

# 電子駆動ILC陽電子源と その課題

AAA技術部会講演会

栗木雅夫

広島大学 先進理工系科学研究科

上大崎群島

# 目次

- 01** はじめに  
陽電子とは？
- 02** ILC電子ドライブ陽電子源の概要  
Overview of ILC E-Driven Positron source
- 03** 陽電子生成とRF補足  
Positron Generation and RF capture
- 04** キャプチャーライナック  
Capture Linac
- 05** 陽電子ブースターとECS  
Positron booster and ECS
- 06** まとめ  
Summary



# 01はじめに

下蒲刈島と川尻間にかかる  
安芸灘大橋からの眺め

# 陽電子とは？

テレサ（反物質） + 白色彗星帝国（物質） = 眩い閃光

電子（粒子） + 陽電子（反粒子） = ミニビッグバン

反粒子 = 粒子とあらゆる電荷などの量子数が逆の性質をもつ粒子のこと。粒子と反粒子が出会うと、その質量に相当する莫大なエネルギーを残して消滅する。

さらば宇宙戦艦ヤマト 愛の戦士達

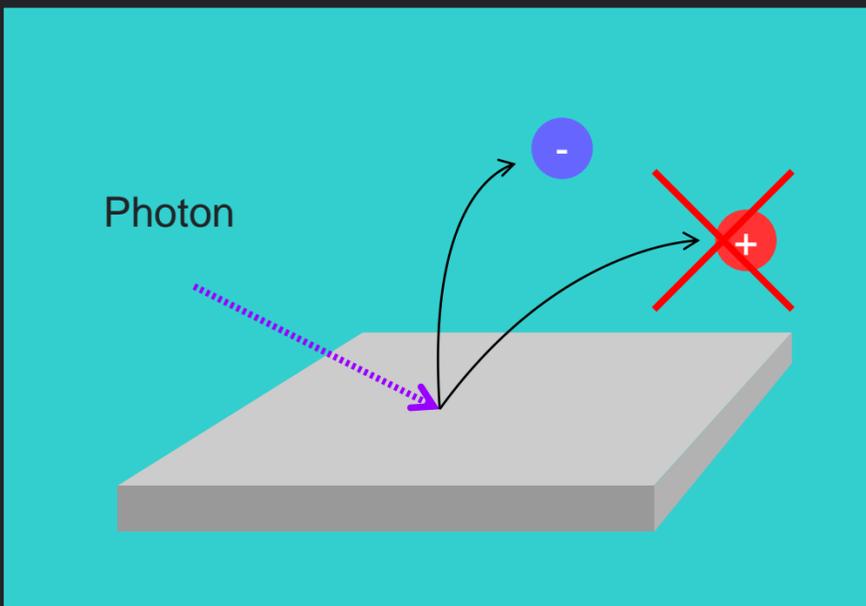
美しい光と共にテレザート星のテレサが現れ、自らの**反物質の身体**が役に立つと語った。そうして古代とヤマトは彼女にいざなわれるようにして超巨大戦艦に向かっていった。そして、宇宙の彼方で爆音と共に一筋の眩い閃光となって消えた。



# 陽電子

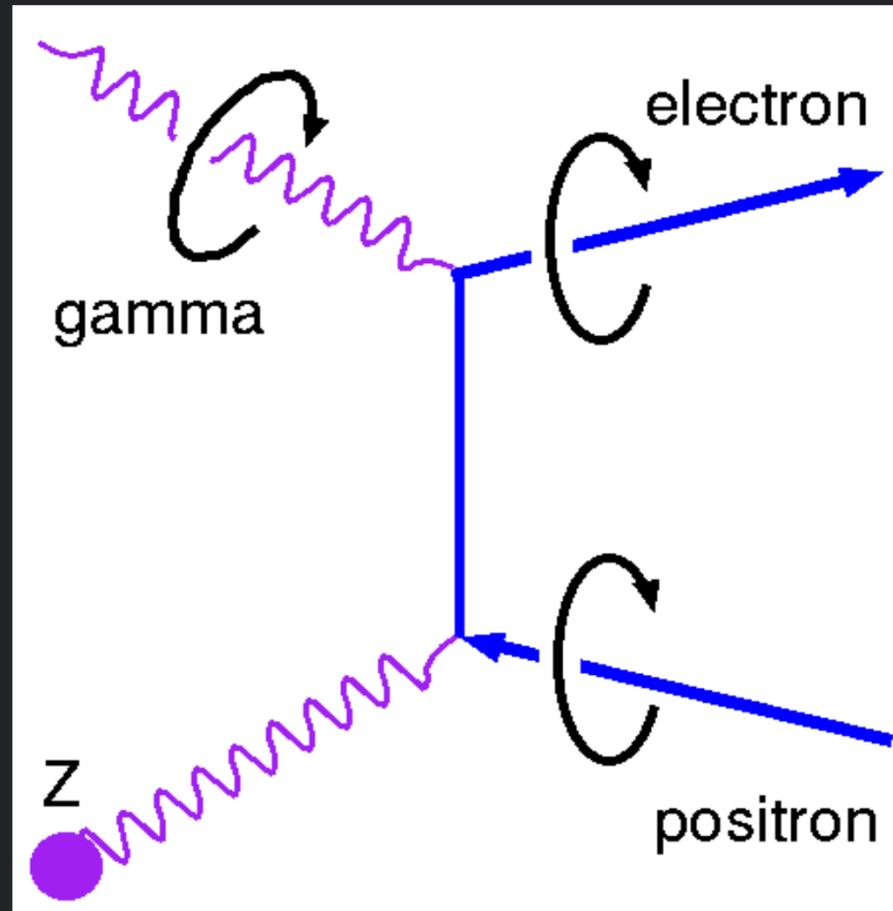
Positron

- 電子のパートナーとなる正電荷の反粒子。質量、寿命（無限大）、などの性質は電子と全く同じ。
- 電子は物質内に大量に存在するが、「反物質」は発見されていないため、陽電子は光電効果で得られない。
- ILCでは大量の陽電子ビームが必要。その数は1秒あたり $2 \times 10^{14}$
- SLC(スタンフォードリニアコライダー)  $5 \times 10^{12}$ , Super KEKB :  $6 \times 10^{12}$



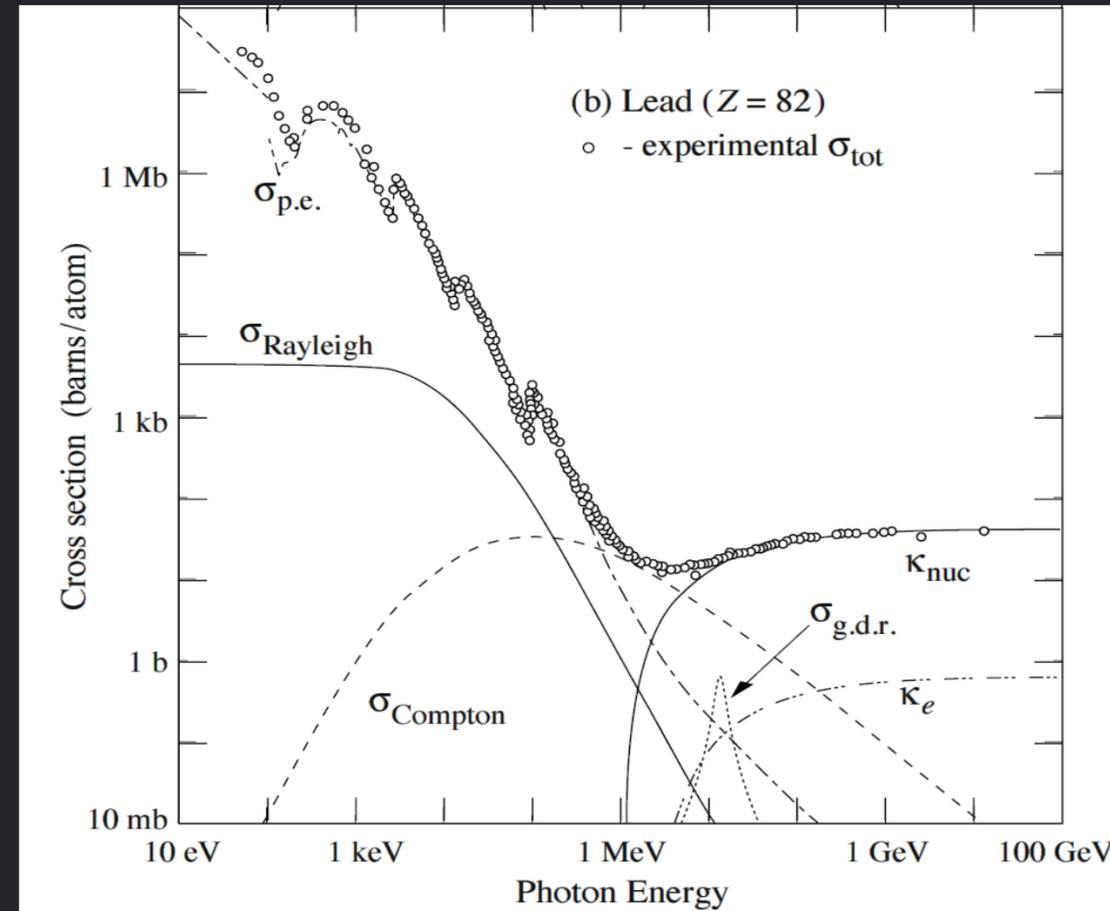
# 対生成反応 対消滅の逆反応

- 1.02 MeV以上のエネルギーのガンマ線が物質と相互作用を行うと、電子と陽電子が対となって現れる反応、対生成反応が生じる。
- しかし、ガンマ線を作るのは簡単ではない。



ガンマ線と物質の相互作用

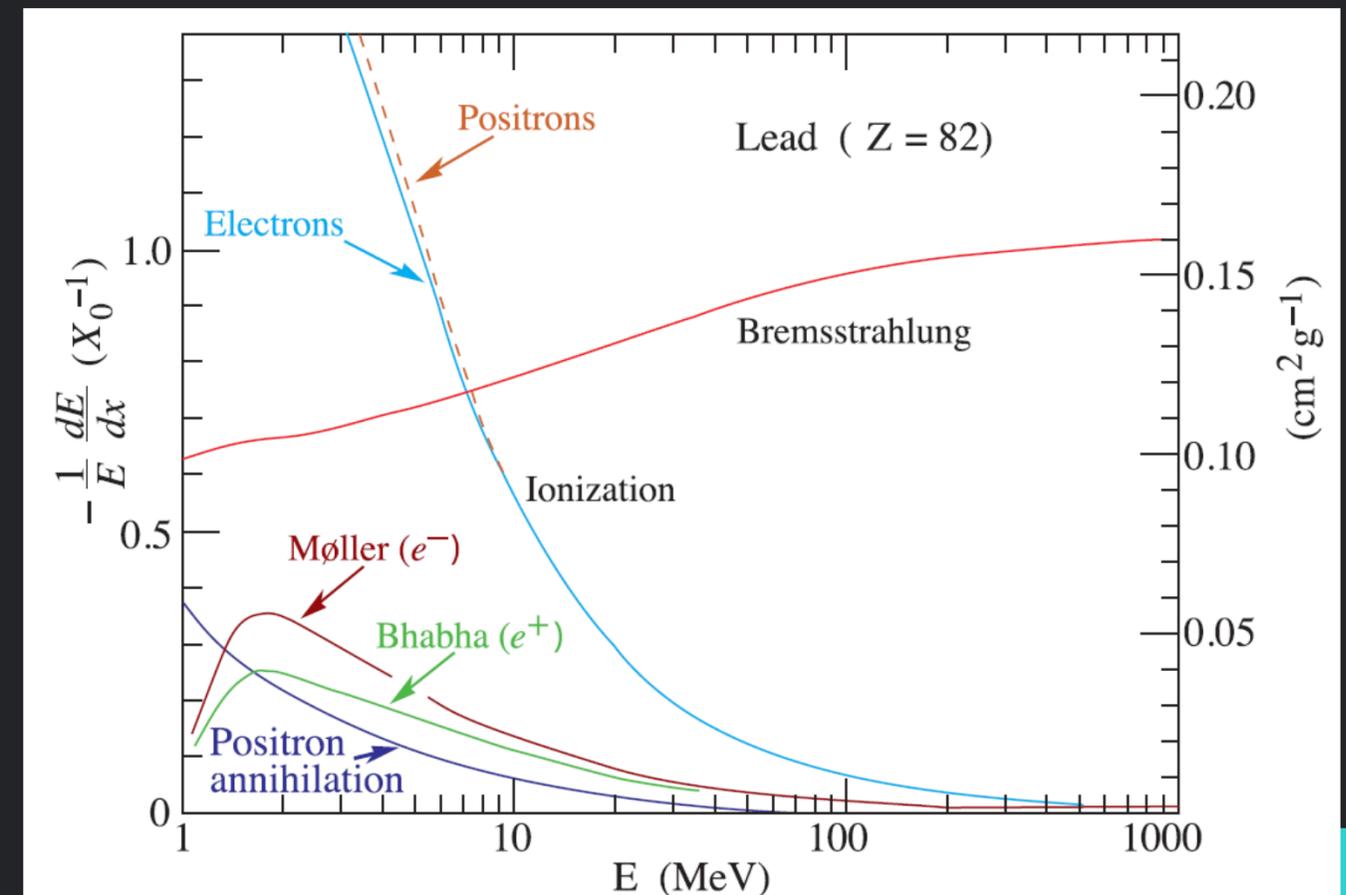
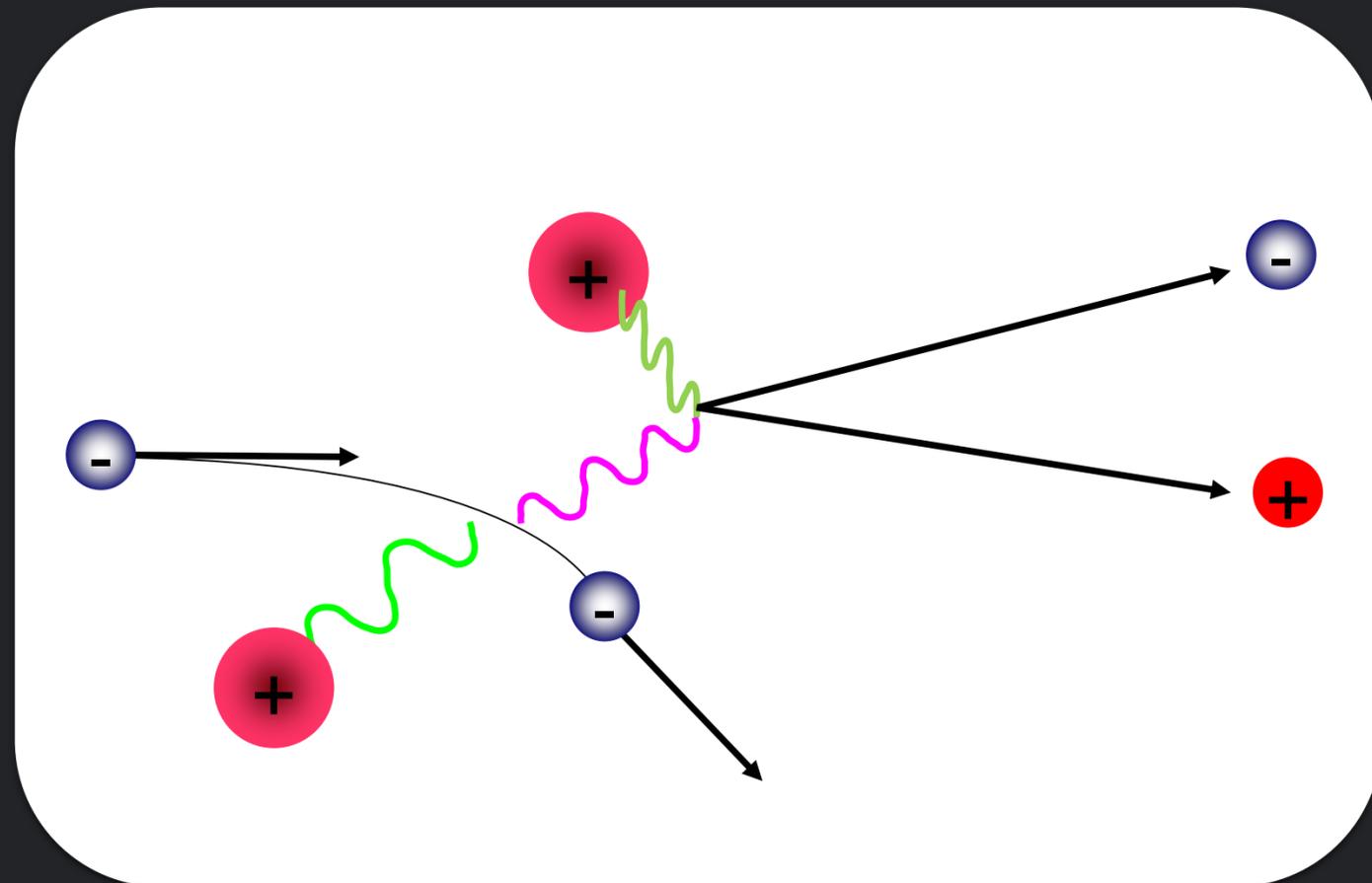
- 0 - 1keV : 光電効果
- 1keV - 10 MeV : コンプトン散乱
- 10 MeV - : 対生成



# 制動輻射と電磁シャワー

- 電子が物質内に入ると急制動をうけ、エネルギー保存から高エネルギーガンマ線を放出する(制動輻射、Bremsstrahlung).
- ガンマ線から対生成で発生した電子と陽電子も制動放射を行って、ガンマ線を放出する。

- 最初のひとつの電子が、沢山のガンマ線と電子・陽電子を作り出す(電磁シャワー)。
- 電子のエネルギーが低くなると、制動放射は起こらなくなる。(閾値エネルギー)。
- 発生する電子・陽電子数はエネルギーに比例する。



愛媛県今治市  
関前諸島岡村島岡村港

## 02 ILC電子ドライブ 陽電子源の概要

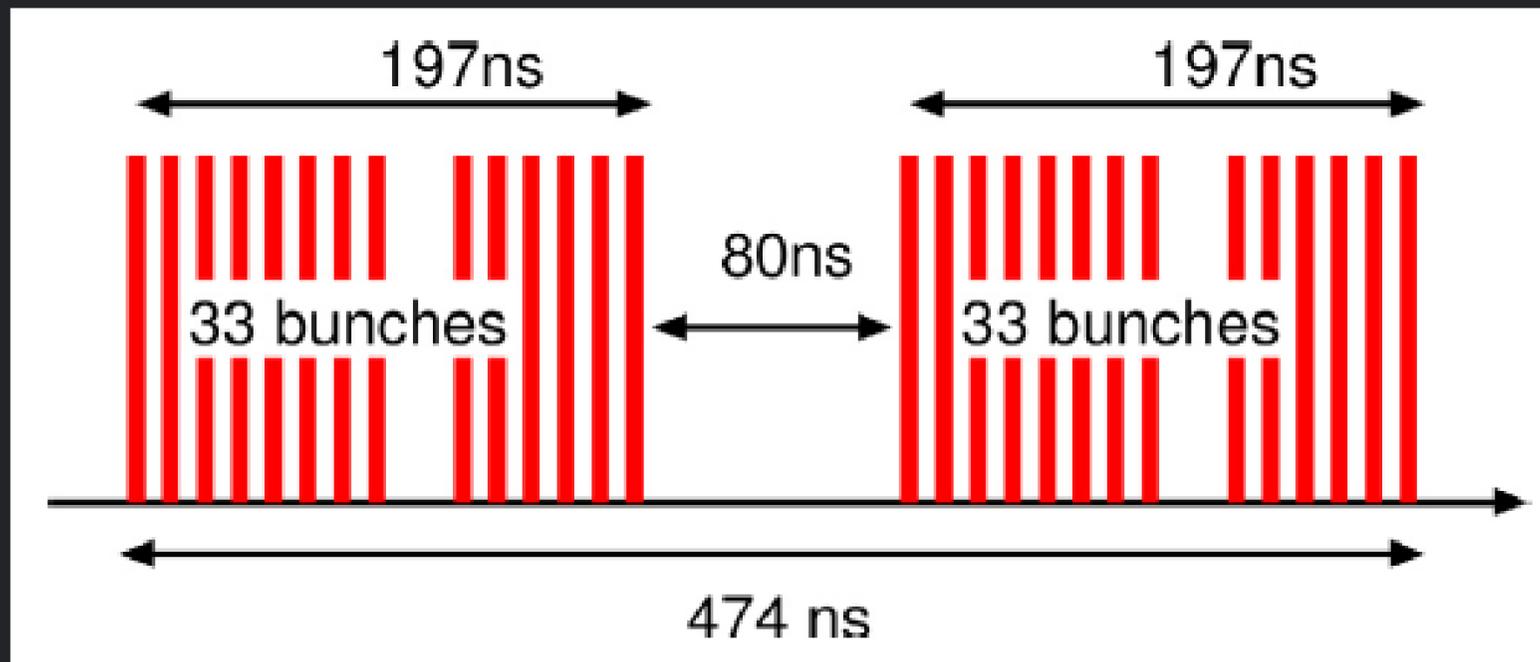
# 電子ドライブ陽電子源の概要



- リニアコライダーでは電子と陽電子はバンチと呼ばれる単位で取り扱われる。
- 一つのバンチには $4.8\text{nC}$  ( $3e+10$ 個) の電子と陽電子が詰め込まれる。
- これを0.2秒あたり1300個つくり、衝突点でぶつける。
- より具体的には0.2秒に一回、0.7ミリ秒間にわたり、 $0.55\mu\text{s}$ あたり一個のバンチをぶつける。
- 0.7ミリ秒間の衝突を開始する前に1300個のバンチを用意しておく。(雪合戦勝利のためには、事前に必要な雪玉を用意しておくこと)

# 陽電子バンチの生成

- 衝突の合間の0.2秒間に1300バンチを作っておく。
- 作った陽電子バンチは、DRというリングに貯めておく。
- 1300バンチをどのようなパターンでつくるか任意性がある。
- 66バンチをひとまとまりにして、これを3ミリ秒(300Hz)ごとに20回繰り返し、1300バンチをつくることにした。
- いっぺんに沢山のバンチをつくると、標的がとろける。
- 線形加速器の繰り返しを高くすると、電源は燃え、加速管が過熱する。
- 300Hzというのは、現実的な電源で無理なく運転できる範囲で、最も高い繰り返し。



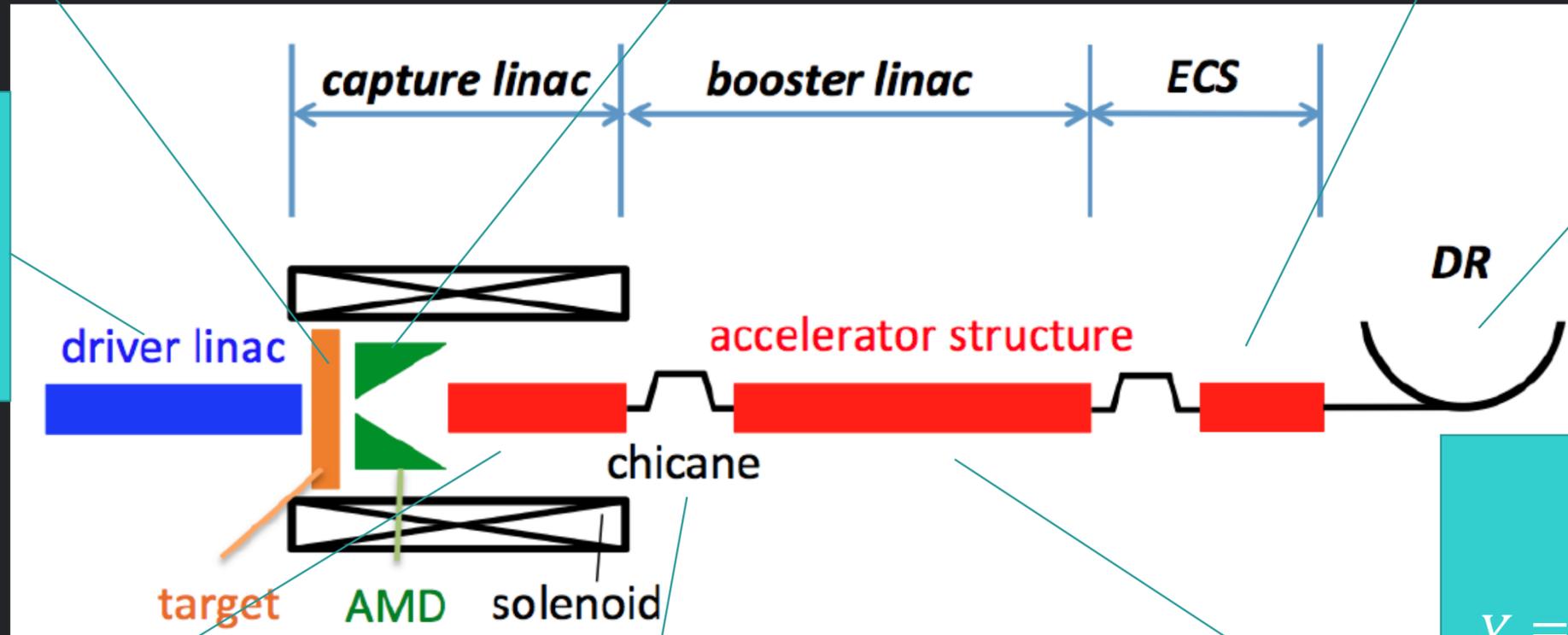
Parameter	Value	Unit
Drive beam energy	3.0	GeV
Bunch charge	4.0	nC
N of bunches in a pulse	66	bunches
Bunch spacing in a pulse	6.15	ns
Average current in a pulse	0.78	A
Pulse repetition	300(100)	Hz

16 mm 厚 W-Re(26) の  
ゆっくり回転する生成標  
的

5テスラの最大磁場を発生するパルス磁石 (Flux Concentrator)

エネルギー広がり抑制するECS : 6つのL-band常伝導進行波管、4つのシケイン軌道

3.0 GeV 4.0nC のバンチをつくる常伝導電子加速器



DRに入射された陽電子のうち、アクセプタンス内の人だけが生き残る

陽電子生成率

$$Y \equiv \frac{N \text{ of captured positrons}}{N \text{ of electrons}}$$

1.3 m L-band 常伝導APS 加速器からなる補足ライナック+ 0.5 テスラソレノイド

電子を取り除くシケイン

陽電子ブースター : 128 常伝導L-band進行波管+108 常伝導 S-band (2a=20 mm) 進行波管

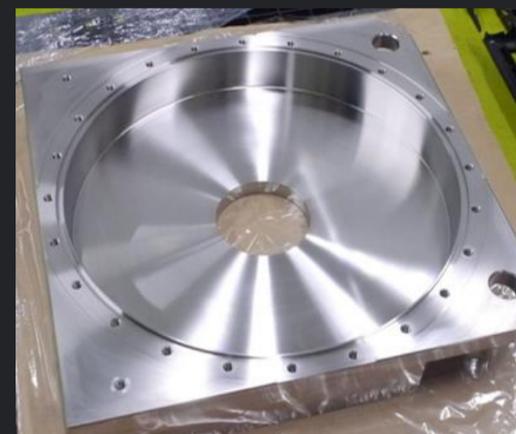
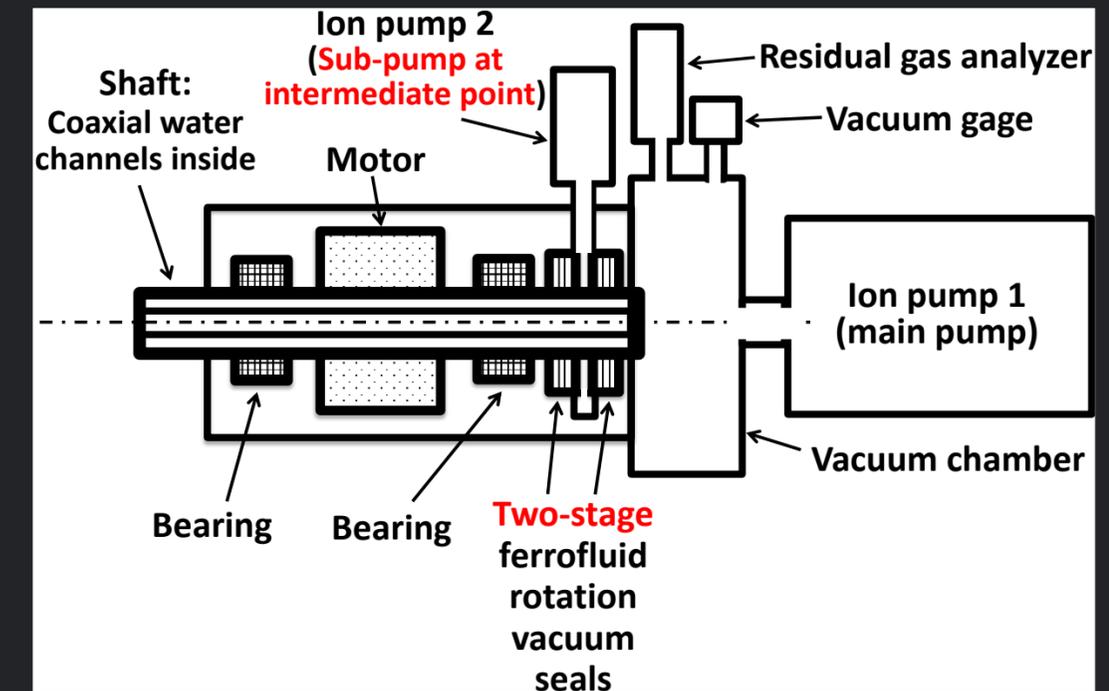
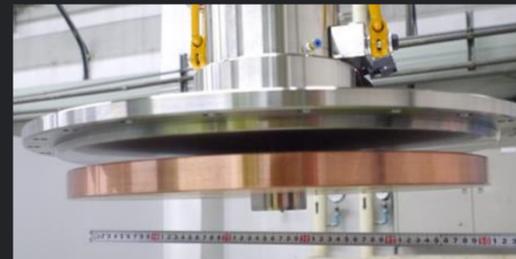
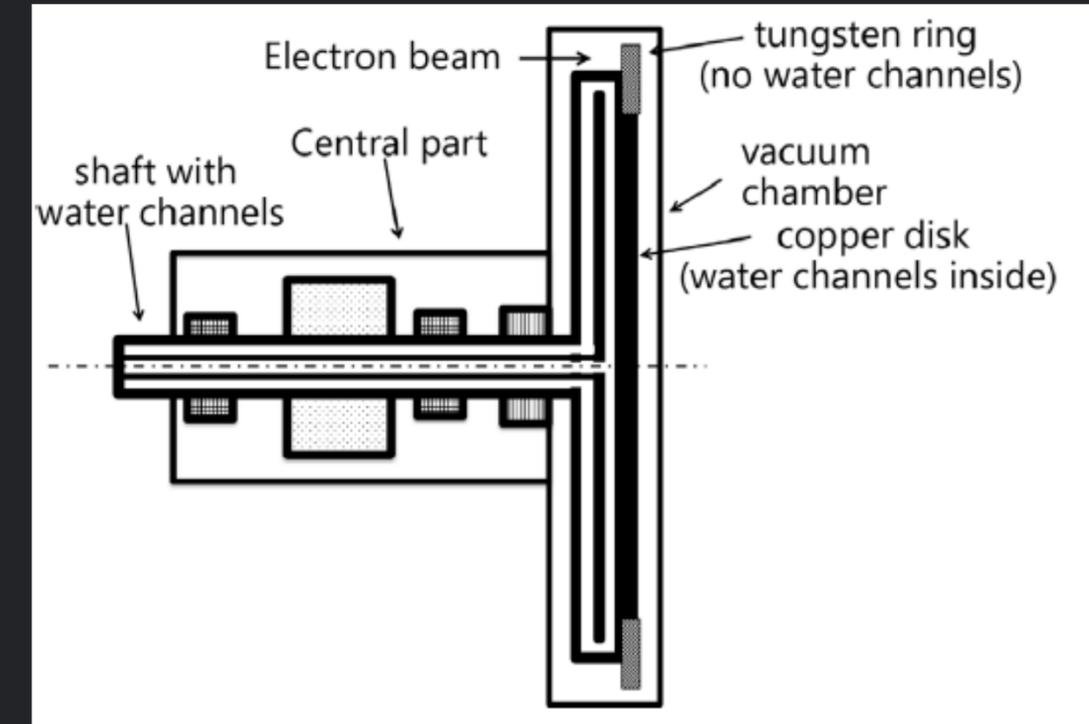
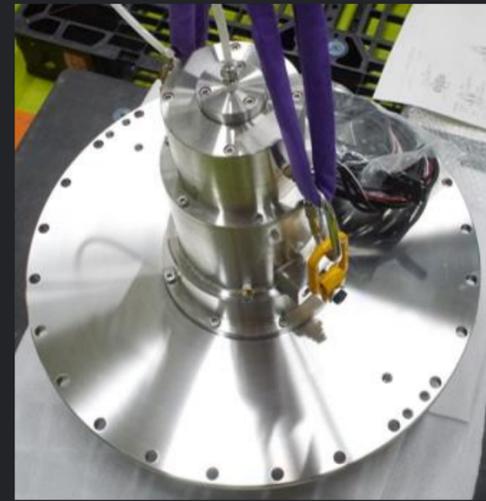
# 03 陽電子生成とRF補足

かつて造船シェア50%以上を  
ほこり、殷賑を極めた  
大崎上島に残る高層木造建築



# 陽電子標的

- 陽電子標的：16mm厚 W-Re(26)合金。
- 5 m/s 接線速度で回転。
- PEDD(Peak Energy Deposition Density, 重量当たりのエネルギー密度) は66バンチが当たると33.6 J/g (安全運転の目安 35 J/g 以下)
- 高真空中である程度の速度で安定して回転させ、さらに冷却する必要。
- 真空中の回転体を水冷するためには、真空の回転導入 (真空封止をした回転機構) が必要。その解の一つが、磁性流体シール技術。
- 回転軸と筐体の隙間を磁性流体で封止。磁性流体は磁場で固定。
- 加速器の真空中で「磁性流体 (有機媒質) をシールとして使うのは非常識」だが、この常識には実は根拠が無い。
- (株) リガクの磁性流体シールのガス放出係数は $5e-8 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 以下ととても低い。このシール材による加速管での圧力は $1e-9\text{Pa}$ 以下となり、通常の加速器よりも環境が良い。
- 放射線損傷による性能劣化をガンマ線源を使ってテストしたが、ILCの2年に相当する線量を照射しても性能劣化は見られなかった。



# Flux Concentrator as AMD

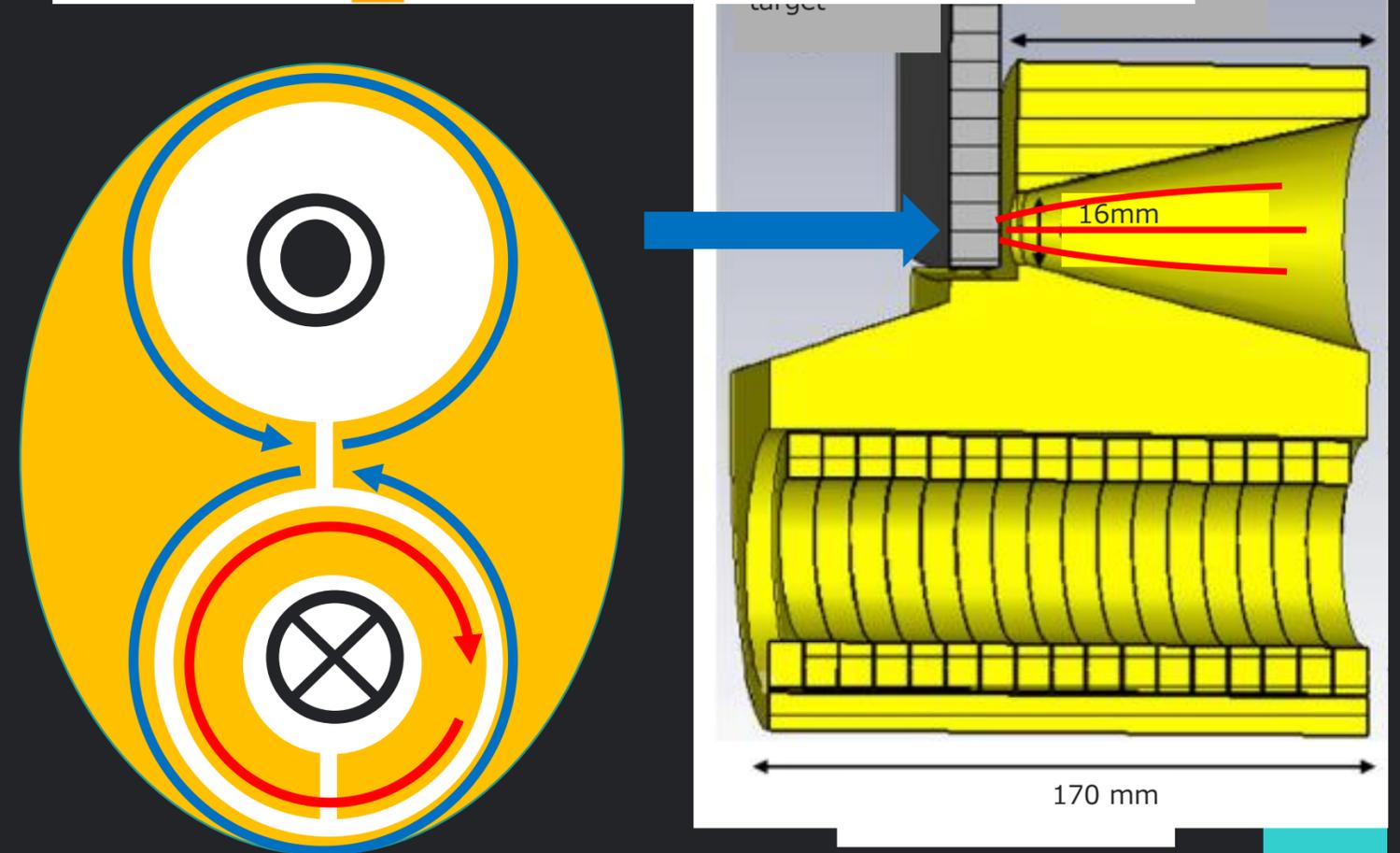
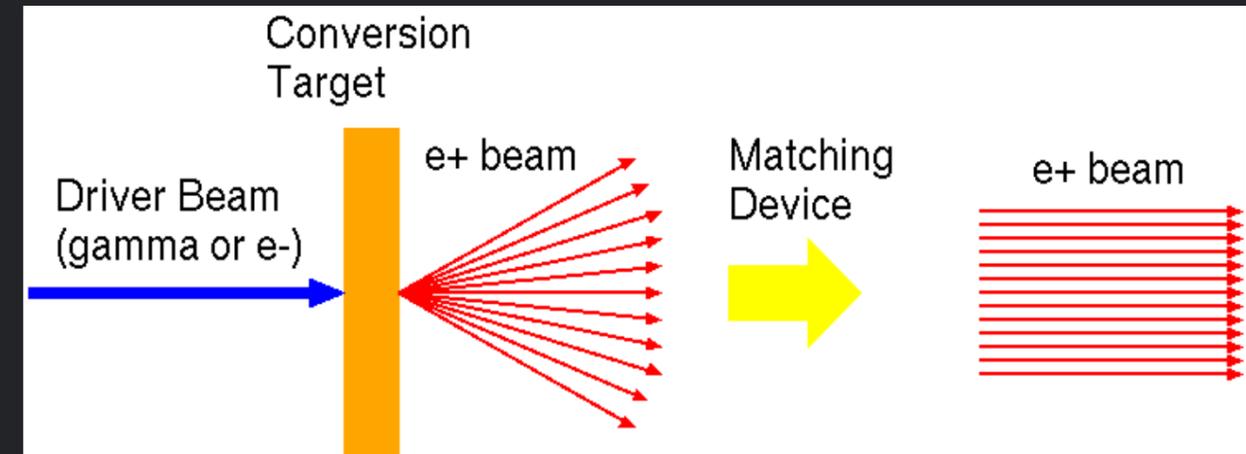
- 発生した陽電子は大きな角度広がりを持つので、扱いにくい。ビームサイズを多少大きくしても、角度広がりを抑制したい。
- そのためにFlux Concentratorという特殊なパルス磁石を用いる。
- 磁場はz方向(ビーム進行方向)に発生するが、その大きさは

$$B_z = \frac{B_0}{1 + \mu z}$$

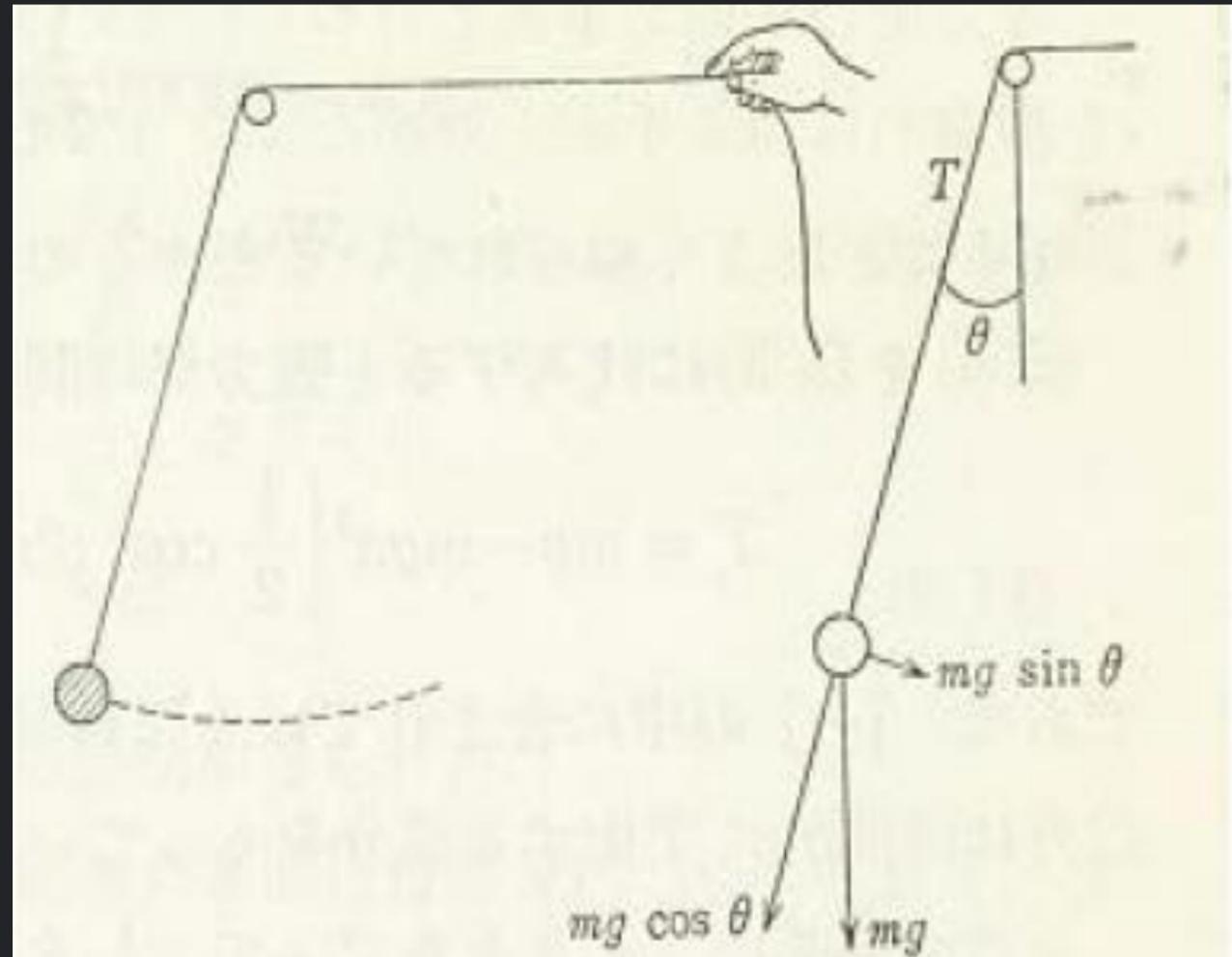
陽電子は磁場により回転運動(サイクロトロン運動)をするが、磁場が弱くなるに従い、回転半径は増大し、横方向運動量は減少する。

断熱不変量 (Adiabatic invariance)

$$\frac{1}{2\pi} \int p dq = 2\rho p_t = 2 \frac{p_t^2}{eB}$$



# 断熱不変量？



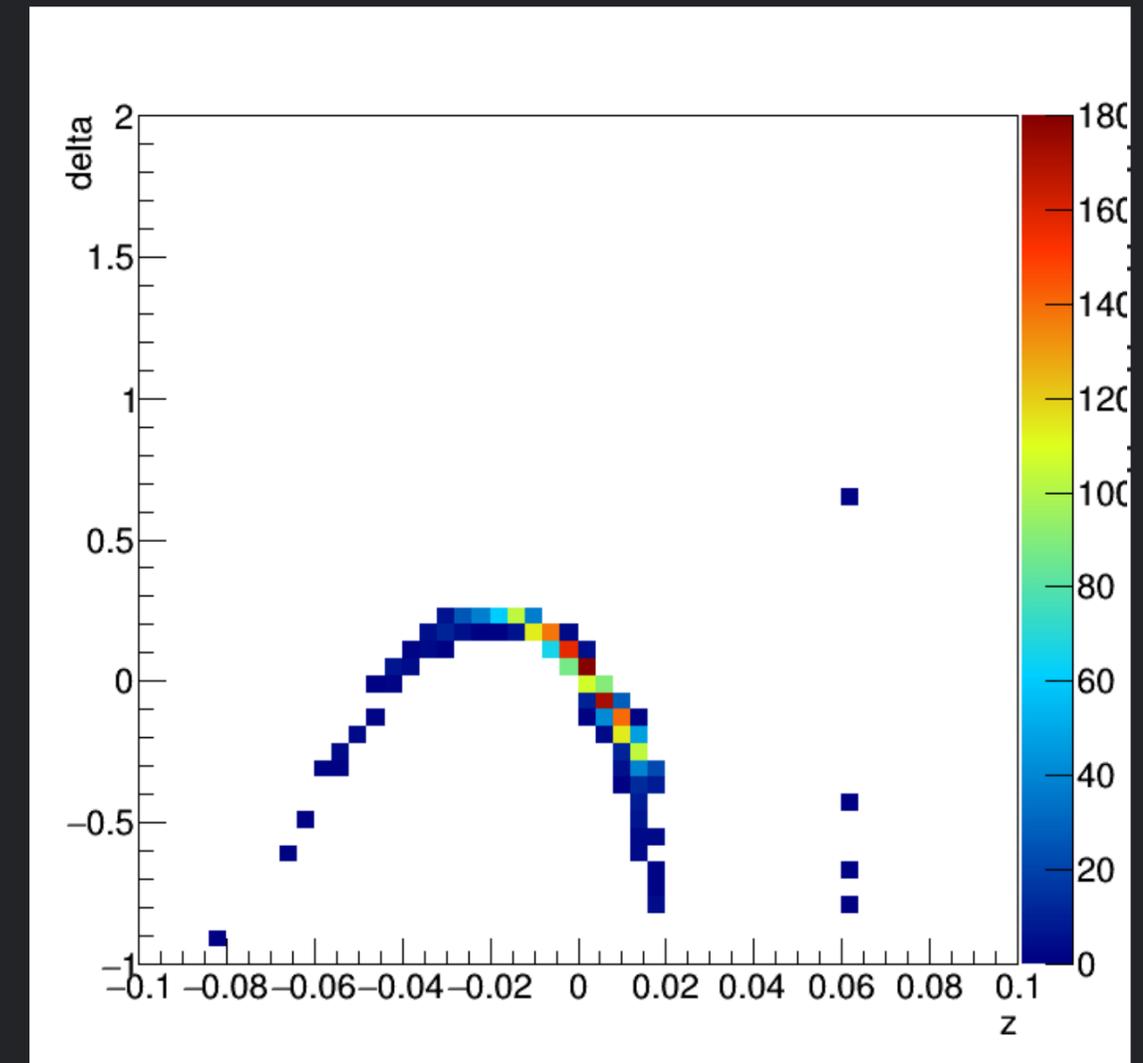
- 外部パラメータを有する力学系で、外部パラメータが時間的にゆっくり変化するときに変に保たれる物理量を断熱不変量（だんねつふへんりょう、adiabatic invariance）と言う。（Wikipedia）
- 振動する振り子のひもの長さを変化させることを考える。ひもを引っ張ると振り子の周期は短くなり（早く振動する）、エネルギーは増加するが、その時次の量は一定となる(断熱不変量)。

$$2\pi \frac{E}{\omega}$$

- 逆に、ひもを長くすると、エネルギーは減少し、周期はゆっくりとなる。
- AMDで磁場を次第に弱くすると、横方向運動量が減少することに相当する。

# Capture Linac

- FCを出た陽電子は補足線形加速器 (Capture Linac) に送り込まれる。
- 陽電子は時間的には局在しているが、横方向に大きく拡がり、エネルギー的にも大きく広がっている。
- このような陽電子を普通に加速しても、うまく加速できるのは一部のみで、多くの陽電子は取りこぼしてしまふ。
- 陽電子をなるべくかき集め (RF Capture)ながら、徐々に加速していくのがCapture Linac の役目。
- 陽電子を**減速位相**に乗せる。陽電子は速度が小さくなり、後ろの位相にずれていく。
- 後ろの位相にずれた陽電子は加速される。
- 加速された陽電子はそれ以上遅れないので、陽電子は**加速位相にかき集められる**。(減速RFキャプチャー)



朝鮮通信使の寄港地として栄えた  
大崎下島の小長港



Capture Linac

# Capture Linac with APS cavity

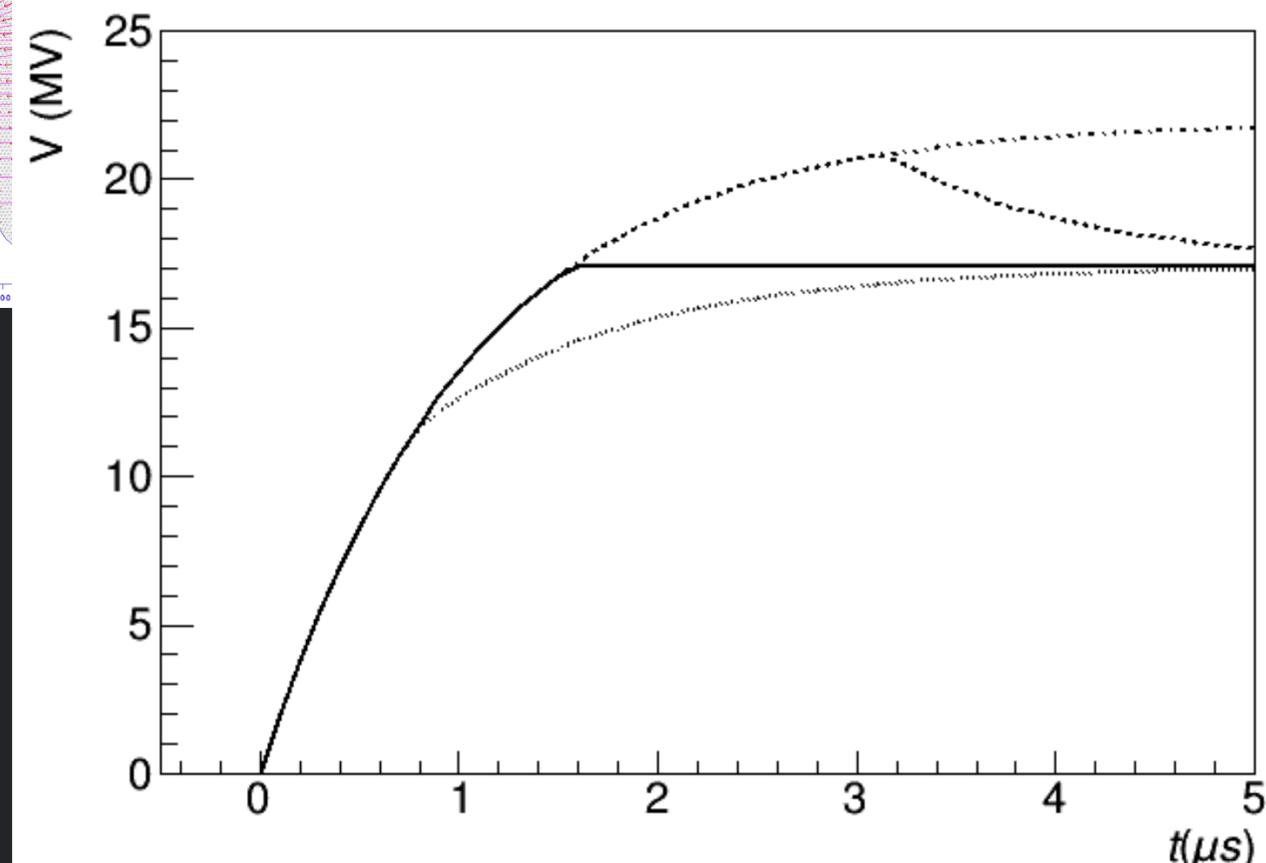
- APSは $\pi/2$ モードの定在波空洞。
- 早い群速度、高いモード安定性、大きなR/Qが特徴。

$$r_{sh} = 31.5 \frac{M\Omega}{m}$$
$$Q_0 = 25000$$

- RF空洞としては確立された技術であるが、ILC陽電子源のCapture Linacとして使うことを考えると、考えなくてはいけないことがある。

- それがビームローディングの補償問題。
- ビームローディングとは、ビームが発生する減速場。
- 複数バンチを連続して加速（マルチバンチ加速）すると、前のバンチが作った減速場により、電場が徐々に減少し、後ろのバンチはうまく加速されない。
- 普通はタイミングを調整すれば、うまく補償できる。

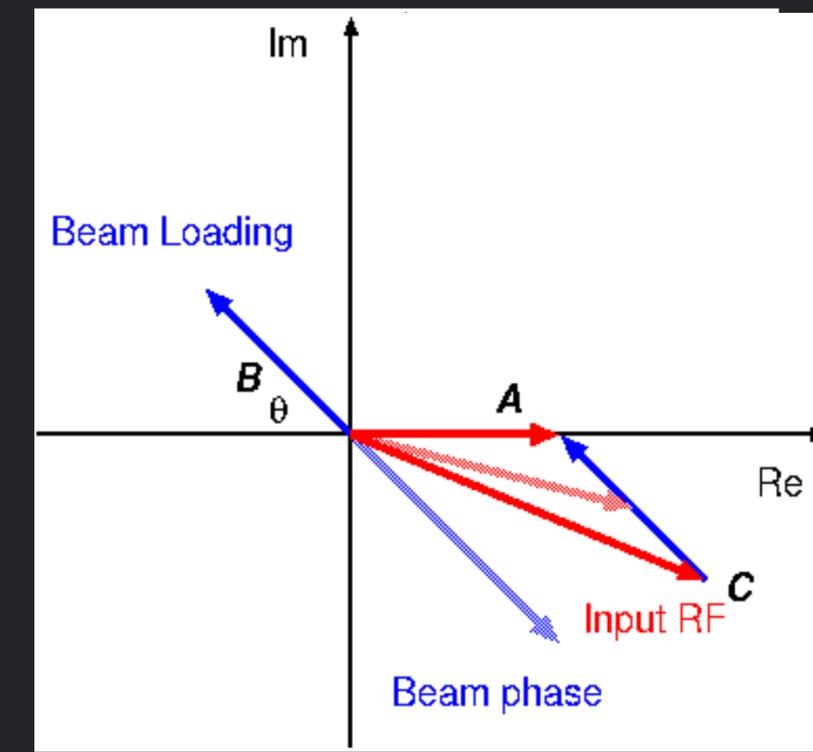
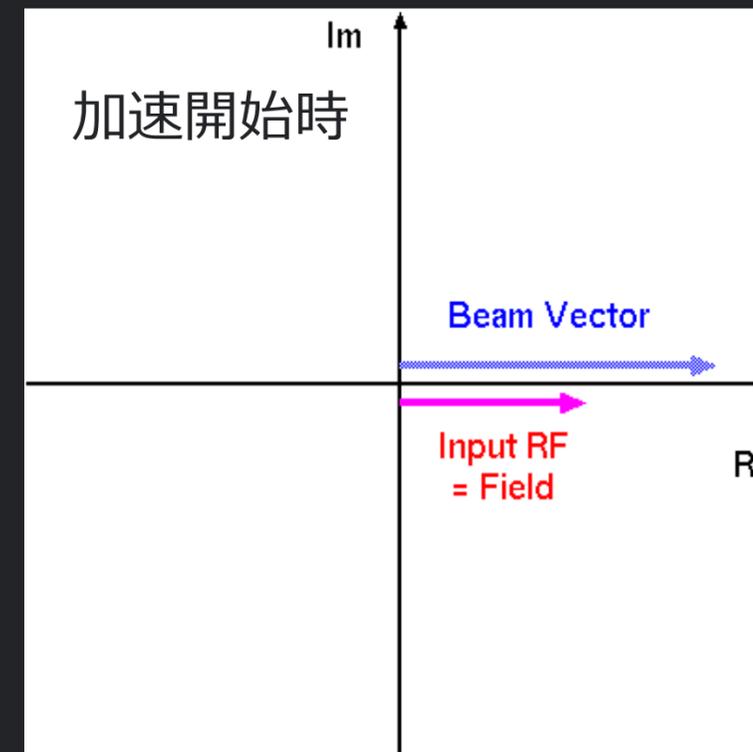
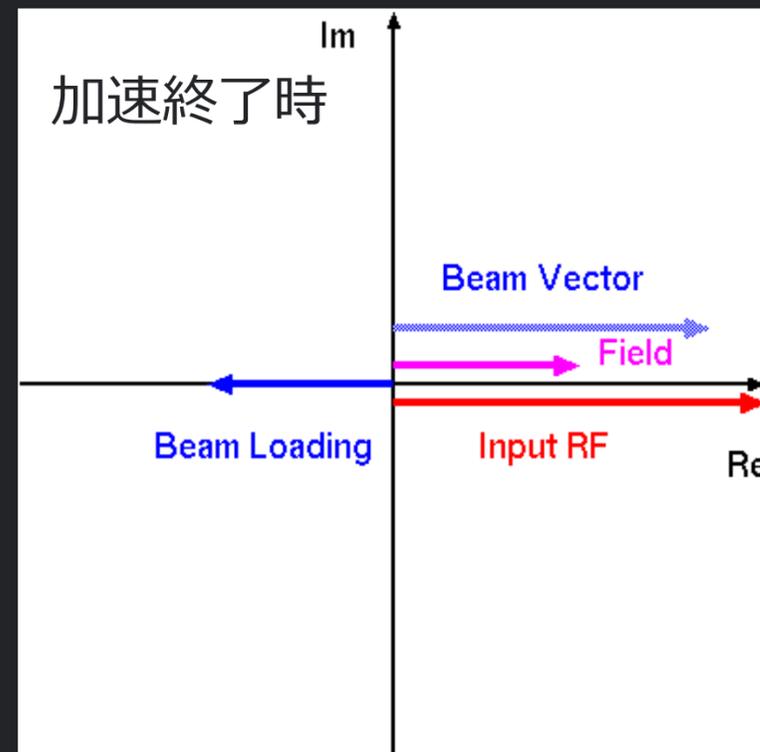
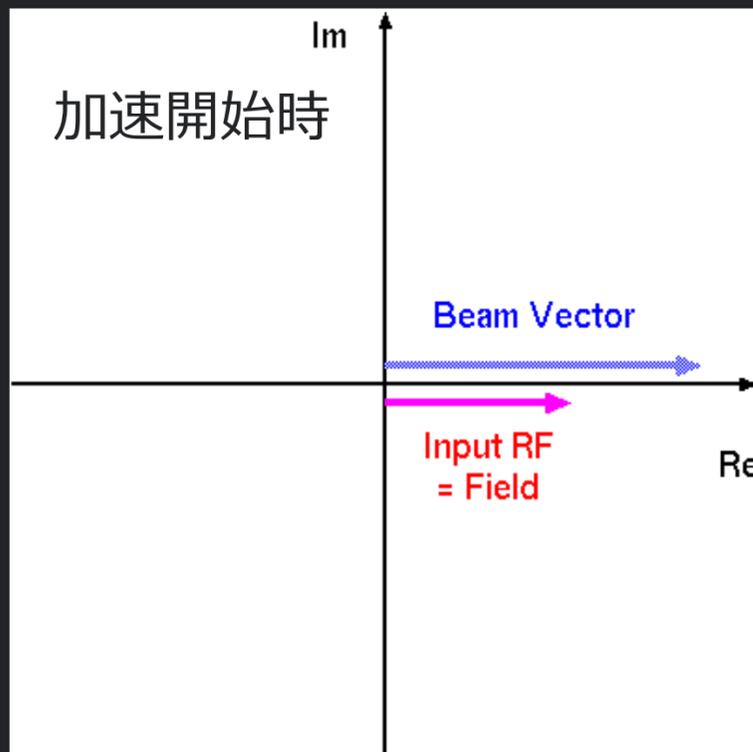
$$V(t) = \frac{2\sqrt{\beta P_0 R}}{1 + \beta} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) - \frac{\omega R I_{B0}}{1 + \beta} \left(1 - e^{-\frac{t-t_b}{\tau}}\right)$$



# Beam-loading Compensation in the capture linac

- 普通の加速 (on crest 加速)
- 加速開始時：加速電場 = RF電場
- 加速終了時：加速電場 = RF電場 - ビーム電場
- 加速開始時と終了時で加速電場が等しくなるように調整。

- Capture Linacの場合 (off crest 加速)
- RF電場とビーム電場が同位相にない。
- いくら条件を合わせようとしても、位相が異なるので、RF電場をうまく調整しても、ビーム電場を打ち消すことができない。



# Beam-loading compensation with Phase-Modulation

- ビームローディングの補償：入力RFによる電場とビーム電場の和が常に一定となる条件を作る。
- ビームがオフレスト加速条件では、入力RFによる電場の位相をすこしづつずらしてやる必要がある。(Phase-modulation)

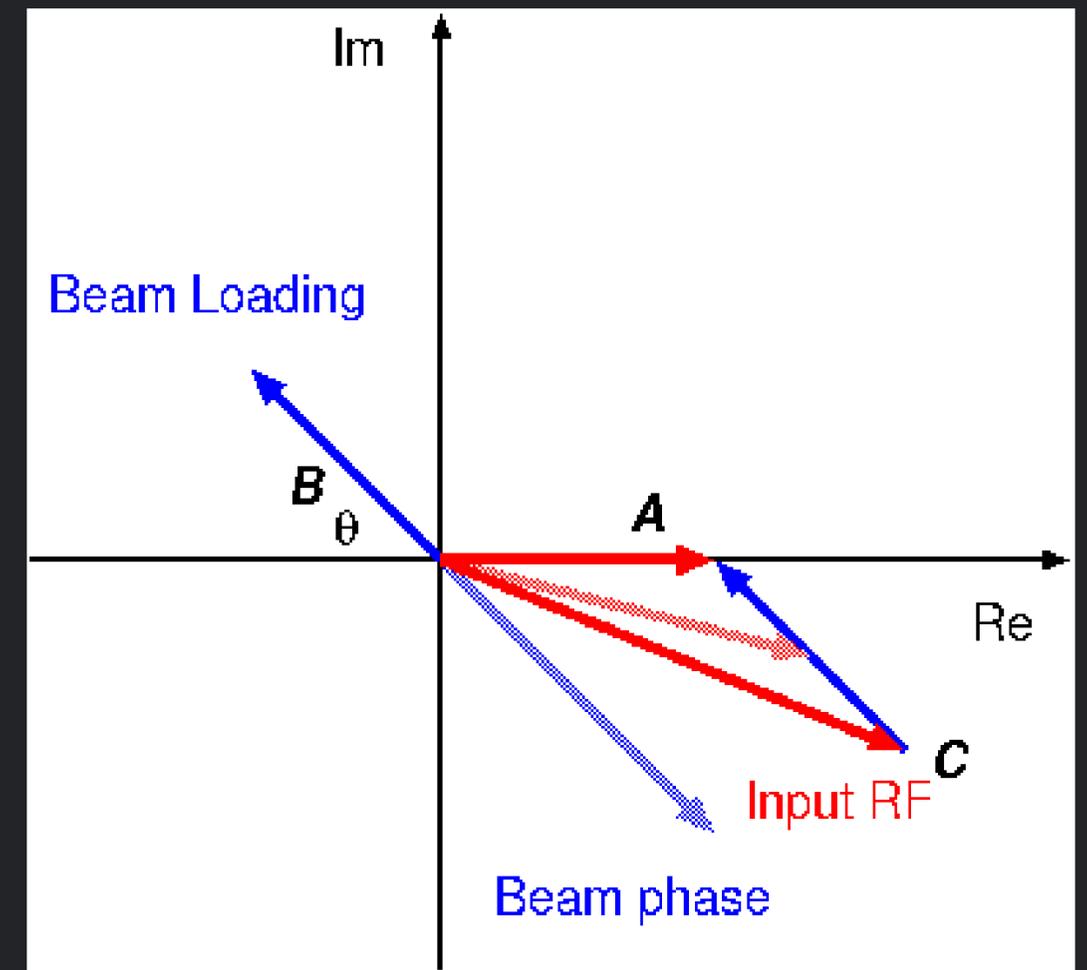
- 位相モジュレーションなし

$$V(t) = V_{RF0} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \cos \omega t - V_{b0} \left(1 - e^{-\frac{t-t_b}{\tau}}\right) \cos(\omega t + \theta)$$

- 位相モジュレーションあり

$$V(t) = V_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \cos(\omega t + \zeta(t)) - V_{b0} \left(1 - e^{-\frac{t-t_b}{\tau}}\right) \cos(\omega t + \theta)$$

位相モジュレーション： $\zeta(t)$  どんな関数を設定すればいいか？



# 位相モジュレーション関数の導出

$$V(t) = V_{10} \cos \omega t + V_1(t) - V_{b0} \left(1 - e^{-\frac{t-t_b}{\tau}}\right) \cos(\omega t + \theta)$$

$V_{10} \cos \omega t$  : 加速を開始するときのRFによる電場。  
ビーム加速を開始したのちも、この値で一定にしたい。

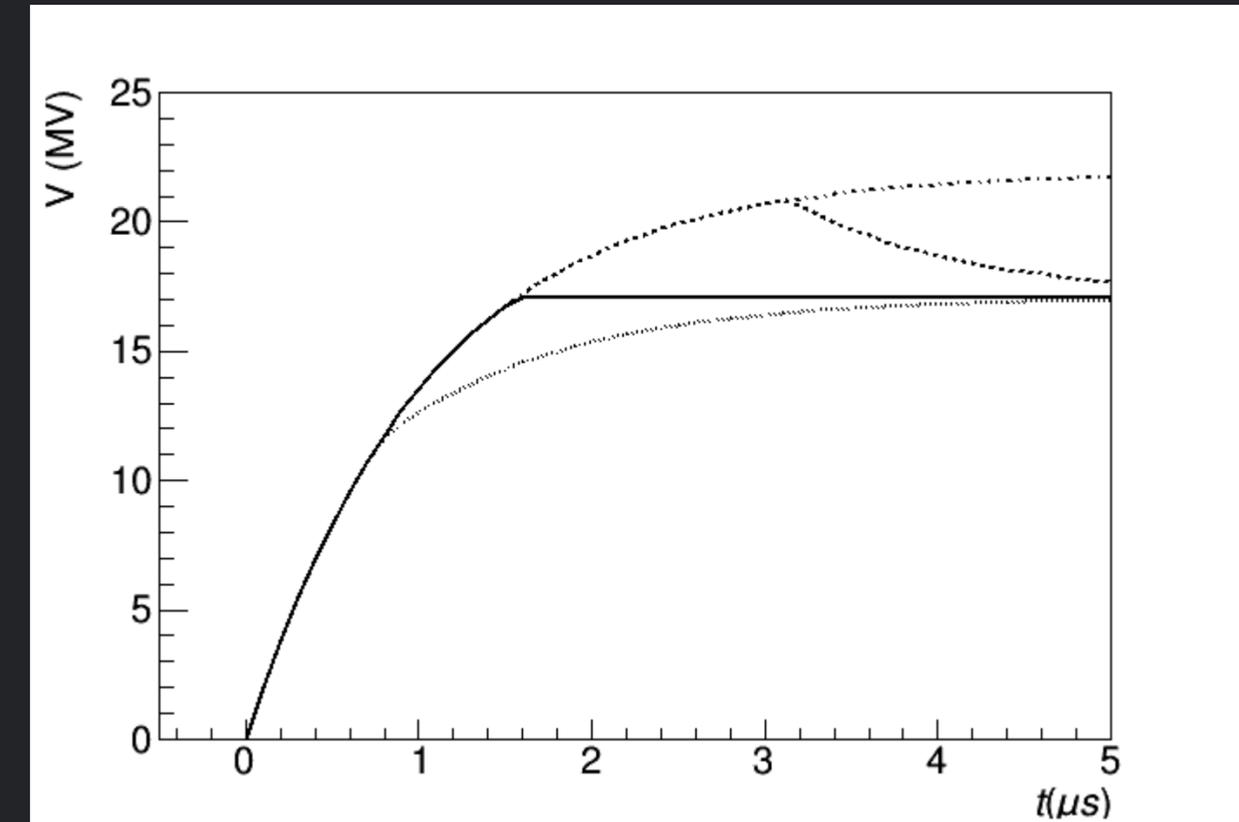
$V_1(t) = V_{b0} \left(1 - e^{-\frac{t-t_b}{\tau}}\right)$ となればよい。この時RFによる電場は

$$V(t) = V_{10} \cos \omega t + V_{b0} \left(1 - e^{-\frac{t-t_b}{\tau}}\right) \cos(\omega t + \theta)$$

この式を  $V_2 = V_{b0} \left(1 - e^{-\frac{t-t_b}{\tau}}\right)$  として三角関数で表すと、

$$V(t) = \sqrt{A^2 + B^2} \cos(\omega t + \zeta)$$

$$A = V_{10} + V_2 \cos \theta, \quad B = V_2 \sin \theta, \quad \zeta = \tan^{-1} B/A$$



$$V(t) = \sqrt{A^2 + B^2} \cos(\omega t + \zeta)$$

$$A = V_{10} + V_2 \cos \theta, \quad B = V_2 \sin \theta, \quad \zeta = \tan^{-1} B/A$$

この振幅 $\sqrt{A^2 + B^2}$ はRFパワーより決まる振幅に等しくなければならないから、

$$\sqrt{A^2 + B^2} = V_0 = \frac{2\sqrt{\beta P_o R}}{1 + \beta}$$

この式を $V_{10}$  (加速開始時の電場)について解くと、

$$V_{10}^2 + 2V_{b0} \cos \theta V_{10} + V_{b0}^2 - V_0^2 = 0$$

$$V_{10} = -V_{b0} \cos \theta + \sqrt{V_0^2 + V_{b0}^2 (\cos^2 \theta - 1)}$$

これより、加速開始時間 $t_b$ は

$$t_b = -T_0 \ln \left( 1 - \frac{V_{10}}{V_0} \right)$$

$$V(t) = V_0 \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_0}} \right) \cos(\omega t + \zeta)$$

$$\zeta = \begin{cases} 0 & (t < t_b) \\ \tan^{-1} \frac{V_2 \sin \theta}{V_{10} + V_2 \cos \theta} & (t > t_b) \end{cases}$$

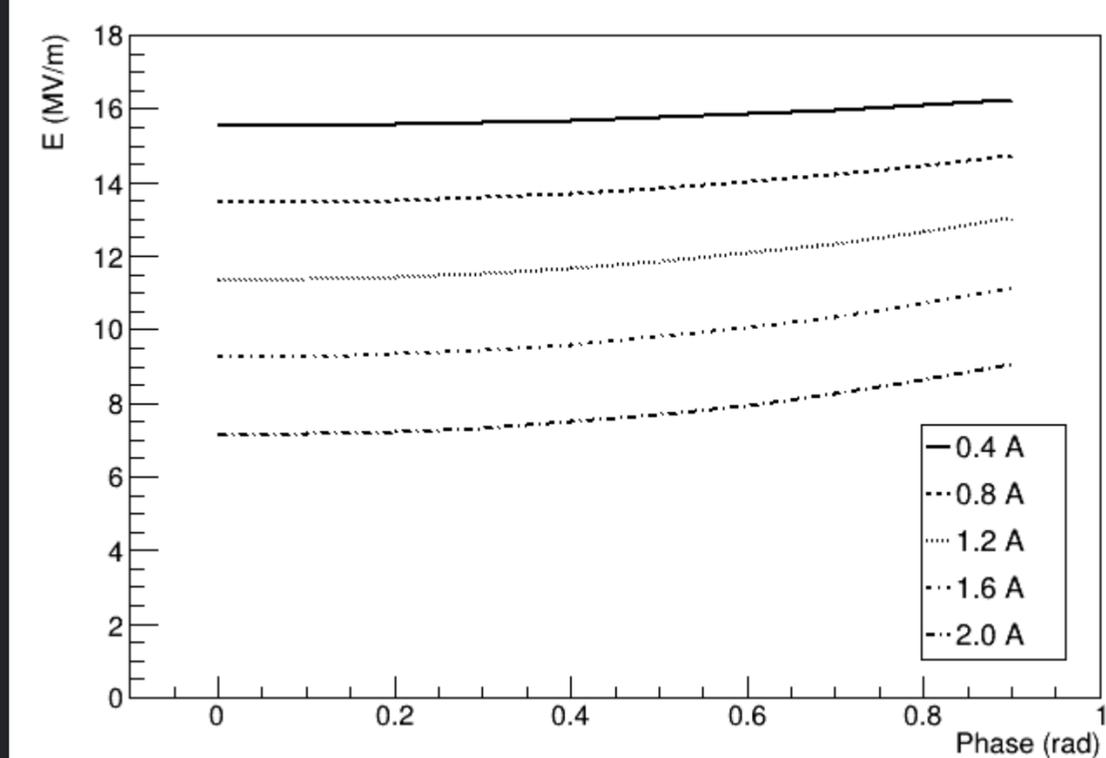
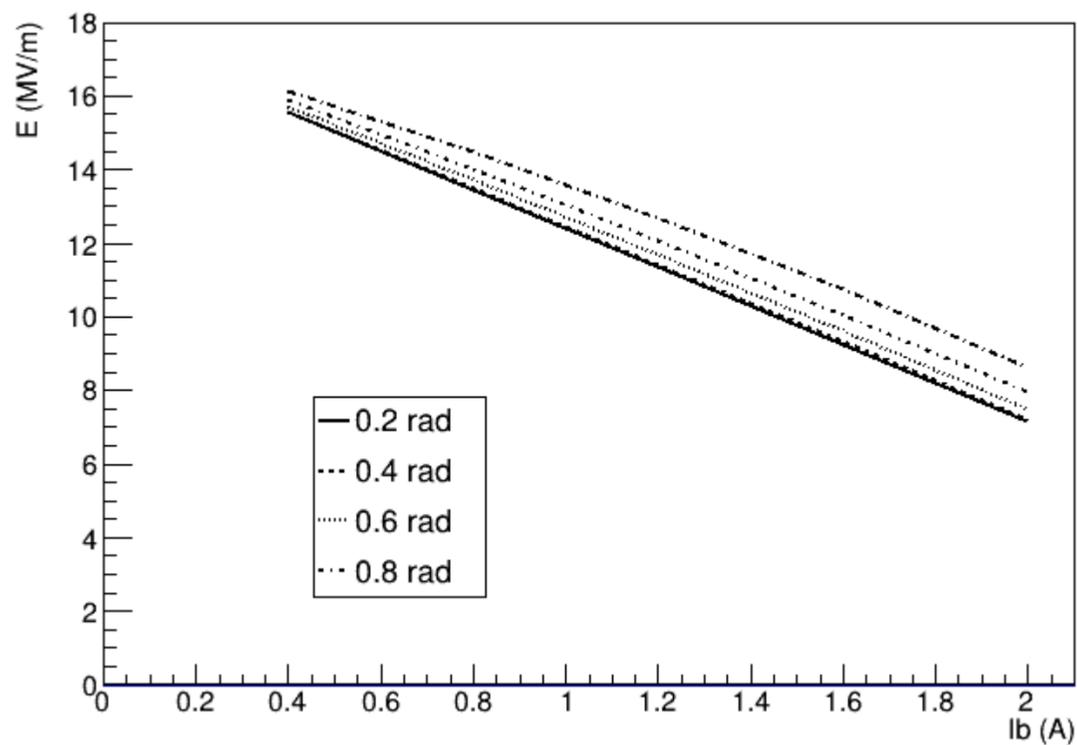
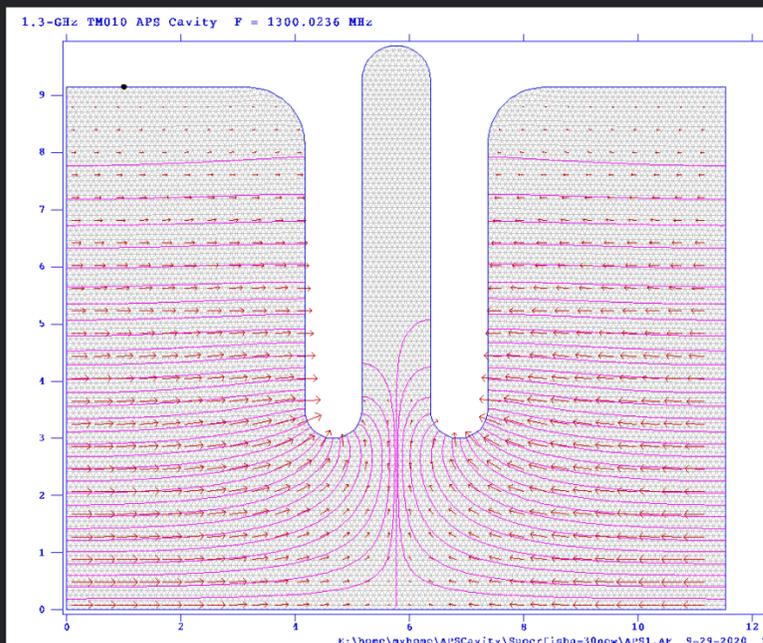
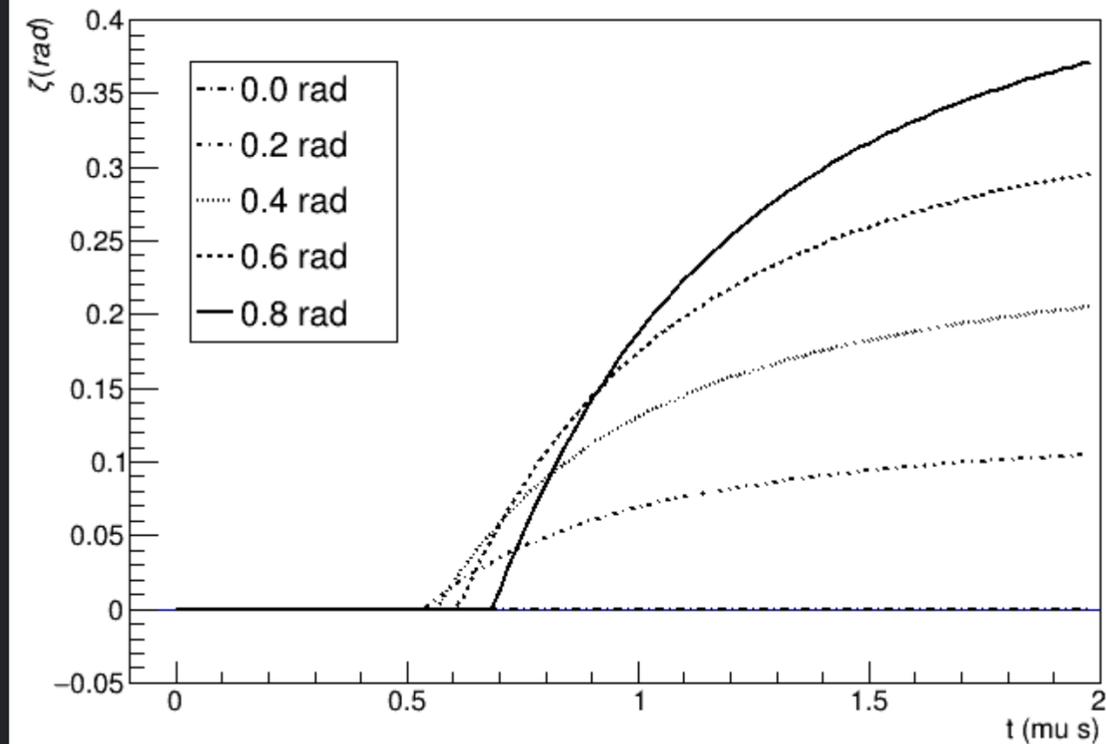
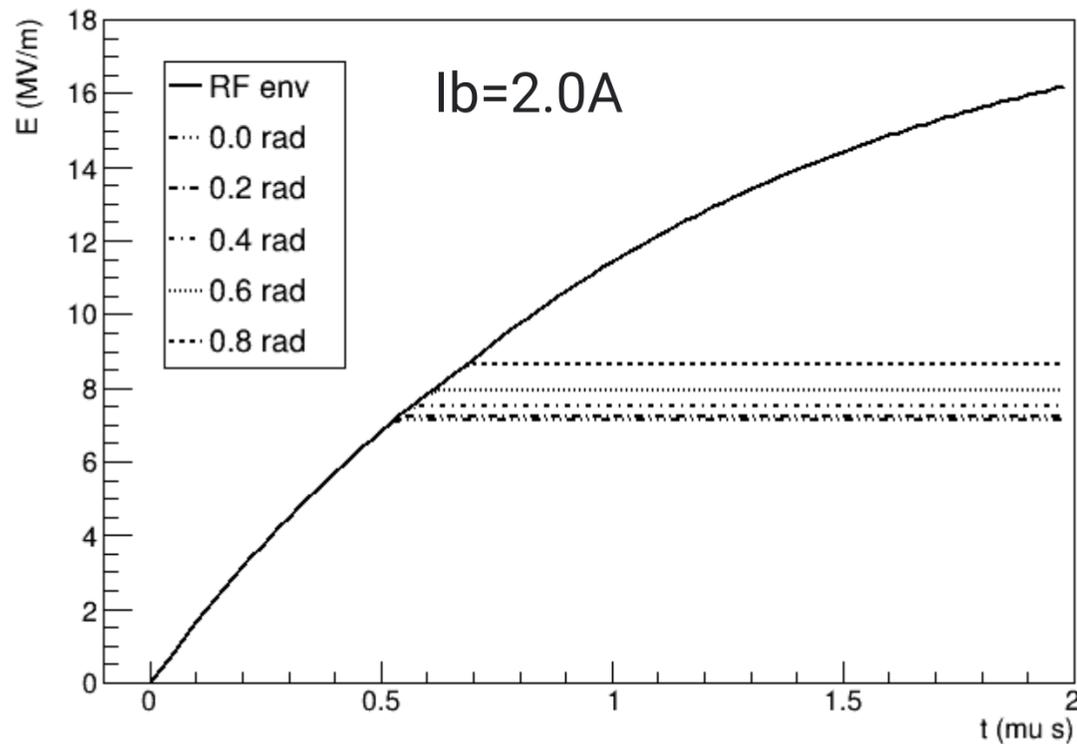
# APS空洞 ( $\pi/2$ モード 定在波空洞)

$$r_{sh} = 31.5 \frac{M\Omega}{m}$$

$$Q_0 = 25000$$

$$\beta = 5.0$$

$$P_{RF} = 22.5 \text{ MW}$$

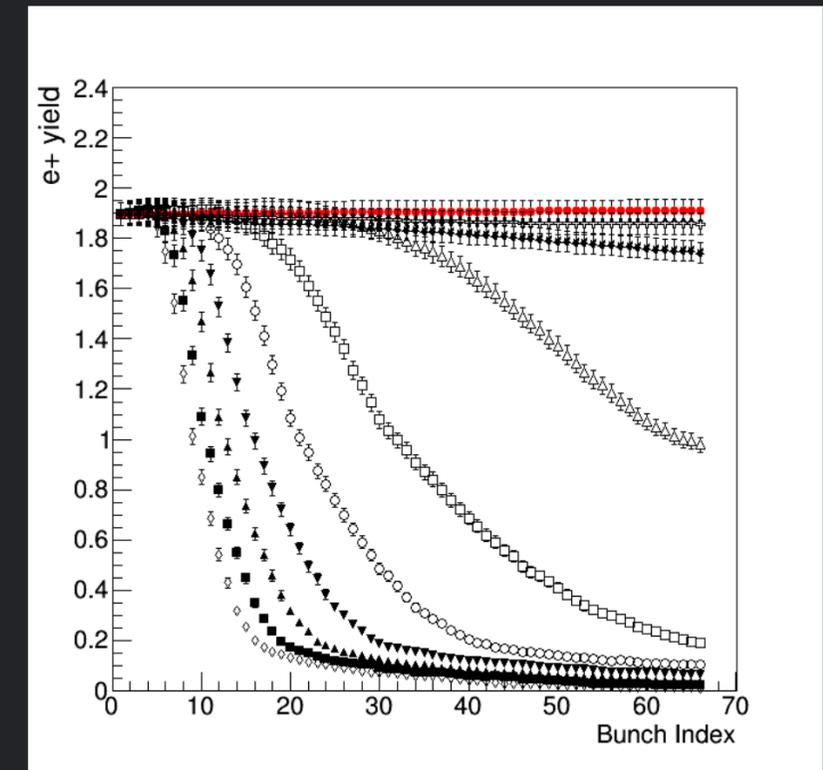
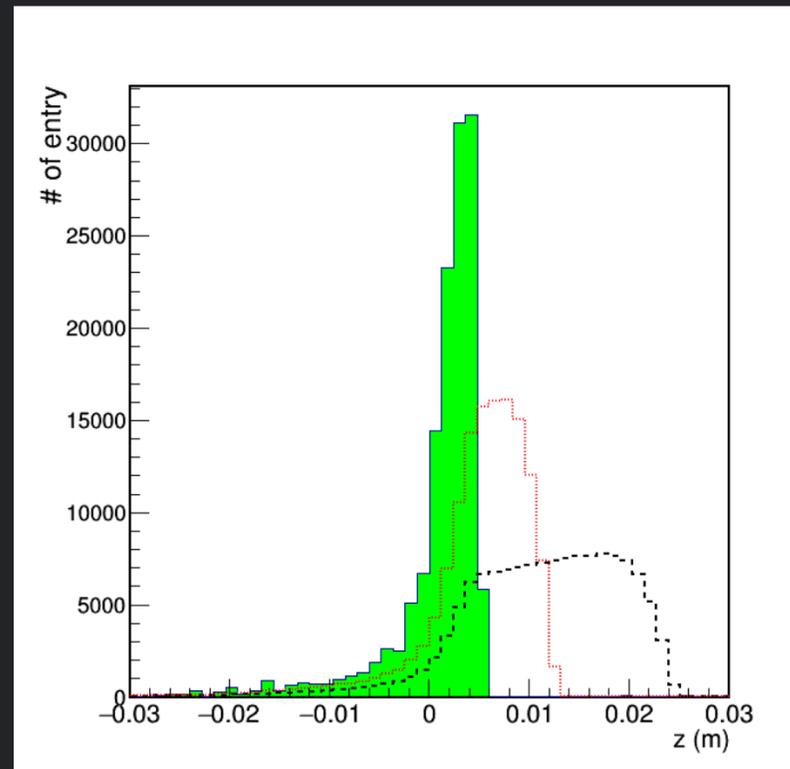
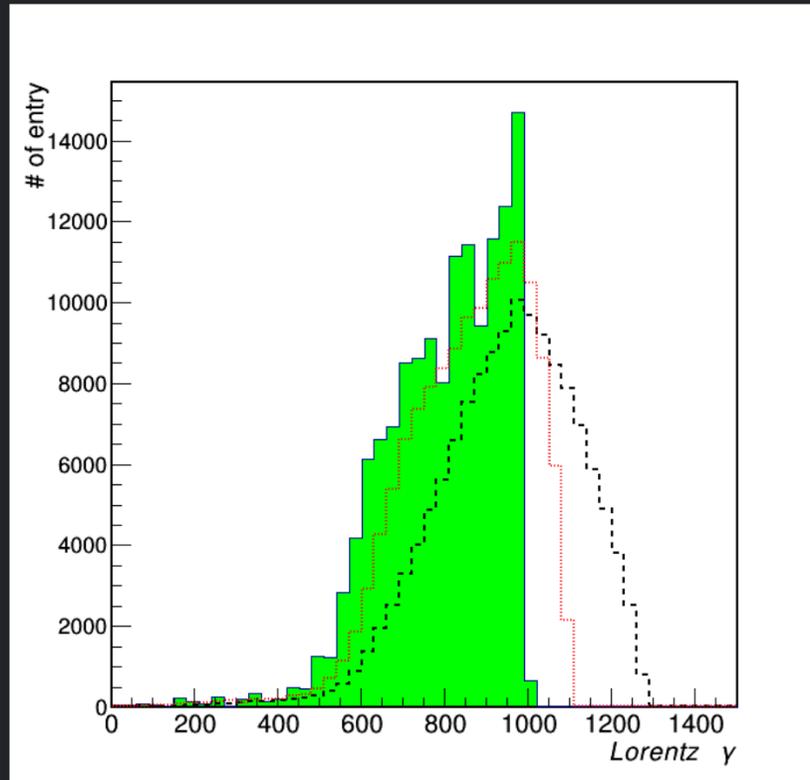


# 位相変調による補償

ビームローディング電流 $I_i$ および位相 $\theta_i$ は加速管ごとにことなるが、位相変調は全ての加速管で共通とした。

$$V(t) = \frac{2\sqrt{\beta PrL}}{1+\beta} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) \cos(\omega t + \zeta(t)) - \frac{I_i r L}{1+\beta} \left(1 - e^{-\frac{t-t_{bi}}{T}}\right) \cos(\omega t + \theta)$$

- 離調の導入により、シケイン出口でのローレンツ $\gamma$ 分布、 $z$ 分布、が大きく改善。
- 最適離調で、バンチ毎の生成効率は統計誤差内で一致。
- 離調は個々の加速管ごとに設定する必要はなく、ライナック全体で共通の離調量として調整するだけでよいことがわかる。

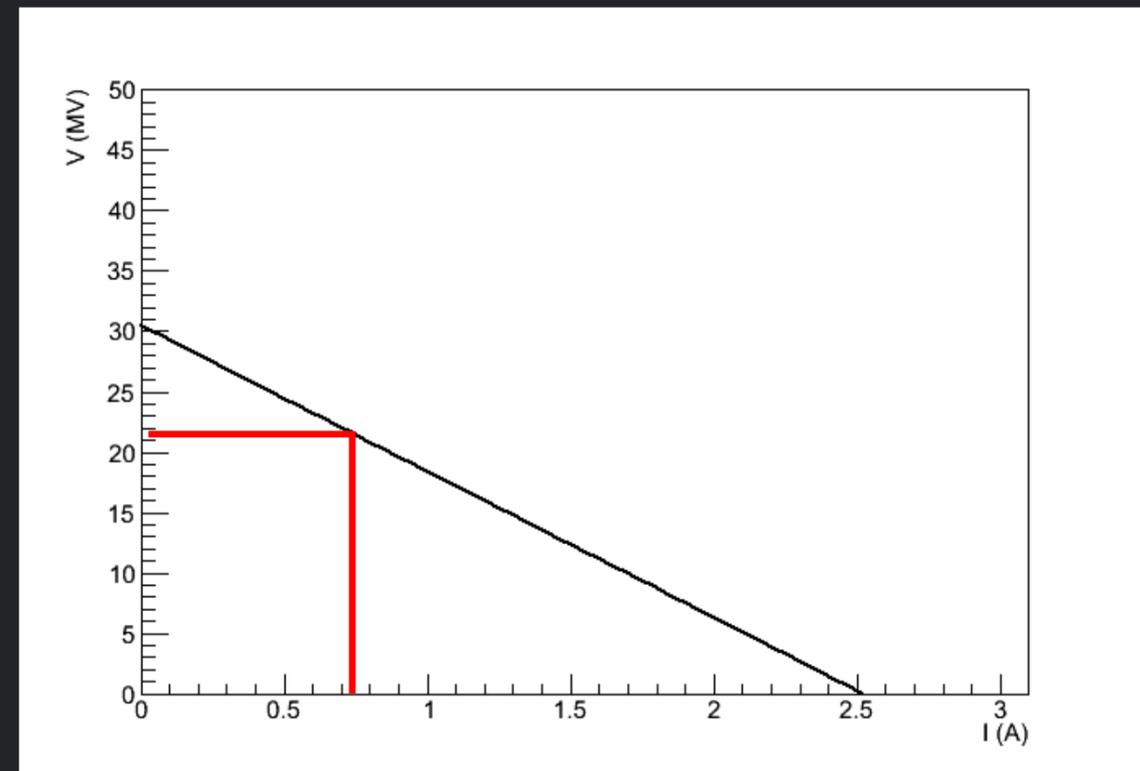
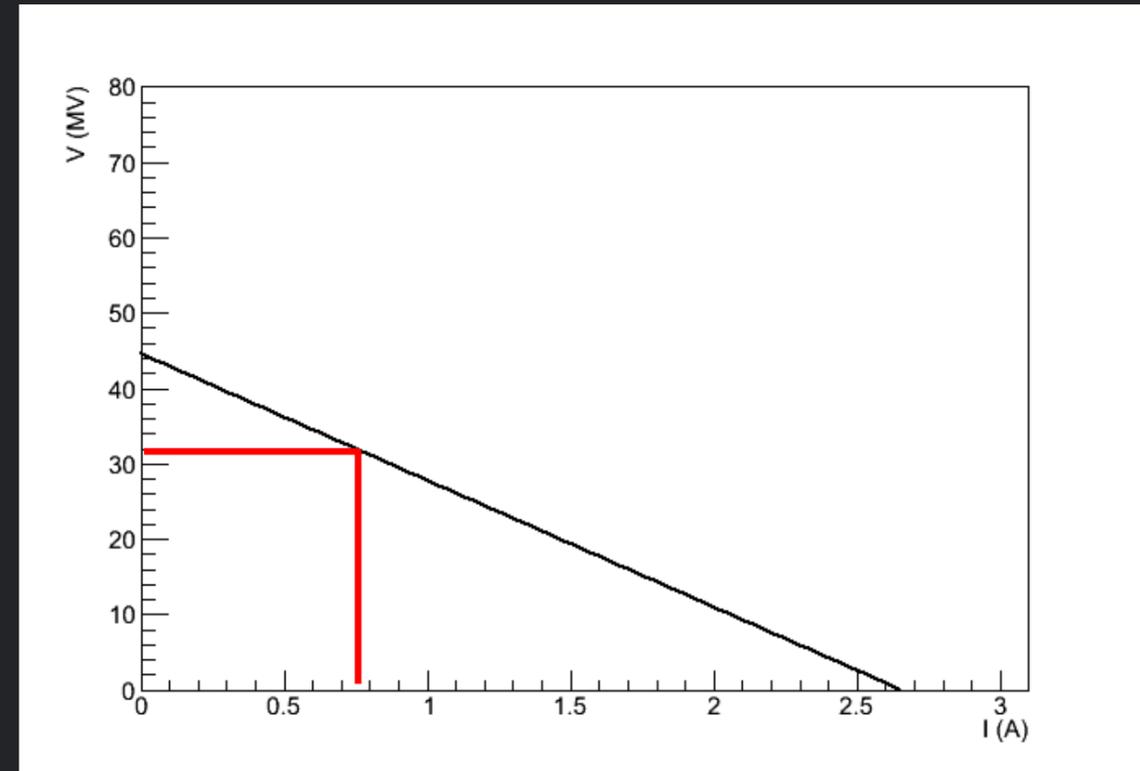


上蒲刈島と下蒲刈島間にかかる  
蒲刈大橋

陽電子ブースターとECS

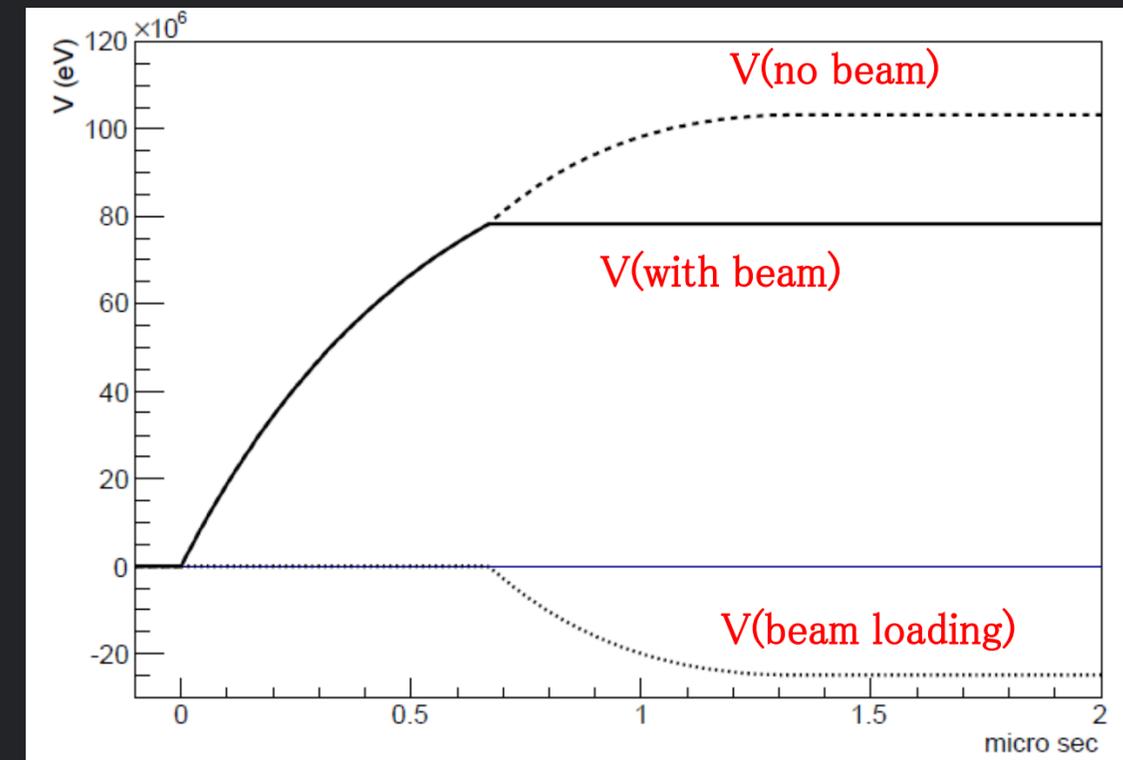
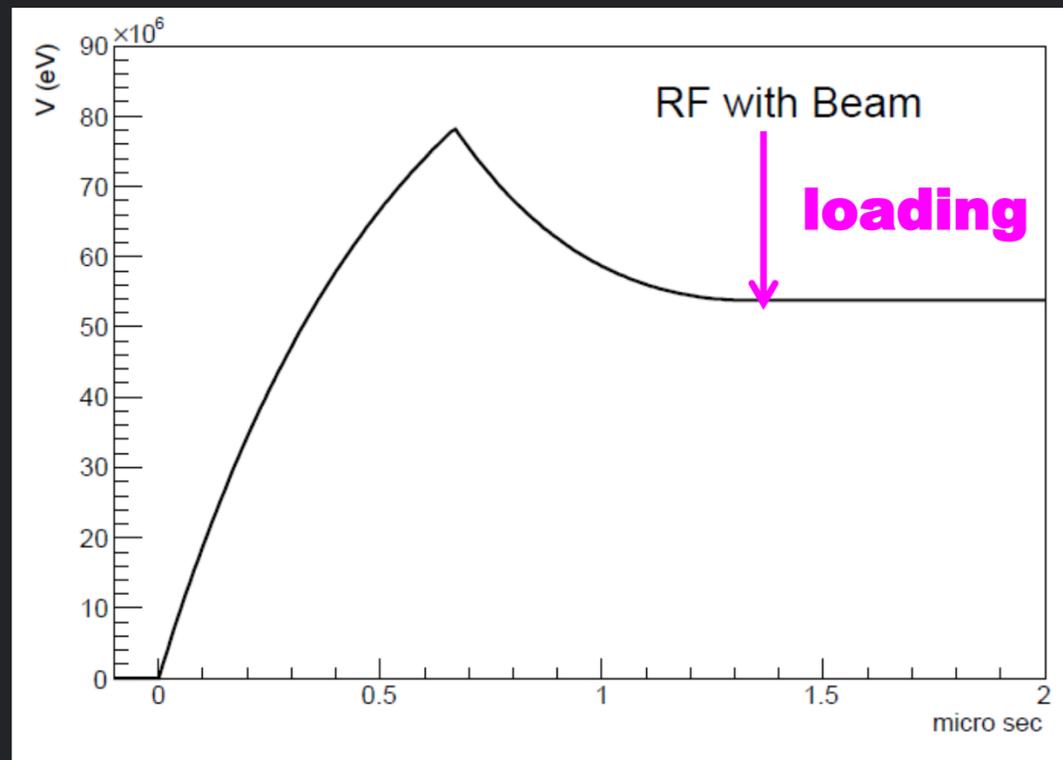
# 陽電子ブースター

- ブースター：エネルギーを高めるだけが目的の加速器。
- Capture linacの出口のエネルギーはおよそ250MeV。これをブースターで5000 MeV (5 GeV)まで高める。
- L-bandとS-bandによる進行波型加速管。
- ビームの半径は加速による断熱減衰により徐々に減少するので、上流側は大きなL-band加速管を用い、下流は小さなS-band加速管を用いる。
- 50MW L-band Klystron drives two L-band acc. ( $2a = 34$  mm).
- 80MW S-band Klystron drives two S-band acc. ( $2a = 20$  mm).



# 進行波型加速管でのビームローディング補償

- ブースターでもCapture Linacと同様に、ビームローディングの補償が必要。
- ビームは加速位相のだ真ん中に乗っかるので、こちらは位相変調の必要はない。
- 一方で、進行波型加速管におけるビームローディング補償は複雑でややこしい。
- 電場の減少を補うために、ビーム加速と同時にRFパワーを増大させる：Amplitude modulation.



# Beam Loading Compensation with AM

任意の時間の関数である入力RFパワーに対して発生する進行波型加速管の電圧は、ラプラス変換を利用して求めることができる。（電気回路と一緒に）

$$V(s) = \frac{\omega L}{Q(1 - e^{-2\tau})} \frac{1}{s + \omega/Q} \mathbf{E(s)} \left(1 - e^{-(s + \omega/Q)t_f}\right) \quad \leftarrow \text{RFによる電場}$$

$$\rightarrow \text{ビームによる電場} \quad -\frac{\omega r_0 L}{2Q(1 - e^{-2\tau})} \frac{I_0}{s^2} e^{-st_f} \left[ 1 - e^{-\frac{\omega}{Q}t_f} - \frac{\omega(1 - e^{-st_f - 2\tau})}{Q(s + \omega/Q)} \right],$$

逆ラプラス変換により、時間ドメインでの電場を計算できる。

# Single Step Modulation

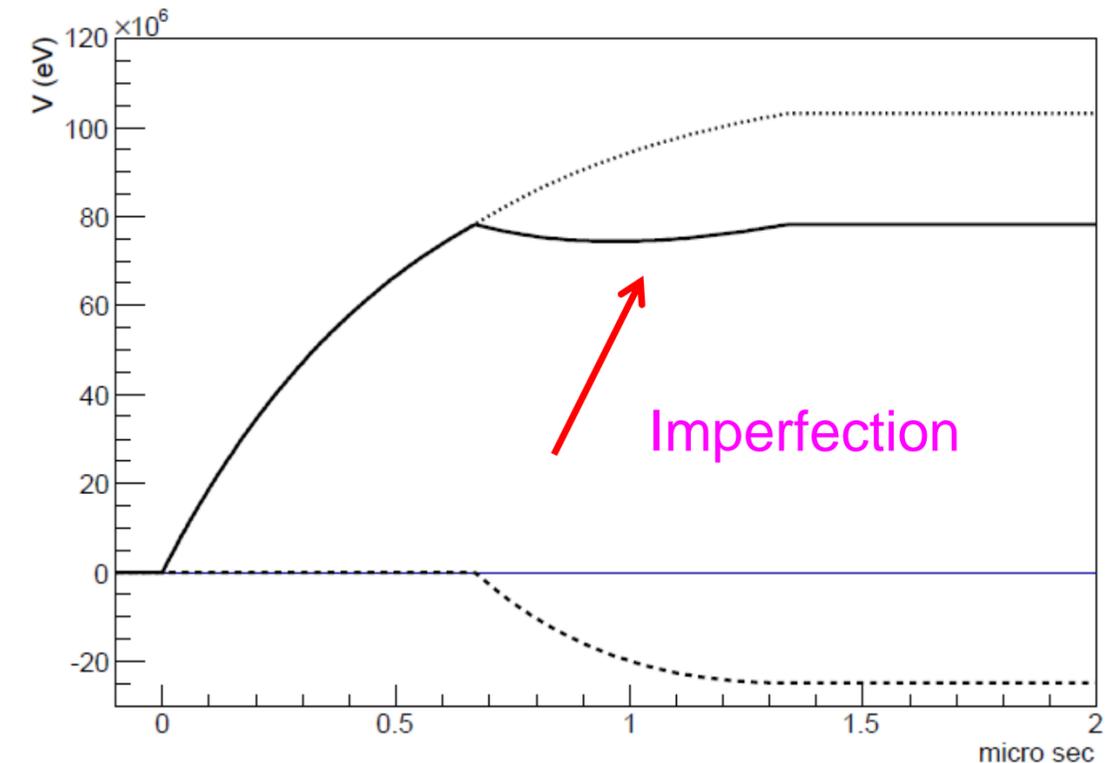
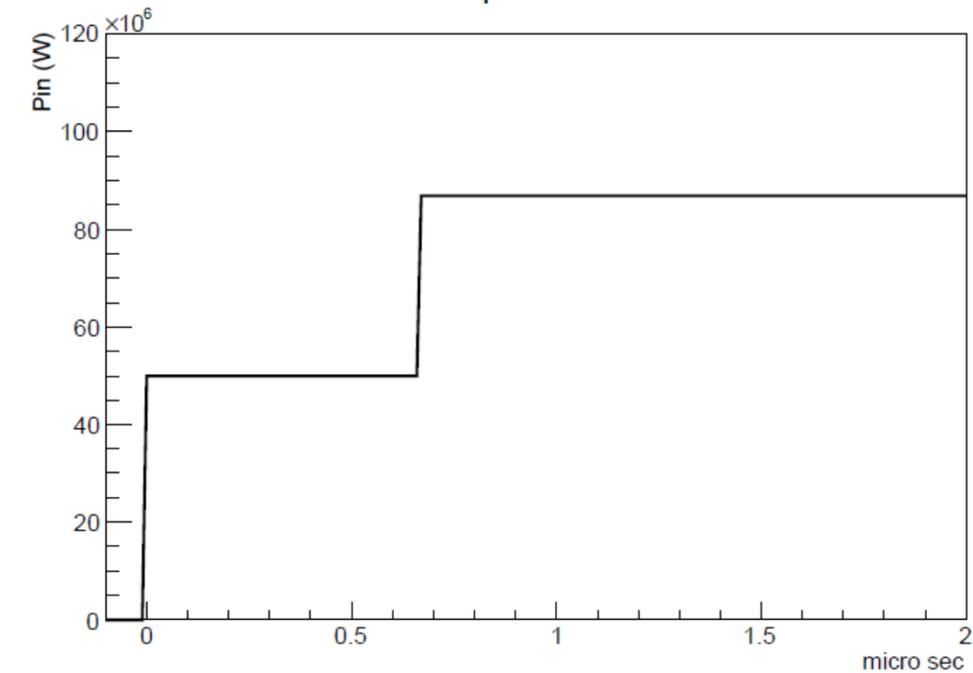
$$E(t) = E_0U(t) + E_1U(t - t_f),$$

$$E(s) = \frac{E_0}{s} + \frac{E_1}{s}e^{-st_f},$$

$$V(t) = E_0L + \frac{LE_1}{1 - e^{-2\tau}} \left(1 - e^{-\frac{\omega}{Q}(t-t_f)}\right).$$

$$- \frac{r_0LI_0}{2(1 - e^{-2\tau})} \left[ -\frac{\omega}{Q}e^{-2\tau}(t - t_f) + 1 - e^{-\frac{\omega}{Q}(t-t_f)} \right]$$

$$E_1 = \frac{r_0I_0}{2} \left( \frac{2\tau e^{-2\tau}}{1 - e^{-2\tau}} - 1 \right)$$



# Saw Modulation

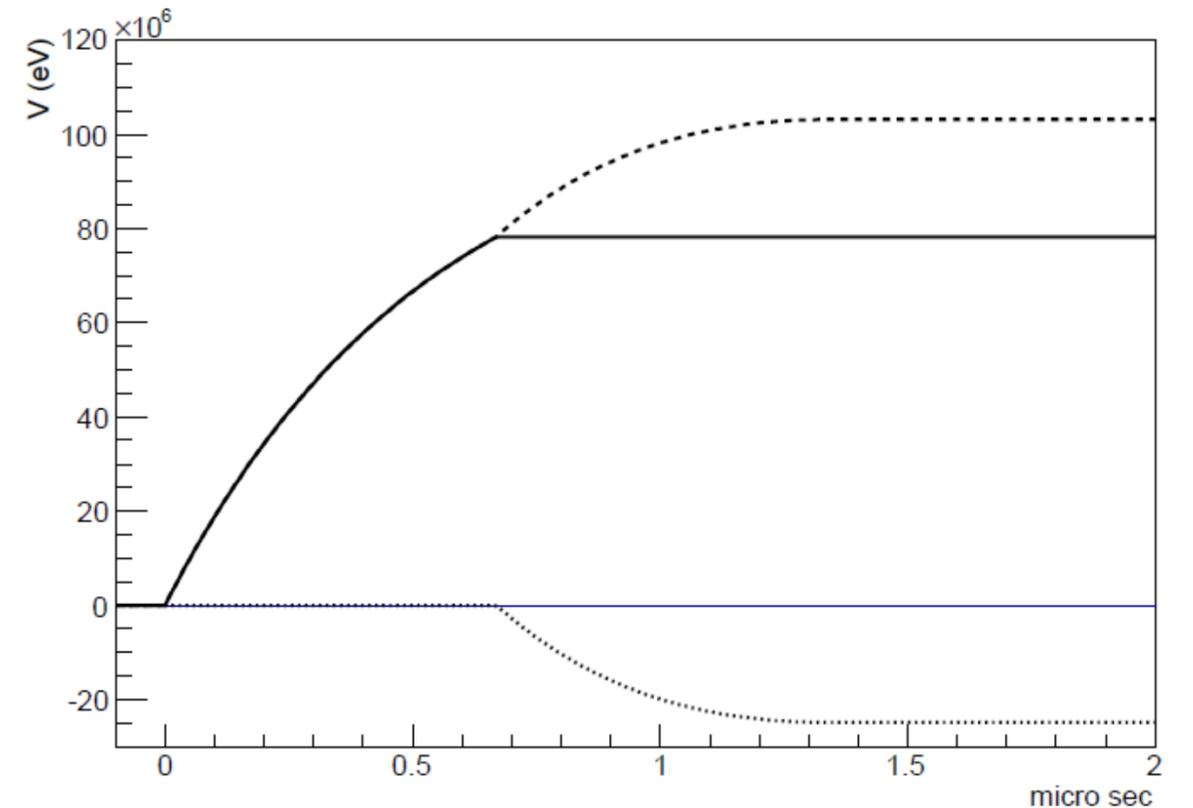
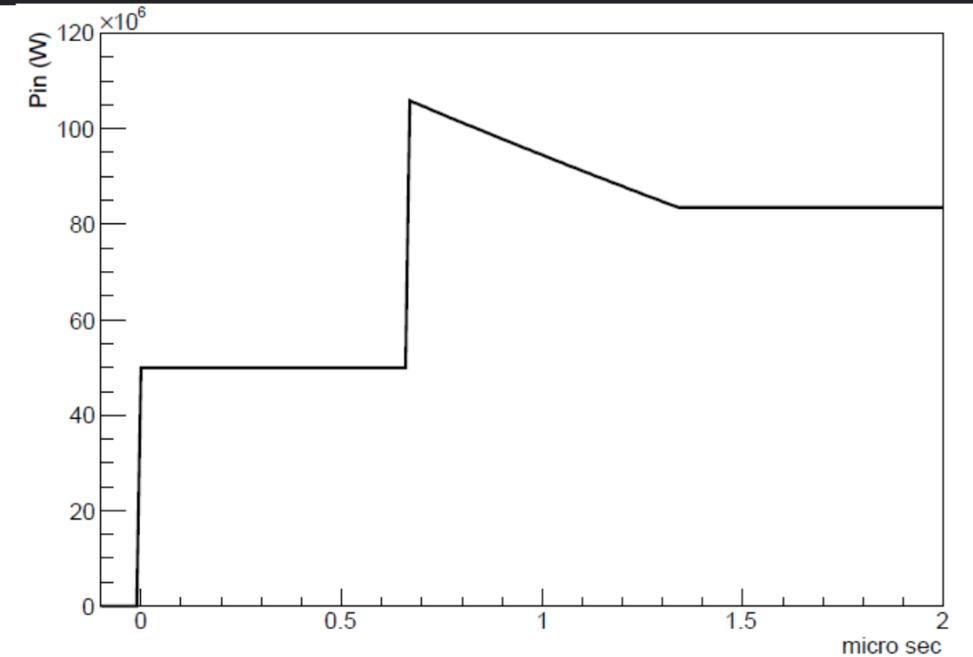
$$E(t) = E_0 U(t) + E_1 U(t - t_f) + \frac{E_2}{t_f} (t - t_f) U(t - t_f)$$

$$E(s) = \frac{E_0}{s} + \frac{E_1}{s} e^{-st_f} + \frac{E_2}{t_f s^2} e^{-st_f}$$

$$V(t) = E_0 L + \frac{L}{1 - e^{-2\tau}} \left( E_1 - \frac{Q}{\omega} E_2 \right) \left( 1 - e^{-\frac{\omega}{Q}(t-t_f)} \right) + \frac{L e^{-2\tau}}{1 - e^{-2\tau}} E_2 (t - t_f) - \frac{r_0 L I_0}{2(1 - e^{-2\tau})} \left[ -\frac{\omega}{Q} e^{-2\tau} (t - t_f) + 1 - e^{-\frac{\omega}{Q}(t-t_f)} \right],$$

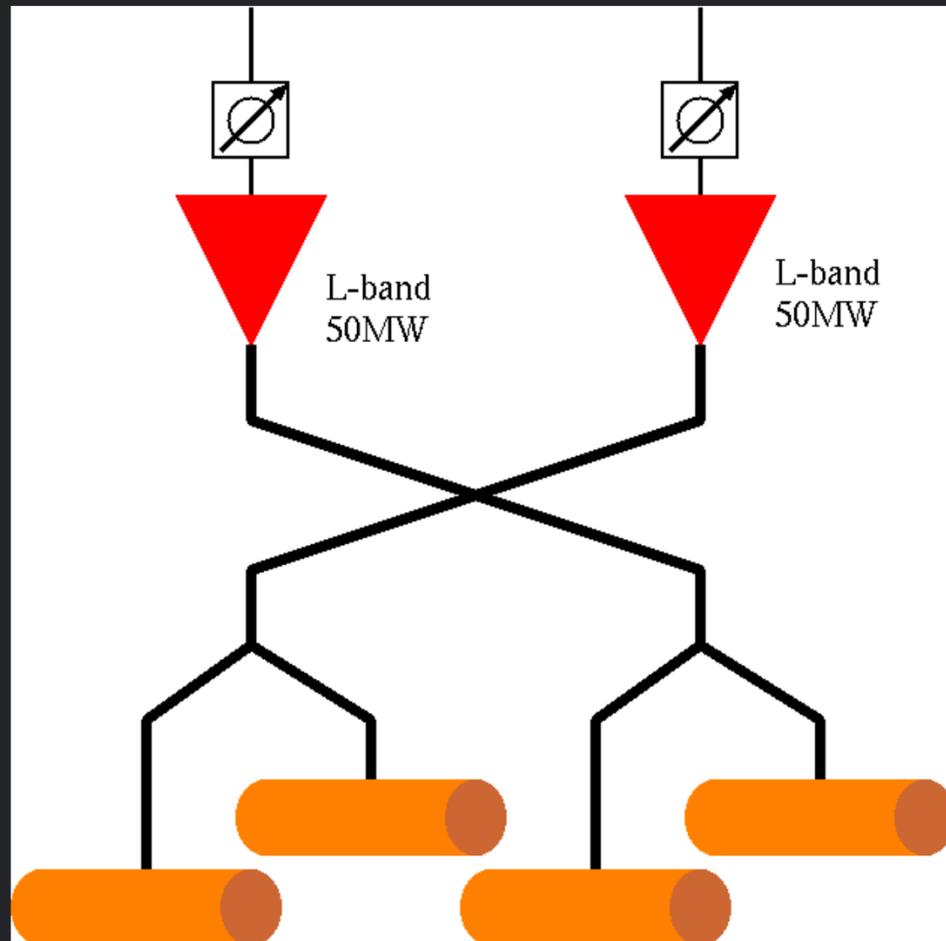
$$E_1 = \frac{r_0 I_0}{2} (1 - e^{-2\tau}),$$

$$E_2 = -\frac{r_0 I_0 \omega}{2 Q} e^{-2\tau},$$



# Phase and Amplitude modulation

- Capture Linac ではPM、Booster LinacではAMによる変調で、ビームローディングによる電圧変動を補償する。
- PMおよびAMを、二つの入力RFへのPMで実現する。
- 同相および逆相のPMを組み合わせて、任意のAMおよびPMを実現する。



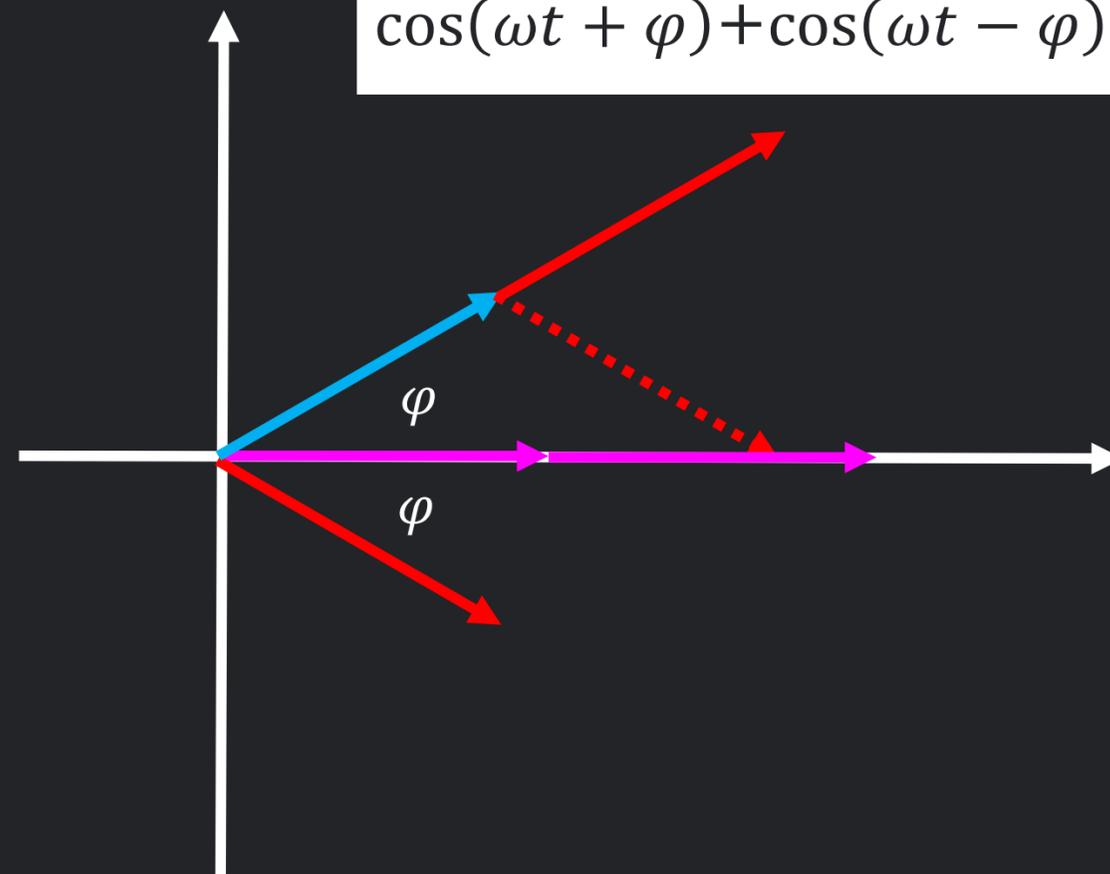
変調前 :  $\cos \omega t + \cos \omega t = 2 \cos \omega t$

同相の変調 : 位相変調

$$\cos(\omega t + \varphi) + \cos(\omega t + \varphi) = 2 \cos(\omega t + \varphi)$$

逆相の変調 : 振幅変調

$$\cos(\omega t + \varphi) + \cos(\omega t - \varphi) = 2 \cos \varphi \cos(\omega t)$$



# KEK CONCEPT DESIGN 80MW S-band RF & Solid State Modulator PARAMETERS



**Fig:** K400-platform

**OPTIONS:** Integration of ...

- Solenoid Power Supply
- Ion Pump Power Supply
- RF Drive amplifier
- Cooling of Klystron (Collector, Body), Solenoid
- All diagnostics and interlocks

Main Parameters	Value	Unit
RF Frequency	2600	MHz
RF Peak Power	80	MW
RF Average Power	0.2 (12) <sup>1</sup>	kW
Mod. Peak Power	143	MW
Mod. Average Power	1.4 (86) <sup>1</sup>	kW
Klystron Voltage	382	kV
Klystron Current	375	A
RF Pulse width (top)	0.5	μs
Pulse Repetition Rate	5 (300)	Hz
Pulse-to-Pulse stability	<15	ppm

<sup>1</sup> Corresponding to 300Hz operation

# KEK CONCEPT DESIGN 50MW L-band RF & Solid State Modulator PARAMETERS



**Fig:** K300-platform

**OPTIONS:** Integration of ...

- Solenoid Power Supply
- Ion Pump Power Supply
- RF Drive amplifier
- Cooling of Klystron (Collector, Body), Solenoid
- All diagnostics and interlocks

Main Parameters	Value	Unit
RF Frequency	1300	MHz
RF Peak Power	50	MW
RF Average Power	0.125 (7.5) <sup>1</sup>	kW
Mod. Peak Power	76	MW
Mod. Average Power	0.7 (42) <sup>1</sup>	kW
Klystron Voltage	271.7	kV
Klystron Current	282	A
RF Pulse width (top)	0.5	μs
Pulse Repetition Rate	5 (300)	Hz
Pulse-to-Pulse stability	<20	ppm

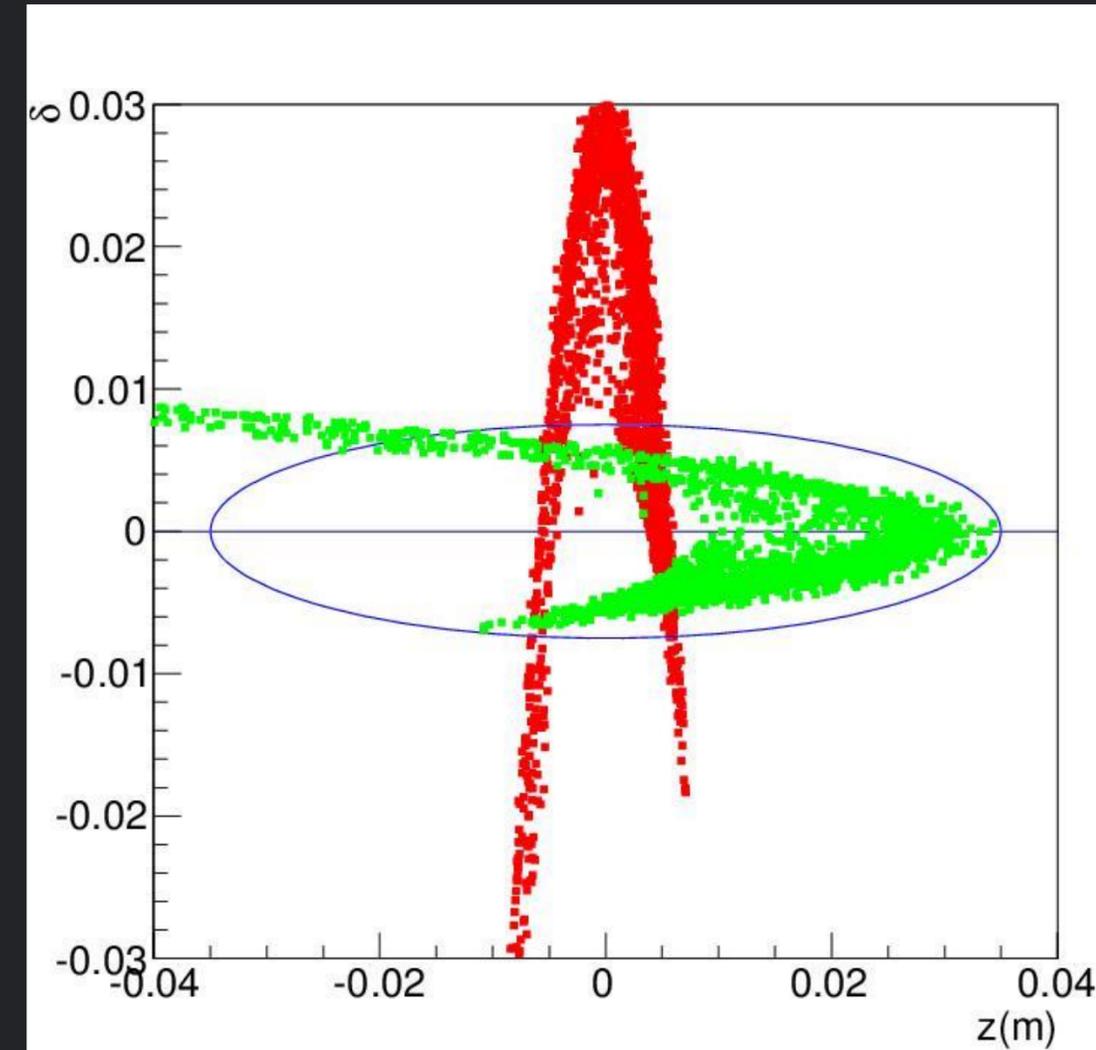
<sup>1</sup> Corresponding to 300Hz operation

# Energy Compressor System

- 最終的に陽電子はDR（ダンピングリング）に入射される。DRに安定的に蓄積されるには、次の条件に合致しないといけない。

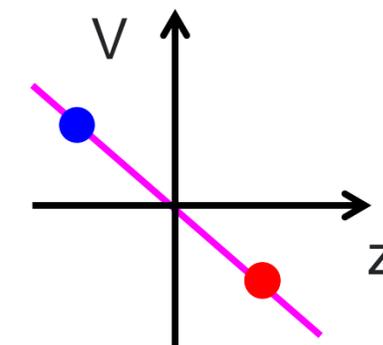
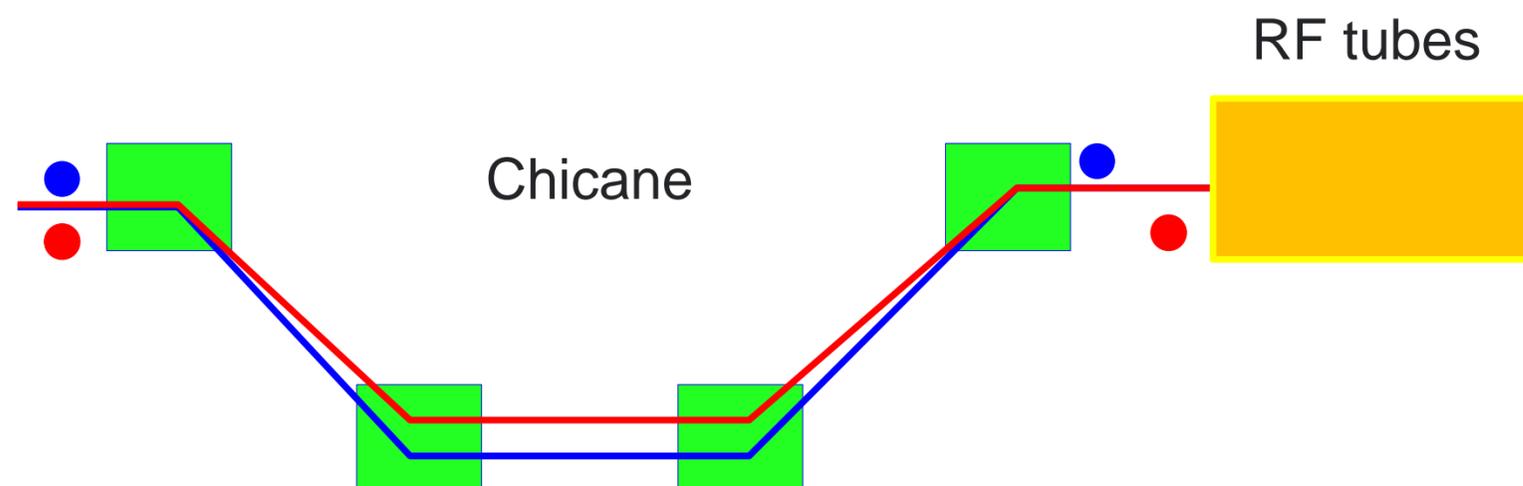
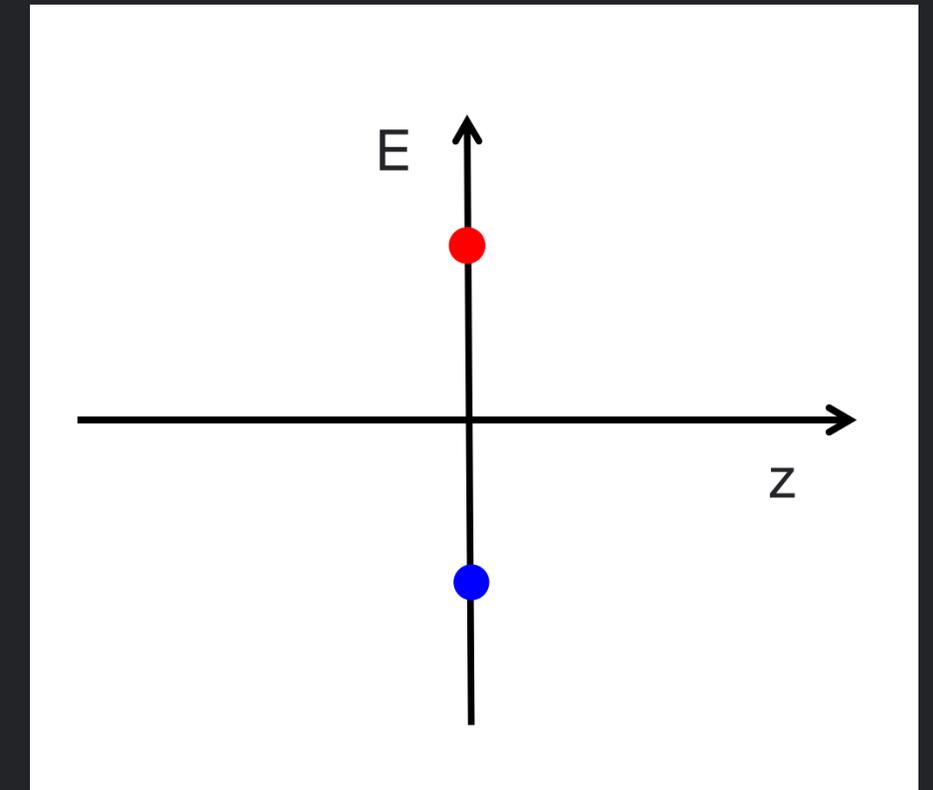
$$\left(\frac{z}{0.035}\right)^2 + \left(\frac{E - \bar{E}}{0.0075}\right)^2 < 1$$

- しかし、ブースター出口におけるビーム分布は、エネルギー方向に大きく広がっている。それとは逆に空間方向（z）には、余裕がある。
- 空間方向には多少広がってもいいので、エネルギー方向に圧縮したい。これをやるのがECS。大まかには、粒子分布を位相空間で90度回転させると思えばよい。



# Energy Compressor System

- ECSはシケインとRF加速器からなる。
- シケインを通過すると、エネルギーの大きな粒子は進み、エネルギーの低い粒子は遅れる。
- RF空洞をゼロクロスで動作させると、遅れてきたエネルギーの低い粒子は加速され、早くきたエネルギーの低い粒子は減速される。
- 結果として、エネルギーが圧縮され、長さは伸びる。

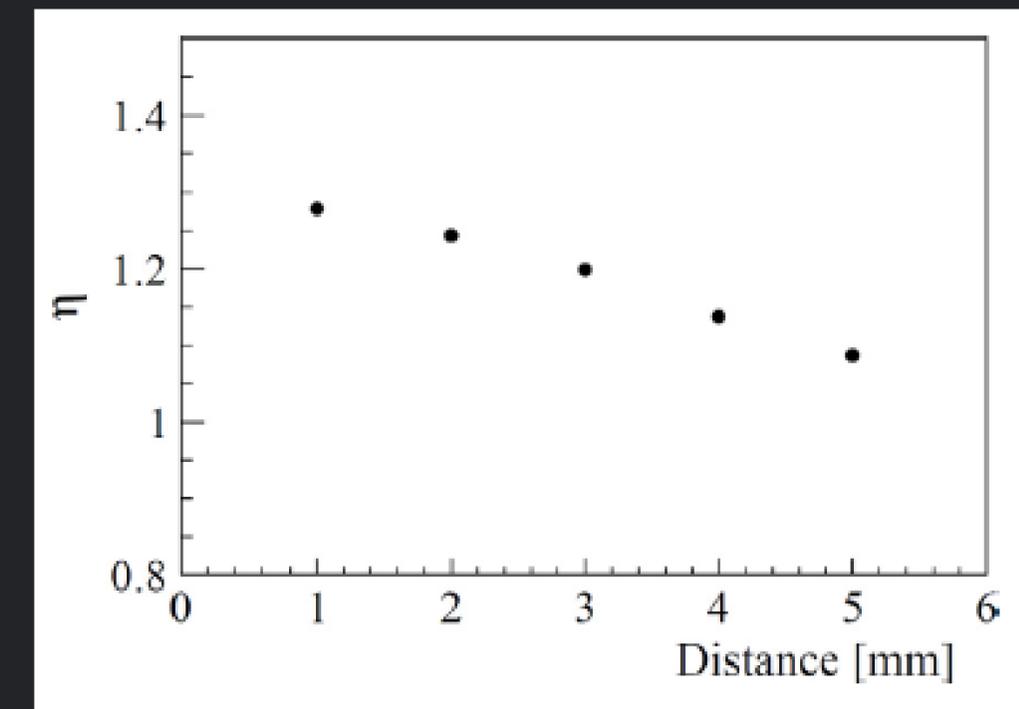
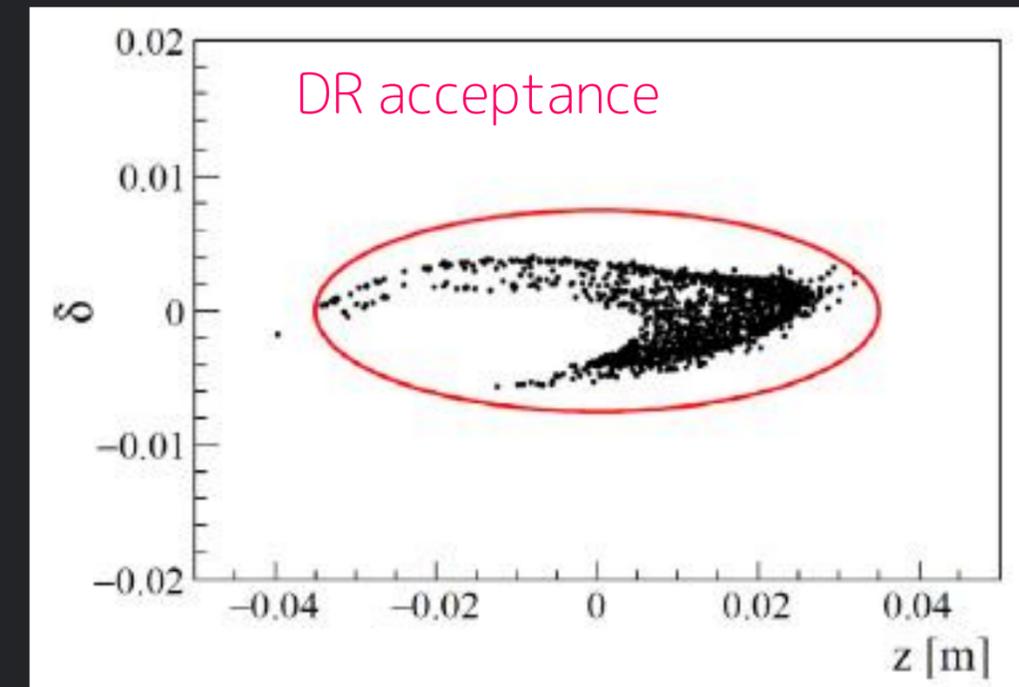
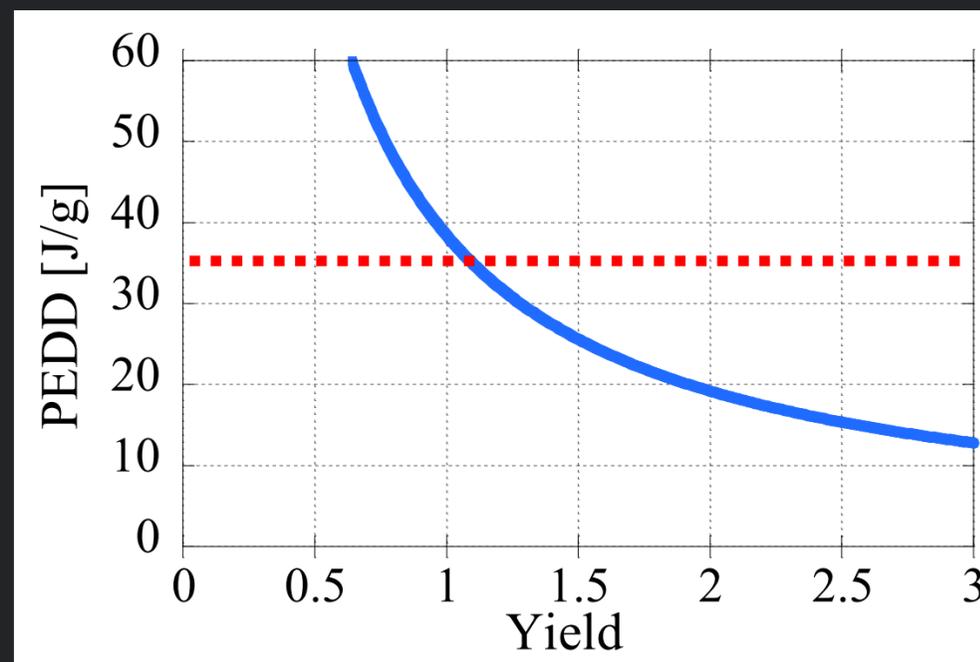


# ECS Optimization and Yield

- ECSを最適化することで、なるべく多くの陽電子をDRアクセプタンス内に放り込む。
- 標的に入射する電子の個数で規格化したアクセプタンス内の陽電子数を陽電子生成率 $\eta$ として定義する。
- 必要なバンチあたりの陽電子数は4.8nCだから、標的に入射する電子数は $4.8/\eta$  [nC/bunch].
- 標的への負荷 (PEDD) は電子数によって決まる。

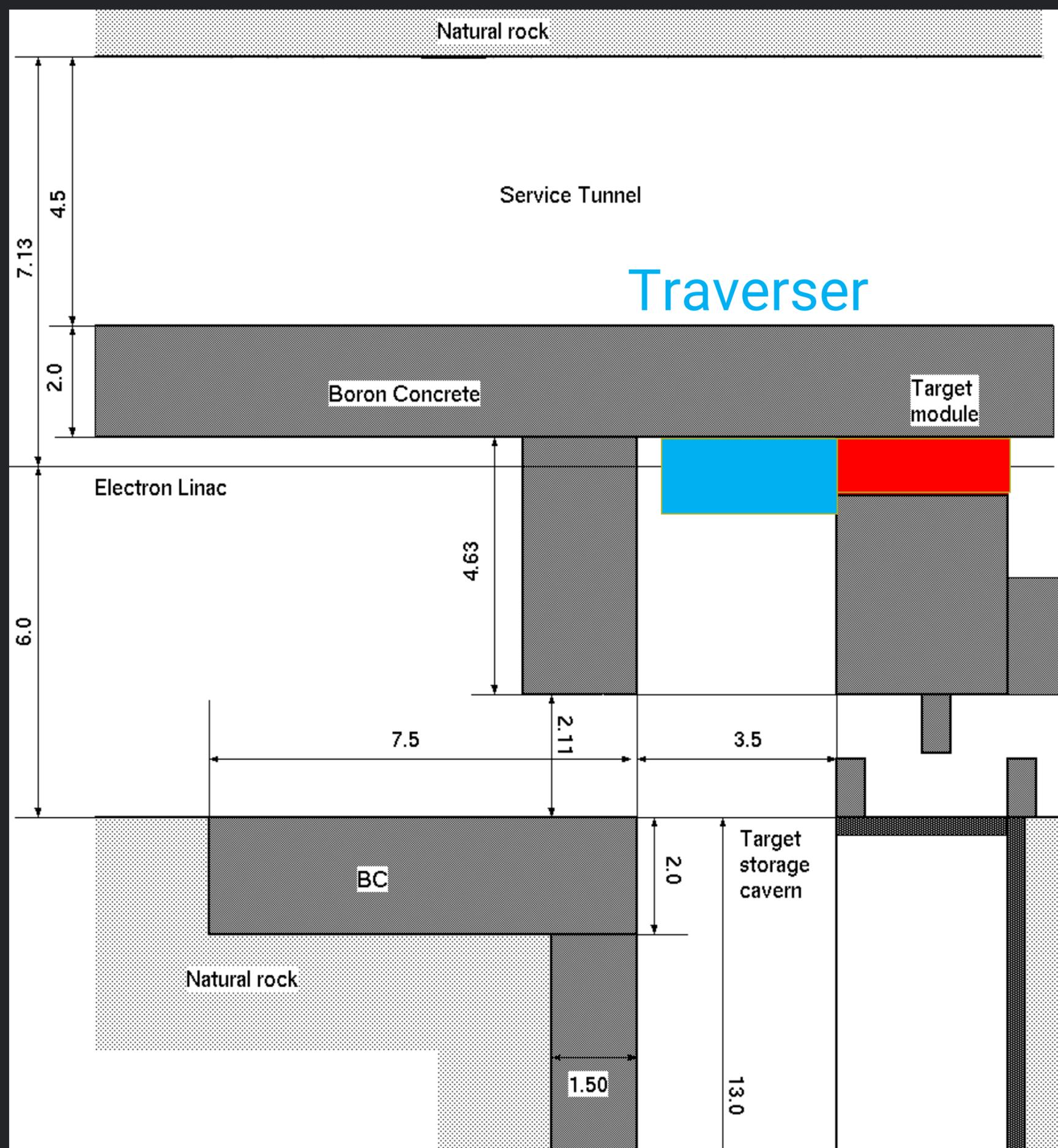
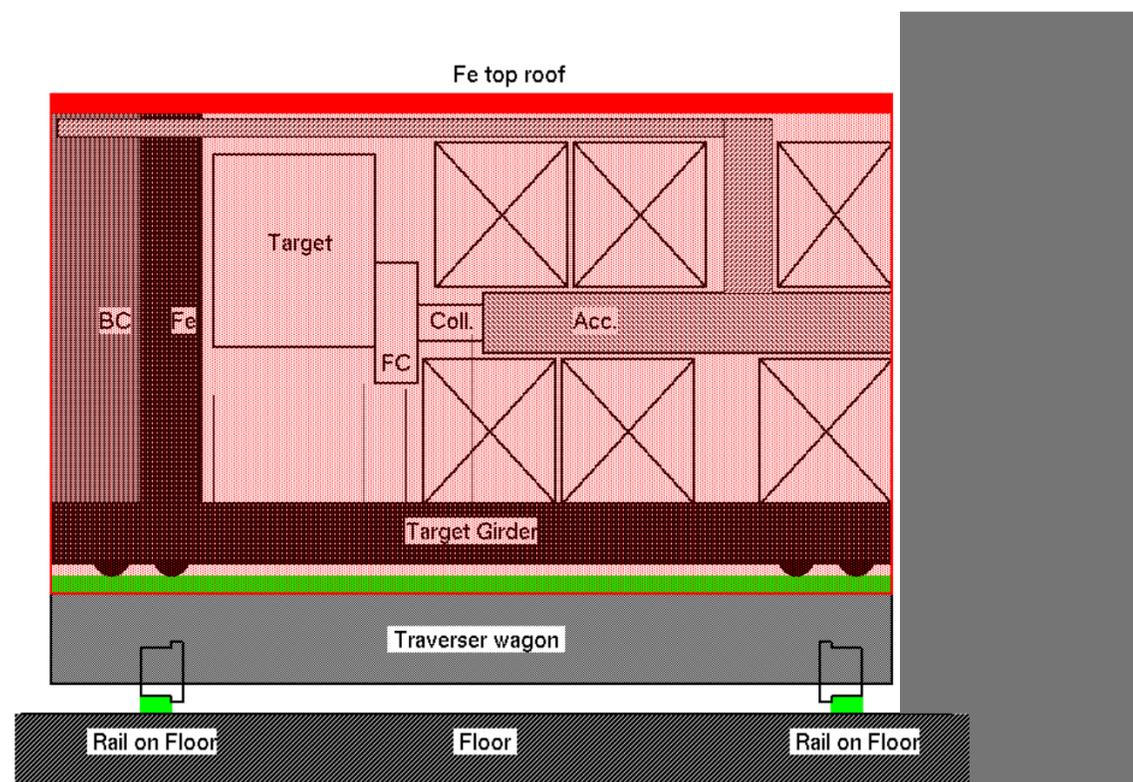
$$PEDD = \frac{25.6 \text{ [J/g]}}{3.2 \text{ [nC]}} \times \frac{4.8}{\eta} = \frac{38.4}{\eta} \text{ [J/g]}$$

PEDDの安全閾値35J/gを達成するには $\eta > 1.1$ が条件。



# Target Maintenance

- 標的は強く放射化される一方、放射線損傷のため2年に一回くらい交換する必要。
- 完全に冷却するには数十年が必要。放射線を遮蔽しながら、メンテをする仕組みが必要。



まとめ

# まとめ

- 陽電子と電子は平等な粒子であるが、世間は平等ではないため、作るのが大変。
- ILCは過去の加速器にくらべても大量の陽電子が必要。
- 電子ビームを金属標的に入射すると大量のガンマ線が発生し、さらに対生成により陽電子が得られる。
- 標的への熱負荷が問題だが、都合のよい時間構造を採用することで、問題を回避。
- 生成標的、FC (AMD)、Capture Linac, Booster Linac, ECSにより電子ドライブILC陽電子源は構成されている。各々のコンポーネントは最適化されることで、高効率な陽電子生成を可能としている。
- 結果として生成率は1.1以上が見込まれる。標的破壊は1.1以上ならば起きないため安心。
- ILC電子ドライブ陽電子源の基本設計は成熟している。技術設計に向けて、技術的な精度をたかめていくことが課題。

# 準備研究所におけるタイムチャート

Item	Task	2021	2022	2023	2024	2025	
Target	Stress calculation				→		
	Vacuum seal	→					
	Prototyping	→					
Flux Concentrator	FC conductor	→					
	Transmission line				→		
	Prototyping				→		
Capture Linac	APS cavity	→					
	Beam loading	→					
	Power unit prototyping				→		
	Solenoid prototyping				→		
	Unit prototyping				→		

# 謝辞

株式会社 リガク

岩手県工業技術センター

いわて産業振興センター

株式会社近藤設備

株式会社 金属技研

株式会社 東北精密

株式会社 スカンジノバ

岩手大学/東北大学

B I N P (Russia)

CERN (Swiss)

IHEP (China)

KEK

広島大学