

令和 4 年 6 月 28 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2018～2021

課題番号：18H05248

研究課題名(和文)50T高温超伝導無冷媒超伝導磁石の要素技術開発

研究課題名(英文) Magnet technology development for 50T cryogen-free high temperature superconducting magnet

研究代表者

淡路 智 (Awaji, Satoshi)

東北大学・金属材料研究所・教授

研究者番号：10222770

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 146,100,000円

研究成果の概要(和文)：50 T級の強磁場超伝導マグネットを目指して、REBa₂Cu₃O_y (REBCO: REはYおよび希土類)インサートコイルの要素技術開発を行った。その結果、局所劣化しない、局所劣化しても健全性を保ち、劣化による局所温度上昇でも焼損しない、ロバストコイル構造を確立することができた。また、ロバストコイル構造における、劣化回避機構、電磁力によるコイル内部ひずみと変形挙動、交流損失機構、クエンチ特性の理解と保護方法などについて明らかにした。これらによって50 T無冷媒超伝導マグネットのための要素技術が確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られた成果は、熱・電磁気・力学挙動の機構は高温超伝導磁石の基礎的な理解をもたらし、汎用のロバスト構造は多くの応用展開が可能である。例えば、米国の大型プロジェクトである40 T超伝導マグネット計画でも、2枚共巻き構造が採用される予定である。また、低炭素社会の切り札とされる、高温超伝導核融合炉においても、重要な技術として認識されるなど、社会的意義も大きい。また、大きな磁気力場を用いた磁気浮上はNHKの科学バラエティで採用されている。

研究成果の概要(英文)：Research and developments of a REBCO insert coil were performed aiming at a 50T class high field superconducting magnet. The robust coil structure with a mitigation of local degradation, a current flow under local degradation and avoiding burn-out were found. The mechanism of the robustness can be described by model calculations. As a result, we successfully construct the basic technology for the 50 T-class superconducting magnet.

研究分野：超伝導・強磁場工学

キーワード：超伝導磁石 高温超伝導 電気工学

1. 研究開始当初の背景

1986年に発見された高温超伝導材料は、30年以上の年月を経て実用線材として販売されるようになり、応用化フェーズへ入っている。特に、高温超伝導線材はその優れた特性から20 Tを超える強磁場マグネットへの応用が期待されている。しかし、高温超伝導材料のマグネット応用における設計理論が、従来超伝導材料とは大きく異なるため、実用の強磁場マグネットは我々以外には実現していなかった。

2. 研究の目的

本研究では、我々が有する52 mmの室温空間に24.6 Tを発生する世界最高実用無冷媒超伝導マグネットのノウハウを発展させて無冷媒超伝導マグネットの世界記録を更新することで、高温超伝導材料の持つ優れた性能を最大限に引き出し、50 T超伝導マグネット開発のための基礎的現象の理解に基づく要素技術を開発する。

3. 研究の方法

強い磁場を安定に発生させる高温超伝導マグネット技術として以下の4課題を設定した。

- 伝導冷却を見据えたコイル化技術、
- 高い電磁力に対する機械的変形と補強、
- クエンチ(熱暴走)現象の理解と保護、
- 交流損失と不斉磁場、

コイル化技術としては、極力劣化防止を施し、さらに一部の劣化でも運電可能な無冷媒コイル化技術を実施。さらに、高い電磁力に耐える補強コイルの変形挙動の解明、部分的に劣化した場合の熱暴走挙動の理解と保護方法に関しては、サーモグラフィによるクエンチ伝搬挙動の計測と、詳細なシミュレーションによるクエンチ挙動を理解し、保護方法を確立する。また、遮蔽電流や電磁気的な結合の影響を考慮した交流損失や不均一電流による影響を計算と実験から追求する。実用レベルのREBCOコイルを作製し、25 T無冷媒超伝導マグネットのインサートを置き換えることで、無冷媒超伝導マグネットの世界記録24.6 Tを超える強磁場を発生させて、世界記録の更新を行い、将来の50 T級超伝導マグネットへの要素技術を実証する。

4. 研究成果

現状の25 T無冷媒超伝導磁石の内挿コイルをREBCOコイルに置き換えることで30 Tの磁場発生を行うことを目標として、その要素技術開発を行うことが本研究の目的である。特に多層膜構造を有するREBCOテープ線材は、大きな異方的超伝導特性を有し、低温の機械特性も含めて十分な理解がすすんでいなかった。さらに複数の企業が異なる組成や構造のREBCOテープを製造販売しており、より複雑となっている。加えて強磁場マグネット開発においては、複雑な熱および電磁応力による局所劣化や、それに起因する焼損が大きな問題となっていた。本研究では、REBCOの他バックアップとしての高強度Bi2223線材も含めた市販高温超伝導線材の詳細な臨界電流特性の理解を行った。その結果をベースとして、局所劣化が起きず、局所劣化が起きても超伝導性を保ち、局所的常伝導転移が起きても焼損しない、REBCOコイル技術をめざした。結果として、これらを満たし、さらには巨大な電磁力に対してコイルを補強効果も有する新たな「ロバストコイル構造」を開発することに成功した(成果論文4)。これにより30 T無冷媒超伝導磁石の設計を完了し、その能力が40 Tを超えることも示された。本研究が終了する2021年度の補正予算により、33 T無冷媒超伝導磁石の予算が承認された。これにより、本研究の成果を活用した当初の目標を超える33 Tの無冷媒超伝導磁石が実現することになる。これは実用超伝導磁石として、米国の32 T超伝導磁石(液体ヘリウム冷却)を抜いて世界一を無冷媒で実現することになる。

1) REBCO テープの臨界電流特性

用いる実用REBCOテープ線材の低温強磁場における臨界電流特性とその機械特性を評価した。低温強磁場中の臨界電流特性は、大きな異方性を示しコイル設計上重要となる。特に、現在の市販線材は人工ピンと呼ばれる柱状の常伝導析出物が導入されており、その臨界電流の角度

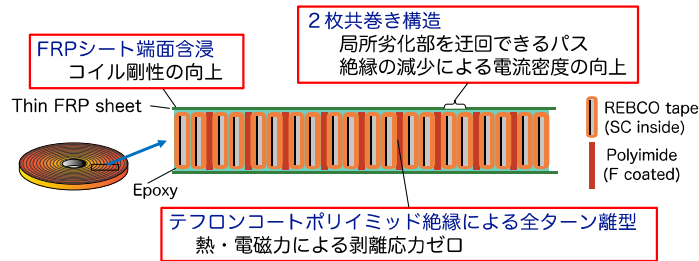


図1 本研究で開発したロバストコイル構造イメージ

依存性や磁場依存性が複雑となる。これらの詳細に調べた結果を用いてコイル設計を行うと共に、析出物の形状を考慮したモデルによって、角度依存性を定性的に説明することに成功した。

2) ロバストコイル構造

図1に本研究で開発したロバストコイル構造を示す。この構造によって、1)剥離力を実質ゼロとすることで劣化を抑制し、2)2枚共巻きによる1枚に局所劣化が起きて迂回できるパスを形成、3)端面含浸によってコイル剛性の向上と補強強化を実現した。これらの効果を検証した結果を以下に示す。

2-1) 局所劣化コイルによる検証

ロバストコイル構造による局所劣化に対する効果検証のため、REBCOテープに局所劣化(臨界電流 I_c が1割以下)を導入した2枚共巻きコイルを作製し、局所劣化REBCO一枚巻きコイルとの比較を行った。図2は77Kにおける両コイルの電流-電圧 (I - V) 特性である。この結果、1枚巻き劣化導入コイルは0A近傍から電圧が発生しており、たった一カ所の劣化により超伝導コイルとしての性能が失われているが、2枚バンドルコイルでは劣化なしコイルとほぼ同じ I - V 特性を示していることが分かる。2枚のREBCOテープの1枚の I_c がゼロであれば、コイル I_c は半分となるはずが、ほぼ完全に劣化なしコイルと同じ振る舞いであることは一見矛盾しているが、詳細な電磁界解析によって、コイルの電圧が発生している場所と劣化箇所のずれによってこのような振る舞いが現れることが理解できた。温度低下にともなって劣化コイルと劣化なしコイルの I_c 比は低下するが、40Kにおいても90%を超えることから、実際に運転が想定される4.2Kにおいても、局所劣化による破損リスクが大幅に低減されることが分かった。

このコイルを用いて測定した不斉磁場(磁場の計算値と実測値のずれ)は、テープ幅方向に流れる遮蔽電流と、2枚のテープに流れる結合電流の2種類存在し、互いに符号が逆であることが分かった。また、結合電流の方が遮蔽電流と比べて時定数が小さいことも理解できた。実機では、結合電流の緩和を待ってから実験することで、NMRなどの高精度実験も可能と想定される。

2-3) コイル剛性と補強効果の検証

本研究では、ロバストコイル構造を有するサイズの異なる2積層、4積層コイル等を作製し、バックアップ磁場中で通電試験を実施してきた。コイルに磁場中で通電することでローレンツ力により電磁力を印加することができ、実際の強磁場超伝導コイルにおける電磁力と同等の応力をコイルに印加することができるからである。本研究では、小コイルから始め最終的には実機コイルと同等のサイズのコイルまで拡張し、コイルの変形挙動を実験と計算で確認した。

その結果、ロバスト構造の端面含浸により、コイル全体が一体として変形する場合と独立変形 (BJR) する場合のちょうど中間の変形となり、コイルの応力分布が最適化できることが分かった。

これらの結果は、本研究で開発した「ロバストコイル構造」が、実用規模でも有効であることを証明している。この結果を基に、最終年度には24積層コイルを作製し、実機検証を行った。申請では、25T無冷媒超伝導磁石への組み込みを想定していたが、予算上実機コイルの作製や組み込み費用が不足したため、液体ヘリウムを用いた試験を実施した。次にその結果を示す。当初は、予算の不足分を東北大金属材料研究所強磁場超伝導材料研究センターの予算を充当することで補う計画であったが、最初に述べたように33T無冷媒超伝導磁石計画が予算化されたため、発展的変更として、実用マグネットへの適用はそちらに移行することとした。

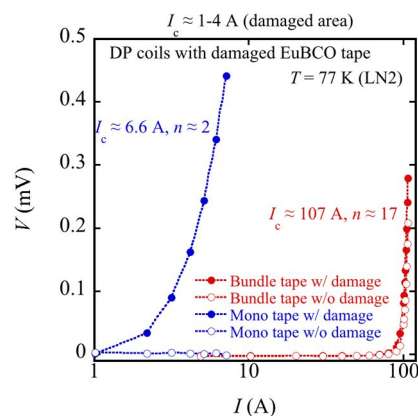


図2 局所劣化導入2枚共巻きコイルおよび1枚巻きコイルの電流-電圧特性(77K)。

3) クエンチ現象の理解と保護

サーモグラフィで実験的に得られたコイル内温度分布測定の結果、コイル内に発生したホットスポット（局所劣化部分の発熱）は、線材長手方向だけでなく径方向や、隣のパンケーキ間にも伝搬が起こり、線材の熱容量が大きく寄与して焼損までの時間が確保できることが理解できた。この結果を踏まえ、局所劣化が発生した場合のクエンチ挙動と保護動作について計算した。ここでは、表 1 に示す 30 T 用内挿 REBCO コイルを想定した。30 T の磁場発生時に 2 枚のうち 1 枚の REBCO の I_c が完全にゼロとなっただけでは電圧が発生しないので（この計算結果は、劣化導入コイルの実験結果と一致している）、ここでは、2 枚目の I_c も 20% となったと仮定して計算した。

図 5 に計算結果を示す。この場合、クエンチを 20mV 以上で検出した場合は、ホットスポットの熱暴走（ホットスポット温度の急上昇）が起こることで急激な温度と電圧上昇が見られるが、18 mV 以下で検出すると熱暴走が起こらず焼損が回避できることが分かった。この仮定は 2 本の REBCO テープが同じ場所で同時に劣化が起こることを想定しているため、発生確率の非常に低い最悪のケースである。すなわち、最悪のケースでコイル内にホットスポットが発生しても焼損に至らずコイル保護が可能な保護回路が実現できる。一方で、冷凍機の停止や金属系超伝導外挿コイルのクエンチなどの場合は高温超伝導コイル内部に抵抗が生じないので、高温超伝導コイルの蓄積エネルギーはすべて、外部の保護抵抗で吸収することが可能であることも示唆しており、高温超伝導材料の高い安定性を積極的に活用した新しい保護方法として活用できる。

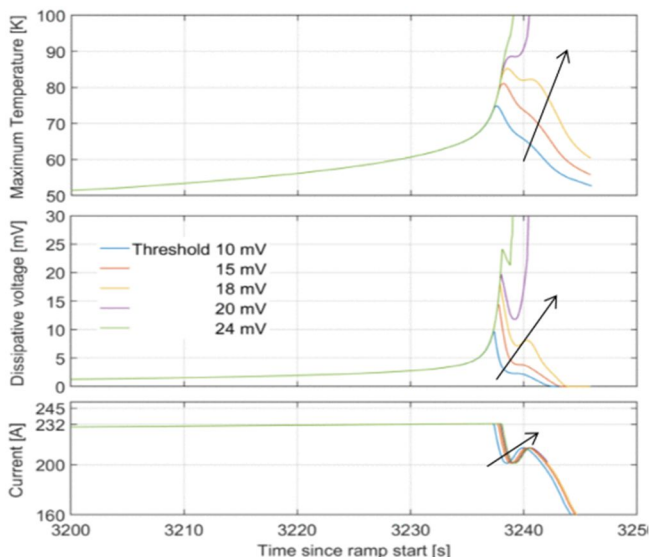


図 3 30 T において局所劣化によるクエンチに対し、検出電圧を変えた際のコイル内最大温度(上段)、発生電圧(中段)、電流(下段)の計算結果

4) 交流損失と不斉磁場

2 枚の REBCO からなるバンドル導体を巻いたパンケーキコイルで発生する交流損失の発生機構を解明するために、有限要素法を用いた数値解析を実施した。その結果、交流損失特性は特徴的な 3 つの区間に分けられることが新たに明らかとなった。つまり、励磁初期は平行磁場損失が支配的であり、導体毎の相違はなく、平行磁場損失のみの理論値とよく一致する。その後、平行磁場損失が飽和すると垂直磁場損失が支配的となり、コイル端部から中心に向かうほど損失が小さくなる。さらに、垂直磁場損失が飽和すると、垂直磁場損失のみの理論値とよく一致する。得られたこれらの交流損失発生機構に立脚すると、交流損失は従来の平行磁場損失と垂直磁場損失の単純和ではなく、新たに提案した重み係数を用いた重み付き和により、コイル端部から少し内側に入った中央部にあるバンドル導体の数値計算結果をほぼ再現できることがわかった。

バンドル導体を巻いたシングルパンケーキコイル 24 枚を積層して製作した 24 積層コイルを対象に、60 分間のマグネット励磁時に発生する交流損失と不斉磁場を試算した。その際、テープ間の磁氣的結合や電流分流を考慮したバンドル導体の交流損失と不斉磁場の理論表式を新たに導出した。また、数値解析で得られた交流損失の発生機構に基づいて提案した重み係数を用いた評価方法も併用した。図 4 に示すように、バンドル導体における 2 つの超伝導層間のギャップを 50 μm から 150 μm まで変化すると、平行磁場損失の増加に伴い全交流損失は大きくなる。現在の巻き線方式では、超伝導層間が約 150 μm であるので、交流損失は低磁場で約 10 W、30 T 近傍で 6 W 程度となる。冷却に用いている 2 台の 4K-GM 冷凍機の冷凍能力は 4 K で 3 W であるが、8 K では 10 W となり十分な冷却が可能である。一方、不斉磁場については、巻線が経験する磁場の垂直成分による寄与が負であるのに対して、磁氣的結合した場合の平行成分による寄与が正となるため、互いに相殺して正味の不斉磁場を弱めるように作用する。

以上のことから、バンドル導体を巻いた高温超

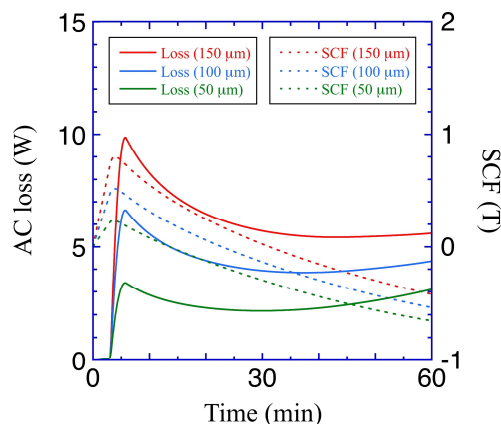


図 4 バンドル導体を巻いた 24 積層コイルで発生する交流損失 (AC loss) と不斉磁場 (SCF) の試算結果

伝導コイルにおける交流損失や不斉磁場を定量的に評価する手法を新たに構築でき、これを用いた交流損失と不斉磁場の計算が可能となった。

5) 30 T アップグレード設計

現状の 25 T 無冷媒超伝導磁石の内挿コイルを REBCO コイルに取り替えることで 30 T とする設計を行った。電源やクライオスタットの制限により最大電流は 250 A に制限されるが、245 A で 30 T を 32 mm の室温空間に発生することができる。このときの最大電磁力は 350 MPa となり、用いる REBCO 線材の限界である 470 MPa 以下となる。仮に電流量の制限がないとすると、350 A で 35 T が発生可能となる。この時の最大電磁力はほぼ線材の応力限界と同等となる。従って現実的な設計は、285 A で 33 T とすると最大電磁力が 409 MPa となり電磁力的にも現実的な設計となることが分かった。

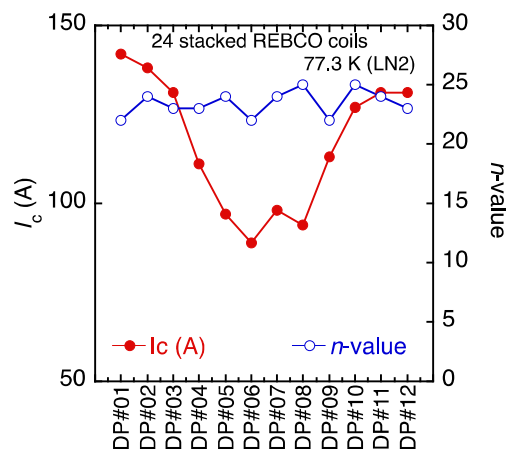


図 5 実証用 24 積層 REBCO コイルにおける各ダブルパンケーキコイルの I_c と n 値特性 (77.3K)

6) 24 積層コイルによる実証

得られたすべての技術を集約した実証コイルとして 24 積層コイルを作製した。このコイルは、上記 30 T 用内挿コイルの約半分のサイズとなる。予算不足によりフルサイズのコイルは作製できなかったが、約半分のサイズのコイルによりその実力を実証した。作製した 24 積層コイルに用いた 24 個のパンケーキコイルを液体窒素で試験をした結果、すべてのコイルが良好な超伝導転移を示す電流-電圧特性を示し、その I_c は 110 -175 A であった。ここで I_c のばらつきは、線材の I_c のばらつきによるものである。これらのコイルを 2 個ずつ重ねてダブルパンケーキコイルとして、測定した I_c と n 値を図 5 に示す。ここで示したコイル番号は 24 積層コイルの上から決定している。REBCO テープの I_c は、テープ I_c の低い磁場方向 ($\theta = 0^\circ$)、すなわちコイルの径方向磁場成分により決定される。このため径方向磁場成分の小さいコイルの赤道面付近にコイル I_c の小さいコイルを配置している。また、コイルの超伝導特性の良好性を示す指標である n 値は、すべてのコイルで 20-25 となっており、コイル内の劣化がないことが示された。本コイルにより 490 A で 20.7 T の磁場発生できる。このときの最大電磁力は約 352 MPa となり、アップグレードにより 25 T 無冷媒超伝導磁石に組み込んだ時に 30 T を発生した際の最大応力とほぼ同等となる。これによって、30 T アップグレードが可能であることが実証できた。本マグネット技術は、今後バックアップ磁場中で更なる電磁力を印加した限界試験を実施する予定であり、33 T 無冷媒超伝導磁石へと展開する。

7) 50 T 超伝導磁石に向けての検討

目的とした 25 T 無冷媒超伝導磁石を 30 T にアップグレードする技術は、そのコイル化、堅牢性、クエンチ対策と保護、交流損失と磁場精度のいずれも十分であることが実証された。さらに、50 T に向けた検討を次に示す。今の設計でも運転電流を上げることで 33 T の磁場発生は、十分なマージンを取って発生可能であることは 5) で説明した通りである。一方で、それ以上の磁場発生には、コイル補強が必要である。そこで、REBCO テープに用いられているハステロイテープ基材を補強と絶縁をかねて用いる方法を考案した。実際に用いられている 50-100 μm のハステロイ基板テープは、表面に MgO 等のセラミックコートが施されているので、超伝導層をつけない状態で用いるアイデアがある。試作マグネットは本科研費とは別に開始しており、コイル巻き線を開始したところである。表 1 に示した同形状の設計に、ハステロイ補強絶縁を適用するだけで、REBCO テープの応力限界以下で 37 T の磁場発生が可能であると試算された。補強テープの厚みやコイルの分割などの最適化により、少なくとも 40 T の磁場発生は可能と考えられる。2022 年度にスタートした 33 T 無冷媒超伝導磁石では、外挿金属系超伝導磁石の内径を、現在の 300 mm よりも大きい 320 mm とすることが決まっており、これを用いることで更なる自由度でコイル最適化が可能となる。将来的には、40 T を超えるユーザーマグネットへと展開できると考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 17件／うち国際共著 1件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Fujita S., Muto S., Hirata W., Tsuchiya K., Iijima Y., Daibo M., Takahashi K., Sakai K., Awaji S.	4. 巻 31
2. 論文標題 Hoop Stress Tests of an Epoxy-Impregnated REBCO Coil With Fluorine-Coated Polyimide Insulation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TASC.2021.3058924	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Awaji Satoshi, Badel Arnaud, Okada Tatsunori, Takahashi Kohki, Miyazaki Hiroshi, Hanai Satoshi, Ioka Shigeru, Fujita Shinji, Muto Shogo, Iijima Yasuhiro, Daibo Masanori, Kajikawa Kazuhiro	4. 巻 31
2. 論文標題 Robust REBCO Insert Coil for Upgrade of 25 T Cryogen-Free Superconducting Magnet	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TASC.2021.3061896	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Badel Arnaud, Okada Tatsunori, Takahashi Kohki, Fujita Shinji, Miyazaki Hiroshi, Ioka Shigeru, Awaji Satoshi	4. 巻 31
2. 論文標題 Detection and Protection Against Quench/Local Thermal Runaway for a 30 T Cryogen-Free Magnet	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TASC.2021.3059604	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Okada Tatsunori, Sakai Kohei, Awaji Satoshi	4. 巻 34
2. 論文標題 Mechanical and critical current characteristics of high-strength (Bi, Pb)2Sr2Ca2Cu3O10+ tapes under uniaxial tensile strain	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Superconductor Science and Technology	6. 最初と最後の頁 025017~025017
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6668/abcd2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Okada Tatsunori、Misaizu Hidenori、Awaji Satoshi	4. 巻 33
2. 論文標題 A possible explanation for double-peak structure in strain dependence of critical current density in REBa ₂ Cu ₃ O _{7-x} coated conductors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Superconductor Science and Technology	6. 最初と最後の頁 094014 ~ 094014
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6668/aba352	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Fujita Shinji、Muto Shogo、Iijima Yasuhiro、Daibo Masanori、Okada Tatsunori、Awaji Satoshi	4. 巻 30
2. 論文標題 Mechanical Properties of BaHfO ₃ -Doped EuBCO Coated Conductors Fabricated by Hot-Wall PLD on IBAD Template	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1 ~ 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2020.2965503	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Awaji Satoshi、Imai Yuto、Takahashi Kohki、Okada Tatsunori、Badel Arnaud、Miyazaki Hiroshi、Hanai Satoshi、Ioka Shigeru	4. 巻 29
2. 論文標題 Field Stability Analysis of 25 T Cryogen-Free Superconducting Magnet and Upgrade Plans for 30T System at HFLSM, IMR, Tohoku University	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1 ~ 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2019.2898699	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Badel Arnaud、Rozier Blandine、Takahashi Kohki、Awaji Satoshi	4. 巻 29
2. 論文標題 Simulation of Local Dissipation Phenomena in the REBCO Insert of the 25-T CSM Magnet: Understanding and Preventing Destructive Thermal Runaway	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1 ~ 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2019.2894831	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Okada Tatsunori, Misaizu Hidenori, Awaji Satoshi, Nakaoka Koichi, Machi Takato, Izumi Teruo, Miura Masashi	4. 巻 29
2. 論文標題 Longitudinal Magnetic Field Effects on (Y,Gd)Ba ₂ Cu ₃ O _{7-x} Coated Conductor With BaHfO ₃ Nanoparticles Fabricated by UTOC-MOD Method	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2019.2899745	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S. Awaji, Y. Imai, K. Takahashi, T. Okada, A. Badel, H. Miyazaki, S. Hanai, S. Ioka	4. 巻 29
2. 論文標題 Field Stability Analysis of 25 T Cryogen-Free Superconducting Magnet and Upgrade Plans for 30 T System at HFLSM, IMR, Tohoku University	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Trans. Appl. Supercond.	6. 最初と最後の頁 4300305
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2019.2898699	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 A. Badel, B. Rozier, K. Takahashi, S. Awaji	4. 巻 29
2. 論文標題 Simulation of Local Dissipation Phenomena in the REBCO Insert of the 25-T CSM Magnet: Understanding and Preventing Destructive Thermal Runaway	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Trans. Appl. Supercond.	6. 最初と最後の頁 4600605
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2019.2894831	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 S. Fujita, S. Muto, W. Hirata, T. Yoshida, K. Kakimoto, Y. Iijima, M. Daibo, T. Kiss, T. Okada, S. Awaji	4. 巻 29
2. 論文標題 Flux-Pinning Properties of BaHfO ₃ -Doped EuBCO-Coated Conductors Fabricated by Hot-Wall PLD	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Trans. Appl. Supercond.	6. 最初と最後の頁 8001505
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2019.2896535	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T. Okada, H. Misaizu, S. Awaji, K. Nakaoka, T. Machi, T. Izumi, M. Miura	4. 巻 29
2. 論文標題 Longitudinal Magnetic Field Effects on (Y,Gd)Ba ₂ Cu ₃ O _{7-x} Coated Conductors with Nanoparticles Fabricated by UTOC-MOD Process	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Trans. Appl. Supercond.	6. 最初と最後の頁 8002705
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2019.2899745	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takahashi Kohki, Badel Arnaud, Okada Tatsunori, Awaji Satoshi, Miyazaki Hiroshi, Hanai Satoshi, Ioka Shigeru	4. 巻 32
2. 論文標題 Mechanical Properties of Four-Stacked Two Tape Bundled REBCO Pancake Coils	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2022.3166469	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Abe T., Badel A., Okada T., Awaji S., Fujita S., Tsuchiya K., Iijima Y., Daibo M.	4. 巻 32
2. 論文標題 REBCO Coil With Robust Behavior Against Local Defects Wound Using Two-Tape Bundle	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2022.3163690	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kajikawa Kazuhiro, Fujiwara Yuna, Miezaki Miyabi, Awaji Satoshi, Badel Arnaud, Takahashi Kohki, Okada Tatsunori, Abe Toru, Fujita Shinji, Muto Shogo, Tsuchiya Koki, Iijima Yasuhiro, Daibo Masanori	4. 巻 32
2. 論文標題 AC Loss Measurements in an HTS Coil Wound Using Two-Ply Bundle Conductor	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2021.3135483	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Awaji Satoshi, Badel Arnaud, Okada Tatsunori, Takahashi Kohki, Miyazaki Hiroshi, Hanai Satoshi, Ioka Shigeru, Fujita Shinji, Muto Shogo, Iijima Yasuhiro, Daibo Masanori, Kajikawa Kazuhiro	4. 巻 31
2. 論文標題 Robust REBCO Insert Coil for Upgrade of 25 T Cryogen-Free Superconducting Magnet	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2021.3061896	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計41件 (うち招待講演 11件 / うち国際学会 36件)

1. 発表者名 S. Awaji, A. Badel, T. Okada, K. Takahashi, H. Miyazaki, S. Hanai, S. Ioka, S. Fujita, S. Muto, Y. Iijima, M. Daibo, H. Yokoyama, K. Kajikawa
2. 発表標題 Upgrade of 25T Cryogen-free Superconducting Magnet
3. 学会等名 10th ACASC/ 2nd Asian-ICMC/ CSSJ joint conference, Jan. 6-9, 2020, Okinawa, Japan (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Okada, H. Misaizu, S. Awaji
2. 発表標題 A possible explanation for double-peaks structure in strain dependence of J_c of REBCO coated conductors
3. 学会等名 10th ACASC/ 2nd Asian-ICMC/ CSSJ joint conference, Jan. 6-9, 2020, Okinawa, Japan (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Awaji, A. Badel, T. Okada, K. Takahashi, H. Miyazaki, S. Hanai, S. Ioka, S. Fujita, S. Muto, Y. Iijima, M. Daibo, K. Kajikawa
2. 発表標題 Upgrade of 25T cryogen-free superconducting magnet to 30T at HFLSM
3. 学会等名 32nd International Symposium on Superconductivity 2019 (ISS2019), Dec. 3-5, 2019, Kyoto, Japan (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Takahashi, T. Okada, A. Badel, S. Awaji, H. Miyazaki, S. Hanai, S. Ioka
2 . 発表標題 Electromagnetic and Mechanical Properties of Two-ply GdBCO Tape double Pancake Coils
3 . 学会等名 32nd International Symposium on Superconductivity 2019 (ISS2019), Dec. 3-5, 2019, Kyoto, Japan (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 H. Yokoyama, B. Zhu, K. Kajikawa, S. Awaji, A. Badel, K. Takahashi and T. Okada
2 . 発表標題 Theoretical Evaluation of AC Losses and Screening-Current-Induced Fields in HTS Insert for High Field Magnet
3 . 学会等名 32nd International Symposium on Superconductivity 2019 (ISS2019), Dec. 3-5, 2019, Kyoto, Japan (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 B. Zhu, H. Yokoyama, K. Kajikawa, S. Awaji, A. Badel, K. Takahashi and T. Okada
2 . 発表標題 Finite Element Analysis of Electromagnetic Responses in Pancake Coils for High Field Magnet Wound Using Two-ply Conductors
3 . 学会等名 International Symposium on Superconductivity 2019 (ISS2019), Dec. 3-5, 2019, Kyoto, Japan (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 S. Awaji, A. Badel, T. Okada, K. Takahashi
2 . 発表標題 R&D studies for 25T-CSM upgrading and 33T-CSM
3 . 学会等名 6th Japanese-French High Field and HTS Magnet Technology Research Collaboration Workshop, 22th-24th November 2019, France (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Okada, S. Shinji, S. Awaji
2 . 発表標題 Jc (T,B,) characterization of REBCO coated conductors with 25T-CSM
3 . 学会等名 6th Japanese-French High Field and HTS Magnet Technology Research Collaboration Workshop, 22th-24th November 2019, France (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 A. Badel, B. Rozier, J. Vialle, P. Tixador, K. Takahashi, T. Okada, S. Awaji
2 . 発表標題 Current distribution and field transient behaviors in REBCO HTS coils: is there any problem?
3 . 学会等名 6th Japanese-French High Field and HTS Magnet Technology Research Collaboration Workshop, 22th-24th November 2019, France (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 S. Awaji, A. Badel, T. Okada, K. Takahashi, S. Hanai, H. Miyazaki, S. Ioka, S. Fujita, S. Muto, Y. Iijima, M. Daibo, M. Sugimoto, H. Tsubouchi, H. Sakamoto, H. Yokoyama, K. Kajikawa
2 . 発表標題 High field cryogen-free superconducting magnet development beyond 30 T with advanced REBCO and high strength Nb3Sn conductors
3 . 学会等名 26th Magnet Technology Conference (MT26), Sep. 22-27, 2019, Vancouver, Canada (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 A. Badel, T. Okada, K. Takahashi, S. Awaji, B. Rozier, J. Vialle, P. Tixado
2 . 発表標題 Field and Voltage transient behavior in REBCO HTS coils
3 . 学会等名 26th Magnet Technology Conference (MT26), Sep. 22-27, 2019, Vancouver, Canada (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 S. Awaji
2 . 発表標題 Status of High-field REBCO Conductor
3 . 学会等名 26th Magnet Technology Conference (MT26), Sep. 22-27, 2019, Vancouver, Canada (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 A Badel, B Rozier, K Takahashi, S Awaji
2 . 発表標題 Simulation of Local Dissipation Phenomena in the REBCO Insert of the 25-T CSM Magnet: Understanding and Preventing Destructive Thermal Runaway
3 . 学会等名 26th Magnet Technology Conference (MT26), Sep. 22-27, 2019, Vancouver, Canada (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 S. Awaji
2 . 発表標題 Superconductors in High Magnetic Fields - Now and the future
3 . 学会等名 14th European Conf. on Appl. Supercond. (EUCAS) 2019, Sep. 1-5, 2019, Glasgow, UK (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 H. Yokoyama, B. Zhu, K. Kajikawa, S. Awaji, A. Badel, K. Takahashi and T. Okada
2 . 発表標題 AC Losses and Induced Fields in HTS Coil Wound Using Two-Ply Coated Conductors
3 . 学会等名 14th European Conf. on Appl. Supercond. (EUCAS) 2019, Sep. 1-5, 2019, Glasgow, UK (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Awaji
2. 発表標題 Design concept and R&D studies for upgrading of 25T cryogen-free superconducting magnet
3. 学会等名 Workshop on Advanced Superconducting Materials and Magnets, Jan. 21-23, 2019, Tsukuba, Japan (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 朱博, 横山大貴, 柁川一弘, 淡路智, A. Badel, 高橋弘紀, 岡田達典
2. 発表標題 2枚バンドル導体を巻いたHTSコイルの初期励磁時の交流損失評価
3. 学会等名 2019年度電気・情報関係学会九州支部連合大会 (第72回連合大会, 北九州市)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 横山大貴, 柁川一弘, 淡路智, 高橋弘紀, 岡田達典
2. 発表標題 2枚バンドル導体を巻いたHTSコイルにおける交流損失の理論的評価
3. 学会等名 平成31年電気学会全国大会 (札幌市)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Awaji, T. Okada, S. Fujita, S. Muto, W. Hirata, Y. Iijima, M. Daibo
2. 発表標題 In-field and low temperature Jc properties of BHO introduced Eu123 tapes
3. 学会等名 Materials Research Meeting 2019, Dec 10-13, 2019, Yokohama, Japan (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Awaji, T. Okada, K. Takahashi, H. Miyazaki, S. Hanai, S. Ioka
2. 発表標題 Operation of 25T cryogen-free superconducting magnet and 30T cryogen-free superconducting magnet plan at HFLSM, IMR, Tohoku University
3. 学会等名 Applied Superconducting Conference 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Awaji
2. 発表標題 Development of HTS Cryogen-free Superconducting Magnet
3. 学会等名 Shanghai High-Temperature Superconductor Conference (ShHTS) 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Awaji
2. 発表標題 Design concept and R&D studies for upgrading of 25T cryogen-free superconducting magnet
3. 学会等名 Workshop on Advanced Superconducting Materials and Magnets (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Imai, T. Okada, K. Takahashi, S. Awaji, H. Miyazaki, S. Iwai, S. Ioka, S. Fujita, M. Daibo, Y. Ijima
2. 発表標題 Properties of two-tapes co-winding GdBa ₂ Cu ₃ O _{7-x} pancake coil
3. 学会等名 Applied Superconducting Conference 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Fujita, S. Muto, W. Hirata, T. Yoshida, K. Kakimoto, Y. Iijima, M. Daibo, T. Okada, S. Awaji
2. 発表標題 Flux pinning properties of BaHfO ₃ doped EuBCO coated conductors fabricated by hot-wall PLD
3. 学会等名 Applied Superconducting Conference 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 横山大貴, 柁川一弘, 淡路智, 高橋弘紀, 岡田達典
2. 発表標題 2枚バンドル導体を巻いたHTSコイルにおける交流損失の予備的評価
3. 学会等名 第97回2018年度秋季低温工学・超電導学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 横山大貴, 柁川一弘, 淡路智, 高橋弘紀, 岡田達典
2. 発表標題 2枚バンドル導体を巻いたHTSコイルにおける交流損失の理論的評価
3. 学会等名 平成31年電気学会全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 淡路 智, 岡田達典, 藤田真司, 平田 涉, 飯島 康裕, 大保雅載
2. 発表標題 BHO 添加EuBCO テープの低温強磁場J _c 特性
3. 学会等名 2019年 第79回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Awaji
2. 発表標題 Robust REBCO Coil Structure for High Field Cryogen-free Superconducting Magnet
3. 学会等名 International Workshop on Coated Conductors for Applications 2016 (CCA2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Awaji
2. 発表標題 High Field Cryogen-free Superconducting Magnet Development at HFSLM
3. 学会等名 Materials Research Meeting (MRM) 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Okada
2. 発表標題 Numerical Evaluation of Elementary Pinning Force due to Spherical Pinning Center -Focusing on Anomalous Angular dependence of Critical Current-
3. 学会等名 Cryogenic Engineering Conference & International Cryogenic Materials Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Awaji
2. 発表標題 5.1T generation in 25 T cryogen-free superconducting magnet with a modified Bi2223 insert
3. 学会等名 27th Int. Conf. on Magnet Technology (MT27) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 A. Badel
2. 発表標題 Design considerations for practical very high field cryogen-free superconducting magnets: 33 T and beyond
3. 学会等名 27th Int. Conf. on Magnet Technology (MT27) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Abe
2. 発表標題 Electromagnetic characteristics of two-tape co-winding REBCO coil including local defects
3. 学会等名 27th Int. Conf. on Magnet Technology (MT27) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Takahashi
2. 発表標題 Hoop stress test of four-stacked two tape bundled REBCO pancake coils
3. 学会等名 27th Int. Conf. on Magnet Technology (MT27) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Awaji
2. 発表標題 High field critical current properties and flux pinning of practical superconducting REBCO tapes with artificial pinning center
3. 学会等名 European Conf. on Appl. Supercond. (EUCAS) 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 D. Kobayashi
2. 発表標題 High-field critical current properties of Bi2Sr2Ca2Cu3Oy high-temperature superconducting filaments
3. 学会等名 European Conf. on Appl. Supercond. (EUCAS) 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Kajikawa
2. 発表標題 Finite Element Analysis of AC Losses in Pancake Coils Wound Using Two-ply Bundle Conductor
3. 学会等名 27th Int. Conf. on Magnet Technology (MT27) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Kajikawa
2. 発表標題 AC Loss Measurements in an HTS Coil Wound Using Two-ply Bundle Conductor
3. 学会等名 European Conf. on Appl. Supercond. (EUCAS) 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Okada
2. 発表標題 High-field critical current properties of FeSe1-xTex coated conductors
3. 学会等名 European Conf. on Appl. Supercond. (EUCAS) 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Okada
2. 発表標題 Angular Dependence of Elementary Pinning Force Evaluated by Numerical Calculation Based on Normal-Core Approximation
3. 学会等名 Coated Conductor for Applications 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Okada
2. 発表標題 Numerical Evaluation of Elementary Pinning Force due to Spherical Pinning Center within Normal-Core Approximation
3. 学会等名 Materials Research Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	B A D E L A R N A U D (Badel Arnaud) (00836017)	東北大学・金属材料研究所・准教授 (11301)	
研究分担者	柁川 一弘 (Kajikawa Kazuhiro) (10294894)	山陽小野田市立山口東京理科大学・工学部・教授 (25503)	
研究分担者	岡田 達典 (Okada Tatsunori) (50793775)	東北大学・金属材料研究所・助教 (11301)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	高橋 弘紀 (Takahashi Kohki) (60321981)	東北大学・金属材料研究所・助教 (11301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関