

## バルク $MgB_2$ を用いた超伝導アンジュレータ試験機の開発

### DEVELOPMENT OF PROTOTYPE BULK SC UNDULATOR USING BULK $MgB_2$

紀井俊輝<sup>#, A)</sup>, 富田優<sup>B)</sup>, 赤坂友幸<sup>B)</sup>

Toshiteru Kii<sup>#, A)</sup>, Masaru Tomita<sup>B)</sup>, Tomoyuki Aksaka<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Institute of Advanced Energy, Kyoto University

<sup>B)</sup> Railway Technical Research Institute

#### Abstract

We are developing a bulk superconducting undulator as a future insertion device for light sources. Although, rare earth cuprate bulk superconductor with high transition temperatures is most promising because of its high critical current density, performance fluctuation coming from its melt-textured growth process using a seed crystal is serious drawback for generating precise periodic magnetic field. Therefore, we focused on magnesium diboride ( $MgB_2$ ) bulk superconductor which does not need melt-textured growth process. We successfully fabricated bulk  $MgB_2$  array and demonstrated periodic field generation using bulk  $MgB_2$  superconductor. Measured peak magnetic field fluctuation was well suppressed comparing to rare earth cuprate bulk superconductor.

#### 1. はじめに

現在、主流となっているアンジュレータは永久磁石や超伝導線材を用いたものであるが、その性能は磁石材料や超伝導線材の物性限界にほぼ到達しており、今後の大幅な磁場強度増大は難しい。京都大学エネルギー理工学研究所では、これらの従来型アンジュレータでの磁場強度限界を大幅に超えることを目標に、バルク超伝導体に着目し、新方式のアンジュレータの開発を行ってきた[1-3]。バルク超伝導体は、塊状の超伝導体で超伝導転移させることで疑似的な超強力永久磁石としての応用が期待されている。バルク超伝導体による最高保持磁束密度は希土類銅酸化物系超伝導体を用いて得られた17.6 Tで、永久磁石と比較して格段に高い磁場が達成されている[4]。

我々は、2006年にバルク超伝導体アレイをソレノイド中に周期的に配置する新方式アンジュレータを提案し、原理検証試験、試験機の開発を継続してきた。これまでに判明した課題のうち、克服が難しい深刻なものとして、入手可能な典型的な希土類銅酸化物系バルク超伝導体の捕捉磁場特性がある程度選別を行ったうえで電流密度に換算すると15%程度ばらついてしまう問題[5]があげられる。これは希土類銅酸化物超伝導体の製法上、回避がたいものであり、本質的な解決策は現時点では見つかっていない。また、この問題に起因して、高精度な磁場調整手法を確立するための数値計算の精度を高めることや、高精度な磁場調整の実証研究が極めて難しいという問題が生じている。そこで、我々は製法の違いにより本質的な電流密度のばらつきが生じにくい  $MgB_2$  超伝導体に着目し、数値解析と実験の評価をすすめてきた[6-8]。本稿では  $MgB_2$  を用いたアンジュレータ試作機の開発状況と、試作機で得られた周期磁場計測結果を紹介し、 $MgB_2$  を用いることで得られた磁気特性の改善について希土類銅酸化物超伝導体と比較し、実験的観点から評価を行ったので報告を行う。

#### 2. $MgB_2$ アンジュレータ試験機の開発

##### 2.1 バルク超伝導体アンジュレータの原理

バルク超伝導体アンジュレータの模式図を Fig. 1 に示す。中心軸を挟み半周期ずらしたバルク超伝導体アレイがソレノイド内に挿入された構造となっている。超伝導転移したバルク超伝導体に対し、ソレノイドにより磁場変化を与えると、個々のバルク超伝導体内部には磁場変化を打ち消すように遮蔽電流が誘導される。その結果、中心軸を挟み上下に向きの異なる電流が配置され、この電流が作る磁場の重ね合わせとして中心軸上に周期交替磁場生成される。磁場生成原理の詳細については文献[1-3]を参照されたい。

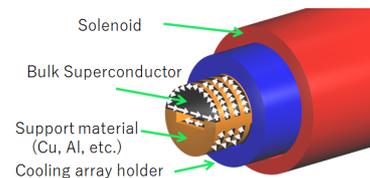


Figure 1: Schematic drawing of bulk SC undulator and its principle of operation. When the magnetic field is changed using a solenoid, superconducting shielding current is induced in each bulk SC materials (white arrow). As the results, periodic magnetic field is generated on the central axis.

##### 2.2 $MgB_2$ バルク超伝導体/超伝導体アレイ

次に、バルク  $MgB_2$  超伝導体について簡単に紹介を行う。 $MgB_2$  は2001年に発見された金属系超伝導体としては最高の転移温度  $T_c$   $\sim 40$  K を持つ超伝導体である[9]。我々がこれまで試験を続けてきた希土類銅酸化物超伝導体と比べて超伝導転移温度が低く、臨界電流密度は自己磁場下でおよそ1/10の1 kA/mm<sup>2</sup>程度で磁場強度の観点からは不利である。ただし、希土類銅酸化物系超伝導体と異なり、結晶粒間の超伝導弱結合特性を

<sup>#</sup> t-kii@iae.kyoto-u.ac.jp

示さず[10]、結晶成長過程が不要という特徴を持つ。結晶粒界間の超伝導的な結合が弱いと、超伝導物質として結晶内の微視的な臨界電流密度が高くても、個々の微小な結晶をまたいだ超伝導電流が流れないため、磁場変化を打ち消す遮蔽電流が微小な結晶内に局在化してしまい、Fig. 1 に示したような中心軸を挟み対向する大電流を誘導することができない。そこで希土類銅酸化物超伝導体では、弱結合を解消するために種結晶を用いた部分熔融・再結晶化過程を経ることで、多結晶体を超伝導的に結合された疑似単結晶化しているが、この過程では種結晶からの距離や再結晶時の方位により超伝導特性がバルク超伝導体内部で異なってしまう、多数のバルク超伝導体を単一のバルク超伝導体から切り出すと特性にばらつきが発生し、アンジュレータ開発では磁場精度の観点で克服すべき重要な課題となっている。

本研究では、電流密度特性がそろったバルク超伝導体による磁場生成を行うことで、アンジュレータピーク磁場の制御性に対する評価を行うことを目的とし、鉄道総研富田グループと共同でアンジュレータ向け  $MgB_2$  バルク超伝導体の開発を行った。Figure 2 に鉄道総研で合成・加工された  $MgB_2$  超伝導体の写真を示す。原料粉末は1:2のモル比率のMgとBで、乾式混合の後  $1 \text{ ton/cm}^2$  の圧力でペレット化したのち  $850^\circ\text{C}$  で3時間Ar気流中での熱処理を行った。(a)は SUS 製の肉厚 2 mm の補強リングをはめて熱処理を行った試料である。(b)は SUS リングを外し、おおよその切削加工を行ったのち、ダイヤモンドやすりを用いてアンジュレータ試験片のサイズに微細加工を施したものである。

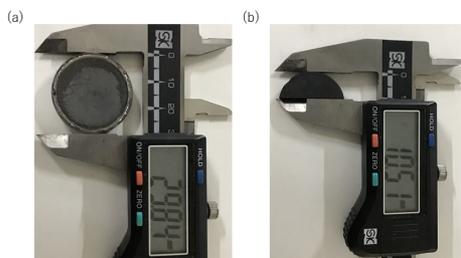


Figure 2: (a)  $MgB_2$  bulk material with SUS ring and (b) precisely machined  $MgB_2$  for undulator prototype.

作成した厚さ 5 mm の試験片 10 個は周期 4 mm のギャップを開けて半周期ずらして一体化を行った。磁場変化を与えて磁束が運動した際の発熱を効率の良く徐熱する必要があるため、純銅および真鍮を支持材として用いた。Figure 3 に  $MgB_2$  アレイの写真を示す。また、Fig. 4 に  $MgB_2$  アレイを挿入するための GM 冷凍機冷却6T ソレノイドの写真を示す。軸上磁場ベクトル計測用ホール素子アレイについては、参考文献[11]を参照されたい。



Figure 3: A stacked  $MgB_2$  array for the undulator prototype.



Figure 4: Photograph of GM cooled 6T solenoid.

### 3. 磁場生成試験

$MgB_2$  超伝導体と希土類銅酸化物超伝導体のアンジュレータピーク磁場特性の比較を行うため、希土類銅酸化物超伝導体として希土類にガドリニウム(Gd)を用いた  $MgB_2$  と同形状の日本製鉄製  $GdBaCuO$  超伝導体®QMGを用いた。アンジュレータ磁場生成と軸上磁場ベクトル計測は以下の手順で行った。

1. 超伝導体アレイを挿入後、ソレノイド初期磁場まで励磁する
2. 超伝導体アレイをヘリウム連続流クライオスタットにより超伝導転移温度以下に冷却する。
3. ソレノイドへの励磁電流をゆっくりと変化させ、バルク内部に遮蔽電流を誘導する。
4. 軸上磁場ベクトル計測用ホール素子アレイをステッピングモーターで駆動しながら磁場計測を行い、その後ホール素子アレイを元の位置まで移動する。
5. 3に戻り、外部磁場強度を掃引し、4の磁場分布計測を繰り返す。

Figure 5 に  $MgB_2$  アレイを用いて計測を行った際の計測データの推移の一例を示す。この例では、1 T まで印加したのち、 $MgB_2$  アレイを 20 K まで冷却し、磁場変化 0.5 T, 1.0 T, 1.5 T, 2.0 T の 4 点で軸上磁場ベクトルの計測を行った。横軸のステップ数は、計測サンプリング間隔(およそ 3 秒)での磁場計測回数を示している。

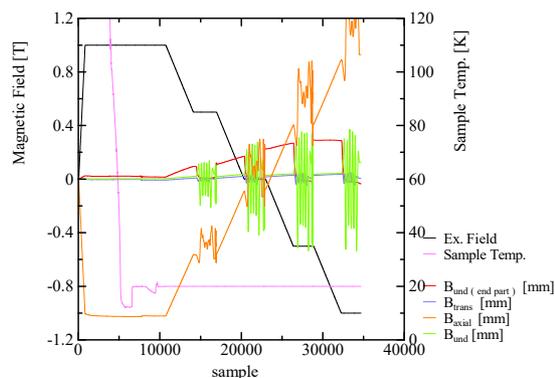


Figure 5: Typical measurement result of undulator field.

## 4. 軸上磁場分布の評価

### 4.1 磁場強度の制御性(MgB<sub>2</sub>)

Figure 5 に示すように、ソレノイドで与える磁場変化量増大に従い、誘導電流が増加しアンジュレータ磁場は強くなる。ただし、超伝導体内には臨界電流密度以上で電流を誘導できないため、磁場変化量を増やすと、外周部から誘導されはじめる遮蔽電流は、次第にバルク中央に近い位置で発生するようになる。そのため、バルク内の誘導電流の重心位置はビーム軸から徐々に離れていき、与えた磁場変化に対するアンジュレータ磁場の比例関係は徐々に悪化し、これ以上誘導電量が流せない状態になるとアンジュレータ磁場は飽和する。Figure 5 の場合、磁場変化 1.5 T まではアンジュレータ磁場の増大が明確に観測されていたが、磁場変化 2.0 T では、ほとんど増加がみられず、遮蔽電流が飽和に至ったと考えられる。

### 4.2 ピーク磁場強度の均一性の比較

ここではMgB<sub>2</sub>バルク超伝導体を用いることで、希土類銅酸化物超伝導体で問題となっていたピーク磁場強度の一様性に改善が見られたかを評価する。

Figure 6 に MgB<sub>2</sub> と GdBaCuO で得られた軸上アンジュレータ磁場を示す。アレイ両端部の大きなピークを除いた、ピーク磁場の一様性に注目すると、GdBaCuO では磁場強度の絶対値の標準偏差が 10% であったのに対し、MgB<sub>2</sub> では標準偏差は 4% と大幅に低減された。なお、磁場強度に関しては超伝導体の臨界電流密度の差が明確に反映されており、MgB<sub>2</sub> で得られたピーク磁場強度はおおよそ 0.3 T とネオジム磁石で得られる磁場強度のおよそ半分となっていた。

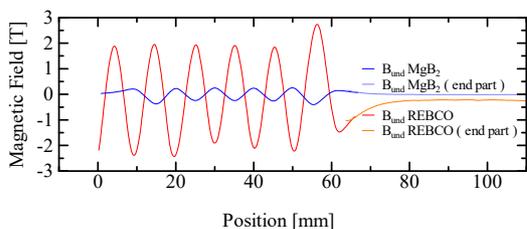


Figure 6: Comparison of on-axis undulator field for MgB<sub>2</sub> and GdBaCuO.

標準偏差の算出に用いたピーク磁場強度の絶対値は、周期数が有限であることに起因し左右両端のピーク磁場強度が若干高くなる影響を含んでいる。左右対称な位置におけるピーク磁場強度の差について評価をおこない臨界電流密度特性のばらつきについて評価を試みた。Figure 7 に MgB<sub>2</sub> および GdBaCuO 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、GdBaCuO ではピークによっては 30% にも達する非常に大きな相違が観測されているのに対し、MgB<sub>2</sub> では相違は最大でも 8% 以内であり、MgB<sub>2</sub> を用いることでピーク磁場強度の一様性の高いアンジュレータ磁場が生成できていることが確認できた。

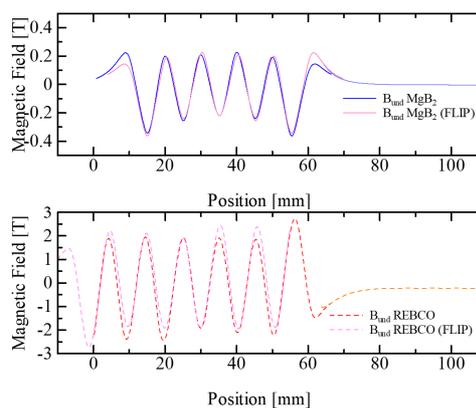


Figure 7: Comparison of flipped undulator field for MgB<sub>2</sub> and GdBaCuO.

## 5. まとめ

MgB<sub>2</sub> は種結晶を用いた疑似単結晶化過程が不要で、結晶成長方位や種結晶からの距離の影響を受けず超伝導体全体で均一な誘導電流が流れることが期待され、また疑似単結晶化の複雑な工程管理が不要でロット間での特性がそろった多数の超伝導体を作成することが比較的容易である。本研究では、MgB<sub>2</sub> バルク超伝導体を用いたアンジュレータ試作機を開発し、実際に磁場を生成し、ピーク磁場強度のばらつきが希土類銅酸化物超伝導体に比べ大幅に抑制できていること確認した。

## 謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP17H01127、JP22H03870 の助成を受け行われた。また、京都大学環境安全保健機構低温物質管理部門による液体ヘリウムの供給が不可欠でした。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- [1] T. Kii *et al.*, Proc. FEL2006 (2006) p. 653.
- [2] T. Kii *et al.*, AIP conf. Proc. SRI2009, Vol. 1234, pp.539-542, (2010).
- [3] R. Kinjo *et al.*, Applied Physics Express vol. 6 042701, (2013).
- [4] J. H. Durrell *et al.*, "A trapped field of 17.6 T in melt-processed, bulk Gd-Ba-Cu-O reinforced with shrink-fit steel", Supercond. Sci. Technol. 27 0820001.
- [5] T. Kii *et al.*, Proc. FEL2010 (2010) p. 648.
- [6] 紀井俊輝, 他, "バルク MgB<sub>2</sub> 超伝導体を用いた放射光発生用アンジュレータの提案", 第 88 回 2013 年度秋季低温工学・超電導学会 2C-a07 P. 117.
- [7] 紀井俊輝, "バルク MgB<sub>2</sub> 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", Proc PASJ2017, TUP020 pp. 347-350.
- [8] 紀井俊輝, "MgB<sub>2</sub> アレイを用いた周期交替磁場の生成", 第 103 回 2022 年度春季低温工学・超電導学会 2B-a10 P. 70.
- [9] J. Nagamatsu *et al.*, Nature 410, pp. 63-64, (2001).
- [10] DC Larbalestier *et al.*, Nature 410, pp. 186-189, (2001).
- [11] 紀井俊輝, "バルク超伝導体アンジュレータのための 3 次元磁場分布計測システム", 第 102 回 2021 年度秋季低温工学・超電導学会 1A-p04 P. 12.