

PULSED QUADRUPOLE [MULTIPOLE] INJECTION FOR A SMALL SCALE SYNCHROTRON RADIATION FACILITY

Yoshiaki Gotoh ^{#,A,B)}, Yohei Hida ^{A)}, Heishun Zen ^{B)}, Naoto Yamamoto ^{A,C)}, Masahito Hosaka ^{A,C)},
Yoshifumi Takashima ^{A,C)}, Masahiro Katoh ^{B,C)},

^{A)} Graduate School of Engineering, Nagoya University

Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi, 464-8603

^{B)} UVSOR Facility, Institute for Molecular Science

38, Nishigounaka, Myodaiji-cho, Okazaki, Aichi, 444-8585

^{C)} Nagoya University Synchrotron Radiation Research Center

Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi, 464-8603

Abstract

We made a study of beam injection system using a pulsed multipole magnet for a small scale synchrotron radiation (SR) facility. In case of conventional injection by using several dipole kicker magnets, the bump orbit occupies most ratio of the circumference, especially a small SR facility. On the bump orbit, SR are also managed to flick during the beam injection (top-up operation). It is considered that pulsed quadrupole magnet (PQM) injection would enable to keep good beam conditions in top-up operation because of making no bump orbit, and need only one pulsed magnet.

We researched effective orbital positions to introduce the pulsed magnet, a geometrical structure of the PQM that can be used by lower operation currents, and some harmful effects of the PQM to stored beams. We have studied to apply PQM injection for Central Japan Synchrotron Radiation Facility (72.0 m), and pulsed sextupole magnet (PSM) injection at UVSOR-III (53.2 m). As a result, it revealed that pulsed multipole injection was sufficiently possible at both SR facilities, but injected beam must feel magnetic field for several turns by the pulsed multipole magnet because of short orbital period of the storage ring.

小規模シンクロトロン光施設のための パルス4極(多極)電磁石を用いた入射の研究

1. はじめに

シンクロトロン光施設におけるストレージリングへのビーム入射には、従来は複数台のダイポールキッカー電磁石を用いることにより生じるバンプ軌道を利用した方法が採用されてきた。しかしながら、この方法は励磁タイミングの誤差や6極電磁石のような非線形磁場がバンプ内に存在する影響から完全に閉じたバンプ軌道を作ることが難しい。また、特に小規模施設においては蓄積リング全長に占めるバンプ軌道の割合が非常に大きく、トップアップ運転ではバンプ軌道上のシンクロトロン光が入射の瞬間に失われるという問題が深刻である。

こうした問題を解決するために、我々はパルス多極電磁石を用いた入射を研究し、現在名古屋市近郊に建設中の中部シンクロトロン光利用施設(周長72.0 m)とUVSOR(同53.2 m)に導入することを検討した。パルス多極電磁石とはパルスの励磁される4極以上の電極を持つ電磁石であり、これをストレージリング上に設置し入射時に励起することで、磁場中心から外れた位置にいる入射ビームには運動量(Courant-Snyder 不変量)を縮小する方向にキックが生じ、一方で磁場中心にいる蓄積ビームにはキックを与えないことで、入射を可能にする。この入射方法ではパルス多極電磁石は1台のみ必要なだけであり、機材を設置するための物理的空間の小さな

小規模リングにおいてはこちらの点でもダイポールキッカーによるバンプ入射より優れている。

2. パルス4極電磁石(PQM)による入射^[1]

まず電子ビームの運動を理解しやすくするために、入射ビームに対して次に示す規格化(Normalization)を行う。

$$X_i = \frac{x_i}{\sqrt{\beta_{x,i}}}, \quad X'_i = \frac{\alpha_{x,i}x_i + \beta_{x,i}x'_i}{\sqrt{\beta_{x,i}}}$$

ここで X_i, X'_i は入射点における規格化された水平位置と水平角度を示す。 x_i, x'_i は実際の位置および角度、 $\alpha_{x,i}, \beta_{x,i}$ は入射点における水平方向の Twiss パラメータである。入射されたビームの水平方向の運動量は次の式で表される。

$$W_i = X_i^2 + X_i'^2$$

W_i を Courant-Snyder 不変量と呼び、規格化された位相空間上では真円を描く。通常、蓄積リング全体にわたって W の面積は不変である。

パルス4極電磁石による入射の概念を次ページの図1に示す。パルス4極電磁石は一時的に励磁されるため、図1のように Courant-Snyder 不変量に変動をもたらす。

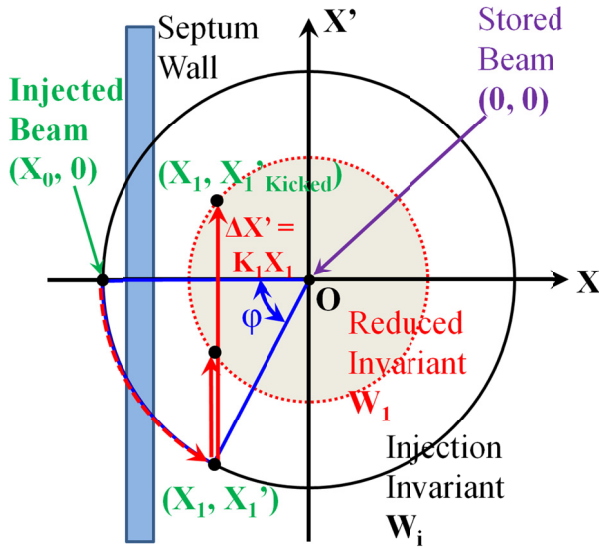


図1：パルス4極電磁石による入射の概念

図1は、 $(X_0, 0)$ から入射されたビームが一定距離進行し、 (X_1, X_1') でパルス4極電磁石 (PQM) によってキックを受けている様子を表している。入射ビームの運動量が W_i のままでは、数周した後セプタム板に電子ビームが当たって損失してしまうが、PQM によって Courant-Snyder 不変量が W_1 にまで縮小され、ビームが生存し続けることができる。

PQM でのキックは薄レンズ効果として表れ、ビームの位置には変化を与えず、進行方向のみを変化させる。この時の角度変化量は次の式で表される。

$$\Delta X' = K_1 X_1$$

ここで K_1 は PQM が生じる規格化された収束力を表しており、電磁石の形状、長さ、電流値によって定められる。図1中の位相前進 ϕ と K_1 の間には次の関係がある。

$$K_1 = -\tan \phi \mp \sqrt{\left(\frac{W_1}{W_i}\right) \frac{1}{\cos \phi^2} - 1}$$

この関係式より、目標の減衰率 (W_1/W_i) に達するために必要な K_1 および最も効率の良いキック位置 (位相前進) を求めることができる。

3. 中部シンクロトロン光利用施設 (中部SR) における PQM の導入

3.1 中部SRでの PQM 設置位置の決定

上述の PQM を使った入射の原理を踏まえ、中部SRへの PQM 導入を検討する。中部SRは現在建設中であるが、リングのラティス配置は既に決定しており、PQM を挿入する位置は限定されている。そこで今回はダイポールキッカーを設置する予定である箇所を含む、長直線部の上流下流計8か所への設置の検討を行った。

中部SRにおいては、算出された W_i と、あらかじめ

め定めた縮減後の不変量 W_1 から、必要な減衰率を $(W_1/W_i)=33.5\%$ と求めた。PQM を設置候補8か所にそれぞれ設置した場合に、この減衰率を達成するために必要な集束力を求めた結果を次の図に示す。

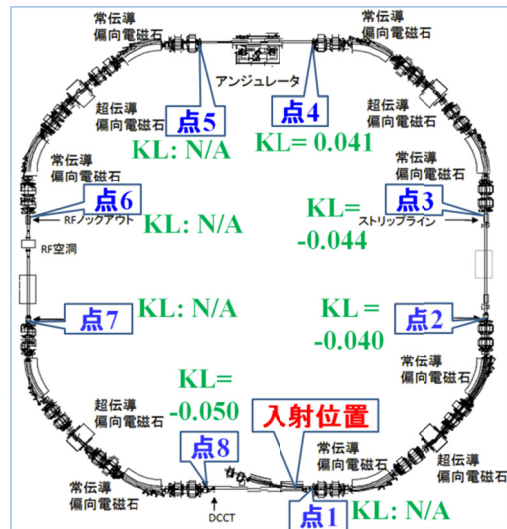


図2：中部SRリング図と各点での必要な集束力

計算の結果、図2上の点2に PQM を置いた場合が最も小さな集束力で入射できる、すなわち最も入射のエネルギー効率が低いことが判明した。ここでは集束力の指標として、実際の集束力 KL を用いた。 KL と K_1 の関係は次の式で与えられる。

$$KL = K_1 / \beta(s)$$

点2における必要集束力 KL は $0.040 \text{ [m}^{-1}\text{]}$ (Defocus) であった。以降はこの位置にこの集束力を与えていく事を考える。

3.2 中部SRのための PQM の設計

中部SRのためのパルス4極電磁石の設計を行った。POISSON^[3]で設計した PQM を以下に示す。

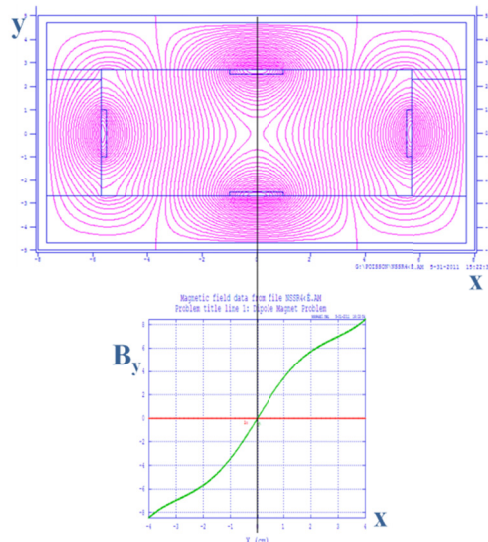


図3：設計したパルス4極電磁石とその磁場

設計においてはヨーク材にフェライト (TDK PE14) を用いるため、極力簡素な形状を取り小型化することに留意した。

次にこの PQM で目標の集束力を出すために必要な電流値を求める。キック位置は $x = -23.6$ [mm] である。必要な磁場は必要集束力 $KL = B'L/[B\rho]$ から求められ、 $|B_y|_{x=-23.6\text{mm}} = 189$ [Gauss] であった。ここで B' は磁場勾配、 L は磁極長さ、 $[B\rho]$ は magnetic rigidity である。図3より、この磁場を発生させるために必要な電流値は925 [A] と判明した。

3.3 マルチターン入射の検討

小規模リングはビームの周回周期が非常に小さい。中部 SR では周回周期は0.24 [us] である。これに対し、電源パルス幅は約1マイクロ秒前後と大きい。このため、小規模リングにおいては複数回にわたる入射ビームのキックを想定しなければならない。今回は下図のようなパルス幅1.2 [us] のハーフサインの電源パルスを想定し、2ターンキックによる入射を想定した。

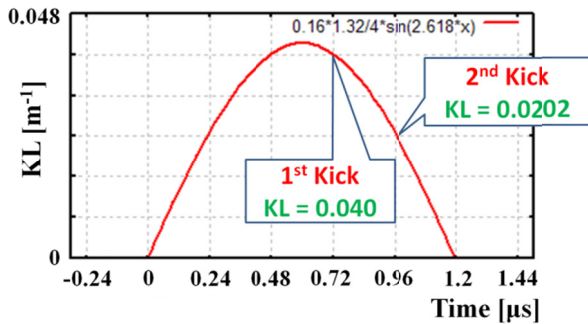


図4：計算に用いたパルス電源波形

本研究におけるアプローチは、1ターン目におけるキックで Courant-Snyder 不変量を最小値まで減衰させ、その後2ターン目以降のキックを考慮する手順であったが、幸いにも2ターン目のキックは Courant-Snyder 不変量をさらに小さくする方向へ働いた。しかしながら2ターン目のキックが不変量を大きくする方向へ働く場合もあり、そういった場合も含めた包括的なマルチターン入射の検討を行っていく事が今後の課題である。

3.4 PQM 入射によるビーム軌道

これまで求めてきた値に加えて入射に最適な Twiss パラメータを別途求め、適用した場合の中部 SR における入射ビームのトラッキングを行った。トラッキングには SAD^[2]を用いた。条件を以下に示す。

- 入射位置 $x_i = -42.0$ [mm], 角度 $x_i' = -0.1$ [mrad]
- 入射ビーム Twiss パラメータ $\alpha_{inj,x} = 0, \beta_{inj,x} = 20$ [m]
- 入射エミッタンス $\epsilon_{inj,x} = 200$ [nm rad]
- エネルギー分散 $\Delta E/E = 0.00084$

これらの条件下で、設計した PQM による入射を行った場合のトラッキング結果を次の図に示す。

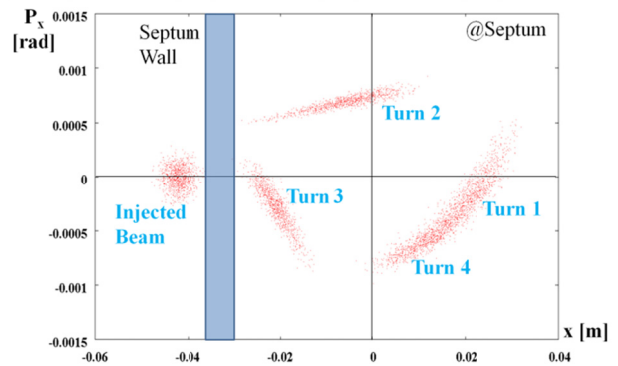


図5：セプタム位置におけるトラッキング結果

入射ビーム (Injected Beam) は周回する度に Turn 1, 2, 3, 4と動き、PQMによって Courant-Snyder 不変量が減衰させられていることで、セプタム板に当たることなく入射ができていくことがわかる。Turn 4迄での入射効率は99%以上あり、設計した PQM と各パラメータによって十分な効率を保った入射ができることが判明した。

4. PQM による蓄積ビームサイズの変動

パルス4極電磁石の磁場は入射ビームだけでなく、蓄積ビームにも影響を及ぼす。蓄積ビームの重心は PQM の磁場中心を通っているため移動しないが、ビーム粒子はガウス分布様の拡がりを持っており、ビーム重心から外れた粒子はキックを受ける。そのため PQM による影響は蓄積ビームサイズの変化として表れる。蓄積ビームサイズが変動することは、シンクロトロン光の瞬き・品質の低下に繋がるため、好ましくない。

次の図は図4のパルス電源によって蓄積ビームが4回パルスキックを受けた場合のビームサイズの変動の様子を表したものである。

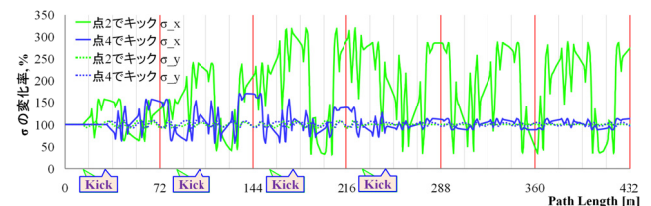


図6：PQMによる蓄積ビームサイズの変動

パルス4極電磁石は線形の磁場分布をもっているため、パルス6極電磁石などと比べると、磁場中心付近に比較的大きな磁場が生じる。そのため蓄積ビームへの影響も大きくなってしまふ。

入射のためのエネルギー効率は PQM を点2に設置した場合が最も高いが、ビームサイズは大きく変動している。これはパルス四極励磁に伴うチューンの移動方向に原因があると考えられる。点4に設置した場合はビームサイズの変動幅が非常に小さくなった。PQM の設置位置を工夫することでビームサイズの変動を抑えることが可能なことが判明した。今後はビームサイズ変動の小さな設置点を検討していく必要がある。

5. UVSOR におけるパルス 6 極電磁石 (PSM) の導入

5.1 パルス 6 極電磁石の設置位置の決定

岡崎市にある UVSOR においても、パルス多極電磁石を用いた入射方法の導入を検討する。UVSOR においては、二次関数的なキック力を与え、磁場中心付近に生じる磁場が小さく、蓄積ビームに与える影響が小さいパルス 6 極電磁石を用いる予定である。

UVSOR ではリングに様々な装置が高密度に配置されているため、物理的に設置可能な場所は限られている。設置可能な場所を候補として最適位置と強度を ELEGANT^[4]を用いた軌道計算により求めたのが図 7 である。設置場所はアンジュレータ U5 の下流 (S5D)、磁場強度は、磁極長が 300 [mm] の場合、 $x=20$ [mm] において $B=233$ [G] 必要と判明した。

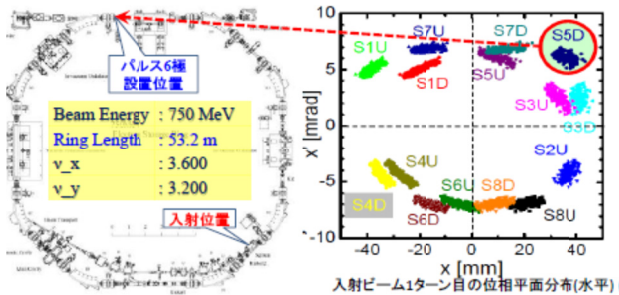


図 7 : 各 PSM 設置位置における位相平面プロット

5.2 UVSOR 用 PSM の設計

まず、ダイポールキッカー電磁石で用いられている、UVSOR の既存のフェライト板 (TDK PE12C) を流用する設計を行い、POISSON で磁場計算を行った。

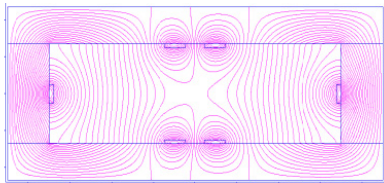


図 8 : 既存のフェライトを流用した PSM

図 8 の PSM では、入射に必要な電流値は 1620 A と求められた。この値を基準に、より効率よく入射できるように電磁石の最適化を行った。最適化においては次の点に留意した。

- (1) 磁束密度を考慮し、ヨークを積層鋼板に変更。
- (2) ヨーク高さを可能な限り小さくする。
- (3) 電極を磁性体に埋め込む。

これらの最適化を行った PSM を図 9 に示す。

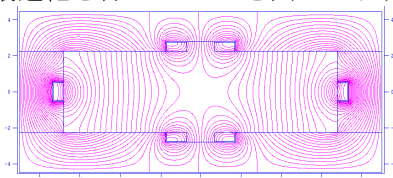


図 9 : 最適化を行った PSM

図 9 の PSM では、入射に必要な電流値を 1365 A まで減らすことができた。

5.3 中心磁場補正案

パルス 6 極電磁石は製作精度に誤差があると、中心にダイポール磁場が残ってしまう。中心磁場をゼロにするためには、磁場補正が必要となる。現在、検討している補正案は、電磁石の上下の電極間に薄い磁性体 (ソフトフェライト) を貼る方法である。

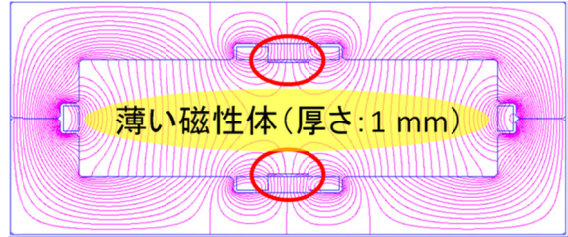


図 10 : 磁場補正の方法 (例)

この案をシミュレーションした結果、中心におよそ +6 [Gauss] の磁場が残ったとしても、補正できることが分かった。磁性体の厚さを変えていくことで、あらゆる磁場の値に対応できるのではないかと考えている。

5.4 PSM 入射によるビーム軌道

これまでで求めてきた PSM の設置位置、設計、励磁電流値を UVSOR-III に適用し、入射ビームのトラッキングを行った。トラッキングには ELEGANT を用いた。結果を以下に示す。

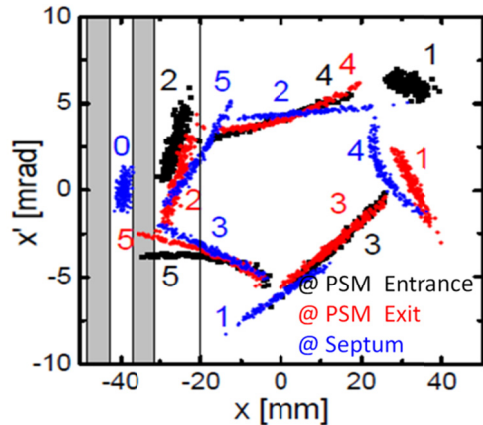


図 11 : セプトム位置におけるトラッキング結果

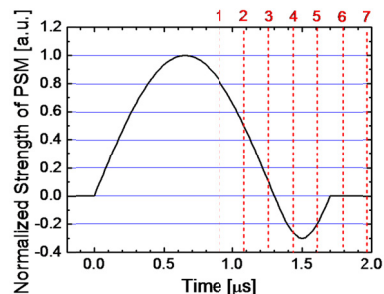


図 12 : 入射計算に使用した電源パルス

UVSORにおいては図1 2のようなパルス幅 1.3 マイクロ秒の電源を導入し、5ターン入射を検討した。青色のプロットがセプタム位置における入射ビームのプロットである。入射ビームはセプタムに当たることなく入射できていることがわかる。

6. まとめ

我々は小規模リングにおけるパルス多極電磁石を用いた入射方法の研究を行い、小規模リングの例として中部シンクロtron光利用施設と UVSOR を取り上げ、シミュレーションを行った。

計算の結果、両施設ではパルス4極（6極）電磁石を用いたビーム入射が現実的なパルス電源を用いて十分に可能であることが判明した。これによりバンパ軌道を形成しないビーム入射が可能となり、小規模リングでは大きな部分を占めるバンパ軌道上の、トップアップ運転時におけるシンクロtron光の品質の向上に貢献する。

パルス4極電磁石は入射ビームに線形の蹴り力を与え、ゼロ磁場点が必ず存在するため実装が容易である一方、蓄積ビームサイズを大きく変動させる。サイズの変動は設置位置を工夫することで小さくできる。

パルス6極電磁石は2次関数的な蹴り力を与えるため蓄積ビームサイズへの影響が小さいが、ゼロ磁場点を作るために高い工作精度や磁場補正策が要求される。

小規模リングではビーム周回周期が電源パルス幅より小さいため、複数ターンにわたって入射ビームへのキックが生じるが、入射は可能である。

状況に応じてパルス4極、6極、あるいは更に多極の電磁石を使い分け、電源強度とマルチターン入射の最適化を行うことで、高効率な入射ができるものであると考えている。

- [1] K.Harada et al., PRSTAB 10, 123501(2007)
- [2] SAD Home Page <http://acc-physics.kek.jp/SAD/>
- [3] Los Alamos National Laboratory Accelerator Code Group
http://laacg1.lanl.gov/laacg/services/download_sf.phtml
- [4] Argonne National Laboratory
http://www.aps.anl.gov/Accelerator_Systems_Division/Accelerator_Operations_Physics/index.shtml