

# CALCULATION AND EXPERIMENT FOR IMPROVEMENT OF TERMINATION FIELD OF BULK HTSC STAGGERED ARRAY UNDULATOR

Naoki Kimura<sup>#,A)</sup>, Todhiteru Kii<sup>A)</sup>, Ryota Kinjo<sup>A)</sup>, M.A. Bakr<sup>A)</sup>, Y.W. Choi<sup>A)</sup>, M. Omer<sup>A)</sup>, Kyohei Yoshida<sup>A)</sup>, Keiich Ishida<sup>A)</sup>, Takuya Komai<sup>A)</sup>, Marie Shibata<sup>A)</sup>, Kyohei Shimahashi<sup>A)</sup>, Hidekazu Imon<sup>A)</sup>, Taro Sonobe<sup>A)</sup>, Heishun Zen<sup>A)</sup>, Kai Masuda<sup>A)</sup>, Hideaki Ohgaki<sup>A)</sup>

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

Gokasho Uji, Kyoto, 611-0011

## Abstract

We proposed bulk High-temperature Superconductor Staggered Array Undulator (bulk HTSC SAU) to achieve shorter period and higher undulator field. While studying this undulator, we found that there is a strong vertical (Y-axis) magnetic field on the edge of the undulator and it strongly kicks a trajectory of the electron beam. By using newly developed numerical simulation code based on Bean model, it was found that the strong vertical field could be suppressed by adding bulk HTSC pieces at end of the undulator. Effectiveness of the developed method was also confirmed by experiments.

## 高温超伝導バルク磁石を用いたスタガードアレイアンジュレータの端部磁場補正の計算と実験

### 1. はじめに

京都大学エネルギー理工学研究所では短周期かつ高磁場なアンジュレータとして高温超伝導バルク磁石を用いたスタガードアレイアンジュレータ (Bulk HTSC SAU : Bulk High-Temperature Superconductor Staggered Array Undulator) を提案し開発を行っている<sup>[1]</sup>。bulk HTSC SAU は図 1 のように高温超伝導バルク磁石を配し、その外側に設置したソレノイドコイルを用いて高温超伝導バルク磁石の着磁を行うことでアンジュレータ磁場を得る構造になっている。このときにソレノイドコイルによって発生させる磁場をコントロールすることにより高温超伝導バルク磁石の着磁量制御を行うことが可能であり、それにより機械的な機構なしに K 値を変えることが出来る。

数値計算及び試作機による実験の結果、bulk HTSC SAU の端部において強い縦方向 (Y 方向) 磁場が発生することがわかった。この端部磁場について電子軌道の計算を行ったところ、電子ビームが大きくキックされることがわかった<sup>[2]</sup>。そこで、この端部磁場の補正を行う手法の検討を行った。

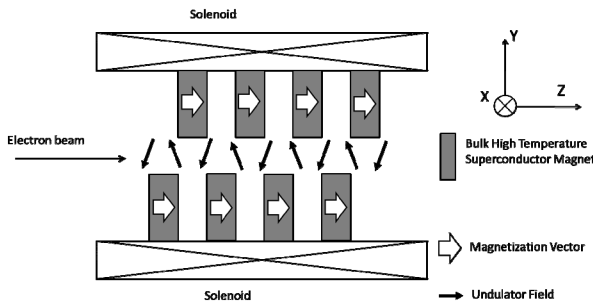


図 1 : bulk HTSC SAU の概要

### 2. 端部磁場補正手法

#### 2.1 Bulk HTSC SAU

超伝導状態に相転位した超伝導バルク磁石では、貫く磁束量が増加すると電磁誘導の法則に従い、内部の磁場を一定に保つようにループ電流が流れ、これにより超伝導バルク磁石は着磁する。bulk HTSC SAU においてはソレノイドコイルを用いて Z 方向の磁場を変化させることにより、各々の高温超伝導バルク磁石が Z 方向に着磁される。高温超伝導バルク磁石は図 1 に示されるように交互に配置されており、これによってアンジュレータ磁場を発生させる。このとき、アンジュレータの中心部においては、近隣の他の高温超伝導バルク磁石の作る磁場によってソレノイドコイルの作る磁場が一部打ち消され、中心部の高温超伝導バルク磁石に実効的に作用する Z 方向の磁場の強度は弱められる。したがって、高温超伝導バルク磁石の着磁量が抑制され、中心部ではアンジュレータ磁場は弱められる。反対に、アンジュレータの端部においては近隣の高温超伝導体の作用が小さくなり、着磁量は大きくなる。数値計算においてもこれを裏付ける結果が得られた。したがってアンジュレータ端部の高温超伝導バルク磁石の着磁量を抑えることで端部のアンジュレータ磁場を補正する手法を検討した。

#### 2.2 端部磁場補正手法

上述の通り、アンジュレータ端部の高温超伝導バルク磁石は近隣の高温超伝導バルク磁石の効果が小さいために強く着磁すると考えられ、数値計算においてもそれを裏付ける結果を得た。アンジュレータ端部に高温超伝導バルク磁石を付加することで、アンジュレータ端部におけるソレノイドコイルの作る磁場を低減させることで、着磁量を低減させる手法を考案した。同時に、アンジュレータ端部の Y 方

向の対称性が向上することからアンジュレータ外部の Y 方向磁場についても補正されることが期待された。

この端部磁場補正手法について数値計算を行い、アンジュレータ磁場の補正が可能であるという結果が得られた。この数値計算にはビーンモデルに基づいた bulk HTSC SAU の磁場計算コードを構築しそれを用いた。ビーンモデルは超伝導体の臨界状態を表すモデルであり、外部磁場が変化するとき超伝導バルク磁石の表面から一定の深さまでの領域に遮蔽電流が流れ、その電流密度(臨界電流密度)は一定とするモデルである(図 4)。数値計算の結果を受けて、この端部磁場補正手法を取り入れた配置の bulk HTSC SAU 試作機の磁場測定を行った。

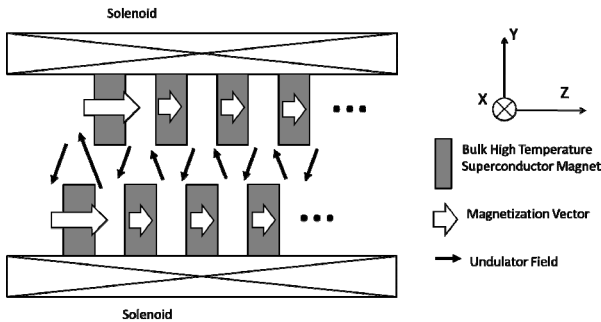


図 2: 端部磁場補正法を用いない場合の端部磁場の状態  
端部の高温超伝導バルク磁石が強く着磁することから端部に強い磁場が生じる。

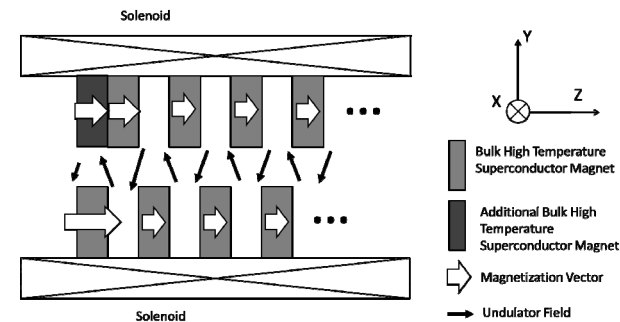


図 3: 端部磁場補正法を用いた場合の端部磁場の状態  
高温超伝導バルク磁石を付加することで、ソレノイド磁場に対する反対磁場を作ることアシストし、着磁量が低下する。これにより端部の磁場が低減される。

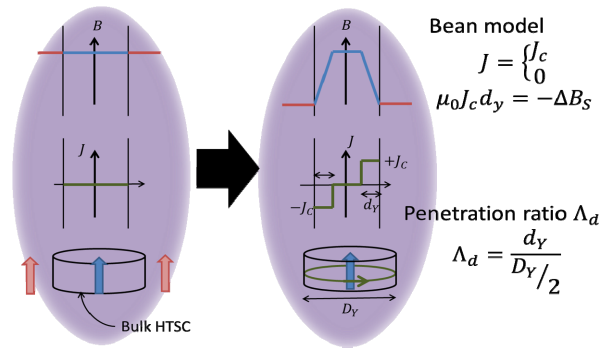


図 4: ビーンモデルの概要

外部磁場が変化したとき、高温超伝導バルク磁石にはその変化を打ち消すように遮蔽電流が流れる。このときに遮蔽電流が一定の深さ ( $d_y$ ) までの領域に流れ、臨界電流密度  $J_c$  を一定とするモデルである。 $d_y$  が大きくなると高温超伝導バルク磁石が大きく着磁していることを表す。

### 3. 結果

実験に用いた bulk HTSC SAU の試作機は、図 5 に示すように直径 25.2mm、周期 5mm、ギャップ 4mm であり、アンジュレータの中心部にホールプローブを挿入することで磁場の測定を行った。実験には 22 個の高温超伝導バルク磁石を使用した。片方の端部の高温超伝導バルク磁石の配置を変更し、2 種類の端部補正の配置について実験を行った。この時の bulk HTSC SAU の端部における高温超伝導バルク磁石の配置と数値計算によって求めた各々の高温超伝導バルク磁石における侵入度(図 4 における Penetration Ratio)  $\Lambda_d$  を図 6,7,8 に示す。測定結果を数値計算の結果とともに図 9,10 に示す。

図 6,7,8 より、高温超伝導バルク磁石を付加することで端部の高温超伝導バルク磁石の侵入度が低減されたことが示された。図 9,10 のグラフの  $Z=30\text{mm}$  付近に示される右端部は補正法を使用していない端部であり、 $Z=25\text{mm}$  付近に示される左端部は補正法を使用した端部である。右端部に見られる大きな磁場ピークが左端部では大きく低減されていることが確認できる。

また、さらに高温超伝導バルク磁石を付加した配置 (C) については、端部磁場の振幅に対する影響は実験においては配置 (B) と比べて有意な差異は見出せなかった。一方で、配置 (B) において  $Z=28\text{mm}$  付近に存在した小さなピークがほとんどなくなり、アンジュレータ入り口付近の Y 方向磁場がフラットな形状になることが確認できた。これは、高温超伝導バルク磁石を付加したことによってアンジュレータ端部の Y 方向対称性がさらに向上し、アンジュレータ外部での Y 方向磁場が打ち消されたことによるものと考えられる。

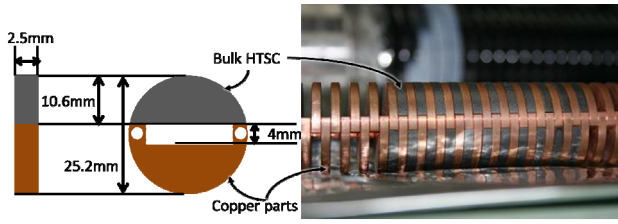


図5：実験用試作機の概略  
左図に示す半円状の高温超伝導バルク磁石と銅パーツを上下方向を交互に変えて並べ、銅パーツで高温超伝導バルク磁石を挟み込むことでアンジュレータを作る。

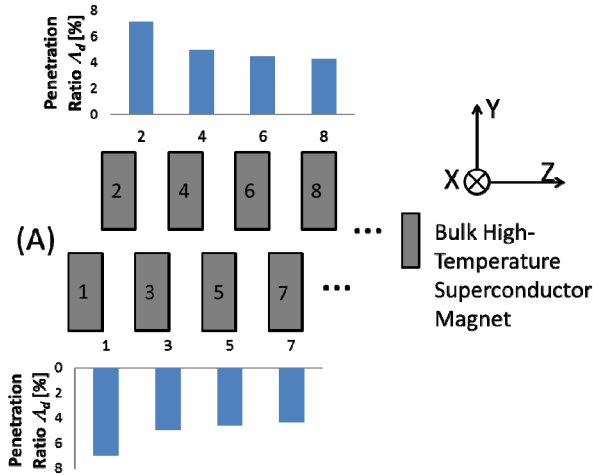


図6：実験を行った bulk HTSC SAU の端部における高温超伝導バルク磁石の配置（端部補正なし）と侵入度

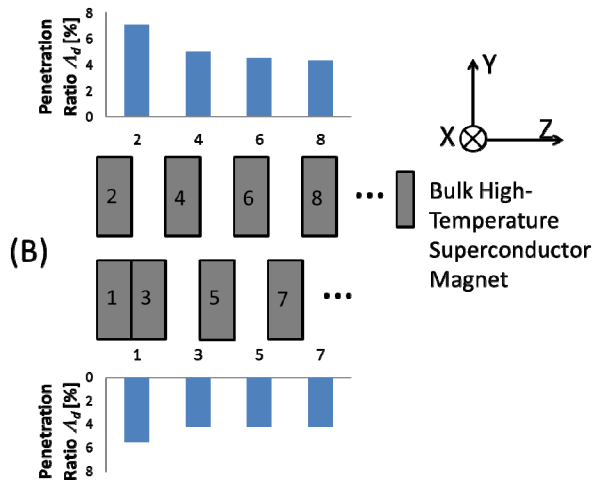


図7：実験を行った bulk HTSC SAU の端部における高温超伝導バルク磁石の配置（高温超伝導バルク磁石を1つ付加した配置）と侵入度

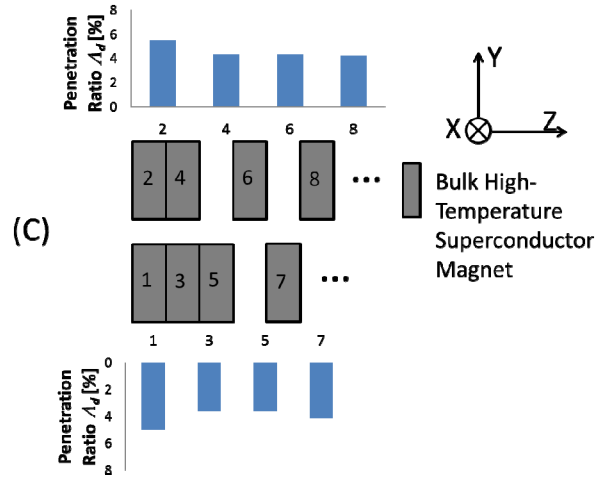


図8：実験を行った bulk HTSC SAU の端部における高温超伝導バルク磁石の配置（高温超伝導バルク磁石を3つ付加した配置）と侵入度

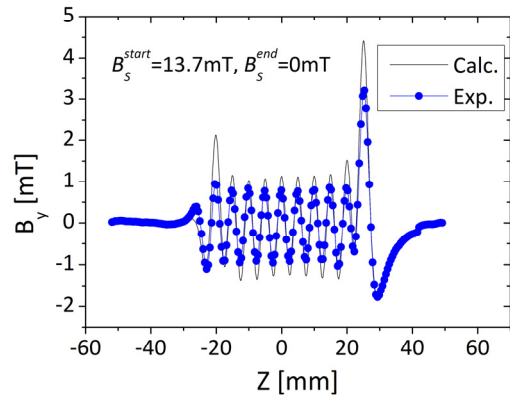


図9：配置(B)による端部補正法の計算及び実験結果  
アンジュレータの左端は  $Z=-25\text{mm}$ 、右端は  $Z=27.5\text{mm}$ 。

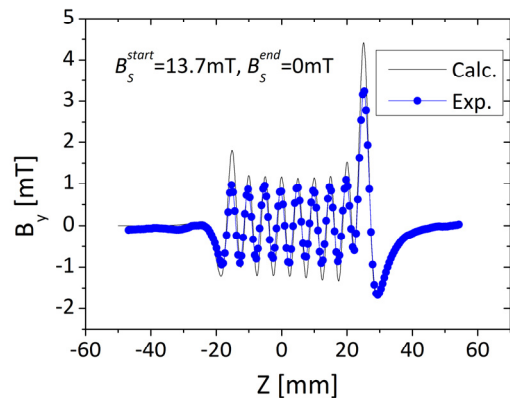


図10：配置(C)による端部補正法の計算及び実験結果

アンジュレータの左端は  $Z=-22.5\text{mm}$ 、右端は  $Z=27.5\text{mm}$ 。

#### 4. まとめ

bulk HTSC SAU の端部に発生する強い Y 方向磁場に対し、高温超電導バルク磁石を端部に付加する補正法を考案し、端部に発生する大きな磁場ピークを低減することができることを実験により確かめた。今回の報告においては Y 方向の磁場補正法について検討を行ったが、今後は Z 方向の磁場補正の手法についても検討を行っていく予定である。

#### 参考文献

- [1] R. Kinjyo, T. Kii, H. Zen, K Higashimura, K Masuda, K. Nagasaki, H. Ohgaki, Y.U. Jeong "BULK HIGH-TC SUPER CONDUCTOR STAGGERED ARRAY UNDULATOR" Proceedings of FEL2008
- [2] 金城 良太, 永原 幸児, 紀井 俊輝, 木村 尚樹, Mahmoud Bakr, 崔 龍雲, Mohamed Omer, 吉田 恭平, 石田 啓一, 駒井 琢也, 柴田 茉莉江, 島橋 享兵, 井門 秀和, 園部 太郎, 増田 開, 長崎 百伸, 大垣 英明, “高温超伝導バルク磁石を用いたスタガードアレイアンジュレータ中の電子軌道解析”, 本年会発表 TUPS077