

# ILC 電子ドライブ陽電子源の機械学習による全体最適化 A START-TO-END OPTIMIZATION OF THE ILC E-DRIVEN POSITRON SOURCE BY MACHINE LEARNING

佐々木 遥大 <sup>\*,A)</sup>, 栗木 雅夫 <sup>A)</sup>, 高橋 徹 <sup>A)</sup>, Zachary Liptak <sup>A)</sup>, 浦川 順治 <sup>B)</sup>,  
榎本 嘉範 <sup>C)</sup>, 大森 恒彦 <sup>C)</sup>, 福田 将史 <sup>C)</sup>, 森川 祐 <sup>C)</sup>, 横谷 馨 <sup>C)</sup>

Yodai Sasaki <sup>\*,A)</sup>, Masao Kuriki <sup>A)</sup>, Tohru Takahashi <sup>A)</sup>, Zachary Liptak <sup>A)</sup>, Junji Urakawa <sup>B)</sup>,  
Yoshinori Enomoto <sup>C)</sup>, Tsunehiko Omori <sup>C)</sup>, Masafumi Fukuda <sup>C)</sup>, Yu Morikawa <sup>C)</sup>, Kaoru Yokoya <sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> Graduate School of Advanced Science and Engineering, Hiroshima University

<sup>B)</sup> Japan Society for the Promotion of Science

<sup>C)</sup> High Energy Accelerator Research Organization

## Abstract

The International Linear Collider (ILC) is a next-generation electron-positron collider based on the superconducting linear accelerator. Many positrons are required for the ILC because beams are not reused in linear colliders. Efficient positron generation is the key to avoiding damage to the positron-production target. The ILC electron-driven (E-driven) positron source system had been designed to optimize the accelerator parameters including the booster linac RF phase, ECS RF phase and amplitude, optics over the system, etc. by the black-box optimizer with the TPE algorithm. In this study, We evaluated the number of positrons that can be accepted by the damping ring for various combinations of drive beam energy and target thickness. We used Geant4 for the simulation and analyzed the phase space distribution of positrons after the target. The positron yield normalized by the energy density is higher for higher drive beam energy. We will try a start-to-end optimization of the system by tuning parameters including the drive electron beam energy, target thickness, positron capture linac RF phase, etc.

## 1. 序論

ILC は重心系エネルギー 250 GeV から 1 TeV を効率的に実現する次世代の電子-陽電子コライダーである [1]。ダークマターなどの新粒子の発見やヒッグス粒子の測定を通して標準理論では説明できない新物理の探索が期待される。ILC では超伝導線形加速器によって加速された電子と陽電子が衝突する。電子は GaAs フォトカソードによって生成される。陽電子生成の方法の一つは電子ドライブ方式である。電子ドライブ方式では、ドライブ電子ビームを WRe 標的に入射することで電磁シャワーとして陽電子を生成する。陽電子は 5 GeV まで加速され、ダンピングリング (DR) でエミッタンスを減少させる。陽電子生成と陽電子捕獲を行うシステムが陽電子源である。陽電子源のパラメータを Table 1 [2] に示した。

のコライダーに比べてけた違いに大きい。したがって、陽電子生成標的を破壊しないために効率的な陽電子生成が求められる。ILC 電子ドライブ陽電子源の概略図を Fig. 1 [3] に示した。

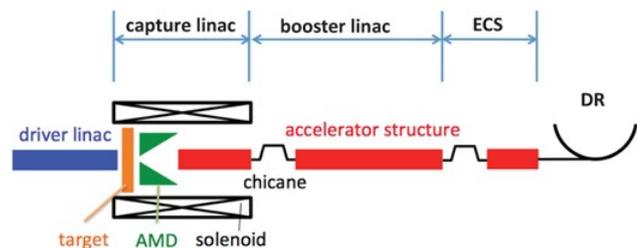


Figure 1: Schematic layout of the ILC electron-driven positron source.

Table 1: Nominal Positron Source Parameters

Parameter	Value	Units
Positrons per bunch	$2 \times 10^{10}$	number
Bunches per pulse	1312	number
Pulse Repetition Rate	5	Hz
DR Dynamic Aperture	<0.07	m rad
DR Energy Acceptance	0.75	%
DR Longitudinal Acceptance	$3.5 \times 37.5$	cm-MeV

線形コライダーではビームを再利用することができないため、ILC で時間当たりに生成する陽電子は従来

ドライバーライナックは電子ビームを数 GeV まで加速する。標的に生成された電子と陽電子はキャプチャーライナックの Lバンド RF および AMD (Adiabatic Matching Device) とソレノイドの磁場によって捕獲される。電子ビームはシケインの偏向電磁石によって陽電子ビームと分離される。ブースターライナックで 5 GeV まで加速された陽電子ビームは ECS (Energy Compressor System) のシケインと Lバンド RF によってエネルギーを圧縮される。本研究ではドライブ電子ビームと標的の厚さをパラメータとして、標的出口での陽電子数を評価した。

\* m252055@hiroshima-u.ac.jp

## 2. ILC 電子ドライブ陽電子源の設計

### 2.1 概要

標的における熱負荷は、標的の単位質量当たりのエネルギーデポジットの最大値である PEDD (Peak Energy Deposition Density) により評価される。SLC (SLAC Linear Collider) の陽電子生成標的は PEDD が 35 J/g で運転されたため、35 J/g が安全に運用できるリミットと言われている。このため、標的の最大エネルギー密度で規格化した陽電子数が陽電子源の設計において考慮すべき指標である。

### 2.2 陽電子生成シミュレーション

標的における粒子トラッキングシミュレーションは Geant4 を用いて行われている。Geant4 はモンテカルロ法を用いて粒子と物質の相互作用をシミュレーションするソフトウェアパッケージである [4-6]。現在の設計であるビームエネルギーが 3 GeV、標的の厚さが 16 mm の場合に、入射電子数が  $10^5$  として標的のエネルギー密度の分布を示したものが Fig. 2 である。標的を 1 辺

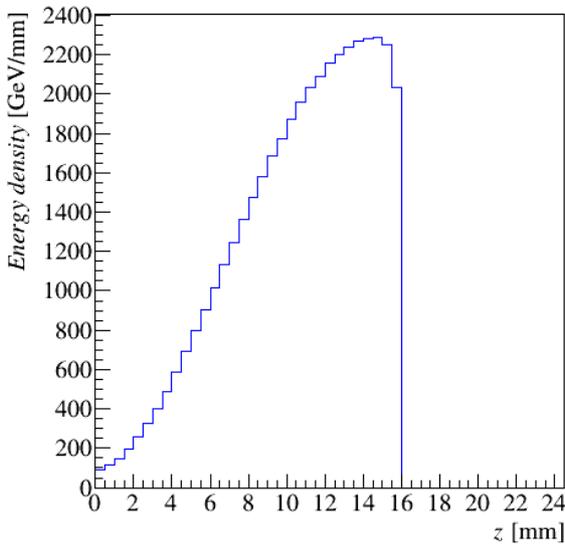


Figure 2: The longitudinal distribution of the energy deposition density of the target.

0.5 mm の立方体に区切ってエネルギーデポジットを計算することで、それぞれの立方体におけるエネルギー密度を求めた。

### 2.3 陽電子捕獲シミュレーション

キャプチャーライナックにおけるシミュレーションは GPT (General Particle Tracer)、ブースターライナックおよび ECS におけるシミュレーションは SAD (Strategic Accelerator Design) を用いて行われている [7]。また、TPE (Tree-Structured Parzen Estimator) アルゴリズム [8] によるブラックボックス最適化を用いて、ブースターライナックの RF 位相、ECS の RF 位相や振幅、ビーム光学系などのパラメータの最適化が進められてきた。この

最適化では、DR アクセプタンスを満たす陽電子数を最大化するパラメータを探索する。TPE アルゴリズムは目的関数  $f$  を最大化するハイパラメータ  $x$  を探索するうえで、確率密度関数  $p(x|y)$  を以下のように定義する。

$$p(x|y) = \begin{cases} l(x) & \text{if } y < y^* \\ g(x) & \text{if } y \geq y^*, \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 $y$  は  $f$  の観測値である。TPE アルゴリズムは獲得関数  $g(x)/l(x)$  を最大化する  $x$  の候補を返す。

### 2.4 標的出口の陽電子分布による評価

本研究では、陽電子生成部も含めた最適化の第一歩として、ドライブ電子ビームのエネルギーと標的の厚さをパラメータとして陽電子生成特性を評価した。本研究では、DR 入口までのフルシミュレーションをする代わりに、標的直下の位相空間分布によって擬似的に陽電子生成特性を評価した。先行研究における標的出口での陽電子の位相空間分布は Fig. 3 のようになる。ここで、青色の点は陽電子捕獲シミュレーションにおいて DR アクセプタンスを満たした陽電子を表す。これをもとに、DR アクセプタンスを標的直下の位相空間に焼き直した。横方向位相空間については DR アクセプタンスを満たした陽電子の分布の Gaussian fitting の平均と標準偏差をもとに、進行方向位相空間については DR アクセプタンスを満たした陽電子の分布の最大値と最小値をもとにして標的出口における擬似的なアクセプタンスを設定した。標的出口における擬似的なアクセプタンスを Eq. (2-5) にまとめた。

$$\left(\frac{x[\text{mm}] - 0.01}{4.00}\right)^2 + \left(\frac{p_x[\text{MeV}/c] - 0.03}{3.92}\right)^2 < 1 \quad (2)$$

$$\left(\frac{y[\text{mm}] - 0.03}{3.96}\right)^2 + \left(\frac{p_y[\text{MeV}/c] - 0.08}{3.94}\right)^2 < 1 \quad (3)$$

$$0.333679 \leq p_z[\text{MeV}/c] \leq 33.4319 \quad (4)$$

$$t - t_{\min}[\text{ns}] \leq 0.017759 \quad (5)$$

ここで、 $t_{\min}$  は陽電子が標的口に到達した時刻の最小値である。DR アクセプタンスを満たした陽電子 1483 個のうち、擬似アクセプタンス内には 1108 個が含まれる。擬似アクセプタンス内にはそれ以外に 482 個の陽電子が含まれる。本研究ではこの擬似的なアクセプタンスを DR アクセプタンスの代わりに用いた。

## 3. 結果

ドライブ電子ビームのエネルギーと標的の厚さの組み合わせを変えながら、標的出口の擬似的なアクセプタンスを満たす陽電子数を調べた。そして、それぞれのエネルギーについて、擬似アクセプタンスを満たした陽電子数を標的の最大エネルギー密度で規格化した値が最大になる標的の厚さを調べた。その条件で PEDD が 35 J/g のときに生成できる陽電子数を示したものが、Fig. 4 である。横軸がドライブ電子ビームのエネルギーを表す。エネルギーが大きいくほど陽電子数が増える傾向がみられた。ビームエネルギーが 1 GeV の場合と 10 GeV の場合を比べると、陽電子数に 4% の差がみられた。

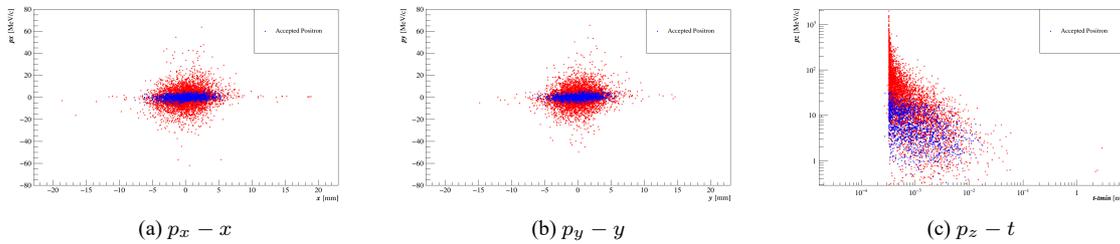


Figure 3: Positrons at the end of the target.

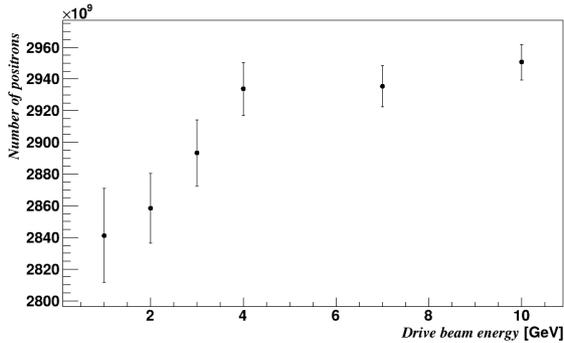


Figure 4: The number of positrons in the target acceptance.

#### 4. 考察

ドライブ電子ビームのエネルギーが1 GeVと10 GeVの場合の標的のエネルギーデポジットの $x$ 方向分布をFig. 5に示した。これは、エネルギーデポジットが最大

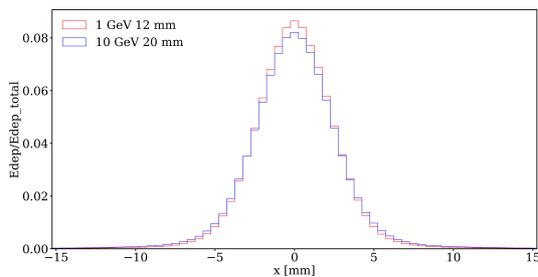


Figure 5: The transverse distribution of the energy deposition of the target.

となる厚み方向のスライスにおける分布である。縦軸は全エネルギーデポジットで規格化している。1 GeVのときの標準偏差は3.05 mm、10 GeVのときの標準偏差は3.45 mmであり、10 GeVのときのほうが横方向の分布が広がっている。これはビームエネルギーが大きいほうが電磁シャワーが発達するためにより厚い標的が必要になることが原因だと考えられる。標的が厚くなると粒子の軌道長が長くなるため、横方向への散乱が

増大すると考えられる。結果として、エネルギーデポジットが最大となるスライスを比較したときに、ビームエネルギーが大きいほうがエネルギーデポジットの密度は小さくなる。よって、エネルギーが大きいほどエネルギー密度で規格化した陽電子数が増えると考えられる。

#### 5. まとめ

ILCは250 GeVを超える電子-陽電子衝突を効率的に実現する加速器である。しかしながら、大量の陽電子が必要であり、陽電子生成標的の破壊を防ぐために陽電子源を最適化する必要がある。ドライブ電子ビームのエネルギーを大きくすることで、標的のエネルギー密度当たりの陽電子数が増加する傾向がみられた。よって、ビームエネルギーを最適化することで性能向上の余地があるといえる。今後は陽電子生成部以降の機械学習を用いた最適化とシームレスにつなげ、システム全体の最適化に取り組む予定である。

#### 参考文献

- [1] T. Behnke *et al.*, “The International Linear Collider Technical Design Report - Volume 1”, Rep. ILC-REPORT-2013-040, Jun. 2013.
- [2] C. Adolphsen *et al.*, “The International Linear Collider Technical Design Report - Volume 3.II”, Rep. ILC-REPORT-2013-040, Jun. 2013.
- [3] Y. Seimiya *et al.*, “Positron capture simulation for the ILC electron-driven positron source”, *Prog. Theor. Exp. Phys.*, vol. 2015, no. 10, p. 103G01, Oct. 2015.  
doi:10.1093/ptep/ptv136
- [4] J. Allison *et al.*, “Recent Developments in Geant4”, *Nucl. Instr. Meth. A*, vol. 835, pp. 186–225, 2016.
- [5] J. Allison *et al.*, “Geant4 Developments and Applications”, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 53, pp. 270–278, 2006.
- [6] S. Agostinelli *et al.*, “Geant4 - A Simulation Toolkit”, *Nucl. Instr. Meth. A*, vol. 506, pp. 250–303, 2003.
- [7] M. Kuriki *et al.*, “Optimal design of ILC e-driven positron source with machine learning”, in *Proc. PASJ’24*, Yamagata, Japan, Aug. 2024, paper FRP024, pp. 901–906.
- [8] J. Bergstra *et al.*, “Algorithms for Hyper-Parameter Optimization”, in *Advances in Neural Information Processing Systems*, vol. 24, 2011.