

リサイクルが進むPET樹脂は 循環経済を実現するか

リサイクルが進む PET 樹脂に焦点を当て、その世界市場、特性と用途、製造法、PET 繊維との関係、PET ボトルのリサイクル状況と技術開発、バイオ PET の導入についてまとめた。2030 年までに達成すべき PET ボトルの再生材含有量に関する EU の規制（2019 年 5 月決定）は市場に大きなインパクトを与え、大手飲料メーカーは前倒しのリサイクル計画を発表した。また、PET 関連事業に特化してグローバルに急成長を遂げたタイの石油化学メーカーであるインドラマ・ベンチャーズの発展の歴史と今後の戦略をまとめた。

2020 年 2 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

- ◆ PET繊維はPET樹脂よりも歴史が古く、生産量が多い（2017年の世界生産量：PET繊維5,384万トン、PET樹脂2,130万トン）。合成繊維市場はかつてナイロン（ポリアミド）、ポリエステル（PET繊維）、アクリルの三大合繊といわれてきたが、近年PET繊維のみが急成長し、合成繊維中のシェアは86%と圧倒的になった。国別には中国が断然トップで、PET繊維生産量 3,934万トンで世界シェア73%である。

一方、PET樹脂は樹脂としては後発であるが、ボトル用途を中心に急成長し、生産量で、PE、PP、PVCに次ぐ第4の汎用樹脂となった。世界の生産量は2017年が2,130万トンで、国別には中国が700万トン（33%）、北米480万トン（23%）、欧州280万トン（13%）、インド170万トン（8%）、日本60万トン（3%）である。中国は2003年以降にPET樹脂の生産が急増し、世界一の生産国になった。（4～11頁）

- ◆ PET樹脂は機械的物性、耐熱性、耐候性、透明性に優れ、ボトル、フィルム、シートなどに使用されている。2017年の世界の用途比率は、ボトル71%、フィルム・シート14%、食品容器包装9%、非食品容器包装6%となっている。（12頁）

- ◆ PETは高純度テレフタル酸（以下PTA）とモノエチレングリコール（以下MEG）の重縮合で製造される。繊維グレードは熔融重合でつくられ、ボトルグレードは繊維グレードを固相重合することにより分子量を高めたものである。PETは原料の炭化水素が酸化されたエステル構造を含むため分子量が原料の約1.45倍に増えることから、1kg当たりの製造に必要な全体エネルギーはPEやPPよりわずかに少ない。（13～15頁）

- ◆ PETのリサイクル技術には、メカニカル（マテリアル）リサイクルとケミカルリサイクルがある。メカニカルリサイクルの例としては、協栄産業（リサイクラー）とサントリーが100%再生材を使ったボトルtoボトルリサイクルを実用化している。使用済みPETボトルの表面をアルカリ洗浄する技術と固相重合による物性修復技術がキーテクノロジーで、再生ボトルは飲料用に使用できる。この技術の共同開発者であるオーストリアのEREMAは、ボトルtoボトル技術を含むPETのリサイクル機器を販売している。また、大手飲料メーカーのコカ・コーラやペプシコもすでにボトルtoボトルリサイクルを実施している。2019年に日本コカ・コーラはセブン&アイと組んで、

セブン&アイ店舗に販売した特定飲料銘柄のボトルを使用後店頭で回収し、これをリサイクルして再生材100%の完全循環型PETボトルをつくるシステムを確立した。

ケミカルリサイクルについては、PETを高温条件下にMEGで解重合するアイエス法（現在は日本環境設計の川崎工場）が知られている。最近、常温常圧、アルカリ存在下にPETをメタノールで解重合してジメチルテレフタレートとMEGを得るカナダのループ・インダストリーズ（以下ループ）の技術、触媒をグラフトした磁性流体（数十nmの金属粒子）を使いPETをMEGで高速解重合するオランダのIonikaの技術、揮発性トリアルキルアミン触媒を使ってPETをMEGで解重合する米国IBMの技術などが発表されている。いずれの方法も汚染物質や顔料・インクなどの着色物を除去できるので、汚染ボトルや着色ボトルのリサイクルも可能である。また、解重合モノマーからつくった再生PETボトルは食品用途に使用できるのが特徴である。ループはインドラマ・ベンチャーズと合弁会社を設立し、2020年より生産を開始する。コカ・コーラ、ペプシコ、ダノンなど飲料メーカーがループとすでに再生材供給契約を締結している。Ionikaには、コカ・コーラが開発支援のため出資している。（16～25頁）

- ◆ EU 議会は 2019 年 5 月に、PET ボトルを含むプラスチックボトルの回収率と再生材使用比率の 2030 年規制（規則）を最終決定した（次々頁の表 4）。これは市場に大きなインパクトを与え、大手飲料メーカーはボトルの再生材使用率の大幅アップとともにバイオ PET の導入も含めた将来計画を次々に発表した。例えば、サントリーは 2030 年までにグローバルで使用するすべての PET ボトルの素材を、再生材と植物由来 PET に 100%切り替え、化石由来原料の新規使用ゼロの実現を目指している。また、2018 年にコカ・コーラ本社（米国）は、2030 年までに再生材を平均して 50%以上自社製品の容器に含有させる計画を発表した。さらに、2019 年に日本コカ・コーラは、2022 年までに PET 再生材の使用率（2018 年実績は約 17%）を 50%以上に、また 2030 年までに“ボトル to ボトル”の割合を 90%に高める計画を付け加えた。

植物由来 PET とは植物を原料としたバイオ PET である。植物からつくった MEG を使って製造したものを PET30、MEG だけでなく PTA も植物からつくったものを PET100 と呼ぶ。PET30 は実用化されているが、PET100 は開発中である。PTA の原料のパラキシレンを非食品系木質バイオマス原料からつくる開発を、米国ベンチャーのアネロテ

ックや “NaturALL Bottle Alliance”（ダノン、ネスレ、ペプシコ、オリジン・マテリアルズが参画）が行っている。なお、PET30、PET100 とともに既存の PET と物性は変わらない。バイオマス（植物）由来なので再生可能で、石油のように枯渇の心配がなく、カーボンニュートラルで燃焼しても温室効果ガス（CO₂）の増加はない。なお、リサイクルとバイオマスプラスチックの導入は競合するものではなく、リサイクルを徹底的に進めたうえで、不足分にバイオマスプラスチックを導入することが理想形である。バイオマスプラスチックの使用量を減らすことにより、食糧や環境への影響をミニマム化できる。（26～39 頁）

- ◆ インドラマ・ベンチャーズ（以下インドラマ）は PET の成長性を先見し、1995 年以来 PET 樹脂メーカーの買収を繰り返し、世界トップの PET 樹脂メーカーに成長した。2018 年の売上高は約 107 億ドル、樹脂生産能力は 510 万トンである。世界的に PET 関連製造企業の買収を続けており、樹脂以外に PET 繊維事業（生産能力 153 万トン）をもち、また川上原料の PTA（同 491 万トン）とエチレンオキサイド・MEG（同 55 万トン）にも遡及している。強力な PET サプライチェーンをグローバルに構築し、地域別売上高は、タイ 6%、その他アジア地域 29%、米国 36%、欧州 29%である。

また、インドラマはリサイクル事業を重視しており、2011 年に欧州の PET リサイクラーのウエルマンインターナショナルを買収して以来、欧州最大の PET リサイクル企業である。2018 年以降に、大手リサイクラーのソレプラ・インダストリーズ（フランス）、カスタムポリマーズ PET（米国）、インビスタ R&F（ドイツ）、グリーンファイバー（米国）を矢継ぎばやに買収した。合計リサイクル能力は、44 万トンに上る。また、新しい動きとして、2018 年にケミカルリサイクルの新技术を開発したループと合併会社を設立し、2020 年の実用化を目指している。

インドラマは日本への PET 樹脂の主要輸出メーカーであり、日本上陸も視野に入れている。2019 年 5 月に 100%再生材のペレット、フレークの外販も開始した。また、2019 年 7 月には今後リサイクル事業（ボトル to ボトル設備中心）に 15 億ドルを投資する計画を発表した。（40～54 頁）

- ◆ PET は循環経済に向けて先頭を走る優等生だが、日本においては PE や PP などでのリサイクル技術の加速が望まれる。（55～56 頁）

表4 EUのプラスチック(PETなど)ボトル規制と大手飲料メーカーの対応

	EU	サントリー	コカ・コーラ		ペプシコ
	EU政府	飲料メーカー	世界 飲料メーカー	日本コカ・コーラ 飲料メーカー	飲料メーカー
発表		2018年11月「ボトルtoボトル推進」 ＊	2018年1月 「World Without Waste」		2018年10月「容器に関するサステイナブルゴール」(2025年)
	2019年5月 EU議会最終決定：ボトル規制など	2019年5月 プラスチック基本方針		2019年7月「容器の2030年ビジョン」	
ボトル回収目標	プラスチックボトル 2025年 77% 2029年 90%		2030年 販売量と同量を回収・リサイクル	2030年 販売量と同量を回収	
rPET(再生材)の使用比率目標	PETボトル 2025年 25%以上	＊2025年までにrPET 50%以上		2022年 rPET使用率50%以上 2025年 素材をすべてサステイナブル材料に転換	2025年 バージンPET35%削減とrPET含有率25%
	プラスチックボトル 2030年 30%以上	2030年 rPETと植物由来PETに100%切り替える	2030年 再生材含有率 50%	2030年 ボトルtoボトル 90%	
ケミカルリサイクルの開発			・ Ionigaに資金援助 ・ ループ・インダストリーズと供給契約		・ ループ・インダストリーと供給契約
バイオ(植物由来)PETの開発		・ アネロテック(米)とバイオPET100の共同開発			・ NaturALL Bottle Allianceに参画
再生材使用比率(現在)		世界・国内販売約10%	全世界	国内販売 約17%	米国 9%、 西欧 21%
バイオPET30の使用(現在)		使用中	使用中	使用中	使用中
リサイクラー		協栄産業		FIGIほか	

出所：EUおよび企業の発表資料に基づき、旭リサーチセンターが作成。

目 次

はじめに	1
1 世界の PET 繊維と PET 樹脂の市場	4
1.1 合成繊維市場を独占する PET 繊維と PET 繊維を独占する中国	4
1.2 第 4 の汎用樹脂に成長した PET 樹脂と急増する中国の生産量	5
1.3 世界の PET 繊維・樹脂の国別生産量と PET のマテリアルフロー	7
2 PET 樹脂の特性と用途	12
3 PET 繊維・樹脂の製造方法	13
3.1 PET の製造ルートと製造に必要なエネルギー	13
3.2 PET 繊維と PET 樹脂の重合法	14
4 PET のリサイクル技術	16
4.1 メカニカルリサイクル	16
4.2 ケミカルリサイクル(モノマーリサイクル)	19
5 PET ボトルのリサイクル計画とバイオ PET の導入	26
5.1 EU のプラスチックボトルの規制	26
5.2 世界の飲料メーカーのリサイクルとバイオ PET 導入の計画	27
5.3 バイオ PET の定義とバイオ PET100 の開発状況	31
5.4 PET ボトルリサイクルの日欧米の状況	36
5.5 日本における PET のマテリアルフローとリサイクル	37
6 インドラマ・ベンチャーズの急拡大する PET サプライチェーン	40
6.1 インドラマ・ベンチャーズとは	40
6.2 川上・川下とグローバルなサプライチェーンの確立	40
6.3 連結売上高とセグメント別売上高	43
6.4 買収による PET 樹脂、PET 繊維、モノマー原料事業の発展の歴史	45
6.5 リサイクル事業	51
おわりに	55
参考文献	57

はじめに

本リポートは、2つのARCリポート「シングルユースプラスチックとそれを取り巻く国際的動き」（2019年8月、巻末の参考文献⑤）、「日本のプラスチックリサイクルの現状と課題」（2019年9月、同参考文献⑥）の続編である。前2編では、PE・PP・EPS・PSなどの炭化水素系樹脂とPET樹脂を比較評価しながら、シングルユースプラスチックとしての問題とリサイクルの問題について議論を進めてきた。

本リポートは議論をPET樹脂に絞り、リサイクルを中心に全体的なレビューをしたものである。このため、必要に応じて前2編のARCリポートに記載の図表や文章を抜粋して載せた。

内容的には、PET樹脂の世界市場、製造方法、PET繊維との関係、リサイクル技術の開発状況を俯瞰した。特にPETボトルのEU規制とそれに対応して、次々に発表された大手飲料メーカーのリサイクル計画を詳述した。また、新技術として欧米で開発中のケミカルリサイクルとバイオPETの導入について解析した。

なお、前2編のARCリポートは国内中心のリポートであったが、本リポートはできるだけ世界の統計データや海外情報を集め、国際的動向を知るための材料とした。

リポートの最後に、ケーススタディとして、PET事業を急拡大しているタイのインドラマ・ベンチャーズの成長の歴史と現状を明らかにした。インドラマ・ベンチャーズの今後の戦略は、世界のPET樹脂事業の将来を占うものである。

注1：PET（ポリエチレンテレフタレート）は、PET樹脂とPET繊維（ポリエステル繊維）の両方を含む総称として使用した。

注2：年間の生産能力、生産量、需要量は“トン/年”と書くべきであるが、煩雑になるので文章中では“トン”と略した。

注3：政府の規制、企業のプレスリリース、新聞記事を抜粋したものは斜体文とした。その中で特に重要なものは、筆者の判断で太字とした。

用語・略語集

(1) プラスチックの名称:

PET（ポリエチレンテレフタレート）：本リポートではPET樹脂、PET繊維の総称。

PET樹脂：ボトル用途、シート・フィルム用途などに使用されるPET樹脂。

PET繊維：ポリエステル繊維（長繊維（Fiber）と短繊維（Staple）がある）。

PET再生樹脂（rPET）：回収PETボトルなどからリサイクルでつくられた再生材。

バイオPET：バイオマス原料を使ってつくられたバイオマスベースPETのこと。

バイオPET30：バイオマスベースのMEGを使用するが、PTAは石化製品を使用してつくられたPET。

バイオPET100：MEGとPTAともにバイオマスベースのものを使用してつくられたPET。

PE（ポリエチレン、LDPE・LLDPE・HDPEの総称）

LDPE（低密度ポリエチレン：高圧法）：LLDPEを含めてLDPEと呼ぶ場合もある。

LLDPE（線状低密度ポリエチレン） HDPE（高密度ポリエチレン）

PP（ポリプロピレン） PVC（ポリ塩化ビニル）

PS（ポリスチレン） EPS（発泡ポリスチレン）

(2) 化合物名称:

PTA：高純度テレフタル酸。 MEG：モノエチレングリコール。

BHET：ビス（2-ヒドロキシエチル）テレフタレート。 DMT：ジメチルテレフタレート。

E0：エチレンオキシド（またはエチレンオキシド）。 PX：パラキシレン。

(3) リサイクル関連用語（日本語、順不同）

- ・廃プラ：廃棄プラスチックの略。使用済みプラスチック製品と生産・加工ロスを含む。
- ・リサイクル：広義にはメカニカルリサイクル（マテリアルリサイクル）、ケミカルリサイクル、サーマルリサイクルを意味し、狭義にはメカニカルリサイクルとケミカルリサイクルを意味する。本リポートでは狭義の意味で使用した。

- ・リサイクル率：廃プラスチック A トンのうちの B トンをリサイクル工程に回し、C トンの再生材を得た場合に、 B/A （％）をリサイクル率という場合もあるし、 C/A （％）をリサイクル率という場合もある。定義が不明確なので注意が必要。
- ・マテリアルリサイクル（材料リサイクル）：廃プラスチックを固体または熔融状態でリサイクルし、再生材を得る方法。メカニカルリサイクルとほぼ同義語。
- ・メカニカルリサイクル：機械的方法で廃プラスチックを材料リサイクルする方法。ケミカルリサイクルと対比して使用されることが多い。
- ・再生材：リサイクル素材と同意語。本レポートでは再生樹脂と同意語。
- ・水平リサイクル：使用済み製品をリサイクルして、同じ製品をつくるリサイクル方法。例：使用済み PET ボトルからリサイクルにより PET ボトルをつくること（ボトル to ボトル リサイクル）。
- ・カスケードリサイクル：使用済み製品をリサイクルして得られた再生材を、元の製品とは異なる製品（元の製品より付加価値が低い場合が多い）に使用する場合。
- ・ケミカルリサイクル（モノマーリサイクル）：プラスチックを解重合によりモノマー化して、そのモノマーを再重合して元のプラスチックをつくるリサイクルの方法。
- ・リサイクラー：リサイクル事業者のこと。
- ・リサイクルの設備能力：次の 2 つの場合があるので注意。
 - ①廃プラ処理能力（Processing capacity）：廃プラをリサイクル設備で処理する能力（インプットの能力）。
 - ②再生材生産能力：リサイクル設備を使って廃プラから再生材を製造する能力（アウトプットの能力）。

(4) リサイクル関連用語と略号(英語)

- ・Post-consumer recycle (PCR)：使用済み消費者製品からの再生材。
- ・Post-consumer recycler：使用済み消費者製品リサイクラー。
- ・Recycle：再生材またはリサイクル素材。
- ・Recycler：リサイクルメーカー。

1 世界のPET繊維とPET樹脂の市場

1.1 合成繊維市場を独占するPET繊維とPET繊維を独占する中国

PET の歴史を見れば、合成繊維（以下合繊）の方が合成樹脂よりも歴史が古い。かつて合繊市場では、ポリエステル（PET 繊維のこと）、ナイロン（ポリアミド）、アクリルが三大合繊といわれ、そのシェアはほぼ 3 分の 1 ずつであったが、近年はポリエステルの一人勝ちで、合繊市場を独占している。

日本化学繊維協会の資料¹によれば、2017 年の世界の合繊生産量 6,241 万トンの内訳は、ポリエステル 5,384 万トン（内ファイバー（ポリエステル F：長繊維）3,826 万トン、ステープル（ポリエステル S：短繊維）1,558 万トン）、ナイロン（ファイバーとステープル）559 万トン、アクリル（ステープル）170 万トンなどとなっている。合繊生産量 6,241 万トンのうちポリエステル生産量 5,384 万トンの占める割合は実に 86%である（図 1）。

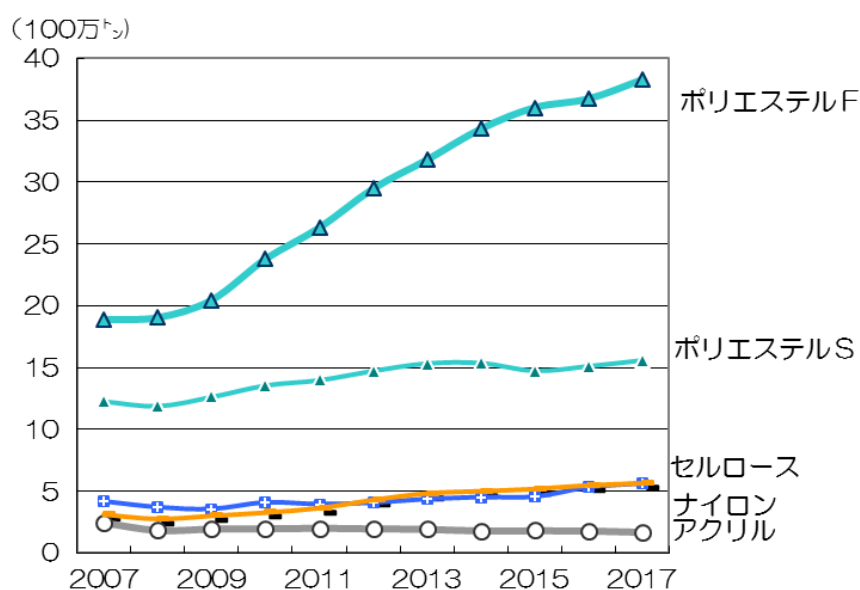


図1 世界の主要化繊品種の生産推移

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）。

¹ 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）。
<https://www.jcfa.gr.jp/mg/wp-content/uploads/2018/06/ed0d7cac100ad6f59f4297632c0a77c8.pdf>

国別のポリエステルFの生産量は、中国が 3,934 万トンと圧倒的シェア（世界シェア 73%）を有している。次にシェアが大きいのはインドの 480 万トン（世界シェア 9%）である。日本の生産は極めて少なく、21 万トンにすぎない。図 2 に示すように、中国のポリエステルFの伸びが顕著で、インドも増加している。

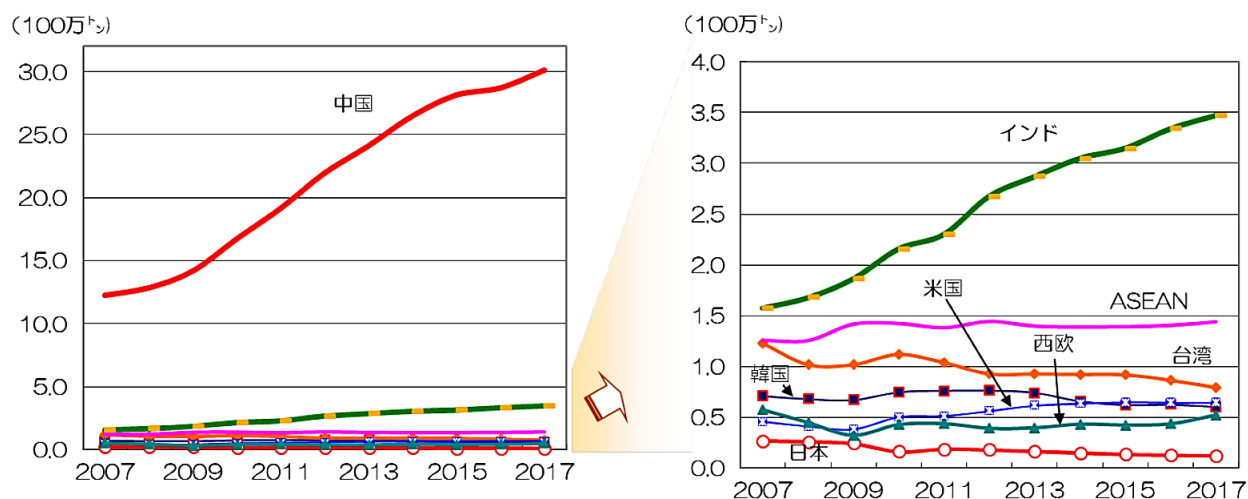


図2 世界の主要地域別ポリエステルFの生産推移

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)。

1.2 第4の汎用樹脂に成長したPET樹脂と急増する中国の生産量

PET 樹脂は樹脂としては後発であるが、PET ボトルを中心に急成長し、その世界生産量（2017 年 2,130 万トン）は PS（ポリスチレン：2016 年世界生産量 1,280 万トン）を抜いて、PE（同 8,910 万トン）、PP（同 6,340 万トン）、PVC（ポリ塩化ビニル：同 4,070 万トン）に次ぐ第 4 の汎用樹脂となった。

PET 樹脂の生産量については、公式統計データがほとんどない²。図 3 の経済産業省資料（三菱商事作成、元資料は Wood Makenzie）によれば、世界の生産量は 2017 年が

² PETの需要・生産の統計については、①公式データがない、②繊維と樹脂には、バージンPETの他にPET再生材が原料に使われる、③PET繊維は熔融重合後、そのまま熔融紡糸をする場合が多い。ただし、一部樹脂ペレットを熔融紡糸する場合があり、この場合樹脂と繊維の生産量の両方に重複してカウントされることがあるなどの問題がある。

2,130 万トンで、国別には中国が 700 万トン（33%）、北米 480 万トン（23%）、欧州 280 万トン（13%）、インド 170 万トン（8%）、日本 60 万トン（3%）である。

中国は 2003 年以降に PET ボトルの生産が急増し、世界一の生産国になっている。

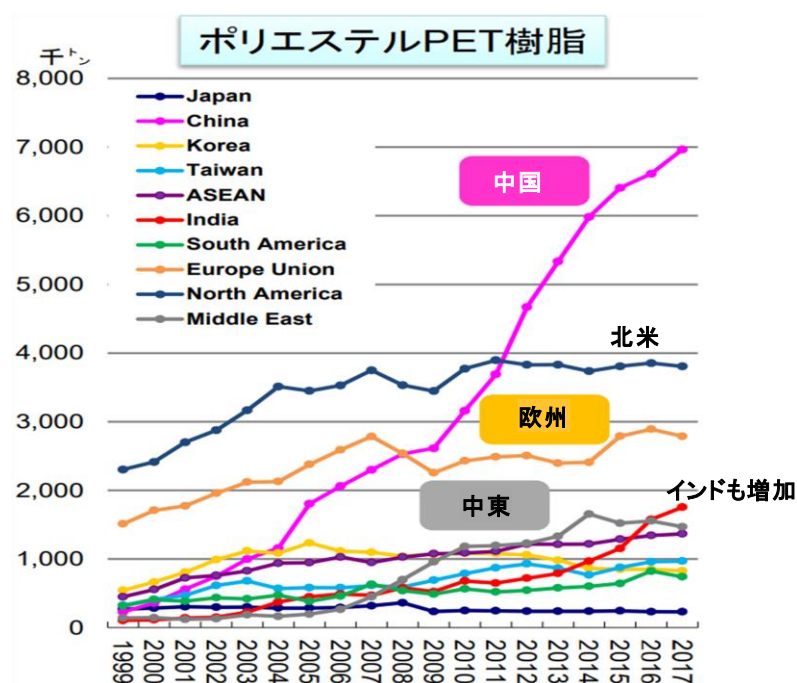


図 3 ポリエステル樹脂の国別生産推移

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）。

https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment/sekiyu_sangyo/pdf/001_08_00.pdf

なお、Plastics Insight によれば³、2015 年の PET 樹脂の世界需要は 2,060 万トンで、ボトル用途が 1,458 万トン（70.8%）、その他用途が 602 万トン（29.2%）である。ボトル用途 70.8%の内訳は、炭酸飲料用 26.4%、飲料水用 26.0%、その他飲料用 18.4%となっている。また、その他用途 29.2%の内訳は、シート・フィルム 13.9%、食品容器包装 9.3%、非食品容器包装 6%となっている。

表 1 に欧州の汎用樹脂価格を示した。欧州では PET 樹脂は汎用樹脂の中でも安い方である。参考に、表 2 に欧州の石油化学原料価格を示す。

³ <https://www.plasticsinsight.com/global-pet-resin-market/>

表 1 欧州の汎用樹脂価格

種類	グレード	価格 (2019年3月) (ユーロ/トン)		(参考) 密度 (g/cc)
		低価格	高価格	
HDPE	フィルム	1,380	1,420	0.94~0.965
	射出	1,310	1,350	
	ブロー	1,340	1,380	
LLDPE	フィルム	1,200	1,230	0.91~0.93
LDPE	フィルム	1,280	1,310	0.91~0.93
PP	フィルム	1,410	1,450	0.9~0.92
	ホモ射出	1,375	1,415	
	コポリ射出	1,435	1,475	
PS	GP(一般)	1,715	1,755	1.04~1.09
	HI(高衝撃) 射出	1,830	1,870	
PVC	パイプ	1,445	1,485	1.3
	高品質品	1,555	1,595	
PET	ボトル	1,270	1,340	1.34~1.39

出所: Plastics News Europe MARCH/APRIL ISSUE 2019。

表 2 欧州の石油化学原料価格

原料	価格 (2019年3月) (ユーロ/トン)
エチレン	1,015
プロピレン	950
スチレン	1,055
ベンゼン	558
パラキシレン	995

出所: Plastics News Europe MARCH/APRIL ISSUE 2019。

1.3 世界のPET繊維・樹脂の国別生産量とPETのマテリアルフロー

表 3 に、世界の PET 繊維の生産量、PET 樹脂の生産量、高純度テレフタル酸 (PTA) の需要量から推定した PET の生産量、PET 再生材の生産量をまとめた⁴。

まず、化学繊維協会の資料より、PET 繊維の世界生産量 (T) は 2017 年に 5,385 万トンである (表 3)。また、図 3 の経済産業省資料 (三菱商事作成、元資料は Wood Mackenzie)

⁴ 世界の生産量と需要量は同じであるが、各国ベースでは、生産と需要には輸出入が影響するので生産と需要は異なる。

より、PET 樹脂の世界生産量 (R) を 2017 年 2,130 万トンとした (表 3)⁵。インドラマ・ベンチャーズは、自社の PET 樹脂生産能力は 2017 年が 440 万トンで、世界シェアの 20%を占めると述べている。これらからすると PET 樹脂の世界生産能力は約 2,200 万トンになり、ほぼ近い値となる。

表 3 PET 繊維・樹脂、PTA 換算 PET、PET 再生材についての世界と国別の生産量

(単位:万トン/年)

	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。

<https://www.jcfa.gr.jp/mg/wp-content/uploads/2018/06/ed0d7cac100ad6f59f4297632c0a77c8.pdf>

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

https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment/sekiyu_sangyo/pdf/001_08_00.pdf

注 3：表 5（37 頁）参照

注 4：高純度テレフタル酸（PTA）の需要量と伸び率（2016～2022）は、経済産業省資料による。

https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/mono/chemistry/downloadfiles/01_souron.pdf

出所：上記各種資料より旭リサーチセンターが作成。

経済産業省は、PE・PP・PS の世界の需給状況を毎年調査しているが、PET 樹脂の項目はない。その代わり、PET（繊維および樹脂）の主原料の PTA の世界需要量のデータがあり、2016 年は 5,710 万トンとなっている。PET 製造のための PTA の理論原単位（0.86）から、バージン PET の 2017 年の生産量（P）を推定すると 6,888 万トンとなる（表 3）。

前述の PET 繊維生産量（T）（5,385 万トン）と PET 樹脂生産量（R）（2,130 万トン）を合計すると、（T+R）7,515 万トンになる。これは、PTA 需要から推定したバージン PET

⁵ 日本の需要量は表 5(37 頁)のデータを基に修正した。

生産量 (P) (6,888 万トン) を約 630 万トン (T+R-P) 上回ることになる。630 万トンのうちのかかなりの部分を PET 再生材が占めていると推定される⁶。

また再生材の量については、2017 年に日本 50 万トン、米国 56 万トン、欧州 134 万トンで合計で 240 万トンであった (表 3、元資料：表 5 (37 頁))。240 万トンには、日米欧から中国などに輸出された使用済み PET も再生材としてカウントされている。本リポートでは、低めに見積もって世界の再生材は約 300 万トンとした。すなわち、上記の差額 630 万トンのうちの約 300 万トンは再生材の供給と考えた。

PET 繊維と PET 樹脂の市場・技術に関する情報から、図 4 の 2017 年における世界の PET のマテリアルフローを作成した。

図 4 に示すように、繊維は熔融重合した後に熔融物を直接紡糸するプロセスがほとんどと考えられる。熔融重合後ペレットをつくり、ペレットから熔融紡糸することも一部ある。重合工場と紡糸工場が地理的に離れている場合や、固相重合の高分子量ペレットを原料にタイヤコードをつくる場合などである⁷。また、使用済み PET ボトルをリサイクルしてつくった再生材も繊維原料に使用される。繊維は再生材の最大の用途である。

PET ボトル用樹脂は熔融重合後、固相重合してつくられた高分子量 PET ペレット (図 7 (14 頁) 参照) が使われる。ボトル用樹脂には一部は再生材も使用される。リサイクル率の高い日本における再生材の比率は約 10% である。

フィルム、シート、その他の用途には、熔融重合でつくられた PET ペレットが主に使われる。熔融重合—固相重合による高分子量 PET ペレットが高強度二軸延伸フィルムなどに使われるが、少量なので図では省略した。再生材も使用される。

使用済み PET ボトルを原料にリサイクルによって PET 再生材ペレットがつくられ、繊維、フィルム・シート、ボトルの原料に使用される。繊維用途は再生材の 50% を超える。

⁶ 中国について同様に解析してみると、中国の PTA の需要は 3,220 万トンなので、PTA 換算の PET 生産量は 3,900 万トンと計算される。2017 年の中国の PET 繊維の生産量は 3,934 万トンで、繊維だけで PTA 換算の PET 生産量をオーバーしている。表 3 の中国の差額 (T+R-P) の 734 万トンのうちのかかなりの量が PET 再生材であろう。

⁷ ペレットから紡糸する場合は、統計上繊維と樹脂の両方にダブルカウントされる可能性がある。

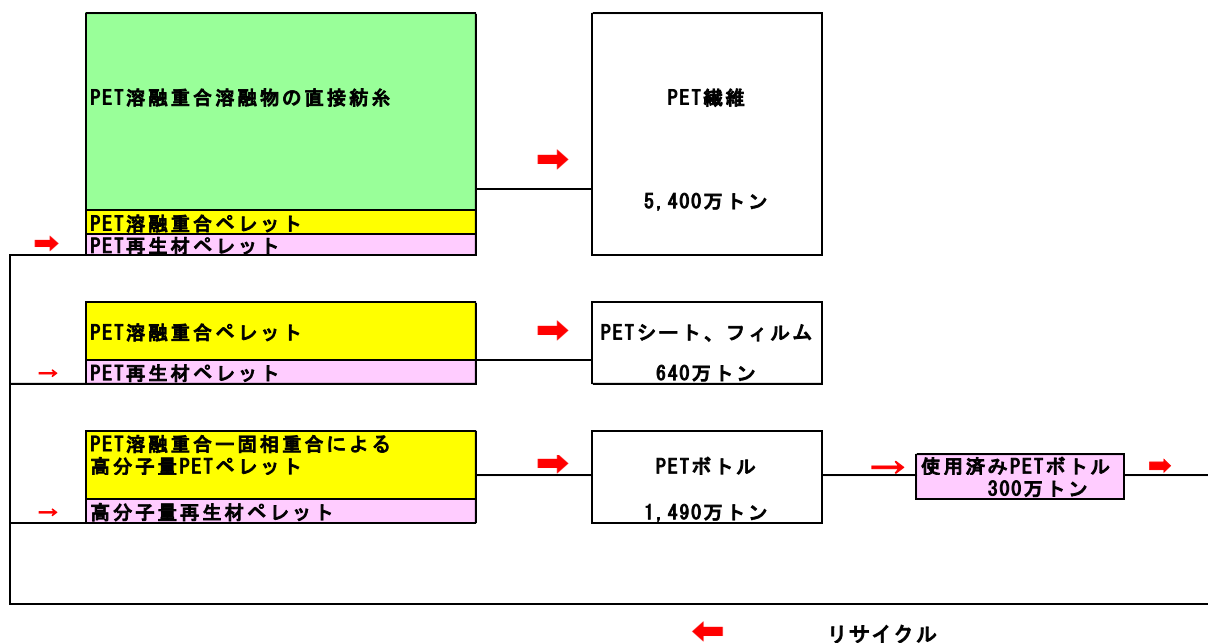


図 4 2017 年における世界の PET のマテリアルフロー(イメージ)

(原料樹脂－PET 繊維、PET シート・フィルム、PET ボトルーリサイクルの関係)

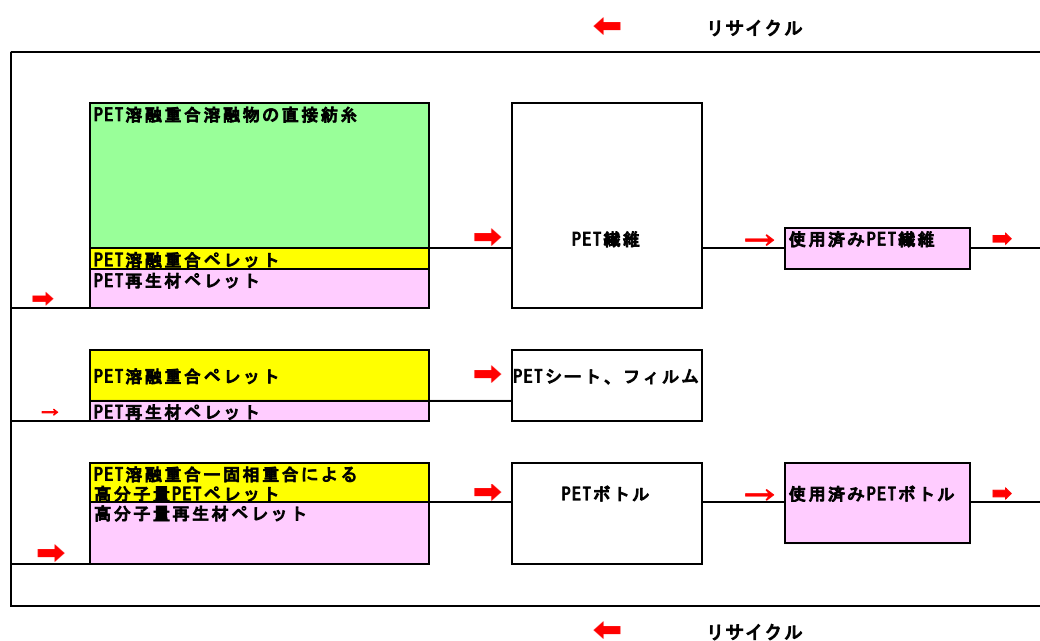


図 5 2030 年における世界の PET のマテリアルフロー(イメージ)

(原料樹脂－PET 繊維、PET シート・フィルム、PET ボトルーリサイクルの関係)

図 4、5 の出所：各種資料より旭リサーチセンターが作成。

図5は2030年の世界のPETマテリアルフローの予想図である（2017年と2030年のマテリアルフローを比較しやすいように、両年の需要量は変わらないと仮定してフローを作成した）。

2030年は、PETボトルの再生材比率が法規制や社会的要請から大幅に高くなる（2017年の10%以下から2030年は50%超へ）ことと、繊維のリサイクル量が増加することを織り込んだ。現在、PET繊維のリサイクルが世界的に始まっており、将来は大きな数量になると予想される。

2 PET樹脂の特性と用途

PET は Polyethyleneterephthalate（ポリエチレンテレフタレート）の略である。化学式は、 $(\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{OCOPhCO})_n$ で主鎖にベンゼン環（式の Ph）を含む芳香族ポリエステルである。脂肪族ポリエステル⁸に比べ機械的物性に優れるので、例えば PET ボトルは薄肉化が可能である。

PET 樹脂は高い結晶融点（270℃）を有する結晶性樹脂であり、耐熱性、耐候性、透明性に優れるエンジニアリングプラスチックである。最大の用途は PET ボトルであり、その他高性能な二軸延伸フィルムや食品包装用などの安価な無延伸フィルム・シート（例：APET トレイ）がある。PET 樹脂の成形方法としては、押出法によるフィルム・シート製造や延伸ブロー成形によるボトルの製造が代表的である。PET は結晶性ポリマーであるが、結晶化速度が遅く射出成形に向いていないことが、数少ない欠点である。

前述（6 頁）の通り、Plastics Insight によれば⁹、2015 年の PET 樹脂の世界需要は 2,060 万トンで、ボトル用途が 1,458 万トン（70.8%）、それ以外の用途が 602 万トン（29.2%）である。ボトル用途 70.8%の内訳は、炭酸飲料用 26.4%、飲料水用 26.0%、その他飲料用 18.4%となっている。また、その他用途 29.2%の内訳は、フィルム・シート 13.9%、食品容器包装 9.3%、非食品容器包装 6%となっている。

使用済みの空 PET ボトルはポイ捨てされやすく、キャップがしてあると水中で浮遊し海岸や川岸に漂着して海洋プラスチック問題を引き起こしている。ただし、PET は耐候性に優れるため、PE、PP、EPS のように紫外線で崩壊・細分化してマイクロプラスチックになることはほとんどない。

PET は使用済みボトルを単独かつ比較的汚染の少ない状態で回収でき、洗浄方法（アルカリ洗浄など）や物性修復技術（固相重合による分子量アップなど）が確立されていることから、プラスチック中で最もリサイクルが進んでいる。

⁸ 生分解性プラスチックの PGA（ポリグリコール酸）、PLA（ポリ乳酸）、PHA（PHBH など）、PBS、ポリカプロラク톤は脂肪族ポリエステルである。

⁹ <https://www.plasticsinsight.com/global-pet-resin-market/>

3 PET繊維・樹脂の製造方法

3.1 PETの製造ルートと製造に必要なエネルギー

PET は高純度テレフタル酸（以下 PTA、 HOOCPhCOOH ）とモノエチレングリコール（以下 MEG、 $\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$ ）からつくられる。PET の製造ルートを図 6 に示す。

PTA 製造は、まず①原油の石油精製によりナフサ留分を取得し、次に②ナフサの接触改質（リフォーミング）によりパラキシレン（以下 PX）を取得し、次いで③PX を酸化して PTA を得る。PTA 製造は酸化プロセスなので副生物があり、また比較的エネルギー多消費プロセスである。このように、現在の PX 製造は基本的に石油精製のガソリン製造プロセスで行われており、ナフサクラッキングでは製造されていない。

MEG は、④エチレンを酸化してエチレンオキシド（以下 EO）に変換し、次いで⑤EO を加水分解して MEG とする。④と⑤の工程は副生物がある。④の副生物は CO_2 であり、⑤の副生物はジエチレングリコール（DEG：MEG の 2 量体）やトリエチレングリコール（TEG：MEG の 3 量体）である。また⑤は加水分解に大量の水が必要で、それを蒸留で除くので、エネルギー多消費プロセスである。

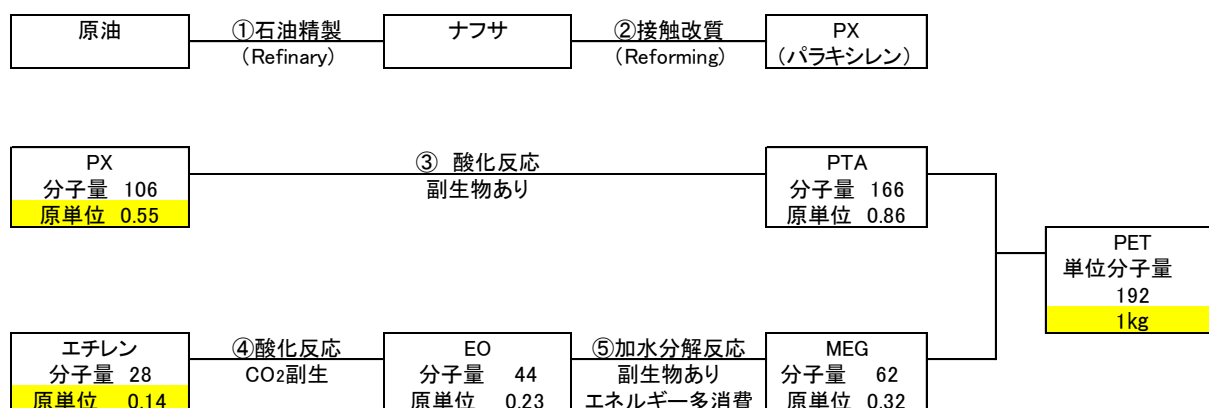


図 6 PET の原油からの製造ルート

注：原単位は、理論原単位を意味する。PTA：高純度テレフタル酸、EO：エチレンオキシド、MEG：モノエチレングリコール。

出所：各種資料より旭リサーチセンターが作成。

PET 1kgをつくるためには、理論原単位でPX0.55kgとエチレン0.14kgが必要である。言い換えると $0.55+0.14=0.69$ kgの原料から1.45倍のPET 1kgが得られることになる。このため、製造工程で副生物があることやエネルギー消費が大きいことが、PET 1kg 当たりに換算すると $1/1.45=0.69$ (69%) に縮小される。すなわち、PET 単位重量当たりの全体エネルギー必要量 (CO₂ 発生量) が大きくならない有利さがある。これはエチレン、プロピレンから理論原単位1.0でそれぞれポリエチレン、ポリプロピレンができることとは対照的である。結果的にPET ボトル用樹脂の製造に必要な全体エネルギーは63Mj/tであり、PEの69~72 Mj/tやPPの71 Mj/tよりわずかに小さい(参考文献⑤)。

なお、協栄産業によれば、ボトルのメカニカルリサイクルに必要な全体エネルギーは、ボトル用バージン樹脂製造に必要な全体エネルギーの63%といわれる¹⁰。エネルギー的にメカニカルリサイクルがバージン樹脂製造よりも有利である。

3.2 PET繊維とPET樹脂の重合法

図7に、モノマー、繊維用PET、ボトル用PET、PETボトルの製造法についてまとめた。

- | | |
|--|--|
| ① 重合用モノマー(BHET)の合成 | : PTA+2MEG→BHET + 2H ₂ O |
| ② 繊維用PETの重合 | : BHET→(熔融重合)→PET (I.V.=0.6) +MEG、 |
| ③ ボトル用PETの重合 | :
PET (I.V.=0.6) ペレット→(結晶化)→(固相重合)→(熔融押出)→PET (I.V.=0.8) ペレット |
| ④ PETボトルの製造 | :
PET (I.V.=0.8) ペレット→(射出成形)→プリフォーム→(延伸ブロー成形)→PETボトル |
| 注: BHET: ビス(2-ヒドロキシエチル)テレフタレート
PTA: 高純度テレフタル酸、 MEG: モノエチレングリコール | |

図7 モノマー、繊維用PET、ボトル用PET、PETボトルの製造法

出所: 各種資料より旭リサーチセンターが作成。

まず、PTAに2倍モルのMEGを反応させて、水を除きBHET(ビス(2-ヒドロキシエチル)テレフタレート: HOCH₂CH₂OOCPhCOOCH₂CH₂OH)を得る。次に、BHETの自己重縮合

¹⁰ 協栄産業ホームページ。 <http://www.kyoei-rg.co.jp/>

反応で重合体を得る。エステル交換反応を利用した重縮合反応で、かつ平衡反応である。重合は加熱・減圧下で副生する MEG を除去することにより、平衡を生成系にずらすことにより進む。

PET の繊維グレード（分子量の指標である固有粘度（I.V.）が I.V.=0.6）のポリマーは、通常の熔融重合で製造できる。熔融重合が終了した後、熔融物をそのまま紡口から押出し、冷却・延伸して PET 繊維を製造することが多い。熔融重合は重合が進むにつれて、粘度が上がるので高粘度用攪拌機と MEG を留去しやすい表面更新型重合機の設計が必要となる。表 11（48 頁）に、工業的に使用されている熔融重合プロセス名（またはエンジニアリングメーカー名）が記載されている。

一方、PET ボトルは PET 樹脂のプリフォーム（試験管形状をしたもの）を加熱して延伸ブロー成形でつくられる。この際、樹脂には延伸ブロー成形に耐えるだけの高い熔融粘度と熔融強度が必要となるので、固相重合で PET の分子量を I.V.=0.8 まで上げる。

固相重合は、繊維グレードのペレットを結晶化させた後に、PET のガラス転移温度（69℃）以上で結晶融点（270℃）以下の 220～235℃の温度範囲で重合を行う。重合温度が高い方が重合速度は速いが、ペレット同士が融着するのを防ぐためには結晶融点より少し低い温度にしなければならない。固相重合装置としては、連続式のホッパー型（サイロ型）重合器がある。表 11（48 頁）に、工業的に使用されている固相重合プロセス名（またはエンジニアリングメーカー名）が記載されている。固相重合により分子量を高める方法の他に、熔融重合で直接ボトルグレードの分子量まで高める技術も開発されている。Uhde-Inventa-Fisher の MTR 技術（Melt To Resin）で、AlphaPet Inc.（アラバマ、US）が採用している。

それ以外のフィルム・シート用途には、繊維グレードより若干高い分子量の樹脂が使用される。なお、特に高い物性を必要とする場合は固相重合による高分子量樹脂が用いられる。

4 PETのリサイクル技術

PET のリサイクル技術には、メカニカルリサイクル（マテリアルリサイクル）とケミカルリサイクルがある。

4.1 メカニカルリサイクル

(1)協栄産業とサントリーの100%ボトルtoボトルリサイクル(水平リサイクル)

リサイクラーの協栄産業¹¹と飲料メーカーのサントリーが再生材 100%のボトル to ボトル技術（再生材 100%でボトルをつくる技術）を 2011 年に実用化した。さらに、2018 年にはプロセスを大幅に簡素化した FtoP ダイレクトリサイクル技術を実用化した¹²。いずれも、技術のポイントは、アルカリ洗浄と固相重合の組み合わせである。

サントリーによれば、「FtoP ダイレクトリサイクル技術は欧州の機械メーカーのイタリア・SIPA¹³とオーストリア・EREMA¹⁴との共同開発によって完成した。FtoP ダイレクトリサイクル技術では、回収したペットボトルを粉碎・洗浄したフレーク（Flake）を高温、真空で一定時間処理し、溶解・ろ過後、直接プリフォーム（Preform）を製造することに特徴がある。プリフォーム製造までに結晶化処理や乾燥など多くの工程が必要だった従来の仕組みと比較すると、CO₂排出量を約 25%削減できる」¹²。

図 8 に協栄産業—サントリーの技術の詳細を示す。

¹¹ 協栄産業：本社、栃木県小山市。合成樹脂の再生・加工・販売を行うリサイクル原料メーカー。1986 年からペットボトルリサイクルを手掛け、グループ全体で年間 8 万トンの再生 PET 樹脂を製造。（出所：脚注 12）

¹² <https://www.suntory.co.jp/news/article/13135.html>

¹³ SIPA：本社、イタリア。プリフォーム・ボトル成形機、フィルターなどの飲料充填設備メーカー。2013 年にロータリー型射出コンプレッション成形機「XTREME」を開発し、サントリープロダクツ榛名工場に最初に導入。（出所：脚注 12）

¹⁴ EREMA：本社、オーストリア。プラスチック再生機などの設備メーカー。1996 年にペットボトル専用再生機「VACUREMA」を開発した。これまでに世界で 200 台以上の販売実績があり、協栄産業も採用。（出所：脚注 12）

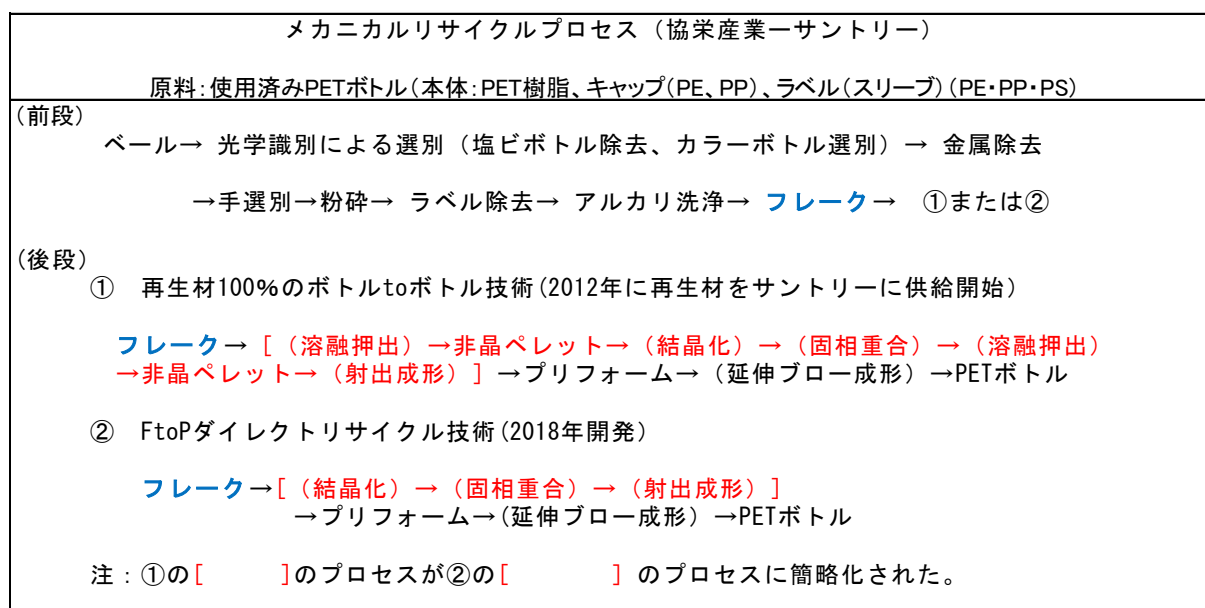


図 8 協栄産業－サントリーのメカニカルリサイクル技術

出所：協栄産業とサントリーの公表資料より旭リサーチセンターが作成。

（2）EREMA

オーストリアに本社のある著名なリサイクル機器メーカーで、リサイクルプロセスの設計も手掛けている。PET樹脂のボトルtoボトルリサイクル技術をもち、世界に展開中である。2018年から2019年にかけての直近1年間の売上高は1.8億ユーロ、従業員は500人以上である。世界で使われているEREMAのシステムからは、年間1,450万トンのプラスチックペレットが生産されている。

（3）日本コカ・コーラの100%ボトルtoボトルリサイクル（水平リサイクル）

2019年6月に日本コカ・コーラは「完全循環型PETボトル」¹⁵について発表した（図9）。それによれば、

「日本コカ・コーラとセブン&アイ・ホールディングスによる共同企画商品「一（はじめ）緑茶 一日一本」が、「完全循環型PETボトル」を採用してリニューアルした（*）。この製品に使われている「完全循環型PETボトル」とは、セブン&アイ

¹⁵ 日本コカ・コーラは、特定銘柄のボトルを使用後に回収して、それを原料にした再生材から再生ボトルをつくり、特定銘柄用ボトルとして使用することから完全循環型と呼んでいる。

グループの店頭で回収した PET ボトルから再生した PET 樹脂を 100%用いたリサイクル PET ボトルである」¹⁶。＊2019 年 6 月 5 日時点。

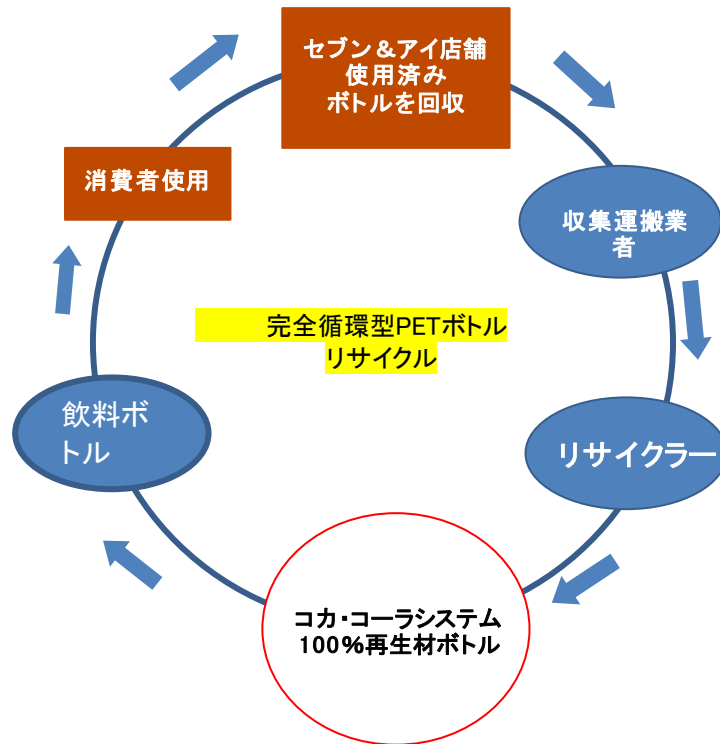


図 9 日本コカ・コーラがセブン&アイ・ホールディングスと共同で開発した完全循環型 PET ボトル

出所：日本コカ・コーラ発表資料を基に、旭リサーチセンターが作成。

日本コカ・コーラの同社技術の紹介ビデオにリサイクラーの遠東石塚グリーンペット（略称：FIGP）¹⁷ の名があるので、リサイクラーに起用しているものと思われる。

¹⁶ https://www.cocacola.co.jp/stories/sus_hajimeryokucha_190607

¹⁷ 遠東石塚グリーンペットホームページ(<http://www.figp.co.jp/company/>)には、「本社、東京工場が日本茨城県猿島郡境町に置かれ、飲料メーカーと非飲料メーカーにリサイクルペット(R-PET)レジンを生産・販売する、いわゆる“ボトル to ボトル”のメカニカルリサイクル事業を営んでいます。東京工場は 2014 年から商業生産を開始しており、年間のペール処理量が 50,000 トン、R-PET レジン生産量が 35,000 トンの日本最大の R-PET 工場となっています。」とある。

(4) インドラマ・ベンチャーズのボトルtoボトル技術

タイの石油化学メーカー、インドラマ・ベンチャーズもボトル to ボトル技術を有していると推定される。2019 年 5 月には 100%PET 再生材（r PET）のブランド“DEJA™”を発表し¹⁸、100% r PET のペレット、フレーク、繊維の形状の製品を発売している。日本への 100% r PET の輸出や日本でのリサイクル工場建設を検討している。

(5) エフピコのボトルtoシートリサイクル(カスケードリサイクル)

エフピコのエコ APET シートは、中間層に PET 再生樹脂（再生材）を使い、両面にバージン PET 樹脂を重ねて押出したもので食品用に使用できる（図 10）。食品に接触する面はバージン PET 樹脂なので、食品包装の安全性を確保できる。バージン PET 樹脂層の厚みは、酸性食品や水性食品用は 25 μ m 以上、それ以外の用途は 25 μ m 以下といわれる¹⁹。



図 10 エフピコ APET シートの 3 層構造(イメージ)

出所：エフピコからの情報により旭リサーチセンターが作成。

4.2 ケミカルリサイクル（モノマーリサイクル）

ケミカルリサイクル（モノマーリサイクル）には、①PET を MEG（モノエチレングリコール）で化学分解して、BHET モノマー（BHET：ビス（2-ヒドロキシエチル）テレフタレート）をつくる方法（グリコール分解法）と、②メタノールで化学分解して、ジメチルテレフタレート（DMT）と MEG の 2 つのモノマーを得る方法（メタノール分解法）がある。これまで、高温条件下に PET を MEG で解重合するアイエス法（現在は日本環境設計が川崎工場（能力 2 万トン）を保有）が知られている。最近、ケミカルリサイクル

¹⁸ <https://www.indoramaventures.com/en/updates/other-release/1259/indorama-ventures-announces-the-launch-of-deja-a-100-rpet-brand>

¹⁹ 厚生省資料 <https://www.mhlw.go.jp/stf/shingi/2r9852000001i9wm-att/2r9852000001kmig.pdf>

技術の新規開発が 3 件発表された。①常温常圧、アルカリ存在下、PET をメタノールで解重合して DMT と MEG を回収するカナダのループ・インダストリーズの技術、②触媒をグラフトした磁性流体（金属粒子）を使って、PET を MEG で高速解重合するオランダの Ioniqa の技術、③揮発性トリアルキルアミン触媒を使って、PET を MEG で解重合する米国の IBM の技術である。

ケミカルリサイクルは、顔料・インクなどの着色物や汚染物質を除去できるので、着色ボトルや汚染ボトルがあっても構わないし、解重合モノマーからつくった再生 PET ボトルは食品用途に使用できるのが特徴である。日本では協定があり着色ボトルはほとんど使われないが、欧米では着色ボトルがまだ使用されている。着色ボトルは、リサイクルにより無色透明な PET 再生材を得るときの支障になっている。

(1)アイエス法(日本環境設計)

日本環境設計は 2018 年にペットリファインテクノロジーを東洋製缶から買収した。図 11 にペットリファインテクノロジーが所有していたアイエス法の工程の概要を示す。解重合温度は約 220℃と比較的高い。MEG によるグリコール分解法で、BHET モノマーを得る。

ケミカルリサイクル（モノマーリサイクル）プロセス（アイエス法）	
第1ステップ：使用済みペットボトルバールの解体→金属、ラベル、キャップの分離 → 粉砕物洗浄→フレーク	
第2ステップ：解重合 PETフレーク+MEG→(解重合) →粗BHET→[着色不純物除去（活性炭）→ 金属イオン除去（イオン交換樹脂）→晶析（MEG溶媒）→分子蒸留] →純BHET	
第3ステップ：再重合 ① 繊維用PETの重合：純BHET→(熔融重合) →PET+MEG PET分子量 (I. V. =0.6) ② ボトル用PETの重合： PET (I. V. =0.6) ペレット→(結晶化) →(固相重合) →(熔融ペレット化) →PET (I. V. =0.8)	
注：BHET：ビス（2-ヒドロキシエチル）テレフタレート PTA：高純度テレフタル酸、 MEG：モノエチレングリコール	

図 11 旧ペットリファインテクノロジーの PET リサイクルプロセス(アイエス法)

出所：同社発表資料より旭リサーチセンターが作成。

(2) ループ・インダストリーズ (Loop Industries)

ループ・インダストリーズ（以下ループ）はカナダのスタートアップ企業で、2010年に創業した。現在は米ナスダックに上場している。使用済みのPETボトルなどPET加工製品や使用済みPET繊維を100%原料として、再生ペットボトルを製造する技術を開発した。

ループの技術は、使用済みPETにジクロロメタン（塩化メチレン）を加え膨潤させたのち、常温常圧・アルカリ存在下に、PETをメタノールでMEGとDMTに分解する方法である。得られたモノマー（MEGとDMT）は、着色物や付着物などを除去し精製され、そこから再びPETボトルを製造できる。このため着色ボトルや色物の繊維製品にもこのプロセスは使用できる。このプロセスは常温常圧下で可能なため、リサイクルにかかるコストや二酸化炭素排出量、エネルギー消費量も大幅に削減できるとしている²⁰。

出願人検索で、ループの米国特許2件（USP9,550,713、10,087,130）が見つかった。2件は、同じPatent Familyで実施例は同じである。実施例1を脚注に示す²¹。ただし、実施例1は、生成物がDMTではなくテレフタル酸である。また、実施例1は大量のアルカリと、中和に等モルの硫酸を使用するので、コストが高いと思われる。

筆者の推定では、反応系にアルカリとメタノールが存在するので、解重合後の処理などでテレフタル酸をDMTに変換することは可能と考えられる。DMTに変換できれば、硫酸で中和する必要はなくなり、アルカリを再利用できるようになるかもしれない。

あるいは、アルカリを触媒的に使用する方法にシフトしているのかもしれない。

²⁰ <https://www.loopindustries.com/en/tech>、<https://www.marketwatch.com/press-release/loop-industries-issues-letter-to-shareholders-2019-01-16-71973257>

²¹ Loop Industriesの特許：<https://patents.google.com/patent/US9550713B1/en> の実施例1によると、

Washed and shredded polyethylene terephthalate (2 Kg, including caps and labels) was introduced in a stainless steel reactor. Dichloromethane (300 mL) was added and the mixture was stirred at ambient temperature and atmospheric pressure. Potassium hydroxide (716 g) dissolved in methanol (6 L) followed by an additional amount of methanol (0.4 L) were then added to the reaction mixture and the resulting mixture was stirred for 66 minutes (aliquots taken at 2, 10, 25, 35, and 50 minutes showed that the depolymerization reaction was complete after 25 minutes). The reaction mixture was then filtered. The filter cake was washed with deionized water.

The pH of the filtrate was lowered to about 2 by addition of aqueous sulfuric acid. The precipitate obtained was filtered and washed with a minimum amount of methanol to yield terephthalic acid.

The filtrate was distilled to first recover the dichloromethane and the methanol and then to recover the ethylene glycol.

とある。

ループのホームページ²²によれば、同社はすでにいくつかの企業と提携や供給契約を結んでいる（下記の①～⑧）。ループの技術が大変注目されていることがわかる。

製造関係の提携としては、

- ① 2018 年 9 月発表：インドラマ・ベンチャーズと 1：1 の合弁契約を締結し、米国に生産プラントを建設し、2020 年に商業生産を開始する。使用済み PET からモノマーをつくり、これを重合して再生 PET 樹脂をつくるプラントである。
- ② ループは Thyssenkrupp（ドイツのエンジニアリングメーカー）との間で、ループの解重合技術と Thyssenkrupp の PET Melt-To-Resin Technology (MTR) を結合させる契約を締結した。前述の通り、MTR は固相重合を使用せず、熔融重合だけで高分子量の PET ボトルグレードを製造する重合技術で、実用化されている（表 11：48 頁）。また、ユーザーに当たる大手食品・飲料メーカーとの再生材供給契約としては、
- ③ 2018 年 7 月：ロレアル（L'Oréal）グループ（フランスベースの化粧品メーカー）は、ループから PET 再生材の供給を受け、欧米の化粧品の容器包装に使用することを発表した。
- ④ 2018 年 7 月：ペプシコ（PepsiCo）の子会社の Gatorade Gx は、同社の Pods をループ技術でリサイクルする契約を締結した。
- ⑤ 2018 年 10 月：ペプシコはループと複数年の PET 再生材（Loop Branded 100% Sustainable Plastic）の供給契約を締結した。契約により、ループとインドラマ・ベンチャーズによる合弁会社の製造能力の一部（キャパシティライト）を取得した。合弁会社から再生材を購入し、2020 年前半の導入を目指す。
- ⑥ 2018 年 11 月：コカ・コーラの調達部門は、ループとの PET 再生材（Loop Branded 100% Sustainable Plastic）の複数年の供給契約のフレームを作成した²³。
- ⑦ 2019 年 2 月：L'OCCITANE（ロクシタン：フランスに本社を置く化粧品メーカー）は、ループと PET 再生材（Loop Branded 100% Sustainable Plastic）の複数年の供給契約を締結した。2025 年の導入を図る。2019 年 11 月に供給契約の拡大を行った。

²² <https://www.loopindustries.com/en/>

²³ <https://www.coca-colacompany.com/stories/coca-cola-announces-new-investments-in-enhanced-recycling-as-par>

- ⑧ 2019年2月：ダノン（Danone：世界的食品&飲料メーカーでエビアンの親会社）はループとPET再生材（Loop Branded 100% Sustainable and Upcycled loop™）の複数年の供給契約を締結した。米国に設立されたループとインドラマ・ベンチャーズの合弁会社から樹脂の供給を受けて、エビアンなどの飲料水ボトルに使用する。

（3）Ioniqaのケミカルリサイクル技術

Ioniqa はオランダの the Eindhoven University of Technology からスピノフしたスタートアップ企業で、PET 廃棄物のリサイクルに特化している。

Ioniqa の技術は、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、イオン性液体（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。静置すると、下層に着色した磁性流体を含む層が 30 秒でできる。上層を分離すると、BHET モノマーが得られる²⁴。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のが特徴である。

Ioniqa で出願人検索したところ 5 件の USP があり、そのうちポリマー分解に関するものは USP10,266,479、10,421,849、10,316,163 の 3 件であった。実施例の一つは、①溶媒にエタンジオール使用、②触媒にブチルイミダゾリウム（+） $-\text{FeCl}_4^-$ （-）タイプのイオン性液体を使用、③表面が酸化鉄（ Fe_2O_3 ）になっている鉄（数百 nm）の磁性流体を使用、④触媒と磁性流体をグラフト（結合）するために、官能基をもつシランカップリング剤（例：トリエトキシシリルプロピル）を使用、⑤反応温度は 180～190℃である。磁性流体—シランカップリング剤—イオン性液体触媒の構造を図 12 に示す。

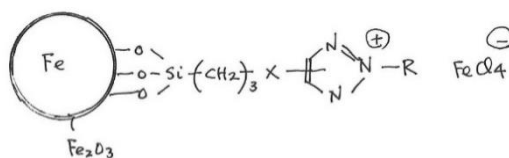


図 12 Ioniqa の磁性流体—イオン性液体触媒の構造（イメージ）

出所：Ioniqa の特許情報から旭リサーチセンターが作成。

²⁴ <https://www.agro-chemistry.com/news/ioniqa-launching-first-pet-plastic-upcycling-plant/>

PET モノマー生産能力 1 万トンのプラントが 2019 年夏に完成し、最初の使用済み PET の投入テストが行われた²⁵。今後、試運転により最適操作条件を確立する。

Ioniqa は、PET 樹脂メーカーや PET 容器包装を使用している消費者製品メーカーとの提携を 2 件行っている²⁶。

① 2018 年 4 月 4 日：ユニリーバ (Unilever)、インドラマ・ベンチャーズ、Ioniqa の 3 社は、Ioniqa が開発した使用済み PET から食品包装用途に使用できるバージングレードをつくる新技術について提携したことを発表した²⁷。インドラマ・ベンチャーズは世界最大の PET 樹脂メーカーである。ユニリーバはオランダとイギリスに本拠を置く世界有数の一般消費財メーカーで、食品・洗剤・ヘアケア・トイレタリーなどの家庭用品を製造・販売する多国籍企業である。

② 2018 年 12 月 13 日：コカ・コーラは、Ioniqa のケミカルリサイクル技術開発やスケールアップを加速するために Ioniqa に出資することを決定した²⁸。コカ・コーラのグローバルビジョン「2030 年までに少なくとも 50%を再生材にする」に貢献するものである。

(4)IBMのケミカルリサイクル技術

2019 年 2 月 11 日、IBM の研究者が PET 容器包装や PET 繊維をケミカルリサイクルする新技術（「VOLCAT」と命名）を発表した。前述のアイエス法や Ioniqa と同じように、PET を MEG で解重合するグリコール分解法で、新規の分解触媒を発見した。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²⁹。IBM が開発した「VOLCAT」は、洗浄・分別費用が抑えら

²⁵ <https://ioniqa.com/ioniqa-takes-first-10-kiloton-pet-upcycling-factory-into-operation/>

²⁶ <https://ioniqa.com/>

²⁷ <https://ioniqa.com/unilever-ioniqa-and-indorama-launching-breakthrough-food-packaging-technology/04/04/2018>

²⁸ <https://ioniqa.com/the-coca-cola-company-announces-loan-agreement-with-ioniqa/Agreement>

²⁹ <https://newsroom.ibm.com/2019-02-11-IBM-Researchers-Develop-Radical-New-Recycling-Process-to-Transform-Old-Plastic>

れ、触媒がリサイクルできるためコストが安いという。学会発表もしているが、スケールアップや事業化の計画は発表されていない。

学会発表³⁰によれば、IBMは以前よりPETのMEGによる解重合反応の触媒を開発しており、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（N（Alk1）（Alk2）（Alk3））触媒であり、触媒リサイクルが可能である。トリアルキルアミン触媒とMEGの配位を図13に示す。

なお、IBMはコンピューターサイエンスを活用して触媒開発をしてきた。



第一世代 TBD 触媒と第二世代 DBU 触媒 第三世代トリアルキルアミン触媒の配位

図 13 IBM の PET 解重合触媒の構造と配位構造

出所：IBM による学会発表、Bob Allen et.al, Polyester Digestion:VOLCAT, Summit on Realizing Circular Carbon Economy, July 24, 2018。

³⁰ Bob Allen et.al, Polyester Digestion:VOLCAT, Summit on Realizing Circular Carbon Economy, July 24, 2018

5 PETボトルのリサイクル計画とバイオPETの導入

表4にEUの規制とそれに対応する大手飲料メーカーの対応・計画をまとめた。

表4 EUのプラスチック(PETなど)ボトル規制と大手飲料メーカーの対応

	EU	サントリー	コカ・コーラ		ペプシコ
	EU政府	飲料メーカー	世界 飲料メーカー	日本コカ・コーラ 飲料メーカー	飲料メーカー
発表		2018年11月「ボトルtoボトル推進」 ＊	2018年1月「World Without Waste」		2018年10月「容器に関するサステイナブルゴール」(2025年)
	2019年5月 EU議会最終決定：ボトル規制など	2019年5月 プラスチック基本方針		2019年7月「容器の2030年ビジョン」	
ボトル回収目標	プラスチックボトル 2025年 77% 2029年 90%		2030年 販売量と同量を回収・リサイクル	2030年 販売量と同量を回収	
rPET(再生材)の使用比率目標	PETボトル 2025年 25%以上	＊2025年までにrPET 50%以上		2022年 rPET使用率50%以上 2025年 素材をすべてサステイナブル材料に転換	2025年 バージンPET35%削減とrPET含有率25%
	プラスチックボトル 2030年 30%以上	2030年 rPETと植物由来PETに100%切り替える	2030年 再生材含有率 50%	2030年 ボトルtoボトル 90%	
ケミカルリサイクルの開発			・ Ionikaに資金援助 ・ ループ・インダストリーズと供給契約		・ ループ・インダストリーと供給契約
バイオ(植物由来)PETの開発		・ アネロテック(米)とバイオPET100の共同開発			・ NaturALL Bottle Allianceに参画
再生材使用比率(現在)		世界・国内販売約10%	全世界	国内販売 約17%	米国 9%、西欧 21%
バイオPET30の使用(現在)		使用中	使用中	使用中	使用中
リサイクラー		協栄産業		FIGPIほか	

出所：EUおよび企業の発表資料に基づき、旭リサーチセンターが作成。

5.1 EUのプラスチックボトルの規制

2019年3月にEU議会はシングルユースプラスチックと酸化型生分解性プラスチックの規制法案を承認し、5月に最終的に議決した³¹。このうちのPETボトルなどのプラスチックボトルの規制または規則(rule)を下記に示す(原文を脚注に示す)。

³¹ ①2019年3月27日 EU COMMISSION(欧州委員会:ブリュッセル):EU議会新ルール承認へ
http://europa.eu/rapid/press-release_statement-19-1873_en.htm

②2019年5月21日 EU議会の最終決定
https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_19_2631

「プラスチックボトルの分別回収を 2029 年までに 90% (2025 年までに 77%)、また、キャップとボトル接続部の設計基準の導入、また PET ボトルに含まれる再生材料比率を 2025 年までに 25%以上、2030 年までに全プラスチックボトルについて再生材料比率を 30%以上にすることを目標 (target) とする。」

プラスチックボトルには PET ボトルだけでなく、PE、PP、PVC、ポリカーボネート製などのボトルも含まれることは注意すべきである。

5.2 世界の飲料メーカーのリサイクルとバイオPET導入の計画

上記 EU によるプラスチックボトルの規制決定は、世界の飲料メーカーに大きなインパクトを与えた。2018 年にリサイクル計画を決めていたサントリー、コカ・コーラは、2019 年に前倒しのリサイクル加速計画を発表した。

(1) サントリー

- ① 2018 年 11 月にサントリーは、使用済みペットボトルの有効利用を目指した取り組みについて以下のように発表した³²。抜粋を示す。

「サントリーグループは、これまで *Reduce* (使う量を減らす)、*Recycle* (再資源化して使う)、*Bio* (植物由来の資源を使う) を表す「2R+B」を掲げ、容器素材の軽量化、薄肉化を進め、国産最軽量のペットボトルの導入や国産最薄の商品ラベルを実用化、さらには、植物由来原料のペットボトル導入など、様々な取り組みを実施してきました。(中略)

今後、当社は、同社を含むリサイクル事業者各社と連携して、*B to B* (ボトル to ボトル) 促進に向けてリサイクルペットボトルをさらに積極的に導入していきます。そして、最新技術を活用し、まずは、**中期計画として 2025 年までに国内清涼飲料事業における当社全ペットボトル重量の半数以上に再生ペット素材を使用していくこ**

関係部分の抜粋 *The new rules will introduce,*

•A 90% separate collection target for plastic bottles by 2029 (77% by 2025) and the introduction of design requirements to connect caps to bottles, as well as target to incorporate 25% of recycled plastic in PET bottles as from 2025 and 30% in all plastic bottles as from 2030.

³² <https://www.suntory.co.jp/softdrink/news/pr/article/SBF0770.html>

とを目指し、更なる循環型社会の実現にむけた地球環境の保全活動を一層強化していきます。」

- ② 2019年5月31日に、サントリーは2018年発表計画を強化する「プラスチック基本方針」を発表した³³。

サントリーグループ「プラスチック基本方針」

1. Recycle & Renewable :

- (1) 2030年までに、グローバルで使用するすべてのペットボトルの素材を、リサイクル素材と植物由来素材に100%切り替え、化石由来原料の新規使用ゼロの実現を目指します。

- (2) 全ての事業展開国において、各国の国情に応じた効率的なリサイクルシステム構築のために必要な施策を、政府機関や業界、環境NGO、NPOなどとともに積極的に取り組みます。(以下脚注)³⁴

産経新聞によれば(2019年5月31日)³⁵、

「サントリーのペットボトル飲料販売は、国内と海外はほぼ半数ずつ。ペットボトル樹脂は2017年実績で、計25万トンを利用した。現在はこの約1割を使用済みペットボトルからの再生樹脂でまかなっている。これを2030年までに6~7割に高め、足りない部分を植物由来の原料で補う。再生技術を共同開発している協栄産業(栃木県小山市)と、安価で効率の良いペット樹脂の再生工場を完成させて軌道に乗せたことから、新たな計画を設定した。米国のベンチャー企業と共同開発中の植物由来樹脂の商業プラントも2023年に立ち上げる。これらに伴う投資規模は500億円を予定している。

³³ <https://www.suntory.co.jp/news/article/13473.htm>

³⁴ **2. Reduce & Replacement:** 資源の有効活用のために、容器包装のデザイン変更等により、プラスチック使用量の削減を推進するとともに、環境にネガティブな影響を与えない代替となる容器包装の導入の検討をすすめます。**3. Innovation:** リサイクル率向上、環境影響を最小限におさえる素材領域等におけるイノベーションに積極投資します。**4. New Behavior:** 人々の行動変容を促す啓発活動を実施するとともに、サントリーグループ社員一人ひとりが、ライフスタイルの変革に努め、分別収集の促進、河川、海岸の清掃活動などの社会貢献活動にも積極的に参加します

³⁵ <https://www.sankei.com/economy/news/190531/ecn1905310032-n1.html>

サントリーは植物由来 PET（バイオ PET）として、すでに PET30³⁶を導入しているが、100%バイオマスベースの PET（PET100）の導入も計画している。サントリーは米国のベンチャーのアネロテックと共同でバイオマスベースの高純度テレフタル酸（PTA）の製造プロセスを開発中であり、これに成功すれば PET100 が実現する。2023 年の実用化を目指している。

（2）コカ・コーラ（Coca-Cola）

- a. ザ コカ・コーラ カンパニー（本社、米国）は 2018 年 1 月に、グローバル計画「World Without Waste（廃棄物ゼロ社会）」を発表した³⁷。計画は 3 本柱からなっており、
1. *DESIGN* 2025 年までに全世界の自社製品の容器を 100%リサイクル可能にし、2030 年までに平均して 50%のリサイクル素材を自社製品の容器に含有する。
 2. *COLLECT* 2030 年までに全世界で販売するすべての自社製品の容器と同等量を回収・リサイクルする。
 3. *PARTNER* 廃棄物ゼロ社会を目指して、協力し合う。

b. 日本コカ・コーラの「容器の 2030 年ビジョン」³⁸

2019 年 7 月、日本コカ・コーラはグローバル計画「World Without Waste（廃棄物ゼロ社会）」に基づき、計画を加速させた「容器の 2030 年ビジョン」を発表した。

具体的には、飲料などで使用したペットボトルを回収・リサイクルして再び飲料用ペットボトルとして用いる “ボトル to ボトル” を推進し、

- ・ 2022 年までにリサイクル PET 樹脂の使用率（2018 年実績で約 17%）50%以上を達成する
- ・ 2030 年までに “ボトル to ボトル” の割合を 90%にまで高める

³⁶ PET30 の原料の MEG はバイオマスベースで、PTA は石油化学品である。PET 中の MEG 由来が 30 重量%なので PET30 と呼ばれる。コカ・コーラなどもすでに PET30 を PET ボトルに採用している。

³⁷ <https://www.cocacola.co.jp/sustainability>

³⁸ <https://www.cocacola.co.jp/sustainability>
<https://www.cocacola.co.jp/press-center/news-20190712-15>
https://www.cocacola.co.jp/stories/sus_www10QA_190919

・2025 年までに国内で販売する全製品のペットボトルにサステナブル素材を採用する

・2030 年までに国内で販売した製品と同等量のペットボトルを回収する³⁹

という計画である。

c. 他社との提携

コカ・コーラは、ループ・インダストリーズとケミカルリサイクルでつくられた PET 樹脂の購入契約を結んだことを発表した。この樹脂を使用すれば、食品用途の PET 製品を製造できるのが特徴である。

また、同時に別のケミカルリサイクル技術をもつ Ioniqa に出資することを発表した⁴⁰。Ioniqa の開発を加速させるためである。

(3) ペプシコ(Pepsico)

a. ペプシコは 2018 年 10 月に、2025 年に向けたパッケージングに関する持続可能計画 (Sustainable Goals) を発表した⁴¹。その骨子は 4 つあり、

- ① 2025 年までに、自社のパッケージングを 100%、リサイクル可能、コンポスト化可能、もしくは生分解性とするよう努力する。
- ② 2025 年までに、自社のプラスチックパッケージング中の再生材含有率を 25%にするよう努力する。
- ③ 2025 年までに、自社の飲料全体でバージンプラスチックの量を 35%減らすよう努力する。樹脂絶対量で 2025 年は 2018 年比 20%の削減になる。
- ④ PEPSICO FOUNDATION と連携してリサイクル率向上に取り組む。

³⁹ <https://business.nikkei.com/atcl/gen/19/00019/072300003/?P=2>

⁴⁰ <https://www.coca-colacompany.com/stories/coca-cola-announces-new-investments-in-enhanced-recycling-as-par> <https://www.chemicalrecycling.eu/news/coca-cola-ioniqa-introducing-coke-bottle-made-with-plastic-from-the-sea/>

⁴¹ <https://www.pepsico.com/sustainability/packaging>
<https://www.pepsico.com/news/press-release/pepsico-announces-new-packaging-goal-for-25-recycled-plastic-content-by-202510262018>

現状は、イ. 2018 年現在、全世界でペプシコのパッケージングは約 89%がリサイクル可能であり、ロ. ペプシコは食品用 PET 再生材（r PET）の最大のユーザーの一つであり、米国飲料容器に r PET を 9%使用しており、西ヨーロッパでは 21%使用している。ハ. 2010 年以來リサイクルプログラムで 4.2 億本のボトルと缶がリサイクルされた。

また、プラスチックパッケージを減らすため、容器の繰り返し使用、Hydration System の導入、プラスチックから他の素材に変換することなどが実施されつつある。

リサイクル推進の一つとして、2018 年に PET ケミカルリサイクル企業、ループ・インダストリーズの米国合弁会社よりキャパシティライトを取得し、100%リサイクル PET を 2020 年に導入する。またパッケージ材料の革新として、2018 年にバイオマスベースプラスチック開発の“NaturALL Bottle Alliance”に参画した。アライアンスメンバーのオリジン・マテリアルズ（Origin Materials）は、消費者が使用したダンボールを原料にバイオマスベースプラスチックを製造する技術を開発中である。

b. 2019 年 9 月には具体的製品について、加速したリサイクル計画を発表している⁴²。

5.3 バイオPETの定義とバイオPET100の開発状況

(1) バイオPETの定義と特徴

バイオ PET とは、バイオマス原料からつくられたバイオマスベース PET のことで、バイオマスプラスチックの一種である。原料のバイオマスには、サトウキビ、トウモロコシ、木材（セルロース）などの植物が使われるので飲料メーカーは植物由来 PET と呼んでいる。バイオ PET は、既存の石油化学製品の PET と素原料は異なるが、モノマーの PTA（高純度テレフタル酸）と MEG（モノエチレングリコール）は全く同じもので、これらを重縮合して得られる PET は既存の石油化学製品の PET と物性も当然同じである。そのため、バイオ PET は、既存 PET に対するドロップインプロダクト⁴³と呼ばれる。バイオマス（植物）由来なので再生可能資源であり、枯渇資源の石油を使用せず、またカ

⁴² <https://www.pepsico.com/news/press-release/pepsico-accelerates-plastic-waste-reduction-efforts09132019>

⁴³ <https://www.monash.edu/business/marketing/marketing-dictionary/d/drop-in-product>

ーボンニュートラルで使用後燃焼しても温室効果ガス（CO₂）の増加がないのが特徴である。なお、当然のことだがバイオ PET は既存の PET と特性は変わらないので、海洋プラスチック問題の解決には全く寄与しない。

ドロップインプロダクトとしては、ブラジルのブラスケムが最初に開発したバイオポリエチレン（PE）が有名である。ブラスケムはサトウキビから発酵でつくったバイオエタノールを脱水してバイオエチレンとし、これを重合してバイオPE（商品名：グリーンPE）を製造した（図14）。バイオPEは、PETボトルのキャップなどに使用されている。

バイオPETについては、現在実用化されているものは、バイオPET30と呼ばれるPET中のエチレングリコールユニットだけが植物由来になっているものである。モノマーにバイオエチレンからつくったバイオMEGを使用し、PTAは既存の石油化学製品を使用している（図14）。重量的にバイオMEGが30%、PTAが70%なのでバイオPET30と呼ばれている。

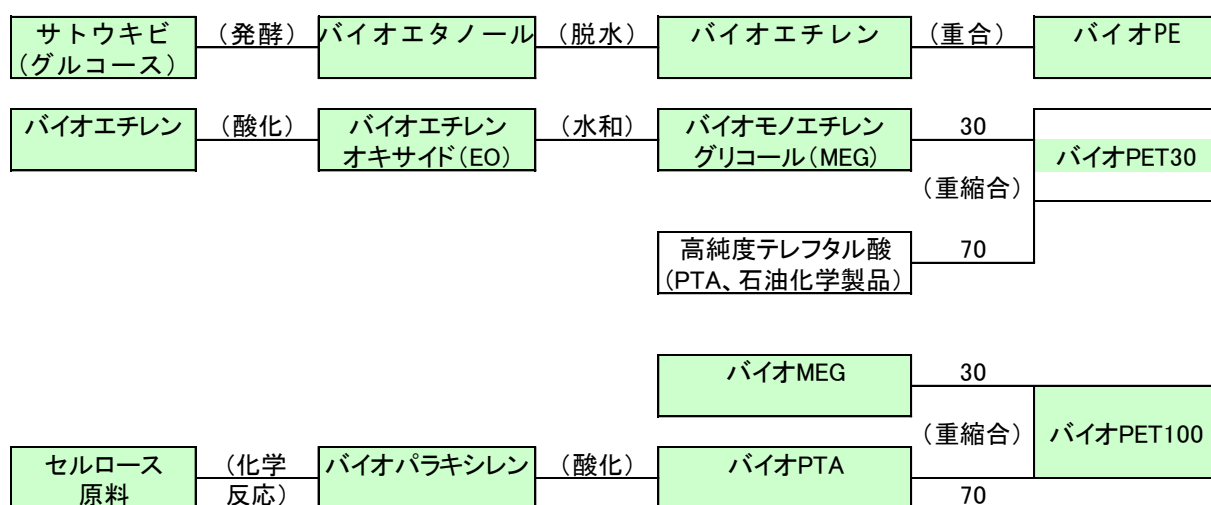


図14 バイオPEとバイオPETの製造ルート

出所：旭リサーチセンターが作成。

なお、インドのインディアン・グリコールが、自社で製造したバイオエタノールを原料にしてバイオMEGを製造している。

(2) バイオPET100の開発

MEG だけでなく PTA もバイオマスベース（植物由来）のものは PET100 と呼ばれる（図 14）。過去、PET100 の開発（バイオ PTA の開発）は多くのベンチャーや企業が取り組んできた。ここでは、サントリーと共同開発中のアネロテック（Anellotech）の技術と、ダノン、ネスレウォーターズ（Nestle Waters）、オリジン・マテリアルズ（Origin Materials：バイオマテリアル技術開発のスタートアップ）が設立した“NaturALL Bottle Alliance”の技術を紹介する。いずれもセルロース原料から、バイオパラキシレンを経てバイオ PTA をつくるルートをとっている。

(3) アネロテック―サントリーの共同開発

サントリーが共同開発中の米国バイオベンチャー、アネロテックのプロセスを図 15 に示す。非食品木質バイオマス原料をクラッキングにより一段で BTX（パラキシレン、ベンゼン、トルエン）に分解し、分離精製によりバイオパラキシレンを得るというものである⁴⁴。触媒にはゼオライトを使用し、反応は流動層反応器を使用している。同社はテキサス州にパイロットプラントをもち、累積 4,000 時間の連続運転の実績がある。アネロテックは、エンジニアリングメーカーの Axens とフランスの研究機関（IFPEN）と技術的に共同開発を行っている。このプロセスでは、バイオパラキシレンだけでなくバイオベンゼンも併産されるので、バイオポリスチレン、バイオ ABS、バイオポリカーボネートの製造に使用できると PR している。



図15 アネロテックのBio-TCat™プロセスによるパラキシレンの合成

出所：アネロテックの資料を基に旭リサーチセンターが作成。

2019年2月にはバイオPET100を試作中と発表した⁴⁵。結果はまだ発表されていない。

⁴⁴ <https://www.anellotech.com/bio-tcat%E2%84%A2-renewable-chemicals-fuels>

⁴⁵ <https://www.anellotech.com/press/100-renewable-plastic-bottle-significantly-closer-reality-after-successful-production-bio>

(4) “NaturALL Bottle Alliance”

2017年にダノン、ネスレウォーターズとオリジン・マテリアルズが100%バイオマスベースのPETボトルを開発するためにつくったアライアンスである“NaturALL Bottle Alliance”を設立した。2018年9月には、このアライアンスにペプシコが参画した⁴⁶。アライアンスのProgress reportによれば、「2017年にパイロット規模で80%バイオマスベースPETを製造した後、商業生産に向けて準備を進めている。商業生産のプラントサイトはカナダのオンタリオ州サーニアで、機器の製作は終了している。プラントのバイオマス処理能力は18,000トンである。2020年フル稼働を目指している。稼働後直ちに95%バイオマスベースPETの生産を始める予定。アライアンスメンバーは、100%バイオマスベースPET実現のためにR&Dの努力を続ける」。

本アライアンスの基本技術をもつオリジン・マテリアルズは本社がカリフォルニアにある。同社のホームページ資料⁴⁷から、開発中の反応ルートを推定したものを図16に示す。また、図17に関係化合物の構造式を示す。

まず、C6セルロース原料を塩酸存在下で分解して、主成分としてクロロメチルフルフラール(CMF)を得る。副生物として、炭素(hydrotthermal carbon: HTC)と有用樹脂が生成する(HTCはタイヤ用のカーボンブラックなどに使用できる。また、CMFからはレブリン酸、フルフラールなどの有用化合物を得ることができる)。次いで、CMFを水素で還元してジメチルフラン(DMF)に変換し、DMFとエチレンをシクロアディクション反応(ディールスアルダー反応)させるとパラキシレンが得られる⁴⁸。なお、100%バイオパラキシレンにするには、水素もエチレンもバイオマスベースのもの(バイオ水素とバイオエチレン)を使用する必要がある。

従来、シュガーやセルロースの分解から得られる有用な中間体である5-ヒドロキシメチルフルフラール(HMF)がよく知られている。HMFを還元して、ジメチルフラン

⁴⁶ https://www.greenerpackage.com/bioplastics/pepsico_joins_naturall_bottle_alliance

⁴⁷ <https://www.originmaterials.com/technology>

⁴⁸ この反応は、USP 8,314,267(出願人:UOP。炭素または活性炭素触媒でシクロアディクション反応させる)などで知られている。

(DMF) にすることは可能だが、HMF は不安定で工業化は難しい。HMF の代わりに、安定な CMF を使うところに本技術の特徴がある。

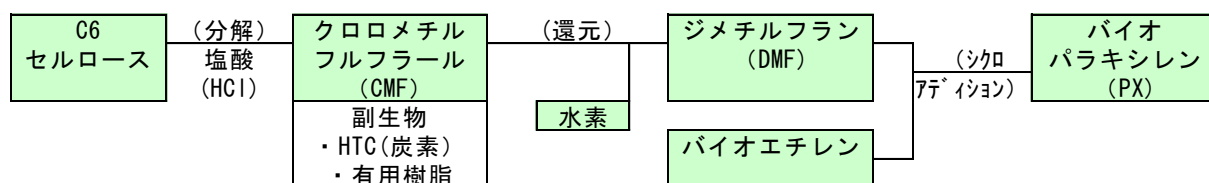


図16 オリジン・マテリアルズのバイオパラキシレンの合成ルート(推定)

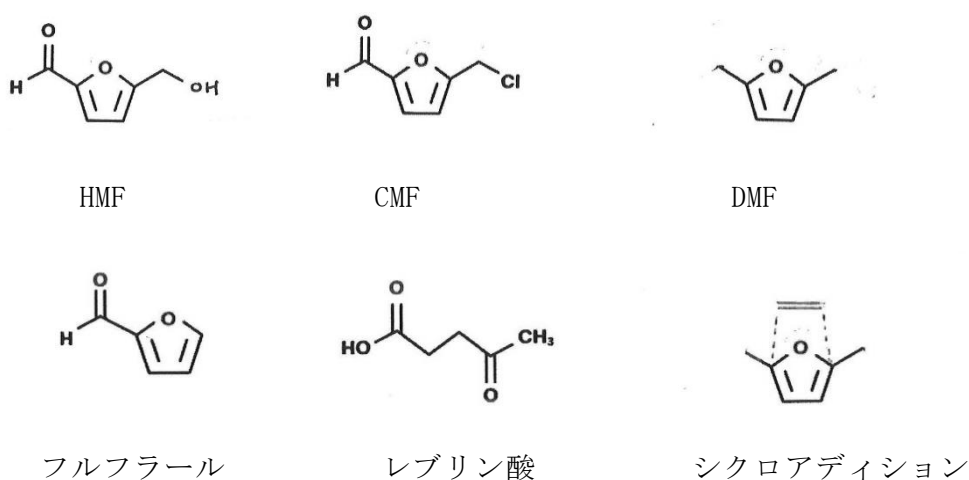


図17:関係化合物の化学構造式

図16と17の出所：オリジン・マテリアルズの公表資料などを基に旭リサーチセンターが作成。

オリジン・マテリアルズの特許・文献を検索したが、見当たらなかった。関連技術として、カリフォルニア大学の Mark Mascall 教授の下記の①の文献と②の特許が見つかった。オリジン・マテリアルズの本拠地がカリフォルニアなのでオリジン・マテリアルズと関係があると推定される。①Mark Mascall Prof.et.al, Chem Suschem/Volume 2, Issue 9：グルコース、セルロース、またはコーンストーバーを塩酸水溶液と 1, 2 ジクロロエタンの 2 層系において、80～100℃で 3 時間反応させると、CMF が 74%の単離収率で得られた⁴⁹。②Mark Mascall ら発明者による CMF を還元して DMF に変換する技術

⁴⁹ <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/cssc.200900136>

に関する USP 9, 556, 137 (アミン触媒を用いて水素還元)、9, 868, 712 (Pd/C 触媒を用いて水素還元)。出願人はカリフォルニア大学。

(5) バイオPETとリサイクル

リサイクルとバイオマスプラスチックの導入は競合するものではなく、シナジー効果がある。そして、リサイクルを徹底的に進めたうえで、不足原料分にバイオマスプラスチックを導入することが理想形である (図 18)。バイオマスプラスチックの使用量を減らすことにより、食糧や環境への影響をミニマム化できる。また、現在はバイオ PET は既存の PET より価格が高いため、少ない量でバイオマス化が可能となることはコストメリットがある。

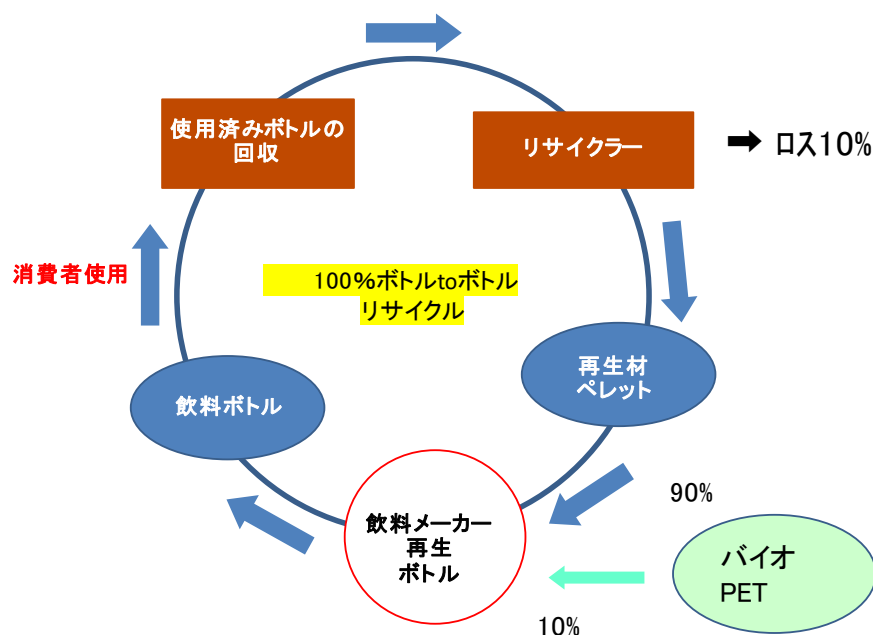


図 18 メカニカルリサイクルと不足分に対するバイオ PET の導入(イメージ)

出所：各種資料より旭リサーチセンターが作成。

5.4 PETボトルリサイクルの日欧米の状況

表 5 に、各国の PET ボトルの回収率とリサイクル率を示す。日本は回収率とリサイクル率の両方に優れ、世界のトップである。

表 5 PET ボトルのリサイクル率

		2012年	2017年
日本	リサイクル率 (%)	85	84.8
	回収率 (%)	90.5	92.2
	販売量(千トン)	583	587
	回収量(千トン)	527	541
	再資源化量(千トン)	495	498
欧州	リサイクル率 (%)	37.5	41.8
	回収率 (%)	52.3	61.5
	販売量(千トン)	3,024	3,207
	回収量(千トン)	1,675	1,972
	再資源化量(千トン)	1,202	1,340
米国	リサイクル率 (%)	21	21
	回収率 (%)	31	29
	販売量(千トン)	2,534	2,682
	回収量(千トン)	779	783
	再資源化量(千トン)	536	561

		2017年
ドイツ	リサイクル率 (%)	54.5
	回収率 (%)	92.7
イギリス	リサイクル率 (%)	18.7
	回収率 (%)	58.3
フランス	リサイクル率 (%)	47
	回収率 (%)	57.4

注 1. リサイクル率の分母を PET ボトル販売量に統一して、推進協議会で計算し直している。

注 2. 元データの出所：米国＝NAPCOR、欧州＝PETCORE、2017 年は、Wood Mackenzie、日本＝PET ボトルリサイクル推進協議会。

出所：PET ボトルリサイクル推進協議会。

表 5 より、PET ボトル販売量は日本 58.7 万トン、欧州 320.7 万トン、米国 268.2 万トンで、合計すると約 650 万トンとなる。また、PET 再資源化量を同様に合計すると、日欧米で約 240 万トンになる。

なお、日欧米はいずれも回収 PET ボトルの中国などへの輸出分を再資源化量に含めているので、リサイクル率が見かけ上高くなっていることに注意が必要である。

5.5 日本におけるPETのマテリアルフローとリサイクル

(1)PET樹脂のマテリアルフロー

PET ボトルリサイクル推進協議会が作成したマテリアルフローを図 19 に示す。

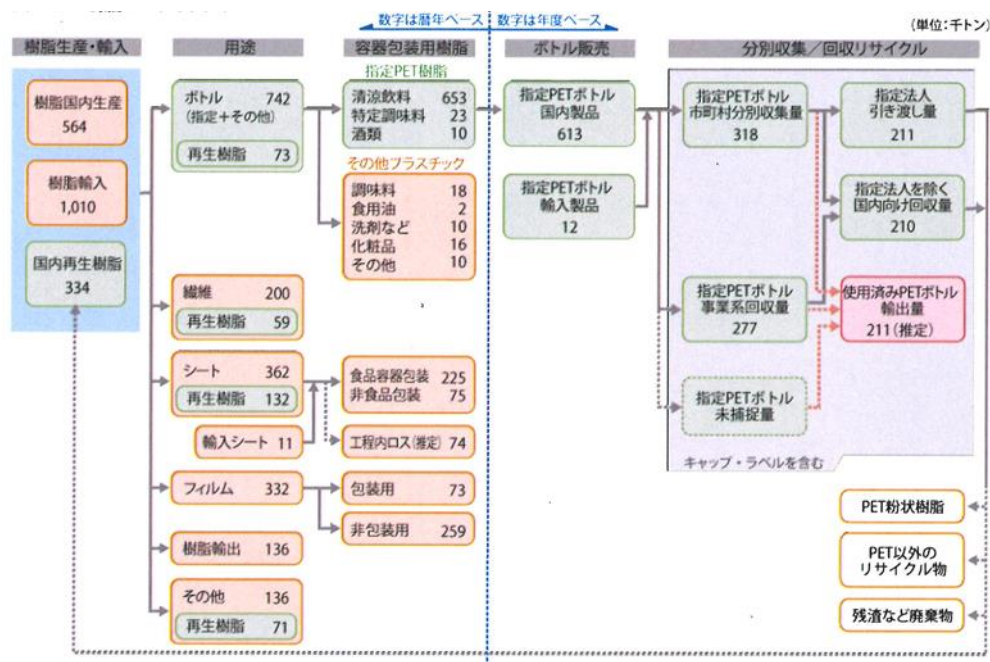


図 19 PET 樹脂のマテリアルフロー(2018 年度)

出所: PET ボトルリサイクル推進協議会。 http://www.petbottle-rec.gr.jp/data/materia_flow.html

図 19 の左から、ポイントになる点を箇条書きにすると、

- ① 日本の PET 樹脂の供給は 191 万トンで、その内訳は国内生産 56 万トン (30%)、輸入 101 万トン (53%)、国内再生樹脂 (再生材) 33 万トン (17%) となっている。PE・PP・PS に比べ、輸入品と国内再生樹脂の比率が高いことが特徴である。輸入品は一時中国品が多かったが、ダンピング問題があり、現在はインドラマ・ベンチャーズの製品が多いといわれる。

用途は、ボトル 74 万トン (39%)、繊維 20 万トン (10%)、食品包装を中心とするシート 36 万トン (19%)、包装・非包装用フィルム 33 万トン (17%)、樹脂輸出 14 万トン (7%)、その他 14 万トン (7%) となっている。

ボトル用途における再生材の占める割合は、 $73/742 \times 100 = 9.8\%$ とまだ低い値である。それ以外の再生材の割合は、繊維用途で 30% (59/200)、シート用途で 36% (132/362)、その他用途で 52% (71/136) である。いずれも再生材比率が高いことが注目される。回収ボトルからカスケードリサイクルで繊維、シート、その他用途に使用されていることになる。

仮に、これまで輸出されている回収 PET ボトルを全量日本でリサイクルすると、当面はリサイクルしやすいシートやボトル用途に出口を求めることになり、PE・PP・PS のシートやボトルとの競合が激しくなる可能性がある。

- ② 容器包装リサイクル法（以下容リ法）で規定される PET ボトルは指定 PET ボトルと呼ばれる。
- ③ 指定 PET ボトル全販売量 62.5 万トン（61.3 万+1.2 万トン）のうち、全部の回収量は 59.5 万トン（31.8 万+27.7 万トン）なので、回収率は 95%となる。高い回収率である。このうちの 31.8 万トンは市町村（自治体）が家庭などから収集するボトルであり、容リ法の適用を受けるものである。残りの 27.7 万トンは事業系回収（産業廃棄物系）であり、容リ法に直接規制されるものではない。
- ④ 回収 PET ボトルのうち、国内でリサイクル処理されるものは 21.1 万+21.0 万=42.1 万トン（67%）である。一方、韓国などに輸出されリサイクル処理されるものが 21.1 万トン（33%）ある。

（2）容器包装リサイクル法による使用済みPETの入札価格

自治体系回収 PET ボトルは、主として容リ法に基づき指定業者が入札して購入する（事業系回収 PET ボトルは指定業者以外でも購入できる）。2018 年の自治体系回収 PET ボトルの入札価格は有償の 33 円/kg である（表 6）。指定法人引き渡し量は 21.1 万トン（図 19）なので、入札総金額は 70 億円になる。この 70 億円はボトル収集を行っている自治体に還元される。

半面、回収 PET ボトル以外の容器包装廃棄物は、表 6 にあるように 50 円/kg 支払って指定業者に引き取ってもらう。引き取り量は 65 万トンで、総額は 325 億円になる。

表 6 容リ法に基づいて回収された廃プラの入札単価と総額

	入札単価 (円/kg)				引き取り量 (万トン)	入札総額 (億円)
年度	2015	2016	2017	2018	2018	2018
プラスチック	39	43	48	50	65	325
PETボトル	-29	-26	-40	-33	21.1	-70

出所：日本容器包装リサイクル協会。

https://www.jcpra.or.jp/recycle/related_data/tabid/483/index.php

6 インドラマ・ベンチャーズの急拡大するPETサプライチェーン

6.1 インドラマ・ベンチャーズとは

インドラマ・ベンチャーズ（Indorama Ventures（略号：IVL）、以下インドラマと略す）は2018年の売上高が約107億ドルのタイの大手石油化学メーカーである。1995年にPET樹脂企業を最初を買収し、その後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、樹脂メーカーとしては早い時期（2011年）に循環経済に寄与するリサイクル事業に参入している。インドラマは世界および日本のPET事業に大きなインパクトを与えることからその動向が注目される。

「連載企画 タイ企業動向（2018年末）」の中で、在バンコク・ジャーナリストの小堀晋一氏はインドラマのねらいを次のように述べている⁵⁰。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。（中略）インドラマ・ベンチャーズはこの PET 樹脂生産で世界トップクラスの企業。世界的なプラスチックごみ削減の動きが広がる中、産業や人々の暮らしにも欠かすことのできないプラスチック業界の軸足は、今後 PET に移ってくると読む。このため、川上から川下まで関連石油化学企業への投資や買収を積極的に進めていく方針だ。」

6.2 川上・川下とグローバルなサプライチェーンの確立

(1) 川上・川下のサプライチェーンの確立

図20に示すように、PET樹脂を中心にPET繊維や、川上の高純度テレフタル酸（PTA）、EO・EGに遡及し、また川下のPETボトルやタイヤコード用・エアバッグ用PET繊維まで展開し、強力なサプライチェーンを構築した。

⁵⁰ <http://www.u-machine.net/sp/column/company/article/1076>

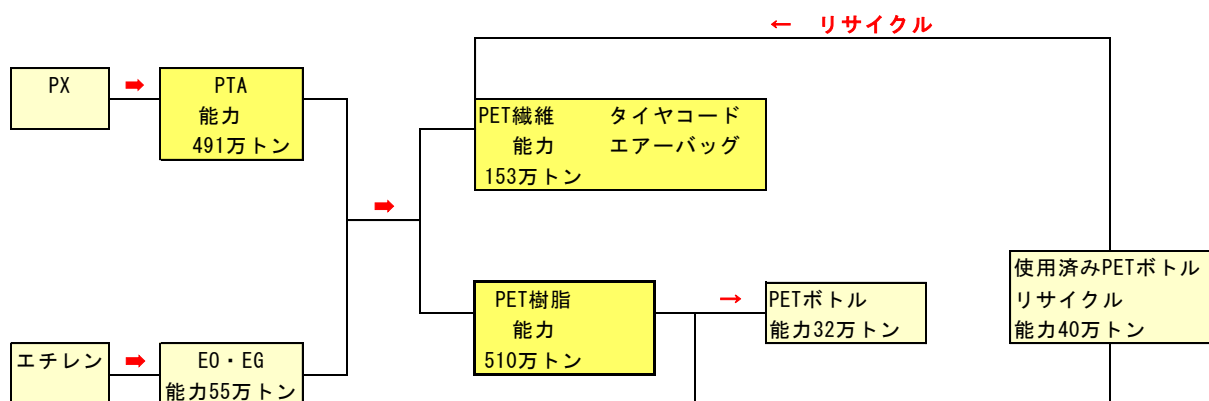


図 20 インドラマ・ベンチャーズの製品群とサプライチェーン

注 1：黄色地は最重要製品、肌色地はその他主要製品。

注 2：生産能力は、表 7 の世界各国の生産設備能力の合計（総生産能力）である。

注 3：リサイクル用原料（使用済み PET ボトル）は、自社製の PET ボトルだけでなく、市場にある使用済み PET ボトルを使用している。

出所：インドラマ・ベンチャーズのアニュアルレポート（2018）などを基に、旭リサーチセンターが作成。

PX（パラキシレン）を原料にして PTA を製造しており、世界最大の PX 購入者である。2016 年には小規模ながら PX の内製を始めた。PTA とともに PET のもう一つの原料である MEG についても内製を拡大している。MEG を含む EO・EG 事業を 2012 年から始めた。さらに、2019 年には EO・EG の原料であるエチレンにまで遡及した。

図 20 によれば、世界の総生産能力は原料の PTA が 491 万トン、EO・EG 事業が 55 万トン、PET 樹脂が 510 万トン、PET 繊維が 153 万トン、PET リサイクル設備が 40 万トンである。EO・EG 事業には、EO（エチレンオキシド）、MEG（モノエチレングリコール）、DEG（ジエチレングリコール）、TEG（トリエチレングリコール）が含まれる。EO は EG の原料である。

インドラマは世界トップの PET 樹脂メーカーで、また世界トップの PET ボトル用樹脂メーカーである。PET ボトル自体の生産も行っているが、その規模は総生産能力 32 万トンと樹脂に比べると小さい。

PET 繊維では高付加価値製品にシフトしており、タイヤコードやエアバッグ用繊維の生産を強化しており、その分野に強いメーカーの買収を進めている。

また、PET ボトルのリサイクル事業を積極的に進めており、総能力は 40 万トンである。PET リサイクル事業は欧州でトップである。PET 再生材の用途の主なものは繊維である。

図 20 には記載しなかったが、高付加価値のフィルム・シート事業もある。2017 年 11 月に DuPont と帝人が設立したポリエステルフィルム合弁企業を買収して、取得した事業である。買収時の合弁企業のもつ PET と PEN（ポリエチレンナフタレート）のフィルム・シートの生産能力は、27 万 7,000 トンである。太陽電池用フィルムと医療用フィルムで世界最大のシェアを有している。PEN は PET よりも耐熱性に優れる特殊ポリエステルである。

(2) グローバルなサプライチェーンの確立

表 7 に主要製品に関する国別・地域別の生産能力と売上高を示す。PTA、PET 樹脂、PET 繊維の生産能力は、いずれもタイを含むアジア地域が一番大きい。PET リサイクル設備の能力は欧州が圧倒的に多い。

表 7 インドラマ・ベンチャーズの PTA、PET 樹脂、PET 繊維、PET リサイクル設備に関する

国別・地域別の生産能力と売上高

国および地域	生産能力 (万トン/年)			PETリサイクル 設備能力 (万トン/年)	地域別 売上高 (億バーツ) (%)
	PTA	PET樹脂	PET繊維		
タイ	137	41	27	2.9	210 (6%)
インドネシア	50	20	40		その他 1,010 (29%)
インド		70	1		
MENA		37	4		
中国		49	14		
欧州	174	136	41	32.3	1,010 (29%)
北米	130	157	26	4.3	1,250 (36%)
合計	491	510	153	40	3,472 (100%)

注：MENA：中東・北アフリカ地域を意味する言葉。表の MENA は主にトルコである。

PTA：高純度テレフタル酸

出所：<http://ivl.listedcompany.com/misc/ar/ivl-ar2018-en.pdf> を基に、旭リサーチセンターが作成。

売上高についてはタイを含むアジア（35%）、欧州（29%）、米国（36%）となっている。米国は生産能力の割に売上高が大きい、これは生産能力に入っていない項目の寄与があるためと思われる。その項目としては、上記の旧 DuPont-帝人のポリエステルフィルム合併事業、エチレン事業、EO・EG 事業が考えられる。

6.3 連結売上高とセグメント別売上高

インドラマの 2016～2018 年の 3 年間の連結売上高と各種利益などの業績を表 8 に示す。

この 3 年間は、目覚ましい成長を遂げていることがわかる。この 3 年間で、連結売上高は 1.5 倍、core EBITDA は 1.9 倍、core EBIT は 2.2 倍、core Net Profit は 2.9 倍になっている。

表 8 最近 3 年間のインドラマ・ベンチャーズの財務状況(単位:百万ドル)

項目/暦年	2016	2017	2018	注
Production Volume (kt)	8,729	9,103	10,419	生産量(千トン)
Consolidated Revenue	7,215	8,438	10,741	連結売上高
Core EBITDA	775	1,004	1,441	コア EBITDA
Segment				そのセグメント内訳
PET	286	296	588	PET樹脂
Fibers	205	208	240	繊維
Feedstock	271	501	613	原料
New Segments				その新セグメント内訳
Integrated PET	388	414	791	PET統合
Olefins	65	145	232	オレフィン
Fibers	176	181	211	繊維
Packaging	29	37	48	容器包装
Specialty Chemicals	108	229	158	特殊化学品
Core EBIT	462	647	1,000	コア EBIT
Core Net Profit	274	459	789	税後NCI後コア純利益(百万ドル)
after Tax and NCI	9,653	15,576	25,488	同上(10億タイバーツ)
Core EBITDA/ton (\$)	89	110	138	トン当たりのコア EBITDA
Operating Cash Flow	707	852	989	運転キャッシュフロー
Net Debt to Equity (times)	[1.06]	[0.75]	[0.87]	資産当たりの純負債(倍)

注 1: 1 バーツは 3.6 円 (2019 年 12 月 18 日現在)。

注 2: 本資料はインドラマ・ベンチャーズのアンニュアルレポート資料の抜粋である。備考に、項目の日本語訳を追記した。コア純利益については米国ドルベースとタイバーツベースの金額が記されている。

注 3: EBITDA は、利子、税金、償却を差し引く前の利益のこと。Core EBITDA は EBITDA から在庫損益を差し引いたもの。EBIT は、利子、税金を差し引く前の利益のこと。

出所: インドラマ・ベンチャーズのアンニュアルレポート (2017、2018)。

<https://www.indoramaventures.com/en/investor-relations/downloads/annual-report>

また、表 9 に最近 3 年間の PET 樹脂、繊維、原料ごとのセグメント別連結売上高を示す。PET 樹脂セグメントが最大で、2018 年の売上高は 1,830 億パーツ、原料セグメント売上高 1,470 億パーツ、繊維セグメント売上高 990 億パーツとなっている。PTA や EO・EG の原料部門は社内売りが多いと予想され、これを差し引くと純売上高は 1,470 億－810 億=660 億パーツになる。

インドラマは、セグメントの内容を変えた新セグメントの情報も公表している。そのデータを表 10 に示す。

表 9 セグメント別売上高(単位:10 億パーツ)

(暦年)	2016	2017	2018	(%)
PET樹脂	135	146	183	53%
繊維	73	81	99	29%
原料	93	115	147	42%
重複削除	▲47	▲56	▲81	▲24
連結売上高	254	286	347	100%

注：1 パーツは 3.6 円（2019 年 12 月 18 日現在）

表 10 新セグメント別売上高(単位:10 億パーツ)

(暦年)	2016	2017	2018	(%)
PET統合	153	170	209	60
オレフィン	11	14	15	4
繊維	64	72	89	26
容器包装	5	6	8	2
特殊化学品	24	29	32	9
重複削除	▲3	▲5	▲5	-2
連結売上高	254	286	347	100

注：1 パーツは 3.6 円（2019 年 12 月 18 日現在）。

表 9、10 の出所：インドラマ・ベンチャーズのアニユアルレポート（2018）より、旭リサーチセンターが作成。

それによれば、PET 統合（Integrated PET）セグメントが最大で、60%を占める。このセグメントには原料の PTA・EO・MEG と PET 樹脂が含まれる。PTA・EO・MEG の社内売りは、セグメント内で重複削除されていると推定される。

オレフィンセグメントは 4%で、これにはエチレンが含まれる。繊維セグメントは 26%を占め、PET 統合セグメントに次ぐ規模になっている。PET ボトルなどの容器包装 (Packaging) セグメントの比率は 2%と低い。特殊化学品の比率は 9%と予想外に高い。特殊化学品には特殊 PET (DuPont－帝人の合弁企業買収による高付加価値フィルム (PET&PEN) や OXYCLEAR、HIGH SHIELD など特殊グレード) や特殊化学品のイソフタル酸、ナフタレンジカルボン酸などが含まれているものと推定される。

新セグメント分類におけるセグメント別の売上高比率と core EBITDA 利益比率をそれぞれ、図 21 と図 22 に示す。PET 統合が売上高比率と core EBITDA 利益比率ともに全体の約 60%を占め、基幹事業であることがわかる。また、特殊化学品が売上高と core EBITDA 利益について一定の比率を確保していることがわかる。半面、繊維は売り上げの割りに core EBITDA 利益比率が小さい。

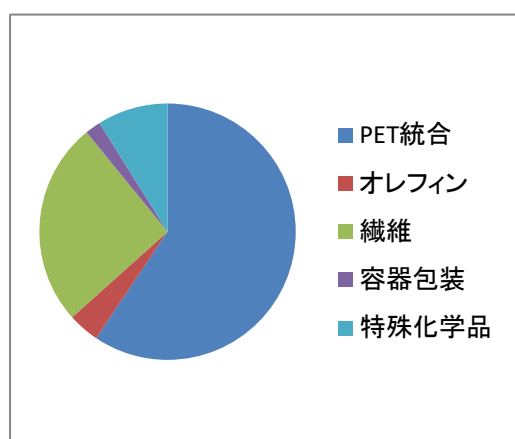


図 21 新セグメントの売上高比率

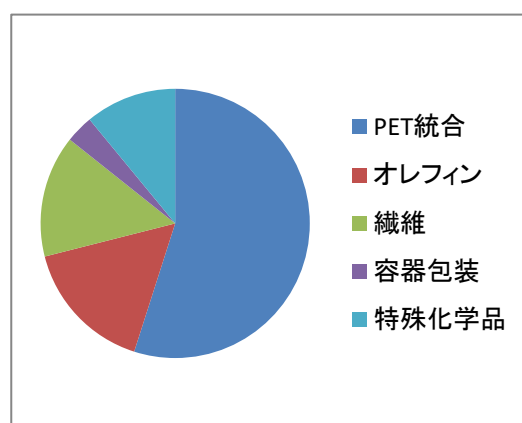


図 22 新セグメントの core EBITDA 利益比率

図 21、22 の出所：インドラマ・ベンチャーズのアンニュアルレポート（2018）より、旭リサーチセンターが作成。

6.4 買収によるPET樹脂、PET繊維、モノマー原料事業の発展の歴史

(1)概況

図 23 に、インドラマの PET 樹脂・PET 繊維・PTA の生産能力の年次推移を示す。2003 年に PET 樹脂の生産を始め、2008 年に PET 繊維と PTA の生産を始めている。2011 年に企業買収により PET 樹脂と繊維の生産能力の大幅拡大を行っている。さらに、2015 年

から 2018 年にかけて PET 樹脂と PTA の生産能力を毎年拡大してきている。半面、PET 繊維の生産能力は 2011 年以降あまり増加していない。

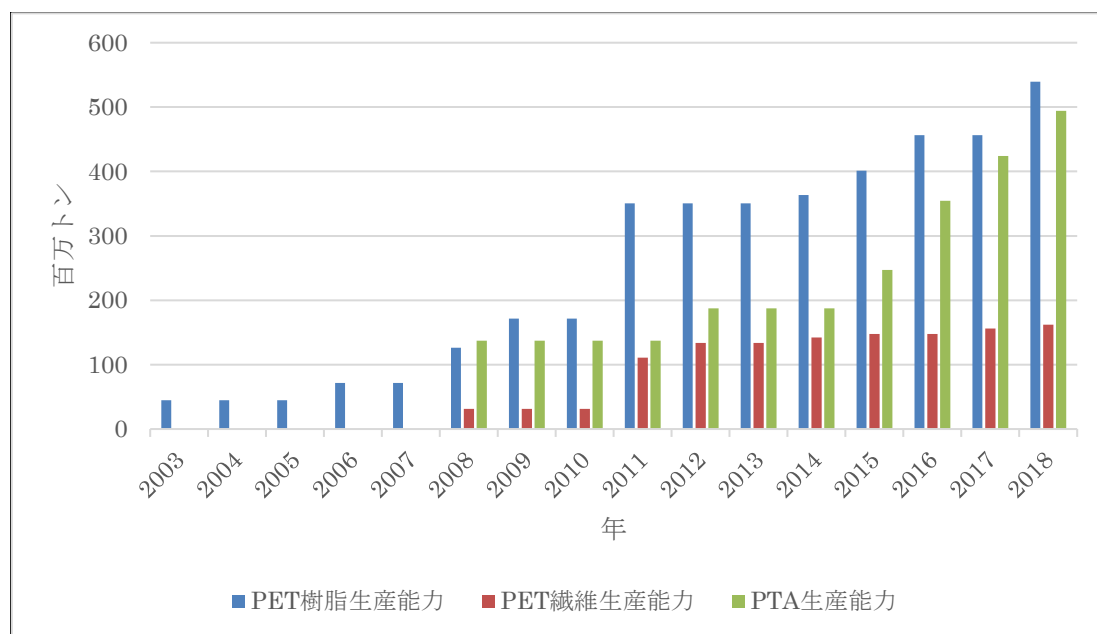


図 23 インドラマ・ベンチャーズの PET 樹脂・繊維、PTA の生産能力の年次推移

出所：インドラマ・ベンチャーズのアンニュアルレポート（2018）などより、旭リサーチセンターが作成。

表 11～14（表 11～13：48～50 頁、表 14：53 頁）にインドラマの PET 樹脂・繊維・原料（PTA など）・リサイクル事業に関する生産能力⁵¹拡大の歴史をまとめた。これらの表からわかるように 2、3 の例外を除いて、ほとんどが企業買収による製造設備の取得であることは注目される。

どちらかといえば経営が芳しくない企業を買収し、これを改善し収益の高い工場・企業に再生させることに成功している。これは企業経営上、大変注目される点である。工場・企業のある地元と徹底した融合を図り、権限を地元人材にゆだねる一貫した経営方針が功を奏しているといわれる。

⁵¹ 2017 年以前に買収した子会社の生産能力は、2017 年 12 月現在の生産能力を示す（買収後に増設があれば、買収時生産能力にそれを加えた数字である）。2018 年以降買収の子会社の生産能力は、買収時の発表データである。

(2)PET樹脂事業の企業買収による生産能力拡大の歴史

表 11 に PET 樹脂事業の企業買収による生産能力拡大の歴史を示す。

1995 年に事業を開始し、2011 年に一挙に 6 社の買収により 172 万トンの設備を取得し、また 2018 年に 3 社の買収により 120 万トンの設備を取得している。直近の総生産能力は 540 万トンで、世界 14 カ国に 22 の子会社の工場がある。

また、買収した企業の使用している技術（メーカー名）についても公表されている。溶融重合技術については、Zimmer、Invista、Inventa-Fisher のものが多い。一方、固相重合技術については、Buhler（スイス）が多く、Sinco もある。また、固相重合を使用せず、溶融重合で固相重合並みの高分子量体をつくる Uhde-Inventa-Fisher の MTR 技術（Melt To Resin）を、AlphaPet Inc.（アラバマ、US）が採用していることが注目される。

表 11 インドラマの PET 樹脂事業—企業買収による生産能力拡大の歴史

子会社名 (所在地)	買収、 合併	年	生産能力 (万トン/年)	製品	溶融重合技術
					固相重合技術
IRP and AsiaPET(Thailand) (タイ)	買収	1995	18.4	ボトル、シート・ フィルム用PET	Zimmer & Aquafil
StarPet Inc. (ノースカロライナ、US)	買収	2003	26.6	ボトル、シート・ 他用PET	Sinco
UAB Orion Global (リトアニア)	買収	2006	26.3	PET resin	Zimmer
Indorama Polyester Industry Rayong(タイ)	買収	2008	12.1	ボトル用PET	Buhler(スイス)
IV Europe B.V. (PET) (オランダ)	買収 (Eastman)	2008	42.6	PET	Invista
AlphaPet Inc. (アラバマ、US)	Green field (IV xylene&PTA に隣接)	2009	45	ボトル、シート・ 他用PET	Buhler
PT Indorama Polypet Indonesia (インドネシア)		2011	10.2	PET	Inventa-Fisher
IV PET (Nigeria) (ナイジェリア)	Green field	—	7.3	ボトル用PET	Buher
PT IV Indonesia (インドネシア)	買収	2011	9.5	ボトル用PET フィラメント用PET	Inventa-Fisher&Invista
IV Poland (ポーランド)	買収	2011	23	PET resin	Eastman/ Buhler
Aurigo Polymers Inc. (サウスカロライナ、US)	買収 (Invista)	2011	28.6	ボトル用PET フィラメント用PET Oxyclear (O2barrier)	MTR(Melt To Resin) (Uhde-Inventa-Fisher)
IV Polymers Mexico (メキシコ)	買収	2011	48.4	ボトル用PET(特徴) ファイバー用PET	
Guangdong IVL PET (中国)	買収	2011	52.3	PET Polymers PET chips for film	Hitachi
IV Adana PET (トルコ)	買収	2014	13	PET resin (ボトル用・他)	Buhler
Miao PolyPET (インド)	買収	2014	21.9		Uhde Inventa Fisher
Indorama Petchem (タイ)	買収	2015	12.1	PETチップ (食品グレード)	Buhler
Indorama Ventures Corlu PET (トルコ)	買収	2015	25.6	ボトル用PET	Invista
Dhunseri (インド)	買収 JV (50/50)	2016	34.8	PET resin (ボトル・シート・他)	Bepex
Indorama Ventures Quimica (スペイン)	買収	2016	20.3 (PTA 32.5)		Invista
Polimeros (ブラジル)	買収 (M&G)	2018	55 (PTAプラント隣 接)	PET	Buhler
Indorama Ventures Polymers Germany GmbH (ドイツ)	買収完了 (Invista)	2018 3月	28.2 (再生材 3.1)	フレークとペレット (包装と工業用繊維)	Invista
Corpus Christi Polymer (テキサス、US)	買収 (M&G) 3社JV	2018 3月18日 発表	Capacity right PET 110/3=37 PTA 130/3=43	(注) 3社JV IVL、Alpek (USA)、 Far East(台湾)	HIRRC
生産能力合計		2019	539.6		(注) 特徴ある製品 (POLYSHIELD、POLYCLEAR OXYCLEAR、Xpure)
					(注) プラント建設中

注：黄色地 アジア、青色地 欧州、緑地 北米・南米。

出所：インドラマ・ベンチャーズのアンニュアルレポート（2018）などより、旭リサーチセンターが作成。

(3)PET繊維事業の企業買収による生産能力拡大の歴史

表 12 に PET 繊維事業の企業買収による生産能力拡大の歴史を示す。現在、世界 13 カ国に 14 の子会社の工場を有し、総生産能力は 162 万トンである。

2008 年に地元タイで計 31.2 万トンで繊維事業を立ち上げた後、2011 年に企業 6 社を買収し（総生産能力 79.8 万トン）、欧米への展開も果たした。また 2012～2015 年にかけて、中国企業 4 社の買収を行い繊維製品大国の中国にも進出した。近年はタイヤコード用繊維、エアーバッグ用繊維に重点を置いている。高付加価値製品のためと考えられる。

表 12 インドラマの PET 繊維事業—企業買収による生産能力拡大の歴史

子会社名 (所在地)	買収年	生産能力 (万トン/ 年)	製品	備考
Indorama Polyester(タイ)	2008	12	fibers yaran and chips	重合から紡糸
Indorama Polyester Rayong (タイ)	2008	19.2	アパレル、home textile、 家庭用品、自動車用、不織 布、衛生用品	重合から紡糸、PET chipsやresinも製造
PT Indorama Ventures (IVI) (インドネシア)	2011	7.5	P0 (ポリオレフィン)・PET filament yarn	技術：日立・帝人精機
PT Indorama Ventures (IPI) (インドネシア)	2011	3.8	PET Fiber Chips and Filament	
PT Indorama Polychem Indonesia (インドネシア)	2011	32.3	PET Fiber Chips and Filament	用途：不織布
IV Polymers Mexico (メキシコ)	2011	6.4		
Trevia GmbH (ドイツ)	2011	12.3	PET filament, staple	技術：ヘキストなど
Wellman International (アイルランド)	2011	17.5	rPET fiber(100%リサイク ル) 使用済みボトル22億 個分	Wellman (オランダと フランス)からの7万 トンのPET再生材使用
FiberVision Product (ジョージア、US)	2012	21.2	monocomponent staple fiber and bicomponent fibers	技術：Fiber Vision
FiberVisions Manfact. (ジョージア、US)				
FiberVision a/s (デンマーク)				
FiberVision (中国)	2012	1.4	bicomponent fiber(PP/PE、 PE/PET)、hygiene用途	2.8万トンに増設
ES Fiber Vision (中国)				
PHP(ドイツ)				
PHP(US)	2014	8.5	N66/N6/N46 airbag yarn, tire cord、 MRG	
PHP (Suzhou、中国)				
Performance Fibers (Kaiping、中国)	2015	5.5	PET fiber、Canvas、tire cord fabric*	*dipped single end cord
Granzstoff Group (中国、チェコ、イタリア、LYX)	2017	3	レーヨン 1.3万トン、 Tire cord fabric single end 0.73万トン	素材 レーヨン、PET ナイロン
Granzstoff Longlaville (フランス)	2017	3.5	tire cord fabrics	旧DFT
Performance Fibers (メキシコ)	2017	2	PET HMLS、PET HDI、 Nylon6、tire cord fabrics、industrial textiles	旧DFT
IV Fibras Brazil (ブラジル)	2019	6	staple fiber、polymer for textile&film	重合技術：R.P・ICI Staple：東洋紡他
UTT de Mexico T.T (メキシコ)	2019	—	Air bag fabrics*	* technical textiles
UTT Technisch Textilien GmbH (ドイツ)				
生産能力合計	2019	162.1		

注：黄色地 アジア、青色地 欧州、緑地 北米・南米。

出所：インドラマ・ベンチャーズのアニュアルレポート（2018）などより、旭リサーチセンターが作成。

(4) 高純度テレフタル酸(PTA)など原料事業の企業買収による生産能力拡大の歴史

表 13 に、高純度テレフタル酸 (PTA) など原料事業の企業買収による生産能力拡大の歴史を示す。

2008 年に PTA 製造企業 2 社を買収して計 137 万トンの生産能力を取得した。それ以降も米国および欧州の 50 万～70 万トンクラスの PTA 製造企業を買収した。

表 13 インドラマの原料(PTA、MEG など)事業—企業買収による生産能力拡大の歴史

子会社名 (所在地)	買収・合併 (買収した会社)	年	製品	生産能力 (万トン/年)	備考
TPT Petrochemicals PCL (Rayong、タイ)	買収	2008	PTA (高純度テレフタル酸)	60.2	技術： 日立/Techmont
Indorama Petrochem Ltd (タイ)	買収	2008	PTA	77.1	
PTIndorama Petrochemicals (インドネシア)	買収 合併 (42%シェア)	2012	PTA	50	
Indorama Venture (Oxide&Glycols) (テキサス、US)	買収 (Old world industry)	2012	EOとグリコール類(MEG、 DEG、TEG)	55	会社略号：IVEOEG
Indorama Venture Olefins LLC (ルイジアナ、US)	買収 (Oxy)	2015	エチレン (プロピレン、C4、C5)	43	2019年Q1スタート IVEOEGに供給
Enterprise Indorama PTA material (カナダ)	買収	2015	PTA	60	
Indorama Venture Quimica S.L.U. (スペイン)	買収 (Capsa Quimica)	2016	PTA PIA (高純度イソフタル酸)	32.5 22	PET 20.3
Indorama Venture Xylene&PTA (アラバマ、US)	買収 (BP・Amoco)	2016	PTA PX (パラキシレン) ナフタレンジカルボン酸 PIA (高純度イソフタル酸)	74.5 72 na 22	
Indorama Venture Portugal (ポルトガル)	買収	2017	PTA	70	
Indorama Venture Europe B.V. (オランダ)	買収 (Eastman)	2018	PTA	70	
Corpus Christi Polymer (テキサス、US)	買収 (M&G) 3社JV	2018 3月18日 発表	Capacity right PET 110/3=37 PTA 130/3=43	(注) 3社JV:IVL、 Alpek (USA)、 Far East(台湾)	(注) プラント建設中 (注) IVL：インドラマ・ ベンチャーズ
ハンツマンの米国テキサス工場	買収(米国・ハンツマンの エチレン・EO・PO事業)	2019 8月発表	エチレン*、EO、PO MTBE、界面活性剤	21億ドルで買収	* シェールガス原料の エタンクラッカー
			PTA 合計	494.3	

注 1：PTA (高純度テレフタル酸)、EO (エチレングリコール類)、MEG (モノエチレングリコール)。

注 2：黄色地 アジア、青色地 欧州、緑地 北米・南米。

出所：インドラマ・ベンチャーズのアンニュアルレポート (2018) などより、旭リサーチセンターが作成。

現在、世界各国に 8 カ所の PTA 製造設備を有し、直近の総生産能力は約 500 万トンである。これは、自社の PET 樹脂・繊維用の原料 PTA を賄うことができる生産能力である。

地域別生産能力はタイが 137 万トン、インドネシア 50 万トン、欧州 174 万トン、北米 130 万トンとなっている。

また、もう一つの原料である EO-MEG についても 2012 年に原料遡及を果たしており、さらに 2019 年に強化している。MEG についても 100% 自社生産体制を構築するものと考えられる。さらに川上のエチレンについても 2015 年の米国企業買収により Indorama Venture Olefins を設立し、2019 年にプラント運転がスタートする。

また、直近のニュースとして 2019 年 8 月にハンツマンよりシェールガス原料のエタンクラッカー（エチレン製造）と、誘導品の EO や PO（プロピレンオキサイド）、MTBE、界面活性剤をつくる設備を 21 億ドルで買収した。これにより、インドラマは世界的な大手石油化学メーカーに仲間入りした。

特殊化学品としては、2016 年に高純度イソフタル酸の製造企業を 2 社買収し、世界トップクラスのメーカーとなった。また、同年、BP・Amoco のナフタレンジカルボン酸の製造設備も買収し、世界唯一のメーカーとなった。ナフタレンジカルボン酸は PEN（ポリエチレンナフタレート）の原料モノマーである。

6.5 リサイクル事業

表 14 に、インドラマが買収したリサイクル企業の概要を示す。直近のリサイクル設備の総能力⁵²は 44 万トンである。そのうち欧州の能力は 32.3 万トンであり、欧州で圧倒的な地位を占めている。

2011 年に欧州の Wellman International を買収して、PET のリサイクル事業に進出し、欧州最大の PET リサイクルメーカーになった。Wellman International はオランダとフランスに使用済み PET ボトルをリサイクルして PET 再生材のチップやフレークにする工場をもち、その合計能力は 7 万トンに上る。これらの再生材は Wellman International のアイルランド工場に送られ、それを原料に再生 PET 繊維がつくられる。アイルランド工

⁵² インドラマのリサイクル能力は、廃プラ処理能力が再生材生産能力か不明なので、単に能力とした。

場の能力は 14 万トンで、オランダとフランスの工場の PET 再生材だけでなく、その他の PET 再生材も使用して再生 PET 繊維がつくられている。

その後、2014 年にメキシコとタイでリサイクル工場を買収している。前者は、能力 1.2 万トン、後者は 2.9 万トンである。

EU の循環経済移行の加速方針に対応して、2018 年以降に企業買収・提携を積極的に展開している。2018 年 7 月に欧州の大手リサイクラーのソレプラ・インダストリーズ（フランス、能力 5.2 万トン）を買収した⁵³。また 2018 年 12 月には米国アラバマ州にある Custom Polymers PET（能力 3.1 万トン）を買収し、米国での拠点を確立した。2019 年 1 月にはドイツの Invista Resins&Fibers を買収した。同社は PET 樹脂 28.2 万トンの大きな能力を有し、PET 再生材についても 3.1 万トンの能力を有している。2019 年 12 月には、米国の Green Fiber International を買収した。食品包装用に使用できる PET 再生材をもっていることが特徴で、能力は 4 万トンである。今後、飲料ボトルなどの食品包装に使用できる PET 再生材がますます重要になる。

また、PET をモノマーに分解するケミカルリサイクル事業にも進出する計画で、2018 年 9 月にケミカルリサイクル技術をもつループ・インダストリーズと合弁企業を設立した⁵⁴。2020 年の実用化を目指している。モノマーに分解するケミカルリサイクル技術は、日本では日本環境設計が川崎工場と北九州市で実施しているが、ループ・インダストリーズの技術は常温で PET を分解できるのが特徴である。

また、2018 年 4 月にユニリーバ、インドラマ、Ioniqa の 3 社は、Ioniqa が開発した使用済み PET から食品包装用途に使用できるバージングレードをつくる新技術について提携したことを発表した⁵⁵。インドラマは世界最大の PET 樹脂メーカーであり、ユニリーバは大手食品メーカーである。Ioniqa がもつ固有技術は、着色した容器包装材料からも透明なバージングレードのモノマーが得られることである。

⁵³ <http://www.indoramaventures.com/en/updates/other-release/1150/indorama-ventures-expands-pet-recycling-capabilities-with-acquisition-of-sorepla>

⁵⁴ <http://www.indoramaventures.com/en/updates/other-release/1162/indorama-ventures-and-loop-industries-jv-to-introduce-new-era-in-pet-and-polyester-recycling>

⁵⁵ <https://ioniqa.com/unilever-ioniqa-and-indorama-launching-breakthrough-food-packaging-technology/04/04/2018>

表 14 インドラマのリサイクル事業—企業買収による設備能力拡大の歴史

子会社名 (所在地)	買収、 合併 買収	年 月	技術	PET再生材 (rPET) 製品	能力 (万トン/年)
Wellman (オランダ)	買収	2011	Wellman	rPET chips and flakes (アイルランドの繊維工場で使用)	4.3
Wellman (フランス)	買収	2011	Wellman	rPET chips and flakes (アイルランドの繊維工場で使用)	2.7
Wellman (アイルランド)	買収	2011	Wellman	rPET fiber (100%リサイクル) 使用済みボトル22億個分 同社 オランダとフランスの会社 から7万トンの rPET	17.5
Ecomex (メキシコ)	買収	2014	設備・技術は ドイツ・米国・ 中国から輸入	rPET washed flakes	1.2
Indorama Polyester CELL (タイ)	リサイクル 工場新設	2014	Wellman	Bottle flakes、rPET resins and recycled fiber (繊維用途)	2.9
ソレプラ・ インダストリーズ (フランス)	買収	2018 7	ソレプラ・ インダストリーズ	再生PETフレーク 2.2万トン 再生HDPE 1.4万トン 食品グレードペレット 1.6万トン	5.2
ループ・ インダストリーズ (カナダ)	合併 (1:1)	2018 9	ループ・ イノベーションズ	PETケミカルリサイクル (モノマー リサイクル)技術	2020年に 実用化
Custom Polymers PET (アラバマ、USA)	買収	2018 12	Custom polymers PET	rPETフレーク food grade、100% rPET	3.1
Invista Resins & Fibers (ドイツ)	買収	2019 1	Invista	(PET工場 28.2万トン) PET再生材(フレークとペレット) 3.1万トン	3.1
Green Fiber International (Ca. USA)	買収	2019 12		PET再生材(特に食品包装用)	4
能力合計		2019末			44

注：黄色地 アジア、青色地 欧州、緑地 北米・南米。

出所：<http://www.indoramaventures.com/en/sustainability/environmental/recycling> などより
旭リサーチセンターが作成。

インドラマは 2019 年 5 月に 100%再生材のペレット、フレーク、繊維を DEJA™の商標で販売を開始した⁵⁶。また、インドラマはこれまで日本に PET のバージン樹脂を輸出しているが、ボトル用の PET 再生材を日本に輸出するといわれている⁵⁷。

⁵⁶ <https://www.indoramaventures.com/en/updates/other-release/1259/indorama-ventures-announces-the-launch-of-deja-a-100-rpet-brand>

⁵⁷ 化学工業日報 2019, 2.21 【バンコク＝岩崎淳一】インドラマ・ベンチャーズが日本のポリエチレンテレフタレート (PET) 市場で存在感を高めている。2017 年に日本が中国品に対するアンチダンピング (AD) 課税措置を下したのを契機として、タイ拠点などから供給を増やし代替需要を獲得。18 年の販売量は年 22 万トン強まで拡大、市場シェアも 20%を超えトップレベルに達している。さらに、リサイクル性に優れるアルミニウム触媒を用いた製品を、PET ボトル再利用を推進する飲料メーカーなどに売り込み攻勢をかける。日本での再生 PET 拠点設置を視野に入れ、事業化も検討している。なお、アルミニウム触媒は東洋紡がインドラマ・ベンチャーズにライセンスしたものである。

2019年7月にインドラマのCEO アローク・ロヒア (Aloke Lohia) は、リサイクル事業に15億ドルを投資する計画を発表した。そして、今後5年間に10億ドルを投資することを約束した。投資には買収から新設まであらゆる形態が含まれ、内容的にはボトルtoボトル設備に集中投資するという。同時に、2018年7月初めから2019年6月末までの1年間に、インドラマは約500万トンのPET樹脂を生産したと述べている。

おわりに

本リポートのタイトルは「リサイクルが進む PET 樹脂は循環経済を実現するか」である。筆者の意見は「イエス、実現する」である。

PET ボトルの分別収集とメカニカルリサイクル技術は確立しており、経済的にリサイクルすることが可能だからである。また、2030 年に向けた EU 政府のプラスチックボトルの再生材含有量の規制が 2019 年 5 月に決定し、また数字的にそれを上回る大手飲料メーカーのリサイクル計画が 2019 年に相次いで発表されたからである。

今後、PET ボトルについては 3R の Reduce（ボトルの薄肉化⁵⁸）、Reuse（通い容器用の大型ボトル使用）、Recycle（メカニカルリサイクルとケミカルリサイクル）の徹底とバイオ PET の導入が進むであろう。リサイクルとバイオ PET の組み合わせにより、クローズドループの循環経済が実現する。その場合、回収・リサイクルを徹底的に行い、やむを得ず出る回収・リサイクルのロス分を植物由来のバイオ PET で補充するかたちにすれば、ボトル to ボトルのループは完璧なサステイナブルなものになる。実現すれば、プラスチックについては初めての例になる。

この間、興味ある技術課題は、ケミカルリサイクルとバイオ PET100 の工業化である。

ケミカルリサイクルはこれまでメカニカルリサイクルに比べコストが高いことが問題とされてきた。コストダウンができる新規プロセスの開発とともに、リサイクル率の増加によって余剰となる既存 PET 重合設備をケミカルリサイクルの重合工程に転用することによるコストダウンが考えられる。

バイオ PET100 については、バイオパラキシレン製造プロセスのイノベーションが期待される。本リポートで取り上げた 2 つのアプローチは、非食料のセルロースを原料に発酵技術を使用しないで化学反応でバイオパラキシレンをつくるというものである。成功すればバイオマス化学（またはバイオエコノミー）に大きなインパクトを与えるであろう。

⁵⁸ これについては、参考文献(2)の PET ボトルリサイクル推進協議会ホームページに詳しい。また、コカ・コーラなど飲料メーカーのホームページに記載されている。

また、バイオモノエチレングリコール（バイオ MEG）をつくる現在のバイオエチレンルートはステップが長くまだコスト高で、それに代わるバイオセルロース原料から直接 MEG をつくる安価なプロセスイノベーションが期待される。

最後に、2019 年 5 月議会決定の EU のプラスチックボトルに関する規制は、PET だけでなく全プラスチックボトルが対象であることは注記すべきである。すなわち、PE、PP、PVC、ポリカーボネート製などのボトルの分別回収を 2029 年までに 90%（2025 年までに 77%）にすること、PE、PP、ポリカーボネート製などのボトルの再生材比率を 2030 年までに 30%以上にすることが求められる。欧州では PE や PP のリサイクルが大規模に行われていて再生材比率 30%以上のボトルがすでに市場に出回っているが、日本は遅れている。日本はこの規制値を達成するために、PE、PP、ポリカーボネート製などのボトルについてのリサイクル技術の開発と実用化が喫緊の課題となる。

以上のように、PET は循環経済に向けて先頭を走る優等生だが、PE や PP などでのリサイクル技術の加速が、特に日本において望まれる。

参考文献

(1) ARCレポート：府川伊三郎

- ① 海洋プラスチックごみとマイクロプラスチック（上） 2017年11月

https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/pdf/rs-1019.pdf

- ② マイクロプラスチック：海洋プラスチックごみとマイクロプラスチック（下）

2017年12月

https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/pdf/rs-1020.pdf

- ③ 浮遊するPE・PPマイクロプラスチックの生成と行方 2018年7月

https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/pdf/rs-1026.pdf

- ④ バイオマス化学 2014年9月

https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/pdf/rs-978.pdf

- ⑤ シングルユースプラスチックとそれを取り巻く国際的動き 2019年8月

https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/pdf/rs-1037.pdf

- ⑥ 日本のプラスチックリサイクルの現状と課題 2019年9月

https://arc.asahi-kasei.co.jp/report/arc_report/pdf/rs-1039.pdf

(2) その他

- ⑦PET ボトルリサイクル推進協議会ホームページ：

<http://www.petbottle-rec.gr.jp/>

<本リポートのキーワード>

PET 樹脂、シングルユースプラスチック、プラスチックリサイクル、ペットボトル、資源循環、EU プラスチックボトル規制、メカニカルリサイクル、ケミカルリサイクル、バイオ PET、植物由来 PET

(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

お問い合わせ先 03-6699-2580

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