

BEAM INJECTION SYSTEM WITH A PULSED SEXTUPOLE MAGNET

Hiroyuki Takaki^{#,A)}, Kentaro Harada^{B)}, Tohru Honda^{B)}, Yukinori Kobayashi^{B)}, Tsukasa Miyajima^{B)},
Shinya Nagahashi^{B)}, Norio Nakamura^{B)}, Takashi Obina^{B)}, Miho Shimada^{B)}, Ryota Takai^{B)}, Akira Ueda^{B)}

^{A)} Institute for Solid State Physics, The University of Tokyo,
5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8581

^{B)} Photon Factory, High Energy Accelerator Research Organization
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801

Abstract

As “top-up” injection is widely used in synchrotron radiation sources, it has become very important to suppress stored beam oscillation during beam injection. To minimize this oscillation, many methods have been proposed. A pulsed sextupole injection system is one of the promising candidates. We succeeded in injecting and storing the beam using this injection system at the PF-ring. The top-up injection with this system has been used for the user operation since January 2011. In this proceeding, we show the overview of the pulsed sextupole injection scheme comparing with the conventional injection system and the results of the injection study at the PF ring.

パルス 6 極電磁石による入射方式の開発

1. はじめに

蓄積ビームの電流値を一定に保つために頻繁に少量の電子ビーム入射を行う“トップアップ入射”を世界中の多くの放射光施設が実施もしくは検討中である^{1,2)}。トップアップ運転ではビーム入射中も放射光ユーザーは実験を行うのが一般的である。この新しい運転形態により、放射光ユーザーは常に一定の高い蓄積電流値での実験ができるようになった。しかしながら、加速器側はこれまでユーザーに対して光を供給していなかったビーム入射時においても光の供給を行うことになり、その結果、入射時における蓄積ビームの重心振動およびビームプロファイル変動を小さくする必要が出てきた。

これらを解決する方法の一つとして、従来の複数台のパルス電磁石を使う入射方法の代わりに、1台のパルス多極電磁石のみによる入射方法がKEK-PFにおいて考案された³⁾。パルス多極電磁石入射は、1台のパルス電磁石を使って入射するという点で従来のバンパ軌道を使った入射に比べて省スペースであり簡単な作りになっている。既に、パルス4極を用いた入射試験がPF-ARで行われ成功しており⁴⁾、現在、PFにおいてはパルス6極を使ったユーザー運転が行われている⁵⁾。また、BESSY-II⁶⁾、MAX IV⁷⁾、LNL⁸⁾、UVSOR-II⁹⁾、中部シンクロトロン光利用施設(仮称)¹⁰⁾においてもパルス多極電磁石を使った入射が検討されている。

2. パルス多極電磁石による入射

入射ビームとセプタム電磁石との衝突を避けるためには、図1に示す位相空間において内側の円が示すように、入射ビームの位相空間内での振幅をセプタム電磁石の壁より小さくする必要がある。一旦セプタム電磁石の壁に当たらない振幅となった入射ビームは、放射減衰により振幅が小さくなりやがて蓄積リングに捕獲されることになる。

パルス多極電磁石を利用すれば、蓄積ビームが通過する磁極中心付近には殆ど磁場が存在しないのに対し、入射ビームが通過する磁極中心から離れた位

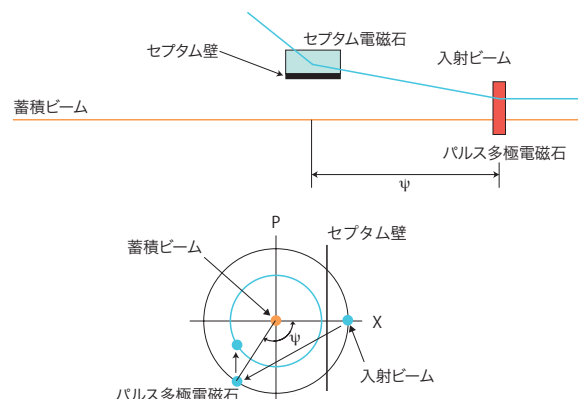


図1：パルス多極電磁石による入射。

[#] takaki@issp.u-tokyo.ac.jp

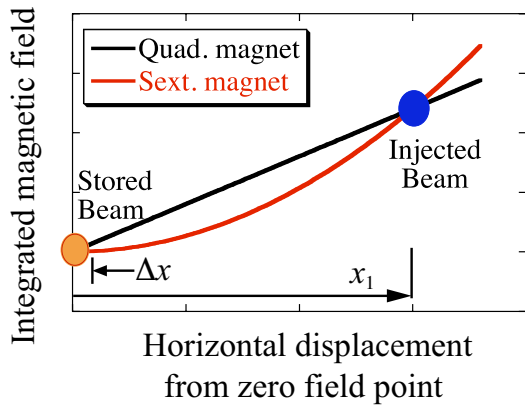


図2：パルス4極とパルス6極の水平方向の磁場分布と蓄積ビームに対する影響。

置には強い磁場を発生させることができる。これにより、蓄積ビームに影響を与えることなく入射ビームだけを大きく蹴る事が可能となる。図1のようにセプト磁石からある位相 ψ 進んだ所に1台のパルス多極電磁石を置き、入射ビームをそこで蹴ってセプトに当たらない振幅まで小さくする。パルス多極電磁石に入射ビームが到着するまでに真空ダクトに衝突していなければ、基本的にパルス多極電磁石はリング上のどこに設置してもよい事になる。ただし、現実的な強さのパルス多極電磁石を作るに当たっては、なるべく磁極中心から離れた場所に入射ビームがくるように位相の進み方を選ぶ必要がある⁵⁾。

2. 1 パルス4極

このコンセプトにしたがって最初に作られたのは磁極中心からの距離に比例する磁場を持つパルス4極である⁴⁾。ビーム入射は成功し蓄積ビームの振動も抑える事ができた。しかしながら、入射時の蓄積ビームプロファイルの詳細に調べると、その形状が細くなったり丸くなったりと変動していることがわかった⁵⁾。原因は、有限のサイズを持つ蓄積ビームが、弱いながらも中心付近の4極磁場を感じてしまい4極振動を起こしたことである。

2. 2 パルス6極

この入射時の蓄積ビームプロファイルの変動を抑えるためには、パルス多極電磁石の極数を増やすの

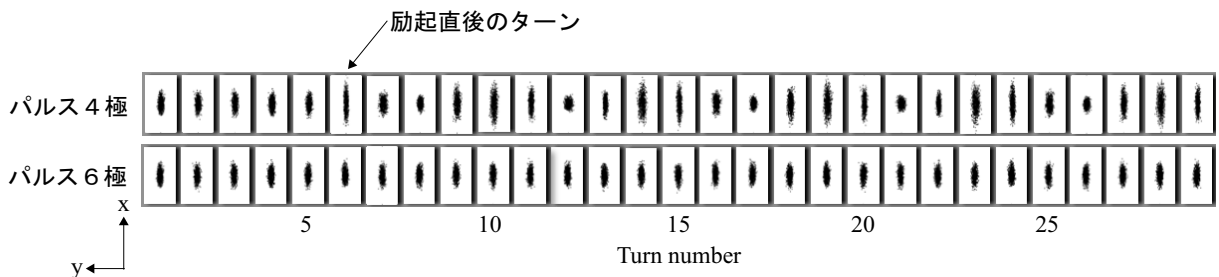


図3：パルス4極およびパルス6極入射時の蓄積ビームのプロファイルの変動をシミュレーションで比較したもの。

が簡単である。図2は入射ビームが感じる磁場の強さをパルス4極とパルス6極で同じにした状態で、蓄積ビームが感じる中心付近の磁場の強さがどのようになるのかを示したものである。入射ビームが中心から x_1 離れた位置に来るとすると、中心から Δx 離れた点における磁場の強さは、パルス4極に比べて磁極数の多いパルス6極では $\Delta x/x_1$ となる。ただし、パルス多極電磁石の極数を増やせば磁極中心付近の蓄積ビームへの影響を小さくすることができるが、磁極付近の磁場の成分は極数の乗数で増加し急激に磁場が立ち上がることになるため、磁極内での磁場の飽和が問題となる。

PFリングにおいて、パルス4極を使った場合とパルス6極を使った場合で入射時の蓄積ビームのプロファイルに影響が出るかシミュレーションを使って比較した結果が図3である。これは、エミッタンスが35 nm radでガウス分布する1000個の粒子に対してビームトラッキングを行い、同じ位置に置いたパルス4極およびパルス6極を励起した前後の蓄積ビームプロファイルをターン毎に追いかけたものである。BL-27に設置してある高速ゲートカメラによる実際の測定結果(図9)と比較するために、シミュレーションも同じ位置でのプロファイルを取り出した。設置誤差や磁場誤差は入れていない。横軸は入射の前後のターンの番号が振ってあり、パルス多極電磁石を励起した直後のターンは6ターン目である。ま

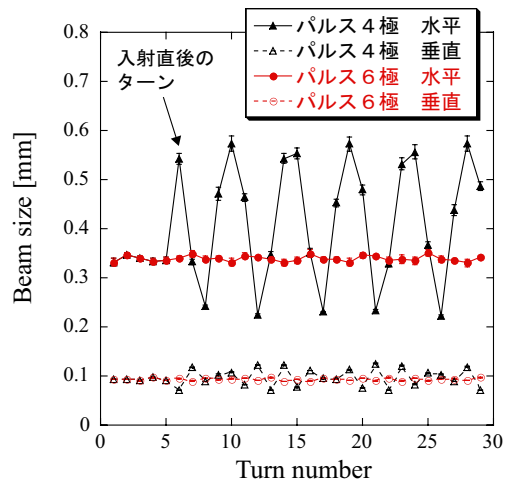


図4：図3で示したビームプロファイルの変動をビームサイズとしてプロットしたもの。

た、このビームプロファイル変動を水平及び垂直方向のビームサイズに変換してプロットしたのが図4である。図からわかるように、パルス4極入射を用いた場合は、PFリングにおいても大きなプロファイルの変動が予想されるが、パルス6極入射を使った場合には、ビームサイズの最大変動幅はパルス4極入射に比べて水平・垂直方向にそれぞれr.m.s.で約1/25および約1/8になっており、ビームプロファイルの変動を小さく出来る事が期待できる。

3. パルス6極の製作

製作したパルス6極は、ボア半径が33 mm、磁極長が300 mmとした。図5に示すのはパルス6極の外観であり、図6には磁極の断面形状および2次元磁場計算の結果を示す。パルス6極の磁極形状であるが、パルス6極入射において重要なのは歪みのない正確な6極磁場成分ではなく、入射ビームが通過する場所での十分な磁場と、蓄積ビームが通過する磁極中心部でのゼロ磁場である。よって、より強い磁場を得るために磁極先端の形状を等ポテンシャル面にするよりも円形の真空ダクトに沿う形にした。これにより、入射ビームが通過する $x = 15$ mmの位置で、等ポテンシャル面を持つ場合に比べて約20%強

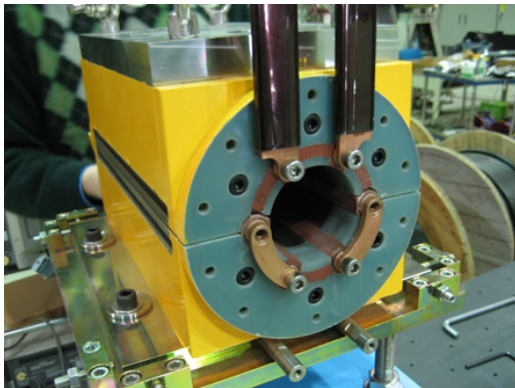


図5：パルス6極の写真。

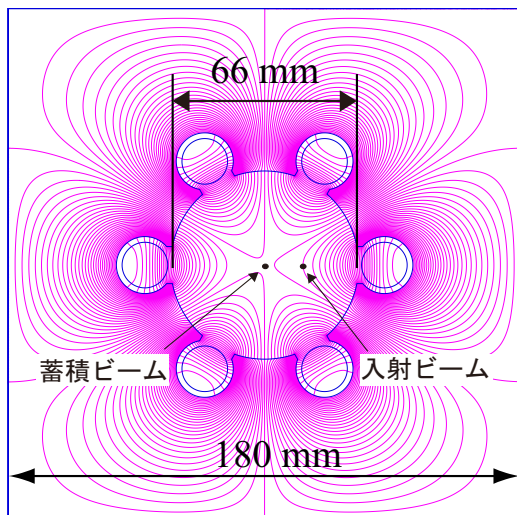


図6：2次元磁場計算によるパルス6極の磁場分布。

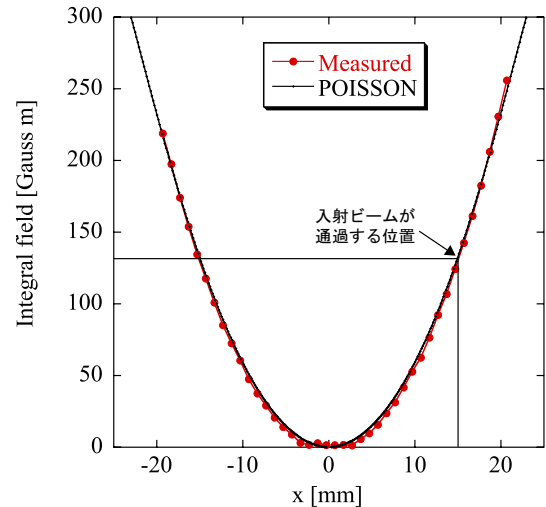


図7：パルス6極の垂直方向の積分磁場の測定結果と2次元シミュレーションの結果。

い磁場を出す事ができた。

磁極は渦電流の影響を受けないように、ブロックではなく0.15 mm厚の無方向性硅素鋼板の積層構造にした。真空ダクトと磁極間の隙間は0.5 mmである。コイルは15 mmφの銅製の1ターンコイルとした。冷却は空冷とし、ブロワーは特に必要としない。コイルは棒状の両端にネジ穴を切り、写真に示すように、銅製の接続用部品で隣のコイルと端点で接続を行い1ターンになるようにしている。耐圧は30 kVとした。

ピーク電流を3000 Aにして、パルス磁場の垂直成分を水平面に沿って測定した結果が図7である。グラフ内の赤点は測定値であり、黒点は2次元の磁場シミュレーションコードであるPOISSONを使った計算結果である。POISSONの計算には後述する磁場の有効長を考慮して磁極長320 mmで計算している。測定結果は設計通りの放物線の磁場が出ている事がわかる。入射ビームが通過する中心から15 mmのところが必要とする積分磁場120 Gauss m以上が出ていることが確認できた。また、磁極中心付近ではほぼ磁場がゼロになっているのがわかる。ただ、パルス磁場測定は非常にノイズの多い測定であり、測定した微分波形を積分することで求めるため、磁場が弱い所での値には大きな誤差が生じる。製作したパルス6極は2008年にPFリングのアンジュレータ2番の長直線部の下流に設置した。

4. パルス6極を用いた入射時のビームの重心振動とプロファイルの変動

パルス6極を使った入射において入射時の蓄積ビームの振動が抑えられているかどうかを比較するため、キッカー入射とパルス6極入射のそれぞれで入射時の蓄積ビームの振動を測定し比較した。測定方法は、PFリング内にシングルバンチモードで電子ビームを約30 mA蓄積し、入射ビームをオフにした状態でキッカー及びパルス6極を個別に励磁した。

キッカー及びパルス6極は、通常の入射時と同じだけの蹴り角で動作させる。蓄積ビームの振動はアンジュレータU#16上流に設置してあるBPMを使って、蓄積されたシングルバンチの重心振動を1周毎に追いかけて測定した。図8の(a)、(b)はキッカー入射時の蓄積ビームの振動である。(a)は水平方向、(b)は垂直方向の振動を表している。横軸はリング周回数である。入射が始まる前の状態からビーム振動を測定しており、150ターン辺りで急激に振動が起きている部分がキッカー及びパルス6極を励磁した瞬間である。励起をする前の振動幅はr.m.s.で水平方向に18 μm 、垂直方向に12 μm であった。キッカーを励起した直後には、水平方向に850 μm 、垂直方向に130 μm の最大振幅を持った振動が起きているのがわかる。なだらかに振幅が減衰しているのは放射減衰(PFリングの横方向の放射減衰時間は7.8 msecであり約12000ターンに相当)と非線形効果による重心運動の減衰によるものである。一方、図(c)、(d)はパルス6極を使った入射である。(c)は水平方向、(d)は垂直方向である。入射中の蓄積ビームの振動は入射直後で、水平方向に180 μm 、垂直方向に40 μm の最大振幅を持った振動にまで小さくなっていることがわかる。パルス6極入射によって蓄積ビームの振動をキッカー入射に比べて抑える

ことができる事を証明できた。しかしながら、入射時の蓄積ビームの振動を完全にゼロに出来た訳ではない。残っている振動の主な原因は製作精度からくる磁場の誤差であることがわかっている。

次に入射時の蓄積ビームのビームプロファイルの変動を測定した¹¹⁾。この測定もシングルバンチモードで行った。シングルバンチの蓄積電流値は10 mAで、パルス6極は励磁するがビームは実際には入射しない状態で測定を行った。高速ゲートカメラの撮影用ゲート時間は50 nsecとし、PFリングの周回時間624 nsecと比較して十分小さくした。ただし、使用した高速ゲートカメラの最大繰り返し周波数は10 kHzであるため、ビーム位置モニタのように同じビームを毎ターン追いつけることはできない。したがって、プロファイルの測定には、入射トリガに対してリング周回分の遅延を加えた撮影用ゲート信号を発生させる方法を使った。蓄積ビームのビームプロファイルはパルス6極で蹴る前は平衡状態にあるため、短時間の実験においては同じプロファイルを持っていると仮定できる。したがって、パルス6極で蹴った後の蓄積ビームのプロファイルは、入射トリガからのターン数が同じなら同じ形状を再現する。図9はこのようにして測定したビームプロファイルをターン毎に並べたものである。パルス6極入射で

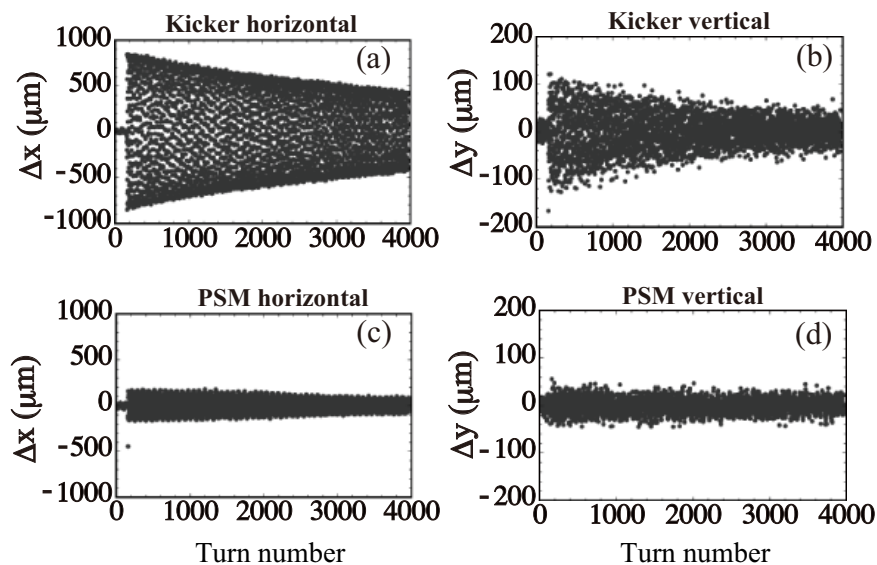


図8：入射時の蓄積ビームの重心振動をアンジュレータU#16の上流に設置したBPMを使ってターン毎に測定したもの。(a)、(b)はキッカー入射時、(c)、(d)はパルス6極入射時である。

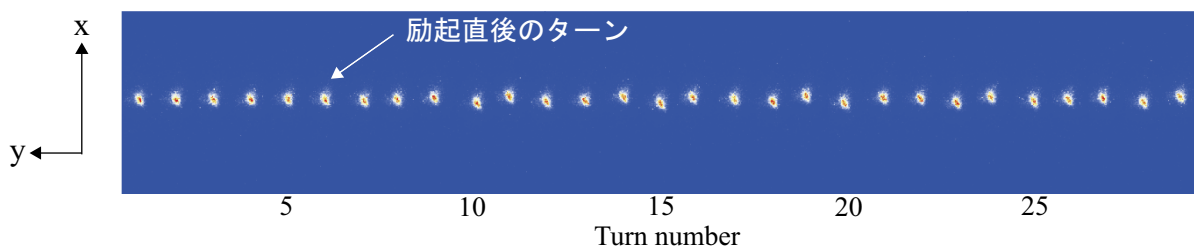


図9：パルス6極入射時の蓄積ビームのプロファイル。

は、PF-ARのパルス4極入射で見えていたような蓄積ビームのビームプロファイルの変動はほとんど見えず、この結果は、図3で示したシミュレーションの結果とも一致している。これにより、パルス6極入射時の蓄積ビームプロファイルの変動は非常に小さいことが確認できた。

また、実際の放射光ビームラインを使って入射中の放射光の強度測定をした結果、放射光の光量の変動がキッカー入射に比べてパルス6極入射では格段に小さくなることも確認できた⁵⁾。

5. パルス多極電磁石の今後

以上述べてきたように、パルス多極電磁石を用いた入射システムは、問題なく電子ビームを蓄積することが可能であり、入射時の蓄積ビームの重心振動およびビームプロファイル変動も抑える事ができる事を実験的に証明できた。しかしながら、捕獲効率はまだ十分に高いとは言えず、蓄積ビームの重心振動もさらに小さくすることが望ましい。また、磁極中心の残留磁場をどう補正すべきか等、今後もR&Dを続けて行く必要がある。最終的な目標はユーザーが使う光が入射時に振動しないことであるため、ユーザー側の光の振動と入射時のビームプロファイルを同時に比較し残存する光量の変動の原因についての理解を深める必要もある。

パルス6極入射の長期安定性については、2010年秋よりユーザー運転に使用中（東日本大震災の影響で途中使用しない時期もあったが現在は再び使用中）であり、実績を積み上げている最中である。

参考文献

- 1) H. Ohkuma, "Top-up operation in light sources," in Proceedings of the 11th European Particle Accelerator Conference, Genoa, 2008, p. 36.
- 2) W. Namkung, "REVIEW OF THIRD GENERATION LIGHT SOURCES," in Proceedings of the International Particle Accelerator Conference, Kyoto, 2010, p. 2411.
- 3) Y. Kobayashi and K. Harada, in Proceedings of the 10th European Particle Accelerator Conference, Edinburgh, Scotland, 2006 (EPS-AG, Edinburgh, Scotland, 2006), p. 3526.
- 4) K. Harada, Y. Kobayashi, T. Miyajima, and S. Nagahashi, Phys. Rev. ST Accel. Beams **10**, 123501 (2007).
- 5) 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).
- 6) T. Atkinson, *et al.*, "DEVELOPMENT OF A NON-LINEAR KICKER SYSTEM TO FACILITATE A NEW INJECTION SCHEME FOR THE BESSY II STORAGE RING," in Proceedings of IPAC2011, San Sebastian, 2011, p. 3394.
- 7) S.C. Leemann, *et al.*, "PULSED MULTIPOLE INJECTION FOR THE MAX IV STORAGE RINGS," in Proceedings of 2011 Particle Accelerator Conference, New York, p. 2522.
- 8) X.R. Resende, *et al.*, "STUDY OF A PULSED SEXTUPOLE MAGNET INJECTION SYSTEM FOR LNLS," in Proceedings of IPAC2011, San Sebastian, 2011, p. 3212.
- 9) M. Adachi, *et al.*, "STATUS OF UVSOR-II," in Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2011.
- 10) N. Yamamoto, *et al.*, "ACCELERATORS OF THE CENTRAL JAPAN SYNCHROTRON RADIATION FACILITY PROJECT (II)," in Proceedings of IPAC2011, San Sebastian, 2011, p. 2987.
- 11) R. Takai, T. Obina, A. Ueda, S. Nagahashi, K. Harada, T. Honda, N. Nakamura, Y. Kobayashi, H. Takaki, "BEAM PROFILE MEASUREMENT DURING TOP-UP INJECTION WITH A PULSED SEXTUPOLE MAGNET," in Proceedings of the DIPAC2011, Hamburg, p. 305.