

# プラスチックのリサイクル技術と当社の取組み

野末幾男 (理博)

技術開発本部・化学環境研究所

## Recycling of Plastics and Activities at Kobe Steel

Dr. Ikuo Nozue

The current situation in the recycling of plastics and related legislation in Japan are reviewed, as well as efforts towards recycling of plastics at Kobe Steel. Waste plastics are mainly placed in landfills and destroyed by combustion. However about 20% of plastics are recycled (based on the total amounts of plastics discharged in 1994) by material recycling and thermal recycling technology. Several problems to be resolved and recent trends in these recycling technologies are also described. The entire Kobe Steel Group, through its unique comprehensive technologies, is making an effort to contribute towards the recycling of waste plastics under the company's "global environment committee" guidelines.

まえがき = 先進工業国がもたらした物質文明は、我々の社会生活に数々の恩恵を与えてきたが、そのいっぽうで大量生産、大量消費を指向した社会・経済活動が環境に与える影響も年々深刻になってきている。このような中、環境に関する大きな課題の一つとして、最近廃プラスチックの処理・リサイクルに関する議論が、活発かつ具体的にになってきている。

1995年6月には「容器包装に係わる分別収集および再商品化の促進に関する法律(容器包装リサイクル法)」が公布され、1995年12月に施行、1997年4月1日よりポリエチレンテレフタレート(PET)ボトルについての再商品化義務履行の適用が始まった。また、高分子学会と高分子同友会が1995年10月に主催した「環境と高分子」に関する国際シンポジウムの成果としてまとめられた「地球環境憲章」宣言には、「21世紀に向けて先進諸国が、高分子科学における新しい環境技術の研究開発を通じて、国際社会に貢献すべき確固たる将来ビジョンを構築することが急務である。」とうたわれている。

以上のように、最近社会的関心が高まっているプラスチックリサイクルの現状および技術動向<sup>1)2)</sup>と当社における取組みについて解説する。

### 1. 廃プラスチック処理の現状と環境法規

1990年代に入ってから、「リサイクル法」の公布と施

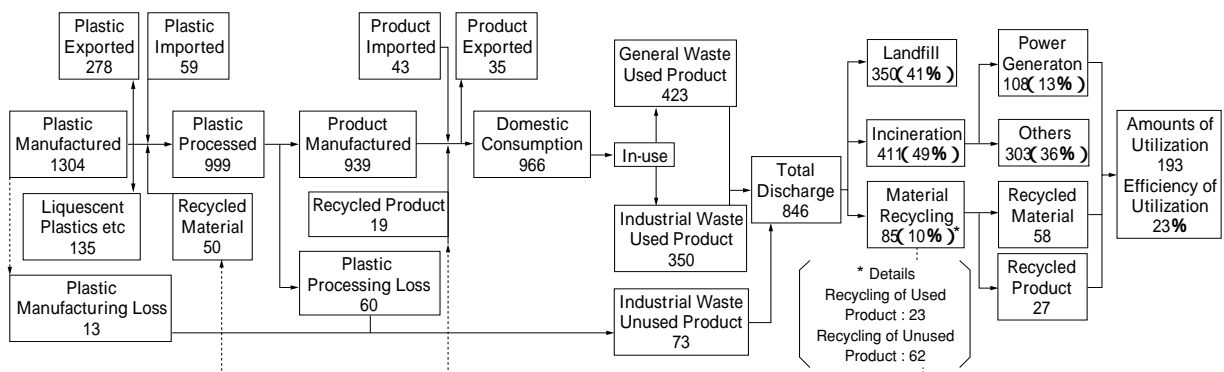
行、「新廃棄物処理法」の公布と施行、「省エネ・リサイクル支援法」の公布と施行、「廃プラスチックの処理に関する21世紀ビジョン」の発表(通産省基礎化学品課)について、「環境基本法」の公布(1993年11月)と「環境基本計画」の間議決定(1994年12月)がなされ、わが国の環境政策の基本が築かれた。環境基本計画には、わが国の環境政策の基本的な考え方と長期的な目標、および21世紀初頭までの施策の方向が述べられている。

長期的な目標としては、

- (1) 環境への負荷の小さい、循環を基調とする社会経済システムの実現
- (2) 自然と人間との共生の確保
- (3) 公平な役割分担のもとですべての主体の参加の実現
- (4) 国際的取組みの促進

の四つがあげられている。とくに(1)の社会経済システムの実現については、廃棄物の発生抑制、再使用・エネルギー回収、処分について詳細に言及しており、近年公布、施行の運びとなった容器包装リサイクル法にも基本理念が引継がれている<sup>3)4)</sup>。

このような環境法規の背景となっているわが国のプラスチック製品・廃棄物・再資源化のフローを概観したものが第1図(社)プラスチック処理促進協会まとめ)で、一部調査未了や数量の仮定があるものの、プラスチック製品の現状把握には格好のデータとなっている<sup>5)</sup>。マテ



第1図 プラスチック製品、廃棄物、再資源フロー(1994年ベース;単位は万トン)<sup>5)</sup>  
 1) 点線で結んだ再生材料、再生製品の数量は、1993年の再生製品が1994年に使用されたものとした  
 2) 固形燃料化、油化、熱回収などの有効利用については、調査未了のため記載していない  
 Fig. 1 Flow of plastic product, waste and recycling (Based on 1994; Figures in x 10<sup>4</sup> ton)  
 1) Amounts of recycled material and product connected with dotted line are those in 1993  
 2) Utilization as RDF, oil and thermal recovery are not shown because of uncompleted assessment

Current State	Intermediate Target	Beginning of 21st Century
Landfill (37%)	Landfill (ab.20%)	Landfill (less than 10%)
Combustion (37%)	Combustion (15%)	Energy Recovery by Power Generation and RDF etc. (ab.70%)
Power Generation (15%)	Energy Recovery by Power Generation and RDF etc. (ab.50%)	Recycling (ab.20%)
Recycling (11%)	Recycling (15%)	
Efficiency: ab. 30%	Efficiency: ab. 60%	Efficiency: ab. 90%

第2図 廃棄プラスチックの処理に関する21世紀ビジョン<sup>2)</sup>  
Fig. 2 21st century vision for treatment of plastic waste

リアルリサイクルの量は85万トンで、総排出量846万トンの10%であった。再生製品(27万トン)の主な排出源は、一般廃棄物のPETボトルや発泡ポリスチレン(PS)トレー、産業廃棄物の魚箱や梱包材(PS)、農業用ポリ塩化ビニル(PVC)シート、ボトルコンテナ(ポリプロピレン:PP)などである。いっぽう、焼却および埋立てによる処理量は、それぞれ411万トン(総排出量の49%)、350万トン(総排出量の41%)となっており、焼却処理のうち13%にあたる108万トンが、ごみ発電によりエネルギー回収されている。

すなわち、プラスチック総生産量1304万トンに対して、846万トンのプラスチック総排出量があり、総排出量のうち193万トンのプラスチックが有効利用されている現状(総排出量に対する有効利用率23%)を、21世紀初頭には有効利用率約90%までに引き上げようというのが通産省の「廃プラスチックの処理に関する21世紀ビジョン(第2図)である。しかし、現状ではその格差是正に大きな努力が必要である。

## 2. プラスチックのリサイクル技術動向

単純な焼却や埋立てを除いたプラスチックのリサイクル技術としては、

- (1)物理的に洗浄や粉砕などの工程を経て再利用されるマテリアルリサイクル
- (2)化学的および熱的な解重合やモノマー化反応などを利用し、燃料や原料のかたちで再利用するケミカルリサイクル
- (3)燃焼熱をスチームや電力などのかたちで回収するサーマルリサイクル

がある(第3図)。以下、各リサイクルの技術動向について概観する。

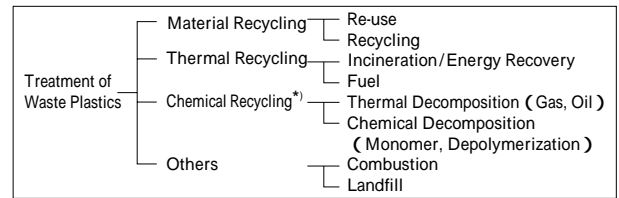
### 2.1 マテリアルリサイクル<sup>5)6)</sup>

マテリアルリサイクルは、粉砕、溶融、洗浄、選別、混合などの単純な機械的処理によって再生品を製造するため、同一または等質であり、異物の混入が少なく、

第1表 使用済みプラスチックの主なマテリアルリサイクル(1992年)<sup>7)</sup>

Table 1 Typical material recycling of waste plastics in 1992

	Waste Plastics		Major Application of Recycled Product
Industrial Waste	Foaming PS(Packing etc.) PVC Film(Agriculture Use) Beer Container(PP) Cable, Wire(PVC) Bumper(PP) Battery Case(PP)		Ingot, Goods Mat, Goods, Tile, Flooring Pallet Mat, Tile, Flooring Pallet Industrial Parts
General Waste	PET Bottle(Beverage Use) Foaming PS Tray(Food Use)		Textile, Cotton, Tray Goods, Furniture



\* Chemical recycling is sometimes classified as a part of material recycling

第3図 廃棄プラスチック処理技術の現状<sup>6)</sup>

Fig. 3 Current treatment technologies of waste plastics

大量に廃プラスチックが確保できる場合に適用されるが、工程での変質や劣化がともなうために、ほとんどの場合低品位製品へのカスケードリサイクルとなる。したがって、選別・分離技術と再生製品の用途開発が大きな課題である。

産業系廃プラスチックのうち使用済み発泡PSは、異物の混入が少ないことから積極的にリサイクルが進められてきている。また、農業用PVCシートのリサイクルも歴史が古く、洗浄・粉砕処理されたシートはマットやタイルに再生されている(第1表)。いっぽう、一般系廃プラスチックは関係団体の努力はあるものの、回収、異物混入と選別の問題があり、リサイクル率はきわめて低い状態にある。ちなみに、代表的な一般廃棄物で、最近、衣料などへの用途開拓が盛んになっているPETボトルの場合でさえ、現状の回収率は数%にとどまっている。

廃プラスチックをマテリアルリサイクルに適した原料とするための選別・分離技術の開発も盛んにおこなわれている。とくに、土砂、ガラス、金属、食物、木、異種のプラスチックなど多様な異物が混入している一般廃棄物から、効率的に目的とするプラスチックを選別・分離するためには、各種の要素技術を併用あるいは組合せる必要がある。

### 2.2 ケミカルリサイクル<sup>7)~9)</sup>

ケミカルリサイクルでは、熱分解、酸・塩基や触媒をもちいた化学的分解などによるモノマー、低分子量物や燃料への変換がおこなわれるが、化学的あるいは熱的処理工程に要するコストのため、一般に再生製品のコスト競争力に課題を抱えている。

ポリエチレン(PE)、PP、PSなど汎用プラスチックを対象とした熱分解油化技術をもちいたプラントは、全国で稼働しており、熱分解反応あるいは熱分解反応と触媒をもちいた化学反応を組合せることにより、プラスチックの80%以上が油化製品として回収される場合もある。分解反応時間が長いこと、熱分解油についても燃料または化学原料として利用するには再処理が必要など、熱分解油化技術には課題も残っており、装置上の改良と改質、分解触媒の開発研究がおこなわれているが、腐食

性ガスを発生する PVC や難分解性のフェノール樹脂などのリサイクルには適さないようである。流動床プロセスにより種々のプラスチックを熱分解した結果を、第2表に示す。

縮重合反応は、加水分解反応やアルコール分解反応の逆反応であることから、アミド、エステル、カーボネートなどの結合を有する縮重合系プラスチックは、加水分解反応やアルコール分解反応によって解重合され、モノマーや低分子量物に変換されうる。解重合反応を利用したモノマー、低分子量物回収技術は、海外の化学会社を中心に PET、ナイロンを対象として活発に技術開発されてきており、一部では実用化段階に入っている。

また、鉄鉱石の還元剤として高炉で廃プラスチックを使用する試みがある。これは廃プラスチックを単なるエネルギー源としてでなく、化学反応に関与する原料として利用するもので、今後、油化との競合が課題になると思われる。

### 2.3 サーマルリサイクル<sup>10)</sup>

異物の混入にともなう選別・洗浄処理やモノマー化処理などに要するコストの点で、サーマルリサイクルは上記二法に比べて有利と考えられる。しかし現状では、プラスチックが本来有している高い発熱量の利用率（エネルギー回収率）の低さや、焼却にともなう二酸化炭素や有害ガスなどの排出、固形燃料化、スラリ化などの解決すべき課題が残っている。

近年、耐食性材料の使用などによって、高発熱量の焼却にも耐える炉が製造可能となっており、設備に起因する課題は解決が図られてきている。いっぽうエネルギー回収率の向上に関しては、発生蒸気温度を上昇させることやガスタービンを利用することなどでの対処がなされてきており、発電効率も20%に達するとの報告もある。

家庭ごみを原料とした固形燃料化（RDF）発電は、安定的な発電とダイオキシンの削減や焼却灰の減量が期待でき、研究開発が盛んになっている。また、廃プラスチックのガス化、スラリ化も燃料の多様化の一環として研究開発がなされている。

これら現状における主なリサイクル技術の課題を第3表にまとめて記す。このほか、最近コンパクトな設計

第2表 熱分解プロセスの生成物<sup>9)</sup>

Supplied Plastics	PE	PE	PE/PP/PS (Household Waste)	PS	PMMA <sup>*1)</sup>	PE/PP
Temp. Carrier Gas Product	740 PG <sup>*2)</sup>	740 N <sub>2</sub>	735 PG 0.66% Cl	520 PG	450 PG	500 PG
Monomer						
Ethylene	19	36	11			1
Propylene	6	15	4			2
Other Gas (C<6)	33	23	34	1		7
Styrene	1		7	77		
Styrene Dimer				6		
Methyl Methacrylate					98	
Craker-feed Aliphatics						88
Aromatics						
Benzene/Toluene/Xylene	24	15	17	2		
Automatic Oils	11	6	18	11		<0.1
Total	94	95	91	97	98	98

\*1) PMMA : Poly(methyl methacrylate) \*2) Pyrolyzed Gas

で移動あるいは移設可能な廃棄物処理装置の開発に各社が力を入れており、装置開発の一つの流れになっている。これまでどちらかといえば「廃棄物を大量に収集して、大量に処理する」場合に関する議論が多くなされてきたが、今後は装置開発の流れと合わせて、「現地で収集してその場で処理する」場合の議論も、より一層盛んになってくるものと思われる。

### 3. 当社のプラスチックリサイクルへの取り組み

当社では、地球環境問題の流れを迅速かつ的確に把握し、対策の立案・実行を機動的におこなうための組織として、1992年4月に「地球環境委員会」を設置した。現在、環境保全に関する全社活動の立案、推進に関する事項と、既存環境関連事業の強化および新規環境関連事業の推進に関する事項について、検討・提言活動をおこなっている。本活動の中ではプラスチックのリサイクルにも取り組んでおり、一例として、生鮮食品の梱包・輸送容器として普及している発泡PSを効率よく回収し、洗浄、溶融し、ペレット化スチレン原料として再資源化するシステムが、横浜中央卸売市場で稼働している。

環境関連エンジニアリング事業の中では、環境適合材料のプロセスエンジニアリング事業にも取り組んでいる。当社および米国モービル社は、当社の高圧精製技術とモービル社のゼオライト触媒技術を組み合わせることにより、ポリエチレンナフタレート（PEN）の製造中間体

第3表 リサイクル技術の課題<sup>6)</sup>

Table 3 Problems of recycling technologies

	Major problems	Other Problems
Recycling (Material Recycling)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sorting of plastics</li> <li>• Separation of plastics from contaminants</li> <li>• Quality standard for recycled product</li> <li>• Application of recycled product</li> <li>• Improvement in properties of recycled product</li> <li>• Development of high-performance processing machines</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Economic feasibility of technologies</li> <li>• Government and municipal need for recycled product</li> </ul>
Incineration / Energy Recovery (Mainly for General Waste)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Management of dioxin</li> <li>• High efficient energy recovery (material for boiler)</li> <li>• Efficiency improvement of power generation</li> <li>• Management of exhaust gas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Collection system of waste plastics</li> <li>• Management by incinerator of small size</li> </ul>
Thermal Decomposition	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Treatment of miscellaneous waste plastics</li> <li>• Efficiency improvement of decomposition, reduction of decomposition time</li> <li>• Development of catalyst</li> <li>• Quality improvement of recovered oil</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Economic feasibility of technologies</li> <li>• Application of recovered oil</li> </ul>
Fuel (Solid, Powder)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Improvement in calories and constant quality</li> <li>• Management of chlorine</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Collection of waste plastics and constant supply as fuel</li> </ul>

である 2,6-ジメチルナフタレンの低コスト新製造プロセスを共同で開発した<sup>11)</sup>。

PEN は、繊維、清涼飲料水用ボトル、ビデオ・写真・食品包装用フィルムとして、大量に使用されている PET の代替プラスチックとして注目を集めている環境適合材料である。PEN は強度が PET の 1.5 倍で薄肉化が可能となし、ガラス転移温度が 113 と PET よりも高く、ガスバリア性が PET の 5~7 倍であることから、とくに煮沸消毒が可能なリターナブルプラスチックボトルへの適用が期待されており、PET ボトルに関するリサイクル問題の解決にもつながると考えられる。

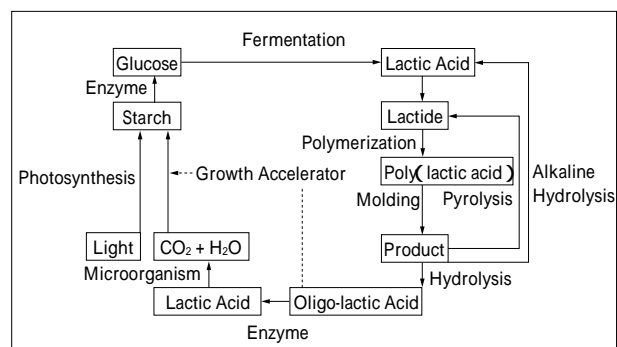
また、医療材料のほか、繊維、フィルム、不織布などへの成形技術開発により種々の用途開拓が進められているポリ乳酸の連続重合プロセスも、島津製作所と共同開発している<sup>12)</sup>。ポリ乳酸は、トウモロコシなどの穀物から発酵・抽出される乳酸を原料とし、微生物によって二酸化炭素と水に分解される、環境に優しい生分解性プラスチック(グリーンプラスチック)として知られている<sup>13)</sup>(第4図)。生分解性プラスチックの普及には量産化によるコスト低減が鍵とされているが、本連続重合プロセスの開発により、大規模生産による低コスト化にも新たな道が開かれるものと期待されている。

容器包装リサイクル法では、PET 以外の廃プラスチックのリサイクル方法として油化を中心に位置づけているが、混入 PVC が障害となる。いっぽう、今後石油系重質油の脱硫・軽質油化のニーズは増加すると考えられる。そこで、これら両者の課題・ニーズに応えるべく、重質油を溶剤として廃プラスチックを熱処理して脱塩素・減容重質油化(前処理)をおこない、えられた重質油をさらに水添するプロセスによって、高効率かつ廃プラスチックの油化と重質油の軽質化をおこなう共処理油化技術の研究開発をおこなっている<sup>14)</sup>。

このほかにも、当社の保有技術を活用したプラスチックのリサイクル技術・製品の開発例としては、超臨界水によるケミカルリサイクルプロセスの開発<sup>15)</sup>、PET ボトルやフィルムなどを再ペレット化し、直接繊維化するプラスチックリサイクルのための押出し機技術<sup>16)</sup>、RDF 製造実証プラント<sup>17)</sup>などがある。

このように、当社および当社グループでは、技術開発部門を中心に培ってきた燃焼技術、溶融・固化技術、高分子技術、化学技術、環境技術、水処理技術、材料設計技術、分離精製技術、分析技術などの基盤技術と、製造部門で蓄積してきた粉碎技術、圧縮技術、輸送技術、選別技術、プロセス設計技術、装置設計技術、材料製造・処理技術などの応用技術を、複合化した独自のトータル技術として活用し、「省エネルギー・リサイクル社会」の早期実現と地球環境保全への貢献をめざしている。

むすび=以上、プラスチックのリサイクルの現状および技術動向と当社の取組みについて概説した。企業、自治体、消費者、各種団体の努力はあるものの、技術、経済性の面から、プラスチックのリサイクルにはいまだ解決



第4図 ポリ乳酸の環境循環<sup>13)</sup>  
Fig. 4 Environment cycle of poly(lactic acid)

すべき課題は多い。主な課題としては、分別排出、分別収集・回収のためのインフラ作り、再生品の用途開発と経済性、プラスチック選別技術の確立(PVC、異物の除去)、一般消費者、自治体、企業の理解と努力、リサイクルコストの負担、長寿命製品製造の材料面、設計面からの検討、などがあげられよう。

1997年6月、自動車メーカーから、自動車が地球環境にどう影響を与え、どう負荷を軽減しているかについて明記した日本車初の「環境ノート」搭載の発表がなされた。「環境仕様(約25項目)には、再生PETボトルのダッシュインシュレータへの使用など、プラスチックに関する仕様も含まれている。

このように、環境に対する企業の関心と取組みは着実に前進しているものの、現実には人口増加と生活水準の向上欲求にともなうエネルギー消費量の増加という根本的な問題があり、全体として資源使用量は増加傾向にある。かけがえのない地球環境を保全して、次の世代に安心して託すことのできるよう、個人および組織レベルでの環境問題に対する一層の関心と啓蒙活動、リサイクルへの取組みが、今後ますます必要になってくるものと思われる。

#### 参考文献

- 1) 富川昌美: エネルギー・資源, Vol.17, No.2 (1996), p.157.
- 2) 草川紀久: プラスチックス, Vol.47, No.1 (1996), p.141.; Vol.47, No.2 (1996), p.88.; Vol.47, No.7 (1996), p.10.
- 3) 草川紀久: プラスチックス, Vol.46, No.12 (1995), p.97.
- 4) 伊澤伯: 化学経済, 6月号 (1997), p.2.
- 5) 安田武夫: 工業材料, Vol.45, No.1 (1997), p.80.
- 6) 飯島林蔵: プラスチックス, Vol.47, No.7 (1996), p.16.
- 7) 安田武夫: 工業材料, Vol.45, No.1 (1997), p.84.
- 8) 三宅彰: 高分子, Vol.46, No.6 (1997), p.406.
- 9) W. Kaminsky: 高分子学会・高分子同友会主催第1回「環境と高分子」国際シンポジウム講演要旨集 (1995), p.18.
- 10) 安田武夫: 工業材料, Vol. 45, No.1 (1997), p.82.
- 11) 化学工業日報ほか, 1996年10月3日.
- 12) 化学工業日報, 1997年6月2日.
- 13) 小関英一: 島津評論, Vol.53, No.1 (1996), p.61.
- 14) 大隅修ほか: 第6回日本エネルギー学会大会, 札幌 (1997)
- 15) 長瀬住之ほか: 化学工学会第28回秋季大会予稿集第2分冊, (1995), p.72.
- 16) S. Nagae et al.: Polymer Processing Society 12th Annual Meeting, Sorrento, Italy, May (1996)
- 17) 朝日新聞, 1997年7月8日.