

磁場応用に向けた (Y,Gd) Ba₂Cu₃O_y + BaZrO₃ 線材の開発

Development of TFA-MOD BaZrO₃ nanoparticle doped (Y,Gd)Ba₂Cu₃O_y coated conductors for magnetic field applications

小山田拓真
Takuma OYAMADA

佐藤迪夫
Michio SATO

塩原 敬
Kei SHIOHARA

高橋保夫
Yasuo TAKAHASHI

青木裕治
Yuji AOKI

足立和久
Kazuhisa ADAHI

井上昌睦*
Masayoshi INOUE

中岡晃一**
Kouichi NAKAOKA

和泉輝郎**
Teruo IZUMI

土屋雄司***
Yuji TSUCHIYA

淡路 智***
Satoshi AWAJI

銅酸化物系 REBa₂Cu₃O_y (RE は Y, Gd 等の希土類元素) 超電導線材の磁場中特性向上は、超電導航空機推進システムに用いる超電導ケーブル、超電導回転機や核融合向けコイルなどの高性能磁場応用機器への実用化に不可欠である。当社では、超電導層の作製方法として TFA-MOD 法と UTOC-MOD 法を用いて Reel-to-Reel 式焼成炉の導入により、長尺 Y_{0.77}Gd_{0.23}Ba₂Cu₃O_y + BaZrO₃ (BZO) 線材の安定製造を実現した。さらに、BZO ナノ粒子の微細化の手法の一つである中間熱処理を用いることで、磁束ピンニング点の最適化を図り、磁場中臨界電流密度 ($J_c(B)$) を大幅に向上させた。77 K および 65 K における 3 T の $J_c(B||c)$ はそれぞれ、0.14 MA/cm²、0.69 MA/cm² と高い値を示した。加えて、 J_c の磁場印加角度依存性では、等方的な特性を示すことが明らかとなった。更に、20 K における 10 T の $J_c(B||c)$ は、1.36 MA/cm² を示した。これらの成果は今後、超電導技術の幅広い分野への展開と、実用化の加速に貢献するものである。今後、当社では更なる性能向上・用途拡大に向け、磁束ピンニング点の最適化と長尺化や量産化を進めていく。

Improving the in-field performance of REBa₂Cu₃O_y (where RE denotes rare-earth elements such as Y and Gd) coated conductors (CCs) is critical for the practical realization of advanced magnetic field applications, including superconducting cables, superconducting rotating machine for superconducting aircraft propulsion systems, as well as fusion reactor coils. We have employed the TFA-MOD method and UTOC-MOD method for the fabrication of superconducting layers and achieved stable mass production of long-length BaZrO₃(BZO) doped Y_{0.77}Gd_{0.23}Ba₂Cu₃O_y CCs by using a Reel-to-Reel type of furnace. Furthermore, by incorporating an intermediate annealing process—a strategy for refining BZO nanoparticles—we have optimized flux pinning centers, resulting in a remarkable improvement in the critical current density in a magnetic field ($J_c(B)$). The J_c values under a magnetic field of 3 T ($B||c$) were 0.14 MA/cm² and 0.69 MA/cm² at 77 and 65 K, respectively. Moreover, measurement of angular dependence revealed near-isotropic J_c behavior. At 20 K, the J_c under a 10 T field ($B||c$) reached 1.36 MA/cm². These results represent significant progress toward the broader adoption and accelerated commercialization of superconducting technologies. Moving forward, we will further optimize flux pinning and advance CC development, including achieving longer lengths and scaling up production, to achieve higher performance and expand the range of applications.

1. はじめに

SWCC 株式会社では、超電導層の作製方法としてトリフルオロ酢酸 (TFA) 塩を基礎とした TFA-Metal Organic Deposition (MOD) 法を採用し、銅酸化物系 REBa₂Cu₃O_y

(REBCO : RE は Y, Gd 等の希土類元素) 線材の開発を進めている。TFA-MOD 法における REBCO の結晶化プロセスでは、大型のドラムに線材を巻き付けて一括熱処理を行うバッチ式を利用し、長尺線材の製造に取り組んできた [1]。しかし、超電導線材の磁場中特性向上を目指した新規手法の導入により、従来のバッチ式焼成炉では、均一な人工ピン導入超電導線材の作製が困難となりつつある事が判明した。そこで、当社では新たにバッチ式焼成炉から

* 福岡工業大学

** 産業技術総合研究所

*** 東北大学

Reel-to-Reel (RTR) 式焼成炉へ切り替え、磁場中の臨界電流特性の向上および長尺線材の安定製造を実現した [2, 3]。

REBCO 線材は、超電導転移温度（臨界温度： T_c ）が約 90 K と液体窒素温度（77 K）より高いため、液体窒素環境下での各種機器への適用が進められている。現在、当社では構内配電向け三相同軸ケーブル、全電動航空機向けの軽量・コンパクト積層ケーブル、回転機用コイル向け超電導線材の開発を進めている [4-6]。REBCO 線材は高い磁場中特性を有するため、液体ヘリウムや液体水素が用いられる低温環境下での高磁場応用も期待されており、REBCO 線材を活用した核融合用コイルの開発が近年活発化している。

REBCO 線材の実用化には、磁場中臨界電流密度（critical current density: J_c ）の向上が重要である。これは、磁場の増加に伴い、超電導状態で通電可能な電流が減衰するためである。磁場中の超電導特性向上策として、(1) Y/RE 置換、(2) 磁束ピンニング点（APC: Artificial Pinning Center）の導入が挙げられる。Y の一部を Gd や Sm で置換することで、YGdBCO や YSmBCO は YBCO に比べて T_c が向上し、磁場中特性が高いことが報告されている [7]。また、図 1 に示す通り、異なる次元性を持つ磁束ピンニング点が存在する。TFA-MOD 法では、あらゆる磁場角度に有効な 3 次元的 BaMO₃（BMO: M = Sn, Zr, Hf）ナノ粒子の導入が可能であり、優れた磁場中特性が得られることが報告されている [8, 9]。加えて、磁場中特性の向上には、この磁束ピンニング点である BMO ナノ粒子の微細化が重要であり、REBCO 層の結晶化温度より低い温度で熱処理（中間熱処理と呼ぶ）を施すことで粒子が微細化し、磁場中 J_c 特性が向上することが報告されている [10-12]。さらに、

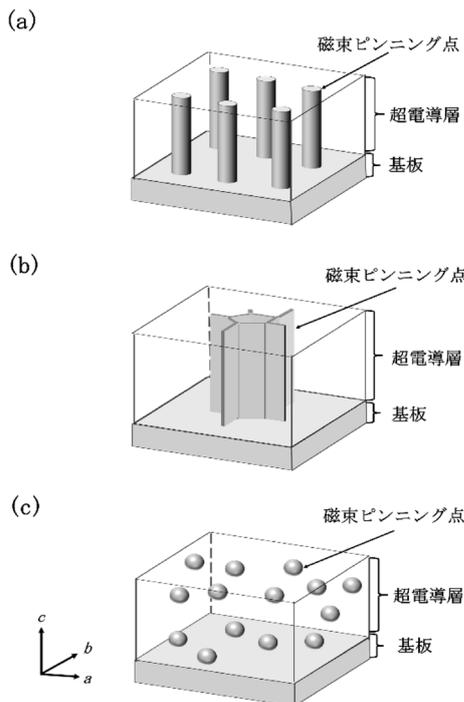


図 1 (a) 1 次元 (b) 2 次元 (c) 3 次元の磁束ピンニング点の概略図

TFA-MOD 法における超電導層の作製プロセスである塗布・仮焼成において、結晶化前の仮焼成膜形成時に、超電導溶液を極薄塗布し、積層する Ultra-thin Once-coating (UTOC) -MOD 法を用いることで BMO ナノ粒子が微細化し、磁場中特性が向上することが報告されている [9, 13, 14]。

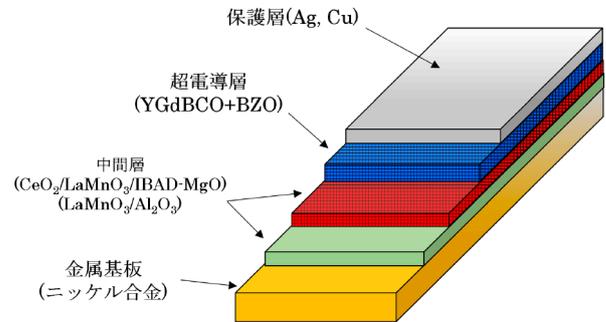


図 2 YGdBCO + BZO 線材の断面概略図

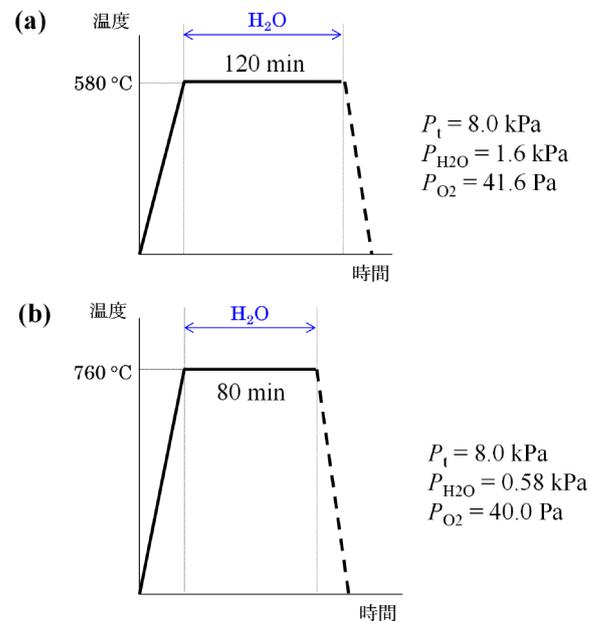


図 3 温度プロファイル (a) 中間熱処理, (b) 本焼成 (図中の P_t , P_{H_2O} , P_{O_2} はそれぞれ炉内圧力, 水蒸気分圧, 酸素分圧である。)

当社では、新たに導入した RTR 焼成炉を用いて、前述の各種手法を適用し、長尺 BZO ナノ粒子導入 $Y_{0.77}Gd_{0.23}Ba_2Cu_3O_y$ (YGdBCO + BZO) 線材の開発・製造を進めている。

我々は、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) から委託を受けた「航空機用推進システム実用化プロジェクト/次世代電導推進システム研究開発」の要素技術開発の一端を担い、REBCO 線材の開発を担当している。開発線材の詳細な評価として東北大学金属材料研究所附属強磁場超伝導材料研究センターにて超電導線材の評価を実施した。これは、東北大学との共創研究の一環として行ったものである。本稿では我々が開発した YGdBCO + BZO 線材磁場中特性に関する評価結果を報告する。

2. 超電導線材の作製方法および評価方法

2.1 YGdBCO + BZO 線材の作製方法

TFA-MOD 法を用いて中間層付きニッケル合金基板上に YGdBCO + BZO 線材を作製した (図 2)。中間層は、高周波 (radio frequency : RF) スパッタリング法を用いてニッケル合金基板上から順に、Al₂O₃ / LaMnO₃ / Ion-beam assisted deposition (IBAD) - MgO / LaMnO₃ / CeO₂ 形成した。ここで、IBAD 法により 2 軸配向した MgO 膜を形成し、更に LaMnO₃ と CeO₂ を積層した。その結果、REBCO と格子整合性が良い 2 軸配向した CeO₂ を得た。CeO₂ 層上に超電導層 YGdBCO + BZO を形成した。作製方法は、(1) 塗布・仮焼成、(2) 中間熱処理、(3) 本焼成に区分される。(1) で使用する超電導原料溶液は Y: Gd: Ba: Cu: Zr = 0.77: 0.23: 1.60: 3.00: 0.10 の化学量論比の配合で調整し、溶液粘度は約 3.5 cp に調整した [16]。マルチターン式連続塗布・仮焼成炉を用いて CeO₂ 付基板上にディップコート法により連続的に溶液を塗布・仮焼成をした。仮焼成では、温度勾配を持たせた炉内に超電導原料溶液を塗布した基板を一定速度で搬送し、酸素雰囲気下で熱処理を実施した。最大温度は約 500 °C とし、約 400 °C で水蒸気を導入した。水蒸気分圧 (P_{H_2O}) は、1.2 kPa とした。本操作を複数回繰り返し、合計 24 層の仮焼成膜を得た。(2) および (3) では RTR 焼成炉を用いて熱処理・結晶化し、YGdBCO + BZO 超電導層を形成した。図 3 に (2) および (3) 工程の温度プロファイル概略図を示す。中間熱処理条件は、作製した仮焼成膜の膜厚に対して最適な条件にて熱処理を行った [2, 11]。作製した超電導膜は約 1.6 μm (本焼後) であった。続いて安定化層として、DC スパッタリング法により Ag 層を形成し、酸素雰囲気下でアニール処理を施して YGdBCO + BZO 超電導膜に適量の酸素をドーピングした。その後、Ag 層の上に Cu めっきを行った。

2.2 YGdBCO + BZO 線材の評価方法

低温での磁場中臨界電流 (critical current : I_c) の評価において、作製した超電導線材の状態では電流源の容量以上の電流が流れてしまうため、評価が困難である。そこで、作製した YGdBCO + BZO 線材の磁場中 I_c を評価するためにウェットエッチングにより線材中心に幅 100 μm のブリッジを形成して、超電導層に流れる電流を制限し評価した。作製したブリッジの概略図を図 4 に示す。磁場中 I_c の評価は、東北大学金属材料研究所附属強磁場超伝導材料研究センターで実施した。測定には 15 T 無冷媒超伝導マグネットを用い、He ガスフローによるサンプル冷却のもと、77 K, 65 K, 20 K で磁場中臨界電流を評価した。臨界電流値は、電界基準 1 μV / cm で定義し、得られた I_c からブリッジ幅と超電導層膜厚を元に J_c を算出した。

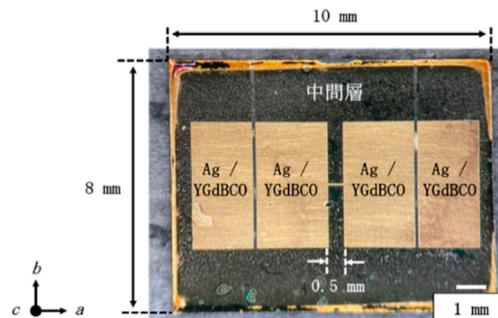


図 4 ウェットエッチングで作製したマイクロブリッジ形成後の表面観察図

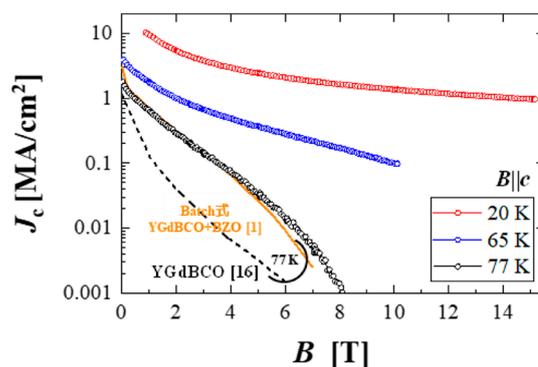


図 5 YGdBCO + BZO 線材の J_c - B 特性. (比較として磁束ピンニング点非導入 YGdBCO 線材 (77 K のみ) と、Batch 式焼成炉で作製した磁束ピンニング点導入 YGdBCO 線材 (77 K のみ) をプロット [1][16])

3. 超電導線材の磁場中 J_c 特性

3.1 YGdBCO + BZO 線材の J_c の磁場依存性 (J_c - B)

図 5 は、YGdBCO + BZO 線材の $B||c$ における J_c の磁場依存性を示す。比較対象として磁束ピンニング点を導入していない YGdBCO 線材 (77 K のみ) [16] と、Batch 式焼成炉で作製した磁束ピンニング点導入 YGdBCO 線材 (77 K のみ) をプロットした [1]。YGdBCO + BZO 線材は、YGdBCO 線材と比べ、77 K 下の全磁場領域で高い J_c を示した。具体的には、YGdBCO + BZO 線材の J_c は 0.62 MA/cm² (77 K, 1 T), 0.14 MA/cm² (77 K, 3 T) であり、それぞれ YGdBCO 線材の J_c に比べて 5.13 倍, 9.73 倍である。これは、導入した BZO ナノ粒子が $B||c$ 方向で有効な磁束ピンニング点となっていることを示している。65 K, 20 K における磁束ピンニング点非導入線材との直接比較はないものの、YGdBCO + BZO 線材の J_c は、0.69 MA/cm² (65 K, 3 T), 1.36 MA/cm² (20 K, 10 T) であることが確認され、77 K における自己磁場 J_c (J_c^{sf}) に対してそれぞれ 0.39 倍, 0.72 倍となった。このことからマグネットコイル等の応用機器設計時において、 J_c を把握する指標になると考えられる。

また、YGdBCO + BZO 線材は、77 K 下において Batch 式 YBCO + BZO 線材とほぼ同等の J_c となった。Batch 式焼成炉では短尺線材で高 I_c を得られるが、長尺線材では温

度分布とガスの流れに起因して長手方向の J_c は不均一であった。それに対し RTR 式焼成炉では長手方向の J_c が均一であることから、高特性かつ均一な線材の開発に成功したといえる [1][2]。

3.2 YGdBCO + BZO 線材の J_c の磁場印加角度依存性 ($J_c - B - \theta$)

3次元形状の磁束ピンニング点である BZO ナノ粒子が $B||c$ 以外の磁場印加角度でも有効な磁束ピンニング点となるか確認するべく、 J_c の磁場印加角度依存性を評価した。図 6 に YGdBCO + BZO 線材の $B||c$ における J_c の磁場印加角度依存性を示す。比較として磁束ピンニング点非導入 YGdBCO 線材 (77 K のみ) [16], Batch 式焼成炉で作製した磁束ピンニング点導入 YGdBCO 線材 (77 K のみ) もプロットしている [1]。図 6 (a) より、YGdBCO + BZO 線材は YGdBCO 線材と比較してすべての角度で高い J_c を示した。なお、 $B||ab$ における J_c のピークは超電導材料固有の異方性および超電導層に内在する積層欠陥が磁束ピンニング点として機能していることによる。最小 J_c と最大 J_c との比 ($J_{c,min}/J_{c,max}$) より等方性の比較を行うと、YGdBCO 線材は 0.44 であり、YGdBCO + BZO 線材は 0.71 であり、 $J_{c,min}/J_{c,max}$ の比が 1 に近いほど等方的であることを示す。本結果より、粒状人工ピン止め点である BZO ナノ粒子が 3次元ピンとして働き、77 K 下で有効な磁束ピンニング点となることが確認された。また、YGdBCO + BZO 線材は Batch 式 YBCO + BZO 線材と比較すると、すべての磁場角度でほぼ、同等の J_c を示した。また、磁束ピンニング点も同様に機能していることを示した。さらに図 6 (b) は、磁束ピンニング点非導入 YGdBCO 線材との比較は無いが、YGdBCO + BZO 線材の $J_{c,min}/J_{c,max}$ は、0.89 と極めて高い等方性を示し、当該線材においても BZO ナノ粒子が広範囲な角度で有効な磁束ピンニング点として機能していると考えられる。一方、図 6 (c) における YGdBCO + BZO 線材の $J_{c,min}/J_{c,max}$ は 0.08 と小さい値を示した。これは高磁場条件下ほど超電導材料固有の異方性により $B||ab$ で J_c ピークが目立つためである。 $B||ab$ 近傍を除く磁場印加角度範囲 ($\theta = 0 \sim 80$ deg.) で磁束ピンニング点非導入線材との比較が無い場合 BZO ナノ粒子の有効性は明らかではない。しかし、YGdBCO + BZO 線材の $T_c = 90$ K と仮定したとき、20 K における磁束サイズは約 4.8 nm であるが、BZO ナノ粒子の粒径は微細構造観察の結果、約 21 nm であり、20 K における磁束のサイズに対して約 4 倍の大きさである。そのため、20 K 環境では YGdBCO + BZO 線材の BZO ナノ粒子は磁束ピンニング点として最適化されていないと考えられる [9][17]。本報告の YGdBCO + BZO 線材において、BZO ナノ粒子サイズの計測実施できていない。そのため、今後は微細構造観察を実施し、その確認を進める必要がある。

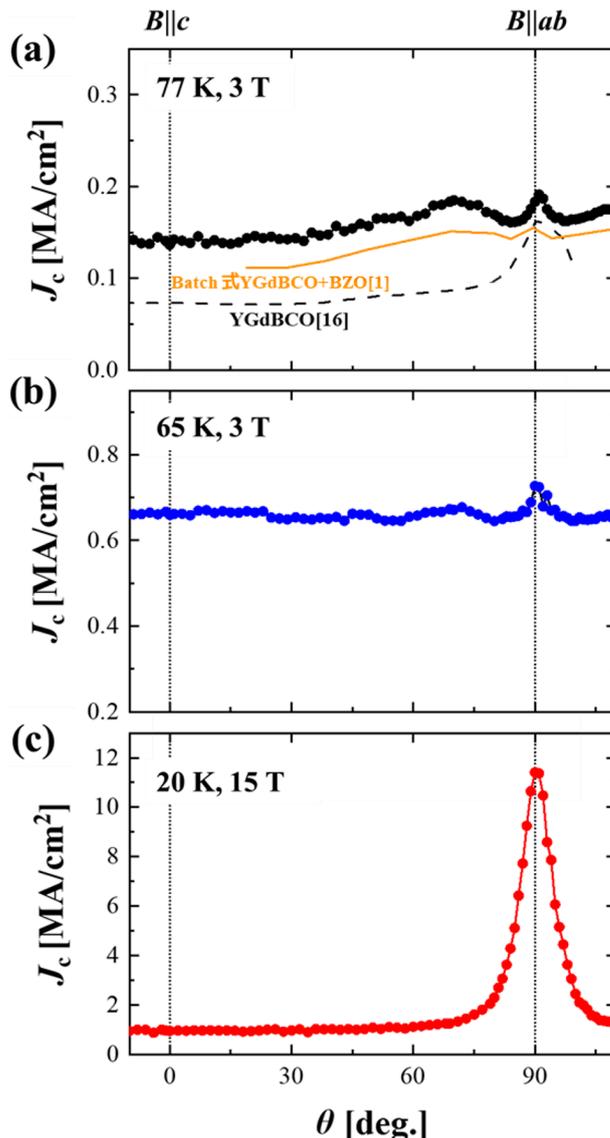


図 6 YGdBCO + BZO 線材の $J_c - B - \theta$ 特性。(a) 77 K, 3 T, (b) 65 K, 3 T, (c) 20 K, 15 T (比較として磁束ピンニング点非導入 YGdBCO 線材 (77 K, 3 T のみ) と、Batch 式焼成炉で作製した磁束ピンニング点導入 YGdBCO 線材 (77 K, 3 T のみ) をプロット [1][16])

4. ま と め

YGdBCO + BZO 超電導線材は、磁場中での臨界電流密度 (J_c) が大幅に向上し、77 K, 1 T で 0.62 MA/cm², 3 T で 0.14 MA/cm² と高い J_c 値を示した。特に、BZO ナノ粒子導入により、 J_c の磁場依存性・角度依存性が改善し、等方性指標 ($J_{c,min}/J_{c,max}$) は、0.71 (77 K), 0.89 (65 K) に達した。低温・高磁場域では、20 K, 10 T で 1.36 MA/cm² を達成した。YGdBCO + BZO 線材は、77 K 下において Batch 式 YBCO + BZO 線材とほぼ同等の J_c となった。また、RTR 式焼成炉では長手方向の J_c が均一であることから、高特性かつ均一な線材の開発に成功したといえる。また、これらの結果は、今後の磁場応用機器への設計指針となり、REBCO 超電導線材の航空機推進・電力・核融合

などの分野へ適用拡大が期待される。今後は更なる磁場中特性の向上を目指し、磁束ピンニング点の微細化を行い、あらゆる磁場応用機器への適用に向けた超電導線材の開発を進める予定である。

この成果は、NEDO（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）の委託業務（JPNP24008）の結果得られたものです。

本研究の一部は東北大学金属材料研究所附属強磁場超伝導材料研究センターで実施いたしました。（課題番号 202412-HMKGE-0030）

参考文献

- [1] K. Kimura, R. Hironaga, T. Nakamura, Y. Takahashi, T. Koizumi, T. Hasegawa, K. Higashikawa, M. Inoue, T. Kiss, M. Yoshizumi, T. Izumi, and Y. Shiohara, "Development of REBCO Coated Conductors by TFA-MOD Method With High Properties in Magnetic Fields," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 25, 6604204, 2015, doi:10.1109/TASC.2014.2380773.
- [2] M. Sato, K. Shiohara, Y. Takahashi, Y. Aoki, K. Adachi, K. Nakaoka, T. Izumi and M. Iwakuma, "Development of Ba-Zr-O-Doped Y-Gd-Ba-Cu-O Coated Conductors Using a Reel-to-Reel System Furnace," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 34, 2024, doi: 10.1109/TASC.2023.3343314.
- [3] M. Sato, T. Oyamada, K. Shiohara, Y. Takahashi, Y. Aoki, K. Adachi, K. Nakaoka, and T. Izumi, "Coated Conductor Development of Thick Y-Gd-Ba-Cu-O Layer With Heavy Ba-Zr-O Doping Using a Reel-to-Reel System Furnace," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 35, 2025, doi: 10.1109/TASC.2025.3528312.
- [4] K. Shiohara, M. Sato, Y. Takahashi, K. Adachi, A. Kawagoe, T. Izumi and M. Iwakuma, "Stacked Superconducting Cables With Coated Conductors Using New Corrugated Tubes for Electric Propulsion Systems for Aircraft," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 35, 2025, doi: 10.1109/TASC.2025.3538574
- [5] K. Shiohara, M. Sato, Y. Takahashi, K. Adachi, T. Izumi and M. Iwakuma, "Development of a Superconducting Cable for Aircraft Electric Propulsion System," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 34, 2024, doi: 10.1109/TASC.2023.3345297.
- [6] H. Sasa, M. Iwakuma, K. Yoshida, S. Sato, T. Sasayama, T. Yoshida, K. Yamamoto, Shun Miura, A. Kawagoe, T. Izumi, A. Tomioka, M. Konno, Y. Sasamori, H. Honda, Y. Hase, Masao Syutoh, S. Lee, S. Hasuo, M. Nakamura, T. Hasegawa, Yuhji Aoki, and T. Umeno, "Experimental Evaluation of 1 kW-class Prototype REBCO Fully Superconducting Synchronous Motor Cooled by Subcooled Liquid Nitrogen for E-Aircraft," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 31, 2021, doi: 10.1109/TASC.2021.3055452.
- [7] M. Miura, T. Kato, M. Yoshizumi, Y. Yamada, T. Izumi, T. Hirayama and Y. Shiohara, "Rare Earth Substitution Effects and Magnetic Field Dependence of Critical Current in Y1-xRExBa2Cu3Oy Coated Conductors with Nanoparticles (RE=Sm, Gd)," *Appl. Phys. Express* 2 023002 2009, doi:10.1143/APEX.2.023002.
- [8] M. Miura, B. Maiorov, J. O. Willis, T. Kato, M. Sato, T. Izumi, Y. Shi-ohara and L. Civale, "The effects of density and size of BaMO₃ (M = Zr, Nb, Sn) nanoparticles on the vortex glassy and liquid phase in (Y,Gd)Ba₂Cu₃O_y coated conductors," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 26, no. 3, p. 035008, 2013, doi:10.1088/0953-2048/26/3/035008.
- [9] M. Miura, B. Maiorov, M. Sato, T. Kato, T. Kato, T. Izumi, S. Awaji, P. Mele, M. Kiuchi and T. Matsushita, "Tuning nanoparticle size for enhanced functionality in perovskite thin films deposited by metal organic deposition," *NPG Asia Materials*, vol. 9, e447, 2017, doi:10.1038/am.2017.197.
- [10] K. Nakaoka, K. Kimura, T. Kato, R. Yoshida, Y. Usui, M. Nakamura, T. Izumi and Y. Shiohara, "Enhancement of Jc properties in magnetic fields of BaZrO₃ doped REBa₂Cu₃O_{6+δ} coated conductors by a newly modified TFA-MOD process," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 26, p. 3, 2016, doi:10.1109/TASC.2016.2522338
- [11] K. Nakaoka, R. Yoshida, M. Sato, A. Ibi, T. Machi and T. Izumi, "Optimization of interim heat-treatment condition on TFA-MOD process for fabrication of Y0.77Gd0.23Ba₂Cu₃O_y coated conductors with BaHfO₃," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1293, no. 1, p. 012035, 2019, doi:10.1088/1742-6596/1293/1/012035.
- [12] K. Nakaoka, K. Kimura, T. Kato, R. Yoshida, Y. Usui, M. Nakamura, T. Izumi and Y. Shiohara, "Enhancement of Jc properties in magnetic fields of BaZrO₃ doped REBa₂Cu₃O_{6+δ} coated conductors by a newly modified TFA-MOD process," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 26, p. 3, 2016, doi:10.1109/TASC.2016.2522338
- [13] K. Nakaoka, R. Yoshida, K. Kimura, T. Kato, Y. Usui, T. Izumi and Y. Shiohara, "Another approach for controlling size and distribution of nanoparticles in coated conductors fabricated by the TFA-MOD method," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 30, no. 5, p. 055008, 2017, doi:10.1088/1361-6668/aa66e1.
- [14] T. Izumi, K. Nakaoka, R. Yoshida, K. Kimura, T. Kato, M. Miura and Y. Shiohara, "Refining process of BaZrO₃ particles in coated conductors by TFA-MOD method," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 27, p. 4, 2017, doi:10.1109/TASC.2016.2646481.
- [15] K. Nakaoka, J. Matsuda, Y. Kitoh, T. Goto, Y. Yamada, T. Izumi and Y. Shiohara, "Influence of starting solution composition on superconducting properties of YBCO coated conductors by advanced TFA-MOD process," *Phys. C*, vol. 463-465, pp. 519-522, 2007, doi:10.1016/j.physc.2007.04.264.
- [16] 木村 一成, 広長 隆介, 高橋 保夫, 小泉 勉, 長谷川 隆代, 東川 甲平, 井上 昌睦, 木須 隆暢, 中村 達徳, 吉積 正晃, 和泉 輝郎, 塩原 融: 「人工ピンニングセンター導入型 TFA-MOD REBCO 超電導線材の開発」 *低温工学* 50 巻 1 号 2015 年, doi:https://doi.org/10.2221/jcsj.50.19
- [17] M. Miura, B. Maiorov, T. Kato, T. Shimode, K. Wada, S. Adachi, and K. Taneda, "Strongly enhanced flux pinning in one-step deposition of BaFe₂(As_{0.66}P_{0.33})₂ superconductor films with uniformly dispersed BaZrO₃ nanoparticles," *Nature Commun.* 4 (2013) 2499, doi:10.1038/ncomms3499

SWCC (株)

小山田 拓真 (おやまだ たくま)
新領域開発センター 超電導システムグループ
超電導線材の研究・開発に従事

SWCC (株)

佐藤 迪夫 (さとう みちお)
新領域開発センター 超電導システムグループ
博士 (工学)
超電導線材の研究・開発に従事

SWCC (株)

塩原 敬 (しおはら けい)
新領域開発センター 超電導システムグループ
博士 (工学)
超電導ケーブルシステムの研究・開発に従事

SWCC (株)

高橋 保夫 (たかはし やすお)
新領域開発センター 超電導システムグループ
超電導線材の研究・開発に従事

SWCC (株)

青木 裕治 (あおき ゆうじ)
新領域開発センター 超電導システムグループ
超電導線材の研究・開発に従事

SWCC (株)

足立 和久 (あだち かずひさ)
新領域開発センター 超電導システムグループ
グループ長
博士 (工学)
超電導ケーブルシステムの研究・開発に従事

福岡工業大学

井上 昌睦 (いのうえ まさよし)
工学部 電気工学科 教授 / エレクトロニクス研究所長
博士 (工学)
超伝導電力機器・システムの開発に向けた超伝導材料の評価・解析

国立研究開発法人産業技術総合研究所

中岡 晃一 (なかおか こういち)
エネルギー・環境領域
研究員
工学博士
超電導線材の研究・開発に従事

国立研究開発法人産業技術総合研究所

和泉 輝郎 (いずみ てるお)
エネルギー・環境領域
主任研究員
工学博士
超電導線材の研究・開発に従事

東北大学

土屋 雄司 (つちや ゆうじ)
金属材料研究所附属強磁場超伝導材料研究センター准教授
博士 (工学)
強磁場を用いた超伝導材料や超伝導マグネット研究・開発に従事

東北大学

淡路 智 (あわじ さとし)
金属材料研究所附属強磁場超伝導材料研究センター教授
工学博士
強磁場を用いた超伝導材料や超伝導マグネット研究・開発に従事