

DEVELOPMENT OF IN-SITU FIELD MEASUREMENT INSTRUMENT FOR UNDULATORS

Takashi Tanaka[†]

RIKEN SPring-8 Center, XFEL Research and Development Division
1-1-1 Koto, Sayo, Hyogo, 679-5148

Abstract

In order to measure the magnetic distribution of in-vacuum undulators, a new instrument has been developed, which enable the measurement of magnetic field generated by magnetic arrays located inside the vacuum chamber. Thanks to its compactness, the new instrument is highly portable and can be applied to do an “in-situ” magnetic measurement of undulators, namely, the measurement without moving from the accelerator tunnel. The principle and measurement examples of the new instrument are presented, together with the future outlook.

アンジュレータ用 In-situ 高精度磁場測定装置の開発

1. はじめに

高精度の磁場測定は、高性能のアンジュレータを開発する上で避けて通ることができない重要な基盤技術の一つであり、一般的には磁石列のギャップに挿入されたホール素子を電子ビーム進行方向へ走査することによって行われる。この際、ホール素子の位置変動によって生ずる測定誤差を軽減するため、駆動系には高精度かつ高剛性の石定盤が利用されることが多い。このような“従来型”磁場測定が可能であるためには、磁石列側面からのフリーなアクセスが可能であることが必要であり、このことがアンジュレータの構造設計に多大な制約を課している。また真空封止型アンジュレータでは、真空槽内部に磁石列を設置した、いわばアンジュレータとしての完成形での磁場測定が、真空槽自体が障害となって実行できないという問題が生ずる。

SPring-8 では数年前から上記の課題に取り組み、レーザ計測を利用した動的な位置フィードバックシステムを備えた、コンパクトで可搬性のある磁場測定装置を開発した。これにより、前述したアンジュレータの設計に関する制約が解除され、より柔軟な設計が可能になっただけでなく、加速器収納部に設置された真空封止型アンジュレータの磁場測定を、測定室などへ搬出することなく、その場で行うことが可能になった。本論文では開発された磁場測定システムの概要と、各種アンジュレータへの適用例並びにその有効性について報告するとともに、将来の展望について述べる。

2. In-situ 磁場測定

まず初めに、In-situ 磁場測定が必要とされてきた

背景について簡単に述べる。SPring-8 では、運転開始直後から多数の真空封止型アンジュレータを導入してきたが、磁石列が真空槽内部に設置される構造であるため、石定盤製長尺ベンチを利用した従来の磁場測定方法はそのままでは適用できない。このため磁場測定や磁場調整は磁石列のみを駆動架台に設置した状態で行われる。そしてこれが完了した後に、一旦磁石列を駆動架台から取り外した上で、真空槽を設置してから磁石列を再度設置する。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、これまでに SPring-8 の蓄積リング用に製作・設置してきたほとんどの真空封止型アンジュレータは周期長が 32 mm と比較的長いため、磁石列設置の再現性に対する許容値が大きく、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、SACLA において周期長 18 mm の真空封止アンジュレータを光源として採用するにあたり、アンジュレータラインに設置後の磁場分布の最終確認や、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、磁石列を真空槽内部に設置した状態で（即ち In-situ で）磁場分布を測定する技術が必要であるという認識が生まれたのである。

3. In-situ 磁場測定の原理

従来型磁場測定装置において高精度の石定盤がホール素子駆動に利用されているのは、アンジュレータ磁場が、特に鉛直軸(=y)方向に（時には水平軸(=x)方向へも）強い依存性を持つため、ホール素子移動中の位置変動が、無視できない測定誤差を生ずるためである。言い換えると、そのような位置変

[†] ztanaka@spring8.or.jp

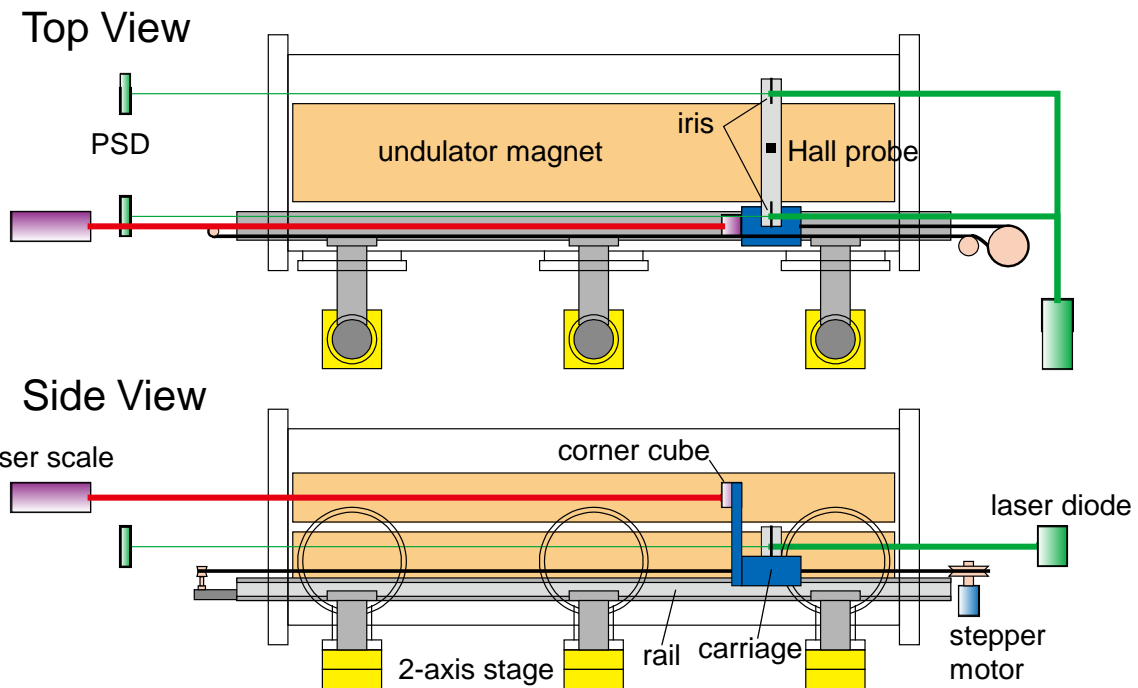


図 1 : In-situ 磁場測定装置模式図。

動を動的に補正することができさえすれば、石定盤による駆動は必須では無い。

図 1 に、SPRING-8 において開発された In-situ 磁場測定装置の模式図を示す。この測定装置では、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をアンジュレータ軸(z)方向へ駆動する。そして、外部から導入されたレーザ光でホール素子モジュールに取り付けられたアイリスを照射し、これによって切り取られたレーザスポットの重心位置を、下流側に設置された光位置検出器 (PSD) で測定することにより、移動中のホール素子の位置変動を測定する。真空槽内部に設置されたりニアガイドは、何か所かで 2 軸ステージによって保持されており、移動中のホール素子位置変動を補正するように位置が制御される。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 (z) 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器により測定する。ちなみに本装置は、Self-Aligned Field Analyzer with Laser Instrumentation の頭文字を取り、SAFALI と命名された。また、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、SAFALI による磁場測定で、石定盤を利用する従来の測定手法と同程度の精度が得られることが確認された。

4. 適用例

次に開発された In-situ 磁場測定装置の適用例とその

結果について報告する。

4.1 磁石列脱着による影響の評価^[1]

前述したとおり、SAFALI 開発の本来の目的の一つは、真空封止アンジュレータにおける磁石列脱着作業による磁場特性変化を測定することにある。ここでは、SACLA 用アンジュレータのプロトタイプ機を利用して行った試験結果について述べる。

同プロトタイプ機の駆動架台は 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再度設置し、さらに SAFALI の各種機器を装着して磁場測定を行った。真空槽設置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 5 m 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 2 本、形 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を試みた。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することが確認された。このことは、仮に磁石列脱着によって磁場特性が劣化したとしても、精密な測定とこれに基づく機械的補正を施すことによって、本来の磁場特性に修正が可能であることを示している。

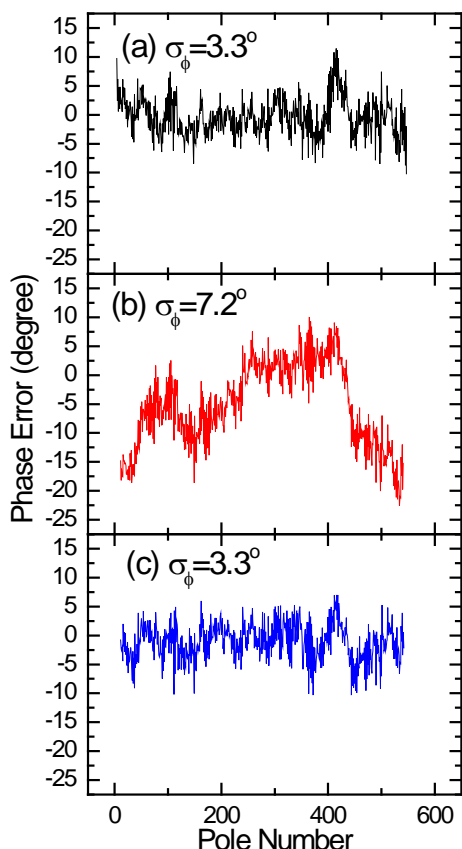


図 2：位相誤差で表した磁場性能の比較。(a)真空槽装着前、(b)真空槽装着後、(c)ギャップ微調後。

4.2 長期運転による影響の評価

SPring-8 にはこれまでに 30 を超える挿入光源が設置され、順調に運転が続けられているが、その半数以上が 10 年以上前に蓄積リングに設置されたものである。これらの挿入光源は 10 年を超える長期間に渡って、高エネルギー電子線やX線・γ線などの放射線に照射されてきたことになるが、その際に最も心配されるのが、放射線損傷、特に永久磁石の減磁である。減磁による影響としては、ビーム軸に沿った磁場分布の均一性の悪化、及び磁場積分の変動である。特に前者は光強度の低下をもたらすため、利用者にとっても好ましくない。このような、放射線環境下での長期運転による影響を定量的に評価するため SAFALI による磁場測定と解析を行った。

図 3 に、1999 年 9 月から 2010 年 2 月まで約 10 年間運転された真空封止アンジュレータの、運転期

間前後での磁場分布の比較を示す。本アンジュレータは、BL35XU で光源として稼働した後 2010 年 3 月に、同ビームラインでの高エネルギー領域での高輝度化のため、新規製作された周期長 20 mm のアンジュレータへ交換されるに伴い、蓄積リングから搬出されたものである。運転前後でギャップ 8 mm において測定した磁場分布から計算された、位相誤差と磁場の变化量を示す。仮に放射線照射によって減磁が引き起こされたとすると、磁場変化は上流側が最も激しいと予想されるが、測定結果を見る限りそのような変化は生じていない。

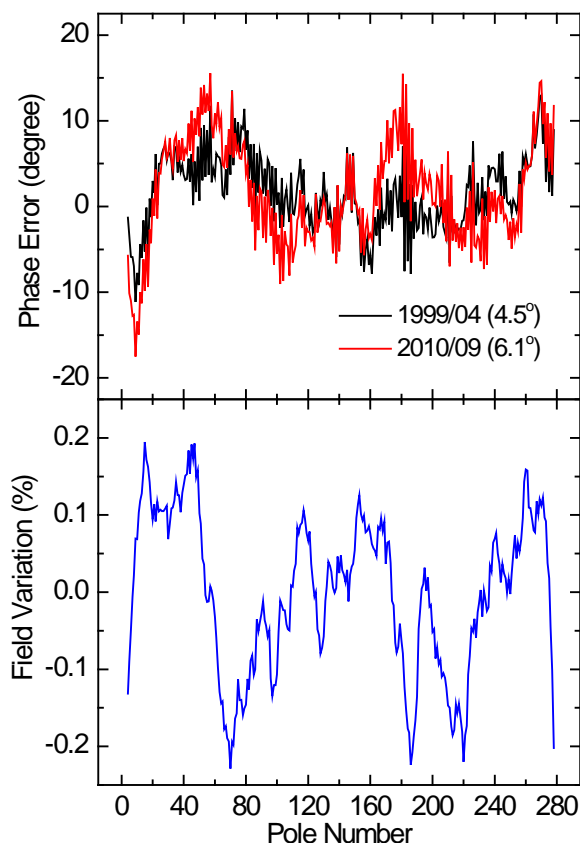


図 3：長期運転による磁場性能への影響。(a) 位相誤差の比較、(b) ピーク磁場の差。

4.3 クライオアンジュレータにおける In-situ 磁場測定と磁場調整^[2]

クライオアンジュレータとは、真空封止型アンジュレータの永久磁石列を 120 K 程度まで冷却することにより、残留磁束密度と保持力という、アンジュレータの性能にとって重要な永久磁石特性を改善するための手法であり、従来の真空封止型アンジュレータに比べてピーク磁場を 40% 程度増強することができる。この手法は既存の真空封止型アンジュレータに冷却機構を取り付けるという簡単な改造で実現できるが、磁場測定を冷却状態において行う必要があるため、従来の磁場測定手法が適用できない。そこで、SPring-8 では SAFALI において必要な各種機器を真空対応とすることで、クライオアン

ジュレータにおける磁場測定手法を確立した。また、冷却後の温度勾配に伴って生じる磁場特性の劣化を、冷却状態を保ったまま補正する技術を確立した。図4にそれらを適用した例を示す。冷却前、室温下で測定した磁場分布から計算される位相誤差（下図、赤線）が、冷却後には大きく劣化している様子（青線）が確認できる。一方で、補正のための機器調整を行った後（緑線）にはほぼ元通りの特性が再現されていることがわかる。

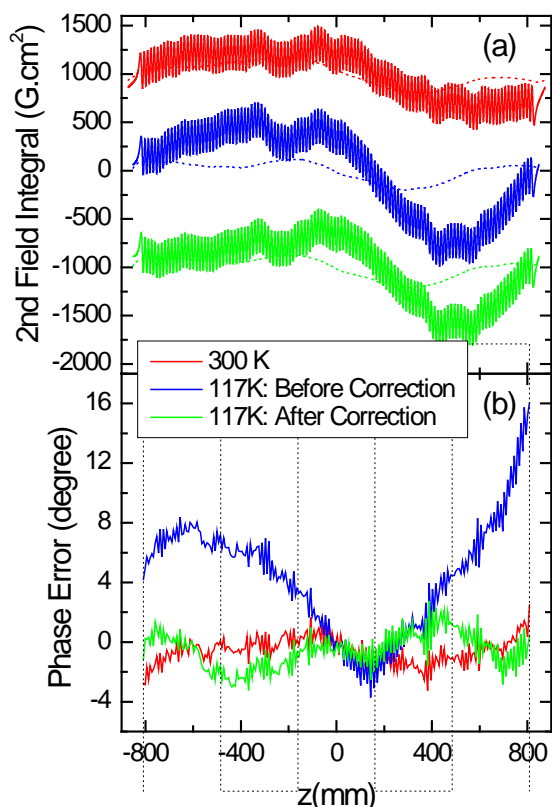


図4：クライオアンジュレータにおける、冷却前（赤）、冷却後（青）、補正機構調節後（緑）の(a)電子軌道及び(b)位相誤差で表した磁場性能。

これにより、クライオアンジュレータの開発において克服すべき重要な課題が解決し、その実用化に向けて大きく前進した。

5. 今後の展望

SAFALIの応用は、単に真空封止型アンジュレータにおける磁場測定への適用にとどまらない。最も重要なことは、アンジュレータの基本構造として、従来型磁場測定を行うための磁石列へのフリーアクセスという、いわば束縛条件を除去できたことである。これにより、駆動架台の柔軟な設計が可能となった。一例として、SPRING-8のBL35XUに設置されたアンジュレータの駆動架台は、方持ち支持方式のC型構造ではなく、両持ち支持の門型構造が採用されており、これによってシンプルだが剛性が高い

構造が可能となっている。今後、この概念をさらに発展させることで、より効率の高い、コストエフェクティブな挿入光源の開発が可能になると期待される。一方、SAFALIの測定精度自体も改良を加えていく必要がある。現在達成されているホール素子の位置精度は、PSDによるレーザスポット位置の測定精度が律速となっており、r.m.s.で約 $10 \mu m$ である。これは、周期長 $15 mm$ 程度のアンジュレータにおける磁場測定では問題ない値であるが、今後、より短周期のアンジュレータを開発していく際には改善していかねばならない。PSDによる位置測定精度はビームサイズに依存するが、現在使用している単純な円形開口による空間的フィルタリングは、回折による角度発散が大きくなり、有利ではない。従って、この種の目的に適したフィルタリングの手法について検討する必要がある。

参考文献

- [1] T. Tanaka, T. Seike and H. Kitamura, "Measurement of SPring-8 XFEL Undulator Prototype with the SAFALI System", Proc. 30th Int. Free Electron Laser Conf. (FEL2008), 371
- [2] T. Tanaka, T. Seike, A. Kagamihata, T. Schmidt, A. Anghel, M. Bruegger, W. Bulgheroni, B. Jakob and H. Kitamura, "In situ correction of field errors induced by temperature gradient in cryogenic undulators", Phys. Rev. ST-AB 12 (2009) 120702