

磁気分離法を用いた放射性物質の土壌からの除去に関する研究

Study on Decontamination of Radioactive Cesium form Soil by Magnetic Separation

西嶋 茂宏 (阪大), 秋山 庸子 (阪大), 三島 史人 (阪大)

NISHIJIMASHigeniro (Osaka Univ), AKIYAMA Yoko (Osaka Univ), MISHIMA Fumihito (Osaka Univ)

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

1. はじめに

2011年3月11日に起こった福島第一原子力発電所における事故により、近傍の地域の放射線汚染が問題になっているが、特に半減期が30年と比較的長い放射性セシウムが問題となっている。放射性セシウムは土壌に含まれる粘土鉱物に対して高い吸着性を示すことが知られており、水相に放出されることなく土壌中に保持されている。このため、震災後も周辺地域での空間線量率の低下の妨げとなっており、被災地域の再生や住民の生活の安全の確保のため、土壌の除染が喫緊の課題となっている。

ICRPにより定められている一般公衆の線量限度は1 mSv/yearであり、環境省の基準で、空間線量率が20~50 mSv/yearの地域が居住制限区域、50 mSv/year以上が帰宅困難区域となっている。また環境省のガイドラインにより、管理型最終処分場で埋立処分可能な土壌の放射能レベルは8000 Bq/kgであり、およその空間線量率に換算すると、およそ5.3 mSv/yearとなる。したがって、土壌の除染の目標値としては、暫定的な目標値として、管理型最終処分場に搬入可能であるレベルの5.3 mSv/year (8000 Bq/kg)、最終的な目標値としては一般公衆の線量限度レベルの1 mSv/year (1000 Bq/kg)を目標としている。

高校パイ磁気分離システムは土壌除染のシステムとして適当と考えられる。なぜなら、除染を必要としている土壌の量は一つのサイトでもおよそ数百tと大量にあり、それを数日程度の短時間で除染することが求められている。また装置がコンパクトであることは、一連のシステムを可搬式とすることを可能にし、除染が必要な箇所を除染しながら順次移動していくことに適している。

2. 磁気分離法を用いた除染システム

磁気分離法を利用した土壌中のセシウム脱離と除去のための一連のシステムの概要を図1に示す。本システムは大きく4つの段階に分けられる。すなわち、①土壌分級 ②粘土洗浄 ③RIの磁性吸着材への吸着 ④磁気分離である。

土壌の成分のうち、粒子径が $2\mu\text{m}$ 以下の粘土にセシウムは強固に吸着されている。このため、まず①土壌から粘土を分級する。砂れきやシルト中の放射線量が基準値以下であることを確認したのち、これらはそのまま元の場所に埋め戻す。次に、分離された粘土の減容化をはかるため、②粘土の洗浄を行う。粘土に吸着したセシウムは、水洗浄ではほとんど分離されないことが明らかになっており、③酸洗浄やイオン交換によりセシウムを脱離させる。そして、水相に放出されたセシウムイオンを、磁性を付与した吸着剤に吸着させ、磁気分離法により効率的に回収することで、土壌からセシウムを除去するというシステムである。強磁性吸着剤には、酸や塩を含む洗浄液中でも安定に存在し、高率にセシウムを吸着できる性質が求められる。

これらの一連の装置がコンテナ2-3台程度で完結するコンパクトで移動可能なシステムとすることで、その場で除染を行い、除染が終了すると次の地点に移動できるようにすることを検討している。また、一連の洗浄装置・回収装置の閉鎖性を確保したシステムとすることで、操

作者の内部被ばく、外部への飛散、汚染廃棄物の低減を図り、RI管理を容易かつ安全に行うことができると考えられる。

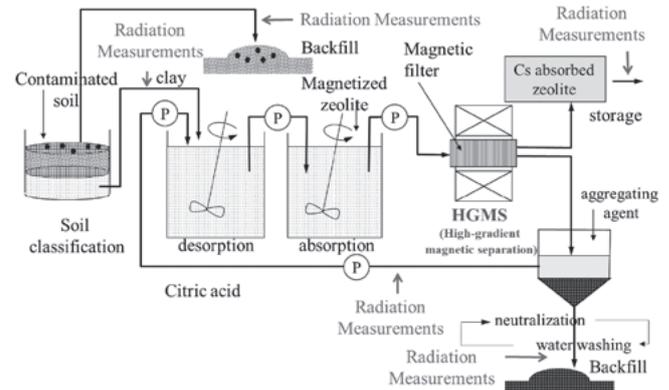


Fig. 1 Flow diagram of decontamination of radioactive soil.

3. 酸環境下でのゼオライトのセシウム吸着特性

脱離に用いた0.5 mol/Lの硝酸とクエン酸中での磁化ゼオライトの吸着特性を調べ、その結果を図2に示す。磁化ゼオライトに含まれるマグネタイトの鉄イオンの溶出は見られなかった。クエン酸の場合は、吸着率が5時間後で80%以上と、蒸留水中とほぼ同等の吸着性能を示した。一方で硝酸の場合は吸着率が24時間後でも40%程度と、かなり低下した。

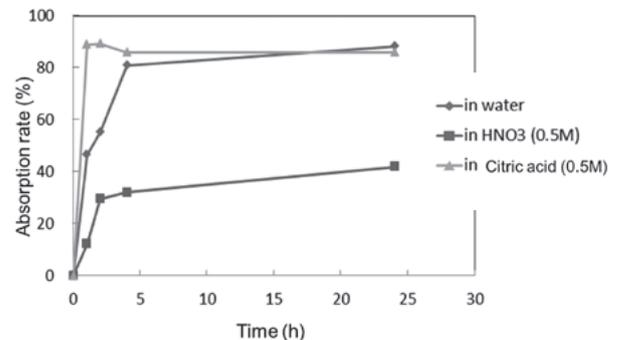


Fig. 2 Adsorption properties of Cs to magnetic zeolite.

4. 結論

粘土鉱物に吸着したセシウムは、酸洗浄で脱離が可能であり、脱離後の洗浄液中にそのまま強磁性吸着剤を添加し、磁気分離を行うプロセスでは、有機酸中であれば水中と同様の吸着率でセシウムを吸着させることが可能であることが明らかになった。

磁性ゼオライトの磁気分離特性は確認しているが、粘土懸濁液から特定のゼオライトのみを効率的に分離する方法は、磁気分離ではなく、超電導磁気分離システムが土壌除染に性能を発揮することが期待できる。

今後の課題としては、実際の汚染土壌の実験も含めた、粘土鉱物の層間により強く吸着したセシウムイオンの脱離条件の検討と、その洗浄液中での強磁性吸着剤による吸着率の向上が挙げられる。

溶存酸素を用いた磁気アルキメデス分離装置の検討

Study on magneto-Archimedes separator using the dissolved oxygen

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

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。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である。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について検討した。

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磁場積を制御することで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 x は鉛直下向きを正としている)。

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

磁場を印加しない時、粒子が流体中で沈殿する初期条件で、 $(\chi_1 - \chi_2) < 0$ となる流体を選択する。その後磁場を印加し、磁場積を正で大きくすることで(1)式が負となる場合、粒子は浮揚する。粒子が浮揚していくと(上方向に移動すると)磁場強度は小さくなる(磁場勾配が正なので、上方向では磁場は小さい)ため、ある場所で(1)式は0となる密度差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. 溶存酸素媒体を用いた磁気アルキメデス分離実験

本研究で用いた磁気アルキメデス装置の模式図をFig.1(a)に示す。磁場発生源として超電導型ソレノイド磁石(ボア直径100 mm, 長さ460 mm, 最大磁束密度10T, 磁場勾配60T/m)を用いた。磁場印加条件はすべての実験で10Tとした。コイルの中心とオートクレーブ中のパーフルオロヘキサンの上部液面と一致するように設置した。内容積96mLの耐圧ガラスオートクレーブ(内径27 mm, 高さ175 mm)にパーフルオロヘキサン(密度1.69g/cm³, 磁化率SI: -3.2×10⁻⁶)50mlとナイロン6樹脂(PA6)(密度1.14g/cm³, 磁化率SI: -8.19×10⁻⁶)1g, ポリエチレンテレフタレート樹脂(PET)(密度1.38g/cm³, 磁化率SI: -8.67×10⁻⁶)1g, および塩化ビニル樹脂(PVC)(密度1.43g/cm³, 磁化率SI: -10.3×10⁻⁶)1gの3種類を同時に投入した。

パーフルオロシクロヘキサンに酸素圧力で溶存させ、ソレノイド型超電導磁石の磁場を印加した。実験中のボア内の様子はCCDカメラにて撮影し分離状態について確認した。

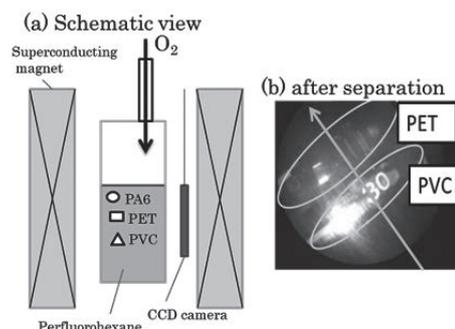


Fig.1 (a) Experimental Set-up, (b) CCD picture after separation.

4. 実験結果と考察

3種類の樹脂はパーフルオロヘキサンより軽いため、磁場印加前は液面に浮いていた。磁場印加により沈降し始め、沈降した位置がそれぞれで異なり、種類ごとに分離できることが示された。(1)式に従いそれぞれの磁化率と密度により、安定沈降する場所が異なるため、分離可能であることが示された。Fig.1(b)は本実験の結果を撮影した写真である。

室温下で0.5MPaから2.0MPaGまで圧力を変化させ、それぞれ酸素の溶解平衡に達するまで溶解させた。その時の圧力下での樹脂の静止位置を示した結果をFig.2に示す。

実験結果から0.5MPaGの圧力下では、PA6とPETは沈降せず、0.8MPaGの圧力下では、PA6のみ沈降しなかった。よって、溶存酸素量(媒体の磁化率)いわゆる圧力制御によって、分離可能であることが示された。

1.5MPa圧力条件下で、PVC, PET, PA6はそれぞれ、6.0T, 6.9T, 8.8Tで沈降を開始した。同一圧力条件下にて、印加磁場を変化させることで分離可能であることも示された。

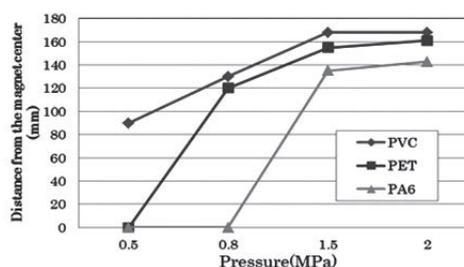


Fig.2 Experimental result.

5. まとめ

実験結果から、圧力制御(溶存酸素媒体の磁化率制御)や印加磁場制御により、溶存酸素を用いた磁気アルキメデス分離が可能であることが示された。実際の分離装置を設計するには、印加磁場を一定にし、溶存酸素量(圧力)を制御する方法が精密に制御可能であると考えられる。

今後は作業媒体の密度より小さい物質について、鉛直成分の磁場だけでなく、径方向の磁場を利用した分離についても検討してゆく。

平板フィルタを用いた対向型バルク磁石による磁気分離

Magnetic separation by a face-to-face superconducting bulk magnet with a novel plate-type filter

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 に考案した二種類の新型フィルタを示す。左図のフィルタ A 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、SUS430 の磁性材を 5[mm]の間隔で埋め込んだ構造になっている。右図のフィルタ B はフィルタ A と同サイズの亚克力板に、直径約 1[mm]の穴をあけてニッケル線を 2[mm]間隔で埋め込んだ構造となっている。また、両フィルタとも表面に透明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、三枚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。

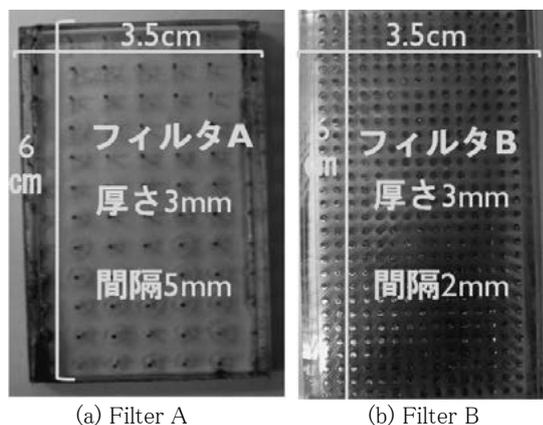


Fig.1 Photograph of the proposed filters.

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。そして、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。図よりフィルタ A は流量が最も遅い 2.5[mL/s]の時には 97.3[%]の回収率を達成し、流量が最も速い 12.6 [mL/s]の時には 86[%]に低下している。一方、フィルタ B では流量が最も遅い 2.7 [mL/s]では 98.2[%]と最大値を示し、流量が最も速い 12.7 [mL/s]の時には、88[%]に低下している。しかし、これら2つのフィルタは、従来のメッシュ型のフィルタとほぼ同じ数値であるので、新型フィルタは従来と同じ分離性能があるといえる。

また、フィルタ A と B を比較してみると、フィルタ A より間隔を詰めたフィルタ B の方が最大値で 1%、最小値で 2%の回収率向上が見られる。このことより、磁性材の間隔を詰めることで、磁場勾配を上げ磁気力も強くなったと言える。

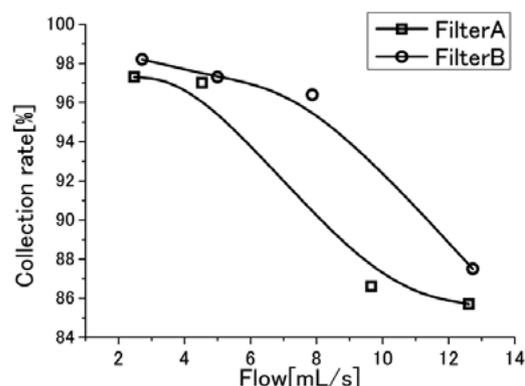


Fig.2. Comparison of the collection ratio of magnetite particles between Filter A and B.

5. まとめ

本文では、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、フィルタ A、B ともに高流量で 85[%]以上の回収率を達成することができた。また、フィルタ A、B を比較すると、磁性材の間隔を詰めることで磁場勾配を大きくすることができ、磁気力を向上させることがわかった。

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

医療用たんぱく質の高速分離・精製・回収用超電導マグネットの製作・試験

Fabrication and test of superconducting magnets for trapping immunoglobulin in serum

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

KAJIKAWA Kazuhiro (Kyushu Univ.); KAMIOKA Yasuharu, AGATSUMA Koh (NETS); FUCHINO Shuichiro, FURUSE Mitsuho (AIST); UEDA Hiroshi (Osaka Univ.); 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血清中に微量存在する抗体(免疫グロブリン)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[1-6]。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、高勾配磁気分離システムに用いる伝導冷却方式の超電導マグネットを設計・製作した。また、健全性を事前に確認するために、製作した超電導マグネットを液体ヘリウム中に浸漬冷却して、励磁試験を実施した。さらに、磁気ビーズや磁性フィルターを効果的に消磁するために製作した回路の試験も実施した。

2. 超電導マグネットの設計および製作

高勾配磁気分離システムに用いる伝導冷却方式の超電導マグネットを設計した。想定した NbTi 線材は既存のものであり、線径は 0.642 mm、フィラメント数は 636、銅比は 1.3、ツイストピッチは 70 mm である。本線材の臨界電流は、6, 7, 8 T 中でそれぞれ 279, 217, 146 A である。この線材を用いて設計・製作した超電導マグネットの諸元を、Table 1 に示す。室温部のクリアボアを 30 mm とし、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。クライオスタットの真空断熱層および巻枠の厚さを確保するために、超電導マグネットの内径を 60 mm とした。巻線部のパッキングファクターを 0.9 と仮定して、動作電流を 100 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、82.7 mm、82.2 mm、2597 となる。このとき、超電導マグネットの自己インダクタンスは 0.257 H と見積られる[7]。

以上の設計に基づいて、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、超電導マグネットの外径は 83.9 mm、ターン数は 2520 となった。

3. 励磁および消磁試験

製作した超電導マグネットの健全性を事前に確認するために、液体ヘリウム中に浸漬冷却して、励磁試験を実施した。結果の一例を Fig. 1 に示すが、定格の約 1.5 倍(中心磁界 4.5 T 相当)の 147.4 A まで通電しても、クエンチは発生しなかった。また、励磁時と減磁時の発生電圧から製作した超電導マグネットの自己インダクタンスを見積ると、0.243 H となる。

次に、高勾配磁気分離システムに用いる磁気ビーズや磁性フィルターを消磁して、捕捉した磁気ビーズを回収するために、専用の消磁回路を製作した。消磁試験の結果を Fig. 2 に示すが、当初の想定通りに動作することを確認した。

本研究は、中小企業庁平成 23 年度戦略的基盤技術高度化支援事業(3 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.: Abst. of CSJ Conf. 77 (2007) 2C-a04.
2. H. Ueda, et al.: Abst. of CSJ Conf. 77 (2007) 2C-a05.
3. K. Agatsuma, et al.: Abst. of CSJ Conf. 78 (2008) 2B-a09.
4. K. Agatsuma, et al.: Abst. of CSJ Conf. 79 (2008) 3C-a07.
5. H. Ueda, et al.: Abst. of CSJ Conf. 79 (2008) 3C-a08.
6. H. Ueda, et al.: Abst. of CSJ Conf. 84 (2011) 1B-a04.
7. K. Kajikawa, et al.: TEION KOGAKU 30 (1995) 324.

Table 1 Specifications of designed and fabricated SC magnets

Parameter	Design	Fabrication
Inner diameter	60 mm	60.0 mm
Outer diameter	82.7 mm	83.9 mm
Winding length	82.2 mm	82.2 mm
Turn number	2597 turns	2520 turns
Self-inductance	0.257 H	0.243 H
Applied current	100 A	103.4 A
Central field	3 T	3.0 T

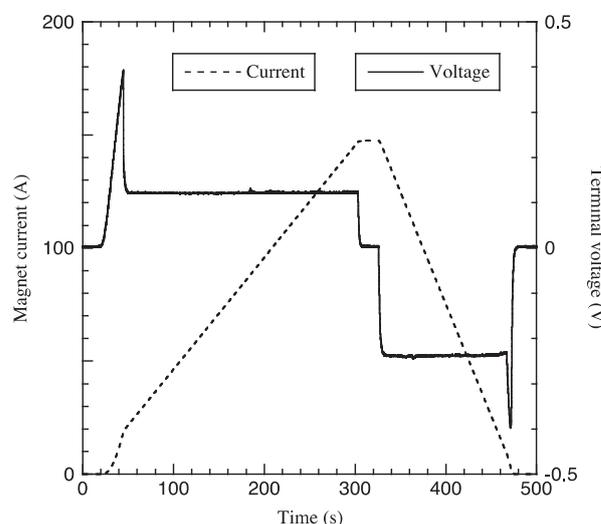


Fig. 1 An example of experimental results of terminal voltages in fabricated SC magnet during charging and discharging processes of currents.

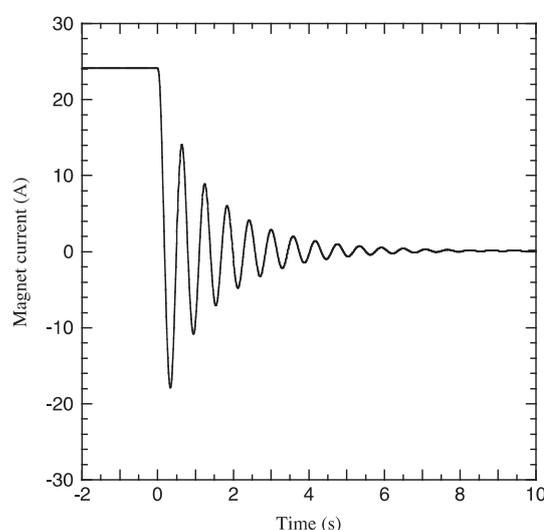


Fig. 2 Experimental results of current oscillation in fabricated SC magnet with prepared demagnetizing circuit.

超電導バルク磁石を用いた磁気力制御遺伝子導入のための研究

Study on magnetic gene transfer by using HTS bulk magnet

中川 公太, 大阿久 佳宏, 玉田 順也, 三島 史人, 秋山 庸子, 西嶋 茂宏,
大塚 マリアナ 今日美, 中神 啓徳(大阪大学)

NAKAGAWA Kota, OAKU Yoshihiro, TAMADA Junya, MISHIMA Fumihito, AKIYAMA Yoko, NISHIJIMA Shigehiro
OSAKO Mariana Kiomy, NAKAGAMI Hironori (Osaka University)
E-mail: nakagawa@qb.see.eng.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

癌に対する治療法として、癌を抑制する遺伝子を患部に導入する遺伝子治療が検討されている。遺伝子は癌組織に局所投与することが考えられているが、遺伝子導入効率が低いことが課題とされている。DNA 配送を行う際、DNA と結合してその輸送を行う担体を利用する必要があるが、このような DNA 担体を物理的外力によってその拡散を防ぎ、局所にとどめておくことが出来れば、遺伝子の導入効率が向上することが予想される。本研究では、超電導バルク磁石による強磁場を利用し、強磁性を付与した DNA 担体を体外から制御することで、局所的でかつ高効率な遺伝子発現を目指すものとする。

2. DNA 担体の調製

本研究では DNA 担体として、強磁性粒子であるマグネタイトを用いる。この DNA-マグネタイト複合体は外部磁場で制御可能であるため、注入部からの DNA の拡散を防ぐことが可能となると考えられる。DNA とマグネタイトは静電的に結合させるものとする。そのため、負の帯電をもつ DNA と結合させるマグネタイトは、正の帯電を持つことが求められる[1]。

ここでは、平均粒子径が 100nm であり、その表面を Polyethylenimine で修飾したマグネタイトを使用した。この磁性ナノ粒子のゼータ電位の pH 依存性を Fig.1 に示す。

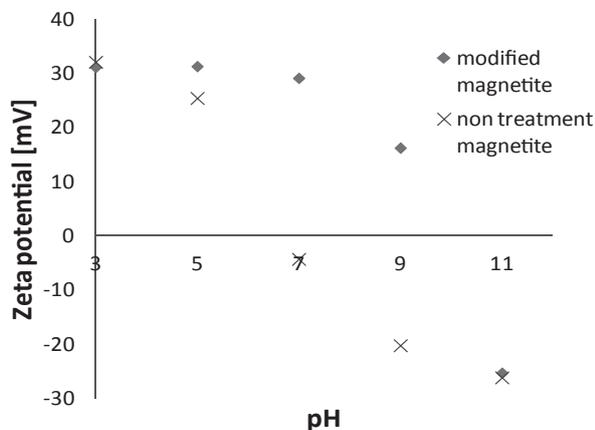


Fig.1 Zeta potential of cationic magnetite particle

生体中では pH はおよそ 7.4 であるとされており、この pH 領域では修飾したマグネタイトは正に帯電していることが確認された。この表面修飾マグネタイトと DNA (pGL3 Luciferase Reporter Vectors)を、それぞれの質量比が 1:1 となるように混合し、20 分間インキュベートすることで DNA-マグネタイト複合体を調製した。

3. 磁気力制御遺伝子導入実験

磁性 DNA 担体の局所的な集積可能性を確認するために、粒子の拡散シミュレーションを行った[2]。これによって、磁性 DNA 担体の拡散の抑制に必要な磁場条件を求め、この条件に基づいた磁氣的遺伝子導入実験を検討している。in

vivo での実験に先駆け、まず生体を模擬したアガロースゲル 1.0 wt.%を用いた拡散モデル実験を行った[3]。アガロースゲルを超電導バルク磁石の中心軸上の磁束密度 1.2 T (クライオスタット上方 20 mm) の位置に設置し、磁性 DNA 担体 50 μ l を注入した後、20 分間静置した(Fig.2-b)。同様に磁性 DNA 担体を注入後、磁場を印加せず 20 分間静置したゲルを用意した(Fig.2-a)。

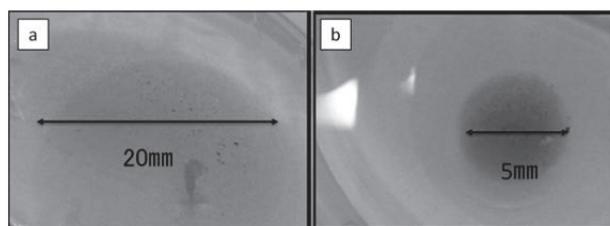


Fig.2 Difference in the diffusion due to the presence or absence of applied magnetic field

実験結果から、通常の投与では直径 2cm 以上の範囲に拡散するところを、超電導バルク磁石を用いることによって直径 5mm の範囲内に留めることが確認できた。これにより、磁性 DNA 担体の局所的な集積、およびそれによる遺伝子導入効率向上の実現可能性が示された。今回は動物実験を想定して、クライオスタット上方 20 mm の距離としたが、バルク磁石により近い条件ではさらに拡散を抑えることが可能である。

さらなる局所集積のために、磁性DNA担体注入部に強磁性針を挿入し、磁場を印加した場合の拡散モデル実験を行ったところ、磁性DNA担体は針挿入部から直径2mm以内の範囲に留まった。強磁性針近傍の磁場勾配は1200 T/mとなり、この磁場勾配を再現するような磁石を設計することができれば、より局所への遺伝子導入が実現可能であると考えられる。

4. 結論

本研究では、磁性DNA担体として、DNAとマグネタイトの複合体を調製し、これを用いた磁氣的遺伝子導入による遺伝子導入効率の向上を確かめた。まずシミュレーションによって、磁性DNA担体の集積可能性を評価し、このシミュレーションの結果に基づいて、臓器を用いた拡散モデル実験を行なった。以上のように、磁気力による局所的でかつ高効率な遺伝子導入の手法を提案し、その実現可能性を示した。

参考文献

- O. Mykhaïlyk, et al.: Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 311 (2007) p.275-281
- A. Nacev, et al.: Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 323 (2011) p.651-668
- B. Westrin, et al.: Journal of Controlled Release, Vol. 30 (1994) p.189-199
- Y. Hirota, et al.: Physica C: Superconductivity, Vol. 469 (2009) p.1853-1856

超長期連続運転永久電流MRIマグネット

Superconducting Persistent Current Mode Magnet for Magnetic Resonance Imaging Operated for Extremely Long Period

山本 俊二, 児仁井 克己, 田邊 肇, 横山 彰一, 松田 哲也(三菱電機); 山田忠利(マグネット・テクノロジー)
 YAMAMOTO Shunji, KONII Katsumi, TANABE Hajime, YOKOYAMA Shoichi, MATSUDA Tetsuya (Mitsubishi Electric);
 YAMADA Tadatoshi (Magnet Technology)
 E-mail: Yamamoto.Shunji@bp.MitsubishiElectric.co.jp

1. はじめに

超電導の特徴の一つに永久電流がある。実フィールドにてこれを実現し、一度も停止することなく、24年以上連続運転を続けているマグネットについて報告する。医療診断に実用されている0.5テスラ磁気共鳴診断装置(MRI: Magnetic Resonance Imaging)であり、磁界の時間安定性は実測値0.001ppm/hrよりも良い値であり、高安定電源では実現しえない安定度である。

ここで示すマグネットは昭和63年(1988年)1月より連続運転を行い、現時点にいたるまで消磁/励磁を一切行わず連続運転を続けている。この当時はMRIイメージングの黎明期に当たる。0.5T級の常電導方式や永久磁石方式にまじり超電導方式が世に出始めたころである。現在は1.5T超電導方式が主流であり、3T超電導機が急速に普及を始めている。

超電導コイル部分には、超電導導体どうしをつなぎ合わせた超電導接続部が存在する⁽¹⁾。この部分での極微弱抵抗の発生はあるが、超電導機器は運転温度が極低温で一定温度であるため、接続部はじめ、内部の劣化がほとんどないという特徴を有する。高磁界の発生、省エネルギーとあわせ、永久電流という大きな特徴を超電導機器は有している。

超電導接続の極微小抵抗は、中心磁界の減衰の要因の一つであり、その他に超電導線内の磁化の磁束クリープ、超電導線材内の電流再配分なども影響すると考えられる。ここでは超電導接続が主要因とみなしその接続抵抗を見積もった。

2. 超電導マグネットの諸元

マグネットの諸元を表1に示す。マグネットはヘリウム浸漬冷却であり冷凍機を搭載している。

Table 1 Specification of the Magnet

タイプ	超電導 水平同軸 全身用
中心磁界	0.5T
運転方式	永久電流モード
磁界安定度	0.1ppm/hr
パワーリード	着脱式
超電導導体	NbTi 多芯線
インダクタンス	23.5H

3. 電気回路

図1にMRIマグネットの励磁回路を示す。

クライオスタット内部に超電導コイル群があり、コイルは永久電流スイッチの動作により励磁モードから永久電流モードに移行する。移行時には永久電流スイッチのヒータをオフにする。永久電流スイッチの保護回路として極低温ダイオードが装着されている。このダイオードは極低温領域ではフォワード方向に対し、スレッシュホールド電圧が存在し、通常励磁時には無限大のインピーダンスを持つ特殊な振る舞いをする。励磁後パワーリードは抜き取り、熱侵入を極限まで抑制する。図には

省略したが、コイルは複数個で構成され、クエンチ保護回路を装備している。

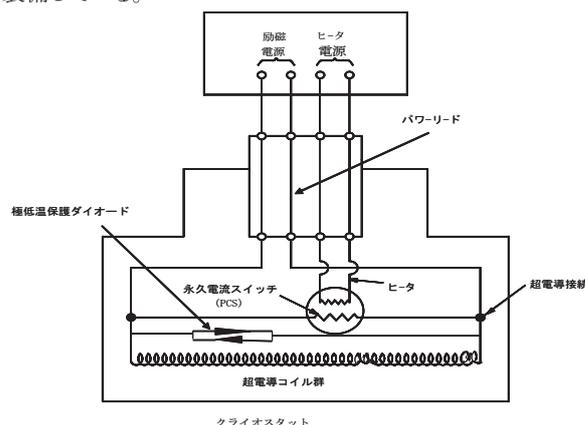


Fig.1 Electric Circuit for MRI Magnet

4. 長期の磁界安定性

図2にボア中心磁界のNMRプローブによる測定結果を、核磁気共鳴周波数で示す。装置は病院にて画像診断のため連続使用されており、データ取得は限られた状況となる。

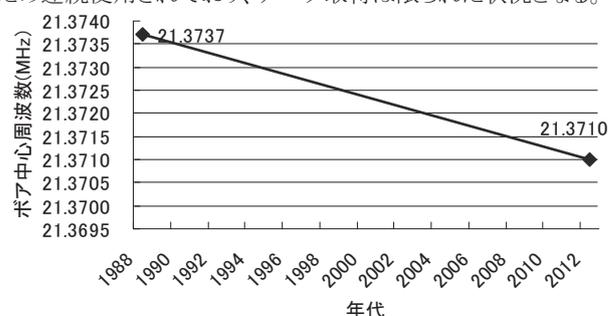


Fig.2 Magnetic Field Decay of the Magnet

データ取得時期は、設置時1988年1月、および2012年2月である。この間の磁界の減衰は126.6ppmである。運転時間より磁界の減衰率は0.0006ppm/hrとなり、仕様より100倍以上の良好な性能を得ている。超電導接続の抵抗値は $10^{-12}\Omega$ のオーダーとなり良好な超電導接続を裏付けている。

5. まとめ

MRI超電導マグネットが永久電流で運転される場合、磁界安定度がずば抜けて良好なため、工場試験期間では、仕様を満たすことはわかっても正確な値まで把握することが困難であった。超長期運転データにより性能を正確に把握することができた。

参考文献

- M. Morita, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 30 (1983) p.272

ビスマス系高温超電導固定子巻線の鉄心中通電特性評価

Evaluation of current carrying characteristics of Bi-based HTS stator windings in iron core

三澤 慎太郎, 中村 武恒, 北野 紘生, 雨宮 尚之(京都大学); 伊藤 佳孝, 吉川 雅章(イムラ材研)
 MISAWA Shintaro, NAKAMURA Taketsune, KITANO Hiroki, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto University);
 ITOH Yoshitaka, YOSHIKAWA Masaaki (IMRA)
 E-mail: tk_naka@kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

我々は、輸送機器への適用を目指し、かご形回転子巻線に高温超電導線材を適用した高温超電導誘導/同期回転機 (High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Machine: HTS-ISM) について、理論的・実験的検討を行っている[1]。本回転機は、かご形誘導機の回転子巻線を超電導化することにより、従来(常電導)機と同様の単純な構造であるにもかかわらず、同期回転に伴う高効率化や高トルク密度化といった高性能化を実現することができる。一方、上記性能を究極化するためには、回転子巻線に加えて固定子巻線も超電導線材で構成する全超電導 HTS-ISM の研究開発に取り組む必要がある[1][2]。

本報告では、低損失固定子巻線技術の確立を目指して、固定子鉄心中に配置したビスマス系高温超電導固定子巻線を通電特性を評価したので報告する。

2. 固定子巻線の試作と通電特性評価方法

これまでに、固定子巻線の候補としてビスマス系とイトリウム系超電導線材を検討していたが、現状は過負荷耐量(磁束フロー状態における短時間安定通電特性)の観点からビスマス系線材を使用して研究開発を進めている[2]。回転機試作に際しては、DI-BSCCO[®]テープ線材を適用して回転子ならびに固定子巻線を作製した。固定子巻線は、30ターンのレーストラックダブルパンケークコイルを24個組み合わせ、毎極毎相1コイルの6/9短節集中巻構造とした(Fig.1)。

まず、Fig. 1に示す固定子巻線を使用して鉄心中におけるコイルの臨界電流測定を行った。測定は液体窒素浸漬冷却条件において行い、3相巻線間及び24個の毎極毎相コイル全てについて直流電界-電流特性を測定した。

さらに、最終的な3相回転磁界中交流損失測定を想定し、パワーメータを利用した測定を実施した。測定に際しては、HIOKI 3390 POWER ANALYZERを用いた。なお、パワーメータを適用した測定法の精度に関しては、福井らが詳細に報告している[3]。

3. 結果と考察

Fig. 2には、直流電界-電流特性について3相分の測定結果を示すが、均一性の高い巻線が実現されている。また、毎極毎相コイルの通電特性測定結果について考察を進めたところ、そのバラつきが統計学的議論に耐えるものであることを確認している。

また、Fig. 3には1相交流損失の測定結果を示す。図から明らかのように、1相全体の損失は毎極毎相コイル8個分の加算と同値になっており、即ち本特性からも固定子巻線の完成度の高さが理解される。

上記特性を電流依存非線形抵抗として導入した電磁界解析結果など、詳細は講演当日に報告する。

謝辞

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託事業「H21年度省エネルギー革新技術開発事業(第二次公募)」の成果物を改良して実施された。

参考文献

1. T. Nakamura: Superconductivity Web21, Vol. 3 (2011) pp. 13-14
2. T. Nakamura, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 84 (2011) p.94
3. S. Fukui, et al.: IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 18, No. 2, (2008)

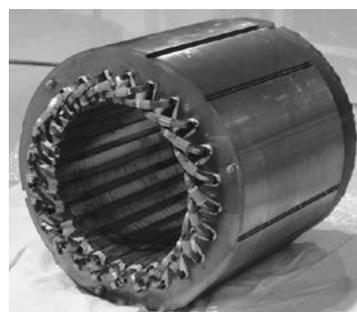


Fig. 1 Photograph of Bi-based HTS stator

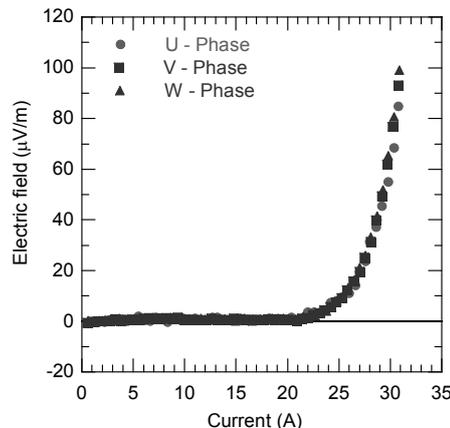


Fig. 2 Experimental results of DC current transport property at 77 K.

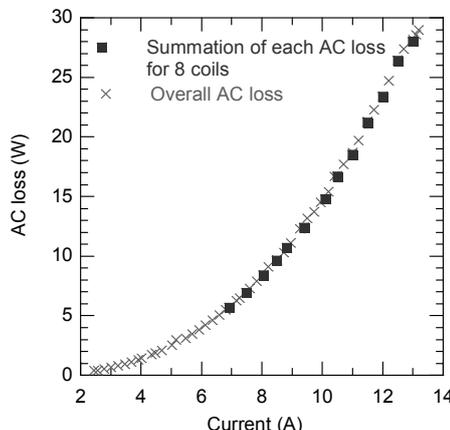


Fig. 3 Experimental results of AC losses for respective phases at 77 K.

MgB₂線材を用いた全超電導モータ用固定子巻線の開発

Development of Stator Winding for Fully Superconducting Motor with MgB₂ Wires

内田 侑史, 柁川 一弘 (九州大学); 中村 武恒 (京都大学); 和久田 毅, 田中 和英 (日立製作所)
 UCHIDA Yushi, KAJIKAWA Kazuhiro (Kyushu Univ.); NAKAMURA Taketsune (Kyoto Univ.);
 WAKUDA Tsuyoshi, TANAKA Kazuhide (Hitachi)
 E-mail: yushi@sc.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

昨今のエネルギー問題や環境問題を改善する先進技術の1つとして、水素エネルギー社会の可能性が検討されており[1]、我々の研究グループでは、液体水素を移送するためのポンプを駆動する高温超電導誘導/同期モータを提案している[2]。本研究では、MgB₂線材に適した固定子巻線構造を提案、試作する。また、試作固定子とMgB₂回転子を用いたモータの回転試験を行う。

2. 新固定子巻線構造の提案

従来の固定子巻線は鉄心スロットに直接銅線を巻くことで製作される。一方、MgB₂線は曲げ歪みに対して弱く、従来の複雑な固定子巻線構造は超電導特性が低下するため採用できない。そこで本研究では、Fig.1 に示す構造を提案した。この構造は対応するコイル対がそれぞれオーバーラップせずに配置され、レーストラック型要素コイルをスロットに挿入することで固定子巻線の構成を可能としている。今回、MgB₂固定子を製作するにあたって、この構造を試作巻線構造として検討する。

試作巻線構造により作られるギャップ部の磁束分布を数値解析により評価した。また、ギャップ部の磁束分布のスペクトル特性を研究することで、磁束分布の空間高調波を含めて評価した。数値解析には辺要素有限要素法を利用し[3]、今回はさらに鉄心を含んだモデルを使用した。Fig.2(a)にギャップ部の磁束分布、Fig.2(b)にそのスペクトル特性をそれぞれ示す。この解析結果より、ギャップ部の磁束分布には比較的大きな5倍高調波と7倍高調波が含まれることがわかった。これらの高調波によりモータ始動時に意図しない動作をすることが想定されるが、基本波の比率から試作巻線構造は始動時に起磁力を補い、高調波成分を考慮することでモータを回転させることができると考えられる。

3. MgB₂固定子を用いたモータの回転試験

まず、MgB₂線を用いてターン数が14の要素コイルを14個製作し、うち2個を用いて液体ヘリウム浸漬冷却下で通電試験を行った。その結果、要素コイルは200 A以上の臨界電流を持っていることがわかり、要素コイルの健全性が確認できた。

次に、残りの12個の要素コイルを結線した3相4極の固定子巻線を構成し、液体ヘリウム中でMgB₂回転子と組み合わせたモータの無負荷試験を行った。モータにインバータからV/f一定制御下で電圧とトルクブースト電圧を印加し、一次側の電圧、電流、周波数、モータの回転速度、回転方向を測定した。MgB₂固定子を用いた試験に先立って、要素コイルに銅線を用いて固定子を構成し、予備試験を行った。その結果、モータは同期回転を達成し、試作巻線構造を用いたモータが同期回転することが確認できた。よって、MgB₂固定子を用いたモータはさらに低損失での同期回転を実現できると考えられる。そこでMgB₂固定子を用いて本試験を行った。試験結果の一例をFig.3に示す。モータは周波数に応じて同期回転を達成し、60 Hz時に1800 rpmに至った。したがって、MgB₂回転子とMgB₂固定子を組み合わせたモータの同期回転が実現できた。

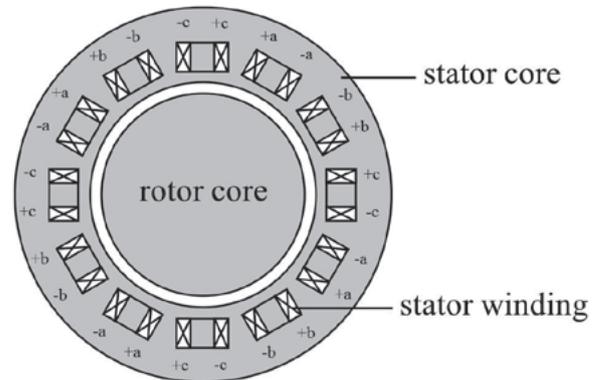


Fig.1 The proposed configuration of stator windings.

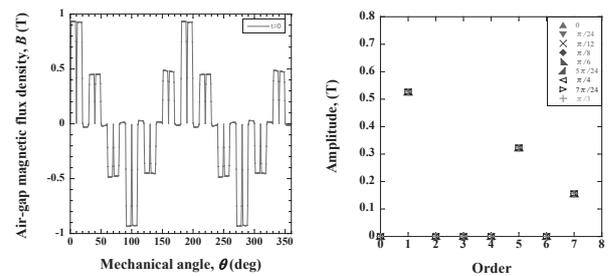


Fig.2 Numerical results of (a) distribution of magnetic flux densities in a gap and (b) their spectral characteristics.

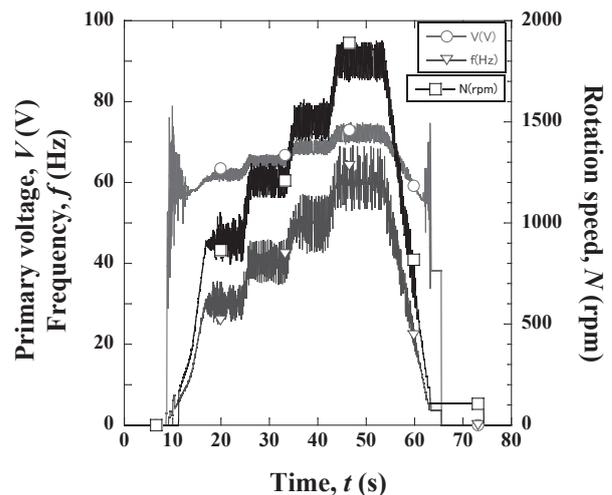


Fig.3 Start-up characteristics of the motor with the fabricated MgB₂ stator windings in liquid helium.

参考文献

1. 平林洋美: 低温工学 40 (2005) 276.
2. K.Kajikawa et al. : IEEE Trans. Appl. Supercond. 19 (2009) 1669.
3. K.Kajikawa et al. : J. Supercond. Nov. Magn. 24 (2011) 987.

高温超電導誘導/同期機の可変速制御に向けた特性評価 Characteristics Evaluation of HTS Induction/Synchronous Machine for Variable Speed Control

北野 紘生, 中村 武恒, 志村 拓俊, 西村 立男, 雨宮 尚之(京都大学); 伊藤 佳孝, 吉川 雅章(イムラ材研)
KITANO Hiroki, NAKAMURA Taketsune, SHIMURA Hiroto, NISHIMURA Tatsuo, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto University);
ITOY Yoshitaka, YOSHIKAWA Masaaki (IMRA)
E-mail: tk_naka@kuee.kyoto-u.ac.jp

1. まえがき

我々は、輸送機器応用を目指した高温超電導誘導/同期回転機 (High Temperature Superconducting Induction/Synchronous Machine: HTS-ISM)の研究開発を実施している[1]。本回転機は、かご形誘導機の2次巻線を超電導化することにより、同期回転に伴う高効率化や高トルク密度化など、既存(常電導)回転機を凌駕する新機能を実現することができる。さらに、HTS回転子巻線の起磁力依存非線形抵抗を利用することにより、回転安定性が保証されることを理論解析・実験により明確化した[2][3]。そこで、上記特性を最大限に生かしたHTS-ISMの可変速制御技術の確立が望まれている。

本研究では、まず最大効率制御を実現する磁束軸電流について、等価回路から導出する方法を検討した。また、上記磁束軸電流を利用して最大効率制御コードを開発し、回転特性の評価を実施したので報告する。

2. 解析方法

対象とした50 kW級HTS-ISMの諸元を表1に示す。本機は、回転子側かご形巻線にDI-BSCCO[®]線材を適用しており、また固定子に3相8極の8/9短節銅巻線を有している。解析は、MATLAB[®]/Simulink[®]を用いて行った。かご形誘導機の電圧方程式ならびに力学方程式を適用し、HTS-ISMの解析コードを開発した。その際、2次側HTS巻線の起磁力依存非線形抵抗の計算にべき乗式(所謂n値モデル; $n = 16.2$)を利用し、また同時に銀シース材への電流分流の影響も考慮した。さらに、実際のかご形巻線においては、ロータバーとエンドリングのハンダ接続抵抗が存在することから、その抵抗も考慮した。

図1には、最大効率制御コードのブロック図を示す。指令速度と実際の速度との偏差よりトルク軸電流を決定し、さらにそれを用いて最適磁束軸電流を求めている。開発したコードを用い、指令速度・要求負荷を変化させながら、最大効率制御を適用した際の回転特性の評価を行った。

3. 結果と検討

図2には、指令速度を300 rpmとした場合の解析結果を示す。比較として、磁束軸電流を一定値(10 A, 15 A)とした時の結果も合わせて示している。図から明らかなように、磁束軸電流が一定の時には、要求負荷の増加に伴って効率が低下している。一方、最大効率制御を適用した場合については、要求負荷の変化によらず効率が96.8%で安定している。本結果より、開発した制御コードによって効率が改善し、即ち最適磁束軸電流が得られることが分かる。また、磁束軸電流を一定とした時に比べ、最大効率制御適用時には、回転数の追従性が良くなり、それに伴って過渡状態におけるトルク軸電流も低い値に抑えられていることが確認された。最適磁束軸電流の導出方法など、詳細は講演当日に報告する。

謝辞

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託事業「H21年度省エネルギー革新技術開発事業(第二次公募)」の成果物を改良して実施された。

参考文献

1. T. Nakamura: Superconductivity Web21, Vol. 3 (2011) pp.13-14
2. T. Nakamura, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 84 (2011) p.95
3. H. Kitano, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 85 (2011) p.40

Table I Specifications of 50 kW Class HTS-ISM

Section	Stator	Rotor
Number of poles	8	---
Number of slots	24	34
Inner diameter	160 mm	50 mm
Outer diameter	265 mm	159.4 mm
Core length	200 mm	206 mm
Number of coil turns	15	---
Critical current	---	2090 A
Material of conductor	Copper	DI-BSCCO [®] Type H

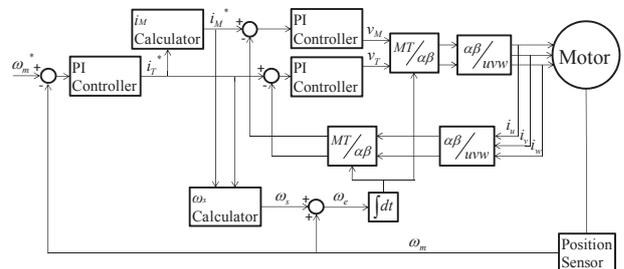


Fig.1 Block Diagram of Maximum Efficiency Control

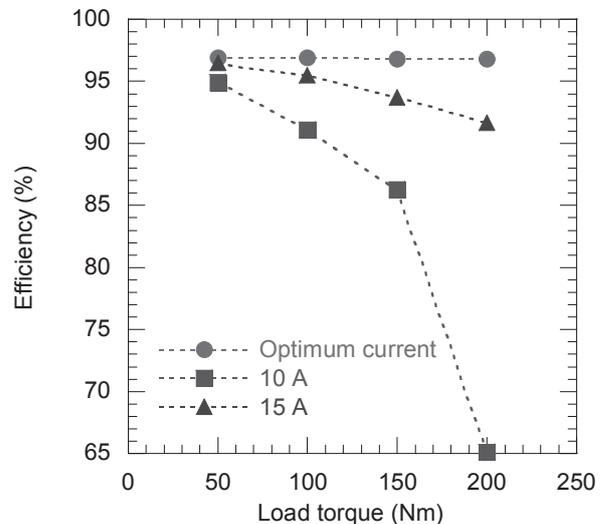


Fig. 2 Analysis Results of Load Torque Dependence of Efficiency in 50 kW Class HTS-ISM

リラクタンストルクを有する高温超電導誘導同期回転機の提案と特性検討

Proposal and characteristic study on HTS induction/synchronous machine having reluctance torque

西村 立男, 中村 武恒, 雨宮 尚之 (京大); 伊藤 佳孝 (イムラ材研)

NISHIMURA Tatsuo, NAKAMURA Taketsune, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto University); ITOH Yoshitaka (IMRA)

E-mail: tk_naka@kuee.kyoto-u.ac.jp

1. 背景

我々は、電気自動車を含む輸送機器への展開を目指した高温超電導誘導/同期回転機 (High Temperature Superconducting Induction /Synchronous Machine: HTS-ISM) の研究開発を実施している[1]。輸送機器用 HTS-ISM に求められる性能としては、可変速駆動に対する高効率化とともに高トルク密度化が挙げられ、後者の究極化と変速機の省略(車両重量減, 車内スペースの余裕に伴う他駆動コンポーネントの高効率重視設計の可能性, 低速回転に伴う回転機本体ならびにインバータの高効率化)によって、例えば最大出力 100 kW 級モータ(ミドルクラスの自動車に相当)で既存機と比較してシステム全体の高効率化・省エネ化が達成できると期待される。一方で、上記最大出力が要求される発進時他は比較的短時間であり、例えば数十秒程度の短時間定格として設計すれば十分である。

本研究では、上記要求性能を実現する一方法として、回転子鉄心内に HTS 磁気遮蔽体を導入して、最大出力時にリラクタンストルクを付与する検討を実施したので報告する。

2. リラクタンストルク付与の基本的考え方

我が国の車載駆動モータとしては、そのほとんどが埋め込み形永久磁石 (Interior Permanent Magnet: IPM)モータである。本構造では、IPMの構成を工夫することによって、磁石トルクだけでなくリラクタンストルク(d軸とq軸のリラクタンス比を利用)を付与している。一方、超電導リラクタンスモータについては、例えばOSWALDのグループが開発を行っていたが、現在は下火のようである[2]。

本提案は、HTS-ISMが同期回転時に、若干の磁気飽和特性を利用してリラクタンストルクを付与させることを特徴とする。即ち、回転子鉄心内にHTS磁気遮蔽体(HTSバルク材若しくはHTSバンドル導体)を挿入し、鉄心が磁気飽和しない定常運転時は誘導同期トルクが発現する磁気回路を妨げないようにする。一方、大きな牽引力が必要な発進時他は鉄心が磁気飽和を起こしながらトルクを発現するが、その際上記飽和の程度によってHTS磁気遮蔽体が磁気的に“見える”ようになり、その際リラクタンストルクも同時に発現して大きなトルクが得られることになる。図1には、リラクタンストルク付与型回転子の概略図を示す。また、図2には上記回転子におけるトルクカーブの概略説明図を示す。

3. 設計と試作

回転子のロータバー作製に際しては、DI-BSCCO®(Type STi, 臨界電流 72 A@77 K)を5枚バンドルすることで、ロータバー1本あたりの臨界電流を 360 A 程度とした。また、回転子スロットに全てのロータバーを挿入後、ロータバーの両端にDI-BSCCO®(Type HT, 臨界電流 166 A@77 K)をハンダ接続してエンドリングとした。一方、回転子鉄心には、リラクタンストルクを発現させるためのスロットを4箇所穿孔して、GdBCO系のHTS磁気遮蔽体を挿入した。図3には、試作した回転子の外観写真を示す。回転試験の詳細他は講演当日に報告する。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金(挑戦的萌芽研究, No. 23656199)の援助を受けて実施された。

参考文献

1. D. Sekiguchi, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 22, No. 3 (2012.06) 5200904 (4 pp).
2. B. Oswald, et al.: Physica C, Vol. 372 (2002), p.1513-1516

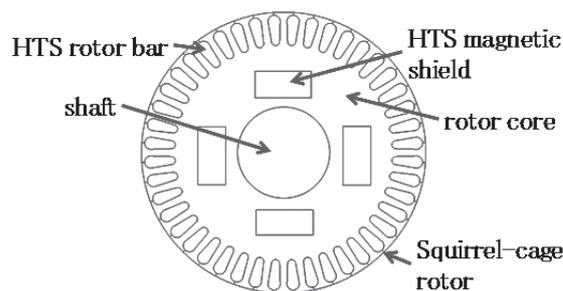


Fig.1 Schematic diagram of proposed HTS rotor having reluctance torque

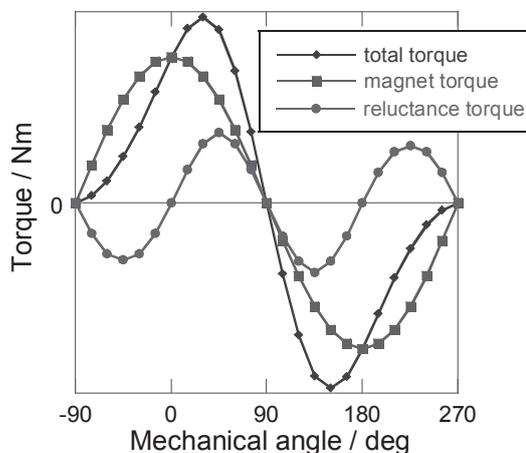


Fig. 2 Schematic explanation of torque increment with the aid of HTS magnetic shield body

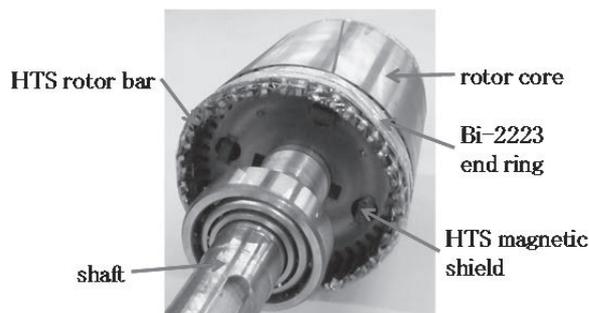


Fig. 3 Photograph of fabricated HTS rotor

超電導一常電導転移温度近傍における高温超電導誘導同期回転機の効率特性

Efficiency characteristics of HTS induction/synchronous machine in the vicinity of superconducting transition temperature

志村 拓俊, 中村 武恒, 西村 立男, 北野 紘生, 雨宮 尚之 (京都大学); 伊藤 佳孝, 吉川 雅章 (イムラ材研)
 SHIMURA Hiroto, NAKAMURA Taketsune, NISHIMURA Tatsuo, KITANO Hiroki, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto University);
 ITOH Yoshitaka, YOSHIKAWA Masaaki (IMRA)
 E-mail: tk_naka@kuee.kyoto-u.ac.jp

1. 背景

我々のグループでは、車載応用に向けた高温超電導誘導/同期回転機(High Temperature Superconductor Induction/Synchronous Machine: HTS-ISM)[1]の研究開発を実施している。本回転機は、かご形誘導機の2次巻線に高温超電導線材を適用することにより、すべりをほぼゼロにすることが可能となる。これに伴い、可変速に対する高効率化および高トルク密度化を実現することができる。しかしながら、運転条件が極低温冷却下に限定されるため、実用の観点からは運転温度が臨界温度(厳密には不可逆温度)を超える冷却系故障時等に対策を検討する必要がある。

そこで本研究では、臨界温度近傍およびそれ以上の温度における駆動を可能にすることを目的として、その基本的考え方を説明すると共に、上記回転機の回転特性ならびに効率特性について等価回路解析を実施したので報告する。

2. 解析方法

対象とした20 kW級HTS-ISMの諸元を表1に示す。本機は、3相8極のかご形誘導機をベースとして、二次側(回転子)巻線に銅およびDI-BSCCO®線材を適用したハイブリッド2重かご形巻線を有している。また、固定子巻線には既存の8/9短節巻銅巻線を採用した。上記回転機の電磁特性は、有限要素法解析ソフトJMAG®を用いて解析した。

また、同一の解析モデルについて無負荷試験ならびに拘束試験のシミュレーションを実施し、等価回路定数を算出した。図1には、かご形誘導機の一次側・二次側分離T型等価回路を示す。超電導由来の二次側非線形抵抗に関しては、HTS短尺線の電界-電流密度特性を実測し、Weibull関数を評価関数として定量化した[1]。なお、ハイブリッド2重かご形巻線の銅巻線抵抗として、上記非線形抵抗に並列に線形抵抗を配置して解析を行った。また、鉄心における電磁界特性の温度依存性は十分無視できる[2]として、常温での値を使用した。

本解析では、任意の二次電流および励磁電圧に対して、一次側と二次側の起電力のバランスから動作点およびすべりを決定した。また、励磁回路の非線形特性は考慮しておらず、従って磁気飽和が起きない条件において解析を行った。

3. 結果と検討

図2には、77 Kにおける効率マップの解析結果例を示す。本解析では、駆動トルクとして、限界性能把握の観点から停動トルクに限定して解析を行った。本結果より、停動トルク特性にもかかわらず最大効率 97.3 %が得られている。その他、温度を変化させた場合の特性変化他の詳細は講演当日に報告する。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金(No. 23360124)の支援を受けて行われた。本研究の実施に際して、協力頂いた京都大学・関口大輔氏(現 関西電力(株))ならびに三澤慎太郎氏(現 修士課程2回生)に謝意を表す。

参考文献

1. G. Morita, T. Nakamura, and I. Muta : 'Theoretical analysis of a YBCO squirrel-cage type induction motor based on an equivalent circuit', Supercond. Sci. Technol.,19, (2006) pp 473-478.
2. M. Miyamoto, T. Matsuo, T. Nakamura, 'Measurement of Vector Hysteretic Property of Silicon Steel Sheets at Liquid Nitrogen Temperature', Przegląd Elektrotechniczny, Vol. 87, No. 9b, pp. 111-114, Sept. 2011.

Table I Specifications of 20 kW class HTS-ISM

Section	Stator	Rotor
Number of poles	8	---
Number of slots	24	34
Inner diameter	160 mm	50 mm
Outer diameter	265 mm	159.4 mm
Core length	200 mm	206 mm
Number of coil turns	15	---

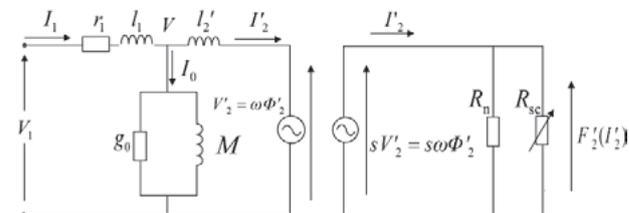


Fig.1 T-type Equivalent Circuit Separated the Primary and Secondary Circuit

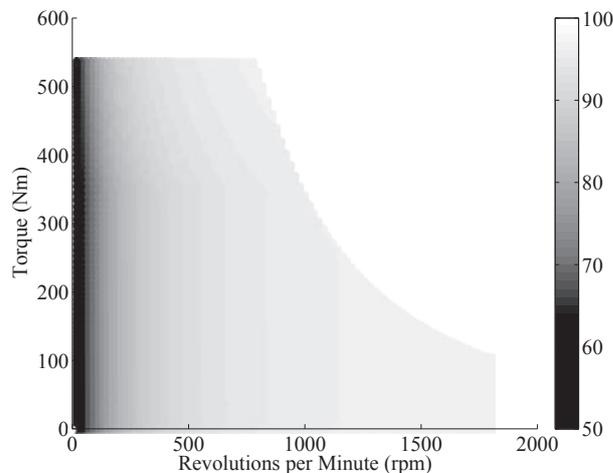


Fig. 2 The Efficiency Contour Draw with T-type Equivalent Circuit at 77 K

風力用大容量 HTS 発電機の構造検討

Structure Study of Large-scale HTS Generators for Wind Power Systems

牧 直樹, 和泉 充(東京海洋大学)

MAKI Naoki, IZUMI Mitsuru (TUMSAT)

E-mail: naokmaki@tuba.ocn.ne.jp

1. はじめに

再生可能エネルギーとして経済性の高い風力発電が注目され、特に洋上風力発電システムの開発が進められている。風力発電向け大容量 HTS 発電機の設計研究を開発したプログラムを用いて進めてきたが[1,2]、今回 HTS 発電機の主要コンポーネントの構造について検討したので報告する。

2. 発電機構造

5~10 MW の大容量機を対象に、提案する発電機構造を次にまとめる。

- 発電機基本構造：アクシャル型は 0.5 MW 以下の中小容量機の実績しかないので、機械強度を確保し易く実績が圧倒的に多いラディアル型を採用する。
- 鉄心型：導体経験磁場が格段に低く導体使用量を顕著に減少できる鉄心型を採用し、有効磁束密度の増大を図るために回転子鉄心を 2 T 程度の磁気飽和状態で使用する。
- 突極型：10~15 rpm の低回転数で運転するので、小型軽量化のために周波数の増大が必要であり、多極化を図る点から円筒型でなく突極型を採用する。
- 大径短軸型：電気性能上から大径短軸型が望ましいが、発電機コストと輸送・据付を考慮して発電機径を決める。

Table 1 に示す大容量 Y 系 HTS 発電機の主要電気設計結果から、5 MW 機において固定子外径を陸上輸送制限の 4 m から約 2 倍の 7.4 m にすると発電機重量は 92→59 トン (0.64 倍) に、HTS 使用量は 28→21 km に低減するなど電気性能向上効果は非常に大きい。また 10 MW 機においても、固定子外径を 7.4 m から約 2 倍の 14.1 m にすると発電機重量は 163→116 トン (0.71 倍) に低減するなど効果は大きい。

Table 1 Main design results of 5 and 10 MW HTS generators

Generator	A	B	C	D
Generator output power [MW]	5	5	10	10
Rotating speed	15	15	10	10
Operating temperature [K]	65	65	65	65
Number of poles	24	48	48	96
Frequency [Hz]	3	6	4	8
Stator outer diameter [m]	4.0	7.4	7.4	14.1
Stator length [m]	1.77	0.46	1.34	0.35
Magnetic flux density in air gap [T]	1.13	1.10	1.13	1.08
Magnetomotive force of field winding [kA/pole]	39.5	39.6	39.9	39.8
Rated current of HTS coils [A]	155	155	155	155
Total length of HTS wires [km]	28	21	44	37
Generator weight [ton]	92	59	163	116
Cooling power [kW]	33	26	53	44
Efficiency [%]	95.2	95.7	96.0	96.0

3. コンポーネント構造

以上の検討結果から提案する HTS 発電機構造を Fig. 1 に、HTS 界磁巻線を内蔵する極低温ベッセルを Fig. 2 に示す。HTS 発電機の主要コンポーネント構造を次にまとめる。

① HTS 界磁巻線

- HTS コイルと運転温度：HTS 導体の励磁性能から決まる HTS 使用量と冷却容易さを考慮して、Y 系コイルを使用し 65 K で運転する。導体経験磁場は約 0.9 T なので、65 K 運転での通電電流密度は 77 K 運転の 2.5 倍になる。

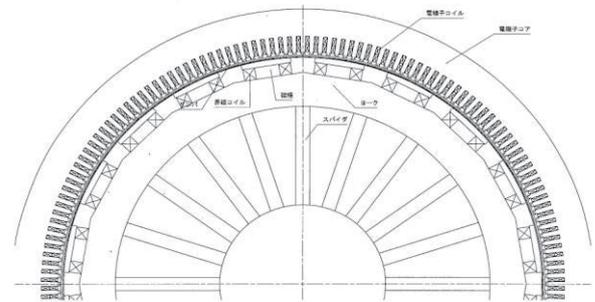


Fig.1 Cross-sectional view of the conceptual structure of the HTS generators

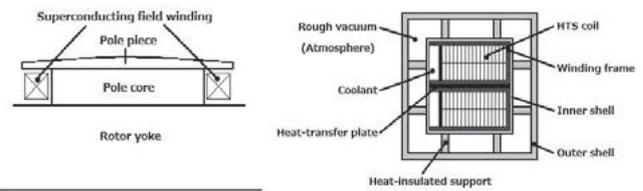


Fig.2 Cross-sectional view of the cryogenic vessel containing the HTS field windings

- HTS コイルの巻線法：コイルの安定性、巻線容易さ、接続数を考慮してレーストラック型のダブルパンチキ巻を採用する。

② 極低温ベッセル

- 構造形状：冷却容易性、信頼・保守性を考慮してレーストラック形状の極低温ベッセルを極数分設ける。
- 真空断絶：65K 運転なので数 Torr の低真空に維持するが、大気中運転に出来る可能性がある。
- 熱シールド：ふく射シールド板は使用せず、スーパーインシュレータを用いる。
- 内槽と外槽間の支持・断熱方式：多数の FRP ピンを分散配置して使用する。
- 冷却方式：65K 運転なので冷却効率の点から LN2 のサブクール冷却を採用する。

③ 冷凍機の配置

- 外部設置して給排装置を通して冷媒を給排するのが一般的だが、将来的には冷凍機を回転子に内蔵する方式が信頼性向上の点から望ましい。

④ 励磁システム

- 摺動集電が一般的だが、将来的には誘導給電が信頼・保守性の点から望ましい。

参考文献

1. N. Maki, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 84 (2011) p.90
2. N. Maki, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 85 (2011) p.39