

# 入射器DC電子銃での加速電圧 変動の影響

2009年2月17日(火)14時～  
第34回ビームダイナミクスWGミーティング  
KEK 3号館5F会議室

高エネルギー加速器研究機構 放射光源研究系  
宮島 司

# 計算の目的

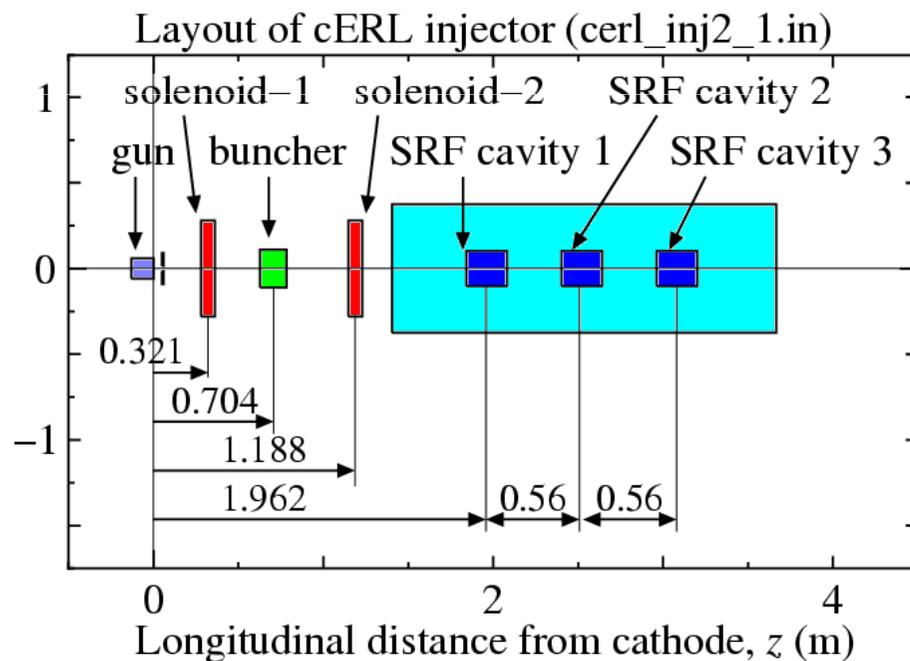
- DC電子銃(500 kV)の加速電圧が、変動したときのビームの質への影響を調べる
- 計算のステップ
  1. 入射器超伝導空洞出口での計算(DC電子銃の加速電圧の影響の評価)
  2. 合流部出口での計算(分散関数のある場所での影響の評価)
- 500 kVの加速電圧に対して、 $\pm 1\%$ ( $\pm 5$  kV)の電圧変動の影響について計算した(高エネルギーモード(8 MeV)の場合のみ)
- 合流部(分散関数あり)での影響(エネルギー拡がり、到達時間のずれ)を調べる
- Elegantで合流部でのR56を計算し、超伝導入射器出口でのエネルギー変化量から、合流部出口での到達時間のずれを計算する

# 計算方法(ステップ1)

- DC電子銃の加速電圧の誤差がビームの質に与える影響を調べる
- DC電子銃: 1台
- 設定する量: 加速電圧(通常は500 kV)
- 500 kVの加速電圧を中心として誤差を与える
  - 加速電圧の誤差: 設定値の $\pm 1\%$
- GPTを用いて、空間電荷効果を含んだトラッキングを行う
- 空洞出口(カソード面から 4.5 mの位置)まで計算
- 計算する物理量:
  - 規格化エミッタンス
  - rmsビームサイズ
  - rmsバンチ長
  - 運動エネルギー
  - rmsエネルギー拡がり
  - 空洞出口までの到達時間

# 今回の計算

- ステップ1:カソード面から空洞出口まで
- バンチャー空洞、入射器超伝導空洞3台の影響を含む
- DC電子銃での加速電圧の誤差(それ以外のパラメタは固定)
- 出口でのビームエネルギー:8 MeV

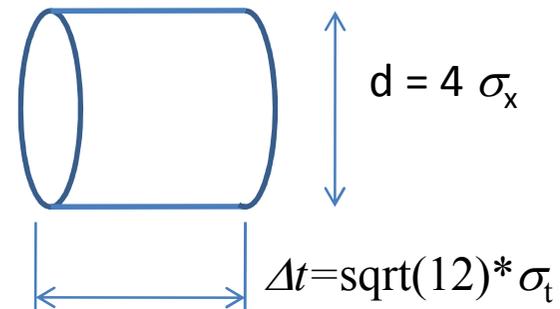


誤差を与えたパラメタ:1つ

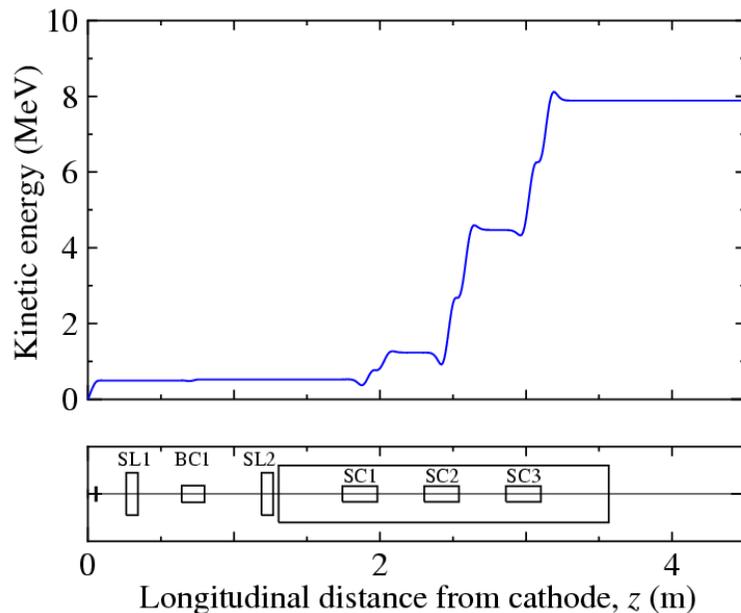
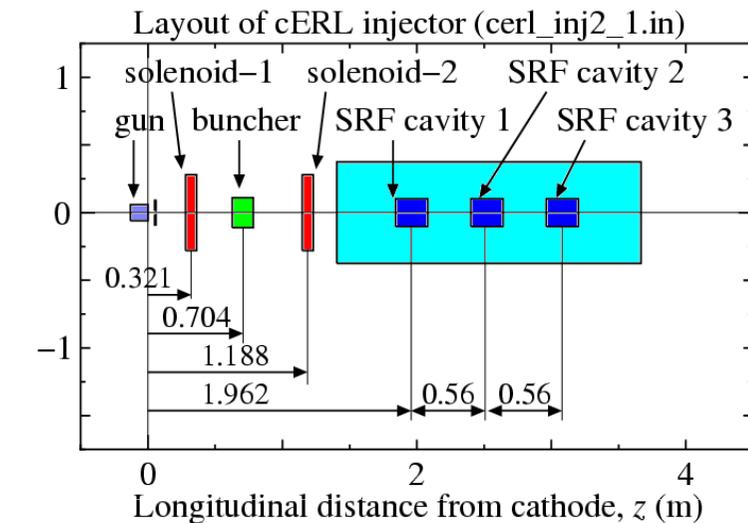
DCG01:加速電圧( $\pm 1\%$ )

$Z=4.5$  mの位置で物理量を計算

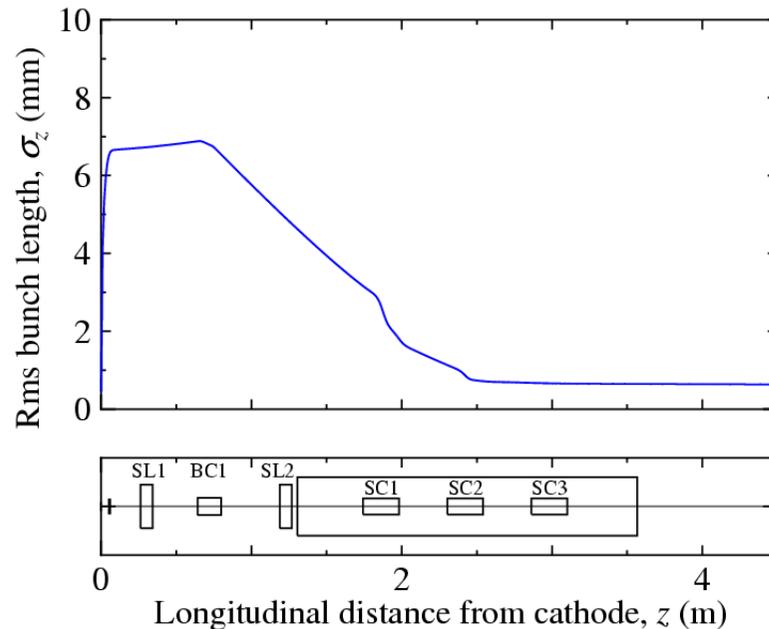
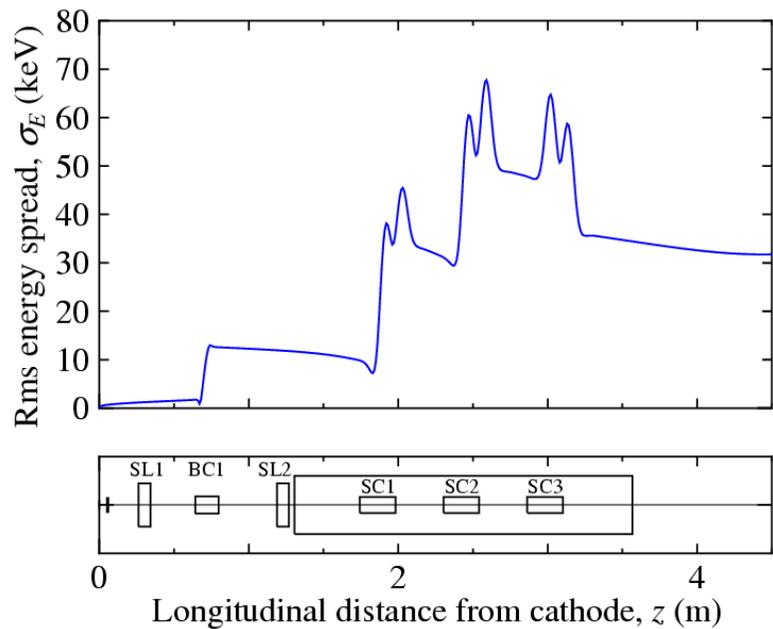
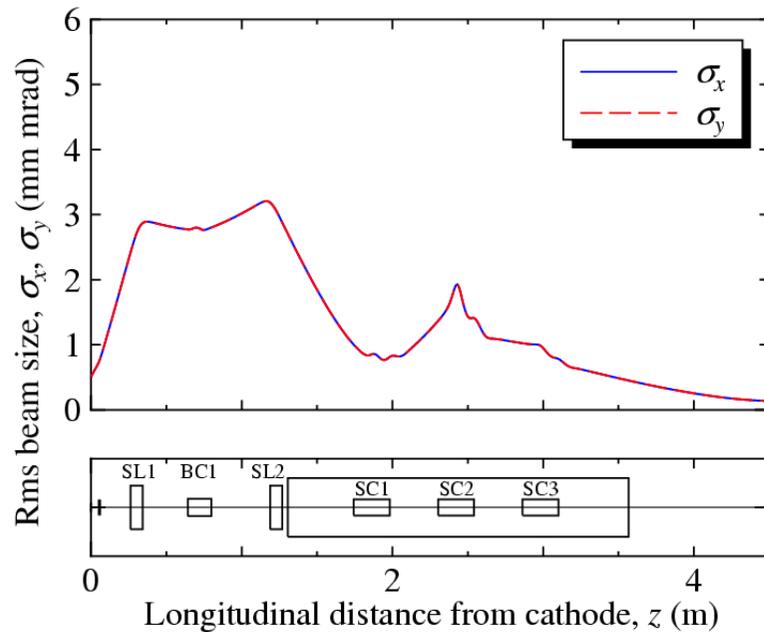
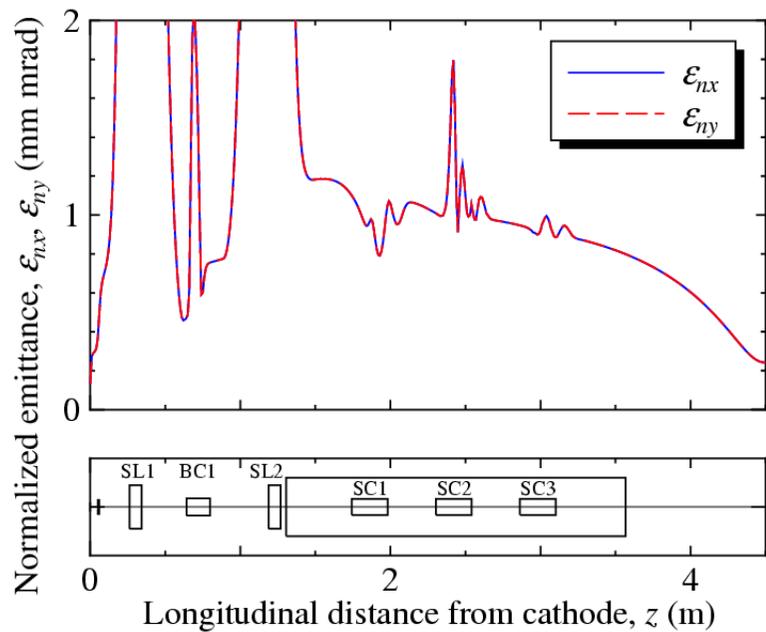
カソード表面での初期粒子分布:ピア缶



# 高エネルギーモード



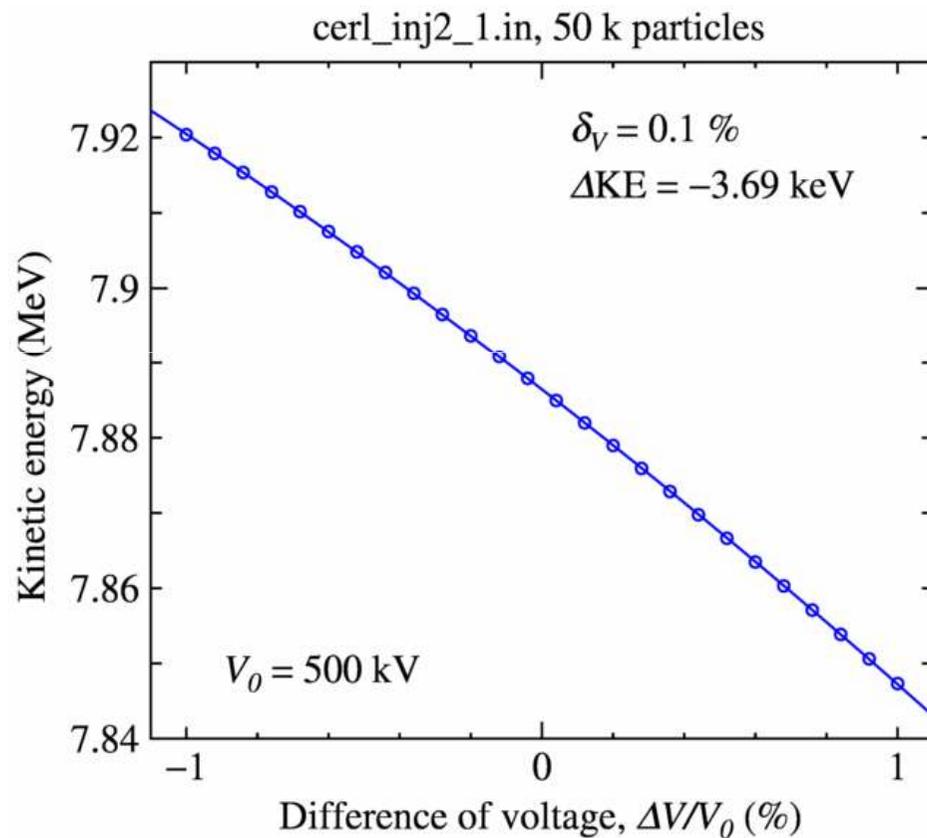
- Max( $E_z$ ) = 30 MV/m に制限( $E_{acc}$ で 15 MV/m)
- バンチ電荷 : -80 pC
- 粒子数 : 50 k particles
- 空間電荷効果計算(3d-mesh, CG)
- ビームサイズ : 0.503367 mm
- レーザーパルス長 : 25.2024 ps
- ソレノイド1の磁場 : 0.0370703 T
- ソレノイド2の磁場 : 0.0297391 T
- バンチャー空洞の加速電場 : 1.25906 MV/m
- 1番目SRFの加速電場 : 8.1881 MV/m
- 2番目SRFの加速電場 : 29.99 MV/m
- 3番目SRFの加速電場 : 30.0 MV/m
- バンチャー空洞の位相 : -89.801度
- 1番目SRFの位相 : -39.8224度
- 2番目SRFの位相 : -16.5836度
- 3番目SRFの位相 : 9.81271度
- ソレノイド1の中心位置 : 0.321 m
- ソレノイド2の中心位置 : 0.704 m
- バンチャー空洞の中心位置 : 1.128 m



# 入射器超伝導空洞の振幅誤差(1)

## 運動エネルギー

DC電子銃の電圧誤差



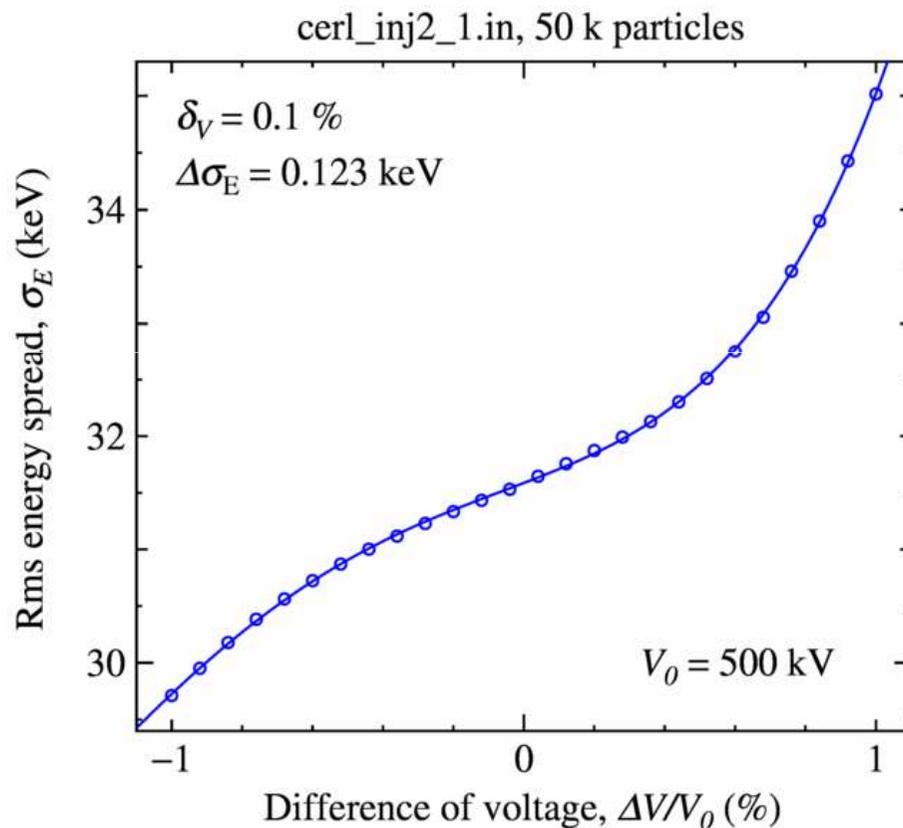
$\delta_V = 0.1$  %

- $-3.69$  keV /  $7.89$  MeV (-0.047%)

# 入射器超伝導空洞の振幅誤差(2)

## rmsエネルギー拡がり

DC電子銃の電圧誤差



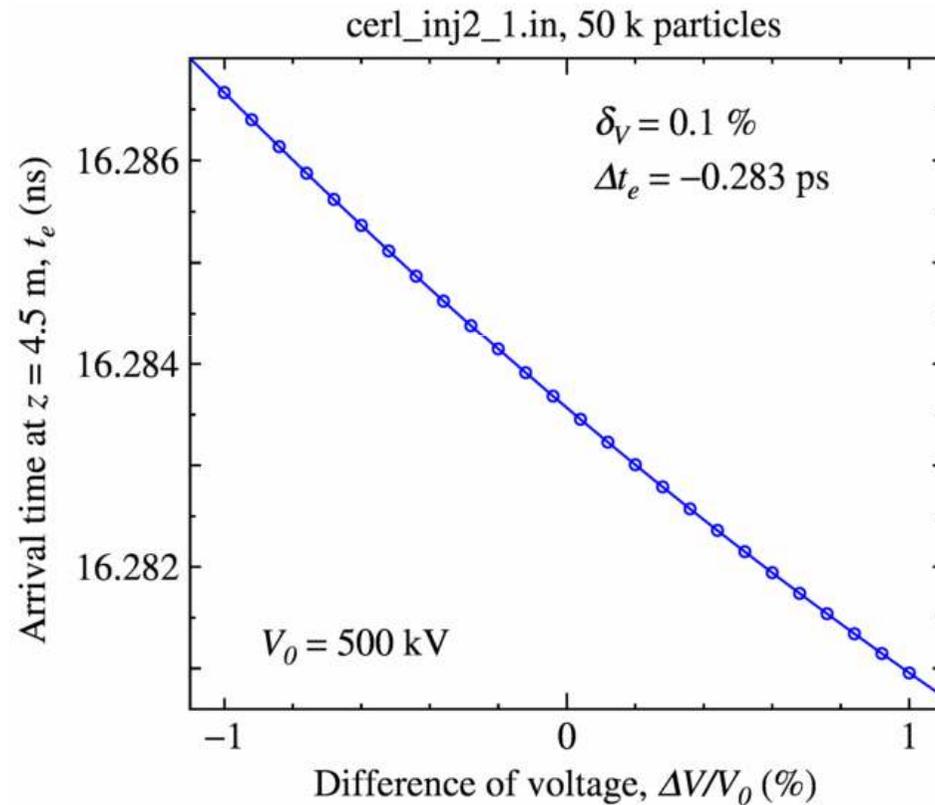
$\delta_V = 0.1 \%$

- $0.123 \text{ keV} / 31.6 \text{ keV} (0.388\%)$

# 入射器超伝導空洞の振幅誤差(3)

## $z = 4.5$ mまでの到達時間

DC電子銃の電圧誤差

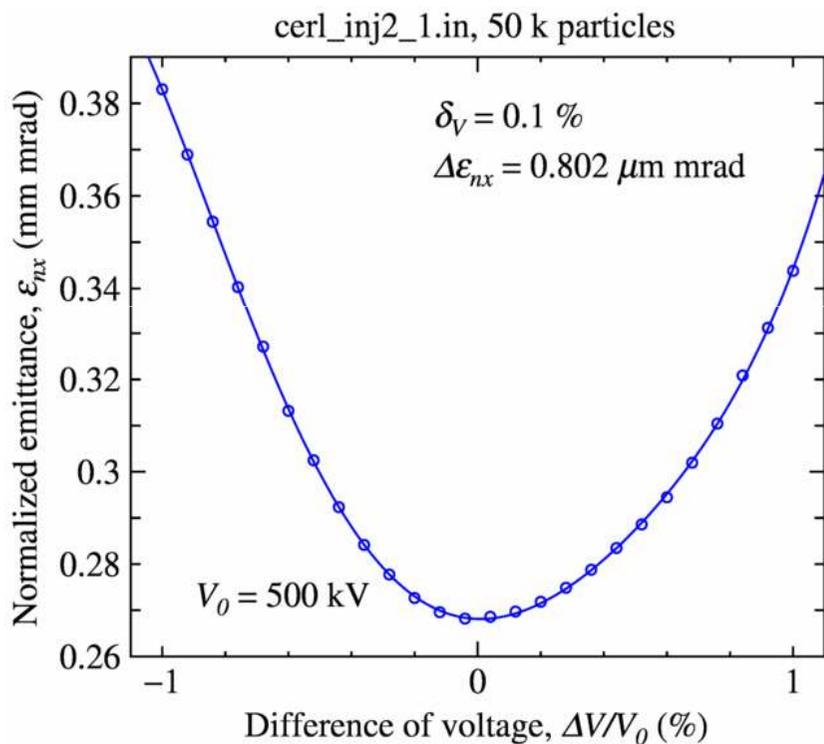


- $\delta_V = 0.1\%$
- $-0.283$  ps (0.132 degree)

# 入射器超伝導空洞の振幅誤差(4)

## 規格化rmsエミッタンス

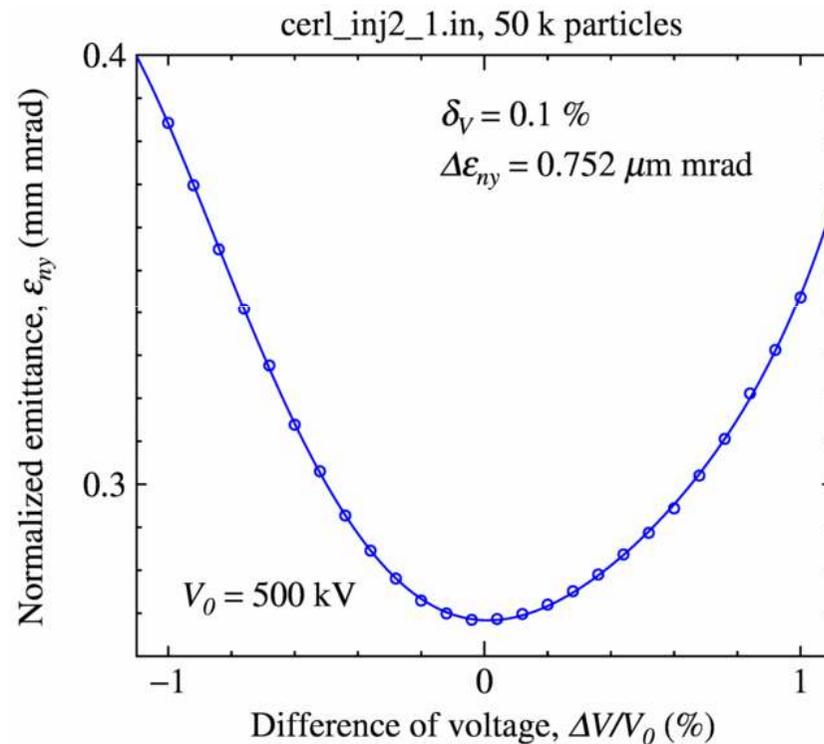
DC電子銃の電圧誤差  
水平方向



$$\delta_V = 0.1 \%$$

- $0.802 \mu\text{m rad} / 0.268 \text{ mm mrad}$  (0.299%)

DC電子銃の電圧誤差  
垂直方向



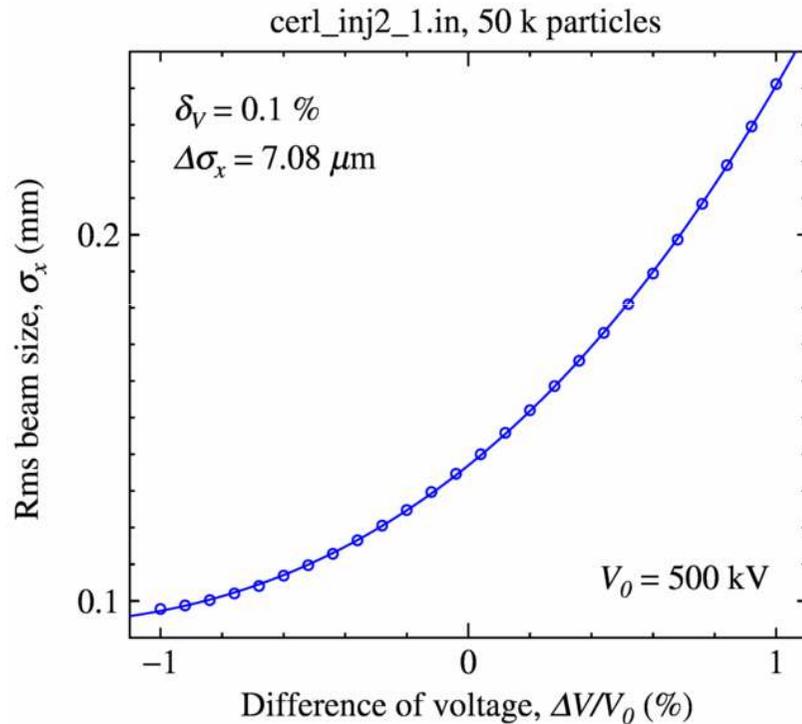
$$\delta_V = 0.1 \%$$

- $0.752 \mu\text{m rad} / 0.268 \text{ mm mrad}$  (0.280%)

# 入射器超伝導空洞の振幅誤差(5)

## rms水平方向ビームサイズ

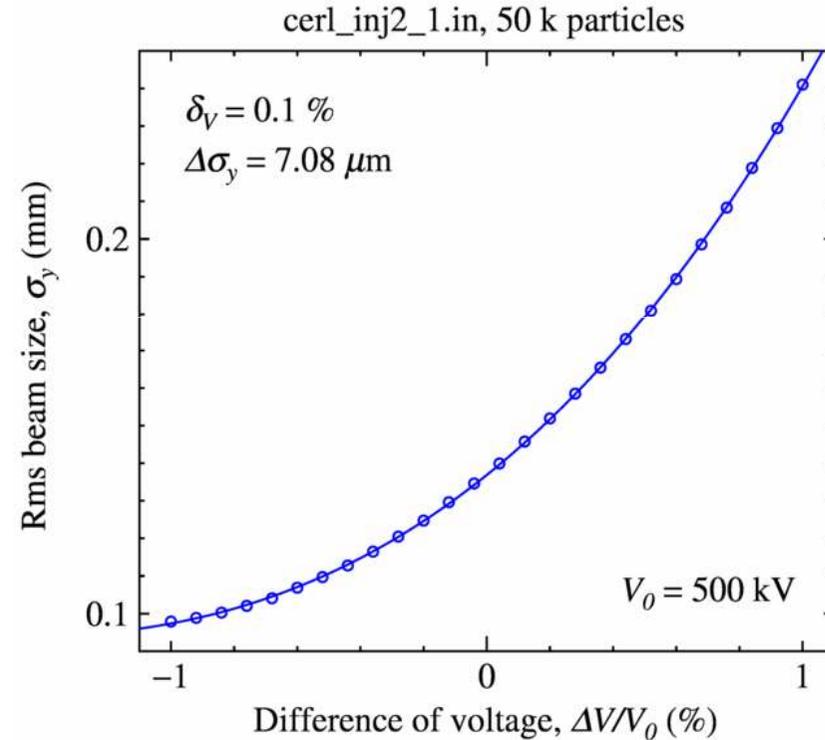
DC電子銃の電圧誤差  
水平方向



$$\delta_V = 0.1 \%$$

- $7.08 \mu\text{m} / 0.137 \text{ mm}$  (5.17%)

DC電子銃の電圧誤差  
垂直方向



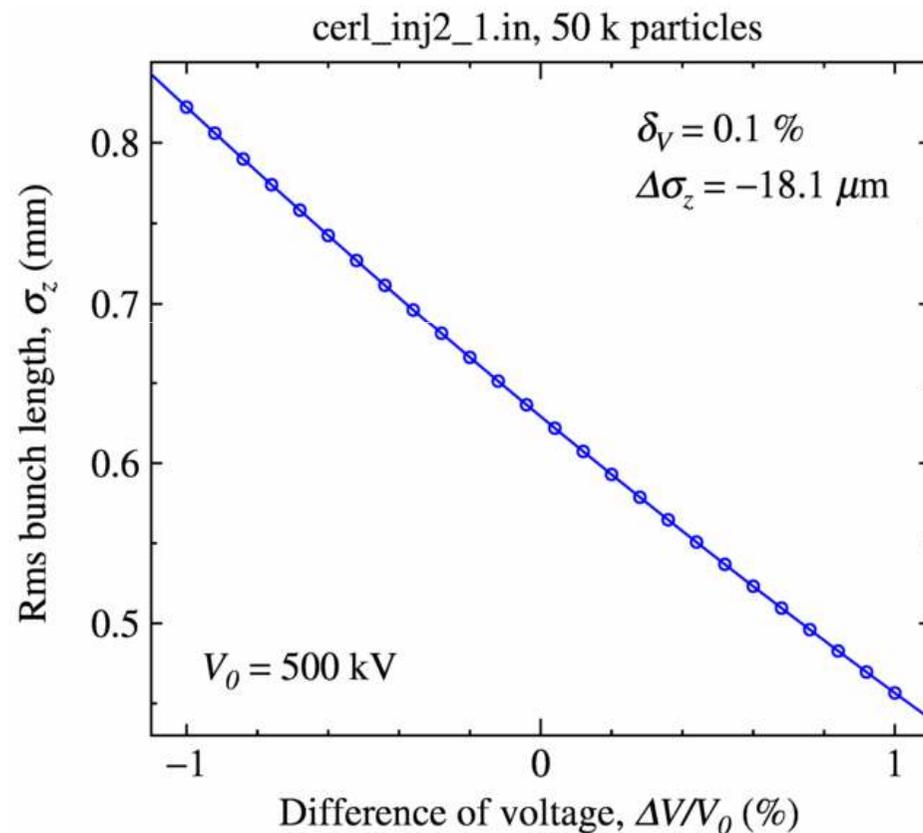
$$\delta_V = 0.1 \%$$

- $7.08 \mu\text{m} / 0.137 \text{ mm}$  (5.17%)

# 入射器超伝導空洞の振幅誤差(6)

## rmsバンチ長

DC電子銃の電圧誤差



- $\delta_V = 0.1 \%$
- $-18.1 \mu\text{m} / 0.629 \text{ mm} (-2.89\%)$

# まとめ

## DC電子銃の電圧誤差

- 電圧誤差の影響(0.1%の電圧誤差を与えた)
- Rmsビームサイズの変化量が一番大きい、5%程度

	超伝導空洞3台
振幅の変化, $\Delta V/V_0$ (%)	0.1 %
運動エネルギーの変化	-3.69 keV / 7.89 MeV (-0.047%)
エネルギー拡がりの変化	0.123 keV / 31.6 keV (0.388%)
到達時間の変化	-0.283 ps (-0.132 degree)
規格化エミッタンスの変化	水平方向: 0.802 $\mu\text{m rad}$ / 0.268 mm mrad (0.299%) 垂直方向: 0.752 $\mu\text{m rad}$ / 0.268 mm mrad (0.280%)
Rmsビームサイズの変化	水平方向: 7.08 $\mu\text{m}$ / 0.137 mm (5.17%) 垂直方向: 7.08 $\mu\text{m}$ / 0.137 mm (5.17%)
バンチ長の変化	-18.1 $\mu\text{m}$ / 0.629 mm (-2.89%)

加速電圧誤差0.1%であれば、ビームの品質は問題なさそう(合流部前まで)

# ステップ2: 合流部での計算

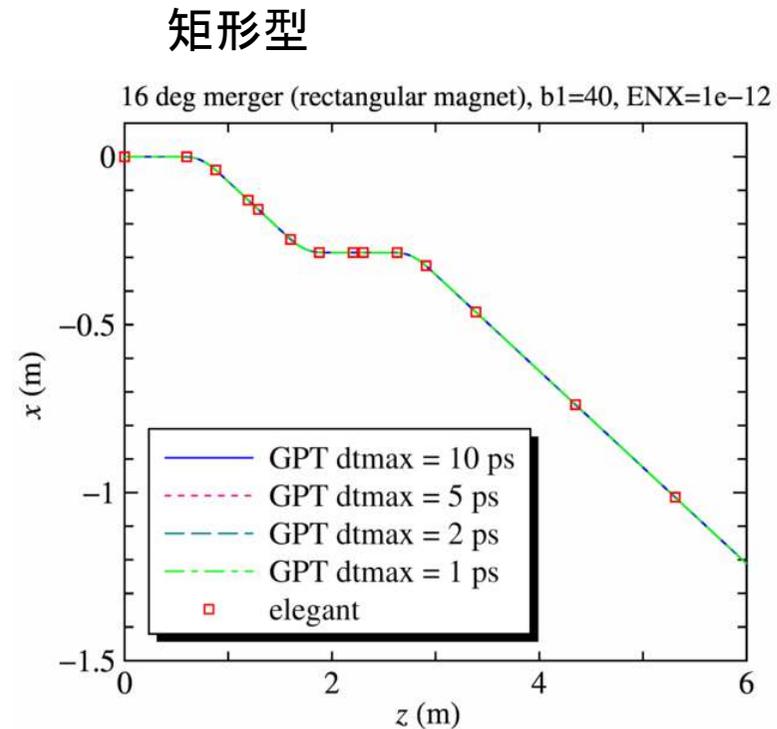
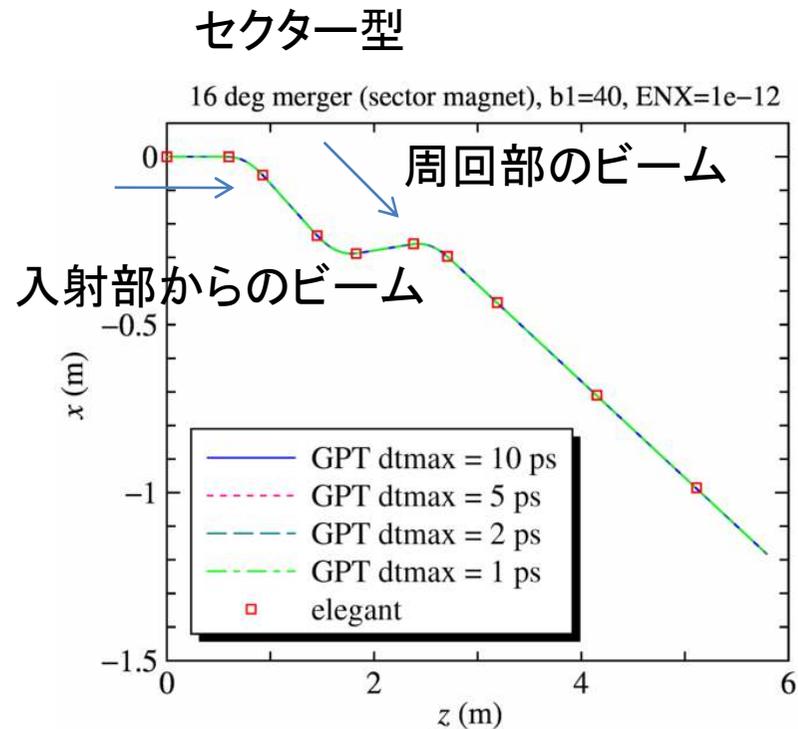
- 合流部(分散関数あり)での影響(エネルギー拡がり、到達時間のずれ)を調べる
- 単粒子計算:
  - 合流部入口から出口まで
  - ステップ1で計算した、ビームのエネルギー、エネルギー拡がりを利用
  - 空間電荷効果なし
  - 合流部でのR56の値から到達時間のずれを計算
- 複数粒子計算:
  - 超伝導空洞入口から合流部出口まで
  - 空間電荷効果あり
  - 分散関数、空間電荷効果を含んだ全ての影響を調べる(時間が掛かる)
- 今回は、elegantで合流部のR56を計算し、ステップ1の計算で得られたエネルギー変化量から、合流部出口での遅れ時間を計算する
- また、ステップ1のエネルギー拡がりの変化量から、バンチ長の変化量を計算する
- 対象とする合流部: 2つ
  - 入射角16度、セクター型偏向電磁石3台(エッジフォーカス付き)
  - 入射角16度、矩形型偏向電磁石3台+四極電磁石2台

$$\Delta z = R_{56} \delta$$

$$\delta = \frac{P - P_0}{P}$$

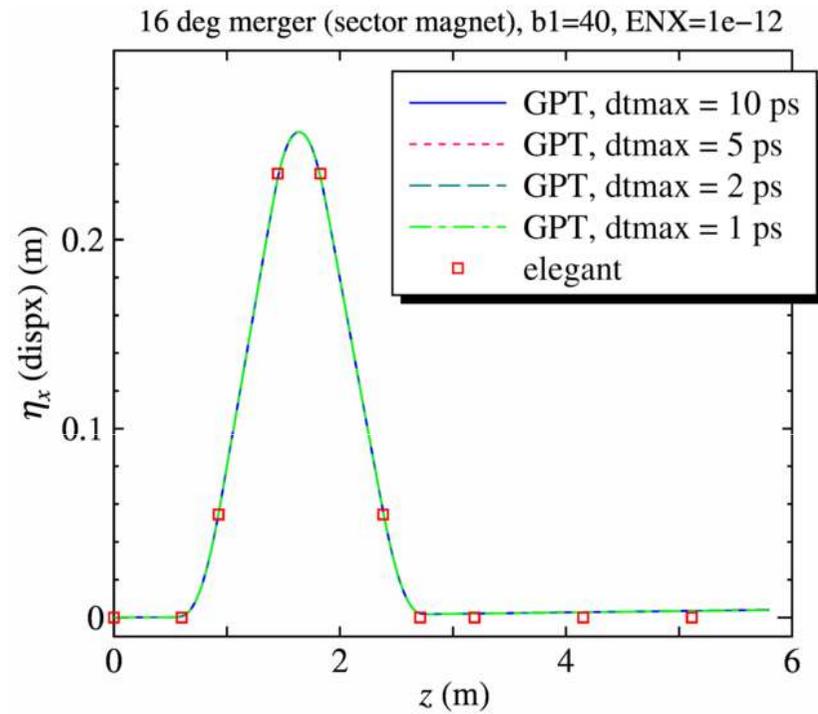
# 対象とする合流部

- 次の2つの合流部(入射角16度)について計算した
  - セクター型: セクター型偏向電磁石3台(-19度、22度、-19度、エッジフォーカス付き)
  - 矩形型: 入射角16度、矩形型偏向電磁石3台(-16度、16度、-16度) + 四極電磁石2台
- 2つの合流部に対して、elegantを用いてR56を計算
- R56とステップ1で求めたエネルギーのずれ量から合流部出口での到達時間の遅れを計算

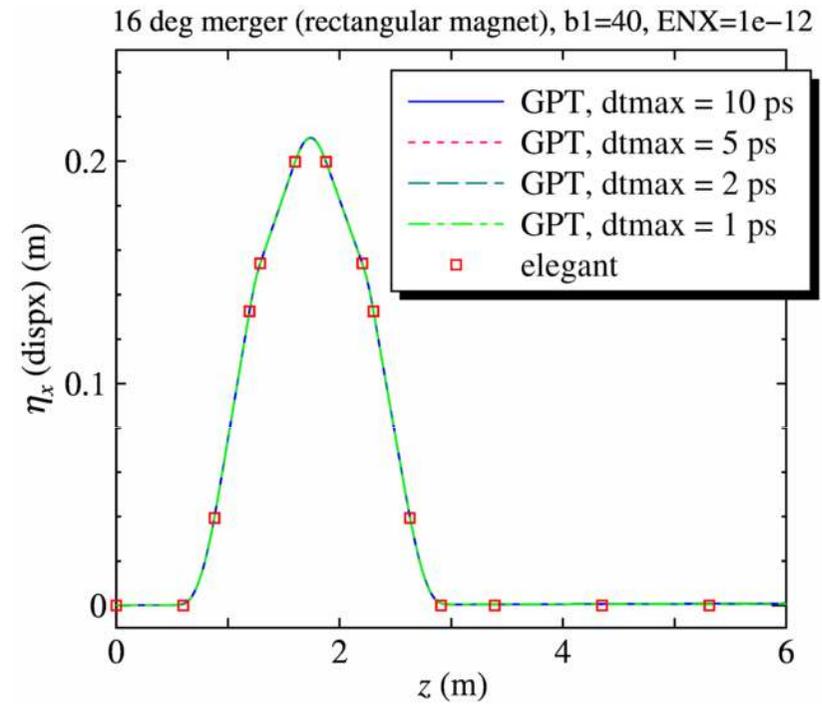


# 分散関数

## セクター型



## 矩形型



セクター型の場合、偏向電磁石間には四極電磁石は配置しない  
2番目の偏向電磁石の出入口に角度を与えて、合流部出口での分散関数をゼロにする

矩形型の場合、B1-B2間、B2-B3間に四極電磁石を配置する  
これを利用して、合流部出口での分散関数をゼロにする

# 中心エネルギーのずれによる合流部出口での到着時間の遅れ

- ステップ1で計算した位置から、合流部出口までのR56の計算値 (elegantにより計算)
  - セクター型:  $R56 = -0.08404$  (m)
  - 矩形型:  $R56 = -0.05064$  (m)
- 誤差なしの場合の運動量:  $P_0 = 8.38187$  (MeV/c)
- 誤差ありの場合の運動量:  $P = 8.38556$  (MeV/c) ←  $\Delta KE = 3.69$  keV  
振幅のずれ0.1%のとき
- 運動量のずれ量:  $\delta = (P_0 - P)/P = 0.000441$ 

$$\Delta z = R_{56} \delta$$

$$\delta = \frac{P - P_0}{P}$$
- エネルギーの違いによる到達時間の遅れ
  - セクター型 (z=4.5 mから合流部出口まで $\Delta S=3.1559$  (m))
    - $dt_{KE} = \Delta S/c * (1/\beta - 1/\beta_0) = -17.21$  (fs)
  - 矩形型 (z=4.5 mから合流部出口まで $\Delta S=3.2691$  (m))
    - $dt_{KE} = \Delta S/c * (1/\beta - 1/\beta_0) = -17.83$  (fs)
- R56による到達時間の遅れ
  - セクター型:  $dt_{R56} = -R56 * \delta / (\beta * c) = 123.87$  (fs) [0.05797 degree]
  - 矩形型:  $dt_{R56} = -R56 * \delta / (\beta * c) = 74.64$  (fs) [0.03493 degree]
- エネルギーの違い + R56による到達時間の遅れ
  - セクター型:  $dt = 106.66$  (fs) [0.04991 degree]
  - 矩形型:  $dt = 56.81$  (fs) [0.02659 degree]

# エネルギー拡がりの変化によるバンチ長の変化

- エネルギー拡がりの変化 (バンチャー空洞の0.1度位相変化)
- $\sigma_E = 0.123 \text{ keV}$
- $\sigma_\gamma = 0.0002407$
- $\sigma_p = mc^2 * (\text{sqrt}((\gamma_0 + \sigma_\gamma)^2 - 1) - \text{sqrt}(\gamma_0^2 - 1)) = 0.0001232 \text{ (MeV/c)}$
- $\delta = \sigma_p / P_0 = 1.4701\text{e-}005$
  
- エネルギー拡がり と R56 によるバンチ長の伸び (空間電荷効果はなし)
  - (1) セクター型  
 $\Delta\sigma_z = R56 * \delta = 1.236 \text{ (\mu m)}$  [バンチ長 0.6 mm に対して]
  - (2) 矩形型  
 $\Delta\sigma_z = R56 * \delta = 0.744 \text{ (\mu m)}$  [バンチ長 0.6 mm に対して]

# 合流部での影響のまとめ

- ステップ1での計算結果(エネルギーの変化、エネルギー拡がり)と、elegantを用いて計算したR56の値を利用して、合流部出口でのビームの到着時間の遅れとバンチ長の変化を計算した
- 合流部は、セクター型と矩形型電磁石を用いた二つのタイプについて計算した
- 合流部出口での到着時間の変化(エネルギー変化量3.69 keVの場合)
  - セクター型:  $dt = 123.87$  (fs) [0.05797 degree]
  - 矩形型:  $dt = 74.64$  (fs) [0.03493 degree]
- 合流部出口でのバンチ長の変化
  - セクター型:  
 $\Delta\sigma_z = R56 * \delta = 1.236$  ( $\mu\text{m}$ ) [バンチ長 0.6 mm(に対して)]
  - 矩形型  
 $\Delta\sigma_z = R56 * \delta = 0.744$  ( $\mu\text{m}$ ) [バンチ長 0.6 mm(に対して)]
- 振幅誤差0.1%、位相誤差0.1度であれば、合流部での影響も十分小さいといえる

# 課題

- 複数粒子計算：
  - 超伝導空洞入口から合流部出口まで
  - 空間電荷効果あり
  - 分散関数、空間電荷効果を含んだ全ての影響を調べる(時間が掛かる)
- 合流部を含んだGPT用の入力ファイルとそのベンチマークが終了した (Twissパラメタ、分散関数のチェック)
- 四極電磁石5台のマッチング部と合流部のパラメタの最適化を始めている
- 最適化が終了したら、分散関数、空間電荷効果を全て含んだ場合についての振幅・位相誤差の計算を行う予定

ベータatron関数のチェック

左図: セクター型

右図: 矩形型

ElegantとGPTで比較

