

SuperKEKB LER での圧力バーストの観測

THE OBSERVATION OF PRESSURE BURST IN SUPERKEKB LER

照井真司[#], 久松広美, 末次祐介, 石橋拓弥, 白井満, 柴田恭, 金澤健一, 池田仁美, 船越義裕

Shinji Terui[#], Hiromi Hisamatsu, Yusuke Suetsugu, Takuya Ishibashi, Mitsuru Shirai,

Kyo Shibata, ken-ichi Kanazawa, Hitomi Ikeda, Yoshihiro Funakoshi,

High Energy Accelerator Research Organization (KEK) 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

A problem during the Phase-1 commissioning was the localized pressure bursts accompanied by beam losses and observed in the positron ring (Low Energy Ring: LER). The beam loss monitors triggered beam aborts, and sometimes the phenomena became an obstacle to the beam commissioning. These pressure bursts were frequently observed from the early stage of the commissioning. Most of the pressure bursts occurred near or inside of Aluminum-alloy beam pipes in dipole magnets, which have grooved surface at the top side. It was indicated from the various observations and experiments that the most probable cause of this phenomenon was the collision between the dusts dropped from the grooves and the circulating positron beam. We report the properties of the pressure bursts, the probable causes, and possible mitigation methods.

1. 初めに

SuperKEKB は KEKB B ファクトリー (KEKB) の後継機となる高ルミノシティ電子・陽電子衝突型加速器である。この SuperKEKB 加速器グループと Belle II 検出器を用いて実験を行う実験グループを主体とする SuperKEKB プロジェクトの目的は、ルミノシティを KEKB の達成値の約 40 倍 (8×10^{35} cm⁻²s⁻¹) に上げ、標準理論を越えた新しい物理を探索することである。SuperKEKB 主リングは 7.0 GeV 電子リング (High Energy Ring, HER) と 4.0 GeV 陽電子リング (Low Energy Ring, LER) から構成される。2010 年から建設を始め、2016 年 2 月から 6 月にかけて加速器調整のために Phase-1 運転が行われた[1]。この運転中、ビームロスを伴う圧力バーストが LER で頻発した[2]。ビームロスの結果、ロスモニターが動作してビームアボートを引き起こし、運転に支障をきたす場合もあった。以下では、この圧力バースト現象の特徴、推定される原因、考えられる対策等を報告する。

2. 頻度と発生場所の予想

Figure 1 は、横軸に時間、縦軸に圧力バースト時のビーム電流 (DCCT 信号) と圧力 (CCG の信号) を記したグラフで、観測された圧力バーストの典型的な例である。この CCG の電圧値は、FPGA を用いてスキヤタイムを 10 ms にして読み込んでいる。ビームがアボートされる前に圧力バーストが起きていることがわかる。すなわち、何か圧力バーストを伴う事象が発生し、それがビームロスをもたらし、ロスが大きい場合にビームアボートを引き起こしていると考えられる。

Figure 2 は、ビーム電流 50 mA 以上の運転時間に対する、50 h あたりの圧力バーストの発生頻度である。最大ビーム電流を増やした直後により頻繁に発

生する傾向にあるようだ。

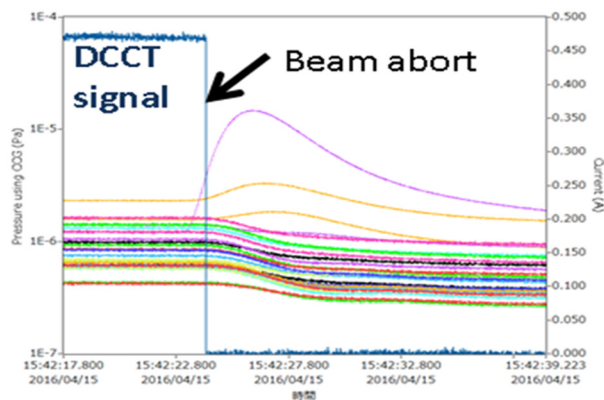


Figure 1 : Typical example of a pressure burst accompanied by a beam abort, where the data were recorded every 10 ms.

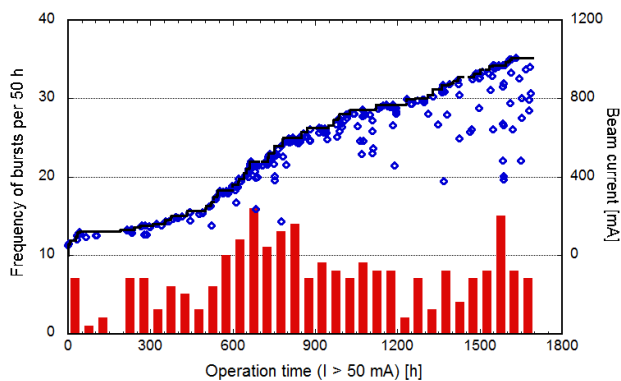


Figure 2 : Frequency of pressure bursts (red bar), the beam currents when the bursts occurred (blue dot) and the maximum stored beam currents (black line) as a function of the operation time with a beam current larger than 50 mA.

[#] sterui@mail.kek.jp

10 m ごとにある真空計のバースト時の圧力値から圧力バーストの発生場所を特定することを試みた。各場所の圧力と発生場所を示す例を Fig. 3 に示す。この図は、圧力バーストの発生点で一番圧力上昇が大きく、そこから、均等にガスが拡散するという仮定をして、CCG で観測している場所から、圧力バーストの場所を推定したものである。距離を横軸に、圧力値を縦軸(対数目盛)にとり、圧力値を直線で結び、交差したところが赤で縁取られた丸である。そこがバースト発生点と推定され、それらが偏向電磁石付近に集まっていることがわかる。Figure 3 は一例であるが、LER の多くの場所で、この傾向が見られた。LER の偏向電磁石の中のビームパイプは、電子雲効果を抑制するために、Fig. 4 で示すような、グループ構造を持っている。[3]

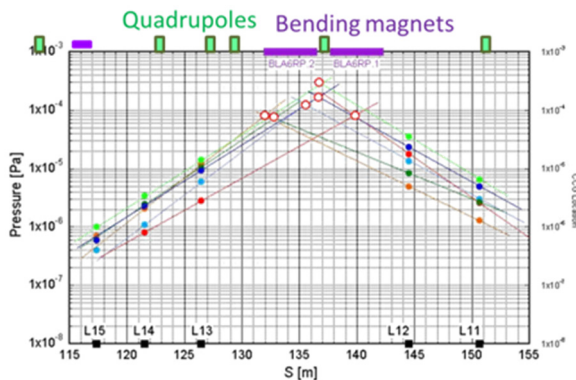


Figure 3 : Estimates of the origins of pressure bursts using the height distributions of measured pressures along the ring for 6 samples.

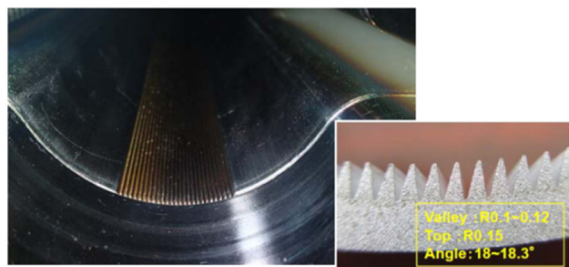


Figure 4 : Inside view of a beam pipe with grooves for a bending magnet, and the detailed structure.

3. 発生メカニズムの仮説とノッカー

圧力バーストの発生原因としては、ビームパイプの壁電流による放電や、ビーム起因の Higher Order Mode (HOM) による放電が考えられた。しかし、発生頻発場所にロスモニターを設置しても、圧力バースト時に信号が見えないこと、ビーム位置モニター電極に HOM を示す信号が見えなかったこと等から、HOM が原因とは考えにくい。他の可能性としては、ビームパイプ内のダストとビームとの衝突が挙げられた。すなわち、ダストがビームと衝突してビーム

ロスを引き起こし、ダストが蒸発したり、発生したイオンが表面に衝突したりした時に発生・脱離した気体がバーストとして観測される、と考えられた。

実際、Fig.3 からわかるように、圧力バーストはダストが捕捉しやすいグループ構造を持つ偏向電磁石用ビームパイプに集中している。Figure 5 は、圧力バーストがあった場合となかった場合での、ビームアボート直前のビーム電流のロスの様子を比較したものである。圧力バーストがあった場合は、なかった場合に比べてビームロスがゆっくり(数百 μs に渡って)起こっていることがわかる。これは、ダストがビームの一部に当たり、エネルギーを失い、少しずつロスをしていると考えられる。Figure 6 は、圧力バーストを伴うビームアボート時の、ビームフェーズ(黄色)と DCCT でみたビーム電流(黄緑色)を示す。このビームフェーズの振動からシンクロトロン振動が起きているとわかり、シンクロトロン振動の原因はビームがダストと衝突してエネルギーを失ったことと考えられる。

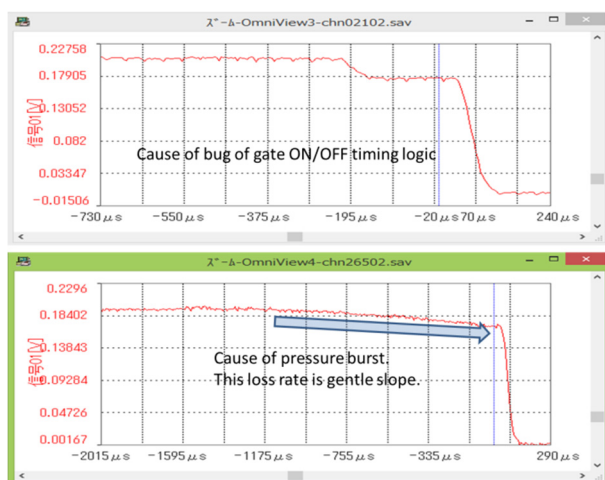
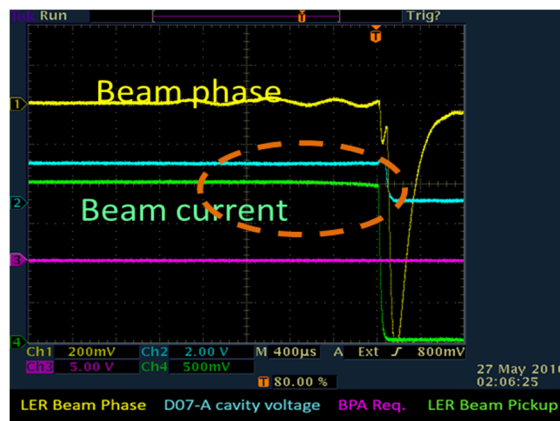


Figure 5 : Typical beam loses just before the beam aborts for the cases without (upperside) and with (lowerside) pressure burst.[4]



400 μs /div.

Figure 6 : Typical behaviors of beam phase and beam current just before the beam abort with pressure burst.

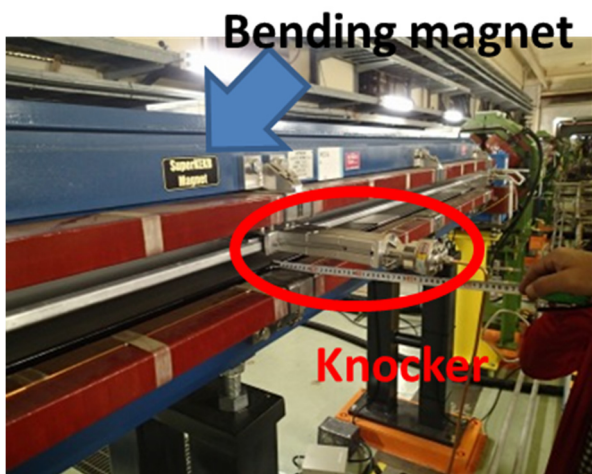


Figure 7 : Knocker attached to the beam pipe in a bending magnet.

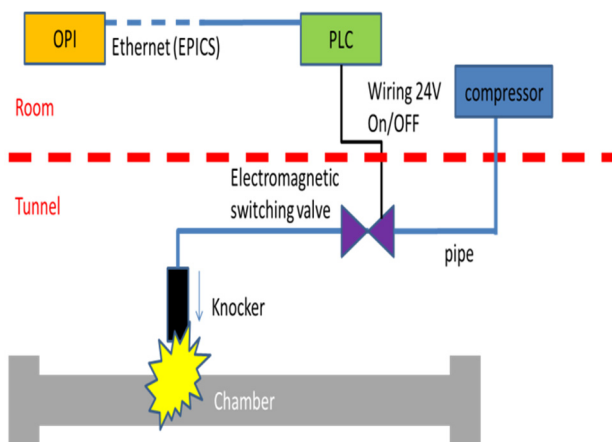


Figure 8: Remote control system for the knocker test.

上の仮説を実証するために、偏向電磁石内のビームパイプに衝撃を与える“ノッカー”を取り付けた。Figure 7 は、偏向電磁石内のビームパイプにノッカーを取り付けた様子である。ノッカーは、ビームからの放射線を受けても壊れないように、圧空を使って動作するものを選んだ（この圧空配管は、ゲートバルブに使われているものを分岐させて作った）。ビーム運転中に、リモート制御できるように、Fig. 8 に示すシステムを構築した。Operator Interface (OPI)から Programmable Logic Controller (PLC) に命令を出して、2.4 V の ON/OFF することで電磁弁のオープン/クローズを行い、ノッカーを動作させる仕組みである。ノッカーを動作させた際には、アルミニウム合金製、銅製のどちらでも、グループ構造を持つビームパイプでは時間差はあるものの 100 % の確率で圧力バーストが起き、ビームがアボートされた。グループ構造を持たないものは、ノッカーで叩いても圧力バーストは起こらなかった。このことから、圧力バーストの原因に、グループ構造は関係していると考えられる。また、運転時にグループに捕

捉されたダストが落ちる原因としては、Fig.2 に示すように最大電流を上げたときに圧力バーストが良く起きることから、放射光からの熱膨張などでグループ形状の変化が起こり、グループとダストの摩擦が弱まったことが考えられる。

さらに、ダストが落ちてきているかを実際に目視で確認するために、Phase-1 運転終了後大気開放をした際に、ファイバースコープをビームパイプ内に入れて、ビームパイプを叩いてみたところ、グループからダストが落ちてくるところが、撮影できた。その様子を Fig. 9 に示す。このことから、運転で使われているビームパイプのグループにダストが実際に捕捉されていることがわかった。

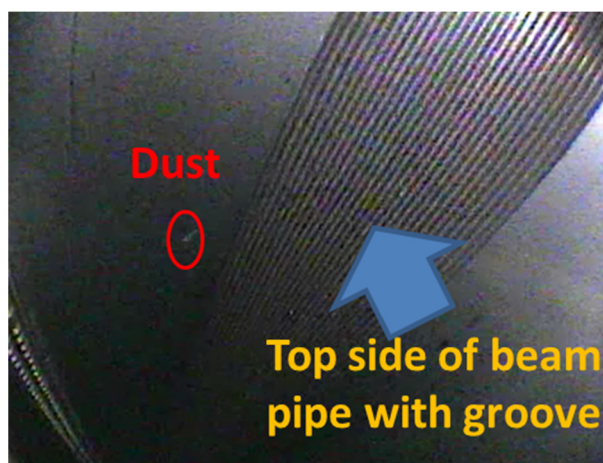


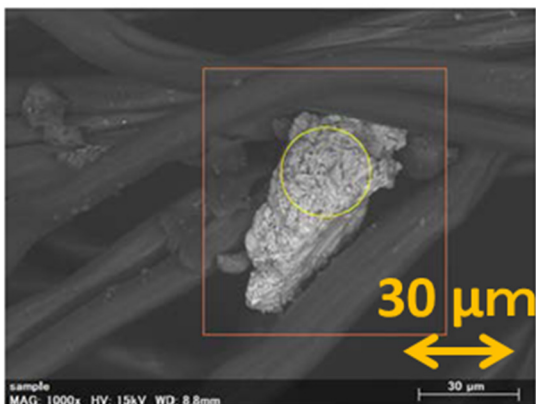
Figure 9: Dust dropping from the groove in the beam pipe observed at the same timing of knocking.

4. ダストの成分と発生原因

予備で保管していた偏向電磁石用ビームパイプの中に、カプトンシートや SEM 用テープを敷いて、ビームパイプを叩き、ダストを採取した。この採取したダストの成分を分析した結果、Si, O を主成分とする粒子、V, Zr を主成分とする粒子、Ti, O を主成分とする粒子、Al, O を主成分とする粒子、Fe, O を主成分とする粒子等が見つけられた。

Si, O を主成分とする粒子は、砂等だと考えられる。Fe, O を主成分とする粒子と V, Zr を主成分とする粒子は、NEG ポンプが原因だと考えられる。Ti, O を主成分とする粒子は、電子雲を抑制するためにコーティングしている TiN が NEG 由来のものだと考えられる。Al, O を主成分とする粒子は、アルミニウム合金のビームパイプを押し出しで作製した後に洗浄しているが、それでも残ってしまったビームパイプ由来のものではないかと考えられる。Figure 10 に、NEG ポンプ由来と考えられるダストの写真と半定量分析の結果を示す。NEG ポンプだと推測する原因は、NEG ポンプ以外に真空ビームパイプの中で V, Zr を使用したコンポーネントはないからである。

ビームパイプのグループに、なぜダストが捕捉されてしまったのかを推察してみた。前述の通り Al, O を主成分とする粒子に関しては、製作工程時に捕捉



黄色円内部分の半定量分析結果

| Element | AN | Series | norm. C Atom. C [wt.%] | [at.%] |
|-----------|----|----------|------------------------|--------|
| Zirconium | 40 | L-series | 30.03 | 7.81 |
| Carbon | 6 | K-series | 26.48 | 52.31 |
| Vanadium | 23 | K-series | 19.57 | 9.12 |
| Oxygen | 8 | K-series | 19.11 | 28.34 |
| Iron | 26 | K-series | 3.93 | 1.67 |
| Silicon | 14 | K-series | 0.50 | 0.42 |
| Aluminium | 13 | K-series | 0.37 | 0.32 |
| Potassium | 19 | K-series | 0.02 | 0.01 |
| Magnesium | 12 | K-series | 0.00 | 0.00 |
| Total: | | | 100.00 | 100.00 |

Figure 10: A typical dust considered to be generated from NEG elements found in a beam pipe, and the result of semi-quantitative analysis of it.

されてしまったのだと考えられるが、他の粒子に関しては、粗引き時やパージ時に粒子が舞い上がり、グループに挟まったのではないかと考えてみた。この推論を検証しようと、Fig. 11 のように、メッシュ付 O リングの上に、SEM 用導電性カーボンテープを貼り付けて、排気を行った。そのテープを、SEM で分析したところ、ダストが確認された。このことから、粗引きで、ダストが舞い上がることが示された。SEM 用テープに捕獲されたダストで一番多かった成分は、SiO₂ と Al₂O₃ であった。最大粒径は、25 μm 以上であった。NEG ポンプ活性化を行った後にも、ダストの舞い上がりを調べたが、NEG ポンプの成分であるダストが増えたということはない。次に、ビームパイプ中のダストの粒径を詳細に調べるためにパーティクルカウンター（リオン社製 HHPC-6）を使用した試験を行った。試験方法は、Fig. 12 に示すように、ビームパイプ内部のみ測定できるようにフランジ部分にパイプを挿入してパーティクルをカウントした。Table 1 に、ノッカー動作前後の粒径

毎のパーティクルの数を示す。ノッカーは 5 回動作させた。ノッカー動作前後で比較すると、ノッカーを動かした後の方では、0.7 μm 以下の粒子は増えていないが、5 μm 以上の粒径の大きいパーティクルが検出されるようになった。グループに捕捉されていた粒子の中には、5 μm 以上の大きい粒径のものがあることを示す結果である。



Figure 11: Conductive carbon tape prepared at the top of a rough pumping system to collect the dust during the evacuation.

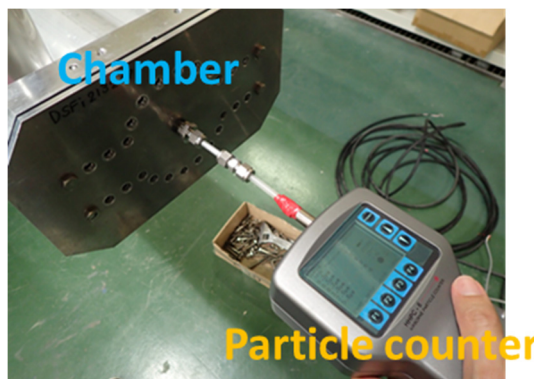


Figure 12: Particle counters to count dust sizes and the numbers in a beam pipe.

Table 1: The Size Distributions of Measured Particles in a Beam Pipe before and after the Knocking

| Size(μ m) | The particle count before knocked (paricles/l) | The particle count after knocked (paricles/l) |
|-----------|--|---|
| 0.3~0.5 | 10236 | 6549 |
| 0.5~0.7 | 230 | 249 |
| 0.7~1.0 | 23 | 80 |
| 1.0~2.0 | 6 | 56 |
| 2.0~5.0 | 1 | 29 |
| 5.0~ | 0 | 5 |

5. 結論

SuperKEKB の Phase-1 運転時に LER で観測された圧力バーストを伴うビームアボート現象について様々な観測及び実験を行い、以下のような結論を得た。

1) ノッカー作動時の現象や大気開放時のダストの観測から、圧力バーストの原因は、放射光からの熱膨張などでビームパイプ形状の変化に伴い、グループに捕捉されたダストが落ち、ビームと衝突したため考えられる。

2) ビームパイプ内から採取したダストからは、アルミニウム合金ビームパイプ製作時の切り屑、保管時に混入したと考えられる砂や NEG ポンプや TiN コーティング等由来と思われる、多くの成分が検出された。

3) ダストがグループに捕捉さえる原因としては、製作時からの切子の残り、運搬時の振動、粗引きやパージ時のダストの舞い上がり等が考えられる。

しかし、この事象はまだ十分解明されたわけではない。例えば、採取されたダストの成分、大きさで、観測されたようなゆっくりしたビームロスが起きるのか検証が必要である。電子リングで観測されているダストトラッピングの解析 [5] に従うと、SuperKEKB のビームエネルギー、ビーム電流値では、数 μm ~ 数十 μm の大きさのダストは短時間(数 μs ~ 数十 μs)で蒸発してしまう。この他、ダストは上部のグループから落ちるだけなのか、下部のダストがビームに引き寄せられることはないのか、ビームパイプ内の電子雲の影響(すなわちチャージアップ)はあるのか、舞い上がったダストが上側のグループに捕捉されるのか、などに検討が必要である。

2017 年度末に予定されている Phase- II 運転では BELLE-II 測定器を用いた物理実験が始まる。また、最終収束系として超電導四極電磁石が稼働する。ビームロスやビームアボートが多発すると、実験の支障となるだけでなく、場合によっては測定器の損傷、超電導電磁石のクエンチをもたらす。そのためには、できるだけ圧力バースト、ビームロスを低減する対策が必要である。ここで述べたように、現状、ビームロスの最も怪しい原因はビームパイプのグループに捕捉されたダストとビームとの相互作用である。そこで、Phase- II 運転前に、ビームパイプをノッカーで予め叩き、グループに捕捉されているダストを落としておくことを考えている。現在予備のビームパイプを使って、ノッカーの強さ、ノックする回数などの評価を進めている。

謝辞

Phase-1 運転途中に観測された圧力バースト問題について、多くの助言、協力を頂いた SuperKEKB 加速器グループの皆様に深謝致します。また、ダストの成分を分析して下さった、化学センターの平氏に感謝致します。

参考文献

- [1] Y. Funakoshi *et al.*, “Phase 1 beam commissioning of SuperKEKB” Proc. PASJ (2016) pp. 24–28.
- [2] Y. Suetsugu, K. Shibata, T. Ishibashi, M. Shirai, S. Terui, K. Kanazawa, H. Hisamatsu, Phys. Rev. Accel. Beams, 19 (2016) 121001.
- [3] Y. Suetsugu, K. Kanazawa, K. Shibata, T. Ishibashi, H. Hisamatsu, M. Shirai and S. Terui, J. Vac. Sci. Technol. -A, 30 (2012) 31602.
- [4] H. Ikeda *et al.*, “Beam abort diagnostics at SuperKEKB” in these proceedings (WEP089).
- [5] F. Zimmermann, “Trapped Dust in HERA and DORIS”, Technical Report DESY HERA 93-08(1993).