

SuperKEKB での突発ビームロス事象の観測と原因究明

OBSERVATION AND CAUSE INVESTIGATION OF SUDDEN BEAM LOSS AT SuperKEKB

池田仁美^{#, A), B)}, 阿部哲郎^{A), B)}, 福間均^{A), B)}, 石橋拓弥^{A), B)}, 梶裕志^{A), B)}, 古賀太一郎^{A), B)}, 小林鉄也^{A), B)}, 小磯晴代^{A)}, 松岡広大^{A), B)}, 三塚岳^{A), B)}, 三橋利行^{A), B)}, 中山浩幸^{A), B)}, 西脇みちる^{A), B)}, 小笠原舜斗^{A)}, 佐々木信哉^{A)}, 末次祐介^{A)}, 照井真司^{A)}, 飛山真理^{A), B)}, 宇野健太^{A), B)}, 山口孝明^{A)}

Hitomi Ikeda^{#, A), B)}, Tetsuo Abe^{A), B)}, Hitoshi Fukuma^{A), B)}, Takuya Ishibashi^{A), B)}, Hiroshi Kaji^{A), B)},

Taichiro Koga^{A), B)}, Tetsuya Kobayashi^{A), B)}, Haruyo Koiso^{A)}, Kodai Matsuoka^{A), B)}, Gaku Mitsuka^{A), B)},

Toshiyuki Mitsuhashi^{A), B)}, Hiroyuki Nakayama^{A), B)}, Michiru Nishiwaki^{A), B)}, Shunto Ogasawara^{A)}, Shinya Sasaki^{A)},

Yusuke Suetsugu^{A)}, Shinji Terui^{A)}, Makoto Tobiyama^{A), B)}, Kenta Uno^{A), B)}, Takaaki Yamaguchi^{A)}

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

^{B)} SOKENDAI, Tsukuba, Japan

Abstract

Sudden Beam Loss (SBL) is one of the obstacles to improving luminosity, which is the main goal of SuperKEKB. SBL is the sudden loss of a significant amount of beam in the bunch train at one to three turns. SBL cause damage to collimators and other accelerator components, QCS quench, and significant background to the Belle II detector. SBL also cause beam abort, which prevents the accumulation of high currents. Therefore, it is an important issue to investigate and resolve the causes of SBL. We have set up several types of monitors to observe SBL events and to determine their causes. This paper describes our efforts to investigate the causes of SBL and to minimize the damage.

1. はじめに

SuperKEKB は、7 GeV の電子 (HER) と 4 GeV の陽電子 (LER) による、リング周長 3 km の衝突型加速器である。ナノビーム方式を採用し、 βy^* を KEKB 加速器の 1/20 に絞り、ビーム電流を 2 倍にすることで、世界最高のルミノシティを目指している。2024 年 6 月までの運転で、 $4.7 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を達成した[1,2]。ピークルミノシティを記録したビーム電流は LER で 1.321 A, HER で 1.099 A である。SuperKEKB のルミノシティ向上の障害の一つとなっているのが、突発的なビームロス (Sudden Beam Loss (SBL)) である。SBL は、コリメータおよび他の加速器コンポーネントの損傷、最終集束超伝導マグネット (QCS) クエンチ、Belle II 検出器への大きなバックグラウンドを引き起こす場合がある。また、ビームアポートを引き起こすため、大電流での長時間運転の妨げとなっている。そこで、SBL の原因を調査し解決するため、様々なモニターを導入し、解決の糸口を探った。

2. SBL 時の観測事象

SuperKEKB 加速器では、前身である KEKB 加速器時代からビームロスによる機器の損傷が度々起こり、それを防止するためのビームロスモニター[3]を中心としたアポートシステムが構築されている[4-6]。またそれぞれのビームロスの原因となるビーム不安定性や真空機器の不具合を調べ解決してきた。

今回問題となった SBL が、これまでのビームロス事象と大きく異なる点はその速さにある。SuperKEKB Phase-

III にあたる本格的な衝突実験が始まってから原因不明のビームロスが起こるようになった。ビームロスは非常に速く、それまで観測していた電流モニター (DCCT) ではその速さが測定できなかったため、ビームアポートに同期したバンチ振動モニター (BOR) 及びバンチ電流モニター (BCM) を開発することで、その速さを調べたところ、目立った前兆現象なしに突然 1 ターン (10 μs) 以内にビーム電流のかなりの割合が突発的に失われていることが分かった[7]。1 例を Fig. 1 に示す。

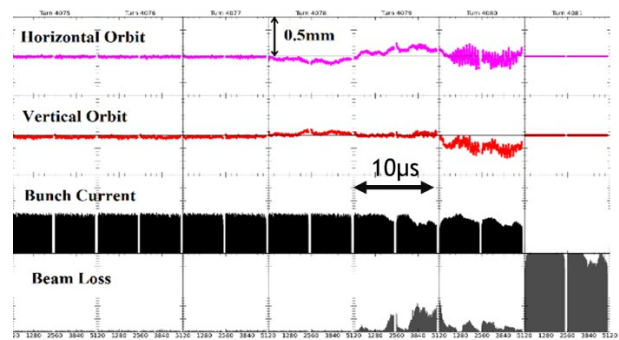


Figure 1: An example of bunch-by-bunch beam orbit variation and beam loss at SBL event.

2022 年 7 月から約 1 年半の間、SuperKEKB 及び Belle II 検出器は長期シャットダウン (LS1) に入り、いくつかの改造を行った[8]。SBL は LS1 以前から観測されており、以下のような様々な観測事象が観測されたが原因は不明だった[9]。

- 蓄積ビームのかなりの部分が、アポート前に突然ロスする。

[#] hitomi.ikeda@kek.jp

- HER と LER のどちらでも起こるが、LER の発生回数が多く、発生した場合のハードウェアへのダメージも LER の場合が大きい。
- ビームロスがコリメータ部で開始するが、リング内のどのコリメータで始まるかはコリメータの設定によって異なり、特定の場所に限定されない。
- ビームロスが始まる直前に軌道が動いているが、変位は小さく $\sim O(0.1 \text{ mm})$ 、ビームロス開始後の軌道変位は $< O(1 \text{ mm})$ である。
- 真空バーストはリング内のあらゆる場所で起きている。

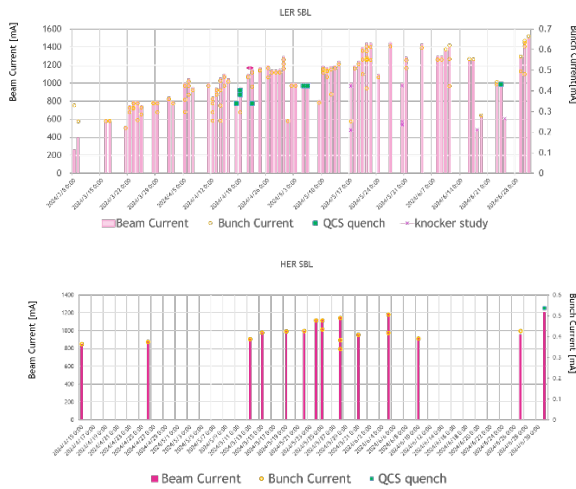


Figure 2: SBL statistics for LER(top) and HER(bottom).

更に情報を集めるために、LS1 中にロスモニターや BOR/BCM の増設を行い、より詳細な解析ができるようになった。LS1 後も SBL 事象は Fig. 2 の通り、主に LER において度々観測された。軌道変位については、SBL 事象では、まず水平振動が発生し、その後のターンで垂直振動や垂直コリメータでのビームロスが起こっていることが多い。また放電音を捕まえるための音響センサーの新設を行ったが、SBL が発生したときに、コリメータでの放電音は測定できなかった。LS1 後に時間を取って調べた結果わかったことは、SBL は、単独ビームと衝突ビームの両方で起きる。また、衝突実験用に β^* を絞った後は、 $\beta^* = 1 \text{ mm}$ と 3 mm の両方で起きるとのことである。

原因解明の糸口となった観測事象は、LS1 後の LER SBL が発生したほとんどの場合に、リング内の決まった場所での真空バーストが見られる様になったことである。Figure 3 は SBL 時に真空バーストが見られた場所の統計だが、リング内の 2 か所(D10/D4)で主にバーストが起きていることがわかる。ただし、SBL が起きていない場合にも、これらの場所で真空バーストが観測されることもある。また SBL アポート時は、他のアポートに比べて垂直ビームサイズが増大していることも分かった。Figure 4 はビームアポートの瞬間のビームプロファイルを放射光モニターで測定した結果である。更に解析の結果 Fig. 5 で示す通り、SBL の発生頻度はビーム電流に依存することも明らかになった。

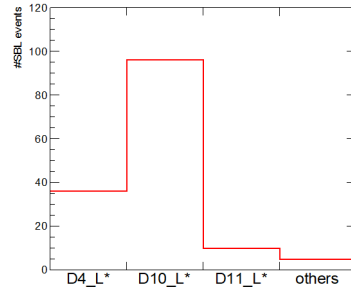


Figure 3 : There are many vacuum bursts in the Wiggler(D10/D4) section.

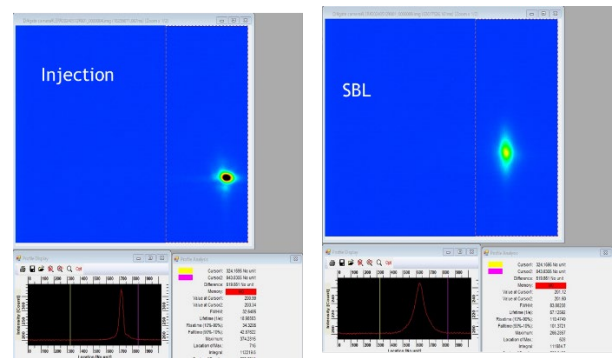


Figure 4: Comparison of beam profiles at the moment of injection-induced abort and SBL abort.

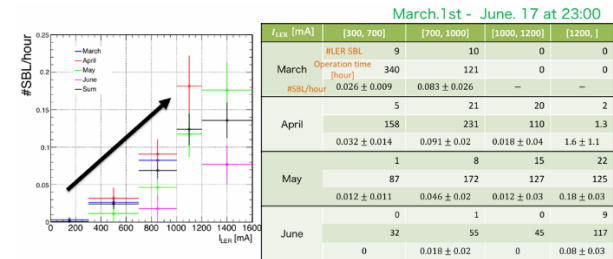


Figure 5: Current dependence of the number of SBLs per month.

3. SBL の原因

SuperKEKB 衝突実験の始まる前の試験運転である Phase-I では、ビームロスを伴う圧力バーストが LER 内で頻りに観察された[10-12]。ビームロスモニターによってアポートトリガーが発報されると同時に、リングのいくつかの部分で圧力が瞬間的に $10^{-7} \sim 10^{-6} \text{ Pa}$ の範囲に上昇した。ただしこの時のビームロスにかかる時間は数 $100 \mu\text{s}$ とゆっくりであり、同時にビーム位相振動も観察された (Fig. 6)。CCG から圧力バーストの位置を推定すると、ほとんどは偏向電磁石内のグルーブ付きアルミニウムビームパイプ付近で発生していることが分かった。圧力バーストが発生するビーム電流は、そのときの最大ビーム電流とともに増加しており、圧力バーストの頻度は同じ最大ビーム電流でしばらく動作させると減少する傾向、つまりエージング効果が観測された。これらの現象から、ビー

ムロスがグルーブに閉じ込められたダストが落下してビームと相互作用することによって引き起こされたものと推測され、検証のために LER ビームパイプにノッカーを取り付け、ビーム運転中にビームパイプを叩くと前記の現象が再現された。その後続くPhase-II運転対策として、運転停止期間中にグルーブ付きアルミビームパイプをノッカーで叩いた結果、Fig. 7で見られる様にビームロスを伴う圧力バーストの頻度は劇的に減少した。

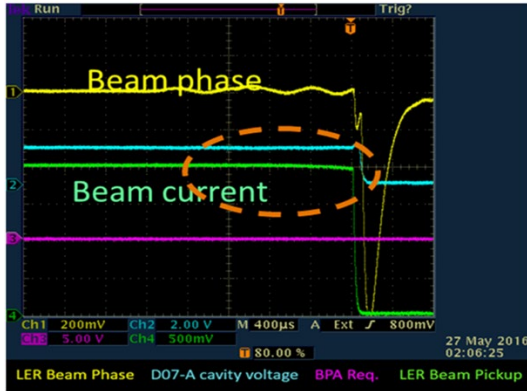


Figure 6: When a loss monitor was triggered and issued abort, the beam was lost over several 100 μ s, and oscillations in the beam phase were observed.

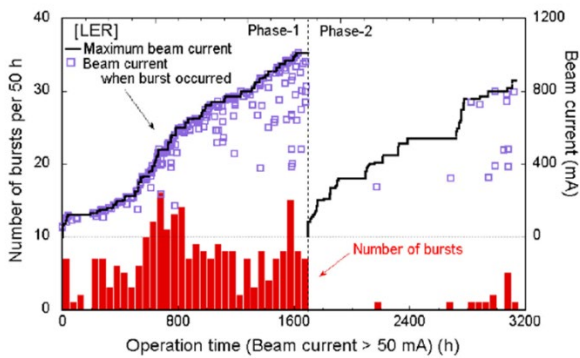


Figure 7: The number of vacuum bursts at Phase-I and Phase-II.

Phase-IIIで見られるようになった SBL はビームロスの速度が異なることやビーム位相振動が見られないことから、当初はダストの影響ではないと考えられていた。しかし、真空バーストやビームサイズ増大、ビーム電流依存性から、ダストの可能性が再浮上する。そこで、再度ノッカー試験を行い、ビームパイプ内にダストを強制的に落として、どのような現象が起きるかを確認することにした。

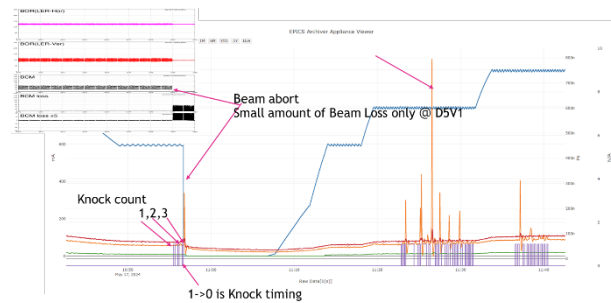
4. ノッカー試験

SBL とダストの関係を調べるために選ばれたノッカー設置場所は、LS1 中に真空作業があり、ダストが再捕捉される可能性が高い場所であるリングアーク部偏向磁石内のグルーブ付アルミニウムビームパイプと、圧力バーストが頻繁にあり、SBL の原因発生が疑われるリング直線部のウィグラー部にある電子クリアリング電極付きビームパイプである。電子クリアリング電極は、電子雲不安定性対策として導入されたもので、銅製のビームパイプに、厚

み 200-300 μ m のアルミナセラミックス(Al_2O_3) を絶縁体として、厚み 100-200 μ m のタングステンの電極がビームパイプ内面に形成されている。長さ 1670 mm、幅 40 mm の電極が計 116 本設置され、それぞれ独立した直流電源に接続されている[13-16]。

ノッカーで叩いた結果を Fig. 8 に示す。グルーブ付きビームパイプをたたいた場合は SBL ではないがビームロスを伴うアボートが発報し、クリアリング電極付きビームパイプをたたいた場合は蓄積電流が高い時に SBL アボートが発報した。この結果から、電極から落下したダストが SBL の主な原因であり、SBL に至らないまでもビームロス起因で起こった他のアボートも、何らかのダスト関連イベントであると考えられる。クリアリング電極部で落下したダストの種類を調べるために電極付きビームパイプをたたいた際に出てきた粉塵を化学分析したが、電極の成分であるタングステンが常に検出されるわけではなく、真空チャンバー内に通常存在する C、Cu、Al などが主に検出された。また、真空バーストの大きさはビームロスの大きさに比例していない。これらの事から、観測される事象はダストの種類、落下場所、ビーム電流によって異なると考えられる。

(a)



(b)

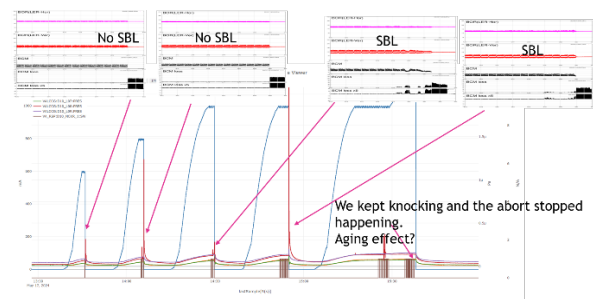


Figure 8: Relationship between knock timing, beam current, and vacuum pressure when (a) a beam pipe with a groove and (b) a beam pipe with a clearing electrode is knocked, and the plots of BOR/BCM at that time.

ダストと SBL の関係を確認するため、Phase-I 後と同様に、特に真空バーストの多かった D10 の電極付きビームパイプをノッカーで各 100 回程度叩いたところ、Fig. 9 で見られる通り SBL の件数が減少した。

LS1 以前はクリアリング電極での目立ったバーストは見られなかったため、その他のビームパイプや相乗効果のありそうな条件でもノッカー試験を行った。クリアリング電極付きビームパイプのほとんどはウィグラー電磁石の中にあるため、放射光や磁場の影響を調べるため、クリアリ

ング電極付きではあるがウィグラー外のビームパイプをたたいたところ、SBL ではないがロスモニターアポートが発報した。通常クリアリング電極の電圧は 10 V でほぼ OFF 状態だが、数 100 V 印加した状態でもノッカー試験の結果は変わらなかった。ただし、-600 V まで電圧を上げた時に電圧のトリップが見られ、同時に SBL が発生した。これは電極で放電現象が起きた場合にも SBL が起きることを意味する。

また、銅グルーヴ付きのビームパイプをたたいた場合にもアポートは発報したが、表面が滑らかなビームパイプをたたいた場合には、SBL およびその他の Abort はおきていない。

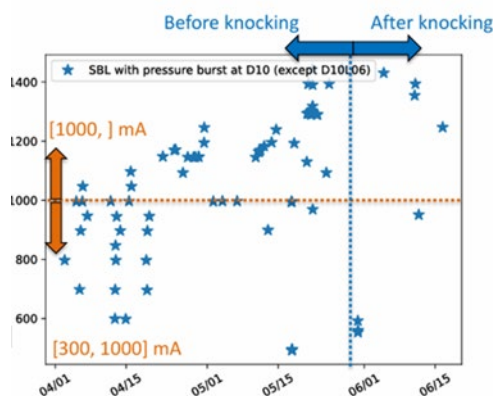


Figure 9: Number of SBL events before and after knocking the D10 chamber about hundred times with a knocker.

5. まとめと今後の予定

SuperKEKB では SBL が Luminosity 向上を目指す上で、問題の1つとなっている。真空バースト、ビームサイズ増大、エージング効果等から、SBL の原因としてダストが疑われたため、ノッカー試験を行った。何らかの特別な機構のあるビームパイプ(グルーヴ付・電子クリアリング電極付)を叩いた時のみ SBL 及びその他のビームロスの原因としたアポートが起きるが、ビームパイプをたたき続けることによりアポートの回数は減少する。これらの事から、メカニズムはまだはっきりしていないが、ダストと SBL の間には何らかの因果関係があるようと考えられる。観測される事象はダストの種類、落下場所、ビーム電流によって異なると思われる。

以上の事から、今後の SBL 対策として、2024 年夏季シャットダウン中に、作業可能な、電子クリアリング電極付きビームパイプ計 13 本を上下反転することにした。クリアリング電極はビームパイプ上部にのみ付いているので、反転することによりビーム運転中のダストの落下を防ぐことができる。また今回反転できないクリアリング電極付きビームパイプやグルーヴ付きビームパイプについては出来るだけノッカーで叩くことで前もってダストを落としておく予定である。

参考文献

[1] Y. Funakoshi *et al.*, “The SuperKEKB Has Broken the World Record of the Luminosity”, in Proc. IPAC’22, Bang-

kok, Thailand, Jun. 2022, pp. 1-5.
doi:10.18429/JACoW-IPAC2022-MOPLXGD1

[2] Y. Ohnishi, “Recent progress of SuperKEKB project and future prospect”, in Proc. IPAC’23, Venice, Italy, May. 2023, paper TUOGB1.

[3] H. Ikeda, M. Arinaga, J. W. Flanagan, H. Fukuma, and M. Tobiya, “Beam Loss Monitor at SuperKEKB”, in Proc. IBIC’14, Monterey, CA, USA, Sep. 2014, paper TUPD22, pp. 459-462.

[4] T. Mimashi *et al.*, “SuperKEKB Beam abort System”, in Proc. IPAC’14, Dresden, Germany, Jun. 2014, pp. 116-118. doi:10.18429/JACoW-IPAC2014-MOPRO023

[5] T. Mimashi *et al.*, “Performance of SuperKEKB High Energy Ring Beam Abort System”, in Proc. IPAC’17, Copenhagen, Denmark, May 2017, pp. 2939-2942. doi:10.18429/JACoW-IPAC2017-WEPIK012

[6] H. Ikeda, T. Mimashi, S. Nakamura, T. Oki, and S. Sasaki, “Fast Trigger System for Beam Abort System in SuperKEKB”, in Proc. IPAC’22, Bangkok, Thailand, Jun. 2022, pp. 754-756. doi:10.18429/JACoW-IPAC2022-MOPOMS048

[7] M. Tobiya *et al.*, “Development of Bunch Position Monitors to Observe Sudden Beam Loss of SuperKEKB Rings”, in Proc. IBIC2023, Saskatoon, Canada, 179-182. doi:10.18429/JACoW-IBIC2023-TUP002

[8] Y. Ohnishi, “Recent status of SuperKEKB operation after long-shutdown (LS1)”, Proc. 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2024), Yamagata, Japan, Jul. 31- Aug. 3 2024, TFSP02.

[9] H. Ikeda *et al.*, “Observation of sudden beam loss in SuperKEKB”, in Proc. IPAC’23, Venice, Italy, May 2023, paper MOPL072. doi:10.18429/JACoW-IPAC2023-MOPL072

[10] Y. Suetsugu *et al.*, “First commissioning of the SuperKEKB vacuum system”, PHYSICAL REVIEW ACCELERATORS AND BEAMS, vol. 19, p. 121001, 2016. doi:10.1103/PhysRevAccelBeams.19.121001

[11] Y. Suetsugu *et al.*, “SuperKEKB main ring vacuum system status until the end of Phase-2 commissioning”, Journal of Vacuum Science & Technology A, vol. 37, p. 021602, 2019. doi:10.1116/1.5083928

[12] S. Terui *et al.*, “Observation of Pressure Bursts in the SuperKEKB Positron Ring”, in Proc. IPAC’18, Vancouver, Canada, Apr.-May 2018, pp. 2830-2832. doi:10.18429/JACoW-IPAC2018-WEPML058

[13] Y. Suetsugu, H. Fukuma, M. Pivi, L. Wang, NIM-PR-A, 604 (2009) 449.

[14] Y. Suetsugu *et al.*, “Construction status of the SuperKEKB vacuum system”, Published in: Vacuum 121 (2015) 238-244. doi:10.1016/j.vacuum.2014.12.010

[15] Y. Suetsugu *et al.*, “Results and problems in the construction phase of the SuperKEKB vacuum system”, J. Vac. Sci. Technol. A, 34 (2016) 021605.

[16] Y. Suetsugu *et al.*, “Properties of electron clearing electrodes in the SuperKEKB LER wiggler sections”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 1-3, 2017, Sapporo, Japan, PASJ2017 TUP118.