

1.4.2 プラスチック包装容器のリサイクル

日本では多くの市町村が、飲料容器と包装に使われたプラスチックを分別回収しています。再生処理の方法と製品の用途は様々ですが、食品のパッケージや袋に使われたプラスチックは、物質として再利用するのが主流です。一方、燃えるごみと一緒に混合収集し、焼却して廃熱を電力に変換する利用方法もあります。本稿では分別・収集・選別・再生処理の負担と利点を整理します。

プラスチックのリサイクルには、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の3種類があります。加熱すれば容易に再成形できる特性を生かした再生利用がマテリアルリサイクルで、PET ボトルをシートや繊維製品に再加工するのがこのリサイクルです。ケミカルリサイクルは、化学工場と製鉄所が原料や燃料として利用するリサイクルです。サーマルリサイクルは、直接燃料として利用するリサイクルで、得られる熱エネルギーを熱源や電源に利用します。プラスチックリサイクルの特徴は、処理方法も再生品の用途も異なる3種類の利用形態を選択できる点にあります。このため排出・収集・選別・貯蔵・輸送・再生処理まで含めた費用と、再生品の市場価値から適切な形態を選択する必要があります。

1. プラスチックリサイクルの現状

2019年における使用済みプラスチックの有効利用状況と、そのための負担を整理したのが表1です。リサイクルの種類は、プラスチック循環利用協会が示している区分です。負担には直接的な費用だけでなく、費用に換算できない手間や効率も考慮しています。

1.1 再生利用（マテリアルリサイクル）

再生利用の対象プラスチックは、主にPET ボトルと発泡スチロールですから選別は容易です。目視で容易に確認できるし、寸法が大きいので他のプラスチックと混合することはありません。収集は空気を運ぶようなものなので、収集車両の運用効率が低く、市町村の負担になっています。収集後は主に地方自治体が運営する資源化センター（選別施設）が、最初に金属缶やビン類を分けます（金属缶やビン類と混合収集の場合）。この作業は機械化されているので困難ではありません。しかし次工程の異物除去では、再生利用が前提なので厳格性が求められます。PET ボトルの場合は、混入してくる異種ボトル・残留物が残るボトル・汚れの激しいボトルを除去し、キャップを取り外します（キャップの多くはPET 樹脂ではない）。これらの作業は機械化に限界があり、多くの手間がかかるので大きな負担になっています。資源化センターで梱包・出荷されたPET ボトルや発泡スチロールは、次に再生原料化工場に運ばれます。PET ボトルは再生原料化工場でフレーク状に加工され、再生PET 樹脂としてkg当たり50円程度で引き取られています。排出量に対する再生PET 樹脂の比率、つまり歩留まりは約95%で有効利用率は高い水準です。

結論を端的に総括するならば、輸送効率が低く、収集後の後処理負担が大きいです。現在は有効利用率の高いリサイクルです。採算性の点では、収集コストと収集後の異物除去・選別・洗浄・梱包に、PET ボトル1kg当たり100円から200円の費用が投入されています。したがって再生PET 樹

表1. プラスチックリサイクルの負担と有効利用率

右：リサイクルの種類 下：負担（大～小） 下：有効利用（高～低）		再生利用		高炉・コークス炉 原料およびガス化		固形燃料およびセメント原・燃料化		焼却					
		内容		内容		内容		内容		内容			
		内容		内容		内容		内容		内容			
負担	排出者	中	選別・洗浄 ・袋詰め	大	該当識別・ 洗浄・袋詰め	小	袋詰め	小	袋詰め	小	袋詰め	小	袋詰め
	収集者	大	分別収集	大	分別収集	小	混合収集	小	混合収集	小	混合収集	小	混合収集
	収集後の選別者	大	洗浄・梱包	中	洗浄・梱包	—	なし	—	なし	—	なし	—	なし
	再生原・燃料化	中	フレーク化・ 熔融・成形化	大	異物除去・ 粉碎・成形化	大	粉碎・乾燥 ・成形化	中	廃熱回収・	中	廃熱回収・ 発電	小	廃熱回収
有効 利用	再生品の 市場価値	高	プラスチック 原料	中	化学原料だが 燃料相当	低	低質燃料	低	温水・蒸気	高	電力	—	—
	有効利用率 (歩留まり)	高	歩留まり 95% (PET ボトル)	高	歩留まり 93% (プラ容器)	低	現状	高	計画利用	高	HP による 熱量転換	低	需要変動

注1：再生利用はマテリアルリサイクルで、対象は主に分別収集されるPETボトルと発泡スチロール。

注2：容器の高炉・コークス炉原料およびガス化はケミカルリサイクルです。高炉で鉄鉱石の還元剤に使用する
方法と、コークスの原料として利用する方法、および化学工場が原料として利用する方法の3種類です。
対象は、分別収集されるプラスチック包装容器です。

注3：固形燃料およびセメント原・燃料化の対象は、一般ごみと混合収集されるプラスチック。

注4：排出者の負担は、ルールに従う選別・該当性の識別・洗浄・袋詰め。負担の大きさは、求められる識別と分
別の厳格性の差異。

注5：収集者の負担は、必要な車両台数と収集作業員の工数。負担の大きさは輸送効率の差異。

注6：収集後の選別者負担は、異物除去、選別、洗浄、梱包。負担の大きさは、必要な工数と厳格性の差異。

注7：再生原・燃料化の負担は、PETボトルは裁断・洗浄・フレーク化の経費、発泡スチロールは熔融・再成形の
経費、高炉・コークス炉原料およびガス化は、不適合物除去・粉碎・ペレット化の経費、固形燃料化は粉
砕・乾燥・成形化の経費、セメント原・燃料化は廃熱利用の経費、発電焼却は廃熱回収と発電関連設備の
経費、熱利用焼却は廃熱回収の経費

注8：再生品の市場価値は売買価格の水準。再生利用の産出品はプラスチック原料だがバージン原料ではない
ので、引き取り価格はkg当たり約50円。高炉・コークス炉原料・ガス化の再生品は化学原料素材だが、
石炭かガス代替品で用途が限定的。Kg当たり30円～40円の市場価値（私見）。

注9：PETボトルとプラ包装容器の歩留まりは、再商品化量／分別収集量（環境白書：平成29年度）による。
固形燃料化の歩留まりは現状で評価。セメント原・燃料化の歩留まりは、採用工場の利用計画に依存

注10：発電焼却の有効利用率は発電効率を約25%と設定。需要側のヒートポンプ（HP）利用による熱量転換
で4倍から5倍に増大できるものと推定。

脂の価格との差が、PET ボトルリサイクルの経費に相当します。PET ボトルと発泡スチロールは、識別しやすく排出者の負担が小さいことから、当分は現在のリサイクル形態が続くでしょう。しかし近い将来、利用効率と経済性の観点から発電焼却との競合が考えられます。なお、2016 年度の処理量は、一般廃棄物に含まれるプラスチック包装容器の約 17%でした。

1.2 高炉・コークス炉原料およびガス化 (ケミカルリサイクル)

対象は分別回収されるプラスチック包装容器（法規上の名称は容器包装）で、排出者の大きな負担は該当プラスチックの識別です。対象プラスチックにはリサイクルマークが記載されていますが、小さな容器や袋までマークを探して確認するのは面倒です。加えて食品パッケージや袋は洗浄が面倒なので、少しでも使い残しがあると分別せずに「燃えるごみ」の方に入れる人が少なくありません。また、玩具・バケツ・シート・文具類は包装容器ではないので対象外ですが、プラスチックというだけで分別収集の対象と判断する人が少なくありません。このため多くのプラスチック包装容器が分別回収されず、一方で対象外のプラスチックが混入しています。対象プラスチックの再生原・燃料化（再商品化）は、リサイクルマークのついた包装容器のメーカー、中身の商品を販売している企業、包装を利用する流通事業者が費用を負担しています。このため対象外のプラスチックの混入は、費用責任の所在を不明朗にしています。

収集は軽量で容積が大きいですから、輸送効率は PET ボトルと同様に低い水準で大きな負担になっています。収集後の異物除去は、PET ボトル

や発泡スチロールほど厳格ではありません。再生品の付加価値がプラスチック原料より低く、求められる品質基準が緩いからです。一方、再生原・燃料化の費用負担は非常に大きいです。再資源化には高炉で鉄鉱石の還元剤に使用する方法と、コークスの原料として利用する方法、および化学工場が原料として利用する方法が採用されています。しかしどの方法でも、大型の化学装置による一連の前処理が必要です。

製鉄所の高炉で還元剤として利用する場合は、最初の工程で選別機によりフィルム類と、パッケージやボトル類を分離します。フィルム類は破碎し、比重差を利用して塩化ビニルを分けます。塩化ビニルは約 350°C に加熱し、塩素を塩化水素にして分離します。脱塩された塩化ビニル（もう塩化ビニルではない）は、粒状にして分級機に送ります。一方、パッケージやボトル類も破碎して分級機に送ります。プラスチックは分級機で粒度を調整され、微粉炭とともに高炉に吹き込まれます。

コークスの原料として利用する場合は、破碎して選別機で塩化ビニルを除去します。次にコークス炉内の炭化室で約 1200°C に加熱しガス化します。この高温ガスから炭化水素油（軽質油とタール）とコークス炉ガス（水素、メタンなど）を除去し、残された炭素分をコークスとして利用します。

化学工場が原料として利用する場合は、破碎して磁力選別で鉄分を除去し、二次破碎して細片にします。次にペレット状に成形し、酸素と水蒸気とともに 600°C~800°C で操作する低温ガス化炉に投入すると、炭化水素、一酸化炭素、水素、チャー（粉状炭化物）が生成します。次に続く高温ガス化炉で水蒸気とともに 1300°C~1400°C に加熱す

ると、ガスが水蒸気と反応して一酸化炭素と水素が主体のガスになります。このガスを急冷し、ガス洗浄設備で塩化水素をアルカリ性の薬品で中和して除去します。こうして得られた水素と一酸化炭素を主成分とする合成ガスは、メタノール、アンモニア、酢酸などの原料に利用できますが、現在は主にアンモニアの原料に利用しています。

上記のように、高炉・コークス炉原料およびガス化には多くの設備と工数が必要です。このため再生原・燃料化の費用が大きく、kg当たり 60 円程度の負担になっています。一方、用途は石炭または石油代替品ですから、市場価値を評価するなら kg あたり 30 円～40 円でしょう。有効利用率は、現状で 93%程度です。なお、2016 年度の処理量は、一般廃棄物に含まれるプラスチック包装容器の約 7%です。

1.3 固形燃料化とセメント原・燃料化 (サーマルリサイクル)

固形燃料化の対象は、一般廃棄物に 1 割ほど含まれているプラスチック包装容器です。しかし、混合収集なので燃えるごみの一部としての扱いになり、排出者は袋詰め程度の軽い負担です。収集はパッカー車で圧縮輸送しますから、効率は悪くありません。しかし、固形燃料化工場の粉砕工程は非常に多くの電力を消費します。また、乾燥に大量の化石燃料を消費します。水分の多い生ごみが 3 割から 4 割も含まれているからです。最後の成形化も非常に電力の消費量が多い工程です。再生品は固形燃料と称していますが、実質は乾燥成形ごみですから熱量が不安定で、塩ビも含まれています。腐敗を防ぐために石灰を混ぜるので未燃分も多いです。品質が劣り市場価値が低いので、

発電所で燃料に使う場合は売却ではなく、有償で引き取ってもらっています。引き取り先を確保できず、産業廃棄物として有償で処分を依頼している固形燃料化工場もあります。このような状況なので、固形燃料専用の発電所も採算性が低く撤退が続いており、今後の拡大は期待できないでしょう。ボイラー燃料に使用している熱供給施設もありますが、採算性が低いので現状では数工場に過ぎません。ごみの固形燃料化は、小規模清掃工場のダイオキシン対策が困難なことから、1990 年代後半に清掃工場に代る施設として建設が進みました。しかし固形燃料の需要が少ないのと、採算性の低さから元の清掃工場に戻す市町村が続出しています。このため 2005 年以後に竣工した固形燃料化工場は 3 カ所しかなく、今後の拡大や普及は期待できません。

セメント原・燃料化は、セメント工場が清掃工場と同様に一般廃棄物を焼却し、廃熱をセメント工場の熱源に、また焼却灰をセメントの原料に利用する方法です。プラスチック包装容器は一般廃棄物との混合収集なので、燃えるごみの一部としての扱いになります。この方法は、セメント工場と清掃工場の立地が、地理的にも熱量バランスの点でも一致しないと成り立ちません。このため現状では全国に 1 工場しかなく、普遍性のあるプラスチックリサイクルとは言えません。なお、2016 年度の処理量は、一般廃棄物に含まれるプラスチック包装容器の約 6%です。

1.4 発電焼却と熱利用焼却 (サーマルリサイクル)

対象は一般廃棄物に 1 割ほど含まれているプラスチック包装容器です。混合収集ですから排出者

の負担は軽いし、収集はパッカー車による圧縮輸送ですから効率も悪くありません。発電焼却の費用は、清掃工場に組み込む廃熱ボイラー、蒸気タービン、発電機、付随する配管や制御設備費などで、清掃工場の費用全体の10%~20%です。得られるのは電力ですから、kW時あたり約16円の市場価値があります。発電焼却の有効利用率は発電効率で評価できますが、約25%の技術的な上限まで選択が可能です。発電効率は立地する市町村の選択に任されており、現在は清掃工場内部利用の5%程度から、電力会社に売電している20%以上までバラついています。

2017年の時点で、全国には清掃工場が民間を除いて1103工場ありますが、発電焼却に適しているのは24時間稼働の686工場です。しかし発電しているのは371工場で、54%に過ぎません。1980年代の後半までに建設された工場は、1日の焼却能力が200トン以下だと、発電焼却に積極的ではなかったからです。2017年度で発電している371工場の発電効率は20%以上が37工場、15~20%が100工場、10~15%が132工場、5~10%が65工場、5%未満が29工場で平均は13%です。なお、新しい工場ほど発電効率が高くなっています。

以上の状況から発電焼却を総括すると、排出者の負担も収集者の負担も少ないですが、設備費の負担が非発電より2割ぐらい高くなります。焼却発電をプラスチック包装容器の利用率で評価すると、現在の平均発電効率は満足できる水準ではありません。しかし既設工場の発電の多くは外部への売電を想定した設計ではなく、清掃工場内の電力需要を賄えばよいとする設計でした。技術的に発電効率を高くできなかったのではなく、必要と有用と考えられていなかったのです。したがっ

て今後の展望を過去のデータから推測するのは適切ではなく、将来の可能性と有用性から選択すべきでしょう。具体的な数値としては、欧米で一般化している25%程度の発電効率が広く採用されるものと推察します。有用性については、産出されるのが電力なので、需要側で以前より効率の良い多様な使い方ができるようになりました。

たとえば冷暖房に利用する場合、ヒートポンプエアコン（以降はHPエアコン）の利用で、電力のエネルギーを5倍程度の熱量に増幅できます。そうすればプラスチックが保有する熱量を、原料の石油に相当する水準で再利用できることになり、匹敵する石油燃料の消費量削減に寄与します。冷暖房需要が少ない時期も、発生電力に匹敵する火力発電の燃料消費量削減に寄与しますから、市場価値は燃料の約4倍から5倍と評価するのが適切でしょう。プラスチックは、原料が燃料としても大量に使われている石油です。このため発電焼却によるエネルギーの有効利用が、化石燃料消費量の削減に直結するのです。なお、近隣施設への熱供給のために、発電効率を犠牲にするのは好ましくありません。熱の直接供給は時間的な需要変化に対応しきれず、利用効率が低い水準に止まるからです。一方、熱利用焼却の対象も、一般廃棄物に含まれているプラスチック包装容器です。しかし清掃工場内の給湯や冷暖房では、発生熱量の数%しか利用できません。近隣施設に供給する場合は、温水か蒸気に変換して配管を敷設して送る必要がありますが、配管費用が高額なので対象施設が限定されます。このため経済性が低く、需要変動もあるので高い有効利用率は期待できません。なお、2017年度の処理量は、発電焼却が一般廃棄物に含まれるプラスチック包装容器の約45%、熱利用焼却が約6%です。

2. プラスチックリサイクル選択肢の評価

2.1 発電焼却の優位性

プラスチック包装容器のリサイクル選択肢は、再生利用、高炉還元剤利用、コークス炉原料化、ガス化、固形燃料化、セメント原・燃料化、発電焼却、熱利用焼却の8種類です。このうちPETボトルと発泡スチロールの再生利用は、識別が容易で排出者の負担が小さく、再生品の市場価値が高いので有力な選択肢です。プラスチック包装容器のリサイクルについては、固形燃料化とセメント原・燃料化は普遍性が乏しく、熱利用焼却は有効利用率が低いので、有力な選択肢にはならないでしょう。残るのはケミカルリサイクルの3選択肢と発電焼却ですが、今後は発電効率の向上が期待できると、需要側の電熱転換利用の拡大で、発電焼却が有力な選択肢になるでしょう。

2.2 ヒートポンプエアコンによる電熱転換利用

ヒートポンプ（HP）エアコンは、作動媒体の圧縮と膨張を繰り返して、消費電力の数倍の熱を大気から取り込む空調機器です。家庭の空調機器として普及し始めたのは1980年代以降で、拙宅では1997年にクーラーとして壁掛け型を購入しました。成績係数（冷/暖房能力(kW)/冷/暖房消費電力(kW)）は、冷房が2.5で暖房が2.9でした。暖房はガスファンヒーターを使い続けましたが、この成績係数だと電気代の方がガス代より高かったからです。次は2011年で、この時は標準的な中級機種ですが、成績係数は冷房が4.3で暖房が4.6になっていました。そこで暖房費を比較すると、電気代の方がガス代より安いことが分かったので、

暖房にもHPエアコンを使うようにしました。2019年にも1台買いましたが、成績係数が冷暖房を含めた通年エネルギー消費効率(APF)に代っており、5.8になっていました。効率の指標が代ったのも、年間を通じて使われるようになったからでしょう。2000年頃と比べると、性能が約2倍に向上していたのです。したがって清掃工場の発電効率が仮に20%でも、プラスチック原料の石油エネルギー相当分を、充分に取り返せるようになったのです。今では多くの家庭が、HPエアコンを冷房だけでなく暖房にも使っています。外気温度が低い寒冷地には向いていないと思っていましたが、今は東北から北海道にまで普及しており、2018年の全国普及率は91%に達しています。このような変化により、プラスチック包装容器の発電焼却は、ケミカルリサイクルの3選択肢より有効利用率を高くできるでしょう。

これまでプラスチックのリサイクルは、物質として再利用する方がエネルギー回収よりも優先されてきました。しかし物質といっても実質的に燃料であれば、電力回収で同等以上の有効利用が可能になったのです。過去にエネルギー回収を優先しなかったのは、発電焼却の売電価格が低かったのと、発電効率が低かったことが原因でしょう。それに需要側には、効率よく電力を熱に転換できるHPエアコンが普及していませんでした。ですがこれらの課題は今ではほとんど解消されています。今後は清掃工場が積極的に発電焼却の普及と発電効率の向上に取り組むことを期待します。プラスチックの有効利用だけでなく、可燃ごみ自体のエネルギー有効活用に大きく寄与するでしょう。

(おわり)

参考:資料「プラスチック容器包装のリサイクルは物質ではなく電力で」「化学装置」2019年4月号