

縦方向 Bunch-by-Bunch フィードバック用高効率エネルギーキッカーの開発 DEVELOPMENT OF A HIGHLY EFFICIENT ENERGY KICKER FOR LONGITUDINAL BUNCH-BY-BUNCH FEEDBACK

正木満博[#], 中村剛, 小林和生, 藤田貴弘, 大石真也, 小路正純, 佐々木茂樹, 大熊春夫
Mitsuhiro Masaki[#], Takeshi Nakamura, Kazuo Kobayashi, Takahiro Fujita, Masaya Oishi, Masazumi Shoji,
Shigeki Sasaki, Haruo Ohkuma
Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI/SPring-8)

Abstract

A highly efficient energy kicker has been developed for longitudinal bunch-by-bunch feedback to suppress synchrotron oscillation of a high-current single electron bunch, and to cure possible longitudinal multi-bunch instability if lower beam energy is to be adopted for emittance reduction and electric power saving in a future upgrade plan of SPring-8. Through the performance test using a prototype kicker, a new water-cooled copper kicker was designed and fabricated, and it has been installed in the storage ring. The new kicker consists of three cells with each cavity length of 96 mm, its resonant frequency of 1.65 GHz, which is 3.25 times of RF frequency of the storage ring, and low Q-factor of 4.2. In beam kick test, the synchrotron oscillation amplitude of 0.64 ps was excited by kick voltage with CW modulation at synchrotron frequency when RF input power was 132 W/3cells. The kick voltage evaluated from the experimental result is 920 V/3cells. Shunt impedance of each kicker cell is estimated as 1.1 k Ω . As we intended, the shunt impedance per length is about three times higher than those of widely used waveguide overloaded cavity type kickers.

1. はじめに

SPring-8 では、蓄積リング高度化の一環としてシングルバンチ電流を増強する取り組みが続けられている。現在、ユーザー利用運転に適用している大電流シングルバンチを含むバンチフィルモードでのシングルバンチ電流は 5mA/bunch である。このバンチ電流を 10mA/bunch まで増強することを目指しているが、バンチ電流の増加とともにシンクロトロン振動の発生が観測されており、これを抑制する必要がある。また、SPring-8 の将来計画において、低エミッタンス化と省電力化のために電子ビームエネルギーを現状よりも下げることが検討されている。これにより、マルチバンチ縦方向不安定性に対する総蓄積電流の閾値が現状よりも下がるため、この縦方向不安定性を抑制する措置が必要となることが予想される。これらの背景を踏まえて、縦方向 Bunch-by-Bunch フィードバック(BBF)用の高効率エネルギーキッカーを SPring-8 で独自に開発し、そのプロトタイプ機を用いた試験を行ってきた^[1]。今回、発熱対策などを講じた水冷式銅製キッカーを実用機として製作し、高周波特性試験を経て蓄積リングに設置した。この実用機のシングルバンチビーム応答、ビームキック試験などの結果とともにキック性能について報告する。

2. 高効率エネルギーキッカー

蓄積リングに設置したエネルギーキッカーは、プロトタイプ機^[1]のデザインに改良を加えて設計・製作された。キッカーの外観を図 1 に示す。電子ビームおよび入力する高周波パワーからの熱を除去する

ため、キッカー本体およびパワー入力フィードスルー部を水冷できる構造となっている。また冷却効率を高めるために、電極、空洞などが内蔵されているキッカー本体部を銅で製作している。このキッカーは 3 セル構成となっている。内部構造を図 2 に示す。各セルの空洞長は 96 mm、駆動周波数は $(3+1/4)f_{RF}$ で 1.65GHz である。ここで、 f_{RF} は蓄積リングの RF 加速周波数 508.58 MHz である。この駆動周波数で励振される共振モードによりビームにエネルギーキックが与えられる。このモードは速く減衰する必要があるため低 Q で設計されている。縦方向ウェイクインピーダンスは、図 3 のようにブロードであり Q 値は 4.2 と見積もられる。駆動パワーは、左右対称に配置された 2 つのポート(I-port)からタイミングを合わせて入力される。また、不要な高次の共振モードがキッカー内部に蓄積しないように、左右および上下対称にそれぞれ 1 ペアずつ H-port と V-port を設けて外部に逃がすようになっている。

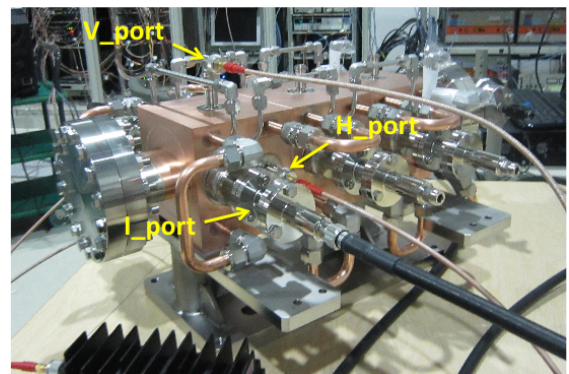


Figure 1: Longitudinal energy kicker installed in the SPring-8 storage ring

[#] masaki@spring8.or.jp

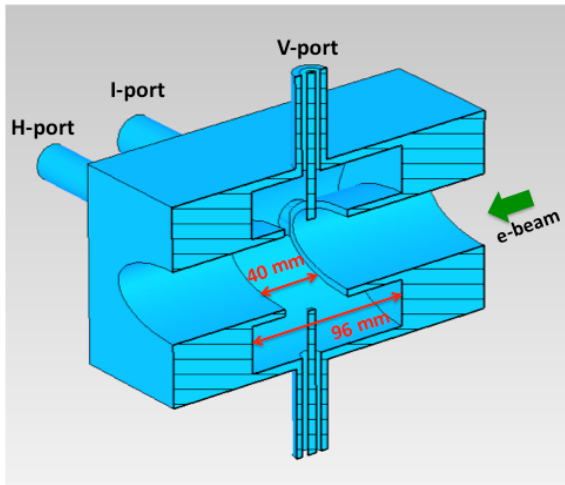


Figure 2: Inner structure of a kicker cell. One-half part is shown in figure.

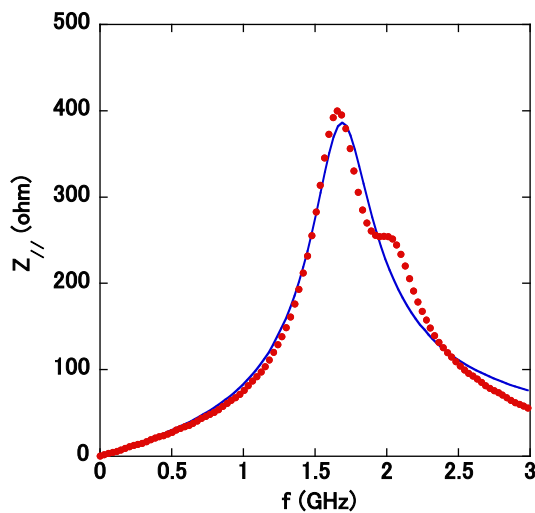


Figure 3: Calculated longitudinal wake impedance of the energy kicker (red dots). Q-factor of 4.2 is obtained by Lorentzian fitting process (blue line).

3. シングルバンチビーム応答

設置したエネルギーキッカーのビームに対する応答を調べるために、シングルバンチ(1mA/bunch)を蓄積し、各ポートに出力されるビーム信号波形を観測した。ここでは I-port からの出力波形とその FFT をシミュレーションの結果とともに示す(図4)。ビームからの信号は、1.65GHz の周波数を主成分に持ち、減衰時間も数 ns となっており、ほぼ設計通りの応答が得られている。計算の波形振幅が実測と比べて大きく、かつ高周波成分を含んでいるのは、実測の波形がパワー入力ラインに挿入されているサーキュレーター(図5参照)を通して観測したものであり、その周波数特性の影響で高周波成分がカッ

トされているためと考えられる。

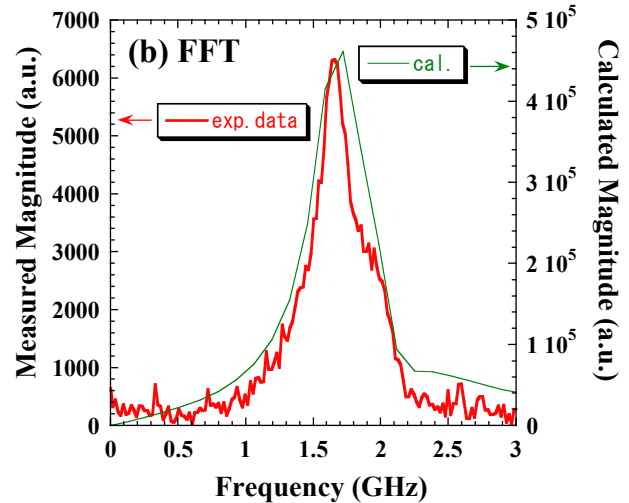
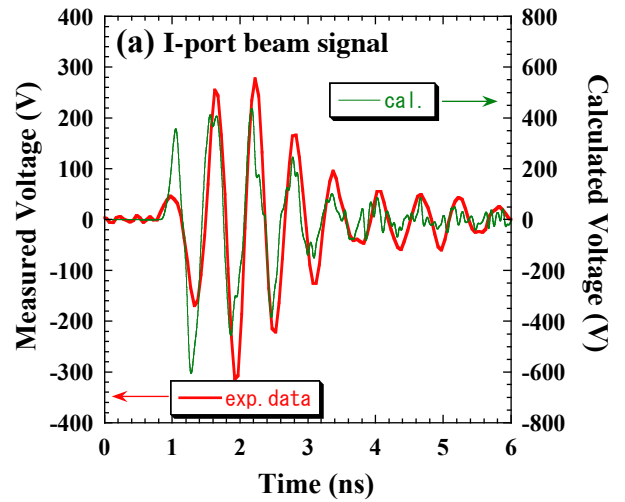


Figure 4: Response to a single bunch beam. The beam signal from the input port (a) and its FFT analysis (b). Red and green curves show the measured and calculated data, respectively.

4. ビームキック試験

エネルギーキッカーのキック性能を評価するため、ビームキック試験を実施した。キッカーは $(3+1/4)f_{RF}=1.65\text{GHz}$ の周波数で駆動するため、図5に示す駆動回路により RF 周波数の1周期の間に3波長存在する3連波を作り増幅して入力する。高速のパルス発生器(Agilent: 81134A)により生成した矩形波(幅 100 ps ~ 300 ps 程度)を Impulse Forming Network (IFN)を用いてバイポーラパルスに変換し、これを3つに分割する。3つの信号を、ケーブル遅延により 1.65GHz のちょうど1波長分に相当する時間だけ相対的に時間差をつけて合成することにより3連波を生成する。これをパワーアンプにより増幅した後、2つに分配し、移相器、サーキュレーター

を経てキッカー入力ポートに入力する。

ビームにエネルギーキックを与えるには、シンクロトロン振動数 f_s でキック電圧を変調して共振させる必要がある。励振される振動振幅は、キックによる励起と放射減衰との釣り合いで決まる。パルス生成器の出力を **Function Generator** により発生させる **sine** 波によりミキサーを用いてキック電圧を変調する (図 5)。変調周波数と変調振幅は **sine** 波の周波数と振幅により調整することができる。

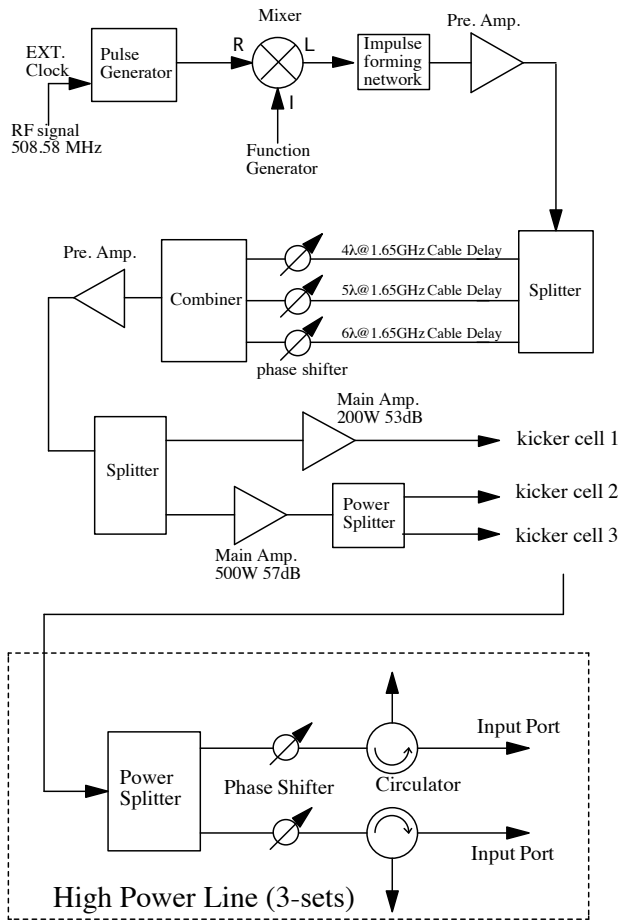


Figure 5: Diagram of kicker driving circuit

実際のビームキック試験の際には、バンチフィルパターンを 84 バンチ等間隔 (バンチ間隔: 57 ns) とし、全バンチにエネルギーキックを与え、シンクロトロン振動を励起した。ここで、変調周波数は $f_{rev} + f_s$ とした。ここで、 f_{rev} はリング周回周波数である。ビームの時間振動は、直前に設置したボタン型 BPM の 4 電極と信号をスペクトラムアナライザーで観測することにより計測した。励起されたシンクロトロン振動の振幅は、 $2f_{RF} + f_{rev} + f_s$ に現れる励起スペクトルのピーク値とキャリア周波数 $2f_{RF}$ におけるピーク値との比から算出した。図 6 にスペアナで観測したシンクロトロン振動の励起スペクトルを示す。キッ

ク電圧とビームとのタイミングは、この $2f_{RF} + f_{rev} + f_s$ のピーク値が最大となるように調整した。

キック電圧とビームとのタイミングが調整された状態で、キックタイミングを 1 バンチずつズラし、隣接するバンチのバンチに対してどの程度の残留キックが発生するかを調べた結果が図 7 である。バンケット 0 の標的バンチのキック量を 1 とした場合、 ± 3 バンケットに渡る隣接バンチが受ける残留キック量は $1/10 \sim 1/20$ 程度である。これは、**Bunch-by-Bunch Feedback** 用のキッカーとして実用上問題ないレベルであると考えている。

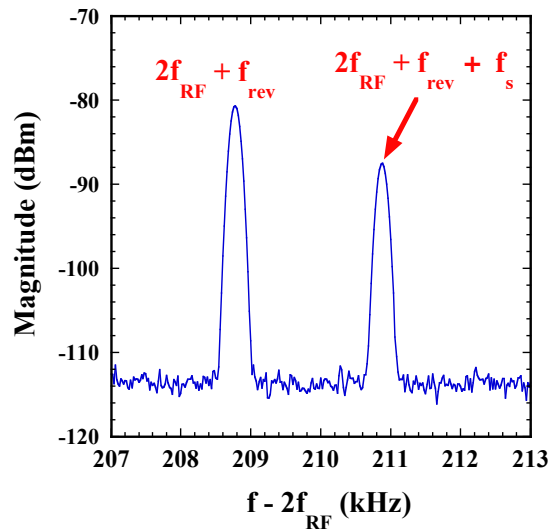


Figure 6: Spectrum of synchrotron oscillation observed at frequency of $2f_{RF} + f_{rev} + f_s$.

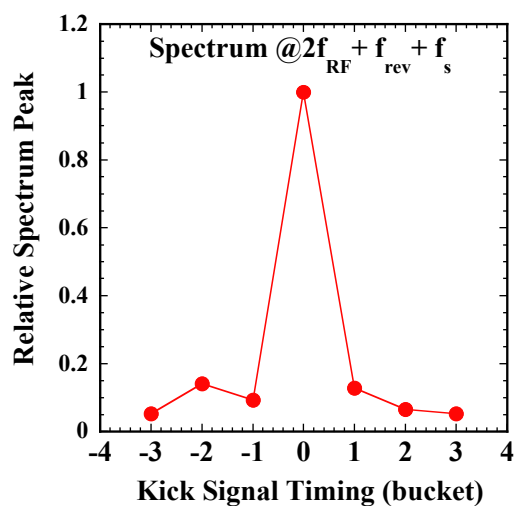


Figure 7: Residual kicks to electron bunches adjacent to the target bunch in bucket 0, measured by shifting the kick timing in steps of 1 bucket (1.966 ns).

最後に、キック電圧の変調周波数をスキャンしながら励起されるシンクロトロン振動数の振幅を測定して共鳴励起曲線を取得した(図8)。強制振動の周波数 $\omega = 2\pi f$ と励起振幅 τ_s の関係は、

$$\tau_s = \frac{\frac{\alpha_c}{T_0} \frac{eV_{kick}}{E_0}}{\sqrt{(\omega^2 - \omega_s^2)^2 + \frac{4}{\tau_d^2} \omega^2}} \quad (1)$$

で表される。ここで、 V_{kick} , α_c , T_0 , E_0 , τ_d は、それぞれ、キック電圧(3セル分の合計)、モーメントムコンパクション因子、リング周回時間、ビームエネルギー、縦方向の放射減衰時間である。また、 $\omega_s = 2\pi f_s$ である。図8の測定データから、式(1)を用いてキック電圧 V_{kick} を算出すると $920\text{V}/3\text{cells}$ となる。このときにキッカー1セルあたりに入力されていたパワー P_w は、キッカー入力ポートにおいて測定した入力波形(図9)から見積もると $44\text{W}/\text{cell}$ となる。ここから、キッカー効率の指標となるシャントインピーダンス $R_s = (V_{kick}/3)^2/P_w/2$ を算出すると、ほぼ設計通りの1セル当たり $1.1\text{ k}\Omega$ となる。縦方向BBFで広く使われている Waveguide Overloaded Cavity (WOC) 型キッカー^[2-4]と比較して1セルの長さが半分以下であるので、単位長さ当たり換算のシャントインピーダンスは3倍近い値となっている。

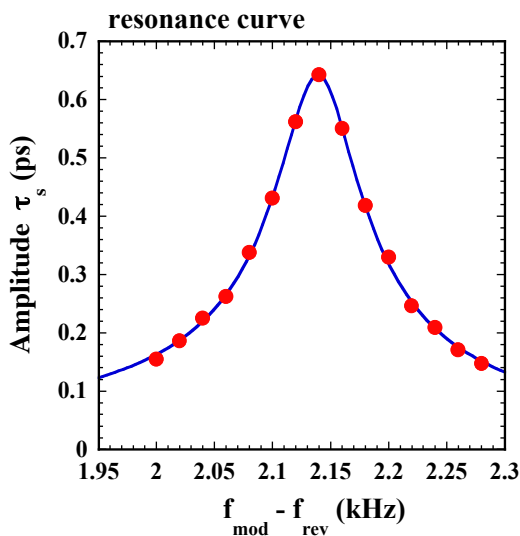


Figure 8: Resonance curve measured by scanning the modulation frequency of the kick voltage. Red dots and blue line show the experimental data and fitted curve by the equation (1), respectively.

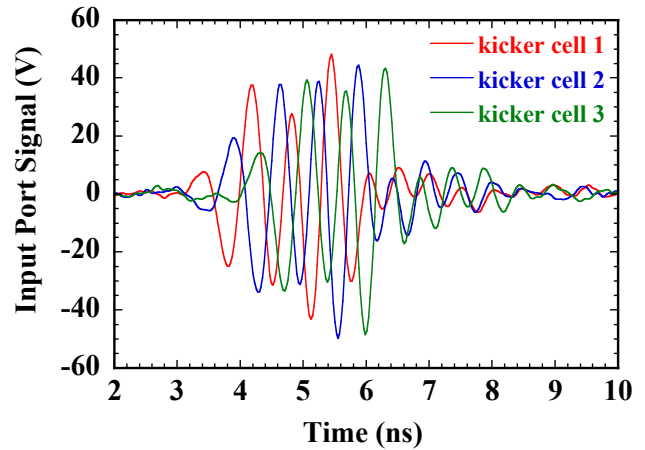


Figure 9: High power signals driving the kickers measured at each input port of the three kicker cells. The peak voltages were about 47 V and the input powers were 44 W per cell.

5. まとめ

縦方向 BBF 用の高効率エネルギーキッカーを開発し、SPring-8 の蓄積リングに設置した。ビームキック試験を実施し、ほぼ設計通りのシャントインピーダンスとなっていることを実験的に確認した。長さ当りのキック効率が WOC 型キッカーと比べて約 3 倍高いため、設置スペースが限られている場合や、高いキック電圧が必要な高エネルギーの大型リングに対しては特に有用である。今後、フィードバック処理回路^[5-6]と組み合わせた試験を行い、縦方向 BBF システムとして完成させる予定である。

参考文献

- [1] T.Nakamura, "Resonant Strip-Line Type Longitudinal Kicker", Proceedings of IPAC2011, San Sebastian, Spain, Sep. 4-9. 2011, p.493-495
- [2] W.B.Li, et al., "Digital Longitudinal Bunch-by-Bunch Feedback System for the HLS II", Proceedings of IBIC2012, Tsukuba, Japan, Oct. 1-4, 2012, TUPA35
- [3] N.Heurich, et al., "Longitudinal Kicker Cavity for a Bunch-by-Bunch Feedback System at ELSA", Proceedings of IPAC2011, San Sebastian, Spain, Sep. 4-9. 2011, p.484-486
- [4] W.Z.Wu, et al., "Development of a bunch-by-bunch longitudinal feedback system with a wide dynamic range for the HIGS facility", Nucl. Instr. Meth., **A632** (2011), p.32-42
- [5] T.Nakamura, et al., "Transverse Bunch-by-Bunch Feedback System for the SPring-8 Storage Ring", Proceedings of EPAC2004, Lucerne, Switzerland, Jul. 5-11. 2004, p.2649-2651
- [6] 中村剛, "FPGA および高精度 ADC を用いた高分解能横方向 Bunch-by-Bunch フィードバック", J. Particle Accelerator Society of Japan, Vol.1, No.3, (2004), p.199-210