

欧米のポリオレフィン・ メカニカルリサイクルの動向

メカニカルリサイクル (MR) はシンプルでLCIA的に優れ、エネルギー消費とCO2排出がバージン樹脂よりもはるかに少ない。EUの再生材含有量規制案が発表され、活発化するポリオレフィン (PO) のMRに焦点を当て、動向を調査した。特に、MRの先端選別技術による食品包装用途に使用できるPO再生材の製造、POメーカー (Borealis、LyondellBasell、TotalEnergies、Dowなど) のMR事業の強化・拡大である。MRの市場、規制、プロセスについても解説した。日本のMRを推進する上で、欧州の状況は参考になると考えられる。

2024年12月



株式会社 旭リサーチセンター

シニアリサーチャー 府川 伊三郎

まとめ

◆ポリオレフィン (PO:PE・PP) と PET について、それぞれのメカニカルリサイクル (MR) とケミカルリサイクル (CR) について比較した。 (P. 4~7)

◆MR の先端技術 (製品) として、次のものが注目される。

①Werner&Mertz (ドイツ) の再生 HDPE 100%のボトル、カラー選別による赤色 HDPE 再生材を 50%使用した赤色のパイプクリーニング用ボトル。

②ALPLA (オーストリア) の再生 HDPE100%ボトル、カラー選別によるカラーHDPE 再生材。

③Veolia UK の再生 HDPE ミルクボトルのクローズドループ (ボトル to ボトル) の工場拡大。

④EREMA (オーストリア) の押出機と ReFresher (脱臭装置) の組合せ (世界累計 100 台販売)、および二重ろ過システムを搭載した新型押出機。

⑤TOMRA (ノルウェー) の食品グレードと非食品グレードの選別用 AI (GAINnext™)。 (これにより、EU(EFSA)食品包装安全基準の純度 95%以上の rPET、rPP、rHDPE が製造でき、ボトル to ボトルに使用可能)

⑥Recycleye (イギリスの自動化技術企業) らは「OMNI」プロジェクトで、AI と機械学習を活用して食品グレードの PP・MR に成功。また、VALTRIS (ベルギーのリサイクラー) は、Recycleye と共同で、AI の助けを借りて動作する選別ロボットに初めて投資。

⑦Berry Global (米国) は AI を使用した「CleanStream」プロセスを開発し、食品グレードの PP 再生材の製造に成功。

⑧電子透かしイニシアティブ「HolyGrail 2.0」は AIM が主導し、電子透かし技術を Digimarc (米国) が選別技術を Pellenc ST (フランス) と TOMRA が担当して、硬質 PP、硬質 PE、PET、フレキシブルについてテストを行い、良好な結果が得られたことから、2024 年にフランスで社会実装。 (P. 8~22)

◆2016 年以来、大手 PO メーカーの Borealis (オーストリア)、LyondellBasell (オランダ)、TotalEnergies (フランス)、SCGC (タイ:ポルトガルで事業展開) は、既存のリサイクラーを買収してリサイクル事業に新規参入した。また、Dow (米国、欧州)、Ineos、Nova Chemicals (カナダ)、Repsol (スペイン) は、それぞれリサイクラーと提携し新規参入し

た。これらのリサイクラーは、技術的に難しい LDPE のフィルム to フィルムのリサイクルを製造しているところが多い。また ELV 規則案で再生材最低含有量が示されたことから自動車用再生 PP に注力している。2023 年以降、これら既参入 PO メーカーはさらに買収、提携、自社開発を積極的に進めており、生産能力は合計で約 50 万トン/年に達した。また、Borealis は TOMRA、Zimmermann と共同で高純度な再生 PE と再生 PP を製造する MR デモ工場を稼働中で、ブランドオーナー（P&G など）にサンプルを提供中。（P. 23～27）

◆欧州で 2022 年に製造されたプラスチック 5,410 万トンの内の MR（post-consumer）再生材は 670 万トン（12%）であった。Plastics Recyclers Europe は、欧州のリサイクル業界は市場の不況と輸入品の増加で窒息しそうな厳しい状況にあり、リサイクラーの倒産が多発していることをニュースリリースで発表した。（P. 28～32）

◆EU はプラスチックに関する 3 つの規制案を発表した。①容器包装（廃棄物）に関する規則（PPWR）案（2024 年 3 月発表、再生材最低含有量～30%規則を含む。特に食品容器包装に使用できる PO 再生材の製造と供給が課題）、②CR に「燃料除外マスバランス方式」を採用する法律案（2024 年 2 月発表、プラスチックボトルの再生材含有量規制の定義を明確にするためのもの）、③ELV（廃車）規則案（2023 年 7 月発表、再生材含有量 25%（そのうち 25%は廃車由来）規則を含む。自動車用プラスチック（特に PP）再生材製造のための体制整備が急がれる）である。（P. 32～35）

◆(1) 米国では、MSW（都市固形廃棄物）を MRF（マテリアルリカバリー施設）で処理している。一方、欧州では、MSW の混合収集とプラスチック分別収集がほぼ半々である。
(2) 廃プラ混合物の究極的な選別例：光学選別機（NIR）でプラスチックの種類別（PET、HDPE、PP、PS、その他）、形状別（フィルム、ボトル、トレーなど）、色別に選別可能。
(3) 選別機器（バリスティックセパレーター、風力シフター、浮遊選別法、静電選別装置、X 線分析選別装置（臭素系難燃剤含有プラスチックの選別に有効）、NIR）を解説。（P. 37～41）

◆一般には PO 再生材はバージンプラスチックより品質が低い。力学特性不足、異物（不純物）、外観、色、臭い、品質のバラツキなどがあり、これらの問題を解決すべく改良技術が開発されている。（P. 42）

目次

はじめに.....	1
用語・略語.....	2
1 リサイクルの中での P0・MR の位置づけ.....	4
2 P0・MR の先端技術と製品.....	8
2.1 Werner&Mertz（ドイツ）による再生 HDPE ボトル.....	8
2.2 Veolia UK による HDPE ミルクボトルのクローズドループリサイクル.....	9
2.3 ALPLA（オーストリア）の HDPE 再生材.....	11
2.4 EREMA（オーストリア）のリサイクル機器.....	12
2.5 TOMRA（ノルウェー）による高度選別の例.....	14
2.6 AI 活用の食品グレード選別：「OMNI」プロジェクト.....	18
2.7 AI 活用の Berry Global の食品グレードの選別技術「CleanStream」.....	18
2.8 欧州の電子透かしイニシアティブ「HolyGrail 2.0」.....	21
3 MR 事業既参入 P0 メーカーの事業拡大状況.....	23
3.1 概要.....	23
3.2 P0 メーカー各論.....	23
4 欧州・米国・日本のリサイクルの状況（市場と規制）.....	28
4.1 日欧米のリサイクルの概況と樹脂別需要.....	28
4.2 欧州のリサイクル市場.....	30
4.3 米国のリサイクル市場.....	32
4.4 欧州のリサイクル関係の規制.....	32
おわりに.....	36
参考文献.....	36
Appendix.....	37
1 MR のフロー（工程）と技術.....	37
1.1 廃プラの収集（collection）、選別（sorting）、再生処理（reprocessing）.....	37
1.2 米国・欧州の MRF（マテリアルリカバリー施設）.....	38
1.3 プラスチック混合廃棄物の究極的選別.....	38
1.4 選別技術と選別機器.....	40
2 再生 P0 の品質課題と改良技術.....	42

はじめに

本レポートは、2022年9月に発行したARCレポート RS-1059「プラスチックのメカニカルリサイクル（欧米のポリオレフィンMRの動向）」（参考文献(1)）を基に、それ以後の情報を中心にまとめた続編である。

本文では、イントロとして、まずリサイクルの中でのポリオレフィン（PO）のメカニカルリサイクル（MR）の位置づけについて解説した。次に、PO・MRの先端技術と製品のトピックスについてその開発の経緯を含めリストアップした。そして、既にMR事業に参入している欧米のPOメーカーの最近活発な事業拡大のニュースをまとめた。そして、欧米のリサイクル市場の状況と各種規制案の概要と規制案がリサイクルビジネスにどんな影響を与えているかを解説した。

また、Appendixでは①MRのフロー（工程）と技術（選別機器）と②再生POの品質課題と改良技術について解説した。参考文献(1)から抜粋したものである。本文を理解する上で必要な基礎的資料と考えた。

欧州は循環経済を進めるため、再生材含有量規制を含むPPWR案やELV案を発表しており、リサイクル事業の重要性が急速に高まっている。これら規制に対応すべくMRとケミカルリサイクル（CR）の事業が大きく動き出している。日本においても再生材含有量規制は2025年にも立法化されるといわれる。先行する欧米、特に欧州のPO・MRの状況を知ることは、日本のPO・MRの推進に役立つと考えた。

用語・略語

(1) 全般(順不同)

- ・メカニカルリサイクル (mechanical recycling (略:MR)) : 粉碎、洗浄、造粒と機械的に廃プラをリサイクルする方法。マテリアルリサイクルと同じ意味。
- ・ケミカルリサイクル (chemical recycling (略:CR)) : ポリマーを分解して、モノマーや化学品にする化学反応を含むリサイクル法。
- ・水平リサイクル : 使用済みプラスチック製品を (リサイクルして)、同じ製品に再生 (して、使用) すること (ボトル to ボトル、シュリンクフィルム to シュリンクフィルムなど)。
- ・ダウンリサイクル : 使用済みプラスチック製品を (リサイクルして)、元の製品より低付加価値の製品に再生 (して、使用) すること (PET ボトルからシートまたはファイバー、容器包装材料からベンチ、園芸製品)。
- ・リサイクラー (Recycler) : 廃プラの再生処理により再生材を製造する企業。
- ・コンバーター (Converter) : プラスチックの成形加工メーカー。
- ・再生材 : 本レポートでは再生プラスチックの意味で使用。
- ・バージンプラスチック : (通常の石油化学で製造される) 未使用プラスチックのこと。
- ・ベール : 廃プラを圧縮して、サイコロ状にしたもの (右写真、出所 : 参考文献(1)「Polymer Comply Europe.」の参考文献(10))
- ・廃プラ (廃プラスチック) : 使用済みプラスチック、プラスチック廃棄物と同じ意味。
- ・シュリンクフィルム : 熱をかけると縮むフィルムで、主に包装用に使われる。
- ・ストレッチフィルム : 梱包用のフィルムで、ぐるぐる巻くと静電気でフィルム同士がくっつくため、不定形物の梱包、荷崩れ防止、養生など幅広く利用される。



(2) 略号と英用語(順不同)

- ・ELV (End of Life Vehicle) 規則案 : 現行の ELV 指令と型式認証の再使用、再利用、再生の可能性に関する指令 (3R 指令) を 1 つにまとめるもの。

- ・PCR (Post Consumer Recyclate または Post Consumer Recycled (Plastics)) : 消費者が使用した廃プラをリサイクルした再生材のこと。
- ・PIR (Post Industrial Recyclate または Post Industrial Recycled (Plastics)) : 産業で使用された廃プラをリサイクルした再生材。
- ・PPWR (Packaging and Packaging Waste Regulation) : 包装・包装廃棄物規則
- ・MRF (Material Recovery Facilities) : マテリアルリカバリー施設 (MSW の選別施設) (マテリアルリカバリーセンターやマテリアルソーティングセンターと同じ)。
- ・MSW (Municipal Solid Waste) : 都市固形廃棄物 (プラスチック、金属、紙・段ボール、ガラス、生ごみなどを含む混合廃棄物)。
- ・NIR (Near Infra-Red) : 近赤外光学選別機 (識別機)。
- ・AI (Artificial intelligence) : 人工知能
- ・LCIA (Life Cycle Impact Assessment) : ライフサイクル(環境)影響評価

(3) プラスチックの略号

- ・PE : ポリエチレン
- ・LLDPE : 線状低密度ポリエチレン、LDPE : 低密度ポリエチレン
- ・PP : ポリプロピレン
- ・PO : ポリオレフィン (本リポートでは、PE と PP の総称)
- ・PS : ポリスチレン
- ・PET: ポリエチレンテレフタレート
- ・rPE : 再生 PE、rPP : 再生 PP、rPET : 再生 PET

(4) 欧米の政府機関、業界協会など

- ・APR : Association of Plastic Recyclers (米国プラスチックリサイクラー協会)
- ・EFSA : European Food Safety Authority (欧州食品安全機関)
- ・EPA : Environmental Protection Agency (米国環境保護庁)
- ・FDA : Food and Drug Administration (米国食品医薬品局)
- ・Plastics Europe : 欧州プラスチック協会
- ・PRE (Plastics Recyclers Europe) : 欧州プラスチックリサイクラー協会

1 リサイクルの中での PO・MR の位置づけ

リサイクルにはMRとCRがあるが、これまで欧米で実用化されていたのはMRだけである。しかし、近年、MRを補完するものとして、CRの事業化が注目されている。

また、現在、最もリサイクルが必要とされるのはシングルユースプラスチック（容器包装プラスチック）のリサイクルであり、そこで使われているのはPET（ボトルなど）とPE・PP・PSグループの2つがメインである。PETは、PE・PP・PSグループに比べかなりMRが進んでいる。また、PETのMRは日本が進んでおり、一方、PE・PP・PSのMRについては、欧州が進んでいる。これらの観点から比較したものを表1に示す。

表1 PETとPE・PP・PSのMRとCR

リサイクルの種類	プラスチックの種類	ステージ	日本	欧州	米国	再生材の品質 (物性、色、臭い、外観、異物)	収集・リサイクル技術の特徴	代表的な再生製品
メカニカルリサイクル (MR)	PET	実用化が特に進んでいる	◎	◎	○	パージン並み	分別収集やデポジット、選別、アルカリ洗浄、固相重合	1. ボトルtoボトル 2. ボトルtoファイバー 3. ボトルtoシート
	PE・PP・PS	実用化	○	◎	○	パージンより劣る (臭いは解決技術あり)	①日本は分別収集、米国は混合収集、欧州は両方半々 ②事業廃プラの利用が多い	水平リサイクル（HDPEボトルやLDPEシュリンクフィルム）もあるが、ダウンリサイクル（ベンチ、パレットなど）が多い
ケミカルリサイクル (CR)	PET・PS (解重合法)	開発・プラント建設中	○	○	○	パージンプラ並み (大規模生産による工業的実証はこれから)	各種技術の開発とプラント建設中（大競争）	水平リサイクルがねらい 実証はこれから
	PE・PP・PS (熱分解法)		○	◎	○			

出所：各種資料より旭リサーチセンター作成。

(1) PET の MR

PET、特にPETボトルのMRは実用化が進んでいる。地域的には日本が進んでおり、欧米よりも高いボトルの回収率とリサイクル率を誇っている。サントリー、日本コカ・コーラ、アサヒ飲料などが加盟する全国清涼飲料連合会は、「PETボトルの『水平リサイクル』」であるボト

ルtoボトル比率を2030年に50%を目指すこと」を宣言した。使用済みPETボトルだけから新しいPETボトルをつくる「100%ボトルtoボトル」は既に実用化されている。

このようにPETボトルのリサイクル率が他のプラスチックに比べ際立って高いのは、個別収集システムの構築と固有の技術開発の両方に成功したからである。すなわち、①使用済みPETボトルの分別収集やデポジットなどのシステム構築、②カラーボトルの不使用、③キャップとスリーブ（ラベル）の材料選択と分別（PETより密度の低いポリオレフィン〈PEとPPの総称〉の採用と密度差を利用した分別）、④アルカリ洗浄と固相重合時の脱気による不純物と臭い原因物質の除去、⑤固相重合による分子量アップによる物性回復などである。これらの合わせ技により、バージンとほぼ同等の品質（力学特性、外観、色、臭い、食品への直接接触可能など）が実現した。プラスチックリサイクルの中で画期的な出来事である。

(2) PE・PP・PS の MR

①PE・PP・PS の MR は、PET に比べると、リサイクル率の点から言っても技術的に言っても遅れている。バージン並みの品質の HDPE 再生材ボトルが先駆的に実用化されているが、多くはバージンプラスチックに比べ品質が劣り、そのため用途は限定されダウンリサイクルが多い。

②欧州は日本や米国よりもリサイクル率が高く進んでいるが、これは 10 年来循環経済（資源の有効活用）の基本方針を推進してきたことや、それをバックにリサイクル技術・システムが発展し、大規模なリサイクラー（Veolia 〈フランス〉、SUEZ 〈フランス〉、Remondis 〈ドイツ〉）やユニークなリサイクル機器メーカー（EREMA 〈オーストリア〉、TOMRA 〈ノルウェー〉、Pellenc ST 〈フランス〉）が誕生し、成長してきたためである。

(3) PET の CR

PETボトルのEU再生材含有量規則（2025年までに25%以上、2030年までに30%以上）やそれを上回る飲料メーカー（サントリー、日本コカ・コーラ、アサヒ飲料など）の意欲的目標（2030年までに50%以上）を実現するためには、MRに適した汚染の少ない使用済みボトルが大量に必要となるが、その確保は容易でない。汚れた廃PETでも解重合して得られるモノ

マーをその段階で精製できることからCRが注目されている。現在、各種の化学分解法CR技術（グリコール分解法、メタノール分解法、アルカリ加水分解法）が開発、事業化されている。

なお、PETのMRの繰り返し可能回数は着色などから3～5回程度という情報がある。これが事実とすれば、リサイクル回数が原理的に限界のない点でCRが注目される。

(4) 混合プラスチック(PE/PP/PS)の熱分解法ケミカルリサイクル

混合プラスチック（PE/PP/PS）の熱分解法はクローズドループを形成でき、マスバランス方式により所望の再生材製品にリサイクル含有量を配分できることから化学業界が注目し、欧州のナフサクラッカー（POメーカー）はこぞって事業化を表明した。マスバランス方式は、Ellen MacArthur Foundation（エレン・マッカーサー財団）とBASF（ドイツ）が考案したいわば「現代の魔法の杖」である。

CRではMRに比べ不純物や異物を除去しやすいので、バージン並みの品質が得られること、さらにCRの再生材は高純度なので、食品に直接接触する容器包装にも使用できると期待されている。ただし、工業的な大規模実証はこれからである。

欧米の熱分解法CR企業は一律に、熱分解法CRを進める理由として、①CR用の原料廃プラはMRができない汚染された廃棄物で、CRをしなければ埋め立てられ、焼却されるものであること、②顧客のブランドオーナーより再生材供給の要請が強いことを強調している。

(5) MR 再生材とバージン材の LCIA

MRはCRに比べ工程が短く、設備費と用役費（電気・スチーム・水など）が安いのでコストが低い。このため、汚染の少ない使用済みプラスチックを一定量収集できる場合には、MRは経済的に有利な方法である。

表2に熱分解油メーカーのPlastic Energyが発表したLCIA（ライフサイクル影響評価）のデータを示す。メカニカルリサイクルされたLDPEは、バージンLDPEはもとより、ケミカルリサイクルされたLDPEよりもはるかにCO₂排出量と資源の消費の観点から優れている。

表 2 CR 再生 LDPE、バージン LDPE、MR 再生 LDPE の LCIA 比較

指標（単位）	ケミカルリサイクルされた LDPE	バージン（化石燃料由来） LDPE	メカニカルリサイクルされた LDPE
気候変動（kgCO ₂ -eq）	0.86	1.9	-0.45
資源の消費（MJ） （Resources Depletion）	39.54	80.08	22.14

出所：Plastic EnergyのためにQuantisが作成したもの（2020年9月）

出所：<https://plasticenergy.com/wp-content/uploads/2020/10/Plastic-Energy-LCA-Executive-Summary.pdf>

2 PO・MR の先端技術と製品

先端製品の再生HDPE100%ボトルや赤色HDPE50%再生ボトル、ミルクボトルのクローズドループリサイクル、先端リサイクル機器（押出機&脱臭機、光学識別機）、AI（人工知能）利用のプラスチック選別の実例、電子透かしイニシアティブについてトピックス的にまとめた。

2.1 Werner&Mertz(ドイツ)による再生 HDPE ボトル

(1) Werner&Mertz の世界初の再生 HDPE 100%ボトルの工業化(2019 年 5 月)

①リサイクルの成功：Werner&Mertz ホームページ抜粋¹

「MR により、使用済みの PET ボトルが再び PET ボトルになり、HDPE ボトルは再び HDPE ボトルになり、PP クロージャーは再び PP クロージャーになる（図 1）。本当のアップサイクリング。Werner&Mertz の数千万本の PET ボトル、HDPE ボトル、PP クロージャーは、その原材料が“イエローバッグ”（ドイツの家庭用プラスチックの分別収集袋）の廃棄物収集から得られたものである。」



図1 Werner&Mertz の PET、PP、HDPE の 100%再生品

出所：Werner&Mertzホームページ（2024年）

②この革新は、Werner&Mertz が The Green Dot および EREMA（オーストリアの機器メーカー）との共同プロジェクトで開発した HDPE の特別なリサイクルプロセスによって可能になった²。

¹ <https://wir-fuer-recyclat.de/recyclingerfolge/>

² <https://www.ereama.com/en/success-stories/first-cosmetic-packaging-on-the-market-made-of-100-percent-recycled-materials--32/>
<https://www.ereama.com/en/public-relations-news/global-innovation-in-cosmetics--2317/>

Werner&Mertz は、この 100%の再生 HDPE でつくられた世界初のボトルの開発で、ドイツ 容器包装賞を 2016 年 9 月に受賞した。ボトルの生産は ALPLA (オーストリア) が担当した。

(2) パイプクリーナー用ボトル“rorax”を 50%赤色 HDPE 再生材(PCR)で製造

2024年4月：Werner&Mertz と ALPLA のリサイクル技術革新

2023年以来、赤色の廃HDPEを“イエローバッグ”から回収し、図2の“rorax”ブランドの パイプクリーナーに50%使用している。約23万本のボトルが循環されている。



図2 Werner&Mertzの“rorax”(パイプクリーナー)用ボトル

出所：脚注3

ALPLAのリサイクルブランドであるALPLA recyclingは、先端のリサイクル施設で使用済み HDPEを、ナチュラル、白、黄、青、緑、赤の「単色」に従って分類。追加の細かい選別ステップにより、個々のカラーストリームに分離することで、赤などの着色プラスチックのリサイクルが可能となった。

2.2 Veolia UK による HDPE ミルクボトルのクローズドループリサイクル

Veolia UK は再生 HDPE ボトルのクローズドループを 2019 年以来進めており、設備を拡大してきた。

①「HDPE ミルクボトルが 10 回リサイクルされる」 2019 年 3 月に Veolia UK 発表

Veolia UK は、ロンドン近郊の Dagenham 工場で、使用済み HDPE ボトルを回収し、NIR (近

赤外) 選別、洗浄など経て再生 HDPE ペレットを製造。これから、再生 HDPE のミルクボトルやヨーグルト容器が製造される。生産能力は、1 万トン/年である。10 回りサイクルすることができる。

②「イギリスで再生 HDPE ミルクボトルを年間1億本以上に拡大する」2021年3月に Veolia UK 発表

③Veolia UK と One Stop (コンビニ) は提携して、38 万本のミルクボトルの循環を目指す。2023 年 8 月に Veolia UK 発表

④図 3 に再生 HDPE ミルクボトルのリサイクルフロー (The MILKY WAY) を示す。リサイクルの工程がよくわかる。ボトル本体とキャップの分離にはカラー光学識別機を使っている。また、有機物除去 (脱臭) 工程があることが記載されている。

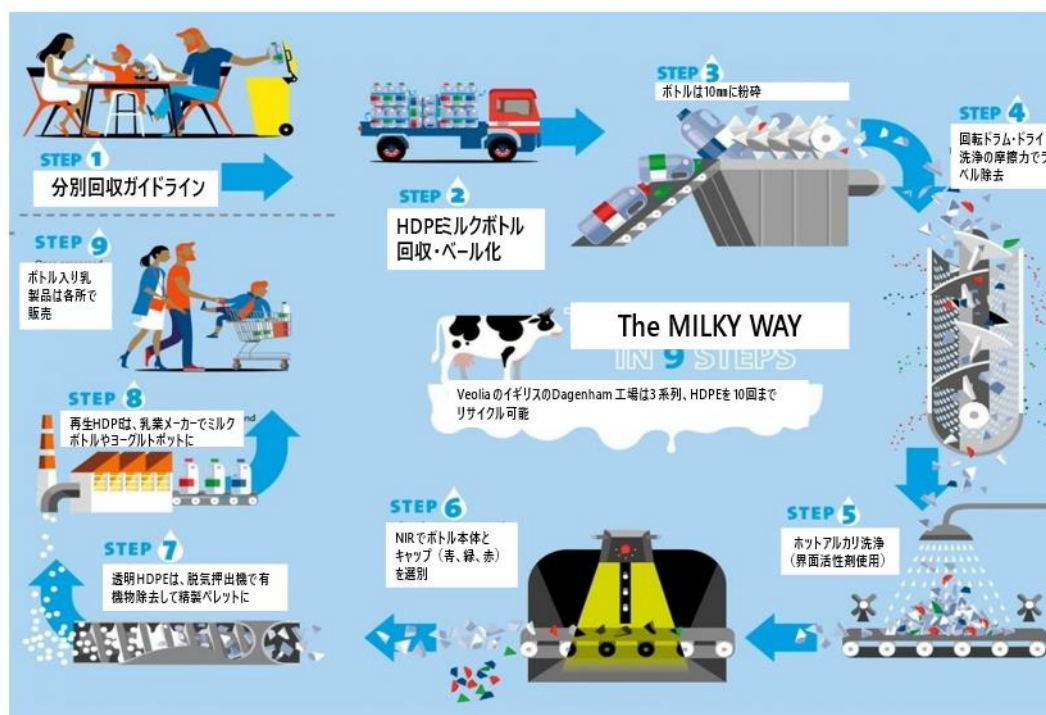


図 3 再生 HDPE ミルクボトルのリサイクルフロー

出所: Veolia UKホームページ (ヴェオリア・ジャパン提供)。

⑤ALPLA UK が、再生材含有率が 30%以上のミルクボトルを供給していると推定される。

2.3 ALPLA(オーストリア)の HDPE 再生材

- ①ALPLA はオーストリアをベースに、グローバルに PET ボトルと HDPE ボトルを生産する大手コンバーターである。ボトルは通常延伸ブロー成形でつくられる。また、リサイクル事業も行っており再生 PET (rPET) 26.6 万トン/年と再生 HDPE (rHDPE) の 8.4 万トン/年の生産能力（設置されているものと予定のもの）を有している。
- ②Werner&Mertz とは長年緊密な提携関係があり、図 1 の Werner&Mertz の 100%再生 PET ボトルや 100%再生 HDPE ボトルを供給している。また、図 2 の Werner&Mertz の赤色の“rorax”（パイプクリーナー）用ボトルも供給している。
- ③ALPLA は、現在、ドイツ、イタリア、メキシコ、オーストリア、ポーランド、ルーマニア、スペイン、南アフリカ、タイの 9 カ国に 13 の工場（うち 4 つの合弁会社）で構成されている。HDPE のリサイクル工場はスペイン、メキシコにある。
- ④ALPLA の目標は、2025 年までに、生産されるすべてのパッケージに占める処理済み PCR 材料の割合を少なくとも 25%に増やすことである。さらに、それまでにすべての包装ソリューションが完全に「リサイクル可能」になることである。これを達成し、今後もしリサイクルを推進していくために、ALPLA は毎年約 5,000 万ユーロを投資し、自社のリサイクル活動を拡大する。
- ⑤上記の Werner&Mertz の赤色の“rorax”（パイプクリーナー）用ボトルに関して、次のようにコメントしている³。「ALPLA は、HDPE のリサイクルに関してはカラー選別に焦点を当てている。これにより高品質の HDPE リサイクルカラーストリームを構築し、長期間にわたりパッケージのリサイクルループを保つ。例えば、“イエローバッグ”中の赤色の廃 HDPE を赤色の rHDPE に、白を白に、黄色を黄色に、青を青に変えると、カラー顔料の使用が減り、さらに混ざり合いを防ぎ、材料の色の「グレー化」を防ぐことができる。これにより、持続可能なリサイクル材料を使用した多様なカラーパッケージを製造することができ、顧客のニーズを満たす。」

³ <https://blog.alpla.com/en/blog/products-innovation-recycling/werner-mertz-and-alpla-create-recycling-innovations/04-24>

⑥ALPLAはArla Foods UKのために、「Eco-Bottle」を開発し、供給している。このHDPEミルクボトルは通常品より20%軽量で、再生材含有量は40%以下である。

⑦メキシコ・Tolucaでは年間3万トンのrHDPEを生産しているが、再生材1kg当たりのCO₂排出量は0.69kg-CO₂eで、バージンHDPE(2.32kg-CO₂e)よりも70%少ないと発表した。

2.4 EREMA(オーストリア)のリサイクル機器

(1) EREMAのリサイクルマシン(押出機)とReFresherの組合せ

EREMAのリサイクルマシン(押出機)とReFresherの組合せ(図4)の需要が増加し、世界で合計年間100万トンの総生産能力に達した。ReFresherは、常圧高温の不活性ガスとプラスチックを向流接触させて、押出機では脱気できなかった比較的高沸点の揮発成分を除去して、脱臭していると推定される。

EREMAのリサイクル装置で製造されたPCR-HDPE(再生材)は、FDAに認定され食品や飲料と直接接触するパッケージの製造に最大100%の割合で使用できるようになった。一方、EUでは、再生材ペレットの食品用使用許可は“novel technology”(EU Regulation 2022/1616)に基づいている。EREMAはリサイクラーに対して、EFSA(European Food Safety Authority)評価プロセスの必要データや証明の取得を支援している。

EREMAグループの2022/2023会計年度の売上高は約3億5,500万ユーロ、350台の押出機(図5)が納入され、その結果、160万トンのリサイクルペレットのリサイクル能力が増加した。

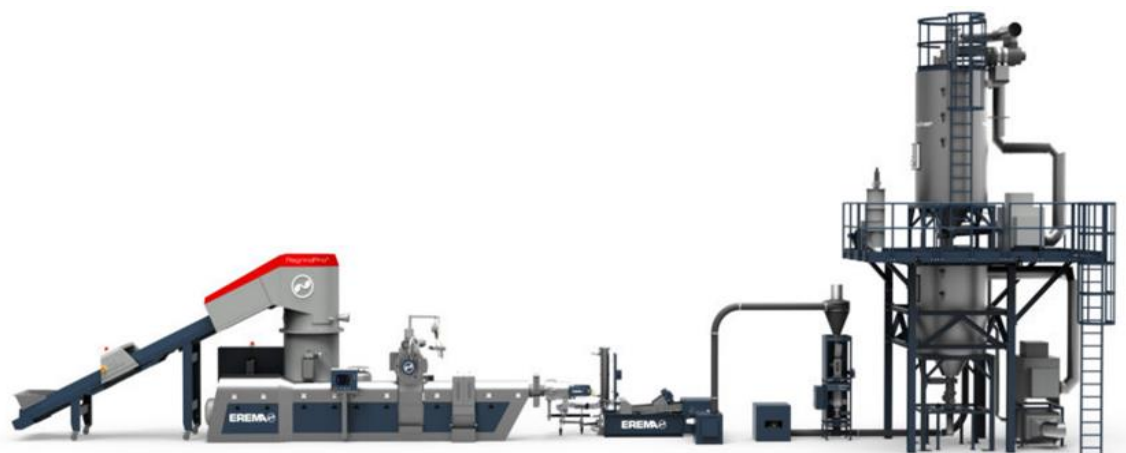


図4 EREMAのINTAREMA®TVEplus®RegrindPro® plus ReFresher(脱臭機)

出所: EREMAのホームページ(エレマジャパン提供)。

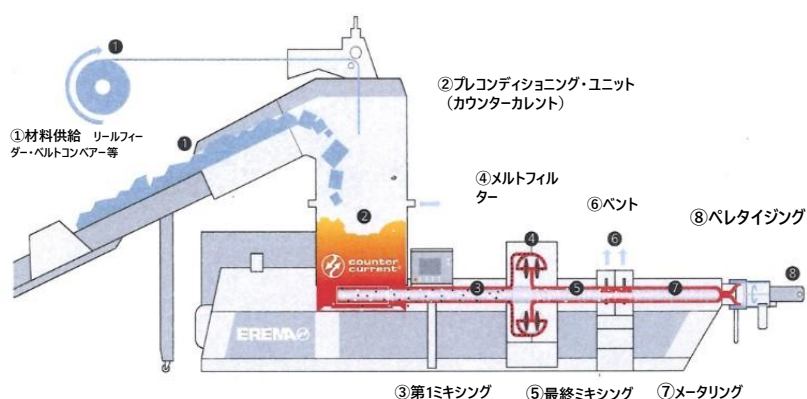


図 5 EREMA INTAREMA® TVEplus® (押出機)

出所：EREMAのINTAREMA® TVEplus®カタログ（エレマジャパン提供）。

図 4 の説明（エレマジャパン提供）

原料投入①は自動方式で顧客の要望に応じて様々な材料の形状に対応する。

プレコンディショニング・ユニット②の中では材料は粉碎、攪拌、加熱（フリクション）、乾燥、圧縮され、接続している押出機のインテーク部に高温のまま連続的に供給される。供給は革新的なカウンターカレント技術のおかげで従来機構より広い温度範囲での供給を可能にしている。

スクリー③ではフィルターを抜け脱気、可塑化されたメルトがシーリングのため VE ゾーンを逆流してくる。その突端でメルトはスクリー部から離れてフルオートマチックの逆洗機能付きフィルター④のボディに流れ込みフィルターを通過したのちまたスクリー部に戻る。

最終混練部⑤で均一化されたメルトはベント部⑥に送られ脱気後、メータリング⑦で定量移送されペレタイザーへと向かう。

(2) INTAREMA® TVEplus® DuaFil® Compact (二重ろ過システム)

2024年5月開催のNPEで発表されたEREMAの二重ろ過システム（図6）は、商業廃棄物からの紙ラベル付きフィルム廃棄物、農業用フィルム、家庭廃棄物からの洗浄済みフィルムなど、汚染や湿気の多い困難な材料をリサイクルできる。脱気量が最大33%増加し、第2フィルターユニットの上流の熔融温度が約22℃低く、比エネルギー消費量が約11%、スループットが約14%向上する。

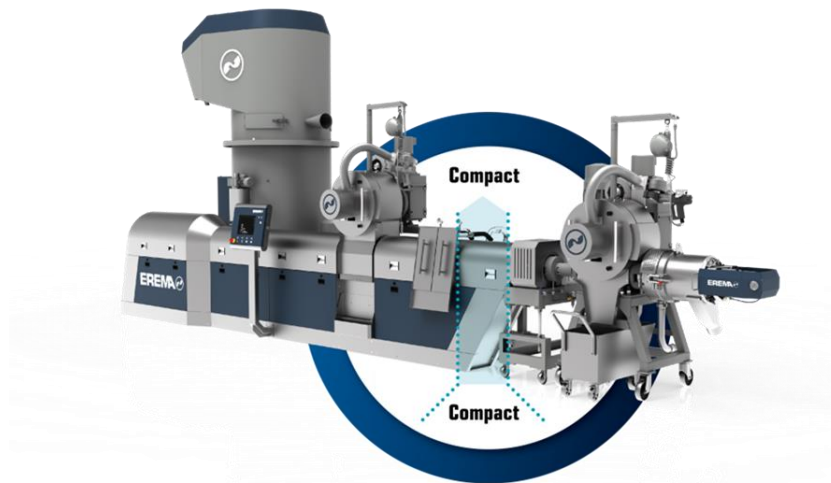


図 6 INTAREMA® TVEplus® DuaFil® Compact (二重ろ過システム)

出所： EREMA https://www.erema.com/en/intarema_tveplus_duafil_compact/

2.5 TOMRA(ノルウェー)による高度選別の例

(1) Ineos と TOMRA による 99.9%を超える高純度再生ポリスチレンの開発

スチレン系の世界的リーダーであるINEOS Styrolutionは、TOMRAと緊密に協力してMRにより99.9%を超える高純度再生ポリスチレンを開発した(2021年6月発表)⁴。これは、TOMRAのハイレベルのNIR(図8に原理図)に基づく選別プロセスにより実現した。そして、2021年7月に食品包装大手Sirap Group(イタリア、スペイン、ポーランドなど)は、この高純度再生材「Styrolution® PS ECO」を採用した。

(2) TOMRA と Syensqo、混合廃プラから PVDC を含む多層フィルムを選別・分離

TOMRAは2024年3月13日、低密度ポリエチレン(LDPE)とSyensqo「Ixan」PVDC(ポリ塩化ビニリデン)からなる商業包装廃棄物を使用した実験の結果、PVDCを含む多層フィルムを混合プラスチック廃棄物から選別・分離できたと発表した⁵。TOMRAの先進光学と近赤外線検出システムの組合せにより、使用済みプラスチック混合物から選別する場合は80%以上、LDPE単層ストリームから選別する場合は95%以上の選択率を達成した。

⁴ <https://www.ineos-styrolution.com/news/INEOS-Styrolution-offers-mechanically-recycled-polystyrene-developed-in-close-collaboration-with-TOMRA>

⁵ <https://convertermag.com/syensqo-partners-with-tomra-to-advance-the-sorting-of-multilayer-pvdc-packaging-waste/>

(3) TOMRA の光学(NIR)選別機器(AUTOSORT)

NIR（近赤外光学選別機）は選別によく使用されている（図 19～20 参照）。図 7 に示すように、プラスチックが種類により固有の NIR スペクトルを持つことを利用したものである。そして、図 8 に示すように、NIR は通常ベルトコンベヤーを用い、コンベヤー上にばらまかれたプラスチック（片）を光学的に識別して、プラスチックをエアジェット（エアガン）で振り分ける。TOMRA の方式は NIR で選別して、2 種類のプラスチック（受け器が 2 個）に選別する。

NIR などの光学識別機（選別機）は高速でプラスチックの種類を識別するだけでなく、プラスチックの色、サイズ、形状による選別も可能である。図 9 は、TOMRA の PET ボトルとその他の形状の PET を選別する光学選別機を示す。

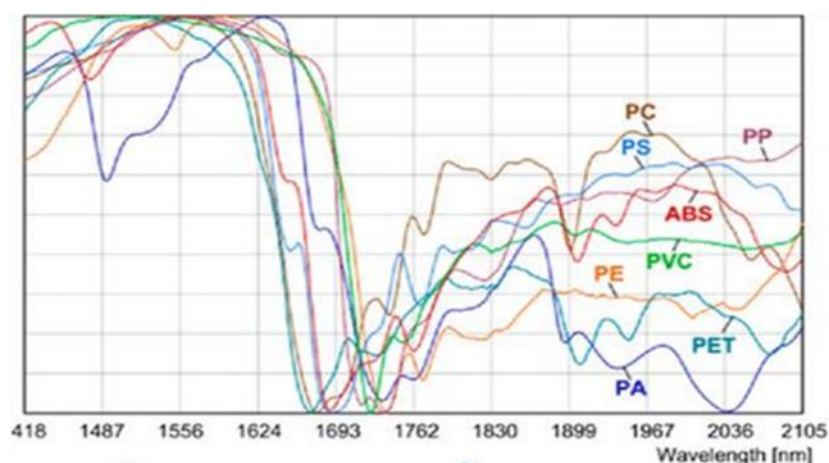


図7 各種プラスチックの近赤外線吸収スペクトル

出所：トムラソーティング提供。

なお、黒色の製品は、NIR 反射光が弱いことため識別ができないことが課題であったが、プロジェクト的に技術開発が行われ実用化された。例えば、TOMRA は AUTOSORT™ BLACK 選別システムを販売しており、黒色 PE、黒色 PP、黒色 PET、PS を識別できるという。

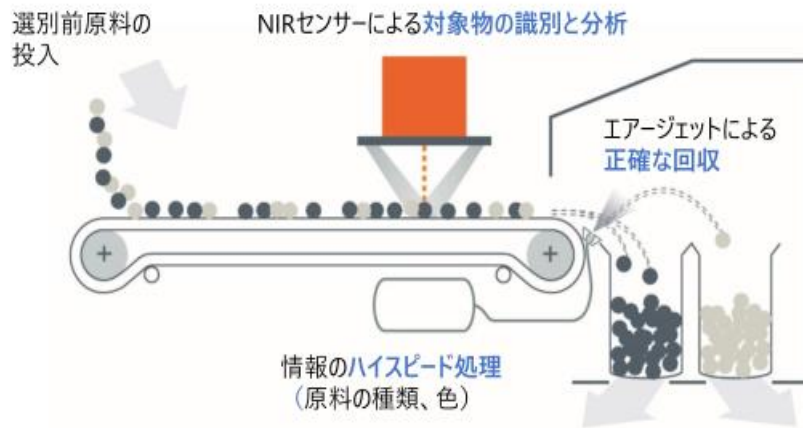


図 8 TOMRA AUTOSORT (NIR)選別原理(原料の種類や色による選別)

出所：トムラソーティング提供。

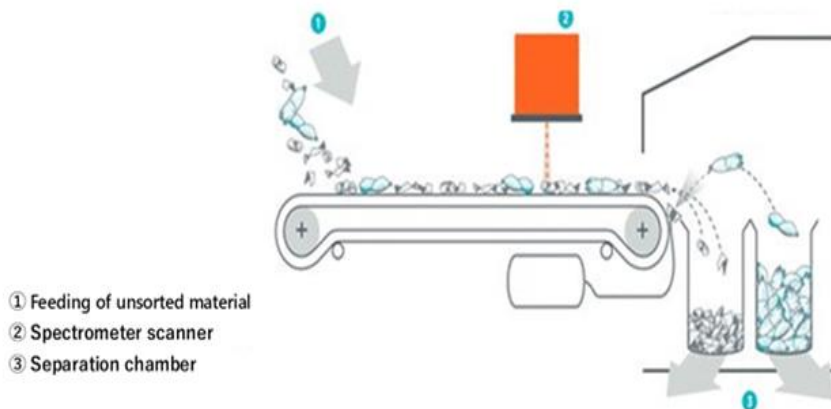


図9 PETボトルを分離する選別機

出所：トムラソーティング提供。

NIR は優れた選別機であるが、①システムは高価であり、また既にプロセスが確立されている既存 MRF に導入するのは難しい場合があること、②同じ PE である HDPE、LDPE、LLDPE の NIR スペクトルには差がないので、識別できないこと、③ラベルが貼ってあると、本体と間違えてラベルの材質で選別する場合があることなどの課題がある。

(4) TOMRA の食品グレードと非食品グレードの選別用 AI(GAINnext™)

TOMRAは、食品グレードと非食品グレードの選別用GAINnext™ をRWM Expo 2024（9月開催）で発表した⁶。それによれば、GAINnext™は、TOMRAのAUTOSORT™ユニット用のディープラーニング（機械学習の一つ）ベースのソートアドオン（図10）である。TOMRAは、センサーベースの材料識別とディープラーニングの物体認識を組み合わせることで、PET、PP、HDPEの食品グレードプラスチックと非食品グレードプラスチックを迅速かつ効率的に大規模に分離できる業界初の製品を提供した。GAINnext™は、食品グレードの選別を実現し、EUの食品包装安全基準を満たすために必要なレベルである95%以上の純度のrPET、rPP、rHDPEを達成した。

GAINnext™は、ボトルtoボトル・リサイクルの品質確保ができる⁷。ディープラーニングを高度に活用することで、長年にわたって業界の大きな課題であった食品グレードの選別やボトルtoボトルの品質を可能にした。AIの活用は、規制の強化や顧客の技術的な高度の要求などに対応することができる。



図 10 TOMRA の AUTOSORT™ユニットと AI(GAINnext™)

出所：TOMRA（脚注6、7）。

⁶ <https://www.tomra.com/en/waste-metal-recycling/media-center/news/2024/tomra-to-showcase-its-world-class-collection-and-sensor-based-sorting-solutions-at-rwm-expo-2024>

⁷ <https://www.tomra.com/en/waste-metal-recycling/media-center/news/2024/tomra-latest-deep-learning-innovation-food-grade-plastic-sorting-solution> 2024年4月17日

この新しいアプリケーションを早期に採用したのは、イギリス・Leamington Sp にある Berry Circular Polymers (Berry Global) の旗艦施設、イギリス最大のマルチポリマー施設である Bristol・Avonmouth にある Viridor、世界的な Dentis Group が所有するフランスの Nord Pal Plast 工場など、市場をリードする工場である。GAINnext™の最新の市場からのフィードバックは、非常にポジティブなものである。

2.6 AI 活用の食品グレード選別:「OMNI」プロジェクト

2023年11月21日に Recycleye (イギリスの自動化技術企業) と Valorplast (フランスの新しい再生ソリューションを見つけることに取り組んでいる民間の非営利団体) は、TotalEnergies (フランス) とともに取り組んでいる AI を活用したプラスチック選別プロジェクト「OMNI」で、食品グレードのPPのMRに向けて世界初の成果を上げたと発表した⁸。OMNI では、AI と機械学習を活用して、家庭の使用済み廃棄物から食品グレードのPPを特定して分離する。AI とロボットによる選別で、食品グレード材料のピッキング率 50%、純度 95%を達成した。

2024年5月28日には、VALTRIS (ベルギーのリサイクラー) は、Recycleye と協力して、AI の助けを借りて動作し、リサイクル可能な材料の選別と回収に真の付加価値を提供する選別ロボットに初めて投資した⁹。これは、Recycleye の自動化技術がベルギーで初めて導入されるケースである。Recycleye ロボットは、コンピュータービジョンと AI を使用して、材料を自動的に検出して分類する。

2.7 AI 活用の Berry Global の食品グレードの選別技術「CleanStream」

Berry Global は米国・インディアナ州に本社を置く、グローバルに展開する容器包装の製造・販売会社(コンバーター)である。コンバーターであるが、リサイクル事業にも力を入れ

⁸ <https://www.valorplast.com/actualites/premiere-mondiale-pour-recycleye-valorplast-et-totalenergies-dans-le-recyclage-mecanique-avance-du-polypropylene-a-usage-alimentaire-grace-a-lintelligence-artificielle/>

⁹ <https://recycleye.com/ai-powered-plastic-sorting-project-delivers-world-first-in-food-grade-sorting-2/>

ている。これは、コンバーターの ALPLA がリサイクル事業でも活躍しているのと同じパターンである。

現在、年間約 16 万トンの PCR および PIR プラスチックをリサイクルする世界最大のリサイクラーの一つである。また、可能な限り多くの内部（社内）スクラップを回収するため、世界中のほとんどの容器包装製造拠点でリサイクル設備に投資している。

① Berry Global の PP の MR が、米 FDA から食品接触用途で「異議なし」の認定を取得¹⁰

Berry Global は 2022 年 9 月 1 日、独自の MR 技術「CleanStream」が、FDA から「異議なし (LNO: Letter of No Objection)」を取得したと発表した。「CleanStream」プロセスによって再生された PP は、食品接触用途向けに最大 100% 使用できる。

イギリスの同社 Leamington Sp 工場で、「CleanStream」プロセスは実用化されている。

なお、同工場はイギリスで収集された廃 PP の 40% 以上を処理することができる処理能力を有している。

「CleanStream」は、オンラインセンサー技術や機械学習アルゴリズムを統合した自動仕分け・除染プロセスで、混合廃プラスチックから食品使用可能なアイテムを識別、分離できる。UK Research and Innovation の資金提供も受けており、EU での承認も見込んでい

る。

図 11 に「Cleanstream」のプロセスフローを示す¹¹。

¹⁰ <https://www.berryglobal.com/en/news/articles/berry-recycling-technology-receives-fda-approval>

¹¹ <https://www.berryglobal.com/en/news/articles/cleanstream-the-future-for-contact-sensitive-mechanically-recycled-plastic>

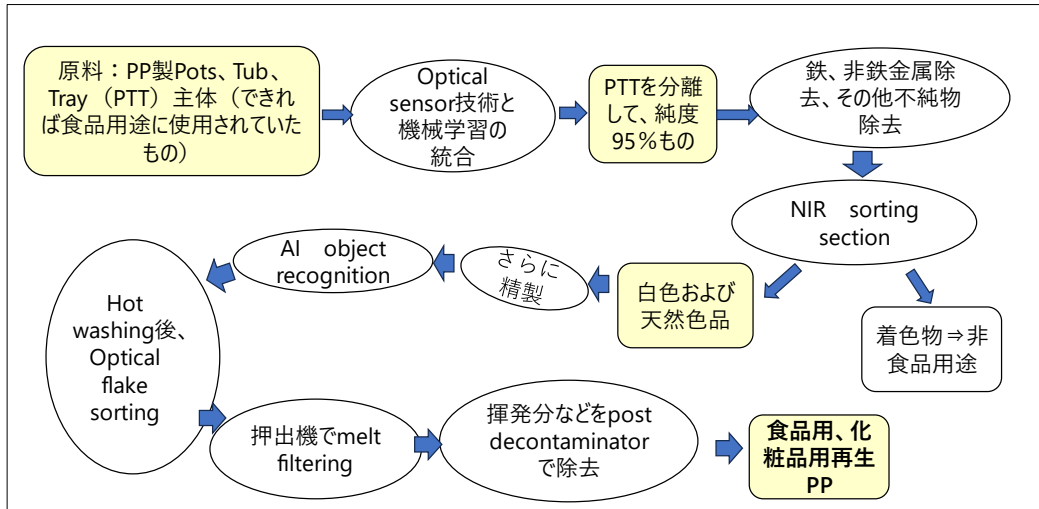


図 11 Berry Global の「CleanStream」リサイクルプロセス

出所：Berry Global、脚注12を基に旭リサーチセンター作成。

②Berry Global はフレキシブルフィルムのリサイクル能力を増強¹²

Berry Global は 2024 年 3 月 14 日、リサイクルポリマー「Sustane」シリーズの生産拡大の一環として、欧州のリサイクル施設 3 ヶ所での能力増強を発表した。イギリス・Heanor、ドイツ・Steinfeld、ポーランド・Zdzieszowice で年間 6,600 トン分が増強される。

「Sustane」シリーズのリサイクルポリマーは第三者認定を受けており、Berry が欧州で生産するストレッチフード、「NorDiVent」通気袋、「FormiFor」圧縮フィルム、園芸基材用ピートフィルムなどには 30% 以上の再生材が含まれている。

③Berry Global はイギリスのプラスチック包装リサイクル施設をアップグレード¹³

Berry Global は 2024 年 10 月 16 日、イギリスのプラスチック包装リサイクル施設のアップグレード投資を行うと発表した。2027 年 3 月にプラスチック軟包装の回収が義務化され、量の大幅増加が予想される中、洗浄工場などをアップグレードし、より多様で低品質なプラスチック包装を処理、洗浄できるようになる。この施設では、家庭や産業廃棄物のフレキシブルフィルムを、ゴミ袋や集積用シュリンクフィルムなどにリサイクルしており、リ

¹² <https://www.berryglobal.com/en/news/articles/berry-global-increases-recycling-capacity-for-flexible-films>

¹³ <https://www.berryglobal.com/en/news/articles/berry-investment-will-help-make-front-of-store-soft-plastic-recycling-a-reality>

サイクルと生産プロセスのトレーサビリティと透明性を確保する「RecyClass」認証を取得している。

2.8 欧州の電子透かしイニシアティブ「HolyGrail 2.0」¹⁴

①電子透かしイニシアティブ「HolyGrail 2.0」は AIM が主導し、電子透かし技術を Digimarc が、選別技術を Pellenc ST と TOMRA が担当している。イニシアティブのフェーズⅡでは、硬質 PP、硬質 PE、PET、フレキシブルなどについてテストが行われた。Pellenc ST-Digimarc の組合せによるテスト（表 3）と TOMRA-Digimarc の組合せによるテスト（表 4）が行われ、良好な結果が得られた。

表3 Pellenc ST-DigimarcによるDetection・Sorting Uniteのセミ工業的バリデーション

カテゴリー	Detection rate	Ejection rate	Purity
	(推定)	(重量)	(重量)
硬質PP	99%	95%	96%
硬質PE	98%	96%	99%
硬質PET	99%	98%	95%
軟質（フレキシブル）	99%	91%	90%
平均	99%	95%	95%

Table 1: Average single sort results from mixed packaging waste streams (watermarked samples + contamination of non-watermarked samples + other pack material classes). Typical industrial process conditions have been used in these trials (belt speed of 3m/s; Loading: Rigids running at ~2.5 tons/hr; Flexibles at ~0.5 tons/hr). Success criteria (after 1 sort) for detection efficiency / ejection efficiency / purity are 95%/95%/92% respectively for rigid packaging; and 95%/87%/90% respectively for film packaging (in line with industrial specifications).

出所：「HolyGrail 2.0」、脚注14

¹⁴ <https://www.aim.be/wp-content/themes/aim/pdfs/demo/Digital%20Watermarks%20Initiative%20HolyGrail%202020-20general%20presentation%20for%20PDF.pdf>

表 4 TOMRA—Digimarc による第 2 プロトタイプの変別

カテゴリー	Detection rate (推定)	Ejection rate (重量)	Purity (重量)
PP	99.60%	99.60%	94.20%
PET	99.10%	95.70%	92.60%
ファイバー	98.90%	97%	93.10%
軟質 (フレキシブル)	97.60%	92%	90.80%
合計	99%	96%	93%

出所：「HolyGrail 2.0」、脚注14

② 欧州の電子透かしイニシアティブ「Holy Grail 2.0」は 2024 年にフランスで社会実装¹⁵

「HolyGrail 2.0 は、2023 年 10 月 3 日に技術研究開発の最終実証 (TRL9) をフランスで行うと発表した。PepsiCo のフレキシブル PP と、Essity と P&G のフレキシブル LDPE の軟包装材 2 種類を、Pellenc ST と Digimarc の技術による選別ラインが設置された Hündgen Entsorgung(ドイツ・ボン)の回収センターで検出、仕分ける。その後、PP と PE は Borealis がリサイクルする。一方、硬質プラスチック包装材のテストでは、分離された非食品用 PET は Indorama Ventures のリサイクル工場に移される。並行して、2024 年のフランスでの社会実装に向けて、メンバー7社が HDPE 硬質包装での展開に協力する。Henkel と L'Oréal、P&G はフランス市場向けの HDPE 硬質包装ポートフォリオに電子透かしを入れる。使用後に店頭で回収された後、Veolia の PlastiLoop Brenouille 施設で選別試験が行われ、洗剤と化粧品用途に適した rHDPE グレードに処理される。

¹⁵ <https://www.digitalwatermarks.eu/post/industrial-tests-with-hg2-0-technology-continue-leading-to-france-wide-pilot-market-launch-in-2024>

3 MR 事業既参入 PO メーカーの事業拡大状況

3.1 概要

Borealis、LyondellBasell、Dow、TotalEnergies、SCGC、Nova ChemicalsなどMR事業に既に参入しているPOメーカーは、2023年以降さらにリサイクラーの買収やリサイクラーとの連携、自社技術開発によりMR事業を強化・拡大している（表5～表9）。

用途はリサイクルが難しいとされるフィルムが中心で、最近は自動車用のPPのリサイクル関係の案件が多い。

年生産能力の明確なものだけでも、Borealisは17万トン、LyondellBasellは8万トン+ α 、Dowは7.2万トン、TotalEnergiesは9万トン、SCGCは5.4万トンで、合計すると約50万トン（46万トン+ α ）になる。

また、EUの各種規則案が発表されて以来、POメーカーのMR事業の強化・拡大が活発になっている。2023年以降の案件を表5～表9の黄色地で示す。

3.2 PO メーカー各論

(1) Borealis(表 5)

Borealis は 2016 年にリサイクラーの mtm plastics を買収し、2018 年にはリサイクラーの Ecoplast を買収してリサイクル事業に参入した。また、並行して自社開発を進め TOMRA などと共同でデモ工場を稼働させている*。2023 年には、Rialti（イタリア）と Integra Plastics AD（ブルガリア）の 2 社を矢継ぎ早に買収した。

*Borealis、TOMRA、Zimmermannは共同して、2021年1月に先端MRデモ工場をドイツ・Lahnsteinに開設した。このデモ工場は、買収したmtm plasticsとEcoplastの工場とともにBorealisのリサイクル事業の3本柱の一つになっている。先端のMRデモ工場は、家庭から出る硬質廃プラと軟質廃プラの両方を処理することができる。また、現在の多くのリサイクル工場とは異なり、自動車や消費者製品など、様々な業界の要求の厳しいプラスチック用途での使用に必要な高度なソリューションを提供する。最新技術で製造されるBorcycleTMMグレー

ド（再生材）は高純度、低臭気、品質の高い一貫性、明るいカラーなど高品質で、バリューチェーン全体でお客様の品質要件を満たす。

このデモ工場の目的は、ブランドオーナー（P&GやHenkelなど）やコンバーターに、非常に要求の厳しいアプリケーションでの使用に適した材料（サンプル）を提供し、彼らが品質認定、検証、証明を行うことを支援することである。技術的に成功すれば、商業規模の高度なリサイクル工場の基礎を築くことになる。ただ、具体的成果はまだ発表されていない。

表 5 Borealis の買収、提携、自社開発によるリサイクル事業への参入と強化・拡大

POメーカー	提携リサイクラー	買収or提携（協業）	発表（年・月）	再生プラスチック（用途）	年生産能力
Borealis (オーストリア)	mtm plastics (ドイツ)	買収	2016年7月	硬質ポリオレフィン	7万トン（ドイツに2か所の工場）
	Ecoplast (オーストリア)	買収	2018年8月	LDPE（主にフィルム用）	3万トン
Borealis 自社技術 (Borcycle™ M)	デモ工場（Borealis、TOMRA、Zimmermannの提携）、Borealis技術、ドイツ・Lahnstein		2021年スタート	Borcycle™ M技術を駆使した世界最先端MR工場。	ポリオレフィンのリサイクル
	Reclay group（廃棄物管理企業）と共同で、Recelerateを設立		2022年5月	軽量容器包装の選別とリサイクルプロセスの再構築	
	Rialti S.p.A. (イタリア・Varese)	買収	2023年6月買収 2023年11月拡張	再生PPコンパウンド：自動車、家電製品、建設用	5万トンに拡張
	Integra Plastics AD (ブルガリア)	買収	2023年11月	ポリオレフィン	2万トン（2019年に完成）
	Borcycle™	FDA異議なし承認	2024年3月	再生HDPEと再生PPが、食品包装用途でFDAの承認（異議なし）を取得	
	自社工場：ベルギー・Beringen	自社工場	2024年6月	再生ポリオレフィンのコンパウンド工場	2014年着工、 2025年上半年稼働
	OMV、Borealis、TOMRA	混合廃プラ由来リサイクル原料の長期契約	2024年4月	TOMRAが選別した原料を、OMVはCR用に、BorealisはMR用に使用	TOMRAの選別施設は8万トン、2025年末稼働見込み
	参考 OMV	Interzeroと共同で選別工場建設：ドイツ・Walldurn	合併： OMV90%、 Interzero10%	2023年10月	OMVのCR工場用の廃プラ原料選別プラント建設

注：OMV(石油会社)はBorealisの株を75%を保有する親会社で、自社技術でCR工場を建設中。このCRのサプライチェーンにBorealisは組み込まれている。Borealisは、それとは別に、熱分油メーカーのRenasciの50%の株式を取得している。Renasciの工場はオランダのOstendeにある。

出所：各社発表を基に旭リサーチセンター作成

(2) LyondellBasell(表 6)

LyondellBasellは再生材をバージン材と同じように自ら販売する。

Veoliaとの合併であったQCPは株取得で持ち分100%になった。AFA Nordと合併会社を設立、Mepol Group買収、DPSRの50%株取得、自社工場の建設と積極的にMR事業を拡大している。米国では、PreZeroを買収した。

一方、欧州と米国の両方で、廃プラ選別工場に大型投資をしている。

表6 LyondellBasellの買収、提携、自社開発によるリサイクル事業への参入と強化・拡大

POメーカー	提携リサイクラー	買収or提携(協業)	発表(年・月)	再生プラスチック(用途)	年生産能力
LyondellBasell (オランダ)	QCP(オランダ)は、LyondellBasellとVeolia(フランス)の1:1合併会社に	合併会社設立	2018年3月	HDPE・PP	3.5万トン
		Tivaco(ベルギー買収)	2020年12月	HDPE・PP	2.2万トン
	QCP(オランダ)の再構築	Veoliaの持ち分を引き受け、持ち分100%に	2023年4月	HDPE・PP(ボトル、パケツ、キャップ、クロージャー、ペーパー、スーツケース)	同上
	AFA Nord	合併会社設立 LMF Nord GmbH(ドイツ)	2023年6月	LLDPE and LDPE 軟質容器包装用 再生材製造: ストレッチやシュリンクフィルム	
	Mepol Group	買収完了	2023年7月	マスターバッチ、エンブラのコンパウンド、 カラー、パウダーのコンパウンドソリューション	不明
	Stiphout Industries(オランダ)	株式50%取得	2023年7月	再生PP、再生HDPEのクリーンフレーク	50万人の年間排出量分に 相当する処理能力
	DPSR(オランダ)	DPSRの持ち株会社の株50%取得	2023年10月	再生PPと再生LDPE	2工場(170万人以上の年間 排出量分に相当する処理能力)
	自社工場: ドイツ・Knapsack	自社	2024年4月	MRとCR用の廃プラ選別施設	高度選別施設2026年完成
自社工場: ドイツ・Lich	自社	2024年9月	自動車バンパーやトリム、電機製品などの 耐久品のリサイクル	2024年の第4四半期スタート	
LyondellBasell (米国)	PreZero: 米国・カリフォルニア州・Jurupa Valley,	買収	2024年2月	硬質ポリオレフィン(PO)	5,000万ポンド(2.3万トン)
	Agilyx, ExxonMobil, LyondellBasell	提携	2023年12月 (最終投資決定)	リサイクル用原料の選別工場 (MR&CR用)	3億ポンド(13.5万トン)

出所: 各社発表を基に旭リサーチセンター作成。

(3) Dow(表 7)

Dow は 2020 年に Avangard Innovative との提携で、米国でフィルムのリサイクル事業に参入し、2024 年にはフィルムの MR 技術を持つリサイクラーの Circus を買収した。欧州でも 2 社と提携して、自動車用再生材とシュリンクフィルム再生材ビジネスに参入した。

表 7 Dow の買収、提携、自社開発によるリサイクル事業への参入と強化・拡大

POメーカー	リサイクラー	買収or提携 (協業)	発表 (年・月)	再生プラスチック (用途)	年生産能力
Dow (米国、欧州) 目標：2030年再生可能リ ユージョン 300万トン	Avangard Innovative (米国)	提携	2020年1月	LDPE (シュリンクフィルム用)	2.2万トン
	WM (北米最大の廃棄物 管理企業)	提携	2022年11月	プラスチックフィルム回収リサイクルのパイロ ットプログラム	
	P&G	提携	2024年3月	独自のPEリサイクル技術の共同開発 (溶解 プロセスを活用) : リサイクルが難しい硬質・ 軟質多層包装が対象	
	Circus (米国のオクラハマ とアラバマの2工場)	買収	2024年6月	フィルムのMR技術 : Dowはシュリンクフィルム、スト レッチフィルム、ライナー、食品包装などで、産業用・ 消費者用・輸送用などの広い用途へ展開	5万トン
	Fiori Group (イタリア)	提携	2024年6月	使用済み自動車部品材料をリサイクルする システム開発で提携	
	RKW Group (欧州)	提携	2024年6月	RKWとの提携により、Dowはシュリンクフィル ム再生樹脂「REVOLOOP」の2グレードを發 表	

出所：各社発表を基に旭リサーチセンター作成。

(4) TotalEnergies(表 8)

TotalEnergiesは自動車用再生PPメーカーのSynovaを買収し、Synovaの生産能力を拡大した。2022年には、自ら自動車用高性能再生PP製造工場を建設中である。いずれもELV規則案の発表で注目される工場である。また、医薬品や化粧品用の高機能包装をターゲットとするMR工場の建設にも着手している。また最近、Iber Resinasを買収した。

(5) Nova Chemicals(カナダ)(表 9)

Nova Chemicalsはリサイクラー2社との提携により新規参入を行った。さらに、MRの新会社を設立し、新ブランド「SYNDIGO」を立ち上げ、Novolexと共同でMR工場を建設中である。

表 8 TotalEnergies と SCGC の買収、提携、自社開発によるリサイクル事業への参入と強化・拡大

POメーカー	提携リサイクラー	買収or提携 (協業)	発表 (年・月)	再生プラスチック (用途)	年生産能力
TotalEnergies (フランス) (自らも再生材製造)	Synova (フランス) 2工場: Tillières-sur-Avre と Nœux-les-Mines	買収	2019年2月	自動車用PP	2工場計2万トンを2021年に倍増して4.5万トン
	Iber Resinas (スペイン)	買収	2023年5月	家庭廃棄物と産業廃棄物に由来するPP、PE、PSをリサイクル、サプライヤーネットワーク保有	スペイン2工場
	自社工場: フランス・Carling	MR工場建設	2022年11月	自動車用高性能再生PP	1.5万トン 2024年試運転
	自社工場: フランス・Grandpuits	MR工場建設	2023年9月	医薬品や化粧品向けの高機能包装をターゲット	3万トン (再生材を最大50%含む)、2026年稼働
SCGC (タイ、石化メーカー) 目標: 「GREEN POLYMER」を2030年100万トン	Sirplaste (ポルトガル)	株式購入して合併会社設立	2021年5月	HDPEの押出やブローが中心、LDPE、LLDPE、PPも持つ	3.5万トン
		増設、SGSCは70%の株所有	2023年9月	消費者使用済み製品を再生した高品質で無臭のHDPE樹脂の生産	9千トンから4.5万トンに
	Kras (Recycling Holding Company Volendam) (オランダ)	株の60%取得	2023年1月		廃プラ収集能力: 16万トン 再生プラ生産能力: 9,000トン

出所: 各社発表を基に旭リサーチセンター作成。

表 9 Ineos、Repsol、Nova Chemicals の提携、自社開発によるリサイクル事業への参入と強化・拡大

POメーカー	B32:B32:H44	リサイクラー	買収or提携 (協業)	発表 (年・月)	再生プラスチック (用途)	年生産能力
Ineos Olefines&Polymers Europe (イギリス)		Saica Natur (スペイン)	長期供給契約	2020年9月	LDPE・LLDPE (ストレッチフィルムとラミネートフィルム用)	公表データなし
Repsol (スペイン) (自らも再生材製造)		Acteco (スペイン)	提携	2020年8月	ポリオレフィン	1.2万トン
Nova Chemicals (カナダ)		Revolution (米国)	提携	2020年12月	LDPE・LLDPE (使用済み軟質包装用)	公表データなし
		Merlin Plastics (カナダ)	提携	2020年9月	HDPE (食品用など)	公表データなし
		Nova Chemicalsが新子会社 (Nova Circular Solutions) 設立、新ブランドの「SYNDIGO」を発表		2023年2月	LDPEベース、LL/LDPEブレンドベース、HDPEベースの3種類で、使用済みの農業用フィルムや配送用ストレッチフィルム、ミルク容器などをメカニカルリサイクルして再生する	
		Novolex (容器包装、フードサービス企業)	提携	2023年7月	Novolexと共同で、インディアナ州・Connersvilleに、MR施設建設: 再生PEの「SYNDIGO」の生産、工場操業はNovolex	2025年稼働
		Amcore (オーストラリアに拠点を置く、包装事業の多国籍企業)	提携	2023年11月	再生PEの調達契約 AmcoreがNovaの再生PE (「SYNDIGO」) を軟包装フィルムに使用	NovaのConnersville・MR工場

出所: 各社発表を基に旭リサーチセンター作成。

4 欧州・米国・日本のリサイクルの状況(市場と規制)

4.1 日欧米のリサイクルの概況と樹脂別需要

①図 12 に日欧米の廃プラの処理状況を示す。日本はエネルギー回収と単純焼却を合わせたいわゆる焼却が非常に多い (69%) こと、欧州は、MR が多い (26%) こと、米国は、リサイクルは少なく、埋め立てが非常に多い (76%) ことが特徴である。

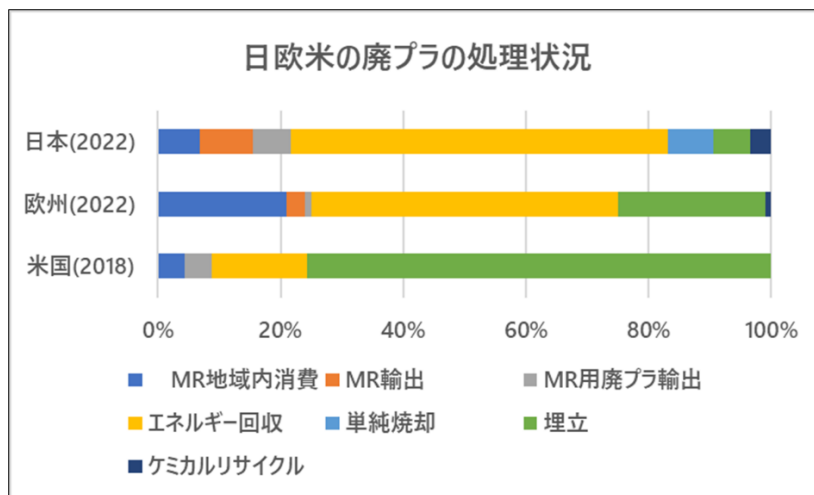


図 12 日欧米の廃プラの処理方法

出所：元データは、日本はプラスチック循環利用協会、欧州はPlastics Europa、米国はEPA。

②表 10 に、日欧米のプラスチック需要量、廃プラ回収量、再生材の生産を示す。

表 10 日欧米のプラスチック需要、廃プラ回収量、再生材の生産

	人口	年	プラスチック需要量 (万トン)	廃プラ回収量 (万トン)	廃プラの処理 (万トン、%)							再生材の生産 (万トン)			出所
					MR地域内消費	MR輸出	MR用廃プラ輸出	ケミカルリサイクル	エネルギー回収	単純焼却	埋立	合計	PET	ポリオレフィン他	
日本	1.3 億人	2022	910	824 100%	57 6.9%	71 8.6%	51 6.2%	28 3.4%	510 61.8%	61 7.4%	46 5.6%				灰色：プラスチック循環協
欧州	5.1 億人	2022	5,330	3,230 100%	680 21%	100 3%	80 2%	<20	1,600 50%	ゼロ	760 24%	POST-CONSUMER 670万トン PRE-CONSUMER 310万トン	24%	FLEX・PE&PP 26% Rigid・PE 14% Rigid・PP 14%	黄色：Plastics Europe 緑：PRE (2022)
米国	3.3 億人	2018	3,700	3,560 100%	157 4.4%		153 4.3%	ゼロ	560 15.7%	ゼロ	2,690 75.6%	198	98	HDPE 56 LDPE 37 PP 5 PS 2	青色：EPA

注：欧州は需要量と回収量に大きな乖離がある。欧州は、エネルギー回収はリサイクルの定義に含めない。

出所：表の出典を基に旭リサーチセンター作成。

③図 13 に日本、中国、米国、欧州におけるバージンプラスチックの LDPE (LLDPE を含む)、HDPE、PP、PS、PET の一人当たりの使用量を比較した。

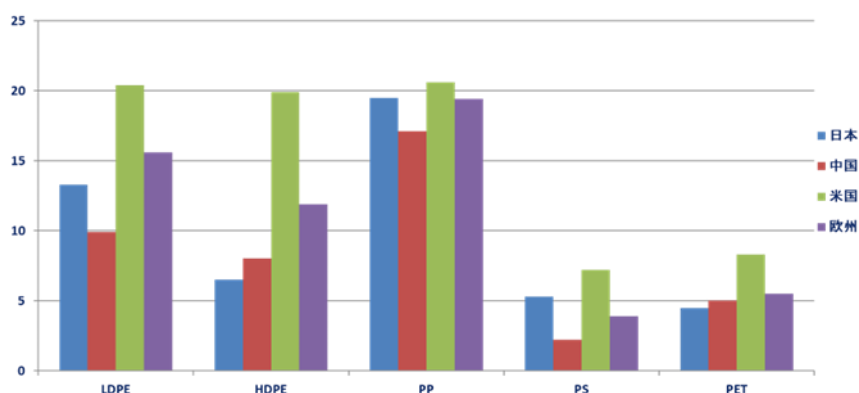


図 13 主要国の各汎用樹脂の一人当たりの使用量(2018年、単位 kg/人)

出所：経産省の石油化学統計資料などを基に旭リサーチセンター作成（参考文献(1)）。

日本は、欧米に比べ PP と PS が多く、HDPE が少ないことが特徴である。日本が強い自動車産業に PP が多く使われることなどから、日本は PP が多い。一方、米国は安価な天然ガスを原料とする LDPE と HDPE が多い。また、欧米では日本と異なり、HDPE ボトルがミルクやジュースなどの飲料ボトルに使用されているので、大きな用途になっている（参考文献(3)の 24 頁参照）。

④図 14 に欧米日の廃プラ輸出の推移を示す。

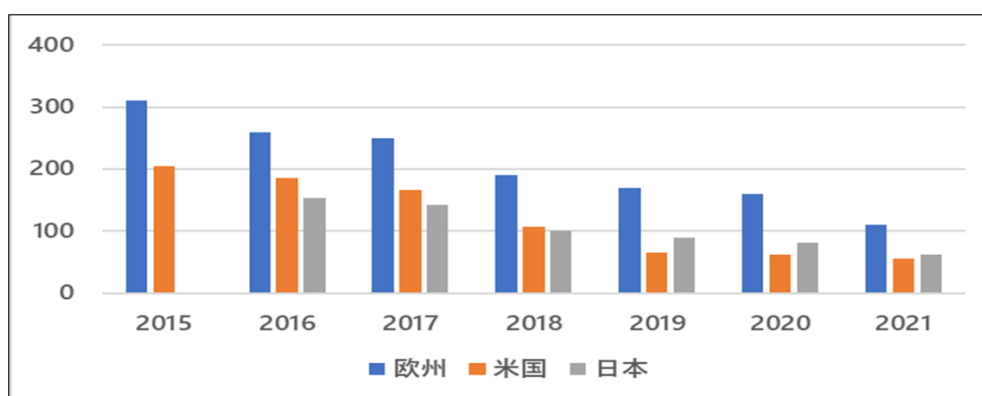


図 14 欧州、米国、日本の廃プラ輸出の年次推移(単位 万トン)

注：2018年 中国輸入禁止、2021年 改正バーゼル法施行。

出所：各国発表資料より旭リサーチセンター作成。

これまで、欧米日から年間 700 万トン近い廃プラが中国を中心にアジアにリサイクル目的で輸出されてきた。しかし、環境問題から、中国は 2017 年 7 月に輸入禁止方針を発表し、2018 年から輸入を禁止した。また、2021 年に改正バーゼル法の施行により汚染廃プラの輸出は実質禁止となった。このため、2017 年以降は廃プラ輸出が大幅に減少して、一時約 700 万トンあったものが約 350 万トンになった。

4.2 欧州のリサイクル市場

(1) Plastics Europe の 2024 年統計(2022 年実績)¹⁶

①EU27+3 のプラスチック 5,410 万トン消費の内訳は、容器包装 39%、電機・電子 6%、自動車 8%、農業・耕作・ガーデニング 4%、家具・レジャー・スポーツ 4%、建築・土木 23%、その他 16%である。

②EU27+3 の廃プラ 3,230 万トンのソースの内訳は、容器包装 57%、電機・電子 6%、自動車 5%、農業・耕作・ガーデニング 5%、家具・レジャー・スポーツ 5%、建築・土木 7%、その他 15%である。

③EU27+3 の廃プラ 3,230 万トンの用途別のリサイクル比率は、容器包装 38%、電機・電子 20%、自動車 19%、農業・耕作・ガーデニング 20%、家具・レジャー・スポーツ 6%、建築・土木 17%、その他 4%である。

④欧州のプラスチックの生産は 5,410 万トンで、バージンプラスチック（石油原料）が 4,370 万トンとリサイクルなどのサーキュラープラスチックが 1,040 万トンである。

バージンプラスチックの種類別内訳は、PP 860 万トン、LDPE/LLDPE 750 万トン、HDPE/MDPE（中密度ポリエチレン）570 万トン、PVC 390 万トン、PET 370 万トン、PS/EPS（発泡 PS）270 万トン、その他熱可塑性プラスチック 300 万トン、PUR 360 万トン、その他熱硬化樹脂 320 万トンである。

サーキュラープラスチックの内訳は、MR（post-consumer）670 万トン、MR（pre-consumer）310 万トン、バイオベース 50 万トンである。MR（post-consumer）670 万トンは生産量 5,410

¹⁶ <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/the-circular-economy-for-plastics-a-european-analysis-2024/>

万トンの12.4%を占める。

Plastics Europe は、再生プラスチック比率が13.5%を占めると発表している¹⁷。ここでは、従来の定義で、(670万トン+50万トン)÷5410万トンで13.5%としている。

(2) Plastics Recyclers Europe(PRE)の2022年データ¹⁸

EU27+3の2022年のリサイクラーのデータは、①設備容量 (installed capacity) は1,250万トン (前年比10%増)、②2022年に推定約10億ユーロの投資、③リサイクラー数は850を数え、平均すると1社当たりの設備容量は1.5万トンである¹⁹。EUプラスチック戦略が発表された2018年の設備容量は660万トンであったので、現在はその約2倍になっている。

プラスチック別の設備容量の内訳は、PE&PPフレキシブル26%、PET24%、硬質HDPE14%、硬質PP14%、PVC9%、混合プラスチック6%、ELV-WEEE plastics5%、PS/EPS2%である。

PREは2024年10月24日に、「不況がEUのプラスチックリサイクル業界を襲う」と題するプレスリリースを行った²⁰。それによれば、「欧州のプラスチックリサイクル市場の縮小傾向は危機的である。欧州で生産される再生材の需要不足が拡大、欧州内のリサイクル投資の減少、EU外からの再生材の輸入の増加が過去数年間にわたって続き、欧州のプラスチックリサイクル業界を窒息させている。これらの問題は、市場に存在する不況を助長し、2023年には多くのリサイクラー社を廃業に追い込み、2024年中にさらなる閉鎖²¹が予定されている。この低迷は、緊急に対処しない限り続くであろう。現在の主要課題の一つは、リサイクル含有量が

¹⁷ <https://plasticseurope.org/media/report-confirms-advances-circularity-of-plastics/>

¹⁸ <https://www.plasticsrecyclers.eu/publications/>

¹⁹ McKinsey の欧州リサイクラー(57社)の調査(2020年)によると、①リサイクラーの47%は小規模(能力:1万トン/年以下)、25%は中規模(同:1~5万トン/年)、28%は大規模(同:5万トン/年以上)である。ほとんどのリサイクラーがPOのリサイクルをしている。②原料廃プラのソースは事業(産業・工業)廃プラ単独が34社、MSW(都市固形廃棄物)単独は9社、両方は14社となっていて、予想外に事業廃プラの利用が多いことが注目される。特に小規模リサイクラーは事業廃プラの使用が多い。出所: McKinsey、<https://www.mckinsey.com/industries/chemicals/our-insights/the-european-recycling-landscape-the-quiet-before-the-storm>

²⁰ <https://www.plasticsrecyclers.eu/news/recession-hits-the-eus-plastics-recycling-industry-8ja84r/>

²¹ ①Umincorp(オランダの廃棄物管理会社(PETリサイクラー))は1月に破産し、2つのリサイクル工場(分離、選別、リサイクル)が8月にオンラインオークションかけられた(2024年8月16日)。

<https://news.troostwijkuctions.com/posts/pressreleases/umincorp-bankrupt-machinery-from-two-plastic>

②ViridorはイギリスのAvonmouth工場(PO中心のMR工場で処理能力年間8万トン)を閉鎖すると発表した。<https://www.viridor.co.uk/news-and-insights/viridor-to-exit-uk-mechanical-recycling-operations-at-avonmouth/> (2024年11月5日)

疑わしく効果的な検証およびトレーサビリティ対策が実施されていないEU域外からのポリマー輸入の憂慮すべき増加である。」

4.3 米国のリサイクル市場

米国における1960年以降のMSWの推移（EPA資料）を図15に示すが、MSWが年々増加していること、埋め立て比率が依然として非常に高いのが特徴である。

2019年以降、EPAはこの統計を発表していない。

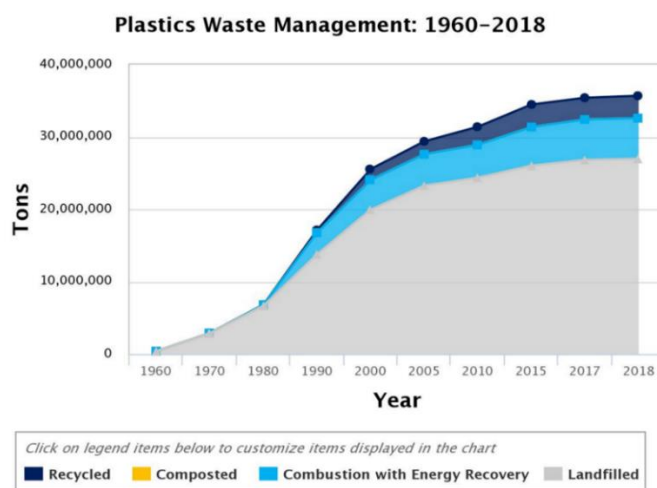


図15 米国のMSW処理方法(リサイクル、エネルギーリカバリー、埋め立て)の年次変化

出所：EPA National Overview: Facts and Figures on Materials, Wastes and Recycling。

また従来、MSWはMRF（マテリアルリカバリー施設）で、①PET、②HDPE、③PP（その他プラスチック）の3つに選別されてきた。①PETと②HDPEは再生材になるが、③は輸出されることが多かったという。ただ、最近再生PPの需要が高まり、設備投資をしてPPを選別するMRFが増えてきている。

4.4 欧州のリサイクル関係の規制

(1) 欧州のリサイクル関係の規制と税制

欧州は循環経済を推進し、表11に示す「EUプラスチック戦略」を発表した。

表 11 循環経済における EU プラスチック戦略(2018 年 1 月発表)

- ・危機感：プラスチックの大量使用による資源枯渇 & 温暖化ガス発生、海洋プラスチック問題
- ・EUプラスチック戦略の具体的骨子（設計図）：
 - ①プラスチックリサイクル設備を近代化し、能力を2025年までに**4倍に拡大**。
（再生材として1,000万トン/年に）。
 - ②**EPR（拡大生産者責任）**を財源として、優れたリサイクル技術（リサイクルに適した製品設計、選別技術など）の開発に経済的インセンティブを供与。
 - ③**効果的分別収集方法**の確立。
 - ④世界トップの**リサイクル技術**を発展させ、その技術で**世界のリサイクル市場**を席捲。
 - ⑤法規制やプラスチック再生材の**基準・規格**（ISOなど）などで**世界をリード**。そして、プラスチックの循環経済を世界に普及。

出所：EU発表資料を基に旭リサーチセンターが作成。

そして、「循環経済におけるEUプラスチック戦略」を推進すべく、プラスチックについて各種の規制や税制が導入されてきた（図16）。

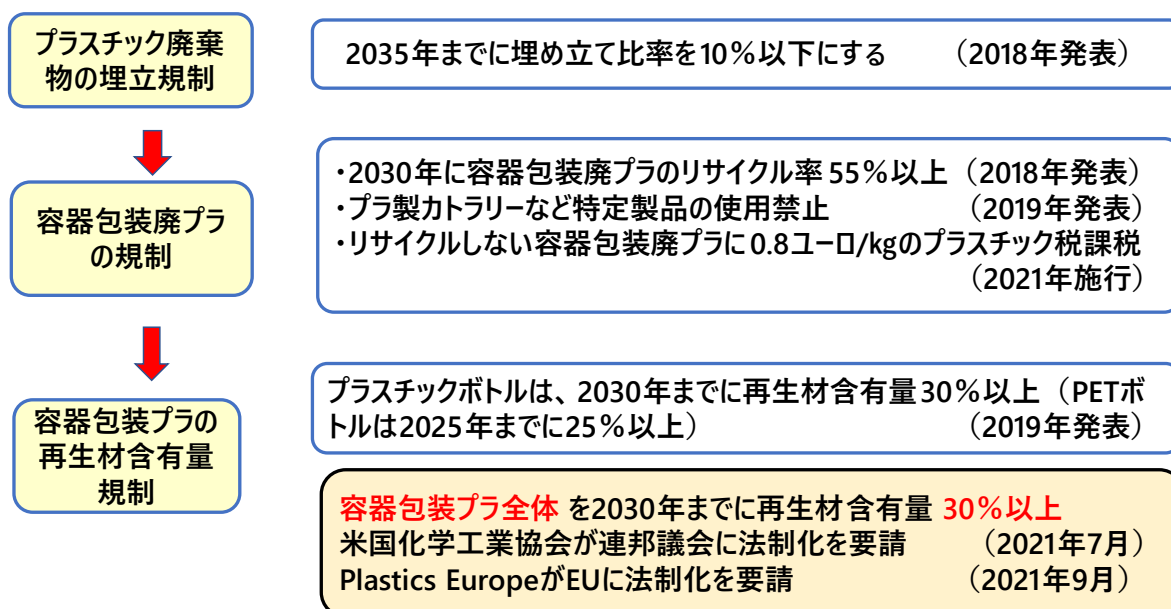


図 16 EU プラスチック戦略(2018 年 1 月)に基づく主なプラスチック規則

出所：各種資料より旭リサーチセンター作成。

(2) 発効予定の EU の新規プラスチック規制と課題(参考文献(2)参照)

現在、3つの規則案が提案されている。

①容器包装（廃棄物）に関する規則（PPWR）合意案：2024年3月発表

この中の最も重要な容器包装プラスチックにおける再生材の最低含有割合の要件を表12に示す。

表12 容器包装プラスチックにおける再生材の最低含有割合の要件

対象	再生材の含有割合	
	2030年以降	2040年以降
主要部分がPET製で、使い捨て飲料ボトルを除く 接触に注意が必要な容器包装	30%	50%
PET以外のプラスチック製で、使い捨て飲料ボトルを除く 接触に注意が必要な容器包装	10%	25%
使い捨ての飲料ボトル	30%	65%
上記以外の容器包装	35%	65%

注：接触に敏感な用途とは、食品、医療など。

出所：規則案より旭リサーチセンター作成。

飲料ボトルもそのほかの容器包装も一律に、2030年の再生材最低含有量規制30%が目指していたが、POなどのPET以外の材料は接触に注意が必要な容器包装の基準を満たすことが技術的に難いため再生材最低含有量を10%に抑えたものと推定される。

容器包装（廃棄物）に関する規則（PPWR）合意案の主要条項を表13に示す。

表13 容器包装(廃棄物)に関する規則(PPWR)合意案の主要項目

第5条	容器包装中の物質の要件
第6条	リサイクル可能な容器包装
第7条	容器包装用プラスチックにおける再生材の最低含有割合の要件
第11条	容器包装の表示
第13条～第17条	経済事業者の義務
第22条	特定容器包装形式に関する使用制限（禁止）
第26条	再利用の目標
第28a条	テイクアウト事業者の再充填義務
第44条	デポジット・リターン・システム（DRS）
第46条	容器包装の材料別リサイクル目標

出所：規則案より旭リサーチセンター作成。

課題：前述のように、接触に敏感な用途用の P0 再生材の供給。

②ボトル CR のための「燃料除外マスバランス方式」の法律ドラフト：2024 年 2 月発表

課題：この規則は、ボトルの再生材含有量の定義のためのものである。その他の容器包装プラスチックや、自動車用プラスチックについてはまだ決まっていない。

③EU の ELV 規制案（自動車用プラスチックの再生材含有割合 25%（そのうちの 25%は廃車由来））。規則決定後、72 か月で施行される。2030 年以降か？：2023 年 7 月発表

課題：寿命の長い自動車用プラスチック由来の再生材は、物性低下と安全性（現在は禁止されている化学物質（臭素系難燃剤）が含まれている）が懸念される。臭素含有難燃剤含有プラスチックを選別する技術（X 線分析選別装置など）の開発が重要となる。この問題は電気製品のリサイクルで既に問題になっており、三菱電機は臭素系難燃剤を含むプラスチックを選別する X 線分析選別装置を既に開発している。図 17 に三菱電機の家電製品の高純度プラスチックリサイクルフローの全体を示す。

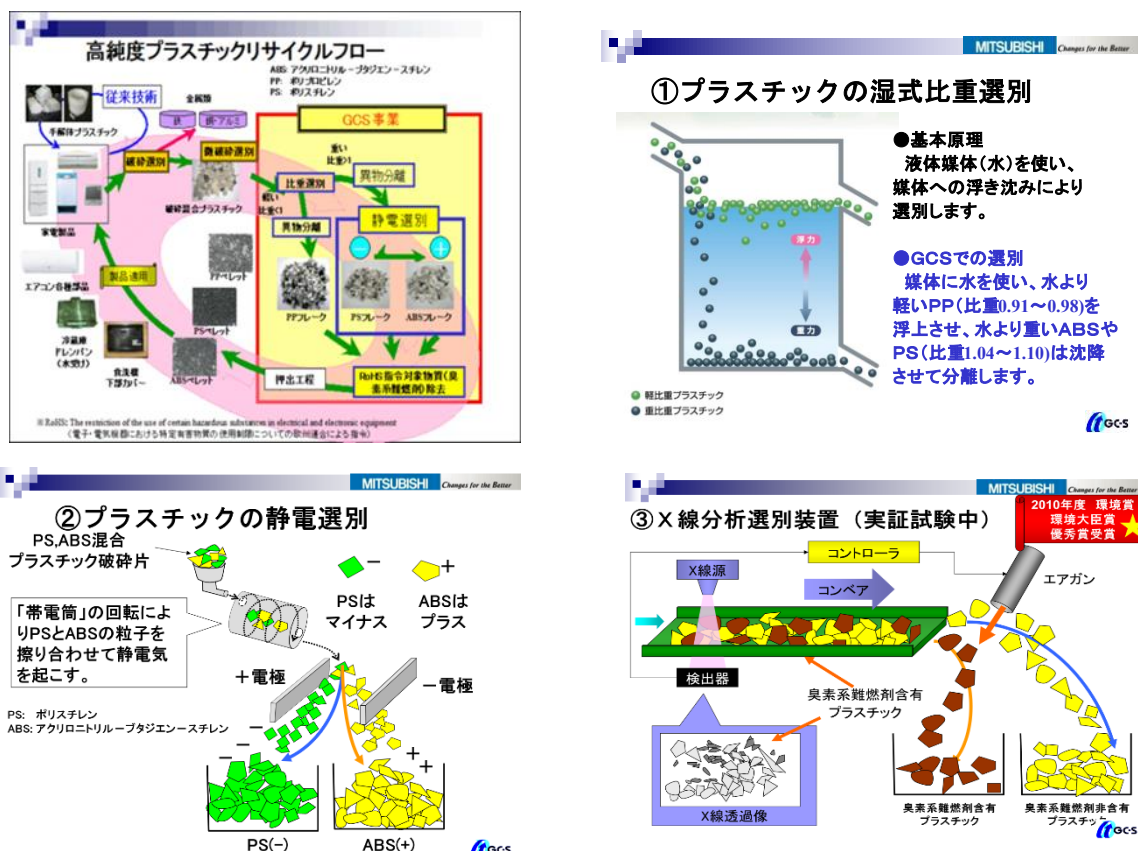


図 17 三菱電機の高純度プラスチックフロー

出所：三菱電機提供 <https://www.pwmi.or.jp/column/column-891>。

おわりに

前回の調査（参考文献(1)）以降のトピックスとしては、①リサイクルビジネスに既に参入しているP0メーカーが、さらにリサイクラーの買収や提携、設備の新增設などにより事業を強化・拡大していること、②MRプロセスにロボティクス、AI、新規識別手法（電子透かし技術など）を導入して、自動化や高度化が具体化してきたこと、③新MR技術を利用した再生材料や食品容器包装用再生材グレードが開発されたことである。なお、EUの食品容器包装用再生材規則はFDAに比べて厳しいため、EU（EFSA）の認定を取るのには容易ではなく、当面供給量不足が懸念される。また、同様に時間的に、技術的に供給量不足が懸念されるのは、ELV規則案に対応するP0再生材である。

一方、今回の調査を通じて、あらためて欧州のP0・MRビジネスの強さを認識した。具体的には、①MRによる年間300万トンを超えるP0再生材市場、②世界をリードする先端リサイクル機器メーカー（EREMA、TOMRA、Pellenc STなど）、③膨大な数のリサイクラーと大規模リサイクラー（Veolia、Remondisなど）、④無臭HDPE100%再生材ボトル、再生P0フィルム、自動車用再生PPなどの先端再生材製品の実用化、⑤P0メーカー（Borealis、LyondellBasell、TotalEnergies、Dowなど）やコンバーター（ALPLA、Berry Global）のMR事業の強化・拡大、⑥再生材含有量規制や再生材の基準・規格（ISOなど）などで世界をリードである。

参考文献

(1)～(3)はARCレポート（府川伊三郎）

(1) プラスチックのメカニカルリサイクル（欧米のポリオレフィンMRの動向） 2022年9月

https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/pdf/rs-1059.pdf

(2) EUの容器包装に関する規則案、マスバランス方式案、ELV規則案 2024年10月

https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/pdf/rs-1071.pdf

(2) 2030年の日本のプラスチック（リサイクルとバイオマスプラスチック） 2023年4月

https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/pdf/rs-1062.pdf

Appendix

1 MR のフロー(工程)と技術

1.1 廃プラの収集(collection)、選別(sorting)、再生処理(reprocessing)

図18に示すように、廃プラの処理プロセスとして、①混合収集とMRF、②分別収集と一次選別、③再生処理工場がある。米欧日を比較すると、

米国は、①混合収集－MRF（マテリアル リカバリー施設）方式がメインである。MRFの企業と再処理工場企業は経営や立地が異なる場合が多い。

欧州は、①混合収集（含むMRF方式）と②分別収集がそれぞれ約50%である。前者のリサイクル率は3.8%と低く、後者のリサイクル率は49.4%と高い

日本は、②分別収集が中心である。一般ごみは収集・一次選別と再生処理を別の企業がやっていたが、プラスチック資源循環の促進に関する法律（2021年6月）により、再生処理企業（リサイクラー）が申請により直接自治体から廃棄物を収集できるようになった。

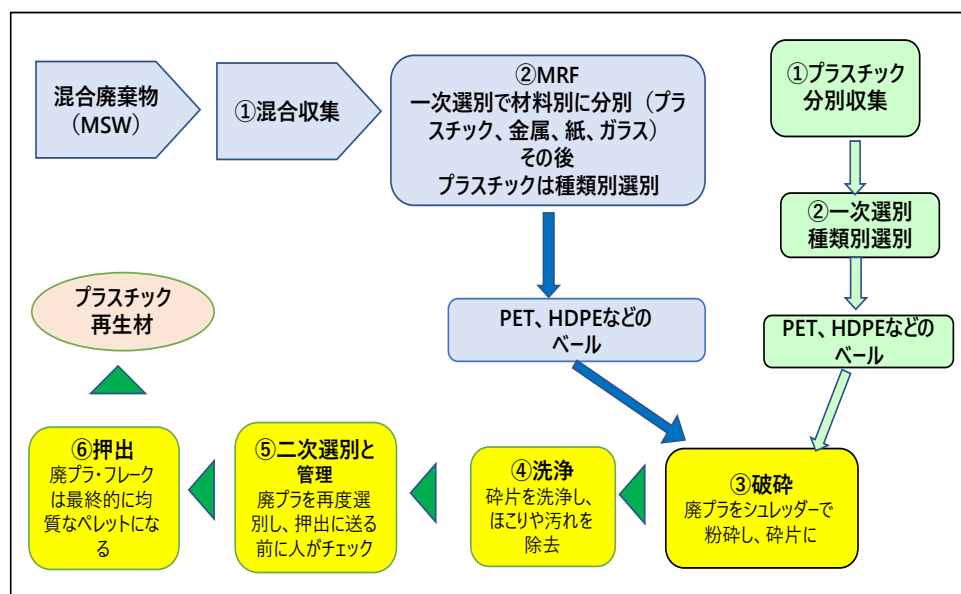


図 18 混合収集と MRF(青色地)、プラスチック分別収集と一次選別(緑色地)、再生処理工場(黄色地)

出所 : Plastics Recyclers Europe : Publication

<https://www.plasticsrecyclers.eu/plastics-recyclers-publications>

を参考に旭リサーチセンター作成。

1.2 米国・欧州の MRF(マテリアルリカバリー施設)

MRFにおける混合廃棄物のマテリアルフローを図19に示す。

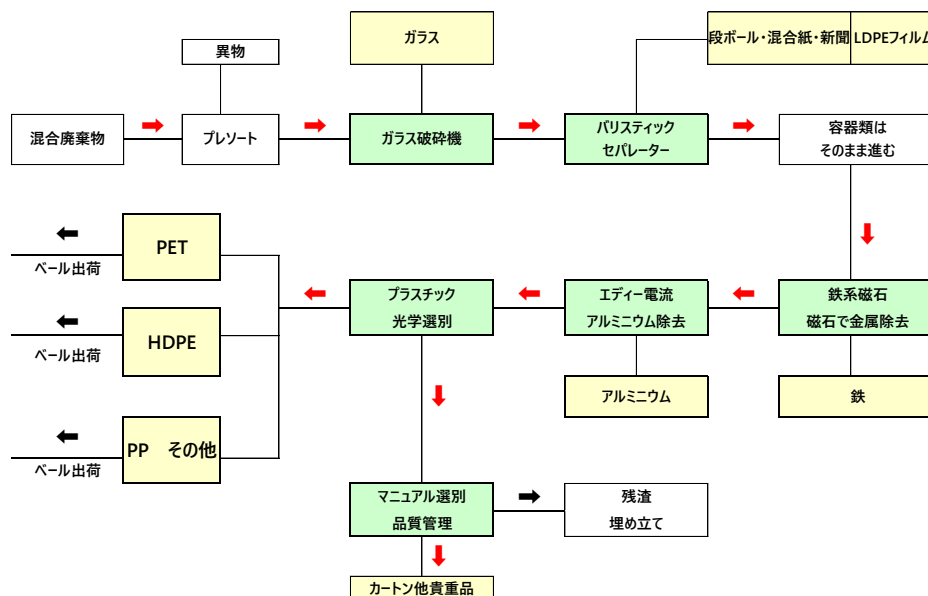


図19 米国のMSW用マテリアルリカバリー施設(MRF)のフロー図

出所：Davis, T., de Thomas, D., Matta, T., ASTRX Review of Material Flow at MRFs and Reprocessors;
<https://astrx.org/wp-content/uploads/2019/12/ASTRX-Review-of-Material-Flow-at-MRFs-and-Reprocessors-1.pdf>
 を基に、旭リサーチセンター作成。

図19に示すように、ガラス、紙類、鉄、アルミニウム、プラスチック、カートンが順次選別される。プラスチックは光学選別機（NIRなど）で、PET、HDPEおよび“PPとその他”（#3～#7）の3つに選別される。さらに、PPを選別することもある。

1.3 プラスチック混合廃棄物の究極的選別

PRE (Plastics Recyclers Europe) のリサイクルフロー（図20）を紹介する。

原図は、光学選別機メーカーのTOMRAが作成したものである。光学選別機をふんだんに使って、プラスチックを可能な限り種類別・形状別（フィルム、ボトルなど）・色別に選別していることが特徴である。

図20のフローでは、まず不純物の金属や非鉄金属が分離されてプラスチック類が残る。プラスチック類は風力シフター（図23参照）により、軽量成分（フィルム類など）と重量成分

に分けられる。軽量成分はNIRにかけられて、PEフィルム、PPフィルム、その他フィルムに選別される。必要ならば、さらにNIRによってカラー（色）選別を行う。一方、重量成分は、バリスティックセパレーターで2D（平らな軽いもの）と3D（転がる重いもの）に選別する（図20参照）。2D成分は、風力シフターの軽量成分と一緒にして処理される。3D成分は、複数のNIRを使用して、PET、HDPE、PP、PS、その他回収プラスチックに選別される。光学選別機は形状を検知・選別できるので、ボトルとトレーに選別できる。さらに、光学選別機によってボトルやフィルムはカラー（色）で選別される。

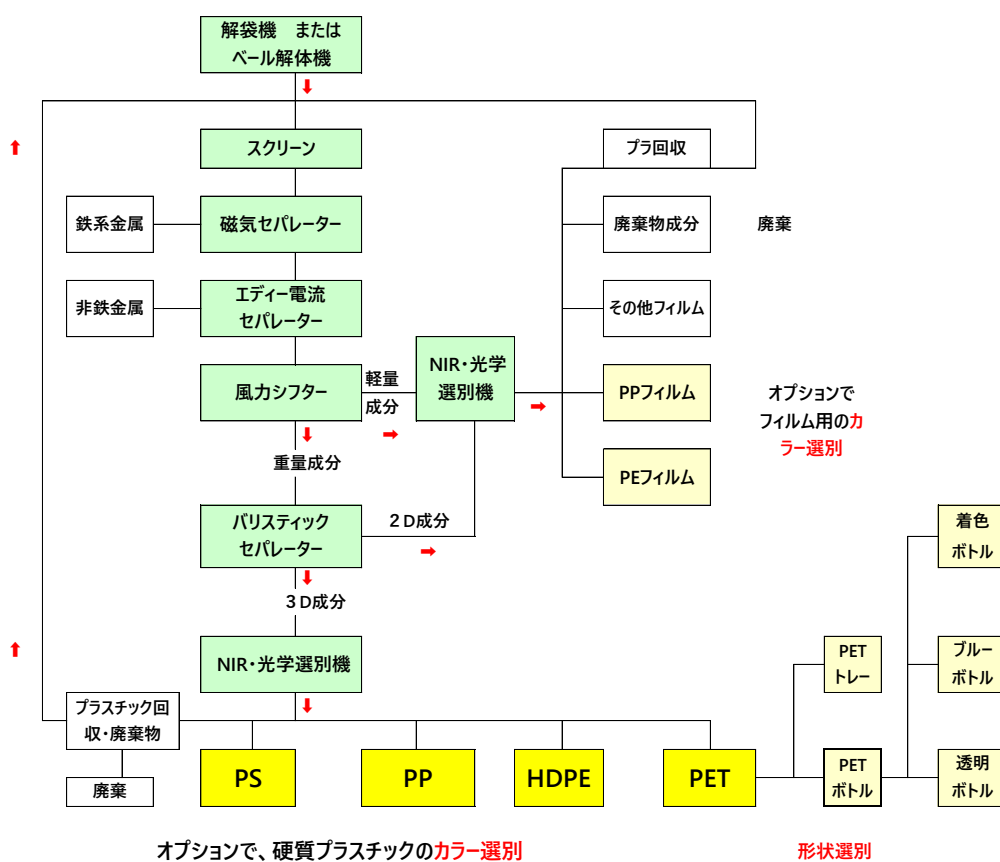


図20 プラスチックの究極的な選別によるリサイクルフロー

出所：PLASTICS RECYCLERS EUROPE：Publication

(<https://www.plasticsrecyclers.eu/plastics-recyclers-publications>)

GUIDANCE ON QUALITY SORTING OF PLASTIC PACKAGING: ESTABLISHING HIGHLY REFINED PACKAGING WASTE STREAMS
を基に旭リサーチセンター作成。

1.4 選別技術と選別機器

(1) 各種の選別技術と選別機器

- ①マニュアル選別：現状、リサイクルフローには必ずどこかの工程でオペレーターによるマニュアル選別とチェックが行われている。
- ②バリスティックセパレーター：選別によく使用される。セパレーターの原理図と外観を図21と図22に示す。揺動式パドルにより材料を「平らな軽いもの（2D）」「細粒物」「転がる重いもの（3D）」の3種類に選別する。

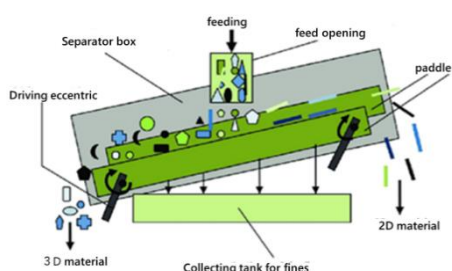


図21 バリスティックセパレーターの原理図 図22 バリスティックセパレーターの一例(Andritz製)

図20の出所：https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-a-ballistic-separator-adopted-from-Martens-Goldmann-2016_fig1_334361959

図21の出所：<https://www.andritz.com/products-en/recycling/recycling/ballistic-separator-rebal>

- ③風力シフター：図23のSingle Drum Separator (SDS) は、一つのsplitter drumを持ち、そこで重いものと軽いものが分離される。

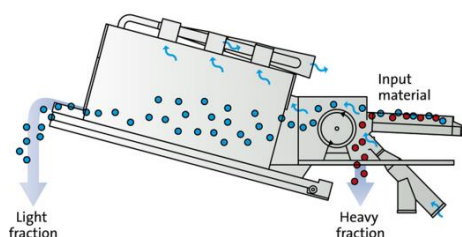


図23 風力シフターの原理図

出所：Nihotのホームページ。
<https://nihot.nl/products/sds-windshifter/>

- ④浮遊選別法 (Flotation)：プラスチックの密度差を利用した選別法である (図24)。P0 (PPの密度は0.90~0.92、LDPE・LLDPE 0.91~0.93、HDPE 0.94~0.965) は水に浮き、その他プラスチック (PS 1.04~1.05、PC 1.15~1.2、ABS 1.2~1.25、PET 1.34~1.39、PVC

1.16～1.30、エンブラや各種生分解性プラスチックは1.0以上)は水に沈むので、POを分離するのに便利な方法である。

⑤静電選別装置：2種のプラスチックの片方にプラスの、もう一方にマイナスの静電気を与え選別するものである。PS/ABS、ABS/PC（ポリカーボネート）、PET/PVCなど2種の混合物の選別に適している。

⑥X線分析選別装置：X線吸収能が大きいハロゲンを含む難燃剤やPVC容器の選別などに適する。

⑦NIR（近赤外光学選別機）：選別にはNIRがよく使用されている（図19や図20）。

(2) 選別技術の開発

AI利用識別と組合せたロボティクスがリサイクル工程に導入されている。AI対応のビジョンシステムがコンベヤーベルトをスキャンし、特定の種類のプラスチックを探す。アイテムを見つけると、ロボットのアームが急降下し、吸着グリッパーでアイテムをつかむというものである。ロボティクスは、コストの削減、手作業の削減、リサイクル効率の向上およびリサイクル材料の純度向上に貢献するという。今後、ロボティクスはマニュアル選別にとって代わっていくであろう。

同様に、NIR選別とロボティクスに加えてAIを導入すると、プラスチックレベル（プラスチックの種類）よりもむしろ、容器包装と用途のレベルで選別する機能が導入される。

「HolyGrail（聖杯）」と呼ばれるEllen MacArthur Foundationの先駆的なプロジェクトにより、仕分け機能のさらなる向上が期待される。30社のコンソーシアムは、化学トレーサーと電子透かし（digital watermarks）の助けを借りて、使用済み容器包装の選別の改善を目指している。このプロジェクトには、典型的なMRF選別ラインで電子透かしを検出する技術の開発も含まれている。

電子透かしとAIを組合せると、同じプラスチック材料でつくられた非食品用容器包装と食品接触用容器包装を区別し、分離することができる。これにより、容器包装のリサイクル性を向上させることができる。使用済み廃プラの中から、食品接触用容器包装プラのみを選別・分離して再生材をつくることができるからである。

このイニシアティブは120以上の企業や組織が協力して、高品質なリサイクルに貢献する電子透かし技術を評価する。電子透かしは、消費財の容器包装の表面に（印刷やモールドイング）で切手サイズの知覚できないコードを付与し、使用後のリサイクル工程で検知する。

2 再生 PO の品質課題と改良技術

欧州では、HDPEボトルやLDPEシュリンクフィルムでは水平リサイクルが実用化されている。ただし、一般にはPO再生材はバージンプラスチックより品質が低いことから、低付加価値のダウンリサイクル（ベンチ、園芸用品、建築・土木分野など）にとどまっていることが多い。

品質問題としては、力学特性不足、異物（不純物）、外観、色、臭い、品質のバラツキなどがある。このうち、力学特性不足の解消については福岡大学八尾滋教授が開発した高性能リサイクル技術が広く実用化されることが期待される。また臭いについては、押出機の脱気と脱臭機の組合せで揮発性物質を除去することで解決できる。また、カラー選別による色の改良も一部実用化されている。

再生材の品質問題とそれを引き起こす原因、対策について図24にまとめた。

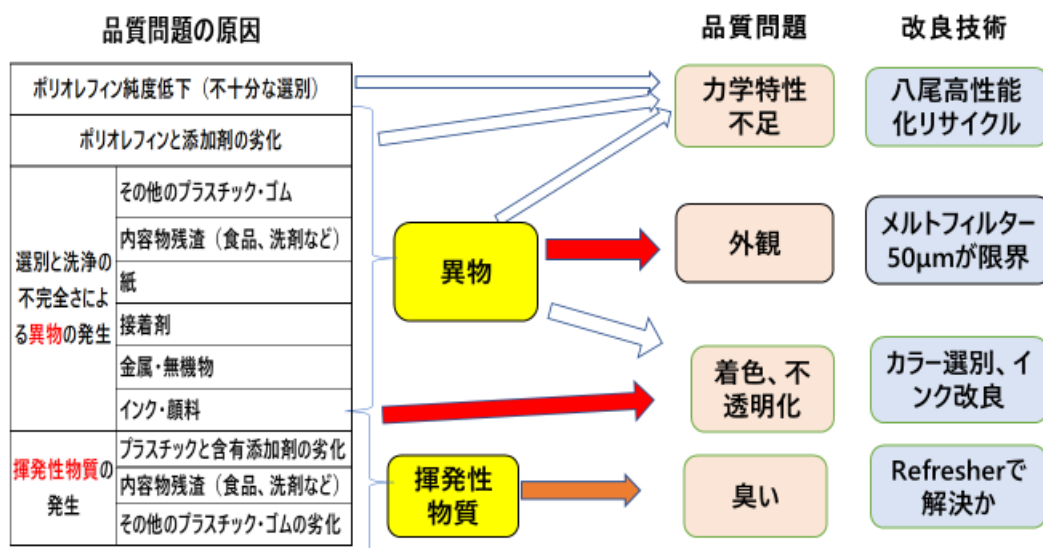


図 24 再生 PO の品質問題、原因、対策（改良技術など）

出所：旭リサーチセンター作成。

<本レポートのキーワード>

メカニカルリサイクル、ポリオレフィン（PE・PP）、MR 技術とプロセス、選別機、プラスチック再生材、品質問題、欧州、米国

(注) 本レポートは、ARCのWEBサイト (<https://arc.asahi-kasei.co.jp/>) から検索できます。

このレポートの担当

シニアリサーチャー 府川 伊三郎

E-mail fukawa.ig@om.asahi-kasei.co.jp

<https://arc.asahi-kasei.co.jp/contact/>