

プラスチックのケミカルリサイクルと その技術開発（上）

メカニカルリサイクル（マテリアルリサイクル）を補完するケミカルリサイクルが世界的に注目されている。大手化学企業6社が、PE/PP/PSを主体とする混合廃プラを無酸素条件下で熱分解して得られたナフサをクラッキングしてPE、PP、PSを再生するクローズドループのケミカルリサイクルを実用化しようとしている。また、PETやポリスチレンを解重合してモノマーに戻し、再重合してリサイクルする技術も活発に開発されている。一方、日本では酸素存在下で廃プラをガス化して合成ガスをつくる手法や、廃プラをコークス炉で化学原料化する手法、廃プラを高炉還元剤に使用する手法が約20年前から実用化されている。

2020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

◆ケミカルリサイクルには、「解重合（モノマー）―再重合」法（略号：解重合法）、
「熱分解（油）―ナフサクラッキング」法（略号：熱分解法）、「ガス化（合成ガス）
―化学品」法（略号：ガス化法）、「コークス炉化学原料化（ガス・オイル・コーク
ス）」法（略号：コークス炉化学原料化法）、「高炉還元剤」法（略号：高炉還元剤法）
の5つの手法がある。（4-5頁）

◆ケミカルリサイクルは、メカニカルリサイクルしにくい汚染したPET廃棄物、PS廃棄物、
混合廃プラ（PE/PP/PS主体）の有力なリサイクル手法であり、また得られる再生材は
飲料・食品の容器包装に使用できるのが特徴である。さらに、ボトルの再生材含有率
に関するEUの規制（2030年までに30%以上）や飲料メーカーの意欲的なコミットメン
トを達成するためには、汚染の少ない廃プラ（廃PETボトルなど）のメカニカルリサイ
クルだけでは数量的に不足することが明らかであり、ケミカルリサイクルが注目され
るようになった。（6-7頁、25頁）

◆5つのケミカルリサイクル手法の概要と強みと弱み・課題を以下の表にまとめた。

手法	廃プラの例	前処理	処理条件	生成物	強み	弱み（課題）
解重合法	PETボトル	PVC分離	グリコール分解(220℃)	PET ⇒ BHET ⇒ PET	・着色物・汚染物を除去しやすい ・食品包装用途に使用可能	メカニカルリサイクルよりもコストが高い
			メタノール分解	PET ⇒ DMT + MEG ⇒ PET		
	ポリスチレン（単一物）		無酸素熱分解(500℃以上)	PS ⇒ SM(モノマー) ⇒ PS		
熱分解法	混合廃プラ（PE/PP/PS）	PVC分離（PET分離）	無酸素熱分解（～400℃）	熱分解油（ナフサなど）	・混合廃プラを使用できる ・熱分解油（ナフサ）をナフサクラッキングして、PE、PP、PSをつくれる（クローズドループ）	ナフサ成分の選択率、収率アップ
ガス化法		前処理不要	純酸素供給2段階熱分解（600～700℃、1300～1500℃）	合成ガス（CO+H ₂ ）	・廃プラや木質バイオマスを原料に使用可能	・純酸素のコストが高い ・合成ガスの付加価値用途の開発が必要
コークス炉化学原料化法		PVC分離	石炭に～1%混合、コークス炉（無酸素条件、蒸し焼き）で反応（1200℃）	オイル（油）40%、コークス20%、ガス（水素、メタン）40%	・オイル（BTX）はプラスチック原料にできる ・有害物の発生がない	生成物のコークス（高炉還元剤）、ガス（燃料用）は1回使用
高炉還元剤法		PVC分離	コークスに～1%添加して反応（高炉 2400℃）	高炉中で還元剤として働き、自らはCO ₂ と水になる	・廃プラを使用すると、CO₂の発生量がコークス比30%削減できる	1種の廃プラの燃焼である

（8 頁、表 2）

◆PETのケミカルリサイクル（解重合法）は、PET廃棄物を解重合でモノマーに戻し、再度重合してバージン並みのPETをつくる手法である。従来、PETのケミカルリサイクルはコスト的に難しいとされているが、海外では少なくとも5つのスタートアップなどが開発中である。このうち進んでいるのは、Loop Industries（カナダ）とIndorama Ventures（タイ）の米国合弁会社で、2020年にプラント（2万トン/年）を稼働させる予定である。（8-10頁、22-25頁）

◆ポリスチレン（PS）のケミカルリサイクル（解重合法）については、PS メーカー大手のINEOS StyrolutionやTrinseoが、スタートアップ企業のAgilyx（米国）とPyrowave（カナダ）などと提携して開発中で、米国と欧州にPS廃棄物の解重合パイロットをつくる計画である。（8-10頁）

◆2018年12月にBASFが、PE/PP/PSを主体とする混合廃プラを無酸素条件で熱分解して得られたナフサをクラッキングしてPE、PP、PSを再生するクローズドループのリサイクルを実証したことを発表した。その後、2019年にSABIC、LyondellBasell、Dow、Shellが同様の熱分解法ケミカルリサイクルを自社のナフサクラッカーで行うことを発表した。（10-13頁）

◆ガス化法は混合廃プラを酸素存在下で熱分解して合成ガス（一酸化炭素（CO）＋水素（H₂））を製造する手法である。精製した合成ガスは各種化学品に転換される。2003年から昭和電工が工業化しており、合成ガスからアンモニアを製造している。混合廃プラ中にPVC、PETが入っていても問題がないのが特徴である。（13-14頁）

◆コークス炉化学原料化法は日本製鉄が開発したもので、全国5か所の同社のコークス炉で実用化されている。日本では、ケミカルリサイクルの中では廃プラ処理量が最も多い手法である。

高炉還元剤法はJFEスチールが開発したもので、同社の2か所の高炉で実用化されている。コークス炉化学原料化法、高炉還元剤法ともに設備余力があり、廃プラが入手できれば、処理量を倍増することができるといわれる。（14-16頁）

◆メカニカルリサイクルと各種ケミカルリサイクル手法を、リサイクル性（同じプラスチックに再生できるか、クローズドループ形成に必要なステップ数、リサイクル収

率など）の観点と、適応できる廃プラスチックの範囲の大きさ（汚染度やプラスチックの混合度などの許容度）の観点から比較評価した。リサイクル性に優れる手法は適応できる廃プラの範囲が狭く、半面適応範囲が広い手法はリサイクル性に劣るという逆相関にあることがわかった。（8 頁、16-17 頁）

- ◆日本のケミカルリサイクルによる廃プラ処理量は一般系廃棄物と産業系廃棄物を合わせて 2017 年は 40 万トンであった。また、日本のケミカルリサイクルの歴史を年表（1995-2030 年）にまとめた。

欧米ではこれまでケミカルリサイクルはほとんど実用化されていなかった。近年、プラスチックの埋立処理を減らし、価値ある再生材（燃料など）を生み出す手段として、混合廃プラの熱分解やガス化などの手法が積極的に開発されており、一部は実用化されている。（18-21 頁）

目 次

はじめに	1
1. ケミカルリサイクルとは	4
2. 今なぜ、ケミカルリサイクルが注目されるか	6
3. 各種ケミカルリサイクル手法の概要と技術比較	8
3.1 「解重合(モノマー)ー再重合」法 (略号:解重合法)	8
3.2 「熱分解(油)ーナフサクラッキング」法 (略号:熱分解法)	10
3.3 「ガス化(合成ガス)ー化学品」法 (略号:ガス化法)	13
3.4 「コークス炉化学原料化(ガス・オイル・コークス)」法(略号:コークス炉化学原料化法) ..	14
3.5 「高炉還元剤」法 (略号:高炉還元剤法)	16
3.6 各種ケミカルリサイクル手法のリサイクル性と廃プラ適応性の比較	17
4. 日本と欧米のケミカルリサイクル事業	18
4.1 日本のケミカルリサイクルによる廃プラの処理量	18
4.2 日本のケミカルリサイクル 20 年の歴史(1999 年～2019 年)	19
4.3 欧米のケミカルリサイクルの状況	20
5. 詳論:PET ボトルのケミカルリサイクル(解重合法)	22
5.1 PET ボトルのメカニカルリサイクルとケミカルリサイクルの比較	22
5.2 PET ボトルのケミカルリサイクルの実用化と技術開発(参考文献⑦参照)	22
5.3 EU のボトル規制(2019 年 5 月)と飲料メーカー各社の対応	25
おわりに	26
参考文献	27

はじめに

海洋プラスチック問題をトリガーに、プラスチックの資源循環が重要な課題になっている（図1）。資源循環は化石資源の枯渇防止と温室効果ガス（二酸化炭素（CO₂））の発生抑制の有力な手段である。資源循環実現の具体的方策としては3R（リデュース、リユース、リサイクル）がよく知られているが、この中でリサイクルは重要である。3R以外の方策としては、既存の石油由来プラスチックを代替できる再生可能な植物由来プラスチック（バイオマスプラスチック）の導入である。

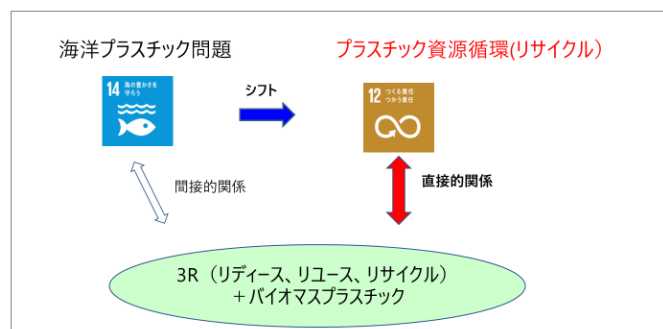


図1 海洋プラスチック問題とプラスチック資源循環(リサイクル)

出所：旭リサーチセンターが作成。

リサイクルの中ではメカニカルリサイクル（マテリアルリサイクル、材料リサイクル）が最も重要で、それを補完するものとしてケミカルリサイクルがあると考えられてきた。ただし、ここ数年間、メカニカルリサイクルを実際に推進する中で数量的限界が見えてきたことや、再生材使用比率に関するEUの新たな規制やそれに対応する企業の意欲的なコミットメントを達成するためにはメカニカルリサイクルだけでは不足で、ケミカルリサイクルの力を借りることが必要になってきた。このようなケミカルリサイクルのニーズの高まりから、ケミカルリサイクルの技術開発や実用化が加速され、大きな話題となってきた。このことから、今回ケミカルリサイクルをARCレポートに取り上げた。

本レポートは、これまでに発行してきた3つのARCレポート「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）、「リサイクルが進むPETは循環経済を実現するか」（2020年2月、同参考文献⑦）の続編である。前3編でも、ケミカルリサイクルについて触れているが¹、本レポートではあらためてケミカルリサイクルの国内外の動向と技術開発の状況を深掘りし、（上）（下）の2編にレビューしたものである。

用語・略語集

（1）本レポートで使したケミカルリサイクルの名称

表 1 本レポートで使したケミカルリサイクルの名称と略号

リサイクルプロセス全体を表す名称 （ ）内は生成物を表す	略号またはリサイクルのキー技術		
		別名	英語
「解重合（モノマー）―再重合」法	解重合法	原料・モノマー化	Depolymerization
「熱分解（油）―ナフサクラッキング」法	熱分解法	油化	Pyrolysis
「ガス化（合成ガス）―化学品」法	ガス化法		Gasification
「コークス炉化学原料化 （ガス・オイル・コークス）」法	コークス炉化学原料化法		
「高炉還元剤」法	高炉還元剤法	高炉原料化	

出所：旭リサーチセンターが作成。

（2）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。本レポートでは狭義の意味で使した。

¹ PET ボトルのケミカルリサイクルについては、ARC リポート（参考文献⑦）に詳しい。

- ・リサイクル率：廃プラ 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）：廃プラを固体または熔融状態でリサイクルし、再生材を得る手法。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を材料リサイクルする手法。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。本リポートでは再生樹脂と同意語。
- ・ケミカルリサイクル：ISO 15270 ではフィードストックリサイクルと呼ばれる。
- ・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）と②再生材生産能力。

(3) 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。

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）

PMMA（ポリメタクリル酸メチル）

PE/PP/PS：これらのプラスチックを主体とする混合廃プラの場合に使用する

(4) 化学品の名称

CO（一酸化炭素）

SM（スチレンモノマー）

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）

DMT：ジメチルテレフタレート

BHET：ビス（2-ヒドロキシエチル）テレフタレート

1. ケミカルリサイクルとは

(1)ケミカルリサイクルの位置付け

プラスチックリサイクルとしては、①メカニカルリサイクル（マテリアルリサイクル）、②ケミカルリサイクル、③サーマルリサイクルの 3 つがある。日本は①～③をリサイクルに分類しているが、EU は③のサーマルリサイクルを、エネルギーリカバリーと呼びリサイクルには含めない。

プラスチック循環利用協会資料（参考文献⑩）によれば、日本の 2016 年の廃プラ処理量（899 万トン）の内訳は、再生利用（メカニカルリサイクルのことで、リサイクルのための輸出を含む）206 万トン（23%）、ケミカルリサイクル（高炉・コークス炉原料・ガス化・油化）36 万トン（4%）、サーマルリサイクル 516 万トン（57%）、単純焼却 80 万トン（9%）、埋立 60 万トン（7%）となっている。

以上のように、ケミカルリサイクルによる廃プラ処理量は 36 万トンで全体の 4%を占めている。

また、環境省資料（2016 年）によれば、上記再生利用 206 万トン（環境省資料では 202 万トン）（23%）の内訳は、再生樹脂国内投入 34 万トン（4%）、再生樹脂輸出が 168 万トン（19%）となっている。したがって、国内で行われているメカニカルリサイクル 34 万トンとケミカルリサイクル 36 万トンはほぼ同量である。

(2)ケミカルリサイクルの種類と概要

ケミカルリサイクルの定義はいくつかあるが、本レポートでは便宜的に燃焼以外の化学反応を伴うものとした。また燃焼以外の化学反応は伴うが、生成物（合成ガスや油）を直ちに燃焼したり、発電用燃料にする場合はケミカルリサイクルではなくサーマルリサイクルと見做した。

本レポートでは代表的なケミカルリサイクル手法として実用化された次の5つを取り上げた。

a. 「解重合(モノマー)―再重合」法（略号:解重合法）

プラスチックを解重合してモノマーに戻し、再度モノマーを重合して同じプラスチックをつくるというものである。代表的なものは PET と PS の解重合法である。

b. 「熱分解(油)―ナフサクラッキング」法（略号:熱分解法）

まず、①PE/PP/PS²などの混合廃プラを“無酸素条件下”で熱分解して熱分解油（ナフサなど）を製造、次いで②熱分解油（ナフサなど）をナフサクラッキングしてエチレン、プロピレン、BTX を製造、③それらを原料に PE、PP、PS を製造する。これにより、クローズドループが形成される。

c. 「ガス化(合成ガス)―化学品」法（略号:ガス化法）

PE/PP/PS などの混合廃プラを“酸素存在下”で熱分解することにより、合成ガス（CO（一酸化炭素）+H₂（水素））を製造する手法である。精製した合成ガスは各種化学品の製造原料となる。

d. 「コークス炉化学原料化(ガス・オイル・コークス)」法（略号:コークス炉化学原料化法）

石炭に PE/PP/PS などの混合廃プラを混ぜてコークス炉に投入し、“無酸素条件下”で分解し、ガス・オイル・コークスを製造するものである。ガスは燃料、コークスは高炉還元剤に使用される。オイル（油）はアロマ成分が多く、化学品やプラスチックの原料になる。

e. 「高炉還元剤」法（略号:高炉還元剤法）

コークスに PE/PP/PS などの混合廃プラを混ぜて高炉に投入する。廃プラは鉄鉱石の還元剤として働き、自らは CO₂ と H₂O になる。

² PE/PP/PS の表示は、これらのプラスチックの混合廃プラの場合に使用する。

2. 今なぜ、ケミカルリサイクルが注目されるか

まず第 1 の理由は、BASF が、PE/PP/PS などの混合廃プラを熱分解してつくったナフサを原料に、既存のナフサクラッカーと重合装置を使って PE、PP、PS を製造する実証テストを発表したためである（2018 年 12 月）。その後、2019 年に SABIC、LyondellBasell、Dow、Shell が同様な取り組みを相次いで発表したことから、さらに注目されることとなった。化学企業が自ら主導的にかつ責任をもってできるリサイクル手法であることが、化学企業の関心を呼んだ。

そして第 2 の理由は、メカニカルリサイクルを優先的に拡大する中で、その限界や困難な点が明らかになったためである。1 つは質の問題であり、もう 1 つは量の問題で、両者は互いに関係している。

まず、汚染した廃プラのメカニカルリサイクルは難しいが、ケミカルリサイクル（解重合法や熱分解法）ではメカニカルリサイクルよりも容易である。またケミカルリサイクルで（再）重合したプラスチックは、飲料・食品の容器包装に再使用できることである。

一方、ボトル（PET ボトルなど）の再生材含有率についての EU の新しい規制や飲料メーカー（CoCa-Cola、PepsiCo など）の意欲的なコミットメントを達成するためには、メカニカルリサイクルだけでは数量的に達成が困難なことが明らかになったためである。

第 3 の理由は、欧米では循環経済に移行するための喫緊の課題の 1 つは、廃プラの埋立を減らすことである。それまで埋め立てられていた混合廃プラを焼却ではなく、熱分解法やガス化法などのケミカルリサイクルで解決しようとしている。この点は、日本と異なる状況である。欧米における埋立の数量や比率は、日本に比べてはるかに多い（第 4 章 4.3 参照）。

第4の理由は、ケミカルリサイクルのニーズに応える技術開発に取り組んでいたスタートアップ企業がブレイクスルーを実現し、革新技术が実用化されつつあることである。注目されるスタートアップ企業としては、PET 解重合技術の Loop Industries（カナダ）、Ioniqa（オランダ）、Carbios（フランス）、ポリスチレン（PS）解重合技術の Agilyx（米国）と Pyrowave（カナダ）、熱分解油製造技術の Plastic Energy（スペイン）、Quantafuel（デンマーク）、Fuenix Ecogy Group（オランダ）、RES Polyflow（米国）、ガス化技術の Enerkem（カナダ）がある。

3. 各種ケミカルリサイクル手法の概要と技術比較

表2に5つのケミカルリサイクル手法の概要および強みと弱み（課題）をまとめた。

表2 ケミカルリサイクルの各種手法の比較

手法	廃プラの例	前処理	処理条件	生成物	強み	弱み（課題）
解重合法	PETボトル	PVC分離	グリコール分解(220℃)	PET ⇒ BHET ⇒ PET	・着色物・汚染物を除去しやすい ・食品包装用途に使用可能	メカニカルリサイクルよりもコストが高い
			メタノール分解	PET ⇒ DMT + MEG ⇒ PET		
	ポリスチレン（単一物）		無酸素熱分解(500℃以上)	PS ⇒ SM(モノマー) ⇒ PS		
熱分解法	混合廃プラ (PE/PP/PS)	PVC分離 (PET分離)	無酸素熱分解 (~400℃)	熱分解油(ナフサなど)	・混合廃プラを使用できる ・熱分解油(ナフサ)をナフサクラッキングして、PE、PP、PSをつくれる(クローズドループ)	ナフサ成分の選択率、収率アップ
ガス化法		前処理不要	純酸素供給2段階熱分解 (600~700℃、1300~1500℃)	合成ガス (CO+H ₂)	・廃プラや木質バイオマスを原料に使用可能	・純酸素のコストが高い ・合成ガスの付加価値用途の開発が必要
コークス炉化学原料化法		PVC分離	石炭に~1%混合、コークス炉(無酸素条件、蒸し焼き)で反応 (1200℃)	オイル(油) 40%、コークス20%、ガス(水素、メタン) 40%	・オイル(BTX)はプラスチック原料にできる ・有害物の発生がない	生成物のコークス(高炉還元剤)、ガス(燃料用)は1回使用
高炉還元剤法		PVC分離	コークスに~1%添加して反応 (高炉 2400℃)	高炉中で還元剤として働き、自らはCO ₂ と水になる	・廃プラを使用すると、CO₂の発生量がコークス比30%削減できる	1種の廃プラの燃焼である

出所：各種資料より旭リサーチセンターが作成。

3.1 「解重合（モノマー）－再重合」法（略号：解重合法）

PETのケミカルリサイクル（解重合法）は日本環境設計（川崎工場：2万トン/年）が実用化している（一時休止していたが、最近稼働したと伝えられる）。一方、海外におけるPETのケミカルリサイクルは開発段階である。この中で、Loop Industries（カナダ、

スタートアップ）とIndorama Ventures（タイの石油化学メーカー）の米国合併会社が、2020年にプラント（能力2万トン/年）を稼働すると発表したことが注目される。予定通り稼働すれば、欧米ではPETのケミカルリサイクルの最初の工業化になる。

一方、ポリスチレン（PS）のケミカルリサイクル（解重合法）については、Agilyx（米国）と Pyrowave（カナダ）の2つのスタートアップが、PS 大手メーカーの INEOS Styrolution（欧米）や Trinseo（欧米）らと共同開発中である。PS 廃棄物の処理能力 5～10 トン/日程度のパイロットが、米国と欧州の2か所で建設される見込みである。また、日本では東洋ポリスチレンが Agilyx(米国)と技術ライセンス契約を締結したことを親会社のデンカが発表した（2020年4月13日）。

解重合法（「解重合（モノマー）―再重合」法）の技術開発のポイントは前段の解重合のステップである。後段の再重合のステップは既存の技術やプラントがあるのでそれを利用することが有利である。

メカニカルリサイクルに比べて、解重合法は着色物や汚染物があっても、モノマー段階での精製が容易なので異物や着色の少ないバージン並みのプラスチックが得られ、またこれを食品用の容器包装に使用できるのが特徴である。もちろん食品包装用に使用するためには、日本では厚生省の認可が必要であり、米国ではFDAの認可が必要となる。認可を得るためには、再生材としての品質管理体制が求められる。製品が確かに再生材であることや製品の再生材含有比率を証明する必要があり、生産や出荷におけるトレーサビリティが求められる。

PETのケミカルリサイクルの課題はメカニカルリサイクルに比べコストが高いことである。解重合と再重合の2つの工程があることが1つの理由である。技術開発による解重合工程と精製工程のコストダウンと、既存PET重合設備の利用による再重合工程のコストダウン（設備償却費や労務費の削減）が必須である。PSのケミカルリサイクルも同様である。

なお、PETとPSのケミカルリサイクル（解重合法）には、それぞれPETボトル廃棄物のみ、PS廃棄物などの原料廃棄物が必要である。PVC廃棄物などの混入は好ましくないため、事前に選別で除くことが必要である。PETとPVCは比重が近いので、比重差による

分離は難しく、人による目視選別や光学識別を使用した機械選別が必要になる。

解重合法は原理的には再生比率100%、再生回数は無限である。再生のためのステップ数は2（解重合と再重合）である。実際にはリサイクルロス分があるのでそれを考慮してリサイクル性を評価する必要がある。

3.2 「熱分解（油）ーナフサクラッキング」法（略号：熱分解法）

大手化学メーカーのBASFは熱分解油（ナフサ）をナフサクラッキングにかけてPE、PP、PSを再生させることを実証した（2018年12月発表）。BASFの発表以降、同様の計画が欧州のSABIC、LyondellBasell、Dow、Versalisから相次いで発表された（表3）。

表 3 廃プラの「熱分解（油）ーナフサクラッキング」法の実証と計画

大手化学メーカー （本社所在地） 「プロジェクト名」	提携先（熱分解油供給企業など） （所在地）	大手化学メーカーのナフサクラッキング実施場所（計画を含む）	提携発表
BASF 「ChemCyclingプロジェクト」	Recenso（ドイツ）	ドイツ・Ludwigshafenのナフサクラッカーで実証	2018年12月13日
	Quantafuel（デンマーク）	ドイツ・Ludwigshafenのナフサクラッカーで実用化を計画	2019年10月7日
Sabir 「TRUCIRCLE™ Solution」	Plastic Energy（スペイン）	オランダ・Geleenのナフサクラッカーで計画（2万トン/年の熱分解油プラント建設中）	2019年1月24日
Borealis （オーストリア・Schwechat） 「OMV ReOil project」	OMV（オーストリア・Schwechat）（石油精製会社）	オーストリア・Schwechatの石油精製プラントで計画	2019年5月8日
LyondellBasell	Neste（フィンランド）	ドイツ・Wesselingで数千トン生産：PPとLDPEを併産、植物油廃棄物の熱分解でバイオ含量は30%	2019年6月18日
DOW	Fuenix Ecogy Group（オランダ）	オランダ・Terneuzenのナフサクラッカーで実施の計画	2019年8月29日
Shell	Nexus Fuels（米国）	米国・ルイジアナのナフサクラッカーで少量テスト生産	2019年11月21日
Versalis(Eniグループ) 「Hoop™」	Servizi di Ricerche e Sviluppo（イタリア）	イタリア・Mantabaで熱分解プラント建設予定	2020年2月17日

出所：各社プレスリリースより旭リサーチセンターが作成。

これら大手化学メーカーは、いずれも提携したスタートアップ企業から熱分解油（ナフサ）の供給を受けて、これを自社のナフサクラッキング設備にかけるスキームである。

熱分解法の強みは、混合廃プラ（PE/PP/PS主体）から3ステップを経てバージン並みのPE、PP、PSがそれぞれ得られることで、図2のようにクローズドループが完成する点である。

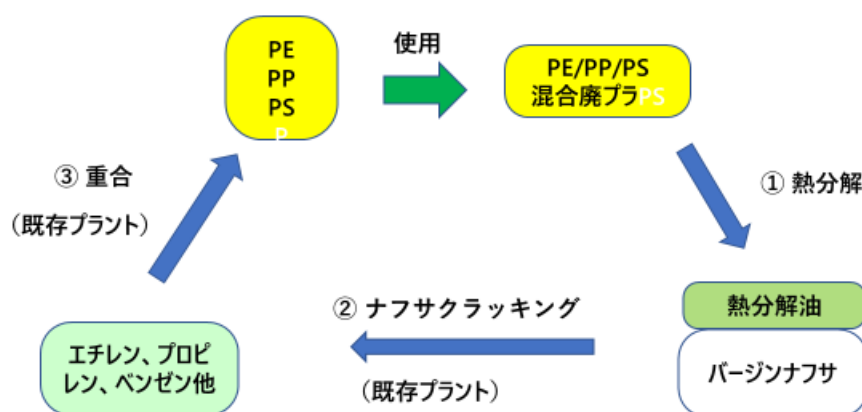


図2 熱分解法：混合廃プラの熱分解・ナフサクラッキング・重合によるリサイクル(クローズドループ)
出所：旭リサーチセンターが作成。

すなわち、①PE/PP/PSなどの混合廃プラの“無酸素条件”での熱分解による熱分解油（ナフサなど）の製造、②熱分解油（ナフサなど）をバージンナフサと混合して、ナフサクラッキングしてエチレン、プロピレン、BTXを取得、③エチレンを重合してPEに、プロピレンを重合してPPに、ベンゼンとエチレンからつくられたスチレンを重合してPSを製造する。

熱分解法の再生比率は熱分解時のナフサ収率で決まる。再生回数は原理的には無限であるが、ナフサ収率が40%程度だと3回リサイクルすると再生材比率は6%になってしまう。

また、図3に示すように、熱分解法は3ステップなので、メカニカルリサイクルの1ステップや解重合法の2ステップに比べるとリサイクル性が劣る。

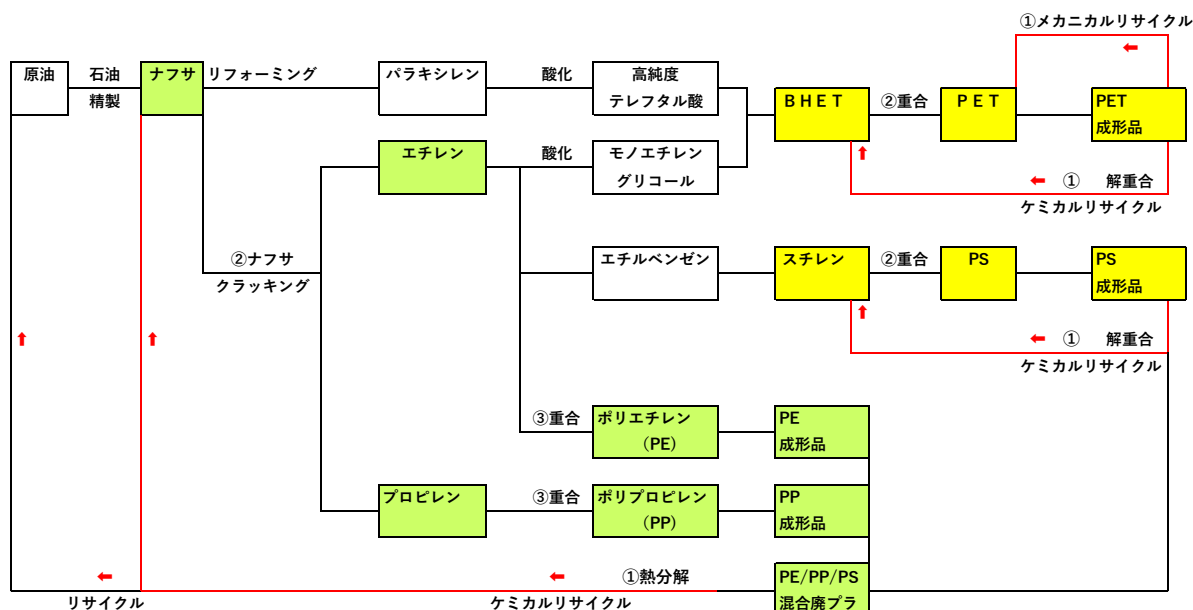


図3 メカニカルリサイクルとケミカルリサイクルのフロー図

注：図の左にあるような熱分解油を石油精製の原料にするリサイクルルートもある。
出所：旭リサーチセンターが作成。

熱分解法の原料は、欧米ではPost-consumer wasteと呼ばれるPE/PP/PSを主体とする混合廃プラである。分別することなく処理できることが強みである。ただ、少量含まれるPVCとPETが熱分解の障害となることが多い。PVC除去のために事前に選別したり、押出機で予備熱分解して塩素を塩化水素の形で除いている。PETについても対策をとっている。

一方、弱み（課題）は、PEとPPの熱分解はランダムに起こるので、生成物の分子量分布が広く、ナフサ収率は高くないことである。いかに収率よくナフサ成分を取得できるようにするかが課題である。熱分解条件（分解温度や触媒）の最適化や反応器の設計・開発が重要である。また、熱分解油中のナフサ成分だけでなく、より沸点の高いガスオイル（軽油（ディーゼル））もクラッキングに使用できれば再生比率は向上する。このためにはガスオイル用のクラッカー設備や、ナフサとガスオイルの両方を使用できるフレキシビリティのあるクラッカー設備が求められる。海外にはガスオイルをクラッキングできる設備がある程度存在するが、日本のナフサクラッカーはほとんどがナフサ専用である。

なお、熱分解法の熱分解工程は、無酸素条件で行うので基本的にCO₂の発生はない（ただし、PETのような含酸素プラスチック廃棄物が混じると、その分酸素が持ち込まれることになる）。

3.3 「ガス化（合成ガス）－化学品」法 （略号：ガス化法）

2003年から昭和電工が川崎工場でガス化法を実用化しており、製造した合成ガスからアンモニアを製造している。固有の触媒を使ったシフト反応により、合成ガスを水素に変換して隣接のアンモニア工場に供給している。ガス化法ではこのように、隣接工場で合成ガスを有用な化学品に変換できることが重要である。

海外では、カナダのEnerkemが、廃プラから合成ガス経由でメタノールやエタノールを製造する大型プラントを2017年に稼働した。同社は他社と組んで欧米の数か所に新プラントを建設する計画である。ガス化法による合成ガスの製造は、廃プラ原料だけでなくバイオマス由来の廃棄物（紙廃棄物や木質廃棄物）にも利用できる。実際に、Enerkemは廃プラと木質廃棄物が混じったMSW（都市（固形）廃棄物）を原料にしてバイオメタノール（欧州向けのバイオ燃料）やバイオエタノール（米国向けのバイオ燃料）を製造していて注目されている³。

世界的に「合成ガス・メタノール/基幹化学」に関する研究開発が盛んであり、ブレイクスルーが期待される（続編の（下）参照）。ブレイクスルーはガス化法にドッキングすることができる。

ガス化法の最大の強みは、原料廃プラの適応度が最も高いことである。混合廃プラはもとより、PVCが混ざっていても問題なく処理できる。PVCの前処理は必要としない。PVCの燃焼によるダイオキシンの発生は燃焼ガスの急冷により防ぐことができる。熱分解法で問題になるPET廃棄物の混在も問題にならない。

ガス化法では、一定量の純酸素を熱分解装置に入れて廃プラの一部を燃焼させている。その燃焼熱は分解炉を高温に保つのに有効に利用されている。ただ、純酸素はコス

³ ただ、燃料に使うと消費されてCO₂になってしまい単なる再使用になるので、リサイクルの観点からは評価が下がる。

トが高いことと、廃プラの一部が燃焼するのでその分のCO₂が発生するのが弱みである。生成ガスのCO : H₂ : CO₂の組成は体積比で1 : 1 : 1といわれる（別に、CO 30～35vol%、H₂ 40～45vol%、CO₂ 20～25vol%との報告もある⁴⁾）。廃プラ中の炭素の約50%（約40%）がCO₂になってしまう。

仮にガス化法でプラスチックを再生するとすると、PE→合成ガス→メタノール→エタノール→エチレン→PEのルートが考えられ、5ステップになってしまう。したがって、各ステップの収率をかけ合わせて計算される再生比率は低くなる。

3.4 「コークス炉化学原料化（ガス・オイル・コークス）」法（略号：コークス炉化学原料化法）

新日本製鉄（現日本製鉄）はコークス炉化学原料化法を開発し、現在国内5か所に工場を有している。2000年稼働の君津80,000トン/年、名古屋50,000トン/年、2002年稼働の室蘭30,000トン/年、八幡60,000トン/年、2005年稼働の大分50,000トン/年である⁵⁾。いずれも設備能力が大きい。コークス炉化学原料化法は日本のケミカルリサイクル手法の中で廃プラ処理量が最も大きい。

コークス炉化学原料化法は、石炭に廃プラを約1%混ぜて、コークス炉で1200℃で蒸し焼き（“無酸素条件”）にするというもので、生成物はガス（水素、メタン）40%、オイル（油）40%、コークス20%である。生成物のガスは燃料や発電に使用され、コークスは高炉還元剤に使用される（これらは1回きりの使用なのでリサイクルではなく再利用である）。オイルはアロマ成分の多い油で、化学品やプラスチックに誘導することが可能である。

コークス炉化学原料化法は1200℃という高温で、熱分解法の400℃よりもはるかに高い。このため、廃プラの熱分解生成物は高温下で脱水素環化反応が進み、アロマ系オイルになる。アロマ系オイル（ベンゼン、トルエン、キシレン）は、ポリスチレン（PS）

⁴⁾ 参考文献⑨の132～138頁、亀田修「廃プラスチックの加圧二段ガス化技術」

⁵⁾ JFE スチールも JFE プラリソース川崎で8,900トン/年の設備をもっている。
海外では、ドイツの Stahlwerke Bremen（現 ArcelorMittal Bremen）が廃プラをコークス炉化学原料化法で処理している。本リポートの4章4.3を参照。

などの原料にすることが原理的には可能である。現在どの程度行われているかはわからない。生成物の40%が油なので、これをすべてPSの再生に回せば再生率は40%となる。再生回数は原理的に無限であるが、油の収率が40%なので再生2回目では再生率16%、3回目では再生率6%まで低下する。油よりPSをつくると仮定すると、廃プラ→BTX→ベンゼン→エチルベンゼン→スチレン→PSのルートでステップ数は5になるのでリサイクル性は良くない。

なお、巨大なコークス炉原料の石炭に廃プラは1%しか混ぜないので、廃プラに組成のばらつきなどの変動要因があってもコークス炉反応全体への影響は小さい。これはこの手法の強みである。

コークス炉化学原料化法には一般廃棄物の混合廃プラ（PE/PP/PS主体）が主に使用されるが、一部産業廃棄物も使用される。PVC混入は好ましくなく、熱分解して塩化水素の形で脱塩するか、PVCのっていない廃プラを使用しているものと推定される。

日本製鉄が20年前に実用化し、完成した技術である。プロセスの詳細な解説⁶が発表されているので、参照されたい。

経団連の調査に対し、日本鉄鋼連盟は鉄鋼関係のケミカルリサイクル拡大に関する目標を提示している（2019年の経団連資料、脚注を参照）⁷。資料によれば、「鉄鋼関係のケミカルリサイクルに関して過去に多大の設備投資をして処理能力100万トン/年体制をつくったにもかかわらず、当初に予定した量の半分の廃プラしか入手できず、処理量は約50万トン/年にとどまっている。これを倍増して100万トン/年（廃プラと廃タイヤ）

⁶ ①加藤健次「コークス炉を利用した廃プラスチック化学原料化技術」新日鉄技報 第384号、69頁（2006年）

②参考文献⑨ 277頁、加藤健次「コークス炉を利用した廃プラスチック化学原料化技術」（2005年）

⁷ 『経団連資料 鉄鋼（日本鉄鋼連盟）：廃プラスチック、廃タイヤの利用』

・1997年に政府から産業界に対して地球温暖化対策拡充に向け自主行動計画の追加的取組みの要請がなされたことを受け、鉄鋼連盟では、政府等による集荷システムの整備を前提に、年間100万トンの廃プラスチック等の製鉄プロセスでの利用を目指すこととした。このため、鉄鋼業界全体で約400億円の設備投資を行っている。しかしながら、これまでに鉄鋼業界が要望してきた集荷システムの整備や入札制度における材料リサイクル優先の見直しが進んでいない等の要因により、鉄鋼業における廃プラスチック、廃タイヤの2017年度の利用実績は約47万トンと前年比微増にとどまっている。

鉄鋼（日本鉄鋼連盟）の目標：政府等による集荷システムの確立等を前提に、廃プラスチック等の製鉄所でのケミカルリサイクルの拡大（100万トン活用）を行うことで、200万トン-CO2削減を目指す。

（注：100万トン活用には廃タイヤを含む）

http://www.keidanren.or.jp/policy/2019/032_kobetsu.pdf

にすることを目指す。」日本製鉄も同じ趣旨の提案を、2019年12月にプレスリリースした⁸。

一方、中国の廃プラ輸入禁止の措置で日本の廃プラの輸出が以前に比べ50万トン減って、その分が国内に滞留して処理に困っているといわれる。設備能力の大きいコークス炉化学原料化工場や高炉還元剤工場では処理できれば、一石二鳥なはずである。すぐにそうならないのは、廃プラの品質の問題（汚染度や望ましくないプラスチックの混入）や処理費（容リ法の入札価格より低い処理費）の問題があるのではないかと推定されるが、これらの問題を解決して処理量を拡大することが望まれる。

3.5 「高炉還元剤」法 （略号：高炉還元剤法）

JFEスチールが20年前に実用化した技術である。現在はJFEプラリソースが、2000年に稼働した福山の40,000トン/年と川崎（水江）の26,000トン/年の工場を運転している。

高炉還元剤法はコークスに混合廃プラを約1%混ぜて、コークス炉の1200℃よりさらに高温の高炉（2400℃）に供給する。高炉内で廃プラの構成元素の炭素と水素は還元剤として働き、鉄鉱石（Fe₂O₃）を還元するとともに自らはCO₂とH₂Oに酸化される。次式に示すように、コークス（C）を使用する場合に比べてCO₂の発生を2/3に減らす（約30%削減する）ことができる。ただ、1回の使用で終わるので、リサイクルとは言いにくい。

（式）

- a. 廃プラによる高炉還元 $(CH_2)_n(\text{廃プラ}) + n Fe_2O_3 \rightarrow 2nFe + n CO_2 + n H_2O$
- b. コークスによる高炉還元 $3n/2C(\text{コークス}) + n Fe_2O_3 \rightarrow 2nFe + 3n/2CO_2$

高炉還元剤法には、一般廃棄物の廃プラ（PE/PP/PSを主体とする混合廃プラ）が使用される。ただ、PVCが含まれている場合は事前に選別分離するか、前処理で脱塩素する必要がある。汚染物質はあってもよい。

プロセスの詳細な解説⁹が公表されているので、参照されたい。

⁸ 日本製鉄「廃プラスチックの効率的なリサイクルに向けて ～「持続可能な開発目標（SDGs）」の実現に向けた提言～」 https://www.nipponsteel.com/news/20191218_100.html

⁹ 参考文献⑨の267頁、脇元一政、木村康一「廃プラスチックの高炉還元剤リサイクル技術」（2005年）

3.6 各種ケミカルリサイクル手法のリサイクル性と廃プラ適応性の比較

PETボトルのケミカルリサイクルと各種ケミカルリサイクル手法をリサイクル性と廃プラ適応性の観点から比較評価した。リサイクル性の評価には、同じプラスチックに再生することができるかどうか、再生される重量比率、再生可能回数、再生のためのステップ数などを考慮して、1位～6位の順位（1位6点～6位1点）で評価した。また、廃プラ適応性の評価には、使用できる廃プラ品質（単一プラスチックか混合プラスチック）と汚染度を考慮し、同様に1位～6位の順位（1位6点～6位1点）で評価した。

結果（イメージ図）を図4に示す。リサイクル性と廃プラ適応性はほぼ逆の順序になっていることがわかる。

PETボトルのメカニカルリサイクルはリサイクル性に優れるが、使用できる廃プラが数量的に限られ廃プラ適応性は劣る。一方、ガス化法はリサイクル性はほどほどだが、廃プラ適応性に優れる。汚染された混合廃プラや木質系廃棄物（神・段ボール・庭木）を処理できる。

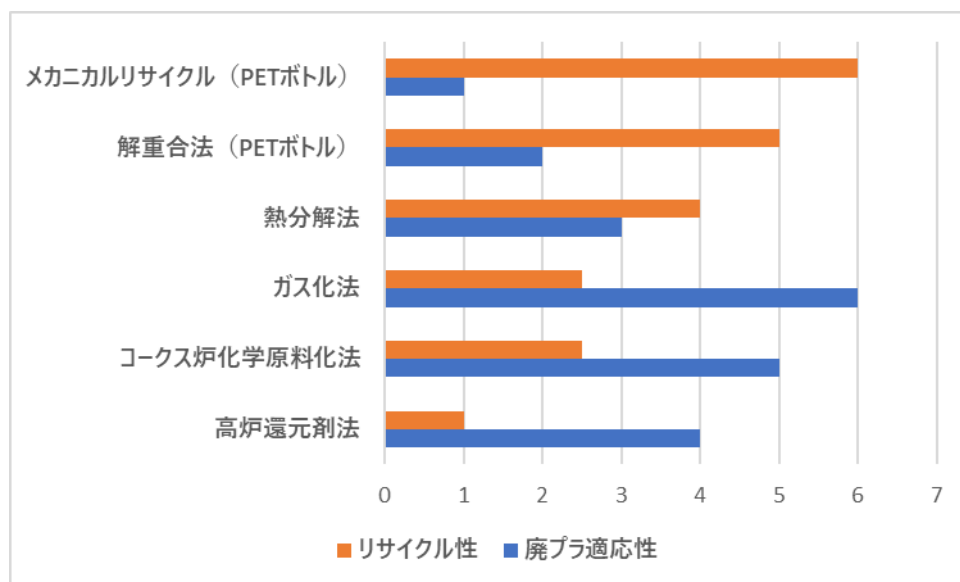


図4 ケミカルリサイクル手法のリサイクル性と廃プラ適応性の分散図

注：順位1位を6点～順位6位を1点とした。

出所：旭リサーチセンターが作成。

4. 日本と欧米のケミカルリサイクル事業

4.1 日本のケミカルリサイクルによる廃プラの処理量

表4に示すように、2016年（2017年）のケミカルリサイクルの実績は一般系廃棄物が28万トン（27万トン）で、産業系廃棄物が9万トン（13万トン）で合計で37万トン（40万トン）である。

表 4 ケミカルリサイクルの実績

	2016年	2017年
一般系廃棄物	28万トン	27万トン
産業系廃棄物	9万トン	13万トン
合計	37万トン	40万トン

出所：プラスチック循環利用協会

次に、図5に一般系廃棄物からの再商品化製品の販売実績の年次推移を示す。平成29年度（2017年度）のケミカルリサイクル比率は63.4%と材料リサイクル（マテリアルリサイクル）比率の36.6%よりも大きい。ケミカルリサイクルのうちでは、コークス炉化学原料（化法）が再商品化製品の44.3%を占め、最も多いことがわかる。同様に合成ガス（ガス化法）13.0%、高炉還元剤（法）6.1%、熱分解油（熱分解法）0%の順である。重量ベースでは、平成29年度（2017年度）のケミカルリサイクル量は約28万トンで、その内訳はコークス炉化学原料（化法）19.4万トン、合成ガス（ガス化法）5.7万トン、高炉還元剤（法）2.7万トン、熱分解油（熱分解法）0トンの順である。

また、図5に示すように、再商品化製品の販売実績とその内訳は、平成24年度（2012年度）から平成29年度（2017年度）までの5年間は大きな変化はなかった。平成30年度（2018年度）は少し変化が見られる。

一方、14年前の平成18年度（2006年度）は熱分解油（熱分解法）が1.2%を占めていたが、平成23年度（2011年度）にはゼロになり、それ以降ずっとゼロである。また平成16年度（2004年度）の高炉還元剤（法）は18.0%と高い比率であったが、近年5～6%に下がっている。

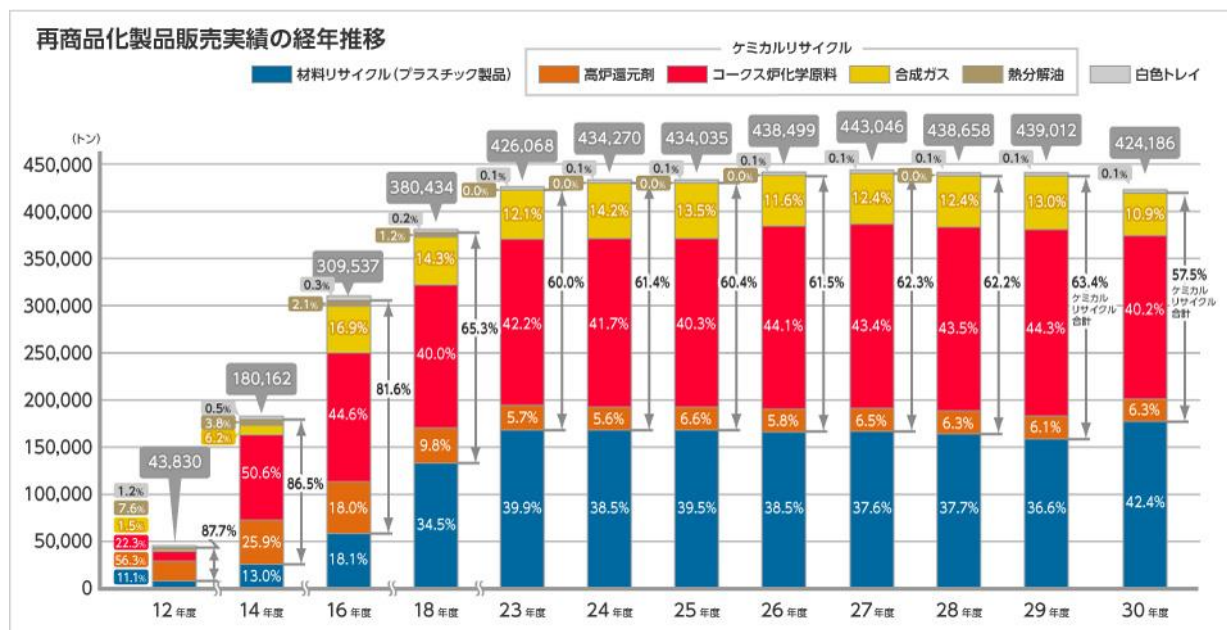


図5 プラスチック廃棄物の再商品化製品の販売実績 (材料リサイクルとケミカルリサイクル)

出所：日本容器包装リサイクル協会。

https://www.jcpra.or.jp/recycle/related_data/tabid/510/index.php

表5に示すように、容器リサイクル法（略称：容リ法）対象廃プラの入札価格は材料リサイクル（メカニカルリサイクル）用は54.9円/kgで、ケミカルリサイクル用は43.3円/kgで、ケミカルリサイクル用はメカニカルリサイクル用よりも11.6円安い。容リ法がメカニカルリサイクルを重視しているためである。一方、PETボトルは有償で33.4円支払って、引き取ることになる。

表 5 廃プラの入札価格

	2018年
材料リサイクル (メカニカルリサイクル)	54.9円/kg
ケミカルリサイクル	43.3円/kg
PETボトル	-33.4円/kg

出所：容器包装リサイクル協会

4.2 日本のケミカルリサイクル20年の歴史（1999年～2019年）

表 6 に 1995 年以降のリサイクル関連の年表を作成した。1995～2000 年にかけてダイオキシン騒動からダイオキシン類対策特別措置法の施行、容器包装リサイクル法の制定から施行、COP3 開催（京都議定書採択）、循環型社会形成推進基本法制定などプラスチック資源循環と地球環境問題にかかわる重要な法律が制定された。その対応としてリサイクル技術の開発が活発に行われ、1999 年から 2005 年にかけて各種ケミカルリサイク

ルプラントが本格的に稼働を開始した。その中には熱分解法（1999 年～）、コークス炉化学原料化法（2000 年～）、高炉還元剤法（2000 年～）、PS の解重合法（2000～年）、ガス化法（2001 年～）、PET のケミカルリサイクル（解重合法、2003 年～）がある。いずれも世界のトップレベルの開発であり、実用化であった。したがって、日本はケミカルリサイクルの先駆者といえる（半面、多くの困難に見舞われプラント休止や事業撤退に追い込まれた例も多い）。

4.3 欧米のケミカルリサイクルの状況

欧米ではケミカルリサイクルはほとんど実用化されていない。

2018 年 1 月に発表された EU のプラスチック戦略は、マテリアルリサイクル重視でケミカルリサイクルについては期待するという記述だけで言及されていない。また、日本のようなケミカルリサイクルの実績データも見当たらない。なお、ドイツの鉄鋼メーカーStahlwerke Bremen（現 ArcelorMittal Bremen）はコークス炉化学原料化法でかなりの数量（1998 年、約 16 万トン/年）を処理していて¹⁰、現在も続いていると聞くが、どの程度の規模かは不明である。

また、ヨーロッパは廃プラの埋立比率の高い国が依然として数多くある。例えば、イギリス 22%、フランス 33%、イタリア 36%、スペイン 39%、ポーランド 42%である。米国もリサイクルは 10%（2016 年）程度で、残りは埋立か焼却だが埋立が多い¹¹。

循環経済移行の要請から、欧米では廃プラの埋立をやめて、廃プラから燃料や化学品をつくることのできる熱分解法（熱分解油）やガス化法（合成ガス）への転換が喫緊の課題になっている。技術開発が活発で、一部実用化されている。大規模なプラントも建設中である（詳細は続編の本リポート（下）を参照）。

¹⁰ 参考文献⑧、55 頁。

¹¹ 日本の埋立比率は 7%と低い（参考文献⑩、2018 年版、7 頁）。

表 6 日本のケミカルリサイクルを中心とするリサイクル年表(含む環境に関する重要事項)

年	環境に関する重要事項	リサイクル特記事項
1995	12月 埼玉県ダイオキシン騒動始まる 容器包装リサイクル法制定	1991-96・BASF 熱分解油プロセス開発 (パイロット、1.5万トン/年)
1996	1990年代半ばよりPETボトル普及	
1997	COP3開催 (「京都議定書」採択) 容器包装リサイクル法本格施行	
1998		
1999	「ダイオキシン類対策特別措置法」制定、焼却炉からのダイオキシン排出基準、「循環型社会形成推進基本法」制定	○新潟プラスチック油化センターの熱分解油工場稼働
2000	「ダイオキシン類対策特別措置法」施行 容器包装リサイクル法完全施行	○新日鐵/君津、名古屋のコークス炉化学原料化工場稼働 ○日本鋼管/川崎・水江、福山の高炉還元剤工場稼働 ○東芝プラントシステムがPS解重合実証テスト (2年間) ○道央油化センターの熱分解油工場稼働
2001		○イーユービー(宇部興産、荏原) のガス化工場稼働 ○札幌プラスチックリサイクルの熱分解油工場稼働
2002	第一次循環型社会形成推進基本計画	○新日鐵/室蘭、八幡工場稼働 (コークス炉化学原料化)
2003		○昭和電工のガス化工場稼働(川崎) ○帝人がPETボトルのケミカルリサイクルを開始
2004		× 道央油化センターの熱分解油工場停止 ○ペトリバースのPETケミカルリサイクル・川崎工場稼働
2005		○新日鐵の大分工場稼働 (コークス炉化学原料化)
2006		
2007		
2008	第二次循環型社会形成推進基本計画、改正容器包装リサイクル法完全実施、9月・リーマンショック	× 帝人がPETボトルのケミカルリサイクルを休止 ペトリバース破綻し、東洋製罐が引き継ぐ(PRT社に)
2009		2009年以降・PRT社は約2万トンのPETボトル処理
2010	EUがフラグシップイニシアティブにRE (資源有効利用)を据える	× イーユービー(宇部興産、荏原) ガス化工場 (宇部) 停止 ○Cynarがアイルランドの熱分解油工場を稼働
2011	3月11日・東日本大震災	× 札幌プラスチックリサイクル (熱分解油工場) 解散 ○協栄産業がPETのボトルtoボトルを実現
2012		
2013	第三次循環型社会形成推進基本計画	
2014		○Plastic Energyがスペインの熱分解油第1工場を稼働
2015	9月・SDGsを国連サミットで採択、12月・パリ協定	
2016		
2017	12月31日・中国廃プラの輸入禁止	○Enerkemがエドモントン・ガス化工場稼働 ○Plastic Energyがスペインの熱分解油第2工場を稼働
2018	1月・EUプラスチック戦略、6月・G7海洋プラスチック憲章 第四次循環型社会形成推進基本計画	PRT社は東洋製罐資本から日本環境設計資本に ○12月・BASFが熱分解油をナフサクラッキングしてPE、PPに
2019	5月・政府がプラスチック資源循環戦略決定 7月・G20 (大阪ブルー・オーシャン・ビジョン)	日揮、荏原、宇部、昭電が協業して、国内外にライセンスへ ○協栄産業とサントリーの「FtoPダイレクトリサイクル技術」
2020	新型コロナウイルス感染症が世界的流行	
2021	1月・バーゼル条約改定発効 (汚染廃プラの輸出入禁止)	
2030	国連のSDGs目標達成期限、EUボトル再生材規制発効	

注：○印は事業のスタート、×印は撤退・終了。緑地はPETのリサイクル、赤地は熱分解法、黄色地はガス化法、青色はコークス炉化学原料化法と高炉還元剤法。出所：各種資料より旭リサーチセンターが作成。

5. 詳論：PETボトルのケミカルリサイクル（解重合法）¹²

5.1 PETボトルのメカニカルリサイクルとケミカルリサイクルの比較

メカニカルリサイクルの強みはコストが安いことである（リサイクル工程が単純でエネルギー使用量が小さい）。弱みは微小異物を除去しにくいことである。また、原料に使用できるボトルが汚染の少ない無着色品に限られるのも弱みである。

一方、ケミカルリサイクルは汚染のあるボトルや着色ボトルでもリサイクル可能なこと、再生材を飲料・食品用容器に使用できることが強みである。弱みはコストが高いことである。リサイクルに解重合工程（精製工程を含む）と再重合工程の2つが必要なことがコスト高の一因である。

5.2 PETボトルのケミカルリサイクルの実用化と技術開発（参考文献⑦参照）

日本は世界に先駆けて、2003年に帝人がPETボトルのケミカルリサイクル（メタノール分解法）を開始し、2004年にはペットリバーズがPETボトルのケミカルリサイクル（アイエス法、川崎工場（能力2万トン/年））を開始した。ところが、ペットリバーズは2008年に経営が破綻したため、東洋製罐が買収してペットリファインテクノロジー（PRT社）が新たに設立された。PRTは2009年以降、一時期2万トン/年近くの生産を行った。その後、2018年にPRT社は日本環境設計に買収された。

アイエス法はグリコール分解法（MEG分解法）で解重合温度は220℃と高い。解重合で生成した高沸点のBHETを分子蒸留で精製できるようにしたのがアイエス法のポイントである（プロセスの詳細は参考文献⑦の図11を参照）。日本環境設計の川崎工場内には解重合設備と再重合設備（熔融重合と固相重合）がある。一時休止していたが、再開したと聞く。また、日本環境設計はアイエス法技術のライセンス活動中である。

なお、2008年に帝人はケミカルリサイクルプラントを停止した。

最近では、欧米のスタートアップ企業による開発が盛んであり、新規の触媒開発や加熱方法などのプロセス開発が行われている（表7）。

¹² PETボトルの「解重合（モノマー）―再重合」法のこと。

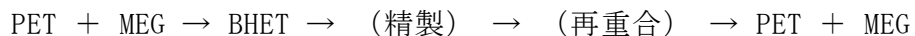
表 7 PET ボトルのケミカルリサイクル(技術開発と実用化)

企業	日本環境設計	Loop Industries	loniqa	IBM	gr3n	Carbios
規模	スタートアップ	スタートアップ	スタートアップ	大企業	スタートアップ	スタートアップ
所在地	日本	カナダ	オランダ	米国	スイス	フランス
プロセス	MEG分解法	メタノール・アルカリ分解法	MEG分解法	MEG分解法	アルカリ加水分解	発酵法(酵素)
特徴	分解温度220°C BHETの分子蒸留	常温・常圧、アルカリ使用	磁性流体にグラフトしたイオン液体触媒	トリアルキルアミン触媒	マイクロウェーブ加熱	発酵法(酵素)
生成物	BHET	DMT、MEG	BHET	BHET	TPA、MEG	TPA、MEG
生産設備年間能力	工業化2004年 2万トン	2万トン(2020年) Indoramaとの合併、倍増計画あり	1万トン(2019年)	なし	なし	デモプラントに 1,000万ドル投資
提携先		Coca-Cola、PepsiCo、L'Oréal、Danoneと供給契約	loniqa、Unilever、Indoramaの3社連合、Coca-Cola出資	なし	EU Horizon2020 支援の DEMETOプロジェクト	Toulouse Biotechnology Institute(共同研究先) 他

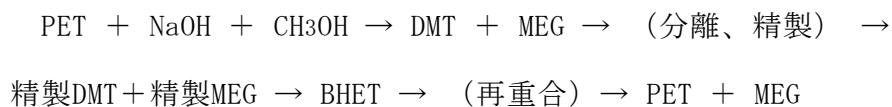
出所：参考文献⑦などを基に旭リサーチセンターが作成。

表7に記載のプロセスを化学式で表すと以下のようになる。

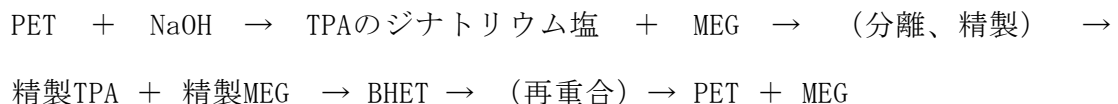
a. MEG分解法(グリコール分解法)



b. アルカリを触媒的に使用したメタノール分解法(推定)



c. アルカリ加水分解法



注) TPA:テレフタル酸(HOOCPhCOOH)。MEG:モノエチレングリコール($\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$)。

BHET:ビス(2-ヒドロキシエチル)テレフタレート($\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{OOCPhCOOCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$)。

DMT:ジメチルテレフタレートまたはテレフタル酸ジメチル($\text{CH}_3\text{OOCPhCOOCH}_3$)。

表7の中では、Loop Industries（カナダ）の技術（常温常圧で解重合）が最も注目されている。Loop Industries は当初、アルカリとメタノールを使ってTPA（テレフタル酸）とMEG（モノエチレングリコール）に分解していたが、現在はDMT（ジメチルテレフタレート）とMEGに分解する方法に変更している。その理由は、TPAは精製が難しいがDMTは精製が容易なためであると述べている。

Loop Industries は、PET樹脂の世界的リーダーであるIndorama Ventures（タイ）と合弁会社を設立し、Indorama Venturesの米国PET工場内に解重合プラントを建設中である（表7）。再重合工程は既存のPET重合設備を利用するものと思われる¹³。

Loop Industriesは、Coca-Cola、PepsiCo、L'Oréal、Danoneとすでに再生PET樹脂の供給契約を結んでいる。

また、Ioniqa（オランダ）の技術（磁性流体に担持したイオン液体触媒）も注目されている。Coca-Colaが資金援助している。

一方、Carbios（フランス）は発酵法でPETを分解するユニークな方法を開発中で、デモプラント建設に1,000万ドルを投資することは知られていた。その技術内容は明らかにされていなかったが、最近（2020年4月8日）、CarbiosはToulouse Biotechnology Institute (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、それに関する論文が雑誌『Nature』に掲載されたことを発表した¹⁴。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、10時間で90%に向上した¹⁵。2021年にはリヨン郊外のFrench Chemical Valleyに実証プラントを設け、テストの予定である。対象のPETとしては使用済みボトルだけでなく、使用済み繊維製品も考えている。

そのほか、IBM、gr3nもPETのケミカルリサイクルの開発を進めている。

¹³ PETボトルのリサイクル率が高まるので、将来は既存のPET重合設備が余る可能性がある。余った設備で解重合モノマーを再重合すれば好都合である。

¹⁴ <https://carbios.fr/en/carbios-announces-the-publication-of-an-article-on-its-enzymatic-recycling-technology-in-the-prestigious-scientific-journal-nature/>
<https://www.nature.com/articles/s41586-020-2149-4> (An engineered PET depolymerase to break down and recycle plastic bottles)

¹⁵ Nature 論文の抜粋: Here we describe an improved PET hydrolase that ultimately achieves, over 10 hours, a minimum of 90 per cent PET depolymerization into monomers, with a productivity of 16.7 grams of terephthalate per litre per hour (200 grams per kilogram of PET suspension, with an enzyme concentration of 3 milligrams per gram of PET).

5.3 EUのボトル規制（2019年5月）と飲料メーカー各社の対応

表8に示すように、EUのPETボトルを中心とするプラスチックボトルの回収率目標は、2025年77%、2029年90%であり、rPET（再生材）の使用比率はPETボトルは2025年25%以上、プラスチックボトル（PETボトルなど）は2030年30%以上となっている。

これに対応して、2019年5月にサントリーは2030年にPETボトルを再生材PET（rPET）と植物由来PETに100%切り替えると発表した。また、2019年7月に日本コカ・コーラは2030年にボトルtoボトルを90%にする計画を発表した。一方、グローバルにはPETボトルの再生材含有率目標として、Coca-Colaは50%（2030年）を、PepsiCoは25%（2025年）を、Nestlé Watersは50%（2025年）を、Danoneは50%（2025年）を目指している¹⁶。

表 8 EU のプラスチックボトル(PET ボトルなど)の規制と大手飲料メーカーの対応

	EU	サントリー	Coca-Cola		Pepsico
	EU政府	飲料メーカー	世界	日本コカ・コーラ	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」	
ボトル回収率目標	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 Loop Industriesと供給契約		Loop Industriesと供給契約
バイオ(植物由来) PETの開発		Anellotech(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%

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。

¹⁶ <https://www.beveragedaily.com/Article/2020/03/06/Coca-Cola-PepsiCo-Nestle-How-packaging-sustainability-commitments-compare>

おわりに

1. メカニカルリサイクルが難しいために埋め立てられていた混合廃プラをケミカルリサイクルによって、バージン並みのプラスチックに再生できることは素晴らしいことである。今後、この動きが世界的に広がることが期待される。

2. ケミカルリサイクル手法の中で、「熱分解（油）－ナフサクラッキング」法が一番注目される。ただし、熱分解油の供給能力の大幅拡充とコスト競争力強化の課題があり、また熱分解油中のナフサ成分の比率が低い問題を解決する必要がある。

将来熱分解法がリサイクルの切り札になるか、それともわずかな数量にとどまり免罪符に終わるかは注視していきたい。続編の本リポート（下）で議論する。

3. ケミカルリサイクルの分野にも植物由来プラスチック（バイオマスプラスチック）やバイオケミストリーの新しい波が押し寄せている。Neste と LyondellBasell が実証した植物油廃棄物を原料とする熱分解法によるバイオ PE やバイオ PP の製造、Carbios が開発した酵素を使った PET の解重合技術、Enerkem が開発した木質原料のガス化によるバイオメタノールとバイオエタノールの製造などである。これらについては、本リポートの（下）で詳しく述べる。

4. 本リポートの（下）では、ポリスチレン（PS）のケミカルリサイクル（解重合法）、混合廃プラの熱分解法、混合廃プラのガス化法について詳しく述べる。

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
- ⑦ 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

(2) 全般

- ⑧ 経済産業省「プラスチックのケミカルリサイクルの動向調査」報告書（ダイア
リサーチマーテック 2005年）
[https://www.meti.go.jp/policy/recycle/main/data/research/h16fy/160629-
1_drmi.html](https://www.meti.go.jp/policy/recycle/main/data/research/h16fy/160629-1_drmi.html)
- ⑨ プラスチックリサイクル化学研究会監修「プラスチック再資源化の基礎と応
用」シーエムシー出版 2005年（普及版 2012年）
- ⑩ プラスチック循環利用協会「プラスチックリサイクルの基礎知識」（2018,
2019）
- ⑪ 日本容器包装リサイクル協会「年次レポート 2018、2019」

<本リポートのキーワード>

プラスチックケミカルリサイクル、解重合、熱分解、ガス化、コークス炉化学原料化、高炉還元剤、EU プラスチックボトル規制、PET のケミカルリサイクル、クローズドループ

(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