DEVELEPMENT OF A SHORT-PERIOD UNDULATOR FOR SPRING-8 XFEL

Takashi Tanaka[1,A),B)], Takamitsu Seike[B)], Hideo Kitamura[A),B)]
[A)] RIKEN Spring-8 Center
1-1-1 Koto, Sayo, Hyogo, 679-5148
[B)] JASRI
1-1-1 Koto, Sayo, Hyogo, 679-5198

Abstract

In SPring-8 X-ray Free Electron Laser (XFEL) project, 18 segments of in-vacuum undulators will be installed to achieve FEL saturation at a wavelength shorter than 1 angstrom. The length and period of each undulator segment will be 5 m and 18 mm, respectively, with a maximum K value of 2.2 operated at a gap of 3.5 mm. A prototype undulator has been constructed last year and a variety of tests have been performed toward mass construction of the undulator segments. For example, a new magnetic measurement system called SAFALI has been developed, which makes it possible to measure the magnetic field distribution inside the vacuum chamber, and comparison of the magnetic performances has been made before and after the vacuum chamber installation. In addition, fine gap control with a resolution better than 1 micron has been tested, which is necessary to suppress gain degradation due to K-value discrepancy between undulator segments.

SPring-8 XFEL用短周期アンジュレータの開発

１．はじめに

SPring-8で建設中のX線自由電子レーザ施設(X-ray Free Electron Laser: XFEL)では、18台のアンジュレータセグメントが設置される。各セグメントは全長5m、周期長18mmの真空封止型アンジュレータであり、磁石列としてはパーメンジュールを磁極材として用いたハイブリッド型磁気回路が採用される。最小ギャップは3.5mmで、このときのＫ値は2.2にも達するため、通常の放射光施設と同様に、広範囲に渡る光子エネルギーの調整を、ギャップの開閉により行うことができる。もちろん、大幅に光子エネルギーを変更したいときには電子のエネルギーを調整することも可能である。

アンジュレータセグメント間の約1.2mのドリフトスペースには、ビーム収束用の四極電磁石、軌道調整用のステアリング磁石、空洞型ビーム位置モニタ、電流モニタ、ゲートバルブ、プロファイルモニタ、そして隣接するアンジュレータの光位相を調節するための位相シフタが設置される。

SPring-8では、18台ものアンジュレータ実機の建設に先立って、実機と同じ仕様で先行機を開発し、各種試験を行ってきた。本論文はこれらの試験結果について報告するものである。

２．SAFALI法による「その場」磁場測定

真空封止型アンジュレータでは磁石列が真空槽内部に設置されているため、石定盤製の長尺リニアステージを利用した従来の磁場測定方法は適用できない。このため磁場測定は磁石列のみを駆動架台に設置した状態で行うのが普通である。この場合、真空槽を設置してアンジュレータとして完成させるためには、一旦磁石列を駆動架台から取り外す必要が生じる。このような磁石列の脱着作業は磁場性能を劣化させる原因となり得る。幸いにも、これまで製作・設置してきた真空封止型アンジュレータでこの種の問題が顕著に現れることはなかった。しかしながら、XFELで真空封止アンジュレータを光源として採用するに当たり、アンジュレータ磁場の最終確認や、ビーム運転後に何らかの原因で発振不調に陥ったときの原因究明を容易にするために、真空槽を設置した状態で磁場分布を測定する技術、いわゆる「その場」磁場測定の技術が必要であるという認識が得られた。

「その場」磁場測定を実行するのに最も単純な手法は、小型のリニアガイドあるいはそれに類する物を真空槽内部に挿入し、これをガイドにしてホール素子モジュールをアンジュレータ軸方向へ駆動する方法である。しかしながらこの場合には、リニアガイドの自重やその他の負荷によりリニアガイドが撓み、アンジュレータ磁場を精密に測定するのに十分な真直度が得られない。そこで我々は図１に示すよう新しい磁場測定システムを開発し、「その場」磁場測定を行った。

本システムでは、小型のレールを真空槽内部に設置し、これを2軸のリニアステージによって支持している。そして外部からレーザ光を導入し、これを

[1] E-mail: ztanaka@spring8.or.jp

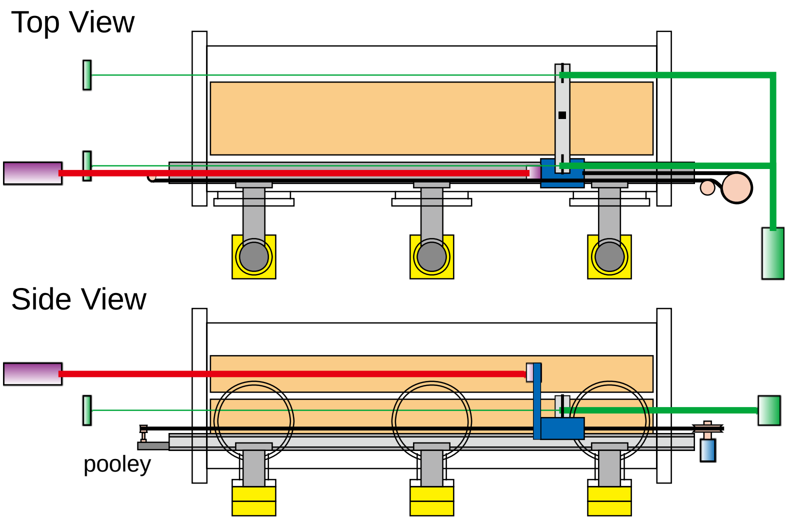

図１．SAFALIシステム原理図。

ホール素子モジュールに取り付けたアイリスに照射して、その回折パターンの重心位置を下流側に設置した位置検出器で測定することにより、ホール素子の位置変動を記録する。そしてこの位置変動をなくすように、レールを支持している2軸ステージを駆動する。こうすることによって、ホール素子の中心位置が常にアンジュレータの軸中心と一致する。さらに、アンジュレータ軸方向におけるホール素子の位置は干渉計を利用したレーザ測長期により測定する。既存のアンジュレータ磁気回路を用いた各種試験の結果、本システムによる磁場測定で、従来の測定手法と同程度の精度が得られることを確認した[1,2]。尚、本システムはSelf Aligned Field Analyzer with Laser Instrumentationの頭文字をとってSAFALIと呼ばれている。

３．磁石列脱着による影響の評価

XFEL用アンジュレータ試験機の駆動架台は2007年10月に納入された後、従来の測定手法による磁場測定及びそれに基づく磁場測調整を行い、2008年1月末に完成した。磁石列を取り外して真空槽を設置した後、その内部に磁石列を設置し、さらにSAFALIシステム用の機器を装着して磁場測定を行った。真空槽装着前に磁石列単体で駆動架台に取り付けた状態で測定した磁場分布と比較するために、位相誤差を計算したものを図2に示す。図2(a)が真空槽装着前、即ち磁場調整が完了した状態での位相誤差であり、標準偏差で3.3°であった。図2(b)が真空槽装着後、即ち磁石列を一回脱着した後の測定結果である。位相誤差が7.2°まで悪化していることがわかる。この原因を調査するために誤差磁場の形状を調査すると、磁石列のギャップに微妙な差異が生じていることが確認された。これは、磁石列が5mの一体物ではなく、3つのユニットに分割されていること、及び、それらがそれぞれ6本のボールネジによって駆動されているために、ユニット毎にギャップのオフセットやテーパが生じているためで

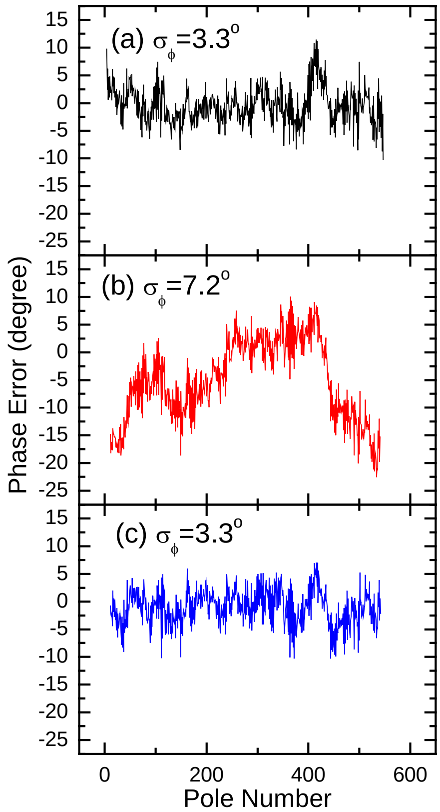

図２．位相誤差で表した磁場性能の比較。(a)真空装着前、(b)真空槽装着後、(c)ギャップ微調後。

あると考えられる。このため、これらのオフセットやテーパを当該箇所の磁場を監視しながら、ボールネジの回転角を微調して補正することにした。この結果、位相誤差は図2(c)に示すように、磁石列脱着前のものと同程度にまで回復した。

４．サブミクロンギャップ制御試験

XFELでは18台のアンジュレータセグメントのK値が10^{-4}程度の精度で正確に一致している必要がある。これはギャップに換算すると1μmという値になる。このような要求を満たすためには、アンジュレータ駆動架台のギャップ制御をサブミクロンの精度で行う必要がある。このためには、サブミクロンの精度でギャップを測長し、かつ同じ精度でギャップを設定することが可能でなければならない。

まず、ギャップ測長のセンサとして、寸法測定用のLEDとCCDを組み合わせたもの、光ファイバを利用したもの、静電容量型変位計、そして磁気センサ式デジタルゲージの各４種類について、ストローク、

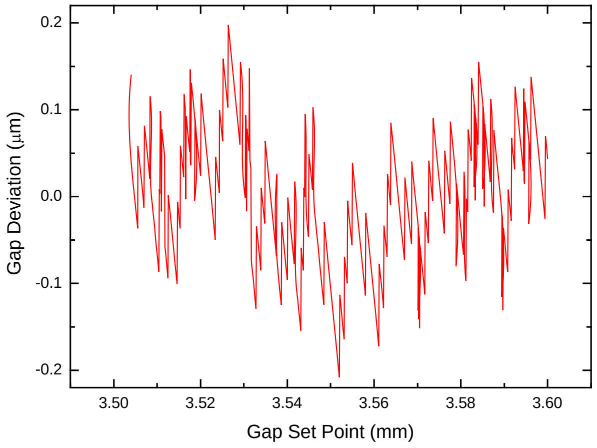

図３．ギャップ制御試験結果

真空環境への適用性、分解能、測定値のドリフト、及び価格等について検討した。この結果、磁気センサ式デジタルゲージが最も適しているとの結論を得た。

次に同センサをXFEL用アンジュレータ試験機の磁石列に取り付け、サブミクロンの精度でギャップ制御が可能かどうかについて調査を行った。結果を図3に示す。横軸にギャップの設定値、縦軸にセンサによる測定値を設定値からの偏差で示してある。ギャップ駆動は3.5mmから3.6mmまでの0.1mmで行った。この結果、ギャップ設定のばらつきは標準偏差で0.07μm、最大でも0.2μm以内であるという結論が得られた。

５．まとめ

本報告で述べた各種試験により、SPring-8 XFEL用アンジュレータの実機建設に向けた懸案事項はほぼ解決し、その仕様がほぼ確定した。実機の建設は2008年11月頃から始まり、1台目の駆動架台が2009年7月頃にSPring-8に納品され、磁場調整を経て同年9月頃に完成する予定である。最終的には2010年10月に18台分のアンジュレータセグメントがXFEL光源収納部へ設置される予定である。

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
[2] T. Tanaka, et al., “Magnetic characterization for cryogenic permanent magnet undulators: a first result”, J. Synchrotron Rad., 14 (2007) 416