

## SuperKEKB LER 電子雲効果抑制のための永久磁石

### PERMANENT MAGNETS FOR SUPPRESSING THE ELECTRON CLOUD EFFECT IN THE SuperKEKB LER

末次祐介<sup>#</sup>, 福岡均

Yusuke Suetsugu<sup>#</sup>, Hitoshi Fukuma

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

#### Abstract

The electron cloud effect (ECE) observed in the initial stage of Phase-1 commissioning of the SuperKEKB positron ring was cured by attaching the iron-type permanent-magnet unit (PMU) consisting of 8 permanent magnets and 1 iron yokes to every aluminum-alloy bellows chamber in the ring. For suppressing the ECE observed at higher beam currents in the final stage, the iron-type PMU are aligned in series along the beam pipes at drift spaces before starting the Phase-2 commissioning. An aluminum-type PMU consisting of 3 aluminum cylinders with 21 permanent magnets in each are also designed for the spaces near to the yoke of electromagnets. The effectiveness of these PMUs in decreasing the electron density in a bellows chambers or a beam pipe was evaluated by a simulation.

#### 1. はじめに

SuperKEKB は、KEK つくばキャンパスにある非対称エネルギー電子-陽電子衝突型加速器である。主リングはそれぞれ周長約 3 km の 7GeV 電子リング(HER)と 4 GeV 陽電子リング(LER)の二つのリングから構成される[1]。トンネル内の様子を Fig. 1 に示す。2016 年の Phase-1 運転時、LER において、ビーム電流 600 mA (1576 バンチ、3.06 RF バケット間隔、以下 1/1576/3.06RF と記す)あたりから、垂直方向ビームサイズ増大等をとまう電子雲不安定性(ECE)が観測された[2-4]。原因は、リングに約 820 個設置されたアルミ製ベローズチェンバー部の電子雲によるものであった。運転期間中、すべての当該ベローズチェンバーに鉄製永久磁石ユニット(以下 PMU、コの字型鉄板に永久磁石を張りつけたユニット)を取り付けた結果、この ECE は緩和された。しかし、運転終盤、ビーム電流約 900 mA 以上で、ドリフト部のビームパイプ内の電子雲が原因の一つと考えられる ECE が再度観測された。次期 Phase-2 運転はビーム電流 1 A 以上の運転となるため、その運転開始前にドリフト部にも鉄製 PMU を取付ける予定である。ただ、この鉄製 PMU は電磁石ヨークの近くでは使用できないため、鉄を使わないアルミ

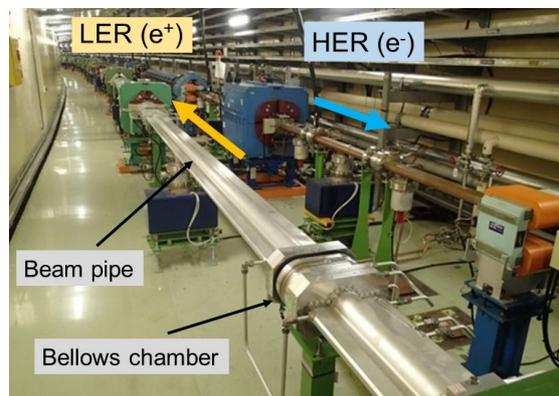


Figure 1: Present view in the SuperKEKB main ring.

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

製 PMU(永久磁石を詰め込んだアルミ円筒を並べたユニット)を考案した。これら PMU をビームパイプへ取り付けた時のベローズチェンバー内やビームパイプ内の電子密度分布はシミュレーションコード CLOUDLAND で解析された。本講演では、PMU の構造、それらによる電子雲抑制効果、および電子密度シミュレーション結果等を報告する。

#### 2. ベローズチェンバー用鉄製 PMU

上述したように、運転初期に観測された ECE は、リングに設置されたアルミ合金製ベローズチェンバー内の電子雲に起因するものであった(Fig. 1 参照) [2-4]。ベローズチェンバー内面は、他のビームパイプとは違い、二次電子放出率を低減する窒化チタン(TiN)がコーティングされていない[5]。そのため表面の二次電子放出率が高く、電子増倍効果(マルチパクタリング)によって、高密度の電子雲が形成されたと考えられる[6]。実際、ビーム電流約 600 mA では、試験用ビームパイプで測定した TiN コーティングの無いアルミ合金製ビームパイプ内の電子密度は、コーティングされた部分の電子密度の 10 倍以上であった。

電子の増倍を防ぐ方法はいくつかあるが、既に設置されている機器に対する最も簡便かつ効果的な方法は、外部からビーム方向の磁場を加えることである[7, 8]。そこで、リング内のアルミ製ベローズチェンバー7個にソレノイドを、別の7個に鉄製 PMU を取り付け、近傍の圧力上昇の振る舞いを観察して ECE 抑制効果を調べた。ベローズチェンバーに取り付けたソレノイドと鉄製 PMU を、それぞれ Fig. 2(a)と Fig. 3(a)に示す。ソレノイドは3種類あり、ベローズチェンバーの周囲に計 510 ターン巻いている。最大電流は 5A である。その時のベローズチェンバー内中心(Center)と上側内壁近く(Top)のビーム軸方向磁場成分( $B_z$ )強度分布を Fig.2(b)に示す。最大で約 40 G の磁場が発生する。一方鉄製 PMU の方は、長さ 120 mm、コの字型の厚み 1.8 mm の鉄板ヨークの両側に 4 個ずつ永久磁石を同じ磁極の向きに付けたもので、そ

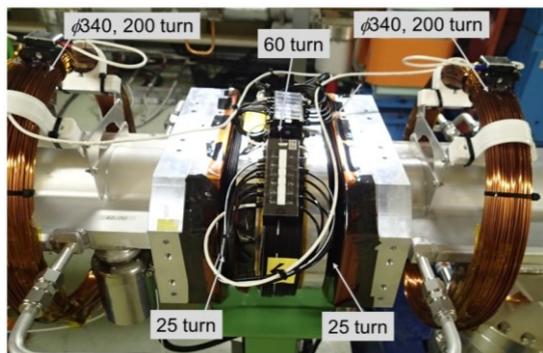


Figure 2(a): Solenoids around an aluminum-alloy bellows chamber.

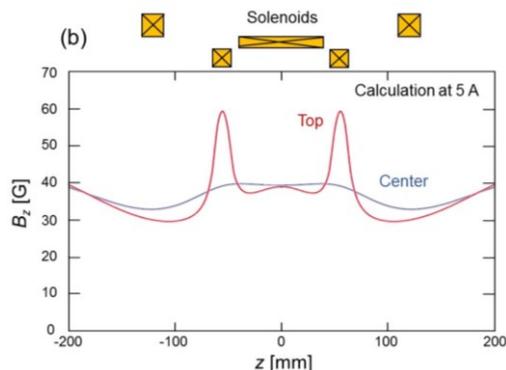


Figure 2(b): Magnetic field in the beam direction ( $B_z$ ) along the beam axis ( $z$ ) at the center axis (Center) and the upper surface (Top) of a bellows chamber, where  $z = 0$  is the center of the bellows chamber.

れらをベローズチェンバーの上下に装着した。永久磁石は直径 30 mm、厚み 8 mm の異方性フェライト磁石で、表面の残留磁場は約 1 kG である。ベローズチェンバー中心と上内面での  $B_z$  分布を Fig. 3(b)に示す。永久磁石であるため極性の反転があるが、ベローズ中心で約 100 G の  $B_z$  が得られる。

Figure 4 に、ソレノイドや永久磁石を取り付ける前と後の近傍の圧力のビーム電流依存性を示している (1/1576/3.06RF)。どちらの場合も、ビーム電流に対して非線形に上昇していた圧力が、線形に上昇するようになり、電子のマルチパクタリングがなくなったことを示している。圧力がビーム電流に対して線形に上昇するのは、放射光による光刺激脱離があるためである。Figure 4 からわかるように、ソレノイド、鉄製 PMU とも ECE に効果があり、その効果はほぼ同じであることがわかった。一方、設置作業の手間、費用の観点からは、永久磁石設置の方がより容易である。

そこで、リングにある残り約 800 個のアルミ製ベローズチェンバーには、鉄製 PMU を取り付けた。Figure 5 と 6 には、PMU 取付前、取付後の垂直方向ビームサイズとアーク部圧力のビーム電流に対する変化をそれぞれ示している。約 900 mA までビームサイズ増大がなくなっていることがわかる。また、圧力の非線形上昇が緩和されていることがわかる。

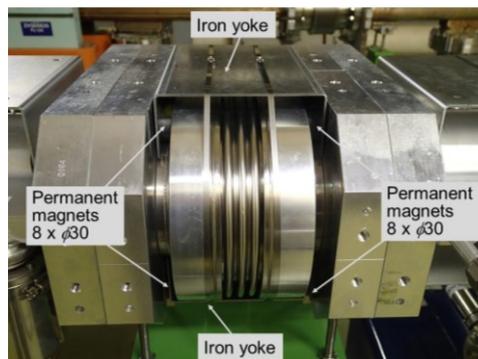


Figure 3 (a): Iron-type PMU attached to an aluminum-alloy bellows chamber.

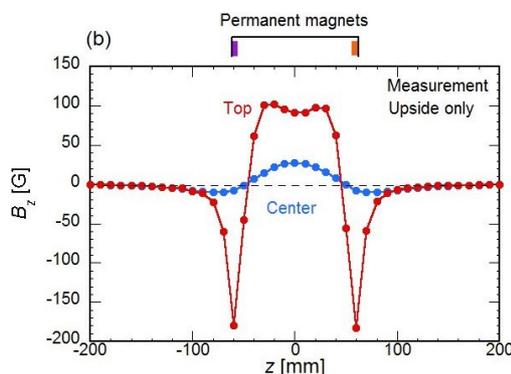


Figure 3(b): Magnetic field in the beam direction ( $B_z$ ) along the beam axis ( $z$ ) at the center axis (Center) and the upper surface (Top) of a bellows chamber, where  $z = 0$  is the center of the bellows chamber.

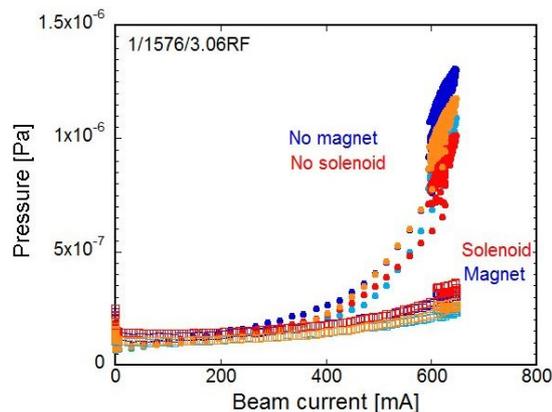


Figure 4: Behaviors of pressures against beam currents for the cases with and without magnetic fields generated by solenoids or PMUs.

ベローズチェンバーに取り付けたソレノイドの電流を変え、近傍の圧力の変化から、電子のマルチパクタリングを抑えるのに必要な磁場強度を調べた。Figure 7 は、ビーム電流 750–768 mA において、ソレノイドに流れる電流を 0 A から 5 A まで変えたときの圧力変化である。図から、ソレノイド電流を約 1 A にすると圧力は急激に下が

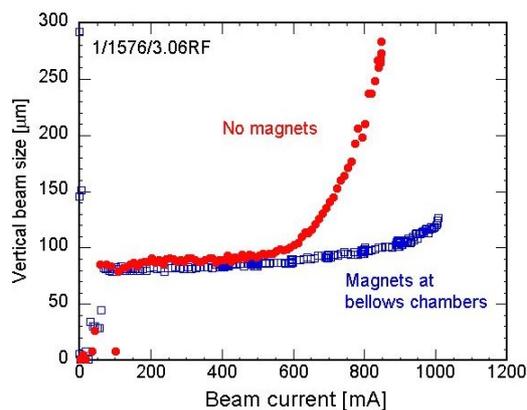


Figure 5: Behaviors of the vertical beam sizes against beam currents for the cases with and without PMUs at aluminum bellows chambers.

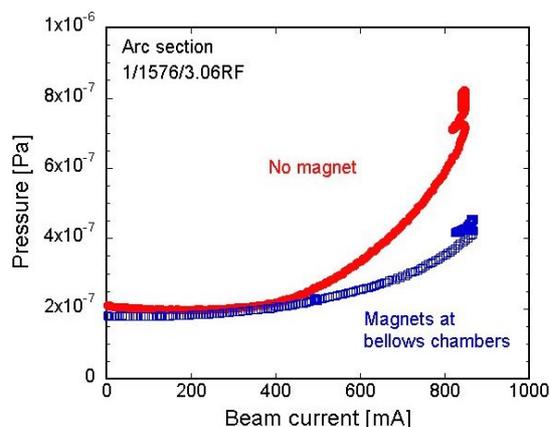


Figure 6: Behaviors of pressures against beam currents for the cases with and without PMUs at aluminum bellows chambers.

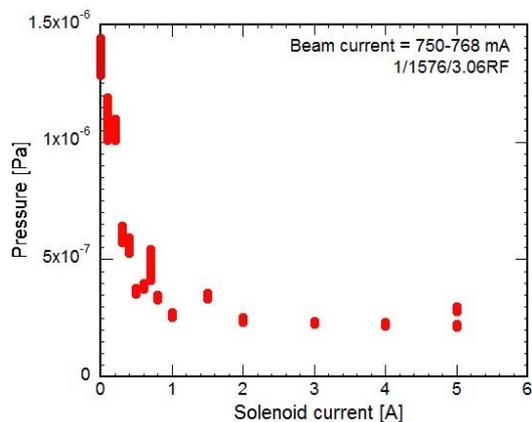


Figure 7: Pressures near the aluminum bellows chambers at the beam current of approximately 760 mA as a function of the currents applies to the solenoid around these bellows chambers.

り、その後はほぼ一定であることがわかる。すなわち、ビーム方向磁場強度が約 10 G でも電子のマルチパク

リングを抑える効果があると言える。KEKB 時代の測定では、ECE 抑制には約 60 G で十分という報告がある[9]。いずれにしろ、ベローズチェンバーに取り付けた PMU の磁場約 100 G でも十分であることがわかる。

### 3. ビームパイプ用鉄製 PMU

通常のバンチフィルパターン 1/1576/3.06RF 運転において、ビーム電流が 900 mA 以上になると、再び ECE が観測された。Figure 5 のように、垂直方向ビームサイズが増大し、また、Fig. 6 にみられるように圧力がビーム電流に対して再度非線形に上昇した。電子雲が発生した可能性のある場所として、電磁石間にあるドリフト部のビームパイプが挙げられた(Fig. 1 参照)。ドリフト部のビームパイプはアンテナチェンバーを持ち、また、内部は TiN がコーティングされている。しかし、先に述べた試験チェンバーでの電子密度測定では、TiN コーティング部でも ECE が励起される閾値に近い電子密度が測定された。そこで、試験的に一部のドリフト部(全長約 20 m)に、ベローズチェンバーに取り付けたものと同様の構造の鉄製 PMU を並べて設置し、付近の圧力変化を調べた。

鉄製 PMU は、ベローズチェンバー用と同じく、直径 30 mm、厚み 8 mm の異方性フェライト磁石を、幅 160 mm、厚み 2 mm のコの字型鉄板ヨークの両側に基本的に 4 個ずつ取付けたユニットで、ビームパイプの上下に装着した。PMU はビームパイプに沿って約 40 mm の間隔を置いて並べられた。この PMU と、それらをドリフト部のビームパイプに設置した様子を Fig. 8 (a)に示す。

Figure 8(b)は、PMU を幅 40 mm で 2 個並べた際の、ビームパイプ中心(Center)、内面上部(Top)の  $B_z$  の強度分布測定結果を示す。ただし、この測定では、PMU はビームパイプ上面だけに置いている。PMU 真下で極性の反転があるが、ビームパイプ上面で約 60 G の  $B_z$  が得られているのがわかる。

Figure 9 は、ビームパイプに鉄製 PMU を試験的に取り付けた場所の、ビーム電流に対する圧力変化を示している。PMU を取り付けた後は、圧力がほぼ線形に上昇し、電子増倍が抑えられていることがわかる。このことから、900 mA 以上で発生した ECE の原因の一つがドリフト部の電子であることが確かめられた。Phase-2 に向けてリング全体のドリフト部、約 1000 m に鉄製 PMU の取り付け作業を行っている。

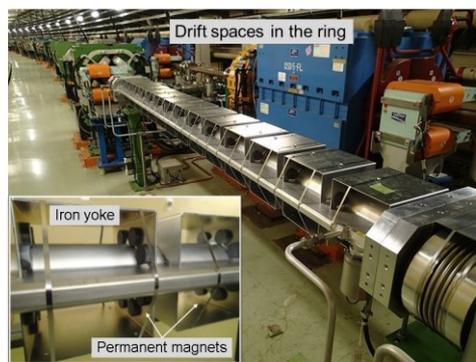


Figure 8 (a): PMU and PMUs attached to the beam pipes at drift spaces.

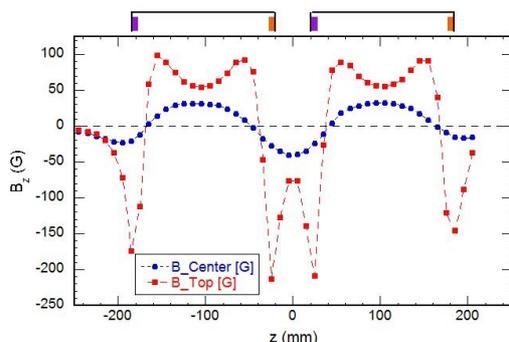


Figure 8 (b): Magnetic field in the beam direction ( $B_z$ ) along the beam axis ( $z$ ) at the center axis (Center) and the upper surface (Top) of a beam pipe, where  $z = 0$  is the center of two PMUs.

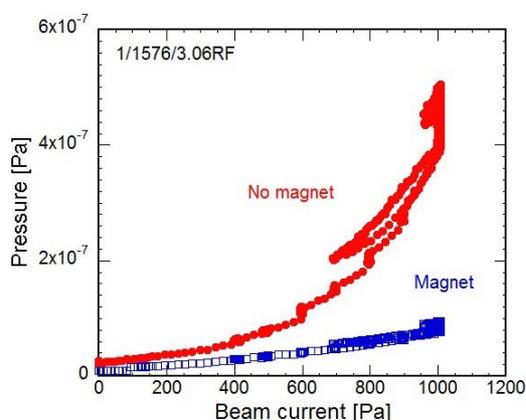


Figure 9: Behaviors of pressures near the beam pipes against beam currents for the cases with and without PMUs in drift spaces.

#### 4. 電磁石近傍用アルミ製 PMU

上述した、ベローズチェンバー用およびドリフト部ビームパイプ用の鉄製 PMU は、鉄板を使用しているため、電磁石ヨークの傍では使用できない。例えば、ビーム位置モニターは四極電磁石の傍にあり、上記鉄製 PMU は使用できない。そこで、アルミ製円筒内に永久磁石を詰めてバー状にして組み合わせた、アルミ製 PMU を考案した。ビームパイプに取り付けた様子を Fig. 10 (a) に示す。アルミ製バーは内径 31 mm、外径 35 mm、長さ 180 mm のアルミパイプで、内部には直径 30 mm、厚み 8 mm の永久磁石が 21 個入っている。このバーは KEKB でも使用された。そのバーを 3 本 1 セットとしてアルミ製金具で固定している。ビームパイプの上面、下面に装着する。

このアルミ製 PMU を上面に取り付けた時の、ビームパイプ中心(Center)と内面上部(Top)の  $B_z$  の  $z$  方向強度分布測定結果を Fig. 10 (b) に示す。約 100G の磁場強度が得られている。このタイプの PMU は、特殊な形状のビームパイプにも取り付けることができる。今後、必要に応じて、四極電磁石、六極電磁石、補正電磁石の傍、ビーム位置モニター部など、特に、 $\beta$  関数の大きい領域の電磁石傍に設置していく予定である。

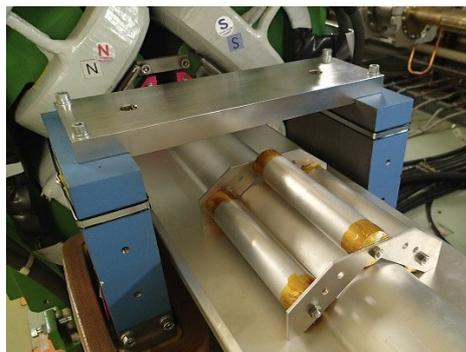


Figure 10 (a): Aluminum-type PMU designed for the beam pipes near electric magnets in the ring.

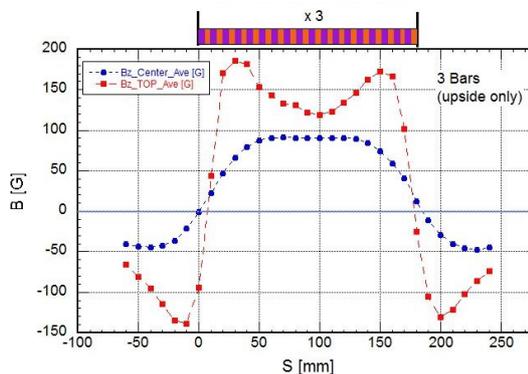


Figure 10 (b): Magnetic field in the beam direction ( $B_z$ ) along the beam axis ( $z$ ) at the center axis (Center) and the upper surface (Top) of a beam pipe, where  $z = 0$  is the center of the beam pipe.

#### 5. 電子密度のシミュレーション

Figure 8 (b) からわかるように、PMU では、永久磁石の傍で極性の反転が起こる。ソレノイドの場合 (Fig.3 参照) のように一様な磁場ではない。そこで、シミュレーションによって、PMU を取り付けた場合の電子密度低減効果を調べた。使用したコードは 3 次元シミュレーションコード CLOUDLAND である [10]。任意の 3 次元磁場分布中での電子の運動を追跡できるようにコードを変更した。一様な電磁場中の電子軌道を計算する解析的な式を用いて微小時間ステップ毎の電子座標を計算しつないでいく。磁場分布には PMU とほぼ同じ配置の永久磁石と鉄板ヨークについて ANSYS で 3 次元磁場計算したものを使用した。主な仮定は以下の通りである。

- ビームパイプ断面:  $\phi 94$  mm。
- アンテチェンバーではない丸パイプを仮定。ただし、アンテチェンバーによる光電子発生量の抑制効果を考慮して、壁から出る光電子の量子効率を 0.01 倍している。
- 光電子の量子効率 0.1。光電子はチェンバー壁から一様に放出される。
- バンチ長 (rms): 4.6 mm。
- 放射光線密度:  $1 \times 10^{15}$  photons  $s^{-1} m^{-1} mA^{-1}$ 。
- 最大二次電子放出率となる入射電子エネルギー 300 eV。

Figure 11 は、ベローズチェンバーの上下に鉄製 PMU を取り付けただけの場合で、ECE が観測された 1578 バンチ、3RF バケット間隔、600 mA 相当での計算である。 $\delta_{max}$  は 2.0 としている(TiN コーティング無しのアルミ)。(a)は PMU がある時、(b)は無い時である。中心部(半径 8 mm)での密度は、それぞれ  $2 \times 10^9 \text{ e} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $1.4 \times 10^{12} \text{ e} \cdot \text{m}^{-3}$  と、PMU で電子密度は大幅に小さくなる。PMU で ECE が抑えられたことがわかる。

Figure 12 はドリフト部に鉄製 PMU を取り付けただけの場合の結果である。この場合、PMU がビーム方向に周期的に置かれたと仮定し、計算領域の境界で周期的境界条件を課している。条件は Phase-2 運転で想定される 1280 バンチ、4RF バケット間隔、1 A 相当である。 $\delta_{max}$  は 1.2 としている。同じく(a)は PMU がある時、(b)は無い時で、中心部の密度は、それぞれ  $4 \times 10^9 \text{ e} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $1.1 \times 10^{11} \text{ e} \cdot \text{m}^{-3}$  と、PMU で電子密度は大幅に小さくなる。Phase-2 運転時も有効であることがわかる。

さらに、両 PMU の場合について、SuperKEKB の設計値である、2500 バンチ、2RF バケット間隔、3.6 A 相当の条件でもシミュレーションを行ったが、ビーム軌道中心の密度は  $10^{10} \text{ m}^{-3}$  台で、ECE の閾値よりも低いことがわかった[11]。

## 6. まとめ

2016 年の Phase-1 運転時、SuperKEKB の陽電子リングでは ECE が観測された。その対処として、アルミ製ベローズチェンバーに鉄製 PMU を取り付けただ。2017 年度に予定されている Phase-2 運転に向けて、ドリフト部等にも鉄製を取り付ける作業を行っている。電磁石近傍用の非磁性金具を用いたアルミ製 PMU の準備も行っている。シミュレーションによれば、これらの PMU により、設計パラメータのビームでも ECE が発生しない程度までビーム軌道近くの電子密度は低減されると期待される。

## 謝辞

ECE 問題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] Y. Funakoshi *et al.*, “Beam commissioning of SuperKEKB,” Proc. IPAC’16 (2016) pp. 1019–1021.
- [2] Y. Suetsugu, K. Shibata, T. Ishibashi, H. Fukuma, M. Tobiyama, J. Flanagan, E. Mulyani, M. Shirai, S. Terui, K. Kanazawa, and H. Hisamatsu, “Achievements and problems in the first commissioning of SuperKEKB vacuum system,” J. Vac. Sci. Technol. A, 35 (2016) 03E103.
- [3] Y. Suetsugu, K. Shibata, T. Ishibashi, M. Shirai, S. Terui, K. Kanazawa, H. Hisamatsu, Phys. Rev. Acc. Beams, 19 (2016) 121001.
- [4] Y. Suetsugu, K. Shibata, T. Ishibashi, K. Kanazawa, M. Shirai, S. Terui and H. Hisamatsu, “First Commissioning of the SuperKEKB Vacuum System,” Proc. IPAC’16 (2016) pp.1086-1088.
- [5] Y. Suetsugu, K. Kanazawa, K. Shibata, T. Ishibashi, H. Hisamatsu, M. Shirai, S. Terui, J. Vac. Sci. Technol. A, 34 (2016) 021605.
- [6] O. Gröbner, “Beam Induced Multipacting,” Proc. PAC97 (1997) pp.3589-3591.

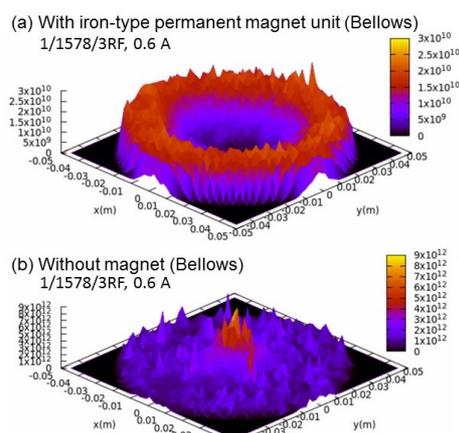


Figure 11: Estimated electron density in a bellows chamber for the cases (a) with and (b) without PMU as shown in Fig. 3(a).

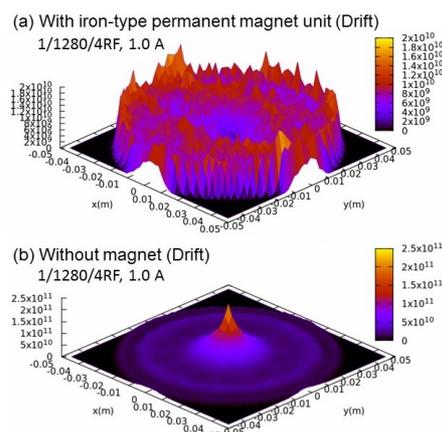


Figure 12: Estimated electron density in a beam pipe for the cases (a) with and (b) without PMUs as shown in Fig. 8(a).

- [7] Y. Cai, M. Pivi, M. Furman, “Buildup of Electron Cloud with different Bunch Pattern in the Presence of Solenoid field”, Proc. PAC03 (2003) pp.350-352.
- [8] H. Fukuma, J. W. Flanagan, T. Kawamoto, T. Morimoto, K. Oide, M. Tobiyama, F. Zimmermann, “The Effect of the Solenoid Field in Quadrupole Magnets of the Electron Cloud Instability in the KEKB LER”, Proc. EPAC 2006 (2006) pp. 2901-2903.
- [9] H. Fukuma and L. F. Wang, “Simulation study of the electron cloud instability in SuperKEKB”, Proc. PAC’05 (2005) pp. 868–870.
- [10] L. F. Wang, H. Fukuma, K. Ohmi, S. Kurokawa, K. Oide, F. Zimmermann, “Numerical study of the photoelectron cloud in KEKB Low Energy Ring with a three-dimensional particle in cell method”, Phys. Rev. ST Accel. Beams 5, 124402 (2002).
- [11] K. Ohmi and D. Zhou, “Study of electron cloud effects in SuperKEKB,” Proc. IPAC’14 (2014), pp. 1597–1599.