

ILC 電子駆動型陽電子源の捕獲部におけるビームシミュレーションによる Yield 改善の研究

BEAM SIMULATION STUDIES FOR YIELD IMPROVEMENT IN THE CAPTURE SECTION OF THE ILC ELECTRON-DRIVEN POSITRON SOURCE

福田将史^{#, A)}, 榎本嘉範^{A)}, 森川祐^{A)}, 佐藤幹^{A)}

Masafumi Fukuda^{#, A)}, Yoshinori Enomoto^{A)}, Yu Morikawa^{A)}, Motoki Sato^{A)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization: KEK

Abstract

The positron source for the International Linear Collider (ILC) requires the generation and acceleration of high-current multi-bunch positron beams. The beam loading effects in the positron capture linac are complex due to the simultaneous acceleration of both electrons and positrons, beam losses, and the unique acceleration sequence in which positrons transition from a decelerating phase to an accelerating phase. In this study, we conducted a beam tracking simulation of the positron generation section and the first four accelerating cavities of the capture linac, based on the design of the ILC positron source test bench in the KEK-STF. We used the PIC solver in CST Studio to evaluate the beam loading effects in this complex environment. Our simulation results show that the positron capture yield is low with the current design, primarily because of beam losses caused by the transverse kicks from the flux concentrator. We demonstrated that increasing the solenoid magnetic field near the collimator can improve the transmission rate. Furthermore, our multi-bunch simulations confirmed that beam loading leads to a decrease in energy and an increase in bunch length for later bunches, as well as a shift in bunch spacing. While adjusting the amplitude of the RF accelerating field can correct the energy decrease and bunch length increase, it does not resolve the bunch spacing shift, suggesting that a separate correction method is needed. This paper reports on our findings regarding methods to improve the positron capture yield and to correct for beam loading, based on these simulation results.

1. はじめに

国際リニアコライダー (ILC) [1]は、重心系エネルギー 250 GeV の電子・陽電子衝突型線形加速器の計画である。この ILC の電子駆動型の陽電子源において、3 GeV の電子ビームをタングステンターゲットに照射し、電磁シャワーにより陽電子を生成する。それらをフラックスコンセントレータ (FC) のパルスソレノイド磁場で収束しながら加速空洞へ導き、DCソレノイド磁場中に設置された陽電子捕獲ライナックで加速する。その後、シケインで電子を分離し、陽電子ビームのみをブースターライナックで 5 GeV まで加速し、ダンピングリングへ蓄積する。これらのレイアウト [1] を Fig. 1 に示す。

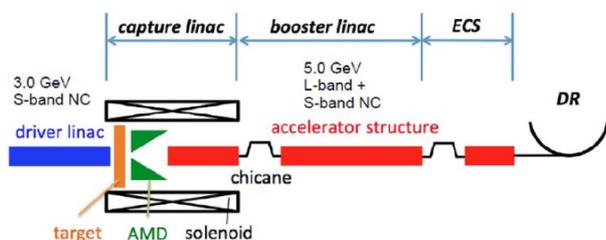


Figure 1: Beamline layout of ILC E-driven positron source [1].

ダンピングリングへ入射するまでは、Fig. 2 にあるような 33 バンチのトレイン2つをもつマルチバンチビーム [2] を 1 つの RF パルスで加速する。リングから取り出すときに、

[#] mfukuda@post.kek.jp

主線形加速器で加速する 1300 バンチのトレインにして、125 GeV まで加速する。

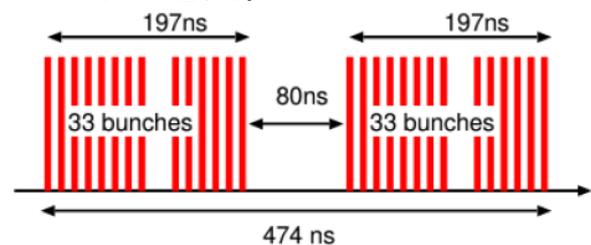


Figure 2: Multi-bunch structure of the ILC E-driven positron source [2], with two trains of 33 bunches each.

ILC では 3.2 nC のバンチ電荷が要求されるため、途中でのロスも考慮すると、陽電子捕獲ライナックではそれ以上のバンチ電荷となり、大電流のマルチバンチビームを生成、加速する必要がある。

このため陽電子源において、陽電子捕獲率の向上およびビームローディング補正は重要な課題となる。特に捕獲ライナックでのビームローディングの影響については、以下の状況により複雑となる。

- 電子と陽電子を同時に加速する。
- 陽電子は最初減速位相に載せられ、その後加速位相へ移動する。
- 加速中のビームロスにより、ビーム電流が減少する。

これらの状況を考慮したビームローディングの影響や補正方法の検討をするため、CST Studio [3] の PIC solver を用い、陽電子生成部および陽電子捕獲ライナックのシミュレーションを開始した [4]。これまでに陽電子源のビー

ムトラッキングやビームローディングについてのシミュレーションが行われている[5,6]が、今回のビームシミュレーションでは、より実際に即した装置を仮定し、この複雑な状況でのビームローディングの影響を考慮した陽電子ビームの詳細な振る舞いを調べる。

本稿では、このビームシミュレーションによる陽電子捕獲率やビームローディング補正について検討結果を報告する。

2. ビームシミュレーション

2.1 シミュレーションの入力条件

シミュレーションへ入力した陽電子生成部および陽電子捕獲ライナックのジオメトリおよび電界や磁界のデータは、KEK の超伝導リニアック試験施設 (STF) に設けた陽電子テストベンチ[7](Fig. 3)のデザインを元としている。陽電子生成部は複雑なシステムであり、実際の装置として考えると、製造上の問題やスペースの取り合いなどで理想的な加速電界や磁界、装置の配置にはならない。そこで、これらによる問題を洗い出すため、この一番複雑な部分のプロトタイプ的设计、製造を行っている。また、これを元にする事で、より実際に即したシミュレーションを行うことができる。

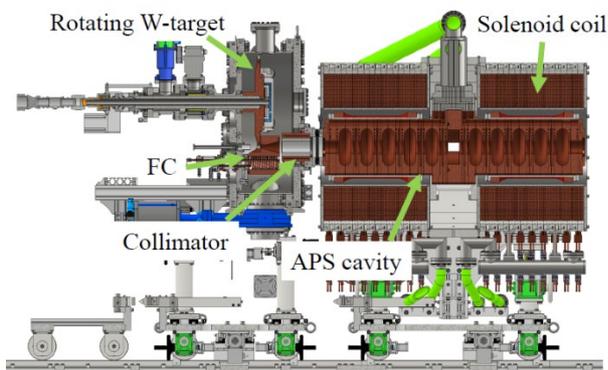


Figure 3: The cut view of the prototype of the positron generation part for ILC E-driven source at the KEK-STF.

Figure 3 は、このテストベンチの 3D モデルであり、陽電子生成のためのタングステン回転ターゲット、ピーク磁界強度 5.2 T の FC、1.3 m の 1.3GHz L-band Alternating Periodic Structure (APS) の加速空洞[8]、および、その周りを覆う最大 0.6 T の DC ソレノイドコイルから成る。これらの電界や磁界も CST Studio を用いて計算され、その 3D マップデータをシミュレーションへ取り込んでいる。そのため、構造などからくる電磁界の非対称性によるビームへの影響も含めて計算できる。Figure 4 に、これらのビーム軸(z 軸)上の加速電界(E_z)やソレノイド磁界(B_z)の強度分布を示す。

各コンポーネントの配置やアパーチャーは、Fig. 5 のようになっている。FC は、長さ 100 mm、内径は入口が 13 mmφ で出口が 64 mmφ、その後ろのコリメータは、長さ 150 mm、内径 60 mmφ となっている。APS 加速空洞は $\pi/2$ モードの定在波管で、加速セル 11 個、結合セル 10 個の合計 21 セルで構成されている。長さ 1.3 m、アイリスや両側のパイプ部の内径は 70 mmφ となっている。中央の加速セルがカブラーセルになっていて、RF を入力

するための穴が 1 か所開いている。

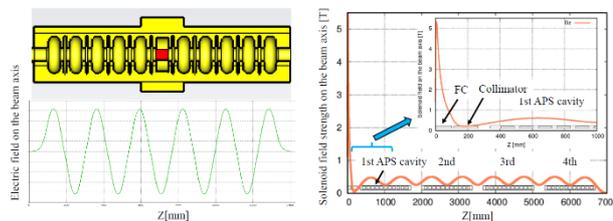


Figure 4: Accelerating field profile and solenoid magnetic field strength along the beam axis(z-axis).

ビームトラッキングはターゲット直後から、陽電子捕獲ライナックの 4 本目の APS 加速空洞までで行っている。捕獲ライナックの加速管の総本数は 36 本だが、今回のシミュレーションでは、PC の計算パワーやメモリの関係で、そのうち前半の 4 本目までを計算している。

ターゲットでの粒子生成は Geant4[9]を用いて行い、ターゲットに 3 GeV の電子を 10,000 個入射したときに生成された電子と陽電子のデータを入力している。

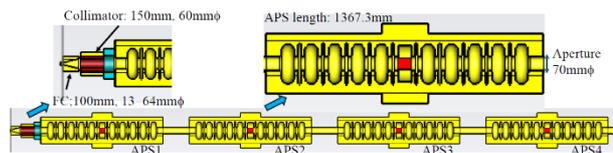


Figure 5: Input geometry for the simulation.

2.2 シングルバンチシミュレーション

ビーム輸送効率やバンチ長は、主に加速空洞の RF 位相や加速電界で決まるため、位相を調整した。

4 本の APS 加速空洞の RF 位相の値は、同じ値なら 4 本とも同じ RF 位相にビームが載るように合わせている。すなわち、4 本の空洞全てを同じ値に位相をセットした時に 1 本目の加速空洞がオンcrestなら、他の加速空洞もオンcrestとなる。

位相などのパラメータ調整には、バンチ電荷は無視できるほど小さくし、またシングルバンチで行った。空間電荷効果やビームローディングの影響を取り除き、できる限りパラメータの変化による違いだけがみえるようにするためである。

位相調整では、ビームライン出口での陽電子数だけでなく、バンチ長が短いことも重要である。これまでの陽電子捕獲シミュレーションの結果から、ダンピングリングに捕獲される陽電子の多くは、陽電子捕獲リニアック出口における Longitudinal 分布においてバンチの中心の ± 7 mm 以内にいるためである。バンチ長が短いほど、この範囲に入る陽電子、つまりダンピングリングへ捕獲できる陽電子が増える。

最初は、4 本の APS 加速空洞の RF 位相を全て同じ値でスキャンし、4 本目の APS 加速空洞出口での陽電子数とバンチ長の変化を調べた。加速電界 E_{acc} 6 MV/m、12 MV/m の場合における位相スキャンの結果が、Fig. 6 である。陽電子数は 0 deg 付近が最大となっているが、バンチ長が短いところは 20-30 deg 付近となっており、両者は一致しないことがわかる。位相調整では陽電子数ではなく、ダンピングリングの入射効率を考慮してバンチ長が最小の位相を選ぶ。また、加速電界が高いほうがより

バンチ長が短く高い電界のほうが良いことが分かる。

次に1本目の加速空洞と2本目以降の加速空洞の位相を別々に変化させ、よりバンチ長が短くなる位相を探した。加速電界 E_{acc} : 12 MV/m の時の結果が Fig. 7 である。一番バンチ長が短かったのは、1本目の位相が 50 deg、2本目以降が 30 deg の時で、10.2 mm と4つ位相を同時に振った時の 12.1 mm よりも短いものが得られている。6.0 MV/m や 7.8 MV/m の時も同様スキャンして探すと、最適な位相は Table 1 のようになる。電界によってこの位相は少し違い、ここでも電界が高いほど短いバンチ長が得られている。

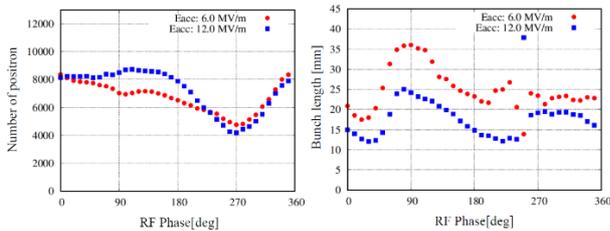


Figure 6: Positron number and bunch length versus RF phase at the exit of the 4th APS.

Table 1: Optimal Phase

E_{acc} [MV/m]	APS1 phase [deg]	APS2-4 phase [deg]	Bunch length [mm]
6.0	70.0	20.0	11.3
7.8	70.0	30.0	10.8
12.0	50.0	30.0	10.2

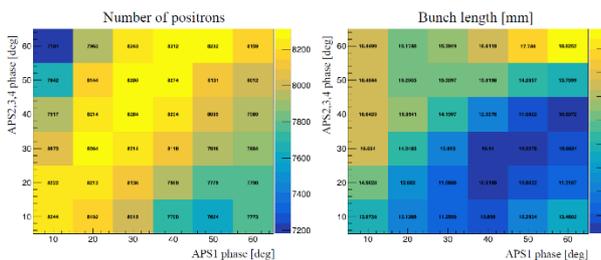


Figure 7: 2D plots showing the positron number and bunch length for different RF phase settings of the first APS cavity and the subsequent 2nd to 4th cavities.

Figure 8 は、加速電界 E_{acc} : 12 MV/m、1本目と2本目以降の位相がそれぞれ 50 deg、30 deg の時の分布である。上段は縦軸がエネルギー、横軸がビーム進行方向 (z 方向) の位置のグラフ、下段は z 位置分布で上流から3か所での分布を示している。また、バンチの先頭はグラフの右側であり、電子(青)と陽電子(赤)の分布を重ねて表示している。

最初、陽電子は減速位相(電子は加速位相)に乗っており(Fig. 8(左))、陽電子のエネルギーが減少し光速より遅くなって後方の加速位相へ流れていく(Fig. 8(中央))。その後、加速位相の途中のスロープ部分に再び集まり短いバンチを形成している(Fig. 8(右))。これが減速位相

キャプチャー[10]と呼ばれる方法で、最初から加速位相に載せるより短いバンチ長の陽電子が得られる。Figure 9 の右のグラフはビームトラッキング中の陽電子のエネルギーの変化であり、一旦減速してから再び加速しているのが分かる。ただし、この方法はエネルギー広がりが多いので、ある程度加速して位相の移動が止まった後は、オンcrest付近に位相を調整するほうが良い。また、電子は加速位相だが、低エネルギーの電子の一部が次のバケットに逃げてしまっている。

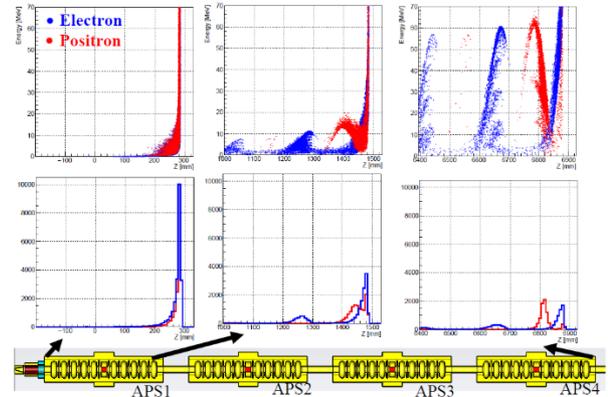


Figure 8: Energy vs. longitudinal position (upper) and longitudinal position distribution (lower) for both electrons and positrons at each location.

Figure 9 の左のグラフはビームトラッキング中の陽電子数の変化であり、FC やコリメータ付近で大きく減少している。このロス、FC での X および Y 成分磁場によるキックに起因している。この磁場成分は、FC にあるスリットが原因である。また、FC と DC ソレノイドコイルの間で、磁場が 0.2 T と弱くなっていることもロスの要因の一つである。Figure 10(左)は、この横キックによりビームの一部がコリメータに衝突している様子を示している。

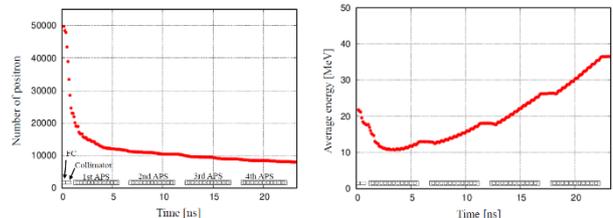


Figure 9: Positron number and energy evolution along the beamline.

その後、加速空洞の部分でも徐々に減少している。加速空洞部でのロスは、階段状になっており、ソレノイドコイルの間の磁場が弱くなる部分でロスが起きている。Figure 11 は、陽電子のビーム位置とサイズの変化で、ソレノイド磁場の強弱で位置やサイズが振動しているのが分かる。また、FC によるキックにより、コリメータ付近で大きく蹴られており、さらに加速空洞でも位置に数 mm のオフセットができています。位置のずれやサイズが拡大するタイミングで、ビームロスが起きていると考えられる。

4本目の加速空洞出口での陽電子数は約 8000 個となり、ターゲットに入射した電子数に対する捕獲できた陽電子数の割合を表す Yield は、0.8 となる。このうち、ダン

ピングリングへ捕獲されると予想される、進行方向の分布でピークの±7 mm 以内の陽電子は約半分となる。これでは不十分なので、パラメータの最適化や装置デザインの改良が必要となる。

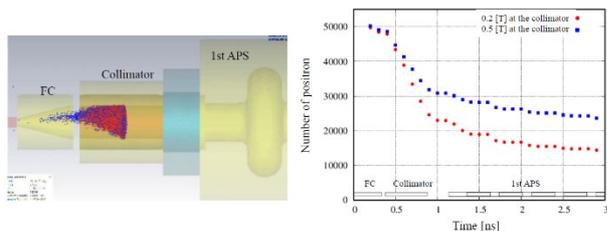


Figure 10: Left: Illustration of beam-collimator interaction. Right: Change in positron number with z position near the collimator.

例えば、コリメータ付近のソレノイド磁場を 0.2 T から 0.5 T に上げることで、コリメータでのロスを減らし、通ってくる陽電子数を約 1.4 倍にできる。Figure 10(右)は、この 0.2 T と 0.5 T の時のコリメータ付近の陽電子数の変化を示している。

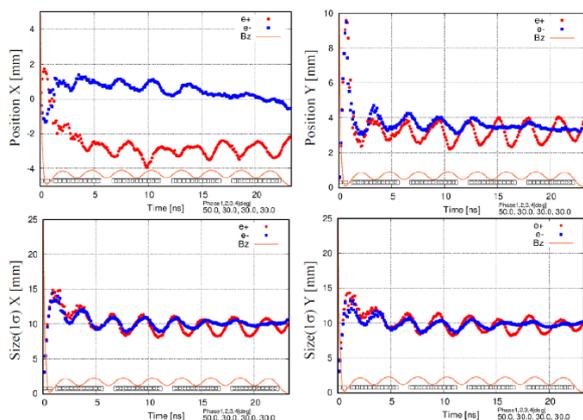


Figure 11: Beam position (x, y) and size (σ_x , σ_y) along the beamline.

2.3 マルチバンチシミュレーション

ビームローディングの影響を調べるため、Fig. 1 のバンチ構造をもつ電子および陽電子のマルチバンチビームを、加速電界が時間変化しない一定の状態、つまり RF が満たされた定常状態を仮定してトラッキングした。この時の 1 本目と 2 本目以降の加速空洞の RF 位相は、その加速電界の時にバンチ長が最小となる位相で、 E_{acc} : 7.8 MV/m の時は、それぞれ 70 deg と 30 deg、12 MV/m の時は、50 deg と 30 deg に合わせた。また、バンチ電荷は 15 nC としている。これはダンピングリングへ入射できるバンチ電荷が 3.2 nC を超えるように選択した。ただし、Yield が改善していけば、15 nC からバンチ電荷を下げるできるので、今回の計算は上限値での影響を見ることになる。

次に、ビームローディングの影響で下がったエネルギーを補正するために、マルチバンチの長さである 474 ns の間で RF による加速電界を 7.8 MV/m から 12.0 MV/m まで直線的に増加する場合を計算した。

Figure 12 は、電子と陽電子を同時に 4 本目の加速空

洞まで加速したときの、各バンチのエネルギーとバンチ長である。

加速電界が一定の場合には、エネルギーは後方のバンチほど低下している。ただし、トレインの間のバンチがないところでは Wake field が新たに生じず時間とともに減少するため、2 番目のトレインは一旦少しだけエネルギーが回復している。このトレイン間では入力 RF パワーを一時的に下げるなどの対応が必要となる。

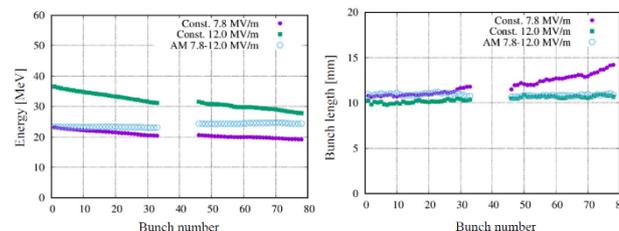


Figure 12: Energy and bunch length for each bunch in the multi-bunch train at the 4th APS exit.

また、加速電界が一定の場合、バンチ長も後方バンチほど増大してしまうのが分かる。陽電子は減速位相から加速位相へ移動するが、電子や陽電子の Wake field により後方バンチほど、減速のためや再加速のための電界が下がる。シングルバンチシミュレーションで見たように電界が高いとバンチ長が短くなるため、電界が下がる後方バンチの長さは増大したと考えられる。実際に、加速電界が 7.8 MV/m の時と 12 MV/m の時を比較すると電界が高いほうがビームローディングによるバンチ長への影響が少なくなる。

RF による加速電界を後方バンチほど高くしてビームローディング補正をした場合は、各バンチのエネルギーは揃い、さらに、バンチ長の増大も抑制できている。ただし、2 番目のトレイン全体が若干高めになっているのは、先に説明したようにトレイン間で Wake field が若干減少しているためである。この間の RF による加速電界を少し下げて調整することで、ビームローディングによる影響の補正はできると考えられる。

陽電子だけでなく電子も同時に加速していることで、ビームローディングの影響は、より大きくなっている。Figure 13 は、電子と陽電子を同時に加速した時と陽電子のみを 4 本目の加速空洞まで加速したときの各バンチのエネルギーのグラフである。陽電子のみの方が後方バンチのエネルギー低下は小さく、電子が作る Wake field も陽電子の加速電界を下げるように影響しているのが分かる。これは電子も陽電子も加速位相に載るため、互いの作る Wake field が強め合う方向に重なるためである。

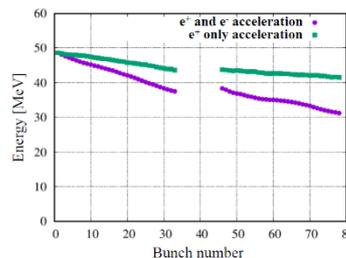


Figure 13: Comparison of positron bunch energy with and without electron acceleration at the 4th APS exit.

Figure 14 は、陽電子バンチが最初に載った位相からの位相の移動量を各バンチについてプロットしたものである。陽電子は始め減速位相に載るが、そこを 0 deg として、加速位相へ向かってどのくらい位相が移動したかを表しており、各バンチとも 120-130 deg ほど動いている。

各バンチの移動量には差があり、先頭バンチより後方バンチの移動量が少なくなっていて、最大 5 deg 程度ずれている。このずれは RF による加速電界の振幅変調でビームローディング補正をしても、ほとんど変化がなく補正できない。このずれは、バンチ間隔のずれを意味しており、5 deg で約 3 mm(約 10 ps)のずれとなる。

この位相ずれは、ダンピングリングへ入射効率に影響を与える可能性があるほか、途中の加速でエネルギー差をつくる原因にもなる。例えば、陽電子捕獲ライナックの後にシケインがあるので、パルスマグネットを使い各バンチのキック量を変えることで、シケインを通過時の通過離を調整してバンチ間隔を補正する、などの対応が必要になると考えられる。

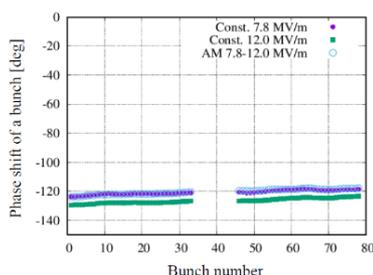


Figure 14: Phase shift of positron bunches as a function of bunch number at the 4th APS exit.

4 本目の加速空洞出口まで通って来た陽電子の各バンチの電荷は、Fig. 15 のようになっており、ビームローディング補正前も後もバンチ間のバンチ電荷の差はほとんどなく、約 13 nC/bunch となっている。ただし、補正前は Fig. 12 にあるようにバンチ長が後方バンチほど長くなっているため、ダンピングリングへ入射されると予想される陽電子は後方バンチほど減少すると推測される。先に述べたように、Longitudinal 方向の分布でバンチ中心の ± 7 mm 以内にいるものが捕獲されるためである。補正後は、バンチ間のバンチ長に差は無いのでダンピングリングへ捕獲される陽電子数も差は無くなるはずである。また、リングへ捕獲される予想電荷量はこの計算の場合で 5 nC/bunch 程度となった。これは要求量よりは多いので、もう少しバンチ電荷を下げることは可能であり、その分、ビームローディングによる影響も減らすことができる。

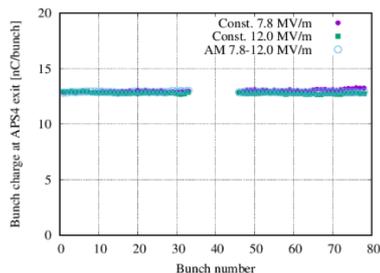


Figure 15: The charge of each positron bunch as a function of bunch number at the 4th APS exit.

3. まとめ

ILC では大電流の陽電子ビームが要求される。ただ、陽電子源の捕獲ライナックにおいては、電子と陽電子を同時に加速する、陽電子は減速位相から加速位相まで移動する、ビームロスで電流が変化するなどがあり、ビームローディングの影響は複雑となる。そこで、この影響を調査するため、陽電子源の陽電子生成部から陽電子捕獲ライナックの加速空洞 4 本目までのビームトラッキングを行った。その際に、KEK-STF にある陽電子源テストベンチの装置の配置やシミュレーションで得られた電界や磁界を取り込み、できるだけ実際に即した形で、陽電子の Yield やビームローディングの影響を調べた。

この結果、4 本目の加速空洞で Yield は 0.8、ダンピングリングへ入射できると予想される陽電子の Yield は 0.4 と低い。FC による横方向のキックに起因するビームロスが主な原因の一つである。例えば、コリメータ部の磁場を 0.5T まで上げるとコリメータの透過率は 1.4 倍となり Yield 改善が期待できる。今後は Yield 低下の原因調査や、改善策の検討を続けて Yield 改善を目指す。また、これらの結果は次の装置デザインの改善策を考える上でも有用となる。

マルチバンチビームでのビームローディングの影響については、後方バンチのエネルギー低下だけでなく、バンチ長の増大およびバンチ間隔の変化が見られる。RF による加速電界を後方ほど高くするようなローディング補正を行うことで、エネルギー低下およびバンチ長増大については補正が可能であると考えられる。ただし、バンチ間隔のずれは補正できなかった。ローディング補正とは別に方策を考える必要があると考えられる。

今後は、Yield 改善のため、ソレノイド磁場のデザイン、電界や磁場、コンポーネントの配置などの最適化を行い、装置設計の改良のための指針を検討していく。また、今回は 4 本目の加速空洞までの計算だったが、本来の捕獲リニアックの加速空洞の本数である 36 本まで拡張して計算することも検討している。

陽電子ビームは ILC だけでなく、他の次世代の電子陽電子コライダーでも必要となる。今回得られた知見は、それらのコライダーの陽電子源のデザインにも有用であると期待される。

謝辞

本研究は、文部科学省「将来加速器の性能向上に向けた重要要素技術開発」事業 JPMXP1423812204 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] ILC Technical Design Report, <https://linearcollider.org/technical-design-report/>
- [2] Report on the ILC Positron Source, PUBDB-2019-00651, 2018.
- [3] CST Studio Suite, <https://www.3ds.com/ja/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>
- [4] M. Fukuda *et al.*, “Beam tracking simulation of the capture linac for the ILC E-driven positron source”, Proc. of IPAC’25, Taipei, Taiwan, Jun. 2025, pp. 453-455.

PASJ2025 WEP047

- [5] M. Kuriki *et al.*, “A design of ILC E-Driven positron source”, Proc. of IPAC’22, Bangkok, Thailand, Jun. 2022, pp. 1889-1892.
- [6] M. Kuriki *et al.*, “Beam loading compensation of standing wave linac with off-crest acceleration”, Proc. of IPAC’22, Bangkok, Thailand, Jun. 2022, pp. 1893-1896.
- [7] Y. Enomoto *et al.*, “Status of positron source development in KEK iCASA”, PASJ2025, Tokyo, Japan, Aug. 2025, FRP045, this meeting.
- [8] M. Fukuda *et al.*, “Design and fabrication study of L-band alternating periodic structure(APS) cavity for the ILC positron capture linac”, PASJ2024, Yamagata, Japan, Jul.-Aug. 2024, THP038, pp. 662-667.
- [9] S. Agosinelli *et al.*, “GEANT4 - a simulation toolkit”, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, vol. 506, Issue. 3, pp. 250-303, 2003.
- [10] SLAC Blue Book, pp 581-582,
<https://ahro.slac.stanford.edu/resources/slac-blue-book>