

アンジュレータ量産化に対応する磁場調整の試み

NEW FIELD CORRECTION SCHEME FOR UNDULATOR MASS PRODUCTION

長谷川照晃^{#, A)}, 鏡畑暁裕^{B)}, 田中隆次^{A)}

Teruaki Hasegawa^{#, A)}, Akihiro Kagamihata^{B)}, Takashi Tanaka^{A)}

^{A)} RIKEN SPring-8 Center

^{B)} JASRI

Abstract

A new procedure for field correction of magnetic arrays was introduced to improve the efficiency of undulator mass production for SACLA beam line 2. In this procedure, the magnetic array is first assembled in a mechanical frame dedicated to magnetic measurements and corrections. Then after the field correction, it is assembled in another frame together with vacuum components, which is actually installed in the accelerator tunnel. Separation of the correction and assembling processes significantly improves the production efficiency. On the other hand, machine performance may change because of a slight difference between the two frames, which can give rise to unwanted effects such as the non-uniform gap along the undulator axis and thus a large phase error. In order to solve the problem, precise readjustment of mechanical components was carried out based on the in-situ field measurement using the SAFALI system.

1. はじめに

SACLA では、電子ビームを複数ビームラインに振り分け、複数ユーザーによる硬エックス線レーザーの利用を目指している。2014 年度は、新たにビームライン 2 を増設し、真空封止型アンジュレータを 18 台設置する。アンジュレータの仕様は、稼働中のビームライン 3 に設置されているものと同じであるが、製造期間が 1 年程度と短く、加速器収納部への設置が長期停止期間に限定される。従来のアンジュレータ製造工程でこのような条件を満足することは困難である。特に、アンジュレータ架台に設置された磁石列が発生する磁場分布を精密に測定し、必要に応じてこれを調整する、いわゆる磁場調整工程に関して、短期間に多数のアンジュレータを処理できるように、作業量の削減や調整手法の改善が必須である。

本稿では、このようなアンジュレータ量産化に対応する磁場調整の試みと調整過程で生じた問題について報告する。

2. 従来の調整組立手法と量産化問題

2.1 従来の磁場調整と最終組立手法

従来行っているアンジュレータの磁場調整の様子とその流れを Figure 1、Figure 2 に示す。

まず、磁場調整ベンチの横に重さ約 12 t のアンジュレータ架台を運び入れ、石定盤と架台のアライメントを行う。次に、厚さ 2 mm のホールプローブを石定盤上のステージに固定し、上下にある磁石列間の磁場を測定する。磁石列は、磁石ユニット 1108 個で構成され、277 周期の磁場を形成する。ホールプローブを長手方向に走査しながら、水平および垂直磁場を 0.32 mm 間隔で測定する。この結果に基づ



Figure 1: Traditional field measurement bench.

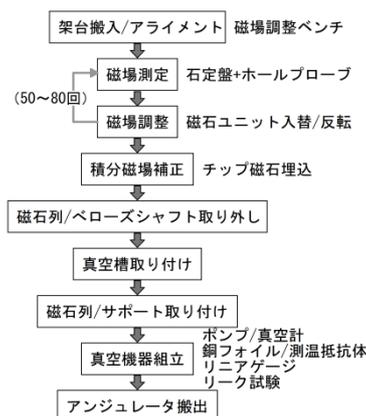


Figure 2: Diagram of traditional field correction and final assembly of undulators.

[#]hasegawa@spring8.or.jp

き、平均磁場に対して偏差の大きい磁石ユニットを選び出し、入れ替えや反転をおこなって全体の磁場強さを均一化する。測定する磁石列ギャップは、3.5 mm, 4 mm, 4.5 mm, 5 mm, 6 mm, 8 mm の 6 点で、入替反転作業はおよそ 50 回~80 回繰り返す。この調整のあと、ムービングワイヤ法により積分磁場を測定し、積分多極磁場が許容値以下になるよう磁石列端部にチップ磁石を埋め込み、磁石列を完成させる。

調整を終えた磁石列とこれを架台に固定するためのベローズシャフト（後述）は、一旦架台から取り外し、真空槽を架台に取り付けた後、再び架台に組み込む。最後に、真空機器や銅ファイルなどを取り付け、アンジュレータは完成する。

2.2 量産化の問題

前節で述べた手法でアンジュレータを量産化すると、次のような問題が生じる。1) 架台を搬入してからアンジュレータを搬出するまで磁場調整ベンチを占有し、調整の作業効率が悪い。2) 完成したアンジュレータを別の場所に移動する必要があり、その都度、重量物の運搬とアライメントを伴う。3) 作業スペースに制限があり、架台の出し入れが困難である。4) 磁場調整と組み立てにかかる期間が、1 台あたり約 8 週間と長い。

これらの問題を解決するため、次のような新たな磁場調整および組み立て手法を試みた。

3. 新たな調整組立手法

量産化に適した磁場調整と組み立ての流れを Figure 3 に示す。

従来の方と同様にまず、石定盤を用いた磁場調整ベンチにアンジュレータ架台を運び入れ、アライメントを行う。これ以降、この架台は一切動かさず、磁石列を調整する専用架台とする。

次に、磁石ユニットの交換や反転による磁場調整手法で磁石列を完成させる。

その後、調整を終えた磁石列とベローズシャフトを架台から一旦取り外し、予め別の場所に用意した

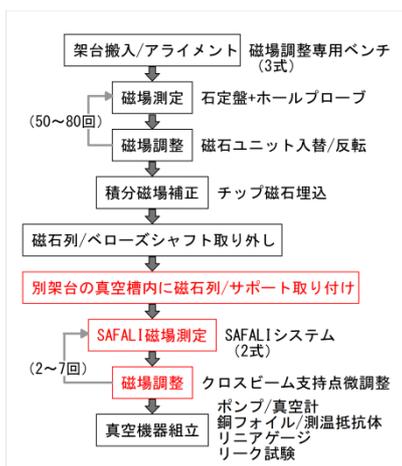


Figure 3: Diagram of the new scheme for undulator mass production.

別の架台の真空槽内に組み込む。

続いて、次節で詳しく述べるとおり、SAFALI システムによる磁場測定とその結果に基づき磁場調整を行う。

最後に、真空機器などを取り付け、アンジュレータが完成する。

本手法では、磁場調整ベンチで行う作業とそれ以外の作業を分業化しているため、効率が良い。また、重量の大きいアンジュレータ架台は、最初に設置した位置から SACLA に移設するまで移動の必要はない。

以上に加え、さらに効率を上げるために磁場調整ベンチを 3 式、SAFALI システムを 2 式用意し、2 種類の磁場調整作業を並列化した。

4. SAFALI による磁場調整

4.1 アンジュレータの構造

アンジュレータの構造を Figure 4 に示す。真空槽に収めた長さ 5040 mm の磁石列は 3 つに分かれる。各磁石列は、リニアガイドとベローズシャフトを介して上下のクロスビームに固定される。さらに、各クロスビームは左右にある支柱 2 箇所支持される。通常、アンジュレータを使用する場合は、この 6 つのクロスビームは連動し、全体の磁石列ギャップは一様に変化する。

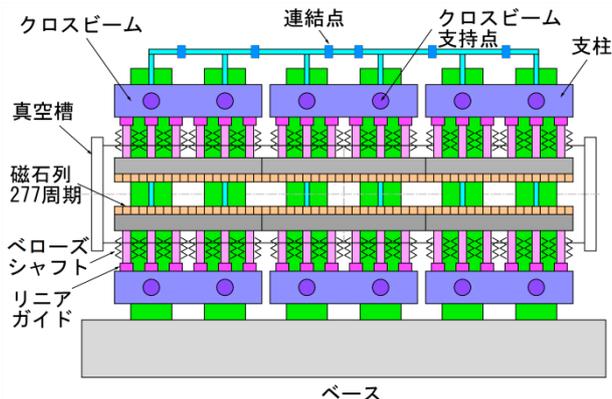


Figure 4: Schematic view of an undulator.

4.2 要求性能

SACLA では、電子ビームエネルギーとアンジュレータのギャップを調整することにより、4.5 keV から 15 keV までの範囲でレーザー波長を選択できる。運用しているビームライン 3 のアンジュレータでは、およそギャップ 3.5 mm から 4 mm (K 値は 1.8 から 2.1 に相当する。) の範囲で利用されている。

レーザーを生成するアンジュレータの磁場性能の一つとして位相誤差があげられる。SACLA では、この目標値を 10 度以内と定めている。少なくともギャップ 3.5 mm から 5 mm の範囲では、この性能が保障され、将来の狭ギャップ化を見据えた場合、ギャップ 3.5 mm 以下でもこれを満たしていることが望ましい。

4.3 予想される問題

本手法の特徴は、磁石列を調整した架台とアンジュレータとして完成する架台が異なることである。このため、1) ベローズシャフト取り付け面の位置関係、2) クロスビームの傾き、3) 吸引力による架台の撓み特性、などの機械特性が変わる可能性があり、磁石列ギャップの均一性に大きく影響する。アンジュレータの位相誤差は磁石列ギャップに強く依存するため、磁場調整用架台で調整が環境した磁石列を異なる架台に設置した場合、その性能が保障されない。

ベローズシャフトの取り付け面に関しては、すべての架台において平面度が $5 \mu\text{m}$ 以下になるよう出荷前に調整されている。これは位相誤差に換算して3~4度程度であり、許容誤差10度に対して十分小さいので、影響は小さいと予測される。

クロスビームの傾きに対しては、磁場分布の測定結果を解析することによって傾斜量を算出し、次節で説明する手法によってこれを補正する。このために SPring-8 で開発された SAFALI システムを[1]を用いて、真空槽内部に磁石列を設置した状態で磁場を精密に測定する。

吸引力による架台の撓み特性については、磁石列直近に、リニアゲージを取り付け、各クロスビームの支持点が一様に変化することを確認した。

4.4 最終磁場調整

磁場調整では、各クロスビームが連動する連結点を切り離し、1つのクロスビームの支持点における磁石列ギャップを微調整する。クロスビームの支持点は6箇所あるため、必要に応じて各点を調整する。実際の調整は、ギャップ4mmとして、支持点付近にある1つのピーク磁場にホールプローブを移動し、垂直磁場を測定しながら行う。調整量は、SAFALIで測定した磁場データを解析することによって決定する。以上の方法より、クロスビーム毎に形成される広範囲な誤差磁場を補正する。

調整結果の一例を Figure 5 に示す。グラフの横軸は磁極数、縦軸は測定した磁場データを位相誤差に

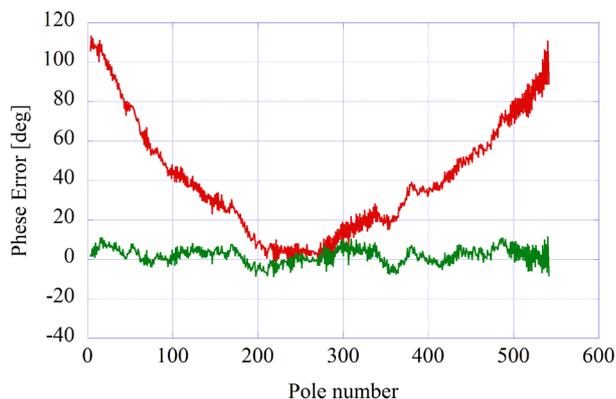


Figure 5: Result of field correction. Red line and green line show phase errors before and after corrections, respectively.

変換したもので、赤線は調整前、緑線は調整後を示す。磁場調整ベンチで調整した時には、位相誤差が3.0度であった。その後、この磁石列を別架台に移設した時には、架台が異なる影響を受けて29.5度まで悪化した。SAFALIによる磁場測定と調整を繰り返した結果、4.1度まで改善した。この時、調整した量は、大きいところで約 $29 \mu\text{m}$ であった。ギャップ4mmで最適化したあと、その他のギャップでも10度以内であることを確認した。

4.5 予期しなかった問題

量産した中には、磁石の吸引力に依存して局部的にギャップの一様性が失われるアンジュレータが発見された。原因は、磁石列を固定するベローズシャフト部のネジの閉め忘れであった。これにより、ギャップを閉じると吸引力が増大し、1つのベローズシャフトだけが浮き上がり、その部分のギャップが狭くなるという不具合であった。このようにクロスビーム内で局部的に分布する誤差磁場は、先述の方法では調整できない。

この問題は、ベローズシャフト部のネジを固定するとともに、ベローズシャフト長さを調整できる差動アジャスタを導入することで解決した。導入後には、再度 SAFALI による磁場測定と該当するベローズシャフト付近の磁場のみを調整した。

5. 進捗状況

量産したアンジュレータの保管状況を Figure 6 に示す。製造および SACLA に設置するまでの一時保管場所として、SCSS 試験加速器のクライストロンギャラリー（縦38m×横10m）を使用した。1列5台で2列、合計10台を仮置きし、残り8台は調整室とその周辺を利用した。

新たな調整手法を導入し、磁場調整と組み立てを進めた結果、2014年7月末までのわずか約9か月間に、アンジュレータ15台について磁場調整ならびに各種機器の組み立てを完了した。また、アンジュレータ1台あたりに要した調整ならびに組み立て期間は約6週間であった。これらのアンジュレータは、2014年8月に SACLA 光源棟に設置された。



Figure 6: Undulators ready for installation.

6. まとめ

SACLA ビームライン 2 の建設にあたり、量産化適した新しい手法による磁場調整を試みた。従来の手法では 1 台あたり約 8 週間を要するところ、本手法により 1 台あたり約 6 週間まで短縮した。これにより、製造期間約 9 カ月間でアンジュレータ 15 台を製作した。また、最終的に SAFALI による磁場測定とその後、調整を行うことで、運用ギャップ 5 mm~3.5 mm の範囲で、位相誤差で 10 度以下まで抑制され、要求性能を達成した。ビームライン 2 では、夏期停止期間にアンジュレータを 15 台設置し、夏以降、コミッショニングを開始する。さらに、冬期停止期間に 3 台を追加して、2015 年度、本格的な利用運転を開始する計画である。

7. 謝辞

アンジュレータの量産化にあたり、NEOMAX エンジニアリング株式会社、ならびに住友重機械ファインテック株式会社の方々にご尽力いただきました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] T. Tanaka, et al., "In-situ Undulator Field Measurement with the SAFALI System", Proceedings of the 29th Free Electron Laser Conference, Novosibirsk, Aug. 26-31, 2007.