

SuperKEKB 主リング真空システムの現状 -Phase-2 コミッショニング-

STATUS OF VACUUM SYSTEM OF THE SUPERKEKB MAIN RING

- Phase-2 COMMISSIONING -

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)}
Yusuke Suetsugu^{#, A, B)}, Kyo Shibata^{A, B)}, Takuya Ishibashi^{A, B)}, Mitsuru Shirai^{A)}, Terui Shinji^{A)}, Ken-ichi Kanazawa^{A)},
Hiromi Hisamatsu^{A)}

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

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

Abstract

The Phase-2 commissioning of the SuperKEKB started in March and ended successfully in July, 2018. The vacuum system of the main ring (MR) worked generally well during the commissioning. The new vacuum components that were installed before the Phase-2 commissioning functioned well as expected. The pressure decreased steadily following the Phase-1 commissioning in 2016. The countermeasures against the electron cloud effect (ECE) worked effectively. Remodeling of several vacuum components and additional installation of beam collimators are planned before Phase-3 commissioning to deal with some problems found 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]。設計ビーム電流は、それぞれ 2.6 A、3.6 A である(2500 bunches、2 RF-buckets 間隔 = 4 ns 間隔)。2016 年 2 月から 6 月までの Phase-1 運転では、主リング真空システムは概ね順調に稼働した[2]。圧力は運転時間と共に順調に下がり、初めて大量に導入された新しい真空機器も約 1 A のビーム電流で問題なく性能を発揮した。一方、Phase-2 運転に向けて、LER の電子雲不安定性励起など、幾つかの課題も明らかとなった。そこで Phase-2 運転前までの長期シャットダウン中に、これらの問題について様々な対策が取られた。平行して、粒子測定器(Belle II)用の新規ビームパイプ等、各種真空機器が新たに設置された。測定器のノイズを低減するビームコリメータも 6 台追加された[3]。Phase-2 運転は 2018 年 3 月に始まり 7 月に終了した[4]。4 月 28 日には最初の衝突事象を観測した。積算ビーム電流および最大蓄積電流は、LER、HER でそれぞれ 325 Ah、333 Ah および 860 mA、800 mA である(1576 bunches、3.06 RF-buckets 間隔)。この間 MR 真空システムは概ね問題なく稼働した。ここでは、Phase-2 運転前に行った様々な対策の効果や、新規に導入した機器の特性など Phase-2 運転時の主リング真空システムの状況、および Phase-3 運転に向けた課題等を報告する。

2. Phase-2 運転前の作業

2016 年 2 月から 6 月にかけての Phase-1 運転では、MR の真空システムはほぼ順調に稼働したが、幾つか課題もみつき、運転終了後必要な対策が取られた。下記に主要な課題とその対策を挙げる。

(1) LER での電子雲不安定性[5]。1576 bunches、3.06

[#] yusuke.suetsugu@kek.jp

RF-buckets 間隔にて、ビーム電流約 900 mA からビー

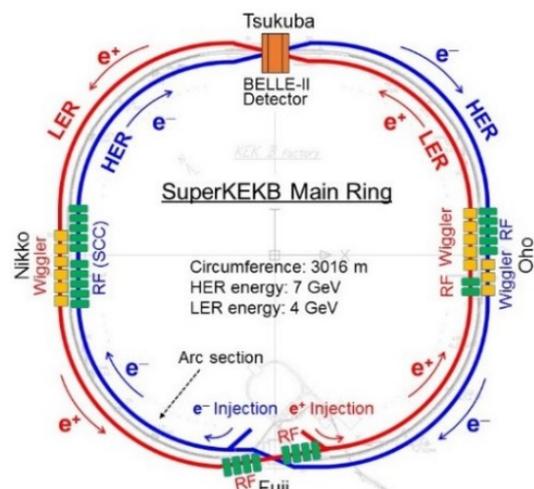


Figure 1: Layout of SuperKEKB Main Ring (MR).

ムサイズの増大、ビーム電流に対する圧力の非線形上昇、結合バンチ不安定性の励起等が観測された。⇒原因となる電子雲はドリフト部のビームパイプで発生していると推定されたので、MR のドリフト部の約 86%にあたる約 1700 m のビームパイプに、ソレノイドあるいは永久磁石を使ってビーム方向に数十ガウスの磁場を加えた。

(2) 主に LER で頻発した、圧力バーストを伴うビームロス [6]。圧力バーストは特に筑波直線部の偏向電磁石用ビームパイプ近傍で観測された。原因ビームパイプ内のダストとビームが衝突と考えられた。偏向電磁石用のビームパイプのビームチャンネル部には電子雲不安定性対策としてグループ構造があり、ダスト粒子が捕捉されやすい。⇒筑波直線部近傍の疑わしい 24 本のビームパイプをノッカーで叩き、予めダストを振り落



Figure 2: New beam pipes, bellows chambers and pumps for the Tsukuba interaction region.

とす作業を行った。

- (3) 富士直線部での大気リーク[7]。ビームロスに伴うアポルト時にビームがビームパイプのフランジに当たったためと考えられた。リーク前、圧力のバーストもその場所で何度か観測されていた。内面にはビームが当たったような筋が見えた。⇒フランジをビームから守るためのビーム用マスクを持つ新規ビームパイプと交換した。
- (4) ウィグラー部ビームパイプの発熱[7]。ウィグラー部下流の放射光パワーの大きい部分で想定よりも高い温度となった。また、ウィグラー部のビームパイプでは、局所的に温度の高い部分があり、ビームの垂直方向軌道に敏感なことから、放射光がアンテナチェンバー部の上側または下側に照射されていると考えられた。一度大気リークが発生した。⇒ウィグラー部下流の冷却水路を見直し、温度の高かった区間の冷却水流用を増やした。ウィグラー部の温度が高かった部分にはアンテナチェンバー部に放射光用マスクのあるベローズチェンバーを設置した。また、ウィグラー部のビームパイプを再アライメントした。
- (5) その他、特殊真空機器(圧力バーストが連続して観測されたベローズチェンバー、放射光を使ったビームサイズモニターチェンバー、横方向ビームフィードバックキッカーチェンバー等)の内部確認や各種通常機器の維持管理作業を行った。

一方、Phase-2 運転では、下記に挙げる様々な真空機器が新たに設置された。

- (1) 筑波衝突点部に設置された Belle II 測定器内部の衝突点用、および測定器の両側にあるビームを細く絞るための最終収束超伝導電磁石(QCS と呼ばれる)用

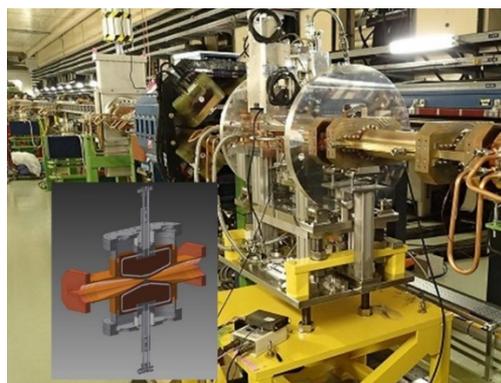


Figure 3: Newly installed vertical-type beam collimator.

のビームパイプ、ベローズチェンバー等真空機器を新たに設置した(Figure 2)[8]。

- (2) 新規に建設された陽電子ダンピングリング[9]を通して入射される低エミッタンス陽電子ビームに対応するための LER 入射部改造に伴い、セプトマグネット用のビームパイプや周辺の関連するビームパイプ等の真空機器を設置した。
- (3) Belle II 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を 6 台追加設置した[3]。Figure 3 は筑波直線部に設置された LER 用垂直方向コリメータである。上下にヘッド(先端はタングステン)があり、それらの位置は 20 μm の精度でリモート制御される。

これらの作業は、Phase-1 運転終了後の 2016 年 7 月から 2018 年 2 月にかけて行われた。

3. Phase-2 運転時の状況

3.1 圧力の減少(Beam Scrubbing)

Phase-2 運転は、HER は 2018 年 3 月 18 日から、LER は 3 月 28 日から始まり、7 月 17 日に終了した。Phase-2 運転当初からの LER と HER のビーム電流、圧力(MR 平均圧力とアーク部平均圧力)の履歴をそれぞれ Figure 4(a)と(b)に示す。図中には、NEG ポンプのコンディショニングを行った日時も記入している。また、単位電流あたりの圧力上昇 dP/dI [$\text{Pa} \cdot \text{A}^{-1}$]のビーム電流積分量(ビームドーズ) [Ah]に対する変化を Figure 5(a)と(b)に示す。同時に、蓄積した最大ビーム電流もプロットしている。Phase-2 前に新規真空機器の設置等様々な真空作業を行ったため運転開始当初は圧力上昇も大きかったが、運転とともに順調に下がっている。Phase-1 運転時から続けてプロットすると Figure 6(a), (b)のようになり、最終的に

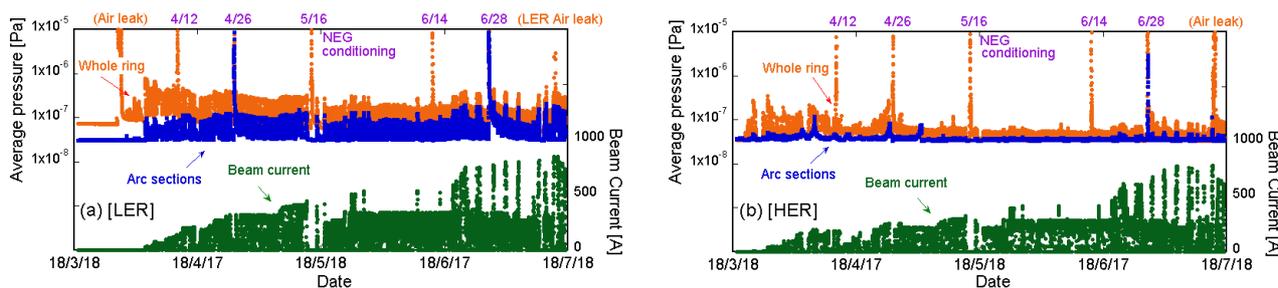


Figure 4: Trends of average pressures and beam currents of (a) LER and (b) HER during the Phase-2 commissioning.

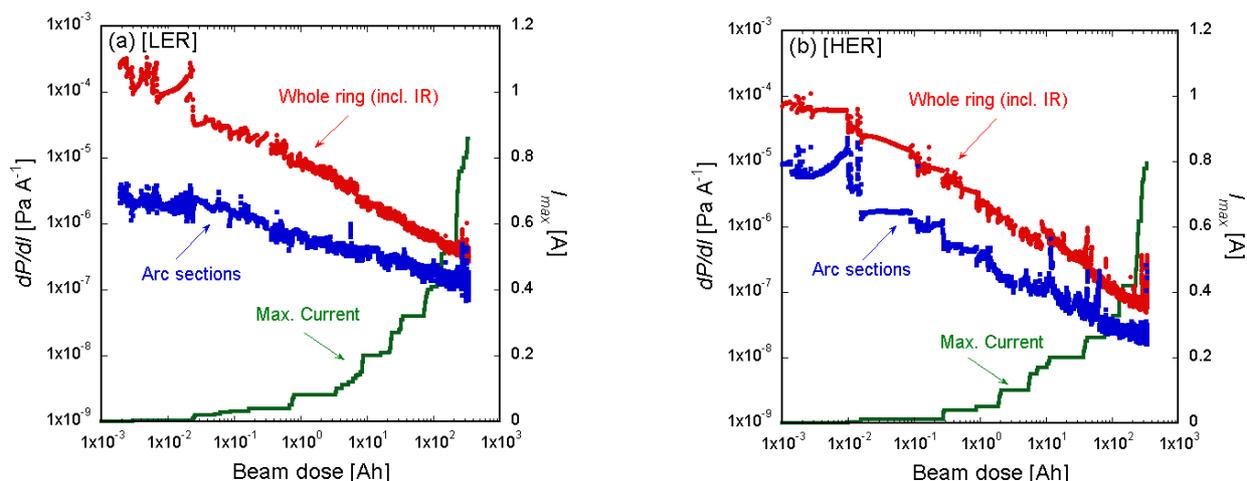


Figure 5: Pressures (P) normalized by unit beam current (I), and the maximum beam current as a function of beam dose for (a) LER and (b) HER during the Phase-2 commissioning.

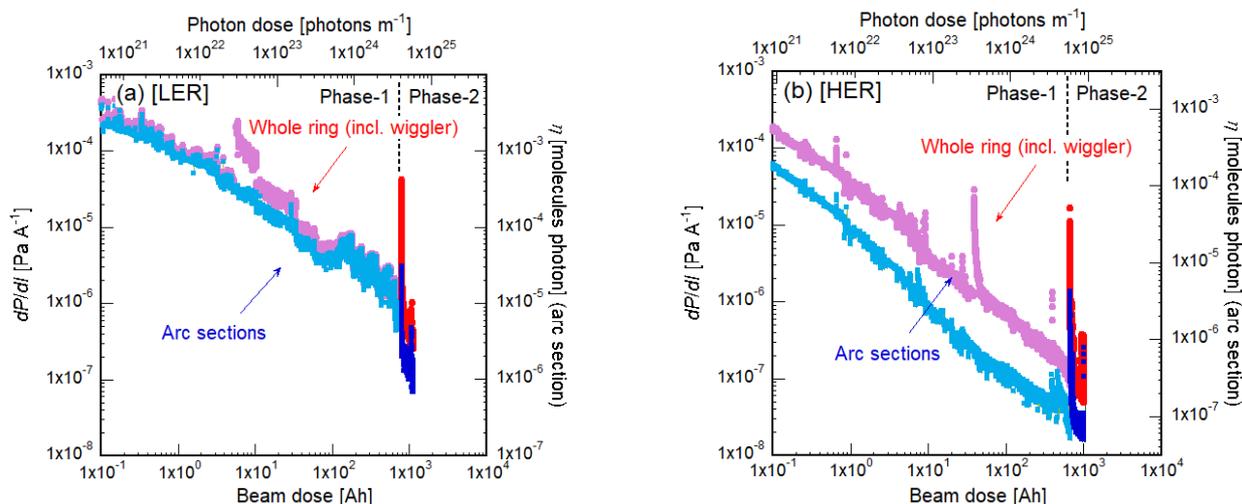


Figure 6: Pressures (P) normalized by unit beam current (I), and the coefficient of photo-desorption rate (η) as a function of the total beam dose or the total photon dose for (a) LER and (b) HER during the Phase-1 and the Phase-2 commissioning.

は Phase-1 運転最後よりも圧力は下がっているのがわかる。特に LER で減少が大きいのは次節で述べる電子雲不安定性が抑制されたためである。なお、これらの圧力上昇のプロットでは、ビーム電流が最大電流の 40%以上の時の圧力データを使い、簡単のため、ベース圧力 (LER: 5×10^{-8} Pa, HER: 3×10^{-8} Pa)を考慮していない。また、ビーム寿命は、LER、HERとも、ほぼ Touschek ライフタイムで決まっている。

Phase-2 運転終了時で Phase-1 運転も含めた全ビームドーズは LER、HER にて 1113 Ah と 1002 Ah である。単位電流あたりのリング全体の圧力上昇は 3×10^{-7} Pa A $^{-1}$ 、 7×10^{-8} Pa A $^{-1}$ である。Figure 6 には、アーク部での光脱離係数 η の光子ドーズに対する変化も示している。アーク部の全光子ドーズは LER、HER で 5.9×10^{24} photons m $^{-1}$ 、 9.3×10^{24} photons m $^{-1}$ で、 η は、それぞれ、 1×10^{-6} molecules photon $^{-1}$ 、 7×10^{-8} molecules photon $^{-1}$ である。

3.2 LER の電子雲不安定性

電子雲不安定性によってビームサイズの増大等が発生するとリノシティが減少するので、この不安定性を抑制することは衝突型加速器にとって重要な課題である。Phase-1 運転で観測された電子雲不安定性の原因となる電子雲は、ドリフト部にあるビームパイプ内に発生していると推定された。そのため、Phase-2 運転前に、リングのドリフト部にソレノイドおよび永久磁石を設置した[10]。その結果、Figure 7 に示すように、2、3 RF-buckets 間隔のフィルパターンでは、Phase-1 運転でビームサイズ増大が始まったバンチ電流線密度 (0.2 mA bunch $^{-1}$ RF-bucket $^{-1}$) より高い値でもビームサイズ増大は起きなかった。磁場の無いドリフト部のビームパイプの電子密度は、Phase-1 運転時とほとんど同じであったので、Phase-2 運転前に取り付けられたソレノイドや永久磁石の効果と考えられる。

ドリフト部のビームパイプは、光電子の影響を抑制するためにアンテチェンバーを持ち、また、二次電子放出率

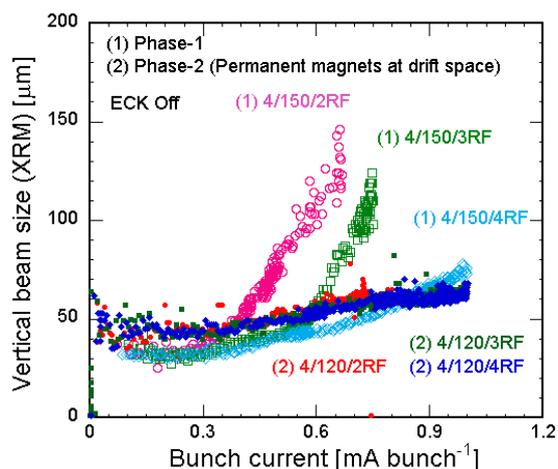


Figure 7: Vertical beam sizes as a function of bunch current in the cases of (1) Phase-1 commissioning and (2) Phase-2 commissioning with permanent magnets at drift spaces for several bunch fill patterns. “4/150/2RF” means a bunch fill pattern of four trains, 150 bunches per train and 2 RF-buckets spacing, for example.

を下げるために内面には TiN コーティングが施されている。KEKB 時の実験から仮定したアンテチェンバーによる光電子低減率(ビームパイプ内の全光電子数とビームチャンネル内の光電子数の比) $\alpha = 0.01$ を使ったシミュレーションでは、TiN コーティングの最大二次電子放出率 δ_{max} は 1.4 程度と推定され、予想値(1.1~1.2)よりも大きかった。そこで、Phase-2 運転中に行った実験および実際のビームパイプ形状を使った放射光のシミュレーション等から実機アンテチェンバーの α を再評価すると、 $\alpha \sim 0.04$ であった。この値を使うと推定される TiN コーティングの δ_{max} は 1.1 程度と推定され予想値に近い。

3.3 ビームロスを伴う圧力バースト

Phase-1 で問題となったビームロスを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が原因と各種観測、実験から推定された[6]。簡単なシミュレーションでも、ビームパイプ上面から落ちた半径数百 μm のダスト粒子と衝突するとして、現象を定性的に説明することができた[11]。そこで、筑波直線部でバーストが頻繁に観測されていた偏向電磁石用ビームパイプを中心に 24 本のビームパイプについて、Phase-2 運転開始前に圧空で動作するノッカーを使ってビームパイプに衝撃を与え、ダスト粒子を予め落としておいた。Phase-1 運転時および Phase-2 運転時に観測されたビームロスを伴う圧力バーストの頻度を Figure 8 に示す。図の横軸は、ビーム電流が 50 mA 以上の運転時間である。図から明らかのように、Phase-2 運転では圧力バーストの頻度が大幅に減っている。問題となっていた筑波直線部での発生も減っているのは先に行ったノッカー作業の効果とも考えられる。しかし、筑波直線部以外の場所の圧力バーストの頻度も減っている。Phase-2 運転では、Phase-1 運転時に比べ、衝突調整、衝突実験のために低電流(200~300 mA)の運転時間が長いこと(Figure 4 参照)等も影響していると考えられる。今後も引き続き観察が必要である。

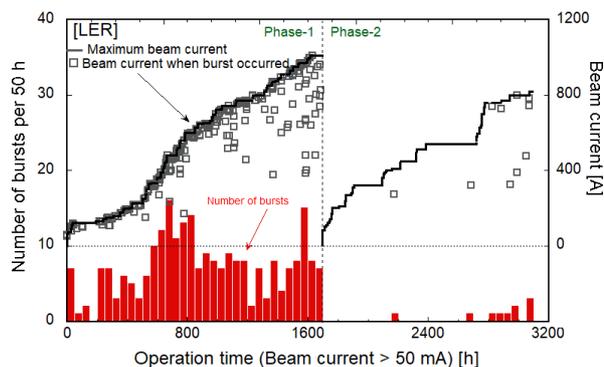


Figure 8: Number of bursts per 50 h of operation time, the beam currents when the bursts occurred, and the maximum beam currents as a function of the total beam operation time during the Phase-1 and the Phase-2 commissioning.

3.4 その他対策の効果

冷却水路を変更し流量を増やしたウイグラー部下流のビームパイプの温度は、ある程度下がったものの、予想ほど下がらなかった。現状以上に流量を増やすことは困難なため、冷却銅ブロックを取り付ける等の対策を今後要する。ウイグラー部のビームパイプの温度上昇の状況も同様であった。ただ、ウイグラー部の垂直方向ビーム軌道を調整して若干改善した。ビームパイプのビームチャンネルに近いアンテチェンバー部分に冷却ブロックを取り付ける、空冷ファンを取り付ける、等の対策を試したが大きな効果は無かった。引き続き冷却方法について検討が必要である。また、富士直線部に設置したビーム用マスク付ビームパイプでは問題は生じなかった。

3.5 新規導入真空機器の状況

- (1) Belle II 用および QCS 用のビームパイプ等真空機器はほぼ問題なく運転に供した。設置直後、衝突点に最も近いベローズチェンバーの冷却水路から水漏れがあり、水冷から空冷に切り替えた。運転時の発熱が危惧されたが Phase-2 終了まで無事運転することができた。また、QCS 内のビームパイプでは、当初、QCS の冷却時にビームパイプが冷やされ、冷却後水冷チャンネルに水を流すと凍結する、という問題があった。運転中に冷却水が何らかの問題で停止すると凍結する恐れがあり、復旧するためには QCS を常温に戻す必要がある。そのため、冷却水が止まったら即座に水を乾燥窒素で置換するシステムを構築した。Phase-2 運転時には冷却水が止まることは無かった。
- (2) LER 入射部のビームパイプには問題はなかった。ただ、徐々に蓄積ビーム電流を上げる際、キッカー用のセラミックチェンバー部で圧力が急激に上昇する、あるいはバースト状に上昇する現象が見られた。この現象は、ビーム電流を同じ電流で維持していると次第におさまる、いわゆるコンディショニング効果が見られた。ビーム電流を上げる際にはこれらの機器に注意することにした。
- (3) 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大きな効果を上げた[12]。また、QCS に正規軌道からずれたビームが衝突して発生するクウェンチを

防ぐことにも貢献した。特に垂直方向コリメータの効果は大きかった。しかし、運転中、ビームが突然不安定になり、蓄積ビームが垂直方向コリメータのヘッドに衝突し、ヘッドに溝、および、突起が発生した。そのため、コリメータヘッドをビームに近づけるとバックグラウンドが上昇するという問題が発生した。これに対して、コリメータ部に水平方向に約 1 mm の避けバンプ軌道を作る、あるいは、コリメータ自身をリング外側に約 2 mm 移動するという対策を講じた。

3.6 新たな問題

- (1) HER の衝突点下流 15~20 m に Phase-1 時から設置されていたステンレス製ビームパイプ(内面銅メッキ)2本が発熱するという問題が発生した。ビームパイプの温度は QCS 部のビーム軌道に敏感で、衝突調整の障害にもなった。原因は衝突点部でビーム軌道が QCS の中心からわずかにずれているため、そこから発生した放射光がビームパイプのビームチャンネル部に照射されたからで、ビームパイプ設計時には考慮されていなかった。運転中、ビームパイプ下流側フランジ(MO 型フランジ)2か所から計 3 回大気リークが発生した。2 回目のリークではガスケット交換が必要であった。運転中測定していた温度は約 40°C であったが、ビーム蓄積・アポート時の熱サイクルにより、ステンレスフランジと銅フランジとの熱膨張の差からガスケットが変形してリークが発生したと考えられる。Phase-3 運転への対策として、ビームパイプ衝突点に近い側に放射光マスク付の短管あるいはベローズを取り付けることにした。また、フランジ部を銅にしたステンレスチャンバーの製作も検討している。
- (2) 運転当初、LER 入射路からの入射ビーム位置を測定するためのビーム位置モニター用電極の電子ビーム部から大気リークが発生した。溶接が十分ではなかったため、外部からの力で溶接部が割れたものと考えられる。Phase-2 運転時は応急処置として、トールシールでリークを止めていたが、Phase-3 運転前に再製作して交換、あるいはダミーのビームパイプに交換する予定である。

4. まとめ:Phase-3 コミッショニングに向けて

Phase-2 運転においても、MR の真空システムは概ね順調に稼働した。HER に比べ LER の方は未だ圧力は高いが、両リングの圧力は単調に下がっている。電子雲不安定性については永久磁石やソレノイドは効果的に働いている。ビームコリメータは測定器のバックグラウンドノイズ低減や最終収束用超伝導電磁石の保護に有効に働いているが、LER ではその数が足りず、十分調整できていない。ビーム位相等を考慮し追加設置が必要である。

Phase-3 開始までの主な作業としては下記を予定している。

- (1) 衝突点部ベローズチャンバー交換。粒子測定器取り付け作業に伴う作業。
- (2) LER、HER のセプタム内ビームパイプ交換。
- (3) ドリフト部の残り部分への永久磁石取付け継続。
- (4) ウィグラー部ビームパイプ発熱対策の検討。
- (5) LER を中心にビームコリメータを 5 台追加。また、損

傷したコリメータヘッドの交換。冷却システム増強。

- (6) HER 衝突点下流に光マスク付の短管あるいはベローズチャンバーを設置。
- (7) LER 縦方向フィードバックキッカーの設置。
Phase-3 運転は 2019 年始めに開始予定である。新たな粒子測定回路を備え、本格的な衝突実験が始まる。衝突点でのビームサイズもいよいよナノビーム領域に入る。蓄積ビーム電流も 1 A を超えて運転される。真空システムにとってはさらに厳しい条件となるが、課題を確実に解決し、安定な稼働を目指していく。

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] T. Ishibashi *et al.*, “Low Impedance Movable Collimators for SuperKEKB”, Proceedings of IPAC'17, Copenhagen, May 14-19, 2017, pp.2029-2032.
- [4] 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.
- [5] Y. Suetsugu *et al.*, “SuperKEKB LER 電子雲効果抑制のための永久磁石”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Aug. 1-3, 2017, pp. 905-909.
- [6] 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.
- [7] Y. Suetsugu *et al.*, “SuperKEKB 真空システムのコミッショニング”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Aug. 8-10, 2016, pp. 1197-1199.
- [8] Y. Suetsugu *et al.*, “SuperKEKB 真空システムの近況 - Phase-2 運転に向けて -”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Aug. 1-3, 2017, pp. 694-698.
- [9] K. Shibata *et al.*, “FIRST COMMISSIONING OF VACUUM SYSTEM OF POSITRON DAMPING RING FOR SuperKEKB”, Proceedings of IPAC'18, Vancouver, Apr. 29 - May 4, 2018, WEPML057.
- [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”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Aug. 7-10, 2018, WEP115.
- [11] Y. Suetsugu *et al.*, “SuperKEKB 陽電子リングにおけるビームロスを伴う圧力バーストの観測”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Aug. 7-10, 2018, THP112.
- [12] 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”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Aug. 7-10, 2018, THP113.