

大口徑 Alternate Periodic Structure 空洞による ILC 陽電子源の設計研究

A DESIGN STUDY OF ILC POSITRON SOURCE WITH ALTERNATE PERIODIC STRUCTURE CAVITY

金野舜^{#, A)}, 栗木雅夫^{A)}, 高橋徹^{A)}, 名越久泰^{A)}, 横谷馨^{B)}, 浦川順治^{B)}, 福田将史^{B)}, 清宮裕史^{B)}, 大森恒彦^{C)}
Shun Konno^{#, A)}, Masao Kuriki^{A)}, Tohru Takahashi^{A)}, Hisayasu Nagoshi^{A)}, Kaoru Yokoya^{B)}, Junji Urakawa^{B)},
Masaumi Hukuda^{B)}, Seimiya Yuuji^{B)}, Tunekiko Omori^{C)},
^{A)} Hiroshima University, ^{B)} Dept. of KEK. of Accelerator, ^{C)} Dept. of KEK. of neutrino

Abstract

ILC (International Linear Collider) is an electron-positron collider based on linear accelerator (linear collider) with center of mass energy of 250 GeV to 1 TeV. Since the beam is used for collision only once, a large amount of electrons and positrons than ring colliders is required. To prevent a destruction of the metal target, we designed a large diameter Alternate Periodic Structure cavity (APS cavity) by maximizing the positron capture efficiency. We present the latest design study of the E-Driven ILC positron source, especially the optimization of ECS parameter.

1. はじめに

現在日本における建設の検討がすすんでいる国際リニアコライダー(ILC; International Linear Collider)は、ヒッグス粒子やトップクォークの大量生成、超対称性粒子の発見など、新物理の発見を目指した高エネルギー物理学の次世代主要計画である[1]。この ILC での陽電子生成方法として、電子を金属標的に入射して標的内で対生成反応を起こし、陽電子を生成する電子ビームドライブ方式が検討されている。ILC では一秒あたり約 $2e+14$ 個もの陽電子が必要なため、入射電子がおとす熱による標的破壊が危惧される。標的破壊は PEDD(Peak Energy Deposition Density)という、エネルギーを物質密度で規格化した値のピーク値を指標として評価可能であることがこれまで研究からわかっている。本研究では金属標的に W-Re を使用する。この標的は SLC の陽電子源[2]としても使用された実績があり、SLC の運転条件における PEDD は 35 J/g であった。そこで本研究では 35 J/g まで安全に運転可能であると仮定する。

ILC 陽電子源では衝突ビームとしてバンチあたり 3.2 nC が要求されている。設計仕様として、その 150 %に相当する 4.8 nC を主リニアックの前段にある Damping Ring (DR) で用意することとなっている。DR の安定蓄積領域である Dynamic Aperture(アクセプタンス)は横方向および縦方向の位相空間において[3]

$$\left(\frac{z}{0.0035}\right)^2 + \left(\frac{\delta}{0.0075}\right)^2 < 1 \quad (1)$$

$$\gamma A_x + \gamma A_y < 0.07 \quad (2)$$

のように定義されている。ここで、 A_x 、 A_y はアクションである。この領域内にバンチあたり 4.8 nC の陽電子を生成する必要がある。一電子あたり DR のアクセプタンス内に生

成される陽電子の数を陽電子生成率 η とすると、4.8 nC の陽電子を生成するために必要な電子バンチ密度は $4.8/\eta$ nC となる。この時の金属標的のエネルギー密度は $38.4/\eta$ J/g であるため[2]、 $\eta > 1.1$ となれば安全に陽電子が生成可能である。

陽電子捕獲率を高めるために重要なのがキャプチャーライナックと呼ばれる初段の加速器である。本研究では Fig. 1 のような大口徑の APS(Alternate Periodic Structure)空洞の使用を仮定し、陽電子生成率を評価した。APS 空洞は $\pi/2$ モードの加速空洞であり、 π モードの空洞よりもモード安定性が高いのが利点である。

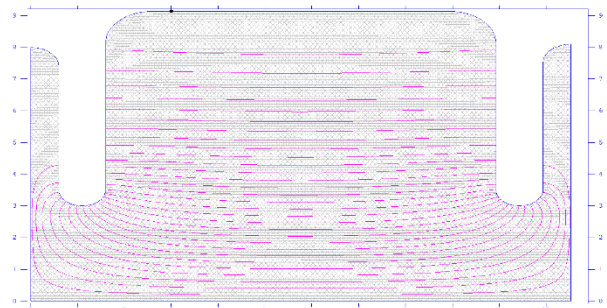


Figure 1: APS cavity.

2. 電子ドライブ陽電子源の構成

Figure 2 は電子ドライブ陽電子源の概要図を示したものである。標的に生成された粒子は AMD(Adiabatic Matching Device, ソレノイド状の磁場を発生)を通過することにより、その横方向運動量を抑制される。キャプチャーライナックは 36 本 11 セルの APS 定在波型加速管で構成されており、陽電子を RF バケツに捕捉するとともに、約 500 MeV まで加速する。キャプチャーライナック全体は陽電子の損失を低減するため、0.5 T のソレノイド磁場中に置かれている。シケインは電子およびエネル

ギーの大ききずれた陽電子を取り除くとともに、Fig. 3(a)と(b)で示されているように、パンチ長を圧縮する効果を持っている。シケインを通過した陽電子は L-band と S-band の進行波加速管で構成されるブースターにより約 5 GeV まで加速される。Fig. 3(c)に見られるように、ブースター出口での陽電子は RF 曲率に由来する大きなエネルギー広がりを持っている。このエネルギー広がり抑制するため、DR 入射前に陽電子は ECS を通過する。Figure 3(d)が ECS 通過後の陽電子の進行方向位相空間分布である。Figure 3(c)と(d)を比較するとエネルギー広がりはおよそ 0.04 倍となっている。この時の R_{56} 及び R_{65} の値は各々 $R_{56}=1.05$ 、 $R_{65}=-0.95$ である。次節では、ECS の構成により陽電子生成率への影響について評価する。

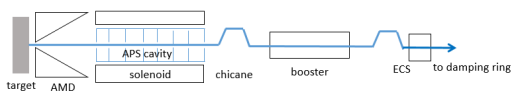


Figure 2: Schematic view of ILC e-driven position source.

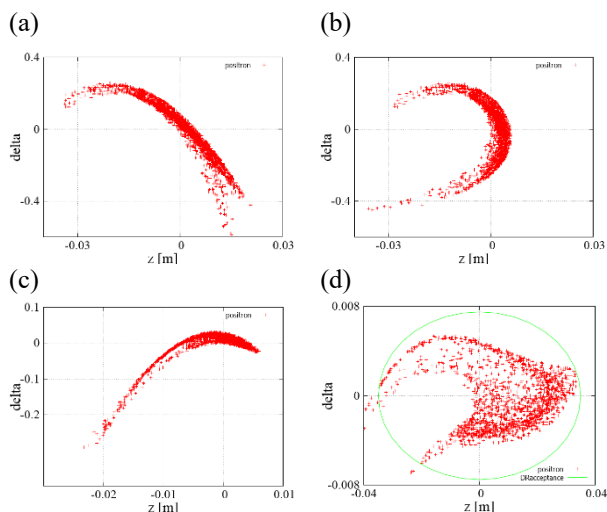


Figure 3: Phase space (a)after capture (b)after chicane (c)after booster (d) after ECS.

3. ECS の最適化

ブースター出口での陽電子分布は大きなエネルギー広がりを持つため、エネルギー広がり抑制する ECS は陽電子生成率を高める上で重要な役割を果たしている。ECS はシケインによる momentum compaction と RF 空洞によるエネルギー変調によりエネルギーを圧縮する。Momentum compaction R_{56} とエネルギー変調 R_{65} は各々

$$R_{56} = 2\theta^2 \left(L + \frac{2}{3} L_B \right) \quad (3)$$

$$R_{65} = -\frac{V_0 \omega}{\gamma c} \quad (4)$$

とあらわされる。 θ はシケインの偏向角、 L は偏向磁石

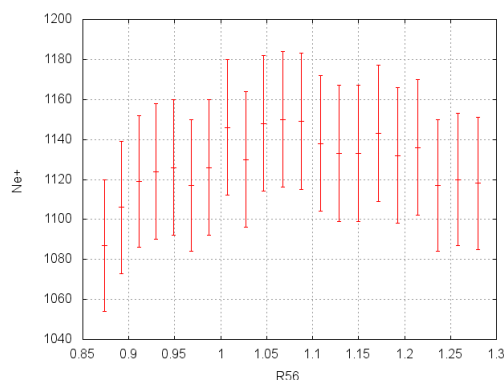


Figure 4: The number of captured positron is shown as a function of R_{56} . The error bar shows statistical error.

BM の磁極長、 L_B は BM 間の距離、 V_0 は加速空洞の加速電圧、 ω は RF の周波数、 γ はビームのエネルギーの平均ローレンツ γ 、 c は光速を表す。momentum compaction の効果によりエネルギーの大きい粒子は先行し、低い粒子は後続するのでビームの進行方向の広がりが大きくなる。その後、RF のゼロクロス位相に乗せることで先行した粒子は減速され、後続した粒子は加速される。これによりエネルギー幅が抑制される。この時、エネルギーは圧縮されるが、パンチ長は伸びることになる。また粒子分布の形状も変化することとなるため、最適な圧縮条件が存在することとなる。

本研究ではまず $R_{65}=-0.95$ に固定した場合の R_{56} による生成率の変化をみる。次に R_{65} を変化させ、各々の値に対して最適な R_{56} とした場合の生成率の変化をみる。これにより、ECS の構成の最適化をはかった。 θ を変えることで R_{56} を、 V_0 を変えることで R_{65} を変化させた。

はじめに、 $R_{65}=-0.95$ に固定した場合、この時の R_{56} と捕獲陽電子数の関係を調べた。Figure 4 に結果を示す。 $R_{56}=1.06$ 付近で捕獲陽電子数が最大となることが分かる。線形力学から R_{56} と R_{65} について、

$$R_{56} R_{65} = -1 \quad (5)$$

の時に整合条件を満たし、エネルギー広がりが最小となることがわかっている。ここでは $R_{56} R_{65} = -1.01$ であり、1%程度ずれた値である。その時の位相空間分布を Fig. 5 にしめす。緑の楕円は DR アクセプトランスを表す。Figure 5(a)および(b)は $R_{56}=0.87$ 、 $R_{56}=1.28$ の場合の位相空間分布を示しているが、いずれも整合条件から大きく離れており、分布がゆがんで DR アクセプトランスからずれていることがわかる。それぞれの陽電子捕獲率は $R_{56}=0.87$ では 1.07 ± 0.03 、 $R_{56}=1.28$ では 1.12 ± 0.03 、 $R_{56}=1.06$ では 1.15 ± 0.03 となる。

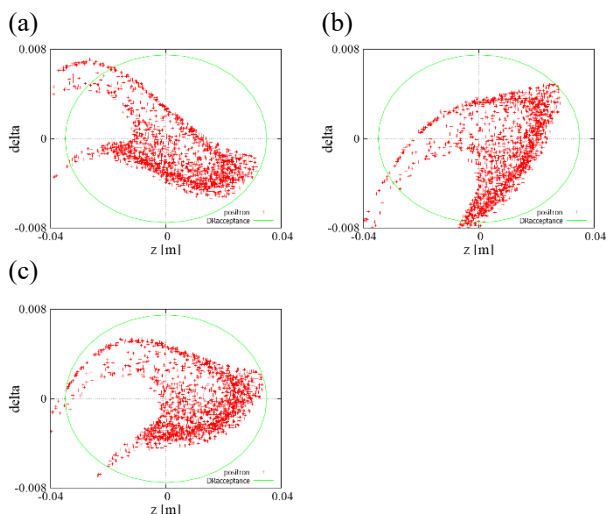


Figure 5: Phase space (a) $R_{56}=0.87$ (b) $R_{56}=1.28$ (c) $R_{56}=1.06$.

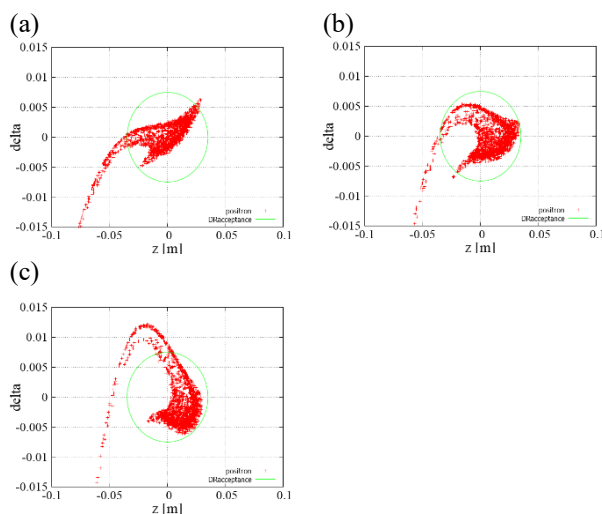


Figure 7: Phase space (a) $R_{65}=-0.57$ (b) $R_{65}=-1.47$ (c) $R_{65}=1.06$.

4. R_{65} を主変数としたときの R_{56} の最適化と陽電子捕獲率

次に、 R_{65} を変化させていき、各々の R_{65} において最適な R_{56} を求め、その時の捕獲陽電子数を求めた。この場合、各々の条件は整合条件を満たしているが、エネルギーとバンチ長の圧縮比と拡大比が異なる。Figure 6 に R_{65} の関数として捕獲陽電子数を示す。誤差は統計誤差である。 R_{65} が $-1.47 \sim -0.76$ の範囲では誤差範囲内で同じ値となっており、陽電子の生成率は ECS の構成には鈍感であることがわかる。Figure 7 に異なる条件での ECS 出口での陽電子の位相空間分布を示す。 $R_{65}=-0.57$ の時は進行方向の広がりが大きく、 $R_{65}=-1.47$ の時はエネルギー方向の広がりが大きく、各々陽電子の生成率を損なっている。

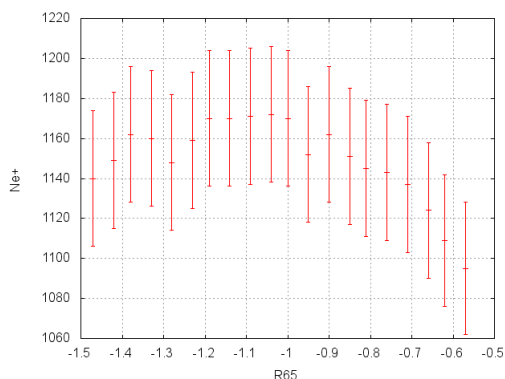


Figure 6: The number of captured positron is shown as a function of R_{65} . The error bar shows statistical error.

5. まとめ

APS 空洞を用いて電子ビームドライブ方式 ILC の陽電子生成についての検討を行った。陽電子捕獲率は最大で 1.17 ± 0.03 と、1.1 を超える捕獲率を実現でき、標的破壊を防ぎつつ陽電子を生成できることが分かった。また、ECS の構成による生成率の変化から、生成率は ECS の構成に対して鈍感であり、 R_{65} が $-1.47 \sim -0.76$ の範囲で同じ値であった。

謝辞

当研究を行うにあたり、栗木雅夫教授には研究を行う上で不明な点や疑問点等について多くのご指導をいただきました。ILC 陽電子源グループの皆様にはミーティング等で様々な助言をいただきました。この場を借りて皆様に感謝の意を表したいと思います。

参考文献

- [1] ILC Technical Design Report, KEK-Report 2013-1, 2013.
- [2] Y. Seimiya *et al.*, "Positron capture simulation for the ILC electron-driven positron source", Prog. Theor. Exp. Phys. 2015 (2015), 103G01.
- [3] 大西幸喜, "加速器の基礎とダンピングリング", OHO(2006).