

EPOCHAL INJECTION SYSTEM USING A PULSED QUADRUPOLE MAGNET AT THE PF-AR

Kentaro Harada¹, Yukinori Kobayashi, Tsukasa Miyajima, Shinya Nagahashi
KEK-PF-Mag, 1-1 Oho, Tsukuba, 305-0031

Abstract

We developed epochal injection system using single pulsed quadrupole magnet (PQM) without any dipole kicker magnets for the PF-AR (Photon Factory Advanced Ring). The system enables us to inject the beam without a local bump of a stored beam that is inevitable for the usual injection system. The PQM has a length of 30cm and a field gradient of about 3T/m at a peak current of 2000A. Using the PQM, the amplitude of the oscillation of the injected beam is reduced to about a half of that only with septum magnets. The reduced amplitude is almost the same as that with the usual injection system. In this proceeding, we show the overview of the parameters of the system and the results of the magnetic field measurements and the machine study.

パルス4極電磁石を用いた新しい入射システムの開発

1. はじめに

最近の第3世代放射光源で主流となっているtop-up入射では、ユーザー実験を中断することなく入射が行われるため、入射中の蓄積ビームの振動を非常に小さく抑える必要がある。従来の入射システムでは、複数台のパルス偏向電磁石を使って蓄積ビームに局所的なパルスバンプを作る必要があるが、複数台のパルス電磁石を誤差なく励磁し、長時間に渡ってそれを保つことはそもそも簡単ではない。さらに、バンプの内側に6極電磁石などの非線形要素がある場合、入射されるタイミング以外のバンチに対しては、特殊な解を除いて原理的にバンプを閉じさせることができず、特に中小規模のリングでは大きな問題となる。そこで、パルス4極電磁石を用いた入射システムが開発された[1,2]。

4極電磁石は蓄積ビームの通過する磁極中心では磁場がゼロ、大振幅で振動する入射ビームの通過する場所では磁場が振幅に比例した有限の値となる。パルス4極電磁石を1台用いるだけで、蓄積ビームに重心振動を励起することなく、入射ビームのみを蹴って発散角を減らし、その振動を小さくすることができる。入射ビームの振動が従来の入射システムと同程度に抑えられれば、入射ビームは放射減衰の効果で振幅を減らし、やがて蓄積される。

パルス4極電磁石の試験を行ったPF-ARは、周長377m、入射エネルギーが3GeVで、通常はそれを6.5GeVまで加速してユーザー運転を行っている。常に単バンチ運転で、電流は最大約60mAである。パルス4極電磁石による入射システムの原理実証の為、PF-ARにパルス4極電磁石を設置し、入射試験を行った。ここでは、PF-AR用の入射パルス4極電磁石の設計、製作、磁場測定及び入射マシンスタディの結果について概略のみを述べる。

2. パルス4極電磁石のパラメータ

従来の入射システムの場合、蓄積ビームに局所パルスバンプを立てることにより、入射ビームの実効的な初期振幅を減少させる。入射ビームの振動の大きさは、クーラン・シュナイダー不変量（以降、入射エミッタンスという）を使って書くことができる。入射点におけるトゥイスパラメータを $\alpha_i = -2.9$ 、 $\beta_i = 18.3m$ 入射ビームの座標を $x_i = 48mm$ 、 $x'_i = 7mrad$ とすると、蓄積ビームの局所バンプ $x_b = 22mm$ 、 $x'_b = 2.8mrad$ により、入射エミッタンスは

$$\varepsilon_{inj} = \frac{1}{\beta_i} \left((x_i - x_b)^2 + (\alpha_i(x_i - x_b) + \beta_i(x'_i - x'_b))^2 \right) \\ = 37mm \cdot mrad$$

まで減少する。（バンプを立てない場合、この値は約133mm・mradである。）

パルス4極電磁石の場合、電磁石設置場所の各パラメータを添え字PQで表すことにすると、入射エミッタンスは

$$\varepsilon_{inj} = \frac{1}{\beta_{PQ}} \left(x_{PQ}^2 + (\alpha_{PQ} x_{PQ} + \beta_{PQ} (x'_{PQ} - k x_{PQ}))^2 \right)$$

となる。ここで、 $k = B'L/B\rho [m^{-1}]$ はパルス4極電磁石の強さである。 ε_{inj} を自由な値としてこの式を k で平方完成すると、その場所にパルス4極電磁石を設置した場合の到達可能な最小エミッタンス及びその時に必要な蹴り角が分かる。一方、これを k の方程式として、 $\varepsilon_{inj} = 37mm \cdot mrad$ とおいて解けば、その場所に設置して入射可能かどうかを実数解の有

¹ E-mail : kentaro.harada@kek.jp

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 [μSec]	2.4
インダクタンス [μH]	1.8

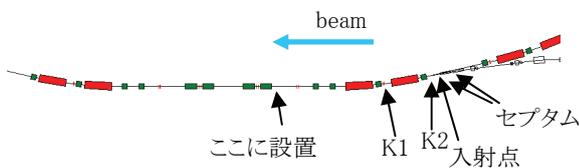


図1 パルス4極電磁石の設置場所

無で判別できる。(詳しい定式化については文献[1,2]を参照。) PF-ARの入射点下流の各場所に対してこの方程式を検討した結果、入射点より約15m下流、PF-ARの南対称点付近の4極電磁石QC2SEの上流側にパルス4極電磁石を設置するのが適当であることが分かった(図1)。設置場所の各パラメータは、 $\alpha_{PQ} = -1.7$ 、 $\beta_{PQ} = 17.9m$ 、 $x_{PQ} = -14.7mm$ 、 $x'_{PQ} = -3.9mrad$ であり、必要な強さは $k = 0.09m^{-1}$ である。その時、入射ビームへの蹴り角は $1.3mrad$ 、磁場勾配は $3T/m$ となる。入射ビームの通る場所での磁場は、約 $450G$ となる。パルス4極電磁石のパラメータを表1に示す。

鉄芯の長さは30cmとし、インダクタンスを小さく抑えるため、コイルは1巻きである。PF-ARの周回周期は $1.2\mu s$ であり、入射ビームを1回だけ蹴るため、半サイン波形のパルス幅は $2.4\mu s$ 以下である必要がある。強い磁場を得る為には、磁極の垂直ギャップは狭い方がよい。そこで、セラミックダクトの垂直ギャップを、リングの最小物理口径である挿入光源NE1と等価な値である $23mm$ とした。ダクトの厚さは $5mm$ 、クリアランスを片側 $1.5mm$ とり、磁極ギャップを $36mm$ とした。電磁石の写真を図2に、セラミックダクトの写真を図3に示す。

3. パルス4極電磁石の磁場測定

リングに設置する前に、性能検査をかねて磁場測定を行った。ここでは、1ターンのサーチコイルを用いて測定した、鉄芯中央における磁場勾配の水平及び垂直方向の分布を示す(図4)。なお、電流値は定格の $2000A$ である。蓄積ビームの通過する磁極中央で磁場がゼロ、振幅に比例して線形の磁場が励磁されていることが分かる。また、入射ビームの通

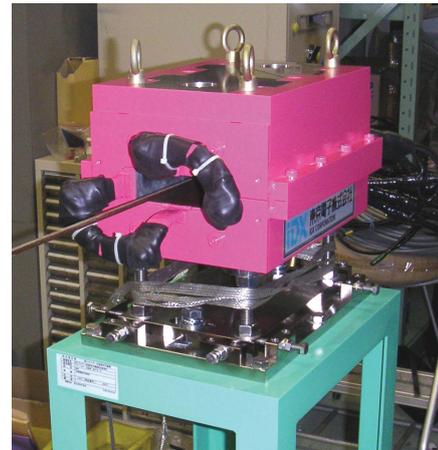


図2 パルス4極電磁石



図3 セラミックダクト

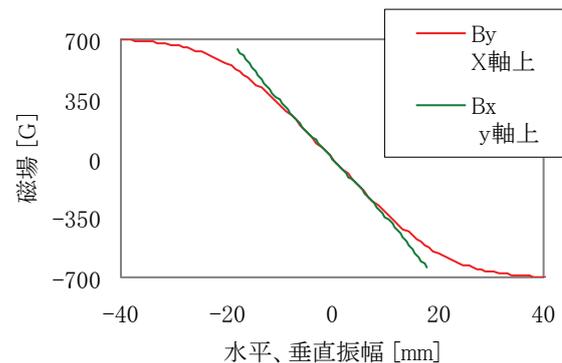


図4 電流2000Aの時の磁場勾配

過する $x \approx -15mm$ で必要な磁場 $450G$ が得られている。磁場測定の詳細については、文献[1,2,3]を参照。

4. マシスタディの結果

電磁石をリングに設置した後、まずは励磁のタイミングを入射タイミングに合わせる為の調整を行った。CTからの入射ビーム信号と、入射キッカーを打った時のノイズを参考にしてタイミングを合わせただけで、まずはパルス4極電磁石のみを用いてのビーム入射が可能となった。その後、パルス4極電磁石内のCOD補正を行うと、入射効率は従来の入射システムと同程度まで向上した。従来のキッカー及びパルス4極電磁石で入射を行った時の蓄積ビームの振動の様子を図5に示す。BOD電圧 $0.4V$ が振幅 $600\mu m$ に相当する。キッカーでは $\pm 600\mu m$ の振動が観測されているが、パルス4極電磁石では $\pm 100\mu m$ 以下になっている。ただし、スタディを始めた最初の段階では、蓄積電流値が増加すると入射率が落ちてゆき、蓄積電流値が $30mA$ を超えるとそれ以上の蓄

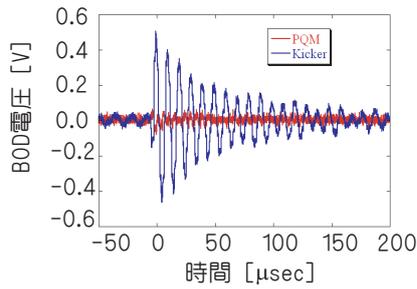


図5 蓄積ビームの振動

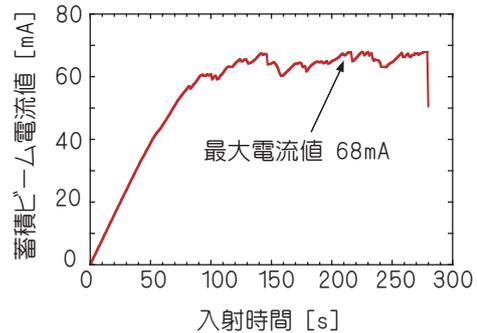


図7 調整後の入射の様子

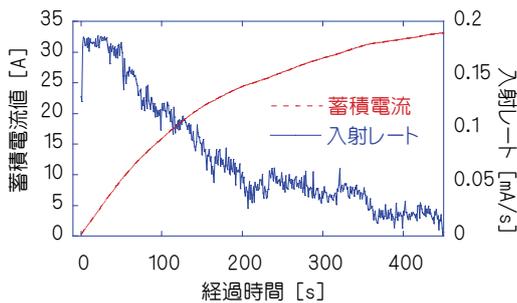


図6 スタディ開始当初の
入射レートと蓄積電流履歴

積はできなくなってしまった(図6)。

マシンスタディを継続して原因を調査した結果、蓄積電流値が30mA以上ある場合、入射ビームの有無に関わらず、パルス4極電磁石の励磁直後から数周回の内に電流が損失し、30mAまで落ちることが分かった。詳細は文献[5]を参照。結局、蓄積電流が増大するとPF-AR固有の問題である強いビーム不安定性により、ビームサイズが増大するだけでなく、ビームに裾のような部分が生じ、それがパルス4極電磁石によって損失しているらしいということが分かった。不安定性はRF電圧を調整することで抑制することが可能で、その結果、従来の入射システムと全く遜色ない、蓄積電流60mA以上まで安定的に蓄積することが可能になった。調整後の入射履歴を図7に示す。

5. 結論及び今後の発展

パルス4極電磁石を用いた新しい入射システムを開発し、実際に電源及び電磁石を製造、PF-ARに設置して入射が可能であることを実証した。マシンスタディ開始直後は蓄積電流を30mA以上にすることができなかったが、マシンスタディを継続することで、原因がビーム不安定性によるビームサイズの増大であり、RF電圧調整でそれを抑制できることが分かった。その結果、従来の入射システムと同様の入射効率で、蓄積電流60mA以上まで、安定的に入射を行うことができるようになった。

パルス4極電磁石を使った入射システムでは、蓄積ビームの重心振動は避けることができるが、ビームサイズ揺らぎである4極振動が生じてしまう。こ

れを避ける為にはより高次の電磁石を入射に使うことが効果的で、実際、PFリングにおいてパルス6極電磁石を使った入射システムを開発し、入射に成功している[6]。

謝辞

グループリーダーであり、本研究の発案者、共著者でもある小林幸則氏に仕事上の全てにおいて感謝いたします。また、電磁石・入射グループの皆様にもお世話になっています。本研究が実現したのは、小林正典前主幹及び春日俊夫主幹の強力なサポートのおかげです。放射光源真空グループの方々には、セラミックダクトや形状変換部分の設計及び製作、システムのリングへの設置に関して大変お世話になりました。PQM設置の為の純化用のキッカーの移設、マシンスタディにおける各種測定などに関して、共著者の帯名さん始めPF-AR共同チームのモニタグループ及びRFグループの方にお世話になりました。また、入射器の方々には入射を、KEKBの方々には貴重な連続入射を中断し、スタディをお許し下さいましたことを、それぞれ感謝いたします。関係者の皆様、本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] K. Harada, Y. Kobayashi, T. Miyajima, S. Nagahashi, "New injection scheme using a pulsed quadrupole magnet in electron storage rings", Phys. Rev. ST Accel. Beams 10, 123501 (2007)
- [2] 原田健太郎、小林幸則, "(解説)パルス4極電磁石による入射システム", 加速器学会誌(2巻3号、2005年10月)
- [3] 原田健太郎、小林幸則、長橋進也、宮島 司, "PF-AR入射用パルス4極電磁石の磁場測定", 第1回加速器学会, 2004
- [4] K. Harada, Y. Kobayashi, S. Nagahashi, T. Miyajima, T. Obina, A. Ueda, T. Mitsuhashi, "Beam Injection for the PF-AR with a Single Pulsed Quadrupole Magnet", Proceedings of PAC2005, pp.1517-1519
- [5] 高木宏之他, "PF-ARにおけるパルス4極電磁石を用いた入射システムの現状報告", 本年会プロシーディング, TP039
- [6] 高木宏之他, "PFリングにおけるパルス6極電磁石を用いた入射実験", 本年会プロシーディング, TP038