

な場合でも精製工程の効率と品質を考慮して、簡単な前処理を行ない、内容物の残滓や異種樹脂を除去し、プロセスに投入するのが一般的である。実際に米国で行なわれていた回収PETボトルのケミカルリサイクルプロセスと、その後各国で提案されている方式を比較し Fig.6 に纏め、更に除去すべき異物との対比においてそれぞれの技術を比較し、第12表に示した。

Fig. 6 PET ケミカル リサイクル 工程比較

ケミカルリサイクルの考え方はPETを化学反応によってその組成原料又は中間原料に分解し、その過程で精製を行い、再度PETに重合することを基本に置いており、PETを分解することなくそのままの形で不純物を除去する考え方であるマテリアルリサイクルやメカニカルリサイクルとこの点で基本的に異なっている。

しかし、ケミカルリサイクルにおいても基本的に二つの方式が存在し、回収対象から目的物のみを純粋に取り出す方式と回収対象から不純物のみを取去って目的物を残す方式がある。前者の方式にはメタノリシス方式が該当し、後者にはグリコリシスやアルカリ分解法が該当する。

メタノリシス方式はPETにメタノールを加え、高温加圧下で分解し、PET樹脂の組成原料の一つであるDMT(ジメチルテレフタレート)に変え、DMTが蒸溜精製できる性質を利用して精密蒸溜することにより純度の高いDMTを取り出す方法である。この方式によると土砂や金属などの無機物は勿論、溶融しているDMTの中で固体の状態が存在するプラスチックや顔料などの有機物や沸点を持たない溶融状態の有機物は蒸溜釜の中に残留し、DMTと分離することができる。この反応の際に蒸発するDMT以外の物質との分離は、それぞれの沸点の差によって分別する。DMTの沸点に近い物質が存在するとDMTの純度を下げる原因になる。現在ボトル用のPET樹脂には主原料のテレフタル酸とエチレングリコールの他に改質剤として少量のイソフタル酸(IPA)やシクロヘキサジメタノール(CHDM)が共重合されているものもあるが、これらが精製の際に不純物としてDMTに混入してくる。これに対しては精密蒸溜と他の技術を組合せることによって混入を防ぐことが出来るので、メタノリシスはあらゆるPETのリサイクル技術の中で現時点で最も高い精製能力を持っている方式といえる。但し、この方式は、現在ボトル用のPET樹脂が殆ど高純度テレフタル酸(PTA)を出発原料として製造されている中で、精製DMTをボトル用に使用するためにはもう一段、工程を加えてDMTからPTAに変換する必要性が出てくる問題がある。

グリコリシス方式はPETに過剰のエチレングリコール(EG)を加えて加熱し、解重合して精製した後、そのままPETに再重合する方法である。EGはPET樹脂を製造する際の組成原料の一つであり、精製工程でEGが残留することがあっても不純物となることはない。PETはEGと化学反応すると分解を始め、最終的にはビス・ヒドロキシエチル・テレフタレート(BHET)という化合物になる。このものはPETの重合時の中間成生物であり、EGには溶解するが水にはあまり溶けない。EGに溶解した状態で固形の不純物や異種樹脂を濾別し、場合によっては活性炭吸着処理で不純物を除去した後、そのままPETに再重合する。不純物の中にはEGに溶解してBHETと同じ挙動を示し、分離が困難なものも含まれている可能性があるため、投入する回収PETボトルの汚染の度合いや前処理工程での異物除去には注意する必要がある。又、この方式ではPETの改質に使用されたIPAやCHDMを完全に取り除くことは困難であり、これを除去する為には得られたBHETを一旦分離して、あら

ためて メタノールを加えて加熱し、DMTに変えて蒸溜精製する方法も行なわれている。

最近開発されたアイエス法はBHETを減圧蒸留によって他の不純物と分離しようとするものである。一般にはこのような条件下ではBHETは縮合反応を生じ、PETに重合され易いと受け止められていて、あまり検討されていなかったが、条件を選んで厳密にコントロールすればBHETとして蒸留できることが確かめられ、メタノリシス並みの精製ができる可能性が出てきた。

部分グリコリシスはPETをEGで最初から完全に分解するのではなく、部分的に分解し、それぞれの段階においてユニークな方法で不純物の除去を行いながら純度を上げ、最終的にはBHETにまで分解して精製し、PETに再重合する方式である。現在、実用化を目指して開発中であり評価は未定である。

最近色々なところで検討が行なわれているアルカリ分解法はPETに少量のEGの存在下に苛性ソーダを加えて加熱することにより、PETをテレフタル酸ナトリウム(TA-Na)に分解する方式である。TA-Naは水或いはEGに溶解するために溶液として濾過し、溶けない不純物を濾別する。その後で硫酸を加えてTA-Naをテレフタル酸(TA)とし、水溶液からテレフタル酸を析出させる。これを濾別し、水洗、晶析等で精製してPTA(高純度テレフタル酸)に再生する方法である。分解反応が単純であり、装置も比較的簡単なもので行なえるために 関心を持たれているが、不純物の除去に対しては前述の二方式に較べると不十分なところがあり、更に副成する硫酸ナトリウム(芒硝)の処理やPTAの精製など実用化に向けてまだまだ技術開発の余地が残されている。

Fig.6 の下欄に各方式の特徴を簡単に比較してあるが、技術としてはメタノリシスが優れているものの投資額の大きさ及びコストに難点があり、本格的に採用される雰囲気がないのが実態である。再生処理技術のコストについては次項で触れてみたい。

2-6)再生処理技術とコスト

PETの再生処理技術の実用化はコストと再利用の用途を加味した品質のバランスで決定されなければならない。

マテリアルリサイクル、メカニカルリサイクル、ケミカルリサイクルの各方式についてそれぞれが現在どういう水準になっているのかについては興味のある課題であるが、詳細な比較を行なった例は公表されていないので個々の情報から推察するしかないのが実状である。

マテリアルリサイクルに関しては 1980 年代の米国で Goodyear 社の試算した例がある。

第13表にそれを紹介する(第13表 参照)

これは Fig.1 に示したベースカップ付きの炭酸飲料ボトルを想定して、Fig.2 のプロセスによって再生処理した場合のマテリアルリサイクルのコスト試算の例である。販売価格は ROI 25 % や販売管理費を合わせて 4.83 ϕ を加え 19.84 ϕ と試算している。当時と較べると物価も上昇していることであり、コストの総額は参考にならないが、工程の収率が 60 % 程度であること、回収ボトルの価格がかなりのウエイトを占めていること、原単位、作業人員、間接費の考え方など興味深いものがある。

第13表 PETボトル マテリアルリサイクルコスト試算²⁾

前提				
製品	: PET フルーク			
工程	: Fig.2			
処理能力	: 4,500 t/y			
設備稼働率	: 85 %、 6,000 hrs/y (250日/年)			
生産量	: 3,850 t/y			
本体設備費	: 750 (10 ³ \$) → 177 百万円* ¹			*1; 140 ¥/\$として 換算した
建物、付帯設備費	: 350 (10 ³ \$) → 82 百万円* ¹			
コスト試算				
	原単位	単価(\$)	¢/lbs	¥/kg* ¹
原料費:				
回収 PETボトル	1.670 lbs	0.080	13.36	41.23
HDPEフルーク 売却	- 0.350 lbs	0.020	- 7.00	- 21.60
アルミ スクラップ 売却	- 0.020 lbs	0.200	- 0.40	- 1.23
ユーティリティ 費:				
電力費	0.071 kw	0.035	0.25	0.77
熱媒費	0.006 gal	0.950	0.58	1.79
他の 変動費:				
包材費			1.50	4.62
直接労務費:				
	2.1 名/シフト		2.25	6.94
変動費 計			10.54	32.52
固定費				
管理費	直接労務費の	10 %	0.22	0.68
直接補修費	本体設備費の	4 %	0.35	1.08
間接補修費	建物付帯設備費の	2 %	0.08	1.05
一般管理費	直接労務費の	100 %	2.47	7.62
税、保険等	総投資額の	2 %	0.26	0.80
設備償却費	10年定額		0.88	2.72
間接償却費	20年定額		0.21	0.65
固定費 計			4.47	13.80
製造原価合計			15.01	46.32

1995年にPETボトル協議会が米国を訪問し、PETボトル再生処理工場の調査を行なったときの報告によれば1995年当時の価格相場は第14表のようであった。(第14表 参照)

第14表 米国におけるPETボトル再生関係のコスト³⁰⁾

単位: ¢/lbs	~1995 / 1	1995 / 5	1997年	1999年/9月
			(参考 ²³⁾)	(参考 ³²⁾)
回収PETボトル(ペール) 価格 (運賃込み)	12~14	30~32	11~12	7~10
デポジット品 38 カーブサイド品 30 HDPE混合品 10				
再生PETフレーク 価格 (運賃込み)	37	57	39~40	31~36
ボトル 用途 42 シート 用途 40 コパウンド 用途 30 繊維 用途 33				
PET 再生処理費(マージン含む)	23~25	25~27	27~29	24~26
PET 再生ペレット 費	17~18		8	
(参考)				
PETペレット (ボトル用)	60~72	72~83	43~50	54~58

この表を第13表と比較してみると1997年になっても原料のボトルペールの価格は1980年代と殆ど変わらないが、再生処理コストは20~30%上昇していることがわかる。更に、最近の米国における再生処理コストに関する情報³¹⁾によると、1995年の高値を除いてボトルペールの価格は10 ¢/lbsとほぼ一定の価格で安定しており、フレークへの加工コストは平均的な値として23 ¢/lbs(日本円換算(110 ¥/\$)で56 ¥/kg]と云われているところから推定すると、バージン価格が安い時には採算が厳しい状態にあることが分かる。

一方我が国の代表的なPETボトルの再生処理会社であるWPR、YPRの再生処理コストは第15表に示すように、年間8,000 t/yのフル能力ベースで操業して110~130 ¥/kgと推定されている。米国との比較では第14表と対比して約2倍になっているが、高コストの原

因についていろいろ推察できるが、特に設備費の差が目を引く。(第15表 参照)

又、台湾では 5~10 NT\$/kg (15 ~ 30 ¥/kg) がマテリアルリサイクルのコストであるという報告もある。³²⁾ 日本が世界で突出して高コストになっていることがわかる。

第15表 マテリアルリサイクル コスト比較

	WPR	YPR	SLW ^{*3}
処理能力 (t/y)	8,000	8,000	12,000 ^{*1}
土地・建物 (億円)	20.1	4.4 + 土地	?
設備費 (億円)	12.1	11.7	3.5 (2.5MM\$) ^{*1}
再生処理費 (¥/kg)	130	110	50 ? ^{*2}

*1; PETボトル 協調査(BDAレポート) ²³⁾
 *2; 第16表より 20 ¢/lbsと 推定して 110 ¥/\$で 計算
 *3; Schmalbach Lubeca

第16表 Supercycle PETのコスト⁶⁾

回収 PETボトル(ペール)	25 ¢/lbs
PET 再生処理費	15 "
乾燥ペレット	10 "
固相重合 ----- Supercycle	15 "
工程 以	5 "
	70 "

SLW社が開発した食品直接接触可能な Supercycle プロセスに代表されるメカニカルリサイクル方式のコストについても詳細は分からないが、雑誌⁶⁾の記事によれば推定値として 第16表に示すように 70 ¢/lbs である。従来のマテリアルリサイクル方式のペレットに較べ

ると2倍に近いコストになっている。(第16表 参照)

このものはバージンのPET樹脂とほぼ同じコストであるとしている。品質的にもバージンと差はないが、販売に際しては環境対応のイメージ商品としてバージンに較べて8~10 ¢/lbs高く売っているようである。SLW社はフランスに5,000 t/y (前処理工程は6,300 t/y)のSupercycle方式によるプラントを7 MM\$で建設し、1998年始めから稼働を開始した。この投資の28.6%はエコアンバラージュ等の業界団体からの支援を受けている。³³⁾ 最近のPETボトル協議会の調査²³⁾によると、同社は米国において、既にこれまでに5~7 MM\$を投じて36,000 t/yの再生PETフレークの製造装置、更に2.5 MM\$で8,000 t/yのペレット化設備、1.5 MM\$を投資してSupercycleの設備を建設し、PETボトルの再生を行なっているが、最近のPETバージン価格の低迷を反映して、高コストの再生品の販売は思わしくなく、Supercycleの稼働率は50%程度に低下しているとのことである。SLW社以外にも食品直接接触に関して米国FDAの認定を受けているメカニカルリサイクル方式はいくつか知られているが、現在のところそれらのコストに関する情報は少ない。

1999年になって設備メーカーが低コストを標榜してメカニカルリサイクルのプロセスを販売し始めているが、オーストリアのEREMA社は200 DM/t [60 ¥/DMとして12 ¥/kg]の追加コストでクリーン化処理ができると云っている。³²⁾ 又、米国のPTI社やドイツのOHL社もバージンと同程度のコストでメカニカルなクリーン化ができるとしており、いずれにしてもSLW社の云っているような高コストにはならないと思われる。

PETボトルを解重合して精製するケミカルリサイクルのコスト比較については、Fig.6に簡単に触れたが、改めてその品質とのバランスを加味して比較検討した結果を第17表にまとめた。(第17表)

ケミカルリサイクルの場合のコスト比較は途中の精製物質ではなく最終的にはボトル用のPET樹脂に再生して比較する必要がある。従って設備費の合計は重合設備との組合せで考えなければならない。既存の遊休重合設備を転用する場合にはこの投資額より少ない額で設備の建設ができる。

メタノリシスのメリットは供給原料に制約が少ないことと、再生品の品質がバージンと較べて遜色ないくらい優れていることであるが、設備投資額が大きくコストが高いことが難点である。グリコリシスは投資の割には品質が劣り、供給原料に制約のあることが問題である。しかし現在開発中のアイエス法はBHETの蒸留精製を前提としており、グリコリシスの特長とメタノリシスの利点を兼ね備えた方式であり開発の成功が期待される。アルカリ分解法は工程は簡単で設備も安く出来る可能性があり、開発が進められているところであるが、現時点では未だ実用化の見通しが得られていないのでコストの比較はできない。

ケミカルリサイクルの場合、大量処理によってコストの増大を抑える必要がある。その為には設備の規模を大きくし、大量の原料を集めることが前提になるが、原料の品質に制約があると、この前提が成り立たなくなるおそれがある。その意味ではメタノリシス以外の方式にはこの障害を回避するための工夫が必要となる。消費者から回収されるボトルを原料にする限りにおいて良い品質のものを大量に確保することは容易なことではないと考えられるからである。

いずれの方法も、解重合して精製する為に、マテリアルリサイクル方式に較べると純度は優れており、食品用ボトルへの再生を進める上ではケミカルリサイクルは優れた方式であることは間違いではないので、それぞれの方式の難点を解決する努力に期待したいものである。

以上これまでマテリアルリサイクル、Supercycleなどのメカニカルリサイクル、ケミカルリ

サイクルのコストをそれぞれ個々に検討してきたが、全体を通して品質とコストのバランスを考慮しながら、現時点で実用化されている技術をあらためて比較し第18表に示した。

(第18表 参照) 第18表のコストについては前提付きの数値の比較であり必ずしも正確とは云えないが、プロセス間の相対的な比較においては支障はないと考えられる。これによるとマテリアルリサイクルが最もコストが低いが、品質的には食品に使用できるものには再生できない。メカニカルリサイクルによる食品への使用可能な方式はマテリアルリサイクルに較

第17表 PETボトルのケミカルリサイクルの比較

プロセス	メカニカル	ケミカル	アセス式 ケミカル	ケミカル分解
精製物質	DMT	BHET	BHET	TPA
設備投資	大	中	中	?
投資額 (億円) *1	+ 31	+ 26	?	+ 32 ?
コスト	高	中	中	?
対パーセント (¢/lbs)	+ 20 *2	+ 8*3	≒ ?	?
供給原料 品質	低	高	低	高
再生品 品質	優	良	優	可
FDA appr.	○	○	○	?

*1; PETボトル協議会ケミカルリサイクル 専門委資料より。50,000 t/y 規模での試算
+の意味は PET の 新設重合設備 80 億円に於ける追加。
*2; パーセント PET 60 ¢ として、再生品 25 % 混合で +5 ¢ から逆算
*3; パーセント PET に +8 ¢ で販売から推察

第18表 PETボトル リサイクル方式の比較

プロセス	物理リサイクル	メカリサイクル (Supercycle)	ケミカルリサイクル (メタリクス)	ケミカルリサイクル (カケリクス)
処理能力(t/y)	8,000	6,000	50,000	50,000
中間成生物	PETフレーク	PETペレット	DMT	BHET
最終製品	PET フレーク PET ペレット	PETペレット	PETペレット	PETペレット
供給原料*1 の 制約	○	○	○	×
再生品の 品質	可	良	優	良
食品用への 使用可否*2	×	○	○	○
投資額 (億円) *3	12 *4	10 *5	111 *6	106 *6
再生コスト PETペレット (¢/lbs)	35~37 *7	45 *8	70 *9	58 *10
(¥ /kg) *11	85~90	109	170	140
<p>*1; 制約なし→○ 制約あり→×</p> <p>*2; 可(FDA yes) →○、否(FDA no)→×</p> <p>*3; 設備費のみ</p> <p>*4; WPR、YPR の 投資より</p> <p>*5; フランスでの SLW の 投資額 7 MM\$ より</p> <p>*6; 第17表より</p> <p>*7; 第15表より</p> <p>*8; 第16表より</p> <p>*9; 第17表より。バージン 60 ¢と置き、再生バージン 80 ¢から原料代として 10 ¢をひく</p> <p>*10; 第17表より。バージン 60 ¢と置き、再生バージン 68 ¢から原料代として 10 ¢をひく</p> <p>*11; 110 ¥/\$</p>				

べるとコストは高いものの、ケミカルリサイクルに較べるとコストも安く、設備の規模も必ずしも大きくなくても良さそうであり、品質的にはベストではないにしても Bottle-to-Bottle によるクローズド化を目指す方向としては現時点ではコストの点から見れば最良の選択と云えるのではなかろうか。ケミカルリサイクル方式については投資額も過大となり、クローズド化を目指す中で一気にここまで突き進むのは原料の確保や技術、コストの両面でのリスクが大きいと思われる。

3. Bot-to-Botを可能とする再生処理技術の課題

使用済みPETボトルの再生処理技術は 1970 年代の中頃から開発が始まり、その後のPETボトルの世界的な普及と共に現在では世界共通の関心の的となっている技術である。

これには大きく分けて素材であるPET樹脂をそのままの状態ですべてを分離、除去するマテリアルリサイクルといわれる方式とPET樹脂を解重合し、組成原料に分解して精製し、再重合するケミカルリサイクルという方式の二つがある。

現在の技術水準で最も純粋な再生品を得るにはケミカルリサイクルに頼らざるを得ないが、投資が嵩み、コストが高いためリスクが大きい。マテリアルリサイクルはコストや設備投資は比較的少なく済むが品質的には純度が劣る。

一方、再生PET樹脂の再利用について云えば現在のところ繊維用途への利用が多い。この用途に関しては現在のマテリアルリサイクルの品質で大きな支障は出ていない。その他にシートや結束バンド及び成形品などの用途もあるが、この分野でも現在の品質は利用を妨げる原因とはなっていない。しかしPETボトルの今後の使用量の伸びを予想すると、最終的には食品ボトルに再利用ができないとリサイクルは行き詰まる。現在マテリアルリサイクルで得られている再生PET樹脂は異物除去が完全でなく、衛生的に安全とは云えない為、食品に直接接触して使用することは出来ない。ケミカルリサイクルによる再生PET樹脂はこの点では安全であるが、コストが高く経済的に合わない。他に方法がなければこれに頼らざるを得ないが、最近開発されたマテリアルリサイクルにクリーン処理を付加し、食品に直接接触使用しても衛生的に安全なメカニカルリサイクル方式は、投資額、コストも従来のマテリアルリサイクル方式に較べると高くなるものの、ケミカルリサイクルに較べるとかなり少なく済む方式であり、現在世界の関心の的となっている。但しこの方式で作られた再生ボトルが世界水準に比べて特に品質に厳しい日本の消費者に受け容れられるかどうかを技術の確立と共に商品性とあわせて確かめる必要がある。

我が国におけるPETボトルの再生処理は、法律の制定を受けて3年前から本格的にスタートし、現在マテリアルリサイクル方式で再生PET樹脂を生産している。再生処理技術にはまだ改良すべき点が多く、品質は必ずしも充分ではないが、繊維用途を主体に再利用されている。この用途を含めて更に再利用率を拡大するためには現在の処理技術の水準を更に向上させる必要がある。しかし欧米の動向をみると、早晚我が国でも食品に直接接触しても安全な再生PETを作る技術「Bot-to-Bot技術」の確立が迫られることは明らかである。これを実現するためには関係者一同、一体となって技術の選択と検証に時間と費用と情熱を注ぎ、わが国の実状に適合した解決法を確立する体制作りが不可欠である。

以上

参考文献

- 1) 内田、ソフトリク技術資料, No.125,1998年 第2号 p.161
- 2) Phillip Townsend Associates Inc.,「PET BOTTLE RECYCLING」
- 3) Goodyear Chemicals,Cleartuf[®] Fact CT 17.
- 4) Modern Plastics International,16 Mar.1989
- 5) 三菱化学調査資料、1997年
- 6) PLASTIC WORLD,p.42 May 1996
- 7) PLASTIC NEWS ,28 Aug.,1995
- 8) URRRC資料,Oct.1995
- 9) PLASTIC WORLD,p27 Aug.1995
- 10) European Chemical News,12-18 July 1999 他
- 11) PETボトル協議会「欧州廃プラスチックリサイクルシステム調査報告」(1997年11月)
- 12) エコパット調査報告(1993年)
- 13) Day Products 資料
- 14) Wellman 社資料
- 15) GOVONI社資料。PCI,Supply/Demand Report,1993/94,p61
- 16) SOREMA社資料より推定
- 17) CHEMICAL WEEK,June 7,1995 p.9, European Plastics News Mar.1996
- 18) RECOPEPET 報告、RECYCLE'94(DAVOS) 14,Mar.'94
- 19) Smorgon C.Ind., 報告、RECYCLE'94(DAVOS) 14,Mar.'94
- 20) 日本エコパット調査報告、1993年
- 21) Pure Tech International 資料
- 22) 日経産業新聞、1996・4・24
- 23) 三菱重工技報、Vol 36.No.3,1999年5月他
- 24) PETボトル協議会がリサイクル専門委員会資料(1997年)
- 25) 日経新聞、1993・3・27
- 26) 週間廃棄物新聞、1996・9・26
- 27) (株)アイエス資料
- 28) Modern Plastics International,10 Sep.'99 他
- 29) FDA,「Points to Consider for the Use of Recycled Plastics in Food Packaging :Chemistry Considerations」Dec.1992
- 30) PETボトル協議会米国調査報告(1995年)
- 31) PCi PET Recycling Business Report,Nov.'99
- 32) PCi PET Recycling Business Report,Sep.'99
- 33) European Plastic News,p.29 Jun.'96

P E T ボトルのケミカルリサイクルについて

緒言

日本に於けるP E Tボトルは、1977年、醤油用ボトルとして使用されて以来、その優れた透明性、内容物保存性、物理的強度、焼却時の燃焼カロリーが低く、排出ガスの安全性が高い、などが評価され、食品、洗剤、化粧品等の各分野で使用されるようになった。

1982年、食品衛生法の改正により清涼飲料用にP E Tボトルが認められて以来、特に食品用ボトルの分野で著しい伸びを見せ、1993年（平成5年）度には14.7万トンの材料がP E Tボトル用として使用されているものと予想される。

このP E Tボトル生産量は、全プラスチック生産量（1240万トン）の約1.2%にすぎないが、重量に比較して容積が大きい事、そのほぼ全量が比較的短期間に家庭で消費され、一般廃棄物として公共機関が回収、処理をする必要がある事から、1991年10月、通産省の「再生資源の利用促進に関する法律」（再資源化法案）が制定され、1993年6月、飲料、醤油、酒類用P E Tボトルが再資源化法第2種指定製品に指定された事により、官民一体となってP E Tボトルのリサイクルに取り組む事となった。

1 廃プラスチックのリサイクル方法

通商産業省の諮問機関である、産業構造審議会廃棄物処理・再資源化部会が平成6年7月に取りまとめ、公表した「今後の我が国の廃棄物処理・リサイクルシステムの在り方について」では、廃プラスチックについて

- 1) P E Tボトル等の再生利用体制の構築
- 2) マテリアル・リサイクルの対象製品の拡大の検討
- 3) 減容化等の技術開発及び設備の普及

が提言されており、政策的位置付けとして、下記のように提言している。

○リサイクルによる最終処分量の軽減の程度、資源の有効利用の観点から一般的に評価すれば、極力、原材料としての利用（マテリアル・リサイクル）を追及すべき

○しかしながら、社会システム上の理由、技術的、経済的理由、環境負荷の程度等により、マテリアル・リサイクルが適切でない場合には、サーマル・リサイクル、すなわち、焼却に伴う環境対策に万全を期しつつエネルギーの有効利用（廃棄物発電及び熱供給）を図るべき。

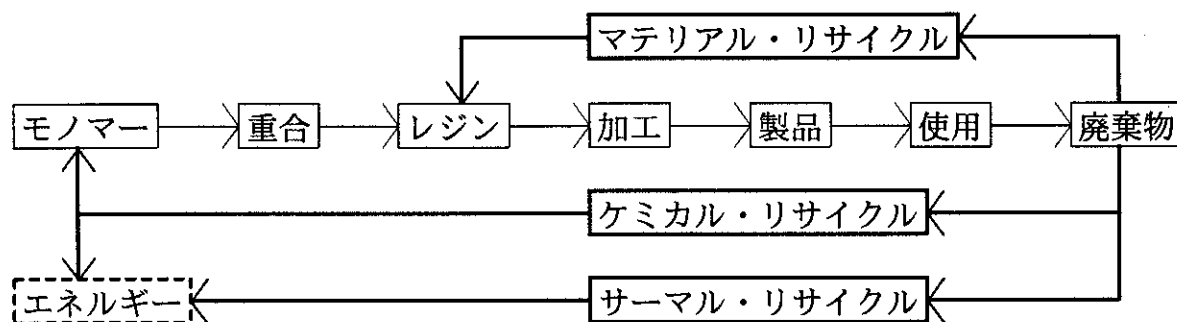
○マテリアル・リサイクルの実施が適当でない場合であって、かつ、廃プラスチックに関し、焼却施設の周辺地域の事情等により直接焼却できない場合、ケミカル・リサイクル（熱分解等によりモノマー、ナフサ等に転換して利用）が有効であり、プラスチック関連業界により、以下のような取り組みが行われるべき。

- ①熱分解油の燃料としての利用等の可能性の追及。
- ②積極的に熱分解油化事業の専門事業者を育成し、国もこれを支援。

③対象プラスチックの拡大及び製品の用途開発等を目的とする熱分解油化に関するモデル事業への取り組み

PETボトルでは、一般的に廃PETをモノマーまで分解し、再重合する事をケミカル・リサイクルとよんでいる。

そこで、この点を加味してリサイクルの方法を図式化すると下記の様になる。



◎マテリアル・リサイクル (Material Recycle)

使用済みプラスチック（廃プラスチック）を、選別、洗浄工程で処理してプラスチック素材のみを取りだし、必要に応じて再ペレット化等を行い、これを原料、又は原料の一部として各種成形物に加工して再利用する方法。

PETボトルについては、PETボトル協議会が中心となってPETボトルリサイクル事業組合を結成し、モデル事業として、1993年1月、回収PETボトル再生処理（マテリアル・リサイクル）を専業とする「ウイズ ペットボトル リサイクル株式会社（WPR）」を設立し、各市町村で分別回収したPETボトルの再生処理を推進している。

WPRの処理能力は6000トン／年であるが、現在のところ関東を中心とした61団体（市町村）が分別回収したPETボトル150～200トン／月を再生処理して再資源化を行っている。

◎サーマル・リサイクル (Thermal Recycle)

使用済みプラスチック（廃プラスチック）を一般廃棄物として、あるいは加工せずにそのまま焼却炉等で燃焼し、熱エネルギーに変えて電力、熱源等として再利用する方法。

現在、自治体の焼却炉のうち、約79％が発電を含む余熱利用を実施していると予想されており、1986年以降には約92％になると予想されている。

焼却施設での発電については、現在23％弱の施設で実施中と予想されているが、1994年～99年にはさらに36施設が竣工する予定である。

◎ケミカル・リサイクル (Chemical Recycle)

ケミカル・リサイクルについては、油化処理とモノマー化処理とに大別する事ができる。

廃プラスチックの油化処理等の技術については、サーマル・リサイクルの前処理と

して位置付ける事もできる。

又、PET回収ボトル等の様にモノマーまで分解し、再重合して原材料と同等のポリマーにする技術では、マテリアル・リサイクルの前処理として位置付ける事もできる。

◇油化処理

廃プラスチックを、熱、触媒等により分解し、ガス化、あるいはガソリン、燃料油等を生成する処理技術

1970年代にプラスチック処理促進協議会等が中心となって大規模処理技術の開発に取り組んだが、廃プラスチックの收拾、コストの点で問題となり、実用には致らなかった。現在、中小企業事業団が中心となって、桶川市、相生市で油化装置のテストが進められている。

今日では、産業廃棄物の有料処理を中心に、中、小規模の処理施設が稼働していると共に、企業においても廃棄物が処理困難となりつつある事から、企業内自家消費を目的として検討が進んでいる。

ここで処理されている廃プラスチックはPE(ポリエチレン)、PP(ポリプロピレン)、PS(ポリスチレン)が主体であり、PETについてはあまり行われていない。

◇モノマー化処理

PET、PMMA(アクリル樹脂)の様に、分解により比較的モノマーに還元しやすいプラスチックについて、廃プラスチック、産業廃棄物等の中より目的とするプラスチックのみを選別し、これを化学設備を使用して解重合を行い、ものと出発原料(モノマー)に戻し、再度重合してプラスチックにして再使用する方法。PETボトルについては主にアメリカで行われている。

2 PETボトルのケミカル・リサイクルの意義

廃プラスチックのリサイクルについては、産業構造審議会の答申にもあるように、マテリアル・リサイクルが最も有用と考えられる。

PETボトルについても例外ではなく、回収ボトルを処理して再度PETボトルとするいわゆるクローズ・ループ・システムが最も効果的なリサイクルシステムを構築出来ると考えられる。

PETボトルでは、その80%が食品包装用として使用されている。

PETボトルを選別、洗浄工程で処理してPET樹脂のみを取りだし、必要に応じて再ペレット化等を行い、これを原料、又は原料の一部として加工して再利用する一般的なマテリアル・リサイクルシステムでは、成形加工時の熱により、菌、酵母等の生物学的汚染はクリア出来るものの、使用済みPETボトルの目的外利用、廃棄PETボトルの二次汚染(例、農薬、殺虫剤、異物等による汚染、又は臭気の吸着汚染等)の危険がある。

この危険性、ならびに洗浄工程での洗浄度について科学的に根拠のあるデータが不足しているのが現状である。

その為、現状ではマテリアル・リサイクルによる回収再処理PETボトルを食品用途に使

用する事は不可能にちかい状態であり、PETボトルとしてのクローズ・ループ・システム構築が困難となっている。

そこで、回収PETボトルを選別、洗浄した後、PET樹脂をモノマーの状態まで分解、生成した後、再度重合してPET樹脂とした上で食品用PETボトルを成型する方法が開発された。

PETボトルでは、一般的にこのシステムを「ケミカル・リサイクル」と呼んでいる。

3 PET樹脂の重合工程

前述の通り、回収PETボトルのケミカル・リサイクルとはPET樹脂の解重合によるモノマーへの還元にはかならない。

そこで、PET樹脂の重合工程を理解する事がケミカル・リサイクルを理解する上で重要なポイントとなる。

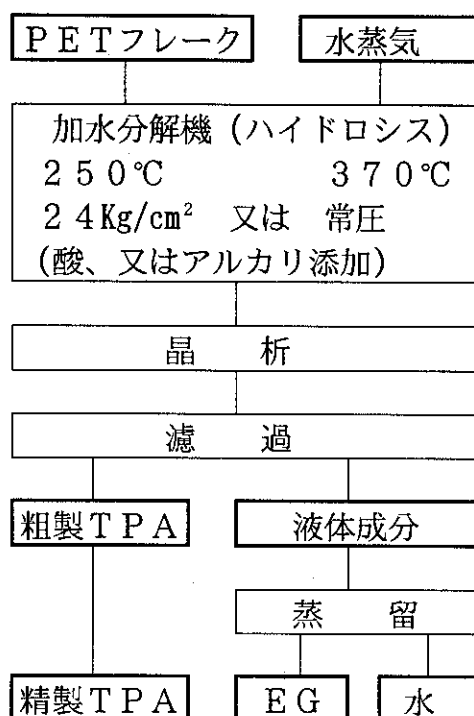
現在、PET樹脂を工業的に製造する方法として下記の2種がある。

		重合方法 (A)	重合方法 (B)
原料	①	TPA(テレフタル酸)	DMT(ジメチルテレフタレート)
	②	EG(エチレングリコール)	EG(エチレングリコール)
第1工程	中間成分	BHET(ビスヒドロキシエチルテレフタレート)	BHET(ビスヒドロキシエチルテレフタレート)
	除去成分	水	メタノール
第2工程	除去成分	水	
	最終製品	PET(ポリエチレンテレフタレート)	

- ◇ TPA(テレフタル酸) ----- $\text{HOOC}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{COOH}$
- ◇ DMT(ジメチルテレフタレート) ----- $\text{H}_3\text{COOC}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{COOCH}_3$
- ◇ EG(エチレングリコール) ----- $\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$
- ◇ BHET(ビスヒドロキシエチルテレフタレート) ----- $\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{OOC}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{COOCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$
- ◇ 水 ----- H_2O
- ◇ メタノール ----- CH_3OH
- ◇ PET(ポリエチレンテレフタレート) ----- $\text{HOCH}_2\text{CH}_2-\left[\text{OOC}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{COOCH}_2\text{CH}_2\right]_n-\text{OH}$

日本に於けるボトル用PET樹脂は、現在ではほとんどが「重合方法(A)」を採用した連続重合装置によって生産されている。

上記の様に、PETは縮重合によって生産されているため、理論的には、PETに除去成分である水、又はメタノールを添加して処理する事により可逆的に原材料(モノマー)に戻り得る。



必要に応じ酸、又はアルカリを添加し、高温高圧の水蒸気で分解する（加水分解）
又は、超高温水蒸気を吹込んで連続分解する

粗製TPAを固形物として析出させる

粗製TPAと液体成分を分離する

液体成分を蒸留してEGと水に分離する

粗製TPAを精製し、PETの原料とする

5 各種ケミカル・リサイクルの特徴

PETのケミカル・リサイクルとして、実用化されている方法、又は実用化の可能性のある方法は上記の3種類と考えられる。

これらの方法については、それぞれ特徴、長所短所があり、設備装置による得失もあるため、一概に結論つけられないが、一般的概論としては下記の様な長短がある。

分解方法		メタノール分解	グリコール分解	加水分解
解重合生成物(モノマー)		DMT	BHET	TPA
精製方法	蒸留精製	可能	困難	不能
	抽出精製	可能	可能	不能
	再結晶精製	可能	困難	困難
	総合難易度	容易	困難	困難
回収ボトルに要求される品質		低品質	中品質	中品質
再生にかかるコスト		高い	低い	低い

6 ケミカル・リサイクルPETボトルの実用例

1991年、米国 Hoechst Celanese社が、メタノリシス法により再生したPET樹脂を使用してコカ・コーラ用ボトルの生産を開始した。同年、Goodyear社もグリコリシス法による再生PET樹脂を使用してペプシ・コーラ社向けPETボトルの生産を開始している。これらはいずれも食品用途用としてFDAの認可を受け、ケミカル・リサイクルでえられたモノマーを20~25%含有するPET樹脂でボトルを成形しているものである。

7 ケミカル・リサイクルメーカーの概要

現在、PETのケミカル・リサイクル（産業廃棄物の自家処理を含めて）を行っている主なメーカーは下記の通りである。

国名	会社名	プロセス	現有能力	将来能力	備考
日本	帝人	メタリシス	10,000トン		自社内廃棄物処理が主体
米国	Du Pont	メタリシス	7,000	45,000	FDA認可
	Hoechst Celanese	メタリシス	9,000	20,000	FDA認可、Coca-Cola対応
	Shell/Goodyear	グリコリシス	11,000	11,000	FDA認可、Pepsi-Cola対応
	Kodak	メタリシス	10,000	20,000	
	Eastman Chemical	メタリシス		23,000	FDA認可
独	Hoechst	メタリシス	1,000	1,000	
	Hoechst	グリコリシス	4,000	4,000	
	Du Pont	グリコリシス	20,000	20,000	
仏	Recopet	鹼化		30,000	
欧州	Innovations in PET	加水分解			

（この表の他にも自社内廃棄物処理を主体としたケミカル・リサイクルを行っている企業があるが、公表していないため割愛した）

8 ケミカル・リサイクルの現状と将来

前述の通り、究極のPETボトルリサイクルシステムは、回収PETボトルを処理して再度PETボトルを成型するクローズ・ループ・システムにある。

その為、現時点では食品用PETボトルへのリサイクルにはケミカル・リサイクルシステムが最も有用と考えられ、欧米では、上記の様にPET材料メーカー各社でケミカル・リサイクル設備の新設、増設計画がある。

しかしながら、採算の問題、回収PETボトル收拾方法、回収量の問題等が表面化して、計画どうり進行していないのが現状である。

回収PETボトルのケミカル・リサイクルの採算性については、45,000トン/年以上の規模になってはじめて原油からモノマーを作るのと同じコストになると言われている。

日本でも同様に、回収PETボトル收拾方法、回収量、安定供給の問題が解決されておらず、採算の面も不透明であり、一般廃棄物（回収PETボトル等）を目的としたケミカル・リサイクル設備の計画はないのが現状である。

又、日本のPETボトル用樹脂の製造設備が、TPA/EGを原料とした重合設備となっており、現有設備では、直ちにケミカル・リサイクルで生成するDMTやBHETを原材料として使用する事が困難である事も遠因として考えられる。

以上、PETボトルのケミカル・リサイクルの一端を紹介させていただいたが、リサイクルシステムについては、今後、より採算性、量産性のよい、高品質な再処理方法の技術開発が期待される所である。