資源リサイクルにおける固/固分離技術の役割

若 松 貴 英*

Takahide WAKAMATSU

1. はじめに

資源開発における選鉱技術が、最近では都市廃棄物の処理や、各種産業での未利用資源の資源化や資源リサイクルの工程に導入され、重要な役割を果たしている。したがって、最終講義としては固/固分離技術の資源循環における役割について、現状と将来展望について述べる。

2. 都市廃棄物の処理

今、日本における廃棄物の発生量とリサイクル率を概観すると、表1のようである¹⁾。廃棄物の総発生量は1990年において、一般廃棄物は5千万t、又産業廃棄物は2億4千万tであり、合計2億9千万tである。廃棄物は経済成長と共に増大するものであり、現在は

表1 わが国の廃棄物発生量とリサイクル率

廃棄物	発生量		リサイクル率 (資源化率) %	調査年
	千t	百万個		
一般廃棄物	50,441		3.4	1990
産業廃棄物	243,223		39.5	1990
スチール缶*	1,094	23,777	56.8	1992
アルミ缶*	198	11,230	53.8	1992
ガラスびん*	2,609		47.9	1990
紙*	29,060		52.2	1991
自動車		5.2	75~90	1990
タイヤ	852	94.0	86.0	1991
カラーテレビ	127	5.1	9.0	1990
電気冷蔵庫	200	3.4	80.0	1990
プラスチック	5,060		12.0	1989

* 発生量=生産量

1995年 8月 30日受付

* 名城大学都市情報学部

(〒509-02 岐阜県可児市虹ヶ丘 4-3-3)

TEL. 0574-69-0137

3億tを越えていると推定される。

リサイクル率に関しては、一般廃棄物については、表1より3.4%であり、極めてわずかである。しかし、この値には「チリ紙交換」のような民間ベースで回収

表2 産業廃棄物の業種別再資源化物量

(1990年度通産省調べ)(単位:千t)

業種中分類	産業 廃棄物等 排出量	再資源 化物量	再資源 化率
食料品製造業	12,741	1,274	10.0%
飲料・飼料等製造業	6,172	1,304	21.1%
繊維工業	3,773	171	4.5%
繊維製品製造業	115	12	10.6%
木材・木製品製造業	4,879	2,177	44.6%
家具・装備品製造業	379	82	21.6%
パルプ・紙等製造業	48,861	3,948	8.1%
出版・印刷関連産業	5,424	848	15.6%
化学工業	21,910	2,364	10.8%
石油石炭製品製造業	1,292	331	25.6%
プラスチック製品製造業	3,076	611	19.9%
ゴム製品製造業	307	52	17.1%
なめし革・毛皮製造業	286	46	16.2%
窯業・土石製品製造業	17,200	7,370	42.8%
鉄鋼業	76,377	56,943	74.6%
非鉄金属製造業	7,848	1,779	22.7%
金属製品製造業	7,431	2,502	33.7%
一般機械器具製造業	4,961	3,086	62.2%
電気機械器具製造業	4,985	1,924	38.6%
輸送用機械器具製造業	8,517	6,220	73.0%
精密機械器具製造業	250	96	38.3%
その他の製造業	475	16	3.3%
電気業	5,939	2,858	48.1%
ガス業	26	7	25.5%
製造業合計	243,223	96,021	39.5%

注) 再資源化物量=C+D+E

再資源化率=(C+D+E)/A×100

(A=産業廃棄物等, C=自社内再利用物, D=有償物,

E=産業廃棄物のうち再資源化された物)

図1 廃棄物の処理方法

される量は含まれていない。スチル缶、アルミ缶、ガラスびん、古紙などの民間ベースによるリサイクルは各々50%程度である。一方、産業廃棄物の内訳およびその再資源化率については表2のようである。産業廃棄物の平均の再資源化率は約40%である。

図1は、日本における廃棄物の処理方法をまとめたものである²⁾。一般に廃棄物は可燃物と非可燃物とに分別され、可燃物は三通りの変換がなされる。第一は熱変換であり；焼却してその際得られる熱を利用して発電や給湯を行ったり、部分燃焼熱分解やガス加熱分解により低カロリーガスや高カロリーガスを得たり、さらに油加熱分解(高温高压)により油やタールを回収するものである。第二は生化学変換であり、発酵させてメタンを回収したり、あるいはコンポストとして肥料とするものである。第三は原料に変換する処理であり紙の原料にしたり、炭や固形燃料として利用するものである。

一方、非可燃物は適当に破碎され、スクリーンでふるい別けられ、その後各種の固/固分離手段を経て、ガラス類、鉄、アルミなどに選別されて資源循環の目的に供される。その他に冷蔵庫、洗濯機、テレビなど

の家電製品廃棄物や、車、自動車などは別ルートで回収される大型廃棄物であり、これらの廃棄物も同様に破碎処理され、特に有価金属を回収するためには、固/固分離技術が大なる役割を果たしている。

表3には、廃棄物処理に良く用いられる固/固分離技術の一覧である。この表に示された技術は、資源開発において用いられている選鉱・選炭技術と同じものである。現在、特に廃棄物の処理によく使用される選別装置としては、鉄分の回収用の磁選法である。又、アルミニウム回収には渦電流選別装置がよく見られる。さらに、昔は人力によって手選別されていた粗粒子の選別に際し、最近は粒子の表面の色彩や輝きの相違を自動的に検出し選別する装置も発達し、廃棄物処理にも利用されている。これに類する装置として、検出にレーザー、蛍光性、放射能などを利用した種々の粗粒選別が開発されている。なお、廃棄物処理のプラントでは、粗粒領域の対象物の形状や色、輝きなど多種多様なもののため、人力による手選別が行われている所も多い。表3に示した固/固分離装置の種類やその詳細については、専門書を参考にして頂きたい。

表3 固/固分離に用いられる選別法

分離・選別法	分離に用いられる特性	装 置
粗粒子選別	色彩、光の反射、蛍光、放射線量の差	色彩選別機、放射能選別機、手選など
比重選別	流体中の粒子の沈降速度、加速度の差	風力選別機、ジグ装置、振動テーブル、スパイラル選別機、重液選別機
磁気選別	磁性の差	乾式・湿式の低磁力あるいは高磁力の磁選機、高勾配磁気選別機
高電圧選別(静電選別)	電気伝導性の差、粒子の帯電量の差	静電選別機、コロナ放電選別機、自由落下型静電選別機など
渦電流選別	渦電流力の差	渦電流選別機
形状分離	平板上の滑りあるいは転がり速度の差	形状分離装置(傾斜回転円板法など)
粒子径分離	粒子径の差	篩分け、クラシファイヤー、サイクロン、エリトリエーションなど
浮遊選別	表面疎水・親水性の差	機械攪拌式浮選機(デンプー型、ワーマン型など)、カラム浮選機など

3. 実操業プラントにおける幾つかの資源リサイクル

3. 1 廃自動車の処理例

乗用車、トラックおよびバスなどを含めて自動車の日本における保有台数は、1992年には約6100万台といわれており³⁾、又廃車数は515万台を数えている。最近、新車の販売台数は減少気味と言われているが、車の廃車数や保有台数は年々増加しており、廃車の処理は資源リサイクルの観点からも重要な問題である。

表4には、自動車の種別による生産用材料の一台当りの構成平均重量が示されており、図2には構成割合が示されている⁴⁾。図2より、車種により若干の差はあるが、非鉄金属類は3～5%、非金属類は15%程度含有されており、残りの約80%は鉄が占めていることがわかる。表4に示されているように、非鉄金属類のうちでは、アルミ地金がもっとも多く、ついで銅、鉛、亜鉛の順となっている。なお、現在の車種では鉄の割合が低下し、非鉄金属類が増加し約8%を占めると言われている。

3. 1. 1 豊田メタル(株)の廃車処理工場

豊田メタル(株)の廃車処理工場の処理系統図は図3に示されている⁵⁾。解体業者より送られてきた車体は、まずシュレッダーに供給され破碎される。破碎された

表4 種別による材料の構成平均重量

単位: kg/台

	乗用車	トラック	バ ス
鉄	35.7	50.8	191.1
普通鋼	691.7	860.6	2,806.7
特殊鋼	179.5	316.1	984.4
電 気 銅	9.9	9.6	40.0
非 鉛地金(含半田用)	6.3	12.2	31.1
鉄 亜 鉛 地 金	5.7	5.5	6.7
金 アル ミ 地 金	29.4	37.6	64.4
属 そ の 他	1.1	7.4	4.4
	計	52.4	146.7
ゴ ム	48.4	73.0	193.3
石 綿	1.3	2.3	6.6
ガ ラ ス	30.5	26.0	182.2
非 合 成 樹 脂	40.0	37.2	60.0
金 { フェノール樹脂	1.3	1.4	2.2
{ ポリウレタン	5.9	3.5	13.3
{ 塩化ビニール	12.2	11.2	33.3
{ ポリエチレン	2.3	1.7	—
{ ポリプロピレン	5.1	6.9	2.2
属 A B S	8.1	8.0	4.4
{ その他の合成樹脂	5.1	4.5	4.4
ガラスファイバー	0.2	0.3	2.2
織 維	7.5	5.0	15.2
木 材	0.4	68.7	182.2
そ の 他	33.5	33.4	175.6
	計	161.8	817.8

スクラップは空気分級機にて軽い部分をシュレッダーダストとして除去し、重い部分は磁選機にて処理され、ここで鉄分が磁性分として回収される。非磁性分は振動スクリーンにより40mm以上、40～12mmおよび12mm以下の3産物に分けられる。その後、40mm以上の産物は手選別による非鉄金属類(アルミ、亜鉛、銅、真鍮など)が回収され、一方、40～12mm産物および12mm以下の産物はそれぞれ乾式流動層比重選別装置および風力選別機を用いた比重選別法で処理され、非鉄金属類を回収している。なお、乾式流動層比重選別装置は豊田メタル(株)が独自に開発した選別機であり、その概略図は図4に示されている⁵⁾。これは原料供給装置、選別メディア供給装置、選別トラフ、選別メディア収集トラフ、メディア循環装置(バケットエレベータ)から成っている。選別トラフの中では、約600～150μm*の乾燥した砂が旋回流動状態にあり、上流より供給された処理物は傾斜したトラフの中を下降するにしたがい、流動層の見掛け比重より軽い物は上

*) 実際には3～6号鑄物用珪砂が用いられている。

図2 種別による材料の構成割合

図3 豊田メタル(株)の廃棄物処理工場の系統図

に、重い物は下に位置し比重分離される。この装置は、この工場では「ドライセパレックス」と呼ばれている。

3. 1. 2 九州メタル産業(株)の廃車処理工場

図5に、九州メタル産業(株)の廃車処理工場の系統

図4 乾式流動層比重選別装置

図が示されている⁶⁾。豊田メタル(株)の場合と同様に廃車はシュレッダーで破碎され、その後磁選機で鉄が回収されている。鉄が除去された非磁性物は空気選別機により、プラスチック、布、繊維類等が除去される。その後、肉眼的に識別可能な粗粒の銅や真鍮などの非金属類やベルト・ゴム等の異物が手選で選別・除去される。残りは、トロンメルスクリーンにより、サイズ別の3産物に分けられる。35mm以上の産物は手選により銅や真鍮等の混合非鉄金属類が回収される。35~

図5 九州メタル産業(株)の廢車処理工場の系統図

10mmサイズは粗粒ジグにより処理され、軽いゴムやプラスチック類が分離除去され、次の工程の重液選別機によるアルミニウム産物と銅・真鍮等の混合非鉄金属産物が回収される。ここで使用されているジグは、プランジャージグであり、その構造は図6に示されている。10mm以下のスクリーン産物は細粒ジグで処理される。この細粒ジグはプランジャーの代りにダイア

粗粒用ECHOメタルジグ(Type LP) 1:ジグ水槽, 2:給水弁, 3:孔明き板, 4:オーバーフローダム, 5:プランジャ, 6:偏心ホイール, 7:モータ, 8:孔明きメタルコンベヤ, 9:排出樋, 10:フィーダ, 11:モータ

図6 粗粒用メタルジグ

フラムを用いたジグである。この工程で沈下物として混合非鉄金属類が産物として得られる。この処理工場のジグは「ECHOメタルジグ」と呼ばれている。

3.2 鉄鋼産業における廃棄物の資源化例

日本では毎年約1億トンの粗鋼が生産されており、それに伴ないスラグやダストの発生も多く、それら廃棄物の資源化は重要な問題である。鉄鋼産業において行われている資源化の事例と、それに利用されている固/固分離技術の現状を眺めてみよう。

3.2.1 製鋼スラグより鉄分の回収⁷⁾

転炉にて1トンの粗鋼が生産される場合、120~140 kgのスラグが発生する。そのスラグの化学組成は表5に示されている。スラグ中の鉄分は一般に金属鉄および酸化鉄の形で存在する。図7は製鋼スラグに対して磁選機を2段に使用し、2種類の精鉱を回収している。Fe 90%の磁選産物は転炉に再供給し、Fe 55%の精鉱は焼結工程に供給している。ここで発生する尾鉱はセメント原料、埋立て、土地改良剤等に利用される。又高炉スラグも同様に磁選により処理される。

3.2.2 高炉ダストからの亜鉛分の回収⁸⁾

製鉄所内で発生するダストの大部分は集められ、一般には焼結工程に供給され処理される。しかし、高炉

表5 製鋼スラグの化学組成

化学種	Fe	FeO	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	MnO
%	5~20	5~20	9~20	37~59	0.1~25	0.6~8.0	1.3~10.0

図7 転炉スラグの磁選処理

図8 高炉ダストの湿式サイクロンによる処理

ダストはZn分が高いために焼結工程に供給不可能であった。基礎研究の結果、分級によってZnが細かい粒度域に濃縮することが確認され、図8に示すような湿式サイクロン(ハイドロネガクロン)を用いてZn分を除去し、低Zn分ダストを得て焼結工程に供給している。ここに用いられているサイクロンについては、フィードを加圧で導入するのではなく、オーバーフロー及びアンダーフローを排出する際の負圧を利用した湿式サイクロンが一般に用いられている。

3. 2. 3 製鉄ダストから黒鉛の回収⁹⁾

製鉄、製鋼工程を構成する各種単位操作においては、ダストが発生するが、そのダスト中には微粒の酸化鉄の他に未燃ゴークス粉、非晶質グラファイト、結晶性グラファイト等が存在する。図9は主として結晶性グラファイトを浮選法により回収している系統図を示したものである。浮選工程では、捕収剤としてクロシン、起泡剤としてMIBCが使用されている。これらの試薬は疎水性鉱物の浮選として普通に用いられる浮選剤である。5~50%Cを含有する製鉄ダストから、97%Cの精鉱を収率良く回収している。

図9 製鉄ダストの浮選による処理

4. 結 言

廃棄物の量は毎年増大し、その焼却処分においては焼却後の灰の処理、又埋立処分においては埋立地の確保が大きな問題となっている。この問題解決には、廃棄物が最終処分に到るまでに資源化処理を行ない、可能な限り廃棄物量を最小化することが必要である。すなわち、各種分離手段を駆使し、廃棄物中の有用成分を回収・再資源化する事、さらに未利用物質を回収し有効に利用する事、又これら生産工程をクローズドシステム化するなどが望まれる。特に金属のような再生不可能な資源については、リサイクルを積極的に進めることにより資源の確保にも関連するので、そのシステムは技術的にも経済的にも効率の良いものが望まれる。

本文では、資源リサイクルを推進する上で固/固分離技術の果たす役割の重要性を示したが、この分野の益々の発展を祈る次第である。

引 用 文 献

- 1) 高月 紘：公衆衛生，56巻，12号，839(1991)
- 2) 平岡正勝：資源処理技術，41巻，1号，40(1994)
- 3) 日本自動車工業会：'93版日本の自動車工業，8(1993)
- 4) クリーンジャパンセンター：再資源化技術(非鉄金属系廃棄物，64(1983)
- 5) 熊谷正克：エネルギー・資源，7巻，3号，261(1986)
- 6) 二又学他：平成5年資源・素材'93分科研究会資料B-1(1993)
- 7) 原田源三郎他：浮選，29巻，1号，32(1982)
- 8) 戸田秀夫他：浮選，26巻，2号，81(1979)
- 9) Mohri, E., et al : Proceedings PMP '93, 807(1993)