

SPring-8-II におけるビーム不安定性抑制用バンチ毎フィードバックの設計

DESIGN OF BUNCH-BY-BUNCH FEEDBACK FOR SUPPRESSING BEAM INSTABILITY AT SPring-8-II

正木満博^{#, A)}, 前坂比呂和^{B, A)}, 阿部利徳^{A)}, 出羽英紀^{A)}, 高野史郎^{A, B)}

Mitsuhiro Masaki^{#, A)}, Hirokazu Maesaka^{B, A)}, Toshinori Abe^{A)}, Hideki Dewa^{A)}, Shiro Takano^{A, B)}

^{A)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)

^{B)} RIKEN SPring-8 Center (RSC)

Abstract

Transverse and longitudinal Bunch-by-Bunch Feedback (BBF) has been designed to suppress beam instabilities at the SPring-8-II storage ring and to ensure stable operation at a stored current of 200 mA. Based on a quantitative evaluation of the beam coupling impedances, the growth rates of transverse and longitudinal coupled bunch instabilities were estimated and the performances required for the BBF system to counteract these instabilities were determined. We report on the design of the BBF kickers and signal pickups to meet these requirements, while also leveraging knowledge gained from the beam tests at the existing SPring-8 storage ring.

1. はじめに

SPring-8-II は、現在の SPring-8 よりも硬 X 線領域での輝度を2桁近く増強し、空間コヒーレンスも大幅に高い第4世代放射光源にアップグレードするプロジェクト[1]である。2027 年の夏に現 SPring-8 をシャットダウンし、約1年半かけて、新しい蓄積リングに入れ替える計画である。新しい蓄積リングの主要パラメータである電子ビームエミッタンスは、100 pm.rad 以下、ビームエネルギーは 8 GeV から 6 GeV に下げられるが、蓄積ビーム電流は 100 mA から 200 mA に増強する。高輝度化に向けた低エミッタンス化のために必要な高勾配の多極磁石のボア半径は小さくなり、ビームが通過する真空チェンバーの開口は狭くなる[2, 3]。SPring-8-II のチェンバー開口は、現リングの約 1/1.4 であり、材質も製作コスト等の観点から、アルミニウムから電気抵抗率が約 30 倍大きいステンレスに変更になった。真空チェンバーの横方向(Transverse)の壁抵抗性インピーダンスは、開口サイズの3乗に反比例し、電気抵抗率の平方根に比例するため、現状の SPring-8 と比べて約 15 倍大きくなる。また、横方向の幾何学的インピーダンスについても開口サイズの3乗に反比例するため、現リングに比べ数倍大きくなる。加えて、ビームエネルギーの低減とビーム電流の増強も不利な方向に働き、SPring-8-II では横方向ビーム不安定性が圧倒的に強くなる。また、縦方向(Longitudinal)ビーム不安定性については、RF 加速空洞の高次モード(HOM) が主要ソースであるが、TM011 モードによって引き起こされる不安定性が、ビーム電流 200 mA で閾値を超える可能性がある[4]。

本論文では、SPring-8-II における横方向及び縦方向ビーム不安定性の成長率を見積もり、それらの抑制に必要な Bunch-by-Bunch Feedback (BBF) の性能を評価し、これまでのビーム試験等から得られた知見も活かして、キッカー等の機器を設計した結果について現状を報告する。

2. 横方向結合バンチ不安定性

横方向の壁抵抗性インピーダンスは周波数の平方根に反比例することから、低い周波数ほどインピーダンスが大きくなる。このため、横方向結合バンチ不安定性(TCBI)は、最低次のモードの成長率が支配的となり[5]、それは、クロマティシティがゼロの条件では、

$$\frac{1}{\tau_{g,RW}} \sim \frac{I_b f_{rev} \langle \beta_t \rangle}{\left(\frac{2E_0}{e}\right)} \text{Re } Z_{t,RW}(f_{lowest}) \quad (1)$$

$$f_{lowest} = (1 - \Delta\nu_\beta) f_{rev} \quad (2)$$

で与えられる。この最低次モードの不安定性を抑制できれば自ずとそれより高次のモードの不安定性は抑制できることになる。ここで、 f_{lowest} が最低次モードの周波数であり、 $\Delta\nu_\beta$ はベータatronチューンの小数部、 f_{rev} は周回周波数である。また、 I_b 、 E_0 、 $\langle \beta_t \rangle$ 、 $\text{Re } Z_{t,RW}$ は、それぞれ、蓄積ビーム電流、ビームエネルギー、横方向のベータ関数のリング全周に亘る平均値、横方向の壁抵抗性インピーダンスの実部である。SPring-8-II の場合、垂直方向のインピーダンスが水平方向よりも大きいので、以降は垂直方向のみで話を進める。垂直方向のベータatronチューンの設計値は 42.58、周回周波数は 208.85 kHz であるので、最低次モード周波数は 87.7 kHz となる。この周波数でのベータ関数の重み付き壁抵抗性インピーダンスは、垂直方向に対して $\langle \beta_y \rangle \text{Re } Z_{t,RW} = 1212 \text{ M}\Omega$ と試算される。これは、磁極ギャップ 8 mm を仮定した挿入光源 40 台分の寄与も含めた値である。なお、この挿入光源からの寄与は全体の 1/4 程度である。これらの数値を元に式(1)を用いて算出した TCBI の成長率は 4.2 ms^{-1} となり、これは現 SPring-8 の TCBI よりも約 10 倍速い成長率である。ビーム不安定性抑制のためには、この成長率よりも速い減衰率を持つ BBF が必要であるので、SPring-8-II 用横方向 BBF の減衰率は、2 倍以上の余裕を持たせるとして、 10 ms^{-1} 以上必要ということになる。

masaki@spring8.or.jp

3. 横方向 BBF の設計

3.1 機器構成

横方向 BBF の機器構成は Fig. 1 に示すように、ビーム位置振動検出用ストリップライン型ピックアップ、ピックアップからの信号をビーム位置(X/Y)信号に変換するフロントエンド回路、FPGA を搭載しキック信号(K_x/K_y)を生成する RFSoc ベースの信号処理回路、スキュー配置電極のキッカーへの信号に変換、レベル調整等を行うバックエンド回路(RFSoc 内部に、ある程度組み込む予定)と、それらキック信号を増幅するパワーアンプ(定格 250 W/電極)、最大 508.76 MHz の繰り返しを持つ電子バンチをバンチ毎に蹴り分ける 30 cm ストリップライン型キッカーから成る。ストリップライン型ピックアップとキッカーは、横方向 BBF の冗長性や将来の拡張性等を考慮し 2 台ずつ用意する。

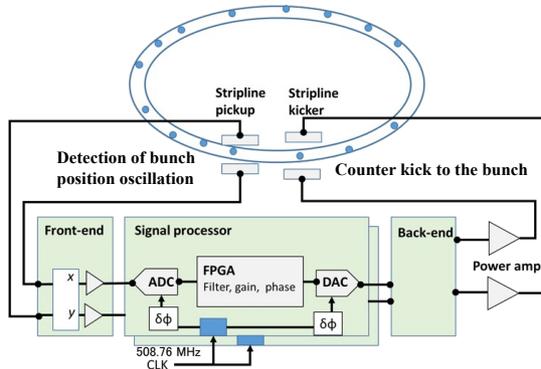


Figure 1: Configuration of transverse BBF system.

3.2 横方向 BBF の減衰率、フィードバックゲイン

横方向 BBF の減衰率 $1/\tau_{FB}$ は、

$$\frac{1}{\tau_{FB}} = \frac{f_{rev} \sqrt{\beta_{pickup} \beta_{kicker}}}{2} G_{FB} \quad (3)$$

$$G_{FB} = \frac{eV_{kick}}{E_0 \Delta y} \quad (4)$$

で与えられる。ここで、 β_{pickup} 及び β_{kicker} は、それぞれピックアップ、キッカー位置でのベータ関数で、両者ともに垂直方向は 3.2 m、水平方向は 8.3 m である。 G_{FB} はフィードバックゲインで、ビーム位置変位 Δy 当りのキック角であり、 V_{kick} はキック電圧である。SPring-8-II で必要な BBF 減衰率 10 ms^{-1} から、式(3) を用いてフィードバックゲインを算出すると、 $G_{FB} > 0.03 (\mu\text{rad}/\mu\text{m})$ の性能が必要ということになる。

3.3 30 cm ストリップライン型キッカー

SPring-8-II の横方向 BBF キッカーに必要な最大キック角を見積もるために、現 SPring-8 リングの 8 GeV ビームにて SPring-8-II 用信号処理回路 RFSoc で得られる垂直方向の BBF 減衰率を実測した。BBF キッカー、ピックアップ、定格 250 W パワーアンプ (2 台) は、現 SPring-8 の BBF システムで使用しているもので、垂直方向のキッカーの最大キック角は $0.43 \mu\text{rad}/\text{turn}$ である。

RFSoc の DAC 出力ゲインを変えながら、ビーム振動を Grow-Damp させて減衰率を測定した。Figure 2 に結果を示す。

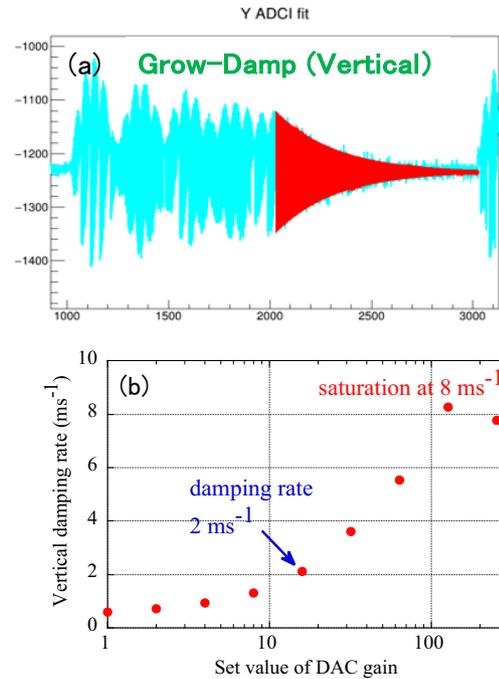


Figure 2: (a) Example of the vertical grow-damp measurement, (b) Evaluated damping rates depending on the DAC gain.

飽和している減衰率 8 ms^{-1} は、フィードバックゲインに換算すると $0.015 (\mu\text{rad}/\mu\text{m})$ であり、SPring-8-II で必要としている性能の 1/2 程度である。DAC ゲインの上げしるを、残しておくことも考慮し、減衰率 2 ms^{-1} 程度で考えると、SPring-8-II で必要な垂直キッカーの最大キック角は、この測定で使用したキッカーの最大キック角 $0.43 \mu\text{rad}/\text{turn}$ の $(0.03/0.015) \times (8/2) = 8$ 倍に相当する $3.4 \mu\text{rad}/\text{turn}$ 程度ということになる。このキック角を実現するためにデザインした 30 cm ストリップライン型キッカーは、4 電極がスキュー配置で、垂直方向および水平方向の電極間距離をそれぞれ 9 mm と 11 mm とした。また、キック電圧を稼ぐために、キッカーインピーダンスをあえて 50Ω マッチングせず少し高めに設定した。つまり、垂直方向の差動モードに対しては 85Ω 、水平方向の差動モードに対しては 64Ω である。各ポートから最大定格 250 W 相当の矩形パルスを入力した時のキッカー断面における垂直および水平の差動モードの電場分布の一例を Fig. 3 に示す。キック角は、ビームが感じる電場 $\langle E_{x,y} \rangle_{beam}$ 、電極長 $L = 0.3 \text{ m}$ 、ビームエネルギー E_0 を用いて、

$$\theta_{kick} = \frac{2e \langle E_{x,y} \rangle_{beam} L}{E_0} \quad (5)$$

と表され、垂直方向の最大キック角は $3.6 \mu\text{rad}/\text{turn}$ となり、要求値を満たしている。また、水平方向についても同程度の $3.1 \mu\text{rad}/\text{turn}$ が得られる。

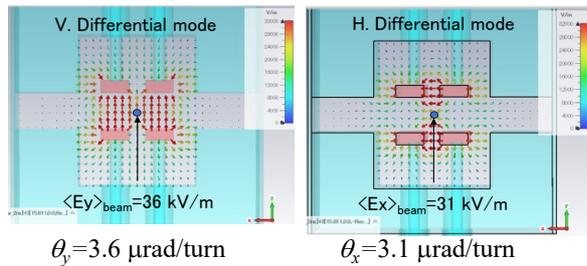


Figure 3: Electric fields of the vertical (left) and horizontal (right) differential modes.

3.4 ストリップライン型ピックアップ

ストリップライン型のビーム信号ピックアップは、横方向 BBF のビーム位置振動検出に加え、5 章で述べる縦方向 BBF のビーム位相振動検出にも用いる。そのため、このピックアップは冗長性等も考慮し、合計で 4 台設置する。設置スペースが限られているため、ストリップライン電極の長さはなるべく短い方が良いが、一方で横方向 BBF におけるビーム位置振動の検出感度の観点からは長い方が良い。また、縦方向 BBF におけるビーム位相検出は、なるべく高い周波数で検波した方が感度が高いが、電極を取り付けるビームダクトを伝播する TE10 モードのカットオフ周波数よりは、低い周波数で検波した方がピックアップ信号に重畳するノイズを低く抑えられる点で望ましい。これらのことを考慮し、Fig. 4 に示すような短絡型の 4 cm ストリップライン型ピックアップをデザインした。電極が取り付けられるビームダクトは、60 mm (H) × 9 mm (V) の矩形型であり、TE10 モードのカットオフ周波数は 2.5 GHz である。縦方向 BBF では、このカットオフ周波数以下のなるべく高い周波数 2 GHz で位相検出することを想定し、2 GHz で検出感度が最大となる 4 cm 長の短絡型ストリップラインとした。Figure 5 に、2.4 nC のバンチ電荷、14 ps (1 σ) のバンチ長を仮定してシミュレーションしたビーム信号波形を示す。最も近い後続バンチが来る 2 ns 後ろでは、ビーム信号はほぼ減衰している。

3.5 横方向 BBF の将来オプション

横方向 BBF のキッカーと信号ピックアップは、Fig. 6 に示すように、直線部に 2 台ずつ距離を離して設置する。これを利用して、将来のゲイン増強のために次のようなオプションが考えられる。2 台のピックアップを用いて、ビーム位置変位に加えてビーム角度変位も検出し、ビームの位相空間内での位置情報を得る。ここから、次のターンにおけるビーム位相 (y_1, y_1') を予測し、2 台のキッカーを用いて位置変位と角度変位を戻すようにカウンターキックすることができる (Figure 7 参照)。つまり、上流側キッカーでは、下流側キッカーでのビーム位置変位がゼロとなるようにキック角 $\theta_1 = -y_1' - y_1/L$ を与え、下流側キッカーでは、ビーム角度変位をゼロにするようにキック角 $\theta_2 = y_1/L$ を与える。この手法を用いると、原理的には 1 ターン前の位相空間情報だけで、ビーム振動をゼロにするような複素カウンターキックが可能となる。

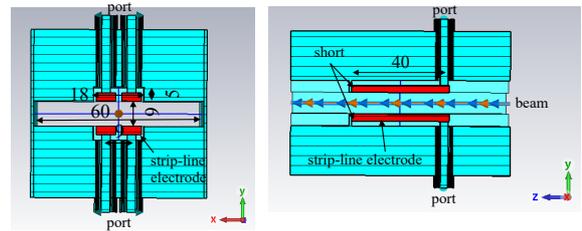


Figure 4: 4 cm-long shorted strip-line pickup.

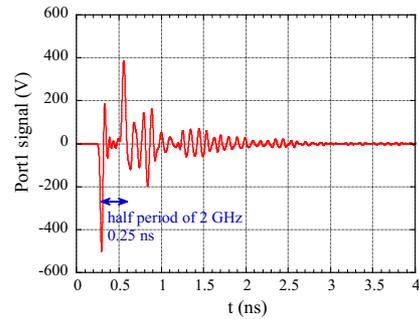


Figure 5: Simulated beam signal, assuming bunch charge of 2.4 nC and bunch length of 14 ps (1 σ).

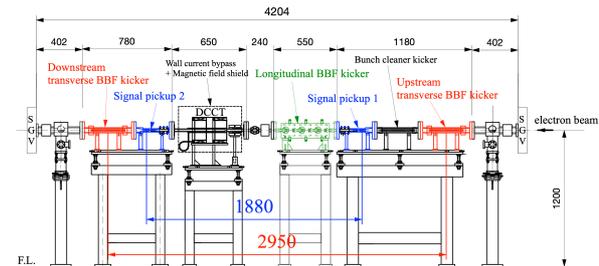


Figure 6: Configuration of the beam diagnostic and feedback instruments at the straight section in 4 cell.

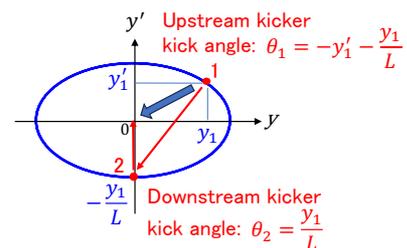


Figure 7: Complex counter kick using two kickers.

4. 縦方向結合バンチ不安定性

縦方向の結合バンチ不安定性 (LCBI) は、RF 加速空洞の高次モード (HOM) によって引き起こされ、この内、特に 900 MHz 付近に存在する TM011 モードが主要因である。現在の SPring-8 では、LCBI の閾値が 100 mA 以上であるため縦方向 BBF は不要であるが、SPring-8-II

では 200 mA で不安定性の閾値を超える可能性がある。LCBI の成長率 $1/\tau_{L,g}$ は、HOM インピーダンスがピーク値となる周波数が、ビームを共振させる周波数と一致する最悪のケースの場合、

$$\frac{1}{\tau_{L,g}} = \frac{\alpha_c I_b f_{rev} f_{HOM} R_{sh,HOM}}{\left(\frac{4E_0}{e}\right) f_s} \quad (6)$$

で表される。SPring-8-II の場合、運動量収縮因子 $\alpha_c = 4.124 \times 10^{-5}$ 、TM011 モードのピーク周波数 $f_{HOM} \sim 900$ MHz、シンクロトロン振動周波数 $f_s = 703.4$ Hz、TM011 モードのシャントインピーダンス $R_{sh,HOM} < 1$ M Ω であるので、式(6)から成長率を算出すると、 $1/\tau_{L,g} < 1/11$ (ms^{-1})となる。実効的な成長率 $1/\tau_{g,eff}$ は、減衰時間 $\tau_s = 13.5$ ms の放射減衰による効果との合成、

$$\frac{1}{\tau_{g,eff}} = \frac{1}{\tau_{L,g}} - \frac{1}{\tau_s} \quad (7)$$

となるので、 $1/\tau_{g,eff} < 1/60$ (ms^{-1})である。したがって、縦方向 BBF で必要な減衰率 $1/\tau_{L,dump}$ は、2 倍程度の余裕を持たせるとして、 $1/30$ ms^{-1} もあれば十分である。

5. 縦方向 BBF の設計

5.1 機器構成

縦方向 BBF(LBBF)の機器構成は、Fig. 1 に示した横方向 BBF と基本的には同じような構成であるが、4 cm ストリップラインピックアップでは、ビーム位置変位ではなく、ビーム位相変位を検出し、5.2 項で述べる縦方向キッカーを用いて、検出した位相変位に比例したエネルギーキックを与える。検波周波数は、Fig. 8 に示すように、ビーム信号の周波数スペクトルにおいてピーク感度を与える 2 GHz とする。フロントエンド回路にて、4 電極ピックアップの和信号から 2 GHz 検波、位相シフトの検出を行い、信号処理回路(RFSoc)によりビーム位相振動を打ち消すエネルギーキック信号を生成、パワーアンプで増幅し、縦方向キッカーを駆動する。

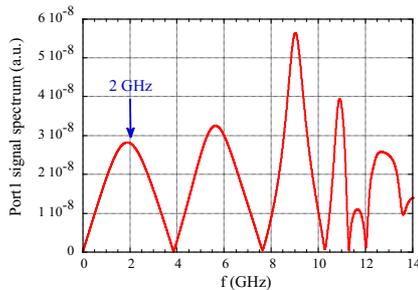


Figure 8: Frequency spectrum of a beam signal from the 4-cm stripline pickup.

5.2 縦方向 BBF キッカー

LBBF の減衰率は、

$$\frac{1}{\tau_{L,damp}} = \frac{\alpha_c f_{rev}}{4\pi E_0 f_s} G_{LBBF} \quad (8)$$

$$G_{LBBF} = \frac{e\Delta V_{L,kick}}{\Delta t} \quad (9)$$

と表され、 $1/30$ ms^{-1} 以上の減衰率は、フィードバックゲイン G_{LBBF} に換算すると 200 eV/ps 以上、つまり、1 ps のビーム位相変位を検出した時に 200 eV 以上のエネルギーキックを与える必要がある、ということになる。

縦方向キッカーは、 $(3 + 1/4)f_{RF} = 1.65$ GHz で駆動し、Q 値が 4 程度の低 Q 空洞を 3 つタンデム配置した 3 空洞構成で、Fig. 9 に 1 空洞分の断面図を示す。1 空洞あたり、最大定格 250 W のパワーアンプで駆動する。1.65 GHz のハイパワーは、X-Z 断面図に示すように両サイドの 2 つのポートから対称に入力し、後続バンチに対する残留キックを減らす低い Q 値を実現するため、上下、左右対称に合計 4 つのパワー逃しポートを設けている。

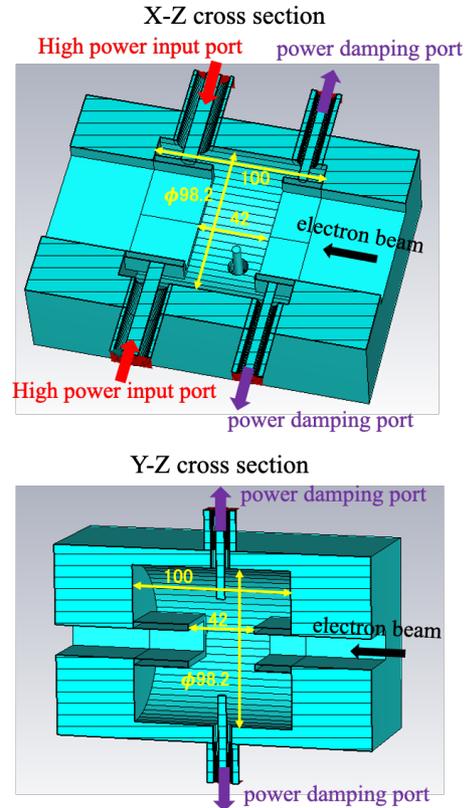


Figure 9: X-Z and Y-Z cross sectional views of one cell of the LBBF kicker.

Figure 10 に、ハイパワー入力ポートの片側 1 ポート当たり 90 W 相当のキッカーパルス波形の例を示す。両側 2 ポートで、合計 180 W 入力時の空洞内における電場分布を(ほぼ最大となるタイミングで)示したものが Fig. 11

である。概ねビーム通過時の電場が 14 kV/m となっており、これを元に 1 空洞セル当たりのエネルギーキック量をシミュレーションすると、 $\Delta E_0/E_0 \sim 10^{-7}$ である。キック電圧は $\Delta V_{L,kick} \sim 600$ V に相当し、シャントインピーダンスは 1 k Ω /cell 程度と見積もられる。なお、1.65 GHz を主成分に持つ Fig. 10 に示したような形状のパルスは、信号処理回路 RFSoc 内部で生成し、DAC から出力することができる。

さて、この縦方向キッカーで 200 eV/ps 以上のフィードバックゲインが実現できるかという点であるが、現 SPring-8 にて、シャントインピーダンス 1 k Ω /cell を持つ類似構造の縦方向キッカー[6]を用いて、LBBF の減衰率を実測している。測定はビームエネルギーを 6 GeV に下げて行った。結果を Fig. 12 に示す。現 SPring-8 のパラメータで換算すると、フィードバックゲイン 200 eV/ps に相当する 0.044 ms⁻¹ 以上の減衰率に到達していることが分かる。したがって、SPring-8-II においても同様の構造、性能を持つ縦方向キッカーを用いて、十分、縦方向ビーム不安定性の抑制が可能であると言える。

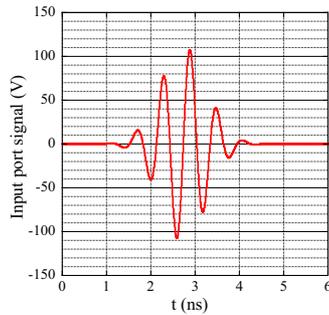


Figure 10: High power input pulse of 90 W per port.

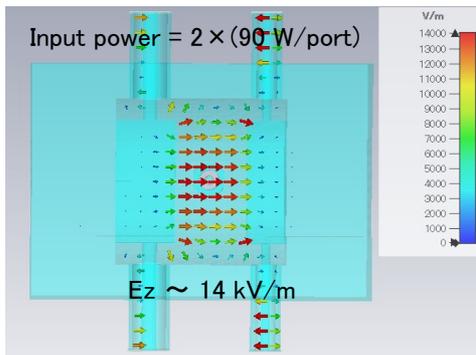


Figure 11: Electric field in a longitudinal kicker cell on the input power feed of 180 W.

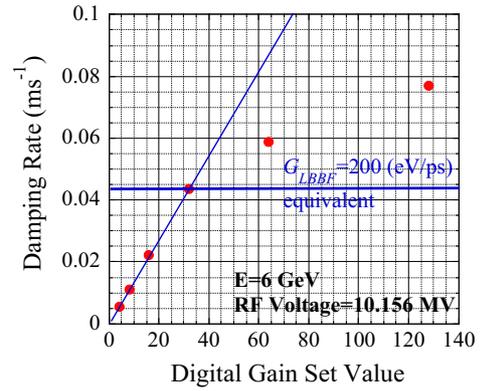


Figure 12: Measured longitudinal damping rate depending on the DAC digital gain, using the existing longitudinal kicker with the similar structure and the current SPring-8 storage ring.

6. まとめ

SPring-8-II では、蓄積電流 200 mA での安定運転を実現するため、ビーム不安定性抑制装置 (BBF) は必須である。横方向、縦方向の結合バンチ不安定性の成長率をインピーダンス評価から定量的に算出し、これらの不安定性を抑制するために必要な BBF の性能を見積もった。現 SPring-8 で実施したビーム試験等で得られた知見も活かし、必要性能を実現できる横方向、縦方向の BBF キッカー及び信号ピックアップを設計した。これらは今後順次、製作に入る予定である。また、回路部分 (フロントエンド、RFSoc、バックエンド等) の詳細仕様の検討も同時進行で進めている。

参考文献

- [1] H. Tanaka *et al.*, “Green upgrading of SPring-8 to produce stable, ultrabright hard X-ray beams”, J. Synchrotron Rad. (2024), **31**, Part 6, p.1420-1437.
- [2] K. Fukami *et al.*, “SPring-8-II 蓄積リング磁石システム”, Proceedings of PASJ2025, FRO605, Tokyo, Japan, August 6-8, 2025, this meeting.
- [3] K. Tamura *et al.*, “SPring-8-II 真空システム設計の現状”, Proceedings of PASJ2024, THP075, Yamagata, Japan, July 31-August 3, 2024.
- [4] T. Tomai *et al.*, “SPring-8-II に向けた加速空洞高次モード起因の不安定性の抑制”, Proceedings of PASJ2025, WEO703, Tokyo, Japan, August 6-8, 2025, this meeting.
- [5] R. Nagaoka *et al.*, “Collective effects in a diffraction-limited storage ring”, J. Synchrotron Rad. (2014), **21**, Part 5, p.937-960.
- [6] M. Masaki *et al.*, “Development of a highly efficient energy kicker for longitudinal bunch-by-bunch feedback”, Proceedings of IBIC2013, TUPC18, Oxford, UK, September 16-19, 2013.