

SuperKEKB 加速器真空システムの現状 – Phase-3 2019 春の運転 –

PRESENT STATUS OF THE SuperKEKB VACUUM SYSTEM - PHASE-3 2019 SPRING 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 慕鑫^{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 2019 Spring run of the SuperKEKB started on 11th, March 2019, and ended successfully on 1st, July, the same year. The vacuum system of the main ring (MR) and the positron damping ring (DR) worked well during the commissioning. The pressures decreased steadily following the Phase-1 and Phase-2 commissioning. The countermeasures against the electron cloud effect (ECE) have been working effectively. The new five beam collimators installed before the Phase-3 commissioning into the MR functioned well as expected, although the heads of a vertical-type collimator received heavy damages by the suddenly steered or blown-up stored beam. The main part of Belle II background was found to come from the beam-gas scattering in the LER, and an *in situ* baking of the existing horizontal-type beam collimators is planned, where the pressure was notably higher than others. A bellows chamber at the interaction region, where extra heating was observed during the commissioning, will be replaced in this summer shutdown.

1. はじめに

SuperKEKB [1, 2]は、KEK の電子・陽電子衝突型加速器で、その主リング(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(Fig. 1)。陽電子入射路の途中には、Phase-2 運転からダンピングリング(DR, 1.1 GeV)も稼働している。Phase-2 運転終了後、Belle II の崩壊点検出器の設置等を行い、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、7 月 1 日に無事終了した(Phase-3 2019 春季運転)。MR の真空システムでは、Phase-3 前にビームコリメータの増設や、入射部ビームパイプの更新、そして Phase-2 までに見つかった発熱等の問題への対処を行った[3-6]。MR、DRの真空システムは Phase-3 でもほぼ順調に稼働し、その圧力も堅調に下がっている。今季運転中は、新規設置機器の特性を検証すると同時に、引き続き LER の電子雲効果(Electron Cloud Effect, ECE)、圧力バースト問題等の観察を続けた。ここでは、Phase-3 2019 春季運転時の SuperKEKB 真空システムの状況、今後に向けた課題等を報告する。

2. ダンピングリング(DR)の状況

陽電子ダンピングリングの真空システムは Phase-3 春季運転中も問題なく稼働した。春季運転で達成した主なパラメータを Table 1 にまとめている。圧力は積算ビーム電流(ビームドーズ)と共に順調に下がっている。Phase-2 および Phase-3 春季運転でのビーム電流[mA]と単位電流あたりの圧力(dP/dI [Pa A⁻¹])のビームドーズ[Ah]に対する変化を Fig. 2 に示す。運転中主ポンプである非蒸発型ゲッターポンプ(NEG)の活性を行う必要はなかった。Phase-2 時から圧力が高かった高周波空洞区間につい

[#] yusuke.suetsugu@kek.jp

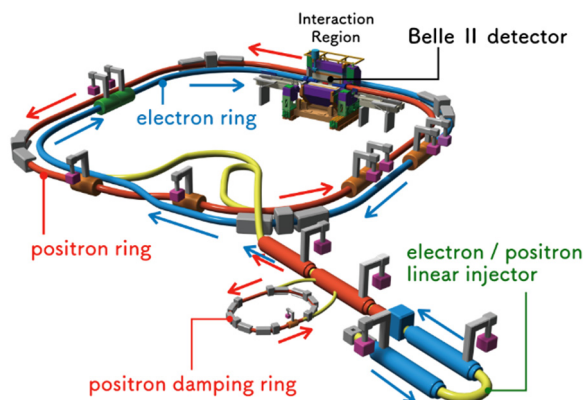


Figure 1: Schematic layout of SuperKEKB.

ては、Phase-3 開始前に空洞部のベーキングが行われたが、顕著な効果は見られなかった。ECE はまだ観測されていない。

3. 主リング(MR)の状況

Phase-3 前の長期シャットダウン中に、衝突点部では、Belle II 測定器の崩壊点検出器(Vertex detector, VXD)がすべて装備され、また、冷却水漏れのあったベローズを交換した。その他、ビームコリメータを HER に 1 台(水平方向型 = H 型)、LER に 4 台(H 型 3 台、垂直方向型 = V 型、1 台)を設置した。また、セプタムチャンバー内のビームパイプをより漏れ磁場が少ない改良型へ交換する作業など、多くの真空作業を行った。

MR の真空システムも今季運転中概ね順調に稼働した。真空に関する主なパラメータの達成値を Table 2 にまとめている。MR の LER、HER の単位電流あたりの

Table 1: Main Results in DR Related to Vacuum

Parameters	Phase-2	Phase-3
Max. current [mA]	12	15
Beam dose [Ah]	2.0	2.0
Photon dose [photons m ⁻¹]	1.0×10 ²³	1.0×10 ²³
Final dP/dI [Pa A ⁻¹] at arc section	6.0×10 ⁻⁵	3.0×10 ⁻⁵

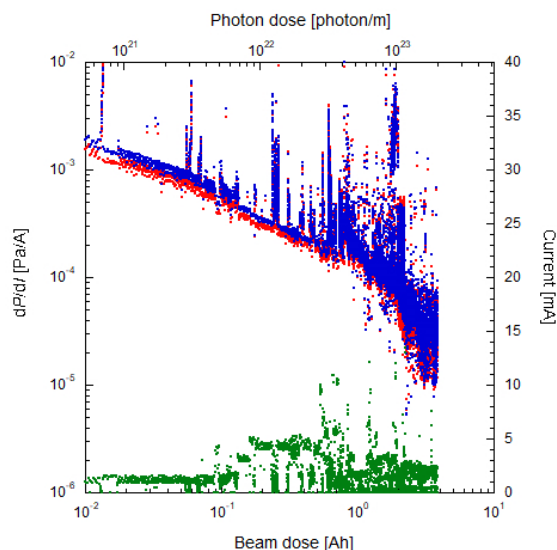


Figure 2: Beam current and dP/dI of DR from Phase-2 to Phase-3 2019 spring run.

圧力上昇 dP/dI [Pa A⁻¹] を Fig. 3 に示す(ベース圧力を 3×10^{-8} Pa と仮定し、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た)。圧力は Phase-1 以降順調に下がっている。HER の圧力は KEKB 運転時代のメモリー効果もあり十分に低い値に到達している。一方 LER の方はまだ焼き出し途中である。設計時に仮定した値(光刺激脱離係数 $\eta \sim 1 \times 10^{-6}$ molecules photon⁻¹)以下まで下がるにはもうしばらくかかりそうである。

新規に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た[7, 8]。H 型は主に Touschek 効果に起因するバックグラウンドに、そして V 型は主にビーム-ガス散乱に起因するバックグラウンドに

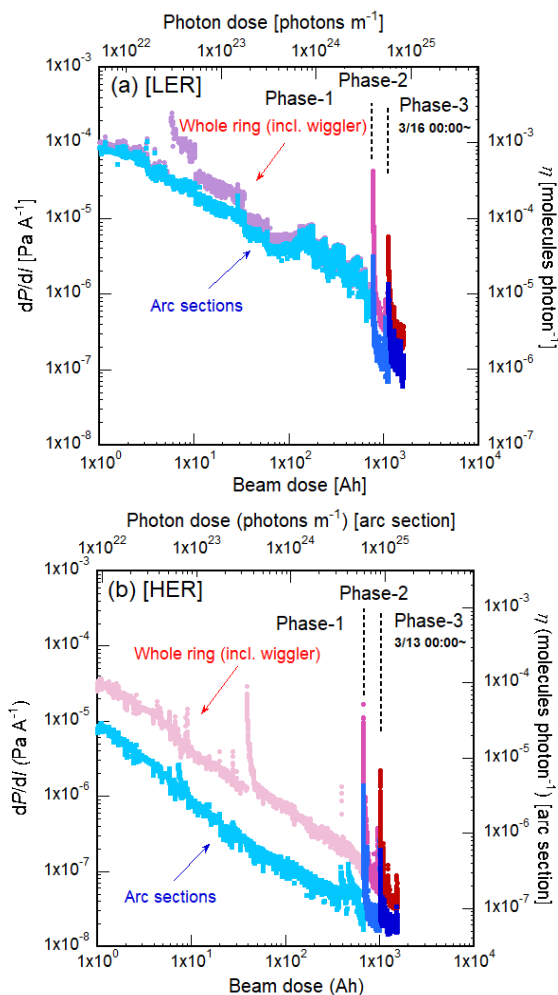


Figure 3: Beam current and dP/dI of (a) LER and (b) HER from Phase-1 to Phase-3 2019 spring run.

効いた。バックグラウンド問題については次章でも触れる。その他の機器は特に問題なく運転に供した。蓄積電流を徐々にあげる、いわゆる大電流スタディー時には、入射部等で圧力のバーストが見られたが、エージング効果があるようで、ビーム電流を維持していると収まってくる傾向があった。

陽電子リングの ECE については、Phase-3 春季運転でもこれまでと同様の実験を行った[9,10]。すなわち、バンチ間隔を 2 RF バケツ、3RF バケツ、および 4RF バケツ

Table 2: Main Results in MR Related to Vacuum

Parameters	Phase-1		Phase-2		Phase-3	
	LER	HER	LER	HER	LER	HER
Max. current [mA]	~1010	~870	~860	~800	~830	~940
Beam dose [Ah]	775.0	661.5	337.5	340.2	500.4	539.1
Photon dose [photons m ⁻¹]	~4.1×10 ²⁴	~6.1×10 ²⁴	~1.8×10 ²⁴	~3.1×10 ²⁴	~2.6×10 ²⁴	~5.0×10 ²⁴
Final dP/dI [Pa A ⁻¹] at arc section	~1×10 ⁻⁶	~1×10 ⁻⁷	~3×10 ⁻⁷	~7×10 ⁻⁸	~2.4×10 ⁻⁷	~4×10 ⁻⁸

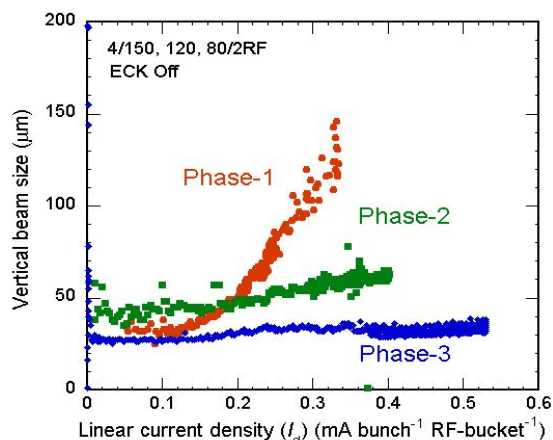


Figure 4: Vertical beam sizes at the collision point as a function of the linear current density at bunch fill patterns with 2 RF-bucket spacings for Phase-1, Phase-2 and Phase-3 2019 spring run.

トと変えて蓄積し、実験時に許される範囲で電流を積み、垂直方向ビームサイズ、励起されるビーム振動モード測定を行った。バンチ間隔 2RF バケット時の、線電流密度 (バンチ電流をバンチ間隔で割ったもの [$\text{mA bunch}^{-1} \text{RF-bucket}^{-1}$]) に対する衝突点での垂直方向ビームサイズ [μm] の変化を、Phase-1、Phase-2 の結果とともに Fig. 4 に示している。今回は $0.53 \text{ mA bunch}^{-1} \text{ RF-bucket}^{-1}$ まで測定を行い、ビームサイズの増大は見られなかった。これは、1576 バンチ、3.06 RF-bucket 間隔のフィルパターンでは約 2.6 A に相当する。Phase-1 以降の ECE 対策が機能していることを示している。

Phase-1 に頻繁に観測された、ビームとダストとの衝突が原因と推定される、ビームアポート(ビームロス)を伴う圧力バーストについても引き続き観測を行った[11,12]。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 から、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ポ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。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。図からわかるように、Phase-3 春季運転においても Phase-2 と同様 Phase-1 に比べると頻度が減っている。これは、通常運転時のビーム電流が低く、Phase-1 でのエイジング効果が一因と考えられる。実際、最後にビーム電流を Phase-1 実績値近くまで上げた時には頻度が上がっている。ただし、その発生場所は Phase-1 と異なっている。頻度が下がった他の原因としては、Phase-1 に比べるとロスモニター等を使った迅速なビームアポートシステムが整ったことが挙げられる、また、筑波直線部近傍(図中 Tsukuba)については、Phase-3 開始前に主なビームパイプをノッカーで叩いてあらかじめダストを落としておいたことも有効だったと考えられる。この現象に関しては引き続き注意が必要である。

4. 主な課題と対策

SuperKEKB の Phase-3 春季運転中、真空システムに

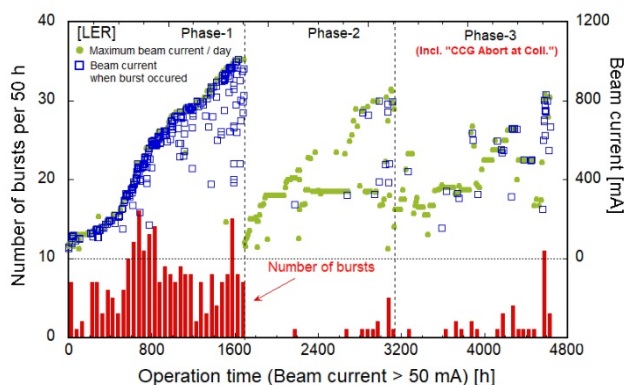


Figure 5: Number of bursts occurring per 50 h of operation time, the beam currents at which pressure bursts occurred, and the maximum operation current at that time from Phase-1 to Phase-3 2019 spring run in LER.

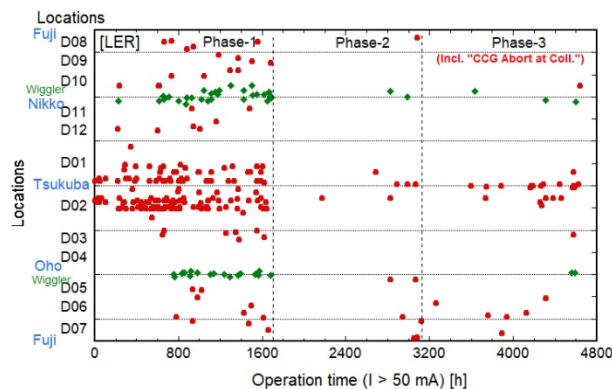


Figure 6: Locations of the pressure bursts along the ring versus operation time from Phase-1 to Phase-3 2019 spring run in LER.

関わる幾つかの課題が明らかとなった。下記に主な課題とその対策案を述べる。

4.1 Belle II 測定器のバックグラウンド

バックグラウンドには様々なものがあつたが、運転中の蓄積ビーム電流を制限した主なバックグラウンドは LER の圧力に起因するものであつた。HER の圧力からの寄与は非常に少なかつた。LER のビーム寿命の大部分は Touschek 効果で決まっていたが、Belle II へのバックグラウンドの 80%以上はビーム-ガス散乱に依るものだった。LER の平均圧力は、Fig. 3 に示したように、ビームドーズに対して堅調に下がってはいるが、HER に比べるとまだ高い。特に、今回運転開始前にビームコリメータを 4 台設置したが、その内 2 台は最もバックグラウンドに影響のある衝突点上流側に設置された。さらに悪いことに、これらの設置作業の際ヘッド部からの水漏れが発生し、作業区間 (~80 m) に大量の水分が入ってしまった。そのため、この区間の圧力減少具合は他の部分よりも悪く、これもバックグラウンドをさらに上げた要因と考えられる。また、HER の方には 9 台の V 型コリメータが設置してあるのに対して、LER には未だ 2 台である。これもビーム-ガス散乱によるバックグラウンドが大きい原因と思われる。



Figure 7: Damage on a vertical-type beam collimator head.

2019 夏季シャットダウン中に当該区間の真空作業はなく、引き続き真空焼きは進むと思われる。しかし、コリメータ付近の圧力はその中でもまだ高いので、トンネル内でのコリメータのベーキングを試みる予定である。区間全体のベーキングは作業上難しく、また熱膨張による危険性もあるので、まずはコリメータのベーキングを行い、次期運転で様子を見ることにした。また、V型コリメータ1台の増設を今冬季シャットダウン中に行う予定である。

4.2 突発的なビームロスとコリメータヘッドの損傷

LER 運転中、突然ビームロスが発生し、衝突点部にある最終ビーム集束用超伝導電磁石(QCS)のクウェンチ、VXD への大量の放射線量被曝、そして、衝突点に近いV型コリメータヘッドの損傷をもたらした(Fig. 7)。この現象は非常に速く、ビームロスが観測されてから 30~40 μs (3~4 ターン)でビームはキッカーでアボートされたが、その間に大きなビームロスが生じた。このアボートのタイミングは、現状のアボートシステムでは最速に近いタイミングである。

突然のビームロスの原因は未だ明確ではないが、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、と推測されている。アボート直前に僅かだが水平方向に軌道がずれていること、ウイグラー部で圧力バーストが同時に観測されていること、がその理由である。同様の QCS クウェンチは 2 回発生しているが、その際にもアーク部で圧力バーストが観測されている。ただし、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。

ヘッドに損傷を受けた V 型コリメータは、損傷を受ける前の位置までヘッドを閉めると Belle II のバックグラウンドが上昇することがわかった。損傷した部分でビームがチップスキャタリングしたためと考えられる。そのため、損傷後の運転では、当該コリメータ部に水平方向の軌道バンパを立てて損傷部を避けて運転を続けた。

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ボートできるシステムへの改良が進められている。例えば、ビームを安全にアボートするためのアボートギャップ数を増やす(タイミングを取る時間が減る)、アボートキッカー制御系が近い場所でもっと早くビームロスを検知する、等である。

コリメータヘッド損傷に関しては、今夏季シャットダウン中に、損傷を受けたヘッドを予備と交換する。また、損傷

を受けても、水平方向の軌道バンパを立てず、当該コリメータ本体を移動することで傷を避けてビームを通せるように、コリメータや近傍のビームパイプ等の配置を変更する。長期的には、現在使用しているタングステンに換えて、損傷しても脆化が少ないタンタルを使用する、あるいは、ヘッド長を短くして電子シャワーの影響を少なくする、等を検討している。今冬季シャットダウン中で、まずはアーク部のコリメータで試験する予定である。

ビームロスの原因は引き続き調査されるが、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であろう。ただ、3 章で述べたようにダスト現象にエージング効果があるとすると、物理実験開始前に、検出器の高電圧は OFF、かつ QCS 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、この事象の発生確率は減らせると考えられる。また、Phase-2 前に行った、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。今夏季シャットダウン中にリングのほぼすべての偏向電磁石用ビームパイプについてこのノッカーを試す予定である。

4.3 衝突点ベローズの発熱

春季運転中、衝突点部にある 4 個のベローズチェンバーの内 HER 用の 1 個で異常な温度上昇が見られた。ビーム電流に対する温度変化を Fig. 8 に示す。温度上昇はバンチフィルパターンに依存し、バンチ電流が高い場合に温度上昇が大きいことがわかった。このことから、発熱は放射光に依るものではなく、ビームが発生する高次高周波(Higher Order Modes, HOM)に依るものと推定された。例えば、内部の RF シールドに不具合があると考えられた。運転中は温度を常時監視しつつ、ビーム電流を慎重に上げて行った。

今期シャットダウン中に、当該ベローズチェンバーは予備のものと交換する予定であるが、交換作業に先立ち、ファイバースコープによってベローズチェンバーの内部を観察したところ、RF シールドフィンガーの一部が正規の位置から外れていたことが判明した。運転当初から温度が高く運転中に外れたものとは考えにくい。一方、

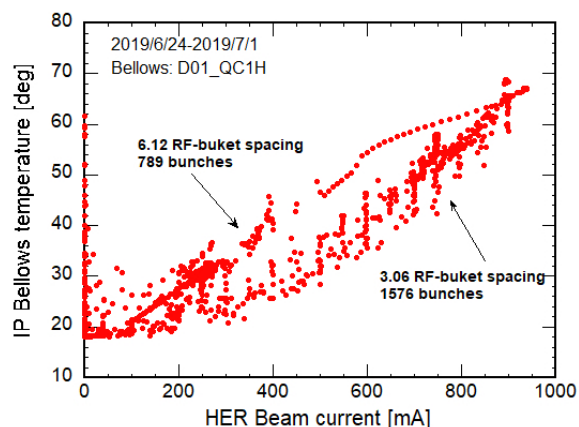


Figure 8: Behavior of bellows temperature at the interaction point against HER beam current for different bunch fill patterns.

Phase-3 開始前のこのベローズ設置直後の内部検査では異常はなかった。その後の QCS との接続作業時に発生したと考えられるが、今のところその原因は不明で、現在調査検討中である。

衝突点部のベローズチェンバーは、内径が 20 mm と小さく、また、大きい伸縮性が求められることから、従来のフィンガー型の RF シールドが採用されている。現在、より堅固な RF シールド構造を持つベローズチェンバーの開発について検討が始まっている。

5. まとめ

Phase-3 2019 春季運転は 7 月 1 日に終了した。本格的な物理実験が始まり、Belle II の積分ミノシティーは 6.5 fb^{-1} となった。ピークルミノシティーは衝突点の β 関数を 2 mm まで絞った後、 $1.23 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を記録した。この β 関数の値は、実用加速器としては世界最小値である。また、 β 関数を 2 mm まで絞っても、SuperKEKB で採用している”ナノビーム衝突方式”が成り立っていることが確認された。ただ、設計値に比べると達成値はまだまだ低い値である。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、今春季運転では、4 章で述べたように、運転に関わる問題が明らかとなった。それぞれ対策を講じ、対応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へ深く感謝致します。

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2におけるコミッショニングの成果,” in *Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Nagaoka, August 2018, pp.1-6.
- [3] K. Shibata *et al.*, “Commissioning of vacuum system for SuperKEKB positron damping ring,” *J. Vac. Sci. Technol., A* 37, p.41601, 2019.
- [4] 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.
- [5] Y. Suetsugu *et al.*, “Phase-2 運転時の SuperKEKB 加速器真空システムの状況,” *表面と真空*, 62, p.324, 2019.
- [6] K. Shibata *et al.*, “SuperKEKB 陽電子ダンピングリング真空システムのコミッショニング,” in *Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Nagaoka, August 2018, pp.1180-1184.
- [7] T. Ishibashi *et al.*, “Low Impedance Movable Collimators for SuperKEKB,” in *Proceedings of IPAC2017*, Copenhagen, May 2017, pp.2029-2032.
- [8] T. Ishibashi *et al.*, “SuperKEKB Phase-2 コミッショニングにおけるコリメータの開発と稼働状況,” in *Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Nagaoka, August 2018, pp.1167-171.
- [9] Y. Suetsugu *et al.*, “Mitigating the Electron Cloud Effect in the SuperKEKB Positron Ring,” *Phys. Rev. Accel. Beams*, 22, p.23201, 2019.
- [10] Y. Suetsugu *et al.*, “SuperKEKB 陽電子リングの電子雲不安定性対策の検証と課題,” in *Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Nagaoka, August 2018, pp.659-663.
- [11] S. Terui *et al.*, “SuperKEKB LER での圧力バーストの観測,” in *Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Sapporo, August 2017, pp.145-149.
- [12] Y. Suetsugu *et al.*, “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,” in *Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Nagaoka, August 2018, pp.1162-1166.