

(論文)

固気流動層による乾式廃プラスチック連続比重分別装置の開発

Dry-type Continuous Specific Gravity Separator by Using Gas-solid Fluidized Bed Technology for Plastic Shredder Dust



菊池直樹*
Naoki KIKUCHI



中尾 昇*
Noboru NAKAO



村上 裕*
Hiroshi MURAKAMI

A dry-type continuous specific gravity separator, using gas-solid fluidized bed technology, was developed for removing polyvinylchloride from plastic shredder dust, in order to effectively utilize the plastic shredder dust through such processes as feedstock recycling. The developed separator successfully recovered plastics containing 0.5% of chlorine with 65% of recovery rate at 50kg/h of throughput from shredder dust derived from defunct home electric appliances containing about 5% of chlorine.

まえがき = 国内における廃プラスチック（以下廃プラ）排出量は年間 1,000 万トンにのぼり、産業廃棄物系廃プラはその約半分を占める。工場排出由来の廃プラは、分別が比較的容易であることからマテリアルリサイクルなどのリサイクル率が比較的高いが、家電リサイクル工場や自動車リサイクル工場から排出される廃プラは、多種のプラスチックが混在するためリサイクル率を向上させるためのいくつかの課題がある。特にポリ塩化ビニル樹脂（以下、塩ビという）を含有する混合廃プラのケミカルリサイクルやフィードストックリサイクルを進める上での課題は、塩ビ由来の塩素が、プラント機器の腐食を引き起こすことであり、多くの塩ビ含有廃プラは埋立て処理されているのが現状である。これらの廃プラを有効利用するためには、含有塩ビを取除くことが必要であるが、従来の湿式比重分別や静電分離などの分別手法には、表 1 に示すようなランニングコストや設備投資コストの課題があり、廃プラ有効利用率向上の妨げになっている。

一方、岡山大学では選炭を目的として、固気流動層を用いた乾式比重分別技術が開発され、選石やシュレッダダスト分別への適用も検討されている^{1)~4)}。本技術は乾式であり、分別物サイズが分別精度に与える影響も比較的小さいため、粒度をそろえる破碎設備が不要であることなどから、上記の従来の分別技術の課題を解決できる技術であると考えられる。当社は、家電リサイクル工場廃プラ処理への適用を目的として、この技術の連続化に向けた研究開発を(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構が進める平成 15 年度産業技術実用化開発助成事業からの援助を受けて実施してきた。本研究開発では、連続比重分別実証機を試作し、連続運転下での分別性能向上に向けた試験を実施した。本稿では連続化装置の構成、分別性能向上のための運転制御方法などを紹介する。

1. 固気流動層による廃プラ比重分別の基礎検討

廃家電（廃冷蔵庫）由来廃プラ 200 個の比重を 0.1 刻

表 1 固気流動層比重分別技術と従来技術の比較

Table 1 Comparison of conventional separation methods and specific gravity separation by fluidized bed for PVC in shredder dust

Separation method		Accuracy of separation	Facility cost	Running cost
Dry	Fluidized bed separation			
	Air table separation	> 1.2% of chlorine concentration	Installation of grinder is required	
	Pneumatic separation	×	Installation of grinder is required	
	Static separation		Installation of grinder is required	
Wet	Float sink separation			×
	Decanter centrifuge			×

*技術開発本部 機械研究所

みで測定後、比重 1.0 から 1.5 の間の廃プラから任意に 7 個の廃プラを選定し、含有塩素濃度を測定した。廃プラ比重分布累積個数と選定した廃プラの含有塩素濃度の関係を図 1 に示す。塩素を含有するプラスチックの比重は 1.2 以上であり、全体に占める比率は 10% 程度であることが分る。したがって、比重 1.2 での比重分別が実現できれば廃プラ中の塩素含有成分を取除くことが可能となる。

この廃プラ群より 24 個の廃プラおよび金属を選定し、図 2 に示すようなバッチ式固気流動層比重分別装置へ 1 個ずつ投入し、それぞれの浮沈を調査した結果を表 2 に示す。流動層高さは 300mm、処理時間は 3 分である。塩ビ以外の廃プラは全て浮揚し、塩ビおよび金属、ハーネスは全て沈降するという結果が得られ、廃家電由来廃プラは固気流動層による比重分別が適用可能であることが分る。この試験では図 3 に示すような粒度分布を持つ珪砂を流動媒体として使用した。また層高 300mm での媒体流動化に関する風速 - 圧損特性は図 4 のとおりである。図 4 において圧損が一定となる風速は、流動層が流動化を開始する風速（最小流動化速度； U_{mf} ）であり、今後、風速の表示としては風速 U_0 と U_{mf} との比である U_0/U_{mf} を用いる。

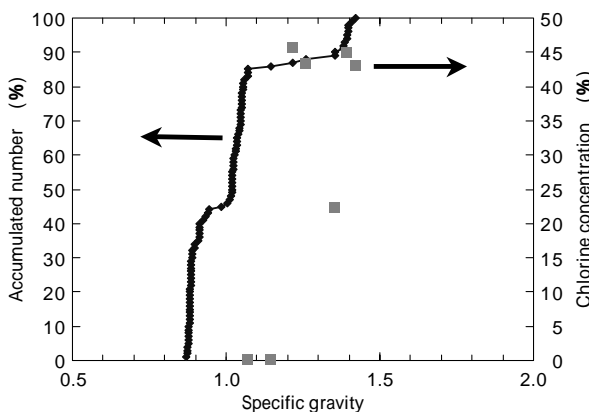


図 1 家電由来廃プラの比重分布と塩素濃度の関係
Fig. 1 Relation between specific gravity and chlorine concentration of shredder dust from home electric appliance

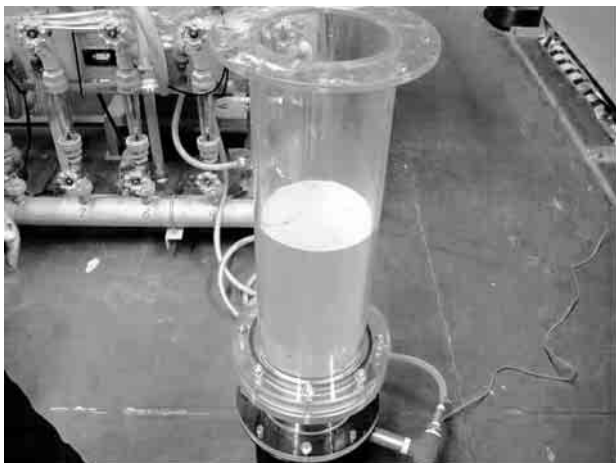


図 2 バッチ式固気流動層比重分別装置
Fig. 2 Batch type fluidized bed specific gravity separator

表 2 バッチ式固気流動層比重分別装置による家電由来廃プラの分別試験結果

Table 2 Fluidized bed separation test results of shredder dust from home electric appliance

	Shredder dust composition (%)	Separation results by Fluidized bed (pcs.)	
		Float	Sink
Chlorine free plastic	76.6	14	0
Polyvinylchloride	10.3	0	2
Metal	9.9	0	4
Wire harness	3.2	0	4

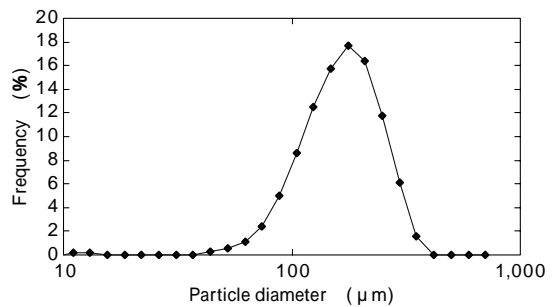


図 3 使用媒体の粒径分布
Fig. 3 Particle size distribution of fluidized bed media

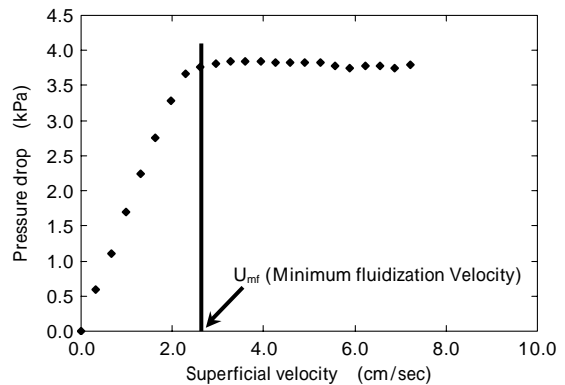


図 4 使用媒体の流動化に関する流速と圧力損失の関係
Fig. 4 Relation between superficial velocity and pressure drop concerning fluidization of fluidized bed media

2. 固気流動層による連続比重分別の検討

本開発では固気流動層による比重分別を連続的に行い、有効利用可能な塩ビを含まない浮揚物の回収率を 60% 以上、含まれる塩素濃度を 0.5% 以下とすることを目標に開発を進めた。

固気流動層による比重分別を連続化するための第 1 の課題は、バッチ試験での流動層流動化状態を保ちながら、分別された廃プラを流動層外へ排出する手法である。さらに、固気流動層による比重分別は、風力選別、静電分離などの他の乾式比重分別方法と比較して分別物サイズの影響は小さいが、10mm 程度のサイズの廃プラに対しての分別精度は低下する傾向があり、この点を連続装置の中でいかに解決するかが第 2 の課題であった。

2.1 分別廃プラ排出機構の検討

図 5 は第 1 の課題を解決するための本連続装置コンセプト図であり、傾斜した分散板を持つ流動層内に移行流を発生させるものである。移行流は流動層深さが浅い上流側より流動媒体を投入し、下流側より媒体を排出する

ことにより発生させる。廃プラは移行流上流側より投入され、媒体とともに流れていくにしたがって分別され、下流側で浮遊物、沈降物に分別され流動媒体とともに排出される。廃プラは媒体と振動ふるいなどにより分離され、媒体は上流側より流動層内に再投入される。この機構により、分別された廃プラを流動層内からかき出すためのバケットコンベヤなどの機構が不要になるため、流動層の状態はバッチ式流動層の状態とほぼ同じに保たれ、分別精度が保たれる。

このコンセプトをベースに製作した実証機の全体概念図、および写真をそれぞれ図6、図7に示す。流動層部は長さ1,500mm、幅600mm、高さ1,070mmとなっており、流動層内の分散板は長さ方向5列、幅方向2列の計10区画に分割され、それぞれの風箱は単独で風速制御が可能である。媒体および分別廃プラの排出駆動はベルトコンベヤによる粉体の切出し機構を適用しており、ベルトコンベヤにて排出された媒体と廃プラは振動ふるいによる分離後、媒体はベルトコンベヤにて流動層へ再度投入さ

れる。分散板の傾斜は10°、流動層深さは、上流側100mm程度、下流側は300mmに保たれ、沈降物排出口は底部から150mm、浮揚物排出口はその上150mmとなっている。流動層深さをさらに深くすることも可能であるが、バッチ試験での流動層深さが分別精度に与える影響検討の結果から300mm程度の深さが最適であったため、300mmを本実証機の設計深さとしている。使用している媒体および分散板はバッチ式試験装置と同じものを使用した。

また、流動層の傾斜分散板よりやや傾斜が大きい(13°)パンチングメタル(ポアサイズ3mm、開口率32%)が流動層底部および側面部に設置されている。これは、分散板から板面内均一に吹込まれている気泡の分散が分散板上の沈降堆積物に阻害され、吹込み直後に気泡が合体、粗大化することによる流動層内気泡サイズの変化が分別精度低下を引起すことを防ぐためのものである。パンチングメタルは振動モータによる振動が付加され、沈降した廃プラが排出口へ搬送される構造になって

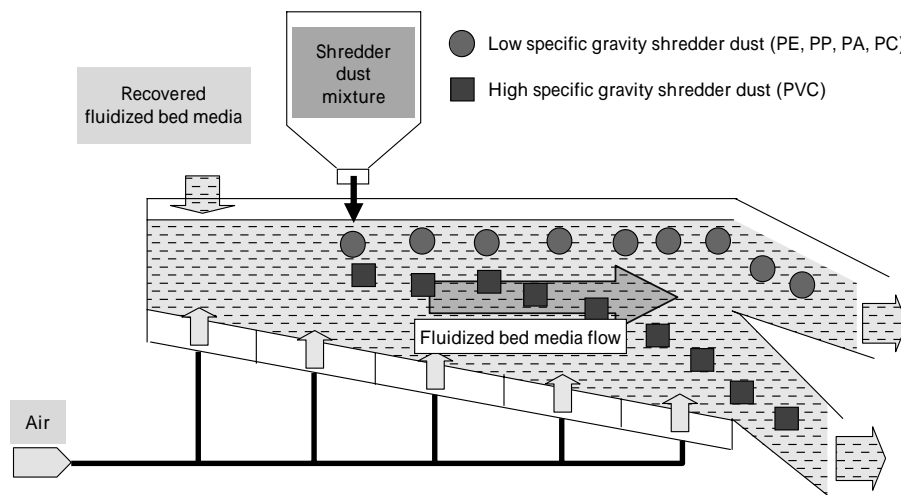


図5 固気流動層連続比重分別装置の概念図

Fig. 5 Conceptual diagram of continuous specific gravity separator by fluidized bed

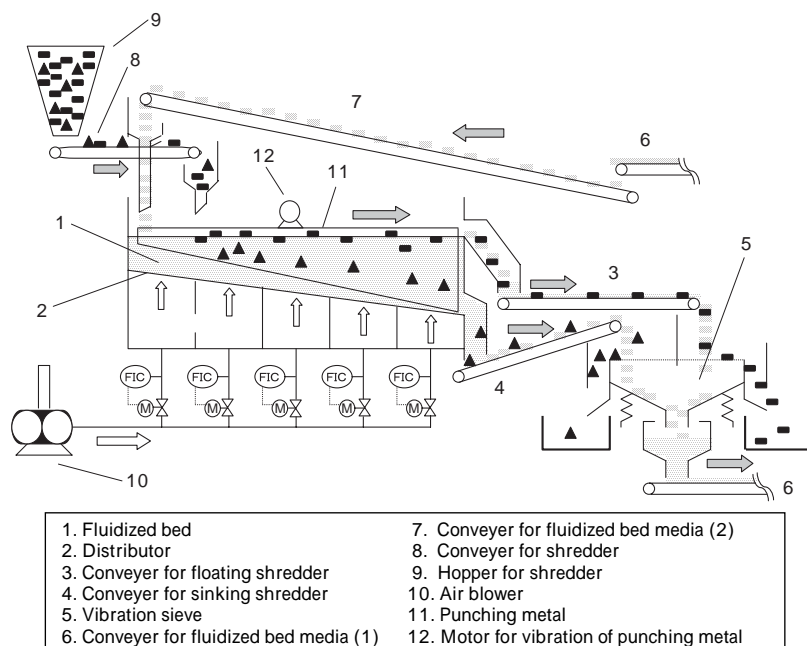


図6 固気流動層連続比重分別装置の概略図

Fig. 6 Diagram of continuous specific gravity separator by fluidized bed

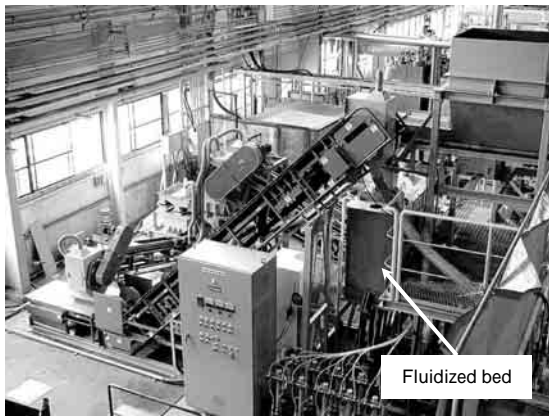


図7 連続式固気流動層比重分別装置実証機
Fig. 7 Continuous fluidized bed specific gravity separator

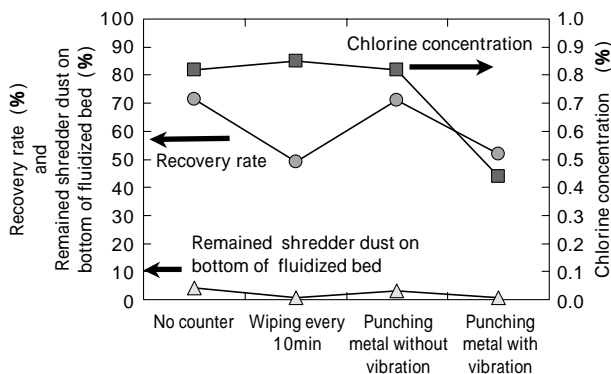


図8 振動パンチングメタルによる分別性能改善 (運転時間: 全て3時間, 処理量: パンチングメタル無し, 振動無しパンチングメタルは 30kg/hr, 振出し処理, 振動パンチングメタルは 40kg/hr)
Fig. 8 Improvement of separation performance by vibrating punching metal (Operating time: 3 hours for all, Treatment capacity: 30kg/hr for no counter and punching metal without vibration, 40kg/hr for wiping every 10min and punching metal with vibration.)

いる。振動パンチングメタルの有無が分別性能に与える影響を調査した結果が図8である。パンチングメタルが設置されない場合は処理量 30kg/h, 3時間の運転において沈降物の分散板上への堆積により, 回収されない沈降物(以下, 未回収沈降物)が 4.3%まで増加し, 浮揚物中に含まれる塩素濃度も 0.82%まで増加している。パンチングメタルを設置せずに定期的(1回/10分)に分散板上に堆積した廃プラをかき出す手法も検討したが, 処理速度 40kg/h, 3時間の運転の結果, 未回収沈降物は 0.6%まで低減するが, 回収率 49.2%, 塩素濃度は 0.85%となった。これに対し振動パンチングメタルを設置した場合は, 処理量 40kg/h, 3時間運転においても未回収沈降物 0.6%, 回収率 51.8%, 塩素濃度 0.44%を維持しており, その効果が確認されている。なお, 処理量 40kg/h では 30kg/h と比較して未回収沈降物量は増加するため, 30kg/h 処理時の振動パンチングメタルによる性能向上はさらに高まると考えられる。またパンチングメタルに振動を付加しない場合には, 処理量 30kg/h, 3時間運転と前記パンチングメタル無し時と同じ少ない処理量での運転条件にて, 回収率 71%, 塩素濃度 0.82%となっている。未回収沈降物も 3.3%まで上昇しており, 沈降物堆積量はパンチングメタル無し時より若干改善されるもの

の, 未回収沈降物堆積は進行するため, 振動機構付与は不可欠である。

2.2 風量制御による分別精度と回収率向上の検討

10mm 程度の小サイズの廃プラに対する分別精度が低下するという第2の課題を解決するために, 比重が明確なモデルプラスチック(以下, モデルプラという)を用いて層高 150mm 流動層にてその沈降挙動を詳細に調査した。図9は, パッチ試験機を1分間運転した場合に比重が異なる2種類のモデルプラ(径 30mm および 10mm)の沈降深さが風速によりどのように変化するかを調べた結果である。沈降深さは, 運転終了時に流動層媒体を表面より順次取除いて測定した。非塩ビモデルプラとしては, 塩ビとの分別が難しい比較的比重が大きいものを用いた。図9中の PVC は塩ビ, PC はポリカーボネート, PA はポリアミド(ナイロン)であり, 括弧内の数値はその比重を表している。30mm サイズのモデルプラは比重 1.4 の塩ビの沈降深さと非塩ビ(PC, PA)の沈降深さは風速が $U_0/U_{mf} < 1.1$ であれば大きく異なり, その沈降/浮揚の風速閾値も明確である。一方, 10mm サイズのモデルプラは沈降/浮揚閾値風速が明確ではなく, $U_0/U_{mf} > 1.1$ の風速領域では塩ビと非塩ビの沈降深さに明確な差が認められなくなり, これが分別精度, 回収率の低下を引起す原因であることが判明した。家電由来廃プラ中に占める 10~30mm サイズの廃プラは排出される廃プラ重量全体の 40%を占めており, このサイズ領域の廃プラの分別精度を向上することが非常に重要となる。

この課題を解決するために, サイズの異なるプラの流動層内での初期の沈降挙動(沈降速度)に着目した。図10は運転開始初期の各比重, サイズのモデルプラの沈降深さを運転開始 15秒後に測定し, 初期沈降速度(mm/s)として表したものである。この図からわかるように, サイズが 30mm のモデルプラは, いずれの風速においても塩ビの初期沈降速度が大きく, 小さな風速においても塩ビの沈降が進む。一方, 10mm サイズのモデルプラの場合は低い風速では塩ビ, 非塩ビの沈降速度に大きな差は見られないが, 風速の上昇に伴い塩ビと非塩ビの沈降速度差が拡大し, $U_0/U_{mf} = 1.2$ では塩ビの沈降速度が非塩

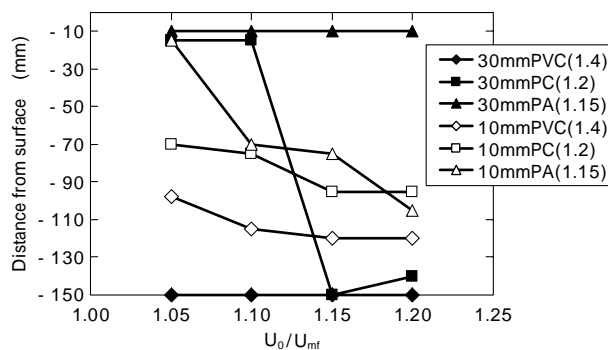


図9 比重が異なる径 30mm および 10mm サイズのプラスチックにおける風速と沈降深さの関係(層高 150mm, 処理時間 1min)
Fig. 9 Relation between distance from surface of fluidized bed and superficial velocity, U_0/U_{mf} for different specific gravity plastics of 30mm and 10mm in diameter (Height of fluidized bed: 150mm, operation time: 1min.)

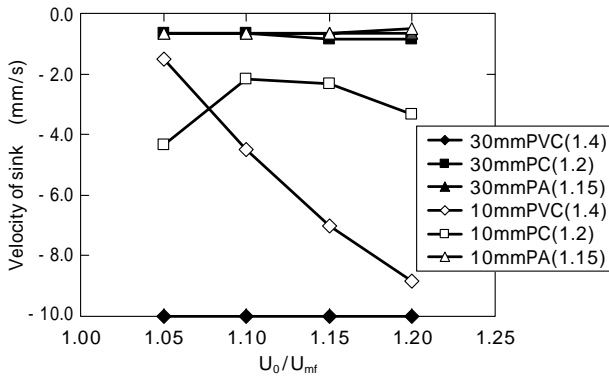


図10 比重が異なる径 30mm および 10mm サイズのプラスチックにおける風速と初期沈降速度の関係(層高 150mm, 処理時間 15 秒)

Fig.10 Relation between velocity of sink of plastic in fluidized bed and superficial velocity, U_0/U_{mf} for different specific gravity plastics of 30mm and 10mm in diameter (Height of fluidized bed : 150mm, operation time : 15sec.)

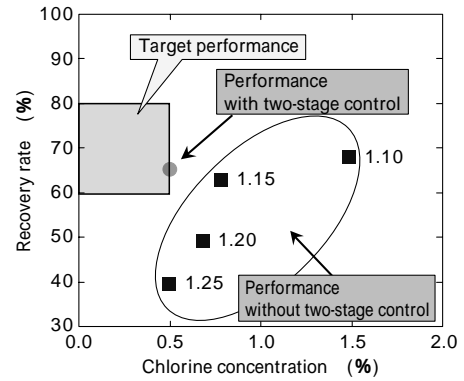


図12 2 段風速変化制御による比重分別性能の向上
印 : 2 段風速制御無し, 印 : 2 段風速制御有り
(図中の数字は U_0/U_{mf} の値)

Fig.12 Improvement of gravity separation performance by two-stage superficial velocity control

: without two-stage control, : with two-stage control
(Numbers in graph show value of U_0/U_{mf})

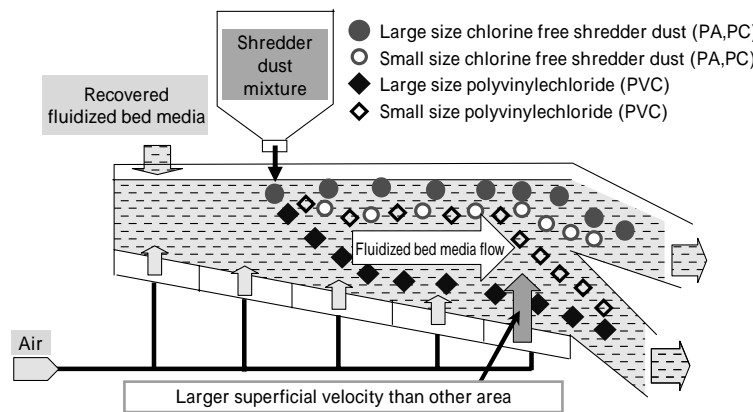


図11 2 段風速制御による小サイズ廃プラ分別精度向上の模式図

Fig.11 Conceptual diagram of improvement of separation accuracy by two-stage superficial velocity control

ビ沈降速度の 2 ~ 8 倍になっている。これらの沈降挙動を利用すれば、10mm 程度の小サイズ廃プラの分別精度を高められると考え、下記のような 2 段の風速制御を検討した。

- (1) サイズが大きい廃プラは流動層上流側(廃プラ投入側)の比較的小さい風速領域で分別する。サイズの小さい廃プラはこの領域では可能なかぎり沈降させないようにする。
- (2) 下流側排出口直前の風速を大きくすることにより小さなサイズの塩ビ廃プラを急速に沈降させるとともに、非塩ビ廃プラの沈降をできるだけ抑え、小サイズ廃プラの分別精度、回収率向上を図る。

連続機では装置幅方向に 2 列、長さ方向に 5 列の風箱配置をしており、上記の流速構成を実現させるために下流排出口直前 1 列 2 個の風箱風速を上げることにより上記制御を実現した。図11 は風箱の風速設定とそれによる廃プラの沈降挙動を模式的に示したものである。

図12 に、連続実証装置にて、実廃プラを使用し、全ての風箱を同じ風速で運転 ($U_0/U_{mf} = 1.10 \sim 1.25$ の 4 条件) した場合の塩素濃度と回収率の関係 (図中 プロット) および本開発による 2 段風速制御運転での同様の関係 (図中 プロット) を示した。2 段風速制御では下流出口側 2 個の風箱風速を $U_0/U_{mf} = 1.35$ 、他の風箱風速を

$U_0/U_{mf} = 1.05$ とした。いずれも処理量 50kg/h, 3 時間運転での結果である。比重分別では分別精度と回収率は一般的にトレードオフの関係にあり、2 段風速制御無しでの運転結果は通常予想される結果であるが、2 段風速制御では、特に 10mm サイズ廃プラの分別精度、回収率を向上させることにより、3 時間運転にて平均塩素濃度 0.5%、回収率 65%の性能を達成している。

むすび = 開発した連続比重分別実証機にて処理量 50kg/h の 3 時間運転を行い、有効利用廃プラ (浮揚物) 回収率 65%、含有塩素濃度 0.5% を達成した。本装置をリサイクル実プラントへ適用していくために、処理量をさらに高める検討を進めるとともに、今回検討した廃家電由来廃プラ以外の廃プラへの適用も含めた検討を進めていく。なお、本装置の実用化開発は㈱神鋼環境ソリューションと共同で実施している。

参考文献

- 1) 田中善之助ほか: 化学工学論文集, 第 26 巻, 第 3 号 (2000) p.327.
- 2) 押谷 潤ほか: 粉体工学会誌, 第 38 巻, 第 1 号 (2001) p.4.
- 3) 押谷 潤ほか: 粉体工学会誌, 第 38 巻, 第 10 号 (2001) p.18.
- 4) 押谷 潤ほか: 化学工学論文集, 第 32 巻, 第 2 号 (2006) p.115.