

# バルク $MgB_2$ 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

## POTENTIAL OF BULK $MgB_2$ SUPERCONDUCTOR FOR BULK SUPERCONDUCTOR STAGGARED ARRAY UNDULATOR

紀井俊輝<sup>#</sup>

Toshiteru Kii<sup>#</sup>

Institute of Advanced Energy, Kyoto University

### Abstract

Bulk high-temperature superconductors (HTS) have a large potential for future insertion device because of its extremely high critical current density. For example, in case for rare-earth barium-copper-oxide, its critical current density exceeds  $10 \text{ kA/mm}^2$  below 10 K. This value is much higher than the equivalent current density of NdFe permanent magnet; which is several hundred  $\text{A/mm}^2$  and the engineering current density of superconducting wire of a few  $\text{kA/mm}^2$ . However, it is difficult to obtain large amount of bulk HTSs with same magnetic performance because of its complicated synthesis process; preparation of precursor powder, mixing, sintering, crystal growth, annealing, and precise machining. As a result, reproducibility of bulk HTS pieces is not enough for insertion device. In this work, we focused on  $MgB_2$  bulk superconductor which has no weak-link problem and growth process is not required on synthesis. Transverse magnetic field profile for  $MgB_2$  bulk superconductor array was estimated using a simple numerical model. Relatively small peak field variation that is lower than 1% was estimated for realistic  $MgB_2$  bulk superconductor array.

### 1. はじめに

バルク超伝導体で発生可能な強磁場をアンジュレータに活用できれば、永久磁石や超伝導線材を用いた従来型アンジュレータでの性能限界を大幅に超える短周期・強磁場アンジュレータの実現が期待できる。現在のバルク超伝導体による最高保持磁束密度は2014年にJ. H. Durrell らに報告された希土類銅酸化物系超伝導体を用いて得られた  $17.6 \text{ T}$  となっている[1]。京都大学では、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[2]研究をすすめてきた。この新方式アンジュレータでは環境磁場を変化させた際にバルク超伝導体内部に誘起される遮蔽電流により周期交替磁場を生成するもので、バルク超伝導体辺縁部における高電流密度の誘導電流を高精度に制御することが強磁場・短周期アンジュレータ実現に必要とされている。2012年には、周期  $10 \text{ mm}$ 、磁極間隔  $4 \text{ mm}$  で世界最強となる磁場強度  $0.85 \text{ T}$  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 20%以上超えることに成功した[3]。

その一方、現時点では個々のバルク超伝導体の電流特性にばらつきが残り、極端なものに対する選別を行った後でも電流密度換算でおおよそ 15%と大きなばらつきが残存し、アンジュレータに必要な磁場精度には大きな隔たりが残っている[4]。

そこで我々は磁場精度の改善を目的とし  $MgB_2$  超伝導体に着目し、調査研究を進めてきた[5]。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  $T_c$   $40 \text{ K}$  を持つ  $MgB_2$  超伝導体[6]は、希土類銅酸化物系超伝導体と異なり、結晶粒間の超伝導電流弱結合特性を持たず[7]、結晶成長過程が不要という特徴を持つ。こ

のにより、焼結直後の多結晶体のままアンジュレータへ利用することが可能で、後述する結晶成長に起因する電流特性の異方性や種結晶からの距離依存性が現れない。次節以降では  $MgB_2$  超伝導体の特徴、数値計算モデル、計算結果を示し、最後に  $MgB_2$  超伝導体によるアンジュレータ磁場高精度化について示す。

### 2. $MgB_2$ バルク超伝導体

前節で紹介したように  $MgB_2$  は 2001年に発見された比較的新しい金属系超伝導体である。NbTi や  $Nb_3Sn$  に比べて超伝導転移温度が高く、液体ヘリウムが不要な超伝導線材としての潜在的なポテンシャルを重視し、線材化による実用化研究が進展した。一方、バルク超伝導体として見た場合、 $40 \text{ K}$  の超伝導転移温度は希土類銅酸化物系超伝導体 ( $90 \text{ K}$  程度) に比べ低く、液体窒素冷却の希土類銅酸化物系超伝導体と同等の性能を得るには  $20 \text{ K}$  以下まで冷却することが求められており、液体窒素の代替として液体水素や液体ヘリウムが必要で冷却難易度が高まることから線材化研究と比べると遅れが生じているように見られた。また、 $4 \text{ K}$  といった極低温まで冷却した場合の臨界電流特性についても希土類銅酸化物系超伝導体の半分以下であるほか、磁場中臨界電流密度の低下も顕著で希土類銅酸化物系超伝導体の代替としての性質は備えていないように見受けられることが多かった。

しかし、磁場精度の観点から  $MgB_2$  バルク超伝導体を評価すると、 $MgB_2$  材料の本質に起因する特性から、重要な利点が明確に表れてくる。マクロなサイズの(一つ一つの結晶粒ではなく、線材やバルク体としての)超伝導体としての特性は単結晶としての  $MgB_2$  超伝導体の特性だけではなく、結晶粒界間を超伝導電流が容易に移動できるかどうか極めて重要である。 $MgB_2$  の場合、弱結

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

合と呼ばれる結晶粒間で超伝導特性が弱まる性質が無く[7]、多結晶体のままで連続した超伝導体としての特性が現れる。それに対し、希土類銅酸化物系超伝導体の場合、結晶粒間の接合は基本的に弱結合であり、隣接する結晶の方位をそろえない限り結晶粒をまたいだ優れた超伝導特性を得ることができない。そのため、希土類銅酸化物系超伝導体では、線材ではPVD法などにより配向度の高い結晶を成長させる必要があり、バルク材では多結晶体生成後に種結晶を付けた後、部分熔融を起こし結晶再成長をさせる必要がある。さらに結晶成長の方向(結晶のc軸方向(Cサブグレイン)かa軸方向(Aサブグレイン)か、またサブグレイン境界か)および距離により臨界電流特性に差異が生じてしまう[8]。この異方性は過去にプロトタイプアンジュレータで使用したバルク超伝導体の臨界電流密度にばらつきが生じていた原因の一つとして考えられる。これまでに、 $MgB_2$  バルク超伝導体を用いた場合の磁場分布の均一化については複数の報告あり、円盤形状バルクに対して極めて対称性の良い磁場分布が観測されている[9, 10]。その一方で、円盤からの切り出し素片における臨界電流密度は中心から半径方向と厚さ方向に向かうにつれて性能が低下していく傾向がみられ、中心部と表面最外周部の間にはおよそ25%程度の性能差がみられる[9, 10]。近年の $MgB_2$  バルク超伝導体合成研究の進展は著しく、2013年には直径100 mm×厚さ10 mmの組織内電流特性が均一な大型 $MgB_2$  バルク超伝導体合成が報告されている[11]。再現性に関しては、原料を密閉したうえで加熱合成するPICT (Powder-In-Closed-Tube)法[12]により化学的反応性や原料の精密組成制御が可能になっており、アンジュレータアレイを構成する複数のバルク超伝導体の再現性良い量産が期待される。すでに最大補足磁束密度換算で2%以下のばらつきレベルでの合成再現性が達成されている[13]。

### 3. 数値計算モデル

#### 3.1 バルク超伝導アンジュレータ

バルク超伝導アンジュレータはFigure 1に示すバルク超伝導体と非磁性体スペーサからなるユニットをFigure 2のように交互にスタックし、ソレノイド中に挿入したものである。

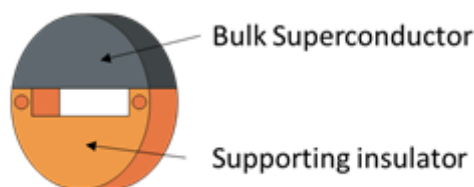


Figure 1: A unit cell of bulk superconducting undulator.

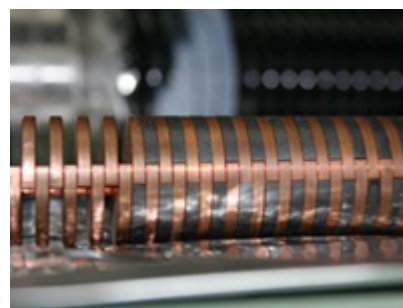


Figure 2: Photograph of stacked bulk superconductor array.

磁場生成の様子を模式的に表した断面図をFigure 3に示す。

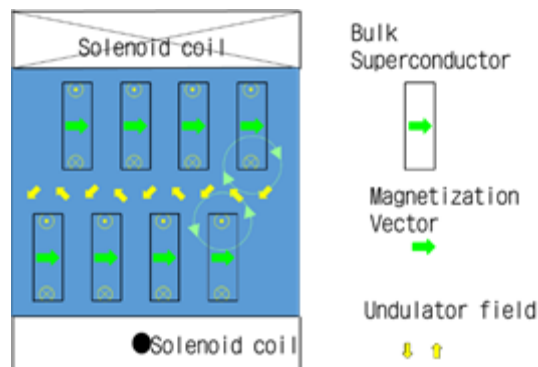


Figure 3: Schematic side view of bulk superconducting undulator. Periodic transverse magnetic field is generated as superposition of magnetic field created by supercurrent in each bulk superconductor.

アンジュレータ磁場の計算には、ループ状誘導電流をモデル化した超高速磁場計算法[14]を用いた。この計算においては、バルク超伝導体素片を複数の同心形状のループ電流とみなし、外部ソレノイドにより与えた磁場変化を打ち消すループ電流の分布を反復計算により決定し、ビオ・サバルの法則により磁場分布を計算する。

#### 3.2 計算条件

Figure 1のユニットの厚さを4 mm、外径を25.2 mmとし、合計100個(50周期)のバルク超伝導体を模擬した。各バルク超伝導体は厚さ方向23層、径方向500層の電流で表現し、全バルク超伝導体中心の磁束密度変化を打ち消すように励起する電流ループの本数を反復計算により決定した。バルク超伝導体の臨界電流密度のばらつきに対する影響を評価するため、基準となる臨界電流密度に対し正規分布で2%から30%の誤差を与えた。基準とした臨界電流密度は、 $MgB_2$ を5 K程度まで冷却した場合を想定し5 kA/mm<sup>2</sup>とした。なお、本来臨界電流密度は磁場の関数としてあらわされるが、磁場依存性を導入すると、電流ループの形状が変化し計算モデルの仮定と矛盾してしまうため、本計算では臨界電流密度の磁場依存性を無視した。また、外場については全領域で均一な磁場とした。

#### 4. 結果と考察

理想的な状態として、臨界電流密度にばらつきがない場合の中央 20 周期分の軸上アンジュレータ磁場を Figure 4 に示す。アンジュレータ磁場は 0.65 T 程度で、500 層のうちおよそ 100 層に電流が励起されていた。次に、臨界電流密度に大きなばらつきがある場合として分散 20% の場合の磁場を Figure 5 に示す。アンジュレータ磁場の分散は 8.7% にも達し、極めて大きな誤差が生じてしまうことがわかる。しかし、与えた分散が 20% に対し半分以下の分散となっており、バルク中心部の磁場変化を抑制するために自発的に励起される電流ループの本数が変化することで発現する誤差抑制効果がみられる。この結果は、アレイ中の 1 つの超伝導体の電流密度を変化させた時に予想された結果[4]とも矛盾していない。

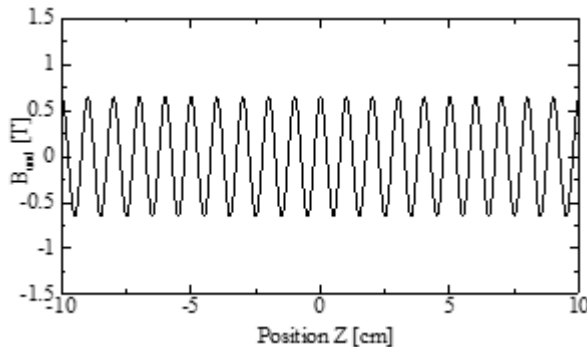


Figure 4: Estimated on axis transverse field. Peak strength is 0.65 T. Critical current density of each bulk superconductor is exactly same.

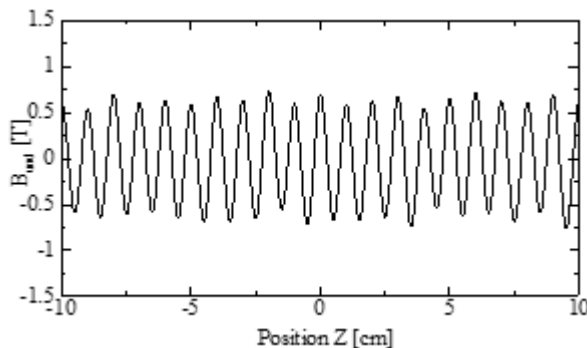


Figure 5: Estimated on axis transverse field when a dispersion of 20% was given for critical current density. Standard deviation on peak field strength is 8.7%.

Figure 6 に与えた分散に対するアンジュレータピーク磁場の分散の推移を示す。各データ点にはループ電流の総数が量子化されていることに起因して約 1.4% の量子化誤差が含まれている。電流密度特性の分散が 5% を下回る場合における誤差圧縮率はこの量子化誤差により決定が困難であるが、分散 10% のときの誤差圧縮効果 (1/5) よりも高い圧縮効果を持つことが推定できる。したがって臨界電流密度の分散が 5% 以下のバルク超伝導体でアレイを構成すれば、ピーク磁場強度の分散は臨界電流密度の分散の 1/5 以下となる 1% 以下が達成でき

る可能性が高い。

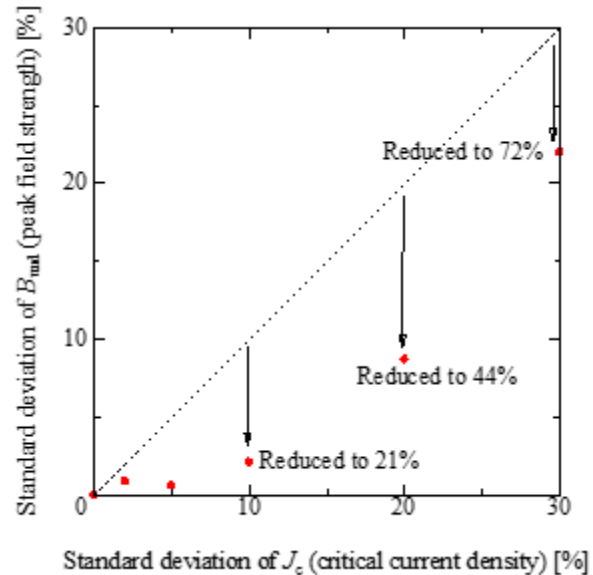


Figure 6: Trend for error reduction as a function of  $\sigma_{J_c}$ . Quantization error of 1.4% is included in each data.

#### 5. まとめ

永久磁石および超伝導線材を用いたアンジュレータにおける材料起因の短周期・強磁場限界を打破することを目指して開発中のバルク超伝導体アンジュレータにおける高精度磁場制御技術の確立に向けて MgB<sub>2</sub> バルク超伝導体の使用について検討を行った。

バルク超伝導体アレイを多数の電流ループで表現し、外部磁場が変化した際に励起される電流ループの分布を計算することでアンジュレータ磁場強度および電流密度にばらつきのある超伝導体でアレイを構成した場合のピーク磁場の分散について評価を行った。温度 5 K の MgB<sub>2</sub> を想定した計算においては 0.65 T のアンジュレータ磁場が予測された。また、臨界電流密度に 2% から最大 30% までの分散を持つアレイに対するピーク磁場特性の変化について評価を行った。

現時点で PICT 法を用いて合成される複数の MgB<sub>2</sub> バルク超伝導体個体間での補足磁場再現性は 2% 以下に抑制されており、1% 以下のピーク磁場強度を達成できる可能性が高い。円盤状 MgB<sub>2</sub> バルク超伝導体の内部における特性差に関しては、中心と表面外周部との比較においては 25% と大きな特性差が残存していることが示唆されているため、自発的にピーク磁場のばらつきが抑制される効果の存在にもかかわらずアンジュレータとしての要求を満たすことは難しい。したがって、PICT 法で単一の円柱状バルクを合成し複数片切出しアレイ構築する手法ではアンジュレータ磁場の高精度化の達成は困難であることが判明した。

今後は、MgB<sub>2</sub> バルク超伝導体を用いた試験機による磁場生成・評価を行い、アンジュレータ磁場高精度化に対する実験的および理論的考察を進める。

## 謝辞

本研究は JSPS 科研費 基盤研究(A) JP 17H01127 の助成を受けたものです。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] T. Kii *et al.*, *Proc. FEL2006* (2006) p. 653.
- [3] R. Kinjo *et al.*, *Applied Physics Express* vol. 6 042701, (2013).
- [4] T. Kii *et al.*, *Proc. FEL2010* (2010) p. 648.
- [5] 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.
- [6] J. Nagamatsu *et al.*, *Nature* 410, pp. 63-64, (2001).
- [7] DC Larbalestier *et al.*, *Nature* 410, pp. 186-189, (2001).
- [8] 小笠原 慶、坂井 直道、村上 雅人, “RE123 バルク超伝導体中のサブグレイン構造”, *日本金属学会誌* 第 66 巻第 4 号(2002) pp. 302-308.
- [9] A. G. Bhagurkar *et al.*, “A trapped magnetic field of 3 T in homogeneous, bulk MgB<sub>2</sub> superconductors fabricated by a modified precursor infiltration and growth process”, *Supercond. Sci. Technol.* 29 (2016) 035008.
- [10] A. Ishihara *et al.*, “Superior homogeneity of trapped magnetic field in superconducting MgB<sub>2</sub> bulk magnets”, *Supercond. Sci. Technol.* 30 (2017) 035006.
- [11] M. Tomita, A. Ishihara, T. Akasaka *et al.*, *EUCAS 2013*, 2A-MA-O3, (2013).
- [12] A. Yamamoto *et al.*, “Synthesis of high J<sub>c</sub> MgB<sub>2</sub> bulks with high reproducibility by a modified powder-in-tube method” *Supercond. Sci. Technol.* 17 921-925.
- [13] A. Yamamoto (Private communication).
- [14] R. Kinjo *et al.*, *Proc. FEL2009*, pp.746-749, (2009).