

## FIELD MEASUREMENT OF THE PULSED QUADRUPOLE MAGNET FOR PF-AR INJECTION

K.Harada<sup>1</sup>, Y.Kobayashi, S.Nagahashi, T.Miyajima  
Magnet and Orbit Group, Light Source Division, Photon Factory, KEK  
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

### Abstract

We have measured the magnetic field of the pulsed quadrupole magnet for the new injection system at the PF-AR (Photon Factory Advanced Ring for Pulsed X-ray). A single pulsed quadrupole magnet enables us to inject the beam without a local bump due to four pulsed dipole magnets (pulsed kickers). For the injection at the PF-AR, we need the pulsed quadrupole magnet with a length of 30cm, a field gradient of about 3T/m at a peak current of 2000A, and a pulse width of 2.4 $\mu$ sec in a half-sine form. From the measured results, we confirmed that the pulsed quadrupole magnet satisfied the required specifications.

### PF-AR入射用パルス4極電磁石の磁場測定

#### 1. はじめに

第3世代放射光源で必須になりつつあるtop-up入射において、入射中に生じる蓄積ビームの振動が大きな問題となっている。現行の入射システムでは入射の際にキッカー（パルス偏向電磁石）を用いて蓄積ビームの軌道を一時的にセプタム電磁石に近づける必要があるが、その際にキッカーの磁場誤差やタイミングのズレ、キッカー間の非線形磁場などの為に蓄積ビームの局所的な軌道変動がその外側に漏れ出してしまうことが、入射中の蓄積ビームの振動の主な原因である。キッカー電磁石は一般に複数台用いる為、電源や電磁石の製作誤差はもちろん数マイクロ秒のパルスに対するタイミング調整も難しく、リングを回る全てのバンチに対してバンチを完全に閉じさせて、蓄積ビームの振動をなくすことは至難の業である。

4極電磁石を用いて入射を行えば、磁場がゼロの中心軌道を通る蓄積ビームは蹴られない為、振動が励起されることはない。一方で、振幅の大きな入射ビームは4極電磁石によって中心軌道に向かって蹴られるので、最低1台あれば入射を行うことが可能となる[1]、[2]。これが従来とは異なるパルス4極電磁石を用いた新しい入射方式のポイントである。

入射されたビームはセプタム電磁石を出てリングに入ると大振幅でベータトロン振動を始める。ベータトロン振動において、振幅の大きな場所では運動量が小さく、逆に中心軌道を横切る時に運動量が最大となる。4極電磁石はビームの振動のうち、運動量成分を減らすことしかできない為、ビームの運動量が大きな場所（振幅の小さな場所）に設置する方が蹴った後の振動をより小さく抑えることができる。ところが、ビームに対する蹴り角はビーム振動の振幅に比例する為、現実的な磁場でビームを十分に蹴

る為にはある程度の振幅が必要である。その2つの効果を計算によって比較した結果、PF-ARにおいては入射点から約15m下流、4極電磁石QC2S\_E直上流の位置が最適な場所であることが分かった。そこは入射ビームが中心軌道を横切ったあと、入射点と逆向きの最大振幅になるまでのちょうど中間に相当する場所である。

最適化した場所にパルス4極電磁石を設置した場合、入射ビームの振動の振幅を現状の入射システムの場合と同じ大きさまで抑える為には3T/mの磁場勾配が必要である。それにより、15mmの振幅を持つ入射ビームは1.3mradだけ中心軌道に向かって蹴ら

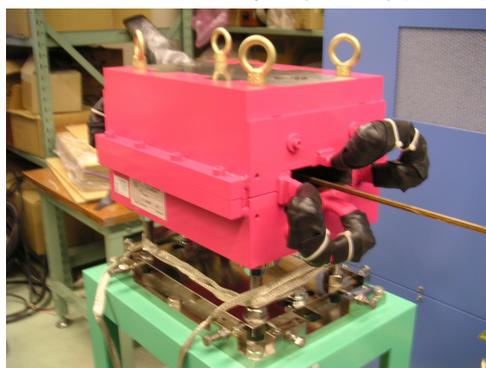


図1 パルス4極電磁石

表1 電磁石のパラメータ

長さ [mm]	300
垂直方向内径 [mm]	36
水平方向内径 [mm]	102
コイルのターン数 [ターン]	1
必要(最大)充電電圧 [kV]	20(40)
必要(最大)磁場勾配 [T/m]	3 (6)
必要(最大)電流 [A]	2000(4000)
パルス幅 [ $\mu$ Sec]	2.4
インダクタンス [ $\mu$ H]	1.8

<sup>1</sup> E-mail: kentaro.harada@kek.jp

れる。製作したパルス4極電磁石の写真を図1に、パラメータを表1に示す。

現在、PF-ARでは蓄積電流が65mAになると入射を続けてもそれ以上電流を積み上げることができなくなってしまい、それが蓄積電流の上限値となっている。入射しても蓄積されない現象の原因は、入射キッカーによって励起される蓄積ビームの振動が作り出す航跡場が、入射ビームを蹴り落とす為だと考えられている[3]。パルス4極電磁石を用いて入射を行うことで、この問題が解決する可能性があると思われる。

## 2. 磁場測定のセットアップ

図1に示したパルス4極電磁石の磁場測定の為のセットアップおよびプロセス等について説明する。

まず、パルス電源への充電および放電トリガー信号であるが、パルス発生器からの25Hzのパルスを分岐、遅延させて用いた。放電してから再び充電を開始するまでを10msecとし、ノイズなどによって誤って放電するのを避ける為、放電してから39msecは再放電禁止となるようにゲートをかけた。なお、電源が充電に要する時間は10msecであるが、回路が複雑になるのを避ける為、繰り返し周波数を変更した場合でも、必ず放電の10msec後には充電を始めるようにタイミング信号を工夫した。実際の入射においてはパルス発生器の代わりにLINACからの入射タイミング信号を適宜遅延させて用いることになる。また、電源のON-OFF制御にはGPIB-リレーインターフェースを用い、充電電圧の設定には小型の定電圧電源をGPIB経由で制御して用いた。電圧10Vが充電電圧40kVに対応するようになっている。

次に、電磁石に発生する誘導起電力によるノイズの問題について述べる。電磁石本体のコイル-鉄芯間や架台などの絶縁は問題なくとれているが、励磁した際に誘導起電力(渦電流)の効果によって鉄芯や架台が帯電することが避けられない。特に、リング内で励磁する際には誘導電荷がダクトなどを通じてビーム診断系の検波回路などに影響を与えることは絶対に避けなければならない。そこで、磁場測定中も鉄芯及び架台は接地するものとし、リング内においてはセラミックダクト両脇の形状変換部(ステンレス製)も全て積極的に接地することとした。なお、磁場測定中はPFリングの運転に影響を与えない為に比較的条件の悪い(インピーダンスの高い)接地端子を用いた。実際、誘導電荷が接地端子に流れる時の電圧がkVのオーダーになってしまったが、リング内に設置する際には入射キッカーに用いている第1種(A種)接地(インピーダンス10以下)に接続する予定であり、この問題は回避されると思われる。

磁場測定はサーチコイルをXYZステージに乗せて行った。電磁石本体とステージの据え付けは、まず水準器を用いて両者を水平にした後、ステージ上のサーチコイルを電磁石の軸方向(z方向)に動かし、モールドされて鉄芯に埋め込まれている電磁石本体のコイルを参考にしながらサーチコイルが電磁石の

軸と平行に動くように調整を行った。電磁石の中心は磁場測定によって磁場ゼロの点として求めた。サーチコイルであるが、短いものと長いものの二種類がガラスエポキシの棒と一緒に取り付けられたものを用いた。短コイルは正方形で幅と長さは5mm、長コイルは幅5mm、長さ60cm、いずれも1ターンである。

最後に実際の磁場測定のプロセスについて述べる。電磁石を励磁するとパルス磁場が発生し、磁場中のサーチコイルに以下の式で表される誘導起電力が発生する。

$$V = -\frac{d\phi}{dt} = -S \frac{dB}{dt}$$

ここで  $S$  はコイルを貫く磁束、 $S$  はコイルの面積、 $B$  はコイル上の(平均)磁束密度である。電圧波形をオシロスコープで取り込み、それを計算機上で積分することで磁場波形を導出した。オシロスコープで観測される典型的な波形を図2に、それを積分した波形を図3に示す。図2で"ch1"は短コイルの電圧波形、"ch2"は電流モニタ波形(電源CT)、“ch3”は長コイルの電圧波形である。ch1の入力には5MHzのlow pass filterを用いており、それに伴いオシロスコープの入カインピーダンスは50とした(1M

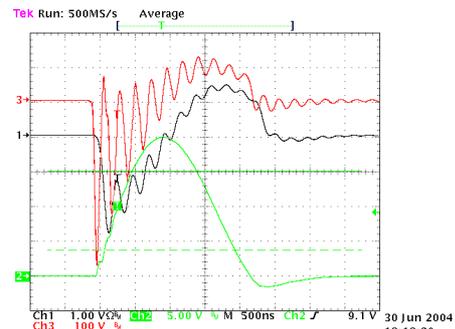


図2 典型的な信号波形

電流2000A、入射ビームの通る水平15mmの場所で測定。“ch1”(短コイルからの信号波形)はおよそ4.5Vpp、“ch3”(長コイル)はおよそ600Vpp、“ch2”(電流モニタ波形)は10分の1に減衰させて20Vである。

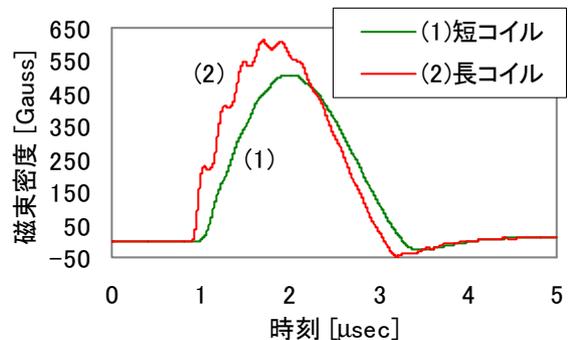


図3 積分波形

短コイル測定値は504Gauss、長コイルは611Gaussであり、実効長は約360mmとなる。

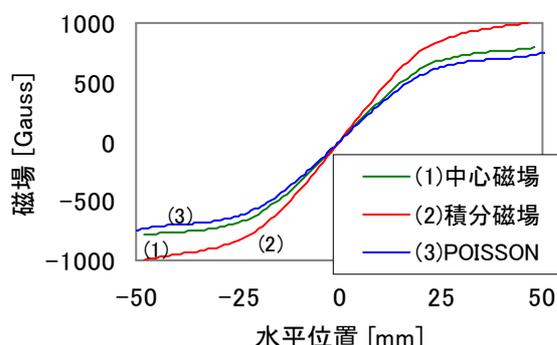


図4 水平方向磁場分布

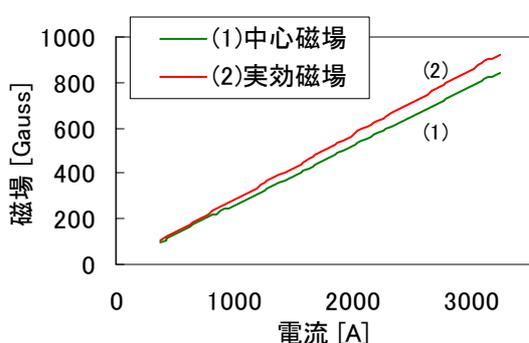


図5 励磁曲線

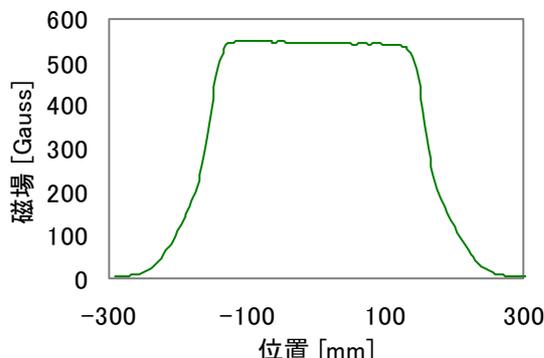


図6 ビーム軌道上磁場分布

入力の場合と比較し、電圧降下がないことは確認済みである)。電源に取り付けられた電流モニタ(CT)は4000A/400V出力であり、20dB(10分の1)の減衰器を通して読み込んだ。また、長コイルからの信号も最大で1kVppと高い電圧になる為、10分の1減衰の入力プローブを用いることとした。また、高周波ノイズ対策として長短両コイルからの信号線(同軸ケーブル)を途中でフェライトコアに巻いた。

### 3. 磁場測定結果

電流2000Aで励磁した場合の測定結果を図4に示す。図は、磁場の垂直方向成分の水平分布を示している。電磁石のコイルは銅のブスバーである為、パルス磁場を渦電流によって遮る可能性も考えられたが、測定された磁場分布は2次元(静)磁場計算コードPOISSONによる計算結果とほぼ等しく、中心

付近ではきちんと線形になっており、電磁石が4極として働いていることが確認できた。また、中心軸上で積分磁場がゼロになっていることも分かった。

PF-ARでは、入射ビームは電磁石の中心から水平に15mmの軌道を通る。磁場測定の結果、入射ビームの軌道上に必要な磁場0.045T(450Gauss)以上の磁場が得られていることが分かった。水平15mmの位置で測定した励磁曲線を図5に示す。電源の最大出力は4000Aであるが、磁場測定に用いた3相200Vの配電盤電気容量の関係で、3200Aまでしか測定ができなかった。電流3000Aでも特に磁場の飽和は見られなかった。同じく水平15mmの場所でビーム軌道に沿って(中心軸に平行として)測定した磁場分布を図6に示す。スペースの問題からセラミックダクトの長さは320mmであり、染み出した磁場を完全に生かすことは難しいが、磁場の強さとしては特に問題はない。

### 4. 結論

キッカー電磁石による蓄積ビームの局所バンプなしで入射を行う、新しい入射方式の為のパルス4極電磁石を製作し、磁場測定を行った。電流2000Aで励磁した場合の磁場分布は2次元磁場計算コードPOISSONによる計算結果とほぼ一致しており、製作した電磁石がパルスのにも4極電磁石になっていることを確認した。入射ビームの振動の振幅を、入射キッカーを用いた現状の入射システムによるものと同じ程度まで小さくする為には、ビームが通る水平15mmの位置で0.045T、すなわち3T/mの磁場勾配が必要である。測定の結果、それも十分に得られていることが分かった。

なお、現状の入射システムによる入射ビームの振幅と比較してパルス4極電磁石の電流を2000Aとしたが、実際はその2倍の4000Aまで可能である。入射ビームの持つ運動量成分を完全にゼロにする為に必要な磁場勾配は7.5T/mであり、その場合、入射ビームの振動は現状の入射系の約10分の1まで小さくできる。4000Aの場合、磁場勾配は約6T/mになると予想され、入射ビームの振幅は現状の半分以下に小さくなるのが期待される。

パルス4極電磁石は2004年7月にリングトンネル中に設置される(学会会期中には作業済みの予定)。そして秋の運転から、実際にビームを用いて、パルス4極電磁石による入射スタディを行う予定である。

### 参考文献

- [1] K.Harada, Y.Kobayashi, T.Miyajima, S.Nagahashi, "PF-AR INJECTION SYSTEM WITH PULSED QUADRUPOLE MAGNET", Proceedings of APAC 2004
- [2] K.Harada, Y.Kobayashi, T.Miyajima, "パルス4極磁石を用いたPF-AR入射システム", SAST03 加速器科学研究発表会, 2003年11月
- [3] T. Fujita, et al., "DETECTION OF WAKE FIELD USING TEST-BUNCH METHOD AT PHOTON FACTORY ADVANCED RING", Proceedings of PAC 2003