

電子ビーム駆動方式 ILC 陽電子源におけるビームローディングの 補正

CORRECTION FOR TRANSIENT BEAM LOADING ON POSITRON GENERATION IN THE ELECTRON-DRIVEN ILC POSITRON SOURCE

名越久泰^{#, A)}, 栗木雅夫^{A)}, 高橋徹^{A)}, 大森恒彦^{B)}, 浦川順治^{B)}, 佐藤政則^{B)},
清宮祐史^{B)}, 住友洋介^{C)}, 柏木茂^{D)}, 根岸健太郎^{E)}

Hisayasu Nagoshi^{#, A)}, Masao Kuriki^{A)}, Tohru Takahashi^{A)}, Tsunehiko Omori^{B)}, Junji Urakawa^{B)}, Masanori Satoh^{B)},
Yuji Seimiya^{B)}, Yoske Sumitomo^{C)}, Shigeru Kashiwagi^{D)}, Kentaro Negishi^{E)}

^{A)} Hiroshima University / AdSM, ^{B)} KEK, ^{C)} Nihon University, ^{D)} Tohoku University / ELPH, ^{E)} IwateUniversity

Abstract

The International Linear Collider (ILC) is a next-generation accelerator for high-energy physics to study the Higgs and top sector in the Standard Model, and new physics such as supersymmetry and dark matter. ILC positron source based on Electron-driven method has been proposed as a reliable technical backup. In this article, we report the design study of the positron source based on the off-the-shelf RF components. The positron is generated and accelerated in a multi-bunch format. To compensate the energy variation by the transient beam loading effect, we employ Amplitude Modulation technique and the results were $16.62 \pm 0.17-0.11$ MV (peak-to-peak) for L-band 2m cavity driven by 22.5 MW power and 25.87 ± 0.19 MV (peak-to-peak) for S-band 2m accelerator driven by 36 MW power with 0.78 A beam loading..

1. はじめに

国際リニアコライダー(ILC)は重心エネルギー250GeVから1TeVの電子陽電子衝突型の線形加速器である。ILCはヒッグス粒子やトップクォークの大量生成や超対称性粒子の発見などの高エネルギー物理学への貢献が期待される[1]。ILCでの陽電子生成方法の1つとして高エネルギー電子を金属ターゲット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。ILCは線形加速器のため粒子を使いまわすことができず、一度に大量の陽電子の生成する必要があるため、熱負荷による金属標的の破壊が危惧される。標的の破壊を防ぐために効率的に陽電子を生成しなければならない。これまでのシミュレーション研究の結果ではDR(Damping Ring)アクセプタンス[2]内に1入射電子あたり約2.0個の陽電子が捕獲できることが分かっている[3]。これは標的破壊の観点からみても十分な数である。このシミュレーションではビームローディングの効果を考慮して行った。しかし、過渡的なビームローディングがマルチバンチ加速に与える影響については考慮していない。過渡的ビームローディングによって各バンチの加速電圧が変化してしまうことで各バンチの陽電子の捕獲率も変化する。各バンチの捕獲率が変化するとパルス内でバンチの電荷量が変ってしまう。各バンチの電荷量変化することで、メインライナックでお加速や衝突点での衝突において影響を与える可能性がある。バンチごとの電荷量の違いがメインライナックの加速や衝突に与える影響の詳細は分かっていない。しかし、バンチごとの電荷量の差は小さい方が望ましい。そのため、過渡的ビームローディングの影響を補正し、各バンチの電荷量の差を抑える必要がある。

ここでは、電子ビーム駆動方式 ILC 陽電子源に使用

される L-Band と S-Band の進行波加速管における過渡的ビームローディングの補正と、バンチごとの捕獲効率の変化について議論する。

2. 電子ビーム駆動方式 ILC 陽電子源

Figure 1は電子ビーム駆動方式 ILC 陽電子源の概要を示したものである。電子 drive linac で電子を 3GeV に加速し、金属標的に入射し、電磁シャワーとして陽電子を生成する。標的に生成された陽電子は AMD (Adiabatic Matching Device)で横方向の運動量が抑制され、36本の11セル定在波加速管で250MeV程度まで加速される。その後、シケインによってエネルギーの大きくずれた陽電子と一緒に生成された電子を排除する。残った陽電子を booster linac の L-Band と S-Band の進行波加速管で 5GeV 程度に加速する。最後に ECS(Energy Compressor Section)でエネルギー広がり抑制し DR (Damping Ring)へと送られる。最終的に DR アクセプタンス内に1バンチ当たり50%のマーヅンを含む4.8nCの陽電子が必要となる。

ILCではバンチ当たり4.8nCの陽電子を1300バンチの5Hzで運転する。しかし、これでは標的への負荷が大

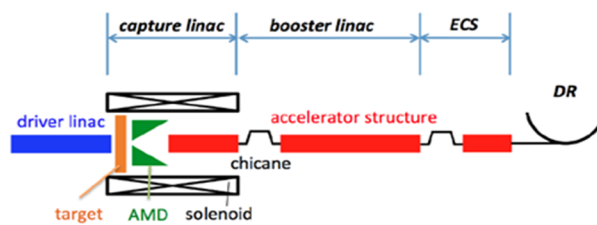


Figure 1: Schematic view of ILC E-driven Positron source [2].

きくなる。そのため、Fig. 2 のように 33 バンチのミニトレインが 2 つのパルスを 100Hz、パルス間隔 3ms で陽電子生成を行い、標的への負荷を低減させる。バンチ間隔は 6.15ns である。このように ILC ではマルチバンチ加速を行う。マルチバンチ加速では過渡的のビームローディングにより各バンチのエネルギーが変動する。特に先頭のバンチではエネルギー変動が大きい。エネルギーが変化すると位相空間の分布がシフトすることで陽電子の捕獲率も変化してしまう。

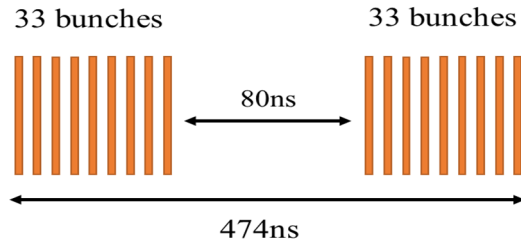


Figure 2: Macro pulse structure of positron source based on Electron-driven. There are two mini-trains in a macro pulse. A mini-train has 33 bunches with 6.15 ns bunch spacing.

3. 進行波加速空洞でのビームローディングの補正

進行波加速空洞における加速電圧は、ラプラス変換における変数 s を用いて

$$V(s) = \frac{\omega L E(s)}{Q(1 - e^{-2\tau})(s + \omega/Q)} (1 - e^{-(s+\omega/Q)t_f}) - \frac{\omega r_0 L I(s)}{2Q(1 - e^{-2\tau})s} \left[1 - e^{-\frac{\omega}{Q}t_f} - \frac{\omega(1 - e^{-st_f - 2\tau})}{Q(s + \omega/Q)} \right] \quad (1)$$

と表すことができる[4]。 ω は角周波数、 L は加速空洞の長さ、 t_f は Filling time、 τ は attenuation、 $E(s)$ 、 $I(s)$ は電場とビーム電流の時間変化をラプラス変換したものである。Equation (1) に加速空洞内の電場の時間変化 $E(t)$ とビーム電流 $I(t)$ をラプラス変換した $E(s)$ と $I(s)$ を代入し、逆ラプラス変換することで時間ドメインの加速電圧 $V(t)$ を求めることができる。

実際の電子ビーム駆動方式 ILC 陽電子源の Booster Linac で使用される L-Band と S-Band の進行波加速空洞のパラメータは Table 1 である。ビーム電流の時間変化は Fig. 2 の実際のパルス構造を仮定し、Filling Time 経過した時最初のバンチの加速を始めるものとして Fig. 3 のように表すことができる。ここでは、ビーム電流の値を $4.8\text{nC}/6.15\text{ns}=0.78\text{A}$ とした。

Table 1: Parameter of the TW Cavities of L-Band and S-Band

Parameter	L-Band	S-Band	Unit
Frequency	1298	2856	MHz
Shunt Impedance	47.2	57.8	M Ω /m
Minimum Aperture (2a)	34	20	mm
Filling time	1.28	0.505	μ s
Q Value	20000	13600	
Attenuation	0.261	0.333	
Length	2.0	1.956	m
Max RF power	22.5	36	MW

空洞内の電場と入力パワー P は

$$P = \frac{E^2}{2\alpha r_0} \quad (2)$$

のような関係がある[4]。 α は減衰パラメータで、 r_0 はシャ

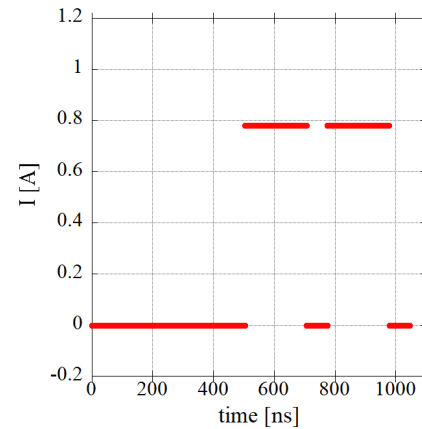
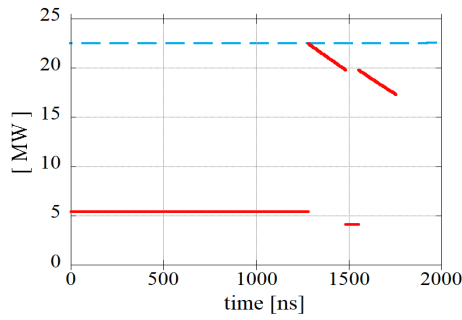


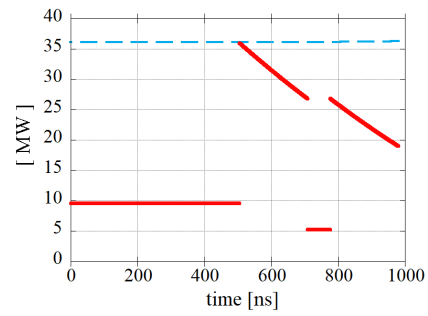
Figure 3: Temporal profile of the beam current of the positron pulse.

ントインピーダンスである。Figure 4(a)および(b)のように、各々 L-Band と S-Band の進行波加速空洞において入力パワー P を変調することで、Fig. 4(c)および(d)のように陽電子が加速される間の加速電圧を完全に一定にするような完全補正を行うことができる。この時の加速電圧は L-Band が 14.40 ± 0.00 MV で、S-Band が 23.00 ± 0.00 MV である。

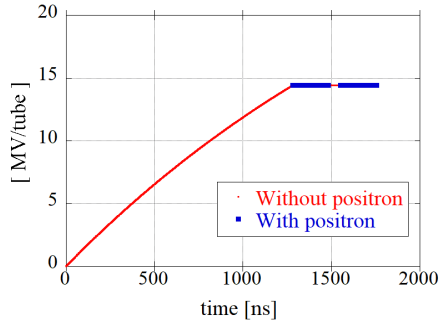
実際の電子ビーム駆動方式 ILC 陽電子源のパルス構造を仮定しても完全補正が可能であることが分かった。しかし、入力パワーの時間変化の凸部によってパワーが制限されるため最大パワーを上手く活用することができず、効率的に加速を行うことができない。そこで、バンチ



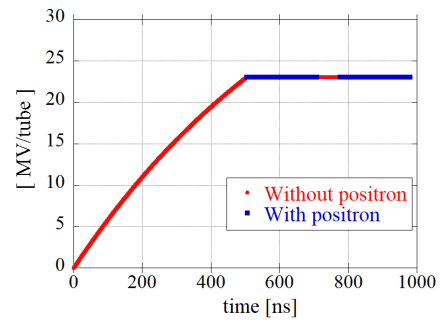
(a) Amplitude modulation at perfect compensation in L-Band TW accelerator.



(b) Amplitude modulation at perfect compensation in S-Band TW accelerator.

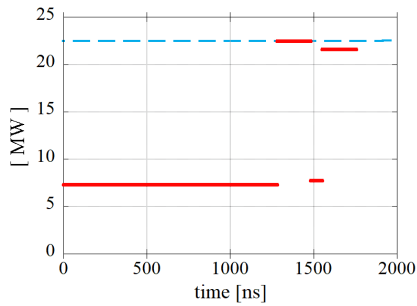


(c) Accelerating voltage at perfect compensation in L-Band TW accelerator.

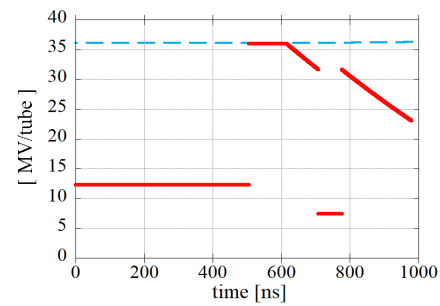


(d) Accelerating voltage at perfect compensation in S-Band TW accelerator.

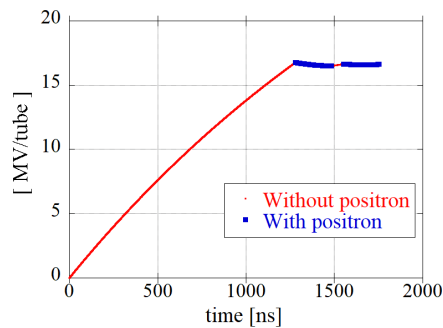
Figure 4: Accelerating voltage and amplitude modulation at perfect compensation. A light blue line is maximum power.



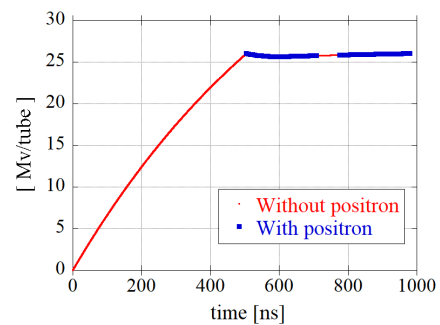
(a) Amplitude modulation at quasi-perfect compensation in L-Band TW accelerator.



(b) Amplitude modulation at quasi-perfect compensation in S-Band TW accelerator.



(c) Accelerating voltage at perfect quasi compensation in L-Band TW accelerator.



(d) Accelerating voltage at perfect quasi compensation in S-Band TW accelerator.

Figure 5: Accelerating voltage and amplitude modulation at quasi perfect compensation. A light blue line is maximum power.

ごとの加速電圧の変化をある程度許容することで平均加速電圧上げるような補正を検討した。このような補正を準完全補正と呼ぶ。Figure 5(a)は L-Band 進行波加速空洞の準完全補正の時のパワーの変調である。

Filling time までの入力パワーを上げ、入力パワーの変調をフラットにすることで最大パワーを効率的に使用した。L-Band の加速電圧は $16.62 \pm 0.17 - 0.11$ MV (peak-to-peak) で、平均値で完全補正の時より 15% 上昇した。バンチごとの加速電圧の広がり peak to peak で 1.7% となった。Figure 5(b)は S-Band 進行波加速空洞の準完全補正の時のパワーの変調である。全体的にパワーを上げて、最大パワーを超えた凸部をカットしたような変調を行う。S-Band の加速電圧は 25.76 ± 0.19 MV (peak to peak) で、平均値で完全補正の時よりも 12% 上昇し、バンチごとの加速電圧の広がり peak to peak で 1.5% となった。次章では L-Band と S-Band の準完全補正の際のバンチごとの加速電圧の広がり陽電子捕獲率に与える影響について検討する。

4. 加速エネルギーへの影響

Table 2 は Booster Linac で使用される L-Band と S-Band の進行波加速空洞の本数を示したものである。この Booster Linac のすべての加速空洞で準完全補正を行うとして Booster 出口で各々のバンチがどれくらい加速されるかを見積もったものが Fig. 6 である。Capture Linac 出口でのすべてのバンチの平均エネルギーは 252MeV とした。

Table 2: Number of the TW Cavities of L-Band and S-Band

TW cavities	Number
L-Band	144
S-Band	92

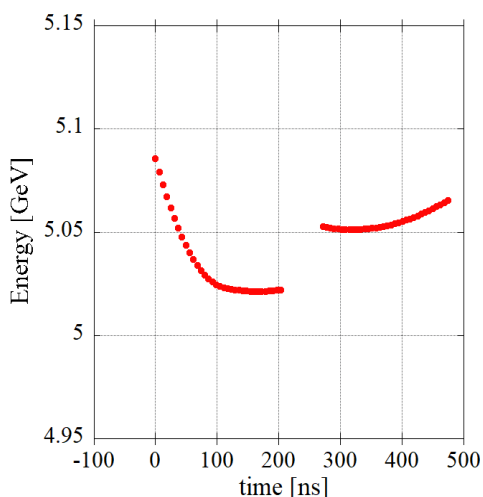


Figure 6: Expected energy after the booster for the macro-pulse. The horizontal axis is the time in the macro-pulse.

バンチごとのエネルギーの平均は $5.05 \pm 0.04 - 0.02$ GeV でエネルギー広がり peak to peak で 1.3% となった。

5. まとめ

電子ビーム駆動方式 ILC 陽電子源の Booster linac の進行波加速管における過渡的ビームローディングの補正についての検討を行った。振幅変調によってバンチごとの加速勾配の広がりを完全に抑制することが可能であることが分かった。完全補正を行えば、バンチごとに加速電圧が変化することはなく、バンチごとの電荷量を一定にできる。しかし、最大パワーの制限から加速電圧が制限されるため、加速電圧が低くなってしまふ。加速電圧が低いと多くの加速管を使う必要がある。そのため完全補正を行い、加速管の数を増やすのはコストの面から考えても効率的ではない。そこで、バンチごとの加速勾配の広がりを 1.5% 程度許容する準完全補正を行うことを検討した。その結果、加速電圧を 12~15% ほど回復させることができた。準完全補正を行った際に予想されるバンチごとのエネルギー求め、 $5.05 \pm 0.04 - 0.02$ GeV という値を得た。

参考文献

- [1] ILC Technical Design Report, KEK-Report 2013-1, 2013.
- [2] Y. Seimiya, "Positron capture simulation for the ILC electron-driven positron source", PTEP(2015)103G01, 2015.
- [3] M. Kuriki, "A Simulation Study of E-driven ILC Positron Source", LCWS 2017, 2017.
- [4] OHO1990, 竹田誠之, "リニアックの基礎"