

# 電子駆動陽電子源 最近の進展

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

三次市江の川

# 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



井原市駅 ← 向原駅  
116 K 597 M  
むかい はら  
向原踏切  
故障専用電話 0120-39-4924

非常ボタン  
非常ボタン

01はじめに

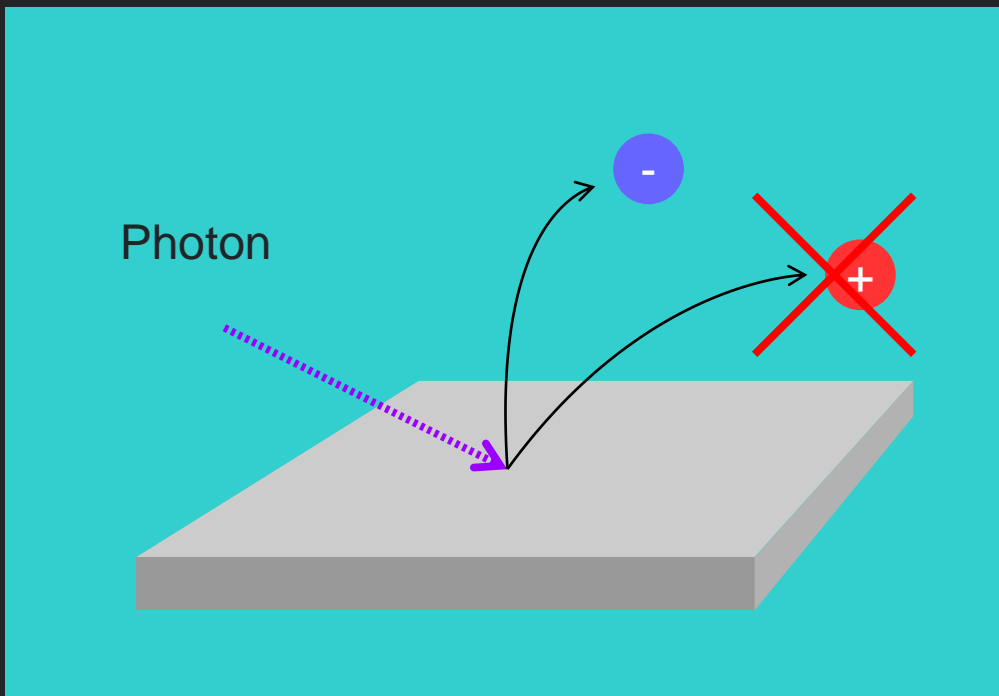
大分水嶺向原踏切



# 陽電子

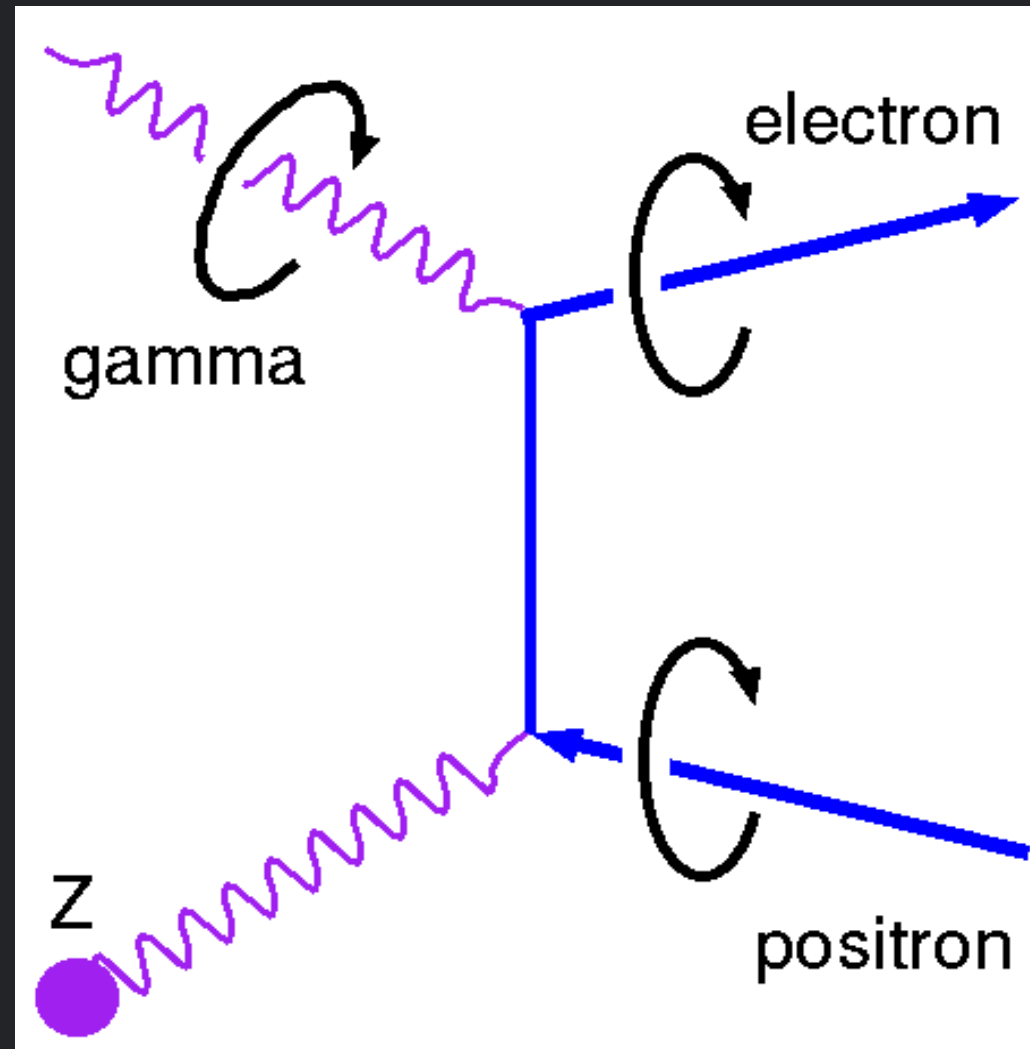
Positron

- 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 :  $6 \times 10^{12}$



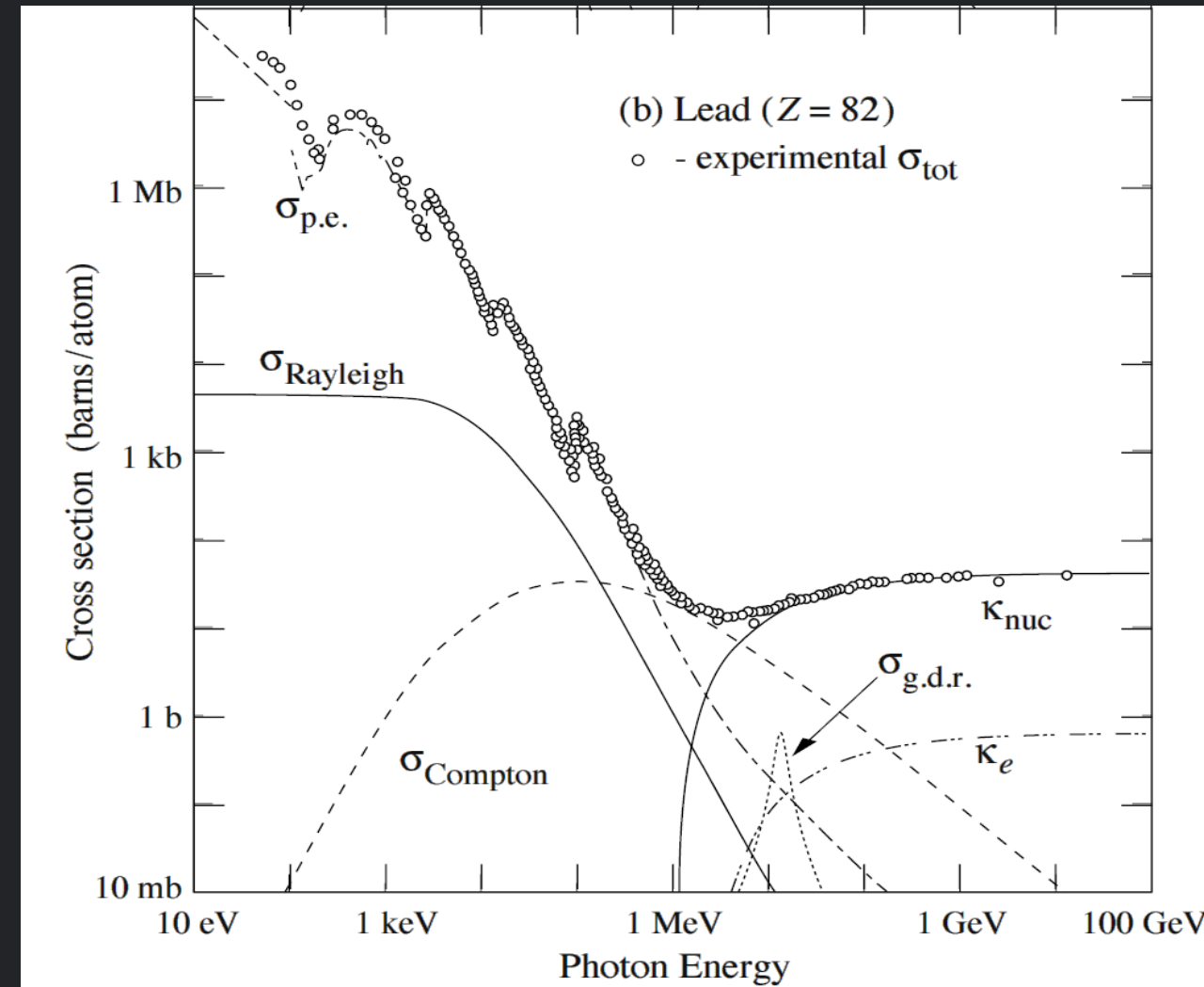
# 対生成反応 対消滅の逆反応

- 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

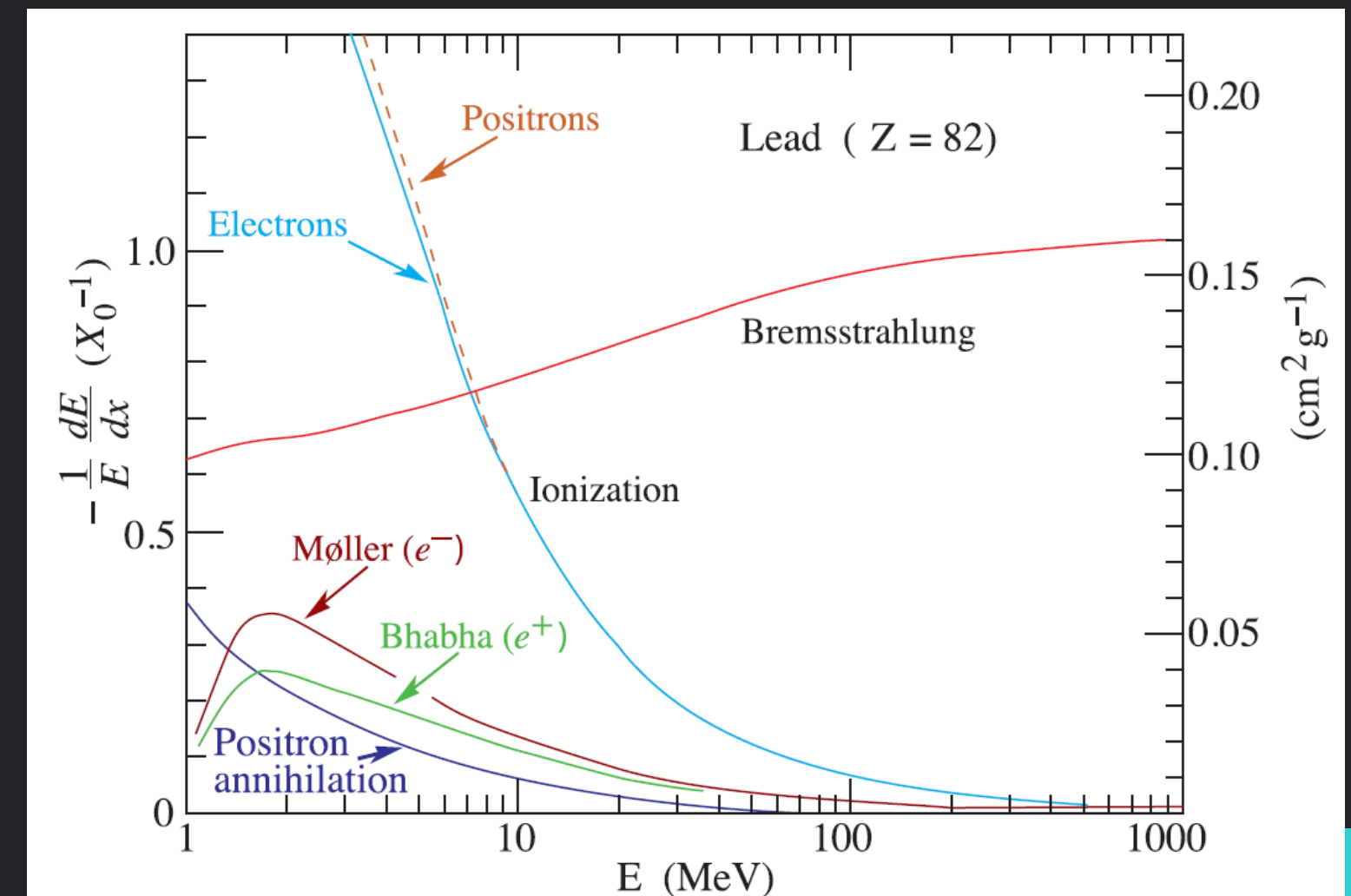
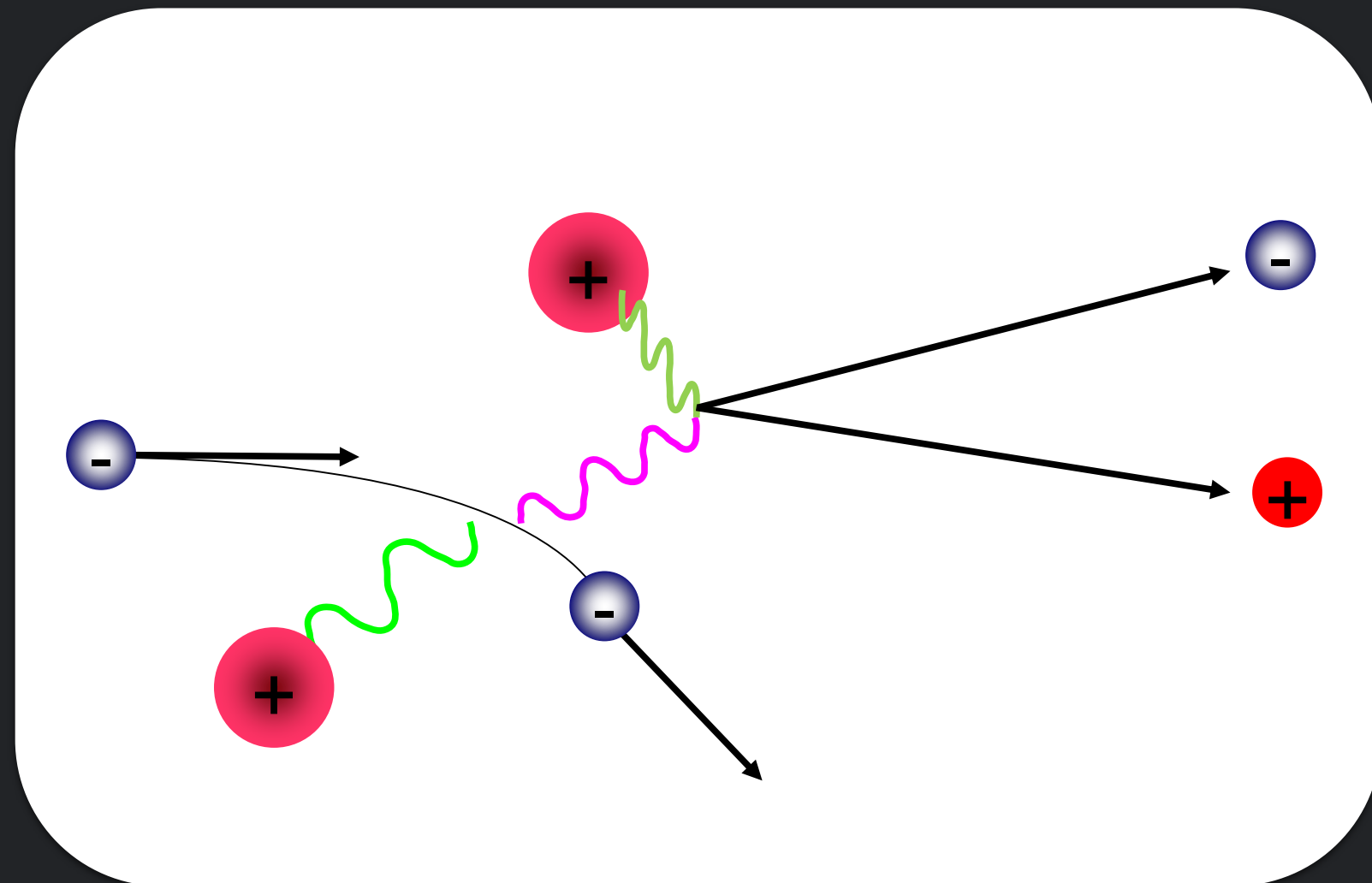
- 0 - 1keV : 光電効果
- 1keV - 10 MeV : コンプトン散乱
- 10 MeV - : 対生成



# 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。



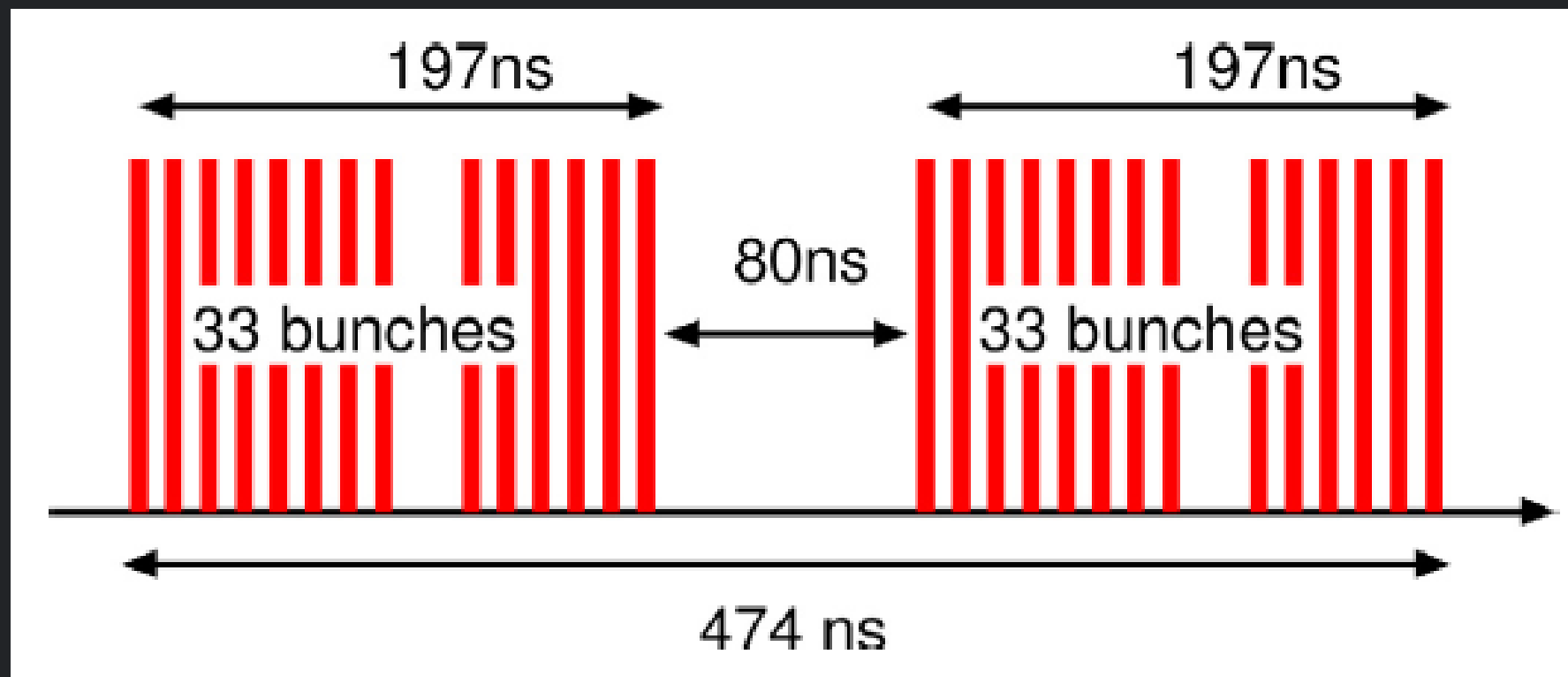
江の川、広島島根県境  
(広島県三次市、島根県美郷町)

## 02 ILC電子ドライブ 陽電子源の概要



# 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。
- 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回繰り返す、1300バンチをつくることにした。



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

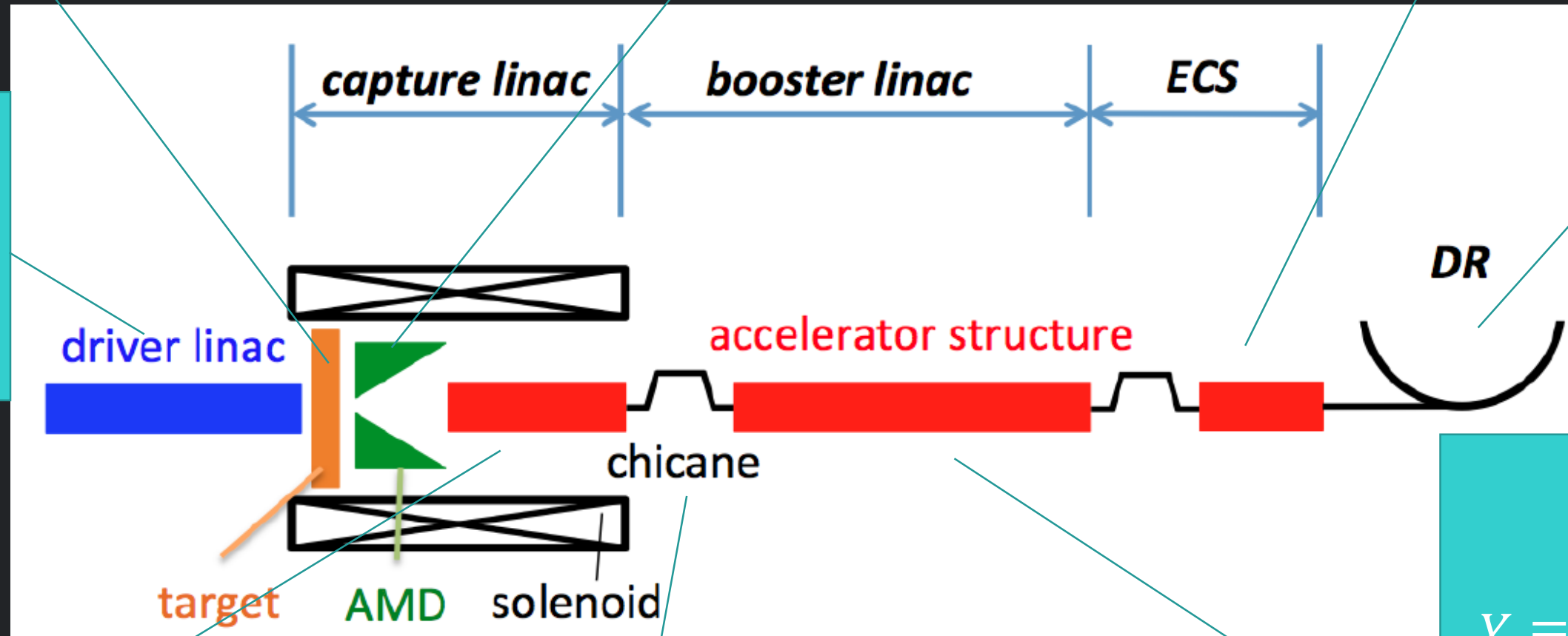


16 mm 厚 W-Re(26) 回転する生成標的 5 m/s

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



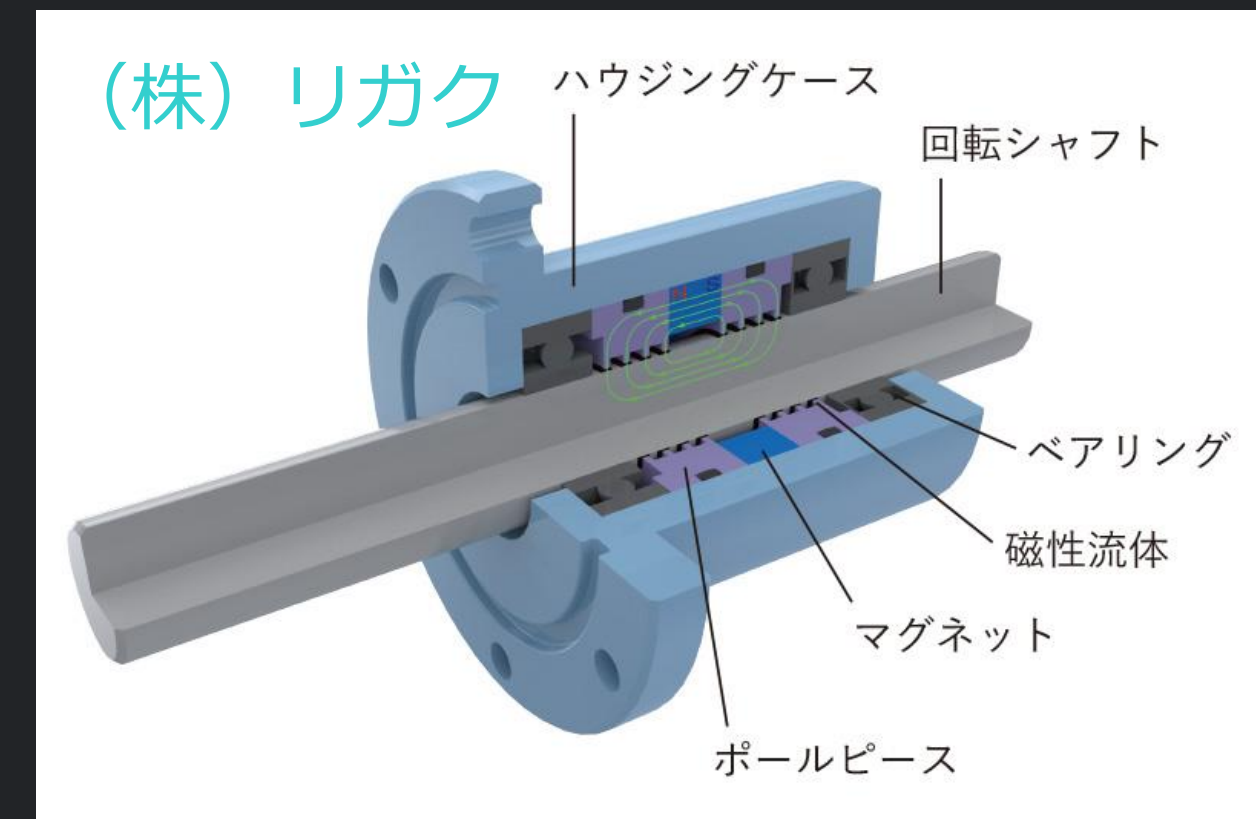
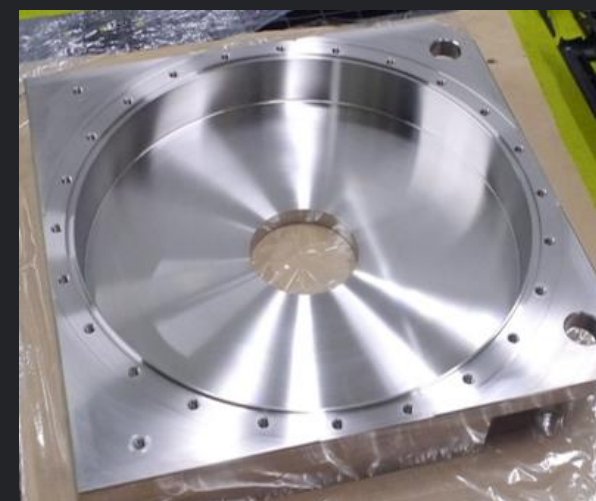
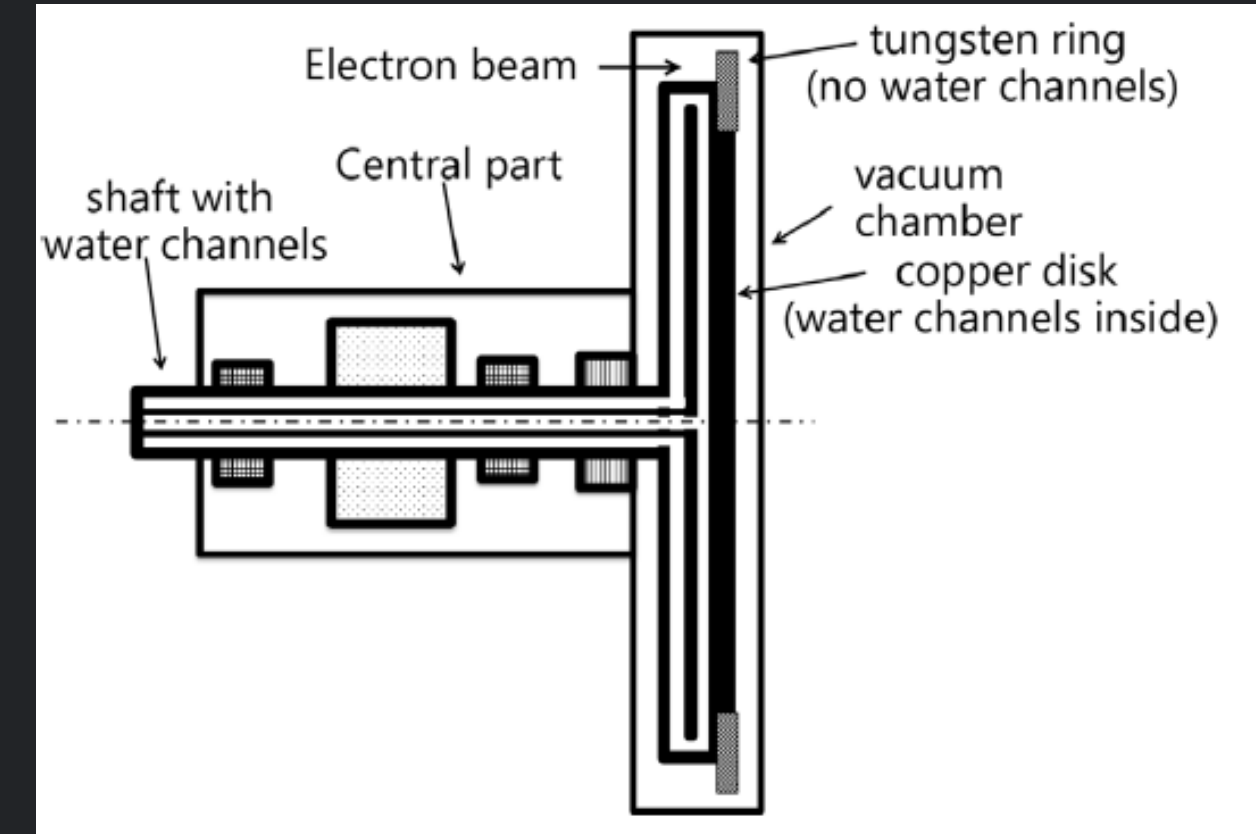
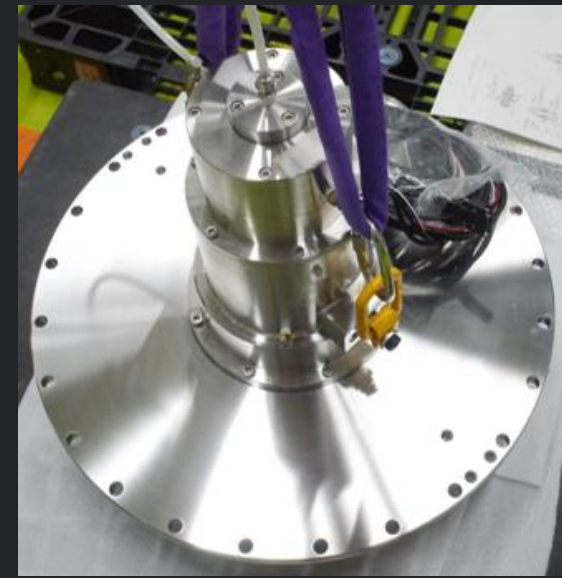
江の川河口

## 03 陽電子生成とRF補足



# 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

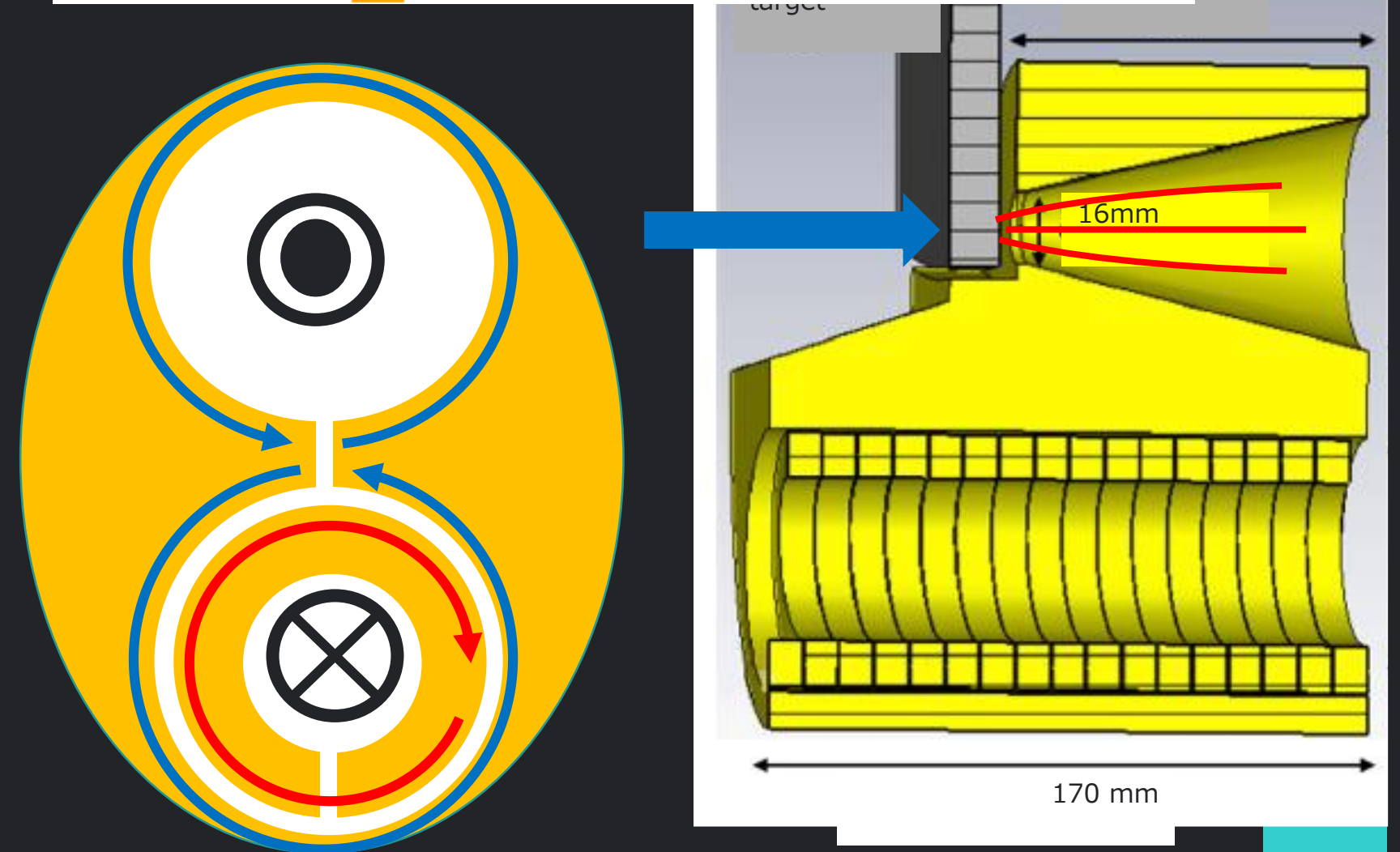
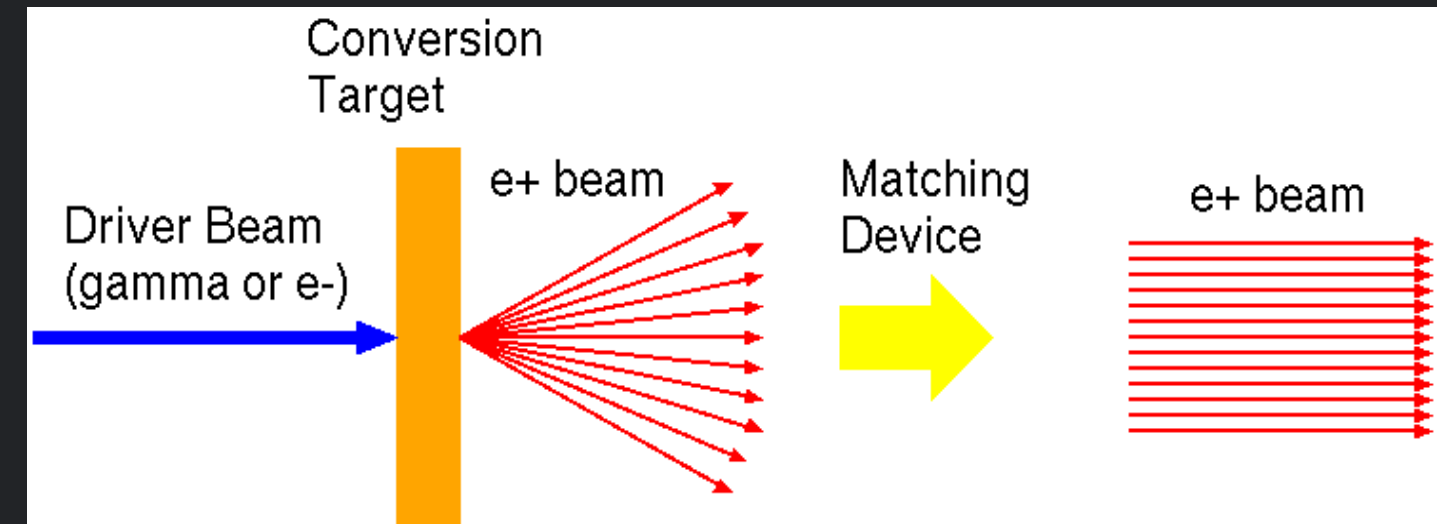
- 発生した陽電子は大きな角度広がりを持つので、扱いにくい。ビームサイズを多少大きくしても、角度広がりを抑制したい。
- そのためにFlux Concentratorという特殊なパルス磁石を用いる。
- 磁場はz方向(ビーム進行方向)に発生するが、その大きさは

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

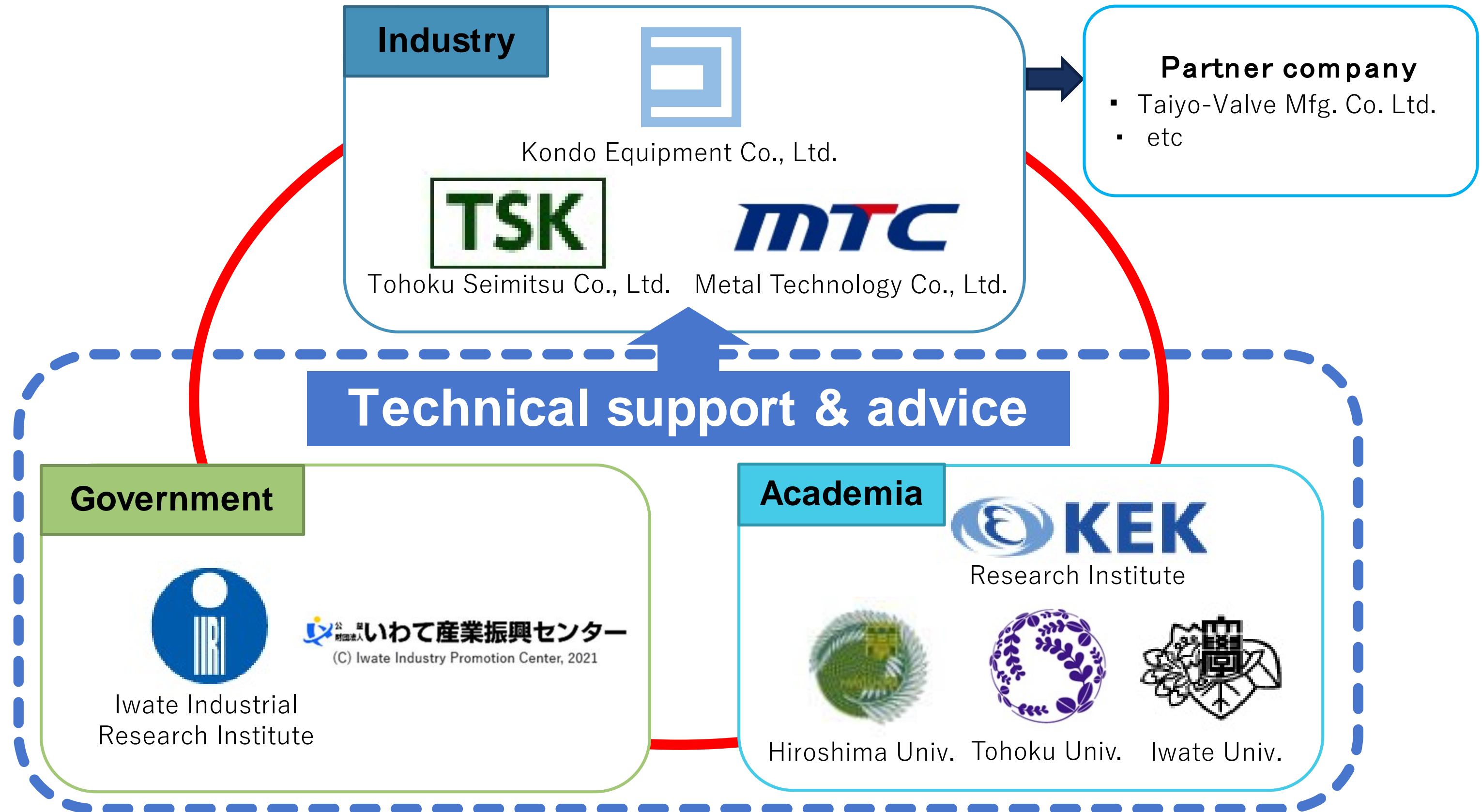
陽電子は磁場により回転運動(サイクロトロン運動)をする  
が、磁場が弱くなるに従い、回転半径は増大し、横方向運動量は減少する。

断熱不変量 (Adiabatic invariance)

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

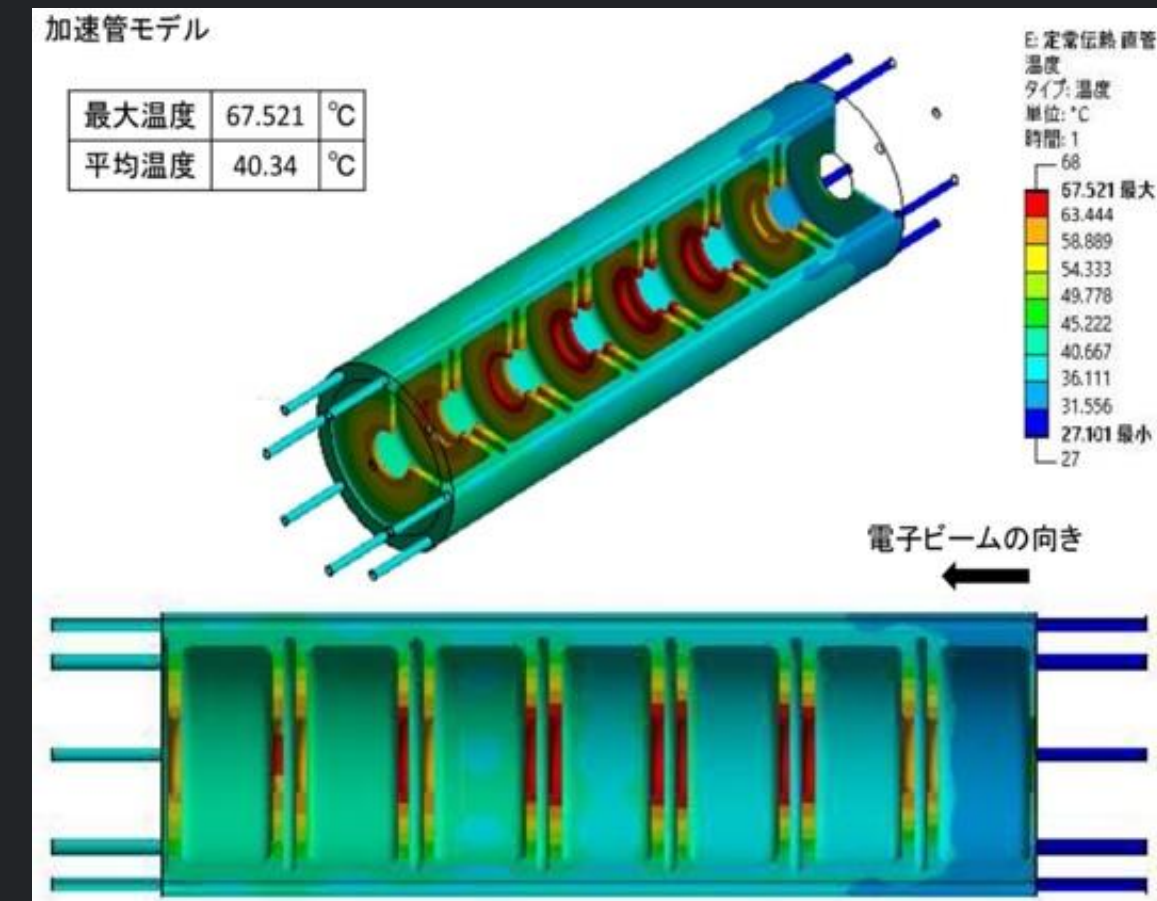
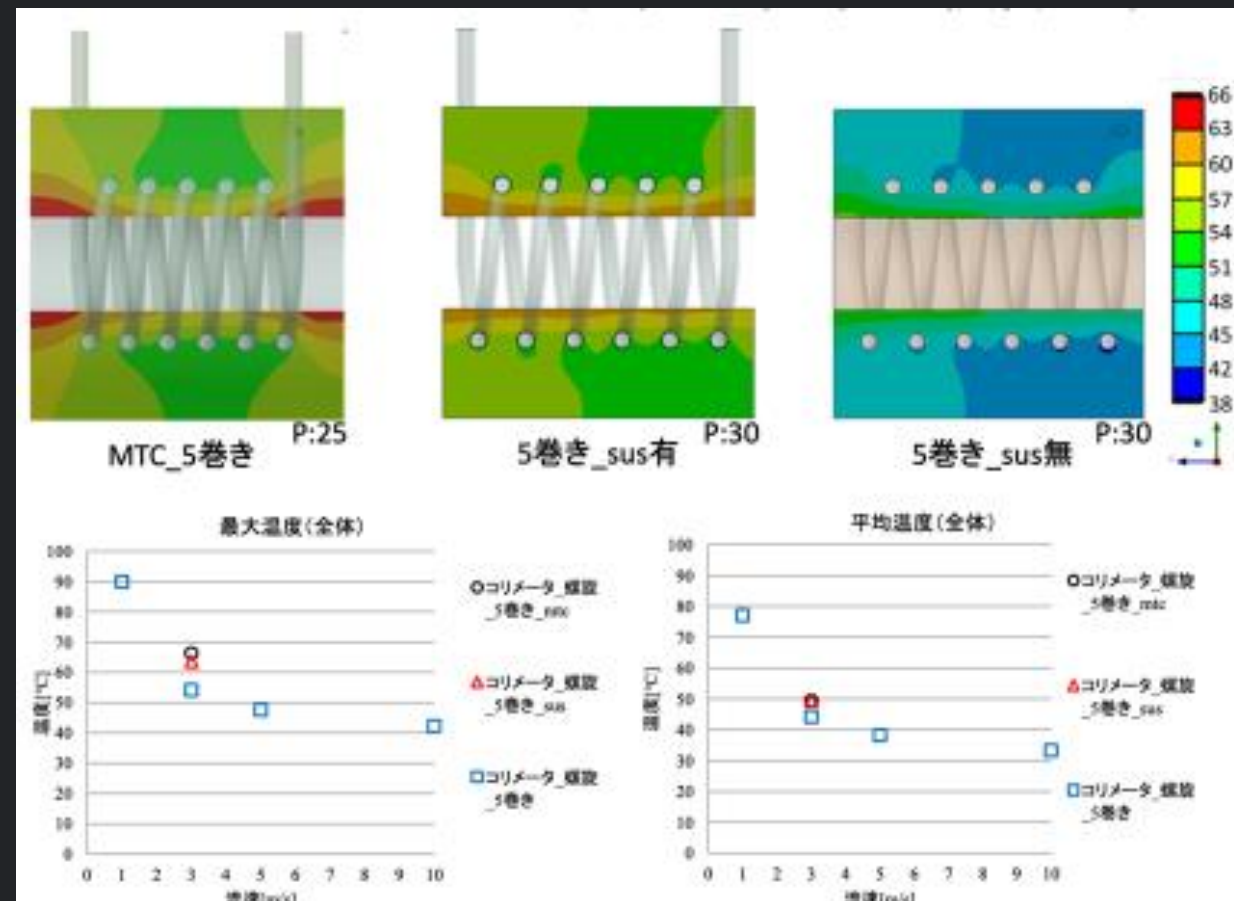
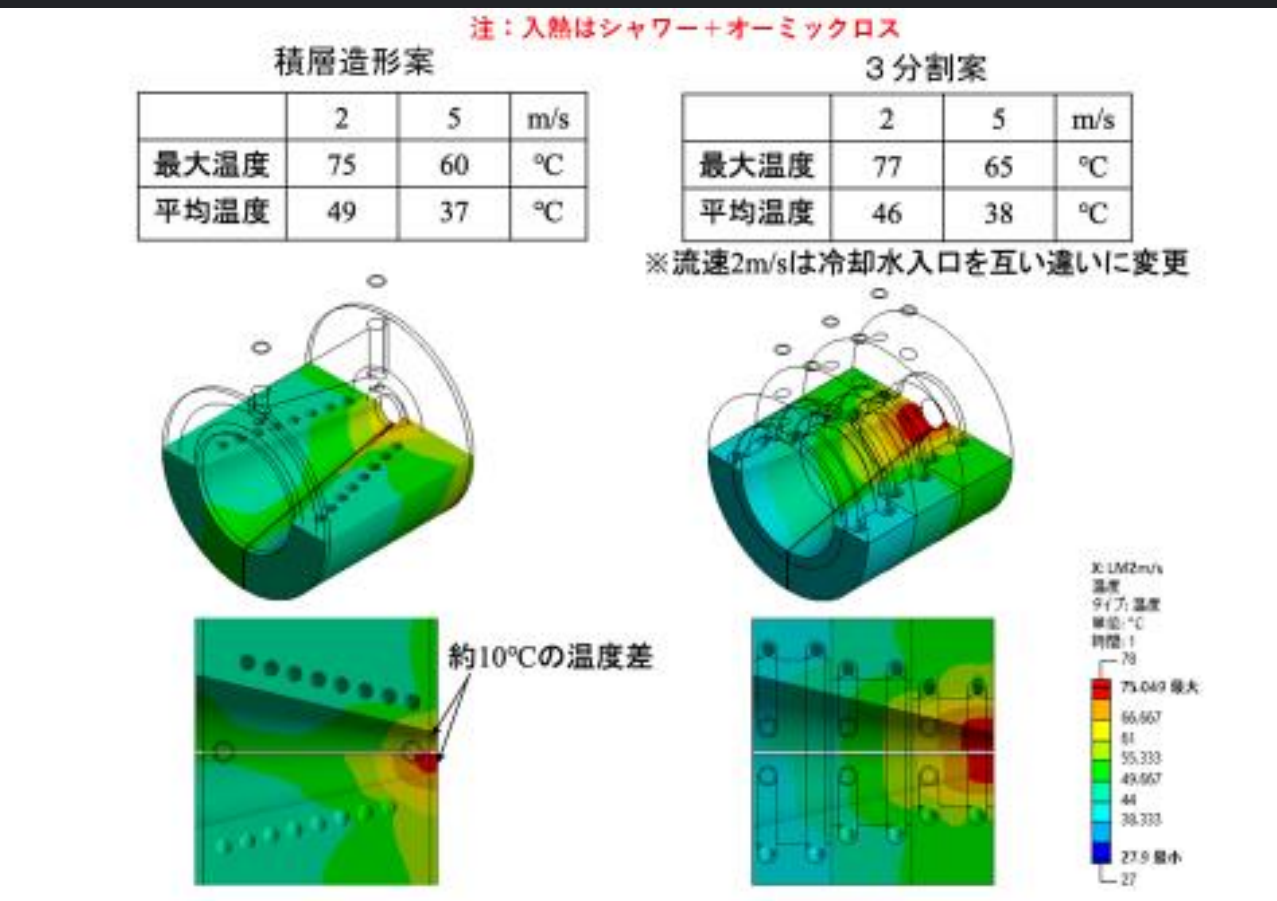
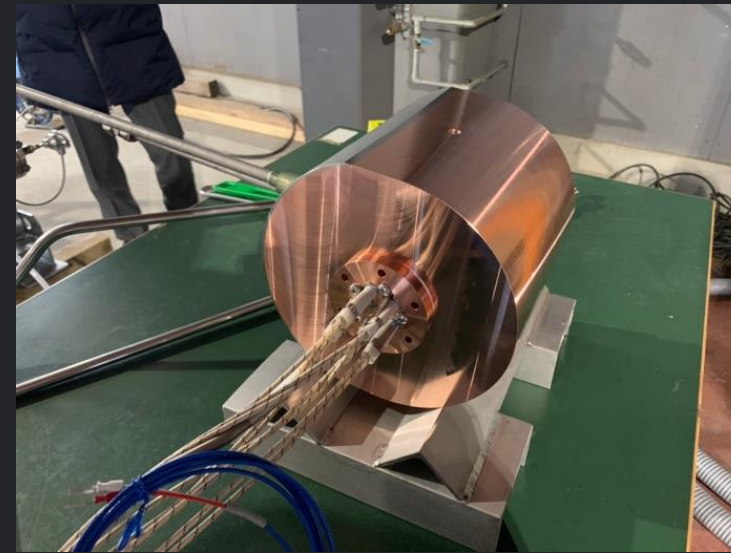


# Industry-Government-Academia Collaboration for ILC Positron source Study



# 熱設計

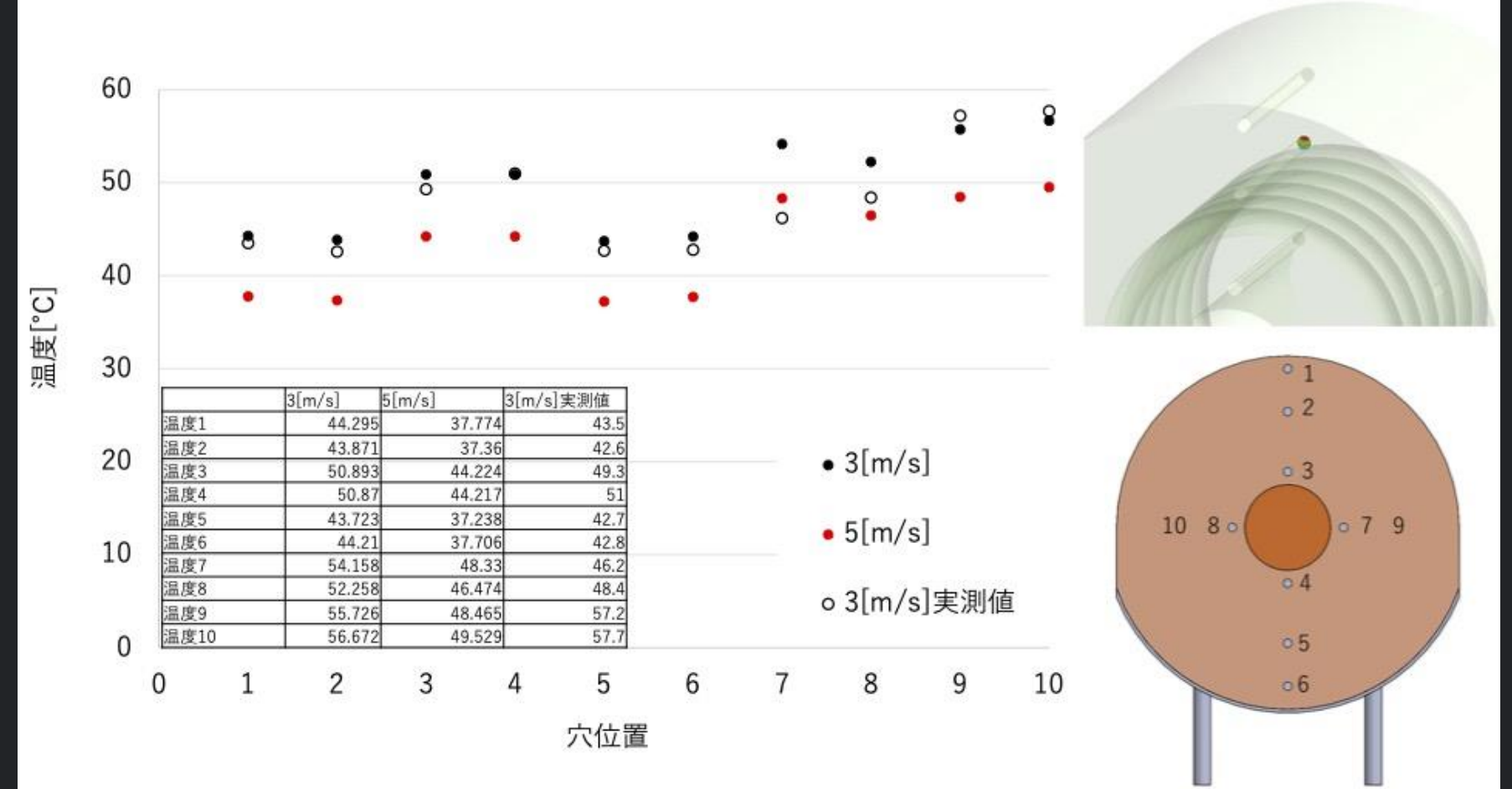
- 標的、FC、第一加速管などでは、ビーム由来の大きな熱負荷が発生。
- 熱設計：適切な冷却構造、そして製作方法について、検討。
- 加速器研究者とノウハウをもつ企業の協力が非常に有効。



# コリメータ部の冷却試験

- コリメータを模擬した銅製円筒
- 中心部のビームホール (φ60) に、7kWのヒーターを挿入し加熱。
- 冷却チャンネルの水量を変えて、温度分布を測定。
- おおむねFEMシミュレーション(Ansys)の計算結果と一致。

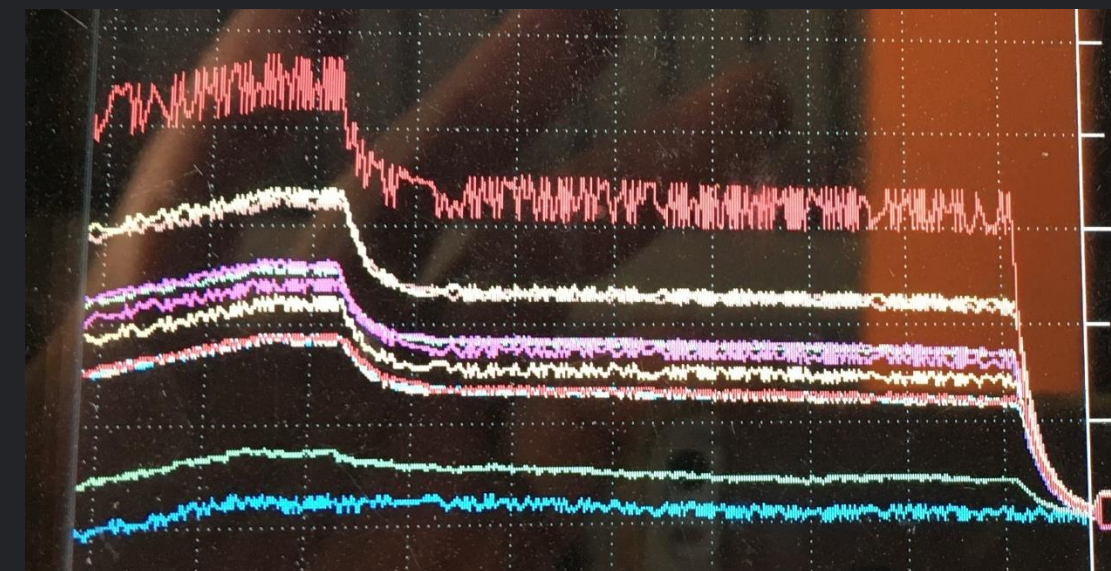
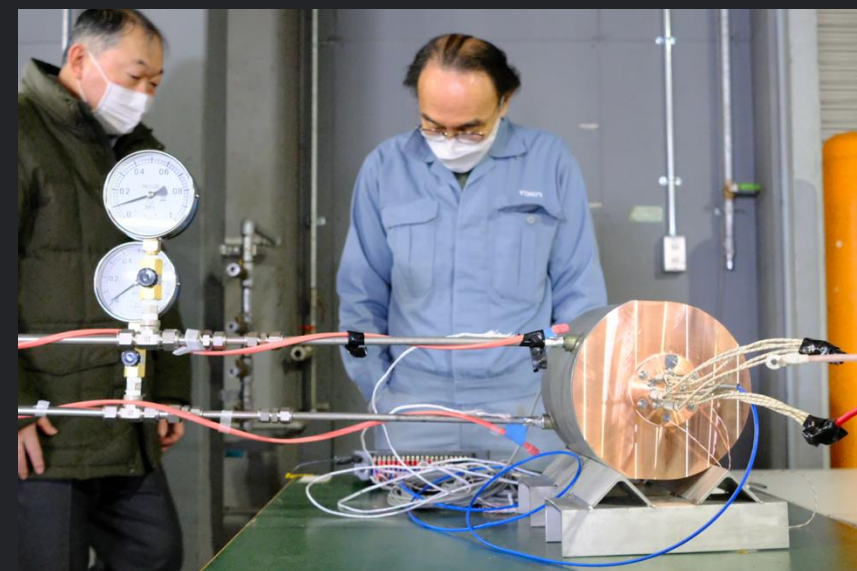
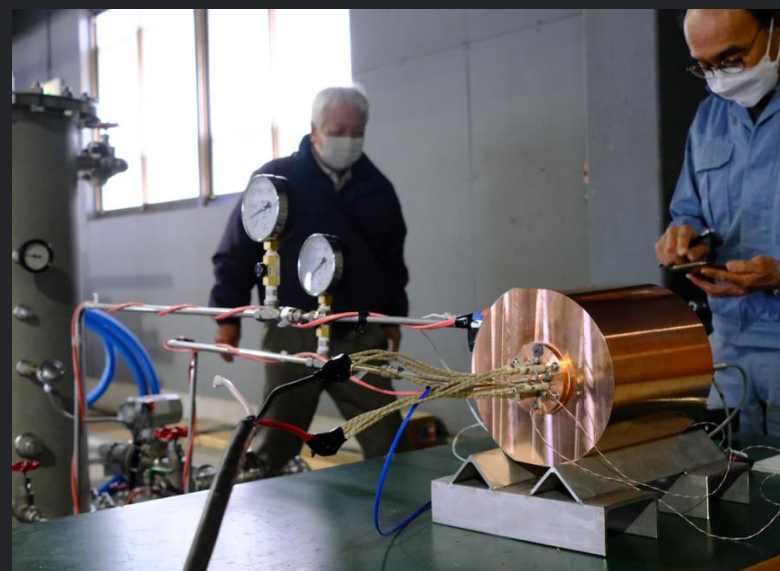
解析結果 (熱電対挿入穴面平均温度)



陽電子源冷却実験装置

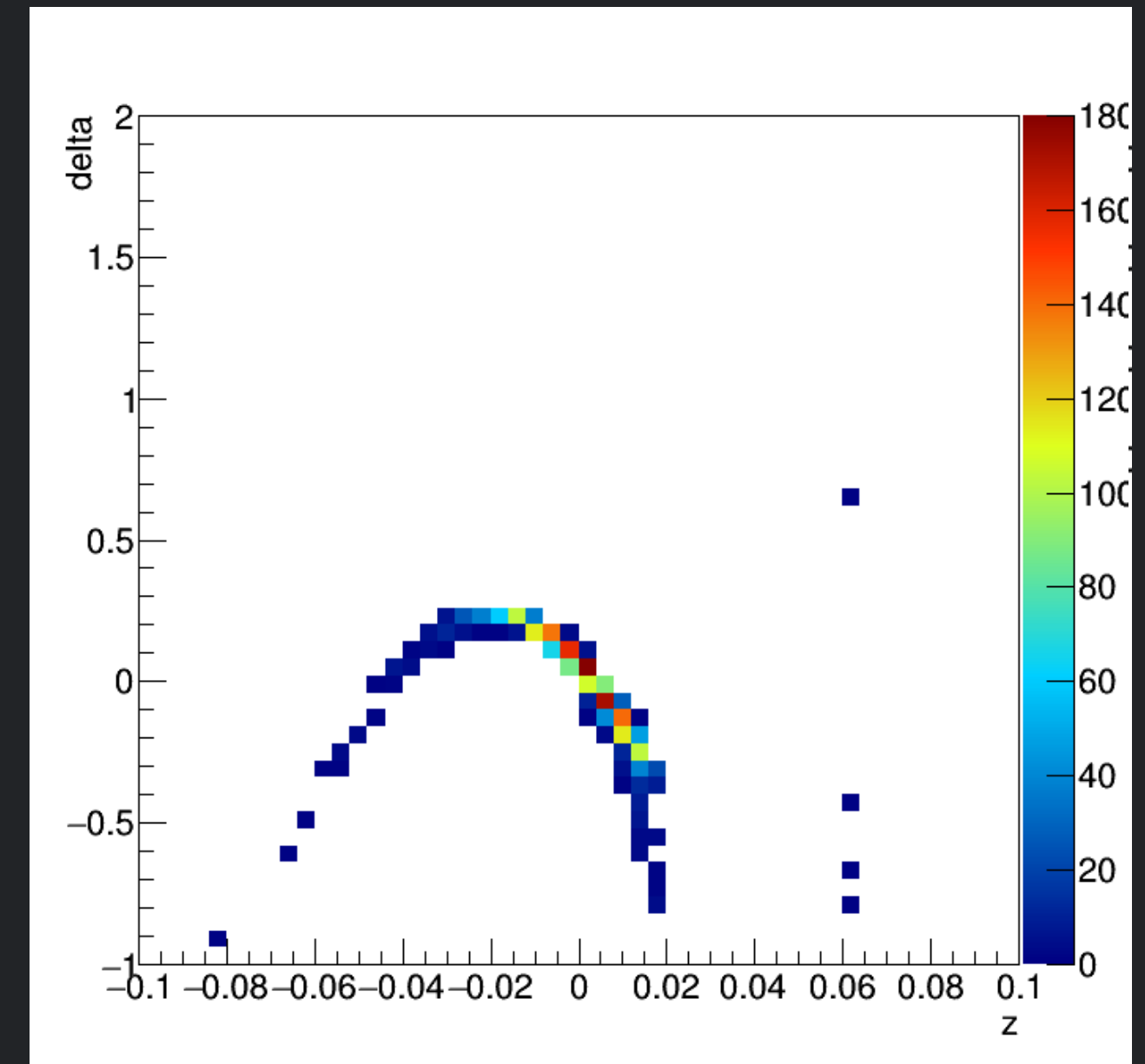
製造業者 株式会社 近藤設備  
Kondo Equipment Co., Ltd.  
〒024-0014 岩手県北上市流通センター 6-13  
TEL 0197-62-5090 / FAX 0197-62-5091

サン・エンジニアリング  
Sun Engineering Co., Ltd.  
〒028-0514 岩手県遠野市遠野町 30-55-4  
TEL / FAX 0198-60-3370



# 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)







Capture Linac

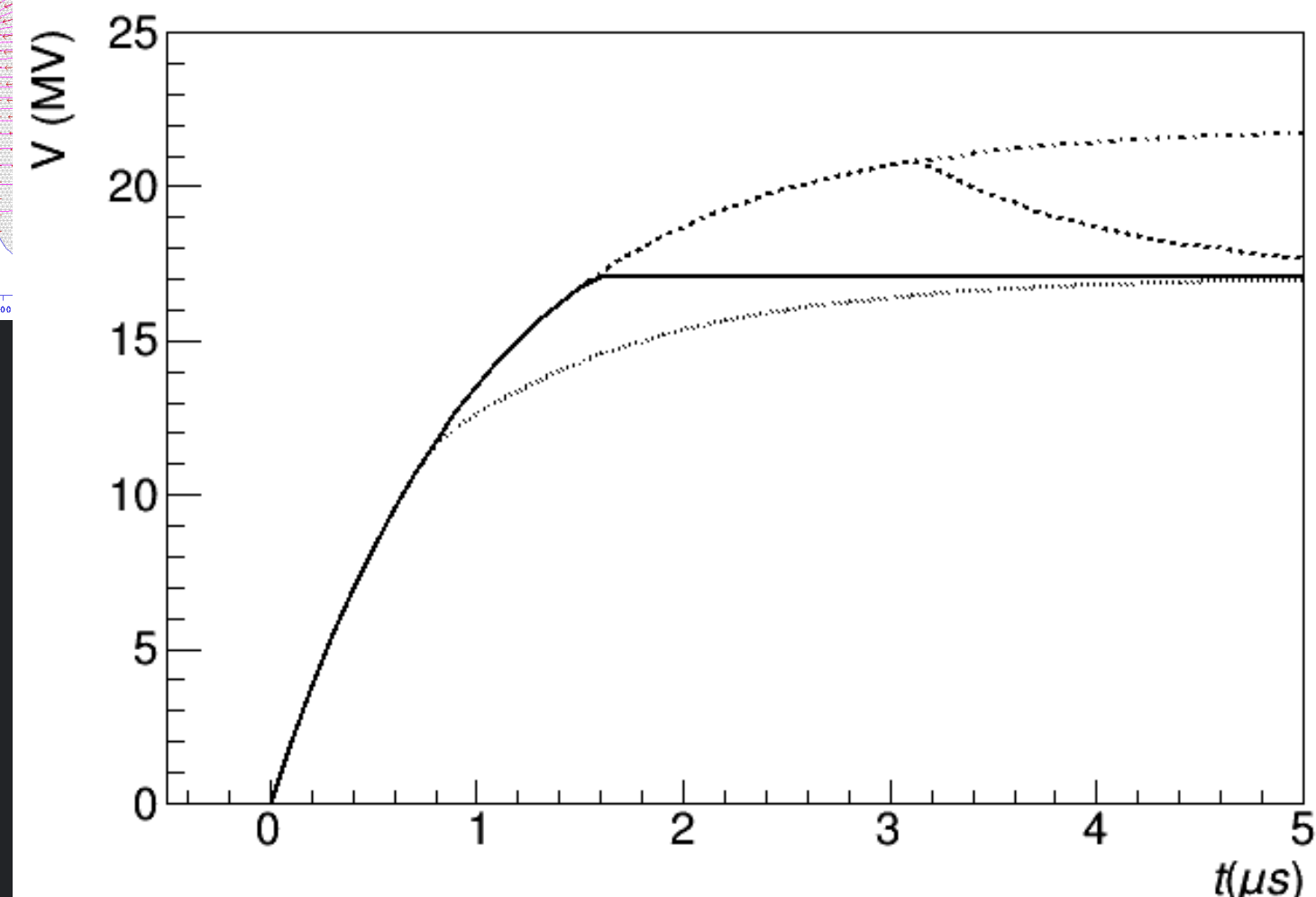
# Capture Linac with APS cavity

- 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。

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

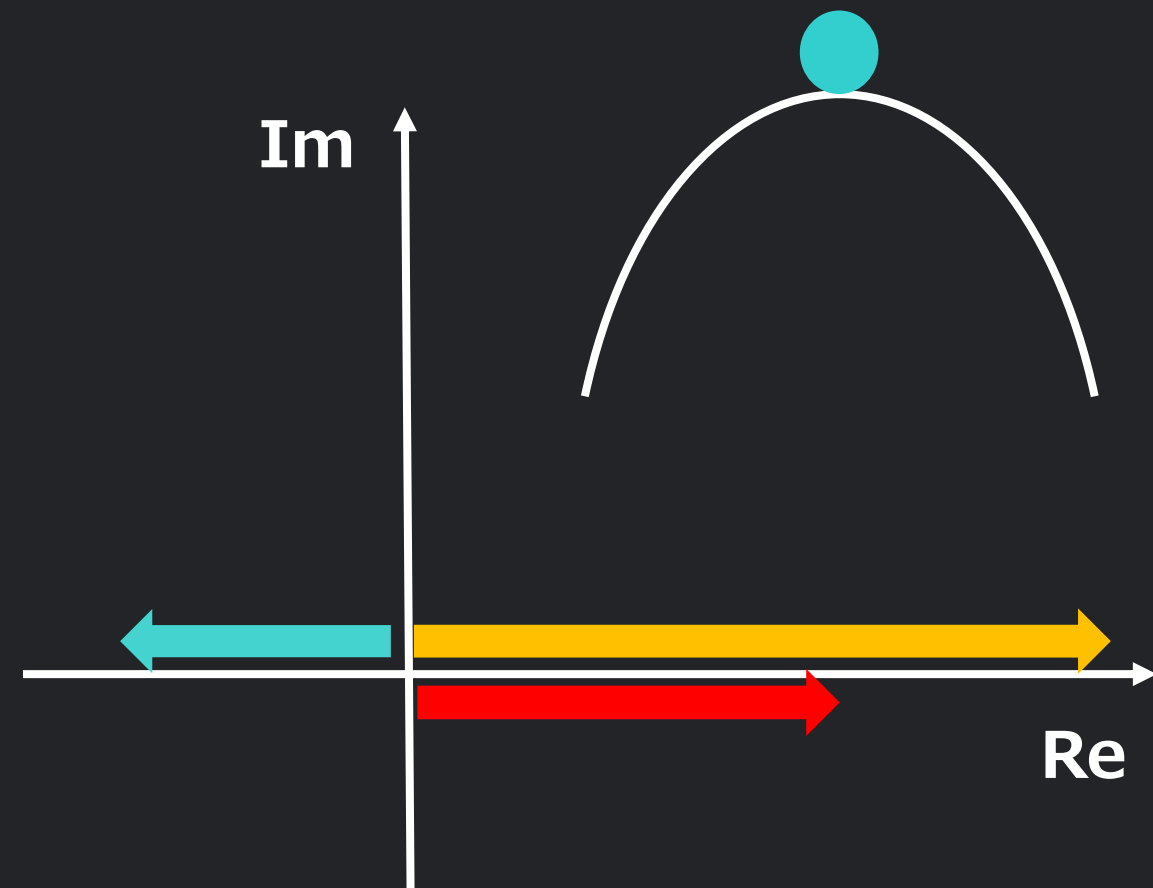
- RF空洞としては確立された技術である。
- ビームローディングの補償が課題。
- 複数バンチを連続して加速（マルチバンチ加速）すると、前のバンチが作った減速場により、電場が徐々に減少し、後ろのバンチはうまく加速されない。
- 普通はタイミングを調整すれば、うまく補償できる。

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

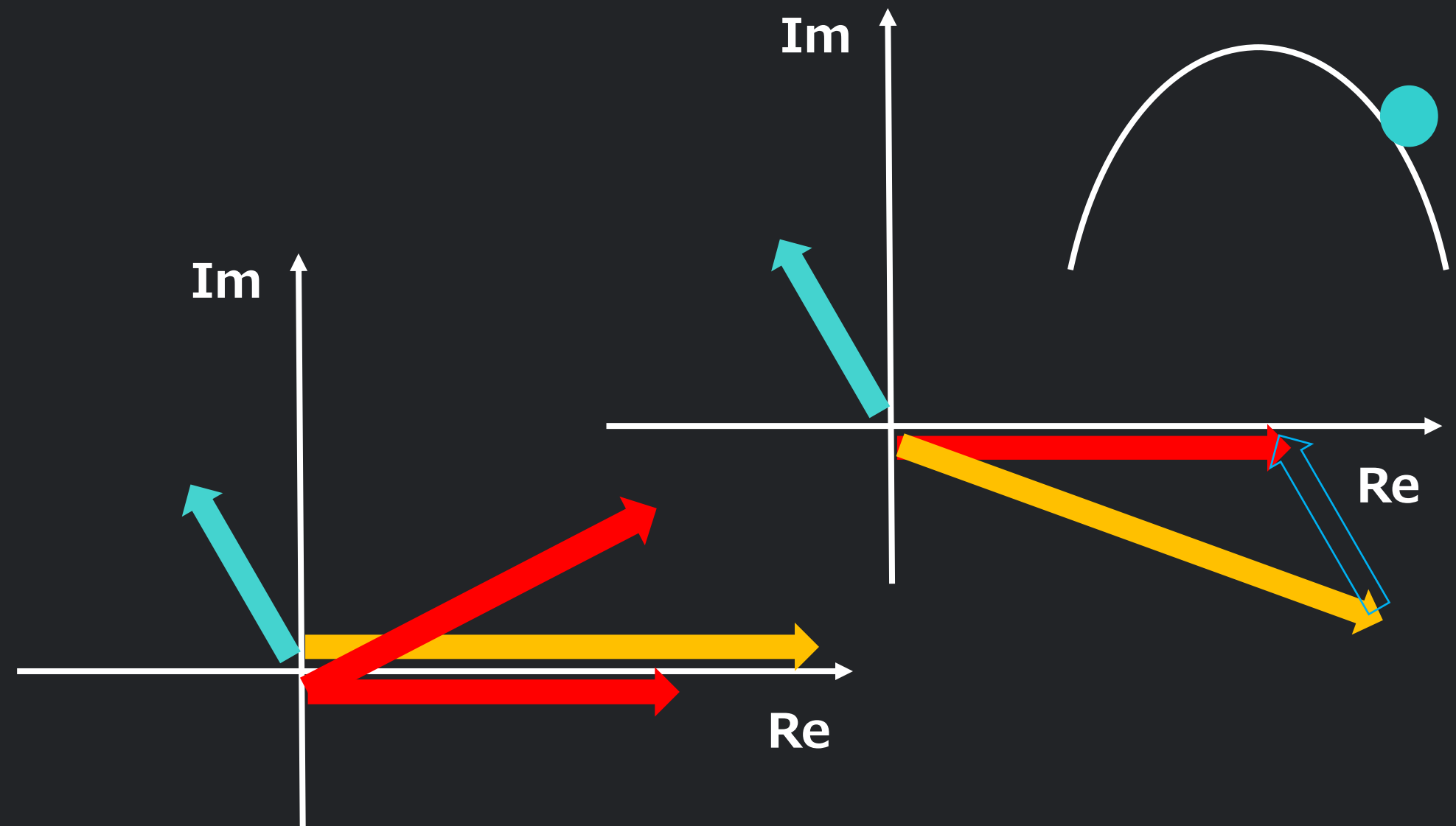


# Beam-loading Compensation in the capture linac

- 普通の加速 (on crest 加速)
- RF電場とビーム電場の漸近値のベクトル和 = 空洞電場の瞬時値の状態であれば、空洞電場は一定となる。

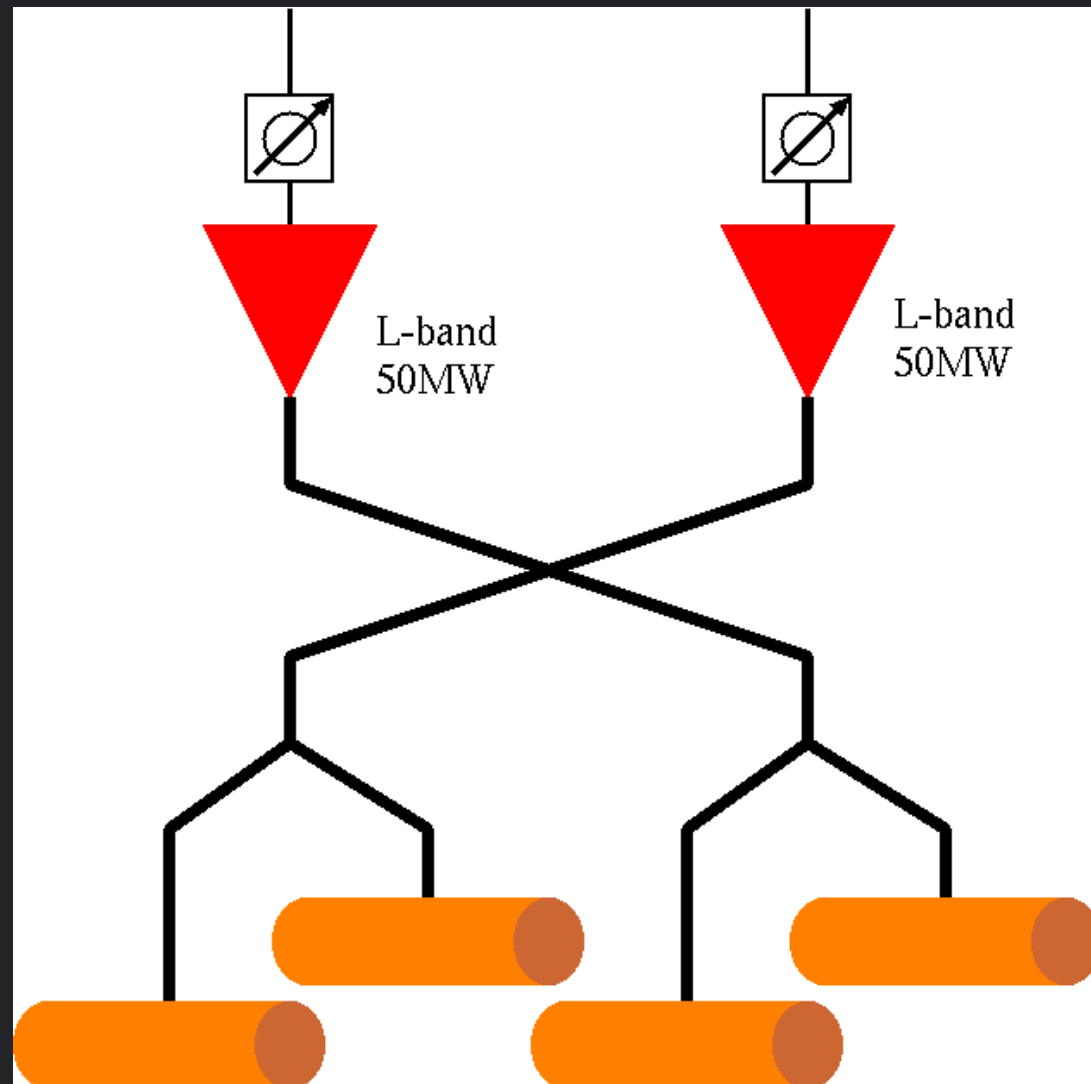


- Capture Linacの場合 (off crest 加速)
- RF電場とビーム電場が同位相にない。
- 空洞電場の調整だけでは、条件を作れない。
- ビーム加速と同時に、PMをかける。



# 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。
- クライストロンは共振構造を持っているので、 $Q/\omega$ の時定数を有する。理想的な階段関数による変調からずれる。



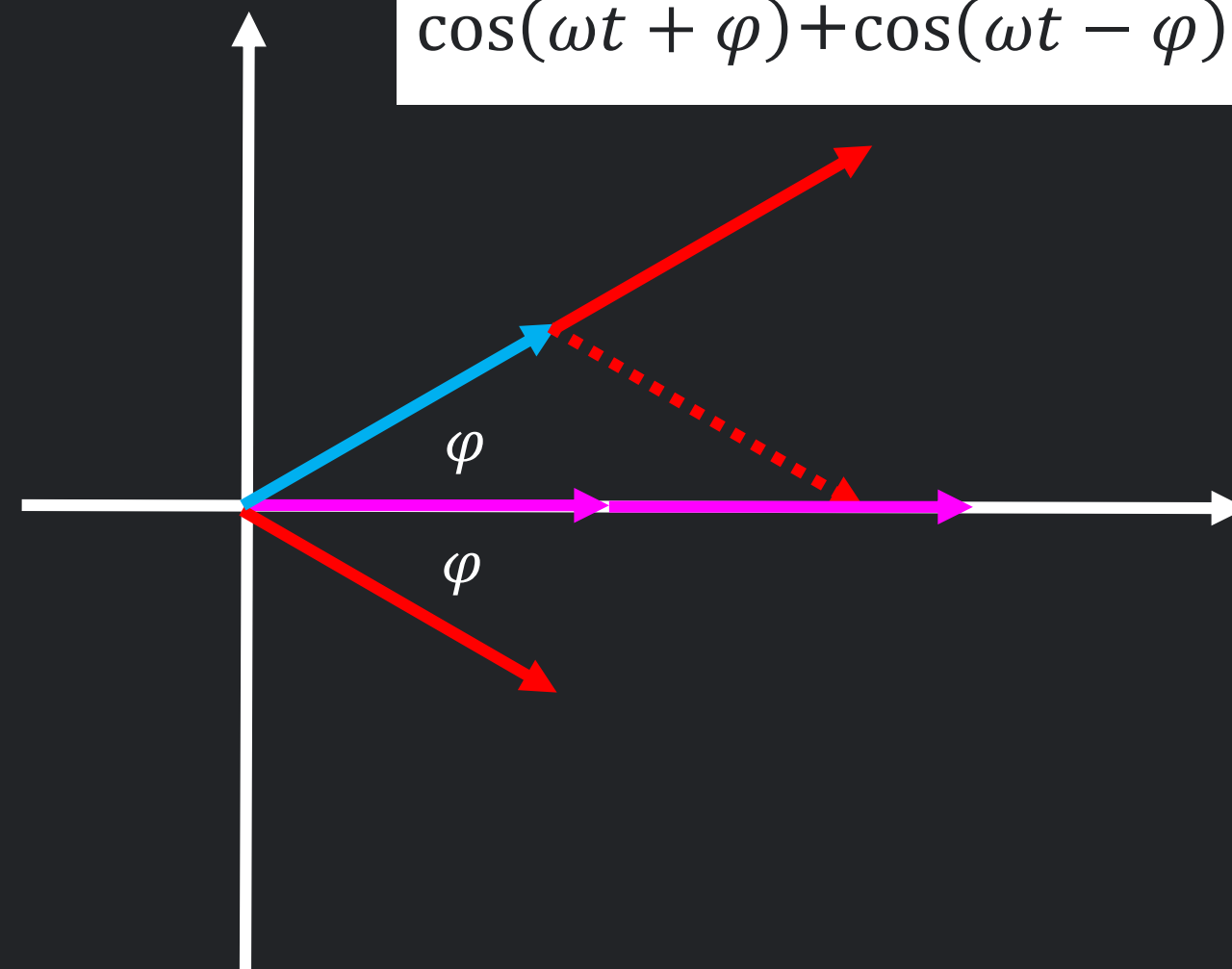
変調前 :  $\cos \omega t + \cos \omega t = 2 \cos \omega t$

同相の変調 : 位相変調

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

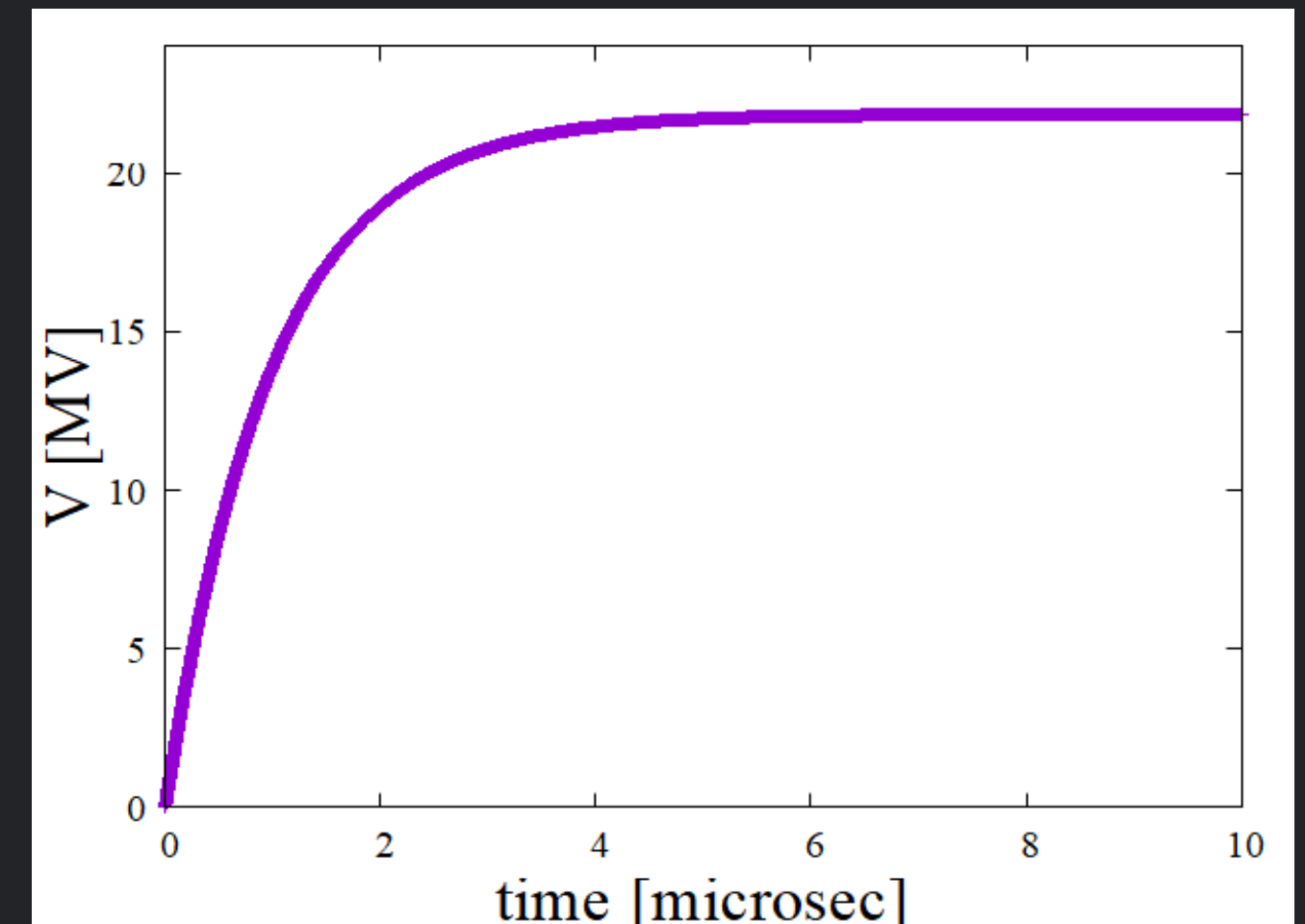
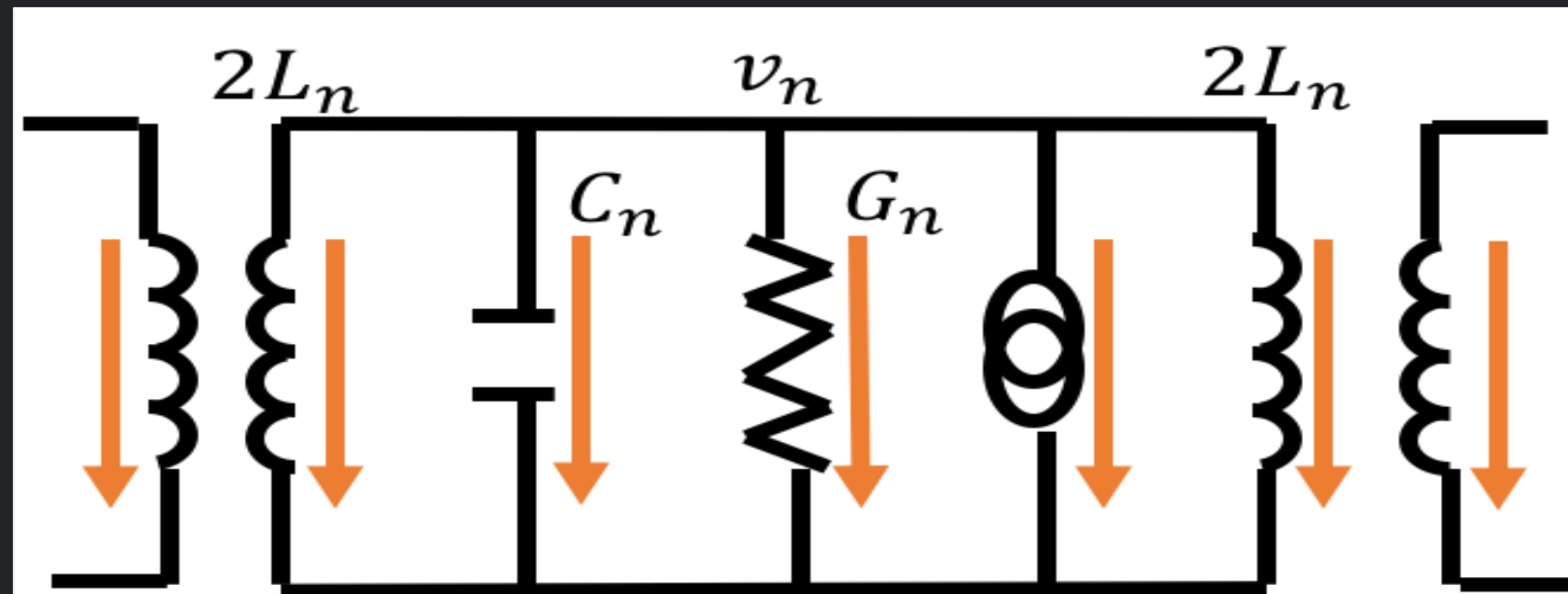
逆相の変調 : 振幅変調

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



# 等価回路モデル

- 11セルAPS空洞を等価回路モデルにより評価。
- 非対称な空洞構造（加速セルと結合セル）の応答を、時間離散化した漸近式により計算。



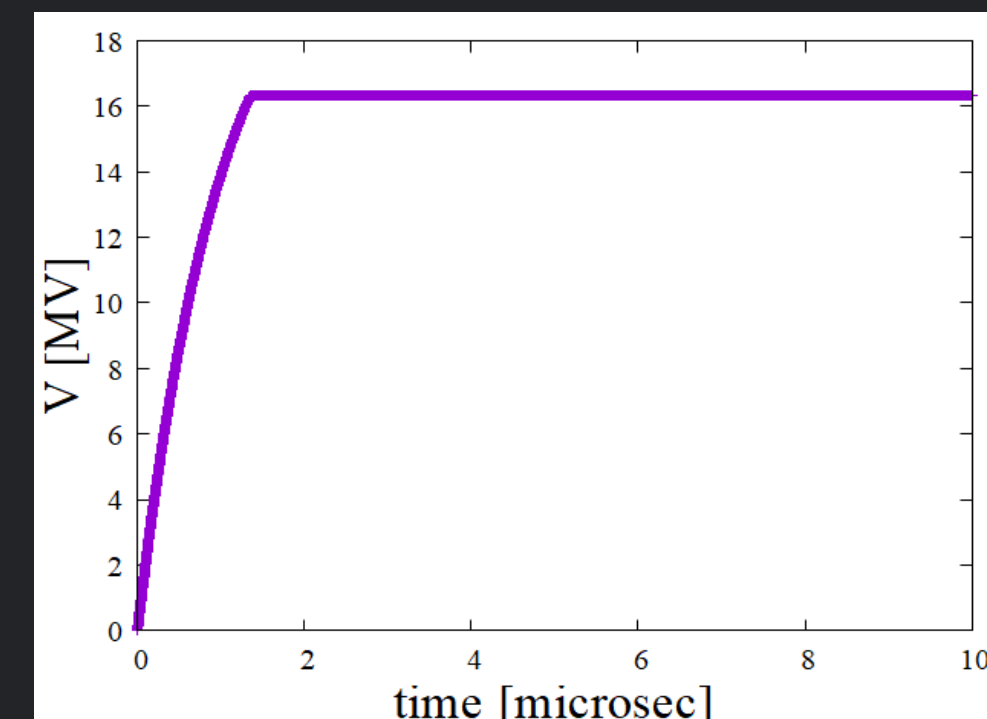
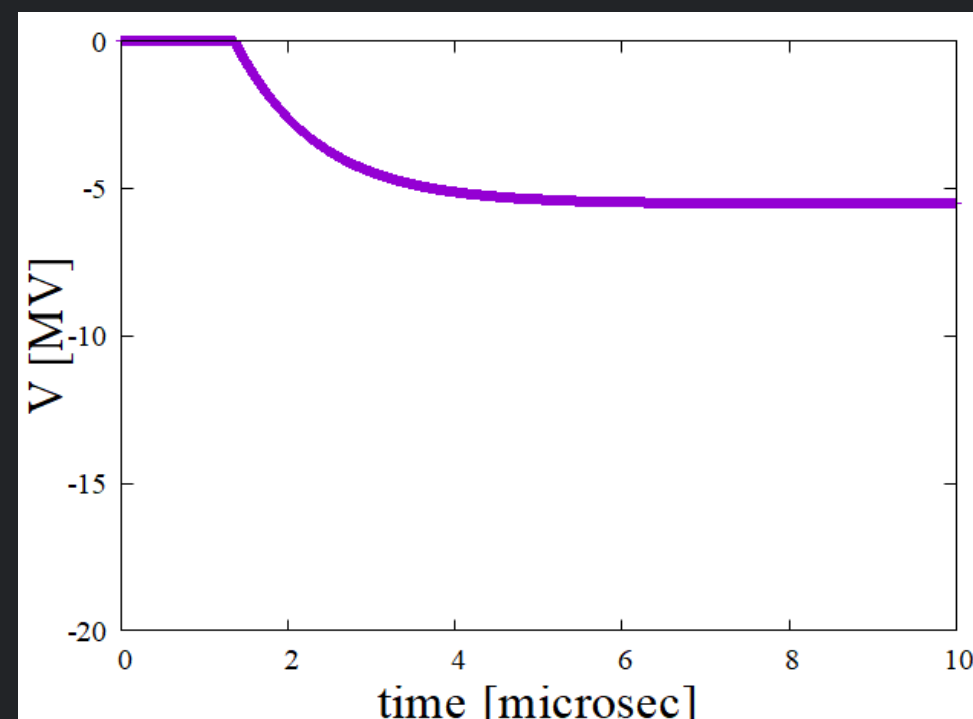
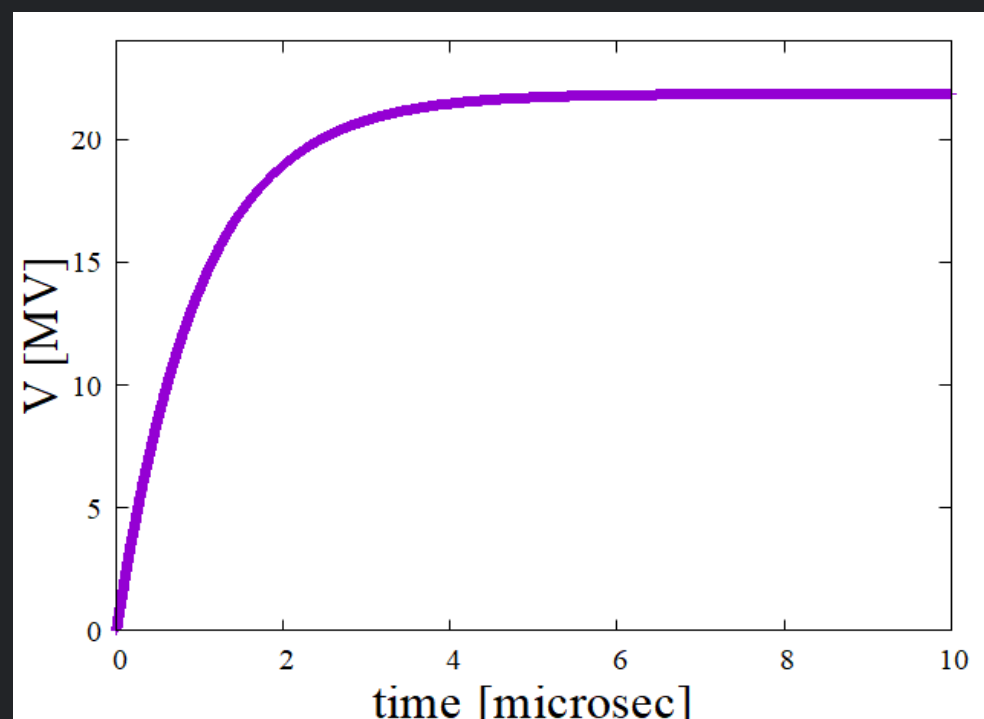
階段関数による変調 ①  $I = \begin{cases} I_{RF} & (t < t_b) \\ I_{RF}e^{i\theta} & (t > t_b) \end{cases} \quad \theta = \pi/6$

RF電圧

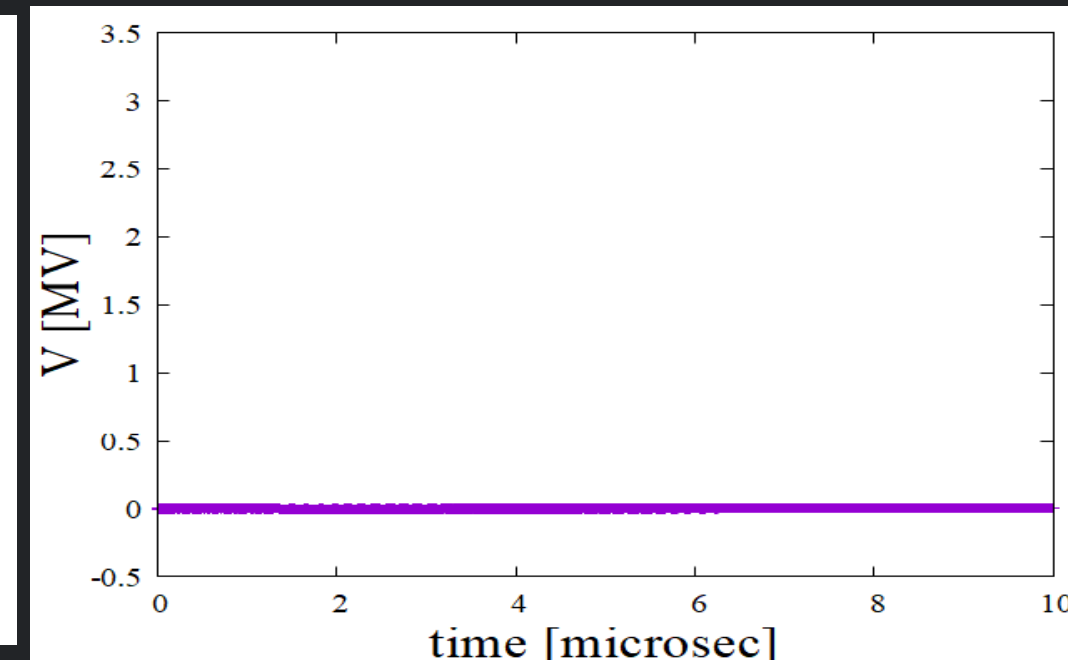
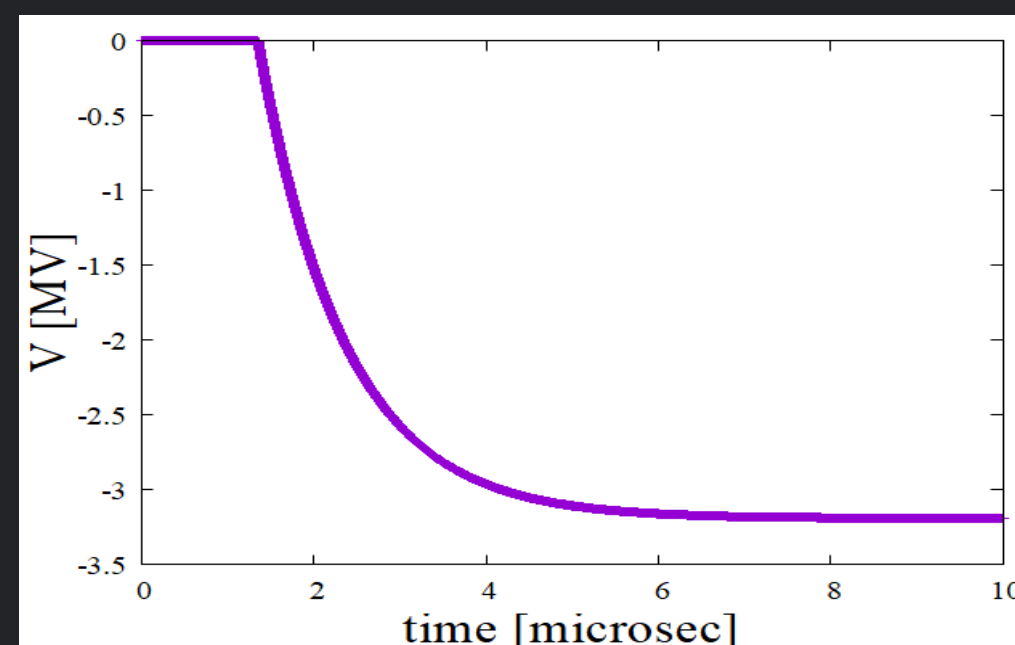
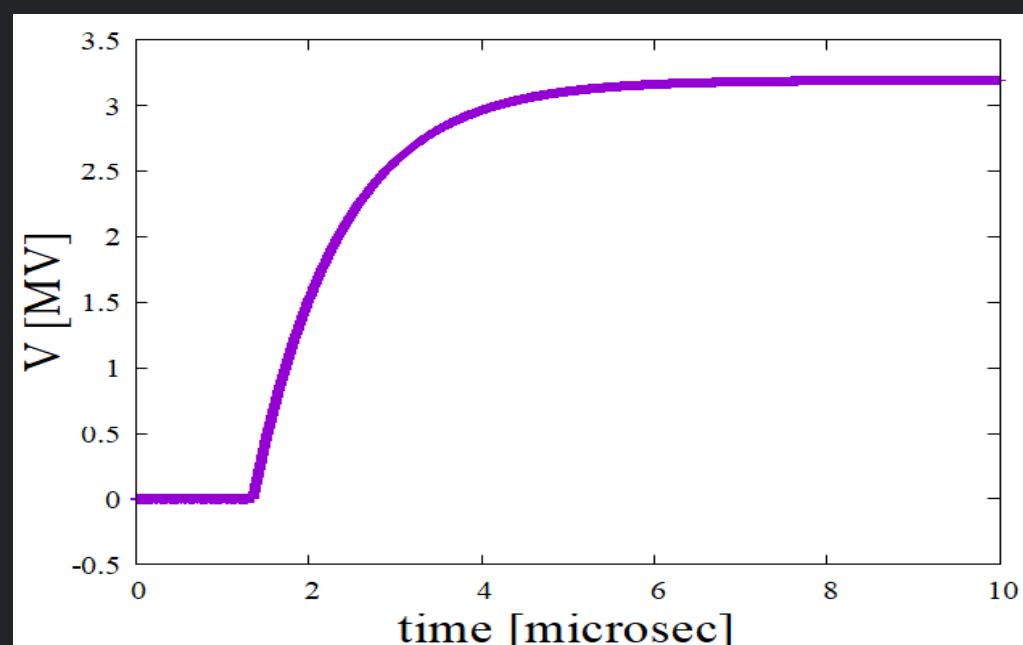
ビーム電圧

空洞電圧

I. 実数部



II. 虚数部



時定数つき変調②  $I = \begin{cases} I_{RF} & (t < t_b) \\ I_{RF} e^{-\frac{t-t_b}{\tau}} + I_{RF} e^{i\theta} \left(1 - e^{-\frac{t-t_b}{\tau}}\right) & (t > t_b) \end{cases}$

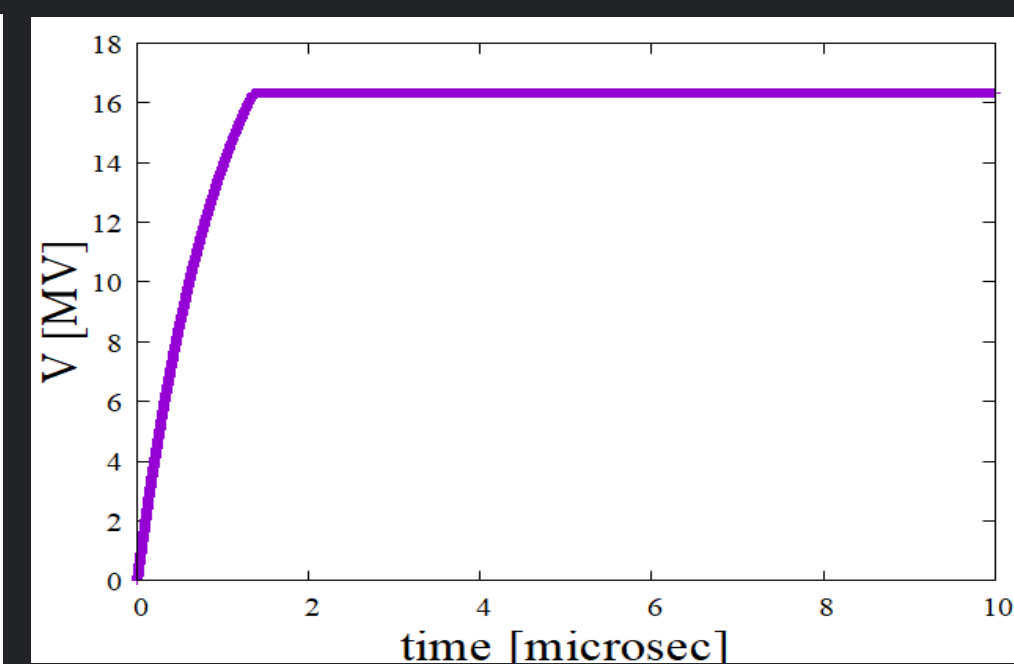
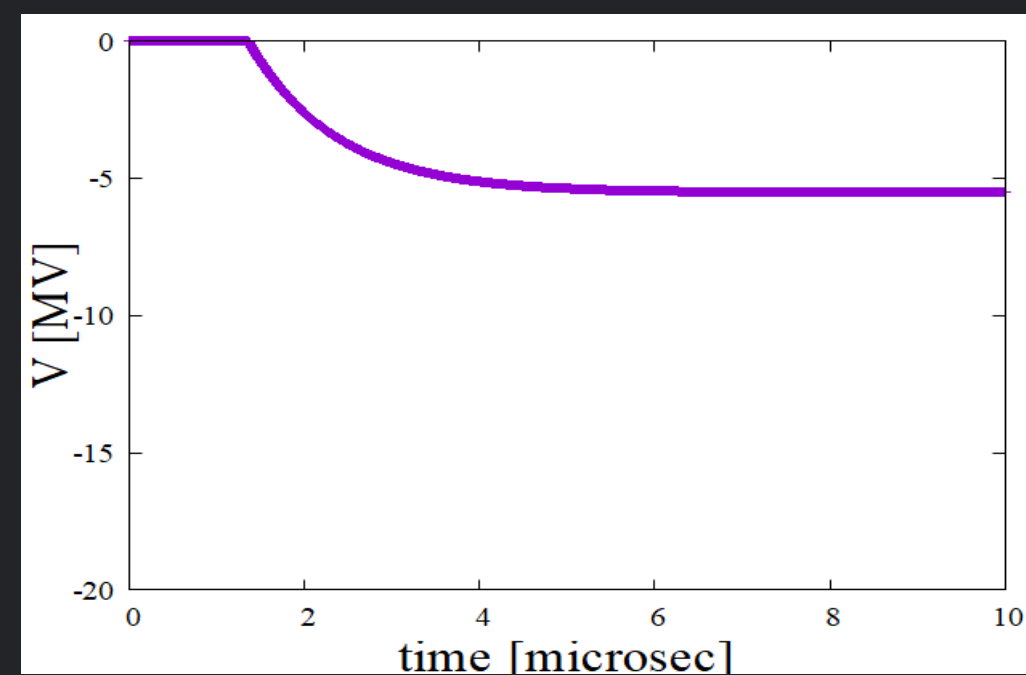
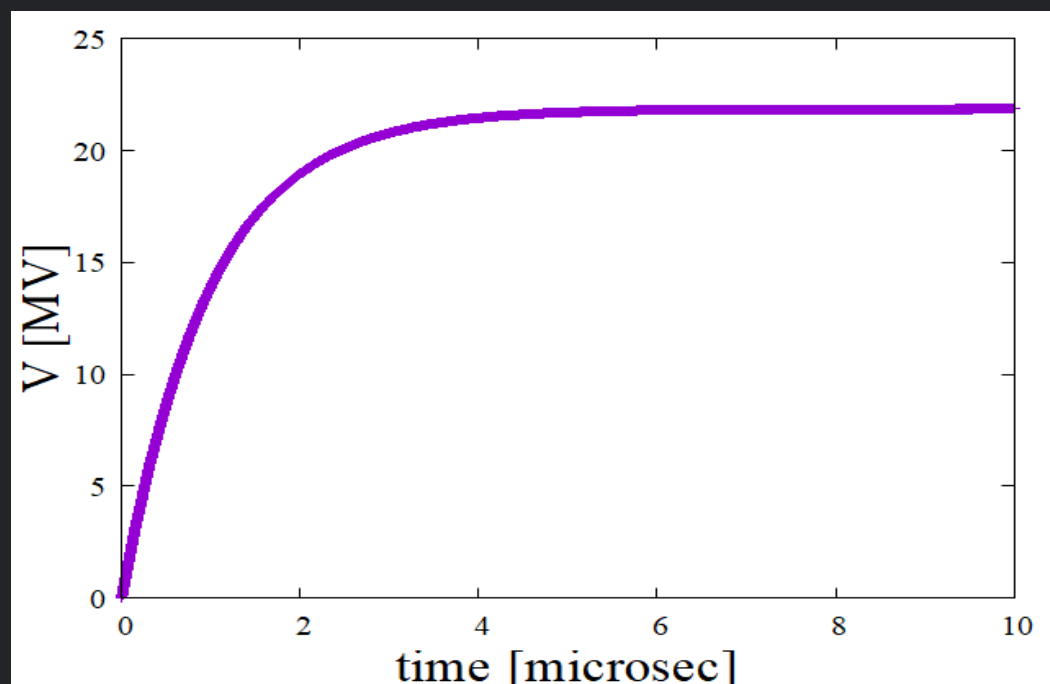
$\theta = \pi/6$   
 $Q = 2000$

RF電圧

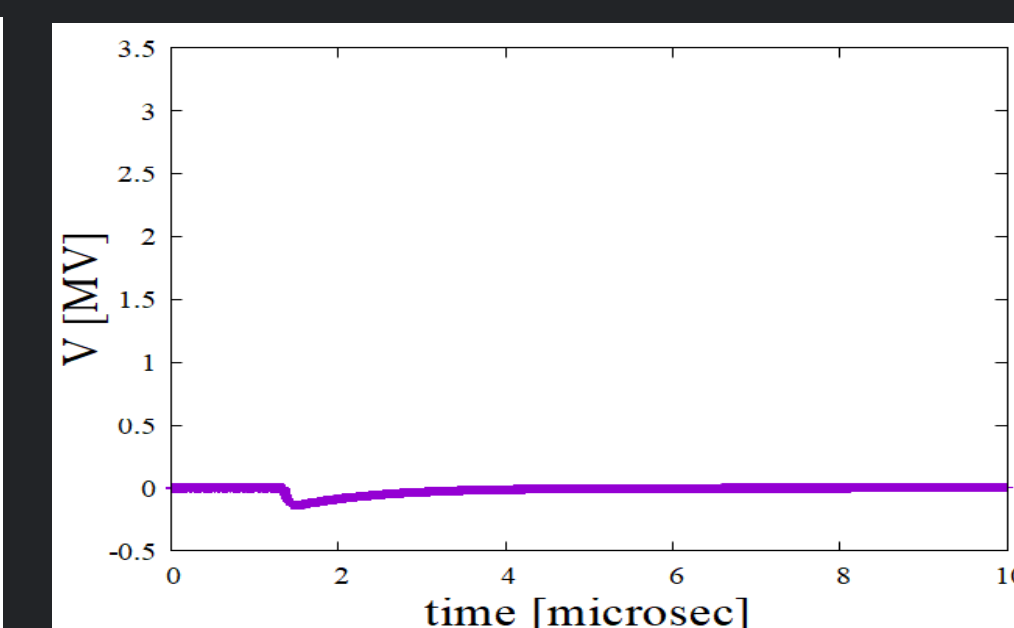
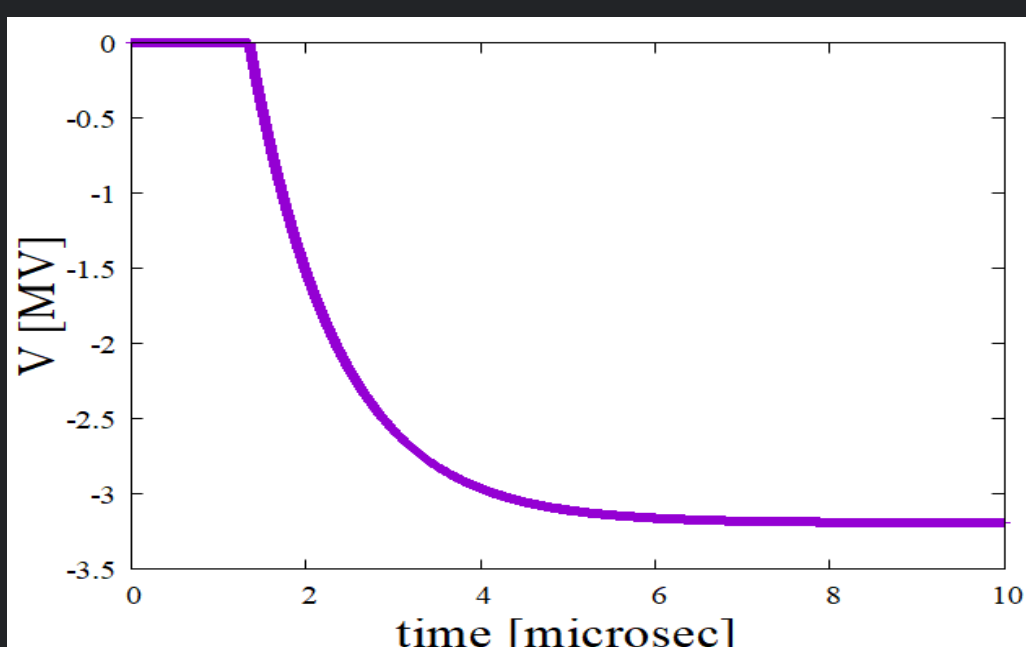
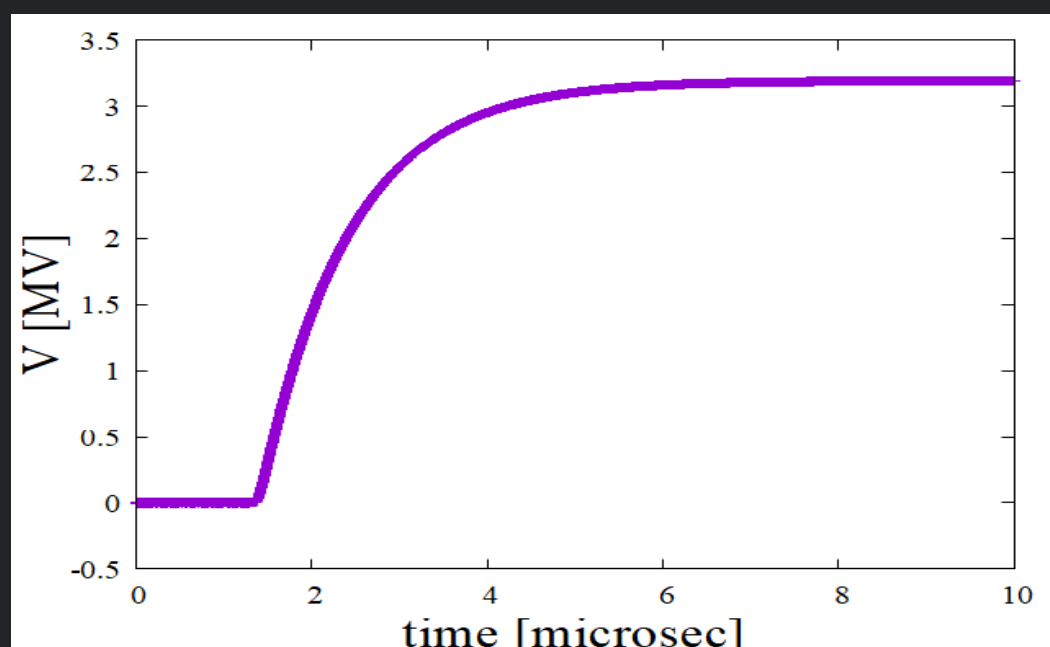
ビーム電圧

空洞電圧

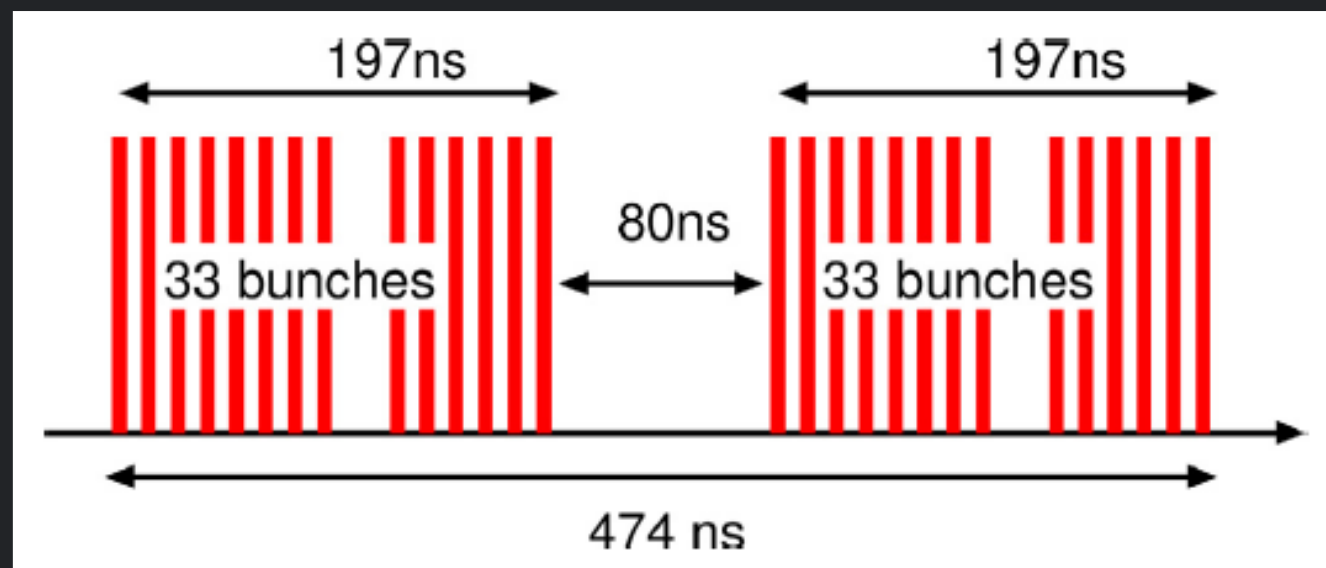
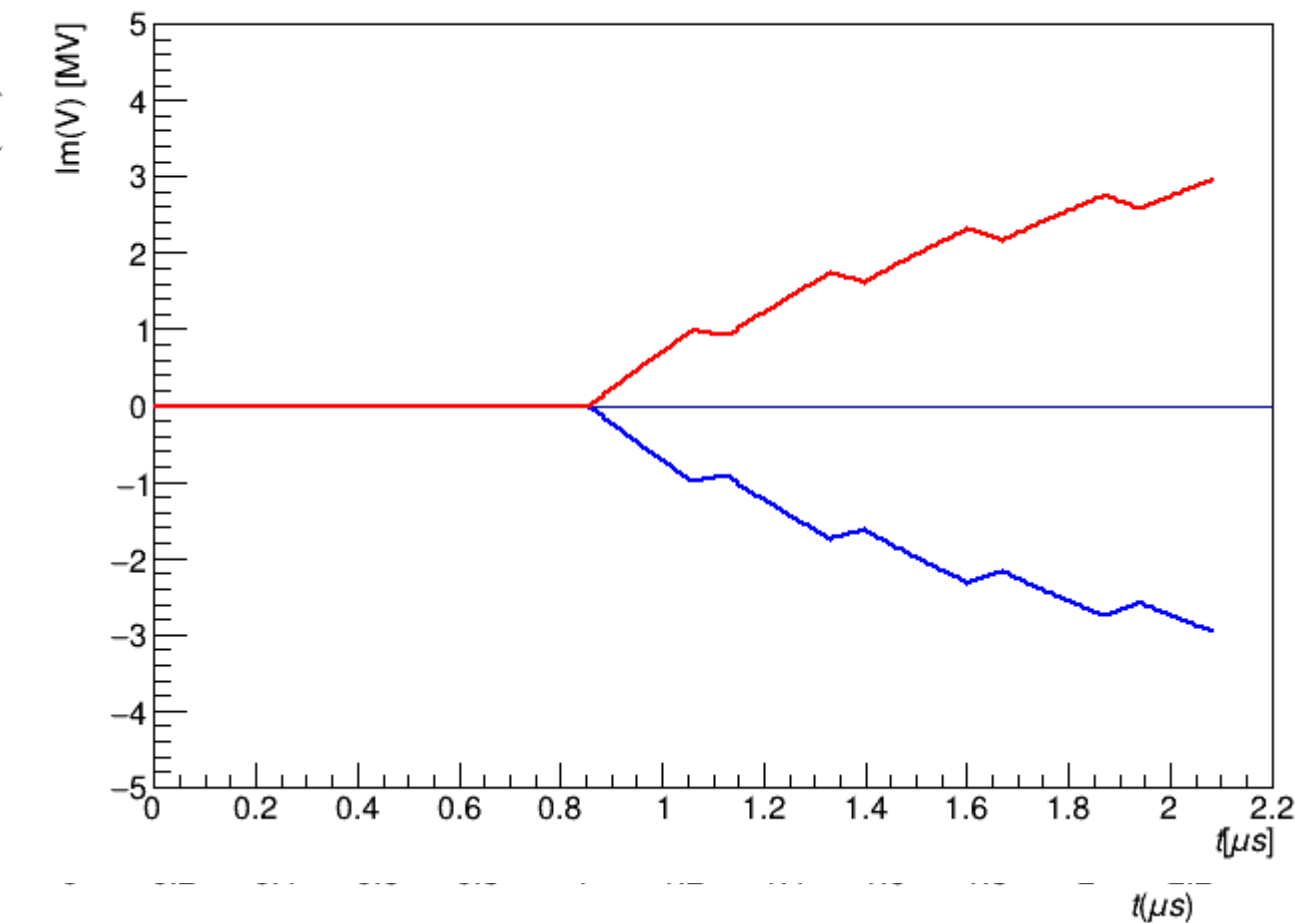
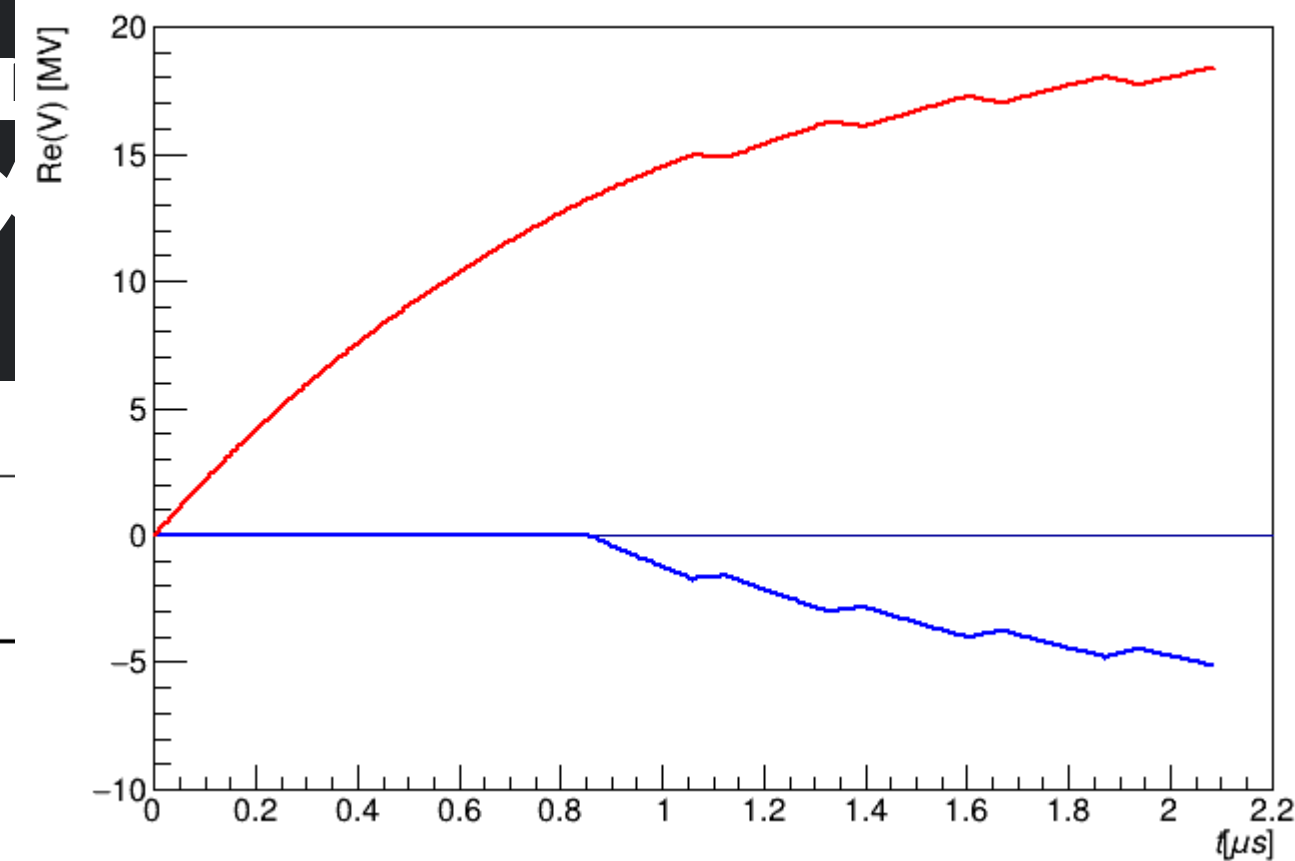
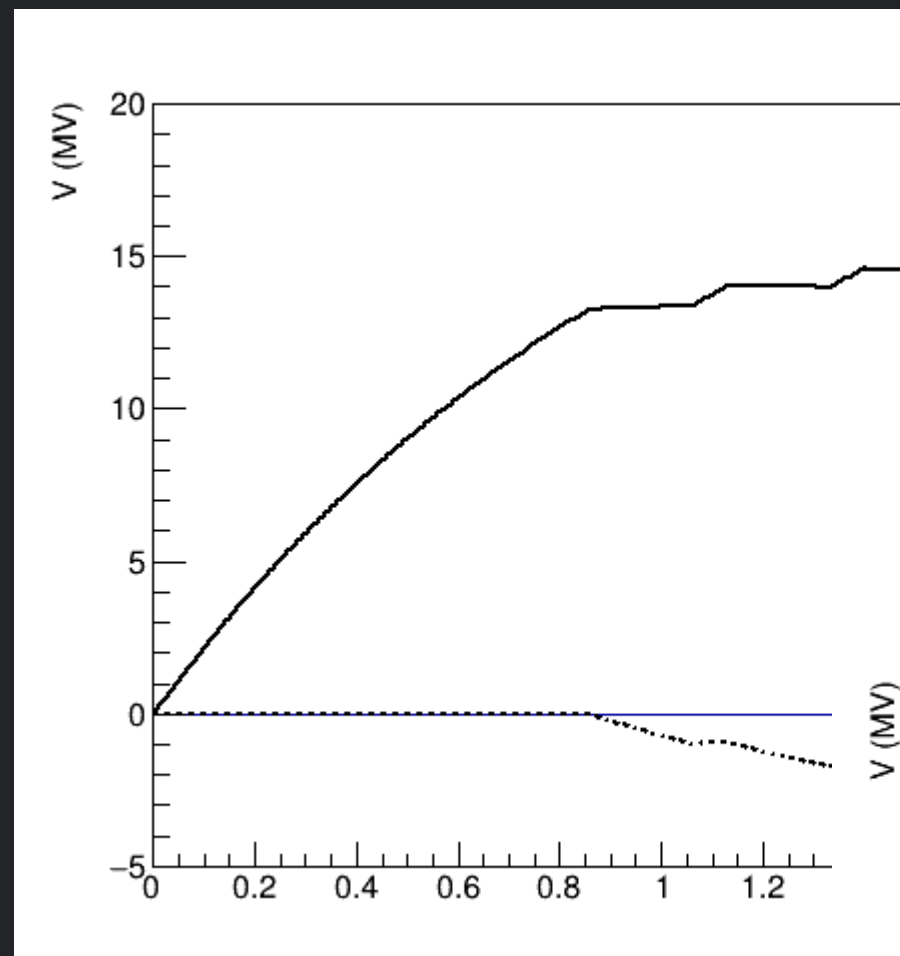
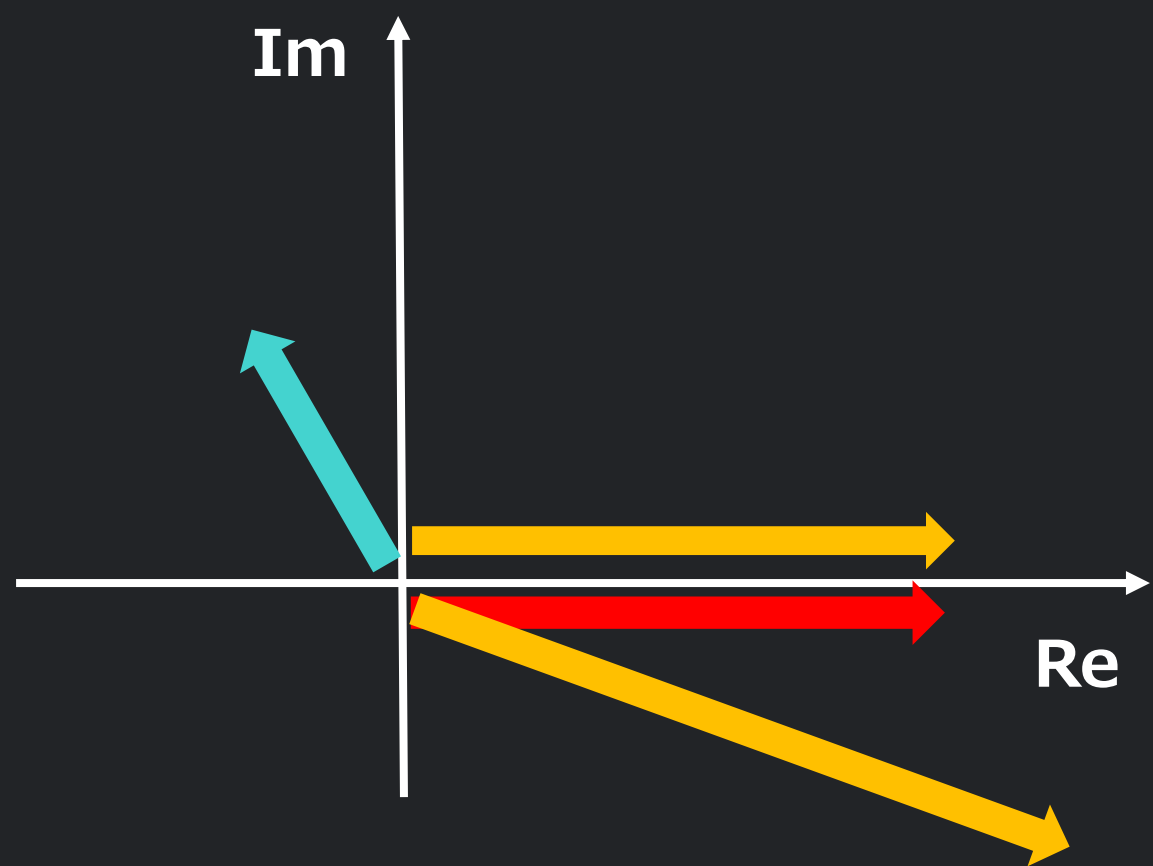
I. 実数部



II. 虚数部



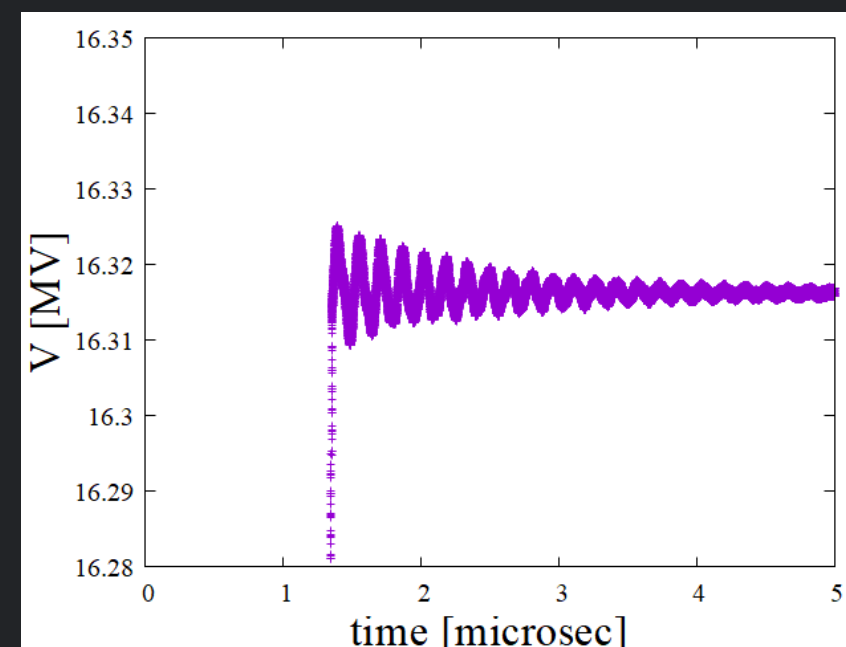
# パルスギャップへの対応



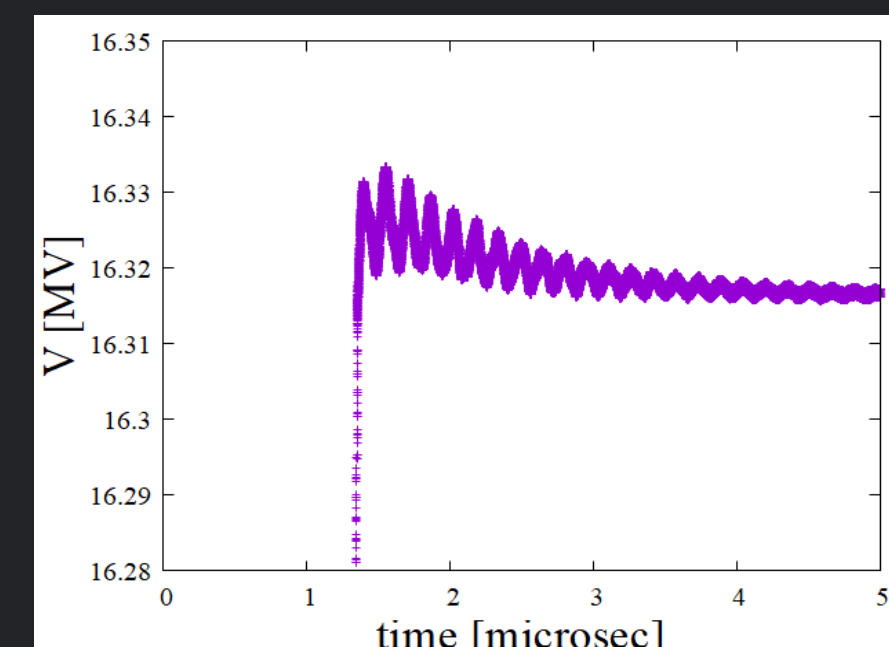


# クライストロンQ値

空洞電圧  
(実部)

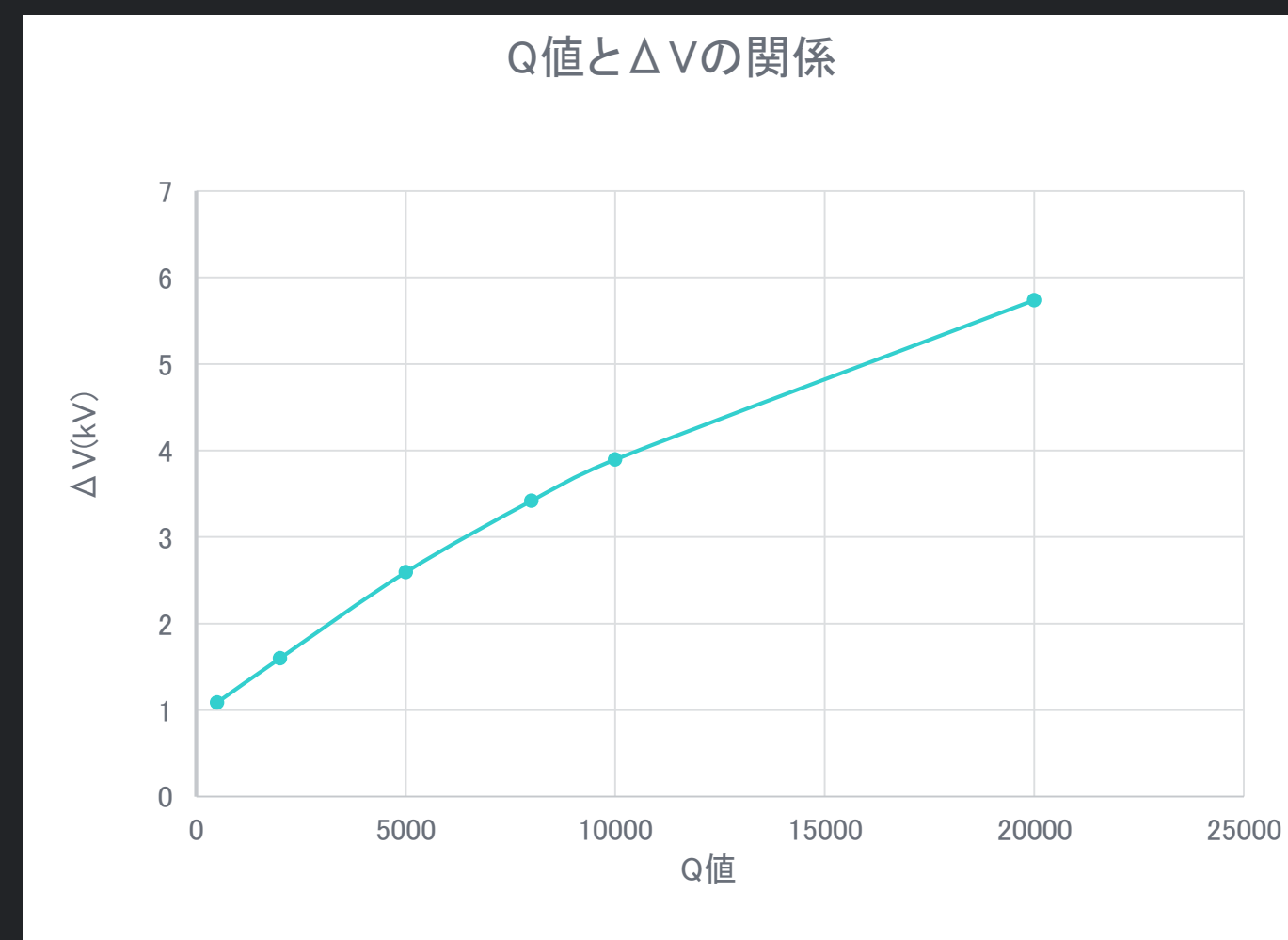


階段関数



時定数付き

- 虚数部の0.15MVの電圧変動は、位相にして0.01 rad.
- 実数部(電圧)には、ビートに加えて、付加的な電圧変動が発生。その大きさを $\Delta V(p-p)$ とする。
- $V_0 = 16.3\text{MV}$ ,  $Q=2000$ での値は1.6kV、0.01%程度。
- ビームへの影響はほぼ無視できる。



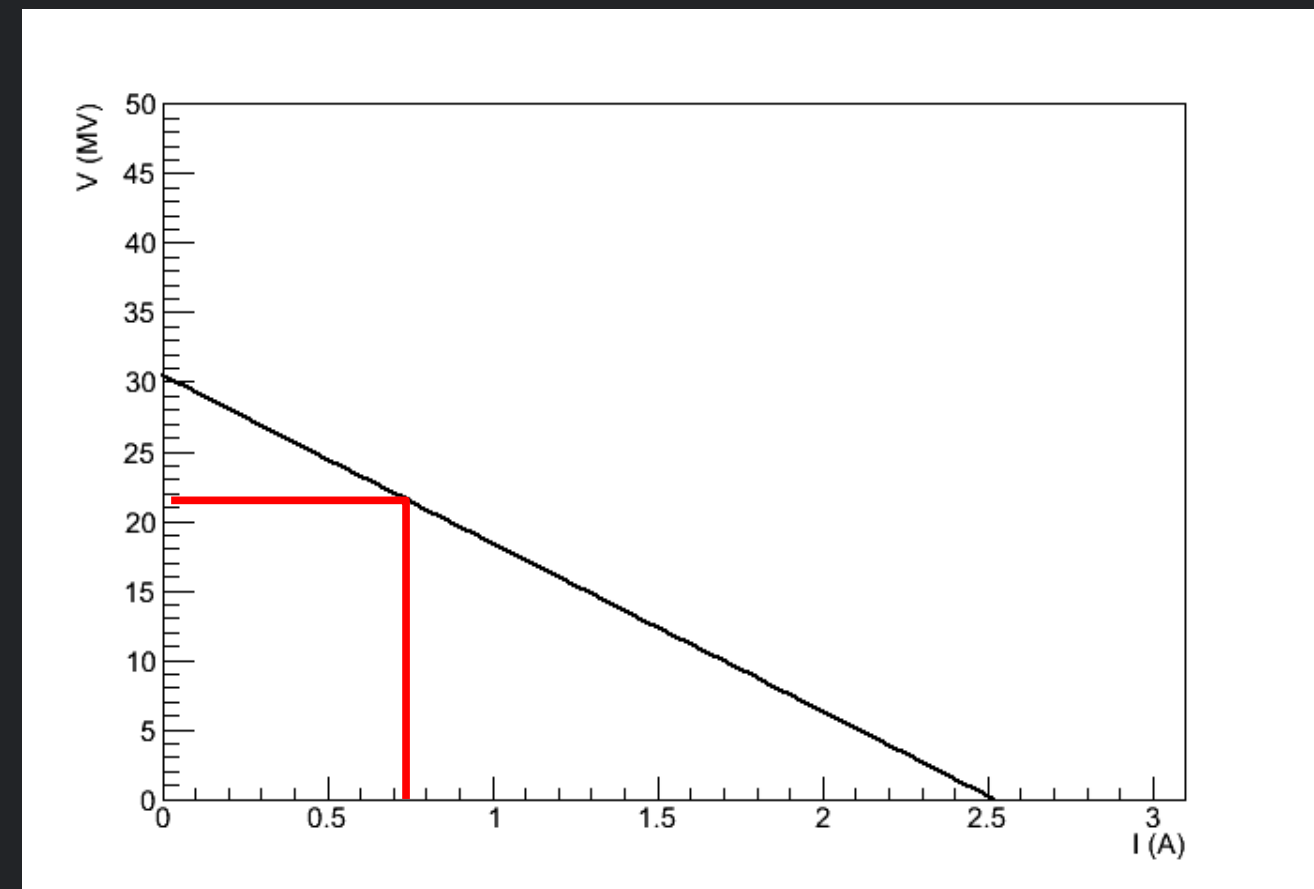
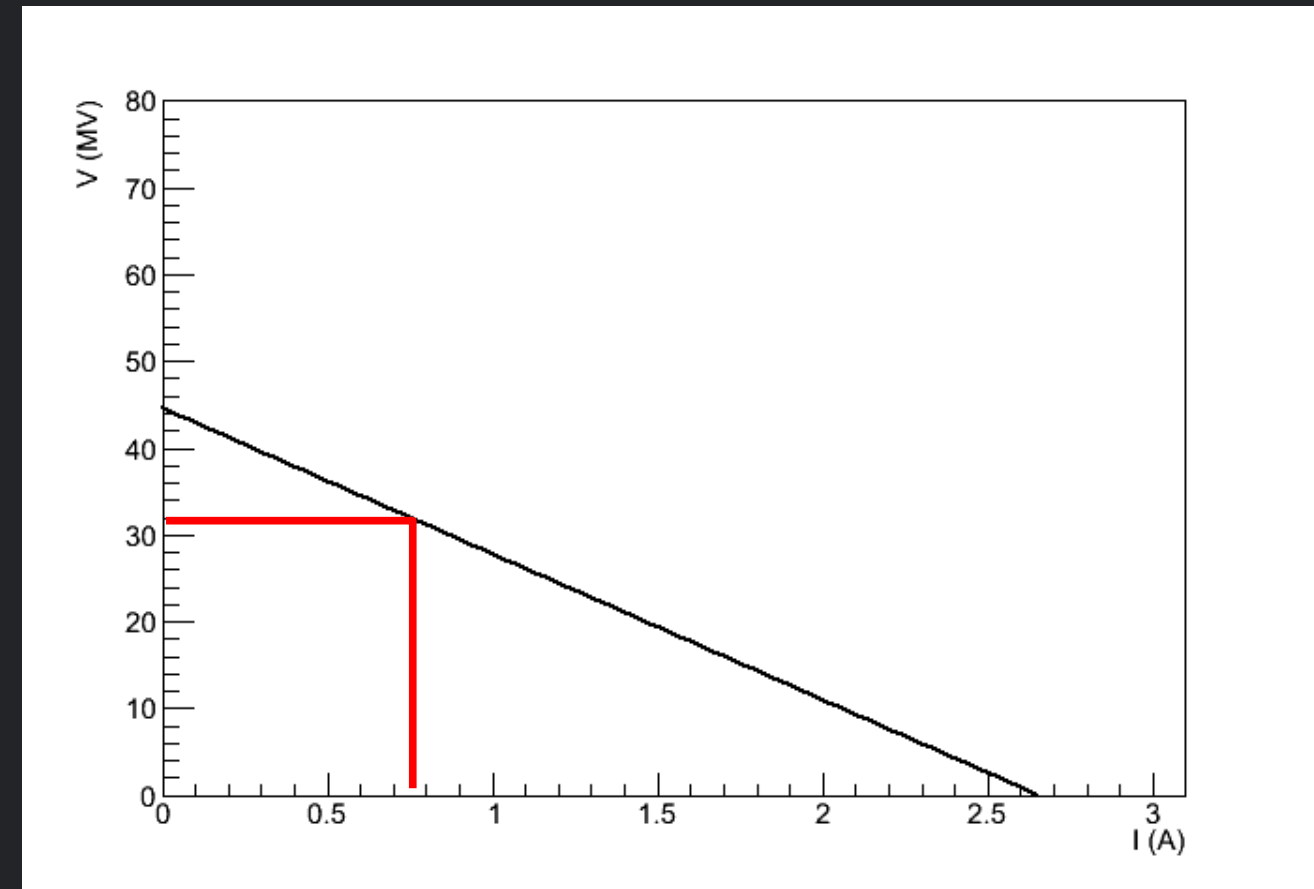
上蒲刈島と下蒲刈島間にかかる  
蒲刈大橋

石見銀山大森集落

# 陽電子ブースターとECS

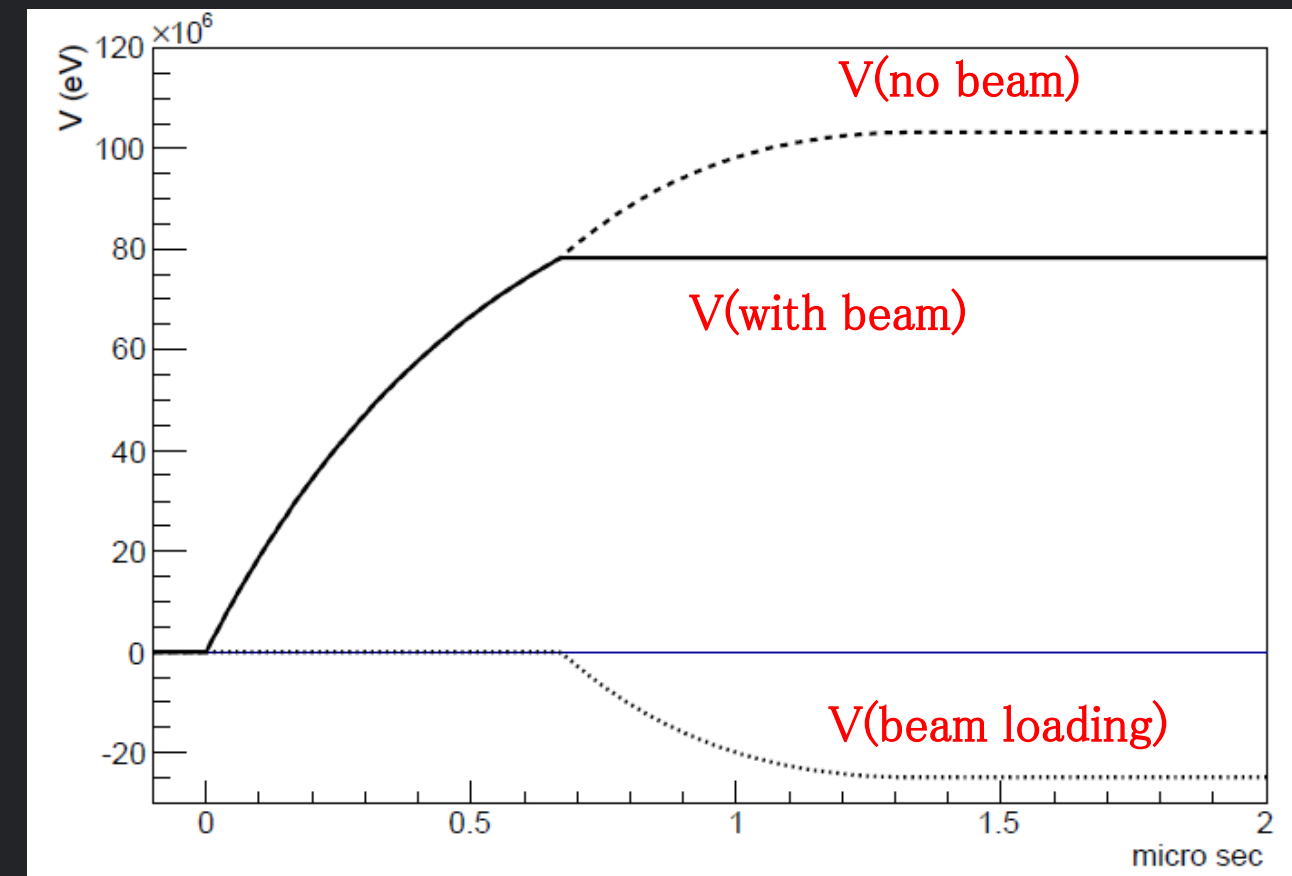
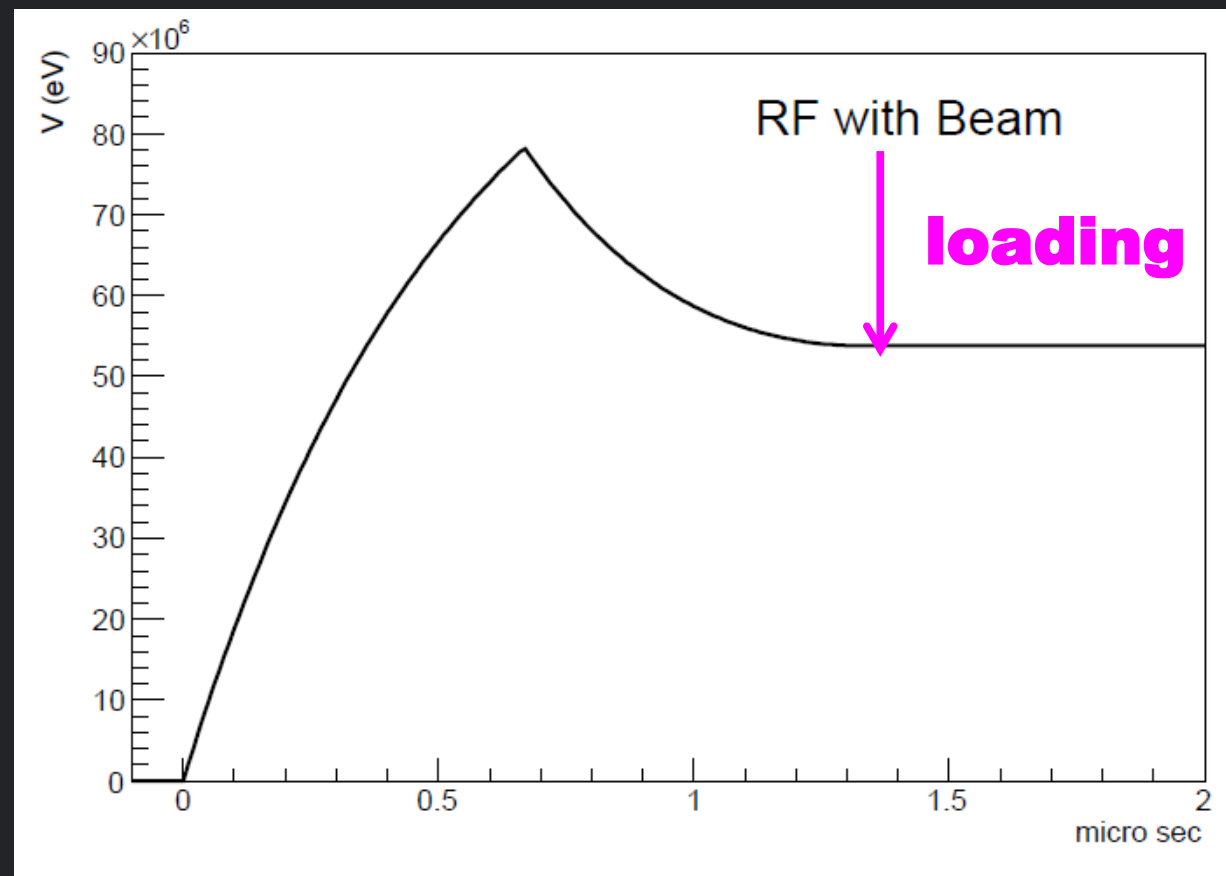
# 陽電子ブースター

- 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）

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



$$-\frac{\omega r_0 L}{2Q(1 - e^{-2\tau})} \frac{I_0}{s^2} e^{-st_f} \left[ 1 - e^{-\frac{\omega}{Q}t_f} - \frac{\omega(1 - e^{-st_f - 2\tau})}{Q(s + \omega/Q)} \right],$$

ビームによる電場

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

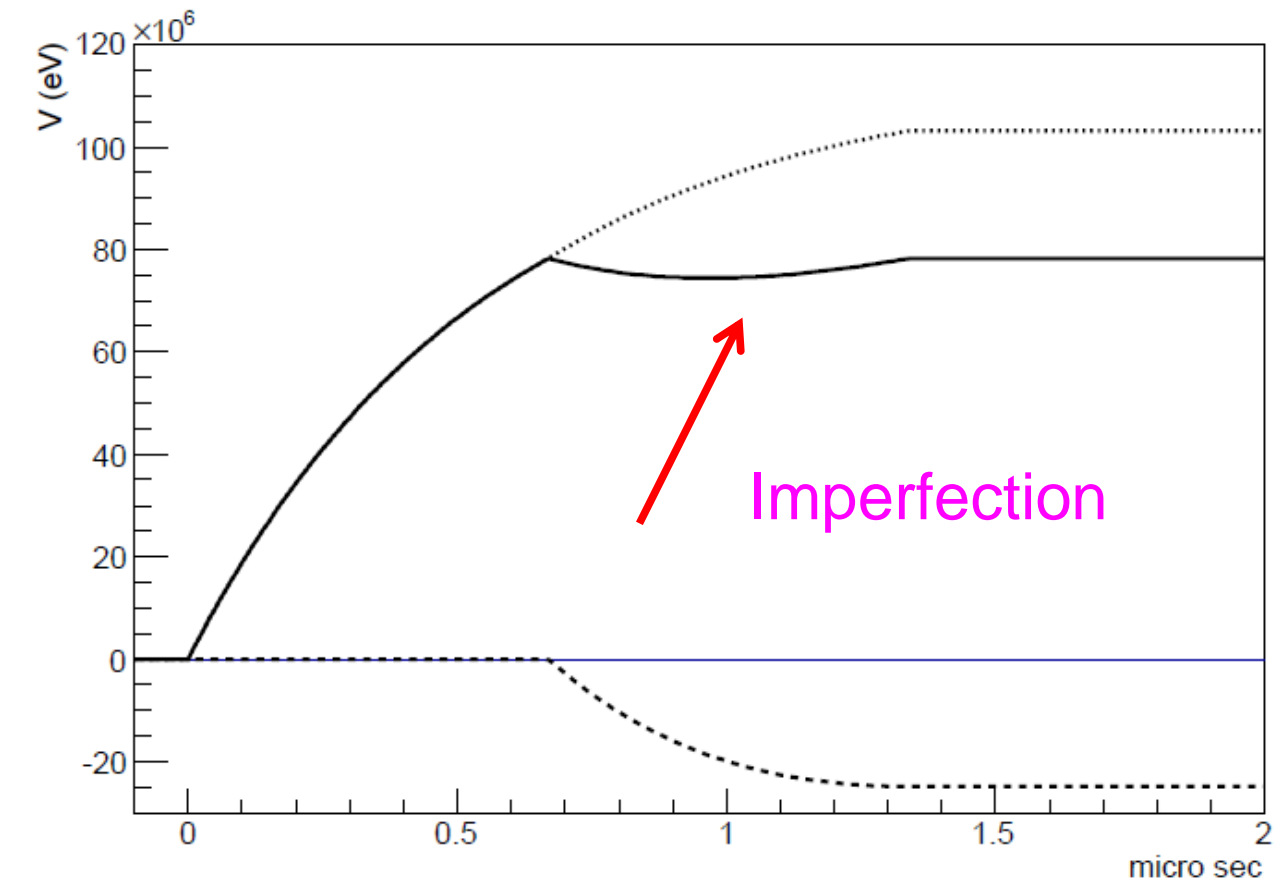
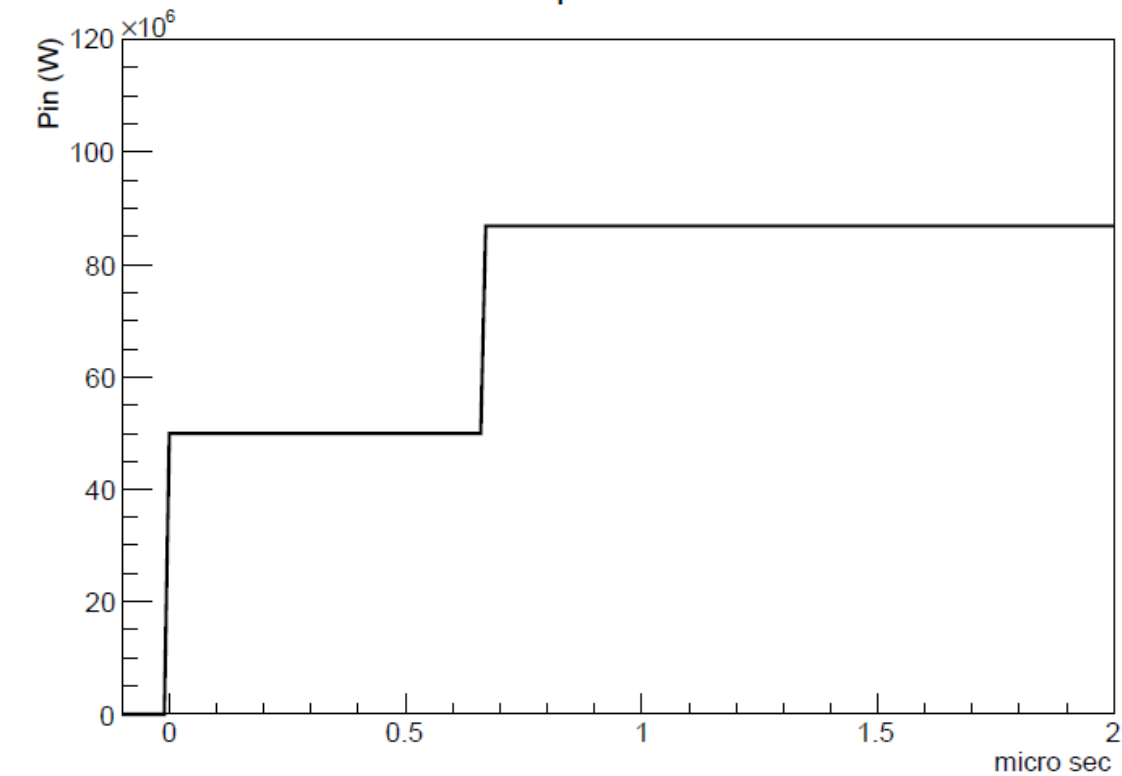
$$E(t) = E_0U(t) + E_1U(t - t_f),$$

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

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

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

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



# Saw Modulation

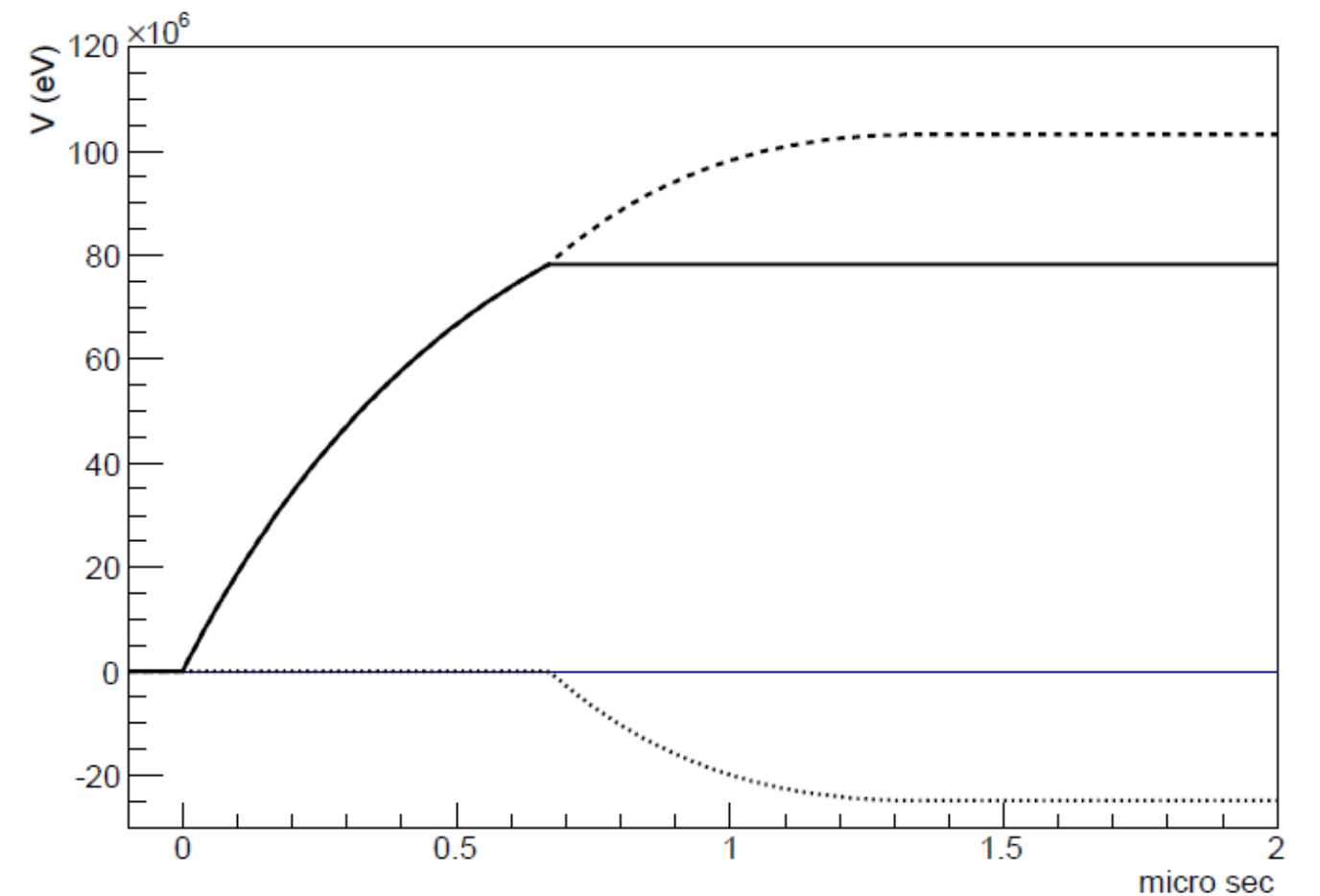
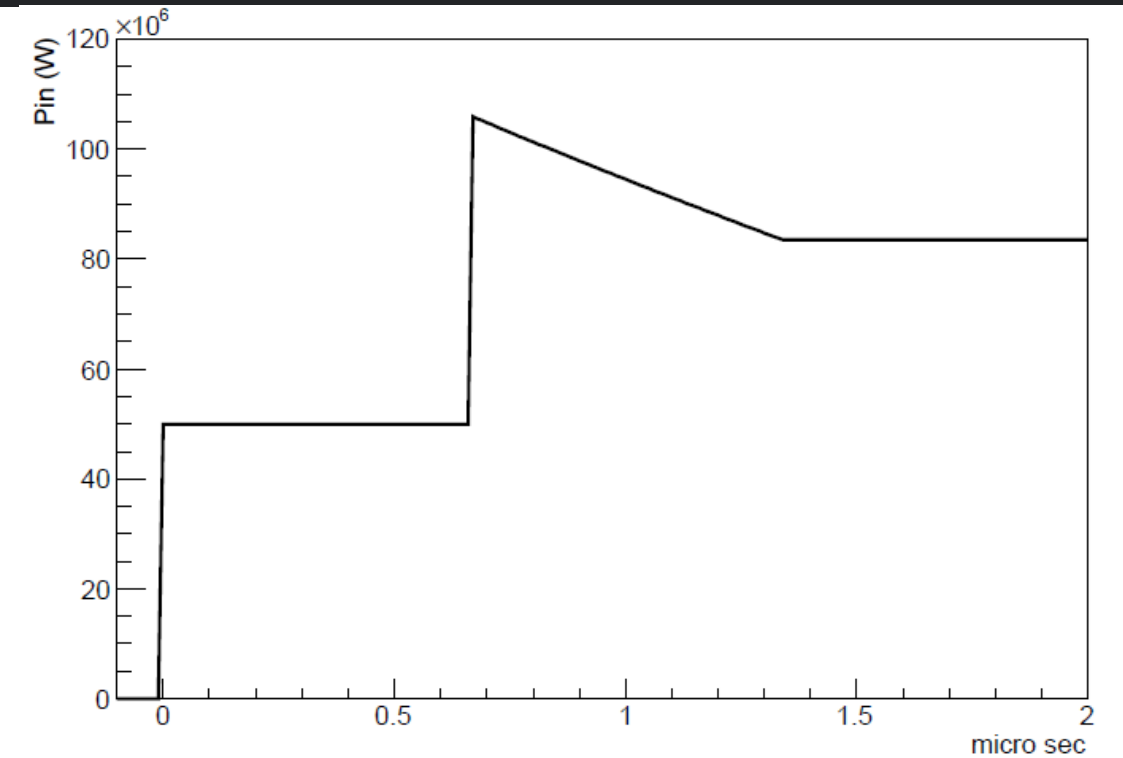
$$E(t) = E_0 U(t) + E_1 U(t - t_f) + \frac{E_2}{t_f} (t - t_f) U(t - t_f)$$

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

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

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

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



# 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

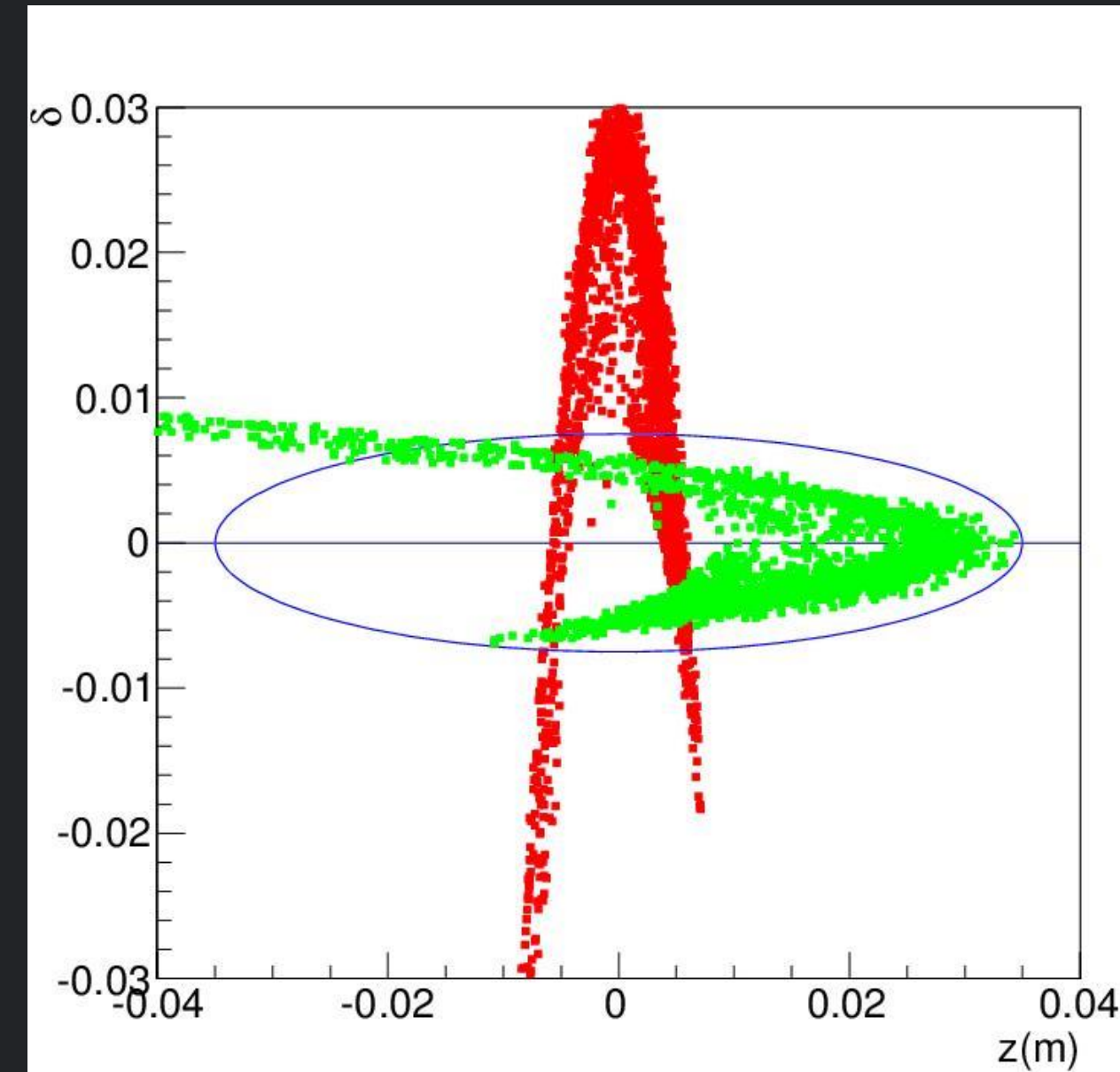
<sup>1</sup> Corresponding to 300Hz operation

# 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。

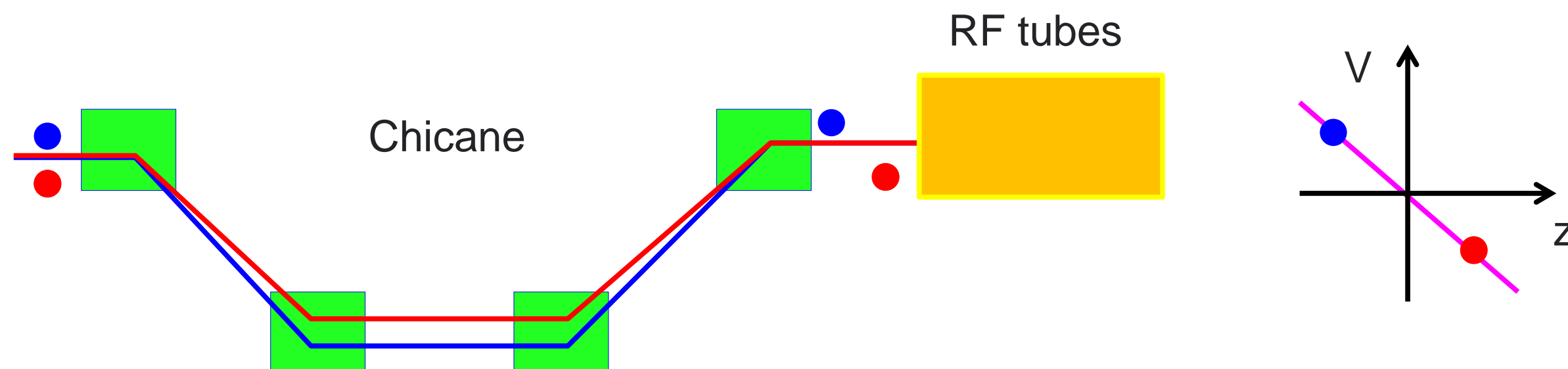
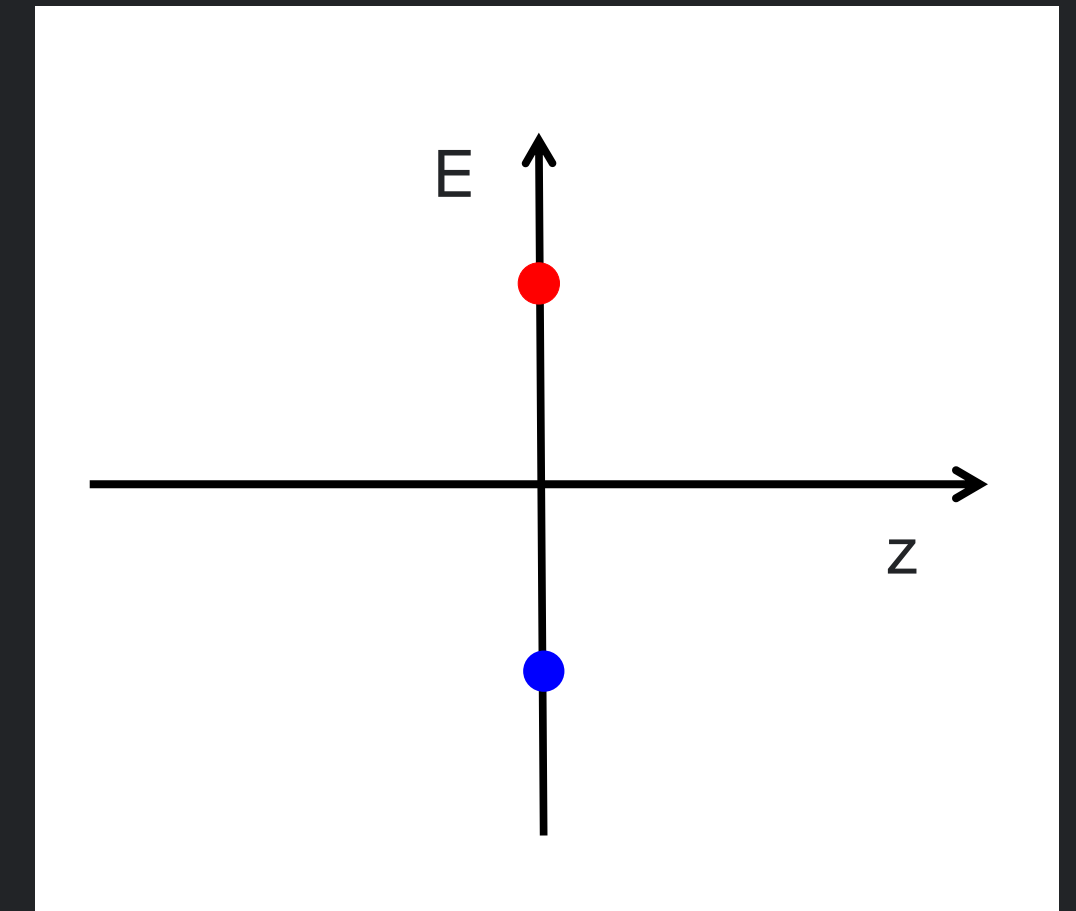
$$\left(\frac{z}{0.035}\right)^2 + \left(\frac{E - \bar{E}}{0.0075}\right)^2 < 1$$

- 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。

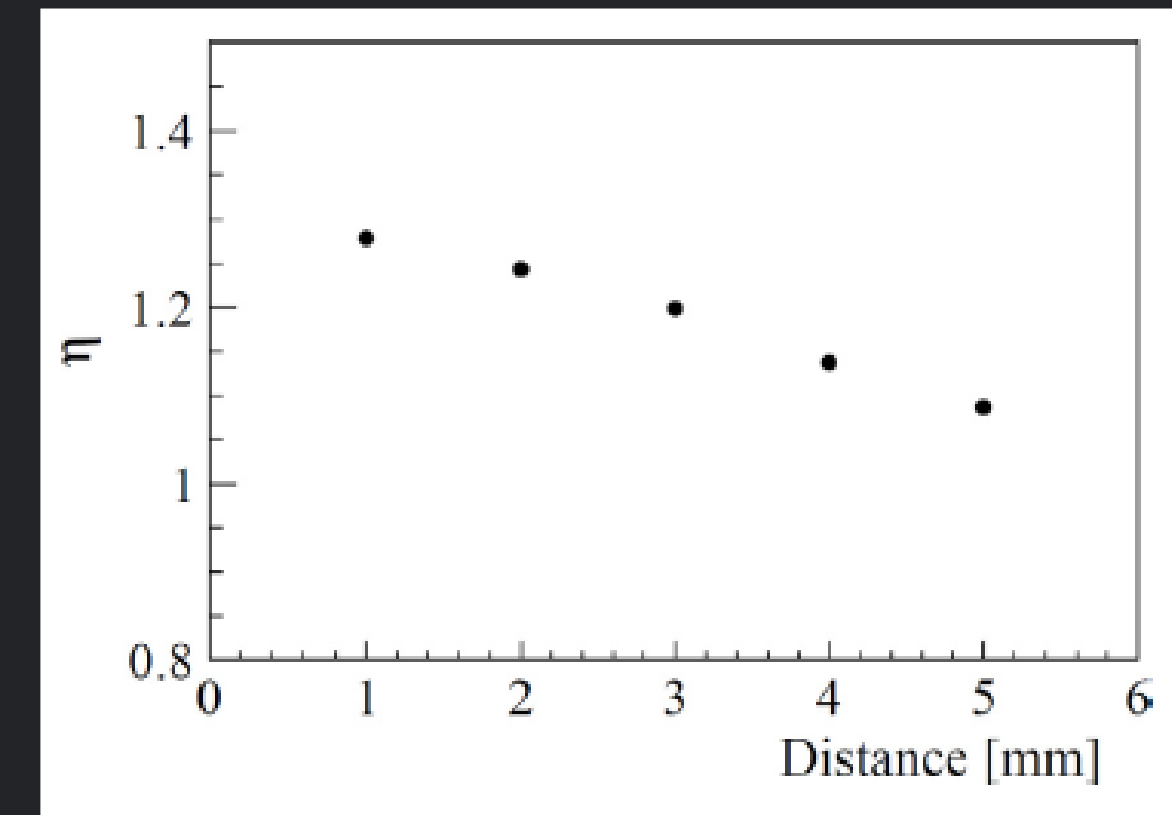
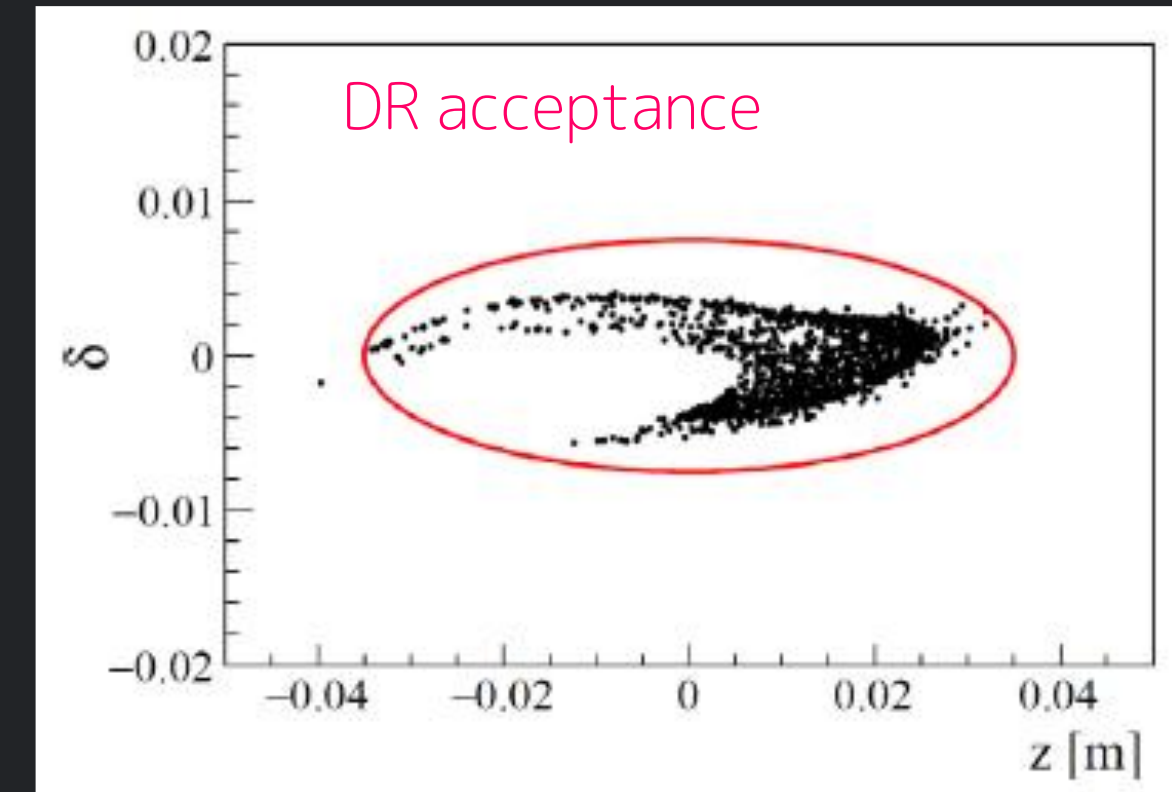
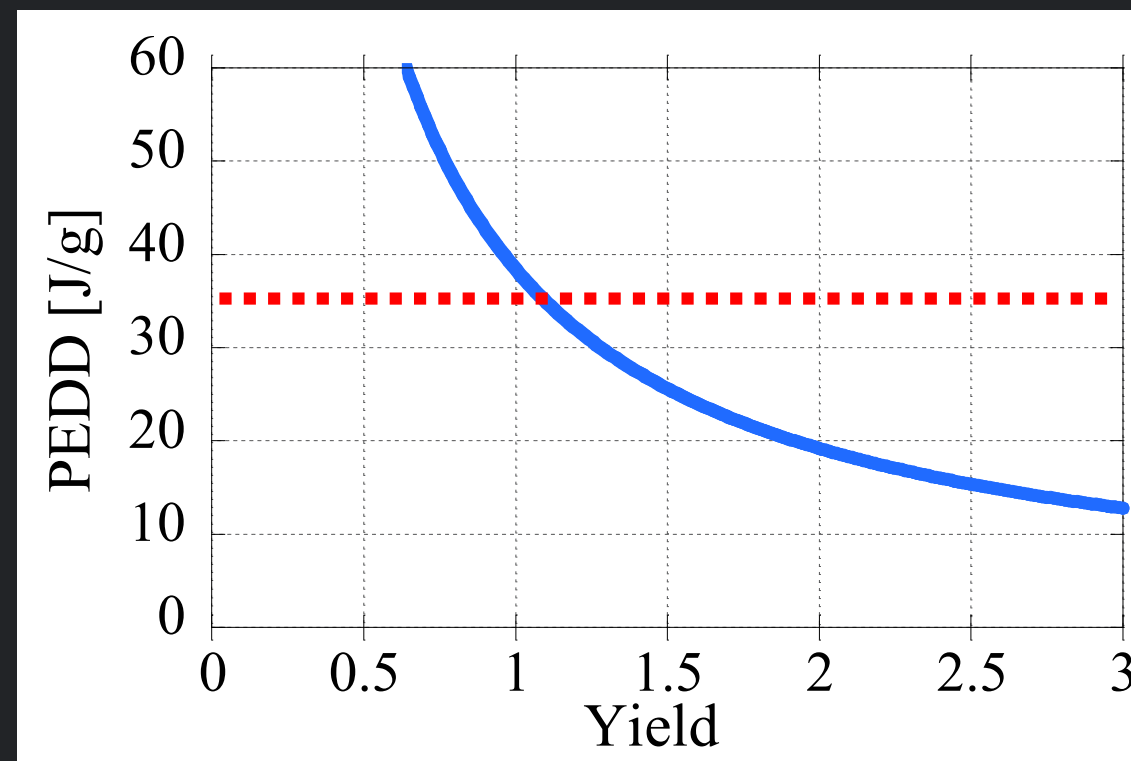


# ECS Optimization and Yield

- 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。

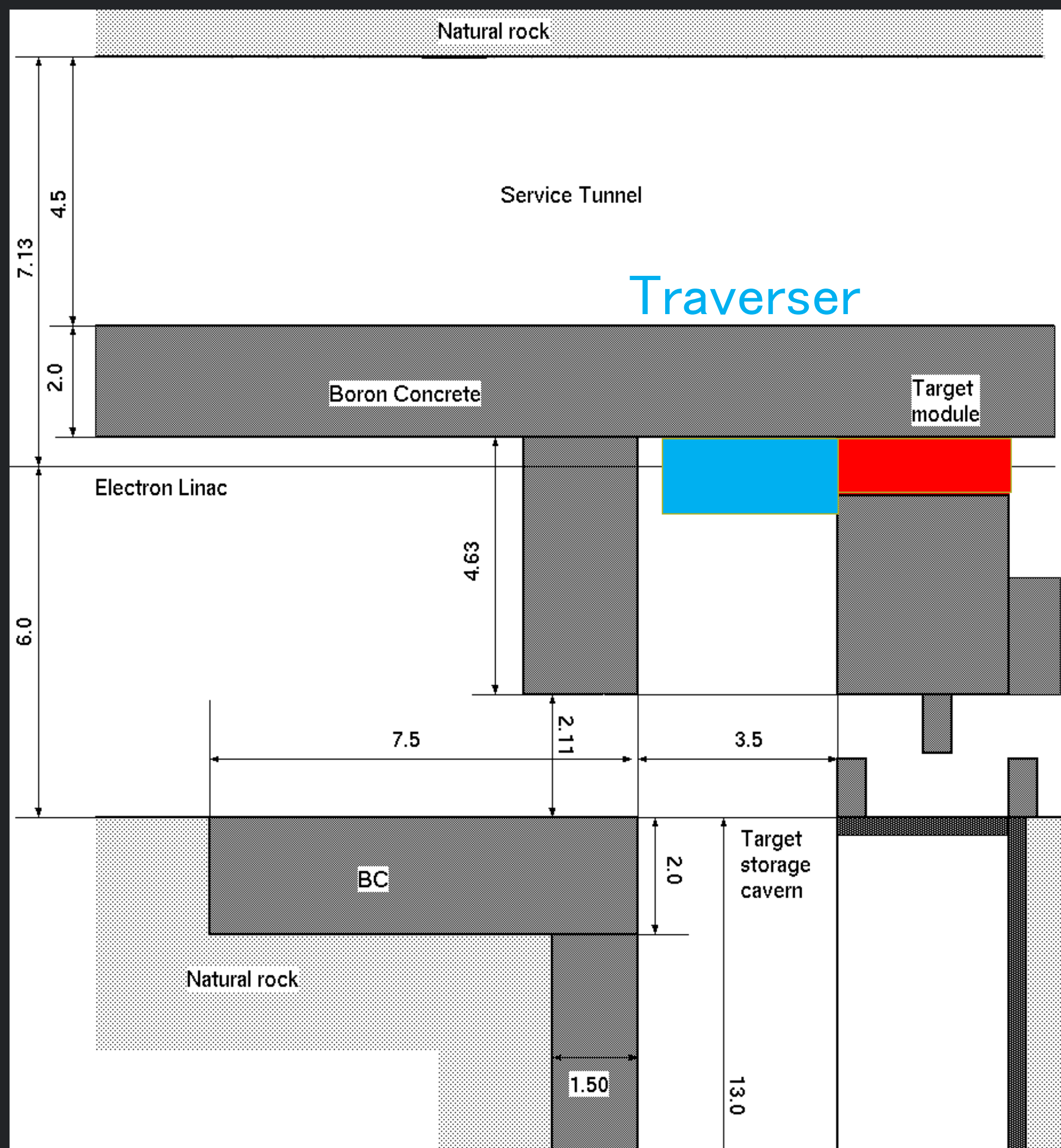
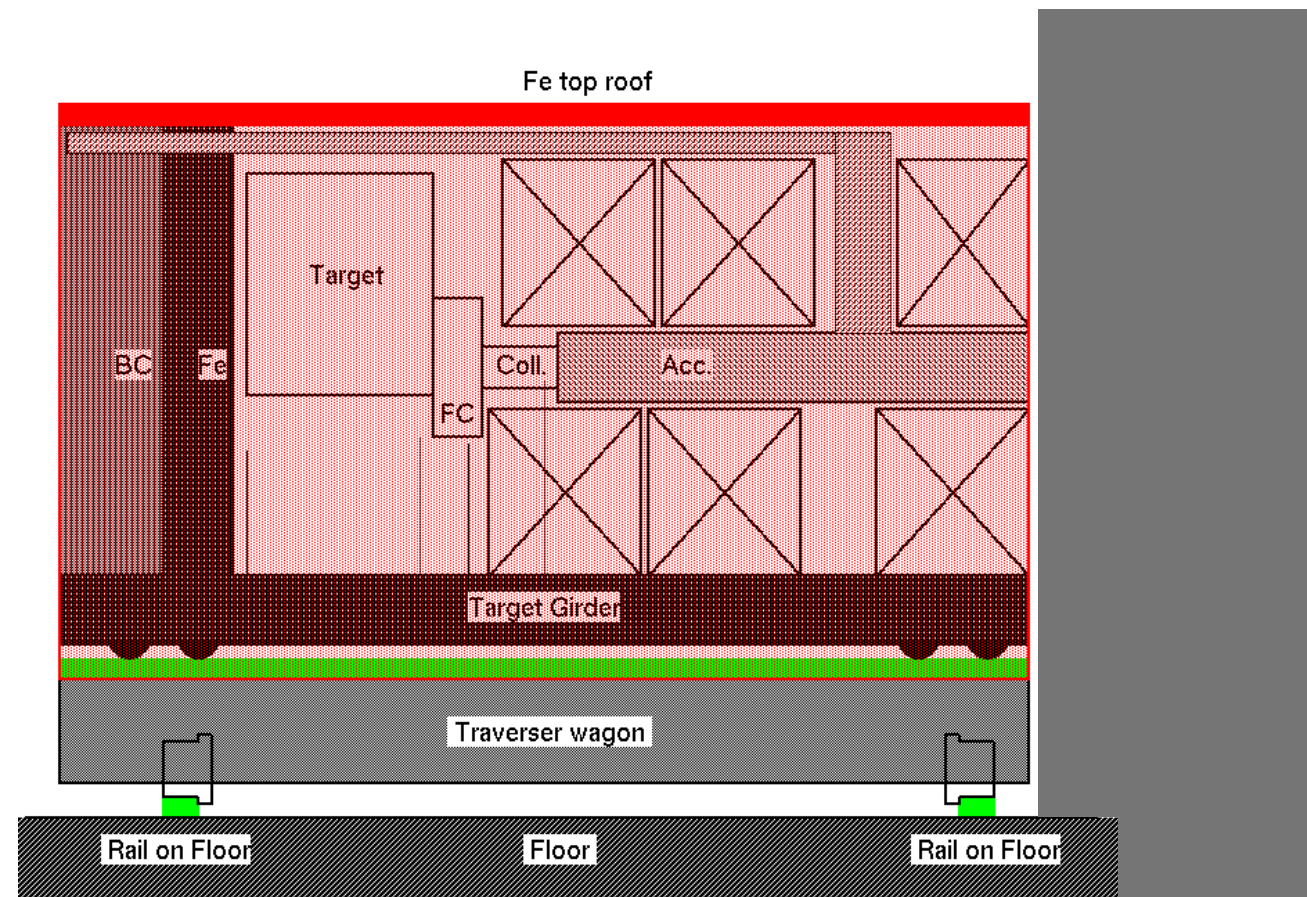
$$PEDD = \frac{25.6 \text{ [J/g]}}{3.2 \text{ [nC]}} \times \frac{4.8}{\eta} = \frac{38.4}{\eta} \text{ [J/g]}$$

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

温泉津の街並み

# 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。
- 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。
- 熱設計にむけた基礎試験を開始した。

# 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