

SuperKEKB 真空システムの近況 - Phase-2 運転に向けて -

RECENT STATUS OF SuperKEKB VACUUM SYSTEM - UPDATES TOWARD PHASE-2 COMMISSIONING -

末次祐介[#], 柴田恭, 石橋拓弥, 白井満, 照井真司, 金澤健一, 久松広美

Yusuke Suetsugu[#], Kyo Shibata, Takuya Ishibashi, Mitsuru Shirai, Shinji Terui, Ken-ichi Kanazawa, Hiromi Hisamatsu
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

The vacuum system of the SuperKEKB main ring worked well through the first (Phase-1) commissioning as a whole, but it was simultaneously experienced several problems, such as the electron cloud effect (ECE) in the positron ring, the pressure bursts accompanied by beam losses, the heating of connection flanges in wiggler sections, the air leak at a tapered beam pipe, and the distortion of the image of beam size monitor. Towards the next (Phase-2) commissioning, countermeasures to these problems are prepared during the long shutdown period. In parallel with these maintenance and improvement works, the installations of new beam pipes for BELLE-II detector around the collision point and for the positron injection regions are on gong. Six new beam collimators are also added to the existing beam collimator system.

1. はじめに

SuperKEKB は、KEK つくばキャンパスにある非対称エネルギー電子-陽電子衝突型加速器である。主リングはそれぞれ周長約 3 km の 7GeV 電子リング(HER)と 4 GeV 陽電子リング(LER)の二つのリングから構成される(Fig. 1) [1]。各リングは、4か所のアーク部と、4つの直線部(BELLE-II 測定器、ウイグラー部、加速空洞部、ビーム入射・ダンプ部等を含む)からなる。SuperKEKBは2016年2月から6月にかけてPhase-1運転を行い、主リングでは約 1A のビーム蓄積に成功した。この運転の間、主リング真空システムは概ね順調に稼働した[2,3]。運転中の圧力も想定通り下がり、また、新規に採用した機器もほぼ問題なく稼働した。

その一方で、ビーム電流がさらに増える今後の運転に向けて様々な課題も見つかった。例えば、陽電子リングでは、電子雲不安定性対策として建設時に採用したアンテナチャンバー付きビームパイプやその内面の窒化チタン(TiN)コーティングについて一定の効果は確認されたが、

運転終盤の約 900 mA (1576 バンチ、3.06RF バケット間隔)以上のビーム電流において電子雲不安定性が観測された。また、ビームパイプ内のダスト粒子とビームとの衝突が原因と推定される、ビームロスに伴う圧力のバースト(突出)が観測された。また、ウイグラー部では一部のビームパイプや接続フランジにおいて放射光照射による温度上昇も確認された。現在、2017 年度後半に予定されている Phase-2 運転に向けて、これらの問題への対応策を講じている。また、新規に設置される BELLE-II 測定器や、陽電子ダンプリングを使った入射方式に対応する新しいビームパイプの設置も進んでいる。測定器のバックグラウンドを低減するためのビームコリメータも新たに 6 台追加される。以下、Phase-1 で確認された主な問題とその対策、および Phase-2 で新たに設置される機器等についてまとめる。

2. Phase-1 での問題点とその対策

2.1 LER の電子雲不安定性

陽電子・陽子ビームの周囲に集まる電子は、電子雲不安定性(Electron Cloud Effect, ECE)を励起してビームサイズの増大などをもたらし、加速器の性能を低下させることが知られている[4,5]。Phase-1 で通常用いられたバンチ数 1576、バンチ間隔 3.06 RF バケットのバンチフィルパターン(以下 1/1576/3.06RF と表記)において、ビーム電流約 600 mA から ECE が LER で観測された[3]。すなわち、垂直方向ビームサイズの増大、ビーム電流に対する圧力の非線形上昇(電子衝撃脱離が原因)、結合型ビーム不安定性等が観測された。詳しい調査により、この ECE は、リングに設置された約 820 個のアルミ合金製ベローズチャンバー内の電子雲が原因であることがわかった。そのため、それらベローズチャンバーに、ビーム方向に約 100 G の磁場をつくる永久磁石ユニット(リターンヨークとなる鉄板に $\phi 30$ の永久磁石を 8 個取り付けしたもの)を設置したところ、ECE は一旦収まった。しかし、ビーム電流が 900 mA を超えたあたりから、再度 ECE が観測された。この ECE の原因の一つは、リングのドリフト部(電

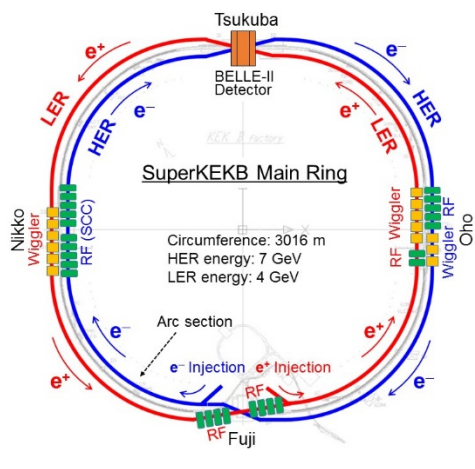


Figure 1: Layout of the SuperKEKB main ring.

[#] yusuke.suetsugu@kek.jp

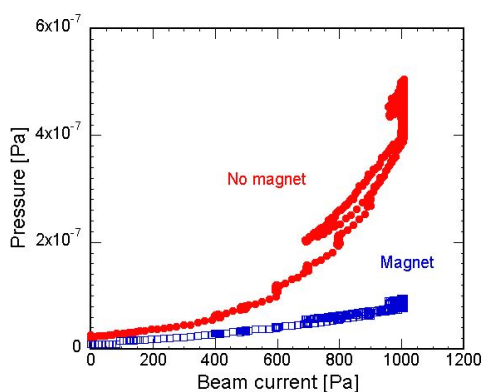


Figure 2: Behaviors of pressures against beam currents with and without permanent magnets around the beam pipes at drift spaces.

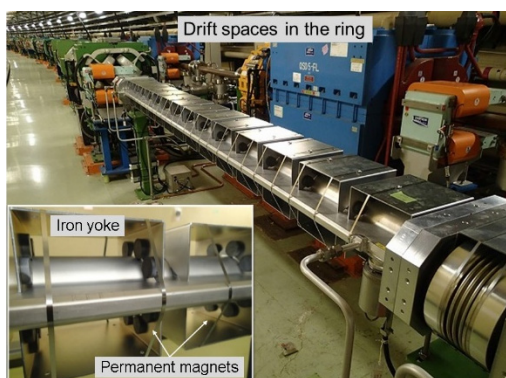


Figure 3: Permanent magnets attached to the beam pipes at drift spaces.

磁石間)のビームパイプ内の電子雲と考えられた。実際、一部のドリフト部にビーム軸方向に約 60 G の磁場をつくる永久磁石ユニットを並べたところ、その付近のビーム電流に対する非線形圧力上昇が緩和された。Figure 2 に、永久磁石ユニットを取付ける前後の圧力の振る舞いの例を挙げている。他の電子雲源としては、KEKB 時代から使用している一部のアルミ合金製ビームパイプ(TiN コーティングはない)の区間が考えられた。この区間でもビーム電流に対する圧力の非線形上昇が観測されていた。

対策として、上述した永久磁石ユニットをリング全体のドリフト部に並べることにした。ビームパイプに取り付けられた永久磁石ユニットを Fig. 3 に示す。この永久磁石ユニットによる電子密度低減効果はシミュレーションでも確認された。すなわち、設計ビーム電流(1/2500/2RF, 3.6 A)でも、ビーム軸近傍では十分低い電子密度が得られる。一方の古いアルミ合金製ビームパイプ部については、KEKB 時代に巻いたソレノイドを再使用することにした。このソレノイドは、5 A の電流でビーム方向に約 40 G の磁場を発生する[6]。

2.2 LER の圧力バースト

LER において、ビームロスを伴う局所的な圧力のバースト(突出)が観測された。観測された場所はリングの 10 箇所以上にわたるが、頻繁に観測されたのは筑波直線部であった(Fig.1 参照)。圧力バーストは運転初期から観

測されたが、最大蓄積ビーム電流をそれまでの実績以上に増やす際に特に頻繁になり、一方、蓄積ビーム電流を一定にしている間は頻度が減少する、という傾向がみられた。Figure 4 は、蓄積電流 50 mA 以上の運転時間に対して、10 時間あたりに発生する圧力バーストの頻度を示す。同時期の最高ビーム電流と圧力バーストが観測されたビーム電流も示している。測定された圧力のピーク値は 10^{-6} Pa 台である。ただし、ビームロスと圧力バーストの間には時間差があるため、ガスが発生した場所は圧力測定場所からは離れていると考えられ、最大圧力はさらに高いと推測される。リングに沿ったバースト時の圧力分布から推定した圧力バーストの発生場所は、偏向電磁石内のアルミ合金製のビームパイプがほとんどであった。このビームパイプには、ECE 対策の一つとして、ビームパイプの上面と下面にグルーブ(縦溝)が形成されている[7]。グルーブの断面は三角形形で、ピッチ約 1 mm、深さ約 2.5 mm で加工している(Fig. 5 参照)。

この圧力バーストの原因はまだ十分には解明されていない。しかし、最も有力な候補は、ビームパイプ内のダスト粒子とビームとの衝突である[8]。偏向電磁石用アルミ合金製ビームパイプのグルーブは、アルミパイプ押し出し時に成型されたもので、その後の加工や組み立て等の過程においてダスト粒子がグルーブ内に捕捉された可能性がある。実際、ビームパイプ内からは様々な成分、大きさのダストが採取された[4]。また、グルーブ内のダス

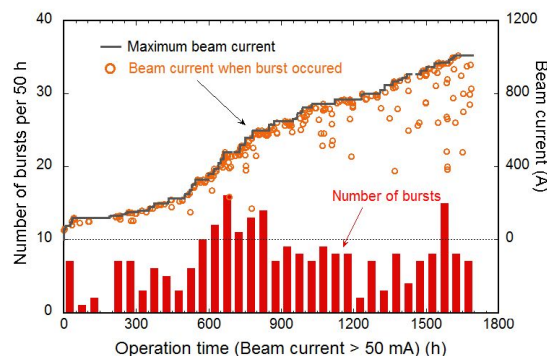


Figure 4: Number of bursts per 50 h of operation time, the beam current when the bursts occurs, and the maximum beam currents as a function of beam operation time.

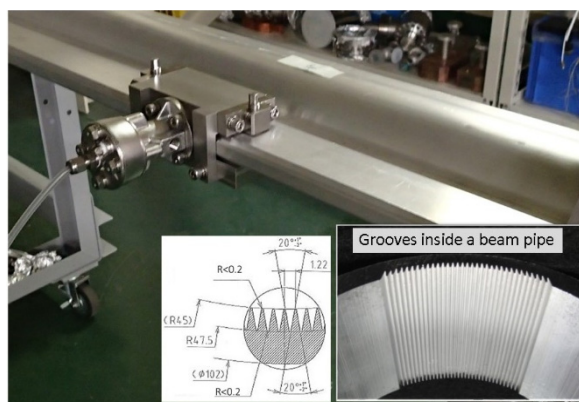


Figure 5: Knocker attached to an aluminum-alloy beam pipe for test and the groove inside the beam pipe.

ト粒子は通常の洗浄工程では容易には取り除くことができない。運転中の発熱によるビームパイプのわずかな変形等によって、上面のグループ内に捕捉されていたダスト粒子が落下し、ビームと衝突することは十分考えられる。傍証として、Phase-1 運転中に、試験的にビームパイプにエアノッカーを取付けてビームパイプに衝撃を与えところ、ビームロスに伴う圧力バーストを再現した。偏向電磁石用以外の(グループの無い)ビームパイプではこの現象は起きなかった。

圧力バーストの原因は現在も調査中だが、Phase-2 に向けた対策として、上記推察に基づき、運転開始前にエアノッカーでビームパイプに衝撃を与え、あらかじめダスト粒子を振り落とすことを検討している。試作したノッカーをビームパイプに取り付けた様子を Fig. 5 に示す。ノッカーはゲージ圧 3~6 気圧の圧搾空気で動作する。

2.3 ウィグラー部での接続フランジの発熱

LER のウィグラー部において、一部の接続フランジ(MO 型フランジ)やその傍のビームパイプの発熱が観測された。発熱したフランジ部の温度は、蓄積ビーム電流 1 A にて 50°C 以上であった。なお、ビームパイプやフランジは、アンテチェンバー付きの断面となっており、温度はそのアンテチェンバー部で測定されている[9]。温度は、発熱がみられたビームパイプのビーム上流側の垂直方向ビーム軌道に敏感であった。ビームの垂直方向位置と測定温度の関係の一例を Fig. 6 に示す。ある場所のビーム位置が垂直方向に変化することは、その場所でビーム

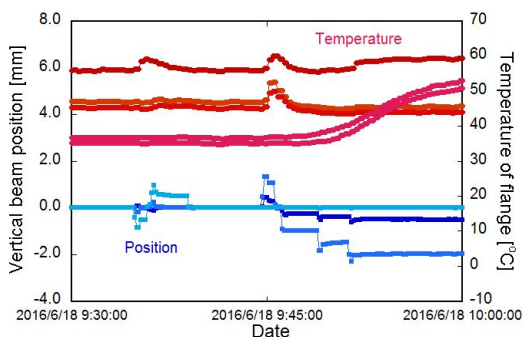


Figure 6: Example of the correlation between vertical beam positions and the temperatures of flanges at the downstream side.

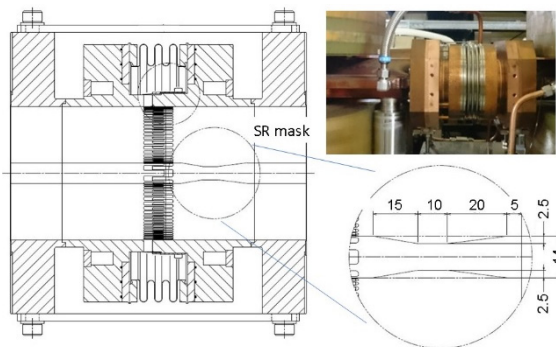


Figure 7: Cross sectional view of a bellows chamber with an SR mask in antechambers.

軌道に垂直方向の傾きが生じることを意味する。また、ビームパイプ(接続フランジ)の垂直方向位置でも大きく変化した。これらのことから、発熱の原因は、上流側のウィグラー電磁石内から放射されているシンクロトロン放射光がアンテチェンバー内の上下面に照射されているためと考えられた。ウィグラー電磁石内を蛇行するビームから放射された放射光は高さ 14 mm のアンテチェンバー内を通過する。そのため、軌道が垂直方向の傾きを持っていると、放射光が冷却水路のないフランジのアンテチェンバー部上あるいは下側に照射される。実際、垂直方向に約 2 mrad の傾きがあった時、発熱によりフランジのガスケットから大気リークが発生した。

対策として、まずは運転中にウィグラー部のビーム生軌道をできるだけ平らにする必要がある。現状、垂直方向に±0.5 mm、かつ垂直方向の傾きを 0.05 mrad 以下にすることは可能である。一方、ビームパイプフランジ部の高さを近傍の四極電磁石に対して±1 mm 以内にアライメントする。さらに、ベローズチェンバーのアンテチェンバー部の上下に高さ 2.5 mm の放射光マスクを設けたベローズチェンバーを製作し、発熱が認められたビームパイプの上流側に設置することにした。新しいベローズチェンバーの断面図を Fig. 7 に示す。仮に、ビーム軌道が 0.05 mrad の傾きを持っているとし、放射光が $2/\gamma$ (γ はローレンツ因子)の広がりを持つとすると、この放射光マスクの後ろにはアンテチェンバー部で約 14 m の影ができ、下流側4~5 本のビームパイプのアンテチェンバー部を守ることができる。そのさらに下流ではビームチャンネル内に光は照射されるが、そのパワー密度は弱い。もしそれが問題となる場合には、ビームチャンネル内に水平方向のマスクが必要となる。例えば、ビームレベルから 11 mm 高い、あるいは低いビームチャンネル内面に照射される放射光については、高さ 3.0 mm の光マスクを設けるとその後ろには約 4.1m の影ができ、ビームパイプ 1~2 本のフランジを守ることができる。ウィグラー部の放射光マスクについては今後の検討課題である。

2.4 放射光を使ったビームサイズモニターへの散乱光の影響

主リング(HER, LER)では、ビームサイズの測定に偏向電磁石内から放射されたシンクロトロン放射光を用いている[10]。そのうち、可視光部分を利用するモニターでは、ビームパイプのアンテチェンバー内にあるミラーで放射光を外に取り出し、測定用カメラまで導いて測定する。ミラーの入った真空容器とアンテチェンバー内にあるミラーを Fig. 8 に示す。Phase-1 運転中、放射光の像がぼやけ、測定や校正が困難になるということがあった。運転終了後、放射光の取り出しミラーの変形とは別に、アンテチェンバー内を通過してきた放射光の散乱光が影響していることが判明した。

散乱光対策として、ミラーから約 15 m 上流までの間にあるベローズチェンバーを、アンテチェンバー部に高さ 2 mm あるいは 3 mm のバッフル(放射光遮断マスク)を設けた新規ベローズチェンバーと交換することにした。バッフルを取り付けた試作ベローズチェンバーの内部を Fig. 9 に示す。放射光はバッフルの一面に垂直に照射される。面は Ra = 2 μ m と粗く、かつ DLC コーティング(厚み 1 μ m)を施し、放射光の散乱を抑制している。これらバッフル

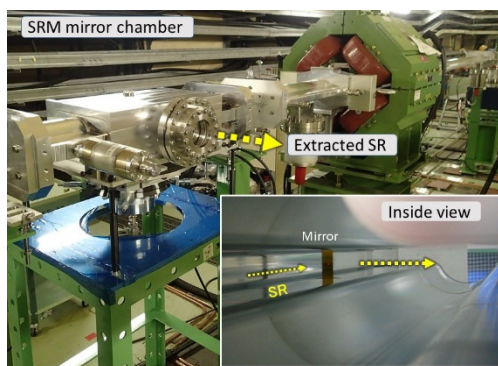


Figure 8: SR mirror chamber and the mirror inside an antechamber.

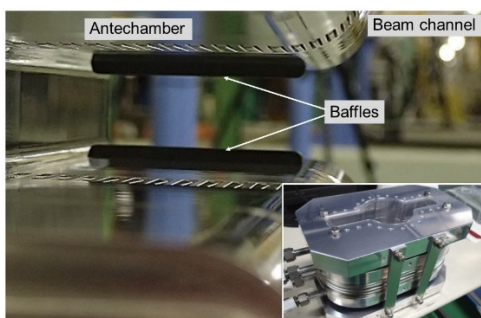


Figure 9: Baffles inside an antechamber of bellows chambers installed at the upstream side of the SR mirror chamber.

付きベローズチェンバー設置後、レーザ光を使った試験では、ミラーで取り出した光の像が、バッフル無しの場合よりも鮮明になっていることが確認された。

2.5 テーパー管接続フランジからのリーク

富士直線部 HER のテーパー管下流側接続フランジから運転中リークが発生した。テーパー管はレーストラック断面を持ち、上流側の 104 mm × 50 mm から 60 mm × 40 mm に緩やかに断面が変化する。真空シールはメタルオーリングである。リークはビームアポートと同時に発生した。この付近ではビームアポートと同時に圧力の

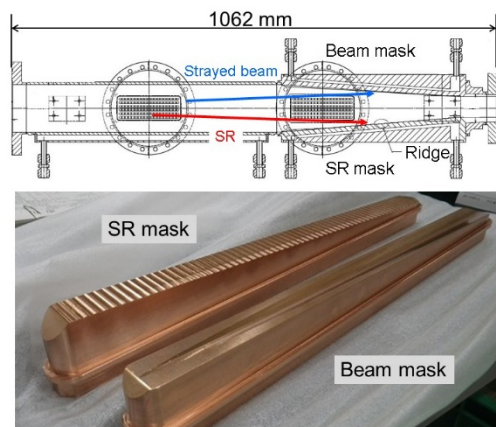


Figure 10: Horizontal cross-sectional view of the new tapered beam pipe, and the SR and beam masks.

バーストが度々観測されており、また、残留放射線量も高かった。これらのことから、アポート時のビームが真空シールに当たり発熱、損傷してリークが発生した、と考えられた。あるいは、上流からの放射光がテーパー部で反射してシール部への照射したため、とも考えられた。

このフランジを守るために、リング外側テーパー部にビーム用のマスク(無酸素銅)、そして、リング内側の放射光が直接照射されるテーパー部にリッジのついたマスク(同じく無酸素銅)を備えた、新規ビームパイプを製作し、既存のものとの交換した。ビームパイプ断面概略図とマスクを Fig. 10 に示す。この対策の他、Phase-2 のビーム運転中はビームコリメータをできるだけ閉め、コリメータ以外の不要な部分にビームが当たらないようにする。

3. Phase-2 への準備

上述したような対策作業と平行して、Phase-2 に向けて様々な準備作業を行っている。

3.1 BELLE-II 測定器、超電導電磁石用ビームパイプ

Phase-2 から本格的な実験が始まる BELLE-II 測定器用の新規ビームパイプの設置を行っている[11]。BELLE-II 内部にあるシリコンバーテックス測定器用のビームパイプ(φ 20 mm)は、発生した素粒子が通り抜けやすいベリリウム製である(Fig. 11)。内面には金がコーティングされている。衝突点の傍には、ビームを最終的に絞るための、超電導電磁石が設置予定で[12]、この電磁石用の新規ビームパイプも設置される。ビームパイプは室温である。ビームパイプ内部には、放射光の散乱を抑えるためのリッジがあり、また、陽電子ビームが通る部分には TiN コーティングが施される。

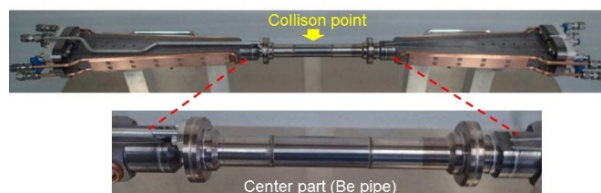


Figure 11: Beam pipe for the interaction region with a total length of 1 m. The center part is made of beryllium.

3.2 LER 入射部用ビームパイプ設置

陽電子の入射ラインには新しくダンピングリングが建設されており、Phase-2 ではダンピングリングを通したビーム入射が行われる。主リングではそのための入射部改造が進んでいる。新規入射用セプタムマグネットとそのビームパイプを Fig. 12 に示す。ビームパイプは鉄製で、内面は厚さ 200 μm の銅がメッキされている。断面は 60 mm × 40 mm のレーストラックである。また、鉄部分のビームパイプは水冷される。

3.3 ビームコリメータ増設

さらに、測定器のバックグラウンドを低減のため、6 台(水平型 4 台、垂直型 2 台)のビームコリメータの追加設置が予定されている。Figure 13 は衝突点上流側に設置された、陽電子リング用の垂直型ビームコリメータである。

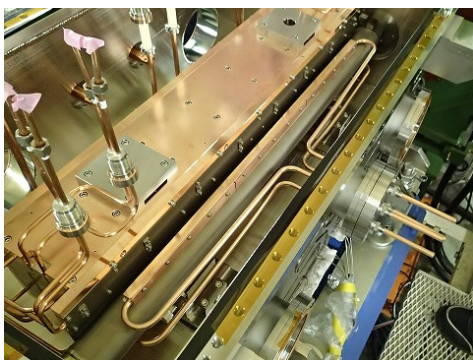


Figure 12: Beam pipes for the new septum magnet for positron injection.

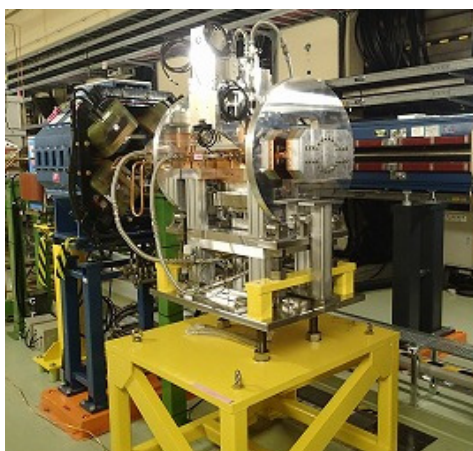


Figure 13: Vertical-type beam collimator installed in the tunnel.

Phase-1 では、SuperKEKB 用に開発された水平方向用コリメータが 2 台設置されて問題なく稼働したため、これらもほぼ同じ構造のコリメータとなっている。ただし、垂直方向用はコリメータヘッドが上下からビームに接近する。また、今回は電子リング用のコリメータも追加される。

3.4 その他

- NEG 活性化電流の直流化。これまで交流であったため、活性化時には偏向電磁石、四極電磁石等の電源を落とす必要があり、初期化等に時間がかかっていた。
- ECE 観測用に、電子モニター付きのビームパイプを LER アーク部に新たに設置する。
- HER ウィグラー部下流の冷却水路増強。
- ビームフィードバック機器内部(真空側)の点検。
- 温度計の点検。流量計の清掃など真空機器維持作業。

4. まとめ

2017 年度に予定されている Phase-2 運転に向けて、Phase-1 運転中に確認された問題の対処作業を行っている。陽電子リングの ECE に対してはリングのドリフト部にビーム軸方向磁場を形成する永久磁石を取り付ける。圧力の局所的なバーストに関しては、運転開始前に、ノッカーを使って予めダスト粒子を落とす予定である。ウィグラー部のフランジの発熱に関してはアンテチェンバー部に放射光マスクを設けたベローズチェンバーを設

置し、ビームパイプを再アラインメントする。また、放射光を用いたビームサイズモニターへの反射光の影響に対してはアンテチェンバー部にバップルも設けたベローズチェンバーを設置する。これらの対策作業と平行して、Phase-2 運転に向け、衝突点近傍や陽電子リング入射部への新規ビームパイプ設置や新規ビームコリメータの設置などが進んでいる。

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 コミッションンググループの皆様に深謝致します。

参考文献

- [1] Y. Funakoshi, "Phase 1 beam commissioning of SuperKEKB," Proc. 13th Annual Meeting of PASJ (2016) pp. 24-28.
- [2] Y. Suetsugu, K. Shibata, T. Ishibashi, H. Fukuma, M. Tobiyama, J. Flanagan, E. Mulyani, M. Shirai, S. Terui, K. Kanazawa, H. Hisamatsu, "Achievements and problems in the first commissioning of SuperKEKB vacuum system," J. Vac. Sci. Technol. A, 35 (2016) 03E103.
- [3] Y. Suetsugu, K. Shibata, T. Ishibashi, M. Shirai, S. Terui, K. Kanazawa, H. Hisamatsu, Phys. Rev. Acc. Beams, 19 (2016) 121001.
- [4] K. Ohmi, F. Zimmermann, Phys. Rev. Lett., 85 (2000) 3821.
- [5] F. Zimmermann, "The Electron Cloud Instability: Summary of Measurements and Understanding," Proc. PAC2001 (2001) pp.666-668.
- [6] H. Fukuma, J. W. Flanagan, T. Kawamoto, T. Morimoto, K. Oide, M. Tobiyama, F. Zimmermann, "The Effect of the Solenoid Field in Quadrupole Magnets of the Electron Cloud Instability in the KEKB LER", Proc. EPAC 2006 (2006) pp. 2901-2903.
- [7] Y. Suetsugu, H. Fukuma, K. Shibata, M. Pivi, L. Wang, "Experimental Studies on Grooved Surfaces to Suppress Secondary Electron Emission," Proc. IPAC10 (2010) pp. 2021-2023.
- [8] G. Papotti, M. Albert, B. Auchmann, E. B. Holzer, M. Kalliokoski, A. Lechner, "Macroparticle-induced losses during 6.5 TeV LHC operation," Proc. IPAC2016 (2016) pp. 1481-1484.
- [9] Y. Suetsugu, K. Kanazawa, K. Shibata, T. Ishibashi, H. Hisamatsu, M. Shirai, S. Terui, J. Vac. Sci. Technol. A, 34 (2016) 021605.
- [10] J.W. Flanagan, S. Hiramatsu, T. Mitsuhashi, "Automatic Continuous Transverse Beam-Size Measurement System for KEKB", Proc. EPAC2000 (2000) pp. 1714-1716.
- [11] K. Kanazawa, "Interaction Region Construction towards Phase 2," presented in the 21th KEKB Accelerator Review Committee (2016).
- [12] N. Ohuchi *et al.*, "Design and Construction of the QC2 Superconducting Magnets in the SpsrKEKB IR", Proc. IPAC2016 (2016) pp.1174-1176.