

SuperKEKB における突発的ビームロス対策のための真空作業

VACUUM WORKS AS A COUNTERMEASURE AGAINST SUDDEN BEAM LOSS IN SuperKEKB

柴田恭^{#, A, B)}, 石橋拓弥^{A, B)}, 白井満^{A)}, 照井真司^{A)}, 秋田尚樹^{A)}, 姚慕蠡^{A)}, 末次祐介^{A)}
Kyo Shibata^{#, A, B)}, Takuya Ishibashi^{A, B)}, Mitsuru Shirai^{A)}, Shinji Terui^{A)}, Naoki Akita^{A)},
Mu-Lee Yao^{A)}, Yusuke Suetsugu^{A)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{B)} The Graduate University for Advanced Science (SOKENDAI)

Abstract

At SuperKEKB, sudden beam loss (SBL) has hindered stable operation, making the identification of its causes and the implementation of countermeasures an urgent priority. During the 2024 summer shutdown, the positron ring (low energy ring, LER) wiggler beam pipes equipped with electron-clearing electrodes were inverted vertically as a countermeasure against SBL; however, the 2024 autumn run (2024c run) showed that this measure had no effect on reducing the SBL frequency. In the same run, thin black film-like deposits were discovered inside the beam pipes of the LER wiggler sections, and their removal was found to reduce the frequency of SBL. For the 2025c run, scheduled to begin in autumn 2025, inspections of the beam pipe interiors are being carried out in the interaction region and LER wiggler sections, where black films are considered likely to form. When such deposits are found, they are removed prior to beam operation.

1. はじめに

KEK つくばキャンパス内にある SuperKEKB 加速器 (SuperKEKB) [1]は、KEK B ファクトリー (KEKB, 1998 年から 2010 年まで運転)を高度化改造した高ルミノシティ電子・陽電子コライダーである。SuperKEKB は、入射器、陽電子ダンピングリング、ビーム輸送ライン、主リング (MR)から成る加速器の複合システムであり、MR は周長約 3 km の 7 GeV 電子リング (HER)と 4 GeV 陽電子リング (LER)で構成されている。SuperKEKB プロジェクトの目的は標準理論を超える新しい物理を探索することであり、MR の衝突点に設置された Belle II 測定器 (Belle II) により B 中間子などの崩壊過程の精密測定が行われている。SuperKEKB は、ルミノシティを KEKB 実績値の数十倍にすることを目標としており、そのためにナノビーム衝突方式が世界で初めて実用化された。本格的な物理実験のための Phase-3 運転は 2019 年 3 月から実施されており、2024 年には長期シャットダウン (LS1, 2022 年 7 月から 2024 年 1 月まで)後の初めての運転である 2024ab 運転 (1-6 月)と 2024c 運転 (10-12 月)が行われた。次の運転 (2025c 運転)は、2025 年 11 月に開始する予定である。

SuperKEKB では、Phase-3 運転でその性能が上がるにつれて、ビームの一部が数ターンで失われる「突発的なビーム損失 (Sudden Beam Loss, SBL) [2-4]」の発生頻度が徐々に増加するようになってきた。大電流蓄積時の SBL は、Belle II やコリメータを損傷する可能性があり非常に危険であるだけでなく、最終集束超伝導電磁石クエンチを引き起こすこともあるため加速器の安定運転の弊害にもなっている。実際に 2024ab 運転では、SBL により Belle II の崩壊点検出器 (PXD) [5]の一部が損傷しており、その後は PXD の電源を落として運転を行うことを余

儀なくされている。そのため、2024 年は加速器スタッフと Belle II スタッフによる強力な協力体制のもと、SBL の原因調査と対策を最重要課題として取り組んできた。SBL の発生頻度は、HER よりも LER の方が多く、これまで主に LER で対策が施されている。本稿では 2024-2025 年に LER で SBL 対策として実施した真空作業について報告する。

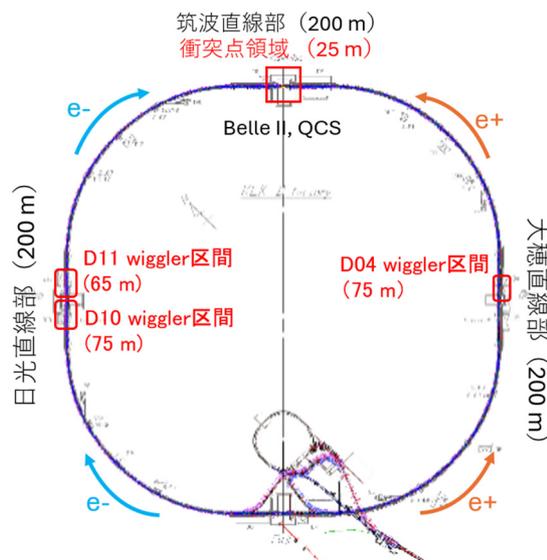


Figure 1: SuperKEKB Main Ring (MR). LER has wiggler sections in Oho straight section (D04) and Nikko straight section (D10, D11).

2. 2024 年の対策

2024ab 運転中に LER で発生する SBL に関して以下のことが明らかになった[3, 4]。

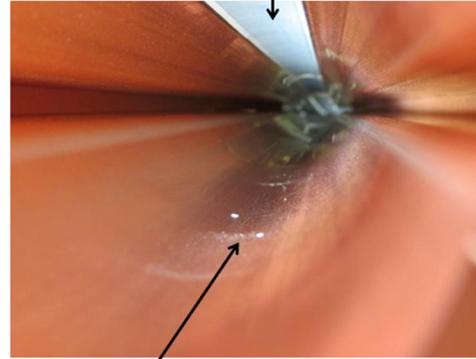
[#]kyo.shibata@kek.jp

- SBL 発生時に Wiggler 部で真空跳ねが起きていることが多い
- Wiggler 部のビームパイプに衝撃を与えると、SBL を起こすことができる

LER は、大穂直線部 (200 m) に D04 Wiggler 部 (約 75 m) を、日光直線部 (200 m) に D10 Wiggler 部 (約 75 m) と D11 Wiggler 部 (約 65 m) を有している。Figure 1 に LER の Wiggler 部の位置と範囲を示す。LER の Wiggler 部には、電子雲密度を下げるために電子雲除去電極付きビームパイプ [6, 7] が設置されているが、このビームパイプはビームパイプ上面のみに電極を有している (Fig. 2)。また、LS1 中に Wiggler 部から取り外した電子雲除去電極付きビームパイプの内部を確認したところ、電極の下に多くのダストが確認された (Fig. 2)。Wiggler 部から採取されたダストの成分は、電極の成分とは完全には一致しなかったが、電極に使用されているセラミックスの成分がどちらからも検出されたため、電極から脱落したダストが SBL の原因であると推察された。そのため、2024ab 運転後の夏期シャットダウン (7 月 1 日-10 月 9 日) では、SBL 対策として 30% の電子雲除去電極付きビームパイプの上下反転作業を大穂直線部で実施した。Figure 3 に上下反転作業を実施した大穂直線部の範囲を示す。電子雲除去電極付きビームパイプは、D04 wiggler 部、D05 非線形コリメータ部 (NLC 部、長期シャットダウン中に wiggler 部を改造)、D10 wiggler 部、D11 wiggler 部に設置されているが、時間的な制約により夏期シャットダウン中には大穂直線部の放射線遮蔽体外部でのみ上下反転作業を実施した。以下に、2024 年夏に実施した作業をまとめる。

- 電極付きビームパイプの 30% (15 本/50 本、56 m/185 m) を上下反転
- D04 Wiggler 部、D05 NLC 部の電極付きビームパイプで上下反転作業を実施 (ただし、放射線遮蔽体内は未実施)
- D10 Wiggler 部、D11 Wiggler 部の電極付きビームパイプの上下反転は未実施。

電子雲除去電極 (上面のみ)



NLC設置のために取り外したダクト内の電極下にダストを確認

Figure 2: Inside a beam pipe with electron clearing electrodes, removed from the Oho wiggler section.

Figure 4 に D04 Wiggler 部での電極付きビームパイプ上下反転作業の様子を示す。作業手順は、「Wiggler 電磁石半割」、「ビームパイプ一時撤去」、「ビームパイプ内部清掃 (ダスト除去)」、「ビームパイプ上下反転」、「Wiggler 電磁石復元」である。また、上下反転した全てのビームパイプはベローズチェンバーを介して接続されているため、17 個のベローズチェンバーが一時的に取り外された。

1 本の電極付きビームパイプには、下側に 6 個の NEG ポンプ (SAES GP50) が排気ポートを介して設置されている。ビームパイプ上下反転により NEG ポンプ設置位置が上側になるため、NEG ポンプから発生したダストがビームパイプ内に落ちてくる可能性がある。そこで、排気ポートと NEG ポンプの間に L 字管を増設し、NEG ポンプで発生したダストがビームパイプ内部に入り込む可能性を低減した (Fig. 4)。

しかしながら、夏期シャットダウン後の 2024c 運転でビームパイプ上下反転を実施した範囲での真空跳ねを伴う SBL の発生頻度を調査した結果、上下反転による SBL 抑制効果は認められなかった [3, 4]。そのため、残りの電極付きビームパイプの上下反転は実施しないこととした。

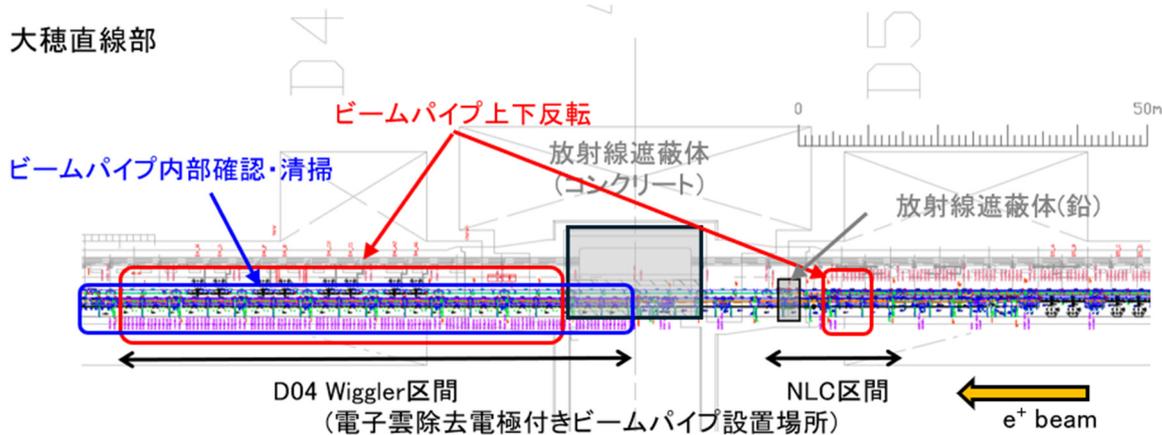


Figure 3: Location where the beam pipes were inverted (upside down) and internally cleaned in the Oho straight section.



Figure 4: Beam pipe inversion work at the Oho straight section.

3. 2025 年の対策

2024c 運転では、電極付きビームパイプ上下反転が SBL 頻度低減に効果が無いことが判明した一方、ビームパイプ内部の黒色付着物を除去することで SBL 発生頻度が大きく減少することが確認された。2024c 運転では、LER D10 wiggler 部で多くの真空跳ねが発生しており、その一部は SBL と同期していた。そこで運転中に真空跳ねが観測された真空計近くのビームパイプの内部を確認したところ、ビームパイプ内面に黒色の付着物が発見された。黒色付着物の写真を Fig. 5 に示す。黒色付着物の一部は小片となって剥がれており、周囲に散乱していた。この付着物を取り除いた後の運転では、この場所での真空跳ねの頻度は、SBL と同期しているものも含めて大きく減少した。また、D10 wiggler 部の他の場所でも黒色付着物の除去作業が行われたが、そこでも同様な SBL 頻度低減効果が認められた[3, 4]。

黒色付着物が確認されたフランジ締結部では、いずれも液体真空漏れ止め剤が使用されていた。また、組成分析から黒色付着物が真空漏れ止め剤と同じ元素 (Si) を含んでいる

ことが判明した。そのため、黒色付着物は、フランジ締結部で使用した液体真空漏れ止め剤がビームパイプ内部に侵入したものであると考えられている。そこで、2024c 運転終了後の保守期間中(2024年12月27日から2025年秋まで)に、以下の条件が全て当てはまるフランジ締結部で内部確認を行うこととした。

- 2024c で SBL 発生時に真空跳ねを観測したところ
- 液体真空漏れ止め剤を使用している可能性が高いところ
- MO フランジ[7]を採用しているところ

液体真空漏れ止め剤は、これまで多くのフランジで使用されているが、その使用記録は残されていない。

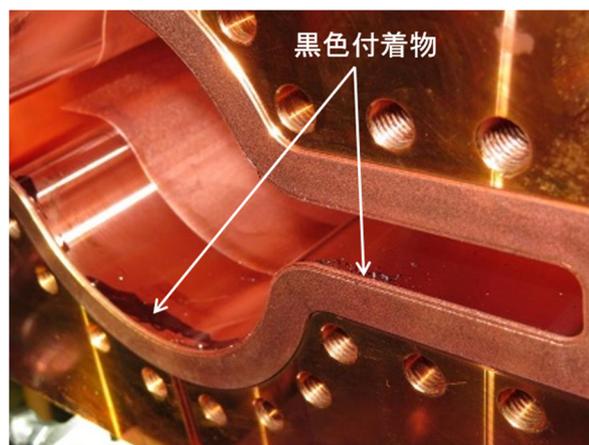


Figure 5: Thin black film-like deposits discovered inside the beam pipes.

SuperKEKB では、MO フランジ以外にもヘリコフレックスフランジが使用されているが、これまでヘリコフレックスフランジでは黒色付着物は確認されていない。なお、KEKBではヘリコフレックスフランジを使用しており、液体真空漏れ止め剤も使用されていたが、黒色付着物が確認されたことはなかった。そのため、今回は内部確認を実施するのは MO フランジのみとし、ヘリコフレックスフランジでは実施しない。以下に、この条件が全て当てはまる真空システム上の領域とフランジ締結部の数を示す。

- 衝突点領域 (Interaction Region (IR)、筑波直線部)、HER と LER 合わせて 41 カ所
- LER wiggler 部、150 カ所 (D04 52 カ所、D10 54 カ所、D11 44 カ所)
- その他、真空漏れ止め剤を使用したことが判明している MO フランジ (数カ所)

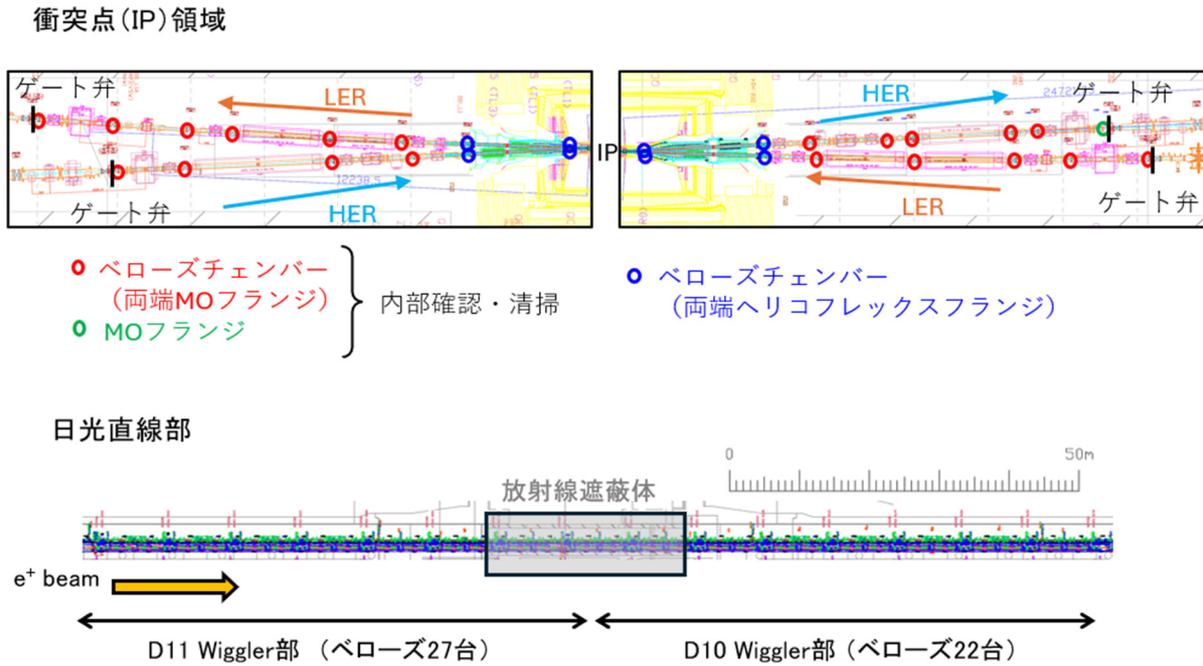


Figure 6: Locations where the interior of the beam pipe was inspected and cleaned (IR and Nikko straight section).

内部作業を行った場所を Fig. 6 (IR, D10 Wiggler 部、D11 Wiggler 部)、Fig. 3 (D04 wiggler 部) に示す。内部確認はコンクリートシールド内のベローズに対しても実施した。内部確認を行った結果、IRとD04 Wiggler 部、D10 Wiggler 部で黒色付着物が確認された。なお、黒色付着物が確認された場所の多くでは、これまで SBL と同時に真空跳ねが観測されている。黒色付着物は不織布研磨剤により除去し、研磨により発生した汚れはアルコールを浸した不織布で取り除いた。

4. まとめ

SBL 対策として、2024-2025 年に大規模な真空作業を実施した。2024 年の夏期シャットダウン中には、30%の電子雲除去電極付きビームパイプの上下反転を実施した。反転を実施したのは LER D04 Wiggler 部と D05 NLC 部であり、15 本のビームパイプ (全体で 56 m) が上下反転された。また、NEG ポンプで発生したダストがビームパイプ内に落ちることが無いように、NEG ポンプの排気ポートには L 字管が増設された。2024c 運転では、ビームパイプ上下反転の効果が検証され、SBL 発生頻度が減少していないことが確認された。一方、2024c 運転中に、LER D10 Wiggler 部でビームパイプ内部に黒色付着物が発見され、この黒色付着物を除去することで SBL の発生頻度が減少することが判明した。黒色付着物は、MO フランジ締結部を透過してきた液体真空漏れ止め剤だと考えられている。そのため、2024c 運転終了時から次期運転を開始する 2025 年秋までに、液体真空漏れ止め剤を使用した可能性が高い IR 及び LER Wiggler 部 (D04、D10、D11) の MO フランジ締結部の内部確認が実施されている。

2025c 運転では、黒色付着物除去の効果で SBL 頻度が大きく下がることが期待されている。一方で、大規模な真空作業が圧力、及びビーム寿命に及ぼす影響が懸念されるため、その評価を行う予定である。

謝辞

SBL 対策に関して多くの助言、協力を頂いた Belle II グループ、SuperKEKB 加速器グループの皆様に深謝致します。

参考文献

- [1] <https://www-superkekb.kek.jp/>
- [2] H. Ikeda *et al.*, “Observation of sudden beam loss in SuperKEKB”, in *Proc. IPAC’23*, Venice, Italy, May 2023, paper MOPL072.
- [3] S. Terui *et al.*, “EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF SUDDEN BEAM LOSS AT SuperKEKB”, Proceedings of the eeFACT2025, Tsukuba, Japan, March 3-7, 2025. To be published.
- [4] K. Shibata *et al.*, “STATUS REPORT ON SuperKEKB VACUUM SYSTEM”, Proceedings of the eeFACT2025, Tsukuba, Japan, March 3-7, 2025. To be published.
- [5] H. Ye *et al.*, “Commissioning and performance of the Belle II pixel detector”, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, 987 (2021), 164875.
- [6] Y. Suetsugu *et al.*, “Construction status of the SuperKEKB vacuum system”, *Vacuum* 121, 238 (2015).
- [7] Y. Suetsugu *et al.*, “Results and problems in the construction phase of the SuperKEKB vacuum system”, *J. Vac. Sci. Technol. A* 34, 021605 (2016).