

磁性流体を用いた有価金属回収装置

Recovery of Nonferrous Metals Using Magnetic Fluid Techniques

生活水準が向上するにつれて、家庭及び産業分野から排出される廃棄物は年々増加している。これら廃棄物のうち、非磁性金属廃棄物を無公害に処理し、かつ資源として再利用するため、磁性流体を用いた有価金属回収装置を開発した。

有価金属回収装置は、磁性流体に傾斜磁場を印加すると、その見掛比重が変化するという性質を利用して、非磁性金属を比重差で分別、回収するものである。

処理量 500kg/hのプロトタイプ回収装置で、自動車や家庭電気品の廃棄物の分別実験を行なった結果、アルミニウム、亜鉛、銅などの非磁性金属をそれぞれ回収率80%、純度90%以上で分別回収することができ、工業装置として使用できる見通しを得た。

野北舜介* *Nogita Syunsuke*
池口 隆* *Ikeguchi Takashi*
村守 清** *Muramori Kiyoshi*
風間三郎*** *Kazama Saburô*
境 弘夫**** *Sakai Hiroo*

1 緒 言

生活水準が向上するにつれて、家庭及び産業分野から排出される廃棄物は年々増加している。通商産業省の予測によると、自動車と家庭電気品の廃棄量は図1、2に示したように経済の高度成長と相関し、昭和44年から急激に伸びている。

これらの廃棄物はもともと価値の高い材料が使われているため、厨芥など他の廃棄物に比べて再利用が進んでいる。しかし、機械的に連続操作で回収できる物質は強磁性体である鉄及び一部のステンレスで、他の金属（アルミニウム、亜鉛、銅など）は、今まで人手に頼るほかに分別する方法がなかった。平均的な自動車に使用されている非磁性金属（エンジンを除く）の組成は、概略表1に示したとおりである。したがって、年間廃棄台数が約200万台に達する自動車を例にした

場合、これら非磁性金属を機械的操作により連続的に回収することは、資源再利用という点で大きな意義を持つ。

磁性流体を利用した有価金属回収装置は、上述したニーズを解決するもので、磁性流体という特殊な重液を利用して非磁性金属を比重差で分別して回収する。

2 非磁性金属の分別方式比較

金属スクラップから単体の金属を分別する方法として、次の三つの方法が考えられる。

- (1) 比重差分別法¹⁾
- (2) 溶融分別法²⁾
- (3) うず電流分別法³⁾

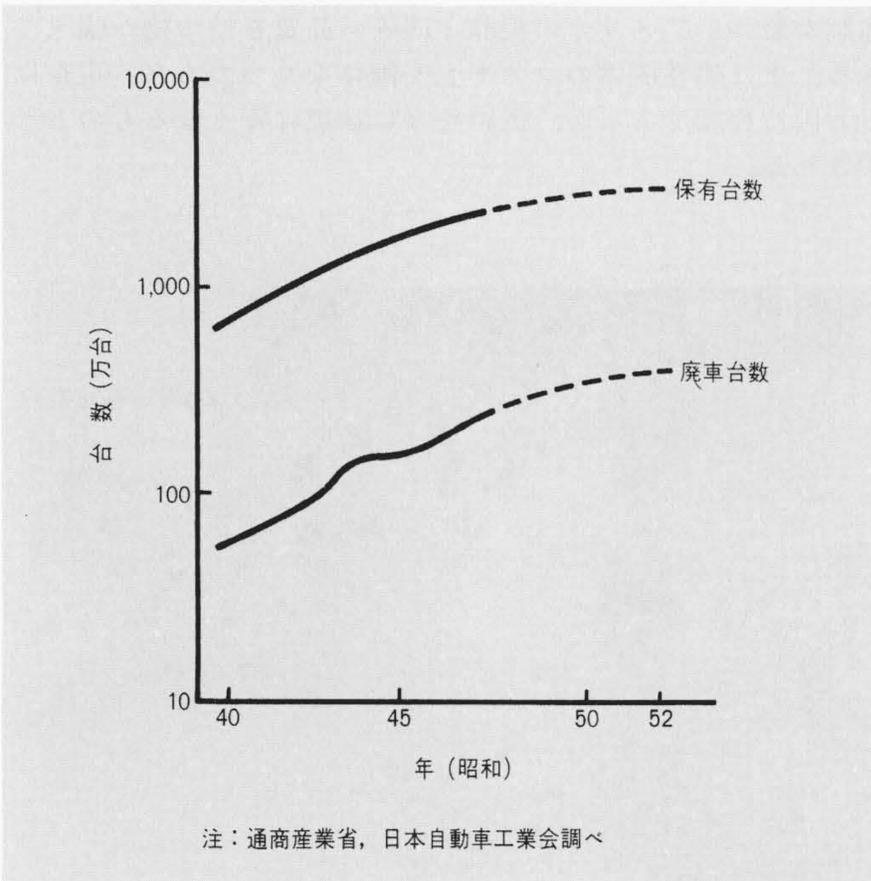


図1 自動車廃棄量推計 我が国は、今後毎年200万台以上の自動車が廃棄されるものと予測されている。

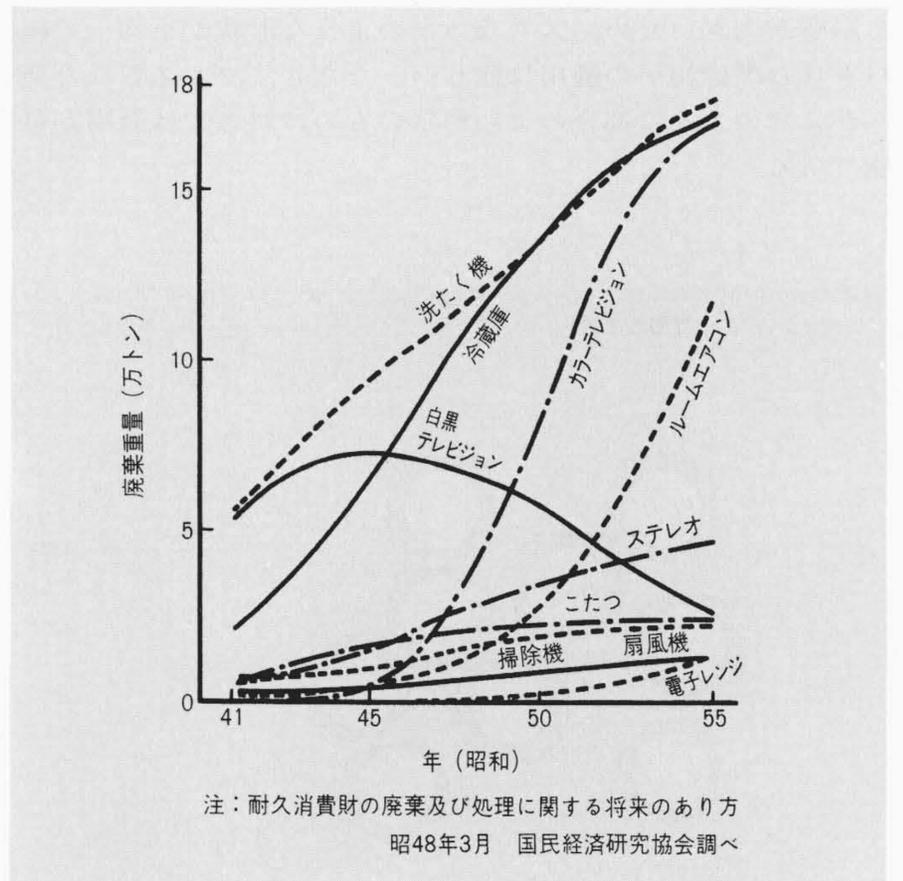


図2 主要家庭電気品品目別廃棄量推移 国民生活の水準が向上するにつれて、家庭電気製品も大量に廃棄されるようになった。

* 日立製作所日立研究所 ** 日立製作所家電事業本部家電研究所 理学博士 *** 日立製作所家電事業本部家電研究所
**** 日立製作所機電事業本部

表1 自動車中の非磁性金属の組成 自動車には、亜鉛、銅、アルミニウムなど回収する価値のある非磁性金属が約30kg/台使われている。

金属	回収量 (kg/台)	単価 (円/kg)	回収金属の価値 (円/台)	
			Min.	Max.
Zn	20	50~140	1,000	2,800
Al	4	70~140	280	560
Cu	2.3	200~450	460	1,030
その他	1	—	—	—
計	27.3	—	1,740	4,390

比重差分別法は、比重の大きい液の中に金属を浸し、浮上する低比重のものと沈降する高比重のものに分別する方法である。運転操作上は最も容易な方法であり、従来から鉱石の選鉱分野で採用されている。しかし、比重差分別に用いられる重液には作れる比重に限界があり、比重7.1の亜鉛、8.9の銅など高比重の金属を分別できるような重液はなく、わずかにフェロシリコン/水系の重液でアルミニウムを分別できる程度であった。ただし、後述するように「磁性流体を用いた有価金属回収法」では、磁性流体 (Magnetic Fluid) という特殊な重液を採用しているため、すべての非磁性金属に対して有効な分別が可能である。

熔融分別法は、金属スクラップを熔融炉中に入れて加熱溶解させ、融点の差により分別回収するものである。高純度物質を回収できるというメリットはあるものの、エネルギー消費形、また公害発生形の技術であるため、金や白金など特殊な金属に対してだけ採用されているにすぎない。

うず電流分別法は、非磁性金属に回転磁場を印加してうず電流力を発生させ、この力による変位量の差により金属を混合物から分離するものである。この方法では、金属片の形状による影響が大きいため、スクラップのような形状が不均一で線材を含む破砕物への適用は難しい。ただし、プレスされた空きかん類のように都合のよい形状のものに対しては適用が可能である。

3 磁性流体を利用した有価金属回収原理

3.1 回収原理

磁性流体は1965年ごろアブコ社⁴⁾ (Avco. Corp., アメリカ) がNASA (アメリカ航空宇宙局) の委託を受けて宇宙機器用に開発した新しい流体で、直径約100Åのマグネタイト (Fe₃O₄) 微粒子の表面を、オレイン酸などの界面活性剤で包んでコロイド粒子とし、水やケロシンなどの溶媒中に10¹⁷個/ccないし10¹⁸個/ccの濃度で完全に分散させたものである。外観は墨汁に類似しており、黒色を呈し常温で20cPないし30cPの粘度を持つ。図3に磁性流体のモデルを、図4に電子顕微鏡写真 (20万倍) を示す。

磁性流体に傾斜磁場を印加すると、磁性流体には(1)式で示す力Fが働く。この現象は磁性流体の中に密度分布が生じたのと同じ効果がある。

$$F = \frac{M}{4\pi} \text{grad } H \cdot V \dots\dots\dots(1)$$

- ただし M: 磁性流体の磁化強度 (G)
- grad H: 磁場のこう配 (Oe/cm)
- V: 磁性流体の微小部体積 (cm³)

一方、磁性流体の見掛比重は次の(2)式で表わされるので、磁性流体中に置かれた非磁性物体は、その比重が磁性流体の見掛比重より大きい場合には沈降し、逆に小さい場合には浮上する。

$$\rho_a = \rho_l + \frac{M}{4\pi g} \cdot \text{grad } H \dots\dots\dots(2)$$

- ただし ρ_a: 磁性流体の見掛比重 (-)
- ρ_l: 磁場を印加しないときの磁性流体比重 (-)

このように、磁性流体という特殊な重液を用い、その見掛比重をコントロールすることにより、従来の重液では処理できなかった高比重の金属をも比重差で分別回収することが可能となった。現在、磁性流体は我が国でも大量に生産される体制が整い、アメリカの製品と同等の品質を持つ物が購入できる。また磁性流体のコストも安価になりつつあり、現在は1万円/l程度であるが、近い将来には更に安くなるものと予想される。

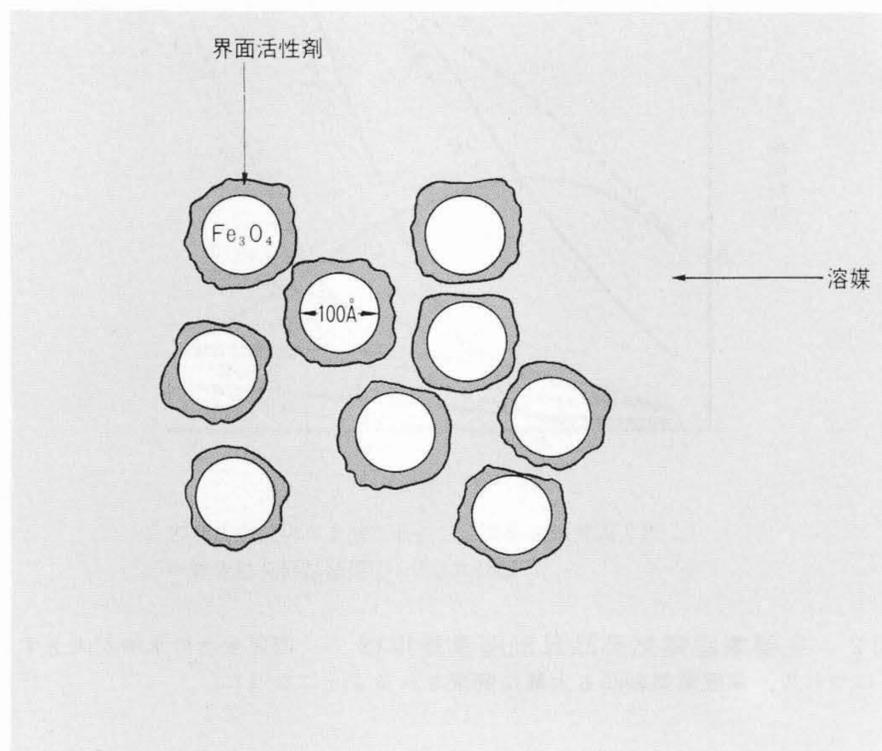


図3 磁性流体モデル 磁性流体の性能は、マグネタイト微粒子の濃度と界面活性剤の厚さで決まる。

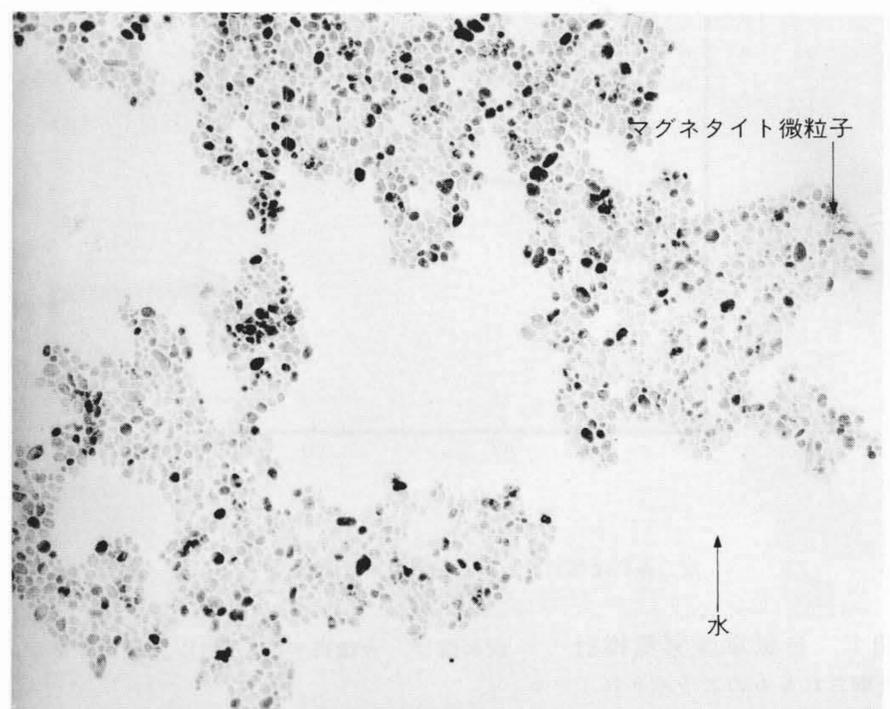


図4 水ベース磁性流体 粘度20cP, 飽和磁化強度380Gの水ベース磁性流体の電子顕微鏡写真を示す。

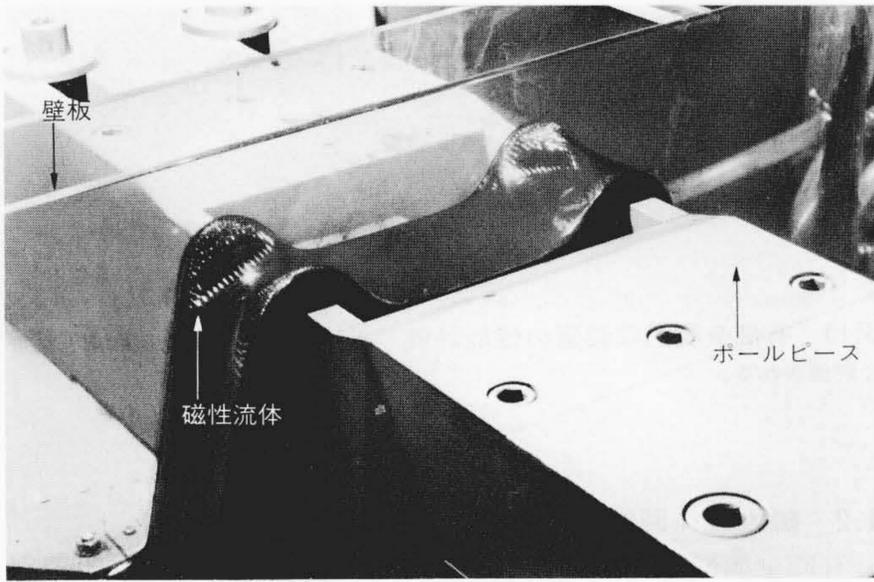


図5 磁性流体の側面保持 磁性流体がポールピース間で側面保持されている様子がよく分かる。

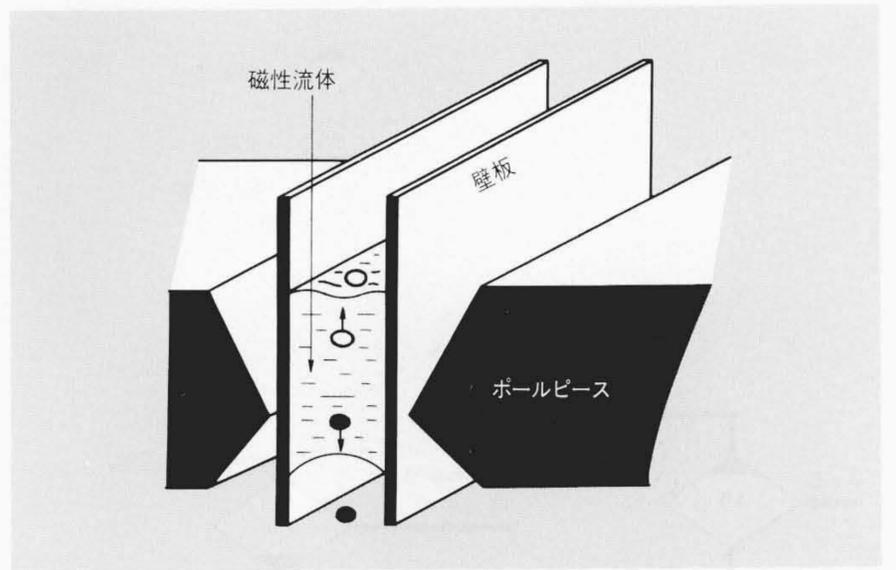


図6 磁性流体の空間保持 磁性流体が完全に空間保持されている様子と、非磁性物質の浮上及び沈降経過を模式的に示した。

3.2 磁性流体の保持

磁性流体の大きい特徴として、磁性流体を側壁なしに保持(側面保持)したり、底板なしに保持(空間保持)することが可能である。これらの側面保持、及び空間保持の特徴を有効に利用することにより分別装置の構造が簡略化され、また新しい機能を付加することが可能となる。

(1) 側面保持

磁性流体内に発生する力を水平方向に対し内側に働くように $\text{grad}H$ を設計すると、磁性流体自身で側壁を形成する。図5に側面保持の写真を示す。この性質を応用すると、コンベヤなどの移送装置を磁性流体を横切って水平に通過させることができる。

(2) 空間保持

側面保持と同じ考え方で、鉛直方向に対し内側に力が発生するように $\text{grad}H$ を設計すると、磁性流体を重力に打ち勝って空間に保持することが可能となる。この状態では、底板は不要である。図6に空間保持の状態を模式的に示す。

この空間保持の性質を応用すると、設定された磁性流体の見掛比重よりも大きい比重の物質を、選択的に磁性流体を突切って下から取り出すことが可能となる。

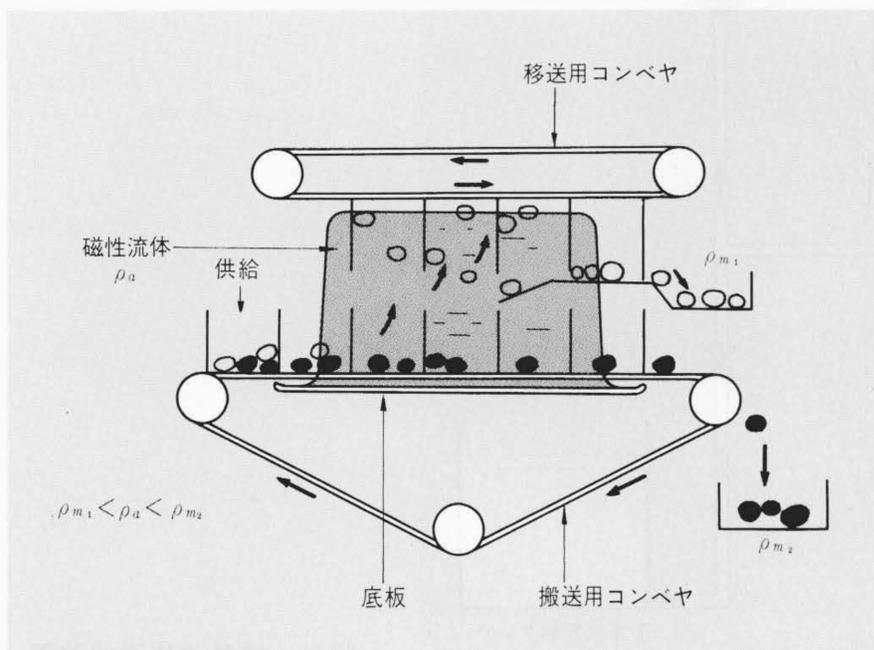


図7 浮上式分別装置 磁性流体の見掛比重 ρ_a より軽い物質だけ浮上させて回収する構造にした。

4 非鉄金属分別回収プロセス

4.1 有価金属回収装置

(1) 浮上式分別装置

分別しようとする物質の比重が比較的小さい場合、その目的物質だけを浮上させて分別回収する方式が採用される。装置的には図7に示すように側面保持されている磁性流体のプールを横切る搬送用コンベヤと電磁石で構成される。

(2) 沈降式分別装置

目的物質の比重が比較的大きい場合、その目的物質だけを沈降させて分別回収する方式である。沈降式の利点は装置を小形化、低廉化できることにある。図8に示すように、磁性流体のプールを横切る搬送用コンベヤが不要になる。磁性流体は側面保持、及び空間保持されている。

(3) 有価金属回収装置の構成

金属スクラップなど複数の物質で構成される被処理物を分別する場合、上記の浮上式分別装置及び沈降式分別装置を組み合わせることで、最適な装置構成とすることができる。

図9は、ガラス・セラミックA、アルミニウムB、亜鉛C、ステンレスD及び銅・黄銅Eの5種類から成るスクラップを

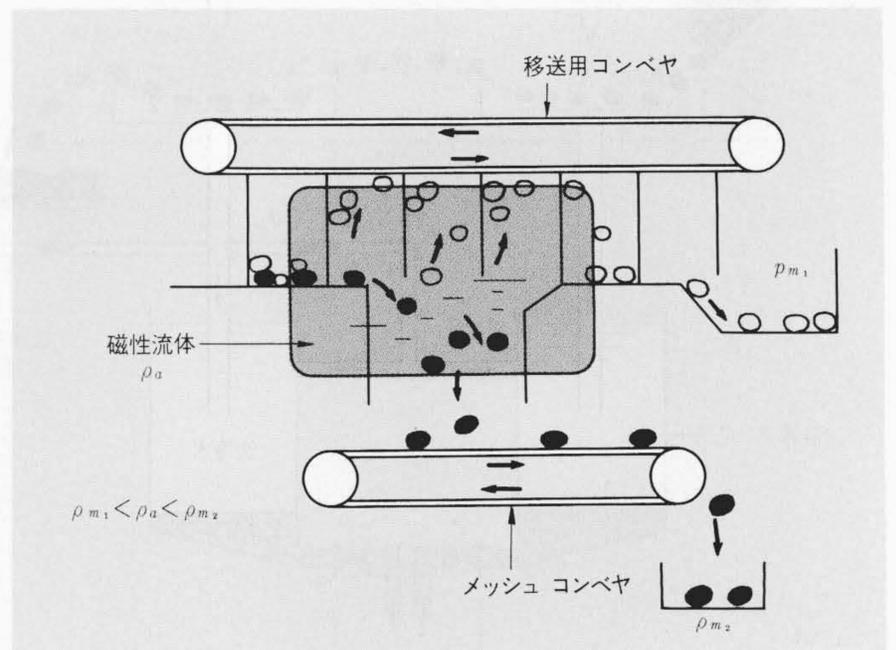


図8 沈降式分別装置 磁性流体を空間保持し、その中央部からスクラップを供給して、磁性流体の見掛比重 ρ_a より重い物質を沈降させて回収する構造にした。

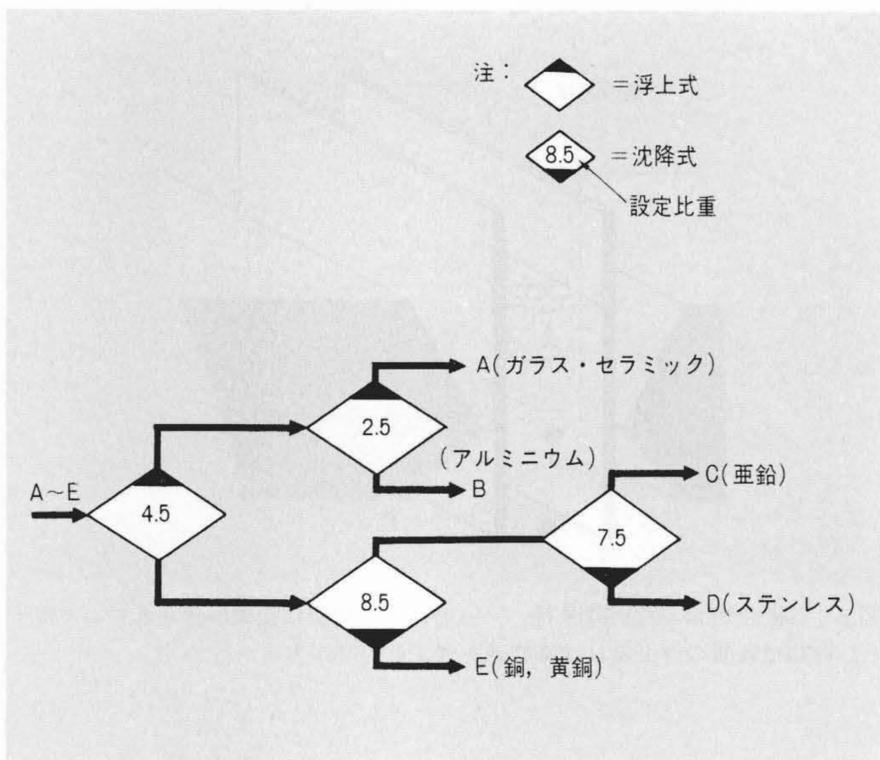


図9 非磁性物質分別シーケンス 浮上式と沈降式分別装置を組み合わせることにより、低比重物質から高比重物質まで、連続して分別できる。

分別回収する有価金属回収装置の構成例を示すブロックチャートである。

(4) 分別性能の評価

有価金属回収装置の性能は、回収率及び製品純度で評価される。

(a) 回収率

分別回収した量の原料量に対する割合を言う。図10において回収率 $R = A_1/A \times 100(\%)$ と定義される。

(b) 製品純度

回収物質中の目的物質の占める割合を言う。同図において純度 $P = A_1/(A_1 + B_1) \times 100(\%)$ である。

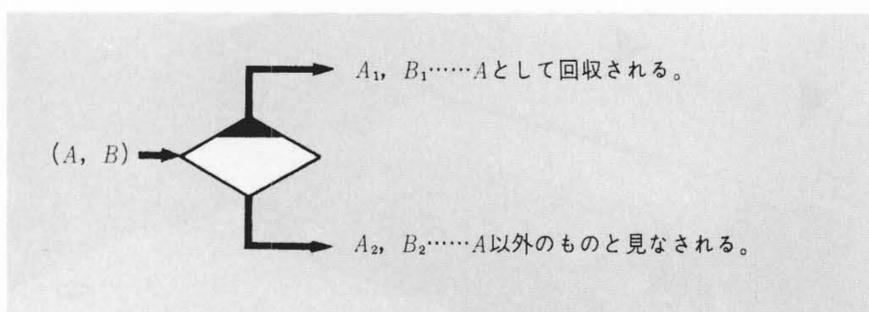


図10 有価金属回収装置の性能評価 分別装置の性能は回収率と純度で評価される。

4.2 磁性流体回収装置

有価金属回収装置で分別回収された金属くずには、3wt%ないし10wt%の磁性流体が付着している。金属くずの製品価値を高めると同時に運転経費を低減するためには、この磁性流体を回収する必要がある。ケロシンベース磁性流体回収装置のフローチャートを図11に示した。磁性流体の付着した金属くずを水でシャワー洗浄し、デカンテーションにより磁性流体($\rho=1.36$)と洗浄水を分離するものである。回収実験の結果、洗浄された金属には磁性流体が0.3wt%程度付着しており、この程度の損失量は経済的に許容される見通しが得られた。

一方、取扱いの容易性、安全性、無公害性の面などで優れている水ベース磁性流体の濃縮回収方式についても検討を進めており、限外ろ過膜を用いた濃縮回収装置を試作し、50倍に希釈された水ベース磁性流体を原液まで濃縮できることを確認した。

4.3 磁性流体補充装置

分別装置内の磁性流体は金属くずやコンベヤに付着して徐々に系外へ持ち出される。磁性流体液位の変動は金属回収率と製品純度の低下を招くので、磁性流体補充装置を併設して分別装置内の磁性流体液位を一定に保つ構成にした。

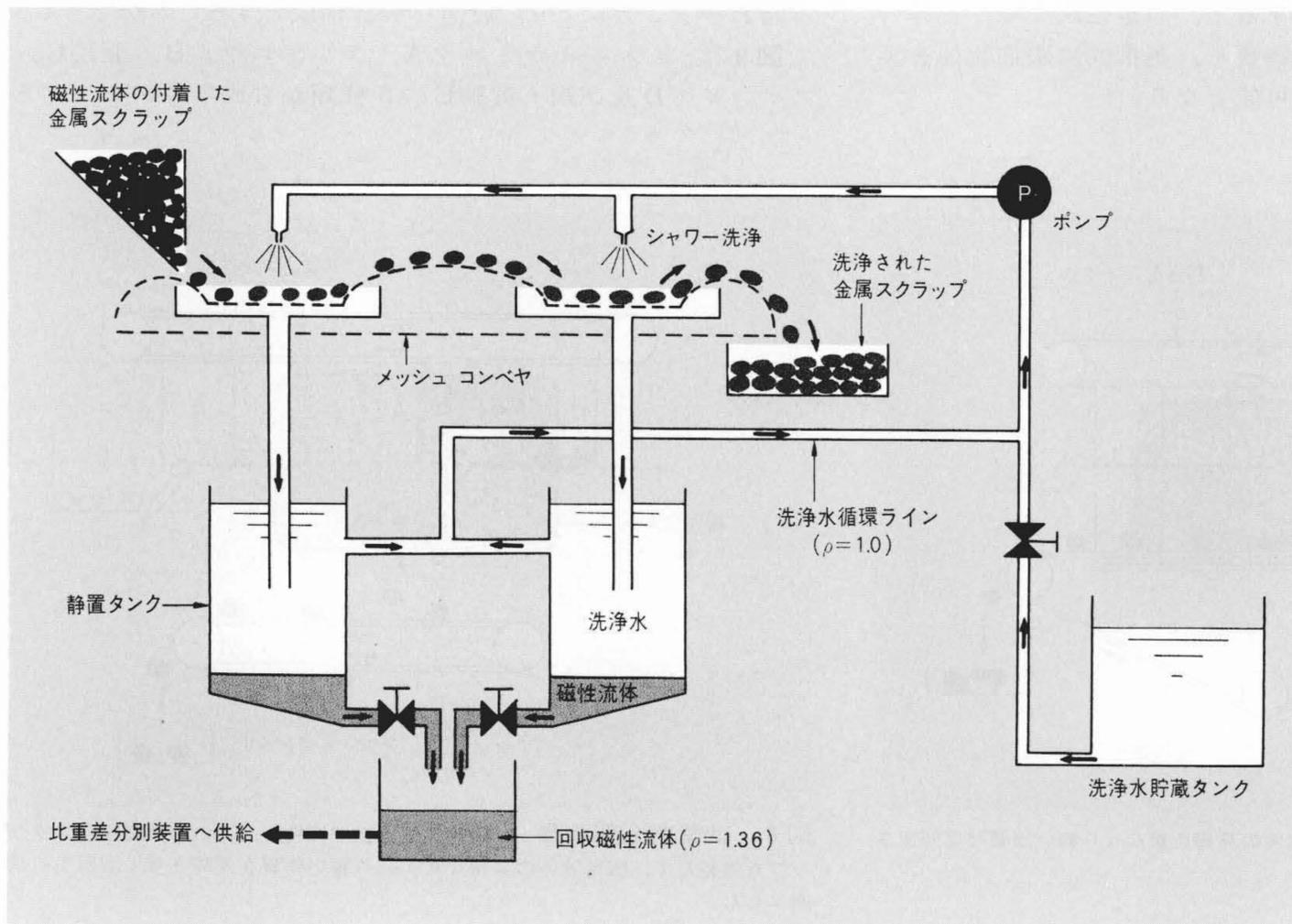


図11 磁性流体回収装置 磁性流体と洗浄水をデカンテーションで分離する方式を採用した。

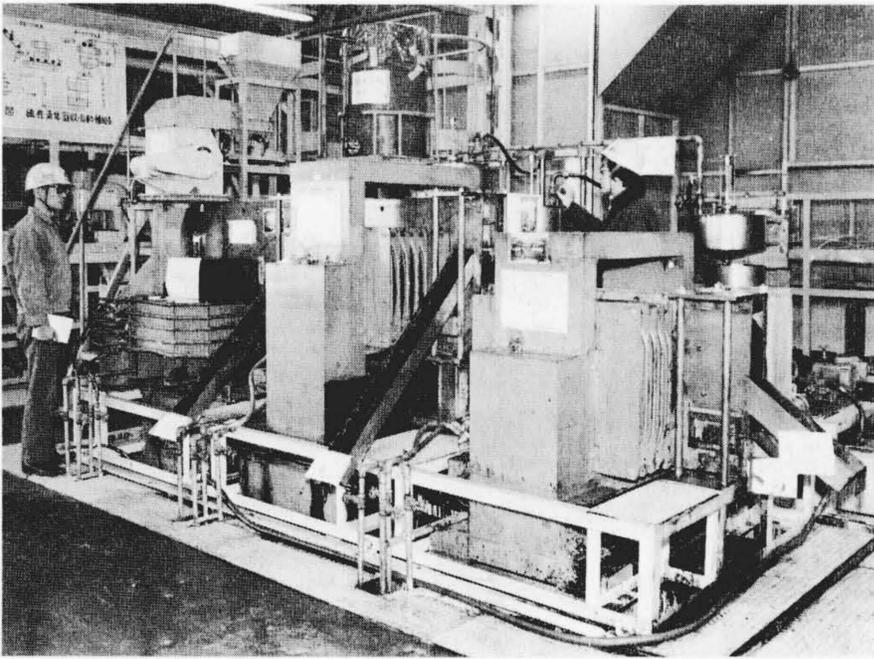


図12 有価金属回収装置 左上部のフィーダから投入された金属スクラップは、3台の分別装置で連続して分別される。

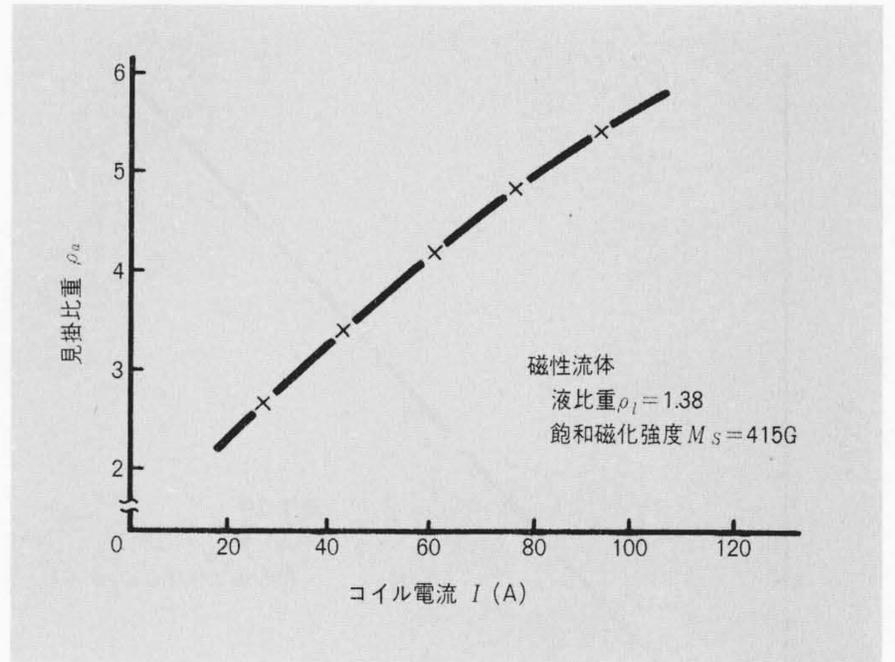


図14 磁性流体の見掛比重(浮上式) コイル電流を増すと、磁性流体の見掛比重も2.3から5.6までリニアに増大する。

5 分別実験結果

製作したプロトタイプ回収装置の外観を図12に、概略構造を図13に示す。本装置は浮上式分別装置と沈降式分別装置を直列に接続した構成である。

各分別装置の分別領域内では、磁性流体の見掛比重をできるだけ一定に保つ必要があるため、電磁石のポールピースは

磁場傾斜 $\text{grad}H$ と磁性流体の磁化強度 M の積が一定となるように設計した。その形状と寸法は二次元のラプラス方程式を解くことにより電子計算機で求めた。磁性流体の見掛比重は、電磁石のコイル電流によりコントロールすることができる。

浮上式分別装置における磁性流体の見掛比重とコイル電流の関係について測定した結果を図14に、沈降式のそれを図15に示した。

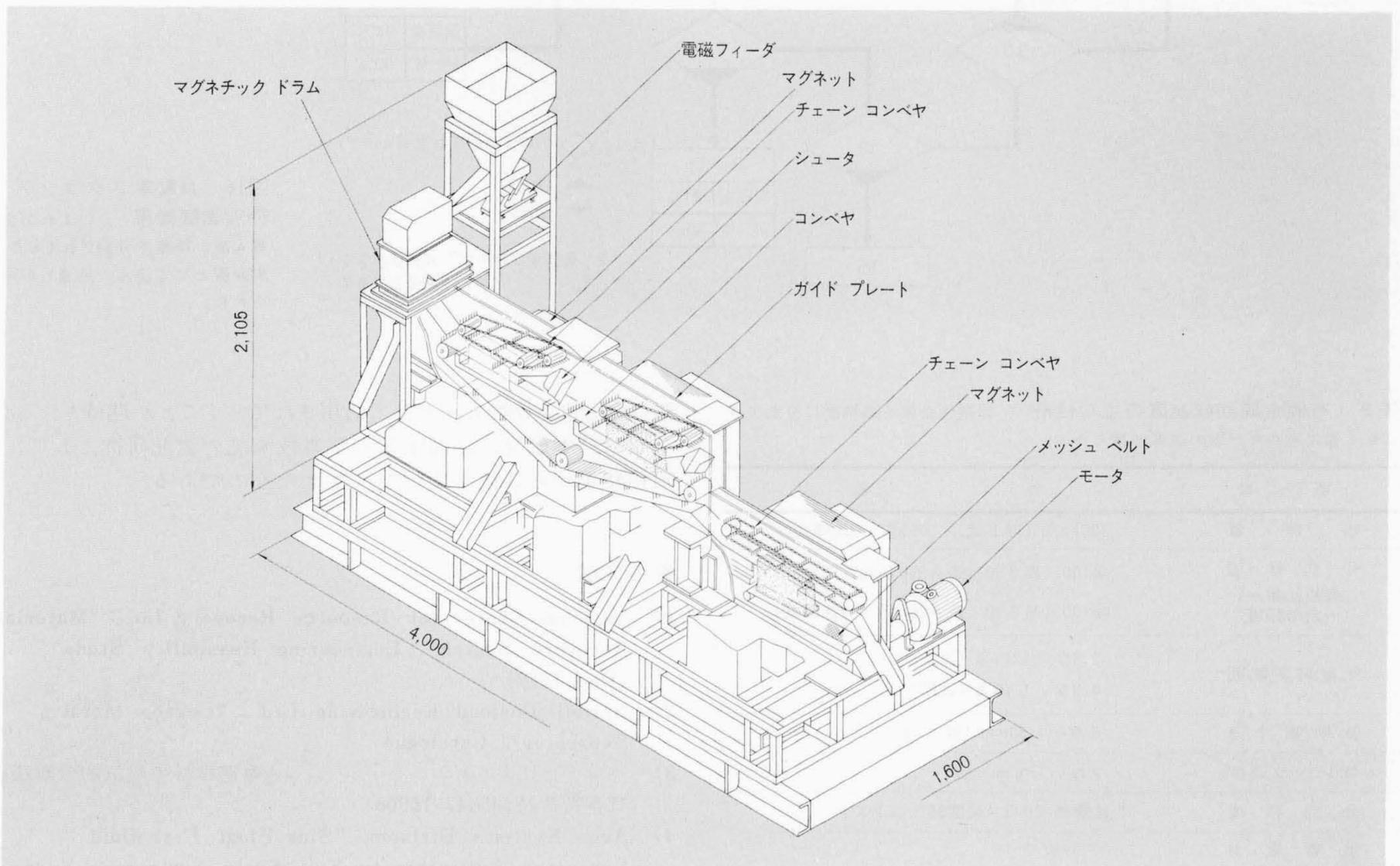


図13 有価金属回収装置概略構造 有価金属回収装置の稼動部分はコンベヤとモータだけであり、単純な構造にした。

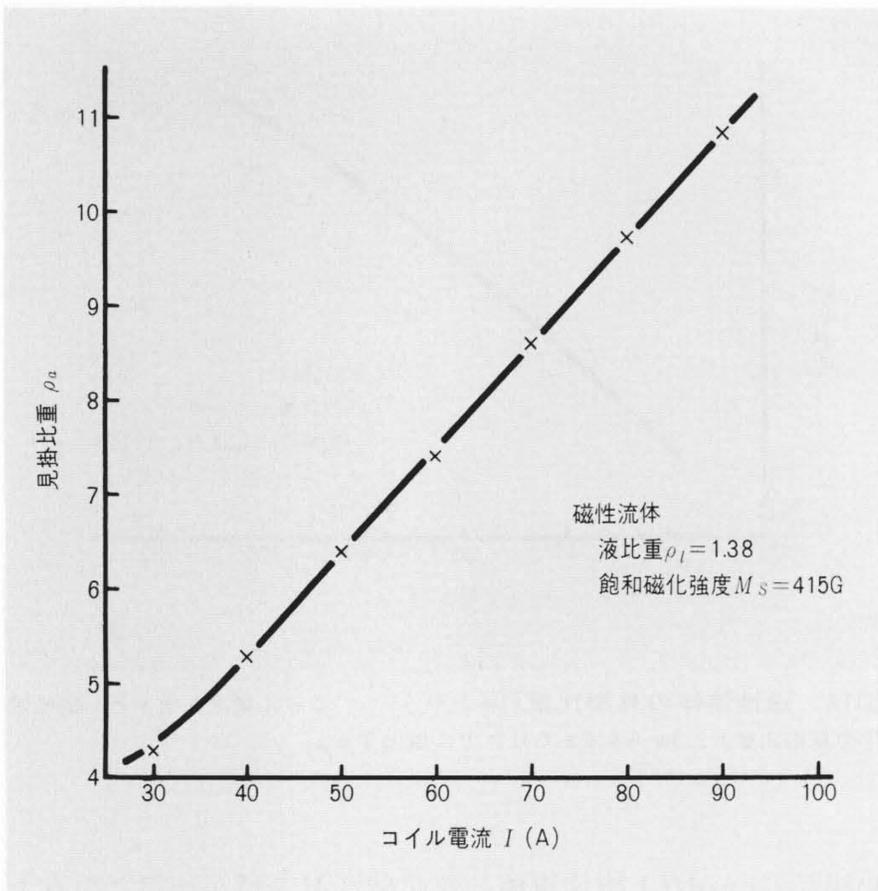


図15 磁性流体の見掛比重(沈降式) コイル電流を増すと、磁性流体の見掛比重も4.3から10.8までリニアに増大する。

自動車の低温破碎くずを用いた分別結果の一例を図16に示す。アルミニウムはその84%が回収され、純度も95%と高い。不純物として混入してくるのは、一部のゴム及びガラスだけであり、このような不純物はアルミニウムスクラップの製錬に対して無害である。

銅及び銅合金は、総称してレッドメタルとして市場性を持つ。レッドメタルの純度は非常に高く、良質であることを示している。

製作した装置の性能を表2にまとめて示した。本装置は比較的low磁化強度の磁性流体を用いて、比重範囲が広く、かつ高精度の分別部を形成でき、また設定比重値を電流で簡単にコントロールできる省エネルギー形の装置であると言える。

6 結 言

磁性流体を用いて非磁性有価金属を広範囲に精度よく分別できる装置を開発した。本装置は廃棄自動車、廃棄家庭電気品などの粗大廃棄物より銅、アルミニウムなどの有価金属を回収する目的で開発したものであるが、非磁性物質を比重差で分別するという技術は他にも応用することができる。例えば、ガス器具など産業廃棄物の処理、生産ラインにおける部品、材料の分別及び検査用装置として適用も可能である。

今後この技術は、より付加価値の高い物質の分別に、また

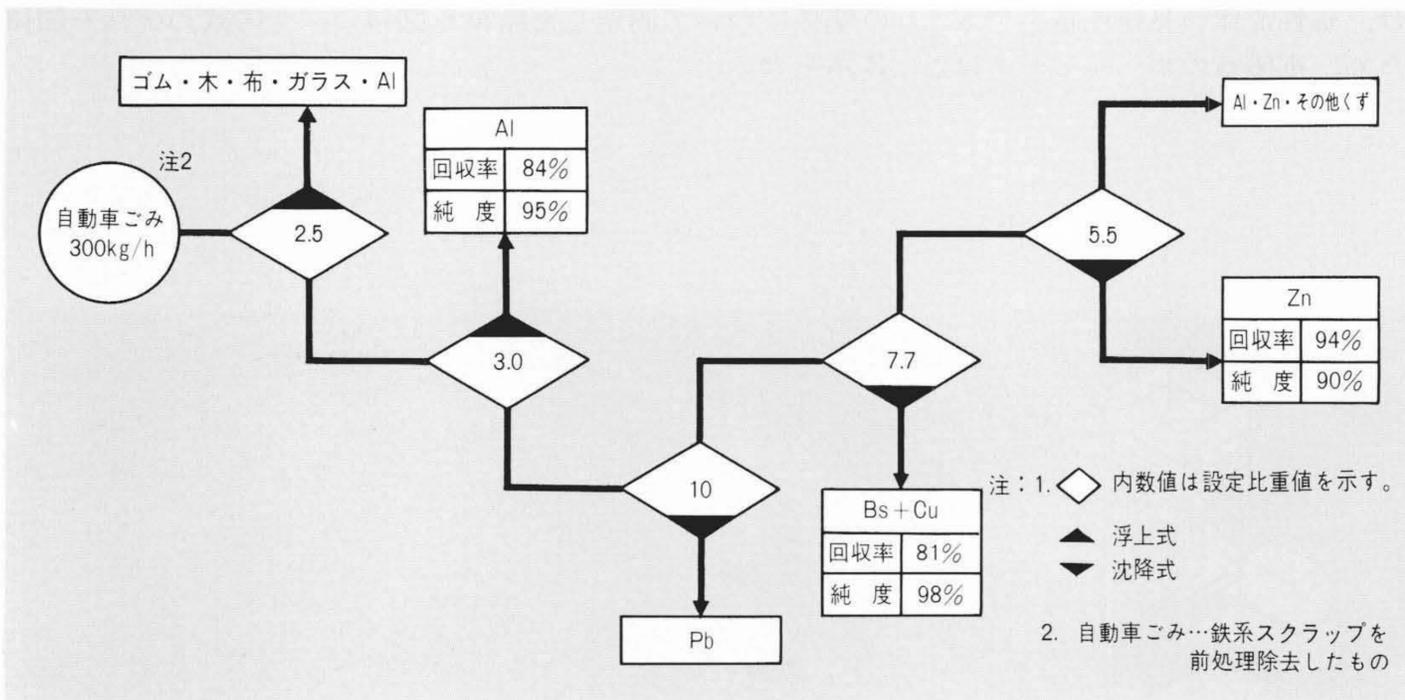


図16 自動車スクラップ分別実験結果 いずれの金属も高い純度で分別されており、実装置として使える見通しが得られた。

表2 有価金属回収装置の主な性能 非磁性金属を高精度に分別できしかも省エネルギー形の装置と言える。

項 目	性 能
処 理 量	300kg/h (浮上式), 500kg/h (沈降式)
分 別 領 域 (見掛比重が一定の領域)	幅100×高さ50×長さ250(mm)(浮上式) 幅100×高さ90×長さ250(mm)(沈降式)
比 重 可 変 範 囲	2.3ないし 5.6 (浮上式) 4.3ないし 10.8 (沈降式)
分 別 物 寸 法	6 ないし 30mm (最大50mm)
コ ン ベ ヤ 速 度	2 ないし 8 m/min
分 別 精 度	比重差で0.3 (純度95%以上で)
消 費 電 力	7.9kW
磁 性 流 体 セ ッ ト 量	24 l

新しい分別、分離方法として活用されていくことが期待される。

なお、本研究は通商産業省工業技術院の委託研究として、昭和48年から3箇年間行なってきたものである。

参考文献

- 1) National Center for Resource Recovery, Inc.: "Material Recovery System", Engineering Feasibility Study (Dec. 1972)
- 2) Newell Dunford Engineering Ltd.: "Coreco Metal Separator", Catalogue
- 3) バンダービルト・ユニバーシティ: 「導電材料の磁気的分離法」日本特許特開昭47-16908
- 4) Avco Systems Division, "Sink-Float Ferrofluid Separator Applicable to Full Scale Nonferrous Scrap Separation" (June. 1973)