

YBCO パンケーキコイルにおける 遮蔽電流による不整磁場発生メカニズムの考察

Examination to mechanism of Magnetic Field generated by Screening Current in YBCO Pancake Coil

今市 洋平, 持田 歩, 有谷 友太, 斎藤 隼, 王 韜, 石山 敦士(早大); 植田 浩史(阪大)
 IMAICHI Yohei, MOCHIDA Ayumu, ARIYA Yuta, SAITO Jun, WANG Tao, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.);
 UEDA Hiroshi (Osaka Univ.)
 E-mail: atsushi@waseda.jp

1. はじめに

加速器やMRIに使われるYBCO線材はテープ形状であるために、遮蔽電流が顕著に誘導され不整磁場が生じる。しかし、遮蔽電流がどのように生じ、振る舞うかはまだ詳しく分かっていない。そこで我々は先行研究において開発された自己磁場および外部磁場環境下で遮蔽電流分布とその影響を計算できる数値シミュレーション[1]による解析結果と、遮蔽電流磁場評価実験の結果とを比較し、変動磁場に対するコイル内部での遮蔽電流の振る舞いや、時間に対する遮蔽電流の減衰のメカニズムについて考察を行ったので報告する。

2. 遮蔽電流評価実験及び電磁場解析

我々は先行研究[2]において、外部磁場印加時のダブルパンケーキ(DP)コイルに三角波(最大 ± 80 A, Sweep rate 20 A/min)を通電し、遮蔽電流によって生じる不整磁場(B_s)を実験及び解析[1]により評価した。このとき用いたコイル諸元をTable 1, 実験及び解析対象をFig.1(i)に示す。通電電流(I_t)に対する B_s (測定位置(a))の実験結果及び解析結果をFig.1(ii)にプロット及び実線でそれぞれ示す。

また、 I_t が0Aから80Aまで増加する際、DPコイル右上断面において変化するコイル線材内の遮蔽電流分布を数値解析によって求めた結果をFig.2に示す。同図において、遮蔽電流がより密になっている部分を破線で囲い強調している。

3. 結果・考察

Fig.1(ii)を見ると、 B_s は外部磁場印加による遮蔽電流の影響で実験・解析結果ともに負の値からスタートし、 I_t の上昇に伴って増加している。そして実験結果においては $I_t = 40$ A程度で飽和し、その後減衰している。減衰要因として、負荷率増大に伴い線材内の遮蔽電流領域が減少していくことが考えられる。 I_t を増減させると I_t - B_s のヒステリシスループが描かれるが、実験・解析結果ともにループの1周目と2周目が重ならない不規則な形状となっている。原因として、外部磁場と同じ向きの自己磁場が増加するに従ってコイル内で磁場飽和が生じ、徐々に外部磁場由来の遮蔽電流が減衰したことが考えられる。その結果、外部磁場によるヒステリシスが失われ、自己磁場によるヒステリシスのみに変化したと考えられる。特に自己磁場の絶対値が最大となる瞬間(Fig.1(ii)-①)では、磁場侵入が最大となり外部磁場由来の遮蔽電流が顕著に減衰したことが考えられる。数値解析により求めたコイル内遮蔽電流分布(Fig.3)を見ると、ループ1, 2周間において遮蔽電流の減衰が確認できる。

またFig.2を見ると、外部磁場印加によってコイル外側に遮蔽電流が密に生じ($I_t = 0$ の破線部分)、 I_t の増加に伴い内側へ広がり、 $I_t = 40$ Aで全体に均一化していることが分かる。さらに I_t を増加すると、コイル外側を流れる遮蔽電流は内側へ移動し、遮蔽電流領域が狭まり減衰している。この現象は、磁場が飽和したことでコイル外側から侵入する磁場と、上昇した通電電流によって、遮蔽電流の流れる領域が奪われたことに因ると考えられる。

Table 1 Specification of Double Pancake Coil

Superconducting Tape	IBAD/ CVD-(Y,Gd)BCO
Wire length	52 m
Insulated tape width	10.2 mm (maximum)
Tape thickness	315 μ m (maximum)
Inner diameter	219 mm
Outer diameter	240 mm
Height	30 mm
Insulation	Low-temperature-curable-polyamide
Number of turns	34 turns/coil

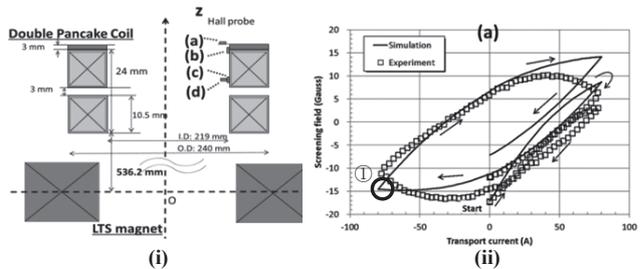


Fig.1 (i) Evaluation points and (ii) Numerical and experimental results of the screening field at point (a)

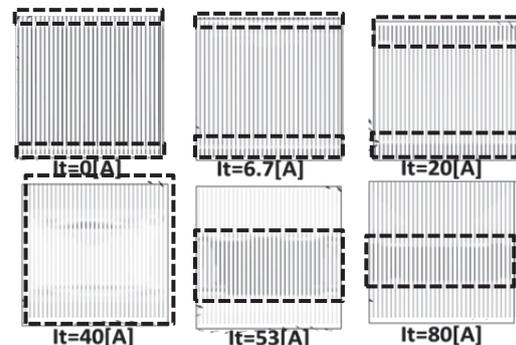


Fig. 2 Screening current distribution maps by numerical simulation while transport current is increasing till 80[A]

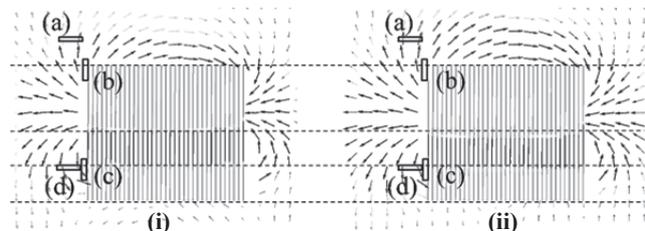


Fig. 3 Screening current distribution maps by numerical simulation. (i) and (ii) are caused by first and second current peak, respectively.

参考文献

- H.Ueda, et al.: IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 23, Issue: 3, Part: 2, (2013), 4100805
- Y.Ariya, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 88 (2013) p.145

2 mm 幅の REBCO 線材で巻いたパンケーキコイルにおける遮蔽電流磁場の顕著な低減効果

Remarkable reduction of screening current-induced magnetic field of REBCO coils by the use of 2 mm width conductors

許 一 (千葉大); 柳澤 吉紀 (理研); 中込 秀樹 (千葉大); 前田 秀明 (理研)

XU Yi (Chiba Univ.); YANAGISAWA Yoshinori (RIKEN);

NAKAGOME Hideki (Chiba Univ.); MAEDA Hideaki (RIKEN)

E-mail: yixu@chiba-u.jp

1. はじめに

REBCO コイルでは遮蔽電流磁場によって、(i)中心磁場のヒステリシス効果、(ii)中心磁場強度の減少、(iii)中心磁場の時間的なドリフト、(iv)磁場分布の歪みなどの問題が生じる。これらは時間的に安定かつ空間的に均一な磁場が必要とされる NMR, MRI, 加速器などの機器において大きな問題である[1]。REBCO コイルにおける遮蔽電流磁場の抜本的低減に向けた基礎的な検討として、我々は昨年学会で、超伝導層を 3 分割したスクライビング REBCO 線材で巻いたダブルパンケーキコイルにおける遮蔽電流磁場を実験と数値解析で定量化し、高電流負荷率領域において、遮蔽電流磁場の顕著な低減効果が得られることを示した [2]。ただし、スクライビング線材においては臨界電流、引張強度、剥離強度などの低下が危惧される。本研究では、幅狭線材使用の観点から、2 mm 幅の REBCO 線材で巻いたダブルパンケーキコイルにおける遮蔽電流磁場を実験で評価し、その低減効果を調べた。

2. 実験方法

SuperPower 社製の 4 mm 幅の REBCO 線材(SCS4050, 厚み 0.1 mm, 臨界電流 110 A) と 2 mm 幅の REBCO 線材(SCS2050, 厚み 0.1mm, 臨界電流 56 A) を用いて、それぞれ 3 個と 6 個のダブルパンケーキコイルを巻いた。コイル同士を直列に繋ぎ、ほぼ同じ寸法の 2 つのコイルを製作した (それぞれ Coil-A, Coil-B と呼ぶ。Table 1 参照)。これらのコイルをそれぞれ 0 A → +50 A → 0 A → -50 A → 0 A → +50 A → 0 A と 0 A → +26.5 A → 0 A → -26.5 A → 0 A → +26.5 A → 0 A の手順で通電し、遮蔽電流磁場のヒステリシスループを取得した。

3. 実験結果

遮蔽電流磁場のヒステリシスループを Fig. 1 に示す。1 回目の励磁過程において負荷率 (I/I_c) が 10% (Coil-A: 5.00 A, Coil-B: 2.65 A) のときの遮蔽電流磁場はそれぞれ 22.1 G と 14.2 G である。すなわち 2 mm 幅の線材で巻いたダブルパンケーキコイルにおける遮蔽電流磁場は 4 mm 幅の線材で巻いたコイルの 64.3% である。次に電流負荷率が 50% (Coil-A: 25.0 A; Coil-B: 13.3 A) のときの遮蔽電流磁場はそれぞれ 67.3 G と 32.8 G である。すなわち 2 mm 幅線材のコイルにおける遮蔽電流磁場は 4 mm 幅線材コイルの 48.7% であり、ほぼ半分である。さらにコイル臨界電流においては、遮蔽電流磁場はそれぞれ 35.7 G と 12.3 G となり、2 mm 幅線材のコイルにおける遮蔽電流磁場が 4 mm 幅線材コイルの 34.5% にまで減少した。

4. 考察

実験結果より、必ずしも線材幅に比例した遮蔽電流磁場の低減効果が得られるわけではないことが明らかである。(1) 低負荷率では低減効果が小さく、(2) 中負荷率ではおおむね線材幅に比例した低減効果が、そして(3) 高負荷率では線材幅から想定される以上の低減効果が得られる。これはスクライビング線材を用いた場合と同様の結果である[2]。

この振る舞いは以下のように解釈できる。(1) 低負荷率領域では、線材に印加される径方向磁場が小さく、線材の上下端部にしか遮蔽電流が流れない。この場合、コイル軸方向に隣接する線材同士の遮蔽電流が打ち消し合うので、結局コイル上下端部における遮蔽電流が作る磁場のみが支配的になる。すなわち遮蔽電流磁場の大きさが、線材幅によらないのである。(2) 中負荷率領域においては、線材の上下端から入った磁束が線材中心部にま

で完全侵入し、線材全体に遮蔽電流が流れるため、線材幅に応じた遮蔽電流磁場が作られる。(3) 高負荷率領域においては、通電電流が支配的になることで、遮蔽電流の流れる余地が激減する。幅細の線材においては、わずかに残った遮蔽電流が、コイル軸方向に隣接する線材同士において打ち消されるので、遮蔽電流磁場が顕著に減少すると考えている。これらについては、数値解析結果によって明示したい。

Table. 1 Physical parameters of test coils

Parameters	Coil-A	Coil-B
Conductor width (mm)	4	2
Winding I.D./O.D./C.H. (mm)	30/38/26.4	30/37.4/29.0
Number of double pancake coils	3	6
Number of total turns	162	324
Total length of conductor (m)	16.8	33.6
n value of coil	25	26
Coil critical current for $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ (A)	50	26.5

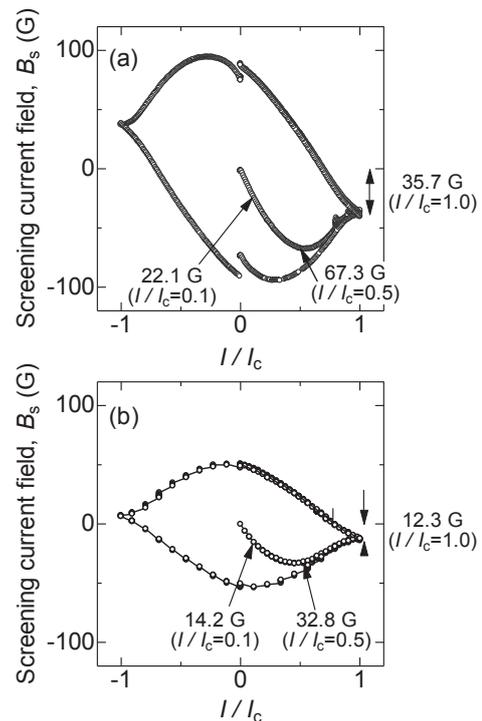


Fig. 1 Hysteresis loop of the screening current-induced field for (a) Coil-A and (b) Coil-B.

5. まとめ

幅の狭い REBCO 線材で巻いたダブルパンケーキコイルにおいては、スクライビング線材のコイルと同様に、高負荷率領域において顕著な遮蔽電流磁場の低減効果が得られる。

参考文献

- [1] Maeda and Yanagisawa, *IEEE TAS*, **24** (2014) 4602412.
[2] 許他, 2013 年度秋季低温工学・超電導学会, 2P-p21

高温超電導サイクロトロンを想定した 試作非円形 YBCO パンケーキコイルにおける発生磁場分布評価

Experiments on Magnetic Field distribution in Noncircular YBCO Pancake Coil for Cyclotron

松見 絢子, 梅田 大貴, 王 韜, 王 旭東, 石山 敦士(早大);
植田 浩史(阪大);渡部 智則, 長屋 重夫(中部電力)

MATSUMI Ayako, UMEDA Hiorotaka, WANG Tao, WANG Xudong, ISHIYAMA Atsushi (Waseda univ.);
UEDA Hiroshi (Osaka univ.); WATANABE Tomonori, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Co., Inc.)
E-mail: atsushi@waseda.jp

1. はじめに

我々は重粒子線がん治療のための次世代加速器として、小型・高効率・高性能の高温超電導サイクロトロンの開発を目指している。目的とするサイクロトロンの概念図を Fig.1 に示す。本研究では、AVF (Azimuthally Varying Field) 発生用の非円形スパイラルセクターコイルの開発に向けて、HIMAC (放医研) と同等の出力 (400 MeV/n, 300nA) を有する高温超電導サイクロトロンの試設計[1]で得られたコイルの最小曲率半径 2 分の 1, 大きさ約 4 分の 1 モデルを試作し、発生磁場分布を測定し、数値計算により得られた磁場分布と比較、評価したので報告する。尚、本研究は科研費(基盤研究A)「次世代重粒子線がん治療装置用超伝導加速器の基盤技術開発」において実施したものである。

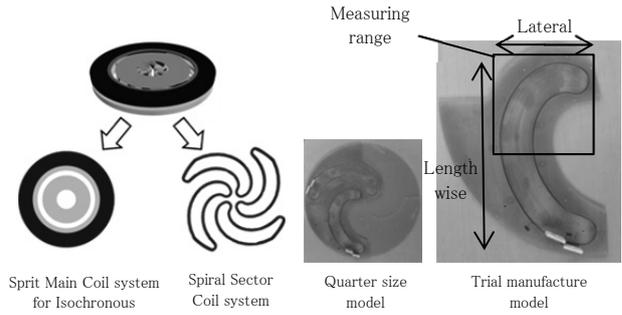


Fig.1 Conceptual design of HTS cyclotron

Fig.2 Structure of trial manufacture

2. コイルの試作

試作した非円形コイルをFig.2に示す。非円形YBCOパンケーキコイルの実規模設計と試作モデルの諸元をTable.1に示す。使用したYBCO線材は幅4 mmで、厚み150 μm(絶縁層50 μm込み)である。スパイラルセクターコイルは4つの非円形コイルがmid-planeを挟んで対を成す構成になっており、実規模設計で4対である非円形コイルの1対分の片側を試作し、シングルパンケーキ形状で巻線した。なお、コイル構造は先行研究で開発されたYOROIコイル構造を適用した[2]。

Table 1 Specification of conceptual design and trial manufacture of noncircular YBCO Pancake Coil

	Real	Trial
Lateral [m]	0.815	0.18
Lengthwise [m]	1.50	0.359
Minimum curvature radius [m]	0.053	0.025
Height of 1 coil [m]	0.13	0.004
Turn	650	23
I _c [A]	379	37

3. 発生磁場分布評価

Fig.2に示す測定範囲において液体窒素中で発生磁場分布をコイルの外枠から高さ1 mmの面について5 mm間隔で実測し、磁場マッピングを作成した。設計計算と実験結果それぞれにより得られたマッピング結果をFig.3に示す。Fig.3より、磁場の最大値, 最小値はほぼ等しく、また、発生磁場分布は計算値に対してよく一致している。

Hill and Valley分布をより詳細に確認するために、Fig.3に示す磁場測定系におけるx=15, 105 mmでのコイル横断面の磁場分布の検証を行った。コイル横断面の磁場分布の実験と解析結果を比較したものをFig.4に示す。Fig.4より、コイル横断面における磁場分布は、それぞれ実験と設計計算で得られた値とよく一致しており、Hill and Valley分布を確認することが出来た。

Fig.3, Fig.4より、今回試作したコイルの発生磁場分布は、目標とする磁場分布をよく再現できており、試作コイルは設計通りに巻けているということが示された。今後は、AVFの発生分布を実測し、加速器用途として求められる発生磁場精度(10⁻⁴以下)の実現に向けて評価を行っていく予定である。

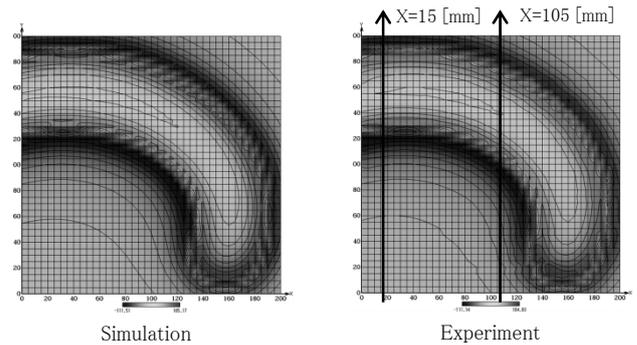


Fig.3 Experimental and numerical results of field mapping in measuring range

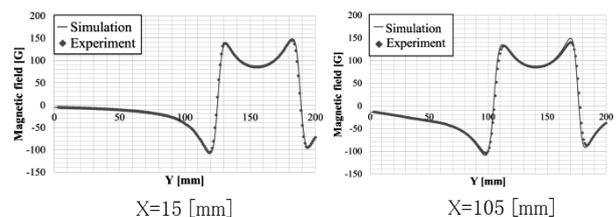


Fig.4 Experimental and numerical results of field on line x=15, 105 [mm]

参考文献

1. H. Ueda, X. Wang, A. Ishiyama, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 23 (2013), 4100205
2. S. Nagaya, A. Ishiyama, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 23 (2013), 4601204

高温超電導サイクロトロンを想定した 非円形 REBCO パンケーキコイルの高機械強度化に向けた構造解析

Structural Analysis on High Strength Noncircular REBCO Pancake Coil for High Temperature Superconductivity Cyclotron

辻 義明, 梅田 大貴, 王 旭東, 石山 敦士, 山川 宏(早大); 植田 浩史(阪大); 渡部 智則, 長屋 重夫(中部電力)
TSUJI Yoshiaki, UMEDA Hirotaka, WANG Xudong, ISHIYAMA Atsushi, YAMAKAWA Hiroshi (Waseda University);
UEDA Hiroshi (Osaka University); WATANABE Tomonori, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Co., Inc.)
E-mail: atsushi@waseda.jp

1. はじめに

我々は, HIMAC(放射線医学総合研究所)と同等出力(400 MeV/核子, 300 nA)を持つ高温超電導技術を用いた5High(高磁場化・小型化, 高機械強度化, 高熱的安定化, 高電流密度化, 高磁場精度化)コイルシステムからなる粒子線がん治療用サイクロトロンの実現を目指し, 研究開発を行っている[1, 2]. 本発表は, 先行研究で開発された YOROI 構造[3]を開発中のサイクロトロンに応用し, 特に応力集中が予想される実規模 AVF 発生用非円形スパイラルセクターコイル(SSC)への補強効果について解析評価を行ったので報告する。なお, 本研究は科研費(基盤研究 A, No.23246053)「次世代重粒子線がん治療装置用超電導加速器の基盤技術開発」において実施したものである。

2. 数値解析

先行研究で試設計[1]を行った SSC の諸元を Table 1 に示す。

SSC の電磁力分布は, 励磁状態における試設計のオーバーオール電流密度で解析し, 超電導サイクロトロンを構成する円形スプリットコイルの発生磁場の影響も考慮した。構造解析では, SSC の単体モデルと 4 対の SSC を囲むように YOROI 構造を応用したモデル(Fig. 1)を採用した。巻線部は Hastelloy(厚み 100 μm), 銅層(厚み 100 μm), 絶縁層(厚み 100 μm)で構成される REBCO 線材を想定して, 材料の異方性を考慮し, 複合則により一体モデルとした。巻線と GFRP 補強部の間は接触境界とした。GFRP 補強部は上下側板を厚み 50 mm と設定して解析を行った。SSC 単体モデルの境界条件には, 収束性確保のため一箇所を固定して, 4 対の SSC モデルには上下側板の最内層は回転をしないという条件を設定した。

3. 結果とまとめ

SSC の単体モデルに加わるひずみと、ミーゼス応力分布をそれぞれ Fig. 3 に示す。最大ひずみは約 13.1% であり, 最大ミーゼス応力は約 16400 MPa であった。この結果より, 支持構造を持たない巻線単体では変位が非常に大きく, コイルの原型を保てないことが確認できる。また, 巻線の Negative Bend 部や曲率半径の小さい部位に特にミーゼス応力が集中し, 大きな負荷が加わる傾向が見られた。次に, YOROI 構造を応用した 4 対の SSC の巻線に加わるひずみとミーゼス応力分布をそれぞれ Fig. 4 に示す。最大ひずみは約 0.148% であり, 最大ミーゼス応力は約 367 MPa であった。したがって, YOROI 構造を SSC に応用することで, 補強部が巻線に加わる応力の大部分を分担することが可能となり, 巻線は REBCO 線材の許容限界であるひずみ約 0.4% を超過しない高機械強度・高電流密度な設計が可能となった。

今後は, 解析事例を重ねてデータを蓄積するとともに, YOROI 構造の各部寸法を設計パラメータとし, 設計条件を満たしつつコイル全体の最少体積の設計を行っていく予定である。

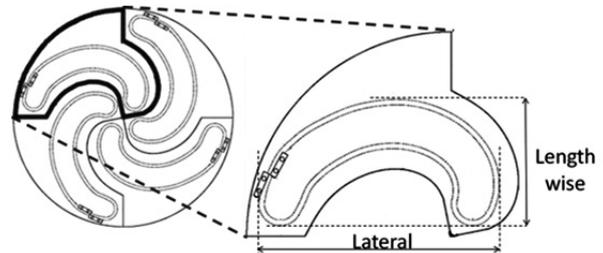


Fig. 1 Structure of spiral sector coil
Table 1 Specifications of spiral sector coil.

Spiral sector coil (one of four part composition)	
Lengthwise (m)	0.815
Lateral (m)	1.50
Height (m)	0.13
Number of turns	650
Operating current per REBCO wire (A)	243
Maximum experience field (T)	8.99

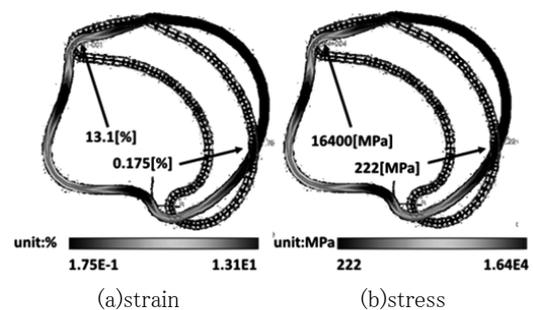


Fig. 3 Results of strain and stress on the coil winding without high strength REBCO pancake coil structure

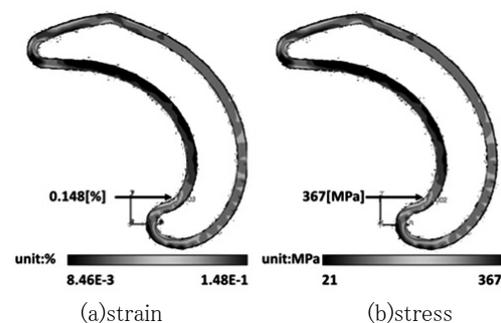


Fig. 4 Results of strain and stress on the coil winding with high strength REBCO pancake coil structure

参考文献

- H. Ueda, X. Wang, A. Ishiyama, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 23 (2013), 4100205
- X. Wang, A. Ishiyama, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 24 (2014), 4601605
- S. Nagaya, A. Ishiyama, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 23 (2013), 4601204

薄膜超伝導線材で巻かれた鞍型コイルに適用可能な 三次元電磁界解析モデルの検討

Three-dimensional modeling for electromagnetic field analyses of saddle-shape coils wound with coated conductor

曾我部 友輔, 塚本 伊秋, 中村 武恒, 雨宮 尚之 (京大)

SOGABE Yusuke, TSUKAMOTO Tadaaki, NAKAMURA Taketsune, AMEMIYA Naoyuki (Kyoto University)

E-mail: y-sogabe@asl.kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

様々な用途で実用化が期待されている超伝導マグネットの多くは三次元形状をもち、このようなマグネットの電磁界解析を行うためには記憶容量や計算時間を抑制できるモデルの構築が重要である。我々は薄膜高温超伝導線材で巻かれた三次元形状コイルの電磁界解析モデルを構築している。

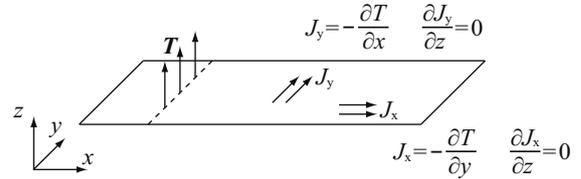


Fig. 1 Thin strip approximation.

2. 三次元形状をもつコイルの電磁界解析モデル

電磁界解析の支配方程式として以下の式を用いた。

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\sigma} \nabla \times \mathbf{n}T \right) \cdot \mathbf{n} + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\mu_0 t_s}{4\pi} \int_{S'} \frac{(\nabla \times \mathbf{n}'T') \times \mathbf{r} \cdot \mathbf{n}}{r^3} dS' + \mathbf{B}_{\text{ext}} \cdot \mathbf{n} \right) = 0$$

ここで、薄膜高温超伝導線材は金属基板上に 1 - 2 μm の厚さの超伝導層を形成したものであり、超伝導層の断面アスペクト比が非常に大きいため、線材厚み方向では電磁界が一様であり、電流が薄膜線材の表面に対する接線方向にのみ流れると仮定する薄板近似を適用している[1], [2]。Fig. 1 に薄板近似の概念図を示す。

コイルのモデル化のために、並列導体近似とブロック近似を導入した。

並列導体近似は、閉ループを線材厚さ方向に重ね、各ターンが回路的に並列接続された状態とし、全てのターンに同じ大きさの電流が流れているとする近似である。Fig. 2 に並列導体近似の概念図を示す。この近似により、電磁界解析における未知変数は八分の一の解析領域に属する節点の電流ベクトルポテンシャル T となり、解析に要する記憶容量や計算時間を削減できる。フィールド点の磁界に影響を与える電流としては、解析領域の範囲外の導体を流れる電流も考慮している。並列近似はしばしば用いられてきたものであるが、この近似が、解析結果、特に内部の電流の減衰時定数などに与える影響についてはこれまで十分検討されていなかった。今回はこの点についても検討を行う。

隣接する複数のターンを一つのブロックとして扱い、特定の一つのターンをそのブロックを代表するターンとして解析を行う。これをブロック近似と呼ぶ。ブロック近似の概念図を Fig. 3 に示す。ブロック近似の適用により、解析すべき対象を、コイルの全ターンから、解析プログラムの中で個数が定義されるブロック群へと削減できるが、この近似の適用による計算精度への影響を検討する必要がある。

上記の近似を高温超伝導コイルの電磁界解析モデルに適用することによって、必要となる記憶容量や計算時間を、現実的な範囲に抑えることが可能となる。この解析モデルを適用しうる対象として、Fig. 4 に示すようなコイルが考えられる。

謝辞

本研究は科学技術振興機構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)」の支援によって行われた。

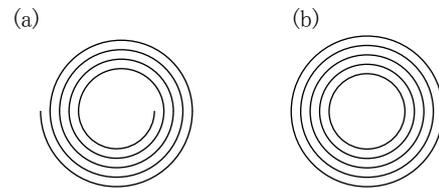


Fig. 2 (a) Without parallel conductor approximation; (b) Applied parallel conductor approximation.

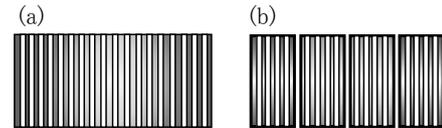


Fig. 3 (a) Without block approximation; (b) Applied block approximation.

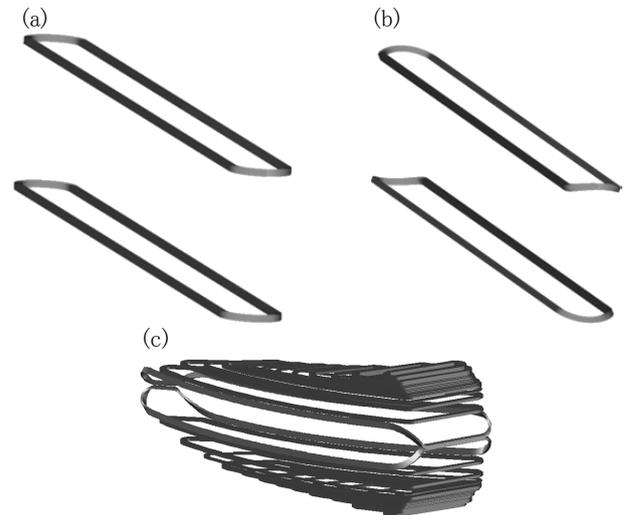


Fig. 4 (a) Racetrack coil; (b) Saddle-shape coil; (c) Coils for Spiral Sector FFAG accelerator magnet[3].

参考文献

1. Y. Ichiki, et al.: Physica C 412-414 2 (2004) 1050-1020
2. M. Nii, et al.: Supercond. Sci. Technol. **25** (2012) 095011
3. K. Goda, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. **24** (2014) 4402605

鞍型ピックアップコイル法による REBCO 超電導テープ線材の 磁化緩和特性の評価

Characteristic tests of magnetization relaxation of REBCO superconducting tapes by saddle-shaped pickup coil low

益田 佳一郎, 岩熊 成卓(九州大学); 和泉 輝郎, 塩原 融(SRL)
Masuda Keiichiro, Iwakuma Masataka (Kyushu Univ.); Izumi Teruo, Shiohara Yuh (SRL)
Email:masuda@sc.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

近年、医療用 MRI の励磁用コイルへの高温超電導技術の導入による脱ヘリウムや高磁界化に期待が高まっている。しかしながら MRI には 1 時間当たり 1ppm 程度の磁界減衰率が要求され、Y 系超伝導テープ線材を用いる際、その磁化による遮蔽電流の緩和が磁界の時間的な均一性に影響を及ぼしてしまう。そこで本研究では、テープ線材に流れる遮蔽電流が緩和しきってから使用するという手法に向け、超電導線材に流れる遮蔽電流の緩和特性を明らかにすることを目的としている。

2. 研究内容

連続的なデータ収録を行えるという鞍型ピックアップコイル法のメリットを活かし、超電導テープ線材の磁化緩和の初期過程の測定を行った。今回は EuBCO 超電導テープ線材を用いて、測定温度を 15K、20K とし、直流バイアス磁界を 0T~2.0T、線材の積層枚数を 3 枚にして測定した。Table. 1 に EuBCO 超電導テープ線材の諸元を示す。また、以下磁化の緩和率について簡単に述べる。磁束クリープの理論より、見かけのピンポテンシャルを U_0^* (eV)、温度を T (K)、ボルツマン定数を $k_B = 8.61 \times 10^{-5}$ (eV/K)、超電導体を流れる電流密度を J (A/m) としたとき、緩和開始後十分に時間が経過すると以下の関係が成り立つ。対数減衰率は、

$$-\frac{d}{d(\log t)} \left(\frac{J}{J_{c0}} \right) = \frac{k_B T}{U_0^*} \quad (1)$$

となる [1]。また磁化 M (A/m) と電流密度 J (A/m) は

$$J = \frac{12MJ}{w(3l-w)} \quad (2)$$

の関係が成り立つので、以下の表式

$$-\frac{d}{d(\log t)} \left(\frac{M}{M_{c0}} \right) = \frac{k_B T}{U_0^*} \quad (3)$$

で磁化 M (A/m) は緩和する。

3. 実験結果及び考察

Fig. 1 に鞍型ピックアップコイル法で測定した EuBCO 線材の磁化緩和特性の測定結果を示す。式 (3) が示すように、測定結果からバイアスが大きくなるほど、また温度が高くなるほど、緩和率が大きくなること分かる。系統的なデータが得られた実験結果から、鞍型ピックアップコイルにより初期過程での磁化緩和の測定が行えることを示した。今後の課題として、SN 比を改善し更に長い緩和時間をとれるようにする必要があると同時に、磁化の緩和を早く収束させる方法を模索し

なければならない。

Table.1 Specifications of EuBCO superconducting tapes

Width	10mm
Stabilizer	Ag(4μm)
Superconductor	EuBCO+BHO(1.52μm)
Cap and buffer layers	CeO ₂ (0.62μm)
	LMO(8nm)
	MgO(5nm)
	Y ₂ O ₅ (14nm)
	Gd ₂ Zr ₂ O ₇ (0.8μm)
Substrate	Hastelloy(100μm)

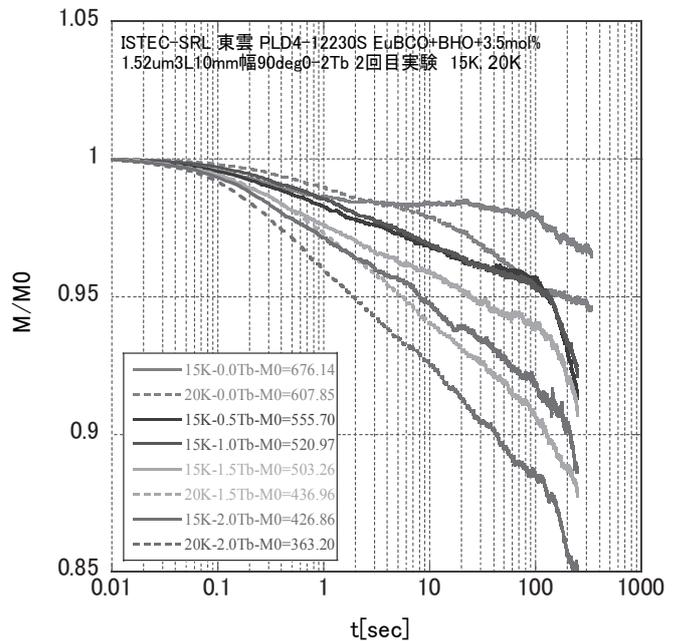


Fig.1 Characteristic of magnetization relaxation

参考文献

1. 馬場竜太郎 CVD 法による YGdBCO 線材の緩和特性に及ぼす超伝導層厚の影響
http://aquarius10.cse.kyutech.ac.jp/Japanese_EUC/researcher/2010/baba_study.pdf

~ 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) ~ LTS/REBCO NMR 磁石に必要なとされる磁場補正のベストミックス技術

- Towards a super-high field compact NMR magnet beyond 1 GHz (1) -
Best mix technology of magnetic field correction methods for LTS/REBCO NMR magnet

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

我々は REBCO 内層コイルを用いた高磁場・小型 NMR システムの開発を進めている。プロジェクトの中間ステップとして LTS/REBCO NMR 磁石の 1 号機を開発し、400 MHz (9.4 T) で運転した。この磁石において、外層補正コイルの磁場が REBCO コイルの遮蔽電流によって遮蔽されることで発生する顕著な Z2 成分を、磁性シムを用いることで補正し、REBCO を使用した磁石として世界初となる多次元 NMR 測定に成功した[1]。しかし、REBCO コイルの遮蔽電流の影響で超伝導シムの能力が低下し、一部のラジアル磁場不均一成分が補正しきれず残留した。これが原因で、NOESY と呼ばれるタンパク質の構造解析に必要な高難度の NMR 測定ができなかった。

本報では、過去に試験した 500 MHz (11.7 T) LTS/Bi2223 NMR 磁石と 400 MHz LTS/REBCO NMR 磁石 1 号機の磁場不均一成分の詳細な比較を行い、LTS/REBCO NMR 磁石に特有の磁場不均一成分の特定し、必要となる磁場補正技術の構成を導き出した。それをもとに製作した LTS/REBCO NMR 磁石の 2 号機の構成について述べる。

2. LTS/REBCO NMR 磁石に特有の磁場不均一成分

Table 1, 2 にそれぞれ 400 MHz LTS/REBCO NMR 磁石, 500 MHz LTS/Bi2223 NMR 磁石における超伝導シムによる磁場調整結果を示す。2 つの磁石において、REBCO コイルと Bi2223 コイルは、ほぼ同じ寸法である。LTS/REBCO NMR 磁石では Z2 成分を磁性シムで補正した後に超伝導シム調整を行った。磁場調整前の不均一成分を比較すると、LTS/REBCO NMR 磁石 (Map: RE #151) では、LTS/Bi2223 NMR 磁石 (Map: Bi #19) と比べ、ZX, ZY, XY, X2-Y2 のラジアル磁場成分が大きい。振幅で比較すると (ZX, ZY) 系は 1.98 倍、(XY, X2-Y2) 系は 5.40 倍である。磁場調整後の成分を比較すると、LTS/Bi2223 NMR 磁石 (Map: Bi #104) では、これらの成分が十分補正できているのに対し、LTS/REBCO NMR 磁石 (Map: RE #196) では超伝導シムの最大電流である 20 A を通電しても、ほとんど補正ができていない。別途、超伝導シムの磁場補正効率を調べたところ、LTS/REBCO NMR 磁石ではこれらの超伝導シムが、設計値の 5% 以下の能力しか出ないことが分かった。

このように、LTS/REBCO NMR 磁石では、顕著なラジアル磁場不均一成分が発生する。さらに、遮蔽電流の影響で、これらを補正する超伝導シムが効かなくなるため、補正ができないのである。これらの磁場不均一性は、巻線のわずかな歪みと遮蔽電流によって発生すると推察される。磁場不均一性が原因で、NMR 信号の感度と分解能が、理想的な状態と比べ 1 桁低く、高分解能 NMR 測定に必要なすべての条件を満たせなかった。

3. 内層 Z2 シムコイルとラジアル磁性シム用いた LTS/REBCO NMR 磁石 2 号機

LTS/REBCO NMR 磁石においては、遮蔽電流の影響による顕著な Z2 成分、ラジアル成分を補正する技術を組み込む必要がある。まず、Z2 成分については、遮蔽電流の影響をなるべく受けずに効率良く補正を行うため、磁石最内層に Nb₃Sn 線材で巻いた Z2 シムコイルを設置した (Fig.1 参照)。これにより、1 号機では Z2 成分を補正するために磁性シムを設置していた室温空間を、ラジアル磁場不均一性を補正するための磁性シムのスペースとして使用できるようになった。

Nb₃Sn 内層 Z2 シムコイルは、6 個のソレノイドからなる。REBCO の内側に設置するため、出来るだけ薄いことが望ましい。それぞれレイヤー数を 4 とし、内径 81 mm、外径 87.8 mm とした。総巻数は 1160 である。これらを連続に巻線した。巻線部のサイズに幅 4 mm のドーナツ状耐熱絶縁物を置くことは難しいが、巻棒の絶縁にはアルミナ溶射を用いた。永久電流ス

イッチも設けた。コイルは最大 50 kHz/cm² (25 A 通電時) の Z2 磁場成分を発生させるように設計しており、遮蔽電流の影響下でも、必要な Z2 成分が発生させられることを数値解析で確認した。2 号機の磁場補正結果については次報で述べる。

Table 1. Field correction results for 400 MHz LTS/REBCO NMR magnet with a Z2 ferromagnetic shim.

Field harmonics	Before SC shim correction (Map: RE#151)		After SC shim correction (Map: RE#196)	
	SC shim coil current	Amplitude of field error harmonics	SC shim coil current	Amplitude of field error harmonics
Z1	0 A	195 Hz/cm	1 A	1484 Hz/cm
Z2	0 A	-1175 Hz/cm ²	-20 A	-475 Hz/cm ²
X	0 A	-833 Hz/cm	20 A	-2 Hz/cm
Y	0 A	-327 Hz/cm	-4 A	295 Hz/cm
ZX	0 A	241 Hz/cm ²	20 A	252 Hz/cm ²
ZY	0 A	-3208 Hz/cm ²	20 A	-2541 Hz/cm ²
XY	0 A	983 Hz/cm ²	20 A	832 Hz/cm ²
X2-Y2	0 A	-3563 Hz/cm ²	-20 A	-2998 Hz/cm ²

Table 2. Field correction results for the 500 MHz LTS/Bi2223 NMR magnet.

Field harmonics	Before SC shim correction (Map: Bi#19)		After SC shim correction (Map: Bi#104)	
	SC shim coil current	Amplitude of field error harmonics	SC shim coil current	Amplitude of field error harmonics
Z1	-7 A	1058 Hz/cm	-6 A	-143 Hz/cm
Z2	0 A	209 Hz/cm ²	3 A	1258 Hz/cm ²
X	0 A	-814 Hz/cm	-6 A	495 Hz/cm
Y	0 A	-9705 Hz/cm	15.7 A	152 Hz/cm
ZX	0 A	-953 Hz/cm ²	3 A	64 Hz/cm ²
ZY	0 A	-1317 Hz/cm ²	6 A	-76 Hz/cm ²
XY	0 A	642 Hz/cm ²	0 A	33 Hz/cm ²
X2-Y2	0 A	-238 Hz/cm ²	-2 A	45 Hz/cm ²

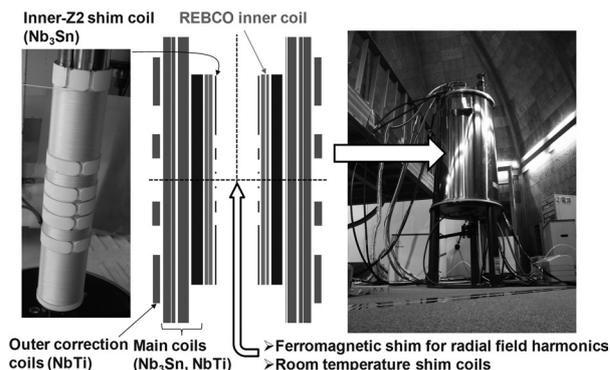


Fig.1 The 2nd 400 MHz LTS/REBCO NMR magnet installed with an inner Z2 shim coil.

4. まとめ

LTS/REBCO NMR 磁石において問題となる Z2 成分とラジアル成分を補正するために、内層 Z2 シムコイルとラジアル磁性シムを用いた 2 号機を製作した。これらに従来の超伝導シム、室温シム、磁場-周波数ロック、オートシムを組み合わせた磁場補正のベストミックス技術を用いて、磁場調整と NMR 測定を行う。

本研究は(独)科学技術振興機構の戦略的イノベーション創出推進プログラムと先端計測分析技術・機器開発プログラムによって行われた。

参考文献

- 柳澤他, 2013 年度春季低温工学・超電導学会, 1A-a03

~ 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) ~ 内層補正コイル方式 400 MHz LTS/REBCO NMR 磁石における磁場の均一化 - Towards a super-high field compact NMR magnet beyond 1 GHz (2) - Magnetic field correction for the 400 MHz LTS/REBCO NMR magnet with an inner-correction coil

井口 聖威也(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 (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

前報で述べた内層 Z2 シムコイルを設置した 400 MHz LTS/REBCO NMR 磁石の 2 号機における磁場調整結果を報告する。

2. 内層 Z2 シムコイルによる磁場補正

磁石を 440 MHz まで励磁した後、400 MHz に戻した。NMR テスラメータ (Metrolab Technology, PT2050) を用いて測定した磁石 z 軸上の磁場分布を Fig.1 に示す。外層補正コイルの磁場が REBCO コイルの遮蔽電流によって遮蔽されることで、-9389 Hz/cm² の Z2 磁場成分が発生した。これを打ち消すために、内層 Z2 シムコイルに 8.52 A の電流を流し、-193 Hz/cm² にまで Z2 磁場成分を低減した。

3. 磁場補正のベストミックス技術

内層 Z2 シムコイル調整後、磁場マッピングシステム (Resonance Research, FMU-1200) を用いて磁場分布測定をしながら、超伝導シムコイル、磁性シム、室温シムコイルによる磁場調整を行った。半径 8.5 mm、ピッチ 2.5 mm の螺旋状の磁場分布を測定し、ル・ジャンドル関数展開することで均一度を評価した。Fig.2(a)に内層 Z2 シムコイルによる磁場調整後の磁場分布を示す。まず超伝導シムコイルを用いて、低次成分である Z, Z2, X, Y 成分を補正した (Fig.2(b)と Table 1 Map 60 参照)。次に純度 99.5 % の鉄で製作したラジアル磁性シムを室温ボアに設置し、再度超伝導シムを微調整することにより、LTS/REBCO NMR 磁石において顕著な ZX, ZY, X2-Y2, XY 磁場成分を補正した (Fig.2(c)と Table 1 Map 98 参照)。最後に、残る高次成分 (Z3, Z4, Z2X, Z2Y, Z(X2-Y2), ZXY, C3, S3) を含めたすべての成分を室温シムコイルで補正した (Fig. 2(d)と Table 1 Map 261 参照)。磁石中心から±5 mm の範囲における磁場分布の両振幅は 0.6 ppm (240 Hz) にまで減少した。以上のように、磁場補正のベストミックス技術により、すべての磁場不均一成分を、磁場マッピングシステムで評価可能な限界にまで低減することに成功した。今後は、NMR スペクトルの線形を観測しながら、高分解能 NMR 測定が可能になるように磁場均一度をさらに調整する必要がある。

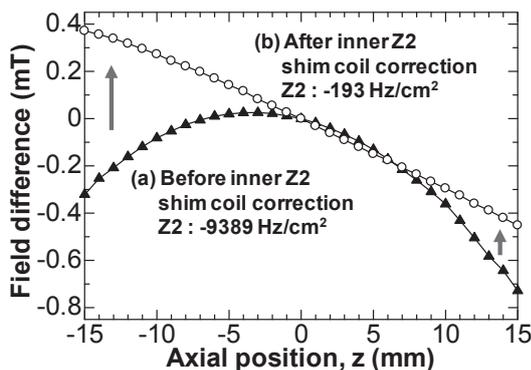


Fig.1 Magnetic field distribution (a) before inner Z2 shim coil correction, (b) after inner Z2 shim coil correction.

4. まとめ

400 MHz LTS/REBCO NMR 磁石の 2 号機において、内層 Z2 シムコイル、超伝導シムコイル、磁性シム、室温シムコイルを組み合わせ、1 号機では補正ができなかったラジアル磁場不均一成分を含め、すべての成分の調整に成功した。今後は NMR 測定による評価を進める。

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

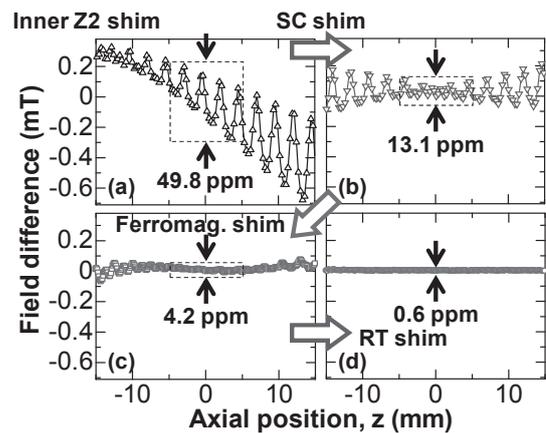


Fig.2 Magnetic field distribution (a) after inner Z2 shim coil correction, (b) after SC shim coils correction, (c) after ferromagnetic shim correction and (d) after RT shim coils correction.

Table 1. Shimming process of field error harmonics using best mix of field correction technologies.

Field harmonics	Amplitude of field error harmonics (Hz/cm ²)			
	(a) After inner Z2 shim correction (Map 1)	(b) After SC shim correction (Map 60)	(c) After ferromag. shim correction (Map 98)	(d) After RT shim correction (Map 261)
Z	-12008	36	120	-18
Z2	-1246	-71	45	21
Z3	731	760	989	-28
Z4	-160	-120	-689	-11
X	-4382	-7	-68	13
Y	-5283	-77	-34	-6
ZX	-3548	-2989	-1	-30
ZY	-4164	-371	67	-13
X2-Y2	-205	119	70	-3
XY	2225	1722	-17	1
Z2X	-49	171	522	-12
Z2Y	-423	-56	-179	0
Z(X2-Y2)	196	300	348	2
ZXY	87	-126	717	-24
C3	115	80	183	6
S3	121	147	104	0

～ 1GHz を上回る超高磁場・コンパクト NMR 磁石の実現に向けて (3) ～ チラー停止による磁石消磁における内層 Z2 シムコイルのクエンチ - Towards a super-high field compact NMR magnet beyond 1GHz (3) - Inner layer shim correction coil quench in degaussing process impact on the 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

本報では前報に引き続き、内層 Z2 シムコイルを設置した 400 MHz LTS/REBCO NMR 磁石 2 号機における NMR 測定結果を報告する予定であった。しかし、NMR 測定試験の開始後、磁石の直流電源とヘリウム再凝縮用のパルスチューブ冷凍機へ冷却水を供給するチラーが停止し、これが原因で磁石が消磁する事象が起きた。本講演概要では、磁石消磁に伴う Nb₃Sn 内層 Z2 シムコイルのクエンチと、それが遮蔽電流磁場に与える影響について報告する。

2. 磁石消磁中の内層 Z2 シムコイルのクエンチ

チラーが停止したことで、液体ヘリウム再凝縮用のパルスチューブ冷凍機が停止し、さらに磁石の直流電源のブレーカーが開いた。Fig.1 の $t=0$ は直流電源のブレーカーが開いた時刻である。Fig.1(a) に示すように、直流電源内部のダイオードにより 0.055 A/s の消磁速度で、初期値である 116 A から 35 分をかけて 0 A になった(○印で表記)。消磁速度は通常の励消磁の 5.5 倍の速度である。消磁中に内層 Z2 シムコイルの永久電流スイッチ (PCS) のヒーターを入れなかったため、誘導電流によって内層 Z2 シムコイルにクエンチが起きた。Fig.1(b) の REBCO コイル電圧(□印で表記)に見られる電圧スパイク(A'), (B'), (C'), (D') は内層 Z2 シムコイルのクエンチによって発生した誘導電圧である。Fig.1(a) に見られる REBCO コイル上端部の径方向磁場(△印で表記)の不連続な振舞い(A), (B), (C), (D) も、内層 Z2 シムコイルへの誘導電流とクエンチによるものである。電圧スパイク(A'), (B'), (C'), (D') の振幅は回を追うごとに大きくなっている。これは、磁石の消磁に伴い内層 Z2 シムコイルの臨界電流が上昇し、より高い電流でクエンチが起きるようになったためである。

(C') において内層 Z2 シムコイルのクエンチが起きた後、 $t = 12 \sim 27$ min の間は V_{all} の値が元に戻っていない。これは(C') において起きた内層 Z2 シムコイルのクエンチに伴い PCS もクエンチし、常伝導状態になったためである。この間は、内層 Z2 コイルに誘導された電流が、PCS においてジュール熱に変換されるので、内層 Z2 シムコイルにクエンチは起きていない。その後 $t = 27$ min において PCS が超伝導状態に回復したため、(D') において再度内層 Z2 シムコイルにクエンチが起きています。消磁と内層 Z2 シムコイルのクエンチによって、内層 Z2 シムコイル、PCS、メインコイルへのダメージはなかった。

3. 内層 Z2 シムコイルのクエンチが磁場分布に与える影響

Fig.2 に消磁後のコイル軸上の残留磁場分布を示す。残留磁場は REBCO コイルの遮蔽電流によって発生する磁場である。磁石中心付近では、磁場分布が上に凸の形状を示している。過去に内層 Z2 シムコイルのない 1 号機でも同様の測定を行ったが、このような分布は見られなかった。この部分を多項式展開すると Z2 成分が -11435 Hz/cm^2 (400 MHz に対して -28.6 ppm) 含まれている。これは、Fig.1(b) の (D') に示す内層 Z2 シムコイルクエンチ時の磁場変化によって、REBCO コイルに誘導された遮蔽電流によるものである。すなわち、Z2 シムコイルの磁場を打ち消すように、Z2 成分を含んだ遮蔽電流磁場が発生したのである。磁石を再度励磁したところ、400 MHz の運転磁場において Z2 成分は -19807 Hz/cm^2 の大きさであった。1 回目の励磁において、Z2 成分は -9389 Hz/cm^2 だったので、2 回目の励磁では約 2 倍の大きさになったのである。すなわち、消磁時の内層 Z2 シムコイルクエンチによって発生し

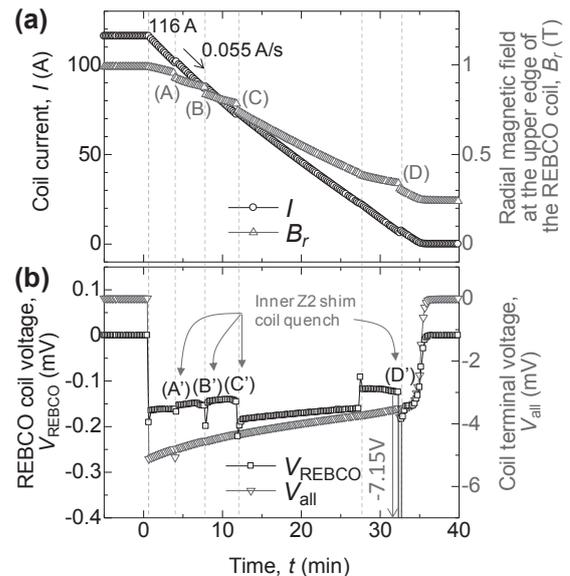


Fig.1 (a) Coil current and radial magnetic field at the upper edge of the REBCO inner coil and (b) Coil terminal voltage during discharging process.

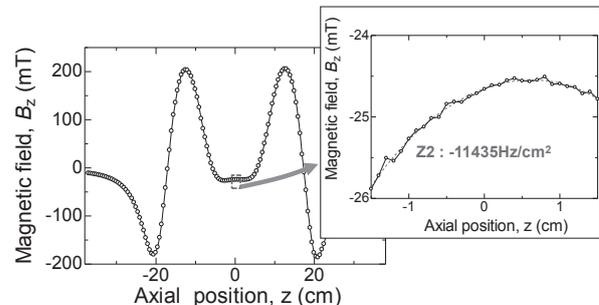


Fig.2 Residual magnetic field distribution along coil axis after discharging.

た遮蔽電流磁場の Z2 成分が、2 回目の励磁過程でも保存され、磁場分布に重畳したのである。さらに、2 回目の励磁後は一部のラジアル磁場成分も大きくなっており、内層 Z2 シムコイルのクエンチによって発生した遮蔽電流が、ラジアル磁場不均一性も同様に増加させたと推察される。

4. まとめ

チラー停止に伴う消磁過程で内層補正シムコイルが 4 回クエンチした。内層 Z2 シムコイルのクエンチによる磁石へのダメージはなかった。ただし、内層 Z2 シムコイルのクエンチによって REBCO コイルへ遮蔽電流が誘導され、これが後の磁場分布に影響を与えることが明らかになった。現在、磁石を再度励磁し、磁場調整を行っている。

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。

NMR 用 HTS インサートにおける遮蔽電流を抑制する補償コイルの設計

Design of compensation coil for suppression of screening current in HTS insert for NMR

梶川 一弘(九大); Hahn Seungyong, 岩佐 幸和(MIT)
 KAJIKAWA Kazuhiro (Kyushu Univ.); HAHN Seungyong, IWASA Yukikazu (MIT)
 E-mail: kajikawa@sc.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

HTS 線材は通常テープ形状を有するため、巻線して励磁するとテープ面に垂直な磁界を遮蔽する電流がテープ面内に流れ、発生磁界の質を低下させることが知られている。MRI/NMR 用超電導マグネットは特に高い磁界均一度を要求するため、HTSテープ線材を用いたMRI/NMR用超電導マグネットの実現に向けて遮蔽電流の除去が解決すべき課題の一つとなっている。これまでに、HTSテープ線材に生じた遮蔽電流を効果的に除去するために、異常横磁界効果を利用した方法が提案されている[1]。そこで、本研究では、実規模サイズの NMR マグネットの一部を構成する巻線に用いたテープ線材に誘起された遮蔽電流による磁化の現実的な除去が可能かどうかを検証するために、過去に製作された 500 MHz NMR 用 LTS インサート[2]を置き換えるための HTS インサートを設計した。HTS インサート用の線材として RE 系 coated conductor を想定し、励磁後に巻線内に誘起される遮蔽電流を除去するための補償コイルも設計した。

2. HTS インサートと補償コイルの設計

Tables 1, 2 にそれぞれ、想定した HTS インサートおよび補償コイルの諸元を示す。内外同軸配置の銅補償コイルで HTS インサートを挟んだ構造を想定し、これら全体が従来の LTS インサートの寸法とほぼ同一である[2]。想定した HTS テープ線材は幅 4 mm、厚さ 0.25 mm であり、周囲に 25 μ m 厚の電気絶縁部をもつ。また、HTS インサートとして 60 ターンのシングルパンケーキを 80 枚積層し、大気圧下の液体ヘリウム中で 160.3 A を通電したときに中心磁界 2.35 T を発生する。外側の 87.1 A を通電した LTS コイルが作る磁界 7.05 T と合わせて、中心磁界は計 9.40 T となる。補償コイル用線材として厚さ 1 mm の銅平角線を想定し、内外それぞれ 2 層のレーヤー巻線とした。HTS インサートと補償コイルの高さは同一である。

RE 系 coated conductor における臨界電流の磁界強度・印加角度依存性の実験結果[3]に基づいて、HTS インサート内の臨界電流分布を評価した。Fig. 1 に、1.1 μ m 厚の超電導層をもつ幅 4 mm の coated conductor における臨界電流について、4.2 K 中の実験結果とその近似曲線を示す。Table 1 に示すように、HTS インサートに用いるテープ線材の超電導層の厚さを 0.2 μ m と想定すると、事前に評価した巻線内の磁界分布から得られた局所的な臨界電流 I_c の最大値は 314 A であり、これは 49.4 mT の中心到達磁界に相当する。次に、銅線の残留抵抗比 RRR を 30 と想定すると[4]、抵抗率は 0.531 n Ω ·m であり、60 Hz の交流周波数に対する表皮の厚さ 1.50 mm は銅平角線の厚さの半分に比べて大きい。そこで、ジュール損失が発熱源の主体と判断して、最大中心到達磁界の約 1.4 倍となる 68.8 mT の振幅をもつ交流磁界を発生する銅補償コイルの発熱量を見積ると、内外コイル分を合わせて計 100 W となる。

次に、断熱条件下で巻線の一部が熱暴走に至った場合の一定時間内の最大許容温度の観点から、HTS テープ線材に必要な安定化銅の厚さも見積った[5]。その結果、非母材金属の厚さ 55 μ m に対して安定化銅の厚さを 195 μ m とすれば、3 s 間の発熱持続時間に対する到達温度を 250 K 未満に抑えることができることがわかった。

本研究は、JSPS 科研費 24360110 の助成を受けたものである。

参考文献

1. K. Kajikawa, et al.: Abst. of CSSJ Conf. 85 (2011) 1D-a07.
2. J.E.C. Williams, et al.: Rev. Sci. Instrum. 52 (1981) 649.
3. V. Braccini, et al.: Supercond. Sci. Technol. 24 (2011) 035001.
4. Y. Iwasa: Case Studies in SC Magnets, 1st ed. (1994) p. 393.
5. Y. Iwasa: Case Studies in SC Magnets, 2nd ed. (2009) p. 473.

Table 1 Specifications of designed HTS insert.

Size of tape	0.3 mm ^t × 4.05 mm ^w
Thickness of superconducting layer	0.2 μ m
Inner/outer diameter of HTS insert	82.2 mm/118.2 mm
Height of HTS insert	399 mm
Number of turns of HTS insert	60 × 80 turns
Current applied to HTS insert	160.3 A
Central magnetic field	2.35 T
Minimum local I_c (and load factor)	186 A (0.863)
Maximum local I_c (and load factor)	314 A (0.510)
Maximum full penetration field	49.4 mT

Table 2 Specifications of designed inner/outer copper coils.

Thickness of Cu tape	1 mm ^t
Number of layers of coil	2 layers/2 layers
Inner diameter of coil	78.2 mm/118.2 mm
Outer diameter of coil	82.2 mm/122.2 mm
Height of coil	399 mm
Amplitude of AC magnetic field	68.8 mT
Frequency of AC magnetic field	60 Hz
Resistivity of copper at 4.2 K	0.531 n Ω ·m@RRR = 30
Skin depth	1.50 mm
Wattage of Joule heating	40 W/60 W

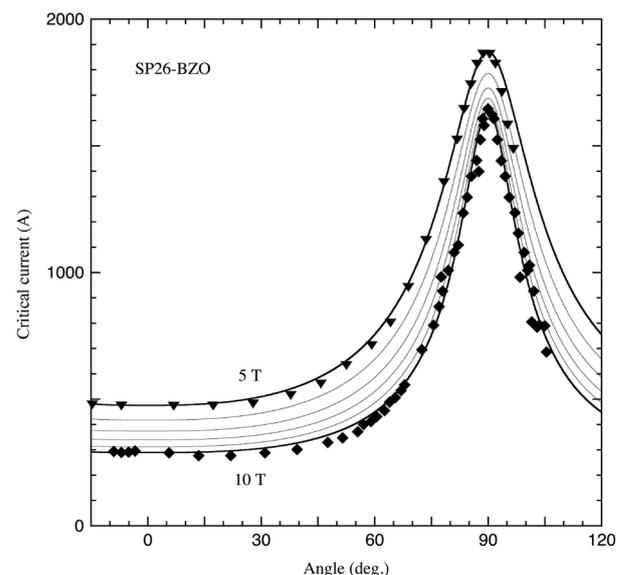


Fig. 1 Approximated curves for experimental results of critical currents at 4.2 K in 4-mm-wide coated conductor with superconducting layer of 1.1 μ m in thickness [3].

配向 Fe テープを用いた超低コスト Y 系線材の提案

Development of the low-cost YBCO coated conductor using textured Fe tape

土井 俊哉(京大, JST-ALCA); 中 順平, 内間 貴之(京大); 堀井 滋(京大, JST-ALCA); 一瀬 中(電中研, JST-ALCA)

DOI Toshiya(Kyoto Univ., JST-ALCA); NAKA Junpei, UCHIMA Takayuki(Kyoto Univ.);

SHIGERU Horii(Kyoto Univ., JST-ALCA); ICHINOSE Ataru (CRIEPI, JST-ALCA)

E-mail: doi.toshiya.8c@kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

液体窒素冷却で使用可能な Y 系線材の開発が進み、現在 IBAD 法もしくは RABITS 法によって製造された Y 系超電導線材が市販されている。しかし、どちらの線材も非常に高価格であるため、一般への普及が進まない状況にある。これら Y 系線材の中で大きなコストを占めるのが金属テープ価格であるが、この部分の大幅なコスト低減を図るためには、ハステロイや Ni-W 合金テープを安価なコモンメタルを用いた基材テープに変更することが最も有効であると考えられる。

我々はこれまでに、配向 Fe テープを使用することを提案してきているが、今回、Fe テープ上に安定化ジルコニアとセリアをバッファ層とすることで、2軸配向した YBCO 層を形成することに成功したので報告する。

2. 実験方法

基板には日本金属(株)製の Fe テープを使用した。Fe テープ表面を機械研磨した後、成膜装置内に導入し、自然酸化膜を除去するため基板表面へ Ar イオンビームを照射した。その後 PLD 法により2種類の間層および YBCO の順で成膜を行った。第1中間層としてイットリア安定化ジルコニア、カルシア安定化ジルコニア(CSZ)、第2中間層として CeO₂を用いた。第1中間層、第2中間層および YBCO 層はいずれもパルスレーザー蒸着法(PLD法)を用いて作製した。

得られた薄膜試料の各層における結晶配向性は CuK α 線を用いた X 線回折測定および極点図により評価し、臨界電流密度(J_c)は液体窒素中における直流四端子法により決定した。

3. 結果と考察

Fig. 1 に配向 Fe テープ上に YSZ, CeO₂, YBCO の各層を順次作製した試料の X 線極点図測定結果を示す。(a) は Fe の {100} 極点図、(b) は YSZ の {111} 極点図、(c) は CeO₂ の {111} 極点図、(d) は YBCO の (103) 極点図である。2 軸配向した Fe テープ上に作製した YSZ が 2 軸配向し、その上に CeO₂ および YBCO 層が順次、エピタキシャル成長していることが確認できる。

次に、配向 Fe テープ上に第1中間層として CSZ、第2中間層として CeO₂ を成膜し、その上に YBCO 層を成長させた。Fig.1 と同様に各層の極点図を測定したところ、第1中間層として CSZ を使用した場合も YSZ を使用した場合と同様に各層とも 2 軸配向することが分かった。

作製した YBCO/CeO₂/YSZ/配向 Fe テープ試料の 77 K、自己磁場中の J_c を測定したところ、 5.7×10^4 A/cm²であった。こ

の値は、線材応用を考えた場合、実用化にはまだ十分な値ではない。今回作製した試料の J_c が低い原因は、使用した Fe テープの結晶配向度が不十分 (FWHM $\sim 12^\circ$) であったため、YBCO 層の配向度も 13° と悪いことが主な原因であったと考えられる。また、図 2 に YBCO 層表面の SEM 観察画像を示すが、YBCO 層の成膜条件が最適化で来ていないために、密度が低いことも大きな原因であることが分かる。

今後、Fe テープの結晶配向度向上および各中間層および YBCO 層の成膜条件の最適化を進めることで、実用レベルの J_c が達成できるものと考えている。

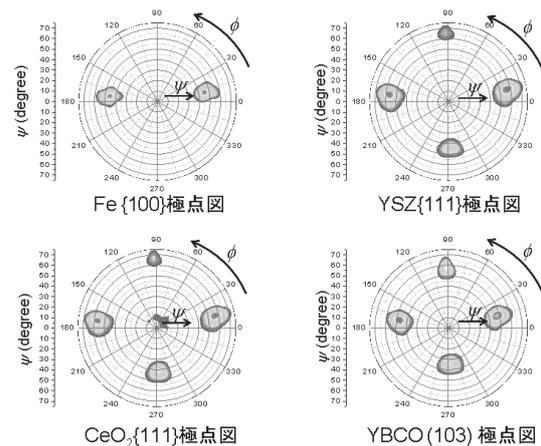


Fig. 1 XRD pole figure measurements for (a) {100}_{Fe} of the Fe tape substrate, (b) {111}_{YSZ} of the YSZ, (c) {111}_{CeO₂} of the CeO₂ and (d) (103)_{YBCO} of the YBCO layers.

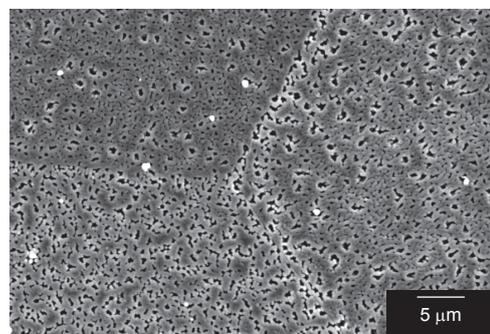


Fig. 2 The SEM micrograph of the surface of the YBCO/CeO₂/YSZ/textured Fe tape.

配向 Fe テープ上の酸化物中間層の微細構造 Microstructures of oxide buffer layers on textured Fe tapes

一瀬 中(電中研, JST-ALCA); 中 順平, 内間 貴之(京大); 堀井 滋, 土井 俊哉(京大, JST-ALCA)
 ICHINOSE Ataru (CRIEPI, JST-ALCA); NAKA Junpei, UCHIMA Takayuki(Kyoto Univ.);
 HORII Shigeru, DOI Toshiya (Kyoto Univ., JST-ALCA)
 E-mail: ai@criepi.denken.or.jp

1. はじめに

YBa₂Cu₃O_y(YBCO)コート線材は、過冷却窒素から液体窒素温度での比較的高い温度領域での臨界電流特性が優れているため、大型の超電導機器に適用されようとしている。しかし、超電導機器の実用化のためには、高性能で価格がより低い線材が要求されている。本研究では、低コスト YBCO 線材の開発のために、金属基材として安価な{110}<001>集合組織を有する Fe を用いた。その上に、2 軸配向した中間層を作製し、面内配向した高性能な YBCO 層を得ようとしている。

これまでに、Fe テープ上に 2 軸配向した CaO 安定化 ZrO₂(CSZ)の作製を試みた。その結果、X 線回折測定より CSZ は(111)配向と(001)配向が混ざったものが生成し、膜厚の増加にしたがい、主な配向が(111)配向から(001)配向に移行することが分かった¹。そこで、Fe テープ上での CSZ の成長機構を明らかにするために、透過型電子顕微鏡で断面組織を観察した。

2. 実験方法

基材には日本金属(株)製の Fe テープを用いた。Fe テープ表面を機械研磨した後、成膜装置内において Ar イオンで 20 分間照射して表面をエッチングした。その後、パルスレーザー蒸着法により CSZ を成膜し、膜厚は 400~1000nm とした¹。

今回、断面組織を観察した試料は 400nm の膜厚である。組織観察は、集束イオンビーム装置を用いて任意の箇所から微小領域を切りだし、薄片化して透過型電子顕微鏡(JEM-2100F)を用いて実施した。また、組織観察とともに、電子線回折による局所的な結晶配向、EDX による元素マッピングを実施した。

3. 結果および考察

400°C で作製した試料の CSZ{111}の極点図を図 1 に示す。図 1 から概ね(001)配向した結晶と概ね(111)配向した結晶の 2 通りの結晶配向が存在することが分かる。(001)配向粒の回折点を○で、(111)配向粒の回折点を□で示す。(001)配向粒の○は、ほとんど理想的な位置に出ているが、(111)配向粒の□は、法線方向から少し傾いていることが分かる。図 2 に STEM 像(a)とコントラストの異なる領域(○で表示)で、コントラストの明るい領域の電子線回折を(b)に、暗い領域の電子線回折を(c)にそれぞれ示す。結晶の向きが分かるように、図中

に水平線と法線の補助線を引いてある。(b)の(111)配向の回折点は水平線、法線からわずかに傾いているが、(c)の(001)配向の回折点はほとんど傾いていないことが分かる。これらの結果は、X 線回折による CSZ{111}の極点図測定の結果と一致する。

CSZ の組織は、(111)配向粒であるコントラストの明るい部分が基板界面は多いのに対して、膜厚が厚くなるにしたがい(111)配向粒が少なくなる一方、(001)配向粒であるコントラストの暗い部分がほとんどの領域を占めるようになった。さらに、その上に作製した CeO₂ は CSZ の方位と CSZ[001] // CeO₂[001], CSZ[110] // CeO₂[110]の関係で成長している。これは、YBCO の作製に適した結晶配向である。

さらに、Fe 基材の結晶粒界上の CSZ の組織は、他の部分の CSZ の組織と大差が無く、Fe 基材の結晶粒界は CSZ の成長に大きく影響することは無いと考えられる。

以上のことから、CSZ は膜厚が増すにしたがい、(111)配向粒が減少し、YBCO の成長に適した(001)配向粒が大きく成長することが分かり、CSZ はコート線材の中間層の候補材料の一つであることが示された。

参考文献

1. J. Naka, et al.: Abstracts of the 61th JSAP spring meeting, (2014) p.11-085

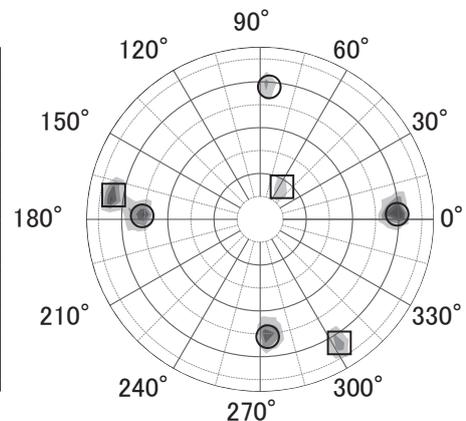


Fig. 1 A pole figure of CSZ{111}.

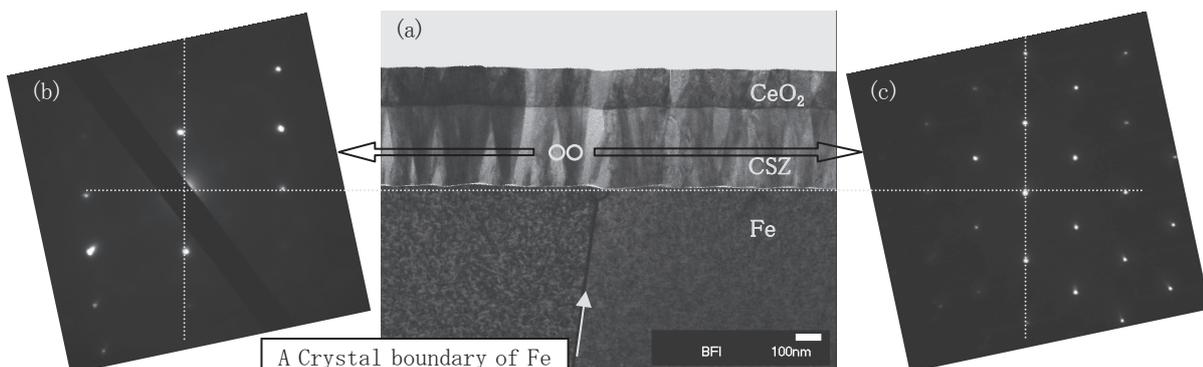


Fig. 2 A scanning TEM image (a) of CeO₂/CSZ/Fe with electron diffractions (b, c) from different image contrast.

低融点 REBCO バルクを介した REBCO 線材の新しい接続方法

A new method for joint of REBCO wires using a REBCO bulk

金 新哲, 柳澤 吉紀, 前田 秀明(理研)

Xinzhe Jin, Yoshinori Yanagisawa, Hideaki Maeda (Riken)

E-mail: xinzhe.jin@riken.jp

1. はじめに

NMR や MRI などの永久電流モードの実現に向けて、REBCO 線材の低抵抗接続に関する研究はすでに精力的になされている。しかし、従来の半田付けによる方法では $10\text{n}\Omega\cdot\text{cm}$ 前後の電気抵抗があり、実用ではさらにその数万分の一程度下げる必要がある。最近では REBCO 層同士を高温で融解して直接接続する溶融拡散法が報告されており、超伝導的な接続のトライ実験が始まっている[1]。しかしこの方法では REBCO 層を融解から再結晶化させるので、臨界電流などの性能が元に回復するのはそれほど簡単ではない。そこで本研究は簡便かつ実用可能な超伝導接続を目的として、線材の REBCO 層を融解させないことを前提でそれより低い融点を持つ REBCO バルクを使用し、線材の REBCO 融点以下の高温でバルクを溶融した後に固体の REBCO 層から結晶成長させてバルクを線材に接続することで、バルクを介した REBCO 線材同士の新たな超伝導接続方法を考え出し、それについて実験評価を行った。

2. ジョイント試料の作製

REBCO 線材は、SuperPower 製の幅 4mm の GD123 テープ線材を使用し、接続用のバルクは新日鉄住金(株)の外径 46mm、厚さ 30mm の YBCO(Y123: 75%, Y211: 25%)バルクを使用した。線材は液体窒素に入れて取り出すことで、急冷急熱させ、表面の Cu 層と銀層を剥離させて REBCO 層をきれいに露出させた。

ジョイント試料の作製は、Fig. 1 に示したようにまず YBCO バルクを電気炉に入れ、最高温度 1170°C まで加熱し、その後 1040°C で保温させた。この時、Gd123 線材をバルク上にセットし、温度を徐々に 1000°C まで降下させた。それからさらに 72 時間の結晶成長のための徐冷過程を設けており、接続のためのこの熱処理過程は合計約 5 日程度かかった。酸素追加のための熱処理は、450°C で 100 時間(4 日程度)行った。

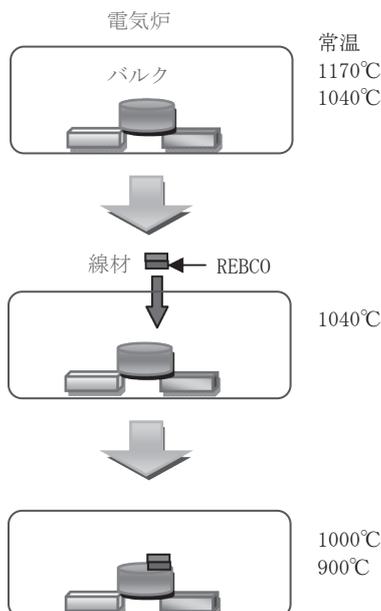


Fig. 1 Heat treatment process for joint.

3. 試料評価

作製した試料の写真を Fig. 1 に示した。REBCO 線材はしっかりバルクに接続されており、数十 MPa 程度の応力では剥がせない機械強度を有しており、線材の周りには結晶成長としてみられるバルク特有のパターンが現れていた。これは、結晶成長によって REBCO 層間の接続ができたことを示し、超伝導接続の可能性を説明している。

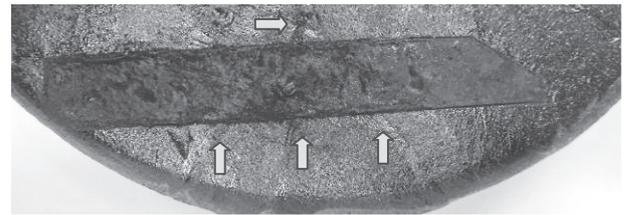


Fig. 2 Joint sample prepared at high temperature. Liner patterns indicate crystal growth of Y123 phase around the Gd123 wire.

電気伝導の測定において、バルクと線材間の U-I 曲線の結果では 10A 以上から電圧上昇が見えており、結晶成長による原子レベル的な接続ができたことを確認できた。詳細については、当日に発表する予定である。

4. まとめ

REBCO バルクと線材の REBCO 層間の原子レベル的な接続ができた。低融点 REBCO バルクを用いたジョイント方法は、接続部の機械強度と電気抵抗などからみれば実用可能性が高い接続方法であると考えている。

5. 今後の予定

ジョイント試料の作製時間の短縮と、ジョイント部の臨界電流密度を向上させる研究を進める予定である。

参考文献

- [1] Dong Keun Park, Min Cheol Ahn, Ho Min Kim, H. G. Lee, Ki Sung Chang, Sand Jin Lee, Seong Eun Yang, and Tae Kuk Ko, "Analysis of a Joint Method Between Superconducting YBCO Coated Conductors," IEEE Trans. Appl. Supercond. 17, 3266-3269 (2007).

高磁場 NMR システムに向けたスクライビング REBCO 線材の開発研究

R&D for scribing REBCO wire toward high-field NMR system

金 新哲, 柳澤 吉紀, 前田 秀明(理研)

Xinzhe Jin, Yoshinori Yanagisawa, Hideaki Maeda (Riken)

E-mail: xinzhe.jin@riken.jp

1. はじめに

NMR には高い磁場均一度が求められているため、磁石の外周のシムコイルによる磁場の精密な調整が不可欠である。しかし、REBCO 線材は REBCO 層が単芯の薄膜テープになっているため、テープ面に垂直の磁場に対してマイスナー効果による反磁性が大きく、外周のシムコイルからの磁場の制御が効かないことが問題となっている。これを解決するためには、多芯構造としての一つは線材のスリット化が考えられている。スクライビング線材については、すでに REBCO フィラメント幅が 1mm 程度の開発研究が進められており、本研究ではさらにスリットの幅が細いスクライビング線材の製造を目標として、製造方法を改善と顕微鏡観察および臨界電流測定などの評価を行った。

2. スクライビング線材の作製

REBCO 線材は、SuperPower 製の幅 4mm、厚さ 0.1mm のテープ線材を使用した。線材は長手方向に直線的なスリットを入れることで分割した。今まで我々は、カッターを利用した機械的なスリット方法と、より精細な製造加工を試みた新しい方法などを進めており、ここでは前者による試料作製について記述する。簡単な手順としては、まず線材にスリットを数本入れ、その表面にはカプトンテープを付けた。スリットは Fig. 1 に示したように、バッファ層まで刃先を入れて切断した。

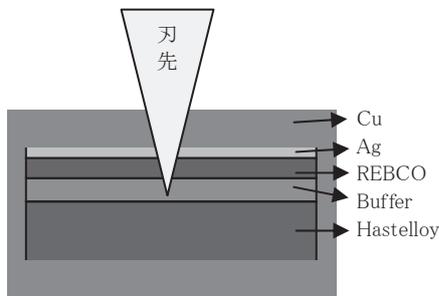


Fig. 1 Fabrication of Scribing wire with slit.

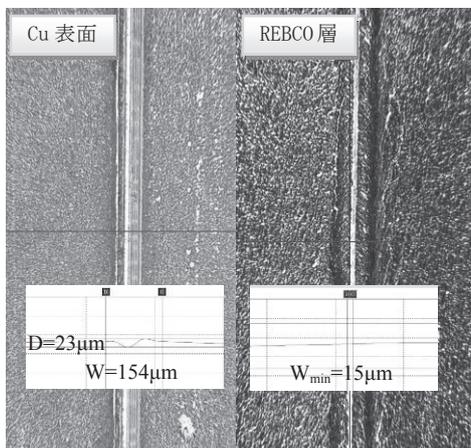


Fig. 2 3D images for slit size.

3. 実験評価と議論

REBCO 層が正確に切断されているかを見るため、まずスリットを入れた線材表面と剥離した後の REBCO 層を 3D 顕微鏡で観察した (Fig. 2)。その結果、スリット幅は Cu 表面において $154\ \mu\text{m}$ 、REBCO では $15\ \mu\text{m}$ (全体幅 4mm の約 0.38%) であり、奥の REBCO 層までスリットができていた。スリットの深さは Cu 表面から $23\ \mu\text{m}$ であり、Cu の厚さ $20\ \mu\text{m}$ を除くとちょうど REBCO 層とバッファ層を切断できる値に一致していた。

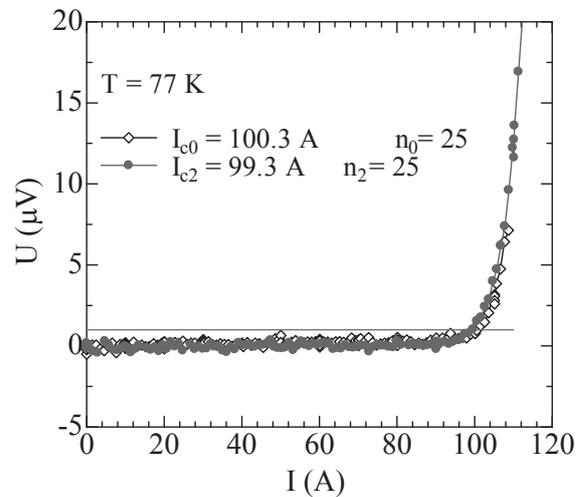


Fig. 3 U-I curve for scribing wire samples. The samples were measured at 77 K without applied magnetic field.

次は電気伝導性の測定から、スリット有無による臨界電流の変化を調べた。測定は液体窒素中、外部印加磁場はなしで行った。その結果を Fig. 3 に示す。プロットからわかるように、臨界電流と n 値はほぼ下がっていなかった。臨界電流のわずかな 1% 程度の降下は測定のばらつきとしても考えられ、スリットによる線材幅の削減は 1% を大きく上回る値ではないので、臨界電流が下がらないことに説明できている。

機械的な方法で作製したスクライビング線材は、機械的な強度を保つ面において大きな工夫が必要となる。スリット部から線材の剥離が起こりえることと、スリット本数が増えることで端部の劣化をどのように防ぐかなど、様々な課題を抱えているのが事実であり、材料強度学の一つの分野として、再現性の高い良質のスクライビング線材を製造するにはより精密な製造装置開発と製造におけるよいアイデアが不可欠であると考えている。

4. 今後の予定

スクライビング線材の製作方法を改善すること、機械特性および磁性を調べることを予定であり、機械特性については東北大学金属材料研究所のマグネットを利用して行う予定である。