

総説 (Review)

プラスチックごみのリサイクルと処理・処分方法の変遷

坂本広美 (調査研究部)

The change of waste plastics recycling, treatment and disposal methods

Hiromi Sakamoto (Research Division)

キーワード: プラスチック, リサイクル, 最終処分

1 はじめに

海洋プラスチックごみの問題は、いまや世界的に解決しなければならない課題という認識が共有化されている。このまま何の対策を取らなければ、海洋に漂うプラスチックごみの量は、2050年には魚の重量を上回ると推計されていることもあり¹⁾、現在環境科学センターにおいて、マイクロプラスチックに関する調査研究を進めているところである。プラスチックがここまで広く使用されてきた要因は、改めて言うまでもなく、「軽くて丈夫」という利点が非常に大きいためである。過去からこれまで、使用済みのプラスチックについては、どのように適正処理すればよいか、あるいはどのようなリサイクル方法が適切かなどの議論が様々になされてきた。特に家庭から排出される容器包装プラスチックについては、現在のところ「容器包装に係る分別収集及び再商品化の促進等に関する法律（以下、容リ法）」の枠組みでリサイクルされているものが多くなっている。環境科学センターにおいても、過去にプラスチックごみに関するいくつかの調査研究を実施しており、解決すべき課題の抽出などに努めてきた経過がある。

本稿では、主として一般家庭で使用されているプラスチック製品が、使用後ごみになった際、どのように処理・処分あるいはリサイクルされてきたのか、また、過去にはどのような課題があり、どのような過程を経て現在に至っているのかについて解説したい。

2 容リ法が導入されるまで

2.1 プラスチックは燃えないごみ

一般廃棄物の処理・処分については市町村が責任を負っている。日本国内においては、狭い

国土に加えて、現在も COVID-19 が世界的流行になっているように、過去においても感染症拡大の危険を防止するための衛生的な処理が求められたため²⁾、焼却処理が主流になっている。最新の 30 年度の報告では³⁾、直接焼却率が 80.1%であり、一時よりはリサイクルが進んだことから、減少傾向になっている。とはいえ、高度経済成長期に大量に排出されたごみの処理・処分に対しては、その時々に応じて、各自治体が苦勞しながら進めて来た。神奈川県内では自治体によってその方法が異なる一方、東京都（特別区 23 区のこと、以下同様）は一律でわかりやすいためそれを参照すると⁴⁾、昭和 35 年当時は、ごみの 8 割以上が埋立処分されていた。また、わずかに焼却されていたごみについても、水分が多い生ごみ主体であったことから、ごみのカロリーも低く、焼却炉で不完全燃焼を起こすなど、炉の構造とのミスマッチがあったと述べられている。それが、昭和 40 年代に入ると、プラスチックごみの量が著しく増加した。表 1 に東京都におけるごみ組成の推移を示す⁵⁾。

表 1 東京都におけるごみ組成の推移 (wet ベース)⁵⁾
(単位%)

		1963年	1968年
可燃物	紙類	24.8	35.2
	プラスチック	2.2	8.7
	繊維	3.6	3.8
	厨芥	37.3	22
	その他可燃物	7.6	18.3
不燃物	金属	2.1	2.3
	ガラス	2.0	3.6
	その他不燃物	20.4	6.1
計		100.0	100.0

特にプラスチックは、燃やすとその高い発熱量によって焼却炉を損傷すること、主として塩化ビニル (PVC) による焼却炉内での高濃度塩化水素ガス発生の問題が浮上したこと、また一説にはプラスチックの安定剤として使用されていたカドミウム (Cd) が原因と言われているが、排ガスを經由して排水中から Cd が基準超過の状態で排出されたこと⁶⁾、加えて「ごみ戦争^{*注1)}」の真ただ中であつたことなどが重なつたため、昭和49年からは、全都一斉にプラスチックの分別収集を開始した。この時点で、科学的には正しいとは言えないものの、プラスチックごみが「燃えないごみ(実際には焼却不適ごみ)」へ分別されることになった。当時から、プラスチックごみは大きな問題を抱えていたのである。

2. 2 プラスチックの埋立処分とその後

その後、プラスチックごみについては、埋立処分される自治体が多くなつたが、軽くて容積が大きく、しかも分解性が低いことから、処分場の寿命を短縮するという新たな問題を引き起こすことになった⁶⁾。県内の自治体でも、将来的にエネルギーとして活用できるように、プラスチックごみを圧縮して埋立処分していたところもある。一方で、全連続機械式焼却炉の登場および昭和48年のオイルショックに伴う時代背景により、焼却炉の熱利用、いわゆる「ごみ発電」が導入されるようになった。炉の耐火性能も時代とともに進んだため、それを見極めながら、横浜市および川崎市のように、プラスチックごみを焼却したり、粗大ごみ・不燃ごみ中の軽量物(プラスチックが主体)などを焼却することにより、発電効率を上げる取り組みを進めた自治体も多かった。

2. 3 プラスチックの埋立処分に関する研究

神奈川県内には、昭和40年代後半から50年代に埋め立てられた、多くの産業廃棄物の最終処分場が存在する。昭和52年3月に「一般廃棄物の最終処分場及び産業廃棄物の最終処分場に係る技術上の基準を定める省令」が施行されているが、それ以前に埋め立てられた処分場については、この基準が適用されない、いわゆる「旧処分場」と呼ばれるものとなり、前述したほと

んどの処分場がその範疇になる。これらの中には管理型処分場も存在するが、多くが水処理施設の設置義務がない安定型処分場であり、埋立物としては、安定5品目と呼ばれる廃プラスチック類、ゴムくず、金属くず、ガラスくず・コンクリートくずおよび陶磁器くず、がれき類に限定されている。基本的には、有害物あるいは有機物が付着・混入しているものを除くこととされており、平成9年には規制強化がなされ、廃プラスチック類であっても、自動車あるいは電気製品のシュレッターダストなどは、鉛などの溶出が問題であることが確認されたため、除外されている。余談ながら、この時に石こうボードについても安定化物から除外されたため、現在管理型処分場である県営のかながわ環境整備センターにおいて、受け入れ量が多くなっている。

環境科学センターでは、衛生研究所に廃棄物部門が存在した頃から、これらの処分場の浸出水および処理水の検査を継続して実施している。その中で、浸出水に含まれる有機系化学物質に関する取り組みも実施していたが、1994年には、管理型処分場に敷設してあるPVC製しゃ水シートから、当時軟質PVCの安定剤として使用されていたビスフェノールA (BPA) が検出されることを明らかにしている⁷⁾。それと並行して、'94年から'95年にかけて、国立環境研究所と当センターも含めた他の地方自治体の環境系研究機関の共同研究が実施されており^{8,9)}、その結果、浸出水中からの検出率が高かつた物質はBPAおよび1,4-ジオキサンであつた。

BPAは90年代後半に内分泌かく乱化学物質(いわゆる環境ホルモン)として注目され、環境省が公表したリスト(SPEED'98)に掲載されたため、非常に多くのデータが蓄積されている。また1,4-ジオキサンについても、この当時は未規制物質であつたが、平成21年11月に、「公共用水域の水質汚濁に係る人の健康の保護に関する環境基準(水質環境基準)」および「地下水の水質汚濁に係る環境基準(地下水環境基準)」として、0.05 mg/L が設定されている。いずれも親水性が高い物質であるが、それぞれの性質は少

*注1:「ごみ戦争」という言葉は、東京都の美濃部知事が、昭和46年9月の都議会で宣言したもの^{5,6)}。昭和41年杉並清掃工場の建設計画を発表したが、周辺住民による建設反対運動を契機として、都と住民の全面対決となつた。加えて、その前年にあつた夢の島(江東区にある都の海面処分場)からハエ・ネズミが大量発生する事態(ごみのほとんどを埋立処分していたため、衛生状態が悪かつたことが原因と言われている)を受け、江東区が新たな処分場の建設(延伸)に反対を表明し、都と22区に対して「自区内処理」及び「迷惑の公平負担」を訴え、ごみを巡る社会のあり方を問う次元にまで到達した。

しずつ異なっている。軟質 PVC からの BPA の溶出は、水と接触するたびに少しずつ起こることが明らかになっている¹⁰⁾。図 1 に 1 例を示す。

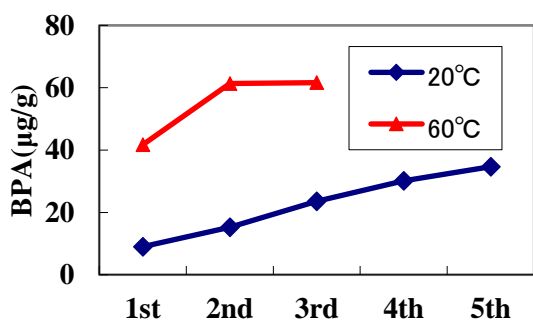


図 1 軟質 PVC の繰り返し溶出試験結果¹⁰⁾

対象物を変えず、水のみ入れ替えた溶出試験を 5 回繰り返して実施したが、毎回一定量の BPA が溶出した。このことから、最終処分場から排出される BPA についても、降雨のたびに雨水と接触することにより、少しずつ排出されることが予想された。実際の処分場において、継続的にモニタリングを実施したところ¹¹⁾、大雨(100 mm 以上の降雨)のたびに、濃度の上昇が認められる結果となった。また、BPA はアルカリに溶解しやすいため、焼却灰と軟質 PVC を混合埋立した場合に、高濃度で検出されることも明らかになった¹⁰⁾。

一方、1,4-ジオキサンについては、当時その起源が完全には明らかにならなかった。しかしながら、BPA より親水性が高く、水に無制限に溶解するとの報告があり¹²⁾、またわずか 1 例ではあるが、帯電防止剤含有 PVC シートにおける溶出試験の結果、水との 1 回の接触により、溶出が完了することが明らかになった。したがって、降雨が浸透し、埋め立てられた廃棄物と接触すれば、1,4-ジオキサンの溶出がほぼ完了するのではないかと推測している¹³⁾。また、1,4-ジオキサンは熱分解によって生成する可能性が以前から指摘されており¹⁴⁾、実際に一部の焼却施設において、バグフィルターで捕集された飛灰から高い濃度で検出されることが明らかになったため¹⁵⁾、環境省では、水の環境基準だけでなく、「廃棄物の処理及び清掃に関する法律(以下、廃棄物処理法)」の規則改正を平成 25 年 1 月に公布し、1,4-ジオキサンを基準以上に含むばいじん、廃油および汚泥について、特別管理産業廃棄物に指定している。

BPA の用途は多岐にわたっていたが、軟質 PVC の安定剤としての使用については、2000 年に日本ビニル工業会などが、自主的に使用禁止にしている¹⁶⁾。また、製紙用顔色剤としての使用についても、同時期中止している。残っている主たるものは、ポリカーボネート樹脂(PC)のモノマー原料としての用途、エポキシ(EX)樹脂の原料としての用途およびポリエステルの中間体としての用途である。このうち、製品からの溶出が考えられるのは、PC および EX 樹脂であるが、PC からの溶出は、軟質 PVC と比べて少ないことから¹⁰⁾、新しい処分場からの BPA の溶出は、大幅に減少することが推測される。BPA が排出されても、水処理が比較的容易であることも、安心できる材料の 1 つである。

一方の 1,4-ジオキサンについては、ばいじん以外の発生源として、過去に使用されていたウレタン樹脂あるいはポリスチレン(PS)等の帯電防止剤など、やはりプラスチックに由来するものが多くあることが明らかになっている¹⁷⁾。過去に埋め立てられた安定型処分場から検出された 1,4-ジオキサンについては、これらの廃プラスチックに由来する可能性が高いと考えられた。ただし、1,4-ジオキサンは分解しにくいことから、オゾン処理などが必要とされている¹⁸⁾。現在は環境基準も設定されているため、監視は強化されていると考えてよいだろう。

2. 4 廃プラスチックのリサイクル

高度経済成長期以後は、当然ながら家庭ごみと同様、産業廃棄物の排出量も増大した。産業廃棄物の全国総排出量は、1980 年度が 2 億 9200 万トン、1985 年度は 3 億 1200 万トンで、5 年間に 6.8 % 増加した。さらにバブル経済期を経過した 1990 年度には、3 億 9500 万トンまで増加し、5 年間の増加率は 26.6 % であった⁵⁾。このバブル経済による廃棄物の急増により、不法投棄の誘発あるいは最終処分場がひっ迫化し、1991 年(平成 3 年)の廃棄物処理法大改正によって、ようやく適正処理だけでなく、排出抑制、分別収集および再生利用が明記された。

これにより、産業廃棄物である廃プラスチックでは、最も事業者が取り組みやすい、製造工程から排出される端材の再生利用が進められた。これまでは、残念ながらそれすらもほとんど取り組まれていなかったのである。もちろん、プラスチックの性質として、熱履歴がかかるほど

劣化が進行するという特徴があることもリサイクルが進みにくかった原因となっている。当時の廃プラスチックリサイクルの優等生は、黒いポリエチレン（PE）製のごみ袋（100%再生品）であった。色が黒いこともあり、様々なポリエチレン製品を再生利用することが可能であったが、その後、ごみ収集作業員の安全性が考慮されたり、一部自治体では有料の指定ごみ袋へ変更されたため、黒いごみ袋の製造は縮小されている¹⁹⁾。

2. 5 ダイオキシン問題とプラスチックごみ

一方で、1970年代には、ベトナム戦争において、米軍が大量に使用した枯葉剤^{*注2}に、高濃度の2,3,7,8-テトラクロロジベンゾ-1,4-ジオキシン（TCDD）が含まれていたことから、現地住民に流産、皮膚疾患、がん、先天性欠損症、先天性奇形が高頻度で発生した²⁰⁾。加えて、'76年にはイタリア北部の都市、セベソの農薬工場における爆発事故においても、2,4,5-トリクロロフェノール（TCP）製造に伴う副生成物であるTCDDが広範囲に拡散し、家畜等の死亡あるいは子供の皮膚疾患が確認されたことなどから、「史上最強の毒物」という触れ込みで、ダイオキシン類問題に火がついた。ヨーロッパのごみ焼却炉からも発生することが確認されたため、日本においても研究が始まった。'83年には、愛媛大学教授（当時）の立川涼氏がごみ焼却炉からのダイオキシン類排出を報告したことから、ごみ焼却炉を巡って、国内は大混乱に陥った²⁾。その後、所沢市の産業廃棄物焼却施設が密集する地区におけるダイオキシン類の発生をマスコミが取り上げたことから、'99年（平成11年）には、「ダイオキシン類特別措置法」が議員立法によって成立したのである。ダイオキシン類問題への具体的な対応については、別の機会に譲るとして、当初原因の1つに取り上げられたのが、PVCあるいは塩化ビニリデン（PVDC）などの塩素を含むプラスチックである。研究が進むにつれて、実際にはダイオキシン類の合成は、De novo 合成によるものであり、発生させないためには、3Tと呼ばれる温度（Temperature）、滞留時間（Time）、混合燃焼（Turbulence）の3つの条件を揃えて完全燃焼させることが重要で

あることが分かってきた。にもかかわらず、PVCだけでなく、プラスチック全体が悪者とされ、プラスチックを分別収集する自治体が増加し、再びプラスチックは焼却不適ごみとして扱われることとなった。

3 容り法の施行

上述したように、廃棄物処理法の大改正に伴い、再生利用が明記されたものの、積極的にリサイクルを進めるインセンティブは働かなかった。しかしながら、前項のダイオキシン類問題により、プラスチックが焼却不適ごみとされたこともあり、個別品目ごとのリサイクル法に係る議論が進むことになった。平成7年に制定、平成12年4月、一番に全面施行されたリサイクル法が容り法である。これまでも、びん、缶あるいは牛乳パックなどの紙製容器包装については、一部有価物としてリサイクルが進められてきたが、これらに加えてプラスチック製の容器包装がリサイクルの対象となった。当時、製品の設計・製造に最も影響を与える生産者に対し、物理的・金銭的責任を製品の廃棄後まで拡大して与える拡大生産者責任（EPR；Extend-ed Producer Responsibility）が叫ばれていたが、容器包装を利用する事業者にリサイクル費用を負担してもらうしくみ、つまりEPRが日本で初めて導入されたことは画期的であった。また、消費者にはリサイクル用にごみの洗浄あるいは分別の役割を、行政には資源物の回収をそれぞれ担わせることにより、リサイクルを効率的に循環させる仕組みが構築されたのである。

3. 1 PETボトルのリサイクル

容り法に基づく、プラスチック製容器包装には、大きくわけてPET（Polyethylene terephthalate）ボトルとそれ以外のその他プラスチックの2種類がある。まず、PETボトルのリサイクルについて解説したい。

当初リサイクルの対象は、飲料用容器およびしょうゆの容器のみであったが、徐々に拡大し、現在は乳飲料等、その他調味料、酒類及びアルコール製発酵飲料なども含まれている。これらについては、ふたおよびラベルがPET樹脂ではないことから、適切なリサイクルのためには分

*注2：使用されていた枯葉剤の代表的なものをオレンジ剤（エージェントオレンジ）という²⁰⁾。成分は非精製ブチルエステルの2,4-ジクロロフェノキシ酢酸（2,4-D）と2,4,5-トリクロロフェノキシ酢酸（2,4,5-T）がほぼ同量。加えて2,4,5-Tの副産物であるTCDDが様々な割合で含まれていた。TCDDはダイオキシン類の異性体の中で最も毒性が高い。

別が必要になる。容り法が制定された平成7年当時は、現在主流である小型PETボトル(500mL以下のもの)については、国内の流通を業界が自主規制していた。しかしながら、海外から輸入されたミネラルウォーター(小型サイズ)の人気の若者の間で高まり、国内メーカーも法施行に合わせて、解禁に踏み切ったものと思われる²¹⁾。図2に、平成8年8月、当センターで実施したモデル地区において収集したPETボトル中の割合を示す。

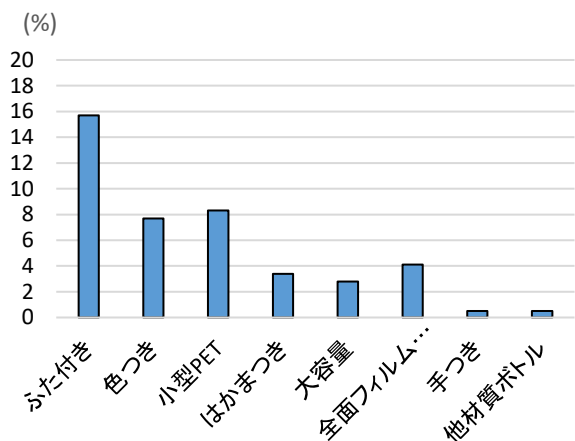


図2 収集したPETボトル中の割合
(平成8年8月:モデル地区にて実施)

モデル地区で実施した結果のため、他素材のボトルの混入割合は0.5%と非常に低かったものの、ふた付きのまま排出されたものが、15.7%と比較的多くあった。逆に、現在では考えられないが、小型PETの割合が8.3%と非常に低いことがわかる。また、リサイクル等を考慮した製品設計(DfE: Design for Environment)の考え方が導入されておらず、サイダーの容器が緑色をしていたり、炭酸飲料の容器には、強度を保つため、「はかま」と呼ばれるポリプロピレン(PP)素材の底がついたものが存在したり、シュリンクラベル(PS製など)がボトルの全面に使用された製品が存在した。現在は、DfEが導入されているため、これらの製品を見かけることは少なくなったが、一部輸入ボトルなどで青色のものがまだ存在する。また最近では、DfEの一環で、ボトル本体の樹脂量を減らすため、軽量化が進んでいる²²⁾。しかしながら、このことが新たな問題を引き起こす可能性がある。リサイクルメーカーによれば、本体を軽量化したことにより、混入するキャップあるいはラベルと

の重量の差がなくなるため、これまでどおり風力等で簡単に選別出来なくなるとのことである。つまり、適切なリサイクルのためには、ボトル、キャップおよび本体の3分別をさらに徹底することが必要になると考えられ、県では現在取り組みを推進している²³⁾。

PETボトルの再生品についても、時代とともに移り変わっている。当初は、作業着などの繊維製品への再生利用率が高かったが、最近では卵パック用などのシートへの再生利用率が高くなっている²⁴⁾。しかし、これでは完全循環型の再生利用とはならないため、品位が劣る製品へのリサイクル、つまりカスケードリサイクルとなってしまう。PETボトルは、中の飲料をより良く見せるために、透明度が高い良質な樹脂を使用しており、その製造には触媒を用いている。過去の調査²⁵⁾では、図3に示すとおり海外製のミネラルウォーターボトル(A~E)にはアンチモン(Sb)が、国内製造のボトル(F~K)には、ゲルマニウム(Ge)が主に使用されていた。

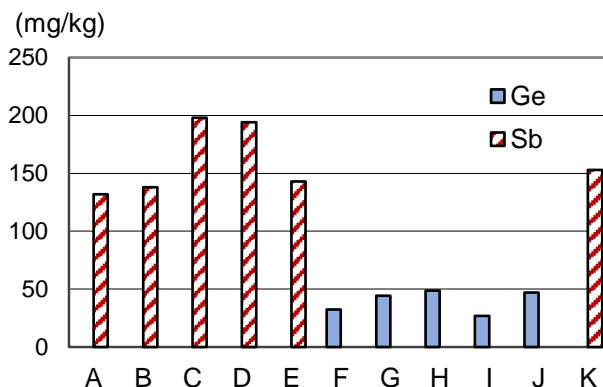


図3 PETボトルに残存する触媒²⁵⁾

これらの触媒の飲料への溶出は、食品衛生法によって規制されているため²⁶⁾、飲料の安全性には問題がないが、使用後のPETボトルが環境中へ散乱したり、カスケードリサイクルばかりを進めると、環境への負荷が増大するため、やはり再びボトルに戻すことが最適である。

‘04年には川崎エコタウンにて、ペトリバースという会社が、廃PETボトルからPETボトルへのリサイクル(PET to PETまたはボトル to ボトル)事業の操業を開始した。ここでは、原料へ戻すケミカルリサイクル方法の1つ、アイエス法を採用している。PET樹脂を製造する1つの方法として、エチレングリコール(EG)とテレフタル酸(TPA)から、中間体であるビス

-2-ヒドロキシエチルテレフタレート (BHET) を合成し、これを重合化する方法があるが、廃 PET ボトルから EG を用いて化学分解し、中間体である BHET を製造する方法がそのリサイクル工程である。ただし、ペトリバースは、平成 20 年に経営破綻し、その後東洋製罐がプラントを継承して、ペトリファインテクノロジー株式会社として事業を継続している²⁷⁾。

一方、PET のもう 1 つの製造法が、テレフタル酸ジメチル (GMT) と EG でエステル化を行い、重縮合によって製造する方法である。過去には帝人が、廃 PET ボトルから上記と同様に BHET を製造後、メタノールを用いて DMT を製造することで、ボトル to ボトルのケミカルリサイクルに取り組んだが、平成 17 年にプラントは休止し、現在はこの技術を繊維の再生に利用している²⁸⁾。ケミカルリサイクルを行うためには、化学プラントの建設が必要になるため、非常にコスト高になる。また、一時期廃 PET ボトルが中国へ輸出され、高値で引き取ってもらえたことから、国内の原料調達にもコストがかかるようになった。以上のことから、いずれの事業も厳しい局面を迎えたわけである。

しかしながら、最近では、より簡易なメカニカルリサイクル方法が実用化されている²⁹⁾。使用済み PET ボトルを選別、粉碎および洗浄して表面の汚れおよび異物を十分取り除いた後、高温下に曝して樹脂内部に貯まっている汚染物質を拡散させて除染する方法である。国がプラスチック資源循環戦略をまとめたことから、各メーカーも競って 100 % 再生ボトルの導入を進めているところである。

3. 2 その他プラスチックのリサイクル

PET ボトル以外のその他プラスチックについては、まず分別がわかりにくいと言われている。法対象の費用負担があるものと、そうではないものに分ける必要があるためである。例えば、容器包装のように見えるクリーニングの袋 (役務の提供に使用されるため) あるいは CD・DVD 等のケース (中身を分離した場合に不要とならないため) などが対象外となる。さらには、容器包装ではないプラスチック製品、例えば 100 円ショップで購入するような、プラスチックのケース類あるいは歯ブラシ、こどものおもちゃなどは当然対象外となる。

リサイクルの優先度は、マテリアルリサイク

ルを第一に推進することになっており、令和元年度は 34.5 万トンが再商品化の原材料として活用されている。実際には、様々な材質のものが混合しているその他プラスチックを、高度な製品へとマテリアルリサイクルすることは非常に難しいと思われる。現在は、パレットあるいは擬木などが主な用途である³⁰⁾。

発泡 PS 製の食品トレイについては、自治体により個別に収集しているところがある。これについては、単独素材であるため、再利用しやすいものになっている。スーパーなどで回収している PS トレイについては、株式会社エフピコが、スーパーへトレイを納入する際に回収する方式で、トレイ to トレイのリサイクルを実現している³¹⁾。ただし、食品と直接接触する部分には安全性を考慮し、フィルム状の新材料を使用している。

一方、ケミカルリサイクルには、令和元年度で 30.9 万トンが活用されている³⁰⁾。用途としては、コークス炉化学原料、高炉還元剤、熱分解油及び合成ガスであり、県内では川崎市の昭和電工株式会社 (アンモニアガス化) あるいは JFE スチール株式会社の高炉における利用などが代表的である。容器包装リサイクル協会のウェブサイトでは、自身が住む市町村から収集されたプラスチックごみが、マテリアルリサイクルされているのか、ケミカルリサイクルなのか「見える化」されている³²⁾。

容り法の枠組み以外で収集されているプラスチックごみについては、市町村が独自にリサイクルを行っている (独自処理と呼ばれる) ケースがほとんどである。独自処理を選択している理由としては、容り法では、毎年入札によってリサイクル先が異なるため、市民に説明しにくいことがある。また、過去には、独自処理の方が、低コストでリサイクルが出来る = 収集した資源物が高く売れるために、独自処理を選択していたケースも多い。しかしながら、この独自処理分が、産業廃棄物である廃プラスチックとともに、中国において高値で取引されたものの、分別が不十分だったり、汚れが付着しているなど、低品位なものがほとんどであったことから、2019 年末までに、段階的な禁輸措置が取られることになったのである³³⁾。これらがそのまま、東南アジア諸国へ流れたものの、中国ほどの処理能力がなかったことから、各国が輸入制限を

かけることになった。このような国際的状況を受けて、2021年1月からは、改正バーゼル条約^{*注3}により、相手国の許可なく汚れたプラスチックの輸出は出来ないことになっている。一時は国内に滞留したものの、輸出量は'16年に153万トンだったものが、'19年が100万トンとなっており、予想したほど減少してはいない。輸出事業者は、できるだけ有価で輸出するため、異物除去を行っているからのようである³⁴⁾。背景には、国内における処理あるいはリサイクルの能力を、急激には増やせないこともあると思われる。

3.3 プラスチックごみのリサイクルに関する研究

環境科学センターでは、科学技術振興調整費を活用した「環境と資源の持続的利用に資する資源循環型エコシステムの構築に関する研究（第Ⅰ期：平成7~9年度、第Ⅱ期：平成10~12年度）に参画し、「廃プラスチックのリサイクル技術の開発に関する研究」をメーカーと共同で実施した。当時の田中真紀子科学技術庁長官が、「生活者ニーズ対応研究」に予算をつける意向を示したことから始まったものである。三菱重工業株式会社横浜製作所（当時）が開発した、近赤外線による廃プラスチックの選別プラントは、茨城県牛久市に導入されたところであった。選別効率を上げるためには、どのような分別を市民にお願いしたらよいかについて、大磯町などをモデル地区として、住民説明なども実施し、分別行動がどのように変化するかなどの検討を行った^{35,36)}。町内のモデル地区において、説明会を実施後にプラスチックごみの排出状況を調べたところ、実施前と比べて実施後では、プラスチック以外のごみの混入率が18.3%から9.2%へ改善された。また、併せてプラスチックごみの排出実態を調査した結果、先に述べたように、ごみ焼却施設から排出されるダイオキシン類が問題となっていた社会的背景から、卵パック・果物パックなどが、PVCからPETへ切り替わりつつあったこと、また、近赤外線による分別が難しい、アルミ蒸着袋（ポテトチップス

などに使用）あるいは複合素材（ハム等の加工食品用に素材を複数層に張り合わせたものなど）が全体の5%程度あったことなども明らかにしている。

さらに、分別されたその他プラスチックについては、別の共同研究者である企業が油化を行うための実証事業も行っていたが、結論から言えば、当時多くのメーカーが盛んに研究を進めたものの、ほとんど実用化には至らなかった。当時の担当者が「こんな生ごみに近いものでは・・・」と感想を述べていたとおり、不純物があまりにも多く、油化装置が詰まったりするトラブルが頻発したためである。汚れたプラスチックについては焼却し、エネルギー回収を実施した方が、廃棄物に特化したライフサイクルアセスメント（WLCA）³⁷⁾による評価結果においても、環境への負荷が小さい結果になっている。高カロリーのプラスチックごみが混入することにより、焼却時に必要な助燃剤の使用量が減ることも1つの要因になっている。現在は、海洋プラスチックごみだけでなく、気候変動に関する問題への取り組みも強化すべき課題であることから、焼却によるエネルギー回収（日本ではサーマルリサイクルと呼ぶ）は、国際的にも合意されておらず、CO₂排出量増加につながるために「厳に慎むべき」と言われている。汚れることが前提のプラスチック製品は、バイオマス由来のプラスチックで作ることも必要であろう。昨今の環境問題については、トレードオフと呼ばれる、あちらが良ければこちらが立たずといったものが多く、その中でより良い方法を選択することが必要になる。先ほどのハム等の加工食品用に使用される複合素材についても、リサイクル性に関しては劣るものの、中身である食品の保存状態を良好に保つことを考えれば、食品ロスの削減には貢献するのである。

以上のことから、容リ法対象プラスチックの完全なリサイクルは、技術的に非常に難しいことがわかる。排出する際、樹脂別に完全に分離できれば可能性はある。ただし、特定家庭用機器再商品化法（以下、家電リサイクル法）のよ

*注3：バーゼル条約の正式名は、「有害廃棄物の国境を越える移動及びその処分の規制に関するバーゼル条約」（1992年5月5日効力発生。2019年12月現在、締約国数は186か国、EU及びパレスチナ）。'80年代に入り、ヨーロッパの先進国からの廃棄物がアフリカの開発途上国に放置され、環境汚染が生じるなどの問題が発生し、何ら事前連絡・協議なしに有害廃棄物の国境を越えた移動が行われ、責任の所在も不明瞭だったことがきっかけ。日本はリサイクル可能な廃棄物を資源として輸出入しているが、条約の手続きに従った貿易を行うことが地球規模の環境問題への積極的な国際貢献となるとの判断の下、1993年9月17日に同条約への加入書を寄託し、12月16日から効力を生じている⁴⁰⁾。

うに、メーカーが主導して実際のリサイクルを進める仕組みであれば、技術的な課題も解決しやすいことから、プラスチックのリサイクルも比較的問題なく進んでいるようである。容リ法についても、5年ごとの見直しのたびに、様々な議論がされているものの、残念ながら問題の本質的解決には至っていない。メーカーに対して、費用負担だけでなく、技術的な課題の解決を負擔させる形になれば、よりリサイクルが進むのではないかと考える。

この原稿を執筆中に、2つのニュースが飛び込んできた。1つは、プラスチックのバリューチェーンを構成する12社、サントリーMONO ZUKURI エキスパート、東洋紡、レンゴー、東洋製罐グループホールディングス、J&T 環境、アサヒグループホールディングス、岩谷産業、大日本印刷、凸版印刷、フジシール、北海製罐、吉野工業所の共同出資により、「R PLUS JAPAN (アールプラスジャパン)」を設立し、さらに広く出資を求め、使用済みプラスチックの新たな再資源化技術を用い、業界を超えた連携により、'27年の実用化を目指すというものである³⁸⁾。もともとなる技術は、アネロテック社が開発したもので、バイオ素材であるウッドチップを使用し、独自の熱分解、触媒反応を用い、PETボトルの原料であるキシレンを生成するものと説明されている。PET以外の使用済みプラスチックを原料とすれば、エチレンあるいはプロピレンなど、プラスチックの原料が生成可能とのことである。それぞれのメーカーが知恵を出し合っ て進める点が、技術的課題の解決につながると考えられるため、実用化が楽しみな技術である。

さらにもう1つは、政府がプラスチック製容器包装とともに、歯ブラシや文房具などの製品プラスチックも一括回収してリサイクルする仕組みの導入に向けて検討を始めたというものである³⁹⁾。費用負担の問題さえ解決できれば、過去からあった「同じ素材なのに、どうして製品系のプラスチックがリサイクルできないのか」という、一般の方々の疑問が解消されるかもしれない。

4. おわりに

以上プラスチックの処理・処分およびリサイクル方法の変遷について述べてきたが、使用中は本当に便利で、使いやすい素材であるのにも

かかわらず、使用後は適正処理がしにくく、埋立処分しても有害物質の溶出などの問題があり、さらにはリサイクルにも限界があるという、非常にやっかいな素材であることが理解いただけ たかと思う。そもそもプラスチック製品の製造は、使用するメーカーが仕様を出すため、レディメイドというよりは、オーダーメイドで作られており、同じPEという材質ひとつとっても、その性質はモノによって千差万別であると、メーカーの方から教えられたことがある。当然、それらを一緒にして適正に処理・処分またはリサイクルすることは、かなり困難であることが推測される。

また、現在プラスチック資源循環戦略にもあるように、植物由来の原料なども使用したバイオマスプラスチックの利用を促進している。このうち、過去一時流行した生分解性プラスチックについては、何をもって生分解性ありと評価できるのか、適切な評価基準が存在しなかったが⁴⁰⁾、OECD ガイドラインの方法等を参考として評価が出来るようになり、プラスチックにトウモロコシでんぷんを混ぜただけといった製品はほぼなくなっている⁴¹⁾。しかしながら、私たちが日常使用している、いわゆる汎用のプラスチック類とは材質が異なることから、現行のリサイクル手法に支障をきたす可能性が考えられるが、残念ながらそこまでの議論はまだ進んでいない。

ごみ全体の問題にも当てはまるが、マイクロプラスチックも含めて、プラスチックごみの問題を簡単に解決できる便利なツールは、今のところ存在しない。プラスチック資源循環戦略を受けて、メーカーもリサイクルなどに力を入れつつあるが、消費者の関心が高まっている今のうちに、それぞれの役割分担を踏まえ、適用可能な新たなスキームを導入することが望まれる。

参考文献

- 1) ELLEN MACARTHUR FOUNDATION: THE NEW PLASTIC ECONOMY: RETHINKING THE FUTURE OF PLASTICS, <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/our-work/activities/new-plastic-economy/reports>
- 2) 田中勝：清掃工場に求められる価値 地域貢献で担う新たな役割, 月刊廃棄物, 46(6), 4-9(2020)

- 3) 環境省：一般廃棄物の排出及び処理状況等（平成30年度）について，令和2年3月30日，<https://www.env.go.jp/press/107932.html>
- 4) 稲村光郎：東京都における清掃技術と行政－技術的視点から－，廃棄物学会誌，11(6)，427-435(2000)
- 5) 寄本勝美他，編：ごみの百科事典，丸善株式会社(2003)
- 6) 溝入茂：ごみの百年史 処理技術の移り変わり，學藝書林(1988)
- 7) 福井博，田中克彦，淡路宣男，平林尚之，伊東富晴，小島幸夫：埋立地浸出水中に含まれる有機化合物に関する研究－塩化ビニル製しゃ水シートから溶出する有機化合物－，廃棄物学会論文誌，5(5)，175-184(1994)
- 8) Yasuhara A., H. Shiraishi, M. Nishikawa, T. Yamamoto, T. Uehiro, O. Nakasugi, T. Okumura, K. Kenmotsu, H. Fukui, M. Nagase, Y. Ono, Y. Kawagoshi, K. Baba and Y. Noma: Determination of organic components in leachate from hazardous waste disposal sites in Japan by gas-chromatography-mass spectrometry, J. Chromatograph, A, 774, 321-332(1997)
- 9) Yasuhara A., H. Shiraishi, M. Nishikawa, T. Yamamoto, O. Nakasugi, T. Okumura, K. Kenmotsu, H. Fukui, M. Nagase and Y. Kawagoshi: Organic components in leachate from hazardous waste disposal sites, Waste Manage. Res., 17, 186-197(1999)
- 10) 坂本広美，福井博，惣田昱夫，金子栄廣：最終処分場浸出水中から検出されるビスフェノール A とその起源に関する研究，廃棄物学会論文誌，16(6)，511-520(2004)
- 11) 坂本広美，福井博，高橋通正，斎藤邦彦，金子栄廣：閉鎖後10年以上が経過した最終処分場浸出水中のビスフェノール A および4-ノニルフェノール濃度の変動特性とその要因，廃棄物学会論文誌 17(4)，259-271(2006)
- 12) 中西準子，牧野良次，川崎一，岸本充生，蒲生昌志：詳細リスク評価書シリーズ2 1,4-ジオキサン，丸善株式会社(2004)
- 13) 大迫政浩，貴田晶子，遠藤和人，酒井伸一，東條安匡，宮脇健太郎，肴倉宏史，坂本広美，田野崎隆雄：再生製品に対する環境安全評価手法のシステム規格化に基づく環境安全品質レベルの合理的設定手法に関する研究，平成17年度廃棄物処理等科学研究（K1716）研究報告書(2006)
- 14) Yasuhara A., Tanaka Y., Tanabe A., Kawata K and Katami T.: Elution of 1,4-dioxane from landfill sites, Bull. Environ. Contam. Toxicol., 71, 641-647(2003)
- 15) 藤原拓，倉田泰人，小野雄策，玉田徹，小野芳朗，小瀬知洋，西村文武，大年邦雄：廃棄物最終処分場浸出水中の1,4-ジオキサンの起源に関する調査研究，第17回廃棄物学会研究発表会講演論文集，844-846(2006)
- 16) 独立行政法人製品評価技術基盤機構ビスフェノール A リスク評価管理研究会：ビスフェノール A のリスク管理現状と今後のあり方，2005年11月
- 17) 安部明美：1,4-ジオキサンによる水環境汚染の実態と施策－地方試験研究機関の仕事に着目して－，神奈川県環境科学センター研究報告，29，53-63(2006)
- 18) 中川裕行，本田由治，酒井伸一：UV/O₃ 処理装置を用いた水中の1,4-ジオキサンの分解，環境と安全，4(3)，171-176(2013)
- 19) 株式会社日報アイ・ビー：包装タイムス創刊40周年記念特集記事，「ごみ袋40年を振り返る」，週間包装タイムス，2006年9月4日号
- 20) 「枯葉剤」：ブリタニカ国際大百科事典小項目辞典
- 21) 谷川 昇：ペットボトルのリサイクルの状況と今後，エコケミストリー研究会情報誌 化学物質と環境，No.161,13-15(2020)
- 22) PET ボトルリサイクル推進協議会：PET ボトルの軽量化，http://www.petbottle-rec.gr.jp/data/weight_saving.html（参照；2020.10）
- 23) 神奈川県，かながわプラごみゼロ宣言アクションプログラム，令和2年3月
- 24) PET ボトルリサイクル推進協議会：再生PET樹脂の用途，<http://www.petbottle-rec.gr.jp/data/use.html>（参照；2020.10）
- 25) 坂本広美，金子栄廣：PET ボトルとそのリサイクル製品に含まれる Sb および Ge の定量，環境化学，17(1)，1-6(2007)
- 26) 日本薬学会：3.1.1.3 溶出試験法，衛生試験法・注解，610，金原出版（2000）

- 27) リペットリファインテクノロジー株式会社：リサイクルプロセス,
<https://www.prt.jp/docs/technology.pdf> (参照 ; 2020.10)
- 28) 化学業界の話題データベース：帝人グループ「ボトル to ボトル」リサイクル施設を操業,
(参照 ; 2020.10)
- 29) 協栄産業株式会社：日本初 B to B の実現,
<http://www.kyoei-rg.co.jp/recycling/mrpet.html>
(参照 ; 2020.10)
- 30) 公益財団法人日本容器包装リサイクル協会：リサイクルのゆくえ,
<https://www.jcpra.or.jp/recycle/recycling/tabid/428/index.php> (参照 ; 2020.10)
- 31) 株式会社エフピコ：エフピコ方式の循環型リサイクル,
https://www.fpco.jp/esg/environmenteffort/fpco_recycle.html (参照 ; 2020.10)
- 32) 公益財団法人日本容器包装リサイクル協会：わたしのまちのリサイクル～分けた資源はどうなるの?～,
<https://www.jcpra.or.jp/Portals/0/resource/special/mytown/index.php> (参照 ; 2020.10)
- 33) 井関勇一郎：プラスチック資源循環戦略の策定に向けて，月刊廃棄物，45(3)4-9(2019)
- 34) 月刊廃棄物編集部：バーゼル条約で輸出にハードル 海洋プラ減らすため回収が重要に，月刊廃棄物，46(1)，10-12(2020)
- 35) 坂本広美，代田寧，牧野宏，桜井敏郎：家庭から排出されるプラスチックごみの材質組成について，都市清掃，51(224)，277-282 (1998)
- 36) 坂本広美，代田寧，福井博：プラスチックごみの分別収集協力度に関する研究，都市清掃，54(241)，197-201(2001)
- 37) 科学技術庁研究開発局：科学技術振興調整費「環境と資源の持続的利用に資する循環型エコシステムの構築に関する研究」(平成7年度～9年度) 成果報告書，平成10年12月
- 38) 食品産業新聞社ニュース：サントリーら12社共同出資で新会社設立，使用済みプラスチックの再資源化;2027年の実用化目指す/オールプラスジャパン，
<https://www.ssnpc.co.jp/news/liquor/2020/07/2020-0701-1112.16.html> (参照 ; 2020.10)
- 39) 時事通信社：歯ブラシ，文房具もリサイクル＝容器包装プラと一括回収-政府，2020.7.2
(iJAMP 官庁速報)，
<http://www.jamp.jiji.asplgwan.jp/apps/c/kiji/view> (参照 ; 2020.10)
- 40) 外務省：バーゼル条約，
<http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/kankyo/jyoyaku/basel.html> (参照 ; 2020.10)
- 41) 坂本広美：生分解性プラスチックの分解挙動に関する基礎的研究、第6回廃棄物学会研究発表会講演論文集、512-514(1995)