

SuperKEKB 加速器の真空システム -約 6 年間の運転経験と現状-

VACUUM SYSTEM OF THE SuperKEKB ACCELERATOR - EXPERIENCES IN THESE SIX YEARS OPERATION AND PRESENT STATUS -

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)}, 姚慕蠡^{B)}, 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)}, Shinji Terui^{A)}, Mu-Lee Yao^{B)},
Ken-ichi Kanazawa^{A)}, Hiromi Hisamatsu^{A)}
^{A)} KEK, ^{B)} SOKENDAI

Abstract

The SuperKEKB accelerator has been operating since 2016. The vacuum systems of the main ring consisting of 7 GeV electron ring (HER) and 4 GeV positron ring (LER), and the damping ring (DR) for 1.5 GeV positrons in the middle of the injector linac have been working well as a whole. The pressure rises per unit beam current ($\Delta P/\Delta I$) are decreasing steadily. The new vacuum components developed for the SuperKEKB have been working well as expected. The recent behavior of vacuum pressure against the beam current for different number of bunches was found to be well explained by both the photon-stimulated gas desorption and the thermal gas desorption due to the heating by beam. The beam lifetime was almost limited by the Touschek effect rather than vacuum pressure (mainly the Rutherford scattering).

1. はじめに

SuperKEKB 加速器は、KEK つくばキャンパスにある電子・陽電子衝突型粒子加速器で、B 中間子領域での新しい物理現象を探索している[1]。周長約 3 km の主リング(MR)は、4 GeV 陽電子リング(LER)と 7 GeV 電子リング(HER)から構成され、運転は 2016 年に始まった。2019 年からは Belle II 測定器を用いた本格的物理実験を継続しており、ルミノシティ(衝突頻度に相当)の世界記録を 2020 年以降更新し続けている[2]。LER、HER、および、2019 年から運転を開始した、入射器途中にある 1.5 GeV 陽電子ダンピングリング(DR)の真空システムは、運転開始以降ほぼ問題無く稼働している[3, 4]。LER、HER および DR の最大蓄積ビーム電流はそれぞれ 1.46 A、1.14 A および 30 mA である。SuperKEKB 用に開発・導入された様々な真空機器は概ね想定通り運転に供している。各リングの単位ビーム電流当たりの圧力上昇は、運転と共に堅調に下がっている。MR のビームライフタイムは、残留気体との散乱等よりも Touschek 効果の寄与が主となっている。また、MR では、蓄積ビーム電流が増えるにつれ、放射光による圧力上昇の他、ビームで誘起される高次高周波等による発熱に起因する圧力上昇も見え始めている。ここでは、運転開始以降約 6 年間の SuperKEKB 真空システムの経験と現況を報告する。

2. 運転履歴

2010 年に KEKB 加速器の運転が終了した後、約 6 年間のアップグレード作業期間を経て、SuperKEKB の MR は 2016 年から運転を開始した。ビームパイプやベローズチェンバー等の真空機器は、LER、HER のそれぞれ約 93%、20%の部分が新規に製作、設置された[3]。運転開始から 2022 年 6 月までの LER の圧力、ビーム電流の履歴を Fig. 1 に示す。圧力が時折スパイク状に高くなっているのは、運転停止期間等に機器の交換作業等でリン

グの一部を大気に曝した直後の運転や、主ポンプである非蒸発型ゲッター(NEG)ポンプを活性化した時等である。ここで示す圧力は、リングに平均約 10 m 毎に置いたイオンポンプ用ポートに取り付けられた冷陰極真空計(CCG)の読み値(窒素換算値)を 3 倍した値の平均値である(以降も同様)。これは、ビームが通るビームパイプ内の圧力が CCG 取り付け位置の圧力より約 3 倍高いことを補正するためである。また、使用している CCG の測定限界が読み値で 1×10^{-8} Pa なので、最低の圧力は 3×10^{-8} Pa となっている。この値に近い圧力は正確ではなく、注意が要る。HER も LER 同様に圧力は堅調に下がっている。2022 年 6 月の運転中の圧力は、LER で 2.0×10^{-7} Pa (1.46 A、2249 バンチ)、HER で 4.9×10^{-8} Pa (1.14 A、2249 バンチ)である。ビームが蓄積されていない時のベース圧力はどちらも測定限界に近い。DR の運転は 2018 年から開始され、ほぼ順調に稼働しており、圧力も堅調に下がっている[4]。最大ビーム電流は約 30 mA である。

Figure 2 には、この 6 年間の各年の運転時間、その内の全トラブル時間(運転を止めたトラブル)の割合、および真空システム関係のトラブルの割合を示している。主な真空関係のトラブルは、大気リーク(多くはフランジから)、機器の損傷のための交換作業等である。真空システム関連のトラブルの割合は 4%以下となっている。

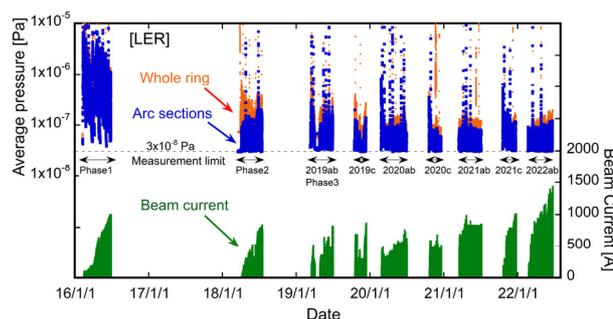


Figure 1: Trends of pressure and beam current since 2016 for LER.

[#] yusuke.suetsugu@kek.jp

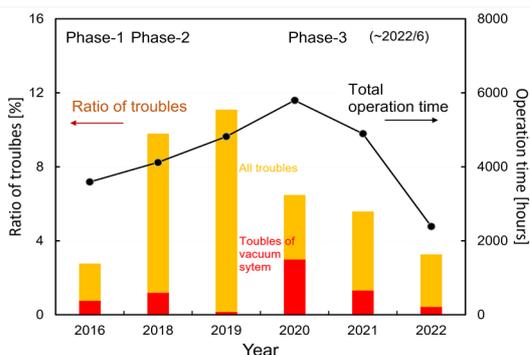


Figure 2: Total operation time, the ratio of no-operation time resulted from troubles to the total operation time, and those related to vacuum system each year from 2016.

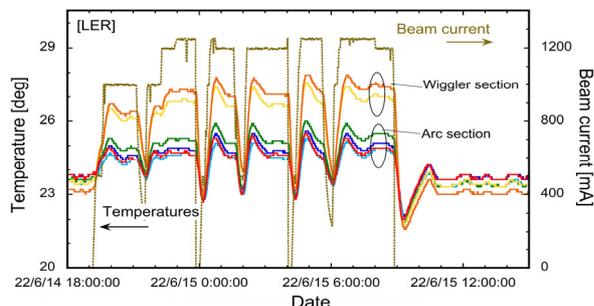


Figure 3: Typical temperatures of bellows chambers at wiggler and arc sections during recent operation.

SuperKEKB にアップグレードするにあたり、KEKB や他の衝突加速器での経験を基に、大電流、ビームインピーダンス、LER の電子雲不安定性等に対して対策を講じた様々な新しい真空機器を導入した[5]。例えば、楕円型 RF シールドを備えたベローズチェンバーやゲートバルブ、インピーダンスを低減するための段差の小さいフランジ(MO 型フランジ)、アンテナチェンバー付きビームパイプ、TiN コーティング、クリアリング電極等である。これらの機器は、運転開始以来概ね問題なく運転に供している。一例としてベローズチェンバーの運転中の典型的な温度変化を Fig. 3 に示す。ウィグラー部にあるベローズチェンバーの温度が高いのは、この区間のシンクロトロン放射光強度がアーク部より強く、その結果周辺のビームパイプや冷却水等の温度も高くなっているためである。

3. ビーム運転中の圧力上昇

3.1 単位電流あたりの圧力上昇

Figure 4(a)に、LER のビームドーズ(積分ビーム電流)に対する単位電流(I [A])あたりの圧力(P [Pa])の上昇率($\Delta P/\Delta I$)、およびアーク部について相当するフォトンドーズ(1 m あたりの積分光子数)に対する光刺激脱離係数 η [molecules photon⁻¹]を示している。なお、圧力については上述したように読み値の 3 倍の値を使用している。また、単位長さあたりの排気速度として 0.06 m³s⁻¹m⁻¹ を仮定している。また、実際の計算では、ビーム電流がその時の最大値の 40%以上の場合について圧力上昇(ベース圧力を 3×10⁻⁸ Pa と仮定)をビーム電流で割って

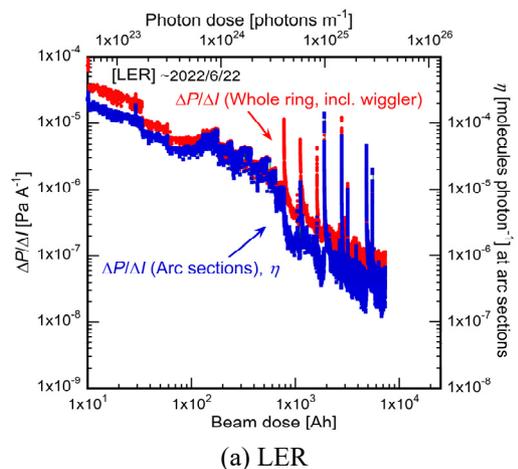
る。LER では、2022 年 6 月の段階で、リング全周で $\Delta P/\Delta I \sim 6.5 \times 10^{-8}$ Pa A⁻¹、アーク部の $\eta \sim 3 \times 10^{-7}$ molecules photon⁻¹に達している(ビームドーズ 7312 Ah)。一方 HER も単調に $\Delta P/\Delta I$ 、 η は減少しており、リング全周で $\Delta P/\Delta I \sim 1.1 \times 10^{-8}$ Pa A⁻¹、アーク部で $\eta \sim 1.6 \times 10^{-8}$ molecules photon⁻¹に達している(ビームドーズ 6199 Ah)。HER の方が LER より値が小さいのは、KEKB から再利用したビームパイプ等が多く、表面が放射光でエージングされていて、いわゆる表面の”枯れ”が進んでいるためである(Memory effect と呼ばれる)。

DR の $\Delta P/\Delta I$ と η も Fig. 4(b)に示しているようにビームドーズと共に堅調に下がっている。ビームドーズ約 70 Ah にて $\Delta P/\Delta I = 3.5 \times 10^{-6}$ Pa A⁻¹、 $\eta = 1.8 \times 10^{-6}$ molecules photon⁻¹である。なお、計算ではビーム電流が 1 mA 以上の時のデータを用い、また、排気速度はポンプポート入口で 0.04~0.05 m³s⁻¹を仮定している[4]。

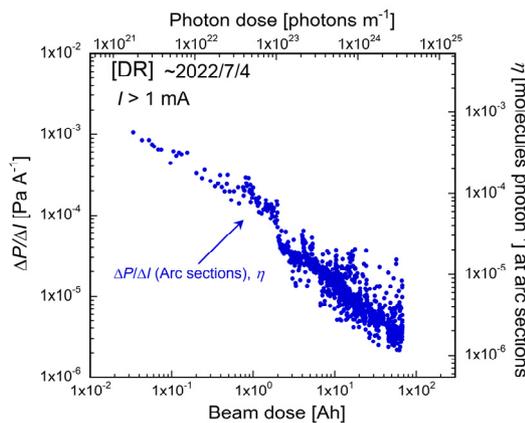
3.2 MR の圧力上昇とビーム電流

Figure 4(a)からわかるように、MR の $\Delta P/\Delta I$ の値の幅(ばらつき)が最近では大きくなっている。これは、圧力上昇が単純にビーム電流に比例する、いわゆる放射光による光脱離だけではないことを示唆している。

Figure 5(a)は、LER について、2022 年 3 月 16 日から



(a) LER



(b) DR

Figure 4: $\Delta P/\Delta I$ of whole ring and arc sections as a function of beam dose, and η at arc sections as a function of photon dose for (a) LER and (b) DR until 2022 spring run.

4月25日までの、ビーム電流に対する圧力の変化である。後述する重回帰分析に用いた 6×10^{-8} Pa 以上の圧力はバンチ数毎に色分けしてプロットしている。値はビーム電流値が 100 mA 以上で、1 分間以上安定して蓄積している時の圧力である。また、この期間、ビームのエネルギーは一定、バンチ数は 393~1662 バンチであった。図からわかるように、圧力はビーム電流に単純には比例せず、ビーム電流が高いほど圧力上昇の傾きが急になっている。また、同じビーム電流でもバンチ数によって圧力の上昇具合が異なっている。

ここでは、この圧力の振る舞いについて、放射光による光脱離に加え、ビームパイプ等の発熱による熱脱離を含めて検討してみる。ただし、排気速度は一定、データ取得期間に”枯れ”はないとした。また、電子雲不安定性による電子衝撃脱離やビームサイズ増大も無いとした。

まず、放射光による光脱離では、その圧力上昇 (ΔP_p) は表面にあたる光子数に比例するので、結局、ビームエネルギーが一定ならビーム電流 (I) に比例する。すなわち、

$$\Delta P_p \propto I \quad (1)$$

と表すことができる。一方、発熱による熱脱離については、注目する温度 (T) を $20 \sim 50^\circ\text{C}$ ($293 \sim 323$ K) とし、気相の分子と表面に吸着した分子で平衡状態がほぼ成り立っているとすると、圧力 P_t の温度 T 依存性は、おおよそ次のように書くことができる。

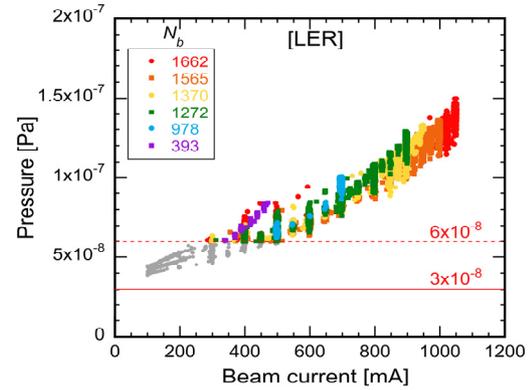
$$P_t(T) \propto \exp\left(-\frac{E_d}{RT}\right) \quad (2)$$

ここで、 E_d は吸着エネルギー、 R は気体定数である。したがって、温度が T から $T+\Delta T$ まで上昇した時の圧力上昇 (ΔP_t) は、Eq. (2) において温度が $T+\Delta T$ の時と T の時との差となる。しかし、指数関数形のままでは ΔT 依存性が複雑で、後述する重回帰解析が難しい。そこで、想定している温度が比較的低温、範囲が狭いことを考慮し、ここでは ΔP_t を ΔT のべき乗で近似する。良く知られているように、室温近い温度で放出される気体は主に水なので、 E_d は $50 \sim 100$ kJ mol⁻¹ と考えられ[6]、その場合、簡単な計算から、 ΔP_t は $(\Delta T)^2$ あるいは $(\Delta T)^3$ が良い近似となる。実際、アルミ合金製の真空容器を 60°C 近くまでゆっくりベーキングし、この温度範囲での圧力変化を測定した結果、圧力変化は Eq. (2) で計算した変化とほぼ一致し、また、 ΔT のべき乗での近似では、 $(\Delta T)^2$ が最もよく測定値を再現した。そこで、ここでは、 ΔP_t が $(\Delta T)^2$ に比例すると考える。

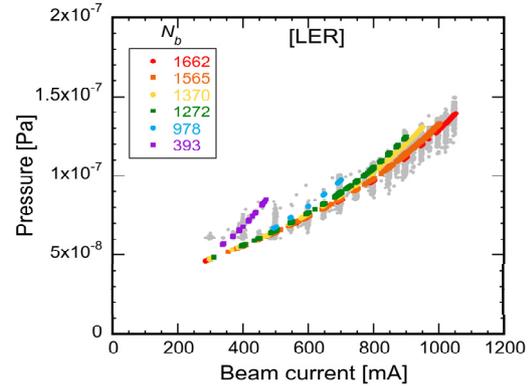
一方、温度上昇 ΔT の原因となる入熱として、放射光がまずは考えられるが、それはバンチ数に依存せず、また、照射部の直近で水冷されているのでここでは無視する。その他の要因としては、ビームが誘起する壁電流によるジュール損、ビームが誘起する高次高周波による表面でのジュール損が考えられる。いずれもバンチ数 (N_b) とバンチ電流 (バンチあたりの電流 I/N_b) の 2 乗に比例する。これらのことから、圧力上昇 ΔP_t は

$$\Delta P_t \propto (\Delta T)^2 \propto \left(\frac{I^2}{N_b}\right)^2 \quad (3)$$

と置くことができる。結局、圧力上昇 ΔP と圧力 P は、



(a) Measurement



(b) Calculation

Figure 5: Dependences of P on I (a) measured, (b) calculated using the regression curve for several N_b of 393 – 1662 for LER, where the P values higher than 6×10^{-8} Pa from 16th March to 25th April, 2022 were used for the multi regression analysis. Gray points are all data.

$$\Delta P = \Delta P_p + \Delta P_t = C_p I + C_t \left(\frac{I^2}{N_b}\right)^2 \quad (4)$$

$$\therefore P = P_0 + C_p I + C_t \left(\frac{I^2}{N_b}\right)^2 \quad (5)$$

と表すことができる。ここで P_0 (ベース圧力)、 C_p と C_t は定数である。これらの定数を Fig. 5(a) の測定データを調査変数として重回帰分析で決定した。ただし、測定限界 (3×10^{-8} Pa) の影響を少なくするために、圧力 6×10^{-8} Pa 以上の 42,254 個のデータを用いた。得られた回帰式は、

$$P = 2.42 \times 10^{-8} + 7.64 \times 10^{-11} I + 7.8 \times 10^{-14} \left(\frac{I^2}{N_b}\right)^2 \quad [\text{Pa}] \quad (6)$$

である (I : mA)。ちなみに、回帰式の精度を表す補正 R^2 は 0.977 であった。この回帰式を使って計算した圧力をビーム電流に対してプロットすると Fig. 5(b) のようになり、Fig. 5(a) の測定値を良く再現している。ビーム電流が増えると、ビームパイプ等真空機器の発熱による圧力上昇

も考慮しなければならないことを示している。ただ、Eq. (6)からわかるように、現状ではまだ光脱離が主である。本報告では省略するが、圧力上昇が $(\Delta T)^3$ に比例すると仮定しても、Fig. 5 のビーム電流範囲ではほぼ同様の結果が得られた。

HER については、ビーム蓄積時でも測定した圧力が測定限界に近く、LER と同様な方法での分析は困難である。ただ、バンチ数による圧力変化の違いは見られた。

4. ビームライフタイム

電子・陽電子蓄積リングの圧力に依存するビームライフタイムは、良く知られているように、制動輻射、Rutherford 散乱、Møller 散乱でほぼ決まる[7]。ビームパイプの開口が十分大きい場合には制動輻射が主要因となるが、SuperKEKB の場合、測定器のバックグラウンドを低減するために、ビームコリメータ[8]がビームから 1 mm 近くまで閉められているので、Rutherford 散乱が主要な要因となる。一方、バンチ長が約 6 mm と短く、ビームエミッタンスも小さいため、Touschek 効果でできるライフタイムも短くなる。

ここでは、ビームライフタイムについて、圧力でできるライフタイムと Touschek 効果で決まるライフタイムを、運転中の測定データを使って 3 章と同様の手法で評価した。なお、ここで評価したのはシングルビーム(衝突実験を行っていない時)の場合である。衝突実験中はこれらの効果以外に衝突による効果、ビーム・ビーム効果による動的開口の変化等もあり複雑となる。

圧力で決まるビームライフタイム τ_p は、ここでは大まかな傾向を評価するために、

$$\frac{1}{\tau_p} \propto P \quad (7)$$

と仮定した。散乱でできるライフタイムは、正確にはリング内のベータ関数とその位置での圧力との積で評価されるが、ここでは単純化してリングの平均圧力 P に比例するとした。一方 Touschek ライフタイム τ_t は、ここでは、

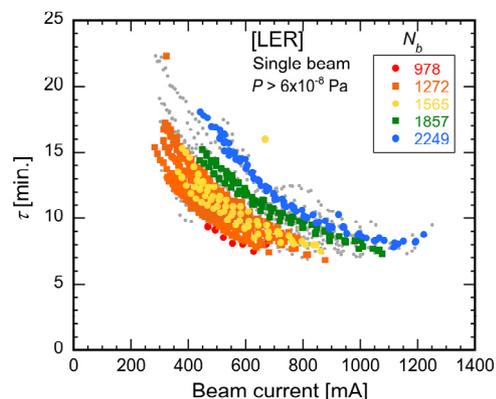
$$\frac{1}{\tau_t} \propto \frac{I}{N_b \sigma_z} \quad (8)$$

と置いた。 σ_z はバンチ長である。Touschek ライフタイムはバンチのサイズに比例することから、本来は、 ϵ_x 、 ϵ_y をそれぞれ水平方向、垂直方向のエミッタンスとして、 $1/\tau_t$ は $I/(N_b \sigma_z \sqrt{\epsilon_x \epsilon_y})$ に比例する、とすべきである。しかし、ここで評価した運転期間(2022年3月15日~6月21日)では、原因は不明だが、運転時期によりほぼ同じビーム電流、バンチ数、ライフタイム、圧力でもエミッタンスの測定値が変動していた。そのため、ライフタイム測定値は $I/(N_b \sigma_z \sqrt{\epsilon_x \epsilon_y})$ よりも $I/(N_b \sigma_z)$ により強く依存していた、すなわち、測定値と後述する回帰曲線での予想値との残差の分散が小さかった。また、実際、通常運転中はエミッタンスが小さくなるように常に調整を行っているので、意図的に変更しない限り、エミッタンスの変化は大きくない。そこで、ここでは Eq. (7)と Eq. (8)を用い、全体のライフタイム τ はこれら二つのライフタイムで決まると仮定した。すなわち、

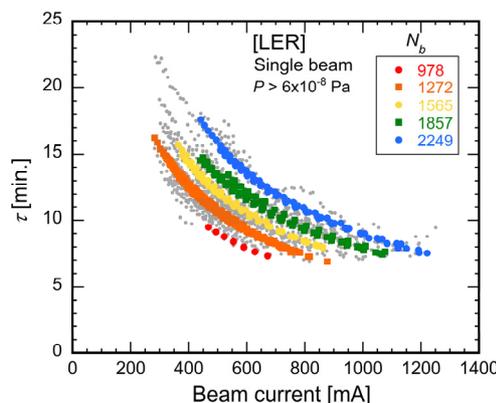
$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_p} + \frac{1}{\tau_t} = C_p P + C_t \frac{I}{N_b \sigma_z} \quad (9)$$

とした。 C_p 、 C_t は定数で、実際には残留気体の種類、分圧、リングの物理的・動的開口等に依存する。ここでは、これらの二つの定数を、上記期間での圧力、ビーム電流、バンチ数の測定値を用い重回帰分析で求めた。なお、バンチ長(σ_z)は、以前に測定されているバンチ電流に対するバンチ長の近似式を用いた[9]。分析に用いたデータは、衝突点での垂直方向ベータ関数(β_y^*)が 1 mm、ビーム電流が 100 mA 以上の場合で、また、ライフタイムが 3 分以上で、少なくとも 1 分間ビーム電流が単調に減少している時の値を選んだ。また、圧力は 3 章と同様、測定限界の影響を少なくするために 6×10^{-8} Pa 以上のデータを用いた。最も狭いコリメータの開口もこの期間ほぼ一定であった。バンチ数 N_b は 978~2346 バンチ、バンチ電流の範囲は $0.1 \sim 0.7$ mA bunch $^{-1}$ であった。代表的なバンチ数でのライフタイムのビーム電流依存性を Fig. 6(a)に示す。

重回帰分析は 1,159 個のデータについて、 $P = 0$ Pa、 $I = 0$ mA で $1/\tau = 0$ min. $^{-1}$ という条件で行った。得られた回



(a) Measurement



(b) Calculation

Figure 6: Dependence of τ on I (a) measured and (b) calculated using the regression curve for several N_b of 978 – 2249 for LER, where the P values higher than 6×10^{-8} Pa from 15th May to 21st June, 2022 were used for the multi regression analysis. Gray points are all measured data.

帰式は、

$$\frac{1}{\tau} = 2.61 \times 10^5 I + 0.979 \frac{I}{N_b \sigma_z} \quad [\text{min}^{-1}] \quad (10)$$

である(I : mA, σ_z : mm)。ちなみに、回帰式の精度を表す補正 R2 は 0.993 であった。この回帰式で得られたライフタイムのビーム電流依存性を Fig. 6(b)に示している。測定値を良く再現していることがわかる。ライフタイムへの圧力の寄与と Touschek 効果の寄与は、Eq. (10)右辺の第 1 項目と第 2 項の比で評価できる。バンチ電流 0.2~0.7 mA の範囲で、おおよそ 0.2~0.4 であり、現状約 6~8 割は Touschek 効果でライフタイムは決まっている。

HER のライフタイムについては、圧力が LER に比べて低いことから想像できるように、ほぼ Touschek 効果で決まっている。圧力が測定限界に近く、正確には評価できなかったが、バンチ電流 0.2~0.6 mA の範囲では約 8~9 割は Touschek 効果で決まっている。

5. 現状の主な課題と対策

MR では、測定器のバックグラウンドを低減するために、ビームコリメータが複数台設置されていて有効に働いている[8]。ビームコリメータのヘッドは、狭いものでビーム軌道から 1 mm 程度の位置にある。運転中、何等かの原因でビームが急激(20~30 μs)に不安定になり、ビームがヘッドに衝突することが度々発生している。時には最終ビーム集束超伝導電磁石のクウェンチも引き起こし、ビーム電流増加時の障害の一つとなっている。ビームロスモニターを増やす等様々な調査やシミュレーションが進められているが、この急激なビームロスの原因はまだ特定されていない。可能性の一つとして、ビームパイプ内のダストとの衝突が指摘されているが、シミュレーション結果と実際の現象は一致しない。さらに原因調査を進める必要がある。一方、ビームが衝突しても損傷し難いコリメータヘッドが検討されており、カーボン製ヘッド等の開発が進められている[10]。

コリメータヘッドがビームに非常に近いことから、コリメータのインピーダンスも問題となっている。実際、運転条件にも依るが、高いバンチ電流で不安定性が励起されやすく、ビームサイズの増大等が観測されている。2022 年からの長期シャットダウン(LS1)中に、リングの一部にスキュー六極電磁石の非線形磁場を利用したコリメータを設置予定である[2]。このコリメータは、既存のコリメータよりビームから遠い位置にヘッドを置いて使用されるため、インピーダンス低減効果が期待されている。

ウィグラー部は、放射減衰を利用してビームエミッタンスを小さくするために導入されているが、長さ 100 m 以上の直線部にあるため、上流で発生した放射光が長い距離にわたって下流側ビームパイプにも照射される。実際の加速器では、ビーム軌道は水平ではなく、垂直方向の COD を持つため、垂直方向に広がった放射光の一部がアンテナチェンバー部だけではなくビームチャンネル部にも照射される。その結果、ビーム電流が増えるにつれ、ウィグラー部でビームパイプのフランジ部分の温度が想定以上に上昇し、場合によってはフランジ部からリークが発生している。対策として、垂直方向の軌道を極力フラットにする、ビームパイプ位置の再アラインメントを行う、フ

ランジ部を空冷する、等の対策を講じているが、長期的にはアンテナチェンバー部の上下、およびビームチャンネルの一部に放射光マスクを設けたペローズチェンバーの設置を検討している。

6. まとめ

SuperKEKB 加速器の今季運転は 6 月 22 日に終了した。Belle II の積分ルミノシティは約 428 fb^{-1} に達し、また、ルミノシティは世界最高値を更新して $4.65 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を記録した。これは KEKB の記録の 2 倍以上である。今後さらに衝突点の β 関数を絞り、ビーム電流を上げて目標に近づけていく。真空システムは、これまでのところ MR、DR 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でてきている。それぞれ適切な対策を講じ、今後も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 コミッションンググループの皆様にも深く感謝致します。

参考文献

- [1] <https://www-superkekb.kek.jp/>
- [2] Y. Funakoshi *et al.*, “The SuperKEKB has Broken the World Record of the Luminosity”, in *Proc. IPAC'22*, Bangkok, Thailand, Jun. 2022, pp. 1–5; doi:10.18429/JACoW-IPAC2022-MOPLXGD1
- [3] 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; doi: 10.1116/1.5083928
- [4] K. Shibata *et al.*, “Commissioning of Vacuum System for SuperKEKB Positron Damping Ring”, *J. Vac. Sci. Technol. A* 37, p. 41601, 2019; doi:10.1116/1.5092956
- [5] Y. Suetsugu *et al.*, “Construction Status of the SuperKEKB Vacuum System”, *Vacuum* 121, p. 238, 2015; doi:10.1016/j.vacuum.2014.12.010
- [6] 福谷克之, *et al.*, “真空に関連の深い分子の特性”, *J. Vac. Soc. Jpn.* 59, p. 145, 2016; doi:10.3131/jvsj2.59.145
- [7] J. Le Duff, “Current and Current Density Limitations in Existing Electron Storage Rings”, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 239, p. 83, 1985; doi:10.1016/0168-9002(85)90702-8
- [8] T. Ishibashi *et al.*, “Movable Collimator System for SuperKEKB”, *Phys. Rev. Acc. Beams* 23, p. 53501, 2020; doi:10.1103/PhysRevAccelBeams.23.053501
- [9] G. Mitsuka, “Beam monitors (XRM, SRM, Loss mon., FB)”, presented in the 23rd KEKB Acc. Review, KEK, Jul. 2019; <https://www-kekb.kek.jp/MAC/2019/Report/Mitsuka.pdf>
- [10] S. Terui *et al.*, “Report on Collimator Damaged Event in SuperKEKB”, in *Proc. IPAC'22*, Online, May 2021, pp. 3541-3544; doi:10.18429/JACoW-IPAC2021-WEPAB359