

高密度 c 軸配向銅酸化物超伝導焼結体の作製と物性

Synthesis of highly dense and c -axis aligned sintered bulks of cuprate superconductors and their physical properties

下山淳一, 近藤真史, 齋藤雄仁, 岩見壮徒, 田中智之(青学大); 武田泰明(東大院工); 元木貴則(青学大)
 SHIMOYAMA Jun-ichi, KONDO Masato, SAITO Yujin, TANAKA Tomoyuki, IWAMI Taketo (Aoyama Gakuin Univ.);
 TAKEDA Yasuaki (Univ. of Tokyo); MOTOKI Takanori (Aoyama Gakuin Univ.)
 E-mail: shimo@phys.aoyama.ac.jp

1. はじめに

銅酸化物超伝導多結晶材料の開発では、大きな電氣的磁氣的異方性、短い超伝導コヒーレンス長、さらに超伝導の d 波対称性による弱結合の問題の解消が主課題であった。今日実用されている代表的な多結晶材料は、緻密な c 軸配向組織を持つ Bi2223 銀シース多芯線材と金属基板上に設けた単結晶的な 2 軸配向した中間層表面上にエピタキシャル成長させた RE123 線材であり、いずれもテープ状である。一方、粒界の無い大型擬似単結晶とみなせる RE123 溶融凝固バルクも強力固体磁石や大容量電流リードなど様々な用途で実用されているが、形状には制約がある。これらに対し、バルク状の焼結体では弱結合の問題が深刻と考えられており、低い J_c でも使える電流リードや磁気シールドなどに用途が限定されている。

これまで我々は主に Bi2223、RE123 についてバルク状の焼結体における弱結合の問題を軽減することを目的とした研究を進めており、以下の指針が結晶粒間の J_c 改善に有効であることを明らかにしてきた。

- キャリア濃度を最適～オーバードープ状態に調整する
- (焼結ではない方法で) 緻密な組織を形成する
- 不定比金属組成を整数比に近づける
- Bi2223 においては Pb 固溶量を高める[1]

さらに、前回の学会では、エタノール(融点 159 K)のみを溶媒に用いた RE123 を含むスラリーを用い永久磁石上で c 軸配向堆積物が容易に得られることを報告した[2]。低温ではエタノールの粘性が大きく、比重の大きな酸化物粉末の沈降速度と熱エネルギーが低下し結晶配向が進みやすいこと、分散剤などが不要、つまり脱媒過程が省けることが特徴である。今回はこの c 軸配向堆積物からの高密度焼結体の作製の試みとそれらの物性を報告する。

2. 実験

あらかじめ調製した Dy(Ca)123, Y(Ca)123, Bi2223 粉末に対してエタノールとジルコニアボールを加え、容器内で混合することによりスラリーを作製した。ペレット成型しやすいように円盤状に切り抜いた銀やプラスチックの板をアルミホイルの円筒容器の中に置き、その上にまずエタノールを少量滴下し、液体窒素で凍結した後、適量のスラリーをその上に徐々に加え凍結した。これを表面温度が約 170 K の永久磁石($B=0.14\sim0.4$ T)上に置き、昇温、乾燥させた。得られた堆積物を仮焼、プレス成型、焼結した後、適切な条件下で後熱処理を行い金属組成、酸素組成を制御した。作製した試料について、表面の結晶配向性を X 線回折法で、超伝導特性を SQUID 磁束計を用いた磁化測定によって調べた。

3. 結果と考察

Dy(Ca)123, Bi2223 では直径 12~16 mm、厚さ 1~4 mm の c 軸配向堆積物を得ることができた。しかし、プレス成型後に焼結した試料には反りやクラックが生じやすいことがわかった。そこで再度、1.5~3 GPa で一軸プレス成型した後に焼結したところ、クラックが無い緻密な試料が得られるようになった。Dy

サイトに Ca を 5%ドープした Dy(Ca)123 焼結体の 300 MPa でプレス後焼結した試料、さらに 3 GPa でプレスし再焼結した試料の表面 XRD パターンを Fig. 1 に示した。高压プレスによる大きな変形後でも無配向にはなっておらず、弱い c 軸配向性が残っている。Fig. 2 にこの試料の表面の 2 次電子像を示したが緻密で一様な組織となっていることがわかる。この試料の残留磁化法で調べた 60 K での粒間 J_c は 5.7 kA/cm² で、これは RE123 の焼結体としては非常に高く、結晶配向の効果が見れたものである。Bi2223 では厚さ 1.5 mm かつ相対密度 70%の試料が 40 K で粒間 $J_c = 3.2$ kA/cm² を示し、これを高压プレス後に焼結した厚さ 0.62 mm、相対密度 86%の試料は同条件で 10 kA/cm² 以上の粒間 J_c を記録した。プレス、焼結および後熱処理条件の最適化によりさらに粒間 J_c が上昇する可能性が高いと考えている。

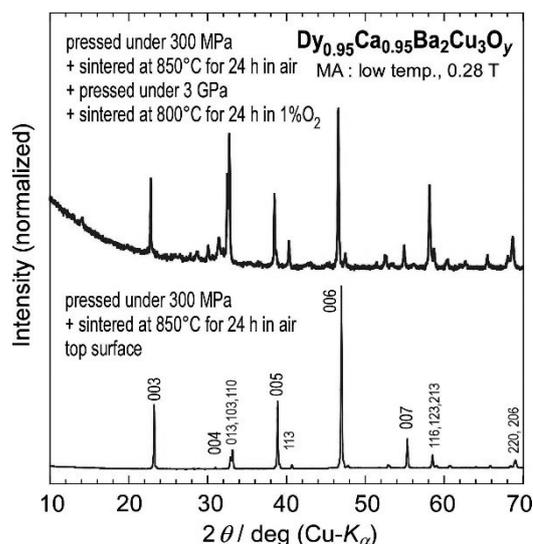


Fig. 1 Surface XRD patterns of Dy(Ca)123 sintered bulks.

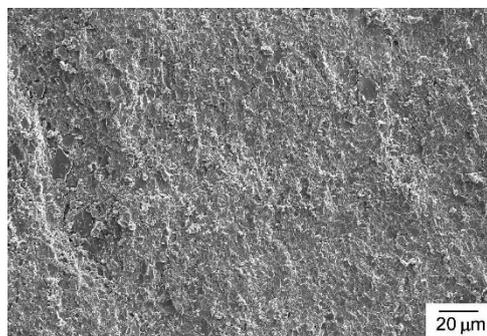


Fig. 2 Surface secondary electron image of a dense and weakly c -axis oriented Dy(Ca)123 sintered bulk.

参考文献

- [1] Y. Takeda *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* **31** (2018) 074002
 [2] J. Shimoyama *et al.*, *Abstracts of CSSJ Conf.* **97** (2018) 23.

Hot wall PLD による実用人工ピン REBCO 線材の開発と機械特性

Development of practical APC-REBCO coated conductors by hot wall PLD and its mechanical properties

藤田 真司 (フジクラ, 東北大); 武藤 翔吾, 平田 渉, 吉田 朋, 足立 泰, 柿本 一臣, 飯島 康裕, 大保 雅哉 (フジクラ); 岡田 達典, 淡路 智 (東北大)

FUJITA Shinji (FUJIKURA, Tohoku Univ.); MUTO Shogo, HIRATA Wataru, YOSHIDA Tomo, ADACHI Yutaka, KAKIMOTO Kazuomi, IJIMA Yasuhiro, DAIBO Masanori (FUJIKURA); OKADA Tatsunori, AWAJI Satoshi (Tohoku Univ.)
E-mail: shinji.fujita@jp.fujikura.com

1. はじめに

フジクラでは大型 IBAD 装置および独自構造の Hot-wall PLD 装置を用い、磁場中の電流特性を向上を目的に、人工ピンを導入した $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (REBCO) 線材の開発を行っている[1]。これまでに、REBCO 成膜時の蒸着速度に着目し、その磁束ピンニング特性を調査してきた[2]。さらに、高速蒸着条件を採用することで、生産性が高く、長尺かつ特性の均一性・再現性に優れた線材製造に成功し、量産化に向けて開発を行ってきた[3]。今回、人工ピン REBCO 線材を新たな製品ラインナップとして提供を開始したので、その量産人工ピン線材の諸特性、特に機械特性について報告する。

2. 機械特性評価

評価した線材は Table 1 に示す、従来の人工ピン無し REBCO 線材(FYSC-SCH04, 超電導層 GdBCO \sim 2 μm)と、新規の人工ピン線材(FESC-SCH04, 超電導層 BHO-EuBCO \sim 2.5 μm)である。共に 4 mm 幅, 20 μm 銅めっきであるが、FESC-SCH04 は Hastelloy 基板の厚さが 50 μm である。

Fig. 1 に液体窒素(LN₂)中の引張試験結果の例を示す。縦軸は応力を印加して、その後応力を解放した際の I_c (I_c^{unload})を試験前の I_c (I_{c0})で規格化した値である。 I_c が低下し始める応力は、FYSC-SCH04 に比べ FESC-SCH04 は 1 割程度低くなっているが、これは線材断面における Hastelloy 基板の断面積割合が減少したこと、超電導層の膜厚がやや厚くなっているためである。Fig. 2 に LN₂ 中の曲げ試験結果の例を示す。試験は Goldacker 式曲げ試験装置を用いた。ここでも、縦軸は曲げた後に直線状に戻した際の I_c である。FESC-SCH04 は基板が薄い分、より小さい曲げ半径まで曲げることができる。

剥離強度の評価として、エポキシ樹脂含浸コイルを冷却して、線材剥離方向にはたらく熱応力でコイルが劣化する確率を求める手法を用いた[4-5]。同一の外径/内径(OD/ID)比のコイルを多数(各100個程度)評価してその劣化確率を求め、有限要素解析によりその OD/ID の剥離応力分布(最大値 σ_c)を求めた。これを複数の OD/ID で実施し、コイル内応力分布と試験コイル内の超電導層体積(\propto 線材長)を含んだワイブル解析を実施することで、超電導層の単位体積(今回は1 mm³とした)あたりの劣化確率(累積破壊確率)を求めた(詳細は[5]参照)。結果を Fig. 3 に示す。FESC-SCH04 は FYSC-SCH04 よりも剥離応力に対する強度が向上していることがわかる。これは基板が薄くなったことで、冷却時の銅めっき層の熱収縮による圧縮効果が大きくなったこと、超電導層変更(人工ピン導入)による超電導膜自体の強度が向上したことが考えられる。

当日は、その他の各種評価結果についても紹介する。また、繰返し引張による疲労特性を 1P-p06 で、FESC-SCH04 を用いたコイルの評価を 2P-p24 で報告する。

謝辞

この成果の一部は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託および助成事業の結果得られたものである。

Table 1 Fujikura's REBCO product lineup (excerpt).

型番	人工ピン	線材幅	線材厚さ	基板厚さ	銅めっき厚さ
FYSC-SCH04	なし	4 mm	0.13 mm	75 μm	20 μm
FESC-SCH04	あり	4 mm	0.11 mm	50 μm	20 μm

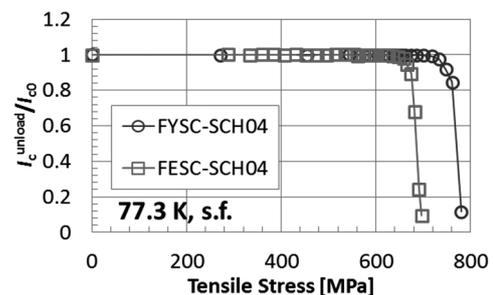


Fig. 1 Typical tensile characteristics of normalized I_c .

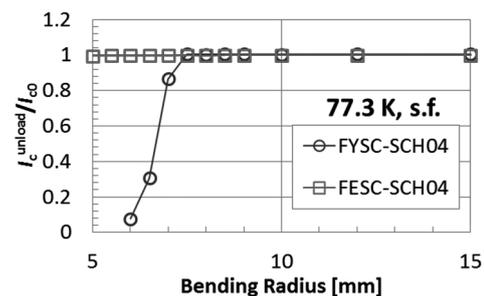


Fig. 2 Typical bending characteristics of normalized I_c .

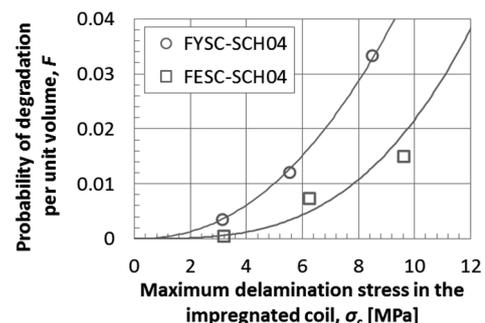


Fig. 3 Probability of coil-degradation per unit volume as a function of maximum delamination stress of impregnated coils.

参考文献

- [1] S. Fujita *et al.*, *IEEE TAS*, vol. 28, no. 4 (2018) 6600604.
- [2] S. Fujita *et al.*, *IEEE TAS*, vol. 29, no. 5 (2019) 8001505.
- [3] W. Hirata *et al.*, *Abstracts of CSSJ Conference*, vol. 96 (2018) p.32.
- [4] S. Fujita *et al.*, *Abstracts of CSSJ Conference*, vol. 94 (2017) p.165.
- [5] S. Muto *et al.*, *IEEE TAS*, vol. 28, no. 4 (2018) 6601004.

フッ素フリーMOD 法 Y123 配向膜への後熱処理による欠陥濃度の制御と J_c 特性の改善

Control of defect density and improved J_c by post-annealing for fluorine-free MOD Y123 thin films

権藤 紳吉, 元木 貴則, 下山 淳一(青学大); 中村 新一(TEP); 本田 元気, 永石 竜起(住友電工)
 GONDO Shinkichi, MOTOKI Takanori, SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.);
 NAKAMURA Shin-ichi (TEP); HONDA Genki, NAGAISHI Tatsuoki (Sumitomo Electric Industries, Ltd.)
 E-mail: c5618046@aoyama.jp

1. はじめに

様々な RE123 薄膜の作製方法のなかでフッ素フリーMOD 法は均質で平坦な表面を持つ薄膜が短時間で得られることから、本質的に量産化に適した手法である[1]が、良質な 2 軸配向膜が得られる焼成条件が狭いことが課題であった。これに対し、我々は原料溶液にハロゲンを適量添加することにより、熱処理時に Y123 と格子整合性が高い酸化ハロゲン化合物が Y123 の結晶成長前に析出し、再現性よく良質の Y123 薄膜が作製できること[2]を示してきた。また、成膜後の薄膜に対して水蒸気を含んだ酸素気流中で後熱処理を行うことで RE247 型の積層欠陥が導入されることを見出した。欠陥が生成した薄膜は低磁場下において J_c が向上する一方で磁場中 J_c が低下することを報告してきた[3]。一方、還元雰囲気中で熱処理を行うことで生成した欠陥が消滅することも見出している。

以上の背景のもと、本研究は欠陥生成後の薄膜に対する還元雰囲気下熱処理に着目し、酸素分圧と温度を変えて熱処理することで低磁場下および磁場中における J_c 特性改善の両立を試みた。

2. 実験方法

(Y, Ba, Cu)のアセチルアセトン塩溶液に塩酸を混合したものを原料溶液とし、SrTiO₃(100)単結晶基板の上にスピコートにより塗布した。塗布後に仮焼して有機物を分解した。この原料溶液の塗布と仮焼を複数回繰り返し、最終膜厚を~500 nm になるよう制御した。続いて 800°C, $P_{O_2} = 10$ Pa(O₂/Ar)の雰囲気中で焼成し、酸素アニールにより酸素量を制御した。得られた薄膜に対し水蒸気含有酸素気流中、300°Cで後熱処理し積層欠陥を導入した。さらに、還元雰囲気である 700°C, $P_{O_2} = 10$ Pa(O₂/Ar)で追加の熱処理を行った後、酸素アニールにより酸素量を再度制御した薄膜も作製した。得られた試料について、XRD による相同定、SEM, TEM による微細組織観察を行い、磁化特性は SQUID 磁束計により、 J_c は液体窒素浸漬下で誘導法により評価した。

3. 結果と考察

Fig. 1 に成膜後、水蒸気雰囲気中で後熱処理後、さらに還元熱処理後の Y123 薄膜の表面 XRD パターンを示す。積層欠陥が生成した薄膜に対して、還元雰囲気下で熱処理した薄膜はシャープな 00l ピークに戻っており、247 型の積層欠陥の多くが消滅していることが示唆された。誘導法により測定した J_c (77 K, ~0 T) はそれぞれ 125 A cm⁻²(成膜後), 172 A cm⁻²(積層欠陥導入後), 156 A cm⁻²(還元熱処理後)であった。Fig.2 にそれぞれの試料の 77 K, 40 K における J_c の磁場依存性を示す。還元熱処理することにより磁場中での超伝導特性が回復していることが分かった。以上より、還元熱処理により低磁場下および磁場中 J_c 特性の制御が可能であることが示された。Fig.3 に還元熱処理後の薄膜の断面 TEM 像を示す。断面 TEM 像から膜中央付近において欠陥が消滅している様子が観察された。講演では後熱処理過程における水蒸気分圧や雰囲気酸素分圧と積層欠陥の生成・消滅の関係を議論する。

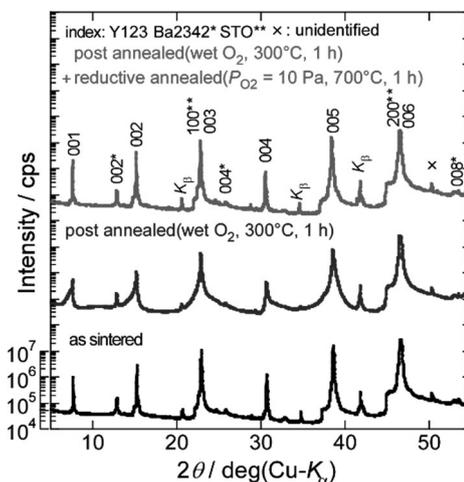


Fig. 1 Surface XRD patterns of Y123 films, as sintered, after post-annealing under wet O₂ and after post-annealing under reducing atmosphere.

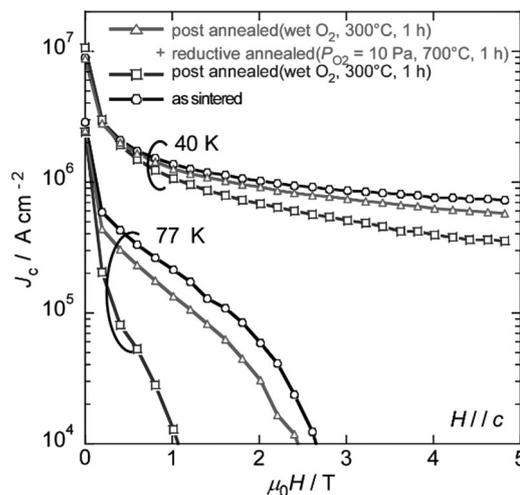


Fig. 2 $J_c - H$ curves at 77 K and 40 K for the Y123 films, as sintered, after post-annealing under wet O₂ and after post-annealing under reducing atmosphere.



Fig. 3 Cross-sectional TEM image of an oxygen annealed Y123 film after annealing at 700°C for 1 h under $P_{O_2} = 10$ Pa.

参考文献

- [1] Y. Ishiwata *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **23** (2013) 7500804.
- [2] T. Motoki *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* **27** (2014) 095017.
- [3] S. Gondo *et al.*, *Abstracts of CSSJ Conference* **97** (2018) 105.

極細多芯構造を有する REBCO スプリット線の特性

Properties of REBCO split wire having extremely fine multi-core structure

金 新哲, 川村 幸裕, 関根 ちひろ(室工大)

Xinzhe Jin, Kawamura Yukihiko, Sekine Chihiro (Muroran Institute of Technology)

E-mail: shin_kin@mmm.muroran-it.ac.jp

1. はじめに

REBCO スプリット線材の製作方法について、主に折り曲げと圧力集中などによる内部スプリット法がある[1, 2, 3]。これまでは線材を長手方向に曲げ線が出るようにV字曲げし、平らに戻すことで多芯化を進めてきた。研究進展に伴い、印加応力と芯数の増加に対応することが必要となり、今回は線材をほぼ折り曲げしないで、応力集中による REBCO 層の劈開を利用した分割方法で多芯化を試みた。実験研究では市販の 4 mm 幅線材に対し、最大 30 本のメインコアを有するサンプルを作製し、表面観察と臨界電流測定および磁化測定などで評価した。

2. サンプル作製

内部スプリット法では、一回の折り曲げまたは REBCO 層の劈開加工により 5~15 本程度のスプリットを同時に加工できる特徴がある。このような複数スプリットの幅は約 10 μm と同程度であるため、サブコアとして名付けている。また、サブコアの形成により、メインコアの幅をより細く加工できる。

REBCO 線材は住友電工製の幅 4 mm、厚さ 0.2 mm の単芯線を使用した。長さは 10 m 程度である。製作装置はV字曲げ処理と同じスプリッターを利用し、線材を曲げる軟質のガイドローラを硬質のナイロン材料に交換して使用した。Fig. 1 は 2 つの内部スプリット法の違いを示している。加工回数は 29 回 (30 本のメインコアが形成) であり、線材の幅方向で 0.1~0.2 mm ずつ移動させながら加工した。

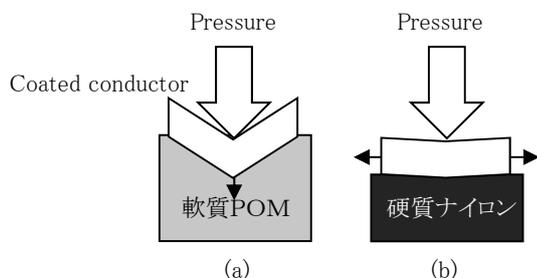


Fig. 1 Images for two inner split methods: (a) V-bending and (b) pressure concentration.

3. 実験結果とまとめ

Fig. 2 は製造したスプリット線の表面写真である。Fig. 2(a) は SUS 側の表面であり、曲げ線の間隔は 50-250 μm である。Fig. 2(b) は REBCO 側の表面であり、凹凸は見られなかったため、応力集中による加工方法では非常に平らなテープ線材が得られることがわかった。また、REBCO 層の SEM 画像では複数のサブコアが形成され、当日に発表する予定である。

臨界電流の測定では、自己磁場中で元の線材の半分程度であったが、スプリット線の臨界電流は元の単芯線より磁場に強い[3]、強磁場応用に臨界電流は問題にならないと考えている。例えば、16 メインコアのスプリット線は約 3 T の磁場以上で元の線材の臨界電流を上回っている[3]。

線材の遮蔽電流磁場の評価では、4.2 K で磁化の磁場依存性を測定し、その結果を Fig. 3 に示した。サンプルサイズは 4×3 mm で、2 枚を重ねてテープ面に垂直な方向で測定した。

図からわかるように、遮蔽電流による反磁性は大幅に改善され、外部印加磁場をゼロに戻した時の残留磁化が元の単芯線材の 1/27 になった。このような遮蔽電流の大幅な改善により、7 T では SUS の強磁性成分が現れ、線材全体の磁化は反磁性を示さない。

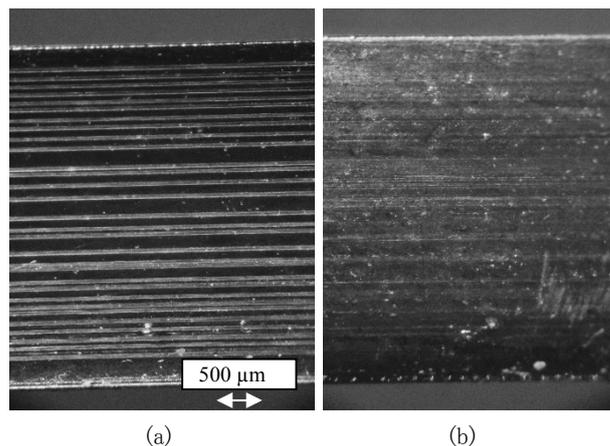


Fig. 2 Tape surfaces for (a) stainless steel side and for (b) REBCO side.

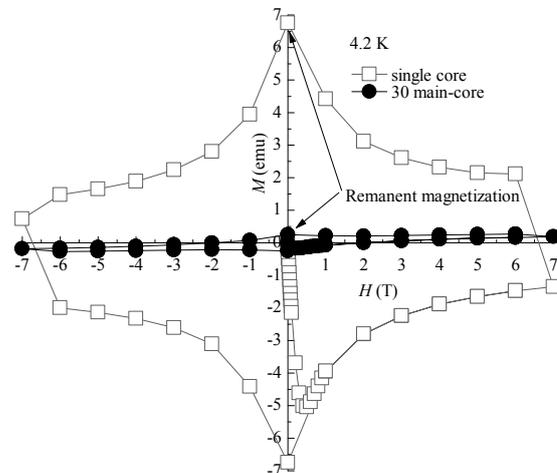


Fig. 3 Magnetic dependence of magnetization for two tapes at 4.2 K.

謝辞

本研究は MEXT 卓越研究員事業 (課題 ID:16810210) の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] 金 新哲, 前田 秀明, PCT/JP2015/072393, 2015.08.06; 特願 2014-164590, 2014.08.12
- [2] Xinzhe Jin, et al., Supercond. Sci. Technol. **29** (2016) 045006
- [3] Xinzhe Jin, et al., "Fabrication of 16-main-core RE123 split wire using inner split method", IEEE Trans. Appl. Supercond. (in press)

REBCO線材を用いた直流磁場シールドの試み

A fabrication and characterization of superconducting shield for DC magnetic field by coated conductors

町 敬人, 衣斐 顕, 和泉 輝郎(産総研)
 Takato MACHI, Akira Ibi, Teruo Izumi (AIST)
 E-mail: t.machi@aist.go.jp

1. はじめに

超電導線材をモーター等に応用するには、磁場をシールドしなければならない場合がある。磁場シールドとしては、鉄やパーマロイなどの磁性体を用いるのが一般的であるが、機器の軽量化が困難であるため、超電導線材を用いた磁場シールドの可能性について検討を行なっている。

REBa₂Cu₃O_{7-d} (REBCO)線材はテープ状であるため、マルチフィラメントである金属系超電導線や Bi2223 線材と比較して、フラットワイズに巻くことによって隙間が少ないシールドを形成できる可能性があり、これまでにいくつかの報告がなされている [1-4]。その多くは交流磁場のシールドであり、磁場の絶対値も 50 mT 以下であるため、さらに高い磁場でのシールド性能については不明な点が多い。そこで今回は 0.5 T までの直流磁場での磁場シールド性能についての実験を行った結果を報告する。

2. 実験方法

磁場シールドを作製するために、Ag 安定化層まで成膜した 10mm 幅の GdBCO 線材を用いた。77 K 自己磁場中の平均 I_c は 500 A の線材である。基板に用いたハステロイの厚さは 70 μ m であった。シールドのボビンの材質はアルミニウムで、ボビン外径は 70mm Φ 、長さ 140 mm まで巻けるようにした。Ag 層を内側にして線材が重ならないように斜めに巻くことでフラットワイズな応力に加わるような巻き方とした。最大層数は 11 層まで作製しシールド特性の評価を行った。層間は接続されていない。

図 1 に測定装置の模式図を示す。BELL 社製のホール素子をボビンの中央に外部磁場の方向の磁場強度を測定できる向きに固定した。最大 3T のマグネット中に内径 200mm のクライオスタットをセットし、液体窒素で満たした後に、ボビンの長手方向が磁場に垂直となるように超電導シールドを挿入した。

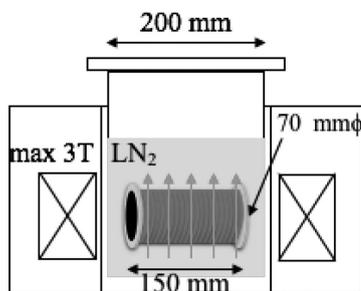


Fig. 1 Schematic configuration of measuring the shield properties.

ゼロ磁場冷却後に外部磁場をステップ状に増減させてホール素子の電圧を測定した。外部磁場は 0.0 T→3.0 T→-0.7 T→3.0 T と変化させて内部の磁場のヒステリシスを測定した。

3. 実験結果および考察

外部磁場とホール電圧より算出した内部の磁場との差がシールドされた磁場を表している。図 2 は、シールド磁場を外部磁場で除算して 100 分率で求めた磁場の遮蔽率を 20 mT で比較した結果である。図 2 に示したように、20 mT で比較した遮蔽率は、3 層では 15%程度だった遮蔽率が 11 層では 75%以上まで増加したことが分かる。

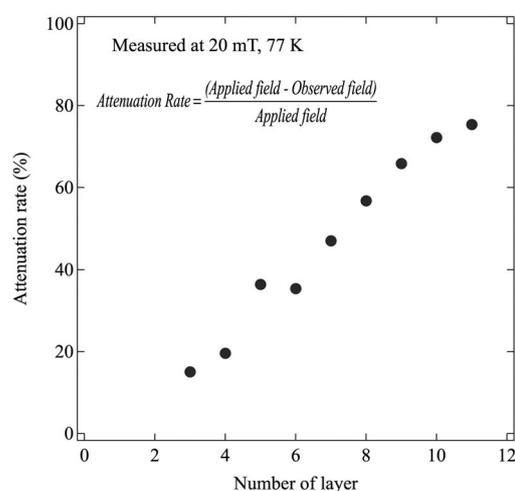


Fig.2 Relationship between number of layer and shielding rate.

遮蔽率は 20 mT 以上で減少する振舞いを見せた。これはシールドの材料である GdBCO の下部臨界磁界 B_{c1} を越えてしまい、混合状態となって磁束が侵入し始めるためと考えられる。しかしながら混合状態であっても層数を増やすことで遮蔽率を高められる傾向が見られたことはさらにシールド特性を高められる可能性を示唆するものと考えられる。

REBCO 線材を用いた磁場シールドの今後の方針として、異なる温度や巻径、線幅の異なる線材を用いた場合などについて実施していく予定である。

謝辞

本研究は、NEDO「革新的航空機用電気推進システムの研究開発」の委託により実施したものである。

参考文献

- [1] L. Wéra, *et al.*, Supercond. Sci. Technol. 28 (2015) 074001.
- [2] J. Kvitkovic, *et al.* IEEE Trans. Appl. Supercon. 27 No.4 (2017) 4700705.
- [3] M. Solovyov, *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercon. 27, NO. 4 (2017) 88000204.
- [4] Y. Nagasaki, *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercon. 28 No.4 (2018) 6601905.

核医学治療用高温超電導スケルトン・サイクロトロンの開発(1)

—REBCO コイルシステムの開発課題—

Development of HTS Skeleton Cyclotron for nuclear medicine treatment (1)

— Technical Issues in Development of REBCO coil system —

石山 敦士(早稲田大);植田 浩史(岡山大);野口 聡(北海道大);渡部 智則,長屋 重夫(中部電力);
吉田 潤(住友重機械);福田 光宏(大阪大);東達也(QST 放医研)

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

WATANABE Tomonori, Shigeo NAGAYA (Chubu Electric Power Co., Inc.); YOSHIDA Jun (Sumitomo Heavy Industries, Ltd.);

FUKUDA Mitsuhiro (Osaka Univ.); and HIGASHI Tatsuya(QST-NIRS)

E-mail: atsushi@waseda.jp

1. はじめに

我々は、遠隔転移などの進行がんへの効果が期待されている「 α 線核医学治療(内用療法)」の普及の鍵となる α 線放出RI(^{211}At)の多量・安定・分散生産のための超小型・高強度・エネルギー可変の加速器「高温超電導スケルトン・サイクロトロン「HTS-SC」」の実現を目指している(Fig.1)。そしてその中で、ビーム加速に不可欠な磁場分布を高精度に形成するための高温超伝導空芯マルチコイルシステムの開発に取り組んでいる(Fig.2)^[1]。本発表では、その開発課題と予定している対応策について概要を報告する。

2. 開発課題・項目と対応策

HTS-SCは、従来の加速器では常識の鉄芯を用いないのが特徴で、複数の空芯コイルから成るマルチコイルシステムのみでビーム加速に必要な高精度磁場形成を行う。これにより、小型・高強度化が可能であることに加え、鉄芯の非線形磁化特性の影響を受けずに磁場を変化させ、エネルギーを制御することができるため、多機能化(α 線放出RI製造、PET-CT用RI製造、中性子捕捉療法用熱中性子照射等)が可能となる。本研究では、HTS-SC用マルチコイルシステム開発のための基盤技術として、1)高機械強度化のための新しいコイル補強構造(Super-YOROIコイル構造)^[2]、2)高電流密度化と高熱的安定化を両立する技術(無絶縁コイル巻線技術)^{[3][4]}、3)高精度の磁場を発生する技術(遮蔽電流による不整磁場の低減法)^{[5][6][7]}、4)5-High統合技術(Fig.3)を活かしたマルチコイル設計最適化技術^[8]の確立を目指している。そして、小型モデル(Ultra-Baby HTS-SCコイルシステム)の設計・試作・実験により、HTS-SCの成立性(発生磁場の空間分布精度や時間安定度)と有効性(出力エネルギー可変)を実証する計画である。

謝辞

本研究の一部は科研費基盤研S(18H05244)に依ったことを付記する。

参考文献

1. 2018年春季低温工学・超電導学会講演概要集 1C-p10
2. 2019年春季低温工学・超電導学会講演概要集 2A-p04
3. 2019年春季低温工学・超電導学会講演概要集 2P-p19
4. 2019年春季低温工学・超電導学会講演概要集 2P-p20
5. 2019年春季低温工学・超電導学会講演概要集 2A-p03
6. 2019年春季低温工学・超電導学会講演概要集 2P-p21
7. 2019年春季低温工学・超電導学会講演概要集 2P-p22
8. 2019年春季低温工学・超電導学会講演概要集 2A-p02

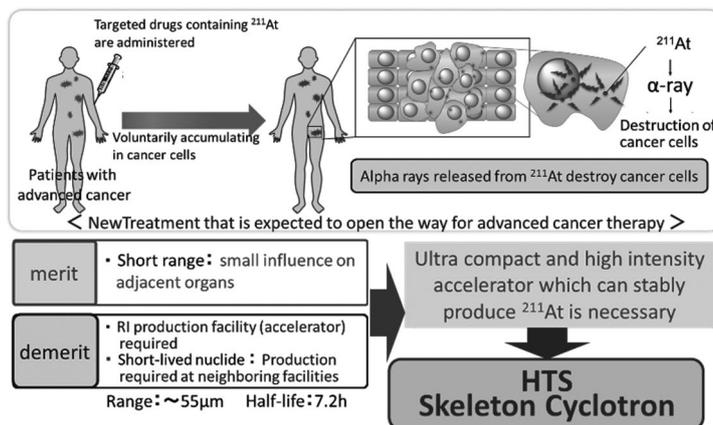


Fig. 1. Targeted particle therapy and issues for dissemination

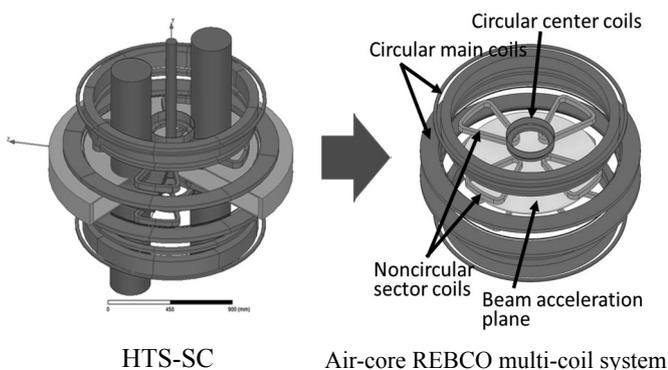


Fig. 2. Schematic drawings of HTS-SC and REBCO multi-coil system.

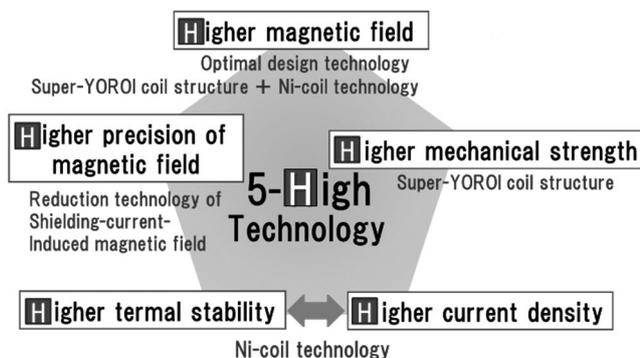


Fig. 3. 5-High REBCO magnet technologies for HTS-SC

核医学治療用高温超電導スケルトン・サイクロトロンの開発(2)

— 実証用高温超電導小型マルチコイルシステムの設計 —

Development of HTS Skeleton Cyclotron for nuclear medicine treatment (2)

— Design of small demonstration model of HTS multi-coil system —

野口 聡(北海道大学); 植田 浩史, 栗津 佑太, 金 錫範(岡山大学); 渡部 智則, 長屋 重夫(中部電力);
吉田 潤(住友重機械); 福田 光宏(阪大); 石山 敦士(早稲田大学);

NOGUCHI So (Hokkaido Univ.); UEDA Hiroshi, AWAZU Yuta, KIM SeokBeom (Okayama Univ.);

WATANABE Tomonori, Shigeo NAGAYA (Chubu Electric Power Co., Inc.); YOSHIDA Jun (Sumitomo Heavy Industries, Ltd.);

FUKUDA Mitsuhiro (Osaka Univ.); ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.);

E-mail: noguchi@ssi.ist.hokudai.ac.jp

1. はじめに

エネルギー可変で多種類の粒子を加速可能な高温超電導空芯型サイクロトロン(スケルトン・サイクロトロン)の開発に取り組んでいる[1]。高温超電導コイルシステムをスケルトン・サイクロトロンに適用する際、1) 高電流密度化と高熱的安定化を両立する技術(無絶縁コイル)、2) 高精度の磁場を発生する技術(遮蔽電流磁場の低減)、3) 高機械強度化技術(Super-YOROI コイル構造)、4) 実規模マルチコイルシステムの設計最適化が課題として挙げられる。そこで、我々は、現在ビーム加速に要求される磁場分布を形成するマルチコイルシステムの開発技術の確立に向けて小型モデルを製作し、上記課題を検証する実験を計画している[2]。本発表では、この実証用高温超電導小型マルチコイルシステムの設計について報告する。

2. 高温超電導小型マルチコイルシステム

高温超電導コイルシステムの設計原理の確立・実証のため、取り出し半径 20 cm で陽子 5 MeV まで加速するサイクロトロンを想定した高温超電導小型マルチコイルシステムを設計した。等時性磁場を図 1 に示す。

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(三角形状)コイルで発生させる。高温超電導線材は、6 mm 幅、0.1 mm 厚(基板、安定化層含む)、巻線の際の最小曲げ半径は 30 mm とした。運転温度 30K で運転電流は 540 A である。コイルはダブルパンケーキ巻で、パンケーキ間スペーサ 1 mm、巻線部の電流密度は無絶縁(NI)巻線技術を採用するとして最大 450 A/mm² とした。また、3 セクターとして、フラッター(磁場の段差の度合い) F^2 を 0.01、セクターコイルのスパン角を 45°、セクターコイル間隔 140 mm (コイル底面 70 mm) である。設計されたセクターコイルの概観を図 2(a) に示す。

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図 1 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図 2(b) 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図 3 に示す。今回の設計では、設計磁場と等時性磁場の差は ±45 mT 程度(約 ±3% 相当)である。

3. 検証項目

現在、設計に基づいてコイルシステムの製作に取り組んでいる。実験においては、磁場分布について、無絶縁巻線による励磁遅れおよび遮蔽電流磁場の影響評価、エネルギー可変を想定した通電パターンの検討などをする予定であり、併せて数値解析等による検証を実施する。

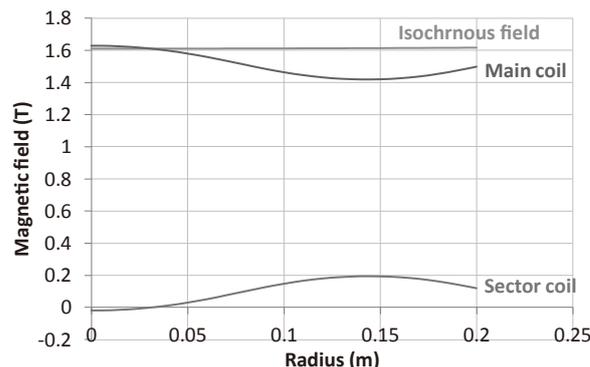


Fig. 1. Azimuthal average magnetic field in the median plane of HTS coil system for accelerating proton to 5 MeV.

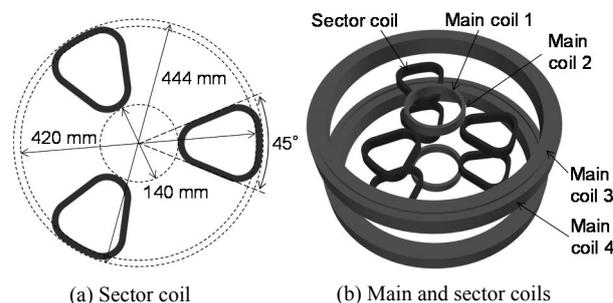


Fig. 2. Schematic drawing of small demonstration model of HTS multi-coil system.

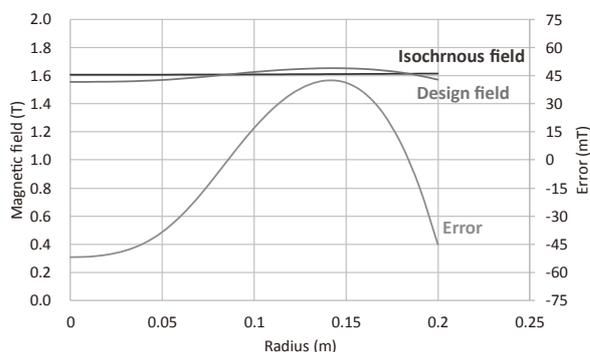


Fig. 3. Magnetic field in small demonstration model of HTS multi-coil system.

謝辞

なお、本研究の一部は科研費基盤研究 S(18H05244) 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-p10 (2018).
- 2019年春季低温工学・超電導学会講演概要集 2A-p01 (2019).

核医学治療用高温超電導スケルトン・サイクロトロンの開発(3) —実証用高温超電導小型マルチコイルシステムの遮蔽電流解析— Development of HTS Skeleton Cyclotron for nuclear medicine treatment (3) — Numerical simulation on screening current in small demonstration model of HTS multi-coil system —

植田 浩史, 粟津 佑太, 金 錫範(岡山大学); 野口 聡(北海道大学); 渡部 智則, 長屋 重夫(中部電力);
吉田 潤(住友重機械); 福田 光宏(阪大); 石山 敦士(早稲田大学);

UEDA Hiroshi, AWAZU Yuta, KIM SeokBeom (Okayama Univ.); NOGUCHI So (Hokkaido Univ.);

WATANABE Tomonori, Shigeo NAGAYA (Chubu Electric Power Co., Inc.); YOSHIDA Jun (Sumitomo Heavy Industries, Ltd.);
FUKUDA Mitsuhiro (Osaka Univ.); ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.);

E-mail: noguchi@ssi.ist.hokudai.ac.jp

1. はじめに

エネルギー可変で多種類の粒子を加速可能な高温超電導空芯型サイクロトロン(スケルトン・サイクロトロン)の開発に取り組んでいる[1][2]。サイクロトロンでは、高精度磁場分布及び時間安定性が要求されるが、高温超電導マグネットにおいては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)が悪影響を及ぼす。したがって、遮蔽電流磁場の補正及び抑制は、サイクロトロンを出力可変(多機能化)とする際の最重要課題となる。我々は、現在ビーム加速に要求される磁場分布を形成するマルチコイルシステムの開発技術の確立に向けて小型モデルの製作・実験に向けた設計を行っている[3]。本発表では、設計した小型モデルを対象に遮蔽電流磁場を評価したので報告する。

2. 解析モデル

高温超電導コイルシステムの設計原理の確立・実証のため、取り出し半径 20 cm で陽子 5 MeV まで加速するサイクロトロンを想定した高温超電導小型マルチコイルシステムを設計した[3]。コイルには、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 30 K とし、メインコイル、セクターコイル共に 0.1 A/s で運転電流 540 A まで励磁し、その後一定でホールドする。各コイルはパンケーキ巻したものとす。REBCO 線材の厚み方向における電磁場が一樣とする近似を用い、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[4]により遮蔽電流磁場の計算を行った。なお、小型モデルでは、無絶縁巻線を採用することになっているが、今回の解析では考慮していない。

3. 遮蔽電流磁場

励磁完了時におけるミッドプレーン(加速平面)上の周方向平均遮蔽電流磁場分布を Fig. 1 に示す。今回のコイルシステムにおいては最大で 2.5 mT 程度の遮蔽電流磁場が生じており、設計磁場に対して 0.15% に相当する。励磁完了時の取り出し半径上の周方向遮蔽電流磁場分布を Fig. 2 に示す。また、励磁完了時の取り出し半径における周方向平均遮蔽電流磁場の時間変化を Fig. 3 に示す。励磁完了後、一定通電中では、磁場のドリフトが発生しており、電流制御法[5]などによる遮蔽電流磁場のドリフトの抑制が必要となる。

謝辞

なお、本研究の一部は科研費基盤研究 S(18H05244) に依ったことを付記する。

参考文献

1. 2018年春季低温工学・超電導学会講演概要集 1C-p10 (2018).
2. 2019年春季低温工学・超電導学会講演概要集 2A-p01 (2019).
3. 2019年春季低温工学・超電導学会講演概要集 2A-p02 (2019).

4. H. Ueda, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., 24, 4701505 (2014).
5. 2019 年春季低温工学・超電導学会講演概要集 2P-p23 (2019).

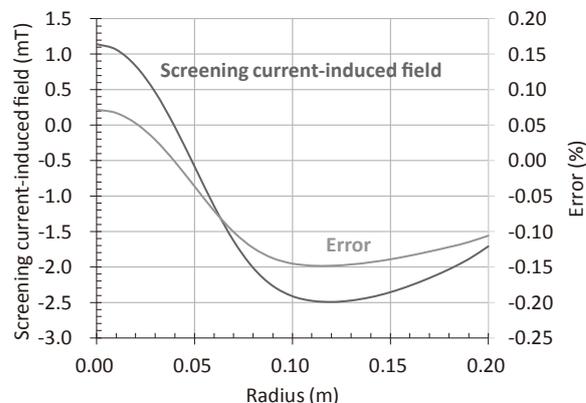


Fig. 1. Azimuthal average of screening current-induced field generated by small demonstration model of HTS multi-coil system.

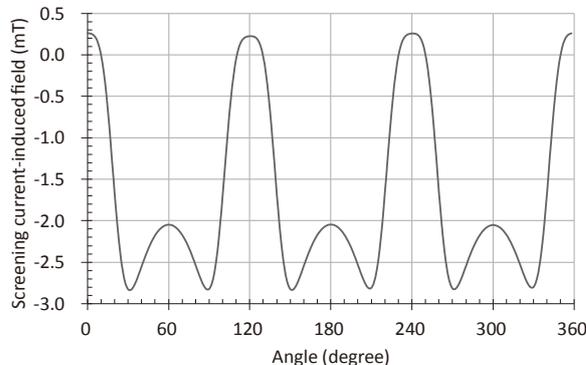


Fig. 2. Azimuthal distribution of screening current-induced field at extraction radius.

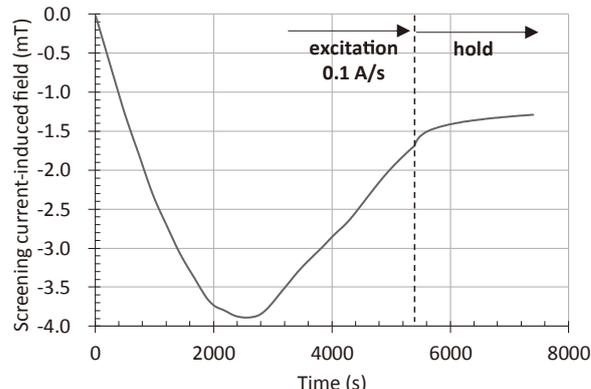


Fig. 3. Temporal variation of azimuthal average of screening current-induced field at extraction radius.

核医学治療用高温超電導スケルトン・サイクロトロンの開発(4)

- 実証用高温超電導小型マルチコイルシステムの機械特性解析 -

Development of HTS Skeleton Cyclotron for nuclear medicine treatment (4)

- Numerical simulation on mechanical behaviors of small demonstration model of HTS multi-coil system -

栗津 佑太, 金 錫範, 植田 浩史(岡山大学); 野口 聡(北海道大学); 渡部 智則, 長屋 重夫(中部電力); 吉田 潤(住友重機械); 福田 光宏(大阪大学); 石山 敦士(早稲田大学)

AWAZU Yuta, KIM SeokBeom, UEDA Hiroshi (Okayama Univ.); NOGUCHI So (Hokkaido Univ.);

WATANABE Tomonori, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Co., Inc.);

YOSHIDA Jun (Sumitomo Heavy Industries, Ltd.); FUKUDA Mitsuhiro (Osaka Univ.); ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.);

E-mail: pvsb55h0@s.okayama-u.ac.jp

1. はじめに

我々は、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。この加速器に、REBCO 高温超電導コイルを用い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][2]。このスケルトン・サイクロトロンに用いられるマルチコイルシステムに高温超電導コイルを適用することで高磁場・高電流密度化を実現し、ビーム加速に要求される磁場分布形成することを目指している。一方で、コイルに作用する電磁力は著しく増加するため、その支持構造及び巻線内電磁応力による劣化、保護動作時のコイル間磁気結合による電流挙動の影響に対しても留意が必要である。そのため、医療機器応用に要求される信頼性を確保するためにも、超電導線材を巻線・コイル化した場合の機械特性の把握、コイルシステム全体での高機械強度・構造設計が重要となる。本発表では、設計を行った小型モデルを対象とし、超電導マルチコイルシステムにおける機械特性を数値解析により評価したので、その結果を報告する。

2. 実証用高温超電導小型マルチコイルシステム

スケルトン・サイクロトロン開発に向けて、マルチコイルシステムの開発技術の確立に向けて課題となる要素技術について検証を行うため、実証用高温超電導小型マルチコイルシステムの設計を行った[3]。取出半径は 200 mm で Proton を 5 MeV まで加速させることを想定した 4 対の円形メインコイルと 3 対のセクターコイルを組合せた高温超電導マルチコイルシステムである。

3. 機械特性解析

設計したマルチコイルシステムが経験する電磁力により生じる機械特性への影響評価を行った。電磁力は各コイルが経験する磁場を基に計算を行った。また、これらの電磁力を基に三次元有限要素法による電磁応力解析を行った。REBCO 線材の積層構造は複合則で考慮して、巻線部を弾性体として解析を行った。REBCO 線材の諸元は、幅 6 mm, 厚さ 0.1 mm で、基板(Hastelloy) 50 μ m, 超電導層 1 μ m, 安定化層(Copper) 40 μ m とした。今回のコイルシステムに働く電磁力分布の例として、Fig.1 に Main Coil 1 とセクターコイルの電磁力分布を示す。また、セクターコイルの配置とその影響を考慮し、Fig.2 に示すように円形メインコイルを周方向に分割した各部に働く、線材長手方向に対して垂直方向と線材幅方向の電磁力 F_r , F_z を Table 1 に示す。Main Coil 1 では、セクターコイルの発生磁場の影響を受け、Fig.2 のようにコイルの各部で経験する電磁力に違いが生じる。そのため、コイル内の電磁力分布の違いを考慮した支持構造や Yoroi 構造[4]適用を検討している。

各超電導コイルが経験する電磁応力については当日報告する。

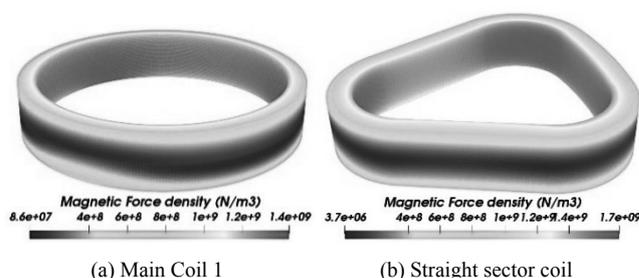


Fig. 1. Example of magnetic force distribution in HTS multi-coil system.

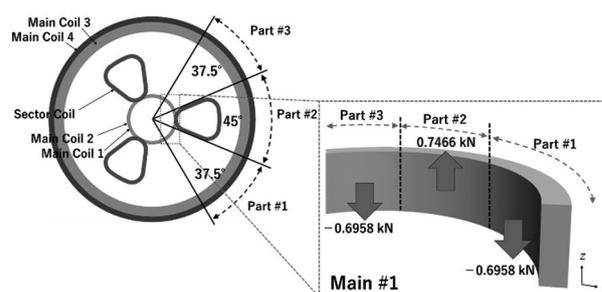


Fig. 2. Behaviors of magnetic force of the axial direction in upper split Main Coil 1.

Table 1. Magnetic force of the radial and axial directions in the upper split Main Coils.

Coil Name	Part	F_r (kN)	F_z (kN)
Main Coil 1	Part #1	9.5832	-0.6958
	Part #2	12.6643	0.7466
	Part #3	9.5832	-0.6958
Main Coil 2	Part #1	0.0595	0.2435
	Part #2	0.2296	0.4740
	Part #3	0.0595	0.2435
Main Coil 3	Part #1	61.7924	-17.9018
	Part #2	73.1986	-22.5613
	Part #3	61.7924	-17.9018
Main Coil 4	Part #1	-14.8022	-6.8645
	Part #2	-18.4965	-8.8977
	Part #3	-14.8022	-6.8645

謝辞

本研究の一部は、基盤研究 S(18H05244)に依ったことを付記する。

参考文献

- H. Ueda, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., 23, 4100205 (2013).
- 特許5682903, 特許5708984, 特開2015-079626
- 2019年春季低温工学・超電導学会概要集 2A-p02 (2019).
- S. Nagaya, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., 23, 4601204 (2014).

Progress of High Field Accelerator Magnet Program in China

Qingjin Xu (IHEP, CAS)

E-mail: xuqj@ihep.ac.cn

1. Introduction

High field magnet technology is the key to the success of the high energy accelerators in future. China is pursuing critical technologies R&D for future circular colliders like the Super Proton Proton Collider (SPPC). SPPC will need thousands of high field (12–20 T) superconducting magnets in around 20 years. A long term R&D roadmap of the advanced superconducting materials and high field magnets has been made, aiming to push the technology frontier to the desired level, and a strong domestic collaboration is established, which brings together expertise of Chinese superconductivity community from fields of physics, materials, technology and application. The goal is to address prominent scientific and technological issues and challenges for high field applications of advanced superconducting materials. In the past years model magnets with hybrid coils (NbTi, Nb₃Sn and iron-based superconductors) have been developed and tested. An overview of the high field magnet program, R&D status and the future plans will be presented.

2. Conceptual Design Study of the Magnet for SPPC

A conceptual design study of 12-T 2-in-1 dipole magnets is ongoing with the Iron-based superconducting (IBS) technology, to fulfill the requirements and need of a proposed large-scale superconducting accelerator: Super Proton Proton Collider (SPPC), which aims to discover the new physics beyond the standard model with a 100-km circumference tunnel and 75 TeV center-of-mass energy [1]. The design study is carried out with an expected J_c level of IBS in 10 years, i.e., about 10 times higher than the present level. Besides the significant improvement of J_c , we are also expecting that the IBS superconductor would have much better mechanical performance comparing with present high field conductors like Nb₃Sn, REBCO and Bi-2212, and the much lower cost than them. The aperture diameter of the magnets is 45 mm. The main field is 12 T in the two apertures per magnet with 10^{-4} field uniformity. The common-coil configuration is adopted for the coil layout because of its simple structure and easy to fabricate. Two types of coil ends are considered and compared for the field quality and structure optimization: soft-way bending and hard-way bending. For the hard-way bending the coil is wound with flared ends and in such way the needed superconductors is minimized. The detailed is presented in [2].

3. High Field Superconducting Magnet R&D

R&D of high field model dipole magnets is ongoing at the Institute of High Energy Physics. As the first step, a 12-T subscale common-coil dipole magnet named LPF1 (Let the Proton Fly) with two apertures and graded coil configuration

was designed, fabricated, and tested. With 4 NbTi racetrack coils outside and 2 Nb₃Sn racetrack coils inside, to reduce the field enhancement at the ends of the coils, the coils were designed with different lengths. All of the six coils were wound with superconducting Rutherford cables and impregnated. Coils were pre-stressed during assembly at room temperature with water-pressurized bladders in vertical and horizontal directions. Two end plates and four aluminum tension rods were adopted for pre-loading in axial direction. A 0.1 Ohm dump resistor was used for the quench protection during the test of LPF1. LPF1 was tested at 4.2 K and a field plateau had been shown around 10.2 T after the 13th quench. The parameters of the design, the process of the fabrication and the test performance of LPF1 are presented in [3]

4. Development of the IBS Coils and Test at High Field

A series of $\phi 35$ mm IBS (Iron Based Superconductor) coils including single pancake (SPC) and double pancakes (DPC) were designed and wound with the 7-filamentary Ba122 (Ba_{1-x}K_xFe₂As₂) tape which was produced by the Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences (IEE-CAS). The tests of the IBS coils were firstly carried out at 4.2 K and 10 T background field. The highest quench current of the coils at 10 T is 68.4 A, which is about 79% of the quench current at self-field and about 90% of the critical current of the short sample. Then two SPCs were selected and tested at 4.2 K at 24 T. The highest quench current of the coils at 24 T is 25.6 A, which is about 39% of the quench current at self-field. The detailed information is presented in [4]. These results suggest that the iron-based superconductors are very promising for high-field magnet applications.

Acknowledgement

The work is supported by the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (CAS) Grant No. XDB25000000, the key research program of CAS Grant No. XDPB01, the Hundred Talents Program of CAS and National natural Science Foundation of China Grant No. 11675193, 11575214, 11604335.

References

1. Conceptual Design report of the CEPC: http://cepc.ihep.ac.cn/CEPC_CDR_Vol1_Accelerator.pdf
2. E. Kong et al., IJMPA, 34, 2019, 1940003
3. C. Wang et al., IEEE TAS, 29(7), 2019, 4003807
4. D. Wang et al., SUST, 32, 2019, 04LT01