

## 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<sup>#, A)</sup>, 照井真司<sup>A)</sup>, 末次祐介<sup>A)</sup>, 芳藤直樹<sup>B)</sup>

Takuya Ishibashi<sup>#, A)</sup>, Shinji Terui<sup>A)</sup>, Yusuke Suetsugu<sup>A)</sup>, Naoki Yoshifuji<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup>KEK Accelerator Laboratory

<sup>A)</sup>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。

<sup>#</sup>takuya.ishibashi@kek.jp

#### 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

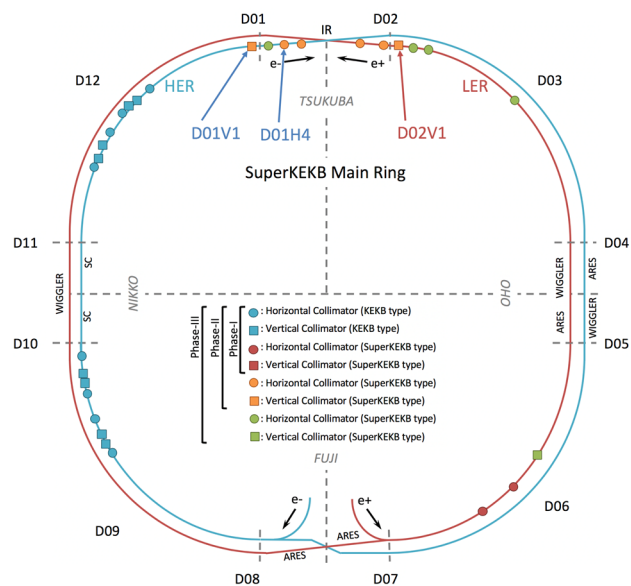


Figure 1: Locations of collimators in the SuperKEKB main ring.

圧降下を防ぐため 5 芯×8 mm<sup>2</sup> 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。

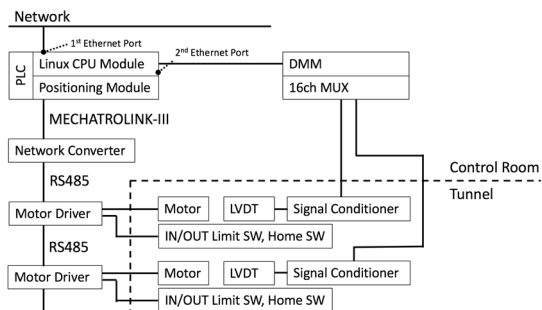


Figure 2: Schematic diagram of collimator control system.

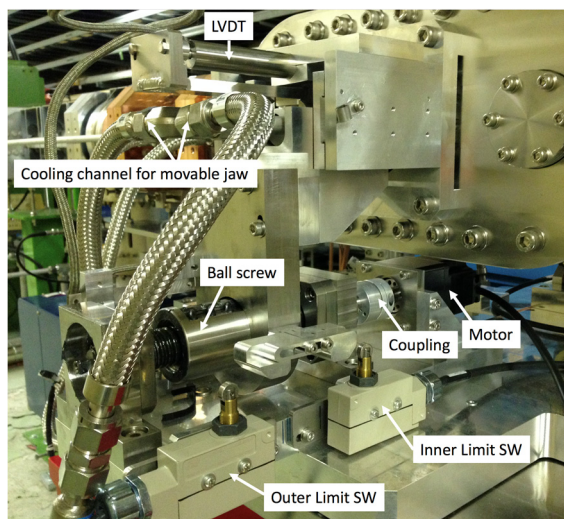


Figure 3: Driving part of a horizontal collimator.

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 でモーターのステップ角は 0.0144° に設定しているため、可動ヘッドは計算上最小 0.2 μm/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-Q22-2) 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)。冷却水の往側に励磁時開のソレノイドバルブ (SMC 社 VXD242KB) を、還側に逆止弁 (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。

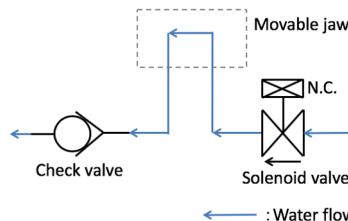


Figure 4: Interlock system for the cooling water flowing in a movable jaw.

## 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。

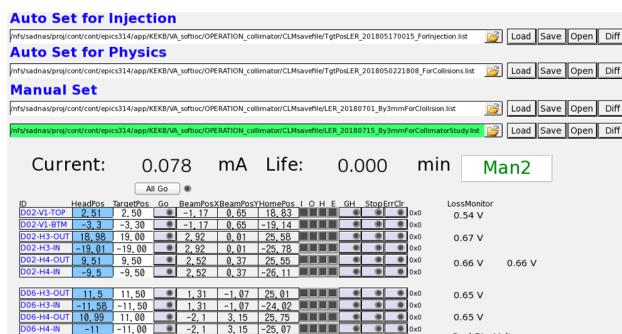


Figure 5: OPI for collimator control.

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、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 0.4 mm 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

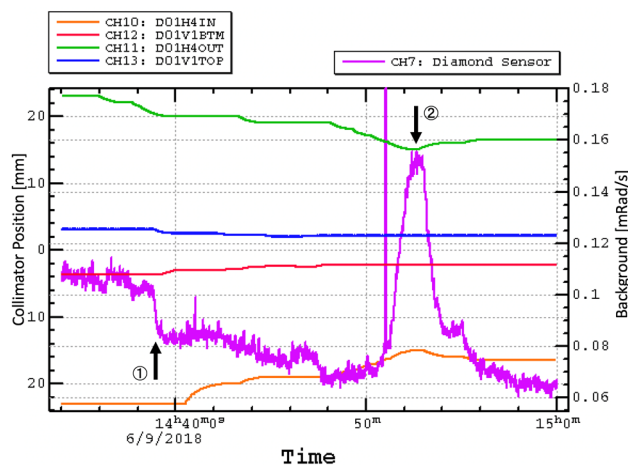


Figure 6: Correlation between the positions of several collimator heads and the background (ionizing dose) measured by a diamond sensor in BEAST II. Zero in the collimator position refers to the center of beam pipe.

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  $\beta^*$  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

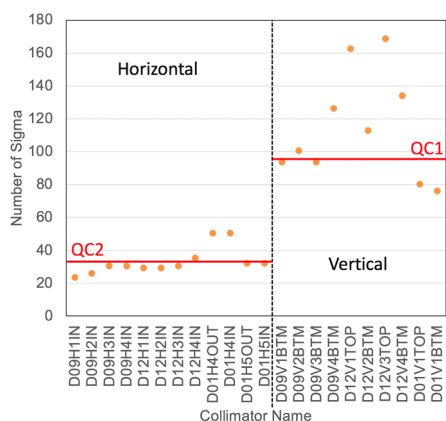
コリメータの調整が十分されていなかった Phase-2 コミッショニング初期には、入射調整、RF 位相調整、衝突点  $\beta$  の絞り込み等の過程で生じたビームロスにより QCS クエンチが度々発生した。クエンチが発生してしまうと再立ち上げに 1~2 時間を要し、大変なタイムロスとなる。

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  $\sigma$  に相当しているかを Fig. 7 は示して

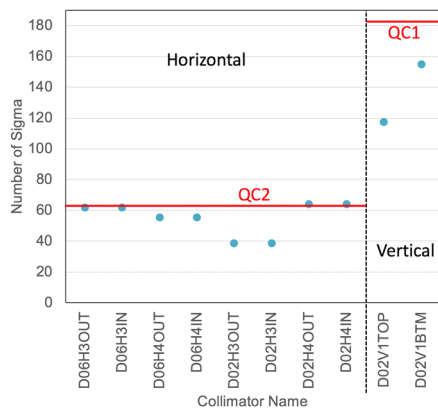


いる。このように QCS よりもアパチャが小さくなる場所をコリメータ部で作ることによりクエンチの発生頻度は劇的に下がった。

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ケ部に設置する予定である。



(a) HER



(b) LER

Figure 7: Physical apertures at each collimator head (orange or blue dots) and QCS (QC1 and QC2, red lines) for (a) HER and (b) LER.

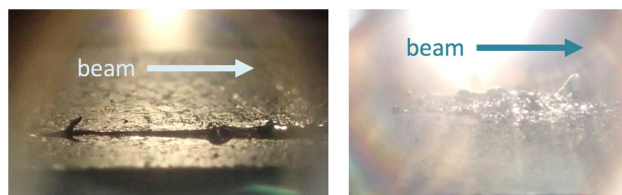
### 3.3 ヘッド損傷と対策

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ウンドは高く、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 1.5~2 mm 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) 当該区間の窒素ページ、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) イオンポンプペーキングおよび 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。

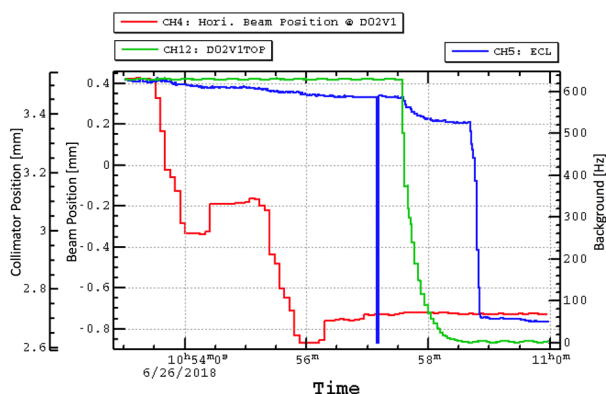


Figure 9: Relations between the horizontal beam position at D02V1 collimator, the position of top-side head of D02V1 collimator, and the background (hit rate) measured by ECL detector.

### 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/mm<sup>2</sup>）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 700 mA で、ヘッド先端の温度は最高約 72°C 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ュの

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  $1.77 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 、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。

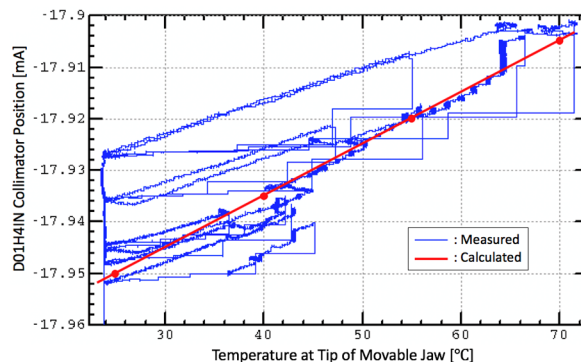


Figure 10: Correlation between the position of inside head and the temperature of D01H4 collimator.

## 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

- [1] 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 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.