連続処理が可能な磁気分離法

福井 聡

新潟大学 新潟市五十嵐二の町 8050 (E-mail:fukui@eng.niigata-u.ac.jp)

(2002 年 7 月 12 日受理)

Magnetic Separation Method for Continuous Separation Process

Satoshi FUKUI

Niigata University, Ikarashi Ni-no-cho 8050, Niigata 950-2181

(Received July 12, 2002)

Synopsis : Magnetic separation is a method to separate and capture fine magnetic particles by the magnetic force acting on the particles in a gradient magnetic field. For the practical use of the magnetic separation, it is necessary to remove the captured particles from the separation area where the magnetic force is active. High gradient magnetic separation utilizes the high spatial magnetic field gradient generated in the matrix of fine ferromagnetic wires (filter matrix) magnetized by an applied magnetic field. In batch-type magnetic separation, the filter matrix is washed by water flushing and by reducing the applied magnetic field to remove the captured particles in the filter matrix. When the particle content in the slurry is large, the short cycle of the water flushing of the filter matrix results in a decrease in separation efficiency. The frequent interruption of the separation process for the flushing is a problem for the practical magnetic separator. Therefore, from the viewpoint of the practical application of magnetic separation, a continuous separation process without interruption for the flushing is useful. In this paper, recently developed magnetic separators for continuous process are reviewed, and their mechanism is explained.

Keywords : magnetic separation, high gradient magnetic separation, continuous process, open gradient magnetic separation

1. はじめに

磁気分離法とは、空間的に不均一な磁界中での磁性粒子に働く磁気力を利用して、磁性粒子のみを選択的に捕獲・分離する手法である。磁気分離の研究開発の歴史は長く、様々な種類の磁気分離装置が考案され、カオリン精製や鉄鋼廃水処理などの工業プロセスに実用化されているものもある¹⁾。ところで、磁気力を利用して目的とする物質を分離するには、磁気力が作用している空間から捕捉されている被分離物質を回収し、かつ作用空間が対象物質などで閉塞されないようにする必要がある。高勾配磁気分離 (High Gradient Magnetic Separation : HGMS) と呼ばれる方法では、磁性粒子に

働く磁気力を大きくするために、磁性細線に外部磁界を印加して、磁性細線近傍に発生する大きな磁界勾配を利用して、磁性粒子をフィルタマトリックスの磁性細線に吸着させる。更に、この磁性細線を多数本網目状にしたフィルタマトリックスを使用して、磁性細線の空間占有率を大きくし、分離効率を向上させている。従って、磁界中にフィルタマトリックスを常時固定する方式 (固定式磁気分離法) では、一定の時間が経過してフィルタマトリックスが粒子吸着により飽和すると、一旦分離処理を中断し外部磁界を取り去って、フィルタマトリックスを清水などで洗浄再生する必要がある (パッチ式という)¹⁾。このため被分離粒子の濃度が高い場合には、洗浄再生の頻度が高くなり、シ

ステム全体の処理効率の低下を招く。特に電磁石を励消磁すると、蓄積エネルギー分の電力を散逸させてしまうことになるので、装置の低消費電力化を目的に超伝導マグネットを使用する場合、励消磁を頻繁に繰り返すことはそれだけ多くの電力を無駄にするということであり、装置の超伝導化のメリットを大きく阻害する。また、直流超伝導マグネットの大きな長所である永久電流モードが使用困難となるばかりか、励消磁の際に発生する交流損失によるマグネットの温度上昇やそれに伴う巻線の安定性の低下など種々の問題が起こることが予想され²⁾、装置設計上得策ではない。実用的な観点では、処理を中断することなく連続的に分離処理ができる装置が望ましい。本稿では、連続処理が可能な磁気分離法について、最近の研究開発例を中心に紹介する。

2. 往復型磁気分離装置

往復型磁気分離装置とは、フィルタマトリックスを電磁石などの外部磁界空間から出入れすることにより、電磁石を励磁したままで、分離処理と捕獲粒子の回収及びフィルタマトリックスの洗浄再生を繰り返し連続的に行えるように工夫された装置である³⁾。

Fig.1 は、CRT ガラス研磨スラリー中から鉄粉を磁気分離するために開発された往復型磁気分離装置³⁾の機構を示したものである。この研磨スラリー中の SS（浮遊固型物）はガラス粉、研磨剤、そして研磨盤からの微量の鉄粉から構成されている。鉄はガラスの透明度を低下させる要因となるもので、この鉄分を除けば濃縮、脱水、乾燥工程を経てガラス原料として再利

用することができる。本装置では、対向する一対の永久磁石の磁極間に強磁性細線のフィルタマトリックスを充填した移動キャニスタを配置し、キャニスタが左右に連続的に移動するようになっている。磁極間のフィルタマトリックスの上方から磁性粒子を含む被処理液を供給すると、被処理液は磁界空間内に位置したフィルタマトリックスを通り抜け下部に流出し、その際に被処理液中の磁性粒子はフィルタマトリックスに磁氣的に吸着される。吸着された磁性粒子は磁界空間外にて圧力水により洗い落とされる仕組みである。

最近の往復式磁気分離装置の開発例としては、湖沼などの閉鎖水系に発生するアオコの除去を目的にした超伝導磁気分離装置⁴⁾があげられる。この装置の外観写真を Fig.2(a)に、磁気分離部の構成図を Fig.2(b)に示す。超伝導マグネットの一端を小型ヘリウム冷凍機の極低温ガスで冷却し、熱伝導によって全体を冷却する構造となっている。本試作機の設計処理能力は 400m³/日である。超伝導マグネットは 2 分割のスプリット型の円筒形であり、ボア内に被分離物質を含む前処理水流路を設ける。スプリットマグネット間に発生する磁界空間に磁性細線で構成されるフィルタマトリックス（メインフィルタ）を設置する。前処理過程において、添加したマグネタイト（Fe₃O₄）と原水中のアオコ等を凝集剤で凝集させて磁性フロック（磁性粒子が多数凝集した状態）を生成し、これを磁気力によりフィルタマトリックスに吸着させて分離する。メインフィルタが設置されたキャニスタは図の左右方向に往復動が可能な構造であり、磁性フロックが吸着してフィルタマトリックスの分離性能が低下する前に、磁

Fig.1 Reciprocating-type magnetic separator for recycling glass-grinding sludge in the CRT surface polishing process³⁾.

(a) Schematic illustration of structure.

(b) Photograph of external view.

Fig.2 Reciprocating-type magnetic separator developed for the removal process of blue-green algae in lakes and reservoirs ⁴⁾.

界空間外に移動させ、ここでフィルタマトリックスの再生洗浄を行う。再生洗浄を行っている間も別の部分のフィルタマトリックスが分離処理を行い、処理を中断することなく連続的に運転することが可能である。また、被処理水のの上流位置にあたるマグネットの下部には、円盤状の回転型サブフィルタを設置し、大きな磁性フロックはここで除去できるようにして、メインフィルタの負荷を低減する。サブフィルタは一定速度で回転し、磁界空間内で磁性フロックを吸着し、磁界空間から外れると洗浄水により洗浄され、メインフィ

ルタと同様に連続的に分離処理できるようになっている。前処理水の流路が設置される磁気分離部の常温ポア径は 310mm で、メインフィルタ及びサブフィルタの中心部分の磁界は、それぞれ 1.0T 及び 0.6T である。一方、磁石から 0.5m 離れた再生洗浄部はともに 0.02T 以下でほとんど磁気力は働いておらず、容易に洗浄運転を行える。本装置を使って遊水池の水の浄化実験した結果、処理流量 400m³/日での連続処理で、原水中のプランクトンを 93%以上除去できることが示されている。

3. 回転型磁気分離装置

Fig.3 に回転型の高勾配磁気分離装置の例を示す。

1 組の鞍型電磁石を囲むヨークに多数の穴を開け、そこをスラリーが流れる。鞍型電磁石を用いることにより、フィルタマトリックスを充填したドーナツ型のキャニスタが回転できる構造とすることができると同時に、電磁石をヨークで取り囲むことができるので磁束密度を大きくできる。磁界部で吸着された磁性粒子は、キャニスタが回転して磁界部から外れると上部から流れ込まれる洗浄水により洗い流される。このタイプの磁気分離装置は、Carpco-Amax, Erinz Magnetics Ltd., SALA などで開発されている ⁵⁾。

最近の回転型磁気分離装置の開発例として興味深いのは、ドイツの Forschungszentrum Karlsruhe (FZK) のグループが開発した装置があげられる ⁶⁾。この装置の構造を **Fig.4** に示す。基本的な分離動作は **Fig.3** に示す装置と同じであるが、特徴は回転するキャニスタ部分に工夫があることである。Fig.4 に示されているように、回転する 40 分割されたキャニスタは、磁界空間内部ではそれぞれが独立せずにジグザグの流路を形成し、磁界空間外部ではそれぞれが独立になるようにキャニスタとそれを挟み込む上下のハウジング間のシールが工夫されている。このような構造にすることにより、磁界空間内部では磁気分離に有効な流路長を長くして、磁界空間外部では少量の洗浄水を上下方向に短時間噴射するだけで容易にフィルタマトリックスを洗浄できるようになっている。

4. 膜磁気分離装置

比較的高濃度の強磁性体フロックを分離対象とする連続型の磁気分離装置としては永久磁石を使用した回転ドラム型 (**Fig.5**) が構造が簡単のため広く採用されているが、発生磁界が小さくその範囲が狭いため被

処理流体流路を広く取れず、処理流量が少ないのが欠点である¹⁾。永久磁石に比べて補足磁場が非常に大きい超伝導バルク体を永久磁石⁷⁾として用いた新たな分離浄化装置として、膜濾過分離と磁気分離を組合わせ

Fig.3 Schematic illustration of a rotating-type magnetic separator¹⁾.

Fig.4 Rotating-type magnetic separator developed for wastewater treatment⁶⁾.

た処理量 $100\text{m}^3/\text{日}$ 膜磁気分離装置が試作されている。

本装置の構造を Fig.6(a)に示す。本装置は、湖沼などの閉鎖水系に発生するアオコ等植物プランクトンの除去に適用することを目的にしたものである。本装置で分離対象とするプランクトン等は、前処理により大半が粒子直径が数百 μm 以上の磁性フロックとなる。

膜分離部分は、目開きは数十 μm の濾過膜を回転ドラム最外周面に取り付けた回転膜で構成される。磁気分離部分では、真空断熱容器内で小型冷凍機により冷却された着磁済み超伝導バルク磁石を、非磁性の回転円筒体の内部に静止固定されている。使用される超伝導バルク磁石は、 $33\text{mm} \times 22\text{mm}$ 厚の YBCO 樹脂含浸型超伝導バルク体を 11 個横長に（磁石部長 387mm）配置した構成となっている（Fig.6(b)）。超伝導バルク体は、断熱真空容器内で小型 GM 冷凍機により、温度約 35K に冷却される。超伝導バルク体は、銅製バー先端部内に埋め込まれており、銅製バーの他端は冷凍機のコールドステーションに締結されている。バルク超伝導体の着磁には、スプリット型のソレノイド超伝導磁石を使用し、磁場で冷却により着磁される。

磁性フロックを含む被処理水を膜の外側から内側に流し、磁性フロックを回転膜面上に濾過・蓄積させ、濾過水はドラムの内側から装置外に放流される。膜面上に蓄積した磁性フロックは、膜の回転とともに水面近傍に配置した超伝導バルク磁石が発生する高磁界の領域に移動する。水面近傍で膜内部から供給されるシャワー状の洗浄水と磁気力により、磁性フロックは膜

Fig.5 Schematic illustration of a drum-type magnetic separator³⁾.

(a) Structure of membrane-magnetic separator.

(b) Structure of superconductor bulk magnet.

Fig.6 Membrane-magnetic separator developed for water treatment⁸⁾.

から剥離し、膜が連続的に洗浄再生される。水面上近傍の磁界中を漂う剥離した磁性フロックは、超伝導バルク磁石の強い磁気吸引力により磁石側に移動する。移動した磁性フロックは、円筒体表面に吸着し、円筒体の回転とともに水面上に移送される。ここで、磁性フロック中の余分な水分は重力で流下し、磁性フ

ロックの濃度は高まり、磁界外に配置された掻き取り板で円筒体表面から連続的に剥ぎ取られ、貯槽に自重で落下する。円筒体表面は掻き取り板で連続的に再生される。超伝導バルク磁石の発生する大きな磁界勾配によって作用する強い磁気力を利用することにより、磁性フロックを円筒体表面に高速で磁気吸引できるため、時間当たり多量の磁性フロックを分離できる。カオリン微粒子を水道水に分散させたモデル水を用いた分離試験により、カオリン粒子の除去率 93%が達成できることが示されている。

5. 開放勾配型磁気分離装置

磁性細線に外部磁界を印加して、磁性線近傍での局所的な磁界勾配を用いる HGMS に対し、電磁石や永久磁石の発生する磁界の空間勾配を利用する方法を、磁界勾配の空間スケールが開放的であることという意味で開放勾配型磁気分離 (Open Gradient Magnetic Separator) という⁹⁾。この方法では、HGMS 程大きな磁界勾配は発生できないため磁気力は大きくできないが、フィルタマトリックスを使用しないので、磁気力と被分離粒子の流れの方向を工夫することにより連続的な処理が可能になる場合があり、被分離物質が強磁性体でかつ比較的粒子径の大きい場合には有効な方法である。

Fig.7 は、ドイツ FZK のグループが試作した開放勾配型磁気分離装置である⁹⁾。本装置の原理は、ソレノイド型マグネットの軸方向の磁界勾配による軸方向の磁気力を利用して、磁性粒子をマグネットポア中心部付近に停留させるものである。Fig.7 に示すように、内径 74mm の樹脂製チャンネルをソレノイド型マグネットのポア内に設置する。チャンネル上方中心部から電磁石の軸方向へ伸びた管から流入した被処理水中の磁性粒子は、マグネットの軸方向に働く磁気力によりテーパ状に絞られたチャンネル下方先端部付近に集中する。浄化された処理水はチャンネル上部より放出される。この時、チャンネルのテーパ状部分の先端がマグネットの中心と一致するようにして、磁性粒子に働く磁気力がチャンネル下方に向くように調整する。チャンネル下部に溜まった磁性粒子は、テーパ状下部の管より排出される。磁性粒子には、テーパ状下部付近に停留しようとする磁気力が働くため、排出用の管は、浄化された処理水を放出するための管 (チャンネル上部) よりも小径になっており、流量を絞って流速を大きくすることにより、効率的に排出できるように工夫されて

いる。使用される超伝導マグネットは、中心磁界 5T、常温ポア 80mm の伝導冷却型 Nb₃Sn マグネットである。本装置を用いた分離試験のシーケンス図を Fig.8 に示す。被処理水は、重金属を含む研究所排水で、一

Fig.7 Open gradient magnetic separator developed for water treatment ¹⁾.

Fig.8 Block diagram of a magnetic separation process for wastewater treatment experiment by the use of the magnetic separator shown in Fig.7 ¹⁾.

般的なフェライト化法により前処理され、磁性が付与される。被処理水の流入流量 500ml/min、磁性フロック化された分離対象物質を含む濃縮液を 25ml/min で排出されるように調整されている。印加磁界 5.0T の場合、5 時間の連続処理で、分離率が 96%を達成できることが確認されている。

この他に、新潟大学のグループでも別の原理の、連続処理を目指した開放勾配型磁気分離装置が研究されている。本方法では、Fig.9(a)に示すようにチャンネルの半径方向に発生させた磁界勾配により磁性粒子に働く磁気力を粒子の流れの方向に対して垂直に作用させ、磁性粒子がチャンネルの左端から右端まで流れる間に、磁気力により流れに対して垂直に移動する。粒子に働く磁気力の大きさ、流速、チャンネルの直径・長さを最適に調整することにより、右端に設けた二つの出口のうち一方からのみ磁性粒子を流出させることができる。Fig.9(a)に示すような磁界勾配は、単一のマグネットで発生させることは難しいが、複数のマグネットなどの磁界源を組み合わせることにより、その近傍空間の磁界勾配を積極的に制御することにより可能である。本グループでは、その例として四重極磁界 (Fig.9(b))、カスプ磁界などを取り上げ、理論解析及び小型装置による基本的な原理の検証が行われている ^{10, 11)}。

(a) Basic principle.

(b) Structure of open gradient magnetic separator using quadrupole magnet.

Fig.9 Open gradient magnetic separator using multiple magnetic field sources ¹¹⁾.

6. まとめ

磁気分離法は、磁性粒子に働く磁気力を利用する物理分離法の一つであるため、有機溶媒などの有害化学物質を使用せずに希薄懸濁液を高速に処理でき、処理に伴う二次廃棄物の排出は極めて少ないという利点を有する。本稿では、連続処理が可能な磁気分離法について、近年の研究開発例を中心に解説した。往復型や回転型磁気分離装置などでは、処理を中断しないという点で連続性はあるが、フィルタマトリックスを磁界空間内外に出入れさせる機械的可動部分があるものがほとんどである。機械的な可動部分が多いと、それだけ処理のシーケンスも複雑になり、また構成部品の消耗に対してのメンテナンスが必要である。実用的な観点から言えば、機械的に消耗する部分を極力少なくして構造を簡略化した装置が理想的である。この点から、連続処理が可能な開放勾配型磁気分離装置の今後の発展が望まれるところである。

参 考 文 献

- 1) 電気学会技術報告 第114号 (1981)
- 2) M.N.Wilson : Superconducting Magnet , Oxford University Press, New York (1983)
- 3) 見目善弘 : 磁気分離, NEC技報, **37-9** (1984) 62
- 4) N.Saho, H.Isogami, T.Takagi, M.Morita : Continuous Superconducting Magnetic Filtration System, IEEE Trans. on Appl. Supercond., **9-2** (1999) 398
- 5) J.A.Oberteuffer : Magnetic Separation : A Review of Principles, devices and Applications, IEEE Trans. on Magn., **10** (1974) 223
- 6) M.Franzreb, P.Kampeis, K.Jungst, W.H.Hoell : New Type of High Gradient Magnetic Separator for Use in Waste Water Treatment, Proc. of 15th Int. Conf. on Magnet Technology (1998) 751
- 7) J.H.P.Watson : High Temperature Superconducting Permanent Magnetised Discs and Rings : Prospects for Use in Magnetic Separation, Minerals Engineering, **12-3** (1999) 281
- 8) 佐保典英, 水守隆司, 西嶋規世, 村上雅人, 富田優 : 高温超電導バルク超電導体を適用した水浄化磁気分離技術, 磁気分離研究開発に関するワークショップ成果報告書 (TML Annual Report supplement I 2001) (2001) 11
- 9) M.Franzreb, K.Juengst, W.H.Hoell : Open Gradient Magnetic Separator for Removal of Heavy Metals from Waste Water Based on a Cryogen Free Superconducting 5T Magnet, Proc. of 15th Int. Conf. on Magnet Technology (1998) 744
- 10) 山口貢, 福井聡, 今泉洋 : オープングラディエント方式による磁気分離, 磁気分離研究開発に関するワークショップ成果報告書 (TML Annual Report supplement I 2001) (2001) 6
- 11) S.Fukui, H.Nakajima, A.Ozone, M.Hayatsu, M.Yamaguchi, T.Sato, H.Imaizumi, S.Nishijima, T.Watanabe, Study on Open Gradient Magnetic Separation Using Multiple Magnetic Field Sources, Presented at 17th Int. Conf. on Magnet Technology, Geneva, 24-28 Sept. 2001