The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	超伝導高勾配磁気分離システムを用いた製紙廃水処理システムの開発
Author(s)	西嶋, 茂広; 武田, 真一
Citation	大阪大学低温センターだより. 2006, 136, p. 1-3
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/10445
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

研究ノート

超伝導高勾配磁気分離システムを用いた製紙廃水処理システムの開発

工学研究科　西嶋　茂宏、武田　真一（内線7896）

１．緒言

古紙の再生工程では大量の水を使用し、それと同量の廃水が発生する。近年、環境保全の認識が高まるにつれ廃水基準が強化されたため再生紙工場では、下水を利用するかあるいは新たな水処理設備の導入が必要となった。さらに大都市近郊に位置する工場では、河川などからの採水、放流が厳しく規制されるようになってきたため、工場内での水処理により水質向上を図り、多数回使用することが求められている。また、通常、古紙再生工場は都市近郊に位置するため、新たな水処理設備に要する面積を確保するのも容易ではない。このため、開発するシステムは、設置面積の小さい排水処理システムであることが要件として挙げられた。そこで我々は超伝導磁石の技術を用いた磁気分離システムの開発を行うことにした。本システムは、古紙再生過程で発生する浮遊物質（SS)、染料、凝集剤などCOD（化学的酸素要求量）を上昇させる原因となっている不純物を廃水から高効率に分離し、再使用可能な水とすることを目的としている[1－3]

２．開発の目標

対象とする再生紙工場は中規模の工場で、5000トン／日の水を使用するとともに同量の廃水を排出する。排出基準はCODで20ppm（mg/ℓ）以下と厳しく、再生紙工場の排水は何も処理しなければ、CODで2000－3000ppmのレベルである。現在は、加圧浮上装置で水処理をしているが、処理後の廃水はCODで数百ppmである。開発する磁気分離システムは加圧浮上装置の後段に設置され、数百ppmのCODを再利用可能なレベルまで下げることを要求される。これらの事を考慮し、下記の開発目標が設定された。

1）処理量：日量2000トン程度

2）処理後の水：再利用可能なレベル（COD値として100ppm程度以下　かつ　濁度10以下）

3）運転費用：300円／トン以下

4）設置面積：6m×6m以下

5）水の回収率：90%以上

上記目標を達成するため、我々は、再生紙工場にも導入可能な超伝導高勾配磁気分離システム[4－7]を使用した廃水処理システムの開発を実施した。現在、日量2000トン級のシステムが完成し、再製紙工場に導入され、1年間の実証運転を終了した。

３．磁気分離装置の基本設計

再製紙工場からの廃水中には図**1**に示すような物質が混合しており、**COD**を増加させている。高勾配超伝導磁気分離システムによっても、工業的にこれらの物質を分離することは困難である。そこで磁気種付けの手法を利用することにした。磁気種付けは、強磁性微粒子を対象物質に（化学反応等により）付着させ、磁気分離を可能とする手法である。有機物質も磁気分離が可能となる磁気種付けの手法を開発した。この手法は、コロイド化学的手法と呼ばれ、水酸化第一鉄を析出させ、それを一部酸化することによりマグネタイト（Fe_3O_4）を製造する方法である。この析出過程で製造されたマグネタイトは**COD**成分を吸着し、フロック化する。また、**SS**成分には表面に付着することが確かめられた。実際の水処理には、コロイド化学的種付けと市販のマグネタイトそのものも併用し、磁気種付けを実施することにした。本手法により、製紙工場廃水の**COD**成分あるいは**SS**成分に磁気種付けすることができ、磁気分離が可能であることは明らかになった。続いて、磁気分離システムの設計をする必要があるが、必要な磁場について検討した。

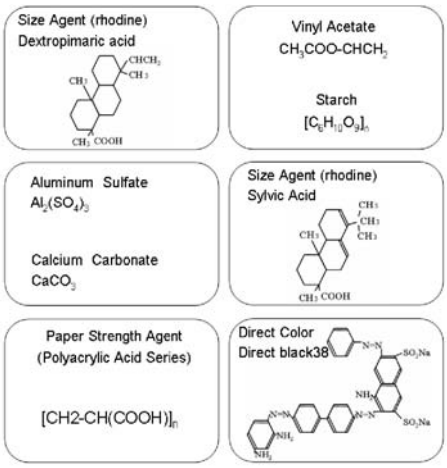

図**1**　製紙廃水中に含まれる**COD**成分

ドラッグ力は式（**1**）で示される。ここで、η は液体の粘性係数、b は粒子の半径、V_f は流体（水）の流速、V_p は粒子の速度である。大量の水を処理する場合は、流体速度 V_f が大きくなるため、ドラッグ力が大きくなる。

$$F_D = 6\pi\eta b(v_f - v_p) \qquad (1)$$

磁気分離を可能にするためには、磁気力はこのドラッグ力より大きくする必要がある。このため磁気力は大きいほうが望ましい。磁気力は式（**2**）で示される。ここで、μ_0 は真空の透磁率、χ_p、χ_f はそれぞれ粒子と流体（水）の磁化率である。粒子と流体に働く力の差を求めている。

$$F_M = \frac{4}{3}\pi b^3 \mu_0 \frac{9(\chi_p - \chi_f)}{(3+\chi_f)(3+\chi_p)} H \,\mathrm{grad}\, H \qquad (2)$$

強磁性体を考える場合は、χ_p は一定では無いため、磁化Mを使って表した方が分かりやすい。また、粒子に働く磁気力は水にはたらくそれより格段に大きいため水に働く磁気力は無視できる。結局、強磁性粒子に働く磁気力は、近似的に粒子の体積と磁化の強さ（M）と磁気勾配（grad H）の積であらわされることになる（式**3**）。

$$F_M \cong 4/3\pi b^3 M \,\mathrm{grad}\, H \qquad (3)$$

強磁性体のMはある外部磁場以上では飽和する。通常、マグネタイトの磁化は外部磁場が約**5000G**で飽和する。ところが、今回利用するコロイド化学的に製造したマグネタイトは、飽和までに外部磁場約**2 T**が必要である。これはコロイド化学的に製造したマグネタイトは、その中にマグ

ヘマイトもできていることによると考えられる。磁気分離で必要な外部磁場は、磁化を飽和させる外部磁場である。このことから、開発する磁気分離システムでは、**2 T** の磁場を発生させる超伝導磁石を利用することにした。（分離効率を考えれば、**1 T** 程度でも充分と考えられたが、第 **1** 号機と云うこともあり、**2 T** とした。）

上記の理由で超伝導磁石は、中心磁場が **2 T** を発生する磁石とすることにした。経済性の観点からは磁石のボア径は小さいほうが良い。一方、分離特性を向上させるためには、流速を低くしドラッグ力を小さくするほうが良く、このためにはボア径は大きいほうが良い。経済的な条件（システムの総計で **1** 億円以下の条件）から、超伝導磁石のボア径は**400mm**と決定された。この時、流速は最大約**200mm/s**となる。

次に、磁気フィルターの設計である。高勾配磁気分離では、高磁場内に強磁性細線（磁気フィルター）を配置し、その近傍に高勾配磁場を発生させる。その高勾配磁場で強磁性粒子が補足されるのが動作原理である。磁気フィルターは磁気勾配（**grad *H***）を大きくするためのものである。強磁性細線の直径は小さい方が磁気勾配は大きくなるが、高勾配磁場が実現できる領域が狭くなることと、機械的強度が小さくなることが問題である。後で述べるが、本システムでは磁場を落とすことなく磁気フィルターを洗浄できるシステムを設計することにしたが、この時磁気フィルターは磁石の中心部から外部へ引き出されるため、フィルターには強い磁気力が働く。この磁気力に耐えるだけの強度が磁気フィルターには要求される。また長期にわたる水からの力に耐ええる必要がある。このように、機械強度の観点からは強磁性細線の太さは太いほうが良い。また製紙廃水は腐食性が高いことからフィルターには機械的強度とともに耐食性も要求される。この条件を満足するものとして、フィルターは線径が**1.1mm**のフェライト系ステンレス線の**SUS430**を採用した。

（**1**）式と（**3**）式を連立させ磁気分離できる条件から磁気速度を計算する。（**1**）式の粒子半径は流体力学的な半径であり、この場合はフロックの大きさである。フロックの大きさは分布しており正確に評価することは困難であるが、約 **1 mm**程度と推定される。（**3**）式の粒子半径はマグネタイトの半径である。利用したマグネタイトの半径は、数ミクロンから**50**ミクロンの分布を持っているが、平均して**10**ミクロンの半径と考えてよい。なおコロイド化学的に合成したマグネタイトはもっと小さな粒子半径を持っているので、解析では無視している。マグネタイトの飽和磁化は約 **0.3 T** と考えて、磁気速度を計算すると**200**㎜／**s**となる。回収率は（**4**）式で計算される。フィルターの充填率は **1** ％程度である。比補足半径は約**0.5**となる。磁石の長さを**0.5m**とすると、回収率は**99**％以上となる。実際はフロックの大きさやマグネタイトの粒子径、飽和磁化など不明な点が残っている。そこで、超伝導磁石の仕様は性能的に余裕を持った仕様とした。表 **1** に磁石の仕様を示した。なお、磁場強度は中心磁場を **2 T** としたため、最大経験磁場は **3 T** となっている。

$$R = 1 - \exp(-\alpha L), \qquad (4)$$

ここで $\alpha = 2F\zeta / \pi a$

F：フィルターの充填率

ζ：比捕捉半径

a：フィルターの直径

L：フィルター部の長さ

表 **1**　使用した超電導磁石の仕様

Diameter of bora	**0.4m**
Magnetic field	**2T**
Length	**0.68m**
Operating current	**100A**

4．磁気分離ユニット

磁気フィルターを使いつづけているうちに捕獲回収された磁性フロックの量は時間とともに増え、最終的には磁気フィルターの飽和捕獲量を超えてしまう。あるいは、目詰まりを起こしたり、処理速度が低下したりする。このため適切な時間間隔で磁気フィルターを交換・洗浄し、処理能力を維持する必要がある。

廃水**COD**成分は数百**ppm**程度であり、処理量は一日**2000**トンである。したがって約**400kg**／日の**COD**成分（**400**ℓ／日）が回収されることになる。超伝導磁石内の空間は約**75**ℓであるので、最低一日 **5** 回の磁気フィルターの洗浄を行う必要がある。

フィルターの洗浄には、フィルターを磁場の弱い空間に取り出す必要があるが、磁場中の磁気フィルターは磁石からの磁気力を受け、その磁気力に打ち勝つための大きな力が必要である。従来は超伝導磁石を止め、磁気力を無くして、磁気フィルターの洗浄がなされていた。この方法では高速大量処理が不可能となるため、連続的にフィルターを交換、洗浄するシステムを考案した。その概要を図 **2** に示した。

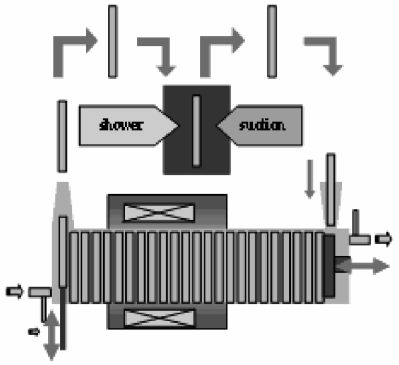

図 **2**　磁気フィルター連続洗浄システム

複数枚の磁気フィルターを超伝導磁石ボア内に軸方向に積層している。こうすることによりフィルターに働く磁気力は内力となり、容易に複数枚の磁気フィルターを一体として動かすことができるようになる。したがって磁石外から新しい磁気フィルターを小さな力で磁石内に押し込むことができるようになる。それと同時に他端から汚れた磁気フィルターが押し出され、このフィルターは容易に回収できる。この方法によると、磁気フィルター交換中もフィルターは磁性フロックを回収し続け磁気分離作業が継続し、連続的に磁気分離の操作が行うことができる。システムでは磁気フィルター挿入位置を排水出口側に、磁気フィルター取り出し位置を排水入口側に設定した。廃水の清浄な出口側から挿入された磁気フィルターは磁性フロックを回収しながら廃水の汚れている入口側へ移動することになる。磁気フィルターは直径**400mm**、高さ**35mm**で、**5** メッシュのステンレスの網になっている。図 **3** に使用した超伝導磁石の写真を示す。

5．磁気分離システム

本超伝導磁気分離廃水処理システムでは、まず廃水に含まれる懸濁物質（**SS**）および**COD**、**BOD**（生物的酸素要求量）原因物質など常磁性あるいは反磁性物質に強磁性粒子を付着させる（磁気種付け）[8－11]。また磁気種付けされた大きなフロックは、自重で沈降することから、沈殿槽を設けている。その後、超伝導磁気分離ユニットに導入し、磁気分離を実施する。本システムの全体像を図 **4** に示した。このシステムは高度処理をも実現できる設計になっている。これは廃水中に

溶解している物質のように通常の磁気種付けが難しい物質をも分離することができる。これを可能にするのが 2 次種付けタンクである。通常はこのタンクは不要である。2 次種付けの種付け材は、磁性活性炭や磁性粘土を利用する。今回の実証実験では、この 2 次種付けは行っていない。

図 3　使用した超伝導磁石

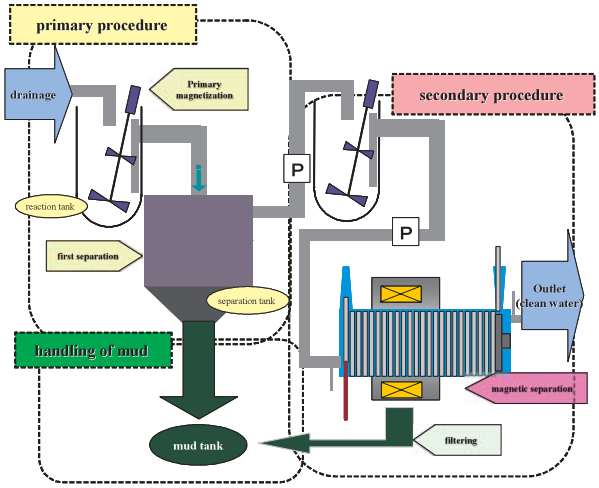

図 4　磁気分離システムの全体

2000t／日規模での実証試験による結果を COD（Cr）で求めた結果を表 2 に示した。COD（Cr）の値からCOD（Mn）を概算してみるとCOD（Mn）＝38－60の範囲に浄化されたことが分かる。システムの最適化が図られるにつれて、処理後のCOD値が下がることが明らかになってきた。本システムでは特に濁度の改善が良好であることが明らかになった。これにより、処理水が再利用できることが確認できた。この連続フィルター交換方式により、実証プラントでは超伝導磁石 1 台の基本ユニットで2000 t／日の製紙廃水の浄化処理を行う事ができることを実証した。

表 2　磁気分離装置の性能

	Wastewater	Treated water
Turbidity（NTU）	100－300	2－10
COD-Cr （mg/l）	200－600	110－230
COD-Mn（mg/l）	60－180	33－69
pH	6.5－7.5	7.0－8.0
SS（mg/l）	200－400	20－40

6．結論

再生紙工場の廃水を回収する超伝導高勾配磁気分離システムを開発し 1 年間の on site での運転を実施してきた。最大処理速度2000トン／日である。処理した水は工場内で再利用できることが確認され、順調に運転されている。

謝辞

このシステムの開発研究は、平成13年度より 4 年間、NEDOの基盤技術研究促進事業「超伝導磁気分離を利用した製紙工場からの廃水処理システム」により補助を受けて実施したものである。

参考文献

［1］ Y. Kakihara, T. Fukunishi, S. Takeda, S. Nishijima, A. Nakahira, " Superconducting High Gradient Magnetic Separation of Waste Water from Paper Factory ", IEEE, Trans. Appl. Supercond. 14. 1565－1567（2004）.

［2］ 劉成珍，武田真一，田里伊佐雄，西嶋茂宏，中平敦，「高勾配磁気分離法による染料分子回収法の開発」，低温工学38［2］（2003）77－82.

［3］ Shigehiro Nishijima and Shin-ichi Takeda, " Superconducting High Gradient Magnetic Separation for Purification of Wastewater from Paper Factory ", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, June 2006.

［4］ J.H.P. Watson, " Magnetic filtration, " *J. Appl. Phy.*, vol. 44, no. 9, pp. 4209-4213, September 1973.

［5］ R. R. Birss, R. Gerber, and M. R. Parker, " THEORY AND DESIGN OF AXIALLY ORDERED FILTERS FOR HIGH INTENSITY MAGNETIC SEPARATION, " *IEEE Trans. magn.*, vol. 1, MAG-12, no. 6, pp. 892－894, November 1976.

［6］ S. Uchiyama, S. kondo, and M. Takayasu, " PERFORMANCE OF PARALLEL STREAM TYPE MAGNETIC FILTER FOR HGMS, " *IEEE Trans. magn.*, vol. 1, MAG-12, no. 6, pp. 895－898, November 1976.

［7］ S. Nishijima, K. Takeda, K. Saito, T. Okada, S. Nakagawa, and M. Yoshiwa, " Applicability of superconducting magnet to high gradient magnetic separator, "*IEEE Trans. Magn.*, pp. 573－576, 1987.

［8］ S. Takeda, S. Yu, T. Furuyoshi, I. Tari, A. Nakahira, S. Nishijima, and T. Watanabe, " Recovery of the microorganism and organic material from water environment by high gradient magnetic separation, " in *Proceeding of the 4th Meeting of Symposium on New Magneto-Science*, 2000, p.388.

［9］ S. Takeda, T. Furuyoshi, I. Tari, A. Nakahira, Y. Kakehi, T. Kusaka, S. Ogawa, J. Katayama, Y. Inno, S. Nishijima, F. Fujino, and K. Ohmatsu, " Separation of algae with magnetic iron（Ⅲ）oxide particles using superconducting high gradient magnetic fields, " *Journal of the Chemical Society of Japan, Chemistry and Industrial Chemistry*, vol. 9, pp. 661－663, 2000.

［10］ S. Takeda, S-J. Yu, S. Nishijima and A. Nakahira, " Development of a Colloid Chemical Process for magnetic Seeding to Organic Dye ", Bull.Chem. Soc. Japan, 76,［5］, 1087－1091（2003）.

［11］ 武田真一「配磁気分離のための担磁法」，低温工学37［7］（2002）315－320.