超電導磁気分離方式による高速浄化技術の開発*

森田 穰^{*1}, 磯上 尚志^{*1}, 佐保 典英^{*1}Development of a High-Speed Purification System by
Using a Superconducting Magnetic Separation MethodMinoru MORITA^{*2}, Norihide SAHO and Hisashi ISOGAMI^{*2} Mech. Eng. Res. Lab., Hitachi, Ltd.,
502 Kandatsu, Tsuchiura-shi, Ibaraki, 300-0013 Japan

We have developed a purification separator that combines high gradient magnetic separation using a newly developed continuously rotating single magnetic filter with a superconducting magnet. In a purification experiment, we used the purification separator to remove ferromagnetic floc, which we generated by adding ferromagnetic powder and coagulant to influent water. The experiment showed that the continuous rotary magnetic filter can be practically used in the developed purification separator and that when the separator operates at a high speed (i.e. about 100 times faster than normal speed), it achieves a good (90% improved) performance.

Key Words: Magnetic Separation, Multi-phase Flow, Environmental Engineering

1. 緒 言

本研究の目的は、大容量高速汚濁水浄化に適する超電導磁気分離システムを開発し、湖沼・河川、並びに下水・廃水中の固形浮遊物 (Suspended solids の略, 以下 SS と略称する) やリンなどの汚濁物を高効率除去する, 省エネルギー性とコンパクト性を有する高速浄化装置を開発することである。汚濁水の高速浄化法の一つとして, マグシード法による磁気分離法がある^{(1) (2) (3)}。マグシード法とは, 本来磁性を有しない被除去物に磁性粉 (四三酸化鉄 Fe_3O_4) と凝集剤を添加して磁性フロック (磁性粉を含む凝集体) を生成し, 磁性粉と凝集剤とともに原水中の汚濁物を磁気力により分離する方式である。特に, 高い磁気勾配による強い磁気力を利用した高勾配磁気分離^{(1) (2)}によるマグシード法が高速浄化に適した方法である。高勾配磁気分離は, 磁場の印加された空間に強磁性体の磁気フィルターを設け,

その磁気フィルターの細線 (以下磁性細線と称す) 近傍に生じる高い磁気勾配を利用するものである。

磁場の発生源には, 永久磁石・電磁磁石・超電導磁石が使用される。それらの中でも, 磁場のオン・オフが可能な電磁磁石と超電導磁石の利用は有効である。とりわけ, 超電導磁石は, ジュール発熱がゼロであることから, 大空間に高磁場を安価に発生することのできる最適手段である。従来の磁気分離方法は, このような磁場発生コイルに挟まれる空間内に磁気フィルターを固定設置するバッチ処理方式であることから, 磁場だけでなく通水も含めシステム全体をオン・オフしなければならない欠点を有していた。

筆者らは, 原水中の SS やリン除去の目的で超電導磁石を用いた超電導磁気フィルターシステムを開発しており^{(3) (4) (5) (6)}, その実用化を進めている。本研究で発表する超電導磁気フィルターシステムは, 超電導磁石の上側端部に円盤状の回転型磁気フィルターを偏心配置し, 磁性フロックの分離と磁気フィルターの洗浄を連続的に行う連続処理構造を有している。磁気分離方式は, 磁気力により吸引除去する方法であるので, 従来技術である凝集沈殿方式と比較して, 高速で SS を原水から分離すること

* 原稿受付 2003 年 10 月 15 日。

^{*1} 正員, (株)日立製作所機械研究所 (〒300-0013 土浦市神立町 502)。

E-mail: morita@gm.merl.hitachi.co.jp

が可能であり、コンパクト化が実現可能である。また、磁気分離用磁石を超電導磁石で構成すれば、少ない電力で大空間に大きな磁場を得ることができるため、運転コストを低減することができる。

筆者らは、これまでに超電導磁石の上下両端部に、磁石中心軸に対して偏心配置した 2 段式回転型磁気フィルターを設置した磁気フィルターについて、実下水処理実験を実施し高除去性能を確認した⁽⁴⁾。本研究では、新たに、低コストでよりメンテナンスの容易な 1 段式回転型磁気フィルターシステムを試作し、それを用いた実験を行った。

また、磁気フィルターの洗浄が不十分で磁性細線上に汚れが残ると、磁性細線上の付着物がもたらす遮り効果により、磁性フロクの磁性細線への吸着が十分になされなくなり、磁気分離性能が低下する。すなわち、磁気フィルター連続処理の信頼性は、磁気フィルターの洗浄再生性能に依存する。これまで実施してきた 2 段式磁気フィルターの実験検討では、エアーによる磁気フィルターの洗浄方法を採用し、その有効性を確認した。しかしながら、エアー洗浄方法は、エアー発生のための消費動力が高く、ランニングコストの面で欠点を有する。そこで、処理水の一部を利用し、より消費動力の低い水噴流洗浄方式についての実験検討を実施した。

2. 実験装置の構造

2・1 超電導磁気フィルターシステム

図 1 に、実験に使用した超電導磁気フィルターシステムの模式図を示す。本システムは、磁性フロクを生成する前処理部である急速混合槽及び緩速攪拌槽と、磁性フロクを除去し処理水を取り出す超電導磁気フィルター部、磁気フィルターで除去した汚濁物を磁気フィルターから洗浄回収して貯留濃縮する汚泥沈降濃縮槽からなる連続処理システムである。本システムでは、処理水の一部を磁気フィルターの洗浄水に利用しているので、システム全体をクローズド化できることも特徴の一つである^{(5) (6)}。

図 2 に超電導方式 1 段式回転型磁気フィルターの構造模式図を示す。本システムの分離部本体である超電導磁気フィルター部は、極低温冷凍機による伝導冷却方式の超電導磁石システムと回転型磁気フィルターから構成される。磁気フィルター部は回転可能な円盤形状であり、超電導磁石の上端近傍に、磁石中心軸に対して偏心配置する。なお 2 段式磁気フィルターの場合は、超電導磁石上下両端部に回転型磁気フィルターを偏心配置する。運転時は、回転型磁気フィルターを超電導磁石上部の高磁場領域と超電導磁石から離れた低磁場領域の間を連続的に回転移動する。磁石上部の高磁場領域で磁性フロク

を吸引除去し、低磁場領域でノズルから出る噴流により磁性フロクを磁気フィルターより剥がし落として磁気フィルターを洗浄再生し、剥がし落とした磁性フロクを連続的に汚泥タンクへ排出する。

次に、処理プロセスについて説明する。原水をポンプで連続的に急速攪拌槽に送り、原水に磁性粉末（四三酸化鉄 Fe_3O_4 のスラリー）、凝集剤、中和剤を添加して急速攪拌を行う。続いて、急速攪拌槽から緩速攪拌槽に送られる前処理水に高分子凝集剤を添加し、緩速攪拌を行い磁性粉を取り込んだ磁性フロクを生成する。磁性フロク生成の時間は 5 分（急速混合時間 1 分、緩速攪拌時間 4 分）である。従来技術である凝集沈殿法におけるフロク生成時間は 30 から 60 分とされていることから、本システムでは処理時間を大幅に短縮化できる。この理由は、小さな磁性フロクでも磁気力により除去可能であることから、5 分間の短時間で生成される小さな磁性フロクでも十分除去可能であることによる。磁性フロクを含んだ前処理水は、クライオスタットの室温ボア内に設置された流路（室温ボア内流路）を通り、超電導磁気フィルター部に送られる。磁性フロクは、磁気力で磁性細線に吸引除去され処理水が得られる。

実験使用した添加材料は、凝集剤として硫酸第二鉄、磁性粉として四三酸化鉄 Fe_3O_4 （平均粒径約 $4\ \mu\text{m}$ ）、高分子凝集剤としてアニオン系高分子凝集剤（アニオン系ポリマー）、中和剤として水酸化ナトリウムを使用した。

Fig. 1 System Structure

Fig. 2 Structure of the magnetic separator with a single rotary filter

2・2 実験条件

本研究では、分離部の流速と磁性フロックの除去性能の関係を実験的に検討した。分離部の幅は室温ボア内流路径に等しいことから、分離流速はボア内流路の平均流速に等しいと仮定し、分離流速 $\bar{U}$ は室温ボア内流路径 D と処理流量 Q を用いて、式(1)で与えた。

$$\bar{U} = \frac{Q}{\pi \cdot D^2 / 4} \quad \dots\dots(1)$$

表1に添加材料の注入条件を示す。磁性粉添加濃度は10 mg/L、ポリマーの添加濃度は1 mg/Lとした。凝集剤の注入量は、凝集剤に含まれる3価の鉄イオン Fe^{3+} の重量濃度(mg/L)により評価した。中和剤は前処理水のpHが6から6.5の間になるように添加した。

原水は、実験施設内にある遊水池の原水を用いた。また、原水SS濃度(原水中の固形浮遊物濃度)の変化に対する影響についての検討では、上記原水にカオリンを添加して人工的にSS濃度を高めた模擬原水を使用した。本実験で用いた原水の粒子径は、レーザー回折法による分析結果からは、0.7~300 μm であった。

Table 1 Test conditions of coagulant injection

Coagulant	10~15 Fe^{3+} mg/L
Magnetite	10 mg/L
Polymer	1 mg/L
Flash mixing time	1 min
Flocculation time	4 min

2・3 分離部磁場強度に関する予備検討

図3に、実験で使用した磁性粉の乾燥粉末の磁化特性と、磁気フィルターの磁化特性を示す。磁化特性は、VSM(振動型磁化計測機, Vibrating Sample Magnetometer)により計測した。図3の横軸は印加磁場強度を示し、縦軸は磁化を飽和磁化で除した無次元化した値を示す。

図3の計測結果から、磁場強度が0.3 T以上では、使用した磁性粉の磁化が95%以上飽和していることが認められる。また、磁気フィルターの磁化は磁場強度が0.7 T以上で95%以上飽和している。磁気フィルターが磁性フロックを吸引する磁気力は磁性粉の磁化に比例するので、磁気分離性能のばらつきを最小限に抑えるためには、磁化を出来る限り飽和させることが望まれる。よって、以下に報告する実験では、分離部の磁場強度を以下のように与えた。

- ①分離流速のパラメータ実験…分離部の磁場強度を、磁性粉と磁気フィルターがともに95%以上飽和する0.7 Tで与えた。
- ②原水SS濃度の影響検討実験…上記①の実験条件と同じく0.7 Tで与えた。
- ③洗浄方法の信頼性検討実験…本水噴流洗浄方法の評価するための連続処理実験では、磁場強度を0.45 Tとした。これは、既に前報⁽⁴⁾で連続処理性能を確認したエアークリーン方式を用いた2段式回転型磁気フィルターの実験と同じ条件である。

Fig. 3

Magnetizing curvatures of sampled magnetic powder in magnetic floc and magnetic filter

3. 実験結果と考察

3・1 分離流速の影響検討結果

本節では、分離流速と磁性フロック除去性能の関係を実験的に検討した分離流速パラメーター試験結果について述べる。

表2に、磁性フロック除去性能と分離流速の関係について検討した実験における、分離流速と分離部磁場強度の条件を示す。実験に用いた原水のSS濃度は10~20mg/Lである。

Table 2 Test conditions
(Separation speed and magnetic field in separator)

Separation speed	0.05~0.3 m/s
Magnetic field in separator	0.7 T

磁性フロックの除去率は、磁気フィルターに流入する前処理水中の磁性フロックの個数濃度と、処理水中の磁性フロックの個数濃度から計算される。しかし、磁性フロックの個数がカウントできないため、下記のように求めた。すなわち、磁性フロックの径、比重、並びに磁化のむつ分布を無視し全一様であること、並びに未凝集なSS粒子は存在しないと仮定する。この仮定により、個数濃度が磁性フロックの含まれる水の質量濃度、すなわちSS濃度に対応すると考える。それにより、磁性フロックの除去率 R_f を、次の式(2)のように処理前後のSS濃度比により定義する。図4に分離流速の影響検討試験の結果を示す。

$$R_f = 1 - \frac{\text{処理水SS濃度}}{\text{前処理水SS濃度}} \quad \dots\dots(2)$$

Fig. 4

Removal rate of magnetic floc vs. separation speed

この結果では、分離流速が0.1m/sを越えたあたりから除去性能が低下しており、今回採用した磁気フィルター構造と分離条件に関しては、分離流速による除去性能への影響が出てくることを示している。分離流速による除去性能の低下がどのような条件で発生するかは、磁気フィルターの構造や磁性粉の添加濃度により異なると考えられるが、これらの条件は今後の検討課題である。また、本結果から、磁気フィルターシステムが、従来の凝集沈殿処理方式の分離流速（沈殿槽内平均上昇速度で定義され、通常は約1 mm/sとされる）に対する100倍以上の処理速度で、90%以上の磁性フロックの除去率を得ることができ、高速浄化を実現可能であることを確認した。

3・2 原水SS濃度の影響検討

図5と図6に、磁気フィルター1段式超電導磁気分離装置を用いた磁性フロック除去性能に及ぼす原水SS濃度の影響に関する検討結果を示す。図5は原水SS濃度と磁性フロック除去率の関係、図6は原水SS濃度と処理水SS濃度の関係である。実験に使用した原水のSS濃度は、4 mg/L、25 mg/L、120 mg/Lとした。分離流速は0.1m/sであり、それ以外の実験装置の運転条件は前節3.1に述べた実験と同じである。

図5において、磁性フロックの除去率は、いずれの場合も95%以上の高い除去性能を示している。また図6においても、処理水SS濃度も、原水SS濃度が4 mg/L~120 mg/Lの広い範囲で変化する場合でも、3.5 mg/L以下で安定している。

これらの結果から、原水SS濃度が120 mg/L以下の範囲では、磁気フィルターシステムにより安定浄化が可能である見通しを得ることができた。

Fig. 5 Influent SS vs. removal rate of magnetic floc
(Effect of suspended solids in influent)

Fig. 6 Influent SS vs. effluent SS
(Effect of suspended solids in influent)

3・3 洗浄方法の信頼性検討

連続運転性能の信頼性は、磁気フィルターの洗浄再生能力に依存する。洗浄再生が十分でない場合は、磁気フィルター細線表面の汚れが磁性フロックの吸着を遮ることにより、磁性フロック除去性能が低下する。そこで、本システムで採用している、処理水の一部を利用する水噴流洗浄方法の信頼性を検証するために、48時間の連続運転試験を実施した。

実験条件の分離流速と分離部磁場強度は、前報⁽⁴⁾で報告した2段式回転磁気フィルターの連続処理性能を確認した際の実験条件と同じである。今回採用した実験システムと前報の実験システムの違いは、回転型磁気フィルターを2段から1段に変更した点と、洗浄方式をエアーから処理水噴流洗浄方式に変更した点である。表3に実験条件を示す。分離流速と磁場強度は、前報の条件と同じく、それぞれ0.05m/s、0.45Tとした。

図7から図11に48時間昼夜連続運転の結果を示す。図7は原水と処理水のSS濃度の比較、図8は磁性フロックの除去率、図9は原水SSの除去率、図10は原水と処理水のT-P（全リン）濃度の比較、図11は原水と処理水のBOD（生物化学的酸素要求量）濃度の比較である。運転初期は処理性能がやや不安定であるが、48時間の連続運転中は概ね安定している。

処理と洗浄の基本構造と方式に関する検証と評価は、これまでの知見から48時間連続運転で評価できると判断した。なお、回転型磁気フィルターの回転運動や装置の汚れ等と絡む機器の信頼性、性能長期寿命、安全性については、より長期間にわたる連続運転による実証確認が必要である。

これらの連続運転結果から、本システムで採用した水噴流洗浄による磁気フィルター連続洗浄再生能力を確認できた。

Table 3 Test conditions of continuous operation
(Separation speed and magnetic field in separator)

Separation speed	0.05 m/s
Magnetic field in separator	0.45 T

Fig. 7 Performance of Continuous operation test

Fig. 8 Removal rate of magnetic floc

Fig. 9 Removal rate of influent SS

Fig. 10 Performance of T-P treatment

Fig. 11 Performance of BOD treatment

3・4 1 段式回転型磁気フィルターの構造評価

表4に、一段式回転磁気フィルターを使用した連続試験による処理水質平均値と、水質環境基準値(排水基準値)の比較を示す。

Table4 Performance of effluent

Effluent	Single Filter	Environmental criteria
SS (mg/L)	4	< 150
T-P (mg/L)	0.02	< 8
BOD (mg/L)	2	< 120

表4に示すように、環境基準値を十分に満たす処理水質を得ることを確認した。これにより、本研究で新たに考案した、回転型磁気フィルターを1段式構造とし、処理水の一部を利用して水噴流により

洗浄する、磁気フィルターシステムが十分な浄化性能を得ることを確認した。

4. 結 言

河川・湖沼、並びに下水・廃水の処理を対象とした超電導磁気フィルターシステムの開発を行い、超電導磁石を用いた連続回転型磁気フィルターを1段式にした構造の実験システムを試作し、実験結果から以下の結果を得た。

- (1) 1 段式の磁気フィルター構造において、分離流速 0.1 m/s で高速浄化を実現できる見通しを得た。
- (2) 洗浄方式を、エアの替わりに処理水の一部を利用した水噴流方式を採用した。その結果、連続洗浄再生を安定して実現できることを確認した。

文 献

- (1) 公害対策電気技術常置専門委員会大勾配磁気分離技術の現状と動向：電気学会 技術報告 (Ⅱ部) 第114号：1981.6
- (2) 金子，高勾配磁気分離法—藻類を多量に含む水への適用—，造水技術，8-3，(1982)，49-53
- (3) 佐保，磯上，森田，超電導磁気分離技術によるアオコ除去装置の開発，電気協会雑誌，8-874，(1996)，31-33
- (4) 磯上，佐保，高木，森田，連続式超電導磁気分離による下水処理特性，機論，66-648 B(2000-8)，274-279.
- (5) 佐保，磯上，森田，公開特許公報，特開平11-244624，磁気分離装置
- (6) 依田，湯本，佐保，磯上，森田，公開特許公報，特開2001-244624，磁気分離装置及びそれを備えた水の浄化装置，