

ILC 電子ドライブ陽電子源の 機械学習による全体最適化

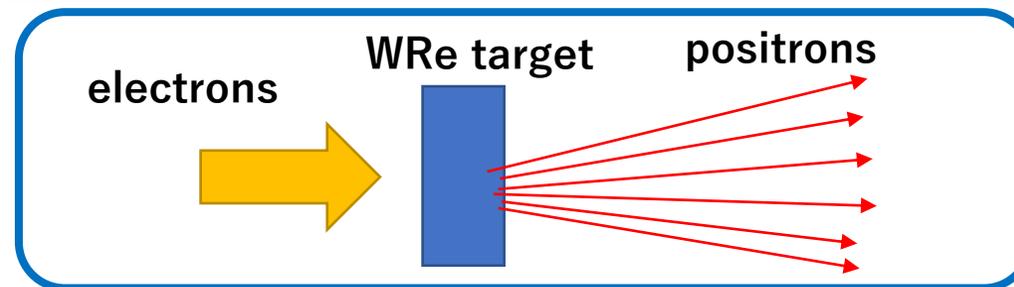
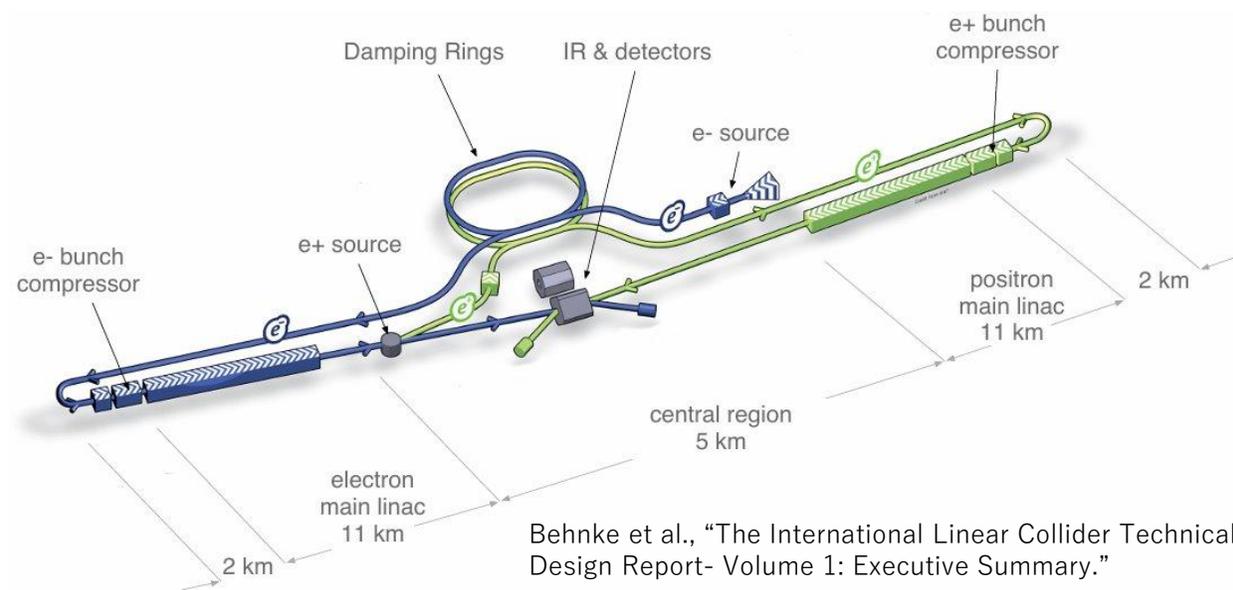
佐々木遥大, 栗木雅夫, 高橋徹, Zachary Liptak (Hiroshima U.)

浦川順治 (JSPS), 榎本嘉範, 大森恒彦, 福田将史, 森川祐, 横谷馨 (KEK)

International Linear Collider

- ILC：超伝導線形加速器を用いた次世代電子－陽電子コライダー。250 GeV を超える衝突を効率的に実現。
- ビームは再利用不可なので、時間あたりに生成する電子・陽電子は従来のコライダーに比べて桁違いに大きい。
- 陽電子生成標的を破壊しないためには、効率的な陽電子生成が求められる。
- 標的への負荷の指標 = PEDD (Peak Energy Deposition Density): 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
- PEDD=35 J/g が安全に運用できるリミット

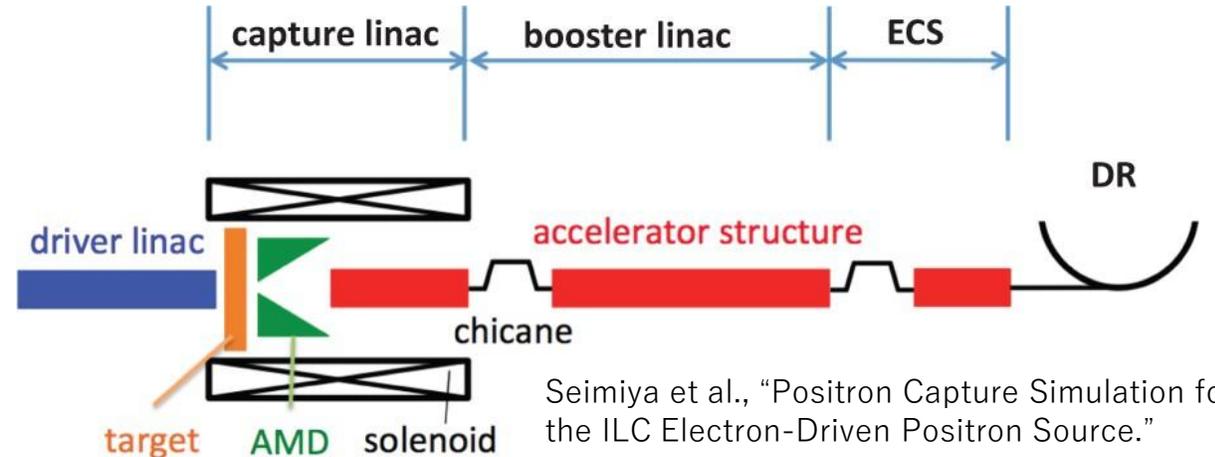
ILC の概略図



ILC 電子ドライブ陽電子源

- 数GeV の電子ビームにより電子と陽電子を対生成
- キャプチャーライナックのRF およびAMD (Adiabatic Matching Device) とソレノイドの磁場により捕獲
- シケインで電子ビームを分離
- ブースターライナックで陽電子ビームを5 GeV まで加速
- ECS (Energy Compressor System) のシケインとRF によりエネルギーを圧縮
- ドライブ電子ビームエネルギーを3 GeV として主にブースター+ECS の最適化が進められてきた

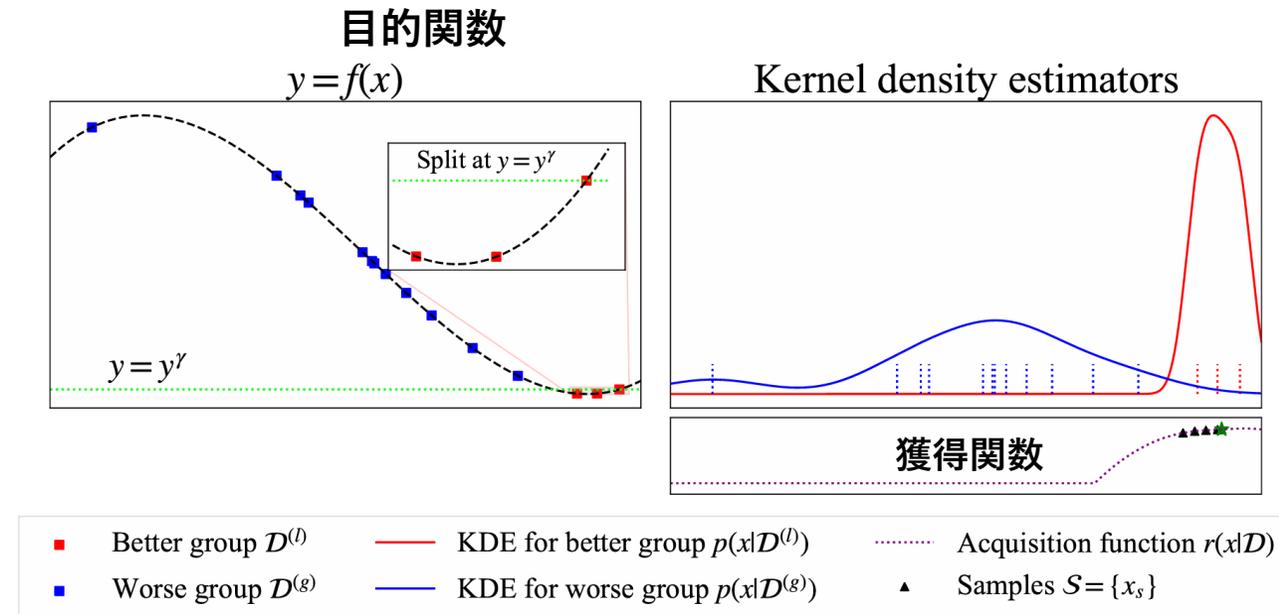
Schematic layout of the ILC electron-driven positron source



Parameter	Value	Units
DR Dynamic Aperture	< 0.07	m rad
DR Energy Acceptance	0.75	%
DR Longitudinal Acceptance	3.5 × 37.5	cm-MeV

Tree-structured Parzen Estimator

- 陽電子生成部以降はTPEによるBlack Box最適化
- 目的関数 f を最小化するハイパラメータ x を探索する
- 確率密度関数 $p(x|y, D) := \begin{cases} p(x|D^{(l)}) & (y \leq y^r) \\ p(x|D^{(g)}) & (y > y^r) \end{cases}$
- D : 観測点, x : ハイパラメータ, y : 目的関数の観測値
- 獲得関数 $r(x|D) := p(x|D^{(l)})/p(x|D^{(g)})$ を最大化するハイパラメータの候補を返す



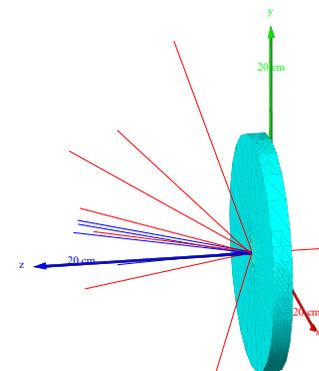
Watanabe, "Tree-Structured Parzen Estimator."

目的

- 陽電子生成部のパラメータ最適化
 - 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
 - GEANT4: 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
- 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、全体の最適化

最適化対象のパラメーターおよび現在の値

Parameters	Values
Drive beam energy E_{-}	3 GeV
Drive beam size σ	2 mm
Target thickness (tungsten)	16 mm



Electromagnetic showers

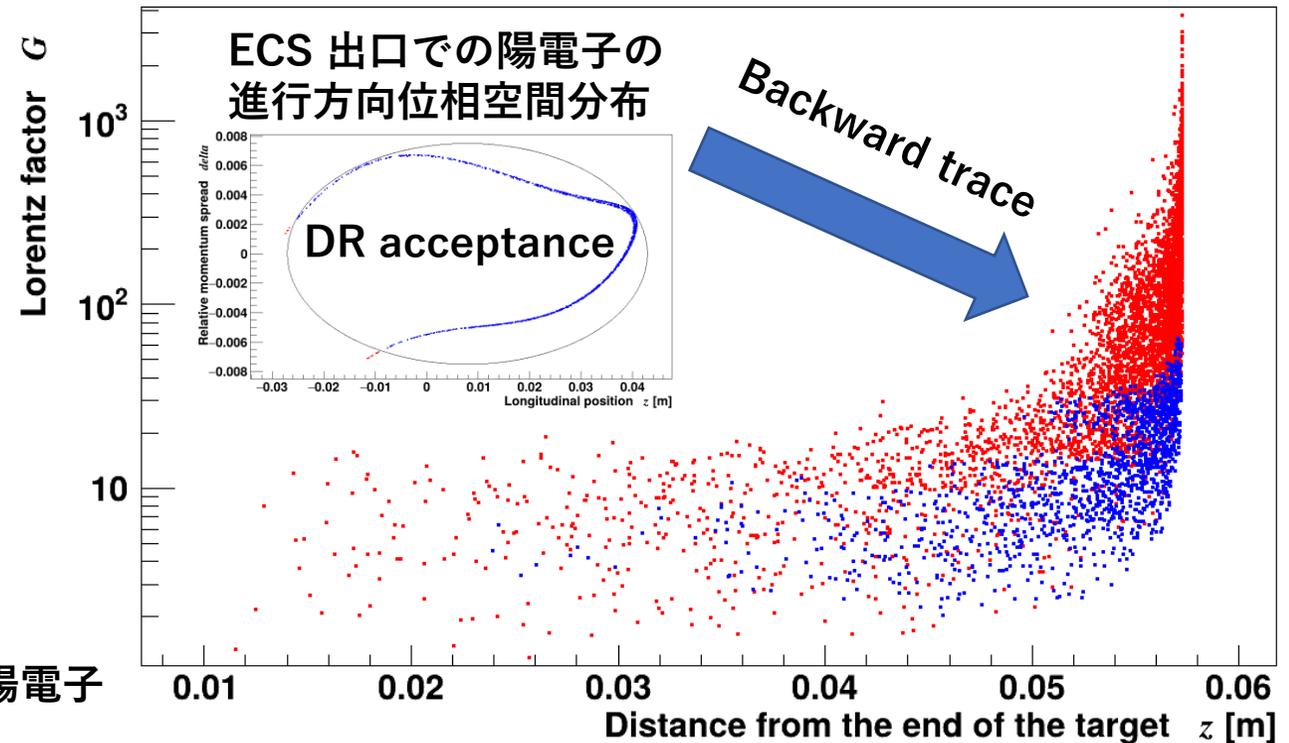
方法

- 先行研究の陽電子捕獲シミュレーションをもとに、DR アクセプタンスを標的直下の位相空間に焼き直し、陽電子生成効率を擬似的に求めた
- 標的負荷の指標は標的の最大エネルギー密度

赤：全陽電子

青：DR アクセプタンスを満たした陽電子

標的直後の陽電子の $G - z$ 分布



横方向位相空間

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

	平均	標準偏差 σ
x	0.01 mm	2.00 mm
y	0.03 mm	1.98 mm
p_x	0.03 MeV/c	1.96 MeV/c
p_y	0.08 MeV/c	1.97 MeV/c

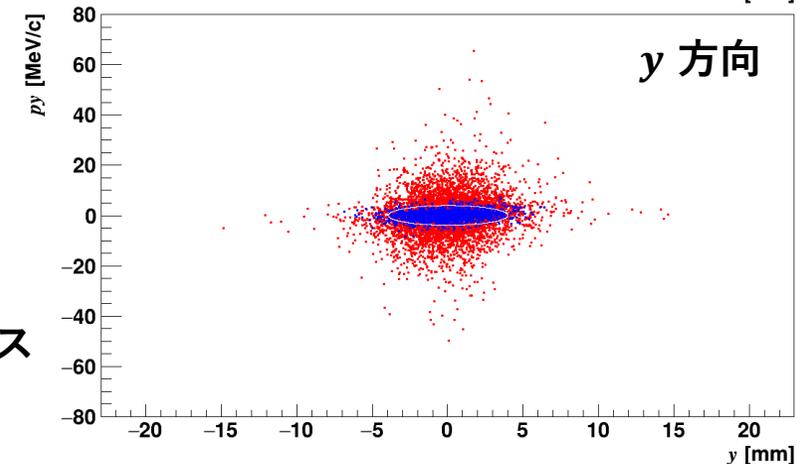
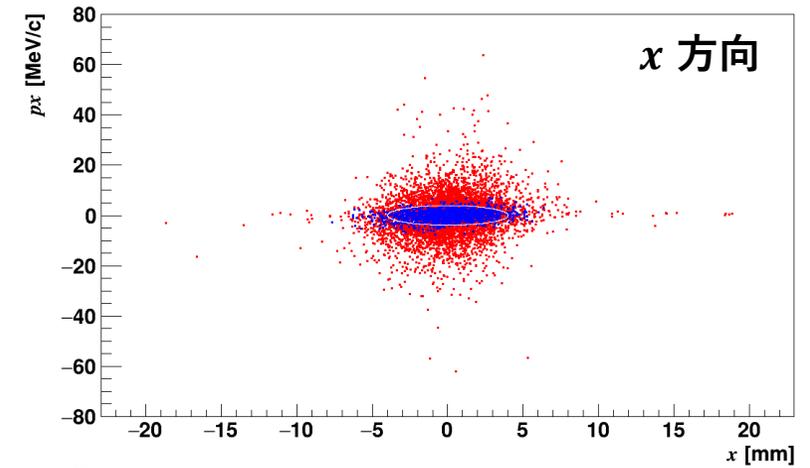
- 擬似アクセプタンスを $\pm 2\sigma$ の範囲と設定

$$\left(\frac{x[\text{mm}]-0.01}{4.00}\right)^2 + \left(\frac{p_x[\text{MeV}/c]-0.03}{3.92}\right)^2 < 1$$
$$\left(\frac{y[\text{mm}]-0.03}{3.96}\right)^2 + \left(\frac{p_y[\text{MeV}/c]-0.08}{3.94}\right)^2 < 1$$

赤：全陽電子

青：DR アクセプタンス
を満たした陽電子

標的出口の陽電子の横方向位相空間分布



進行方向位相空間

- 擬似アクセプタンスをDR アクセプタンス中の陽電子の分布の最小値と最大値をもとに設定

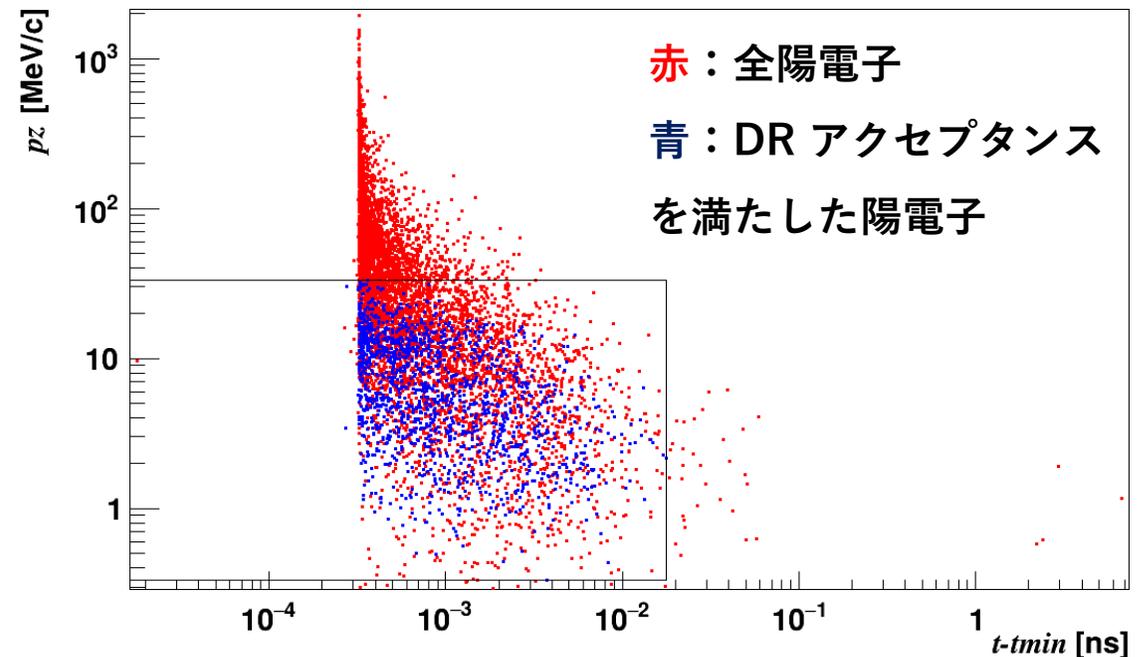
- $$0.333679 \leq p_z [\text{MeV}/c] \leq 33.4319$$

$$t - t_{\min} [\text{ns}] \leq 0.017759$$

擬似アクセプタンスを満たす陽電子数

	個数	うちDR アクセプタンス中の陽電子
全陽電子	7292	1483
擬似アクセプタンス中の陽電子	1600	1108

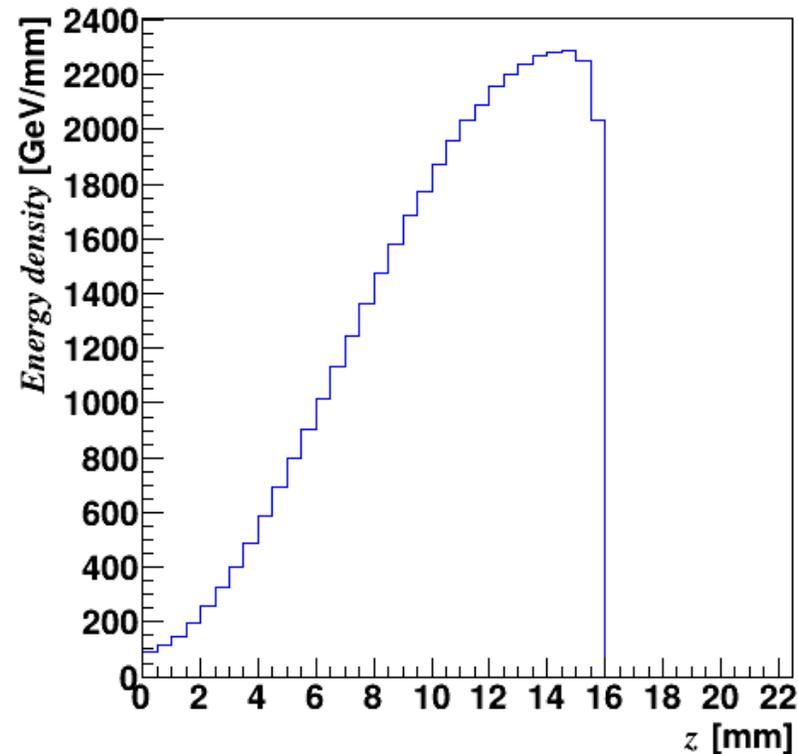
標的出口の陽電子の進行方向位相空間分布



t_{\min} : 陽電子が標的出口に到達した時刻 t の最小値

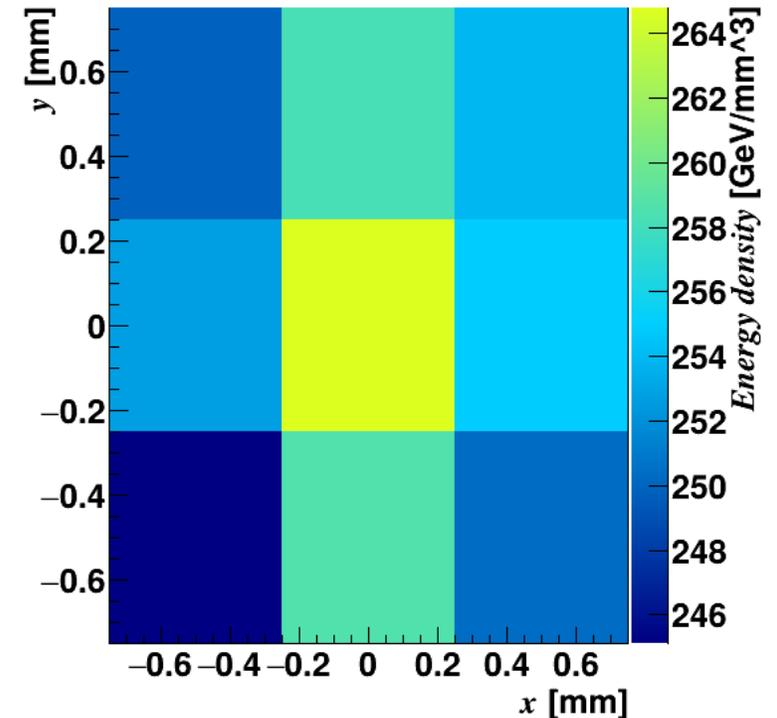
最大エネルギー密度

- 標的を $0.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ の立方体に区切って，エネルギーデポジットを計算
- それぞれの立方体におけるエネルギー密度を求め，最大エネルギー密度を標的負荷の指標とした



標的のエネルギー密度の進行方向分布

(ビームエネルギー：3GeV, 入射電子数： 10^5 ,
 $x: [-0.75, 0.75] \text{ mm}$, $y: [-0.75, 0.75] \text{ mm}$)

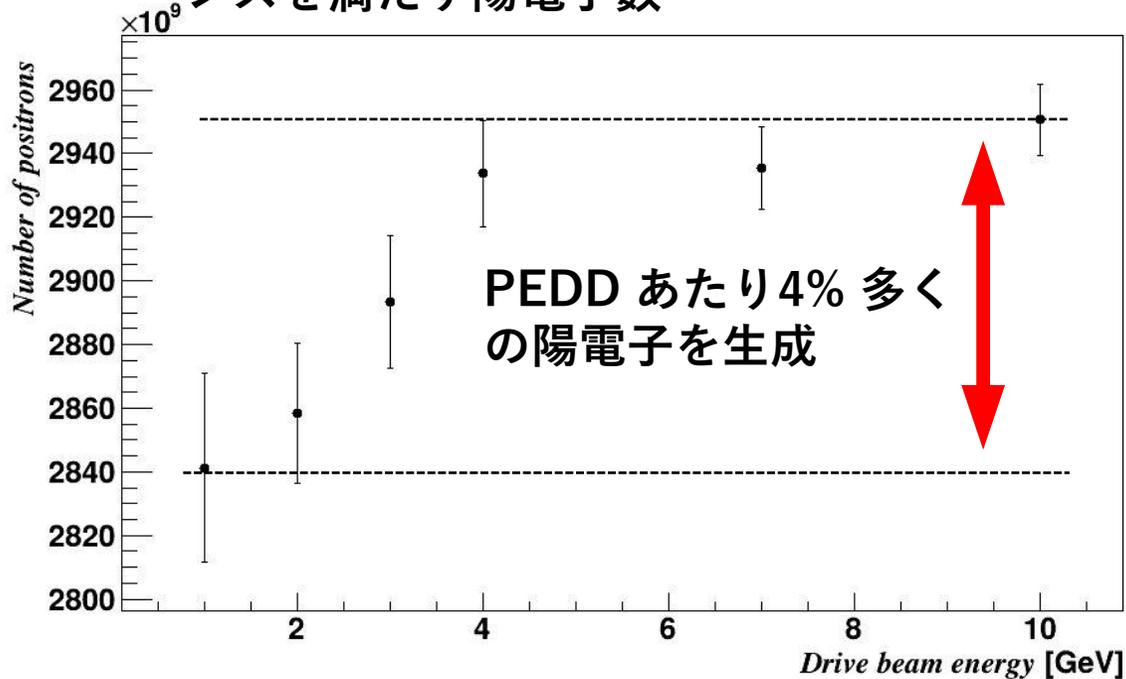


標的のエネルギー密度の横方向分布

($z: [14.5, 15.0] \text{ mm}$)

結果・考察

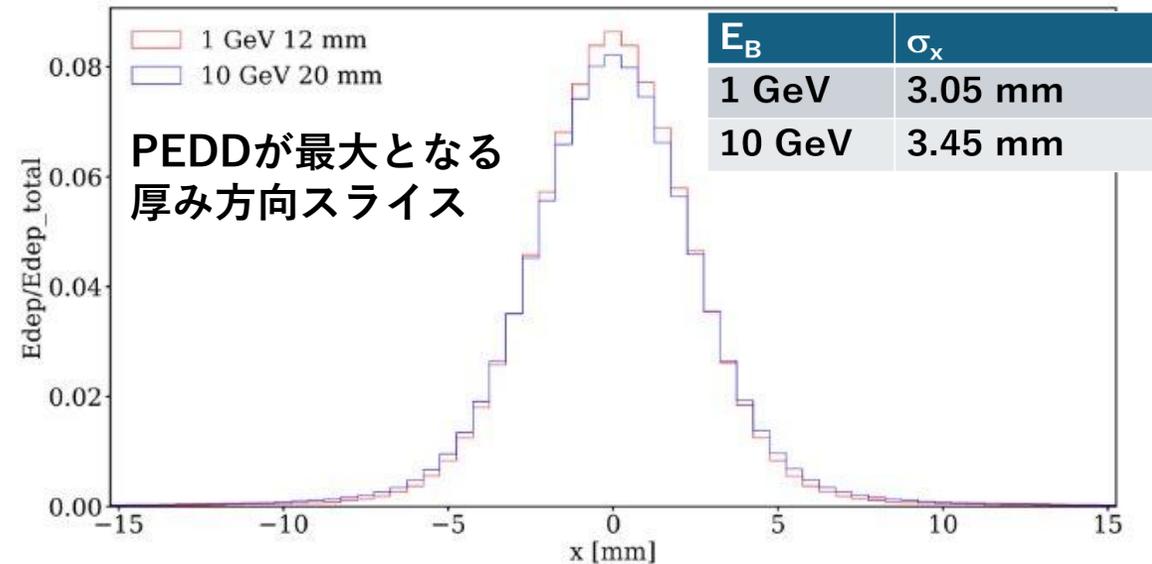
PEDD=35 J/gのときの擬似アクセプタンスを満たす陽電子数



PEDD あたり4% 多くの陽電子を生成

ドライブビームエネルギー

スライスの全エネルギーデポジットで規格化したエネルギーデポジットのx方向分布



PEDDが最大となる厚み方向スライス

- ビームエネルギーが大きいと、PEDDが最大となるスライスで横方向の分布が広がる。
- 結果として、PEDDで規格化した陽電子数はエネルギーが大きくなると大きくなる。

まとめ

- ILC では、時間あたりに生成する電子・陽電子は従来のコライダーに比べて桁違いに大きい。
- 陽電子生成に用いる標的の負荷を破壊限界以下で用いる必要がある。
- 電子ビームエネルギーを大きくすることで、PEDDあたりの陽電子数が増加する。電子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。
- Future work
 - 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、全体の最適化