

## SuperKEKB 真空システムのコミッショニング COMMISSIONING OF THE SUPERKEKB VACUUM SYSTEM

末次祐介<sup>#</sup>, 柴田恭, 石橋拓弥, 白井満, 照井真司, 金澤健一, 久松広美  
Yusuke Suetsugu<sup>#</sup>, Kyo Shibata, Takuya Ishibashi, Mitsuru Shirai, Shinji Terui,  
Ken-ichi Kanazawa, Hiromi Hisamatsu  
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

### Abstract

The first commissioning of the SuperKEKB had started in February, 2016, and finished at the end of June. The vacuum system worked stably throughout the commissioning. A major task was the vacuum scrubbing of new beam pipes, and the rise of vacuum pressures per unit beam current steadily decreased as expected. Another important task was confirming the properties of various new vacuum components with high current beams. The increase in the temperatures of bellows chambers, gate valves, and flanges were found to be less than 5 degrees at a stored beam current of approximately 1 A. The effectiveness of antechambers and TiN coating on suppressing the electron cloud effect (ECE) in the positron ring was confirmed. The ECE, however, was still observed for operation modes with high charge densities. Pressure bursts accompanying beam loss were frequently observed near or in the beam pipes with grooves for dipole magnets in the positron ring, which were possibly caused by dusts inside the beam pipes.

### 1. はじめに

SuperKEKB は、4 GeV 陽電子と 7 GeV 電子とを衝突させる、非対称エネルギー衝突型加速器である[1]。主リング(MR)は、周長約 3 km の陽電子リング(Low Energy Ring, LER)と電子リング(High Energy Ring, HER)から構成される。約 5 年半に渡る KEKB からのアップグレード作業が終わり、2016 年 2 月から 6 月末まで、第一段階(Phase-1)のビームコミッショニングが行われた。

MR の真空システムでは、LER、HER それぞれ約 90%、20% の各種真空機器(ビームパイプ、ベローズチェーン、主ポンプ、コリメータ等)が新たに設計、製作、設置された[2]。制御システムには必要に応じて最新のシステムが導入された。一方、HER のアーク部ビームパイプや両リングの冷却水・圧空システム等の大部分は KEKB の再利用である。2015 年末にはほぼすべての真空機器の設置やシステムの調整が完了した。Figure 1 は、新規ビームパイプ等が設置された MR トンネル内の様子である。以下、SuperKEKB Phase-1 コミッショニング時における真空システムの稼働状況や、問題等を報告する。

### 2. 真空システムの稼働状況

#### 2.1 運転中の圧力

MR へのビーム入射調整は LER、HER それぞれ 2 月 8 日、22 日に始まり、数日の内に蓄積に成功した。その後、様々な機器の状況を確認しながら蓄積ビーム電流は徐々に増やされ、6 月 28 日の運転停止時まで、LER、HER それぞれ最大 1010 mA、870 mA を蓄積した。ビームドーズ(積分ビーム電流)はそれぞれ 780 Ah、660 Ah に達した。

真空システムは重大な故障も無く、ほぼ順調に稼働した。すべての真空機器は CSS (Control System Studio)で

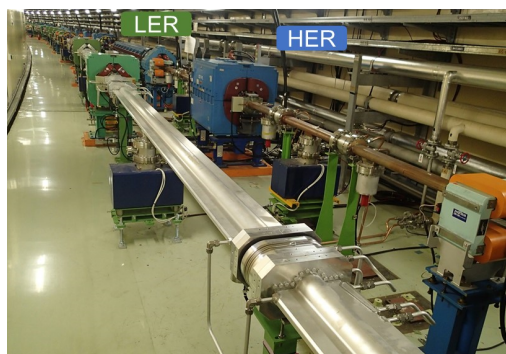


Figure 1: Present view in the SuperKEKB main ring.

構築した端末画面で監視・制御された。アラーム、ビームアポート信号発報システムも問題なく動作し、安定した稼働に寄与した。リング全体に配置された数百個の主ポンプ(NEG ポンプ)、補助ポンプ(イオンポンプ)、真空計(冷陰極真空計)もほぼ問題無く動作した。運転終盤の LER、HER の平均圧力は、最大ビーム電流蓄積時で、それぞれ  $1 \times 10^{-6}$  Pa、 $1 \times 10^{-7}$  Pa であった。

Phase-1 運転の主目的の一つは、素粒子実験が始まる第二段階(Phase-2)運転の前に、主リングの圧力を下げること、いわゆる「ビームによる焼き出し」である。Figure 2 は、LER の平均圧力上昇( $P$ )をビーム電流( $I$ )で規格化した  $dP/dI$  [ $\text{Pa A}^{-1}$ ] の、ビームドーズ(積分ビーム電流) [Ah] に対する変化である。円(赤)と四角(青)は、それぞれ、直線部を含めたリング全周の平均圧力とアーク部のみの平均圧力を示している。図中には NEG 活性化を行った時期も示している。また、図の上側横軸はアーク部の光子ドーズ(単位長さの積分光子数 [ $\text{photons m}^{-1}$ ])、右側縦軸はアーク部の光刺激脱離係数  $\eta$  [ $\text{molecules photon}^{-1}$ ] である。ただし、単位長さの排気速度として  $0.4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1}$  を仮定した。LER アーク部の  $dP/dI$  は、ビームドーズ 780 Ah 時で約  $8 \times 10^{-7} \text{ Pa A}^{-1}$ 、 $\eta$  は  $6 \times 10^{-6}$

<sup>#</sup> yusuke.suetsugu@kek.jp

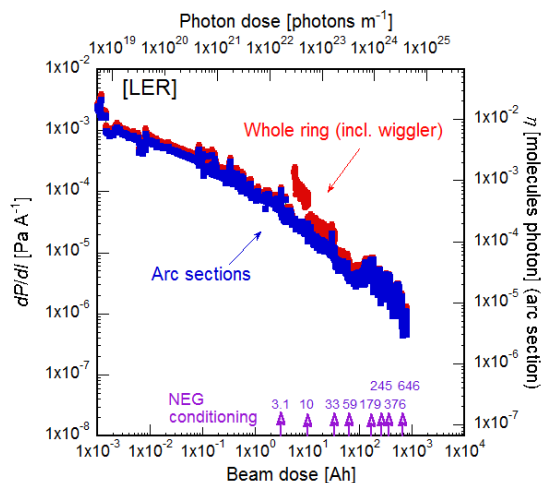


Figure 2: Decreases in  $dP/dI$  [ $\text{Pa A}^{-1}$ ] and  $\eta$  [molecules  $\text{photon}^{-1}$ ] as functions of the beam dose [Ah] and Photon dose [Photons  $\text{m}^{-1}$ ] in the LER.

molecules  $\text{photon}^{-1}$ であった。これらの値は、ビームパイプの材質や内面の TiN コーティング等条件は異なるが、KEKB の場合の同じビームドーズ量での値とはほぼ同じであった[3]。ただし、後で述べるように、ビームドーズ 100 Ah 以上では、電子雲のマルチパクタリングによるガス放出の影響が大きく、 $\eta$ は単純な光刺激脱離係数と言えない。一方 HER も LER 同様  $dP/dI$  は順調に下がった。特に、KEKB のビームパイプを再利用しているアーク部では、ビームドーズ 660 Ah にて、 $4 \times 10^{-8} \text{ Pa A}^{-1}$ 、 $\eta$ は  $1 \times 10^{-7}$  molecules  $\text{photon}^{-1}$ であった。この値は KEBB 運転終盤の値に近い[3]。再利用したビームパイプ表面が以前の状態を「記憶」しているためと考えられる。

ビーム運転中の残留ガスは LER アーク、および直線部にて四重極質量分析計で測定された。運転中の主な残留ガスは、水素、一酸化炭素、メタン、水、二酸化炭素であり、光刺激脱離によるガス成分としては典型的な残留ガスである。メタンが多いのは主ポンプが NEG ポンプであるため、水が多いのはビームパイプ等を現場でベークンしていないためであろう。直線部の質量分析計でも同様のガスが主であった。

## 2.2 新しい真空機器の状況

SuperKEKB では、KEKB 時に開発された新しい構造の真空機器が初めて大規模に採用された。内部に段差ができない MO 型フランジ、櫛歯型の RF シールドを採用したベローズチェンバーやゲートバルブ、ビームコリメータ、ストリップ型 NEG を用いた傍熱型主ポンプ、LER ウィグラー部のクリアリング電極、偏向電磁石内ビームパイプのグループ構造等である[2]。これらの新規機器の信頼性を確認することも Phase-1 運転の目的である。

フランジ、ベローズチェンバーやゲートバルブの温度は、LER 最大蓄積電流 1010 mA でも温度上昇は 1~5 度であり問題なく使用に供している。高次高周波(HOM)が発生しやすいコリメータ近くでもベローズの温度上昇は約 5°C であった。クリアリング電極は、最大ビーム電流にて 500 V を安定に維持できた。主ポンプも Figure 2 に示すように、8 回のコンディショニングを行い問題はな

かった。コリメータはほぼ想定通り稼働し、測定器のバックグラウンド低減に効果があることも確かめられた。

## 2.3 LER での電子雲問題

陽電子リングである LER では、電子雲不安定性 (Electron Cloud Effect, ECE)の抑制が重要な課題である。そのため、前述したアンテチェンバー付ビームパイプ、ビームパイプ内面の TiN コーティング、クリアリング電極、グループ構造等が採用された[2]。特にアーク部のビームパイプはアルミ製なので、ほぼすべてのビームパイプには TiN がコーティングされた。ドリフト部にはソレノイド等を使って軸方向の磁場を加える予定だが、Phase-1 では未だ装備していない。

アーク部の試験用ビームパイプに取り付けた電子モニターを使って、運転中のビームパイプ内の電子密度を測定した。Figure 3 に、TiN コーティング部とコーティングしていない部分での電子電流測定例を、KEKB 時の測定例を含めて示している[4]。電子電流値はビーム近くの電子密度を反映する。バンチ間隔は約 3 RF バケツ(約 6 ns)、バンチ数は 1500~1576、モニターグリッド(リペラー)電圧は -30 V である。400 mA 以下の低いビーム電流領域では、TiN コーティングの有無に関わらずアンテチェンバー付ビームパイプの方が円断面ビームパイプよりも値が小さく、アンテチェンバーによる光電子抑制効果を示している。一方、600 mA 以上の高いビーム電流領域では、TiN コーティング無しの部分の電子電流が大きく上昇するのに対して、TiN コーティング部分の電子電流は小さいままであり、TiN コーティングの二次電子放出率低減効果を示している。

しかし、同じバンチフィルパターンにおいてもビーム電流が 500 mA を超え始めたころから、アーク部の圧力がビーム電流に対して非線形的に上昇した。同時に、垂直方向ビームサイズの増大も観測された。よりバンチ間隔が短い、電荷密度の高いバンチフィルパターンほど、より低いビーム電流からこの現象が確認された。これらは

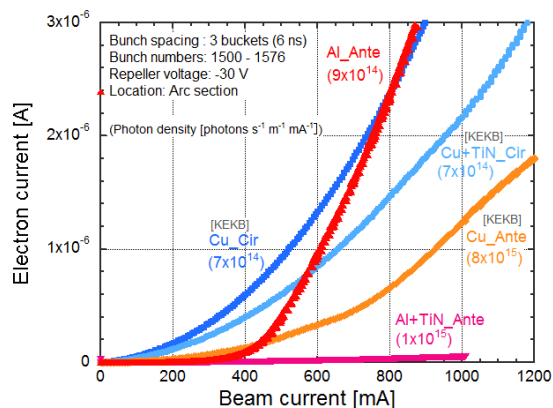


Figure 3: Beam current dependences of electron currents of electron monitor for copper circular beam pipe (Cu\_Circular), TiN-coated copper circular beam pipe (Cu+TiN\_Circular), copper beam pipe with antechamber (Cu\_Ante), aluminum beam pipe with antechamber without TiN coating (Al\_Ante), and TiN-coated aluminum beam pipe with antechamber (Al\_Ante+TiN).

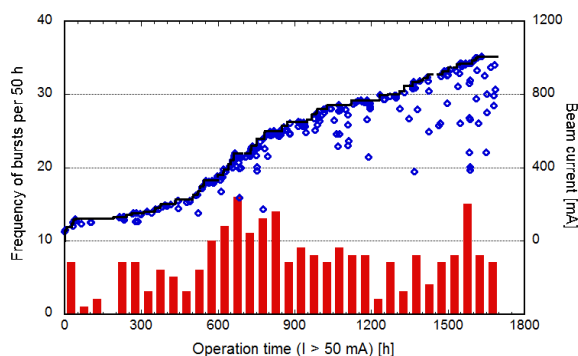


Figure 4: Frequency of pressure bursts, the beam currents when the bursts occurred and the maximum stored beam currents as a function of the operation time with a beam current larger than 50 mA.

ECE の典型的な現象である。原因として、電子電流測定結果等から、アーク部を中心に約 820 個使用されているアルミ製ベロウズチェンバー部で電子雲が形成されて、ECE が励起されていると推定された。そこで、これらアルミ製ベロウズチェンバー部分に約 100 G のビーム方向磁場を形成する永久磁石を取り付けた結果、圧力の非線形上昇やビームサイズの増大は大きく緩和された。

しかし、さらに電流を上げると、再び圧力の非線形性が顕著になり、また、ビームサイズの増大も再発した。これは、高い電流密度の運転では、TiN をコーティングした部分でも電子雲が形成され、ECE が励起されたためと考えられた。実際、試験的に一部のビームパイプに約 50 G の軸方向磁場を形成する永久磁石を並べた結果、その区間の非線形圧力上昇が治まった。現状、4RF バケツ(8 ns)間隔では 1010 mA までビームサイズ増大も無く蓄積できるが、Phase-2 以降に向けては永久磁石設置等の ECE 対策が必要であろう。

#### 2.4 圧力バーストを伴うビームロス

運転中、ビームロスを伴う圧力バーストが LER で頻発した。ビームロスの結果、ロスモニターが動作してビームアポートを引き起こした。Figure 4 は、ビーム電流 50 mA 以上の運転時間に対する、50 h あたりの発生頻度である。当初はリングの一部に集中していたが、次第に他の場所でも発生した。また、最大ビーム電流を増やした直後により頻繁に発生する傾向にあった。さらに、ほとんどの圧力バーストは偏向電磁石の中あるいは縁付近で発生した。原因としては、ビームパイプ内部の放電も考えられたが、グループ構造を持つ偏向電磁石用ビームパイプに集中していること等から、製作時などにグループに捕捉されたダストが原因ではないかと推定された。すなわち、ダストがビームと衝突してビームロスを引き起こし、ダストが蒸発したり、発生したイオンが表面に衝突したりした時に発生・脱離した気体がバーストとして観測される、と考えられた。実際、偏向電磁石内のビームパイプに衝撃を与える“ノッカー”を取り付け、運転中に動作させたところ、圧力バーストとビームロスが再現された。今後の対策としては、予めビームパイプに衝撃を与えてダストを落としておく、素粒子実験の前にビーム電流を上げてエージング時間を設ける、等が現在検討されている。

#### 2.5 その他の問題

運転中リークは 2 回発生した。1 回目のリークは、HER ビームアポート部近くで、断面が次第に狭まるテーパ構造を持つビームパイプのフランジからであった。内部を確認すると、片側の水平面位置に“筋”が確認され、真空シールにも変色が見られた。付近ではアポート時に圧力バーストが観測され、また、リーク箇所付近の残留放射能が高いこと等から、ビームの一部が内壁に当たっていたものと考えられた。リーク発生後、アーク部にあるビームコリメータを閉めて運転し、圧力のバースト強度が緩和されたように見えた。また、反射放射光による熱の影響も指摘された。Phase 2 までには、ビームに対するマスクを取り付けたビームパイプに改造する予定である。

もう 1 回は、LER ウィグラー部のフランジから発生した。ウィグラー部は、長さ 100 m 以上にわたる直線部で、アンテナチャンバー付ビームパイプを採用している。そのため、放射光が照射される部分は垂直方向のビーム軌道やビームパイプのアラインメントに敏感となる。リークはビームパイプの温度を調整するために、軌道を垂直方向に調整していた際に発生した。対策としては、まずビームパイプの再アラインメントを行い、Phase-2 ではビーム軌道をできるだけ平にして運転する予定である。

その他、温度計や流量計の表示の異常等が発生したが、多くは容易に対応できるもので、個別に対処した。

### 3. まとめと今後の予定

SuperKEKB の真空システムは、Phase-1 運転中ほぼ順調に稼働した。単位電流あたりの圧力上昇は単調に減少した。今回初めて大規模に採用された新規真空機器は順調に稼働した。LER で採用された電子雲対策の効果も確認された。しかし、高い電荷密度のバンチフィルパターンの運転では ECE が観測され、ECE 対策が未だ不十分であることが確認された。また、ビームロスに伴う圧力バーストが頻繁に観測されたが、その原因はビームパイプ内のダストによるものと推定された。

現在来年度予定されている Phase-2 に向けて BELLE-II 測定器および超伝導最終収束電磁石の設置作業が始まっている。それまでに、LER の ECE 対策、圧力バースト対策が必要である。また、LER 入射部改造、新規 6 台のビームコリメータの設置等が予定されている。

#### 謝辞

真空機器の製作に関して様々な困難な要求に対応して頂いた各製作会社に深く御礼申し上げます。また、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 *et al.*, Proc. IPAC2016, May 8-13, Busan (2016) p.1019-1021.
- [2] Y. Suetsugu, K. Kanazawa, K. Shibata, T. Ishibashi, H. Hisamatsu, M. Shirai, S. Terui, Vacuum, **121** (2015) 238.
- [3] K. Kanazawa *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. (2013) 03A005.
- [4] Y. Suetsugu, K. Kanazawa, K. Shibata and H. Hisamatsu, NIM-PR-A, 556 (2006) 399.