

# 磁場中の海水の電気分解のイオンモデルを用いた数値シミュレーション

Numerical simulation of brine electrolysis in magnetic fields using an ion model.

岩田 祐樹, 小俵 翔也, 赤澤 輝彦, 岩本 雄二, 梅田 民樹 (神戸大学)  
 IWATA Yuki, KODAWARA Shoya, AKAZAWA Teruhiko, IWAMOTO Yuji, UMEDA Tamiki  
 (KOBE UNIVERSITY)  
 E-mail: 121w504w@stu.kobe-u.ac.jp

## 1. はじめに

海水に磁場を印加し磁場と垂直な方向に通電を行うと、海水には磁気力が働くが、海水中の油には磁気力は働かない。この違いを利用して海水から油を分離する装置(MHD 油水分離装置)が考案されている。これまでのMHD 油水分離装置に関する理論的研究では、海水を単純な導電性の流体として扱うことが多かった。しかし、海水の電気伝導度はイオン濃度によること、拡散電流に対しては磁気力が働かないことなどから、イオンの流れに関する研究が必要となってくる。そこで本研究ではイオンモデルを用い、電流とイオン濃度については変形 Nernst-Planck 方程式、海水の流れについては Navier-Stokes 方程式を用いて MHD 油水分離装置の数値シミュレーションを行った。

## 2. イオンモデル

図1に示す様に出口が二分割された流路を考える。流路に海水を流し、紙面垂直方向に電流を流す。また、流路に沿って磁場  $B$  をかける。このとき、流路中の各イオン ( $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{OH}^-$ ) の流束は次の変形 Nernst-Planck 式で決まる。ただし、 $c_\alpha$  はイオン濃度、 $v$  は流体の速度である。

$$J_\alpha = c_\alpha v - \lambda_\alpha c_\alpha \nabla \phi + c_\alpha \lambda_\alpha A_\alpha \times B - D_\alpha \nabla c_\alpha$$

また、電流密度は  $i = \sum z_\alpha F J_\alpha = i_E + i_M + i_D$  となる。ただし、 $i_E = -\sum z_\alpha F c_\alpha \lambda_\alpha \nabla \phi$  は電気泳動電流、 $i_M = \sum z_\alpha F c_\alpha \lambda_\alpha A_\alpha \times B$  は誘導電流、 $i_D = -\sum z_\alpha F D_\alpha \nabla c_\alpha$  は拡散電流である。このとき、流体に働くローレンツ体積力は  $f = (i_E + i_M) \times B$  となり、拡散電流は関わらない。

## 3. 結果

上記イオンモデルに基づき、有限要素ソフトウェア COMSOL Multiphysics を用いて、流路中のイオン濃度、電流、海水の流速の計算を行った。その結果、ローレンツ体積力のため、電極板間で電流と磁場に垂直な方向に圧力勾配が生じ、海水の流れが大きく蛇行することが分かった (Fig.1)。2つの流路出口で流量が大きく異なっているが、このことは実験的にも確かめられている。

流路中のイオン濃度及び電流については、(i) 電極近傍でイオン濃度に大きな偏りが生じる。特に、流路角部で変化が大きい (Fig.2A)。(ii) 拡散電流は負極側の電極表面で大きい (Fig.2B)。(iii) 流路中に渦が生じるとき、淀んでいる場所で上記の変化が大きくなる。(iv) 誘導電流は電気泳動電流や拡散電流に比べて非常に小さい、ことが分かった。

計算に用いた条件では、流路中のイオン濃度差は小さく、拡散電流も全電流の数%程度であり、ローレンツ体積力は海水を導電性流体とみたときの計算とあまり変わらない。しかし、流速が極端に遅い場合や流路が長い場合は、イオン分布が電流に影響を与え、ローレンツ体積力や流体の流れに影響すると考えられるので、今後の研究が必要である。

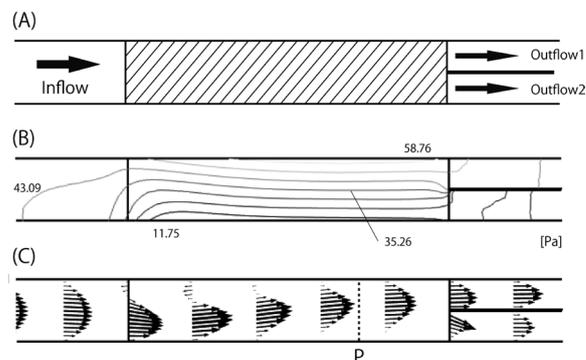


Fig.1 Schematic diagram of the simulation model and one of the numerical results. (A) Top view of the flow channel. Two rectangular electrodes are placed on the top and bottom of the channel (shaded area). Electrical current (1.0A) and magnetic field (1.0T) are applied on the channel. (B) Numerical result of pressure distribution. (C) Fluid velocity.

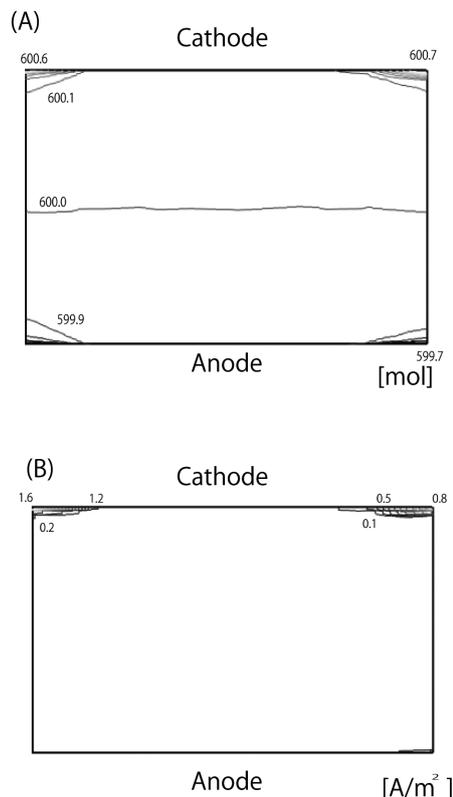


Fig.2 Cross section of the channel at position P of Fig.1C. (A) Concentration distribution of the sodium ions. (B) Distribution of the diffusion current density  $i_D$ .

# 溶存酸素パーフルオロカーボンを用いた磁気分離装置の検討

A study on magnetic separator using the oxygen dissolved in the perfluorocarbon

三島 史人, 秋山 庸子, 西嶋 茂宏 (大阪大学)

MISHIMA Fumihito, AKIYAMA Yoko, NISHIJIMA Shigehiro (OSAKA UNIV.)

E-mail: f-mishima@see.eng.osaka-u.ac.jp

## 1. はじめに

物質の磁化率, 密度の差によって浮揚場所が異なることを利用する分別方法として常磁性溶液中で反磁性物質を浮上させる磁気アルキメデス法が知られている。しかしながら従来の方法では, 塩化マンガン等の遷移金属のハロゲン化合物を水に溶解させた常磁性液体を用いるため, 後工程で分離物質に付着した遷移金属塩の除去や, 最終的な廃棄物の削減のため使用済の溶媒からの遷移金属ハロゲン化合物の回収及びリサイクルプロセスが必要である。この分離物質や分離装置に付着したハロゲン化合物を除去することは, 分離物質として食品や医薬品等を扱う場合はその安全性の確保, さらにステンレス等装置の材質をハロゲン化合物からの腐食を防ぐという意味で実用化において重要であると考えられる。

溶存酸素を利用して調製された常磁性の液体を用いれば, 媒質は酸素を加圧溶解させているため, 容易に酸素と有機溶媒に再生でき, 分離後の分離物質あるいは装置表面にハロゲン化合物は残存することはない。そこで本研究では酸素をパーフルオロヘキサンに加圧溶解させた媒質を用いた磁気アルキメデス法を検討したので報告する。

## 2. 溶存酸素を用いた磁気アルキメデス分離の原理

分離方法の基本原理解は磁気アルキメデス法であるため, 2種類以上の混合物質から物質の磁化率および密度の差によって, 印加する磁場および磁場勾配の積 (以降, 磁場積と呼ぶ) を制御し, 混合物質から各成分を個別に分離可能である。

流体中に粒子が分散している状態で磁場を印加すると, 粒子および流体の見かけの重さは磁気力により変化する。流体中の単位体積当たりの粒子の重さは (1) 式で与えられる。ここで  $\rho_1$  と  $\chi_1$  はそれぞれ物質の密度と体積磁化率を表し,  $\rho_2$  と  $\chi_2$  はそれぞれ周囲媒体 (流体) の密度と体積磁化率を表す (ただし  $z$  は鉛直上向きを正としている)。

$$-\frac{(\chi_2 - \chi_1)}{\mu_0} B \frac{\partial B}{\partial z} + (\rho_2 - \rho_1)g = 0 \quad (1)$$

$Z > 0$  の場合, 磁場は正とすると, 距離とともに減少するので磁場勾配は負となり, その積は負となる。(1) 式が示すように, 媒体の磁化率が物質の磁化率より大きい場合には, 磁場が関係する項は浮上力として働く。物質が流体中に沈殿する条件で,  $(\chi_2 - \chi_1) > 0$  となる流体を選択して, 磁場積を大きくすることで (1) 式を負とし, 粒子は浮揚する。粒子が浮揚していくと磁場は小さくなるため, ある場所で (1) 式は 0 となり, 重力と磁気力が釣り合う場所で粒子は安定に浮揚することになる。

## 3. 磁気アルキメデス分離実験

本研究で用いた磁気分離装置の模式図を Fig. 1 に示す。磁場発生源として高温超伝導バルク磁石 (以降, HTS バルク磁石と呼ぶ), 直径 60 mm, 高さ 20 mm, クライオスタット表面での最大磁束密度 3.1T, 磁場勾配 250T/m) を用いた。HTS バルク磁石の鉛直上面に圧力容器 (内容積 10mL の耐圧ガラスオートクレーブ) を設置した。圧力容器中にパーフルオロヘキサン (密度 1.69g/cm<sup>3</sup>, 磁化率 SI: -3.2x10<sup>-6</sup>) 8ml を満たし, その中に, 赤ガラス (密度 2.55g/cm<sup>3</sup>, 磁化率 SI: -13.3x10<sup>-6</sup>) を投入した。パーフルオロヘキサンに酸素を加圧し, 溶存酸素パーフルオロヘキサンとし, 加圧し

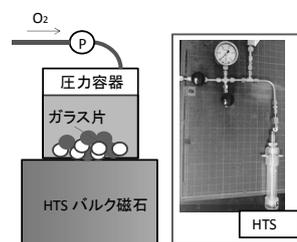


Fig.1 実験装置概略図

た際の赤ガラスの浮揚状態 (高さ方向位置) について確認した。次に, 圧力容器の横方向に赤ガラスを移動させる実験を行った。そして, 高さ方向, 横方向に赤ガラスが移動した位置とそれぞれの加圧条件について検討した。最後にと青ガラス (密度 2.20g/cm<sup>3</sup>, 磁化率 SI: -2.2x10<sup>-6</sup>) を赤ガラスと共に加圧容器内に投入し, 赤ガラスと青ガラスの分離実験を行った。

## 4. 実験結果と考察

溶存酸素濃度を高めることにより, パーフルオロヘキサンの見かけの磁化を常磁性とすることで, 赤ガラスを高さ数 (2-3)mm 浮遊させることに成功した。その時の酸素加圧は 2~2.5Mpa であった (圧力容器の厚さを考慮すると, 印可されている磁場は最大で 2T, 磁場勾配は 150T/m 付近である。2Mpa 時, 計算した磁化率は 2.27 x10<sup>-5</sup>)。

次に HTS 磁石の水平方向の磁場がガラス片に印加されるように圧力容器を設置して実験を行った。その結果, 赤ガラスは 0.9MPa の酸素加圧時に, 図 2 に示すように HTS バルク磁石の中心の初期位置から, 横方向に浮遊および移動した。2Mpa の酸素加圧時の縦方向の位置の変化量は 2mm 程 (これは最終的な安定位置であり, 浮遊は 0.9MPa でも可能である。) であったが, 1MPa 酸素加圧時の水平方向の位置変化量は HTS バルク半径分の 30mm 以上 (実験結果は 40mm) が得られることが示された。

最後に青ガラス, 赤ガラスを圧力容器内に設置し, 横方向の分離実験を行い, 赤ガラスは 0.9MPa, 青ガラスは 1.5MPa で横方向に移動した。両者を溶存酸素量 (加圧 1MPa で赤のみ移動) により, 分離可能なことが示された。

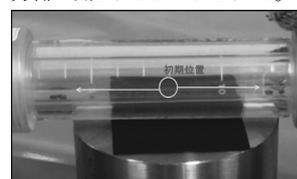


Fig.2 横方向の磁場を用いた磁気アルキメデス分離

## 5. まとめ

パーフルオロヘキサンに酸素を加圧溶解させた媒質を用いた磁気アルキメデス分離法について, その分離に必要な溶存酸素量や磁気力について検討した。さらに横方向の磁場を利用した分離方法を提案し実験によってその効果を示すことができた。

なお, 本研究は科研費 (若手研究 (B): 24760232) に依ったことを付記する。

# 磁気力制御を用いた土壌の除染に関する研究

## Study on Decontamination of Radioactive Cesium from Soil by Magnetic Separation

野村 直希, 五十嵐 亨, 三島 史人, 秋山 庸子, 西嶋 茂宏

NOMURA Naoki, IGARASHI Susumu, MISHIMA Fumihito, AKIYAMA Yoko, NISHIJIMA Shigehiro

E-mail: nomura@qb.see.eng.osaka-u.ac.jp

### 1. はじめに

福島第一原子力発電所事故に伴い、発電所周辺地域に大量の放射性物質が放出された。中でも<sup>137</sup>Csは約30年の半減期を有しており、現在の放射性物質による被害の主要因となっている。除染に伴い発生する放射性廃棄物量は膨大であり、汚染土壌の除染および減容化技術が求められている。

そこで本研究では、超電導磁石を用いた高勾配磁気分離による土壌の除染方法を提案した。本手法の特徴として、連続的な高速大量処理が可能であり、装置が省スペースであることが挙げられる。汚染土壌の減容化を図るための新たな手法として、粘土鉱物が有する磁化率の差に着目し、自然界中に元来存在する粘土の中で強くCsを吸着するものを選択的に分離することで、土壌の除染を行う手法について検討した。

### 2. 除染システムの提案

土壌中のCsの半分以上が粘土鉱物との結合によって土壌中に保持されていることが報告されている[1]。また、粘土鉱物には1:1型と2:1型の2種類があり、Csは2:1型粘土鉱物の層間に強固に結合し、脱離が困難な固定状態であると報告されている[2]。1:1型粘土鉱物と2:1型粘土鉱物には、その構造の違いにより同型置換の有無が存在する[3]。これにより、磁化率の差が生じることから、磁気力による分離が可能であると考えられる。よって、本研究ではCsを多く固定している2:1型の粘土鉱物のみを磁気分離法により選択的に分離することで、土壌の除染および減容化を行うシステムを提案した。概要をFig.1に示した。

本システムでは、まず土壌分級により土壌を砂れきとシルト・粘土に分離する。次に、磁気分離により、シルト・粘土からCsを多く含む粘土鉱物を除去する。本研究においては、磁化率の異なる粘土鉱物を、超電導磁石を用いた高勾配磁気分離法により分離することを検討した。

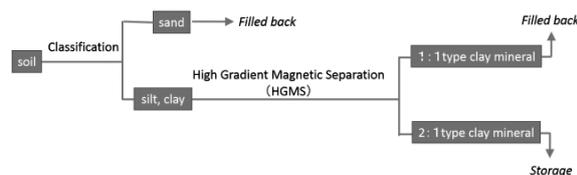


Fig.1 A picture of high gradient magnetic separation

### 3. 粘土鉱物の分離実験

HTSバルク磁石(大きさφ=60mm×20mm、表面最大磁束密度3.5T)の鉛直上方に円筒型の流路(内半径r=4.5mm)を配置し、その内部に磁気フィルターを充填した。磁気フィルターは線径28μmのスチールウール1.5gを充填した。ポンプによって流量を制御しながら懸濁液を流し込み、分離実験を行った。実験装置の写真をFig.2に示す。50mlの水道水に1:1型粘土鉱物であるカオリナイトと2:1型粘土鉱物であるバーミキュライトを各0.5gずつ混合し、懸濁液を調製した。粘土鉱物の磁化率および粒子径の測定値を基に、バーミキュライトの分離可能条件を検討し、流速1cm/sの条件で分離可能であると算出した。カオリナイトは白色であり、バーミキュライトは茶色であることから、分離実験後、分光光度計及び積分球装置によってフィルターに捕獲された試料の吸光スペクト

ルを測定することで、分離前後の粘土鉱物の重量比を算出した。



Fig.2 A picture of high gradient magnetic separation system

### 4. 結果と考察

磁気フィルターに捕捉された粒子およびフィルターを通過した粒子中のカオリナイトとバーミキュライトの重量比を算出し、結果をTable.1に示した。磁気分離により、フィルター通過物中のバーミキュライトの重量比を元の重量比の半分以下に低下させることができた。以上より、提案した手法により線量の高い2:1型粘土鉱物と線量の低い1:1型粘土鉱物に分離することが可能であると考えられ、磁気分離法による線量低減の可能性が示された。

Table.1 Weight percentage of vermiculite and kaolinite after separation

	vermiculite	kaolinite
initial	50	50
Particles trapped in filter	91	9
particles through filter	23	77

### 5. 結論

本研究では、超電導磁石を用いた磁気分離法による土壌の除染システムを提案し、Csの吸着・脱離特性が異なる1:1型粘土鉱物と2:1型粘土鉱物の分離による汚染土壌の減容化の可能性について検討を行った。超電導バルク磁石を用いた高勾配磁気分離(HGMS)による粘土鉱物の分離実験を行い、2:1型粘土鉱物の濃縮に成功した。今後は、放射性廃棄物の減容化が可能な実用的な除染システムの設計を行う予定である。

### 参考文献

1. 塚田祥文, 武田晃, 中尾淳, 久松俊一:「土壌に添加した<sup>137</sup>Csとフォールアウト<sup>137</sup>Csの継時的な抽出率の変化」, 日本原子力学会2010年春の大会講演要旨集
2. 山口紀子・高田裕介・林健太郎・石川 覚:「土壌-植物系における放射性セシウムの挙動とその変動要因」, 農業環境技術研究所報告 第3号(2012)
3. 中尾淳・山口紀子:「放射性物質の土壌中での動き」, 農文協刊『最新農業技術 土壌施肥 vol.4』(2012)

# 除染技術への磁気分離応用の試み～ 汚泥中に含まれる粘土物質の磁気分離に関する基礎的検討

## Application of magnetic separation technique for decontamination – fundamental study of magnetic separation of clay particles in sludge

酒井 保藏, 落合 聖史(宇都宮大), 西嶋茂宏(阪大);  
SAKAI Yasuzo, OCHIAI Seiji (Utsunomiya Univ.), NISHIJIMA Shigehiro (Osaka Univ.)  
E-mail: sakai@cc.utsunomiya-u.ac.jp

### 1. はじめに

原発事故由来の放射性セシウムが下水汚泥などに蓄積し問題となっている。放射性セシウムは、汚泥中の粘土粒子に吸着しているといわれる。この粘土粒子を分離することで放射性汚泥廃棄物の減量と後処理の合理化が可能となる。我々は汚泥に磁気シーディングして、剪断力を加えながら磁気分離すると粘土粒子を汚泥から液中に放出できることを見だし、汚泥の磁気分離による粘土粒子の放出特性を調べたので報告する。

2011年3月の福島原発の事故により、広範な地域が放射性物質で汚染された。大震災から2年経過し、除染技術は発展しつつあるが、水処理プラントから発生する汚泥が放射性物質で汚染され、焼却や埋め立てが困難となったことで、大量の保管されている放射性汚泥や今後も発生し続ける放射性汚泥の効果的な除染方法は確立されていない。

放射性汚染の主成分とされる放射性セシウムはカリウムと性質が似ており、水溶性である一方で、環境中では、ほとんどが土壌中のカオリナイト、パーミュキュライトなどの層状の粘土物質に吸着された状態で存在しているとされる。しかも、汚染土を分級すると、ほとんどの放射性セシウムは粒径 $75\ \mu\text{m}$ 以下の粘土粒子中に偏在しているといわれている。表土中のこれらの粒子が雨水と共に下水に流れ込み、下水処理の沈降分離時に汚泥フロックに捕捉・濃縮されていると考えられる。

我々は、磁化活性汚泥法と呼ばれる汚泥を磁気分離する新規水処理法を研究してきた。このプロセスでは粘土粒子など無機性懸濁物質が汚泥に蓄積しなかった。そこで、1～3 hかけてゆっくり分離する重力沈降法では、粘土粒子は汚泥とともに分離されるが、数秒～1分で高速分離される磁気分離法ではフロックから脱離して流出するのではないかと考えた。この磁気分離の選択性を活用し、汚泥フロックから粘土微粒子を取り出すことができれば、放射能汚染された水処理汚泥から放射性セシウムを取り出し濃縮できると考えた。磁気分離後の汚泥が一定レベルまで除染できれば、従来の方法で処理できる。また、汚泥から取り出された放射性的粘土粒子は、酸処理でセシウムを脱着し吸着法や紺青法などで回収する既往の技術が適用できる。従って、効果的に放射能汚染汚泥の大幅な減量化が可能となると期待できる。

本研究では、最初の基礎的な研究として、カオリナイト微粒子を用いて磁気分離による活性汚泥からのカオリナイトの脱離・流出挙動を調べた。

### 2. 実験方法

用いた装置を Fig. 1に示す。混合槽(曝気槽)の容積は5 L、磁気分離部は約0.1 L、磁石ドラムは直径10 cm、表面磁束密

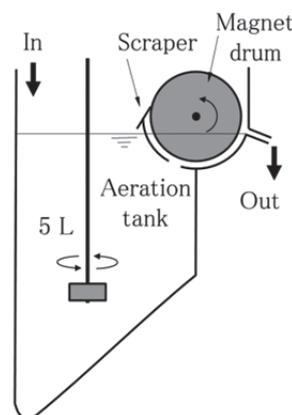


Fig.1 Experimental apparatus

度最大0.08 T、多極着磁のプラスチック磁石を貼り付けたものである。曝気槽に3.0 g/Lの活性汚泥、0.40 g/Lのカオリン、4.0 g/Lのマグネタイトを投入し、5.0 Lとした後、10分間曝気した。その後、流量0.33 L/minで水道水を連続的に追加した。磁性粉からカオリンを脱離させるため攪拌(せん断)をおこなった(0～2150 rpm)。攪拌による剪断力を受けた後、汚泥は20秒以内に磁気分離され汚泥と流出水に分けられる。汚泥はスクレーパによって全量が曝気槽に戻される。流出水中のカオリン濃度は流出水の濁度から求めた。

### 3. 結果と考察

攪拌0 rpm、(曝気のみ)のとき、磁気分離後の流出水のカオリン濃度は、初期、約30 mg/Lから約30分後に10 mg/Lまで低下した。攪拌を720 rpmとすると、流出水中のカオリン濃度が上昇し約20 mg/Lとなった。攪拌を1640 rpmとすると50 mg/Lまで増加したが、さらに2150 rpmとしてもほとんど変化しなかった。2150rpmで約3 h通水するとカオリンの90%を汚泥から脱離させ流出させることができた。この間、マグネタイトや活性汚泥は曝気槽に回収・保持できた。流出したカオリンは凝集沈殿やろ過操作により回収できる。汚泥から粘土微粒子を磁気分離により選択的に洗い出せることが示された。

### 4. おわりに

本実験では放射性粘土物質は用いていないが、除染操作であれば90%の放射性物質を汚泥から取り除けると予想できる。汚泥洗浄に用いた水は粘土物質を凝集沈殿やろ過で除き、循環使用できる。また、磁気分離装置をより強力なものにすれば大幅な時間短縮も可能と思われる。

### 謝辞

本研究は科学研究費基盤研究(A) 21241020の支援を受けた。

# 医薬用タンパク質の超電導高勾配磁気分離装置の開発(1):装置設計と製作

## Development of Medical Protein Screening System using High Gradient Magnetic Separation by Cryocooler-cooled LTS Magnet: Manufacture of Medical Protein Screening System

上岡 泰晴, 我妻 洸(ネッツ); 柁川 一弘(九大); 植田 浩史(阪大);  
淵野 修一郎, 古瀬 充穂(産総研); 中村 秀一, 飯塚 倫尋(ネッツ)

KAMIOKA Yasuharu, AGATSUMA Koh (NETS); KAJIKAWA Kazuhiro (Kyushu Univ.); UEDA Hiroshi (Osaka Univ.);  
FUCHINO Shuichiro, FURUSE Mitsuo (AIST); NAKAMURA Shuichi, IITSUKA Tomohiro (NETS)

E-mail: cityboy-y.kamioka@nifty.com

### 1. はじめに

抗体医薬用原料のモノクローナル抗体の分離・精製に、超電導マグネットを用いた磁気ビーズによる高勾配磁気分離システムを応用する研究を行い[1]、連続に高速・高効率に分離精製できる装置を開発した。装置の小型化と、運転の自動化、高速励磁・減磁および、磁気フィルターの消磁を行うための交流運転ができる冷凍機冷却型超電導マグネットの開発が一つのポイントである。

### 2. 高速励磁・減磁対応冷凍機冷却型超電導マグネット

磁気分離装置用超電導マグネットとしては、初期冷却時間が短いこと、高速励磁・減磁が行えること、磁気フィルターを消磁するために交流運転が行えること、軽量小型であることが上げられる。これらの条件を満足するためには、以下の技術的課題を解決しなければならない。

1. 交流磁場が発生できること
2. 交流磁場による発熱が極力少ない
3. 冷凍機は小型であること
4. マグネットは軽量であること
5. マグネット電源は小さいこと
6. 真空容器は小さいこと

交流磁場対策は、渦電流を無くするためにマグネット巻き枠と熱シールドのスリットを入れて対応した。Fig.1にマグネット巻き枠のスリット状況写真を示した。また、次の関係について検討を行い、装置全体の小型化を行った。

1. 冷凍機1段目の熱負荷---電流リード
2. マグネットサイズ---電流値(電源サイズ)

1.については、電流リードサイズ最適化を行い、熱負荷の最小値を見いだした[2]。また、その最適値検討に伴って、マグネット仕様の室温ボア径30mm、中心磁場強度3Tを発生するマグネットの諸元を決定した[2]。真空容器の小型化には、冷凍機、マグネットの小型化の上に、熱侵入を最小にできる小型化した断熱支持構造の検討結果により設計製作を行った。熱侵入計算値は以下の通りである。なお、冷凍機能力は、1段 0.5W@4.1K、2段 5W@51K である。

断熱支持構造: 300K→50K	0.02W
50K→5K	5E-3W
断熱真空: 300K→50K	0.21W
50K→5K	1.4E-4W
電流導入リード: 300K→50K	4W
50K→5K	1E-3W
1段への熱侵入:	4.2W
2段への熱侵入:	6E-3W

### 3. 装置と試験結果

磁気分離装置の写真を Fig.2 に示す。サイズは、幅 517mm×奥行 617mm×高さ 1000mm である。

装置には、冷凍機冷却型超電導マグネットをほぼ中央に配置し、その中に磁気フィルターカラム[3]を設置、上部から原料溶液、回収用液、洗浄液を工程によって導入する。下部からは、原料廃液、回収液、洗浄液が流出する。各系統にポン

プがあり、バルブと共に連動して作動する。キャビネット前面のタッチパネルによって自動運転、手動運転が選択できるようにしている。この装置によって試験を行った結果、大きさ約200nmの磁気ビーズを懸濁液から98%もの高効率で分離でき、回収率も94%に達し、目標以上の成果が得られた[3]。

また、マグネット試験結果は以下の通りとなった。

超電導磁石温度: 4.2K、熱シールド温度: 60K  
達成磁場強度: 3T、電流値: 63A  
0T から 3T までの励磁: 150 秒、減磁: 100 秒  
初期冷却時間: 8 時間

なお、本研究は、経済産業省 関東経済産業局 平成 23 年度戦略的基盤技術高度化支援事業(三次補正)の一環として実施したものである。

### 参考文献

1. K. Kajikawa, et al.: Abst. of CSJ Conf. 86 (2012) 3A-a04.
2. K. Kajikawa, et al.: Abst. of CSJ Conf. 87 (2013) 3D-a06.
3. H. Ueda, et al.: Abst. of CSJ Conf. 87 (2013) 3D-a07.



Fig.1 Photo of magnet bobbin with a slit



Fig.2 Protein Magnetic Separation System

## 医薬用タンパク質の超電導高勾配磁気分離装置の開発(2): マグネット設計と消磁システム

Development of medical protein screening system using high gradient magnetic separation by cryocooler-cooled LTS magnet: Magnet design and degaussing system

柁川 一弘(九大); 植田 浩史(阪大); 上岡 泰晴, 我妻 洸(ネッツ); 淵野 修一郎, 古瀬 充穂(産総研);  
中村 秀一, 飯塚 倫尋(ネッツ)

KAJIKAWA Kazuhiro (Kyushu Univ.); UEDA Hiroshi (Osaka Univ.); KAMIOKA Yasuharu, AGATSUMA Koh (NETS);  
FUCHINO Shuichiro, FURUSE Mitsuho (AIST); NAKAMURA Shuichi, IITSUKA Tomohiro (NETS)  
E-mail: kajikawa@sc.kyushu-u.ac.jp

### 1. はじめに

医療用たんぱく質のうち特に抗体医薬用原料としてモノクローナル抗体が多く使われる。我々はモノクローナル抗体の分離・精製に超電導マグネットを用いた磁気ビーズによる高勾配磁気分離システムを応用する研究を行っている[1-3]。既存技術の永久磁石に比べて、超電導マグネットを用いて高磁界化することにより、ナノサイズの磁性ビーズを捕捉可能となることが期待される。本研究では、高勾配磁気分離に用いる伝導冷却方式の超電導マグネットおよびパワーリードの設計・製作について報告する。

### 2. 超電導マグネットとパワーリードの設計・製作

前報[1]と同じ NbTi 線材を用いて設計・製作した超電導マグネットの諸元を、Table 1 に示す。マグネット中心部の発生磁界 3 T に対し、直径 30 mm の球内の磁界均一度を 5% とする。超電導マグネットの内径を 60 mm、巻線部のパッキングファクターを 0.9、動作電流を 60 A に設定すると、超電導マグネットの外径、長さ、ターン数はそれぞれ、99.9 mm、82.0 mm、4546 となる。以上の設計を基に、外径 60.0 mm、長さ 82.2 mm の巻枠に NbTi 線材を巻線した。その結果、巻線部の外径は 98.5 mm、ターン数は 4311 となり、63.1 A の通電で中心磁界 3.0 T を発生することができる。また、超電導マグネットの自己インダクタンスは理論的に 0.789 H と見積れる。

2 段式 GM 冷凍機を用いて超電導マグネットを伝導冷却する際、1 段目を高温超電導パワーリードと良好に熱接触させれば、2 段目への熱侵入を大幅に低減できる。しかし、室温部からの電流導入に銅等の金属材料を使用せざるを得ず、この金属製パワーリードを介した熱侵入や自身のジュール発熱を全て冷凍機で恒常的に冷却する必要もある[4]。熱侵入は一般に金属製パワーリードの断面積と長さそれぞれ比例および逆比例し、ジュール発熱はその逆の依存性を示す。つまり、金属材料や通電電流値に応じた断面積と長さの最適値が存在することとなる。そこで、数値計算の結果、直径 3 mm の銅棒に 63 A の電流を通電する場合、長さ 450 mm で 55 K への熱侵入量を約 2.7 W/本と見積ることができる。

### 3. 励磁試験および消磁試験

Fig. 1 に示すように、定格まで約 150 秒の高速励磁に成功し、自己インダクタンスは 0.787 H と見積れる。また、Fig. 2 に示すように、RLC 回路を利用した電流の周期的な減衰により、マグネット中心部に配した磁性フィルターを消磁できる。

なお、本研究は、経済産業省関東経済産業局平成 23 年度戦略的基盤技術高度化支援事業（三次補正）の一環として実施したものである。

#### 参考文献

1. K. Kajikawa, et al.: Abst. of CSJ Conf. 86 (2012) 3A-a04.
2. Y. Kamioka, et al.: Abst. of CSJ Conf. 87 (2013) 3D-a05.
3. H. Ueda, et al.: Abst. of CSJ Conf. 87 (2013) 3D-a07.
4. M. Furuse, et al.: Cryogenics 49 (2009) 263.

Table 1 Specifications of designed and fabricated SC magnets

Parameter	Design	Fabrication
Inner diameter	60 mm	60.0 mm
Outer diameter	99.9 mm	98.5 mm
Winding length	82.0 mm	82.2 mm
Turn number	4546 turns	4311 turns
Self-inductance	0.886 H	0.787 H
Applied current	60 A	63.1 A
Central field	3 T	3.0 T

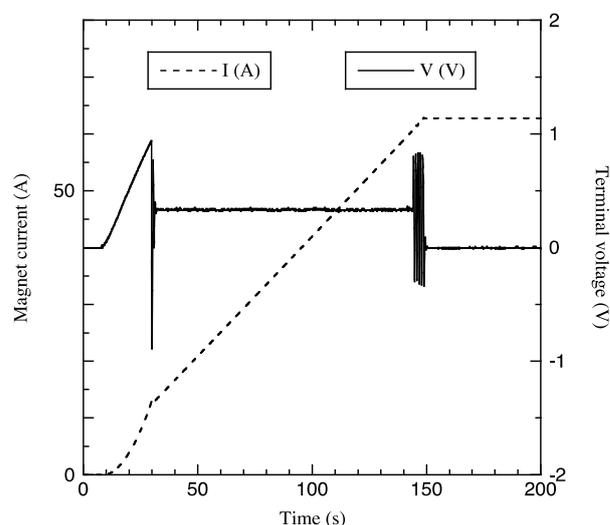


Fig. 1 Experimental results of terminal voltage in fabricated SC magnet during charging process of current.

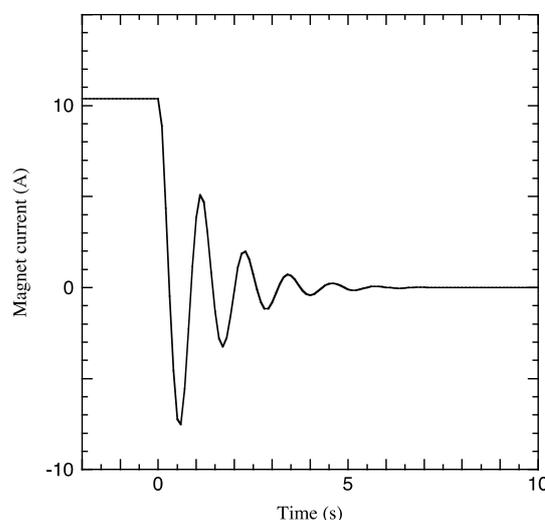


Fig. 2 Experimental results of current oscillation in fabricated SC magnet with prepared degaussing circuit.

# 医薬用タンパク質の超電導高勾配磁気分離装置の開発(3): フィルター特性

## Development of Medical Protein Screening System using High Gradient Magnetic Separation by Cryocooler-cooled LTS Magnet: Performance of Filters

植田 浩史(阪大); 柁川 一弘(九大); 上岡 泰晴, 我妻 洸(NETS);  
淵野 修一郎, 古瀬 充徳(産総研); 中村 秀一, 飯塚 倫尋(NETS)

UEDA Hiroshi (Osaka Univ.); KAJIKAWA Kazuhiro (Kyushu Univ.); KAMIOKA Yasuharu, AGATSUMA Koh (NETS);  
FUCHINO Shuichiro, FURUSE Mitsuho (AIST); NAKAMURA Shuichi, IITSUKA Tomohiro (NETS)

E-mail: hueda@rcnp.osaka-u.ac.jp

### 1. はじめに

医療用たんぱく質のうち特に抗体医薬用原料としてモノクロナール抗体が多く使われる。我々はモノクロナール抗体の分離・精製に超電導マグネットを用いた磁気ビーズによる高勾配磁気分離システムを応用する研究を行っている[1][2]。今回は、設計・製作した伝導冷却方式の超電導マグネットを利用した高勾配磁気分離システムで、磁気ビーズの分離実験を実施し、フィルターの性能を検証したので報告する。

### 2. 磁性細線フィルターの磁場・磁気力解析

捕捉効率を上げるためには、高勾配磁気分離用フィルターの最適設計が必要になる。そのためには、フィルター周辺の詳細な磁場解析と流体解析により、磁気ビーズの挙動を把握し、捕獲率を高めたフィルターの設計技術を確認する必要がある。そして、フィルターを構成する磁性細線の材質、形状、寸法、配置によって磁気ビーズの捕獲率が大きく変わる[3]。今回は、3.0 T程度の磁場を超電導電磁石によって発生した際の、磁気フィルターの周囲の磁界解析を行い、本装置への適否評価を行った。

表 1 に我々が想定しているフィルターの諸元を示す。今回検討したフィルターは、市販されている構造に基づいたもので、丸細線を縦と横が一定の間隔を保ち、一本ずつ交互に交わった最も基本的な織り方である平織したものである。

図 2 に印加磁場 3.0 T の際のフィルター周囲の磁気力の分布を示す。これまでの検討で、磁気力は  $10^{-12}$  N を超える必要があることがわかっている。図 2 では  $10^{-12}$  N 以上に磁気力を黒で示した。細線が交差する場所で磁場が強くなり、その周囲で大きな磁気力が発生していることがわかる。また、メッシュが細かいほど、細線の径が小さくなるため、磁気力が大きくなり、メッシュの開口部に磁気力が広がって分布する。今回の計算結果によれば、いずれのメッシュも十分な磁気力が発生することがわかった。

以上の結果に基づいて、メッシュ 350 の平織磁性細線金網を 100 枚積層したフィルターを用意し、積層したものを磁気分離装置に使用することとした。フィルターを図 3 に示す。

### 3. 磁気分離実験

今回、我々は超電導高勾配磁気分離装置を設計・製作した[2]。そこで、径約 50 nm の磁気ビーズ 3 個程度をポリマーで被覆した外径約 200 nm のアフィニティー磁気ビーズを純水に懸濁した液体で磁気分離実験を行った。磁場は 3.0 T 印加した。実験結果を図 4 に示す。磁場を励磁した状態で懸濁液を流した場合、98% の磁気ビーズが捕捉された。次に、1 回の消磁・洗浄[4]とゼロ磁場・洗浄を併せて、64% の磁気ビーズが回収された。2 回目、3 回目の消磁・洗浄と合わせると 94% の磁気ビーズが回収され、良好な結果が得られた。

### 4. 今後の予定

製作した高勾配磁気分離システムを用いて、メッシュ粗さ、フィルターの積層間隔をパラメータに、基礎データをさらに蓄積していく予定である。

Table 1 Specifications of filter.

Mesh*	Wire diameter ( $\mu\text{m}$ )	Aperture ( $\mu\text{m}$ )	Aperture ratio (%)
150	60	109	41.6
200	50	77	36.8
250	40	62	36.9
350	30	43	34.7

\* Mesh number in 1 inch (2.54 cm)

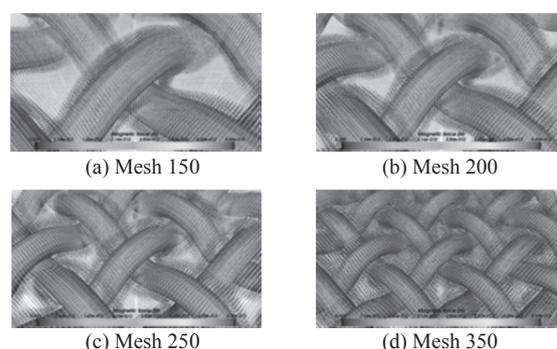


Fig. 2 Distributions of magnetic force around wire.

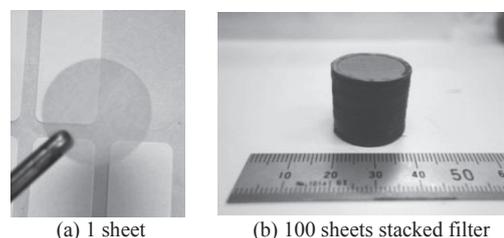


Fig. 3 Filter (Mesh 350).

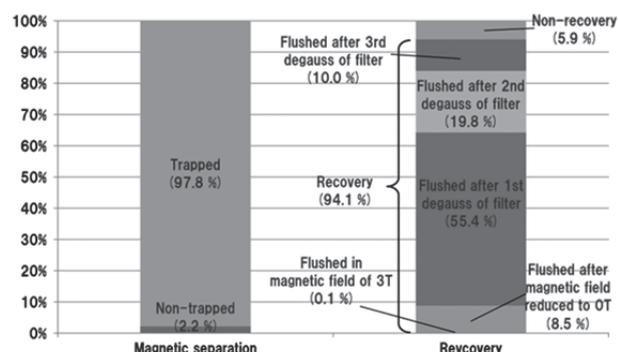


Fig. 4 Experimental result of magnetic separation (solvent: pure water).

なお、本研究は、経済産業省 関東経済産業局 平成23年度戦略的基盤技術高度化支援事業(三次補正)の一環として実施したものである。

### 参考文献

1. K. Agatsuma, et al.: Abstracts of CSJ Conference, vol.77, p.132 (2007).
2. Y. Kamioka, et al.: Abstracts of CSJ Conference, vol.87, 3D-a05 (2013).
3. H. Ueda, et al.: Abstracts of CSJ Conference, vol.84, p.17 (2011).
4. K. Kajikawa, et al.: Abstracts of CSJ Conference, vol.87, 3D-a06 (2013).