

# バルク超伝導アンジュレータ試験機のハイブリッド化

## DEVELOPMENT OF PROTOTYPE HYBRID BULK SC UNDULATOR

紀井俊輝<sup>#</sup>  
Toshiteru Kii<sup>#</sup>  
A) RIKEN SPring-8 Center

### Abstract

We have been developing a new type of undulator using bulk superconductor to generate strong magnetic field in short period for the future light sources. The periodic magnetic field of 2.22 T has been generated with a period of 10 mm and a gap of 4 mm at 7 K. In this work, we have tried to enhance magnetic field by combining it with ferromagnetic pieces. In the experiment, we used two type of arrays by inserting thin metal plate between bulk superconductors; one is hybridized with 1 mm-thick YEP-2V and the other with 1 mm-thick non-magnetic brass. The hybridized array showed that the undulator field was enhanced from 2.24 T to 2.54 T with a period of 12 mm.

### 1. はじめに

放射光施設において電子ビームを蛇行させるアンジュレータでは主に永久磁石や超伝導線材が用いられているが、その磁場強度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いるため、今後大幅な磁場強度増大を達成することは難しい。この磁場強度限界を打破するため、我々は温度 10 K 程度でも非常に高い電流密度を達成可能な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いる[1-3]。バルク超伝導体は、塊状の多結晶体の超伝導体であるが、結晶粒界間を流れる超伝導電流を十分高くすることができれば、疑似的な大電流が流れるコイルとみなすことができ、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。これまでに得られている最も高い捕捉磁束密度は希土類銅酸化物系超伝導体で報告された 17.6 T で、永久磁石の磁束密度がおよそ 1 T であるのに対し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(バルク超伝導体スタガードアレイアンジュレータ)を提案し、原理検証試験、試験機の開発を継続してきた。2023 年には温度 7 K にて周期 10 mm、磁極間隔 4 mm の条件で 2.22 T を達成し、永久磁石技術の 3 倍以上の磁場強度を報告した[5]。

### 2. アンジュレータ試験機のハイブリッド化

#### 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3次元模式図を 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ており、超伝導転移したバルク超伝導体内部に外部ソレノイドで磁場変化を与えることで、バルク超伝導体内部に遮蔽電流を誘導し、この電流の作る磁場の重ね合わせとして中心軸上に周期交替磁場を生成する。バルク超伝導体アンジュレータについては文献[6]を参照されたい。

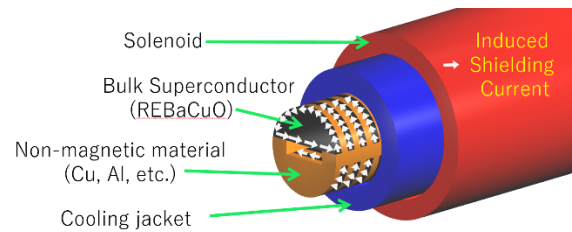


Figure 1: Schematic drawing of bulk SC undulator. Below the critical temperature of superconductor, when the magnetic field is changed, shielding current is induced in each bulk SC materials (white arrow). As the results, on the central axis, periodic magnetic field is generated as a superposition.

#### 2.2 ハイブリッド化アレイ

高い飽和磁束密度を持つ軟磁性材料を組み合わせることで永久磁石型や超伝導巻き線型アンジュレータにおいて磁束集中を強化することで磁場増強が行われている。バルク超伝導体スタガードアレイアンジュレータにおいても同様の構造を導入することで磁場増強できる可能性がある。Figure 2 に、永久磁石型、超伝導巻き線型、バルク超伝導体スタガードアレイ型におけるhybrid構造の断面模式図を示す。

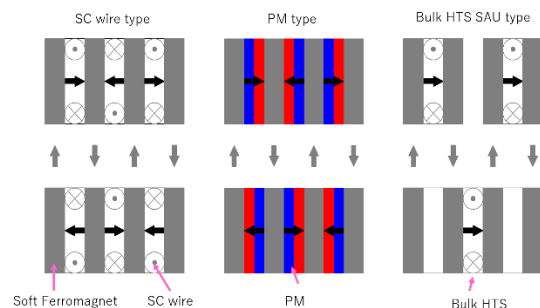


Figure 2: Conceptual diagram for hybrid superconducting wire, permanent magnet, and bulk HTS undulator. Gray rectangles indicate ferromagnetic pieces.

巻き線型や永久磁石型の場合、通電電流の増大や磁極間隔縮小により徐々に強磁性体部が飽和していくが、

<sup>#</sup> t.kii@spring8.or.jp

バルク超伝導体スタガードアレイ型では遮蔽電流の誘導前の初期状態で強いソレノイド磁場を印加するため磁性体の飽和状態が初期状態となる点で動作点が大きく異なる。磁場分布の変化と遮蔽電流の増大が同時に生じるが、三次元有限要素法での予測が困難であり実測により強磁性体の効果を調査することとした。

### 3. 磁場生成試験

#### 3.1 バルク超伝導体アレイ

アレイを構築する材料は超伝導体として日本製鉄製 QMG®GdBaCuO、QMG®DyBaCuO、サポート部材として無酸素銅加工品、ハイブリッド試験用試験片として日立金属パーメンダ YEP-2V、および真鍮加工品を用いた。磁場生成には、以下の3種類の超伝導体アレイを用意した。いずれのアレイも組立後の外径は 25.0 mm で、端部支持体を含む全長はおよそ 80 mm とした。アレイを構成するバルク超伝導体および強磁性体の断面はいずれも同じ準半円状とし、磁場掃引開始時に外部ソレノイドにより与える軸方向磁場の乱れが小さくなるように留意した。

a)



b)



c)



Figure 3: Photograph of bulk HTS array a), b), and c).

- a) 周期 12 mm: YEP-2V 1 mm GdBaCuO 5 mm  
YEP-2V 1 mm 無酸素銅 5 mm
- b) 周期 12 mm: 真鍮 1 mm GdBaCuO 5 mm 真鍮  
1 mm 無酸素銅 5 mm

- c) 周期 7 mm: YEP-2V または 真鍮 1 mm  
DyBaCuO 2.5 mm YEP-2V または真鍮 1 mm  
無酸素銅 2.5 mm

c)のアレイは一つのアレイに YEP-2V 部分と真鍮部分をそれぞれ 3.5 周期ずつ構築し、一度の磁場走査で比較可能なデータの取得が行えるようにした。

Figure 3 に a) ~ c)それぞれのアレイの写真を示す。

#### 3.2 磁場生成・制御手順

アンジュレータ磁場生成・制御は以下の手順で行った。

1. 超伝導転移温度より高い温度を保ち、ソレノイド初期磁場まで励磁する。初期磁場は YEP-2V の飽和磁束密度を超えない 2 T および ソレノイドの最大励磁磁場である 6 T とした。
2. バルク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。(磁場中冷却)
3. ソレノイド励磁電流をゆっくりと変化させ、バルク超伝導体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ったのち原点復帰させる。
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。

なお、今回の計測では液体ヘリウムの残量の都合によりヒステリシス特性の取得等は行わなかった。

### 4. 磁場測定結果と考察

磁場計測の実例を Fig. 4 に示す。横軸は実験開始からの測定回数を示しており、ホール素子アレイの移動の後、ホール素子出力が安定するまでの待ち時間を経て、およそ3秒ごとにデータを取得した。

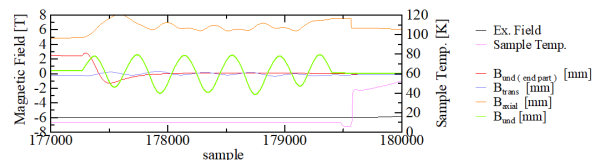


Figure 4: Typical measurement result of undulator field.

周期 12 mm である a)と b)のアレイについては、温度 10 K 初期磁場 2 T および 6 T でデータ取得を行った。また、c)のアレイについては、温度 19 K 初期磁場 6 T の条件でデータ取得を行った。アンジュレータ磁場については、隣接する6つのバルク超伝導体間のピーク磁場強度の絶対値の単純平均を採用した。Figure 5 にソレノイドで与えた磁場変化量を横軸として a)および b)のアレイに対する初期磁場 2 T の、Fig. 6 に 6 T 場合のアンジュレータ磁場走査結果を示す。周期 7 mm の c)のアレイについては、Fig. 7 にアンジュレータ磁場走査結果を示す。

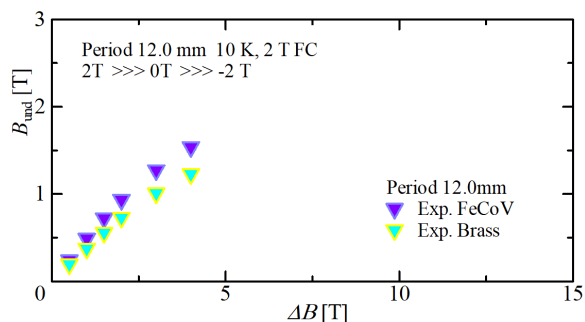


Figure 5: Measured undulator peak field for initial field of 2 T at 10 K.

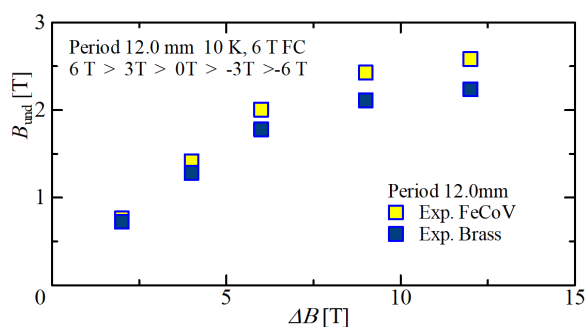


Figure 6: Measured undulator peak field for initial field of 6 T at 10 K.

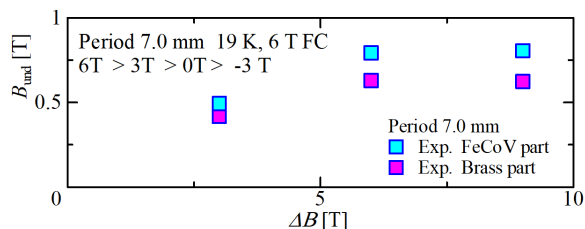


Figure 7: Measured undulator peak field for initial field of 6 T at 19 K.

初期磁場 2 T の場合、およそ 20~30 % の磁場強度の増大が観測されたが、強磁性体の飽和状態から磁場走査を開始した初期磁場 6 T の場合、ソレノイド印加磁場強度が 2 T 程度になるまでは増強効果はほとんど見られず、印加磁場が弱まるにつれて 10 % 程度にまで増強がつづき、さらに逆方向に 6 T まで印加してもその効果は増大し最終的に b) で 2.24 T であったものが a) で 2.54 T となりおよそ 13 % の増強効果が得られた。周期 7 mm の c) のアレイに対しても周期 12 mm 初期磁場 6 T の場合と同様に、ソレノイド印加磁場が減少するにつれ、増強効果が増えていき、ソレノイド磁場を反転させてもその効果は増大しつづけた。Figure 8 に与えた磁場変化に対する増強割合を示す。

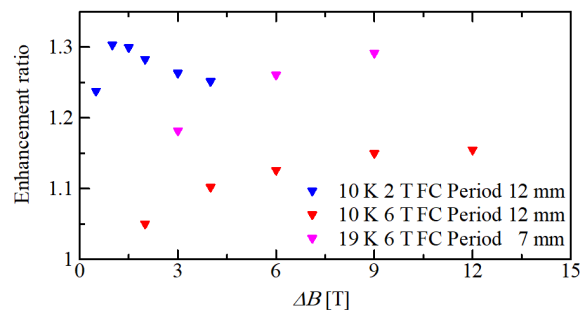


Figure 8: Typical measurement result of undulator field.

初期磁場 6 T においては、強磁性体が完全に飽和した状態から磁場掃引がすすむため、掃引初期は増強効果の生じる余地はほとんどないが、軸方向印加磁場が弱まるにつれて増強効果が徐々に増えていくことが定性的に確認できる。外部ソレノイドの極性切り替えにより磁場印加方向を変化させ、逆方向に飽和磁束密度を大きく超える 6 T が印加されても軟磁性体間に生じている磁束集中効果が維持されており、興味深い結果が得られた。初期磁場 2 T では全域にわたり 20 % 以上の高い増強効果が観測された。軟磁性材料の飽和レベル以上の条件においても高い磁場増強効果が得られており、ハイブリッド化はバルク超伝導体スタガードアレイアンジュレータにおいても有効性が高いことが示された。軟磁性体内部の磁束分布や隣接する超伝導体内部の電流密度分布等については、今後詳細な 3 次元数値解析を進め、理解を深めていく必要がある。また、今回は実験条件の制約のためソレノイド磁場を再度変化させた際のヒステリシス特性測定や、強磁性体内の磁化がゆっくりとした緩和を示すかなどの検証は行えなかった。今後、より長時間の連続計測が可能な体制を整え、改めて計測を行う予定である。

## 謝辞

本研究は JSPS 科研費、JP22H03870 (23K25124) 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: "A Bulk Superconductor and Its Application to Insertion Devices", Proceedings of FLS2023, pp.224-227 (2023).
- [6] 紀井 俊輝: "バルク超伝導体の基礎とアンジュレータへの応用", 加速器 Vol.20 No.1, pp. 10-19, (2023).