

SuperKEKB ダンピングリングのモニターシステム

BEAM INSTRUMENTATION SYSTEM OF SuperKEKB DAMPING RING

池田仁美[#], 有永三洋, 石井仁, 手島昌己, 飛山真理, 福間均, フラナガンジョン, 森健児
H.Ikeda[#], M.Arinaga, H.Ishii, M.Tejima, M.Tobiyama, H.Fukuma, J.W.Flanagan, K.Mori
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

Beam commissioning of damping ring (DR) will start in December, 2017 before the SuperKEK Phase-II operation. Turn-by-turn beam position monitors (BPMs), a synchrotron radiation monitor (SRM), loss monitors using ion chambers, a transverse feedback system, a DCCT, a bunch current monitor and a tune meter are installed for beam diagnostics at DR as well as the main ring. The preparation for each instrument goes on smoothly. An overview of the instrumentation of DR and construction status will be presented in this paper.

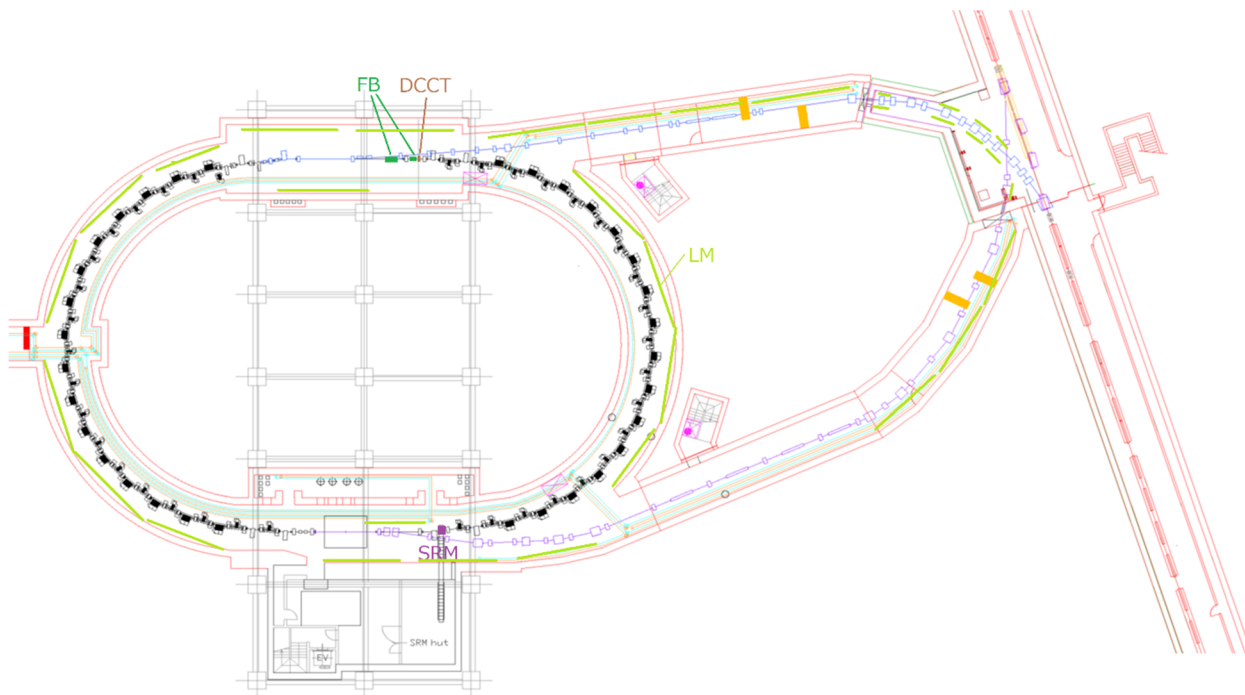


Figure 1: Layout of the SuperKEKB DR.

1. はじめに

SuperKEKBは、電子7GeV、陽電子4GeVの2リング衝突型加速器である。KEKBの40倍に相当する $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ のルミノシティを達成するために、ビーム電流をKEKB時の2倍、衝突点でのビームサイズをnmレベルまで絞り込む。主リング(MR)の試験運転であるPhase-I運転は、2016年2月から6月にかけて行われ、成功裏に終わった[1]。Belle-II検出器の据え付け後、ビームサイズを絞った衝突運転が、2017年度後半から始まるが、陽電子ビームのエミッタンスを小さくするためには、1.1GeVのダンピングリング(DR)建設が進んでおり[2,3]、

[#]hitomi.ikeda@kek.jp

2017年12月からコミッショニングが始まる。DRの主なパラメータはTable 1に示す通りである。

DRの真空チェンバーは、コヒーレントシンクロトロン放射(CSR)や光マスクに起因するビーム不安定性を抑えるために、高さが25mmのアンテナチェンバーになっている[4]。ビームモニターはTable 2の通り、MRと基本的に同様のものを準備しているが、DRのパラメータに合わせた設計を行った。モニターシステムの全貌をFigure 1に示す。ビーム位置モニター(BPM)は各四極偏向電磁石にサポートを作って取付け、トンネル内4か所にあるケーブル貫通孔から電源棟に信号を送る。ロスモニター(LM)は全周にわたって壁やケーブルラックに取り付け、全数

の信号を電源棟内制御室に集める。バンチフィードバックシステム (FB) と電流値モニター (DCCT) を入射部、放射光モニター (SRM) を出射部に据え付ける。

Table 1: Damping Ring Parameters

| Parameter | | unit |
|--|-----------|------|
| Energy | 1.1 | GeV |
| Maximum bunch charge | 8 | nC |
| No. of bunch trains/ bunches per train | 2/2 | |
| Circumference | 135.5 | m |
| Maximum stored current | 70.8 | mA |
| Horizontal damping time | 10.9 | ms |
| Injected-beam emittance | 1700 | nm |
| Equilibrium emittance(h/v) | 41.4/2.07 | nm |
| Maximum x-y coupling | 5 | % |
| Emittance at extraction(h/v) | 42.5/3.15 | nm |
| Energy band-width of injected beam | ± 1.5 | % |
| Energy spread | 0.055 | % |
| Bunch length | 6.53 | mm |
| Momentum compaction factor | 0.0141 | |
| Cavity voltage for 1.5 % bucket-height | 1.4 | MV |
| RF frequency | 509 | MHz |

Table 2: Number of Beam Monitor in DR

| System | Quantity | Specification | |
|------------------------------------|----------|---|------------------------|
| Beam position monitor | 83 | S/N Resolution | 65dB 100 μ m |
| Synchrotron radiation monitor | 1 | Beam size resolution Bunch length resolution | PSF 16 μ m 1 ps |
| Loss Monitor | 34 | Dynamic range Resolution | 16bit 0.5nC |
| Transverse bunch by bunch feedback | 1 | Damping time | 100 turns |
| DCCT | 1 | Max Resolution | 200mA 30 μ A |
| Bunch current monitor | 1 | Dynamic range | 8 bits |

2. ビーム位置モニター

ビーム位置の測定には 6mm のボタン電極を使用する。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、Figure 2 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[5]。DR では、通常ビームは 40ms 周回した後に射出されるので、リング内での滞在時間は短く、40ms 毎に異なるバケット

に入射される。そのため、位置検出には、ターン毎に 4 電極の信号を同時に読み込み、32k または 64k ターンのデータをまとめて Input-Output Controller (IOC) 上で計算するという手法を取る。

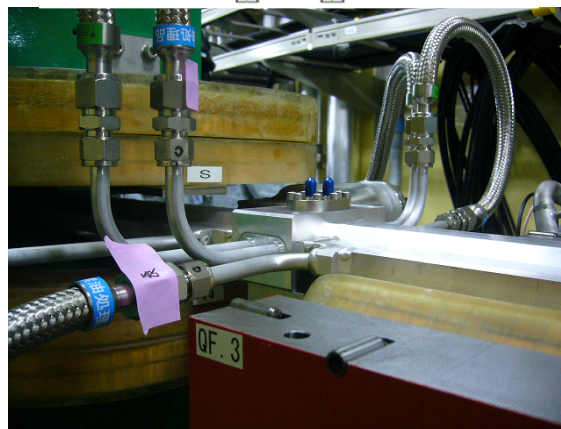
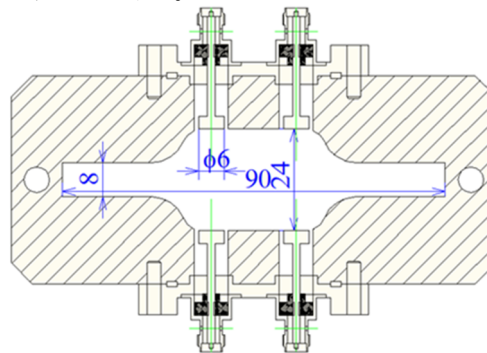


Figure 2: BPM chamber.

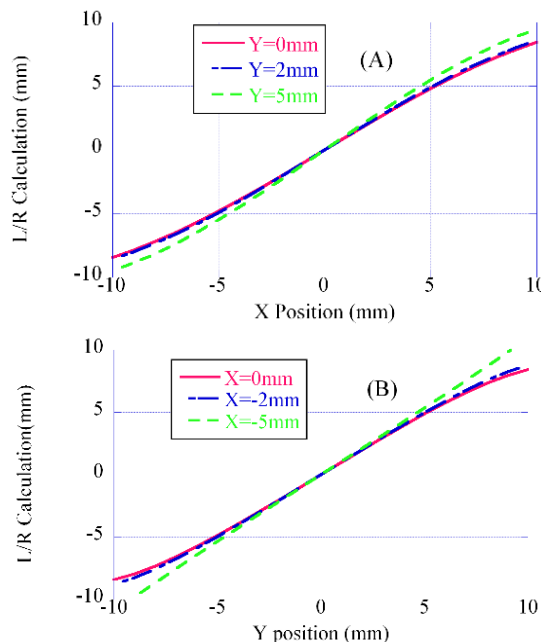


Figure 3: The beam position vs the result of the log ratio (L/R) calculation method when we fix a vertical position and change the horizontal position (A) and when we fix a horizontal position and change the vertical position (B).

測定電圧から位置情報への変換は以下の式を使う。

$$\begin{aligned} x &= k_x(\log V_A - \log V_B - \log V_C + \log V_D) \\ y &= k_y(\log V_A + \log V_B - \log V_C - \log V_D) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで V_A, V_B, V_C, V_D はそれぞれの電極からの電圧を表す。Figure 3 では、ビーム位置対計算結果を (A) Y 方向の位置を 0mm, 2mm, 5mm に固定した場合の X 方向、(B) X 方向の位置を 0mm, 2mm, 5mm に固定した場合の Y 方向について示しており、中心から $\pm 5\text{mm}$ の位置ではほぼ線形な結果が得られることが分かる。

3. 放射光モニター

ビームサイズ及びバンチ長の測定には放射光モニターを使う[6]。ビームサイズ測定にはゲートカメラ、バンチ長測定にはストリークカメラを用いる。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 3.14m の偏向電磁石からの光を、約 0.5m 下流のベリリウム鏡で取り出し、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 (Figure 4)。

取り出し鏡までの距離が短いため、アパーチャは広く、測定に十分な光量が得られ 0.1nC bunch まで測定が可能である。測定精度を見積もるために、取り出しチャンバーの開口部 8mm から Fraunhofer 回折の式[7]を用いて、各波長での回折パターンを計算した。カメラの測定可能な波長領域についての量子効率の重みを掛け合わせると、Figure 5 の様になる。この結果をガウスフィットすることで、回折による測定のぼけは $\sigma = 12\mu\text{m}$ と見積もることができ、SRM の位置で予測される、水平方向 380 μm 、垂直方向 75 μm のビームサイズ測定は可能である。バンチ長はストリークカメラの測定精度が 1psec なので 6.5mm 程度のバンチ長に対し約 5% の測定精度になる。取り出し鏡に当たるパワーは 17.9W と計算されており、空冷式チラーからの冷却水で冷却する。



Figure 4: Layout of the DR SRM line.

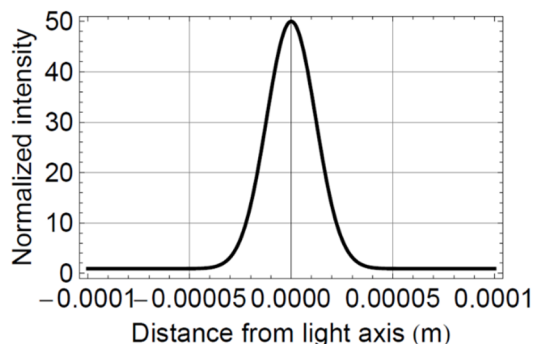


Figure 5: The convolution of the quantum efficiency of the camera and the Fraunhofer diffraction pattern of $\lambda = 200\text{nm}$ - 900nm light.

4. ビームロスモニター

DR 内でビームロスが起きた場合にアラームを出し、入射を止めるために、ロスモニター (LM) を用いる。センサーには入射器で使用していた 9m の FC-20D 同軸ケーブルを使ったイオンチェンバーを再利用する (Figure 6)。+200V の高電圧を外部導体につけ、約 1ms かけて中心導体に集められた +イオンによる電気信号を測定する。その後、SuperKEKB メインリングと同様の積分回路で信号を処理する[8]。0.1mA/s のビームロスまで測定することができる。イオンチェンバーは Figure 1 で示すトンネル全周の外壁又はケーブルラックに取り付けられる。DR は電流値が小さいので、電磁石で遮蔽される測定量ができるだけ減らすために、ビームラインと同じ高さに取り付けることを基本とする。またバックアップとして、局所的なビームロスを測定するために光ファイバーを入射路近辺に敷設し、SRM 室で測定できるようにする。



Figure 6: Ion chamber for the beam loss monitor.

5. フィードバックシステム

入出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する[9]。Figure 7 で示すモニターチェンバーには、MR と同じ電極を用い、位置検出には 2GHz の位置検出回路を使用する。キッカーには長さ 40 cm の 4 本の電極が 45° 配向しているストリップラインを用いる。

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と 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。

ベータトロンチューン測定には、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。

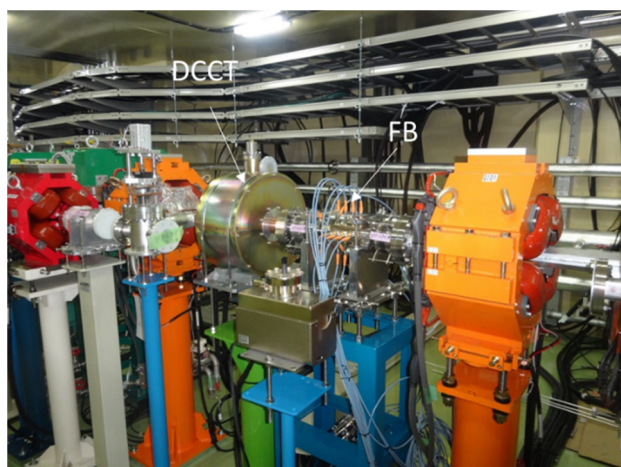


Figure 7: DCCT and FB chamber.

6. 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 チェンバー (Figure 7) と DR 用に変更した検出回路を使用する。200mA まで測定可能で、分解能は $30\mu\text{A}$ となる。

7. タイミングシステム

BPM, SRM, FB システムには、データ取得のためのタイミングが必要である。特に DR では入射毎にバンチが入るバケットが異なるため、ターン毎にバンチの位置を測る BPM とバンチ長を測る SRM には、バケット情報が不可欠である。また RF 信号、入射タイミング、周回タイミングも必要である。Figure 8 に、モニターシステムに用いるタイミングの流れを示す。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 ステーション及び SRM へ送信する。各ステーションに 21 台ある BPM は、設置位置と測長済みのケーブル長による遅れが最大 200ns 程度になるため、分周器から送られた信号を更にチャンネル毎にデジタルディレイで個別に設定する[10]。

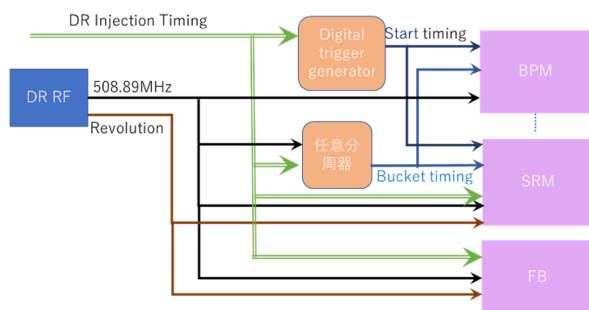


Figure 8: Overview of DR timing for beam instrumentation system.

8. まとめ

SuperKEKB DR は 2017 年 12 月にコミッショニングを開始する予定だが、モニターシステムについては、R&D

は終了し、各機器の設置が進んでいる。

電源棟に設置した制御ラックと、トンネル内モニター機器間のケーブル敷設はすべて終了した。入射機器の設置及びアライメントの終了を待たなければならない直線部以外の BPM は、ケーブル末端処理、繋ぎこみまで終わっている。制御室外に 3 か所ある BPM ステーションにはビニールハットを被せエアコンを付けて温度の安定性を図り、システム試験を行っている。読み出しソフトウェアの準備もほぼ終わった。BPM の測定は運転開始前の 10 月に行う。SRM はチェンバーの設置が 7 月中に終わり、その後光路を設置する。測定用カメラの準備は出来ている。LM はイオンチェンバーに必要な改造を行った後、8 月には取付け作業にかかる。DCCT、FB モニター及びキッカーチェンバーの設置は終了し、ビームなしでの動作確認まで行った。今後、SRM、FB、DCCT のチェンバーの温度モニターのための機器を設置する。

4 か所の BPM ステーション、FB ステーション、SRM 室へタイミングとネットワークを伝送するための光ケーブル、同軸ケーブルの敷設は終了し、RF 信号及び周回タイミング信号の送受信は確認出来た。タイミングシステムからの入射信号が送られてきた後で、全体のタイミングを確認しシステム試験を行う。

コミッショニングが始まると、まず各モニターのタイミング合わせ、SRM については光軸調整等が必要で、その後 DR 運転の性能向上のために役立てることができる。

参考文献

- [1] Y. Funakoshi, 第 13 回日本加速器学会年会 千葉県 MOOL02 (2016).
- [2] M. Kikuchi *et al.*, Proceedings of IPAC'10, Kyoto, Japan, TUPEB054 (2010).
- [3] N. Iida *et al.*, Proceedings of IPAC'11, San Sebastian, Spain, THYA01 (2011).
- [4] H. Ikeda *et al.*, Proceedings of IPAC'13, Shanghai, China, (2013).
- [5] M. Tobiyama *et al.*, 第 8 回日本加速器学会, つくば, MOPS080 (2011).
- [6] H. Ikeda *et al.*, 第 8 回日本加速器学会, つくば, MOPS069 (2011).
- [7] M. Born and E. Wolf, Principles of Optics, Cambridge, (1999).
- [8] H. Ikeda *et al.*, Proceedings of IBIC'14, Shanghai, China, TUPD022 (2013).
- [9] M. Tobiyama *et al.*, 第 14 回日本加速器学会, 北海道, WEP088 (2017).
- [10] M. Tobiyama *et al.*, to be published in Proceedings of IBIC'17, Michigan, USA, (2017).