

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2017～2020

課題番号：17H01127

研究課題名（和文）新材料MgB₂と超伝導電流流体解析による新型アンジュレータ精密磁場制御法の確立研究課題名（英文）Establishment of Precise Field Control for New Type Undulator using Bulk MgB₂ Superconductor and Fluid Analysis of Supercurrent

研究代表者

紀井 俊輝（KII, TOSHITERU）

京都大学・エネルギー理工学研究所・准教授

研究者番号：30314280

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 33,900,000円

研究成果の概要（和文）：電子ビーム蛇行用の周期交替磁場を発生させるアンジュレータは放射光生成に必要な装置である。永久磁石や電磁石が使われてきたが、超伝導材料を用いることで大幅な性能向上が期待されている。本研究では、新材料MgB₂を用いることで周期磁場の制御性を格段に高めた。その結果、希土類銅酸化物超伝導体を用いた際の磁場強度のばらつきを半分に以下に抑制でき、高度な数値計算との比較が可能な周期磁場の生成に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

バルク超伝導体を用いた放射光生成用アンジュレータは、磁場強度は格段に高く放射光生成に革新をもたらすことが期待されている。しかしピーク磁場強度の一様性に課題があり、現時点では実用化に至っていない。希土類系バルク超伝導体では製法上の理由により特性にばらつきが生じてしまうことが、実用レベルのピーク磁場均一度を得るための妨げとなっていた。本研究では、希土類系とは製法が異なりばらつきの発生が極めて小さいMgB₂超伝導体を用いることで、ピーク磁場均一度を大幅に向上させた。これにより、数値計算モデルの精度向上等を通じて実用化にむけた研究を可能とし、革新的なアンジュレータの実現が近づいた。

研究成果の概要（英文）：Undulators, which generate periodically alternating magnetic fields for undulating electron beams, are an essential device for generating synchrotron radiation. Permanent magnets and electromagnets have been used in conventional undulators, but the use of superconducting materials is expected to significantly improve their performance. In this study, the use of the new material MgB₂ has improved the controllability of the periodic magnetic field. As a result, the use of MgB₂ suppressed the fluctuation of the peak field strength in rare-earth cuprate superconductors to less than half.

研究分野：超伝導応用

キーワード：バルク超伝導体 アンジュレータ 放射光

1. 研究開始当初の背景

SPring-8 などの世界各地の放射光施設では、超高輝度電子ビームを永久磁石や電磁石で周期交替磁場を生成するアンジュレータ中で蛇行させ広範な波長域で強力な放射光を発生し、X線構造解析、物性研究、創薬、新材料開発など、幅広い領域で研究を推進している。特にX線領域における放射光の輝度向上には、磁場交替周期の短周期化が効果的だが、永久磁石の最大磁気エネルギー積や超伝導線材の実効臨界電流密度の制約により、磁場強度を高めつつ短周期化することはほぼ限界に達している。現在の短周期化の限界は、周期 15 mm、磁場強度 1 T 程度で、永久磁石を等価電流に置き換えると、数 100 A/mm² の電流密度に相当する。

研究代表者は、希土類銅酸化物 (REBCO) バルク超伝導体を超伝導臨界温度 (T_c : ~90 K) より十分に低い温度 (30 K 以下) に冷却すると、永久磁石技術の 10 倍を超える数 kA/mm² の臨界電流密度 (J_c) が得られることに着目し、ソレノイド中にバルク超伝導体を周期的に配置する新型アンジュレータを考案し[1](図 1)、周期交替磁場の生成に成功した[2]。2012 年には、磁極間隔 4 mm、周期 10 mm の条件で世界最強となる磁場強度 0.85 T を達成し、希土類永久磁石で到達可能な最大周期磁場強度を超え[3]、アンジュレータ技術にブレークスルーをもたらした。さらに、ループ状誘導電流をモデル化した超高速磁場計算法[4]やアンジュレータ端部における磁場分布調整法[5]などの、多くの基盤技術開発で世界をリードし、他の追従を許さない圧倒的な優位性を保持している。一方、REBCO バルク超伝導体には種結晶を用いた結晶成長過程に起因する個体間および組織内 J_c のばらつきがあり、磁場分布の整形精度に課題が残っている[6]。

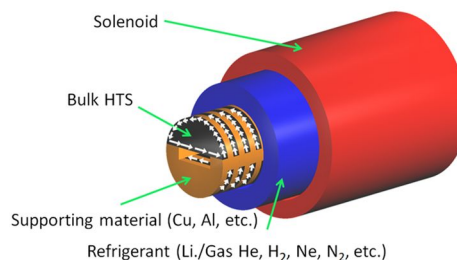


図 1 新型アンジュレータ模式図

個々のバルク超伝導体内に誘導される超伝導電流のつくる磁場の重ね合わせにより中央の空隙部に周期磁場交代磁場が生成される。

この J_c のばらつきのため、アンジュレータに必要な 1% 以下の磁場精度で数値モデルの検証が行えず、新型アンジュレータ実用化の障害となっている。また、数値解析では精度向上と計算コストがトレードオフの関係にあり、従来から広く用いられている有限要素法を複雑形状のバルク超伝導体を大量に用いる実機モデルの解析に使うことは現実的ではない。この J_c のばらつきに起因する問題を根本的に解決するため、研究代表者は MgB_2 超伝導体に着目し調査研究を進めてきた。2001 年に発見された T_c 40 K を持つ MgB_2 超伝導体[7]は、REBCO 超伝導体と異なり、結晶粒間の超伝導電流弱結合特性を持たず[8]、結晶成長過程が不要である。2013 年には研究分担者の富田らが MgB_2 バルク超伝導体で世界最高磁場強度 4 T を温度 11 K で達成するとともに、直径 100 mm × 厚さ 10 mm の組織内電流特性が均一な大型 MgB_2 バルク超伝導体の開発に成功した[9]。

2. 研究の目的

現在、放射光施設で用いられる電子ビーム蛇行装置 (アンジュレータ) へはより高精度・強磁場・短周期の周期交替磁場の生成が要求されている。しかし、磁気特性は永久磁石の物性値による限界を迎えている。研究代表者は等価電流密度で比較すると 10 倍以上の物性値をもつ希土類銅酸化物バルク超伝導体に着目し新方式のアンジュレータを考案し、永久磁石での磁場強度限界を打破したが、磁場精度においては不均一性の課題が残されていた。本研究では、磁場精度に焦点を絞り、均一な超伝導特性が得やすい二ホウ化マグネシウム (MgB_2) バルク超伝導体と、超伝導電流解析とにより、新方式アンジュレータでの高精度な磁場制御技術の実験的・理論的基盤を確立し、放射光発生・利用に革新的な飛躍をもたらすことを目的とした。

3. 研究の方法

新方式アンジュレータで精密な磁場分布制御を達成するには、超伝導特性を制御した任意形状のバルク超伝導体を適切に配置し、誘導電流を高精度にデザインすることが不可欠である。個々のアンジュレータ用 MgB_2 バルク超伝導体の特性・形状制御は試験片切出し評価、3次元磁場分布計測結果を統計評価しフィードバックすることで、 MgB_2 合成・加工・生産基盤として確立する。電流の高精度デザインに関しては、大規模複雑系の高精度電磁解析に有効な計算法が現存しないため、精密 3次元磁場計測、既存ループ電流モデル、既存有限要素法で評価を進めた。

(1) 超伝導ソレノイドシステムの設計・製作

これまでの REBCO バルク超伝導体を用いたアンジュレータで得られているピーク磁場の一様性が MgB_2 バルク超伝導体を用いることで、改善できるかを実験的に検証するために、6 T ソレノイドシステムを導入した。また、ビーム軌道となる中心軸上近傍における 3次元磁場分布の精密測定のために、磁場走査システムを構築した。

(2) MgB₂バルク超伝導体の合成・加工

MgB₂バルク超伝導体の持つ、「弱結合を持たず均一な誘導電流が誘起できる」と「任意形状に加工できる」という特性[10]を活かし、REBCOバルク超伝導体では実現不可能であった高精度磁場制御を目指した。具体的には、MgB₂バルクの合成・加工プロセスの最適化により、個体間のばらつきを抑制しアンジュレータ用に最適化されたMgB₂バルク超伝導体を合成・加工・生産し、世界初のバルクMgB₂超伝導体アンジュレータ用試験片を試作した。

(3) 周期交替磁場の生成・制御・評価

導入した6TソレノイドシステムとMgB₂バルク超伝導体を用いたアレイユニットを用いて、周期磁場の生成を行い、世界初のMgB₂超伝導体アンジュレータを試作した。磁場強度の制御性の評価およびピーク磁場強度の均一性を評価した。

4. 研究成果

(1) 世界初のバルクMgB₂アンジュレータの実現

外径25mm厚さ5mmの円盤状のMgB₂バルク超伝導体から図1に示したような疑半円形状の試験片を精密加工により切り出し、10片の試験片を組み合わせ周期10mm磁極間隔4mmとなる5周期分のMgB₂バルク超伝導体アレイユニットを作成した。図2に準備したバルクアレイの写真を示す。バルクアレイユニットをサンプルホルダに装着したうえで、真空ダクトに挿入し6Tソレノイドを用いて磁場変化を与えた。磁場印加および温度制御シーケンスを以下に示す。初期印加磁場までソレノイドを励磁する。その後、バルクアレイを冷却し超伝導転移温度以下の目標とする運転温度に保つ。



図2 MgB₂アレイユニットの写真

続いて、ソレノイド磁場を徐々に変化させ、超伝導体内部に誘導電流を励起する。目標とする磁場変化を与えた後、直線導入機に取り付けたホール素子アレイを走査し中心軸上でのアンジュレータ磁場を計測する。例として初期印加磁場を1T運転温度を20Kとし、磁場変化量0.5T, 1.0T, 1.5T, 2.0Tにおいて、磁場分布計測を実施したときのサンプル温度・ソレノイド印加磁場・軸上磁場3成分の計測結果を示す。本成果は、世界初となるMgB₂バルク超伝導体を用いた周期磁場生成である。本成果は第103回低温工学・超電導学会研究発表会で公表した。

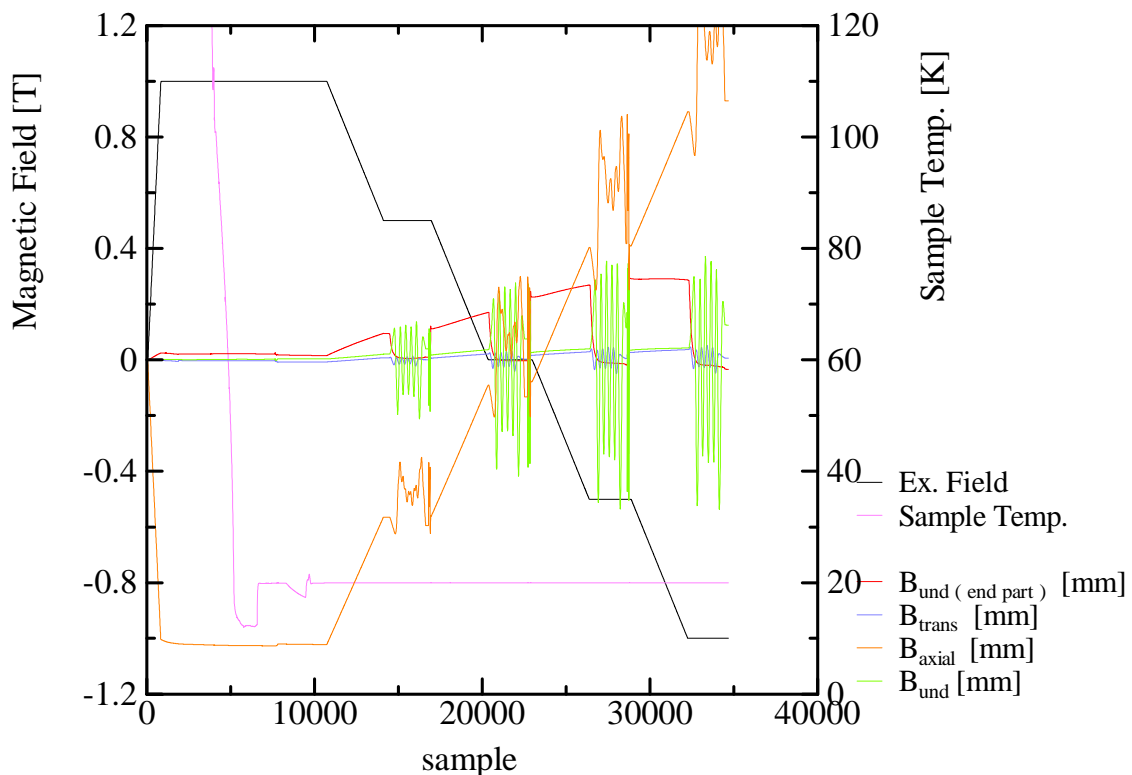


図3 MgB₂アンジュレータ磁場計測時の各計測値の推移を示す。横軸のsampleは1sampleあたりおよそ3秒であるが、間隔は計測器からの応答時間が異なるため、完全に一定ではない。

(2) 磁場強度の制御性の確認

ソレノイドで与える磁場変化量を増やすにつれて、誘導電流が増加しアンジュレータ磁場はより強くなるが、臨界電流密度以上の電流は超伝導体内部に誘導されないため徐々に誘導電流の重心位置がビーム軸から離れ、与えた磁場変化に対するアンジュレータ磁場の比例性が悪化していく。希土類銅酸化物超伝導体 REBCO (測定では、希土類としてガドリニウムを用いた GdBCO を使用) と比較すると、 MgB_2 は臨界電流密度が低いため、より小さな印加磁場変化で比例性が悪化をはじめ。図4に磁場制御性について REBCO との比較を示す。 MgB_2 では磁場変化 1.0 T から線形性から外れ、磁場変化 2.0 T で飽和し完全に制御性を失う。それに対し、GdBaCuO の場合は、6 T ソレノイドで与えることが可能な最大磁場変化 12 T でも飽和には至らない。ループ電流モデルを用いた数値計算と比較すると、温度 20 K における MgB_2 バルク超伝導体の臨界電流密度はおよそ $1 \sim 2 \text{ kA/mm}^2$ に対する予測曲線と近く、この値はこれまでに報告されている MgB_2 バルク超伝導体の臨界電流密度特性ともおおむね一致している。なお、GdBaCuO で得られたアンジュレータ磁場強度は 2.22 T で世界最高値を更新した。

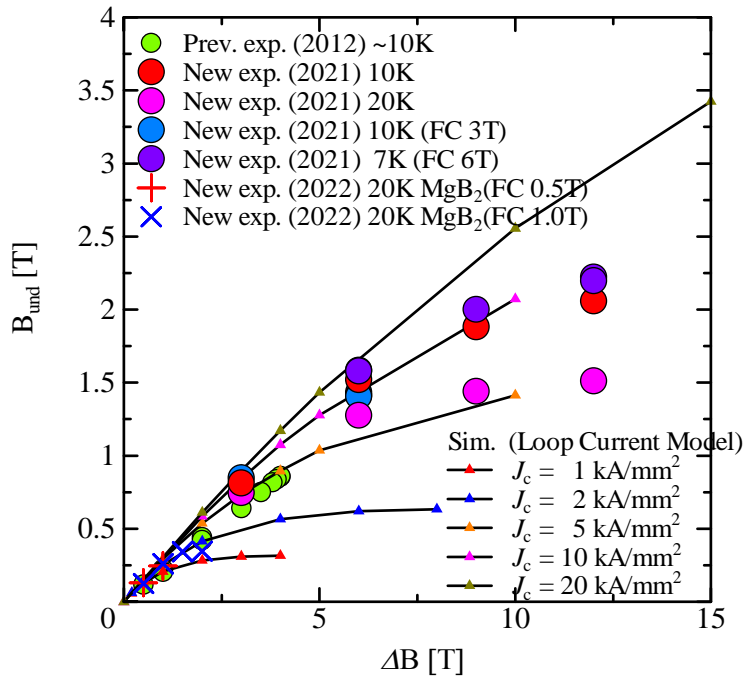


図4 ソレノイドで与える磁場変化 ΔB に対するアンジュレータ磁場の変化

(3) 磁場ピーク強度の均一性の向上

MgB_2 バルク超伝導体には「弱結合を持たず均一な誘導電流が誘起できる」と「任意形状に加工できる」という特性があり、これまでに REBCO で問題となっていたピーク磁場強度の均一性の問題を解決する手がかりとなる。図5に REBCO と MgB_2 で得られたアンジュレータ磁場分布を示す。左右両端部の大きなピークを除いた、ピーク磁場の均一性に注目すると、REBCO では標準偏差で 10%であったのに対し、 MgB_2 では標準偏差は 4%と大幅に低減されていることが明らかになった。なおこれらの値は、周期数が有限であることに起因して左右両端でピーク磁場強度が若干高くなる影響を含んでいるため、実用機で必要となる数 10 周期のアンジュレータに対してはさらに大きな差となることが予測できる。また、アンジュレータ磁場分布を左右反転さ

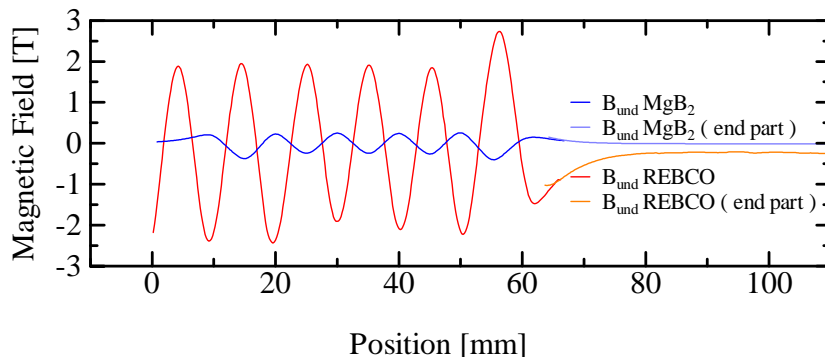


図5 MgB_2 と REBCO におけるアンジュレータ磁場分布

せて重ねて表示することで、ピーク磁場の一様性について評価を試みた。図6に MgB_2 および REBCO についてそれぞれ左右反転させて重ねて表示したグラフを示す。反転の結果、REBCO ではピークによっては 30%にも達する大きな相違が観測されているのに対し、 MgB_2 では端部を除けば相違は 8%以内であり、ピーク磁場の一様性の高い磁場が生成できていることが確認できた。

本研究で示した MgB_2 バルク超伝導体を用いたアンジュレータでの高度な磁場制御は、今後のアンジュレータ実用化研究の推進の必要な課題である磁場強度・分布制御の確立にむけた重要な基礎的な知見となった。

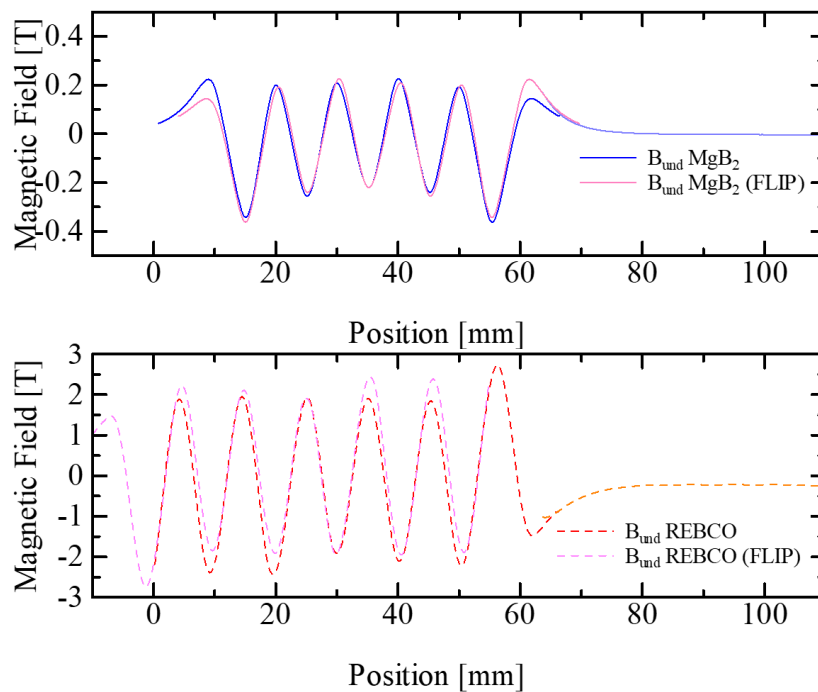


図6 左右反転させて重ねて表示した MgB_2 と REBCO におけるアンジュレータ磁場分布

参考文献

- [1] T. Kii, et al., Proc. FEL2006, pp. 653-655, (2006).
- [2] T. Kii, et al., AIP conf. Proc. SRI2009, Vol. 1234, pp.539-542, (2010).
- [3] R. Kinjo, T. Kii, et al., Applied Physics Express Vol. 6 042701, (2013).
- [4] R. Kinjo, T. Kii, et al., Proc. FEL2009, pp.746-749, (2009).
- [5] R. Kinjo, T. Kii, et al., Proc. IPAC2010, pp.3156-3157, (2010).
- [6] T. Kii, et al., IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.22, pp. 4100904, (2012).
- [7] J. Nagamatsu, et al., Nature 410, pp. 63-64, (2001).
- [8] DC Larbalestier, et al., Nature 410, pp. 186-189, (2001).
- [9] M. Tomita, A. Ishihara, T. Akasaka, et al., EUCAS 2013, 2A-MA-03, (2013).
- [10] A. Ishihara, M. Tomita, T. Akasaka, et al., ASC 2014, 4MOr2C-03, (2014).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計19件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 紀井 俊輝, 富田 優, 赤坂 友幸
2. 発表標題 バルクMgB2アレイを用いた周期交替磁場の生成
3. 学会等名 第103回 低温工学・超電導学会研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 紀井俊輝
2. 発表標題 バルク超伝導体における超伝導遮蔽電流制御とその応用
3. 学会等名 大阪大学産業科学研究所附属量ビーム科学研究施設 令和3年度成果報告会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 紀井俊輝
2. 発表標題 バルク超伝導体の新しい応用
3. 学会等名 2021年度 KPSIセミナー 第85回（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 紀井俊輝
2. 発表標題 バルク超伝導体を用いた短周期・強磁場アンジュレータの可能性
3. 学会等名 2021年度 ビーム物理研究会・若手の会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 紀井俊輝
2. 発表標題 バルク超伝導体を用いた短周期アンジュレータ
3. 学会等名 応用物理学会 (超伝導分科会 第59回研究会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toshiteru Kii
2. 発表標題 Design study of Bulk HTS Undulator using MgB2
3. 学会等名 11th International Workshop on Processing and Applications of Superconducting Bulk Materials (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toshiteru Kii
2. 発表標題 Improvement of End Field Profile of Bulk HTS Undulator
3. 学会等名 14th European Conference on Applied Superconductivity (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toshiteru Kii
2. 発表標題 Recent progress on Bulk Superconducting High-Tc micro undulator
3. 学会等名 Workshop on "Generation and Application of High Brightness Electron Beam" (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 紀井俊輝
2. 発表標題 バルク超伝導体アンジュレータにおけるバルクソーティングによるピーク磁場強度調整
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 紀井俊輝
2. 発表標題 高品位MgB2多結晶バルク体を用いた周期磁場生成
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Toshiteru Kii
2. 発表標題 Computational fluid dynamics approach to determine current distribution in cylindrical bulk HTS
3. 学会等名 6th Internatinal Workshop on Numerical Modelling of High Temeperature Superconductors (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 紀井俊輝
2. 発表標題 流体力学的超伝導電磁解析における電磁力の扱い
3. 学会等名 2018 年度秋季 (第97回) 低温工学・超電導学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 紀井俊輝
2. 発表標題 流体力学的超伝導電磁解析
3. 学会等名 第8回量子化磁束動力学シミュレーション研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 紀井俊輝
2. 発表標題 バルクMgB2超伝導体によるバルク超伝導体スタガードアレイアンジュレータ高精度化の検討
3. 学会等名 第14回日本加速器学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Toshiteru Kii
2. 発表標題 Effect to periodic magnetic field quality of non-uniformity of J_c in each piece of bulk superconductor array
3. 学会等名 The 10th International Workshop on Processing and Applications of Superconducting (RE)BCO Large Grain Materials (PASREG 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 紀井俊輝
2. 発表標題 Ultra-short period high field undulators for compact light sources
3. 学会等名 The 60th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop FLS2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Toshiteru Kii
2. 発表標題 "Bulk High-Tc Superconductor Staggered Array Undulator" -- Principle of Operation --
3. 学会等名 Workshop on CSR and FELs from ultra-short bunch electron beams (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石原篤, 恩地太紀, 赤坂友幸, 福本祐介, 紀井俊輝, 関野正樹, 大崎博之, 岸尾光二, 富田優
2. 発表標題 半円状MgB2超電導バルク磁石の磁場特性評価
3. 学会等名 2017 年度秋季 (第95回) 低温工学・超電導学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 赤坂友幸, 恩地太紀, 石原篤, 福本祐介, 関野正樹, 大崎博之, 岸尾光二, 紀井俊輝, 富田優
2. 発表標題 M0センサーによる高温超電導バルク磁石の捕捉磁場分布評価 (2)
3. 学会等名 2017 年度秋季 (第95回) 低温工学・超電導学会
4. 発表年 2017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	富田 優 (TOMITA MASARU) (40462915)	公益財団法人鉄道総合技術研究所・浮上式鉄道技術推進部・担当部長 (82658)	

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			
スイス	Paul Scherrer Institute			