

SuperKEKB-ダンピングリング ビームベースドアライメントシステムの構築と測定 CONSTRUCTION AND MEASUREMENT OF SuperKEKB DAMPING RING BEAM BASED ALIGNMENT SYSTEM

植田猛[#], 杉本寛

Takeshi Ueda[#], Hiroshi Sugimoto

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

Beam-based-alignment (BBA) system for SuperKEKB positron damping ring (DR) was developed to determine the offset of Beam-Position-Monitor (BPM) respect to the magnetic center of neighbour quadrupole magnet. Correction coils and an additional power supply is utilized to perform BBA for quadrupole families in the arc section. By using the presented BBA system, we find a BPM reading which is insensitive to the field strength of the quadrupole magnet. The offset information is planned to be incorporated into the BPM system for better orbit control. We present in this paper the BBA system together with the power supply testing and the measurement results obtained so far.

1. はじめに

ビームベースドアライメント(BBA)システムとは四極電磁石の中心では磁場がゼロになる特性を活かし磁場中心位置と、その四極電磁石と近傍の Beam Position Monitor (BPM)の中心位置とのずれを測定するシステムである[1]。具体的にはビームの軌道を変化させながら測定したいBPM近傍の四極電磁石の磁場も変化させビーム位置を測定し、四極電磁石の磁場を変化させてもビーム位置が変化しないBPM読み値を求める。BBAを行うためには着目している四極電磁石の磁場を他の四極電磁石とは独立に制御する必要がある。四極電磁石が単独の電源に接続されていれば電源も既存のものを使用できるが、1台の電源に複数の電磁石が接続されているものであると、測定したい四極電磁石だけを磁場変化させることはできない。そこで、四極電磁石の補助コイルを使ってBBAを行うシステムを新たに構築した。本システムでは切り替え機を使うことで1台の電源で各四極電磁石の補助コイルを独立に制御できる。本発表ではBBAシステムの構築のために行った切替システムの検討、電源の試験及び、これまでに得られたBBA測定の結果を報告する。

2. 構成

2.1 切り替え機

DRにはBPMが83個あり各四極電磁石近傍に設置されている。Figure 1にDRのレイアウトを示す。DRは北の入射直線部、南の出射直線部と東西のアーカ部からなる。アーカ部はFig. 2に示すセルが東西に16セットずつ並んでおり、南北直線部付近は電源1台に対し1台の電磁石、アーカ部に関しては電源1台に対し同タイプの複数の電磁石が接続されている[2]。このためアーカ部の四極電磁石は個々で磁場を変化できないため四極電磁石の補助コイルを使用して個々に磁場を変化させられるよう構築した。

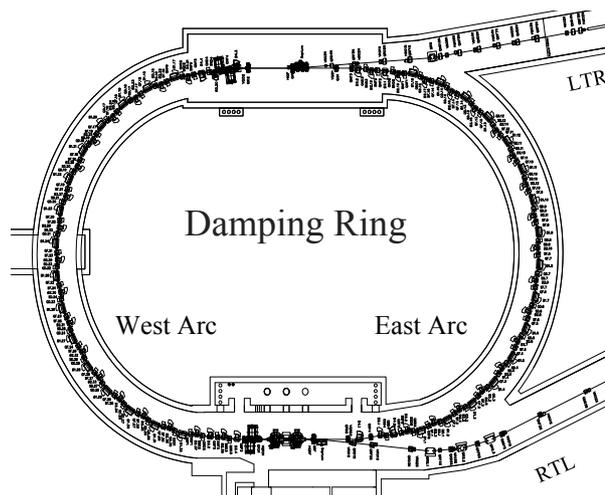


Figure 1: Layout of DR.

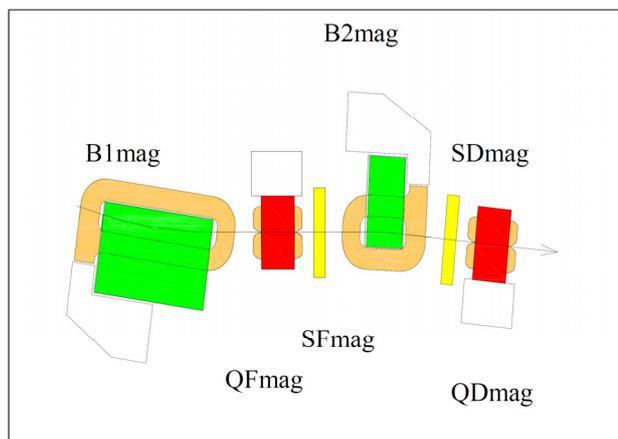


Figure 2: Arrangement of magnets in one arc cell.

補助コイル用の配線は2017年の運転休止期間に各電磁石から地上部のラックまでの配線は行われていた。

[#] uedata@post.kek.jp

今回は電源側の構築と接続を行った。BBA システムは SuperKEKB のメインリング(MR)や入射リニアックでも運用されており、DR の BBA システムを構築するにあたり MR のシステムを参考に検討した。MR の BBA システムは 1 台の電源を切り替えて各四極電磁石に通電できるよう構成されている。切り替えには専用で作られた制御基板とミニチュアリレーが使用されている。DR ではこの切り替えをメンテナンス性や費用を考慮し PLC とミニチュアリレーで行うことにした。Figure 3 に MR_BBA と DR_BBA の略図を示す。

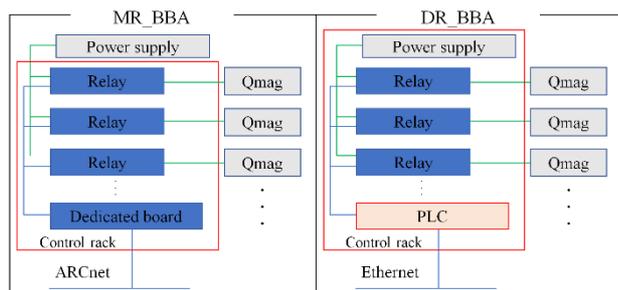


Figure 3: Configuration of the BBA switching machine.

2.2 安全対策

切り替え機を構成するにあたり考慮する点が 2 つあった。1 つは負荷を切り替える際に負荷側が開放状態にならないようにしなければならないことである。開放した状態で通電しようとする電源側で OV(Over Volt)のアラームが発報し出力不可となる。これを回避するためダミー抵抗を別に用意し切り替え時にはダミー抵抗を並列に接続するようにして切り替え後ダミー抵抗を切り外すプログラムを組んだ。2 つめは通電時に切り替え操作を行うと急激な切断となり危険なことである。これを回避するために通電時は切り替え操作ができないようにソフトを組んだ。また、電源は DR の六極電磁石の補正コイル用電源と同じものを流用しており電源性能は DC ± 10 A 出力可能である。四極電磁石の補助コイルは仕様で ± 5 A で制限となるため電源側で ± 5 A でリミット設定し、また電源操作ソフト側でも制限をかけた。

3. 動作確認

3.1 磁場測定

四極電磁石の補助コイルを使用するにあたり予備電磁石で磁場測定を行った。運転時の四極電磁石メイン側通電電流は 134 A 程度で同様にメイン側を通電した状態で補助コイルに ± 5 A 通電し測定した。メインコイルの巻き数比は 16 turn/pole 補助コイルの 10 turn/pole で補助コイルに +5 A 通電した時の磁場をメインに換算し、メインのみの磁場と補助コイルを使用した場合の磁場と比較した。差は 0.0263%となり設計通りの磁場が発生していることを確認した。

3.2 出力波形確認

実機において電源の前面 Imon 端子と出力ケーブル

で出力波形を確認したところ波形の乱れが見られた。5 A 出力で 0.5 Hz、920 mA (92 mV) 程度の乱れである。常時観測されるわけではなく 20 sec 程度連続して出たかと思うと 15sec 程度見えなくなっているときもある。また低電流時は見られず 3~5 A 程度通電すると発生する。個体差もありアーク部の四極電磁石 56 台中、数十台で発生した。ノイズ原因の特定作業として四極電磁石や切り替え機を収めているラック、電源のアースを調査しアースを浮かせたり、配線替えなどを行ったがノイズに変化がなかった。そのため、アースが原因でノイズが発生しているわけではないと判断した。また切り替え回路の途中にあるミニチュアリレーを切り離し電源と電磁石を直接接続し電源と四極電磁石間にある機器がノイズ発生源になっていないか確認をした。その結果、ミニチュアリレーを切り離しても同様にノイズが見られた。以上の調査結果からアースからノイズが回ってきているわけではなく、また途中に組み込んでいる BBA システムの機器も問題ではないことが分かった。次に電源側との相性を疑い確認した。電源スペックを Table 1 に示す。

今回使用した電源は DR の六極電磁石の補正コイルに使用されているものと同じものである。この電源は PID パラメータを Ethernet 経由で変更できるため各パラメータを変更しながら測定したがノイズは消えなかった。

Table 1: Power Supply Specification

| | |
|--------------------------|--|
| Input Voltage | 3-Phase 180/240 VAC (50-60 Hz) |
| Output current range | ± 10 A |
| Output voltage range | ± 50 V (± 48 V guaranteed) |
| Maximum output power | Up to 500W |
| Regulation Type | Current- or Voltage- Control |
| Drivers | EPICS |
| Communication interfaces | 1x Ethernet 10/100/1000 TCP-IP 2x SFP ports ARCnet protocol |
| Output current ripple | 30 ppm / FS |
| Output current stability | 50 ppm / FS |
| Output voltage stability | 50 ppm / FS |
| Switching Frequency | 100 kHz |
| Accuracy | < 0.05% |
| size | W482mm×D503mm×H43.5mm |
| Weight | 10 kg |

3.3 ノイズ対策

次に負荷側のインピーダンスを変化させ確認を行った。コイルを負荷回路に直列に接続し負荷の L 値を変えた。変更前の L 値は 0.898 mH で L 値を少しずつ上げていった。300 mH までは変化が見られなかったが徐々に変化し 600 mH でノイズが消え始めた。但し、日によってはノイズが見える場合があったため、負荷に L = 1556 mH のコイルを直列に接続することでノイズが完全に消え安定した出力ができるように改良した。

Figure 4 に負荷にコイルを接続する前のインピーダンス特性と L = 1556 mH のコイルを接続したときのインピーダンス特性を示す。

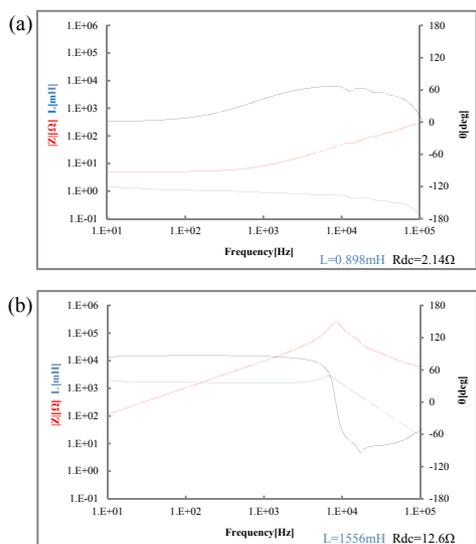


Figure 4: Impedance measurement with $L=0.898$ mH (a) and $L = 1556$ mH (b).

安定した出力にするために L 値を大きく変更することになり、これは他で使用している同じ電源負荷と比較しても大きいものであった。 L 値を下げられないか検討したが 600 mH 程度でノイズが発生するのであまり L 値は下げられなかった。なぜこのような大きい L 値が必要なのかは特定できていないが 2019 年 1 月からの運転が迫っていたため $L = 1556$ mH のコイルを接続しノイズが消え安定した出力が得られる状態で運用した。Figure 5 に改善前の出力波形と $L = 1556$ mH のコイルを接続し改善したときの出力波形を示す。

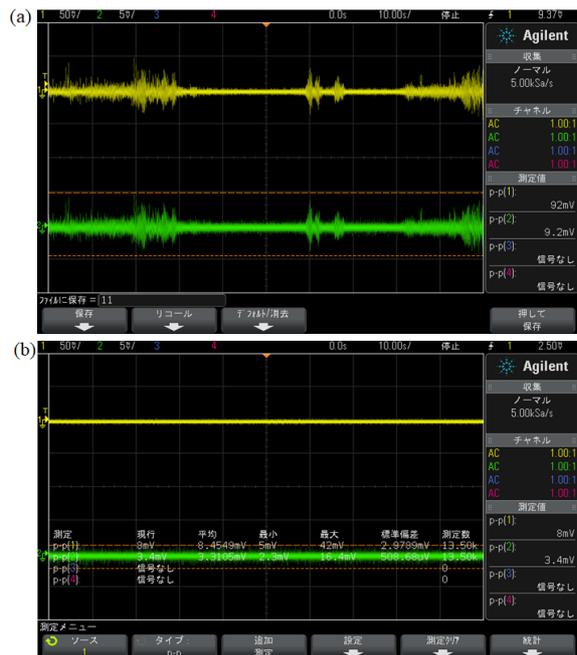


Figure 5: Output waveform of the BBA power supply with $L = 0.898$ mH (a) and $L = 1556$ mH (b). Yellow: PS Imon 1 V/A. Green: output 0.01 V/A.

Imon 端子で 5 A 出力時に 920 mA (92 mV) 見えていたノイズが 80 mA (8 mV) となった。これは同電源を他負荷で使用しているものと同程度であり、安定した出力と言える。

4. ビーム測定結果

DR の BPM83 台のうちのアーク部にある QF 電磁石近傍の BPM28 台と QD 電磁石近傍の BPM2 台の水平方向の測定を行った。測定方法は直線部にある単独ステアリング 2 台を使用して、測定したい BPM で水平方向に -1.0 mm \sim 1.0 mm まで 0.5 mm step で Beam 位置を変化させ、かつ、各点で四極電磁石の磁場(電流)を BBA 電源を使用し -5 A \sim $+5$ A 変化させて行った。Figure 6 に四極電磁石 QF1 の補助コイルを用いて行った、BPM MQF1 の BBA 測定の結果を示す。

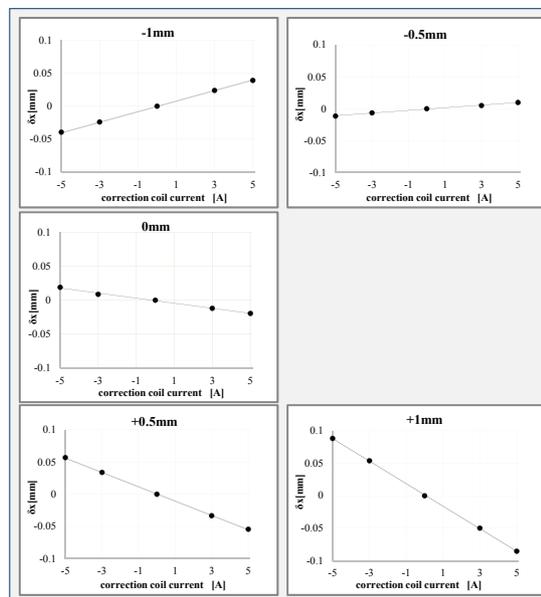


Figure 6: Response of the BPM reading (δx) respect to the excitation current (I) of the correction coil.

軌道を -0.5 mm から 0 mm に変更した時に傾きが逆になり、この間に磁場中心があることがわかる。この測定結果から各点での傾き ($\delta x/I$) を求め、横軸に測定点の BPM 値 (δx_i)、縦軸に $\delta x/I$ としたグラフを Fig. 7 に示す。

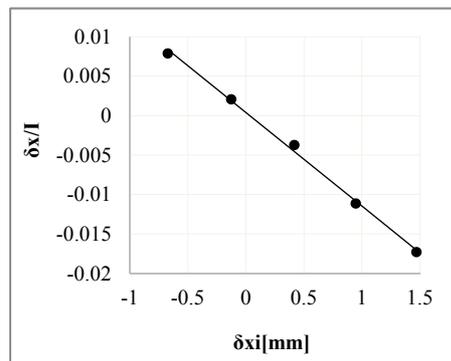


Figure 7: Gradient ($\delta x/I$) vs BPM reading (δx_i) of MQF1.

$\delta x/I$ がゼロでの BPM 値が測定した近傍四極電磁石の磁場中心を通った時の閉軌道の BPM 値とのずれ量となる。この測定から得られたずれ量に閉軌道の BPM 値 (BPM stan)を加えれば、ビームが磁場中心を通った時の近傍の BPM の読み値となる。精度を上げるためこの測定を各 BPM でも行い、ヒストグラム化した結果を Fig. 8 に示す。

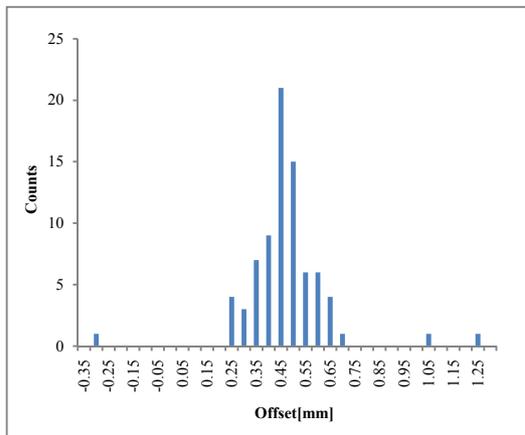


Figure 8: Horizontal offsets of MQF1 BPM evaluated by all BPMs installed in DR.

このヒストグラムから平均値を求めそれを BPM のオフセット量とした。アーク部 30 台分の水平方向の BBA 測定の結果をまとめたものが Fig. 9 である。BPM の読み値のプラスがリング外側、マイナスがリング内側である。一部外れているものもあるが全体的に各電磁石の磁場中心は 0.6 mm 程度リング外側にあるといえる。また BPM はチェンバーに固定されている。BPM が精度良くチェンバーに取り付けられているとすれば、チェンバーが電磁石の磁場中心よりもリング内側にあるともいえる。ビームの閉軌道と BBA の測定結果を比較するとほぼ同じ位置であるから、現在の閉軌道は概ね磁場中心を通っていると考えられる。

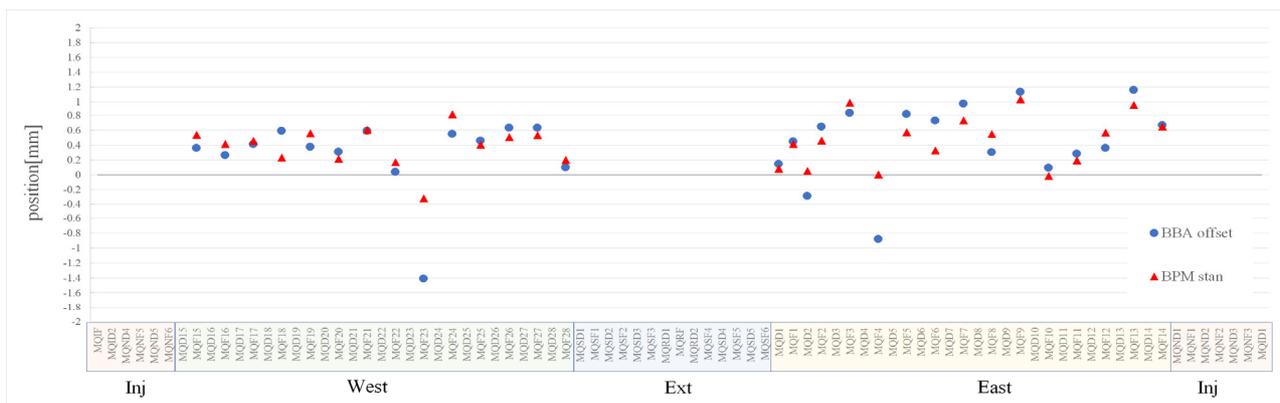


Figure 9: Comparison between BPM offset obtained with the BBA measurements and BPM reading of the closed orbit.

5. まとめ

SuperKEKB の DR において BBA システムを構築し測定をおこなった。測定した BPM は 83 台中 30 台の水平方向で BPM 中心から見て 0.6 mm 程度リング外側に磁場中心があることがわかった。また、現在の閉軌道は概ね四極電磁石の磁場中心を通っていると考えられる。今後の課題としては残りの BPM 水平方向、垂直方向の測定を進め BPM の offset 値として運用できるようにしていく。

謝辞

本発表の BBA 測定にあたり、三菱電機システムサービス株式会社の吉井兼治氏にご協力頂きました。深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] M. Masuzawa *et al.*, “Beam-based Calibration of Beam Position Monitors and Measurements of the Sextupole Magnet Offsets at KEKB”, Proceedings of EPAC2000, Vienna, Austria (2000) WEP5A16, p1780-1782.
- [2] H. Sugimoto, “Commissioning of SuperKEKB Positron Damping Ring”, Proceedings of J. Particle Accelerator Society of Japan, Vol. 15, No. 4, 2018, p238-244.