

## BEAM INJECTION STUDY USING A NEW PULSED POWER SUPPLY FOR THE PULSED SEXTUPOLE MAGNET AT THE PF RING

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

<sup>A)</sup> Institute for Solid State Physics, The University of Tokyo,

5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8581

<sup>B)</sup> Photon Factory, High Energy Accelerator Research Organization

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801

### Abstract

We have fabricated a new power supply optimized for the pulsed sextupole magnet (PSM) at the Photon Factory storage ring in the spring of 2010. To avoid the PSM kick to the injected beam at the second turn, its pulse had a half-sine shape with a full width of about 1.2  $\mu\text{sec}$ , since the revolution period of the PF ring was about 0.6  $\mu\text{sec}$  and the injection timing was adjusted at the peak of the excitation waveform. The beam injection with the new power supply was operated successfully. In addition, a fast-gated camera was installed at the PF ring, by which we could measure turn-by-turn beam profiles of the stored and injected beams. We confirmed that the modulation of the stored beam profile during the injection, which was measured with the pulsed quadrupole injection at the Photon Factory Advanced Ring, was almost disappeared by the PSM injection.

## PFリングにおけるパルス6極電磁石用新電源による入射実験

### 1. はじめに

放射光源で一般的に用いられているキッカーバンブを用いたビーム入射システムでは、キッカーの蹴り角やタイミング等にミスマッチがあると、蓄積ビームの振動がビーム入射時に発生する。この入射時の蓄積ビームの振動は、放射光源におけるトップアップ入射の広まりと共に考慮すべき課題となって来た。

これに対する解としてPF-ARにおいてパルス4極電磁石を使った入射が行われた<sup>[1]</sup>。だが、パルス4極入射時に蓄積ビームの4極振動が発生した為、こ

れを抑える為に、パルス6極電磁石(PSM)を用いた入射システムを2008年春にPFリングに導入した<sup>[2]</sup>。PSM入射システムに使用したパルス電源は、予算の関係上PFリングの周長に最適化されたものではなかった。PFリングのリング周回時間は0.624  $\mu\text{sec}$ であり、ハーフサインのパルスのピークでビームを入射した場合、リングを周回して来たビームが次にPSMによって蹴られないようにするには、パルス幅が約1.2  $\mu\text{sec}$ 以下である必要がある。しかしながら今迄使用していた電源のパルスは図1に示すように2.4  $\mu\text{sec}$ のパルス幅を持っていた為、2周目のビームも1周目の約0.7倍の強さの蹴りを受け、これは無視出来ない大きさであった。この2周目のキックがある為、入射ビームの捕獲効率はリングのオペレーションチェーンに依存する事になり、シミュレーションによる予測でも70%を切る値となっていた<sup>[2]</sup>。今回、このパルス幅を1.2  $\mu\text{sec}$ としたPFリングに最適化した新しい電源を製作し、それを使ったPSM入射実験を行ったので報告する。

### 2. 新電源

新電源への要求は、パルス波形はハーフサインで全幅は1.2  $\mu\text{sec}$ 、ピーク電流は3000A、最大電圧はPSMの耐圧の制限から30kV、最大繰り返しは25ppsとした。

新電源は、DC電源部とパルサー部からなっており、DC部はリングトンネル地下に設置し、パルサー部は少しでも接続部が持つインダクタンスを小さくする

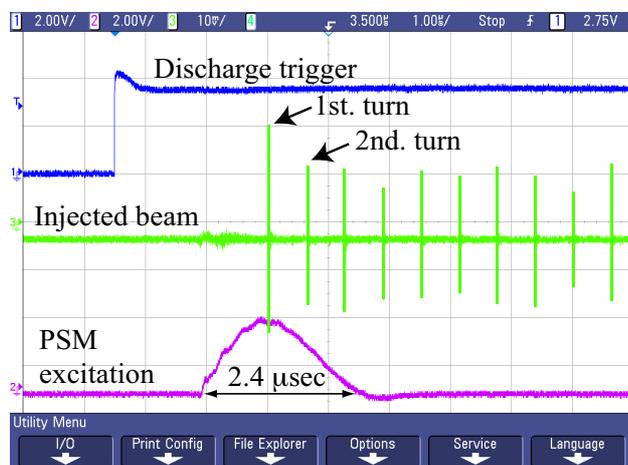


図1 : 旧電源のパルスと入射ビームの関係。

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

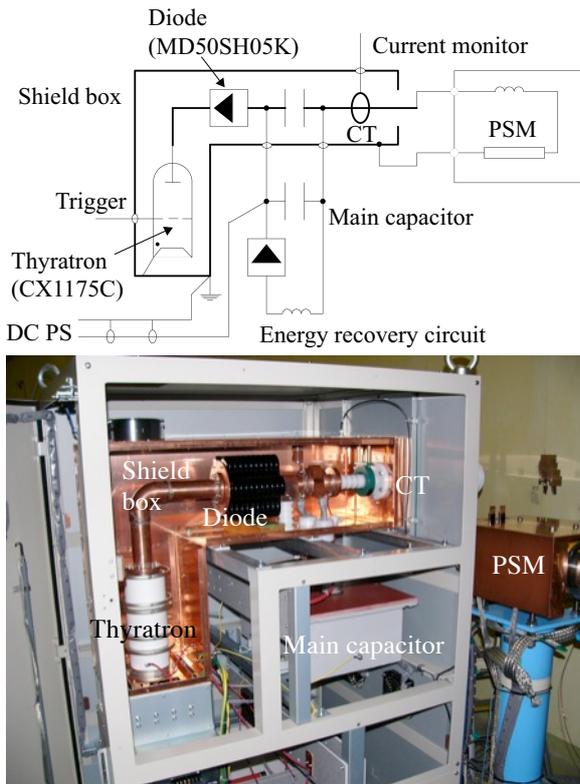


図2：パルサー部の回路の概略図（上）とリングトンネル内におかれたパルサー部実機の内部の写真（下）。回路図は各コンポーネントの配置が写真と同じになる様に描かれている。パルサー部の写真の右に見えるのがPSMで、パルスノイズを撒き散らすのを抑える為に銅の板で囲っている。

為にリングトンネル内に設置した。

パルス発生回路は、電源内蔵のキャパシタンスにインバーター方式で充電し、その電荷をサイラトロンによるスイッチングによってL負荷のPSMに流す方式とした。パルサー部の回路の概略図と実機の写真を図2に示す。回路図のメインのコンデンサ上方にあるのはパルス幅微調整用のコンデンサである。サイラトロンは2ギャップ構造を持つE2V社製のCX1175Cを使用し、同軸構造をしたハウジングの中に設置した。ハウジング内はファンによって強制空冷する。一般的にマルチギャップのサイラトロンは回復時間が遅く、今回使用したサイラトロンも回復時間が約50μsecある。逆電流を防ぐ為にOrigin electronic社製のダイオード（MD50SH05K、写真黒色部）を入れて対処したが、それでもダイオードの逆回復時間が0.5μsec程ある為、その時間だけは逆電流が流れてアンダーシュートが発生する。しかしながら、KEKライナックからPFリングへのビーム入射は常にシングルバンチであり、タイミングを調整する事でアンダーシュート部を回避する事ができる為、問題にはならない（3.1節参照）。

新電源において、最も電力消費の大きい部分はメ

インのコンデンサ電荷吸収回路での損失である。本電源のコンデンサ電荷量 $Q_c$ は21J/shotであり、パルスの最大繰り返しを25ppsとすると電力は525Wにもなる。これを逆充電吸収抵抗で吸収しようとするれば、コスト、サイズ、冷却などの点で考慮すべき問題となる。そこで、共振回路を設置してコンデンサ逆充電電荷を使って電力を回生する方式にした。電力回生回路の共振時定数は、サイラトロンの回復時間 $T_r$ に対して、 $Tr < (\pi/2)\sqrt{LC}$ となるようにインダクタンスを調整した。得られたパルス波形を図3に示す。パルス電流の測定に使用したCTはpearson社製のmodel-411で、20dBの減衰器を着けて測定した。PSMが持つインダクタンスは100kHzで2.4μHであり、抵抗値は100kHzで0.055Ωであった。したがって、最大電圧30kV以内で3000Aを出す為には電源が持つインダクタンスは1.4μH以下である事が必要であり、今回28.5kVで3000Aを出せているので、接続部込みで電源が持つインダクタンスは1.29μHである。出力パルスのピーク電流の繰り返し変化時の変動は0.5%以下であった。

電源のコントロールは、旧電源がPFリングの制御システムから孤立していたのに対して、新電源ではLinuxCPUモジュール付きのPLCを電源内部に組み込み、PFの制御の標準となっているEPICSによる制御ができるようにした。

### 3. 入射実験

#### 3.1 入射タイミング

タイミング調整には、PFリングの壁電流モニターで測定した入射ビームの信号と電源のCTで測定した励起波形を使用した。ビーム入射は繰り返し0.5Hzのシングルバンチモードで行い、タイミング調整時には入射ビームが蓄積されないように、入射後250msecを経過したらRF-KOで入射ビームを蹴り落とした。図3に示すように、入射ビームがPSM励起パルスのピークに来る様に調整し、更に2ターン目がゼロクロス位置に来る様に微調整した。図中の励

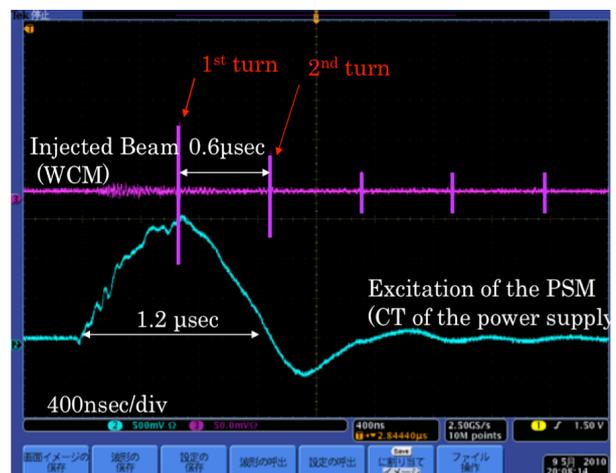


図3：入射ビームとPSM励起パルスの関係。

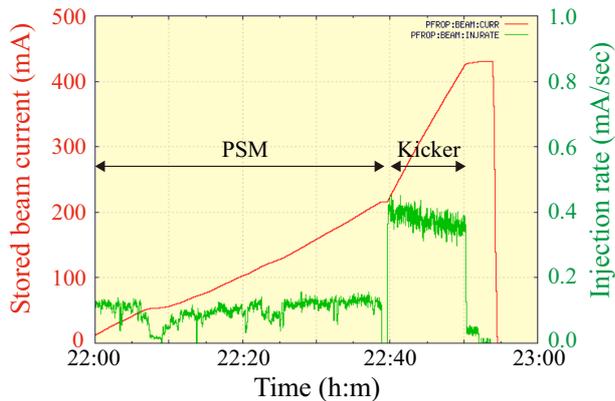


図4：パルス6極入射とキッカー入射の蓄積電流値と入射レート。入射の繰り返しは5Hz

起パルス波形が乱れているのはケーブルによる反射の影響である。新電源のアンダーシュート部分が若干大きかったが、2ターン目をゼロクロス位置に合わせる事で2ターン目以降の入射ビームが蹴られないように出来る事がこの図から分かる。

### 3.2 PSM入射と通常のキッカー入射の切り替え

新電源を使ったビーム入射は問題なく行われた。図4は、最初PSMで入射し、途中から通常のキッカー入射に途中から切り替えた様子を示している。切り替えに要するのは短時間（パルス電源の電圧を上下させる時間）で、この切り替えは逆も可能であり、現状ではPFでどちらのモードでも切り替えて運転出来るようになっている。

### 3.3 ビーム捕獲効率

新電源によって1ターン入射が出来る事になった為、旧電源での2ターン入射に比べてビーム捕獲効率は向上する事が予想される。多粒子トラッキングを使ったシミュレーションでは、2ターン入射ではビーム捕獲効率が67%、1ターン入射では92%が期待される<sup>[2]</sup>。しかしながら図4に示すように、現状ではPSMの入射レート（捕獲効率×入射電荷×繰り返し）はキッカー入射の約1/3程度のしかなく、現在原因を調査中である。

### 3.4 蓄積ビームの振動

この春の入射試験から、BL27に設置した高速ゲートカメラを使って入射ビーム及び蓄積ビームのターン毎のプロファイル測定できるようになった。ただし、同じビームを毎ターン追いかける事は出来ない為、入射トリガーに対してゲートを発生させるタイミングの遅延時間を変化させて、別のビームのターン毎のプロファイルを追いかけていく方式である。蓄積ビームはシングルバンチモードとし、CCDのゲート時間は50nsecとした。

PSMを励起した直前及び直後の蓄積ビームのプロファイルを図5に示す。ターン番号5の時にPSMを励起した。蓄積ビームの水平方向の振動が見やすい

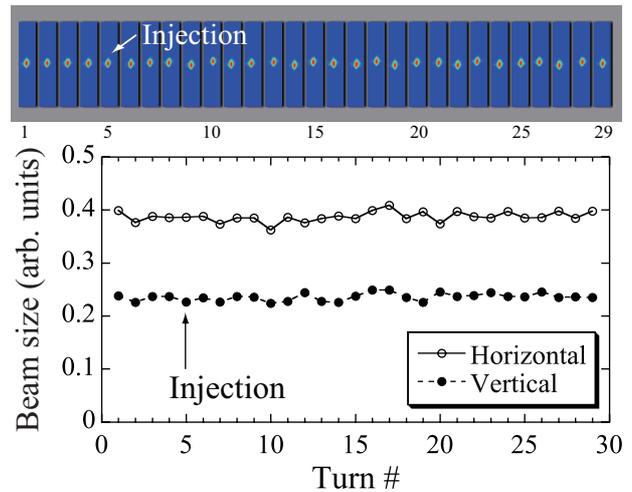


図5：高速ゲートカメラによって撮影したPSM入射前後の蓄積ビームのターン毎のプロファイルの（上）とビームサイズの変動（下）。PSMの励起はターン番号5。上図プロファイルは縦軸がビームの水平方向を示す様に配置した。

ように各プロファイルは90度回転して並べた。ビームサイズのグラフは、各ターンにおけるビームプロファイルをガウス分布でフィットし、水平垂直それぞれの1σの値をプロットしたものである。各ターンでのビームサイズは変動が少なく非常に安定しており、パルス6極電磁石を使うメリットの一つであった「入射時の蓄積ビームプロファイルの変動がパルス4極電磁石入射に比べて小さくなる」という事が証明できた。ただ、蓄積ビームの水平方向の重心振動が若干見えており、これについては現在調査中である。

## 4. まとめ

今回我々は、PFリングに最適化したパルス幅をもつPMS入射用新電源を製作し、ビーム入射が問題なく行われる事を確認した。ビーム捕獲効率及び入射時の蓄積ビームの重心振動に関してはシミュレーションと比較して調査が必要な部分があるが、高速ゲートカメラを使った入射時の蓄積ビームのプロファイルは非常に安定しており、パルス6極電磁石の有効性を示すことができた。2010年秋の運転からはトップアップ運転時にPSMを使い、PSM入射の長期安定性について実証試験を行って行く予定である。

## 参考文献

- [1] K. Harada, Y. Kobayashi, T. Miyajima, and S. Nagahashi, Phys. Rev. ST Accel. Beams **10**, 123501 (2007), URL: <http://prst-ab.aps.org/pdf/PRSTAB/v10/i12/e123501>.
- [2] H. Takaki, N. Nakamura, Y. Kobayashi, K. Harada, T. Miyajima, A. Ueda, S. Nagahashi, M. Shimada, T. Obina, T. Honda, Phys. Rev. ST Accel. Beams **13**, 020705 (2010), URL: <http://prst-ab.aps.org/pdf/PRSTAB/v13/i2/e020705>.