高勾配磁気分離機 (SALA-HGMS®) の応用について*

堀 田 祐 邦**・大 森 勝 朗**
俣 川 恭 輔**・中 田 三 郎**

Applications of SALA-HGMS® High Gradient Magnetic Separator

Yuho HOTTA, Katsuro OMORI

Kyosuke MATAKAWA and Saburo NAKADA

1. は じ め に

高勾配磁気分離^{a)} (High Gradient Magnetic Separation) は、磁気を利用した物理選別技術の新領域であり、磁場勾配を積極的に利用しようという目的で、1968年(昭43)に MIT の H. H. Kolm らが、強磁性細線をソレノイドコイル内部の均一磁場に置くことによって細線周囲に生ずる高い磁場勾配を磁気分離に利用する提案を行ったことが発展の契機となった。その後 MIT と SALA グループとの共同開発により、ジョージアカオリン中の有色鉱物の除去に対して、従来の化学処理に取って代って実用化された。それ以来、常磁性微細粒子を工業的規模で処理できる特徴が活かされ、その応用分野は急速に拡大しつつある。最近では磁力選鉱分野以外に、各種の用水、廃水処理、気体の清浄化にも用途が展開されてきており、今後資源問題、環境公害問題とも関連してその発展が注目される。

本稿ではまず磁気分離について概説し、次いで高勾配磁気分離の原理、SALA-HGMS® の構造と特徴に触れた後、筆者らが行った実験例について述べてみたい。

2. 磁気分離のソフト

プロセス的観点からみた磁石利用分離技術の区分

筆者らは、磁石を利用した物質分離技術を広義の Magnetic Separation とし、第1表のように区分して考えている。

まず第1表の狭義の Magnetic Separation に関し説明を加えると、このうちの Concentration とは、鉄鉱石の

磁選など、従来の磁力選鉱が大部分これにあたり、Purification とは窯業原料の脱鉄がその一例であり、また Extraction には希土類鉱物の選鉱や液中イオンの選択的捕集などが含まれる。いずれの場合も、磁性物質と非磁性物質とが単体分離していること、更にこれら粒子が相互付着または凝集を起していない分散状態にあることが必要であり、そのための前処理技術が磁気選別の必須条件である。

次に、第1表中の磁気浮過を第2表のように細分した。原水中に含まれている固体の大部分が磁性体であって直接磁気浮過にかけ得る場合を直接法とした。一方、液中の除去対象物が磁性を有しないため、磁気浮過の前処理として何らかの添加剤を必要とする場合を磁気分離剤法としたが、この中には除去対象物がイオンである場合も含まれ、これらに何らかの磁性付与剤を加えてみかけ上磁性を持たせた後、磁気浮過処理を行なう場合である。この磁性付与方法は色々あるが、筆者らはその時に用いる添加剤を、浮遊選鉱における浮選剤と同格な意味で磁気分離剤 (Magnetic Reagent) とし、それを用いた磁気分離法を磁気分離剤法 (Magnetic-reagent Method) とすることにより、これらの名称に技術的な意味と同時に、工業的に最も重要な経済性を持たせた名称として提唱したい。

最後に、磁性流体を用いた比重分離は、磁場勾配内における磁性流体の見掛け比重を変化させることにより、その中にある非磁性固体に働く浮力を任意に調整できる

^{a)} HGMS という言葉は、1971年(昭46) MIT グループが最初に使ったと言われている。また、高勾配磁気分離という訳語を日本で最初に使用したのは、1974年(昭49)12月、サラ・ファー・イースト[®]の加知学による。他に大勾配磁気分離、高傾斜磁気分離という表現も使用されている。

* 昭和54年5月14日本会第62会例会において発表

** 日鉄鉱業株式会社技術開発部
昭和54年4月11日受理

第1表 Magnetic Separation の区分

第2表 磁 気 浮 過

ことを利用した比重分離法であるが、東北大学下飯坂教授らによって水ベース磁生流体が発明されたこともあり、次第に脚光をあびてくるものと考えられる。

3. 磁気分離のハード

強力磁選機の進歩

次に、本稿の目的である高勾配磁気分離へと筆を進めるにあたり、種々の強力磁選機 (High-power Magnetic Separator) につき、湿式に限定して概観しておきたい。

第3表に代表的な各種磁選機についてその磁場 H 、磁場勾配 dH/dx 及び磁界条件^{b)} $H \cdot dH/dx$ の目安値を示したい。

最近、強力磁選機を湿式高磁力磁選機 (Wet High Intensity Magnetic Separator: WHIMS) と高勾配磁気分離機 (High Gradient Magnetic Separator, HGMS) とに区分して呼ぶ趨勢にあるが、こう区分することは第3表の磁界条件の数字からも首肯できると思う。

(1) 湿式高磁力選別機

(1-1) Frantz Ferrofilter (第1図)

S. G. Frantz が1937年 (昭12) に発明 (米国特許 2, 074, 085) したキャニスター型の Wet High Intensity Magnetic Filter で、頭記の名称でよく知られている。メタルスクリーン又はグリッドをマトリックスとしており、この分野の草分けである。日本では同種のものが粘土の脱鉄に用いられている。

(1-2) Jones High Intensity Wet Magnetic Separator

^{b)} 磁界条件 (Field condition) は、1963年 (昭38) 日鉱誌第83巻第947号において、八嶋、俣川が提案した $H \cdot dH/dx$ で、これは Force index あるいは Force density ともいうが、磁気分離を論ずる場合、後述(2)式において d, ρ, χ は粒子側の条件であるのに対し、 $H \times dH/dx$ は磁気分離機の場合の条件として重要なので、この $H \cdot dH/dx$ を磁界条件と称することにした。

(第2図、第3図)

G. H. Jones が1955年 (昭30) に発明 (英国特許 768, 451及び767, 124) したもので、2個のコイルを鉄芯で連結して磁気回路を構成し、鉄芯の一部を切った空間に発生する磁場の中に波鉄板をマトリックスとしたキャニスターを置いている。Jones のこの磁選機は WHIMS の代表例であって、連続式 (第3図) がよく知られており、20 KOe まで出るといわれる。本機はブラジルの CVRD, Caué 鉱山で1970年 (昭45) に採用され⁵⁾、Conceição 及び Ferteco でもヘマタイトの選鉱に稼働しており、カナダの Quebec Cartier 及び Sidbec-Dosco では低シリカの Superconcentrate の製造に用いられている。

第1図 Frantz Ferrofilter

第3表 H , $\frac{dH}{dx}$, $H\frac{dH}{dx}$

区 分	磁 選 機 名	磁場 H	磁場勾配 $\frac{dH}{dx}$	磁界条件 $H\frac{dH}{dx}$
		Oe	Oe/cm	Oe ² /cm
Conventional Low-intensity	Drum	0.5×10^3	0.5×10^3	0.25×10^6
	Davis Tube Tester	4×10^3	4×10^3	16×10^6
High-power	High-intensity — Frantz Ferrofilter	10×10^3	100×10^3	$1,000 \times 10^6$
	— Jones	20×10^3	200×10^3	$4,000 \times 10^6$
	High-gradient-Kolm-Marston (SALA)	20×10^3	$2,000 \sim 20,000 \times 10^3$	$40,000 \sim 400,000 \times 10^6$

(1-3) Carpco High Intensity Wet Magnetic Separator

(第4図)

マトリックスとしてボール、立方体、曲ったロッドを使っている。

(1-4) Eriez Wet High Intensity Magnetic Separator

(第5図)

マトリックスとしてエキスパンドメタル或いはそれとスチールウールとのサンドイッチを使用している。

(1-2), (1-3), (1-4) の三機種に共通する特徴は, (1-2) Jones の項で書いたように, いずれも鉄芯の空隙に生じた磁場を利用しているため, 磁場の方向と処理物の流れの方向が直交している点で, これが Frantz 及び次に述べる SALA-HGMS® との大きな相違点の一つである。

第2図 Jones の WHIMS 原理概念図

第3図 Jones High Intensity Wet Magnet Separator

第4図 Carpco High Intensity Wet Magnet Separator

(2) 高勾配磁気分離機 (SALA-HGMS® 高勾配磁気分離機) (第6図, 第7図, 第8図)

これは発明者らの名前をとって Kolm-Marston 型磁気分離機ともいわれ, 基本特許として1968年(昭43)米国特許3,567,026及び1969年(昭44)同3,627,678がある。この実用化を米国 SALA Magnetics, Inc. が行ない, SALA-HGMS® 高勾配磁気分離機として世に出した。その構造的特徴は, 第6図に示すようにソレノイドコイルの内部磁場そのものをワーキング空間として使用し, そこに強磁性細線として耐摩耗耐蝕性エキスパンドメタル, スチールウールを入れたキャニスターを使っている点であるが, 磁気回路を形成させるためコイル外部をリターンフレームという鉄枠で囲んで

磁気漏洩が殆どないのも特徴である。本機には Cyclic type (固定式, 第7図) と Carousel type (回転連続式, 第8図) がある。

4. 高勾配磁気分離の原理

磁気分離の理論モデルには力の釣り合いモデル (Force Balance Model) と粒子航跡モデル (Particle Trajectory Model) がある。後者は着目粒子がマトリックスフィラメントに捕捉されるまでの運動軌跡を論ずるものであるが, 本稿では前者によって説明を進めることとする。

強磁性または常磁性粒子は磁場内に置かれると第9図(a), (b)に示すように両端に磁極を生ずるため力 F_N, F_S を受ける。(a)の場合は, 均一磁場(磁束密度がどこでも一樣)であるため, $F_N = F_S$ となって, 見掛け上粒子には磁気力が働かない。一方(b)の場合には, 不均一磁場であるために $F_N > F_S$ となり F_N の向きに $F_N - F_S$ だけの磁気力が粒子に働いて粒子は引っ張られる。この(b)のように磁束密度が不均一であるところを磁場勾配があるという。

H. H. Kolm らは均一磁場の中に透磁率の大きい細線を置くことによって細線周囲に大きい磁場勾配を作った。これを第10図で説明すると, 直径 D なる円形断面を有する強磁性細線が磁場 H の中に置かれているとき, 細線表面近く点 P では $H + 2\pi J$ (J は細線の磁化であり, 飽和磁化を J_s とすると $2\pi J_s \cong 20,000$ Gauss 程度) なる磁場となるのに対し, P より ℓ だけ隔った点 Q での磁場は $\ell \cong D$ だけ離れれば H そのものとなる。従って PQ 間の平均磁場勾配は $dH/dx = 2\pi J/\ell \cong 2\pi J/D$ となる。

従って, 強磁性細線により作られた勾配のある磁場の中に粒子が置かれた場合, 第11図の模式図に書かれてい

第5図 Eriez Wet High Intensity Magnetic Separator

第6図 SALA-HGMS® の原理概念図

第7図 SALA-HGMS® Cyclic type

る様に、70のような非磁性粒子はそのままであるが、磁性粒子68は力を受けて66のように細線表面に磁着捕捉されてしまう。

ここで、粒子に働く力として磁気力 F_M とそれに抗する力 (重力 F_G , 流体抗力 F_D) について考えてみる。直径 d cm, 体積 V cm³, 密度 ρ g/cm³, 帯磁率 χ emu/g の常磁性粒子が、磁場 H Oe, 磁場勾配 dH/dx Oe/cm の中にあるとき、粒子の磁化 (単位体積あたりの磁気能率) を M Gauss, 磁気力を F_M dyne とすると

$$M = \rho \chi H \quad (1)$$

$$F_M = VM \frac{dH}{dx} = (\pi/6) d^3 \rho \chi H \frac{dH}{dx} \quad (2)$$

となる。また前述の通り

$$dH/dx = 2\pi J/D \quad (3)$$

となる。

(1)式によれば、磁場 H を強くすれば粒子の磁化 M も比例して大きくなるが、 H の強さは工業用水冷電磁石で 20 KOe 程度が限度である。一方 dH/dx は D 一定の細線に対しては $2\pi J$ と同一傾向をとっては H に比例して増大していくので、細線、粒子とも磁気飽和していない段階では $F_M \propto H^2$ となり、また細線が飽和しても粒子が飽和していない場合には $F_M \propto H$ となる。

細線を磁場の方向と平行においた L 配置 (Longitudinal Configuration) では、比較的低い磁場で細線は磁気飽和してしまうが、細線を磁場と直角においた T 配置 (Transversal Configuration) の場合には、細線の反磁場係数が大きいので磁化しにくく、10 KOe 程度以上でようやく飽和に近づく。

ところで、(3)式からわかるように、細線の直径 D を一桁小さくすれば dH/dx は一桁大きくすることができるので、 χ, d の小さい粒子でも F_M を大きくすることができる。

一方磁気力に対抗する力については、

$$F_G = (\pi/6) d^3 \rho g \quad (4)$$

$$F_D = 3\pi \eta d v \quad (5)$$

と書ける。

そこで、 $\rho = 3$ g/cm³, $\chi = 10 \times 10^{-6}$ emu/g の粒子を磁場 $H = 20,000$ Oe の条件で処理流速 v cm/sec をいろいろ変えて処理した場合に、 d cm なる直径の粒子を磁気捕捉し得る最大細線径 D cm がどうなるかを、筆者らが行った計算によって半定量的に考察してみたい。

細線に捕捉された粒子が離脱しない条件は $F_M \geq F_G + F_D$ であるから、 $R = F_M / (F_G + F_D) = 1$ となる D を第4表、第5表から求めると第6表のようになる。

第8図 SALA-HGMS® Carousel type

第9図 (a) 均一磁場
(b) 不均一磁場

第10図 T配置における磁場勾配

つまり、帯磁率 $10 \times 10^{-6} \text{ emu/g}$ (例えば、酸化第二銅 CuO では $3 \times 10^{-6} \text{ emu/g}$) の 1μ の粒子を、流速 0.28 cm/sec で流した時は 10μ 以下の細線が必要になる。

第11図 強磁性細線と粒子の捕捉

5. SALA-HGMS® 高勾配磁気分離機の構造及び特徴

第12図は、WHIMS と SALA-HGMS® の電磁石の大きさを比較したものである。また第13図は Cyclic type

第4表 F_M

D cm	$\frac{dH}{dx}$	$H \frac{dH}{dx}$	各 d に対する F_M		
			$d=10^{-4}$ (1 μ)	$d=10^{-3}$ (10 μ)	$d=10^{-2}$ (100 μ)
0.1	2×10^5	4×10^9	6×10^{-8}	6×10^{-5}	6×10^{-2}
0.01	2×10^6	4×10^{10}	6×10^{-7}	6×10^{-4}	6×10^{-1}
0.001	2×10^7	4×10^{11}	6×10^{-6}	6×10^{-3}	6

第6表 D at $R=1$

v cm/sec (m/Hr)	各 d に対する D cm		
	$d=10^{-4}$ (1 μ)	$d=10^{-3}$ (10 μ)	$d=10^{-2}$ (100 μ)
0.028 (1)	0.01	1	1
0.28 (10)	0.001	0.1	1
2.8 (100)	0.0001	0.01	1

第5表 $F_G + F_D$

v cm/sec	(m/Hr)	各 d に対する $F_G + F_D$		
		$d=10^{-4}$ (1 μ)	$d=10^{-3}$ (10 μ)	$d=10^{-2}$ (100 μ)
0.028	(1)	3×10^{-7}	5×10^{-6}	2×10^{-3}
0.28	(10)	3×10^{-6}	3×10^{-5}	2×10^{-3}
2.8	(100)	3×10^{-5}	3×10^{-4}	5×10^{-3}

の動作概念図及び操作サイクル構成例である。ここに見られる通り、Cyclic type はバッチ式であるが、プロセスコントローラーを使って繰り返し操作することにより連続処理を行なうことができる。

SALA-HGMS® の大きさについていうと、Cyclic type では 10-15-5 (数字は、コイル内径 cm-マトリックス厚さ cm-最大定格磁場 KOe を表わす) という試験機から、カオリン精製に使われている 214-51-19 (乾量で 60 ton/時)、廃水処理用の 305-15-5 (鉄鋼廃水 2,000~6,000 m³/時) まであり、一方 Carousel type には 185-10 (数字はリング中心径 cm-最大定格磁場 KOe) から 480-03-03-03 (3 KOe が 4 ヘッド付いたもので、鉄鉱石 400 ton/時) までがある。

次に、本機の特徴のうち主なものをいくつかを挙げれば次のようになる。

- (1) マトリックスの種類が豊富で、処理物の性状に応じた最適のものが選択できる。
- (2) マトリックスの空間率が 87~95% と大きいので、非磁性粒子が通り易く圧力損失が少ない。
- (3) マトリックスエレメントの総表面積が大きいため、着磁物の捕捉場所が多い。
- (4) 重力フィードのほか、下方からポンプ圧入フィードができるため、気泡による磁着妨害がない。
- (5) 磁場の方向と処理物の流れの方向とが一致しているため、着磁物による閉塞が起きない。
- (6) Carousel でも、リングと電磁石との間を特殊なシール構造としているため、流速制御が容易である。
- (7) 可動部分が軽量で、駆動電動機が小さくて済む。
- (8) 漏洩磁束が殆どない。またマトリックスの残留磁気が少ないため、着磁物の取出しが十分に行なわれる。
- (9) 試験結果のスケールアップが確実、容易にでき、大型機を作り易い。

一方問題点もないわけではなく、その一つはマトリックスの耐磨耗性で、鉄鉱石のように粒度の粗い、硬度の高い鉱石を高速大量処理する場合には、まだ改善の余地があるものと考えられる。また、粗い粒子がマトリックスに機械的に捕捉されとか、あるいは着磁物が極少量でも残留蓄積していった場合には、マトリックスの性

今までの一般的の高磁力磁選機 (WHIMS) の磁気回路

SALA-HGMS® 磁気回路 (Kolm-Marston型)

第12図 電磁石の大きさの比較

第13図 Cyclic type 動作概念図及び操作サイクル例

能劣化が考えられ、この対策としては、数カ月ないしは数年ごとにマトリックスを解体し、圧力水で洗浄するという方法がとられているが、その際少しずつではあってもスチールウールのような元素は脱落していくので、長年月の間にはマトリックスの更新が必要となる。

SALA-HGMS® がカオリン精製に偉力を発揮していることは前に述べたが、本機以前に開発されていた Jones High-Intensity Wet Magnetic Separator が SALA-HGMS® に先立つ1966～68年(昭41～43)に試験的にカオリン精製に使われたことがある。しかしその成績は芳しくなく、経済性もないため採用されなかった。それに関して J. Iannicelli は次に示すものを含め11項目の問題点を挙げている⁶⁾。

- 重力フィードに限られるため、処理物が磁場を通過する滞留時間の調整が困難である。
- 漏洩磁束が多い。
- 波鉄板をマトリックスとしているために、磁性物粒子を捕獲する面積が小さい。
- 磁場勾配が小さいため微細な粒子を捕捉できない。

6. 適用分野及び実験例⁷⁾

SALA-HGMS® 高勾配磁気分離機を用いて筆者らが

行った試験のうちから、いくつかの結果を拾って次に述べる。

使用した試験装置

SALA-HGMS®

Cyclic type MODEL 10-15-20 全自動式及び

Cyclic type MODEL 10-15-5 手動式

キャニスター(直径3.5インチ及び1.5インチ)受電設備、直流電源装置、プロセスコントローラー、用水設備、圧縮空気設備、給鉍設備、薬剤添加設備、その他

(1) 陶磁器原料

第7表のように Fe_2O_3 と同時に TiO_2 が除去できる特徴があり、白色陶磁器原料処理に対しては特に有利である。

(2) 珪砂粉

従来の湿式高磁力磁選機では Fe_2O_3 品位を下げる事ができず、歩留も非常に低いという不十分な結果であった。かような微細な珪砂粉に対し、SALA-HGMS® を適用して第8表のような優秀な成績が得られた。

(3) 低品位ヘマタイト鉍に対する SALA-HGMS® とシリカ逆浮選との組合せ処理

固体比重 3.6
 スラリー濃度 30~40 wt%
 原鉱分析品位 T. Fe 37%
 SiO₂ 47%

第9表の Mags 2 から、デアミンを用いたシリカ
 浮選により T. Fe 64~66%の Final Concentrate が
 得られた。

特徴としては、(1) SALA-HGMS® は微粒の低

第7表 陶磁器原料

銘柄	磁場 KG	産物 区分	固体 比重	泥漿 濃度 wt%	泥漿 pH	粒度分布 wt%		重量 (%)	分析品位 (%)				分布率 (%)	
						-10 μ	-20 μ		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂
陶石	19	原鉱 処理物	2.6	20	7.3	85	92	100	79.0	13.6	0.67	0.020	100	100
								90			0.20	0.011	27	50
カオリン	19	原鉱 処理物	2.5	20	5.5	75	91	100	48.5	34.8	1.15	0.14	100	100
								93			0.60	0.054	49	36

第8表 珪砂粉

泥漿 pH 10.5

固体比重 2.65
 泥漿濃度 1.5~3.0 wt%
 粒度分布 wt%

μ	-2	-4	-6	-8	-10	-20	-30
微粉	11	20	76	91	95	100	
粗粉	4	9	18	32	50	81	88

区分	磁場 KG	原鉱 Fe ₂ O ₃ (%)	Nonmags (脱鉄物)		Mags (着磁物)		
			歩留 (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	歩留 (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ 分布率 (%)
微粉	8	1.3	92.0	0.17	8.0	14.3	88.0
〃	19	1.5	92.0	0.11	8.0	17.5	93.3
粗粉	8	1.4	92.2	0.10	7.8	16.3	93.4

第9表 低品位ヘマタイト

原鉱 TFe 37%			
↓			
-150 mesh 一次磨鉱			
↓			
SALA-HGMS® 粗選 (Preconcentration) 2.6 KOe			
Mags 1		Non-Mags 1	
歩留	70.1%	歩留	29.9%
TFe	50.8%	TFe	3.9%
実収	96.9%	実収	3.1%
↓			
-280 mesh 二次磨鉱			
↓			
SALA-HGMS® 精選 (Grade-up Cleaning) 1.7 KOe			
Mags 2		Non-Mags 2	
歩留	53.3%	歩留	16.8%
TFe	61.4%	TFe	12.2%
実収	88.9%	実収	8.0%
↓			
HGMS-Tailings			
歩留	46.7%		
TFe	8.4%		
実収	11.1%		

第10表 スペキュラーヘマタイト鉱

スペキュラーヘマタイト鉱から Superconcentrate の製造

鉱物種：スペキュラーヘマタイト 石灰石 シデライト ゲーサイト ドロマイト カル
サイト パイライト カルコパイライト

原鉱 52% TFe -250 mesh 粉碎

700 Oe 350 m/Hr にて粗選, 精選1回

Superconcentrate 歩留 43 wt% 粒度分布 -325 mesh 70%

分析値% TFe 68.2 SiO₂ 0.66 Al₂O₃ 0.27 CaO 0.10

MgO 0.23 S 0.02

尾鉱 (粗選尾鉱+精選尾鉱) 歩留 57 wt% TFe 40%

品位ヘマタイト鉱の Preconcentration に対して非常に有効である。(2) 粗選, 精選に SALA-HGMS® を使用すれば脈石スライムが効果的に除去できるので, シリカ除去のための逆浮選が非常にやり易い。

- (4) スペキュラーヘマタイト鉱からの Superconcentrate の製造 (第10表)

本サンプル中にはマグネタイトは全く含まれていないが, 表にある通り 700 Oe という低磁場でもよく磁着できており, これは磁場勾配 dH/dx の大きいことが非常に効いている現われと思われる。

- (5) ボーキサイト鉱及び同種人工試料の脱鉄

①人工試料 (試薬混合物) (第11表)

第11表の如き結果であった。TiO₂ は本来なら

Nonmags へ来るべきであるが, Mags の方が TiO₂ 品位が高くなっている点が注目され, TiO₂ と Fe₂O₃ との何らかの相互作用があるものと考えられる。

②ボーキサイト (第12表)

表の通り, 低品位ボーキサイトに対する選別の可能性がこの試験例から推定される。

- (6) 石炭の脱灰 (第13表)

試験に供した石炭は, 灰分中の鉄分, 無機硫黄分ともに非常に低い原炭であり, 脱灰しにくいものであったが, 20~50%の脱灰率を得た。

- (7) 低品位ウォルフラマイト鉱の粗選 (第14表)

表のように, まず SALA-HGMS® を粗選に使うて濃縮した。この後は比重選鉱と浮選とを組み合わせ

第11表 人 工 試 料 (試薬混合物)

重量% アルミナ 54, 石英 36, 酸化第二鉄 8, 二酸化チタン 2

湿式粉碎 -10 μ

磁場 20 KOe

	重 量 (%)	分 析 品 位 %				分 布 率 %	
		Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂
Mags	24.8	19.2	4.2	44.7	32.0	63.1	47.1
Nonmags	75.2	3.7	1.5	56.5	37.4	36.9	52.9
Total	100.0	7.5	2.2	53.6	36.1	100.0	100.0

第12表 ボ ー キ サ イ ト

原鉱分析値% Al₂O₃ 53.2 Fe₂O₃ 11.5 SiO₂ 5.9 TiO₂ 0.7 Ig.Loss 28.5湿式粉碎 -37 μ

磁場 2.7 KOe 及び 20 KOe

	重 量 (%)	分 析 品 位 %		分 布 率 %	
		Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃
2.7 KOe Mags 1	17.6	22.0	43.7	33.7	14.7
20 KOe Mags 2	26.1	14.1	50.5	32.0	25.0
20 KOe Nonmags 2	56.3	7.0	56.2	34.3	60.3
Total	100.0	11.5	52.5	100.0	100.0

第13表 石 炭

原炭分析値% 固定炭素 42 揮発分 37 灰分 17 全鉄 0.38 全硫黄 0.51 無機硫黄 0.03
粒度 -100 mesh

	重 量 (%)	灰 分 (%)	分布率 (%)		重 量 (%)	灰 分 (%)	分布率 (%)		重 量 (%)	灰 分 (%)	分布率 (%)
Mags	10.5	31.0	19.2	Mags	26.3	23.5	36.0	Mags	30.6	27.4	50.2
Nonmags	89.5	15.3	80.8	Nonmags	73.7	14.9	64.0	Nonmags	69.4	12.0	49.8
Total	100.0	16.1	100.0	Total	100.0	17.2	100.0	Total	100.0	16.7	100.0

せて処理するのが良い。

(8) 選鉱廃水……低品位ヘマタイト鉱処理の赤水中の
浮遊けん濁物除去と水の回収

凝集剤添加量 (ppm)	浮遊懸濁物 (ppm)			磁場 (Koe)	流速 (m/Hr)
	原 水	処理水	除去率		
2	420	7	98.0	2.6	680

上表のように、低磁場で高速処理できる特徴がある。
なお、同じ原水に 2ppm の凝集剤を添加したもの
のから沈降法によって 10ppm の処理水を得る場合
の沈降速度は約 0.6m/Hr 程度であった。

(9) 製紙工場廃水……マグネタイトシーディングによる
磁気浮過

モード粒径 10μ のマグネタイトを廃水中の SS 量
と等量程度を加え、更に硫酸アルミニウム、高分子
凝集剤を添加した後 SALA-HGMS® で処理した。
SS 314ppm の原水から、磁場 3Koe、流速 250m/Hr
で SS 6ppm の処理水が得られた。なお添加したマ
グネタイトは、その約80%が回収再使用できた。

(10) 地熱熱水の脱砒、脱シリカ (第15表)

7. 結 び

筆者らが SALA-HGMS® を用いて行った試験は、広

第14表 ウォルフラマイト 鉱

低品位ウォルフラマイト鉱に対する粗選

分析品位 0.35% WO₃ であるが含鉄鉱物の種類と比率が多い。
鉱 物 種 Fe を含むもの〜ウォルフラマイト、電気石、雲母、シデライト、パイライト、カルコパイライト
Fe を含まないもの〜雲母、長石、石英、モリブデナイト

第15表 地 熱 熱 水

地熱熱水の脱砒 脱シリカ処理

原水 pH 7.7 As 4.1 ppm SO₄ 59 Ca 12 Mg 1 T.SiO₂ 120 Na 113 K 11

条 件	含鉄バクテリア 1000 ppm 10 KOe 85°C	硫酸第二鉄 100 ppm 10 KOe 85°C	同 300 ppm 10 KOe pH 9 85°C
処 理 水	As 0.013 ppm	As 0.038 ppm	T.SiO ₂ 8 ppm
除 去 率	As 99.7%	As 99.1%	T.SiO ₂ 93.3%

い適用分野のうちの極く一部にしか過ぎないが、高勾配磁気分離機は下記の適用例にあげたような広範囲の応用が考えられ、このうち既に報告されているものも少なくない。また本技術を他の物理化学的前処理技術、あるいは比重選別、浮上分離、静電選別といった他の選別方法と組み合わせることによって処理が可能となる場合も考えられる。

適用例

金属鉱物……非磁性鉄酸化鉱物、ウォルフラマイト、クロマイト、イルメナイト、シデライト、コバルト鉱、モリブデン、ボーキサイト、鉛・亜鉛鉱、ウランウム鉱、希土類鉱物、ニオブ・タンタル鉱
石炭の脱硫・脱灰、原油・ナフサ中の鉄異物除去、SRCの脱硫・脱炭
非金属鉱物……カオリン、陶石、セリサイト、けい砂、粘土、閃長岩、カイアナイト、タルク
化学工業の触媒脱鉄及び原料中の鉄分除去
焼却灰処理
赤血球の分離等医学分野への利用
食品、薬品工業への利用
鉱山廃水処理、石炭重選排水中の微粒磁鉄鉱回収
工場廃水中の重金属の除去、製鉄所廃水 SS の除去
地熱熱水の脱砒・脱シリカ
火力・原子力発電所ボイラー復水中の極微量金属除去
含油廃水処理及び油スラッジ処理、油水分離、廃油及び潤滑油処理
生活排水・河川水中のリン分・SS・藻類・大腸菌の除去
メッキスラッジ処理
海水中のウラン回収
気体中の含鉄物質除去、乾式法による固体選別
筆者らは、高勾配磁気分離技術の構成を第16表のよう

第16表

に考えている。この中で Hard というのは HGMS の Device そのものである。Soft を Matrix と Process に区分したのは、SALA-HGMS® では既に述べたようにマトリックスが豊富で、その選定範囲が広いことから、Matrix 技術が Soft の重要な一部分を占めるからである。この Matrix 技術に、粉碎、分級、凝集、分散等の前処理技術と、HGMS 自体の技術から成る Process 技術が組み合わされて初めて Soft が成立するものである。

更に基本的には分析、鉱物及び磁気測定等の測定解析技術が前提となるし、また本技術を工業的に実施し、経済性を見出して人間生活に役立てていくためには、化学、電気、機械等関係各方面の総合的な力が要求されるものと考えている。

研究開発関係に従事されている方々、現場の技術者の方々の関心や協力、ニーズに対する積極的な提言を望んでやまない。

最後に、本稿を発表するにあたり多大の御協力をいただいたサラ・ファー・イースト株式会社及び、サンプルを御提供下された各会社に深甚の謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) Obersteuffer, J. A.: Magnetic Separation: A Review of Principles, Devices and Applications, IEEE Trans. Magn., MAG 10, No. 2, pp 223~238, June, 1974
- 2) Obersteuffer J. A.: High Gradient Magnetic Separation, IEEE Trans. Magn., MAG 9, No. 3, pp. 303~306, Sept, 1973
- 3) H. コールム, J. オバートユーファー, D. ケランド: サイエンス Scientific American 1, 1976 日本版 pp. 22~31
- 4) 八嶋, 俣川, 栗野: 日鉱誌, 第83巻, 第947号
- 5) 向井: 鉄鉱石選鉱の最近の進歩, 浮選, 第25巻, 第3号, 1978 秋季号, pp. 146~157
- 6) Iannicelli, J.: Recent Developments in Magnetic Separation, IEEE Trans. Magn., MAG 12, No. 5, pp. 436~443, Sept. 1976
- 7) 堀田, 俣川: SALA-HGMS® 高勾配磁気分離機の鉱物選別に対する適用試験例について, 化学プロセスへの磁気分離の応用, S 54. 2. 2., pp. 68~73, 理研シンポジウム