高勾配電磁フィルタ

足立敏夫*, 菅原富男*, 市川修一*, 大倉末代史*, 矢野純一*

High Gradient Magnetic Filter (HGMF)

Toshio Adachi, Tomio Sugawara, Shuh-ichi Ichikawa,
Sueyoshi Ohkura and Jun-ichi Yano

Synopsis

An investigation was made about fundamental characteristic and operational performance of "High Gradient Magnetic Filter" (HGMF).

After experiment of changing magnetic field, flow velocity, wire diameter, packing density and viscosity it was confirmed that effects of these factors upon initial removal ratio and filter loading capacity follow certain indexes respectively.

Removal performance of waste water could be grasped to some degree by considering magnetization of particle and particle size in addition to the above written factors.

On the other hand, there were found various merits of this filter.

- (1) Ultra high speed filtering is possible and installation area can be reduced.
- (2) Wide application from low up to high concentration is possible.
- (3) Running cost is cheap.
- (4) Back washing time is short and volume of back wash water can be reduced.
- (5) Removal of non-magnetic particles is also possible by execution of pre-treatment.

1. は じ め に

高勾配電磁フィルタの実用化研究はここ数年急速に進んで来た^{1),2)}。我々も昭和52年10月鉄鋼廃水処理としては世界でもはじめての実用機を設置して以来、精力的にその応用拡大を図り、現在まで10基に余る実績を数えるに至った^{3)~5)}。

高勾配電磁フィルタは常磁性体までもその捕捉範囲に含めたということで各方面の注目を集めた技術であるが、その特性の把握は実用化をさらに進めるにあたって重要なことである。

本稿では基礎実験結果および実施結果を紹介し、高勾配電磁フィルタの性能特性について概説する。

2. 原 理⁶⁾

ある磁場中に磁性材料で作られた細線を置くと、細線は磁化し、そのまわりには高い磁場勾配が発生する。処理すべき廃水がこの細線を通過すると、廃水中の磁性粒子は強大な磁気力のため細線に吸着、除去される。高勾配電磁フィルタはこのような極めて簡単な原理に基づいているが、ここではこの吸着の様子を理論的に述べてみる。

2.1 磁 気 力 F_m

磁場 H の中に置かれた粒子に働く磁気力 F_m は

昭和54年 7月17日 受付

*大同特殊鋼(株)機械事業部プロジェクト室

Fig. 1. Magnetic wire and magnetic particle in a uniform magnetic field H_0 and fluid flows V_0 .

$$F_m = 1/2 V \chi \nabla (H \cdot H) \quad \dots\dots\dots (1)$$

但し, V : 粒子の体積

χ : 粒子の磁化率

∇ : ナブラ記号

つぎに Fig. 1 に示すように一様な磁場 H_0 の中に磁力線に対して垂直に置かれた強磁性線 (半径 a) を考えると, このまわりの磁場 H は

$$H(r, \theta, Z) = -\nabla(-r H_0 \cos \theta + M_s a^2 \cos \theta / 2 \mu_0 r) \quad \dots\dots\dots (2)$$

但し, μ_0 : 真空透磁率

M_s : 強磁性細線の磁化

(1)と(2)より

$$\begin{cases} F_{mr} = -V \chi H_0 M_s a^2 (\cos 2\theta / r^3 + M_s a^2 / 2 \mu_0 H_0 r^5) / \mu_0 \quad \dots\dots\dots (3a) \\ F_{m\theta} = -V \chi H_0 M_s a^2 \sin 2\theta / \mu_0 r^3 \quad \dots\dots\dots (3b) \end{cases}$$

2.2 流体のドラッグ力 F_d

粒子の速度を V_p , 流体速度を V_f とすると, 粒子が流体から受ける力 F_d は,

$$F_d = 6 \pi \eta b (V_f - V_p) \quad \dots\dots\dots (4)$$

但し, η : 流体の粘性係数

b : 粒子の半径

つぎに細線のまわりの流れの分布を考えて上式を書き換えると,

$$\begin{cases} F_{dr} = 6 \pi \eta b \{ (1 - a^2/r^2) V_0 \cos \theta - dr/dt \} \quad \dots\dots\dots (5a) \\ F_{d\theta} = 6 \pi \eta b \{ -(1 + a^2/r^2) V_0 \sin \theta - r d\theta/dt \} \quad \dots\dots\dots (5b) \end{cases}$$

但し, V_0 は $r \rightarrow \infty$ における流体

Fig. 2. Particle trajectory for various values of the parameter V_m/V_0 .

Fig. 3. Dimensionless capture radius for V_m/V_0 .

速度で H_0 と平行とする

2.3 粒子航跡

$F_m + F_d = 0$ より磁性粒子の運動方程式が下式のように定まる。重力は小さいので無視した。

(3)と(5)より

$$\begin{cases} dr/dt = V_0/a(1 - 1/r^2) \cos \theta - V_m/a \\ (\cos 2\theta/r^3 + K/r^5) \quad \dots\dots\dots (6a) \end{cases}$$

$$\begin{cases} r \cdot (d\theta/dt) = -V_0/a(1 + 1/r^2) \sin \theta - V_m \sin 2\theta / ar^3 \quad \dots\dots\dots (6b) \end{cases}$$

但し, r_a : r/a

$$V_m = 2 \chi M_s H_0 b^2 / 9 \eta \mu_0 a$$

$$K = M_s / 2 \mu_0 H_0$$

この方程式を数値計算によって解き, 粒子の捕捉される過程, すなわち航跡の一例を図示したのが Fig. 2 である。この粒子航跡において, $t = 0$ の $\chi = \infty$ における粒子の位置を y_∞ とすると, V_m/V_0 によって捕捉され得る限界値 y_∞ が決まる。さらに $\epsilon = y_\infty/a$ とすれば ϵ は比捕獲半径となる。すなわち比捕獲半径は, V_m/V_0 に依存しており, この様子を Fig. 3 に示す。

2.4 フィルタ除去効率 R

磁性細線の比捕獲半径 ϵ を用いて細線を多数積層した場合の総合的なフィルタ除去効率を計算することができる。単位断面積をもったフィルタの、厚さ dx の部分を考える。磁性細線の体積充填密度を F とすると、この中の磁性体の体積は $Fdx/\pi a^2$ となる。これからフィルタの捕獲断面積 dSc は

$$dSc = 2\epsilon a F dx / \pi a^2 \quad \dots\dots(7)$$

となる。(7)式はこれ自体厚さ dx で捕捉される粒子の割合を表わしている。いま $N(x)$ を、位置 x を流れる流体に含まれる粒子の濃度とすると、

$$dSc = -dN/N = 2\epsilon a F dx / \pi a^2 \quad \dots\dots(8)$$

これよりフィルタの除去効率 R は

$$R \equiv \{N(O) - N(L)\} / N(O) = 1 - \exp \{-2F\epsilon L / \pi a\} \quad \dots\dots(9)$$

但し、 L はフィルタの長さとなる。

3. 装 置

3.1 装 置

高勾配電磁フィルタ本体の写真を **Photo. 1** に、その概略構造を **Fig. 4** に示す。

フィルタ部には直径0.1～1 mmの磁性ステンレス細線が磁力線に対して直角になるように一様に充填されている。その充填密度は、目づまりや逆洗効果を考慮してせいぜい10数%であり、フィルタ部厚さ(ろ過長さ)は150mmが標準である。

このフィルタ部のまわりをコイル、継鉄、磁極が取り囲んでおり、磁場の漏洩を防ぎ、また低消

Photo. 1. High gradient magnetic filter (HGMF).

Fig. 4. Schematic structure of HGMF.

Fig. 5. Schematic flowchart of HGMF.

費電力で一様かつ高磁場が得られるように工夫されている。

3.2 運 転

基本的な処理フローチャートを **Fig. 5** に示す。処理は上向流によって行われ、処理時間もしくはフィルタの圧力損失が設定値に達した時点で、逆洗工程へ移行する。逆洗においては、特に消磁は行わず通電を断つのみで、水と圧縮空気をフィルタ部上方より噴入し、エアバグリング方式によってフィルタ内部は急速に洗浄、再生される。

4. 基礎特性

4.1 試料

実験で用いた試料は強磁性粒子としてのマグネタイト（粒径 $0.5\sim 10\mu$ 平均 2μ ，磁化 60emu/g at 3kOe ）と常磁性粒子としてのヘマタイト（粒径 $0.5\sim 10\mu$ 平均 1μ ，磁化 1.4emu/g at 3kOe ）である。

4.2 初期除去率

ヘマタイトに対する初期的な除去結果を Fig. 6 に示す。ここで実験は磁場，ろ過速度，線径，充填率，流体の粘度を変化させて行った。除去率は $F\epsilon L/a$ に依存することがわかる。

また(9)式を次式のような補正 f を考え，実験結果と比較すると

$$R = 1 - \exp \{-2Ff\epsilon L/\pi a\} \quad \cdots \cdots (10)$$

$f=0.3$ 程度の補正となる。この f は粒径のばらつきや細線の重なりなどによる補正と考えられる。

4.3 堆積効果

マグネタイトとヘマタイトに対する除去率の時間の変化を Fig. 7, 8 に示す。マグネタイトに対し

Fig. 6. The dependence of initial filtration efficiency for hematite on $F\epsilon L/a$.

Fig. 7. Filtration efficiencies for magnetite.

てはほとんど100%の除去率が一定時間続く。ヘマタイトに対しては除去率低下の様子が線径，充填率によって異なるが，いずれにせよ徐々に低下して行く。

この様子を別の角度から見たグラフが Fig. 9, 10 である。これはおのおのの粒子に対するフィルタ部での捕捉過程を細分化して調べたものであり，マグネタイトに対しては数 cm のろ過長さでほとんど捕捉されており，時間経過と共に捕捉部

Fig. 8. Filtration efficiencies for hematite.

Fig. 9. Collection process for magnetite in the filter medium.

Fig. 10. Collection process for hematite in the filter medium.

Fig. 11. The dependence of the filter loading on $F\sqrt{M \cdot M_s / 2V_o \cdot a}$ at the time when the filtration efficiency goes down to 80%.

が出口側へ移行することがわかる。そして捕捉部がフィルタ長さを越えると除去率は急激に低下する。一方ヘマタイトは初期の段階からフィルタ部全体が有効に働いており、言い換えればそれでも捕捉しきれない粒子があり、全体として捕捉性能が低下するため、除去率も徐々に低下することがわかる。

以上のようにフィルタ部の捕捉には限度がある。Fig. 11 にマグネタイトに対する最終除去率を80%とした時のフィルタ部単位体積当りの捕捉量を示す。ここで横軸には $F\sqrt{M \cdot M_s / 2V_o \cdot a}$ (M は粒子の磁化)をとってある⁷⁾。マグネタイトに対して約 500kg/m^3 の捕捉容量を持つ。また磁場、ろ過速度、線径、充填率が与える効果は定性的には初期除去率に対するものと同じであるが、定量的には必ずしも同じでないことがわかる。例えば初期除去率を高めるためには充填率アップより線径を小さくする方が効果的であるが、捕捉容量の観点から見ると充填率の方がその影響が大きい。このことは Fig. 7, 8 のグラフによっても確認される。

4.4 原液濃度の影響

ヘマタイトに対して原液濃度を $0.5 \sim 200\text{ppm}$ まで変化させても除去率の変化はなかった。このことは、(9)式からもわかることであるが、粒子同士の磁場内での凝集がない場合は、除去率は原液濃度によらないと考えて良く、高勾配電磁フィルタが低濃度原液に対しても有効であると言える*。

*一般廃水は濃度によって粒径分布が変わることが多いため除去率も多少変動する。

Fig. 12. The time dependence of pressure drop.

Fig. 13. The dependence of the accumulation quantity on the number of times of repeating of filtration and back washing.

4.5 圧力損失

Fig. 12 に SS 捕捉による圧力損失の時間的な上昇を示す。500m/hr の高速にもかかわらず 0.5kg/cm^2 以下と小さい。このことはろ過ポンプに対する負荷低減と運転中の流量低下が小さいという利点につながる。

4.6 逆洗性能

逆洗は圧縮空気を標準状態換算で逆洗水の3倍程度噴入する。また逆洗水のフィルタ部通過速度は、 1000m/hr を越えるため実質逆洗時間は10sec程度という非常に短時間で逆洗再生することができ、逆洗水量も少なく済むため、逆洗水中のSSは1%程度の高濃度になる。

Fig. 13 にくり返し逆洗によるフィルタ部でのSS堆積量の変化を示す。これからわかるように、ろ過・逆洗のくり返しによる堆積はなく、捕捉SSのほとんど100%が逆洗によって排出されている。

5. 応 用

高勾配電磁フィルタは用途別には分離とろ過に大別されるが、処理方式から見ると直接処理と前処理によるものの二つがある。そこでここでは分離、直接ろ過、前処理ろ過のおおのの実施結果を紹介する。

5.1 分 離

磁気分離は古くから用られてきた技術であり、その応用分野には、低品位鉄鉱石の品位上昇、陶土やカオリンの除鉄など数多くあるが、ここではガラス研磨工程から排出されるスラリーの除鉄結果を紹介する。このスラリーには1.5~2.5%の有用なガラス原料と共に鉄分が全固形物中1.5~2.5%含まれており、この鉄分に対して1/10程度までの除鉄が必要となっている。このスラリーに対する試験結果を Table 1 に示す。

除鉄性能は約90%であり満足すべき結果であるが、これは原液中の鉄分の磁化が 80emu/g とかなり高く、強磁性の性質を示す物質であるためと思われる。

ただ基礎実験でのマグネタイトに対する除去性能と比較して、必ずしも除去率は高くなく、またろ過時間が 6 min と短いのは、処理液の固形物濃度が下がっていることからわかるように、磁性細線への吸着が鉄分だけでなくガラス原料も多く、その分鉄分の吸着が妨げられたものと思われる。

またスラリー歩留まりの問題から、処理終了から逆洗に至るまでにブロー工程を行い、フィルタ容器内のスラリーを原液槽に戻した。これにより、85%以上の回収率を達成することができた。

以上の除去性能は従来型の磁気分離機では成し

Table 1. Test result for glass slurry.

Item \ Fluid	Influent	Effluent
Suspended solids	1.97%	1.74%
Fe/Suspended solids	1.92%	0.19%

〈Test condition〉

Magnetic field : 8kOe

Flow velocity : 200m/hr

Filter run : 6min

得なかったものであり、高勾配電磁フィルタの性能の良さを示すものであろう。

5.2 直 接 ろ 過

高勾配電磁フィルタの有効性は、ろ過の分野で著るしく高まったと言っても過言ではない。これは廃水処理という、一般産業界に応用の目が向けられたためであり、特に直接ろ過という前処理を必要としないろ過はランニングなどの面からも確実に従来のろ過装置を上回るものである。

産業界の中でも鉄鋼廃水は多く酸化鉄を主体とした SS を多量に含んでおり、SS は強磁性を示すものが多く、直接ろ過の対象としては最適な分野の一つである。ここではその中でも代表的な熱間圧延廃水での運転結果を紹介する。

原水 SS の磁化は 25emu/g at 3kOe で、マグネタイトが約 3 割を占めており、粒径は最大 50 μ まで幅広く分布している。この廃水に設置された装置の主要諸元を Table 2 に、そのろ過結果を Fig. 14 に示す。600m/hr という高速ろ過で90%以上の

Table 2. HGMP for waste water from a hot-rolling mill.

Flow rate :	1 100m ³ /hr
Influent suspended solids :	200ppm
Effluent suspended solids :	Below 25ppm
Flow velocity :	600m/hr
Magnetic field :	3 kOe
Filter run :	20min
Volume of back wash water :	340m ³ /day
Power consumption of magnet :	24 kW
Space requirement :	40m ²

Fig. 14. Filtration efficiency of HGMP for the waste water from hot rolling mill.

ろ過性能が得られている。また SS 捕捉量も最終除去率を90%とすると 400kg/m^3 になり、対マグネタイトの値と同等である。この結果はつぎのように説明できる。

- (1) マグネタイトの成分比が3割であるにもかかわらず除去率が90%以上得られているのは、7割を占める磁性の弱い酸化鉄のうちマグネタイトから分離して存在しているのは少なく、多くの酸化鉄はマグネタイトと共に吸着除去されるためと考えられる。
- (2) 磁化がマグネタイトの1/3程度にもかかわらず捕捉容量が同等であるのは、粒径が大きいためと考えられ、捕捉容量に粒径が寄与すると推定される。

この他、転炉集塵廃水では SS 磁化が 60emu/g at 3kOe と高いこともあり、粒径が 1μ 程度の微粒子に対して99%以上の除去性能が得られている。高勾配電磁フィルタは対象粒子の磁化と粒径によってその性能が大きく変わるため、この両者は重要な指標となる。ただ一般廃水は様々な性状が異なり、この磁化と粒径だけでその除去性能が決定されると考えることは危険であろう。

5.3 前処理ろ過

従来のろ過装置においては、凝集前処理は粒径を大きくすることにあったが、高勾配電磁フィルタでは前処理の意味は非磁性粒子を磁性粒子に吸着させることにある。

Fig. 15 に真空脱ガス装置冷却水に対するろ過結果を示す。原水 SS は磁化が 5emu/g at 3kOe

Fig. 15. Filtration efficiencies of HGMF for the cooling water of the steam ejector for a vacuum degassing installation.

とマグネタイトが5%程度しか含まれておらず、70~80%の除去率を得るためには、直接ろ過では 6kOe まで磁場を高める必要があるが、凝集剤添加による前処理を行うことによって同等の除去性能が磁場 3kOe で得られ、この有効性が確認された。また循環水処理に対しては除去性能の低い非磁性物質の濃縮を除くためにも、各元素を平均して除去することができるこの前処理は意味のあるものである。

この他、廃水の中に核となる磁性物質が含まれていない下水のような廃水に対しても、前処理によってその処理が可能となる。つまり凝集剤とともにマグネタイトを添加してやれば良く、実験的には90%の除去率が得られており、これからの応用分野である。また重金属含有廃水に対しては、前処理としてフェライト法を用いれば良く、イオン交換廃液やメッキ廃液への応用が可能である。

6. 特長のまとめ

これまでの応用結果から高勾配電磁フィルタはつぎのような特長を有していることがわかった。

- (1) $200\sim 1000\text{m/hr}$ という超高速の直接ろ過が可能であり、設置面積は従来装置のクラリファイヤ、砂ろ過器に比べて $1/2\sim 1/20$ に縮少できる。
- (2) 電磁石消費電力量は、処理当たり通常 $0.01\sim 0.25\text{kWh/m}^3$ となり大きな問題とならない。
- (3) 圧力損失が高速ろ過にもかかわらず 1kg/cm^2 以下と小さい。
- (4) ろ過面積が数 m^2 までは、スケールアップによってコストは割安になり、大量処理に適している。
- (5) 粒子捕捉の様子が理論的に裏付けされているため磁場、ろ過速度等を適当に選ぶことにより所要の除去率を達成できる。
- (6) 非磁性粒子は前処理によって除去が可能となる。
- (7) 高温、高圧、低濃度液への応用が可能である。

7. おわりに

これまでの実験や実施運転から、高勾配電磁フィルタが従来の磁気分離機やろ過装置に比べて高性能であり、数多くの特長を有していることがわ

かった。またその特性において、様々な因子が除去性能に及ぼす影響もかなりの程度まで把握できたと思われる。ただ理論、基礎特性、実施結果がおのおの一致しているとはいえない。例えば基礎特性における補正係数 f であるが、これについては、本文で述べた他に流体や磁気学の問題に起因することも考えられ、今後検討する必要があるだろう。また実施結果の定量的な解析を図るには、さらに実廃水の性状把握が必要と思われる。高勾配電磁フィルタは、これらの点に若干の問題を残しながらも、その優秀な特性から今後さらに応用開発が進み様々なプロセスの中に組み込まれていくことだろう。

(文 献)

- 1) J. R. Harland: IEEE. Trans. Magn., MAG

-12, (1976), 904

- 2) 化学プロセスへの磁気分離の応用 (理研シンポジウム), (1979)
 3) 矢野, 江口: 電気四学会連合大会論文集, (1975) 2, 49
 4) 菅原, 矢野: 用水と廃水, 21 (1979) 2, 63
 5) 足立, 矢野, 菅原: 産業機械, (1979) 340, 14
 6) J. H. P. Watson: J. Appl. Phys., 44 (1973), 4209
 7) S. Uchiyama and S. Kurinobu: Industrial Applications of Magnetic Separation, Ed. by Y. A. Liu, Published by Institute of Electrical and Electronic Engineers, Inc., (1979), 166

研削能率に挑む

FSK レジノイド研削砥石

製造販売品目

ビトリファイド研削砥石
 レジノイド研削砥石
 切断砥石
 軸付砥石
 フジラップ
 フラッシュカット

不二製砥株式会社

本社工場 愛知県知多市新知字中殿1番地

営業部 電話(05625)5-3111(代表)

総務部・製造部 電話(05625)5-3115(代表)

東京支店 電話(03) 917-7881 名古屋支店 電話(052)322-5166 熱田営業所 電話(052)681-6551
 安城営業所 電話(05667)7-9318 広島営業所 電話(0822)91-0619 大阪販売所 電話(06) 716-1257