

水処理用高勾配磁気分離機「日立マグネフィルタ」

High Gradient Magnetic Filter for Water Treatment "Hitachi Magne-filter"

これまで産業界で利用されてきた従来形の磁気分離機は、粒子径の粗い、しかも強磁性粒子の分離を対象としてきた。一方、最近の高勾配磁気分離法の開発により強磁性粒子はもとより微細な常磁性粒子をも工業的な規模で分離することが可能となり、磁気分離技術の応用範囲が広がられた。

そこで、日立プラント建設株式会社は高勾配磁気分離機の水処理分野への応用を考えて、まず製鉄所廃水へ適用することを検討してきた。その結果、高勾配磁気分離機は高流速下での磁気分離性能の優秀さが立証され、このほど実用1号機として、製鉄所廃水の中でも特に微細な常磁性粒子を含む転炉脱ガス廃水の処理用としての高勾配磁気分離装置を完成した。

この論文では、高勾配磁気分離機「日立マグネフィルタ」の原理、構造及び特長並びにこれの製鉄所廃水への適用例について述べる。

滝野和彦* Takino Kazuhiko

横尾弘一郎* Yokoo Kôichirô

塚原伸一郎* Tsukahara Shinichirô

1 緒言

従来、磁気分離機は鉄を含む比較的粒子径の大きな強磁性粒子の分離を対象として、鉱山、金属工業などの分野で広く用いられてきた。

一方、1970年代初頭に、海洋底の磁性物質の探索に端を発して、高勾配磁気分離法(High Gradient Magnetic Filtration: HGMF)として知られる技術が開発され、非常に高い磁場勾配を容易に、しかも高い空間効率で発生させることができるようになった。

このHGMF技術の開発によって、強磁性粒子はもとより、これまで磁気分離が困難とされていたミクロンサイズ以下の常磁性粒子の磁気分離をも工業的な規模で行なえるようになった。

日立プラント建設株式会社は、1975年にこの基礎技術を米国のサラ・マグネティックス社から導入して、水処理への応用にいち早く取り組み、システムとしての開発を推進してきた。

その結果、1978年1月に、製鉄所廃水の微細な磁性粒子の除去を目的として、その実用1号機を納入した。

以下、この高勾配磁気分離機「日立マグネフィルタ」の原理、構造及び特長、これの適用例などについて概要を述べる。

2 高勾配磁気分離機の原理

高勾配磁気分離法での磁場発生の基本となる原理は、均一な磁場内に曲率半径の極めて小さな部分をもつ磁性媒体(マトリックス)を挿入することによって、その表面近傍で局部的な磁場の疎密ができ、大きな磁場勾配が発生するという事実に基づいている。

いま、図1に示すように曲率半径の極めて小さな部分をもつ磁性媒体を、均一な磁場内に挿入すると磁性粒子が磁性媒体に吸引されるが、この磁性粒子に作用する磁力の大きさは、一般に次式で表わされる。

$$F \propto V \cdot \alpha \cdot H \cdot dH/dx \cdots \cdots (1)$$

ここに F : 磁場中に置かれた磁性粒子に作用する磁力

V : 磁性粒子の体積

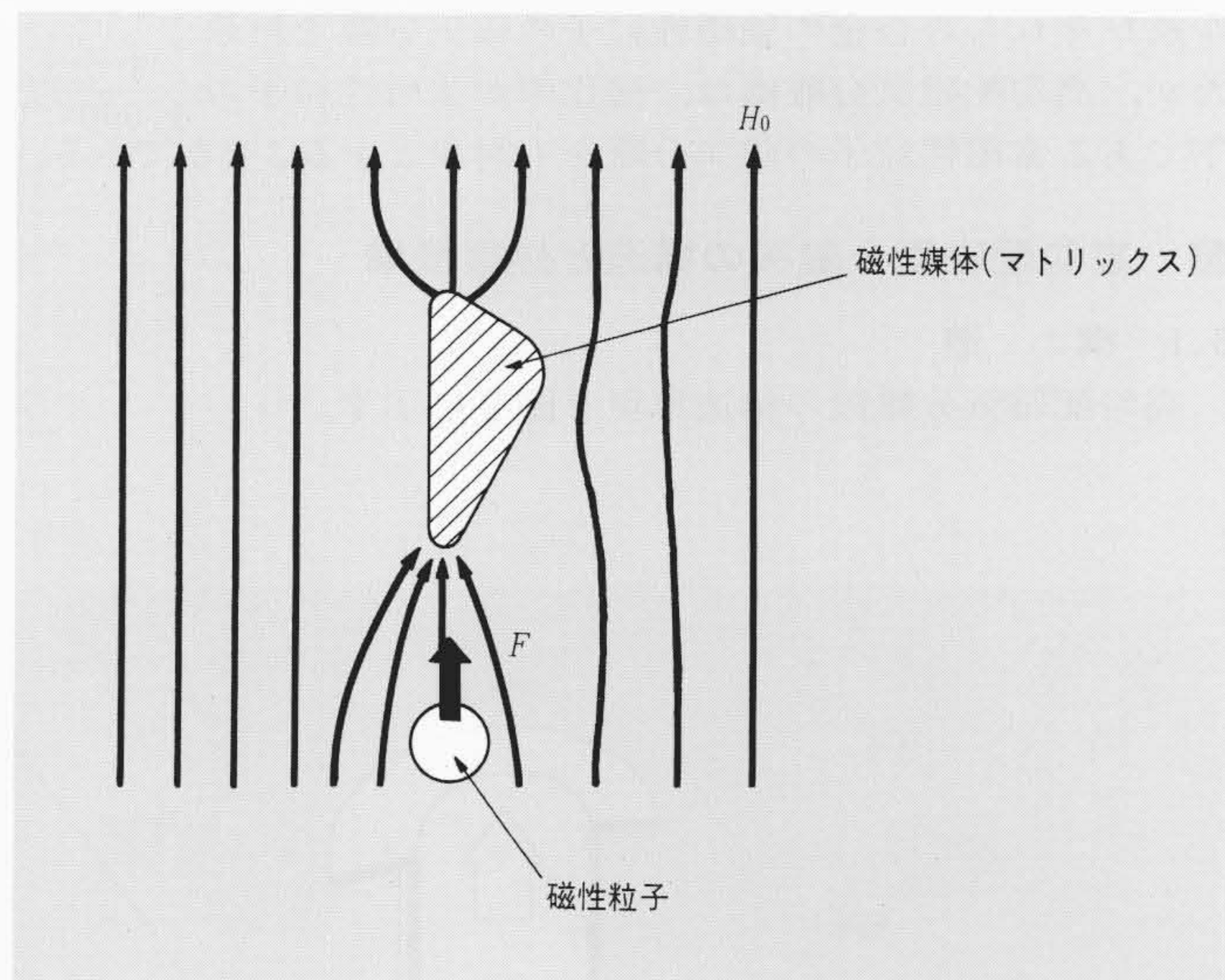


図1 磁場内の磁性媒体と磁性粒子 均一磁場内に曲率半径の小さい磁性媒体を挿入すると、高勾配の磁場が発生し、磁性粒子に強力な磁力が作用する。

α : 磁性粒子の磁化率

H : 磁界の強さ

dH/dx : 磁場勾配

(1)式から固有の体積と磁化率とをもつ磁性粒子をその媒質中から磁気分離させる効率を高めるには、磁界の強さ(H)と磁場勾配(dH/dx)との積を最大にするように工夫すれば良いことが分かる。このことから、高い磁場勾配をもちかつ磁界の強さを大きくとれる磁気分離機が小さな体積の磁性粒子あるいは磁化率の小さな常磁性粒子を、高い分離性能で磁気処理することができるわけである。

高勾配磁気分離機では、この磁場勾配を最大にするために、コイルによって発生させた磁場内に、磁性媒体の一種である線径数ミクロンのウール状充填物を挿入して、表1に示すよ

* 日立プラント建設株式会社

表1 各種磁気分離装置と磁気的性能¹⁾ 高勾配磁気分離機は、常磁性体のCuOに対しても大きな磁力を作用させることができる。

分類	装置名称	物理的外力	磁 気 的 性 能				
			磁力の及ぶ範囲 (cm)	発生磁界の強さ (kOe)*	磁 場 勾 配 (kOe/cm)	力 (dyn/cm ³)	
						Fe ₃ O ₄ に対して	CuOに対して
従 来 形 (永久磁石形分離機)	格子形磁気分離機	重 力	1	0.5	0.5	3 × 10 ⁵	5
	ドラム形磁気分離機	重力, 水力	5	0.5	0.5	3 × 10 ⁵	5
	ディスク形磁気分離機	重力, 水力	5	0.5	0.5	3 × 10 ⁵	5
	ベルト形磁気分離機	重力, 水力	1 ~ 10	0.1 ~ 1	0.1 ~ 1	5 ~ 50 × 10 ⁴	0.2 ~ 20
小 規 模 形 (永久磁石形分離機) (電磁石形分離機)	デビス・チューブ形分離機	重力, 水力	1	4	4	2 × 10 ⁶	3 × 10 ²
	フランツ等磁力線形分離機	重 力	1	10	2	1 × 10 ⁶	4 × 10 ²
フ ィ ル タ 形 (電磁石形分離機)	フランツ・フェロー・フィルタ	水 力	0.1	10	100	1 × 10 ⁸	2 × 10 ⁴
	ジョーンズ形磁気分離機	水 力	0.1	20	200	1 × 10 ⁸	8 × 10 ⁴
	高勾配磁気分離機	水 力	0.01	20	2,000	1 × 10 ⁹	8 × 10 ⁵

注：*kOe=キロエルステッド

うに大きな磁場勾配(2,000kOe/cm)を得ることが可能である。これは永久磁石形分離機の4,000倍の磁場勾配に相当する。したがって、これまで永久磁石形磁気分離機は、鉄、ニッケル及びそれらの合金の強磁性粒子の磁気分離を対象としていたが、高勾配磁気分離機は、磁化率が強磁性粒子の $\frac{1}{1,000}$ 以下である常磁性粒子の磁気分離をも対象とすることができる。

3 高勾配磁気分離機の構造と処理機構

3.1 構 造

高勾配磁気分離機の構造原理を図2に示す。

高勾配磁気分離機は、空心コイルの内部に円筒状立て形圧力容器(Canister)が配置され、それらの外部を、磁気シールドのための帰磁路継鉄(Return Frame)が覆っている。この帰磁路継鉄は、磁場が直流磁場であるため、うず電流の影響が少なく、そのため厚板鋼を使用している。

円筒状立て形圧力容器内部には、磁性媒体のウール状充填物(Matrix Wool)が充填されている。このウール状充填物の線径は、分離対象とする磁性粒子の粒子径に応じてその都度適切なものを選択している。例えば、粒子径が1μm程度のヘマタイトの分離には、ウール状充填物の線径は3μmのものが

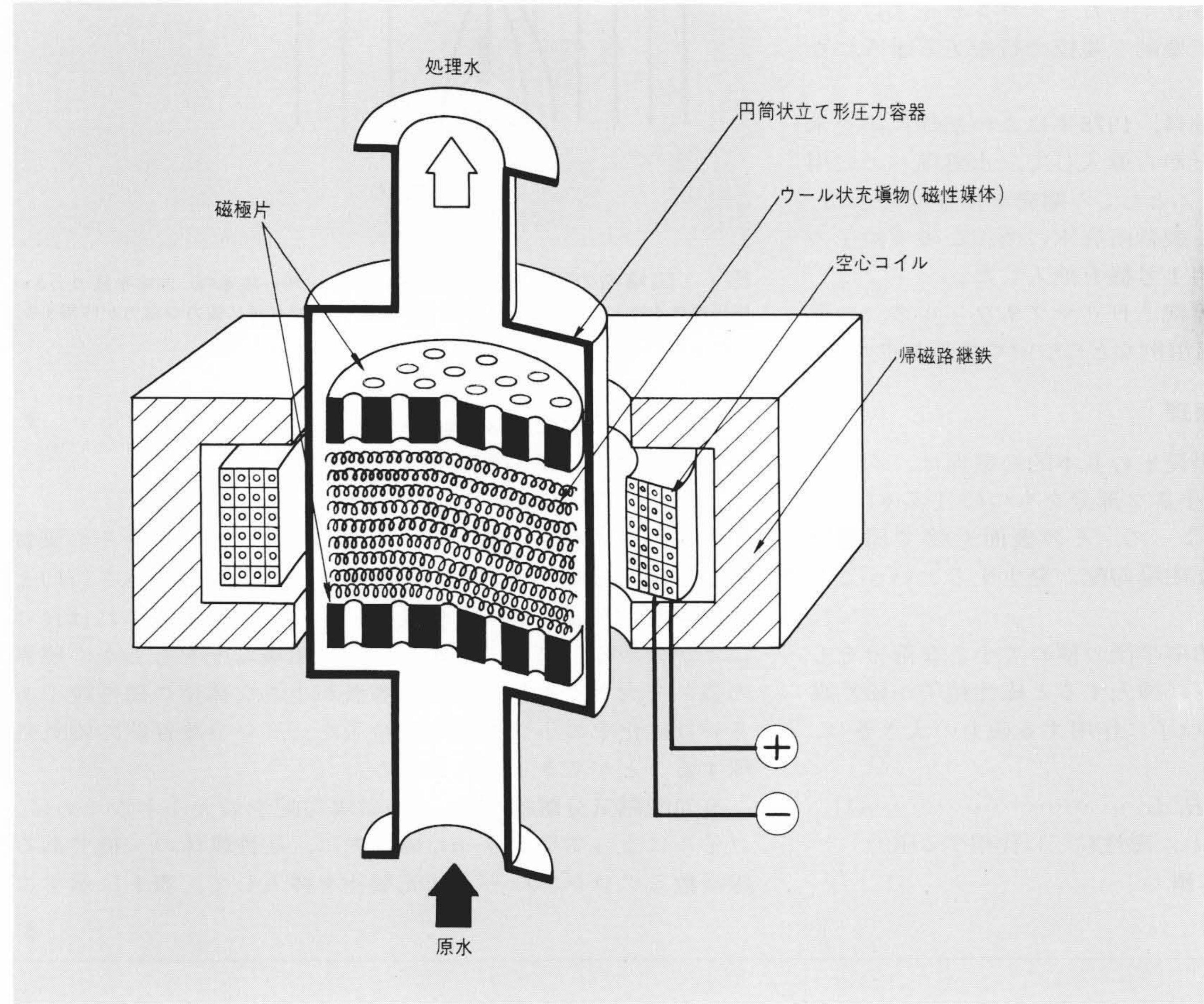


図2 高勾配磁気分離機の構造原理図 原水中の磁性粒子は、高勾配磁気分離機内のウール状充填物に捕捉される。

望ましく、また相当大的い粒子径の場合には、線径数ミリメートルの金網状充填物が用いられている。

更に、円筒状立て形压力容器内部に均一な磁場を形成させるために、磁極(Pole Piece)がウール状充填物をはさむような形で上下に設けられている。

3.2 処理機構

- 高勾配磁気分離機の処理機構は、次のように行なわれる。
- (1) 空心コイルに直流電源装置から直流電源を流す。
 - (2) それにより、直流電流の大きさに比例した強力な磁場が円筒状立て形压力容器内に発生し、磁場は磁極によって均一化される。
 - (3) 均一化された磁場によって、ウール状充填物を磁化する。
 - (4) 磁場は、磁化されたウール状充填物のために乱れを生じ、局部的に磁束の疎密ができ、高磁場勾配となる部分が多数発生する。
 - (5) そこに、磁性粒子を含んだ原水を下方から上向流で送水すると、原水中の磁性粒子はウール状充填物に大きな磁力で捕捉され、磁気分離される。
 - (6) 磁性粒子が一定量分離された後、磁気分離の性能を回復させるために自動的に逆洗が行なわれる。逆洗時には直流電源を切り、洗浄水(通常、処理水が使用される)を上向流あるいは下向流いずれかの形で洗浄を行ない、ウール状充填物に捕捉されている磁性粒子を洗い出す。

4 高勾配磁気分離機の特長

高勾配磁気分離機の大きな特長は次の2項である。

(1) 常磁性微粒子の磁気分離が可能である。

前述のように、高勾配磁気分離機は、磁場勾配が高いために微細な常磁性粒子の磁気分離が可能である。

一般に、磁性体は、物質内部の磁氣的構造(3d殻の不対電子のスピンのよる強磁性、遷移元素・希土類元素などの不完全殻の電子のスピンのよる弱磁性、アルカリ金属などにみられる伝導電子のスピンのよる弱磁性など)によって磁気感受性に強弱があり、それらの磁化の程度は、物質の磁化率と称される。表2に主な化合物の磁化率を示すが、この表中でプラスの磁化率をもつ常磁性物質は、高勾配磁気分離機で磁気分離が可能である。

図3に、日立プラント建設株式会社が製作した高勾配磁気

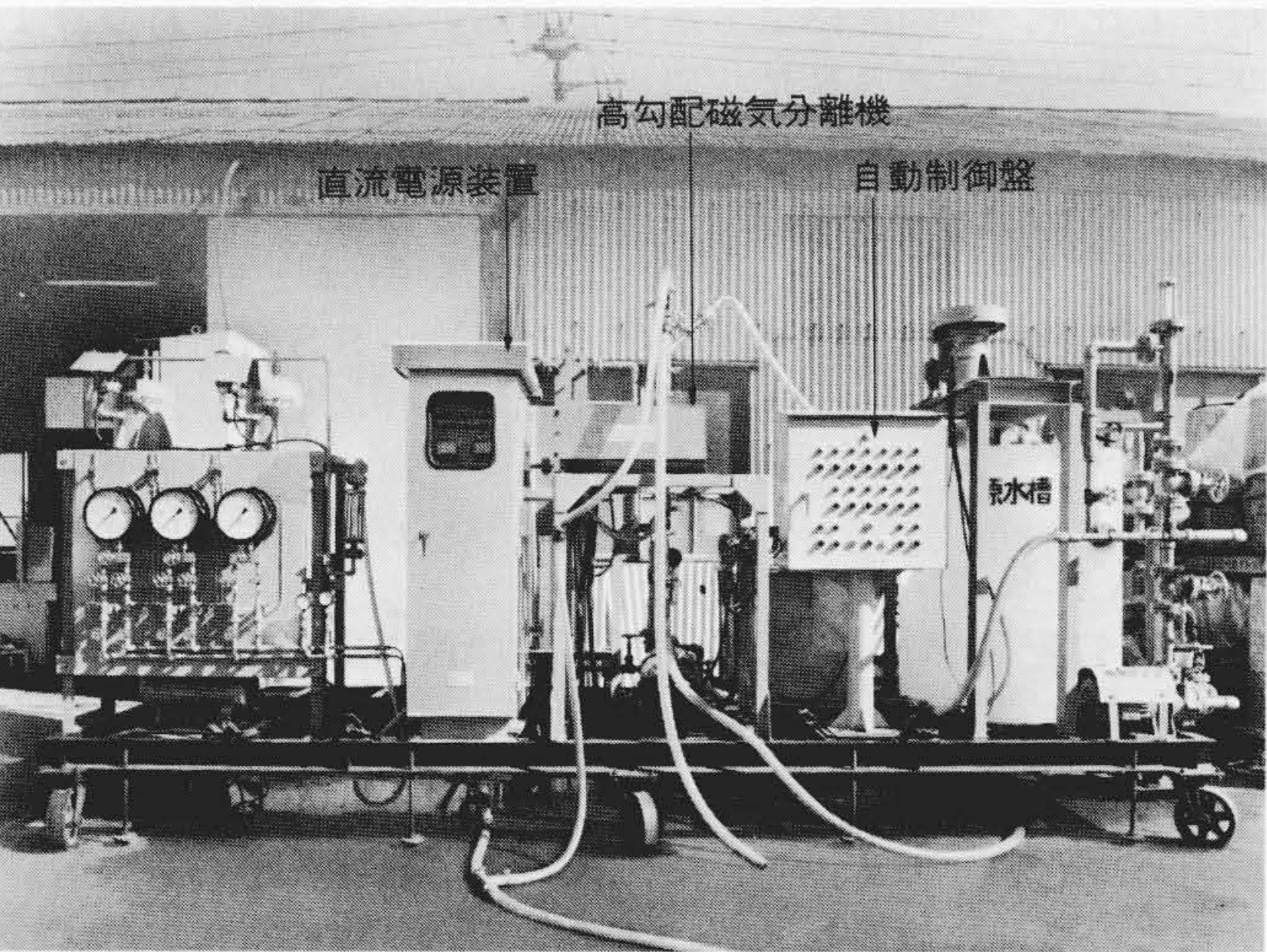


図3 高勾配磁気分離機実験装置の外観 高勾配磁気分離機の内径は直径90mm、容量は3 m³/hで中央の架台上に本体がある。

表2 主な化合物の磁化率²⁾ 高勾配磁気分離機では、プラスの磁化率をもつ常磁性物質も磁気分離できる。

化 合 物	温 度 (K)	磁化率 (×10 ⁻⁶)
Al	ord.	+ 16.5
Al ₂ O ₃	ord.	- 37.0
Al ₂ (SO ₄) ₃	ord.	- 93.0
Cr	273	+ 180.0
Cr ₂ O ₃	300	+ 1,960.0
Cr ₂ (SO ₄) ₃	293	+ 11,800.0
Co	—	ferro.
Co ₂ O ₃	ord.	+ 4,900.0
Cu	296	- 5.46
CuO	289.6	+ 238.9
CuSO ₄ ·H ₂ O	293	+ 1,520.0
Fe	—	ferro.
FeCO ₃	293	+ 11,300.0
FeO	293	+ 7,200.0
Fe ₂ O ₃	1,033	+ 3,586.0
FeSO ₄ ·7H ₂ O	293	+ 11,200.0
Pb	289	- 23.0
PbO	ord.	- 42.0
Mg	ord.	+ 13.1
Mg(OH) ₂	288	- 22.1
MgO	ord.	- 10.2
Mn	293	+ 529.0
MnO	293	+ 4,850.0
Mn ₂ O ₃	293	+ 14,100.0
MnSO ₄	293	+ 13,660.0
Mo	293	+ 89.0
Mo ₂ O ₃	ord.	- 42.0
MoO ₂	289	+ 41.0
Ni	—	ferro.
NiO	293	+ 660.0
Ni(OH) ₂	ord.	+ 4,500.0
Ti	293	+ 153.0
Ti ₂ O ₃	298	+ 125.6

注：ord.=常温 ferro.=強磁性体

分離機「日立マグネフィルタ」の実験機の外観を、図4にこの実験機で行なった常磁性粒子(Cr₂O₃、Fe₂O₃)の除去結果を示す。図4からも分かるように、常磁性粒子は3 kOe程度の比較的低い磁場でも十分に分離されている。

(2) 大容量処理が可能であり、かつ経済的に有利である。

永久磁石形磁気分離機など従来形の磁気分離機は、比較的小容量のものを対象としており、本体製作材料の価格の大部分を永久磁石が占めている。また、処理水量に比例して永久磁石が必要となってくるために、装置価格も処理水量に比例して大きくなる傾向にある。

一方、高勾配磁気分離機は、空心コイル形電磁石を採用しているために、図5に示すように一定磁場の発生で、処理水量が高勾配磁気分離機の内径の2乗に比例して大きくとれるにもかかわらず、コイル材の総量はおよそ内径の1乗に比例する。したがって、コイル材の材料費が大半を占める高勾配磁気分離機の装置価格は、処理水量が大きくなると割安となるため大容量処理に有利である。

現在、日立プラント建設株式会社では、5 m³/hの実験用から約3,000m³/hの処理能力をもつ内径3 mの大形高勾配磁気分離機までを製作している。

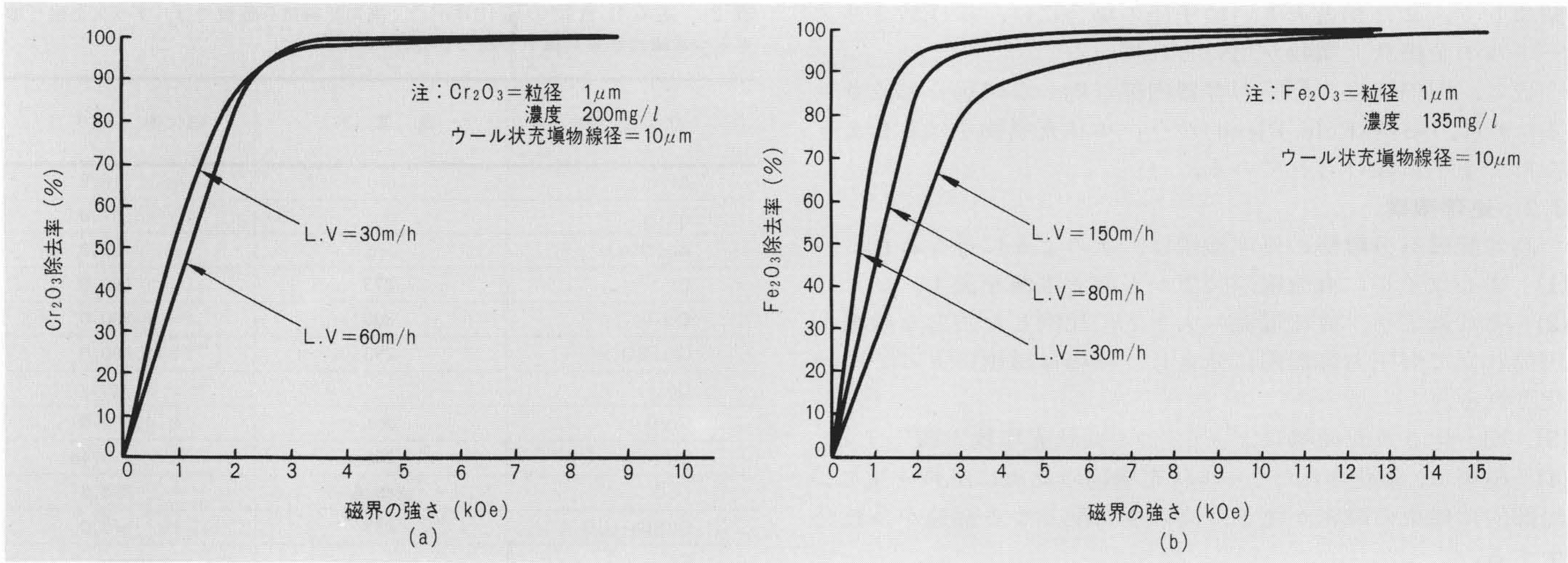


図4 高勾配磁気分離機による常磁性粒子の除去結果 3 kOe程度の磁場で、常磁性微粒子が十分に除去されている。

5 高勾配磁気分離機の主要設計項目

高勾配磁気分離機を水処理に応用する場合、主として次に示す項目について検討しなければならない。

- (1) 汙過速度(L.V)
- (2) 磁界の強さ
- (3) 充填物(磁性媒体)の種類
- (4) 充填物のSS(浮遊固形物)負荷

高勾配磁気分離機の汙過速度は、分離対象廃水中の磁性粒子の種類、粒子径などによって異なるが、粒径1μm程度の常磁性微粒子の分離には、50～100m/hの汙過速度がとれ、製鉄所廃水の処理には、200～1,000m/hまでの汙過速度がとれる。

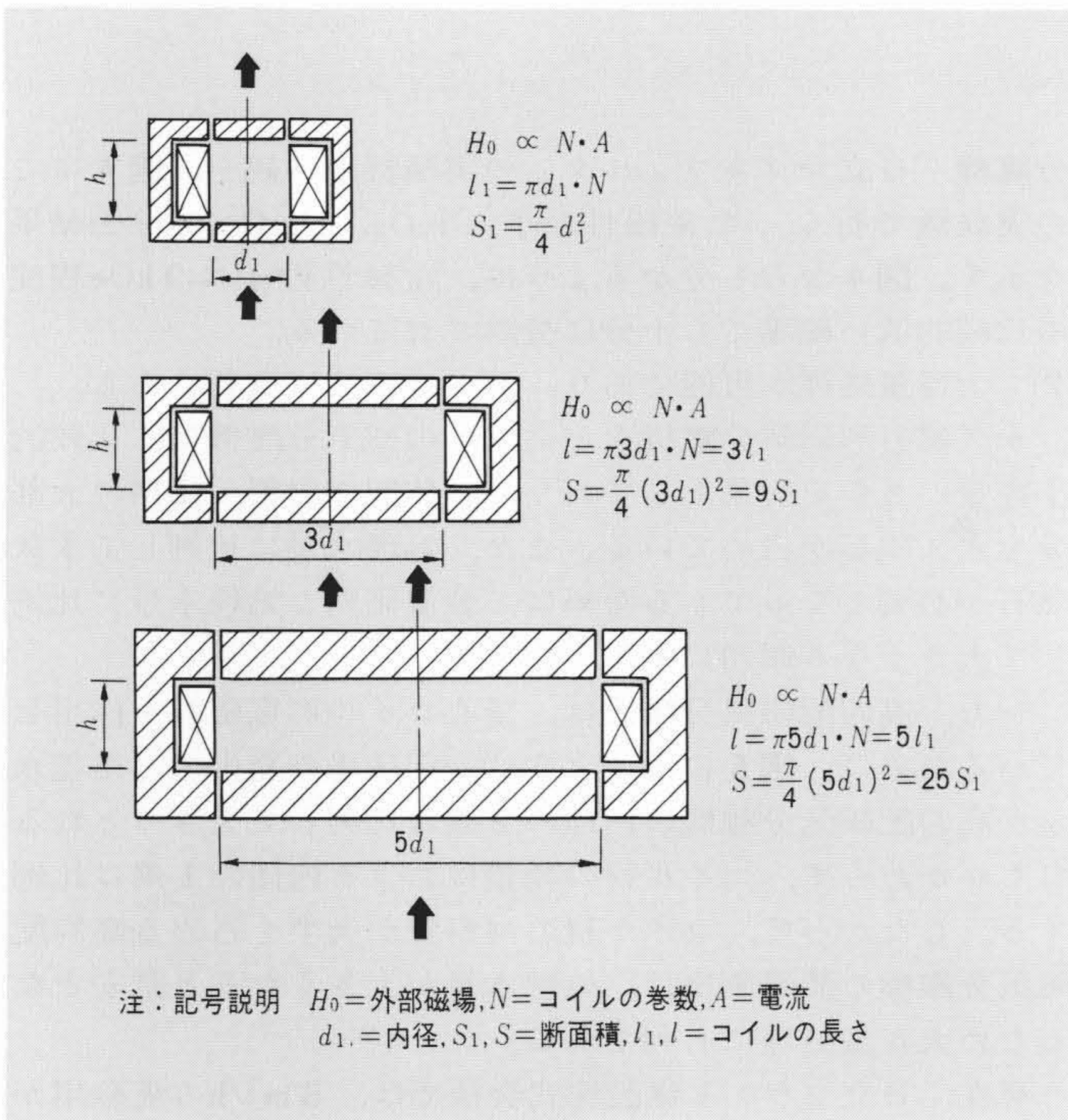


図5 高勾配磁気分離機の内径によるコイル長さと断面積の比較 磁極間距離が同一の高勾配磁気分離機は、内径が大きいほうが有利である。

この汙過速度は、通常水処理に使用されている高速汙過機の10～30倍、沈殿池の100倍に相当する処理速度である。これは、製鉄所廃水中のSSがマグネタイトやヘマタイトなどの比較的磁化率の大きい磁性粒子であり、しかも粒子径が大きい(5～100μm)ためと考えられる。

5.1 磁界の強さ

通常、高勾配磁気分離機の磁界の強さは、印加外部磁場で表現され、測定には、ホール効果を利用したガウスメータやサーモコイルによる磁束計などが使用される。

製鉄所廃水を対象とした場合に、磁界の強さは通常3 kOe程度であり、なかでも連続鋳造廃水では1 kOeでも処理ができる。

5.2 充填物の種類

充填物の種類は、その材質、形状などで、多くの種類がある。充填物の特性としては、磁化されやすく、残留磁気の小さい材質が望ましく、しかも適度な機械的強度と耐腐食性をも合わせて要求される。

5.3 充填物のSS負荷

高勾配磁気分離機で、適切な汙過速度と磁界の強さで磁気分離を行なう場合、分離時間とともに磁性粒子が充填物に堆積し分離効果が低下してくる。そこで、分離効果の許容値までの捕捉粒子の累積捕捉総量(乾燥状態で)の充填物体積に対する比を、高勾配磁気分離機充填物のSS負荷と称し、1サイクル当たりのSS捕捉限界量を次の(2)式によって規定している。

充填物のSS負荷 = $\frac{\text{限界捕捉SS量(g)}}{\text{充填物体積(cm}^3\text{)}} \dots\dots\dots (2)$

磁性粒子が強磁性体の場合は、充填物のSS負荷は、5～7 g/cm³にとることができ、常磁性体の場合は1～1.2g/cm³程度である。この充填物のSS負荷の決定によって、1サイクルの分離時間、逆洗方法、逆洗水量などが定められる。

6 高勾配磁気分離機の各種製鉄所廃水への適用例

前述したように、高勾配磁気分離機は、強磁性粒子はもとより微細な常磁性粒子をも磁気分離でき、しかも大容量処理に極めて有利であることから、大容量で磁性粒子の多い製鉄所廃水の処理に適した装置である。

以下、日立プラント建設株式会社で行なった各種製鉄所廃水への適用例について述べる。

6.1 各種製鉄所廃水のSS性状

製鉄所廃水には、製造工程によって各種の廃水がある。主な廃水としては、溶鋳炉ガスの洗浄廃水である高炉スクラバ廃水、転炉ガス洗浄廃水の転炉スクラバ廃水、熱間圧延工程でのプレスローラ冷却水、連続鋳造工程でのスプレー廃水などがある。通常これらの廃水は、廃水中のSS分を除去したのち再び冷却用水などとして再利用されることが多い。

これら各種製鉄所廃水中のSSの化学組成及び粒径分布を表3に示す。

転炉スクラバ廃水、熱間圧延冷却廃水及び連続鋳造スプレー廃水中のSSの化学組成は、鉄の酸化物が多い(約90%)が、高炉スクラバ廃水では、鉄の酸化物が他の廃水に比べその含有率が少なく(50%)、逆に、C、SiO₂、CaOなどの反磁性物質の含有率が高い。

一方、粒径分布では、廃ガス中のダストに起因する高炉スクラバ廃水及び転炉スクラバ廃水中のSSは微細で、高炉スクラバ廃水では40 μ m以下のものが87.2%、20 μ m以下のもの

が58.2%を占め、また、転炉スクラバ廃水ではそれぞれ89.0%、86.3%である。一方、熱間圧延冷却廃水及び連続鋳造スプレー廃水中のSSはミルスケールが主であり、粒子径は比較的大きく100 μ m以上がそれぞれ35.2%、95.7%である。

6.2 各種製鉄所廃水の処理実験結果

上記各種製鉄所廃水を、高勾配磁気分離機の実験機で処理した結果を図6に示す。この図から除去効果は、各廃水とも約3kOeの磁場で十分に処理されており、これは、各廃水中のSSの磁化飽和磁場とよく一致する。また、転炉スクラバ廃水、熱間圧延冷却廃水及び連続鋳造スプレー廃水では、廃水中のSSの大部分が強磁性・常磁性粒子であるため、汜過速度を高速(450m/h)にとっても容易に処理目標値以上の効果が得られる。一方、反磁性粒子のC、CaCO₃などを約30%程度含む高炉スクラバ廃水は、直接、高勾配磁気分離機で処理しても目標値に達することができない。しかし、原水中にあらかじめ若干量の高分子凝集剤を添加することにより、これらの反磁性粒子をも分離でき、しかも汜過速度500m/h程度で

表3 各種製鉄所廃水中SSの化学組成と粒径分布 高炉スクラバ廃水は、他の廃水に比べ反磁性体が多い。

廃水名称	主 な 化 学 組 成 (%)						粒 径 分 布 (%)				
	Fe ₂ O ₃	C	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	100 μ m以上	100～40 μ m	40～20 μ m	20～5 μ m	5 μ m以下
高 炉 ス ク ラ バ 廃 水	52.3	13.1	6.2	4.9	4.1	1.7	5.0	7.8	29.0	28.5	29.7
転 炉 ス ク ラ バ 廃 水	95.9	1.1	0.4	2.0	0.1	0.2	8.25	2.75	2.75	86.0	0.25
熱 間 圧 延 冷 却 廃 水	90.5	0.1	0.05	0.07	0.02	0.13	35.2	29.3	29.5	6.0	—
連 続 鋳 造 ス プ レ ー 廃 水	89.1	0.3	0.55	0.11	0.06	0.26	95.7	3.7	0.15	0.3	0.15

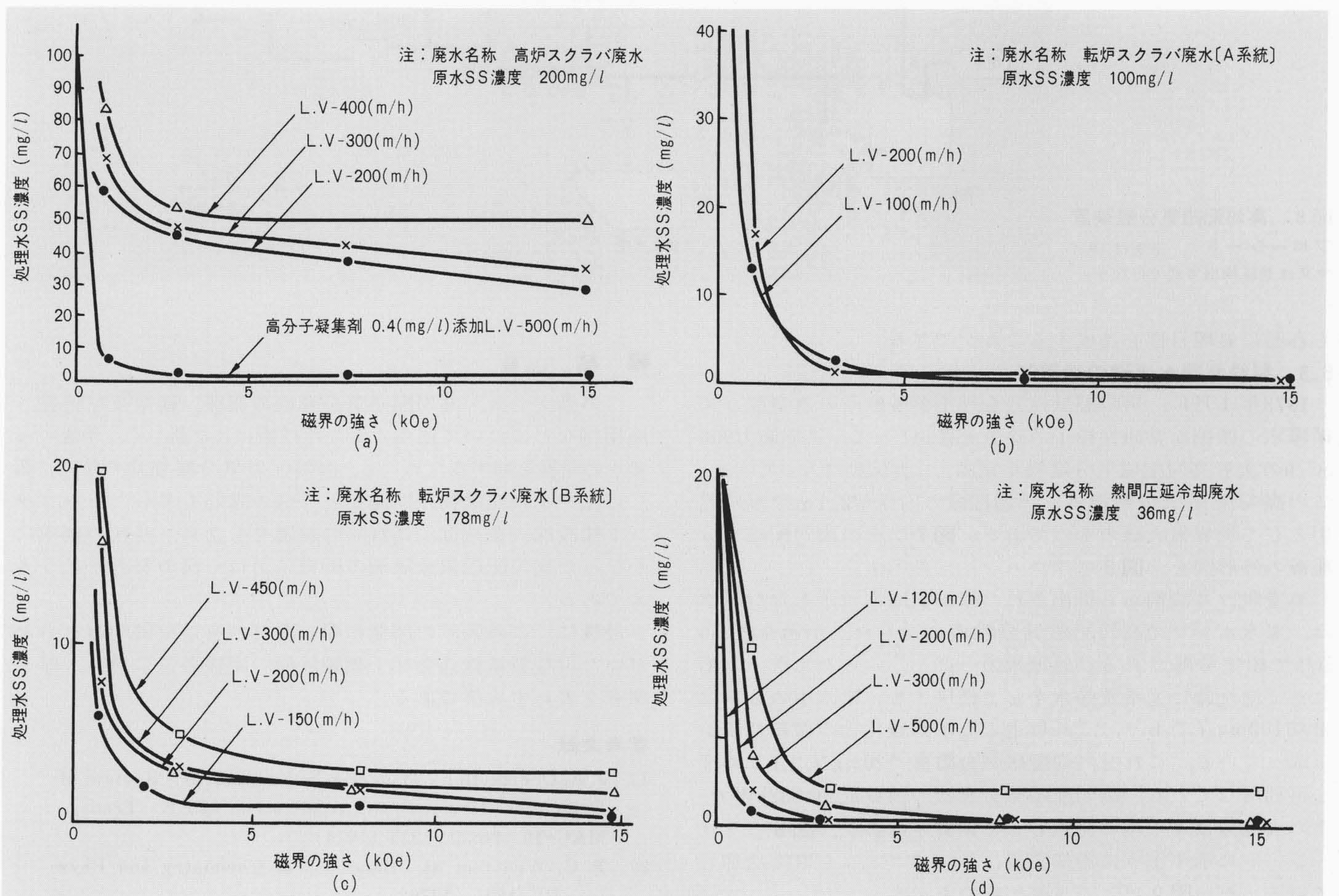


図6 各種製鉄所廃水の処理結果 各廃水とも、3kOeの磁場で十分に処理されている。

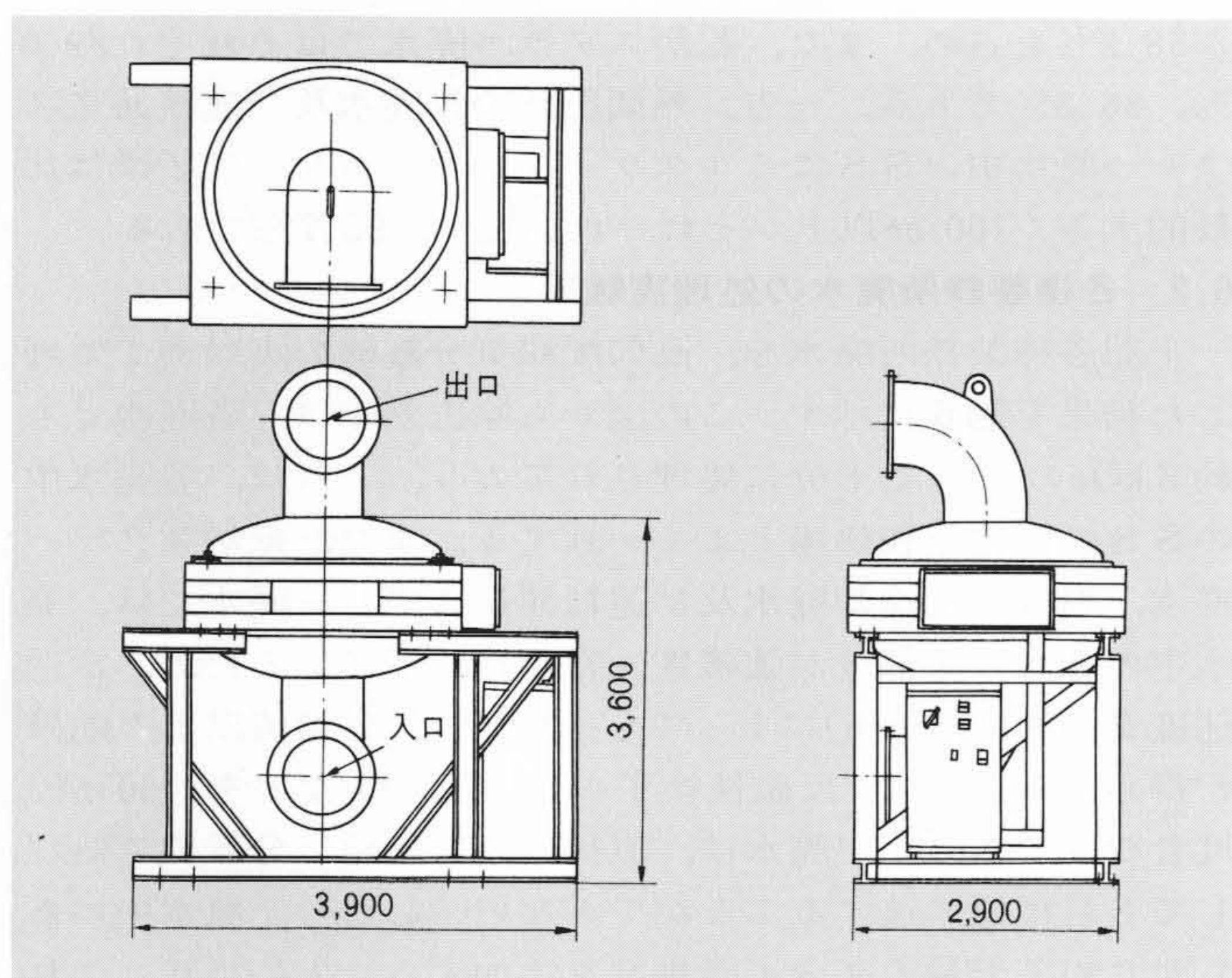


図7 高勾配磁気分離機外形図 内径2,100mm, 最大発生磁場 5 kOeで、磁場はタップ切換により可変できる。

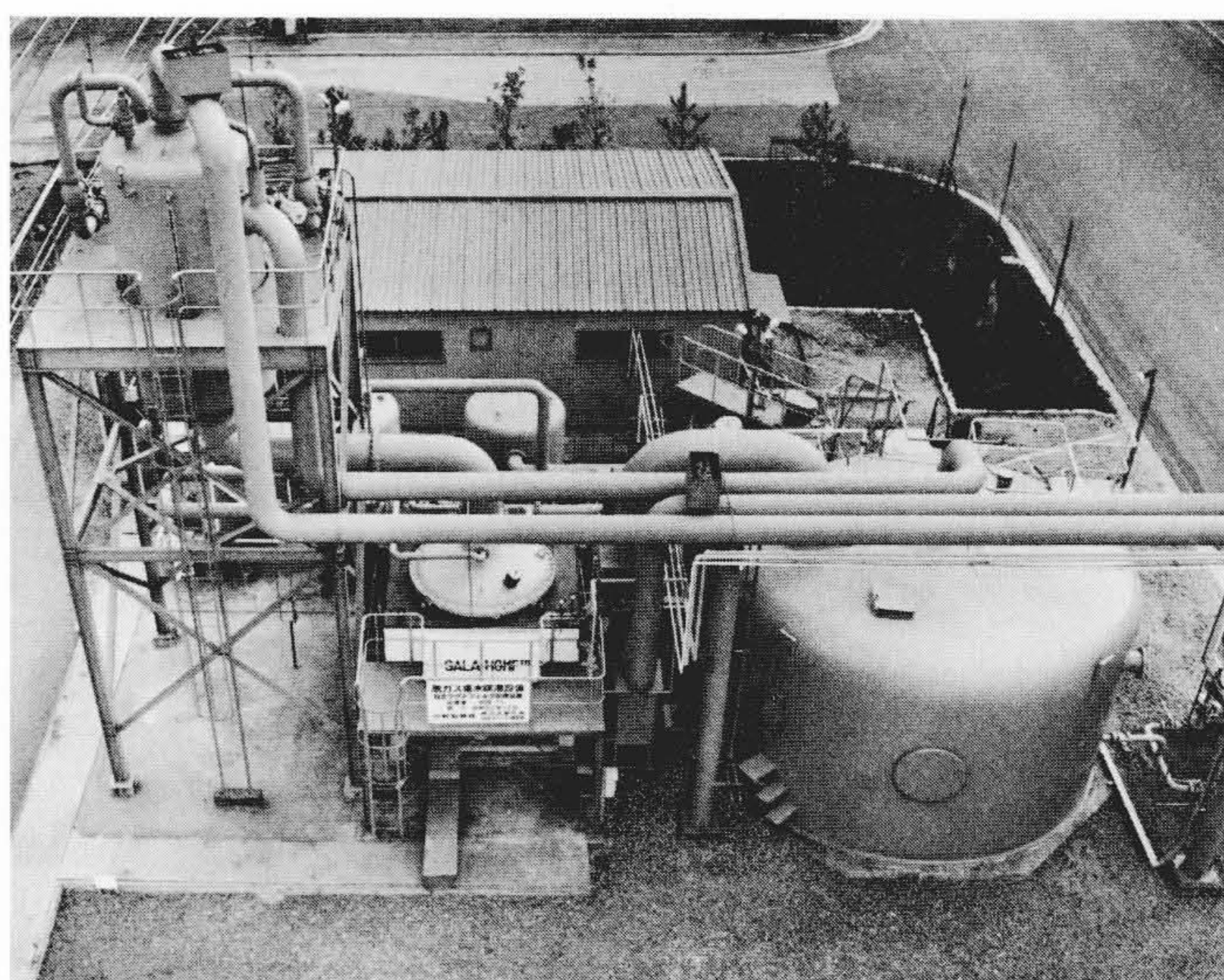


図9 高勾配磁気分離機システム外観 処理容量は900m³/hで、写真中央に高勾配磁気分離機を、左に洗浄水槽を、右に逆洗水槽を示す。

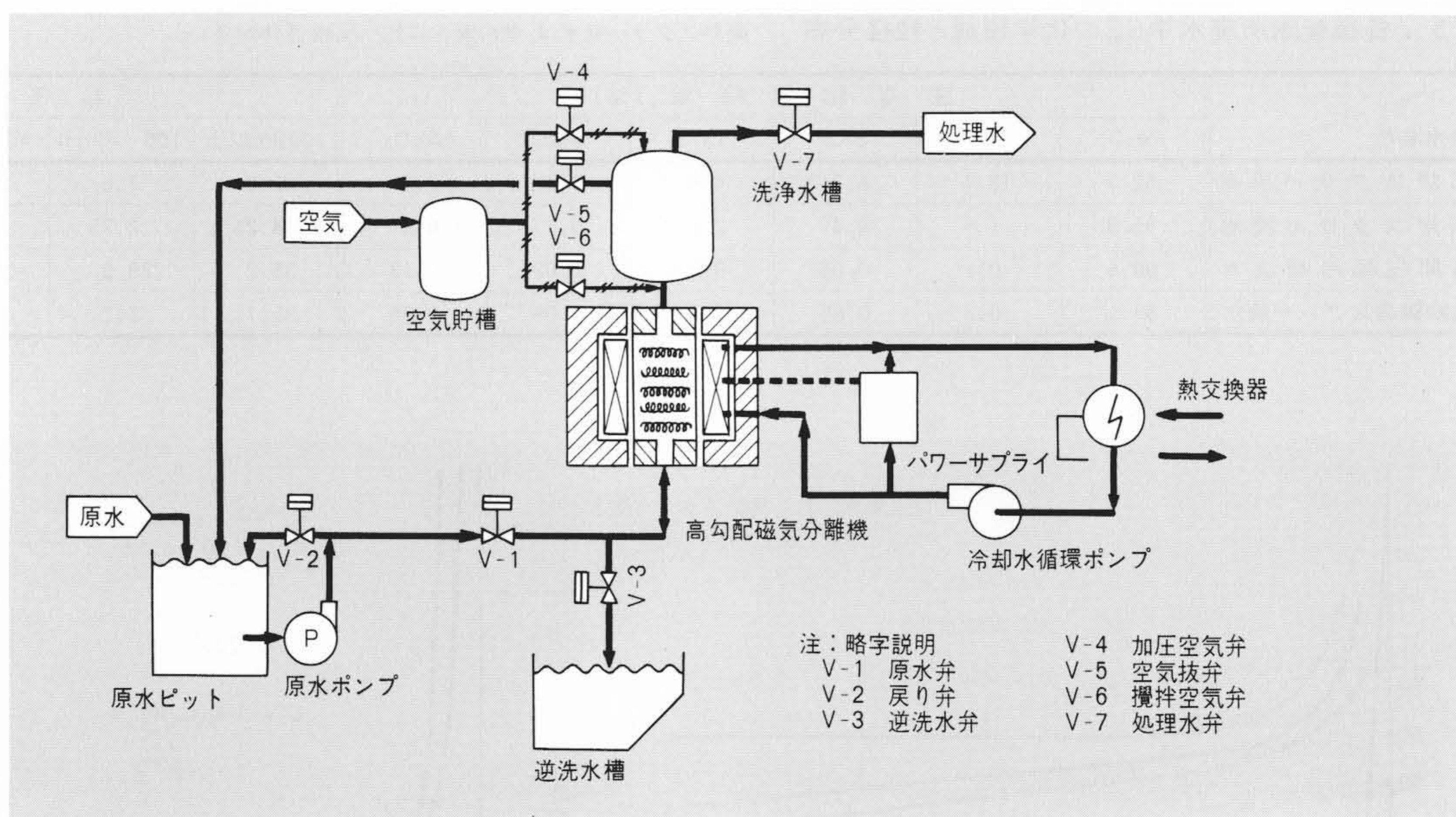


図8 高勾配磁気分離装置フローシート 逆洗は、タイマ又は差圧検出方式で行なう。

も容易に処理目標を達成することができる。

6.3 製鉄所廃水処理の適用例

1978年1月に、川崎製鉄株式会社千葉製鉄所の真空脱ガス循環水の微細な常磁性粒子の除去を目的として、処理能力900m³/hの大形高勾配磁気分離機が完成し、実稼動に入っている。この高勾配磁気分離機は、汙過部分の内径が2.1mで水処理用として世界最大級のものである。図7にその高勾配磁気分離機の外形図を、図8にフローシートを示す。

真空脱ガス設備から排出された微細常磁性粒子を含む原水は、原水ポンプで高勾配磁気分離機に送られ、汙過速度250m/hで磁気分離される。処理水の一部を、いったん洗浄水槽に蓄え逆洗時に逆洗洗浄水として使用する。原水中のSSは平均100mg/lであり、これは主として鉄酸化物の微細粒子から成っている。これを高勾配磁気分離機で20mg/l以下に処理し再利用している。高勾配磁気分離機の消費電力は32kWで、その大部分はコイルの発熱として消費されるが、図8のフローシートに示すように冷却装置によってコイルを直接冷却している。なお図9にこの設備の外観を示す。

7 結 言

この論文では、高勾配磁気分離機の原理、構造及び特長、適用例などについて述べた。この技術はまだ新しく、今後いっそうの発展を期するためにも、高勾配磁気分離理論の確立、新しいウール状充填物の開発など今後の課題も多い。日立プラント建設株式会社は、これらの課題をも含め、時代の要求にかなった高勾配磁気分離機の開発に更に一段の努力を払う考えである。

最後に、この装置の開発に際し数々の有益な御助言をいただいた川崎製鉄株式会社千葉製鉄所の関係各位に対し、厚く謝意を表わす次第である。

参考文献

- 1) J. A. Oberteuffer : Magnetic Separation; A Review of Principles, Devices and Application, IEEE Trans, MAG-10, No. 2, 223 (1974)
- 2) R. C. Weast et al. : Handbook of Chemistry and Physics, PE-122, (1976)