

SuperKEKB 加速器真空システムの現状 – 2020b ランまでの運転 – STATUS OF THE SuperKEKB VACUUM SYSTEM UNTIL 2020B RUN

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

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

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

Abstract

The Phase-3 2020a and b runs of the SuperKEKB started on 25th, February 2020, and ended successfully on 1st, July, the same year. Various beam tunings have been continued during these runs to improve the collision performance, and the world highest luminosity of $2.4 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ was recorded in June 2020 while taking physics data at Belle II detector. The vacuum system of the main ring (MR) and the positron damping ring (DR) worked well during the commissioning. The vacuum pressures decreased steadily following the previous runs. Several problems, such as an abnormal pressure rise near a gate valve, pressure bursts in some limited locations in the ring and so on, were found in these runs, and the measures against them will be taken during this long summer shutdown.

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(MR)は 7 GeV 電子用の High Energy Ring (HER)と 4 GeV 陽電子用の Low Energy Ring (LER)、そして衝突実験を行う Belle II 測定器から構成される[1, 2]。陽電子入射路の途中には、陽電子ビームのエミッタンスを低減するためのダンピングリング(DR, 1.1 GeV)が設置されている。KEK つくばキャンパスの SuperKEKB のレイアウトを Fig. 1 に示す。

SuperKEKB は Phase-1、Phase-2 に続き 2019 年 3 月から本格的な衝突実験となる Phase-3 運転を開始した[2]。2020 年 2 月 25 日から 7 月 1 日までは Phase-3 2020a ラン(2月25日~3月31日)および b ラン (4月1日~7月1日)を行い、衝突実験を継続しつつ加速器性能向上のため様々な調整を行った。2020 年 6 月には世界最高となるルミノシティ $2.4 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を記録した[3]。ビーム運転中、MR、DR の真空システムはほぼ順調に稼働した。各種真空機器の状況を確認しつつ、発生した様々な問題に対する対応等を行った。ここでは、主に 2020b ランまでの MR および DR の真空システムの状況や課題等を報告する。

2. MR および DR 真空システムの状況

MR および DR の真空システムにて、2020b ランまでに達成した主な真空関連パラメータを Table 1 にまとめている。また、MR の LER、HER、および DR について、2020b ランまでの単位電流あたりの圧力上昇(dP/dI [Pa A^{-1}])の積算ビーム電流(ビームドーズ) [Ah]に対する変化(真空焼きの進捗具合)を Fig. 2(a), (b)、および Fig. 3 にそれぞれ示している(左、下軸)。なお、MR の場合、ベース圧力を $3 \times 10^{-8} \text{ Pa}$ と仮定し、また、計算には最大蓄積電流の 40%以上のビーム電流時の値を使用して誤差を低減している。各リングとも単位電流あたりの圧力上昇はビーム



Figure 1: Schematic layout of SuperKEKB at Tsukuba campus.

Table 1: Main Results in MR and DR During Phase-3 2020b Run Related to Vacuum

Parameters	MR LER	MR LER	DR
Max. current [mA]	~660	~770	~6
Beam dose [Ah]	2791.5	2579.6	10.3
Photon dose [photons m^{-1}]	~ 1.5×10^{25}	~ 2.4×10^{25}	~ 5.2×10^{23}
Final dP/dI [Pa A^{-1}] at arc section	~ 1.3×10^{-7}	~ 2.1×10^{-8}	~ 2.0×10^{-5}

ドーズと共に順調に下がっていることがわかる。MR にて、2020a ランの開始当初 dP/dI が高くなっているが、これはその前の 2019 冬季シャットダウン中にビームコリメータ設置などビームパイプを大気に曝す作業を行ったためである。また、同図は、アーク部について、光刺激脱離係数

[#] yusuke.suetsugu@kek.jp

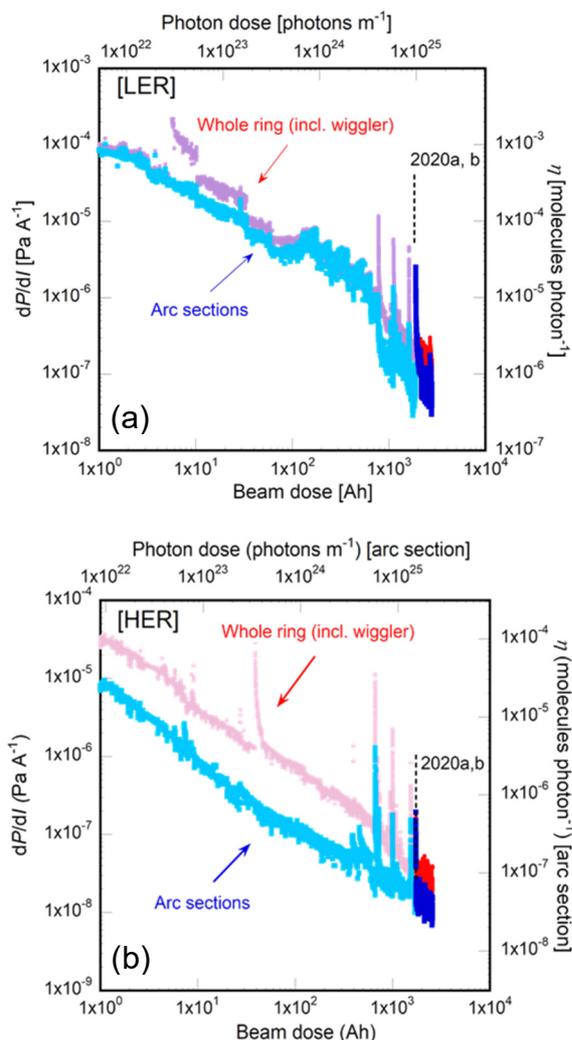


Figure 2: Beam current and dP/dI of (a) LER and (b) HER from Phase-1 to 2020b run, where the dark-color data are those during 2020a and b runs.

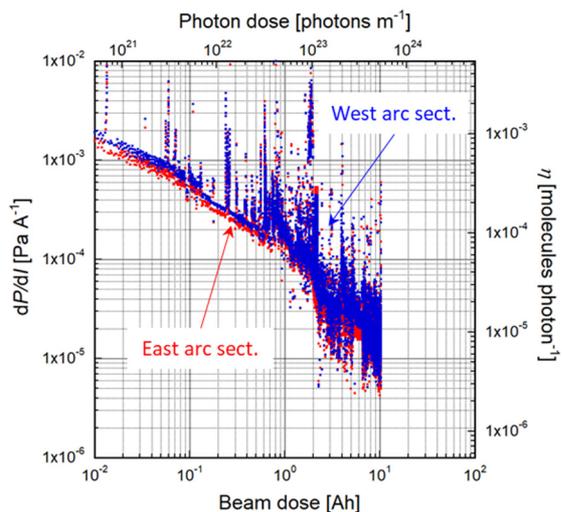


Figure 3: Beam current and dP/dI of DR from Phase-2 to 2020b run.

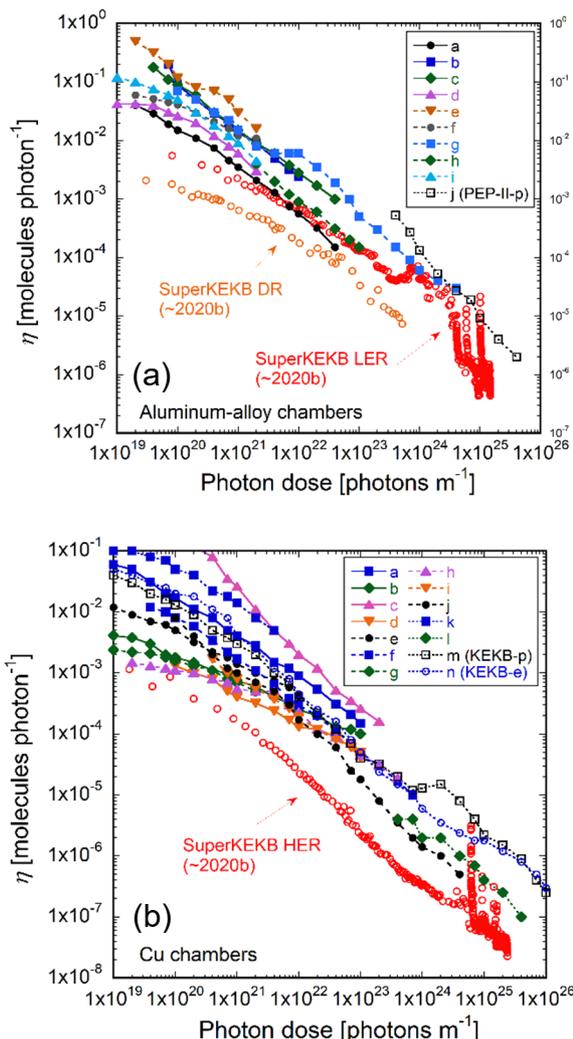


Figure 4: Summary of experimental data concerning the value of η [molecules photon⁻¹] for (a) aluminum-alloy chambers and (b) copper chambers, obtained at various accelerators; the data sources are listed in Ref. [4].

(η [molecules photon⁻¹])の単位長さの平均積分光子数 (フォトンドーズ) [photons m⁻¹]に対する変化も示している (上、右軸)。LER の方は、設計時に仮定した値($\eta \sim 1 \times 10^{-6}$ molecules photon⁻¹)程度まで下がっている。一方 HER の圧力は KEKB 運転時代のメモリー効果もあり十分低い値に到達している [4-6]。

これまでの様々な電子・陽電子蓄積リング(ビームパイプの材質がアルミあるいは銅)における光脱離係数 η の光子ドーズに対する変化と、SuperKEKB の LER、HER および DR のそれらと比較したものを Fig. 4(a), (b)に示す。図中の凡例にあるデータについては、参考文献[4]を参照されたい。図からわかるように、SuperKEKB の各リングの η は、これまでの加速器に比べると同等かそれ以下となっている。特に HER は、先にも述べたように、KEKB 運転時代のメモリー効果もあり、他に比べて格段に低い値となっている。引き続き観測を続けていく。

陽電子リングの電子雲不安定性 (Electron Cloud Effect, ECE)は今の所観測されていない。2020b ランでは、

バンチフィルパターン 783 バンチ(平均 6.12 RF bucket 間隔)では最大約 600 mA、978 バンチ(平均 4.9 RF bucket 間隔)で最大約 770mAを蓄積した。これらの場合の最大バンチ電流密度は、それぞれ、0.13 mA RF-bunch⁻¹ bucket⁻¹、0.16 mA RF-bunch⁻¹ bucket⁻¹ であり、Phase-1 ではECEが出現し始める値である[7]。今後ビーム電流を増やす予定であり、ECE についても引き続き観察を続けていく。

3. 主な課題と対策

3.1 Belle II 測定器のバックグラウンド(ノイズ)

運転中の蓄積ビーム電流値を制限したのは主に Belle II 測定器のバックグラウンドである。そのバックグラウンドの約 50%は LER の圧力に起因するもの(ビーム-ガス散乱)であった。HER の圧力からの寄与は LER に比べると少なかった(約 15%)。その他、LER、HER の Touschek 効果に起因するものが、それぞれ約 10%、約 5%であった[8]。LER、HER のビーム寿命の大部分はビームコリメータ部の物理的開口と Touschek 効果で決まっている。コリメータの増設や調整、そして真空焼きが進むにつれてバックグラウンドは改善されており、2020b ランでは 2019c ランに比べて約 1/2 となった。しかし一方、ビームエミッタンスを小さくすることで Touschek 効果が顕著になり、また衝突点の β 関数を絞るにつれてバックグラウンドが高くなっている。今後さらにビームを絞り、またビーム電流を増やしてルミノシティを上げていくため、状況はさらに厳しくなるであろう。バックグラウンドに影響が大きい区間があれば、ベーキングやポンプ増強等により、その区間の圧力を下げる等対策が必要になるかもしれない。

2019c ラン開始前に行ったコリメータ付近の現場ベーキング(100~120°Cで数日間)は、バックグラウンド低減に一定の効果があったように見える。今後、設置、あるいは大気に曝す作業を行ったコリメータ部では、現地ベーキングを行う予定である。また、ベーキングとはいかなくても、粗排気ポンプを取り付けた状態で NEG 活性化を長めに行い(数日間)、NEG 活性化に伴うビームパイプの温度上昇を利用した長時間の低温ベーキング(60~80°C)も付近の圧力低下にある程度効果が見られている。

3.2 ビームアボート(ビームロス)を伴う圧力バースト

Phase-1 以来観測されている、ビームとビームパイプ内ダストとの衝突が原因と推定されるビームアボート(ビームロス)を伴う圧力の跳ね(バースト)についても引き続き観測を行った[7, 9]。LER における Phase-1 からのバーストの発生頻度(50 mA 以上での運転 50 時間あたりの発生頻度)と発生時のビーム電流、発生時の最大運転電流を、50 mA 以上の運転時間に対して Fig. 5 に示している。なお Phase-3 の 2019a からは、ビームコリメータ傍の圧力が 20%程度急上昇したらビームをアボートする機能が追加されたので、その場合も含まれている。一方、アボートとほぼ同時に RF 空洞に隣接する場所で観測された圧力の跳ねは、アボート時の RF パワーオフに起因してビームとは無関係なので除いている。また、圧力バーストが発生した場所の変遷を Fig. 6 に示している。ここで、D01~D12 は、リングに沿って分けられた 12 区間の記号である。"Fuji"等は実験棟の名前で、衝突点は"Tsukuba"

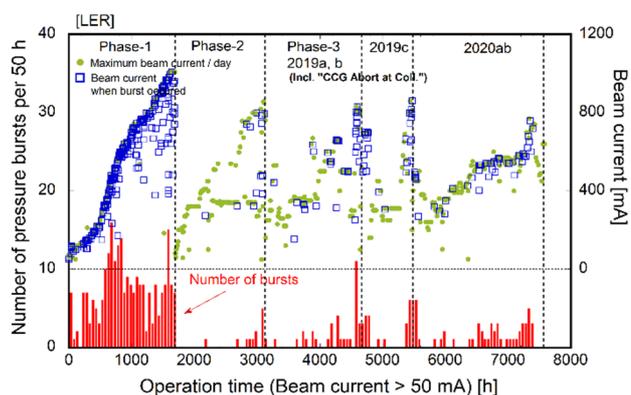


Figure 5: Number of pressure bursts occurring per 50 h of operation time, the beam currents at which pressure bursts occurred, and the maximum operation current at that time from Phase-1 (2016) to Phase-3 2020b run in LER.

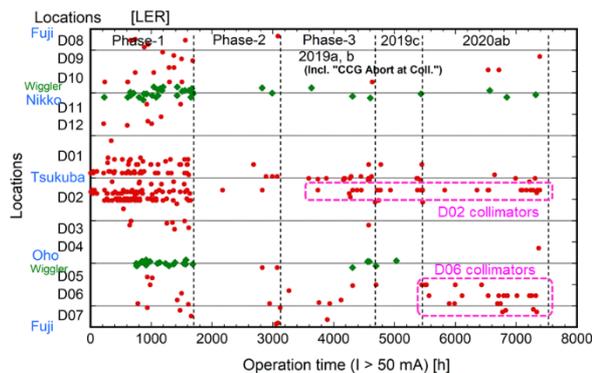


Figure 6: Locations of the pressure bursts along the ring versus operation time from Phase-1 (2016) to Phase-3 2020b run in LER.

にある。

Figure 5 からわかるように、2020a, b ランにおいても 2019a, b, c ランと同様な頻度で発生しているが、2019ab や 2019c に比べて低い電流で発生しているように見える。ただし、これらのバーストの多くは、Fig. 6 のように、発生場所が限られている。2020ab ランでは、衝突点からみてビーム上流側にあたる D02、D06、D07 で頻繁に発生しているが、この場所はビームコリメータ部に相当する。これは、ビームコリメータ部ではバックグラウンドを低減するために開口が狭くっており(特に垂直方向はビームから 1~2 mm)、不安定になったビームがヘッドに衝突しやすい、ということも原因の一つと考えられる。一方、HER の方も観測を続けているが、HER の方は、アボートとほぼ同時に衝突点直下流部(衝突点から約 20 m)で頻繁にバーストが観測された。しかし、この場所の圧力は、衝突点部でのビーム軌道に敏感に反応することから、アボートの原因ではない、つまり、不安定になったビームからの放射光が原因、と考えられる。この圧力跳ねを除くとこれまでと同様の頻度である。引き続き注意して観測を続ける。

LER や HER で観測されている、突然のビームロス、あるいはビームアボートの原因は、ビームアボート直前の

ビーム軌道解析やシミュレーションを用いて引き続き調査されるが、上述したように、ダストとの衝突でビームがエネルギーを失いビームが急激にブローアップした、あるいは軌道が逸れたのが原因ではないか、との説がある。アポルト直前に僅かだが水平方向に軌道がずれている場合があること、リング内で圧力バーストが同時に観測される場合があること、等がその理由である。ただし、必ずしも圧力バーストが同時に観測される訳ではない。ダストとの衝突で今回のような急激なビーム不安定性が起きるかどうかを含め、この事象の発生メカニズムの解明が必要であろう。

ダストとビームとの衝突が引き金になったとすると、この事象を完全に除去することは難しい。ただ、Fig. 5 でもわかるように、発生頻度にエージング効果(運転につれて同程度のビーム電流では発生頻度が減る)があるとすると、物理実験開始前に、検出器の高電圧は OFF し、かつ必要なら QCS(ビーム最終収束用超伝導電磁石)のクウェンチが発生しにくいように衝突点の β 関数を緩めた状態で高い電流まで蓄積し、安定に運転できることを確認した後(すなわちエージング運転後)、やや少ない電流で物理実験を行うことで、衝突実験中この事象の発生確率を減らせ、測定器へのダメージも低減できると考えられる。また、Phase-2 前にも行った、運転前にビームパイプをノッカーで叩くことも有効と考えられる[7]。2020 年夏季シャットダウン中にも、リングのほぼすべての偏向電磁石用ビームパイプに対してノッカーで叩く作業を行う。

3.3 コリメータヘッドの損傷

2019c ラン前に新規設置したビームコリメータは Belle II 測定器のバックグラウンド低減に有効に働いている[10]。突然のビームロスに伴う、垂直型コリメータヘッドのビーム衝突による損傷は 2019c でも発生した[10, 11]。前節でも述べたように、このビームロスの原因は未だ明確ではない。ヘッドに損傷を受けた場合、傷によってバックグラウンドの増加や入射効率の低下が起こるため、当該コリメータ部に水平方向の軌道バンプを立てて損傷部を避ける、あるいは、コリメータ自身を水平方向に少しずつ等々の応急処置をとり運転を継続しているが、それができないものもある。これら傷を受けたコリメータヘッドは長期シャットダウン中に予備と交換している。しかし、コリメータの放射化が激しくなっているため交換作業も容易ではなく、また、作業後の真空立ち上げに時間がかかる。この急激なビームロスへの対策として、より速くビームをアポルトできるシステムへの改良が進められた。例えば、ビームを安全にアポルトするためのアポルトギャップ数を 2 か所に増やす(タイミングを取る時間が減る)、アポルトギャップを待つ時間を減らす、等である。2019c 前の対策により、アポルトまでの最小遅延時間は 4~9 μ s 早くなった[12]。

一方、コリメータヘッド損傷を防ぐ手段として、これまでのタンゲステンやタンタルに代わり、原子番号が小さい、つまり、ビーム衝突時の単位長さあたりの発熱量が小さく、また融点も高いカーボン製のヘッドも開発しており、2020 年夏に試作機を設置する予定である[10]。

3.4 直線部の圧力異常上昇

2020b ランにおいて、バンチ数 783 バンチにて 550 mA

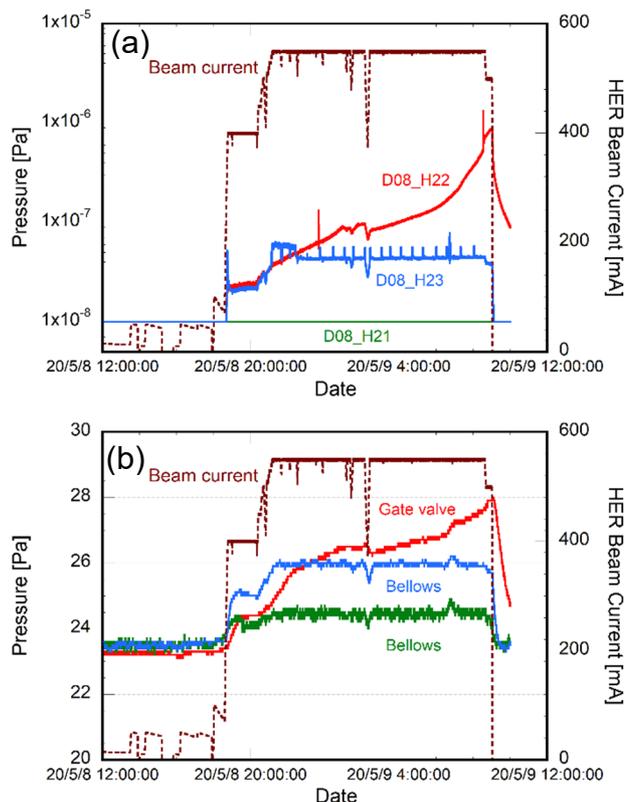


Figure 7: Trends of (a) pressures of three vacuum gauges, D08_H21, H22 and H23, at Fuji straight section, (b) temperatures of a gate valve and two bellows chambers near the vacuum gauge of D08_H22, and HER beam currents.

程度で運転中、Fuji 直線部にある D08 H22 と呼ばれる真空計の圧力が、ビーム電流が一定にも関わらず徐々に上昇するという事象が発生した。Figure 7(a)に圧力の時間変化の一例を示す(縦軸は対数目盛)。約 12 時間の連続運転中圧力は上昇し続け、終盤で圧力は急激に上昇している。この圧力上昇のため、HER の蓄積電流を一時制限した。この区間のビームパイプの断面は、幅 60 mm、高さ 40 mm のレーストラック型である。付近のベローズチェンバー、NEG ポートやゲートバルブの温度を測定したところ、Fig. 7(b)に示すように、20°C 台と低いものの、ゲートバルブの温度が同様な振る舞いをしてきた。温度がビーム電流には比例しないことから放射光による発熱とは考えにくく、ビームが誘起する高次高周波(Higher Order Mode、HOM)による発熱が疑われた。実際、バンチ電流が小さい 978 バンチの時には、約 600 mA でもこの温度上昇は見られなかった。原因の一つとして、HOM で NEG 素子が発熱することによるガス放出を疑ったが、NEG 活性化後でも大きな変化が見えず、結局ゲートバルブが原因ではないかと推定された。ゲートバルブの RF シールド(楕円型)から HOM がゲートバルブ筐体に侵入し、共鳴等で発熱している可能性がある。マルチパクティングの発生を想定し、ゲートバルブの周囲に永久磁石を配置してみたが、明確な変化はなかった。対策として、2020 年夏の長期シャットダウン中に当該ゲートバルブを撤去して、2020c 秋季運転で様子を見る

ことにしている。

3.5 その他の問題

(1) MR ウィグラー部でビームパイプの温度上昇(〜40°C@〜600 mA)が観測されているが、2020b ラン中、ウィグラー部のフランジ一か所から大気リークが発生した。シンクロトロン放射光(Synchrotron Radiation、SR)の垂直方向分布の裾部分がアンテチェンバー部のフランジにあたって、熱膨張/収縮を繰り返したためと推定される。応急処置としてフランジの増し締めを行った。運転中のビーム上流側の軌道をできるだけ水平になるように補正する、長期シャットダウン中に SR マスク付きベローズの順次設置する[7]、等で対応している。

(2) これまで、HER のビームコリメータは KEKB で使用していたものを再利用していた。しかし、最近では、バックグラウンド抑制のために、より精密な制御が必要になってきている。また、KEKB 時代に受けたと思われるヘッ드의損傷がバックグラウンドに影響する可能性も指摘された。さらに、駆動系の老朽化も進んでいる。そこで、SuperKEKB 用コリメータの駆動装置、制御系を応用した新しい駆動装置の開発を進めている。また、予備のコリメータヘッドの製作も開始している。

(3) DR ではイオンポンプ電源の故障が頻発している。主ポンプが NEG であるため、運転には直接支障はないが、場所によってはインターロックが働きゲートバルブが閉まってしまう。予備と逐次交換しているが、最近故障の頻度が上がっている。初期故障とも考えられる。長期的対策を検討中である。

4. まとめ

Phase-3 2020b ランは7月1日に終了した。本格物理実験が開始された 2019c 以降、Belle II の積分ルミノシティは約 67 fb^{-1} に達した。ルミノシティは衝突点の垂直方向 β 関数を 1.0 mm まで絞った後、世界最高となる $2.4 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を記録した。この β 関数の値もまた、実用加速器としては世界最小値である。今後さらに β 関数を絞り、ビーム電流を上げて目標に近づけていく予定である。真空システムは、DR、MR とも概ね順調に稼働しているが、ビーム電流が増大するにつれ、大電流、高バンチ電流に起因する様々な課題も発現している。それぞれ対策を講じ、安定な運転に供していく予定である。

謝辞

真空システムの運転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にも深く感謝致します。

参考文献

- [1] A. Morita, "STATUS OF EARLY SUPERKEKB PHASE-3 COMMISSIONING," in *Proceedings of IPAC2019*, Melbourne, May 2019, pp.2255-2257.
- [2] Y. Ohnishi, "SuperKEKB フェーズ 3 コミッショニング," in *Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Kyoto, July - August 2019, pp.1215-1219.
- [3] <https://www.kek.jp/ja/newsroom/2020/06/26/1400/> (Press release, June 2020).

- [4] Y. Suetsugu *et al.*, "Beam scrubbing of beam pipes during the first commissioning of SuperKEKB," *Appl. Surf. Sci.* **432**, p.347, 2018.
- [5] K. Shibata *et al.*, "Commissioning of vacuum system for SuperKEKB positron damping ring," *J. Vac. Sci. Technol., A* **37**, p.41601, 2019.
- [6] Y. Suetsugu *et al.*, "SuperKEKB main ring vacuum system status until the end of Phase-2 commissioning," *J. Vac. Sci. Technol., A* **37**, p.021602, 2019.
- [7] Y. Suetsugu, *et al.*, "SuperKEKB 加速器真空システムの現状 - Phase-3 2019 春の運転 -," in *Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Kyoto, July - August 2019, pp.622-626.
- [8] H. Nakayama, *Presented in the 24th KEKB Accelerator Review Committee*, Tsukuba, July 2020; <http://www-kekb.kek.jp/MAC/2020/>
- [9] Y. Suetsugu, *et al.*, "First commissioning of the SuperKEKB vacuum system," *Phys. Rev. Acc. Beams*, **19**, p. 121001, 2016.
- [10] T. Ishibashi, *et al.*, "Movable collimator system for SuperKEKB," *Phys. Rev. Acc. Beams*, **23**, p. 053501, 2020.
- [11] S. Terui, *et al.*, "SuperKEKB メインリングのコリメータの現状," in *Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Kyoto, July - August 2019, pp.903-906.
- [12] H. Nakayama, *Presented in the SuperKEKB workshop "SuperKEKB: Challenges for the High Luminosity Frontier,"* Tsukuba, January 2020; <https://conference-indico.kek.jp/event/103/>