

## 強磁性物質分離のための永久磁石を用いた磁気分離装置の検討

### Study on magnetic separation devices using permanent magnets for separation of ferromagnetic materials

野田 和孝, 井原 一高, 豊田 浄彦(神戸大学)

Kazutaka Noda, Ikko Ihara, Kiyohiko Toyoda (Kobe University)

立嶋 正勝, 中 聖一(NEOMAX エンジニアリング(株))

Masakatsu Tateshima, Syoichi Naka (NEOMAX Engineering)

#### 1. はじめに

磁気分離技術は、特に水処理分野における応用が提案されている。例えば、抗生物質の磁気分離が挙げられる。家畜に広く使用されている抗生物質は、一部が畜産廃棄物中へ残留し、環境への拡散が問題となっている。そこで、磁性ビーズのような強磁性物質を用いた磁気シーディングによって見かけの磁化率を増加させ、磁気力による分離が可能になる<sup>[1]</sup>。このような磁気分離応用には、超伝導マグネットが設置困難な場合が多く、特に装置の可搬性が求められる場合は永久磁石が望ましい。超伝導マグネットと比較すると、磁束密度が低い永久磁石の場合、より大きな磁気力を確保するためには磁場勾配を拡大させる磁気フィルタが重要になる。

本研究では、永久磁石磁気分離装置を用いて強磁性物質の分離を目的とした磁気フィルタの検討を行った。一般的な磁気フィルタとしてステンレス製のシームレスメッシュが用いられるが、腐食しやすく再利用が困難である。そこで、耐食性に優れたステンレス球やステンレス製メッシュプレートを用いて、性能比較を行った。

#### 2. 実験方法

21.6 Lの蒸留水に磁性粉としてマグネタイトを添加し、磁性粉溶液を作製した。磁性粉の分離試験にはネオジム磁石を用いた磁気分離装置を使用した。磁気分離装置の分離槽(125 mm×83 mm×15 mm)は、ネオジム磁石を対向させた。磁石のギャップは15 mmである。磁気フィルタとして、SUS440C ステンレス球(φ2.38 mm, φ5.55 mm), SUS304 ステンレス球(φ2.38 mm), シームレスメッシュ(SUS430, φ0.01 mm), ステンレス網(SUS329J1, SUS304 および SUS430の合金, φ0.1 mm)を使用した。

また、磁気分離実験の流入時の試料と流出時の試料を採取し、原子吸光度装置(日立, Z-2000)を用いて、鉄量を測定した。

#### 3. 結果および考察

##### 3-1 磁性粉濃度の影響

磁気フィルタとしてステンレス球(φ2.38 mm)を使用し、流量 15 mL/s において磁性粉濃度が除去率に与える影響を調べた。250 mg/L と 500 mg/L の磁性粉濃度では、いずれの条件においても、殆どの磁性粉を除去できることが示された。

##### 3-2 磁気フィルタの影響

流量 15 mL/s, 磁性粉濃度 250 mg/L において、SUS440C ステンレス球(φ2.38 mm), シームレスメッシュ(SUS430), SUS304 ステンレス球(φ2.38 mm)そしてステンレス網を用いて、磁気フィルタ材料の形状や材質が磁性粉の除去率に与える影響を調べた。結果を Fig.1 に示す。いずれの磁気フィルタを使用した場合でも除去率は高い傾向にあったが、SUS440C ステンレス球(φ2.38 mm)を使用した場合、より安定して殆どの磁性粉を除去することが可能であっ

た。また、ステンレス網を磁気フィルタとして使用した場合、磁気分離開始直後の除去率は 80%未満であったが、徐々に除去率は上昇し、その後は安定した。

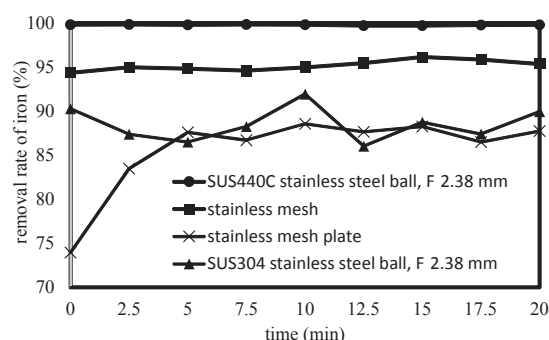


Fig.1 Effect of magnetic filters on magnetic separation

##### 3-3 ステンレス球の粒子径の影響

流量 15 mL/s, 磁性粉濃度を 250 mg/L において、ステンレス球の粒子径が除去率に与える影響を調べた。2.38 mm と 5.55 mm の2種類の粒子径のステンレス球を用いて比較を行った。

いずれのステンレス球を用いた場合においても磁性粉の除去率は 99%以上に達した。本実験の条件では、粒子径の違いが除去率に与える影響は見られなかった。

#### 4. まとめ

今回の磁気分離試験において、SUS440C ステンレス球が最も高い除去率を示した。ステンレス球を使用した場合に分離槽内のフィルタ材料の充填率が最も高くなることから、磁性粉の補足や保持に有利に働いたことが考えられる。また、磁性粉の濃度を増加させても除去率は殆ど減少せず、ステンレス球は高い捕捉能力を持っていることが示唆された。加えて、今回粒子径異なるステンレス球を用いたが、いずれも高い除去率を示した。粒子径が数 mm のステンレス球は磁性粉分離用磁気フィルタとして適していると考えられる。

永久磁石による磁気分離において、ステンレス球はシームレスメッシュと同水準以上の捕捉能力を示し、磁気フィルタとして有効な素材であることを示した。今後は、磁気分離使用後の磁気フィルタの洗浄性試験等を行い、より実用的な性能評価を行う必要がある。

#### 参考文献

1. I. Ihara, et al.: Journal of Physics: Conference Series, 156(2009)

#### 謝辞

本研究は、文部科学省科学研究費基盤研究(C) 24580369の支援を得た。

## 磁気分離によるボイラー給水系中の鉄酸化物粒子除去の検討 Magnetic Separation to remove iron oxide particles in boiler Feed Water

岡田秀彦, 廣田憲之(物材機構); 今村健太郎, 安藤努(日大院生産工); 西嶋茂宏(大阪大工)  
H. Okada, N. Hirota (NIMS); K. Imamura, T. Ando (Nihon Univ.); S. Nishijima (Osaka Univ.)  
E-mail: OKADA.Hidehiko@nims.go.jp

### 1. はじめに

地球温暖化防止のために CO<sub>2</sub> の削減は緊急の課題となっているが、現在、我が国では原子力発電所の停止により全発電量の 90% 近くを多量の CO<sub>2</sub> を発生する火力発電に頼っているため、その削減は非常に難しい状況にある。本研究では、火力発電プラントのボイラー給水中の鉄酸化物(スケール)を除去して、ボイラーの熱変換効率を改善する磁気分離装置の開発を行っている。開発中の装置は、既存の火力発電所にも設置が可能であるため、CO<sub>2</sub> の削減に大きく寄与できると考えている。

火力発電所の給水系ではボイラー近くの高圧高温部で、給水中に溶解していた鉄が鉄酸化物主体の腐食生成物となって懸濁、沈積し、熱交換効率の低下や圧力損失を引き起こし発電効率を低下させる。腐食生成物は主にマグネタイト (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>、強磁性体) であるため、我々はその除去方法として超伝導マグネットを用いた高勾配磁気分離法の適用を検討している。高温高圧水中の磁性粒子の分離実験は、頻繁に行うことは不可能なため、我々はまず、数値シミュレーションにより問題点の発見とその改良方法の指針を得ることとした。今回はそのシミュレーションの結果を報告する。

### 2. 高勾配磁気分離

高勾配磁気分離装置の概念図を Fig. 1 に示す。高勾配磁気分離装置では、流路内に置かれた磁性細線(マトリックス)を外部磁場によって磁化させ、細線の周りに大きな磁場勾配を作って強い磁気力を発生させる。この磁気力により、細線に流れの中にある磁性粒子を引き付けて捕獲、回収する。外部磁場を切れれば、磁気力がなくなり粒子を保持できなくなるため、細線に付着した磁性粒子は容易に洗い流すことができる。磁性細線としては、ステンレス (SUS430) の金網が良く用いられている。

### 3. 計算方法

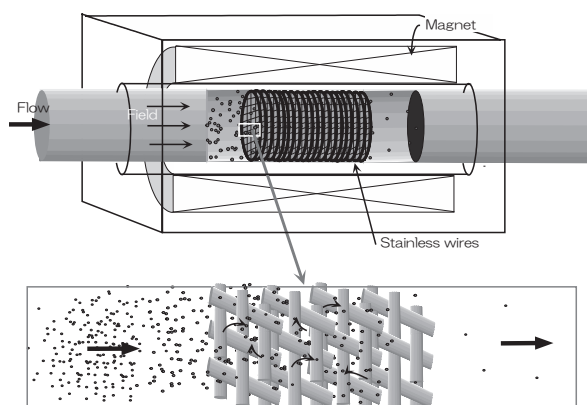


Fig. 1 Schematic view of high gradient magnetic separation. The device is consist of a magnet and magnetic wires.

本研究では、汎用 CFD プログラムの COMPACT [1] に高勾配磁気分離を模擬するプログラムを付加して使っている。プログラムでは、まず、Navier-Stokes 方程と移流拡散方程式を連立させて解き、流れと粒子の濃度分布を求めている。また、静磁場による磁性線の磁化による磁場分布も同じプログラム内で解いている。計算は 2 次元、定常状態で行っている。計算で得られた濃度分布と流速から、マトリックスを構成する金網や針金の捕獲率(通過する粒子が捕獲される割合)等を求め、性能を評価している。

### 4. シミュレーションの結果

計算結果の一例を Fig. 2 に示す。複数の SUS430 の針金 (0.5mmφ) で構成されたマトリックスを模擬した構造でのマグネタイト粒子の捕獲性能を調べたものである。横軸は金網を構成する針金の流れに垂直な方向の間隔、つまり、金網の目の粗さで、右に行くほど、目が粗くなる。縦軸はマトリックスの捕獲率である。捕獲率 = 1 で全粒子の捕獲を意味する。このグラフでは、室温 (20 °C) と高温 (200 °C) での同じ構造のマトリックスの捕獲率の違いも示している。計算によると 200 °C でも十分な捕獲性能を有していることがわかる。

これらの計算などにより、高温でもフィルタとして十分に機能する事が分かった。今後は、最適なマトリックスの形状、処理速度等についても調べ、磁気分離装置の最適化等を行う予定である。

### 謝辞

本研究の一部は、科学技術振興機構の先端的低炭素化技術開発 (ALCA) の支援を受けている。

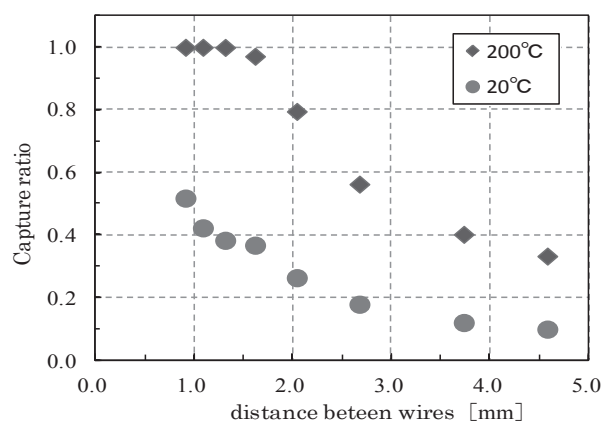


Fig. 2 Functions of capture ratio vs. distance between wires at 20 °C and 200 °C.

[1] パタンカー著, 水谷他訳, コンピュータによる熱移動と流れの数値解析, 森北出版, 1985

# 超電導磁気分離法による火力発電所給水中の酸化鉄スケール除去に関する研究

## Removal of iron oxide scale from feed-water in thermal plant using superconducting magnetic separation

水野 信洋, 三島 史人, 秋山 庸子, 西嶋 茂宏 (大阪大学); 松浦 英樹, 前田 龍己, 重本 直也 (四国総合研究所); 岡田 秀彦, 廣田 憲之 (NIMS)

MIZUNO Nobumi, MISHIMA Humihito, AKIYAMA Yoko, NISHIJIMA Shigehiro (Osaka university); MATSUURA Hideki, MAEDA Tatsumi, SHIGEMOTO Naoya (Shikoku research institute); OKADA Hidehiko, HIROTA Noriyuki (NIMS)

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

### 1. はじめに

近年、火力発電の利用率が増加している。その結果、CO<sub>2</sub> 排出量も増加したため、その対策が必要とされている。そこで配管やボイラーに析出している酸化鉄スケールが熱交換効率を低下させていることに着目した。本研究では、熱交換効率の改善により、CO<sub>2</sub> 排出量を削減するために、火力発電所給水中のスケール除去による熱交換効率改善を目指す。

AVT (全揮発性処理) を行っている火力発電所の低温部では、溶出した鉄が鉄イオンまたは弱磁性の微小な酸化鉄粒子となっている。一方で高温部ではスケールの主成分はマグネタイトであり、スケールの粒径や磁化率も大きい。上記の理由から、従来の手法である低温部に設置された電磁フィルターによるスケール除去よりも、高温部における磁気分離によるスケール除去の方が効果的である。そこで高温状態において大量かつ連続的なスケール除去を行うために、高勾配磁気分離法を用いる。本研究では、高温部のボイラーの入口で超電導磁石を用いた高勾配磁気分離を行うことを想定し、その条件における検討を行った。

### 2. 実験方法

高温部のボイラー入口で高勾配磁気分離について検証を行うため、2基の圧力容器を配管(内径:3.1 mm, SUS316)で繋ぎ、圧力容器の差圧によって流れを作り、高温高圧条件を保った状態で磁気分離を行った。実験装置の概念図を Fig.1 に示す。磁気分離部は Fig.1 のように圧力容器を繋ぐ配管の途中に設置した。

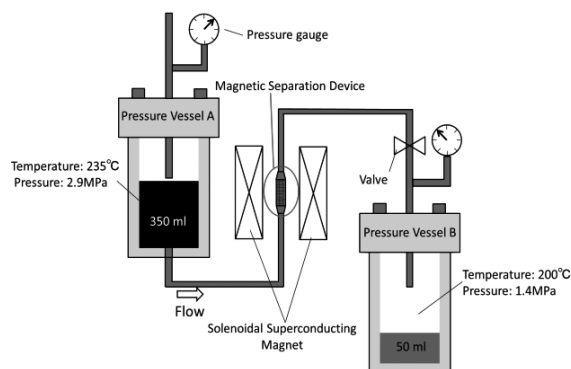


Fig. 1 Schematic view of the experiment method.

分離対象には、模擬スケール(マグネタイト 80 wt.%, ヘマタイト 20 wt.%) 50 ppm の懸濁液を用いた。実験で使用したマグネタイト粒子の粒径は 1.5  $\mu$ m、ヘマタイト粒子の粒径は 1.4  $\mu$ m である。磁気分離部内のフィルター( $\phi$  6.3mm  $\times$  90 mm, SUS430)の線径は 0.1 mm である。磁場発生源には、ソレノイド超電導磁石を用い、印加磁場は 0.5 T、1 T、2 T の 3 通りで行った。

圧力容器 A に懸濁液 350 ml、圧力容器 B に蒸留水 50 ml を入れ、A を 235°C、B を 200°C に加熱した。加熱後の内圧

は A が 2.9MPa、B が 1.4MPa である。加熱後に圧力容器間に配置したバルブを開けることで、差圧により懸濁液を A から B へと流した。この時の平均流速は 60~70 cm/s である。

磁気分離後に、フィルターに捕捉された酸化鉄粒子と磁気フィルターを通過した酸化鉄粒子を回収し、酸溶解した後に誘導結合プラズマ原子発光分光分析装置(ICP-AES)を用いて鉄濃度を計測し、分離前後の鉄濃度の変化から分離率を算出した。

### 3. 実験結果と考察

それぞれの磁場における分離率を Fig.2 に示す。2T の磁場を使用した場合は、98% の高い分離率を示した。この実験結果から、高温高圧条件の高勾配磁気分離、ボイラー入口における超電導磁気分離法を用いたスケール除去の可能性を示すことができた。

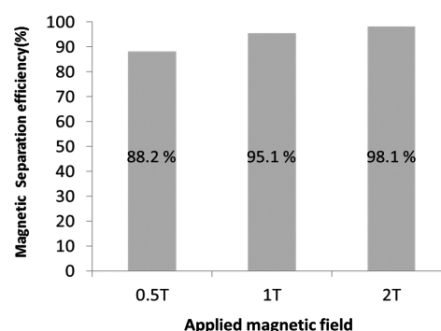


Fig.2 Result of magnetic separation efficiency.

実際の火力発電所中の給水のスケールの濃度は約 10 ppb であり、実験で使用した酸化鉄粒子の濃度は、実際の給水中の濃度より濃いものである。そのため、給水の濃度の模擬スケールの磁気分離では分離率の低下が予想されるため、今後は実際の濃度での実験の検討を行う。

### 4. まとめ

本研究では、高勾配磁気分離による火力発電所高温部における給水中の酸化鉄スケール除去を試みた。その結果、ソレノイド磁石を用いた実験により、2 T の磁場によって、除去が困難な模擬スケール中のヘマタイトを除去し、高い分離率によってスケール除去を行うことができた。今後は、ドレイン系等のボイラー入口以外の分離装置設置候補の条件における磁気分離、実際の火力発電所の給水の濃度である ppb 単位の磁気分離実験を検討する。

### 5. 謝辞

本研究の一部は日本科学技術振興機構 (JST) の先端的低炭素化技術推進開発 (ALCA) 「磁気分離法による発電所ボイラー給水中の酸化鉄除去」の助成を受けて、実施したものである。



# 除染範囲の最適決定手法の検討

## Study on Method of Optimal Range Design of Decontamination from Radioactive Soil Pollutant

福井 聡, 齊藤 公世(新潟大学); 秋山 庸子, 西嶋 茂宏, 三島 史人(大阪大学); 長屋 重夫, 渡部 智則(中部電力)  
 FUKUI Satoshi, SAITO Kimiyo (Niigata University); AKIYAMA Yoko, NISHIJIMA Shigehiro,  
 MISHIMA Fumihito (Osaka University); NAGAYA Shigeo, WATANABE Tomonori (Chubu Electric Power Co. Inc.)  
 E-mail: fukui@eng.niigata-u.ac.jp

### 1. はじめに

汚染地域の除染が進行するにつれて、膨大な量の除染廃棄物が発生し、その仮置き場の確保が困難になりつつある。除染作業により排出される膨大な量の放射性廃棄物の減容化のために、超伝導磁気分離を適用する研究開発が行われている。超伝導磁気分離を用いた除染法を効果的に運用するためには、それぞれの除染対象物質・対象地域に対して最も効果的な除染、減容化および保管の方法を明らかにし、最小限の労力、コスト、期間で除染を行うためのシナリオ構築が同時に必要である。本研究では、除染範囲の最適化選定ツールの開発に資することを目的とし、適切な除染範囲・除染方法を選択する手法について検討を行った。

### 2. 除染範囲の最適化手法

現在、日本原子力研究開発機構により、汚染密度分布から空間線量率を評価するフリーソフトウェア CDE (Calculation system for Decontamination Effect) が開発されている<sup>1</sup>。本研究では、このソフトウェアを利用して、更に感度解析的手法を導入することにより、対象地域の空間線量率を目標値以下にできる最小の除染範囲を計算する手法を提案する。本研究で検討している除染範囲の最適計算手法のアウトラインは以下の①～⑤のプロセスである。①まず、対象地域の航空地図データとそれに対応する空間線量率のモニタリングデータを入手する。CDEを利用して、地図データから空間メッシュを作成し、汚染源の密度分布を求める。②同時にCDEを利用して、ある5m×5mの空間メッシュに存在する単位汚染源密度による別の空間メッシュ上に与える空間線量率を距離の関数として求めておく。③空間線量率を目標値以下に低減したい対象区域(居住地など。以下、「対象区域」という)に最も大きな影響を与えている周辺区域(耕作地など。以下、「周辺区域」という)のセルを検索し、そのセルを適当な方法で除染する。④周辺区域で最も影響の大きい1つのセルを除染する(③のプロセス)たびに、対象区域の空間線量率を再計算する。⑤対象区域の空間線量率が目標値を下回るまで、③及び④を繰り返す。

### 3. ケーススタディ

前述したフローに基づき解析プログラムを作成し、仮想的な小規模モデルでプログラムの検証を行った。まず、図4に示すような仮想的な20×20セル(100m四方)の対象地域(Fig. 1)を考え、汚染密度や除染係数、除染方法をTab. 1に示すように設定する。ここで、対象区域をエリア1とし、目標空間線量率を0.7μSv/hとする。エリア1内は既に除染済みとする。対象区域(エリア1)内を除染しても、汚染源密度の高い周辺区域(エリア7等)の影響を受けて、対象区域内の空間線量率は目標値を超える部分が存在する(Fig. 2(a))。この状態からスタートして、周辺区域内の影響度の高いセルを適切に検索し、必要最低限な数のセルを除染することにより、対象区域内の空間線量率を目標値以下に低減できる結果(Fig. 2(b))を得

ることができた。今後は、伊達市の除染実証実験データ<sup>2</sup>を用いて、検証する予定である。

なお、本研究は環境研究総合推進費「セシウムの動態解析に基づく除染シナリオの構築と磁気力制御型除染法の開発」(環境省, H25-26)によるものである。

Tab. 1 想定汚染源密度及び除染方法

区分	ID	汚染密度	除染係数
エリア1 (居住地)	1	10 Bq/cm <sup>2</sup>	1.0
エリア2 (舗装道路)	3	10 Bq/cm <sup>2</sup>	1.5
エリア3 (草地)	11	70 Bq/cm <sup>2</sup>	5.0
エリア4 (砂地)	12	20 Bq/cm <sup>2</sup>	3.0
エリア5 (未舗装道)	14	20 Bq/cm <sup>2</sup>	5.0
エリア6 (耕作地)	16	40 Bq/cm <sup>2</sup>	4.0
エリア7 (林)	17	150 Bq/cm <sup>2</sup>	10.0
エリア8 (グラウンド)	21	20 Bq/cm <sup>2</sup>	4.0

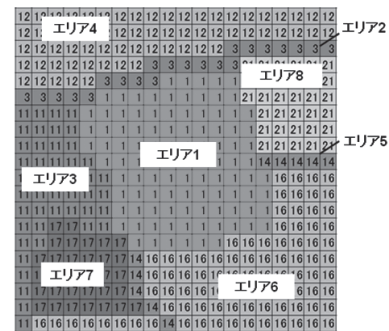
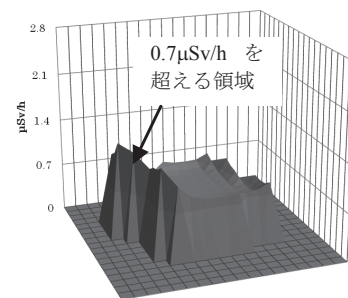
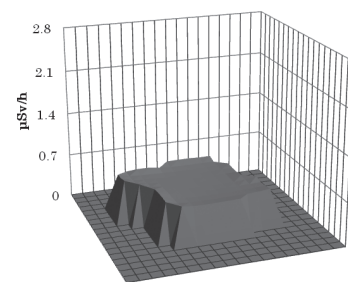


Fig. 1 Small model for evaluation of optimization algorithm.



(a) Before decontamination



(b) After decontamination.

Fig. 2 Rate of radioactivity in AREA 1.

### 参考文献

1. CDE 除染効果評価システム <http://nsec.jaea.go.jp/josen/>
2. [http://www.jaea.go.jp/fukushima/kankyoanzen/guideline\\_report/3.1.pdf](http://www.jaea.go.jp/fukushima/kankyoanzen/guideline_report/3.1.pdf)

# セシウム動態に基づいた除染技術の研究

## その1. 住宅建材におけるセシウムイオンの動態に関する研究

### Studies of Decontamination Technologies Based on Dynamics of Cesium

#### Part 1. Study on Dynamics of Cesium Ion on the Surface of Construction Materials

岡田 俊介, 野村 直希, 三島 史人, 秋山 庸子, 西嶋 茂宏 (大阪大学)

Shunsuke Okada, Naoki Nomura, Fumihito Mishima, Yoko Akiyama, Shigehiro Nishijima (Osaka University)

e-mail: okada@qb.see.eng.osaka-u.ac.jp

#### 1. 緒言

本研究では、住宅建材表面のCsの吸着動態を明らかにし、効果的な除染手法を提案することを目的としており、宅地除染の対象となっている住宅建材(セメント瓦, 木材, トタン材)について、Csの吸着機構や空間的な分布について考察し、それぞれの住宅建材におけるCs動態モデルについて検討を行った。ここでは、特にセメント系材料におけるCs吸着機構・空間分布について考察を行った。









#### 2. 実験方法

福島県内で採取した実汚染物(セメント瓦)を加工し、試料片(80 mm×80 mm×14.1 mm)を作製した。始めに水溶性のCsと粒子を媒介して間接的に吸着したCs [1]を調べるため、水道水に10分間浸漬後、80℃で乾燥させ、水道水で10分間超音波洗浄した。洗浄後、80℃で乾燥させ、放射線量を測定した。また、洗浄水を孔径0.45 μmのメンブランフィルターを用いてろ過し、分離した粒子を80℃で乾燥後、ろ液と分離粒子の観察・放射線測定を行った。次に洗浄・乾燥後の試料片表面を切削し、切削深さごとの放射線量を測定した。

#### 3. 実験結果・考察

粒子の観察・放射線測定の結果をTable 1に示す。セメント瓦では、数μm～数十μm程度の土壌由来と考えられる微粒子が観察された。放射線を測定した結果、ろ液からはCsが検出されず、分離粒子からはわずかにCsが検出された。この結果から、超音波洗浄によって液相に溶けだす水溶性のCsは存在せず、粘土粒子や有機物粒子を媒介して間接的に吸着したCsのみが脱離したと考えられる。また、水洗浄・超音波洗浄では、試料片表面の線量はほとんど低下せず、粒子を媒介して間接的に吸着しているCsの表面汚染への寄与が比較的小さいことが確認された。

Table 1. Results of observation and radiation measurement

Sample	Cement tile (kBq/g)		Timber (kBq/g)		Galvanized plate A (kBq/g)		Galvanized plate B (kBq/g)	
	Cs137	Cs134	Cs137	Cs134	Cs137	Cs134	Cs137	Cs134
filtrate	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Separated particles	0.27	N.D.	2.7	N.D.	N.D.	N.D.	3.3	N.D.
Microscope pictures								

次に、切削深さごとの放射線測定の結果をFig 1に示す。Fig 1に示すように、約950 μm切削後において、超音波洗浄後の約14%まで線量が低下しており、自然環境中において、表面からおよそ1 mm以内にほとんどのCsが分布していると考えられる。しかし、K. Maslovaらが<sup>137</sup>Csを用いて行

った実験[2]では、セメント表面へのCs溶液の散布から28日後において600 μm以内に約90%が存在しているという報告があることから、事故直後表面に吸着したCsは、降雨・積雪によって湿潤・乾燥が繰り返されることで内部方向へ拡散したと推測される。

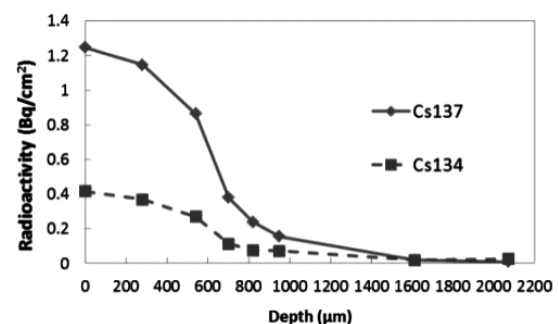


Fig 1. Radiation dose as a function of cutting depth

#### 4. 結言

実験結果から、セメント系材料ではCsの多くはイオンの状態で直接的に吸着しており、表面から1 mm以内に約86%が分布していることが確認された。また木材では1.6 mm以内に約85%、トタン材では表面の腐食部分(約90 μm)に約91%が分布していた。今後、これらの実験結果を基に、各建材におけるCs吸着機構について検討し、Fig 2に示すような除染シナリオを用いて、効果的に住宅地の空間線量を低減するための指針として活用することを目指す。

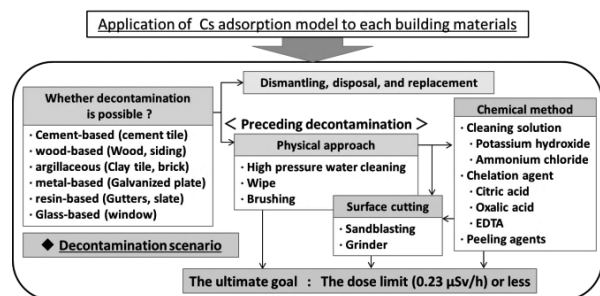


Fig 2. Application of Cs adsorption model to each building materials

#### 参考文献

1. JAEA, 平成24年度放射能測定調査委託事業成果報告書, pp.123-128, pp.153-159
2. K. Maslova et al., Journal of Environmental Radioactivity, 125, pp.74-80, 2013

#### 謝辞

本研究の一部は、環境省「環境研究総合推進費」(5Z-1301)によって行われた。

# セシウム動態に基づいた除染技術の研究

## その2. 磁気力制御による汚染土壌の減容化

### Studies of Decontamination Technologies Based on Dynamics of Cesium Part2. Volume Reduction of Contaminated Soil by Magnetic Force Control

野村 直希, 吉田 有輝, 関谷 一輝, 三島 史人, 秋山 庸子, 西嶋 茂宏(大阪大学)

NOMURA Naoki, YOSHIDA Yuki, SEKIYA Kazuki, MISHIMA Fumihito, AKIYAMA Yoko, NISHIJIMA Shigehiro(Osaka University)

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

#### 1. 研究背景

福島第一原発事故由来の放射性物質を含む土壌の表土剥ぎ取りにより約2000万 $\text{m}^3$ という大量の汚染土壌が発生した。したがって、これらを「大量の埋戻し可能な低線量土壌」と「管理保管が必要な少量の高線量土壌」に分ける減容化手法が必要といえる。我々はセシウムが特定の粘土鉱物に選択的に吸着されることを利用し、磁気力制御による汚染土壌の減容化について研究を進めてきた。本手法は、①土壌分級、②セシウム脱離溶液を用いた鉱物間でのセシウムの移行、③超電導磁石によるセシウム濃縮粘土の磁気分離、の3つの技術要素から構成される。ここでは主に磁気分離の前処理に当たる①の土壌分級に関する研究結果を報告する。

#### 2. 減容化プロセス

まず、我々が研究を進めている減容化手法と現状の問題点をFig.1に示す。

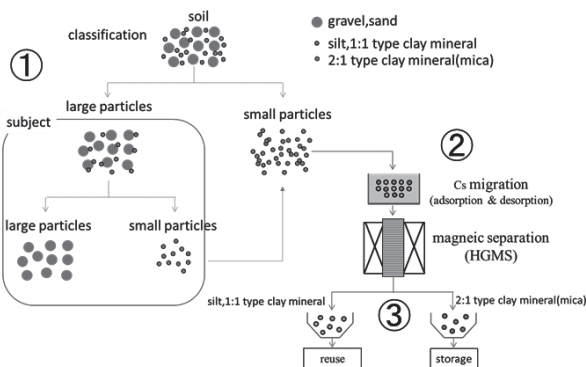


Fig. 1 Volume reduction process of contaminated soil.

土壌中のセシウムが主に粒子径の小さい粒子に吸着され存在していることは既に知られている。したがって、まず土壌を分級し、セシウム濃度の高い細粒分とセシウム濃度の低い粗粒分とを分離する。砂礫分が土壌全体の80%前後を占める土壌が多いことから、土壌分級により大幅な減容化が可能となる。次に、細粒分間のセシウム吸着の選択性の違いを利用し、セシウムを弱く吸着しているシルトや1:1型粘土鉱物からセシウムを選択的かつ強固に吸着する2:1型粘土鉱物へセシウムを移行させる。最後にセシウムを濃縮させた2:1型粘土鉱物のみを磁気分離法により分離回収し、セシウムを濃縮した2:1型粘土鉱物を管理された環境で安定的に保管する。

本研究では第1段階にあたる土壌分級において高い減容化率を達成することを目的とし、実験を行った。先行研究において有機物を多く含む土壌を分級した際に、砂礫分の線量が下がりにくい傾向が確認されたため、分級後の砂礫画分の顕微鏡観察を行ったところ、砂画分において有機物の影響により団粒構造を形成した細粒分の存在が観察された。実験土壌の各粒度画分の重量比率は礫:約40%、砂:約50%、シルト+粘土:約10%であったことから、砂画分の減容による影響は大きい。そこで、本研究では砂画分の試料を実験対象とし、ボールミルにより粒子凝集の解消を行うことで分級時の線量低減率および減容化率の改善を図った。

#### 3. 実験方法

実験試料には福島県内で採取し、湿式ふるい分けにより土壌を $-75\ \mu\text{m}$ ,  $75-250\ \mu\text{m}$ ,  $250-2000\ \mu\text{m}$ ,  $2000-\ \mu\text{m}$ の4つの粒度に分類した。このうち $250-2000\ \mu\text{m}$ (以下A),  $75-250\ \mu\text{m}$ (以下B)の粒度の試料を本実験の試料として用いた。5gずつA, Bの粒度の試料を用意し、試料に対しボールミルによる減容化効果を調査するための実験を行った。100 mlのアイボリーに試料5 g, 水道水50 ml, ボール(40個)を投入し、120 rpmで1 h 攪拌した。ミル後の懸濁液から $-75\ \mu\text{m}$ ,  $75-250\ \mu\text{m}$ ,  $250-2000\ \mu\text{m}$ の3つの粒度に分類して試料を回収し、乾燥させた後、重量測定および放射線量測定を行った。放射線量の測定にはCsIシンチレーションカウンターを用いた。

#### 4. 結果と考察

回収した試料の測定結果をFig.2に示す。

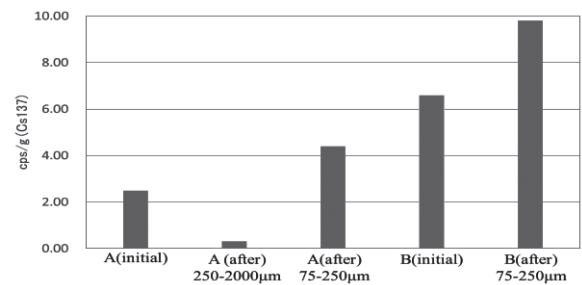


Fig.2 Radiation dose before and after polishing.

試料Aにおいて回収した $250-2000\ \mu\text{m}$ の試料では、88%の線量低減率が得られ、回収重量は19%であった。一方 $75-250\ \mu\text{m}$ の試料の線量は初期試料の1.8倍となり、回収重量は8%であった。

一方でBにおいては、実験後の試料の方が線量が高くなるという、Aとは異なる傾向が見られた。この結果は分級時にみられる一般的な傾向とは異なるが、ボールミル処理により凝集が解消される他、粒子表面が研磨される効果の影響が大きいと考えられる。土壌粒子の表面には凹凸が存在しており、セシウムはまず凸部分に多く吸着される。しかし自然環境中において雨水による洗浄と吸着を繰り返す中でセシウムは凸部分から凹部分へと濃縮されることが考えられる。この場合、今回のように凸部分が研磨されても全放射線量があまり下がらず、重量変化により重量あたりの線量が増加することも起こりうる。今後詳細に検証を進めていく必要があると考えられる。

本実験は提案した減容化手法のうちの分級工程にあたり、課題であった有機物含有量の高い土壌においても $250-2000\ \mu\text{m}$ の粒度において88%の線量低減率が得られたが、重量比率は $2000\ \mu\text{m}$ の粒子の19%に留まった。さらに高い減容率を得るためには $250\ \mu\text{m}$ の高線量土壌を減容する必要がある。今後はセシウム脱離溶液を用いた鉱物間でのセシウムの移行、超電導磁石によるセシウム濃縮粘土の磁気分離についても研究を進めていく。

#### 謝辞

本研究の一部は、環境省「環境研究総合推進費」(5Z-1301)の助成によって行われた。



## 超伝導回路のためのNbTiN薄膜の磁場侵入長評価

## Evaluation of the magnetic penetration depth of NbTiN thin films for superconducting circuit

坂本 隼也, 宗本 健太郎, 赤池 宏之, 藤巻 朗 (名大院工)

SAKAMOTO Shunya, MUNEMOTO Kentaro, AKAIKE Hiroyuki, FUJIMAKI Akira (Nagoya Univ)

E-mail: sakamoto@super.nuqe.nagoya-u.ac.jp

## 1. 研究背景

単一磁束量子回路(SFQ回路)はジョセフソン接合を組み合わせて構成され、高速動作・低消費電力性を有する回路である。このSFQ回路の課題の一つは集積度の向上である。そこで、我々は、この解決手段としてNbTiN材料をSFQ回路へ応用する検討を行っている。

SFQ回路は $LI_c$ 積( $L$ : ループインダクタンス、 $I_c$ : 接合の臨界電流)に基づき設計されるため、配線部分のシートインダクタンス、すなわち配線の幅と長さが等しい寸法の配線パターンに対するインダクタンスが大きいほど集積度を向上させることができる。現在のSFQ回路は接合作製技術の信頼性の高さから、超伝導材料としてNbが用いられる。しかし、配線材料として、より磁場侵入長 $\lambda$ の大きなNbTiNを用いることで、現状のNbと同じ配線寸法であってもシートインダクタンスを2-3倍程度大きくすることが可能であり、集積度の向上が期待できる。更には、回路の低消費電力化に繋がる低 $I_c$ 化において必須となる大きなインダクタンスも、比較的小さな寸法で実現できるようになる。

このようにNbTiNは配線材料として有望と考えられるが、さらに臨界温度が16 K程度とNbより高いという特長も持つ。従って、信頼性の高い接合技術がNbTiNにより実現すれば回路の高温動作化が期待できる利点もある。

本研究では、反応性DCマグネトロンスパッタ法を用いてNbTiN薄膜を成膜し、配線応用に向けて重要となる磁場侵入長の検討を行った。また、過去に行った反応性RFマグネトロンスパッタ法により成膜したNbTiN薄膜との比較についても行った。

## 2. 実験手法

NbTiN薄膜は、反応性DCマグネトロンスパッタ法を用いて室温にて堆積させた。用いたターゲットは、NbTi(重量比5:1, ターゲットサイズ3 inch $\phi$ )、基板には酸化膜付Siを用いた。到達真空度は約 $1.5 \times 10^{-4}$  Paであった。成膜に際しては、Ar流量を40 sccmと固定し、 $N_2$ 流量を変化させることで窒素分圧比を変化させた。堆積条件を最適化するにあたり、NbTiN中の窒素の分量がNbTiNの様々な相を決めることから窒素分圧比依存性の調査を行った。今回の実験では、3.4-18.1%の間で窒素分圧比を変化させた。スパッタ電流は500 mA、全ガス圧は0.8 Paである。成膜したNbTiN薄膜の膜厚は200 nm程度であり、堆積レートは約75 nm/minであった。

今回の実験では、臨界温度 $T_c$ 、20 Kにおける抵抗率 $\rho$ の評価を行い、磁場侵入長 $\lambda$ 、シートインダクタンス $L$ を見積もった。 $T_c$ はSFQ回路の高温動作の指標、 $\lambda$ はシートインダクタンスの指標、 $L$ は回路の高集積化の指標としてそれぞれ検討を行った。

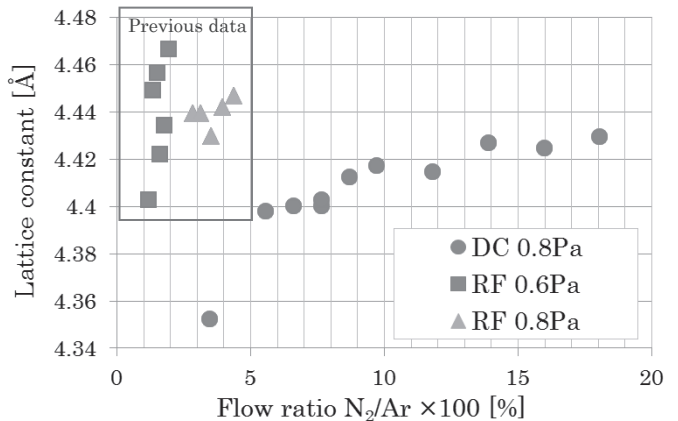
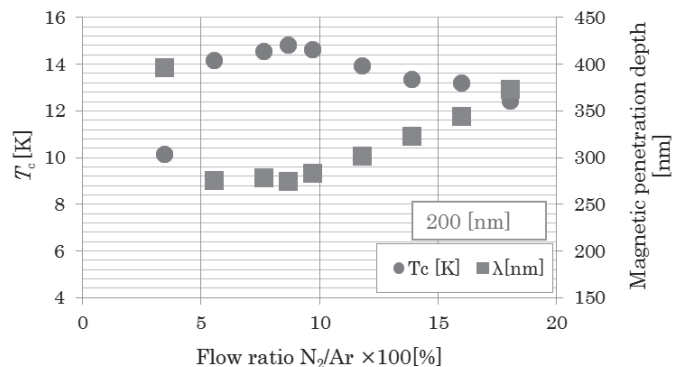
## 3. 実験結果と考察

DCマグネトロンスパッタ法により成膜したNbTiN薄膜の格子定数-窒素分圧比依存性をFig. 1に示す。また、RFマグネトロンスパッタ法により成膜した過去のNbTiN薄膜についてもFig. 1に記載した<sup>1)</sup>。RFマグネトロンスパッタ法で成膜した薄膜は窒素分圧比で制御することが困難であったが、DCマグネトロンスパッタ法で成膜した薄膜は確かな相関関係をもって変化しており、窒素分圧比で

十分に制御することができると考えている。また、窒素分圧比に対して格子定数が緩やかに変化していることから制御性が高いことも分かった。

$T_c$ と $\lambda$ の窒素分圧比依存特性をFig. 2に示す。 $\lambda$ は $T_c$ と20 Kにおける抵抗率 $\rho$ から計算で見積もった<sup>2)</sup>。 $T_c$ 、 $\lambda$ は窒素分圧比に対して確かな相関をもって変化していることが分かる。窒素分圧比が8.6%の時に、 $T_c$ の最大値14.8 Kを記録し、その時の磁場侵入長 $\lambda$ は274 nmであった。配線部分のシートインダクタンスは配線の寸法と磁場侵入長及びデバイス断面構造から見積もることができる。そこで今回得たNbTiNの磁場侵入長( $\lambda=274$  nm)を用いてシートインダクタンスを見積もり、現在のNb配線との値を比較した結果、約1.9倍となった。

また、現在、今回求めた磁場侵入長 $\lambda$ の妥当性を検討するために、NbTiNを用いたSQUIDの作製を進めている。

Fig.1 Lattice constant-Flow ratio  $N_2/Ar$  characteristicFig.2  $T_c$  and  $\lambda$ -Flow ratio  $N_2/Ar$  characteristic

## 4. 謝辞

この研究の一部は、JST-ALCA「低エネルギー情報ネットワーク用光・磁気・超伝導融合システム」、ならびに科学研究費基盤研究C(26420306)、新学術領域研究(26105511)のもとで行われた。

## 参考文献

1. S. Sakamoto, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 88 (2013)
2. T.P.Orlando, E.J.McNiff, Jr., S.Foner, and M.R.Beasley, Phys.Rev.B19, 4545(1979)

## SQUID上に配置したPdNiパターンの磁化反転の検討

## Study on the magnetization reversal of PdNi patterns placed on SQUIDs

石川 航太, 伊藤 大, 谷口 壮耶, 赤池 宏之, 藤巻 朗(名大院工)

Kouta Ishikawa, Hiroshi Ito, Soya Taniguchi, Hiroyuki Akaike, Akira Fujimaki(Nagoya Univ.)

E-mail: ishikawa-k@super.nuqe.nagoya-u.ac.jp

## 1. はじめに

低消費電力性、高速動作性に優れている超伝導回路は次世代のデバイス技術として期待されている。しかし現在、超伝導回路に用いる高集積化が可能なメモリが存在していない。この課題に対して、我々は超伝導回路に磁性体を導入することでの解決を目指している。磁性体の磁化反転を利用することで、セル面積の小さなメモリを実現できると考えている。これまでに我々は磁性合金薄膜として強磁性体の性質の弱めたPdNiを用い、縦型の超伝導量子干渉計(SQUID)上にPdNiパターンを配置させた際の超伝導位相シフトの動作を確認している[1]。ここでは、Ni割合が11%のPdNi薄膜を用い、異常ホール効果測定から薄膜のキュリー点( $T_{Curie}$ )が110K程度であった。しかしメモリ応用の観点から見ると、4.2Kの極低温下での磁化反転が観測されていないことから、 $T_{Curie}$ が110K程度では高すぎると思われる。そこで、より低い $T_{Curie}$ をもつNi割合の小さなPdNi薄膜を用い、その磁場応答や磁化反転に対する検討を進めた。

## 2. 実験手法

Nb/AlO<sub>x</sub>/Nb 接合プロセスを用いて縦型SQUIDを作製し、この上にPdNi薄膜パターンを形成した。PdNi薄膜はPdとNiの同時スパッタ法により直接堆積し、加工に際しては、光リソグラフィ及びArイオンミリングにより行った。Fig.1は作製したデバイスの顕微鏡写真である。今回用いたPdNiは、Ni 6.8%と7.5%であり、膜厚70nmのものである。

磁化反転の評価は、PdNiパターンを形成したSQUIDに対し、4.2K下で外部磁場 $\mu_0 H_{ex}$ ( $\mu_0$ は真空の透磁率)を-1.2mTから+1.2mTの範囲で印加し、臨界電流-外部磁場( $I_c - \mu_0 H_{ex}$ )特性を評価することにより行った。その際、 $\mu_0 H_{ex}$ の正の向きをFig.1の上から下向きとし、負から正及び正から負の両方を印加・掃引した。磁化反転がある場合、この $I_c - \mu_0 H_{ex}$ 特性にヒステリシスが見られることになる。PdNiの磁化に際しては、有磁場冷却(FC)を用いた。FCの開始温度を30K、終了温度を15Kとした。また、比較のため、無磁場冷却時の特性を評価した。

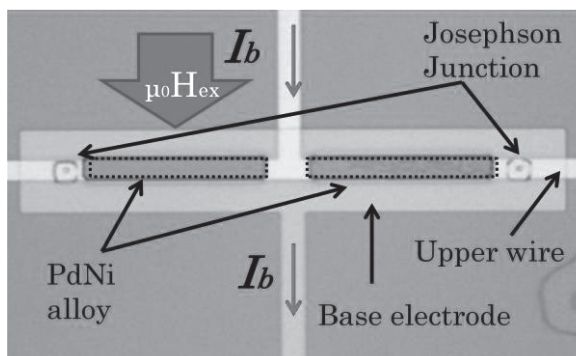


Fig.1 Microphotograph of SQUID

## 3. 結果と考察

30Kから15KまでのFCに対し、Ni6.8%のものは磁化による $I_c - \mu_0 H_{ex}$ 特性のシフトが見られないのに対し、Ni7.5%のものはシフトが見られた。Fig.2にFC時の印加磁場 $\mu_0 H_{FC} = \pm 140 \mu T$ のときの結果を示す。 $\mu_0 H_{FC}$ の極性を変えることにより、

シフト量は同じであるものの、シフト方向が変化していることがわかる。また、 $\mu_0 H_{FC}$ は最小で30 $\mu T$ 程度まで、同様のシフトが見られた。この結果から、6.8%のものは磁化が小さすぎると思われ、メモリ応用には不適であると推測される。一方、7.5%のものは有効な磁化が存在すること、及び、FCを用いることにより磁化反転が可能になることがわかる。

メモリ応用を想定すると、回路の動作温度4K付近での磁化反転が重要となる。しかし、Ni7.5%のPdNiパターンに対して、 $\mu_0 H_{ex} = \pm 1.2mT$ の範囲における4.2Kでの $I_c - \mu_0 H_{ex}$ 特性の観測の結果、磁化反転を反映するヒステリシスが見られなかった。これは、PdNiパターンの4.2Kでの保磁力が大きすぎることの意味している。メモリ応用を可能にするには10 $\mu T$ 程度の磁場による磁化反転が必要と思われる。従って、Ni割合を減少させることが必要と思われる。

以上の結果から、メモリ応用に適したPdNiにおけるNi割合は、6.8%から7.5%の範囲内にあるものと予想される。現在、Ni割合を減らしたPdNi膜に対して、異常ホール効果測定を含めた評価・検討を進めている。

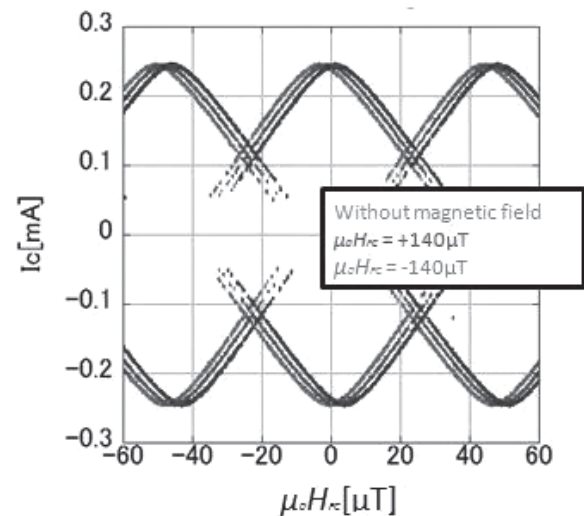


Fig.2 Dependence of the critical current,  $I_c$ , of a SQUID on the external magnetic field,  $\mu_0 H_{ex}$ , under various field cooling conditions

## 4. 謝辞

この研究はJST-ALCA「低エネルギー情報ネットワーク用光・磁気・超伝導融合システム」、ならびに科学研究費基盤研究C(26420306)のもとで行われた。

## 参考文献

1. S. Taniguchi, et al.: JSAP., Vol.61 17p-D4-13



# Bi-2223 テープ線材を用いた高温超伝導リニアスイッチトリラクタンスモータの設計に関する研究

Study on design of HTS linear switched reluctance motor using Bi-2223 tape

大當 聡嗣, 浅川 慎一郎, 川畑 秋馬, 平山 斉 (鹿児島大)

OTO Satoshi, ASAKAWA Shinichiro, KAWABATA Shuma, HIRAYAMA Tadashi (Kagoshima University)

E-mail: k6678979@kadai.jp

## 1. はじめに

近年、省資源化の流れを受けてプレス機や射出成形機の電動化が進んでいる。これらの機器では、大きな推力を発生し、かつモータサイズを小さくすることが求められている。我々はこれまでに、リニアモータの大推力化、小型化を目指し、リニアスイッチトリラクタンスモータ (LSRM) の巻線に高温超伝導線材 (HTS) を用いた、高温超伝導リニアスイッチトリラクタンスモータ (HTS-LSRM) について検討してきた [1]。今回は、プレス軸や射出軸への応用を考えた小型・短ストローク構造の HTS-LSRM について検討する。まず、設計に利用する有限要素法 (FEM) を用いた磁場解析の妥当性を検証するために、鉄心付 HTS コイル用要素実験を行い、実験結果と解析結果の比較を行う。次に、HTS-LSRM のコイルに印加される磁場分布を FEM により求め、さらに HTS-LSRM の最適設計を試みたので、その結果について報告する。

## 2. HTS-LSRM の構造

図 1 に提案した HTS-LSRM の断面図を示す。一次側は、6 つの突極構造を持つ鉄心と HTS コイルから構成される。各突極にシングルパンケーキ型の HTS コイルが施され、これら 6 個のコイルにより A, B, C 相の 3 相巻線が構成される。二次側の極数は 4 極であり、突極構造を持つ鉄心のみから構成される。一次側鉄心と二次側鉄心が対向するように配置され、図 1 の矢印の方向に移動する。

## 3. 計算値と実測値の比較

HTS-LSRM では、一次側と二次側鉄心の相対位置により HTS コイルに印加される磁束密度が変化する。そのため、磁場解析を利用して HTS-LSRM を設計する場合、HTS コイルに印加される磁場を正しく見積る必要がある。そこで、設計に利用する 3 次元 FEM による磁場解析を用いた解析結果の妥当性を検証するために、HTS コイルの臨界電流の算出値と実測値との比較を行った。検証のために内径 25mm、巻数 1 ターンの HTS コイルを作製した。電圧端子間距離は 75mm である。

電圧-電流特性の測定結果を図 2 に示す。測定は、空芯および図 2 中に示すような鉄心付きの状態で行った。磁場解析による HTS コイルの臨界電流は空芯で 101A、鉄心有りで 91A である。磁場解析により得られた HTS コイルの磁場分布より、それぞれの臨界電流のときのコイル端子電圧を算出し、図 2 よりその電圧での電流を求めると、空芯で 102A、鉄心有りで 95A となった。解析結果と実験結果がよく一致しており、解析結果の妥当性が確認された。

## 4. 解析結果

図 1 に示した HTS-LSRM において 3 次元 FEM により磁場解析を行い、HTS コイルに垂直に印加される磁束密度  $B_{\perp}$  を算出した。B 相にのみ 20A 通電し、一次側鉄心と二次側鉄心の相対位置を変化させたときの、各位置における B 相コイルに印加される  $B_{\perp}$  の最大値を算出した結果を図 3 に示す。ここで、HTS コイルは 34 ターン、ギャップ長は 1mm である。また、図 4 は、HTS コイルに印加される  $B_{\perp}$  が最大になる位置 16mm のときの、B 相コイルに印加される  $B_{\perp}$  の分布図である。図 3 よ

り、HTS コイルに印加される  $B_{\perp}$  は、0mm の位置から移動するに従って増加し、16mm で最大値をとり、その後低下する特性となる。また図 4 より、鉄心の角に近い部分で最も  $B_{\perp}$  が大きくなるため、一次側鉄心の四隅を円弧形状にすることにより  $B_{\perp}$  が低減され HTS コイルの臨界電流が改善される。詳細な設計検討については当日報告する。

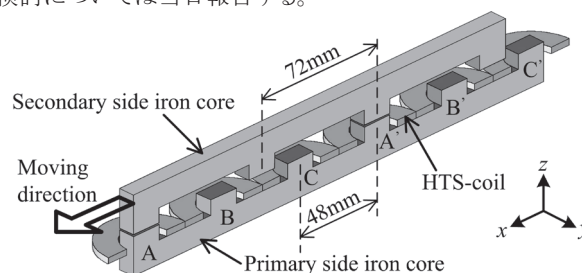


Fig. 1 Cross-section view of the HTS-LSRM

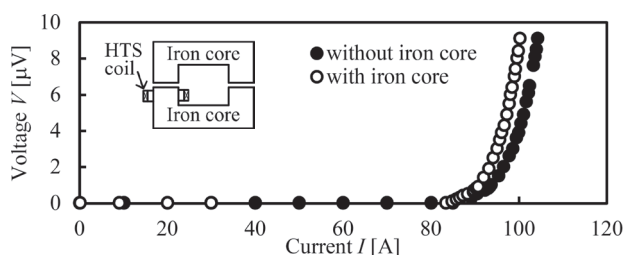


Fig. 2 Measured results of  $V-I$  characteristics of HTS coils

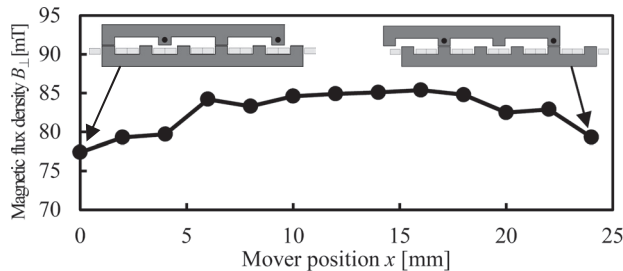


Fig. 3 Analytical results of maximum perpendicular magnetic flux density applied to the B-phase HTS coils in several mover positions

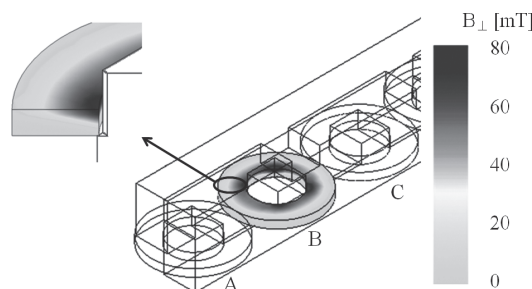


Fig. 4 Analytical results of perpendicular magnetic flux density distributions applied to the B-phase HTS coils

## 参考文献

1. T. Hirayama, et al. : JICEMS, Vol. 2, No. 4 (2013) pp.394-398

# 磁場回転型ドラッグデリバリーシステムに関する基礎的研究

## Fundamental study on magnetic drug delivery system with rotating magnetic field

竹内 一将, 三島 史人, 秋山 庸子, 西嶋 茂宏 (大阪大学 工学研究科)  
 TAKEUCHI Kazumasa, MISHIMA Fumihito, AKIYAMA Yoko, NISHIJIMA Shigehiro  
 (Osaka University Graduate school of Engineering)  
 E-mail: takeuchi@qb.see.eng.osaka-u.ac.jp

### 1. はじめに

薬剤と強磁性粒子を結合させた強磁性薬剤を患者に投与した後、体外から磁場を印加することで標的患部に積極的に薬剤を集積させる磁場印加型薬剤送達システム (Magnetic Drug Delivery System: MDDS) に関して、近年盛んに研究が行われており[1,2]、この手法による高効率な治療法の確立が期待されている。しかし体外の一方向からのみ磁場を印加する従来の MDDS では強磁性薬剤は体表面に集積されるため、体内深部に存在する疾病の治療が困難である。本研究では磁場を回転させることで、磁場の回転軸上のみ強磁性薬剤を集積させる磁場回転型 MDDS の手法について検討した。磁場の回転軸上では、強磁性粒子に半径方向に、大きさが等しく向きが回転する磁気力が働くため、強磁性薬剤は内壁に沿って円運動し、集積される。一方、磁場回転軸外では、磁場の大きな変動によって、強磁性薬剤に働く磁気力が変動する。これにより、強磁性薬剤は血管内壁に沿った円運動ができず内壁から離れ、血流によって押し流されることで、集積を防ぐ (Fig.1) [3]。本研究では、磁場発生源に電磁石を採用することで、患者や磁石を回転させることなく電流の制御のみにより磁場を回転させる手法を検討した。ここでは、上記の磁場回転型 MDDS の技術を開発するという目的のもと行った模擬実験の結果について報告する。

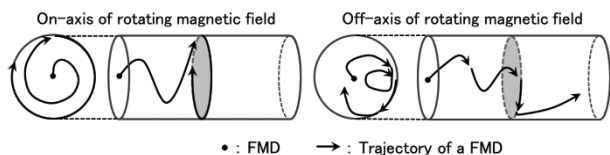


Fig.1 The trajectory of a ferromagnetic drug in blood vessels on- and off- axis of rotating magnetic field

### 2. 実験方法

直径 3cm の円を対象領域とし、この領域の周囲四方にコイルを配置した。対象領域の中心および中心から 9 mm 離れた箇所にそれぞれ模擬血管 (内径: 4.8 mm) を配置し、各模擬血管に粒径 30  $\mu\text{m}$  のマグネタイト粒子懸濁液を流し、これに回転磁場を印加した場合にマグネタイト粒子が示す挙動をビデオカメラで観測した。電流制御に関しては、次の 2 種類の手法で行った。いずれの手法においても、磁場回転軸は対象領域の中心に設定された。

- 1) 各コイルに順次瞬間的に通電することで、回転磁場を模擬する手法
- 2) 対向するコイルを接続して形成される対に通す電流をそれぞれ制御することで、各対が形成する磁場の合成磁場を回転させる手法

### 3. 実験結果・考察

手法 1) では、回転周波数 1 Hz で磁場を回転させたとき、磁場回転軸外では、粒子は一度磁場領域で集積されたが徐々に流され、初めに粒子が集積された時点から 6 分間経過した段階で全ての粒子が流された。一方磁場回転軸上で同様に中止は集積され、6 分間が経過した後も粒子は安定して集積された。手法 2) では磁場の回転周波数を容易に変更できた

め、1 Hz から順次 1 Hz ずつ上昇させた。磁場回転軸上では、磁場回転周波数を 5 Hz から 6 Hz へ切り替えた瞬間に半分程度の粒子が流されたものの、安定して集積された (Fig.2 a~c)。一方磁場回転軸外では、周波数が 4Hz より大きくなると粒子は徐々に流され (Fig.2 b)、6 Hz に達した段階で全ての粒子が流された (Fig.2 c)。以上、手法 1)、2) の観測結果により、磁場回転型 MDDS の基礎的技術の実現可能性が示された。

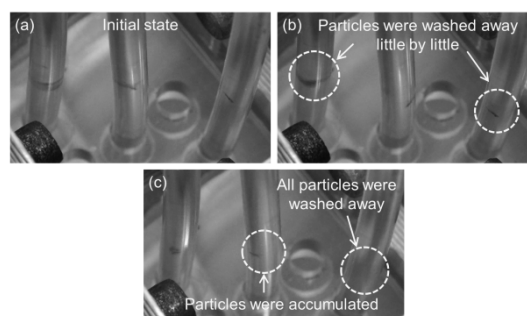


Fig.2 Appearance of accumulation in the second method

### 4. 今後の展望

现阶段では簡易的な磁場制御として、対象領域の中心に磁場回転軸を配置する手法を検証したが、将来的には各コイルにより印加される磁場を様々に制御することで、磁場回転軸を対象領域の任意の箇所に設定する手法を検討している。例えば Fig3.(a) で示す病巣に磁場回転軸を設定するためには、Fig3. 中の 1~4 の各磁石によって同血管上に印加される磁場を Fig3.(b) のように制御すればよいと考えられる。ただし、臨床段階では人体規模に適用できる広範囲の強磁場が必要であるため、超電導ソレノイド磁石の漏れ磁場を用いることになるが、標的とする病巣の箇所ごとに磁場分布に関して詳細な検討を行うことが必要である。

以上の考察と今回の研究成果から、体内の任意の箇所に強磁性薬剤を集積させることができると考えられるため、体内のあらゆる箇所の病巣に対する薬剤治療の可能性が見込まれる。

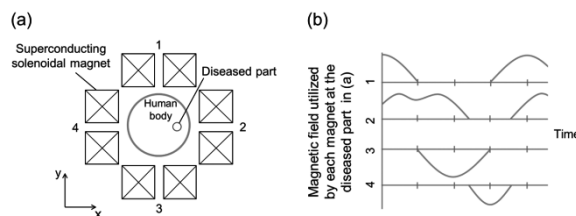


Fig.3 Magnetic field control (b) to accumulate ferromagnetic drugs in the diseased part shown in (a)

### 参考文献

1. Benjamin Shapiro et al, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 321(2009) 1594-1599
2. A.Marcu et al, Applied Surface Science, Vol.281(2013) 60-65
3. M.Chuzawa et al, Physica C, Vol.484(2013) 120-124

## 超電導バルク体に鎖交する磁束密度操作による 磁気浮上力および振動特性に関する基礎的検討

A basic study on the magnetic levitation force and vibration characteristic for the operation of magnetic flux density across the HTS bulk.

佐々木 修平, 長内 大輔, 丹波 織恩, 宮崎 純 (八戸高専)

SASAKI Shuhei, OSANAI Daisuke, TANBA Shio, MIYAZAKI Jun (Hachinohe National College of Technology)

E-mail: sasakis-e@hachinohe-ct.ac.jp

### 1. はじめに

超電導バルク体の磁束のピン留め効果を用いた磁気浮上の応用機器の開発が様々行われている[1]。これらの研究を実用化させるためには磁気浮上力(磁気支持力)が重要となる。単純に磁気浮上力を稼ぐためには、超電導バルク体の個数を使用すればよいが、コストや設置面積の問題が挙げられる。そのため、効率的に磁気浮上力が得られることが望まれる。そこで、本研究では超電導バルク体と永久磁石から構成されるシステムを想定し、超電導バルク体に鎖交する磁束密度を操作し、効果的なシステム構成について検討した。さらに、機器の実用化の際には、並進・回転運動による内部振動や外部振動がシステムに印加させることが想定されるため、鉛直振動を印加した際の振動特性ならびに磁束ピンニングからの逸脱防止について検討した。

### 2. 実験

超電導バルク体と永久磁石から構成されるシステムにおいて効率的に磁気浮上力を得るために、Fig. 1 に示すように永久磁石(30×30×t10 mm)を基礎に対して垂直に設置し、単位面積あたりの浮上力の向上を図った。また、Fig. 2 に示すように超電導バルク体に鎖交する磁束密度を磁性体および基礎とは別の永久磁石を用いて変化させ、磁気浮上力の比較を行った。

振動特性の試験では、基礎の永久磁石に鉛直振動を印加し、超電導バルク体における応答変位を測定した。また、振動伝達の増幅防止を図るために、Fig. 2 のように超電導バルク体の側面に超電導線材を1周巻いて測定を行った。なお、印加した鉛直振動は振幅4 mm、卓越周期2 Hzであり、永久磁石と超電導バルク体の加速度応答スペクトルを比較した。

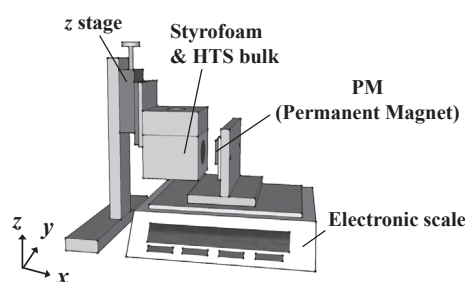


Fig. 1 Schematic drawing of the experimental equipment for the magnetic levitation force.

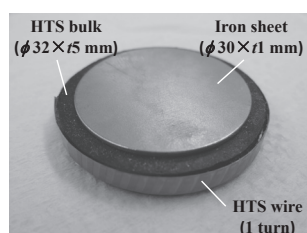


Fig. 2 Photograph of the proposed HTS bulk for improving the magnetic levitation force and vibration transmission.

### 3. 実験結果・考察

永久磁石の中心と超電導バルク体の中心を合わせ(ギャップ5 mmで液体窒素による磁場中冷却)、 $-z$ 方向に変位させた際に発生する磁気浮上力の測定結果をFig. 3に示す。Fig. 3より、超電導バルク体の中心が永久磁石の端部まで変位する間(15 mm変位まで)は、ほぼ一定の傾きで磁気浮上力が発生することがわかる。また、基礎の永久磁石と吸引する方向に永久磁石および磁性体を用いることで、超電導バルク体を鎖交する磁気勾配が大きくなり(磁束の向きが鉛直方向と直交する方向になる)、磁気浮上力を向上させることに成功した。

基礎の永久磁石に鉛直振動を印加し、卓越周期における振動伝達率(基礎の永久磁石に対するフーリエスペクトル比)をFig. 4に示す。Fig. 4より、超電導バルク体みの場合、基礎の振動に対して二倍近く振動が増幅していることがわかる。一方で、超電導バルク体に基礎とは別の永久磁石および超電導線材から構成されるコイルを用いることで、振動伝達を抑制することに成功した。これは、提案した超電導バルク体によって基礎の永久磁石との磁気結合が強められ、着磁位置に留まろうと基礎の永久磁石に追従したことになる。つまり、超電導バルク体の磁束ピンニングからの逸脱を防ぐことにつながる。

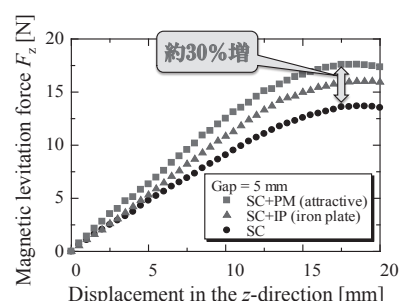


Fig. 3 Experimental results of magnetic levitation force as a function of displacement in the  $z$ -direction from field cool position.

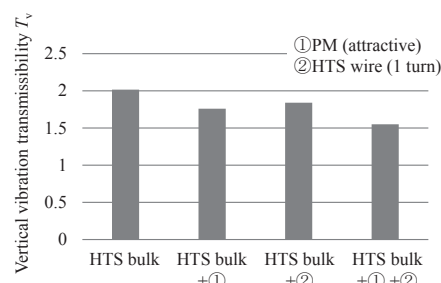


Fig. 4 Vertical vibration transmissibility with/without the operation of magnetic flux density across the HTS bulk at the vibration of 2 Hz.

### 参考文献

1. 超電導技術分野の技術ロードマップ2010(エネルギー・電力分野, 産業・輸送分野): 経済産業省(2010)



## 卓上型超伝導バルク磁石の基礎特性の評価

### Estimation of basic performance of a desktop type superconducting bulk magnet

横山 和哉, 五十嵐 僚太, 戸ヶ崎 亮介(足利工大); 岡 徹雄(新潟大)

YOKOYAMA Kazuya, IGARASHI Ryota, TOGASAKI Ryosuke (A.I.T.); OKA Tetsuo (Niigata Univ.)

E-mail: k-yokoyama@ashitech.ac.jp

#### 1. はじめに

本研究は超伝導バルク磁石(以下, バルク磁石と略す)の産業応用を目指して, 装置の操作性の向上, 強磁場化及び着磁の簡便化等について研究を行っている。本文は装置の更なる小型を図るため, スターリング冷凍機を用いたパルス着磁専用の卓上型バルク磁石装置の開発し, 冷却及び着磁試験を行った結果を報告する。

#### 2. 卓上型超伝導バルク磁石装置

Fig. 1 に卓上型超伝導バルク磁石装置の写真を示す。本装置はスターリング冷凍機を採用することで外部にコンプレッサが不要となり, さらに磁化方法をパルス着磁に限定することで磁極を短尺化し, 全長 548mm のコンパクトな装置となっている。冷却能力は 11 W@77 K, 消費電力は 160 W であり, 一般的な单相 100V の電源で駆動できる。

冷凍機のコールドヘッドに接続したサンプルステージの先端に,  $\phi 45 \times 15$  mm の GdBCO バルク体を取り付ける。真空断熱のためチャンバを取り付け, その表面を磁極として用いる。なお, バルク体表面と磁極表面は約 3 mm である。

#### 3. 冷却及び着磁試験

Fig. 2 にバルク体を取り付けて室温から冷却した時の, コールドステージ部における温度の時間変化を示す。約 4 時間で最低到達温度 51.3 K となった。

次に磁極に着磁コイルを取り付けて 3.1~7.0 T の単一パルス磁場を印加し, 磁場印加後の磁極表面の磁束密度分布を測定した。Fig. 3 に印加磁場 3.9, 5.4, 7.0 T の時の結果を示す。3.9 T で周辺部に磁場が入りはじめ, 5.4 T でほぼ同心円状の分布となり, 7.0 T ではピークが大きくなっている。

Fig. 4 に試料表面の中心部分における磁束密度及び磁極表面における磁束密度の最大値, さらに磁束密度分布から算出した総磁束量を各印加磁場で比較した結果を示す。捕捉磁場は印加磁場と共に増加し, 印加磁場 7.0 T において試料表面で 2.8 T, 磁極表面で 1.3 T となっている。総磁束量は 4.6~7.0 T でほとんど変化がないが, 5.4 T 以上で若干の減少が見られる。磁束密度が増加する一方で総磁束量が減少している結果から, 中心部及び GSB 部の捕捉磁場は増加するが, 大きな印加磁場による発熱により GSR 部でフラックスフローが発生して磁場が減少していることが考えられる。

電源の制限上, これ以上の磁場を印加できないが, 更に捕捉磁場の増加が見込まれる。しかし, 実用化を考えた場合, より低い印加磁場で大きな磁場を捕捉できることが望ましく, 試料に細孔を加工する等, 今後改善する予定である。

#### 4. まとめ

本研究は装置の取り扱い易さを考慮した卓上型バルク磁石装置を開発し, 冷却及び着磁試験を行った。最低到達温度は 51.3 K となり, 捕捉磁場は試料表面で 2.8 T, 磁極表面で 1.3 T となった。着磁中を含め運転状態は良好であり, また動作音も静かで, 1 週間以上の安定運転を確認している。

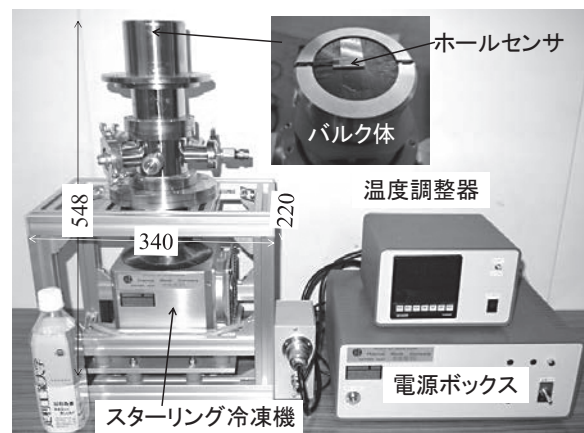


Fig. 1. Photograph of a desktop type superconducting bulk magnet system.

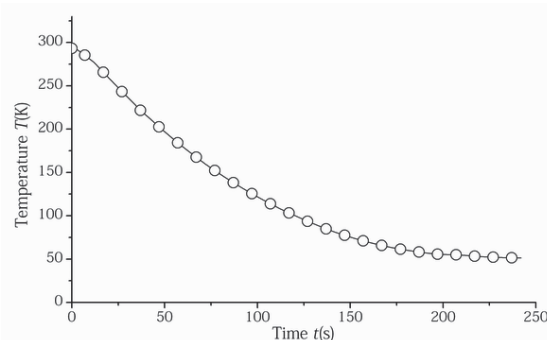


Fig. 2. Time response of temperature at a cold stage

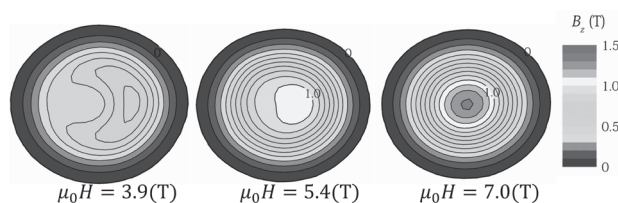


Fig. 3. Trapped field distributions on the pole surface

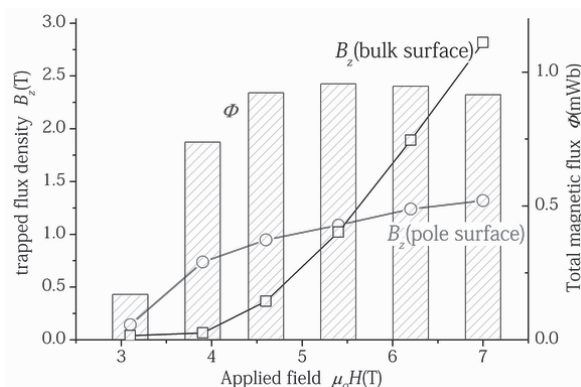


Fig. 4. Trapped flux density and total magnetic flux as a function of the applied field

# 1 GHzを上回る超高磁場・コンパクト NMR 磁石の実現に向けて (1) ～高温超伝導コイルを使用した超高磁場 NMR 磁石開発の展望～

Toward a super-high field NMR magnet operated beyond 1 GHz (1)

- Perspectives of developments of super-high field NMR magnets using HTS coils-

柳澤 吉紀(理研);井口 聖威也(上智大);朴 任中(千葉大);濱田 衛(JASTEC);高尾 智明(上智大);中込 秀樹(千葉大);  
松本 真治(NIMS);末松 浩人(JEOL RESONANCE);金 新哲, 高橋 雅人, 前田 秀明(理研)  
YANAGISAWA Yoshinori (RIKEN); IGUCHI Seiya (Sophia Univ.); PIAO Renzhong (Chiba Univ.); HAMADA Mamoru (JASTEC);  
TAKAO Tomoaki (Sophia Univ.); NAKAGOME Hideki (Chiba Univ.); MATSUMOTO Shinji (NIMS);  
SUEMATSU Hiroto (JEOL RESONANCE); JIN Xinzhe, TAKAHASHI Masato, MAEDA Hideaki (RIKEN)  
E-mail: y.yanagisawa@gsc.riken.jp

## 1. はじめに

1 GHz (23.5 T)を大きく上回る超高磁場の NMR 磁石を実現するには高温超伝導(HTS)コイルが必要である。HTS コイルの候補には REBCO、Bi-2223、Bi-2212 の 3 種類がある。我々はこれまで Bi-2223、REBCO など内層コイルに用いた 400-500 MHz の LTS/HTS 磁石を開発し、重要な技術課題を明確にしてきた。

本報告(第 1 報)では、これらの試験結果をもとに、REBCO と Bi-2223 における遮蔽電流磁場の影響とフープ応力の観点から導き出される超高磁場・コンパクト NMR 磁石開発に向けた新しい展望を示す。また、米国国立高磁場研究所(NHMF)と日米協力で行う 400 MHz LTS/Bi-2212 NMR 磁石の試験概要も紹介する。さらに、続く 3 つの報告では、それぞれ下記の内容について詳細な報告を行う。

第 2 報: 400 MHz LTS/REBCO NMR 磁石における、顕著な遮蔽電流磁場の影響下での安定・均一磁場発生と、高分解能 NMR 測定の最終結果を報告する。

第 3 報: Bi-2223 線材は遮蔽電流磁場が小さいが、フープ応力への耐性が低く、磁石小型化の観点からは候補から外れていたが、Ni-Cr 補強材とプレ圧縮による高強度タイプの Bi-2223 線材が開発された。この線材で巻いたコイルの耐フープ応力試験結果を報告する。

第 4 報: これまでに得られた HTS コイルの遮蔽電流とフープ応力耐性に関する知見をもとに、小型 1.2 GHz LTS/Bi-2223 NMR 磁石の基本設計を行った。特に高分解能 NMR 測定を実現するための磁場調整技術について述べる。

## 2. 小型・超高磁場 NMR 磁石開発に向けた新しい展望

REBCO コイルは高いフープ応力に耐えられるため、磁石小型化の観点からは最も優れる(Fig.1(d)参照)。しかし、REBCO コイルは遮蔽電流の影響が非常に大きい[1]。第 2 報で示すように、顕著な遮蔽電流の影響下であっても高分解能 NMR 測定が可能であるが、1.2 GHz NMR 磁石では、REBCO コイルの体積が 400 MHz の場合の約 40 倍に増大するため、

超伝導シムコイルを用いた磁場調整は、より困難になると考えられる。また、超高磁場では、フープ応力の観点から、磁場ドリフトを抑えるための電流掃引逆転も困難になる。

Bi-2223 コイルは遮蔽電流磁場が小さいが、フープ応力への耐性が低く、磁石のサイズが巨大になってしまう(Fig.1(c)参照)。しかし近年、高強度の Ni-Cr 補強材とプレ圧縮技術を用いた高強度の Bi-2223 線材が開発された[3]。Bi-2223 コイルは REBCO コイルと比べ、遮蔽電流磁場が大幅に小さい。さらに安価かつ単長の長い線材が製造できるため、この線材が高いフープ応力に耐えられれば、現状では REBCO より有望である。

## 3. 400 MHz LTS/Bi-2212 NMR 磁石

Bi-2212 線材は、ツイストしたマルチフィラメントの丸線であり、超伝導線材の形状として最も望ましい姿である。近年、高圧法により、コイルの電流密度が十分に高くなってきた[4]。この線材は遮蔽電流の影響が非常に小さいと考えられるため、高い磁場安定度・均一度発生観点から有望である。我々は NHMF と共同で、400 MHz LTS/Bi-2212 NMR 磁石を開発し、励磁試験・NMR 測定試験を行い、このコイルの可能性を検証する予定である。

## 4. まとめ

これまでの試験結果をもとに 1 GHz を超える小型・超高磁場 NMR 磁石開発の構成を再考した。超高磁場かつコンパクトな NMR 磁石を実現(パラダイムシフト)するには、現状では高強度 Bi-2223 線材が最も有望な選択である。

本研究は(独)科学技術振興機構(JST)の研究開発事業・戦略的イノベーション創出推進プログラム(S-イノベ)によって行われた。

## 参考文献

1. Yanagisawa et. al., *J. Mag. Res.*, Accepted for publication.
2. 大塚, 木吉, 低温工学, **42**, 196-205, 2007.
3. Nakashima et. al., ASC2014 preprint.
4. Larbalestier et. al., *Nat. Mat.*, **13**, 1-7, 2014.

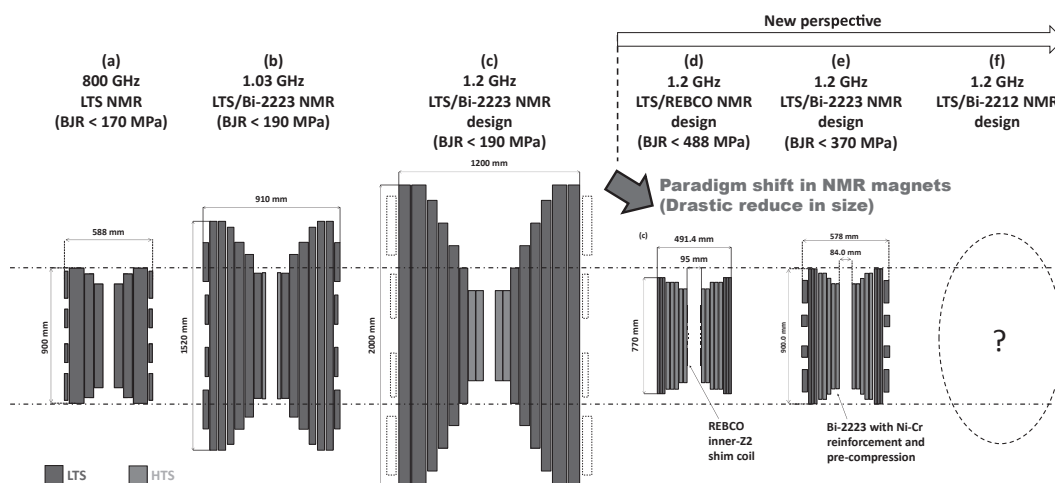


Fig. 1. Cross section for (a) a conventional 800 MHz LTS NMR magnet, (b) the 1.03 MHz LTS/Bi-2223 NMR magnet installed in NIMS, (c) a design of a 1.2 GHz LTS/Bi-2223(BJR<190 MPa) NMR magnet[2], (d) a design of a 1.2 GHz LTS/REBCO(BJR<488 MPa) NMR magnet, and (e) a design of a 1.2 GHz LTS/Bi-2223(BJR < 370 MPa) NMR magnet. (e) Bi-2212 is also a candidate for a super-high field NMR magnet.

# 1 GHz を上回る超高磁場・コンパクト NMR 磁石の実現に向けて(2) ~400 MHz (9.39 T) LTS/REBCO NMR 磁石における高分解能 NMR 測定~ Toward a super-high field compact NMR magnet operated beyond 1 GHz (2) - High resolution NMR measurements for the 400 MHz LTS/REBCO NMR magnet -

朴 任中(千葉大);井口 聖威也(上智大);柳澤 吉紀(理研);濱田 衛(JASTEC);高尾 智明(上智大);  
 中込 秀樹(千葉大);松本 真治(NIMS);末松 浩人(JEOL RESONANCE);金 新哲,高橋雅人,前田秀明(理研)  
 PIAO Renzhong (Chiba Univ.); IGUCHI Seiya (Sophia Univ.); YANAGISAWA Yoshinori (RIKEN);  
 HAMADA Mamoru (JASTEC); TAKAO Tmoaki (Sophia Univ.); NAKAGOME Hideki (Chiba Univ.);  
 MATSUMOTO Shinji (NIMS); SUEMATSU Hiroto (JEOL RESONANCE);  
 JIN Xinzhe, TAKAHASHI Masato, MAEDA Hideaki (RIKEN)  
 E-mail: piao@chiba-u.jp

## 1. はじめに

1 GHz (23.5 T)の磁場を大きく上回る NMR 磁石を実現するには、高温超伝導 (HTS) コイルが必須である。HTS には REBCO、Bi-2223、Bi-2212 があるが、磁石を小型にする観点からは、フープ応力耐性の高い REBCO コイルに強みがある。しかしながら、REBCO コイルでは遮蔽電流の影響により、超伝導シムの能力が大幅に低下し、ラジアル磁場不均一性が消しきれない。その結果、高分解能 NMR 測定に必要な磁場の均一度が出せないことが、400 MHz LTS/REBCO NMR 磁石 1 号機の試験で明らかになった[1]。その後、内層 Z2 シムコイル、鉄シム、超伝導シムコイル、室温シムコイルを組み合わせた磁場補正のベストミックス技術を用いた 2 号機において、1 号機では消せなかったラジアル磁場不均一成分を消すことに成功したことを春の学会で報告した[2]。本報では、その後、NMR 信号を観測しながらさらに磁場均一度を向上させ、標準試料やタンパク質試料を用いた高分解能 NMR 測定を行った最終結果を報告する。

## 2. 室温シムコイルによる最終調整と NMR 測定の方法

Fig 1 は内層 Z2 シムコイルによる磁場調整から室温シムコイルによる磁場調整までの流れを示す。今回行った室温シムコイルによる磁場調整は磁場調整の最終手段である。目的は他のシム調整では精度問題で不可能である NMR 測定要求レベルまで磁場の不均一成分を下げることである。不均一成分の種類には低次から高次まで 34 チャンネルが含まれている。

NMR 装置においては磁場一周波数ロックの信号レベルと磁場均一度が対応する。室温シムコイルのシム電流を調整し、信号レベルが最大になるように調整を行った。事前に磁場マッピングシステムを用い、REBCO 特有の高次成分と鉄シムの副作用で発生する高次成分を定量化し、これらの値を参照しながら室温シムコイルの調整を行った。

磁場の均一度を向上させた後、NMR としての分解能試験・感度試験を行った。分解能測定は 1% クロロホルムの NMR スペクトルの半値幅から、感度試験は 0.1% エチルベンゼンの NMR スペクトル強度/ノイズ比から算出した。さらに、2 mM リゾチームのタンパク質試料を用い、構造解析に必須の 2 次元 NOESY 測定を行った。

## 3. 高分解能 NMR 測定結果

Table 1 に、今回の 400 MHz LTS/REBCO NMR 2 号機における分解能試験及び感度試験の結果を、他の NMR と比較しながら表記した。分解能は値が小さいほど、感度は値が高いほど望ましい。400 MHz LTS/REBCO NMR 1 号機では分解能が 38 ppb であったが[1]、2 号機では、1/30 の 1.3 ppb にまで向上している。これは 500 MHz LTS NMR 及び 500 MHz LTS/Bi2223 NMR[3]と同レベルの十分高い分解能である。

感度試験の結果は 318 であり、1 号機の 11 倍に向上した。感度は磁場の 1.75 乗に比例するので磁場が 500 MHz になった場合、感度は 318 から 470 になると見積もれる。この値は 500 MHz LTS NMR の 78%、500 MHz LTS/Bi2223 NMR の 92%である。

Fig 2 に NOESY 測定の結果を示す。この測定は、溶媒である水の巨大な NMR 信号を消し、微弱なタンパク質の NMR 信号を検知することで試料中の水素核の距離情報を取得し、2 次元スペクトルで表すものである。(a) は 500MHz LTS NMR、

(b) は今回行った 400 MHz LTS/REBCO NMR 2 号機での結果である。後者は磁場が 400 MHz であり感度が多少低いため、点線丸で示すようないくつかの信号が観測できていないが、十分に良質なスペクトルである。

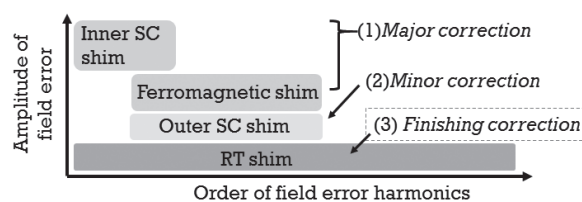


Fig. 1. Flow of the magnetic field correction

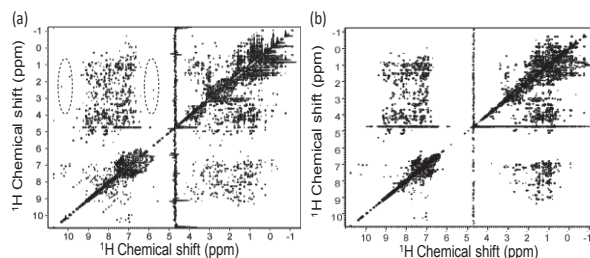


Fig. 2. NOESY spectra for 2 mM Lysozyme in 90% H<sub>2</sub>O and 10% D<sub>2</sub>O obtained by (a) a conventional 500MHz LTS NMR magnet and (b) the 2nd 400MHz LTS/REBCO NMR magnet. Acquisition time interval was 3h.

Table 1. Resolution and sensitivity for the NMR spectrometers

	500MHz LTS NMR	500MHz LTS/Bi-2223 NMR [3]	400MHz LTS/REBCO NMR-#1 [1]	400MHz LTS/REBCO NMR-#2
NMR resolution	<2 ppb	1.4 ppb	38 ppb	1.3 ppb
NMR sensitivity	600	512	28	318

## 4. まとめ

400 MHz LTS/REBCO NMR 2 号機において、室温シムを用いた磁場均一度の最終調整を行い、鉄シム由来の高次不均一成分と、超伝導シムで調整できない高次不均一成分を消した。これにより、LTS NMR に近いレベルにまで感度と分解能を向上させ、タンパク質試料の最も難易度の高い NOESY 測定に成功した。これにより、顕著な遮蔽電流の影響下においても、高分解能 NMR 測定が可能であることが実証された。Bi-2223 を使用した場合でも、遮蔽電流の影響はあるため、今回の技術が活用できる。

本研究は(独)科学技術振興機構(JST)の研究成果展開事業・戦略的イノベーション創出推進プログラム(S-イノベ)によって行われた。また一部は、理化学研究所の大学院生リサーチ・アソシエイト制度の下で行われた。

## 参考文献

1. Yanagisawa et. al., Accepted for *J. Mag. Res.*
2. 井口他, 2014 年度春季低温工学・超電導学会, 1A-p02
3. Yanagisawa et. al., *J. Mag. Res.* **203**, 274-282, 2010.



# 1 GHz を上回る超高磁場・コンパクト NMR 磁石の実現に向けて(3) ～高強度 Bi-2223 コイルのフープ応力試験～

Toward a super-high field compact NMR magnet operated beyond 1 GHz (3)  
- Hoop stress test for a high-strength Bi-2223 coil -

許 一(千葉大);井口 聖威也(上智大);柳澤 吉紀(理研);濱田 衛(JASTEC);高尾 智明(上智大);  
中込 秀樹(千葉大);松本 真治, 西島 元(NIMS);末松 浩人(JEOL RESONANCE);  
金 新哲, 高橋 雅人, 前田 秀明(理研)

XU Yi (Chiba Univ.); IGUCHI Seiya (Sophia Univ.); YANAGISAWA Yoshinori (RIKEN);HAMADA Mamoru (JASTEC); TAKAO Tomoaki (Sophia Univ.); NAKAGOME Hideki (Chiba Univ.);  
MATSUMOTO Shinji, NISHIJIMA Gen(NIMS); SUEMATSU Hiroto (JEOL RESONANCE); JIN Xinzhe, TAKAHASHI Masato, MAEDA Hideaki (RIKEN)  
E-mail: yi.xu@riken.jp

## 1. はじめに

1 GHz 以上の超高磁場の NMR 磁石を実現する候補には REBCO、Bi-2223、Bi-2212 線材がある。Bi-2223 コイルは REBCO コイルと比べ、遮蔽電流磁場が小さい利点があるが、フープ応力への耐性が低く、電流密度を高くできないため、磁石のサイズが巨大になってしまう。ところが近年、高強度の補強材(Ni-Cr)とプレ圧縮技術を用いた高強度 Bi-2223 線材が住友電工によって開発され、 $I_c$  が低下する長手方向の引張応力がこれまでの 250 MPa 程度から 400-500 MPa 程度へと大きく向上した[1]。Bi-2223 コイルは REBCO コイルと比べて遮蔽電流が小さいため、この線材がコイルにおいて高いフープ応力に耐えることができれば、超高磁場・コンパクト NMR 磁石を実現する有力な候補となる。本報ではこの高強度 Bi-2223 線材で巻線したレイヤー巻コイルを、17 T の磁場中で励磁し、許容されるフープ応力を調べた。

## 2. 実験方法

30  $\mu\text{m}$  厚の Ni-Cr 補強材を半田で両面に貼ることで補強した Bi-2223 線材(住友電気工業 Type HTi-XX)を用いてレイヤー巻コイルを製作した(Fig.1(a)参照)。この線材は補強材を引っ張りながら貼り付けることで線材にプレ圧縮を施しているため、圧縮ひずみを内包している[1]。線材臨界電流が 5% 低下する長手方向引張応力( $\sigma_c$ )は 430 MPa である。コイルパラメータを Table 1 に示す。コイル巻線後、0.5 mm 径の真鍮線をバインドとして 4 レイヤー巻き(Fig.1(b)参照)、その後パラフィンワックスで含浸した。バインド線の表面にはひずみゲージを設置した。NIMS の 17 T 超伝導マグネットの中心にこのコイルを設置し、4.2 K において外部磁場を 17.2 T まで励磁した後、Bi-2223 コイルを励磁した。

## 3. 実験結果

17 T 外部磁場中における Bi-2223 コイルの V-I 特性を Fig.2 に白抜き丸印(○)で示す。コイル電圧は、電流ホールドしながら測定したものである。電極の抵抗 3  $\mu\Omega$  分の電圧が含まれていたが、この図ではこれを除去してプロットしている。また、コイル電流に対応するフープ応力(BJR で計算)を実線で示す。コイルの常伝導電圧は 490 A 付近から立ち上がりはじめ、535.4 A で 0.1  $\mu\text{V}/\text{cm}$  に対応する電圧に達した。対応するフープ応力は、それぞれ 408 MPa、441 MPa である。また、電流の上昇に従って、引張ひずみが増加するのが観測された。

また、外部磁場なしの状態での励磁を行ったところ、低電流領域において顕著な遮蔽電流磁場が観測された。この点についてはさらなる検討が必要である。

## 4. 考察

常伝導電圧が観測された時点のフープ応力は 408 MPa であり、短尺線材の  $\sigma_c$ (430 MPa)より 22 MPa 低い。これは曲げひずみによる影響であると推察される。従来の銅合金、ステンレスで補強した線材では、今回と同程度の径のコイルで、それぞれ 200 MPa、220 MPa のフープ応力で劣化が生じる[2]。

これらと比べ、今回の線材は約 200 MPa も高いフープ応力に耐えることができる。この結果は、高磁場中でコイルを従来より高い電流密度で運転でき、サイズを大幅に小型化できることを意味する。この線材を用いた小型 1.2 GHz NMR 磁石について次報で述べる。

Table 1. Physical parameters of Bi-2223 conductor and coil

Parameters	Value
Bare conductor width (mm)	4.5
Bare conductor thickness (mm)	0.29
Conductor critical current at 77 K (A)	192
Length of conductor (m)	50.9
Coil I.D.; O.D.; C.H. (mm)	119.1;122.9;100.62
Number of layers	6
Number of turns per layer	21
Number of turns	126
Coil constant (mT/A)	1.0
Coil critical current in 17.2 T obtained from a coil load line	625 A

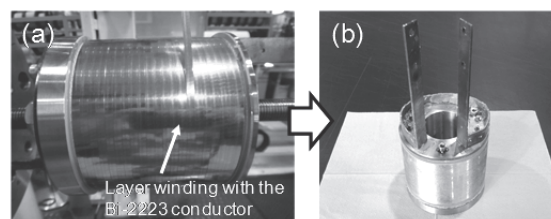


Fig.1 Layer winding with the Bi-2223 conductor. (b)Coil surface after winding the binding wire.

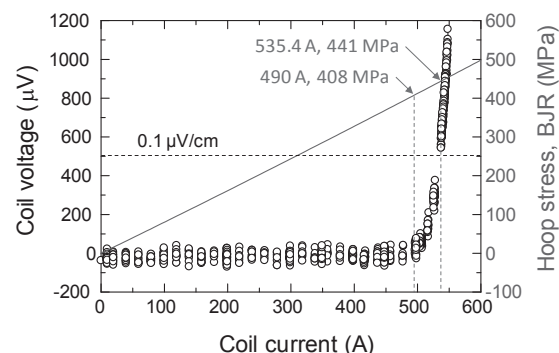


Fig.2 Coil voltage (open circles) and hoop stress (solid line) as functions of coil current.

## 5. まとめ

Ni-Cr 補強材とプレ圧縮技術を用いた高強度 Bi-2223 線材のコイルは、高い耐フープ応力特性を示すことが実証された。この線材は 1 GHz を超える超高磁場・コンパクト NMR 磁石を実現するための有力な候補である。

本研究は(独)科学技術振興機構(JST)の研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム」(S-イノバ)の支援によって行われた。

## 参考文献

1. Nakashima et. al., ASC2014 preprint.
2. Miyoshi et. al., Super. Sci. Tech., 27, 025003, 2014

# 1 GHzを上回るコンパクト・超高磁場 NMR 磁石の実現に向けて (4)

## ～小型 1.2 GHz NMR 磁石の基本設計と磁場補正技術～

### Toward a super-high field NMR magnet operated beyond 1 GHz (4)

#### - Design of a 1.2 GHz NMR magnet and field correction technology -

井口 聖威也, 梶田 健太郎(上智大); 朴 任中(千葉大); 柳澤 吉紀(理研); 濱田 衛(JASTEC); 高尾 智明(上智大); 中込 秀樹(千葉大); 松本 真治(NIMS); 末松 浩人(JEOL RESONANCE); 金 新哲, 高橋 雅人, 前田 秀明(理研)

IGUCHI Seiya, KAJITA Kentaro (Sophia Univ.); PIAO Renzhong (Chiba Univ.); YANAGISAWA Yoshinori (RIKEN);

HAMADA Mamoru (JASTEC); TAKAO Tomoaki (Sophia Univ.); NAKAGOME Hideki (Chiba Univ.); MATSUMOTO Shinji (NIMS); SUEMATSU Hiroto (JEOL RESONANCE); JIN Xinzhe, TAKAHASHI Masato, MAEDA Hideaki (RIKEN)

E-mail: seiya.iguchi@riken.jp

#### 1. はじめに

これまでの報告を踏まえ、Ni-Cr 補強材・プレ圧縮により高強度化した Bi-2223 線材を用いた小型 1.2 GHz LTS/Bi-2223 NMR 磁石の基本設計と、高分解能 NMR 測定を実現するための磁場補正技術の検討を行った。

#### 2. 主コイルの基本設計

設計した主コイルの断面図を Fig.1 に示す。Bi-2223 コイルは内層側の 5 つであり、総レイヤー数は 320、総線材長は 38 km である。LTS コイルと Bi-2223 コイルは別電源励磁を想定し、前者は永久電流モード運転 (200 A)、後者は通電モード運転 (265 A) である。中心磁場は 1.2 GHz (28.2 T)、蓄積エネルギーは 11.3 MJ、Bi-2223 コイルの負荷率は 58 % である。Bi-2223 コイルのフープ応力は 370 MPa 以下になるようにした。また、最内層 Bi-2223 コイル内径は通常の 80 mm から 84 mm に広げた。これにより室温ボアを通常の 54 mm から 58 mm に広げ、鉄シムを十分設置できるスペースを確保した。コイルの断面サイズは、従来の 800 MHz LTS NMR 磁石と同程度である。

#### 3. 高分解能 NMR 測定を実現する磁場補正技術

発生する可能性のある磁場不均一性のワーストケースを Table 1 に示す。これらの値は過去に行った LTS/HTS NMR 磁石試験において発生した磁場不均一性の最大値をピックアップし、さらに 2 倍したものである。1.2 GHz LTS/Bi-2223 磁石では Bi-2223 コイルの巻厚が大きい (レイヤー数合計 320) ため、外層の超伝導シムコイルの能力が顕著に低下する可能性がある。別報 [1] で示す通り、レイヤー数と負荷率を考慮し、外層の超伝導シムコイルの補正能力は、設計値の 4~10 % にまで低下すると仮定した。

まず、従来通り超伝導シムコイルのみで主要な磁場補正をする場合の設計を行った。シムコイルが磁石中心から離れると磁場勾配の発生効率が悪くなるため、Fig.2(a) のようにシムコイルを大きくしても、ZX/ZY と C2/S2 のラジアルシムについては、想定される磁場不均一性を補正するだけの能力を持たせることができなかった (Table 1(a) 参照)。また、外層の補正コイルも補正能力が低下する可能性があるが、この場合、外層の超伝導 Z2 シムコイルで補正するのは不可能である。このように主要な磁場成分を超伝導シムコイルで補正する方式は成り立たない。

過去に試験した 400 MHz LTS/REBCO NMR 磁石試験において、鉄シムは空間効率が非常に良いことがわかっている [2]。磁石内層に鉄シムを挿入することで主要な磁場不均一成分を大まかに補正し、外層の超伝導シムコイルで微調整をする方式で設計を行った (Table 1(b) 参照)。超伝導シムコイルは低次の Z, Z2, X, Y シムコイルのみとした。この場合、Fig.2(b) に示すように超伝導シムコイルのサイズが小さくなるため、磁石のサイズも小型になる。

#### 4. 鉄シムの技術的な課題

鉄シムによる磁場補正は何度か鉄片のサイズ・位置を微調整する必要がある。すなわち磁石を励磁した状態で、鉄シムを抜き差しするため、磁場勾配の大きい磁石下端で大きな電磁力を受ける。今回の設計では、この部分において鉄シム全体が約 75 kg の力を受ける。これは Table 1 に示すワーストケースであり、実際にはこの数分の一の程度の力と考えられるが、抜き差しの時に、鉄片を室温ボアに残さない措置が必須である。

また、鉄シムは高次の磁場不均一成分を副次的に発生させるため、これらの成分を補正するために室温シムコイルに十分な能力を持たせる必要がある。

#### 5. まとめ

高強度 Bi-2223 線材を用いた小型 1.2 GHz LTS/Bi-2223 磁石の基本設計を行った。鉄シムと超伝導シムコイルを組み合わせた補正技術を用いれば、高分解能 NMR 測定に必要な均一磁場を得られる。鉄シム挿入時には大きな電磁力がかかるため、その設置方法の検討が必要である。また、システム全体としては、遮蔽電流の緩和による磁場ドリフト、クライオの熱設計、コイル保護、通電モード運転のバックアップシステムに関して検討が必要である。

本研究は(独)科学技術振興機構(JST)の研究開発事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム」(S-イノベ)の支援によって行われた。

Table 1 Worst case field error harmonics and field correction ability in a 1.2 GHz LTS/Bi-2223 NMR magnet.

Field harmonics (Hz/cm <sup>3</sup> )	Worst case errors in a 1.2 GHz LTS/Bi-2223 NMR	(a) SC shims	(b) Ferro. shims and SC shims	
			Ferro.shims	SC shims
Z	50,000	±53,113	-	±53,113
Z2	3,000	±3,634	+96,385	±567
X / Y	20,000	±21,685	±19,373	±4,977
ZX / ZY	10,000	±2,154	±12,457	-
C2 / S2	6,000	±780	±6,388	-

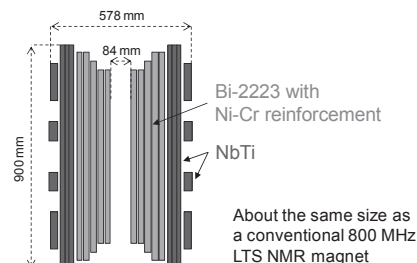


Fig.1 Cross section of a 1.2 GHz LTS/Bi-2223 NMR magnet.

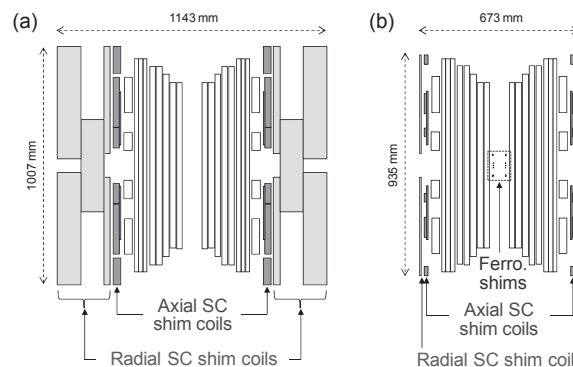


Fig.2 Cross section of 1.2 GHz LTS/Bi-2223 NMR magnets with (a) SC shim coils, and with (b) SC shim coils and ferromagnetic shims.

#### 参考文献

- 梶田他, 2014 年度秋季低温工学・超電導学会, 2P-p21
- 井口他, 2014 年度春季低温工学・超電導学会, 1A-p02

# 高磁場 MRI 用高温超電導磁石開発の進捗('14 年秋) -プロジェクト進捗-

Progress in the development of an HTS magnet for ultra-high field MRI (2014 autumn)

- Project status -

戸坂 泰造, 宮崎 寛史, 岩井 貞憲, 大谷 安見, 高橋 政彦, 田崎 賢司, 野村 俊自, 来栖 努(東芝);  
石山 敦士(早大); 植田 浩史(早大/阪大); 野口 聡(早大/北大); 浦山 慎一, 福山 秀直(京大)  
TOSAKA Taizo, MIYAZAKI Hiroshi, IWAI Sadanori, OTANI Yasumi, TAKAHASHI Masahiko, TASAKI Kenji,  
NOMURA Shunji, KURUSU Tsutomu (TOSHIBA); ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.);  
UEDA Hiroshi (Waseda Univ./Osaka Univ.); NOGUCHI So (Waseda Univ./Hokkaido Univ.);  
URAYAMA Shinichi, FUKUYAMA Hidenao (Kyoto Univ.)  
E-mail: taizo.tosaka@toshiba.co.jp

## 1. はじめに

高強度、高臨界電流密度の REBCO 線材を用いることで、一般病院にも設置可能となるコンパクトな 10 T 級 (9.4T) MRI 用磁石の実現を目標として、経済産業省の高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクト「高磁場コイルシステムの研究開発」を進めている。本プロジェクトでは、モデル磁石として、2015 年度に小型高精度磁場磁石 (室温ボア径  $\phi$  100 mm 程度、磁場強度 10 T 級) を、プロジェクト最終年度となる 2017 年度には、中型高精度磁場磁石 (室温ボア径  $\phi$  300 mm ~  $\phi$  600 mm 程度、磁場強度 7 T 級) を試作し撮像評価を行うことで、10 T 級 MRI に必要なコイルシステム技術を確認することを目指している。今年度は、これらモデル磁石の試作、撮像評価に必要な設計・製造基盤技術の確立を目指した研究開発を行う位置づけとなっている。

## 2. 確立を目指す設計・製造基盤技術

広い空間に高均一で時間的に安定な磁場 (高精度磁場) を発生することは、MRI 用磁石に求められる最も特徴的な性能である。しかしながら、磁石に REBCO 線材を適用した場合、テープ線材の内部に生じる遮蔽電流によって非常に大きな不整磁場 (遮蔽電流磁場) が発生する。そのため、この遮蔽電流磁場を如何にして設計・製造可能とするか、が設計・製造基盤技術の研究開発の柱となる。また、大型の高温超電導磁石に共通の問題として、特性劣化させないコイル化技術やコイル保護も重要である。以下に、研究開発をおこなう主な設計・製造基盤技術とその取り組み方針について述べる。これらの研究開発は、内径  $\phi$  50 mm 程度のパンケーキコイルを多数積層した極小口径コイル、 $\phi$  100 mm 程度のパンケーキコイルをマルチコイル配置した小コイル、また Fig. 1 に示す  $\phi$  400 mm 程度のマルチコイルを用いた 1/2 サイズモデルコイルなど、複数のモデルコイルの設計および試作を通じて進める。

### ① 遮蔽電流磁場の予測技術

これまでに開発した 3 次元電磁場解析プログラムを適用することで、様々な状況において、ある程度定量的に遮蔽電流磁場を予測できることがわかってきた。遮蔽電流磁場を高精度で予測するためには、如何に現実の条件を解析に入れられるかがひとつのポイントと考えている。例えば、超電導特性 (臨界電流、 $n$  値) の磁場、磁場角度、温度依存性、さらにはそれらのばらつきなども含めて精査する。

### ② 遮蔽電流磁場の抑制技術

遮蔽電流磁場を抑制する方法としては、遮蔽電流磁場の発生源である線材レベルで対処する方法と、線材にかかる磁場の角度を低減したり、遮蔽電流磁場を打ち消すようなコイル形状、配置にしたりするなど、コイル設計レベルで対処する方法が考えられる。前者については、細線化した線材の適用化開発、後者については、コイル配置最適化設計で検討をすすめる。

### ③ 遮蔽電流磁場以外の不整磁場抑制技術

遮蔽電流以外にも、コイルの寸法精度や、冷却・電磁力による変形、渡り線等が原因となる不整磁場があり、モデルコイルの試作、評価を通じて検証する。

### ④ 不整磁場補正技術

遮蔽電流による不整磁場は、これまでの MRI における不整磁場に対して桁大きいレベルであるため、超電導シムコイルが不可欠であると考えている。10 T 級の磁場中で超電導シムコイルを使う場合、REBCO 線材を適用せざるを得ないため、その製造技術を進める。

### ⑤ コイル安定化・保護技術

現時点で、高磁場 MRI へ適用できるコイル安定化・保護技術は、熱暴走をさせない運転範囲で運転する (予防保全) 方法のみと考えられるが、よりロバスタな方法として、無絶縁コイル技術の適用検討も進める。

### ⑥ 高精度磁場計測、室温補正技術

設計・製造基盤技術が確立できたことを確認するためには、高精度な磁場評価技術が不可欠であるとともに、磁場評価結果をフィードバックしてシミングを行う必要があり、そのシステムの開発を行う。

## 3. まとめ

高磁場 MRI 用磁石開発プロジェクトの今年度の開発内容について述べた。モデルコイルの開発を通じて、ヒト全身用高磁場 MRI 磁石に必要な設計・製造基盤技術の確立を目指していく。

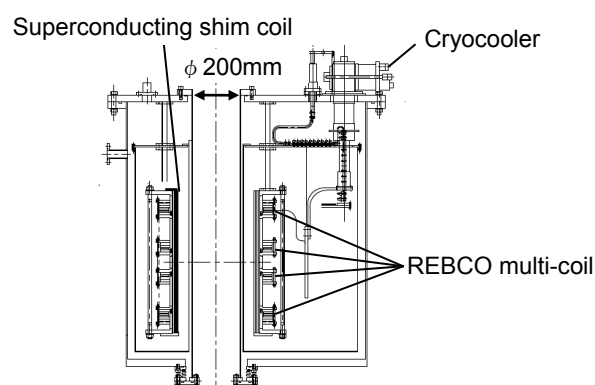


Fig. 1 1/2-size model coil design

## 謝辞

本研究は、経済産業省の産業技術研究開発委託費「高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクト〈高磁場コイルシステムの研究開発〉」を通じて実施された。



# 高磁場 MRI 用高温超電導磁石開発の進捗(14 年秋)

## —極小口径 10 T コイル試験—

Progress in the development of an HTS magnet for ultra-high field MRI (2014 autumn)

—Test results of a small-bore 10 T superconducting coil—

宮崎 寛史, 岩井 貞憲, 大谷 安見, 高橋 政彦, 戸坂 泰造, 田崎 賢司, 野村 俊自, 来栖 努(東芝);  
石山 敦士(早大);植田 浩史(早大/阪大);野口 聡(早大/北大);浦山 慎一, 福山 秀直(京大)

MIYAZAKI Hiroshi, IWAI Sadanori, OTANI Yasumi, TAKAHASHI Masahiko, TOSAKA Taizo, TASAKI Kenji, NOMURA Shunji,

KURUSU Tsutomu (TOSHIBA); ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.); UEDA Hiroshi (Waseda Univ./Osaka Univ.);

NOGUCHI So (Waseda Univ./Hokkaido Univ.); URAYAMA Shinichi, FUKUYAMA Hidenao (Kyoto Univ.)

E-mail: hirosi17.miyazaki@toshiba.co.jp

### 1. はじめに

MRI 用磁石は, 空間的に極めて均一かつ極めて小さい時間変動の磁場が必要となる。REBCO 線材は, テープ形状のため, 外部磁場を遮蔽するように遮蔽電流が流れてしまい, MRI 撮像に必要な磁場空間を作ることが困難となる。そこで, 遮蔽電流磁場の影響を調査することを目的として, 伝導冷却で 10 T 級の磁場が発生可能な極小口径コイルを開発し, 遮蔽電流磁場の影響を実験的に評価したので報告する。

### 2. コイル試作

極小口径 10 T 級コイルの外観を Fig.1 に示し, コイル諸元を Table1 に示す。内径  $\phi$  50 mm, 外径  $\phi$  129 mm, 240 ターンのシングルパンケーキコイルを 22 枚積層し, コイル内周側および外周側で電気的に接続した。各シングルパンケーキコイルは液体窒素中で通電試験を実施し, 劣化がないことを確認している。遮蔽電流磁場は臨界電流値の影響を受けるため, 今回は, コイル臨界電流値が低いほうから順番に軸方向に並べて積層した。また, 各シングルパンケーキコイルには, 厚さ 0.25 mm の高純度アルミ板をエポキシ樹脂で貼り付け, 高純度アルミ板の端部を GM 冷凍機の 2 段冷却ステージに接続してコイルを冷却した。



Fig.1 Photograph of small-bore 10 T superconducting coil

Table1 Specification of small-bore 10 T superconducting coil

Tape width (mm)	4 mm
Tape thickness	0.1 mm
Inner diameter	50 mm
Outer diameter (average)	129 mm
Height	104 mm
Number of pancakes	22
Turns / pancake	240
Tape length / pancake	67 m

### 3. 通電試験

2 段冷却ステージに取り付けたヒータの出力を制御し, コイル温度を 10 K に固定した状態で通電試験を実施した。通電試験の結果を Fig. 2 に示す。最大 166.2 A 通電時にコイル中心磁場は 7.66 T に達した。遮蔽電流を考慮しない場合の中心磁場の計算値は, 8.07 T であり, 遮蔽電流の影響で中心磁場が減少していることを確認した。また, 0 A から 129 A まで, 30 min 励磁, 30 min ホールド, 30 min 消磁のパターンで通電し, 遮蔽電流磁場と通電電流の関係を調べた。その結果を Fig. 3 に示す。本試験においても最大 0.4 T 近くの大きな遮蔽電流磁場の発生を確認した。

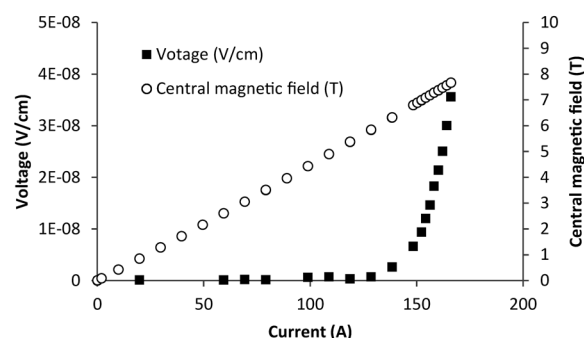


Fig.2 Current dependence of voltage and central magnetic field at 10 K

### 4. まとめ

内径  $\phi$  50 mm, 外径  $\phi$  129 mm のシングルパンケーキコイルを 22 枚積層した極小口径 10 T 級コイルを試作し, 伝導冷却にて通電試験を実施した。コイル温度 10 K にて, 最大 166.2 A 通電し, 中心磁場 7.66 T に達した。遮蔽電流を考慮しない場合の計算値 8.07 T に対して, 約 0.4 T が遮蔽電流の影響で減少していることを確認した。引き続き, コイル温度や電流パターン等を変化させて, 遮蔽電流磁場の評価を行う。また, 遮蔽電流磁場を定量的に予測する技術および遮蔽電流磁場を抑制する技術の開発も併せて行っていく。

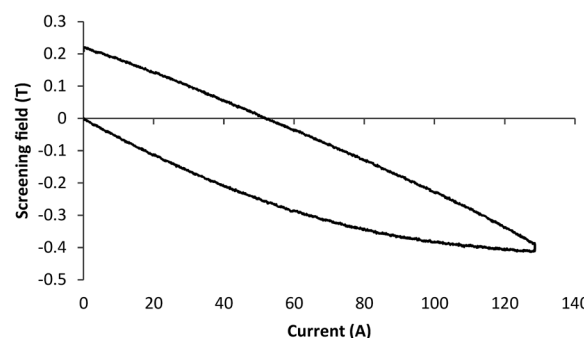


Fig.3 Current dependence of screening field at 10 K

<謝辞> 本研究は, 経済産業省の産業技術研究開発委託費「高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクト<高磁場コイルシステムの研究開発>」を通じて実施された。

# 高磁場 MRI 用高温超電導磁石開発の進捗(14 年秋)

## — 極小口径 10T コイル遮蔽電流解析 —

Progress in the development of an HTS magnet for ultra-high field MRI (2014 autumn)  
 - Numerical simulation on screening current in a small-bore 10 T superconducting coil -

植田 浩史(早大/阪大); 石山 敦士(早大); 野口 聡(早大/北大);

戸坂 泰造, 宮崎 寛史, 野村 俊自, 来栖 努(東芝); 浦山 慎一, 福山 秀直(京大)

UEDA Hiroshi (Waseda Univ./Osaka Univ.); ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.); NOGUCHI So (Waseda Univ./Hokkaido Univ.);

TOSAKA Taizo, MIYAZAKI Hiroshi, NOMURA Shunji, KURUSU Tsutomu (Toshiba);

URAYAMA Shinichi, FUKUYAMA Hidenao (Kyoto Univ.)

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

### 1. はじめに

我々は、経済産業省プロジェクト「高温超電導定磁場コイルシステムの研究開発」で、10 T 級(9.4 T)のヒト全身用 MRI の実現を目指している[1]。REBCO 線材はテープ形状をしているため、高温超電導コイルでは、遮蔽電流が顕著に誘導され、それによる不整磁場が MRI 磁石に必要な磁場均一度や時間安定性を損なうことが問題となる。そこで、遮蔽電流による不整磁場(以下、遮蔽電流磁場)の影響を定量的に予測する技術の開発が必要となる。今回は、伝導冷却で 10 T 級の磁場が発生可能な内径 50 mm の極小口径コイルの遮蔽電流磁場の測定試験結果に対して、三次元電磁場数値解析によって計算した結果について報告する。

### 2. 極小口径 10T コイル

解析対象のコイルは、幅 4 mm、厚さ 0.1 mm(超電導層 1.0  $\mu\text{m}$ )の REBCO 線材を用いた、内径 50 mm、外径 129 mm、巻数 240 のシングルパンケーキを 22 段重ねたものである[2]。各コイル  $I_c$  はそれぞれ単独で 77 K で測定した結果、最低で 35.15 A、最高で 54.34 A であり、下側から  $I_c$  が高いコイルを順番に積層した。したがって、コイルは上下非対称な特性を持っている。このコイルは伝導冷却下 10 K で、166.2 A 通電時にコイル中心磁場は 7.66 T 発生する。実験では、コイル軸方向および径方向の遮蔽電流磁場を測定するため、Fig. 1 に示す位置にホール素子を配置した。

### 3. 遮蔽電流磁場解析

REBCO 線材は超電導層の断面アスペクト比が非常に大きいことから、線材厚み方向で電磁場が一樣であると仮定する近似を用いて、積分方程式、高速多重極法や超電導特性を考慮可能な非線形有限要素法を組み合わせた三次元電磁

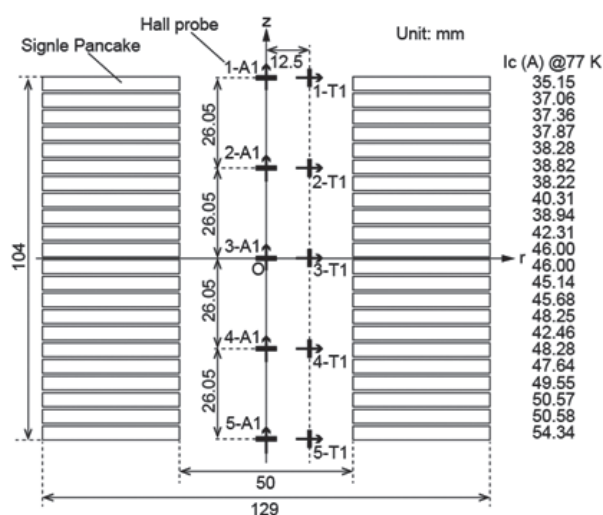


Fig. 1 Schematic drawing of small-bore 10 T coil and location of Hall probes.

場数値解析を用いて計算を行った[3]。超電導特性( $I$ - $V$  特性)は  $n$  値モデルを採用した。 $I_c$  の磁場強度・角度依存性は、各コイルの 77 K におけるコイル  $I_c$  の実測値を基に文献[4]のデータを参考に定式化したものを用いた。 $n$  値は 30 一定とした。

通電パターンは実験[2]と同様に、129 A まで 30 min. で励磁し、30 min. ホールド、その後 0 A まで 30 min. で消磁した。遮蔽電流磁場の解析結果を Fig. 2 に示す。コイル中心の 3-A1 では、遮蔽電流磁場は実験で -0.4 T に対して、解析で -0.32 T となった。対称な位置にある 2-A1 および 4-A1 を見ると、 $I_c$  の非対称性に起因する考えられる遮蔽電流磁場の非対称性が再現されている。一方、対称な位置にある 1-A1 および 5-A1 が実験ではほぼ同じ遮蔽電流磁場になっているが、解析では差がある。この差は  $I_c$  の非対称性に起因するものだが、実験では観測されなかった。解析では線材の  $I_c$  の磁場強度・角度依存性を同じデータを基にフィッティングしたが、実際には線材毎に個性があるためと考えられる。

### 4. まとめ

伝導冷却 10 T 級極小口径コイルを対象にして、遮蔽電流磁場を電磁場数値解析によって計算し、試験結果と比較検討し、再現できることを確認した。

### 謝辞

本研究は、経済産業省の産業技術研究開発委託費「高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクト<高磁場コイルシステムの研究開発>」を通じて実施された。

### 参考文献

1. T. Tosaka, et al.: *Abstracts of CSJ Conference*, Vol.90 (2014) 3B-p05.
2. H. Miyazaki, et al.: *Abstracts of CSJ Conference*, Vol.90 (2014) 3B-p06.
3. H. Ueda, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol.23 (2013) 4100805.
4. V. Selvamanickam, et al., *Supercond. Sci. Technol.* 25 (2012) 125013.

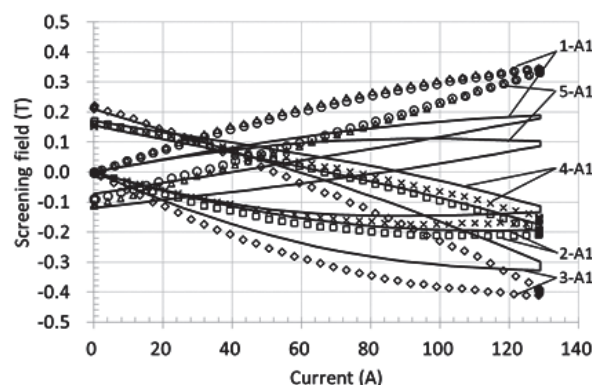


Fig. 2 Experimental and numerical results of axial direction of magnetic field generated by screening current. Plots and solid lines are the experimental and numerical results, respectively.

# 高磁場 MRI 用高温超電導磁石開発の進捗(14 年秋)

## —REBCO マルチコイルにおける遮蔽電流による不整磁場の評価試験と解析—

### Progress in the development of an HTS magnet for ultra-high field MRI (2014 autumn)

#### —Evaluation of Irregular Magnetic Field Distribution Generated by Screening Current in Multiple REBCO Coils —

持田 歩, 松見 絢子, 今市 洋平, 齋藤 隼, 有谷 友汰, 王 韜, 石山 敦士(早大); 植田 浩史(早大/阪大); 宮崎 寛史, 戸坂 泰造, 野村 俊自, 来栖 努(東芝)

MOCHIDA Ayumu, MATSUMI Ayako, IMAICHI Youhei, SAITO Jun, ARIYA Yuta, WANG Tao, ISHIYAMA Atsushi (WASEDA Univ.); UEDA Hiroshi (Waseda Univ/Osaka Univ.); MIYAZAKI Hiroshi, TOSAKA Taizo, NOMURA Shunji, KURUSU Tsutomu (Toshiba)  
E-mail: ayumu531@asagi.waseda.jp

#### 1. 背景

我々は、経済産業省プロジェクト「高温超電導磁場コイルシステムの研究開発」で、10 T 級(9.4 T)のヒト全身用 MRI の実現を目指している[1]。REBCO 線材はテープ形状をしているので、テープ面への垂直磁場によって遮蔽電流が顕著に誘導されてしまうため、発生磁場の空間的均一性や時間的安定性に影響を及ぼしてしまう。更に、NMR/MRI では複数の空芯コイルを積み重ねて構成するマルチコイル構造が用いられるため、発生磁場が相互に影響し合い、遮蔽電流がより複雑に誘導されてしまう。そのため、様々な励磁条件(励磁順)での遮蔽電流の振舞いを明らかにする必要がある。

今回は、様々な励磁条件におけるマルチコイルの遮蔽電流による不整磁場(以下、遮蔽磁場)の測定および三次元電磁場解析[2]による遮蔽磁場の解析を行ったので報告する。

#### 2. 実験方法

作製したモデルコイルには SuperPower 社製の線材を用いた。線材幅は 4 mm、厚みは 0.1 mm である。また、マルチモデルコイルは内径 100 mm、外径 125.8-127.3 mm、巻数 110-111 のシングルバンケーキコイル(SP)およびダブルバンケーキコイル(DP)を Fig. 1 のように重ねて構成し、マルチコイル中心とコイル内径の内側付近の 5 箇所(1)~(5)を磁場計測点としてホール素子を設置した。

今回、超電導状態の REBCO コイルの発生磁場を 3 種類の励磁条件下で測定した。Case 1 では、スプリットコイル全てを 30 A まで同時励磁しホールドした。Case 2 では、スプリットコイル B,C を先に励磁し、1 時間ホールドした後、スプリットコイル A を励磁した。Case 3 では、スプリットコイル A を先に励磁し、1 時間ホールドした後、スプリットコイル B,C を励磁した。なお、全実験においてスイープレートは 30 A/min.とした。

#### 3. 結果と考察

例として Case 2 の実験と解析の結果を Fig. 2 に示す。Fig. 2 より定量的な誤差は見られるものの、マルチコイルにおける遮蔽磁場の振舞いを解析で再現できている。また、Case 2 における 2 回目の励磁時のコイル内の電流密度分布を Fig. 3 に示す。これにより、電流密度分布を可視化することで、遮蔽磁場の振舞いの差異を電流密度分布の偏りにより説明できる。

#### 4. まとめ

REBCO 超電導線材を用いたマルチモデルコイルを構成し、様々な励磁条件(励磁順)での遮蔽磁場の計測を行った。更に開発した三次元電磁場解析プログラムにより REBCO マルチモデルコイルの遮蔽磁場および遮蔽電流分布の計算を行い、遮蔽電流の影響の再現、線材内の電流分布の可視化をした。これにより、各励磁条件による遮蔽磁場の差異を線材内の電流分布から評価・考察した。

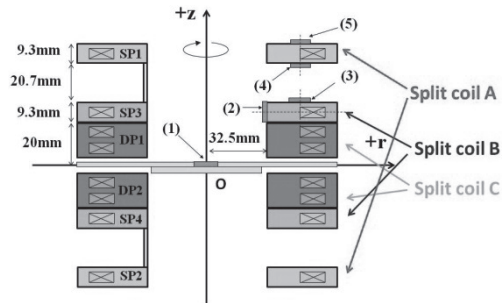


Fig. 1 Schematic layout of the multiple-coil model and measurement points (1)-(5).

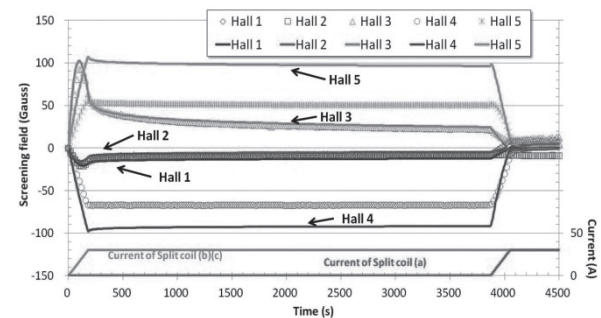


Fig. 2 Experimental and numerical magnetic field generated by screening currents as a function of time in Case 2.

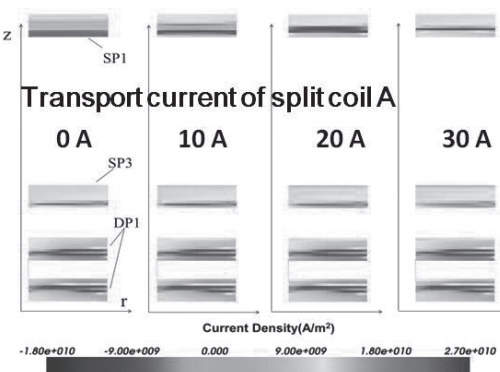


Fig. 3 Numerical results for the current distributions at the second excitation in Case 2, when the transport currents are 0 A, 10 A, 20 A, and 30 A.

#### 謝辞

本研究は、経済産業省の産業技術研究開発委託費「高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクト<高磁場コイルシステムの研究開発>」を通じて実施された。

#### 参考文献

1. T. Tosaka, et al.: *Abstracts of CSJ Conference*, Vol.90 (2014) 3B-p05.
2. H. Ueda, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol.23 (2013) 4100805