

特集

資源リサイクル問題

プラスチック製品とリサイクル

Recycling of Waste Plastic Products

原 田 紘 一*

Kouichi Harada

1. まえがき

より軽く、より薄く、より丈夫に、より安く……
 そうした要請に応え得る材料として、この20年あまりの間にプラスチックの需要は非常ないきおいで伸びて来た。しかしながら、この間、メーカーも消費者もプラスチックを、いかに製造し、どのように使うか、ということに夢中になっていて、使用後廃棄されるプラスチックのゆくえについては、殆ど無関心であった。ちなみにわが国のプラスチック廃棄量を見てみると、1972年に200万トン/年であったものが、1990年には500万トン/年に増加しているにもかかわらず、埋め立て処分をするか、他のゴミと同様に焼却する以外に廃棄プラスチックの処理方法は開発されていないのである。しかも、プラスチックは焼却時の発熱量が大きいために、既設の焼却炉では炉を損傷する不安があって、自治体等では、プラスチック廃棄物を埋め立て処分にするケースが多い。しかし、プラスチックは耐蝕

性でかつ分解しにくい性質を持っており、たとえ埋め立て処分をしても、半永久的に土中に残存するので、自然環境保護や環境二次汚染防止の観点から、廃プラスチックの埋め立て処分には限界がある。今や、メーカーも消費者も、プラスチック廃棄量を、いかに減少させるかを真剣に考え、何らかの形の再生利用の方法を創り出さなければならないところ迄来ているのである。

図-1にわが国における熱可塑性プラスチックの1989年度の生産と廃棄の状況を示した¹⁾。理想的には、廃プラスチックが再生利用されるのが望ましいが、残念ながら図に見る如く、廃プラスチックの約10%しか再生使用されていない。しかもプラスチック処理促進協会の調査によれば、そのうちの90%が産業廃棄物として出て来る廃プラスチックを再生使用したものであり、一般ゴミとして廃棄されてくるプラスチックは全廃プラスチックの約60% (290万トン) になるにもかかわらず、その内の5万トン即ち全廃棄プラスチックのた

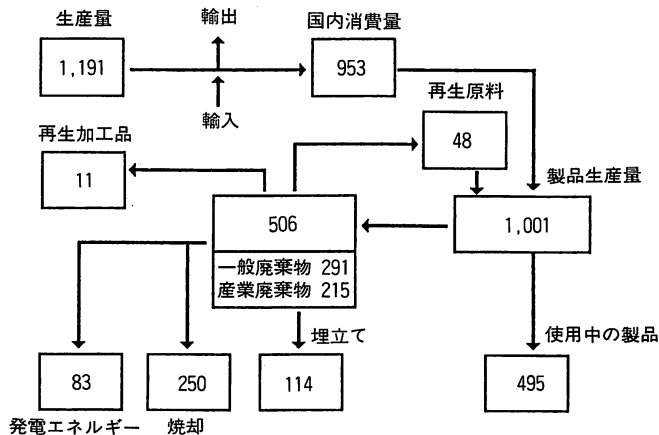


図-1 日本のプラスチック循環 (1989年) (数字の単位は万トン)

*住友化学工業(機能開発研究所)所長
 〒569 高槻市塚原2-10-1

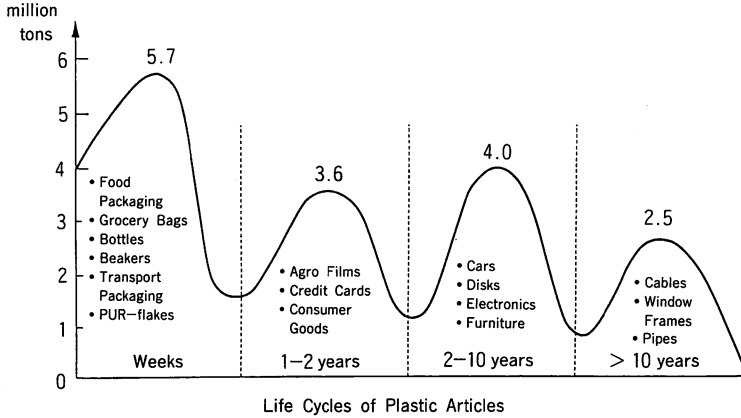


図-2 プラスチックの用途とライフサイクル (ヨーロッパ)

った1%に相当する量しか、一般ゴミ中のプラスチックは再生使用されていないのである。一般ゴミ中の廃プラスチックの再生利用が少ないのは、再生利用することに経済メリットがない事、プラスチックの種類が多いこと、しかも複合成形されている商品が多いこと、多品種混合廃プラスチックから各プラスチックを分離回収する事が困難なこと、回収プラスチックが新規品と同一の物性を維持しているとはかぎらないこと、など解決の困難な問題が沢山あるからである。従って、私達は「プラスチックの単純再生使用」という“夢”にのみ廃プラスチックの将来を賭けているわけにはいかないのである。そこで本稿では広義なプラスチックリサイクルについて、開発中の技術を紹介し、今後のプラスチック再生利用の方向を探ってみることにしたい。

2. プラスチックリサイクルの方法

全てのプラスチックをリサイクルすることが望ましいが、非常に多品種多用途のプラスチックを一挙にリサイクルする事は不可能である。図-2は、SRIの資料からの転用であるが²⁾ 西欧におけるプラスチック使用

品の製品寿命を示している。図に見られる如く、大半のプラスチックは、数週間から数年間のライフサイクルの製品に使用されている。即ち、飲料容器、包装材、トレー、等に使われているプラスチックが非常に多いのである。こうしたところに使われているプラスチックは、低密度ポリエチレン、ポリスチレン、ポリエチレンテレフタレート、ポリプロピレン、等であるが、まずこれらのプラスチックのリサイクル手段を確立することが当面の課題であろう。また、家電や自動車は、10年程度のライフサイクルではあるが、比較的大型のプラスチック成形体(洗濯槽、バンパー等)の廃棄物が発生するので、これらのプラスチック(主としてポリプロピレン、ABS)のリサイクル手段を確立することが中期的課題であろう。そして建築廃材中のプラスチックについては、ポリ塩化ビニルをはじめとして多品種であり、しかも異物質と混合して排出されて来ることから、リサイクルは当面困難である。幸い、図-2から予測がつく様に、建築の廃プラスチックは、廃棄量が少ないので、当面埋め立てや焼却などの既存の処理方法に頼りながら、リサイクル技術の開発をじっくり進める長期的課題とせざるを得ないであろう。私達は、こうした色々なレベルの課題を持つ廃プラスチックを、一様にリサイクルする事は不可能であり、廃出ルート、廃出形態等に応じて、最も合理的(=安価・安全・低エネルギー消費・低環境負荷)にリサイクルすることを考えなければならない。そうした観点から廃プラスチックのリサイクル手法を分類すると図-3のようになる。

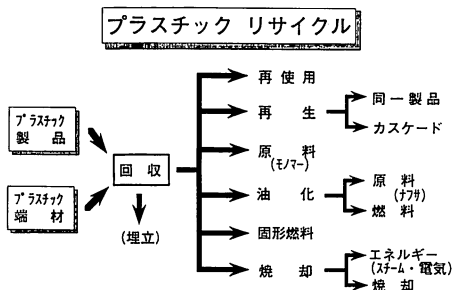


図-3 プラスチックリサイクル手法

- 即ち ① 廃プラスチックをプラスチックとして再使用する——マテリアルリサイクル
- ② 廃プラスチックを分解し原料又は油に戻し

て利用する——ケミカルリサイクル

- ③ 廃プラスチックを燃料として利用し、発生する熱をスチーム又は電気へ転換して使用する——サーマルリサイクル

の三つに大別される。私達は、先ず廃プラスチックをマテリアルリサイクルすることを念頭におかなければならないが、それにこだわりすぎると、かえって環境破壊を引き起すことになる。環境先進国と云われているドイツが、最近、廃プラスチックのマテリアルリサイクル一辺倒から、ケミカルリサイクルやサーマルリサイクルに関心を示し始めていることも、私達の廃プラスチック再利用の方向として参考になるのではなからうか。

3. プラスチックのマテリアルリサイクル

プラスチックを再利用する時に、回収されたプラスチックの中から異物を除去し、同一プラスチックを選別することが必要であるが、現在のところ完成された分別技術はない。表1に、現在比較的用意の近い分別技術を示したが、異物分離には有効な技術は多いが、プラスチックの分別に有効な技術は未だ見当たらないのである。しかし、技術の進歩は必ず問題解決の糸口を見出すことであろう。例えば、BASFのアイデアであるが、プラスチックごとに、特定の波長の光を吸収する物質を混練しておくことを国際規格化しておくことによって、回収後光分別が可能になるという手法は一つの問題解決の方向を示唆しているのではなからうか。こうした技術開発が達成されるまでは、プラスチックごとに、特定のマークをつけることが一つの問題解決手段であろう。

現在プラスチックのマテリアルリサイクルがおこな

表1 プラスチックの分離・分別法

選別法	異物分離	異プラ分離	装置例
磁力	○	×	磁気分離機
渦電流	○	×	渦電流分離機
静電気	○	△	静電気分離機
粒度	△	×	振動ふるい
風力(比重)	△	△	流動層分離機
液比重	○	△	沈降分離機 ハイドロサイクロン
浮遊	△	△	浮遊分離機
溶剤	△	△	
色彩	△	△	色彩分離機
溶融	○	△	
X線	○	△	

表2 リサイクル材の使用例

	LDPE	HDPE	PP	PVC	PS	ABS	PET
ラジカセ						○	
VTRカセットケース					○		
マンホール蓋						○	
玩具		○	○		○	○	
ゴミ袋	○	○					
ハンガー					○		
パレット		○	○				
コンテナ		○	○				
育苗箱			○				
履き物		○			○		
フロアタイル					○		
マット					○		
建築材		○			○		
シートトレイ							○
非食品ボトル							○

われている例を、表2に示した。魚箱用ポリスチレンをVTRカセットケースにしたり、温室用ポリ塩化ビニルをフロアタイルに使ったり、ビールコンテナを回収して得たポリプロピレンを使ってプラスチックパレットにした例などが示されているが、成功した例はまだまだ少ないのである。これらのマテリアルリサイクルが成功したのは、使用後のプラスチックが単一品種であり、しかも回収ルートが確立しており、そのうえ、比較的多量に再生使用出来る用途を見出したからであるが、通常、このような三条件が揃うことは、極めて稀なことである。今後プラスチックのマテリアルリサイクルの機会をふやして行くためには、社会制度や行政力も加味して、前述の三条件が揃うように状況整備をして行く、産官民一致の努力が重要である。さらに、リサイクル品を優遇する経済政策もとらなければ、海外から流入する安価なプラスチックには、リサイクルプラスチックは対抗出来ないであろう。こうした状況がそろったうえで、なお重要な課題は、この項の冒頭に述べた、分別技術とともにプラスチック加工技術である。ここにも多数の企業が色々な機械を提案しているが、紙数の都合で割愛させて頂き参考文献を上げることに止めたい³⁾。

4. プラスチックのケミカルリサイクル

マテリアルリサイクルとサーマルリサイクルの間に位置付けられる、このケミカルリサイクルの概念は、クローズドなリサイクルシステムとして近年西欧諸国で関心が高まって来ている。表3にケミカルリサイクルとして商業化されたものと開発中のものを示した⁴⁾。

表3 廃プラスチックのケミカルリサイクル実施例

メーカー	対象物	方法	
HOECHST -CELANESE	PET	メタノール分解	com
GOODYEAR TIRE	PET	グリコール分解	com
DUPONT	PET	メタノール分解	com
EASTMAN CHEMICAL	PET	グリコール分解	com
GE	ポリウレタン	加水分解	
DOW MOBEY	ポリウレタン	グリコール分解	
AMOCO	ポリオレフィン	触媒分解	Pilot
CHEVRON	ポリオレフィン	熱分解	Pilot
MOBIL	ポリオレフィン	熱分解	Pilot
フジリサイクル	ポリオレフィン	熱分解	(com)
USS	混合物	熱分解	Pilot
日本理化学 研究所	混合物	熱分解	Pilot

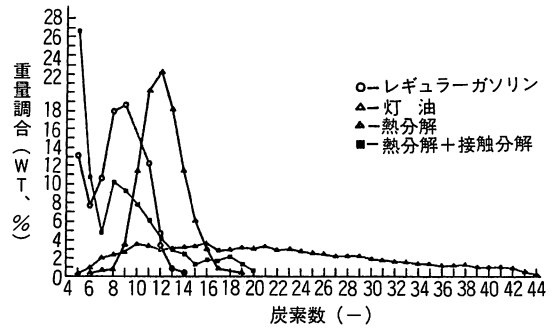


図-5 分解油の分子量分布

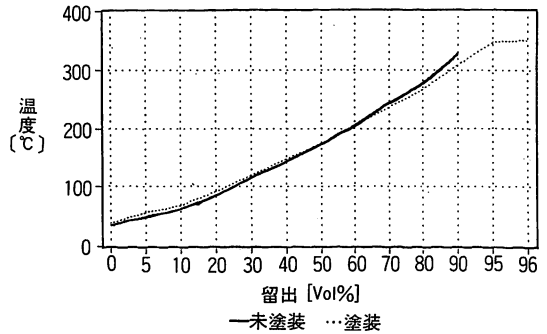
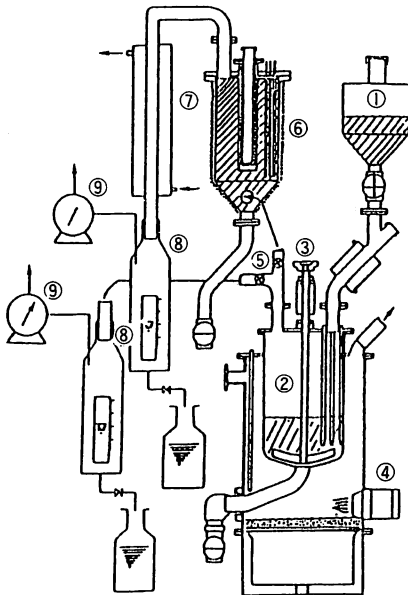


図-6 ポリプロピレンバンパーの油化品蒸留曲線



② 一次反応槽 ⑥ 二次反応槽 ⑦ 冷却器 ⑧ 受器

図-4 油化装置

現在、ポリウレタン及びPETのアルコール分解によるモノマー再生が実用化の段階に入っているものの、ポリオレフィン、ポリスチレン等の大半のプラスチックのケミカルリサイクルは、まだ、実証プラントレベル段階である。日本においても、この分野で活発な技術開発がおこなわれており、北海道工試の研究結果をベースにして、フジリサイクル、新日鉄、等がポリオレフィンの油化還元技術の実証プラントの稼働をおこ

なっている。北工試では⁵⁾図-4のようなベンチプラントを使って、ポリエチレンの油化を検討している。同所では、一次反応器の中で、天然ゼオライト触媒を用いて、ポリエチレンを、約400℃で重質油(〜C₄₄)に分解気化後、二次反応塔で、合成ゼオライト触媒を用いて接触分解することによって、非常に効率良く、ガソリン類似組成の油を作ることに成功した。その油の成分を図-5に示した。この技術をいち早く取り入れてフジリサイクル(株)が、相上市において、5000T/Yの能力のプラントの稼働を、平成4年央に開始している。このプラントで廃車のポリプロピレン製バンパーの油化実験をおこなうと、図-6のような蒸留曲線を示す油になった。このプラントは日本ではじめての大型油化プラントであるが、残念ながら、今のところ、素姓の明確な産業廃棄プラスチックのみの油化をおこなっており、生成油中に塩素が入らないように、頭初から、ポリ塩化ビニルの混入を避けている点で、一般廃プラスチックの油化プラントとは云えないのである。

ポリ塩化ビニルフィルムや、ポリ塩化ビニリデンラミネートフィルム、等塩素を含有するプラスチックの混入して来る、一般廃棄プラスチックの油へのリサイクルを可能にするために、北工試の齊藤氏は⁶⁾異方向

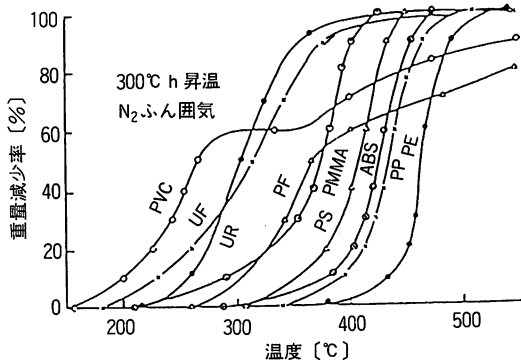


図-7 PVCの熱分解・脱塩酸曲線¹⁰⁾

回転二軸スクリュ-熱分解装置を用いて、320℃でポリ塩化ビニルの脱塩酸を完全におこなった後に、先に示した図-4の工程に導入することによって、塩素の入らない、油化リサイクル技術を開発している。これは、ポリ塩化ビニル（PVC）が、図-7、に示すように、300～350℃の範囲でスムーズに脱塩酸をおこす性質を利用したものである。この北工試の新技術を利用して、新日鉄が主体となって桶川市で400T/Yの油化パイロット、プラントの実証運転を平成5年3月より開始した。さらに、マツダ、東芝、等も塩素系廃プラスチックから塩素の混入しない油へのリサイクル技術を開始したことが新聞に発表されている。

さらに一歩踏みこんで、ポリオレフィン（PE PP）を熱分解し、ナフサラッキング類似成分に還元しようとする試みが欧米でかなり進められている。例えば、バツテル研究所では¹¹⁾ 20 l d/h のラボスケールで、低密度ポリエチレンからエチレン回収実験をおこない、3.3 C/kg のコストで 58 wt % 回収できることを明らかにしている。また、ハンブルク大学ではカミンスキー教授が、石英砂の流動床でポリエチレンの熱分解を

表 4 PEからナフサへ再生の可能性

	K法 PE 810℃	B法 PE 840℃	ナフサ
H ₂	1.2	1.42	0.86
CH ₄	18.8	18.85	15.3
C ₂ H ₂		1.35	0.75
C ₂ H ₄	17.9	46.34	29.8
C ₂ H ₆	6.2	3.9	3.75
C ₃ H ₆	7.2	17.16	14.3
C ₃ H ₈	0.2		0.27
C ₄ H ₈	0.1		4.15
C ₄ H ₆	1.5		4.9
C ₅ H ₈			2.35
B	21.6		6
T	3.8		4.6
X	0.2		1.65
SM	0.4		0.85

おこない、表 4 に示すような良好な結果を得たことを明らかにしている。さらに、BP社、DSM社、は夫々、廃プラスチックからナフサへ還元するセミコマ-シャルプラントの建設を発表しており、西欧においては、この分野の技術開発に積極的な挑戦が見受けられる。わが国においても、北工試・日揮プロセスや日本製鋼所プロセスなど、廃ポリスチレンからスチレンモノマーを回収する技術がほぼ完成している。

廃プラスチックを化学原料へ戻す技術は、ここまで記して来たようになり確立して来ているが、さらにケミカルリサイクルの新たな技術展開として興味深い研究活動の芽が見受けられる。その一つは、米国の Environmental Protection Agency が廃棄物の将来技術として提唱している、超臨界水酸化技術である。超臨界水とは、374℃以上の水の状態であるが、この

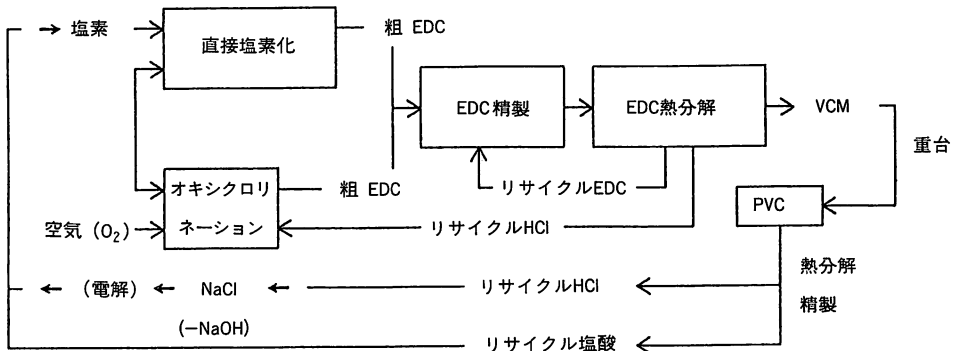


図-8 PVCケミカルサイクルシステム

状態の水は、極性物質であるにもかかわらず、ほとんどの有機物質と相互に溶解するうえに、酸素や水素などのガスとの混合も可能であり、さらに高圧力下では塩と相溶化し、高温にすると塩と相分離する、と言った諸物性を持っていることが知られている。この性質を利用して、超臨界水中に有機物質と酸素を送り込むと均一相反応となり、極めて速い反応速度で、炭酸ガスと水になる。この時にハロゲン物質があると、アルカリを存在させておくことにより塩として、とり出すことも出来る。こうした点に着目してModarとOxydyneの2社が、難廃棄性物質の高速水中燃焼プロセスを米国で開発している。現在は主として、PCBの処理に使用とされているが、ハロゲン系プラスチックに対しても有効な処理方法になるのではないかと考えられる。(この頃、東北大学、阿尻先生より情報入手)さらに、こうした超臨界水に近い状態のアルカリ水を溶剤にして、ポリ塩化ビニルを部分酸化することにより、しゅう酸を回収する結果やPETを硝酸水溶液中で部分酸化することにより、テレフタル酸とエチレングリコールを回収する結果が東北大、奥脇教授より報告されており、今後の展開に興味の持たれるところである。今一つの興味ある提案は、オキシデンタル社が提案している⁸⁾ 廃ポリ塩化ビニルを脱塩酸処理後、塩酸を回収し、オキシクロリネーション法によって再び塩化ビニルモノマーに戻す、図-8のようなりサイクルスキームである。ポリ塩化ビニルは、燃却時にHClガスが出るため、廃棄物処理の中でも困難なところがあるので図-8のようなりサイクルが可能になれば、非常に有益であり、早急な技術開発の待たれるところである。

5. プラスチックのサーマルリサイクル

現在流通しているプラスチックは、大部分が、炭化水素化合物であり、しかも、不純物の含有量が少ないので、廃プラスチックを燃料として使用し、発生する熱エネルギーを、スチームや電気に変換して活用することが検討されている。近年、特にわが国においては焼却技術の進歩がめざましく、流動焼却炉を使うことによって、高発熱量のプラスチックをスムーズに燃焼させることが出来るようになった。また焼却炉出口の排ガスや灰の無害化処理技術の開発も進んで来た。こうした関連技術の進歩にともなって、廃プラスチックを、エネルギーの形で回収しようとするサーマルリサイクルが非常に現実的になって来ている。こうした動

きの中で、通産省が主唱しはじめている。「廃棄プラスチックを利用したエネルギー供給システムを中核とする環境調和型エネルギーコミュニティの形成」の概念⁹⁾は極めて興味ある提案である。その概念は図-9のようなものである。こうした概念を現実のものにしていくためには、まだ多くの課題が残っている。例えば、燃焼熱をスチームに変換して使用する場合、スチームを年間需要変動なく使用出来る施設を持ち得る地域に限られると言う制約がある。この解決には、ケミカルヒートポンプや蓄熱システムなど、熱損失の少ない、熱運搬・蓄熱技術、等の開発が必要であろう。また、エネルギー運搬を容易にするためには熱を電力に変換する方が望ましいが、発電を経済ベースでおこなうには、プラスチックを、約30000T/Y以上集積出来る場所に、廃プラスチック燃焼炉を置く必要がある。(発電施設の固定費から推算して小規模燃焼炉に発電施設を設置すると、発生電力のコストが非常に高価になる——経済性から見て上記したように、燃焼プラスチック量は、30000T/Yは最低必要である。)プラスチックは高高いので、遠距離輸送はコスト高になることを考慮すると、これだけ多量の廃プラスチックを一般ゴミとして集め得るのは100万都市近傍に限定されるであろう。この問題解決のためには、廃プラスチックを発電場で良質の固形燃料に変換して運搬を容易にする事や、廃プラスチック発電の効率を、現在の約19%から大巾に改善することや、低温熱電素子の開発によって一次発電後の未利用廃熱を有効利用すること、などの技術開発課題が多々ある。勿論、こうした課題解決以前の問題として、ハロゲン含有プラスチックをどのようにして燃焼させるかという問題にも取り組んで行かなければならないであろう。このように、この概念の実現には多くの課題が内在しているけれども、廃棄物を有効利用し、大きな意味でリサイクルをさせているところに、廃棄物問題に対する一つの解答を示しているのではないかと考えられる。通産省のプランでは、このサーマルリサイクルを含めると、わが国の廃プラスチックは、究極90%までリサイクルが可能であろうと推定している。私達は、こうしたリサイクルシステム完成のために、産官学協力して課題解決に取り組んで行かなければならないと痛感する。

6. おわりに

以上プラスチックのリサイクルについて現状と課題をおおまかに述べて来たが、最後に、プラスチックリ

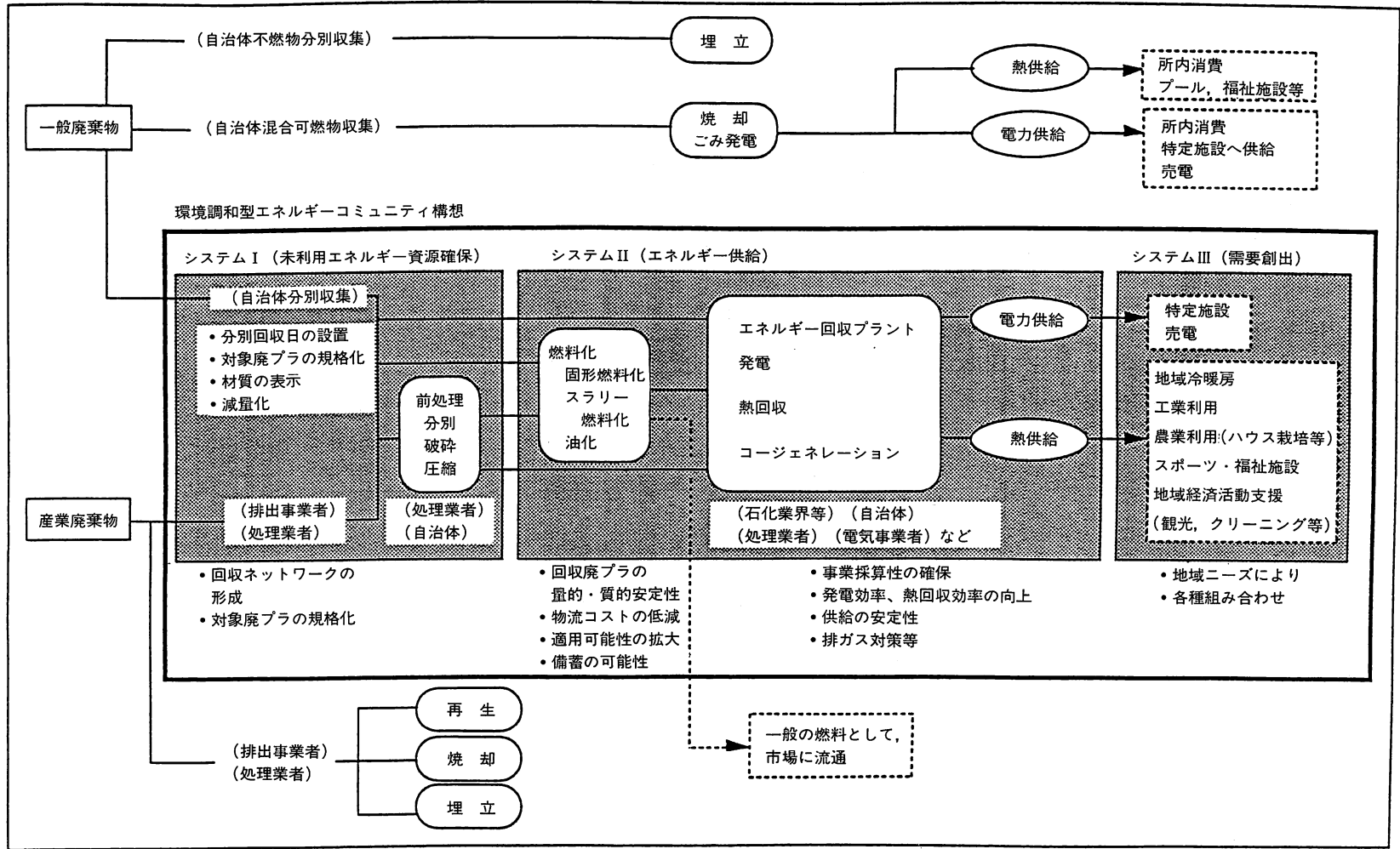


図-9 廃棄プラスチック利用エネルギー供給システムによる環境調和型エネルギーコミュニティ構想の概念⁹⁾

サイクルを実現して行くために、どのような取り組みが必要であるかを整理しておきたい。

- (1) 廃棄プラスチックの選別を容易にする技術開発
- (2) 廃棄プラスチックは他素材に比較して高高く、輸送コストが高くなるので、廃棄プラスチック集積地域ごとに減容積化を手軽に出来る技術の開発
- (3) 出来るだけ、単純再生の道を探すべきであり、そのためには、再生コストを下げる努力と再生プラスチックの用途拡大の努力
- (4) 一つのリサイクル手法にだけ頼らず、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を併用して、廃棄プラスチックのリサイクルを実現する
- (5) 廃プラスチックのリサイクル手段を決める際には、環境保護と省資源の両方の観点からプラスチックの生産・加工・輸送・使用・廃棄回収・再生の全工程にわたる、トータルエコロジーバランスを評価すべきである。こうした、製品のライフサイクル、アナリシスの手法は現在未だ試行段階であるが、近い将来には、ISO等によって国際共通システムが整備されるであろう。

上述のような取り組みを推進して行くためには、社会制度の整備、経済的支援、行政施策、消費者の価値感の革新と教育などを徹底しなければならない。また通産省、厚生省、環境庁など省庁の壁をはずした総力

を結集して、例えば、廃棄物リサイクルモデルの実証都市を日本全国に数カ所作ってみることも一つの試みではないかと考える。

以上、プラスチックリサイクルについて、かけ足で紹介して来たが、最後に、プラスチックリサイクルを円滑におこなうために、プラスチックを適所に適量使い、廃棄物排出量をへらすことが最も重要であることを書き添えておきたい。プラスチック、メーカーにとっては、つらいところではあるが、多量生産、多量消費によって利潤を追求する時代から、地球環境保護までを視野に入れて適量生産による適正利潤を追求する時代へと、事業のリストラクチャーを進めて行かなければならない時に至っていることを、プラスチック業界に身を置く一員としておおいに自覚しなければならないと考えている。

参 考 文 献

- 1) プラスチック処理促進協会パンフレットより
- 2) スタンフォード研究所パンフレットより
- 3) プラスチックエージ1992年7月増刊号P111.
- 4) Modern Plastics, July '91より引用.
- 5) 通産省工技院平成2年資源研究発表会資料他.
- 6) 科学と工業 66 (10) 438~445 (1992).
- 7) Battelle 研究所技術資料.
- 8) 合成樹脂 1992, No. 2, P27.
- 9) 平成4年度環境調和型エネルギーコミュニティー形成調査 (通産省).
- 10) 三菱重工技術資料より.