

サーキュラーエコノミーに資する プラスチック高度選別技術のDX化

中村保博*
Yasuhiro Nakamura
黒田真司*
Shinji Kuroda
井関康人†
Yasuto Iseki

藤本夏郎‡
Natsuro Fujimoto
筒井一就§
Kazunari Tsutsui

DX Conversion of Advanced Plastic Sorting Technology for Circular Economy

*先端技術総合研究所
†事業推進部
‡知的財産渉外部
§渉外部

要 旨

世界中でプラスチックリサイクルに係る政策や法整備が活発化する中、長年家電リサイクル事業で培ってきた三菱電機のプラスチック高度選別技術へのニーズが高まっている。これを受けて当社は、高度選別技術を活用した新規事業開発を開始し、ブランドオーナーやリサイクラーを始めとする74社(2023年6月27日時点)に及ぶ企業との議論やサンプル試験を重ねてきた。2022年には花王(株)との業務委託契約に基づく広報発表を行い、当社が高度選別技術の社外展開に向けて始動したことを宣言した。また並行して高度選別のDX(Digital Transformation)化技術開発を開始した。今後、誰もが容易に扱えるようにDX化を施した高度選別装置(スマート静電選別)を世の中に普及させると同時に、この装置をベースにした事業を新たに創出し、サーキュラーエコノミー社会の実現に貢献する。

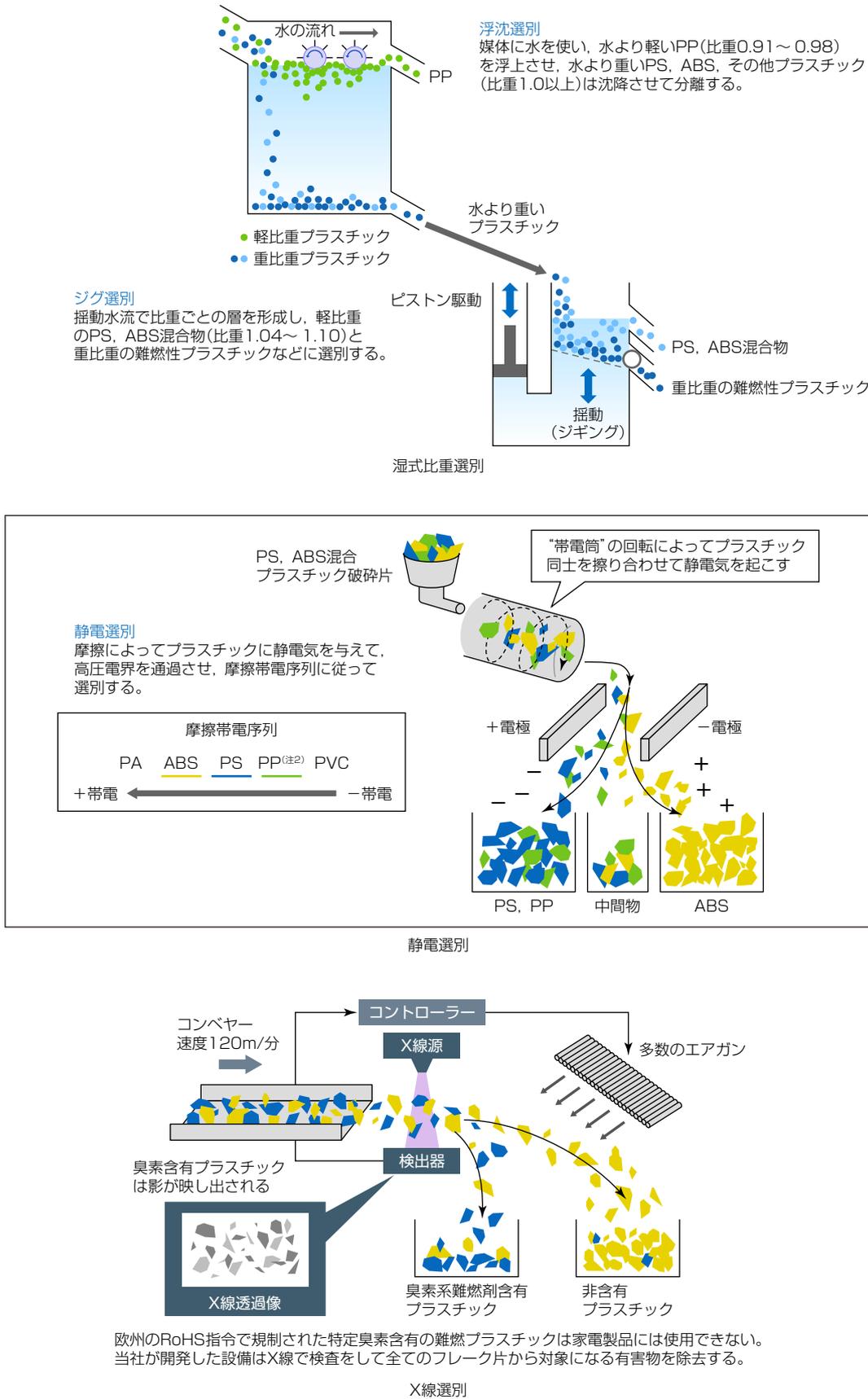
1. ま え が き

コンビニエンスストアのレジ袋有料化やカフェの紙製ストローへの移行等、身近でも脱プラスチックが急速に進んでいるが、プラスチックの使用削減だけでは不十分である。成形が容易で、軽く、低コストなプラスチックはモノづくりに必要不可欠なため、今後脱プラスチックが推進される中でも世界的にプラスチックの消費は増えると予想されている⁽¹⁾。一方、使用済みのプラスチックが適切に処理されないことによる地球温暖化、生態系破壊、資源枯渇といった社会課題の深刻化がある。今後プラスチックの消費が増えるからこそ、皆で手を取り合いこれまで以上に真剣にこれら社会課題に対応していかねばならない。解決策の一部にリサイクルがある。現状の国内でのプラスチックリサイクル率は20%程度であり、リサイクル率の向上が社会課題の解決及びサーキュラーエコノミーの実現に向けて重要になる。

こういった背景から近年、先進国を中心に世界中でプラスチックリサイクルに係る政策や法整備が活発化しており、日本でもプラスチックリサイクルを促進する「プラスチック資源循環促進法」が2022年4月に施行された。法改正を受けて、日用品、自動車、建材、飲料、食品、衣類といった多種多様な業界のブランドオーナーやリサイクラー、又は自治体等がプラスチックリサイクルへの取組みを強めている。当社は家電リサイクル法が施行された2001年度以降、使用済み家電製品のプラスチックリサイクルの技術開発を継続し、技術やノウハウの蓄積を培ってきた。多くの企業でもこのような技術やノウハウの蓄積が必要と考える。廃プラスチックをもう一度材料として使うためには、破碎した混合片から材料ごとに高い純度で選別する高度選別技術が重要になるが、多くの企業が高度選別の導入に当たってオペレーションに課題感を持っており、プラスチックリサイクル実現の上での大きな障害になっていることが分かった。したがって当社はこれまで家電で培ってきた技術をベースに、プラスチック種の適用範囲の検証を行うとともに誰もが容易に扱える高度選別に改善するため、更なる技術開発及び新規事業開発をスタートした。

2. 当社のプラスチック高度選別技術

千葉市にある当社のグループ会社GCS(株)グリーンサイクルシステムズ)では、家電リサイクル法の下回収された廃家電由来の破碎混合プラスチックからABS(アクリロニトリル・ブタジエン・スチレン)、PS(ポリスチレン)、PP(ポリプロピレン)を種類ごとに選別回収し、得られた再生材の他社販売や当社家電製品への再適用(自己循環)を行っている。GCSでは年間1万トン以上に及ぶ再生材を出荷し、そのうち約4,000トンについて自己循環を実現している。純度の高いプラスチックしか自己循環できないため、いかにプラスチックを素材ごとに高純度に選別回収できるかが重要になる。GCSの数ある選別工程で、高純度な再生材を得るために重要な役割を担っているのが図1に示す“湿式比重選別装置”“静電選別装置”“X線選別装置”である。これらの高度選別装置は当社が独自開発し、2010年のGCS創業以来改善を加え続け



(注2) ガラス強化PPは比重が1.0以上

PA：ポリアミド、PVC：ポリ塩化ビニル、RoHS：the Restriction of the use of certain Hazardous Substances in electrical and electronic equipment

出典：(株)グリーンサイクルシステムズ プラスチックリサイクルのフロー
<http://www.gc-s.co.jp/>

図1. 当社の代表的な高度選別技術⁽²⁾

て選別性能を高めてきた。また現場で起こる様々な課題に対応することで、装置のオペレーションノウハウを磨いてきた。中でもプラスチックの帯電特性の違いを利用して選別する静電選別装置は特に汎用性が高く多種多様なプラスチックを高純度に選別できる。静電選別は当社グループが家電業界で初めて(注1)プラスチックリサイクルラインへの適用を実現し、20件以上の特許を持っている。その名のとおり静電気力を利用して対象を選別する技術であり、GCSではABSとPSの選別工程で用いられている。

静電選別の原理について述べる。回転する帯電筒に混合プラスチックを投入しプラスチック片同士を擦り合わせて摩擦帯電させる。その際、摩擦帯電序列に従いABSはプラス、PSはマイナスに帯電する。帯電した混合プラスチックを高電圧を印加した電極間に投入すると、静電気力によってプラスに帯電したABSはマイナス電極側に、マイナスに帯電したPSはプラス電極側に引き寄せられながら落下する。それらを装置の下側に備えた回収容器で別々に受けて選別が完了する。

一般にABSとPSは近赤外線選別も可能だが、過去に実施したGCSの家電プラスチックサンプルを用いた試験で、近赤外線選別に対して当社の静電選別の選別結果が優れることを確認している。また家電とは異なる様々な業界の混合プラスチックサンプルについても、静電選別のスケールダウン機で試験の結果、近赤外線選別が苦手とする黒色プラスチックや、PE(ポリエチレン)とPPのような比較的分子構造の近いプラスチック等についても選別可能な事例が多数確認され、当社の静電選別技術が家電以外の多くのプラスチックに対しても有効であることの確信を得た。ただし、静電選別にはオペレーションの課題がある。リサイクルでは業界によらず常に同じ状態の廃棄製品が回収されてくることはあり得ないため、それらを破碎して得られる混合プラスチック片(原料)の混合比は様々に変動する。例えば原料の混合比が変わるとプラスチックの摩擦帯電量が影響を受け電極間での各種プラスチックの落下位置が変わる。したがって各種プラスチックの純度、回収量を高い状態で維持するには電極電圧や回収容器の仕切り位置の調整が必要になる。この原料変動に対応するオペレーションノウハウがないと、静電選別の性能を最大限に引き出せず再生材の品質を安定化できない。当社はこれまで現場やラボでの実験に加えて、図2に一例を示すように様々なシミュレーション技術を駆使しオペレーションノウハウを蓄積してきた(3)(4)。そこで、オペレーションノウハウ不要で誰もが最大限の性能で安定して高度選別を行えるよう、静電選別をDX化し当社が蓄積してきたオペレーションノウハウを詰め込むことを考えた。

(注1) 2010年6月2日、当社調べ

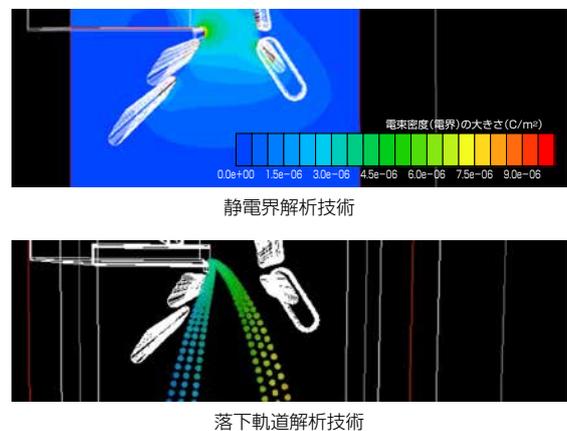
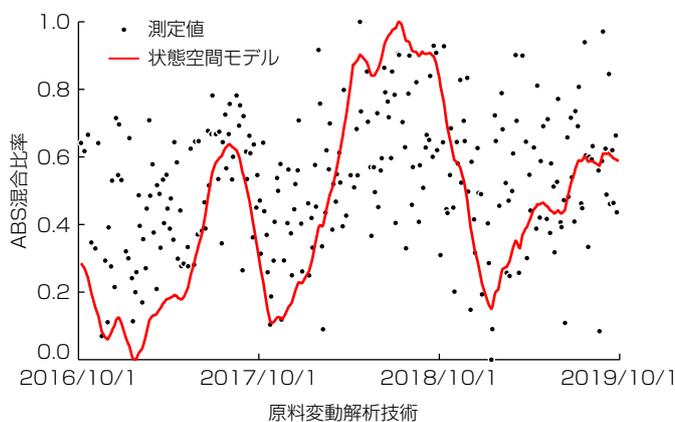


図2. シミュレーション技術の一例

3. 高度選別のDX化(スマート静電選別)技術

現行の静電選別装置は原料変動を検知するリアルタイムなセンシング手段や選別条件の自動制御手段を持たないため、GCSでも選別の全自動化は実現できておらず、定期的な手動による解析と制御にとどまっている。そこで図3に示すように静電選別装置にIoT(Internet of Things)センサーを搭載して選別に影響する因子及び選別結果を常時センシングし解析サーバーでデータを基に最適な選別条件をAIで導出することで、原料変動に対応する最適な選別条件を自動で遠隔制御するシステム“スマート静電選別”を提案した。スマート静電選別では原料混合比、選別結果、電極電圧に加えて、比電荷分布をセンシングすることで高度な自動選別を行う。比電荷とは摩擦帯電後のプラスチック片の帯電量を質量で除し

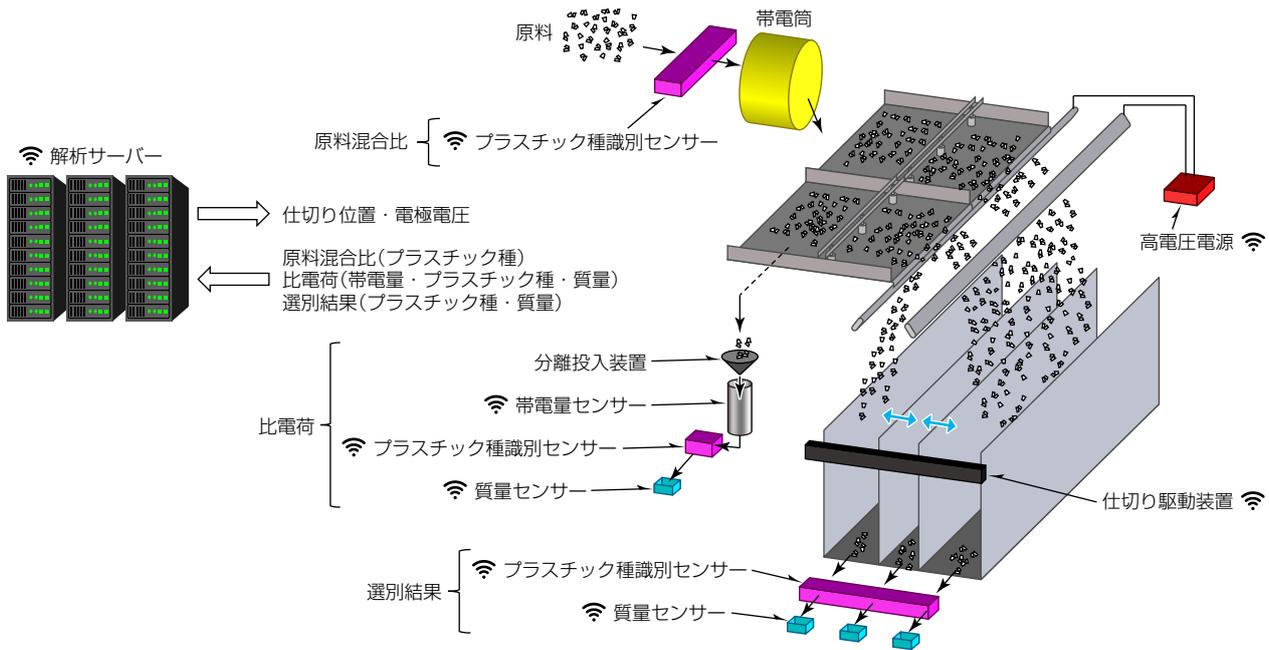


図3. 高度選別のDX化(スマート静電選別)の概念

た物性値である。プラスチック片ごとの形状ばらつきや摩擦帯電時の擦れ方の違いなどによって、同種のプラスチック片であっても比電荷は一定の値にはならず分布を取る。比電荷分布と選別電極間を通過した後のプラスチックの落下位置の分布には相関性があるため、比電荷分布を得ることが最適な仕切り位置を予測する上で重要な手がかりになる。スマート静電選別では帯電筒で摩擦帯電した直後の混合プラスチックの一部を採取し、分離投入装置によって1片ずつ帯電量センサーに投入する。その後、プラスチック種識別センサー、質量センサーで得られた計測データを解析サーバーに送信し比電荷分布を得る。解析サーバー上で、比電荷分布を基に落下位置の分布の予測を行うことで最適な仕切り位置を決定し遠隔で自動制御する。さらに選別後の各容器に回収されたプラスチックについてもプラスチック種識別及び質量計測を行うことで、各回収容器のプラスチックの選別結果(純度及び回収量)を算出する。このようにして得られた予測値と実測値との照合も随時行い解析することで、原料変動による仕切り位置の決定精度を高めていく。

もともとスマート静電選別はGCSの現場負担軽減や家電プラスチック選別性能の更なる改善を目的に考案したため、ターゲットを家電プラスチックに限定し開発を進めてきた。しかし、原料変動に対するオペレーションノウハウを必要とせず自動選別可能な特長を持つことから他社へ高度選別を普及させる上でも有用と考えて、ターゲットを家電プラスチック以外にも拡大し開発を行う方針転換を行った。将来的に多種多様な業界に装置を展開し、あらゆる原料に対するデータを収集するほどスマート静電選別装置の汎用性や選別性能は高まっていく。

スマート静電選別の構成要素である各種センサーについてはラボでの検証を開始している。比電荷分布を得るための肝になるのが帯電量センサーだが、プラスチック片の帯電量を自動かつ連続的にファラデーカップ並みの高精度で計測できる帯電量センサーが市販されていないため、図4に示すスマート静電選別向けの帯電量センサーを開発した。開発した通過型ファラデーケージ式の帯電量センサーは二重円筒構造になっており上方から帯電プラスチック片を落下させ、内側管を通過する際に生じる±1～4V程度の静電誘導電圧波形をマルチメーターで計測し、得られた波形をパソコンで解析することで帯電量に換算する。外側管は電磁シールドの役割を果たしている。家電プラスチックを用いた試験の結果、従来ラボで用いてきたファラデーカップによる手作業での帯電量計測と遜色ない精度(相関係数R=0.9996)で自動計測可能なことを確認できた。別途開発した分離投入装置のラボ検証も完了した。その他のプラスチック種識別センサーや質量センサーについては市販のセンサーを選定し検証を進めている。質量については直接計測だけでなく画像解析による予測の両面に取り組んでいる。今後ラボでの検証が完了後、これらをGCSのラインに組み込んで家電プラスチックでのセンシングの実証を行う計画である。

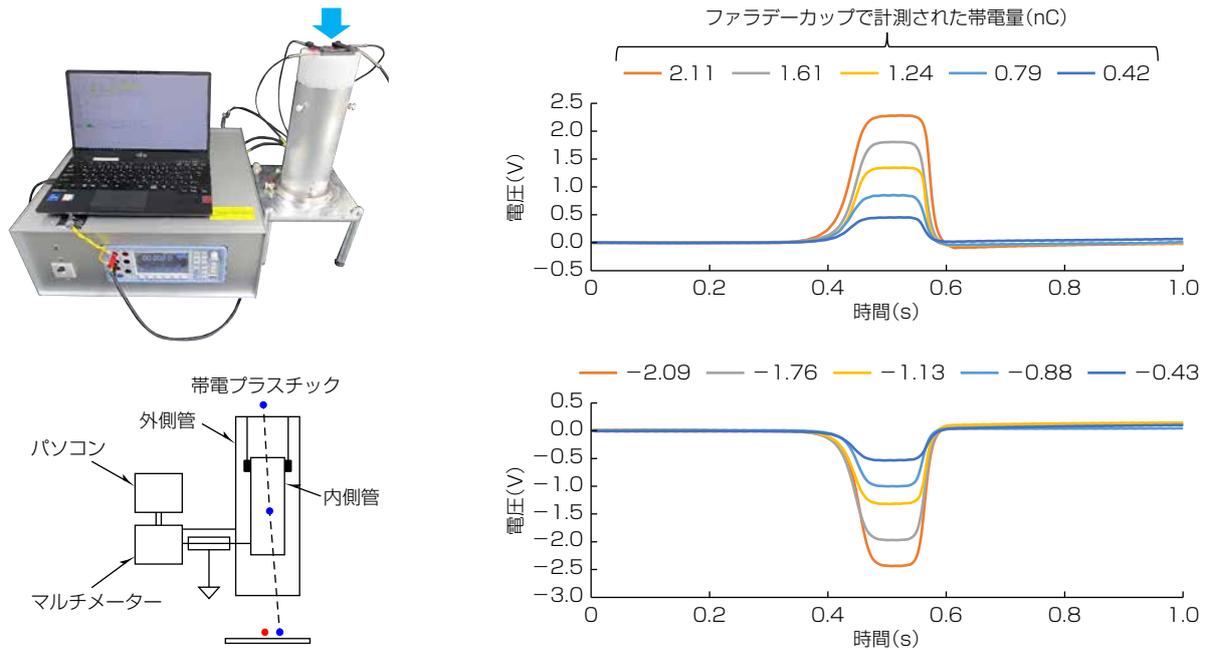


図4. 帯電量センサー及び家電プラスチックを投入した際の静電誘導電圧波形

4. 社外展開へ向けた取組み

2022年に花王(株)と業務委託契約を結んで、シャンプー容器等から出た混合プラスチックに当社の静電選別を試行し、高純度に選別できることを実証した。これを基に“三菱電機の高度選別技術による花王提供の日用品プラスチックの選別試験を開始”というタイトルでプレスリリースを発表した。これによって当社が家電で培った高度選別技術の社外展開に向けて始動したことを世の中に初めて伝えた。さらに2023年1月には社外展開へ向けた推進母体として、本社の営業本部内に新組織“リサイクル共創センター”を設立した。今後も社内外的関係者との議論や試験を重ねて、装置形態や事業モデルを改善していき、静電選別を核とした当社高度選別技術の社外展開による新規事業化を進めていく。

5. むすび

多種多様な業界のプラスチックサンプルで評価を行い、当社の高度選別技術が家電以外の多くのプラスチック材料に対しても有効であることの確信を得た。また当社高度選別技術の社外展開のキープデバイスとして、高度選別をDX化したスマート静電選別を考案し、構成要素である各種センサーについてラボでの検証を開始した。

当社のリサイクル技術とデジタル技術を融合させることで誰もが高度選別を容易に扱える形に変えて世界に普及させ、サーキュラーエコノミー社会の実現に貢献できることを願っている。高度選別技術及びその周辺の総合的な知見をいくら持っていても当社だけではサーキュラーエコノミー社会を実現できない。循環の中に存在する多くの企業・機関・消費者の人々と協力し課題解決へ向かっていきたい。

参考文献

- (1) 一般社団法人 プラスチック循環利用協会：2021年 プラスチック製品の生産・廃棄・再資源化・処理処分の状況 マテリアルフロー図 (2022)
<https://pwmi.or.jp/pdf/panf2.pdf>
- (2) ㈱グリーンサイクルシステムズ ホームページ
<http://www.gc-s.co.jp/>
- (3) 稲永康隆：プラスチックリサイクルにおける静電選別技術，粉体技術，7，No.8，738～742 (2015)
- (4) 黒田真司，ほか：静電選別のプラスチック回収率向上に向けたデータ駆動型の選別条件決定技術の開発，第33回廃棄物資源循環学会研究発表会，181～182 (2022)