大量希薄懸濁系処理への磁気分離技術応用に関する研究開発

小原 健司*

Progress of Magnetic Separation Technology for Processing
a Large Quantity of Dilute Suspension

Takeshi OHARA*

Synopsis: This introductory article describes the progress of magnetic separation technology including its background, principles, and application to process a large quantity of dilute suspension (i.e., up to 50 kg/hr). Development of this technology dates back to the 1970s when researchers at the Massachusetts Institute of Technology (MIT) invented “high gradient magnetic separation” (HGMS). The HGMS could enable magnetic separation to be applied to a large class of weak paramagnetic materials, down to colloidal particle size. The strength of the magnetic force generated with HGMS has since been increased by a factor of $10^3 \sim 10^4$ compared with that of permanent magnets. Due to the availability of direct, selective, high-intensity magnetic forces on particles to be separated, HGMS devices have been used for beneficiation of kaolin clay in the paper industry, for wastewater purification in the steel industry, and for recovery and recycling of glass grinding sludge in the glass fabrication industry.

In 1986, *Machine Design* magazine reported that the first superconducting magnetic separator designed for commercial use was operating at the Huber clay-processing plant in Wrens, Georgia. Since then, a new 230-ton HGMS separator has been built by Eriez Magnetics. It requires fewer chemical additives, less space (34%), and weighs less (42%) than a conventional separator. However, due to retrofitting, only three separators of this type have been installed in the plant without any consideration for the generation of AC loss in superconducting wires. With development of technical R&D on applied superconductivity, two large-scale applications became commercially successful in the mid 90s; namely, magnetic separation and magnetic resonance imaging (MRI). At the time of February 1999, the number of HGMS systems in operation using superconducting magnets for magnetic separation was as follows: seven in Brazil, five in the U.S.A., four in the U.K., three in Germany, two in India, two in Australia, one in Austria, and one in Egypt. These systems were all equipped with a reciprocating canister HGMS in order to utilize superconducting persistent current mode, and were operated mainly in the kaolin clay beneficiation industry.

Since 1995, the so-called “new magneto-science” has been extensively researched in Japan to study the effects of strong magnetic fields on non-magnetic (extremely weak magnetic) substances in a wide variety of scientific areas including solid state physics, chemistry, metallurgy, biology, and medicine. The initial driving force behind this research was the invention of a liquid helium-free superconducting magnet system in 1993, which could be more easily operated due to its use of high critical temperature superconducting materials developed since the 1986 discovery of cuprate superconducting matter. Magnetic separation is a primary application field for superconducting magnets, and in 1999, many HGMS application projects were initiated in Japan aiming at arsenic removal from geothermal water, purification of water seeping from reclaimed land, and purification of wastewater from paper factories. Magnetic seeding methods to various non-magnetic particles dispersed in water have been developed, such as electro-coagulation, electro-chemical oxidation, magnetic flock, and magnetic precipitation. Magnetic separation is also a promising technology to remediate soil polluted with radioactive particles.

Keywords: HGMS, magnetic force, dilute suspension, sc magnet, remediation of soil polluted with radioactive particles

Received July 29, 2011

* 金沢工業大学工学部電気電子工学科

〒921-8501 石川県野々市町扇が丘 7-1

Dept. Electrical and Electronic Eng., College of Engineering,

Kanazawa Institute of Technology, 7-1 Ohgigaoka, Nonoichi,

Ishikawa 921-8501, Japan

E-mail: oharat@neptune.kanazawa-it.ac.jp

1. はじめに

水や空気または汚泥に懸濁する微細粒子を磁気力を利用して吸着分離浄化する技術が“磁気分離”である。鉱石選別には古くから用いられてきた。1960年代後半から1970年代初期にそれらより3～4桁大きな磁気力を発生する“高勾配磁気分離”が米国MITで開発された。この結果、従来分離できなかった微細粒子への磁気力利用が可能になり、希薄懸濁系の大量高速処理が必要な製紙業用カオリン粘土精製や製鉄排水純化などに実用されるようになった。

1990年代には上記カオリン粘土精製用磁気分離の磁場発生部分に電力損失の小さな低温超電導マグネットが適用された。高温超電導材料を電流供給リード部分に用いた冷凍機冷却型超電導マグネットが実現されたのが1993年であり、液体ヘリウム冷媒の使用なしでの大空間強磁場発生が可能になった。そのため、大量希薄懸濁系の安価なハンドリング技術の実用性が高まり、研究開発が活発化した。例えば1995年から6年間の科学技術庁第二期マルチコアプロジェクトおよび1999年から5年間の学術振興会未来開拓プロジェクトと岩手県地域結集型共同研究事業、あるいは近畿通産局補助事業などが開始された。

以下、異分野研究者や初心者に向けて、磁気分離技術の発展経緯と背景および基本原理と応用、さらに冷凍機冷却型超電導マグネットの発明などについて記述する。

2. 研究開発の時代区分

磁気分離研究開発時期は、分離対象粒子の磁性と粒径からFig. 1のように大きく3つに区分できる。すなわち、第1期の対象粒子はFeやTi, Snなどの鉱石選別における大粒径強磁性鉄酸化物であり、第2期は製紙業用カオリン粘土資源に含まれる強磁性微小有色鉱物や微粉炭内の硫黄分（硫化鉄）、あるいはガラス研磨廃棄物と製鉄排水中の強磁性鉄酸化微粒子であった。

第3期は、格段に使いやすくなった超電導マグネットの適用を目的とし、弱磁性かつ小粒径、または水中電離物質に磁気種付けして磁気分離することを試み始めた時期であ

Fig. 1 Main three targets of R&D on magnetic separation.

Fig. 2 Sites where the magnetic separation symposiums have been held.

る。具体的には地熱水中のヒ素や、埋立地浸出水中の窒素、リン、有機物などの浄化であった。また、放射性微粒子についても検討を開始した時期でもあった。

Fig. 2は、磁気分離研究成果発表会の開催時期と場所である。第1節に記したように、第3期には国内で数多くの公的プロジェクトが遂行されたため、2000年からの5年間は毎年開催された。この分野の“夏の学校”は今年で10回目、2002年箱根での開催が第1回目であった。

3. 新しい超電導マグネットの実現とその利用

3.1 冷凍機冷却型超電導マグネット

1993年に世界で初めて液体ヘリウムを必要としない実用的な超電導マグネットが実現された^{1,2)}。小型冷凍機で直接伝熱冷却する方式の超電導マグネットである。従来は液体ヘリウム中に沈めて冷却していたが、冷媒の取り扱いの煩わしさを払拭する革新的な発明であった。この技術のキープポイントは1986年に金属材料技術研究所・前田弘博士が発見したBi系高温超電導物質³⁾を超電導マグネットの電流供給部分に適用して外部からの熱侵入を大きく低減したことにある。次頁Fig. 3⁴⁾の左側の図がこれである。右側の図は上記発明以前の超電導マグネット稼動状態である。大きな超電導低温容器に満たされた液体ヘリウムを移送管を通じて超電導マグネット側の背の高い低温容器に移送した状態を示している。しかし、移送中にはもちろん、稼動（励磁）中にも高価な液体ヘリウムがどんどん蒸発する。したがって、輸入に頼る日本では蒸発ガスを回収して不純ガスを除去（純化）し、大型液化機で再び液体ヘリウムに液化する必要があった。

発明されたFig. 3⁴⁾左側の装置では、冷凍機が直接超電導マグネットを無人で冷却するので電気（と冷却水）さえあれば、どこでも誰でも稼動できる。液体ヘリウムを扱う際に必要な極低温技術の習熟が不要になった。低温工学に不慣れな研究者や学生でも、容易に超電導マグネットを操

作できる。これは、従来に比べてはるかに広い技術分野での強磁界利用が可能であることを意味する。このため 2005 年までに約 100 台の超電導マグネットが国内の大学と民間の研究施設へ設置され、次節で紹介する強磁場利用研究に使用された。

発明に至る道のりは長かった。1983 年にマサチューセッツ工科大学フランシス・ビター国立磁石研究所の Hoening⁵⁾ が、金属間化合物 Nb_3Sn 超電導線材を用いた上記タイプの超電導マグネットを考案して発表した。もちろんその後、試作もされたが、一般には普及しなかった。電流供給部分からの熱侵入が大きく、実用に耐えるものではなかったからである。冒頭で述べた実用装置を開発したのは、東北大学金属材料研究所と住友重機械工業の開発チーム^{1, 2, 4)}であった。しかし、超電導マグネット巻線には従来の Nb-Ti 合金や Nb_3Sn 金属間化合物を用いたため、絶対温度 4.2 K の液体ヘリウム温度、あるいはそれ以下に保つ必要があり、ギフォード・マクマホン式 (GM) 冷凍機への負担が大きかった。

その後、2000 年 3 月に Bi 系高温超電導物質を、上記の電流供給部分と超電導マグネット巻線の両方に用いたものが完成した^{6, 7)}。Bi 系高温超電導材料の臨界温度は 110 K 以上であるために、運転温度が約 10 倍に上昇し、40 K 近くにもなった。この結果、冷凍機への負荷 (消費電力) が大幅に軽減されたことは言うまでもない。このために上記 Bi 系超電導マグネットを用いた磁気分離装置⁸⁾は、完成後、科学技術庁金属材料技術研究所における環境ホルモンに汚染された水の浄化⁹⁾と、岩手県雫石町での地熱水中の砒素

浄化実験¹⁰⁾に実用された。研究成果については各々の文献⁶⁻¹⁰⁾を参照されたい。

3.2 強磁界内で生じる現象に関する研究と開発

上記冷凍機冷却型超電導マグネットの実現は超電導応用研究開発分野に大きな影響を与えた。すなわち、一般社会での強磁界利用の実用可能性と国際的な技術開発競争の重要性が認識され、1988 年頃から約 20 年間、通商産業省と科学技術庁、運輸省などは関連研究機関に多大な研究開発費を投入した。その結果、(1) 新超電導物質の材料化、(2) マグネット技術、(3) 新磁気現象のメカニズムなどに関する研究が急速に進展した。特に(3)に関する 1990 年代後半の研究者数と活発さは、世界的に突出したものであった。

当時の研究機関は、工業技術院の電子技術総合研究所と化学技術研究所、科学技術庁金属材料技術研究所、岡崎国立共同研究機構、東京大学、東北大学、東京工業大学、東京都立大学、横浜国立大学、岩手大学、名古屋大学、大阪大学、信州大学などと、埼玉県と岩手県の公立研究機関であり、新磁気科学と呼ばれる新しい科学現象一例えば、たんぱく質、プラスチック、空気や酸素ガスとその他のガス、ガラス、カーボン繊維、炎、溶液の電気分解、電気めっき、高分子物質合成、猩猩蠅 (ショウジョウバエ) の遺伝などへの顕著な磁界印加効果を示す現象一が発見され、そのメカニズムが検討された。初期の研究成果は、例えば文献^{11, 12)}に集約されている。

Fig. 3 Two methods to cool down a superconducting magnet for comparison⁴⁾.

Left: Conduction cooling; Right: Liquid helium pool-boiled cooling.

一方 1980 年代後半のフランスではすでに、従来型超電導マグネットの発生する 8 T 程度の強磁界内に置いた常磁性物質に、顕著な磁界印加効果が現れることを見出していた。すなわち、Tournier 率いる研究グループは磁気力で高温液体を空間に浮かせる実験装置を試作し、高温液体の対流を磁界強度と磁界勾配によって制御可能なことを公表した¹³⁾。また強磁性材料や超電導材料の合成を磁場浮遊状態でを行い、その重量をモニターすると、熱処理プロセス進展状況を詳細に記録できること¹⁴⁾も明らかにした。その後、空中に浮かせた複数の液体球が衝突し合体する様子の観察が可能なことも見出している。

Tournier の他にも、例えば 1960 年代後半から超電導応用の観点から磁気分離研究開発をリードしてきた英国サザンブトン大学の James H.P. Watson をはじめとして、仏国や米国の研究リーダーが日本政府の要請に応じて 1999 年以降数回来日し、日本の研究開発を見学して回った。その中で行われた彼らの含蓄ある講演と研究成果や方向に関する議論が、各プロジェクト遂行中であったわが国の研究者と支援者たちの志気を高めたことは特筆に値する。

研究成果の応用例としては、厚み方向の熱伝導が従来の 10 倍以上のカーボン樹脂シートがある。これにより携帯電話やノートパソコンの CPU 発熱の効率的冷却が可能になった。従来の熱処理工程と異なる点は、カーボン樹脂シート長さ方向に強磁界を印加しておくことである。カーボン繊維は反磁性物質であるため 1 本 1 本の繊維がシート厚み方向に配向し、冷却後の熱伝導率が 1 桁以上向上した。

日本では、上記研究プロジェクト遂行当時に設置された約 100 台の冷凍機冷却型超電導マグネットを利用して、強磁界応用研究が現在も継続されているところが多い。

3.3 強磁界内で生じる現象の主要因

磁界印加によって発現する現象をその主要因によって分類すると、以下の 5 つである。

- (1) 勾配磁界中に置かれた物質に作用する磁気力
- (2) 電子スピンの及ぼす磁界印加効果
- (3) 磁界中で移動する自由電荷に働くローレンツ力
- (4) 結晶磁気異方性に起因する回転力
- (5) 生体遺伝子形成過程への磁界印加効果

Fig. 4 Titanium mine at Tapira, State of Minas Gerais, Brazil, February 16, 1984.

Fig. 5 Magnetic separator using permanent magnets at Tapira, Minas Gerais, Brazil, February 16, 1984.

(1) は後述の磁気分離であり、前節カーボン樹脂シートは (4) の応用である。(5) では劣性遺伝発現確率の増加が知られている。さらに、これら以外には、水分子クラスターの発生や生体代謝機能の亢進などが主張されることがある。しかし、科学的根拠を疑問視する研究者は多い。

4. 強い磁気力を発生する高勾配磁気分離の誕生

4.1 従来型磁気分離装置

磁気力を利用した物質分離技術は一般的に磁気分離 (Magnetic Separation) と呼ばれる。鉱山における土砂と鉱物を選別する装置として古くから用いられてきた。選別対象は、直径数ミリメートルサイズの大粒径で、かつ鉄やマグネタイトなどの強磁性粒子と、弱磁性の硫化物や酸化物の粒子である。例えば、Fig. 4 に示すブラジル・ミナスジェライス州タピラ村にある世界最大の Ti 鉱山¹⁵⁾では、第一工程で永久磁石を用いた Fig. 5 の磁気分離装置で、鋭錐石 (Anatase) を鉄酸化物から分離している。さらに中間工程では熱処理と化学的酸化処理を加えて磁性を付与し、最終工程で再度、磁気分離装置を用い純度向上を図っている。

4.2 強い磁気力を発生しようとする 2 つの試み

(1) Frantz 型の装置

鉱山で利用される磁気分離装置 (磁気選別機) の磁気力は弱いので、被分離物は強磁性かつ大粒径粒子に限られる。そこで 1930 年後半に S.G. Frantz は混合物から直径数 μm の微細粒子を分離したいと考えた。このためには磁気力増強が必要であり、磁界ひずみを大きくする目的で Fig. 6 左図の Frantz Ferrofilter¹⁶⁻¹⁸⁾を思いついた。すなわち、磁界内に強磁性ワイヤを固定して磁界ひずみ (以下、磁界勾配) の大きい空間を部分的に発生させるものである。原理的には後述の高勾配磁気分離 (High Gradient Magnetic Separation) と同じであったが、電磁石の発生磁界が低いため実用できなかった。理由は、電磁石直径を大きくして処理量を増やそうとすると発生磁界が低減し、電磁石内のリボン状強磁性ワイヤに十分大きな磁界を印加できず、このために磁界勾配を大きくできなかったからである¹⁹⁾。

Fig. 6 Comparison of two magnetic separators.
Left: Frantz Ferrofilter; Right: Jones separator.

(2) Jones 型の装置

1960 年代初期になって、George Jones も上記と同様に磁気力を高めることに挑んだ。それが Fig. 6 右側の図である。すなわち、両面に突起を付けた強磁性板を数枚、継鉄付き電磁石の磁極間に適度な間隔で固定した。その結果、低品位鉄鉱石の大粒径ヘマタイトであれば、なんとか選別できた。しかし、磁界勾配は上記 Frantz 型装置の磁気飽和強磁性ワイヤ近傍の値の約 1% しかなく、そのために磁気力は弱かった。したがって、小粒径粒子の処理には無力であり、かつ強磁性板の突起部分の大変狭い空間にしか被分離物が吸着されないため、大型装置であるにもかかわらず処理量が少なく実用的ではなかった¹⁹⁾。

4.2 高勾配磁気分離改良のきっかけと実用化

磁気分離技術が見直されたきっかけは 1960 年代に米空軍科学局研究予算によりマサチューセッツ工科大学磁石研究所（以下、MIT）で実施された磁気単極子の探索研究²⁰⁾であった。この研究は、強磁場を用いて存在未確認の磁気単極子を鉱物から引き出すことを目論んだものであった。彼らは「磁気単極子は宇宙線被爆で発生し鉱物に蓄えられる。」という科学シナリオを思い描いていたからである。

なお、磁気単極子とは、N 極のみ、または S 極のみの性質を持つ粒子である。これらが自然界に存在しても何ら奇妙ではないことは理論物理学者 Paul A.M. Dirac が報告している²¹⁾。しかし、正電荷あるいは負電荷のみを持つ電気単極子とは異なり、存在が確認されていなかった。

ところが研究結果は、彼らの科学シナリオを裏付けるものではなかった。すなわち、鉱物から抽出できなかったのである。彼らは、文献²⁰⁾で、否定的結果は磁気単極子の大きさ予測の困難さのためであり、存在そのものの否定ではないと主張している。

その約 20 年後の 1982 年 2 月に、スタンフォード大学の Blas Cabrera が、自作検出器を用いて磁気単極子を発見したと報じた²²⁾。しかし、現在までのところ、追試験に成功した者はいない。したがって、自然界に本当に存在するかど

うかは依然不明のままである。

さて、話を磁気分離に戻そう。前節の Frantz Ferrofilter から 30 年以上経た 1970 年代初期、MIT の学生 Christopher de Latour と研究者の Henry H. Kolm, John A. Oberteuffer, David Kelland, Peter G. Marston らは High Gradient Magnetic Separation（高勾配磁気分離、以下 HGMS）を発明し、製紙業用カオリン粘土の精製装置として実用化した²³⁻²⁶⁾。Fig. 7 がこの Kolm-Marston 型装置²⁶⁾である。これと Frantz Ferrofilter との比較考察については後出の第 6 節を参照。

岡本祥一らは「それ（HGMS）は、（磁気単極子存在の証明という）アカデミックな学問の有用性に対する世界的な反省の気運から、NSF の RANN（Research Applied to the National Needs）の援助を得て、工業上の応用の開発に発展（した）」と記している²⁷⁾。

文献¹⁹⁾に記された HGMS 発明経緯は次のようである：

- (1) 1960 年代初期に MIT の研究者は磁気飽和スチールワール近傍に大きな磁界勾配が発生する事実気づいた。
- (2) 同年代半ばにカオリン粘土精製の相談が持ち込まれ、
- (3) 原料中の主要な不純物のチタン酸化物が μm サイズの酸化鉄粒子に固着していることが判明し、
- (4) HGMS 精製装置の開発を開始した。

5. 磁気力発生原理

5.1 高勾配磁界の発生

強い磁気力を発生する高勾配磁気分離の基本原理解は磁界勾配を極端に大きくすることである。これは、磁気フィルタと呼ばれるメッシュ状やワール状に加工された強磁性線

Fig. 7 Kolm-Marston type of HGMS²⁶⁾.

に外部から磁界を印加する手法で実現できる。

具体的には、強磁性線の長さ方向が紙面に垂直になるように配置して、外部から横軸 x 方向に均一磁界 H_0 [A/m] を印加する。すると、その近傍に極端に大きな磁界勾配が発生するのであるが、この理由を以下に説明しよう。

Fig. 8(a)と(b)の中央の円は、飽和磁化（磁気モーメント密度） $\mu_0 M_s = 1$ [T] の上記強磁性線を円柱として、その円断面を示している。同図(a)は、水平右向きの外部均一磁界 $\mu_0 H_0$ ($= 1$ [T]) (以下、外部磁界) によって、その飽和磁化まで磁化されたときの磁束分布である。同図(b)は外部磁界を取り去っても飽和磁化の値が変化しないと仮定した場合の磁束分布計算例²⁸⁾である。すなわち、これと水平右向きの外部均一磁界 $\mu_0 H_0$ ($= 1$ [T]) の和で同図(a)の磁束分布が現れると考えてよい。なお、座標には距離を強磁性線半径で規格化した規格化座標を用いている。

Fig. 8(a)(b)の強磁性線の左右表面には $-m$ [Wb] と $+m$ [Wb] の磁極ができる。同図(b)の磁力線に注目すると、その方向は、磁極近傍空間における x 軸上では外部磁界 H_0 と同じ方向であるが、 y 軸上では反対向きである。したがって前者では磁界は強く、後者では弱いことが分かる。こうして強磁性線近傍には磁界の強弱の分布、すなわち磁界勾配が形成される。なお、磁界勾配は x - y 座標 $(1,0)$ と $(-1,0)$ で最も大きく、同 $(0,1)$ と $(0,-1)$ では最も小さくなる。

最大磁界勾配は、円柱磁性線半径を a [m] とすると次式で計算できる。楕円断面の場合については文献^{29,30)} 参照。

$$(\nabla \mu_0 H)_{\max} = \mu_0 M_s / a \quad [\text{T/m}] \quad (1)$$

例えば、線径 $2a$ が $100 \mu\text{m}$ 、飽和磁化が 1.0 T であれば、 $2 \times 10^4 \text{ T/m}$ となり、永久磁石近傍空間の 1 万倍に達する。

(a) Magnetic field $\mu_0 H_0$ ($= 1$ [T]) is applied in the x direction. (b) No external magnetic field. Magnetization $\mu_0 M_s = 1$ [T]

Fig. 8 Cross-sectional view of a circular cylinder wire and magnetic flux lines with and without $\mu_0 H_0$ applied externally²⁸⁾.

もし吸引対象が常磁性粒子であれば、そこで作用する磁気力は磁界勾配に比例するので 1 万倍にもなる。ただし永久磁石は希土類磁石であり $\mu_0 H_0 = 1.0 \text{ T}$ を発生するとした。また、被分離粒子の大きさには制限があり、経験的には強磁性線の直径程度が限度と考えられている³¹⁾。

5.2 強力な磁気力の発生

つぎに分散媒中にある被捕獲粒子に働く力、磁気力 F_m [N] を電気磁気学の SI 単位 E-B 対応系で表示すると以下のようになる。導出には、被捕獲粒子の内部磁化を場所によらず一定と仮定し、被捕獲粒子の持つ静磁エネルギーから同じ体積の分散媒の持つ静磁エネルギーを差し引いた値の傾きが磁気力に等しいとした³²⁾。

$$F_{m\xi} = V_p \cdot M^* \cdot \mu_0 \nabla_\xi H \quad [\text{N}] \quad (2)$$

$$M^* = M_p - M_f = \chi_{\text{eff}} H_0 \quad [\text{A/m}] \quad (3)$$

$$\chi_{\text{eff}} = \frac{\chi_p - \chi_f}{(1 + \chi_p)(1 + \chi_f)} \quad [-] \quad (4)$$

ただし V_p は被捕獲粒子の体積、 M^* は被捕獲粒子の分散媒に対する相対磁化、 μ_0 は真空の透磁率、 $\nabla_\xi H$ は被捕獲粒子のある場所の ξ 方向 (x 方向または y 方向) の磁界勾配、 H は強磁性線近傍の磁界 H の大きさ、 χ_p と χ_f はそれぞれ被捕獲粒子と分散媒の磁化率である。また、(4)式で定義される χ_{eff} を実効磁化率と呼ぶことにする。

磁気力の発生には(2)式をゼロにしないことが必要である。したがって、① $V_p \neq 0$ 、② $M^* \neq 0$ 、③ $\nabla_\xi H \neq 0$ のすべてが満たされなければならない。また磁気力を強大にするには、それぞれを大きくすればよい。MIT の研究者らが強磁性細線に垂直に磁界を印加して強大な磁気力を発生した高勾配磁気分離 (HGMS) 法¹⁹⁾ は、③の磁界勾配を桁違いに大きくした手法である。

反対に、磁気力を弱くして強磁性線に吸着した被捕獲粒子を引き離したい場合には、(3)式の相対磁化 M^* を小さくすればよい。そのためには、印加磁界 H_0 の低減が必要である。そうすれば、磁界勾配 $\mu_0 \nabla_\xi H$ も小さくでき、磁気力は急激に減少する。

6. 高勾配磁気分離実用装置の実現と改良

6.1 MIT で電磁石を改良、カオリン粘土精製へ

実用装置実現には、スチールワイヤやスチールウールの磁気フィルタに磁界印加するためのマグネットが必要である。そこで MIT の Marston らは最適設計検討のために次の 3 条件を設定した。

- (1) 磁気フィルタを磁気飽和させ得る強い磁界の発生
- (2) 大量処理に適する大磁場空間の実現
- (3) 製作と運転に要するコストの低価格化

Fig. 6 の Frantz Ferrofilter と、1970 年代初期に実用装置を実現した Fig. 7 の Kolm-Marston 型装置とを比べると、後者の工夫が以下の 3 つであったことが分かる：

- ① 電磁コイル内側に 2 組の鉄磁極を設置
- ② Fig. 7 のように鉄製ケース（鉄ヨーク）で電磁石の外側を囲み、かつ被分離スラリーの磁気フィルタ入口と出口部分にも鉄ヨークを設置して磁束を短絡
- ③ 電磁コイルの磁界発生方向の長さを直径より短くした
この結果、直径 2.1 m、高さ 0.5 m の円筒大空間に 1.6×10^6 A/m の磁界 ($\mu_0 H_0 = 2.0$ T) 発生が可能になり、60 ton/時のジョージア・カオリン粘土高速精製が実現した²⁶⁾。かつ、製作コストと運転コストを、ともに従来型の 1/10 にできた。ただし、所要電力は 500 kW であり、多量の鉄をヨーク（継鉄）として用いるので、装置重量が約 250 ton もある巨大なものであった。

6.2 製鉄排水純化装置の開発

日本では製鉄排水の純化と再利用を目的に、発生磁界 4×10^5 A/m ($\mu_0 H_0 = 0.5$ T) までの装置が 1970 年代後半から 1980 年初めにかけて 100 台以上が製作された³³⁻³⁶⁾。これらは従来の沈殿池式に比べて後述のように大きなメリットを持つことが判明し、順次置き換わった。

世界初の実用装置は日立プラント建設から川崎製鉄千葉に納入された。ろ過部分の直径は 2.1 m であった。Fig. 9 は大同特殊鋼製の熱間圧延排水純化用高勾配電磁フィルタ³⁴⁻³⁶⁾であり、処理量は 1,100 ton/時で、原水濃度 150 ppm の浮遊酸化鉄粒子を 25 ppm 以下に低減する。適用磁界は 2.7×10^5 A/m ($\mu_0 H_0 = 0.34$ T)、ろ過速度は 600 m/時。この結果、従来の沈殿池方式に比較すると節約効果が大きく、例えば設置面積を 1/20 に、建設コストを 1/2 に、運転コストを 1/6 にできた。

6.3 超電導マグネットの適用

1980 年代末期になると、米国のカオリン粘土精製用高勾配磁気分離装置に超電導マグネットを適用しようと試みられた³⁷⁾。この結果、運転温度 4.5 K、発生磁界 2 T の低温超電導マグネットであったにもかかわらず、従来の銅鉄マ

グネットシステムと比べて、装置重量を 42% に、装置体積を 34% に、消費電力 500 kW をわずか 25 kW (5%) に低減した。しかも、励磁時間を 1 分に短縮して稼働効率を大幅に向上させた³⁸⁾。

当時、上記の超電導化には次のような異論があった：『高勾配磁気分離技術の意義は、磁界勾配を桁違いに大きくできる点にあるはず。しかし電磁石を超電導磁石に置き換えても、利用可能な磁界を桁違いに強くできるわけではないのだから、あまり意味がないのではないか。』というもの。しかし実際の超電導化は、上記のように、大きな省エネルギー効果とコンパクト化、および高速化をもたらした。そのため、高勾配磁気分離本来の利点がはじめて発揮されたといえる。

しかし、これでもまだ超電導のメリットを十分活用できなかった。というのは、励磁と減磁を、例えば 15 分毎に繰り返すので、超電導コイルと極低温発生システムへの負担が大きかった。さらに、磁石の最適化や 2 T 以上の高磁界利用に関する検討はされず、結局このタイプは 3 台しか製作されなかった。

サザンプトン大学教授 James H.P. Watson によれば、上記の超電導マグネット採用手法は「洗練さに欠けたレトロ・フィッティングである。」すなわち、超電導ではじめて実現可能な省エネルギー効果の「永久電流」が活用されていない。それどころか、従来の銅鉄マグネットと同じ励磁・減磁を繰り返すので、有害な交流損失が発生する。

このために英国でさらなる改良が進み、永久電流運転方式と高磁界の採用、および装置寸法の小型化が図られた。すなわち、1990 年代初期に永久電流運転で発生磁界 $4 \times 10^6 \sim 4.8 \times 10^6$ A/m (= 5 ~ 6 T) の装置が完成した³⁹⁾。この結果、1999 年 2 月に至ると、後述のように、世界中で約 30 台の同型の磁気分離装置が主に鉱物選別分野で実用されるようになった。Fig. 10 がこの一例である。横型ソレノイド超電導磁石の高さの最長部分は約 5 m、磁気フィルタの入る中心部磁界空間の最大径は 1 m である。

Fig. 9 Magnetic separator adopted for water recycling in the steel industry³⁶⁾.

Fig. 10 Superconducting reciprocating canister HGMS system. Courtesy of Oxford Instruments and Carpc Division, Outokumpu Technology, Inc.

改良点は以下の3つであった：(1) 鉄ヨーク無しで永久電流モード稼動とし、磁石と冷却システムへの負担を軽減、(2) 発生磁界を5～6Tへ増強。(3) 磁気フィルタ2組を交互に発生磁界空間（ボア内）へ入れて使用し、稼働率を向上。この結果、処理量に対する装置寸法と重量を著しく低減できた³⁹⁾。

Watsonによれば、1999年2月時点でブラジル7台、米国5台、英国4台、ドイツ3台、インド2台、オーストラリア2台、オーストリア1台、エジプト1台の超電導HGMS装置が稼動しているとのことであった⁴⁰⁾。さらに同教授は次のように語った：「90年間の超電導技術研究開発の末に、2つの大型産業応用に成功した。それらは磁気共鳴イメージング（MRI）と磁気分離であり、前者は1台/日、後者は1台/月のペースで生産されている。」⁴⁰⁾（筆者注：これに加えて、この頃から熔融シリコン引き上げ装置にも超電導マグネットが適用されるようになった。）

以上のように、高勾配磁気分離技術は、従来不可能とされていた弱磁性・小粒径、かつ微量の不純物を含む大量の液体または気体を、高速かつ経済的に分離・ろ過することを可能にした。この技術のキーポイントは2つである。すなわち、(1) 強い磁気力を直接、不純物粒子に選択的に作用させ得ることと、かつ、(2) 磁界を低減することで磁気フィルタを簡単に再生できることである。

7. カオリン粘土精製と製鉄排水純化以外への応用

7.1 ガラス研磨廃棄物の再資源化装置

1980年代初期に、Fig. 11に示すガラス研磨廃棄物の再資源化装置⁴¹⁾が開発された。これはブラウン管（CRT）製造工場のガラス研磨工程で発生するガラス粉と研磨材の混合物を磁気分離して後者の混入割合を低減し、前者を原料に戻す装置である。すなわち、研磨によって3%の鉄分が混入したガラス粉を0.65%まで低減し、原料に添加する。

Fig. 11 Recovery and recycling system of glass grinding sludge.

この結果、一工場当りの水分抜き排出量 300～350 ton/時のガラス研磨廃棄物をすべて再資源化できた。当時の節約効果は原料換算で一ヶ月当り数百万円であった。ただし、この工場への装置導入においては、装置設計はもちろん、使用研磨材と研磨工程を全面的に見直すことが行われ、最適運転条件の設定に10年以上を費やした。財団法人クリーンジャパンセンターは、同社のこの功績に対して1994年度の再資源化貢献賞を贈った。

7.2 放射性微粒子のハンドリングに関する検討

磁気分離フィルタ（HGMF）の材質は金属であり、かつ外部磁場の除去により繰り返し使用できる。したがって、放射性物質の処理にはきわめて都合が良い。そのため原子力分野でこの技術を応用しようという気運が高まり、1988～1992年度に動力炉核燃料開発事業団から未踏科学技術協会に対して“磁気分離技術に関する調査研究”が委託された。このうち1989～1992年度の活動内容はFig. 12のとおりである。すなわち、各年度の特徴を短く表現すると、(1) 概念の創出、(2) 概念の具体化、(3) 仮想システムの高度化、(4) 実現性に関する検討の深度化であった。

活動内容をもう少し具体的に記すと、(1) 核燃料再処理における清澄工程での放射性不溶解残渣除去と、(2) 燃料貯蔵プールに残存する放射性物質の浄化への適用法、および、(3) 磁気分離フィルタ部に捕捉された放射性物質に関する臨界対策を考慮した磁気フィルタの設計法、(4) 高勾配磁場利用の作用場流動分画法（FFF: Magnetic Field Flow Fractionation）の提案と性能解析などである。

これらについて当時の横浜国立大学教授・塚本修巳委員長のもとに委員らが議論した記録とこの活動への評価は現在、日本原子力研究開発機構のホームページで公開されている^{42, 43)}。他の調査活動と比べ、かなり良い評価を得ているが、それらの詳細を知りたい場合には是非閲覧されたい。さらに1993年から4年間、同上事業団と電子技術総合研究所との間で共同研究が行われた⁴⁴⁾。その主要テーマは上記FFFの振る舞いを数値解析して、どの程度微細な放射性粒子に磁気力を作用させて分離できるかを試算したものであった。その結果、単純モデルの仮定のもとではあるが、7Tの外部磁界中に直径20μmの強磁性線を配置した磁気カラムによって、粒径150Å程度のNdとPuの粒子を連続分離可能なことを理論的に示した^{45, 46)}。

その後この研究は、科学技術庁第二期超伝導マルチコアプロジェクトに引き継がれた。そこでは更に精度の高い数値計算プログラムが開発され、流体流速や磁界勾配発生のための強磁性線配置をパラメータにした解析⁴⁷⁾が、さらに被分離粒子粒径分布の有無の分離性能への影響^{48, 49)}が検討された。

もちろん、実験的検討^{50, 51)}も行われたが、被分離試料液中の粒子粒径を数百Åに調整する技術を持ち合わせていなかったため、CoCl₂やCrCl₃、NiCl₂、CuSO₄、NaIなどの

Fig. 12 Feasibility study on the utilization of magnetic separation and high magnetic field in the nuclear fuel cycle.

電離液を、長さ 450 mm の試作磁気クロマトカラム⁵²⁾に流し、カラム通過後の濃度をフォトダイオードアレイ検出器でモニターした。このときの外部磁界は 0~3 T であった。この実験の結果、各金属イオン濃度と印加磁界およびボーア磁子数の積を横軸にとり、縦軸にカラム通過時間をとって整理すると、すべてのデータが 1 本の曲線上に集約されることを見出した。すなわち、水中の遷移金属イオンがそれらの磁性に応じた磁気力を受けて、カラム排出時間が異なることを明らかにした⁵³⁾。

なお、遷移金属イオンの流れをリアルタイムで高感度で検出する目的で SQUID を用いた新しい手法も試作された。濃度が 1 mol/L の 6 種類の遷移金属イオン溶液を用いた実験からは、磁気モーメント感度が $3.7 \times 10^{-5} \text{ G} \cdot \text{cc/V}$ であり、濃度から計算される各物質のボーア磁子数と出力電圧が比例することが判明した⁵⁴⁾。この結果、溶液中の金属イオンの磁性の大きさを、その状態のまま SQUID で直接計測可能なことを明らかにした。

7.3 石炭の脱硫と脱灰

1960 年代末から始まった磁気分離研究開発分野には多くの研究者や技術者が集い、多種多様な応用を目指して活動した。その中には当然、たくさんの失敗があったはずであるが、もちろんほとんど公表されなかった。

ところが長い年月が経過した後、例えば学協会調査委

員会での雑談、あるいは転職や定年などで職場を離れた研究者からの裏話として、ときどき洩れてくる。ここでは石炭の脱硫と脱灰への磁気分離応用を紹介する。

石炭には有機硫黄と無機硫黄が含まれている。前者は反磁性であるが、後者のほとんどはパイライト FeS_2 や FeS , FeS_x , $\text{FeSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ などであり、鉄との化合物である。しかも FeS_x には熱するとピロタイトと呼ばれる反強磁性相が生じるので、鉄の 1/10 程度の比較的大きな自発磁化を持つようになる。このことは磁気分離適用にたいへん都合が良い。このため、米国では比較的早期から磁気分離応用の有望な分野として着目された⁵⁵⁻⁵⁷⁾。もちろん日本や中国でも微粉炭や溶剤精製炭に関する実験が行われた。

しかし、現在実用されていない。理由は燃焼後の石炭に適用される化学的排煙脱硫技術の開発が速かったことと、石炭化学に携わった多くの研究者の興味が物理的前処理の磁気分離技術に向かわなかったことであろう。この分野の磁気力利用技術が当初の期待どおりに発展しなかったことに残念な思いを抱くのは筆者のみではないと思う。

8. 第 3 期以降の高温超電導マグネット応用研究

液体ヘリウムの不必要な酸化物超電導体電流リード付冷凍機冷却式超電導マグネットを用いて、約 5 つに分類できる磁界印加現象の確認と応用の試みが 1995 年頃から盛んになったことを第 3 節で述べた。その中でも、磁気分離は最も実用可能性の高い応用分野とみなされ、例えば、湖沼のアオコ除去⁵⁸⁾ (発生磁界 1 T) や、酸化物超電導バルク体採用のオープン・グラディエント磁気分離⁵⁹⁾ (OGMS)、研究排水処理用 OGMS⁶⁰⁾ などが試みられた。

2004 年頃、日本で初めて超電導マグネットを用いた実用装置が古紙再生工場稼働を開始した⁶¹⁾。この成果は 1984 年頃から大阪大学で研究開発を開始し、20 年もの長い間、研究開発を持続してきた西嶋茂宏氏と多くの学内外の共同研究者の尊い努力の結実の結果である。しかし、それと同時に、日本で磁気分離の超電導化を目指して 1977 年から研究を開始した旧電子技術総合研究所と旧公害資源研究所、あるいはその後の国立研究所や大学、公立研究機関のプロジェクト研究分担者、およびそれらへの協力者、さらに、当時の研究成果報告⁶²⁻⁷³⁾ や動向調査報告⁷⁴⁻⁷⁹⁾ 原稿の執筆を担当した電気学会、低温工学協会 (現、公益社団法人低温工学・超電導学会)、未踏科学技術協会などの委員たちの夢の実現でもあった。

なぜ夢の実現に 30 年も待たされたのか。理由は銅酸化

物超電導物質の発見が 1986 年、これを電流供給部分に用いた液体ヘリウム不要の超電導磁石の完成が 1993 年頃であり、使い易い新しい超電導磁石の完成に、年月を要したからである。しかし、これが“使える超電導磁石”として認知されなかったとすれば、“夢”はまだ続いていたかも知れない。要素技術の成熟と社会ニーズの追い風をいち早く取り込んでシステムを完成させた研究者に脱帽である。

9. 今後に遂行すべき実用化のための研究開発

磁気分離技術には環境保全と廃棄物リサイクルへの貢献が期待されている。すでに述べたように、第 3 期の磁気分離研究プロジェクトのほとんどは、国内の研究者によって遂行された。したがって、基礎研究の成果はすでに我が国に大量に蓄積されている。これらを適用して実用段階へ進むべきテーマは多数あるが、その中でも緊急性の高いものを、以下に 4 つ提案する。

9.1 放射能汚染土壌の浄化

現在、福島第一原子力発電所から飛散した放射性物質が少なくとも福島県表土の 1/3 以上を汚染している。そのため、希薄な ppb オーダーの放射性物質を除去するための安価でかつ確実な処理技術が求められている。すなわち、現時点で行われている地表の削り取りだけでは問題は解決しない。その削り取った土壌中の主要放射性物質である Cs-137 と Sr-90 の半減期が約 30 年であり、長期的かつ広大な保管場所の確保が必要なためである。したがって、除染・分離後の放射性物質の嵩をできるかぎり小量にする技術が早急に求められている。

これには磁気分離が最適であると、筆者らは考えている。磁気フィルタと洗浄水および吸着剤の再利用が容易なことから、強大な磁気力を利用するので処理速度が従来型フィルタより数桁速いからである。提案工程は以下のとおり：土壌を大量水で洗浄し、放射性物質を溶出あるいは単離させ、その水を反応沈殿タンクに送る。そこで磁性の大きな微細粉末吸着剤と混ぜて攪拌し、放射性物質を吸着させる。その後、大粒径粒子については沈殿させ、沈殿しにくい微細粒子を磁気分離装置で浄化する。これらの操作により浄化された水と吸着剤は再び土壌除染に用いられる。

すでに 6.2 節で概観したように、鉄鋼排水純化システムと同様、磁気分離装置は繰り返し使用可能な磁気フィルタを含めて、すべて金属で密閉構造にできる。そのため放射線による劣化の心配はなく、かつ放射性二次廃棄物は非常に少ない。

磁性吸着剤には、第 2 節で概観した磁気分離研究開発の第 3 期の成果が利用できる。すなわち、それぞれの研究ターゲットに応じて多くの磁性吸着剤が開発・使用された。それらの多くは微細粒子で比表面積が大きく吸着性能に優れているが、沈殿、膜分離等の磁気分離以外の方法では分離が難しい吸着剤である。例えば、ゼオライト、活性

炭、特定物質を吸着する有機物を表面に修飾したマグネタイト、さらに微細な超常磁性のマグヘマイトナノ粒子や水酸化鉄等を使った磁気種付け法も開発され、ダイオキシン、リン、有機物、ヒ素などの除去にも成功している。

9.2 地熱水無害化システムとその他

生体に有害な砒素を地熱水から除去できれば、地熱発電所で使用した後の地熱水を地下へ戻す必要がなく、暖房施設やビニールハウス栽培施設で利用できる。この原理実証基礎研究は 2005 年に完了^{67, 68, 73)}しており、本格的な実用システム構築に関するプロジェクト開始が望まれる。

次に、表面を疎水化処理した磁性粉の利用による排水中の微量環境ホルモン除去⁷⁰⁾と、従来の活性汚泥法に比べて余剰汚泥発生を低減でき、かつ磁性粉の再利用が可能な磁化活性汚泥法⁷²⁾を推したい。これらは近年の急激な工業化で有害な産業廃水が大量に発生し、地域河川に多大な負荷をかけている発展途上国、例えば、中国や東南アジアにおける実用化が期待される。

ただし磁化活性汚泥法⁷²⁾については超電導マグネット採用のメリットに関する総合的検討が現在のところ少ないように思う。すなわち、工場廃水や一般下水、酪農廃水、農業集落廃水などの大規模処理システム構築に必要な設備と運転・維持管理方式への多面的で詳細な検討が不足している。したがって、国民の安全・安心を守る中立機関の各国の国公立研究機関と大学に日本から働きかけ、異分野研究者の共同作業として、根本的かつ公正な課題設定とその解決策の策定に向けて着実に行動すべきである。

独立行政法人物質・材料研究機構特別研究員・岡田秀彦氏と、熊本大学特任教授・千田 晋氏、および大阪大学教授・西嶋茂宏氏には、本稿執筆時にたいへん有益な意見をいただきました。心より感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) K. Watanabe, et al.: “(Nb, Ti)₃Sn superconducting magnet operated at 11 K in vacuum using high- T_c (Bi, Pb)₂Sr₂Ca₂Cu₃O₁₀ current leads,” Jpn. J. Appl. Phys. **32** (1993) L488
- 2) J. Sakuraba, et al.: “Development of liquid helium-free superconducting magnet,” IEICE Trans. Electron. **E78-C** (1995) 535
- 3) H. Maeda, Y. Tanaka, M. Fukutomi and T. Asano: “A new high- T_c oxide superconductor without a rare earth element,” Jpn. J. Appl. Phys. Part 2 **27** (1988) L209-210
- 4) 桜庭順二：「液体ヘリウムを使わない超電導マグネット」、電気学会超電導磁気分離技術調査専門委員会資料 no.22-8 (January 10, 1997)
- 5) M.O. Hoening: “Design concept for a mechanically refrigerated 13 K superconducting magnet system,” IEEE Trans. Magn. **MAG-19** (1983) 880
- 6) H. Kumakura, T. Ohara, H. Kitaguchi, K. Togano, H. Wada, H. Mukai, K. Ohmatsu and H. Takei: “Conduction-cooled Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O_x (Bi-2223) magnet for magnetic separation,” Physica C **350** (2000) 76-82

- 7) T. Ohara, H. Kumakura and H. Wada: "Magnetic separation using superconducting magnets," *Physica C* **357-360** (2001) 1272-1280
- 8) H. Kumakura, T. Ohara, H. Kitaguchi, K. Togano, H. Wada, H. Mukai, K. Ohmatsu and H. Takei: "Development of Bi-2223 magnetic separation system," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **11** (2001) 2519-2522
- 9) 三橋和成, 吉崎亮造, 岡田秀彦, 小原健司, 和田 仁: 「超電導磁石を用いる環境ホルモン除去磁気分離システムの開発」, *分析化学* **52** (2003) 121-126
- 10) H. Okada, Y. Kudo, H. Nakazawa, A. Chiba, K. Mitsuhashi, T. Ohara and H. Wada: "Removal system of arsenic from geothermal water by high gradient magnetic separation-HGMS reciprocal filter," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **14** (2004) 1576-1579
- 11) Proceedings of Symposium on New Magnetic Science or Magneto-Science, The First Meeting '97 (November 27-28, 1997)/The Second Meeting '98 (November 25-27, 1998)/Third Meeting '99 (November 24-26, 1999)
- 12) 北澤宏一監修, 尾関寿美男, 谷本能文, 山口益弘編著: 「磁気科学—磁場が拓く物質・機能および生命科学のフロンティア—」, アイピーシー, 東京 (2002)
- 13) D. Braithwaite, E. Beaunon and R. Tournier: "Magnetically controlled convection in a paramagnetic fluid," *Nature* **354** (1991) 134-136
- 14) E. Beaunon, D. Bourgault, D. Braithwaite, P. de Rango, R. Perrier de la Bathie, A. Sulpice and R. Tournier: "Material processing in high static magnetic field – a review of an experimental study on levitation, phase separation, convection and texturation," *J. Phys. I France* **3** (1993) 399-421
- 15) 小原健司: 「伯国 FTI 研究所と Campinas 大学に於いて遂行したニオブをベースとした高性能超電導線材製造および応用技術に関する研究」, 電子技術総合研究所在外研究報告書 (1984)
- 16) S.F. Frantz: US patent no.2074085 (1937)
- 17) S.G. Frantz: "Separation by magnetic methods," *Chemical & Metallurgical Engineering* **45**, no.5 (1938) quoted from both the next references 18) and 19)
- 18) P.G. Marston: "The use of electromagnetic fields for the separation of materials," Major review paper presented at the World Electrotechnical Congress, Moscow, USSR (June 21-25, 1977)
- 19) H. Kolm, J. Oberteuffer and D. Kelland: "High gradient magnetic separation," *Scientific American* **233**, no. 5 (1975) 46-54
- 20) E. Goto, H.H. Kolm and K.W. Ford: "Search for ferromagnetically trapped magnetic monopoles of cosmic-ray origin," *Physical Review* **132** (1963) 387-396
- 21) P.A.M. Dirac: "The theory of magnetic poles," *J. Appl. Phys.* **74** (1948) 817-830
- 22) B. Cabrera: "First results from a superconductive detector for moving magnetic monopoles," *Phys. Rev. Lett.* **48** (1982) 1378-1381
- 23) C. de Latour: "Magnetic fields in aqueous systems," Submitted document in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Dr. Philosophy, MIT (August 1974)
- 24) H.H. Kolm and W. Meadow: US patent no.3567026 (1971), Filed Ser. no.761048 (September 20, 1968)
- 25) P.G. Marston, J.J. Nolan and L.M. Lontai: US patent no.3627678 (1971), filed Ser. no. 854895 (September 3, 1969)
- 26) J. Iannicelli: "New developments in magnetic separation," *IEEE Trans. Magn.* **MAG-12** (1976) 436-443
- 27) 岡本祥一, 関沢 尚: 「公害処理 (水処理) と磁場応用」, *応用物理* **43** (1974) 183-188
- 28) 小原健司, 藤田敦久: 「磁気学の基礎: 磁力線の描き方」, 第 7 回 2008 磁気力制御・磁場応用夏の学校予稿集 (September 2008) 7
- 29) 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」, 電子技術総合研究所研究報告 858 (September 1985) 15-41
- 30) T. Ohara: "Particle capture theory and experiment on an amorphous magnetic ribbon filter," *IEEE Trans. Magn.* **MAG-20** (1984) 436-443
- 31) J.A. Oberteuffer: "Magnetic separation: a review of principles, devices, and applications," *IEEE Trans. Magn.* **MAG-10** (1974) 223-237
- 32) 小原健司: 「磁気分離の基礎」, *Magnetic Science '97 Proceeding of The First Meeting* (November 27-28, 1997) 1-19
- 33) 滝野和彦, 松野正一, 藤田博志, 加藤洋一: 「高勾配磁気フィルタとその応用」, *工業用水* no.227 (1977) 54-59
- 34) 足立敏夫, 菅原富男, 市川修一, 大倉未代史, 矢野純一: 「高勾配電磁フィルタ」, *電気製鋼* **50** (1979) 290-296
- 35) 矢野純一, 菅原富男, 市川修一: 「高勾配電磁フィルタの廃水処理への応用」, 理研シンポジウム「化学プロセスへの磁気分離の応用」予稿集 (February 2, 1979) 45-50
- 36) 矢野純一: 「排水処理への応用」, 日本応用磁気学会第 14 回研究会資料 (March 7, 1980) 29-37
- 37) J.A. Selvaggi, P. Vander Arend and J. Colwell: "An industrial superconducting high gradient magnetic separator," *Adv. Cryo. Eng.* **33** (1988) 53-60
- 38) "Superconductivity finds work in industry," *Machine Design* (October 23, 1986) 18
- 39) J.H.P. Watson: "The design for a high- T_c superconducting magnetic separator," *Supercond. Sci. Technol.* **5** (1992) 694-702
- 40) J.H.P. Watson: private discussion at the International Symposium on Novel Uses of Magnetic Force, AIST, Tsukuba (March 8, 1999)
- 41) Y. Kenmoku and S. Sakata: "HGMS technique application to environment improvement resulting from material recycling system (I) – recovery and recycling of glass gringing sludge," *IEEE Trans. Magn.* **MAG-20** (1984) 1198-1201
- 42) 日本原子力研究開発機構公開資料, フロンティア研究評価関連資料集-I (報告書、計画書), PNC-TN1420 95-013 (January 1995) 60-63
- 43) 日本原子力研究開発機構公開資料, フロンティア研究評価関連資料-2 (OHP シート集), PNC-TN1420 95-014 (January 1995) 195-211
- 44) 日本原子力研究開発機構公開資料, 磁気分離に関する共同研究成果報告書, PNC TY8662 97-001 (May 1997) 1-83
- 45) T. Ohara, S. Mori, Y. Oda, Y. Wada and O. Tsukamoto: "Feasibility of magnetic chromatography for ultra-fine particle separation," *Trans. IEE Japan* **116-B** (1996) 979-986
- 46) T. Ohara: "Feasibility of using magnetic chromatography for ultra-fine particle separation," *High Magnetic Fields: Applications, Generation and Materials*, edited by Hans J. Schneider-Muntau, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. (1997) 43-55
- 47) 王 曉丹, 小原健司, E.R. Whitby, K.C. Karki, C.H. Winstead: 「磁気クロマトグラフィーにおける微粒子分離の計算機シミュレーション」, *電気学会論文誌* **117-B** (1997) 1466-1474

- 48) 小原健司, 王 曉丹, 和田 仁, E.R. Whitby: 「粒径分布がある場合の磁気クロマト性能の数値解析」, 電気学会論文誌 **120-A** (2000) 62-67
- 49) K.C. Karki, E.R. Whitby, S.V. Patankar, C. Winstead, T. Ohara and X. Wang: "A Numerical model for magnetic Chromatography," Appl. Mathematical Modeling **25** (April 2001) 355-373
- 50) S. Sato, K. Mitsuhashi and T. Ohara: "Effect of chemical state of dispersed phase on magnetic filtration efficiency," Separation Science and Technology **39** (2004) 2827-2838
- 51) 佐藤宗一: 「使用済燃料の再処理工程への磁気分離技術の適用」, 福井工業大学博士論文 (January 2007)
- 52) 玉ノ木敏司, 三浦賀一: 「磁気クロマトカラムの試作」, 磁気分離研究開発に関するワークショップ成果報告集, 物質・材料研究機構, TML Annual Report supplement **I** (March 2002) 51-52
- 53) K. Mitsuhashi, R. Yoshizaki, T. Ohara, F. Matsumoto, H. Nagai and H. Wada: "Retention of ions in a magnetic chromatograph using high-intensity and high-gradient magnetic field," Separation Science and Technology **37** (2002) 3635-3645
- 54) 高畑光博, 長山剛久, 荒川 彰, 品川 恵, 三橋和成, 小原健司, 藤岡耕治: 「磁気クロマト用 SQUID 装置の開発」, 第 25 回日本応用学会学術講演概要集 25pD-12 (2001) 89
- 55) S.C. Trindade and H.H. Kolm: "Magnetic desulfurization of coal," IEEE Trans. Magn. **MAG-9** (1973) 310-313
- 56) Proc. Magnetic Desulfurization of Coal Symposium, IEEE Trans. Magn. **MAG-12** (1976) 423-551
- 57) E. Maxwell and D.R. Kelland: "High gradient magnetic separation in coal desulfurization," IEEE Trans. Magn. **MAG-14** (1978) 482
- 58) N. Saho, H. Isogami, T. Takagi and M. Morita: "Continuous superconducting-magnet filtration system," IEEE Trans. Appl. Supercond. **9** (1999) 308-401
- 59) 佐保典英, 村上雅人: 「高温超電導バルク体を適用した水浄化用膜分離技術」, 未踏科学技術協会と他 2 機関主催の超伝導磁気分離に関するワークショップ資料 (November 16, 2000)
- 60) M. Franzreb, K-P Juengst and W.H. Hoell: "Open gradient magnetic separator for removal of heavy metals from waste water based on a cryogen free superconducting 5 T magnet," Proc. 15th International Conference on Magnet Technology **86**, no.1 (1997) 744-747
- 61) Y. Kakihara, T. Fukunishi, S. Takeda, S. Nishijima and A. Nakahira: "Superconducting high gradient magnetic separation for purification of wastewater from paper factory," IEEE Trans. Appl. Supercond. **14** (June 2004) 1565-1567
- 62) T. Ohara, H. Kumakura and H. Wada: "Magnetic separation: review and our research activities at TML," Proceedings of the Third Meeting of International Symposium on New Magneto-Science '99 (November 24-26, 1999) 164-179
- 63) 超電導磁気分離に関するワークショップ資料, 未踏科学技術協会-岩手県地域結集型共同研究事業-日本学術振興会未来開拓共同開催, 於東京 (November 16, 2000)
- 64) 第 2 回磁気分離研究開発に関するワークショップ予稿集, 日本学術振興会未来開拓-物質・材料研究機構-岩手県地域結集型共同研究事業共同開催, 於岡山大学 (November 1-2, 2001)
- 65) 小原健司, 渡辺恒雄, 西嶋茂宏, 岡田秀彦, 佐保典英: 「超伝導磁気分離システムの開発」, 応用物理 **71** (2002) 57-61
- 66) 第 3 回磁気分離研究開発に関するワークショップ予稿集, 日本学術振興会未来開拓-岩手県地域結集型共同研究事業-物質・材料研究機構共同開催, 於東京都立大学 (November 15-16, 2002)
- 67) H. Okada, T. Tada, A. Chiba, K. Mitsuhashi, T. Ohara and H. Wada: "High gradient magnetic separation for weakly magnetized fine particles," IEEE Trans. Appl. Supercond. **12** (2002) 967-970
- 68) A. Chiba, H. Okada, T. Tada, H. Kudo, H. Nakazawa, K. Mitsuhashi, T. Ohara and H. Wada: "Removal of arsenic from geothermal water by high gradient magnetic separation," IEEE Trans. Appl. Supercond. **12** (2002) 952-954
- 69) 第 4 回磁気分離研究開発に関するワークショップ予稿集, 岩手県地域結集型共同研究事業-日本学術振興会未来開拓-物質・材料研究機構共同開催, 於盛岡 (October 25-16, 2003)
- 70) 三橋和成, 吉崎亮造, 岡田秀彦, 小原健司, 和田 仁: 「超伝導磁石を用いる環境ホルモン除去」, 分析化学 **52** (2003) 121-126
- 71) 第 5 回磁気分離研究開発に関するワークショップ予稿集, 磁気分離研究会, 於大阪大学 (August 3-4, 2004)
- 72) 酒井保蔵: 「磁気分離の活用により活性汚泥法の新しい展開—余剰汚泥ゼロ・維持管理容易な磁化活性汚泥法—」, 用水と廃水 **46** (2004) 803-810
- 73) 岡田秀彦, 三橋和成, 工藤靖夫, 中澤 廣, 藤原英治, 小原健司, 千葉晶彦: 「高磁場高勾配磁気分離による地熱水からのヒ素除去」, 電気学会論文誌 B, Trans. PE **125** (2005) 701-708
- 74) 海保勝之: 「磁気分離装置—超電導マグネットを用いた高性能磁気分離」, 電気学会誌 **120** (April 2000) 211-214
- 75) 超電導エネルギー・環境応用に関する調査報告書, 未踏科学技術協会 (March 2002)
- 76) T. Ohara: "From basic research to industrial application of superconducting magnets in magnetic separation," TEION KOGAKU **37** (2002) 303-314 (in Japanese)
小原健司: 「磁気分離研究開発の経緯—超電導マグネット応用の視点から」, 低温工学 **37** (2002) 303-314
- 77) 小原健司: 「強磁場応用—磁気分離技術の展開」, 低温工学会低温工学サマーセミナーテキスト, 於物材機構 (July 12, 2002) 167-183
- 78) 「最新の磁気分離技術—環境保全と資源循環への利用」, 電気学会技術報告 932 号 (July 2003)
- 79) 「物質の磁気特性を活用した精密磁気制御応用技術の現状と動向」, 電気学会技術報告 1198 号 (July 2010)

小 原 健 司

1948 年 11 月 28 日生。1972 年千葉大学工学部電気工学科卒業。1974 年同大学院工学研究科修士課程（電気工学専攻）修了。1974 年工業技術院電子技術総合研究所入所。超電導線の磁気的安定性と超電導磁気分離の研究に従事。1985 年米国 MIT 客員研究員。1995-2001 年科学技術庁金属材料技術研究所に併任。2001 年同研究所へ出向, 物質・材料研究機構へ転任。2004 年同機構名誉研究員, 金沢工業大学工学部教授。2005 年電気学会 IEEJ プロフェッショナル認定取得。低温工学・超電導学会, 電気学会, 日本磁気学会, 日本工学教育協会会員。工学博士（東北大学）。