

触媒懇談会ニュース

触媒学会シニア懇談会

プラスチックリサイクル

元出光興産 蔵本正彦

1. はじめに

日常生活の中で、合成高分子は非常に多くのところで使用されている。テレビ、ラジオ、洗濯機、CD プレーヤー等の電化製品類、種々の容器類や食品を始めとする包装類、自動車部品類などがあり、私たちにとって身近な材料である。その性質からプラスチック材料と呼ばれている。代表的には、ポリエチレン、ポリプロピレン、ポリスチレンなどの付加重合体やポリエステル、ポリカーボネートなどの縮合重合体がある。モノマーはナフサから大量に安定的に得られる石油原料が利用され、重合触媒や重合プロセスの発展と共に効率的に得られている。

2016年のプラスチック国内生産量は1,075万トンでその内訳を表1に示す。

表1 プラスチック生産量内訳 (2016)

ポリエチレン	257万トン
ポリプロピレン	247万トン
塩化ビニル樹脂	165万トン
ポリスチレン	118万トン
その他熱可塑性樹脂	173万トン
熱硬化樹脂	90万トン
その他樹脂	26万トン

プラスチックの国内生産量は2,000年よりやや少なくなっているが、それでも表1に示すように現在も約1,000万トンの

生産を続けている。特にポリオレフィンは約500万トンが生産されており、継続して広く利用されている。

一方、最近、資源・環境の観点から脱石油系としてバイオマス由来のプラスチックの開発が進められている。また、使用後の廃プラスチック問題がニュースで取り上げられることも多くなってきている。

そこで本報では、プラスチック製造の観点ではなく、資源としてのプラスチック再利用(リサイクル)という点にフォーカスして紹介すると共に、最近話題の廃プラスチック問題についても触れてみたい。

2. プラスチックの再利用

プラスチックは、軽くて丈夫、さびや腐食に強い、大量生産が可能、電気特性が優れる、発泡体などの断熱性が高い、衛生的などの長所を有しており、多方面で利用されている。石油(ナフサ)を原料としており、資源・環境の面から材料を少なく、かつ有効活用しようとする活動も活発に行われている。3R(Reduce リデュース、Reuse リユース、Recycle リサイクル)が良く知られており、

◇Reduce は、モノを大切に使用する。製造ロス削減や、使用する資源量を少なくする、産業廃棄物を少なくすることなどがなされている。

◇Reuse は、使用できるものは繰り返し

使用する（製品の再利用）。

◇Recycle は、ゴミ（廃棄物）を資源として原材料などへの再利用やエネルギーとして有効利用することが考えられる。

リサイクルの方法としては、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に大別される。プラスチックのリサイクルについては、プラスチック循環利用協会発行のプラスチックリサイクルの基礎知識²⁾や廃棄物資源循環学会発行のプラスチックリサイクル入門³⁾に詳しく紹介されているので、ここでは抜粋して現状を紹介する。

3. 廃プラスチック排出量と利用

2016年のプラスチック生産量 1,075 万トンに対し、消費量は 980 万トン、その内、廃プラ総排出量が 899 万トン、有効利用量は 759 万トン、有効利用率は 84%である。廃プラスチックの総排出量・有効利用量・有効利用率の推移(抜粋)を表 2 に示す²⁾。

表 2 廃プラスチックの総排出量・有効利用量・有効利用率の推移²⁾

年	2004	2010	2016
廃プラ総排出量	1,013	945	899
有効利用量(内訳)			
マテリアルリサイクル	181	217	206
ケミカルリサイクル	30	42	36
サーマルリサイクル	364	465	517
合計	575	723	759
有効利用率(%)	57	77	84

廃プラスチック総排出量は生産量の低下と共に低下傾向にあるが、有効利用率は、2000年前後は 50%程度であったのに対し、年々、向上しており、2016年には 84%となっており、リサイクルに対する取り組み強化の努力がみられる。

2016年のリサイクル方法内訳をみると
 マテリアルリサイクル 206 万トン(23%)
 ケミカルリサイクル 36 万トン(4%)
 サーマルリサイクル 517 万トン(58%)
 残りの 16%(未利用廃プラ)は、単純焼却や埋立などとなっている。リサイクルとして

はサーマルリサイクルの比率が多く、マテリアルリサイクルは、如何に多量の分別回収ができ、その後の処理費用が余りかからず、効率的にできるかにかかっている。

マテリアルリサイクル (206 万トン) は
 ・一般廃棄物から 68 万トン(33%)
 ・産業廃棄物から 138 万トン(67%)
 更に、
 ・使用済品 134 万トン(65%)
 ・生産加工ロス品 72 万トン(35%)
 となっている。

使用済品 (134 万トン) の内、ペットボトルが 50 万トン、包装用フィルムが 21 万トン、発砲スチロール梱包材などは 7 万トンである。そこで、プラスチックのリサイクル方法について紹介する。

4. プラスチックのリサイクル

環境省では 1991 年「再生資源利用促進法」、2001 年「資源有効利用促進法」(名称変更)とゴミ容積をとるペットボトルや発泡ポリスチレンを主たる品目に挙げ、資源の有効利用をはかる仕組みを作った。更に 1995 年「容器包装リサイクル法」を交付し、分別排出、分別収集、再資源化を消費者、市町村、事業者がそれぞれ責任を負う仕組みを作った。回収時に材質別に集めやすいように「PE」、「PP」、「PS」などの表示がなされている。年々、回収量は増えてきており、市町村から再商品化事業者への引き渡し量は、表 3 に示す様にペットボトルが約 29 万トン、プラスチック製包装容器が約 67 万トン(2010:環境省)となってきた⁴⁾。

表 3 市町村から再商品化事業者への引き渡し量 (環境省:トン)⁴⁾

年	ペットボトル	プラスチック製容器包装
1997	19,330	
2000	117,877	77,568
2005	244,026	538,123
2010	286,009	671,704

また、環境省は、容器包装リサイクル法

の対象外で焼却・埋立による処置が行われている生活用品等の製品プラスチックの効率的な回収・リサイクルを促すため、店頭回収による実証事業「BRING PLA-PLUS（プラプラ）プロジェクト」を実施している⁵⁾。

4. 1 プラスチックのリサイクル技術

種々の方法にて回収・集積された廃プラスチックを有効に活用するために先ず、選別が行われ、マテリアル、ケミカル、サーマルリサイクルなどに利用される。

4. 1. 1 選別技術

回収プラスチックを選別するには、プラスチックとプラスチック以外とに分別する方法とプラスチックの種類を分別する方法がある。その方法としては、比重で分ける比重分離法、水中の気泡付着力を利用した浮遊分離法、摩擦帯電を利用した誘電分離法、人手や色彩による識別分離法、篩や磁力を利用した異物分離法などがあり、回収された材料によって選択されている³⁾。

4. 1. 2 マテリアルリサイクル

マテリアルリサイクルでは、異物除去、選別され、その後、破碎、洗浄工程を経て添加剤を入れた後に造粒されペレット化される。ペレット化されたものは、通常の製造ラインにて種々の製品に再生され、利用される。マテリアルリサイクルは、廃プラスチックをプラスチックのまま原料にして新しい製品を作る技術であり、基本的には、廃プラスチックを粉碎・熔融してペレット化して成型機にて再度プラスチック製品として利用するものである。材料が同じもの、異物のないものが良い。産業系プラスチックの方が、一般廃棄物に比べ、樹脂の種類がはっきりしていることや汚れが少ない、量的に確保できることなどから利用されている。また、家電リサイクル法にて回収された洗濯機、冷蔵庫、複写機などに使用されているプラスチックは再生工場にて再利用されている。

ここで回収・再利用が特に系統的に

進んでいるペットボトル、発砲スチロールなどについて紹介する。

① ペットボトルのリサイクル

包装リサイクル法によって、自治体にて回収されたペットボトルは、異物除去などを行った後、圧縮梱包され、各再生商品化事業者へ送られ、工場にて再度ペレット化され出荷され、利用されている⁶⁾。

既に、協栄産業（株）、J F E環境（株）、日本環境設計（株）、中央化学（株）、帝人ファイバー（株）などで事業化され、リサイクルとしても進んでいる⁷⁾。一例を挙げると

回収PETボトル→選別→粉碎→フレーク洗浄（再縮重合）→ペレット化→ペレット再結晶化→出荷
のような工程を経て、再利用される。

ペットボトルといっても容器とキャップ、ラベルとで材料が異なるため、キャップ、ラベルと容器とを分別する必要があり、容器部分がPETとして再生利用される。

帝人（株）では、廃ペットボトルから繊維やシート用としてリサイクルする技術を確立し、帝人ファイバー（株）に2003年に約6万2千トンの設備を稼働させた。更に、ボトル to ボトルへの再生事業も2004年にスタートさせたが、廃ペットボトルの中国への輸出が多くなり、回収ペットボトルが落札できなくなり、ボトル to 繊維に移行している。ただ、中国の状況は後述するように最近、大きく変化している。

② 発砲スチロールのリサイクル

発砲スチロールは、ほとんどが単一素材でできており、分別が容易で、熱や溶剤・圧縮により体積を減らす減容が可能であり、リサイクル特性に優れている。リサイクルについては、発砲スチロール協会のホームページに紹介されている⁸⁾。

使用済みの発砲PSのリサイクルとしては、マテリアル、ケミカル、サーマルケミカルすべてに行われている。処理方法も他のプラスチックと同様である。

4. 1. 3 ケミカルリサイクル

ポリオレフィンやポリスチレンなどは、モノマーの重合体であり、熱分解温度を有しており、熱すると熱分解が起きるため、モノマー回収もできるが、全体的に低分子のオリゴマー（液状物）が生成し、分布も広く単品として回収しづらいため、混合物として利用される。ゼオライト（ZSM-5など）触媒による熱分解では分布は狭くなり、C8成分を中心にしたものが得られるとのことである³⁾。

ポリスチレンはラジカル重合体であるので比較的スチレンモノマーとしての回収ができ、原料の60%程度までモノマーとして回収できることが報告されている。ただ、ケミカルリサイクルとしては、現実的にはモノマーとしての再利用というより、熱分解物を高炉還元や油化、ガス化、コークス炉化学原料として利用されている³⁾。

昭和電工（株）川崎事業所では廃プラスチックを原料として加圧二段プロセス（「低温ガス化炉」＋「高温ガス炉」）にて合成ガスを製造し、得られたH₂からアンモニア合成を行っている⁹⁾。

ポリエステルやポリカーボネートでは解重合により、モノマーを回収して再利用（ケミカルリサイクル）を行うことが進められている。PETの分野では、アイエス（株）法：回収PETをエチレングリコール中で分解し、更に分子蒸留して、高純度BHET（テレフタル酸ビスヒドロキシエチル）を得る方法や帝人（株）法：メタノール分解、更に加水処理してTPA（テレフタル酸）として回収して、ポリエステル原料として再利用する方法も検討されている。また、ポリカーボネートでは、解重合により、原料のビスフェノール-Aを回収するプロセスも検討されている³⁾。

ポリ乳酸は、石油系と異なり、バイオマス由来のプラスチックである。汎用プラスチックに比べてまだ利用量は少ないが、バイオプラスチックということもあり、資

源・環境面で注目されている。更にリサイクルも比較的容易とのことである。水蒸気分解で乳酸オリゴマー、更にラクチドが得られるので、これを重合すればまたポリ乳酸が再び得られるため、理想的なケミカルリサイクルができることになる。そのリサイクルシステムについては九州工業大学の西田治男教授¹⁰⁾や白井義人教授¹¹⁾らにより、提案されており、分解反応に適した酸化マグネシウム触媒も見いだされている。北九州にあるエコタウン実証研究センターにて生活ごみからの再利用（リサイクル）実証研究が積極的に検討されている。

4. 1. 4 サーマルリサイクル

廃プラスチックの触媒による分解は1970年代から研究が始まり1980年代後半には接触分解の研究は盛んに行われた。触媒の大半は酸化物で、シリカアルミナが代表的な触媒であるが、近年ではゼオライト系触媒が主流で、ポリオレフィン分解反応を促進する有効な触媒といわれている。

ガス化溶融炉はガス燃焼炉とガス改質式があり、炉形式としては流動床式、シャフト式、キルン式などが知られている。

一方、エネルギーを最大限利用するためにごみ焼却炉のボイラーが重要な設備として捉えられている³⁾。

5. 廃プラスチックの問題

5. 1 中国問題

これまで、原料確保の観点から廃プラスチックの輸入国であった中国が、中国国内の公害問題も考え、2017年12月末に生活由来の廃プラスチックなどの輸入禁止を発表した。これまで日本国内の廃プラスチック（資源となりうるペットボトル等）が中国に多く輸出されていたのが、今後、中国には輸出できなくなった。このような状況に対し、環境省は、直ちに中国の廃プラスチック輸入禁止に伴う国内リサイクル体制整備の緊急支援を発表した。（2017.11.22）

中国の廃プラスチック輸入禁止により、再度、国内リサイクルシステムを見直す必

要が出てくると考えられる。中国はプラスチックのみならず古紙についても輸入禁止を打ち出しており、製紙業界への影響も懸念される。

5. 2 プラスチックごみ問題

プラスチックは軽く、安定なものが多いため、ごみとして河川や捨てられると河口付近に大量に集積され環境問題（衛生、景観）として議論されていた。これらは、生活排水や産業廃棄物を含んだ廃棄物である。特にアジア地域のインドネシア（チタルム川）、フィリピン（パッシング川）、バングラディッシュ（ブリガンガ川）など酷い汚染状態が報道されている。これら汚染物は河口から海へと流れ、更に船舶からの廃棄物や漁具類（漁網やブイなど）と共に、海洋浮遊・漂流物となっている。海洋汚染については 1997 年にチャールズ・モア船長が海洋汚染調査を行い、北太平洋のプラスチック漂流物の集積状態を発見し、その状態を「北太平洋巨大ごみベルト」や「プラスチックスープの海」と呼び海洋汚染に警鐘を鳴らしている¹²⁾。

最近では、環境問題だけでなく、海洋生態系への影響が懸念されている。プラスチックは波や紫外線で細かく砕けていくが、直径 5 ミリ以下のプラスチックは「マイクロプラスチック」¹³⁾¹⁴⁾といわれ、水鳥や魚類などの海洋生物が餌と間違えて誤飲して体内に取り込まれていることが報告されている。プラスチックストローがウミガメの鼻に突き刺さった映像が象徴的に取り上げられたこともあり、警鐘とともに「使い捨てプラスチック」の削減あるいは代替の声が広がりを見せている。

既に、マクドナルドやスターバックスでは、相次いで使い捨てのプラスチックストローの使用禁止を発表した。次いで、米国ウォルト・ディズニー社、すかいらーくホールディング、IKEA なども今後、使い捨てプラスチック、まずはストローを使用しない方向であることが発表されている¹⁵⁾。

日本プラスチック工業連盟では、2017 年に「プラスチック海洋ごみ問題の解決に向けた宣言活動」を開始している。

環境省は、プラスチック製品の原料を植物由来のバイオマスプラスチックや紙に切り替える企業に対する補助制度を創設する方針を決めた。また、プラスチックごみ削減やリサイクルを推進する「プラスチック資源循環戦略を来年 6 月までに策定予定であると報道されている。

使い捨てプラスチック問題については、まずは、自然界への投棄をせず、きちんと処理システムに乗せること、企業や国（自治体）は回収システムをしっかりと整備すること、回収された廃棄プラスチックを資源として有効にリサイクル利用することである。ただ、ごみの投棄が減らないのも現状であり、マイクロプラスチックになる前に除去・回収（清掃）を行うことも大切である。東京湾では国土交通省の海洋浮遊物回収船「べいくりん」も活躍して東京湾上の浮遊物（流木も含む）除去を行っている。また、ボランティア活動にて河川、海岸の清掃活動が行われている。

プラスチックストローやカップのキャップについては、代替品として、紙、天然物（ビンロウ落ち葉）、生分解性プラスチックや石灰石複合物なども候補に挙がってきている¹⁶⁾。これら材料が海洋汚染問題の解決手段となりうるかは、耐水性や海洋環境における分解速度との関係や分解物の生態系への影響の有無等が議論されていくことであろう。

4. おわりに

プラスチックは現在の生活を支える重要な材料であり、現在、安定的に供給されている。その特性を理解し、上手に利用するとともに資源の有効活用の面から、できるだけリサイクルを考えていくことが大事である。効率的に回収・利用率を上げるために、材料（グレード）の統一や回収システムも工夫されてきている。

海洋汚染問題については、地球全体の問題として考えていかなければならない。

今後、用途・使用環境に合った材料選定や分解触媒の開発などが求められてくると予想される。

参考文献

- 1) 石油化学工業協会：「石油化学工業の現状」（2017版）
- 2) 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、
- 3) 廃棄物資源循環学会リサイクルシステム・技術研究部会：プラスチックリサイクル入門—システム・技術・評価、技報堂出版
- 4) 日本プラスチック工業連盟：「廃プラスチックの処理と再資源化」
- 5) 環境省 HP
- 6) PET ボトルリサイクル推進協議会 HP
日本容器包装リサイクル協会 HP
- 7) 各社 HP
- 8) 発泡スチロール協会 HP
- 9) 昭和電工 HP：昭和電工 K P R
- 10) 西田治男：明専会報 2012.11.12
- 11) 白井義人：ケミカルリサイクルについて「グリーンプラスチックのケミカルリサイクル」
- 12) チャールズ・モア：プラスチックスーパーの海、NHK 出版
- 13) 府川伊三郎：マイクロプラスチック，ARC レポート 2017，旭リサーチセンター
- 14) NHK：2015.10.29 クローズアップ現代
- 15) 朝日新聞：2018.08.30
- 16) テレビ朝日：2018.09.12 未来世紀ジパング