

KEK 電子陽電子入射器の陽電子生成の現状と性能評価

CURRENT STATUS AND PERFORMANCE EVALUATION OF THE POSITRON GENERATION OF KEK INJECTOR LINAC

宮原房史^{#, A)}, 榎本嘉範^{A)}, 紙谷琢哉^{A)}, 夏井拓也^{A)}, Chaikovska Iryna^{B)}, Alharthi Fahad^{B)}

Fusashi Miyahara^{#, A)}, Yoshinori Enomoto^{A)}, Takuya Kamitani^{A)}, Takuya Natsui^{A)},

Iryna Chaikovska^{B)}, Fahad Alharthi^{B)}

^{A)} High energy Accelerator Research Organization

^{B)} Laboratory of the Physics of the two Infinities Irène Joliot-Curie

Abstract

The KEK e⁺/e⁻ injector Linac produces positron beam for the Belle II experiment and injects them into the SuperKEKB LER. The positrons generated by irradiating a tungsten target with an electron beam of 2.9 GeV are captured and accelerated by the strong magnetic field of the capture section, forming a positron beam. Report on the details of the positron capture section, the comparison between experiment and simulation, and the method for tuning the positron beam.

1. はじめに

KEK 電子陽電子入射器(入射器)では Belle II 実験のための陽電子ビームを生成し、SuperKEKB LER へ供給している。陽電子ビームは陽電子捕獲セクションに設置されたターゲットへ 2.9 GeV, 9 nC/bunch の電子ビームを照射し、電磁シャワーで生成された陽電子を強力なソレノイド磁場で捕捉しながら加速することで生成する。陽電子ビームは捕獲セクション下流でエネルギー 1.1 GeV まで加速され、ダンピングリングで低エミッタンス化した後、SuperKEKB LER へ入射される。陽電子の収集効率は標的への入射位置や加速位相など様々なパラメータで変化する。陽電子生成部の詳細と実験とシミュレーションの比較、陽電子ビームの調整方法について報告する。

2. 陽電子捕獲セクション

陽電子捕獲セクションのレイアウトを Fig. 1 に示す。標的にエネルギー 2.9 GeV の電子ビームを照射し、電磁シャワーで発生した陽電子をソレノイド磁場で捕捉しながら加速し、陽電子ビームを生成している。陽電子と同時に電子も捕獲、加速されるため、陽電子捕獲セクション下流に設置されたシケイン中央に設置した可動式ビームストッパーで電子ビームを止めている。陽電子ビームは陽電子捕獲セクション下流でさらに 1.1 GeV まで加速され、ダンピングリング[1]で低エミッタンスビームとなる。標的の構造を Fig. 2 に示す。陽電子生成の標的は直径 4 mm、厚さ 14 mm のタングステンで、中心がビーム軸から 3.5 mm オフセットした位置にある。ビーム軸には直径

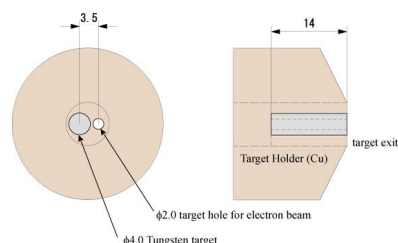


Figure 2: Target geometry

2.0 mm の穴がけられており、SuperKEKB HER、PF ring、PF-AR に供給する電子ビームはこの穴を通過する。陽電子生成時は電荷量 9 nC、エネルギー 2.9 GeV の電子ビームをターゲットに照射する。ターゲットおよび、その直下流に設置されたコーン形状のパルスソレノイド Flux Concentrator (FC) [2]は Bridge Coil (BC) 内部に配置されており、FC 入口では約 4 T の強力なソレノイド磁場を生成している。FC の軸上磁場強度を Fig. 3 に示す。FC、BC とその後続く DC ソレノイド (DCS) は中心をビーム軸に合わせて設置してある。陽電子の収集効率はビーム中心がソレノイド磁場、加速管の中心で最大となるが、標的がオフセットしているため、陽電子ビームは標的中心ではなく、ビーム軸から約 2.5 mm の位置に照射している。入射器にはパルス四極電磁石、パルスステアリング電磁石が複数設置されており、ビームを供給する加速器に合わせてパルス電磁石の強さ、RF 位相などを設定し、下流の加速器に合わせてビーム軌道やエネルギーが調整可能である[3]。

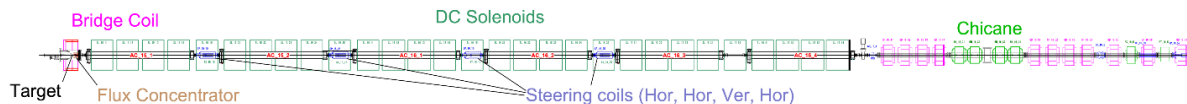


Figure 1: Positron capture section layout.

[#] fusashi.miyahara@kek.jp

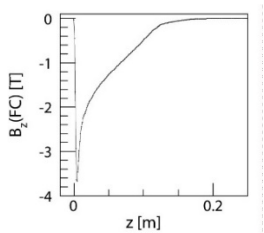


Figure 3: On-axis magnetic field strength of the flux concentrator.

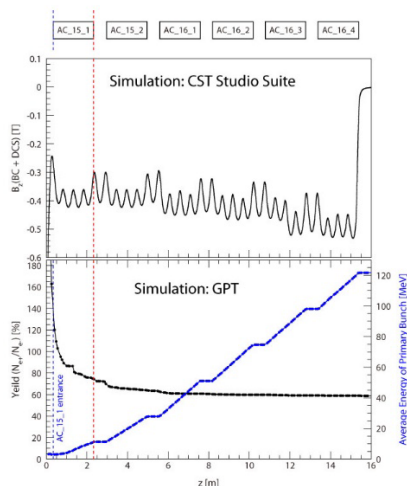


Figure 4: The axial magnetic field of BC and DCS (top), and the positron yield and energy change of the primary bunch (bottom)

陽電子捕獲セクション中の陽電子の運動の理解と陽電子収量の見積りのため、シミュレーションを行った。陽電子の生成は EGS5[4]、ソレノイド磁場は CST STUDIO SUITE[5]、加速管の電磁場は SUPERFISSH、3次元の粒子トラッキングは GPT[6]を用いた。陽電子の収量を増やすため、陽電子捕獲セクションの加速管は大口徑 S バンド加速管を用いている[7]。最初の加速管 (AC_15_1) から最後の加速管 (AC_16_4) までの陽電子の収量 (入射電子に対する陽電子の数の比) とプライマリーバンチ (バンチ先頭が減速位相に乗り、加速管中の速度差でバンチングした最初のバンチ) の平均エネルギーの変化を Fig. 4 下図に示す。ターゲット出口表面で入射電子の約 7 倍の陽電子が生成されるが、FC の $\phi 7.0$ mm のアパーチャーで大部分が失われ、加速管入口で 140% 程度となる。その後、1 台目の加速管で大きなビームロスが続く。1 台目と 2 台目の加速管の間に磁場の落ち込みがあり、ダクト径より加速管のアパーチャーが小さいことから 2 台目の加速管入口でもビームロスが発生する。その後の陽電子の減少は緩やかで、捕獲セクション出口でエネルギーは約 120 MeV、収量は最大で約 60% となる。

陽電子は FC と BC による強力なソレノイド磁場で捕獲された後、螺旋運動をしながら加速管で加速される。捕獲セクション出口での縦方向位相空間分布は 1 台目の加速管の位相で大きく変わる。1 台目の加速管に減速位相、加速位相で入射したそれぞれの場合について、捕

獲セクションの異なる位置ごとの縦方向位相空間分布の様子を Fig. 5 に示す。加速管入口ではバンチの先頭にエネルギーの高い陽電子が集中し、その後に速度の遅い低エネルギーの陽電子が続く (最上段の図)。減速位相に乗せた場合、先頭の陽電子のエネルギーが徐々に減少していき、 $\beta < 1$ に減速した後、位相スリップのため加速位相に乗り、加速されていく。最後の加速管出口の位相空間分布は RF の形を反映したものになっている。また位相空間分布が 3 重構造の見えるが、これは初期のエネルギーが高く、1 本目の加速管中で減速位相から加速位相に位相スリップできず、1 本目または 2 本目の加速管出口で $\beta < 1$ まで減速された陽電子が加速管のギャップで位相スリップを起こして次の加速管で加速される様子を表している。減速位相で捕獲した場合、陽電子のクレスト位相を中心にバンチング出来るため、エネルギー広がり比較的小さい陽電子ビームが得られる。1 本目の加速管に加速位相で乗せた場合は、バンチ先頭付近の $\beta \approx 1$ の陽電子は位相スリップを起こさず、そのまま加速されていく。このため、加速位相で捕獲した場合はエネルギー広がり大きな陽電子ビームとなる。

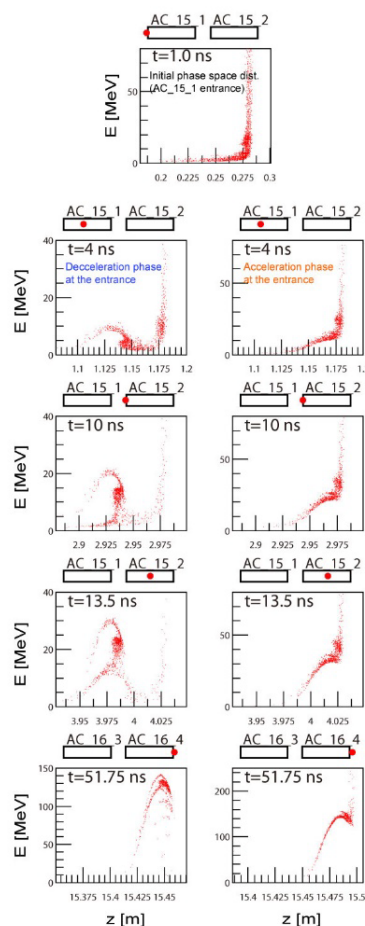


Figure 5: Longitudinal phase space and beam position in the capture section. The left figure corresponds to the deceleration phase capture, while the right figure corresponds to the acceleration phase.

3. 陽電子ビーム調整

3.1 ステアリングコイルの最適化

陽電子捕獲セクションの建設後、捕獲セクション下流で HER 入射用の電子ビームに軌道が発生する問題が発生した。HER 用のビームは低エミッタンスが要求されるが、ビームが加速管中心を通らない場合、ウェイク場によるエミッタンス増大が発生する。軌道発生の原因はソレノイドのホココンの巻き方が原因で発生するダイポール成分と考えられるが、捕獲セクションには軌道補正用のステアリング電磁石が無かった。そこで、2020 年に軌道補正用のステアリングコイル4台 (Fig. 1) を捕獲セクション内部に設置した[8]。ステアリングコイルははじめに捕獲セクション出口の電子ビームに軌道が発生しないように調整した。その後、陽電子の収量が最大となる様に再度調整を行っている。捕獲セクションでは陽電子のエネルギーが数 MeV~120 MeV であるのに対し、電子は~3 GeV であることと加速管のアパーチャーが広い為、この調整の影響は小さい。Figure 6 にステアリングコイルの電流値 (補正後の値に対する比率) と陽電子の収量を示す。減速、加速位相のどちらで捕獲した場合も、ステアリングコイルの電流値が小さくなるにしたがって収量が減少する様子が分かる。

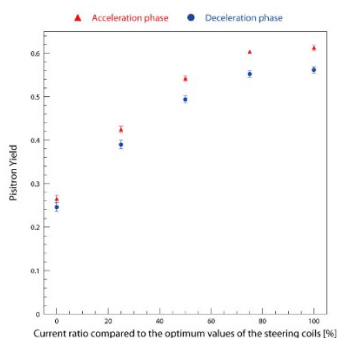


Figure 6: The current value of the steering coil (as a ratio to the optimum value) and the yield of positrons.

3.2 ビーム調整

ビーム調整ははじめにマニュアルによる調整を行った後、ベイズ最適化または滑降シプレックスによる自動調整を行っている。ベイズ最適化のプログラム[9]は Python の GPy, GPyOpt ライブラリ[10]を使用している。滑降シプレックスは主に、長期の位置のドリフト等の補正に用いている。最適化プログラムは汎用な設計であるため、入射器の様々な調整に利用している。Figure 7 に捕獲セクション下流からダンピングリングへのビーム分岐路までのビームロスと束電荷を最小とする調整の例を示す。この例ではパラメータに捕獲セクション下流の9台のステアリング電磁石、四極電磁石、評価関数用に捕獲セクション出口、および入射器2セクターの電荷量がセットされており、評価関数は捕獲セクション出口に対する、2セクターの電荷量に-1 を乗じた値となっている (Fig. 7 左図)。Figure 7 右図はパラメータの変化とともに評価関数が小さくなっていく様子を示している。陽電子ビーム生成では最適化プログラムは標的に照射する電荷量と捕獲セクションでの陽電子生成量の最大化および捕獲セクション下

流の陽電子ビーム透過率の最大化に利用している。陽電子ビーム生成量は上流部の J-ARC でのビームロスの低減、標的への入射位置が重要となる。

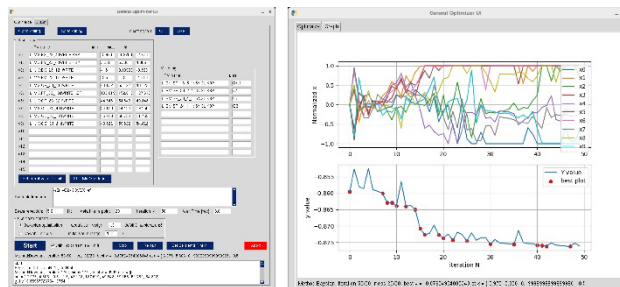


Figure 7: Optimization Program

陽電子捕獲セクション下流にはビームサイズ、エネルギー分散が大きな陽電子ビームの輸送のため多数の電磁石が配置されており、捕獲セクション出口 (Fig. 1: SP_16_5) からダンピングリングへの分岐路までの約 106 m の区間に四極電磁石 106 台、ステアリング電磁石 24 台、パルス四極電磁石 4 台、パルスステアリング電磁石 22 台が設置されている。捕獲セクション出口のビームパラメータは様々な条件で変化し、エネルギー、Twiss パラメータの測定は現実的に不可能で、計算条件も定まらず、マッチングは事実上不可能である。合計 156 台もの電磁石を手動で調整することも非常に困難なため、捕獲セクション下流のビームロスを低減することが難しかったが、最適化プログラムによる調整でこれまでで最高のビーム透過率を実現した (Fig. 8)。

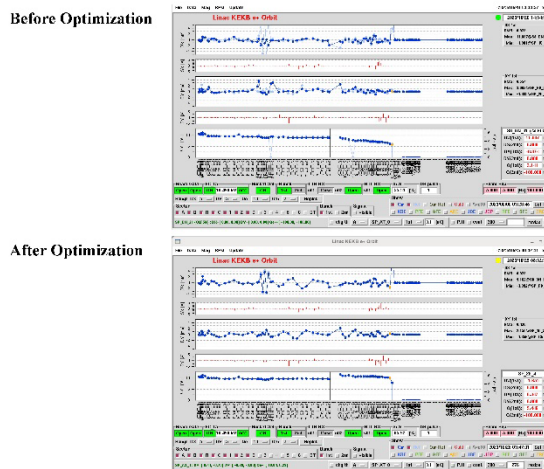


Figure 8: The beam trajectory and bunch charge before applying the optimization program (upper) compared with after applying it (lower). The Qe- at the bottom of the Linac KEKB e+ Orbit panel represents the charge amount along the beamline.

陽電子の捕獲位相と収量の関係を Fig. 9 に示す。実験では位相の絶対値を測定することが困難であるため、シミュレーションに近くなる様に位相のオフセットを調整してある。収量の最適化プログラムが決めた値は 28° 対

応し、減速捕獲のピーク付近に位置していることが分かる。このピークが減速位相であることは実験的にも確認している[11]。シミュレーションの収量のピーク値は実験を良く再現しており、位相依存性もほぼ同様であるため、シミュレーションが陽電子捕獲セクションのビームの運動の理解と装置開発に有効であることが確認できた。しかし、減速、加速位相のどちらも幅や構造に若干の違いが表れている。ターゲットへの入射角度やソレノイド内部の磁場の不均一性、ショットごとのビーム形状の変化などはシミュレーションには取り込まれておらず、加速勾配も入力電力をもとに評価した値のため、誤差をもつ可能性があり、これらがシミュレーションと実験値の違いの原因と考えられる。

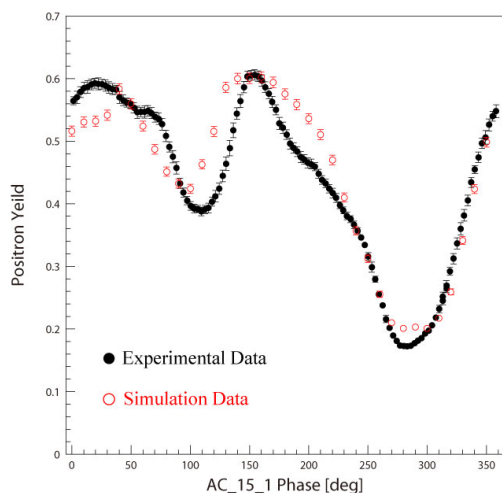


Figure 9: The current value of the steering coil (as a ratio to the optimum value) and the yield of positrons.

4. まとめ

KEK 電子陽電子入射器では陽電子捕獲セクションで SuperKEKB LER に供給するための陽電子ビームを生成している。捕獲セクションは標的にエネルギー2.9 GeV の電子ビームを照射して生成された大量の陽電子を Flux Concentrator、Bridge Coil、DC ソレノイドが作る強力なソレノイド磁場で捕獲し、DC ソレノイド内に設置された 6 台の大口徑 S バンド加速管でエネルギー約 120 MeV まで加速し、陽電子ビームにしている。陽電子は1台目の加速管の減速位相で捕獲し、速度差によるバンチング

でエネルギー広がり比較的小さいビームにしている。陽電子は捕獲セクションの後、エネルギー1.1 GeV まで加速し、ダンピングリングへ入射され、低エミッタンス化される。捕獲セクションからダンピングリングまでは合計 156 台の四極電磁石・ステアリング電磁石があるが、ビームロス無しに輸送することが困難であった。ベイズ最適化を用いた最適化プログラムを開発し、利用することで、陽電子捕獲効率とダンピングリングへのビーム輸送路分岐点までのビーム透過率が大きく向上した。陽電子ビームの位相依存性はシミュレーションと同様であり、シミュレーションが陽電子捕獲セクションの陽電子ビームの運動と装置開発に有効であることが確認できた。

参考文献

- [1] M. Kikuchi *et al.*, "DESIGN OF POSITRON DAMPING RING FOR SuperKEKB", Proc. IPAC'10, Kyoto, Japan, May 2010, pp.1641-1643.
- [2] Y. Enomoto *et al.*, "SuperKEKB 用フラックスコンцентрータの開発", Proc. 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2024), Yamagata, Japan, Aug. 2016, pp.520-523.
- [3] 佐藤 政則, "KEK 電子・陽電子入射器による5リング同時トップアップ入射", Journal of the Particle Accelerator Society of Japan, Vol. 17, No 3, 2020, pp.169-173.
- [4] <https://rcwww.kek.jp/research/egs/egs5.html>
- [5] <https://www.3ds.com/products/simulia/cst-studio-suite>
- [6] <https://www.pulsar.nl/gpt/>
- [7] S. Matsumoto *et al.*, "KEK 電子陽電子入射器の大口徑 S バンド加速管", Proc. 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2014), Aomori, Japan, Aug. 2014, pp. 595-598.
- [8] K. Kakihara *et al.*, "SuperKEKB 入射器における陽電子用 DC ソレノイドの測定と BPM、ステアリングコイル設置", Proc. 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2021), SAT-Takasaki (Online), Japan, Aug. 2021, pp. 890-894.
- [9] T. Natsui, "SuperKEKB positron beam tuning using ML", Proc. International Workshop on Future Linear Colliders (LCWS2024), Tokyo, Japan, Jul, 2024, Manuscript submitted for publication.
- [10] <https://sheffieldml.github.io/GPyOpt/>
- [11] T. Suwada, J.A. Rehman, F. Miyahara, "First simultaneous detection of electron and positron bunches at the positron capture section of the SuperKEKB factory", Sci Rep 11, 12751 (2021).