

発泡スチロール（EPS）のマテリアル リサイクル技術

Material Recycle Technology of Expanded Polystyrene (EPS)



(化)エンジニアリング部
今 中 照 雄
Teruo Imanaka

我が国においては、1970年代に都市ゴミ処理問題としてのプラスチックリサイクルがクローズアップされたことがあるが、経済性の問題などにより、解決されるには至らなかった。ところが、1990年以降世界での環境問題への認識の高まりと共に、我が国においてもプラスチックリサイクルが再度社会的に重要な課題となっている。

本稿では、公表されている資料を用いて発泡スチロール（EPS）のマテリアルリサイクル技術を紹介する。EPSは、プラスチックの中でも古くからリサイクルに取り組みられてきたものの一つである。また、プラスチックリサイクルの種類の中なかで最もマテリアルリサイクルが望ましい方法と言われているが、EPSのリサイクル方法はそのほとんどが、多様な手法でマテリアルリサイクルされている。よって、プラスチック全体のリサイクルを考えるにあたり、EPSのマテリアルリサイクルは参考となる。

In Japan, plastic recycle appeared close-up as urban refuse disposal in the 1970s, but it was not settled because of economical problem. After 1990, plastic recycle has become a social problem with an upsurge of a critical mind for international environmental issue, again.

Material recycle technology of EPS (Expanded Polystyrene) is shown using published materials in this paper. EPS has been recycled from old in comparison with other plastics. And, the main method of EPS recycle is material recycle received better appreciation as one of ideal methods. Therefore, EPS recycle system is a good guide to the study of overall plastic recycle systems.

Key Words :

マテリアルリサイクル
天 然 溶 剤
減 容 積
エ ク セ バ

Material recycle
Natural solvent
Volumetric reduction
EXEVA

まえがき

容器包装リサイクル法においてプラスチックはPET（ポリエチレンテレフタレート）と他のプラスチックと2種類に分類されているだけであり、発泡スチロールは他のプラスチックに分類され、一般家庭からは分別回収が行われな可能性が強い。材質が判別しづらいプラスチックや、多品種のプラス

チックが混在している一般系廃プラスチックに対する処理方法としては、リサイクルと呼ぶべきかどうかは別問題として、油化や高炉還元剤としての再利用が最も現実的であるかもしれない。しかしながら、発泡スチロールは、他のプラスチックに比べて見分けやすい、すなわち分別回収しやすい、というリサイクルにとっては最大のメリットを持っている。こ

の点、発泡スチロールは、エネルギーとして回収するよりも、本稿で述べるマテリアルリサイクルや今後の開発が待たれる樹脂原料へのケミカルリサイクルが最も望ましくかつ現実的に実施可能なリサイクル法であり、今後も推進していくべきと考える。

発泡スチロールには主に食品用トレーに使われるPSP (Polystyrene Paper) や主に断熱建材や畳床として使われるXPS (Extruded Polystyrene) があるが、本稿においては、主に魚箱や家電機器の梱包緩衝材として用いられるEPS (Expanded Polystyrene) について現在取り組まれているマテリアルリサイクルの概要を紹介する。

1. EPSのリサイクル

以前は、購入した家電製品の梱包用として使用されていたEPSは、一般ゴミとして各家庭で処分されていたが、近年はほとんど家電販売店が回収してくれる。魚箱についても、一般家庭に持ち込まれる機会は少ない。EPSは発生場所や流通ルートが限られており、魚市場、家電販売店などを經由して産業廃棄物のルートで回収されている。そのため、比較的分別も容易である。業界としても、原料メーカーと加工メーカーが共同で1991年5月に発泡スチロール再資源化協会（以下JEPSRA）を発足させ、他の業界に先駆けてリサイクルに取り組んでいる。

財団法人・ジャパン・センターが発表しているEPSの生産量と再資源化率の推移を第1図¹⁾に示す。

EPSの生産量は1991年から減少もしくは横這い状態にあるが、リサイクルはJEPSRAが設立され

た1991年以降は、近年のリサイクル気運にも後押しされて順調に増加している。1996年における日本で生産されたEPSは約22.5万tonであり、このうち約46%は鮮魚・青果などの容器、41%は包装材、残り13%はその他の用途である。輸出された分を補正した国内流通は18万ton、そのうち5.2万ton(28.7%)がリサイクルされている。

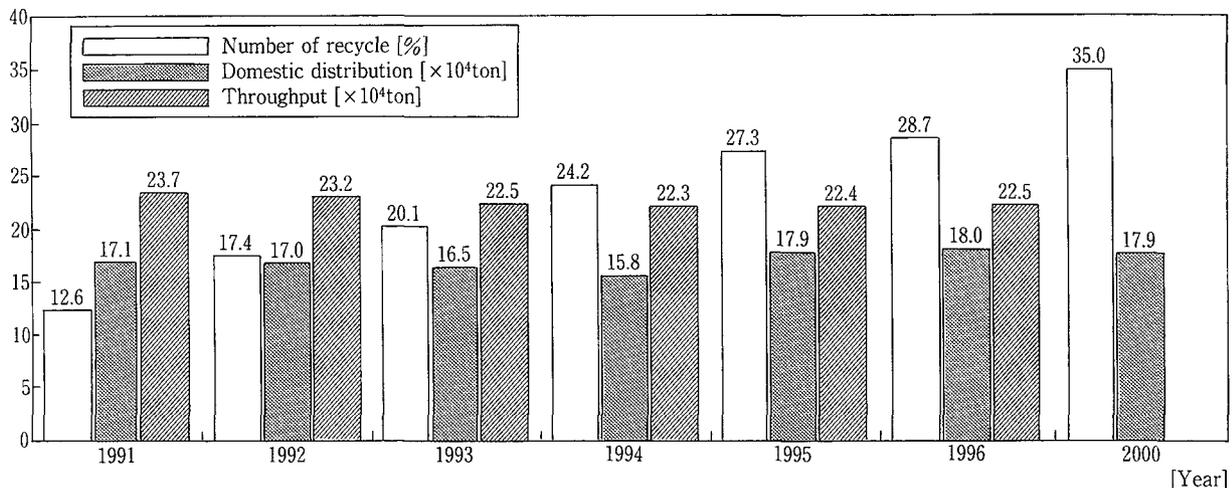
第2図²⁾に現在実施されている、使用済みEPSのリサイクル方法について示す。又、第3図²⁾に各リサイクル方法の量的内訳を示す。

第2図にも示すように、EPSのリサイクルには大きく分けて、ポリスチレンに戻して(EPSとしてそのまま使う場合もある)マテリアルリサイクルする方法と、固形燃料化や油化させてサーマルリサイクルする2つの方法が、現在の主流である。その他に、粉碎→油化/分解→分留→石油化学製品原料としてのケミカルリサイクルも研究が進められている。

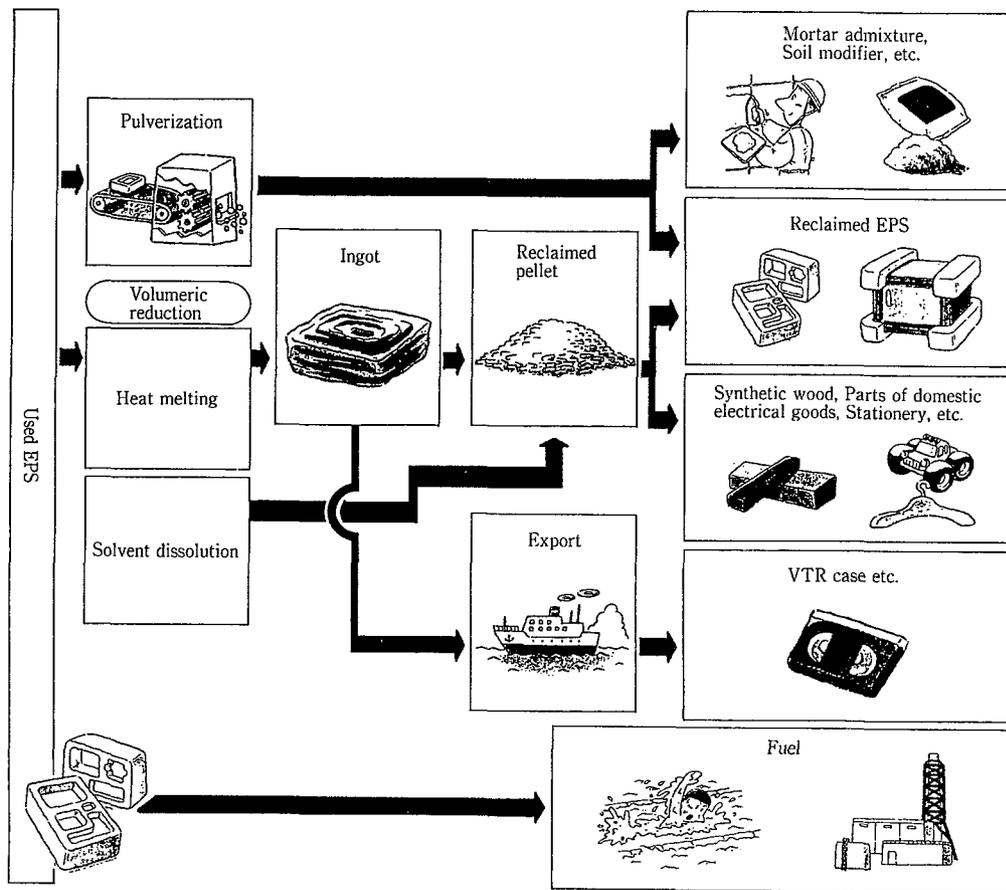
2. EPSのマテリアルリサイクル

第3図からも判るように、リサイクルされている全量の内95%がマテリアルリサイクルされている。

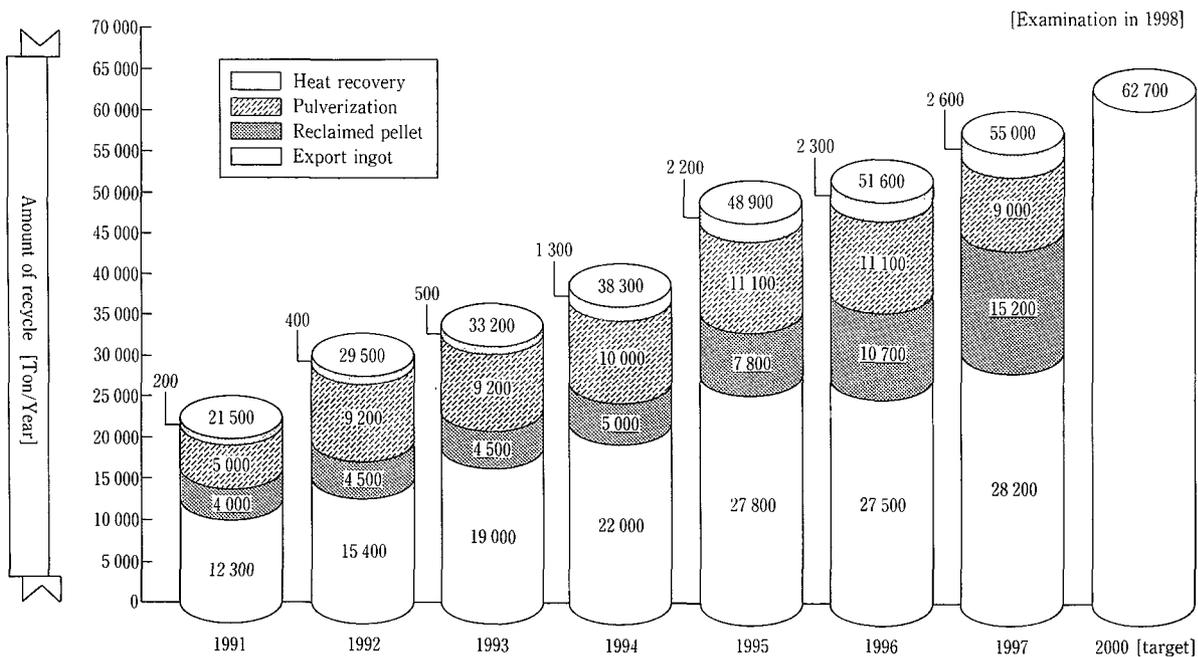
まず、一つの方法として、EPSの粉碎品をそのままの状態ですべて再利用する方法がある。粉碎された後、粉碎軽量化骨材や土壌改質剤として使用されたり、一部は新品の一次発泡ビーズに混合して再度EPSとして利用されている。EPSをそのまま粉碎するということは、粉碎設備が設置されている場所までの輸送費がコスト上一番のネックとなっている可能



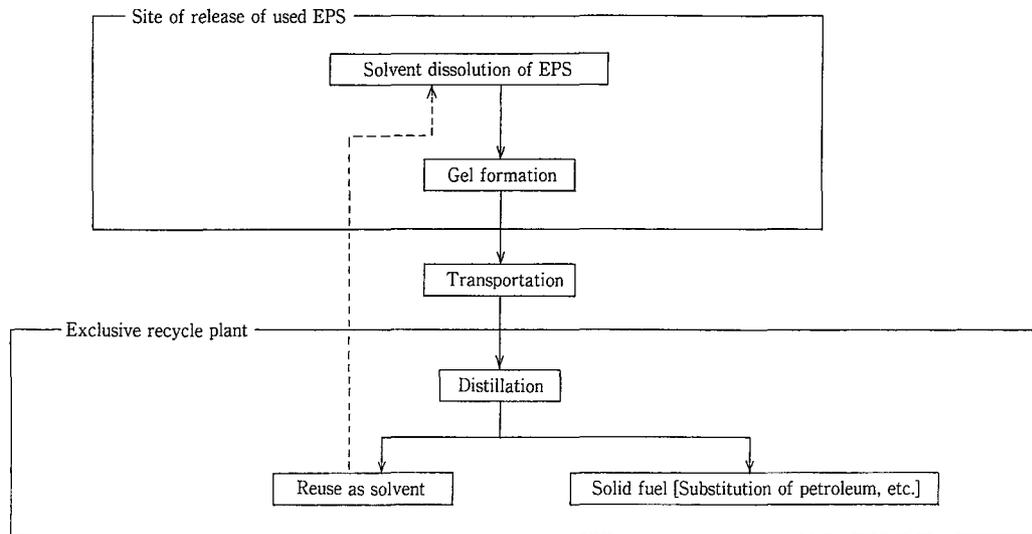
第1図 EPSの生産量と再資源化(リサイクル)率
Fig. 1 Throughput of EPS and Number of recycle



第2図 使用済みEPSのリサイクル
Fig. 2 Recycle of used EPS



第3図 EPSのリサイクル方法の内訳
Fig. 3 Amount of EPS recycle



第4図 石油系溶剤を用いた発泡スチロールのリサイクル³⁾
Fig. 4 EPS recycle flow by use of petroleum solvent

性が強く、特に新しい用途が開発されない限り、これ以上の量的な増加は望めない。

マテリアルリサイクルとして最も一般化されているのが、一旦減容化してインゴットやポリスチレンペレットにし、家電品部材、文房具や擬木などの各ポリスチレン製品（EPS含む）に再生する方法であり、1997年度実績でも全リサイクル量の約79%を占めている。特に近年量的にも著しく伸びているのは、再生ペレットへのマテリアルリサイクルである。この要因は、現在JEPSRAが中心となってリサイクルを推進しているエプシープラザの設置が順調に拡大されていることにあると思われる。PETボトル同様、回収費用がかさばるEPSの場合も、他のプラスチック同様に回収拠点の整備が第一に重要であると言える。

3. 溶剤を用いた減容法

EPSの減容化には、加熱減容と溶剤減容法がある。減容操作は嵩張るEPSの搬送コストを押さえるためには必須であり、古くからまた現在はほとんどの場合加熱減容法が採用され、インゴットが作られている。加熱減容機の熱源としては、熱風、電気ヒータ、摩擦熱や遠赤外線などを利用したものが多い。ここでは詳しく述べないが、最近では問題とされてきた高温処理時の熱分解による分子量の低下と、処理時の臭気の発生に対して改良が進められている。次に、最近注目されている溶剤減容法について述べる。

リサイクルセンターまでに発生する輸送コストや熱減容時の物性低下などの欠点を補う減容法として、

溶剤を用いた減容法がある。溶剤の種類は、石油系溶剤と天然溶剤の2つがある。

3.1 石油系溶剤

最近では、HI-メルツ工法協会中部支局が行っている、HI-メルツ工法がある。そのリサイクルフローを第4図³⁾に示す。

この溶剤（TJ溶剤）は、発泡スチロールの溶解能力が高く、破碎などの前処理が不要である。但し問題点は、灯油と同等の取り扱いができる溶剤ではあるが、蒸留分離工程で完全に溶剤を分離することが困難な点にあると思われる。そのためであろうか、再利用は日用品として使われるハンガーや文房具などのポリスチレン成型品ではなく、固形燃料用途に限られているようである。なお、三井物産も生研化学、三井鉱山と共同で、石油系溶剤を用いたリサイクルシステムを販売⁴⁾している。

3.2 天然溶剤

近年、石油系溶剤ではなく天然溶剤を用いたリサイクルシステムが、実用化されつつある。

次項にその概要を示す。

4. 天然溶剤を用いたマテリアルリサイクル

このリサイクル方式はソニー、ついでスタイロジャパンの2社からそれぞれ発表されている。

本来この方式は、従来のリサイクル方式では主に加熱収縮時の酸化により物性値が低下してしまう欠点（他に着色、異物混入、品質のばらつき）と、石油系溶剤の取り扱い上の危険性を改善するために開発された、高品質リサイクルシステムと言われている。

る。その特徴を次に示す。

- 1) 天然溶剤であるので、人体、環境に安全である。
- 2) 高熱を加えない収縮方法なので、物性劣化が非常に少ない発泡スチロールの再生材が得られる。
- 3) 浸すだけで溶けるので、減容装置のエネルギーがほとんどいらない。
- 4) 溶剤はその大部分を繰り返し再利用ができるのでコスト低減が可能。
- 5) 1/25~1/100に減容させるので、輸送コストが軽減できる。

4.1 リサイクルフロー

スタイロジャパン社のリサイクルフローを第5図⁹⁾に示す。ソニー社のフローもほぼ同様である。

1) 減容

原則として廃 EPS 発生場所で減容を行う。その場所に減容装置を設置するか、または溶解減容車を巡回させて、天然溶剤により減容させたゲルを再生プラントに搬入する。

2) 前処理

搬入されたゲルはオンドルで加温後投入槽に移送され、ここでさらに溶剤を追加して処理しやすい粘度に調整する。次に濾過器を通して異物を除去した後、脱水槽で水分の除去を行う。

3) 脱揮

異物と水分が除去されたゲルは、薄膜蒸発機で溶剤とポリスチレンに分離される。

4) ペレット化

ポリスチレン樹脂は水冷後、ストランドカッターでペレットにされ、ペレットサイロに貯蔵された後袋詰めされて出荷される。

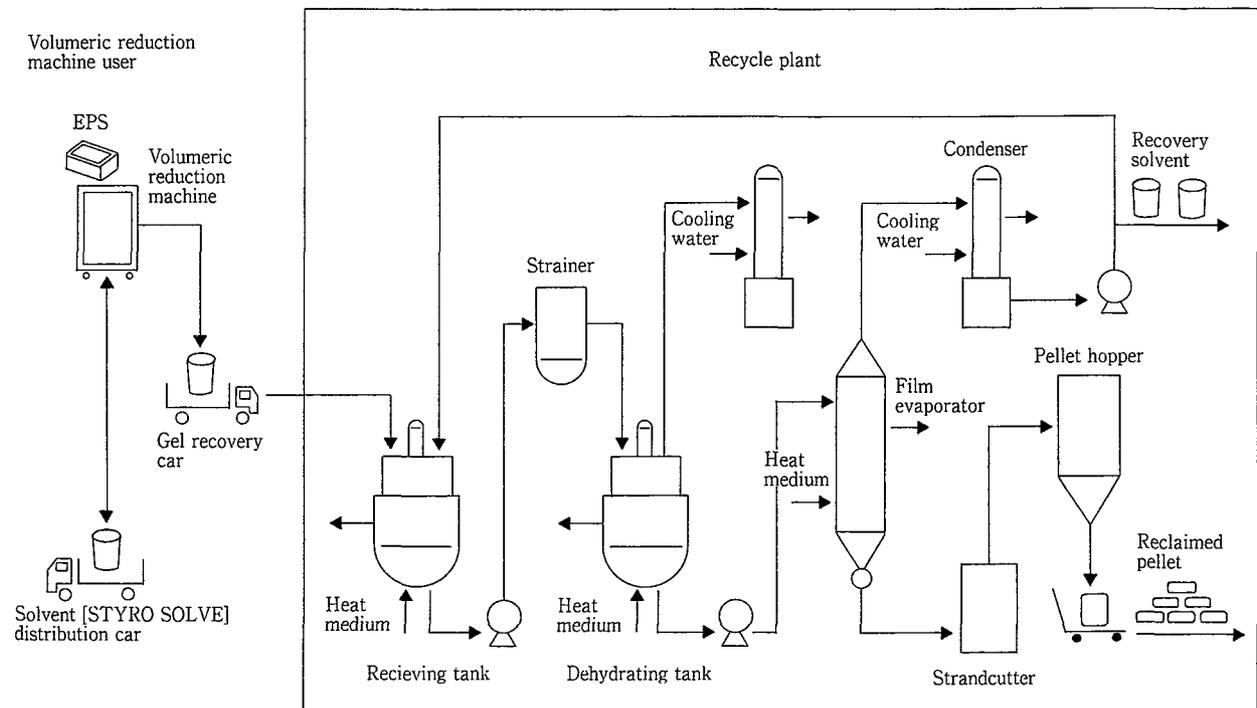
5) 溶剤回収

脱揮された溶剤はコンデンサーで凝縮され、再利用される。

4.2 使用される天然溶剤

ソニーとスタイロジャパンがそれぞれ使用している溶剤の組成を第1表に示す。

d-リモネンは柑橘類に含有されている精油成分の一種（オレンジの皮に約0.5%含有）で、芳香を有する。古くから着香料、鉱油系オイルのマスキング剤、工業用洗剤などに利用されてきた。d-リモネンのEPSに対する溶解能力を第6図⁹⁾に示す。スタイロソルブは、引火点が高く夏場での取り扱いや貯蔵、輸送など作業上の安全性が高いことが特徴とされている。尚、第1表に示されている減容率は、対象材料の発泡率が不明であり両社の比較は困難である。

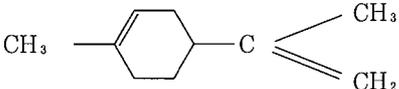


第5図 天然溶剤を用いたマテリアルリサイクルフロー（スタイロジャパン方式）

Fig. 5 EPS material recycle flow by use of natural solvent (STYRO JAPAN's method)

第 1 表 減容天然溶剤の種類と特性^{6,7)}

Table 1 A kind and characteristics of natural solvent for volumetric reduction

Method	SONY	STYRO JAPAN
Name	d-limonene (citrus fruits-vegetable oil/ORANGE OIL)	STYRO SOLVE (Ester-vegetable oil)
Manufacture	Yasuhara Chemical Co., Ltd.	International Form Solution INC.
Number of volumetric reduction	1/25	1/50~1/100
Flush temperature	48 °C	95 °C over
Others	Specific gravity (20 °C) 0.844 Viscosity (25 °C) 0.98cp Boiling point 175~179 °C Solubility Insoluble for water Soluble for IPA Molecular structure 	FDA qualified product

両溶剤はポリスチレンの物性をほとんど変えることなく減容させることが特徴であると同時に、ポリスチレン以外の物質の溶解能力はほとんど無く、そのために少量の異物があっても濾過で除去できることも特徴の一つとなっている。

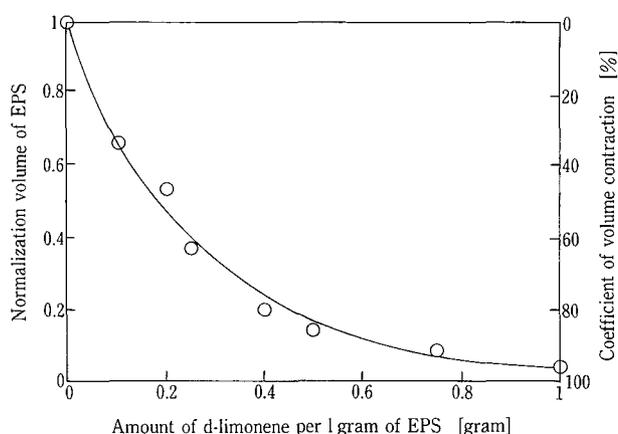
4.3 溶解減容搬送車

減容機を持たない廃 EPS 発生場所からの回収には、減容装置を積載した溶解減容搬送車⁹⁾が利用されている。ソニー方式、スタイロジャパン方式共に 2 トン車の搬送車を有し、嵩張る EPS の輸送コストの低減と回収率の向上を試みている。例えば、スタイロジャパン方式の搬送車（新明和工業^(株)製作）には、粉砕器と溶剤噴霧装置、貯蔵タンクが設置されており、EPS と溶剤の重量比 1:1 での減容処理が可能となっている⁹⁾。最大回収積載量は EPS 重量 300 kg であり、容積では約 50 m³ 換算となる。ソニー社の搬送車（東京三菱ふそう自動車販売^(株)製作）Orange R-net は、溶剤噴霧装置ではなく歯車式粉砕浸漬式装置が搭載されていることと、減容時の EPS と溶剤の重量比が前者とは若干異なるようである。

4.4 溶剤分離操作

先の加熱減容とは異なり、ポリスチレンと溶剤の分離操作が必要になってくる。脱溶剤後のポリスチレン樹脂は極めて粘性の高い流体となるため、この操作には EXEVA（当社製）やハイビスカスエバポレータ（三井造船^(株)製）や 2 軸押出機などの高粘度流体用蒸発装置が適用できる。

EXEVA は攪拌式型非接触タイプの薄膜式蒸発機に分類され、その構造図を第 7 図⁹⁾に示す。投入された流体を缶体内壁面に一様分散させるディス



第 6 図 d-リモネンの溶解能力⁷⁾

Fig. 6 Solubility capacity of d-limonene

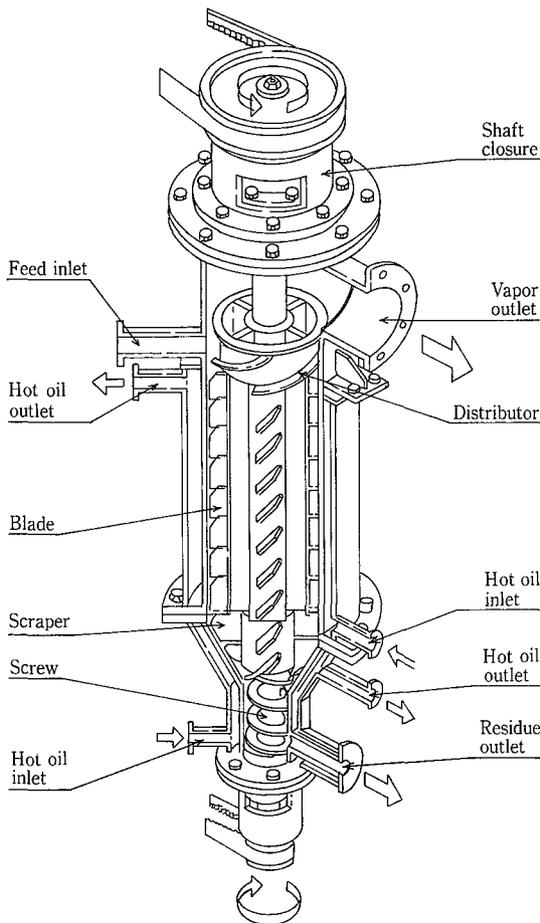
トリビュータ、薄膜時に生じるフィレットの流動に着目し採用された傾斜多段翼と脱揮された高粘度流体を停滞させることなく排出できる下部スクリーに特長を持つ。これらの機構によって流体は常に機械的な送り作用を受けるため、10 000 Pa·s (at 10 sec⁻¹) もの超高粘度液の処理も可能となっている。EXEVA は、本来ポリマーからのモノマーなどの不純物分離用途に適用されており、適用例を第 2 表¹⁰⁾に示す。

溶剤と溶解されたポリスチレンは、これらの蒸発装置の内部で真空加熱 (150~200 °C) 状態にさらされて溶剤の蒸発分離が行われる。減容時は低温で処理されるものの、ここでの高温操作が物性劣化の要因とならないように操作条件を検討する必要がある。ソニー社によれば、d-リモネンに溶解したポリスチレンは加熱操作による分子量の低下が極めて小さいとの報告 (第 8 図⁷⁾) がある。

4.5 再生ペレット

再生されたペレットは、他のリサイクル方法と同様に文具、日用品などのポリスチレン成型品に再生されたり、物性低下が小さいことによりソニー社では再度発泡スチロールに再生している。

再生されたペレットの、現状の最大の問題点は着色である。ヴァージンペレットは無色透明であるが、



第7図 EXEVAの構造図
Fig. 7 Structure of EXEVA

再生ペレットは黄色味や茶褐色がかっていたりする。このために、外観部品には使えないなど再生用途が限られていたり、再生時にヴァージンペレットに対する再生ペレットの混合比率を上げられないなどの問題が生じている。この原因はいくつか考えられるが、着色 EPS の顔料や汚れ、溶剤分離操作時のポリスチレンの炭化などが推定される。ソニー社はこの外観の向上を目指し、d-リモネンへの溶解状態で脱色する方法を研究中であると報じられている。

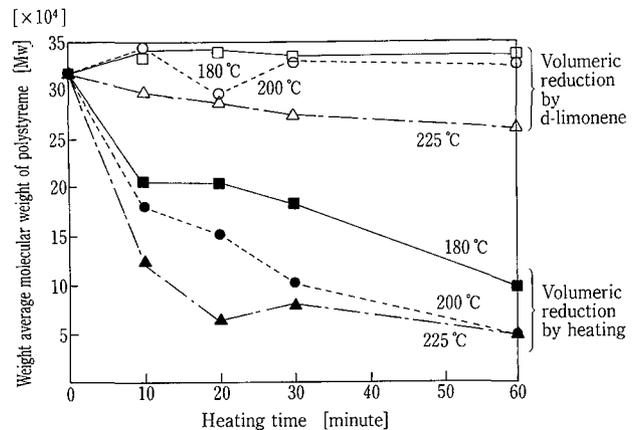
5. リサイクルの経済性

経済性について公表されているデータはほとんど無い。ここでは、前述の天然溶剤を用いたリサイクルプラントにおける、処理コストの試算を筆者の仮定のもとに試みる。

建設費2.7億円、処理能力2 ton/日、運転員3人の再生プラントを考える。

1) 回収費

ここでは既に天然溶剤で1:1の比率で減容されているゲルを、回収拠点を回って再生プラントまで搬送するコストを回収費とする。2 ton の EPS が



第8図 加熱時間による分子量低下⁷⁾
Fig. 8 Lowering of molecular weight by heating time

第2表 EXEVAの不純物分離データ例¹⁰⁾
Table 2 EXEVA's test data of impurity distillation

Product	Feed			Discharge			Operating Data	
	Rate kg/m ² /h	Polymer %	Viscosity Pa·s	Rate kg/m ² /h	Solvent/Monomer %	Viscosity Pa·s	Press. Torr	Temp. Deg.
P.VA	175	38	0.25	67	1.0	44	264	220
EPOXY RESIN	90	25	15	23	1.1	5 000	10	230
EPOXY RESIN	75	98.9	3 500	74	0.005	3 500	5	240
AS	400	49	500	206	4.8	3 000	503	260
AS	110	99.8	2 500	110	0.01	1 000	5	235
FLUOROPLASTICS	150	60	30	90	0.8	3 100	6	92
SILICONE RESIN	150	97.3	300	146	0.43	300	0.5	190
MMA	150	99	3 500	149	0.07	600	30	235
PS	150	97.2	2 500	146	0.015	350	1	160

溶解しているゲルは4 tonである。

4 ton車, 一日, 運転手付きで, 60 000円とする。

2) 変動費

電力: $50 \text{ kw} \times 24 \text{ 時間} \times 14 \text{ 円/kWH} = 16 \text{ 800円}$

蒸気, 水: 10 000円とする。

天然溶剤費: これは回収できなかった溶剤を追加する費用と考える。溶剤とポリスチレンとの混合比を1:1.7とし, 5%が回収できなかったとすると, $2 \text{ 000 kg} \times 1.7 \times 0.05 \times 1 \text{ 000円/kg} = 170 \text{ 000円}$

(変動費合計 196 800円)

3) 固定費

労務費: $3 \text{ 人} \times 8 \text{ 百万円/年/人} \div 300 \text{ 日/年} = 80 \text{ 000円}$

管理費: $80 \text{ 000円} \times 0.3 = 24 \text{ 000円}$

修繕維持費: $2.7 \text{ 億円} \times 0.02/300 \text{ 日} = 18 \text{ 000円}$

税金・保険: $2.7 \text{ 億円} \times 0.015/300 \text{ 日} = 13 \text{ 500円}$

償却費(15年), 金利(5%): 79 000円

(固定費合計 214 500円)

よって, 処理コストは(回収費 60 000円) + (変動費合計 196 800円) + (固定費合計 214 500円) = 471 300円/2 ton (236 円/kg)となる。ここで, 再生ペレットの買い取り価格が40円/kgとすれば, $-40 \times 2 \text{ 000} = -80 \text{ 000円}$ となり, 1 kg当たりの処理コストは, $(471 \text{ 300} - 80 \text{ 000})/2 \text{ 000} = 196 \text{ 円/kg}$ となる。ちなみにポリスチレンのヴァージンペレットの価格は, 100~140円/kgである。

もし, 廃EPS発生場所で減容化されないとすると, 2 tonのEPS(約100 m³)を搬送するには4 ton車(10 m³)が10台必要となり, 回収費だけでも600 000円/日にもなる。よって, このリサイクル方式にかかわらず, EPSの回収に当たっては現地での減容装置の設置が極めて重要であると言える。他に上記の試算結果より, 処理コストの低減には,

- ・溶剤費の削減(再生量の増加と単価の低減)
- ・プラント建設費の低減(フローの簡素化など)

・オペレータの削減(自動運転化など)を検討する必要があると考えられる。

また, PSPの処理コストについては, PSPトレー以外の廃PSPを扱う発泡スチレンシート工業会は回収コストが167円, さらに再生コストが80円で合計約250円, 大手PSPトレーメーカー各社は160~200円で再生できるとの情報がある。

むすび

今後のリサイクル率向上に当たっては, 次のことが重要と思われる。

1) リサイクルコストの低減

それには搬送コストの低減のためのリサイクル拠点の増加が必要である。特に天然溶剤によるマテリアルリサイクルでは, 溶剤の回収率向上と溶剤費用(単価)の削減が必要。

2) 分別回収の促進

3) 物性低下をおこさない再生方法や物性回復方法の開発と再生ペレットの用途開発

昨今, 法的規制の前に各企業の自主的取り組みが期待される風潮が強いが, リサイクル事業を推進して行くには単独メーカーではかなり取り組みづらい経済状況にある。よって, 各メーカー間での協定が必要であり, JEPSRAに代表されるような協会の設立と積極的な参入が必然と思われる。

[参考文献]

- 1) リサイクル'97, (財)クリーンジャパンセンター, (1997)
- 2) JEPSRA INFORMATION '98, 発泡スチロール再資源化協会, (1998), p. 4.
- 3) HI-メルツ工法協会 中部支局 カタログ
- 4) 日本経済新聞, (1996) 6,12
- 5) 石川島播磨重工業(株) カタログ
- 6) ソニー(株) カタログ
- 7) 野口勉, 渡辺春夫, 宮下真由美: 特開平 5-263065
- 8) 新明和工業(株) カタログ
- 9) 神鋼パンテック(株) カタログ
- 10) 永田純洋, 高田一貴: 配管技術, (1998), p. 25.

連絡先

今 中 照 雄 化工機事業部
エンジニアリング部

TEL 0794 - 36 - 2511

FAX 0794 - 36 - 2578

E-mail t.imanaka@pantec.co.jp