

医薬用タンパク質の超電導高勾配磁気分離装置の高速励磁の電磁界解析

Electromagnetic Simulation on Fast Charging Characteristics of Medical Protein Screening System using High Gradient Magnetic Separation by Cryocooler-cooled LTS Magnet

植田 浩史(阪大); 柁川 一弘(九大); 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)

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。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り、連続に高速・高効率に分離精製出来、抗体医薬分野に貢献できることが期待される。既に、我々は冷凍機により伝導冷却する超電導マグネットを用いた高勾配磁気分離を開発し⁽¹⁾、良好な分離・回収特性を得ている⁽²⁾。本装置では、励磁・減磁速度の高速化および磁性フィルターの交流消磁⁽³⁾に対する対策が必要となる。今回は、高速励磁で問題となる渦電流および発熱について電磁界解析によって評価したので報告する。

2. 高速励磁・消磁のための渦電流対策

渦電流防止構造については、Fig. 1のように超電導電磁石巻棒を2分割し、熱シールドもフランジ部、円筒部を中心まで2分割にした。この渦電流対策の効果を、励磁速度 63 A / 150 s, 63 A / 60 s の場合について有限要素法による電磁場解析によって評価した。Fig. 2 に発熱分布の一例として、励磁速度 63 A/min. のときの計算結果を示す。スリットを入れることによって、渦電流が格段に抑制されていることがわかる。Table 1 は、スリットの有無によるフランジや巻棒各部の総発熱量をまとめたものである。励磁速度 63 A / 150 s の場合、スリットの効果で発熱は11分の1、63 A / 60 s の場合は22分の1になった。Fig. 1 にスリット入り伝熱板およびボビンに巻いたコイルの写真を示す。

3. 励磁試験

磁場 3 T まで励磁するために、開発目標として5分の高速励磁・減磁を想定していた。0 T から 3 T まで 150 秒および 60 秒で励磁したときの電流波形と温度を Fig. 3 に示す。60 秒で励磁した場合は電源の制約で定電流モードでは励磁できず、定電圧モードとなった。コイルの温度は 150 秒励磁では 4.5 K, 60 秒励磁では 4.8 K まで上昇した。励磁時間を 60 秒より速くした場合はクエンチした。また、減磁に 100 秒かけたとき、および電源を遮断し回路中の抵抗でエネルギーを消費させた場合(減磁に約 40 秒)、いずれもクエンチしなかった。

これらの結果は、開発目標の励磁減磁 5 分以内に対し、大幅に短縮されている。従来の冷凍機冷却型超電導電磁石と比較して、時間的慣性の短縮に加え、操作性、安全性の大幅な性能向上を示す値である。

なお、本研究の一部は、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. Kamioka, et al.: *Abstracts of CSJ Conference*, vol.87, p.196 (2013).
2. H. Ueda, et al.: *Abstracts of CSJ Conference*, vol.87, p.198 (2013).
3. K. Kajikawa, et al.: *Abstracts of CSJ Conference*, vol.87, p.197 (2013).

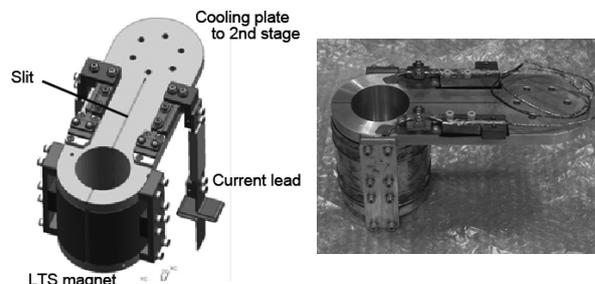


Fig. 1 3D design of fabricated LTS magnet.

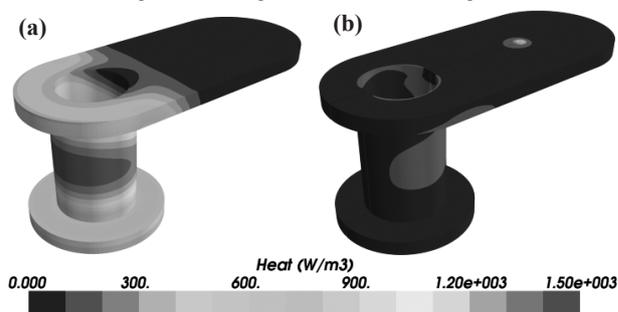


Fig. 2 Distributions of eddy current loss in the bobbin and flange (a) without the slit and (b) with slit at a ramp rate of 63 A / 60 s .

Table 1 Eddy current loss in bobbin and flange.

Charging time	150 s		60 s	
	No Slit	Slit	No Slit	Slit
Cooling plate (Top flange) (mW)	5.58	1.13	36.1	2.3
Bobbin (mW)	11.0	0.541	68.9	1.6
Bottom flange (mW)	4.68	0.329	29.1	2.0
Total (mW)	21.6	2.0	134.0	6.0

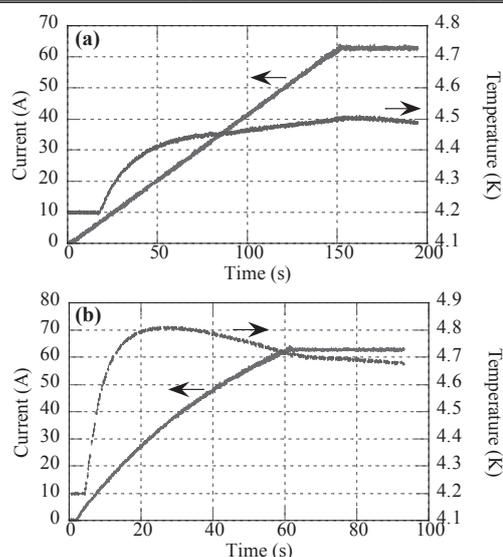


Fig. 3 The charge of magnet. (a) 63 A / 150 s (Constant current mode), (b) 63 A / 60 s (Constant voltage mode).

溶存酸素パーフルオロカーボンを利用した磁気アルキメデス分離法に関する研究

Study on magneto-Archimedes separation method using the oxygenated 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

本研究では作業媒体の溶存酸素を利用した磁気アルキメデス分離法により食品や医薬品系有価物の分画の検討を行っている。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、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などが必要である。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、その安全性の確保するため、さらには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。

そこで、酸素を加圧溶解させ常磁性を示す作業媒体として用いれば、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磁場積を制御することで混合物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 ρ_1 と χ_1 はそれぞれ物質の密度と体積磁化率を表し、 ρ_2 と χ_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)。

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

$Z > 0$ の場合の磁場の向きを正とすると、距離とともに減少するので磁場勾配は負となり、その積(以降、磁場積と呼ぶ)は負となる。(1)式が示すように、媒質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。

3. 磁気アルキメデス分離実験(可溶性物質の分離実験)

本研究で用いた磁気分離装置の概略の写真を 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60mm、高さ20mm、クライオスタット表面での最大磁束密度3.1T、分離容器底面で磁場勾配240T/mを用いた。分離容器内(内容積10mLの耐圧ガラスオートクレーブ)にパーフルオロヘキサン(密度1.69g/cm³、磁化率SI:-3.2x10⁻⁶)を10ml満たし、その中には、可溶性物質のKCl(密度1.99g/cm³、磁化率SI:-1.25x10⁻⁵)とNaCl(密度2.16g/cm³、磁化率SI:-1.4x10⁻⁵)を分離容器中心に設置した。その後HTSバルク磁石の鉛直上面に溶存酸素を満した圧力容器を設置した。加圧前には2種類の粒

子は沈んでいた。KClは0.5MPaで浮遊し、NaClは1.2MPaで浮遊した。それぞれの浮遊の高さは圧力容器厚さが鉛直浮上高さに影響することもあり、1mm程度であった。本磁場発生源では浮遊した高低差を利用して分離を行うことが困難であることが分かった。

HTSバルク磁石の磁場はソレノイド磁石の磁場分布とは異なり、径方向にも高磁場勾配磁場を形成しているため、媒質および粒子には水平方向への大きな磁気力が働くので水平方向に粒子が移動することも期待できる。

そこで、分離プロセスとして、粒子を一度わずかに浮遊させ水平方向に粒子を移動させることで分離する方法を検討した。

4. 実験結果と考察

水平方向に粒子が移動できるように分離領域を配置し、KClのみが浮上可能となる0.8MPa(0.5Mpa)にて分離実験を行った。その結果HTSバルク磁場の中心からKCl粒子は最大で40mm移動した。その実験の結果を図2に示す。水平方向の分離方法を利用することで、HTSバルク磁石を磁場発生源として十分に溶存酸素パーフルオロカーボンを利用した分離が可能であることが示された。

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可溶性物質の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。

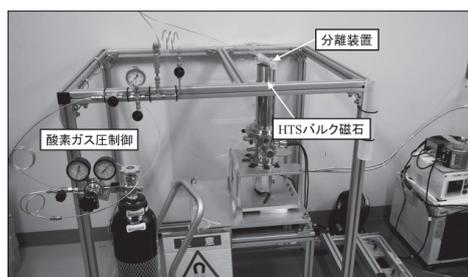


Fig.1 実験装置概略図

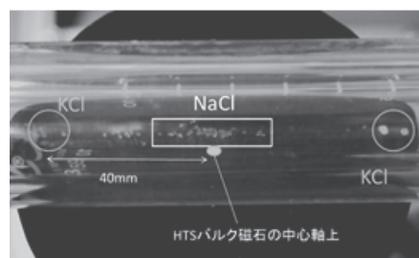


Fig.2 浮上したKClのみ横方向へ移動させる磁気アルキメデス分離

謝辞 本研究は科研費補助金 若手(B)「パーフルオロカーボンを用いた新奇磁気アルキメデス法の開発」(研究課題番号: 24760232)の支援を受けて行われました。

磁気力を利用したプラスチック分離に関する研究

Study of Plastic Separation Utilizing Magnetic Force

植田 雄輝, 三島 史人, 秋山 庸子, 西嶋 茂宏 (大阪大学)

UEDA Yuki, MISHIMA Fumihito, AKIYAMA Yoko, NISHIJIMA Shigehiro (Osaka University)

ueda@qb.see.eng.osaka-u.ac.jp

1. 研究背景

プラスチックの普及に伴い持続的な資源の利用、環境への負荷の低減を可能とするマテリアルリサイクルが求められている。マテリアルリサイクルは、プラスチックの種類ごとの分離が必要とされるが、比重分離や近赤外線選別などの従来のプラスチックの分離手法では、いずれも分離速度、精度が低い。そこで本研究では、密度や磁化率などの物理的性質に着目し、磁気力を利用したプラスチックの選択的な分離法を検討した。分離対象はプラスチックの中でも特に密度の差が小さく従来の分離法では分離が難しいポリプロピレン(PP)とポリエチレン(PE)を対象とした。この2種はいずれも反磁性であり、従来の磁気分離法では分離が困難であるため、反磁性、常磁性物質にも適用できる磁気アルキメデス浮揚法を用いた。本研究ではこの磁気アルキメデス浮揚法と水平方向の磁気力を組み合わせた新しい連続的な磁気分離装置を提案した。

2. 分離実験概要

磁気アルキメデス浮揚法は、媒質の密度と磁化率、磁場発生源の印加磁場を操作することで、浮揚をコントロールできるため、比重の差が小さい物質同士でも、磁化率の差から一方を沈め、もう一方を浮揚させて分離できる手法である。媒質中、磁場印加下での粒子に作用する合力を水平方向 r 、鉛直方向 z の成分に分けると以下の式に表すことができる[2]。

$$F_r = \frac{(\chi_p - \chi_f)}{\mu_0} (\mathbf{B} \cdot \nabla) B_r \quad (1)$$

$$F_z = (\rho_p - \rho_f)g + \frac{(\chi_p - \chi_f)}{\mu_0} (\mathbf{B} \cdot \nabla) B_z \quad (2)$$

ここで χ_p , χ_f はそれぞれ粒子、媒質の体積磁化率を、 ρ_p , ρ_f は粒子、媒質の密度、 \mathbf{B} は磁場を示しており、 B_r , B_z はそれぞれ \mathbf{B} の水平成分、鉛直成分を示している。式(2)は磁気アルキメデス浮揚に基づく式で、右辺の第一項の重力項と第二項の磁気力項がつりあうとき、 F_z が 0 となり、ある浮揚位置に静止する。磁場発生源には超電導ソレノイド磁石(ボア径 100 mm、中心最大印加磁場約 10 T)を用いた。PP、PE はソレノイド磁石の上から投入し、その後磁気浮上により PP($\chi = -8.72 \times 10^{-6}$ [-])のみを浮揚させ、PE($\chi = -8.07 \times 10^{-6}$ [-])を沈降させる。浮揚した PP は式(1)に基づいて、ソレノイドボアの中心から水平方向外側に磁気力を与え移動させることで、PP が PE の沈降を阻害せず、より高精度な分離を可能とした。また磁気浮上法は磁場を印加していない状態でサンプルが媒質中に沈んでいる必要があるため PP、PE より密度の小さいエタノールを媒質として用い、媒質の磁化率はエタノールの濃度をvarすることで調整した。

3. 連続処理装置の設計

予備実験として、流れのない容器中での分離を行った結果、PP はソレノイド磁石中心から $z=165$ mm の高さで浮揚し、PE は装置底面($z=80$ mm)まで沈降した。さらに PP は中心から外側に装置壁面まで移動した。また、PP サンプルは全て浮揚、PE サンプルは全て沈降し互いに浮揚や沈降を阻害することはなかった。このことから、本分

離法を用いて PP、PE の高精度な選択的分離が可能であることが分かった[1]。

そこで PP の回収を考慮に入れた連続処理装置の設計を行った。装置の概要を Fig. 1 に示す。装置には浮上した PP を回収するために PP 回収用の管を外側に配置する。サンプルは tubeA から投入し、これにより浮上し外側に移動した PP を回収管から、PE を装置の下側から回収する。PP 回収は 1.0 cm/s の流速で吸い上げるものとし、tubeA から PP、PE を投入する際に鉛直下向きに 1.0cm/s の流速を与えると仮定した。

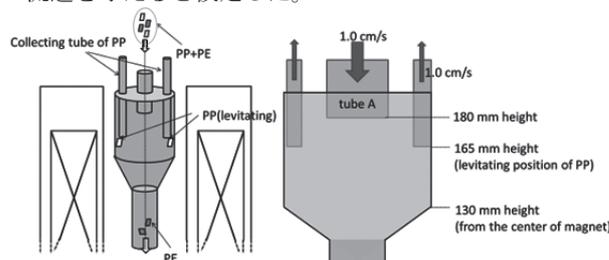


Fig 1 Schematic diagram of continuous separator for PP and PE.

この連続処理装置では装置内に流れが生じるため、流れのある状態での分離が可能かどうかを確認するために粒子軌跡計算によるシミュレーションを行った。流速と磁場の分布は有限要素法により解析したデータを用い、粒子には作用する力は式(1)(2)の関係から磁場からの磁気力、重力、さらに流れによるドラッグ力が働くものとし運動方程式を時間発展で解くことで軌跡を計算した。

シミュレーション結果を Fig. 2 に示す。PP は全て回収管に吸い上げられている。一方、PE は流れにより外側に移動しているが、沈降して下で回収することができる。このことから、流れのある状態でのプラスチックの連続的な磁気分離の可能性が示された。

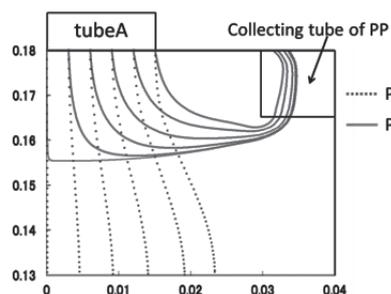


Fig 2 Result of the trajectory calculation of PP and PE.

またこの条件で処理量を計算すると単位時間当たりの処理量は最大で $2.54 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{h}$ であった。このシミュレーションを基に、実際の装置を用いた実験を行い分離が可能かを確かめ、さらに実用化に必要な処理量を確保すべく、装置の大型化を検討していく。

参考文献

1. Y. Ueda et al: *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, in press.
2. Y. Ikezoe, et al.: *Energy conversion and Management*, vol.43, 2002, pp 417-425.

磁気力増強と回収し易さを考慮したフィルタの製作と性能評価

Fabrication and evaluation of a magnetic filter taking into account enhancement of magnetic force and the ease of collecting

坪野谷 典之, 津久井 友隆, 三田 裕幸(足利工大); 岡 徹雄(新潟大); 横山 和哉(足利工大)

TUBONOYA Noriyuki, TUKUI Tomotaka, MITA Hiroaki (A.I.T.); OKA Tetsuo (Niigata Univ.); YOKOYAMA Kazuya (A.I.T.)

1. まえがき

近年、環境問題や資源問題において、工業排水から有害物質を取り除いたり、産業廃棄物から有用金属を回収したりする方法として、磁気分離が注目されている[1-3]。特に、対象物質の磁性が弱い場合や大量処理を行う場合には、磁性フィルタを用いて大きな磁気力を発生させる高勾配磁気分離が用いられる。同方法は分離性能が高い反面、フィルタによってはフィルタから分離物質を回収することが難しい点が問題となっていた。

本研究では、磁気分離した物質を回収しやすい新型フィルタを考案・製作し、その性能を評価した。

2. 平板フィルタ

Fig.1 に考案した平板フィルタを示す。同図(A)のフィルタ A は、今回新たに考案し作製したもので、磁性材を 3[mm]間隔でフィルムの上に並べ、ラミネートコーティングすることで、縦 60[mm]、横 30[mm]、厚さ 0.1[mm]のフィルタを製作した。同図(B)のフィルタ B は縦 60[mm]、横 35[mm]、厚さ 3[mm]の亚克力板に、直径約 1[mm]の穴をあけて磁性材 2[mm]間隔で埋め込んだ構造で、表面にフィルムを貼り付けている。

フィルタは平板状であるため分離物質の回収や逆洗が容易であるというメリットがある。これらの新型フィルタを、縦 50 [mm]、横 110 [mm]、深さ 50 [mm]の配管に、任意の枚数をセットして使用する。配管は、組立・分解が簡単に行えるように作られており、作業性を向上させている。

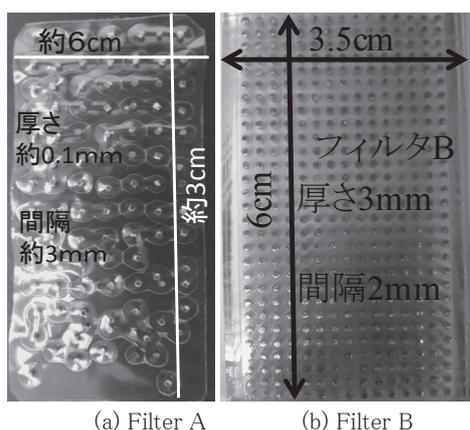


Fig.1 Photograph of proposed filters.

3. 実験方法

対向型超伝導バルク磁石の磁極間に、考案した新型フィルタを挿入した配管を配置する。約 500 [ppm]のマグネタイト (Fe_3O_4 , 平均粒径 1 [μm], 強磁性体)の混合水をポンプで汲み上げ、配管部に供給する。流量を 3~12 [ml/s]に変化させ、磁気分離後のサンプルを回収した。分離性能の評価は、0~200 [ppm]の既知の濃度のサンプルについて、分光光度計(UVmini-1240、島津製作所)で吸光度を測定し、検量線を作成した。そして、各流量における分離後のサンプルの吸光

度を測定し、検量線から濃度を求めた。さらに、分離前後の濃度を比較して磁性粒子の回収率を求めた。

4. 結果および考察

Fig 2 に、マグネタイトの流量と回収率の関係を示す。低流量である 3[ml/s]の時では、フィルタ A が 96.4%、フィルタ B は 95.4%となっており、低流量時ではフィルタ A の方が 1%高い事が確認できた。また、高流量である 12[ml/s]の時では、フィルタ A は 79.5%、フィルタ B は 81.2%となっており高流量時ではフィルタ B の方が 2%高いことが確認できた。

これらの結果、厚さを薄くすることでフィルタ枚数が増え、表面積大きくすることが出来たため、低流量時ではより多くの磁性物質を回収できた。また、磁性材の大きさが小さくなったため、高流量時では 1枚毎の磁気力の弱いフィルタ A より、の磁気力の強いフィルタ B の方がより多く回収できる結果となった。また、フィルタ B が 3枚の場合とフィルタ A が 25枚の場合では、ほぼ同じ磁気力になる事が確認できた。

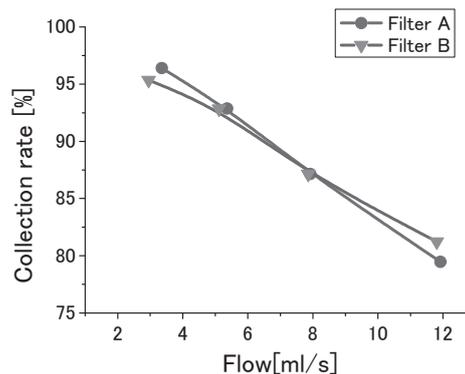


Fig.2. Comparison of collection ratio of magnetite particles between Filter A and B.

5. まとめ

本文は、高勾配磁気分離において分離された物質を容易に回収することのできる新型フィルタを考案し、磁気分離性能を調べた。強磁性体のマグネタイトを用いた測定を行い、低流量時ではフィルタ A、高流量時ではフィルタ B の回収率が高いことが分かった。今回の結果から、フィルタ B とフィルタ A を同時に用いた実験を行う予定である。

参考文献

- [1] N. Saho, H. Isogami, T. Takagi and M. Morita, "Continuous Superconducting-Magnet Filtration System", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 9, No. 2, pp. 398-401, 1999.
- [2] T. Ohara, "Particle Capture Theory and Experiment on an Amorphous Magnetic Ribbon Filter", *IEEE Trans. Mag.*, Vol. MAG-20, pp. 5103-5105, 1984.
- [3] K. Yokoyama, T. Oka, H. Okada, Y. Fujine, A. Chiba and K. Noto, "Solid-Liquid Magnetic Separation Using Bulk Superconducting Magnets", *IEEE Trans. Appl. Superconduct.*, vol. 13, No. 2, pp.1592-1595, 2003.6

超電導磁石を用いたセシウム汚染土壌の除染に向けた 土壌の磁気分離に関する研究

Study on soil magnetic separation using superconducting magnet for decontamination of cesium contaminated soil

五十嵐 亨, 野村直希, 三島史人, 秋山庸子, 西嶋茂宏 (大阪大学)

IGARASHI Susumu, NOMURA Naoki, MISHIMA Fumihito, AKIYAMA Yoko, NISHIJIMA Shigehiro (Osaka university)

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

1. はじめに

福島第一原子力発電所の事故に伴い、放射性セシウムが周辺地域へ飛散した。放射性物質の除染および放射性廃棄物の減容化を行い、汚染区域の空間線量率を低下させることが急務である。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法を提案した。セシウムは土壌中において、多くが粘土鉱物に付着している。粘土鉱物はその構造から 2:1 型と 1:1 型粘土鉱物に分類され、それぞれ (例外はあるが) 常磁性および反磁性を示すことが確認されている。セシウムは特に 2:1 型粘土鉱物に強固に付着していることが知られている。このため、土壌を分級し、その後、超電導磁石の磁場を利用して、2:1 型粘土鉱物のみを粘土鉱物の中から選択的に分離することで、汚染土壌の減容化が可能となると考えられる。特に、本研究では、磁気分離効果を評価するために、磁気分離後 X 線回折法 (XRD) を利用して、分離された粘土の成分分析を実施し、除染効果、減容化率について検討したので、その結果を報告する。

2. 実験方法

高勾配磁気分離を施す土壌サンプルとして、福島県において代表的な 2:1 型粘土鉱物であるバーミキュライト (ニッタイ株式会社製) と 1:1 型粘土鉱物である合成カオリナイトを用いた [1]。それぞれを 75 μm 以下にふるい分けした後、重量比で 1:1 の割合に混ぜ合わせたサンプルと大阪府内の学校の校庭の土を蒸留水に、それぞれ固液比 (重量比) で 1:100 となるよう混ぜ合わせ、均等に混ざり合うよう十分に攪拌した。

HTS バルク磁石 (大きさ $\phi=60\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 、表面最大磁束密度 3.5 T) の鉛直上方に置かれた円筒型の流路 (内径 $\phi=7.9\text{ mm}$) に磁気フィルターを設置した。流路へポンプによって流量を制御しながら懸濁液を流し込み、懸濁液から選択的に 2:1 型粘土鉱物を磁気分離するための装置を作製した。磁気フィルターの材料として、飽和磁化が 1.6 T であるデミスター (SUS430) を使用した。ワイヤーの平均線径は 0.15mm であり、磁石直上の流路 8 cm の区間に 3.0 g を詰め、体積充填率は 2.5% であった。外部印加磁束密度は流路の中心の底面で 3.0 T であった。この条件で磁気分離を行った。

分離後の試料に XRD 解析および磁化率測定を施し、分離効率を評価した。

3. 結果・考察

既知の標準粘土鉱物を異なる割合で混ぜ合わせたサンプルをいくつか用意し、それぞれの粘土鉱物に代表的なピーク強度の比を求め、検量線を作成し、それをもとに磁気分離後の粘土鉱物の定量解析を行う、直接法を利用し [2]、磁気分離後の土壌成分の定量解析を行った。各混合比のバーミキュライトとカオリナイトの混合サンプルの 2.9 \AA と 3.6 \AA のピーク比のプロットから得た検量線と磁気分離後の捕捉粘土鉱物の XRD スペクトルから得たピーク比を Fig. 1 に示す。磁気分離後の 2.9 \AA と 3.6 \AA のピーク比は 1.38 となり、検量線から分離後のバーミキュライトの割合は 82.5 % まで濃縮されていることが分かった。

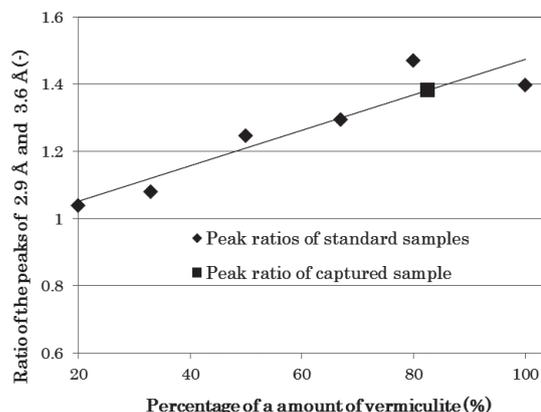


Fig.1 A Calibration Curve Prepared by a Peak Ratios of 2.9 and 3.6 \AA and Peak Ratio of Captured Sample

また、磁気分離後の捕捉および通過した試料の質量はそれぞれ 0.65 g と 1.09 g であった。検量線から得たバーミキュライトの割合と試料の質量から磁気分離前後の 2 種類の粘土鉱物の存在量の変化を Fig. 2 に示す。

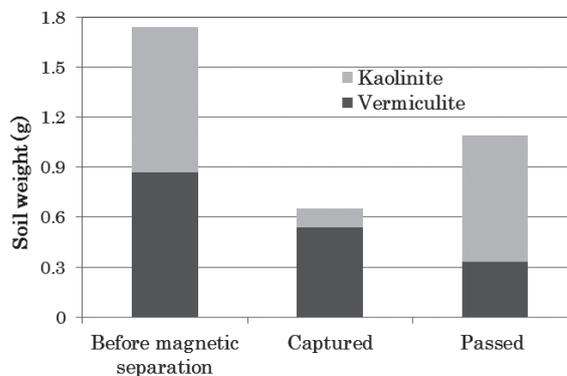


Fig.2 Soil Weight before Magnetic Separation and Captured by and Passed through the Magnetic Filter after Magnetic Separation

以上の結果から、2:1 型粘土鉱物であるバーミキュライトに放射性セシウムがより多く付着していることを利用して、放射性物質を含む土壌の減容化が期待できることが示された。

また、磁気分離前の校庭の土の体積磁化率は $5.10 \times 10^{-4} (-)$ で、磁気分離後のフィルター捕捉分および通過分の磁化率は $10.7 \times 10^{-4} (-)$ および $0.97 \times 10^{-4} (-)$ であった。このことから、実土壌においても、磁化率の差を利用した、土壌磁気分離が可能であることが示された。

参考文献

1. The Japan Atomic Energy Agency: Confirmation of depth distribution of radioactive substance in soil
2. H. Shirozu: Introduction to Clay Mineralogy (1988) p.76

磁気浮上型超電導免震装置の制動特性に関する検討

A Study on Braking Characteristics of a Magnetic Levitation Type Superconducting Seismic Isolation Device

鹿野 智裕, 刀 友基, 佐々木 修平, 宮城 大輔, 津田 理(東北大); 濱島高太郎(八戸工大)
 KANO Tomohiro, KATANNA Tomoki, SASAKI Shuhei, MIYAGI Daisuke, TSUDA Makoto (Tohoku University);
 HAMAJIMA Takataro (Hachinohe Institute of Technology)
 E-mail: tomohiro.k@ecei.tohoku.ac.jp

1. 緒言

磁気浮上型超電導免震装置は、超電導バルク体と永久磁石レールで構成され、免震対象物を磁気浮上させることで任意の水平方向振動伝達を除去する装置である[1]。長手方向の磁場分布が均一な永久磁石レール上に超電導バルク体を浮上させれば、永久磁石レールに長手方向の振動が印加されても、超電導バルク体を経験する磁束密度に変化が生じないため復元力は発生せず、超電導バルク体(浮上層)への振動伝達を除去することができる。しかし、浮上層に加わる擾乱に対し静止安定浮上を維持することは困難となる。そこで、安定浮上システム(以下、SL システム)を考案し、静止安定浮上と振動時の振動伝達抑制という相反する要件をパッシブ制御で行うことに成功した[2]。しかし、振動発生後は、浮上層が無制御状態となり等速度運動をするため、その速度が大きい場合には永久磁石レールから逸脱する可能性がある。このような状態を回避するには、浮上層の移動速度を制御する制動機構が必要となる。そこで、本研究では、制動機構を有する磁気浮上型超電導免震装置の制動特性について検討した。

2. 磁気浮上型超電導免震装置の制動特性

2.1 浮上層の速度制御における永久磁石重量依存性

図 1 に実験装置の概略図を示す。本装置では、浮上層と地上層に設置された永久磁石間の吸引力を利用して静止安定浮上を実現している。本装置において、地上層に振動が印加されて浮上層と地上層との間に相対変位が生じ、 $F_z < \text{重力}$ となると、PM1 は落下し、浮上層への振動伝達は完全に除去される。そこで、安定浮上に最小限必要となる力が得られる様に PM1 の重量を調整することで、PM1 がより素早く落下するようにした。この時、磁気結合消滅時の浮上層の速度 v は、式(1)で表されるように、磁気結合が消滅するまでに浮上層に加えられる力 F_x を時間で積分した力積に依存する。このため、磁気結合が消滅するまでに浮上層に加わる力積を小さくできれば浮上層の速度を抑制することが可能となる。

$$F_x \cdot \Delta t = mv \quad (1)$$

以上を確認するために、PM1 の重量を変化させたときの浮上層の速度について実験と解析を行った。PM1 の重量は 2g, 20g とし、20g のときは、 F_x のピーク値が得られる相対変位以上の変位が生じた場合に PM1 が落下するようにした。図 2 に PM1=2g のときの実験結果と解析結果、また、PM1=20g のときの解析結果を示す。図 2 より、PM1 の重量を 20g に増加させ、永久磁石間の吸引力を浮上層の静止安定浮上を可能とする最小限の大きさに設定することで、磁気結合消滅後の浮上層の速度を抑制できることがわかった。

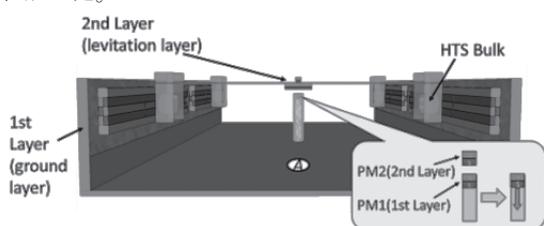


Fig.1 Schematic drawing of a Stationary Levitation system.

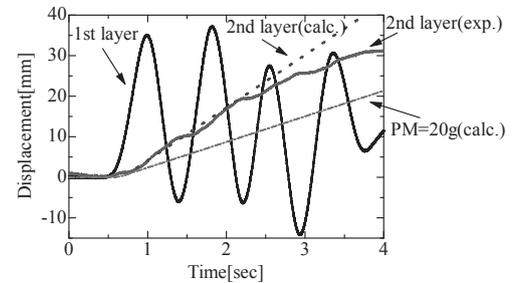


Fig.2 Experimental and analytical results of vibration waveforms of the 1st and 2nd layers in a model device having a SL system (PM=2 g and 20 g).

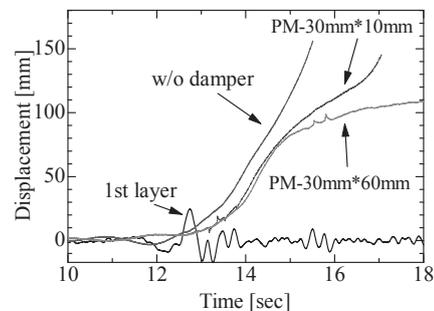


Fig.3 Experimental results of braking characteristics of a stationary levitation system with eddy current damper.

2.2 渦電流ダンパーを用いた速度制御

浮上層と地上層の永久磁石間の磁気結合消滅後、等速度運動をする浮上層の速度を減少させるために、渦電流ダンパーを用いた制動機構を考案し、その有効性を検証するために実験を行った。図1のA点(浮上層の進行方向の先)に永久磁石を取り付け、浮上層に銅板を設置した。これにより、銅板が磁石上を通過する際に渦電流が生じ、浮上層の速度を減少させる方向に力が働く。図 3 にダンパーで用いる永久磁石の大きさを変えた場合の振動抑制試験の結果を示す。図 3 が示す様に永久磁石の表面積が大きくなるほど大きな制動力が得られる結果となり、提案する渦電流ダンパーが浮上層の速度抑制に有効であることがわかった。

3. 結言

浮上層と地上層の永久磁石で構成される静止安定浮上システムにおいて、永久磁石の重量を大きくし、渦電流ダンパーを採用することによって、永久磁石間の磁気結合消滅後の浮上層の移動速度を抑制できることを確認した。しかしながら、本装置は初期位置への復帰機構を持たないため、今後は、余震などの連続した振動への対策方法について検討していく必要がある。

参考文献

1. M.Tsuda, et al.: IEEE Trans. Appl.Supercond., Vol.17 (2007), pp.2059-2062
2. T.katana, et al.: ICEC24-ICMC2012, 2012, 17P-P01-12

被災時に MR 装置の運転・管理関係者へ提供すべき 超伝導マグネットの工学的情報の検討

Study of engineering information of the superconducting magnet to be provided
to the operator of the MR systems in the disaster.

野口 隆志, 端 健二郎, 大木 忍(NIMS); 中井 敏晴(国立長寿医療研国立長寿医療研究センター)

NOGUUCHI Takashi, HASHI Kenjiro, OHKI Shinobu(NIMS); NAKAI Toshiharu(NCGG)

E-mail: NOGUUCHI.Takashi@nims.go.jp

1. はじめに

東日本大震災に起因した MR 装置の被災状況に関する被災状況調査を行ってきた。質問紙および聞き取り調査の結果を分析すると、MR 装置の運転・管理関係者の不安要因は、超伝導マグネットのクエンチに関する工学的情報の不足によって招かれるケースが多いことが解った[1]。本調査研究の目的は、MR 装置用超伝導マグネットを運転・管理する医療関係者に、どのような工学的情報を提供すれば不安要因を低減できるかを検討することにある。

2. 質問紙および聞き取り調査の結果

調査対象は大きな被害があった1都5県の MR 装置を有する機関で、602 台の被災時の MR に関する諸情報が収集できた。特に危険を感じた事象として回答項目に記載されていない事象など MR 装置の破損状況についての自由記述は 34 件あった。そのうちクエンチの不安が最も多く、その背景は停電による液体ヘリウム液位の低下である。液体ヘリウム液位が低下すればクエンチ発生の可能性は増すという定性的な理解は広く行き届いていることがうかがえる。しかし臨床検査担当者の不安事項を分析すると、その9割が超伝導マグネットのクエンチに対する漠然とした不安を背景としており、クエンチに関する工学的情報の不足によって招かれるケースが多いことが解った。クエンチを知り、クエンチに至るか否かを診断し、クエンチ回避策が実施できれば、多くの不安要因を解消できると考えられる。

3. 工学的調査方法

4 台の超伝導型 MR 装置の強制クエンチに立会い、強制クエンチ実施前の状態記録、クエンチ過程のマグネットおよび設置環境の挙動、実施後の変化などを観測調査し、使用者が必要とする工学的情報を具体化する方法について検討した。またその調査実験を実施する過程で装置使用者から聞き取り調査を行い、工学的情報不足が不安につながることを確認した。

4. 調査結果

実際のクエンチを観測し、いろいろな不安要因を確認した。“クエンチ”を知り、“クエンチに至るか否か”を診断し、“クエンチ回避策”を実施できることで、多くの不安要因が解消できることが期待できた。また MR 装置に関する初期点検および復旧立ち上げ作業を設置機関の職員主導で実施した装置は 309 台(調査対象装置 602 台の内)であったことが、本調査研究の重要性根拠として挙げられる。

実際の4台の強制クエンチの観測結果として、主磁場は 1 秒以内におよそ 1/4 以下となりおよそ 10 秒以内に消失し、内圧は逆止弁動作の後破裂弁動作が起り、放出配管表面温度が液体空気液化温度(78.8K)以下となる放出時間は約 10 分であった(図1)。ただし本調査で実施した事前点検は、クエンチさせることを前提に行われたため、クエンチ回避策そのものは実施できなかった。

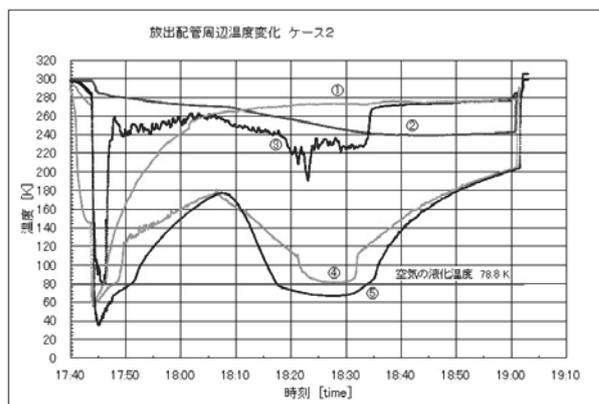


図1 クエンチダクト表面温度変化の経緯



(a)クエンチ直後の放出口 (b)放出口カバーの空気の液化
図2 屋外放出口付近の様子

5. まとめ

事前点検、クエンチ過程での点検、クエンチ後の確認項目が明らかとなった。被災時の超伝導マグネットの初期診断および処置方法に関する情報不足を補うことで、被災時に関係者が抱く不安はある程度補えると期待できる。

しかし冷凍機が止まってからの液位減少速度の変化情報、実施の最低液位情報などは現場に提供されていないことが不安残留の原因となっていることも分かった。

本被災調査および工学的調査は、厚生労働科学研究費補助金、地域医療基盤開発推進研究事業、『大震災におけるMRI装置に起因する2次災害防止と被害最小化のための防災基準の策定』の一環として実施された。

参考文献

1. 中井敏晴他、東日本大震災による MR 装置 602 台の被害状況報告、磁気共鳴医学会誌、Vol. 33 (2013) No.2 p.92-119

磁性粒子の空間移動を考慮した超電導バルク磁石の着磁

Magnetization of superconducting bulk magnet in consideration of the spatial displacement of magnetic particles

二ノ宮 晃 (成蹊大学)

AKIRA Ninomiya (Seikei Univ.)

E-mail: ninomiya@st.seikei.ac.jp

1. はじめに

我々は、一対の着磁した超電導バルク磁石とこれを励磁する電磁石を用いて直径 5 mm から 10 mm の軟鉄球が 20 mm 程度のギャップ中で浮上することを実証してきた。しかしながら、磁性粒子など、より小さな磁性体になると浮上も移動も困難であることが同時に判明した。そこで、磁場空間において磁性粒子が移動できるように本手法を改良することを進めている。

これまでの検討により、着磁したバルク磁石に着磁時と同程度あるいはやや強い磁場を外部磁場として重畳させると、バルク磁石の遮蔽効果により磁石の磁気力が低下することを見出している(1)。今回は、これを利用した改良を行った。

実施した事項は、空芯のヘルムホルツコイルを補助コイルとして追加利用するもので、一方は着磁磁場と同方向に、他方は逆方向に接続する。これをバルク磁石がその内側に入るサイズで作成し、バルク磁石着磁時に励磁用電磁石の磁場に重畳させる。着磁後は、着磁磁場に電磁石磁場と補助コイル磁場を外部磁場として重畳させる。このとき、外部磁場変化時におけるギャップ空間磁場を計測すると、外部磁場が着磁磁場以上になるあたりからギャップ空間に傾斜磁場が形成されることを見出した。

この効果を検証するために、磁性粒子の移動可能性を試みたところ、低磁場側にセットした磁性粒子は外部磁場を重畳させていくに従い高磁場側へと移動することを確認した。

2. 試験方法とその結果

Fig. 1 に実験装置の全体図を示す。本装置は、ギャップ長が可変可能な電磁石、HTS バルク磁石、そして補助コイルからなる。Fig. 2 は、HTS バルク磁石(直径 60mm、厚さ 20mm)と傾斜磁場発生用補助コイルである。補助コイルは、0.3mm φ の銅線を 1200 巻きしてあり、そのインダクタンス値は 61mH、中心軸上に発生する軸方向磁場(x軸方向成分)はコイルから 2mm 離れた位置において 23mT/A である。

バルク磁石の着磁方法は、フィールドクール法である。具体的には、電磁石に 4A を通電させてバルク磁石部分で 110 mT、ギャップ中心部で 100mT の軸方向磁場を発生させる。ここに補助コイルで約 17mT の磁場を発生させて、一方では電磁石と同方向に、他方では逆方向になるように配線して左右の磁場強度に約 34mT の差を与える。その後、液体窒素で冷却して着磁させる。着磁後は、バルク磁石の磁場に電磁石と補助コイルによる外部磁場を重畳させてギャップ空間の磁場変化を測定すると共に、磁性体を低磁場側にセットして移動過程を観測する。

Fig. 3 は、外部磁場強度を変化させたときのギャップ磁場軸方向特性(B_x)である。これより、外部磁場を着磁磁場以上になると、ギャップ空間がほぼ一定の傾きを持つ磁場になることがわかる。なお、測定はバルク体の中心軸上で実施している。Fig. 4 は、このときの磁性粒子の移動状態を示した写真であり、磁性粒子は、はじめ右側の低磁場側にセットしてある。そして、外部磁場を着磁磁場の約 80%にした時点から磁性粒子が移動し始め、125%ではほぼ全てが移動したことを確認した。

以上、HTS バルク磁石と着磁用電磁石、そして磁場形成用の補助コイルにより、磁性粒子が磁場空間中で移動できることがわかった。現在、ギャップ中央部に磁性体を移動させる方策について検討している。

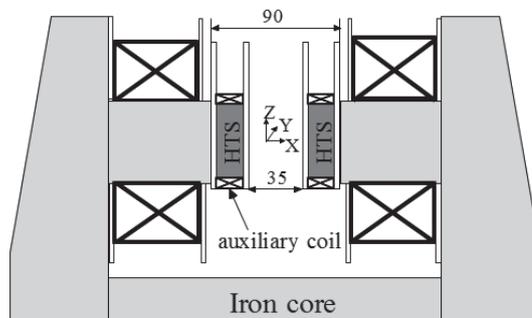


Fig. 1 Overview of experimental equipment

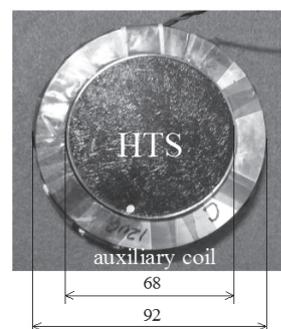


Fig. 2 HTS bulk and auxiliary coil

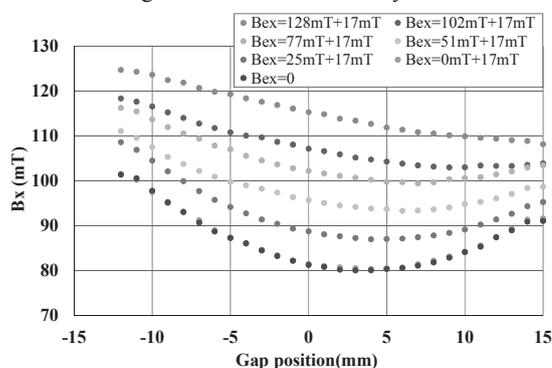
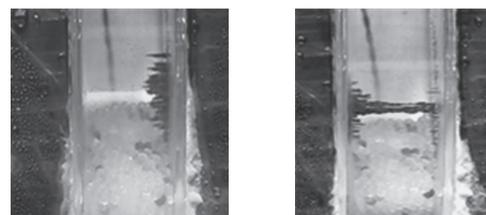


Fig. 3 Gap space axial magnetic field (B_x) characteristics, where the trapped HTS magnetic field is 100mT and the external field, B_{ex} , is the sum of the magnetic field by the auxiliary coil and by the electromagnet.



(a) Initial state (b) Final state

Fig. 4 Movement before and after photos of magnetic particles.

参考文献

1. A. Ninomiya, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 85 (2011) p.60