

## ■ 技術報告 ■

# PETボトル, PSPトレイのリサイクル代替案に関するエネルギー消費量の比較

Energy Consumption Associated with Recycling of PET Bottles for Drinking and PSP Trays for Food Wrapping

乙間 末広\*・森 保文\*\*・中條 寛\*\*\*・萩原 一仁\*\*\*\*

Suehiro Otoma Yasufumi Mori Hiroshi Nakajo Kazuhito Hagiwara

## 1. はじめに

都市域における一般廃棄物に占める紙、プラスチックの割合は年々増加の一途をたどっている<sup>1)</sup>。これはあらゆる商品に多用される包装材に起因する部分が多い。ドイツやフランスではそれぞれ独自の包装材リサイクルシステム<sup>2)</sup>を考案し実施しているが、まだ、その良否の決定的な評価をくだすまでには至っていない。日本でも、関連省庁によって包装材のリサイクルに関する新たな枠組みが構築されようとしている状況である。

リサイクルを実施するとき、多くの場合は収集・処理方法や再利用方法などにおいて複数の代替案が考えられ、選択にあたっては、各代替案がもたらす資源・環境負荷の収支を十分検討し、考慮しなければならない。日本生活協同組合連合会<sup>3)</sup>は容器包材の改善を目的に、ライフサイクル解析による環境影響評価を実施しているが、詳細を記した最終報告は公表されていない。また、最近、石川ら<sup>4)</sup>はリサイクル方式を比較する目的で容器・包材に関する広範な環境負荷ライフサイクルインベントリーを調査している。

プラスチック包装材の望ましいリサイクル方式については、利用、収集、処理、再利用を担うそれぞれの立場・主張から、資源、環境、経済などの側面<sup>5)</sup>が議論されており、今のところまだ意見の一致は見られていない。むしろ、混乱しているようにも思える。本文は、そのような議論に資する資料の1つとし、プラス

チック包装材の中でも使用量が着実に伸びているPET (polyethylene terephthalate) ボトルとPSP (polystyrene paper) トレイを対象に、いくつかのリサイクル方式を想定したケーススタディーを通して、それぞれの方式のエネルギー消費量を比較検討する。同じ方式であってもリサイクルの効率は、地域の社会的状況によって異なるため、ここでは、東京23区を想定してモデル化し、回収方法の違いによる影響の把握をも試みた。

## 2. 生産とリサイクルの概況

PETは軽量、丈夫、衛生的、美しい、成形が容易など容器として優れた特性を有しているため、調味料や油脂食品、酒類、清涼飲料、洗剤、化粧品、医薬品まで幅広く使用されている。ボトル用PET樹脂の需要は年々増加し、1991年には約12.6万トン（前年比107.8%）に達しており、中でも全体の7割を占める清涼飲料用ボトルの伸び率が顕著で全体の伸びを大きくしている<sup>6)</sup>。

PSPもPETと同様に包装材として優れているため、容器やトレイに広く利用されている。特に、水分や湿気を通さず、断熱性が良いことから生鮮食品の包装に多く使用されている。1991年のPSP容器向け原反出荷量は約16.8万トンで、そのうち65.5%の約11万トンはPSPトレイに使用されている<sup>7)</sup>。

現在PETボトルやPSPトレイの処分方法は自治体によって異なっているが、大半は不燃物として埋立られているか、あるいは可燃物と一緒に焼却処分されている。最近では一部の自治体でPETボトルを分別回収し、企業との協力によりフレック状の再生PETに戻す試み（マテリアルリサイクル）も行われているが、まだ量的にも少なく試験的段階である。一方、PSPトレイについても、分別回収し、再生PSPビーズを

\* 国立環境研究所 社会環境システム部資源管理研究室長  
 \*\* " " 資源管理研究室主任研究員  
 〒305 茨城県つくば市小野川16-2  
 \*\*\* (株)三菱総合研究所 地球環境研究センター  
 資源環境研究部資源システム室長  
 \*\*\*\* " " 資源システム室  
 〒100 東京都千代田区大手町2-3-6

生成する技術が開発、試験されている。この他にも、試験的にポリマー還元（ケミカルリサイクル）やRDF化あるいは液化燃料化などの方法が提案されている。

プラスチックのリサイクルは、その必要性は早くから論じられているが、いまだ大規模な実施に至っていない。その第1の要因は経済性である。現在の状況では、分別回収、輸送、再生処理にかかる費用が、処女材の調達費用を大きく上回っている。第2に、再生材の品質が処女材に比べ劣っていることである。品質面から再生材の用途が制限されるため、再生材の供給を増やしても、需給面で著しいアンバランスが生じ、せっかくの再生品が有効に活用されないという懸念がある。さらに、回収のための社会システムの不備、再生処理技術の未確立、再生材用途に係わる法的制約など多くの要因が考えられる。

本文はこれらの要因を承知したうえで、資源の有効利用と二酸化炭素排出量削減の観点から重要なエネルギー消費に焦点を絞り検討し、プラスチックの再利用に関する議論の材料を提供する。

### 3. ケーススタデーの設定

検討の対象としたのは、埋立方式、焼却方式（サーマルリサイクル）、再資源化方式（マテリアルサイ

クル）の範疇に入る代替案で、ケミカルリサイクルは他の方式に比べてその実現性がまだ小さく、利用可能なデータが十分でないことからここでは対象としなかった。

#### 3.1 PETボトルの回収・処理処分方式

PETボトルについては図-1に示す5つの代替案を設定した。代替案①、②は最も一般的な現状の処理・処分フローである。代替案④、⑤は廃PETボトルを原材料として再資源化するマテリアルリサイクルのフローで、これまでに行われたモデル回収実験を参考にした。

①埋立処分：分別ごみ（不燃ごみまたは焼却不適ごみ）として自治体が回収し、そのまま埋立処分する。エネルギー消費としては、収集拠点から埋立処分場までの運搬に要する回収車の燃料消費を考慮した。

②焼却処分：可燃ごみとして自治体が回収し、自区内の清掃工場に運搬、焼却処分を行う。この場合は、収集拠点からのごみ回収と清掃工場への運搬に要するエネルギーを算出した。清掃工場では焼却熱を利用したごみ発電をするものとし、この発電により節約される商用電力のエネルギーの節減量を考慮した。

③廃プラスチック専焼処分：PETボトルやPSPトレイなど廃プラスチックを処理業者が分別回収し、専

#### <PETボトル>



#### <PSPトレイ>



図-1 回収・処理処分方式

焼却で焼却，発電する。分別回収をするため回収に要するエネルギーは上記焼却処分より多くなるが，専焼却によってプラスチックの持つ高カロリーを有効に抽出し，発電効率を向上させることが可能である。考慮したエネルギーは焼却処分の場合と同じである。

④再資源化1（秦野方式）：神奈川県秦野市と伊勢原市がPETボトル協議会と共同で実施したモデル回収実験を参考にした。すなわち，一般ごみ収集時に一般ごみとは別に分別して回収し，清掃工場に運搬する。清掃工場で再分別と減容化処理をしたのち，再生工場に運び，PETのフレックとして再資源化する。この方式は実質的な分別回収であるにもかかわらず，回収のためのエネルギーを少なく押さえることができる。エネルギー消費としては，ボトルの回収に要するエネルギー，清掃工場における減容化エネルギー，再生工場への運搬エネルギー，再資源化施設の運転エネルギーを考慮した。

⑤再資源化2（播磨生協方式）：学校やスーパーマーケットを回収拠点として自治体が回収する。この回収方法は兵庫県の播磨生協がPETボトル協議会と共同で実施したモデル回収実験を参考にした。回収後のフローは再資源化1と同じである。

### 3.2 PSPトレーの回収・処理処分方式

PSPトレーについてもPETボトルと同様の5つの代替案を設定した。代替案④，⑤はそれぞれ回収方式の異なるマテリアルリサイクルである。

①埋立処分：3.1参照

②焼却処分：3.1参照

③廃プラスチック専焼処分：3.1参照

④再資源化1（エフピコ方式）：広島県のトレーメーカー，エフピコが実施している方式で，回収拠点であるスーパーマーケット（小売店）に持ち込まれた使用済みトレーをトレー問屋が配送の帰り便を利用して回収し，その後，トレーメーカーに送る。エネルギー消費としては，回収拠点からの回収とトレー（再生）工場への運搬エネルギー，再資源化に要するエネルギーを考慮した。なお，府中市が試験実施している方式はトレー問屋に代わって自治体が回収するもので，この方式に類似している。

⑤再資源化2（兵庫県方式）：兵庫県などが業界団体と協力して実施している方式である。消費者が最寄りのスーパーマーケットなどにトレーを持ち込み，そこで選別・袋詰めを行った後，業界団体が回収し，リサイクルセンターで再資源化する。エネルギー消費と

しては，回収に係わる運搬エネルギーと再資源化に要するエネルギーを考慮した。

### 3.3 回収・処理シナリオの設定

回収・処理処分に係わるエネルギー消費は地域の状況，すなわち排出規模や必要輸送距離によって異なる。ここでは，1991年時の東京23区の状況を想定し，実績値を基にこれらの諸条件を設定した。

排出量：PETボトル，PSPトレーの消費量および排出量に対する直接的な統計データがないため，国内需要量（出荷量）を総排出量とみなし，人口で比例配分した。例えば，対象地域におけるPETボトルの排出量は次式で求めた。

$$\text{年間排出量} = (\text{全国のボトル用PET樹脂出荷量}) \\ \times (\text{東京23区人口} / \text{全国人口})$$

その結果，PETボトルは8,305トン/年，PSPトレーは7,265トン/年となった。この合計量は約43トン/日に相当する。

回収拠点：可燃ごみ，分別ごみの回収拠点数としては，東京23区内の実数を採用し，それぞれ239,841ヶ所および236,849ヶ所とした。PETボトル，PSPトレーの拠点回収場所としては，スーパーマーケットや学校（幼稚園，小学校，中学校）を想定し，それぞれ765ヶ所，2,976ヶ所とした。

埋立処分：東京都の実績にもとづき分別ごみは回収拠点から週に1度，2トンバッカー車で回収され，中央防波堤埋立処分場まで平均輸送距離50kmで搬入されるものとした。また，回収車1台に積載できる分別ごみ量についても，東京都の実績から0.9トンとした。

焼却処分：東京都の実績にもとづき可燃ごみは回収拠点から週に3度，2トンバッカー車で回収され，自区内の清掃工場まで平均輸送距離20kmで搬入されるものとした。また，回収車1台に積載できる分別ごみ量についても，東京都の実績から1.3トンとした。

廃プラスチック専焼処分：前述のように，東京23区内から排出される廃PETボトルと廃PSPトレーの合計量を約43トン/日と推定した。この量は現実的な施設1基分相当である。従って，ここでは廃プラスチックを専焼却で焼却し，発電する施設が対象地域に1ヶ所あると仮定した。PETボトルやPSPトレーをスーパーマーケットや学校を回収拠点とし，平均輸送距離50kmで回収し，焼却するものとした。回収車は2トン平ボディ車で1台の重量積載効率は約10%とした。

PETボトルの再資源化：秦野方式の場合は週3回，播磨生協方式の場合は週1回の頻度で回収するとした。

回収後は自区内の清掃工場に平均輸送距離20kmで搬入され、ベラーによる減容化の後、平均30km離れた再資源化工場に10トン平ボディー車で送られる。

PSPトレーの再資源化：エフピコ方式では、スーパーマーケットを回収拠点に2トン平ボディー車で週3回、平均20km走行で回収し、卸売問屋で10トン平ボディー車に積み替え、さらに30km走行して再資源化工場に搬入すると設定した。一方、兵庫県方式では、スーパーマーケットと学校を回収拠点にし、週に1度、4トン平ボディー車で回収し、平均50km離れた再資源化工場に直接搬入するとした。回収、輸送車の重量積載効率はいずれも10%とした。

### 3.4 エネルギー関連データ

回収・輸送車の燃費：2トン車、4トン車、10トン車に対し実績にもとづきそれぞれ8.0km/l、5.5km/l、3.5km/lとした。

PETボトルの減容化：ベラーによる減容を仮定する。実稼働している処理能力3トン/時間のベラーの消費電力は22kWであり、一次エネルギーベースの換算係数2,250kcal/kWhを適用すると、16.5kcal/kgとなる。

発熱量：原油が9,250kcal/kg、PETボトルが5,500kcal/kg、PSPトレーが9,450kcal/kgとした。

発電効率：実施設の実績より可燃ごみによるごみ発

電の効率は10%とし、そのうちの35%は場内の運転に費やされるものとした。廃プラスチックの専焼について実績はないが、プラントメーカーへのヒヤリングにより20%の発電効率を仮定した。生産された電力は商用電力と等価と考え、エネルギー節約量を算出した。

PETボトルの再資源化：ウィズウェストジャパンとPETボトル協議会が共同運営している再生工場のヒヤリングデータを採用した。この工場の処理能力は約5,000トン/年である。

PSPトレーの再資源化：三浦<sup>8)</sup>が報告している製造メーカー所有工場におけるリサイクルペレット製造のエネルギー消費量、1枚あたり4,232kcalを採用した。

## 4. 処理・リサイクルに要するエネルギーの比較

それぞれの方式について、フローに沿ってエネルギー消費を推定した。

表1はPETボトルの処理・処分代替案のエネルギー消費量を比較したものである。PETボトルのライフサイクルの中で処理・処分過程のみを抽出してエネルギー消費量の合計を比較するのはあまり意味はないが、それぞれの内訳は参考になる。PETボトルのみを別便で回収する方式（廃プラスチック専焼、再資源化2）は、通常の可燃ごみあるいは分別ごみとして自治体が

表1 PETボトルの処理・処分代替案のエネルギー消費量の比較 [単位：kcal/kg]

	埋立処分	焼却処分	廃プラスチック専焼	再資源化1（栗野）	再資源化2（播磨生協）
フ ロ ー	消費	消費	消費	消費	消費
	回収拠点	回収拠点	回収拠点	回収拠点	回収拠点
	自治体回収	自治体回収	処理業者による回収	自治体回収	自治体回収
	・輸送エネルギー 62	・輸送エネルギー 19	・輸送エネルギー 290	・輸送エネルギー 19	・輸送エネルギー 131
	埋立	焼却	焼却	二次集積	二次集積
	熱回収	熱回収	・減容化エネルギー 17	・減容化 エネルギー 17	
	・節減エネルギー ▲936	・節減エネルギー ▲1,874	輸送	輸送	
			・輸送エネルギー 14	・輸送エネルギー 14	
			再資源化	再資源化	
			・再資源化エネルギー 3,125	・再資源化エネルギー 3,125	
合計	62	▲917	▲1,584	3,175	3,287

表2 PSPトレーの処理・処分代替案のエネルギー消費量の比較

[単位: kcal/kg]

	埋立処分	焼却処分	廃プラスチック専焼	再資源化1 (エフビコ)	再資源化2 (兵庫県)
フ ロ ト	消費	消費	消費	消費	消費
	回収拠点	回収拠点	回収拠点	回収拠点	回収拠点
	自治体回収 ・ 輸送エネルギー 62	自治体回収 ・ 輸送エネルギー 19	処理業者による回収 ・ 輸送エネルギー 290	問屋回収 ・ 輸送エネルギー 125	業界団体回収 ・ 輸送エネルギー 217
	埋立	焼却 熱回収 ・ 回収エネルギー ▲1,968	焼却 熱回収 ・ 回収エネルギー ▲4,441	二次集積 トレーメーカー回収 ・ 輸送エネルギー 85 再資源化 ・ 再資源化エネルギー 1,010	再資源化 ・ 再資源化エネルギー 1,010
	合計	62	▲1,949	▲4,151	1,220

収集する方式（埋立処分，焼却処分，資源化1）に比べ，10倍から15倍の輸送エネルギーを要す。

このことから，資源化を実施する場合にも，再資源化1の方式のように，通常のごみ回収を利用してPETボトルを分別回収する方法が資源化2の方式よりエネルギー的に有利である。しかし，これら回収方法に起因するエネルギー消費量の差は，再資源化に要するエネルギー量に比べれば小さい。

なお，ここで，回収作業者の労働力が計算されていないことに注意が必要である。さらに，通常の焼却と廃プラスチック専焼の比較からわかるように，廃プラスチックの専焼による発電効率の向上は回収エネルギーの増加を十分埋め合わせるができる。

PSPトレーの処理・処分に必要なエネルギーの比較を表2にまとめた。それぞれの数値はPETボトルの場合とほぼ同様の傾向を示しているが，PSPトレーの再資源化に要するエネルギーはPETボトルに比べてかなり小さい。一方，PSPの発熱量がPETの倍近くあることから，発電によるエネルギー回収の効果が大きい。

5. 再資源化の評価

厳密に言うならば，処理・処分方式の選択はボトル，トレーのライフサイクルの全過程に何らかの影響を及

ぼす。したがって，各方式のトータルな評価はそれぞれの場合のライフサイクルを追跡し，エネルギー消費量を積み上げる必要がある。しかし，実際には再生素材はもとの製品には戻らず，いわゆるオープンループ・リサイクルになっていることから，ライフサイクルを忠実に追うとシステム境界が際限なく広がり，收拾がつかなくなる。そこで，ここでは便宜的に再生素材はいずれバージン素材の製造量を削減するものと仮定し，それに伴うエネルギー節約量を以て再資源化を評価した。

図-2は各再資源化方式のエネルギー節約量を他の処理・処分方式と比較したものである。バージンのPETペレットおよびPSP樹脂製造に要するエネルギーは文献<sup>9-11)</sup>を参考にそれぞれ23,750kcal/kg，28,940kcal/kgとし，再資源化の歩留まり率を70%とした。

図からもわかるように再資源化の効果は著しい。これはバージン素材の製造に多量のエネルギーを使用するからである。再資源化のエネルギー節約量は焼却・発電に比べて，PETボトルの場合で約8倍，PSPトレーの場合で約4.5倍であった。前節で述べたように，プラスチックからの熱（電力）回収がエネルギー節約に寄与する量は無視し得ないが，再資源化による寄与はそれを大きく上回ると思われる。

PETボトル，PSPトレーどちらの場合も収集方法

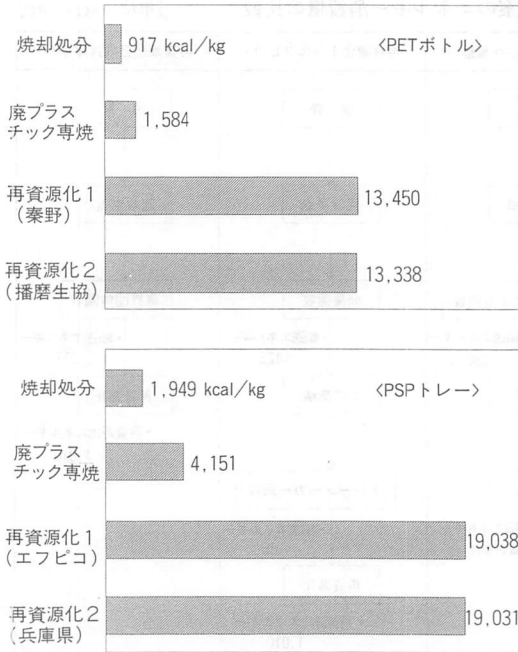


図-2 回収・節約エネルギーの比較

による影響はほとんどなく、ここで想定したシナリオ（東京23区）が少々変化しても再資源化の優位性は変わらないと予想される。例えば、もっと小規模な都市で、資源化のためにごみの長距離輸送が必要な場合も、やはり同様の結果になるであろうと思われる。

本検討によれば、PETボトルやPSPトレーの再資源化（マテリアルリサイクル）がエネルギー面からは優れていると言える。実現化への今後の課題は、（1）再生素材の品質を向上させ、用途を飛躍的に拡大させること、（2）経済的なハードルを克服するために各種のメカニズムを確立すること、などであろう。

## 6. おわりに

プラスチックは安価かつ優れた性質を有することから、我々の生活において不可欠なものとなっている。しかし、原料の石油は有限な資源の代表であり、無策に消費し続けることは許されない。なんらかの循環の利用を早急に実施する必要がある。

ここではPETボトルとPSPトレーの2、3の処理、リサイクル方式について、エネルギー消費の観点から検討した。その結果、再生素材に再資源化することが著しいエネルギー節約になることがわかった。また、ボトルやトレーの回収方法の差による影響がわずかであることも示された。これらの検討では設備、施設に

関わるエネルギーや人の労働力を考慮できなかったことを注記しておく。

最後に、本研究を遂行、まとめるにあたり、貴重な助言をいただいた、国立環境研究所社会環境システム部長後藤典弘氏に謝意を表します。また、データの収集に協力して頂いたメーカーおよび業界団体の方々に感謝いたします。

## 引用文献

- 1) 東京都清掃局ごみ減量総合対策室；東京ごみ白書（1995）。
- 2) 倉阪秀史；フランスのエコ・アンパラージュ（1995）、グローバルネット、50号、8～11。
- 3) 日本生活協同組合連合会；容器包材の環境評価に関する中間報告（1993）
- 4) 石川雅紀、梶野真弘、金森 剛；容器・包材リサイクルのライフサイクルインベントリー（1995）、第11回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集、55～60。
- 5) 特集「プラスチックは燃やすべきか燃やさざるべきか」（1993）、リサイクル文化、40号、14～81。
- 6) PETボトル協議会資料（1992）。
- 7) ヤノ・レポート1993年3月25日号（1993）。
- 8) 三浦浩之（1993）；エコマテリアル研究会第1回ワークショップ資料、45～48。
- 9) （社）化学経済研究所；「新規素材の導入に伴う省エネルギー効果の分析について」調査研究報告書（1981）、通産省委託調査報告書。
- 10) 三菱総合研究所；飲料容器のリサイクルに関する調査と基礎データの収集（1993）、国立環境研究所地球環境推進費委託調査報告書。
- 11) 乙間末広ほか；飲料容器のライフサイクル消費エネルギーとリサイクル効果（1994）、エネルギー・資源、15巻、5号、98～105。