

## DEVELOPMENT OF A PULSED SEXTUPOLE MAGNET FOR THE BEAM INJECTION IN ELECTRON STORAGE RINGS

Yukinori Kobayashi<sup>1 A)</sup>, Kentaro Harada<sup>A)</sup>, Tsukasa Miyajima<sup>A)</sup>, Shinya Nagahashi<sup>A)</sup>,  
Norio Nakamura<sup>B)</sup> and Hiroyuki Takaki<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Photon Factory, High Energy Accelerator Research Organization, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

<sup>B)</sup> The Institute for Solid State Physics, The University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba, 277-8581

### Abstract

We succeeded in the beam injection using new injection system with a single pulsed quadrupole magnet (PQM) at the Photon Factory Advanced Ring in KEK. The PQM enables us to inject the beam into the storage ring with only one pulsed magnet. This is an obvious advantage compared with a conventional injection system using several pulsed dipole magnets. Since the barycenter of the stored beam is not kicked on the magnetic pole center of the PQM, we can reduce the coherent dipole oscillation which is often produced by the unclosed bump. It is important for the top-up injection in electron storage rings such as synchrotron radiation sources or high energy colliders. However, the turn-by-turn profile is modulated due to the excitation of the PQM since it provides the instantaneous focusing force to the beam. We have examined the injection system with a single pulsed sextupole magnet (PSM) to reduce both of the coherent dipole oscillation and the profile modulation. We are going to develop the PSM system, and then install it at the Photon Factory storage ring in next summer shutdown.

## 蓄積リングにおけるビーム入射のためのパルス六極電磁石の開発

### 1. はじめに

最近、放射光用光源リングや電子陽電子衝突リングにおいてTop-Up運転が行われるようになってきている。加速器運転中に連続的に入射を行うTop-Up運転を採用すると、電子ビームの寿命による電流損失を補い、蓄積電流値をほぼ一定に維持することができる。その利点は、積分電流値が増えることによる、衝突リングのルミノシティの増大、放射光リングのフラックスの増大などがあるが、他にも、蓄積電流値が一定となることで、例えばミラーや分光器等の歪など、電流値や熱負荷に依存する様々な問題が解消され、ビームや各種機器がより安定となる。また、連続入射を行うことで電子寿命の短いより低エミッタンス、高輝度なモードでの運転も可能になることが期待される。

数々のメリットがあるTop-Up運転であるが、その実現のためには従来までのビーム入射では問題にならなかったいくつかの課題を解決しなければならない。その課題の一つが、入射時における蓄積ビームの軌道変動の問題である。蓄積リングでは、すでに蓄積されているビーム（蓄積ビーム）に積み上げる（注ぎ足す）ように、入射ビームをリングに打ち込んでいく。その場合、キッカー電磁石と呼ばれる数台のパルス偏向電磁石によって、入射点にパルスのバンパ軌道を作り、蓄積ビームを失うことなく、入射ビームを中心軌

道に向けてキックして、リングに捕獲させる方法がとられている（入射バンパ方式：図1(a) [1]）。

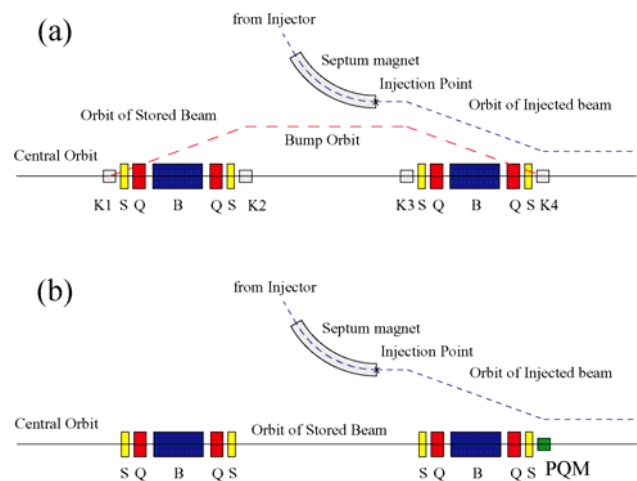


図1：図(a)はパルス偏向電磁石を用いた従来の入射システムの概念図を、図(b)はパルス四極電磁石を用いた新しい入射システムの概念図を示す。

この入射方式は確立されており、ほぼ100%の電子蓄積リングで採用されているが、バンパ軌道を作るために蓄積ビームを蹴るという操作が、Top-Up運転の場合には大きな問題となる。理想的なバンパにおいては蓄積ビームの軌道変動は生じないが、現実にはバンパ内に存在する誤差磁場や非線形磁場などが原因となって、入射時に蓄積

<sup>1</sup> E-mail: yukinori.kobayashi@kek.jp

ビームのコヒーレント双極振動が発生してしまう。これを抑制することはなかなか難しい問題である[2]。特にTop-Up運転時は入射中も実験することを想定しているため、バンプの蹴り残りによって一瞬蓄積ビームが揺さぶられることは好ましくない。

このような状況のもとで、我々はパルス偏向電磁石を用いる従来の入射方式に替わる新しい入射方式として、パルス多極電磁石による入射方式を提案した。四極以上の $2n$ 極電磁石( $n \geq 2$ )は、磁極中心では磁場がゼロであり、垂直磁場は中心からの距離の $n-1$ 乗に比例して強くなるという特徴を有している。そのため、中心を通る蓄積ビームの軌道を変えずに、入射ビームのみを蹴ってその振動を小さくすることが可能となる。

パルス多極電磁石による入射方式の最初の試みとして、我々はまずパルス四極電磁石(PQM)による入射システム(図1(b))を開発し、そのシステムを高エネルギー加速器研究機構放射光実験施設の6.5GeVリング(PF-AR)に設置、ビームによる入射テスト実験を行った。実験の結果、1台のPQMで入射が可能であることが実証され、さらに蓄積ビームに対しては、PQM中のCODを補正し、電子軌道をPQMの中心にあわせることで、コヒーレント双極振動がほぼ抑えられることを確認した[3]。しかし、想定されていたことではあるが、PQMでは中心軸上の線形磁場(勾配)によってビームプロファイル(ビームサイズ)の変動(コヒーレント四極振動)が発生する。実際に高速ゲートカメラで測定を行った結果、周回毎のビームプロファイルの変動が観測された。瞬間的なビームサイズの変動が放射光実験にどれほど影響するかは定かではないが、できるだけ変動を小さくするほうが望ましい。

この変動を小さくするためには、例えば入射点の上流にもう一台のPQMを設置し、蓄積ビームのコヒーレント四極振動を打ち消すように励磁する方法がある。その場合、入射ビームに影響を及ぼすことなく、蓄積ビームのサイズ変動を2台のPQM間の局所的な変動に抑えることができるが、1台のパルス電磁石で入射が可能であるというメリットがなくなり、また2台の設置場所間の位相やベータ関数などの条件が整っていないと変動を打ち消すことがなかなか困難である。

そこで、我々は次にパルス六極電磁石(PSM)を用いて入射を行う方法の検討を行った。PSMを用いた入射システムでは、蓄積ビームの軌道変動及びサイズ変動の両方を小さく抑えることができる。検討の結果、技術的には困難ではあるが、 $1.2\mu\text{s}$

のパルス幅で動作するパルス六極電磁石が開発できれば、PFリングにおいてビーム入射が成立しうることが分かった。ここでは、その詳細および今後の予定について報告する。

## 2. 蓄積ビームに対するパルス六極電磁石(PSM)のメリット

六極電磁石は磁極中心の磁場がゼロで、中心からの距離の2乗に比例して(四極電磁石の場合は距離に比例)垂直磁場が強くなるという特徴がある。つまり、四極電磁石と六極電磁石で入射ビームの位置における蹴り角が同じであれば、蓄積ビームに対しては、六極電磁石の方が、四極電磁石より蹴り角が小さくなり、入射時における蓄積ビームの振動(コヒーレント四極振動)をさらに低減できることが期待できる。図2に水平位置に対する四極電磁石と六極電磁石の蹴り角を示す。青線が六極電磁石で赤線が四極電磁石である。図2(a)に示すように、 $x=15\text{mm}$ で、四極と六極電磁石が同じ蹴り角を入射ビームに与えるとすると、蓄積ビームが通過する磁極中心付近では図2(b)のようになる。蓄積ビームのビームサイズが $1.0\text{mm}$ 程度であるとすると、蓄積ビームに対する蹴り角は、四極電磁石に比べて $1/15$ 程度となる。したがって、完全ではないもののビームプロファイルの変動は十分に低減できるはずである。

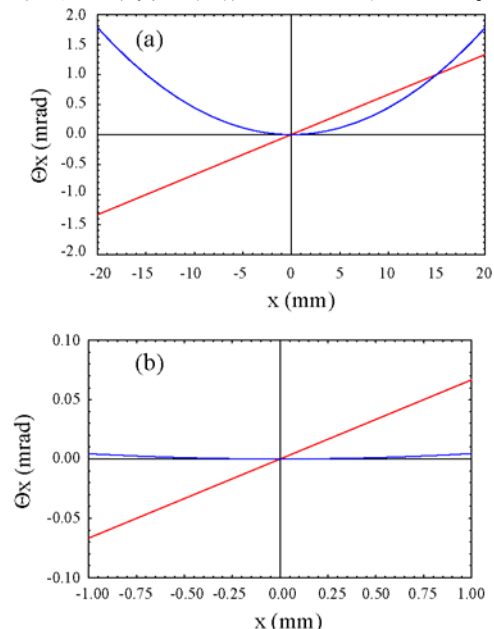


図2：四極電磁石(赤線)と六極電磁石(青線)の水平位置に対する蹴り角を示す。図(a)は $x=15.0\text{mm}$ の位置でも入射ビームに対して $1.0\text{mrad}$ の蹴り角を与える場合を想定したときの蹴り角を示している。図(b)は、図(a)と同じ蹴り角を示しているが、 $x=-1.0\text{mm} \sim 1.0\text{mm}$ の範囲を拡大して表示している

### 3. PFリングにおけるパルス六極電磁石の設置場所

図3にPFリングにおける入射点付近から北の長直線部付近にかけての電磁石配置図を示す。PFリングは昨年度リング直線部の増強計画が完了し、既設直線部の長さが延長され、また4箇所の短直線部が新たに作り出された[4]。したがって、パルス六極電磁石の設置スペースとして、現在既設挿入光源前後にその候補となるスペースが何箇所か存在する。その場所をターゲットとして、入射用の1台のパルス六極電磁石の最適場所および最適強度をシミュレーションにより求めた[5]。その結果、北の長直線部に設置されているアンジュレータ#02の上流が最適な設置場所であり、入射に必要な強度は  $K_2 = B''L/B\rho$  でおおよそ  $12 \text{ m}^{-2}$  となる。すなわち磁石長0.3mと仮定すると、中心軌道からおおよそ15mmのところまで370Gauss程度の磁場が出せるパルス六極電磁石が開発できれば、その電磁石1台でPFリングにビームを入射することが可能になる(図4)。

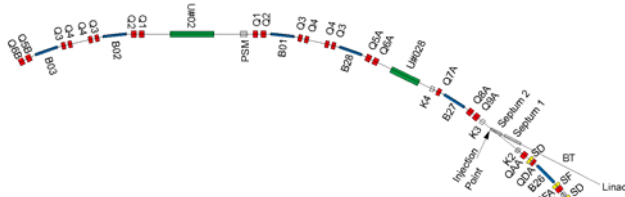


図3：PFリングの入射点付近から北長直線部付近までの電磁石配置図を示す。パルス六極電磁石の最適設置場所はアンジュレータ#2(U#02)の上流でPSMと記した場所である。

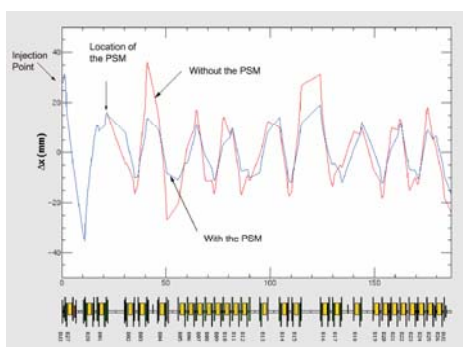


図4：PFリングに入射されたビームの重心の、入射後1ターン目の軌道を示す。赤線はパルス六極電磁石を励磁しない場合、青線は励磁した場合の軌道である。

### 4. パルス六極電磁石のパラメータおよび磁石形状案

表1に、現時点で開発を予定しているパルス六極電磁石のパラメータ案を、図5にその磁石断面形状案を示す。ボア径に関しては、リングのア

パーチャおよび真空チャンバー(セラミックチャンバーの厚みとも関係があるが、できるだけ小さくして電磁石およびパルス電源に対する負荷を小さくしたいと考えている。

表1：パルス六極電磁石のパラメータ案

磁場強度	$K_2$	$12 \text{ m}^{-2}$
磁石長	L	0.3 m
磁場勾配	$B''$	$333 \text{ T/m}^2$
ボア径	$\phi$	60 mm
パルス長	$\tau$	$1.2 \mu\text{s}$

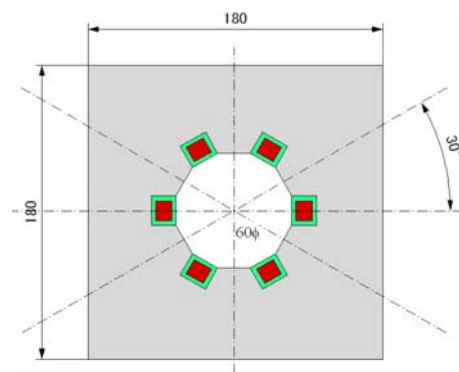


図5：パルス六極電磁石の磁石形状案。六個の四角(茶色)はコイルを示す。

### 5. 今後の予定

今後は、磁場計算を行いながらパルス六極電磁石の最適化をはかり、年度内に電磁石の製造を行う。そして、来年夏のリング停止期間中に、トンネル内に電磁石を設置し、秋からビームテストを行うことを予定している。

### 参考文献

- [1] See for example, Gottfried Mülhaupt, "Synchrotron Radiation Sources A Primer, Chapter 3: Injection Systems", World Scientific, 1994.
- [2] H. Tanaka et al., "Suppression of injection bump leakage caused by sextupole magnets within bump orbit", Nucl. Instrum. and Meth. A539, 547 (2005)
- [3] K. Harada et al., "Beam injection for the PF-AR with pulsed quadrupole magnet", PAC'05, Knoxville, Tennessee, p. 1517.
- [4] T. Honda et al., "Commissioning of the PF ring after the reconstruction for the straight-sections upgrade", SRI'06, Daegu, Korea, proc. will be published soon.
- [5] Y. Kobayashi et al., "Possibility of the beam injection using a single pulsed sextupole magnet in electron storage rings", EPAC'06, Edinburgh, UK, proc. will be published soon.