

BaMO₃ ナノ粒子導入による TFA-MOD (Y_{0.77}Gd_{0.23})Ba₂Cu₃O_y 線材の高特性化 Strongly enhanced flux pinning in TFA-MOD (Y,Gd)BCO CCs with BaMO₃ nanoparticles

三浦正志, 金井基樹, 佐藤迪夫(成蹊大); 中岡晃一, 和泉輝郎 (ISTEC&iSTERA)

MIURA Masashi, Motoki Kanai, Sato Michio (Seikei Univ.); NAKAOKA Koichi, IZUMI Teruo (ISTEC&iSTERA)

E-mail: masashi-m@st.seikei.ac.jp

1. はじめに

TFA-MOD 法 REBa₂Cu₃O_y(REBCO)線材は、低コスト化が期待され、高い超伝導特性を有するため機器応用が期待されている。これまで我々は、磁界中臨界電流密度(J_c)向上を目的に、磁束ピンニング点として BaMO₃ ナノ粒子を選定し、そのサイズや密度の制御に成功し、高い磁界中 J_c 特性を得ることに成功してきた[1-3]。しかし、磁気共鳴画像診断(MRI)装置や医療用加速器用マグネットなどの応用機器には更なる磁界中 J_c 特性の向上が必要である。

そこで本研究では、サイズや密度が異なる BaMO₃ ナノ粒子が各磁界、温度における磁束ピンニングに及ぼす影響を明らかにし、更なる特性向上を目指す。

2. 実験方法

本研究では、TFA-MOD法を用い金属基板上に添加量(0~50 mol%)の異なるBaZrO₃(BZO)導入(Y,Gd)Ba₂Cu₃O_y線材を作製した。本焼後の膜厚は、0.5 [μm]である。超伝導線材の結晶性、表面観察及び超伝導特性をX線回折法、高解像度光学顕微鏡及び四端子法を用いて評価した。

3. 実験結果

図1(a)にBZO添加量の異なる(Y,Gd)BCO線材の77Kにおける自己磁界(J_c^{sf})を示す。図より30 mol%までは、ほぼ一定の約4 MA/cm²を示すことが分かる。一方、40 mol%以上では J_c^{sf} の低下が確認された。この要因を調べるために各線材の面内配向性を評価した。図1(b)に示すように J_c^{sf} の低下が確認された40 mol%以上では面内配向性が低下していることが確認された。図2に30 mol%BZO線材の77Kにおける巨視的ピンニング力を示す。30 mol%BZO線材は、2Tにおいて $F_{p,max}=17.3$ GN/m³と(YGd)BCO線材の2倍以上の高い $F_{p,max}$ を示すことが確認された。

当日の発表では、微細構造観察結果をもとに詳細な磁界中 J_c 特性についても議論する。

謝辞

本研究は、高温超伝導コイル基板技術開発プロジェクトの一環として経済産業省(METI)及び日本医療研究開発機構(AMED)の委託により実施したものである。また、本研究の一部は、JSPS 科研費 26709076 の助成を受けたものである。

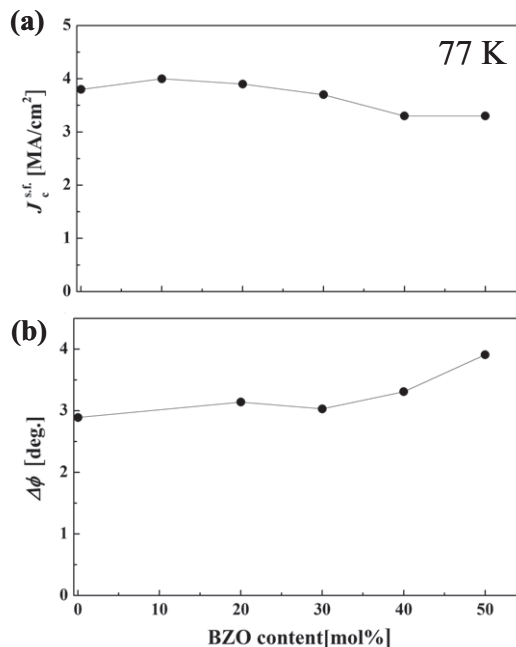


Fig. 1 BZO content dependence of (a) self-field J_c at 77 K and (b) $\Delta\phi$ of (Y,Gd)BCO CCs.

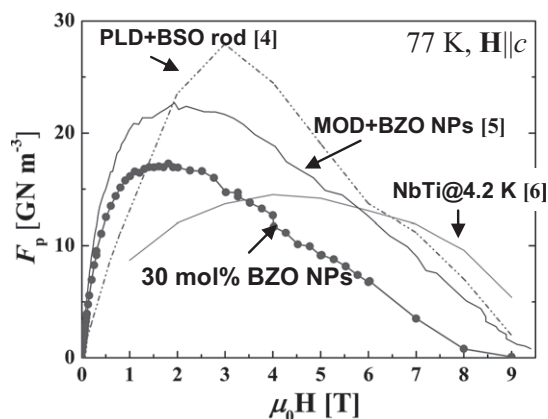


Fig. 2 The F_p - μ_0H curves of (Y,Gd)BCO +30 mol.% BZO CCs at 77 K.

参考文献

1. M. Miura, et al., Appl. Phys. Express, **1** (2008) 051701
2. M. Miura, et al., SUST **23** (2010) 014013
3. M. Miura, et al., Phys. Rev. B **83** (2011) 184519
4. P. Mele, et al., SUST **21** (2008) 125017
5. J. Gutiérrez et al., Nature Mater. **6** (2007) 367
6. C.Meingast, et al., J. Appl. Phys. **66** (1989) 5971.

酸素アニール温度が TFA-MOD ($Y_{0.77}Gd_{0.23}$) $Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ 線材の 結晶性及び磁場中超伝導特性に及ぼす影響

Influence of oxygen annealing temperature on the crystallinity and in-field properties of
TFA-MOD ($Y_{0.77}Gd_{0.23}$) $Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ coated conductors

関翼, 丹羽信博, 佐藤迪夫, 三浦正志(成蹊大); 中岡晃一, 和泉輝郎(ISTEC-SRL & iSTERA)

SEKI Tsubasa, NIWA Nobuhiro, SATO Micho, MIURA Masashi; (SEIKEI University)

NAKAOKA Koichi, IZUMI Teruo (ISTEC-SRL & iSTERA)

E-mail: dm146312@cc.seikei.ac.jp

1. はじめに

Trifluoroacetates Metal Organic Deposition(TFA-MOD)法で作製した $REBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (REBCO)線材は、装置コストが他のプロセスに比べ低く、原料高収率であるため低コスト化が期待されている手法の一つである[1]。TFA-MOD で作製した $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (YBCO)線材は、安価な液体窒素(77 K)下において高い超伝導特性を有することから、磁気共鳴画像診断(MRI)装置や超伝導電力貯蔵装置(SMES)などの機器応用にも期待されている。しかし、これらの機器応用には更なる臨界電流密度(J_c)の向上が課題となっている。 J_c 向上の具体的な手法として Y/RE 置換やキャリア制御(酸素量の最適化)が上げられる。我々は、これまで TFA-MOD 法を用い、YBCO 線材の Y の一部を Gd に置換した($Y_{0.77}Gd_{0.23}$) $Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ ((Y,Gd)BCO)線材が YBCO 線材より高い臨界温度(T_c)、高い磁場中 J_c 特性を示すことを報告してきた[2]。また、キャリア制御に関して REBCO バルク体は、その影響について研究されてきたが[3]、TFA-MOD 法により作製した(Y,Gd)BCO 線材の酸素アニール条件が結晶性や磁場中超伝導特性に及ぼす影響については明らかになっていない。

そこで本研究では(Y,Gd)BCO 線材を作製し、酸素アニール温度を 250~500 °C と変化させ、酸素アニールが結晶性や磁場中超伝導特性に及ぼす影響について検討した。

2. 実験方法

本研究では、金属基板上に TFA-MOD 法を用い (Y,Gd)BCO 線材を作製した。結晶後の膜厚は、~0.5 [μ m]である。酸素アニール温度を 250~500 °C と変化させ、保持時間を 3 時間とした。また、温度による超伝導特性の違いを確認するために、3 時間保持後は酸素を流さず急冷を行った。作製した超伝導線材の結晶性は X 線回折法、表面観察を高解像度光学顕微鏡、超伝導特性は四端子法を用いて行った。

3. 実験結果

Fig.1 に異なる酸素アニール温度による諸特性を示す。Fig.1(a)より、酸素アニール温度の違いによる結晶性への影響はほとんど無いことが確認された。次に 77 K における $J_c^{s.f.}$ を Fig.1(b)示す。図より、500 °C から温度が低下するにつれて $J_c^{s.f.}$ が向上し、300 °C において最も高い $J_c^{s.f.}$ を示すことが確認された。また、Fig.1(c)より、高い $J_c^{s.f.}$ を示した 300 °C において、最も短い c 軸長を示すことが確認された。このことより 300 °C では最も酸素量が多いと考えられる。更に、Fig.1(d)より、300 °C は他の線材より T_c が低いことが確認された。これらのことから 300 °C は酸素量が多く T_c が低いことからオーバードープ状態になっている可能性がある。

当日の発表では、磁場中 J_c 特性や不可逆磁場、酸素アニールによるピンニングについても議論する。

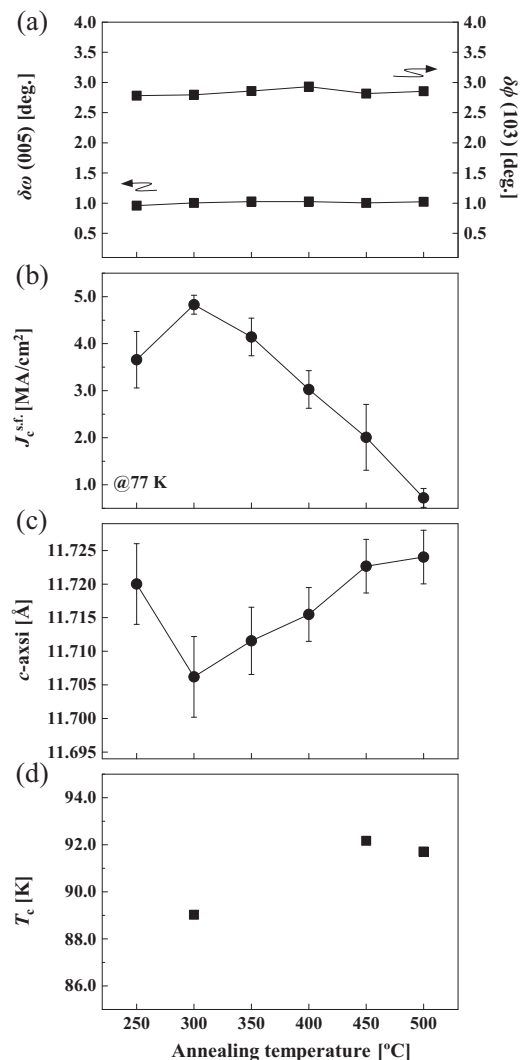


Fig.1 Annealing temperature dependence of (a) crystallinity, (b) $J_c^{s.f.}$, (c) c-axis and (d) T_c in TFA-MOD (Y,Gd)BCO CCs.

謝辞

本研究は、高温超伝導コイル基板技術開発プロジェクトの一環として経済産業省(METI)及び日本医療研究開発機構(AMED)の委託により実施したものである。また、本研究の一部は、JSPS 科研費 26709076 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Y. Shiohara, et al.: Jpn. J. Appl. Phys. **51** (2012) 01007
- [2] M. Miura, et al.: APEX **2** (2009) 023002
- [3] J. Shiomoyama, et al.: Mat. Res. Soc. Symp. Proc. **689** (2002) 3236

低温焼成によるフッ素フリーMOD法 YBCO 配向膜の作製 Preparation of textured fluorine-free MOD YBCO films by applying low temperature sintering

元木 貴則(東大); 下山 淳一(青学大); 荻野 拓, 岸尾 光二, 幾原 雄一(東大); 本田 元気, 永石 竜起(住友電工)
MOTOKI Takanori (Univ. of Tokyo), SHIMOYAMA Jun-ichi (Aoyama Gakuin Univ.), OGINO Hiraku,
KISHIO Kohji, IKUHARA Yuichi (Univ. of Tokyo), HONDA Genki, NAGAISHI Tatsuoki (Sumitomo Electric Industries, Ltd.)
E-mail: 3064622801@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

REBa₂Cu₃O_y (REBCO) 超伝導体薄膜の作製法のなかで、フッ素フリーMOD法は単純な固相反応により、均質なREBCO相が短時間で生成するという特徴がある^[1]。しかし、材料開発に向けた研究例は少なく高 I_c を示す薄膜は得られていない。これまで我々は原料溶液へのClドーブにより c 軸配向したBa₂Cu₃O₄Cl₂ (Ba2342)酸塩化物が膜中に析出することを報告してきた。この酸塩化物はYBCOの2軸配向を促進し磁場中の J_c 特性を改善することがわかっている^[2]。

本研究では、Ba2342の生成機構の解明を目指した断面組織観察を行った。また、長尺化が可能な金属Clad基板上への高特性ClドーブYBCO薄膜の成膜を目的に焼成条件を系統的に変化させて薄膜を作製し通電特性を調べた。

2. 実験方法

Y, Ba, Cuのプロピオン酸塩溶液に塩酸を混合し、仕込組成がYBa_{2+2x}Cu_{3+3x}O₇Cl_{2x} ($x = 0, 0.05$)となるように溶液を調製した。SrTiO₃(100)単結晶基板もしくは金属クラッド基板上に溶液を塗布後、酸素気流中~500°Cで仮焼して有機物を分解した。この操作を3回繰り返して仮焼膜を作製し、続いてO₂(3, 10 Pa)/Arフロー中、740-800°C, 1-1080 minの条件下で焼成した後、酸素気流中450°Cでのアニールによってキャリア濃度を調節した。膜厚は~0.5 μmである。これらの薄膜に対して、STEMによる微細組織観察、誘導法による I_c 特性の評価を行った。

3. 結果

はじめに、ClドーブによるBa2342の生成機構に関して考察した。Ba2342は焼成プロセス中に~550°Cから c 軸配向して生成することが分かっている。SrTiO₃基板上に800°C焼成で成膜したClドーブYBCO薄膜の基板界面の断面STEM像をFig. 1に示す。これまで、基板から直接Ba2342がエピタキシャル成長していると考えていたが、Fig. 2に示すように基板とBa2342の間に1層の c 軸配向したYBCOが生成していることが高倍率の断面観察および元素分析から明らかになった。

続いて、金属Clad基板上に酸素分圧・焼成温度・焼成時間を変化させてClドーブYBCO薄膜を作製した。Fig. 2にそれぞれの条件における I_c をまとめた。ノンドーブの場合、酸素分圧10 Paにおいて780°C以下の焼成では配向膜が得られない。一方、Clドーブを行うことにより酸素分圧10 Pa, 780°C, 30 min焼成で I_c が高い薄膜が得られ、従来よりも低い温度での配向膜の作製が可能であることが明らかになった。さらに酸素分圧を3 Paに下げると、740°Cという低温焼成によって90 A/cm-w近い I_c を示す高特性な薄膜が得られた。当日は、厚膜化によるさらなる高 I_c 化の試みについても発表する予定である。

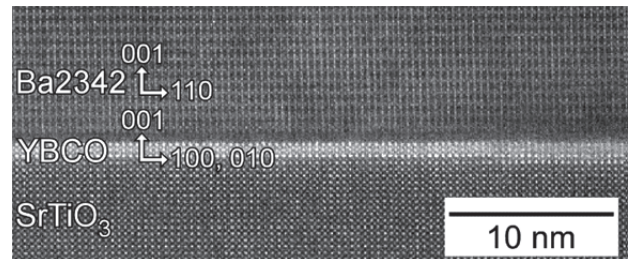


Fig. 1 Cross-sectional STEM image of Ba2342/YBCO/SrTiO₃ interface of the Cl-doped YBCO film.

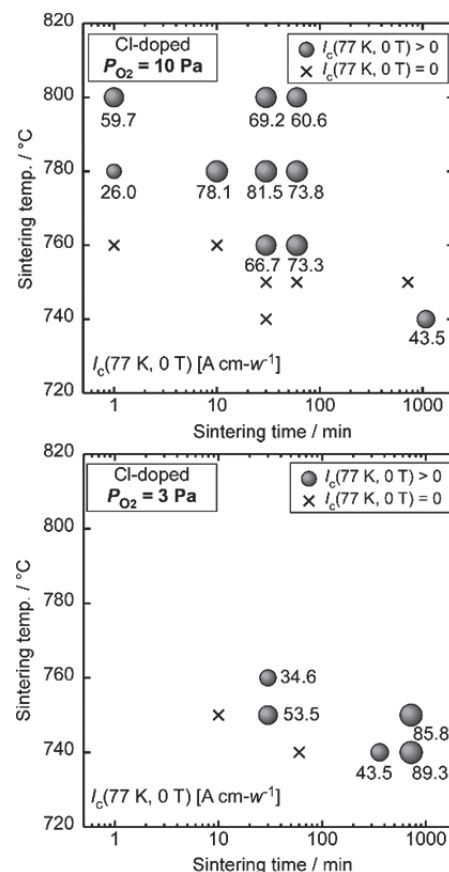


Fig. 2 I_c (77 K, 0 T) dependence of Cl-doped YBCO films sintered under various conditions. I_c values are shown beside the respective data points and “X” marks represent $I_c = 0$.

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.

YBCO ナノコンポジット薄膜における T_c 機構の解明 T_c mechanism in YBCO nanocomposite films

堀出 朋哉(九州工業大学); 吉岡 聡(九州大学); 北村 貴典, 松本 要(九州工業大学)
HORIDE Tomoya (Kyushu Institute of Technology); YOSHIOKA Satoru (Kyushu University);
KITAMURA Takanori, MATSUMOTO Kaname (Kyushu Institute of Technology)
E-mail: horide@post.matsc.kyutech.ac.jp

1. はじめに

YBa₂Cu₃O₇(YBCO)超伝導線材は高い超伝導特性が実現できることから、ケーブル、マグネット等への応用が期待されている。YBCO 線材ではナノロッドやナノ粒子を導入することにより高い臨界電流密度(J_c)が実現してきた。現在までの研究でナノロッドやナノ粒子を導入することにより高い特性が実証されてはきたが、その特性を支配する因子については明らかではない。近年特性向上が飽和しつつあり、さらなる超伝導特性向上には特性決定因子を解明したうえで、YBCO 薄膜や線材の構造を設計、制御していく必要がある。

J_c を支配する因子として、臨界温度(T_c)と磁束ピンニングがあげられる。マトリックスの T_c がマトリックスの超伝導状態を決定するとともに、ピンニングセンター周辺の局所的な T_c 分布は要素ピン力(f_p)を決定する。 T_c と f_p を理解するうえで電子スケール、原子スケールの現象が重要である。一方、磁束挙動の議論の段階になると、ピンニングセンター密度やピンニングセンター分布などのナノスケールの幾何学的因子が主要パラメータである。このように T_c と磁束ピンニングの両因子を明らかにする必要があるが、それぞれ異なるアプローチで機構を解析する必要がある。これまでの研究ではどちらの因子に関しても詳細な議論が進められているとは言えない。

本研究では T_c 因子を議論する。YBCO の T_c は酸素量に大きく依存することが知られている。一方で、静水圧下での T_c 測定は、 T_c がひずみにも依存することを示している。さらに CuO₂ 面の乱れ等も T_c に影響を及ぼす可能性が指摘されている。ピンニングセンターを導入するとマトリックスとピンニングセンター材料のミスフィットに起因してYBCO内にひずみが導入される。ピンニングセンターがひずみや界面を通して酸素量を変化させることは十分に考えられる。これらの機構を詳細に検討することで T_c 決定機構を明らかにすることができる。

本研究では BaM₂O₃(BMO, M=Zr, Sn, Hf)ナノロッドを導入した YBCO 薄膜に着目する。ナノロッドを有する YBCO 薄膜においてひずみや酸素量が T_c に及ぼす影響を明らかにすることができれば、その他のピンニングセンターを有する系においてもその知見を適用できると考えられる。YBCO+BMO 薄膜の T_c 機構を明らかにするために、ひずみ、酸素量、電子状態などの解析を行う。従来のナノロッド解析において用いられてきた透過型電子顕微鏡(TEM)、X 線回折(XRD)を行い、さらに X 線吸収微細構造(XANES)解析を行う。実験結果を議論するために有限要素法による弾性解析や第一原理計算を用いた酸素空孔形成エネルギー計算やバンド計算を行う。これらの結果をもとに、YBCO+BMO 薄膜の T_c 機構を明らかにする。

2. 実験及び計算方法

パルスレーザー蒸着(PLD)を用いて YBCO+BMO 薄膜は SrTiO₃ 基板上に作製した。PLD では YBCO+BaZrO₃(BZO)、YBCO+BaSnO₃(BSO)、YBCO+BaHfO₃(BHO)混合ターゲットを用い、BMO 添加量を 3–8wt%とした。XRD(2θ - ω スキャン、逆格子マッピング(RSM))、TEM を用いて薄膜構造を評価した。さらに Cu 吸収端において XANES を行った。酸素量の効果はキャリアを通して Cu 価数に影響する。ここでは Cu 価数をもとに酸素量を議論する。Physical Property Measurement System(PPMS)を用いて抵抗-温度曲線を測定し T_c を求めた。

実験結果をシミュレーションを用いて議論した。YBCO+BMO 薄膜のひずみ挙動を議論するために有限要素法弾性ひずみ計算を行った。ひずみが酸素空孔量に及ぼす影響を議論するために、さまざまなひずみ状態下での酸素空孔形成エネルギーを計算した。なお酸素空孔形成エネルギーの計算には VASP(Vienna Ab initio Simulation Package)を用いた。

3. 結果

XRD と TEM 結果から YBCO+BMO 薄膜において BMO ナノロッドが形成されていることが分かった。また XRD 結果から BMO ナノロッドにより YBCO 薄膜にひずみが導入されていることがわかった。ひずみは YBCO の酸素空孔形成エネルギーを変化させることをすでに報告している [1]。また特性評価実験の結果から T_c は BMO 添加量とともに減少することが分かった。これらの結果はナノロッド導入により酸素空孔が導入され、それによって T_c が減少していることを示唆している。

YBCO+BMO 薄膜における酸素空孔導入を議論するために XANES 測定を行った。図 1 に XANES スペクトルを示す。図 1 では酸素導入(冷却)時の酸素分圧を減少させることにより酸素量を減少させた YBCO 薄膜と酸素を十分に導入した YBCO 薄膜において XANES スペクトルを比較している。酸素空孔導入によりピークが小さくなった。このようなスペクトルの変化は酸素空孔導入の特徴であると考えられ、BMO 導入による YBCO 薄膜のスペクトル変化と比較することで YBCO+BMO 薄膜の酸素空孔挙動を議論することができる。

当日は YBCO+BMO 薄膜の XRD、XANES 結果を総合的に解析し、シミュレーション結果と比較することにより、ナノロッドが T_c に及ぼす影響を詳細に議論する。

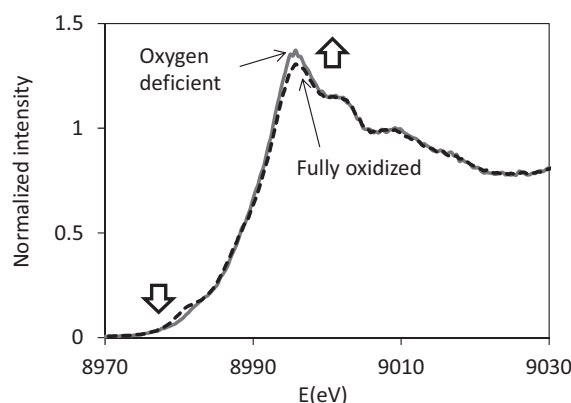


Fig.1 XANES spectrum in fully oxidized and oxygen deficient YBCO films.

参考文献

1. T. Horide et al: Supercond. Sci. Technol. Vol. 27(2014) p. 115013

YBCO+BMO 薄膜における磁束ピンニング機構解析

Vortex pinning mechanism in YBCO+BMO films

堀出 朋哉, 田口 健太, 松本 要 (九州工業大学)

HORIDE Tomoya, TAGUCHI Kenta, MATSUMOTO Kaname (Kyushu Institute of Technology)

E-mail: horide@post.matsc.kyutech.ac.jp

1. はじめに

ケーブルやマグネット応用に向けて $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (YBCO) 超伝導線材の臨界電流密度 (J_c) の向上が求められている。人工ピンニングセンター (APC) として、格子欠陥・ナノロッド・ナノ粒子が導入され、 J_c が向上してきた。しかし今後さらに高 J_c 化を目指すには、 J_c 機構を理解したうえで APC 構造を設計、制御していく必要がある。 T_c と磁束ピンニングが J_c に大きな影響を及ぼすと考えられるが、どちらのメカニズムもよく理解されているとは言えない。本研究ではこれらの因子のうち、磁束ピンニングが J_c におよぼす影響を明らかにすることを目的とする。

磁束ピンニング機構は APC の幾何学的形状に大きく依存するため、APC の種類ごとに詳細な議論を行う必要がある。本研究ではナノロッドを導入した YBCO 薄膜の磁束ピンニングについて議論する。ナノロッドは c 軸相関ピンであり、 c 軸相関ピンに関する研究は多くの研究者によってなされてきた。理論面では Nelson らによって Bose glass 理論が提案され [1]、これを用いて c 軸相関ピンニングに関するさまざまな現象が議論された。また重イオン照射により柱状欠陥を YBCO に導入し、 c 軸相関ピンニングが実験的に評価されてきた。ここでは J_c やグラス液体転位温度が測定され、 c 軸相関ピンに特徴的な J_c の磁場依存性や相転移臨界指数が観察された。また YBCO 薄膜に APC である BaMO_3 (BMO; M=Zr, Sn, Hf etc.) ナノロッドを導入すると強い c 軸相関ピンとして機能することが明らかにされた。YBCO 薄膜においてピンニングに支配的な転位と比べてサイズが大きく、密度も 1 ケタ以上大きいため、磁場中 J_c が大きく向上する。 J_c の磁場角度依存性における c 軸ピークや J_c や不可逆磁場曲線におけるマッチング磁場近傍での異常な振る舞いが観察されており、強い c 軸相関ピン効果を示している。しかし現時点では c 軸相関ピン機構の解明には至っておらず、YBCO+BMO 薄膜において磁束ピンニング特性を詳細に議論していく必要がある。

本研究では YBCO+BMO 薄膜の J_c 特性および不可逆磁場特性を議論する。BMO 材料や BMO 添加量を変化させることにより、ナノロッドのサイズ・密度・界面状態が変化する。さまざまな BMO 材料や BMO 添加量を用いて YBCO+BMO 薄膜を作製することにより、BMO ナノロッドの構造パラメータを変化させる。このようにして作製した試料の J_c や不可逆磁場を測定することにより密度・サイズ・界面状態の効果を観察することができる。結果をもとに BMO ナノロッドの c 軸相関ピンニングメカニズムを議論する。

2. 実験方法

YBCO+BMO 薄膜作製にはパルスレーザー蒸着 (PLD) を用いた。基板に SrTiO_3 (100) 単結晶を用い、YBCO+BaZrO₃ (BZO)、YBCO+BaSnO₃ (BSO)、YBCO+BaHfO₃ (BHO) 混合ターゲットにより BMO ナノロッドを導入した。なお添加量は 3–8 wt% とした。透過型電子顕微鏡や X 線回折により薄膜の構造を評価した。さらに Physical Property Measurement System (PPMS) を用いて薄膜の超伝導特性の評価を行った。20–77 K における J_c - B 特性、77 K における J_c の磁場角度依存性、 $B//c$ における不可逆温度 (T_{irr}) を測定し、それらをもとに磁束ピンニングメカニズムを議論した。

3. 結果

YBCO+BSO (3 wt%) 薄膜では低磁場において J_c が大きく向上した。一方、YBCO+BZO (4 wt%)、YBCO+BHO (6 wt%) においては低磁場では J_c の向上は小さかったが、高磁場で J_c が大きく向上した。図 1 に YBCO+BZO (4 wt%)、YBCO+BSO (3 wt%)、YBCO+BHO (6 wt%) 薄膜における 77 K の $F_p/F_{p,max}$ - B 特性を示す。なお F_p 、 $F_{p,max}$ は巨視的ピン力およびその最大値である。 $F_{p,max}$ は YBCO+BSO (3 wt%)、YBCO+BZO (4 wt%)、YBCO+BHO (6 wt%) の順に高磁場にシフトした。 T_{irr} - B 曲線においてキックが観察された。キックはマッチング磁場 ($=n\phi_0$; n はナノロッド密度; ϕ_0 は磁束量子) で現れることが知られている。キックから求められるマッチング磁場は YBCO+BZO (4wt%)、YBCO+BSO (3wt%)、YBCO+BHO (6wt%) 薄膜において 3.8 T、1.5 T、4 T となった。YBCO+BZO (4wt%)、YBCO+BSO (3wt%)、YBCO+BHO (6wt%) 薄膜における J_c 挙動はマッチング磁場に大きく依存し、マッチング磁場が小さい YBCO+BSO (3 wt%) では低磁場で高 J_c が観察されたのに対し、マッチング磁場が大きい YBCO+BZO (4wt%)、YBCO+BHO (6wt%) 薄膜では高磁場で高 J_c が大きく向上した。また $F_{p,max}$ が観察された磁場もマッチング磁場とともに増加した。

当日はマッチング磁場と要素ピン力をもとに J_c および不可逆磁場の決定メカニズムを詳細に議論する。

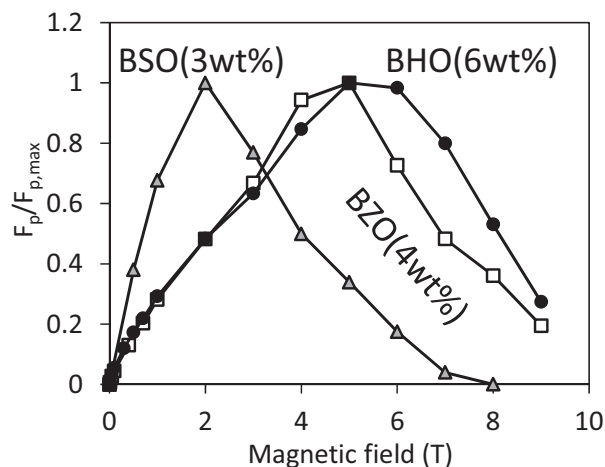


Fig.1 $F_p/F_{p,max}$ - B curves in the YBCO+BSO (3 wt%), YBCO+BZO (4 wt%), and YBCO+BHO (6 wt%) films.

参考文献

1. D. R. Nelson, V. M. Vinokur: Phys. Rev. B Vol. 48(1993) p. 13060

MgB₂ 線の臨界電流特性に影響する撚り線加工に伴う減面効果の測定Measurement of drawing effect in twist process and critical current density properties of MgB₂ wire

葛 雅志, 安藤 憲之介, 水落 空, 高尾 智明, 谷貝 剛(上智大); 新富 孝和, 槇田 康博(KEK); 濱島 高太郎, 津田 理, 宮城 大輔(東北大); 花田 一磨(八戸工大); 岩城 勝也(岩谷産業); 駒込 敏弘(前川製作所)

KATSURA Masashi, ANDO Kennosuke, MIZUOCHI Sora, TAKAO Tomoaki, YAGAI Tsuyoshi (Sophia Univ.); SHINTOMI Takakazu, MAKIDA Yasuhiro (KEK); HAMAJIMA Takataro, TSUDA Makoto, MIYAGI Daisuke (Tohoku Univ.); HANADA Kazuma (HIT Univ.); IWAKI Katsuya (Iwatani); KOMAGOME Toshihiro (Mayekawa)

E-mail: sutla.katsura@gmail.com

1. はじめに

我々は再生可能エネルギーを有効利用するためのシステムとして、先端超伝導電力変換システム(ASPCS: Advanced Superconducting Power Conditioning System)を提案している。ASPCS は SMES、燃料電池、電気分解装置から構成され、これらの組み合わせにより太陽光発電などの再生可能エネルギー源の変動出力を制御する[1]。ASPCS に用いる SMES コイルの線材には、安価で将来性が見込まれている MgB₂ 線材を検討しているが、MgB₂ 線材を SMES コイルに応用するには大容量化が必須であり、そのため撚線加工が重要となる。そこで、MgB₂ 撚線の減面加工による J_c への影響を調査した。

2. 試験方法

HyperTech 社の MgB₂ 線材(線径 0.83 mm、30 フィラメント)を用いて MgB₂ 撚線(3 本撚り)を作成し、ダイスに通して減面加工を施した。その後撚線を解し、1 本ずつバラバラの状態に熱処理した。サンプルの作成条件を Table 1 に、またサンプル断面を研磨し観察した写真を Fig.1 に示す。

サンプルの J_c は、ヒステリシスループの振幅 ΔM に比例する[2]。そのため、各サンプル A1~A6 の ΔM を比較することで、 J_c 特性の変化を測定することができる。そこで、それぞれのサンプルを 5 mm 長に切り出し、Quantum Design 社の PPMS (Physical Property Measurement System) を用いて磁化を測定した。なお外部磁界は -5~5 T であり、測定温度は 4.2, 20, 45 K である。 T_c 以上である 45 K で測定した理由は、サンプルに含まれるモネルの磁化を測定して、サンプル全体の磁化からモネルの磁化をキャンセルするためである。

3. 測定結果とまとめ

A1 の ΔM を基準とした、各サンプルの $\Delta M (J_c)$ の比較を Fig. 2 に示す。4.2 K、-1 T において、A1 と比べて A2~A6 は 100% から 97, 84, 80, 76, 70% に劣化した。つまり、ダイス径がより細くなり、サンプル断面が大きく変形するほど、電流特性が悪くなるのがわかる。また、0 T 付近と -5 T 付近で傾向が乱れた。この原因として、前者はフラックスジャンプの影響により、後者は外部磁場の増減が逆転し、遮蔽電流の向きが逆転したため、磁化測定に乱れが生じたことが考えられる。今後は長尺サンプルに対して通電試験を行って実際に I_c を測定し、また今回得られた劣化率と一致するか確認する。

謝辞

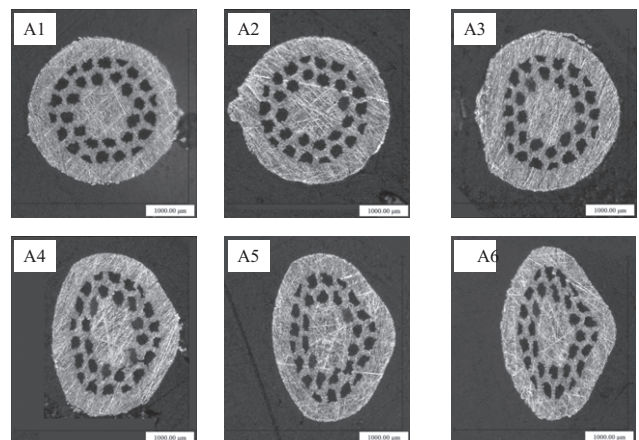
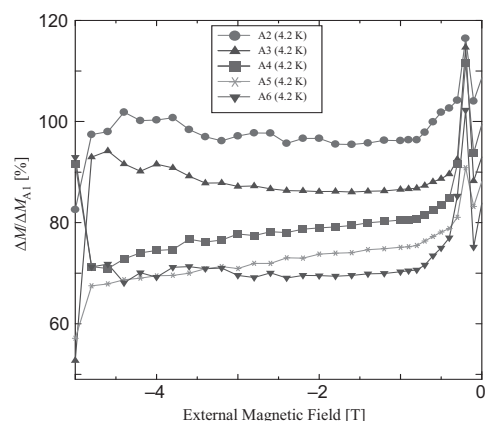
本研究は JST 先端的低炭素化技術開発事業(ALCA)の助成を受け、実施したものである。

参考文献

1. T. Hamajima, et al., Application of SMES and Fuel Cell System Combined with Liquid Hydrogen Vehicle Station to Renewable Energy Control, IEEE Trans. Appl. Supercond., 22 (2012) 5701704.
2. M.N. Wilson, Superconducting Magnets. Oxford: Clarendon Press, 1983.

Table 1 Conditions of Sample

Sample No.	Twist Pitch Length [mm]	Twisted Sample Outer Diameter [mm] (Before processing)	Die Diameter [mm] (After processing)
A1	No Twist (Straight)	0.83	0.83
A2	13.5	1.77	1.77 (No Reduction Process)
A3	13.5	1.77	1.65
A4	13.5	1.77	1.55
A5	13.5	1.77	1.45
A6	13.5	1.77	1.35

Fig.1 The photograph of polished cross-section of the analyzed MgB₂ wiresFig.2 The comparison of the $\Delta Ms (J_c)$ at 4.2 K

内部 Mg 拡散(IMD)法による MgB₂ 線材の超電導接続 Superconducting joints made with internal Mg diffusion(IMD) processed MgB₂ wires

熊倉浩明, 葉 術軍(物質・材料研究機構); 齊藤祐亮(芝浦工大)
KUMAKURA Hiroaki, YE ShuJun(NIMS); SAITO Yusuke(Shibaura Inst. Tech.)
E-mail: KUMAKURA.Hiroaki@nims.go.jp

1. はじめに

我々は、高い MgB₂ の充填率が得られる内部 Mg 拡散 (internal Mg diffusion, IMD) 法を適用して MgB₂ 線材の開発を進めている。これまでに、高品位のカーボンコートされたナノ B 粉末や、B 粉末へのコロネン(C₂₄H₁₂)添加により、臨界電流密度 J_c が大幅に向上することを見出し、4.2K、10T で 10 万 A/cm² を超える J_c 、ならびに 1 万 A/cm² を超えるエンジニアリング J_c (J_e) を得ている。[1,2]。また、この内部 Mg 拡散法によって 37 芯までの MgB₂ 線材の作製や、 J_c 増加に効果のある IMD 法と PIT 法のハイブリット法の開発なども進めてきた。今回は、単芯の IMD 線材を用いて、永久電流モードでの運転に不可欠な超電導接続を試みたので報告する。

2. 実験方法

Fig. 1 に、今回試みた IMD 法線材の超電導接続の作製法を示す。径 0.8mm の IMD 法で作製した鉄シース単芯丸線材の一端(長さ~1cm)を平ロールに挟んでプレスしてテープ状とし、片方の面の鉄シース材をグラインダーで削って取り除き、B 粉末層を露出させた。このような線材試料を二本用意し、互いに B 層の面が向き合うように重ね合わせて、平たくつぶした金属管内に挿入し、この部分を油圧プレスで圧縮して、二本の線材の先端部分の結合を改善させた。最後に真空中で 670°C、6 時間の熱処理を行った。この熱処理条件は、MgB₂ 線材の熱処理条件と同一である。得られた超電導接続の例を Fig. 2 に示す。

接続部分に流れる臨界電流 I_c は、線材の場合と同様の方法により、4.2K、種々の磁界中で四端子抵抗法で評価した。電圧リードは Fig. 2 に示した線材部分にハンダ付けした。磁界はプレスした面に平行、電流の方向とは垂直に印加した。接続部の I - V 特性は IMD 線材と同じようにある電流値までは電圧は認められず、電流がある値を越えると電圧が観測された。 I_c を 1μV の電圧が発生する電流で定義した。臨界電流を評価した後、接続部分の組織を光学顕微鏡で観察した。

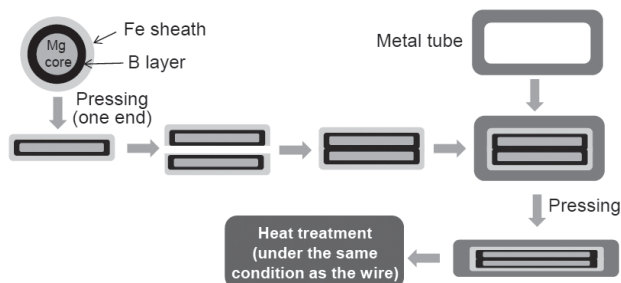


Fig.1 Fabrication of superconducting joint for IMD processed MgB₂ wire.

3. 結果及び考察

Fig.3 に接続部の I_c - H 特性を示す。比較のために、接続部作製に用いた IMD 線材の値も示した。今回の接続部の I_c は、線材と同様の磁界依存性を示すが、かなり大きなバラツキを

示すことがわかる。これは鉄シースを取り除くときに B 層も剥離されるのが影響していると考えられる。今回得られた最大の I_c は、IMD 線材自身の I_c よりも約一桁小さいが、例えば 3T における接続部の I_c は IMD 線材の 10T における I_c にほぼ等しいことから、IMD 線材で作製したマグネットの場合、この接続部をマグネットの磁界の低い部分に持ってくれば、現在での特性でも超電導接続として使用可能であると考えられる。

組織観察の結果、二つの試料が一体化しているのがわかったが、B リッチな化合物が多くみられ、MgB₂ の割合は比較的少なかった。現在、超電導接続作製時のプレス圧、接続部分の長さなど、幾つかのパラメータの最適化を図っており、これによって本超電導接続の I_c の向上が得られると考えている。

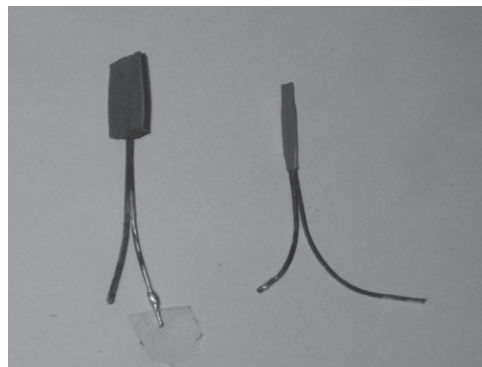


Fig.2 Superconducting joints fabricated with IMD processed MgB₂ wires.

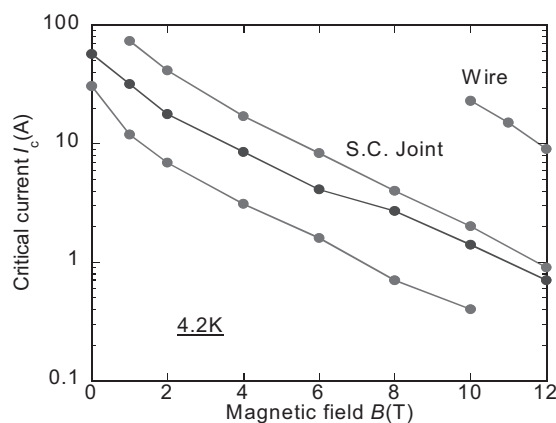


Fig.3 I_c - H properties of superconducting joints fabricated with IMD processed MgB₂ wires.

参考文献

- [1] Ye S-J et al.: Supercond. Sci. Technol. 26 (2013) 125003
[2] Ye S-J et al.: Supercond. Sci. Technol. 27 (2014) 085012

謝辞 本研究はJST先端的低炭素化技術開発事業 (ALCA) の助成を受けた。

電子ビーム蒸着 MgB₂ 薄膜の臨界電流特性に与える Ni 導入効果Ni-doping effects on critical current properties in electron-beam-deposited-MgB₂ thin films

下田 佑太郎, 竹原 寛人, 堀井 滋, 土井 俊哉(京都大学); 楠 敏明(日立製作所)

SHIMODA Yutarō, TAKEHARA Hiroto, HORII Shigeru, DOI Toshiya (Kyoto Univ); KUSUNOKI Toshiaki (Hitachi Ltd)

E-mail: shimoda.yutarō.66e@st.kyoto-u.ac.jp

1. 序論

MgB₂ は、金属系超伝導体で最高の臨界温度($T_c=39$ K)を有することから、液体水素や冷凍機を利用した 20 K 近傍での実用化が期待されている。我々は電子ビーム(EB)蒸着法で Al テープ上に作製した MgB₂ 薄膜が、4.2 K, 10 T において、1 MA/cm² を超える高い臨界電流密度(J_c)を示すこと⁽¹⁾を報告した。この高い J_c は超高真空中・低温での薄膜作製により MgO 相の少ない結晶粒界や柱状組織をもつ c 軸配向 MgB₂ 薄膜が得られたことによる。しかし、応用が期待される 20 K での磁場中 J_c がまだ十分ではない。そこで本研究では量子化磁束線の運動を止める方法として新たな磁束ピンニング点の導入を目的とし、アークプラズマガン(APG)を利用した 2 種類の Ni 導入を試み、それぞれの Ni 導入効果を明らかにした。また、これらの試料に対してアニールを試み、Ni を導入した MgB₂ 薄膜の T_c , J_c への影響についても明らかにした。

2. 実験方法

EB 蒸着法(基板: Si, 基板温度: 280°C)により Ni-free MgB₂ 薄膜に加えて、MgB₂ 成膜と同時に Ni を導入した Ni-doped MgB₂ 薄膜、および Ni と MgB₂ とを交互に成膜した 3 層の MgB₂/Ni 層からなる Ni-layer MgB₂ 薄膜を作製した。原料には Mg 鑄造塊と結晶性 B を用いた。Ni の導入量は APG の周波数(f : 1/10 Hz~1 Hz)で制御した。また、一部の試料について、超高真空中のアニール(温度:450°C~550°C, 時間:1h~50h)を行った。

得られた試料について X 線回折(XRD)測定法により生成相の同定を行い、化学組成を誘導結合プラズマ(ICP)発光分光分析から決定した。なお、Table 1 に示すように MgB₂Ni_x 薄膜の Ni 組成は、いずれも Mg : B : Ni = 1 : 1.7~2.3 : 0.01~0.08 であり、周波数の増加とともに増加することがわかった。薄膜の T_c , J_c については四端子法から決定した。

3. 結果および考察

XRD測定からいずれの試料においても、(001), (002)ピークのみが観測されていることから、MgB₂が c 軸配向していることが確認できた。Ni-doped MgB₂薄膜も c 軸配向が認められたが、MgB₂相の(002)ピークがNiドーパ量の増加とともに低角側にシフトする様子が見られた。また、Table 1に得られたMgB₂薄膜の T_c を示す。Ni-doped(as-grown)試料ではNiドーパ量の増加とともに T_c は劇的に低下することがわかった。 c 軸長と T_c の結果は、導入したNiがMgB₂結晶中に固溶している可能性を示唆する。as-grown試料においてNi導入による20 K・高磁場中の J_c 改善には至らなかった。

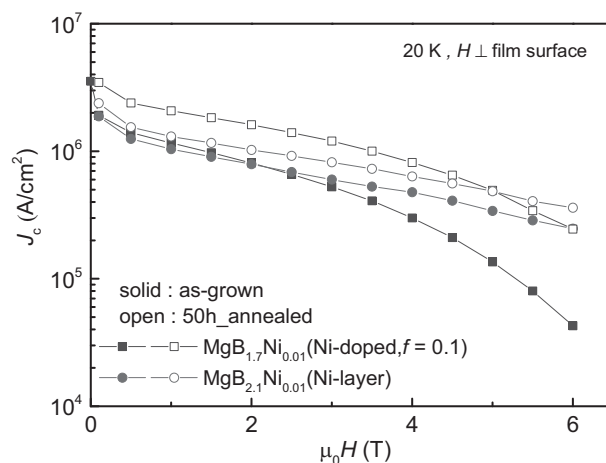
これらのNiを導入したMgB₂薄膜について超高真空中アニールを試みた。まず、Ni-free MgB₂薄膜(MgB₂)では、顕著な

T_c 向上効果(Table 1)が得られた。なお、長時間アニールにより、 T_c はさらに改善し、バルク試料に匹敵する T_c (~36 K)が実現した。そこで、Ni-doped MgB₂薄膜($T_c = 31.4$ K)および Ni-layer MgB₂薄膜($T_c = 32.5$ K)に対して同様アニールを行った。その結果、どの試料でも1hアニールでは顕著な T_c 上昇を示し、50hアニールするとそれぞれ T_c は34.3 K($f = 0.1$), 34.1 K(Ni-layer)まで上昇した。

Fig.1に20 Kにおけるas-grown試料と50hアニール試料の J_c の磁場依存性を示す。Ni-doped MgB₂薄膜($f = 0.1$), Ni-layer MgB₂薄膜ともにアニールにより J_c は向上し、いずれも20 K・5 Tで $J_c \sim 0.3$ MA/cm²を得た。この J_c 向上はアニールによる T_c 改善が主たる理由と考えられる。また、 J_c の磁場依存性を比較すると、Ni-layer MgB₂薄膜で J_c の減衰が鈍く、5 T以上の高磁場下でNi-doped MgB₂薄膜の J_c を上回った。この結果は、多層に導入したNiがピンニングセンタとして機能している可能性を示唆している。

Table 1 T_c values of Ni-free, Ni-doped MgB₂ thin films

Sample	f [Hz]	Mg:B:Ni	T_c [K]		
			as-grown	1h-annealed	50h-annealed
Ni-free		1:2:1:0	35.0	35.3	36.1
	0.1	1:1.7:0.01	31.4	32.8	34.3
	0.33	1:1.7:0.02	23.3	24.1	
Ni-doped	0.5	1:2.3:0.04	19.5	20.5	
	1.0	1:2.3:0.08	13.5	15.0	
Ni-layer		1:2.1:0.01	32.5	34.0	34.1

Fig. 1 $\mu_0 H$ dependence of J_c for Ni-doped and Ni-layer MgB₂ thin films grown on Si at 280°C

参考文献

1. 吉原ら, 低温工学, 47, 103, (2012)

超電導フライホイール蓄電装置実証機の開発状況

Demonstration Machine of Flywheel Energy Storage System using Superconducting Magnetic Bearing

小方 正文, 山下 知久, 長嶋 賢(鉄道総研); 前田 忠和(クボテック);
松岡 太郎(古河電工); 清水 秀樹(ミラプロ); 堀内 伸一(山梨県)

OGATA Masafumi, YAMASHITA Tomohisa, NAGASHIMA Ken (RTRI); MAEDA Tadakazu (KUBOTEK);
MATSUOKA Taro (FURUKAWA ELECTRIC); SHIMIZU Hideki (MIRAPRO); HORIUCHI Shin-ichi (YAMANASHI Pref.)
E-mail: ogata.masafumi.54@rtri.or.jp

1. はじめに

フライホイール蓄電装置は、装置に内蔵した大径の円盤(フライホイール)を回転させることで電気エネルギーを運動エネルギーに変換して蓄えておき、必要に応じてその運動エネルギーを再び電気エネルギーに変換する充放電可能な蓄電装置である。今回開発したシステムは化学反応を伴わず、強力な磁場を発生可能な超電導磁気軸受の反発力による非接触支持を利用するため、本質的に劣化のない「蓄電池」とも言える。NEDO 助成事業により系統安定化用蓄電装置として超電導磁気軸受を用いたフライホイール蓄電装置の開発を進めており[1]、このたび実証機が完成したので概要を報告する。

2. 実証機の概要

完成した実証機の構成と主要性能を図1および表1に示す。円形螺旋織物技術を応用した直径 2 m、質量 4000 kg の世界最大級の CFRP 製大径フライホイールを定格回転数 3000~6000 min⁻¹で運転し、蓄電容量は100 kWhである。この縦回転するフライホイールの軸下端に超電導磁気軸受を配置し、非接触で上下方向の荷重を支持する。この超電導磁気軸受は RE 系の高温超電導材料からなるコイル(固定側)およびバルク(回転側)で構成され、荷重支持は零磁場冷却後のコイル通電によりバルクに発生する反発力を利用している。超電導磁気軸受の採用により、4000 kg 支持時でも 20 mm のメカニカルクリアランスを実現した。

Table 1 Specifications of FESS demonstration machine

Output power	300 kW
Storage capacity	100 kWh
Maximum rotating speed	6000 min ⁻¹
Flywheel material / mass / dimensions	CFRP / 4000 kg / 2 m in diameter and 0.9 m in height
Thrust bearing	Magnetic bearing composed of RE high temperature superconducting coils and bulks
Radial bearing	Active magnetic bearing for assistance

3. 今後の計画

本実証機は山梨県甲府市の米倉山実証試験用太陽光発電所(出力 1 MW)に設置後、超電導磁気軸受の冷却試験、浮上安定性試験等を完了し、系統連系試験を開始した。今後は、回転速度向上試験、連続運転試験、信頼性・耐久性試験等、系統安定化に向けた実証試験を 2015 年度末にかけて実施していく計画である。

本開発は、NEDO 助成事業「次世代フライホイール蓄電システムの開発」により鉄道総研、クボテック、古河電工、ミラプロ、山梨県が共同実施しているものである。

参考文献

1. H. Hasegawa, et al.: Abs. of CSSJ Conference, Vol. 91 (2015) p.11

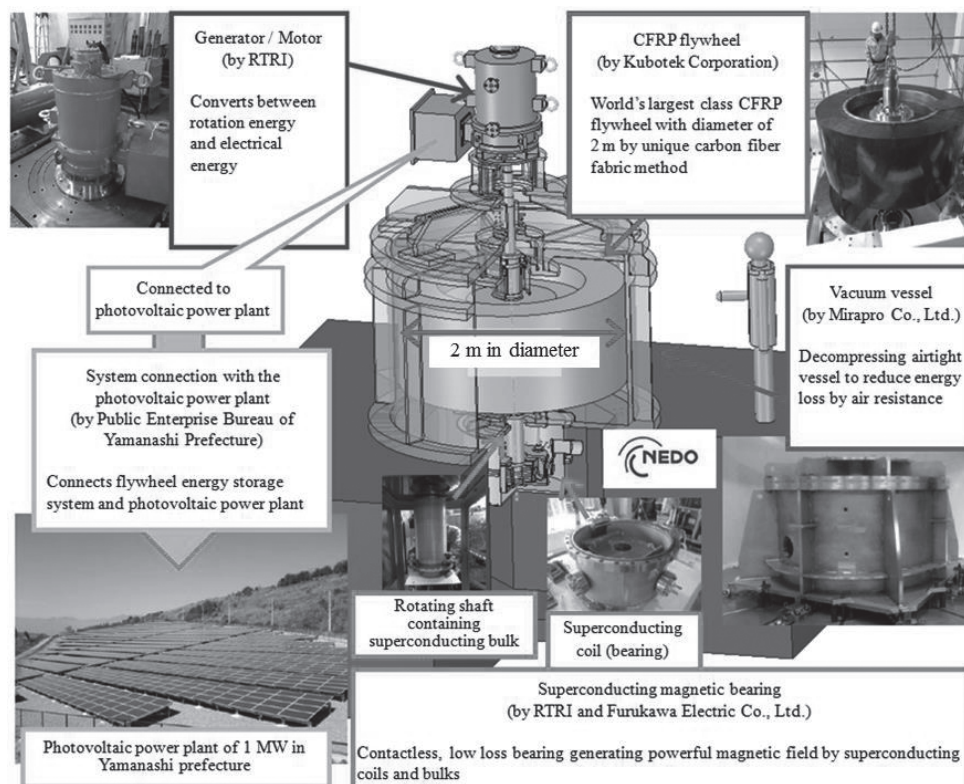


Fig.1 System configuration of FESS demonstration machine

超電導フライホイール蓄電装置用超電導磁気軸受の開発① ～SMBの試験結果と回転試験速報～

Development of Magnetic Bearing for HTS Flywheel energy storage system -SMB Test Results and Prompt Report of Rotation Test-

中尾 健吾, 松岡 太郎, 古川 真(古河電工); 山下 知久, 小方 正文, 宮崎 佳樹(鉄道総研);
清水 秀樹, 澤村 秀次, 小澤 孝仁(ミラプロ)

NAKAO Kengo, MATSUOKA Taro, FURUKAWA Makoto (Furukawa Electric); YAMASHITA Tomohisa, OGATA Masafumi,
MIYAZAKI Yoshiki (RTRI); SHIMIZU Hideki, SAWAMURA Hidetsugu, OZAWA Takahito (Mirapro)
E-mail: mr251726@mr.furukawa.co.jp

1. はじめに

超電導フライホイール蓄電装置(FESS)は超電導磁気軸受(SMB)によってフライホイールを浮上、回転させるため、軸受部でのエネルギー損失が無く、また、摩擦することも無いためメンテナンス性にも優れている。[1] SMBの浮上原理は、超電導コイルに通電し、発生した磁界と超電導パルクの完全反磁性現象により得られる大きな反発力を利用するものである。

FESSは実証試験を行うため山梨県米倉山へ設置が完了し、回転試験とそれに合わせて信頼性の検証を進めている。SMBは大質量を浮上させるため、超電導コイルと超電導パルクの冷却状態の検証が重要である。さらに、回転時には渦電流による発熱と風損、熱侵入特性が重要な検証項目である。

今回の発表では回転試験時の冷却・浮上状況について得られた知見について報告する。

2. 長時間安定浮上の検証状況

米倉山への移設後、700時間以上の通電浮上を行い、工場試験と合わせて延べ1200時間以上の浮上を行うことで信頼性の検証を行っている。

図1に浮上高さを通電電流の時間依存性を示す。グラフより300時間以上にわたる安定浮上が確認できたと考えている。途中、浮上高さが変化しているが、励磁電源由来の電流変化によるもので、制御範囲に収まっていることから浮上の安定性に問題はないと考えている。

3. 高速回転時の浮上高さ制御特性

図2に高速回転時の浮上高さの制御例として1410rpmで120分間回転させたデータを示す。回転中も大きな浮上高さの変化は無く、回転後も回転前と同じ浮上高さで安定制御できており、これはパルクが温度変化なく冷却されていることも意味していると考えられる。回転することによる風損や、振動による熱侵入が問題ないレベルであり、超電導部分のみ部分冷却する本SMB構成で安定浮上の目処が立ったと考えている。

4. 高速回転時のコイル温度上昇度合い予測

ローターが高速で回転した場合、渦電流による発熱が予想される。[2] Table 1に1410rpmと1750rpmで長時間回転試験した時のコイル温度の変化をまとめたものを示す。

1410rpmで120分間回転させた場合、0.2Kの温度上昇が見られた。渦電流による発熱は回転数の2乗で比例することから、本装置の最高回転数6000rpmでは1410rpmの約18倍の発熱が予想される。温度変化が小さいので冷凍機能力は温度変化と比例し各部の物性値が変化しないと仮定すれば、コイルの温度上昇は約3.6Kと試算され、その時のコイル温度は約22Kと推定されるが、運用温度上限の30K以下を満たすので、最高回転数6000rpmでも安定浮上可能と考えている。

5. まとめ

FESSを実証試験施設のある米倉山への移設が完了し、長時間の浮上試験と高速回転試験を進めている。これまで合計

1200時間を越える浮上を行い、信頼性検証に取り組んでいる。

これまでの回転数向上試験結果から安定浮上が可能なことやパルク温度やコイル温度に顕著な変化が無く、冷却に問題ないことが確認できている。特に、1410rpmでの回転試験時の温度上昇特性から、本装置の最高回転数6000rpmの温度上昇も運用上の許容範囲内になるか立ってできたと考えている。

6. 謝辞

本研究は、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)の助成事業として実施している。

本超電導コイルの設計は中部電力(株)の「YOROIコイル」構造を採用している。

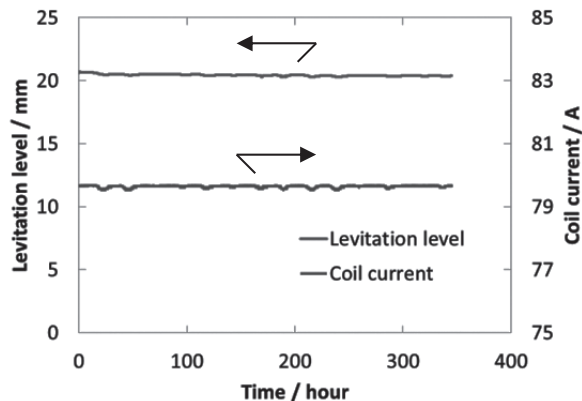


Fig. 1 Time dependence of current and levitation level

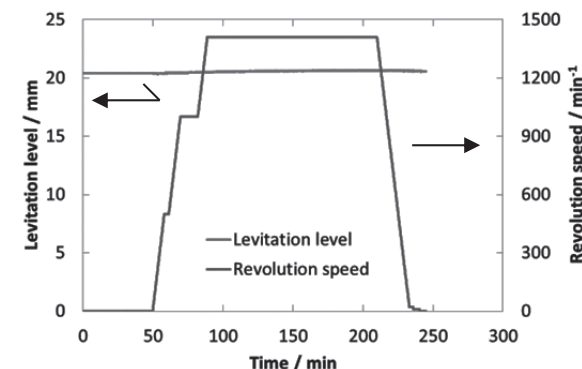


Fig. 2 Levitation level during rotation test

Table 1 Temperature change by rotation

	1410 rpm (120 min)	1750 rpm (60 min)
Before rotation	18.5 K	18.5 K
Rotating	18.7 K	18.7 K
Difference	+ 0.2 K	+ 0.2 K

参考文献

- H.Hasegawa, *et al.* Abstracts of CSSJ conference, vol. 91 (2015) p.11
- Y. Miyazaki, *et al.* Abstracts of CSSJ conference, vol. 91 (2015) p15

超電導フライホイール蓄電装置用超電導磁気軸受の開発②

高 Ic 線材を用いた SMB 設計及び高 Ic 線材コイルの性能

Development of Magnetic Bearing for HTS Flywheel energy storage system
 -The design of SMB with high critical current HTS coil and the performance of the HTS coil -

古川 真, 松岡 太郎, 中尾 健吾 (古河電工); 山下 知久, 小方 正文, 水野 克俊 (鉄道総研)

FURUKAWA Makoto, MATSUOKA Taro, NAKAO Kengo (Furukawa Electric)

YAMASHITA Tomohisa, OGATA Masafumi, MIZUNO Katsutoshi (Railway Technical Research Institute)

E-mail: furukawa.makoto@furukawa.co.jp

1. はじめに

超電導フライホイール蓄電装置用超電導磁気軸受(SMB)では、ダブルパンケーキ型超電導コイル(DPC)によって発生させる磁場により、超電導バルクを含む4,000 kgのロータを浮上させる。DPCは蓄電装置全体に占めるコスト割合が大きいため、超電導線材の使用をできるだけ削減することを目的として新たにSMBを設計、製作、評価した。Super Power社製の高Ic線材を使用することにより、超電導線材の使用量を従来品と比較して大幅に削減することに成功した。今回、高Ic線材を用いたSMB設計と、実験による設計妥当性の評価について報告する。

2. 高 Ic 線材の性能

図1にSuper Power社製超電導線材の磁場中Ic特性を示す(線材幅:6mm)。点線は従来線材、実線は高Ic線材の測定結果である。30K,50K共に従来品と比べて、磁場中Icが約1.5倍に向上していることが分かる。図中の直線はDPC枚数が5枚(5DPC)と3枚(3DPC)の場合における最大経験磁場と通電電流Iopの関係を表したものである。たとえば、3DPC@30Kの場合、従来線材でのコイルIcが170A、高Ic線材でのコイルIcが235Aであり、SMBに組込んだ場合でも約1.4倍向上していることが分かる。SMBの浮上力はIopの2乗に比例するため、高Ic線材を用いることで蓄電装置の大容量化が可能となる。また、同じの浮上力に対しては負荷率(Iop/Ic)が低減できるため、裕度を持った機器運用や、DPCの枚数削減によるSMBのコスト削減も可能になると考えている。

3. 高 Ic 線材を用いた SMB 設計

図2の実線は5DPCと3DPCにおけるIopと浮上力の解析結果を表している。4,000 kg浮上に必要な通電電流はDPCが5枚の場合(5DPC)は74A、3DPCの場合は1枚当たりの必要磁場が増加するため101Aとなった。DPCのIcは変化しないため、3DPCの方が大きな負荷率となる。表1に線材の種類とDPC枚数ごとの50Kにおける負荷率を示す。SMBは負荷率0.8以下で設計されているが、従来線材を用いた3DPCの場合は負荷率が0.93となってしまった。そのため、実証試験機ではDPCを5枚用いる必要があった(負荷率:0.76)。一方で高Ic線材を用いた場合、3枚であっても負荷率は0.71となり、従来と比べDPC枚数を3/5に削減することが可能である。

4. 3DPCでの4,000 kg 浮上実験

設計の妥当性を示すため、高Ic線材DPC2枚と従来線材DPC1枚の計3枚を用いて4,000 kg浮上実験を行った。高Ic線材DPCは超電導バルク付近であり経験磁場が大きいSMB上部側に配置した。図2の点が浮上実験結果を示したもので、解析結果と良く一致していることから、高Ic線材DPCの優位性とSMB設計の妥当性が実証できたと考えている。

5. まとめと今後の予定

Super Power社製の高Ic線材を用いたSMBの設計および、

高Ic線材コイルを含む3DPCによる浮上実験を実施し、高Ic線材コイルを用いたSMB設計の妥当性の実証とDPCのコストを3/5に削減する見通しが立てられた。

今後は、山梨県米倉山のメガソーラ発電所で実証試験を通して、事業化に向けたSMB設計の具体化に注力していく。

6. 謝辞

本研究は、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)の助成事業として実施している。

本超電導コイルの設計は中部電力(株)の「YOROIコイル」構造を採用している。

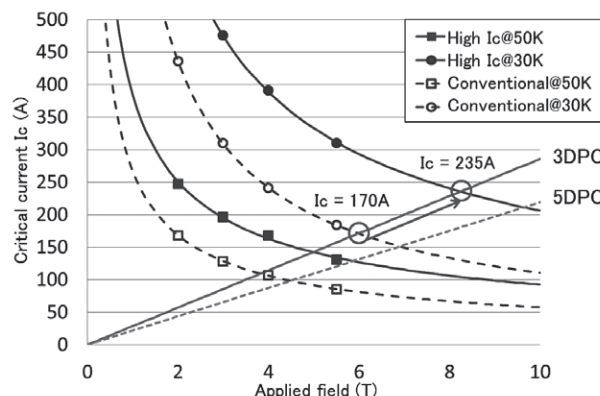


Fig.1 Ic-B characteristics (wire width: 6 mm)

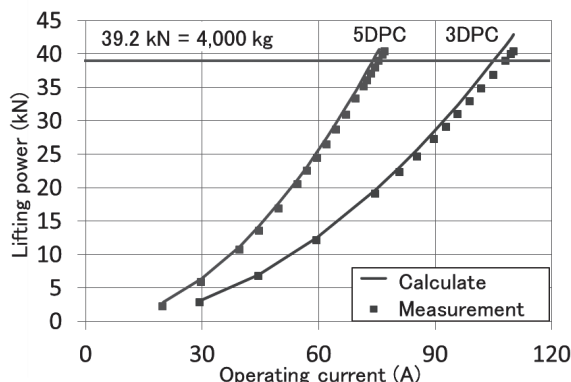


Fig.2 Current dependence of lifting power

Table.1 Load factor for DPC

Number of DPC	Load factor @50K (Iop/Ic)	
	Conventional HTS wire	High Ic HTS wire
5	0.76	0.58
3	0.93	0.71

参考文献

- H. Hasegawa, et al: Abstracts of CSSJ conference, vol. 91 (2015) p.11

超電導フライホイール蓄電装置用超電導磁気軸受の開発③ 吊り上げ方式高速回転荷重支持体の試設計

Development of Superconducting Magnetic Bearing for flywheel energy storage system③ - Trial design for lifting and levitated type of SMB high speed rotor support -

山下 知久, 宮崎 佳樹, 松江 仁(鉄道総研); 松岡 太郎, 中尾 健吾(古河電工)
清水 秀樹, 澤村 秀次, 小澤 孝仁(ミラプロ); 松井 義, 土肥 哲也(松井鋼材); 上島 史生(ステンレスプロダクト)
森本 富治, 徳永 宏, 風間 竜也, 浅野 幸雄(三星工業)
YAMASHITA Tomohisa, MIYAZAKI Yoshiki, MATSUE Hitoshi (RTRI)
MATSUOKA Taro, NAKAO Kengo (Furukawa Electric Co.,Ltd.)
SIMIZU Hideki, SAWAMURA Shuji, OZAWA Takahito (Mirapro Co.,Ltd)
MATSUI Yoshi, DOHI Tetsuya (Matsuiokozai Co.,Ltd.); UEJIMA Fumio (Stainless-product Co., Ltd.)
MORIMITO Tomiji, TOKUNAGA Hiroshi, KAZAMA Tatsuya, ASANO Yukio (Mitsuboshi-kogyo Co., Ltd.)
E-mail: yamashita.tomohisa.91@rtri.or.jp

1. はじめに

鉄道総研はREBCO高温超電導コイルとREBCO高温超電導バルク体(HTSバルク)を組合せた超電導磁気軸受(SMB)で、大質量フライホイールを非接触支持することを特徴とした高温超電導フライホイール蓄電装置を提唱し、現在NEDOの助成を受けて100 kWhの実証機を開発、山梨県米倉山の太陽光発電所の実証試験施設で検証試験を進めている[1]。今回開発した実証機は、希薄ガスヘリウム中で直径2000mm、質量4000 kgの大質量フライホイールを3000⇔6000min⁻¹で回転(加速・減速)させ蓄電・放電可能な設計である。装置内部を約10Paのガスヘリウムで満たすのは、大質量フライホイールの風損低減およびHTSバルクを冷却するためである。

米倉山むけ実証機ではSMBを装置下部に設置、4000 kgの大質量フライホイールの荷重を圧縮方向に作用させることを前提に高速回転可能な荷重支持体を設計してきた[2]。

今回、既存のSMBユニットを天地逆転させても部分冷却法が維持され、吊り上げ方式SMBが成立することを実験的に確認できた知見を踏まえ、10,000 kgの大質量フライホイールを装置上部から吊り上げ可能なSMBの試設計を実施した。

2. 開発コンセプト

吊り上げ方式SMBが満足すべき条件は以下のとおり

- ①大径フライホイールの荷重を吊り上げ安定浮上できること
- ②高い同心性を有し、高速回転に対応できること
- ③冷凍能力に対して、低熱侵入化を実現できること

3. SMBユニットの天地逆転試験

前述の開発コンセプト③の低熱侵入特性の事前検証として既存のSMBユニットを試験体として天地を逆転し冷凍機冷却試験を実施した。Fig.1にその冷却特性を示す。グラフより8Paでの最低到達温度は、HTSコイル<18K, HTSバルク<23KでSMBユニットの天地逆転の顕著な影響は見られなかった。

この結果から、希薄ガスヘリウムによる部分冷却法が吊り上げ方式SMBにも適用できると考え、その試設計に着手した。

4. 吊り上げ方式SMBの試設計

Table 1に今回検討した荷重支持体の設計諸元を示す。吊り上げ方式SMBロータ荷重支持体は、高強度・高断熱AFRPロッドを介して低温部のHTSバルク[2]を収納するGFRPホルダーとSUS製の常温側フランジを組合せて大径フライホイールの荷重に対応し、直径100mm肉厚2mmの薄肉GFRPパイプで低温側ホルダーと常温側フランジを直結することで高速回転に対応する設計とした。なお高強度・高断熱AFRPロッドは、この開発の最終目標の仕様(最大荷重10,000 kg)に対応可能な設計とするため、軸径を直径24 mmとした。

なお前述のAFRPロッドの軸径は、既存の実証機用SMBコイル内槽用荷重支持材の強度特性から換算して設定した。

今回の試設計にあたり、要素試作した薄肉GFRPパイプの圧縮強度試験等の詳しい結果については当日報告する。

5. 謝辞

今回の試設計に際してHTSバルクに直径30mmの貫通穴設置に対して、新日鐵住金殿より磁束の補足特性への貫通穴の影響度合いや具体的な製作法に関して有益な助言と数多くの情報提供を頂きました。ここに深謝申し上げます。

本研究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)の助成事業として実施している。

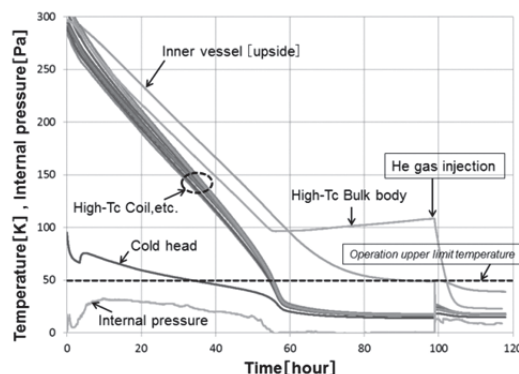


Fig.1 Cooling property of SMB unit in upside down state

Table 1 Specifications of SMB high speed rotor support

Maximum load	10,000 kg
Maximum speed	7,000 min ⁻¹
Levitated gap	20 mm
HTS bulk for levitation	dia. 120×t20 mm, 1 peace
HTS bulk for guidance	dia. 90×t20 mm, 2 peace
Temperature of HTS bulk	Less than 65K
Heat load	Less than 3W
AFRP rod	dia. 24 mm
GFRP pipe	dia. 100 mm
Length	Around 385 mm

参考文献

1. H. Hasegawa, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 91 (2015) p.11
2. T. Yamashita, et al.: Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 91 (2015) p.14