

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

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)}

A) 広島大学, B) KEK, C) 日本大学,
D) 東北大学電子光センター, E) 岩手大学

目次

- ILCについて
- 電子ビーム駆動方式ILC陽電子源の概要
- 進行波加速管におけるビームローディングの補正

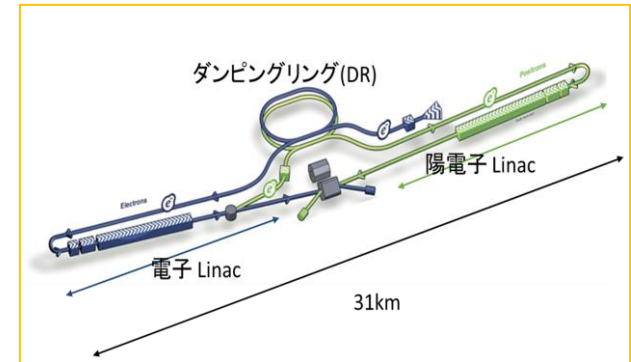
ILC (International Linear Collider)

- 電子、陽電子コライダー

→素粒子とその反粒子の衝突のため
クリアな素粒子反応が観測可能

- 線形衝突型加速器

→従来の円形加速器では達成できなかった
中心エネルギー250 GeV ~ 1 TeVでの運転が可能

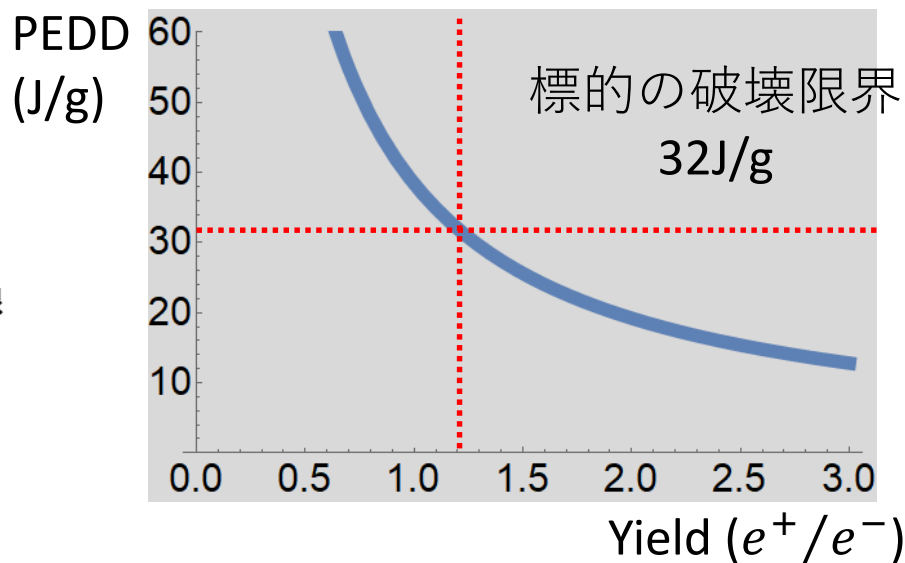
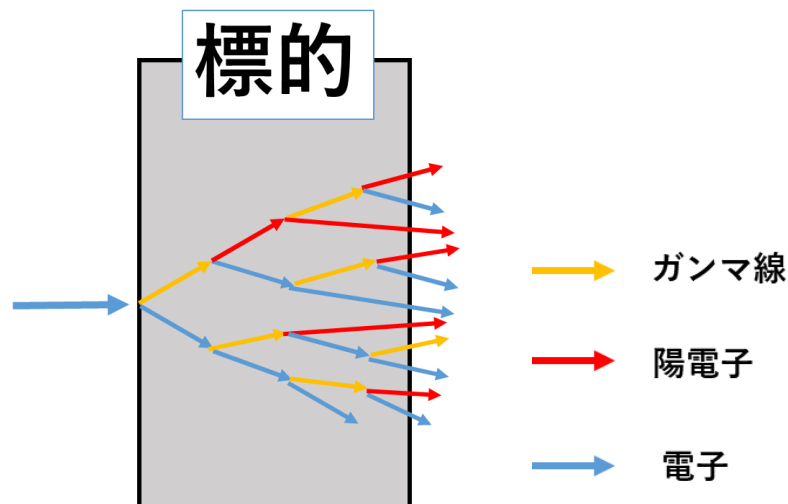


- ヒッグス粒子の詳細研究や未発見の粒子の発見が期待
- 粒子が使い捨てとなるため、大量の電子・陽電子の生成が必要（円形加速器のインジェクターの1000倍程度）

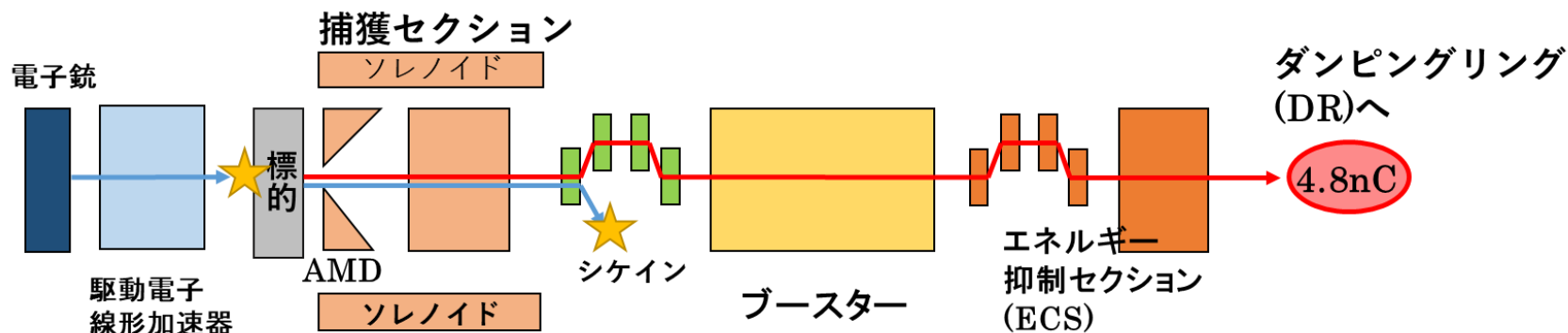
陽電子の生成方法

電子ビーム駆動方式

- ▶電子を標的金属に入射し、制動輻射と対生成反応の連鎖反応により電磁シャワーとして陽電子を生成。
- ▶技術的に成熟。
- ▶ILCでは、31 mC/secという大量の陽電子の生成が必要となるため、標的破壊が危惧される
⇒陽電子を効率よく生成することが必要。



電子ビーム駆動方式ILC陽電子源



電子銃 : CsTe陰極のL-BandのRF電子銃。

駆動電子線形加速器 : 40 MV/tube の常伝導加速空洞 × 75で3GeVに加速

AMD(Adiabatic Matching Device) : ピーク磁場は5 T。横方向運動量を抑制

捕獲セクション : ソレノイド磁場の強さは0.5 T。AMD出口の磁場と接続。

11セルL-Band定在波加速管 × 36で捕獲と加速を行う。

シケイン : 電子とエネルギーの大きくずれた粒子を排除。

ブースタ : L-BandとS-Bandの進行波加速管で5 GeVまで加速。

ECS : シケイン × 3とL-Band進行波加速管 × 4でエネルギー広がり抑制。

DRアクセプタン内に1バンチあたり4.8 nCの陽電子が必要。

ビームローディング

過渡的ビームローディング

前に通ったバンチの負荷によりバンチごとにエネルギーが変動すること。バンチごとのエネルギーの変動により
捕捉率も変動してしまう。

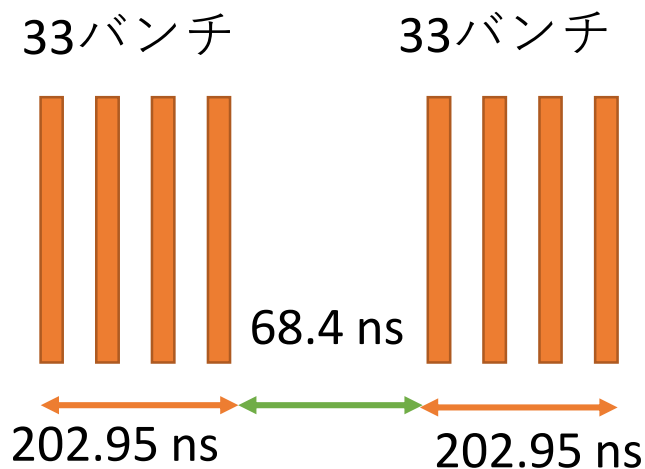
ビームローディング問題

- ・ 捕獲セクションの11セルL-Band定在波加速管
- ・ ブースターのL-BandとS-Bandの進行波加速管
- ・ ECSのL-Band進行波加速管

で問題となる。

パルス構造

ILCでは1300バンチを5 Hzで運転する。標的への負荷を考え、33バンチの2トレインを100 Hzで陽電子を生成する。



33バンチの2トレイン
バンチ当たりの電荷 4.8 (nC)
バンチ間隔 6.15 (ns)

このパルス構造を仮定して、過渡的ビームローディングによる加速エネルギーの変動を抑制し、陽電子捕獲率の均一にする必要がある。

目的

- ブースターの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影響について調べる。
- 実際のパルス構造を仮定し、RFの振幅変調を用いた補正について検討する。
- 補正後のバンチごと加速電圧からバンチごとの捕捉率とその広がりを求めた。

進行波加速管の加速電圧

パワーの進行方向の変化

$P(z,t)$: 加速管を通過するパワー

$$\frac{dP}{dz} = \underbrace{\left(\frac{dP}{dz}\right)_{wall}} + \underbrace{\left(\frac{dP}{dz}\right)_{beam}} = -2\alpha(z)P(z,t) - I(t)E(z,t)$$

電場を作る
ためのパワー

ビーム加速に
使われたパワー

α : 減衰パラメータ

$I(t)$: ビーム電流

E : 加速管内の電場

全微分 $\frac{dP}{dz} = \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial P}{\partial t} \frac{dt}{dz}$, 群速度 $\frac{dt}{dz} = \frac{1}{v_g}$ より

$$\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{1}{v_g(z)} \frac{\partial P}{\partial t} + 2\alpha(z)P(z,t) + I(t)E(z,t) = 0$$

$P = \frac{E^2}{2\alpha r_0}$ と Constant Gradient の条件より

$$\frac{\partial E}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial E}{\partial t} + I r_0 \alpha = 0$$



$$\frac{\partial E(z,s)}{\partial z} + \frac{s}{v_g} E(z,s) + I(s)r_0\alpha = 0 \quad \dots (*)$$

ラプラス変換

r_0 : シェントインピーダンス

進行波加速管の加速電圧

(*) の微分方程式を解くと

$$E(z, s) = E(0, s)e^{-st_z} - e^{-st_z}r_0I(s) \int_0^z e^{st_z}\alpha(z)dz$$

t_z : $z=0$ から z までRFが伝搬する時間

長さ L の加速管での加速電圧 $V = \int_0^L E(z, s)dz$

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

t_f : 加速管全体にRFのパワーが伝達する時間

$I(t), E(t)$ をラプラス変換した $E(s), I(s)$ を $V(s)$ に代入し、それを逆ラプラス変換することで、 $V(t)$ を求める

計算条件 ～実際のパラメータ～

L-Band進行波加速管

$$r_0 = 4.72 \cdot 10^7 \text{ (}\Omega/\text{m)}$$

$$L = 2.00 \text{ (m)}$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot 1.298 \cdot 10^9$$

$$Q = 20000$$

$$\tau = 0.261$$

$$P_{\max} = 22.5 \text{ (MW)}$$

$$t_f = 1.28 \cdot 10^{-6} \text{ (s)}$$

S-Band進行波加速管

$$r_0 = 5.78 \cdot 10^7 \text{ (}\Omega/\text{m)}$$

$$L = 1.959 \text{ (m)}$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot 2.856 \cdot 10^9$$

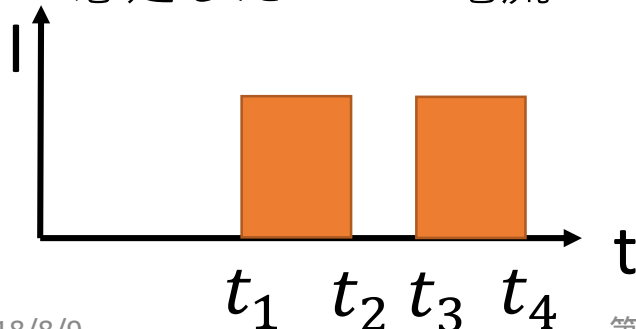
$$Q = 13600$$

$$\tau = 0.333$$

$$P_{\max} = 36.0 \text{ (MW)}$$

$$t_f = 0.505 \cdot 10^{-6} \text{ (s)}$$

実際のビームパルスを
想定したビーム電流



$$I(t) = I_0 U(t - t_1) - I_0 U(t - t_2) \\ + I_0 U(t - t_3) - I_0 U(t - t_4)$$

$$I_0 = 4.8 \text{ nC} / 6.15 \text{ ns} = 0.78 \text{ (A)}$$

U : ステップ関数

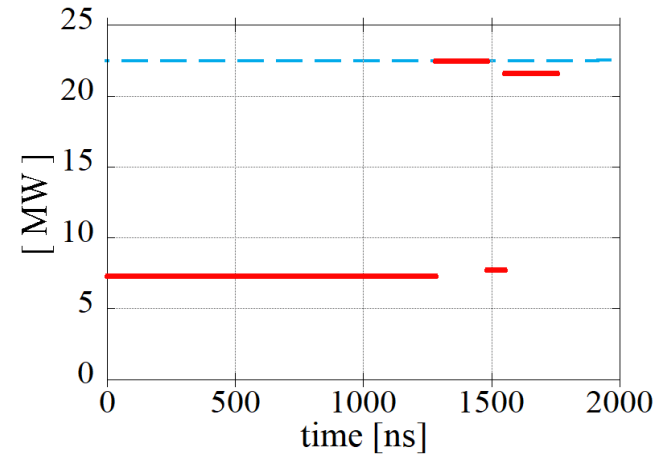
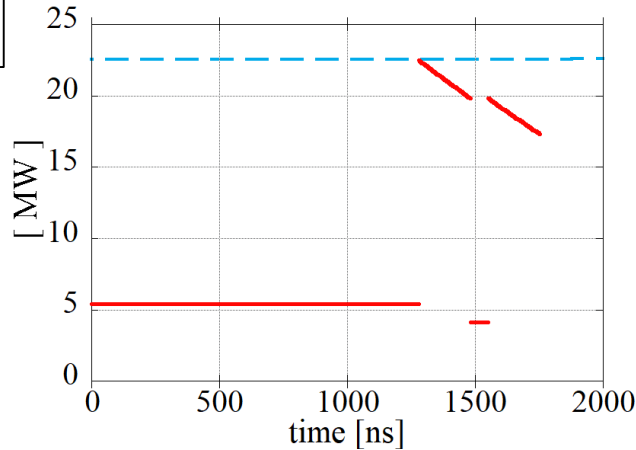
L-Band進行波加速管の加速電圧

水色の点線
 $P_{max} = 22.5MW$

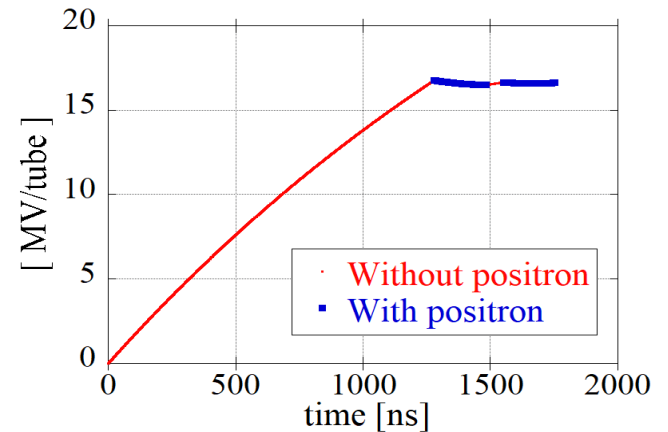
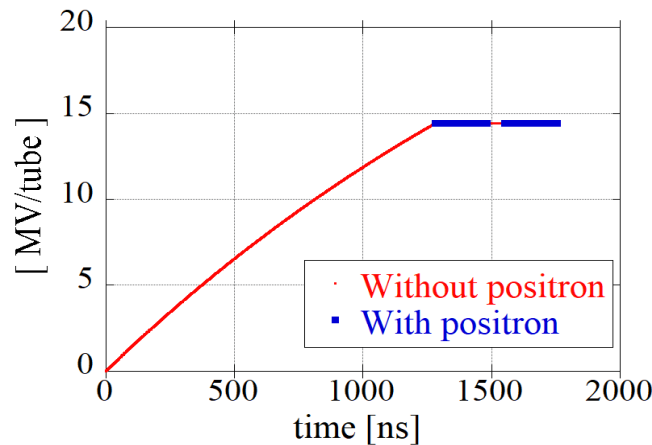
完全補正

準完全補正

入力パワー



加速電圧



$V = 14.42 \pm 0.00 \text{ (MV)}$

$V = 16.62 + 0.17 - 0.11 \text{ (MV)}$

加速電圧の広がりを1.7%許容することで、15%回復

(peak to peak)

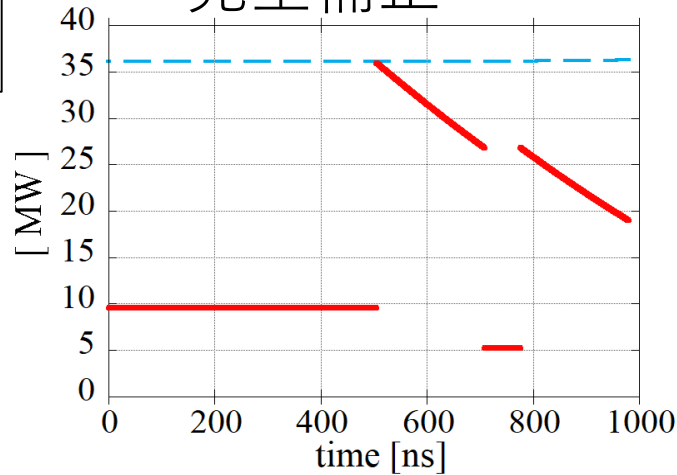
S-Bandの進行波加速管の加速電圧

水色の点線

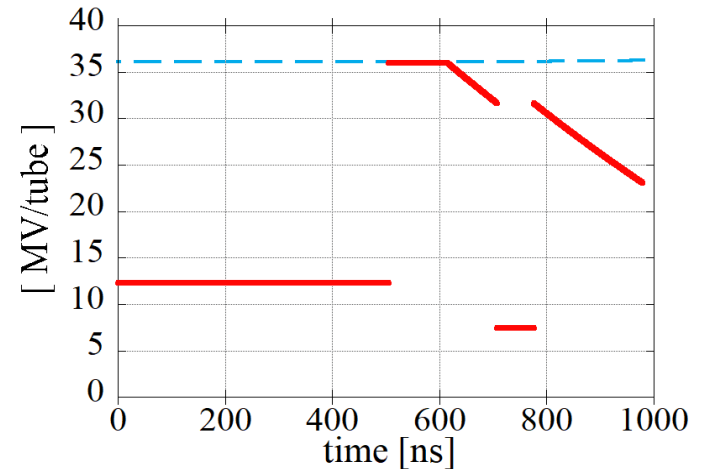
$$P_{max} = 36MW$$

入力パワー

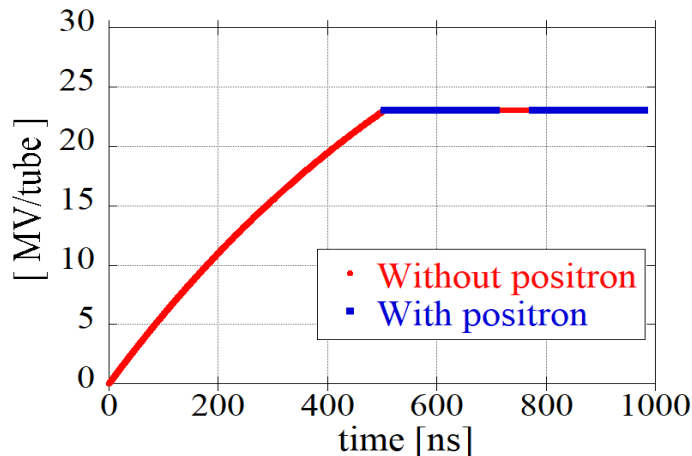
完全補正



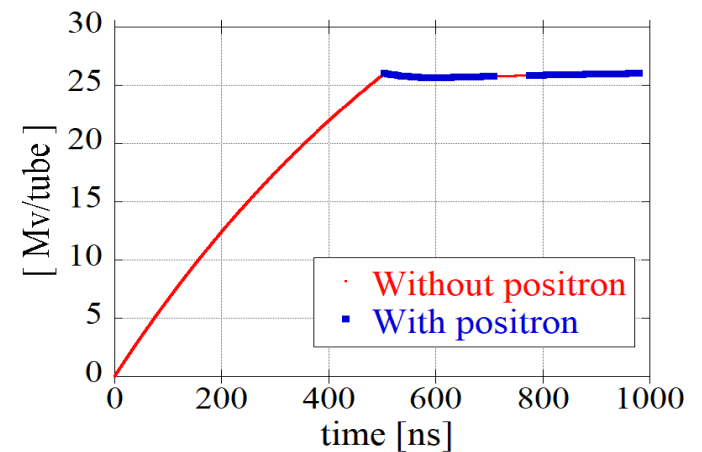
準完全補正



加速電圧



$$V = 23.05 \pm 0.00 \text{ (MV)}$$



$$V = 25.87 \pm 0.19 \text{ (MV)}$$

加速電圧の広がりを1.5%許容することで、12%回復 (peak to peak)

バンチごとのエネルギー

捕獲セクション後の
エネルギーは252MeV

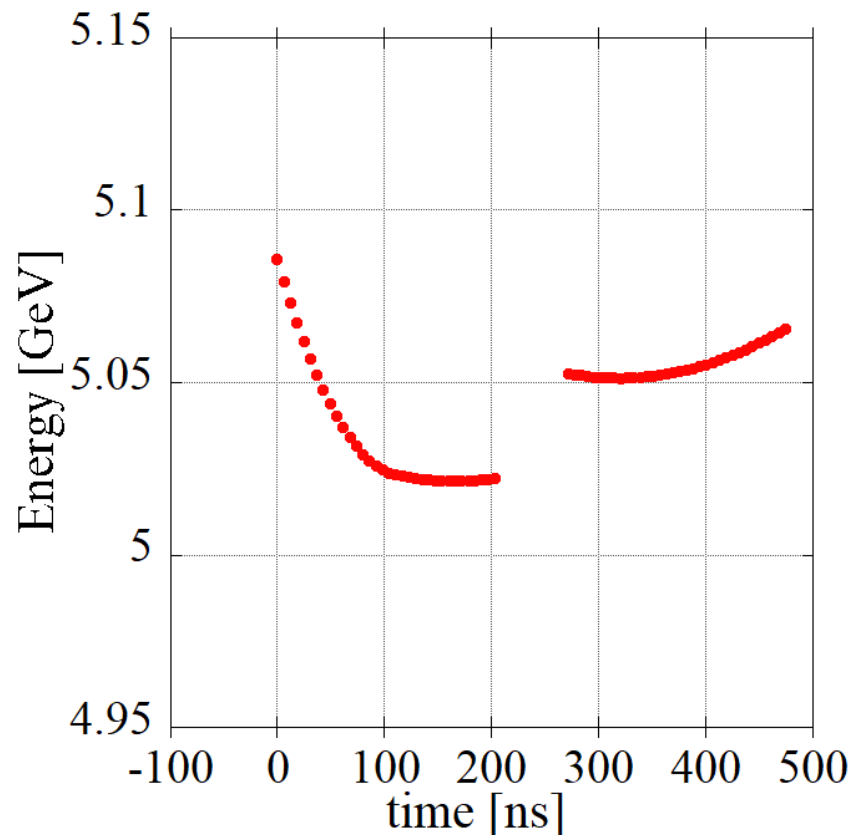
L-Band進行波加速空洞 × 144本
S-Band進行波加速空洞 × 92本
として

計算した準完全補正の
加速電圧から
到達エネルギーを計算

平均エネルギー

5.05GeV + 0.04 (0.81%)
- 0.02 (0.47%)
(peak to peak)

予想されるバンチごとの
ブースター後のエネルギー



一番最初のバンチを0s
とした時の時間

まとめ

- ・電子ビームドライブ方式LC陽電子源の進行波加速管における過渡的ビームローディングとその抑制方法について検討を行った。
- ・振幅変調により、過渡的ビームローディングの完全抑制が可能であるが、加速電圧が制限される。
- ・エネルギー広がりを1.5%程度許容することで、加速電圧が12～15%程度回復。
- ・振幅変調の帯域、場所によるビーム電流の変化を取り込むのが課題。