中国科学院における超電導磁気分離の研究開発

屠 規 炳, 嚴 陸 光*

中国科学院低温技術実験中心 中国北京中関村

* 中国科学院電工研究所 中国北京中関村

(1992年1月10日受理)

Research and Development of the Superconducting
Magnetic Separation in Chinese Academy of Sciences

TU Gui-bing and YAN Lu-guan*

Cryogenic Laboratory, Chinese Academy of Sciences, Zhong Guan Cun, Beijing, China

* Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Zhong Guan Cun, Beijing, China

(Received January 10, 1992)

Synopsis:

After summarizing the development of the superconducting magnetic separation (SC-MS) in the world mainly for kaolin clay and coal, construction and experimental results of the miniature experimental equipment in Chinese Academy of Sciences (CAS) are presented in details. The present status of the industrial prototype SC-MS separator now under construction in CAS is also described.

1. ま え が き

磁気分離法は強磁性あるいは常磁性粒子を非磁性材料の質量流の中から磁力によって分離する方法である。磁性粒子に働く力 F は次のように書ける。

$$F = V \cdot M \cdot \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{dB}{dx}$$

ここで、 V 、 M はそれぞれ粒子の体積および磁界 B によって生じた単位体積当りの磁化の大きさを表わす。 μ_0 は真空の透磁率、 x は位置座標である。粒子の選別が可能であるためには、磁力が重力や粘性力より大きくなければならない。

マグネット技術が進歩するにつれて、磁気分離技術は弱磁気分離、強磁気分離、高勾配磁気分離 (HGMS: High Gradient Magnetic Separation)¹⁾ から超電導高勾配磁気分離 SC-HGMS へと進歩してきた。超電導磁気分離は10年余りの実験段階を経て、工業規模の実用化に進み、逐次常電導磁気分離法にとって代わりつつある。

2. 超電導磁気分離技術の発展

超電導磁気分離は、常電導磁気分離と比較して、磁界と磁界勾配が上昇し、磁性粒子に働く磁力が強くなるので、磁気分離の能率が上がり、その応用も多方面にわたって期待される。そのため、超電導磁気分離技術は最近急速に発展してきた。以下にカオリン粘土の精製と石炭の脱硫に主眼をおいた世界の超電導磁気分離技術の発展と応用²⁾ について概説する。Table 1 に世界の概況を示す。

2.1 カオリン粘土の精製

1969年米国のHuber粘土社はカオリン粘土の白色度を高めるために世界で初めて常電導高勾配磁気分離 HGMS 装置を製作した。この装置の処理容器は直径51 cm、高さ30 cmで、磁界は2 T、粘土処理量は2 t/h、電力消費は200 kWであった。次いで、米国のPacific Electric Motor Co., Sala Magnetics Inc., Eriez Magnetics の3社が協力して工業的常電導磁気分離機 PEM-84 を開発した。この装置の磁界は2 T、処理容器直径2.14 m、粘土処理量14~16 t/hである。現在、この種の常電導 HGMS の装置は世界で約

Table 1 Main devices of superconducting magnetic separation in the world.³⁻²²⁾

	Central field B [T]	R. T. bore diameter D [cm]	Height H [cm]	Separation mode	Cryogenic system	Year of completion
Small experimental device						
1. MCA(America)	5	12.7	50.8	Reciprocating		1975
2. Southampton University(UK)	6	12.5				—
3. Southampton University(UK)	8	7.3	30			1982
4. British Clay Co. (UK)	5	13.0	80			1982
5. ECN(Holland)	4.5	15.0	40			—
6. Czechoslovakia	5	9.0	35		Helium liquefier 2 l/h	1980
7. Saclay(France)	7	12	80		Compressor 12 bar, 17 m ³ /h	1983
8. National Inst. for Environmental Studies	8	4.5	15		Helium liquefier 1.36 l/h	1982
9. Eriez Magnetics (America)	5	15.2	50.8		Helium liquefier 1 l/h	1984
Industrial prototype						
1. CCI-Southampton University(UK)	5	25.0	100	Reciprocating		1985
2. IRD(UK)	3	100	100			—
3. Eriez Magnetics (America)	2	200	100		Helium liquefier 20 l/h	1985
4. Prague (Czechoslovakia)	5	52.0	100	Reciprocating	Helium liquefier 20 l/h	1985

20 台稼働中で、その利潤は大体 \$30/t と見積もられる。

1985 年 Eriez Magnetics 社は超電導 HGMS の工業的装置を開発し、これを Georgia カオリン粘土社に設置した。磁界 2 T、処理容器直径 2 m で、カオリン粘土の白色度を 88 度から 92 度まで上げる能力を持っている。この装置による利潤は現時点では約 \$30/t である。同年にチェコスロバキアの Research Inst. of Food & Refrigeration Eng. でも超電導 HGMS の工業的装置を開発した。その装置は磁界 5 T、処理容器直径 2 m である。

2.2 石炭の脱硫

1940 年代初めに、石炭の主成分は反磁性(磁化率：負、小)であるのに対してその中の不純物は常磁性である(磁化率：正、大)ことが見だし、磁気分離によって石炭中の灰分や硫化物などの不純物を除き得る見通

しが立てられた。1970 年代になって磁界 2 T の常電導 HGMS 装置が開発され、石炭の磁気分離が実現した。

① 米国 MCA 社は超電導 HGMS 装置を製作し、1980 年 Upper Freeport (Delmont) と Illinois No. 6 (Old Ban) の石炭を使って研究を行った。例えば、磁界 5 T、流速 4 cm/s の条件で、Delmont の石炭を濃度 20% の懸濁液とし、その中に含まれる硫化物中の硫黄 54% (この内黄鉄鉱 FeS_2 の硫黄が 88% を占める)、灰分 75% を除去した。回収率は 62% であった。

② 1983 年オランダの FDO 社と HOLEC 社は 14 T の超電導 HGMS 装置を使ってドイツの石炭について研究を行い、硫化物中の硫黄 40% (内、黄鉄鉱の硫黄が 96%)、灰分 75% を除去した。回収率 71% を達成した。

③ 米国のオークリッジ国立研と Auburn 大学も石炭の脱硫について研究を行い、良い結果を得ている。

3. 中国における超電導磁気分離の目的

3.1 カオリン粘土の精製

① カオリン粘土は高級紙の表面塗料あるいは陶器や電気部品に用いられる陶品などの原料となり、その用途は多岐にわたっている。中国における良質のカオリン粘土消費量は最近急激に増加しており、現在の消費量は約3万t/年、輸入量は3千t/年に達し、1990年代の終り頃には20万t/年の消費が予測されている。最近、中国で多くのカオリン粘土鉱山が発見され、鉱石埋蔵量は約8億tと見積もられている。しかし、良質のカオリン粘土は少なく、白色度は50~60度程度のもが多い。

② カオリン粘土の白色度を上げるには、一般に化学漂白法とHGMS法が用いられる。次の諸点で磁気分離法HGMSのほうがより優れている。

- a) 操作が簡単
- b) 処理量が多い
- c) 化学薬品を使わないので、処理コストが安く、また水の汚染も少ない
- d) 化学薬品がカオリン粘土中に残って品質劣化を招くことがない

しかし、次のような欠点もある。

- e) 装置が高価
- f) 電力消費が大きい

③ 超電導HGMS法は常電導HGMS法と比較して次のような利点がある。

- a) 高磁界が利用できるので、同一処理量では産物の白色度をより高めることができる。
- b) 産物の白色度を同じにすれば、処理量が多く

なり、生産コストが低減できる。

- c) 超電導マグネットの電力消費は常電導マグネットの1/5~1/10である。

3.2 石炭の脱硫

中国における石炭埋蔵量は8900億tと見積もられ、生産量は10億t/年であるが、その中の20%は2%以上の硫化物を含有している。特に中国南西部の石炭は硫化物含有量が5~6%に達する。この硫黄分は空気汚染の原因となり、中国では良質の石炭が少ないため、石炭輸出量は世界の2%に止まっている。中国の火力発電所では主に石炭を燃料としており、現在、約1.3億t/年の石炭消費で、SO₂排出量は約436万t/年に達している。

現在、中国では工業的な石炭の脱硫・脱灰には石炭洗浄法が用いられており、約1.2億t/年を処理している。しかし、石炭洗浄のコストが高いため、洗浄した石炭は主に金属の精錬所で使用されているに過ぎない。このように石炭の洗浄は経済的な理由から一部に限られているが、超電導磁気分離装置によって石炭の脱硫を行えば、コスト低減が可能となり、その効果は計り知れない。

SO₂の排出は中国の大気環境を著しく汚染しているばかりでなく、日本の環境にも悪い影響を及ぼしている。もし日本が中国と協力して超電導磁気分離の開発を行うことができれば、酸性雨を減らし、両国の大気環境改善に大きく貢献するであろう。

4. 小型超電導高勾配磁気分離 SC-HGMS 装置とその実験結果²⁾

カオリン粘土の精製と石炭の脱硫に対する超電導

Fig.1 Schematic diagram of the small experimental superconducting magnetic separator.

Fig.2 Schematic drawing of the superconducting magnet.

HGMS 法の可能性および分離条件の研究を行うため、中国科学院では小型実験装置を製作した。Fig.1 にこの装置の模式図を示す。

装置は大別して原料供給・磁気分離・水による洗浄の3系統から構成される。原料はカオリン粘土（粒径 $2\sim 15\ \mu\text{m}$ ）あるいは粉碎した石炭（粒径 $70\sim 150\ \mu\text{m}$ ）で、水を加えて電動攪拌機で攪拌する。混合液をポンプで輸送するが、このポンプは回転速度を連続的に調節することができる。

磁気分離筒の内部は6小室に分かれ、各小室にスチール・フィラメントが充填されている。スチール・フィラメントの体積は全容積の6%である。フィラメント材料はステンレス鋼で、100 Oe の磁界の下で 15,000 G (1.5 T) の磁束密度が得られる。Table 2 に使用したスチール・フィラメントの寸法を示す。カオリン粘土には粒子が細かいので No.1 フィラメントを用い、石炭では粒子が粗いので No.2, 5 を用いた。磁界 5 T の下で、磁気分離筒の下部から混合液体をポンプで送り込むと、磁性粒子はフィラメント表面に捕獲され、非磁性物質は磁気分離筒の上部から排出されて採取容器に収集される。

一定時間経過してスチール・フィラメントに付着した磁性粒子が飽和に達した時、混合液の輸送を止め、非磁性粒子を水で洗い流す。次にマグネットを消

磁し、4気圧の水を磁気分離筒の上部から圧入し、磁性粒子を分離筒の下方に洗い出す。以上の操作を繰り返す。

Fig.2 にこの装置の超電導マグネットを示す。主コイルは二つのコイルからなり、内側は $0.75\ \text{mm}\phi$ 、外側は $0.5\ \text{mm}\phi$ の NbTi 超電導線で巻いてある。両端の補正コイルによって磁界均一性は95%以上にできる。超電導が破れた時の温度と電圧の上昇を抑えるために、6個の電気抵抗が挿入されている。マグネットは電流71.9Aの時、中心磁界7.06Tを発生する。Table 3 に主要パラメータを示す。

Fig.3 に装置のデューワーの構造を示す。外径473mm ϕ

Fig.3 Schematic view of the cryostat.

Table 2 Parameters of steel filaments.

	No.1	No.2	No.5
Width [μm]	30~60	60~90	150~200
Thickness [μm]	20 ± 5	30 ± 5	60 ± 5

Table 3 Main parameters of the experimental superconducting separator magnet.

		Main coil		Compensation coil, ϕ 0.5 wire	Magnet
		ϕ 0.75 wire	ϕ 0.5 wire		
Inner diameter	[mm]	136	157	192.7	136
Outer diameter	[mm]	157	191.7	217.2	217.2
Length	[mm]	560	560	2×35	560
Layers		14	34	24	72
Turns		9,441	35,859	$2 \times 1,584$	48,468
Weight	[kg]	15	30	2×1.6	48.2
Current	[A]	71.9	71.9	71.9	71.9
Overall current density					
	[A/cm ²]	11,500	26,600	26,600	21,200
Central field	[T]	1.474	5.523	0.068	7.064
Peak field	[T]	1.477	5.542	0.058	7.077
B_0/I	[Gauss/A]	205	771	9.4	982.5
Inductance	[H]	2.94	57	2×1.95	100
Stored energy	[kJ]	7.6	147	2×5.04	258

Table 4 Separation results for coals.

Sample	Conditions	Ash [%]	Total S [%]	Pyrite [%]	Sulfate [%]	Fe ₂ O ₃ [%]
No. 1	Original	33.99	4.48	2.58	0.10	3.21
	$B=2$ T, $V=1.4$ cm/s	24.5	2.35	0.48	0.09	0.60
	3 , 1.4	25.6	2.40	0.57	0.08	
	4 , 1.4	24.37	2.40	0.43	0.08	
	4 , 0.67	24.78	2.44	0.65	0.11	
	4 , 2.82	26.67	2.66	0.84	0.09	1.05
No. 2	Original	32.48	2.83	1.67	0.03	2.08
	$B=1.5$ T, $V=1.6$ cm/s	22.99	1.93	0.45	0.02	
	2 , 1.6	22.38	1.92	0.48	0.04	
	2 , 0.59	23.23	1.86	0.33	0.03	
	2 , 3.69	23.98	1.93	0.47	0.06	

常温ボア径 80mm ϕ 、高さ 1,230mm で、液体窒素および蒸発ヘリウムガスで冷却された二つの放射シールドが挿入されている。液体ヘリウム量は 11 l で、連続 12 時間の実験が可能である。

Fig. 4 にカオリン粘土に対して最初に行った実験結果を示す。原料粒子濃度 20 %、流速 0.6 cm/s、磁界 4 T の条件で行ったもので、磁界をかけたまま、混合液を何度も取り換えずに分離筒に通し、その都度、白色度を調べたものである。4 回目でスチール・フィラメントは磁性粒子で飽和し、それ以後は分離筒を通す程、白色度は低下している。Fig. 4 の実験では白色度

は 4 % しか上昇していないが、最近の実験では処理技術が向上し、白色度が 10 % 上昇している。

Fig. 4 Experimental results of kaolin clay filtration.

Fig.5 Schematic diagram of the industrial prototype superconducting magnetic separator.

Table 4 に石炭に対する実験結果を示す。高い流速 2.82 cm/s で原料液を通した場合、石炭中の硫化物は総量で 4.48 % から 2.66 % に下がり（内、黄鉄鉱の硫黄は 2.58 % から 0.84 % へ）、灰分は 33.99 % から 26.67 % に下がっている。分離度は未だあまり高くないが、さらに上げるべく研究を続けている。

5. 超電導 HGMS 工業装置の開発^{23, 24)}

カオリン粘土精製と石炭脱硫工業を促進し、併せて超電導技術・低温技術の発展を図るために、1988 年超電導 HGMS の工業的規模の装置の開発を開始した。現在、各部分のテスト、装置の組み立てを終り、全系統の試験を行っている。

Fig. 5 に装置の概念図を示す。装置は超電導マグネット、電源、デュワー、ヘリウム液化機、処理容器、処理容器自動往復装置、原料供給ポンプ、水洗浄ポンプ、消磁用鉄筒などからなる。磁気分離は往復循環過程で行われ、その過程は磁気分離、非磁性粒子の洗い出し、処理筒交換、磁性粒子の洗い出しに分かれる。

① 磁気分離過程：きれいな処理筒を励磁した超電導マグネットの中に入れ、ポンプで原料液を処理筒に送り込む。原料液は中心の管を通過した後、反転してスチール・フィラメントを充填した部屋に送り

込まれ、磁性粒子が捕獲される。非磁性物質は処理筒を通り抜け、産物槽に送り込まれる。一定時間を経過して、フィラメントに付着した磁性粒子が飽和に達した時、原料液の輸送を止める。

② 非磁性粒子の洗い出し過程：ポンプで水を処理筒に圧送し、処理筒と管の中にある非磁性粒子を産物槽へ洗い出す。

③ 処理筒交換過程：磁性粒子で飽和した処理筒を磁界の外に出し、きれいな処理筒を磁界中に入れる。

④ 磁性粒子洗い出し過程：磁性粒子の付着したフィラメントは消磁用鉄筒の中に入り、超電導マグネットとは逆向きの弱磁界にさらされて残留磁化を失う。この状態で逆方向にポンプにより水を圧送すると、フィラメントに付着した磁性粒子は容易に洗い出され、磁性粒子槽に送られる。

以上の操作を繰り返して行う。

この装置の設計処理量は 3 ~ 5 t/h (2 ~ 3 万 t/年) である。

超電導マグネットの構造を Fig. 6 に、諸元を Table 5 に示す。マグネットは三つのコイルから構成される。各コイルは NbTi 極細多芯線材を用い、線材の接続は拡散溶接によっている。液体ヘリウムとの接触を良くするため、巻線 1 層ごとに幅 6 mm、厚さ 0.45

Table 5 Main parameters of the industrial prototype superconducting separator magnet.

		Coil			Magnet
		No. 1	No. 2	No. 3	
Inner diameter	[mm]	600	600	600	600
Outer diameter	[mm]	685	676	684	780
Height	[mm]	220	260	220	850
Number of layers		18	16	18	18
Number of turns		1,136	1,223	1,164	3,523
Room temperature resistance	[Ohm]	10.78	10.75	10.36	31.5
Inductance	[H]	0.932	1.058	1.018	3.77
Central field B_0/I	[Gauss/A]	21.12	22.35	21.58	41
Peak field B_m/I	[Gauss/A]	40.38	39.12	41.31	48
Conductor length	[m]	2,293	2,451	2,348	7,092
Conductor weight	[kg]	115	123	117	355

Fig. 6 Schematic drawing of the superconducting separator magnet.

mm の FRP 片を挿入してある。

この超電導マグネットは 1,000 A の電流を流した時、4.0 T の中心磁界を発生した。Fig. 7 に各コイル個別の場合と組み合わせた場合の励磁特性のトレーニングを示す。組み合わせた場合の励磁特性は単独コイルの場合より低下し、最大電流は約 25 % 減少した。

Fig. 8 にデュワーの構造を示す。デュワーはステンレス鋼製で、低温部は全部溶接加工されている。室温部のフランジはニトリルゴムの O-リングを使用した。頸部にはベローズを用いて収縮による歪みを避けるようにした。液体ヘリウム容器の容積は 195 l で、マグネット上部に液体ヘリウム約 120 l を溜められ、12 時間の連続操作が可能である。

Fig. 7 Quench currents versus quench times of each coil and the assembled magnet.

Fig. 9 にデュワーの断熱構造を示す。二つの放射シールド銅板があり、一つは液体窒素の蛇管により、他は蒸発ヘリウムガスの蛇管によって冷却される。シールド板の間および外側に積層断熱材が挿入してある。シールド板間の積層断熱材は反射率の高いアルミ箔と活性炭粉末を含んだガラス繊維のシートとを何枚も重ね合わせたものである。

Fig. 10 にマグネットを含むデュワーの内筒を吊り下げる方法を示す。マグネットと内筒の合計重量は約 1 t、処理筒を移動する際マグネットに働く吸引力は約 4 t、これに磁界の不均一性に起因する力 1 t が付加される。この合力は大きいので、内筒の両端にそれぞ

Fig. 8 Cross section of the dewar and the magnet.

れ 6 本の FRP 製支持棒を取り付けている。支持棒の室温端にステンレス鋼の球状継ぎ手を設けている。支持棒の総熱負荷は約 1.5 W (計算値) である。

Fig. 11 にパワーリードの実験結果を示す (別のクライオスタット使用)。パワーリードの下端は NbTi 超電導線を用いている。パワーリードの非通電時の熱負荷は 2.1 W, 1,000 A 通電時には 3.6 W に増加した。この値は設計値より大きく、この原因は熱交換が良くないためと考えられる。

Fig. 12 はマグネットを入れたデュワーでのヘリウム蒸発率の実験結果である。300 K から 77 K まで冷却するのに約 4 時間と液体窒素 750 l を要した。77 K から 5 K までには約 4.5 時間と液体ヘリウム 140 l を要した。さらに、デュワーに 140 l の液体ヘリウムを溜めるのに 2 時間の移送時間がかかった。非通電時の液体ヘリウム蒸発率は 5.6 l/h (4.5 W) である。パ

ワーリード、測定用リード線、測定用パイプなどを除去した場合、デュワーの熱負荷は約 2.5 W である。

1992 年 5 月にこの超電導 HGMS プロトタイプ装置の全系統の試験運転を行い、カオリン粘土の処理を行った。処理能力は 3 t/h で、分離の結果はカオリン粘土の白色度を 82 度から 84.5~86 度上げることができ、この中の Fe_2O_3 12~20 %, TiO_2 44~58 % を除去した。

6. あとがき

超電導磁気分離 SC-HGMS 装置によるカオリン粘土の精製は、現在 \$30/t の利潤を挙げているが、今後技術の向上に伴って効果は増加していくものと考えられる。SC-HGMS 装置による石炭の脱硫は、精製コストを低減すると共に、環境の改善に大きく役立つものと期待される。

中国科学院は SC-HGMS の研究開発に 5500 万円の研究投資を行った。今後の発展を図るために、外国との共同開発研究を行いたいと考えている。日本で興味のある方は岡山理科大学の信貴教授に連絡されたい。

超電導磁気分離の研究開発には、表記の著者のほか、電工研究所の易昌練、余運佳、宋守森、叶祖湘らと低温技術実験中心の李項生、李錫之、林安民、鄭積新らが参加していることを付記する。

信貴教授には本稿を詳細にわたって修正していただいた。深く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) R. Gerber and R.R. Birss: *High Gradient Magnetic Separation*, Research Studies Press, John Wiley & Sons (1983)
- 2) 余運佳, 嚴陸光: 電工電能新技術 **4** (1990) 7
- 3) D.R. Kelland and E. Maxwell: IEEE Trans. Magn. **MAG-11** (1975) 1582
- 4) J. H. P. Watson, et al.: *High Gradient Magnetic Separation of Uranium Oxide and Gold from Mine Residues*, Intern. Symp. Elec. & Magn. Separation & Filtration Tech., Antwerp, 23-25, May, 1984
- 5) J. A. Obersteuffer, et al.: IEEE Trans. Magn. **MAG-11** (1975) 1591
- 6) J. H. P. Watson and D. Hocking: IEEE Trans. Magn. **MAG-11** (1975) 1588
- 7) D. Melville, F. Paul and S. Roath: *Red Blood Cells in High Gradient Magnetic Separation*, Proc. Intern. Conf. Indust. Appl. of Magnetic

Fig. 9 Radiation shield cooled by evaporated helium gas.

Fig. 10 Support structure of the magnet and the inner container.

Fig. 11 Test results of the power leads.

Separation, Ed. by Y. A. Liu (1979) 39

- 8) 白浚仁: 媒化学 (山東磁業学院), (1983. 5 月)
- 9) J. A. Oberteuffer: IEEE Trans. Magn. **MAG-10** (1974) 223
- 10) J. Iannicelli: IEEE Trans. Magn. **MAG-12** (1976) 436
- 11) H. Kolm, J. A. Oberteuffer and D. Kelland: *High Gradient Magnetic Separation*, Scien-

tific American (1975) 47

- 12) J. Kopp: IEEE Trans. Magn. **MAG-24** (1988)
- 13) D. Fletcher: *High Gradient Magnetic Filtration and Separation, Part 1*, Mine and Quarry, **16**(1), (1987) 35
- 14) S. C. Trindade and H. H. Kolm: IEEE

Fig. 12 Change of liquid helium evaporation rates of the dewar containing the superconducting magnet for the case of no current in power leads.

Trans. Magn. **MAG-9** (1973) 310

- 15) S. C. Trindade, et al.: *Magnetic Desulfur-*

ization of Coal, Fuel, **53** (July 1974) 178

- 16) H. H. Murray: IEEE Trans. Magn. **MAG-12** (1976) 498
 17) C. J. Lin, et al.: IEEE Trans. Magn. **MAG-12** (1976) 513
 18) I. Weschler, et al.: *Coal Preparation Using Magnetic Separation*, EPRI Report, No. CS-1517, Vol.3 (EPRI July 1980)
 19) Z. J. J. Stekly, et al.: *Coal Preparation Using Magnetic Separation*, EPRI Report, No. CS-1517, Vol.2 (EPRI July 1980)
 20) C. P. Van Driest, et al.: *Coal Cleaning by HGMS*, FDO-Holec Report on Phase 1a (August 1963)
 21) F. E. Luborsky and B. J. Dramond: IEEE Trans. Magn. **MAG-12** (1976) 463
 22) J. E. Nasset, et al.: IEEE Trans. Magn. **MAG-16** (1980) 833
 23) Y. Luguang, et al.: *Cryogenics* **30** (Suppl.) (1990) 771
 24) L. G. Yan, et al.: IEEE Trans. Magn. **MAG-25** (1989) 1873

編集委員会より

中国科学院の屠氏より貴重なご寄稿をいただき、会員と共に感謝する次第です。磁気分離に関する解説は、未だ本誌に掲載されたことがなく、専門でない会員には多少親しみ難い点もあろうかと思えます。本来、解説として基礎的な事項をも屠さんに書き足していただくとよろしいのですが、通信事情等を考えますと、せっかくのご寄稿の掲載が遅れる心配がありますので、ご造詣の深い小原健司氏（電総研）に下記の一文をお願いしました。屠さんの文と合わせてお読みいただければ、理解がより容易になるものと考えます。

磁気分離について（補足解説）

小 原 健 司

電子技術総合研究所 つくば市梅園 1-1-4

On Magnetic Separation (Supplemental Notes)

Takeshi OHARA

Electrotechnical Laboratory, 1-1-4 Umezono, Tsukuba 305

1. 磁気分離の原理

分散媒中にある粒子に磁力を作用させ、目的の粒子を分散系から分離することを磁気分離 (magnetic separation) と呼ぶ。磁力 F_m の x 座標成分 F_{mx} は次式で表わされる。

$$F_{mx} = V_p \cdot \mu_0 \cdot M_p^* \cdot (\text{grad})_x H$$

磁化を磁化率で表現すれば、

$$F_{mx} = V_p \cdot \mu_0 \cdot (\chi_p - \chi_f) \cdot H \cdot (\text{grad})_x H$$

ここで、 V_p は被分離粒子体積、 M_p^* はその粒子の分散媒中の見掛けの磁化、 μ_0 は真空の透磁率、 H は印加磁界、 χ_p と χ_f はそれぞれ被分離粒子と分散媒の磁化率であり、SI単位 E・B 対応系で記述した（屠氏論文は E・H 対応系）。

上式から、目的粒子と分散媒の磁性の差が大きいほど、磁力が強くと分離能率が高いことがわかる。また、

磁化率の差により磁力を生ずることから、常磁性粒子でも反磁性粒子でも同様に分離できる。強磁性粒子では M_p は大きい、磁化を飽和させるに必要な磁界の強さ以上の磁界に対しては、磁力は磁界の強さによらず、磁界の勾配だけに比例する。

磁界の発生には永久磁石、電磁石（超電導磁石）が考えられるが、通常の方法では大きな磁界の勾配は得られず ($10^6 \sim 10^7$ A/m²)、1970 年頃まではもっぱら強磁性粒子が対象で、磁気選鉱として古くから利用されていた範囲であった。

磁界中に置いた強磁性ワイヤの近傍での大きな磁界の勾配を利用して強力な磁力を発生させ、分離対象を弱磁性粒子（反磁性も含む）に広げたのが、高勾配磁気分離 (High Gradient Magnetic Separation: HGMS) である。線径 100 μ m 程度の SUS430 ウールを用いることにより、 10^{10} A/m² 台の磁界の勾配が得られ、ろ過法の形で分離が可能となった。従来のろ過法と比較して、フィルタ材の占積率が 3～6% と極めて低いので、

- ① 圧力損失がない
- ② 高速ろ過が可能 (200～1,000 m/h)
- ③ 磁界 OFF によるフィルタの洗浄と再生が容易などの特徴がある。

2. 超電導 HGMS の特徴

銅鉄電磁石と比較して、超電導マグネットを用いた HGMS の特徴は、

- ① 電力消費量の低減（運転コストの経済性）
- ② 装置の軽量化（鉄ヨークが不要）とフィルタ交換の容易性

③ $\mu_0 H \geq 2$ T の磁界発生が容易で、弱磁性粒子分離に有効

④ 大容量化が可能（大型では製作費が割安）などである。ただし、次のような面もある。

⑤ 製作費が高い

⑥ 冷凍機が必要

⑦ 磁界を強くしても、磁界勾配は高くない（ステンレス鋼の磁化の飽和する $\mu_0 H \geq 0.7$ T では磁界勾配は増加しない）

3. 石炭脱硫への適用可能性

石炭は可燃物である高分子有機成分と酸化物・硫化物等の無機成分からなり、その各成分の磁化率は

有機物 $-5 \sim 10 \times 10^{-6}$

無機物

頁岩（酸化物） $4.9 \sim 5.7 \times 10^{-4}$

カオリン（アルミノ珪酸塩） $2.5 \sim 4.9 \times 10^{-4}$

パイライト (FeS₂) $\sim 1 \times 10^{-4}$

ピロタイト (FeS_x ($1.0 < x < 1.14$)) $\sim 1 \times 10^{-2}$

などである。中国炭は特にピロタイトを多く含み、磁気分離による脱硫は十分期待できる。

参 考 文 献

小原健司：「非晶質磁性合金リボンを用いた高磁界高勾配磁気分離に関する研究」，電総研研究報告，858号（1985.9）

小原健司：「最近の磁気分離研究」電総研彙報，55(5)，(1991) 678

電気学会「大勾配磁気分離技術の現状と動向」，技術報告（Ⅱ部）114号（1981.6）