

## 新博士紹介

氏名 金城 良太\* (理化学研究所)  
 論文提出大学 京都大学  
 学位種類 博士 (エネルギー科学)  
 取得年月日 2014年3月24日  
 題目 Generation and Modeling of Alternating Magnetic Field in Undulator using Bulk High-Temperature Superconductor with Staggered Array Configuration

### 1. はじめに

真空封止をはじめとするアンジュレータの短周期化の成功と電子ビーム制御技術の発展により、高輝度な軟 X 線・硬 X 線の利用が可能な中規模放射光施設の建造が世界的に活発化している。また、X 線自由電子レーザー (XFEL) SACLA においても、真空封止アンジュレータを用いたことで、XFEL の中では比較的低い電子ビームエネルギー (8 GeV) でありながら世界最短波長の X 線レーザーの生成に成功している。

さらなるアンジュレータの短周期・強磁場化を推進し放射光科学の進展に資する為、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 High-Temperature Superconductor Staggered Array Undulator: BHSAU) を提案し、実証実験と数値計算を用いた性能評価を行った。

### 2. BHSAU

アンジュレータの短周期化において、単に磁石を小さくし周期を短くしただけでは磁場が弱くなり、放射光のパワーや FEL におけるゲインの低下をもたらす。その為、アンジュレータの短周期化においては強磁場化も同時に行う必要があり、これまで永久磁石を液体窒素温度近くまで冷却するクライオ型、低温超伝導コイル型、高温超伝導バルク磁石型など様々な研究開発が行われてきた。これらの経緯については「加速器」Vol. 5 の「加速器におけるアンジュレータ」<sup>1)</sup> に詳しい。

高温超伝導バルク磁石を用いる利点は、永久磁石の 10 倍以上の磁場を、低温超伝導コイル型より高い運転温度で持ち得る点である。しかしながら、高温超伝導バルク磁石を数十 K まで冷却し着磁を行った状態でアンジュレータを組み立てることは現実的ではないため、いかにしてアンジュレータ構造中で着磁を行い、正弦関数的磁場を生成するかという点が最初に克服すべき課題となる。そこで我々は図 1 に示すような原理を持った BHSAU を提案した<sup>2)</sup>。

### 3. 実証実験と磁場計算

#### 3.1 実験セットアップ

実験は、6 周期分 12 個の新日鉄 QMG-GdBCO ( $T_c \sim 91$  K) を真空チャンバー内にスタガードアレイ構造に並べ、 $\pm 2$  T の超伝導ソレノイドの中に設置し、ソレノイドとは独立して温度制御可能な He ガス冷却系による間接冷却で行った。内部の磁場分布を直線導入器の先端に付けたホールプローブでスキャンした。

#### 3.2 結果と考察

ある値のソレノイド磁場中で BHSAU を超伝導転移させた後に運転温度まで冷却し、その後ソレノイド磁場を変化させると、正弦関数的な分布を持つ y 方向磁場が生成され、その振幅が増大していく様子が見られた<sup>3)</sup>。図 2 に、ソレノイド磁場

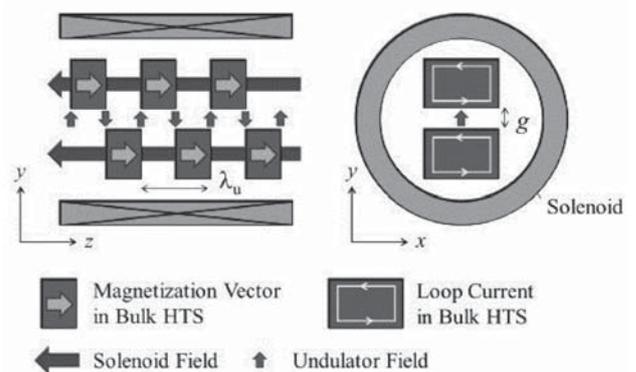


図 1 BHSAU の概念図。ソレノイドの z 方向磁場の变化を打ち消すようにバルク磁石内部に誘起された超伝導永久ループ電流が、アンジュレータ中心軸上に y 方向の正弦関数的な磁場成分を作る。

\* 理化学研究所 放射光科学総合研究センター RIKEN SPring-8 Center (E-mail: r-kinjo@spring8.or.jp)

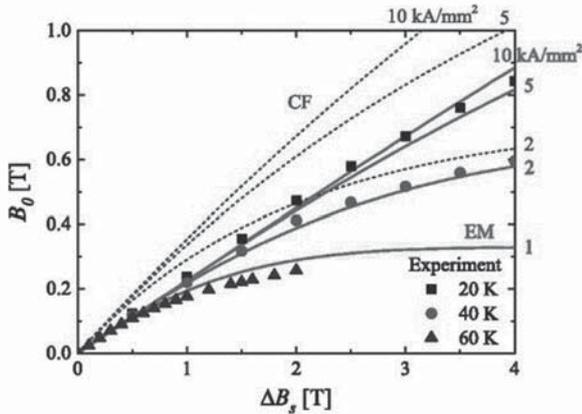


図2 アンジュレータ磁場振幅  $B_0$  のソレノイド磁場変化  $\Delta B_s$  への依存性<sup>4)</sup> (周期 10 mm, ギャップ 4 mm).  $B_0$  は 0.85 T を超え未だ飽和していない (20 K). 電流分布を考慮しないモデル CF (点線) に比べ, 考慮した EM (実線) は実験をよく再現している.

を  $-2$  T から  $+2$  T まで変化させた時のアンジュレータ磁場振幅  $B_0$  のソレノイド磁場変化  $\Delta B_s$  への依存性を示す. 高温超伝導バルク磁石を用いて 0.85 T という実用強度のアンジュレータ磁場の生成に成功すると共に, より強いソレノイドを用いれば 10 mm という短周期でありながら更なる磁場強度が期待できることが見て取れる. また,  $B_0$  は絶対値  $B_s$  ではなく  $\Delta B_s$  に依存しており, 伝統的なスタガードアレイアンジュレータとは異なる特徴を示している.

さらに同じ図 2 に, BNSAU 内部の超伝導電流分布を第二種超伝導体の臨界状態モデルに基づくエネルギー最小化法 (EM) で計算し, 得た  $B_0$  を示す. このモデルはよく実験を再現し, さらに, 電流分布を考慮していない計算結果 (CF) との比較から, BNSAU の磁場計算には互いに干渉しあうバルク磁石内部の超伝導電流分布を扱う必要があることが分かる.

開発した計算コードを用いて現在購入可能なバルク磁石の磁場依存臨界電流密度データを取り入れた BNSAU の性能予測を行った<sup>4)</sup>. 一例として, SACLA で用いられている真空封止アンジュレータの運転条件と同じ周期 18 mm, ギャップ 3.6 mm を仮定した場合, BNSAU は 40 K 程度の運転温度で 2 倍の磁場強度を達成可能であることが

分かった. また 20 K まで運転温度を下げれば周期 10 mm, ギャップ 4 mm で 2.1 T ( $K$  値にして 2.0) を達成可能であることが分かった.

#### 4. まとめと今後の展望

次世代の短周期・強磁場アンジュレータの候補として BNSAU について研究を行い, 高温超伝導バルク磁石を用いての実用強度アンジュレータ磁場の生成に成功すると共に, 実験をよく再現する BNSAU の物理モデルを構築し, その高い磁場性能について数値的に明らかにした. 今後の展望として, 放射光からの熱流入が BNSAU の電流分布に与える影響の評価, 及びフラックスクープと呼ばれる時間的な電流密度の低下への対策が挙げられる. 後者は高温超伝導応用における共通問題の一つであり, 提案されている対策手法がアンジュレータに適用可能かどうかを検討する必要がある.

#### 5. 近況と抱負

現在, 理研放射光センターにおいて SACLA や SPring-8 の光源に関する研究に取り組んでいる. 所属する光源物理チームは, XFEL や放射光の光源性能を飛躍的に高める先端的手法の開拓とその実用化に取り組むとともに, 新たな利用価値を生み出す斬新な光源コンセプトを発信しそれを可能にする各種機器を開発することを目標としている. その中で私は SACLA アンジュレータの超狭ギャップ運転に向けた研究開発や, 次世代挿入光源に向けた基盤技術の開発に従事している. 未だ人類が持ちえない光源の実現に貢献できるよう研鑽して行きたい.

#### 参考文献

- 1) 田中隆次ら, 加速器におけるアンジュレータ (前・後編), 加速器 Vol. 5 (2008) pp. 3-12 (1), pp. 100-110 (2)
- 2) R. Kinjo, et al., Proc. Int'l. FEL Conf. 2008
- 3) R. Kinjo, et al., Appl. Phys. Express, Vol. 6 (2013) 042701
- 4) R. Kinjo, et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams, Vol. 17 (2014) 022401