

Design Study on a Short-Period Hybrid Staggered Array Undulator by Use of High-Tc Superconductor Bulk Magnets

Ryota Kinjo^{1,A)}, Toshiteru Kii^{A)}, Heishun Zen^{A)}, Keisuke Higashimura^{A)},
Kai Masuda^{A)}, Kazunobu Nagasaki^{A)}, Hideaki Ohgaki^{A)}, Young Uk Jeong^{B)}

^{A)} Institute of Advanced Energy, Kyoto University

Inst. Advanced Energy, Kyoto Univ. Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011

^{B)} Korea Atomic Energy Research Institute

Abstract

A hybrid staggered undulator by use of high-Tc superconducting bulk magnets has been investigated in Institute of Advanced Energy, Kyoto University. In this report, we show the results of magnetic field calculation. The new undulator can achieve $K = 1$ at the period of 8 mm when it consists of vanadium permendur poles and the superconducting magnets with its critical current density of 5×10^8 A/m². This indicates a possibility of short-period undulator. We also show the experimental setup of magnetic field measurements in 3-periods prototype.

高温超伝導バルク磁石を用いた 短周期のハイブリッドスタガードアンジュレータの検討

1. はじめに

京都大学エネルギー理工学研究所では、短周期アンジュレータの候補として、バルク高温超伝導体磁石を用いたハイブリッドスタガードアンジュレータについて研究を行っている[1]。

バルク高温超伝導体磁石とは、不純物や欠陥を持つ第二種超伝導体中での磁束のピン止め効果を利用した磁石で、従来の永久磁石より1桁大きい磁場を持つ。現在では中心での表面磁束密度が17Tを超える試料が作られている[2]。ただし、バルク高温超伝導体を磁石として使用するためには超伝導転移温度以下に冷却し着磁する必要がある。アンジュレータに超伝導コイルではなくバルクの超伝導体を利用しようという試みは現在までも行われてきているが、その着磁方法が主要な課題となっている[3],[4]。

スタガードアレイアンジュレータでは、交互にスタックされた強磁性体と非磁性体によってソレノイド磁場を歪め、アンジュレータ磁場を作り出す[5]。ハイブリッドスタガードアンジュレータは、スタガードアレイアンジュレータの非磁性体をソレノイド磁場と逆方向の磁化を持つ永久磁石で置き換えることにより、スタガードアレイアンジュレータの弱点である低いアンジュレータ磁場を改善するもので、K値が約40%上昇するという計算結果が報告されている[6]。

バルク高温超伝導体磁石を用いたハイブリッドスタガードアンジュレータ(図1)は、磁石の磁化方向が単一方向でよいというハイブリッドスタガード構造の利点によってバルク高温超伝導体磁石の着磁方法の問題を解決し、永久磁石よりさらに強力な磁石で非磁性体を置き換えることにより、永久磁石を

利用した通常のハイブリッドスタガードアンジュレータより高いK値を得ることが期待できる。それゆえ短周期のアンジュレータになる可能性がある。

本研究では、バルク高温超伝導体磁石を用いたハイブリッドスタガードアンジュレータの特性と短周期化の可能性を調べるため、バルク高温超伝導体磁石の特徴的な磁場分布および静磁場計算コードRadiaを用いてアンジュレータ磁場の計算を行った。

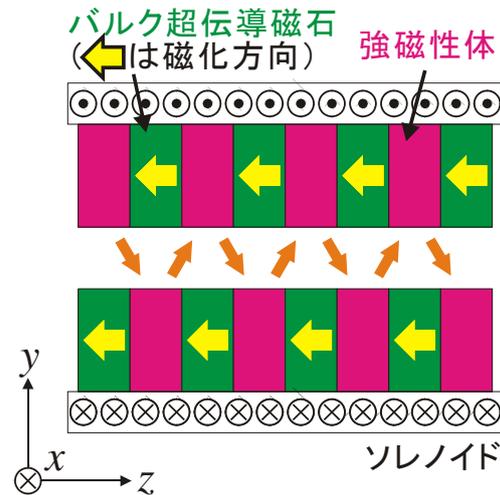


図1 バルク高温超伝導体を用いた
ハイブリッドスタガードアンジュレータ

2. 静磁場計算

バルク高温超伝導体磁石を用いたハイブリッドスタガードアンジュレータの磁場計算を、表1に示す

¹ E-mail: r-kinjo@iae.kyoto-u.ac.jp

パラメータを用いてRadiaで行った。RadiaはEuropean Synchrotron Radiation Facilityで開発された磁場計算コードである。臨界電流モデルによるとバルク高温超伝導体に捕捉できる表面磁束密度は、超伝導臨界電流密度 J_c およびバルク体のサイズによって決まる。超伝導材料の精力的な研究によって希土類、バリウム、銅酸化物からなるバルク高温超伝導体において数Tの磁場中で $1 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ (4.2K)、 $5 \times 10^8 \text{ A/m}^2$ (63K)もの臨界電流密度を持つ材料がつけられている[7]。本研究においては液体窒素の融点(63K)付近で得られる $5 \times 10^8 \text{ A/m}^2$ 以下の臨界電流密度を仮定して計算を行った。

図2に、ソレノイド磁場に対するアンジュレータ磁場の依存性を示す。また図3に、それぞれの磁石の強さでの、ソレノイド磁場によって変えることのできるK値の範囲を示す。K値は電子ビームの蛇行を特徴付けるパラメータで、アンジュレータ光の波長を λ 、ローレンツファクターを γ とすると、

$$\lambda = \lambda_u (1 + K^2/2) / (2\gamma^2)$$

の関係がある。アンジュレータとして主に使われるK値1付近となるアンジュレータ磁場が発生できている。またソレノイド磁場によってK値を変えられることができるというスタガードアレイアンジュレータの特徴も持っていることがわかった。

図4に、同じ周期とギャップ3.6mmの永久磁石型アンジュレータのデータと比較した。点がバルク高温超伝導体磁石を用いたハイブリッドスタガードア

ンジュレータ、黒い破線がSPring8で開発された永久磁石を真空中に並べ狭いギャップを実現した真空封止型アンジュレータ、赤い実線が永久磁石を冷却

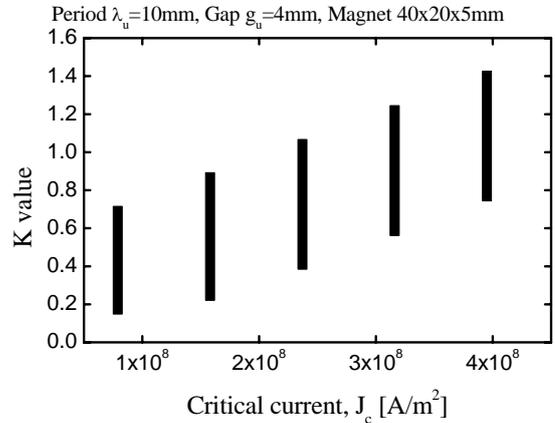


図3：ソレノイド磁場で可変なK値の範囲

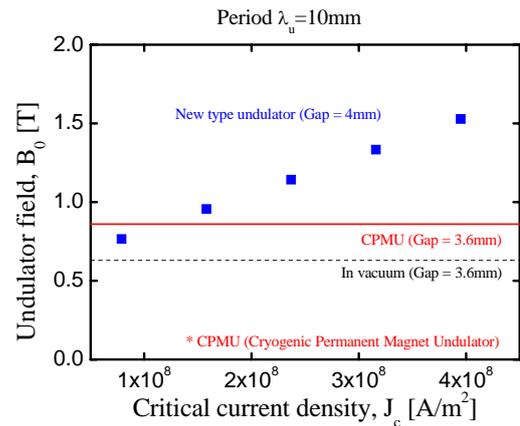


図4：永久磁石アンジュレータとの比較

表1：計算パラメータ

周期, λ_u	4 - 16	mm
ギャップ, g_u	4	mm
周期数, N	20	
磁石の大きさ	(40, 20, 2-8)	mm
強磁性体の大きさ	磁石と同じ	
臨界電流密度, J_c	$< 1 \times 10^9$	A/m^2
ソレノイド磁場, B_s	0 - 20	T

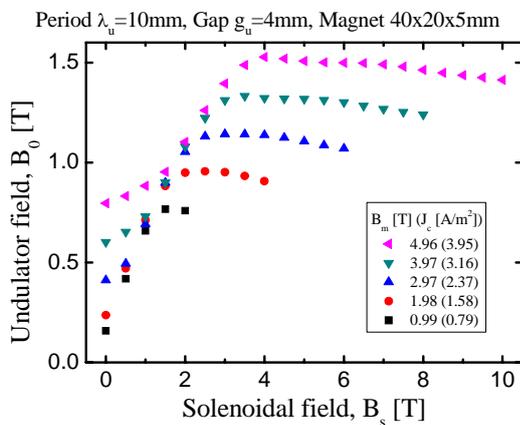


図2：ソレノイド磁場依存性

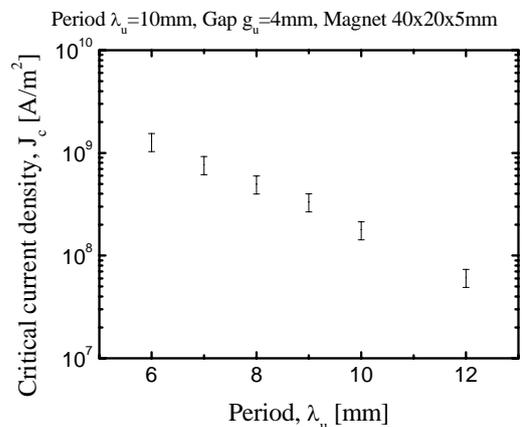


図5：短周期化に必要な臨界電流密度

することで飽和磁化および保持力を上昇させるCPMU (Cryogenic Permanent Magnet Undulator) である[8]。 $2 \times 10^8 \text{ A/m}^2$ の臨界電流密度があればこれら永久磁石型アンジュレータより強いアンジュレータ磁場を発生させることができるという結果を得た。

図5に、周期とその周期で $K=1$ を達成するために必要な臨界電流密度 J_c との関係を示す。 $5 \times 10^8 \text{ A/m}^2$ で周期8mmという短周期を得る。

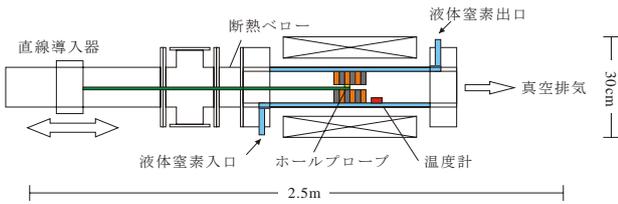


図6：試作機

3. 試作機の製作状況

前章でバルク高温超伝導磁石を用いたハイブリッドスタガードアンジュレータの静磁場計算結果をもとに短周期化の可能性を示した。計算ではバルク高温超伝導磁石の磁場分布は臨界電流モデルにもとづき幾何的な中心部分で最大値を取り、磁場勾配が臨界電流密度で一意に決まるようなモデルを用いた。しかしながら、ハイブリッドスタガード構造においてバルク高温超伝導磁石を着磁する場合に、周囲のバルク高温超伝導体との相互作用や、強磁性体の影響により、単体で着磁した場合と異なった磁場分布になると考えられる。また逆磁場を印加することにより、バルク高温超伝導磁石内の磁化が変化すると考えられる。そのような影響は計算には含まれていない。そこで現在、計算では無視したこれらの影響を調べるために、バルク高温超伝導磁石を用いたハイブリッドスタガードアンジュレータの試作機を開発中である。

図6に試作機の概略図と写真を示す。真空ダクトの内側に、バルク高温超伝導体である厚さ2.5mm、直径25mmの半円形のDyBaCuOが銅のポールによって固定されている。真空ダクトは外壁と内壁の間に液体窒素を流せる構造になっており、内壁と銅のポールとの接触によりバルク体を冷却する。バルクの温度は内壁に設置された温度計によって計測する。真空ダクトの内壁は真空断熱され、外壁にはグラスウールがまかされている。その外側に0.05Tのソレノイドコイルが設置されている。また直線導入器の先

端には極低温用のホールプローブが固定されている。着磁方法は以下のとおりである。外部からソレノイド磁場を印加した状態で、バルク体を液体窒素によって超伝導臨界温度(約91K)以下まで冷やす。するとソレノイド磁場を消しても磁場がバルク内にピン止めされた状態となる。これをフィールドクーリングという。

試作機で行う実験については次のとおりである。まず強磁性体を挟まずバルクのみを並べた場合にバルク同士の相互作用によりバルクに着磁分布がどのように変化するかを調べる。次に強磁性体をはさんだ場合についてバルクに着磁分布がどのように変化するかを調べる。着磁したバルク高温超伝導磁石によってできるアンジュレータ磁場を直線導入器の先につけた極低温用ホールプローブで計測する。

4. まとめ

バルク高温超伝導磁石を用いたハイブリッドスタガードアンジュレータは、ソレノイドによる一方方向の磁場で着磁ができるため着磁に機械的機構が必要なく、ソレノイド磁場によりアンジュレータ磁場を変更でき、永久磁石アンジュレータより強いアンジュレータ磁場を発生でき、短周期アンジュレータの候補となりうることを磁場計算の結果をもとに報告した。

また、試作機の製作状況を報告した。予定している着磁試験の、フィールドクーリングの方法、バルク高温超伝導磁石のみを並べた場合の計測、強磁性体を挟んだ場合の計測について述べた。

参考文献

- [1] T. Kii, et al., "Design Study on High-Tc Superconducting Micro Undulator", Proceedings of FEL 2006 pp. 653-655, 2006.
- [2] M. Tomita, et al., "High-Temperature Superconductor Bulk Magnets That Can Trap Magnetic Fields of over 17 Tesla at 29K", Nature vol. 421 pp. 517-520, 2003.
- [3] T. Tanaka, et al., "Application of High-Temperature Superconducting Permanent Magnets to Synchrotron Radiation Sources", Physical Review ST-AB7, 090704 (2004), 2004.
- [4] T. Tanaka, et al., "Pure-type Superconducting Permanent-Magnet Undulator", Journal of Synchrotron Radiation (2005). 12, pp. 442-447, 2005.
- [5] S. Sasaki, "The Possibility for a Short-Period Hybrid Staggered Undulator", Proceedings of 2005 Particle Accelerator Conference (2005) pp. 982-984, 2005.
- [6] Y.C. Huang, et al., "Compact Far-IR FEL Design", Proceedings of the Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A318 (1992) 765-771, 1992.
- [7] M. Morita, et al., "Development of Oxide Superconductors - High Tc Bulk Superconductor, QMG, and Its Magnetic Applications", Nippon Steel Technical Report No.93 January 2006 pp. 18-23, 2006.
- [8] T. Hara, et al., "Insertion Devices of Next Generation", Proceedings of APAC 2004 pp. 216-220, 2004.