

## 超高速4極キッカーによる入射ビーム振幅の低減の提案

### PROPOSAL OF ULTRA-FAST QUADRUPOLE KICKER FOR REDUCTION OF INJECTED BEAM MOTION

中村剛<sup>#, A)</sup>, 出羽英紀<sup>A)</sup>, 安積隆夫<sup>B)</sup>, 小林和生<sup>A)</sup>, 藤田貴弘<sup>A)</sup>, 正木満博<sup>A)</sup>, 佐々木茂樹<sup>A)</sup>, 大熊春夫<sup>A)</sup>  
Takeshi Nakamura<sup>#, A)</sup>, Hideki Dewa<sup>A)</sup>, Takao Asaka<sup>B)</sup>, Kazuo Kobayashi<sup>A)</sup>, Takahiro Fujita<sup>A)</sup>, Mitsuhiro Masaki<sup>A)</sup>,  
Shigeki Sasaki<sup>A)</sup>, Haruo Ohkuma<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> Japan Synchrotron Radiation Research Institute / SPring-8

<sup>B)</sup> RIKEN Harima / SPring-8

#### Abstract

The scheme for the reduction of the oscillation amplitude of an off-axis injected beam by a ultra-fast quadrupole kicker is proposed. The injection scheme with a quadrupole kicker magnet is already proposed and tested, however, a quadrupole kick excites a quadrupole oscillation of a stored beam and further development of the scheme is not performed. Contrary to magnets of which kick has time constant of hundreds nano seconds, the quadrupole kicker of TEM mode stripline type of which time constant is nano seconds is proposed to reduce the number of bunches that suffers the quadrupole kick. The kicker is designed based on the ultra-fast quadrupole/dipole variable field kicker that is proposed at SPring-8, and show the designed performance at the beam test. Recently, advanced undulators that produce nonlinear kick are installed to the SPring-8, and the injected beam with large oscillation amplitude suffers the nonlinear kick and lead to the reduction of the injection efficiency. With the above scheme, the effect of the non-linear kick is expected to be reduced by the reduction of the amplitude of the injected beam.

#### 1. はじめに

蓄積リングへの低振幅 off-axis 入射を目標とし、かつ、bucket-by-bucket でのビームのハンドリングが可能な 2 極キック/4 極キック可変のキッカーが著者らにより提案され[1]、これを製作してビーム試験を行った結果、ほぼ設計通りのキックが生成されていることを確認した[2,3]。

このキッカーは 50kV パルスにより駆動されたストリップライン型 TEM モードキッカーであり、数 ns の時間幅のキックを生成し、かつ、電極の形状の工夫により 2 極キックから 4 極キックまで、電極の駆動電圧の調整により連続可変、かつ、水平方向のアパチャへの制限なしに強いキックを発生するという特徴を持つ。

本報告ではこの成果に基づいて設計された超高速 4 極キッカーによって、蓄積ビームへの影響を最小限に保ちつつ入射ビームの振幅を低減する手法を提案する。

SPring-8 の蓄積リングには近年、種々の高度化が施された挿入光源が設置されているが、その中の幾つかはギャップを閉じた際に、ビームに対して強い非線形キックを発生する。Top-up 入射では、これらを閉じたまま入射する必要があるため、10mm 程度の大振幅をもつ off-axis 入射ビームはその影響を大きく受け、入射効率の低下の原因となっている[4]。

そこで、超高速 4 極キッカーを用いてキックを発生することにより、蓄積ビームへの影響を小さく抑えつつこの振幅を低減することを検討した。Fig. 1

に概念を示す。問題となっている非線形キックは、振幅に対して 2 乗以上の依存性を持つので、振幅を 7 割程度でも低減できれば、キックの影響を半減以下とすることが可能となる。

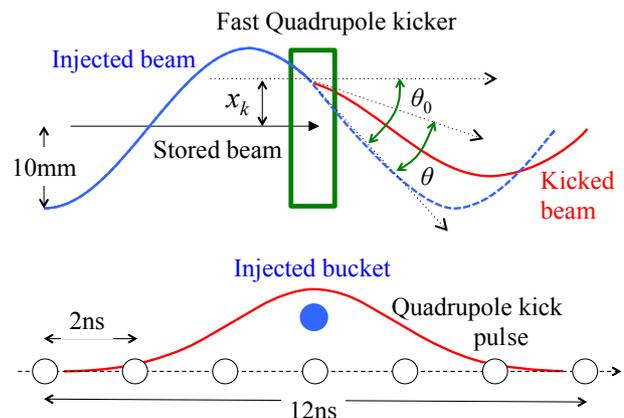


Figure 1: Amplitude reduction by fast quadrupole kicker. Injected beam is kicked by the quadrupole kick of which pulse length is 12ns in full width for the kicker in this report.

4 極パルス磁石を用いた入射は以前に提案され試験されていたが[5]、蓄積ビームが 4 極キックされてビームサイズの振動が生じビーム品質の劣化につながるため、実用化はされていない。一方、本提案では、超高速キッカーを用いることにより、そのキッ

<sup>#</sup> nakamura@spring8.or.jp

クの影響を数バンチにのみ制限することが可能であり、蓄積ビーム全体としてみた影響は大きく低減される。一方、パルス6極磁石による入射は実用化されているが、発生磁場が非線形のため、振幅低減後の振幅が小さければそれだけ非線形的に強い磁場が必要となるので、ここでは検討しない。

以下では、超高速キッカーの設計例、それを用いた入射ビームの振幅の低減について記述する。

## 2. 超高速4極キッカー

超高速4極キッカーは2対のストリップラインを内蔵したキッカーであり、各ストリップラインは、50kVのパルスにより駆動される。駆動には、現在所有しているパルス発生器 (FID 社)の出力である正極性の50kVパルスを用いるため、水平方向に対して発散となる4極キックを生成する。

キッカーに入力された電磁場は、ストリップライン上をTEMモードとなって、ビームに対して反対方向に光速度で進行しながらキックを発生する。そのため、キックの時間構造は、ストリップラインの全長を $L$ 、光速度を $c$ とすると、入力電磁場パルス波形を時間幅 $2L/c$ でrunning averageしたものなり、入力パルス幅次第で、高速のキックを発生することが可能となる。この報告では、システムの単純化のため1台のキッカーを1台のパルス発生器で駆動することを考え $L=0.9\text{m}$ としているため、 $2L/c=6\text{ns}$ となり、また、キッカー長を有効に用いてキックするためには入力パルス幅も $2L/c$ 以上が必要となるので、パルス発生器のパルス幅を、改造により3nsから6nsへと伸長する。これにより、それらを合わせたキックの時間幅は全幅で12nsとなる。すなわち、500MHzのバケットレートの場合、6バケット程度が多かれ少なかれキックの影響を受けることになる。

SPring-8の場合、ハイブリッドフィリング等においてトレイン部に蓄積されているバンチ数は、最小でも200程度であるので、この程度のバンチ数であれば4極キックの影響を受けても、全体としては大きなビーム品質の低下にはつながらないと考えられる。しかし、より短いキックが必要となれば、数台の短いキッカーに分割し、かつ、短パルスで駆動し、時定数を短縮する必要がある。

キッカーの概念図を Fig. 2、断面図および電場分布を Fig. 3、中央部の外導体の幅("wpole" in Fig. 3)を変えた時の水平電場の分布を Fig. 4 に示す。駆動電磁場はTEMモードなので磁場が電場に随伴して電場と同方向・同強度のキックを発生する。そのため、生成されるキック量は電場のみの値の2倍となる。

このキッカーでは、垂直アパチャは26mmとした。この値は通常部のアパチャ40mmよりは小さいが、top-up入射時においてギャップが閉じられている挿入光源のアパチャより十分に大きく、問題とはならない。4極キック勾配は駆動電圧が一定の場合、アパチャの2乗に比例して大きくなるが、前回のキッカー[1-3]に比べてキック力は小さくて良いので、ギャップを大きくとることができている。

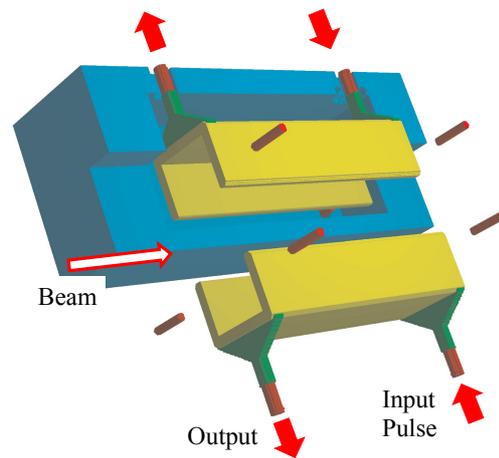


Figure 2: Ultra-fast quadrupole kicker. Three fourth of outer conductor is removed in the figure and kicker length is shortened from actual length to show the full structure.

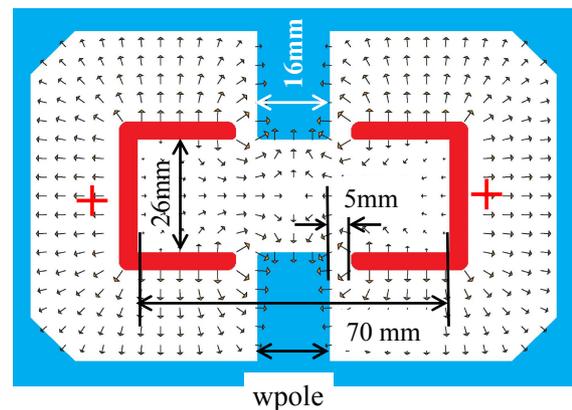


Figure 3: Cross sectional view of the kicker and electric field direction with positive potential on striplines. Arrows are showing the direction of the field, not its strength.

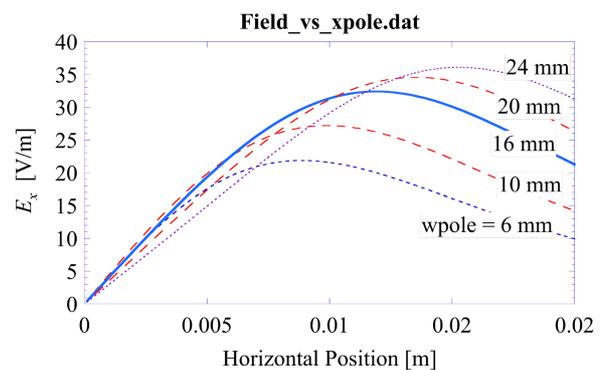


Figure 4: Horizontal electric field distribution in horizontal plane for several values of the pole width ("wpole" in Fig. 3). Applied voltages on striplines are -1V.

電場強度の分布を Fig. 5 に示す。これから最大電場は、1V 印加に対して 300V/m となり、50kV で駆動した際には、15MV/m となる。入力パルスの時定数を 6ns とした場合にその周波数成分は  $1/(2 \times 6\text{ns}) = 83\text{ MHz}$  となるが、これを周波数とした Kilpatrick limit は、11MV/m であるので、これを 1.5 倍程度、超過しているが、前回のキッカーでも同程度の割合で超過していたが放電はみられず、今回のキッカーにおいても放電の問題はないことが期待される。

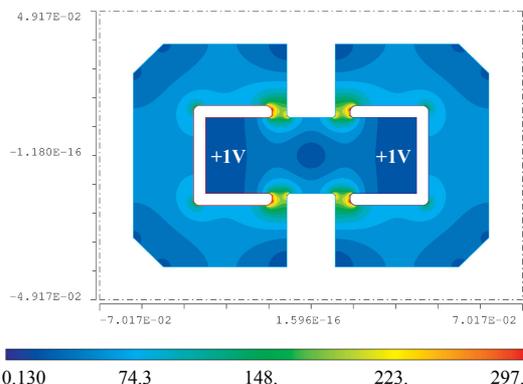


Figure 5: Electric field strength distribution. Applied voltages on striplines are +1V.

Fig. 6 に励起された横方向のウェーク場を示す。トラップされたウェーク場が見られるが、これは、前回同様、ウェーク場の吸収用アンテナの設置位置等の最適化により減衰させることが可能と考えられる。

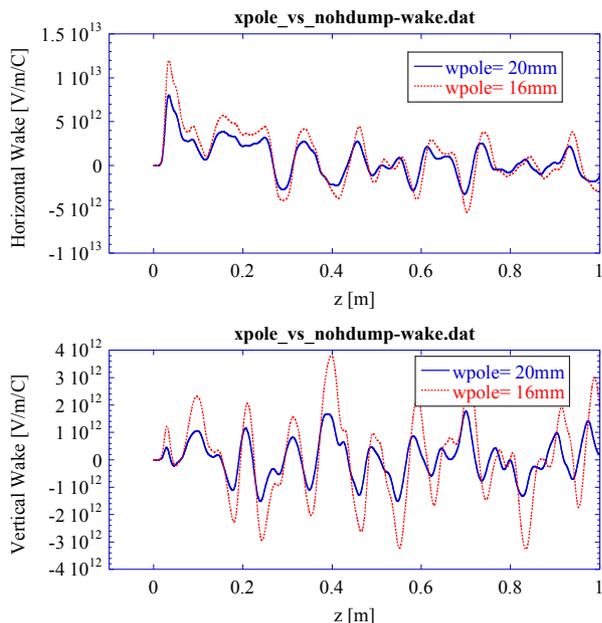


Figure 6: Transverse wake field. Bunch length is 5mm (rms).

### 3. 入射ビームとリング内での挙動

入射器であるシンクロトロンから出射されたビームは、リングへの輸送系において水平方向のベータトロン位相差が 90 度となるように設置された 2 台のコリメータによりエミッタンスが低減され、セプタム磁石に導かれる。セプタム磁石は、前後にアルミニウムおよびベリリウムの隔壁をもち、その間にはヘリウムガスを充填するという隔離構造となっており、入射ビームはそれらにより多重散乱を被る[6]。

4 極キック無しでの入射ビームのリング内での挙動の計算の結果を Fig. 7 に示す[7]。数ターンでは位相空間内のビーム形状が大きく崩れることはないで、以下ではリングの非線形は考慮せず線形のみでの議論とする。

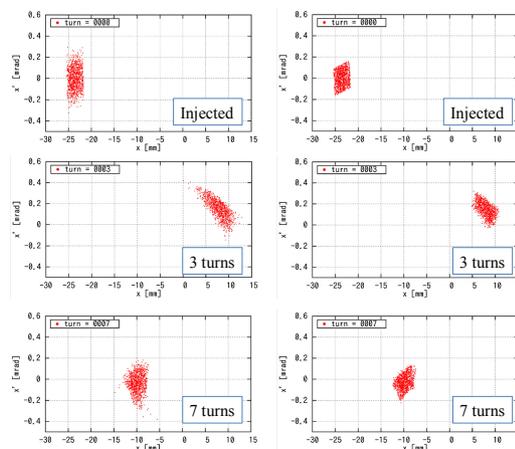


Figure 7: Tracking for normal injection scheme with injected beam with, and without multiple scattering at septum magnet (left and right, respectively) [6].

### 4. 4 極キックの効果

キッカーの 4 極キックは、水平には発散であるので、ビームは最大振幅のピークからビーム軸に戻ってくる際にキックを受け、振幅が低減される。入射セプタムは通常直線部に置かれており、キッカーの設置場所を通常直線部あるいは長直線部として、入射及びキッカーの水平のベータ関数をそこでこの値である 25m とする。

キックの効果を知るパラメータとして、 $(x, x') = (0, 0)$  を中心とした入射ビームの 95% を含むエミッタンスを定義し(以下、95%-エミッタンスと呼ぶ)、それが 4 極キックによりどれだけ低減できるかを検討した。

Fig. 8 に、キックを与える時のビームの重心位置  $(x_k)$ 、およびキックの強さ(重心の  $x'$  を 0 とする重心へのキック量  $\theta_0$  に対する、ビーム重心に与えるキック量  $\theta$  の比)に対する 95%-エミッタンスの減少を示す。また、その際の 4 極キック量  $k_0$  を横軸にしたものを Fig. 9 に示す。Fig. 10 は、水平方向の位相空間  $(x, x')$  における、入射ビームの分布、および、Fig. 8 と Fig. 9 での計算の幾つの場合: (A)、(B)、(C)のキック前後の分布を示している。

単一粒子では、 $x_k$  が小さいところで重心の角度が 0 となるキックを与えた場合にエミッタンスが最小となるが、有限サイズを持つビームの場合には、その条件では、テールのエミッタンスが大きくなり、95%-エミッタンスは大きくは低減せず(B)、逆に、(A)のように、大きめの $x_k$ で小さめのキックを与えれば、95%-エミッタンスが低減でき、場合によってはそれを 55% 程度に減少させることが可能であることがわかる。非線形キックは、95%-エミッタンスに比例以上の依存性をもつので、その影響は半減以下となることが期待される。また、キックの強さおよびキック位置への依存性が小さいので、キッカーのキック力の変動および入射ビームとキッカーとの位相にある程度の余裕度が期待される。

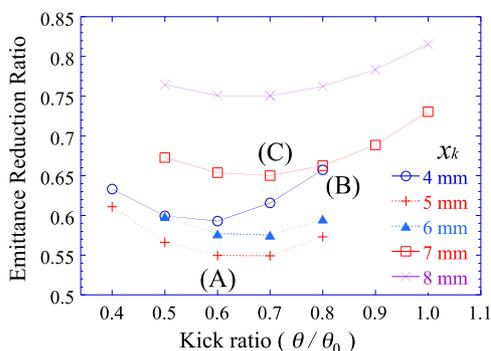


Figure 8: Reduction ratio of 95%-emittance for the kick at several amplitude  $x_k$  with kick strength (Kick ratio  $\theta/\theta_0$ ). The definitions of  $x_k$ ,  $\theta$ , and  $\theta_0$  are shown in Fig. 1.

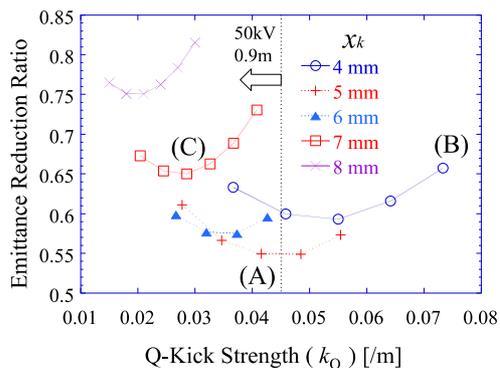


Figure 9: Reduction ratio of 95%-emittance and quadrupole strength. Maximum kick strength of the kicker is 0.045/m for drive voltage of 50kV and length 0.9m.

## 5. まとめ

超高速4極キッカーを用いることにより、磁石に比べて、蓄積ビームに与える影響を大幅に低減しつつ、入射ビームの振幅の低減が可能であることを示した。これにより、SPRING-8では入射ビームの非線形磁場による損失の低減が期待される。

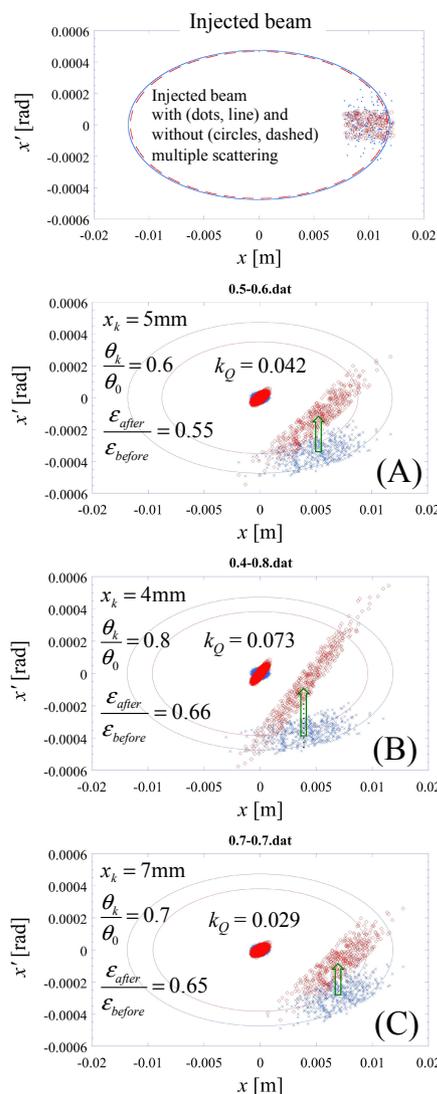


Figure 10: Linear tracking result for (A), (B) and (C) in Fig. 8 and 9.

## 参考文献

- [1] T. Nakamura, <http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/IPAC2011/papers/tupc095.pdf>, [http://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj8/proceedings/poster/MOPS101.pdf](http://www.pasj.jp/web_publish/pasj8/proceedings/poster/MOPS101.pdf)
- [2] T. Nakamura, H. Dewa, T. Asaka, K. Kobayashi, T. Fujita, M. Masaki, S. Sasaki, H. Ohkuma, [http://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj9/proceedings/PDF/WEPS/WEPS057.pdf](http://www.pasj.jp/web_publish/pasj9/proceedings/PDF/WEPS/WEPS057.pdf)
- [3] T. Nakamura, H. Dewa, T. Asaka, K. Kobayashi, T. Fujita, M. Masaki, S. Suzuki, S. Sasaki, H. Ohkuma, [http://pasj.jp/web\\_publish/pasj2014/proceedings/PDF/MOOM/MOOM08.pdf](http://pasj.jp/web_publish/pasj2014/proceedings/PDF/MOOM/MOOM08.pdf)
- [4] M. Takao, K. Soutome, K. Fukami, Y. Shimosaki, <https://jacowfs.jlab.org/conf/proceedings/IPAC2015/papers/taub1.pdf>
- [5] K. Harada, Y. Kobayashi, T. Miyajima, S. Nagahashi, PR-STAB 10, 123501 (2007).
- [6] K. Soutome, J. Shimizu, K. Fukami, “パルスセプトラム電磁石ヘリウムガス置換部での多重クーロン散乱の影響”, internal report of SPRING-8 Accelerator Division.
- [7] Courtesy of K. Kaneki, JASRI/SPRING-8.