

## BEAM INJECTION STUDY BY USING A PULSED SEXTUPOLE MAGNET AT THE PF-RING

Hiroyuki Takaki<sup>1,A)</sup>, Norio Nakamura<sup>A)</sup>, Yukinori Kobayashi<sup>B)</sup>, Kentaro Harada<sup>B)</sup>, Tsukasa Miyajima<sup>B)</sup>, Akira Ueda<sup>B)</sup>,  
Shinya Nagahashi<sup>B)</sup>, Takashi Obina<sup>B)</sup>, Tohru Honda<sup>B)</sup>, Miho Shimada<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> ISSP, Univ. of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8581, Japan

<sup>B)</sup> KEK, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

### Abstract

We have developed a new beam injection system by using a single pulsed sextupole magnet (PSM) at the Photon Factory storage ring (PF-ring) in KEK. We demonstrated the beam injection with this system and succeeded in storing a beam current of 450 mA. The beam oscillation of the stored beam during the beam injection was very small compared with the normal injection system. This is the first demonstration of the PSM beam injection in electron storage rings all over the world.

## PFリングにおけるパルス6極電磁石を用いた入射実験

### 1. はじめに

我々は、2008年春のシャットダウン期間を利用して、PFリングにパルス6極電磁石 (Pulsed Sextupole Magnet: PSM) を用いた新しい入射システムをインストールした。電子蓄積リングの入射では、入射ビームのコヒーレント双極振動を小さくする為に、ビーム入射時に数台のパルス電磁石によってバンパ軌道を作るのが一般的である。しかしながら、完全なバンパ軌道を作ることは、キッカーの誤差磁場やタイミングの誤差や揺らぎの為に難しく、また、バンパ軌道の中に6極電磁石等の非線形磁場を持つ構成要素がある場合にはバンパが閉じないこともある。このバンパ軌道の不整合は、蓄積ビームを振動させる原因となり、特に放射光リングにおいてTop-up運転(連続的に入射し、蓄積電流をほぼ一定に保ちつつ、ビームシャッターを開けた状態で運転すること)を行う場合は、光源点が振動し光強度が変動するという問題となって現れることになる。この入射時の蓄積ビームの振動をできる限り抑制する為に、我々はPSMを使用した入射システムを提案してきた[1-2]。PSM入射では、入射ビームは磁場中心からの距離の2乗に比例する磁場を受けリングに捕獲される。一方、蓄積ビームはPSMの磁場中心付近を通るので、その磁場の影響はかなり弱く、入射時のビーム振動は殆どない。したがって、このPSMを使ったビーム入射システムは、Top-up運転に非常に適していると期待される。

今回我々は、まだテスト実験段階ではあるものの、PFリングにおいてPSMを用いたビーム入射に世界で初めて成功した。以降では、そのテスト実験結果を含めて報告する。

### 2. パルス6極電磁石のインストール

PSMの磁極長は300mm、ボア半径は33mmである(図1左)[2]。PFリングにおいて入射のために要求されるPSMの積分磁場強度は、入射ビームが通過するPSMの磁極中心から水平方向に15mm離れたところで120Gauss·mであり、これは規格化磁場勾配強度( $K_2=B''L/B\rho$ )で $13\text{m}^{-2}$ に相当する。ここで、 $B''$ は6極磁場勾配であり、 $L$ は磁極長、 $B\rho$ は磁気剛性である。

PFリングにおけるPSMの設置場所は、シミュレーションによる最適化により、長さ8.9mの北長直線部にあるアンジュレータ#02の下流とした。パルス磁場の歪みと遅れを引き起す原因となる渦電流を減少させる為に、真空チャンバーはセラミック製とし(図1右)、チャンバーの肉厚を3mm、チャンバーと磁極間のクリアランスを0.5mmとした。また、チャンバーの内側は、厚さ $3\mu\text{m}$ のチタニウムでコーティングした。

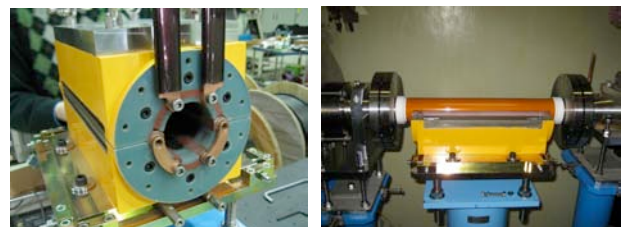


図1: PSM (黄色) を正面から見た写真 (左) と 半割にしてセラミックチャンバー (白色) を載せた写真 (右)。コイルは1ターンである為、銅棒の両端を一筆書きで繋ぐような構造になっている。磁極の両端はガラスエポキシ (緑色) で絶縁されている。セラミックチャンバーは $100\mu\text{m}$ のカプトン膜 (茶色) によって保護している。

<sup>1</sup> E-mail: takaki@issp.u-tokyo.ac.jp

### 3. ビーム入射実験

#### 3.1 入射パラメタの最適化

PFリングの周回時間はおよそ $0.6\mu\text{sec}$ であるので、PSMのパルス磁場の形状が $1.2\mu\text{sec}$ 以下のハーフサインのパルスであれば、入射ビームは一度だけPSMによるキックを受けるだけですむ。すなわち、周回した時にはパルスはゼロになっているので、再びキックを受けることがない。しかし、このようなパルス電源を用意することができなかつた為、今回のビーム入射のテスト実験には $2.4\mu\text{sec}$ のハーフサインの既設パルス電源を使用した。したがって、入射のタイミングを $2.4\mu\text{sec}$ のパルスのピークとした場合、入射後リングを1周してきたビームは、PSMに到達した時に再びPSMからキックを受けることになる。その強さは最初のキックの約0.7倍に相当する。ビーム入射に対するこのキックの影響を見積もる為に、多粒子によるトラッキングシミュレーションを行い、PFリングにおける通常のオペレーションチューンでの捕獲効率を予測した。

図2は、入射ビームの入射点における入射角（蓄積ビームと平行時をゼロとする）と入射ビームの捕獲効率をプロットしたものである。入射タイミング

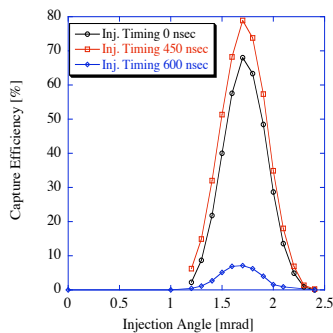


図2：入射ビームの入射角とその捕獲効率のシミュレーション結果。黒、赤、青のラインはそれぞれ入射タイミングが0、450、600nsecである時の入射効率を示している。入射タイミングに関係なく1.7mradが最良入射角となることが分かる。

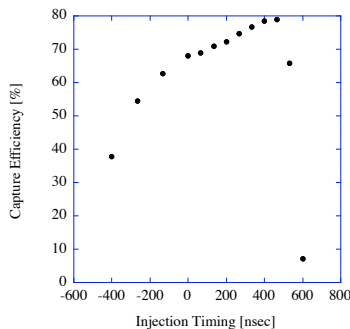


図3：入射タイミングと捕獲効率のシミュレーション結果。入射角は1.7mradとしている。入射タイミングがゼロの点は、ハーフサインパルスのピークの位置としている。捕獲効率は広い範囲で60%を超えており、入射タイミングはそれほど厳しくないことが分かる。

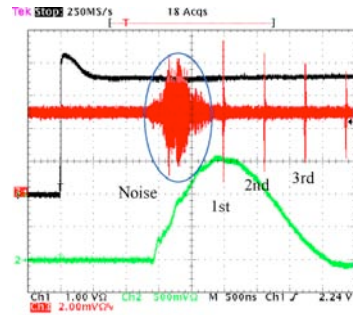


図4：デジタルオシロスコープを使って測定したPSMの励起パルスと入射ビームの関係。黒は放電トリガーのタイミング、緑はCTでモニタしたPSMの励起電流パルス波形、赤はリングの壁電流モニタの波形。シングルバンチ入射モードの為、壁電流モニタの間隔はPFリングの周回時間（約 $0.6\mu\text{sec}$ ）を示している。最初のキックの前にあるノイズはその周期が周回時間からずれていることから、パルス電源のノイズであることが分かる。

はPSMの励起パルスのピークをゼロとしており、そこから入射ビームが来るまでの時間を表している。セプタム電磁石の出口で、水平方向に理想軌道から $27.0\text{mm}$ 外側にビーム入射があると仮定した場合、約 $1.7\text{mrad}$ の入射角で入射すれば入射タイミングが0nsecの時でも60%以上の捕獲効率を達成出来ることが分かる。図3は入射タイミングと捕獲効率の関係を示しているが、理想的な入射条件が満たされれば、入射タイミングが $-200\text{nsec}$ から $500\text{nsec}$ の範囲で、捕獲効率を60%以上確保できることが分かる

#### 3.2 シングルバンチ入射

初めてのビーム入射テスト実験は、2008年5月に行なった。まず、入射ビームとPSMとのタイミングを調整するために、シングルバンチモードでの入射を行った。入射ビームのタイミング調整は、PFリングの壁電流モニタからの入射ビーム信号とPSMのパルス電源の出力波形を同時観測して行った。入射ビームの信号が、1回で消えることなく周回を繰り返すタイミングを、遅延モジュールを調整しながら捜した。図4は、高周波加速空洞（RF）を切った状態での調整を行ったときの入射ビームとパルス磁場のタイミング関係を表している。この図は、パルス磁場のピークで入射が行われていることを示しているとともに、強度が徐々に減っているものの周回が繰り返されていることを示している。このタイミング調整後、RFをONにすると直ちに入射ビームが蓄積できるようになった。世界で初めてPSMで入射が可能になった瞬間である。

#### 3.3 マルチバンチ入射

次に、PSM入射システムを使ってマルチバンチモードで入射を行い、PFリングの通常運転時の蓄積電流値である $450\text{mA}$ までの蓄積を行った。図5はその時の蓄積電流値の変化、図6は同時に測定した入射効率である。現状でのPSM入射の繰り返し周波数

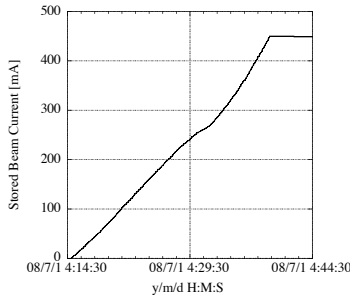


図5：PSM入射による蓄積ビーム電流値の経過。450mA蓄積するのに約20分を要している。

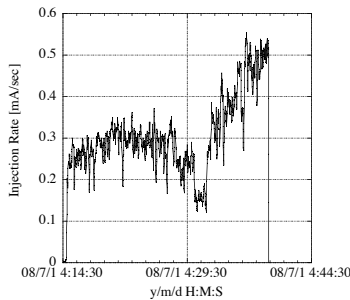


図6：図5と同時に測定した入射効率の経過。途中ビーム輸送路のスリットを開く事で、効率が0.5mA/secまで上昇している。

は最高で12.5Hzであり、この時の入射レートは0.5mA/secであった。

### 3.4 Top-up運転に向けての連続入射試験

蓄積ビーム電流が450mAを超えたところで、PSMを使ったTop-up運転に向けての連続入射試験を行った。連続入射の条件として、蓄積電流値が450.00mAまで減少したら1Hz入射を開始し、450.05mAになったら入射を終了するように設定した。2時間測定を行い、図7はその時の蓄積電流値、及び拡大した10分間の安定度を示している。入射条件は、繰り返しの周波数を12.5Hzから1Hzにした以外は変更していない。電流モニタの測定周期は0.5秒である。図からも解る通り、連続入射時のPSMの動作は非常に安定であった。このときの蓄積電流の一定度は0.02%と見積もられるが、電流値測定の高速度および入射電荷量の調整がうまくいけば、0.01%以下も可能であると思われる。

### 3.5 蓄積ビームへの影響

PSMを用いた入射システムの最大の長所は、入射時に蓄積ビームがあまり振動をしないことである。それを確認する為に、入射ビーム無しでPSMと通常のキッカーをそれぞれ励起し、BPMを使って蓄積ビームの振動をターンごとに測定し比較した(図8参照)。通常のキッカーのパラメタを使った場合、蓄積ビームは水平方向に±800μm程度、垂直方向に±100μm程度振動するのに対して、PSMでは水平方向に±200μm程度垂直方向は殆ど変化が見えないという結果を得た。PSMを励起した時に水平方向に振

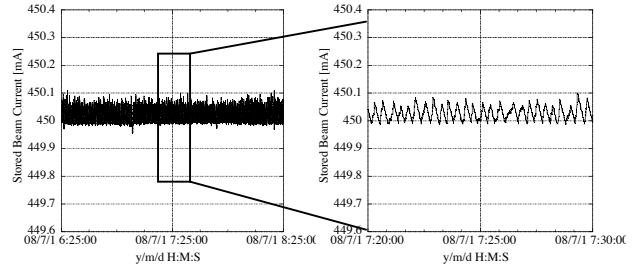
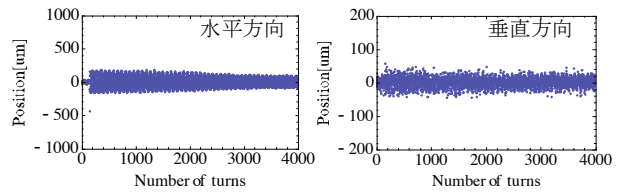


図7：連続入射試験時の電流の安定度。0.1mA(約0.02%相当)の範囲で一定に維持されている。

#### (a)PSM



#### (b)通常キッカー

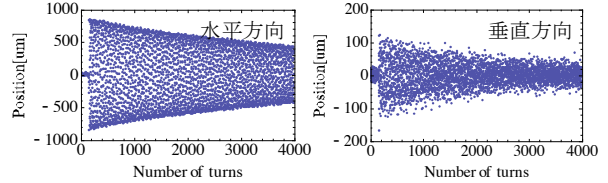


図8：励磁した直後の蓄積ビームの振動をターンごとに測定した位置データ。PSMによる蓄積ビームの振動(上)と通常キッカーによる蓄積ビームの振動(下)を示している。

動が見られるのは中心軸を完璧に出せていないのが理由だと考えられ、この振動の大きさについては現在シミュレーションとの比較を行っている。

## 4. まとめ

我々は、PSMを用いた新しいビーム入射システムを開発し、それをPFリングに2008年春にインストールした。ビーム入射実験は成功し、PSMを使った入射によって450mAまで電子ビームを蓄積できることを確認した。また、その入射効率は通常の入射キッカーを用いたものと同じ程度の効率を得ることができた。蓄積ビームに対する影響を調べ、水平方向に±200μm程度、垂直方向には殆ど変化が見えないという結果を得た。これは、通常キッカーを使った入射に比べてビームの振動が非常に小さく、これによりPSM入射システムは非常に有効に使える事が証明できた。今回の入射実験は、電子ストレージ・リングでPSMを使った入射としては世界初である。今後は、放射光を使ってビームの振動を調べると共に、2回目のキックに因る影響を抑える為に、オペレーティング・チューンの最適化を行う予定である。

## 参考文献

- [1] Y. Kobayashi and K. Harada, Proc. of the EPAC 2006, Edinburgh, p3526.
- [2] H. Takaki et al., Proc. of the PAC 2007, Albuquerque, p231.