

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)}, Liptak Zachary John^{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)}, 柏木茂^{D)}

Shun Konno^{#, A)}, Masao Kuriki^{A)}, Liptak Zachary John^{A)}, Tohru Takahashi^{A)}, Hisayasu Nagoshi^{A)},
Kaoru Yokoya^{B)}, Junji Urakawa^{B)}, Masahumi Hukuda^{B)}, Yuji Seimiya^{B)}, Tunchiko Omori^{C)}, Shigeru Kashiwagi^{D)}

^{A)} Hiroshima University AdSM, ^{B)} Dept. of KEK. Of Accelerator,

^{C)} Dept. of KEK. Of neutrino, ^{D)} Tohoku University ELPH

Abstract

The International Linear Collider (ILC), which is planned to be constructed in the Kitakami Mountains of Japan, is an electron-positron collider with 250-1000 GeV center of mass energy. The mass production of Higgs boson and top quark and the discovery of supersymmetric particles are expected. The ILC is studying an e-drive method in which an electron beam of several GeV is incident on a metal target as a positron generation method. Since the beam cannot be reused with the linear collider, it is necessary to generate a large amount of electron/positron beams compared to the conventional ring collider. Especially for positrons, it is necessary to improve the generation efficiency and prevent the damage of the generation target. Therefore as a positron capture accelerator, we adopted a $\pi/2$ mode Alternate Periodic Structure cavity (APS cavity) that has a large diameter ($2a = 60$ mm) and can generate a high and stable acceleration gradient. In addition, a more efficient deceleration capture method with a bunching action is used. In this method, positron are placed in the deceleration phase and captured in the acceleration phase by phase slip. In this study, we report the compensation of beam loading in the positron capture accelerator considering the phase change, the positron capture accelerator, the optimization of positron capture by the parameters of ECS, and the overall design.

1. はじめに

現在、東北地方の北上山地に建設が予定されて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駆動方式が検討されている。

生成された陽電子はキャプチャーライナック、シケイン、ブースター加速器、ECS を通過したのち、Damping Ring (DR) を周回し、衝突点へと輸送される (Fig. 1)。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[2]

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

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

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。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捕獲率 η とし、この η をある閾値より大きくすることで、標的破壊を防ぎつつ陽電子の生成が可

能である。

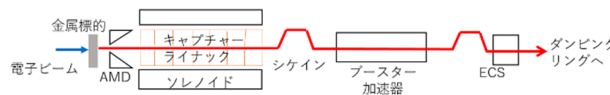


Figure 1: Constitution of ILC e-driven positron source.

η 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. 2 のような大口径の APS(Alternate Periodic Structure)空洞を仮定した。APS 空洞は $\pi/2$ モードの定在波型加速空洞であり、大きいアパーチャー、高い加速勾配を実現可能かつ、 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。電場が生じるセル(加速セル)を長く、電場が生じないセル(結合セル)を短くすることで、より効率的に粒子を加速させることが可能となっている。

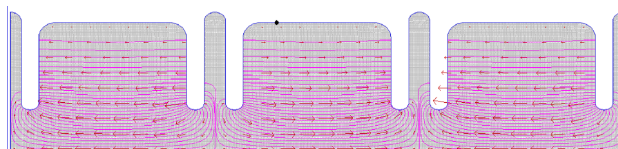


Figure 2: APS cavity.

電子ビーム駆動方式では陽電子のほかにも電子も生成されるため、ビームローディング(ビームが空洞内を通過する際に減速場が生じる現象)の効果が大きくなるため、その補償が課題となっている。本研究ではシングルセルモデルでの、APS 空洞に生じる電場の計算のほか、等

[#] m201277@hiroshima-u.ac.jp

価回路を用いたマルチセルモデルでのビームローディング補償を行った。

2. シングルセルモデルにおけるビームローディングを含めた粒子トラッキング

superfish で設計した APS 空洞のパラメーターを用いて、キャプチャーライナックを通過する粒子のトラッキングを General Particle Tracer(GPT)を用いて行った。キャプチャーライナックは加速セル 11 セル、結合セル 10 セルの計 21 セルで一本の加速管とし、この加速管 36 本で構成される。シングルセルモデルなので、21 セルを一つのセルとして計算した。シングルセルモデルの場合、定常状態において、空洞に発生する電圧は次のように表される。

$$V = \frac{2\sqrt{\beta P_{in} L r_s}}{1 + \beta} - \frac{L r_s}{1 + \beta} I \quad (3)$$

β はローレンツベータ、 P_{in} は加速管一本当たりの入力パワー、 L は加速管一本当たりの長さ、 r_s は単位長さ当たりのシャントインピーダンス、 I はビームローディング電流となっている。ビームローディングを含むシミュレーションは以下の方法で行った。

1. 全ての加速管でビームローディング電流 I_0 を、 $I_0=1$ A として GPT で計算。
2. 1 で得られた結果を用いて自作のプログラムによりビームローディング電流 I_1 を求めた。
3. I_1 の値を用いて再び GPT で計算。
4. 2-3 を繰り返すことで、 $I_{n-1} \cong I_n$ となった時、この値をビームローディング電流と決定。

このようにして得られた結果が Fig. 3 である。

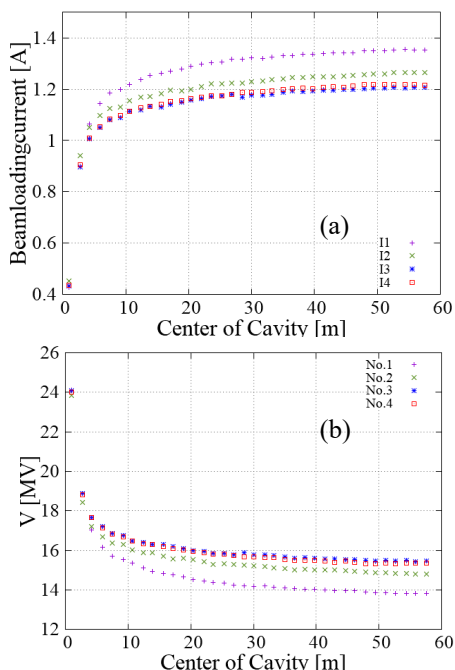


Figure 3: (a) Beamloading current of each cell. (b) Voltage of each cell.

Figure 3(a)について、横軸はキャプチャーライナック入口からの距離、縦軸はビームローディング電流、(b)の縦軸は電圧となっている。(a)、(b)それぞれ、各加速管の中

央の位置でのビームローディング電流、電圧をプロットしたものである。赤い四角が最終的な結果であり、キャプチャーライナック中流から下流ではビームローディング電流、電圧ともにほぼ一定の値となっている。

3. 等価回路モデルによるマルチセルモデルの計算

次に、モデルの精度を上げるために、加速管を複数のセルで構成される、マルチセルとして計算を行った。マルチセルで考えるために本研究では、等価回路モデル (Fig. 4)[3]を用いた。(等価回路モデルの詳細については他の発表[4]にて説明)等価回路モデルから得られる微分方程式は、以下の様になる。

$$\frac{1}{\omega^2} \frac{d^2 \hat{v}_n}{dt^2} + \frac{1 + \beta}{\omega Q_{0n}} \frac{d \hat{v}_n}{dt} + \hat{v}_n = \frac{1}{2} k (\hat{v}_{n-1} + \hat{v}_{n+1}) + \frac{1}{\omega} \frac{d}{dt} (\hat{i}_g - \hat{i}_n^{ind.}) \quad (4)$$

\hat{v}_n は n 番目のセルの電圧、 ω は空洞の共振周波数、 Q_{0n} は各セルの Q 値であり、この値は加速セルと結合セルで異なっている。 β はカップリングベータ、 k はセル間の結合度、 \hat{i}_g は RF による電流、 $\hat{i}_n^{ind.}$ はビームローディング電流を表す。ここで、電圧と電流はそれぞれ規格化された値であり、

$$\hat{v}_n = \frac{v_n}{\sqrt{\omega (R/Q)_n}} \quad (5)$$

$$\hat{i}_n = \sqrt{\frac{(R/Q)_n}{\omega}} i_n \quad (6)$$

である。また、導波管と接続しているセルは一つだけであり、このセルをカプラーセルと呼び、導波管と接続していないセルはレギュラーセルと呼ぶ。カプラーセルの場合、 β と \hat{i}_g は有限の値をとるが、レギュラーセルの場合は $\beta = 0$ 、 $\hat{i}_g = 0$ となる。(4)式より、 n 番目のセルの電圧はその両隣のセルの電圧と、電流の時間微分により決まる。この方程式を解くことでマルチセルモデルによる電圧が求まる。

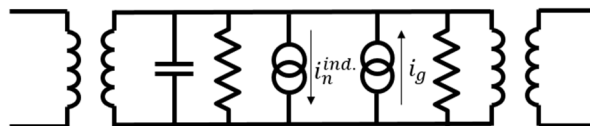


Figure 4: Equivalent circuit.

4. 等価回路モデルとシングルセルモデルの比較

等価回路モデルで計算される電圧とシングルセルモデルで計算される電圧の β 依存性を比較した。シングルセルモデルの場合、空洞に生じる電圧は(3)式で表される。また、時定数は次のようになる。

$$\tau = \frac{2Q_0}{\omega(1 + \beta)} \quad (7)$$

空洞のパラメーターは以下の値を用いた。

Table 1: Parameter of Cavity

Parameter	value	unit
P_{in}	22.5	MW
L	1.25	m
r_s	37.3	MOhm/m
I	1	A
Q_0	2.47×10^4	
ω	8.17×10^9	rad/s

始めに、RF のみを入力した場合の比較を示す。

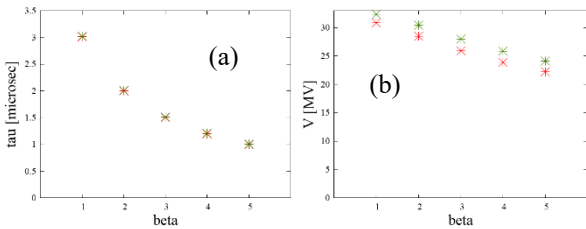


Figure 5: The comparison of multi cells model and single cell model. (a)The beta dependency of time constant. (b)The beta dependency of voltage.

Figure 5(a)は時定数の β 依存性の比較を表す。横軸は β 、縦軸は時定数であり、赤い点が等価回路モデル、緑の点がシングルセルモデルである。(b)の縦軸は電圧となっている。この二つの結果より、時定数は両モデルで一致し、電圧が等価回路モデルのほうが少しだけ小さくなっている。これはセル間の結合が影響しているのではないかと考えられる。

次に、ビームのみを通過させた場合の結果を示す。

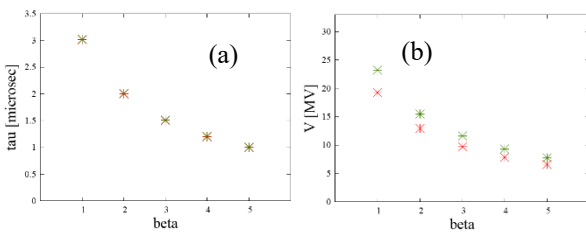


Figure 6: The comparison of multi cells model and single cell model. (a)The beta dependency of time constant. (b)The beta dependency of voltage.

Figure 6(a), (b)ともに、RF のみを入力した場合と同じような結果が得られた。

ここで、等価回路モデルにおいて、RF のみを入力した場合とビームのみを通過させた場合それぞれの空洞全体の電圧の時間発展を示す。

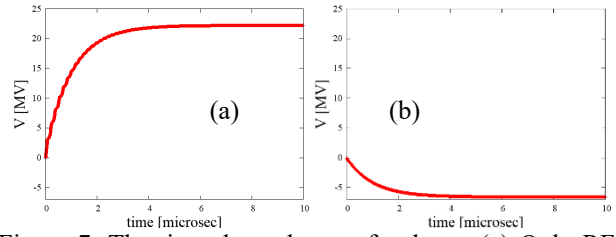


Figure 7: The time dependency of voltage. (a) Only RF. (b) Only beam.

Figure 7の横軸は時間、縦軸は電圧を表す。この結果は $\beta = 5$ の結果である。等価回路モデルの場合でも、電圧は $1 - e^{-t/\tau}$ に比例していることが分かる。

次に、RF とビーム両方を入れた場合の結果を示す。シングルセルモデルの場合、空洞の生じる電圧は、ビームの入力を開始する時間を t_b として、

$$V = V_{RF} \left(1 - e^{-t/\tau}\right) - V_{Beam} \left(1 - e^{-(t-t_b)/\tau}\right) \quad (8)$$

と表される。 V_{RF} 、 V_{Beam} はそれぞれ、定常状態におけるRF、ビームによる電圧を表す。ビームローディングを補償するためには、電圧が時間によらず一定となればよいので、

$$\frac{dV}{dt} = 0 \quad (9)$$

となればよい。これを満たすための条件は、

$$\begin{aligned} V_{RF} \frac{1}{\tau} e^{-t/\tau} - V_{Beam} \frac{1}{\tau} e^{-(t-t_b)/\tau} &= 0 \\ e^{t_b/\tau} &= \frac{V_{RF}}{V_{Beam}} \\ t_b &= \tau \ln \frac{V_{RF}}{V_{Beam}} \end{aligned} \quad (10)$$

となり、この時間でビームの入力を開始すればよい。等価回路モデルにおいても(10)式でビームを通過させ、ビームローディング補償が可能であるか調べた。この時、 V_{RF} と V_{Beam} は Fig. 7で示した結果を用いた。

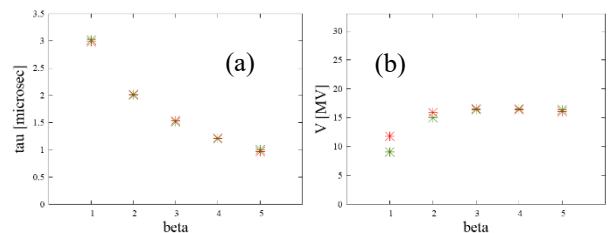


Figure 8: The comparison of multi cells model and single cell model. (a)The beta dependency of time constant. (b)The beta dependency of voltage.

Figure 8より、RF とビーム両方を入力した場合も β 依存性は両モデルで同じになることが分かった。

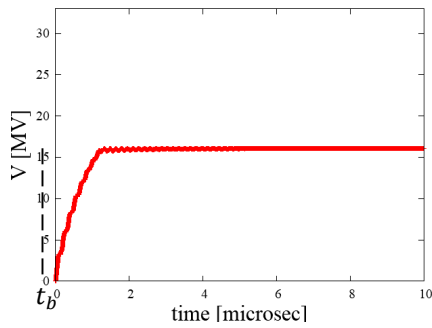


Figure 9: The time dependency of voltage. ($\beta = 5$).

Figure 9 は、空洞全体の電圧の時間発展を示す。ビームを入力し始めた時間 t_b は $t_b = 1.22 \mu\text{sec}$ であり、 $t_b \leq t \leq 4 \mu\text{sec}$ での電圧の値は、 $16.6 \pm 0.07 \text{ MV}$ となり、十分にビームローディング補償が行われているという結果が得られた。

5. 陽電子捕獲率への影響

等価回路モデルで得られた結果が陽電子捕獲率への程度影響するのかを評価した。キャプチャーライナックの加速空洞をシングルセルモデルとし、キャプチャーライナック出口での陽電子バンチのエネルギーを変化させたときの陽電子捕獲率の変動は Fig. 10[5] のようになる。

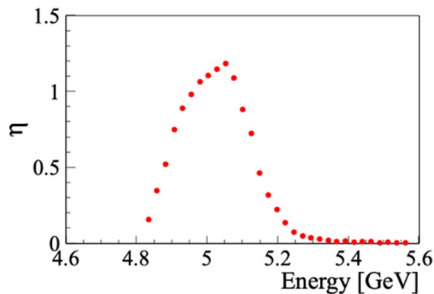


Figure 10: The energy dependency of η .

η をエネルギーの関数とすると、その誤差 $\Delta\eta$ は、

$$\Delta\eta = \frac{\partial\eta}{\partial E} \Delta E \quad (11)$$

$$\Delta E = \frac{\sigma}{V} \bar{E} \quad (12)$$

となる。ここで、Fig. 10 において、 $5.05 \leq E \leq 5.20$ の範囲を直線と近似すると、

$$\frac{\partial\eta}{\partial E} = \frac{1.2 - 0.2}{5.20 - 5.02} = 6.7 \text{ GeV}^{-1} \quad (13)$$

となる。また、キャプチャーライナック出口での陽電子バンチの位相空間分布は、次のようになる。

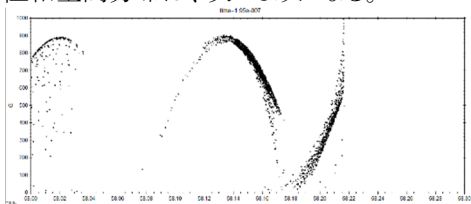


Figure 11: The phase space of positron.

Figure 11 の横軸は金属標的からの距離、縦軸はローレンツ γ である。Figure 11 より、キャプチャーライナック出口での陽電子バンチの平均エネルギーは、

$\bar{E} = 368 \text{ MeV}$ となるので、(12)式より、

$$\Delta E = \frac{0.07}{16.6} \times 368 = 1.55 \text{ MeV} \quad (14)$$

となる。(13)式と(14)式から、

$$\Delta\eta = 6.7 \times 1.55 \times 10^{-3} = 0.01 \quad (15)$$

すなわち、陽電子捕獲率は $\eta = 1.2 \pm 0.01$ となり、キャプチャーライナックでの陽電子加速への影響は限定的だが、ルミノシティなどへの影響に関しては検討が必要である。

6. まとめ

本研究では ILC 陽電子源の設計を行い、課題となっているビームローディング補償を等価回路モデルを用いて行った。ビームを通過させる時間を調整することでビーム通過後の空洞に生じる電圧は $16.6 \pm 0.07 \text{ MV}$ となり、ビームローディング補償が行われていると分かった。また、陽電子捕獲率へ影響を調べた結果、 $\eta = 1.2 \pm 0.01$ となり、ビームローディング補償を行った時のエネルギーの変動が陽電子加速に及ぼす影響は小さいと言える。

謝辞

本研究を進めるにあたって、栗木雅夫教授や Liptak Zachary John 助教にはミーティングのほかにも様々な場面でアドバイスをいただきました。また、ILC 陽電子源のメンバーの方々には毎週のミーティングで、多くのコメントやアドバイスをいただきました。学生であり、まだまだ至らぬ点も多い筆者の研究に関して問題点や改善点を熱心に考えてくださり、研究の手助けになっていると強く感じています。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] 大西 幸喜, “加速器の基礎とダンピングリング”, OHO(2006).
- [3] T. Shintake, “ANALYSIS OF THE TRANSIENT RESPONSE IN PERIODIC STRUCTURES BASED ON A COUPLED-RESONATOR MODEL”, 1999.
- [4] S. Konno *et al.*, “電子駆動 ILC 陽電子源のための等価回路モデルを用いた Alternate Periodic Structure 空洞におけるビームローディング補償の研究”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Aug. 8- 12, 2021, WEP035
- [5] 名越久泰, “電子ビーム駆動方式 ILC 陽電子源の設計研究”, 平成 30 年度 広島大学大学院修士論文.