

長尺作製に向けた $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 超伝導線材の作製技術開発 ～REGREB 法による線材作製高速化の検討～

Development of fabrication technology for $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ superconducting coated conductor with long length

～Investigation of high speed fabrication by REGREB method～

松坂 陣, 後藤 大志, 土屋 雄司, 一野 祐亮(名大); 淡路 智(東北大); 松本 要(九工大); 吉田 隆(名大)

Matsuzaka Jin, GOTO Daishi, TSUCHIYA Yuji, ICHINO Yusuke, YOSHIDA Yutaka (Nagoya University);

AWAJI Satoshi (Tohoku University); MATSUMOTO Kaname (Kyushu Institute of Technology)

E-mail: matsuzaka.jin@j.mbox.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

$\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (REBCO) 高温超伝導線材は磁場中臨界電流密度 J_c の特性が優れる材料として様々な超伝導機器へ応用が期待されている。代表的な作製法であるパルスレーザー蒸着(PLD)法は、REBCO 焼結体ターゲットに高エネルギー紫外レーザーを照射し、ターゲットのアブレーションにより蒸着する方法である。また、PLD 法を用いた長尺線材作製には Reel to Reel (RTR) システムで線材を移動させながら成膜を行う。そこで、我々の研究グループでは、PLD 法により数十 m 級 REBCO 長尺線材の高 J_c 化及び線材作製速度の高速化を目指している。

そこで本発表では、レーザー光源の変更やヒーターサイズの変更を行うなど Rtr-PLD 装置を改良し、様々な条件下で数 cm 級の短尺線材を作製した。また、高 J_c 化を目的にブルームマスクを導入して短尺線材を作製した。さらに線材作製速度の高速化には新たな手法である REBCO Growth using REBCO Buffer-layer (REGREB) 法を用いて短尺線材を作製した。なお、REGREB 法とは基板上に良好な結晶性を示す REBCO の薄い buffer 層を事前に成膜し、その buffer 層上に REBCO の upper 層を成膜する手法である。

2. 実験結果及び考察

本研究で $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (SmBCO) 線材はすべて IBAD-MgO 基板上に Rtr-PLD 装置を用いて作製した。

図 1 に本研究で作製した短尺線材の線材作製速度に対する $J_c(\text{A/cm-w}) \times L(\text{cm})$ を示す。図 1 に示すようにレーザー光源の変更、ヒーターサイズの変更やマスクの導入を行うなど様々な Rtr-PLD 装置の改良、そして REGREB 法の導入を行うことでそれぞれにおいて線材の性能が向上し、同性能に対する線材作製速度が高速化していることが確認できる。

図 2 に REGREB 法の有無によるレーザーのエネルギー密度と発振周波数に対する a 軸配向粒混在率を示す。図より REGREB 法を用いた際にはレーザーのエネルギー密度、発振周波数の増大に対して a 軸配向粒の増大が抑制されていることが分かる。したがって、SmBCO 層が c 軸配向するエネルギー密度及び発振周波数の上限が、REGREB 法を用いることで上昇した。これは、REGREB 法を用いた場合、 c 軸配向した seed 層上に upper 層がホモエピタキシャル成長するため a 軸配向粒の発生が抑えられたためと考えられる。これらの結果から、REGREB 法を用いて作製した SmBCO 線材は良好な結晶性を保ちながらの成膜レートの高速化が可能であることが分かった。

当日は、作製した数十 cm 級 (30 cm) の中尺線材の線材作製速度に対する $J_c(\text{A/cm-w}) \times L(\text{cm})$ などの検討結果などに関しても詳細を報告する。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費(15H04252, 15K14301, 15K14302, 16H04512 及び 16K20898)と先端的低炭素技術開発(JST-ALCA)及び名大産総研アライアンス事業からの助成を受けて実施したものである。また、本研究では、株式会社フジクラ飯島康裕様より金属テープに関して御協力を得た。

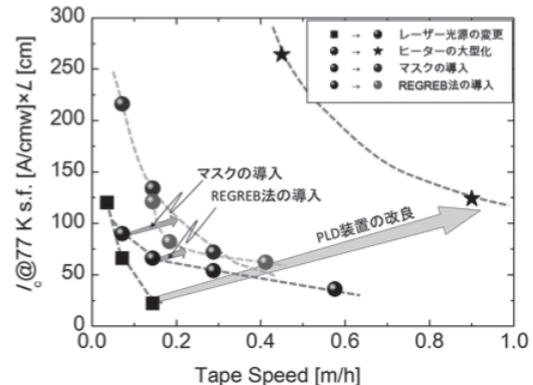


Figure 1 J_c (A/cm-w) \times L (cm) values of short REBCO samples fabricated with various tape speed.

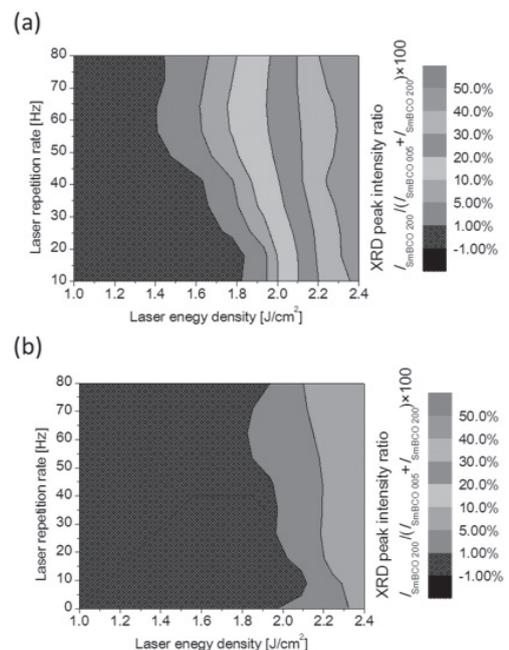


Figure 2 XRD peak intensity ratio of a -axis oriented grain for various laser energy densities and laser frequencies. (a) without and (b) with REGREB technique.

BHO 人工ピンを導入した SmBCO 超電導薄膜の見かけのピンニング・ポテンシャル

Apparent pinning potential of SmBCO superconducting thin film with BHO artificial pin introduction

木内 勝, 柏木 啓, 小田部 荘司, 松下 照男 (九工大・情報工); 土屋 雄司, 一野 祐亮, 吉田 隆 (名大); 阿久根 忠博, 西寄 照和 (九産大)

KIUCHI Masaru, KASHIWAGI Kei, OTABE Edmund S., MATSUSHITA Teruo (Kyushu Inst. of Tech.); TSUCHIYA Yuji, ICHINO Yusuke, YOSHIDA Yutaka (Nagoya Univ.); AKUNE Tadahiro, NISHIZAKI Terukazu (Kyushu Sangyo Univ.)
E-mail: kiuchi@cse.kyutech.ac.jp

1. はじめに

高い臨界電流を有する RE 系コート線材が開発され、高磁界発生マグネット、高均一高安定が要求される Magnetic Resonance Imaging (MRI)、Nuclear Magnetic Resonance (NMR)用マグネット等への利用が期待されている。更に、大型で高品質なコイルのためには線材の超電導接続が必要で、この接続に関する研究も精力的に進められている。一方で、この RE 系コート線材は金属超電導体に比べると応用機器の利用温度が高く、酸化物特有の結晶構造を持ち、さらにテープ形状のために超電導層が薄い。このような超電導体は磁束クリープの影響を受け、臨界電流密度 J_c が減少することが知られている。また、臨界電流密度 J_c の磁界特性を向上させるために、ナノサイズの人工ピンの導入及びその最適化も進められている。したがって、超電導層の厚さや人工ピンの導入が、磁束クリープ下の臨界電流特性へどのように影響を与えるのかを詳細に把握する必要がある。

ここでは RE 系コート線材に人工ピンを導入し、さらに厚さを変化させた場合の臨界電流特性を調べるために、磁化の時間対数緩和特性から見かけのピンニング・ポテンシャル U_0^* を評価した。その実験に対して磁束クリープ・フローモデル[1]を用いて解析を行い、超電導の厚さ及び人工ピンがこれらにどのように影響を与えるかを調べた。

2. 実験方法

人工ピン、超電導層の厚さの緩和特性への評価するために、2 グループの IBAD-MgO 基板上に PLD 法を用いて作製した $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 薄膜である。1) 人工ピンの影響は、無添加薄膜 (#0) と、混合ターゲット法を用いて BaHfO_3 を 3.0 vol% 添加した薄膜 (#3.0) で超電導層の厚さは 250 nm である。2) 超電導層の厚さの影響は、 BaHfO_3 を 3.0 vol% 添加し、超電導層の厚さ d を 600 nm、1200 nm と変化させた薄膜を準備した。

J_c は SQUID 磁力計を用いた磁気モーメント M から、見かけのピン・ポテンシャル U_0^* は、

$$-\frac{d}{d \log t} \left(\frac{M}{M_0} \right) = \frac{k_B T}{U_0^*}$$

の M の時間対数緩和率から求めた。ここで、 M_0 は初期磁化の大きさである。磁界は薄膜に対して垂直、すなわち c 軸方向に加えた。

3. 実験結果と考察

Fig. 1 に BaHfO_3 を 3.0 vol% 添加した薄膜 (#3.0) と無添加薄膜 (#0) の磁界を 1~3 T まで加えた場合の、 U_0^* の温度依存性を示す。10 K、1 T における人工ピン添加薄膜の臨界電流密度 J_c は、無添加薄膜に比べて 6 倍程度大きく、 U_0^* の大きな値が期待されるが、結果は人工ピン添加薄膜の方が小さな値となった。この原因の一つは、磁束バンドルサイズと超電導層厚の相互作用によるものである。つまり、 J_c が低い無添加薄膜の磁束線の長さ方向のバンドルサ

イズは、超電導層厚さが 250 nm と薄く、低温度及び低磁界で超電導層の厚さを超え、それ以上の温度及び磁界領域では磁束バンドルの動径方向に大きくなり、磁束バンドルサイズが大きくなるため、結果的に U_0^* が大きくなったと考えられる。

Fig. 2 に厚さの異なる薄膜の磁界を 1~3 T まで加えた場合の、 U_0^* の温度依存性を示す。高温領域において、僅かであるが超電導層が厚い 1200 nm の方が大きくなった。2 つの試料の J_c はほぼ同程度であり、高温領域においては超電導層が厚い薄膜の方が磁束クリープの影響は少ない。

これらの実験結果と磁束クリープ・フローとの比較は発表当日に行う。

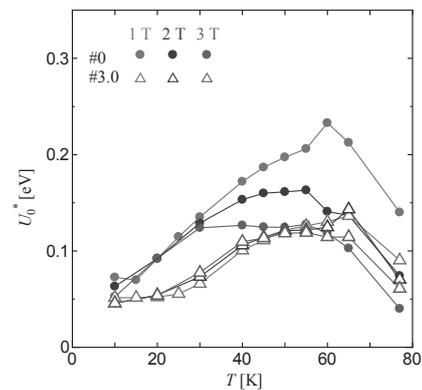


Fig. 1: Temperature dependence of apparent pinning potential in $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ films with different contents of BaHfO_3 , 0 vol.%, #0 (●) and 3.0 vol. %, #3.0 (△).

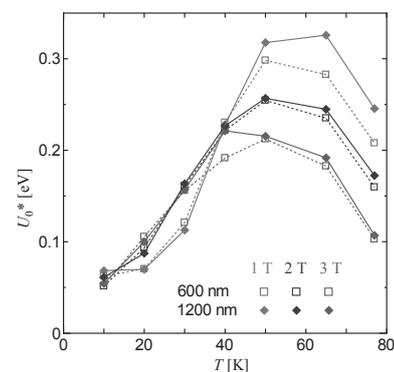


Fig. 2: Temperature dependence of apparent pinning potential in BaHfO_3 -doped $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ films with different thickness of superconducting layer, (□) 600nm sample, (◆) 1200nm sample.

参考文献

[1] M. Kiuchi, *et al.*, *Physica C* vol. 278, (1997) p. 62.

配向 Cu テープを基材とする YBCO 線材における 中間層の導電性と安定化の数値解析的理解 Current distribution analysis of electrical resistivity of conductive buffer layer required for current bypass

井上 靖也, 前田 啓貴, 堀井 滋(京大); 北口 仁(NIMS); 土井 俊哉(京大)

INOUE Seiya, MAEDA Hiroki, HORII Shigeru (Kyoto Univ.); KITAGUCHI Hitoshi (NIMS); DOI Toshiya (Kyoto Univ.)

E-mail: inoue.seiya.73u@st.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

我々は低コスト YBCO 線材の開発を目的に、{100}<001> 集合組織を有する Cu テープ上に導電性を有する中間層を介して YBCO をエピタキシャル成長させる線材構造に着目している。この線材構造では、YBCO 層の一部で超伝導性が破れた際、YBCO 層を流れる電流は導電性中間層を通して安定化層と基材を兼ねた Cu テープに回避することが可能である。当研究室ではこれまでに、導電性中間層に Nb ドープ SrTiO₃ を用いた YBCO/SrTi_{0.95}Nb_{0.05}O₃/Ni/Cu/SUS 試料を作製し、2.6 MA/cm² (77 K、自己磁場)の臨界電流密度(J_c)を示した[1]。また、臨界電流(I_c)を超えた一部の電流が、安定化層である Cu に回避することが電流-電圧特性から示唆された。

しかしながら、YBCO 層から Cu テープへ全電流が回避するのに要する距離と中間層の抵抗率の関係は明らかではない。また、Cu テープが安定化層として有効に働くために求められる中間層の抵抗率(の上限)も明らかではない。本研究では、有限要素法による電流分布解析から中間層の電気抵抗率(ρ_b)に対する電流回避、および YBCO 層への電流の流入の様子を調べた。

2. 実験方法

電流分布解析の計算には有限要素法を用い、設定する電圧を境界条件として各要素に対して $\text{div} \mathbf{J} = 0$ が満たされるように計算を行った。なお、解析は 2 次元で行った。電流回避に要する距離を求める数値解析には、実際の試料と同様に、YBCO 超伝導層、導電性中間層、Cu 層を順に配置し、YBCO 超伝導層の一部に超伝導が破れた領域を設けた。

YBCO の特性は当研究室の先行研究の試料[2]に基づいて設定した。そして、Cu と Ag、YBCO の超伝導が破れた部分の抵抗率を固定し、 ρ_b を $1.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^1 \Omega \cdot \text{cm}$ の範囲で 10 倍ずつ変化させて解析を行った。

3. 結果及び考察

Fig. 1(a)に電流回避の計算を行ったモデルの概念図を示す。ただし、実際の計算には対称性を利用して右半分のみを用いた。 ρ_b を 10 倍ずつ増加させたとき、YBCO の超伝導領域と超伝導が破れた領域との境界からの距離に対する、モデル内の全電流のうち YBCO 層を流れる電流が占める割合は大きく下がることが分かった。また、Fig. 1(b)に ρ_b の変化に対する、

全電流のうち YBCO 層を流れる電流が占める割合が 90%となるまでに要する、YBCO の超伝導領域と超伝導が破れた領域との境界からの距離(L)の変化を示す。線形近似の結果より、電流回避に要する距離は ρ_b に対して 0.5 乗で増加することがわかった。

一連の数値計算結果より、YBCO の超伝導領域と超伝導が破れた領域との境界から 1 mm 以内で全電流の 90%が YBCO 層に復帰するという条件の下では、必要とする中間層の電気抵抗率は $1.0 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ 程度以下であることがわかった。

当日は、電極を Cu 基材側に設置した場合の数値計算結果についても報告する。

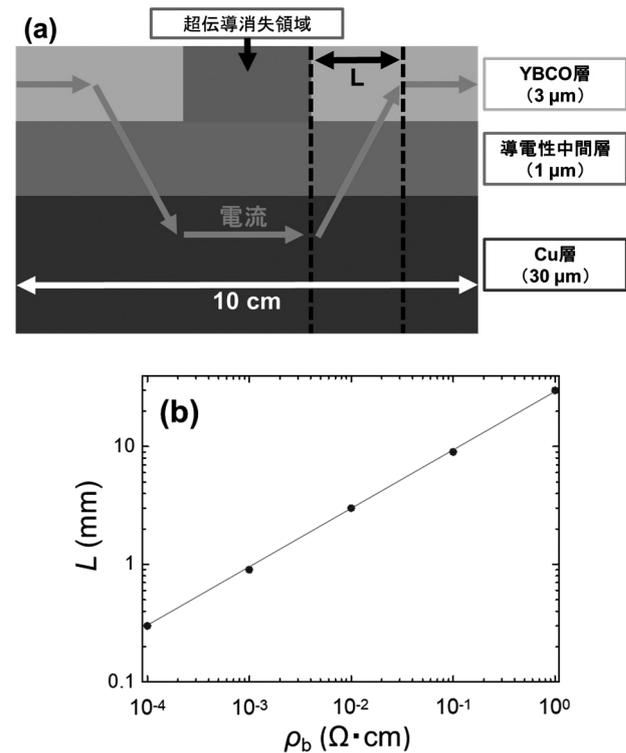


Fig. 1 (a) A schematic model for current distribution analysis and (b) change in L as a function of ρ_b .

参考文献

- [1] T. Doi et al., Master. Trans. **58** (2017) 1493.
- [2] M. Hashimoto et al., JSAP Spring Meeting (2015) 12a-P9-11.

溶融水酸化物法を用いた REBCO-CC の超電導接合

Superconducting-Joint for REBCO-CC by molten hydroxide method

船木 修平, 山田 容士(島根大); 宮地 優悟(島根大, 学振特別研究員 DC); 下山 淳一(青学大)
 FUNAKI Shuhei, YAMADA Yasuji (Shimane Univ.); MIYACHI Yugo (Shimane Univ., JSPS Research Fellow);
 SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.)
 E-mail: s-funaki@riko.shimane-u.ac.jp

1. はじめに

REBa₂Cu₃O_y 超電導線材(REBCO-CC)の研究は応用フェーズに入り, 様々な応用に向けた検討がなされている. しかしながら, REBCO-CC の一度の製造長は長くても 1 km 程度であることから, REBCO-CC 同士, または異種の超電導線材との超電導接合技術が必要不可欠とされている. その中で, 各国の研究機関により REBCO-CC 同士の超電導接合技術の開発が進められてきたが, これまでの提案では, 接合時に生じた REBa₂Cu₃O_y (RE123)の酸素欠損を補うための酸素アニールが必要であることから, 利用現場で施工可能な装置, 環境, 工程における接合技術の確立が必要であると考えられる.

一方, 接合部分で超電導性を発現する候補材料としては, RE123 や REBa₂Cu₄O₈ (RE124)が挙げられる. RE124 は結晶構造中の二重の Cu-O 鎖に起因し, 酸素欠損を生じない構造安定性を有し, さらに, Caなどを置換させホールドープすることで T_c が 90 K まで向上することが知られている[1]. そして, これまで我々は水酸化物をフラックスに用いることで, $T_c = 90$ K 級の RE123 及び RE124 を 600°C 程度の低温下で合成できることを報告してきた[2-4]. さらに他の研究機関の報告によると, この手法により 450°C で合成された Eu123 には Twin が存在しないことから, 結晶成長時に Cu-O 鎖の酸素が満たされていることが明らかとなっている[5]. つまり, この結晶育成手法によって得られる RE123 及び RE124 は, 酸素アニール不要で超電導性を示すことが期待できる.

これらの背景から, 本研究では水酸化物をフラックスに用いた酸素欠損の無い RE123 及び RE124 の低温液相成長反応を利用して, REBCO-CC 同士の超電導接合を試みた.

2. 実験方法

Eu₂O₃, BaO₂, CuO 原料粉末を金属モル比が Eu : Ba : Cu = 1 : 2 : 4 となるように秤量・混合し, 厚さ 0.2 mm のペレットに 20 MPa で加圧・成形した. 保護層を除去した REBCO-CC の RE123 層間に原料ペレットを挟み, 治具により約 20 MPa の圧力を印加した. これらを, 水酸化カリウム(KOH)を入れたアルミナなるつぼ内に配置し加熱することで, KOH 蒸気中で低温合成させた.

3. 結果及び考察

図 1 に, KOH 量を 17.5 g, 26.3 g (るつぼの容積比 = 116 g/ℓ, 174 g/ℓ)として 525°C で 12 h 熱処理をした試料における, 接合部を介した REBCO-CC の $R-T$ 測定結果を示す. また, 図中には KOH を用いずに同条件で熱処理した試料の結果も示している. 図より, KOH 蒸気中で熱処理することで, 接合部が金属的な導電性を示し, KOH 量の増加とともに $T_{c\text{onset}}$ が約 90 K まで上昇することが分かった. しかしながら, いずれの試料も 4 K 下で 0 抵抗が確認されなかった.

残留抵抗の要因を検討するため, KOH 量 26.3 g, 525°C, 12 h の熱処理をした試料における, 接合部を介した REBCO-CC, 接合部を介さない REBCO-CC, 線材からはみ出たペレット, それぞれの $R-T$ 測定を行った結果を図 2 に示す. なお, 図中における接合部を介した REBCO-CC の $R-T$ 曲線は, 図 1 の KOH: 26.3 g と同じデータである. 図より, ペレットは超電導転移を示したが, REBCO-CC 自体の超電導性が消失してい

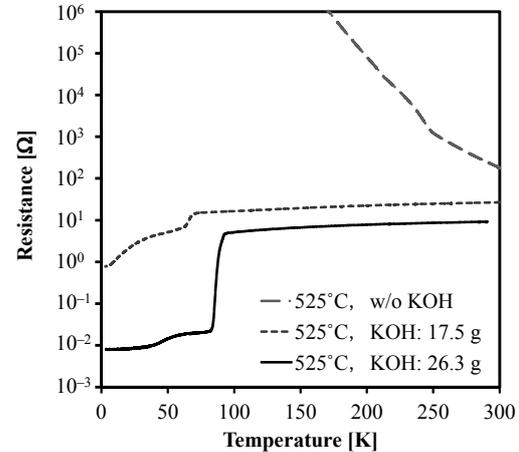


Fig.1 $R-T$ curves of jointed REBCO-CCs at 525°C x 12 h with several KOH amounts

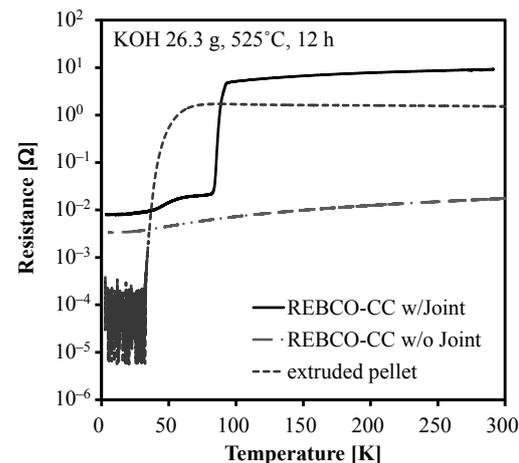


Fig.2 $R-T$ curves of several samples heated at 525°C x 12 h with KOH amounts of 26.3 g

た. これにより, 接合部を介した REBCO-CC の残留抵抗は, KOH 蒸気による REBCO-CC 自体の劣化によるものであると考えられ, 接合部分は超電導性を有していると期待できる. 今後, 接合部以外を保護することで, 接合部を介した REBCO-CC においても 0 抵抗の実現が可能であると考えられる.

謝辞

本研究の一部は, JST, 未来社会創造事業, JPMJMI17A2 の支援を受けたものである.

参考文献

1. T. Miyatake, et al.: Nature, Vol. 341 (1989) p.41
2. S. Funaki, et al.: Physics Procedia, Vol. 27 (2012) p.284
3. S. Funaki, et al.: Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 55 (2016) p. 04EJ13
4. Y. Miyachi, et al.: Physics Procedia, Vol. 65 (2015) p. 129
5. L. N. Marquez, et al.: Chem. Mater., Vol. 5 (1993) p. 761

薄型ペレットの固相反応による REBCO-CC の超電導接合

Superconducting-Joint for REBCO-CC via solid reaction using thin pellet

宮地 優悟(島根大, 学振特別研究員 DC); 船木 修平, 山田 容士(島根大); 下山 淳一(青学大)
 MIYACHI Yugo (Shimane Univ., JSPS Research Fellow); FUNAKI Shuhei, YAMADA Yasuji (Shimane Univ.);
 SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.)
 E-mail: s169826@matsu.shimane-u.ac.jp

1. はじめに

REBa₂Cu₃O_{7-δ} (REBCO) は $T_c=90$ K を示す超電導体であり、磁場中で高い電気輸送特性を示すことから、高磁場を発生させる超電導マグネットの線材として有望な材料である。REBCO の線材はテープ状の金属基材上に配向した REBCO を形成させる手法で作製されており、Coated Conductor (以下、REBCO-CC) と呼称される。REBCO-CC の応用における課題として、超電導膜の品質を一定にすることが難しく、超電導マグネットに必要な数 km の長尺線材の製造が困難であることが挙げられる。

そこで、線材同士を臨界電流の劣化なく接続する技術があれば、上記の課題が解決できると考えられ、研究が行われてきた。Y.J. Park らは、REBCO-CC の REBCO 面同士を向かい合わせ、低酸素分圧下で REBCO を溶融させ、再結晶化させることによって接合に成功した[1]。しかし、接合面の密着度が高く、溶融接合時に抜けた REBCO 内の酸素を再び補填するための酸素アニール処理を施しても酸素が導入されず、接合面で超電導性を示さなかった。そこで、レーザー加工によって接合部に無数の穴を開けることによって、350 時間の酸素アニール処理で線材の特性が回復することを報告した。

しかし、超電導マグネットの応用に際しては、接合箇所は数十箇所を超えることが予想され、これらの接合はマグネットの作製現場で行う必要がある。さらに、接合が狭い空間内で行われることも想定されるため、大型の装置の利用は避けるべきである。そのため、真空装置やレーザー加工機などの装置を用いない接手法が必要とされる。

そこで我々は、REBCO-CC で YBCO 原料ペレットを挟み、加圧しながら熱処理を施すという簡便なプロセスによる接合を考案した。REBCO-CC は原料ペレットの反応過程で接合され、また、ペレットは密度が低いいため酸素導入が容易となることが期待される。熱処理雰囲気も 1 気圧の混合ガス中で行うため、真空装置が不要になる。本研究においては、REBCO 線材の超電導接合の簡便なプロセスの確立を目的とし、ペレットを用いて接合を行い、熱処理を施したペレットの生成相と接合線材の超電導特性の評価を行った。

2. 実験方法

YBCO 原料粉末を 40 MPa で加圧し、0.2mm 厚にしたものを接合用の薄型ペレットとした。REBCO-CC は REBCO 層が Ag 層によって保護されているものを用いたため、Ag 保護層をアンモニア水と過酸化水素水の混合溶液を用いて除去した。保護層を除去した REBCO-CC の REBCO 面を対向させ、その間に薄型原料ペレットを配置し、金属製の治具によって 40 MPa で加圧した。 $P(O_2)=0.01$ atm の N₂-O₂ 混合ガス雰囲気において 800°C で 12 時間熱処理した。酸素気流中において 400°C、12 時間の酸素アニールを行ったのち、ペレットの生成相ならびに接合線材の電気特性を粉末 XRD 測定と直流四端子法によって評価した。

3. 実験結果

まず、ペレットの熱処理後の生成相について検討を行った。図 1 に接合同じ条件で熱処理を施したペレットの粉末 XRD 2θ - θ パターンを示す。XRD パターンから、Y211 並びに Ba-

Cu-O 系酸化物からの異相ピークが混在していたが、主相として YBCO が確認された。

次に、接合された線材の特性を検討した。接合処理を施した線材は、ピンセットで持つ、あるいは測定用の端子取り付けといった操作過程においても、接合面が剥離しなかった。

図 2 に接合線材の電気抵抗の温度依存性を示す。接合線材は室温から金属的な電気抵抗値の温度依存性を示したのち、93.5 K において超電導転移が確認され、92 K でゼロ抵抗を示した。このことから、接合界面には 12 時間の酸素アニールによって YBCO ペレット並びに REBCO-CC へ酸素が供給されていることが明らかとなった。

本研究では、REBCO-CC 及びペレットの配置-加圧-熱処理という簡便なプロセスによって、接合界面において 92 K でゼロ抵抗を示す REBCO-CC の超電導接合に成功した。

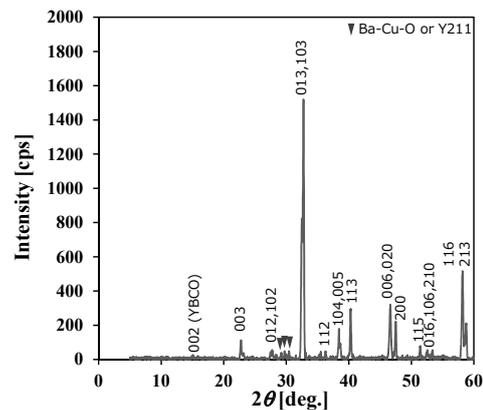


Fig.1 XRD 2θ - θ pattern for YBCO pellet annealed at 800°C in $P(O_2) = 0.01$ atm.

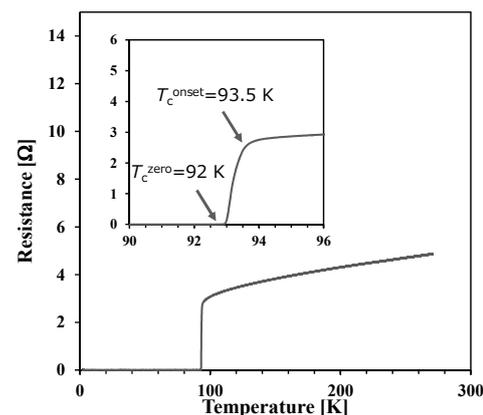


Fig.2 R - T curve for jointed-REBCO-CC.

謝辞

本研究の一部は、JST、未来社会創造事業、JPMJMI17A2 の支援を受けたものである。

参考文献

1. Y.J. Park et al.: Supercond. Sci. Technol. Vol. 27 (2014) p. 085008

GFRP の熱伝導率測定と熱侵入量の見積もり

Measurement of thermal conductivity of GFRP and estimation of heat leak of cryogenic pipe

神田 昌枝, 山口 作太郎, 岩田 暢祐 (中部大学);

FAMAKINWA Tosin (Western Sydney University); 岩室 徳人, 平岡 一高 (日揮株式会社)

KANDA Masae, YAMAGUCHI Satarou, IWATA Yousuke (Chubu University);

FAMAKINWA Tosin (Western Sydney University); IWAMURO Norito, HIRAOKA Kazutaka (JGC CORPORATION)

E-mail: kanda@isc.chubu.ac.jp

1. 緒言

本研究グループでは、超伝導送電システムの低温部の支持構造材料として、低温でも強度が高く、熱伝導率が小さいガラス繊維強化プラスチック(GFRP)を使用している。そして冷却状態を維持するために熱侵入量の低減を課題としている。本研究では、低温下で熱伝導率を計測し、低温部の支持構造物を設計するために GFRP の積層方向が異なる試料を準備し、評価した。そして熱侵入量について、有限要素法を用いて評価を行った。

2. 実験試料・方法

本研究で使用した試料は、エポキシ系 GFRP(菱電化成株式会社製)で、試料形状は 10mm×10mm、試料厚さ(d)は 0.5mm, 1mm, 1.5mm で準備した。Fig.1 に実験で使用した試料 A と試料 B の 2 種類の試料のイメージ図を示す。試料 A は測定面と平行方向にプリプレグシートを積層させ、試料 B は測定面と垂直方向にプリプレグシートを積層させている。

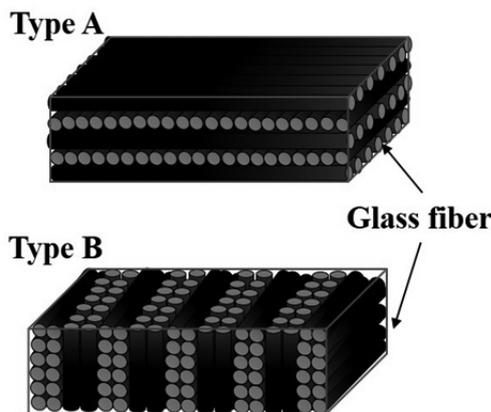


Fig.1 Image diagram of a glass fiber direction of type A and B.

試料 A、試料 B の低温下における熱伝導率を評価するため、試料である GFEP は、温度制御が可能な GM 冷凍機のコールドヘッドに取り付けた銅製のブロックの上に置いた。その上にアルミ製のブロック(内部にヒーターあり)で試料を抑え、上から固定した。これらは全てクライオスタット内にあり、試料固定の際はアピエゾン N グリースを試料表面に塗布した。また、測定部分を周囲から熱が伝わらない様に放射シールドで覆った。実験では、試料上部(ヒーター側)にあるヒーター電流を 0, 5, 10, 15 mA と変化させることで試料に加わる熱量を変化させ、ヒーター側の温度(T_1)と冷却側の温度(T_2)を抵抗温度センサーにより測定した。ヒーター電流を変化させて十分な時間が経過した後、温度変化が一定になった時の T_1 、 T_2 、そして T_1 、 T_2 の温度差を ΔT として解析に用いた。なお実験の測定範囲は 40K~250K である。

3. 実験結果・考察

熱伝導率 $\kappa(W/m \cdot K)$ は、ヒーターに加えた電圧 $V(V)$ と電流 $I(A)$ 、試料の面積 $S(m^2)$ と厚さ $d(m)$ として式 1 に示す。

$$\kappa = (I \times V) / \{ (S/d) \times (T_1 - T_2) \} \quad (\text{式 1})$$

ヒーターにより加えられた熱量に対して生じた温度差から熱伝導率を求めた。しかし、試料厚さ 0.5mm と 1mm の実験結果は、試料厚さ 0.5mm と 1mm は試料と銅ブロックなどの表面での接触熱抵抗が大きく、測定結果にバラつきが生じてしまい再現性が取れなかった。そこで、試料が厚い 1.5mm についてプリプレグシートの積層方向の異なる 2 種類の熱伝導率の結果を Fig.2 に示す。

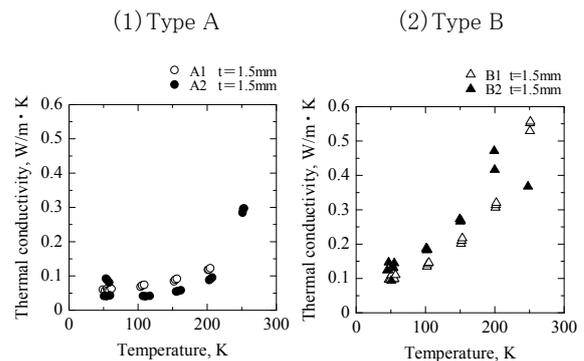


Fig.2 Thermal conductivity with different temperature of GFRP type A (1) and B (2).

試料厚さ 1.5 mm において、熱伝導率を比較すると試料 B の熱伝導率は試料 A よりも熱伝導率は高い。以上のことから今回、測定に用いた GFRP を低温部の支持構造物としてサポート材に用いる場合は、ガラス繊維の方が熱の伝わる方向性に対し、垂直になるように加工すると、外部からの熱侵入が小さくなる。また、これらの実験結果より、熱侵入量について、有限要素法を用いて評価も行った。

4. 結言

本研究では、低温下で熱伝導率を計測し、低温部の支持構造物を設計するために GFRP の積層方向が異なる試料を準備し、評価した。その結果、GFRP を低温部の支持構造物としてサポート材に用いる場合は、ガラス繊維の方向が、熱の伝わる方向に対して垂直になるように加工する事で、外部からの熱侵入が小さくなる。

500 MHz LTS/REBCO NMR の遮蔽電流磁場解析

Numerical simulation on screening current-induced field in 500 MHz LTS/REBCO NMR

盛川 瑛亮, 小泉 智暉, 金 錫範, 植田 浩史(岡山大学); 濱田 衛(JASTEC); 柳澤 吉紀, 前田 秀明(理研)

MORIKAWA Eisuke, KOIZUMI Tomoaki, KIM SeokBeom, UEDA Hiroshi (Okayama University);

HAMADA Mamoru (JASTEC); YANAGISAWA Yoshinori, MAEDA Hideaki (RIKEN)

E-mail: pc063zqa@s.okayama-u.ac.jp

1. はじめに

現在, 国立開発研究法人 科学技術振興機構(JST)による「未来社会創造事業大規模プロジェクト型研究開発」として, 「高温超電導線材接合技術の超高磁場 NMR と鉄道き電線への社会実装」というプロジェクトが進行している. この一環として 1.3 GHz NMR の開発が進められており, 従来の低温超電導(LTS)マグネットに高温超電導(HTS)マグネットを組み合わせた, LTS/HTS NMR が検討されている. しかし, HTS 線材はテープ形状をしているため, 超電導マグネットを励磁した際, 磁場の径方向成分によって, 線材内に遮蔽電流が誘導され, 不整磁場を生じさせる. この不整磁場は磁場均一性や時間安定性を悪化させる要因となり, NMR の性能に大きく関わる. 本研究では, 既に製作された 500 MHz NMR[1]を対象に遮蔽電流磁場解析から検討を開始した. また, マグネットはソレノイド巻であるが, パンケーキコイルを積層した場合とマグネット形状による影響について比較検討を行った.

2. 解析モデルおよび条件

解析対象は, 既に製作された 500 MHz NMR の LTS/HTS マグネットでは, inner HTS coil と outer LTS coil の 2 種類で構成されている. inner HTS coil はテープ幅 5 mm, 超電導厚さ 2 μm の REBCO 線材で巻線されている. Table 1 に inner HTS coil の諸元を示す. 今回の解析では最も遮蔽電流を生じると想定される inner HTS coil を対象に解析を行った. inner coil は内径 80 mm, 外径 117.702 mm である. 運転電流を LTS/HTS マグネットに通電した際の中心発生磁場は, inner HTS coil で 2.31 T, outer LTS coil で 8.51 T である. マグネット構造はソレノイド巻とシングルパンケーキ巻を想定し, ソレノイド巻は径方向 72 ターン, 軸方向 77 ターンとした. シングルパンケーキ巻は 72 ターンのコイルをコイル間隔 0.1658 mm で 77 積層した. REBCO 超電導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様であると仮定する近似を用いて, 積分方程式, 高速多重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場数値解析を用いて計算を行った[2]. 支配方程式は次のようになる.

$$\{\nabla \times \rho(\nabla T \times \mathbf{n})\} \cdot \mathbf{n}$$

$$+ \frac{\mu_0 d}{4\pi} \frac{\partial}{\partial t} \int_S \frac{(\nabla T' \times \mathbf{n}') \times \mathbf{R}}{R^3} \cdot \mathbf{n} dS' = - \frac{\partial \mathbf{B}_0}{\partial t} \cdot \mathbf{n} \quad (1)$$

T と T' はそれぞれ観測点とソース点におけるテープ面垂直方向の電流密度ベクトルポテンシャル成分, \mathbf{n} と \mathbf{n}' はそれぞれ観測点とソース点のテープ面法線垂直方向の単位ベクトルである. \mathbf{R} はソース点から観測点への方向ベクトル, \mathbf{B}_0 は外部磁場, ρ は超電導体の抵抗率, μ_0 は真空中の透磁率, d は超電導層の厚みである. 積分範囲 S は超電導体の全領域である. 超電導の電流—電圧特性は n 値モデルを用い, 超電導体の電気抵抗率 ρ は式(2)で示される.

$$\rho = \frac{E_c}{J_c} \left(\frac{|J|}{J_c} \right)^{n-1} \quad (2)$$

ここで, J_c は臨界電流密度, E_c は臨界電流の定義電界である.

Sweep rate を 0.01 A/s とし, 運転電流は 138.6 A である. 励磁完了後 100 時間電流をホールドした. コイル中心での z 軸方向の遮蔽電流磁場について評価を行った.

3. 解析結果と考察

Fig. 1 にソレノイドコイル, パンケーキコイルそれぞれにおける磁場の時間安定性を示す. 両マグネット構造ともに, 励磁完了後から遮蔽電流磁場は指数関数的に減衰していることが確認できた. この結果は磁束クリープによって説明することができる. またソレノイドコイルにおける磁場の時間安定性は, 励磁完了後 1 時間後で 146 ppm/h, 10 時間後で 1.82 ppm/h であった. パンケーキコイルにおける磁場安定性は, 励磁完了後 1 時間後で 147 ppm/h, 10 時間後で 1.84 ppm/h であった. したがって, 両巻線モデルとも磁場の時間安定性に大きな違いがないことを確認した.

Table 1 Model Coil Specifications

Conductor cross section (width \times thickness) (mm \times mm)	5 \times 0.15
Insulated conductor cross section (width \times thickness) (mm \times mm)	5 \times 0.25
Inner diameter (mm)	80
Outer diameter (mm)	117.702
Height (mm)	400
Number of layers	72
Number of turns	5544

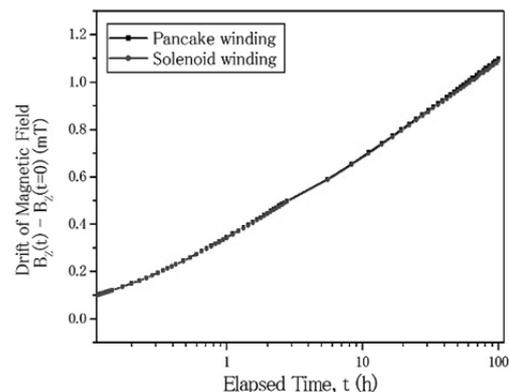


Fig. 1 Drift on Magnetic Field with Time

謝辞

本研究の一部は, JST 未来社会創造事業 JPMJMI17A2 の支援を受けたものである.

参考文献

1. Y. Yanagisawa, et al., J. Magn. Reson., Vol. 249 (2014)
2. H. Ueda, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., 24, 4701505 (2014)

REBCO コイルにおける部分的細線化による遮蔽電流磁場低減効果 : 9.4-T 級ヒト全身用 MRI コイルを対象として

Numerical Evaluation of Irregular Magnetic Field by Screening-current in Coils for 9.4T-Class MRI

稲垣 善太, 小曾根 裕一, 伊東 慶太, 石山 敦士(早大); 植田 浩史(岡山大); 野口 聡(北大)
INAGAKI Zenta, OZONE Yuichi, ITO Keita, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.);
UEDA Hiroshi (Okayama Univ.); NOGUCHI So (Hokkaido Univ.);
E-mail: z-inagaki@asagi.waseda.jp

1. はじめに

我々は 9.4-T 級ヒト全身用 MRI の開発を目指した研究を行ってきた [1]。REBCO 線材を使用した MRI 用超電導マグネットでは変動磁場により遮蔽電流が顕著に誘導される。その遮蔽電流による磁場(以下、遮蔽電流磁場)が撮像空間における磁場の時間的安定性と空間精度を悪化させてしまう。REBCO 線材の細線化が遮蔽電流の低減に有効であることは知られているが、先行研究で MRI を構成するコイルシステムにおいて細線化により空間精度が向上することが確認されている。またスプリットコイルの一つを選択的に細線化することの有効性も確認されている[2]。本研究では細線化量を少なくするため、選択されたコイルを更に部分的に細線化した場合の効果について解析・評価したので報告する。

2. 解析対象と解析手法

解析対象のコイルシステムの概略図を図 1 に示す。このコイルは、中心磁場 9.4T、内径 1m 以上、400mmDSV において 2~6 次の磁場不均一度を 50ppm 以下とする等の制約条件を考慮し、使用線材量の最小化を目的として設計されている。

遮蔽電流磁場の解析には 3 次元非線形電磁場解析手法を用いた[3]。その手法における定式化モデルを式(1)に示す。細線化の解析では線材を 2 分割し、溝部分を絶縁するとした。励磁条件については 0.1A/s で運転電流 253.7A まで励磁し、1 時間ホールドするものとした。

$$\{\nabla \times \rho(\nabla T \times \mathbf{n})\} \cdot \mathbf{n} + \frac{\mu_0 d}{4\pi} \frac{\partial}{\partial t} \int_S \frac{(\nabla T' \times \mathbf{n}') \times \mathbf{R}}{R^3} \cdot \mathbf{n} dS' = -\frac{\partial \mathbf{B}_a}{\partial t} \cdot \mathbf{n} \quad (1)$$

細線化については通常の場合で解析を行う場合を normal モデル、全てのコイルを細線化する場合を Scribing_All モデル、コイル 1 のみを細線化する場合を Scribing_C1 モデル、コイル 1 の一部を細線化する場合を Optimized モデルと呼ぶこととする。

3. optimized モデルについて

optimized モデルは Scribing_C1 モデルの結果を踏まえて考案した。不整磁場の 2 次の項についてコイル 1 の分割解析を行うと、コイル 1 の上部が正の値を作り、コイル 1 の下部が負の値を作ることがわかった。コイル 1 以外のコイルは負の値を作っているため、コイル 1 の下部のみを細線化するときの不整磁場を計算することにした。これが optimized モデルである。その概略図を図 2 に示す。

4. 解析結果

励磁完了時、遮蔽電流が作る不整磁場の 2 次、4 次、6 次の項を図 2 に示す。normal モデルで最も値の大きい 2 次の項に着目すると、Scribing_All モデルより Scribing_C1 モデルの磁場不均一度が高く、更に optimized モデルの磁場不均一度が高くなることわかった。Scribing_C1 モデルでは 13.2ppm、optimized モデルでは -2.71ppm である。つまり、細線化量を減らしながら、磁場不均一度が向上できると言える。

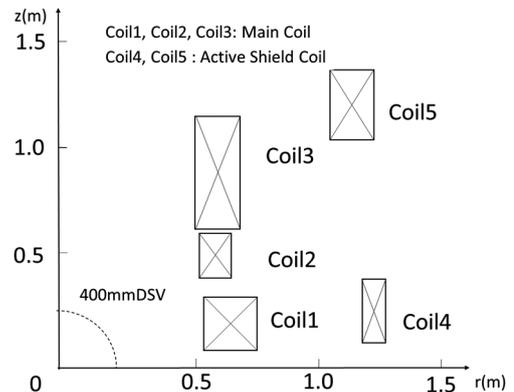


Fig. 1 Schematic Drawings of MRI Coil System

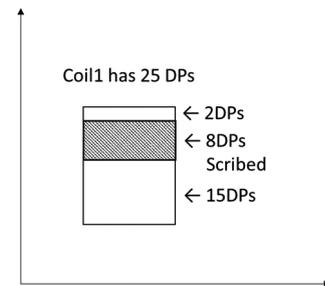


Fig.2 Schematic Drawings of Scribed part of Coil1 for optimized model

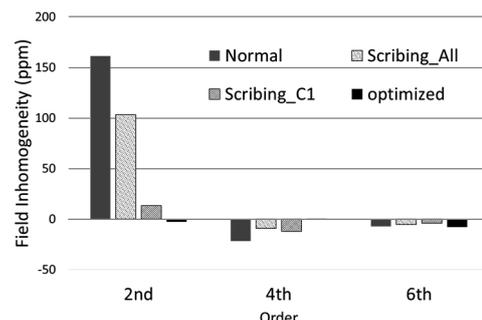


Fig. 3 Field Inhomogeneity for the four conditions

謝辞

本研究は、日本医療研究開発機構 (AMED) の「未来医療を実現する医療機器・システム研究開発事業『高磁場コイルシステムの研究開発』」の成果を利用している。

参考文献

1. T. Tosaka, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 92 (2015) 3B-a01
2. K. Ito, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 95 (2017) p.23
3. H. Ueda, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 26, no. 4, 4701205, June 2016.

二組のヘルムホルツコイルと傾斜磁場コイルを利用した 微小磁性体位置制御の実験研究

Experimental Study on Position Control in Milli-sized Magnetic Beads Using Two Sets of Helmholtz Coils and a Pair of Gradient Magnetic Field Coils

許 航, 鎌田 太陽, 二ノ宮 晃, 野村 新一(明治大学)

XU Hang, KAMADA Hiroharu, NINOMIYA Akira, NOMURA Shinichi

E-mail: wardenxuhang@meiji.ac.jp

1. はじめに

本研究では、複数のコイルを利用し、微小磁性体の位置を連続的に制御する可能性を検討している。目標は、中心軸における磁場最大点の位置を移動することで、微小磁性体の位置を制御することである。今回は、簡単な中心軸上の磁場計算によりコイル形状を検討して試作し、これを用いて微小磁性体の位置制御の可能性実験を実施した。ここでは、その結果について報告する。

2. 各組コイルの作用

磁気力を受けるので、磁性体は移動する。磁性体は磁気力を受け、移動する。この時、磁性体の位置を安定させるには、以下の条件を満たす必要がある。

1. 磁性体が安定位置に留まる時に受けた磁気力はゼロである。
2. 磁性体が移動する時には、安定位置に戻る復元力が働かなければならない。

この時、磁性体を安定させる位置は磁場の最大点である。従って、今回の実験研究は中心軸における磁場最大点を調整できるコイルシステムを設計し、試作した。具体的には、Fig. 1 のような、二組のヘルムホルツコイルと傾斜磁場コイルを利用して磁性粒子を位置制御させる方法を提案した。ヘルムホルツコイル 1(M コイル) が作る磁場は、ヘルムホルツコイル 2(S コイル) が作る磁場に対して極性を逆向きにしている。これにより、磁極部の磁場を弱くして、ギャップ中心部を強くする。ここでは、M コイルと S コイルを利用し、コイル中心軸上の中心部を磁場最大点に設定した。

そして、磁性体はアクリルケースに封入しているが、磁性体はケースの壁からの摩擦力を受けるので、磁性体の移動を妨げるようになった。その影響を解消するため、交流傾斜磁場(Ex コイル)を印加し、磁性体を微小距離で振動させて、摩擦力からの影響を低減させた。

この磁場空間に傾斜磁場(L コイル)を加えて、その傾斜磁場の大きさを調整し、中央軸上に磁場最大点の位置を調整し(Fig.2)、微小磁性体を位置移動させるようにした。

3. 実験装置と実験結果

今回の実験では、試作したコイルを液体窒素で冷却し、直径 2 mm の鉄球をアクリルケースに封入し、3 組のコイルの中心軸上に設置した。M コイルを 8 A、S コイルを -2.1 A で励磁した。

そして、Ex コイルを実効値 1 A、20 Hz の交流電流で励磁し、L コイルの励磁電流を徐々に調整させた。磁性粒子の位置移動現象はビデオカメラで記録した。録画映像から、Ex コイルを通電すると、磁性体は空間中心部で振動する。そして、L コイルの通電電流の調整に伴って、磁性体の位置が連なって移動することを確認した(Fig. 3)。つまり、磁性体の位置を制御できることを確認した。

4. まとめ

本研究では磁場空間に微小磁性体の位置を制御する可能性を検討している。今回の実験研究では、複数のコイルを利用して磁性体をコイルから離し、コイル間の空間に連続的に誘導移動させることを確認することができた。

今後は、微小磁性体の代わりに、磁性粒子の位置制御の可能性を検討する。

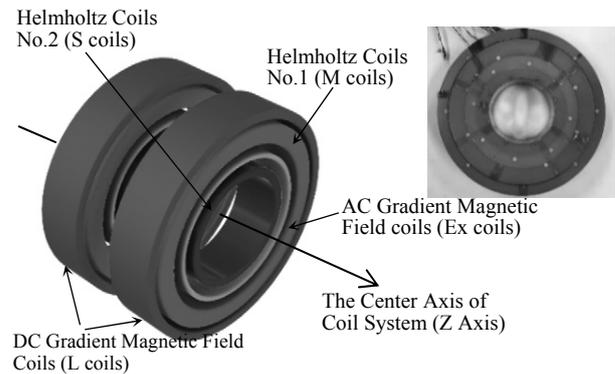


Fig. 1 Schematic illustration and the key parameters of the coil system.

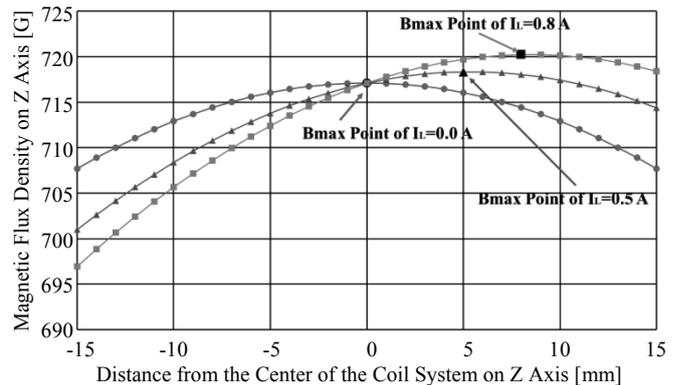


Fig. 2 Calculation of the magnetic flux density on Z axis in case of L coils are excited by different current.

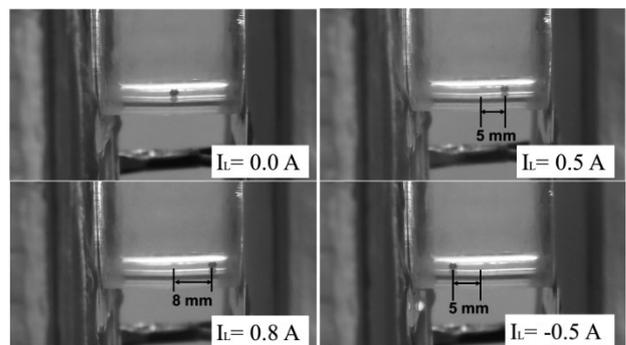


Fig. 3 Displacement of the magnetic particles in case of L coils are excited by different current.

参考文献

1. N. Saho, M. Ono : Abstracts of CSSJ Conference, Vol.93 (2016) p.64
2. H. Xu, A. Ninomiya, S. Nomura : Abstracts of CSSJ Conference, Vol.95 (2017) p.129

磁化活性汚泥法の社会実装を可能とする 汚泥磁気分離装置の標準化によるプラント設計の簡易化

Simplification of plant design by standardization of magnetic separator that enables social implementation of magnetic activated sludge method

直井 裕哉, 渡辺 紡, 酒井 保藏, 荷方 稔之(宇都宮大); 弓場 誠, 中 聖一(NEOMAX エンジニアリング(株));
ミヒル ラル サハ(ダッカ大); 三浦 大介(首都大)

NAOI Yuya, WATANABE Tsumugi, SAKAI Yasuzo, NIKATA Toshiyuki (Utsunomiya Univ.); YUNBA Makoto,
NAKA Shoichi (NEOMAX Engineering); Mihir Lal SAHA (Dhaka Univ.); MIURA Osuke (Tokyo Metropolitan Univ.)
E-mail: sakaiy@cc.utsunomiya-u.ac.jp

1. はじめに

磁化活性汚泥法(MAS 法)は活性汚泥を磁気分離する生物学的な水処理法である。昨年度から実用化を目指して、大型の標準磁気分離装置の開発を開始した。今回は、下水処理を行っている磁化活性汚泥法パイロットプラントの汚泥を用いて性能を評価した。最もよい処理水質が得られたのは MLVSS 6000 mg/L、磁性粉/MLVSS=2 のとき、流量 167 m³/d、漏出磁性粉 7 mg/L であった。本標準磁気分離装置を用いれば、300 m³/d であれば 2 ユニットというような設計の簡易化が可能となる。

磁化活性汚泥法の磁気分離装置は分離性能に様々な因子が影響する。数千 mg/L 以上の汚泥を磁気分離する際の性能を予測する工学的な基盤はほとんど開拓されておらず、実用化の障害となっていた。そこで、我々は昨年度から、200 m³/d クラスの実用の標準磁気分離装置を提案し、この装置の性能を様々な条件で明らかにすることで、2000 m³/d 程度までの水処理に必要な数を決めるだけの設計の簡易化を提案し、標準装置の開発を進めてきた。1 台のコストも明らかなので計画段階で従来法とのコストも比較できる。本研究では実用規模の標準磁気分離装置ユニットを製作し、ユニットの処理性能を調査した。

2. 実験方法

実験は宇都宮市の水再生センターに設置した MAS 法パイロットプラント(曝気槽容積 8 m³)でおこなった。磁気分離装置は NEOMAX エンジニアリング製の回転ドラム型のものを使用した。ネオジム磁石をドラム(直径 16.5 cm、長さ 150 cm)内に固定し、外側のドラムのみを回転させる二重構造となっている。そのため汚泥が付着するドラム下部では 0.5 T、汚泥を剥離するスクレーパー部分は 2 mT 以下の磁場に抑えられている。この磁気分離装置 2 台を直列に配置したものを標準磁気分離装置ユニット(Fig.1)とし本実験で性能評価した。分離された磁化活性汚泥は全て曝気槽に戻される。この磁気分離ユニットの性能評価は、処理水量を変化させ、処理水の磁性粉濃度を測定することでおこなった。

3. 結果と考察

結果を Table 1 に示す。磁性粉濃度が増加することにより磁気力が増大し処理性能が向上したと考えられる。最もよい処理水質が得られたのは MLVSS 6000mg/L、磁性粉/MLVSS=2 のとき流量 167 m³/d、磁性粉濃度 7mg/L であった。MLVSS が 4 g/L のとき磁性粉を 3 倍添加すると 300 m³/d で流出磁性粉濃度 50 mg/L 以下にまで処理できることがわかった。

1 ユニット当たりの処理水量をもとに 1,000 m³/d、800 mg-BOD/L の工場排水処理を仮定したコスト試算の結果を Table 2 に示した。初期コストおよび運転コストが従来法よりも少なくなった。運転コストは脱水汚泥廃棄の代わりに磁性粉の補充が必要になるが、コストは従来法の 13% 程度に抑えられる。また沈澱池や汚泥処理設備が不要なため省スペースになると考

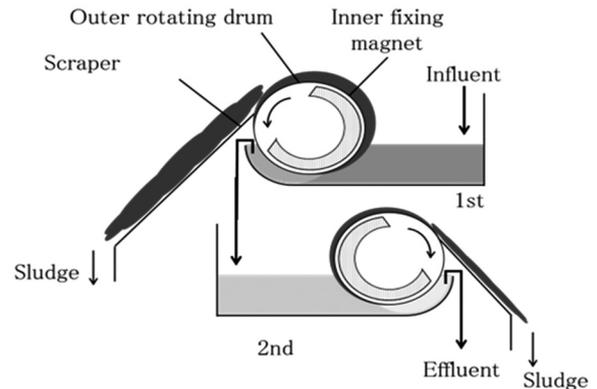


Fig. 1 Magnetic separator unit

Table1 processing performance of standard magnetic separation unit

MLVSS(mg/L)	4,000			6,000		
Magnetic powder /MLVSS	1.5	2	3	1.5	2	3
Magnetic powder concentration of second shelf under 50 mg/L (m ³ /d)	Under 144	216	312	125	240	-

Table 2 contrast two method cost

	Standard activated sludge method		Magnetic activated sludge method	
	With removal waste sludge		Without removal waste sludge	
Initial cost	Sedimentation basin(diameter of 7m)	60 million yen	Magnetic separator (7 unit)	35 million yen
	Sludge concentrating tank			2.7 million yen
	dehydrator		Magnetic powder	
Running cost	Dewatered sludge disposal	20 million yen/year	Supplied magnetic powder	2.6 million yen/year

えられる。なお曝気槽については同一のものを使用するため省略した。

4. まとめ

1 ユニットの処理水量を求めることによりプラント全体の設計、コスト試算が容易になった。処理性能は汚泥や磁性粉濃度の影響を強く受け、条件次第では 1 ユニットで 300 m³/d の処理が可能であることが示された。コスト試算の結果、従来法よりも少ない費用で運転できることが示唆された。標準装置としてさらに性能向上のための工夫を重ねて行く必要がある。

磁化活性汚泥法に適したリン除去法の検討 ～凝集砂ろ過法と凝集磁気分離法の比較

Study of phosphorus removal method suitable for Magnetic Activated Sludge method -Comparison coagulation-sand filtration between coagulation-magnetic separation-

福田 芳樹, 酒井 保藏, 小林 拓美, 荷方 稔之, 六本木 美紀(宇都宮大); サハ ミヒル ラル(ダッカ大)
 FUKUDA Yoshiki, SAKAI Yasuzo, KOBAYASHI Takumi, NIKATA Toshiyuki, ROPPONGI Miki (Utsunomiya Univ.);
 SAHA Mihir Lal (Dhaka Univ.)
 E-mail: sakai@cc.ustunomiya-u.ac.jp

1. はじめに

磁気分離を応用した生物学的水処理法である磁化活性汚泥(MAS)法は余剰汚泥引抜きを行わずに運転するため、余剰汚泥と共にリンを除去する生物学脱リンプロセスは適用できない。本研究では、MAS 法の後段に設置するリン除去法のプロセスとして凝集砂ろ過法と凝集磁気分離法の適用を考え、両者の比較を行った。その結果、回収された濃縮汚泥の処理にも磁気力を利用できる凝集磁気分離法が有利であると考えられた。

排水中のリン除去法は物理化学的除去と生物学的除去に大別される。このうち生物学的リン除去はポリリン酸蓄積菌による代謝メカニズムを利用している。これは活性汚泥にリンを過剰摂取させ余剰汚泥の引き抜きとともにリン除去を行う方法である。このプロセスは磁化活性汚泥法でも適用できるが、余剰汚泥の引抜きを行うため磁化活性汚泥法のメリットが失われることとなる。そこで、MAS 法の後段にリン除去プロセスを設けることでリンを除去すると同時に、懸濁物質も除去でき、磁化活性汚泥法の高度処理プロセスを構築できると考えた。本研究では、高度処理のための後段プロセスとして凝集砂ろ過法と凝集磁気分離法について比較検討した。

2. 実験方法

前段の MAS 法には有効容積 5 L の磁化活性汚泥法標準実験装置を用いた。[1]

(1) 凝集砂ろ過法

流出水(PO₄-P 濃度 : 15.0~15.5 mg/L) 100 mL に Fe³⁺ 濃度 5~200 mg/L の範囲で凝集剤として FeCl₃ を加えた。その後、1 分間 NaOH 溶液を用いて、約 pH6 に調整した。1 分間急速攪拌した後、3 分間の緩速攪拌を行った。これを砂ろ過装置に通水し、ろ過された処理水の PO₄-P 濃度を測定した。

(2) 凝集磁気分離法

pH 調整の後に磁性粉濃度 25 mg/L となるように磁性粉を加えた他は、凝集砂ろ過法と同様の操作を行った。その後、ネオジム磁石(5 cm×5 cm×1 cm、最大磁束密度 0.35 T)を用いて磁気分離を行い PO₄-P 濃度を測定した。

それぞれのプロセス概略図を Fig.1, Fig.2 に示した。

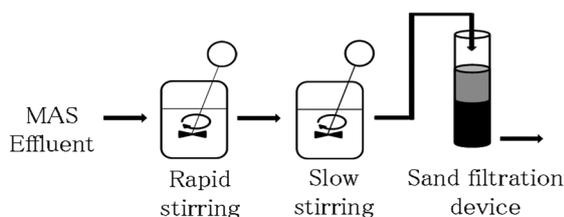


Fig.1 Coagulation-Sand Filtration Process

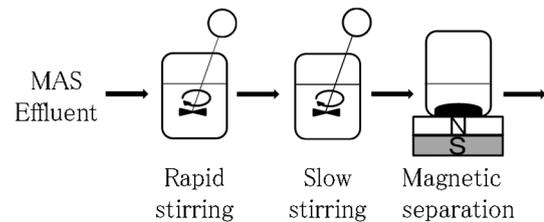


Fig.2 Coagulation-Magnetic Separation Process

3. 結果と考察

測定結果を Fig.3 に示した。凝集剤である Fe³⁺ 濃度 5~40 mg/L の範囲では凝集磁気分離法の方が高いリン除去率となった。しかし、Fig.3 の場合、PO₄-P を全て FePO₄ にするのに必要な Fe³⁺ 濃度は 22~27 mg/L と見積もられたが、35 mg/L で 80 %程度、50 mg/L でほぼ 100 %のリン除去率となった。Fe³⁺ 濃度 50 mg/L の時点で濁度の除去率は 90 %程度であり、リン除去と同時にSSの除去も行った。しかし、本実験では pH 調整の時間を 1 分間としたが、凝集磁気分離法において磁性粉を加える時点ですでにフロックが形成されていたため効率的にフロックを形成できていなかったと考えられる。

リン回収後の処理を考えると、一般的に凝集砂ろ過法ではろ材に吸着したフロックを完全には洗浄できない、ろ材表面で微生物が繁殖するといった問題が挙げられる。また逆洗水で捕捉フロックが希釈されるため、濃縮や脱水処理も必要となる。一方、磁気分離法では、汚泥を高濃度、高速で分離することができ、その後の濃縮、脱水も磁気力を利用して効率的に行えると考えられる。

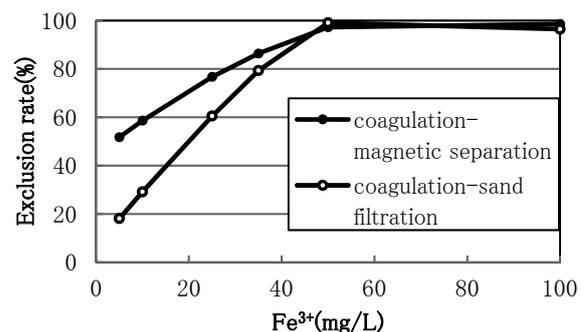


Fig.3 The Relationship between FeCl₃ Addition and Phosphorus Exclusion Rate

4. まとめ

本実験において、両者ともにリン除去率がほぼ 100 %となる FeCl₃ 添加量は変わらない結果となったが、後処理の観点から見て凝集磁気分離の方が有利であると考えられる。

参考文献

1. I. Masashi, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 94(2017) p.71

水処理における磁気分離プロセスに用いる種々のマグネタイトの性能評価

Performance evaluation of various magnetite used for magnetic separation process in water treatment

王悠 エン, 酒井 保藏, 荷方 稔之, 六本木 美紀 (宇都宮大); 弓場 誠, 中 聖一 (NEOMAX エンジニアリング)
 WANG Youyan, SAKAI Yasuzo, NIKATA Toshiyuki, ROPPONGI Miki (Utsunomiya Univ.);
 YUNBA Makoto, NAKA Shoichi (NEOMAX Engineering);
 E-mail: sakaiy@cc.utsunomiya-u.ac.jp

1. はじめに

水処理分野において磁気分離は用途が限られたいわばニッチなプロセスである。しかし、近年、安価にマグネタイトが入手可能となり、様々な非磁性の汚濁対象物にマグネタイトを添加し、磁気分離するプロセスが従来法と経済的に競争できる状況となっている。本発表では、入手可能な安価なマグネタイトを従来のマグネタイトと比較した。その結果、100~200 円/kg で提供されるマグネタイトでも、磁化活性汚泥(MAS)法や凝集磁気分離法に利用できることが示された。

活性汚泥法やメタン発酵法で利用される微生物や一部の懸濁物質はマグネタイトを添加するだけで吸着、一体化させることができ、磁気分離を導入できる。凝集分離プロセスでは凝集剤と共に適量のマグネタイトを添加すれば磁気分離を導入できる。マグネタイトの添加によって広く利用されている主要な水処理プロセスのほとんどに磁気分離を導入できることはあまり知られていない。これは、マグネタイトのコストが500~1000 円/kgであったため、磁気分離導入が経済的に難しかったためと考えられる。現在、鉄系凝集剤の500~1000 円/kg-Fe と比べて1/5 程度で入手でき、分離速度の速さや分離後の汚泥処理まで考えると磁気分離は従来法に代わる競争力があると考えられる。

本研究の目的は、入手可能な安価なマグネタイトを磁気シーディングの材料として評価することである。

2. 実験方法

本研究に用いた磁性粉は A が試薬とし入手できるマグネタイト(関東化学製)、B が戸田工業製 KN-320、C がマエダマテリアル製ナノフェロスラリー II、D、E、F、G が今回入手した安価なマグネタイトである。

分離試験は、次に示す2つの方法で行った。

1) 汚泥の磁性粉の磁気シーディング特性

蒸留水を50 mL サンプル瓶にとり、7種類の磁性粉をそれぞれ0.125 g 加えて攪拌する。沈降分離1時間後と5cm×5cm×1cmのネオジウム磁石(約0.3 T)上で磁気分離30秒後の上澄み液濁度を測定した。次に、MLSS約2500 mg/Lの馴養された活性汚泥を50 mL サンプル瓶にとり同様に7種類の各磁性粉を添加し(混合比約1:1)、磁性粉のみで行ったのと同様に沈降分離と磁気分離試験を行なった。

2) 簡易磁気分離曲線の測定

MLSSとマグネタイトの混合比約5:1で混合して、磁気分離10秒後、20秒後、30秒後の清澄液をすばやく吸い取り、濁度を測定して磁気分離曲線を作った。

3) 長期使用時の課題検討

活性汚泥にそれぞれのマグネタイトを混合、磁化活性汚泥とし、1週間以上曝気運転した。

3. 結果と考察

1) 汚泥の磁性粉の磁気シーディング特性

Table 1 に各磁性粉のみ、及びそれらの磁性粉で磁気シーディングした MAS を沈降分離及び磁気沈降した場合の上澄み液濁度の結果を示した。磁性粉のみの濁度を見ると、C の上澄み液の濁度が大きな値となった、スラリー液が若干着色し

Table 1 Supernatant turbidity after 1 h settling and 30 s magnetic separation of various kinds of magnetite.

	A	B	C	D	E	F	G
Magnetite, settling (1h)	3	2	93	2	2	14	7
Magnetite, Magnetic separation (30 s)	2	3	216	21	4	2	6
MAS, settling (1 h)	22	24	25	19	10	160	72
MAS, magnetic separation (30 s)	7	14	12	11	8	23	11



Fig. 1 Photograph after 30 min settling of MAS seeded with various kinds of magnetite. The photograph shows magnetite A, B, C, D, E, F and G from left side.

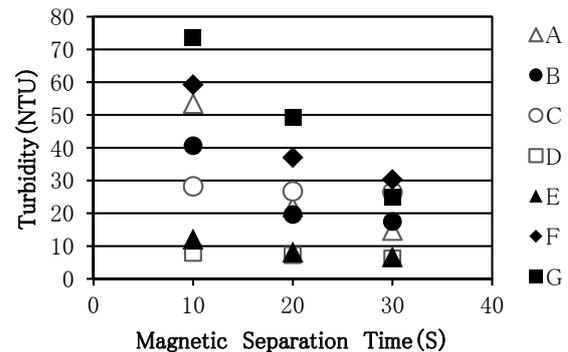


Fig. 2 Change of supernatant turbidities magnetic separation of various kinds of magnetite.

ており、上澄み液が着色したためである。FとGは微細な粒子が含まれ、濁度がやや高くなった。

それぞれの磁性粉で磁気シーディングされた MAS を沈降分離したところ、Fig. 1 のように沈降性に大きな差が見られた。数値の小さい D、E は活性汚泥との吸着性が良いと考えられる。C、D、E の MAS は重力沈降速度が速くて、マグネタイトを沈降促進剤として用いる場合は、有効と考えられた。

2) 簡易磁気分離曲線の測定

MLSS:マグネタイトの混合比約5:1の MAS を磁気分離した結果を Fig. 2 に示した。D、E の MAS は磁気分離が最も速かった。C もスラリー液に含まれる着色成分の影響を除けば分離が速いと予想された。F、G の磁気分離は遅く、磁気シーディングに適さないと考えられた。

3) 長期使用の課題

磁性粉 A、B、C は MAS 法に長期使用して問題がないことが確認できた。D、E は磁気シーディングでは優秀であったが、粒子が大きいため、MAS 法のように、長期間、曝気槽内で使用される場合、汚泥から脱離する傾向があり、課題が残った。しかし、凝集磁気分離には十分に使用できると考えられた。

磁化活性汚泥法における磁気分離の選択分離性の役割

The role of selective separation of magnetic separation in magnetic activated sludge process

五十嵐 創, 酒井 保藏, 荷方 稔之, 六本木 美紀(宇都宮大)

IGARASHI Hajime, SAKAI Yasuzo, NIKATA Toshiyuki, ROPPONGI Miki (Utsunomiya Univ.)

E-mail: sakai@cc.utsunomiya-u.ac.jp

1. はじめに

磁化活性汚泥法では余剰汚泥引き抜きを行わずに水処理を継続できる。これは磁気分離法が汚泥を曝気槽に高濃度で維持できるだけでなく、選択分離性の寄与が大きいと考えられる。磁化活性汚泥法から流出する懸濁物質(SS)に着目し、流出 SS を戻す系と戻さない系で比較し、プロセス磁気分離の選択性が余剰汚泥引抜きなしでの運転を可能にしている理由を検討した。流出 SS を戻す系では濁度の増加が認められ、SS が曝気槽に蓄積していることが示唆された。

生物学的水処理法である活性汚泥法では微生物は有機物を栄養として取り込み、その半分程度が同化され増殖に利用される一方、自己消化により汚泥濃度に比例して汚泥が徐々に減少すると言われている。磁化活性汚泥法は、汚泥濃度を磁気分離により高めることで、増殖速度と自己消化速度を拮抗させ、汚泥引抜きを行わず、自己消化によって汚泥濃度の定常化を達成している。膜分離活性汚泥法でも、汚泥濃度を任意に高めることは可能であるが、汚泥は増え続け、余剰汚泥引抜きは省略できないとされている。これは、自己消化によって発生する難分解性懸濁物質が蓄積するためと考えられるが、磁気分離では、難分解性懸濁物質は磁性粉を吸着しないため流出し蓄積しないと思われる。

本研究では、磁化活性汚泥法から流出する懸濁物質に着目し、磁気分離の選択性が磁化活性汚泥法の余剰汚泥引抜きなしでの運転に寄与していることを検証する。

2. 実験方法

合成下水としてポリペプトンと酢酸を主成分とするものを用いた。HRT=12 h として運転を行った。

宇都宮市内の磁化活性汚泥法パイロットプラントから磁化活性汚泥を採取し、実験に使用した。実験装置を Fig. 1 に示す。実験装置は曝気槽容量が 5 L のものを A と B、二つ用意し、比較条件として A は自己消化に伴う懸濁物質(自己消化 SS)を曝気槽に戻し、B は自己消化 SS を取り出すことにした。

装置の運転をしつつ、濁度や MLVSS などを測定し比較を行った。

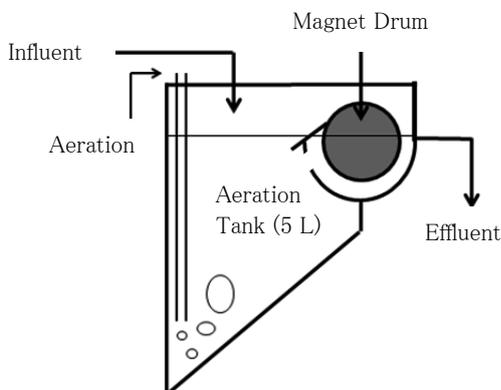


Fig. 1 Experimental Apparatus

3. 実験結果

装置 A と B の濁度揭示変化を Fig. 2 に示す。5 日目までは実下水から合成下水に変わったことによる馴養期間と考えられる。6 日目以降、濁度は安定しているが、流出 SS を戻している装置 A では装置 B と比べて濁度が約 2 倍に増加している。装置 B では自己消化 SS を流出させているため、自己消化 SS の蓄積が抑制されたためと考えられる。

微生物濃度に相当する MLVSS の経時変化を Fig. 3 に示す。装置 A の MLVSS が高い傾向がみられ、これは装置 A では自己消化 SS を曝気槽に戻しているためと考えられる。

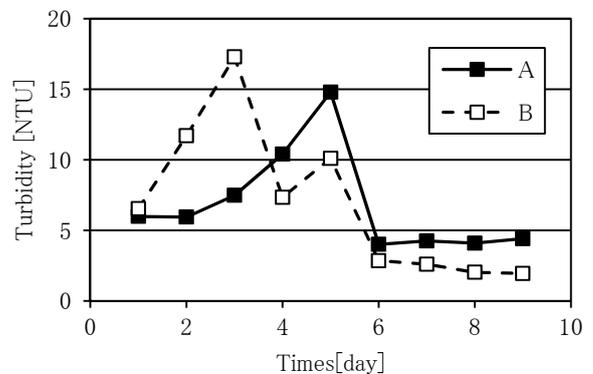


Fig. 2 Result of Turbidity

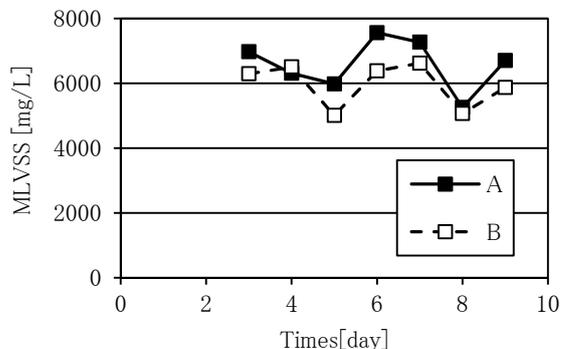


Fig. 3 Result of MLVSS

4. まとめ

沈澱した自己消化SSを曝気槽に戻送している装置Aでは、装置Bよりも流出液濁度が高く、磁気分離の選択性により、余剰汚泥引抜きを行わない運転をしても、曝気槽内への有機SSの蓄積が抑制できていることが示唆された。さらに実験が続けが定量的な考察を行う必要がある。

磁気分離技術教育のための様々な磁気分離デモンストレーション

Various Magnetic Separation Demonstration Experiments for Education of Magnetic Separating Technique

和久井 結太, 酒井 保藏, 荷方 稔之, 六本木 美紀 (宇都宮大学)

WAKUI Yuta, SAKAI Yasuzo, NIKATA Toshiyuki, ROPPOINGI Miki (Utsunomiya Univ.)

E-mail: sakaiy@cc.utsunomiya-u.ac.jp

1. はじめに

磁性粉が安価に入手可能となつて磁気分離を広く利用する環境が整いつつある。水処理の基幹技術である活性汚泥法を始め、メタン発酵法や凝集分離法も磁気分離導入が可能であるが、ほとんど利用されていない。微生物、有機・無機懸濁物質、染料、顔料、界面活性剤、油分など様々な対象物を磁気分離するデモンストレーションを紹介して、磁気分離技術の可能性を啓発する契機としたい。

污水浄化技術の中で、磁気分離法は現在あまり利用されていない。これは汚濁物質のほとんどは常磁性または反磁性のため、磁気力が小さく磁気分離を簡単に利用できないためである。最近、製紙排水への磁気分離や我々が研究してきた磁化活性汚泥法など磁気分離の水処理への導入が試みられており、非強磁性汚濁物質に強磁性を付与する前処理(以下、磁気シーディングと呼ぶ)に用いるマグネタイトが安価(従来の約 1/5)に入手可能となった。本発表は、様々な汚濁物質に磁気シーディングをして磁気分離可能とする手法を紹介し、磁気分離技術の可能性を啓発し、磁気分離研究の裾野を広げることが目的としている。

2. 様々な模擬汚濁物質の磁気分離

マグネタイトは、試薬として市販されている四三酸化鉄(関東化学製)を用いた。磁気シーディングを次の 3 つに分類した。

(1) マグネタイトを加えるだけで磁気分離できるもの

活性汚泥、みそ汁、トイレトーパー懸濁液、デンプン懸濁液、小麦粉懸濁液などはマグネタイトを加えるだけで磁気分離できる。ここでは入手しやすい、みそ汁、セルロース、デンプンについて紹介する。

みそ汁: ペースト状のみそ約 30 g を 1L の水に懸濁させ、沈降分離を数回繰り返し、着色成分を除いておく。

デンプン: コーンスターチまたは片栗粉 1g を水に懸濁させる。

小麦粉: 小麦粉 1g を水に懸濁させる。

セルロース: トイレトーパー 1g を水に入れ、十分攪拌して懸濁させる。

磁気シーディングと磁気分離操作: これらの懸濁液 50 mL を 50 mL サンプル瓶にとり、マグネタイト懸濁液(10%)を 0.5 mL 加え、10 秒程度攪拌し、すばやくネオジム磁石(5cm×5cm×1cm、表面磁束密度約 0.3 T)の横に接するように置く。

(2) マグネタイトと凝集剤を組み合わせると磁気分離できるもの
マグネタイトとの親和性がほとんどない汚濁物質でも、凝集分離法が適用できるものは、磁性粉を添加してから凝集処理すれば凝集フロックを磁気シーディングできる。

炭酸カルシウム: 歯磨きの研磨剤などに用いる。難溶性の塩。炭酸カルシウム 1 を 1 L の水に懸濁させる。

ベンガラ (Fe₂O₃): 代表的な橙～黄色顔料。酸化鉄であるが強磁性ではない。

カオリン: 粘土物質。1 g のカオリンを 1 L の水に懸濁させる。

染料: インクジェットプリンタインク(マゼンダ)を水に溶かす。

磁気シーディングと磁気分離操作: 凝集剤は広く利用されている PAC 懸濁液(ポリ塩化アルミニウム、市販品は Al₂O₃として 10%以上を含む)を用いた。(1)と同様に、50 mL サンプル瓶に 50 mL の模擬汚濁水をと、マグネタイト懸濁液を 0.5 mL

加え混合する。次に PAC 原液を 0.5 mL 加え、良く混合する。PAC を加えると pH が酸性となるため、pH 調整剤として、1M トリスヒドロキシメチルアミノメタンまたは 1M 水酸化ナトリウム水溶液を加え、pH を 6~8 に調整すると、凝集フロックが形成され、汚濁物質と磁性粉が共にフロックに取り込まれる。これをネオジム磁石の横に接して置き、磁気分離する。

(3) マグネタイト(強磁性粉)と機能性材料を組合せたもの。

磁性活性炭、磁性イオン交換樹脂(MIEX)、磁化活性汚泥、磁化メタン発酵などはこの分類に当てはまる。水処理分野の研究者にとっては磁化活性汚泥がマグネタイトと水処理微生物の組合せであり、分かりやすいデモンストレーションとなると考えられる。

3. デモンストレーションの一例

Fig. 1, 2 に磁気分離の写真を、Table 1, 2 に磁気分離の前後の濁度と除去率を示した。

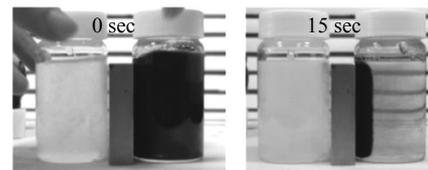


Fig. 1 Magnetic separation of cellulose (Toilet paper).

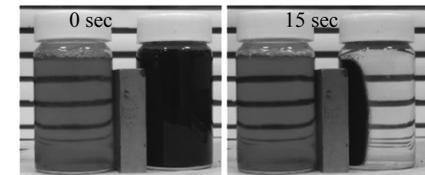


Fig. 2 Magnetic separation of dye (Ink).

Table 1 Turbidities before and after simple magnetic separation

Material	Before magnetite addition /NTU	After magnetite addition /NTU	After magnetic separation /NTU	Removal rate /%
Toilet paper	285	1092	29	90
Flour	467	642	51	89
Starch	134	450	14	89

Table 2 Turbidities before and after coagulating magnetic separation

Material	Before mag. add. /NTU	After mag. add. /NTU	After mag. sep. /NTU	After flocc. add. /NTU	Removal rate /%
Calcium carbonate	1535	1683	927	67	96
Kaolin	1337	1885	460	39	97
Soap	982	1480	645	93	91
Iron oxide	7877	7223	4563	369	95
Ink (magenta)	1	352	38	16	—

多くの汚濁物質が磁気シーディングにより磁気分離できることがわかる。安価な工業用マグネタイトの重量当たりの価格は PAC の Al₂O₃ 重量当たりの価格の 1/5 程度であり、凝集沈降分離を凝集磁気分離に代えても水処理コストはあまり変わらない。磁気分離は高速分離でき、汚泥も濃縮されるため、総合的にみると磁気分離の導入が経済的に成り立つ可能性があると考えられる。

高強度小型多機能スケルトンサイクロトロンの開発 — 遮蔽電流磁場解析 —

Development of high intensity compact multifunctional skeleton cyclotron

— Numerical simulation on screening current-induced field —

栗津 佑太, 金 錫範, 植田 浩史(岡山大学); 野口 聡(北海道大学); 石山 敦士(早稲田大学);
渡部 智則, 長屋 重夫(中部電力); 吉田 潤, 鶴留 武尚, 高橋 伸明, 三上 行雄(住友重機械); 福田 光宏(大阪大学)
AWAZU Yuta, KIM SeokBeom, UEDA Hiroshi (Okayama Univ.); NOGUCHI So (Hokkaido Univ.);
ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.); WATANABE Tomonori, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Co., Inc.);
YOSHIDA Jun, TSURUDOME Takehisa, TAKAHASHI Nobuaki, MIKAMI Yukio (Sumitomo Heavy Industries, Ltd.);
FUKUDA Mitsuhiro (Osaka Univ.)
E-mail: hiroshi.ueda@okayama-u.ac.jp

1. はじめに

我々は、科学技術振興機構(JST)の産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラム(OPERA)において、エネルギー可変で多種類の粒子を加速可能な高強度小型サイクロトロンの開発に取り組んでいる。我々は高温超電導技術を適用した空芯型サイクロトロン(スケルトンサイクロトロン)を提案している[1]。スケルトンサイクロトロンは、等時性磁場を形成する円形のコイルと周方向の AVF (Azimuthally Varying Field) を形成するセクターコイルにより構成される。これらのコイルに用いられる高温超電導線材はテープ形状であるため、遮蔽電流が誘導され、それに起因する不整磁場(以下、遮蔽電流磁場)が発生磁場における空間的均一性及び時間的安定性の低下を引き起こす原因となる[2]。よって、高磁場精度化においては上記の遮蔽電流が影響を与えるため、設計段階において遮蔽電流磁場の影響度を評価し、補正及び抑制を行うことが重要である。本発表では、設計を行った多機能スケルトンサイクロトロンを対象とし、電磁場数値解析により遮蔽電流磁場の影響を評価したので報告する。

2. 解析対象および解析手法

別報 1C-p11[1]で報告しているように、我々は、アルファ線核医学治療に用いられる ^{211}At を生成するために、 $^4\text{He}^{2+}$ を 36 MeV まで加速する小型サイクロトロンの研究開発に取り組んでいる。今回は最も磁場を必要とする D^+ 40 MeV を解析対象とする。解析対象のコイルでは、幅 6 mm、厚さ 0.1 mm(超電導層 1.0 μm) の REBCO 線材を用いた。運転温度は 20 K とした上で、メインコイル、セクターコイル共に 16.6 時間励磁し、その後一定でホールドする。各コイルはシングルパンケーキ巻したものとして、その解析条件は Table.1 に示す通りである。REBCO 線材の厚み方向における電磁場が一様とする近似を用い、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場数値解析[3]により遮蔽電流磁場の計算を行った。

3. 遮蔽電流磁場解析

この小型サイクロトロンにおいて、粒子を加速させる領域は半径 10 cm から取り出し半径である 50 cm のミッドプレーン上の平面内である。従って、以上の加速領域における励磁完了時における周方向平均遮蔽電流磁場分布を Fig.1 に示す。また、励磁開始から 5 時間後、10 時間後、励磁完了時の 16.6 時間後における取り出し半径での周方向遮蔽電流磁場分布を Fig.2 に示す。今回のコイルシステムにおいては最大で 3~5 mT 程度の遮蔽電流磁場が生じていることが確認できる。サイクロトロンに必要とされる等時性磁場および AVF における発生磁場に要求の目標精度は 10^{-4} であることから、 D^+ 40 MeV の設計仕様においては遮蔽電流磁場の影響を考慮することが重要であると考えられる。解析内容の詳細については当日報告する。

Table.1 Simulation conditions of HTS coil system for accelerating D^+ to 40 MeV

	Number of turns	Number of layers	Operating current (A)
Main Coil 1	315	3	364
Main Coil 2	15	9	483.4
Main Coil 3	92	3	516
Main Coil 4	74	16	469.5
Main Coil 5	62	1	53.2
Main Coil 6	383	4	472.2
Main Coil 7	34	2	499.7
Sector Coil	110	6	598

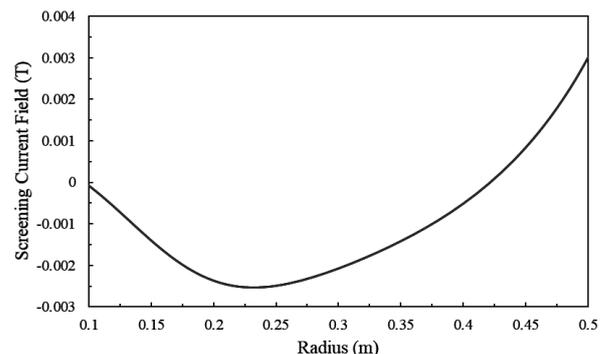


Fig.1 Screening current-induced field generated by HTS coil system for accelerating D^+ to 40 MeV

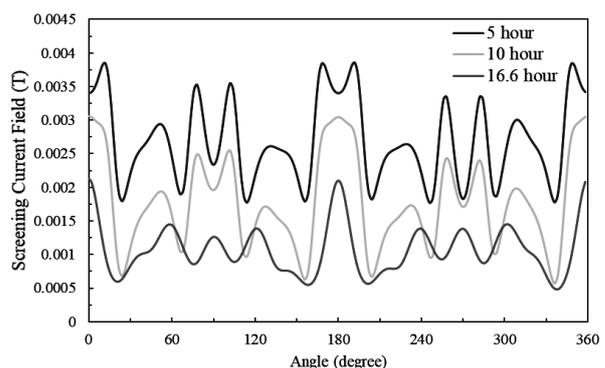


Fig.2 Screening current-induced field at extraction radius

謝辞

本研究の一部は、科学技術振興機構(JST)の産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラム(OPERA)に依ったことを付記する。

参考文献

- 2018年度春季低温工学・超電導学会講演概要集 1C-p11 (2018).
- Y. Yanagisawa, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., 20, 744-747 (2010).
- H. Ueda, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., 24, 4701505 (2014).

高強度小型多機能スケルトンサイクロトロンの開発 —超電導コイル設計—

Development of high intensity compact multifunctional HTS cyclotron – Design of HTS coil –

野口 聡(北海道大学);植田 浩史(岡山大学); 石山 敦士(早稲田大学);
 渡部 智則, 長屋 重夫(中部電力);吉田 潤, 鶴留 武尚, 高橋 伸明, 三上 行雄(住友重機械);福田 光宏(阪大)
 NOGUCHI So (Hokkaido Univ.); UEDA Hiroshi (Okayama Univ.); ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.);
 WATANABE Tomonori, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Co., Inc.); YOSHIDA Jun, TSURUDOME Takehisa,
 TAKAHASHI Nobuaki, MIKAMAI Yukio (Sumitomo Heavy Industries, Ltd.); FUKUDA Mitsuhiro (Osaka Univ.)
 E-mail: noguchi@ssi.ist.hokudai.ac.jp

1. はじめに

我々は、科学技術振興機構(JST)の産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラム(OPERA)において、エネルギー可変で多種類の粒子を加速可能な高強度小型サイクロトロンの開発に取り組んでいる。我々は、高温超電導技術を適用した空芯型サイクロトロン(スケルトンサイクロトロン)を提案している[1]。スケルトンサイクロトロンは、等時性磁場を形成する円形のコイルと周方向の AVF (Azimuthally Varying Field) を形成するセクターコイルにより構成される。加速空洞、機械支持構造、クライオスタットなどの配置による空間制約、さらに電磁力や臨界電流特性などの超電導特性による制約の下、コイルを設計しなければならない。本発表では、エネルギー可変・多種類加速粒子に対応した等時性磁場や AVF の発生に要求される超電導コイルの設計について報告する。

2. 超電導コイルシステムの試設計

別報 1C-p10 で報告しているように、我々は、アルファ線核医学治療に用いられる ^{211}At を生成するために、 $^4\text{He}^{2+}$ を 36 MeV まで加速する小型サイクロトロンの研究開発に取り組んでいる。このサイクロトロンは、取り出し半径を 50 cm とし、4 セクターの空芯高温超電導サイクロトロン(スケルトンサイクロトロン)であり、また、アルファ線核医学治療だけでなく、BNCT(ホウ素中性子捕捉療法)用の中性子生成、SPECT(単一光子放射断層撮影)や PET(陽電子放出断層撮影)に用いられる RI 製剤の製造も可能な多機能サイクロトロンである。今回は、高温超電導コイルとして、等時性磁場発生用のメインコイルと、AVF 発生用のセクターコイルの試設計を行った。多機能サイクロトロンとして発生すべき等時性磁場を Fig. 1 に示す。まず、最も磁場を必要とする D^+ 40 MeV の等時性磁場を発生するコイルを設計した。

2.1 セクターコイルの設計

スケルトンサイクロトロンは、AVF をセクターコイルと呼ばれる非円形(三角形)コイルで発生させる。今回は、4 セクターとして、フラッター(磁場の段差の度合い) F^2 を 0.04 とした。また、セクターコイルのない領域(バレー部)には、加速空洞を配置することを想定し、セクターコイルのスパン角を 38° とした。

2.2 メインコイルの設計

セクターコイルで発生する磁場の周方向平均した分布を Fig. 2 に示す。所望の等時性磁場分布と併せて示した。この差の磁場をメインコイルで発生させることになる。コイル形状・位置等を設計変数として GA-SA 法を用い、使用超電導線材量が最少となるよう設計最適化を試みた。設計されたコイルシステムの概観を Fig. 3 に示す。また、設計されたコイルシステムが発生する磁場を Fig. 2 に示す。

2.3 エネルギー可変

コイルの電流を変更することで、Fig. 1 の多機能サイクロトロンとして要求される等時性磁場が発生できることを確認した。詳細は当日報告する。

謝辞

本研究の一部は、科学技術振興機構(JST)の産学共創プ

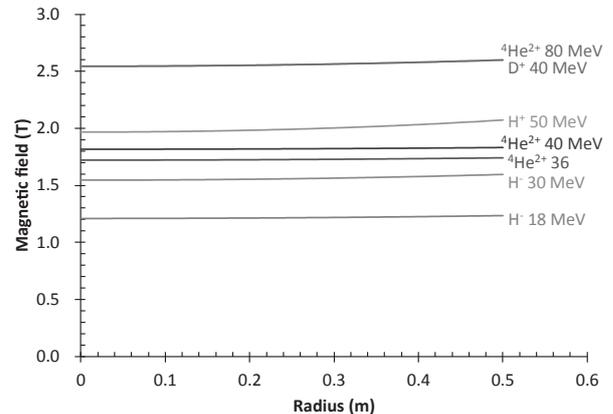


Fig. 1. Isochronous field for variable-energy multi-particle Skeleton Cyclotron

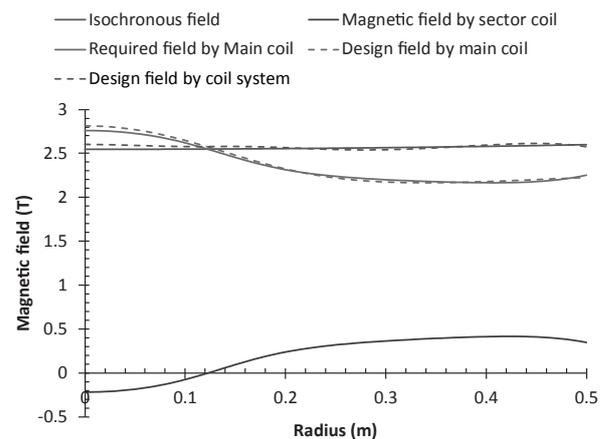


Fig. 2. Azimuthal average magnetic field in the median plane of HTS coil system for accelerating D^+ to 40 MeV.



Fig. 3. Schematic drawing of HTS coil system for K80 Skeleton Cyclotron

プラットフォーム共同研究推進プログラム(OPERA)に依ったことを付記する。

参考文献

- 2018年春季低温工学・超電導学会講演概要集1C-p11 (2018).

重粒子線回転ガントリーのためのアクティブシールド型超伝導マグネットの設計研究

Design study of a superconducting magnet with active shielding for a rotating gantry

尾花 哲浩(NIFS); 荻津 透(KEK)

OBANA Tetsuhiro (NIFS); OGITSU Toru (KEK)

E-mail: obana.tetsuhiro@LHD.nifs.ac.jp

1. はじめに

粒子線がん治療では、回転ガントリーを使用することで、患者の周囲360度の任意角度から粒子ビームを患部に向けて精度良く照射することが可能になる。その結果、患者への身体的負担が軽い治療を実現している。

現在、放射線医学総合研究所(放医研)にて稼動中の重粒子線用回転ガントリーには、鉄ヨークを用いた超伝導マグネットが使用されている[1]。マグネットの重量は鉄ヨークが支配的となり、1台のマグネットの重量は数トン程に達する。回転ガントリーは10台のマグネットを使用するため、数10トンの重量物が強固なフレームに搭載された状態で、非常に困難な回転制御が求められている。そこで、本研究では、マグネットの軽量化により、回転ガントリーの制御系とフレーム構造を簡素化するため、鉄を使用しないアクティブシールド型超伝導マグネットの開発を目指す。本講演では、アクティブシールド型超伝導マグネットの磁場計算について発表する。

2. マグネットの詳細

放医研の超伝導回転ガントリーで使用されているダイポールマグネット(BM07)[1]のアクティブシールド化を検討した。ダイポールマグネット(BM07)の詳細をTable 1に示す。コイル設計は、 $\cos\theta$ 型(鞍型)コイル断面用最適化設計コード[2, 3]を使用し、ダイポールコイルとアクティブシールドコイルについて行った。各コイルの詳細をTable 2に、コイル断面をFig. 1に示す。コイル間で生じる電磁力(斥力)とコイル上での最大経験磁場を軽減するため、ダイポールコイルとアクティブシールドコイルの間に、0.09 mの隙間を設けた。コイル巻線に使用する超伝導線には、Surface winding法[3]に対応できる径0.9 mmのNbTi線を用いる。

3. 磁場計算結果

Fig. 1に示したコイル断面を構成するNbTi線の配置に基づいて、2次元磁場計算を行った。Fig. 2にダイポールコイルとアクティブシールドコイルの磁場分布、及び各磁場分布を足し合わせた結果を示す。各コイルの通電電流値は、ダイポールコイルが217 A(正值)、アクティブシールドコイルが-249 A(負値)であり、各コイルで生じる磁場の向きが部分的に相反する。その結果、アクティブシールドコイル外周において、漏れ磁場を遮蔽することができた。ただし、ダイポールコイルの口径内において、アクティブシールドコイルの磁場分布により、ダイポール磁場が低減される。

謝辞

本研究を進めるにあたり、貴重な助言を頂いた株式会社東芝エネルギーシステムズの折笠朝文氏と高山茂貴氏に感謝致します。

参考文献

1. S. Takayama, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 94 (2017) p.104
2. T. Obana, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.158

3. T. Obana, et al.: Fusion Engineering and Design, Vol. 81 (2006) p.2541

Table 1 Specification of the dipole magnet (BM07).

Bending angle	22.5 degree
Bending radius	2.8 m
Dipole field	2.37 T
Reference radius	60 mm
Beam duct aperture	122 mm

Table 2 Specification of dipole and active shield coils.

Coil type	Dipole	Active shield
Number of layers	60	25
Number of turns	6954	3000
Inner radius	0.09 m	0.3 m
Outer radius	0.21 m	0.35 m
Nominal current	217 A	249 A

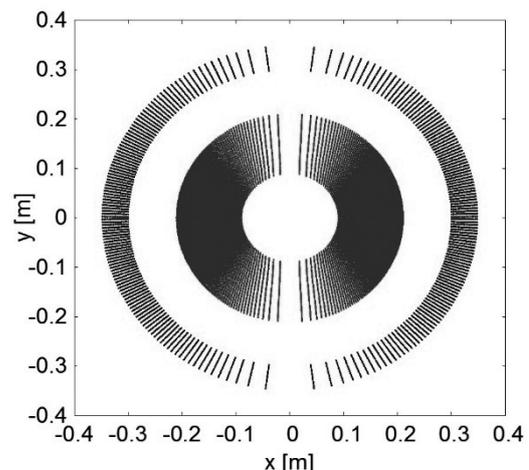


Fig.1 Cross-section of dipole and active shield coils for a rotating gantry.

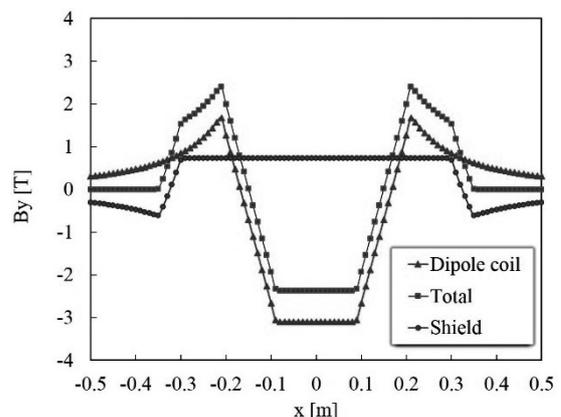


Fig.2 Magnetic field distributions of dipole and active shield coils.

ITER 超伝導マグネットシステム冷却のダイナミックシミュレーション

Dynamic Simulation of Superconducting Magnet System of ITER Tokamak

岩本 晃史, 鷹見 重幸(NIFS); 前川 龍司(ITER 機構)
 IWAMOTO Akifumi, TAKAMI Shigeyuki (NIFS); MAEKAWA Ryuji (IO)
 E-mail: iwamoto.akifumi@LHD.nifs.ac.jp

1. はじめに

ITER 超伝導マグネットシステムのダイナミックシミュレーションを行った。ITER トカマクは 15MA のプラズマ電流によるパルス的な放電実験が計画されているが、超伝導マグネットシステムの一次冷却系は、そのプラズマ実験に伴う動的な熱負荷を受ける。シミュレーションでは補助コールドボックス (ACB) に取り付けられた熱交換器において一次冷却系から二次冷却系の冷凍機側へと伝達される熱負荷の変動について評価を行っている。プラズマ崩壊によりファーストイベント (センターソレノイド (CS) コイルや垂直磁場 (PF) コイルシステムの緊急減磁) が発生することが想定されているが、その大きな熱負荷変動による冷却運転への影響が懸念されている。シミュレーションではその影響を軽減する方法の検討も行っている。これらはプロセスの検討だけではなく超臨界ヘリウム (SHe) 循環ポンプ (CCrc) や低温圧縮機 (CCmp) を含む ACB の設計にも役立っている。

2. リアルタイムシミュレータの開発

大型クライオプラントのプロセス検討や運転員教育のためのシミュレータの開発をおこなっている。その用途から本シミュレータは実時間性を重視している。この点が他機関で開発されているシミュレータとは大きく異なる特徴となっている。石油化学プラント用シミュレーションソフトである Visual Modeler (VM) (株式会社オメガシミュレーション製) をベースとして使用し、クライオプラントのシミュレーションに必要な改良を加えている。VM はその用途から配管内の流体のエンタルピーに対して圧力変動を考慮していない。しかし SHe を対象とするクライオプラントでは圧力変動を無視することはできず、それを考慮したシミュレーションモデルの構築が必要であった。ITER ではトロイダル磁場 (TF) コイルや一次冷却系を構成するトランスファーラインが長尺であり、それらを表現する配管モジュールやケーブルインコンジット導体 (CICC) モジュールを独自に開発した。そのモジュールを使い CEA-Grenoble において実施された HELIOS テストループの実験結果の再現に成功している [1]。

3. ITER マグネットシステムのモデル化

Fig. 1 に ITER クライオプラントの概略図を示す。3 台の冷凍機から供給される冷媒がクライオプラントターミナルコールドボックス (CTCB) において統合され、各 ACB へと分配される。ACB の貯槽へと供給された SHe は、各被冷却体で発生した熱を回収する熱交換器を冷却し。その後、熱負荷として冷凍機へと回収される。一次冷却系では循環ポンプにより SHe を被冷却体へ供給するが、吐出側熱交換器が SHe の供給温度を一定に保つ役割を果たしている。

今回のシミュレーションでは ACB の熱交換器 (HEX)、CCrc、被冷却体: TF 構造物 (ST)、CS、TF や PF/磁場補正コイル (CC) を含む一次冷却系のみをモデル化した。

4. シミュレーション

プラズマ放電時に各被冷却体から発生する動的な熱負荷は、各 ACB の HEX から二次冷却系へと放出される。その放熱量の変動をシミュレーションにより明らかにした。プラズマ実験は 1800 秒を一周期とし、その前半でプラズマ電流 15MA に

よる 400 秒の定常放電を実施、後半は核発熱や渦電流損失により発生した熱負荷を回収し次の放電に向けた準備期間となっている。シミュレーションでは各被冷却体で発生が予測されている熱負荷をモデルの分割に従って割り当て、循環している SHe により回収された熱負荷が時間の経過と共に HEX で放出される様子を計算した。この計算の前提として SHe 供給温度 (熱交換器貯槽内圧力) や供給流量を定格にする制御だけを行っており、冷凍機側への熱負荷変動を緩和する対策などは行っていない。一例として ST において発生した熱が HEX で放出される様子を Fig. 2 に示す。図中には熱交換器貯槽への定常熱侵入などを含んだ冷凍機側への熱負荷変動も同時に示している。実験開始直後はプラズマ放電毎に熱負荷の最大値が大きくなるが、その後はほぼ一定の熱負荷変動振幅に落ち着くことが分かる。その熱負荷変動は 10kW 以上と非常に大きい。本シミュレーション結果を他のシミュレーションと比較し矛盾がないことを確認している。

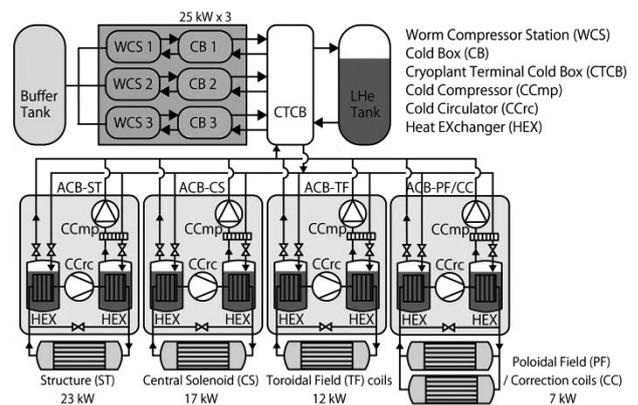


Fig. 1 A simplified Process Flow Diagram (PFD) of ITER Cryoplant.

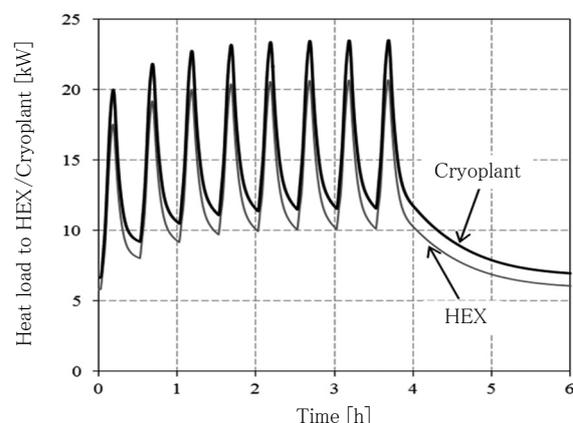


Fig. 2 Heat load variations to the Cryoplant and HEX. [2]

参考文献

1. R. Maekawa, et al.: J. Cryo. Super. Soc. Jpn., 49 (2014), p311.
2. R. Maekawa, et al.: Cryogenics 63 (2014), p220.