

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

(その2) プラスチックリサイクルの負担と有効利用率

環境企画 松村 眞

本稿は「化学装置」2019年4月号に掲載されたので、出版社の許可を得て転載する。

2. プラスチックリサイクルの負担と有効利用率

(その1)で示したプラスチックマテリアルフローのうち、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ついて、表2にリサイクルの負担と有効利用率を評価した。評価は現状を参考に、近未来の展望も考慮している。詳細な理由や判断基準は、表中には記載しきれないので、注記と次節の焼却発電の評価を参照していただきたい。

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					
		排出者	選別・洗浄 ・袋詰め	該当識別・ 洗浄・袋詰め	袋詰め	袋詰め	袋詰め	袋詰め	袋詰め				
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・ 溶融・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:再生利用の対象廃プラは、主に分別収集されるPETボトルと発泡スチロール。

- 注 2：高炉・コークス炉原料およびガス化の対象廃プラは、分別収集されるプラスチック容器包装。
- 注 3：固形燃料およびセメント原・燃料化の対象廃プラは、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、出荷。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、固形燃料化は粉碎・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 円の市場価値と推察（私見）。
- 注 9：PET ボトルとプラ容器包装の歩留まりは、再商品化量／分別収集量（環境白書：平成 29 年度）。固形燃料化の歩留まりは現状。セメント原・燃料化の歩留まりは、採用工場の計画利用による。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想定。

2.1 再生利用

再生利用の対象廃プラは、主に PET ボトルと発泡スチロールだから選別は容易。目視で容易に確認できるし、寸法が大きいから他のプラスチックと混合することもない。排出者の負担は大きくはないと言えよう。収集は空気を運ぶようなものなので、収集車両の効率が低く負担が大きい。収集後は主に地方自治体が運営する資源化センターが、最初に金属缶やビン類を分ける（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から困難ではない。しかし次工程の異物除去では、再生利用を前提とした厳格性が求められる。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の除去、キャップの取り外し（キャップの多くは PET 樹脂ではない）が必要である。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負担が大きい。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る。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る。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。

結論を端的に総括するなら、輸送効率が低く、収集後の後処理負担が大きいのが、有効利用率は高い。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1 kg当たり 100 円から 300 円の費用が投入されているとの報告がある。したがって再生 PET 樹脂の価格との差が、PET ボトルリサイクルの損益に相当する。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あろう。しかし近い将来、資源の有効利用と経済性の観点から発電焼却との競合が考えられる。

2.2 高炉・コークス炉原料およびガス化

処理対象はプラスチック容器包装で、排出者の大きな負担は、該当プラスチックの識別にある。対象廃プラにはリサイクルマークが記載されているが、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ある。加えて食品パッケージや袋は洗浄が面倒なので、使い残しがあると「燃えるごみ」の方に入れる人が少なくない。このため多くのプラスチック容器包装が分別回収されず、一方でマークのない袋やシート類が混入してくる。収集は軽量で容積が大きいから、収集車両の輸送効率が低く負担が大きい。収集後の異物除去と圧縮梱包の負担は、PET ボトルや発泡スチロールより軽い。再生品がプラスチック原料ではなく、許容される品質基準が緩いからである。

一方、再生原・燃料化の負担は非常に大きい。再資源化には 3 種類の方法があるが、限られた製鉄所と化学工場にしか処理設備がないので輸送コストが大きい。再資源化の前処理は、3 種類の方法によって異なる。製鉄所の高炉で還元剤として利用する場合は、最初に選別機でフィルム類とパッケージやボトル類に分ける。次に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る。塩化ビニルは約 350℃に加熱し、塩素を塩化水素にして分離する。塩素分が高炉に入ると、装置類を腐食させるからである。脱塩された塩化ビニル（もう塩化ビニルではない）は、粒状にして分級機へ送る。一方、パッケージやボトル類は、破碎して分級機へ送る。分級機に送られたプラスチックは、粒度が調整されて微粉炭とともに高炉に吹き込まれる。

コークスの原料として利用する場合は、破碎し、塩化ビニルを除去する。次にコークス炉内の炭化室で約 1200℃に加熱すると、熱分解してガス化する。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する。炭化水素油は、化成工場で燃料または化学原料として利用され、コークス炉ガスは製鉄所の燃料や発電燃料に利用する。

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混入する鉄分を除去し、二

次破碎を行って貯蔵する。次にペレット状に成形し、低温ガス化炉に投入して酸素と水蒸気を加えると、炭化水素、一酸化炭素、水素、チャー（粉状炭化物）が生成する。塩化ビニルも含まれているので、塩化水素ガスも発生する。続く高温ガス化炉では、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る。生成ガスは下流のガス洗浄設備に送られ、残存する塩化水素をアルカリ性の薬品で中和処理する。最終的に得られる再生品は、水素と一酸化炭素を主成分とする合成ガスで、メタノール、アンモニア、酢酸などの化学工業原料に使用する（主にアンモニア原料として使用）。

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ある。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る。一方、用途は石炭または石油代替品だから、市場価値を評価するならkgあたり 30 円～40 円であろう。歩留まり、つまり有効利用率は 93%程度で、十分に高い有効利用状況である。

2.3 固形燃料化とセメント原・燃料化

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容器包装である。混合収集だから排出者の負担は袋詰め程度で軽い。収集はパッカー車で圧縮輸送するから、効率は悪くない。ただし、固形燃料化工場の粉碎工程は電力消費量が多い。また、乾燥には大量の化石燃料を消費する。水分の多い生ごみが、3 割から 4 割も含まれているから当然であろう。最終工程の成形化も電力消費量が多い。再生品は固形燃料だが、実質は乾燥成形ごみだから熱量が不安定で、塩ビも含まれている。腐敗を防ぐために石灰を混ぜるので、未燃分も多い。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る。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工場もある。

有効利用率は、発電に利用するなら発電効率によって大きく異なる。しかし固形燃料利用の発電所は、採算性の低さから撤退が続いており、今後の拡大は期待できない。熱利用目的の固形燃料化は、用途にボイラー燃料用と近隣施設の空調用があるが、空調用は需要変動が大きいので有効利用率は低いであろう。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んだ。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地区が続出している。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ない。

セメント原・燃料化では、ごみの熱量を燃料として、また焼却灰をセメントの原料に利用している。有効利用率は熱利用の効率に大きく依存する。一方、セメント原・燃料に利用し

ているのは1工場だけで、増加は期待できない。セメント工場が清掃工場の立地要件と一致している必要があるからである。処理量もセメント生産量の制約があるから、普遍性のあるプラスチックリサイクルの形態とは言えない。

2.4 発電焼却と熱利用焼却

発電焼却の対象は、一般廃棄物に1割ほど含まれているプラスチック容器包装である。混合収集だ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だから効率も悪くない。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%と推察される。得られるのは電力だから、kW時あたり約15円の市場価値がある。熱も同時に利用する場合は燃料相当の価値がある。焼却発電の有効利用率は発電効率で代表され、発電しない0%から約25%の範囲で選択の余地がある。発電効率は各工場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22%程度までバラついている。

2016年の時点で、全国には清掃工場が民間を除いて1120工場あるが、441工場は24時間稼働ではないから、発電には適していない。しかし441工場の処理能力は、24時間稼働工場を含む全処理能力の約10%に過ぎない。工場数は約4割を占めるのに、処理能力は約1割なのである。これらの小規模工場は、効率が低いのと環境保全対策が困難なことから、年々、統廃合が進んでいる。発電焼却に適している24時間稼働の清掃工場は679工場あるが、現時点で発電しているのは358工場で約半分に過ぎない。24時間稼働の工場でも、1970年代から1980年代に建設された工場は、発電焼却に積極的ではなかった。清掃工場自体が不足していたから、発電設備に投資するより、清掃工場の拡充の方が重要だったのであろう。発電している358工場の発電効率は、20%以上が34工場、15~20%が97工場、10~15%が120工場、5~10%が73工場、5%未満が27工場、平均は12.8%である(7工場は不明)。なお、建設年次が新しいほど発電効率が高くなっている。

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が、設備費の負担は非発電より大きい。焼却発電をプラスチック容器包装の有効利用率で評価すると、現在の平均発電効率は高いとは言えない。ただし、発電効率は建設当時の社会環境における選択だったのだから、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、将来の可能性と利用形態から選択すべきである。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であろう。利用形態については、産出されるのが電力なので、需要側で多様な用途に使える。

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る。そうすれば、廃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する。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するから、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あろう。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ある。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ある。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ない。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ある。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容器包装である。しかし清掃工場内の給湯や冷暖房では、発生熱量の数%しか利用できない。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るが、配管費用が高額なので対象施設が限定される。このため経済性が低く、需要変動もあるから高い有効利用率は期待できない。発電効率の向上とヒートポンプによる熱量増幅能力については、次節で具体的に補足する。

3. 焼却発電の評価

前節で述べたように、プラスチック容器包装の現在のリサイクルは、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 7 種類である。このうち高炉還元剤利用とコークス炉原料化、およびガス化は、排出者による識別と分別の負担が大きい。収集後の利用側による異物除去・粉砕・成形化の費用も大きい。一方、発電焼却は混合収集だから排出者の負担も収集者の負担も軽い。現状では発電効率が必ずしも高いとは言えない。そこで本節では、発電焼却の発電効率向上の可能性と、需要側のヒートポンプ (HP) 利用による熱量転換で、有効利用率が他の方法より大幅に高くなることを示す。

3.1 発電焼却の発電関連設備と発電効率

図 2 は最も多い焼却炉方式 (ストーカー炉) の発電焼却工程である。発電関連設備は炉壁に沿って設置される廃熱回収ボイラー、飽和蒸気を乾燥蒸気にする過熱器、タービン、発電機、復水器である。発電効率に最も大きく影響するのは、タービンに供給する蒸気温度と圧力で、高いほど大きな出力を得られる。2016 年の時点で、日本では平均の発電効率が 12.8% と紹介したが、欧州では発電効率 30% を超える清掃工場が少なくない。アメリカの清掃工場も概して発電効率が高く、25% を超える工場が非常に多い。欧米の清掃工場は、タービン入り口の蒸気圧力が 4MP~6 MP、温度は 400°C~500°C が多い。日本も 1965 年の時点でさえ、大阪市の旧西淀清掃工場は蒸気発電タービン入口温度を 350°C、圧力を 2.35MP と

して 23%の発電効率を達成している。

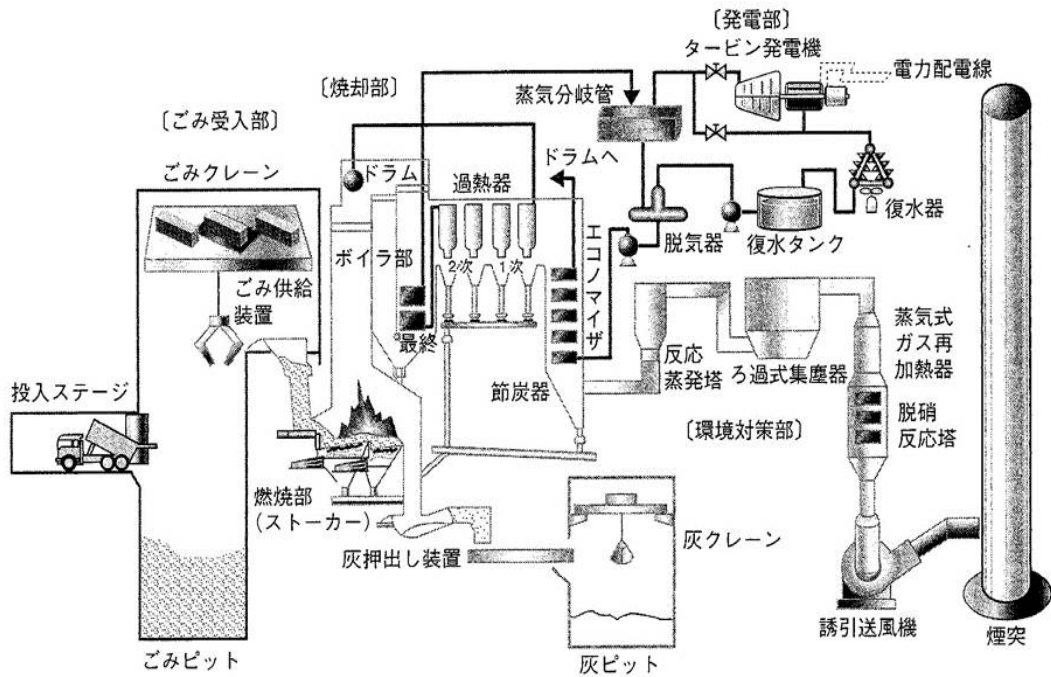


図 2. 清掃工場の発電工程

しかし蒸気過熱器で伝熱管の腐食損傷が多発したので、1970年以降の建設から蒸気温度を 300°C 以下に抑えるようになった。清掃工場はごみ処理のための衛生施設として建設したのであり、発電は副次的な機能に過ぎなかった。このため、発電効率の向上よりも継続的な安定運転を重視したのである。また、ごみ焼却発電は出力が不安定なので、電力会社の購入価格が低かった。それに加えて、公共施設なので余剰電力を売却して収入を得る動機が希薄だった背景もある。このような状況から、これまでに建設された清掃工場は、規模の大きい全連続式でも発電をしないか、発電しても自家消費電力を賄う程度が多かった。

しかし1980年代から1990年代になると省エネルギー対策が重視されるようになり、2000年前後の建設から蒸気条件 4MP 、入り口温度 400°C が採用され始め、発電効率25%に近づいている。タービンに供給する蒸気温度と圧力だけでなく、凝縮器の空冷から水冷への変更、情緒的な対策に過ぎない白煙防止対策の廃止も発電効率の向上に寄与する。その場合の発電効率は、25.6%に達する試算も得られている。なお、欧州には $7\text{MP} \cdot 450^{\circ}\text{C}$ の蒸気条件で27.4%の発電効率を達成している工場もある。そこで無理のない数値として、近い将来の発電効率を25%と想定した。

3.2 発電関連設備の投資効率

日本で清掃工場の発電効率が低かった理由に、技術問題ではなく、売電価格が低くて投資効率が低かった背景もある。欧州で発電効率が高かったのは、早くから国が一定規模以上の清掃工場に発電を義務化し、売電価格水準を設定して電力会社に買い取り義務を課していたからである。アメリカの清掃工場も発電効率が非常に高いが、清掃事業が民営で売電が収益源になっているからである。

一方、日本では 2012 年から廃棄物発電の固定価格買い取り制度が始まった。現在の買い取り価格は kW 時当たり 17 円で、有効期間は 20 年である。この固定価格は再生可能エネルギーに限定しているので、約 1 割を占めるプラスチックの寄与分を修正する必要があり、筆者の試算では約 16 円になる。なお、固定価格が設定される前から、電力会社は清掃工場の余剰電力を買い取っていたが、価格は昼間が約 12 円、夜間は 6 円程度が多かった。この価格が昼夜の別なく約 16 円になったのだから、清掃工場は大きな収入源を手に入れたのである。これも筆者の計算だが、まだ発電設備を設置していない処理能力 300 トン/日の清掃工場が、発電効率 25% の発電設備を導入すると、年間で約 7.5 億円の収入が得られる（化学装置 2014 年 3 月号・4 月号）。したがって、数年間の収益で発電関連設備の費用を回収できるであろう。

3.3 ヒートポンプの利用による熱量転換の効率

ヒートポンプ (HP) は、作動媒体の圧縮と膨張を繰り返し、消費電力の数倍の熱を大気から取り込む空調機器である。原理的には新しくないが、家庭の空調機器として普及し始めたのは 1970 年代以降である。拙宅では 1997 年にクーラーとして壁掛け型を購入したが、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 だった。暖房はガスファンヒーターを使い続けたが、この水準だとまだガス代の方が電気代より安かったからである。次は 2011 年で、この時は標準的な中級機種だが、成績係数は冷房が 4.3 で暖房が 4.6 になっていた。暖房費を比較すると、ガスファンヒーター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なった。昨年も 1 台買ったが、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あろう。2000 年頃と比べると、性能が約 2 倍に向上したのである。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ある。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る。以前は外気温度が低い寒冷地には不適だと思っていたが、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% に達している。このような変化により、プラスチック容器包装の発電焼却は、高炉・コークス炉原料化やガス化より有効利用率を高くできると考えてよい。

おわりに

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再利用が可能になったのである。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ことと、発電効率が低かったことが原因であろう。発電設備の導入に積極的でなかった背景も理解できる。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なかった。だがこれらの課題は、今ではほとんど解消されていると言ってよい。今後は清掃工場を設置している地方自治体が、積極的に焼却発電の普及と発電効率の向上に取り組むことを期待したい。廃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ことを強調しておきたい。

以上