

あいち SR におけるパルス多極入射の検討

DESIGN STUDY OF PULSED MULTIPOLE INJECTION FOR AICHISR STORAGE RING

山本尚人 ^{*A)}、保坂将人 ^{*A)}、高野琢 ^{A)}、真野篤志 ^{A)}、高嶋圭史 ^{A)}、加藤政博 ^{B)}
N. Yamamoto ^{*A)}, M. Hosaka ^{A)}, T. Takano ^{A)}, A. Mano ^{A)}, Y. Takashima ^{A)}, M. Katoh ^{B)}

^{A)}NUSR, Nagoya University

^{B)}UVSOR, Institute for Molecular Science

Abstract

We have planned to install a pulsed multipole injection system for the aichiSR storage ring. A rectangular-shape pulsed multipole magnet with the sextupole-like field was designed. By using this magnet with the loaded current of 1 kA, the kick angles around higher than 1 mrad and lower than $5 \mu\text{rad}$ could be obtained simultaneously for injection beams and stored beams. For a power supply, we designed a pulser system with the time response of 960 ns and the discharging voltage of around 20 kV. As a result of the beam tracking simulation, the injection efficiency of higher than 90 % is expected when the injection system is installed into the straight section of 20 m downstream from the injection point, where the phase advance is evaluated to be 68 degrees and the required kick angle is 1 mrad.

1. はじめに

あいちシンクロトロン光センター（あいち SR）の光源加速器は 100 keV の直流型熱電子銃、50 MeV ライナック、1.2 GeV のブースターシンクロトロン、超伝導偏向電磁石を用いた蓄積リングから構成される [1, 2]。蓄積リングは蓄積電流 300 mA でトップアップ運転されており、現状は 4 台のパルスキッカーを用いたバンプ入射が採用されている。また、現在バンプ軌道（蓄積リングの約 4 分の 1 周にわたる）内に新たに 2 つのビームラインが建設中であり、トップアップ運転時の入射によるビーム変動を抑えることが必要となっている。このため新たにパルス多極入射の検討を開始した。

パルス多極入射法はバンプ入射の二極電磁石の代わりに多極電磁石を用いた入射法である。多極電磁石を用いると磁石中心には磁場を励起せずに任意振幅位置において磁場を励起できるため、蓄積ビームには影響を与えることなく入射ビームのみをキックすることが可能となる。バンプ入射では最低二台のパルス電磁石が必要なうえ、バンプ軌道内では大きく蓄積ビームが動くため入射の瞬間放射光は利用できなくなる。これに対しパルス多極入射では最低一台のパルス電磁石で入射が成立し、入射の瞬間も蓄積リングの全周に当たり放射光の利用が可能となる。本入射法は、KEK-PF 及び KEK-AR^[3, 4]にて開発された入射手法であり、その後国内では UVSOR-III^[5]、海外では BESSY-II^[6]において試験されている。また、現在建設中の MAX-IV^[7, 8, 9]においても導入が検討されている。

本研究ではあいち SR に最適化した六極ライクな多極電磁石を設計し、ビームトラッキングによる入射の検討を行った。その結果、従来のバンプ入射と同等の入射効率が実現可能なことが示唆された。以下、詳細を報告する。

2. 入射位置の検討

あいち SR の蓄積リングは周長 72 m、蓄積ビームのエネルギーは 1.2 GeV である。ラティスは超伝導電磁

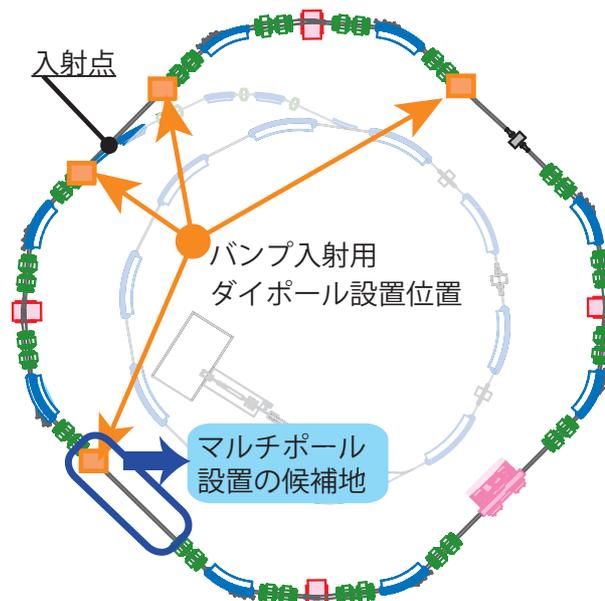


Figure 1: 光源加速器の概要図とパルス多極電磁石の設置候補地

石 1 台を含んだトリプルベンドの 4 回対称となっている。入射ビームは高エネルギー輸送路からシングルバンチで直線部下流付近に打ち込まれる。入射頻度は 1 Hz である。

パルス多極電磁石の設置候補地（図.1）は入射点から見て約 15.4 ~ 20.3 m 下流に位置する第 2 直線部である。この位置における入射ビームの位相前進は 66.8 ~ 68.4 度となり、入射ビームの水平振幅は $-25 \sim -20 \text{ mm}$ と見積もられる。本直線部は現在、バンプ用キッカーの一台が設置されている他は使用されておらず、パルス多極電磁石の設置には十分な空間が確保されている。また、さらに最下流の第 3 直線部では位相前進が 134 度となつてしまいパルス多極電磁石の設置には適していない。

蓄積リングのアクセプタンスとパルス多極電磁石の設置候補地の関係を図.3 に示す。この図から候補地の

* naoto@nagoya-u.jp

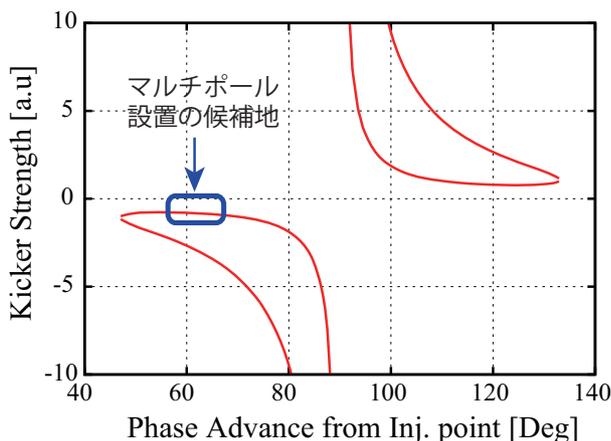


Figure 2: 入射点からの位相前進と必要キック量

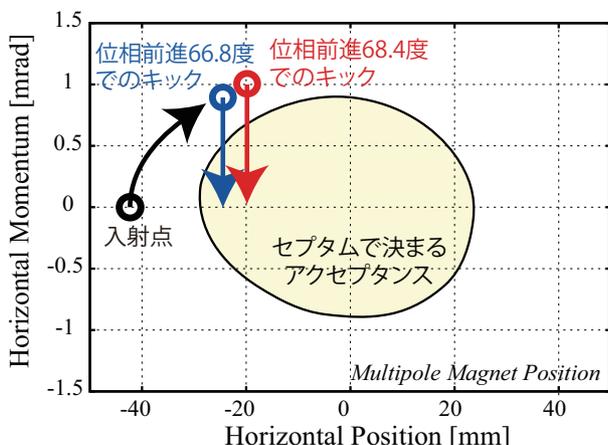


Figure 3: 蓄積リングのアクセパタンスとパルス多極電磁石の設置候補地の関係

うち位相前進の大きい位置（直線部下流側）を選択した方が、アクセパタンスのより内側にビームをキックできることがわかる。しかし必要なキック量も大きくなるため、これは電磁石設計条件が厳しくなることを意味する。

以下、第2直線部の下流側、つまり位相前進 68.4 度の位置に電磁石を設置すると仮定し議論を進める。この場合、必要なキック量は 1 mrad となり、磁極長を 200 mm とした場合、必要磁場強度は 18 mT となる。

3. パルス多極電磁石の設計

3.1 パルス電源の設計

あいち SR における電子ビームの周回時間は 240 ns であるため、パルス電磁石によるシングルキックを考慮した場合 480 ns 以下のパルス応答が必要とされる。しかし、電磁石励磁に必要な電流を 1 ~ 2 kA 程度と考えると正弦半波のパルス波形を仮定しても必要な充電電圧は 26 ~ 52 kV となってしまう（インダクタンスは 4μH と仮定）。この値は実現不可能ではないが、パルス電源の規模が大きくなってしまいます。安定運用を考慮した場合、充電電圧はもう少し抑えたいところである。

そこで、電磁石のパルス応答時間を 960 ns（正弦半波）

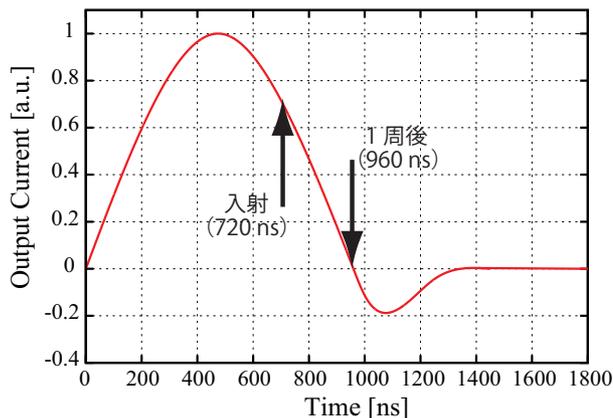


Figure 4: 想定した電源のパルス応答

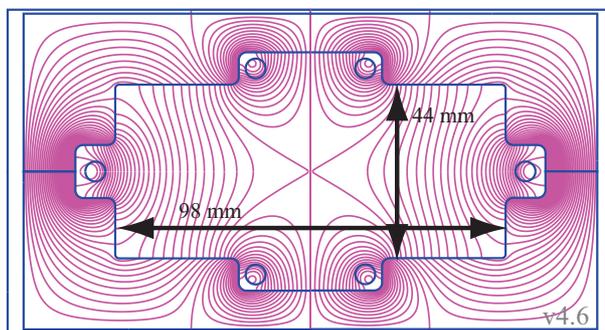


Figure 5: 設計した多極電磁石の断面構造

と決定した。図.4 に示すようにパルス応答時間が 960 ns であってもビームの入射タイミングを 720 ns 付近に調整することでシングルキック的な運用が可能となる。この場合、必要なキック量を得るのに必要な励磁電流値は約 1.4 倍となるが、充電電圧は半分とすることができる。また、パルス応答時間が長くなるため、真空ダクトやヨーク内での渦電流効果についても寄与を減らすことができる。

図.4 からわかるように設計したパルス電源の時間応答には約 20 % の逆電流が生じている。これは LCR 回路によるパルサー製作を想定したからである。入射ビームタイミングにもよるが、電子ビームは 2 周目もしくは 3 周目に逆電流によるキックを受けるため、この効果も考慮した電磁石設計が必要となる。

3.2 パルス電磁石の設計

パルス多極電磁石の設計においては、次の 2 つの条件を満たすよう考慮した。1) 入射ビーム位置 (20mm) において 18mT 以上の磁場強度を実現する。2) 蓄積ビーム位置において 0.1mT 以下に磁場強度を抑える。ただし、磁石の磁極長は 200mm と仮定した。これらの条件のうち 1) は上述した検討から得られたものであり、2) は入射による蓄積ビーム位置変動をビームサイズの 10 % 以下に抑えるという条件のもと設定した。

これらの条件を満たすべく設計した電磁石の断面構造と 1kA で励磁した際の磁場分布をを図.5,6 に示す。磁場計算および断面構造の決定には Poisson コード^[10]を用いた。電磁石設計においては矩形型のヨーク内側に 6 本

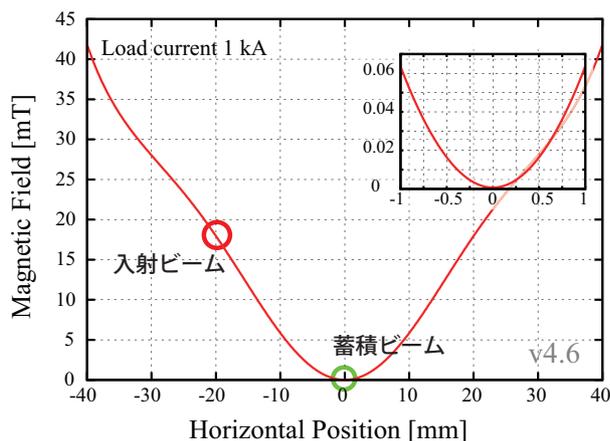


Figure 6: 多極電磁石の磁場分布 (励磁電流 1kA)

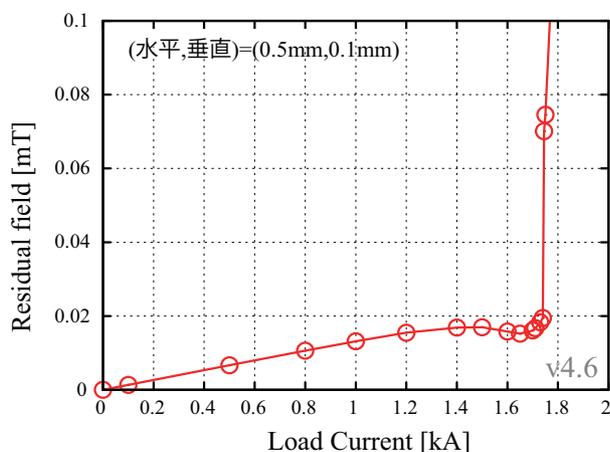


Figure 7: 磁石中心磁場の励磁電流値依存

の直径 5mm の電極を配置し、六極ライクな磁場分布を生成した。実際の製作ではこれらの電極は端部において互いに接続されワンターンコイルとなる。電磁石の開口は水平 98mm, 垂直 44mm であり、片側におけるクリアランス 2mm を確保しつつ内径において水平 86mm, 垂直 32mm の真空ダクトを設置できるように設計した。あいち SR における最小クリアランスは水平 30+47.5mm(セプタム部, リング内側+外側), 垂直 19mm (アンジュレータ部) であり (いずれも β 関数は同じ)、これと比べて十分に大きい。また、従来のバンプ用パルス二極電磁石位置における開口は水平 94mm, 垂直 40mm となっている。

図.7 に磁石中心位置 (水平振幅:0.5mm, 垂直振幅:0.1mm) における磁場強度の励磁電流値依存を示す。これは 1.7 kA 以上の励磁電流において電磁石ヨークが飽和していることを示している。磁場飽和により各電極とヨークから決まる磁場分布のバランスが崩れ、磁石中心位置の磁場強度が急激に変化するのである。また、図.6 と図.7 から、励磁電流 1.7kA 以下の領域において、条件 1),2) を満たしていることが図.6 からわかる。

設計した電磁石および電源のパラメータを表 1 にまとめる。また、製作精度について、に条件 2) を満たすためにはヨーク部及び電極位置について少なくとも 100 μ m を実現する必要がある。さらに UVSOR-III での先行研究^[5]により、矩形型の多極電磁石を用いる場合ワンター

Table 1: 電磁石及び電源の設計パラメータ

Multipole Magnet	
Iron yoke length	200 mm
Vertical Gap	44 mm
Horizontal Gap	98 mm
Magnet Inductance	1.7 μ H
Power Supply	
Max. peak current	2.0 kA
Max. charging Voltage	26 kV
Pulse period	960 ns
Max. Repetition rate	1 Hz

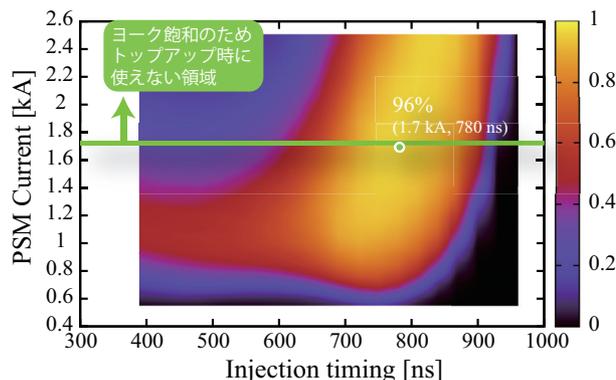


Figure 8: 入射効率のタイミングおよび励磁電流値依存

ンコイル電極の接続部が電磁石端部の磁場分布に無視できない影響を与えることも確認されている。このため、実際の製作においては注意が必要である。

4. 入射シミュレーション

設計したパルス多極電磁石およびパルス波形を用いてビームトラッキングによる入射シミュレーションを行った。計算は SAD コード^[11]を用いて行った。計算の条件として蓄積リングのチューン及びクロマティシティは通常の運転条件を再現するように決めた。チューンおよびクロマティシティはそれぞれ $(\nu_x, \nu_y) = (4.72, 3.19)$ と $(\xi_x, \xi_y) = (1.2, 5.6)$ である。入射ビームはエミッタンス 200nm.rad とし、3シグマの分布を仮定した。

図.8 に計算の結果得られた入射効率のタイミングおよび励磁電流値依存を示す。計算において、励磁電流 0.5 ~ 2.5 kA までの範囲を評価しているが、1.7 kA 以上では磁場が飽和してしまうため、実際の入射、特にトップアップ運転時には使用不可能だと考えている。計算の結果、入射タイミング 700 ~ 850 ns, 励磁電流 1 kA 以上の広い領域で入射効率 90 % 以上が得られていることがわかる。磁場の飽和しない領域における最大の入射効率は励磁電流 1.7 kA, タイミング 780 ns で得られており、その値は 96 % であった。以下、最大の入射効率が予測された励磁電流 1.7 kA, タイミング 780 ns においてさらに詳細に考察する。

タイミング 780 ns に合わせてビームが入射された場合、各周回における磁場強度はそれぞれ、ピーク磁場の 0.52,-0.15,-0.04 倍となる (図.4 参照)。つまり、3 周目以

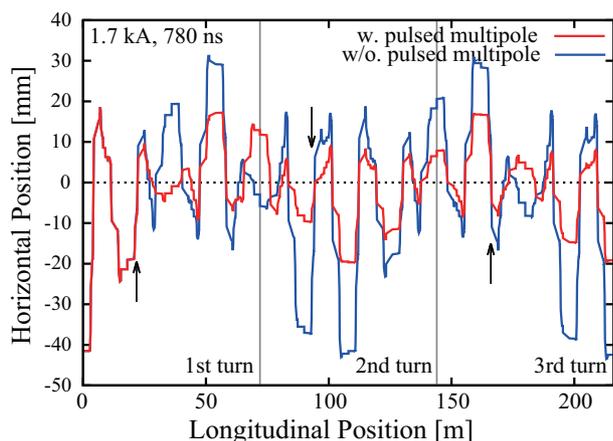


Figure 9: 最大の入射効率が得られた条件での入射の様子 (水平軌道)

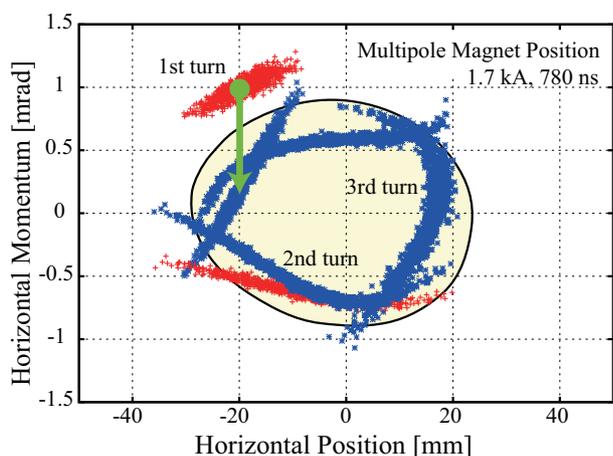


Figure 10: 最大の入射効率が得られた条件での入射の様子 (位相空間)

降のキック量は非常に小さい。パルス多極入射有り・無しにおける3周分のビーム重心軌道変化を図.9に示す。図中の矢印はパルス電磁石の設置位置に対応する。図.9より、1周目のキック以降、入射ビームの振幅が絶対値として最大20 mm以下に収まっていること、パルス電磁石がビーム重心に与える影響がほぼ1周目で完結していることがわかる。これは2周目におけるパルス電磁石位置における入射ビームの重心振幅が非常に小さくなるからである。また、パルス電磁石を励磁しない場合、ビーム振幅は3周目から4周目において-40 mmに達している。この位置にはセプタム壁がありその開口は振幅で-30 mmに対応するため、入射ビームのほとんどはここで失われることになる。ちなみに、バンプ入射時における3周目のビーム振幅は-25 mmである。

次にパルス多極入射における入射ビームの様子を図.10に示す。図.10においてキック前後のビーム分布をそれぞれ赤と青色で区別した。入射ビームの重心に注目すると、1周目20 mmの位置において1 mradのキックを受けアクセプタンス内に移動していることがわかる。また、ビームに分布があることを考慮した場合、2周目の逆電流の寄与によりビーム両端がアクセプタンスの

より内側に打ち込まれており、これにより入射効率が向上していることがわかる。これは六極ライクな磁場分布を用いる場合、パルス波形に生じる逆電流が入射効率の向上に寄与していることを示している。

あいちSRでは現状バンプ入射を行っており、その入射効率の期待値はパルス多極電磁石の場合と同様に求められ78%となっている。これに対し、実際に得られている値は、最大で約70%、平均で50%となっている。ここで、計算による期待値がパルス多極電磁石の場合と比べ小さくなっているのは3周目に多くの電子が失われているからであろうと予測している。また、バンプ電磁石ダンプ後のビーム最大振幅はパルス多極電磁石の場合と同じ20 mm程度である。以上のことから、あいちSRにおいてパルス多極電磁石を導入した場合、少なくとも現状のバンプ入射と同等かそれ以上の入射効率が期待される。

5. まとめ

あいちSRへのパルス多極入射を導入することを目的に、多極電磁石およびパルス電源の設計を行った。その結果、第2直線部にパルス多極電磁石を導入することで、計算上は90%を越える入射効率を期待できることがわかった。この期待値は従来のバンプ入射と比べても高く、その効果が期待できる。

今後は、実際のパルス多極入射導入にむけ、より詳細な検討を進めていく予定である。

参考文献

- [1] N. Yamamoto, Y. Takashima, M. Hosaka, et al. Accelerators of the Central Japan Synchrotron Radiation Facility Project. In *Proceedings of IPAC10*, pages 2567–2569, 2010.
- [2] N. Yamamoto, M. Hosaka, K. Takami, et al. Beam commissioning of central japan synchrotron radiation facility. *加速器*, 9(4):223–228, 2012.
- [3] K. Harada, Y. Kobayashi, T. Miyajima, and S. Nagahashi. New injection scheme using a pulsed quadrupole magnet in electron storage rings. *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, 10(12):123501, 2007.
- [4] H. Takaki, N. Nakamura, Y. Kobayashi, et al. Beam injection with a pulsed sextupole magnet in an electron storage ring. *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, 13:020705, 2010.
- [5] N. Yamamoto, H. Zen, M. Hosaka, T. Konomi, M. Adachi, et al. Beam injection with pulsed multipole magnet at uvsor-III. *Nucl. Instr. and Meth. A*, to be published, 2014.
- [6] T. Atkinson, M. Dirsat, O. Dressler, P. Kuske, and H. Rast. Development of a non-linear kicker system to facilitate a new injection scheme for the bessy-II storage ring. 2011.
- [7] S. C. Leemann. Pulsed sextupole injection for sweden's new light source MAX-IV. *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, 15:050705, 2012.
- [8] S.C. Leemann. Injection with a single dipole kicker into the MAX-IV storage rings. *Nucl. Instr. and Meth. A*, 693(0):117–129, 2012.
- [9] S.C. Leemann and L. O. Dallin. Progress on pulsed multipole injection for the MAX-IV storage rings. In *PAC'13*, pages 1052–1054. PAC'13 OC/IEEE, 2013.
- [10] Poisson/superfish. Los Alamos National Laboratory Report No. LA-UR-96-1834.
- [11] K. Oide. A final focus system for flat-beam linear colliders. *Nucl. Instr. and Meth. A*, 276(3):427–432, 1989.