様式Ｃ－１９

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成２４年　５月３１日現在

機関番号：１４３０１
研究種目：基盤研究　（Ｂ）
研究期間：２００９～２０１１
課題番号：21340057
研究課題名（和文）　バルク超伝導体を用いた新型短周期アンジュレータ

研究課題名（英文）　Short Period Undulator Using Bulk Superconductor

研究代表者
紀井　俊輝（KII TOSHITERU）
京都大学・エネルギー理工学研究所・准教授
研究者番号：30314280

研究成果の概要（和文）：
次世代の放射光発生装置で要求される強磁場・短周期の周期磁場生成をめざし、バルク超伝導体を用いた新しい方法について研究を行った。バルク超伝導体をソレノイド磁石中に周期的に配置するシンプルな構造のアンジュレータの開発を行い、温度６Ｋの環境下で、磁極間隔 4 mm、周期 10 mm、磁場強度 0.85 T の強力な周期磁場生成に成功した。本研究により、次世代放射光発生装置の性能を格段に高める基盤技術が確立された。

研究成果の概要（英文）：
Generation of strong periodic magnetic field in short period is important technology for advanced light sources such as free electron lasers and synchrotron radiation facilities. In this work, a new type of undulator using bulk high-Tc superconductors (HTS) and a solenoid magnet was developed. Undulator field strength of 0.85 T with period length of 10 mm and gap width of 4 mm was achieved. Through the research, fundamental technology for future undulator was established.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合　計
２００９年度	10,200,000	3,060,000	13,260,000
２０１０年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
２０１１年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総　計	15,200,000	4,560,000	19,760,000

研究分野：数物系
科研費の分科・細目：物理学　　素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理
キーワード：放射光・バルク超伝導体

１．研究開始当初の背景

次世代の放射光として波長・偏光可変、極短パルス、コヒーレンス、自由なパルス構造、といった特徴を持つ光源の開発が強く望まれている。X線領域における次世代放射光の応用範囲は、X線構造解析、物性研究、材料開発をはじめとし、極めて広い領域に広がり、世界各国で積極的な開発が推進されている。

ここに示した次世代放射光は、加速器を用いた超高輝度電子ビームを磁場中で蛇行させて発生する放射光を利用し、コヒーレント光を生成するものであるが、電子－陽電子衝突リニアコライダー向けの加速器開発の進展にともないピーク電流 1 kA を超えるような超高輝度電子ビームの生成が可能になったことが、光源開発のひとつのブレークスル

ーとなっている。その一方でもうひとつの基盤技術であるアンジュレータに関しては、真空封止永久磁石アンジュレータが開発されるといった成果はあるものの、ネオジム永久磁石を用いた場合でも生成可能な磁場強度は磁石特性の制約により 1T 程度が限界で、放射光の特性を決めるK値を1近傍に保ったまま周期を1cm以下にすることはできない。1T を超えるアンジュレータ磁場の生成が実現できれば、アンジュレータの更なる短周期化が可能になり、次世代放射光発生装置の小型化や放射光の短波長化が可能になり、新たな技術開発が望まれていた。

２．研究の目的

本研究ではバルク酸化物超伝導体をソレノイド中にスタックすることで、ビーム軌道上に強力な交代磁場を生成する世界初の手法を用いることで、アンジュレータによる電子ビーム蛇行技術を格段に進歩させ、次世代放射光装置の格段の高性能化・小型化へ寄与する短周期・強磁場アンジュレータを実現することを目的とした。

３．研究の方法

本研究で提案するバルク酸化物高温超伝導体を用いた方式では、第二種超伝導体のピン止め効果による高い磁場捕捉性能を用いることで、電子ビーム軌道上への強い交番磁場の生成が期待できる。本研究の研究期間中には、新型アンジュレータ実現に向け以下のポイントに絞り研究をおこなう。

（１）小規模プロトタイプによる磁場生成試験を行い、実用機制作に不可欠な数値予測モデルを確立する。

（２）数値予測モデルに基づき、周期数を増やした放射光生成試験用モデル機に拡張する。

（３）加速器起因の放射線環境下での磁場捕捉性能変化について評価を行う。

４．研究成果

本研究により、バルク超伝導体を用いた新しい原理に基づく、短周期・強磁場のアンジュレータ磁場生成技術を確立することができた。得られた磁場強度は、既存の他の方式（永久磁石利用型・巻線型超伝導電線型）で到達可能な値を超えており、次世代の放射光施設の大幅な性能向上や小型化に貢献できる可能性が高い。具体的な研究成果は３．の研究の方法に示した（1）～（3）についてそれぞれまとめる。

（１）液体窒素温度 77 K での運用が可能な22周期のGdBaCuOバルク超伝導体から構成されるプロトタイプを用いて磁場生成試験を実施した。周期は 5 mm、磁極間隔は 4 mm とした。図１ にプロトタイプの概略図を示す。

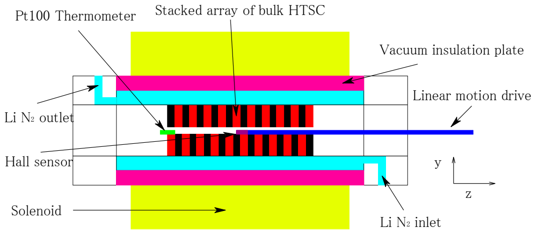

図１ プロトタイプの概略図

ソレノイドコイルの中心にGdBaCuO超伝導体と銅スペーサ―を交互にスタックし、液体窒素冷却により超伝導転移させた後、外部磁場強度を変化させ周期磁場の生成を行った。周期磁場の強度は 0-5 mT の間で制御可能であった。

当初の想定通り、外部磁場の印加によりバルク超伝導体内部に超伝導電流が誘起され、周期磁場の生成が可能であることを確認することができた。この結果に基づき、バルク超伝導体内部に誘起されるループ電流をモデル化した数値計算コードの開発を行った。その結果、実験で計測された磁場分布を定性的に再現可能であることが確認できた。

アンジュレータの両端の周期磁場の振幅が中心部分に比べおよそ2倍と大きくなる現象が観測され、数値計算モデルを用いて評価を行ったところ、アンジュレータ端部ではバルク超伝導体内部の磁束密度の変化を最小化するためにより多くの永久電流が誘起される必要があることが明らかになった。そこで、端部の磁場強度を中央部と揃えるためのバルク体の配置方法について数値モデルを用いて検討を行った。さらに検討に基づき超伝導体を配置し磁場生成試験を行ったところ、予測通りの磁場補正効果が得られることを確認することができた。

磁場生成試験と数値モデルの開発を並行して行うことで、新しい原理に基づく周期磁場生成の基礎的な知見を確立することができた。

（２）前項では、液体窒素温度 77 K での運用であったため、超伝導体の臨界電流密度が低く、放射光発生で必要とされる強力な磁場の生成ができなかった。そこで、ヘリウム冷却連続流クライオスタットを用い 10 K 以下までサンプルを冷却可能な放射光生成試験用モデル機の開発を行った。また、バルク超伝導体から試験片を切り出し、物理特性計測装置 PPMS を使用して 77 Kから 4 Kの温度領域における磁場中での臨界電流密度の評価を行った。その結果、30 K以下の温度領域で運用することで、既存の永久磁石を用いたアンジュレータで到達可能な短周期での磁場生成が可能であることという予測結果を得た。

この結果にもとづき、6 周期で構成される試験機の製作を行った。磁場変化を与えるソレノイドは最大励磁磁束密度 2 T の超伝導

ソレノイドを用いた。放射光発生で実用的な磁場強度を達成するために、周期はプロトタイプでは 5mm であったのに対し、10 mm へと拡張した。磁極間隔については、ホール素子を用いた磁場計測を行うため、4 mm とした。図 2 に運転温度 10 K での磁場生成試験の結果を示す。ソレノイドで与えた磁場変化量に比例してアンジュレータ磁場強度が変化している。4 T の磁場変化を与えた条件では、周期磁場の振幅は 0.85 T に達し、この値は既存の永久磁石や超伝導巻線型のアンジュレータで到達可能なレベルを上回るものであった。

低温領域での磁場生成に成功したことにより、バルク超伝導体を周期的にスタックし、外部磁場を変化させることで超伝導電流を誘起し、短周期・強磁場のアンジュレータとする基本原理の実証を行うことができた。

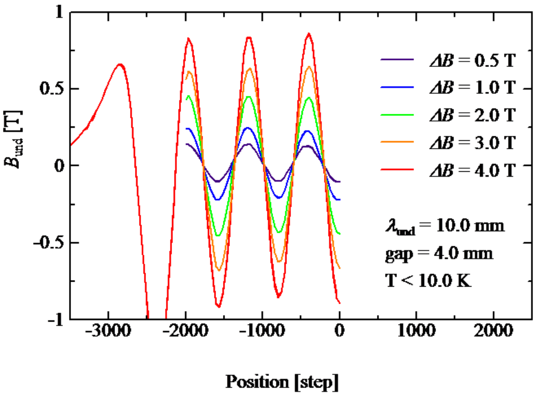

図２　低温での磁場生成試験の結果

（３）バルク超伝導体の作製技術は年々進歩しているものの、依然として製品間の臨界電流密度のばらつきは数 10%であり、アンジュレータのような精密な周期磁場の生成を必要とする装置に対しては十分とは言えない。

まず、個々のバルク超伝導体の臨界電流密度の違いがアンジュレータ磁場のピーク値のばらつきに与える影響を（１）で開発した数値モデルを用いて評価した。その結果、臨界電流密度に差があっても、バルク超伝導体内部に流れる電流の総量の変化は少なく、磁場振幅に与える影響は臨界電流密度のばらつきの 1/5 から 1/7 に抑制されることが明らかになった。この特性は、精密な磁場生成が必要とされるアンジュレータへの応用において大きな利点となっている。ただし、現在のバルク超伝導体の作製技術でも磁場の均一度 1%を得るのは大幅な選別を必要とし、製造後に臨界電流密度を制御する手法の開発は重要である。粒子線照射により超伝導体中にピン止めセンターを導入する方法が知られており、この原理を用いて臨界電流密度の向上および均一化を行う方法について調査を行った。

これまでに報告されていた重粒子線照射によるピン止めセンターの導入は主に薄膜状の超伝導体を対象としていたが、アンジュレータで用いるバルク超伝導体に対しては表面近傍のみにしかピン止めセンターが導入できない。そこで、ピン止めセンター生成の効率は劣るものの、バルク超伝導体内部に均一にピン止めセンターを導入できる 200 MeV 陽子ビームの照射による特性制御を試みた。

その結果、臨界電流密度のばらつきの抑制および向上に効果があることが確認できた。この成果については、「バルク超伝導体の臨界電流密度制御方法、及びアンジュレータ用バルク超伝導体の製造方法」として特許出願を行った。

研究開始前に想定していた性能劣化に関しては、放射光発生施設では問題にならず、逆にピン止めセンターの生成により性能は向上することが判明した。

５．主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計１０件）

1. T. Kii, R. Kinjo, N. Kimura, M. Shibata, M.A. Bakr, Y.W. Choi, M. Omer, K. Yoshida, K. Ishida, T. Komai, K. Shimahashi, T. Sonobe, H. Zen, K. Masuda, and H. Ohgaki, “Low-Temperature Operation of a Bulk HTSC Staggered Array Undulator”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, in press.　査読有り
10.1109/TASC.2011.2180498

2. N. Kimura, M. A. Bakr, Y.W. Choi, H. Imon, K. Ishida, T. Kii, R. Kinjo, K. Komai, K. Masuda, H. Ohgaki, M. Omer, S. Shibata, K. Shimahashi, T. Sonobe, K. Yoshida, “Improvement of Termination Field of Bulk HTSC Staggered Array Undulator”, Proc. of the FEL2011, in press.　査読有り

3. R. Kinjo, M. A. Bakr, Y.W. Choi, T. Hori, H. Imon, K. Ishida, T. Kii, N. Kimura, K. Komai, K. Masuda, K. Nagasaki, H. Ohgaki, M. Omer, S. Shibata, K. Shimahashi, T. Sonobe, K. Yoshida, “Enhancement of Undulator Field in Bulk HTSC Staggered Array Undulator with Hybrid Configuration”, Proc. of the FEL2011, in press.　査読有り

4. T. Kii, R. Kinjo, M.A. Bakr, Y.W. Choi, K. Yoshida, S. Ueda, M. Takasaki, K. Ishida,

N. Kimura, T. Sonobe, K. Masuda, H. Ohgaki, "Conceptual Design of a Novel Insertion Device using Bulk Superconducting Magnet", Physica C, 471, pp. 897-900, (2011) 査読あり
10.1016/j.physc.2011.05.083

5. T. Kii, R. Kinjo, "Application of Bulk High-temperature Superconductor to Insertion Device for Synchrotron Radiation", 低温工学 46 3, pp. 118-124 (2011) 査読有り

6. R. Kinjo, M. A. Bakr, Y.W. Choi, K. Ishida, T. Kii, N. Kimura, K. Masuda, K. Nagasaki, H. Ohgaki, T. Sonobe, M. Takasaki, S. Ueda, K. Yoshida, "STUDY OF PERFORMANCE OF BULK HTSC STAGGERED ARRAY UNDULATOR AT LOW TEMPERATURE", Proc. of the FEL2010, pp,679-682 (2010) 査読有り

7. T. Kii, M. A. Bakr, Y.W. Choi, K. Ishida, N. Kimura, R. Kinjo, K. Masuda, H. Ohgaki, T. Sonobe, M. Takasaki, S. Ueda, K. Yoshida, "A STUDY ON FIELD ERROR OF BULK HTSC STAGGERED ARRAY UNDULATOR ORIGINATED FROM VARIATION OF CRITICAL CURRENT DENSITY OF BULK HTSCS", Proc. of the FEL2010, pp.648-651 (2010) 査読有り

8. R. Kinjo, M. A. Bakr, K. Higashimura, T. Kii, K. Masuda, K. Nagasaki, H. Ohgaki, T. Sonobe, S. Ueda, K. Yoshida, H. Zen, "Numerical Evaluation of Bulk HTSC Staggered Array Undulator by Bean Model", Proc. of the FEL 2009, pp.746-749 (2009) 査読有り

9. Toshiteru Kii, Ryota Kinjo, Mahmoud A. Bakr, Taro Sonobe, Keisuke Higashimura, Kai Masuda, Hideaki Ohgaki, Kyohei Yoshida, and Heisyun Zen, "Proposal of a Bulk HTSC staggered array Undulator", AIP Conf. Proc. 1234, pp. 539-542 (2009) 査読有り

10. T. Kii, R. Kinjo, M.A. Bakr, T. Sonobe, K. Higashimura, K. Masuda, H. Ohgaki, K. Yoshida, H. Zen, "Generation of Periodic Magnetic Field Using Bulk High-Tc Superconductor", Proc. of PAC09, pp. 2435-2437 (2009) 査読有り

〔学会発表〕(計２０件)
1. 紀井俊輝、「バルク超伝導体を用いた短周期・強磁場アンジュレータの開発」、日本物理学会、２０１２年3月２５日、西宮市

2. T. Kii, "Low-temperature operation of a Bulk HTSC Staggered Array Undulator", 22nd International Conference on Magnet Technology, 2011, 9,14, マルセイユ（フランス）

3. 紀井俊輝、「バルク超伝導体を用いた短周期アンジュレータの開発」、低温工学超伝導学会、２０１０年１２月１日、鹿児島市

4. T. Kii, "Conceptual Design of a Novel Insertion Device using Bulk Superconducting Magnet", ISS2010, 2010,11,3, つくば市

5. T. Kii, "A STUDY ON FIELD ERROR OF BULK HTSC STAGGERED ARRAY UNDULATOR ORIGINATED FROM VARIATION OF CRITICAL CURRENT DENSITY OF BULK HTSCS", FEL2010, 2010,8,22, マルメ（スウェーデン）

〔産業財産権〕
○出願状況（計１件）

名称：バルク超伝導体の臨界電流密度制御方法、及びアンジュレータ用バルク超伝導体の製造方法」
発明者：紀井俊輝・久米恭
権利者：紀井俊輝・久米恭
種類：特許
番号：特願２０１０－２７４７７６
出願年月日：２０１０年１２月９日
国内外の別：国内

６．研究組織
(1)研究代表者
紀井　俊輝（KII　TOSHITERU）
京都大学・エネルギー理工学研究所・准教授
研究者番号：30314280