

材料リサイクルから燃料利用へ（Ⅳ） －「その他のプラ」の燃料利用に伴う資源節約について－

技術士（衛生工学・建設・環境）
環境計画センター 会長代行 鍵谷 司

はじめに

1995（平成7）年6月の容器包装リサイクル法の制定・施行により容器包装廃棄物のリサイクルが促進された。当初、容器包装廃プラスチック類は、PETボトルが対象であったが、1997（平成9）年4月の法改正により、その他の容器包装廃プラスチック（以下、その他プラと記す）に拡大され、さらに、2021（令和3）年6月にプラスチック資源循環促進法が制定され、すべての廃プラが対象となった。併せて、緊急避難的な措置として、熱利用がリサイクル手法として認められた。

「その他プラ」がリサイクル対象として分別回収・材料およびケミカルリサイクルが義務づけられたことにより、廃プラのリサイクルは大きく促進された。しかしながら、その他プラは、様々な種類のプラの混合物として回収されるので、不適物も多く混入し、かつ、製品の品質が劣るので、良質な製品を製造することは難しい。

これまで燃焼利用を極力避けてきた経緯の中で、おもにコークス代替物（還元）として利用するケミカルリサイクルが大きな割合を占めている。最終的に燃料として燃やすのであれば、石炭代替利用（酸化）も同様にリサイクル対象とすべきであるが、認められていない。国際的にも燃焼利用は、リサイクルとは認められていない中で、異例の取り扱いである。なお、その他プラのケミカルリサイクルの実態と問題点については、『環境施設』第175号、pp.22-31（2024年3月）で詳細に紹介した。

以上のように、廃プラの燃焼利用は、大きな制度的な問題を含んでいるが、化石燃料のほとんど

を輸入に依存しながら、そのほとんどを燃焼利用している実態にもかかわらず、化石燃料の代替資源として認定しない施策は適切とは思えない。プラは、もともと原油を原料として製造したのであり、製品として利用された後にもとの燃料として再利用することは理に適っている。

以下に、廃プラを燃料として利用した場合、石油や石炭の化石燃料の資源をどれだけ節約できるかについて検討した。なお、その他プラの燃料利用に伴う発電時における二酸化炭素排出量については、次回に取り上げたい。

1. 廃プラの燃料価値と資源節約について

その他プラをリサイクルするにあたっては、分別回収、選別、ベーリング、破碎・選別、運搬など、様々な工程を経て、引き取り基準に適合したものだけが、公益財団法人日本容器包装リサイクル協会（以下、容リ協会）に引き渡され、材料リサイクルあるいはケミカルリサイクルされる。その他プラは回収量の95%程度がリサイクルされているが、これは容リ協会への引き渡し量である。燃焼を伴うケミカルリサイクルをリサイクルと位置づけているため、分別収集量のリサイクル率は6割強であるが、実質、材料としてリサイクルされる量は30%程度に過ぎない¹⁾。

これだけ無理して材料リサイクルするよりも、廃プラはもともと石油から製造されたのであり、良質な燃料としての価値がある。燃やすと二酸化炭素の排出量が増加するとの意見も多いが、あくまでも単純焼却あるいは低発電効率での利用と比較した議論が多い。分別回収から再生品製造に至

る多くの工程を考慮すると、その他プラの材料リサイクルは賢明とは言えない。現在は、ごみ発電技術の向上もあり、発電効率は高くなっている。発電効率が高いことは、火力発電を補完する効果が大いことを意味し、化石燃料の節約に大きく寄与する。

以下に、廃プラの燃料価値を算定するにあたって、計算の基礎となる発熱量、発電量などの換算方法をまとめておく。

1. 1 ごみ発熱量を電力に換算する方法について

ごみや化石燃料は、燃焼（酸化反応）すると熱を発生する。発生した熱で発電する場合には、発熱量が高いほど、発電効率が高いほど、発電量は多くなる。

従来、発生する熱量は、カロリー（cal）で表していたが、1993（平成4）年に施行された新計量法により国際単位系（SI）のジュール（J）が法定単位となった。最近では、従来から用いられている単位との互換性を考慮して、カロリーとジュールを併記する事例が多い。

ここでは、従来から用いられている単位（カロリー：cal）で表示した。なお、1カロリーは4.18ジュール（J）である。

（1）発熱量：高位発熱量と低位発熱量について

通常、石炭や石油などの燃料価値は、発熱量で評価されるが、用いられる発熱量は高位発熱量である。一方、都市ごみ焼却施設における焼却処理では、低位発熱量が重要な役割を果たす。当然、その他プラを都市ごみとして焼却して発電する場合も低位発熱量が用いられる。

以下に、高位発熱量と低位発熱量について解説しておく。

【高位発熱量と低位発熱量】

発熱量には、高位発熱量（総発熱量）と低位発熱量（真発熱量）がある。通常、可燃物は、炭素、酸素、水素などの元素から構成されている。燃焼とは、空気中や含まれる酸素との反応（酸化反応）

であり、発熱を伴う。完全燃焼の場合は、炭素は気体の二酸化炭素、水素は燃焼時に温度が高いため水蒸気となり、酸素は燃焼に使用される。高位発熱量と低位発熱量は、この水蒸気の取り扱いで決まるので換算できる。それぞれの目的により表示が異なることに留意する必要がある。

ところで、燃焼（酸化反応）過程では、水素と酸素の反応で生成する水蒸気および可燃物中に含まれる水分が蒸発するが、水蒸気を液体の水に戻した場合には蒸発潜熱が放出される。潜熱を含めた熱量を高位発熱量と、水蒸気をそのまま放出した場合の熱量を低位発熱量と呼ぶ。つまり、低位発熱量と高位発熱量とは次の関係がある。なお、水蒸気が水に変わるとき、1gあたり放出される潜熱は2,500ジュール（J）（約600cal/g）である。

低位発熱量＝

高位発熱量－水蒸気の潜熱×水蒸気量

それぞれの発熱量は、次の項目で用いられるので、注意して引用する必要がある。

○高位発熱量：①総合エネルギー統計などの統計類、②日本の火力発電所の発電効率、③省エネ法で使用される発熱量、④日本のCO₂排出量計算に使用される発熱量等がある。

○低位発熱量：①ボイラ設備の熱効率、②原動機の熱効率、③IPCCのCO₂排出量計算に使用される発熱量、都市ごみ焼却施設の設計

一般に、可燃物の熱量測定はボンベ熱量計が用いられるが、発生した水蒸気（気体）を水（液体）に戻すので、測定値は高位発熱量である。一方、ごみ焼却では、燃焼時に発生する水蒸気は、水に戻すことなく、そのまま大気へ放出されるので、低位発熱量が用いられる。化石燃料の取引引きでは高位発熱量が用いられているが、水分が少ないので、高位発熱量と低位発熱量との差は小さいためである。

参考に最終ページに各種可燃物の高位発熱量を付記した。これらは付着水分は少ないので、低位発熱量との差は小さい。なお、付着水分の多い家庭ごみ等については、水分率の変化が大きく、低位発熱量も大きく変動するので省略した。

【都市ごみの低位発熱量と高位発熱量】

都市ごみは、水分の多い生ごみや草木類など、および水分の少ない紙ごみ、廃プラなどの混合物であり、その組成割合により発熱量が大きく変動する。とくに、大きな影響を及ぼすのは付着水分であり、水分率は30～60%にもなる。水分率が高いことは、可燃分が少ないことを意味する。高位発熱量は、蒸発した水分を水に戻した際の潜熱を含めており、低位発熱量は、そのまま蒸気として放出した場合の熱量である。ごみ焼却施設では、燃焼排ガス中の水分はそのまま煙突から放出されるので、低位発熱量が用いられる。

前述したようにごみは様々な組成の混合物であり、組成ごとに高位発熱量と低位発熱量を算定しても意味はなく、混合物として算定することが求められる。例えば、大雑把に高位発熱量と低位発熱量を算定する概算式として下記がある。現在のごみ質とは合致しないが、簡単で分かりやすいので引用して解説する。

○低位発熱量算出の式（厚生省；環整95号）

$$HI = 45V - 6W$$

HI：ごみの低位発熱量（kcal/kg）

V：ごみの可燃分（%）

W：ごみの水分（%）

可燃分（V）は、可燃物と灰分から成るので、水分がゼロの場合、つまり、可燃物を完全に乾燥した場合には、分子中の水素が水分になるがわずかなのである。灰分が10%程度発生するので、低位発熱量と高位発熱量はほぼ同じ4,000（kcal/kg）程度になる。これが水分40%程度になると2,200（kcal/kg）程度、50%なら1,700（kcal/kg）、60%なら1,260（kcal/kg）程度になる。このように低位発熱量は、水分が10%変動すると500（kcal/kg）程度低下する。つまり、低位発熱量は、混入した水分により1/2～1/3程度低くなる。

【ごみ焼却施設の設計は低位発熱量が重要】

ところで、ごみ焼却炉の設計にあたっては、焼却能力を決める燃焼炉の大きさ、排ガス設備など主要設備の設計には、低位発熱量が用いられる。

また、低位発熱量の変動幅も重要な要因である。地域特性や季節により発熱量が変動する。このため、平均的な基準ごみ質、高質、低質ごみに対応した低位発熱量を設定する必要がある。変動幅が大きすぎると設計が困難になり、設備費用が高騰する。変動幅が小さいほど、安定した燃焼、つまり、安定したごみ処理が実施できる。

一方、化石燃料や固形燃料などは、水分率が10%程度以下と低いので、高位発熱量と低位発熱量の差は大きくはない。しかし、都市ごみの場合は、含まれる水分率が30～60%にもなり、低位発熱量も1,000～3,000kcal/kgと3倍程度変動する。通常、発熱量の変動を抑制するために、生ごみの水切りの徹底やピット投入時のごみの攪拌等により焼却炉に投入する前に均一化する操作が行われる。なお、焼却施設の設計では、発熱量のほかにごみ質として、ごみ組成、元素分析値、三成分（可燃分、水分、灰分）、かさ比重等が重要である。

（2）発熱量と電力の換算方法と計算事例

ごみ発電では、燃焼排ガスは、熱回収することなく、煙突から放出されるので、低位発熱量が用いられる。また、ごみを乾燥・破碎・圧縮固化した固形燃料に含まれる水分は10%程度であり、高位発熱量と低位発熱量には大きな差はない。いずれにしても、燃焼排ガスは、煙突からそのまま放出するので、低位発熱量が用いられる。

【発熱量と電力の換算方法】

以下の関係式から発熱量のカロリーからジュールに、さらに電力であるワットに換算ができる。ワットは、仕事量であり、1秒間に1ジュールの仕事が行われるときの仕事量である。それぞれの単位の間には次の関係がある。

《事例》

①ごみ熱量が1 kcal = 4.182kJに相当/時間

$$\begin{aligned} \text{電力 (W) に換算} &: 4.182 \times 1,000 \text{ (J)} / 3,600 \text{ 秒} \\ &= 1.1617 \text{ (J/s)} \Rightarrow 1.1617 \text{ (W)} \end{aligned}$$

②1（kW）= 860（kcal）

【ごみ発熱量と発電量の換算】

上記の換算式より、ごみや化石燃料を燃焼した際に発生する熱量を電力に換算することができる。

例えば、家庭ごみの低位発熱量は、おおよそ1,000～3,000 (kcal/kg) である。これを電力に変換すると、ごみトンあたり1,162～3,500kWの発電能力があり、これに発電効率を乗じると実質発電量となる。当然、ごみの水分が多いと低位発熱量は低くなり、発熱量の高い廃プラが多く混合すると発電量は多くなる。

次のようにごみ低位発熱量と焼却量から総発熱量を計算し、熱量を電力に換算し、これに発電効率を乗じるとごみ発電における総発電量を算定することができる。

例えば、ごみ発電を行う焼却施設100t/日の場合をモデルにすると次ようになる。

○ごみの低位発熱量；2,000 (kcal/kg)
⇒2,323 (kW/ごみt)

○発電効率；20%に設定

○実質発電量（発電設備付き焼却施設）；465kW

○発電能力；1,940kWh/時間 (100t/24hr×465kW)

ゆえに、1日の発電総量は、46,560kWh (1,940kWh×24) になる。実際は、ごみ焼却施設においては、クレーン、ごみ搬送、通風設備などで大量の電気を消費するので、余剰電力として売電できる量は半分以下になる。なお、焼却施設に付帯設備として温水プールなどの余熱利用施設や破碎処理施設など設置されている場合には、余剰電力はさらに小さくなる。

1. 2 「その他プラ」の燃料価値について

「その他プラ」のリサイクルの有用性を主張する報文も多々公表されている。しかし、ケミカルリサイクルに含まれる燃焼利用（RPF、セメント焼成など）あるいは残渣を熱利用と称してリサイクルに含め、廃棄物発電よりも二酸化炭素排出削減に寄与する、あるいは禁止されている単純焼却（熱利用を伴わない）と比較するなどして「その他プラ」のリサイクルの有用性が高いと結論している事例が多い。「その他プラ」のリサイクルの有効性

をあたかも正論のごとく定量的に説明しているが、論理的に納得できるような報文は見当たらない。

基本的には、ケミカルリサイクルの燃焼利用をリサイクルに含んでいること、および発電利用では発電効率を低く設定し（発電設備のない焼却施設での処理量あたりの発電効率を採用）など用いた数値の根拠が明らかでないことであろう。法律で、ケミカルリサイクルを「リサイクル」と位置づけているので、その実態については反論しようがない。しかし、同様な燃焼利用方法に石炭があるが、廃プラはその代替燃料として認められていないことが最も大きな疑問であると言えよう。

ここでは、「その他プラ」を燃料化した場合の燃料価値および発電事例について紹介する。

(1) 「その他プラ」の燃料価値と発電能力について

廃プラは、もともと石油を原料として製造した製品であり、使用済みで不要になったとしても燃焼すると大きな熱を発生する。つまり、燃料として有効に使えるのである。たとえ、汚染物や不適物が混入していたとしても少量であれば燃焼には大きな支障はない。

ここでは、自治体により分別回収され、容リ協会に引き渡された廃プラの発熱量を算定し、化石燃料の発熱量と比較することにした。

令和3年度（令和5年3月；容リ協会データ）におけるプラ製容器包装のリサイクルフローを図1に示す。容器包装廃棄物は、おもに家庭から排出されており、自治体が収集・回収を行い、容リ協会に再商品化を委託するルートによりリサイクルされている。

【容リ協会ルートによるリサイクル】

プラ製容器包装廃棄物のリサイクルまでの流れは次のとおりである。

- ①家庭からの排出量は127.9万トン
- ②市町村が収集する量は71.6万トン；排出量の56.0%（市町村が独自にリサイクルする分は、計上されていない）
- ③容リ協会が引き取る量（再商品化事業者に委託



プラスチック製容器包装

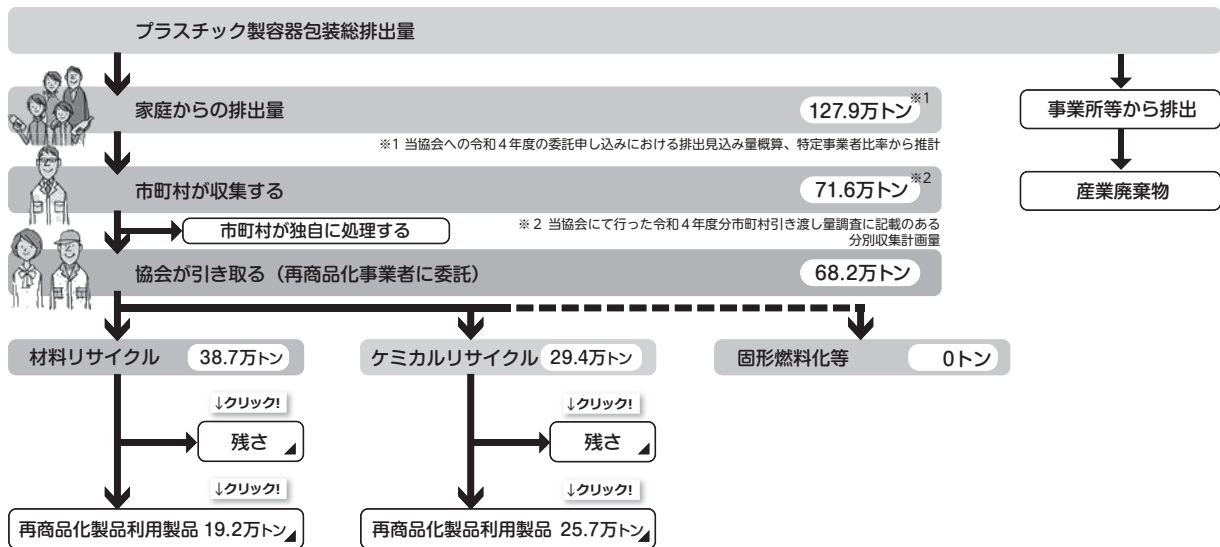


図1 プラスチック製容器包装のリサイクルフロー（令和4年度）

する量）は68.2万トン：排出量の53.3%であり、市町村が収集した量の95.3%に相当する。

対象は、③容リ協会が引き取る量の68.2万トンである。なお、令和4年から容器包装以外のプラスチック廃棄物がリサイクルの対象になったが、その収量はまだ公表されていないが、14,000トン程度と想定されている。

以上の検討より、燃料対象とする廃プラ量を70万トンに設定する。

（2）容器包装廃プラの燃料価値について

70万トンの廃プラを燃料として利用した場合、石炭および石油に換算した場合のエネルギー価値について検討した。

①廃プラの持つエネルギー

○発熱量を8,000kcal/kgに設定すると、70万t
 $\times 8,000\text{kcal/kg} = 56 \times 10^{11}\text{kcal}$

②石炭換算の場合

○石炭の発熱量を6,000kcal/kgに設定すると、約93万トンに相当する。

$$56 \times 10^{11}\text{kcal} / 6,000\text{kcal} \div 93 \times 10^4\text{t}$$

③石油換算の場合

○石油の発熱量を10,000kcal/l、比重を0.8に設定すると、約70万トンに相当する。

$$56 \times 10^{11}\text{kcal} / 10,000\text{kcal/l} \times 0.8 \text{（比重）}$$

$$\div 70 \times 10^4\text{t}$$

以上のように、廃プラを燃料とした場合、石炭で93万トン、石油で70万トンの資源節約に寄与できるのである。

おわりに

容器包装リサイクル制度が実行されてからすでに27年が経過し、ほとんどの自治体が容器包装類の分別収集に取り組んでいる。しかし、成果をあげるために何でもリサイクルする、「リサイクルはいいことだ!」との風潮に乗って「その他プラ」までも対象にしたことから制度の欠点が浮き彫りになってきた。本来、「循環資源としてのリサイクルは、資源節約、環境負荷の低減および経済性などを総合的に判断して推進すべき」であるはずなのに、むしろ、労力をかけて資源やエネルギーを浪費するような無駄な方向に向かいつつある。

もともと、日常生活で使用されるプラは、多種多様であるにもかかわらず、容器包装類に限定したことにより、対象外のプラが少なからず混入し、仕組みを複雑化している。また、その他プラを収集し、再商品化するにあたり、材料利用は収集量のわずか3割程度であり、非常に非効率であり、

しかも大した節約にもならないとの結論に至る。

2022（令和3）年2月のロシアによるウクライナ侵攻は、世界経済システム、とく資源大国のロシアが世界のエネルギー価格や需給に大きな影響を与えている。さらに、為替市場が大きく円安に振れたことから、輸入品の高価格化が市民生活を脅かしている。エネルギーは「産業の米」であり、あらゆる生産物のコスト上昇を招いている。

このような世界情勢や我が国の経済状況を熟慮

すると、一度使用した後の材料としてリサイクルするよりも、材料を分別回収して、選別、破碎、加工等により、できるかぎり燃料として有効活用することは、むしろ理にかなっている。材料リサイクルは、分部回収が容易、他のプラと区分が容易な発泡ポリスチレンやペットボトルを対象に限るべきであり、合理的である。

次回は、「その他プラ」を発電利用した場合に発電量と二酸化炭素削減の可否について検討したい。

付表 各種可燃物の高位発熱量⁴⁾⁵⁾

可燃物の種類		発熱量 (kJ)	発熱量 (kcal)	可燃物の種類		発熱量 (kJ)	発熱量 (kcal)
廃棄物等	廃油	34.7	8,300	化石燃料等	一般炭	34.1	6,150
	合成繊維	22.2	5,300		灯油	36.7	8,780
	廃タイヤ	35.5	8,500		軽油	37.7	9,020
	廃プラ	33.4	8,000		A重油	39.0	9,350
	RPF	33.4	8,000		B重油	40.4	9,670
	RDF	18.8	4,500		C重油	41.7	9,980
	木材	14.4	3,440		コークス	30.1	7,200
	木炭	15.3	3,660		都市ガス	41.1	9,830

※RDF：ごみ固形燃料、RPF＋プラ・紙ごみ固形燃料。

※都市ガス単位：Nm³あたり

※低位発熱量（真発熱量）は、分子中の水素が水蒸気として放出されるので若干低くなる。

〈引用・参考文献〉

- 1) リサイクルのゆくえ プラスチック製容器包装；公益財団法人日本容器包装リサイクル協会
- 2) 標準発熱量・炭素排出係数（総合エネルギー統計）
- 3) 令和3年度版 日本の廃棄物処理；環境省環境再生・資源循環局廃棄物適正処理推進課（令和5年3月）
- 4) 物質の性質：燃料の発熱量；(株)八光電機ホームページ（www.hakko.co.jp/library/qa/qakit/html/h01110.htm）
- 5) 廃棄物熱回収施設設置者認定マニュアル（平成23年2月）；環境省大臣官房リサイクル対策部