

VARIATION OF UNDULATOR FIELD IN BULK HTSC STAGGERED ARRAY UNDULATOR

Ryota Kinjo^{1,A)}, Toshiteru Kii^{A)}, Mahmoud A. Bakr^{A)}, Keisuke Higashimura^{A)}, Kyouhei Yoshida^{A)}, Satoshi Ueda^{A)}, Heishun Zen^{B)}, Taro Sonobe^{A)}, Kai Masuda^{A)}, Kazunobu Nagasaki^{A)}, Hideaki Ohgaki^{A)}

^{A)} Institute of Advanced Energy, Kyoto University
Gaksho, Uji, Kyoto, 611-0011

^{B)} UV-SOR, Institute for Molecular Science
38, Nishigo-Naka, Myodaiji, Okazaki, Aichi 444-8585

Abstract

Bulk HTSC Staggered Array Undulator has the possibility for a short-period undulator. However present bulk HTSC magnets have great piece-to-piece variations. Thus we studied the amplitudes and the variations of undulator field in Bulk HTSC Staggered Array Undulator with the different variations of the critical current densities of the bulk HTSC magnets by the experiment with the prototype and the numerical calculation. In this report, we show the dependence property of the amplitudes and the variations of undulator field on the critical current densities.

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における アンジュレータ磁場振幅のばらつきを検討

1. はじめに

京都大学エネルギー理工学研究所では、強磁場・短周期アンジュレータの候補として、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- T_c Superconductor Staggered Array Undulator) を提案している[1]。試作機を用いた実験において、高温超伝導バルク磁石に着磁する磁場が小さいうちは、アンジュレータ磁場振幅は、ソレノイド磁場に比例した。しかし、着磁磁場を大きくすると、アンジュレータ磁場振幅が飽和し始め、ばらつきが大きくなる現象がみられた。この問題の解決策を検討するため、ビーンモデル[2]に基づくアンジュレータ磁場の計算モデルに磁石個々の臨界電流密度を取り入れた計算を行った。アンジュレータ磁場振幅のばらつき、磁石個々の臨界電流密度のばらつき及び着磁磁場の強さへの依存性を調べたので報告する。

2. Bulk HTSC SAU

Bulk HTSC SAUの概念図を図1に示す。白い矢印は高温超伝導バルク磁石の磁化を、黒い矢印はアンジュレータ磁場を表す。着磁磁場を補足し続けるためには超伝導転移温度以下に冷却し続けなければならないため、永久磁石型のように着磁後に組み立てることができない高温超伝導バルク磁石でアンジュレータ磁場を生成するために、この方式が提案された。この方式では、外部のソレノイド磁場により、上下互い違いの構造に並べられた高温超伝導バルク磁石に同一方向の磁場を着磁することでアンジュ

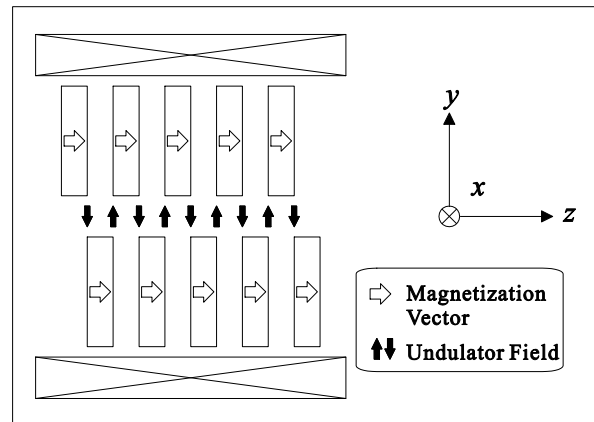


図1 Bulk HTSC SAUの概念図

レータ磁場を生み出す。さらにこの方式には、アンジュレータ磁場振幅を、高温超伝導バルク磁石の磁化をソレノイド磁場により制御することで、アンジュレータ磁場振幅を連続的に可変であるという利点もある。

3. 原理

まず、高温超伝導バルク磁石に着磁を行う原理について述べる。次に、高温超伝導バルク磁石の非飽和状態と飽和状態について述べ、それらがアンジュレータ磁場の飽和と、ばらつきの増大にどのように関係するのかについて述べる。

高温超伝導バルク磁石の着磁の前後を図2の左右に示す。上段は磁場分布、中段は電流分布、下段は高温超伝導バルク磁石を示す。図中の縦線は軸の左

¹ E-mail: r-kinjo@iae.kyoto-u.ac.jp

が高温超伝導バルク磁石の左端、右が右端を表す。着磁のプロセスは、まず左側の状態 ($B_{ex}=0$) で超伝導転移以下まで温度を下げる (ゼロフィールドクーリング)。その後、右側の状態 ($B_{ex}=-B_m$) にする、つまり磁場を印加する。ファラデーの電磁誘導の法則より、磁場変化を打ち消す向きにループ電流が流れる。このループ電流は超伝導電流であるため減衰しない。この時、ビーンモデルによると、ループ電流の電流密度は高温超伝導バルク磁石の臨界電流密度 J_c をとり、 B_m が増加した場合には、電流密度ではなく、電流の流れる領域 d_y が増加することになる。

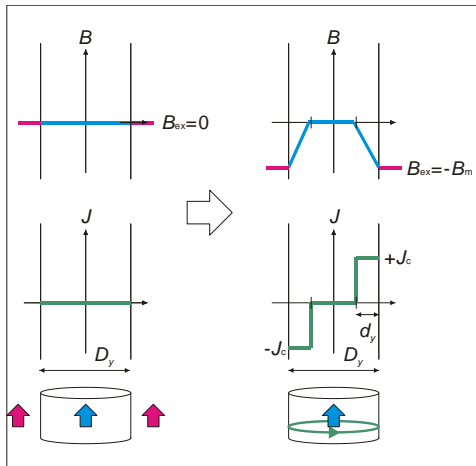


図2 高温超伝導バルク磁石への着磁過程

次に、高温超伝導バルク磁石の着磁における非飽和状態を図3に示す。左側は臨界電流密度が高い高温超伝導バルク磁石 ($2J_c$)、右側は低いもの (J_c) である。ここに、同じだけの磁場を印加すると、左側の高温超伝導バルク磁石には端から d_y まで電流が流れ、右側には $2d_y$ まで電流が流れる。この時、バルクの作る最大磁場はどちらも等しい。つまり、非飽和状態であれば、個々の高温超伝導バルク磁石の臨界電流密度がばらついていても、アンジュレータ磁場はほぼ一样になる。ほぼ一样と述べたのは、高温超伝導バルク磁石の最大磁場を持つ点の電子ビー

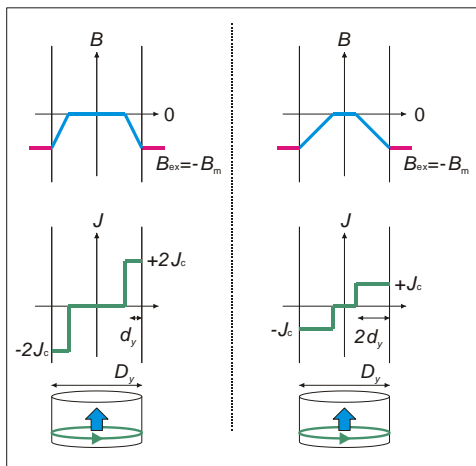


図3 非飽和状態。バルクの作る最大磁場は臨界電流密度に関わらず等しい。

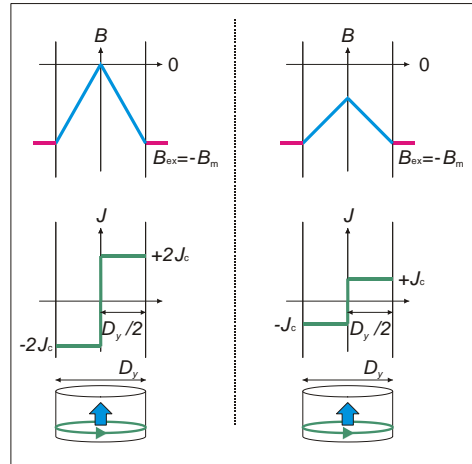


図4 飽和状態。バルクの作る最大磁場は臨界電流密度に依存する。

ム軸からの距離が変化するためである。この最大磁場を持つ点は、アンジュレータのギャップ g とすると、左右のそれぞれで、 $g/2+d_y$ および $g/2+2d_y$ となる。この差が $g/2$ に比べて十分に小さければ、一样と見なせるアンジュレータ磁場が生み出せる。

次に、高温超伝導バルク磁石の着磁における飽和状態を図4に示す。図3の状態から印加磁場を大きくしていった状態を表す。この場合、高温超伝導バルク磁石全体にループ電流が流れている。そのため、左側の高温超伝導バルク磁石の作る最大磁場は、右側の2倍となる。つまり、飽和状態は、アンジュレータ磁場は、個々の高温超伝導バルク磁石のばらつきの影響を大きく受ける。

4. ばらつきの評価方法

Bulk HTSC SAUの11周期の試作機におけるアンジュレータ磁場のばらつきを評価するために、図5のようにピーク値を取り、アンジュレータ磁場振幅 B_0 およびばらつき $B_0^{C.V.}$ を

$$B_0 = \frac{1}{6} \sum_{i=9}^{14} \frac{|P_i - P_{i+1}|}{2}$$

$$B_0^{C.V.} = \frac{1}{B_0} \sqrt{\frac{1}{6} \sum_{i=9}^{14} \left(\frac{|P_i - P_{i+1}|}{2} - B_0 \right)^2}$$

として評価を行った。

4. 実験結果

Bulk HTSC SAUの11周期の試作機において、フィールドクーリングを行った後、印加するソレノイド磁場を変化させていく実験を行った。図6の上図はソレノイド電流を -10 A (高温超伝導バルク磁石を入れずにソレノイドのみの場合に計測した磁場にして -13.7 mT) から -30 A (-41.1 mT) に変化した時の y 方向磁場の z 方向分布の変化の様子である。そこからさらにソレノイド磁場を印加し、ソレノイ

ド電流-100 Aおよび-200 Aにした時の磁場分布を図6の下図に示す。これらの図を見ると明らかにソレノイド電流-100 Aおよび-200 Aでは磁場分布の一樣

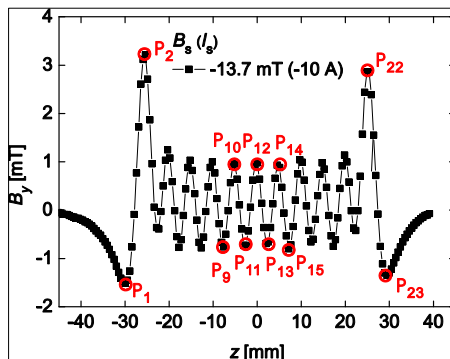


図5 アンジュレータ磁場評価の為のピーク

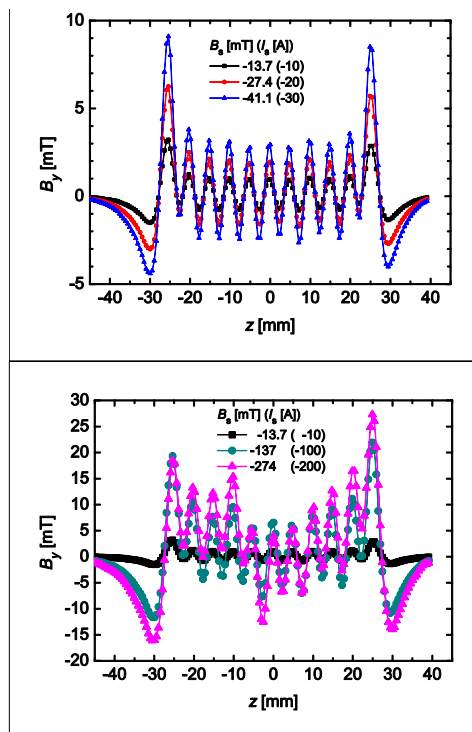


図6 上が弱いソレノイド磁場を印加した場合、下が強いソレノイド磁場を印加した場合

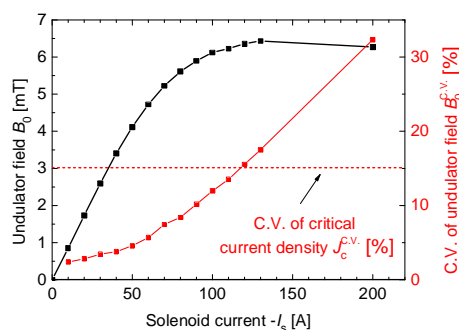


図5 アンジュレータ磁場振幅とばらつきのソレノイド電流依存性。

性が失われていることがわかる。この実験での、アンジュレータ磁場振幅 B_0 およびばらつき $B_0^{C.V.}$ を図7に示す。図中の破線は参考としてこの実験に用いた11周期分(22個)の臨界電流密度のばらつき $J_c^{C.V.} = 15\%$ を示した。高温超伝導バルク磁石の出荷時検査時の最大補足磁場のばらつきを臨界電流密度のばらつきとみなした。アンジュレータ磁場は、ソレノイド電流-50 A程度から飽和し始め、-130 Aでほぼ完全に飽和している。また、ばらつきはソレノイド電流が増えるに従って増大していつている。

6. 計算結果

上記の実験結果と同じ条件で、高温超伝導バルク磁石の臨界電流密度のばらつきを変えて計算を行った結果を図8に示す。計算は平均 $J_c = 100 \text{ A/mm}^2$ で行った。この値は実験で用いた高温超伝導バルク磁石の J_c と同程度である。この結果からばらつきの大きい磁石を用いた場合でも、振幅を犠牲にすればばらつきを抑制できること、ばらつきの小さい磁石を用いればばらつきを抑えたまま

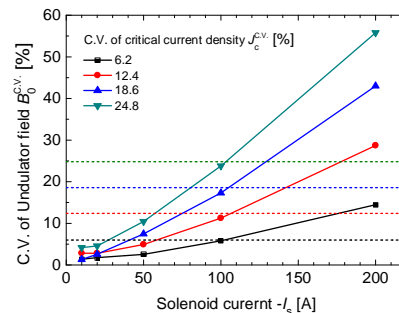


図5 アンジュレータ磁場評価の為のピーク

アンジュレータ磁場振幅を大きくできることがわかる。

6. まとめ

Bulk HTSC SAUにおけるアンジュレータ磁場振幅およびばらつきのバルクのばらつきに対する依存性を調べ、両者がトレードオフの関係にあることがわかった。今後、実機的设计に際し、求めるアンジュレータ磁場振幅を達成し、かつ、シムなどにより補正可能なばらつきの許容範囲に収まるよう、磁石のばらつきの統計データを元に着磁磁場を決める必要がある。

参考文献

- [1] T. Kii, et al., "Design study on high-Tc superconducting micro-undulator", In Proceedings of the 29th Free Electron Laser Conference, pp. 653-655, 2006
- [2] C. P. Bean, "Magnetization of high-field superconductors", Review of Modern Physics, pp. 31-39, 1964