

# BUCKET-BY-BUCKET ON-AXIS / OFF-AXIS INJECTION BY FAST KICKER WITH VARIABLE POSITION DEPENDENCE OF KICK

Takeshi Nakamura

Japan Synchrotron Radiation Research Institute

1-1-1, Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5198, Japan

## Abstract

The bucket-by-bucket on-axis/off-axis injection system is proposed with new stripline fast kicker with variable position dependence of kick, from dipole to quadrupole, controlled by the drive voltage and its polarity. Applying the injection system to on-axis injection necessary to ultimate storage rings with narrow dynamic aperture, every bucket can be stored to achieve high average current with top-up operation. Also the minimum perturbation for stored beam can be achieved with the system by limiting the perturbations to injected bucket. Also the impurity electrons are prevented from injection with this system.

## キック量位置依存性可変な高速キッカーを用いたバケット毎 On-axis / Off-axis 入射システム

### 1. はじめに

SPring-8 の次期計画として検討中である SPring-8 II 蓄積リングへの入射には、

- 1) 極低エミッタンスリングのため、数 mm と小さくなったダイナミックアパチャへの入射、
- 2) off-axis 入射による多様なバンチ電流の蓄積、とフィリングの高い自由度、
- 3) 大電流孤立バンチ周辺の不純電子の抑制、
- 4) 蓄積ビームに対する擾乱の最小化、
- 5) 調整が未了な稼働初期やより高品質なビームを目指した高度な運転条件などでは、アパチャはさらに小さくなるため、その際の on-axis 入射による実用的な電流の蓄積

が要求されている。

これに対して、現状のキッカー電磁石によるバンプ軌道形成による入射システムでは、off-axis 入射の場合には、蓄積ビームと入射ビームをこのような狭いアパチャ内に共存させることは困難である。また、磁石を用いているため、その時定数が数百 ns - 数 us と長く、その間、蓄積ビームに大きな擾乱を与え、また、on-axis 入射では蓄積可能バケット領域が非常に限られ、大電流蓄積は困難である。

そこで、SPring-8 では、キックの位置依存性を、入力パワーや極性を変えることにより可変とした電極構造をもち、かつ、2ns 間隔のバケットを個別に制御可能な超高速キッカーを提案し、それを用いて bucket 毎に個別に入射の制御を行う bucket-by-bucket on-axis/off-axis 入射を検討している。これにより以下が実現可能となる。

- \* 入射時の擾乱を入射バケットに制限することによる、蓄積ビームに対する擾乱の最小化、
- \* on-axis 入射による、全バケット蓄積での平均電流 100 mA での top-up 運転、
- \* 入射時の擾乱を入射バケットに制限できるので、quadrupole キックによる入射 [2] が可能となり、それを用いての 2mm のアパチャでの off-axis 入射、

- \* 入射バケットのみ入射条件を成立させることによる、不純電子の入射の抑制。

### 2. キック量位置依存性可変高速キッカー

#### 2.1 形状

ナノ秒での立ち上がり、たち下がりをもつストリップライン型高速キッカーは、ILC ダンピングリング用として、KEK 等で開発されている[1]。SPring-8 では、これに対して、ストリップライン電極の構造を、Fig.1 および Fig.2 とすることにより、水平方向キックの位置依存性を可変とした高速キッカーを検討している。これらのストリップライン電極は、KEK 等の場合と同様に、TEM モードで駆動される。KEK のものとの相違点は、

- \* ビーム軸上での電磁場の強度は、垂直方向のギャップを小さくすることにより得られている。これにより、水平方向のアパチャ制限は緩和される。
- \* ビーム軸の直上下に外導体(接地)がおかれている。これにより、電極の駆動パワーおよび極性を変えることにより、dipole キックから、quadrupole キックまで連続的にキック量の位置依存性を実現可能である (Fig. 3)。また、dipole キック時には、キック量の位置依存性が一様となる領域を作り出すことができている。
- \* ビームパイプの内部に、キック電磁場の無い領域を作り出せるため(Fig.2)、その場所にビームを通せばキックなしでの通過が可能である。たとえば、Fig. 6 の on-axis 入射の際に、出射用キッカーを入射セプトラムと共存させて設置することが可能となり、下流部の直線部を挿入光源設置のために空けることができる。

また、キックの時間構造は、キッカーの長さを  $L$ 、光速を  $c$  とおくと、入射信号を、 $2L/c$  の間、積分したものとなる (Fig. 5)。そこで、2ns のバケット間隔に対応するために、キッカー長を 0.2m とし、 $2L/c$  を 1.3ns と短くしている。

このため、必要なキック量は、このキッカーを数台並べることにより発生する必要がある。

このキッカーの駆動には、数十 kV のハイパワーパルスを用いる。そこで、MAFIA により得られたキック量と、最大電場、放電限界電場 (Kilpatrick limit) の関係を Fig. 4 に示す。駆動パルス幅は、2ns 程度であるので、約 250MHz の帯域に相当する。50kV のパルスでは、Kilpatrick limit を越えた電場となる。しかし、この limit は比較的余裕を持たせた値となっているため、50kV での駆動は可能性があり、試験を行う予定である。

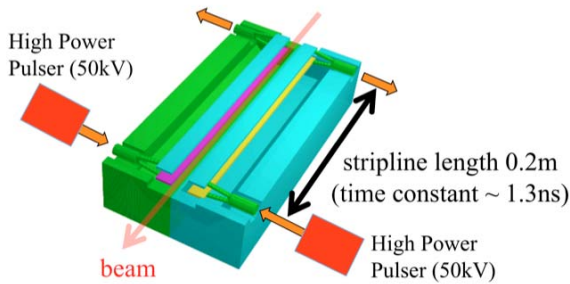


Figure 1 : キック量位置依存性可変高速キッカー (外導体上部を取り除いている)。

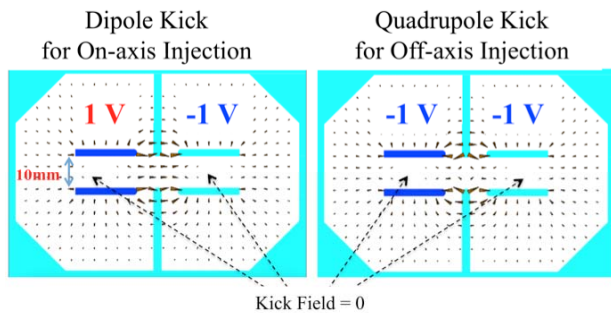


Figure 2 : キッカーのビーム軸に対する断面での電場分布。左: 反対極性による駆動で生成される dipole キック (on-axis 入射用)、右: 同極性による quadrupole キック (off-axis 用)。

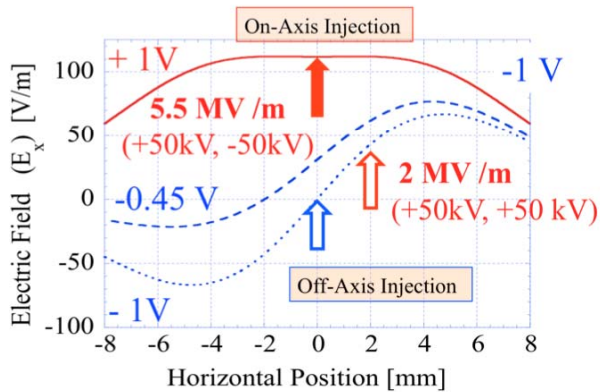


Figure 3 : 水平軸上での水平方向電場の分布。Fig.2 での左右の電極の電圧を (+1V, -1V) とした場合 (実線, on-axis 用)、(-0.45V, -1V) の場合 (破線)、および (-1V, -1V) の場合 (点線, off-axis 用) を示す。上向き矢印は、ビームの通過位置を示す。ストリップラインは TEM モードで駆動されているので磁場からも同等量のキック量を受け、全キック量は、電場によるものの2倍となる。

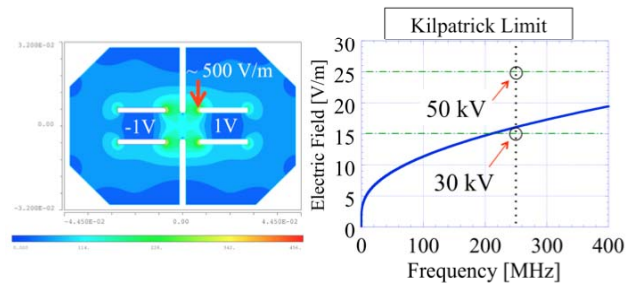


Figure 4 : 最大電場と Kilpatrick limit。2ns のパルスを 250MHz の周波数に対応すると仮定すると、50kV での駆動は、Kilpatrick limit を越えるが、この limit は余裕を持たせているので、実現の可能性はある。

## 2.2 駆動パルス波形と、キックの時間構造

キッカーを駆動するハイパワーのパルサーとして、FID 社の 50kV 出力 (50 Ω) の製品を検討している[1]。現在、検討中のものは、立ち上がり/たち下がり時間 1ns、フラットトップ 2ns であるが、この波形では、Fig. 5 に示すように、近隣のバケットに対しても若干のキックを与えるので、より短い波形での駆動を検討している。しかし、この検討でも、漏れたキック量は小さいので、補正キッカーを設けて打ち消すか、または、キッカー一台当たりのキック量を犠牲にして、短いキッカーとすることで対応は可能である。

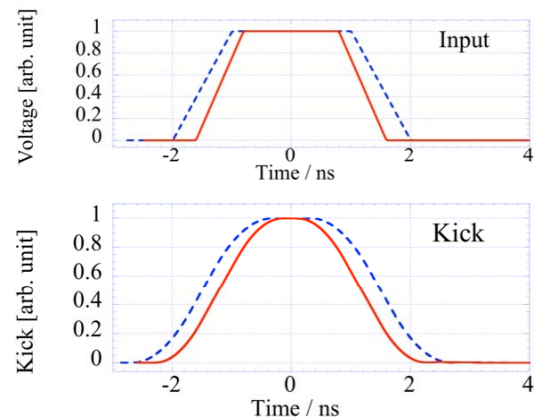


Figure 5 : キッカーへの入力パルス (上図) により生成されたキック (下図) の時間構造についての MAFIA によるシミュレーション結果を示す。立ち上がり時間、フラットトップ時間、たち下がり時間はそれぞれ、(実線 : 0.8ns, 1.6ns, 0.8ns)、(破線 : 1ns, 2ns, 1ns)。

## 3. SPring-8 II 蓄積リングへの適用

SPring-8 II リングは、SPring-8 リングと同様、4 カ所に長直線部を有しており、この一つを入射に用いることを検討している。通常の直線部では、挿入光源からの放射光の輝度を最適化するために、水平、垂直のベータ関数を 1m 程度に抑えるため、そこでダイナミックアパチャは、調整後でも 1mm を下回る値となる。これに対して長直線部では、ベータ関数の自由度は高く、小さくとも

25m 程度は確保できると考えている。これにより、2mm 程度のダイナミックアパチャを確保する。さらに、4つの長直線部では、そこでの位相進みが 360 度となることを満たせば、個別に異なる光学系とすることも可能である。そこで、Fig. 6 に示す配置とした入射を検討している。この入射では、ビームの入射点、キッカーそして、on-axis 入射時のビーム出射点でのベータ関数を 25m とし、それらの間の位相は 90 度と設定している。電子ビームのエネルギーは 6 GeV であるので、Fig. 6 のように 0.6 mrad のキックを与えるためには、3.6 MV キック電圧が必要となる。Fig. 5 に示すように、on-axis 入射時には、50kV で駆動した場合、キック量は、磁場によるものを含めて  $2 \times 3.3 \text{ MV/m}$  であるので、ストリップラインの全長は、 $3.6 / (2 \times 3.3) = 0.55 \text{ m}$ 、off-axis 入射時には、キック電磁場は、 $2 \times 2 \text{ MV/m}$  となるので、 $3.6 / (2 \times 2) = 0.9 \text{ m}$  となる。ストリップライン1台の長さが 0.2 m であるので、キッカーとして、5 台が必要となるが、入出力ポートやフランジなどを含めても、2m 程度の長さ収まるのが期待される。

On-axis 入射では、蓄積されているバンチのうち、電流が減少したものを入射バンチと取り替えるため、Fig. 6 に示すように、出射用のビームラインまたはビームダンプが必要となる。また、off-axis 入射では、あらかじめ、別の高速キッカーにより quadrupole キックを作り出し、入射ビームにあらかじめ若干のキックを与えている。

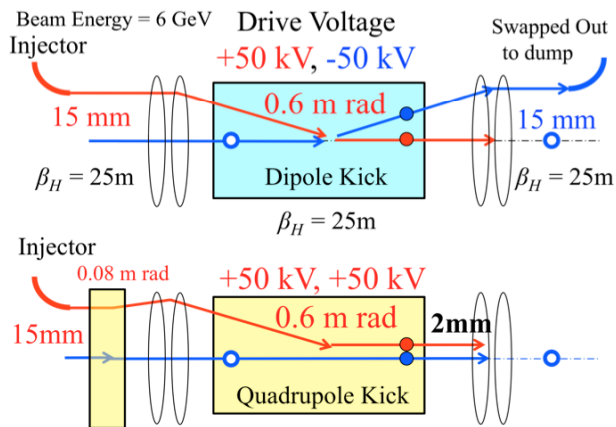


Figure 6 : SPring-8 II の長直線部での入射に適用した例。上図は、dipole キックによる on-axis 入射、下図は、quadrupole キックによる off-axis 入射。

#### 4. SPring-8 蓄積リングへの適用

現在の蓄積リングでは、入射ビームは、10mm 程度の振幅を持って入射されるので、挿入光源の非線形磁場の影響を受けて、入射効率の低下が生じている。これに対して、このキッカーを用いることにより、この振幅を半減させることを検討している (Fig. 7)。キッカーは、長直線部に設置する。通常の入射点において入射されたビームは、何周かリングを周回する間に、キッカー点において、Fig. 7 の位相となる。その際に、キッカーを稼働させ、振幅を減少させる。Fig.7 の上図は、quadrupole キックを用いる場合であり、入射点および長直線部の水平方向

のベータ関数は  $\beta_H = 25 \text{ m}$  であるので、必要なキック量は、 $10 \text{ mm} / 25 \text{ m} = 0.4 \text{ mrad}$  となる。ビームエネルギーが 8 GeV であるので、キック量は、3.2 MV である。Off-axis 入射の場合であるので、Fig. 3 から、蓄積ビームから 5mm のところでは長さあたりのキック量として、 $2 \times 3 \text{ MV/m}$  となる。これにより 3.2 MV のキック量を得るために必要なキッカー長は 0.6 m となり、3 台の 0.2m キッカーが必要となる。

Fig.7 の下図は、dipole キックを用いて、振幅を入射ビームと蓄積ビームで分配する方法である。このとき、必要なキック角は  $5 \text{ mm} / 25 \text{ m} = 0.2 \text{ mrad}$  であるので、キック量は、1.6 MV であり、Fig. 3 から、 $2 \times 5.5 \text{ MV/m}$  が得られるので、必要なキッカー長は、 $1.6 \text{ MV} / (2 \times 5.5 \text{ MV/m}) = 0.15 \text{ m}$  となり、1 台の 0.2m キッカーで可能となる。蓄積ビームのうち、分配により振動が発生するのは、入射バケットのもののみである。ただし、SPring-8 のように、蓄積ビームのバンチ電流が大きく、シングルバンチ不安定性をフィードバック等で抑制しているような場合[3]には、蓄積ビームの振動の発生に対抗して、フィードバックのキック量を大きくする必要があり、これが過大となる場合には、不安定性の抑制方法の変更[4]が必要となる。マルチバンチ不安定性だけが生じている場合には、振動抑制が困難になるのは一つのバンチのみで、ほとんどのバンチの振動は抑制されるので、この入射により不安定性が成長することはない。

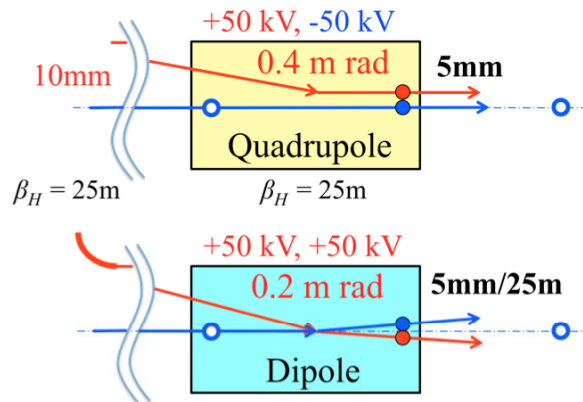


Figure 7 : SPring-8 に適用した場合。上図は、quadrupole キックを用いて振幅を低減する場合。下図は、dipole キックにより振幅を、蓄積リングと分配する場合。

#### 参考文献

- [1] Naito, et al. "Multi-bunch Beam Extraction using Strip-line Kicker at KEK-ATF", Proc. of IPAC10, WEOBMH02 (2010).
- [2] K. Harada, et al. "PF-AR Injection System with Pulsed Quadrupole Magnet", Proc. of APAC04, TUP14001 (2004).
- [3] T. Nakamura, et al. Proc. of EPAC08, THPC127 (2008).
- [4] T. Nakamura, et al. Proc. of IPAC10, THOBRA02 (2010).