

## その場磁場測定による SPring-8 真空封止アンジュレータの減磁評価

### EVALUATION OF PERMANENT MAGNET DEMAGNETIZATION OF THE SPRING-8 IN-VACUUM UNDULATOR BY IN-SITU MAGNETIC MEASUREMENTS

長谷川照晃<sup>#, A)</sup>, 清家隆光<sup>B)</sup>, 備前輝彦<sup>B)</sup>, 鏡畑暁裕<sup>B)</sup>, 金城良太<sup>A)</sup>, 田中隆次<sup>A)</sup>

Teruaki Hasegawa<sup>#, A)</sup>, Takamitsu Seike<sup>B)</sup>, Teruhiko Bizen<sup>B)</sup>, Akihiro Kagamihata<sup>A)</sup>, Ryota Kinjo<sup>A)</sup>, Takashi Tanaka<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> RIKEN SPring-8 Center

<sup>B)</sup> JASRI

#### Abstract

It is well known that permanent magnets (PMs) can be demagnetized when exposed to radiation, which can be more serious for PMs used in in-vacuum undulators (IVUs) to be operated at a narrow gap. Recently in SPring-8, it has been reported that opening and closing the gap of the IVU installed in BL10XU (ID10) have shown a significant impact on the electron beam in terms of the COD variation and coupling, which seems to be attributable to demagnetization of PMs. In order to look for the reason, we have measured the field distribution and integrals of ID10 without exporting from the accelerator tunnel, by means of the SAFALI and stretched wire systems. It was found that the PMs of ID10 had been locally demagnetized near the entrance, and the local demagnetization extended over the first 10 poles (5 periodic magnets) in the longitudinal direction, with the maximum demagnetization rate of -6.5% at the 1st pole. The demagnetization also extended over a wide range of  $\pm 10$ mm in the horizontal direction, and almost no difference was found between the top and down magnetic arrays. The integral magnetic errors induced by these demagnetizations have been corrected by inserting a number of chip magnets using magic fingers newly installed at the both extremities of ID10 in order to reduce the unwanted effects on the accelerator operation.

#### 1. はじめに

アンジュレータの製作過程では、次に示す精密磁場調整を実施する。すなわち、石定盤上のホールプローブ掃引による磁場測定とその結果に基づく磁石ユニットの反転/並べ替えによる最適化、ならびにムービングワイヤー法による磁場積分評価とチップ磁石を用いたエラー除去である。アンジュレータを蓄積リングにインストールした後、その上下流にある2つのステアリング電磁石で、わずかに残った磁場積分を補正する。補正テーブルは磁極間隔(ギャップ)ごとに作成し、フィードフォワード制御でステアリング電磁石を操作する。この手法でギャップ駆動によるビーム軌道への影響を打ち消し、ビームラインの光軸を一定に保つ。通常、この調整はインストール時に一度実施するだけでよく、得られた補正テーブルは長期間保存される。

近年、SPring-8 BL10XU に設置した真空封止アンジュレータでは、年に数度の更新が必要になるとともに、電子ビームのカップリングを悪化させるねじれ4極磁場が誘起されることが報告され、その原因として長期運転による永久磁石の減磁<sup>[1][2]</sup>が疑われた。そこでマシン収納部にあるアンジュレータに対し、その場磁場測定システム(SAFALI)<sup>[3]</sup>を用いた磁場分布測定とムービングワイヤー法による磁場積分を測定し、永久磁石の減磁について評価した。

#### 2. 磁場分布

##### 2.1 測定方法

BL10XU のアンジュレータは、1998年8月にBL46XUの挿入光源としてインストールされた後、2007年8月に現在のBL10XUへ移設され、2015年2月まで約17年間利用している。周期長および周期数は、それぞれ24mmと184で、装置全長は4.5mである。利用期間中の積分電流は6882Ahで、主な利用ギャップは7-8mm(最小ギャップ6mm)である。磁場分布は、SAFALIを用いてマシン収納部内で測定した。測定系の設置ならびに真空チャンバ内へ長さ4.5mのホールプローブ掃引用一体T型レールを挿入するため、アンジュレータを通路側へ約1m引き出した。

##### 2.2 磁場分布

ビーム軸上の磁場分布をギャップ8mmで測定した。各磁極のピーク磁場をFigure 1に示す。横軸は磁石ユニット(磁極)数でビーム進行方向へ増大する。磁極#1は電子ビームが最初に通過する磁石ユニットを意味する。縦軸は平均ピーク磁場からの偏差である。今回の測定結果を青線で示し、これと比較するため、インストール前(1998年2月)に石定盤を用いた調整ベンチで測定した結果とその差分を、それぞれ緑線と赤線で示す。この結果は、電子ビーム入口にある磁石ユニット、つまり磁極#1から#10あたりまで5周期(長さ約120mm)にわたってピーク磁場が単調に減少したことを示しており、永久磁石の減磁が明らかになった。平均ピーク磁場は6714

<sup>#</sup>hasegawa@spring8.or.jp

G で、入口付近の減磁率は最大-6.5 %である。磁極総数 368 のうち、入口以外のピーク磁場は、インストール前の値とおよそ一致しており、減磁はなかった。

続いて上下磁石列の減磁を比較するため、ビーム軸に対し垂直方向に±1 mm オフセットした軸上の磁場分布を測定した。これらの結果を Figure 2 に示す。横軸は磁極数で減磁した入口付近のみを示す。縦軸は平均ピーク磁場からの偏差である。上へ 1 mm オフセットした測定結果を赤線、下へのそれを黄線で示す。その結果、上下磁石列の変化率に大きな偏りはなかった。

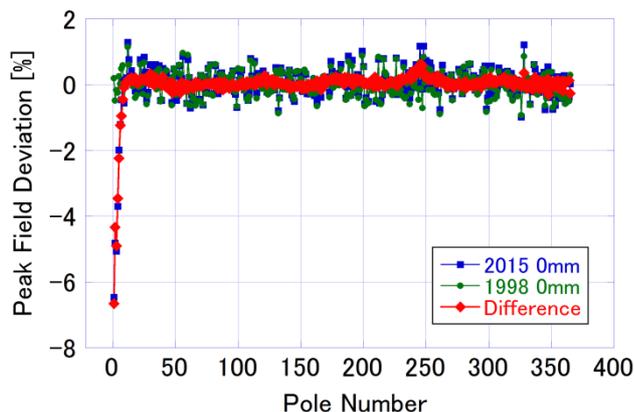


Figure 1: Results of peak field deviation. Red line shows a difference 1998 from 2015. Blue line and green line show each of deviation of 1998 and 2015.

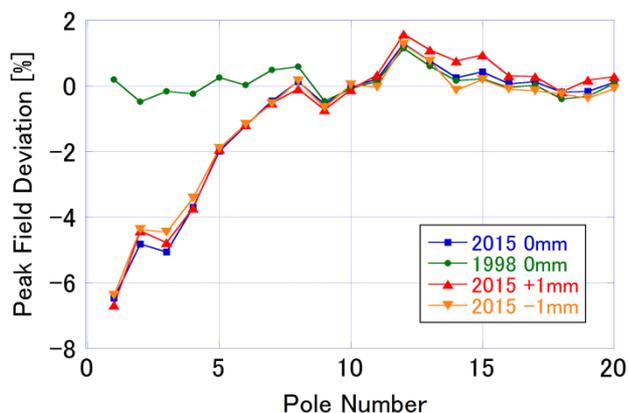


Figure 2: Results of vertical peak field deviation around undulator entrance. In. Red line, blue line, green line and yellow line show each of on-axis, +1mm off-axis, -1mm off-axis and original.

### 3. 磁場積分

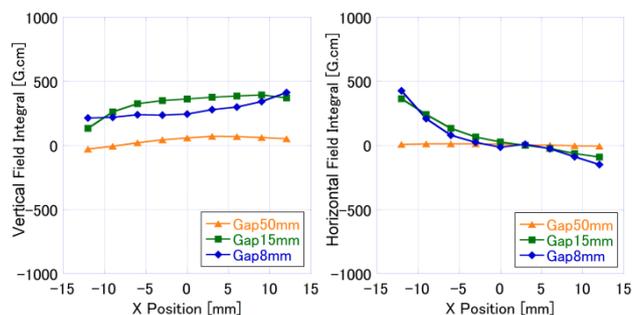
#### 3.1 測定方法

磁場積分をムービングワイヤー法で評価した。水平/垂直方向に 1mm 移動し、その際に生ずる磁場変化によって発生する誘導起電力を測定するための銅ワイヤーをビーム軌道に設置し、そのリターン線は真空チャンバ外側に通す。ワイヤーを固定する両

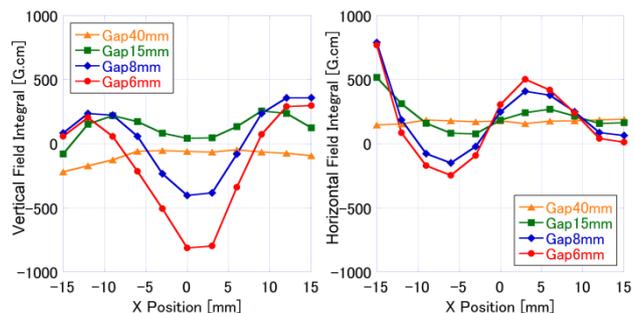
端部には駆動装置があり、1 次積分の場合は同方向、2 次積分の場合は逆 (クロス) 方向へ動かす。この時の誘導起電力をナノボルトメータで計測し、積分磁場に変換する。

#### 3.2 磁場積分

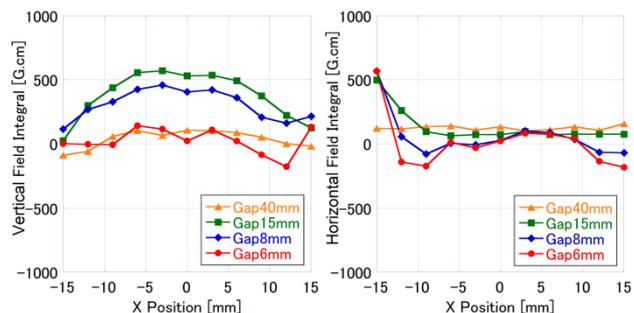
ギャップを変えて測定した結果を Figure 3 に示す。横軸はビーム軌道に対する水平方向の位置で、プラスはビーム軌道の外側を意味する。縦軸は 1 次積分を示す。赤線はギャップ 6 mm、青線はギャップ 8 mm、緑線はギャップ 15 mm、黄線はギャップ 40 mm で測定した結果である。(a) は蓄積リングのインストール前、(b) は減磁評価時で、(c) は後述する補正後を示す。



(a) Before install to SR in February, 1998



(b) Before correction in February, 2015



(c) After the correction

Figure 3: Results of field integral measured by moving-wire method. Left graph is vertical field integral, right is horizontal one. Red line, blue line, green line and yellow line show each of gap 6mm, 8mm, 15mm and 40mm, respectively. (a) Before install to SR in February, 1998. (b) Before correction in February, 2015. (c) After the correction.

インストール前の磁場積分は、特に重要なビーム軸付近 ( $X=0$ ) において、水平/垂直磁場ともにほぼ平坦である。異なるギャップにおいてもおおむね同様であった。一方減磁評価時では、垂直磁場積分が、特にギャップ 6 mm で大きく変化しており、ビーム軸を中心に左右対称に  $\pm 10$  mm の範囲で下向きの磁場が増加していた。中心の磁場積分の変化量が最も大きく、約 800 G.cm であった。水平磁場についても同様に大きく変化しており、ビーム軸を中心に左右へ発散する方向へ増加していた。

このように局在化する磁場は 4 極磁場を生成するため、ステアリング電磁石で補正しきれず、ビーム軌道やカップリング (垂直ビームサイズ)、ならびに入射効率を悪化させる。

### 3.3 補正方法

このアンジュレータは標準型の初期モデルであり、現在積分磁場の補正方法として主流となるチップ磁石は導入していなかった。そこで先頭にある最も減磁率の大きい 2 つの磁石ユニット (1 周期分) を取り除き、ハーフ磁石と呼ばれる端部磁場補正用の磁石ユニットの位置を変更して、その横にチップ磁石を埋設する幅 24 mm の銅製ホルダーを挿入した。銅製ホルダーは上下磁石列の上下流端部 4 箇所を設置した。今回の減磁は局所的に発生しており、光強度にさほど影響しないことと時間的な制約から、磁極 #3 から #10 の減磁した磁石ユニットは、入れ替えなかった。補正後の磁石配列を Figure 4 に示す。

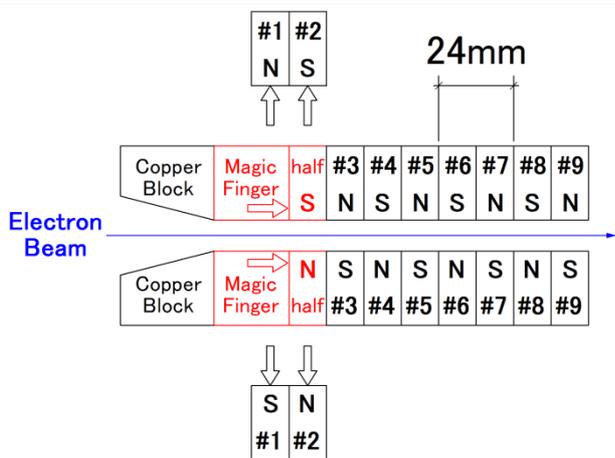


Figure 4: Schematic view of magnetic arrays with magnetic finger after a correction.

銅製ホルダーの外観図を、Figure 5 に示す。チップ磁石を埋設する穴が水平方向に 9-10 箇所、ビーム軸方向に 4 列あり、ひとつの穴に複数個のチップ磁石を収められる。

磁場積分は、測定結果を磁場分析ソフトで解析し、チップ磁石の埋設位置と強さ (数量) を割り出し、補正する。補正は合計 6 回繰り返し、ギャップ 6 mm で 1 次および 2 次積分を最適化した。

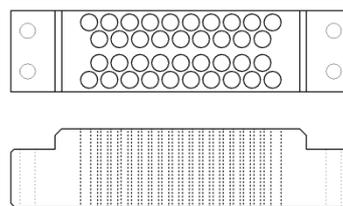


Figure 5: Schematic view of magnetic finger.

### 3.4 補正結果

補正結果を Figure 3(c) に示す。垂直磁場において補正前に局在化していた下向きの成分 (6 極磁場成分) が補正され、広い範囲で平坦化された。また、軸から発散していた水平磁場 (ねじれ 4 極成分) もほぼ補正されていることが分かる。

## 4. まとめ

真空封止アンジュレータは、長期的に電子線や放射線に曝されるため、永久磁石の減磁が採用当初より懸念されていた。近年、SPring-8 BL10XU アンジュレータでは、磁場積分を補正するステアリングテーブルの更新頻度が増すとともに、電子ビームのカップリングを悪化させるねじれ 4 極磁場を誘起していることが観測され、永久磁石の減磁が疑われた。そこで、マシン収納部内で SAFALI による磁場分布測定とムービングワイヤー法による磁場積分を評価した結果、アンジュレータ入口付近の 10 極 (5 周期) で永久磁石の減磁が明らかになった。先頭にある磁石ユニットの減磁率が最も大きく、約 6.5% であった。また、減磁は水平方向に  $\pm 10$  mm と広い範囲に及んでいたが、上下磁石列に大きな差異はなかった。

マジックフィンガーを導入して 1 次および 2 次の磁場積分を補正し、電子ビームへの影響を大幅に緩和した。

## 参考文献

- [1] T. Bizen, et al., "Radiation damage in permanent magnets for ID", Radiation Measurements 41, S260-S264, 2007.
- [2] T. Tanaka, et al., "放射線環境下での長期運転による挿入光源磁場特性変動とその評価", 第 24 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム予稿集, つくば, Jan. 66-, 2011.
- [3] 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.