

SuperKEKB 陽電子リングにおけるビームロスに伴う圧力バーストの観測

OBSERVATION OF PRESSURE BURSTS ACCOMPANIED BY BEAM LOSS IN THE SUPERKEKB POSITRON RING

末次祐介^{#, A, B)}, 照井真司^{A)}, 白井満^{A)}, 池田仁美^{A, B)}, 石橋拓弥^{A, B)}, 柴田恭^{A, B)}, 久松広美^{A)}, 金澤健一^{A)}
Yusuke Suetsugu^{#, A, B)}, Shinji Terui^{A)}, Mitsuru Shirai^{A)}, Hitomi Ikeda^{A, B)}, Takuya Ishibashi^{A, B)}, Kyo Shibata^{A, B)},
Hiromi Hisamatsu^{A)}, Ken-ichi Kanazawa^{A)}

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

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

Abstract

Pressure bursts accompanied by beam losses had been frequently observed during the Phase-1 commissioning of the SuperKEKB positron ring. The cause was presumed to be the collision of dust particles in the beam pipe with the stored beam. A simple model, that is, a dust particle drops from the upper surface of the beam pipe and the beam loss occurs by the energy loss during the collision with the dust particle, qualitatively reproduced the phenomena. Relatively large dust particles with diameters of several hundred micrometers were actually collected from a beam pipe where the pressure burst had been frequently observed. Based on the assumption, the suspicious beam pipes were mechanically knocked, and the dusts attached on the beam pipes were shaken off before starting the Phase-2 commissioning. As a result, the frequency of the pressure bursts was drastically decreased in the Phase-2 commissioning.

1. はじめに

SuperKEKB は KEK の電子・陽電子衝突型加速器で、その主リング(Main Ring、MR)は、8 GeV 電子用の High Energy Ring (HER)と 4 GeV 陽電子用の Low Energy Ring (LER)から構成される(Figure 1)[1]。2016 年 2 月から 6 月までの Phase-1 運転時、LER では大きなビームロス、ひいてはビームアポートを伴う圧力バースト(突出)が筑波直線部を中心に頻りに観測された[2-4]。多くの場合ビームロスは最終的なビームアポートの数百 μ s~数 ms 前から始まっていた。発生頻度は、最大蓄積ビーム電流を上げる際に増え、最大に近い一定電流でしばらく運転していると減る傾向があった。また、バースト時の圧力分布からバーストの発生点を推定すると偏向電磁石部であった。様々な観測結果から、この圧力バーストはビームパイプ内のダスト粒子とビームの衝突によるものと推定された。ノッカーと呼ばれる衝撃を与える装置を偏向電磁石内のビームパイプに取り付けてビーム運転中に動作させると、観測した現象を再現した。

Phase-1 運転後、圧力バーストが頻りに観測された場所にあるビームパイプ内から数百 μ m 以上のアルミ、アルミ合金の粒子が多数採取された。また、ダスト粒子との衝突によるエネルギーロス簡単なモデルを使って計算すると、この程度の大きさのダスト粒子との衝突で観測された現象を定性的に再現できた。Phase-2 運転前の対策として、Phase-1 運転時に圧力バーストが頻りに観測された筑波直線部の 24 本の偏向電磁石用ビームパイプに対して、ノッカーを使って衝撃を与え、予めダスト粒子をビームパイプ上面から振り落とした。

Phase-2 運転は 2018 年 3 月から 7 月まで行われたが[5]、この Phase-2 運転時、筑波直線部でのビームロスに伴う圧力バーストは Phase-1 運転時に比べて大きく減つ

[#] yusuke.suetsugu@kek.jp

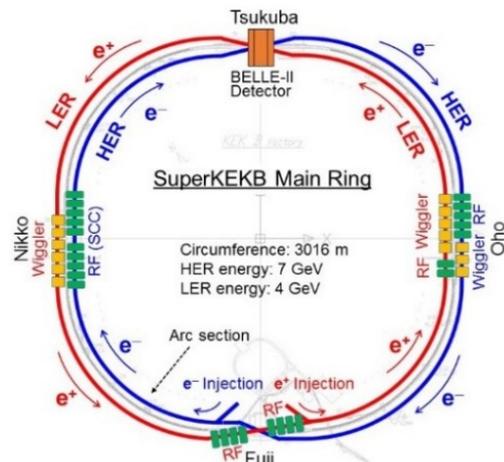


Figure 1: Layout of SuperKEKB Main Ring (MR).

た。ただし、リングの他の場所で発生していた圧力バースト現象も減っており、Phase-1 運転と Phase-2 運転時の運転状況の違いも影響している可能性がある。

ここでは、LER の主に筑波直線部で観測された圧力バーストについての Phase-1 運転後の調査、ダスト粒子とビームとの衝突の簡単なモデル計算、それに基づいた対策と Phase-2 運転時の状況等について報告する。

2. Phase-1 運転時の圧力バースト[2-4]

観測された圧力バーストには以下のような特徴がある。

- 圧力のバーストはビームアポートの直後に観測される。典型的な例を Figure 2 に示す。バーストは幾つかの真空計で観測される。真空計は約 10m 間隔で設置されているため圧力バーストの観測までにアポート時から数秒掛かる場合があり、バーストはビームアポートと同時にその前に起きていと考えられる。実

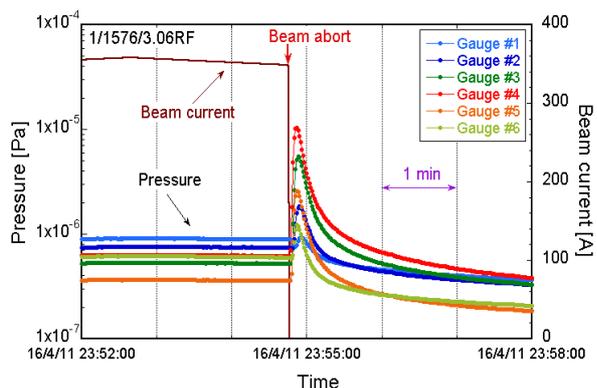


Figure 2: Typical pressure burst accompanied by beam loss.

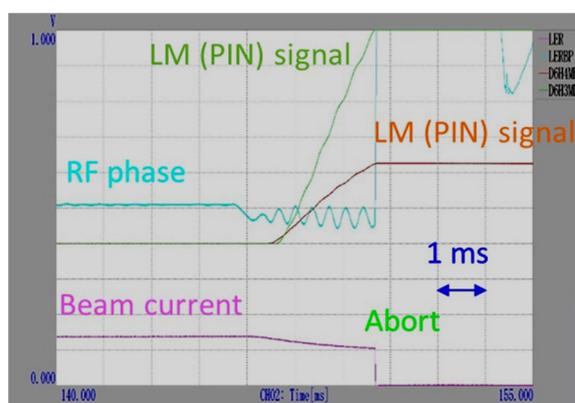


Figure 3: Typical behavior of the beam current, RF phase and the loss monitor (LM) signal at the pressure burst. The LM signal is the time-integrated beam loss.

際、速い時間間隔の記録を見ると圧力の上昇がビームアボート前から始まっている時もある。

- Figure 3 は、ビームアボート時のビーム電流、コリメータでのビームロス(ピンダイオード出力)の積分量、高周波空洞の位相変化の典型的な例である。ビームロスがビームアボートの数 ms 前から起きている。
- リング内で観測された圧力バースト発生位置、発生時期、および最大蓄積ビーム電流とバースト発生時のビーム電流を、運転時間(ビーム電流 50 mA 以上の運転時間)に対してプロットしたものを Figure 4 に示す。バーストは約 100 mA 蓄積時から観測され始めた。当初は筑波直線部のみであったが、ビーム電流が増えるに従い筑波直線部だけではなく他の場所でも発生するようになった。なお、ウイグラー部にはクリアリング電極があり、他の場所のバーストと少々状況が異なると思われる。
- Figure 5 は、運転時間に対して、50 時間の運転あたりに観測された圧力バーストの頻度を最大蓄積ビーム電流、バースト発生時のビーム電流と共に示している。最大ビーム電流増加時に発生頻度が増え、一方、最大ビーム電流増が緩やかな時、つまり、一定電流での運転時間が長い時には頻度が減少する傾向が見える。また発生するビーム電流値も最大電流に近

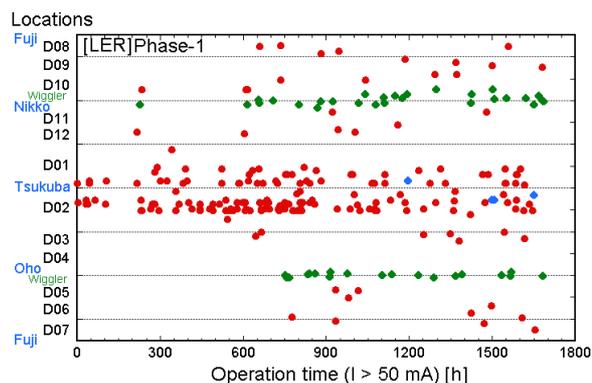


Figure 4: Locations of the pressure bursts in the ring as a function of the operation time with a beam current larger than 50 mA during the Phase-1 commissioning.

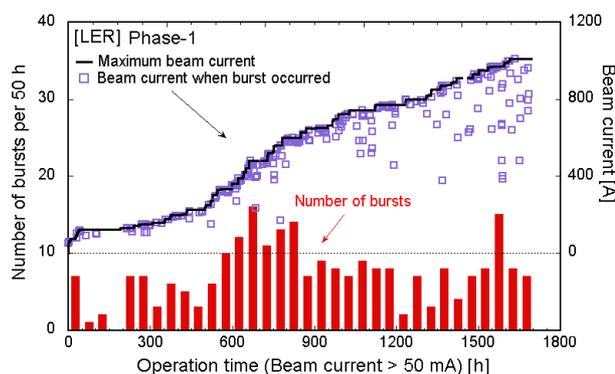


Figure 5: Number of bursts per 50 h of operation time, the beam current when the bursts occurred, and the maximum beam currents as a function of beam operation time during the Phase-1 commissioning.

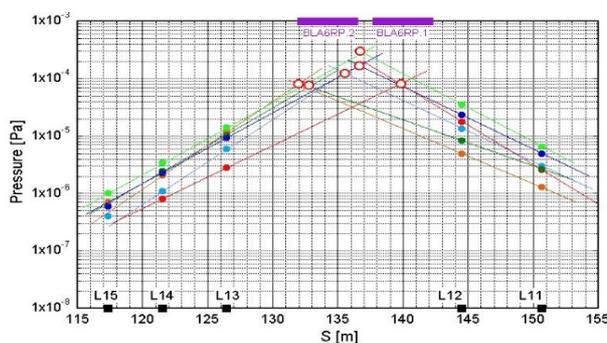


Figure 6: Deduction of the location of pressure burst using the pressure values of several vacuum gauges.

い値が多い。これは、Phase-1 運転がビーム焼き出し運転が主目的の一つであり、高い蓄積電流での運転時間が長いことも一因と考えられる。

- 圧力バーストは幾つかの真空計で観測されているので、それらの最大圧力の分布からバースト発生位置をある程度推定することができる。筑波直線部での典型的な例を Figure 6 に示す。多くの場合、この図にあるように圧力バーストは偏向電磁石の内部かその端付近で発生していた。

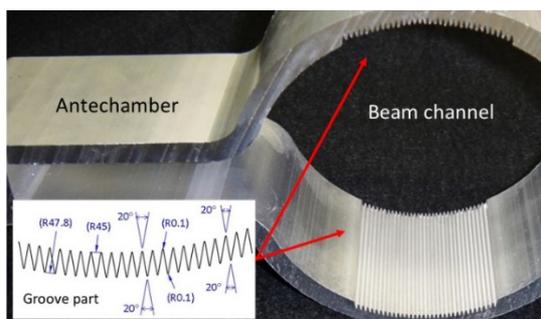


Figure 7: Cross section of a beam pipe for bending magnet, and the structure of groove at the top and the bottom of the beam channel.



Figure 8: Knocker attached to a beam pipe for bending magnet.

以上のような特徴から、圧力バーストはビームパイプ内のダスト粒子とビームとの衝突で発生し、その際のビームロスからビームアポルトに至る、と考えられた。実際、予備のビームパイプ内からは数～数百 μm の多くのダスト粒子が確認された。それらの成分は、アルミ(合金)、アルミ酸化物、ケイ素、チタン、ジルコニウム(NEGの材料)等多種であった。また、偏向電磁石部用ビームパイプには、LERの電子雲不安定性(Electron Cloud Effect, ECE)対策のために、ビームチャンネル部上下面にグループ構造が形成されている(Figure 7)。そのため、ダスト粒子がこのグループ内に捕捉されやすいと考えられる。

この仮定を確認するため、バーストが頻繁に発生していた筑波直線部の偏向電磁石用ビームパイプに、圧空で動作するノッカーを取り付け(Figure 8)、運転中にリモート制御で動作させたところ、観測されていた圧力バーストとビームロスを再現することができた。銅製およびアルミ合金製の偏向電磁石用ビームパイプでは発生したが、グループの無いドリフト部用ビームパイプでは発生しなかった。これは上記推定を裏付けるものである。

3. 単純なモデルを使ったシミュレーション

ビームロスに伴う圧力バースト現象を、ビームパイプ内のダスト粒子とビームとの衝突として、簡単なモデルでシミュレーションを行った。

Figure 9 にビーム方向からみた衝突時の断面を示す。ダスト粒子は半径 r の球体とする。ダスト粒子は、ビームチャンネルの上面から重力で落下する。ダスト粒子は途

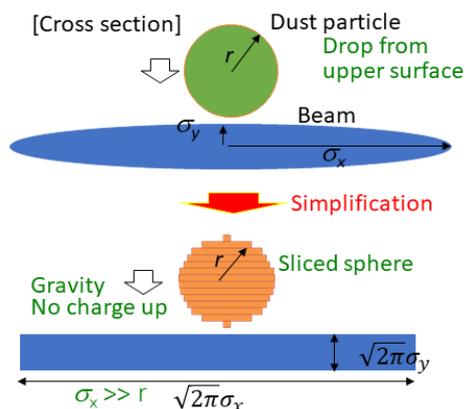


Figure 9: Simplified cross-sectional model for the simulation of the collision of a dust particle with a circulating beam.

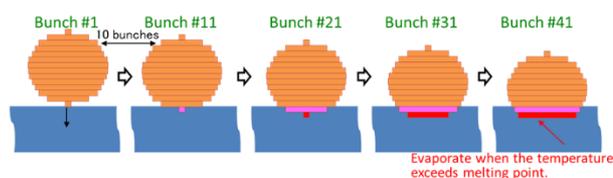


Figure 10: Process of calculating the heating of dust particle and the beam loss during the collision.

中で電荷をもたないとする。また、ビームの断面の粒子数分布は水平、垂直方向に分散 σ_x 、 σ_y を持つガウス分布とする。これを計算ではさらに単純化し、ビーム断面を同じ断面積の四角形とした。ダスト半径 r は σ_x よりも十分小さいとした。

衝突時のダスト粒子の発熱とビームロスの時間変化を計算するために、ダスト粒子を垂直方向に 10 バンチ間隔でスライスした。バンチ間隔が 3 RF-bucket (6 ns 間隔) の時、スライスの高さは約 55 nm である。そして、スライス毎、すなわち 10 バンチ毎に、スライス部分の温度、およびスライス部分でのビームエネルギーロスを計算した。スライス部分の温度が融点に達した時、あるいは、その温度での蒸気圧が 1×10^{-2} Pa を超えた時、当該スライスには蒸発して消失すると仮定した (Fig. 10)。

ダスト粒子の各スライスの温度上昇は、ビームのエネルギー吸収に依るものとした。ダスト粒子は断熱とした。また、各スライスの温度減少は黒体放射を仮定したが、それは常に温度上昇よりも十分小さかった。ビームロスの割合、すなわちビーム寿命は、ダスト粒子とビームがオーバーラップしている部分との相互作用と考え、制動放射、ラザフォード散乱、Moller 散乱から計算したが、アパーチャが広い場合主には制動放射によるものであった。これらは基本的に F. Zimmermann のダストトラッピングの解析方法に倣ったものであるが[6]、LER は陽電子リングなのでトラップはしない。

Figure 11 に、ダスト粒子として酸化アルミ(Al_2O_3)を仮定し、ダスト粒子の半径に対する寿命と積分ビームロス量をビーム電流 100～1000 mA の場合について計算した例を示す。ダスト粒子の半径が大きいほど寿命は短くなり、また、ビームロスも大きくなる。

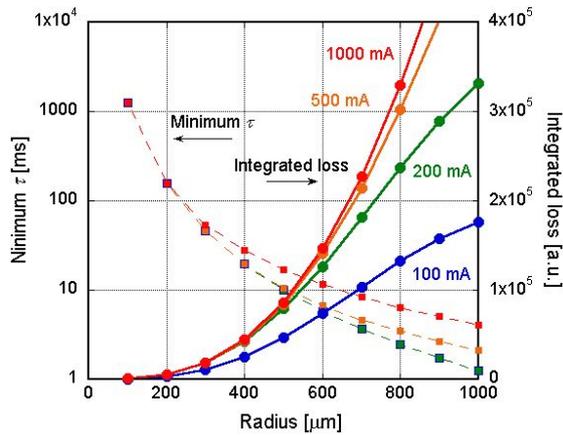


Figure 11: Typical calculated results of the minimum beam life-times and the integrated beam losses as a function of the radius of dust particle for several beam currents in the case of Al_2O_3 particle.

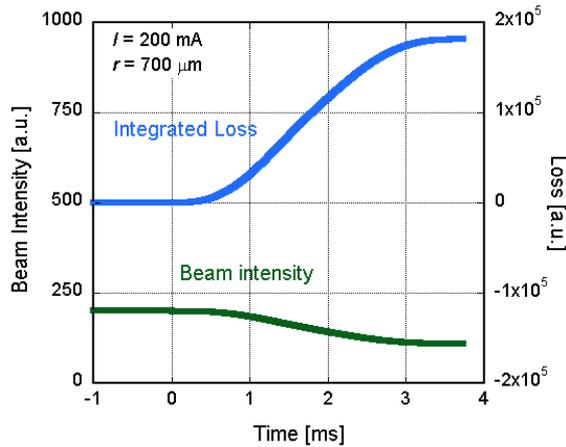


Figure 12: Time behaviors of the beam intensity and the integrated beam loss for the case of the beam current of a 700 mA and the radius of a 200 μm in Figure 11.

例えば、ビーム電流が 200 mA でダスト粒子半径が 700 μm の時の、ビーム強度と積分ロス量の時間変化は Figure 12 のようになる。これは、Figure 3 の測定結果と定性的に合っている。ダスト粒子の半径が数百 μm と大きい、これはビームロスが数 ms 程度続くという観測結果と矛盾しない。

上記では、ダスト粒子とビームとの相互作用を、ダスト粒子の発熱とビームエネルギーロスと仮定して現象を説明した。しかし、衝突するダスト粒子は数 μm と小さいが、それとビームとの相互作用でビーム不安定性が励起され、数 ms に渡ってビームロスが続く、という説明も考えられる。ただ、ビームロス時にビームの振動は観測されていない。この仮説については、現在、シミュレーションやダイナミックアパーチャ測定等による考察が進められている。

4. 実機ビームパイプ内のダスト粒子採集

圧力バーストが頻繁に見られていた筑波直線部近くの 2 本の偏向電磁石用ビームパイプの内部のダスト粒子を採集した。まず、真空状態のビームパイプをノッカーで



Figure 13: Special tool for collecting dust particles at the bottom of beam channel.

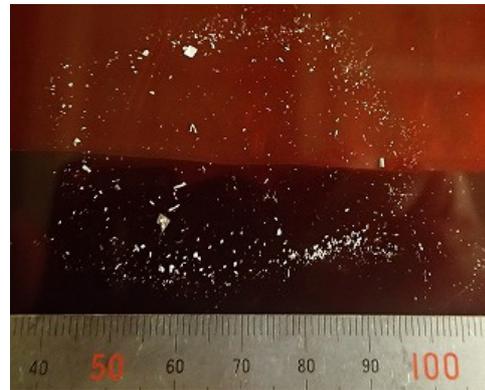


Figure 14: Collected dust particles from a beam pipe for bending magnet where the pressure bursts were frequently observed during the Phase-1 commissioning.

叩き、上面にあるダスト粒子を下に振り落とした。その後ゆっくり大気圧にもどし、Figure 13 のような、掃除機に接続された特性治具を使って内部のダスト粒子を採集した。治具はビームパイプ端面から挿入され、ローラーによって約 3 m 内部まで挿入できる。

その結果、1 本のビームパイプから数百 μm 程度のダスト粒子が多数採集された(Figure 14)。採集したダスト粒子がもともと上面にあったのか下面にあったのかはわからないが、3 節で述べた、比較的大きな粒径のダスト粒子との衝突が圧力バーストの原因という説を支持する一つの結果である。ただし、圧力バーストが観測されていない偏向電磁石用ビームパイプ内部の観察は行っていない。今後機会があれば行う予定である。

5. Phase-2 運転前の対策

原因となるダスト粒子の大きさが数百 μm 程度とすると、ビームチャンネル下面にあるダスト粒子がチャージアップされ、ビームに引き寄せられるとは考えにくい。したがって、上面に捕捉されているダスト粒子が問題と考えられる。この仮定に基づき、Phase-2 運転開始前に、圧力バーストが頻繁に観測された筑波直線部にある 24 本のビームパイプについて、ノッカーを使ってダスト粒子を振り落とした。その際ビームパイプは真空状態であった。ビームパイプ側面にノッカーを取り付け(Figure 8 参照)約 6 気圧の圧空により、ビームパイプ中央部および両端部を各

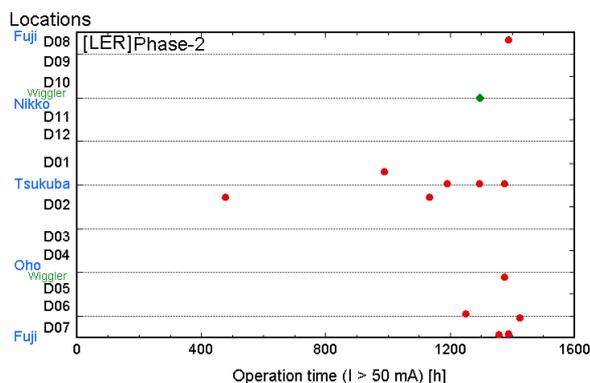


Figure 15: Locations of the pressure bursts in the ring, the beam currents when the bursts occurred and the maximum stored beam current at that time as a function of the operation time with a beam current larger than 50 mA during the Phase-2 commissioning.

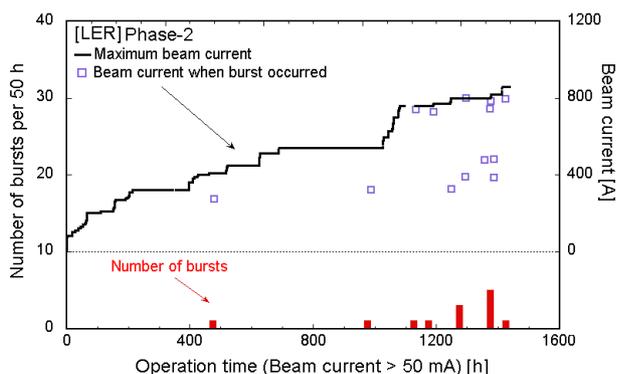


Figure 16: Number of bursts per 50 h of operation time, the beam current when the bursts occurs, and the maximum beam currents as a function of beam operation time during the Phase-2 commissioning.

50 回、計 150 回叩いた。予備実験では 50 回叩くと、落ちてくるダスト粒子の数は 1 回目の衝撃時の数から約 1 ケタ減少した。今回は落としたのみで、その後の掃除は行わなかった。

6. Phase-2 運転時の状況

Phase-2 運転は、2018 年 3 月から 7 月まで行われた。この間のビーム電流 50 mA 以上の運転時間に対する圧力バーストの発生位置、発生電流、最大蓄積ビーム電流を Figure 15 に、運転時間 50 時間毎の発生頻度と発生電流、最大蓄積ビーム電流を Figure 16 にそれぞれ示している。両図から明らかなように、Phase-2 運転時には、ビームロスに伴う圧力バーストは各段に減っている。特に筑波直線部では新規に設置したビーム衝突点部以外ではほぼ観測されなくなった。これは 5.節で述べた対策が効いたものとも考えられる。しかし、筑波直線部以外での圧力バーストも減っている。この原因としては、Phase-2 運転では、粒子測定器(BELLE-II)を使った衝突実験や加速器の衝突調整が主な目的の一つであったため、300mA 以下の比較的小電流での運転時間が多くを占め、Phase-1 運転時のような最大電流に近い状態での運転時

間が短かったことが挙げられる。実際、Phase-1 運転時のビームドーズは 775 Ah、50 mA 以上の運転時間は 1694 h、すなわち平均ビーム電流は 457 mA であったが、Phase-2 運転時は、それぞれ、315 Ah、1378 h で、平均ビーム電流は 229 mA と Phase-1 運転時の約 1/2 であった。Phase-1 運転時に多くのダスト粒子が落ち、いわゆるコンディショニングが進み、低い電流では落ちにくかったと考えられる。その他、ビームコリメータの増設、ロスモニターの更新などビームアポート条件の変化も影響している可能性があるが現在検討中である。Phase-3 以降、より高い蓄積電流での観察が必要である。

7. まとめ

Phase-1 運転時に観測されたビームロスに伴う圧力バーストは、ビームパイプ内のダスト粒子とビームとの衝突に依るものと考えられた。ダスト粒子半径数百 μm として、ダスト粒子とビームとの衝突を簡単なモデルを使って計算すると、観測結果を定性的に再現した。Phase-2 運転前に、Phase-1 運転で頻繁に圧力バーストを観測していた場所のビームパイプをノッカーで叩き、ビームパイプ上面のダスト粒子を振り落としした。その結果、Phase-2 運転では筑波直線部での圧力バーストの頻度は大幅に減少した。ただ、発生頻度の減少は筑波直線部以外でも見られ、その原因は、Phase-2 運転では高いビーム電流での運転が短かったため、Phase-1 でのコンディショニングが進んだため、等と考えられる。Phase-3 運転での高電流運転時に観察を続ける必要がある。

謝辞

真空システムの実験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へ深謝致します。

参考文献

- [1] H. Koiso *et al.*, "COMMISSIONING STATUS OF HIGH LUMINOSITY COLLIDER RINGS FOR SuperKEKB", Proceedings of IPAC'17, Copenhagen, May 14-19, 2017, pp.1275-1280.
- [2] Y. Suetsugu *et al.*, "Results and problems in the construction phase of the SuperKEKB vacuum system", JVST-A, 34, 2016, 021605.
- [3] S. Terui *et al.*, "OBSERVATION OF PRESSURE BURSTS IN THE SUPERKEKB POSITRON RING", Proceedings of IPAC'18, Vancouver, April 29 - May 4, 2018, WEPML058.
- [4] S. Terui *et al.*, "SuperKEKB LER での圧力バーストの観測", Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Aug. 1-3, 2017, pp. 145-149.
- [5] Y. Ohnishi, "SuperKEKB フェーズ2におけるコミッショニングの成果", Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Aug. 7-10, 2018, WEOLP01.
- [6] F. Zimmermann, "Trapped Dust in HERA and Prospects for PEP-II", PEP-II AP Note No 8-94, 1994.