

新しい入射法

A NEW INJECTION METHOD

妻木孝治[#], 深見健司

Koji Tsumaki[#], Kenji Fukami

JASRI/SPring-8

Abstract

It is important to keep the high stability of stored electron beams and high injection efficiency during top-up injection. We studied the new injection system that satisfies these requirements. The new injection system consists of dipole kicker magnet and correction magnet that make the step function like magnetic field distribution; No magnetic field around the central orbit where the stored electron beams are circulated and pure dipole field at an injection point. The small dipole kicker magnet is placed at off-center position and a correction magnet placed after main magnet cancels the leakage field generated by the main kicker magnet around the central orbit. We designed the main kicker magnet and the correction magnet to apply the SPring-8 storage ring and realized the magnetic field distribution that the sum of the magnetic fields of two magnets are almost zero around the central orbit and the dipole field around the injection point.

1. はじめに

放射光用蓄積リングでは蓄積電流を一定に保つため、通常数秒に1回程度入射を行う。入射中もユーザーは実験を行うため、蓄積中の電子ビームは入射中も高い安定性を保たなければならない。入射はバンパ電磁石によりバンパ軌道を作って行うが、バンパ電磁石同士の不整合やアンダーシュート、バンパ軌道内の六極電磁石の存在などにより蓄積電子の軌道が閉じなかったり、一周後に再度けられたりして蓄積中の電子が動いてしまう。これらを防ぐために様々な努力がなされているが影響を完全に取り去ることは難しい^[1]。

バンパ軌道を作る入射に代わるものとしてパルス四極電磁石やパルス六極電磁石による入射法が検討された。パルス四極電磁石^[2]や六極電磁石^{[3][4]}による入射は、蓄積電子が通る中心軌道付近は磁場が小さいことを利用して蓄積電子に影響を与えないまま、入射ビームを蓄積リング内に蹴り込もうとするものである。これらは非常に優れたアイデアであるが、蓄積ビームへの影響を完全に取り去ることはできない。また入射電子のビーム幅のためキック量に幅ができ、エミッタンスの小さな超低エミッタンスリングなどでは、入射効率の低下が予想される^[5]。

本研究では、これらの問題点を解決するために理想的な入射を検討したものである。以下最初に基本的な考え方について述べたあと、パルス電磁石による入射について述べ、さらに本方法を SPring-8 蓄積リングに適用した場合について議論し、最後にパルス電磁石の設計について述べる。

2. 基本的な考え方

放射光リングにとって理想的な入射法とは、蓄積中の電子に影響を与えることなく、連続的に入射できることと、入射電子を同じ方向に蹴り込むことが

できることである。オフモーメントの場合まで考えると複雑になるため以下簡単のためオンモーメントの電子の場合のみ考える。このような入射を実現できる磁場分布は、中心付近は磁場がなく、入射点付近は二極磁場が存在するステップ関数的な磁場分布である。そのためには磁極間距離を小さくして漏れ磁場を少なくした二極電磁石を中心軌道から離れた位置に置けば良い。磁極間距離が短いほど漏れ磁場は少なくなるが、蓄積軌道上への漏れ磁場はどうしても避けられず、蓄積電子に影響を与えてしまう。これを防ぐには中心に対して対称に同じパルス二極電磁石を置き逆方向の磁場を発生させて八極磁場とする方法が考えられる。しかしこの場合中心は零になるが中心からずれた位置の漏れ磁場は残ってしまう。

この方法より簡単な方法として次の方法が考えられる。入射ビームを蹴り込む二極電磁石はそのまま中心軌道を外して設置し、中心軌道上に作られる漏れ磁場は、直後あるいは前後に補正用のパルス磁石を設置して打ち消してしまうのである。このようにすれば、入射電子は純粋な二極磁場で蹴り込まれ、蓄積電子は結果的に漏れ磁場の影響を受けないことになる。

3. パルス電磁石による入射

入射電子の位置を x 、傾きを x' とすると Courant Snyder の普遍量は、

$$W = \frac{1}{\beta} \left[x^2 + (\alpha x + \beta x')^2 \right] \quad (1)$$

ここで

$$X = \frac{x}{\sqrt{\beta}}, P = \frac{\alpha x + \beta x'}{\sqrt{\beta}} \quad (2)$$

とおく。ただし α 、 β は Twiss パラメータである。この規格化座標 (X 、 P) 上でパルス電磁石による入

[#]tsumaki@spring8.or.jp

射スキームを示す (図 1)。通常入射点は α が零で入射ビームも平行に入射するため、入射電子は $P=0$ の位置に入射される。その後リング内に入射された電子は位相が進み、パルス電磁石の位置 $A(X_1, P_1)$ までくる。そしてパルス電磁石により角度 θ だけ蹴り込まれ、位相空間上での位置が $B(X_2, P_2)$ となる。以降は (X_2, P_2) で決まる円の上を回転しながら、放射減衰して定常状態のビームの大きさに落ち着く。ただし蹴り込み後の位置はパルスセプタムの壁の位置で決まるアクセプタンスより小さくなくてはならない。

パルス電磁石位置での入射ビームを蹴る前後でのビーム座標を (x_1, x_1') 、 (x_2, x_2') 、対応する規格化座標を (X_1, P_1) 、 (X_2, P_2) とすると蹴る前後では位置は変わらず角度だけ変化するため、

$$X_1 = X_2 = \frac{x_1}{\sqrt{\beta_1}} \quad (3)$$

$$P_1 = \frac{\alpha_1 x_1 + \beta_1 x_1'}{\sqrt{\beta_1}} \quad (4)$$

$$P_2 = \frac{\alpha_1 x_1 + \beta_1 x_2'}{\sqrt{\beta_1}} \quad (5)$$

従って、

$$\Delta P = P_2 - P_1 = \sqrt{\beta_1}(x_2' - x_1') = \sqrt{\beta_1}\theta \quad (6)$$

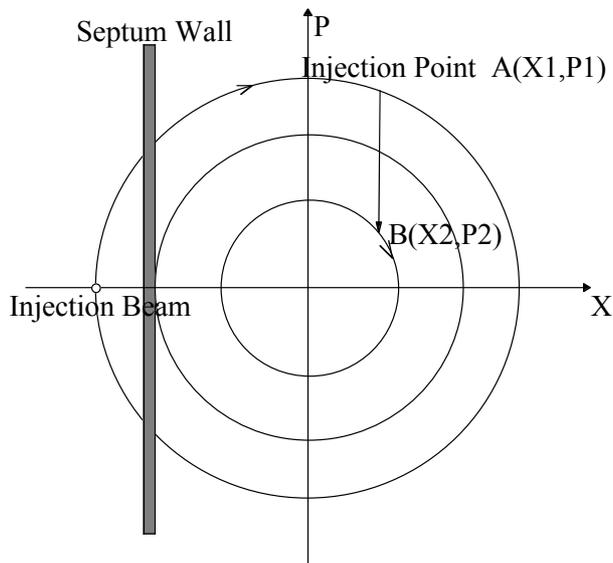


Figure 1: Injection by a pulse magnet on a normalized phase space.

4. SPring-8 への応用

図 2 に SPring-8 のラティス関数を示す^[6]。入射点は原点から 2.05 m の位置で、ほぼ α は零である。また入射ビームは入射角零で入射されるため図 1 で示される位相空間上で P が零の位置に入射される。その後時計回りに位相が進んで行く。入射位置 X_1 は出来る限り小さい方が W は小さくなるが、あまり

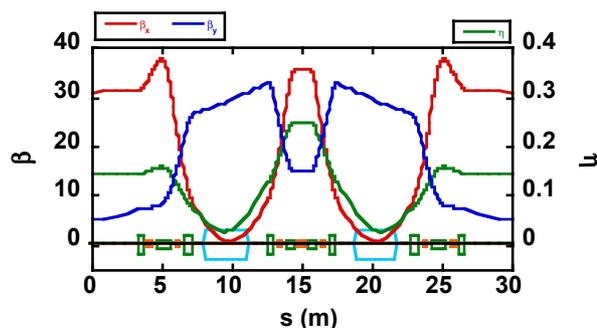


Figure 2: Low emittance optics of the SPring-8 storage ring.

中心の蓄積電子の軌道に近づけると磁石も中心に近付けなければならない、漏れ磁場が大きくなりすぎるため、漏れ磁場との兼ね合いから入射位置を決めなければならない。

入射位置を決めるため、入射点から 1 セルの終わりまでの各位置で $P=0$ の X 軸上の点 P_0 に蹴り込んだ場合の蹴り込んだ後の W と必要な蹴り角 θ を計算した。結果を図 3 に示す。セプタム壁で決まる SPring-8 のアクセプタンスは $1.1 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{rad}$ であるため、蹴り込んだ後の W の値はこの値より小さくなければならない。ところがアクセプタンスより小さくなるのはちょうど偏向電磁石の部分であるためキッカー電磁石を置くことができない。偏向電磁石部の位相の進み幅が大きいため、偏向電磁石部が、 X が小さく蹴り込み後の W が小さくなる位相空間上の軌跡の大部分を占めているためである。

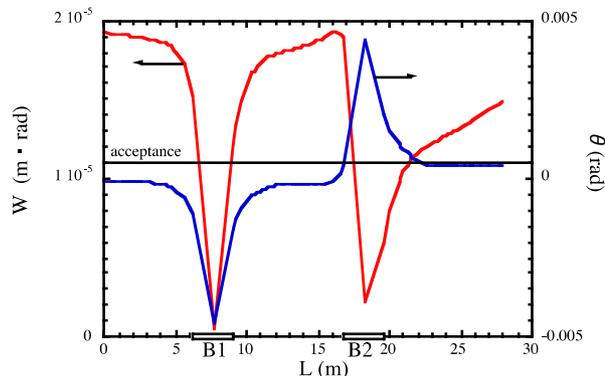


Figure 3: Courant Snyder invariant W of injected beam after kicked into the storage ring and the kick angle.

位相空間上で入射に適した X の小さい所から偏向電磁石部を外すためには、入射電子に角度をつけて、位相を進めるか、送らせれば良い。図 4 に $+1 \text{ mrad}$ の角度をつけて位相を進めた場合、図 5 に -1 mrad の角度をつけて位相を送らせた場合のキック後の W と蹴り角の計算結果を示す。これより位相を送らせた方がより広い範囲で W が小さくなることがわかった。ここで実際にキッカー電磁石を置くことができるのは 2 個の偏向電磁石の前とセルの最後の四極電磁石の後方である。このうち 1 番目の偏向電磁石の前は角度を変えてみても解はなかった。2 番目の偏向電磁石の前 (B 2 B) とセルの最後の C 架台

と名付けている架台に搭載されている一番下流側の四極電磁石の後方 (CGA) における、蹴り込んだあとの W と、蹴る位置の中心からの距離 $|X|$ の入射角依存性を図 6、図 7 に示す。また図 8 には必要な蹴り角の入射角依存性を示す。

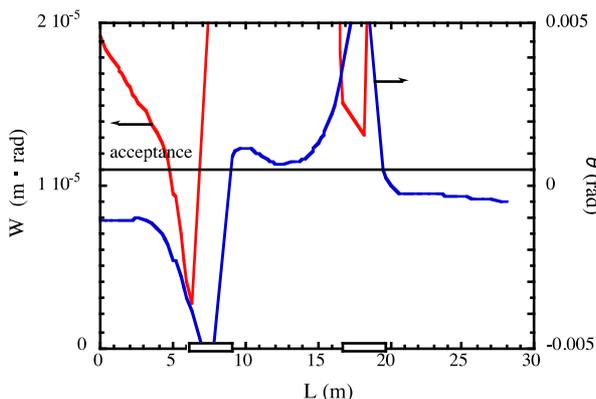


Figure 4: Courant Snyder invariant W of injected beam after kicked into the storage ring and the kick angle. Injection angle is $+1\text{mrad}$.

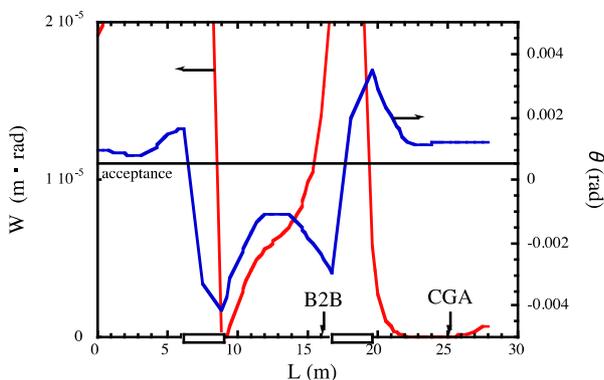


Figure 5: Courant Snyder invariant W of injected beam after kicked into the storage ring and the kick angle. Injection angle is -1mrad .

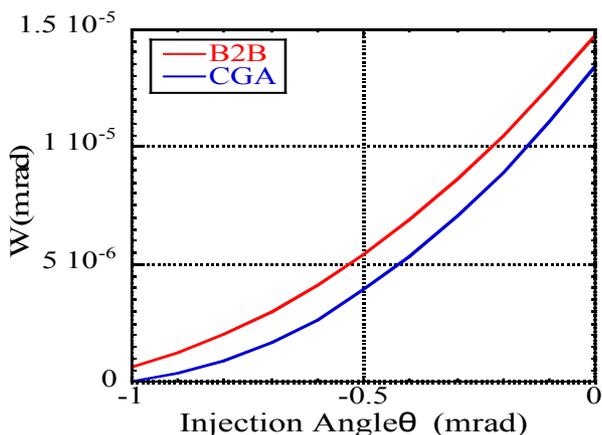


Figure 6: Injection angle dependence of Invariant W after kicked into the storage ring. B2B shows the position just before the second bending magnet and CGA shows just after the quadrupole magnet on the third girder C.

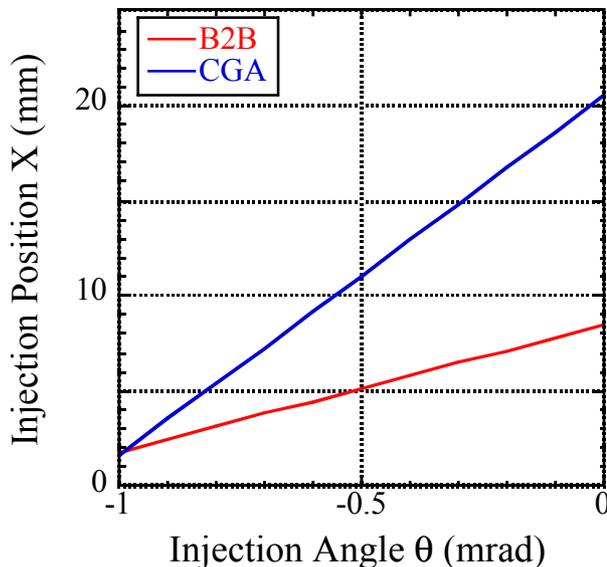


Figure 7: Injection angle dependence of kick position at the kicker magnet.

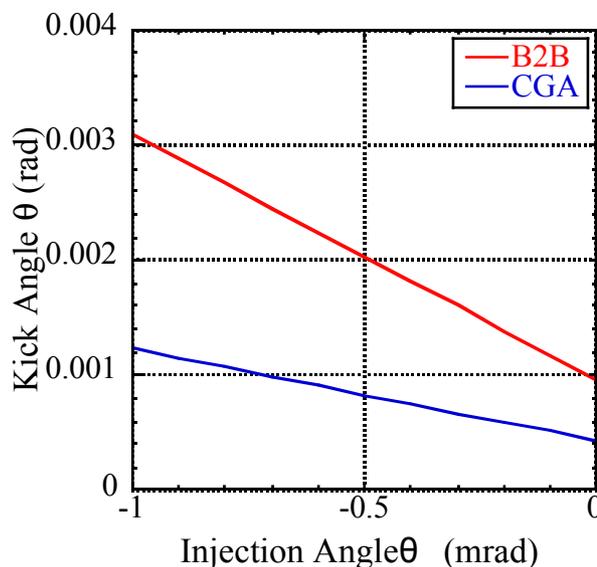


Figure 8: Injection angle dependence of kick angle required to kick into the zero normalized momentum P_0 .

蹴り込んだ W が小さく蹴り込み角も小さな入射角が良い。ただし蹴る位置は前述のように漏れ磁場があまり大きくなりすぎない程度にキッカーを置ける位置が良い。図 6 と図 7 より CGA の方が W を小さくでき、 x も大きくとれ入射点を中心から離すことができる。又図 8 より蹴り角も小さくできることがわかる。そのため C 架台後方の CGA をキッカー設置場所とする。入射角は -0.7mrad とした。このとき必要な蹴り角は -0.97mrad 入射位置は $x = -7.3\text{mm}$ の位置である。 W は $1.7 \times 10^{-6}\text{m}\cdot\text{rad}$ となり現在の SPring-8 の入射後の W の 52% となる。表 1 にこの時のパラメータをまとめて示す。

Table 1: Main Parameters for Injection

Parameter	Value
Injection position x	-7.3 mm
Kick angle of kicker magnet θ	0.989 mrad
W after injection	$1.7 \times 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{rad}$
(W of SPring-8 after injection)	$(3.2 \times 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{rad})$

5. 電磁石の設計

前章より蹴り角は 1 mrad で蹴る位置は中心から 7.3 mm の位置である。一様磁場のところで蹴り込むためには磁極の端部は出来る限り中心軌道に近付きたいが漏れ磁場の観点からはできるかぎり離す必要がある。ここでは中心軌道から 6 mm の位置に磁極端部がくるようにした。磁石長は 0.1 m とした。磁極間のギャップは短いほど漏れ磁場は小さくなるが、SPring-8 の挿入光源の最小ギャップ 5.81mm を参考にして 5 mm とした。挿入光源の長さは約 5 m あるのに対し本キッカー電磁石は 0.1 m の長さのため 2 mm 程度でも十分と思われるが念のため実績のある値とした。磁極形状はそのままでは 7.3 mm の位置ですでに磁場が減り始め一様でなくなるため、端部に幅 0.3 mm 高さ 0.5 mm のシムをつけた。図 9 に磁石形状とフラックスを示す。鉄中の磁束密度は十分低い値にあるので、磁石をさらに小さくすることは可能であるが余りに小さくするメリットも思いつかなかったため幅 2.2 mm 高さ 30 mm とした。図 10 に $y=0$ の x 軸上の磁場の計算結果を赤線ですす。

$x=0$ の中心軌道上に約 0.034 T の二極磁場と 10 T/m \times 0.1 m の四極磁場が発生する。この漏れ磁場を消すため弱収束型の機能結合型の補正電磁石を設計した。図 11 に磁石形状と磁力線図を示す。長さは主電磁石の半分の 0.05 m、最小ギャップは 4.72 mm、幅は 25 mm、高さ 30 mm とした。図 10 の青線が $y=0$ での磁場分布である。ここでは分かりやすいように長さ 0.1 m に換算して磁場強度を示した。ビームが見る合成磁場を黒線で示す。実際の磁場計算はまず主キッカー電磁石の磁場を計算しその漏れ磁場に対応する補正電磁石を設計し磁場計算を行い、合成磁場を求めた。合成磁場はもとの磁場より小さくなるので磁場が低下した分だけ電流値を増加させ主キッカー電磁石の磁場を計算し、それに対応して補正電磁石の磁場計算を行い合成磁場を求めた。入射点の磁場が所定の強さの二極磁場で、中心軌道上の磁場が零で四極成分ができるかぎり小さくなるようにこの手続きを繰り返した。主キッカー電磁石の起磁力は 1345AT である。SPring-8 蓄積リングのバンブ電磁石は四台あり起磁力は 12000AT と 9600AT の 2 種類である。これと比較すると 1/9 および 1/7 の起磁力で済むことがわかる。しかも 1 台ですむこ

とを考えれば非常に経済的であるとともに、電源も小型で済み、現在のバンブ電源のパルス幅 6 μ sec より大幅に短くできる可能性がある。表 2 に電磁石の主なパラメータを示す。

本方法で得られた磁場とパルス四極電磁石、パルス六極電磁石で得られる磁場とを中心軌道上および入射点で比較した。ただし磁場の強さは入射点での磁場の強さが同じになるようにした。結果を図 12 および図 13 に示す。本法で得られた中心軌道付近の磁場はまだわずかに四極成分が残っておりさらに改善の余地がある。入射点付近では四極電磁石や六極電磁石に比べて十分一様な磁場分布になっている。

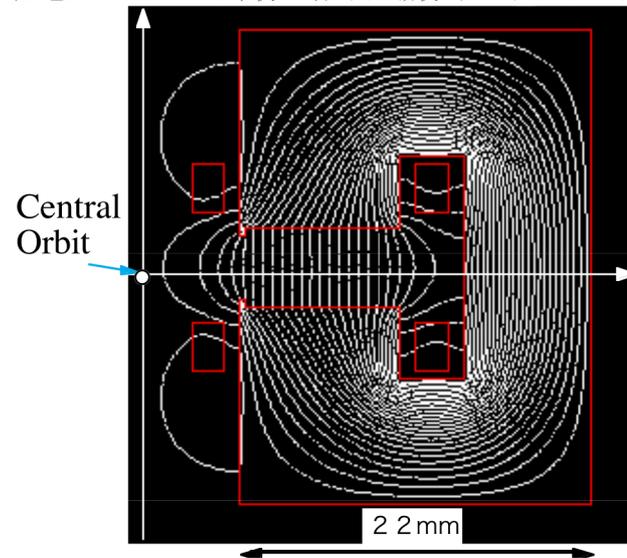


Figure 9: Kicker magnet and contour plot of magnetic flux lines.

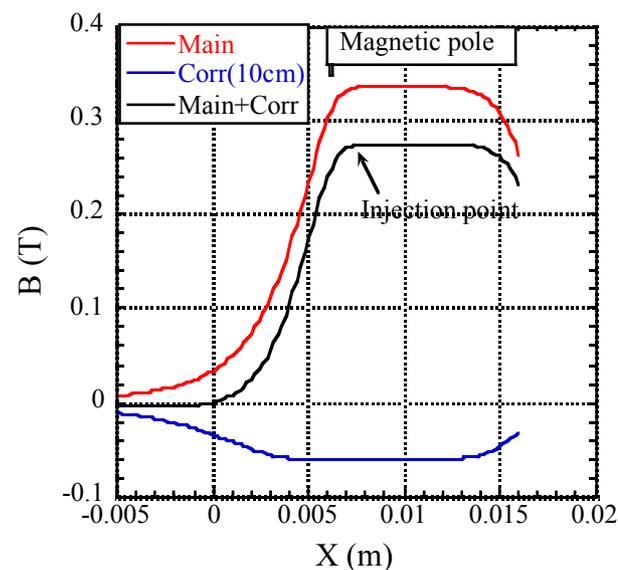


Figure 10: Magnetic flux density of main kicker magnet, correction magnet and the sum of the two magnets.

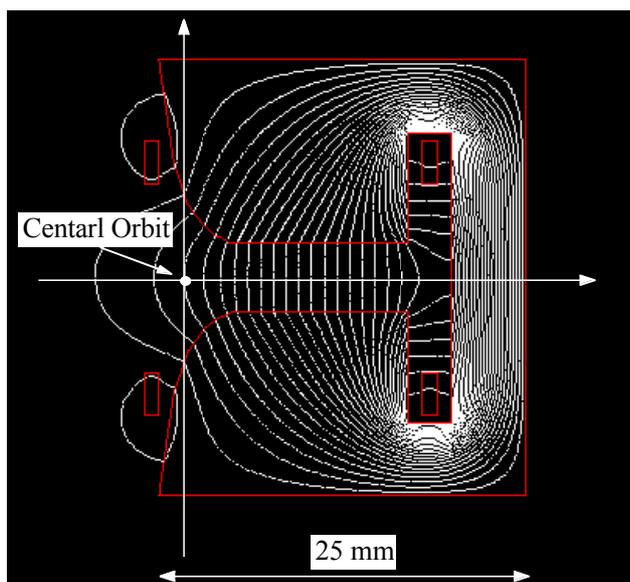


Figure 11: Correction magnet and contour plot of magnetic flux lines.

Table 2: Main Parameters of Injection Magnets

Parameter	Value
Main kicker dimension	22×30×100 mm
Main kicker pole gap	5 mm
Main kicker magnetomotive force	1345 AT
Main kicker magnetic flux density	0.3343 T
Correction magnet dimension	25×30×50mm
Correction magnet minimum gap	4.72 mm
Correction magnet magnetomotive force	432 AT

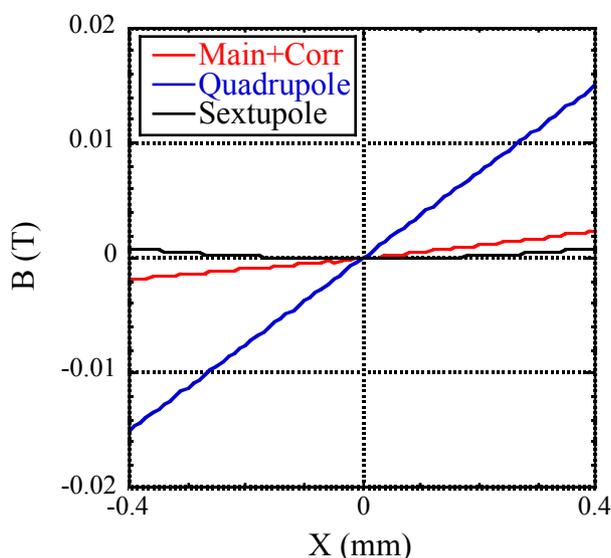


Figure 12: Comparison of magnetic field distribution of quadrupole magnet, sextupole magnet and this system around central orbit.

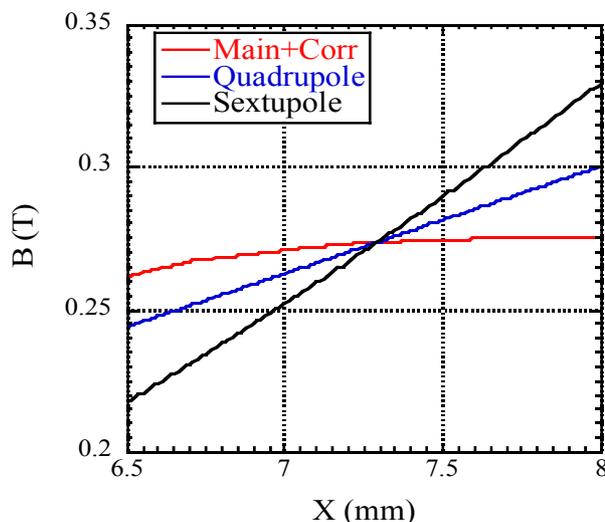


Figure 13: Comparison of magnetic field distribution of quadrupole magnet, sextupole magnet and this method around injection position.

6. まとめ

蓄積中の電子に影響を及ぼすことなく入射電子を一樣な蹴り角で蹴り込む入射システムを検討した。蓄積電子の存在する中心軌道上は零磁場で、入射点は二極磁場になるような磁場分布を作るため、二極のキッカー電磁石を中止軌道から外して設置し、中心軌道付近の漏れ磁場を弱収束型の補正電磁石で補正し、合成磁場が中心付近で零、入射点では二極磁場となるようにした。

SPring-8 蓄積リングに応用する為に実際に入射システムを設計した。設計した主キッカー電磁石のギャップは5 mm で外形は、幅22 mm、高さ30 mm 長さ0.1 m、必要な起磁力は1345ATである。この値はSPring-8のバンパ電磁石の1/7~1/9である。補正電磁石は、ギャップ4.72 mm、幅25 mm、高さ30 mm、必要な起磁力は432 ATである。

なお本検討ではディスパージョンを考慮していないが、ディスパージョンを積極的に取り入れて入射電子のエネルギーに応じた磁場分布として入射効率をより高くすることも可能である。

参考文献

- [1] H. Tanaka, et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 539, 547 (2005).
- [2] K. Harada, et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams 10, 123501 (2007).
- [3] Y. Kobayashi, et al., Proceedings of the 10th European Particle Accelerator Conference, Edinburg, Scotland, 2006, p. 3526.
- [4] H. Takaki, et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams 13, 020705 (2010).
- [5] Y. Jiao, Workshop on Accelerator R&D for Ultimate Storage Rings, /www.usr2012.ihep.ac.cn/.
- [6] Y. Shimosaki, et al., Proceedings of IPAC2013, Shanghai, China, 2013, p. 133.