

プラスチック廃棄物の低温破碎分別技術とその応用

Classification Technique of Plastic Waste by Cryogenic Crushing

日立製作所は、通商産業省工業技術院の委託研究の一環として性状の一定しない都市系プラスチック廃棄物の処理を容易にするために、低温ぜい性の差を利用した選択的破碎によってこれを分別する技術につき、その開発した結果を取りまとめ述べたものである。

処理量30kg/hのパイロットプラントにより、分別効率に及ぼす冷却温度などの諸要素の影響を明らかにした。実用に当たって期待できる分別性能の一例は、ポリ塩化ビニルの分離効率は99%、ポリエチレンの回収率は82.7%である。試算処理コストは、処理量30t/dの場合で5,420円/tとなった。本技術は、産業系コンパウンドプラスチックの端材処理などにも応用できる。

市原 潔* *Ichihara Kiyoshi*
高村義之* *Takamura Yoshiyuki*
林 政克** *Hayashi Masakatsu*
内田昭就** *Uchida Akinari*

1 緒 言

家庭より排出される「都市ごみ」の処理が、今日の大きな社会問題となっている。これには二つの側面があり、その一つは、生活水準の向上と生活様式の多様化によって都市ごみもまた量的増大、質的多様化を迎えたことであり、これまでの埋立て及び焼却を主体とした我が国の都市ごみ処理形態に対し、埋立地の確保難や二次公害の面から改革を迫ったことである。他の側面は、世界的な資源枯渇と資源ナショナリズムの動きによるもので、資源の少ない我が国として廃棄物を新しい資源として見直そうという認識である。

このような観点から見た場合、都市ごみ中のプラスチック廃棄物の処理が重要な課題となってくる。都市ごみとして廃棄されるプラスチックの量は年々増加し、昭和51年度では131万4,000tに達すると見込まれている¹⁾。プラスチックは他の可燃性廃棄物と比べ、高い発熱量を持つために焼却処理において焼却炉の損傷の原因となり、埋立て処分においては耐食性を持つために土壤に還元されることはほとんど期待できない。一方、再資源化という点からは、そのほとんどを輸入に頼っている原油を原料とするプラスチックは好適な対象物である。

周知のように、プラスチック廃棄物は主としてポリエチレン(以下、PEと略す)、ポリ塩化ビニル(以下、PVCと略す)、ポリスチレン(以下、PSと略す)、ポリプロピレン(以下、PPと略す)の四大プラスチックを主として構成されているが、なかでも10~30%含まれるPVCは、焼却又は熱分解の過程で有害な塩化水素を発生することからプラスチック公害の元凶といわれており、何らかの方法でPVCを分別できれば廃プラスチックの処理、再利用が非常に容易となる。各種プラスチック混合物を分別する方法としては、静電選別法、重液選別法、風ひ選別法、溶剤分別法などが考えられているが、これらを形状、材質、汚れ具合が種々雑多な都市ごみ系廃プラスチックに適用するのは、技術的、経済的に問題が多く実用的でない。

プラスチック廃棄物の低温破碎分別技術は、以上のような背景のもとに、通商産業省工業技術院が昭和48年度より50年度にかけて実施した、準大型プロジェクト「資源再生利用技術システムの研究開発」の一環として、日立製作所に開発を委託された結果、開発されたものである。

2 低温破碎分別

2.1 原 理

プラスチック材料について温度の変化に伴う状態変化をみると、図1に示すようになる²⁾。ゴム領域では鎖状高分子が比較的自由に主鎖セグメントのミクロブラウン運動をしており、外力に対して追従性を持っている。ところが、主鎖セグメントの運動は主として熱運動であるため、温度が低下するにつれ運動が鈍くなり、ついには凍結する。この凍結過程でプラスチックの力学的性質が急激に変化する温度をぜい化点と呼び、物性値が急激に変化する温度をガラス転移点と呼んでいる。

ぜい化点、ガラス転移点は共に各物質に特有な値を持つため、各種プラスチックのぜい化点の差を利用して、ガラス領域つまり非常にもろくなったものだけを選択的に小さく破碎したのち、ふるい分けることで種別ごとに分別しようというのが本技術のねらいである。

2.2 各種プラスチックの低温特性

各種プラスチックの材質ごと、肉厚ごとの低温特性を、シャルピー衝撃試験機と特別に設計、製作した低温破壊特性試

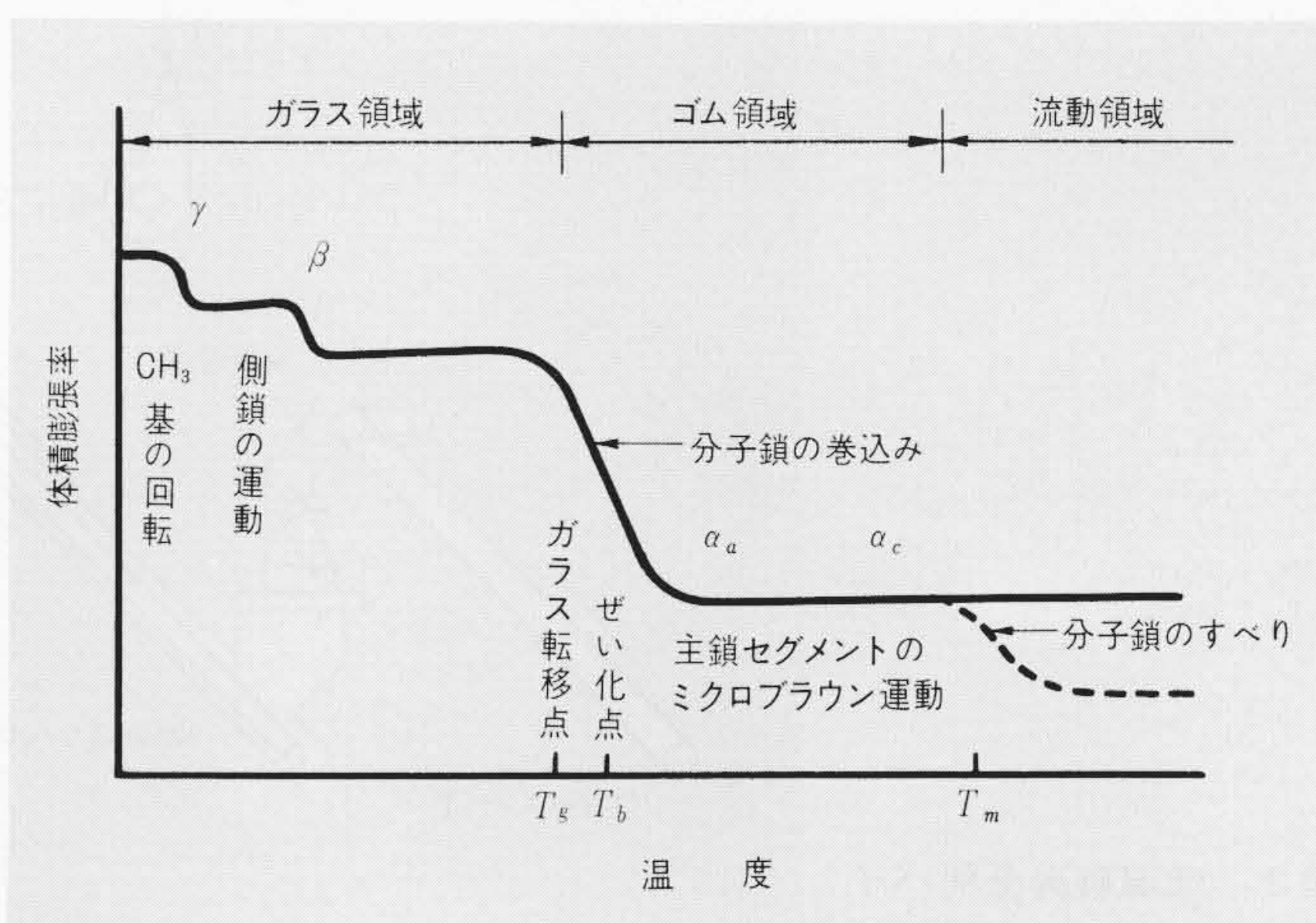


図1 プラスチックの温度による状態変化 実線は線状ポリマー、破線は架橋ポリマーを示す。体積膨張率の急変する点を高温側より順に α 、 β 、 γ 転移という場合もある。

* 日立製作所笠戸工場 ** 日立製作所機械研究所

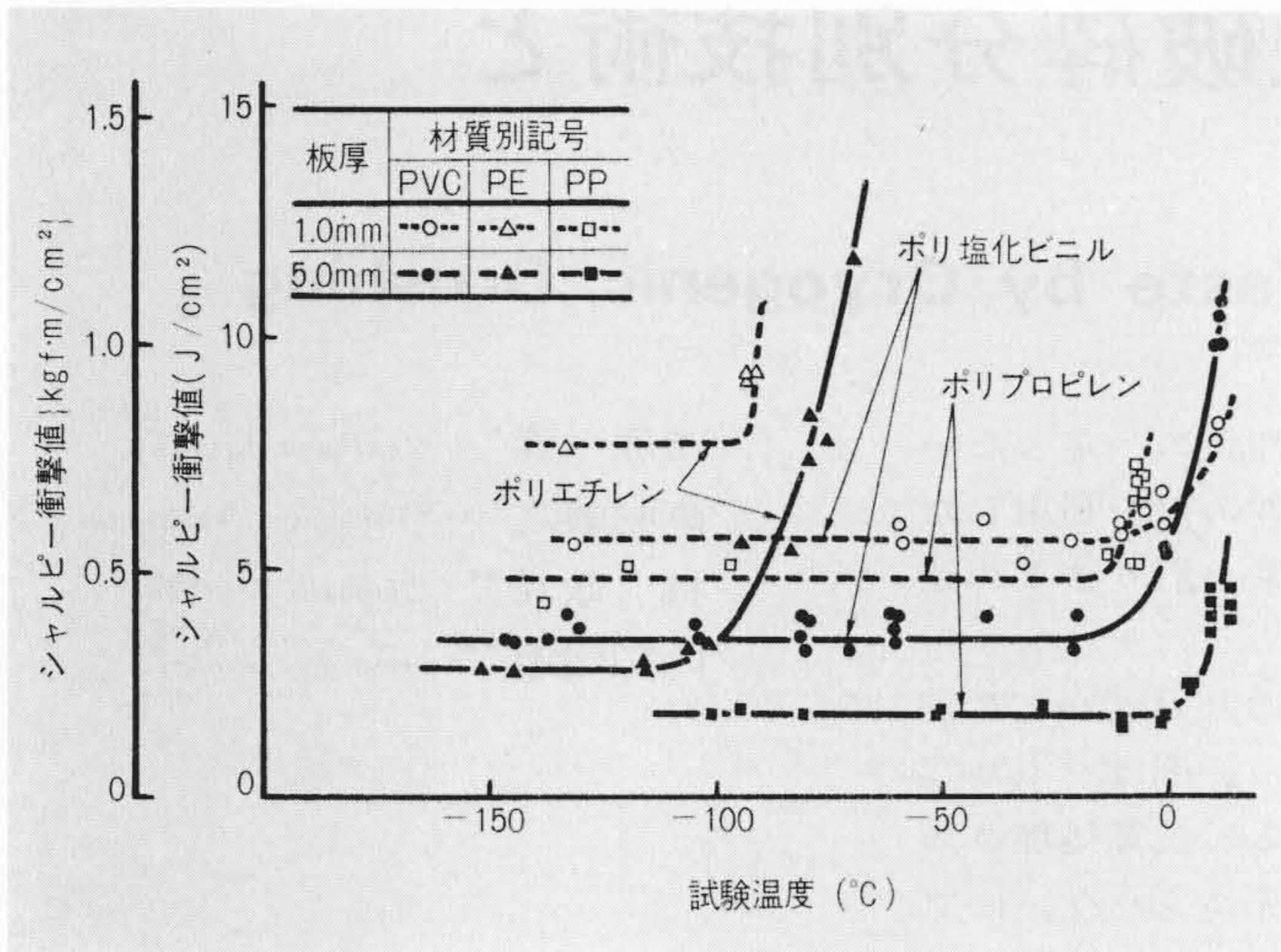


図2 各種プラスチックのシャルピー衝撃試験結果 板厚が薄いほうが衝撃値が高く、破壊されにくいことを示しているが、衝撃値と断面積の積である吸収エネルギーとしては、それほど差がない。

験機とを用いて実験した。結果の一例を図2に示す。

これらの実験より次のことが分かった。

- (1) 同一材質のプラスチックでも製品の種類、肉厚によりぜい化点がばらつく。
- (2) PVCのぜい化点は-5~-20℃、PEは-95~-135℃、PP及びPSはPVCに近いぜい化点を持つ。

以上の結果、都市系廃プラスチックのように肉厚が千差万別のものに対して、本技術が適用されるかどうかの確認が重要な課題となった。

2.3 選別破碎機

一般に破碎機の破碎機構としては、引張り、圧縮、曲げ、衝撃あるいはせん断力を利用したもの及びこれらの複合力によっている。そこでぜい性の差を利用した選択的破碎を行なうために適した破碎機構を確認するため、曲げによる破碎を主とするダブルロールクラッシャー、圧縮による破碎を主とするジョークラッシャー、衝撃による破碎を主とするスタンプミル及び引張り、衝撃、せん断の複合力によって破碎するロータリミルの4形式の破碎機を使用して検討した。その結果、衝撃、せん断、引張りなどの単一力よりこれらの複合力を利用し、その中でも特に衝撃力を大きくしせん断力を弱めたものが最適であることを確かめ、特殊仕様の選別破碎機を試作した。

3 連続式低温破碎分別装置

本技術の実用性を確認するため、自社工場に処理能力30kg/h(体積にして約3m³/h)のパイロットプラントを建設した(図3、4)。

装置は大別して前処理、冷却、選別破碎、ふるい分けの四つの機能から成っている。

廃プラスチックは袋に入れて収集される場合が多いが、袋のまま冷却槽に供給すると冷却効率が悪いので、前処理として袋解裁機を設けている。ベルトコンベヤ内蔵形の冷却槽で廃プラスチックは-20~-40℃まで冷却されるが、冷却効率を上げるためブロウで冷気を強制循環させるようにしている。選別破碎機でぜい化しているPVCは選択的に細かく破碎されるが、ぜい化していないPEはほとんど破碎されない。破碎物をふるい分けすることによりPVCとPEを分別できる。

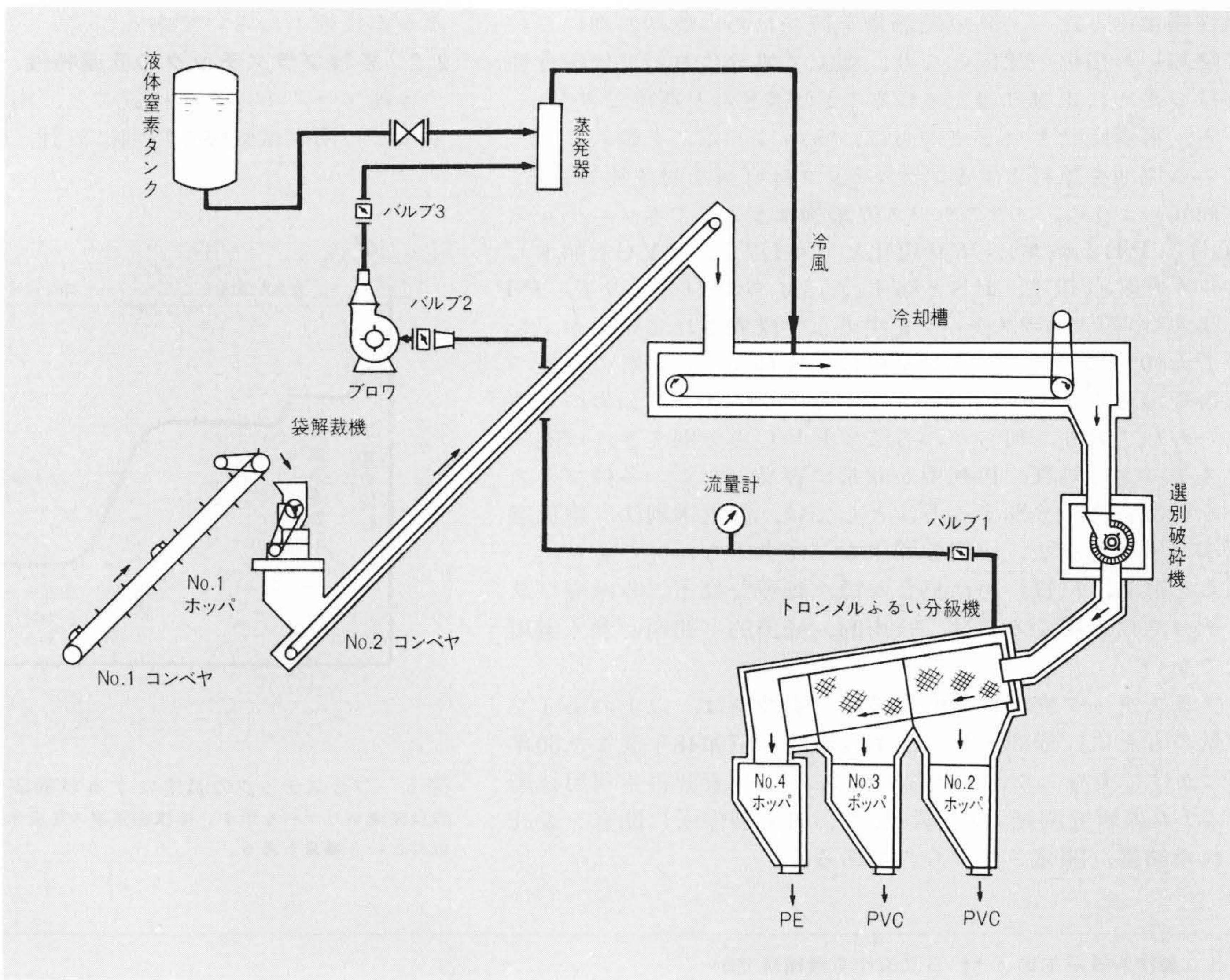


図3 低温破碎分別パイロットプラント系統図
実験効率を上げるため、ふるい分級機には2種類の大きさの網目を組み込んでいる。試験装置のため冷却源に液体窒素を用いているが、必要冷却温度は-20~-30℃であり実用機では冷凍機による冷却となる。

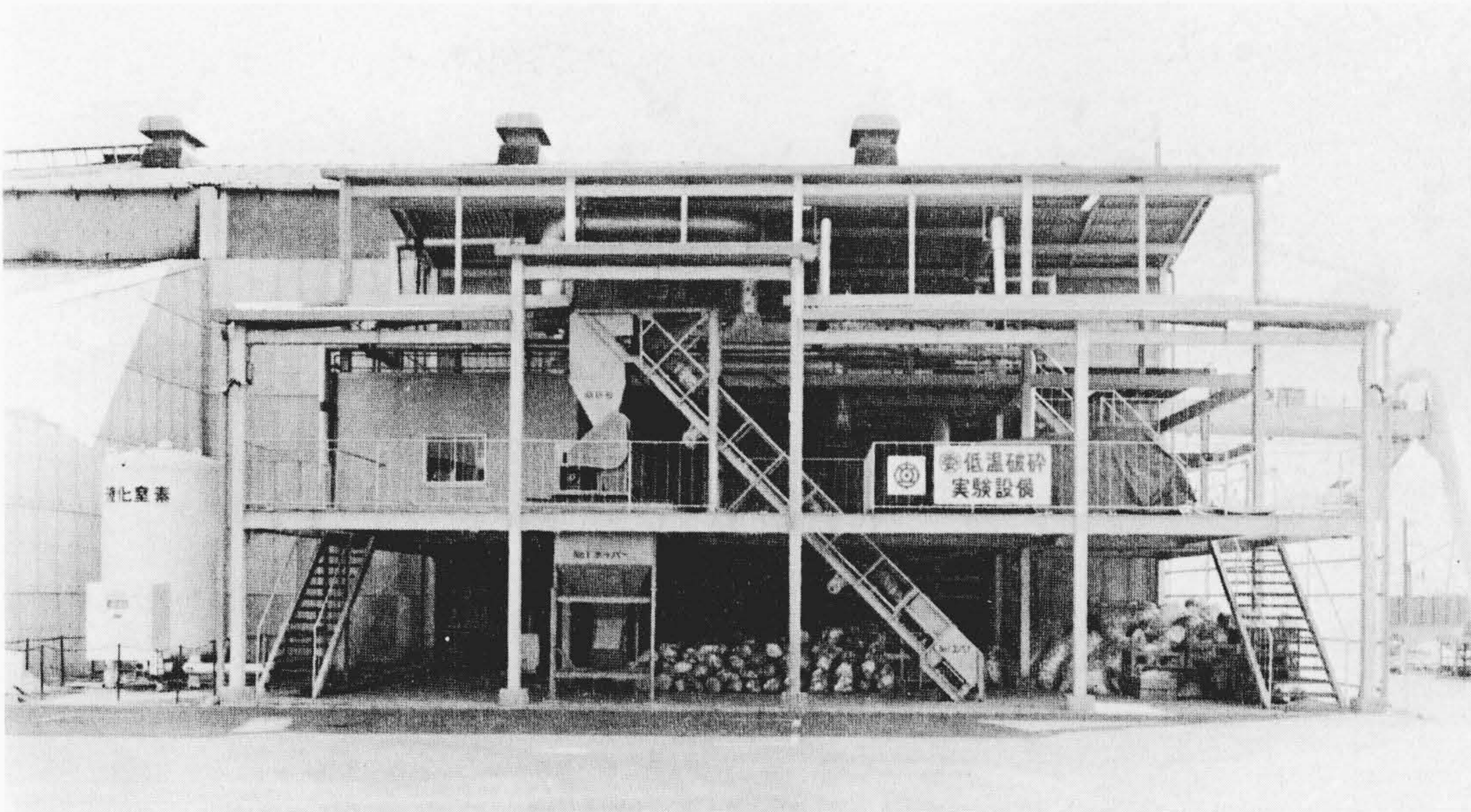


図4 低温破碎分別パイロットプラント外観 試験装置のため、コンベヤ使用箇所をできるだけ避ける目的で立体的な配置としている。

装置として特に注意を要する点は次のとおりである。

(1) 処理対象物のかさ比重が極めて小さい。

プラスチック廃棄物のかさ比重は、0.01～0.05程度であり、堆積厚みによって変化する。破碎することにより、見掛け体積は大きく増加するために、十分な通路断面が必要である。

(2) シート状廃棄物の飛散

都市系廃プラスチックの中には食品包装袋などシート状のプラスチックが多い。これらシート状プラスチックは軽くてふわふわしているために、冷却ガス流に乗って飛散する傾向があるので注意を要する。

4 分別性能

実験に供したプラスチック廃棄物は、自社工場の周辺より無作為に分別収集した実ごみで、その形状、材質は一定していない(図5、6)。このように種々変化するインプット条件に対して、常に所定のPVCの分離効率が確保できるかどうか本技術の実用化のための最大のポイントになる。

データ解析に当たっては、インプット条件が不定のため、分別に影響を与えると考えられた供給速度(2水準)、冷却温度(3水準)、選別破碎機回転刃先周速(4水準)、ふるい分級機の網目の大きさ(4水準)などをパラメータとして条件の割付けを行ない、各条件における評価関数を求めた。評価関数としては、図7に示した区分で次のように定義した。

$$\text{PVC分離効率} \quad \beta = \frac{A}{A+D} \times 100(\%) \quad \cdots \cdots (1)$$

$$\text{PVC混入率} \quad \phi = \frac{D}{D+E+F} \times 100(\%) \quad \cdots \cdots (2)$$

PE, PS, PP, その他のプラスチック回収率

$$\theta = \frac{E+F}{B+C+E+F} \times 100(\%) \quad \cdots \cdots (3)$$

$$\text{PE回収率} \quad \eta = \frac{F}{C+F} \times 100(\%) \quad \cdots \cdots (4)$$

これらの評価関数のうち、(2)式で表わされるPVC混入率以外は大きいほど良いシステムになるが、どれか一つが特に良くても他の評価関数が悪くなった場合は必ずしも良いシステムであるとはいえない。したがって、それぞれの目的に応

じて主となる評価関数を選び、それが最大となるような条件を選ぶとともに、他の評価関数を従として、これが許容範囲に収まるようにすることが必要である。次に各評価関数に主

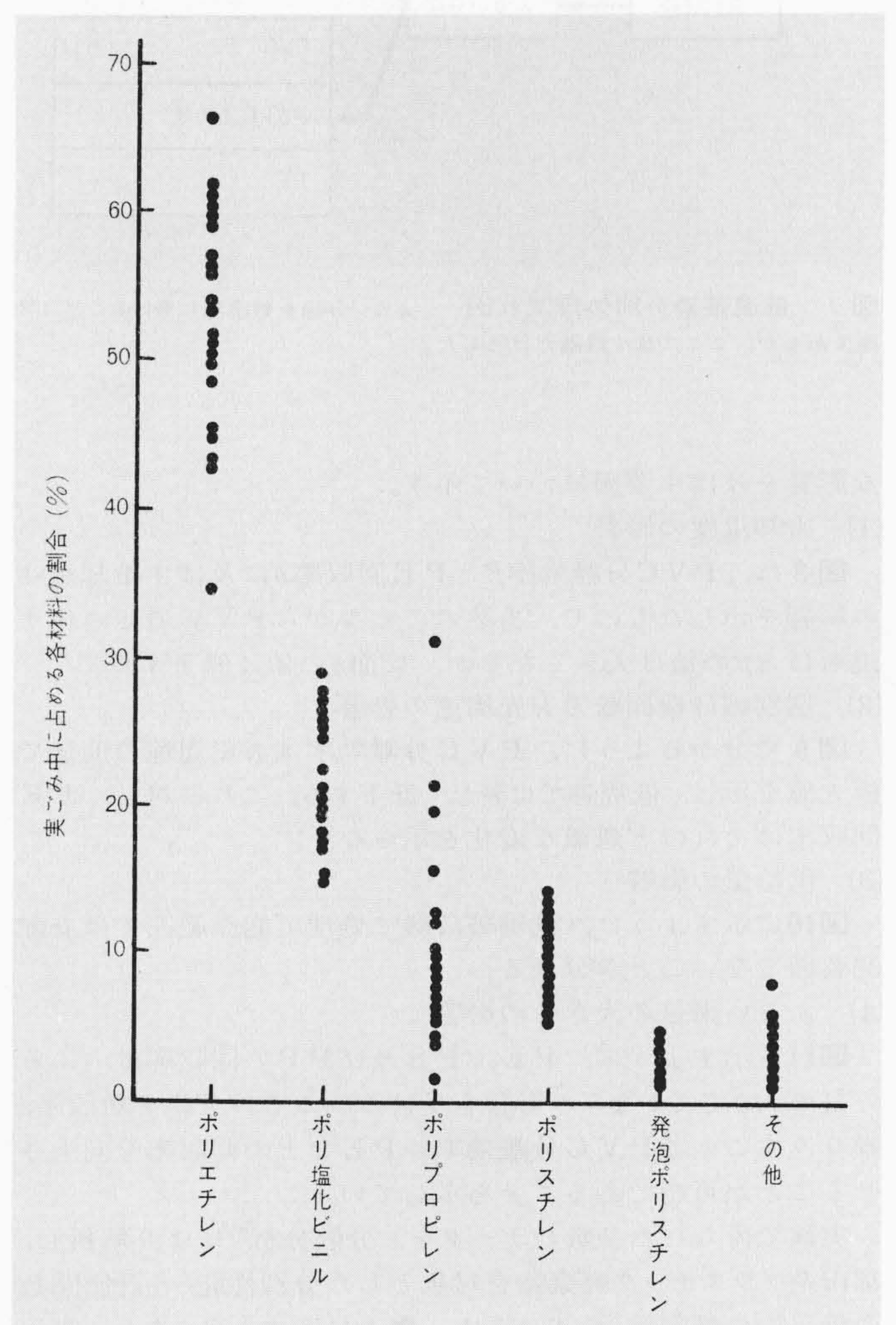


図5 実ごみの各材質ごと組成の変動 季節、場所などにより組成は大きく変動する。変動範囲としては特異なものでない。

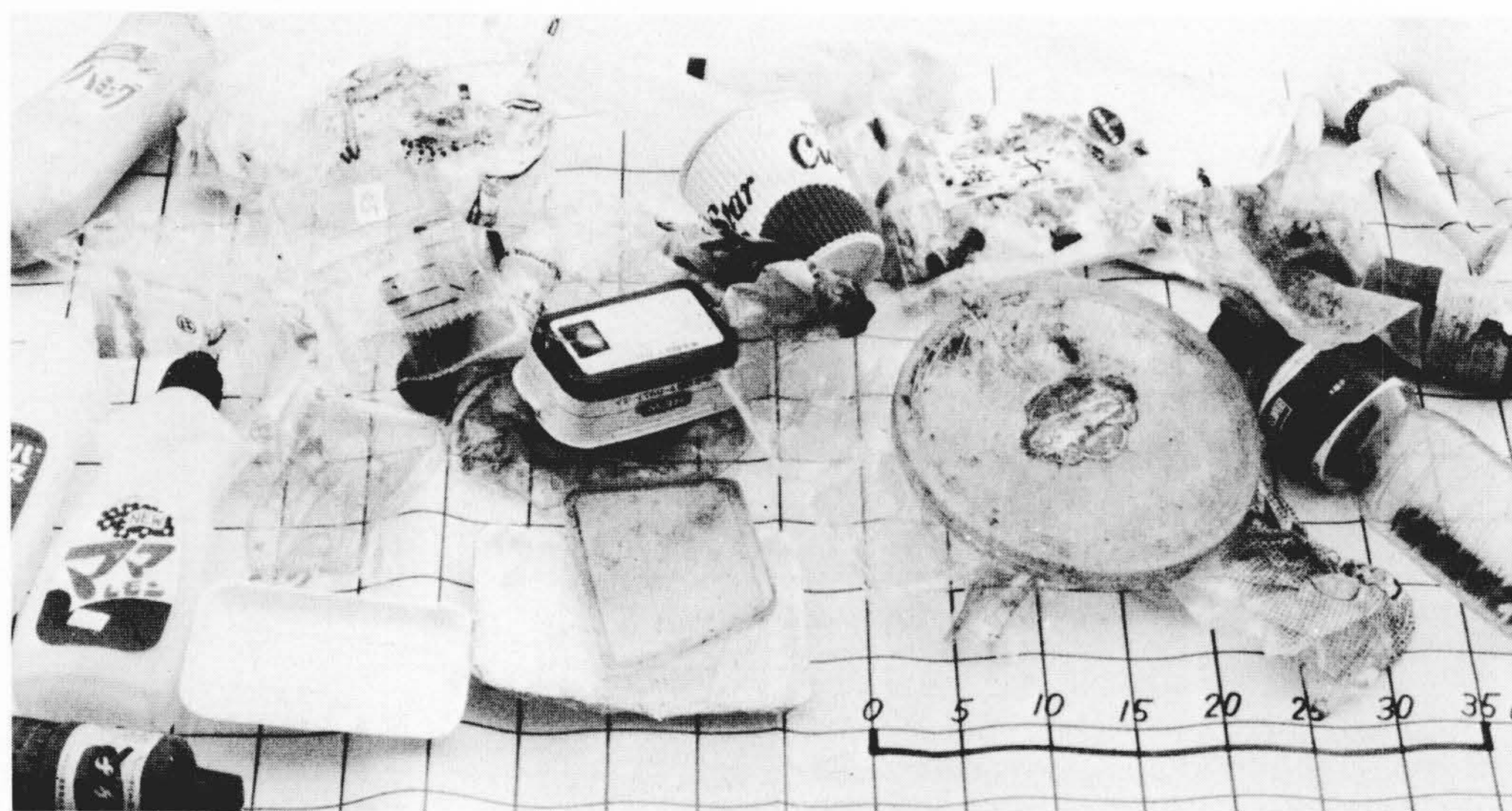


図6 都市系プラスチック廃棄物の一例 洗剤容器、発泡スチロールの皿、卵のパックなどが多い。また、容器は内容物が残っていて汚れているものが多い。

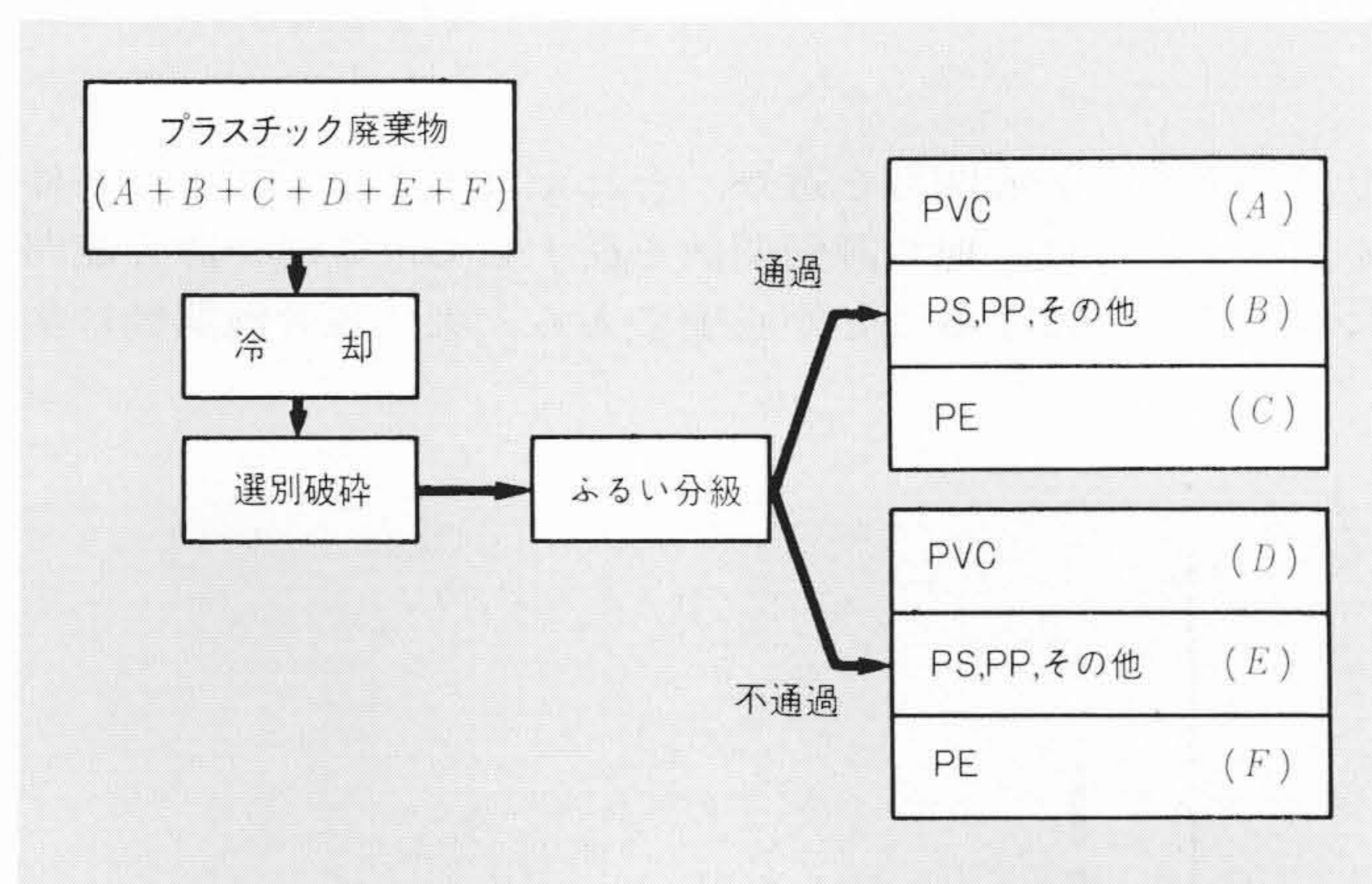


図7 低温破碎分別処理流れ図 ふるい分級を数段階に分けることは可能であるが、ここでは1段階だけとした。

な影響を及ぼす要因について示す。

(1) 冷却温度の影響

図8は、PVC分離効率 β とPE回収率 η に及ぼす冷却温度の影響を示したもので、当然のことながらPVCのぜい化が進むほど β の値は大きくなるが、反面 η の値は低下する。

(2) 選別破碎機回転刃先周速の影響

図9で分かるように、PVC分離効率はある周速の前後で極大値を示し、低周速では著しく低下する。これに対し、PE回収率はそれほど急激な変化を示さない。

(3) 供給量の影響

図10に示すように、選別破碎機で処理可能な範囲では支配的要因でないことが分かる。

(4) ふるい網目の大きさの影響

図11に示すように、PE、PS及びPPの回収率は、ふるい目の大きさでかなりの影響を受ける。ふるい分級を数段階、繰り返すことでPVC分離効率やPEなどの回収率を向上させることが可能であることを示している。

実験で得られた多数のデータを、分散分析³⁾により解析し、都市系プラスチック廃棄物を対象とした分別性能(各評価関数の母平均の推定値)を求めると、表1に示すようになり、実用上十分な性能が期待できることが分かった。

なお、廃プラスチックに付着又は残留していた水分、内容

物は、その大部分が氷結した状態で細かく破碎されPVCとともに分離されるので、回収されるPEの汚れが少ないという利点がある。

5 経済性

プラスチック廃棄物の処理量を30t/dとした場合の処理コストの試算例を表2に示す。この処理量は、およそ人口40万人の都市からの排出量に相当する。

処理コスト5,420円/tは、焼却などの処理法に比べて必ずしも安価ではないが、廃プラスチックを回収して再利用を図る場合には、通常必ず破碎工程が入るので、それに組み合わせ

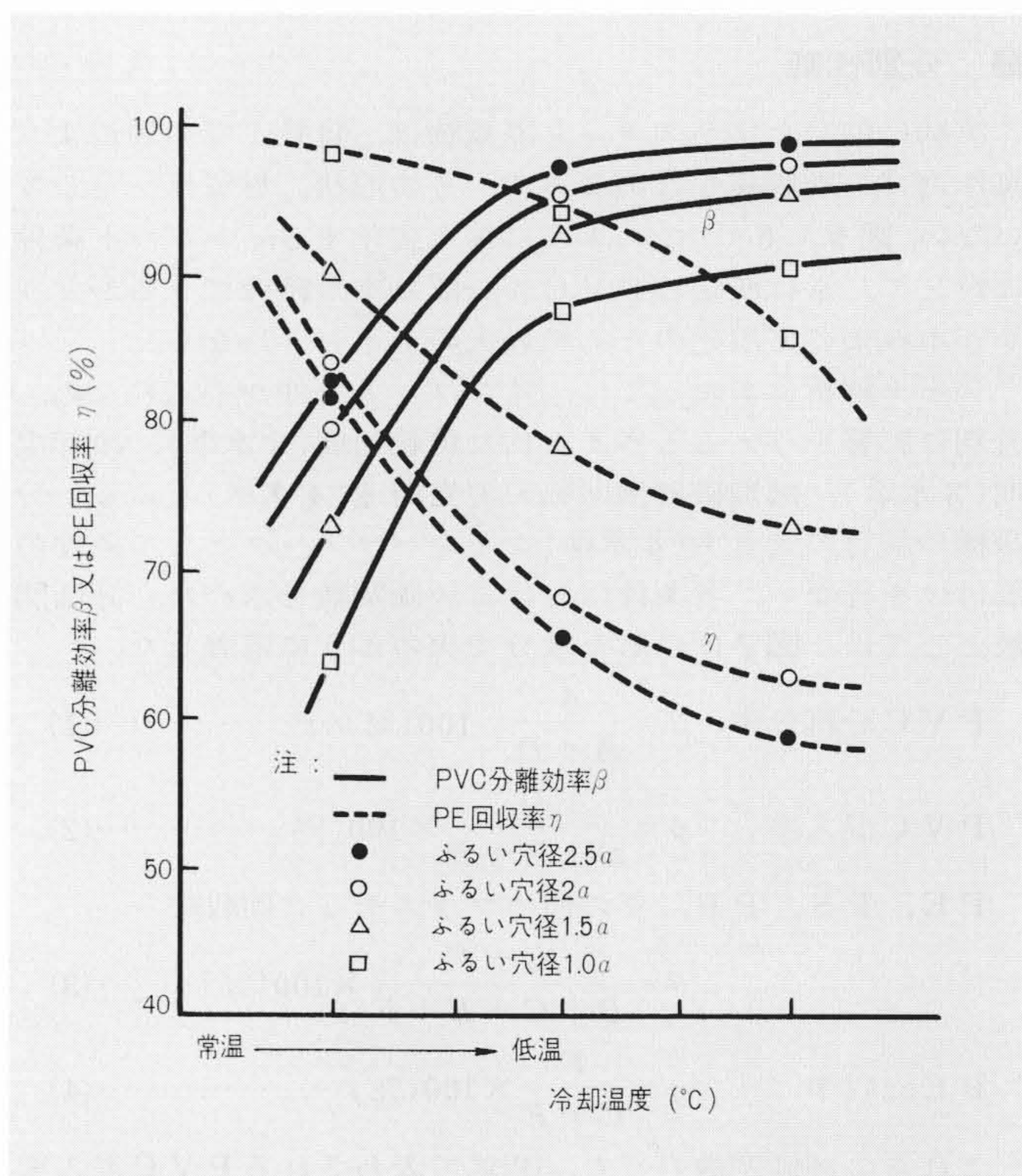


図8 冷却温度のPVC分離効率、PE回収率に及ぼす影響 PVC分離効率は、ある温度以下に冷却してもほぼ一定となり、PEの破碎が進んでPEの回収率は低下する。

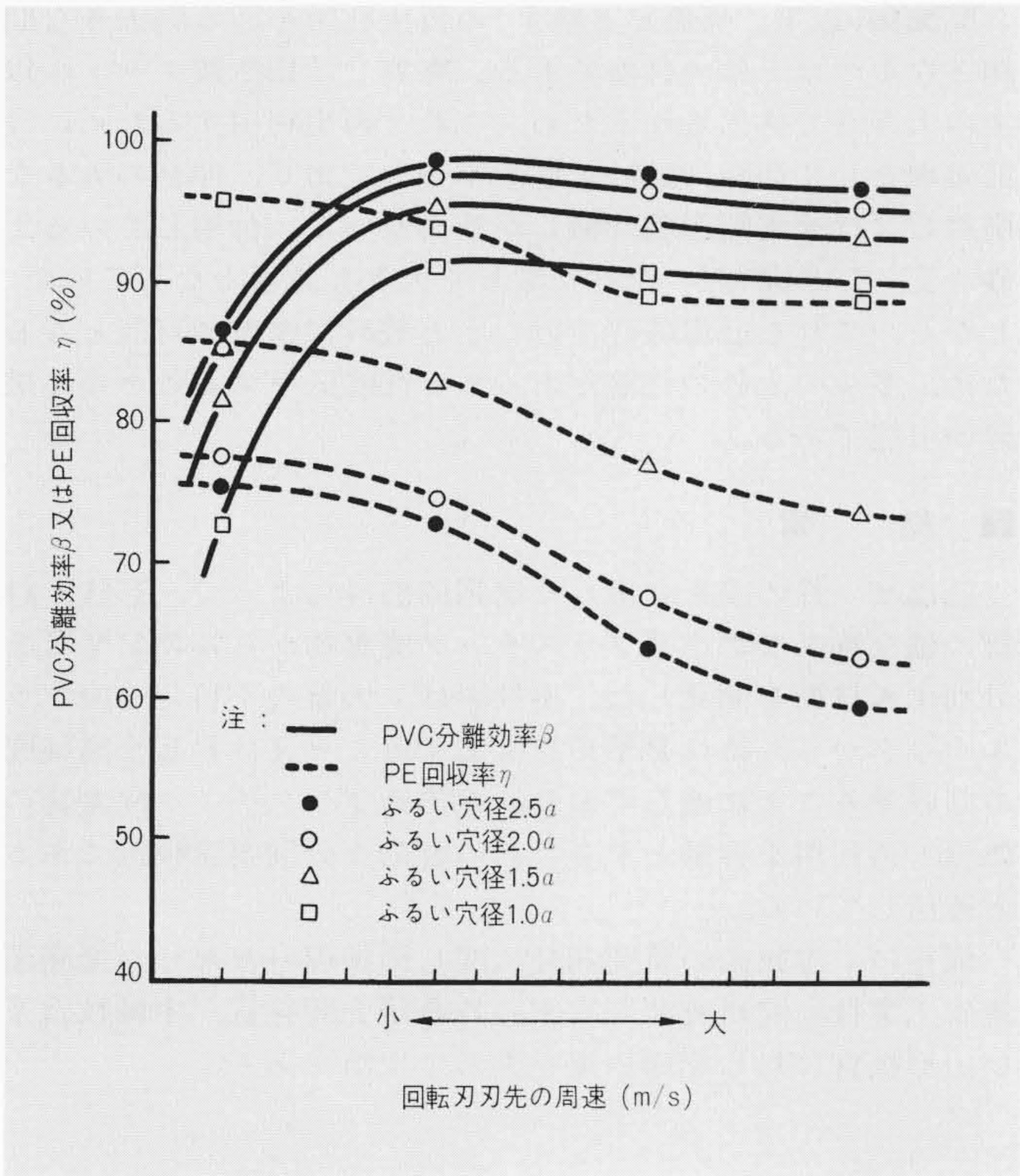


図9 回転刃先周速のPVC分離効率，PE回収率に及ぼす影響
周速の低下によってPVC分離効率が低下していることは，衝撃力を主体とした破碎機構になっていることを示している。

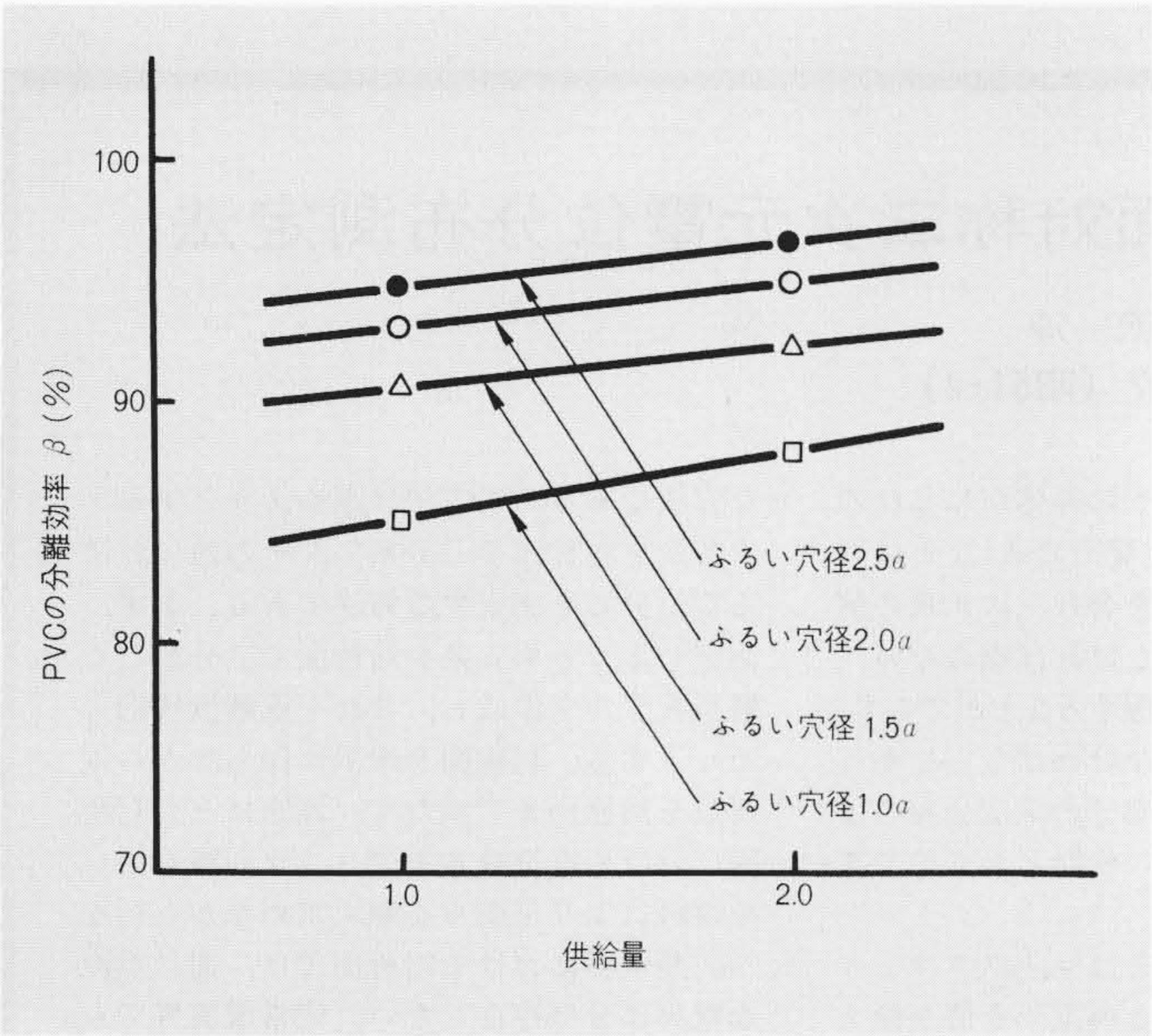


図10 PVC分離効率に及ぼす供給量の影響 供給量が2倍になったほうがPVC分離効率が良いのは，破碎されないPEの存在でPVCの滞留時間が延びるためである。

ことで実際に分別に要する処理コストの低減を図ることが可能である。

6 応用面

本技術は，都市系プラスチック廃棄物の処理又は再利用を容易にすることを目的として開発されたものであるが，この方式は産業系プラスチック廃棄物の再生利用のための前端システム

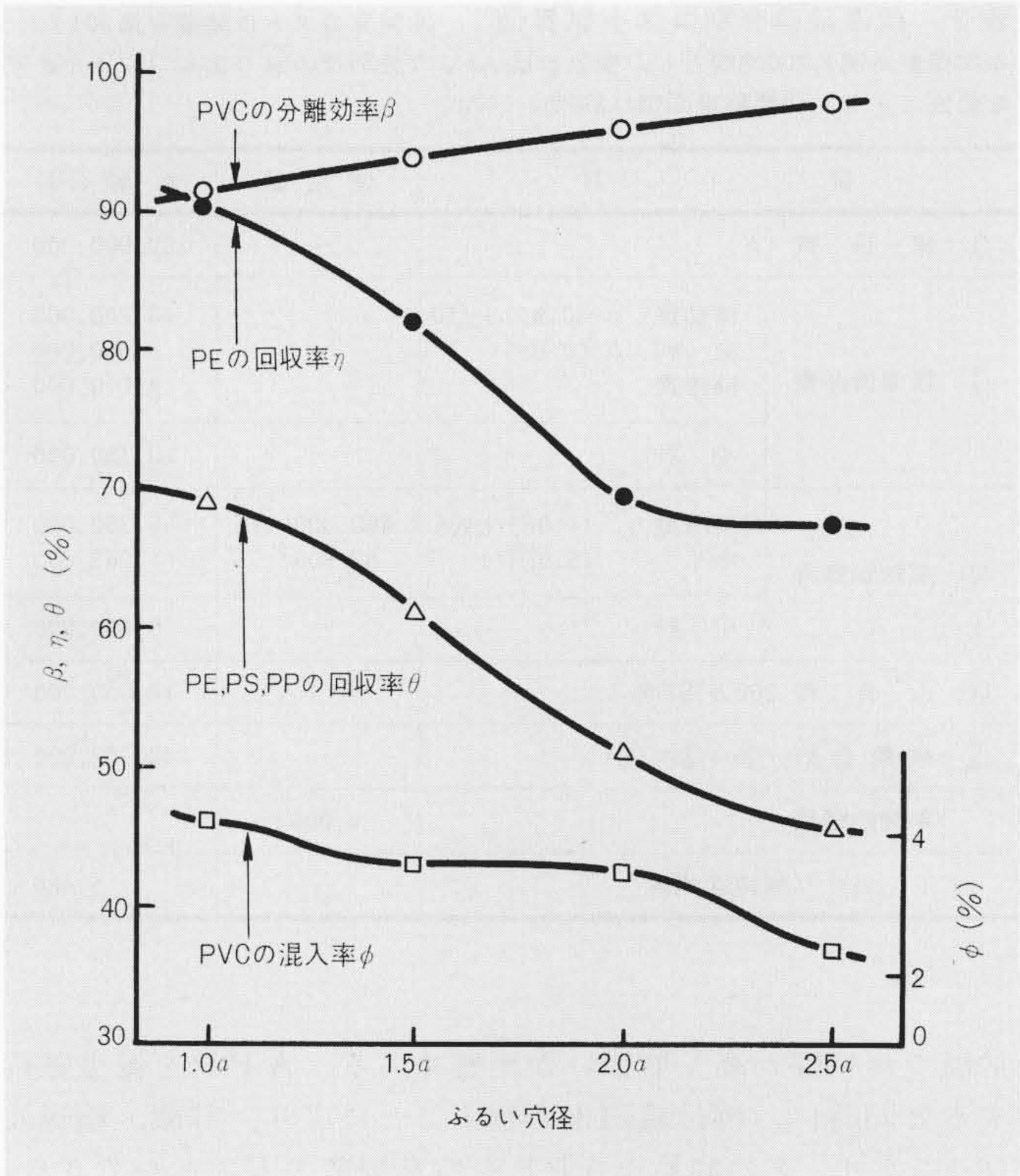


図11 ふるい網目大きさの分別性能に及ぼす影響 分別性能を向上させるには，多段階のふるい分級を行なうのも一つの方法である。

としても有効である。応用面としては次のものが考えられる。

(1) 複合プラスチック端材の処理

近年，単一プラスチック材料より成形後の物理的性質の優れているコンパウンドプラスチック材料が使用される割合が増えてきている。この場合，成形端材の再利用が難しく，投棄されるケースが多い。しかし，低温破碎処理を行なうと，コンパウンドしていたプラスチックが単一プラスチックとして回収できる場合がある。例えば，ポリエチレンと塩化ビニリデンのコンパウンドプラスチックの場合，塩化ビニリデンだけがぜい化して微小片化するのに対し，ポリエチレンは破碎を受けないので容易に分別できる。

(2) APP(アタクチック ポリプロピレン)の微粉碎

ポリプロピレンの製造の際，5～10%副生するAPPは，

表1 都市系プラスチック廃棄物の低温破碎分別性能の一例
冷却温度，回転刃先周速，コンベヤ供給速度をある条件に設定したときの各評価関数の母平均推定値である。

ふるい穴径	評価関数	推定値 (wt %)
1.5 a	ポリ塩化ビニルの分離効率 β	99.0
	ポリ塩化ビニルの混入率 ϕ	2.0
	PE, PS, PPの回収率 θ	62.3
	PEの回収率 η	82.7
1.0 a	ポリ塩化ビニルの分離効率 β	98.6
	ポリ塩化ビニルの混入率 ϕ	2.6
	PE, PS, PPの回収率 θ	70.2
	PEの回収率 η	90.7

表2 低温破碎分別コスト試算値 本試算コストは装置容量30t/d、年間稼働時間7,200時間とし、受入れピットより分別後の送り出しコンベヤまでを範囲とする。所要敷地面積は約28m×42m。

費 目		使用量	金額(円)
① 建設費(A)		—	180,000,000
② 設備償却費	償却費 $A \times 0.9 \times 1 / 10$	—	16,200,000
	金利 $A \times 0.055$		9,900,000
	補修費		4,050,000
小 計		—	30,150,000
③ 運転管理費	使用電力 11.0円/kWh	490,000kWh 82,800t	5,390,000
	水 15.0円/t		1,242,000
	小 計	—	6,632,000
④ 人件費 200万円/年		6 人	12,000,000
⑤ 経費合計(②+③+④)		—	48,782,000
年間処理量		9,000t	
トン当たり維持管理費		—	5,420

常温では粘性が高く取扱いが困難である。APPを低温破碎すると同時に、再付着防止を施すことにより、貯蔵、輸送及びハンドリングの容易なAPP粉体を製造することができる。APP粉体は各種成形品の増量材として再利用が可能であり、また重油などに混ぜて燃料化することもできる。

(3) 土砂の付着した廃プラスチックの破碎

ビニルハウス、ビニルトンネル、育苗用など農園芸分野にビニルシートが多量に使われているが、農園芸用ビニルシー

ト廃棄物(以下、廃農ビと略す)の再生利用を図る際大きな問題となるのは土砂の付着である。廃農ビは長さ数メートル以上の大ききで排出されるため、これを再生利用するためには前処理として切断(破碎)工程が不可欠であり、伸びの大きな廃農ビにはせん断形破碎機しか使えないが、付着している土砂によってせん断刃の摩耗が激しく大きな障害となっていた。しかし、これを低温破碎で行なうと破碎が衝撃で可能となるため、多少の土砂の付着があっても性能低下することなく破碎が可能である。

7 結 言

低温ぜい性の差を利用した選択的破碎によって、形状、材質の種々雑多な都市系プラスチック廃棄物から特にPVCを分別する技術を開発した。本技術は、大量の不特定な廃プラスチックから、特にPVCを除去すること又はPEを高純度で回収することに適しており、都市系プラスチック廃棄物の処分、再利用を容易とするための有効な分別要素技術であると確信している。

最後に、本技術の研究開発に関し御指導いただいた通商産業省工業技術院研究開発官室の斉藤研究開発官、中軸技官及び山形技官に対し感謝の意を表わす次第である。

参考文献

- 1) (財)日本産業技術振興協会編：「資源再生利用技術システム研究開発委員会報告書(昭50-3)」
- 2) 灰佐：「高分子」220(昭43、東京化学同人)
- 3) 田口：「実験計画法(上)」(昭49、丸善)

論文抄録

電解液槽による面対称三次元電位分布測定法

日立製作所 山極時生・小沢 淳
電気学会雑誌 96—4B, 207 (昭51-4)

従来の電解液槽による電位分布測定法を応用し、今まで解析の困難であった偏心円筒系、同軸円筒系直交部、直交円筒系などの電位分布を比較的容易に測定できる面対称三次元電位分布測定法を検討した。
近年電力系統では、変電所の大容量化、縮小化が叫ばれ、絶縁設計の信頼性が一段と要求されている。特にSF₆ガスを絶縁媒体としたガス絶縁機器では、従来の気中絶縁機器と異なり、機器の絶縁耐力はガス中の最大電界によって決定されるため、これら機器の電位分布を正確に知ることが絶縁設計上重要な問題になっている。これらガス絶縁縮小形変電所の絶縁構造は、機器の大部分が円筒接地タンク内に収納されており、基本的に軸対称三次元構造である。このため、従来方法により比較的容易に電位分布を求めることができる。しかし、接地タンクが分岐される部分(同軸円筒系直交部)、あるいはタンク内の高電圧部が偏心している場合(偏心円筒系)、更には三相一括

構造などの分岐部のように導体がねじれの関係で直交する場合(直交円筒系)などにおいては、軸対称三次元を含む二次元系の解析により近似的に求めなければならない。このため正確な値を把握することができず、裕度の大きな設計をしなければならなかった。本方法はこれらの部分の電位分布をより正確に測定するために検討したものである。
静電界と定常電流界とはマックスウェルの方程式より、誘電率と導電率を置き換えることにより模擬することができる。すなわち、電位分布を測定しようとする三次元電極を電解液中に沈め、電極間に定常電流を流し、各点の電位を求めることにより分布を測定することができる。しかし、このような方法では三次元的に等電位面を求めなければならないため、電位分布を正確に把握することが困難である。これを容易にするためには、ある平面を定め、その面上における電位分布として把握することが有効

な方法である。本方法は求めようとする三次元系を対称面で二分割し、その面における電位分布を測定する方法である。まず、測定しようとする系を対称面で二分割した解析モデルを作成し、これを電解液槽内にセットする。対称面を水平に保ちながら電解液を対称面まで満たす。測定はその対称面における電位分布をブリッジ回路を用いた探針により平衡点を順次求めながら行なう。静電界における対称面では、面に垂直な電界成分は存在しない。定常電流界でも同様な電流成分が存在しないため完全に模擬ができる。
従来、解析の困難であった系は面対称であり、またこの面内に最大電界の点を含む場合が多いので、これらの系の解析に有効な方法である。本方法を用い、測定精度及び各種基本構造部の測定を行ない、実用的な測定法であることを確認した。現在電子計算機による解析と併用し、解析精度向上に努力している。