

## SuperKEKB メインリングのコリメータの現状

### STATUS REPORT OF COLLIMATOR OF SuperKEKB MAIN RING

照井真司<sup>#, A)</sup>, 石橋拓弥<sup>A)</sup>, 末次祐介<sup>A)</sup>, 白井満<sup>A)</sup>, 芳藤 直樹<sup>B)</sup>

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

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

<sup>B)</sup> East Japan Institute of Technology Co., Ltd.

#### Abstract

Collimators for SuperKEKB have been designed to fit an antechamber scheme in the vacuum system. They were installed to suppress backgrounds in the particle detector named Belle II and also to protect various components from the damage due to the hitting of steered beam. The features of the collimators are low-impedance, high durability for high current and tapered from the end to the center in order to avoid trapped Higher Order Mode (HOM) electromagnetic field excited by beams. They contributed the steady operations during the commissioning. We report some problems found in the commissioning.

#### 1. はじめに

SuperKEKB の目標ピークルミノシティは KEKB の約 40 倍の  $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  である。この目標を実現するために SuperKEKB では蓄積電流を 2.6 A(電子リング)、3.6 A(陽電子リング)、また、約 5 mm(電子リング)、約 6 mm(陽電子リング)という短いバンチ長さでデザインしている。コリメータはビーム軌道近くの手すりを削る装置で、素粒子検出器(Belle II)のバックグラウンドを低減するために使用される。また各加速器コンポーネントを周回ビームから防護する目的でも使用される。ここで使用されるコリメータの特徴は、大電流に耐えることができ、かつ、バンチ長が短いので低インピーダンスであること等が挙げられる[1]。今年会では、Phase-2 運転時に損傷したコリメータヘッドの交換、Phase-3 春季運転前の新規コリメータインストール時のトラブル、運転中のトラブル等について報告する。

#### 2. 運転時に損傷したコリメータヘッド

2018 年 3 月から 7 月まで行われた Phase-2 運転にて、電子リング・陽電子リング共に Fig. 1 に示すような SuperKEKB 用 Vertical 型コリメータはビームが衝突して損傷した。Vertical 型コリメータだけ損傷した理由は、Vertical 型コリメータはビーム中心から 2 mm あたりまで近づけて運転を行い、Horizontal 型コリメータは 10 mm あたりまで近づけて運転していたため、振動したビームはアパーチャーが小さいほうのコリメータに衝突したと予測されている[2]。

Figure 2 に示すようにコリメータヘッドの先端には硬く、融点が高いタングステンを使用している。タングステンの融点が高いが、 $1300^\circ\text{C}$ を超えたあたりで脆化することが知られている。脆化したタングステンは、手で触れるだけで剥がれるもろい素材になってしまう。Figure 3 に、Phase-2 運転時に損傷したヘッドの写真を示す。Figure 3 (a)の方に、ビームが当たり、蒸発したものが、Fig. 3(b)の方にくっついたと推測している。

ビームで損傷したタングステンを交換するときの問題点は、放射化した物質が拡散する可能性があることである。大気開放後は、放射線担当者がチェンバー内を丁寧に清掃作業する必要があった。また、服などに付着する危険性があるため作業時には、使い捨ての作業着を装着して行った。Phase-2 運転時に損傷したヘッドの交換時の作業の写真を Fig. 4 に示す。マスクは内部被爆を防ぐために装着しており、作業終了後に作業員全員のマスクのサーベーターを行っている。交換を行ったコリメータは、衝突点から陽電子リング上流に約 80 m 離れた D02V1 という場所と、衝突点から電子リング上流に約 60 m 離れた D01V1 という場所である。

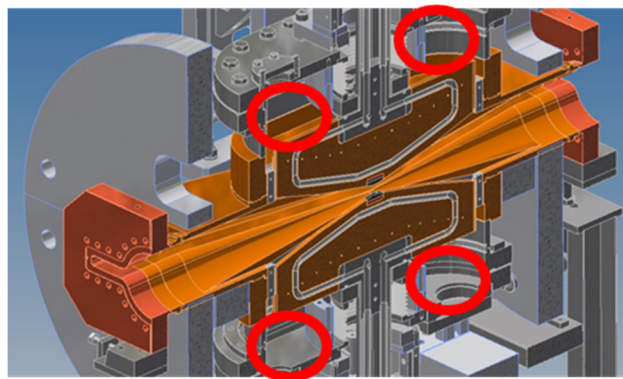


Figure 1: Vertical collimator for SuperKEKB.

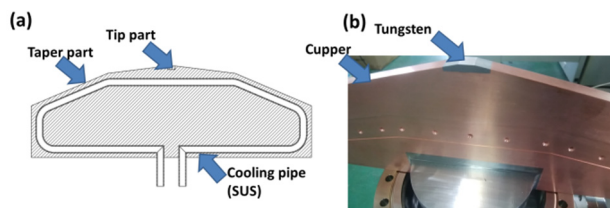


Figure 2: (a) Schematic drawing of collimator jaw (cross-sectional view), and (b) the photograph of collimator jaw.

<sup>#</sup> sterui@mail.kek.jp

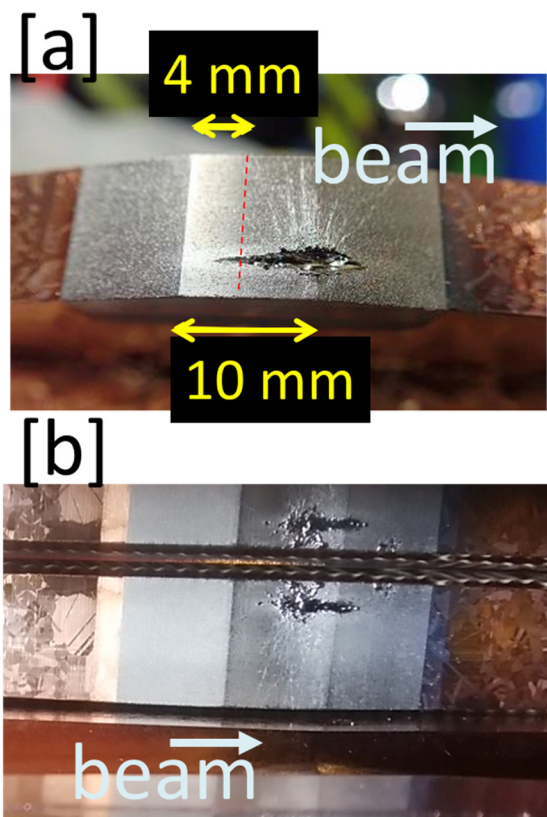


Figure 3: The photograph of (a) a D02V1 bottom jaw, (b) a D02V1 top jaw.



Figure 4: Replacement work of D02V1 collimator jaw.

ここまで Phase-2 運転時のコリメータヘッドの損傷事例を書いてきたが、残念ながら Phase-3 春季運転でもコリメータヘッドが損傷する事象が起こった。原因はビームがダストに当たり、エネルギーを失ったビームが振動した結果、アパーチャーが狭いコリメータヘッドに衝突したと私個人は予測している。ダストが原因と考えられる理由

は、ビームにダストが衝突したときに、蒸発したと考えられる真空バーストが観測されたことと、ビームロス前にビーム振動が観測されず、急激に beam intensity の変化が観測されたためである。この beam intensity の急激な変化は、ダストと衝突したものと推測される。ただ、これは私個人の予測であり、今の段階では確実にダストが原因かはわかっていない。Figure 5 がコリメータののぞき窓から観察した写真である。損傷後最初のビーム周回時には、検出器で大きな background が観測され、損傷したコリメータ部分に約 1 mm の水平軌道バンプを立てることで、background が減少して、physics run を再開することができた。そのときの background の変化を、Fig. 6 に示す。Background signal (スケールは右側縦軸) を赤線で、その時のビーム電流値 (スケールは左側縦軸) を青線で示した。水平軌道バンプを立てる前の時間を青丸部分で、水平軌道バンプを立てた後を橙丸部分で示した。大体同じビーム電流の時に約半分近く Background signal が減少していることがわかる。これらのことから、損傷したコリメータヘッドが検出器の大きな background source になっていることがわかった。

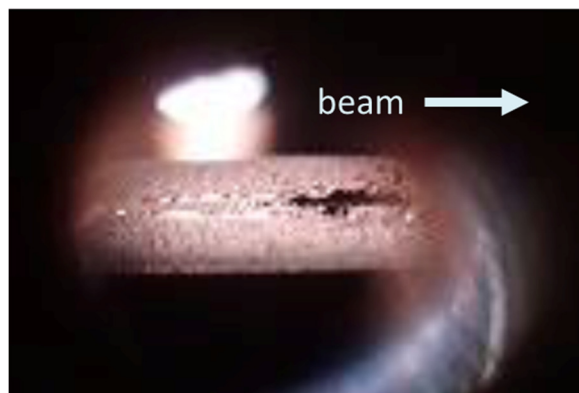


Figure 5: Photograph of a bottom jaw in D02V1 taken from a view port.

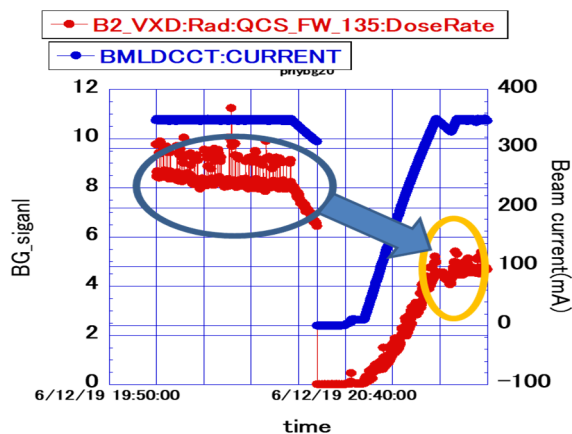


Figure 6: Background signal before and after beam orbit bumped.



### 3. Phase-3 春季運転前の新規コリメータインストール時のトラブルとコリメータ付近の圧力値

#### 3.1 Phase-3 春季運転前の新規コリメータインストール時のトラブル

Phase-3 春季運転前の新規コリメータインストール時に、真空リークテスト時にトラブルが起きた。時系列毎に以下に箇条書きしていく。

- i. コリメータ製造時の真空リークテストでは  $E-12 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{sec}$  以上の漏れがないことを確認した。
- ii. コリメータインストール時の真空リークテストも  $E-12 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{sec}$  以上の漏れがないことを確認し、冷却水の通水を行った。
- iii. 真空ゲージに電圧を印加しようとしたところ圧力が高く印加することができなかった。D02H1 コリメータ傍で  $E-1 \text{ Pa}$  以上で、その両側で  $E-2 \text{ Pa}$  台であった。この付近のフランジやろう付け部からのリークを疑い、真空リークテストを行ったが、リークを観測することができなかった。
- iv. D02H1 コリメータヘッドからの漏れを疑い、その区間の冷却水を止め、水抜きしたところ圧力値が  $\sim 1/10$  に下がった。ヘッド部の冷却水路内をエアで吹いて水を出し、ヘリウムをガンで入れたが反応はなかった。冷却水路をヘリウムで  $3 \text{ kgf cm}^{-2}$  まで加圧したところ、 $1E-5 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{sec}$  の漏れを感知したため、ヘッドを予備品と交換することにした。リークのあるコリメータヘッドの根元部分には、ステンレスと銅の HIP 部にシミらしきものがあった。
- v. 実験室にてスニファー法でシミがあった部分からのリークを確認した。また、スヌープ塗布で泡を確認した。スヌープ実施の写真を、Fig. 7 に示す。

先述のように、製造完了時とインストール直後のリークテストで  $E-13 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{sec}$  以下であることは確認を行っている。したがって、冷却水配管からの真空部への水漏れが起きた原因として、貼りついていた金属が、水を流したことにより剥がれてしまったのではないかと私は推測している。このコリメータヘッドは、製造時に問題があり、溶接で補修したものであった。今後はインストール前に冷却水を流して、リークテストを行う予定である。

#### 3.2 コリメータ付近の圧力値

Phase-3 春季運転時の検出器の background は、LER の真空が主要素である。特に、上で述べた水が漏れた部分を含めコリメータ部の圧力値がなかなか下がっていない点が問題視されている。この理由として、他のチェンバーはインストールする前にベーキングしているが、コリメータは製作中のろう付け時に真空漏れする事態がたびたび起きたので、リスク回避のためベーキングを行わずにインストールしたことが考えられる。もう 1 つの理由としては、Fig. 1 の赤丸部はコリメータヘッド後ろ側にあり、ポンプなどは設置されていない部分であり、RF コンタクトの関係でコンダクタンスも小さくなっているため、この部分

の圧力が悪い可能性が疑われている。

我々は、検出器の background 改善のために、Phase-3 春季終了時に、トンネル内にてベーキングを行うことを決断した。ベーキングは、コリメータを断熱材付のアルミの箱で囲い、熱風機を使用して行う。Figure 8 にベーキング時の写真を示す。現在は、ベーキングの条件出しを行っている最中である。

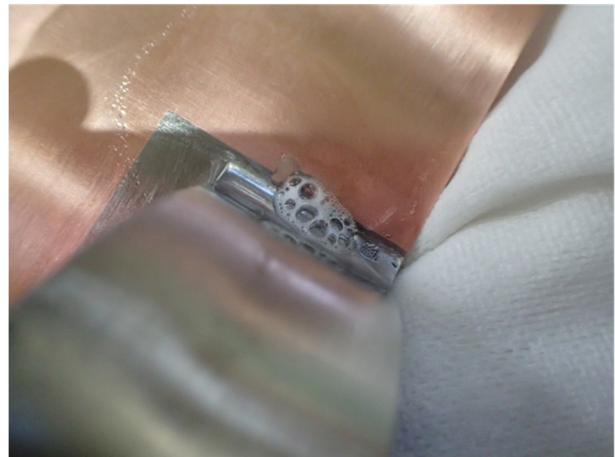
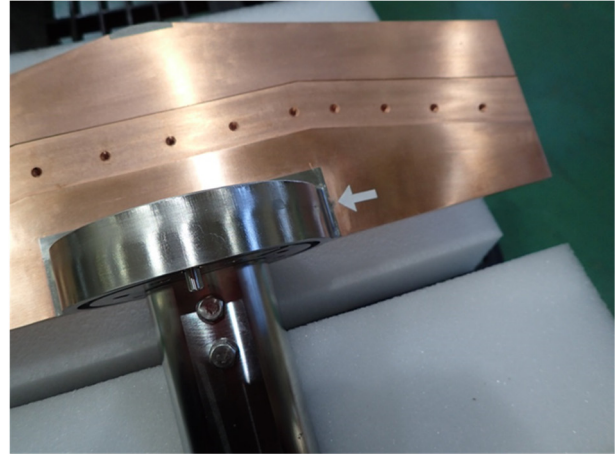


Figure 7: Water leakage point found by using soap bubble.



Figure 8: Collimator baking set up.

#### 4. ヘッド先端材質の変更

Phase-2 運転時に損傷したヘッドの交換時に、損傷したヘッドを観察した結果、1 radiation length を過ぎた後からタングステンが蒸発していることがわかった。ヘッド交換の際の放射線の安全と大気開放の時間削減のために、Phase-2 運転後にヘッド材質の変更とヘッドの長さの変更について検討を行った。ここでは、タングステンからタンタルに材質の変更が可能かを検討した結果を報告する。タンタルを検討した理由は、銅との接合が容易なこと、ビームが衝突した際に脆化(水素脆化する可能性はあるが)する可能性が低いこと、タングステンほどではないが高融点で、radiation length が短いこと、J-PARC での使用実績等が挙げられる。タンタルの懸念点として、タングステンに比べて電気伝導性が悪いため、ビームまでコレメータヘッドを 2 mm 位まで近づける SuperKEKB では、インピーダンスが問題になる可能性がある。そこで、Particle Studio を用いてヘッドの材質変更がビームに及ぼす影響を計算した。コレメータヘッド先端とビームの gap は 2 mm として計算した。Table 1 にあるように、ヘッドの材質をタンタルに変えてもロスファクター、キックファクター共に影響は 2 % 以内に収まっていることがわかり大きな影響がないことがわかった。

また、1 radiation length を過ぎた後からタングステンが溶けだしていることから、先端を短くすると蒸発する体積が少なくなることが予測される。先端を短くした場合、長い場合と比べてコレメータ本体での energy deposit は減少して、エネルギーを失った粒子は直下流の偏向電磁石内のチェンバー内に落ちる量が増えると予測される。最初の設計の段階から先端を短くしなかった理由は、先端が長いものに比べて、衝突点直前のコレメータでは検出器に入る粒子の量が多くなるという計算結果があったためである。損傷している Vertical 型コレメータは、検出器直前のコレメータでないため先端を短くしたコレメータが使用できないかを検討を行っている。Table 1 に先端が 10 mm から 5 mm に短くした場合のロスファクター・キックファクターが示してある。ロスファクター、キックファクター共に減少していることから、先端を短くしたコレメータヘッドが使用可能な場合、Transverse Mode Coupling Instability 対策[1]にもなることがわかる。現在、垂直方向コレメータヘッドとして、先端が 5 mm で、先端の材料がタンタルのものを 1 セット製造している。今年度の冬のシャットダウン時にインストールを行い、効果を検証する予定である。

Table 1: Loss Factor and Kick Factor

Material	Tip length [mm]	Loss factor [V/pC]	kick factor [V/pC/mm]
Tungsten	10	6.22E-2	8.00E-2
Tungsten	5	3.04E-2	6.22E-2
Tantalum	10	6.25E-2	8.14E-2

#### 5. 結論

以下の点を結論として述べる。

1. Phase-2 運転で損傷したコレメータヘッドを交換して観察することで、1 radiation length を過ぎた後から蒸発していることがわかった。
2. Phase-3 春季運転前にインストールしたコレメータヘッド 1 台から真空中に冷却水漏れが発生した。現在このコレメータの圧力値改善を目標に、ベーキング作業を行っている。
3. コレメータヘッドの先端の材料を、タングステンからタンタルに変更が可能かの計算を行った。計算上は問題ない予定なので、1 セット製造している。今年度の冬のシャットダウン時にインストールを行い、効果を検証する予定である。

#### 謝辞

コレメータ作業に関して多くの助言、協力を頂いた KEKB 加速器グループの皆様、SuperKEKB コミッショニンググループの皆様、放射線科学センターの皆様に感謝致します。

#### 参考文献

- [1] T. Ishibashi *et al.*, “Low Impedance Movable Collimators for SuperKEKB”, Proceedings of IPAC’17, Copenhagen, May 14-19, 2017, pp.2029-2032.
- [2] T. Ishibashi *et al.*, “SuperKEKB Phase-2 コミッショニングにおけるコレメータの開発と稼働状況”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Aug. 7-10, 2018, THP113.