PASJ2018 THP113

SuperKEKB Phase-2 コミッショニングにおけるコリメータの稼働状況

OPERATIONAL STATUS OF COLLIMATORS IN SUPERKEKB PHASE-2 COMMISSIONING

石橋拓弥^{#, A)}, 照井真司 ^{A)}, 末次祐介 ^{A)}, 芳藤直樹 ^{B)} Takuya Ishibashi^{#, A)}, Shinji Terui^{A)}, Yusuke Suetsugu^{A)}, Naoki Yoshifuji ^{B)} ^{A)}KEK Accelerator Laboratory ^{A)}East Japan Institute of Technology Co., Ltd.

Abstract

In order to protect accelerator components and reduce background noise in Belle II detector, six collimators were additionally installed in SuperKEKB electron/positron rings before starting the Phase-2 commissioning. One collimator has two oppositely arranged movable jaws with RF shields, and they cut off beam halos and so on with approaching circulating beams. There are two types of the collimators: horizontal and vertical collimators in which the jaws approach the beam from the horizontal and vertical direction, respectively. The collimators functioned well during Phase-2 commissioning up to a beam current of approximately 860 mA and 800 mA for LER and HER, respectively. We report here the control system, the operation status, and the future plans of the collimators.

1. はじめに

SuperKEKB のメインリングは周長約 3 km ある電 子・陽電子衝突型蓄積リングで、7 GeV, 2.6 A (設計 値)の電子リング (High Energy Ring: HER) と4 GeV, 3.6 A (設計値)の陽電子リング (Low Energy Ring: LER)から構成されている。大電流ビームから各種 加速器コンポーネントを防護するため、また Belle II 測定器におけるバックグラウンドを低減するため、 両リングにはコリメータと呼ばれる真空機器が設置 されている。

SuperKEKB のために新たに開発されたコリメータ [1, 2]は 1 台のチェンバー内に対向する 2 枚の可動 ヘッドが収められている。コリメータには水平また は垂直方向からビームにアプローチする構造のもの を用意している。Phase-2 コミッショニング開始前に LER/HER にそれぞれ 3 台、計 6 台(うち水平方向 4 台、垂直方向 2 台)のコリメータを追加設置した (Figure 1)。 Phase-2 コミッショニング時には、 LER には新型のみが計 5 台、HER には新型が計 3 台 と KEKB 時から使用している旧型を含めて計 19 台 のコリメータが設置されたことになる。

Phase-2 コミッショニングはナノビームスキームの 検証、衝突調整、Belle II 測定器におけるバックグラ ウンド測定等を主目的とし、2018 年 3 月から 7 月に 行われた。Phase-2 コミッショニングにおける最大蓄 積ビーム電流は LER と HER でそれぞれ 860 mA と 800 mA であった。このコミッショニング中、コリ メータはほぼ絶えず調整が行われ、衝突点超伝導最 終収束電磁石 (QCS)のビームからの防護、衝突実 験運転 (ルミノシティランや物理ランなどと呼ばれ ている)時の Belle II 測定器におけるバックグラウン ドの低減に多大な貢献をした。

2. コリメータ制御

2.1 駆動システム

コリメータ制御システムの概略と駆動部の写真を Fig.2 と Fig.3 にそれぞれ示す。なお、コリメータ制 御に関する EPICS システムや MECHATROLINK-III 通信の詳細については文献[3]を参考されたい。加速 器運転中の加速器トンネル内は放射線レベルが高く、 位置決めモジュールやモータードライバーをコリ メータ本体近傍に設置することができない。そのた めこれらの機器は地上にある電源棟の制御室に設置 している。モータードライバーからコリメータ部へ は最長 300 m に渡ってケーブルを敷設しており、電



Figure 1: Locations of collimators in the SuperKEKB main ring.

[#]takuya.ishibashi@kek.jp

PASJ2018 THP113

圧降下を防ぐため 5 芯×8 mm²のケーブルを使用し ている。モーターはオリエンタルモーター社の 5 相 ステッピングモーターCRK564BKD-H50 を使用して いる。メーカー仕様ではこのようにモーターとドラ イバー間を離して使用することは保証されていない ため、実験室で約 300 m のケーブルを使用して事前 に試験をし、問題なくモーターが駆動可能なことを 確認している。



Figure 2: Schematic diagram of collimator control system.



Figure 3: Driving part of a horizontal collimator.

ボールねじは THK 社の BIF2805-10G0 を耐放射線 グリス (モレスコ社 Gk-1 または RG-42R-1) で置換 したものを使用している。リード長は 5 mm でモー タのステップ角は 0.0144°に設定しているため、可 動ヘッドは計算上最小 0.2 μ m/step で動く。また、 耐放射線性の観点からオールメタルのリミットス イッチ (オムロン社 XE-O22-2) を使用している。

放射光等からの熱負荷を取り除くために可動ヘッドにはステンレス製パイプが仕込んであり、運転時はそこに常に冷却水を流している。ビームが衝突して可動ヘッドが溶融し、そこから漏れ出た冷却水がビームパイプや真空機器を汚染する、という最悪のケースを想定し、可動ヘッドの冷却系はインターロック機構を備えている(Figure 4)。冷却水の往側側に励磁時開のソレノイドバルブ(SMC社INA-14-85-04)を取り付けている。ソレノイドバルブはAC100

V/DC24 Vを変換する中継盤を介して、PLCのデジ タル出力(DC24 V)と接続されている。コリメータ が設置されている区間の真空ステータス(区間内設 置の真空計複数台のセットポイントから作るロジッ ク)が正常であれば、ソレノイドバルブを自動的に 励磁して通水する。水漏れ等により真空ステータス が異常となればソレノイドバルブおよび当該区間を 挟む2台のゲートバルブを閉じ、被害を最小限に止 める。



Figure 4: Interlock system for the cooling water flowing in a movable jaw.

2.2 オペレータインターフェース・ツール

コリメータ制御システムのオペレータインター フェース (OPerator Interface: OPI) は Control System Studio で構成されている (Figure 5)。 コミッショニ ング状況に合わせて、またオペレータらからのリク エストを元にソフトウェアに順次機能を追加して いった。この OPI では各コリメータの目標位置設定、 位置決め開始リクエスト、位置決めの中止、ホーム ポジション (ホームスイッチ) 探索、エラークリア 等の制御が行える。また変位計として使用している Linear Variable Differential Transformer (LVDT)の指示 値の確認、リミットスイッチのステータス、エラー のステータス等を常時監視している。さらにコリ メータ近傍に設置したロスモニターの電圧値や、 ビーム電流、ライフタイム、コリメータ近傍の Beam Position Monitor (BPM) を使って計算したコ リメータでのビーム重心位置等のコリメータ調整時 に使用する情報も表示している。なお、Fig. 5 では LER に設置されたコリメータのみ抜粋しているが、 実際の OPI では両リング全てのコリメータを 1 枚の パネルで制御・監視できる。またコリメータの設定 をテキスト形式で保存、読み出せるようになってい る。



Figure 5: OPI for collimator control.

コリメータ制御ソフトウェアは大きく分けてモー ター制御用と OPI 用の2 つで構成されている。後者 は1)全てのコリメータに対して同時に位置決め操 作をする一括指令制御、2)外部トリガー信号やオ ペレータ操作の監視、3)設定ファイルの読み書き、 及び自動ログ出力等のファイル制御を担っている。

これらを連動させた機能の1つに、外部トリガー を基にコリメータヘッドを自動的に予め指定した目 標値まで動作させる auto set という機能がある。オ ペレータが入射用、物理ラン用、手動用の設定ファ イルをロードまたはセーブの操作を実行すると、ソ フトウェアではその時点での設定ファイルのパス情 報をログとして毎回保存するようにしている。ソフ トウェアが外部トリガー(入射モードまたは物理ラ ンモードの)信号を感知すると、保存されているパス 情報から各々のコリメータ用の設定値を抽出し、 モーター制御用ソフトウェアにパラメータとして引 き渡している。このとき運転開始リクエストも併せ て発行する仕組みにしているため、オペレータは一 切の OPI 操作をせずに、コリメータヘッドを自動で 入射または物理ランに合せた目標位置に移動させる ことができる。

位置決めの速度は通常 2000 Hz で行っている。こ れは1秒間位置決め動作をさせるとモーターは2000 ステップ回転し、コリメータヘッドが0.4mm移動す ることを意味する。EPICS シーケンサーでは、この うち1秒間に移動するステップ数と、実際に移動さ せるステップ数を設定して位置決め開始のリクエス トを発行する。例えば目標位置と LVDT の読み値の 差が 0.1 mm であれば、EPICS シーケンサーは「0.25 秒間、500 ステップ」という動作仕様書をモーター ドライバーに渡し、その後に位置決め指令を出す。 LVDT の指示値と目標位置の差が 0.5 mm 以内に入っ た場合は速度を 1000 Hz に落としている。なお、 Phase-3 コミッショニングではコリメータの変位に対 して Belle II 測定器のバックグラウンドが非常にセン シティブになることから、1 パルスのみヘッドを動 かすといった制御方法を今後実装する予定である。

OPI の裏では位置決め操作を実行するたびに操作 対象のリング名、操作した日時をファイル名にした コリメータ目標位置のリストを自動的に保存する機 能が動いている。

3. Phase-2コミッショニング時の状況

3.1 バックグラウンド低減

HER で Beam Exorcism for a Stable Experiment-2 (BEAST II)を用いたコリメータスタディを実施した 際のダイヤモンド測定器で測定したバックグラウン ドの一例をFig.6に示す。コリメータ位置の0はビー ムパイプ中心を意味しており、水平方向については リング外/内側を正/負、垂直方向についてはリング 上/下側を正/負とそれぞれ定義している。このとき のビーム電流は約 230 mA、フィルパターンは 6.12 RF バケットスペーシング(1RF バケット = 2 ns)、 1 トレイン、789 バンチで LER にはビームがない状 態であった。 図中①では衝突点上流に設置された垂直方向コリ メータ D01V1 (Figure 1 参照)の上下可動ヘッドを 2.2 mm まで閉めたところ、バックグラウンドが大き く減少していることがわかる。また図中②では同じ く衝突点上流に設置された水平方向コリメータ D01H4 (Figure 1 参照)の内外可動ヘッドを 15 mm 程度まで閉めていったところバックグラウンドが急 増した。これはヘッドの先端部で tip-scattering した 粒子が衝突点領域に到達したことによると考えられ る。

Phase-2コミッショニングの中盤頃まではビーム入



Figure 6: Correlation between the positions of several collimator heads and the background (ionizing dose) measured by a diamond sensor in BEAST II. Zero in the collimator position refers to the center of beam pipe.

射時と物理ラン時(ビーム蓄積時)のコリメータ設定 をその都度変えていた。入射時のコリメータは検出 器における入射ビームによるバックグラウンド低減 と QCS 防護のために使用されるが、入射効率を落と さないように調整される。一方、物理ラン時のコリ メータは蓄積ビームによるバックグラウンド低減と QCS 防護のために使用され、各種測定器に高電圧の 印加が可能な限りビームライフタイムを落とさない ように調整される。また、Optics の変更(衝突点に おけるベータ関数 β*の絞り込み)の度にコリメータ の再調整が必要だった。コミッショニング終盤は物 理ラン用のコリメータ設定で問題なく入射ができた ため、入射と物理ランで設定を変えることはなかっ た。

3.2 QCS 防護

コリメータの調整が十分されていなかった Phase-2 コミッショニング初期 には、入射調整、RF 位相調 整、衝突点 βの絞り込み等の過程で生じたビームロ スにより QCS クエンチが度々発生した。クエンチが 発生してしまうと再立ち上げに 1~2時間を要し、大 変なタイムロスとなる。

2018 年 7 月 8 日の運転時において、ビームがガウ ス分布していると仮定して、各コリメータと QCS の アパチャが何 σ に相当しているかを Fig. 7 は示して

PASJ2018 THP113

いる。このように QCS よりもアパチャが小さくなる 場所をコリメータ部で作ることによりクエンチの発 生頻度は劇的に下がった。

LER に入射する際にクエンチが発生することが 度々あった。これは LER に垂直方向コリメータが1 台しか設置しておらず、この場所だけではクエンチ を防ぎきれていないことに意味している。キッカー タイミング等入射調整が不十分だったこともあるが、 特にコリメータヘッド先端で tip-scattering された粒 子が QCS に入射した可能性が指摘されている。その ため急遽、LER 用垂直方向コリメータ1台の追加製 作に取り掛かることとなった。このコリメータは Phase-3 コミッショニング開始前に衝突点上流のアー ク部に設置する予定である。



(a) HER





3.3 ヘッド損傷と対策

2018年6月25日11時20分頃にLERの衝突点上 流に設置された垂直方向コリメータD02V1(Figure 1 参照)において急激な圧力上昇を伴うビームアボー トがあり、同時にQCSクエンチが発生した[4]。QCS を再立ち上げし、入射調整・衝突調整等を実施した 後、6月26日の早朝に物理ランを試みたがBelle II測 定器でのバックグラウンドが非常に高く、各測定器 に高電圧を印加できなかった。LER 単独で運転して もバックグランドは高く、またコリメータを調整し てもバックグラウンドが下がることはなかった。そ の後、D02V1 を現場で確認したところ、下側ヘッド 先端タングステン部全長に渡ってビーム進行方向に 傷が入っていた。また上側ヘッドの先端には下側 ヘッドでスパッタされたタングステンが蒸着したと 見られる形状を確認した (Figure 8)。何らかの原因 でビーム軌道が急変し、ビームがコリメータに直撃 したと推測されているが、アボート直前にビーム振 動や軌道逸脱は観測されておらず、原因はわかって いない。

この問題への対処法を検討するため、ヘッドの損 傷箇所を回避するように D02V1 部でビーム軌道に水 平方向のバンプを立て、損傷していない箇所がコリ メータとして機能しているかを調査した。D02V1 近 傍の BPM を使って計算した D02V1 での水平方向 ビームポジション、D02V1 のコリメータヘッドの位 置、電磁カロリメーター(Electromagnetic Calorimeter: ECL) のバックグラウンドレベルを Fig. 9 に示す。D02V1 においてビーム軌道をリング内側 へ約 1.2 mm、2 段階で動かしている。その後、 D02V1 を 3.5 mm→2.6 mm まで閉めると ECL のバッ クグラウンドレベルが急落することがわかった。こ の水平方向バンプでも運転可能なことは分かったが、 ルミノシティを減少させてしまう可能性があったこ とから軌道は元に戻し、D02V1 チェンバー本体をリ ング外側に1.5~2mmシフトすることで損傷箇所を回 避させた。可動ヘッドの交換も検討したが、その場 合加速器の運転が可能な状態になるまでには1)当 該区間の窒素パージ、2)コリメータの切り離し、 3) ヘッドの交換、4) コリメータのつなぎ込み、 5) 粗排気、6) リークチェック、7) イオンポン プベーキングおよび NEG 活性化、という行程が必要 となる。行程2)は垂直方向コリメータ下側のヘッ ドを交換する際に必要な作業で、ビームラインから コリメータを切り離した後に架台に取り付けられた 回転機構を使ってコリメータ本体を回転させ、可動 ヘッドを交換する作業である。これは多大なタイム ロスになることから、ヘッドの損傷についてはコ ミッショニングの最後(2018年7月17日9時)ま でコリメータ本体のシフトで対応した。

6月16日17時50分頃にはHERでこれと同様の 垂直方向コリメータ(D01V1)部での圧力急上昇を



(a) bottom side

(b) top side

Figure 8: Damages observed on the heads at (a) bottom and (b) top sides of vertical collimator D01V1 after a large pressure burst accompanied by beam abort and QCS quench.

伴う QCS クエンチが発生した。その後、D01V1 の ヘッド先端を現場で確認したところ、ビーム進行方 向に傷が入っていた。この損傷による Belle II 測定器 でのバックグラウンド増大は確認されなかったため、 コミッショニングの最後まで対処しなかった。LER と同じく軌道が急変してビームがヘッドに直撃した と推測されるが、これも原因は不明である。



Figure 9: Relations between the horizontal beam position at D02V1 collimator, the position of top-side head of D02V1 collimator, and the background (hit rate) measured by ECL detector.

3.4 可動ヘッドの動作不良

Phase-2 コミッショニング中、LER 用垂直方向コリ メータの上側可動ヘッドが開けなくなるという事象 が数回発生した。この場所は大気圧で約 100 kg、 ヘッド自身で約 7 kg の重量が鉛直方向(可動ヘッド が閉まる方向)にかかっており、当初は電圧降下に よるモーターのトルク不足が疑われた。しかし実際 にはボールねじおよびステッピングモータにキーが 付いていないために空回りが起こっていることが判 明した。キー付きのものに交換して以降、空回り問 題は起こっていない。なお、このコリメータ以外に キー構造を持っていないものは LER の Phase-1 前に 設置した水平方向コリメータ 2 台があり、これらに ついては空回りの問題が起こってはいないが、順次 キー付きの機器に交換する予定である。

3.5 放射光によるヘッドの温度上昇と変位

HER の水平方向コリメータ D01H4 のリング内側には直上流の偏向電磁石で発生した高強度(ビーム 電流 2.4 A で最大 23.4 W/mm²)の放射光が照射され る(詳細は文献[4]参照)。この可動ヘッド先端には 熱電対が埋め込んであり、常時温度のモニターをし ている。

Figure 10 には7月15日12時~7月16日2時の ヘッド先端温度と変位計の指示値を示す。この期間 にコリメータの調整はされておらず、最大ビーム電 流は約700mAで、ヘッド先端の温度は最高約72℃ まで上昇している。温度と相関して変位計の指示値 が約50 µm 変化している。可動ヘッドは大気圧がか かっており、また駆動機構にはノーバックラッシの ボールねじを用いて遊びがない。図中にはヘッド先 端温度から概算した熱変位量もプロットしている。 ここでヘッドの材質は銅として線膨張係数 1.77× 10⁻⁵℃⁻¹、ヘッドの可動軸方向の厚みを 125 mm とし、 水路構造は無視している。測定結果が計算結果に凡 そ乗っていることからコリメータ本体が熱膨張・収 縮をしていると考えられる。



Figure 10: Correlation between the position of inside head and the temperature of D01H4 collimator.

4. 今後の予定

コリメータヘッドを詳細調査し、損傷が見られる 箇所については予備品と交換する。Phase-3 コミッ ショニング開始前までにコリメータを HER に水平方 向1台、LER に水平方向3台、垂直方向1台追加す る予定である。またコリメータ設置場所のベータ関 数の位相を一様に分散させるため、既設の水平方向 コリメータ1台を移設する予定である。また、放射 光の強度が高い D01H4 コリメータ部に増圧ポンプを 設置し、流量の増強試験を行う。

謝辞

コリメータの運転に関して多大なる助言、協力を 頂いた SuperKEKB コミッショニンググループのみな さま、Belle II コミッショニンググループのみなさま に深く感謝いたします。

参考文献

- T. Ishibashi *et al.*, "Design of collimator for SuperKEKB positron ring", Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, Japan, Aug. 3-5, 2013, SUP103, pp. 1191-1195.
- [2] T. Ishibashi *et al.*, "Low Impedance movable collimators for SuperKEKB", Proceedings of IPAC2017, Copenhagen, Denmark, May. 14-19, 2017, WEPIK009, pp. 2929-2932.
 [3] N. Yoshifuji *et al.*, "Development of collimator control
- [3] N. Yoshifuji *et al.*, "Development of collimator control system for SuperKEKB with MECHATROLINK-III communication", Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsuruga, Japan, Aug. 5-7, 2015, WEP107, pp. 782-786.
- [4] S. Terui *et al.*, "SuperKEKB メインリングのコリメータ ヘッドの開発", Abstracts of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 7-10, 2018, THP114.