]	42	41	10	15	29	7
曲げ弾性率[MPa]	1780	1540	2980	1760	1550	2950
曲げ強さ[MPa]	42	40	45	42	41	47
シャルピー衝撃強さ ノッチなし[kJ/m ²]	43	55	21	39	42	18
シャルピー衝撃強さ ノッチあり[kJ/m ²]	3.2	4.4	1.9	—	—	—
荷重たわみ温度[℃]	112	107	124	—	—	—
金網メッシュ	# 120 メッシュ			#60 メッシュ		

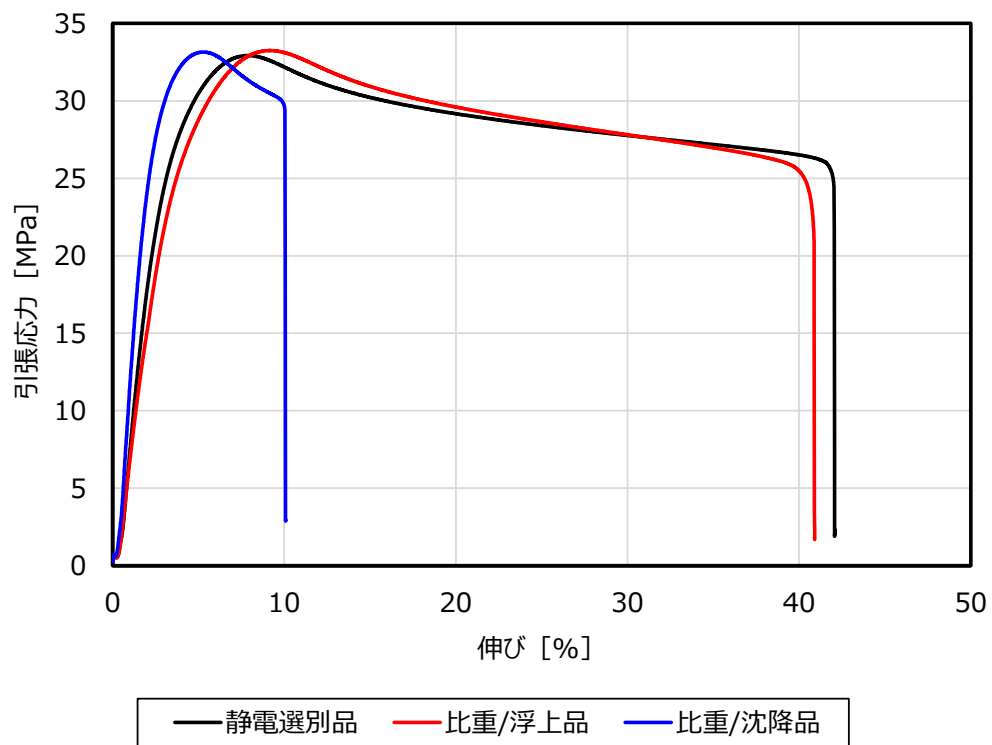


図 55 引張試験の結果（応力-伸び線図）

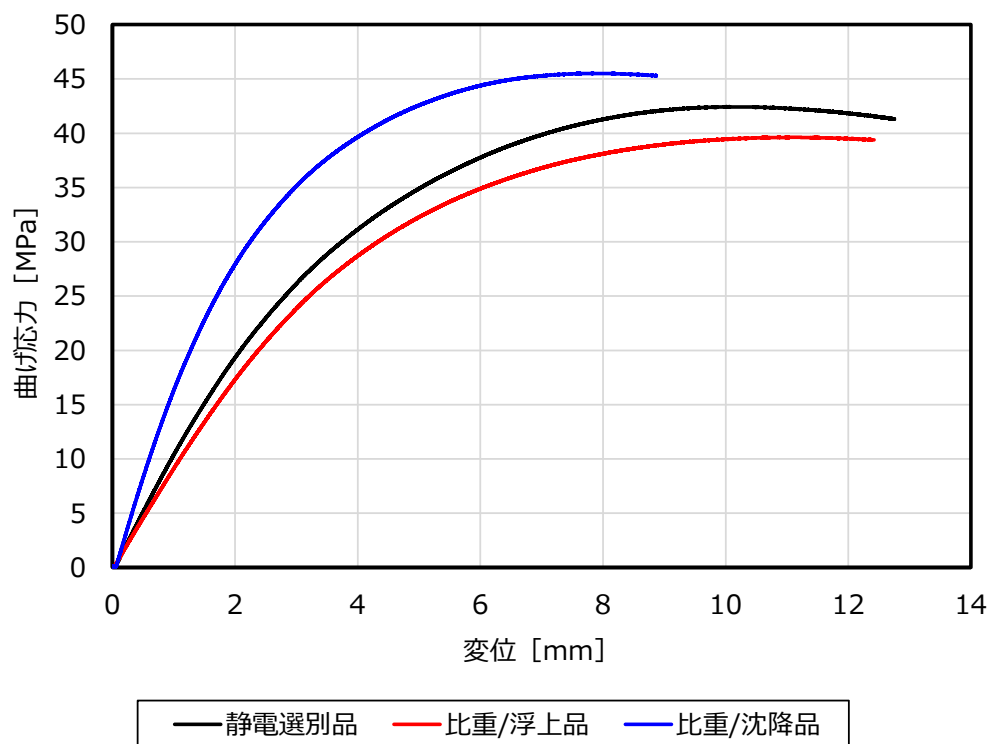


図 56 曲げ試験の結果（応力-変位線図）

この結果、炊飯器由来リサイクル PP の 3 種類（静電選別品、比重/浮上品、比重/沈降品）では、比重選別を行っているため、密度が大きく異なり、密度に応じて、曲げ弾性率、曲げ強度、荷重たわみ温度等に差異がみられた（差異は、曲げ特性のみで、引張強度は差異がない）。特に、比重/沈降品においては、無機物が多く含まれていることが予想されるため、無機物の成分だけでなく、含有率の把握は重要となるので、次項で検討する。また、金網メッシュサイズの違いにより、引張破断伸びやシャルピー衝撃強度に差異がみられることから、要求される物性値に応じて、金網メッシュサイズを選定する必要があることがわかった。

④-2-3-3 不純物の同定

前項にて、炊飯器由来リサイクル PP は、一般的な PP 樹脂（密度 $0.90 \sim 0.92 \text{ g/cm}^3$ ）より重いことから、比較的密度の高いポリエチレン樹脂（密度：低密度ポリエチレン樹脂 $0.91 \sim 0.94 \text{ g/cm}^3$ 、高密度ポリエチレン樹脂 $0.94 \sim 0.98 \text{ g/cm}^3$ ）や無機物等が含まれていることが予想されることから、不純物の分析を行った。

まず、DSC測定を行い、融解の伴う吸熱ピークから、PE樹脂の含有を確認した結果を、図 57（静電選別品、比重/浮上品）、図 58（比重/沈降品）に示す。

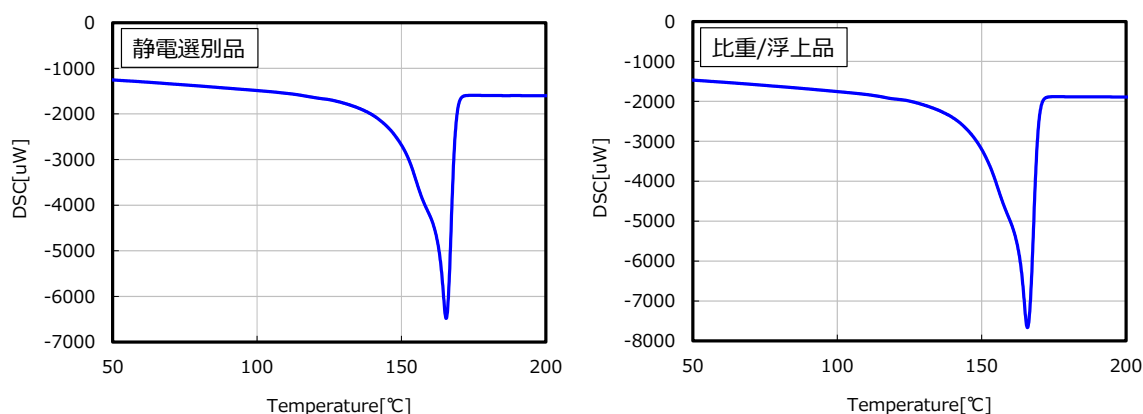


図 57 DSC 測定結果（静電選別品、比重/浮上品）

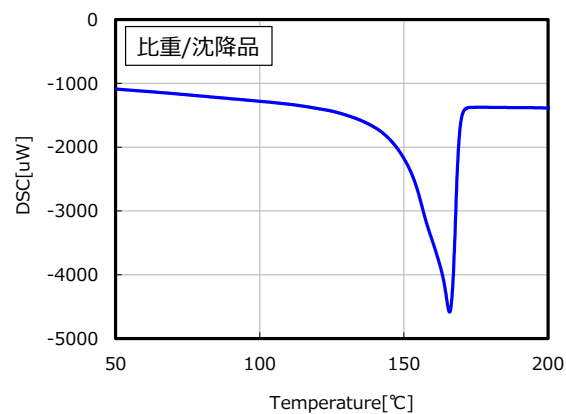


図 58 DSC 測定結果（比重/沈降品）

この結果、炊飯器由来リサイクル PP の 3 種類（静電選別品、比重/浮上品、比重/沈降品）は、融点が約 165℃ 付近にあり、PE 樹脂を含まない PP 樹脂であることがわかった。

次に、無機物の同定を行うために、FT-IR 分析を行った結果を、図 59（静電選別品）、図 60（比重/浮上品）、図 61（比重/沈降品）に示す。

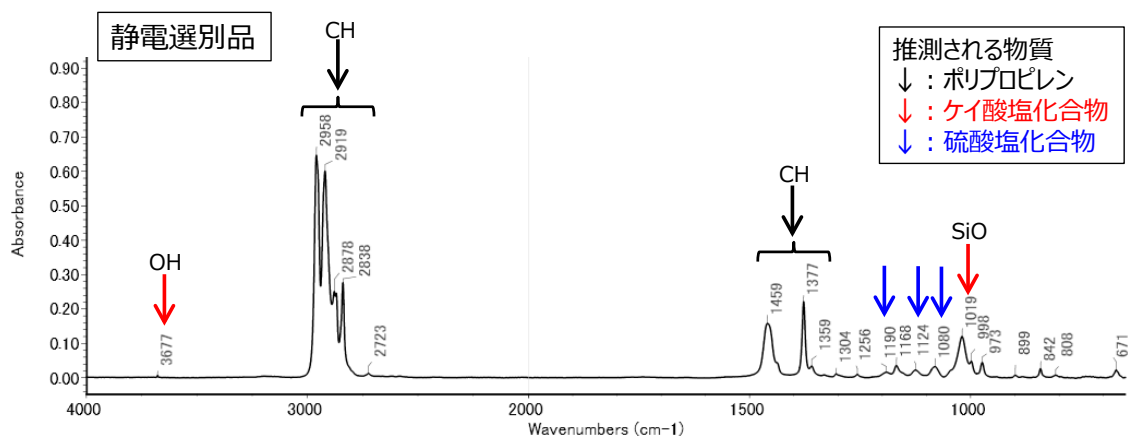


図 59 炊飯器由来リサイクル PP（静電選別品）の FT-IR スペクトル

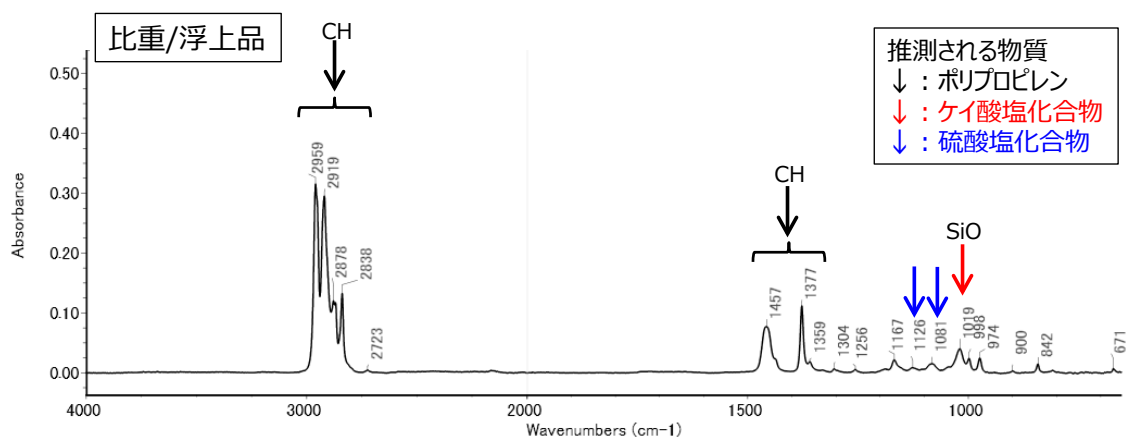


図 60 炊飯器由来リサイクル PP（比重/浮上品）の FT-IR スペクトル

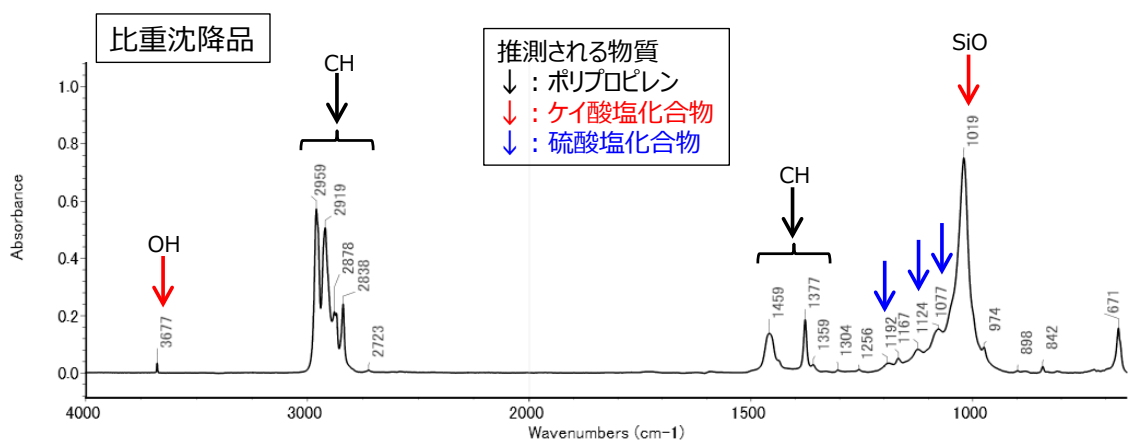


図 61 炊飯器由来リサイクル PP（比重/沈降品）の FT-IR スペクトル

FT-IR 分析結果から、静電選別品、比重/浮上品、比重/沈降品からは、主材の PP 樹脂由来のピークに加えて、ケイ酸塩化合物由来と推測される 1019cm^{-1} (SiO) のピークと、硫酸塩化合物由来と推測される 1192 、 1124 、 1078cm^{-1} (SO) のピークが検出された。特に、ケイ酸塩化合物由来のピークおよび硫酸塩化合物由来のピークに注目すると、PP 樹脂由来のピーク強度を基準とした場合、比重/沈降品が強く検出されているのに対して、比重/浮上品は、弱いことから、FT-IR スペクトルで定量性を議論できないが、比重/沈降品の方が、比重/浮上品より、ケイ酸塩化合物および硫酸塩化合物が多く含有していることが推定できる。なお、炊飯器由来リサイクル PP に含有する無機物として、ケイ酸塩化合物はタルク、硫酸塩化合物は硫酸バリウムであると推測される。

さらに、炊飯器由来リサイクル PP に含有する無機物の含有率を測定するために、灰分測定を行った結果を、表 21 に示す。

表 21 炊飯器由来リサイクル PP の灰分測定結果

材料 物性項目	炊飯器由来リサイクル PP		
	静電選別品	比重/浮上品	比重/沈降品
灰分 [%]	12.5	5.8	29.2

灰分測定の結果、無機物が静電選別品で 12.5%、比重/浮上品で 5.8%、比重/沈降品で 29.2%含有していることがわかった。

④-2-3-4 劣化度合の確認

劣化度合の確認の目的で、炊飯器由来リサイクル PP の 3 種類（静電選別品、比重/浮上品、比重/沈降品）の分子量分布の測定結果を、図 62、表 22 に示す。

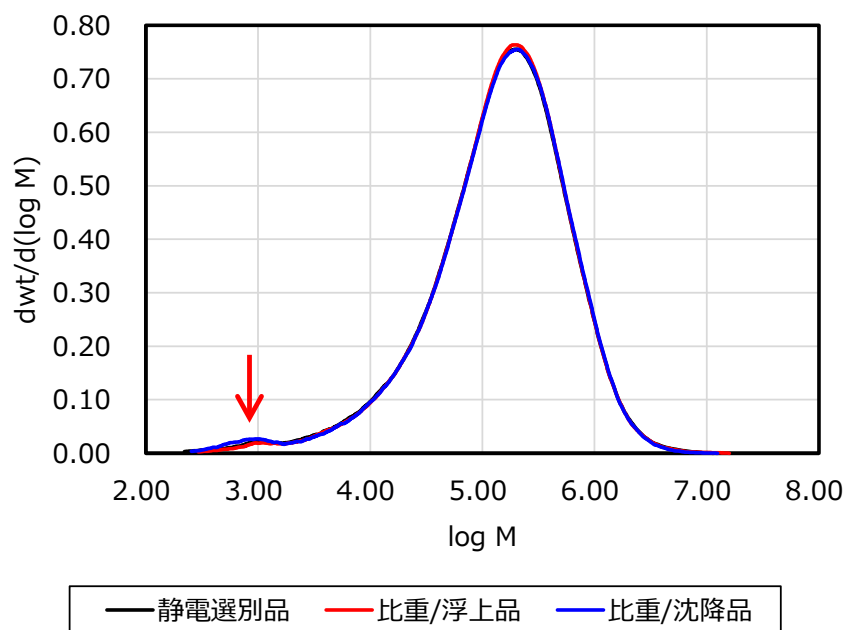


図 62 炊飯器由来リサイクル PP の分子量分布測定の結果

表 22 炊飯器由来リサイクル PP の分子量分布測定の結果

炊飯器由来リサイクル PP	分子量分布		分散度
	Mw	Mn	Mw/Mn
静電選別品	306,000	28,900	11
比重/浮上品	307,000	33,900	9.1
比重/沈降品	302,000	26,100	12

この結果、静電選別品、比重/浮上品、比重/沈降品において、一部、低分子量化（赤矢印）による劣化がみられたが、前項の図④-2-7～9 に示した FT-IR スペクトルにて、PP 樹脂の劣化に伴うカルボニル基（ $C=O$ 、 1700cm^{-1} 付近）が検出されないことから、機械的物性値に影響するほどの劣化でないと考えられる。なお、分散度（＝分子量のばらつき）の結果から、比重/浮上品は、比重/沈降品に比べて、分子量のばらつきが小さい材料であることがわかった。

④-2-4 家電製品への再利用検証

炊飯器由来リサイクル PP について、上記の測定結果から、家電製品への再利用検証（汎用 PP 樹脂用）を行うことにした。

今回、評価した家電製品への再利用検証項目と検証結果を表23に示す。

この結果、炊飯器由来リサイクルPPの中では、未評価の項目があるが、比重/浮上品が密度（改善の余地あり）以外が適合であり、密度も、比重選別の精度向上や新材とのブレンドにより、改善できる可能であるとする。

表23 家電製品への再利用検証項目と検証結果

家電製品への再利用検証項目 (汎用PP樹脂用)		炊飯器由来		
		静電選別品	比重/浮上品	比重/沈降品
1	生産性評価	△	○	×
2	物性値/MFR(15～35 g/10min)	○	○	○
3	物性値/密度(0.90～0.93 g/cm ³)	×	△	×
4	その他、機械的物性値	未評価	未評価	未評価
5	不純物/異種樹脂	○	○	○
6	不純物/金属成分	未評価	未評価	未評価
7	有害物質 (RoHS指令対象物質)	未評価	未評価	未評価
8	劣化度合	○	○	○

※判定○：適合、△：改善の余地あり、×：不適合

＜家電製品への再利用検証項目の説明＞

1. 生産性評価：量産化検討を想定した項目で、異物の多い材料は、異物除去によるロスが多く、量産化できない可能性がある。
2. 物性値/MFR（15～35 g/10min）：家電製品の射出成形品を生産するのに必要な流動性の物性値である。大型部品の場合、高流動性の材料が求められる。
3. 物性値/密度（0.90～0.93 g/cm³）：家電製品の重量に関する物性値である。
4. その他、機械的物性値：今回、適用対象製品が決まっていないため、具体的な数値設定はなし。
5. 不純物/異種樹脂：PP樹脂の場合、PE樹脂やスチレン系樹脂は、相溶性が悪いため、物性が劣化する、熱的性質が低下するとの問題がある。
6. 不純物/金属成分：PP樹脂の場合、金属害（銅害）を起こすことから、含有の有無等の確認が必要である。
7. 有害物質（RoHS指令対象物質）：含有している場合、使用不可である。
8. 劣化度合：マテリアルリサイクル可能なレベルであるかを判断する。

参考文献

- 1) JIS Z8722 : 2009. 色の測定方法－反射及び透過物体色.
- 2) JIS K7161-1 : 2024. プラスチック－引張特性の求め方－第 1 部：通則.
- 3) JIS K7171 : 2022. プラスチック－曲げ特性の求め方.
- 4) JIS K7111-1 : 2012. プラスチック－シャルピー衝撃特性の求め方－第 1 部：非計装化衝撃試験.
- 5) JIS K7210-1 : 2014. プラスチック－熱可塑性プラスチックのメルトマスフローレイト（MFR）及びメルトボリュームフローレイト（MVR）の求め方－第 1 部：標準的試験方法.
- 6) JIS K7112-1 : 2023. プラスチック－非発泡プラスチックの密度の求め方－第 1 部：水中置換法、液体ピクノメータ法及び浮沈法.
- 7) JIS K7191-1 : 2025. プラスチック－荷重たわみ温度の求め方－第 1 部：通則.
- 8) JIS K7191-2 : 2025. プラスチック－荷重たわみ温度の求め方－第2部：プラスチック及びエポナイト.
- 9) JIS K7121 : 2012. プラスチック－プラスチックの転移温度の測定方法.

(2) デジタル活用による回収状況の見える化

本項では、使用済小型家電の回収から再資源化に至る各工程における数量情報および工程情報を整理し、使用済小型家電由来のプラスチックの発生量ならびに処理量を把握するためのデータ取得のあり方について検証することを目的とする。

従来の小型家電リサイクルでは、金属回収を主目的とした処理フローが中心であり、回収台数や総処理量は把握されているものの、品目別・工程別・ロット別といった粒度での情報管理は限定的であった。このため、使用済小型家電由来のプラスチックの発生量や工程内での流れを一貫して把握する基盤は十分に整備されていない状況にある。

プラスチックの水平利用量の拡大・品質安定化を見据えた場合、単にデータを蓄積するのではなく、今後の工程改善や事業化検討に資する情報をどのような粒度で取得・整理すべきかを明確にすることが求められる。そのため、取得可能なデータ範囲、現場運用との整合性、ならびに継続可能な登録方法を整理し、次段階の取組に向けたデータ設計の方向性を明らかにする。

このため、①回収数量の見える化、②トレーサビリティ情報の整理、③コスト構造の把握という三つの観点から整理を行った。

(2) ①使用済小型家電収集量の見える化システムの活用検証

①-1 背景および問題意識

高品位小型家電（PC 等）については、従来から手解体が行われ、一定程度品目別の把握がなされている。一方、低品位小型家電においては、品目別の入荷量管理は行われておらず、回収総量および最終的な出来高の把握にとどまっているのが実態である。

一括破碎および金属選別工程において回収されたプラスチックの総量は把握されているものの、それがどの品目に由来するものを特定することは困難である。

前段の品目別破碎・選別の検証により、品目別に処理を行うことが樹脂純度向上に寄与することを確認した。しかし、品目別処理を実装するためには、当該品目の発生量が一定規模で安定的に確保できるかを判断する必要がある。そのためには、品目別の数量を把握することが前提となる。

数量が総量レベルに届かない場合、品目別の処理設計や将来的な拡張可能性の検討が困難となる。このため、どの品目についてどの粒度で数量を把握するかという整理が、水平利用プロセス構築の初期設計として重要となる。

しかしながら、低品位小型家電の現行処理構造においては、品目別管理は経済合理性を伴わず、また現場運用に新たな負荷を生じさせる可能性がある。このため、全量を直ちに品目別にデジタル管理することは現実的ではない。

以上を踏まえると、重要なのは「どの範囲を、どの粒度で、どの段階から把握するか」を整理することである。すなわち、水平利用の拡大に資する範囲から段階的にデータ取得を行う設計が求められる。本項では、この観点から、低品位小型家電を中心とした現行プロセスを前提に、数量データ取得のあり方について検討を行う。

①-2 回収量データ取得に向けた現行構造の整理

前項で述べたとおり、どの品目がどの程度発生しているのかを把握できなければ、品目別に処理する体制が現実的かどうかを判断することはできない。

しかし、現在の低品位小型家電の処理は、金属回収を前提とした一括処理が基本となっており、品目別管理を想定した仕組みにはなっていない。

そのため、本検討では、直ちに品目別データの取得を求めるのではなく、まず現行プロセスの中でどのような数量データが取得されているのかを確認し、どこまでなら無理なく把握できるのかを整理することとした。

①-2-1 回収チャンネルおよび回収量の実態

使用済小型家電の回収は、市町村回収および認定事業者による直接回収に大別される。令和5年度の国内回収量は約8.6万tであり、そのうち約3.2万tが直接回収に該当する。

直接回収の内訳を見ると、家電量販店を通じた回収が相当量を占めており、主要な回収チャンネルの一つとなっている。（図63 使用済小型家電の回収構造と量販店チャンネルの位置付け）

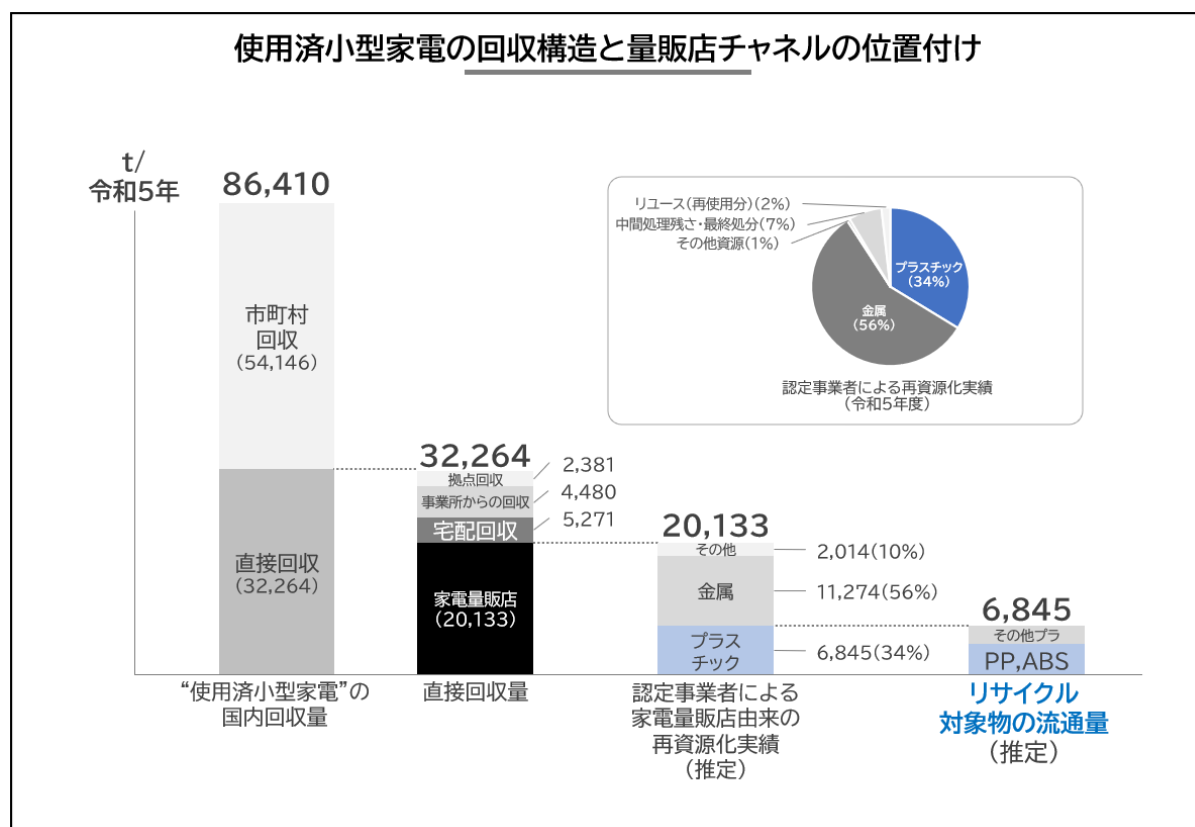


図 63 使用済小型家電の回収構造と量販店チャネルの位置付け

量販店回収には、

- ・店舗での新品購入時の下取り回収
- ・オンライン購入品の配送時における下取り回収（戻り便）

といった形態が存在する。

これらにより回収された使用済小型家電は、量販店の物流センターに集約された後、認定事業者へと輸送される。

認定事業者に入荷された低品位小型家電は、入荷総量がトラックスケール等により把握される。その後、発火リスクのあるリチウムイオン電池等の危険物を除去したうえで、原則として一括破碎・金属選別工程に投入される運用が一般的である。

この工程では、金属回収量や破碎後のプラスチック回収量といった出来高は把握されている。一方で、入荷段階における品目別数量管理は行われておらず、MIX 小型家電として取り扱われているのが実態である。

その結果、

- ・どの品目がどの程度搬入されているのか
- ・どの品目が水平利用対象としてどの程度の母数を有しているのか

といった観点での把握は困難な状況にある。

本実証では、この量販店回収チャネルを対象とし、現行プロセスを前提とした数量把握の可能性を検討する。

①-2-2 回収拠点におけるデータ登録の実現性評価

量販店回収を対象とする場合、回収量データをどの段階で取得するかが論点となる。まず、回収の一次拠点である量販店の物流センターにおける数量記録の可能性を検討した。

量販店の物流センターは、商品の入出荷が高頻度で行われる施設であり、ストックヤードも限定的であることから、使用済小型家電についても入荷後は可能な限り速やかに搬出する運用が求められる。こうした環境下において、入荷量を新たに記録・登録する業務を追加することは、現場担当者の負担増加につながる可能性が高い。

また、量販店各社は既に社内基幹システムを有している場合が多く、新たな情報プラットフォームへのデータ入力は、二重登録の発生や基幹システムとの接続調整を必要とする可能性がある。個別最適化が進みやすい構造の中で、量販店各社が共通で活用できるプラットフォームを前提とした一次データ収集は、現実的なハードルが高いと判断した。

以上より、回収量データの取得地点としては、量販店の物流センターよりも、出荷先である小型家電リサイクル認定事業者側の方が、実現性が高いと考察する。

①-3 回収量データの取得可能地点の整理

①-2-2 での評価を踏まえ、本項では回収量データの取得地点および取得粒度を具体的に整理する。

まず、取得地点については、量販店の物流センターではなく、小型家電リサイクル認定事業者における入荷時点を基本とする。認定事業者では、入荷時にトラックスケール等により重量が把握されており、回収チャネル別に管理されている場合もある。この既存の重量把握の仕組みを活用することが、最も現実的な出発点と考えられる。

次に、取得するデータの範囲について整理する。現行構造を前提とした場合、直ちに品目別の全量管理を行うことは困難である。したがって、まずは以下の粒度での把握を基本とする。

- ・回収チャンネル別の入荷重量
- ・水平利用ターゲットに限定した品目別のお荷数量（可能な範囲）
- ・MIX 小型家電としての総お荷重量

すなわち、全量を品目別に管理するのではなく、

- ・全体母数としての MIX 小型家電量を把握する
- ・水平利用対象として選定した品目についてのみ、段階的に粒度を高める

という二層構造でのデータ取得を想定する。

また、小型家電分野では、家電 4 品目とは異なり、個社単位の在庫システムや Excel 管理を中心とした運用が多い実態が確認されている。このため、新たなデジタルプラットフォームの導入にあたって、既存運用との整合を図りながら比較的柔軟に対応できる可能性がある。

以上より、本実証では、回収チャンネルごとに新たな一次データ収集体制を構築するのではなく、認定事業者側のお荷データを起点として、段階的に粒度を高める設計を基本方針とした。

①-4 代行登録による実証

①-3 で整理した回収量データ取得方針に基づき、認定事業者側のお荷データを起点とした数量把握の実行可能性を検証した。直ちに現場担当者へ新たな登録業務を求めるのではなく、役割を分担したうえで、外部による代理登録を実施した。

①-4-1 役割分担

本検証では、以下の体制でデータ取得を行った。

■ フューチャー・エコロジー側

- ・水平利用ターゲット品目の仕分け
- ・品目別回収重量および台数の計測
- ・計測結果（重量・台数）の共有

■ digglue 側

- 共有された品目別回収重量・台数を基に、入荷データをシステムへ代理登録
- 回収重量の累計値のモニタリング
- 各品目 300 台を目安とした回収目標への到達状況の確認

①-4-2 登録対象データ

登録対象としたデータは以下のとおりである。

- 入荷元（取引先企業名・拠点名）
- 入荷日
- 品目区分（水平利用ターゲット品目のみ）
- 品目別の入荷重量
- 品目別の台数（実証期間中のみ）
- 品目別のロット番号（実証期間中のみ）

入荷元を登録項目に含めたのは、回収元の特性に応じた数量把握を可能とし、将来的な供給安定性やチャネル別傾向の分析に資するためである。

品目区分については、家電量販店で回収された MIX 小型家電全量を対象とするのではなく、水平利用対象 5 品目に限定してデータ化を行った。これは、現行の回収・物流構造において、量販店物流センター段階で品目別データを取得することが困難であることを踏まえた対応である。

まずは対象範囲を限定することで、現場負担を抑えつつ、水平利用に直接関係する母数把握の実行可能性を検証した。

①-4-3 システム登録方法および操作性

登録は、フューチャー・エコロジーから共有された品目別回収重量・台数情報を参照しながら、システム上の入荷登録機能を用いて実施した。

(図 64 入荷登録(入荷テンプレートの選択)、図 65 入荷登録(入荷日付・入荷元・品目)、図 66 入荷登録(重量・ロット番号))

図 64 入荷登録（入荷テンプレートの選択）

MateRe Traceability

フューチャー・エコロジー (小型家電リサイクル実証)
フューチャー・エコロジー

入荷登録 (テンプレート「小型家電リサイクル実証」)

入荷日* 今日の日付を入力

発送情報

取引先* 家電量販店A社
取引先マスタを追加する

取引先工場* 物流センターA拠点
取引先工場マスタを追加する

出荷日

運搬情報

運送会社 フューチャー・エコロジー
運送会社マスタを追加する

配送伝票番号

入荷情報

入荷アイテム

ロット番号	アイテム名	数量1	数量2	アイテム情報
	使用済の炊飯器	0 kg	0 個・台	ロットNo. △備考 アイテム情報・数量編集
	使用済の掃除機 (スティック型)	0 kg	0 個・台	ロットNo. △備考 アイテム情報・数量編集
	使用済の掃除機 (キャスター型)	0 kg	0 個・台	ロットNo. △備考 アイテム情報・数量編集
	使用済の掃除機 (ロボット型)	0 kg	0 個・台	ロットNo. △備考 アイテム情報・数量編集
	使用済の空気清浄機	0 kg	0 個・台	ロットNo. △備考 アイテム情報・数量編集
	使用済の扇風機 (据え置き型)	0 kg	0 個・台	ロットNo. △備考 アイテム情報・数量編集
	使用済のラジオ/電話機/体重計	0 kg	0 個・台	ロットNo. △備考 アイテム情報・数量編集

+ アイテムを追加

登録する キャンセル

手動操作箇所
テンプレート自動入力

図 65 入荷登録 (入荷日付・入荷元・品目)

MateRe Traceability

フューチャー・エコロジー (小型家電リサイクル実証)
フューチャー・エコロジー

運搬情報

運送会社 フューチャー・エコロジー
運送会社マスタを追加する

入荷情報

アイテム情報・数量を編集する

数量1* kg
入力してください

数量2 個・台

ロット番号

アイテム情報

情報項目* 備考

入力欄

登録する キャンセル

アイテム情報・数量編集

図 66 入荷登録 (重量・ロット番号)

都度すべての項目を入力するのではなく、あらかじめ入荷テンプレートを作成する運用とした。
テンプレート化した内容は以下のとおりである。

- 入荷元（取引先企業名・拠点名）
- 入荷品目の名称およびラインナップ

これにより、実際の登録時に都度入力が必要となる項目は、

- 入荷日
- 入荷重量
- 台数（実証期間中のみ）
- ロット番号（実証期間中のみ）

の3点に限定された。

重量入力を中心とした構成とすることで、登録作業は簡便に実施可能であることが確認された。

①-4-4 重量・台数・ロット管理の整理

各品目 300 台規模の母数を回収するという実証条件に基づき、重量に加えて台数の計測・登録を実施した。また、解砕実証協力先への出荷単位を明確化し、後日トレースバック可能な状態とすることを目的として、入荷・品目単位ごとにロット番号の付与も試行した。

しかし、回収量把握を主目的とする通常運用を想定した場合、以下の整理が妥当であると考えられる。

- 回収量管理は重量ベースを基本とする
- 台数管理は母数確認の補助的手段と位置付ける
- ロット管理は入荷段階ではなく、処理工程以降で設計する

台数カウントは追加的な作業負担を伴い、その後の処理工程実績も重量単位で管理されるため、恒常的な管理項目とする必要性は高くない。

また、入荷段階でのロット付与は、仕分け後にストックヤードへ移動する現行運用においては、厳密な処理トレースと必ずしも直結しない。ロット設計については、解砕・選別後のフレークやペレット単位など、物理的に同質性が担保される工程段階で行う方が合理的である。

以上より、台数および入荷段階でのロット管理は実証段階における検証的措置と位置付け、本

格運用時は重量管理を基軸とし、ロット管理は処理工程以降に委ねる設計が現実的であると整理した。

①-4-5 確認された事項

本取り組みにより、以下の点が確認された。

- 小型家電リサイクル認定事業者の入荷時点の重量データを起点とする方向性の妥当性が示された
- 水平利用ターゲット品目に限定することで、品目別回収量の取得の可能性及び、入荷テンプレート活用により入力項目を限定できることが確認された

以上より、認定事業者側の入荷データを基盤とした数量把握は、現実的な選択肢となり得ることが示された。

①-5 抽出された課題と次年度対応方針

①-5-1 品目別仕分けが行われていないこと

現状、PC・タブレット等を除く低品位小型家電は品目別に仕分けされておらず、MIX 状態で保管・破碎処理されている。そのため、品目別数量把握を拡張する場合には追加作業が発生する可能性がある。

現状、PC・タブレット等の高品位小型家電を除き、多くの低品位小型家電については品目レベルでの仕分けが行われていない。

認定事業者のストックヤードでは、MIX 小型家電として混載状態で保管されるケースが一般的である。また、大型破碎機へ一括投入する運用を採用している事業者においては、解砕前の品目別仕分けは実施されていない。

このような現行構造のもとでは、入荷後に品目単位で数量を把握しようとする場合、新たな選別工程を追加する必要がある可能性がある。これは、作業負荷や保管スペースの確保といった現場運用上の制約に直結する。

そのため、品目別管理の拡張を図る場合には、

- どの段階で仕分けを行うのか
- 仕分け作業を誰が担うのか
- 経済合理性が担保されるか

といった点を整理する必要がある。以上の課題を踏まえ、次年度においては、以下の事項を検討する。

- 水平利用対象品目に限定した仕分け運用の定着可否を検証
- 仕分け負荷と経済合理性の整理
- 品目拡張の可否を段階的に検討

①-5-2 既存計量システムとのデータ連携

トラックスケールにより重量データは取得されているが、既存システムとの自動連携可否やデータ形式の標準化は未整理である。以上の課題を踏まえ、次年度においては、以下の事項を検討する。

- 計量システムからのデータ出力可否の調査
- CSV 等による半自動連携の実証
- 必要最小限の標準データフォーマットの整理

①-5-3 回収チャネル分類の標準化

入荷元情報は取得可能であるが、チャネル区分（量販店回収、宅配回収、市町村回収等）の標準定義は未整備である。以上の課題を踏まえ、次年度においては、以下の事項を検討する。

- 回収チャネル分類の定義整理

①-5-4 品目判別基準の標準化

品目分類の粒度や判別基準が統一されていない場合、数量管理精度および現場負荷に影響を及ぼす可能性がある。以上の課題を踏まえ、次年度においては、以下の事項を検討する。

- 品目分類ルールの明確化
- 現場で判別可能な簡易基準の整理

(2) ②トレーサビリティシステムの活用検証

②-1 目的

本項は、対象 5 品目について、回収・解砕・高純度選別・再生（造粒・物性評価）に至る各工程で実際に取得された工程データを活用し、それらを企業横断的に接続するトレーサビリティシステムの成立性を検証することを目的とする。

小型家電リサイクル分野においては、各工程単位での処理実績は管理されているものの、これらの情報は企業ごとに個別管理されており、企業間をまたいだデータ接続は行われていない。そのため、再生材がどの回収チャンネルに由来し、どの処理工程を経て製造されたかを一貫して説明可能とする基盤は整備されていない。

水平利用量の拡大および品質安定化を図るためには、工程単位の改善にとどまらず、企業間で工程データを引き継ぎ、トレースフォワードおよびトレースバックを可能とするデータ構造を確立する必要がある。本検証では、各企業にアカウントを発行し、工程実績をトレーサビリティシステム上に登録することで、企業間でのデータ引継ぎの可否、必要な登録項目、工程単位およびロット管理方法の妥当性を確認した。

あわせて、システム導入時に想定される運用上の課題を整理し、水平利用の次段階に資するデータ取得設計の方向性を明らかにする。

②-2 実証方法の整理

対象 5 品目について、回収から再利用に至るまでの一連の工程を対象とし、各工程で取得されたデータをデジタルプラットフォーム上に登録し、企業間で引き継ぐ構成とした。

（図 67 対象工程フローおよびデータ接続概念図）

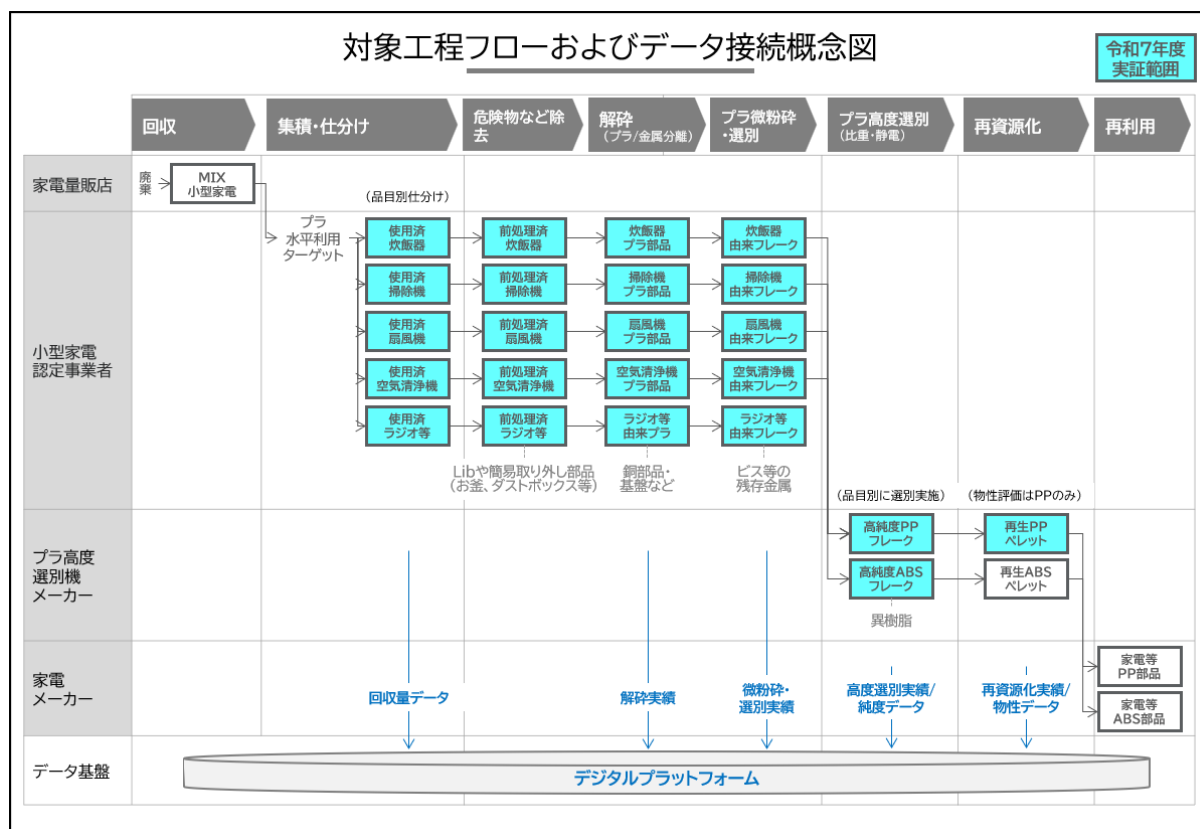


図 67 対象工程フローおよびデータ接続概念図

対象とした工程は以下のとおりである。

- ・回収・仕分け工程（家電量販店、株式会社フューチャー・エコロジー）
- ・解砕工程（実証協力先の小型家電リサイクル認定事業者 3 社）
- ・高純度プラスチック選別工程（三菱電機株式会社が主体となり、設備メーカー保有の実証機を用いて実施）
- ・再資源化工程（造粒）および物性評価工程（三菱電機株式会社、パナソニックホールディングス株式会社）

企業ごとに個別アカウントを発行し、自社工程の実績を登録する方式とした。登録されたロット情報は次工程へ引き継がれ、企業横断でトレースフォワードおよびトレースバックが可能な構造とした。

本年度実証では、工程接続の成立性およびロット管理単位の妥当性を検証することを目的とし、対象 5 品目を品目別に一連の工程で処理した。これにより、各品目の組成傾向および工程別歩留まりの把握を行い、基礎データを取得した。

なお、PP については高純度選別後に造粒および物性評価まで実施した。一方、ABS については高純度プラスチック選別および純度評価までを実施し、ペレット化および物性評価は実施していない。

一方で、実装段階においては常時品目別に選別・再資源化を行うことを前提とするものではない。解砕工程においては品目別に処理することで原料由来の明確化を図るが、その後の高純度選別および再資源化工程においては、プラスチック組成が類似する品目をグルーピングし、まとめて選別を行うことを想定している。これにより、処理効率の向上と純度確保の両立を図る設計とする。本年度実証は、その前提となる品目別データの取得および組成傾向の把握を目的としたものである

②-3 各工程における登録方法および取得データ

本検証では、工程ごとの歩留まりを正確に把握し、品目ごとの傾向差を分析することを目的として、実際の処理フローに即して工程を細分化し、各工程単位でデータ登録を行った。

登録対象とした工程は以下のとおりである。

- 危険物など除去
- 解砕
- プラスチック手選別
- 微粉碎
- 静電選別
- 水比重選別

各工程において、入力ロット、出力重量、残渣重量等を登録し、工程間でロットを引き継ぐ構成とした。その結果、各工程における重量バランスおよび品目別歩留まりの差異を定量的に把握することが可能となった。

一方で、本年度の登録粒度は、あくまで実証段階における分析目的のものであり、実装時に同一粒度での恒常的登録を想定するものではない。実装段階では、工程を適切に統合し、必要最小限の管理単位に再設計することを前提とする。

したがって、本年度実証は、工程分解単位の妥当性および情報粒度の最適化検討に向けた基礎データ取得フェーズと位置付けられる。

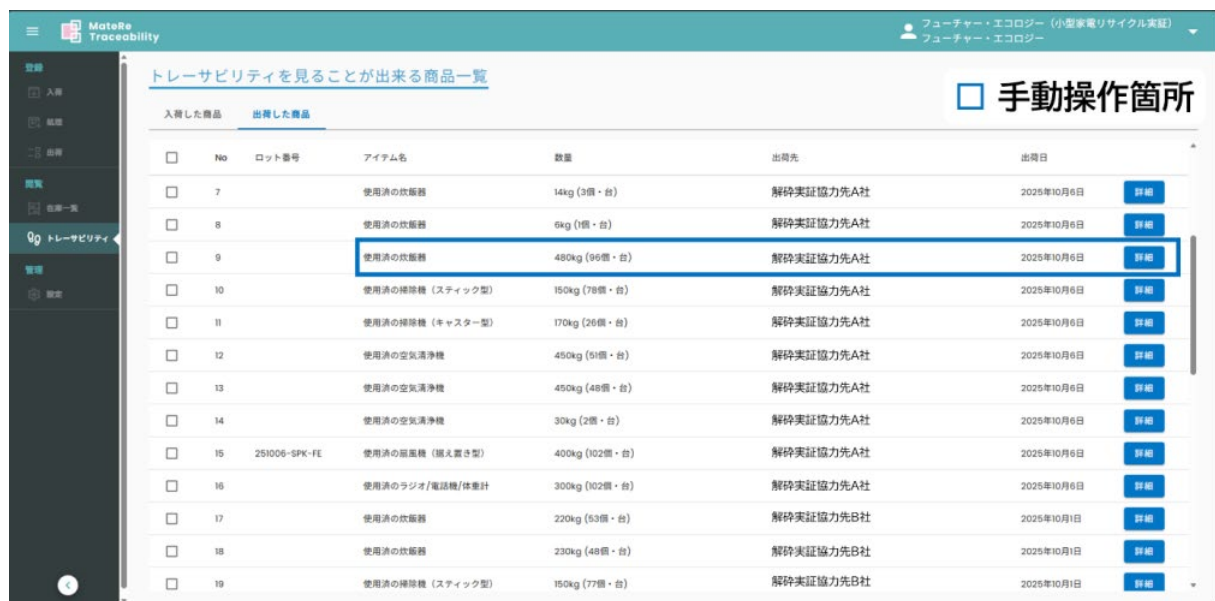
②-4 トレーサビリティ表示結果（炊飯器事例）

トレーサビリティ閲覧画面において対象ロットを選択すると、当該ロットに紐づく前工程および後工程の情報が時系列で表示される。対象ロットから前工程方向には回収情報および前処理情報が表示され、トレースバックが可能である。また、後工程方向には解砕、選別、再資源化に至る工程情報が表示され、トレースフォワードが可能である。

実際に登録された工程データを基に、炊飯器ロットを例として、登録情報の内容およびトレース表示状況を整理する。

②-4-1 閲覧対象ロットの選択

トレーサビリティ閲覧画面(図 68)において、フューチャー・エコロジーが出荷した炊飯器ロットを選択する。



トレーサビリティを見ることが出来る商品一覧							☐ 手動操作箇所
	No	ロット番号	アイテム名	数量	出荷先	出荷日	
☐	7		使用済の炊飯器	14kg (3個・台)	解砕実証協力先A社	2025年10月6日	詳細
☐	8		使用済の炊飯器	5kg (1個・台)	解砕実証協力先A社	2025年10月6日	詳細
☐	9		使用済の炊飯器	480kg (96個・台)	解砕実証協力先A社	2025年10月6日	詳細
☐	10		使用済の掃除機 (スティック型)	150kg (78個・台)	解砕実証協力先A社	2025年10月6日	詳細
☐	11		使用済の掃除機 (キャスター型)	170kg (26個・台)	解砕実証協力先A社	2025年10月6日	詳細
☐	12		使用済の空気清浄機	450kg (91個・台)	解砕実証協力先A社	2025年10月6日	詳細
☐	13		使用済の空気清浄機	450kg (48個・台)	解砕実証協力先A社	2025年10月6日	詳細
☐	14		使用済の空気清浄機	30kg (2個・台)	解砕実証協力先A社	2025年10月6日	詳細
☐	15	251006-SPK-FE	使用済の洗濯機 (縦置き型)	400kg (102個・台)	解砕実証協力先A社	2025年10月6日	詳細
☐	16		使用済のラジオ/電話機/体重計	300kg (102個・台)	解砕実証協力先A社	2025年10月6日	詳細
☐	17		使用済の炊飯器	220kg (53個・台)	解砕実証協力先B社	2025年10月1日	詳細
☐	18		使用済の炊飯器	230kg (48個・台)	解砕実証協力先B社	2025年10月1日	詳細
☐	19		使用済の掃除機 (スティック型)	150kg (77個・台)	解砕実証協力先B社	2025年10月1日	詳細

図 68 トレーサビリティ閲覧画面（閲覧対象の選択）

一覧画面には、ロット番号、品目、数量、出荷先、出荷日等が表示される。本事例では、数量 480kg の炊飯器ロットを対象とした。

②-4-2 トレースバック（回収）の登録情報

対象とした炊飯器は、2025 年 7 月 18 日にフューチャー・エコロジーにおいて入荷登録されたものである。

入荷時には、品目名、数量（kg および台数）、入荷日、入荷元等の基本情報を登録している。本事例では、入荷総量 710kg（144 台）のうち、480kg（96 台）を解砕実証協力先 A 社へ出荷した。

出荷時には、出荷日、出荷先、出荷数量が登録されている。これにより、解砕工程で処理された炊飯器が、どの入荷実績に由来するものであるかを遡って確認することができる。（図 69 トレースバビリティ閲覧画面（回収））

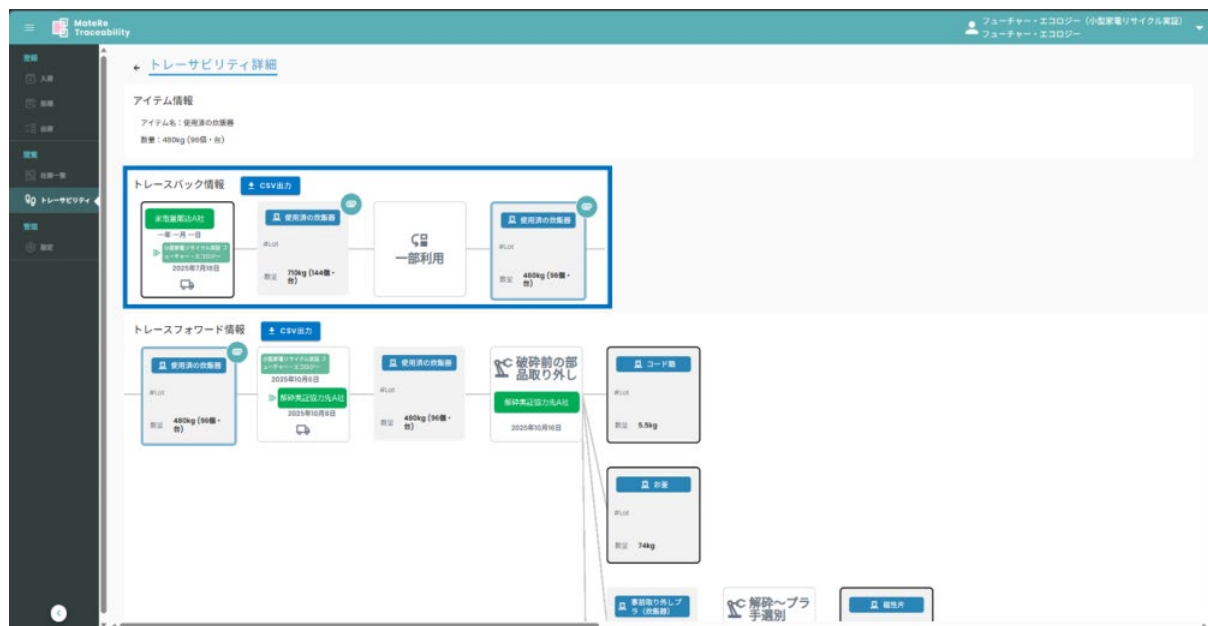


図 69 トレースバビリティ閲覧画面（回収）

②-4-3 トレースフォワード（解砕前の部品取り外し）の登録情報

解砕工程に先立ち、破砕前の前処理として部材の取り外しを実施した。

本事例では、解砕前投入量 480kg（96 台）に対し、以下の 4 区分で重量を計測し、登録している。

- ・コード類
- ・お釜
- ・事前取り外しプラ（炊飯器）
- ・前処理済みの炊飯器

コード類については、解砕機内部で絡まることによる設備トラブルを防止する観点から事前に取り外している。

お釜については、筐体を解砕機で破砕する際に内部で干渉し、効率的な破砕を妨げる懸念があるため、事前に分離している。

事前取り外しプラは、この段階で手作業により容易に取り外すことができたプラスチック単一部品（例：しゃもじ等）を指す。当該部材については重量を計測のうえ登録している。

なお、当該単一プラスチックは、その形状やサイズに応じて、前処理済みの炊飯器とともに解砕工程へ投入する場合と、解砕を経ずに直接プラスチック微粉碎・選別工程へ投入する場合がある。

前処理済みの炊飯器は、上記部材を除去した本体であり、後工程である解砕機への投入対象となる。

これにより、解砕前段階においてどの部材が確実に取り除かれているかを把握することが可能である。

なお、炊飯器の表示板に含まれるボタン電池については、実証協力先 A 社の解砕機仕様上、そこまで細かく粉碎されるものではなく、電池が破損することによる発火リスクは低いと判断されたため、同社においては事前除去の対象とはしていない。

解砕前の部品取り外し工程におけるトレーサビリティ表示結果を図 70 に示す。



図 70 トレーサビリティ閲覧画面（解砕前の部品取り外し）

②-4-4 トレースフォワード（解砕～手選別）の登録情報

前処理済みの炊飯器を解砕機に投入し、破砕処理を行った後、排出された破砕物を手選別した。その後、材質別に計量し、分別登録を行っている。

本事例では、解砕～プラ手選別工程において、以下の区分で重量を計測し登録している。

- ・鉄
- ・銅線・モーター
- ・基板
- ・その他金属
- ・炊飯器由来プラスチック

解砕後に分離された金属類（鉄、銅線・モーター、基板、その他金属）は、それぞれ独立した区分として重量を登録している。

一方、金属分離後に残ったプラスチックについては、手作業によりピック可能なサイズ以上の破砕片・部品を「炊飯器由来プラスチック」として登録している。当該品は、後工程であるプラスチック微粉碎・選別工程へ移送される。

本工程で登録された炊飯器由来プラスチック部品は、解砕実証協力 B 社へ出荷し、次工程へ引き継がれている。

これにより、解砕投入量に対する金属回収量およびプラスチック回収量の内訳を把握することが

できる。また、当該プラスチック部品が解砕実証協力先 B 社へ出荷され、次工程でその後の処理及びデータ登録がされていることを確認することができる。

解砕～手選別工程におけるトレーサビリティ表示結果を以下(図 71)に示す。

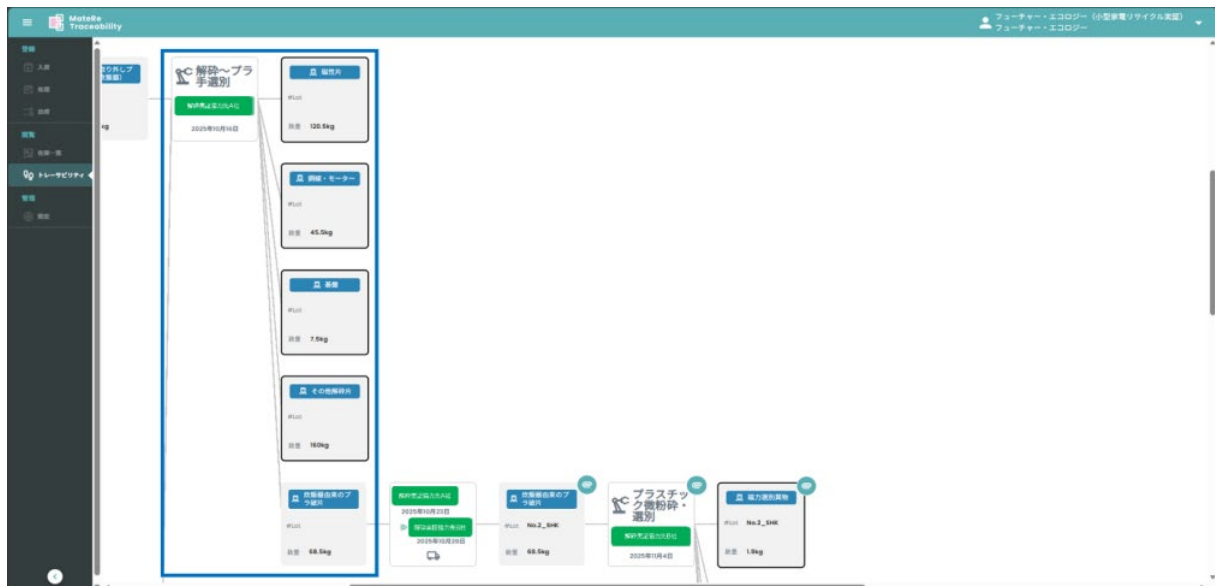


図 71 トレーサビリティ閲覧画面（解砕～手選別）

②-4-5 トレースフォワード（プラ微粉砕・選別）の登録情報

解砕実証協力先 B 社へ移送された「炊飯器由来プラ部品」は、プラ微粉砕・選別工程に投入された。本工程では、手選別後のプラスチック部品を微粉砕機によりフレーク化し、その後、複数の選別工程を経て異物除去および再資源化対象となるプラスチックの抽出を行っている。

本事例では、以下の区分で重量を計測し、工程ごとに登録している。

- ・磁力選別物
- ・アルミ選別物
- ・風力選別物
- ・金属検出除去物
- ・MIX プラフレーク（炊飯器由来）

磁力選別では、破碎片に残存していた鉄系異物を除去している。アルミ選別では、アルミ片を分離している。風力選別では、軽量異物や微細粉を除去している。さらに、金属検出機により微量金属を検出・除去している。

これらの除去工程を経た後、再資源化対象となるプラスチックとして「MIX プラフレーク（炊飯器由来）」が得られ、後工程である静電選別工程へ移送されている。

本工程でロット番号を付与しており、投入元となる解砕実証協力先および製品由来情報と紐づけて登録している。これにより、後工程においても当該ロットに紐づく由来情報を確認することができる。

これにより、再資源化後のプラスチックについて、

- ・どの解砕実証地由来の材料であるか
- ・どの製品由来のプラスチックであるか

を後工程において追跡することが可能である。

プラ微粉碎・選別工程におけるトレーサビリティ表示結果を図 72 に示す。

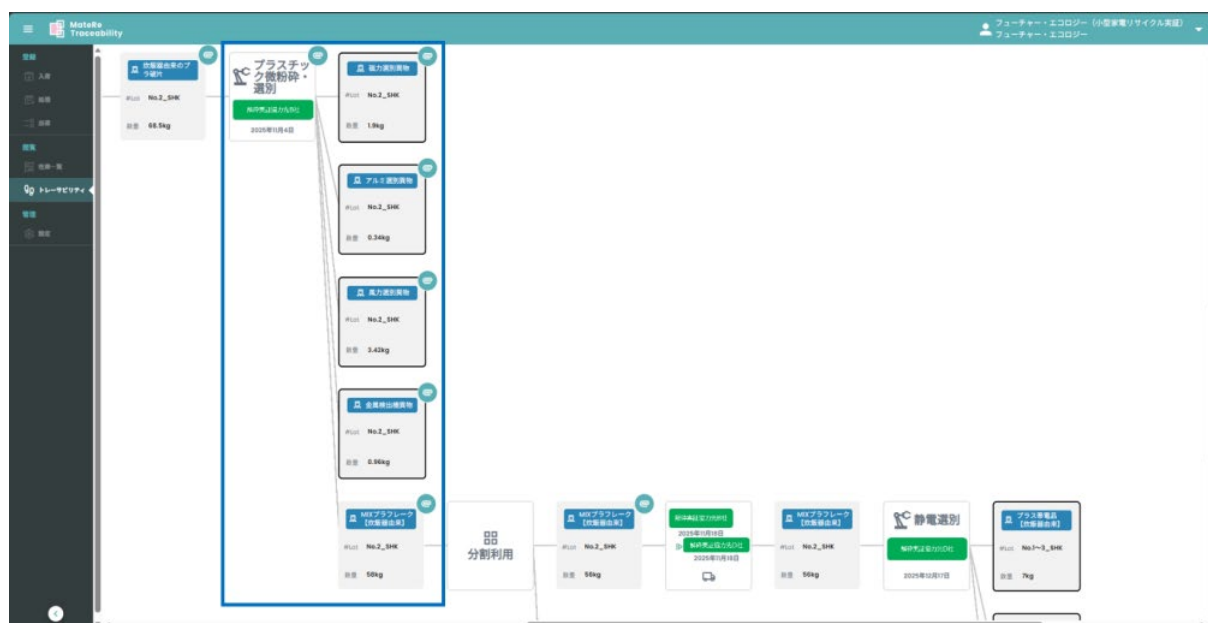


図 72 トレーサビリティ閲覧画面（プラスチック微粉碎・選別）

②-4-6 トレースフォワード（プラ高度選別-静電選別）の登録情報

微粉碎・選別工程を経て得られた MIX プラフレークは、静電選別工程に投入された。本工程では、摩擦帯電特性の差を利用し、材質ごとに分離を行っている。

本事例では、静電選別工程において以下の区分で重量を計測し登録している。

- ・プラス帯電品
- ・ミドル品
- ・マイナス帯電品

静電選別機により、MIX プラフレークは帯電特性の違いに応じて分離される。プラス帯電品およびマイナス帯電品に加え、帯電特性が明確に分離しなかったフレークは中間区分として「ミドル品」に分類されている。ミドル品は、プラス極とマイナス極の間に落下したフレークである。

本工程においても、前工程で付与したロット番号を引き継いで管理しており、解砕実証地および製品由来情報と連続して確認することができる(図 73)。

これにより、微粉碎後の混合プラスチックが静電特性に基づきどのように分離されたか、その重量内訳を把握することが可能である。

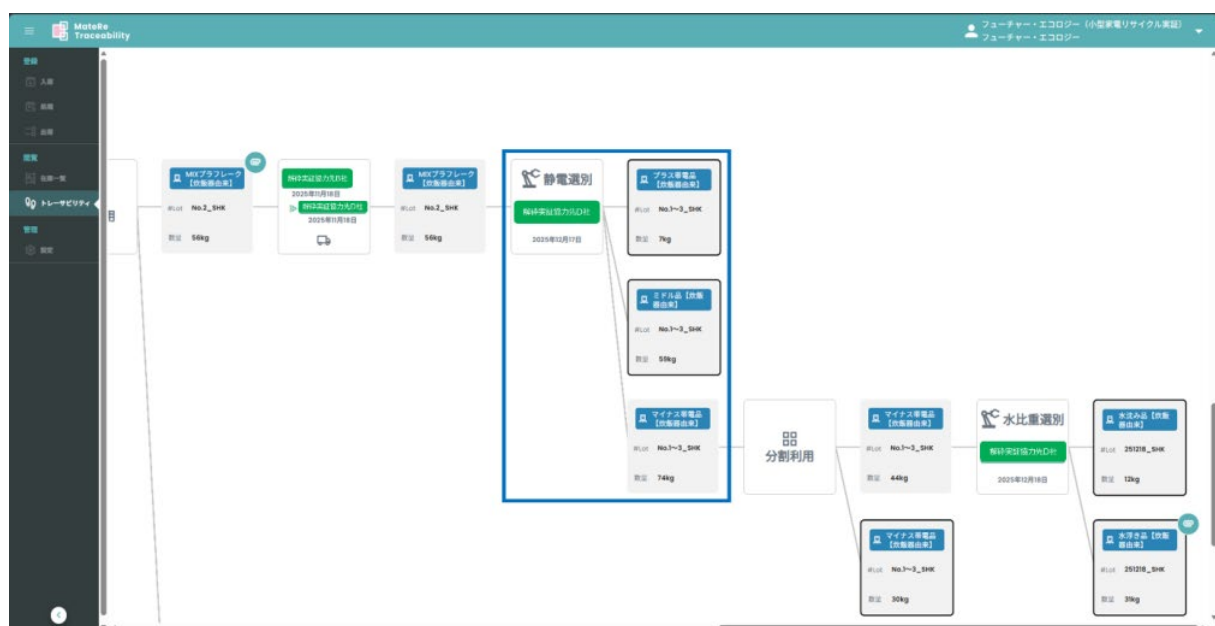


図 73 トレーサビリティ閲覧画面（静電選別）

②-4-7 トレースフォワード（プラスチック高度選別-比重選別）の登録情報

静電選別工程において分離されたマイナス帯電品は、PP リッチな材料であることから、水比重選別工程に投入された。

本工程では、水中における浮沈特性の差を利用し、比重の異なるプラスチックを分離している。

PP は比重が水より小さいため浮上し、比重の高い材料は沈降する。

本事例では、マイナス帯電品を投入し、以下の区分で重量を計測し登録している。

- ・水浮き品（炊飯器由来）
- ・水沈み品（炊飯器由来）

水浮き品はPPを主成分とする材料として整理され、水沈み品は比重の高い樹脂や残存異物を含む材料として区分されている。

本工程においても前工程で付与したロット番号を引き継いで管理しており、静電選別工程との連続性を保持している(図 74)。

また、本システムでは各アイテムに対して独自の管理項目を紐づけることが可能である。本事例では、水浮き品（炊飯器由来）について、材質（PP）、純度（%）、備考情報等を登録している。これにより、単なる重量管理にとどまらず、組成情報や分析結果をあわせて管理することが可能である。

これにより、静電選別後のマイナス帯電品が水比重選別を経てどの程度 PP 主体材料として回収されたかを把握するとともに、組成情報を含めた材料特性を確認することができる(図 75)。

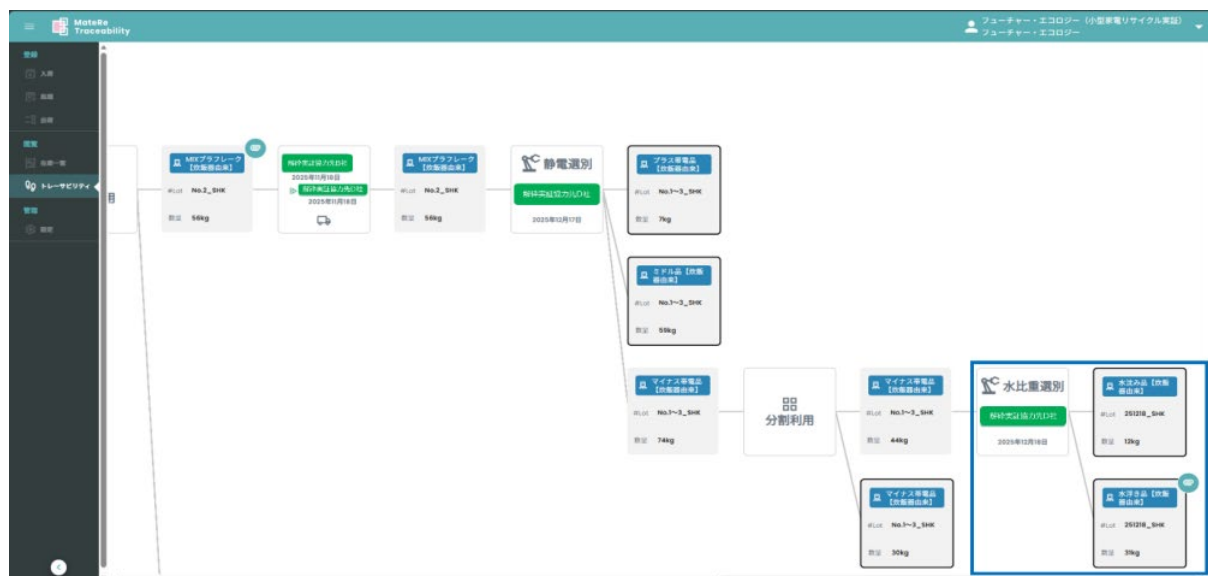


図 74 トレーサビリティ閲覧画面（比重選別）

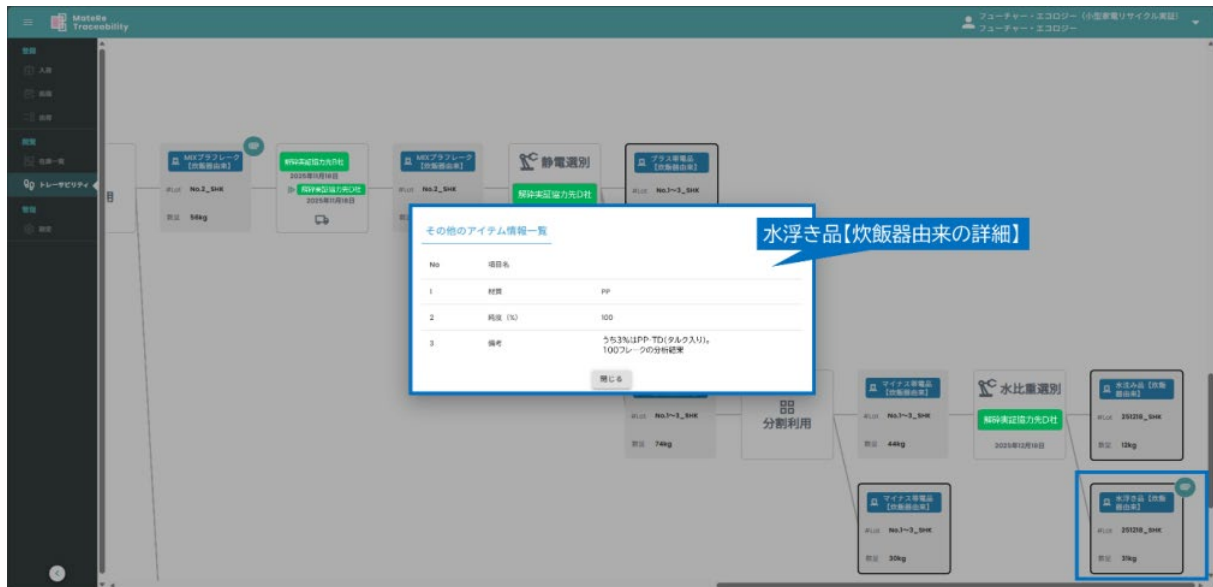


図 75 トレーサビリティ閲覧画面（比重選別後の材料の詳細）

②-4-8 得られたデータの価値

②-4-8-1 水平利用量の算定可能性

本実証において登録したデータを一括エクスポートし、工程別重量推移を整理した結果の一例を（図 76 水平利用量の算定）に示す。

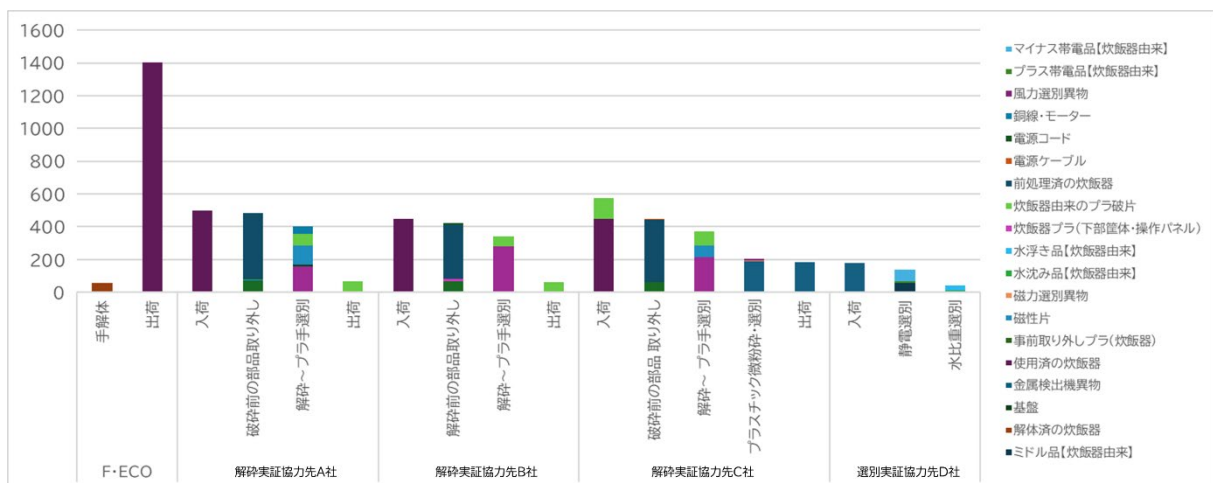


図 76 水平利用量の算定

本図は、回収から解砕、微粉碎、静電選別、水比重選別に至るまでの工程別重量を横断的に整理したものである。これにより、各工程における減耗量および再資源化対象材料の残存量を

定量的に把握することが可能である。

特に、水比重選別後の水浮き品重量を基準とすることで、PP 主体材料として水平利用可能な数量を算定できることを確認した。

②-4-8-2 品質変動要因の分析可能性

各工程での重量内訳および組成情報（材質、純度等）を登録していることから、選別精度や異物混入率の変動傾向を把握することが可能である。これにより、前工程条件や回収チャンネルの違いが品質に与える影響を分析できる可能性がある。

②-4-8-3 チャンネル別傾向分析可能性

回収元情報および実証地情報を保持していることから、回収チャンネル別・実証地別の回収量構成や品質傾向の比較が可能である。これにより、より効率的な回収スキーム設計に資する示唆を得られる可能性がある。

②-5 システム導入時に抽出された課題

システム導入および運用にあたり、以下の課題が整理された。

・課題 1) ロット単位設計の最適段階

どの工程段階でロット管理を開始することが最も合理的かについては、運用負荷とトレース精度のバランスを踏まえた設計が必要であることが確認された。

・課題 2) 登録項目の過不足

重量情報に加え、品質情報や設備条件等をどの粒度で登録するかについては、分析目的との整合性を踏まえた項目設計が必要である。

・課題 3) データ形式の標準化

企業間でデータを連携する際、登録フォーマットや名称体系の標準化が求められる。

・課題 4) 企業間共有範囲の制御

企業間でのデータ共有にあたり、どの情報をどの範囲まで開示するかについての制御設計が必要である。

・課題 5) リアルタイム性の課題

現場入力とシステム登録のタイムラグが生じる場合があり、リアルタイム性の確保に向けた運用設計が課題として整理された。

・課題 6) 現場運用とデータ粒度の不整合

入荷工程では、実態として「トラック単位」で登録が行われている。一方、処理工程はストックヤード内の材料をまとめて順次実施する運用であり、個別の入荷ロットと処理実績の厳密な紐づけは現場では管理されていない。

しかしながら、システム上ではロット単位での明確な紐づけ入力が求められるため、現場入力負荷および運用負担が増大する可能性があることが確認された。

②-6 対応策および改善点

抽出された課題に対し、以下の対応策および改善方針を整理した。

対策 1) ロット単位設計の最適化

ロット管理の開始段階については、全工程で一律に厳密な管理を求めるのではなく、分析目的および運用負荷を踏まえた段階的設計とする。特に、実質的な材料分岐が生じる工程を起点とするロット設計の妥当性を検討する。

対策 2) 登録項目の整理・最適化

登録項目については、水平利用量算定および品質分析に資する必須項目と、参考情報としての任意項目を整理し、過不足のない構成へ再設計する。これにより、分析有効性を維持しつつ、現場入力負荷の低減を図る。

対策 3) データ形式および名称体系の標準化

企業間でのデータ連携を見据え、項目名称、単位、区分体系の標準化を検討する。これにより、将来的な横展開および比較分析の基盤を整備する。

対策 4) 企業間共有範囲の制御高度化

企業間共有にあたっては、社名、拠点名、品質情報等の公開範囲を柔軟に設定できる設計を前提とし、運用ルールとあわせて整理を行う。

対策 5) リアルタイム性を踏まえた運用設計

現場入力とシステム登録のタイムラグを許容した運用設計を基本としつつ、入力手順の簡素化や一括登録機能の活用により、実運用上の負担軽減を図る。

対策 6) 簡易トレーサビリティ機能の実装検証

入荷ロットと処理実績の厳密な個別紐づけが現場で管理されていない実態を踏まえ、在庫数量や処理順序に基づく自動紐づけ機能の実装を検討する。実用上十分なトレーサビリティ精度を確保できるかについて、今後検証を行う。

②-7 次年度に向けた設計方針

得られた知見を踏まえ、次年度においてはトレーサビリティ設計の高度化に向けた検討を進める。

具体的には、以下の観点について整理を行う予定である。

- ・登録対象情報項目の最適化
- ・工程単位の標準化
- ・ロット番号設計の方向性の整理
- ・水平利用量算定に資するデータ粒度の検討
- ・品質安定化に資する情報項目の整理

なお、具体的な設計内容については、実証結果および関係者との協議を踏まえ、段階的に検討を進める。

(2) ③ビジネスモデル具体化・検証

③-1 目的

本項目では、本事業で対象とする小型家電 5 品目を前提に、回収から再生材製造に至る水平リサイクルスキームについて、供給条件、品質水準及び処理コストの観点から事業成立性を検証することを目的とした。

コスト構造の把握および課題の定量化を行い、バージン材と比較可能な水準での製造可能性を評価することにより、別表に示された令和 7 年度目標に対応する成果整理を行った。

なお、本年度の試算は、実証により一定量の処理データおよび品質評価データが取得できた品目を対象とした。具体的には、ラジオ、体重計、電話機については、回収量が限定的であり、

工程実証データが十分でなかったことから、本年度の経済性試算対象からは除外した。

また、将来的な処理量増減や対象品目拡張の検討に活用可能な基礎整理として、コストを kg 当たり単価で算定・整理した。これにより、処理規模が変動した場合にも比較検討が可能な評価枠組みを整備した。

③-2 方法

本年度の経済性試算は、実証工程において一定量の処理実績及び品質評価データが取得できた品目を対象とした。具体的には、以下の 4 品目を対象とした。

- 炊飯器
- 掃除機
- 扇風機
- 空気清浄機

一方で、ラジオ、体重計、電話機については、選別後のプラ回収量が限定的であり、工程別実測データが十分に取得できなかったことから、単位コストの妥当な算定が困難であると判断し、本年度の経済性試算対象からは除外した。

本検証は、取得可能な実証データに基づき、合理的に算定可能な範囲で整理を行ったものである。

③-2-2 評価範囲

評価対象範囲は、水平利用プロセスに直接関与する以下の工程とした。

- 集積・仕分け工程
- 解砕工程
- 高純度選別工程
- 再資源化工程

本検証では、既存回収スキームを前提とし、解砕以降の水平利用プロセスに伴う追加的成本を主な算定対象とした。すなわち、水平利用を実現するために必要な工程増分コストを明確化することを目的とした。

③-2-3 対象樹脂

対象樹脂は、実証により高純度回収が可能と確認された以下の2種とした。

- PP
- ABS

③-2-4 コスト区分

コスト算定は、実証により再整理した水平利用工程（解砕～選別～再生ペレット化）を対象とし、工程別に追加的費用を積み上げる方式で実施した。

算定対象は、人件費、電力費、設備償却費を基本とし、水道費については循環利用を前提に影響が限定的であることを確認したうえで整理した。なお、既存回収スキームに係る費用は本検証の対象外とし、水平利用プロセスに起因する追加コストのみを対象とした。

人件費は、実証工程における作業内容および作業時間実績を基に、一般的な作業単価水準を用いて算定した。

電力費は、各設備の定格消費電力を基に、1時間当たりの処理量（kg/h）で按分することにより単位処理量当たりの電力量を算出し、電力単価を乗じて算定した。なお、算定は定格値を基にしており、実運転時の負荷変動は考慮していない。

設備償却費は、設備取得費および想定耐用年数を前提とし、年間処理量で按分することにより単位処理量当たりの負担額として整理した。

以上の各費目を工程別に積み上げ、最終的に kg 当たり単価として整理することで、処理量拡大時のスケール試算が可能な形で収益構造を可視化した。

③-2-5 単位整理方法本検証では、コストを kg 当たり単価として算定した。

これは、処理量の増減や対象品目の拡張が生じた場合においても、前提条件を再設定することで経済性比較が可能となる評価構造を整備することを目的としたものである。

③-2-6 比較基準

成立性評価にあたっては、市場におけるバージン材価格水準を参考に、以下を目標価格として設定した。

- PP : 330 円/kg
- ABS : 360 円/kg

本目標価格との比較により、水平利用プロセスの経済合理性を評価した。

③-3 結果

モデルプロセスにおいて算定した追加コストは、PP・ABS ともに目標価格を下回る水準であった（図 77 水平利用プロセスに伴う追加コスト計）。

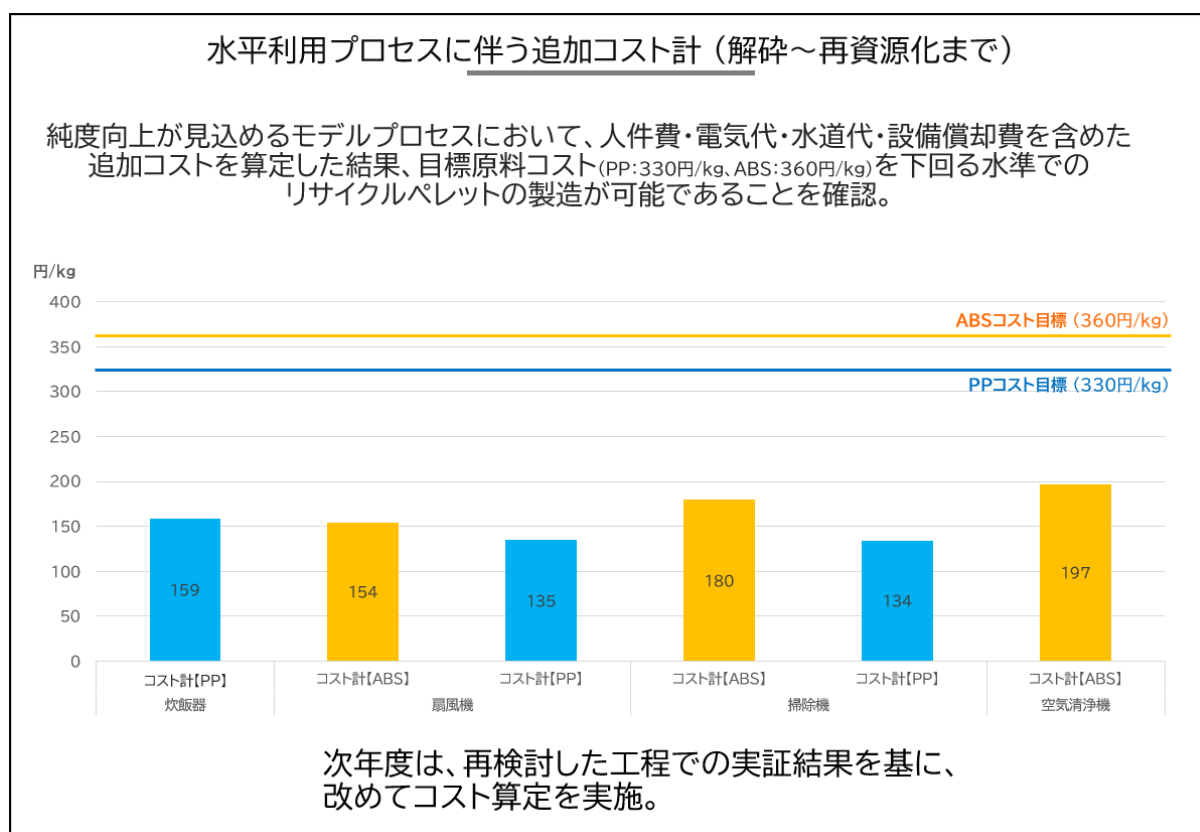


図 77 水平利用プロセスに伴う追加コスト計

③-4 示唆

本検証は、使用済み小型家電の回収から再資源化までを同一拠点で実施するモデルケースを前提として実施した。選別設備および再資源化（リペレット）設備を備えることにより、工程間輸送を最小化できる条件下での試算である。

この前提のもと、対象を 5 品目に限定した場合においても、目標原料コストを下回る水準での再生ペレット製造が可能となる条件が整理された。

一方で、本結果はあくまでモデルケースに基づく整理であり、実際の事業化にあたっては設備配置、処理量、物流条件等を踏まえた個別検討が必要である。

次年度は、工程再設計後の条件を前提に再試算を実施し、処理効率およびコスト構造の変化を定量的に評価する。

(3) LCA の検証・評価

(3)-1 評価条件

本事業における CO₂削減効果は、小型家電を機能単位とし、製品ライフサイクル全体を対象として評価した。評価対象製品は、小型家電（PP・ABS）とし、リサイクル材の適用有無による差分から CO₂排出削減効果を算定した。評価においては、申請時点では LCA データベース（IDEA）に基づくバックグラウンドデータを主に用いていたが、実証段階では可能な範囲で実測値に基づくフォアグラウンドデータへ切り替えている。

(3)-2 評価シナリオ

評価は以下の 2 つのシナリオを設定して実施した。

■評価対象製品シナリオ（本事業）

再生プラスチック（PP・ABS）を適用した小型家電を想定し、使用後は回収・選別を経てリサイクル工程に投入するシナリオ。

■ベースラインシナリオ

バージン材（PP・ABS）を使用した小型家電を想定し、製品廃棄後はマテリアルリサイクルを行わず、焼却処理を主体とするシナリオ。

なお、評価対象製品と比較対象製品は、製品機能および使用条件が同一であると仮定し、原材料起因の差分を主に評価対象とした。

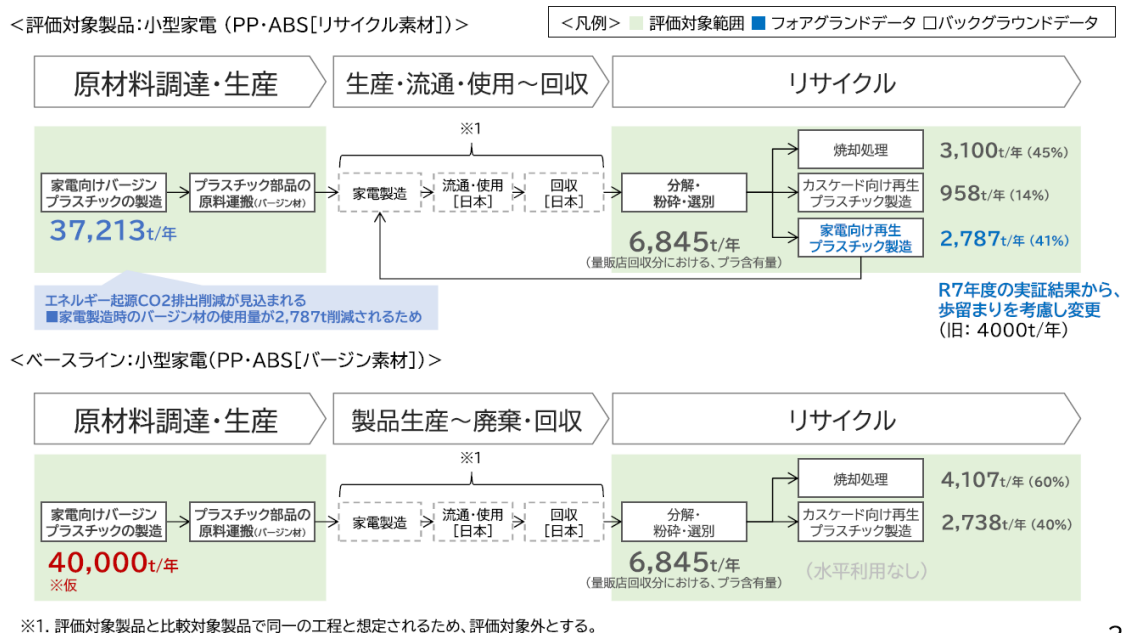


図 78 評価範囲およびマテリアルフロー

(3)-3 CO₂排出量および削減効果の算定結果

各シナリオでの CO₂ 排出量を算出した。その結果を表 24、表 25 に示す。また、その差分から、本事業での CO₂ 削減量を算出した。その結果を表 26 に示す。

表 24 評価対象製品シナリオの CO₂ 排出量

(単位 t-CO ₂ /年)	① 評価対象製品					
	原材料調達 ・生産	生産	流通	使用 ・廃棄	リサイクル	合計
エネルギー 起源	79,354	(対象外)	(対象外)	(対象外)	1,729	81,082
非エネルギー 起源	0	(対象外)	(対象外)	(対象外)	8,524	8,524
合計	79,354	(対象外)	(対象外)	(対象外)	10,253	89,606

表 25 ベースラインシナリオの CO₂ 排出量

(単位 t-CO ₂ /年)	②ベースライン					
	原材料調達 ・生産	生産	流通	使用・ 廃棄	リサイクル	合計
エネルギー 起源	84,912	(対象外)	(対象外)	(対象外)	715	85,627
非エネルギー 起源	0	(対象外)	(対象外)	(対象外)	11,293	11,293
合計	84,912	(対象外)	(対象外)	(対象外)	12,008	96,920

表 26 本事業での CO₂ 削減量

(単位 t-CO ₂ /年)	③削減量 (②－①)					
	原材料調達 ・生産	生産	流通	使用・ 廃棄	リサイクル	合計
エネルギー 起源	5,558	(対象外)	(対象外)	(対象外)	-1,013	4,545
非エネルギー 起源	0	(対象外)	(対象外)	(対象外)	2,768	2,768
合計	5,558	(対象外)	(対象外)	(対象外)	1,755	7,314

ライフサイクル全体における CO₂ 排出量を比較した結果、バージン材使用を前提としたベースラインシナリオに対し、再生材を適用した評価対象製品シナリオでは、エネルギー起源 CO₂ 排出量および非エネルギー起源 CO₂ 排出量の双方において削減効果が確認できた。

特に、バージン材の使用削減を通じて、原材料調達・生産段階における CO₂ 排出量が大きく低減される結果となった。

算定の結果、本事業では、バージン材の使用削減を通じて、エネルギー起源 CO₂排出量は年間 4,545 t-CO₂（約 5%）削減されることが見込まれた。また、リサイクル工程の高度化およびエネルギー効率の改善により、非エネルギー起源 CO₂排出量は年間 2,768 t-CO₂（約 25%）削減される結果となった。

これらを合算すると、ライフサイクル全体では、年間 7,314 t-CO₂（約 8%）の CO₂排出削減効果が得られると確認できた。

(3)-4 今後の検討

今後は、実証期間（2 年間）を通じて、以下の検討を進める予定である。

■再生材使用率のさらなる向上（例：10%→20%）による CO₂削減効果の追加評価

■水平利用を含む再生プラスチックの適用範囲拡大（PP・ABS 以外の材料を含む）

これらの検討結果を踏まえ、循環型ものづくりの高度化および CO₂排出削減効果の最大化を目指す。

総合整理・横展開に向けた示唆

総合整理・横展開に向けた示唆本実証事業では、小型家電由来プラスチックの水平利用を実現するために、集積・仕分け、解砕・選別、再利用検証、デジタル活用および LCA 評価といった各工程について検証を行った。

従来の小型家電リサイクルでは、金属回収を主目的とした処理フローが中心であり、プラスチックは混合状態で回収・処理されることが多かった。その結果、再生後の樹脂品質が安定せず、水平利用への展開に制約が生じる構造が存在していた。

本実証では、こうした課題を踏まえ、

- ・上流段階における仕分けロジックの整理
- ・解砕特性および作業効率の検証
- ・高度選別技術の活用可能性の確認
- ・再生材としての利用可能性評価
- ・デジタル活用による回収・トレーサビリティの可視化

といった複数の要素を横断的に検証した。

その結果、水平利用プロセスは、単一工程の高度化のみで成立するものではなく、

「上流での適切な仕分け」

「中流での選別技術の組み合わせ」

「下流で求められる品質要求」

が相互に整合したプロセス設計思想のもとで成立し得ることが示唆された。

特に、樹脂組成の類似性を軸とした初期的なグルーピング方針（Ver.0）は、過剰な選別や不要な処理工程の発生を抑制しつつ、再生材品質の安定化を図るための有効な出発点となる可能性がある。

一方で、製品サイズや構造に起因する解砕性、再生材用途ごとの品質要求水準など、今後さらに精緻化が必要な観点も明確になった。

したがって、本年度の成果は、工程全体を確立したものではなく、

水平利用に向けたプロセス設計の基本思想および初期構造を整理した段階

と位置づけられる。

横展開に向けた示唆

本実証の知見を他地域・他品目へ展開するにあたっては、以下の観点が重要となる。

- ・対象 5 品目以外の樹脂組成特性の把握
- ・上流段階での品目管理の徹底
- ・出口側用途の品質要求との整合性確保
- ・トレーサビリティおよびデータ活用基盤の整備

特に重要なのは、「選別を高度化すること」自体を目的とするのではなく、最終用途から逆算したプロセス設計を行うことである。

過剰な選別や分離は、工程負荷やコスト増加を招く可能性があるため、再生材の用途要求と整合した合理的な分離レベルを設定することが不可欠である。

本実証は、その設計思想の妥当性を検証するための第一段階として位置づけられる。

今後は、再生材評価結果や LCA 評価を踏まえ、閾値条件の具体化および運用モデルの精緻化を進めることで、より実装可能性の高い水平利用プロセスへと発展させていくことが求められる。

別表 本技術開発[実証研究]の目標

	項 目	採択時の 技術の状況	令和 7 年度の 目標	最終目標 (令和 8 年度)
(0)	全体目標	小型家電リサイクルは金属回収が中心で、プラスチックリサイクルは選別が難しく、多くがサーマル処理されており、資源循環が進んでいない。	対象の 5 小型家電から回収されるプラスチックの組成分析、回収～再資源化までを行い、横展開性・経済合理性等を考慮した効率的な運用プロセスの確立に向けた課題・対策を明確化。	対象の 5 小型家電における高品位樹脂回収工程の開発・作り込みを完成。小型家電認定事業者・リサイクル事業者に対する普及活動を開始。
(1) ①	集積・仕分けプロセスの整備・検証	事前に調査した炊飯器以外の組成情報が不明であり、水平利用に適した仕分けロジックも未構築。	対象 5 品目×10 タイプの手解体による組成分析を完了し、水平利用に適した仕分けロジック案を構築。	組成分析の対象製品（使用済小型家電の種類）の範囲を拡大させ、特定商品群での集積・仕分けロジックの構築及び体制を確立。
(1) ②	解砕機（分離）の活用検証	手解体は工程上非効率かつ、将来的な人材確保への懸念があり、通常運用では解砕機による省人化が必要だと仮定している段階。	解砕機 2 種類程度でトライアルを実施し、処理精度・コストの評価を通じて課題と対策を抽出・整理。	解砕機導入による工程フローを策定し、1 時間当たり 50 台の処理能力を実現。

(1) ③	高純度プラスチック選別・活用検証	ラボ試験レベルでは静電選別等の技術を組み合わせることで、水平利用に適した純度向上を確認。	実証機によるトライアルを通じて、必要な選別工程・処理能力等を整理し、純度向上に向けた対策を具体的に示す。	PP・ABS 樹脂について純度 98%以上の選別を実現。
(1) ④	再利用検証・グレーディングの整理	リサイクル材の再利用に向けた製品・部位の適合性評価は未実施。	小型家電・家電 4 品目等を対象に、再利用可能な製品・部位の候補を絞りこみ・決定。	試作・評価を経て、1～2 製品における採用可能な品質を満たす再生材の製造を実現。
(2) ①	使用済小型家電収集量の見える化システムの活用検証	デジタル管理システム自体は開発済みだが、小型家電リサイクルにおけるユースケースへの適合性は未検証。	対象 5 品目の収集状況を把握し、データ登録・可視化の課題と対応策を整理。横展開時の基礎データ構築も併せて行う。	デジタルシステムにおけるデータ登録を実施しており、収集・回収情報が可視化・管理できている状態。
(2) ②	トレーサビリティシステムの活用検証	システムは開発済。小型家電の回収～再利用までの全工程を対象とした運用実績は無く、現場での有効性は未検証。	対象 5 品目を対象に、実際に取得した工程データを活用し、回収・選別・再資源化までの各工程情報をデジタル上で接続したシステム検証を行い、システム導入時の課題や、検証を通じて得られた対応策・改善点を整理。	デジタルシステムにおけるデータ登録完了、回収・選別・再資源化までの各工程情報の可視化と管理の実現。

(2) ③	ビジネスモデル 具体化・検証	バージン材に対する コスト競争力の評価 は未実施。	リサイクルスキーム全 体におけるコスト構 造の把握と、課題の 定量化・対策の立 案。	バージン材同等のコ スト水準の確立。
(3)	LCA の検証・ 評価	バックグラウンドデー タに基づいた CO ₂ 排 出量の評価が未実 施。	本事業でのマテリア ルフローを整理し、 解砕及び選別工程 での使用設備仕様 を基に、CO ₂ 排出 量を 1 次評価。	解砕及び選別工程 の電力使用量や処 理量等の実績値を 基に、CO ₂ 排出量 の最終評価完了。 あわせて、水平利用 対象プラスチック種 の拡大といったシナリ オ分析を行い、横展 開された際のCO ₂ 削 減ポテンシャルの評 価完了。

