

SuperKEKB の陽電子ビーム輸送路におけるエミッタンス増大の調査 INVESTIGATION OF EMITTANCE BLOWUP IN THE POSITRON BEAM TRANSPORT LINE FOR THE SuperKEKB

飯田直子^{*,A)}, 船越義裕^{A)}, 古川和朗^{A)}, 池田仁美^{A)}, 池野孝^{A)}, 石橋拓哉^{A)}, 伊藤史哲^{A)}, 紙谷琢哉^{A)},
小林鉄也^{A)}, 小玉恒太^{A)}, 菊池光男^{A)}, 三浦孝子^{A)}, 宮原房史^{A)}, 森隆志^{A)}, 内藤孝^{A)}, 中澤遊^{B)},
夏井拓也^{A)}, 大西幸喜^{A)}, 生出勝宣^{C)} 佐々木信哉^{A)}, 佐藤政則^{A)}, 清宮裕史^{A)}, 設楽暁^{A)}, 杉本寛^{A)},
杉村仁志^{A)}, 多和田正文^{A)}, 照井真司^{A)}, 植田猛^{A)}, ワン ディ^{A)}, ワン シェンチャン^{A)}, 山口孝明^{A)}, 由元崇^{A)}
Naoko Iida^{*,A)}, Yoshihiro Funakoshi^{A)}, Kazuro Furukawa^{A)}, Hitomi Ikeda^{A)}, Takashi Ikeno^{A)}, Takuya Ishibashi^{A)},
Fumiaki Ito^{A)}, Takuya Kamitani^{A)}, Tetsuya Kobayashi^{A)}, Kota Kodama^{A)}, Mitsuo Kikuchi^{A)}, Takako Miura^{A)},
Fusashi Miyahara^{A)}, Takashi Mori^{A)}, Takashi Naito^{A)}, Yu Nakazawa^{B)}, Takuya Natsui^{A)}, Yuki Yoshi Ohnishi^{A)},
Katsunobu Oide^{C)} Shinya Sasaki^{A)}, Masanori Satoh^{A)}, Yuji Seimiya^{A)}, Satoru Shitara^{A)}, Hiroshi Sugimoto^{A)},
Hitoshi Sugimura^{A)}, Masafumi Tawada^{A)}, Shinji Terui^{A)}, Takeshi Ueda^{A)}, Di Wang^{A)}, Shengchang Wang^{A)},
Takaaki Yamaguchi^{A)}, Takashi Yoshimoto^{A)}

^{A)} Accelerator Laboratory, KEK, Tsukuba, Japan, ^{B)} Institute of Particle and Nuclear Studies, KEK, Tsukuba, Japan,

^{C)} Université de Genève, Geneva, Switzerland

Abstract

The positron beam generated in the middle of the injector (Linac) is injected to SuperKEKB through the damping ring (DR) and the beam transport Line (BT). The measured horizontal and vertical emittances at the end of the BT are $175 \mu\text{m}$ and $25 \mu\text{m}$, respectively. These are much larger than the designed emittances of $65 \mu\text{m}$ and $1 \mu\text{m}$ at the DR. The blowup occurred mainly at the extraction line (RTL) from the DR to the Linac in the horizontal direction and in the BT in the vertical direction. This paper gives a summary of the extensive beam commissioning on the emittance growth in the BT. It was found that the vertical emittance growth was primarily caused by the nonlinear magnetic field of the bending magnets of the third BT arc section. The horizontal emittance growth in the first BT arc section was initially suspected to be due to coherent synchrotron radiation (CSR), the bending magnets and beam ducts were moved vertically to pass the positron beam near the inner duct surface to suppress the CSR shielding effect, although no CSR effect was confirmed.

1. はじめに

SuperKEKB 加速器 [1] (以下、SuperKEKB) は電子陽電子衝突型加速器 (HER: $7 \text{ GeV } e^-$, LER: $4 \text{ GeV } e^+$) で、Belle II 検出器により B 中間子等の精密測定を通して新しい物理現象を発見することを目的としている。SuperKEKB では衝突方式として Nano-beam scheme や Crab waist 方式 [2] を採用することにより、衝突点での垂直方向の β 関数を従来より小さく絞り込むことを目指している。その結果リングの力学口径や、Belle II 検出器のビームバックグラウンドを低減するためのコリメーターの物理口径が狭くなり、ビーム寿命は短く入射はより困難になる。このため入射ビームは電荷量が高くても低エミッタンスである必要がある [3]。現在ピークルミノシティは $4.65 \times 10^{34} / \text{cm}^2 \text{s}$ (2022 年 6 月) であり、次の目標は $1 \times 10^{35} / \text{cm}^2 \text{s}$ である。この目標達成のために必要な入射ビームは、Linac の 1 rf pulse 当たり 2 バンチの入射で、各バンチの電荷量、水平および垂直規格化エミッタンスは、陽電子で 3 nC 以上、 $100 \mu\text{m}$ 、 $15 \mu\text{m}$ 以下、電子では各々 2 nC 以上、 $40 \mu\text{m}$ 、 $40 \mu\text{m}$ 以下である。しかし、2022 年現在の入射率は目標ルミノシティ達成に必要な量の約半分であった [4]。その要因には入射ビームのエミッタンス増大、リングの狭い力学口径、衝突によるビームビーム効果等がある [3]。入

射ビームの電荷量とエミッタンスは Linac 終端ではほぼ目標値に達しているが、その下流の BT で両ビームにおいてエミッタンスが水平、垂直ともに増大しており、低入射効率、Belle-II 測定器への高バックグラウンドの原因の一つとなっている。この論文では、陽電子ビームの主に BT でのエミッタンス増大について 2024 年 1 月までに調査した結果を報告する。

2. 陽電子ビームのエミッタンス増大

陽電子ビームは Fig. 1 に示すように、Linac、BT を経て LER に入射される。BT には大きな水平アーク部が 5 箇所あって、そのどこかでエミッタンス増大が起こっていると考えられた。今回の調査の大きな成果として以下の 2 件が挙げられる。1 つ目は、2022 年に入射効率の電荷量依存性が観測されたことから、BT の第 1 アーク (Arc1) での coherent synchrotron radiation (CSR) による水平エミッタンス増大を疑って調査した。2 つ目は BT の第 3 アーク (Arc3) で大きな X-Y 結合が観測され、これがエミッタンス増大を引き起こしていることが分かった。原因の一つとして偏向電磁石の非線形磁場が考えられる。以下、上記 2 点についての調査結果を報告する。

2.1 入射効率の電荷量依存

Figure 2(a) に示すように、2022 年の運転で LER の入射効率 (入射後 100 ターン目でのバンチ電流値と入射

* naoko.iida@kek.jp

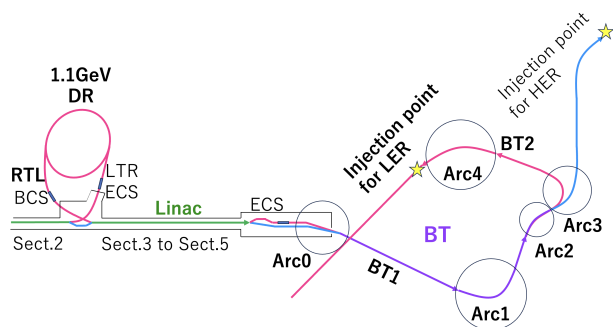


Figure 1: Schematic layout of the positron beam line. After its emittances are damped in the DR, the positron beam passes through a bunch compression system (BCS) in the extraction line from DR to Linac (RTL), Sect.3 to Sect.5 in the Linac, an energy compression system (ECS) at the end of the Linac, and the BT with five arcs.

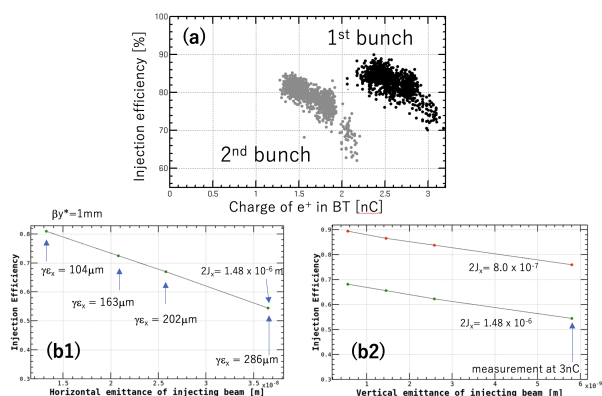


Figure 2: (a) LER injection efficiencies for 1st and 2nd bunches in 2022, and the dependence of the injection efficiency in simulations on horizontal (b1) and vertical (b2) injected beam emittances. J_x is the horizontal action, i.e., $\sqrt{2J_x\beta_x}$ is the maximum amplitude of the horizontal betatron oscillation.

ビームの電荷量より算出) が入射ビームの電荷量依存性を持つことが観測された。また Fig. 2(b1), (b2) に示すシミュレーションによって入射効率が入射ビームのエミッタンスに依存することが分かっている [5]。特に入射効率は水平エミッタンス依存性が高いことから、入射ビームのエミッタンス増大に電荷量依存性があり、これが BT のアーク部での CSR に起因するという仮説が考えられた。一方で、電子の BT では Arc1 において CSR が発生していることがシミュレーションで示されている [6]。また、電子ビームを真空チャンバーの内壁に極端に近づけると鏡像効果により CSR が低減することが分かっている [7]。CSR が電荷量依存の水平エミッタンス増大の原因だと仮定すると、陽電子 BT Arc1 の偏向電磁石の真空チャンバー (垂直口径は ± 16 mm) を鉛直方向にオフセットさせることによって陽電子ビームを内壁に近づけると、測定される水平エミッタンスは小さくなるはずである。しかしビームをチャンバー内壁に近づける場合、resistive wall impedance による垂直

エミッタンス増大が懸念される。これについては理論計算と数値シミュレーションの結果、その効果はチャンパー内壁から約 2mm 以上離れたビームについては無視できるほど小さいことを確認した [8]。このことより、チャンパー内壁の ± 16 mm からチャンパーの均一性を考慮にして 1 mm 余裕を見てオフセット量は 13 mm とした。

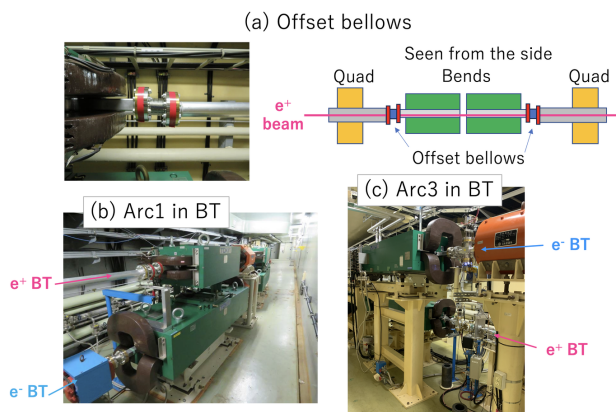


Figure 3: (a): Pictures and schematic drawing of the offset bellows. (b) and (c): Pictures of the BTs in Arc1 and Arc3. In Arc1, the positron BT is above the electron BT, whereas in the Arc3, they are upside down.

SuperKEKB の 2022 年から 2023 年まで 1 年半の long shutdown (LS1) 期間中に、Fig. 3(a) に示すように、陽電子 BT の Arc1 の偏向電磁石およびそのチャンパー 17 台を上方に 13 mm オフセットさせた。このように、本来ビームが通過することを想定しない磁極面近傍では、磁石の端面で水平方向の磁場が存在しビームは垂直方向にキックされることが予想される。そこで Arc1 の偏向電磁石の磁場測定結果を BT のラティスに取り入れて、ビームが偏向電磁石の磁場の様性の良い中心面を通らず磁極面付近を通る場合を想定したシミュレーションを行った。シミュレーションには SAD 計算コードを用いた [9]。実際、Fig. 4 に示すように、チャンパーオフセット直後の軌道 (a)、軌道補正後 (b)、光学補正、分散補正、再起動補正後 (c) は、シミュレーションと実際の Arc1 から発生する垂直分散パターンがよく一致した (シミュレーションの垂直座標軸が BPM と反対であることに注意)。一方、LS1 中に BT のほぼ全てのスクリーンモニターを、1 mm 厚のデマルケストから解像度の良い optical transition radiation (OTR) に交換し、精度の良いエミッタンス測定が可能になった。

Figure 5(a) 右に示すように、Arc1 下流の OTR1 を使い、水平規格化エミッタンスおよび Twiss parameters の mismatches である BMAG を測定した。また Fig. 5(b) に、Arc1 でのロング垂直バンプの高さ (a) および陽電子電荷量を変えた測定結果を示す。Arc1 での水平エミッタンスの電荷量依存性は観測されず、Arc1 内のビームの垂直バンプ高さにも依存しないことが分かった。このことから、陽電子ビームのエミッタンスは BT Arc1 において CSR 効果の影響を受けていないことが改めて明らかとなった。

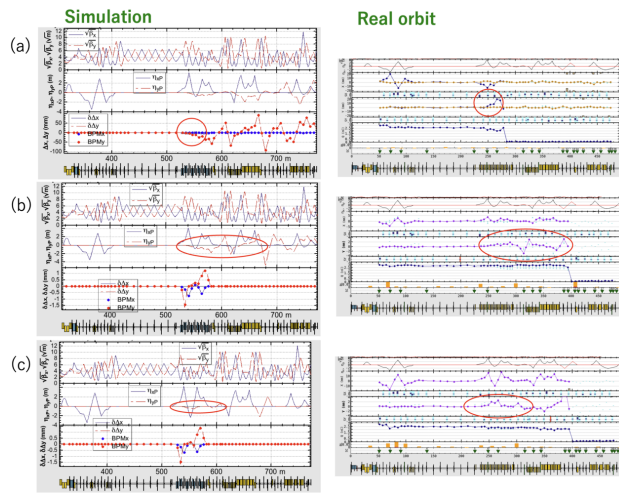


Figure 4: The left and side graphs show orbits in the BT from simulation and real orbits, respectively. The simulation plots show beta functions, dispersion functions, and orbits, from top to bottom, in which the black and red lines show horizontal and vertical, respectively. The real plots show dispersion functions, horizontal orbit, vertical orbit, and bunch charge. From top to bottom, in which the black, yellow, and violet lines show measured orbit, reference orbit, and the difference of them. The vertical coordinate is reversed in the simulation.

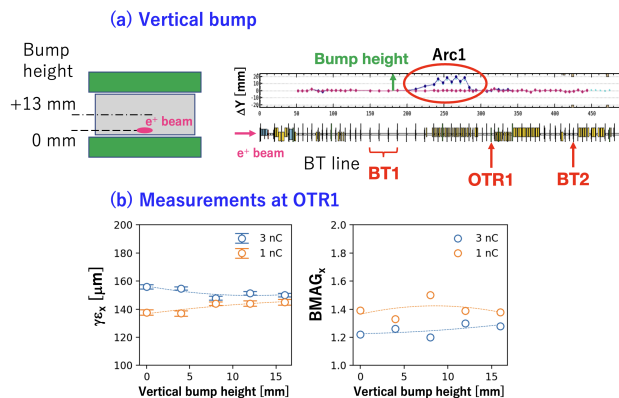


Figure 5: (a) Left: Schematic view of the vertical bump height. A +13 mm height means that the beam passes at the center of the bending magnet. Right: The long vertical bump orbit in Arc1. (b) Measured normalized horizontal emittance and BMAG_x at the OTR1 vs. the vertical bump height with for 1 nC and 3 nC beams.

Figure 6(a) にシミュレーションによる規格化エミッタンスの電荷量依存性を示す。BT1 から BT2 までのエミッタンス増大は水平で約 $106 \mu\text{m}$ から $110 \mu\text{m}$ に、垂直で約 $3.5 \mu\text{m}$ から $4.5 \mu\text{m}$ にと小さい。Figure 6(b1) に BT2 で測定された規格化エミッタンスの、Linac の rf 位相依存性についてプロットした。3 nC での rf 位相の運転値は、BT でのエネルギー広がりを最小 (さらに入射効率や Belle-II のバックグラウンドが最適) になるように決めており、代表値の Sect.3 位相値としては 297° である。ここでの測定エミッタンスは各電荷量でほぼ同

値であり、電荷量依存性がない事はシミュレーションと一致している。しかし、BT2 での測定規格化エミッタンスは、水平で約 $175 \mu\text{m}$ 、垂直で約 $22 \mu\text{m}$ であり、シミュレーションの値より水平で 1.6 倍、垂直で 4.9 倍大きい。この原因については次章で述べる。

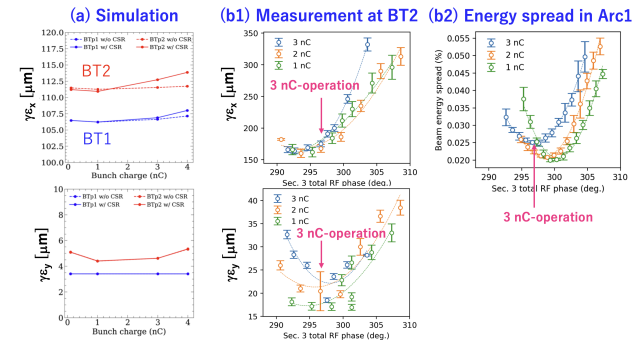


Figure 6: (a) Simulated horizontal (top) and vertical (bottom) normalized emittances. (b1) Measured normalized emittances with OTR at BT2 vs. rf-phase of Sect.3 to Sect.5. (b2) Measured energy spread with OTR in Arc1 vs. rf-phase of Sect.3 to Sect.5. For the 3 nC beam, the nominal emittance is about $29 \mu\text{m}$ where the energy spread becomes its minimum.

LER 入射効率の電荷量依存性の原因については今後要検証であるが、定性的には以下のことが考えられる。入射粒子の電荷量依存性があることから、LER のウェイク場による影響が考えられる。例えば LER の力学口径測定時 (バンチ電流 (I_b) は 0.3 mA) において、蓄積バンチ電流が低い ($I_b = 0.25 \text{ mA}$) と力学口径がより広く測定された [3]。LER の単バンチ電流 0.3 mA は、入射ビームの 3 nC に相当する。これは低バンチ電流では LER でのウェイク場によるエミッタンス増大が小さいためと考えられる。LER のコリメーター [1] は 1 箇所上下を閉めるため、垂直ウェイク場が HER より発生しやすい。2022 年には入射効率の電荷量依存性が強く観測された (Fig. 2(a)) が、2024 年では顕著ではなかった。これは 2024 年運転始めに BT 終端部でオプティクスマッチングを行なったため、入射ビームの有効エミッタンスが小さくなったことが効いた可能性がある。

2.2 BT でのエミッタンス増大

Figure 7 に、ビームラインの測定地点に沿った陽電子ビームの規格化エミッタンスの測定値を示す。水平エミッタンスは主に RTL から Sect.3 の間で増大しており、垂直エミッタンスは Sect.5 から BT1 間、および BT1 から BT2 間で増大が見える。先述のように水平エミッタンスについては BT 内ではほぼ増大していないことが分かった。RTL 後半での水平エミッタンス増大について、RTL 内の BCS 用加速管に DR から分散が漏れている可能性を疑って、DR から出射されるビームエネルギーを変えて分散を測定し、BCS 用加速管での分散が収まるように RTL の四極電磁石の補正を重ねて行ったが、水平エミッタンス増大を抑えることができなかった。今後の課題としたい。

次に垂直エミッタンスの BT1 と BT2 間での増大の原因について述べる。Figure 8 に、BT の Arc2 から Arc3

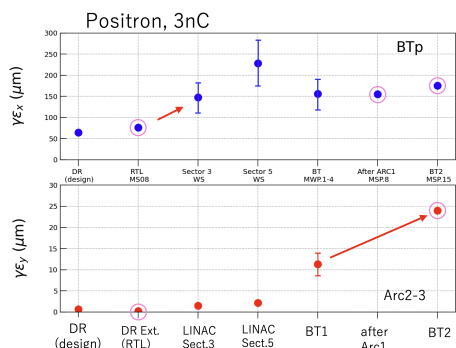


Figure 7: Measured normalized emittances along the beam line. Upper and lower graphs show the horizontal and vertical emittances, respectively. The circles show the measurements with multi-wire scanners. The dots with red circles denote the measurements by the quadrupole-scan with OTRs.

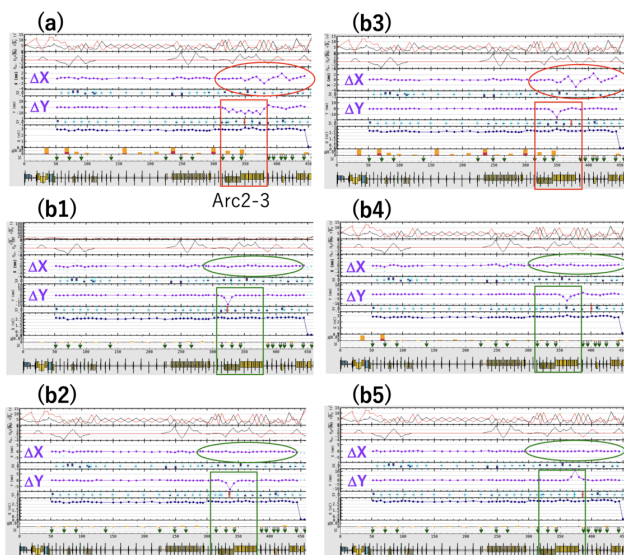


Figure 8: Measured differential orbits with various vertical bumps from Arc2 to Arc3. (a): A long vertical bump in Arc2 to Arc3. (b1) to (b5): Each short vertical bump.

に垂直バンプを立てた時の軌道を示す。(a)では Arc2 から Arc3 まで広範囲にわたって垂直バンプを立てたところ、Arc3 の先頭付近から予期せぬ水平軌道が発生した。そこで (b1) から (b5) に示すように、Arc 内 5 箇所所局所的な垂直バンプを立てた。結果は (b3) の Arc3 入口付近での垂直バンプでのみ、(a) と同様の水平軌道が発生した。また、この水平軌道は垂直バンプ高さに対して 2 次関数的に大きくなることから、この付近に設計にない六極成分が存在することが示唆され、 $k_2 \sim 0.65/m^2$ と見積もられた。

今までの BT のトラッキングシミュレーションでは、偏向電磁石の磁場測定結果は取り入れず、またビームの軌跡と同様に曲がった偏向電磁石に沿った成分として扱ってきた。しかし今回は Fig. 4 に示すシミュレーションで行ったように、Arc1 の偏向電磁石に磁場測定結果を反映させた上で偏向電磁石の磁場は直線に沿っ

たものとして、ビームの軌跡のみ偏向電磁石上で曲がるようにした。そして Arc2、Arc3 でも同様に多重極磁場計算結果を取り入れ、偏向電磁石磁場は直線、ビーム軌道は磁場で曲がった軌跡として扱った。各偏向電磁石台数は、Arc2 が 7 台、Arc3 が 11 台である。

Arc2 と Arc3 の偏向電磁石は以下に述べる 2 点において特殊な形をしている。1 つ目には Arc2 と Arc3 の偏向電磁石は磁石に対して磁極部が上下非対称になっている。これは、これらの偏向電磁石が SuperKEKB の前身である KEKB のものの再利用だからである。3.5 GeV から 4.0 GeV に引き上げられた陽電子のビームエネルギーに対応する磁場を発生させるために、電磁石のギャップを縮めた。電磁石の磁場計算は、40 mm の元ギャップに対して片側の磁極のみ 6 mm の鉄板を挟んだ結果を用いた。2 つ目には Arc3 の偏向電磁石のみ単なる長方形ではなく、2 つの平行四辺形の接合型をしている。Arc3 はスペースが狭いことから、1 台の偏向電磁石の曲げ角度が約 12° と大きく進行方向長さが約 2 m と長い場合、磁場の均一性を確保するのにサジツタを小さくできるからである。さらに、Arc2 と Arc3 には、2019 年に行った歪四極磁石による分散補正が設置されている。歪四極磁石は直径 30 mm、厚さ 8 mm のフェライト永久磁石でできており、測定分散関数の大きな偏向電磁石端 16 箇所に設置されている。歪四極磁石は 2 種類あり、強いものが $k_1 \sim -0.002/m$ 、弱いものが $k_1 \sim -0.001/m$ である。これにより当時、予期せぬ垂直分散関数を最大で 1.4 m から 0.5 m に減らし、BT2 での規格化垂直エミッタンスを $70 \mu m$ から $28 \mu m$ まで抑えることに成功した [10]。このように永久歪四極磁石の効果で偏向電磁石の多重極成分によるエミッタンス増大を一部抑えてはいたが、完全ではなかった。

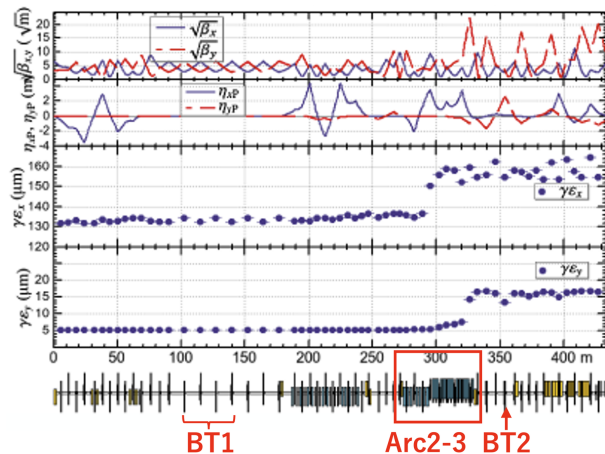


Figure 9: Results of the tracking simulation in the positron BT line. The plots show beta functions, dispersion functions, normalized horizontal emittance, and vertical emittance along the BT line.

上述の、Arc3 先頭の予期せぬ六極磁場成分、Arc2 と Arc3 の偏向電磁石多重極成分、磁石を通過するビーム軌道、そして永久磁石による歪四極磁石全てを反映させたトラッキングシミュレーションの結果を、Fig. 9 に示す。ここで初期エミッタンスには BT1 での測定値を

Table 1: Emittance Measurement and Simulation in BT

	Measured BT1	Measured BT2	Simulation
$\gamma\epsilon_x$ [μm]	130	175 \pm 10	160
$\gamma\epsilon_y$ [μm]	5	20 \pm 1	17

用いた。主に垂直エミッタンス増大の原因は Arc3 下流部 (Fig. 9 の約 320 m 地点) の偏向電磁石の多重極成分であることが明らかとなった。なお、Fig. 8 で述べた Arc3 の先頭の六極磁場成分は水平エミッタンス増大に寄与しているが、約 4.5% と小さいことが分かった。BT1 から BT2 までのエミッタンス測定値とシミュレーション結果の比較を Table 1 に示す。本シミュレーションにより測定されたエミッタンスが水平で 91%、垂直で 85% まで説明された。

3. まとめと今後の課題

2024 年 1 月時点で観測されている SuperKEKB 陽電子入射ビームのエミッタンス増大について調査した。

入射効率が入射ビームの電荷量に依存することから、水平エミッタンスが CSR インピーダンスのためにバンチ電流に依存して増大することを疑った。LS1 中に BT の Arc1 内の偏向電磁石チェンバーをオフセットさせることによって CSR によるエミッタンス増大の抑制を期待したが、水平エミッタンスのバンチ電流依存性自体が観測されなかった。同じく LS1 中に BT のスクリーンモニターを OTR に置き換えたことにより、BT 各所でエミッタンス測定を精密に行うことが可能となった。

BT の Arc2-Arc3 において、偏向電磁石の磁場分布の詳細を用いたシミュレーションを行った。水平エミッタンス増大については、Arc2-3 の偏向電磁石の多重極磁場によって約 18%、Arc3 入口に予期しない六極成分が存在し 4.5% の増大を引き起こしている。垂直エミッタンス増大は、主に Arc3 の中で起こっており偏向電磁石の多重極磁場が主な原因であると考えられる。シミュレーションによる垂直エミッタンス値が測定値の 85% まで一致した。

今後の課題として、水平エミッタンス増大は RTL 下流でも起こっておりこれを解明する必要がある。入射効率の入射ビーム電荷量依存性は、BT でのエミッタンス増大ではなく LER 内に原因があると思われる。LER 内のウェイク場等についても検討すべきである。垂直エミッタンス増大について、Arc3 の偏向電磁石磁場について検討が進められている。

LER の力学口径内に入射ビームが入るように、入射

ビームのエミッタンスを小さくする事はもちろんであるが、LER のリング側の改善が重要である。例えば LER の力学口径を広くする事に関しては改善の余地がある。また、ビームビーム効果により相手ビームのバンチ電流が高くなると、入射効率が大きく下がるという問題が確認されている [3]。これを回避するには入射振動を小さく抑える必要があり、そのための改善案としては、LER の入射点での水平ベータ関数を大きくする事や、シンクロトロン入射等がある。これらにより、入射に必要なリングの口径を小さくできる可能性がある。

謝辞

Linac, BT, SuperKEKB 入射スタディに関わった KEK 職員、三菱運転員のみなさまに感謝します。BT Arc1 の偏向電磁石のチェンバーをオフセットさせていただいた真空グループのみなさまに感謝します。

参考文献

- [1] T. Abe *et al.*, “Technical Design Report of SuperKEKB”, <https://kds.kek.jp/indico/event/15914/>
- [2] P. Raimondi, “Introduction to SuperB-Accelerators”, presented at the 2nd Workshop on SuperB-Factory, Frascati, Italy, Mar. 2006.
- [3] Y. Ohnishi *et al.*, “Recent Status of SuperKEKB Operation after Long-Shutdown (LS1)”, Proc. PASJ2024, Yamagata, Japan, Jul.-Aug. 2024, TFSP02, this meeting.
- [4] N. Iida *et al.*, “Beam Injection Issues at SuperKEKB”, in Proc. IPAC’23, Venice, Italy, May. 7-12, 2023, pp. 832-835. doi:10.18429/JACoW-IPAC2023-MOPL120
- [5] Y. Funakoshi *et al.*, “Beam Injection and Beam Quality in Injector Linac and in beam transport lines at SuperKEKB”, submitted to ICFA-BD Newsletter #85.
- [6] T. Yoshimoto *et al.*, “Incoherent and Coherent Synchrotron Radiation Effects in the SuperKEKB Electron Beam Transport”, in Proc. IPAC’23, Venice, Italy, May. 7-12, 2023, pp. 295-297. doi:10.18429/JACoW-IPAC2023-MOPA107
- [7] T. Mori *et al.*, “Vertical Bump Orbit Study on Emittance of Injection Beam in Transport Line for the SuperKEKB Main Ring”, in Proc. IPAC’23, Venice, Italy, May. 7-12, 2023, pp. 298-300. doi:10.18429/JACoW-IPAC2023-MOPA108
- [8] T. Ishibashi, T. Yoshimoto, D. Zhou, Private communication.
- [9] Strategic Accelerator Design (SAD), <https://hep-project-sad.web.cern.ch/SADHelp/SADHelp.html>, <https://acc-physics.kek.jp/SAD/>
- [10] N Iida, EIC Workshop - Promoting Collaboration on the Electron-Ion Collider, Oct. 7-9, 2020, <https://indico.cern.ch/event/949203/>