

SuperKEKB における陽電子入射ビームのエミッタンス保存 EMITTANCE PRESERVATION OF POSITRON INJECTION BEAM FOR SUPERKEKB

飯田直子*, 菊池光男, 清宮裕二, 森隆志, 紙谷琢哉, 柿原和久, 大越隆夫, 荒木田是夫, 多和田正文
Naoko Iida*, Mitsuo Kikuchi, Yuji Seimiya, Takashi Mori, Takuya Kamitani, Kazuhisa Kakihara, Takao Oogoe,
Yoshio Arakida, Masafumi Tawada
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

SuperKEKB, a B-factory of electron and positron collider rings, aims at luminosity of $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$, which is about forty times higher than the world record achieved in KEKB. Achieving the design luminosity, it is essential that not only the stored beams but also the injected beams have high charges and low emittances. Requirements for the positron injected beam to the LER are 4 nC/bunch and the normalized emittances of $100 \mu\text{m}$ and $15 \mu\text{m}$, for horizontal and vertical plane, respectively. The low emittance positron beam extracted from the 1.1 GeV-damping ring is compressed in length via a BCS system prior to being accelerated by the injector LINAC. After accelerated to 4 GeV, the beam is conveyed to the LER through a transport line, which has an ECS system before four arc sections. It is not straightforward to transport the beam keeping emittances in order of $10 \mu\text{m}$. It is essential to control the leakage of dispersions generated by the arcs and chicanes at the ECS cavities, and to reduce x - y couplings in the arcs. Currently, the measured emittance of 1 nC beam has been reduced from $450 \mu\text{m}$ to $150 \mu\text{m}$ in the horizontal, and from $70 \mu\text{m}$ to $30 \mu\text{m}$ in the vertical plane. This paper describes various effort to preserve the emittance of the positron beam.

1. はじめに

SuperKEKB 加速器 (以下、SuperKEKB) は $\Upsilon(4S)$ を大量に作り出すことを目的とした、7 GeV の電子用リング (HER) と 4 GeV の陽電子用リング (LER) の衝突型円形加速器で、物理検出器は Belle II である。1999 年から 2010 年まで稼動していた KEKB 加速器 [1] は当時の世界最高ルミノシティ、 $2.1 \times 10^{34} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を記録した。SuperKEKB はそのアップグレード版で、ピークルミノシティをさらに 40 倍に増やすために、ナノビーム方式という低エミッタンスビームの衝

突方式を採用したため、入射ビームも低エミッタンスであることが要求される。また蓄積ビームが低エミッタンス、大電流であることから寿命が短いため、供給される入射ビームの電荷量も高い必要がある。SuperKEKB は 2016 年から試験運転を開始し、目的ごとに大きく分けてフェーズ 1、2、3 で運転しており、2020 年 9 月現在フェーズ 3.3 (改名、2020a,b) が終了している [2]。入射ビームへの性能要求値は HER、LER 共に、衝突性能に応じて徐々に最終値に近づけていく。

入射陽電子ビームは、Fig. 1 に示すように、電子陽電子入射器 (LINAC) の Sector A 先頭の熱電子銃を源とする電荷量が約 10nC のプライマリー電子ビーム

* naoko.iida@kek.jp

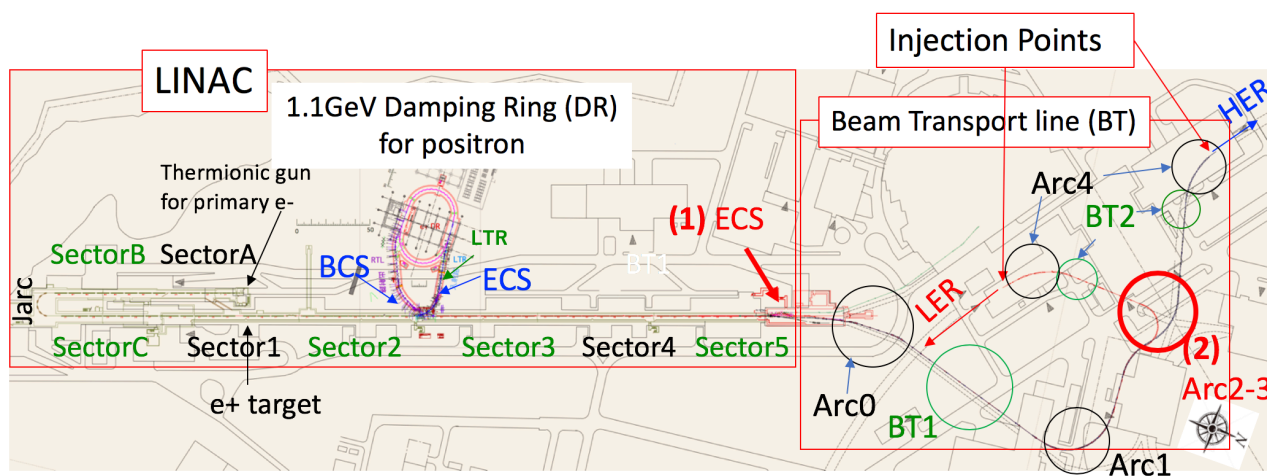


Figure 1: LINAC consists of eight sectors from Sector A to Sector 5 starting from the electron sources. The electron and positron beams are accelerated up to 7 GeV and 4 GeV, respectively, and are injected into HER and LER of SuperKEKB via each beam transport line (BT). Both of the injection line for DR (LTR) and the extraction line from DR (RTL) have two arc sections and a straight section in between them. There are 5 arc sections in the each BT.

を、180°-Jarc を経て約 3.5 GeV まで加速し、Sector 1 のタングステン標的に照射、e-/e+ 対生成で発生する。標的直下流のフラックス・コンцентрーター (FC) で大電荷量の陽電子を収集し、1.1 GeV ダンピングリング (DR) で規格化エミッタンスを約 2800 μm から水平方向には約 100 μm へ、垂直方向には約 5 μm 以下に縮小している。DR から出射されたビームは、LINAC の Sector 3 に戻され、エネルギーを 4 GeV まで加速されて 5 つのアーチ部 (Arc-0~Arc-4) を持つビーム輸送路 (BT) を経て、LER に入射される。また、エネルギー方向の広がりやパンチ長においても、入射器及び DR の加速周波数の違いや、LER 入射点での要求値を満たすために、DR への入射路 (LTR) に Energy Compression System (ECS)、DR からの出射路 (RTL) に Bunch Compression System (BCS)、LINAC 終端にはもう一つの ECS を設置している。この小さなエミッタンスビームを保持したまま、4 nC レベルの電荷量をロスすることなく、LER 入射まで導くことは簡単ではない [3]。

エミッタンス測定は、Fig. 1 の緑色で示した場所に設置されているワイヤスキャナー (WS) で実施している。BT2 以外は 4 本の WS を用いて、ほぼ非破壊でエミッタンスや Twiss parameter を測定する。BT2 は 1 本の WS しかないため、WS 上流の四極電磁石を変更することでエミッタンスを測定している。2019 年の運転中に DR から BT2 までの WS で測定されたエミッタンス値を、Fig. 2 に示す。2019 年 1 月には、水平、垂直、両方向のエミッタンスが目標値から大幅に増大しており、もはや「爆発」と言っても過言ではなかった。しかし、現在の LER 入射点での陽電子電荷量は約 1.2 nC で、本来ウェーク場によるエミッタンス増大はこの爆発を説明できるほど大きくない領域であり、実際 LINAC 内では増大は観測されていない。この原因が解明され、2019 年 10 月には水平方向のエミッタンスが、11 月には垂直方向がほぼフェーズ 3.3 の目標値付近まで小さくすることに成功した。本論文は、これら陽電子入射ビームのエミッタンス抑制について述べる。

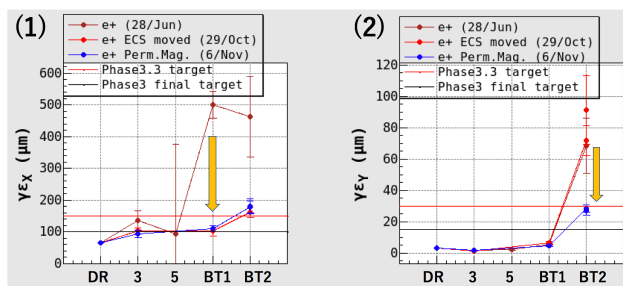


Figure 2: The normalized emittances measured with wire scanners except for the emittances at the DR, which is a design value. The left (1) and right (2) figures show results of horizontal and vertical directions. The red and black line show the required values for the LER in the phase 3.3 and final target, respectively.

2. 水平エミッタンス抑制

Figure 2 に示すように、水平エミッタンス増大は Sector 5 と BT1 との間で起こっている。Figure 1 に示す通り、この間には (1) の ECS が設置されている。この ECS は、6 台の偏向電磁石から成るシケインと、ゼロクロス加速管で構成されている。このシケインから BT1 までの分散 (dispersion) を測定した結果を、Fig. 3 に示す。Figure 3-(a) では、ECS 用加速管での

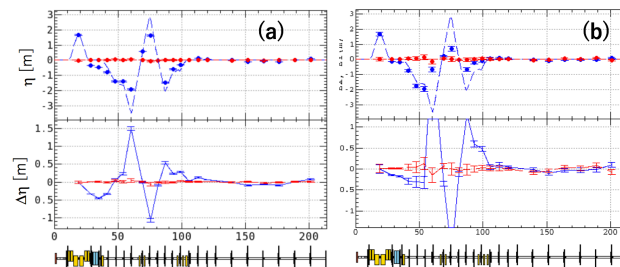


Figure 3: Dispersions measured by changing the beam energy at the Sector-5. The blue and red lines show the horizontal and vertical dispersions, respectively. The upper and lower graphs show the measured dispersion and the difference from the design value, respectively. The left (a) and right (b) figures show the dispersion before and after the improvement, respectively. In the lattice at the lower part of the figures, the yellow and blue rectangles depicts a chicane and an acceleration structures in the ECS.

残留分散の大きさは、約 0.35 m と大きい。しかし、Fig. 4-(a) に示す設計分散は、シケインで閉じていて下流の加速管には分散は存在しない。Figure 4-(b) に示す圧縮システムのようなゼロクロス加速管に分散が存在した場合、 $z-x$ 相関が発生し、パンチ内の先頭と後方の粒子でのエネルギー差が水平方向の軌道差を生じ、水平射影エミッタンスが増大する。この時のエミッタンス増大率は、以下のように表される。

$$\left(\frac{\tilde{\epsilon}}{\epsilon_0}\right)^2 \approx 1 + (\beta\eta'^2 + 2\alpha\eta\eta' + \gamma\eta^2)\sigma_{\delta 0}^2(1 - m^2)/\epsilon_0 \quad (1)$$

ここで、 β 、 α 、 γ は加速管での Twiss parameter、 $\sigma_{\delta 0}$ は ECS 入り口のエネルギー幅、 m はエネルギー幅圧縮率である。 $\eta' = 0$ 、 $\alpha = 0$ として、 $\eta = 0.35 \text{ m}$ 、 $\beta = 26 \text{ m}$ 、 $\sigma_{\delta 0} = 0.008$ 、 $m = 0.125$ 、 $\epsilon_0 = 10 \text{ nm}$ とすると、 $\tilde{\epsilon}/\epsilon_0 = 5.6$ となる。

ではなぜシケインで分散が閉じなかったかの考察を以下に述べる。Figure 5-(a) に示す磁場測定結果から、シケインの偏向電磁石に無視できない多極成分がある事がわかった。この多極成分磁場は、偏向電磁石が C 型磁石で且つ、ギャップが 20mm と狭く磁場が強いために磁場をかけた状態で磁極間距離が縮んでしまったために起こった。Figure 5-(b) に、シケイン偏向電磁石 6 台中 4 台の C 型磁石の磁極部歪みを CST を用いて計算し、その結果から水平方向の積分磁場を計算した結果を示す。ギャップの縮み (Δy) が 0 の設計値では、 $X = 0$ で積分磁場は傾きを持た

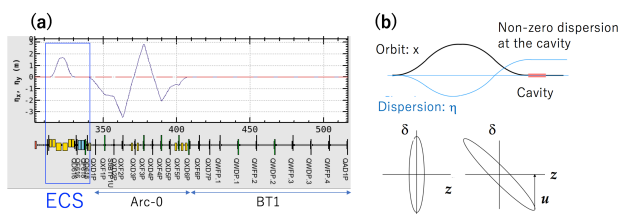


Figure 4: (a) The design dispersion from the ECS to BT1. The blue square region shows the ECS. (b) Horizontal orbit and dispersion which does not close in the chicane. The lower left figure in (b) shows the longitudinal phase space at the upstream of the chicane while lower right is the phase space before the cavity.

ないが、 $\Delta y = 69 \mu\text{m}$ で磁場測定結果をほぼ再現している。水平方向の入射ビームエミッタンスが約 14 倍大きかった KEKB 時代には、シケインで漏れた分散によるエミッタンスは無視できたが、SuperKEKB の入射ビームに対しては要求値を超えてしまった。

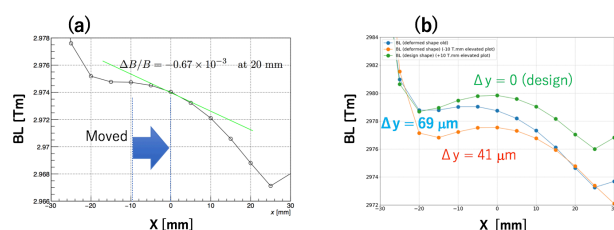


Figure 5: Integrated magnetic field along the horizontal direction in one of the chicane bends. (a) Measured value. The big arrow shows the distance and direction of the moving of the magnet. (b) Field calculation for a case of designed gap of the magnetic poles, as well as the case of $41 \mu\text{m}$ and $69 \mu\text{m}$ narrower gap than the design.

偏向電磁石の水平方向に約 10mm ずれた位置に磁場の多極成分が小さい領域があったため、Fig. 5-(a) の矢印のように磁石のみを移動させて多極成分磁場の影響を小さく抑えた。実際の各磁石の移動量を、Fig. 6 に示す。磁石の移動後に測定した分散、及びエ

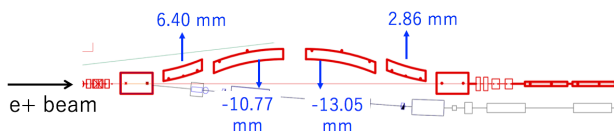


Figure 6: The moved distances of bends in the chicane.

ミッタンスは、Fig. 3-(1)、及び、Fig. 2-(b) に示す通りである。加速管での分散は完全にゼロではなく、平均で約 0.15m は残っている。ここから発生するエミッタンス増大率は、Eq. (1) より約 2.5 倍のはずだが、実際の測定ではほぼ増大は治っている。今後、さらに分散を補正する必要がある。

3. 垂直エミッタンス抑制

垂直エミッタンス増大は、Fig. 2-(2) から分かるように、BT1 と BT2 の間で起こっている。ECS 加速位相を変化させることで BT 全領域の分散を測定した結果を、Fig. 7 に示す。補正前の (a) から、約 300m 付近から設計にはなかった垂直分散が発生していることがわかる。ここは Arc2~3 と呼ばれる場所で、偏向電磁石が多数設置されている。BT の電磁石は

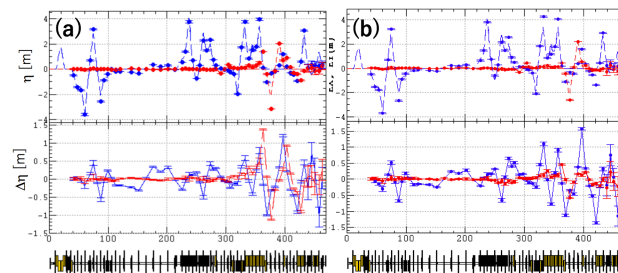


Figure 7: The dispersion measured in the BT. (a) and (b) show the dispersion before and after the correction with skew quads.

全て KEKB 時代から使用されているが、この偏向電磁石は SuperKEKB へのアップグレードで陽電子ビームのエネルギーが 3.5 GeV から 4 GeV 上がった時に、Bend の Gap を狭くすることで磁場を強くした。Figure. 9 に示すように、Gap 上部にのみ板を挟んだためビームに対してコイルは上下非対称となり、端部でのコイルによる磁場に異常なスキュー四極成分が発生したと推測される。Figure 8-(c) を再現

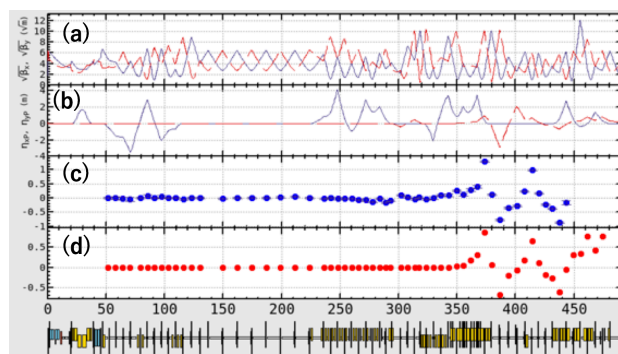


Figure 8: Design optics of the BT, and measured dispersion. (a) and (b) show the beta-function and dispersion of the BT, where the red and blue lines show horizontal and vertical functions. (c) shows measured vertical dispersion. (d) shows the vertical dispersion assuming the bends have skew quad components at the edges.

するように Arc2~3 の偏向電磁石端部にスキュー四極成分を仮定すると、Fig. 8-(d) に示す垂直分散が発生する。この分散は Fig. 8-(c) の形をよく再現している。ここで仮定したスキュー四極成分は、Arc-2 で $B'l=0.0097 \text{ T}$ 、Arc-3 で $B'l=0.0147 \text{ T}$ で、磁場計算から推測されるスキュー四極成分はその約 1/3 である

が、補正を試みた。補正のために永久磁石を用いたス

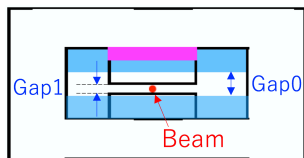


Figure 9: Schematic view of the cross section of bend. The original Gap0(40 mm) is reduced to Gap1(34 mm) by inserting a 6 mm-thick iron plate on the top of the gap.

キュー四極磁石を作成し、Fig. 10 に示すように、Gap を縮めた偏向電磁石の両端に取り付けた。スキュー四極磁石はスペーサーを調整する事により強さを微調整できるようにした。磁場の強さ B_0 、半径 a の円形永久磁石を使って、ポア半径 b のスキュー四極磁石の磁場の強さは、以下のように表される。

$$B'l = 8B_0 \frac{a^3}{(a^2 + b^2)^{3/2}} \quad (2)$$

使った永久磁石は、 $B_0=1$ kG、 $a=15$ mm、 $b=39$ 、 51 、 60 mm の 3 種類である。今回は、計算上 16 箇所を設置すべきスキュー四極磁石のうち、11 箇所に取り付けた。永久磁石設置後に測定された分散を、Fig. 8-(b)

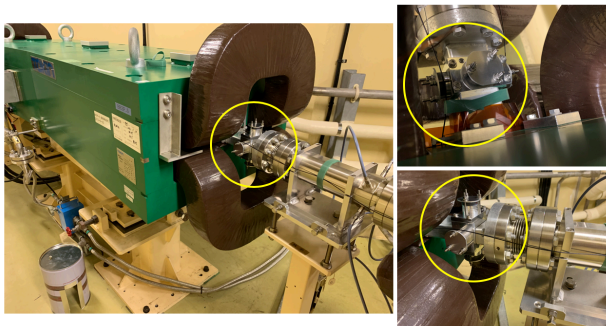


Figure 10: The picture of the skew quad made of permanent magnets installed at the edge of the bend (yellow circles).

に示す。300 m 以降の垂直分散は、補正前に比べて平均的に 1/3 に減っている。また垂直エミッタンスも Fig. 2-(2) に示すように補正前の約 1/3 程度に小さくなり、Phase3.3 の LER からの要求値を満たすようになった。

4. まとめ

SuperKEKB/LER に入射する陽電子ビームにおいて、BT で水平、垂直両方向でそれぞれ別の理由によりエミッタンス増大が起こっていたが、これらを補正し抑制することができた。水平方向では ECS のシケインから加速管に水平分散が漏れたことが原因で、エミッタンス増大が起こっていた。シケイン電磁石の磁場の平坦な場所をビームが通過するように磁石を移動させる事で、エミッタンスを抑制した。垂直方向では、BT の一部の偏向電磁石の Gap を上下非対称に狭くしたために、無視できないスキュー四極成分が原因で垂直分散が発生し、エミッタンス増大を引き起こしていた。永久磁石を用いたスキュー四極磁石を偏向電磁石両端に設置する事で垂直分散を補正し、エミッタンスを約 1/3 に減らした。

今後は、さらなる分散の補正を行いより小さなエミッタンスビームを入射したい。

参考文献

- [1] T. Abe *et al.*, “Achievements of KEKB”, PTEP 2013(2013)03A001; DOI: 10.1093/ptep/pts102
- [2] Y. Ohnishi *et al.*, WESP07 “ナノビーム方式においてクラブ・ウエストの導入を含めた SuperKEKB 加速器の最近の運転状況”, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Japan, Sep. 1-4, 2020.
- [3] N. Iida *et al.*, THYA01 “Beam Dynamics in Positron Injector Systems for the Next Generation B-Factories”, Proceedings of IPAC’11, San Sebastian, Spain, Sep. 4-9, 2011.