

## SuperKEKB Phase-II でのダンピングリングビームモニターシステムの運転 BEAM INSTRUMENTATIONS OF POSITRON DAMPING RING AT SUPERKEKB PHASE-II OPERATION

池田仁美<sup>#,A),B)</sup>, 有永三洋<sup>A)</sup>, 石井仁<sup>A)</sup>, 岩渕周平<sup>A)</sup>, 手島昌己<sup>A)</sup>, 飛山真理<sup>A),B)</sup>, 福間均<sup>A)</sup>, フラナガンジョン<sup>A),B)</sup>,  
森健児<sup>A)</sup>  
H.Ikeda<sup>#,A),B)</sup>, M.Arinaga<sup>A)</sup>, H.Ishii<sup>A)</sup>, S.Iwabuchi<sup>A)</sup>, M.Tejima<sup>A)</sup>, M.Tobiyama<sup>A),B)</sup>, H.Fukuma<sup>A)</sup>, J.W.Flanagan<sup>A),B)</sup>,  
K.Mori<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

<sup>B)</sup> The Graduate University for Advanced Science (SOKENDAI)

### Abstract

We performed SuperKEKB Phase-II commissioning from March through July, 2018. Commissioning of the positron dumping ring started prior to that of the main ring in February of the year. There are monitor systems such as beam position monitor (BPM), synchrotron radiation monitor (SRM), beam loss monitor (LM), beam current monitor (DCCT) and bunch feedback system (FB) in the dumping ring as well as a main ring. These systems worked smoothly each. In this report, we introduce the outline and the operation situation of the dumping ring monitor system.

### 1. はじめに

SuperKEKB は、7 GeV の電子リング (HER) と 4 GeV の陽電子リング (LER) から成る衝突型加速器で、KEKB の 40 倍のルミノシティを目指して、2011 年に建設を開始した。2016 年 2 月から 6 月にかけて主リングの試験運転である Phase-I 運転を行い[1]、問題がないことを確認した後、Belle-II 検出器の据え付け及び入射部の改造を行い、2018 年 3 月から 7 月まで Phase-II 運転を行った[2]。デザインルミノシティを達成するためには、衝突点でのビームサイズを nm レベルまで絞ることが必要である。そのため LER に関しては、ダンピングリング (DR) を建設し陽電子のエミッタンスを小さくする[3,4]。今期の運転での DR の主なパラメータは Table 1 の通りである。DR は、Phase-II 運転に先立ち、2018 年 2 月初旬に調整を開始した。メインリング (MR) のコミッショニング開始前の約 1 か月で、入射路 (LTR) から DR への入射、DR から出射路 (RTL) への出射を含めた調整を行ったが、DR モニターシステム調整は、入射開始時のタイミング調整、運転中のフィードバックも含めて順調に進めることができた。

DR のモニターシステムは、Table 2 に示される通り、MR のシステムに準じた設計になっている[5]。ビーム位置モニターは、高さ 24 mm のアンテナチャンバーの形に合わせて 2 個一組の電極を上下に取り付け、全周に 84 個ある 4 極磁石のうち、場所の取り合いで不可能な 1 か所を除いた 83 か所に設置した。放射光モニターには、出射路の直下流の偏向磁石からの可視光を使用し、トンネルに隣接して設けたモニター室で測定する。ロスモニターとしては、トンネル内をすべて網羅する様に取り付けたイオンチャンバーを使用する。DR 入射部から 1 周回ったところに、バンチフィードバックのためのモニターチャンバーとキッカーチャンバー、電流モニターのための DCCT チェンバーを用意した。以下の節でそれぞれのモニターについて説明する。

<sup>#</sup> hitomi.ikeda@kek.jp

Table 1: Damping Ring Parameters

Parameter		unit
Energy	1.1	GeV
No. of bunch trains/ bunches per train	2/2	
Circumference	135.5	m
Maximum stored current	12	mA
Damping time (h/v/z)	11.5/11.7/5.8	ms
Emittance(h/v)	29.2/1.5	nm
Energy spread	0.055	%
Bunch length	6.6	mm
Mom. compaction factor	0.01	
Cavity voltage	1.0	MV
RF frequency	509	MHz

Table 2: Beam Monitor in DR

System	Quantity
Beam position monitor	83
Synchrotron radiation monitor	1
Beam loss monitor	34
Transverse bunch by bunch feedback	1
DCCT	1
Bunch current monitor	1

### 2. ビーム位置モニター

ビーム位置モニター (BPM) には直径 6 mm のボタン電極を使用している。断面積の小さなアンテナチャンバーの形に合わせるため、Fig. 1 の様に 2 個の電極を組にして 1 つのフランジに組み込み、チャンバーの上下に取り

付ける。検出回路は対数増幅器を内蔵した VME 18K11 L/R を使う[6]。

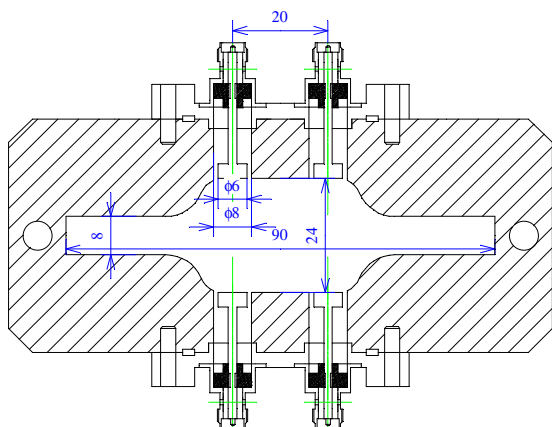


Figure 1: BPM chamber.

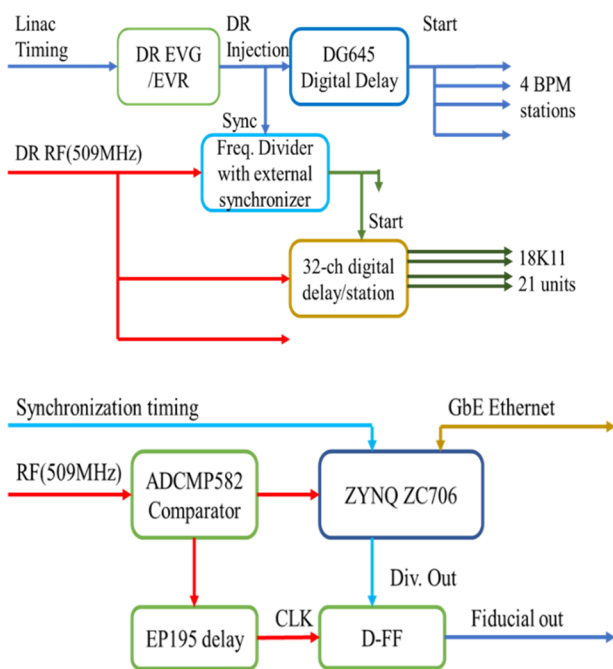


Figure 2: BPM timing.

BPM は全周にわたって設置されているが、ケーブル損失を低減するために、トンネルから電源棟へ上がるケーブル穴 4 か所の傍にそれぞれ VME ラックを組み込んだ制御ラックを設置し、20~21 台のデータをその場で変換し、ネットワークで中央へ送る。DR ではシングルターン毎に位置を測定するため、4 電極の信号は 4 ns 内に、83 台の全 BPM 信号は次の測定ターンの前までに測定が終わる様に、タイミングを合わせる必要がある。Figure 2 が、タイミング信号の流れである。加速器全体のタイミングシステムから送られる、バンチに同期した入射

タイミングを、任意分周器内で DR 周回に同期した信号に分周し、測定スタートタイミングとともに、BPM ステーションへ送信する。DR 運転開始前の準備として、各 BPM ラックから電極までのケーブル長 (~30 m) を TDR で測定し、入射点から BPM 設置位置までの距離による遅れとの合計が最大 200ns 程度に収まる様に、チャンネル毎に 32 ch デジタルディレイで個別に設定した[7]。DR 入射が始まると、ファーストターンの前に、ステーション毎の遅れ信号をデジタルディレイモジュール (DG645) に設定するために、各ステーションの先頭の BPM からのビーム信号をオシロスコープで確認して、あらかじめベンチで測定しておいた 18K11 モジュールへの正しいタイミングに合わせた。その結果、入射開始後数時間で、DR ビームの周回が確認できた。

それぞれの BPM ブロックの取付け精度の確認のためには、FARO 3D-ARM[8]を使った測量を行い、Fig. 3 の結果を得ている。得られた結果は、あらかじめ EPICS record に BPM のオフセットとして入力した。

運転開始後、位置情報の不自然な BPM が 1 か所あったが、これは、チャンバーの形状が通常と異なっており、特別な位置変換関数を使っていたところだが、仮定していたチャンバー形状が実際のもものと比べて x-y 方向に 90 度回転していたせいであることが分かり修正した。それ以外に問題は起きていない。

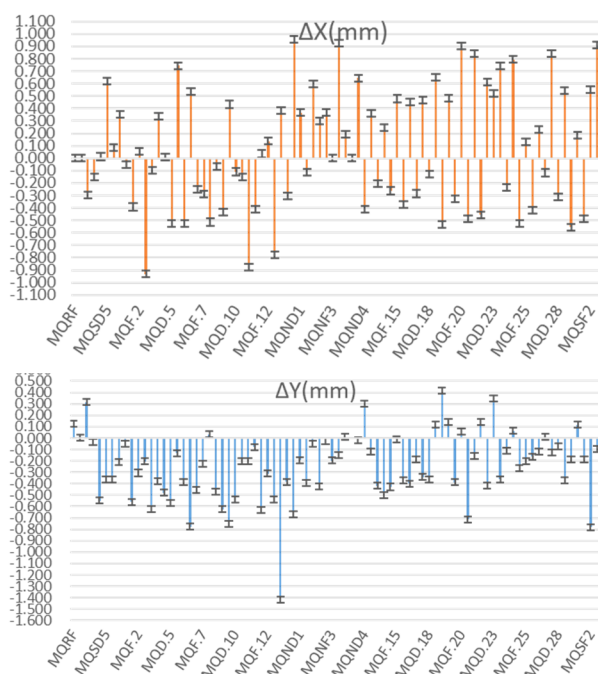


Figure 3: BPM survey result.

### 3. 放射光モニター

放射光モニター (SRM) は、DR から入射器への出射路 (RTL) が枝分かれた直後にある曲げ半径 3.14 m の偏向電磁石からの光を使用する。磁石から約 0.5 m 下流のベリリウム鏡で光を取り出し、トンネル床下のピットを通してトンネルに隣接する SRM 室まで伝送する。ビーム周回が十分長くなり、バンチ電流がある程度入射できるよう

になると、SRM 室で可視光が確認でき、各カメラへの光軸の調整を行った。Figure 4 の写真は、SRM 室から鏡を通して、発光点を見た時の様子で、最上流の鏡の中心部に放射光が見える。入射直後のバンチ形状は上流の入射器からのシミュレーション結果を見ると、Fig. 5 で示される通り、長手方向に偏りを持っているが、DR を周回するにつれて、ダンピングされて、Gaussian に近づく[9]。ストリークカメラで測定すると、Fig. 6 の様に入射直後から徐々にダンピングされて、遅くとも 20 ms 後には設計値の 6.5 mm になっていることが分かる。ストリークカメラの測定精度は 1 ps なので 6.5 mm のバンチ長に対しては約 5% の測定精度である。Figure 7 は、ゲートカメラで測定した横方向のビームサイズである。絶対値の較正が出来ていないので、オフセットがあるが、これも 50 ms 後にはほぼダンピングされていることが分かる。出射後の RTL でのワイヤースキャナーを使ったエミッタンス測定で推測されるビームサイズと比較するためにも、Phase-III で正確なサイズ較正を行いたい。



Figure 4: Synchrotron radiation at damping ring.

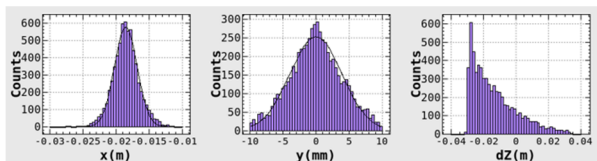


Figure 5: Bunch shape of just after injection by simulation.

#### 4. ビームロスモニター

ビームロスモニター (LM) は、入射ビームが不安定になった時に、入射トリガーを停止してハードウェアの損傷を防ぐことを目的としており、全周に約 9 m の同軸ケーブルでできたイオンチェンバーを張り巡らしている。可能な場所はビームラインと同じ高さの壁に、場所の取り合いで難しい場合はケーブルラックに取り付けている。信号は MR と同じように 1 台 8 チャンネルの積分器に入力し、積分時間 (0.1, 0.3, 1 ms) と倍率 ( $\times 1, 10, 100, 1000$ ) で、インターロックレベルを調節する。Figure 8 の様にオンラインで各位置での信号をモニターすることが出来、入射調整に役立っている。DR コミッショニング中に SRM 室に付けた放射線モニターが発報した事例がある。測定値は中性子 15  $\mu\text{Sv/h}$ 、 $\gamma$  線 12  $\mu\text{Sv/h}$  が数分続いた程度で、放射線管理区域としては問題ないが、想定外の事例だった

ため状況を調べたところ、出射セプタムの HV がオフになっているにも関わらず、バンチ電流が高い状態で 25 Hz 入出射を行っていた。そのため出射部近くの SRM 室で放射線レベルが上がった。セプタム横の LM 信号は Fig. 9 の 10 番にあたり、通常の 20 倍以上の値を出していたが、インターロックレベルよりも低かったため、6 分間運転が続いていた。この後、インターロックレベルを厳しくしたが、その後もセプタムへのトリガー抜け等が原因で、出射部付近のビームロスが大きくなるがあったため、セプタム両脇の直下流に 1 m のイオンチェンバーを追加して、インターロックを更に強化した。

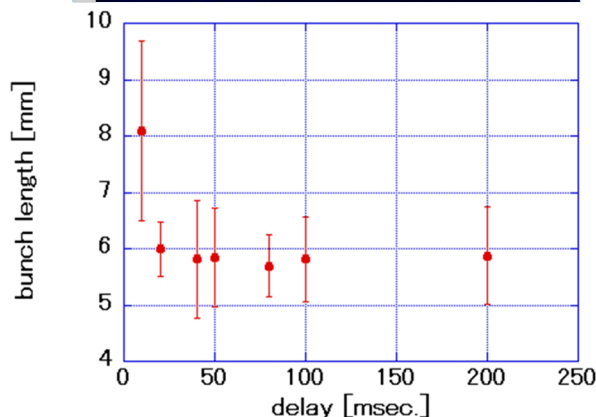
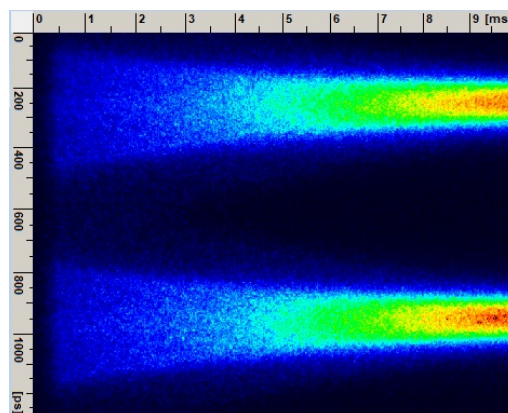


Figure 6: Measured bunch length after injection.

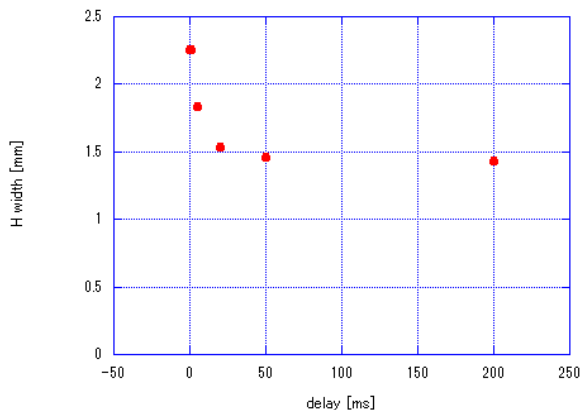


Figure 7: Measured horizontal beam size after injection.



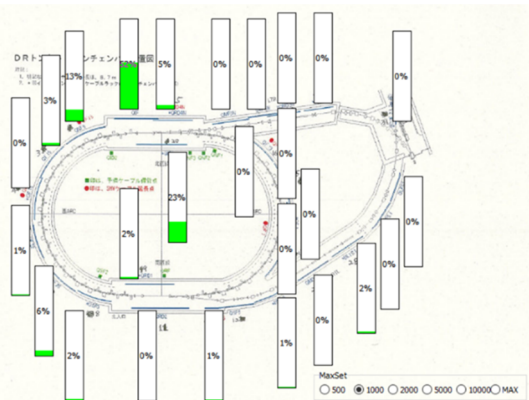


Figure 8: Distribution of output signal of beam loss monitor.

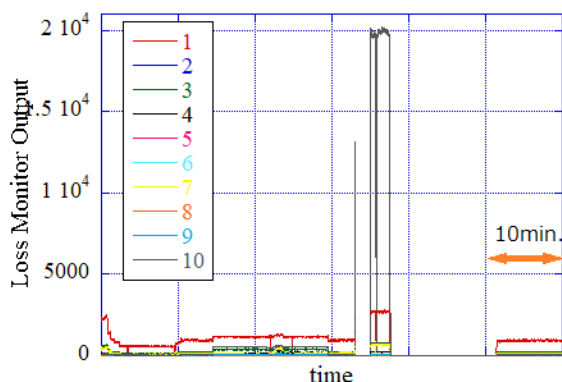


Figure 9: Loss monitor signals at that moment of the alarm from the radiation monitor.

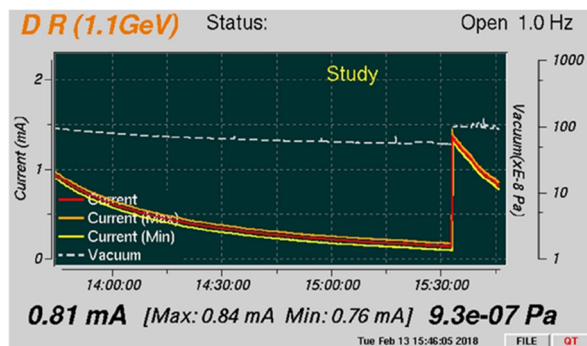


Figure 10: Beam current measurement by DCCT.

## 5. 電流モニター

電流モニターには、MR のものを再利用した DCCT コアと DR 用に変更した検出回路を使用している。200mA まで測定可能で、分解能は  $30 \mu\text{A}$  となる。測定は 5ksps で行い、Fig. 10 で示す通り、運転時は常に電流値をモニターしている。安全のため、電流制限を 17 mA でかけており、これ以上になると、入射を停止する。運転開始時にオフセットを調整し、様子を見ていたところ、電流値がマイナスになっていることが分かった。これは、建設時にチャンバーを逆向きに設置してしまったことに起因する。現在は、ソフトウェアで補正しているが、機会があればチャンバーを置きなおす予定である。

## 6. フィードバックシステム

入射機器のパルスの漏れによる不要なキックを受け、誘起される可能性がある振動を抑えるために、横方向個別バンチフィードバックシステムを導入した[10]。モニターチャンバーには、MR と同じ電極を用い、位置検出には 2 GHz の位置検出回路を使用している。キッカーには長さ 40 cm の 4 本の電極が  $45^\circ$  配向しているストリップラインを用いる。縦横両方向に対して位相調整を行い、安定した振幅でベータatron振動を励起出来ている。

バンチ電流モニターは SuperKEKB 主リング で使用しているものと同じ検出回路 VME ボード(Digitex 18K10)を、内部ファームウェアを切り替えて用いる。安全のため、バンチ電流が一定以上入ると入射停止するシステムも導入している。ベータatronチューン測定には、スペクトラムアナライザのトラッキングジェネレータ出力をダウンコンバートしてビームを励振し、電極出力を直接スペクトラムアナライザで観測するシステムを設置した。いずれも問題なく測定できている。

## 7. まとめ

SuperKEKB DR のモニターシステムはすべて予定通りにインストールされ、調整を済ませた。DR 入射開始後は、必要なタイミング、位相調整、光軸調整を行った。いくつかの手直しはあったが、順調に働いている。Phase-III 運転での高い電流値に達する前に BPM のゲイン校正、SRM の校正、LM のインターロックレベルの最適化等を行いたい。

## 参考文献

- [1] Y. Funakoshi, “BEAM COMMISSIONING OF SuperKEKB”, Proceedings of IPAC2016, Busan, Korea TUOBA01 (2016).
- [2] Y. Ohnishi *et al.*, “SuperKEKB フェーズ 2 におけるコミッションングの成果”, 第 15 回日本加速器学会, 新潟県, WEOLP01 (2018).
- [3] M. Kikuchi *et al.*, “DESIGN OF POSITRON DAMPING RING FOR SUPER-KEKB”, Proceedings of IPAC’10, Kyoto, Japan, TUPEB054 (2010).
- [4] N. Iida *et al.*, “BEAM DYNAMICS IN POSITRON INJECTOR SYSTEMS FOR THE NEXT GENERATION B-FACTORIES”, Proceedings of IPAC’11, San Sebastian, Spain, THYA01 (2011).
- [5] H. Ikeda *et al.*, “SuperKEKB ダンピングリングのモニターシステム”, 第 14 回日本加速器学会, 北海道, WEP090 (2017).
- [6] M. Tobiyama *et al.*, “SuperKEKB ダンピングリング用ビーム位置モニター”, 第 8 回日本加速器学会, つくば, MOPS080 (2011).
- [7] M. Tobiyama *et al.*, “TURN-BY-TURN TIMING SYSTEMS FOR SuperKEKB DAMPING RING POSITION MONITORS”, Proceedings of IBIC’17, Michigan, USA, TUPCF09 (2017).
- [8] <https://www.faro.com/ja-jp/products/factory-metrology/faroarm/>
- [9] N. Iida *et al.*, “SuperKEKB の陽電子ダンピングリングの入射路コミッションング”, 第 15 回日本加速器学会, 新潟県, THOM04 (2018).
- [10] M. Tobiyama *et al.*, “SuperKEKB ダンピングリング用バンチフィードバックシステムの建設”, 第 14 回日本加速器学会, 北海道, WEP088 (2017).