

話題

SuperKEKB 陽電子リングの電子雲不安定性

末次 祐介^{*1,2}・福間 均^{*1}・大見 和史^{*1}・飛山 真理^{*1,2}・John FLANAGAN^{*1,2}・
池田 仁美^{*1,2}・柴田 恭^{*1,2}・石橋 拓弥^{*1,2}・白井 満^{*1}・
照井 真司^{*1}・金澤 健一^{*1}・久松 広美^{*1}

Electron Cloud Effects in the SuperKEKB Positron Ring

Yusuke SUETSUGU^{*1,2}, Hitoshi FUKUMA^{*1}, Kazuhiro OHMI^{*1}, Makoto TOBIYAMA^{*1,2},
John FLANAGAN^{*1,2}, Hitomi IKEDA^{*1,2}, Kyo SHIBATA^{*1,2}, Takuya ISHIBASHI^{*1,2},
Mitsuru SHIRAI^{*1}, Shinji TERUI^{*1}, Ken-ichi KANAZAWA^{*1} and Hiromi HISAMATSU^{*1}

Abstract

SuperKEKB is an electron-positron collider located at the High Energy Accelerator Research Organization (KEK) in Tsukuba. The electron cloud effects (ECE) have been a serious problem in recent high-intensity positron and proton rings, and the positron ring of the SuperKEKB (the Low Energy Ring, LER) is no exception. Various countermeasures against ECE, such as beam pipes with antechambers and TiN coating on the inner wall of the pipes, were adopted in LER from the beginning. The ECE, however, were observed during Phase-1 commissioning at a lower beam current than expected. Additional countermeasure, that is, magnetic fields in the beam direction, was applied at drift spaces in the ring after the Phase-1. Experiments in Phase-2 and Phase-3 commissioning showed that the threshold of the current linear density for exciting the ECE increased by a factor of at least 2.6 compared to that during Phase-1. Mitigating effects of several key countermeasures were also experimentally re-evaluated using the real ring.

1. はじめに

SuperKEKB は、KEK つくばキャンパスにある電子・陽電子衝突型加速器である¹⁻³⁾。加速器は、長さ約 600 m の入射器（線形加速器）、周長約 135.5 m の 1.1 GeV 陽電子ダンピングリング（Damping Ring, DR）、周長約 3016 m の主リング（Main Ring, MR）、そして素粒子測定器である Belle II⁴⁾ から構成されている（図1）。MR は 4.0 GeV の陽電子リング（Low Energy Ring, LER）と 7.0 GeV の電子リング（High Energy Ring, HER）の二つの蓄積リングから成る。MR トンネル内に並んでいる両リングの様子を図2 に示す。設計ビーム電流は、1 トレイン、2500 バンチ／トレイン、2 RF-bucket 間隔（SuperKEKB では 1 RF-bucket は約 2 ns に相当）のバンチフィルパターン（以降 1/2500/2 RF と書く）にて、LER 3.6 A, HER 2.6 A で

ある。設計ルミノシティ（衝突頻度に相当するパラメータ）は前身の KEKB 加速器での達成値の約 40 倍にあたる $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ である⁵⁾。この時毎秒約 1000 対の B 中間子対のデータを得ることができる。

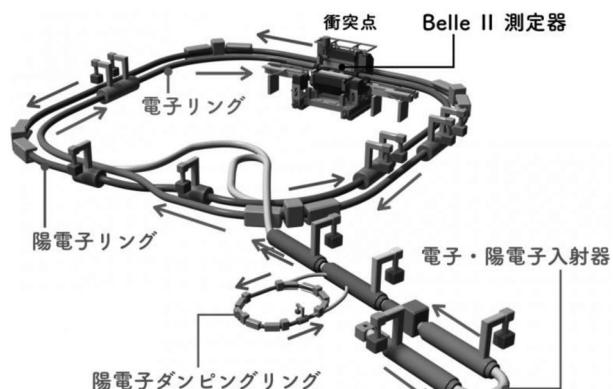


図1 SuperKEKB のレイアウト。

^{*1} 高エネルギー加速器研究機構 KEK, High Energy Accelerator Research Organization^{*2} 総合研究大学院大学 SOKENDAI, The Graduate University for Advanced Science

(Yusuke Suetsugu E-mail: yusuke.suetsugu@kek.jp)

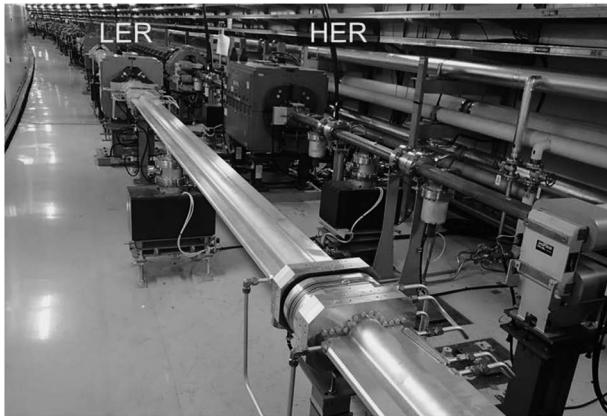


図2 MR トンネル内の2 リングの様子.

SuperKEKBは2016年2月に試運転(Phase-1運転と呼ぶ)を開始した。約5か月のPhase-1運転では加速器の調整が主に行われた⁶⁾。Phase-1運転後、Belle II測定器と、衝突点でビームを細く絞るための最終ビーム集束用超伝導電磁石(QCSと呼ぶ)を設置した後、2018年3月からPhase-2運転を約5か月間行った⁷⁾。この間、SuperKEKBとして初めての衝突事象を観測した。そして、Belle II最内層部に崩壊点検出器を装着した後、2019年3月から本格的物理実験となるPhase-3運転を始めた⁸⁾。3月11日から7月1日まで約4か月間、Phase-3 2019春季運転を行った。

電子雲効果(Electron Cloud Effects, ECE),あるいは電子雲不安定性(Electron Cloud Instabilities, ECI)は、近年の大強度陽子、陽電子蓄積リングで大きな問題の一つとなっており、SuperKEKBのLERもその例外ではない⁹⁻¹³⁾。放射光等によりビームパイプ壁で発生した電子がビーム軌道近傍に集まり(電子雲という)、ある密度以上になるとビームと相互作用を起こすのである。ECEとは、結合バンチ不安定性、シングルビーム不安定性(ビームサイズ増大)と言ったビーム不安定性、電子雲による圧力の異常上昇等を意味する。例えばビームサイズが増大すると、ルミノシティーが落ち、衝突性能が劣化する。

SuperKEKBのLERでは、当初からECEが大きな問題となると予想されたので、第3章で述べるように、製作時から様々なECE対策を検討・導入した^{14, 16)}。そして、Phase-1からPhase-3 2019春季運転にかけて、ECEに関して様々な観測を行ってきた¹⁷⁻²¹⁾。Phase-1運転時、ECEが想定よりも

低い線電流密度(バンチ電流をバンチ間隔で割った値で、バンチフィルパターンが変わってもほぼ同じ値からECEが現れる^{17, 18)})から観測された。そこでPhase-1終了後、未実装だった永久磁石やソレノイドでビーム方向磁場を加える対策を追加し、Phase-2、およびPhase-3 2019春季運転でその効果を調べた。このECE対策追加作業と並行して、Phase-1において想定より低い線電流密度でECEが発生した原因を探るために、Phase-2ではアンテチェンバーやTiNコーティングの効果の再評価を行った。また、Phase-3 2019春季運転では、実機に採用しているグループ構造の効果について評価実験も行った。

ここでは、SuperKEKB LERの電子雲不安定性について概説し、LERで採用した対策を紹介する。そしてPhase-1～Phase-3 2019春季運転で観測されたECEとそれに対する対策と結果、また採用したECE対策の再評価等について報告する。

2. LER の ECE

ECEで最も重要なのはビーム不安定性である。電子雲は、シングルバンチ不安定性、結合バンチ不安定性を励起する。

まず、シングルバンチ不安定性の電子密度の閾値を見積る¹³⁾。軌道近傍の電子は陽電子バンチの電界ポテンシャル内で振動する。その垂直方向(y方向)の周波数は

$$\omega_e = \sqrt{\frac{\lambda_p r_e c^2}{\sigma_y (\sigma_x + \sigma_y)}} = 2\pi \times 136 \text{ GHz} \quad (1)$$

で表される。ここで、 $\lambda_p = N_p / \sqrt{2\pi}\sigma_z$ は陽電子バンチの線密度、 $\sigma_x = 200 \mu\text{m}$, $\sigma_y = 10 \mu\text{m}$ はそれぞれ水平、垂直方向ビームサイズ、 $\sigma_z = 6 \text{ mm}$ はバンチ長である。ビーム電流3.6 A、バンチ数2500ではバンチ内の陽電子数 $N_p = 9 \times 10^{10}$ である。また、 $c = 3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$ は光速、 $r_e = 2.818 \times 10^{-15} \text{ m}$ は古典電子半径である。低エミッタンスビームの場合、ビームサイズが小さいため周波数は増大する。電子は陽電子バンチが通る間に10回以上振動し、ショートレンジのウェイク場を誘起する。その結果、ヘッドテイル不安定性が励起される。ビームサイズが大きい水平方向(x方向)の動きは垂直方向よりもゆっくりなので(式(1)で $x \leftrightarrow y$)、垂直方向の不安定性がより重要である。リング全周

で電子密度は一様で β 関数も一定として、垂直方向のシングルバンチ不安定性の電子密度の閾値 $n_{e,\text{th}}$ は

$$n_{e,\text{th}} = \frac{2\gamma v_s \omega_e \sigma_z / c}{\sqrt{3} K Q r_e \beta_y L} = 2.2 \times 10^{11} \text{ m}^{-3} \quad (2)$$

で与えられる。ここで、 $\gamma=7830$ は陽電リング(4 GeV)のローレンツ因子、 $v_s=0.02$ はシンクロトロンチューン、 $L=3016 \text{ m}$ はリング周長である。また、 $K=\omega_e \sigma_z / c = 17$ 、 $Q=\min(\omega_e \sigma_z / c, 10) = 10$ 、 $\beta_y=10 \text{ m}$ を用いた。一方、シミュレーションコード PEHTS を用いた評価では、

$$n_{e,\text{th}} = 3.8 \times 10^{11} \text{ m}^{-3} \quad (3)$$

が得られる¹³⁾。このシミュレーションでは一つのバンチはスライスされた多くのピースに分けられ、各スライスと電子雲との相互作用は PIC(Particle in Cell)に基づいたポテンシャルソルバーで評価されている。

実際には、式(1)からわかるように、 ω_e は β 関数に沿ってリング上で変わる。 β はビームと電子の相互作用の強さを示し、リング内の β の大きい所の電子密度は ECE に対する影響が大きい。

3章で述べるように、SuperKEKB では様々な方法で電子雲を抑えるが、採用する方法が場所によって違うので、電子密度も場所によって異なる。また、衝突点部近傍では、ビームを細く絞るために β_y が大きい場所がある。リングに沿った予想される電子密度分布と β 関数を用いてシミュレーションを行うと、

$$n_{e,\text{th}} = (0.8 - 1.2) \times 10^{11} \text{ m}^{-3} \quad (4)$$

が得られる¹³⁾。

一方、 $2 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$ 程度の電子密度では、シミュレーションコード PEI を使った評価によると、結合バンチ不安定性の成長率は約 40 turn(約 400 μs)と見積もられるが¹³⁾、この程度の成長率はフィードバックシステムで抑えることができる。したがって、シングルバンチ不安定性の方が重要である。

陽電子リングにおける主なガス負荷は、シンクロトロン放射光による光刺激脱離である。この場合、圧力はビーム電流に比例する。電子密度が増大していくと、電子がパイプ内壁に衝突したとき

に起きる電子衝撃脱離による圧力悪化が始まり、圧力はビーム電流に対して線形以上に急激に上昇する。ただ、ガス放出率は電子の積分衝突量とともに減少するので、運転上、ビーム不安定性ほど厳しいものではないが、ECE の指標の一つとはなる。

SuperKEKB では、上記のような検討結果から、ビーム近傍付近の平均電子密度として、 $1 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$ 未満を達成目標値とした。

3. ECE 対策

KEKB の LER で用いた直径 94 mm の単純な銅パイプの場合、設計ビーム電流での平均電子密度は約 $5 \times 10^{12} \text{ m}^{-3}$ と見積もられるので、LER では十分な ECE 対策が必要となる¹⁴⁻¹⁶⁾。LER には、これまで世界各地の研究施設、例えば、CERN²²⁻²⁴⁾、コーネル大学^{25, 26)}、SLAC^{27, 28)}、INFN²⁹⁾、BNL³⁰⁾、BINP³¹⁾、KEK³²⁻³⁷⁾ などで検討・開発された対策を取り入れた。表1に採用された対策をまとめている。また、実際に使用している対策を図3に示している。

アンテレンバー付ビームパイプは、放射光によって放出される光電子の影響を小さくするのに有効である³²⁾。KEKB での実験では、光電子の影響を単純な丸パイプに比べて 1/100 程度まで低減できた。しかし、ビーム電流が高くなると、光電子よりも電子が表面に衝突した際に放出される二次電子が電子雲の形成には重要となる。その対策として、ビームパイプ内面に、二次電子放出率が小さい、厚み約 200 nm の TiN コーティングが施されている^{28, 33, 34)}。二次電子放出率が小さい薄膜としては、TiN のほかに NEG (Non-Evaporable Getter) 用材料 (Ti, Zr, V) やグラファイトがある²²⁻²⁴⁾。SuperKEKB では、設計・建設当時に最も技術が確立していた TiN を採用した。総計約 1000 本のビームパイプに対してコーティング処理を行った³⁴⁾。

グループ構造とは、ビームチャンネル内面に凹凸を付けるもので、二次電子放出率を実効的に下げることができる³⁶⁾。グループの溝はビーム方向に作られているため、インピーダンスへの影響は比較的少ない。LER では、偏向電磁石内のビームパイプに採用した。電子はこの磁場中では上下面にのみ衝突するので、グループも上下面の

表1 LERで採用されたECE対策。○印は各セクションで採用された対策を示す^{14,15)}。

Sections	Length [m]	n_e (circular) [m ⁻³]	Countermeasures					n_e (expected) [m ⁻³]
			Antechamber (1/5)	TiN coating (3/5)	Solenoid (B_z) (1/50)	Groove (1/2)	Electrode (1/100)	
Drift space (arc)	1629	8×10^{12}	○	○	○			2×10^{10}
Corrector mag.	316	8×10^{12}	○	○	○			2×10^{10}
Bending mag.	519	1×10^{12}	○	○			○	6×10^{10}
Wiggler mag.	154	4×10^{12}	○	○*			○	5×10^9
Quadrupole and Sextupole mag.	254	4×10^{10}	○	○				5×10^9
RF cav. section	124	1×10^{11}		○	○			1×10^9
IR	20	5×10^{11}		○	○			6×10^9
Total	3016							
Average		5.5×10^{12}						2.4×10^{10}

*クリアリング電極を持つビームパイプを除く。

主な省略語：“RF cav. section” RF 空洞区間にある空洞以外の部分，“IR”衝突点部，“ n_e (circular)” 銅製の単純な丸パイプで予想される電子密度，“ n_e (expected)” 対策後に期待される電子密度，“Solenoid” ビーム方向の磁場(永久磁石を含む), “Electrode” クリアリング電極。

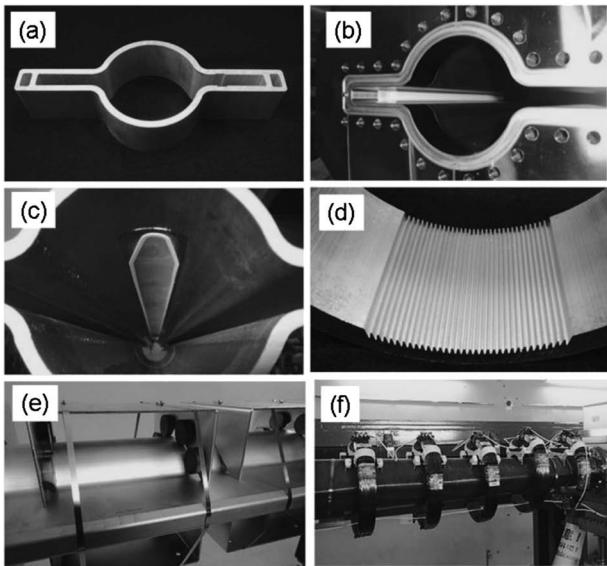


図3 SuperKEKB LERに採用された種々のECE対策：(a)アンチエンバー付きビームパイプ、(b)TiNコーティング、(c)クリアリング電極、(d)グループ構造、(e)永久磁石による軸方向磁場、(f)ソレノイドによる軸方向磁場。

みに形成した。なお、このグループ部分にもTiNコーティングが施されている。

クリアリング電極とは、ビームパイプ内部の電極に正の電位を印加し、ビーム近傍の電子を除去するものである^{29,35)}。インピーダンス低減のため、溶射法を用いた薄い(計0.3 mm厚)の電極が開発された。電子密度低減効果は非常に大きかつ

たが、大規模に採用するにはインピーダンスが大きく、またシステムも高価となる。LERでは、放射光が強く大量の光電子の発生が問題となるウィグラー部に設置した。

このほか、ドリフト部や補正電磁石内では、ビームパイプ外側にソレノイドや永久磁石を置いて、約50ガウス程度のビーム方向の磁場を作り、電子雲の形成を抑える³⁷⁻³⁹⁾。ただし、外部からの磁場は電磁石の内側に適用できない。KEKB等で実績のある方法である。

これらの対策をすべて講じれば、ビーム軌道近くの電子密度は、設計ビーム電流3.6 A (1/2500/2 RF)においても、リング平均で約 $2 \times 10^{10} \text{ m}^{-3}$ まで低減できると期待される。

なお、先に述べたように、Phase-1では表1中にあるソレノイドは備えなかった。この場合、3.6 A蓄積時、平均電子密度は約 $1 \times 10^{12} \text{ m}^{-3}$ と予想される(表1でソレノイドの効果“1/50”がなくなるため)。この電流は線電流密度としては $0.72 \text{ mA bunch}^{-1} \text{ RF-bucket}^{-1}$ に相当する。ECEが現れる平均密度が約 $3-4 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$ とすると、約 $0.25 \text{ mA bunch}^{-1} \text{ RF-bucket}^{-1}$ がECEの閾値となる。これはPhase-1運転時の1/1576/3.06 RFではビーム電流約1.2 Aに相当する。したがって、最大約1 Aと予定されたPhase-1ではソレノイドがなくても問題ないと考えられたが、後述するよう

に ECE が発生した。

4. ECE の観測と対策

4.1 Phase-1

ECE の観測用として, LER のアーカ部には, 図4に示すようにビームパイプ内の電子密度を測定する電子モニターを備えた試験用ビームパイプが2本設置されている^{17, 18, 40)}。各パイプには2個のモニターがあり, TiN コーティングの有無, グループの有無の条件を変えて測定が可能である。また, モニターパーには, 磁場の効果を調べるために, 垂直方向に弱い磁場 (B_y , 最大40 G) を印加できるソレノイドを持っている。また, ビームサイズはビームから放射されるシンクロトロン放射光のX線成分を用いたモニターを使って測定された⁴¹⁾。発光点と衝突点のベータ関数から, 衝突点のビームサイズを推定することが可能である。さらに, バンチ毎フィードバックシステムを用いて, バンチ結合不安定性の成長率測定やモード特定ができる^{42, 43)}。

Phase-1 運転時バンチフィルパターン1/1576/3.06 RFにおいて, ビーム電流約600 mA から ECE が観測された。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, 結合バンチ不安定性等が観測された(後述する図7 参照)¹⁷⁻¹⁹⁾。

図5には, 電子モニターで測定された, TiN コーティングのないアルミ部分の電子密度 n_{e_Al} と, TiN コーティングされた部分の電子密度 n_{e_TiN} のビーム電流依存性を示す(1/1576/3.06 RF, 左/右軸目盛が約2桁違うことに注意)。なお, ビーム電流が低い時の値は測定原理から精度はない⁴⁰⁾。図から, ビーム電流600 mA 近くで, アルミ部分の電子密度が 10^{13} m^{-3} 近くまで増えていることがわかる。一方, TiN コーティングされた部分の電子密度はまだ低い。このことから, このECE はリング内の TiN コーティングのないアルミ部分の電子雲によるものではないかと推測された。実際, リングに約820 個設置されているアルミ合金製ベローズチェンバー(長さ 200 mm)には TiN コーティングは施されていなかった。その総全長は約160 m と, 全周の約1/20 であるが, その部分の電子密度が 10^{13} m^{-3} になると, 平均密度は約 $5 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$ となり, ECE が起きても不思

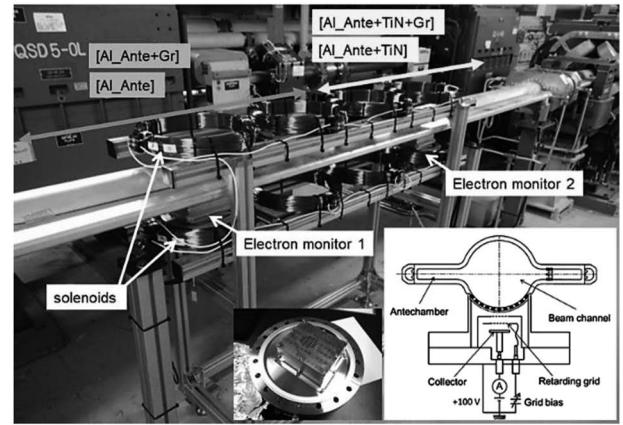


図4 LER アーカ部に設置された電子モニター(下図)付き試験用ビームパイプ。TiN コーティング有り無しのものと, さらにグループ有り無しのものの, 2本のビームパイプがある。

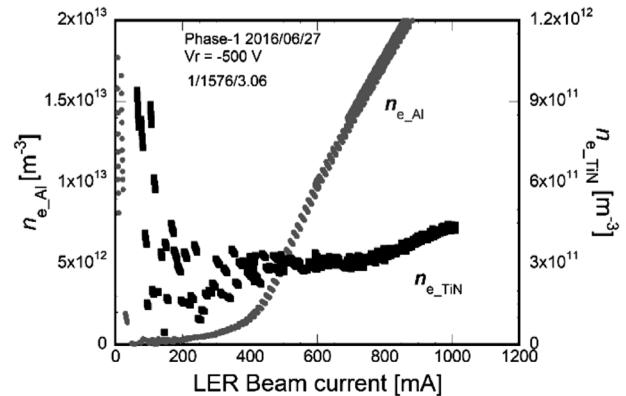


図5 電子モニターで測定された, TiN コーティングがない箇所とある箇所の電子密度。左/右軸で目盛が約2桁違うことに注意。

議ではない。そのため, それらベローズチェンバーにビーム方向に約100 G の磁場を作る永久磁石を設置したところ, このECE は治まった。

しかし, その後運転が進み, ビーム電流が 900 mA を超えたあたりから, 再度 ECE が観測され始めた。図6に, 2~6 RF-bucket 間隔のバンチフィルパターンでの, 垂直方向ビームサイズの線電流密度に対する変化を示す。約 $0.2 \text{ mA bunch}^{-1} \text{ RF-bucket}^{-1}$ 程度からビームサイズの急激なブローアップが観測された。なお, 六極電磁石を使ってエミッタンスを制御するノブ(Emittance Control Knob, ECK) は OFF にしていた。また, 図7のように, ECE 特有のモード(フィルパターンで決まるモードからシフトしたモード)での結合バンチ不安定性によるビーム振動も観測された¹⁹⁾。このECE の原因としては, ドリフト部(電

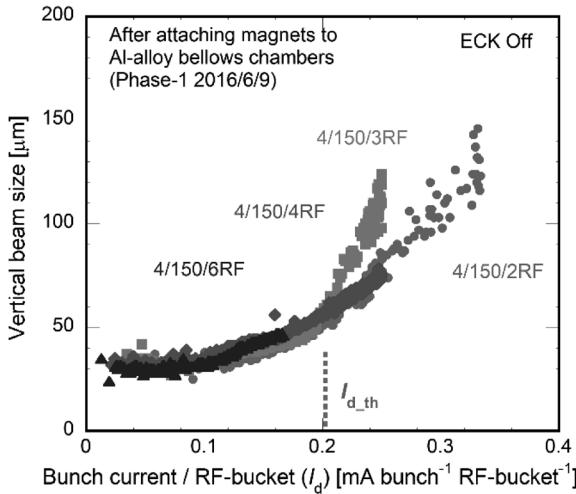


図6 Phase-1における、2~6 RF-bucket 間隔のフルパターンにおける垂直方向ビームサイズの線電流密度依存性(ECK=Emittance Control Knob)。

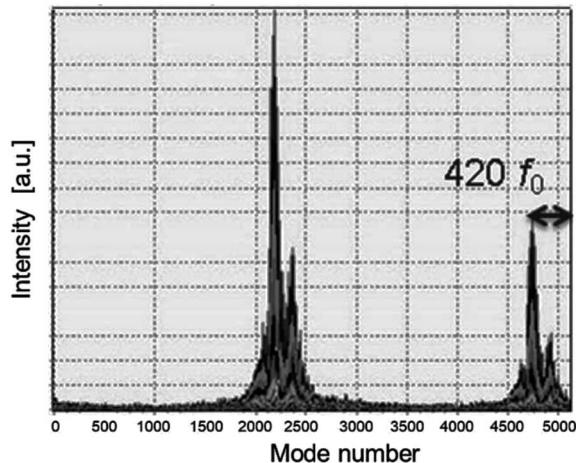


図7 ドリフト部の電子雲で励起される特有の不安定モード。 f_0 は周回周波数。

磁石間)のビームパイプ内の電子雲が考えられた。実際、図5からわかるように、TiNコーティング部の電子密度も $4 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$ 近くまで増えている。これは、設計時の予想と違い、現アンチエンバー付きビームパイプと TiN コーティングだけでは ECE 対策として不十分だったことを示している。また、KEKB 時代から使用している、直線部等にある一部の TiN コーティングのないアルミ合金製や銅製ビームパイプ(長さ数十 m)も原因の一つと考えられた。

4.2 Phase-2 および Phase-3 2019 春季運転

Phase-2 運転開始前に、追加の ECE 対策としてドリフト部の約 86% の部分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ビ-

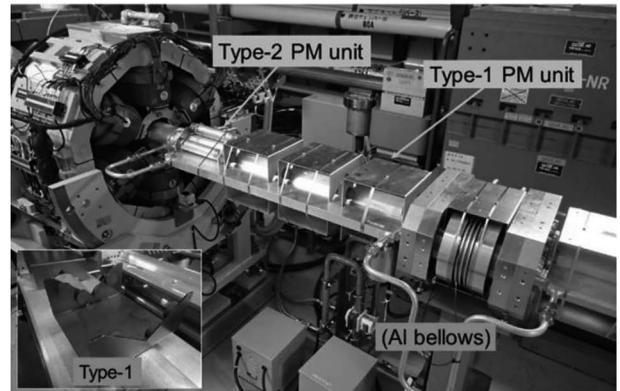


図8 ドリフト部に設置した、Type-1, Type-2 の永久磁石ユニット(PM unit)。アルミ合金製ベローズチャンバーに取り付けた永久磁石ユニットも示している。下図は Type-1 ユニットの拡大図。

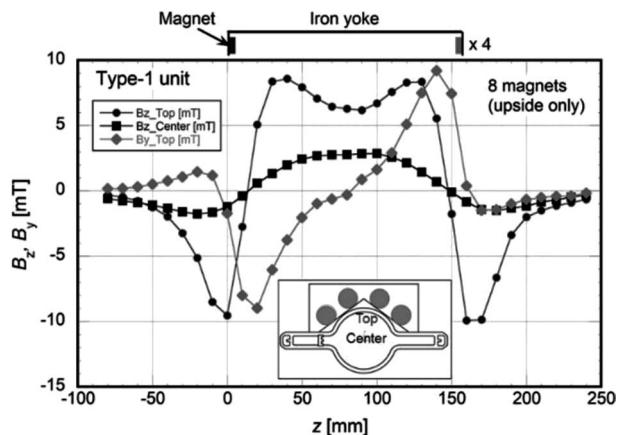


図9 Type-1 ユニット(ビームパイプ上側にのみ置いた時)の磁場分布。

ムパイプに並べた(図8)^{20, 21)}。永久磁石ユニットには、鉄ヨークを使った Type-1 と、アルミ等非磁性材を使った Type-2 がある。Type-1 ユニットが作るビームパイプ内磁場分布を図9に示す。Type-2 ユニットもビーム軌道付近では同等の磁場分布である。非磁性材を使った Type-2 は、主に電磁石の傍に設置された。古いアルミ合金製や銅製ビームパイプ部については、KEKB 時に巻いたソレノイドを再使用した。このソレノイドはビーム方向に約 40 G の磁場を発生する。Phase-3 運転開始前にはさらに永久磁石ユニットを追加し、ドリフト部の約 91% にビーム方向磁場を加えた。

Phase-3 2019 春季運転中、バンチ間隔を変えてビームサイズ、不安定性モードの測定を行った。2~4 RF-bucket での線電流密度に対するビームサイズの結果を図10に示す。Phase-1 で ECE が観

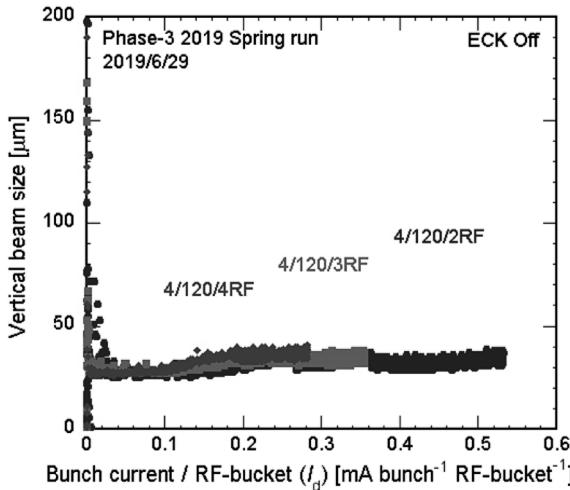


図10 Phase-3 2019 春季運転における、2~4 RF-bucket 間隔のフィルパターンにおける垂直方向ビームサイズの線電流密度依存性 (ECK=Emittance Control Knob).

測された線電流密度の約2.6倍にあたる0.53 mA bunch⁻¹ RF-bucket⁻¹までビームサイズのブローアップは観測されなかった。なお、この値は、測定時に安定して蓄積できた最大値である。ドリフト部由来のパンチ結合型不安定性のモードも観測されなかった。圧力もビーム電流にほぼ比例して上昇した。追加した永久磁石ユニットによるビーム方向磁場が有効に働いていると考えられる。なお、線電流密度0.53 mA bunch⁻¹ RF-bucket⁻¹は、1/1576/3.06 RF では2.6 A に相当する。

5. 実機での ECE 対策の効果

5.1 アンテチェンバーと TiN コーティング

前節で述べたように、ドリフト部のビームパイプはアンテチェンバーを持ち、また、ビームチャンネル部には TiN コーティングが施されている。この状態で Phase-1 時には約900 mA で ECE が観測されたが、これは予想よりも低い電流である(3章参照)。Phase-2 では、この原因を調べる実験を行った²¹⁾。

まず、アンテチェンバーの光電子低減効果を示す指標として、丸ビームパイプと比較したビームチャンネル内光電子数の低減率 α を次式で定義する。

$$\alpha \equiv \frac{p_b + \beta \times p_a}{p_b + p_a} \quad (5)$$

ここで、 p_b と p_a はそれぞれビームチャンネル内

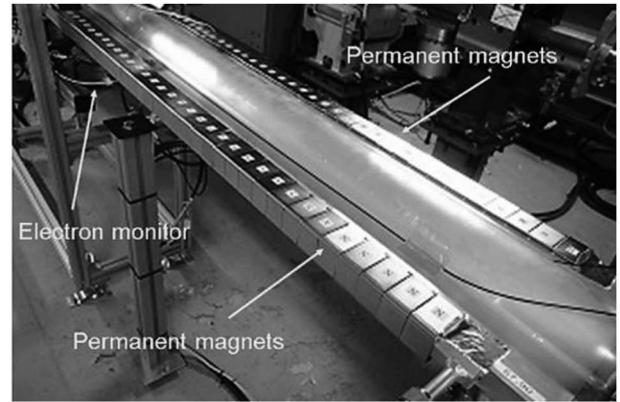


図11 アンテチェンバー内に光電子を閉じ込めるために、アンテチェンバー端に並べた永久磁石。

で生成される光電子とアンテチェンバー内で生成される光電子の数である。生成される光電子の総数は $p_a + p_b$ である。 β はアンテチェンバーからビームチャンネル部へ光電子が出て行く確率である。つまり、 α が小さいほどアンテチェンバーの効果が大きいことを示す。 β の値は、ビームパイプの幾何学的構造を基にシミュレーションコード PEI⁹⁾ で計算され、ビームチャンネル内の電子密度によっても変わるが、約0.05と見積もられた。また、表面の二次電子放出率を示す指標としては、最大二次電子放出率 δ_{\max} を用いる。

実験やシミュレーションを使い、いくつかの方法で α を見積もったが、ここでは電子密度の測定から推定した方法を紹介する²¹⁾。電子密度 n_e が 10^{11} m^{-3} のオーダーでは、まだ二次電子の增幅作用は小さく、 n_e はビームチャンネル内の光電子数にはほぼ比例する (δ_{\max} が一定として)。アンテチェンバーから出てくる光電子の数が無視できる時の密度を n_{e0} とすると、 n_{e0} と n_e との比は、次式となる。

$$\frac{n_{e0}}{n_e} = \frac{p_b}{p_b + \beta \times p_a} \quad (6)$$

したがって、 n_{e0} と n_e (の比) が測定できれば、式(5)と(6)から α を推定することができる。

Phase-2 運転中、図11 のように、試験用ビームパイプのアンテチェンバー部両端のみに小さな永久磁石を並べて、アンテチェンバー内で発生した光電子を閉じ込めるようにして n_{e0} を測定した。この永久磁石は垂直方向に弱い磁場を持つ。磁石近くの磁場は約10 mT だが、ビームチャンネル部

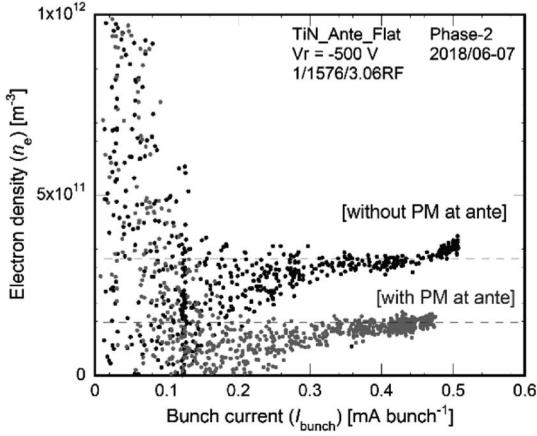


図12 アンテチェンバー端の永久磁石がある時とない時のビームチャンネル内電子密度.

では0.05 mTと地磁気と同程度であった。

バンチフィルパターン1/1576/3.06 RFの時に測定した n_{e_0} と n_e をバンチ電流に対して図12に示す。図から、 n_{e_0}/n_e はバンチ電流0.45 mAで約1.5/3.3である。式(5)から、 β を0.05とすると、 p_b/p_a は約0.04となる。よって α は式(6)から0.08となる。この値は、SuperKEKB設計時に仮定した、KEKBでの実験から得られた値 $\alpha=0.01$ よりも大きい³²⁾。

このほかにも、ビームパイプの幾何学的形状を基にシミュレーションコードSynrad3D⁴⁴⁾を用いた光電子分布計算、測定した電子密度とシミュレーションコードPyECLOUD⁴⁵⁾で計算した電子密度のバンチ電流依存性の比較等からも α を見積もったが、いずれの場合も α は0.01よりも大きかった。これらのことは、実際のビームパイプでは設計時の予想よりもアンテチェンバーの光電子低減効果が少ないことを示す。ビーム上流部からの放射光の散乱効果が実機では大きいためと考えられる。これがPhase-1時に予想より低いビーム電流でECEが確認された一因であろう。一方、得られた α の値を使ったシミュレーションから見積もった δ_{max} は、0.8~1.0と実験室で得られた値に近かった。TiNコーティングの方は想定通りの働きをしているようである。

5.2 グループ

Phase-3 2019 春季運転では、グループ付きの試験用ビームパイプを使ってグループの効果を調べた。グループ構造についてはKEKB時に試作グループで測定しているが³⁶⁾、実際に採用した構

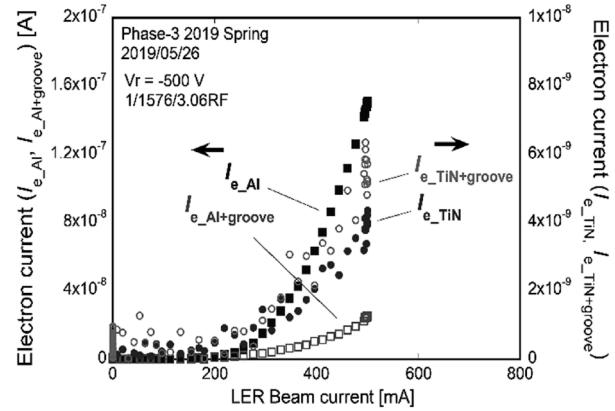


図13 試験用ビームパイプで測定した、アルミ部(I_{e_Al})、TiNコーティング部(I_{e_TiN})、グループのあるアルミ部($I_{e_Al+groove}$)、グループのあるTiNコーティング部($I_{e_TiN+groove}$)の電子電流($B_y=0$)。左/右軸で目盛が約2桁違うことに注意。

造でも確認しておく必要がある。図13に、 $B_y=0$ の時の電子電流(I_e)測定結果を示す(1/1576/3.05 RF、左/右軸の単位が違うことに注意)。 I_{e_Al} (グループ無し、TiN無し)と $I_{e_Al+groove}$ (グループ有り、TiN無し)の差は大きく、明らかに $I_{e_Al+groove}$ の方の電子電流(つまりは電子密度に相当)は小さい。一方、 I_{e_TiN} (グループ無し、TiN有り)と $I_{e_TiN+groove}$ (グループ有り、TiN有り)の差はほとんどない。この理由としては、TiNコーティングされている部分は電子密度が 10^{11} m^{-3} 台と小さいため、4.2節でも述べたように、二次電子よりも光電子の影響が大きいこと、また、測定電流が小さく、電子モニターや測定ポートの構造的違い(個性)の影響も見えやすいこと、が挙げられる。

そこで、図3(d)に示すように、グループがビームパイプの上下面のみにあることを利用し、電子モニター部に弱い磁場 B_y を印加して電子電流の変化を調べた。 B_y を加えることで電子の動きが上下方向に限定され、グループの効果がより顕著になるからである。また、側面からの光電子の影響も小さくなり、二次電子の影響が大きくなる。ただし、 B_y があるため測定電子電流から電子密度の推定は難しい。相対的な変化を調べるために、 $B_y=0$ の時の電子電流値で規格化した、 $I_{e_Al+groove}/I_{e_Al}$ と $I_{e_TiN+groove}/I_{e_TiN}$ の B_y に対する変化を図14に示す。TiNコーティングされている場合では測定値のばらつきが大きいが、両方の場合ともグループがあるときの電子電流が、ない時に比べて小さくなっている。これはグループ表面で

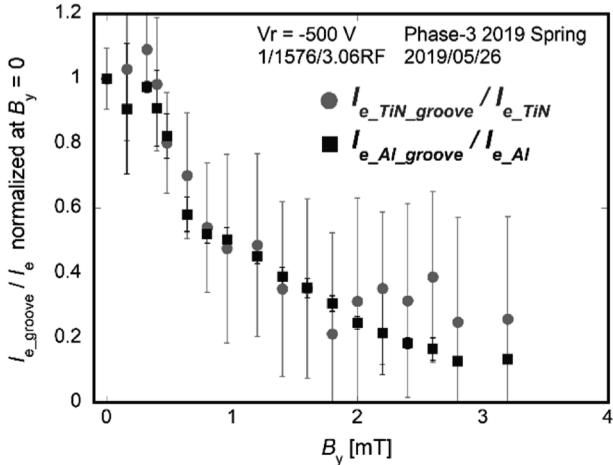


図14 $B_y=0$ の値で規格化した、 $I_{e\,TiN+groove}/I_{e\,TiN}$ と $I_{e\,Al+groove}/I_{e\,Al}$ の B_y に対する変化。

の二次電子放出率が滑らかな面よりも小さいことを示している。実機でのグループ構造も二次電子放出を抑えるのに効いていることがわかった。

6. ま と め

SuperKEKB の LER では、設計段階から様々な電子雲効果 (ECE) 対策が採用された。Phase-1 時、対策が取られていなかったアルミ合金製ベローズチャンバーが原因となる ECE を磁石で抑えた後も、線電流密度約 $0.2 \text{ mA bunch}^{-1} \text{ RF-bucket}^{-1}$ 付近から ECE が確認された。Phase-2 前に、ドリフト部にビーム方向磁場を主に永久磁石を使って磁場を加える追加対策を実施し、Phase-3 2019 春季運転では線電流密度約 $0.53 \text{ mA bunch}^{-1} \text{ RF-bucket}^{-1}$ まで ECE は観測されなかった。Phase-1 時にドリフト部の電子雲で ECE が予想よりも低いビーム電流で発生したのは、Phase-2 での実験から、アンテチャンバーの光電子抑制効果が予想よりも低かったことが一因と考えられる。光電子抑制の重要性が改めて認識された。また、Phase-3 2019 春季運転での実験では、実機に採用されたグループの二次電子抑制効果を確認することができた。

SuperKEKB は 2019 年 3 月から、本格実験となる Phase-3 運転がいよいよ始まった。これまでのところ ECE は確認されておらず、ECE 対策はほぼ予想通り働いている。ただ、まだ設計電流（線電流密度 $0.73 \text{ mA bunch}^{-1} \text{ RF-bucket}^{-1}$ に相当）までは到達しておらず、今後さらにビーム電流を上

げ、またビームを絞った時にも十分に ECE を抑制できるのか、注意して見守っていく必要がある。

謝 詞

ECE に対する検討、対策の設計、実施、運転中の測定に関して、KEKB 加速器グループの皆様には多くのご協力を頂きました。また KEK に限らず、国内外の様々な研究者から多くの有益な意見を頂きました。ここに深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) SuperKEKB Home page: <http://www-superkekb.kek.jp/index.html>
- 2) K. Akai et al.: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **907**, 188 (2018).
- 3) Y. Ohnishi, T. Abe, T. Adachi, K. Akai, Y. Arimoto, K. Ebihara, K. Egawa, J. Flanagan, H. Fukuma, Y. Funakoshi, K. Furukawa, T. Furuya, N. Iida, H. Iinuma, H. Ikeda, T. Ishibashi, M. Iwasaki, T. Kageyama, S. Kamada, T. Kamitani, K. Kanazawa, M. Kikuchi, H. Koiso, M. Masuzawa, T. Mimashi, T. Miura, T. Mori, A. Morita, T. Nakamura, K. Nakanishi, H. Nakayama, M. Nishiwaki, Y. Ogawa, K. Ohmi, N. Ohuchi, K. Oide, T. Oki, M. Ono, M. Satoh, K. Shibata, M. Suetake, Y. Suetsugu, R. Sugahara, H. Sugimoto, T. Suwada, M. Tawada, M. Tobiyama, N. Tokuda, K. Tsuchiya, H. Yamaoka, Y. Yano, M. Yoshida, S. Yoshimoto, D. Zhou and Z. Zong: Prog. Theor. Exp. Phys. **2013**, 03A011 (2013).
- 4) Belle II Home page: <https://www.belle2.org/>
- 5) T. Abe, K. Akai, N. Akasaka, M. Akemoto, A. Akiyama, M. Arinaga, Y. Cai, K. Ebihara, K. Egawa, A. Enomoto, E. Ezura, J. Flanagan, S. Fukuda, H. Fukuma, Y. Funakoshi, K. Furukawa, T. Furuya, J. Haba, K. Hara, T. Higo, S. Hiramatsu, H. Hisamatsu, H. Honma, T. Honma, K. Hosoyama, T. Ieiri, N. Iida, H. Ikeda, M. Ikeda, S. Inagaki, S. Isagawa, H. Ishii, A. Kabe, E. Kadokura, T. Kageyama, K. Kakihara, E. Kako, S. Kamada, T. Kamitani, K. Kanazawa, H. Katagiri, S. Kato, T. Kawamoto, S. Kazakov, M. Kikuchi, E. Kikutani, K. Kitagawa, H. Koiso, Y. Kojima, I. Komada, T. Kubo, K. Kudo, S. Kurokawa, K. Marutsuka, M. Masuzawa, S. Matsumoto, T. Matsumoto, S. Michizono, K. Mikawa, T. Mimashi, T. Mitsuhashi, S. Mitsunobu, T. Miura, K. Mori, A. Morita, Y. Morita, H. Nakai, H. Nakajima, T. T. Nakamura, H. Nakanishi, K. Nakanishi, K. Nakao, H. Nakayama, M. Nishiwaki, Y. Ogawa, K. Ohmi, Y. Ohnishi, S. Ohsawa, Y. Ohsawa, N. Ohuchi, K. Oide, T. Oki, M. Ono, T. Ozaki, E. Perevedentsev, H. Sakai, Y. Sakamoto, M. Sato, K. Satoh, M. Satoh, Y. Seimiya, K. Shibata, T. Shidara, M. Shimada, S. Stanic, M. Shirai, A. Shirakawa, T. Sueno, M. Suetake, Y. Suetsugu, R. Sugahara, T. Sugimura, T. Suwada, O. Tajima, S. Takano, S. Taka-

- saki, T. Takenaka, Y. Takeuchi, Y. Takeuchi, M. Tawada, M. Tejima, M. Tobiyama, N. Tokuda, K. Tsuchiya, S. Uehara, S. Uno, Y. Wu, N. Yamamoto, Y. Yamamoto, Y. Yano, K. Yokoyama, M. Yoshida, M. Yoshida, S. Yoshimoto, K. Yoshino, M. Yoshioka, D. Zhou, F. Zimmermann and Z. Zong: *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2013**, 03A001 (2013).
- 6) 船越義裕: 加速器, **13**, 91, (2016).
- 7) 赤井和憲, 小磯晴代: 加速器, **15**, 213, (2018).
- 8) A. Morita: Proc. IPAC2019, Melbourne, 2255–2257 (2019).
- 9) K. Ohmi: *Phys. Rev. Lett.* **75**, 1526 (1995).
- 10) K. Ohmi and F. Zimmermann: *Phys. Rev. Lett.* **85**, 3821 (2000).
- 11) G. Rumolo, A. Z. Ghalam, T. Katsouleas, C. K. Huang, V. K. Decyk, C. Ren, W. B. Mori, F. Zimmermann and F. Ruggiero: *Phys. Rev. Spec. Top. Accel. Beams* **6**, 081002 (2003).
- 12) F. Zimmermann: *Phys. Rev. Spec. Top. Accel. Beams* **7**, 124801 (2004).
- 13) K. Ohmi et al.: Proc. IPAC2014, Dresden, 1597–1599 (2014).
- 14) Y. Suetsugu, K. Kanazawa, K. Shibata, T. Ishibashi, H. Hisamatsu, M. Shirai and S. Terui: *J. Vac. Sci. Technol. A* **30**, 031602 (2012).
- 15) Y. Suetsugu, K. Kanazawa, K. Shibata, T. Ishibashi, H. Hisamatsu, M. Shirai and S. Terui: *Vacuum* **121**, 238 (2015).
- 16) Y. Suetsugu, K. Kanazawa, K. Shibata, T. Ishibashi, H. Hisamatsu, M. Shirai and S. Terui: *J. Vac. Sci. Technol. A* **34**, 021605 (2016).
- 17) Y. Suetsugu, K. Shibata, T. Ishibashi, K. Kanazawa, M. Shirai, S. Terui and H. Hisamatsu: *Phys. Rev. Accel. Beams* **19**, 121001 (2016).
- 18) Y. Suetsugu, K. Shibata, T. Ishibashi, H. Fukuma, M. Tobiyama, J. Flanagan, E. Mulyani, M. Shirai, S. Terui, K. Kanazawa and H. Hisamatsu: *J. Vac. Sci. Technol. A* **35**, 03E103 (2017).
- 19) K. Ohmi et al.: Proc. IPAC2017, Copenhagen, 3104 (2017).
- 20) Y. Suetsugu, K. Shibata, T. Ishibashi, M. Shirai, S. Terui, K. Kanazawa and H. Hisamatsu: *J. Vac. Sci. Technol. A* **37**, 021602 (2019).
- 21) Y. Suetsugu, H. Fukuma, K. Ohmi, M. Tobiyama, J. Flanagan, H. Ikeda, E. Mulyani, K. Shibata, T. Ishibashi, M. Shirai, S. Terui, K. Kanazawa and H. Hisamatsu: *Phys. Rev. Accel. Beams* **22**, 23201 (2019).
- 22) B. Henrist, N. Hilleret, C. Scheuerlein and M. Taborelli: *Appl. Surf. Sci.* **172**, 95 (2001).
- 23) S. Calatroni, E. Garcia-Tabares Valdivieso, H. Neupert, V. Nistor, A. T. Perez Fontenla, M. Taborelli, P. Chiggiato, O. Malyshev, R. Valizadeh, S. Wackerow, S. A. Zolotovskaya, W. A. Gillespie and A. Abdolvand: *Phys. Rev. Accel. Beams* **20**, 113201 (2017).
- 24) C. Y. Vallgren et al.: *Phys. Rev. Spec. Top. Accel. Beams* **14**, 071001 (2011).
- 25) J. R. Calvey et al.: Proc. IPAC2011, San Sebastián, 796 (2011).
- 26) J. R. Calvey, W. Hartung, Y. Li, J. A. Livezey, J. Makita, M. A. Palmer and D. Rubin: *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **770**, 141 (2015).
- 27) R. E. Kirby and F. K. King: *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **469**, 1 (2001).
- 28) F. Le Pimpec, R. E. Kirby, F. King and M. Pivi: *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **551**, 187 (2005).
- 29) D. Alesini et al.: Proc. IPAC2012, New Orleans, 1107 (2012).
- 30) R. Todd et al.: Proc. PAC2005, Knoxville, 3088 (2005).
- 31) A. A. Krasnov: *Vacuum* **73**, 195 (2004).
- 32) Y. Suetsugu, K. Kanazawa, K. Shibata, H. Hisamatsu, K. Oide, F. Takasaki, A. E. Bondar, V. Kuzminikh, A. Gorbovsky, R. Dostovalov, K. Sennyu and H. Hara: *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **538**, 206 (2005).
- 33) Y. Suetsugu, K. Kanazawa, K. Shibata and H. Hisamatsu: *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **556**, 399 (2006).
- 34) K. Shibata et al.: Proc. EPAC2008, Genoa, 1700 (2008).
- 35) Y. Suetsugu et al.: Proc. IPAC2010, Kyoto, 2369 (2010).
- 36) Y. Suetsugu, H. Fukuma, M. Pivi and L. Wang: *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **604**, 449 (2009).
- 37) H. Fukuma et al.: AIP Conf. Proc., 357 (2002).
- 38) Y. Cai, M. Pivi and M. A. Furman: *Phys. Rev. Spec. Top. Accel. Beams* **7**, 024402 (2004).
- 39) H. Fukuma et al.: Proc. EPAC2006, Edinburgh, 2901 (2006).
- 40) K. Kanazawa et al.: Proc. PAC2005, Knoxville, 1054 (2005).
- 41) E. Mulyani, J. W. Flanagan, M. Tobiyama, H. Fukuma, H. Ikeda and G. Mitsuka: *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **919**, 1 (2019).
- 42) M. Tobiyama et al.: Proc. PAC2005, Knoxville, 943 (2005).
- 43) S. S. Win, K. Ohmi, H. Fukuma, M. Tobiyama, J. Flanagan and S. Kurokawa: *Phys. Rev. Spec. Top. Accel. Beams* **8**, 094401 (2005).
- 44) G. Dugan et al.: Proc. ECLOUD'12, Isola d'Elba, 117 (2012).
- 45) G. Iadarola et al.: Proc. ECLOUD'12, Isola d'Elba, 189 (2012).