

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360007

研究課題名(和文)短 高温超伝導体における粒内・粒界の不可逆磁場決定因子の解明

研究課題名(英文)Clarification of Determining Factors of Irreversibility Fields in High-Tc Superconductors with Short Coherence Length

研究代表者

下山 淳一(Shimoyama, Jun-ichi)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20251366

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,100,000円、(間接経費) 4,230,000円

研究成果の概要(和文)：銅酸化物超伝導体、鉄系超伝導体の無配向焼結体を中心に合成条件と微細組織、結晶粒間の臨界電流特性の関係を調べた。Y123および(Bi,Pb)2223超伝導体においては還元ポストアニール過程の追加とキャリアのオーバードープ状態が粒間Jcの大幅な改善に有効であることを発見した。これらは不定比金属組成制御による超伝導凝縮エネルギーの増加とc軸方向のコヒーレンス長の伸びの効果で、Y123においては不可逆磁場も大幅に上昇した。鉄系超伝導体では不純物相低減やSn添加による粒間Jcの向上に成功した。本研究の粒間の臨界電流特性は無配向焼結体として最高であり、高密度化によりさらなる上昇が期待できる。

研究成果の概要(英文)：Relationships among synthesis conditions, microstructure and critical current properties across the grain boundaries were studied for randomly oriented sintered bulks of cuprate and iron-based superconductors. Addition of reductive post-annealing process and achieving carrier overdoped state were found to be quite effective for dramatic enhancement of intergrain Jc of both Y123 and (Bi,Pb)2223 superconductors. This improvement is explained by the effect of an increase in condensation energy by a control of cation composition and an increase in coherence length along the c-axis direction. Irreversibility field of Y123 was also largely improved by adopting above method. For iron-based superconductors, improvement of intergrain Jc was succeeded by reduction of impurity phases and addition of Sn metal. Intergrain critical current properties achieved in this study are highest for each material as randomly oriented sintered bulks and further enhancement can be expected by densification.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 応用物性・結晶工学

キーワード：超伝導 臨界電流特性 不可逆磁場

1. 研究開始当初の背景

銅酸化物高温超伝導材料がこの数年、実用化に至り、その全て結晶の配向技術が取り入れられている。これは超伝導が 2 次元的で CuO₂ 面に平行方向と垂直方向で結晶内臨界電流密度 J_c に大きな異方性があること、超伝導コヒーレンス長 ξ が 2 nm 以下と短く、さらに Cu の $d_{x^2-y^2}$ 方向を揃えないと粒界面における J_c の劇的な低下が避けられないことによる。よって無配向の焼結体の場合には、結晶粒間の弱結合の問題が顕著になるため、試料全体の J_c やその磁場依存性は劣悪なもので、材料応用の可能性はほとんどなかった。

2008 年に高温超伝導が発見された鉄系超伝導体も、コヒーレンス長が短い問題、超伝導が Fe 面で起こり 2 次元的であるなど、銅酸化物超伝導体と類似した性質を持っているが、超伝導が複数の d バンドで起こっていることから無配向高 J_c 材料が開発できる可能性が高い。

一方、化学組成が精密に制御しにくかつ不均一性が生じやすいことも両系に共通するもので、これはドーピングや不定比性化学組成の制御によって超伝導特性がそれぞれの物質で最適化されているため、また多元系であるため不純物相が生じやすい。

高温超伝導体の無配向多結晶材料の可能性を明らかにするには結晶粒間の臨界電流特性向上を積極的に追求する必要がある、これには粒界面だけでなく結晶粒内の性質も大きく影響するはずである。しかしながら、これまでの研究では高密度化や高純度化が臨界電流特性向上に有効と認識されていたものの、化学組成の精密制御の効果に注目したものは全くなかった。

2. 研究の目的

本研究ではともに短い ξ を持つ銅酸化物超伝導体、鉄系超伝導体について無配向多結晶体における臨界電流特性改善を目的として、主に結晶粒間の臨界電流特性 (J_c および不可逆磁場) を系統的に調べた。

3. 研究の方法

銅酸化物超伝導体では希土類 123 系 (REBa₂Cu₃O_y)、ビスマス系 2223 相 ((Bi,Pb)₂Sr₂Ca₂Cu₃O_y)、水銀系 1223 相 ((Hg,Re)Ba₂Ca₂Cu₃O_y) を、鉄系超伝導体では臨界温度 T_c が ~55 K と鉄系では最高の Sm1111 (SmFeAs(O,F)) と異方性が小さい Ba122 (Ba(Fe,Co)₂As₂) を対象とし、無配向多結晶体の合成方法・条件と微細組織、臨界電流特性を調べた。希土類 123 系については亜粒界を持つ熔融凝固バルクについても粒間の臨界電流特性の改善を試みた。超伝導特性は交流 4 端子法による抵抗率測定、SQUID 磁束計を用いた磁化測定により行い、粒間の J_c は残留磁化の磁場依存性を拡張 Bean モデルに基づいた解析により評価した。

4. 研究成果

4.1 銅酸化物超伝導体焼結体に関する成果

希土類 123 系では、RE が Y である Y123 の焼結体および熔融凝固バルクを中心に研究を進めた。一連の Y123 焼結体に関する研究から得られた知見を以下にまとめた。

- ① Y123 焼結体の相対密度を 85% 以上に高める高温焼結は結晶の粗大化と同時に巨大なクラックを生じ、 J_c が劇的に低下させる。
- ② 相対密度が 65~75% の試料で最高の粒間 J_c が発現する。
- ③ ボールミルによって微細化した Y123 粉末を用いることにより最適焼成温度が 40°C 低下し、粒間 J_c が改善する。
- ④ 800°C、酸素分圧 1 kPa 下での還元アニール過程の導入とキャリアのオーバードープは常に粒間 J_c の向上に有効で、通電法で評価した粒間の不可逆磁場も大幅に改善する。
- ⑤ Ca 添加もキャリアのオーバードープの効果によって粒間 J_c の向上に有効である。

理想的には相対密度が 100% の高純度な焼結体を得られることであるが、焼結過程で粒成長が進みクラックを生じやすくなる。これは Y123 の大きな酸素不定比性と熱膨張率の異方性に由来するものである。実際、本研究において相対密度 85% 以上の試料において粒間 J_c が改善した例は一度も無かった。

Fig. 1 に様々な方法で作製した Y123 焼結体の残留磁場下における粒界をまたぎ試料全体を回る J_c の温度依存性を示した。試料は全て最終的にキャリアのオーバードープ状態となるように 300°C、酸素気流中で十分にアニールしたもので、 T_c は 90~91 K である。まず、下の 2 つの □ と ■ で表した結果は、800°C、酸素分圧 1 kPa 下還元ポストアニール

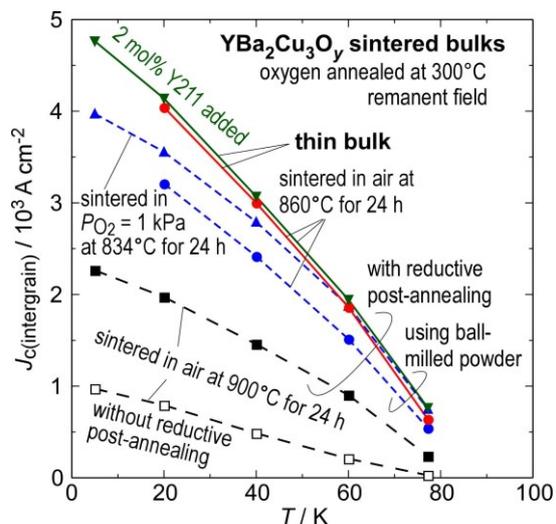


Fig. 1 様々な方法、条件で作製した無配向 Y123 焼結体の残留磁場下における粒間 J_c の温度依存性。

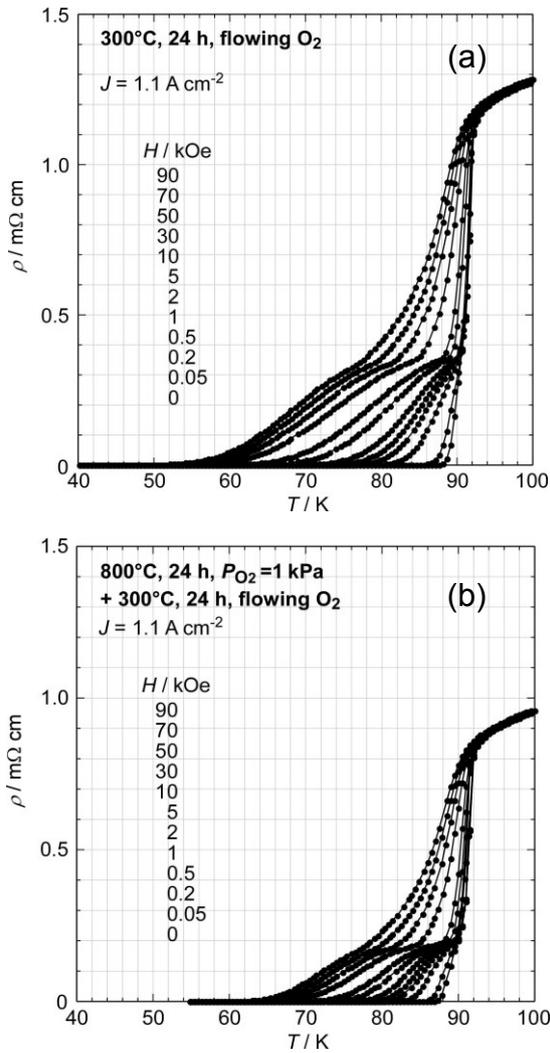


Fig. 2 空气中 890°C で 72 時間焼結した Y123 焼結体の電気抵抗率の温度依存性の印加磁場による変化。(a)還元ポストアニール過程なし、(b)同あり。

過程の導入による違いを表している。ちなみに、□の 20 K における J_c は 800 Acm^{-2} であるが、同じ試料をキャリアの最適ドーピング状態とすると ($T_c \sim 92.5 \text{ K}$)、 J_c はほぼ半分に低下する。このように本研究を通じ、必ずキャリアのオーバードープが粒間 J_c を高めることを確認している。上記、還元ポストアニールは亜粒界を持つ Y123 溶融凝固バルクにおいて J_c の改善に有効であることがわかったもので [1]、わずかではあるが Ba サイトへの Y の固溶を抑制する効果がある。この過程の導入が粒間の J_c を 2 倍以上に向上させたことはやや意外であったが、Fig. 2 に示したように、常伝導状態の抵抗率の低下と磁場中での抵抗率のブロードニングの抑制にも効果を持つことから、粒界の結合を改善することが明らかになった。還元ポストアニールにおける温度、酸素分圧を変えて最適化を試みたが、800°C、酸素分圧 1 kPa が最適であり、時間は 6 時間で十分な効果を持つことがわかった。他の 4 つの試料は全てボールミル粉碎した Y123 粉末を用いて作製した焼結体で全てに還元ポストアニールを行っている。ボールミル粉碎した

Y123 粉末は微細で比較的低温で焼結が進行することが特徴である。点線で結んだ●のデータは空气中 860°C で▲のデータは酸素分圧 1 kPa 下、834°C で焼結した試料であるが、20 K の J_c は 3 kAcm^{-2} をともを超えている。相対密度は約 70% で特に上昇していない。これらの結果は焼成温度の低下が、クラック発生の有無とは別の理由で粒間 J_c の改善に有効であることを示唆している。その解明には粒界近傍の微細組織観察やマイクロな組成分布が必要であり、今後の課題である。薄い焼結体 (<300 μm) を作製したところ、焼結温度が同じ場合でも相対密度が 75 % 程度に上昇することがわかり、これによってさらに粒間 J_c が上昇したのが実線で結んだ●や▼で示した結果である。結果的に 20 K における粒間 J_c は 4 kAcm^{-2} に達した。これは従来の焼結体 (キャリア最適ドーピング状態) より約 1 桁高い値で、無配向 Y123 焼結体としては最高の特性である。60 K においても $\sim 2 \text{ kAcm}^{-2}$ を維持していることから、冷凍機伝導冷却方式の超伝導機器に用いる電流リードに実用可能なレベルに達したといえる。また、Y サイトに Ca を 5~10% ドープした焼結体においては、ボールミル粉碎をしていない仮焼粉末を用いても 20 K で同様に $\sim 4 \text{ kAcm}^{-2}$ の粒間 J_c を示すことがわかったが、 T_c が大きく低下するため温度の上昇による粒間 J_c 低下がより顕著であった。

キャリアのオーバードープ、還元ポストアニール過程追加、ボールミル粉碎粉末の使用による粒間 J_c 改善の効果は Er123 をはじめ他の希土類 123 焼結体でも確認できているが、今のところ Y123 を上回る特性は観測できていない。

Fig. 2 に示した結果をもとに $10 \mu\Omega\text{cm}$ の抵抗率で定義した不可逆曲線の温度依存性が Fig. 3 である。残留磁場下での粒間 J_c の改善ばかりでなく、還元ポストアニールが 90 kOe の高磁場下まで 10 K 以上不可逆曲線を高温側に移動させていることがわかる。この

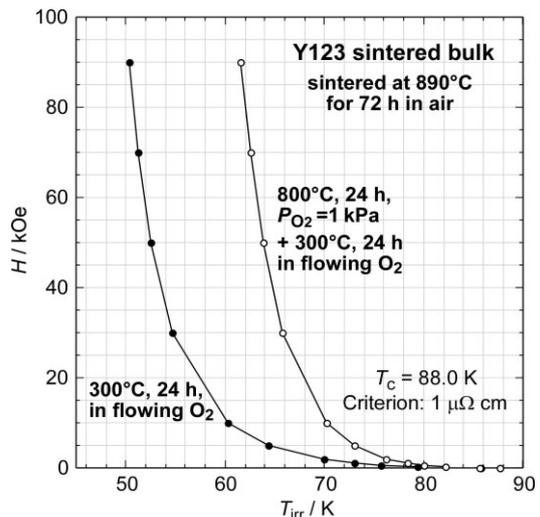


Fig. 3 Fig. 2 の結果を解析して得られた不可逆曲線。還元ポストアニール過程導入で高磁場下まで劇的に改善した。

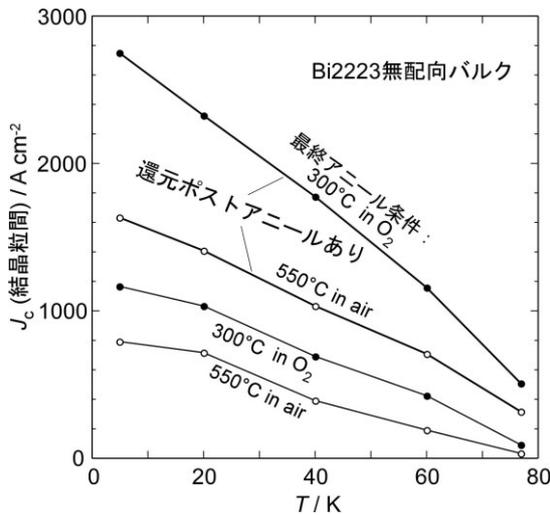


Fig. 4 (Bi,Pb)2223 焼結体における還元ポストアニール過程導入、キャリアのオーバードープが粒間 J_c に及ぼす効果。

図に示した還元ポストアニール過程なしの試料の 20 K、残留磁場下における粒間 J_c は 1.0 kAcm^{-2} で還元アニールを行った試料は 1.8 kAcm^{-2} である。さらに Fig. 1 に示したボールミル粉碎した粉末を用いた場合には 90 kOe の不可逆温度が $67\sim 68 \text{ K}$ に上昇することがわかった。この値は Y123 焼結体として極めて高いもので、磁場中でも粒間 J_c が劇的に改善していることを強く示唆する結果で材料応用の可能性を広げたといえる。

(Bi,Pb)2223 焼結体においても Y123 焼結体と同様に還元ポストアニール過程の追加とキャリアのオーバードープによって Fig. 4 に示したように粒間 J_c の大幅な改善が認められた。Bi(Pb)2223 においては、 $700\sim 725^\circ\text{C}$ 、酸素分圧 $0.5\sim 1 \text{ kPa}$ が最適な還元アニール条件であることがわかった。その効果は Pb3221 相と呼ばれる不純物相の除去と Bi サイトにおける Pb 置換量の増加、Sr サイトにおける Bi と Ca の固溶の抑制であり、これらを達成するために 24 時間程度のアニールが必要である。還元ポストアニールが金属組成の変化を伴うことを反映し、 T_c はこれによって約 2 K 上昇した。また、最終的に空气中、 550°C から急冷した場合には最適キャリアドープ状態の酸素気流中、 300°C から急冷した試料はキャリアのオーバードープ状態となり、 T_c は後者のほうが $0.5\sim 1 \text{ K}$ 低下するが粒間 J_c は明らかに高い。この実験では粒内 J_c のアニール条件による違いも評価したが、ほとんど変化が認められなかった。

以上の Y123、(Bi,Pb)2223 焼結体の研究より結論できることは、焼結後に還元ポストアニールによって金属組成の制御を適切に制御(サイト間固溶と不純物相生成の抑制)すること、キャリアのオーバードープ状態の実現が結晶粒間の臨界電流特性の改善に有効であることである。これは短い ξ の超伝導体の多結晶体において、金属組成制御による結晶粒内の超伝導凝縮エ

ネルギーの増加と c 軸方向の ξ を長くするオーバードープが、結果的に大きく粒間の臨界電流特性の向上に寄与することから説明できるものである。さらなる特性向上に対しては結晶成長を抑制したうえで高密度化が有力な指針となるが、これはプレス成型時の圧力の増加や、加圧焼成法の採用によって実現できると考えている。

このほか、(Hg,Re)1223 焼結体についても粒間 J_c の改善を試みたが、Y123 や (Bi,Pb)2223 のような劇的な改善には至らなかった。その一因として高温反応中の Hg の平衡蒸気圧の制御が難しいことが考えられる。

一方、Y123 の溶融凝固バルクにおける亜粒界の J_c の改善には、 $\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_4\text{Cl}_2$ の添加が有効であり、 $30 \text{ mm}\phi$ の大型バルクにおいても表面中心に置いた種結晶から離れた部分でも J_c が低下しなくなることがわかった。この改善の機構は不明であり、現在、探究中である。さらに、種結晶を 2 つ用い意図的に粒界を設けた Y123 溶融凝固バルクを作製し、粒界と粒内の臨界電流特性を評価したところ、Y サイトの Ca 置換が粒界の J_c の低下抑制に有効であることを見出した。Fig. 5 は Y123 および Ca 置換 Y123 溶融凝固バルクの粒界(GB)を含む部分の 77 K における残留磁場下での磁気光学像である。Y123 では粒界部から磁束が流出しているが、Ca 置換 Y123 では一様に磁場が捕捉されていることがわかる。この効果は ab 軸方向の角度が 45° ずれている粒界でも同様であった。

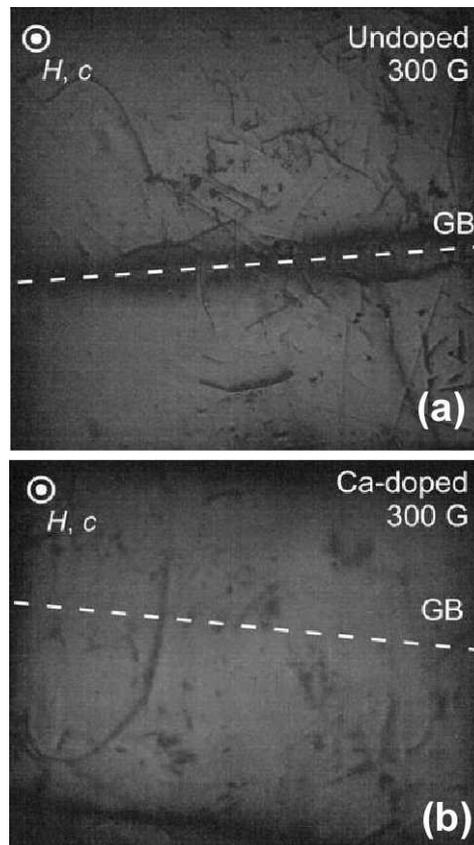


Fig. 5 300 G 下で 77 K に磁場中冷却した Y123 溶融凝固バルクの残留磁化の磁気光学像。(a) Y123、(b) Ca ドープ Y123

4.2 鉄系超伝導体焼結体に関する成果

Sm1111(SmFeAs(O_{1-x}F_x))超伝導体は F 置換量 x によって超伝導特性が大きく変化し、 $x \sim 0.2$ において最高の T_c となることが知られている。本研究ではまず、これまでより 100°C 以上低い 900°C での焼成が F の飛散を抑制し高純度の焼結体作製に適していることを見出した。F 置換量を変えた一連の Sm1111 試料の磁化の温度依存性を Fig. 6 に示す。図中、塗り潰したシンボルで表した $x = 0.08, 0.10, 0.12$ の試料の超伝導転移が、 x が大きく T_c が高い試料よりも鋭いことがわかった。鋭い超伝導転移は強い粒間結合を示唆するものであるが、実際に 5 K での粒間 J_c は、 $x = 0.12$ の試料で 4.4 kAcm⁻²であったのに対し、 $x = 0.20$ の試料は 1.1 kAcm⁻²と低かった。F 置換量が少ないほうが粒間の結合が改善する理由としては、共存する不純物相が少ないことが挙げられる。一般に Sm1111 において T_c を高めるための F 置換量の増加は SmOF などの共存不純物相の増加が起り、粒間結合の障害となる。つまり、この結果は T_c の低下よりも高い粒間結合の実現には不純物相の低減が優先されるべきことを意味している。

Sn の添加が鉄系超伝導体の線材作製においては配向組織の形成に有効[2]であることが知られていたが、これを無配向の Sm1111 多結晶に適用した場合に、大幅な粒間 J_c の改善を伴うことも見出した。Sn を添加した場合には、Sm1111 相中の F 置換量が若干減少する傾向にある一方、最適 F ドープ量の試料 ($x=0.20$)では不純物相を減らす効果があることがわかってきた。また焼結体内に分散した金属 Sn の表面から数 μm の範囲には緻密で不純物が無い Sm1111 相が形成されていることがわかった。 $x=0.20$ の試料では 65~80 mol%の Sn 添加によって 5 K、残留磁場下で粒間 J_c が急激に上昇し 13 kAcm⁻²に達したことから、この領域がバルク内で連続することが粒間 J_c の改善に寄与したと考えられる。なお、この Sn 添加効果については論文投稿

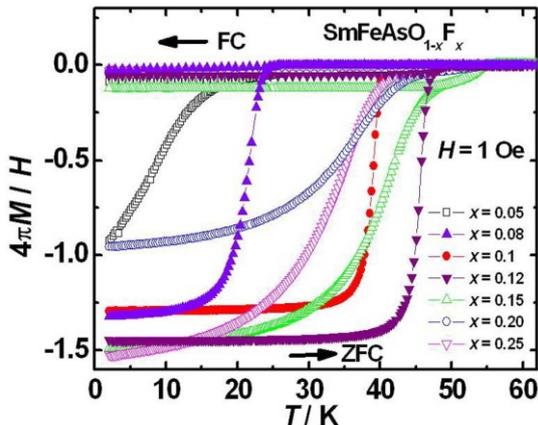


Fig. 6 900°Cで焼成した様々な F 置換量 x の SmFeAs(O_{1-x}F_x)の ZFC 磁化。

し印刷中である。

Ba122 (Ba(Fe_{1-x}Co_x)₂As₂)では Co 置換量 x を最適ドープ状態となる 0.08 に固定して、出発原料や混合方法、焼成条件を変えて焼結体を作製した。結果的に元素の原料を用い高エネルギーボール粉砕によって混合することで低温焼成(600°C)が可能になったことが不純物相を減らし粒間 J_c の向上に大きく寄与した。5 K、残留磁場下で粒間 J_c は 6 kAcm⁻²に達した。

以上のように鉄系超伝導体では Sm1111、Ba122 とも粒間 J_c の改善には成功したものの、 T_c が銅酸化物超伝導体よりも低いことから温度の上昇によるその低下は顕著で、無配向焼結体の用途は今のところ見えていない。但し、無配向多結晶線材においては 100 kAcm⁻²を超える粒間 J_c が既に達成されている[3]。線材では強加工によって空隙がほとんどない緻密な組織が形成されているのに対し、本研究で作製した焼結体は相対密度が 70%以下である。今後、高密度化ができれば無配向焼結体としての応用の可能性が見えてくるとともに、化学的な見地から線材高特性化のための知見が提供できるようになると考えている。

[1] T. Akasaka et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **21** (2011) 2706-2709.

[2] C. Wang et al., *Supercond. Sci. Technol.* **26** (2013) 075017

[3] Z. Gao et al., *Sci. Reports* **4** (2014) 4065.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 7 件)

1. S.J. Singh, J. Shimoyama, A. Yamamoto, H. Ogino, K. Kishio, "Enhancement of intergranular current density of Sm based oxypnictide superconductors with Sn", *Supercond. Sci. Technol.* **27**, (2014), 査読有, 印刷中
2. J. Shimoyama, "Potential of iron-based superconductors for practical future materials", *Supercond. Sci. Technol.*, **27** 044020 (2014), 査読有, doi:10.1088/0953-2048/27/4/044002
3. Y. Hayashi, A. Yamamoto, H. Ogino, J. Shimoyama and K. Kishio, "Influences of material processing on the microstructure and inter-granular current properties of polycrystalline bulk Ba(Fe,Co)₂As₂", *Physica C*, in press., 査読有, doi.org/10.1016/j.physc.2014.01.010
4. S.J. Singh, J. Shimoyama, A. Yamamoto, H. Ogino, K. Kishio, "Significant enhancement of the intergrain coupling in lightly F-doped SmFeAsO superconductors", *Supercond. Sci. Technol.* **26** 065006 (2013), 査読有, doi:10.1088/0953-2048/26/6/065006.

5. T. Ozaki, J. Shimoyama, A. Yamamoto, H. Ogino, K. Kishio, "Critical Current Properties of c -axis Oriented Hg(Re)1223 Bulks", IEEE Trans. Appl. Supercond. 23 6800404 (2013), 査読有, doi: 10.1109/TASC.2012.2235520
6. R. Tajima, J. Shimoyama, A. Yamamoto, H. Ogino, K. Kishio, T. Nakashima, S. Kobayashi, K. Hayashi, "Synthesis of Bi(Pb)2223 tapes by low P_{O_2} sintering", IEEE Trans. Appl. Supercond. 23 6400604 (2013), 査読有, doi: 10.1109/TASC.2012.2239593
7. K. Obata, J. Shimoyama, A. Yamamoto, H. Ogino, K. Kishio, S. Kobayashi, K. Hayashi, "Critical Current Properties of c -axis oriented Bi(Pb)2223 Bulks", Physics Procedia **36** 665-668 (2012), 査読有, doi: 10.1016/j.phpro.2012.06.264

[学会発表] (計 30 件)

1. 下山 淳一, 栗山陽介, 廣田哲也, 山本 明保, 荻野 拓, 岸尾 光二, "RE123焼結体・溶融凝固バルクへのCaドーブ効果", 第59回応用物理学関係連合講演会, 2014/3/18, 相模原
2. 下山 淳一, 廣田哲也, 今康一, 市川直樹, 稲森聡, 内藤恭吾, "RE123焼結体の粒間臨界電流特性の支配因子", 第88回低温工学・超電導学会, 2013/12/5, 名古屋
3. 椎野匠, 下山 淳一, 山本明保, 荻野拓, 岸尾光二, "磁場配向法による c 軸配向Hg(Re)1212焼結体の作製", 第88回低温工学・超電導学会, 2013/12/5, 名古屋
4. 林 雄二郎, 山本 明保, 荻野 拓, 下山 淳一, 岸尾 光二, "Ba122多結晶体における相・組織形成と粒界臨界電流特性の評価", 第88回低温工学・超電導学会, 2013/12/5, 名古屋
5. S.J. Singh, J. Shimoyama, A. Yamamoto, H. Ogino, K. Kishio, "Study of fluorine doped Sm1111 arsenide oxide superconductors", 日本セラミックス協会第26回秋季シンポジウム, 2013/9/6, 長野
6. Y. Hayashi, A. Yamamoto, H. Ogino, J. Shimoyama, K. Kishio, "Influence of microstructure on the intergranular current transport properties of Ba(Fe,Co)₂As₂ polycrystalline bulks", European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS2013). 2013/9/17, Genova, Italy
7. S. J. Singh, H. Ogino, J. Shimoyama, A. Yamamoto, K. Kishio, "Transport properties of Fe based superconductors: SmFeAs(O,F) and (Fe₂As₂)(Ca₄(Mg,Ti)₃O₈)", European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS2013). 2013/9/17, Genova, Italy
8. T. Hirota, J. Shimoyama, A. Yamamoto, H. Ogino, K. Kishio, "Control of Grain Boundary Properties of RE123 Sintered Bulks by Reductive Post-annealing", European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS2013). 2013/9/18, Genova, Italy
9. J. Shimoyama, "Potentials of iron-based superconductors for practical materials in future" (基調講演), European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS2013). 2013/9/19, Genova, Italy
10. 下山 淳一, 廣田哲也, 今康一, 市川直樹, 稲森聡, 内藤恭吾, "微細なY123粉末を原料とした高臨界電流特性Y123焼結体の開発", 第87回低温工学・超電導学会, 2013/5/14, 東京
11. J. Shimoyama, A. Yamamoto, K. Kishio, H. Ogino, "Derivable Potentials of HTS by Chemical Methods toward More Versatile Materials" (招待講演), Materials Research Society 2013 Spring Meeting, 2013/4/3, San Francisco, USA
12. 下山 淳一, 廣田哲也, 山本 明保, 荻野拓, 岸尾 光二, "後熱処理によるRE123焼結体の臨界電流特性の制御", 第60回応用物理学学会春季学術講演会, 2013/3/29, 厚木
13. 林 雄二郎, 山本 明保, 荻野 拓, 下山 淳一, 岸尾 光二, "微細混合粉末を原料としたCoドーブBa122多結晶バルクの作製", 第60回応用物理学学会春季学術講演会, 2013/3/29, 厚木
14. J. Shimoyama, A. Yamamoto, H. Ogino, K. Kishio, "Relationships among Crystal Structure, Chemical Composition and Superconducting Properties of Layered Cuprates and Iron-Arsenides", IUMRS-ICEM2012, 2012/9/24, 横浜

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

下山 淳一 (SHIMOYAMA JUN-ICHI)
 東京大学・大学院工学系研究科・准教授
 研究者番号: 20251366

(2) 研究分担者

山本 明保 (YAMAMOTO AKIYASU)
 東京大学・大学院工学系研究科・助教
 研究者番号: 20581995
 岸尾 光二 (KISHIO KOHJI)
 東京大学・大学院工学系研究科・教授
 研究者番号: 50143392
 荻野 拓 (OGINO HIRAKU)
 東京大学・大学院工学系研究科・助教
 研究者番号: 70359545

(3) 連携研究者

なし