

ポリエステル繊維とPET樹脂の リサイクル技術と最新動向

ポリエステルの『繊維 to 繊維』ケミカルリサイクル (CR) は、欧米 3 社が事業化を開始し、約 10 社が開発中である。フランス政府の支援スキーム、EU の繊維のエコデザイン規則施行、EPR 制度制定案合意など『繊維 to 繊維』推進の機運が高まっている。混紡や染色されているポリエステル繊維製品の CR はハードルが高いが、それを克服する技術が出てきている。

一方、PET 樹脂 (ボトル) のメカニカルリサイクル (MR) は急速に拡大している。同じ飲料ボトル用途を狙う PET 樹脂 (ボトル) の CR は、コストが高いためスケールアップに苦戦している。

2025 年 5 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

- ◆2022年の世界のポリエステル繊維の需要は約5,600万トンで、PET樹脂の需要は2,400万トンである。PET樹脂はボトル用途が増加した。ポリエステル繊維もPET樹脂も生産量は中国がトップである。 (2～4 頁)
- ◆PETの重合法としては、直接重合法（TPA（テレフタル酸）法）とエステル交換法（DMT（ジメチルテレフタレート））法があるが、現在は前者が主流である。 (4～7 頁)
- ◆PETの解重合法 CR としては、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、メタノール・アルカリ分解法、酵素分解法などがある。 (7～8 頁)
- ◆プラスチックのリサイクルの中で、PET樹脂（ボトル）のメカニカルリサイクル（MR）は最も進んでいる。また、PET樹脂のCRも収率が高く、1段階で価値あるモノマーが得られる優れた方法である。Eastman Chemicalは米国で既にCRを工業化しているが、欧州ではMRと同じ飲料ボトル用途を狙うCRは、コストが高いため工業化に苦戦している。また、ポリエステル繊維のリサイクルは樹脂に比べ相当遅れている。 (8～10 頁)
- ◆PETは優れたリサイクル性を持ち、しかも製造時のポリマー1 kg当たりのCO₂発生量はPEやPPと同等である。Indorama Ventures（タイ）はこの優れた性能を持つPETに賭け、企業買収によりPET樹脂、ポリエステル繊維、PET樹脂リサイクルの事業を急速に拡大し、現在ではPET樹脂の世界のトップメーカーである。同社は、世界のCR企業3社と提携して、工場建設決定に重要な役割を担っている。 (11～14 頁)
- ◆MRの技術、市場、EUのプラスチックの容器包装規則について解説した。近年、日本ではMR新工場の建設ラッシュで、2023年に総生産能力は40万トン/年になり、日本の「ボトル to ボトル」比率は33.7%に上昇した。PETのMR再生材は飲料用ボトルだけでなく、非飲料用ボトル、シート、繊維の用途に使用されている。 (15～18 頁)
- ◆欧米の3社（Syre、Ambercycle、Reju）が『繊維 to 繊維』リサイクル事業を開始した。衣料の製造小売大手H&MはスタートアップのSyreに強力な資金援助を行い、同様に衣料の製造小売大手InditexもスタートアップのAmbercycleに強力な資金援助を行った。川下の衣料メーカーや小売が『繊維 to 繊維』リサイクル推進のために大きな投資をしたことは注目に値する。

『繊維 to 繊維』リサイクルに取り組む世界企業 6 社の動向を表 9 にまとめた。この 6 社以外に、帝人の DMT 法 CR 技術を導入している中国の浙江佳人新材料が再生ポリエステル繊維を年間 3 万トン生産していると発表している。また、Eastman Chemical は既存リサイクル工場を利用した繊維の CR 事業化に着手している。その他、国立研究開発法人産業技術総合研究所（産総研と略す）（DMC 分解法）、キリン（酵素分解法）、Worn Again Technologies（イオン液体使用の溶媒精製法）が開発中である。（19～20 頁）

表 9 『繊維 to 繊維』リサイクルに取り組む世界企業の動向

企業名	Syre	Ambercycle	Reju	帝人フロンティア	Carbios	DePoly
国	スウェーデン、米国	米国・ロサンゼルス	フランス	日本	フランス	スイス
企業の性格	2024年3月にH&Mなど3社が創設（6,000万ドル初期投資）	2015年創設のスタートアップ	2023年11月にTechnip Energiesが創設（ベースは2021年設立のIBM、Technip、Under Armourの合併会社）	・帝人の子会社 ・帝人は既にDMT法リサイクル技術を開発し、事業化の経験あり（国内および中国（かつての合併会社の浙江佳人新材料））	スタートアップ	2020年設立のEPFL大学発スタートアップ
資金		・2023年10月にInditexが3年間の			・5万トン工場の建設費：2.3億ユーロ ・Indorama Venturesが工場建設に1.1億ユーロ拠出予定だが、まだ確定せず ・2024.12 フランス政府から4,250万ユーロの支援確保か	2023年6月：1,380万ドル獲得
提携	H&Mは、Syreが製造した再生ポリエステルを7年間、総額6億ドルで購入する契約締結	購入計画で7,000万ユーロ以上を支払う契約締結 ・中国3社、カナダ1社と提携	Goodwill（米国）とWM（米国）と協力して、北米における繊維リサイクル事業の推進計画作成中	2024.12に良品計画とPET繊維製品の完全循環型リサイクルプロジェクトを共同で開始		
開発レベル		～1トン/日のTシャツ処理能力			・デモプラント稼働中 ・5万トン工場着工：フランス・Longlavill、稼働は2026年見込み（2024年4月発表） ・資金計画が明確になるまで一時工事延期（2024年12月）	2021年以来パイロット運転
事業化計画	2025年にBlue Print工場稼働（米国NC州のSelenis・PET工場）最高1万トン/年	Inditexからの資金で商業プラントを建設：2025年稼働見込み、10トン/日のTシャツ処理能力	2024.10：ドイツに「繊維to繊維」のハブ開設	新触媒のBHET法パイロット（2022年5月スタート）		
	2027年 15-20万トン/年工場稼働					2024年6月ショーケース工場建設開始
CR技術	グリコール分解法	溶媒精製法	グリコール分解法（VolCat触媒）	グリコール分解法（新触媒）	酵素分解法	常温/光触媒・光照射法
技術の源	ノースカロライナ大学の2教授（スタートアップ）	創業者2名（カリフォルニア大学の学生～）	IBMのVolCat	帝人フロンティア	Carbios	EPFL大学（スイス）
生成物	BHET	精製PET	BHET	BHET	TPAとMEG	TPAとMEG
解重合条件	・高温（～220℃） ・原料PET溶解 ・急速加熱（高周波加熱法利用）	・染色されたPET混紡製品から、特定の溶媒・温度条件でPETを抽出	・高温（～220℃） ・原料PET溶解 ・VolCat触媒	・高温（～220℃） ・原料PET溶解 ・新触媒	・～70℃ ・固体PETの反応性を高めるため非晶化の事前処理	・常温 ・固体PETの反応 ・非晶化不要

出所：各種資料より旭リサーチセンター作成。

◆2025 年 2 月に欧州委員会は、フランスのプラスチック廃棄物の CR について 5 億ユーロ支援するスキームを承認した。対象に一定量のポリエステルを含有する繊維材料が

含まれている。2024 年 12 月には、PETCORE EUROPE が『繊維 to 繊維』リサイクル推進の提言を行った。EU は 2024 年 7 月にエコデザイン規則（ESPR）を施行し、その 25 条で衣類や履物の売れ残った消費財の廃棄を禁止し、2025 年 2 月には繊維製品の拡大生産者責任を義務付ける EPR 制度法案（合意案）を発表した。（21～24 頁）

◆『繊維 to 繊維』リサイクルの技術的課題としては、その繊維製品の多くがコットンやポリウレタン弾性繊維などとの混紡であり、また染色されていることがある。グリコール分解法と溶媒精製法について、課題解決の方策を考察した。（25～29 頁）

◆『繊維 to 繊維』リサイクルに取り組む 11 社の各論をまとめた。このうち、帝人フロンティア新触媒による高純度 BHET を直接得る新技术が注目される。（30～46 頁）

◆PET 樹脂の CR に取り組む企業の各論をまとめた。各企業の状況を表 10 に示す。
Eastman Chemical は米国で 2022 年末に、10 万トン/年のメタノール分解法工場を稼働し、マスバランスを利用した再生 PET 樹脂を販売中である。Ioniqa は 2024 年 10 月に破産したが、12 月にライセンスビジネスに特化して再出発した。Loop Industries は共同で計画中であったフランス工場を 2024 年 11 月に、韓国工場を 2025 年 1 月にいずれも断念した。（47～57 頁）

表 10 PET 樹脂の CR 企業の概要と工場建設状況

	JEPLAN	Eastman Chemical	gr3n	Loop Industries	Carbios	Ioniqa
企業規模	スタートアップ	PETの大手メーカー	スタートアップ	スタートアップ	スタートアップ	スタートアップ
所在地	日本	米国	スイス	カナダ	フランス	オランダ
プロセス	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	メタノール・アルカリ分解法	酵素分解法	グリコール分解法
特徴	分解温度220℃、BHETの再結晶、分子蒸留による精製	以前に開発した自社技術。酢酸亜鉛触媒	マイクロウェーブ加熱、200℃未満、10分以内	常温・常圧、アルカリ（NaOCH ₃ ）使用		磁性流体にグラフトしたイオン液体触媒使用
生成物	BHET	DMT、MEG	TPA、MEG	DMT、MEG	TPA、MEG	BHET
設備の年間処理能力	・2万トン（川崎市、2004年） ・休止中であったが本格再稼働（2021年11月発表）	・米国に10万トン工場建設（2022年末稼働）、2.5億ドル投資 ・フランス・ノルマンディに16万トン工場計画（2022年1月発表） ・米国第2工場建設計画（テキサス州）11万トン（2024年3月発表）	・EU Horizon2020支援のDEMETOプロジェクト ・Next Chemは1,000トン工場（イタリア）を完成（2022年4月発表）	・SUEZ、SK Geo Centricと提携して工場建設計画：7万トン、フランス・建設（2024年12月計画中止発表） ・SK Geo Centricと蔚山に9.4万トン工場計画、2025年稼働（2025年1月取りやめ発表）	・デモプラント稼働中 ・5万トン工場着工：フランス・Longlavill、稼働は2026年見込み（2024年4月発表） ・資金計画が明確になるまで一時工事延期（2024年12月）	・1万トン（オランダ、2019年） ・破産発表（2024年10月） ・ライセンス事業中心に再出発発表（2024年12月）

出所：各種資料より旭リサーチセンター作成。

目 次

はじめに	1
1. ポリエステル繊維と PET 樹脂とは	2
1.1 ポリエステル繊維と PET 樹脂の市場	2
1.2 PET の重合法(工業的製造方法)	4
1.3 PET の解重合法(CR)	7
1.4 PETの優れたリサイクル性とポリオレフィン同等の CO ₂ 発生量(LCA)	8
1.5 優れたリサイクル性能を持つ PET に賭けた Indorama Ventures	12
2. PET 樹脂のメカニカルリサイクル(MR)技術と再生材市場	15
2.1 PET 樹脂の MR 技術	15
2.2 PET 樹脂の再生材市場とリサイクル企業	16
2.3 EU の PET 樹脂容器包装規制	18
3. ポリエステルの『繊維 to 繊維』リサイクルの最新動向	19
3.1 『繊維 to 繊維』リサイクル事業参入	19
3.2 フランス政府の投資支援スキームと PETCORE の提言	21
3.3 EU の持続可能な繊維戦略、エコデザイン規則、繊維のEPRに関する合意案	23
4. ポリエステルの『繊維 to 繊維』リサイクルの技術的課題と方策	25
4.1 ポリエステルの『繊維 to 繊維』リサイクルの技術的課題	25
4.2 グリコール分解法における課題解決の方策	26
4.3 選択的解重合法(酵素分解法と常温解重合法)における課題解決の方策	27
4.4 溶媒精製法における課題解決の方策	28
5. ポリエステル『繊維 to 繊維』リサイクルに挑戦する企業の各論	30
5.1 Syre(スウェーデン、米国/グリコール分解法)	30
5.2 Ambercycle(米国・ロスアンゼルス/溶媒精製法)	32
5.3 Reju(フランス/グリコール分解法)	35
5.4 帝人フロンティア(グリコール分解法)	38
5.5 Carbios(フランス)、キリン(日本)(酵素分解法)	40
5.6 DePoly(スイス)と産総研(日本)(常温解重合法)	43
5.7 Worn Again、Circ、RE&UP のコットン/ポリエステル混紡の分離・精製法	45
6. PET 樹脂の CR 企業の技術と最新動向	47
6.1 グリコール分解法(JEPLAN、帝人(帝人フロンティア)、Ioniga)	47
6.2 メタノール分解法(Eastman Chemical)	53
6.3 (アルカリ)加水分解法(gr3n と Loop Industries)	55
おわりに	58
参考文献	59

はじめに

本リポートは、PET樹脂のメカニカルリサイクル(MR:マテリアルリサイクルともいう)とPET樹脂とポリエステル繊維のケミカルリサイクル(CR)に関するものである。このうちCR、特に黎明期のポリエステルの『繊維 to 繊維』リサイクルに焦点を当てて、最近の技術開発と事業化の動向をまとめたものである。

PET樹脂のMRとCRについては、既にARCリポート「リサイクルが進むPET樹脂は循環経済を実現するか」(2020年2月)¹と「重縮合ポリマーのケミカルリサイクル」(2023年10月)²を発行している。その中の基礎的なあるいは重要な事項はあらためて本リポートに記載し、本リポートだけでPET樹脂とポリエステル繊維のリサイクル技術と事業の全体を把握できるようにした。

本リポートでは、ポリエチレンテレフタレート(PET)の化学構造を主として有する樹脂をPET樹脂とし、同じ化学構造を主として有する繊維をポリエステル繊維と定義した。また、単なる重合体は、PETまたはポリエステルの用語を使用した。

PETのCR企業の多くは樹脂と繊維の両方のCRを目指すと表明しているが、実際には樹脂のCRが優先である。しかし、本リポートでは繊維に焦点を当てるため、「繊維のCRに取り組む企業」の各論を第5章にまとめ、それ以外の企業は、「PET樹脂のCRに取り組む企業」の各論の形で第6章にまとめた。

略語

MR:メカニカルリサイクル(マテリアルリサイクルともいう) CR:ケミカルリサイクル

TPA:テレフタル酸 PTA:高純度テレフタル酸

MEG:モノエチレングリコール(慣用的にエチレングリコールも使われる)

BHET:ビス(2-ヒドロキシエチル)テレフタレート

グリコール分解法(glycolysis): PET + MEG → BHET

¹ 参考文献(7)

² 参考文献(8)

1. ポリエステル繊維とPET 樹脂とは

1.1 ポリエステル繊維とPET 樹脂の市場

gr3n（PET の CR 技術を開発したスタートアップ）は、「2022 年の世界の PET の需要は約 8,000 万トンと予想され、30%が樹脂（ボトルなど）（2,400 万トン）、70%が繊維（5,600 万トン）で、成長率は年 4%である。使用済み PET のうち、3,500 万トンは埋め立て、1,700 万トンは焼却、1,900 万トンは繊維の再使用、700 万トンは MR、180 万トンは MR 処理時のロス」と述べている³。

図 1 に合繊の生産推移を、表 1 に 2022 年生産量を示す。表 1 によれば、2022 年のポリエステル繊維の生産量は 6,300 万トンで、合繊全体のうちのポリエステルの比率は 81%を占める。

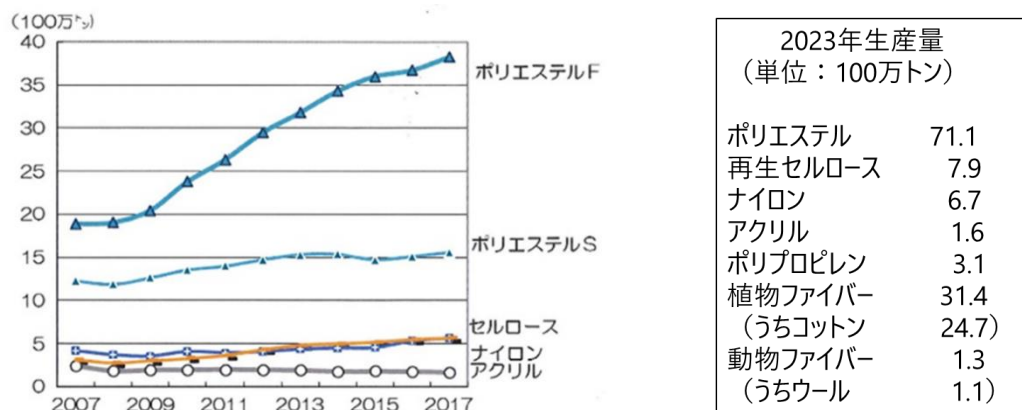


図 1、表 1 世界の主要化繊品種の生産推移

図 1 の出所：日本化学繊維協会「内外の化学繊維生産動向（2017 年）」（2018 年 3 月 13 日）。

表 1 の出所：Textile Exchange Material Market Report より抜粋。

<https://textileexchange.org/app/uploads/2024/09/Materials-Market-Report-2024.pdf>

図 2 に世界の国別合成繊維の生産量推移を示す。中国が急成長し、トップシェアを占めている。

³ <https://www.milanpolymerdays.org/blog/recycling-polymeric-materials-via-an-alkaline-hydrolysis-depolymerization-process-gr3n-approach>

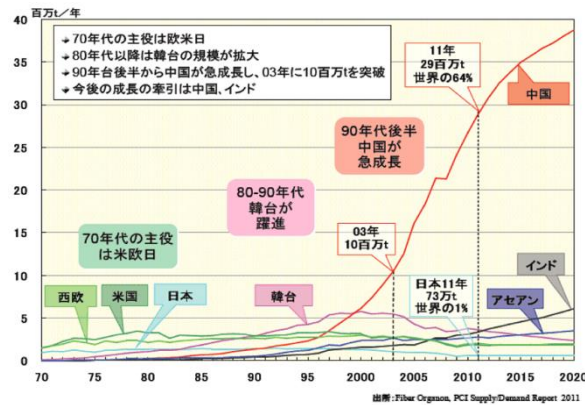


図 2 ポリエステル繊維の国別生産量推移

出所: 経済産業省「繊維産業の現状及び今後の展開について(2013 年 1 月 17 日)」。

資源・リサイクル促進センター資料に同じ図がある。

<https://www.cjc.or.jp/school/d/d-1-3.html>

図 3 は PET 樹脂の国別生産量推移である。PET 樹脂も中国が急成長でトップシェアになっている。

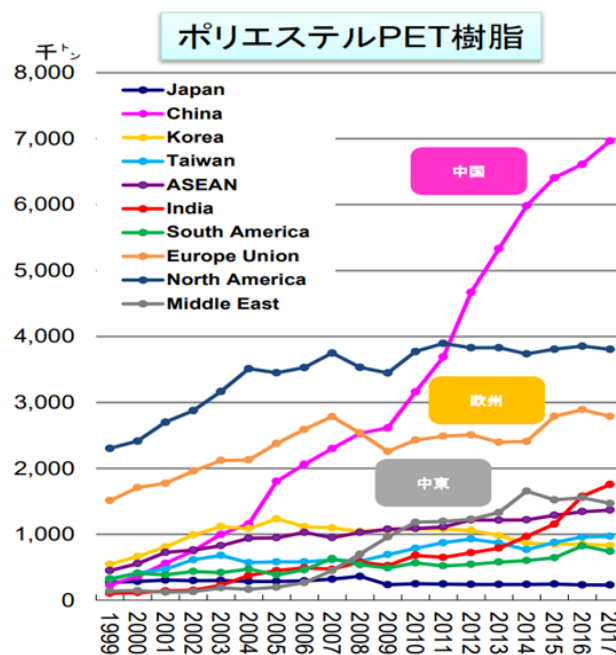


図 3 PET 樹脂の国別生産量推移

出所: 経済産業省資料(三菱商事作成、元資料: Wood Makenzie。2018 年 2 月 20 日)。

表 2 は、2017 年における国別(地域別)にポリエステル繊維、PET 樹脂(ボトルなど)の生産量と主要原料である高純度テレフタル酸(PTA)の需要をまとめたものである。そ

それぞれの出所は異なるが、PET 繊維と PET 樹脂の合計の PET 生産量と TPA の需要から理論原単位で計算した PET 生産量を比較したところ、よい対応が見られる。

国別には、PET 繊維については、中国の生産量が圧倒的に多く世界の 73%を占めている。その後は、インド (9%)、アセアン (5%)、台湾 (2%)、韓国 (2%) と続く。PET 樹脂についても、中国がトップで 33%を占め、続いて北米 23%、欧州 13%となっている。PET 樹脂の主体は、PET ボトルと推定される。

表 2 PET 繊維、PET 樹脂、原料 PTA の国別生産量または需要

	年	世界計	中国	インド	アセアン	台湾	韓国	日本	北米	欧州	中東	注1
PET繊維生産量 (T)	2017	5,385	3,934	480	266	132	123	21	131	107		注1
PET樹脂生産量 (R)	2017	2,130	700	170	130	80	80	60	480	280	150	注2
繊維と樹脂の合計 (T+R)	2017	7,515	4,634	650	396	212	203	81	611	387	150	
PTA換算の PET生産量 (P)	2017	6,888	3,900	490	447	278	312	68	698	364	239	
差額 (T+R-P)	2017	627	734	160	-82	-66	-109	13	-87	-23	-89	
PET再生材生産量	2017							50	56	134		注3
PTAの需要量 需要の伸び率	2016 %/年	5,710 4	3,220 4.4	400 5.6	370 4	240 0.2	270 -0.8	60 -0.9	590 2.1	310 1.3	190 8.5	注4

注 1: 化学繊維協会資料、注 2: 経済産業省資料(元資料は Wood Makenzie)、注 3: 推定、注 4: 経済産業省資料

出所: 各種資料より旭リサーチセンター作成。

1.2 PET の重合法(工業的製造方法)

(1) 直接重合法(または TPA 法)

PET はテレフタル酸 (TPA と略す) とモノエチレングリコール (MEG と略す) の縮合とそれに続くエステル交換反応で工業的に製造される。TPA としては高純度テレフタル酸 (PTA と略す) が使用される。

①縮合反応ステップ

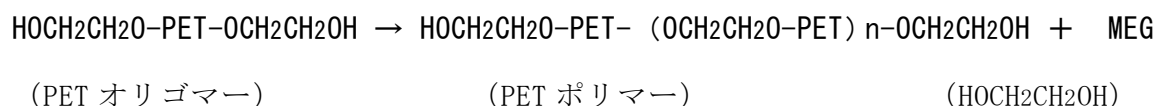
縮合反応は平衡反応なので、PTA と MEG の混合物を加熱しながら水を除去して平衡を生成系にシフトさせて、PET オリゴマーをつくる（下式）。



通常、PTA に対して MEG を当モルより過剰にして縮合させて、両末端がエチレングリコール基の PET オリゴマーをつくる。

②エステル交換ステップ

PET オリゴマーを加熱しながら、副生物の MEG を減圧下に除去していくと、下式の反応が繰り返し起こり、高分子量の PET が得られる。最終的に得られる PET の両末端は安定構造のエチレングリコール基になる。

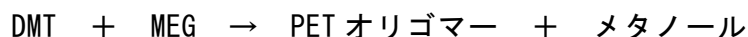


重縮合の反応条件の一例は、まず 250～260℃で副生物を除去しながら 3.5 時間反応させたのち、温度を上げて 280～300℃で副生物を除去しながら 0.1 時間反応させる⁴。

(2) エステル交換法 (DMT 法)

1963 年に帝人が直接重合法を工業化する以前は、ジメチルテレフタレート (DMT と略す) と MEG を原料とするエステル交換法が工業的に実施されていた。当時は、TPA の精製が難しかったため、精製しやすい DMT をモノマー原料に使用した。

①重縮合反応ステップ：副生メタノールを反応系から除去しながら重縮合する（下式）。



②エステル交換ステップ

直接重合法と同様に、PET オリゴマーからエステル交換反応により両末端エチレングリコール基の PET を得る。式は略す。

上記の (1) の TPA 法、(2) の DMT 法による PET の重合には各種の触媒が使用される。

⁴ <https://www.milanpolymerdays.org/blog/recycling-polymeric-materials-via-an-alkaline-hydrolysis-depolymerization-process-gr3n-approach>

図 4 に主要化合物の化学式を示す。

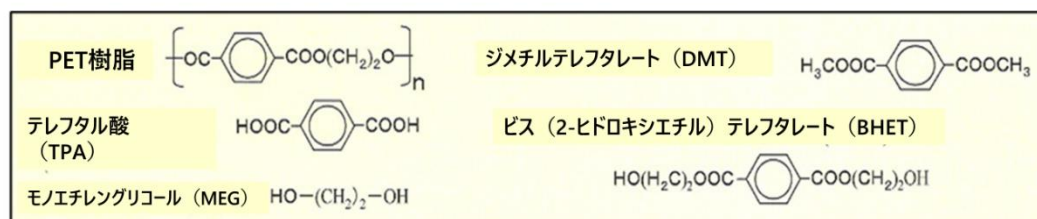


図 4 主要化合物の化学式

出所: 各種資料より旭リサーチセンター作成。

(3) ボトル用 PET と繊維用 PET の製造

樹脂も繊維も同じ PET であるが、樹脂の方が繊維より分子量が高い。ボトル用の PET 樹脂の固有粘度 (I.V. : 分子量の指標) は 0.8 で、繊維の固有粘度の 0.6 よりも高い。

通常、無溶媒の熔融重合で繊維用ペレットを製造する。そして、繊維用ペレットをさらに固相重合により分子量を上げてボトル用ペレットを製造する。

熔融重合は、重合度が上がるにつれて熔融粘度が上がり攪拌が難しくなり、副生物の MEG の除去が難しくなる。このため、ボトル用ペレットの製造には、熔融粘度の制約がない固相重合法が用いられる。固相重合は PET を結晶化させた後、PET のガラス転移温度以上かつ結晶融点以下の温度で重合する。重合温度が高い方が反応速度上は有利だが、結晶融点に近いとペレットが融着するので、それ以下の温度にする。

(4) ポリエステル重合触媒

ポリエステル重合触媒としては、アンチモン酸化物、チタン酸化物、ゲルマニウム酸化物が使用される。触媒は、重合速度の加速効果と得られる PET の品質の両方の観点から評価される。PET の品質としては無色透明なものが必須となる。

東洋紡は 2002 年に、アンチモンなどの重金属を含まない世界初のアルミニウム系ポリエステル重合触媒 (TOYOB0 GS Catalyst®) を開発し、この触媒を使用して製造した PET 樹脂は、透明度が高く、熱安定性に優れているため熔融成形時の劣化が起こりにくいなど、環境対応性に優れた特徴を有していることを発表した。2017 年には、PET 樹脂製造

最大手の Indorama Ventures と「TOYOBO GS Catalyst®」を使用した重合技術や特許に関するライセンス契約を締結するなど、グローバルに展開している。

また、「TOYOBO GS Catalyst®」は、リサイクル性に関する APR 認証（The Association of Plastic Recyclers）を取得したと発表した（2024 年 5 月 24 日）。図 5（写真）は、3 種の触媒を用いて製造した PET 樹脂を加熱溶融（300℃、2 時間）した際の黄変の状況を示す。

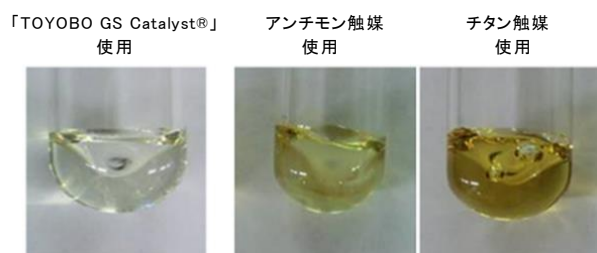


図 5 3 種の触媒を使用して製造した PET 樹脂の外観

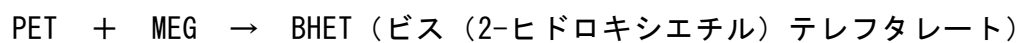
出所: 東洋紡 https://www.toyobo.co.jp/news/2024/release_1613.html

1.3 PET の解重合法 (CR)

これまでに PET の多様な化学的解重合法（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、酵素分解法など）が開発され、いずれも工業化を目指している。なお、PET 樹脂と PET 単一繊維は、基本的には同じ方法で CR が可能である⁵。

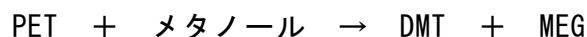
PET の解重合には次の手法がある。いずれの手法も原料モノマーを回収できる。

① グリコール分解法 (glycolysis)



（再重合：BHET を加熱しながら、重合系より MEG を除去）

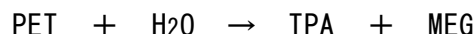
② メタノール分解法 (methanolysis)



（再重合は DMT 法）

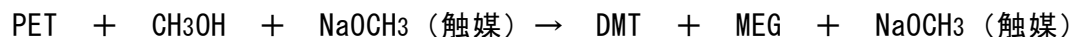
③ （アルカリ）加水分解法 (hydrolysis)

⁵ 参考文献(3)



(再重合は直接重合法)

④メタノール・アルカリ分解法：NaOCH₃（ナトリウムメトキシサイド）を使用した場合



⑤酵素分解法：特定酵素により PET のみが選択的に分解され、TPA と MEG が得られる。

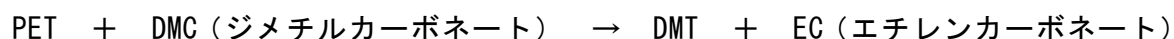


以下 2 つは、ポリエステル繊維の選択的分解を狙った常温分解技術である。

⑥光触媒（酸化チタン）&UV 照射分解法



⑦DMC 分解法（アルカリ触媒使用）



1.4 PETの優れたリサイクル性とポリオレフィン同等の CO₂ 発生量 (LCA)

(1) PET の優れたリサイクル性

表 3 に汎用プラスチックの MR と CR の特徴と事業化状況を示す。

表 3 汎用プラスチックの MR と CR の状況

	プラスチックの種類	ステージ	日本	欧州	米国	リサイクルプロセス	再生材の品質	代表的な再生製品
メカニカルリサイクル (MR)	PET (ボトル)	実用化が特に進んでいる	◎	◎	○	個別分別収集、選別、アルカリ洗浄、固相重合、ボトル成形	バージン並み	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	○	◎	○	収集、選別、粉碎・洗浄、(選別)、押出	バージンより劣る (物性、色、臭い、外観、異物)	水平リサイクル (ボトルなど) 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)	実用化・プラント新設中	○	○	○	PETは化学的解重合で、PSは熱分解的解重合でモノマー取得	バージンプラ並み (大規模生産による工業的実証はこれから)	水平リサイクルが狙い (食品容器包装用途など) だが、実証はこれから
	PE/PP/PS (熱分解法)		○	◎	○	選別、溶融、熱分解により熱分解油取得		

出所：各種資料より旭リサーチセンター作成。

表 3 の中で世界的にリサイクルが最も進んでいるのは、PET 樹脂（ボトル）の MR である。日本では 2023 年に「ボトル to ボトル」比率が 33.7%に上昇した。また、EU の 2022 年における PET ボトルの再生材比率は 24%に達している。

表 4 に各種 CR の特徴をまとめた。

表 4 各種 CR の特徴

手法	廃プラの例	処理条件	生成物
解重合法	PETボトル	グリコール分解	BHET
		メタノール分解	DMT + MEG
	ポリスチレン	無酸素熱分解（500℃）	PS⇒SM
熱分解法	混合廃プラ（PE/PP/PS）	無酸素熱分解（400～500℃）	熱分解油（ナフサなど）
ガス化法	PE/PP/PS/PVC/PETほか	純酸素供給、2段階熱分解（～650℃、1400℃）	合成ガス（CO+H ₂ ）
コークス炉化学原料化法	混合廃プラ（PVCを嫌う）	石炭に～1%混合、無酸素条件で反応（1200℃）	オイル（BTX）40%、コークス20%、ガス40%
高炉還元剤法	混合廃プラ（PVCを嫌う）	コークスに～1%混合して無酸素条件反応（2400℃）	廃プラはCO ₂ と水になる

出所：各種資料より旭リサーチセンター作成。

図 6 に PET の MR と CR、およびそれらの関係を示す。

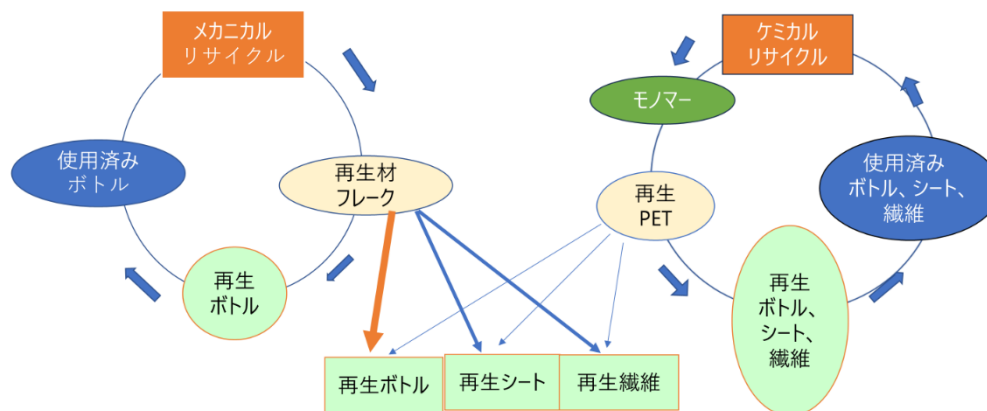


図 6 PET(樹脂、繊維)の MR と CR による再生ボトル、再生シート、再生繊維の製造

出所：各種資料より旭リサーチセンター作成。

PET の CR は化学的な解重合により 1 段階で再生モノマーを得て、それを再重合することにより再生 PET が得られ、全体としてクローズドループが形成できる（図 6 の右側）。また、この CR は 1 段階プロセスにより高収率で価値のあるモノマーを製造できる優れた方法である。表 4 の他の CR（混合廃プラの熱分解法など）に比べてはるかに優れたルートである。熱分解法はナフサ収率が低く、またエチレンやプロピレンをつくるのに 2 段階あるいは 3 段階のプロセスが必要である。

さらに、PET の CR はモノマー段階で精製することで、バージン並みの性能が得られ、食品容器包装にも使用できるのが特徴である。

PET の CR の工業化については、Eastman Chemical が米国で既に 10 万トン/年の工場を 2022 年末より稼働している。しかし、欧州の CR 企業は工業化に苦戦している。これは、MR の技術革新により MR 再生材でも食品用容器包装の製造が可能になることで、同じ飲料ボトル用途を狙う CR の存在意義が弱まり、また MR よりもコストが高いためである。

現在、MR で製造された再生 PET はボトル（「ボトル to ボトル」：日本での比率 59%）だけでなく、シート（「ボトル to シート」：同 33%）や繊維（「ボトル to 繊維」：同 8%）に使用されている（図 6 の左側）。

MR のシート to シートは行われている。日本ではエフピコが PET の 3 層構造（バージン/再生材/バージン）の再生シートを食品包装用に販売している⁶。

繊維の MR は難しく量的に限られ、CR が期待されている。世界的に MR の「ボトル to 繊維」は大規模に商業化されているが、『繊維 to 繊維』リサイクルの大きな流れがないと、ボトル再生材の繊維用途での単に 1 回だけの使用にしかならず、循環性（Circularity）は得られない。循環性を重視する欧米の衣料メーカーや小売は、ポリエステル『繊維 to 繊維』リサイクルの実用化に期待し、大きな投資を始めた（第 3 章 19 頁参照）。ポリエステル繊維は、多くがコットンやポリウレタン弾性繊維と混紡になっていることや染色剤や添加剤が含まれていることから、CR の実用化は遅れていたが、本格的に取り組みが始まったといえる。

⁶ https://www.fpc.jp/esg/environmenteffort/fpc_recycle.html

(2) PET のポリオレフィン同等の CO₂ 発生量

PET の原油からの製造ルートを図 7 に示す。まず、石油精製工場でナフサから接触改質で、パラキシレンをつくりこれを酸化して高純度パラキシレン（PTA）を製造する。この工程は副生物が生成し、これを PTA に変化する必要がある、複雑なプロセスでエネルギー消費が大きい。

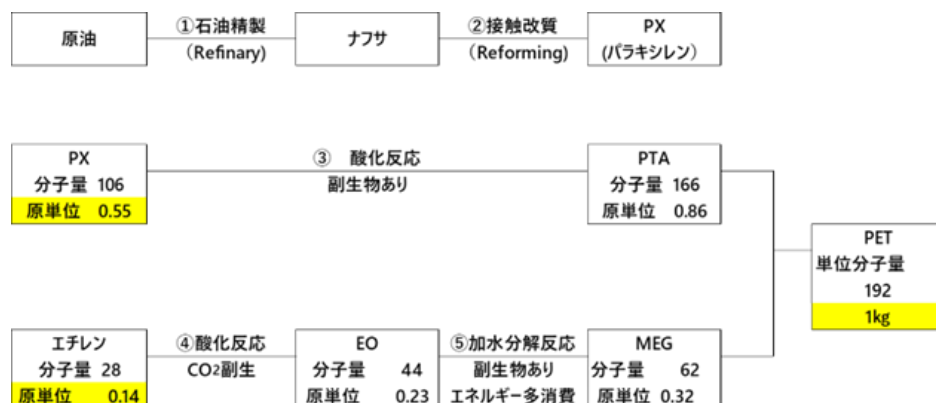


図 7 PET の原油からの製造ルート

出所：各種資料より旭リサーチセンター作成。

また、ナフサのスチームクラッキングによりエチレンをつくり、エチレンを酸化してエチレンオキサイド（EO）にし、これを水和して MEG を製造する。水和工程は多量の水を使用し、かつ反応後水を蒸留で除去しなければならず、エネルギー消費が大きい。

表 5 に、PE・PP・PS・ボトル用 PET の製造プロセスの定性的解析と製造に必要なエネルギー（換算 CO₂ 発生量）をまとめた。PET は製造工程が長く、かつエネルギー消費の多いプロセスを含むが、原料原単位が小さいためその分を打ち消し、1 kg 当たりの CO₂ 発生量は PE や PP とほぼ同等である。

「ボトル to ボトル」の事業化をしている協栄産業はウェブサイトで、「原油由来の PET ボトル 1 kg 当たりの CO₂ 発生量は 1.577 kg であるが、MR の再生ボトル 1 kg 当たりの CO₂ 発生量は 0.583 kg で、1 kg 当たり 0.994 kg の CO₂ が削減されている」と記している⁷。

⁷ <http://www.kyoei-rg.co.jp/proposal/index.html>

表 5 製造プロセスの定性的解析と製造に必要なエネルギーと換算 CO2 発生量

製造プロセスの定性的解析				製造に必要なエネルギーと換算CO2発生量				
種類	原油からの製造ステップ数	低収率か、エネルギー多消費プロセス	モノマー理論原単位	種類	工程エネルギー MJ/ t	資源エネルギー MJ/ t	合計製造エネルギー MJ/ t	合計製造換算CO2発生量 kg/t
PE	3	なし	エチレン 1	LDPE	26,132	46,103	72,235	1,518
				HDPE	22,324	46,194	68,518	1,326
PP	3	なし	プロピレン 1	PP	25,091	45,817	70,908	1,483
PS	5	なし	エチレン 0.27 ベンゼン 0.75	PS	28,188	45,626	73,814	1,920
				EPS	29,957	45,537	75,494	1,939
PET	4.3	あり	PX 0.55 エチレン 0.14	ボトル用PET	28,120	34,772	62,892	1,578

出所：表の右側のインベントリデータは LCA 日本フォーラム。

1.5 優れたリサイクル性能を持つ PET に賭けた Indorama Ventures

(1) Indorama Ventures の狙い

「連載企画 タイ企業動向（2018 年末）」⁸の中で、在バンコク・ジャーナリストの小堀晋一氏は Indorama Ventures の狙いを次のように述べている。

以下は抜粋である。

「インド・コルカタ出身の印僑アローク・ロヒア CEO 率いるタイの石油化学大手『インドラマ・ベンチャーズ・グループ』。同社ではプラスチックごみの問題の根底には、リサイクルができるかどうか、再生が可能であるかどうかがかぎとなって存在すると判断する。その切り札となるのが、100%リサイクルが可能で、軽く、耐久性が高く、人体を含む生物への影響も少ないとみられる PET の普及だ。」（注：現在の会長は Sri Prakash Lohia）

(2) Indorama Ventures の経営状況

Indorama Ventures は 2023 年の売上高が約 155 億ドル、生産量（販売量）約 1,400 万トンのタイの大手石油化学メーカーである（表 6）。

これまで利益を上げてきた会社であるが、2023 年度は最終損益の NET PROFIT が赤字である。

⁸ <https://www.u-machine.net/about/backnumber/pdf/no179.pdf>

表 6 Indorama Ventures の最近の経営状況

		2021	2022	2023
生産量	万トン	1472	1465	1392
販売量	万トン	1483	1468	1408
売上	億ドル	146.3	187.2	155.6
EBITDA	億ドル	19.8	23.9	11.2
EBIT	億ドル	13	16.5	3.3
NET PROFIT	億ドル	8.2	8.8	-3.1

出所: Indorama Ventures

<https://hub.optiwise.io/en/documents/109948/ivl-one-report2023-en.pdf>

(3) 事業拡大の歴史

同社は 1995 年に PET 樹脂企業を最初を買収し、その後企業買収を繰り返して世界トップの PET 樹脂メーカーになった。また、企業買収により樹脂メーカーとしては早い時期（2011 年）にリサイクル事業に参入した。初めは廃 PET ボトルから繊維（「ボトル to 繊維」）を製造し、現在大規模に生産している。その後廃 PET ボトルから再生ボトル（「ボトル to ボトル」）の製造も手がけている。また、PET 原料の PTA と MEG（図は EG）についても企業買収により参入し、現在は大きな生産能力を持っている（図 8）。このため、同社の動向は世界の PET 関連事業に大きなインパクトを与えることから注目される。

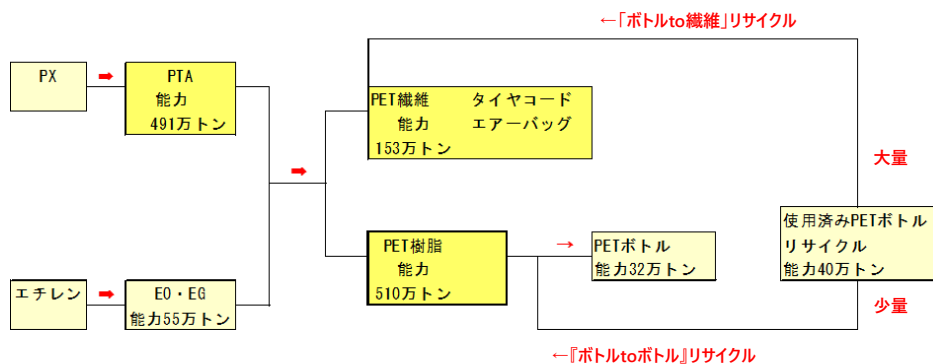


図 8 Indorama Ventures の主要事業事業（2017 年データ）

出所: 各種資料より旭リサーチセンター作成。

同社は PET 製造の世界のトップメーカーであり、5 カ国で 20 以上の生産サイトを有している。生産能力は 600 万トン/年（2023 年）で、世界の PET ボトルの 5 個に 1 個は同社が製造した PET 樹脂である⁹。また、同社の容器包装事業では、PET 製のプリフォーム、ボトル、クロージャーを 7 カ所で生産している。合計 39 万トン/年（2023 年末）である。

(4) リサイクル事業¹⁰

①2011 年、Wellman International（欧州）の買収により、同社は PET ボトルのリサイクル事業を開始し、繊維、シート、ボトルの用途に使用されるクリーンな PET フレークを製造した。その後、同社はメキシコ、米国、タイで PET ボトルのリサイクル能力を増設した。また、PET 樹脂事業のパイオニアとして、バージン重合プロセスに再生 PET フレークを追加することで、最大 30%の再生材含有量の PET 樹脂を効率的に製造することができた。

②同社は、選ばれたパートナーと CR イニシアティブも実施した。

欧州でのコラボレーションを通じて、2019 年には、同社は Ioniqa（オランダ）が製造する再生モノマーと従来のバージンモノマーを組み合わせ、再生材含有の PET 樹脂を製造することを想定した。これは、消費後の廃棄物から新しいものを生成することによる PET の循環を意味する。

Loop Industries（米国）との合弁事業では、使用済み PET 樹脂を分解して 100%の再生 PET 樹脂を製造することが目標である（57 頁④参照）。

また、同社は Carbios（フランス）のバイオリサイクル新工場建設にも深く関与している（41 頁④参照）。

今後同社が、最終的にどの CR 企業と組んで CR 事業に参入するかが注目される。

⁹ <https://hub.optiwise.io/en/documents/109948/ivl-one-report2023-en.pdf>

¹⁰ <https://sustainability.indoramaventures.com/en/environmental/recycling/at-a-glance>

2. PET 樹脂のメカニカルリサイクル(MR)技術と再生材市場

2.1 PET 樹脂の MR 技術

PET ボトルの MR が成功したポイントは次の 5 点と考えられる。

- ①ボトル設計（日本）：無着色ボトルに統一、キャップとラベル（スリーブ）の材質統一。
- ②分子量と分子量分布が同じ PET ポリマー：ボトルグレードは高分子量グレードで、分子量分布は重縮合ポリマーなので同一。
- ③個別分別回収（日本）：PET ボトル専用の分別収集体制。
- ④アルカリ洗浄技術： PET 表面を微量溶解して、汚染物を除去。
- ⑤固相重合による分子量（物性）の回復、同時に揮発成分（臭い）の除去：
通常は 220～235℃、減圧にして反応系から重縮合副生物の MEG を除去。

図 9 に協栄産業—サントリーが開発した 100%「ボトル to ボトル」技術と FtoP ダイレクトリサイクル技術を示す。この技術は世界に広まっている。

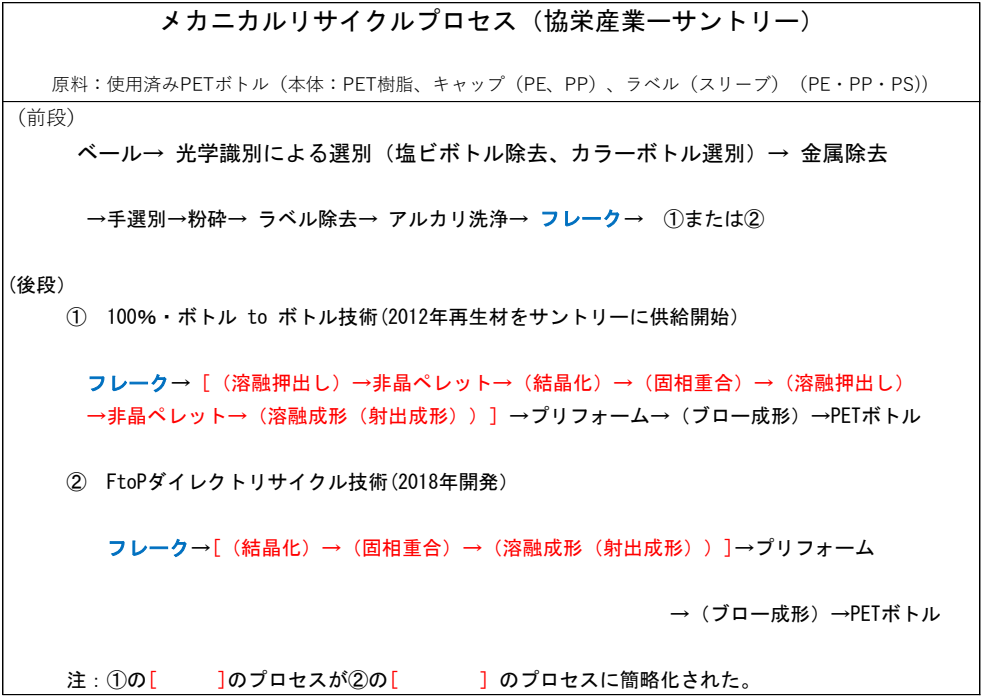


図 9 PET ボトルのメカニカルリサイクル

出所：各種資料より旭リサーチセンター作成。

2.2 PET 樹脂の再生材市場とリサイクル企業

(1) PET 樹脂の再生材市場

PET ボトルリサイクル推進協議会より、PET 樹脂の詳細なマテリアルフローが示されている（図 10）。使用済み PET ボトルからリサイクルでつくられた再生材は、ボトル製造用に 21.5 万トン（59%）、繊維製造用に 2.9 万トン（8%）、シート用に 12 万トン（33%）使用されている。少ないながら繊維にも使用されている（「ボトル to 繊維」）。

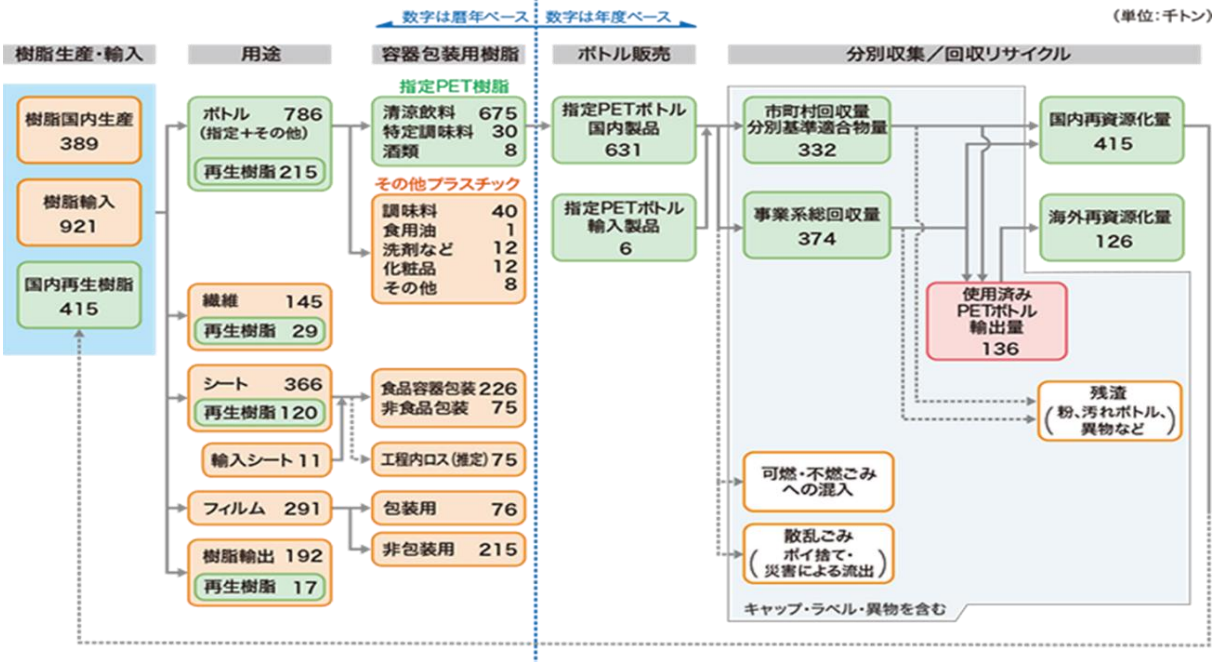


図 10 PET 樹脂のマテリアルフロー（2023 年度）

出所:PET ボトルリサイクル推進協議会 <https://www.petbottle-rec.gr.jp/data/comparison.html>

また、図 11 に示すように、「ボトル to ボトル」比率は年々着実に増加しており、2023 年度は 33.7%に達している。後述するように、日本の MR の PET 再生材生産能力はここ数年で急増して約 40 万トンに達しており、「ボトル to ボトル」リサイクル比率は引き続き増加し、50%になることが見込まれる。

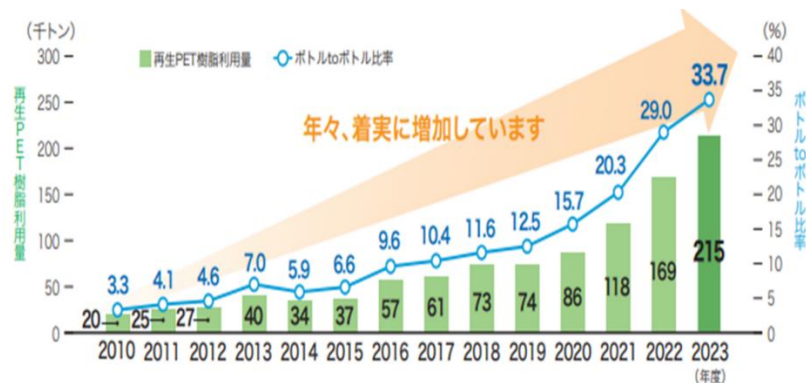


図 11 「ボトル to ボトル」への再生 PET 樹脂利用量と「ボトル to ボトル」比率の推移

出所: PET ボトルリサイクル推進協議会

https://3r-forum.jp/activity/seminar_symposium/2025/20250220_maebashi/files/report_2.pdf

(2) 日本の MR 企業と再生材生産能力

日本の MR による PET 再生材製造企業と生産能力は以下の通りである。

- ①協栄産業は現在、年間 10 万トンのリサイクル PET 樹脂を供給。工場は、栃木県の小山工場（2012 年稼働）と栃木県笠間市にある東日本 FtoP ファクトリー（2018 年に稼働）の 2 つである。協栄産業はサントリーと提携。
- ②遠東石塚グリーンペットは、茨城県境町に 8.5 万トン/年（2015 年稼働）の工場。
さらにここ数年で「ボトル to ボトル」の新工場が完成し、稼働（次の③～⑥）。
- ③協栄 J&T 環境は、西日本 PET ボトル MR センター（三重県津市、PET 再生材製造能力：5 万トン/年）を 2022 年 4 月に商業運転開始。
- ④サーキュラーペット（ヴェオリア・ジャパン、三井物産およびセブン&アイ・ホールディングスの合弁会社）は、岡山県津山市に PET ボトルリサイクル工場（PET 再生材製造能力：約 2.5 万トン/年）を 2024 年 3 月に竣工し、稼働中。
- ⑤豊通ペトリサイクルシステムズは、滋賀県日野市に PET ボトルリサイクル工場（PET 再生材能力：4 万トン/年）を 2022 年より稼働。
- ⑥遠東石塚グリーンペットは、兵庫県姫路工場に PET ボトルリサイクル工場 PET（再生材製造能力：10 万トン）を 2023 年に稼働開始。

既存と新設を合わせた MR 工場の総生産能力は、約 40 万トン/年に達する。

2.3 EU の PET 樹脂容器包装規制

PET 樹脂製容器包装（ボトルやシートなど）は海洋プラスチック問題などのプラスチック汚染問題を引き起こし、また使い捨てで資源循環の面でも問題が大きいことから、これまで世界的に PET 樹脂のリサイクルが強力に推進されてきた。

そして、EU では 2024 年 12 月に容器包装・容器包装廃棄物規則（PPWR）が発布され、その中で容器包装プラスチックの再生材最低含有量規制が決定した（表 7）。

また、ELV（End of life Vehicles：廃車）の再生材最低含有量規制案が 2023 年 7 月に出され、2025 年 2 月に改定案が欧州議会で承認された。改定案では、再生材にバイオプラスチックや、製造工程で発生する廃プラからの再生材を含め、その比率を 20%以上とする。また、廃車由来の再生プラ比率は 15%以上とし、廃車由来には廃車に限らず、車製造工程や修理工場で発生する廃プラも含めるとした。改定案は当初より緩い規制になった¹¹。現在のところ、EU には繊維の再生材最低含有量規制はないが、近々制定されるであろう¹²。

表 7 EU の容器包装・容器包装廃棄物規則（PPWR: 2024 年 12 月発布）の再生材最低含有規制

対象	再生材の最低含有割合	
	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%
使い捨てのプラスチック製の飲料ボトル	30%	65%
上記3点以外のプラスチック製の容器包装	35%	65%

注: PET ボトルの 2025 年における最低含有量規制は 25%

表 8 EU の ELV 規制案と ELV 規制改定案の再生材最低含有規制

2023年7月1発表の規制案	再生材最低含有量25%（うち廃車由来最低25%）
2025年2月欧州議会承認の 改定案	再生材最低含有量20%（うち廃車由来最低15%）
	再生材に、バイオプラスチックや、製造工程で発生する廃プラからの再生材を含める。
	廃車由来に、廃車に限らず車製造工程や修理工場で発生する廃プラも含める。

表 7 と表 8 の出所: 各種資料より旭リサーチセンター作成。

¹¹ <https://www.europarl.europa.eu/legislative-train/theme-environment-public-health-and-food-safety-envi/file-revision-of-eu-rules-on-end-of-life-vehicles-and-type-approval-of-motor-vehicles>

¹² PETCORE EUROPE は PET 繊維の再生材最低含有量 20%を提案している(21 頁参照)。
なお、「ボトル to 繊維」リサイクルでなく、『繊維 to 繊維』のリサイクルを増やすことが重要なので、ELV 規制（再生材最低含有量 25%（うち廃車由来最低 25%）と同様の形を取り、ポリエステル繊維の再生材最低含有量 X%（うち使用済みポリエステル繊維由来 Y%）の形を取るのが適当だろう。

3. ポリエステルの『繊維 to 繊維』リサイクルの最新動向

3.1 『繊維 to 繊維』リサイクル事業参入

(1) 事業参入(予定)メーカーの概要

表 9 に事業参入(予定)メーカー6社の概要を示す。Syre(スウェーデン、米国)、Ambercycle(米国)、Reju(フランス)、帝人フロンティア(日本)、Carbios(フランス)、DePoly(スイス)である。各社の詳細は第5章の企業各論(30頁参照)に記載した。

表 9 『繊維 to 繊維』リサイクルに取り組む世界企業の動向

企業名	Syre	Ambercycle	Reju	帝人フロンティア	Carbios	DePoly
国	スウェーデン、米国	米国・ロサンゼルス	フランス	日本	フランス	スイス
企業の性格	2024年3月にH&Mなど3社が創設(6,000万ドル初期投資)	2015年創設のスタートアップ	2023年11月にTechnip Energiesが創設(ベースは2021年設立のIBM、Technip、Under Armourの合併会社)	・帝人の子会社 ・帝人は既にDMT法リサイクル技術を開発し、事業化の経験あり(国内および中国(かつての合併会社の浙江佳人新材料))	スタートアップ	2020年設立のEPFL大学発スタートアップ
資金		・2023年10月にInditexが3年間の購入計画で7,000万ユーロ以上を支払う契約締結 ・中国3社、カナダ1社と提携	Goodwill(米国)とWM(米国)と協力して、北米における繊維リサイクル事業の推進計画作成中		・5万トン工場の建設費: 2.3億ユーロ ・Indorama Venturesが工場建設に1.1億ユーロ拠出予定だが、まだ確定せず ・2024.12 フランス政府から4,250万ユーロの支援確保か	2023年6月: 1,380万ドル獲得
提携	H&Mは、Syreが製造した再生ポリエステルを7年間、総額6億ドルで購入する契約締結			2024.12に良品計画とPET繊維製品の完全循環型リサイクルプロジェクトを共同で開始		
開発レベル		～1トン/日のTシャツ処理能力			・デモプラント稼働中 ・5万トン工場着工: フランス・Longlavill、稼働は2026年見込み(2024年4月発表) ・資金計画が明確になるまで一時工事延期(2024年12月)	2021年以来パイロット運転
事業化計画	2025年にBlue Print工場稼働(米国NC州のSelenis・PET工場) 最高1万トン/年 2027年 15-20万トン/年工場稼働	Inditexからの資金で商業プラントを建設: 2025年稼働見込み、10トン/日のTシャツ処理能力	2024.10: ドイツに「繊維to繊維」のハブ開設	新触媒のBHET法パイロット(2022年5月スタート)		2024年6月ジョーケース工場建設開始
CR技術	グリコール分解法	溶媒精製法	グリコール分解法(VolCat触媒)	グリコール分解法(新触媒)	酵素分解法	常温/光触媒・光照射法
技術の源	ノースカロライナ大学の2教授(スタートアップ)	創業者2名(カリフォルニア大学の学生～)	IBMのVolCat	帝人フロンティア	Carbios	EPFL大学(スイス)
生成物	BHET	精製PET	BHET	BHET	TPAとMEG	TPAとMEG
解重合条件	・高温(～220℃) ・原料PET溶解 ・急速加熱(高周波加熱法利用)	・染色されたPET混紡製品から、特定の溶媒・温度条件でPETを抽出	・高温(～220℃) ・原料PET溶解 ・VolCat触媒	・高温(～220℃) ・原料PET溶解 ・新触媒	・～70℃ ・固体PETの反応性を高めるため非晶化の事前処理	・常温 ・固体PETの反応 ・非晶化不要

出所: 各種資料より旭リサーチセンター作成。

表 9 にはないが、Eastman Chemical は PET ボトルリサイクル用工場（テネシー州・Kingsport）でポリエステル繊維のリサイクル（解重合）の開発を進めている¹³。また、産総研が常温解重合の DMC 分解法を開発し（44 頁参照）、キリンが酵素分解法を発表し（42 頁参照）、Worn Again Technologies が溶媒精製法によるコットン/ポリエステル混紡からセルロースとポリエステルの再生品を併産するプロセスを開発中である（45 頁参照）。また JEPLAN はもともと繊維のリサイクルに取り組んでいる（48 頁参照）。

一方、中国では既に浙江佳人新材料がポリエステル繊維の CR を工業化している。同社は 2012 年に精工控股集团と帝人が合弁で設立した会社で、帝人は 2018 年に合弁会社から撤退している。同社の『Green Circle』技術は、帝人の「エコサークル」の DMT 法であり、2023 年にリピート（帝人、日揮、伊藤忠商事合弁企業）がその改良技術を同社にライセンスした（51 頁（2）③参照）。同社は 2023 年 3 月 29 日に上海で CR 再生ポリエステル発表会を開催し、再生 DMT、再生チップ、再生繊維などの新製品を発表した¹⁴。何建李総経理は「2012 年に設立された浙江佳人新材料は、ポリエステルについて中国国内唯一かつ世界最大の CR 企業で、毎年『Green Circle』技術により 4 万トンの繊維製品廃棄物を処理し、3 万トンの再生材を生産している」と報告した。また、新たに 15 万トンのグリーン・ポリエステル生産プラントを建設中で、5～10 年以内に 30～50 万トン級の『Green Circle』再生繊維産業を形成するとしている。

同社の再生ポリエステル繊維は最終的にほとんどが欧米に輸出され、ブランド衣料に使用されているといわれる。

（2）衣料メーカーの支援で進む Syre と Ambercycle の『繊維 to 繊維』リサイクル事業

衣料の製造小売業界大手の H&M は『繊維 to 繊維』リサイクル推進のために、スタートアップの Syre に多額の資金提供をした。同様に衣料の製造小売業界大手の Inditex も『繊維 to 繊維』リサイクル推進のため、スタートアップの Ambercycle に多額の資金提

¹³ 参考文献(5)

¹⁴ <https://news.sina.com.cn/sx/2023-03-31/detail-imyntzva7600315.shtml#/>
浙江佳人新材料は、リピート（帝人、日揮、伊藤忠商事の合弁企業）が DMT 法をライセンスした浙江建信佳人新材料と同じく、精工控股集团のグループ企業である（51 頁（2）③参照）。

供をした。川下の衣料メーカーや小売が大きな投資をして、『繊維 to 繊維』リサイクル推進をしたことは注目に値する。なお、ファストファッション業界では、Inditex が第 1 位、H&M が第 2 位といわれる。

3.2 フランス政府の投資支援スキームと PETCORE の提言

(1) フランス政府のポリエステル繊維の CR に対する投資支援スキームの発表

2025 年 2 月 3 日：欧州委員会はフランスのプラスチック廃棄物の CR を支援するスキームを、EU の国家補助規則に基づいて承認したと発表した。このスキームはトレイ、フィルム、非飲料ボトル、一定量のポリエステルを含有する繊維材料など、特定種類のプラスチック廃棄物を CR するための投資を支援するもので、5 億ユーロを用意する。

(2) PETCORE EUROPE の『繊維 to 繊維』リサイクルに関する提言とセミナー

①PETCORE EUROPE（以下 PETCORE）は「欧州でポリエステル繊維の循環性を推進するための効果的なエコデザイン規則（ESPR：Ecodesign for sustainable products regulation）スキームに関する行動¹⁵を提言した（2025 年 1 月 23 日発表）。

②「PETCORE Advancing Polyester Textile Circularity」セミナーでの PETCORE の提言内容についての説明と関連情報（2024 年 12 月 21 日：Argusmedia¹⁶）：

a. ポリエステル繊維リサイクル業界がリサイクルの規模拡大を目指す上で、よい前例である PET 樹脂容器包装リサイクル業界から学ぶことが多い。ポリエステル繊維の回収率（現在 20%）とリサイクル率（現在 7%）を高めるためには、リサイクルを支援する EU の法律制定が不可欠である。また、再生ポリエステル繊維の需要を刺激するために、リサイクル素材最低含有量の義務化（PETCORE は最低含有量 20%を提案¹⁷）も必要である。また未分類の繊維製品の欧州からの輸出を禁止することで、より安定した市

¹⁵ 参考文献(1)

<https://www.petcore-europe.org/news-events/656-textile-recycling-can-learn-from-packaging-market.html>

¹⁶ <https://www.argusmedia.com/en/news-and-insights/latest-market-news/2642990-textile-recycling-can-learn-from-packaging-market>

¹⁷ 参考文献(1)

場が生まれ、原料が欧州内にとどまることを提案する。そして、これを調和の取れた拡大生産者責任（EPR）システムと組み合わせて、収集インフラストラクチャの拡大に必要で十分な財政支援を提供する必要がある。

また、リサイクル業界をよりよくサポートするために、繊維製品のリサイクル可能（Recyclable）な製品設計を求める。複数素材ではなく単一素材の生地に移行したり、識別を容易にするためにデジタルマーキング（デジタル製品パスポート（DPP））を採用したりすることで、リサイクルプロセスを合理化できる可能性がある。また、材料を簡単に選別できるようにするために、明確なラベリング規制も必要である。

繊維のリサイクルは、衣服に使用されるさまざまな材料（表面処理、染料、コーティング、プリント）が使用され、また危険な化学物質が存在する可能性があるため、容器包装のリサイクルよりも複雑である。MR はより単純な材料には効果的だが、複数の繊維素材の混紡には限界があるため、CR は MR の必要な補完的なプロセスになる。

b. 解重合 CR を支持する人は、CR を繊維廃棄物に取り組むための解決策と見なしているが、まだ初期段階にとどまっている。現在リサイクル業界は、低コストの輸入再生品との競争、消費者やブランドのプレミアム価格に対する低い感度、不十分なインフラストラクチャ、欧州でのエネルギーコストの高騰などから、リサイクラーの倒産が発生し、またスケールアップに対する大きな障壁に直面している。このため、工業規模の解重合プロジェクトへの投資を確保することは、依然として課題である。

c. ポリエステル繊維廃棄物の酵素ベースの CR プロセスの商業化を目指す Carbios の Bruno Langlois は、業界の発展を支援するために、下流のバイヤーがリサイクル材料にプレミアムを支払うことをいとわないことが必要だと指摘した。彼は、PET の解重合プロセスの総コストは、収集と選別から材料の再重合と紡糸まで、工業規模でも 2,600 ユーロ/トン（2,714 ドル/トン）にもなる可能性があるの見積もっている。ただこれらのコストは、サポートインフラストラクチャが改善されるにつれて減少する可能性があると付け加えた。これらのコストは、各衣料品の価格に約 1 ユーロを追加するだけであると彼は述べているが、容器包装業界の経験から、バージン PET に対するこのような高いプレミアムは、一部のバイヤーにとって依然として受け入れがたい可能性が高い。

3.3 EU の持続可能な繊維戦略、エコデザイン規則、繊維のEPRに関する合意案

(1) EU の持続可能な繊維戦略(2022 年 3 月)

JETRO 情報（抜粋）：「欧州委、持続可能な繊維戦略を発表、ファストファッションは時代遅れと批判¹⁸」

欧州委員会は 2022 年 3 月 30 日、循環型経済に関する政策パッケージの一環として、持続可能な循環型繊維製品戦略を発表した。繊維戦略は、同日に発表された、エコデザイン規則案に対応した、繊維業界向けの政策となっている。

繊維戦略では、2030 年までに EU 域内で販売される繊維製品を、耐久性があり、リサイクル可能で、リサイクル済み繊維を大幅に使用し、危険な物質を含まず、労働者の権利などの社会権や環境に配慮したものにする、との目標を掲げている。

繊維戦略によると、現在、EU 域内において、繊維製品の消費は、環境と気候変動への悪影響の 4 番目に大きい原因である。今後も繊維製品の消費は増加が見込まれることから、主に以下の対策を提言している。

- a.デザイン要件の設定：エコデザイン規則案の施行後に、耐久性、修理やリサイクルの容易性、リサイクル済み繊維の混合、懸念すべき物質の含有などに関する法的拘束力のある製品別の要件を設定する。
- b.情報提供の強化：エコデザイン規則案の一部として「デジタル製品パスポート」の導入。
- c.過剰生産・過剰消費をやめる：ファストファッションは持続可能でなく、「時代遅れ」と指摘。未使用繊維製品の廃棄をやめる。
- d.生産者責任の見直し：2023 年に予定されている廃棄物枠組み指令の見直しに合わせて、使用済み製品の収集とリサイクルなどへの拡大生産者責任（EPR）を規定し、廃棄抑制や再利用準備などに向けたエコ調整料金を導入する。

(2) EU の「持続可能な製品のためのエコデザイン規則(ESPR)」、2024 年 7 月 18 日から施行

JETRO 情報（抜粋）¹⁹：

¹⁸ <https://www.jetro.go.jp/biznews/2022/04/a5dc1b749bd99990.html>

¹⁹ <https://www.jetro.go.jp/biznews/2024/07/f2af2bb5a7f33a8e.html>

デジタル製品パスポートの創設や、公的機関に対するグリーン製品の公共調達基準、売れ残った消費財が廃棄されるのを防ぐ枠組みの創設などを定める。エコデザイン要件として、耐久性、信頼性、修理可能性、リサイクル素材の使用率などの要件を規定（第 5 条 1 項）。これらの要件に関する情報を、デジタル製品パスポートを通じて消費者に提供することを求める（第 9～15 条）。さらに注目されるのが、企業に対して、売れ残った消費財の廃棄を禁止する規定だ（第 25 条）。衣類や履物が対象となる（大企業については 2026 年 7 月 19 日から適用）。

(3) EU、繊維製品の製造事業者に拡大生産者責任を課す廃棄物枠組み指令改正案に合意(2025 年 2 月)

JETRO 情報（抜粋）²⁰：

EU 理事会（閣僚理事会）と欧州議会は 2025 年 2 月 19 日、廃棄物枠組み指令の改正案に関し暫定合意に達したと発表した。改正案は、2023 年 7 月に提案されたもので、繊維廃棄物の製造事業者に拡大生産者責任（EPR）を課すとともに、加盟国に対し食品廃棄物の削減目標を設定する。改正案は、両機関による正式な採択の後に施行される見込みで、施行後 20 カ月以内に国内法化される。

合意された改正案によると、加盟国は繊維製品の製造事業者に対し、拡大生産者責任として、繊維製品の回収、分別、再利用に向けた準備、リサイクル、廃棄、関連して発生する輸送などの費用負担を義務付ける。負担金の額は製品の持続可能性の水準によって異なる見込みで、加盟国はファストファッション対策として製品の想定使用年数や耐用性を考慮することができる。対象製品は、衣類、靴類、ブランケット、ベッドリネン、カーテンなど。対象企業は、域内に対象製品を供給する EU の製造事業者や輸入事業者などのほか、オンラインで対象製品を域内の消費者に直接販売する域外企業だ。改正案の適用開始時期は施行後 30 カ月後で、零細企業については 42 カ月後となる。

加盟国は 2025 年 1 月から、現行指令に基づき、繊維製品の再利用やリサイクルに向けた分別回収制度の設置が義務付けられている。対象企業が支払う負担金は同制度の運営などに利用される。

²⁰ <https://www.jetro.go.jp/biznews/2025/02/28974820740fefdd.html>

4. ポリエステルの『繊維 to 繊維』リサイクルの技術的課題と方策

4.1 ポリエステルの『繊維 to 繊維』リサイクルの技術的課題²¹

ポリエステルの『繊維 to 繊維』リサイクルの技術的課題には次の3点がある。

- ①衣類にはボタン、ファスナー、違う素材の芯地などがあり、リサイクルの前にこれらを分離しなければならない。
- ②ポリエステル繊維製品の多くが他の繊維（コットンやポリウレタン弾性繊維（PU）など）の混紡であり²²、ポリエステルの他の繊維から分離しなければならない。
- ③ポリエステル繊維製品の多くが染色剤、仕上げ材などの添加剤が使用されており、ポリエステルからそれら添加剤を分離しなければならない。

上記を考慮して、『繊維 to 繊維』リサイクルのクローズドループの図12を作成した。

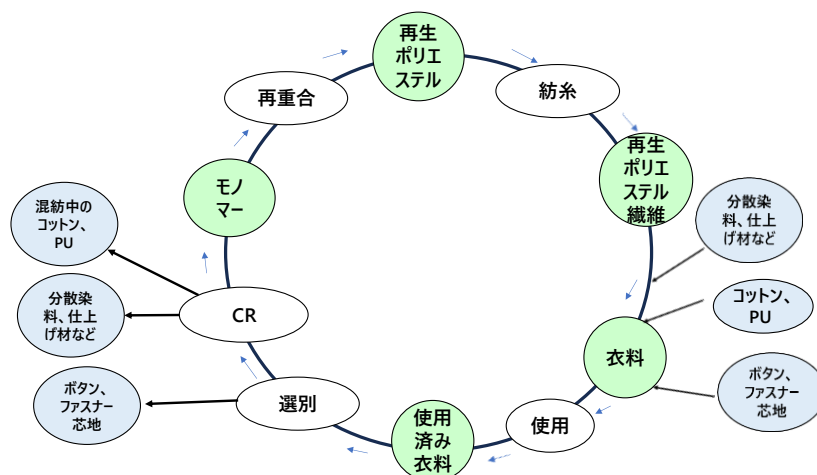


図12 ポリエステル繊維の『繊維 to 繊維』リサイクル

出所：各種資料より旭リサーチセンター作成。

上記の②と③の課題について、どのような解決策があるかを以下考察した。

²¹ ・参考文献(2)、(3)。

・NEDO 先導研究(2023年決定)「繊維製品の資源循環のための選別・分離技術の研究開発」
応募代表機関：東レ株式会社、連名提案機関：帝人フロンティア株式会社、神戸大学
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/seizo_sangyo/textile_industry/pdf/008_06_00.pdf

²² ナカノ株式会社資料：回収衣類の構成繊維の割合は、1種類 35%、2種類 18%、3種類 47%。ポリエステルについては、ポリエステル 100% (10.3%)、綿/ポリエステル (9.3%)、ポリエステル/レーヨン (1.4%)、ポリエステル/ナイロン (0.5%)、ポリエステル/ポリウレタン (0.4%)

出所：内村とも子 繊維学会誌 第80巻 第4号 P-129(2024)の表1

4.2 グリコール分解法における課題解決の方策

①グリコール分解法は多くの CR 企業が採用している最もシンプルな分解法である。また MEG は沸点が高いため、高温（～220℃）でポリエステル繊維を MEG に溶解した状態で分解できる特徴がある。ただし、高温分解による副生成物の生成が予想される。

②ポリエステル混紡製品のグリコール分解により、ポリエステルだけを選択的に分解することは一応可能であろう（IBM の米国特許 US11787917 参照）。ただし高温分解なので、混紡素材のコットンやポリウレタン弾性繊維が劣化する可能性がある。劣化繊維は混紡比率が低い場合は廃棄すればよいが、ポリエステルとコットンの混紡では 50%/50%のものもあるので、その場合は両素材を高収率で回収することが望ましい。

③別の方法として、解重合の前にコットンやポリウレタン弾性繊維をポリエステル繊維から分離する方法が考えられる。分離した後のポリエステル繊維は、通常の解重合法技術を使用できる。

帝人フロンティアは、PET/ポリウレタン弾性繊維の混紡製品を事前に新たな処理剤により、ポリウレタン弾性繊維を選択的に除去する方法を 2023 年 4 月に発表した²³。新たな処理剤は同時に染料を含む異物も除去し、脱色工程を兼ねることが可能という。同社はこの技術関連で、国際特許 W02024/117056 と W02025/070222 を出願している。

④染色剤などの添加材を、解重合の前に除去する方法がある。添加剤の溶媒抽出法が発表されている。なお、分散染料は PET と物理的に結合しているので、温度をかけると結合が弱まるといわれる。溶媒抽出法の例を以下に示す。

a. IBM の米国特許 (US11814487)：廃ポリエステル材料を塩化メチレンで前処理して、再利用のための精製ポリエステルの生成する。精製ポリエステルは、任意の CR または MR プロセスを通じて再利用することができる。実施例 8 では、赤色のポリエステル/コットン（60/40）生地を塩化メチレン処理を行い、生地から赤色物質を除去した。

b. JEPLAN の米国特許 (US12157796)：沸点が 160℃以上のグリコールモノエーテルタイプ化合物を抽出溶媒に使用して、ポリエステルの脱色する方法。抽出溶媒の例として

²³ <https://www2.teijin-frontier.com/news/post/138/>

は、ジエチレングリコールモノヘキシルエーテル、トリエチレングリコールモノブチルエーテルなどがあげられている。

- ⑤グリコール分解法の課題は、再重合して無色透明の再生 PET をつくることのできる「再生高純度 BHET」を、（低コストで）製造することである。BHET は沸点が高く、精製が難しい。解重合で得られた粗 BHET は活性炭による不純物の吸着除去、イオン交換樹脂による金属除去をした後、再結晶（および分子蒸留）による精製が行われているが、「再生高純度 BHET」を（低コストで）つくることは難しいといわれる。混紡や、染色されたポリエステル繊維を原料にして解重合を行う場合、BHET の精製はさらに難しい。この課題を解決したと発表したのが、1 つは回収できる揮発性の第 3 級アミン触媒を使用した IBM の「VolCat」プロセスで、着色のないモノマーが得られる（35 頁参照）。もう 1 つは帝人フロンティアの着色のない BHET が得られる解重合新触媒（マンガン系触媒と推定）の開発で、2022 年 5 月にパイロット研究を開始している（38 頁参照）。

4.3 選択的解重合法（酵素分解法と常温解重合法）における課題解決の方策

混紡製品においてもポリエステル繊維だけを選択的に解重合することを特徴とする分解法が発表されている。1 つは、選択性のある酵素を利用した酵素分解法で、Carbios やキリンが取り組んでいる。キリンは、コットン混紡とポリウレタン弾性繊維混紡においても、選択的にポリエステル繊維が解重合するデータを発表している（42 頁 図 14 参照）。また、常温でのポリエステル繊維解重合法は混紡中のポリエステル繊維の選択的分解が可能になる。DePoly の光触媒&UV 照射分解法や産総研の DMC 分解法である（43～45 頁参照）。ただ、選択的解重合法は分解温度が低いので、ポリエステル繊維を固体状態で分解しなければならず、解重合速度が遅いことが欠点になる。

Carbios は、結晶性の高い固体 PET は分解速度が遅いので、事前に結晶化を下げる処理をしてから（酵素）解重合する方法を特許出願している（W02017/198786、US11377533）。結晶化を下げる方法として、PET を押し出し機で熔融押し出しした後に水冷する方法が例示されている。Carbios の複数の酵素特許において、事前に結晶化を下げる処理をしてから酵素解重合することが記載されている（例は米国特許出願：US2025/0034347）。

4.4 溶媒精製法における課題解決の方策

(1) 溶媒精製法: 繊維素材や添加剤の溶媒溶解性データの収集

ポリエステル混紡製品には、他素材（例えばコットン、ポリウレタン弾性繊維）や各添加剤（染料や仕上げ材）が含まれている。溶媒精製法は、ポリエステル繊維を特定溶媒に溶解し、不溶の不純物をろ過分離後、冷却や貧溶媒添加で回収する方法である。

ポリエステルの溶媒としては、常温膨潤で高温溶解の塩化メチレン（沸点 39.6℃）やジメチルスルホキシド（DMSO：沸点 189℃）²⁴、高温溶解の 1,3-ジメチル-2-イミダゾリドン（DMI、沸点 100℃）やエチルベンゾエート（沸点 120℃）²⁵などがある。Worn Again Technologies 特許（US2019/0345306）によれば、「ポリエステル繊維を DMI（あるいはエチルベンゾエート）と混合し、100℃に加熱するとポリエステル繊維は溶解し、不溶の染料をろ過して分離できる」としている。

コットンの溶媒としては、二硫化炭素&苛性ソーダ（レーヨン）、銅・アンモニア（キュプラ）、ホットな N-メチルモルホリン N-オキシド（NMMO、テンセル/リヨセル）がある。また、2002 年にアラバマ大学の R. D. Rogers 教授が初めて、イオン液体がコットンなどのセルロースを溶解することを見出した²⁶。ポリエステル繊維はイオン液体には溶解しないので、セルロース繊維とポリエステル繊維の分離にイオン液体を使用することができる。文献/特許が報告されている²⁷。

ポリウレタン弾性繊維の溶媒としては、ジメチルフォルムアミド（DMF）やジメチルアセトアミド（DMAC）などが考えられる²⁸。また、染料の種類と溶解溶媒についても知っておく必要がある。前述の IBM 特許²⁹では、塩化メチレンは染料をよく溶解する。

²⁴ Canada Inc. (Loop Industries) の US10252976 には塩化メチレンと DMSO が解重合溶媒として記載。

²⁵ Worn Again Technologies 特許 (US2019/0345306、US9611371)

²⁶ J. Am. Chem. Soc., 124, 4974 (2002)、WO2003/029329

²⁷ 最近のものでは、Aalto University の WO2018/115584: ポリエステルとコットンの混紡から、イオン液体を使ってポリエステルとコットンを分離して、再生ポリエステルと再生セルロースを製造。

²⁸ Sanko Tekstil 特許 (US2023/0392297): DMF または DMAC 溶媒を使用して、ポリエステルとポリウレタン弾性繊維の混紡から、ポリウレタン弾性繊維を選択的に溶解してポリエステルと分離する方法。

²⁹ IBM 特許 (US11814487、特表 2023-551807)

(2) Worn Again Technologies(イギリス、イオン液体を使った溶媒精製法)

同社はコットン/ポリエステル混紡を原料に、溶媒精製法により再生セルロースと再生ポリエステルの2つの再生品を併産する技術を確立している(45頁参照)。実用化はまだである。製造工程は、布の切断―不純物除去―脱色―分離―再生である。

特許では、コットン/ポリエステルの混紡を、DMSOとイオン液体からなる混合溶媒系を使用して、再生セルロースと再生ポリエステルを回収している³⁰。分離はまずDMSO主体溶媒でポリエステルの溶解・分離して再生ポリエステルの回収し、不溶のコットンをイオン液体含有DMSOに溶解して不純物を除き再生セルロースを回収する。

(3) Ambercycle の再生ポリエステルの製法

Ambercycleのウェブサイト³¹によれば、工程は、①使用済み繊維製品を回収、ボタンやファスナーなどの金具を取り除く、②前処理：繊維製品を細断し、シリーズの反応器に投入する、③分離：混紡をそれぞれの素材に分離する、④素材から染料や仕上げ材などの添加剤を除去する、分子レベルの精製をする、⑤精製されたPETを回収する。それ以上の詳細な説明はない。出願特許も見当たらない

雑誌LAMP00NのAmbercycle創始者に対するインタビュー記事³²から、同社プロセスは溶媒精製法と推定される。同記事によれば、「同社プロセスは特定の液体(溶媒と推定される)と混合して、種々の素材を液体の形に変換する。その時点で、ポリエステルは液体になるが、他の素材は固体のままである。ポリエステルが液化したら、他の素材から分離し、それから染料や添加物を取り除く。その後、液体を回収して冷却し、固まると新品同様の再生ポリエステルが得られる。同社プロセスの真のブレイクスルーポイント(他社技術との違い)は、プロセスが極めて低い温度で動作し、プロセス開始から終了までが約2時間と高速で、スケールアップが十分可能なことである」とのことである。

³⁰ Worn Again Technologies 特許(US2019/0345306、US9611371)

³¹ <https://www.ambercycle.com/technology>

³² <https://lampoonmagazine.com/article/2025/02/21/molecular-regeneration-ambercycles-technology-for-textile-waste-recycling/> (February 21, 2025)

5. ポリエステル『繊維 to 繊維』リサイクルに挑戦する企業の各論

5.1 Syre(スウェーデン、米国/グリコール分解法)

(1) Syre の設立(2024 年 3 月 15 日発表³³)

H&M (大手の衣料の製造小売企業)、ベンチャーキャピタルの Vargas Holding、プライベート・エクイティの TPG Rise Climate は、ポリエステル『繊維 to 繊維』リサイクルを工業規模で行う企業 Syre を設立した。設立 3 社は、2024 年後半にノースカロライナ州にオープンする予定の初の工場の建設資金として、Syre に合計約 6,000 万ドルの初期投資を行った。

Syre は、2034 年までに世界中に 12 の工場を保有し、合計 300 万トン/年以上の再生ポリエステル繊維を生産する計画である。

H&M は、Syre が製造する再生ポリエステル繊維を 7 年間、総額 6 億ドルで購入することに合意した。この契約は、H&M が再生ポリエステル繊維の長期的なニーズの大部分をカバーすることになる。現在は、主に廃 PET ボトルのリサイクルから再生ポリエステル繊維(「ボトル to 繊維」)を調達している。H&M の目標は、2025 年までに素材の 30%を繊維廃棄物から調達し、2030 年までに 50%を調達することである。

Syre の技術は、MEG を使用してポリエステル繊維をモノマー(BHET)に分解し、その後、BHET を再重合して新しいポリエステル繊維を製造する³⁴。同社は、再生繊維の品質はバージンポリエステル繊維と同等であり、他の繊維や技術に事業を拡大する可能性がある」と述べている。

今後の工場建設計画は、①2024 年に米国・ノースカロライナ州に最初の Blueprint リサイクル工場建設、②2025 年に Blueprint 工場を稼働させ、商業販売開始、③2027 年最初の大型工場(再生 PET 生産能力 15~20 万トン/年)の建設開始、④2032 年に世界に複

³³ <https://cen.acs.org/environment/green-chemistry/Chemical-recycling-textiles-advances-shakily/102/web/2024/03>

³⁴ <https://www.syre.com/>

数工場を建設し、再生 PET の生産能力を 300 万トン/年以上として、CO₂ 排出量を 1,500 万トン/年以上削減する。

(2) ベトナム工場の建設計画(2025 年 2 月 20 日発表³⁵)

Syre は 10 億ドルの PET リサイクル工場をベトナム中部に建設する計画を発表した。

(3) Syre とノースカロライナ州の関係: Specialty fabrics review 記事(2025 年 2 月 1 日)³⁶

Syre はノースカロライナ州にも根を下ろしている。同社はノースカロライナ州に拠点を置く大学発スタートアップの「Premirr Plastics」を買収してその技術を取得した。

「Premirr Plastics」はそれまで 9 年間、消費者廃棄物を循環型ポリエステルに変える方法を開発してきた。

同社の次のステップは、高品質の特殊ポリエステルのグローバルサプライヤーである Selenis と提携して建設する Blueprint 工場である。Syre の工場は、ノースカロライナ州シーダークリークにある Selenis の特殊ポリエステル生産工場内に建設し、同社と連続的な生産フローをつくり出す(再生 BHET の再重合は Selenis の工場で行われるものと推定される)。2025 年半ばに操業を開始する予定のこの工場は、年間最大 1 万トンの再生ポリエステルを供給することができる。

(4) Syre 技術の最初の開発者: fibre2fashion 誌記事(2024 年 8 月 1 日)³⁷

元ノースカロライナ大学チャペルヒル校 (UNC-Chapel Hill) 教授の Matthew Parrott と Chris Luft が PET リサイクル技術を開発し、スタートアップ会社「Premirr Plastics」を設立し、開発を続けた。Syre が「Premirr Plastics」を買収し、その技術を使用している。現在、Parrott と Luft は Syre のメンバー (社員) である。

³⁵ <https://scandasia.com/swedish-textile-firm-syre-plans-1-billion-polyester-recycling-plant-in-central-vietnam/>

³⁶ 参考文献(5)

³⁷ <https://www.fibre2fashion.com/news/sustainability-news/american-professors-develop-system-to-recycle-pet-from-textiles-297086-newsdetails.htm>

(5) Matthew Parrott と Chris Luft を発明者とする米国特許(USP)

彼らの米国特許の1つであるUS11396588によれば、「廃PETの粒子をMEGに懸濁させ、スラリー状を維持しながら、連続的に管型フロー反応器に供給し、そこで急速加熱して短時間に解重合を行う方法である。管型フロー反応器の加熱に間接的なマイクロ波加熱を利用している。誘電率の高い加熱媒体をマイクロ波で加熱し、その加熱媒体を管型フロー反応器のジャケットに循環させ、急速加熱で解重合させる」である。

その他、同社技術については米国特許のUS11981779、11639431、11479651がある。

5.2 Ambercycle(米国・ロスアンゼルス/溶媒精製法)

(1) Ambercycle の概要

Ambercycle は2015年に、Shay Sethi と Moby Ahmed により共同で創設されたロスアンゼルスを本拠地とするスタートアップである。ファッション業界を変革する受賞技術³⁸である「分子再生技術」(「molecular regeneration technology」)は、共同創設者の9年間の努力と研究の結果³⁹であるという。当時、まだカリフォルニア大学デービス校の学生だった2人は繊維産業で未来を築くことを目指していたわけではなく、彼らの目標は、テクノロジーを通じて繊維廃棄物の問題を解決することであった。

同社の最初の製品はプレミアムの再生ポリエステル繊維 cycora®である。2023年10月に、Inditex (スペイン、ZARAを傘下に有する世界最大の衣料の製造小売企業)が、『繊維 to 繊維』の cycora®を7,000万ユーロ以上で購入する3年間契約を締結したことで、大きな注目を浴びた⁴⁰。

同社の生産能力については正式な発表はないが、複数のウェブ情報から、現在Tシャツベースで15,000枚/日(～1トン/日)の設備があり、Inditexからの資金で10倍の15万枚/日(～10トン/日)の商業設備を建設する。

³⁸ 2016年に、H&M Foundationが毎年開催するGlobal Change Awardを受賞し、技術開発の資金となった。
<https://cen.acs.org/environment/recycling/Shay-Sethi-talks-future-fabric/99/i9>

³⁹ <https://lampoonmagazine.com/article/2025/02/21/molecular-regeneration-ambercycles-technology-for-textile-waste-recycling/> (February 21, 2025)

⁴⁰ <https://www.ambercycle.com/news/inditex-signs-a-three-year-agreement-to-buy-textile-to-textile-recycled-polyester-cycora-r-for-over-eu70-million>

同社技術の詳細は発表されておらず⁴¹、特許出願も見当たらないが、同社の技術は解重合法ではなく、溶媒精製法と推定した（29 頁参照）。

(2) 川下の衣料の製造小売業との提携

①2023 年 10 月 25 日発表⁴²: Inditex は、『繊維 to 繊維』の再生ポリエステル繊維 cycora® を 7,000 万ユーロ以上で購入する 3 年間の契約を Ambercycle と締結した。この購入コミットメントは、この素材を拡大するための Ambercycle 初の商業プラント建設の鍵となる。Inditex 傘下の Zara Athleticz は、この革新的な素材を最大 50% 使用したテクニカルウェアのカプセルコレクションを本日発売する。

②2025 年 1 月 21 日発表⁴³: デンマークのレディースウェアブランド GANNI は、Ambercycle 初の商業プラントから再生ポリエステル繊維 cycora® を入手するオフテイク契約を締結した。この契約は、cycora® を GANNI のコレクションに拡大するというコミットメントを意味しており、まず、バージンポリエステルと「ボトル to 繊維」の再生ポリエステルの年間合計使用量の 20% 以上を、使用済み衣料(繊維)からつくられた Ambercycle の再生材に置き換えることから始まる。

2021 年にパートナーシップが始まって以来、Ambercycle と GANNI はコラボレーションして cycora® を GANNI のコレクションに取り入れてきた。

③2024 年 Textile Exchange 誌発表⁴⁴: Ambercycle と GANNI は共同でポリエステル（『繊維 to 繊維』）を市場に投入。デンマークのレディースウェアブランド GANNI は「「ボトル to 繊維」リサイクルは、プラスチックやポリエステルの分野で大きな機会を提供するものだが、私たちは真の解決策である『繊維 to 繊維』を探求することに熱心でした」とし、また「製品を発売して材料の品質が証明されると、材料パートナーとのより緊

⁴¹ <https://www.ambercycle.com/technology>

⁴² <https://www.ambercycle.com/news/inditex-signs-a-three-year-agreement-to-buy-textile-to-textile-recycled-polyester-cycora-r-for-over-eu70-million>

⁴³ <https://www.ambercycle.com/news/ganni-commits-to-cycora-r-offtake-agreement-reducing-reliance-on-conventional-polyester-by-20>

⁴⁴ <https://textileexchange.org/textile-to-textile-recycled-polyester-ambercycle-ganni/>

密な連携が実現し、材料開発をシームレスに進めることができる環境が育まれる」と述べた。

- ④2024年10月29日発表⁴⁵:Ambercycle はカナダの高性能野外ブランド企業の Arc’teryx と戦略的パートナーシップを締結し、高性能アパレル分野でのマテリアルイノベーションを推進することを発表した。

(3) 台湾・中国などのポリエステル製造会社との提携

- ①2024年8月13日発表⁴⁶: Ambercycle と Shinkong Synthetic Fibers Corp (台湾、ポリエステルの世界的メーカー)が戦略的パートナーシップを締結し、Shinkong が 1,000 万ドルを投資して、循環型ポリエステル繊維 cycora®の生産規模を拡大する。
- ②2025年1月7日発表⁴⁷: 世界的なポリエステル製造会社の Shenghong Holding Group (中国) は 再生ポリエステル繊維 cycora®拡大のために、Ambercycle と戦略的パートナーシップを通して、関係を強化する。2024 年以来、Ambercycle と Shenghong は協力して、cycora®素材を使用した高品質の再生フィラメント糸を開発してきた。業界が『繊維 to 繊維』へのソリューションを採用する中、cycora®はグローバルブランドの要求を満たす素材の提供でリードしている。
- ③2025年3月4日発表⁴⁸: Ambercycle は、中国の Zhejiang Huilong New Materials (浙江匯隆新材料)と提携して、循環型繊維材料の生産と商品化を拡大する。Huilong は、差別化されたドープ染色ポリエステル糸の生産のパイオニアで、サステナブルでカラフルな新素材のグローバルリーダーになるというビジョンを掲げ、北米、欧州、東南アジアの主要な繊維市場にまたがる世界中の 20,000 社以上の企業にサービスを提供している。

⁴⁵ <https://blog.arcteryx.com/news/ambercycle-announces-strategic-innovation-partnership-with-arcteryx/>

⁴⁶ <https://www.ambercycle.com/news/shinkong-invests-10m-in-ambercycles-new-facility-to-commercialize-circular-polyester-innovation>

⁴⁷ <https://www.ambercycle.com/news/ambercycle-and-shenghong-form-strategic-partnership-to-scale-circular-yarns-for-global-apparel-brands>

⁴⁸ <https://www.just-style.com/news/ambercycle-huilong-textile-recycling/>

④2025 年 1 月 8 日発表⁴⁹：Ambercycle と Benma（奔馬（杭州奔馬化繊）：中国のポリエステル繊維製造会社）が戦略的パートナーシップを締結し、再生ポリエステル繊維の拡大を図る。

5.3 Reju(フランス/グリコール分解法)

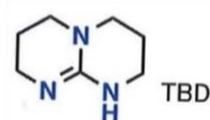
(1) 設立の経緯と将来計画

2023 年 11 月 14 日に、Technip Energies（フランス、大手エンジニアリング会社）は、ポリエステル繊維のリサイクルに特化したリサイクル企業の Reju を創設したと発表した⁵⁰。技術は、IBM の「VolCat」を使用する。以下は、これまでの経緯である。

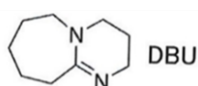
①2018 年 7 月 24 日発表⁵¹：IBM の研究者が独自のリソグラフィ技術を発展して、PET 樹脂容器包装やポリエステル繊維を CR する新技術（「VolCat」）を開発した。新規分解触媒を用いる PET のグリコール分解法である。従来のリサイクル技術とは異なり、回収廃プラの洗浄や分別が不要な上に、従来品より高品質の PET を再生産できるという。

「VolCat」は、洗浄・分別費用が抑えられ、触媒がリサイクルできるためコストが安いという。

IBM は以前より、グリコール分解法の触媒について研究し、第一世代としては TBD 触媒を、第二世代では DBU 触媒を開発したが、第一世代は触媒の回収ができず、第二世代はコストが高く、黄色の PET しか得られなかった。今回の第三世代の触媒は揮発性のトリアルキルアミン触媒のため触媒リサイクルが可能で、無色の PET が得られた。



第一世代 TBD 触媒



第二世代 DBU 触媒



第三世代トリアルキルアミン触媒

⁴⁹ <https://www.ambercycle.com/news/ambercycle-and-benma-form-strategic-partnership-to-scale-development-of-circular-polyester-fiber>

⁵⁰ <https://investors.technipenergies.com/news-releases/news-release-details/technip-energies-creates-reju-innovative-polyester-textile/>

⁵¹ Polyester Digestion: VOLCAT, Summit on Realizing the Circular Carbon Economy, Bob Allen, Greg Breyta, Jamie Garcia, Gavin Jones and Jim Hedrick, IBM Almaden Research Center, July 24, 2018
https://www.energy.gov/sites/prod/files/2018/10/f56/Robert_Allen_CCE_PanelDay1_0.pdf

- ②2021 年 3 月 10 日発表⁵²: Technip Energies、IBM、Under Armour の 3 社は、合成繊維、PET ボトル、硬質食品容器に一般的に使用される PET の新しいリサイクルフレームワークと循環経済を構築し、商業化するための合弁契約を締結した。Under Armour は繊維とアパレルの会社である。合弁会社は、IBM の「VolCat」技術を利用する。
- ③2023 年 4 月 4 日発表⁵³: IBM は「VolCat」の開発状況を詳細に発表した。DOE の資金援助を得て、開発したためと思われる。その中の解重合プロセスフローによれば、ポリエステルをアルキルアミン触媒存在下に過剰の MEG でグリコール分解後、揮発性の触媒は回収、再使用し、生成した粗 BHET/MEG 反応混合物はろ過、脱色、金属除去後、再結晶して、精製 BHET を得るとともに MEG を回収する。再結晶溶媒は MEG であろう。また、BHET の純度と再生 PET のカラーの相間が必ずしも明確にならなかったと述べており、BHET の精製が難しいことが示唆される。ポリエステル繊維や混紡の解重合データも紹介されている。
- なお、IBM は「VolCat」に関する米国特許 (US9255194 と US9914816) を保有している。
- ④2023 年 11 月 14 日発表⁵⁴: Technip Energies は、上記 3 社合弁の開発成果を基に、ポリエステル繊維に特化したリサイクル企業の Reju を創設した。元 Under Armour CEO でアパレル業界のベテランである Patrik Frisk が CEO に、Technip Energies の Alain Poincheval が COO に就任した。IBM は Technip Energies に協力すると記されている。
- ⑤2024 年 10 月 7 日発表⁵⁵: Reju はドイツのフランクフルトに『繊維 to 繊維』リサイクルの Regeneration Hub Zero を開設した。
- ⑥2025 年 2 月 1 日発表の Specialty fabrics review 誌記事⁵⁶: Reju はドイツのフランクフルトに Regeneration Hub Zero をオープンし、2025 年に繊維廃棄物からつくられ

⁵² <https://www.technipenergies.com/en/media/news/technip-energies-ibm-and-under-armour-form-joint-venture-advance-possibilities-plastics>

⁵³ Upcycling PET via the VolCat Process, April 4, 2023:
<https://www.energy.gov/sites/default/files/2023-05/beto-12-project-peer-review-plastic-apr-2023-breyta.pdf>

⁵⁴ <https://investors.technipenergies.com/news-releases/news-release-details/technip-energies-creates-reju-innovative-polyester-textile/>

⁵⁵ <https://www.reju.com/news/press-releases/reju-opens-regeneration-hub-zero-its-first-textile-textile-hub-frankfurt>

⁵⁶ 参考文献(5)

た Reju ポリエステルの販売を開始する予定である。Reju は、繊維の循環性をミッションに掲げ、米国の WM や Goodwill などの業界パートナーと協力して、収集とリサイクルのための地域システムを開発している。Reju には、繊維アグリゲーター、繊維・糸紡績業者、繊維工場、主要ブランドなど、繊維・マーケティングの専門家チームがあり、Goodwill や WM と協力して、CR の原料ソース（売り先のない繊維廃棄物）を確保する。

(2) 他社との提携

①2024 年 1 月 27 日発表⁵⁷：Reju と Cibunex（オランダ）は、よりサステナブルな繊維サプライチェーンを確立するために提携した。Cibunex のメンバー会社と協力して、リサイクル原料を Reju に供給し、Reju が再生ポリエステルを生産し、エコシステムを確立する。

②2024 年 10 月 30 日発表⁵⁸：Goodwill（米国）と Reju は、WM（米国）と協力して、北米における繊維リサイクルを推進する、複数年にわたる初期計画作成について合意した。彼らは、地域の繊維収集、分別、再利用、リサイクルのための共同モデルを開発することを計画しており、これは、廃棄物の流れからより多くの繊維材料を再利用やリサイクルに転用することを目的としている。

Goodwill は、米国とカナダにある 154 の地元の非営利団体で構成される北米最大の労働力開発ネットワークおよび中古品小売業者である。また、WM は包括的な環境ソリューションの北米の大手プロバイダーである。

③2024 年 11 月 25 日発表⁵⁹：Reju と、使用済み繊維の回収を専門とするフランスの企業である Nouvelles Fibres Textiles（NFT）は、フランスにおける循環型エコシステムの構築を支援するための繊維廃棄物の調達とリサイクルに関する提携を発表した。NFT

⁵⁷ <https://www.reju.com/news/press-releases/reju-partners-cibunex-establish-circular-textile-ecosystem>

⁵⁸ <https://www.reju.com/news/press-releases/goodwill-and-reju-announce-plans-help-advance-textile-recycling-north-america>

⁵⁹ <https://www.reju.com/news/press-releases/reju-and-nouvelles-fibres-textiles-collaborate-textile-waste-circular-ecosystem>

は、使用済みまたは未使用の廃繊維から得られる二次原料を Reju に供給し、Reju は再生ポリエステルを生産を行う。

5.4 帝人フロンティア(グリコール分解法)

帝人フロンティアは、既に『繊維 to 繊維』のリサイクル技術として DMT 法（50 頁参照）を有しているが、新たに BHET 法のリサイクル技術を開発した。

①2022 年 5 月 18 日(24 日)発表⁶⁰：帝人フロンティアはポリエステル繊維用の新規な CR 技術を開発。DMT を経由せず、BHET から直接 PET をつくる BHET 法（図 13 の新プロセス）の開発に成功した。従来の BHET 法では、着色されたポリエステル繊維から染料などの異物を完全に除去できなかつたり、再生されたポリエステル原料に変色を来したりするなど、品質の高いポリエステル原料にリサイクルすることが困難であった。

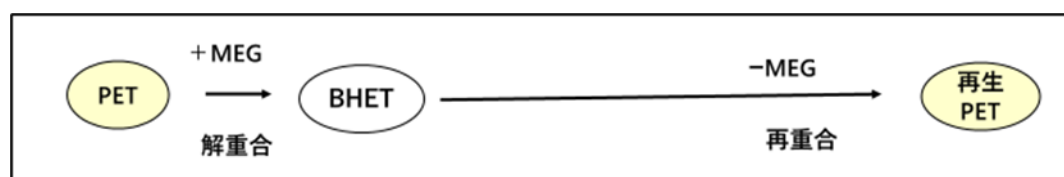


図 13 帝人フロンティアの新規グリコール分解法技術のフロー

出所：帝人フロンティア <https://www2.teijin-frontier.com/news/post/120/>

発表によれば、「a. 新リサイクル技術は、従来のグリコール分解法に新たに開発した解重合触媒を用いることで、再生ポリエステル原料の変色（染色剤などによる）を抑制することが可能となり、石油由来のポリエステル原料と同等の品質の再生ポリエステル原料にリサイクルすることができる。b. 新リサイクル技術は、DMT 法よりも工程数が少ないためにエネルギー消費量が少なく、さらには排水、排液、解重合触媒などを再利用することができるため廃棄物の削減が可能である。c. 帝人フロンティアは、2022 年 5 月にパイロットプラントを松山事業所内に設置して実証試験を進めていく。d. パー

⁶⁰ <https://www2.teijin-frontier.com/news/post/120/> 2022 年 5 月 18 日
<https://www2.teijin-frontier.com/english/news/post/120/> 2022 年 5 月 24 日
<https://thinkeco.info/story/story04/>

トナー企業や国内外のコンソーシアムなどと連携して、持続可能なポリエステル繊維の『繊維 to 繊維』のリサイクルを実現する仕組みを構築する。」と述べている。

新分解触媒の化学構造は発表されていないが、同社の国際特許出願 W0 2023/190102(優先権主張日 2022 年 3 月 29 日)に記載のマンガン系触媒と推定される。同特許の抜粋では、「ポリエステルを触媒存在下で解重合する芳香族ジカルボン酸ビス(ヒドロキシアルキル)の製造方法であって、触媒がマンガン系触媒であり、触媒使用量がポリエステルに対し 20~500mmol%であることを特徴とする芳香族ジカルボン酸ビス(ヒドロキシアルキル)の製造方法。マンガン系触媒として好ましいのは、酸化マンガンや酢酸マンガン、特に酢酸マンガンである。」

- ②2023 年 4 月 10 日発表⁶¹:使用済み衣料品のリサイクル推進に貢献するポリウレタン弾性繊維の除去技術を開発した。PET/ポリウレタン弾性繊維の混紡製品を新たな処理剤によりポリウレタン弾性繊維を選択的に除去する方法を発表した。新たな処理剤は同時に染料を含む異物も除去し、脱色工程を兼ねることが可能である(26 頁の再掲)。同社はこの技術関係で、国際特許 W02024/117056 と W02025/070222 を出願している。処理剤に特定アルコールなどを使用するのが特徴である。

- ③2024 年 12 月 4 日発表⁶²:良品計画と帝人フロンティアがポリエステル繊維製品の完全循環型リサイクルプロジェクトを共同で開始。良品計画は、店頭で使用済み繊維製品を回収し、引き続きリユースの取り組みを拡大していきながら、リユースできないポリエステル繊維製品を分別する。また、全ての素材を単一化してリサイクル時の分解・分離工程をなくす“易リサイクル商品設計”をコンセプトとした商品群の開発を 2024 年秋冬シーズンから拡大する。

帝人フロンティアは、リユースできないポリエステル繊維製品や製造時のプレコンシューマ繊維を、独自の CR を活用してリサイクルポリエステル原料へと再資源化する。

⁶¹ <https://www2.teijin-frontier.com/news/post/138/>

⁶² <https://www2.teijin-frontier.com/news/post/179/>

④帝人と帝人フロンティアはPET樹脂とポリエステル繊維のCRについては日本のパイオニアであり、参考文献(3)などこれまで数多くの文献特許を発表している⁶³。

5.5 Carbios(フランス)、キリン(日本) (酵素分解法)

PETの酵素分解は、100℃以下の低い温度と常圧での分解が可能なことや、分解対象物の選択性（混紡でもポリエステル繊維だけを選択的に分解する）が高いという特徴がある。このことから多くの研究が行われ、最近のトピックス分野になっている。その中で、フランスのスタートアップのCarbiosが分解酵素のブレイクスルーに成功した。

(1) Carbios(フランス、バイオ系スタートアップ)

①Carbiosは既に酵素によるPET解重合法の1,000万ドルを投資したデモプラント（リヨン郊外）を完成させ、再生PETの評価に入っており、順調に開発が進んでいる⁶⁴。さらに、Indorama Venturesとフランスで工場を建設中である。

同社の開発の中心はPETボトルのリサイクルであるが、繊維のリサイクルも開発している（22頁c参照）。繊維リサイクルは、酵素の選択的解重合性の特徴を生かせる。

②2020年4月8日記事：CarbiosはTBIと共同で新規酵素を使ったPET解重合技術の開発に成功し、その論文が雑誌『Nature』に掲載された。それによれば、PETの分解収率は当初10時間で1%であったものが、90%に向上した⁶⁵。実験例を紹介すると、「20gのPETの酵素解重合の一例は、PET/水が20%（w/w）、酵素/PETが0.2%（w/w）、温度は72℃、pHは8（NaOH水溶液）の条件で、12時間分解させると解重合は90%完了した。生成PTAは活性炭カラムで脱色し、酸性にしてPTAを沈殿させ、最後に再結晶により99.8%以上の高純度のPTAを得た」である。

⁶³ ・2004年発表：堀内裕志「繊維 to 繊維、ボトル to ボトルの実現」 繊維学会誌 Vol.6, No.6, P-242(2004)
・2007年発表：向井浩二「ポリエステル繊維 to 繊維実現のためのケミカルリサイクル技術開発」
https://www.jstage.jst.go.jp/article/fiber/63/10/63_10_P_350/_pdf

⁶⁴ <https://www.carbios.com/en/enzymatic-recycling/>

⁶⁵ <https://www.carbios.com/en/carbios-announces-the-publication-of-an-article-on-its-enzymatic-recycling-technology-in-the-prestigious-scientific-journal-nature/>

③2023年1月12日発表:Carbiosは2020年に締結した酵素のトップメーカーのNovozymesとのPET分解酵素供給に関する共同開発契約を強化した。NovozymesはCarbiosのフランス工場やライセンサーに対して独占的に酵素を供給する。

④2023年6月1日発表⁶⁶:CarbiosとIndorama Venturesがフランス初のPETバイオリサイクル工場を建設するための合弁会社の設立に関する拘束力のない覚書(MOU)に署名した。MOUに定められた包括的な条件に基づき、Indorama Venturesは、合弁事業に約1.1億ユーロを拠出する予定である。現時点で、建設費は2.3億ユーロと見積もられている。

締結された覚書(MOU)に基づき、2022年12月に工場許可を申請したCarbiosは、LonglavilleにあるIndorama Venturesの既存PET工場から13ヘクタールの土地を取得し、2025年に試運転を開始する予定であり、またIndorama Venturesは再重合能力を100%確保し、両パートナーは協力して原料モノマー供給を確保する。

⑤2024年4月25日発表⁶⁷:Carbiosは関係者とともに、世界初のPETバイオリサイクル工場(フランス・Longlaville、フル稼働時能力5万トン/年、2026年稼働見込み)の起工式を祝った。

⑥2024年12月19日発表⁶⁸:Carbiosは2024年12月19日、フランスLonglavilleでのPETバイオリサイクル工場建設について、追加の資金調達が満足のいく条件で完了するまで6~9ヵ月延期すると発表した。Indorama Venturesとの交渉はまだ完了しておらず、民間・公的金融機関とも協議中で、フランス政府に「戦略的プロジェクト保証」(8,600万ユーロ)を申請中である。

⑦(再掲)2025年2月3日発表⁶⁹:欧州委員会、フランスのCR支援計画を承認。欧州委員会はフランスのプラスチック廃棄物のCRを支援するスキームを、EUの国家補助規則に基づいて承認したと発表した。トレイ、フィルム、非飲料ボトル、一定量のポリ

⁶⁶ <https://www.carbios.com/en/carbios-and-indorama-ventures-reaffirm-partnership/>

⁶⁷ <https://www.carbios.com/newsroom/en/carbios-celebrates-the-groundbreaking-of-its-pet-biorecycling-plant/>

⁶⁸ <https://www.carbios.com/newsroom/en/carbios-postpones-construction-of-its-longlaville-pet-biorecycling-plant-for-6-to-9-months>

⁶⁹ https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_25_387

エステルを含有する繊維材料など、特定種類のプラスチック廃棄物を CR する投資を支援するために 5 億ユーロを用意する。

⑧2025 年 2 月 6 日⁷⁰：Carbios は欧州委員会がフランスの「循環型経済」国家支援制度を承認したことを喜んでいと発表した。Carbios による Longlaville での PET バイオリサイクル工場建設プロジェクトに対する、フランス環境エネルギー管理庁(ADEME)などからの 4,250 万ユーロの資金援助が確保されるとしている。Carbios は 2024 年 12 月にプロジェクトを延期し、2025 年 1 月にはプロジェクトを再編し人員を削減すると発表していた⁷¹。

(2) キリン

2024 年 11 月 25 日発表⁷²：キリン、静岡大学、分子化学研究所、大阪大学は PET を高効率で分解する CR 技術を開発、廃繊維中の PET も循環可能に——混紡繊維中の PET 分解率が世界最高値の 90%（図 14）、PET ボトルの PET 分解量が 28 倍に向上。解重合温度は 60℃である。なお、現在本技術は特許出願中である。

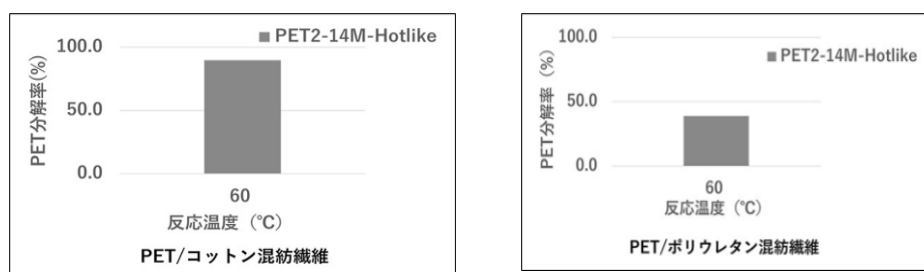


図 14 PET/コットン混紡繊維の PET 分解率と PET/ポリウレタン混紡繊維の PET 分解率

出所:キリンのプレスリリース。

⁷⁰ <https://www.carbios.com/newsroom/en/carbios-welcomes-the-european-commissions-approval-of-the-circular-economy-state-aid-scheme/>

⁷¹ <https://www.carbios.com/newsroom/en/in-line-with-its-press-release-dated-19-december-2024-carbios-today-launched-a-project-to-reorganize-and-reduce-its-workforce/>

⁷² https://www.kirinholdings.com/jp/newsroom/release/2024/1125_03.html

5.6 DePoly(スイス)と産総研(日本)(常温解重合法)

(1) DePoly(スイスのスタートアップ): 光触媒 & UV 照射分解法

①2020 年に EPFL 大学 (スイス) をスピンアウトして設立された DePoly は、PET および ポリエステル繊維を低温で解重合してモノマーを回収する CR 技術を開発した⁷³。DePoly は 1,380 万ドルの資金調達ラウンド (Seeds) を獲得し、CR 技術のスケールアップに使用することを発表した(2023 年 6 月 27 日)⁷⁴。この資金調達ラウンドは、BASF Venture Capital と Wingman Ventures が共同で主導し、Beiersdorf など 6 社以上が参加した。DePoly によると、その技術は室温と常圧で作動し、予備洗浄、選別、予備溶融、または他のプラスチックや繊維の除去を必要とせず、混合プラスチック、混合色、汚染ストリーム、布地、繊維を含むものなど、これまで MR ができなかったものにも対処できるという。

②2024 年 6 月 25 日記事⁷⁵ : DePoly は、2021 年以来パイロットを運転しており、2024 年 6 月にショーケース工場 (スイス・Monthey) の建設を開始した。2025 年半ばの稼働見込みである。

③2025 年 1 月 22 日発表⁷⁶ : DePoly と PTI (Plastic Technologies Inc) は、クローズドループのリサイクル PET ボトルで協業。

④DePoly の創設者の Christopher Ireland 発明の米国特許 (US2022/0153674) によれば、金属酸化物触媒を含むアルカリ・水・エタノール溶液に PET を加え、室温で UV 照射をしながら解重合すると、TPA と MEG が回収できる。金属酸化物の代表例は酸化チタンと酸化亜鉛である。触媒の存在下に UV 照射すると、アルカリから「O. sup. 2-」、「H00-」、H00H、「H00. sup. -」、「H0-」や「OH. sup. -」などのラジカルが発生して、解重合を促進すると推定している。

⁷³ https://www.basf.com/global/en/who-we-are/organization/group-companies/BASF_Venture-Capital/portfolio/DePoly.html

⁷⁴ <https://www.recyclingtoday.com/news/seed-funding-helps-depoly-scale-pet-chemical-recycling-technology/>

⁷⁵ <https://ggbaswiss/en/depoly-begins-construction-of-switzerlands-first-plastic-monomer-recycling-plant/>

⁷⁶ <https://www.plastictechnologies.com/depoly-and-pti-collaborate-to-create-closed-loop-recycled-pet-bottle/>

実施例：PET（powder）8g、PET：NaOH=1：7.5、300mL の 80：20 のエタノール・水混合溶液、120 mg の TiO₂ からなる溶液を攪拌しながら常温で 4 時間、UV black light 照射をする。TPA が約 90% の収率で得られた。MEG も回収される。

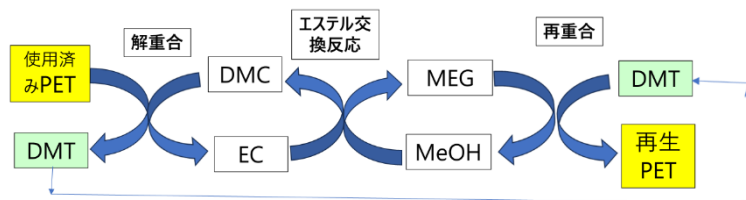
実施例：混紡（コットン（35%）/ポリエステル（65%））のシャツを 9 時間解重合して、TPA を 92% の収率で回収した。

実施例：混紡（コットン（83%）/ポリエステル（15%）/ポリウレタン弾性繊維（2%））の収縮性パンツを 9 時間解重合して、TPA を 80% の収率で回収した。

⑤TPA の精製法に関する国際特許も出願している（W02024/104811）。

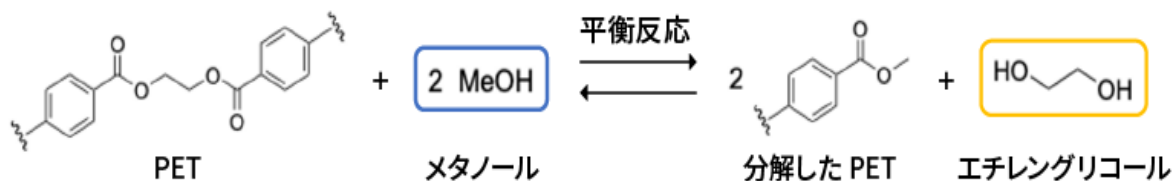
(2) 産総研:DMC 分解法

産総研の田中真司博士は PET の新規な解重合反応を見出した⁷⁷。PET をアルカリ金属アルコキシド触媒の存在下に、メタノールとジメチルカーボネート（DMC と略す、炭酸ジメチルともいう）を使って低い温度で分解すると、高収率で DMT とエチレンカーボネート（EC と略す。炭酸エチレンともいう）が生成する（PET + DMC → DMT + EC）。



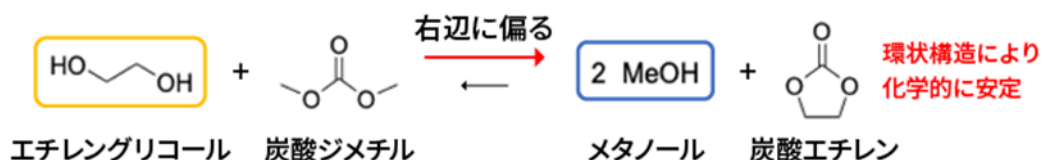
EC はメタノールとエステル交換反応をさせれば、DMC と MEG になり、DMT と MEG を再重合すると、PET とメタノールが得られるので、全体としてクローズドループになる。

産総研マガジンの記事⁷⁸によれば、開発経緯は「PET にメタノールを加えて PET を分解し、エチレングリコール（MEG）を生成する、従来の高温高压条件が必要な反応と、エチレングリコールと炭酸ジメチルが反応し、メタノールと炭酸エチレンを生成する反応。

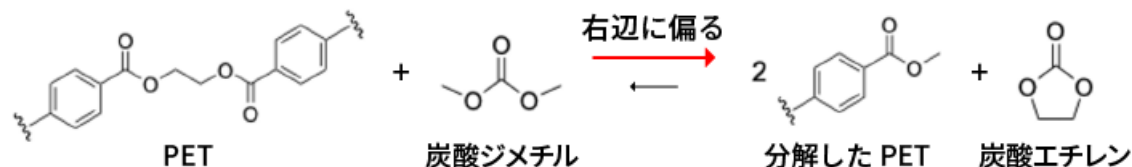


⁷⁷ 触媒学会誌 触媒 No.65 No.2 84 頁(2023)、繊維学会誌 第 80 巻 第 4 号 114 頁(2024)

⁷⁸ https://www.aist.go.jp/aist_j/magazine/20230614.html



この2つの反応をうまく組み合わせて常温・常圧で反応が進むようにしたのが、田中真司博士の画期的なアイデアだ」。



産総研は本技術について、特開 2022-126617 や W02024/034609 を出願している。

5.7 Worn Again、Circ、RE&UP のコットン/ポリエステル混紡の分離・精製法

(1) Worn Again Technologies (イギリス、イオン液体を使用した溶媒精製法)⁷⁹

Worn Again Technologies は、2005年に創設されたイギリスのスタートアップである。

ポリコットン（コットン/ポリエステルの混紡）を原料とし、溶媒精製法（例：DMSO とイオン液体を溶媒に使用）により再生セルロースと再生ポリエステルを併産する。



まだ実用化されておらず、共同で事業を立ち上げるパートナーを探している。

同社は、混紡からセルロースとポリエステルを分離する特許⁸⁰とポリエステルの精製（染色剤除去）の特許⁸¹を出願している。

(2) Circ (米国・バージニア州、水熱反応(亜臨界水)によるポリコットンの分離・精製)

Circは水熱反応でポリコットンをセルロース繊維原料とポリエステル繊維原料に再生する CR 技術を保有している⁸²。国際特許 W02019/140245（出願人は TYTON BioSciences :

⁷⁹ <https://wornagain.co.uk/>

⁸⁰ US2022/0177667、GB2560726

⁸¹ US2019/0345306、US2017/0218162、US9611371

⁸² <https://circ.earth/> <https://circ.earth/our-technology/>

Circ の旧社名) の実施例 6 は、ポリ Cotton の水熱反応処理 (苛性ソーダ水溶液中、180℃、120～150psi で 60 分反応) により、ポリエステルを TPA と MEG に分解し、分解しない Cotton と分離する方法が開示されている。丸紅は Circ に出資しており、2024 年 2 月に Circ のリサイクル素材が日本ブランドに採用されたことを発表した⁸³。

(3) RE&UP (オランダ、(熱) 機械的リサイクルによるポリ Cotton の分離・精製)⁸⁴

RE&UP は、Sanko Tekstil (トルコ) グループの Cotton、ポリエステル、ポリ Cotton のリサイクルベンチャーである。ウェブサイト⁸⁵に、「(熱) 機械的リサイクルによって、使用済み混紡はすぐに紡糸できるファイバーとチップになる」と記載されており、ウェブサイトの他の記述も考慮すると、ファイバーは Cotton、チップはポリエステルと推定される。同社は、(熱) 機械的リサイクルと称しているが、チップが得られるということとは、溶媒を使用していると考えられる。

同社は、(熱) 機械的リサイクルについて現在特許出願中というが、特許は見当たらなかった。なお、Sanko Tekstil はポリ Cotton 中のポリエステルを解重合しモノマーとして回収し、Cotton と分離する方法を出願している⁸⁶。

同社はトルコのガジアンテップに処理能力 8 万トン/年の繊維リサイクル工場を有している。繊維には、Cotton、ポリエステル、ポリ Cotton などが含まれる。

2024 年 7 月 19 日の発表によれば、トルコの繊維リサイクル工場の処理能力を強化するために、Proparco (フランスの開発金融機関) が提供する 7,000 万ユーロの融資を受ける⁸⁷。2025 年には、同工場の処理能力は 20 万トンになる。

⁸³ <https://www.marubeni.com/jp/news/2019/release/20190829J.pdf>
<https://www.marubeni.com/jp/news/2022/release/00049.html>
<https://www.marubeni.com/jp/news/2024/info/00006.html>

⁸⁴ <https://sanko.com.tr/en/reup-2/> <https://reandup.com/ja/> <https://www.andritz.com/annual-report-en/annual-report-2023/sanko-fundamentally-changing-the-textile-world>

⁸⁵ <https://reandup.com/what-we-do/> The one-stop solution provider(図)の CLOSED-LOOP RECYCLING の説明文。

⁸⁶ Sanko Tekstil の出願特許: US2024/0270926 と US2025/0092217 (PET の分解物は TPA と MEG)。

⁸⁷ <https://www.proparco.fr/en/actualites/reup-sankos-circular-tech-venture-secures-financing-proparco-scale-its-textile-recycling>

6. PET 樹脂の CR 企業の技術と最新動向

表 10 に、PET 樹脂の CR 企業の概要と工場建設状況を示す。

表 10 PET 樹脂の CR 企業の概要と工場建設状況

	JEPLAN	Eastman Chemical	gr3n	Loop Industries	Carbios	Ioniqa
企業規模	スタートアップ	PETの大手メーカー	スタートアップ	スタートアップ	スタートアップ	スタートアップ
所在地	日本	米国	スイス	カナダ	フランス	オランダ
プロセス	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	メタノール・アルカリ分解法	酵素分解法	グリコール分解法
特徴	分解温度220℃、BHETの再結晶、分子蒸留による精製	以前に開発した自社技術。酢酸亜鉛触媒	マイクロウェーブ加熱、200℃未満、10分以内	常温・常圧、アルカリ（NaOCH ₃ ）使用		磁性流体にグラフトしたイオン液体触媒使用
生成物	BHET	DMT、MEG	TPA、MEG	DMT、MEG	TPA、MEG	BHET
設備の年間処理能力	・2万トン（川崎市、2004年） ・休止中であったが本格再稼働（2021年11月発表）	・米国に10万トン工場建設（2022年末稼働）、2.5億ドル投資 ・フランス・ノルマンディに16万トン工場計画（2022年1月発表） ・米国第2工場建設計画（テキサス州）11万トン（2024年3月発表）	・EU Horizon2020支援のDEMETOプロジェクト ・Next Chemは1,000トン工場（イタリア）を完成（2022年4月発表）	・SUEZ、SK Geo Centricと提携して工場建設計画：7万トン、フランス・建設（2024年12月計画中止発表） ・SK Geo Centricと蔚山に9.4万トン工場計画、2025年稼働（2025年1月取りやめ発表）	・デモプラント稼働中 ・5万トン工場着工：フランス・Longlavill、稼働は2026年見込み（2024年4月発表） ・資金計画が明確になるまで一時工事延期（2024年12月）	・1万トン（オランダ、2019年） ・破産発表（2024年10月） ・ライセンス事業中心に再出発発表（2024年12月）

出所：各種資料より旭リサーチセンター作成。

以下、各種解重合法とその CR 企業の各論をまとめた。

6.1 グリコール分解法（JEPLAN、帝人（帝人フロンティア）、Ioniqa）

MEG を使ったグリコール分解法の開発と事業化が進んでいる。日本では、2003 年に帝人ファイバーが、また 2004 年にペトリバース（株）がアイエス法を工業化した。また、Ioniqa（オランダ）と IBM（米国、「VolCat」）が新たな触媒の開発に成功している。Ioniqa は既に 1 万トン/年の解重合工場を持っている。

MEG 使用のグリコール分解法では、新たな化合物を〔解重合―再重合〕系に導入することがないので、全体プロセスがシンプルなことが大きな特徴である。また、MEG は沸点が 197℃ と高いので、解重合速度を上げるために温度を上げて、低い圧力で解重合ができる。

しかし、MEG を使用するグリコール分解法においても解重合速度は遅い。よりエネルギー消費が少なく副生物の少ない経済的プロセスのニーズは高く、より温和な条件で短時間に PET を分解すべく、触媒開発や溶媒の添加が検討されてきた。

グリコール分解反応の触媒としては、酢酸亜鉛 ($\text{Zn}(\text{OAc})_2$) が以前から最もよく知られている。その他触媒として、各種の金属塩、金属を含まないアルカリ塩、イオン液体、ハイドロタルサイトなど数多く開発されてきた。

この中で、イオン液体は温和な条件で解重合ができること、触媒の繰り返し使用ができることが特徴として注目されている。イオン液体の中では、1-ブチル-3-メチルイミダゾリウムブロマイド ($[\text{bmim}]\text{Br}$) が優れた触媒性能を有することが見出された。この触媒を使うと、 180°C 、8 時間で PET を 100% 分解する。さらに、1-ブチル-3-メチルイミダゾリウムテトラクロロフェレート ($[\text{bmim}]\text{FeCl}_4$) は、 140°C 、8 時間で PET を 100% 分解する⁸⁸。後者の触媒は、Ioniqa (オランダ) の触媒につながるものである。

PET に、DMSO、N-メチルピロリドン、テトラヒドロフラン (THF)、塩化メチレンなどの溶媒の添加も検討されている。これらの溶媒は、低温で固体 PET を膨潤、溶解する働きがあり、分解反応を加速し、解重合温度を下げる効果がある。半面、生成物との分離の煩雑さや安全性の懸念 (塩化メチレンなど) もある。

また、グリコール分解法の大きな問題は、生成物の BHET の融点 ($106\sim 109^\circ\text{C}$) が高く、蒸留による精製が難しいことにある。各社、独自の精製法を開発しているものと推定される。

(1) JEPLAN (アイエス法)

① アイエス法の経緯

2004 年にペットリバースが建設した川崎市にあるアイエス法の工場 (図 15) は、さまざまな経緯を経て、現在は JEPLAN 子会社のペットリファインテクノロジー (PRT) の

⁸⁸ S.Thiyagarajan ら、Back-to-monomer recycling of polycondensation polymers: opportunities for chemicals and enzymes, RSC Adv/,2022,12,947-970
<https://pubs.rsc.org/en/content/articlepdf/2022/ra/d1ra08217e>

工場になっている。世界的に希少な既存 CR 工場で、解重合と再重合・ペレット化の設備が含まれている。初期設備費は 80 億円で、追加投資を含めて 100 億円といわれる。



図 15 ペットリファインテクノロジー(JEPLAN グループ)の PET・CR 工場
(川崎市): 生産能力 2 万トン/年

出所:https://www.meti.go.jp/policy/recycle/main/3r_policy/policy/html/pdfjirei/03_refine.pdf

アイエス法の工場を建設したペットリバーズは倒産し、PRT が継承した。2014 年頃に PRT は開発経緯、事業状況、川崎工場概要を記載した資料を発表した⁸⁹。そこには川崎工場の全景写真も掲載されている。

その後、JEPLAN は PRT を買収し、PRT を子会社にした。川崎工場はしばらく休止していたが、JEPLAN は 2021 年 11 月に本格的に再稼働したことを発表した。

JEPLAN はもともと繊維のリサイクルに取り組んでいる会社で、福岡県北九州市にポリエステル繊維の CR ができる小規模工場を持っている⁹⁰。

②アイエス法のプロセス

図 16 にアイエス法のプロセスを示す。第 1 ステップ～第 3 ステップからなる。

⁸⁹ https://www.meti.go.jp/policy/recycle/main/3r_policy/policy/html/pdfjirei/03_refine.pdf

⁹⁰ https://bring.org/pages/magazine_31?srsId=AfmBOop5oNtxRgQMZuf9yxlr-MPExOL9LQgKcPuGT0NZjdwP2EjJfOpD

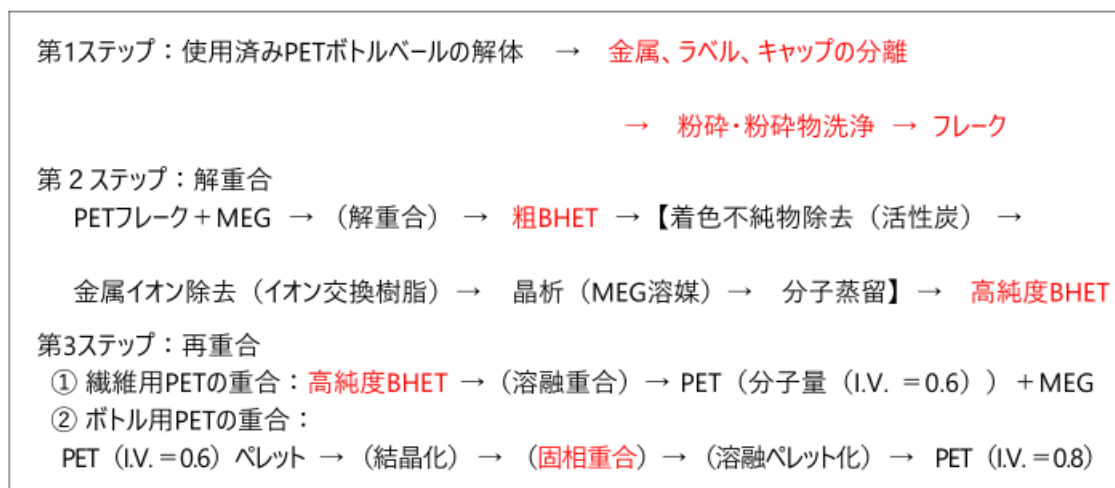


図 16 アイエス法の PET ボトルの解重合と再重合

出所:アイエス法に関する公表資料などに基づき旭リサーチセンター作成。

プロセスの最大の特徴は、BHET を MEG 溶媒で再結晶した後、分子蒸留⁹¹により最終精製する工程である。精製された高純度 BHET は再重合に使用できる。再生 PET を使って、再生ボトルが製造される。

図 16 を見ると、粗 BHET を、活性炭吸着による着色不純物の除去とイオン交換樹脂を使った金属イオンの除去を行った後に、晶析と分子蒸留を経て精製 BHET をつくっているので、精製コストが相当かかっていると推定される。

(2) 帝人(帝人フロンティア)

①帝人は PET の CR のパイオニアであり、2003 年に日本で初めて PET の CR 工場を建設した。この日本工場は 2008 年に停止し、その後中国で工場がつくられ稼働していたが、原料(廃 PET)の入手ができなくなったことから 2018 年に事業は終了した経緯がある。

②帝人の「DMT 法 CR プロセス」

帝人の「DMT 法 CR プロセス」を図 17 に示す⁹²。解重合生成物の BHET とメタノールを

⁹¹ 分子蒸留は、 10^{-3} Torr 以下の高真空下で行う蒸留で、普通の減圧蒸留では蒸留できない高沸点物質、または、熱に不安定な物質などに応用が可能である。この分子蒸留法技術の確立が BHET 精製のキーになっている。

⁹² <https://www2.teijin-frontier.com/news/post/120/> (2022 年 5 月 18 日)

反応させ、エステル交換反応により DMT と MEG に変換して、DMT を精製する。精製 DMT を MEG とのエステル交換により BHET に変換した後、再重合する。

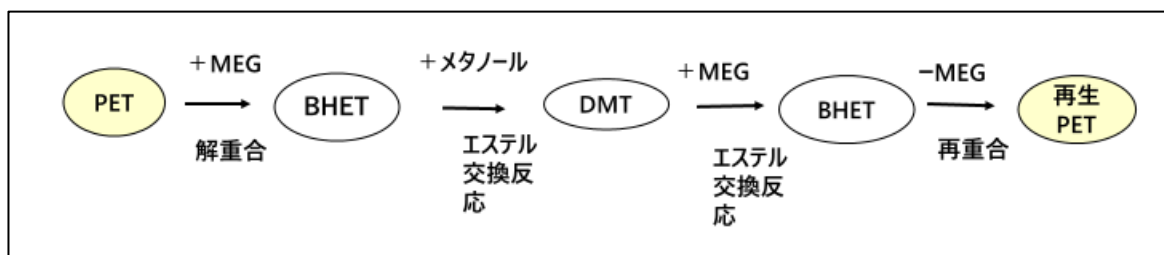


図 17 帝人の「DMT 法 CR プロセス」のフロー

出所：帝人フロンティア <https://www2.teijin-frontier.com/news/post/120/>

DMT (沸点 288℃) は BHET に比べ沸点が低く、精製が容易であるのがメリットである。半面、グリコール分解法にメタノールを使用することは、シンプルなグリコール分解法の特徴が減少する可能性がある。

③帝人の「DMT 法 CR プロセス」のライセンス

2022 年 12 月 1 日発表：帝人は日揮ホールディングス、伊藤忠商事とともに PET の CR 技術ライセンス事業を行う合弁会社（リピート（RePEaT））を設立した⁹³。

2023 年 2 月 15 日発表：合弁会社のリピートは中国の浙江建信佳人新材料とポリエステルの CR 技術のライセンス契約を締結した。CR 生産に関する設備の設計や運転などの技術を提供する。

この浙江建信佳人新材料と浙江佳人新材料（20 頁に記載のポリエステル繊維のリサイクル企業）は、ともに精工控股集团のグループ会社である。

(3) Ioniqa(オランダ)

①Ioniqa は Eindhoven University of Technology (オランダ) からスピンオフした会社であり、固有のイオン液体触媒による解重合技術が特徴である。

⁹³ https://www.teijin.co.jp/news/2022/12/01/20221201_01.pdf

- ②技術の詳細は、まず着色した使用済み PET 製品（着色 PET ボトルなど）を細かくしたものに、イオン液体（Ionic liquid）触媒を表面にグラフト（結合）した磁性流体（Magnetic fluid）と MEG の混合物を加え、攪拌しながら 1 時間加熱する。30 秒静置すると、下層に着色した磁性流体を含む層ができる。上層を分離すると、BHET モノマーが得られる。触媒をグラフトした磁性流体は容易に分離でき、何回も再使用できる。
- ③出願人検索で、Ioniqa の米国特許 3 件（US10266479、10421849、10316163）が抽出された。実施例の 1 つは、a. 溶媒に MEG を使用、b. ブチルイミダゾリウム（+）-FeCl₄⁻ タイプのイオン液体と、表面が酸化鉄になっている鉄（数百 nm）の磁性流体とを、官能基を持つシランカップリング剤（例：トリエトキシシロプロピル）を用いてグラフト（結合）した触媒を使用、c. 解重合温度は 180～190℃である。
- 磁性流体—シランカップリング剤—イオン液体触媒の推定構造を図 18 に示す。

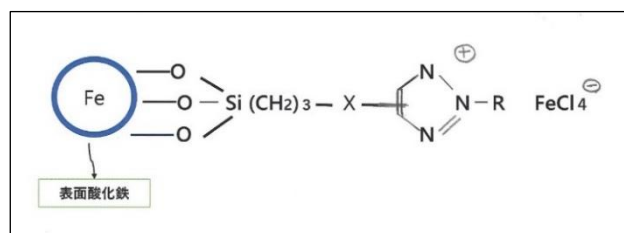


図 18 Ioniqa の磁性流体-イオン液体触媒の構造（イメージ）

出所:Ioniqa の情報から旭リサーチセンターが作成。

- ④2019 年 7 月 9 日発表：Ioniqa の PET 解重合工場が 2019 年夏にオランダで完成し（モノマー生産能力は 1 万トン/年）、工業的規模の PET・CR を実現した⁹⁴。
- ⑤2022 年 9 月 13 日発表：Koch Technology Solutions（KTS）と Ioniqa は、PET の CR リサイクル事業化のために提携した。KTS は 3,000 万ユーロを Ioniqa に投資する⁹⁵。
- ⑥2024 年 1 月 25 日発表：Ioniqa は、PET 解重合技術のライセンス活動を開始する⁹⁶。
- Ioniqa は、Infinity Recycling の Circular Plastics Fund から「大型の成長投資」

⁹⁴ <https://ioniqa.com/ioniqa-takes-first-10-kiloton-pet-upcycling-factory-into-operation/>

⁹⁵ <https://ioniqa.com/ioniqa-takes-a-new-step-in-100-recyclable-pet-plastic/>

⁹⁶ <https://www.sustainableplastics.com/news/ioniqa-license-pet-polyester-chemical-recycling-technology>

を受け、その技術の市場投入を行う。同社は、全ての種類と色の廃 PET を元のモノマーに解重合する独自のプロセスを開発した。Ioniqa によると、その原料は主にローエンドの廃 PET からなっている。

Ioniqa は、2019 年夏からオランダの Geleen にある Brightlands Chemelot Campus でデモンストレーション施設を運営している。年間 1 万トンの生産能力を持ち、食品接触用途向けの再生 PET を製造している。Infinity Recycling の資金調達により、Ioniqa は原料を廃ポリエステル繊維に拡大することも可能になる。

Ioniqa の戦略的ライセンスパートナーは、Koch Technology Solutions である。

⑦2024 年 10 月 10 日記事：Ioniqa は破産保護を申請した⁹⁷。採算が取れない。

⑧2024 年 12 月 11 日発表：Ioniqa は PET/ポリエステルの CR の再出発を宣言⁹⁸。Ioniqa 創業者の Tonnies Hooghoudt が再始動すると発表した。PET/ポリエステルの CR を手がける Ioniqa は 2024 年 10 月に破産申請を発表していたが、技術をライセンスによって実装する方向で最終調整中としている。複数の市場関係者とも協力し、持続可能な PET プラスチックを実現する工場建設を目指す。

6.2 メタノール分解法 (Eastman Chemical)

(1) メタノール分解法の概要

メタノールと MEG は似た化学構造なので、メタノール分解法は、グリコール分解法と同じような解重合速度と予想される。ただし、MEG（沸点 197℃）に比べてメタノールの沸点（65℃）は低いので温度を上げるためには、高圧下での解重合にならざるを得ない。例えば、180～280℃、20～40 気圧の条件で分解される。グリコール分解法と同様に、触媒や溶媒添加により解重合速度をアップし、圧力を下げる試みが行われてきた。DMT の精製は TPA よりも容易だが、アルコールやフタレート不純物を含むといわれる。

⁹⁷ <https://www.icis.com/explore/resources/news/2024/10/10/11040085/chemical-recycler-ioniqa-files-for-bankruptcy-protection/>

⁹⁸ <https://ioniqa.com/ioniqa-is-restarting-in-a-world-that-is-demanding-circular-plastic>

(2) Eastman Chemical の PET メタノール分解法の工業化

①Eastman Chemical は、米国でメタノール分解法の 10 万トン/年の大型 PET 解重合プラントを建設し、稼働中である。また、後述するようにフランスに新規工場を建設する予定があり、米国の第 2 工場計画（テキサス州 Longview）を発表している。

使用プロセスは同社が過去に開発した技術と発表しているが、プロセスの詳細は公表していない。室井高城アイシーラボ代表は、「微量の酢酸亜鉛を触媒として用いることや、DMSO または N-メチルピロリドンのような極性非プロトン性溶媒をメタノールに加えることでメタノール分解を促進している」と述べている⁹⁹。

②2021 年 2 月 1 日記事（C&EN）：C&EN によれば、「Eastman Chemical は、2022 年末までに本拠地テネシー州 Kingsport の化学コンプレックスに 2.5 億ドルを投じて PET 解重合工場を建設する。この工場は自社技術のメタノール分解法を採用して、年間 10 万トンの使用済みの PET カーペット繊維や PET 容器包装を DMT と MEG に分解する。Eastman Chemical は、これらモノマーを使用して、詰め替え可能なウォーターボトルなどの製品に成形される Tritan Renew（商標）製品などの特殊 PET を製造する¹⁰⁰。」

なお、Tritan Renew は、再生モノマーとバージンモノマーをブレンドして重合して製造した再生材で、再生材含有量はマスバランス方式により決められる（図 19）。

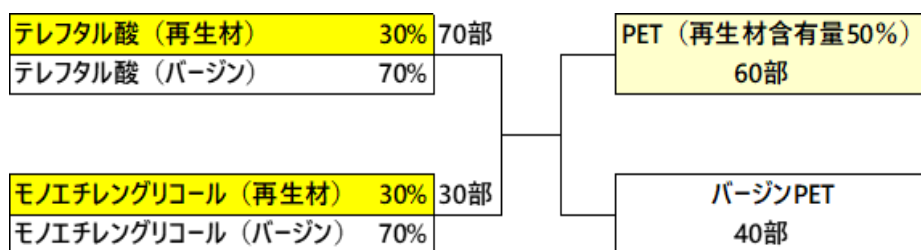


図 19 PET の CR におけるマスバランス方式の利用

出所：各種資料より旭リサーチセンター作成。

⁹⁹ 室井高城、「プラスチックリサイクル」第 3 章 ケミカルリサイクル技術の開発動向と応用展開（サイエンス&テクノロジー社、2021 年 7 月 28 日発刊）

¹⁰⁰ <https://cen.acs.org/environment/recycling/Eastman-build-250-million-plastics/99/web/2021/02>

- ③2022 年 1 月 15 日発表：フランスのマクロン大統領と Eastman Chemical の CEO Mark Costa は共同で、Eastman がフランスで 10 億ドル投資し、廃 PET 処理能力 16 万トン/年の CR 工場とイノベーションセンターを建設する¹⁰¹。技術は、メタノール分解法である。
- ④2022 年 5 月 11 日記事：フランス工場の立地は、Port-Jérôme-sur-Seine に決定した。
(まだ着工の発表はない。)
- ⑤2024 年 3 月 25 日発表¹⁰²：米国の第 2 工場をテキサス州・Longview に建設する。エネルギー省 (DOE) より最大 3.75 億ドルの資金援助を受ける。テキサス州からも資金援助を受ける。設備能力は 11 万トン/年である。

6.3 (アルカリ)加水分解法 (gr3n と Loop Industries)

(1) 加水分解法の概要

加水分解法には、中性、酸性、アルカリ性がある。中性の加水分解は触媒を使用しても解重合速度が遅いのが欠点である。解重合速度を上げるために高温、高圧の条件になるので、実用化には至っていない。酸性加水分解は 90℃でも、硫酸を使えば解重合速度が十分速くなる。ただし、反応器腐食と生成物の純度が低いという問題があり、実用化されていない。

一方、アルカリ加水分解法は実用化が進んでいる。この方法の欠点は、生成物の TPA の精製が DMT より難しいことである。TPA はジカルボン酸で融点が高い (融点 300℃ (密閉管内)) ので蒸留精製は難しく、再結晶での精製となる。工業化例を以下に示す。

¹⁰¹ <https://www.eastman.com/en/media-center/news-stories/2022/eastman-invest-accelerate-circular-economy>

¹⁰² <https://www.eastman.com/en/media-center/news-stories/2024/eastman-selected-to-receive-investment-for-its-molecular-recycling-project>

(2) gr3n(スイス)とNextChem(イタリア)による工業化

①スタートアップの gr3n は、EU の DEMETO プロジェクトとして PET の解重合技術を開発した。マイクロ波を利用して急速に温度を上げる方法である。gr3n によれば、通常のアルカリ加水分解では、分解温度が 210～250℃で 3～5 時間かかるといわれるが、マイクロ波利用熱分解炉を利用すると分解温度 200℃未満で、10 分以内で分解できるという。原料には、使用済みの PET ボトルとポリエステル繊維が使用できる。連続プロセスであり、欧州特許 (EP2736968) を出願している。

gr3n は、ウェブサイトで自社プロセスについて比較的詳しい説明をしている¹⁰³。この中で、MEG を溶媒に使用することが記載されており注目される。

②2022 年 4 月 6 日記事:NextChem は EU の DEMETO プロジェクトの一環として、イタリアで最初となるポリエステル繊維と PET ボトルの CR 実証工場 (1,000 トン/年) の建設を完了した。工場は、イタリア・Chieti の Abruzzo Technology Park にある。技術は gr3n のアルカリ加水分解法である。このプロジェクトは、DEMETO プロジェクトのアドバイザーボードメンバーである Unilever、Coca-Cola、Oviesse、Danone、Henkel などの支援を受けている¹⁰⁴。

(3) Loop Industries のメタノール・アルカリ分解法

①Loop Industries が開発したメタノールとアルカリ触媒を使用する解重合法を、「メタノール・アルカリ分解法」と本リポートでは命名する。分解生成物は DMT と MEG である。

②Loop Industries は、2019 年頃に常温常圧の解重合技術を開発したと発表し注目された。当初は加水分解法 (アルカリ触媒) であったが、生成物の TPA の精製が難しいことから、DMT の形で回収できるプロセスに変更した。

¹⁰³ <https://www.milanpolymerdays.org/blog/recycling-polymeric-materials-via-an-alkaline-hydrolysis-depolymerization-process-gr3n-approach>

¹⁰⁴ <https://www.mairetecnimont.com/en/newsroom/news/first-demonstration-plant-for-chemical-recycling-textiles/>

③Adel Essaddam (Loop Industries 副社長) 発明の米国特許 (US10252976) からすると、メタノールとナトリウムメトキサイド (NaOMe) を使用していると推定される。

その実施例によれば、1 kgの PET と塩化メチレン 500g を混合し、40 分間室温で攪拌して PET を膨潤した後、NaOMe32g とメタノール 667g を加え、攪拌しながら 55℃で 120 分間解重合を行い DMT と MEG を回収した。DMT の収率は 90%であった。塩化メチレンの代わりに DMSO を使用して、同様な条件で解重合した場合の DMT の収率は 89%であった。

④スケールアップと工業化

a. Loop Industries は、PET 樹脂の世界的リーダーである Indorama と 2019 年に合弁会社を設立し、Indorama の米国・サウスカロライナ州 Spartanburg の PET 製造工場サイトに PET 解重合法工場 2 万トン/年を建設する予定であった¹⁰⁵。しかし、これまで具体化していない。

b. SUEZ、Loop Industries、SK Geo Centric の 3 社は合弁で、フランス北東部に解重合法工場を建設することを発表した。しかし、2024 年 11 月 28 日に 3 社はこの計画を断念した¹⁰⁶。

c. SK Geo Centric (韓国) は Loop Industries の技術を導入して、韓国・蔚山に 9.4 万トン/年の解重合法工場を建設する計画を発表した¹⁰⁷。しかし、C&EN 誌は、2025 年 1 月 23 日に Loop Industries と SK Geo Centric がこの計画を取り下げたことを報じた¹⁰⁸。

¹⁰⁵ <https://resource-recycling.com/plastics/2020/11/11/loop-industries-challenged-by-setbacks-and-legal-strife/>
<https://resource-recycling.com/plastics/2022/03/30/indorama-to-invest-8-billion-in-chemical-recycling-and-more/>

¹⁰⁶ <https://www.sustainableplastics.com/news/suez-loop-sk-geo-centric-abandon-plans-pet-chemical-recycling-plant>
<https://www.euwid-recycling.com/news/business/suez-cancels-pet-recycling-project-in-saint-avold-france-251124/>

¹⁰⁷ <https://skinnonews.com/global/archives/11807>

¹⁰⁸ <https://cen.acs.org/environment/recycling/Loop-SK-nix-PET-recycling/103/i2>

おわりに

1. PET 樹脂については、MR が飲料ボトルにも使用できる高い技術レベルに達している。
このため同じ飲料ボトル用途を狙う CR は存在意義が弱くなった。CR は MR よりコストが高いので工業化の壁が高く、苦戦しているのが現状であろう。
ただし、MR による「ボトル to ボトル」の比率が高まれば、何回もリサイクルされた再生材成分が含まれることになるので、着色や固相重合性に問題を生じる可能性がある。
MR の限界が見えてきたときには、CR の存在意義が高まるであろう¹⁰⁹。
2. ポリエステル繊維については、MR がほとんどなく、解重合法や溶媒精製法に頼らざるを得ない。そして、ポリエステル繊維の循環性を上げるためには、「ボトル to 繊維」でなく『繊維 to 繊維』のリサイクルが必須である。ポリエステル繊維製品は混紡が多く、またほとんどが染色されていることから、繊維は樹脂のリサイクルよりはるかに難しい。しかし、川下の衣料メーカーや小売の再生ポリエステル繊維のニーズが高く、EU も繊維の循環性アップに力を入れ始めている。確実に『繊維 to 繊維』リサイクルは拡大していくだろう。ただし工業技術は未完成であり、今後、市場拡大のスピードに技術開発やスケールアップが追いつかない事態が生じる可能性があるが、『繊維 to 繊維』リサイクルは必要なことなので追いつくまで待たざるを得ない。

謝辞

神戸女子大学家政学部家政学科の山根千弘教授には『繊維 to 繊維』に関する貴重な情報とコメントをいただき、深く感謝しております。

¹⁰⁹ 比較として、PE・PP の MR と CR を考えてみる。PE・PP の MR では、食品容器包装の安全のための規制が厳しくクリアすることが難しい。そのため、2030 年の再生材最低含有量規制は当初は 30% が目標であったが、最終的には 10% に後退して決定された。混合廃プラ(PE/PP/PS)の CR はモノマ一段階で精製がしやすく、規制をクリアしやすいとみられ、CR の 1 つの強みや魅力になっている。PET の場合とは対照的である。

参考文献

- (1) PETCORE EUROPE's call to action on Effective ESPR Schemes to Drive Polyester Textile Circularity in Europe, January 23, 2025
<https://petcore-europe.prezly.com/petcore-europes-call-to-action-on-effective-espr-schemes-to-drive-polyester-textile-circularity-in-europe>
<https://www.petcore-europe.org/news-events/656-textile-recycling-can-learn-from-packaging-market.html>
- (2) NEDO TSC「繊維製品の資源循環システムの構築に向けた技術開発について」
2023年1月20日
https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/resource_recycling/pdf/01_05_00.pdf
<https://www.nedo.go.jp/content/100967090.pdf>
- (3) 帝人フロンティア株式会社「繊維 to 繊維リサイクルの課題」
https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/resource_recycling/pdf/01_06_00.pdf
- (4) SYSTEMIQ, Transforming PET Packaging and Textiles in the US, 20th November 2024
https://www.systemiq.earth/wp-content/uploads/2024/11/Systemiq-Transforming_PET_Packaging_and_Textiles_in_the_United_States_EN.pdf
- (5) Specialty fabrics review, Advances in textile recycling/New technologies help enable circularity, February 1, 2025
<https://specialtyfabricsreview.com/2025/02/01/advances-in-textile-recycling/>
- (6) Argus Recycled Polymers, Cost pressure European recycling margins, March 7, 2025
<https://view.argusmedia.com/rs/584-BUW-606/images/CHE-Report-Sample-Recycled-Polymers.pdf>
- (7) 府川伊三郎、ARC リポート「リサイクルが進む PET 樹脂は循環経済を実現するか」2020年2月
https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/pdf/rs-1043.pdf
- (8) 府川伊三郎、ARC リポート「重縮合ポリマーのケミカルリサイクル」2023年10月
https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/pdf/rs-1064.pdf
- (9) Adam McNeeley, and Y. A. Liu, Assessment of PET Depolymerization Processes for Circular Economy.
2. Process Design Options and Process Modeling Evaluation for Methanolysis, Glycolysis, and Hydrolysis, REVIEW February 16, 2024
<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.iecr.3c04001>

<本リポートのキーワード>

ポリエステル繊維、繊維 to 繊維、PET 樹脂、ケミカルリサイクル、メカニカルリサイクル、解重合、BHET、グリコール分解法

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

このリポートの担当

シニアリサーチャー 府川 伊三郎

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