

## 循環型社会構築に向けての 廃プラスチック油化リサイクル技術開発の課題

阪田 祐作

### Engineering issues of Degradation of Waste Plastics into Fuel Oil for Recycling Society

Yusaku Sakata

The rate of increase of plastic waste has been exceeded the rate of increase of plastic production during the period of 1975-1998. The development of technologies for resource reutilization of waste materials will not only be based on the waste-conversion-to-resource techniques but also the development of techniques for the effective collection, sizing, separation and sorting of the waste, and usage and transportation of the products from waste will be necessary. The treatment of waste materials must not be limited only to the scale-up of the treatment plants. Considering the population density and nature of locality, construction of small-scale plant for intermediate treatment will be essential. Even after repeated reutilization and resource-conversion of waste material the generation of ultimate refuse can not be avoided. Accepting this fact, formulation of a strategy for a progressive society with "Less Emission" will be necessary. For this purpose, arrangements of treatment facilities for the ultimate refuse will be essential. Among them, there is an urgent need for the development of technology for the treatment of halogen containing ultimate refuse.

**Key words :** Polymer waste, Plastics, Chlorine, Bromine, Recycling society, Catalytic dehalogenation,

#### 1. 緒 言

統計[1]によると、1975年度に517万トンであったわが国の樹脂生産量は、1997年には1521万トンまで伸び続けた。この生産量はその翌1998年には1391万トンに減少したが、それに伴って樹脂製品の国内消費量も1997年の1136万トンから1998年には1020万トンに減少している。このように生産量の増減は消費量の増減に敏感であることは当然である。因みに、廃樹脂の総排出量の伸び率は1975年の261万トンを基準にすると、以来1998年までの24年間で3.8倍であり、同じ期間での樹脂生産量の伸び率2.7倍を大きく上回っている(表1)。

表1 わが国のプラスチックの生産量と排出量(1998)

	1998年統計	対1975年伸び率
樹脂 生産量	1391万ton	2.7倍
樹脂製品の国内消費量	1020万ton	3.2倍
廃樹脂 総排出量	984万ton	3.8倍
内訳 使用済製品 排出量	900万ton	
生産・加工ロス排出量	84万ton	

岡山大学工学部物質応用化学科

〒700-8530 岡山市津島中3-1-1

Department of Applied Chemistry, Okayama University,

Tsushima Naka, Okayama 700-8530, Japan

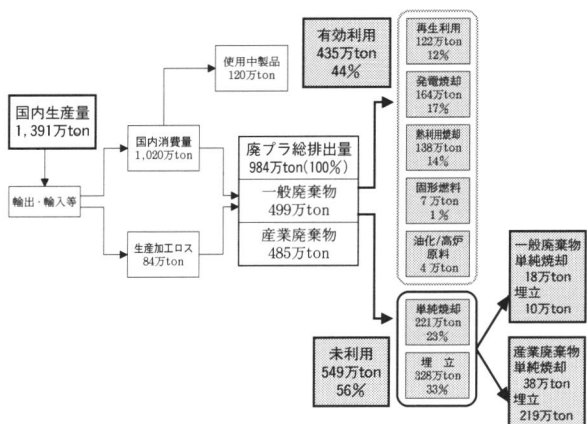
(平成13年5月27日受理)

次に1998年度において国内で生産および排出された樹脂の種類別内訳(表2)をみると、3P樹脂と称されるポリエチレン(PE)、ポリプロピレン(PP)、ポリスチレン(PS)の3樹脂合計は、生産量702万トン、に対して排出廃樹脂は661万トンであり、両者はほぼ近い値を示しており、これらの樹脂の消費寿命が短いことを示唆している。他方、迷惑視される場面のおおいポリ塩化ビニル(PVC)は、生産量246万トンのほぼ半量127万トンしか廃棄されておらず、長寿命型資材としての消費性格が覗かれる。

表2 生産量と排出量の樹脂(プラスチック)種類別内訳(1998)

国内生産量71391万ton		廃樹脂総排出量(984万ton)	
熱可塑性樹脂			
ポリエチレン	22.6%	ポリエチレン	30.2%
ポリプロピレン	18.1%	ポリプロピレン	19.9%
ポリスチレン	9.8%	ポリスチレン	17.1%
塩化ビニル樹脂	17.7%	塩化ビニル樹脂	13.0%
PET樹脂	4.6%	その他の樹脂	19.8%
その他	15.2%		
熱硬化性樹脂			
PE+PP+PS	50.5%(702万ton)	PE+PP+PS	67.2%(661万ton)
PVC	246万ton	PVC	127万ton

図1は1998年度について、生産・廃棄・再資源化のフローを詳しく示したものである[1]。使用済製品の排出量(900万トン)に、生産・加工時のロス排出量(84万トン)を加えた廃樹脂の総排出量は984万トンである。これらが「産業廃棄物」ならびに家庭などからの「一般廃棄物」となって社会に出るが、両者はここ数年間(1994~1998年度)、ほぼ等量で推移している。



【出典】(社)プラスチック処理促進協

図1 プラスチック製品・廃棄物・再資源化フロー

近年社会的に関心の高い廃棄物の再資源化の観点からすると、984万トンの廃プラスチック総廃棄量(1998年)のうち、44%が何らかの方法で有効に利用されているが、まだ半量に達していない。熱利用焼却と発電焼却を合わせて31%であり、マテリアルとしての再生利用は12%にとどまっている。再商品化技術として開発の進む油化利用と高炉原料利用を合わせてもまだ4万トン(0.4%)にすぎない。そして残る56%(549万トン)は、単純焼却(23%)と埋立(33%)により処分されている。

この未利用分の処分法をさらに詳しくみると、産業廃棄物では485万トンのうち45%が埋立処分されていて、単純焼却は8%であるのに対して、一般廃棄物(499万トン)では37%が単純焼却、22%が埋立により処分されている。このように未利用率は一般廃棄物が59%で、産業廃棄物の53%を上回っていることは意外であると思われる。今後、産業廃棄物としての樹脂・プラスチックの有効利用をはかることが社会的に重要になる。

## 2. 循環型社会とは

2000年6月に公布された「環境型社会形成推進基本法」では、循環型社会とは「天然資源の消費を抑制し、環境への負荷をできる限り低減させる社会」であるとされている。その実現のために、

- ① 廃棄物の発生を抑制すること、
  - ② 廃棄物はできるだけ資源として利用すること、
  - ③ 利用できないものは適正に処分すること、
- を掲げている、

循環型社会構築のためにも、利用できないものは適正処分が必要であることを明言している点が重要である。

更にこの法律では、一般的な意味での“要らなくなったもの”全般を指す「廃棄物等」の中に、特に有用なものを指す「循環資源」という新しい概念を導入している。物の有害性やリサイクル可能性を標準として「廃棄物等」と「循環資源」との分類が明確に制度化されれば、解決できる問題は多くあるが、実体としてはどちらもほぼ同じ物を指しているようである[2]。今後は他の法律との整合性をとるなどが、注目される。

## 3. 循環資源はどこまで再利用できるか

再資源化・リサイクルが、循環利用・再利用であるならば、果たして何度まで繰り返して利用できるか、原料のどのレベルまで遡って再利用するかは、リサイクル技術を開発する思想の根源にかかわる点である。

### 3.1 苦と楽の循環 (A)

環境関係の雑誌[3]で紹介されていた東南アジアのボルネオ島で生活する人達の羨ましい話である(図2(A))。

板廊下の床上に臼(ウス)を置き、粳など穀物を入れて立杵(たちきね)で打つと、打ち下した杵とウスの振動が床板に伝わり、心地よいリズムを発する仕掛けがしてある。トンと杵を打ち下すと、床板がトントントンと響いて、まるでリズム楽器の演奏のようになるという。粳をする、玄米をつくという労働が、そのまま楽器を演奏するという遊び(音楽)となっている。これが「苦」と「楽」とが循環しているという話であった。

この人達は死を迎えても、魂は山に還って、また新しい生命となって戻って来ると信じている。すなわち、「生」と「死」との無限循環(輪廻)の思想で生きているらしい。

### 3.2 生と死の循環：輪廻思想 (B)

我われ現代人は健康に過ごしていても、突然病気になるれば、お医者さんのお世話になり患者と呼ばれることになる。従ってこの世は「患者以前存在(健康人)」と「患者以後存在(病人)」に分かれる(図2(B))。もし50才で患者になり40才の身体に戻して欲しいと医師に懇願しても、現在の医術では叶うことはない。健康を取り戻して社会復帰、すなわちリサイクルできれば幸いで、不幸にも死を迎えることもある。宗教的な輪廻観を納得できない者にとっては存在の有限性(不条理)を感じざるを得ない。

## 4. 資源とゴミの循環：リサイクル

物質文明社会では「モノ」は、使用可能であるかどうかとか、必要であるかどうかを問わず、捨てられるとゴミ(廃棄物)になる。一般廃棄物も産業廃棄物でも同じである。従ってこの世は廃棄物以前存在としての「資源」とゴミ以後存在としての「再生資源」からなり、この両世界を結びつけるものが、再資源化(リサイクル)という循環理念である(図2(C))。

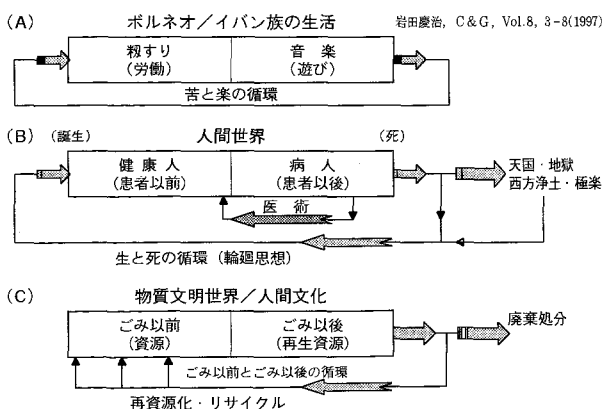


図2 有限資源の有限循環(リサイクル)と「無限思想」

しかし先に述べた人間世界の話と違って、科学技術論(工学)では、どの程度の資源にまで再資源化(リサイクル)するかを選ぶことができる。ただしコストを無視すればと言うべきではあるが。石油化学製品であるポリスチレン(PS)トレイを例にすれば、使用後の廃棄トレイを石油化学2次原料である再生PSペレットまで戻して、再成型したトレイとして再利用することも出来るし、石油ナフサやモノマーにまで戻す、燃料油として使う、さらに製造履歴を遡れば、石油原油に混入したり、石油精製工業の特定プロセスの原料にすることも考えられる。すなわち、われわれは、マテリアル・リサイクルから化学原料(Feedstock)リサイクルまで、幅広い選択肢を持ち得るし、またそれぞれの段階に対応した複数の再資源化技術を揃えるべきであろう。しかし再資源化技術では、立地条件や地域性がきわめて重要な因子であり、たとえば北海道から沖縄まで、どの地域において採用しても最適であるような、普遍的な技術はほとんど見あらず、どれか一つに絞り込むことができないというのが特徴である

更に、はじめから再資源化し易いようにモノを造る「逆生産システム」の提案もなされている。またそれらを実現するための技術開発・工学研究の努力が営々と進められているのは周知の通りである。しかし一般に、廃棄物の再資源化にはコストがかかり、本来の資源から生産されるモノよりも価格が高くなる。だから直接燃焼が可能な廃棄物であれば、再生不可能な化石系エネルギーを消費してまで廃棄物を再資源化して循環使用することに意味があるのかと言う問いかけ[4]も聞こえる。

## 5. 廃棄物処理問題と資源リサイクル戦略

廃棄物リサイクル技術は、多くの要素技術の組み合わせからなる複雑なシステムにならざるを得ない。すなわち、ゴミ(再生資源)の回収と運搬の技術とシステム作りに始まり、回収物の破碎に続いて、鉄/非鉄金属/ゴム/多種類プラスチック/木質/土砂などの分別と分離の技術、消臭/洗浄、各成分の再資源化処理技術、そして最終リサイクル製品への加工と利用の技術など、エネルギー(燃焼/蒸気/電力)回収、環境(大気圏/水圏/地圏)保全化学、さらにハロゲン(F/Br/Cl)防食技術など、環境材料科学の新しい視点からの研究開発も課題となる。当然、廃棄物の資源リサイクルはコストが掛かるものになる。

本論はじめに述べた埋立や単純焼却による廃棄物処分と、資源有効利用というリサイクル戦略について、わが国での実践すなわち企業化の議論を複雑にしているのに、いくつかの要因が考えられる。

### 5.1 ゴミ処理問題と資源問題の整理不足

土木建築系廃棄物から一般家庭ゴミまで廃棄物が、わが国では今までのように埋立ても燃焼もできないという現状、すなわち環境保全対策ないしはゴミ処理問題と、鉱物資源や化石系炭化水素資源などの地球規模での枯渇対策が急がれている資源問題の2つが緋い交ぜになって議論されている。資源リサイクルのために意図した技術が、思いがけなくゴミ処理関係の法規で強い制限を受ける場合が生じており、技術進歩と法律・法規整備など社会システムとの同調が急がれる。

### 5.2 リサイクル技術の選択基準の問題

天然や人工の高分子廃棄物のリサイクルに対して、サーマル/マテリアル/ケミカルなど種々な方面から、品位低下(カスケード)型を中心とした資源化変換技術の開発努力がなされている。しかし廃棄物リサイクルの3つの鍵である「回収システム(ソフト)」と「資源化技術(ハード)」、そしてリサイクル製品を誰が何処でどのように使うのかという「用途の開発と促進(フレーム)」が最も重要である。個々の資源化変換技術の単純なコスト比較を越えて、リサイクルを実施しようとする地域の特性に根差した回収法、変換法、利用法を組み合わせ、最後は社会的コストミニマムを実現しようとする視点がますます重要になるであろう。

### 5.3 設定すべき最終ゴミの質と量の問題

理念としての「ゼロエミッション」または「資源の無限循環」に対して、実学である工学・技術では、医術と同様に、資源の循環は有限であることを明確に認識し、臆することなく議論することが重要である。言い換えると、リサイクル(再資源化)技術をいくら押し進めても最終的にはゴミが出ることは自明であり、どの程度までの再資源化に留めておくべきか、最終ゴミの質と量をどの程度で善しとするかのオープンで活発な議論が行われるべきである。

幸いにも、先に述べたように循環型社会形成推進基本法という循環社会は、廃棄物をゼロにする社会の形成ではなく、廃棄物の安定化、減量化、最終処分という一連の処分をも肯定しているのである。ただし、優先順位があり、まず循環的利用(再使用⇒再生利用⇒熱回収)を優先すべきであり、それが技術的に可能でないときは、処分する仕組みになっている。

例えば、リサイクル製品の中にある有害成分が含まれる場合、仮に「1 ppm以下にしよう」と要請されれば、触媒を多く充填するなり、滞留時間を長くするなどして、技術的に対処できる可能性はあるが、「限りなく精製せよ」もしくは「ゼロエミッションであるべき」と言う要請に対しては、

装置の設計はできない。

『持続的成長を目指した少(省)廃棄』(Less emission for sustainable progress)の戦略など、社会的な制度の確立が必要であり、また再資源化技術の普及ないしは循環型社会構築のためには、リサイクル製品の品質基準の設定(例えば標準化)など、社会的な合意の形成が急がれる。グリーン購入(国の事業者・消費者としての環境保全に向けた取り組みの率先実行のための行動計画)などは、頼もしい方向ではあるが、リサイクル品として消費者に喜んで受け入れられる物・商品を作り出す技術開発が先ず必要である。

### 5.4 炭化/液(油)化/ガス化/残渣処理の4技術の統合

再生可能な木材やおが屑などバイオマス資源でも、石炭やプラスチック、イオン交換樹脂など化石系高分子でも、すべて不活性雰囲気中で加熱すると、高分子炭素鎖の切断長さによって、コークやピッチなど炭素質固体とタールや燃料油など液状炭化水素、そして燃料ガス・合成ガスなど、大別して固体・液体・気体の3種の性状物が得られ、さらに加えて、一般的には残渣(灰分)が残る。それぞれ、炭化、液(油)化、ガス化と別個の技術として扱われることが多いが、リサイクル技術開発では残渣(灰分)処理を含めた4技術を統合化した幅広い視点からのプロセス開発が重要であろう。

### 5.5 分解化学(静脈化学)の課題

学問としての化学について言えば、有機化学が無機化学かを問わず、合成する化学(動脈化学)に較べて、分解するための化学(静脈化学)の未発達さがある。石油精製工業は原油という高分子の分解化学を基幹とする代表的な化学工業であるが、プロセスは熱分解が基本であって、触媒を用いるなどにより高分子分解反応を積極的に制御し、直接的に生成物炭素数の制御などをしようとする方法論[5,6]は今もって育っているとは言えない。石油精製化学で活躍する触媒は、ほとんどの場合、熱分解による生成物の二次的改質に用いられているものである。

## 6. 製品の長寿命化と3R

吸着剤やイオン交換体など機能材は、本来の吸着やイオン交換の機能と共に、繰り返し再生利用(Recycle)する機能も技術も予め考慮されている逆生産システム的な優等生の材料である。しかし再生寿命が切れて廃棄物(ゴミ)になったときは、機能材であるが故に他用途への再利用(Reuse)は一般に難しい。機能性材料にとっては、長寿命化をはかり結果として廃棄物の減量化(Reduce)に資することが、リサイクル社会にとって最も有効

な貢献方法であろう。長寿命で最後まで優れた機能を保ち、寿命が尽きた時点では易分解性ゴミとしての処理処分が容易であるか、あるいは再資源化の可能性を内在させていることが理想である。この場合、機能材供給側の長寿命化・高付加価値化のための技術開発努力は、製品の高価格化(コスト)で報われるべきであると言うのが正論である。

## 7. 廃棄物再資源化処理ゴミの最終処理装置

廃棄物の再資源化努力を重ねても無限循環はできないとなると、最後に残るゴミの最終処理装置、すなわち現在の工業社会における「高級ゴミ箱」は不可欠である。リサイクル社会の形成が進むほどに、今後益々重要になる「高級ゴミ箱」装置は、誤解を恐れずに言えば、次の4つが挙げられる。

- ① 製鉄高炉。
- ② セメントキルン。
- ③ 開発進行中である熔融ガス化炉。
- ④ 硫黄化合物処理に可能性を秘めている製紙パルプの製造プラントに組み込まれている黒液回収ボイラー。

これらのうちで、①と②、④は、既存工場設備の利用であり、新たな設備投資の必要がない点で、リサイクル事業設備としてのメリットは高い。製鉄高炉とセメントキルンは、プラスチックのリサイクル設備としてすでに実用化の域にあるのは周知の通りである。

しかし、ハロゲン(Cl, Br, F)化合物は、医薬、農業をはじめ絶縁材、難燃剤、熱媒体など工業製品として、その優れた数々の特性の故に、人類が努力のすえに人工的に化学合成を重ねて作り出したものがほとんどであり、それ故、積極的に生活に取り入れ、幅広く利用してきたものである。しかし、ひとたび廃棄物(ゴミ)となった時点で、どのように処理すべきかの適切な方法・技術[7]は開発途上であり、ましてその最終処理を託せる高級ゴミ箱は、残念ながら思い浮かばない。

化学の世界が進歩した今において、PCB処理やダイオキシン除去をはじめ、プラスチック分解油からの脱ハロゲンなどの環境プロセスが、これほど期待されながら、技術開発が難渋している理由は、何であろうか。天然海産物にはハロゲン化合物を含むものがわずかに見られるが、陸生動植物ではハロゲン化合物を有意に含むものはほとんどないようである。したがって石油という天然資源にも有機ハロゲン化合物はほとんど含まれず、石油精製プロセスに始まる石油化学の世界には、今日まで高濃度の有機ハロゲン分解に対する積極的な対策経験が基本的に必要なかったものと考え

られる[7]。

## 8. プラスチック分解油の触媒ハロゲン精製の試み

PVCに由来する塩素(Cl)や難燃剤成分の臭素(Br)化合物を含むプラスチック分解油は、燃焼時にダイオキシン類が生成する懸念のために、数10ppmレベルまでの深度の有機ハロゲン除去が要請される。図3に概容を示したガラス製分解反応器とメスシリンダ型受液器を組み合わせた油化実験装置を用いた回分操作により、ハロゲン含有プラスチック混合物を加熱分解し油化する基礎実験の結果を紹介する。

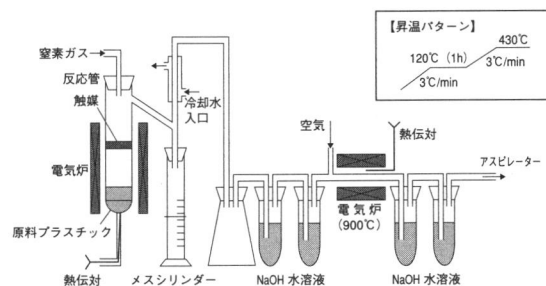


図3 半回分式油化分解実験装置

Cl含有プラスチックとしてPVC、Br含有プラスチックとしてHIPS(ポリスチレン)を含む混合プラスチックを考える。実験は120°Cで系内を乾燥した後、毎分3°Cで430°Cまで升温し、メスシリンダに捕集される生成油量の経時変化を記録するものである。この場合のプラスチックの分解に伴うハロゲン化合物の系内での挙動を図4に示した。260~300°CでHClやHBrなど無機ハロゲンが分解脱離する(図4①)。さらに高温域380~430°Cでは、PSのみならずポリエチレン(PE)、ポリプロピレン(PP)もクラッキングが起きて低分子量化をうけて、炭化水素蒸気が発生する(油化分解)。このとき系内に無機ハロゲンが残存すると、炭化水素へのハロゲン付加が起こる場合も見られる(図4②)。図4②で生成する数百成分に及ぶ炭化水素と共存する有機ハロゲンは最終的には再び無機ハロゲン(HCl, HBr)に変換する必要がある(図4③)。

岡山大学グループでは、 $Fe_3O_4$ —多孔質炭素複合材が、有機ハロゲンの無機化変換触媒能と、無機ハロゲン(気体)と固体( $Fe_3O_4$ )間反応による無機ハロゲン収着機能の2元機能を併せ持つハロゲン精製材であることを報告[7,8,9,10]してきた。このハロゲン精製材(戸田工業製TR00301)を、反応器内で分解生成蒸気相と接触させると(図3),

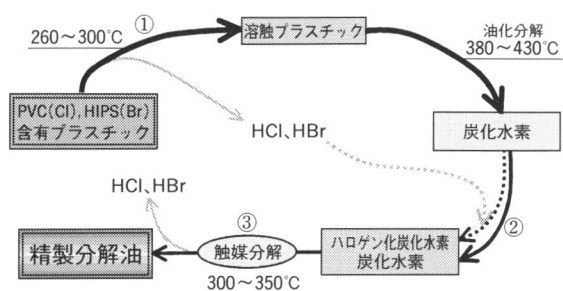


図4 ハロゲン含有プラスチックの油化分解におけるハロゲンの挙動

熱分解(無触媒)ではCl(4300ppm)とBr(13800ppm)が生成する油中に高濃度で共存する場合にも、何れのハロゲンもガスクロ(AED-GC)検出限界以下まで精製できた(図5)。

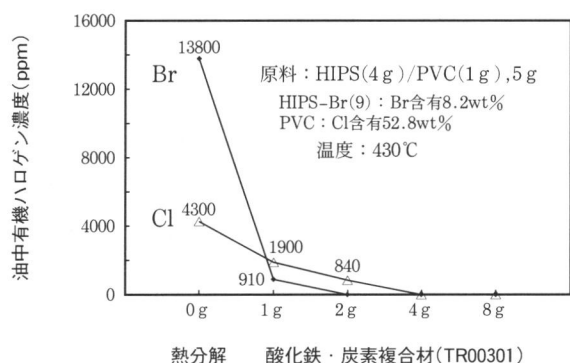


図5 使用触媒量と生成油のハロゲン (Br, Cl) 濃

現在、岡山大学では図4の①と③の工程で効果的な無機ハロゲン収着材と、図4③で有効な有機ハロゲンの無機化触媒について、基礎開発とプロセス開発研究[10]を行い、戸田工業(株)では精製材の実用化製造研究を進めている。並行して、このハロゲン精製プロセスを組み込んだプラスチック処理能力250kgの回分式小型油化装置の実用化研究を、NEDO地域コンソーシアム研究開発事業としての支援を得て、平成12年度から3年計画で、中国地方において進めている。

## 9. おわりに

1975年と1998年の間、プラスチック廃棄物量の伸び率は、生産量の伸び率を上回っている。廃棄物の再資源化を目指す技術開発には、単に資源化変化の技術のみならず、廃棄物の回収、運搬、破碎、分離、分別や製品の用途と流通までを含めた、幅広い視点が必要である。廃棄物処理では、常に大型装置がスケールメリットを生かせるとは限らない。人口密度や地域性を考慮すると、中間処理

対応の小型分散型装置も必要である。

また廃棄物の再資源化を繰り返しても、最終的にはゴミの生成は避けられない。このことを認めたと上で、工業社会の「持続的発展のための少廃棄(Less Emission)」戦略が必要であろう。そのためには、究極的な最終ゴミを処理する装置をいくつか準備しておく必要がある。中でもハロゲン化合物を処理できる万能の高級ゴミ箱(処理装置)の開発が急がれる。

## 参考文献

1. (社)プラスチック処理促進協会「プラスチック製品の生産・廃棄・再資源化・処理処分の状況(1998年), 2000年6月
2. 山川肇, 「循環型社会は形成されるか」, *C & C*, Vol.12(5), 69-73(2001)
3. 岩田慶治, 「美と循環—ごみから考える生活哲学—」, *C & C*, Vol.8(3), 3-8(1997)
4. 武田邦彦「環境にやさしい生活をするためにリサイクルしてはいけない」青春出版社(2000)
5. Y.Sakata, Md.A.Uddin, A.Muto, *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, Vol.51, 135-155(1999)
6. Y.Sakata, Md.A.Uddin, K.Koizumi, K.Murata, *Chemistry Letters*, No.3, 245-246(1996)
7. 阪田祐作, Md.A.Uddin, 武藤明德「廃プラスチック分解油の有機塩素化合物除去—触媒分解精製プロセス開発の試み—」*ケミカル・エンジニアリング*, Vol.45, 138-147(2000)
8. Md.A.Uddin, Y.Sakata, Y.Shiraga, A.Muto, K.Murata, *Ind. Eng. Chem., Research*, Vol.38, 1406-1410(1999)
9. J.Yanik, Md.A.Uddin, Y.Sakata, *Energy & Fuels*, Vol.15, 163-169(2001)
10. T.Bhaskar, Md.A.Uddin, J.Kaneko, A.Muto, K.Murata, Y.Sakata, *Proceedings of the 8th Japan-Korea Symposium on Catalysis*, P-26, pp.173-176, May 29-30, 2001. Sakai, Osaka, Japan