

SuperKEKB 陽電子リングの電子雲不安定性対策の検証と課題

VERIFICATION AND REMAINING PROBLEMS OF THE COUNTERMEASURES AGAINST THE ELECTRON CLOUD EFFECT IN THE SUPERKEKB POSITRON RING

末次祐介^{#, A, B)}, 柴田恭^{A, B)}, 福岡均^{A)}, 大見和史^{A, B)}

Yusuke Suetsugu^{#, A, B)}, Kyo Shibata^{A, B)}, Hitoshi Fukuma^{A)}, Kazuhiro Ohmi^{A, B)}

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

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

Abstract

The electron cloud effect (ECE) was observed in the Phase-1 commissioning (February – June, 2016) of the SuperKEKB positron ring. The electron cloud was considered to be formed in the beam pipes at drift spaces, which have antechambers and TiN coating as the countermeasures against ECE. Before starting the Phase-2 commissioning (March – July, 2018), permanent magnets or solenoids, which make axial magnetic fields of several ten gauss, were attached along the beam pipes as additional countermeasures. The effect of the magnets was verified in the Phase-2 commissioning. At the same time, the maximum secondary electron yield (SEY) of the TiN coating and the photoelectron suppression effect of the antechambers were evaluated from the simulations and the experiments using beams during the Phase-2 commissioning.

1. はじめに

KEK の SuperKEKB 4 GeV 陽電子リング(Low Energy Ring, LER)では、アンテチェンバー付きビームパイプや、ビームチャンネル内面への窒化チタン(TiN)コーティング等、様々な電子雲不安定性(Electron Cloud Effect, ECE)対策が取られている[1]。2016年2月から6月にかけて行われた Phase-1 運転の終盤、ビーム電流約 0.9 A (1 train, 1576 bunches, 3.06 RF-buckets 間隔 = 約 6 ns 間隔、以下 1/1576/3.06RF と表す)で ECE が観測された[2]。この時のバンチ電流線密度(バンチ電流をバンチ間隔で規格化したもの)は、銅製丸パイプを用いていた KEKB の場合よりも高く、準備した対策の効果が確認された。しかし同時に、対策がまだ不十分であることも示された。

現状を把握するために、ドリフト部のビームパイプ(Fig. 1 参照)に採用した実機アンテチェンバーの光電子放出抑制効果とビームチャンネル部の TiN コーティングの二次電子放出抑制効果の再評価を行った。すなわち、電子密度のシミュレーション結果や運転中の測定結果等から、円断面パイプの場合と比較したアンテチェンバーによる光電子減少率 α と、TiN コーティングの最大二次電子放出率(Secondary Electron Yield, SEY) δ_{\max} を推定した。一方、さらなる ECE 対策として、Phase-2 運転前にドリフト部のビームパイプに永久磁石やソレノイドによってビーム方向の磁場(最大 60~100G)を加えた[3]。

ここでは、Phase-1 運転終了後、および 2018 年 3 月から 7 月まで行われた Phase-2 運転時[4]に行った、アンテチェンバーと TiN コーティングの効果の再評価結果、追加対策効果の確認実験の結果等を報告する。

2. Phase-1 運転での ECE

Phase-1 運転終盤、1/1576/3.06RF のフィルパターンに

[#] yusuke.suetsugu@kek.jp

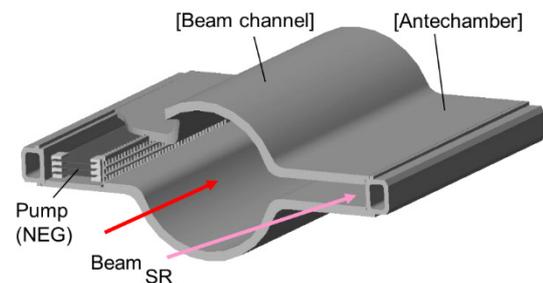


Figure 1: Typical cross section of a beam pipe at the arc sections for LER.

て、約 0.9 A から、ビームサイズの増大、圧力の非線形上昇や結合バンチ不安定性が観測された[2]。Figure 2 は 4/150/2RF, 3RF, 4RF および 6RF で測定したビームサイズのバンチ電流線密度依存性である。2 および 3 RF-buckets 間隔の時、約 0.2 mA bunch⁻¹ RF-bucket⁻¹ からブローアップが始まっている。

電子雲の源を確認するために、リングのドリフト部の一部ビームパイプに永久磁石を並べ、軸方向に最大約 60 G の磁場を加えたところ、非線形だった当該区間圧力のビーム電流依存性が線形になった。このことから、観測された ECE の原因となる電子雲はドリフト部で発生していると推定された。

ドリフト部の典型的なビームパイプ断面を Fig. 1 に示す。ビームパイプはアンテチェンバーを持ち、 $\phi 90$ mm のビームチャンネル内面には TiN コーティングが施されている。このビームパイプは電磁石内を含めると約 3 km のリングの約 90%で使用されている。ECE が観測され始めたバンチ電流線密度は、銅製丸パイプを用いていた KEKB の場合(約 0.05 mA bunch⁻¹ RF-bucket⁻¹)よりも高く、準備した対策の一定の効果を示している。しかし同時に、対策がまだ不十分であることも示した。実機のアンテ

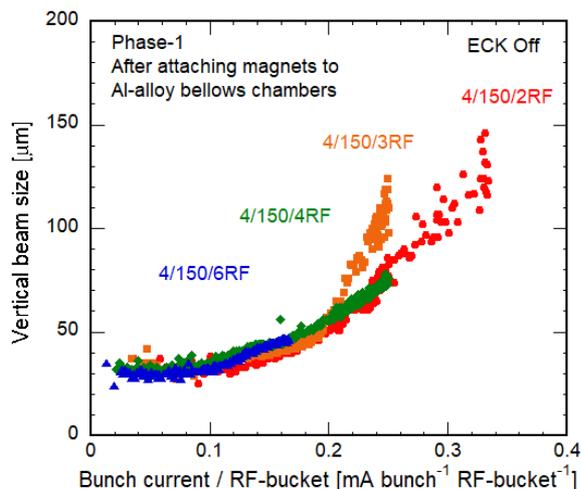


Figure 2: Vertical beam sizes as a function of the bunch current divided by bunch spacing (RF bucket) for several bunch fill patterns measured in the Phase-1 commissioning. Here, “4/150/2RF” means the bunch fill pattern of 4 trains, 150 bunches per train, and 2 RF-bucket spacings, for example.

チェンバーと TiN コーティングの効果を再評価し、また、ECE を抑える追加対策が必要となった。

3. TiN コーティングとアンテチェンバーの効果の再評価

アンテチェンバーの光電子低減効果を示す指標として円断面パイプの場合と比較したアンテチェンバーによる光電子減少率 α を次式で定義する。

$$\alpha \equiv \frac{p_b + \beta \times p_a}{p_b + p_a} \quad (1)$$

ここで、 p_b 、 p_a 、 β は、それぞれ、ビームチャンネル内で発生する光電子数、アンテチェンバー部で発生する光電子数、アンテチェンバー部からビームチャンネル部に出てくる光電子の確率である。

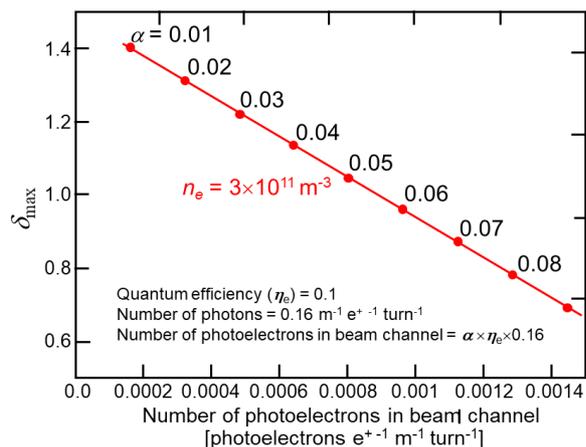


Figure 3: Combinations of δ_{\max} and α that give the same density of electrons (n_e) of $3 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$ at 0.9 A (1/1576/3.06RF) calculated by CLOUDLAND.

3.1 α と δ_{\max} の関係から

SuperKEKB で ECE が観測され始める電子密度の閾値は $2 \sim 3 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$ と報告されている[5]。この程度の電子密度は空間電荷制限で決まるほど高くはなく、電子密度はビームチャンネル部の SEY(つまりは δ_{\max})だけではなく、ビームチャンネル部の光電子数にも依存する。Phase-1 運転時の測定では、1/1576/3.06RF において約 0.9 A から ECE が観測されることから、この時の電子密度は約 $3 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$ と推定される。この条件の下に、 δ_{\max} とビームチャンネル部(計算では同じ直径の丸ビームパイプ)の光電子数を CLOUDLAND を使って計算した結果を Fig. 3 に示す。図には相当する α の値も示している。この計算では、フィルパターン 1/150/3RF、バンチ内陽電子数 $3.13 \times 10^{10} \text{ e}^+ \text{ bunch}^{-1}$ ($0.5 \text{ mA bunch}^{-1}$)、 δ_{\max} を与える電子エネルギー 300 eV、光子の線密度 $1 \times 10^{15} \text{ photons s}^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ mA}^{-1}$ ($= 0.16 \text{ photons e}^+ \text{ m}^{-1} \text{ turn}^{-1}$ 、アーク部の平均線密度)、量子効率 0.1 を仮定し、光電子はビームチャンネル内面から一様に放出されるとした。測定やシミュレーションから α が推定できれば、この図を用いて TiN コーティングの δ_{\max} を評価することができる。例えば、KEKB の試作アンテチェンバー付きビームパイプを用いた測定では $\alpha = 0.01$ という値が得られており、これを使うと $\delta_{\max} \sim 1.4$ が得られる。この値は実験室での測定で得られた TiN の δ_{\max} の値 1.0~1.2 よりも大きい[6]。ここでは、実際に使用したビームパイプにおける α から δ_{\max} を推定した。

まず、Eq. (1)中にある、アンテチェンバー奥で発生した光電子がビームチャンネル部に出てくる割合 β を計算した。電子雲による電場分布計算にはバンドマトリクスソルバーを用いた。ビームによる力は、半径が $10\alpha_x$ 以内の時は Basatti-Erskine の式を、それより大きい半径ではビームポテンシャルの式を使った。放射光による光電子はアンテチェンバーの奥のみで発生するとし、光電子の放出角度はコサイン則に従うとした。Figure 4 は、空間電荷の影響が無視でき、二次電子放出はなく、反射も無い場合のビームパイプ内電子分布の計算例である。この条件では、アンテチェンバーからビームチャンネル部に出てくる光電子の割合は約 0.07 となった。一方、バンチ電流 1 mA bunch^{-1} 、3 Rf-bucket 間隔の時、発生する光電子線密度 $0.016 \text{ photoelectrons e}^+ \text{ m}^{-1} \text{ turn}^{-1}$ とし、 $\delta_{\max} = 1.2$ 、反射率 0.7 を仮定して空間電荷を考慮した場合、その割合は 0.03~0.04 になった。以下では $\beta = 0.05$ とした。

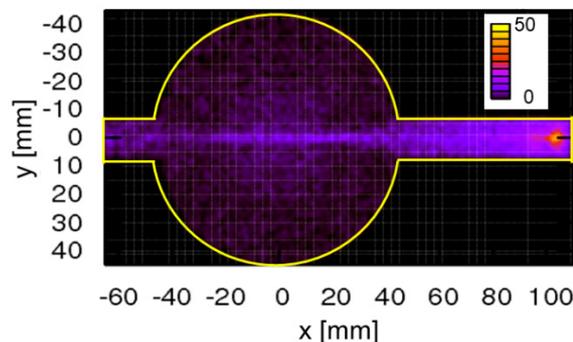


Figure 4: Calculated number of photoelectrons emitted from the inner most surface of the antechamber, here the SEY and the reflection of electrons were not considered.

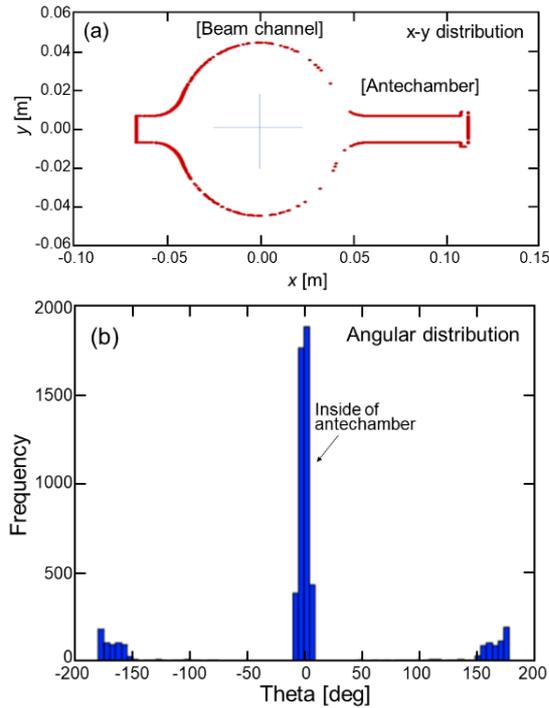


Figure 5: Calculated results by Synrad3D for (a) the distribution of absorbed photons along the peripheral of the beam pipe, and (b) the angular distribution of absorbed photons, where zero degree corresponds to the inner most side of the antechamber.

(1) 放射光レイトレーシングから求めた α を使う

実際のビームパイプ断面、表面粗さを使い、Synrad3Dを用いてビームチャンネル内の光子数を計算し、その値から α を評価した。実機ビームパイプではアンテチェンバー部奥の壁は Glass Bead Blast (GBB)を使って表面を粗くしている。測定では、表面粗さ(RMS) $\sigma = 11.59 \mu\text{m}$ 、粗さの相関長 $T = 47.59 \mu\text{m}$ で、 $T/\sigma = 4.11$ である。一方ビームチャンネル部は引き抜いたままで、 $\sigma = 0.647 \mu\text{m}$ 、 $T = 9.52 \mu\text{m}$ 、 $T/\sigma = 14.12$ である。実際の電磁石配置を用い、電子密度測定地点でビームパイプに吸収される光子の数を計算した。表面での反射には、アルミ表面に 200 nm の TiN があると計算した。Figure 5(a)は断面の壁に沿った光子の分布、(b)は角度分布である。Theta = 0 度がアンテチェンバー奥に相当する。注目している地点で失われる全光子線密度は $0.16 \text{ photons e}^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ turn}^{-1}$ である。この時、ビームチャンネル部で失われる光子線密度は $0.00956 \text{ photons e}^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ turn}^{-1}$ であった。光電子数は光子数に量子効率を掛けたものなので、量子効率が一定とすると、Eq. (1)における $p_b/(p_a+p_b)$ が 0.0598 となる。 $\beta = 0.05$ として、アンテチェンバーの光電子抑制効果 α は ~ 0.11 となる。Figure 3 のプロットを外挿すると、 $\delta_{\text{max}} \sim 0.6$ を得る。

(2) 電子密度測定から求めた α を使う

問題としている電子密度の領域では、電子密度は光電子数にほぼ比例する。そこで、通常状態で測定した電子密度(n_e)と、アンテチェンバー部からビームチャンネルに入る電子を抑えた状態で測定した電子密度(n_{e0})の比をとると、

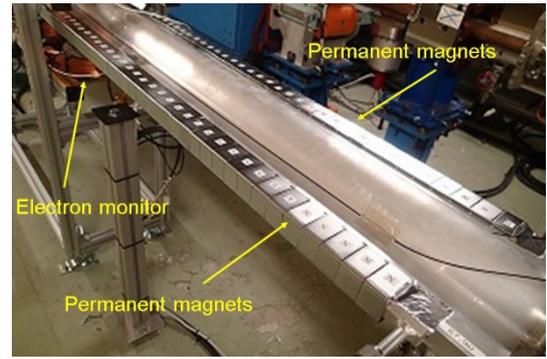


Figure 6: Weak permanent magnets attached at the antechambers of the beam pipe with electron monitors to prevent the photoelectrons generated in the antechamber from entering into the beam channel.

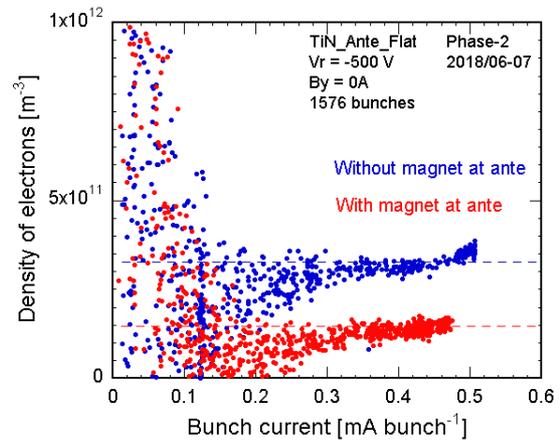


Figure 7: Measured density of electrons near the beam orbit for the case with and without permanent magnets at antechambers.

$$\frac{n_{e0}}{n_e} = \frac{p_b}{p_b + \beta \times p_a} \quad (2)$$

と表すことができる。この比から α を評価した。

n_{e0} は、アンテチェンバー部のみに弱い磁石を置いて測定した。Figure 6 は電子モニターを備えたテストビームパイプのアンテチェンバー部に永久磁石を並べた様子である。磁石の傍での垂直方磁場は約 100 G であるが、アンテチェンバーとビームチャンネルの境付近では 0.5 G 未満と地磁気と同程度になる。シミュレーションでは、この程度の磁場は電子密度にはほとんど影響しなかった。一方電子モニター部分に同程度の垂直磁場を加えても測定値は変化しなかった。

n_e と n_{e0} の測定結果(1/1576/3.06RF)を Fig. 7 に示す。図から、バンチ電流約 $0.45 \text{ mA bunch}^{-1}$ の時、 $n_{e0}/n_e = 1.5/3.3$ である。 $\beta = 0.05$ を使うと、 $p_b/p_a = 0.04$ となり、結局 Eq. (1)から、 $\alpha = 0.087$ が得られる。再度 Fig. 3 を使うと、 $\delta_{\text{max}} \sim 0.8$ となる。

3.2 電子密度のビーム電流依存性から

ここでは、測定した電子密度のバンチ電流線密度依存性から δ_{max} と α を推定する。Figure 8(a)は、Phase-2 運

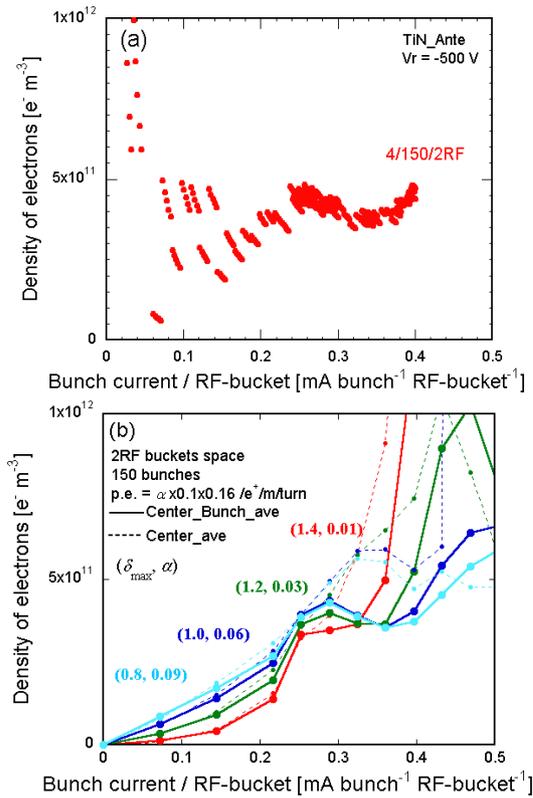


Figure 8: (a) Measured density of electrons near the beam orbit and (b) calculated those at the bunch position for several combinations of (δ_{\max}, α) , as a function of the bunch current liner density for 4/150/2RF.

転で測定した、4/150/2RFでの電子密度のバンチ電流線密度依存性である。バンチ電流線密度が小さい時に密度が大きいのは測定原理からくる誤差である[7]。一方、Fig. 8(b)は、PYECLOUD を用いて計算した 1/150/2RFでのバンチ通過時のバンチ近傍の電子密度を $(\delta_{\max}, \alpha) = (0.8, 0.09), (1.0, 0.06), (1.2, 0.04), (1.4, 0.01)$ の組み合わせで計算した結果である。3.1 の CLOUDLAND を使った場合と同じく、3RF-bucket 間隔で 0.5 mA bunch⁻¹の時に電子密度が 3×10^{11} m⁻³ になるという条件で計算した。振る舞いは、 $\alpha = 0.03 \sim 0.06$ 、 $\delta_{\max} = 1.2 \sim 1.0$ が合っているようだ。他の 3, 4 RF-buckets 間隔での測定結果とシミュレーション結果との比較でも同様の傾向が得られた。

3.3 再評価の結果

実機ビームパイプを使ったシミュレーションや実験から、Fig. 3 の α と δ_{\max} の関係を使った評価では $\alpha = 0.09 \sim 0.11$ 、 $\delta_{\max} = 0.8 \sim 0.6$ が、電子密度のビーム電流依存性を使った評価では $\alpha = 0.03 \sim 0.06$ 、 $\delta_{\max} = 1.2 \sim 1.0$ が得られた。いずれの場合も、 α の値はKEKBの実験で得られた値($\alpha = 0.01$)よりも大きい。これは、KEKBの実験時には偏向電磁石の直ぐ下流だけに置いたアンテナチャンバ付きテストビームパイプで測定していたため、光電子のほとんどがアンテナチャンバ内に照射されていたからと考えられる。実機では放射光の垂直方向の広がりや上流からの反射によりアンテナチャンバ部以外にも放射光が照射

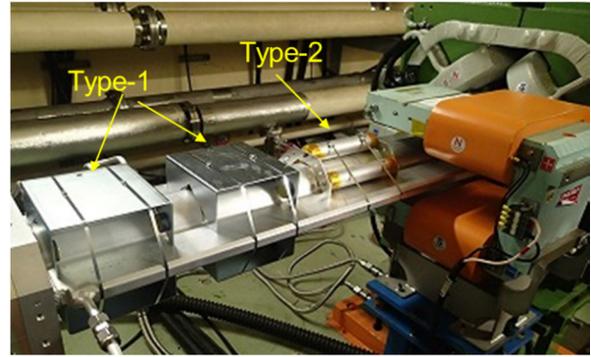


Figure 9: Type-1 and Type-2 permanent-magnet units attached to the beam pipes at drift region.

され、 α が大きくなっていると考えられる。一方、TiN コーティングは想定に近い二次電子放出低減効果を発揮していると考えられる。

4. Phase-2 運転に向けた対策

Phase-2 に向けた対策として、SuperKEKB で設置されたドリフト部のビームパイプに、軸方向に最大約 60 G の磁場を形成する、コの字型鉄ヨークに永久磁石を張り付けた Type-1 永久磁石ユニット、および、軸方向に最大約 100 G の磁場を生成するアルミ円筒に永久磁石を詰め込んだ Type-2 永久磁石ユニットを並べた[3]。Type-2 ユニットは非磁性の材料で構成されているため、電磁石の直ぐ傍でも置くことができる。また、ビーム光学系への影響をできるだけ小さくするため、隣接する四極電磁石間で永久磁石の向きを反転させた。アーク部のドリフト部に取り付けられた永久磁石ユニットの様子を Fig. 9 に示す。

KEKB 時から使用している TiN コーティングの無いアルミ合金製ビームパイプや、高周波空洞部の円断面銅製ビームパイプ部には、ソレノイドを使って約 50 G の軸方向磁場を作ったり[8]、上述した永久磁石ユニットを取り付けたりした。

Phase-2 開始前までに、約 2000 m のドリフト部の約 86%について 20 G 以上のビーム軸方向磁場を印加した。

5. Phase-2 運転時の ECE

5.1 ビームサイズ測定

Phase-2 運転終盤、Phase-1 運転時とほぼ同様に、4/120/RF、3RF、4 RF のバンチフィルパターンにおいて、ビームサイズのバンチ電流依存性、結合バンチ不安定性モード測定、圧力のビーム電流依存性を測定した。ビームサイズのバンチ電流線密度依存性を Fig. 10 に示す。なお、4/120/2RF と 4/150/2RF でほとんど同じ結果が得られた。残念ながら十分高いビーム電流までのデータは得られなかったが、2, 3 RF-buckets 間隔のフィルパターンでは、Phase-1 運転時の約 1.5~2 倍のバンチ電流線密度まではビームサイズ増大は見えなかった。

5.2 圧力のビーム電流依存性測定

ECE がなく、ガス放出が放射光による光脱離だけに依るとすると、ビームパイプ内の圧力はビーム電流に比例する。しかし、ECE が発生すると、マルチパクティングで

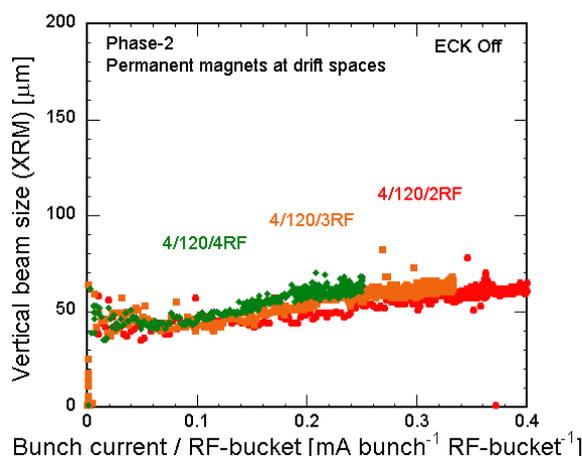


Figure 10: Vertical beam sizes as a function of bunch current linear density for several bunch fill patterns in the Phase-2 commissioning.

増殖した電子による電子衝撃脱離のため、圧力はビーム電流に対して非線形に上昇する。Figure 11 は、3 か所のアーク部の圧力をビーム電流で割った値 $[\text{Pa mA}^{-1}]$ のバンチ電流依存性である(4/150/3RF、4/120/3RF)。バンチ電流が低い時に値が大きくなっているのは、ビームが無い時のベース圧力の影響である。図中には、Phase-1 運転時の値と、Phase-2 運転時の値をプロットしている。Phase-1 運転時にはバンチ電流とともに急激に大きくなっているが、Phase-2 運転ではほぼ一定である。これは、ドリフト部に置いた永久磁石やソレノイドの効果で ECE が発生しないことを示している。

5.3 結合バンチ不安定性モード測定

バンチフィードバックを一時的に切り、横方向結合バンチ不安定性の成長率、モードを測定した[9]。モードは磁場によってビームパイプ周辺に捕捉された電子によるモードが見え、ビーム軸にある電子によるモードは見えなかった。また、観測されたモードの成長率は、Phase-1 で観測されたモードの成長率よりも小さかった。

6. まとめ

Phase-1 運転終盤に観測された ECE は、アンテチェンバー付きの TiN コーティングが施されたドリフト部のビームパイプ内の電子雲に起因すると考えられた。測定やシミュレーションを用いて、アンテチェンバーの光電子低減率 α と TiN コーティングの δ_{max} を再評価した。その結果、実機のアンテチェンバーの効果は想定よりも小さい (α が大きい) と推定され、TiN コーティングの δ_{max} は実験室での測定値に近いことがわかった。Phase-2 運転への対策として、ドリフト部ビームパイプに永久磁石やソレノイドを使って軸方向に磁場を加えた。Phase-2 運転時に測定したビームサイズや圧力のビーム電流依存性から、Phase-1 運転時よりも ECE が発生するビーム電流の閾値が高くなっていることが分かった。

Phase-3 運転は 2018 年度中に開始され、さらに高いビーム電流が蓄積される予定である。Phase-3 前にはドリフト部の残り部分への永久磁石ユニットの取り付けを行う。

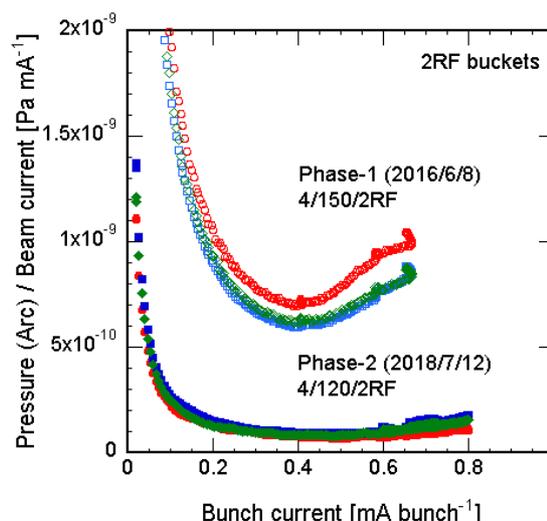


Figure 11: Behaviors of pressures at three arc sections divided by the beam current against the bunch currents in Phase-1 and Phase-2 commissioning.

Phase-3 でも ECE について注意深く観察を続けていく。

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、不安定性モードは KEK 飛山真理教授に測定して頂きました。感謝致します。

参考文献

- [1] Y. Suetsugu *et al.*, “Results and problems in the construction phase of the SuperKEKB vacuum system”, JVST-A, 34, 2016, 021605.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [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. Susaki *et al.*, “ELECTRON CLOUD INSTABILITY IN SuperKEKB LOW ENERGY RING”, Proceedings of IPAC’10, Kyoto, May 23-28, 2010, pp.1545-1547.
- [6] K. Shibata *et al.*, “SuperKEKB 用ビームダクトの窒化チタンコーティング及びベーキング”, Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, Aug. 3-5, 2013, pp.1168-1172.
- [7] K. Kanazawa *et al.*, “MEASUREMENT OF THE ELECTRON CLOUD DENSITY AROUND THE BEAM”, Proceedings of PAC’05, Knoxville, May 16-20, 2005, pp.1054-1056.
- [8] H. Fukuma, *et al.*, “Status of Solenoid System to Suppress the Electron Cloud Effects at the KEKB”, AIP Conference Proceedings 642, 2002, pp.357-359.
- [9] M. Tobiyama, private communication.