

## 50kV-3ns 超高速 2 極-4 極キッカーの開発

### DEVELOPMENT OF 50KV ULTRA-FAST DIPOLE-QUADRUPOLE KICKER FOR BUCKET-BY-BUCKET BEAM HANDLING

中村 剛<sup>#</sup>, 出羽 英紀, 安積 隆夫<sup>A)</sup>, 小林 和生, 藤田 貴弘, 正木 満博, 鈴木 伸介, 佐々木 茂樹, 大熊 春夫

Takeshi Nakamura<sup>#</sup>, Hideki Dewa, Takao Asaka<sup>A)</sup>, Kobayashi Kazuo, Takahiro Fujita, Shisuke Suzuki, Shigeki Sasaki, Haruo Ohkuma  
Japan Synchrotron Radiation Research Institute  
<sup>A)</sup> RIKEN-Harima

#### Abstract

Ultra-fast dipole / quadrupole field variable kicker was developed for bucket-by-bucket handling of a beam and tested with a 1GeV electron beam from the SPring-8 linac. The kicker produces dipole field to quadrupole field by changing the driving voltage and polarity. The kicker was tested with 50kV pulse generator and the high kick field was expected in the kicker. For dipole kick, the kicker does not impose the horizontal aperture

#### 1. はじめに

SPring-8 では、バケット毎にバンチの制御が可能な超高速かつ強力なストリップライン型の 2 極-4 極可変キッカーを開発し、ビーム試験によりその特性を確認した。このキッカーは、ストリップライン型であり、その特徴として、

- 1) 3 - 4 ns 幅のキックが生成可能  
蓄積リングのバケット毎の制御が可能
- 2) 50kV 駆動による強いキック電磁場  
キッカーでの放電は観測されていない
- 3) 2 極水平キックから 4 極キックまで連続可変電極の駆動電圧や極性の変更
- 4) 強力な 2 極水平キックを水平アパチャへの制限のなしに生成  
垂直方向のアパチャの低減することにより強いキック電磁場の生成している
- 5) 一様領域をもつ 2 極水平キックの生成可能歪のないビームの生成

を持つ。

4 極キックの応用としては、蓄積ビームへの入射の影響を入射バンチに局在化しての、ダイナミックアパチャ数 mm へのビーム入射法、既存リングに設置しての入射ビーム振幅の低減を提案している[1]。

一方、2 極キッカーとしては、より狭いアパチャへの on-axis swap 入射による蓄積電流 100mA でのトップアップ運転を提案している[1]。また、リニアコライダーのダンピングリングへの応用[2,3]や、キッカー磁石の代替[4]への適用が可能である。2 極キッカーでは従来は水平に並べた並行平板型のストリップラインが用いられていたが、この場合、強いキック電磁場を得るためには水平アパチャを小さくする必要がある。しかし、入射ビー

ムや、放射光の照射を避けるためには、この低減には限界があり、キック電磁場をその制限を超えて強化することは困難であった。

一方、本キッカーでは、垂直方向のアパチャを低減することにより、強い水平キック電磁場を生成している。そのため、水平アパチャへの制限なしに非常に強いキック場が生成可能となっている。但し、単純にこの方法を適用すると、キック電磁場の大きな非一様性が問題となるが、本キッカーでは電極構造を工夫して電磁場を補正し、一様なキック場を生成している。

この広い水平アパチャにより、入射ビームや、放射光の照射を回避しつつ、強力なキック場の発生を可能としている。さらに、キッカーの多段化による大振幅キックを可能とし、このような技術の適用範囲が広がることが期待できる。

#### 2. キッカー形状と特性

本キッカーは 50Ω インピーダンスの 2 本のストリップライン電極をもち、それらに 50kV の TEM モードのパルスビームと反対に伝搬させることによりキック電磁場を生成する。TEM モードであるため、電場のキックと、磁場のキックは等しく、電場のキックの 2 倍のキック力が発生する。

キッカーのビームに垂直な断面図を Fig.1 に示す。2 つのストリップライン電極の間にリッジを持つ構造となっており、2 つのストリップラインを同極性で駆動すると、リッジが相対的に反対極性の電極となって、4 極キックを発生する。また、ストリップラインを反対極性で駆動すると、水平方向の 2 極キックを発生するが、その際にはこのリッジはキック電磁場を補正し、中心近傍にフラットなキック場の分布を生成する。また、このリッジにより左右の電極の電磁場は分離されているので駆動方法の違いによるインピーダンスの変化は小さい。

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

2つのストリップライン電極の駆動電圧・極性を変化させた場合のキック電磁場の水平分布の計算をFig. 2に示す。TEMモードなので、2次静電場計算(MAFIA-S)を適用した。

キッカーのもつ時定数を1ns程度に短縮するために、ストリップライン長を0.2m(時定数1.3ns)としている。長さが短いので1台あたりのキック量は少ないので、より強いキックが必要なおときには、これを多段化する。

トラップされたモードによる狭帯域インピーダンスに対しては、アンテナを用いて減衰をはやめ、その低減を行っている。但し、垂直方向のアパチャの低減は大きなブロードバンドインピーダンスをもたらしているため、他のキッカーとの比較が必要となる。

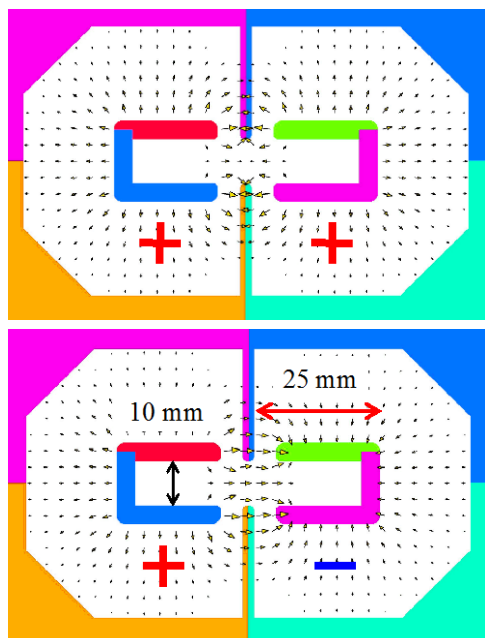


Figure 1: Cross sectional view and electric field of the kicker. Top: Dipole kick with opposite polarity drive pulses, and bottom: Quadrupole kick with same polarity drive pulses.

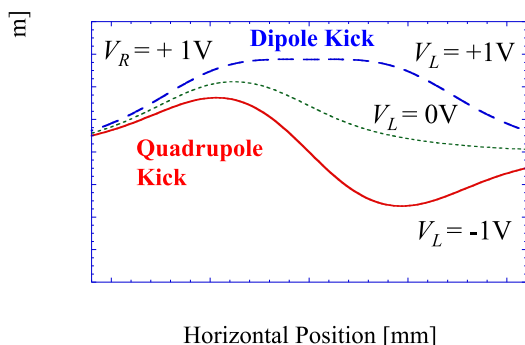


Figure 2: Calculated horizontal electric field distribution in the kicker. Voltage of the right hand side electrode is fixed to 1V, while the voltage of the right hand side electrode is varied from -1V, 0, and +1V. The same amount of the kick from magnetic field is also exist.

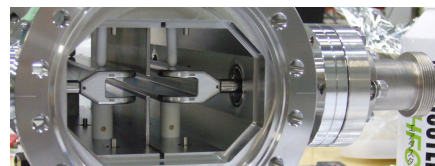


Figure 3: Inner view of kicker (end plate is removed). Stripline electrodes and ceramics rods supporting them can be seen.

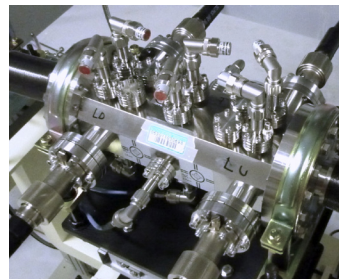


Figure 4: External view of the kicker on X-Y (H-V) stage installed in L3 beamline for beam test. N-type feedthrough ports are for the damping of wake and monitoring signals.

2極キック生成では、従来の平行平板型のストリップライン[2-4]の場合、強いキック場を生成するためには、電極のアパチャを低減する必要がある。一方、入射ビームや放射光の照射を避けるためには、水平アパチャはある程度が必要であり、最大キック電磁場は制限される。

これに対して、本キッカーでは、垂直方向のギャップを低減することにより強いキック場を生成しており、水平方向のアパチャへの制限はない。そのため、水平アパチャを確保したうえで従来に比べてより強いキック場が生成可能となっている。

製作したキッカーの外観、内部構造をFig. 3およびFig. 4に示す。キッカーには多数のアンテナが設置されているが、これらは、高次モードを減衰させるとともに、キッカー内部での電磁場の観測にも用いている。

ストリップライン電極と、外導体との間隔が最小の所で5mm程度であるので、ストリップライン電極の位置決めは重要であるが、フィードスルーの支持のみではこの精度を求めることが困難であった。そこで、電磁場が小さいところに、セラミックス製の支柱を設けることにより、高い位置決め精度を得ている。この支柱の影響は、計算、および以下に示すパルス特性試験において観測されていない。

### 3. ベンチ試験

前回の報告[5]では、キッカーのフィードスルーにはHN型を用いていたが、大気側での放電が発生し、パルスが20kVに制限されていた。キッカーの構造は、前もってフィードスルーの交換が容易な設計としていたのでHN型からFID社製50kVフィードスルーに交換したところ放電の問題は解決し、再

度試験を実施した。

### 小信号試験

小電圧の短パルス(FWHM 330ps)に対するキッカーの応答を測定した。結果を Fig.5 に示す。パルス発生器(81134A)からの信号を2分割し、片側はキッカーを通過させてからオシロスコープへ、もう片側は直接、オシロスコープに接続している。

キッカーは、0.2mのストリップライン長を持つので、ビームから見たキック力の波形は、入力信号を1.33ns (= 2 x 0.2m / 光速)で移動平均をとったものとなる。これを Fig.5 の応答から計算したものが Fig.6 である。これから、入力信号にも存在する若干のテールを差し引けば、出力信号は十分に早く立ち下がっており、数 ns の入力に対して、十分な応答を持っていることがわかる。

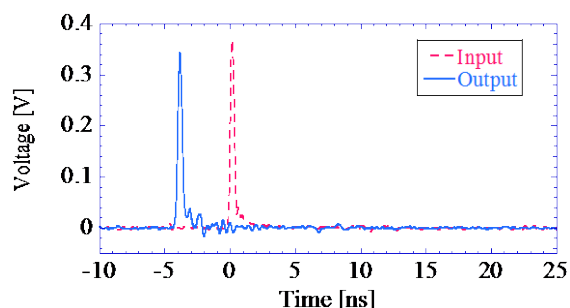


Figure 5: Output of the kicker for short input pulse.

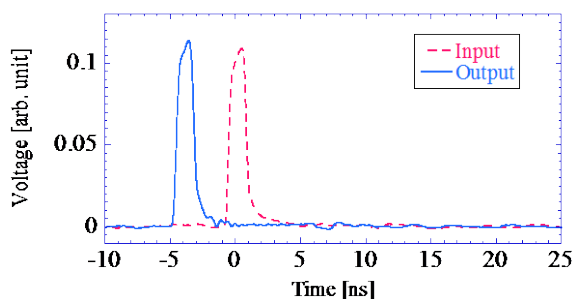


Figure 6: Calculated kick of the kicker for the short input pulse of 0.3ns FWHM in Fig. 5.

### 高電圧信号試験

高電圧パルス発生器は FID 社 FPG 50-01NKS2 を用いている。仕様では最大出力 +50kV だが、我々の測定では+45kV であった。この測定では、減衰器、オシロスコープ等のキャリブレーションを実施している値である。キッカーを 2m のケーブルおよび 25m のケーブルを介して駆動した際のキッカー出力を Fig. 7 に示す。パルス波形の崩れが小さく放電は生じていないと考えている。25m ケーブルは、以下で記すビーム試験において、パルス発生器を設置する場所と、ビームライン上のキッカーを接続するためのものであり、2m ケーブルに比較して、パルスの波高が低下し、時間長が伸びている。これから 1.3ns のキッカーの時定数を考慮して計算したキック量は、25m ケーブルの場合は、2m ケーブルに比べて、75%であった。

### キッカーの駆動方法

正極パルス発生器 2 台をもちいて、4 極キックおよび 2 極キックを生成した。その構成を Fig.8 に示す。4 極キックでは、2 本のストリップラインに正パルスがビームと反対に伝搬するように駆動した。キッカーを通過したパルスは、観測室まで戻され、その振幅、タイミングが観測される。

一方、2 極キックの場合は、一方の電極の電磁場の極性を反転させる必要がある。そこで次の方法を用いた。一台のパルス発生器のパルスを、まずビームと同方向にキッカーを通過させたのち、ショートさせたケーブルへと導く。パルスはショート端において極性が反転し負極性となって反射され、再度、キッカーに戻る。このとき、パルスは、ビームと反対方向に伝搬するので、キック力を発生する。但し、このパルスは、キッカーを再度通過した後にパルス発生器に戻ってしまうため、波形、タイミングを観測することが不可能であり、キック電圧の調整が困難である。Fig.9 は、キッカーに設けたアンテナ電極(antenna in Fig 8)からの信号を示しており、キッカーを最初に通過したパルス(先着)と、極性が反転されて再度、キッカーを通過しているパルス(後着)が観測されている。なお、反射されたパルスがパルス発生器へ戻り、発生器へ悪影響を及ぼすことが懸念されたが、通常用いているパルス出力レート 1Hz ではパルス波形の劣化は見られていない。

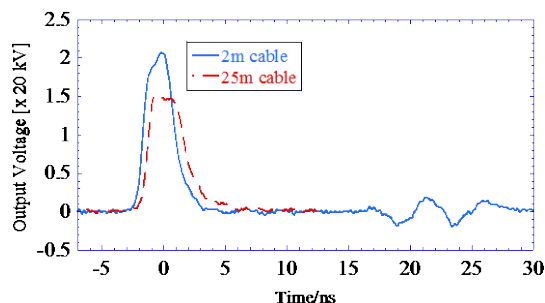


Figure 7: Output of the kicker for high voltage input of 45kV (setting of the pulse generator is 50kV) for 2m long cable (solid line) and 25m long cables (dashed line: range: -6.5ns to 12.5ns). The source of the ringing observed at 20- 25ns for 2m cable is not known.

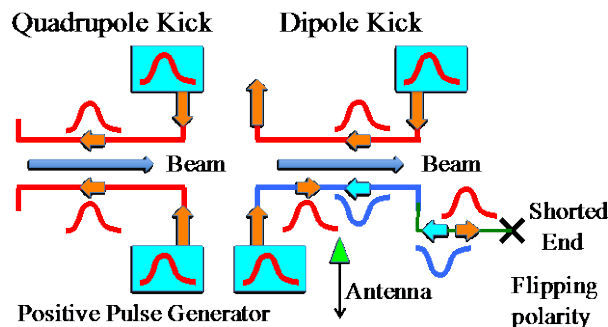


Figure 8 : Driving schemes for quadrupole kick (left) with same polarity pulses and dipole kick (right) with opposite polarity pulses produced with shorted cable.

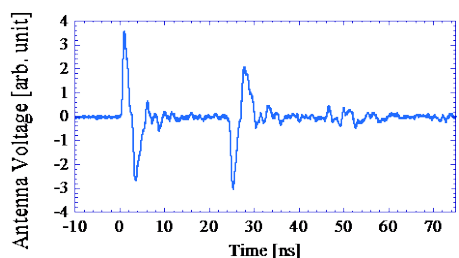


Figure 9: Signal of an antenna in Fig. 8 showing positive pulse (earlier one), and reflected and inverted pulse (later one).

### 3. ビーム試験

SPRING-8 の電子線型加速器の L3 ビームラインにおいて電子ビームを用いた本キッカーのキック力およびその時間・空間構造を計測した。

#### ビームラインの構成

SPRING-8 線型加速器からのエネルギー1GeV の電子ビームは、90 度偏向され L3 ビームラインに導入される。この偏向部には、水平方向ビームスリットが設置され、ビームのエネルギー広がりや低減している。電子銃は 500ps のパルスで駆動されており、1 パルス中には、2-3 バunchが含まれている。

L3 ビームラインには、本実験のために上流側から、アパチャ可変ビームコリメータ、水平・垂直ステージ上のキッカー、スクリーンモニタ(Ce:YAG)、約 8 m ドリフト空間、スクリーンモニタ(Ce:YAG)を設置した (Fig. 10)。アパチャ可変コリメータは、エミッタンスを低減して、キッカー内でのビームの通過位置の確定し、かつ、スクリーンモニタのビームサイズ低減によるキック力の測定精度の向上を図るために設置した。このコリメータには、Fig. 11 の構造を持たせることにより、作り出す菱形のアパチャの大きさを可変としている。キッカー直後のスクリーンモニタを用いて、コリメータのアパチャの大きさ、位置の調整を行う。

キッカーでキックを受けたビームは、8.2m のドリフトスペースを経て、2 台目のスクリーンモニタによりそのプロファイル・位置が観測される (Fig.12)。

キッカーは、水平・垂直ステージ上に設置され、ビームに対して水平・垂直方向の相対位置を変更可能である。これにより、キッカー内部でのキック場の分布を、ステージの精度で走査可能となっている。

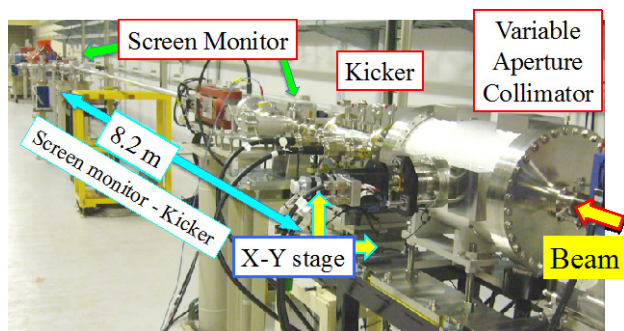


Figure 10: Beam test setup. Position of kicked beam was measured with the screen at 8.2m downstream.

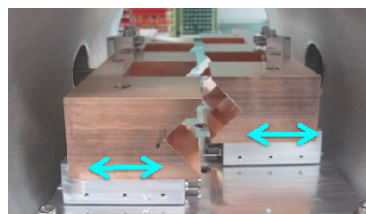


Figure 11: Inside of the collimator. Left and right movable blocks connected to stepping motors produces variable size diamond shape aperture between them.

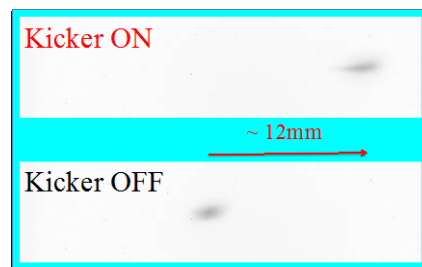


Figure 12: Example of the observed beam profile (negative image) at the screen monitor for single pulse generator.

#### 測定結果

キック角は、キッカーから 8.2m 下流側のスクリーンモニタにおいて観測されたビーム位置のずれから計算した。キッカーでのパルスの最大電圧は、ベンチテストや、ケーブル損失測定から、発生器の最大出力 50kV 設定時に 34kV と予想された。以下では断りがない限り出力は 50kV に設定している。

ストリップライン電極 2 本のうち、1 本のみを駆動した際の測定結果を Fig. 13 に示す。波形は、電圧およびキッカーの中心位置を (45kV, -0.6mm) とした計算とよく一致しているが、キック力は強めとなっている。ストリップライン長と実効長の違いを時間シミュレーション(MAFIA-T3)で確認したがその差は小さく、この違いは説明できていない。

4 極キックの結果を Fig. 14 に示す。キックの分布は 2 本のストリップライン電圧および中心を (+40kV, +40kV, -0.6mm) とした計算とよく一致している。

2 極キックの結果を Fig.15 に示す。計算では、負のパルスの波高は観測できないため、計算条件を変えて測定を再現できる駆動電圧および中心 (+31kV, -35kV, -0.6mm) を求めた。このときの発生器の出力設定は、(+40kV, +50kV) である。このときのキック電磁場は、7.8MV/m であり、発生器として(+50kV, -50kV)が用意できた際には、8.8MV/m となる。これらの値は、従来のキッカー[2-4]に比べて2倍以上となっている。

2 極キック時の垂直方向のキックの分布を調べたものが Fig.16 である。水平キックについては垂直方向の分布も一様性が得られているが、垂直キックの

垂直方向依存性は、計算にくらべて数倍大きい。この大きさは、左右の駆動電圧のアンバランスやおよびキッカー中心位置と測定位置のずれでは説明が困難であり、現在、データを確認中である。

キックの時間構造を Fig. 17 にしめす。これから、FWHM で 3ns、また、キックが一桁程度、小さくなる幅で、4ns 程度が得られている。

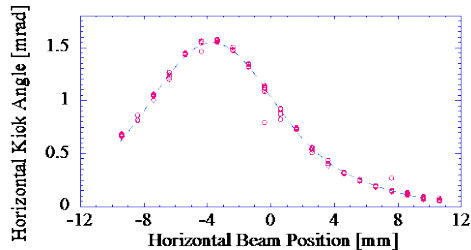


Figure 13: Measured single electrode kick (marks) with calculation for +45kV (dashed line). Collimator aperture is +/- 0.75mm.

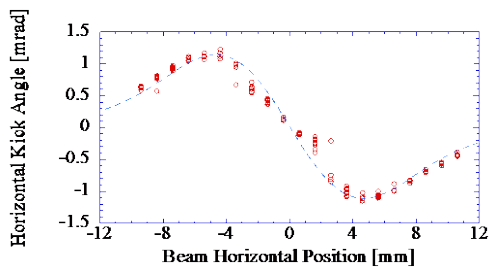


Figure 14: Measured quadrupole kick (marks) with calculation for two +40kV inputs (dashed line). Collimator aperture is +/- 0.75mm.

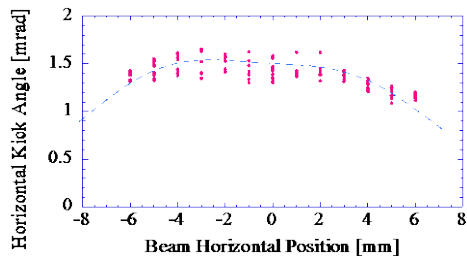


Figure 15: Measured dipole kick (marks) with calculation for -35kV and +31kV inputs (dashed line). Pulse generator voltage settings were +50kV (for reflection) and +40kV, respectively. Collimator aperture is +/- 1mm. Peak electric field is 3.8 MV/m and total kick field is 7.5 MV/m including magnetic field.

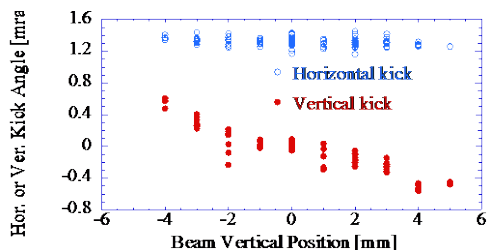


Figure 16: Vertical beam position dependence of horizontal and vertical kick.

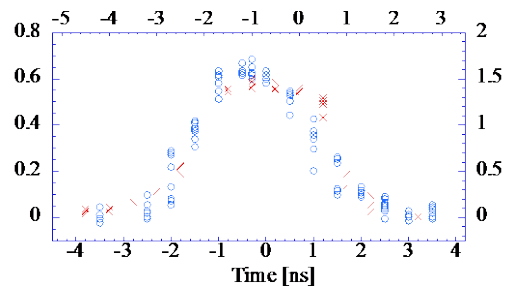


Figure 17: Kick timing width. (o): single electrode kick, (x): dipole kick.

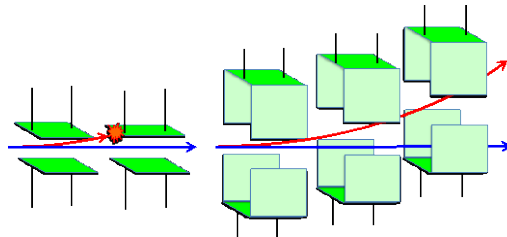


Figure 18: Multi-stage kicker wide horizontal aperture. Left: narrow horizontal aperture kicker limits the number of stages by interrupting non-kicked beam. Right: Wide horizontal aperture multi-stage kicker for large kick angle.

## まとめ

キック時間幅 3-4 ns をもつ 50kV 駆動の強力な 2 極 -4 極可変キッカーを開発し、ビーム試験によりキックの空間・時間分布を確認した。さらに、2 極キック時のキック電磁場としては、十分な水平アパチャを持ちながらも、従来のキッカーの 2 倍の 7.8MV/m が確認された。これは、水平方向のアパチャの低減ではなく、垂直方向のアパチャの低減により実現している。また、同時に、キックの平坦性を電極構造の工夫により得ている。なお、インピーダンスについては、今後、比較、検討、最適化を行う考えである。

## 参考文献

- [1] T. Nakamura, "BUCKET-BY-BUCKET ON /OFF-AXIS INJECTION WITH VARIABLE FIELD FAST KICKER", Proc. of IPAC11 (2011). <https://accelconf.web.cern.ch/accelconf/IPAC2011/papers/tupc095.pdf>
- [2] C. Belver-Aguilar, A. Faus-Golfe, F. Toral, and M. J. Barnes, "Stripline design for the extraction kicker of Compact Linear Collider damping rings", Phys. Rev. ST Accel. Beams 17, 071003 (2014).
- [3] T. Naito, et al., "Development of Strip-line Kicker System for ILC Damping Ring", Proc. of EPAC07 (2007), <https://accelconf.web.cern.ch/accelconf/p07/PAPERS/THP MN028.PDF>
- [4] F. Marcellini, D. Alesin, "(RF DEFLECTORS) and FAST KICKERS for Dafne and ILC DAMPING RING", [http://www.slac.stanford.edu/econf/C0508141/proc/pres/ILCAW0418\\_TALK.PDF](http://www.slac.stanford.edu/econf/C0508141/proc/pres/ILCAW0418_TALK.PDF)