

# EUV-FEL 入射器の最適化計算 合流部出口まで

2015年10月1日(木)14時～  
第98回ビームダイナミックスWGミーティング

宮島 司

# 目的と方針

- 目的

- EUV-FEL 用の入射器の最適化計算
- これまでは、入射器超伝導空洞出口まで最適化を実施
- 合流部でどれくらいエミッタンスが悪化するかを見積もる

- 方針

- 合流部の設計 (cERLの合流部より機器配置の余裕を持たせたい)
- 入射器超伝導空洞出口までの最適化結果を元にして、合流部の輸送条件を調整 (空間電荷分散関数の調整)
- 電子銃から合流部出口までの最適化計算

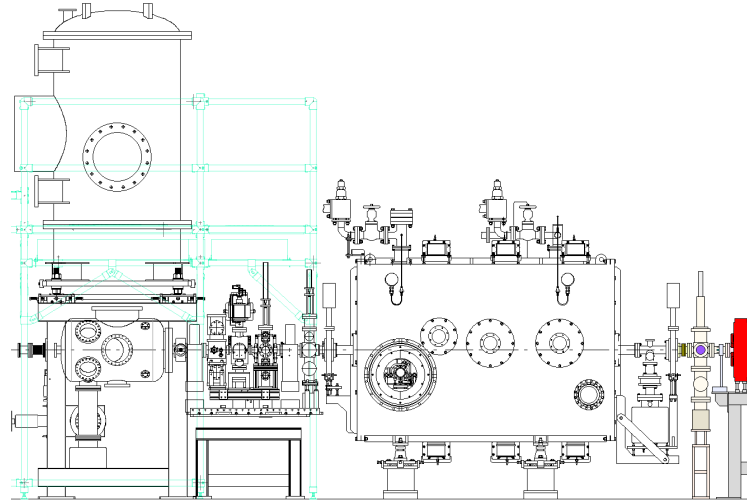
- ビーム条件

- バンチ電荷: 60 pC
- 入射器エネルギー: 10 MeV 程度 (入射器  $E_{acc} < 7.3 \text{ MV/m}$ )
- 入射器空洞: 2 cell × 6 空洞

# 入射器の配置

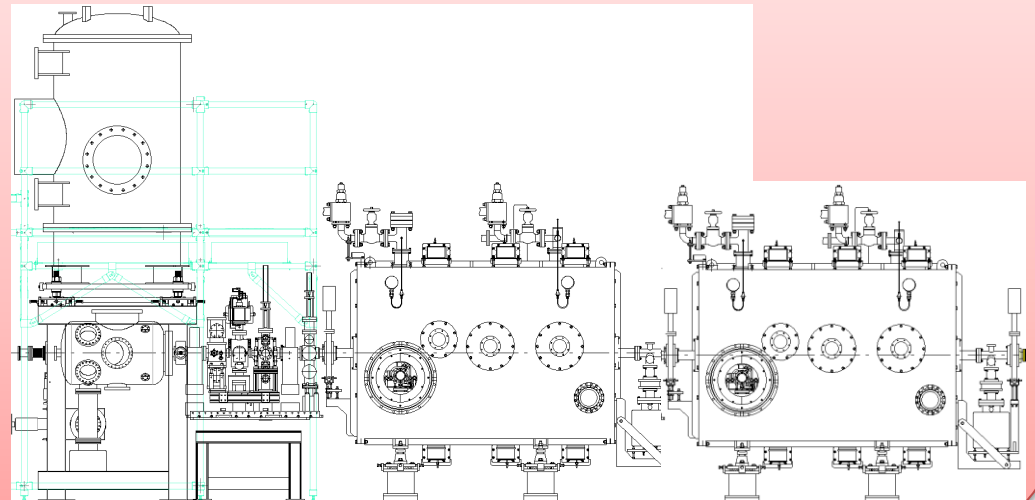
## 1. cERLの配置

入射器超伝導空洞  
2 cell × 3 空洞



## 2. EUV-FEL用の配置

入射器超伝導空洞  
2 cell × 6 空洞

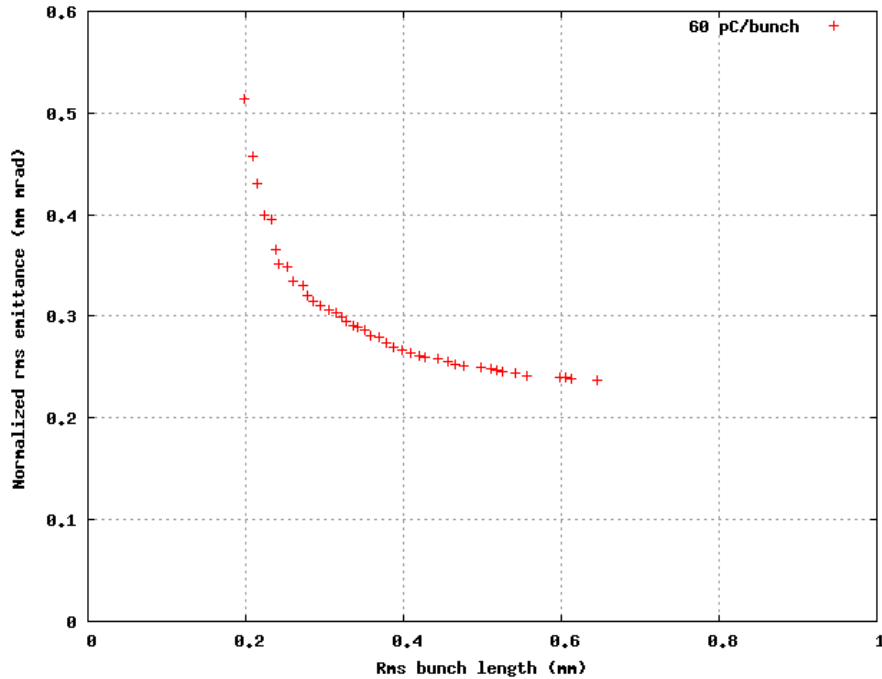


# 入射器空洞出口までの最適化

- 最小化する条件： 入射器空洞出口における規格化エミッタンス、バンチ長
- マクロ粒子数： 10 k  $\Rightarrow$  100 k の2段階で最適化
- 最適化するパラメタ（17個）
  - 初期レーザー直径 [m]: 0.05e-3  $\sim$  3.0e-3
  - 初期レーザーパルス全幅 [s]: 1.0e-12  $\sim$  192.0e-12
  - ソレノイド1の磁場 [T]: 0.0  $\sim$  0.06
  - ソレノイド2の磁場 [T]: 0.0  $\sim$  0.06
  - バンチャー加速電圧 [kV]: 10.0  $\sim$  150.0
  - 空洞1のEacc [MV/m]: 2.0  $\sim$  8.0
  - 空洞2のEacc [MV/m]: 4.0  $\sim$  8.0
  - 空洞3のEacc [MV/m]: 4.0  $\sim$  8.0
  - 空洞4, 5, 6 のEacc [MV/m]: 6.0  $\sim$  8.0
  - バンチャー位相 [deg]: -91.0  $\sim$  -89.0
  - 空洞1位相 [deg]: -30.0  $\sim$  30.0
  - 空洞2位相 [deg]: -15.0  $\sim$  15.0
  - 空洞3位相 [deg]: -15.0  $\sim$  15.0
  - 電子銃からSL1までの距離 [m]: 0.3  $\sim$  0.6
  - SL1からバンチャーまでの距離 [m]: 0.1295  $\sim$  1.0
  - バンチャーからSL2までの距離 [m]: 0.1295  $\sim$  1.0
  - SL2から空洞1までの距離 [m]: 0.6045  $\sim$  1.5
- 電子銃から8 m の位置でビーム条件を計算
- 加速位相は全てオンクレスト加速からの位相差
- 空洞4, 5, 6 はオンクレスト加速

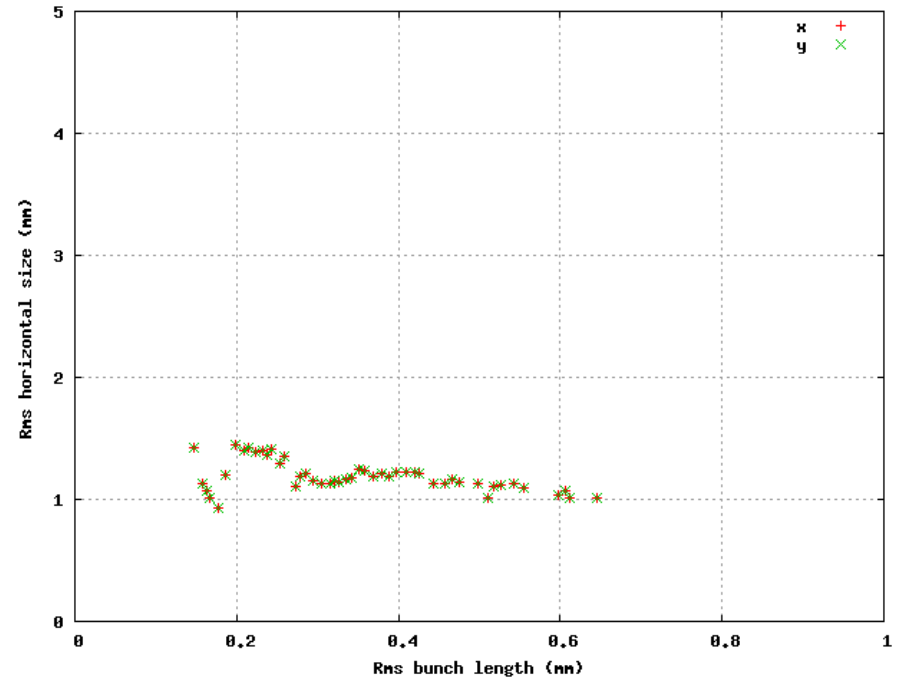
# 100 k 粒子の結果

## 規格化rmsエミッタンス



バンチ長 2 ps で 0.3 mm mrad

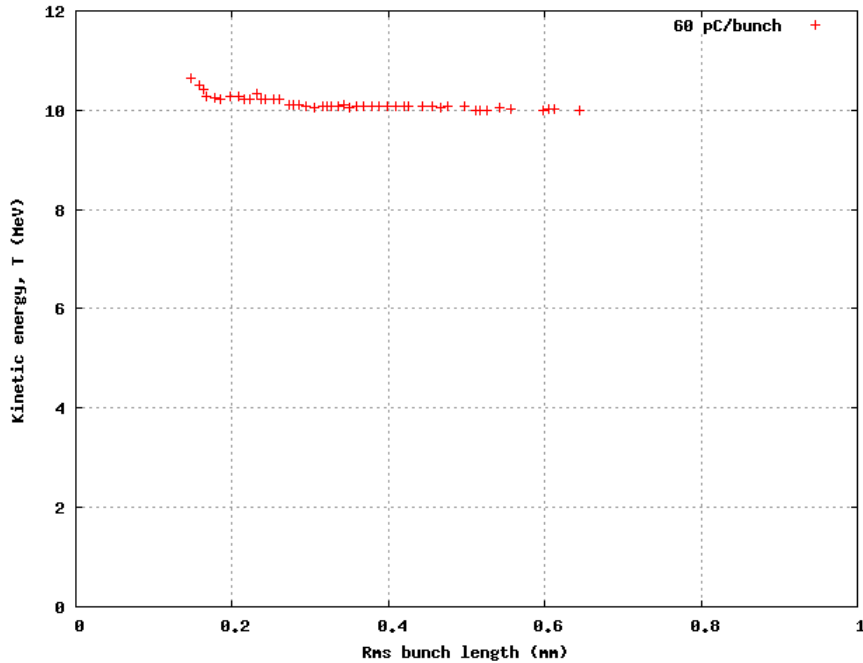
## Rms ビームサイズ



バンチ長 2 ps で 1 mm

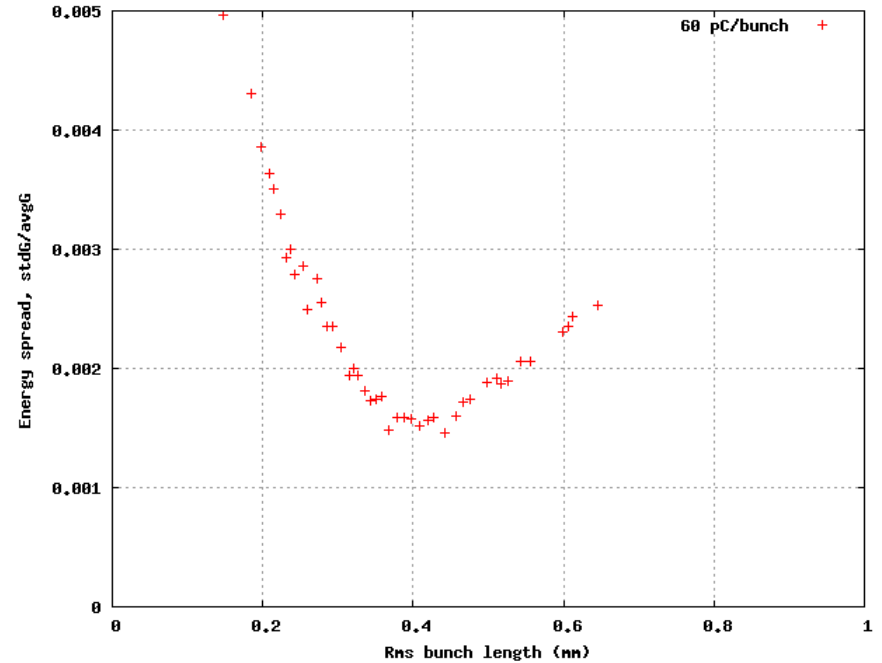
# 100 k 粒子の結果

## 運動エネルギー



運動エネルギー 10 MeV

## Rmsエネルギー拡がり



バンチ長 2 ps で 0.25 % 程度

次に、合流部の形式について検討した

# EUV-FEL用の合流部の設計

## 線形解析

2015年8月27日(木)

宮島 司

- 課題:
  - FEL用入射器の条件でエミッタンス悪化を最小化した合流部設計
- 方法:
  - 線形解析の後、大規模最適化計算(空間電荷効果による運動の結合のため絶対必要)
- 結果(欲しいもの):
  - どれくらいのエミッタンス悪化に抑えられたを示す計算結果
- 解析の流れ
  - 線形オプティクス設計
  - GPT用の入力ファイル作成、検証
  - 大規模計算(数週間)
  - 計算結果のフィードバック
- 今回の解析
  - 線形オプティクス設計(分散関数、空間電荷分散関数)

# 設計の方針

- 設計方針

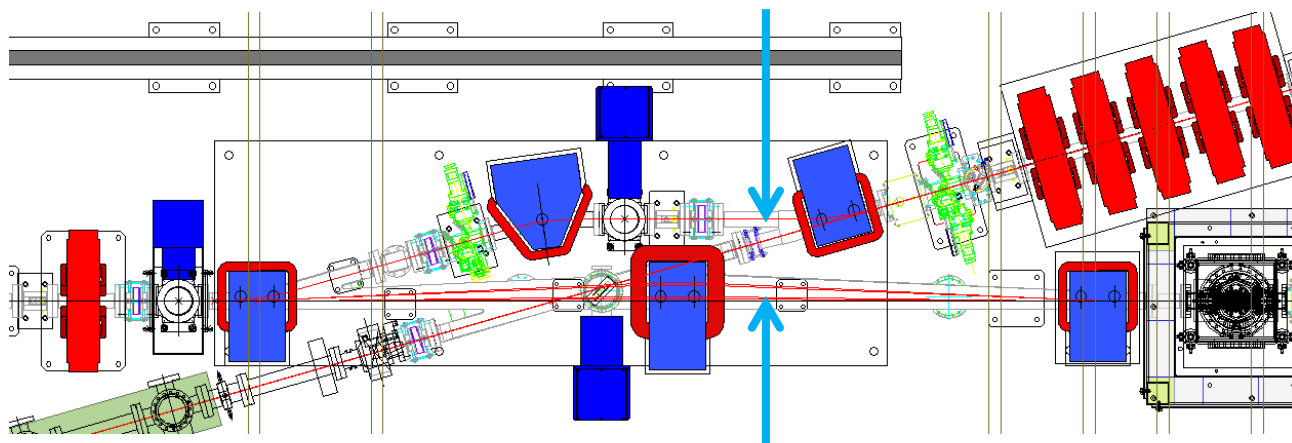
- 機器の配置に余裕を持たせる(スクリーンモニタ、四極電磁石、コリメタ、真空フランジをメンテナンス性を考慮して配置したい。また、入射軌道と周回軌道の距離を取ってお互いの磁場の影響を小さくしたい)

- 機器の配置に余裕を持たせたときの影響

- 合流部の軌道長が長くなるため、ビーム力学的には不利になる

- 今回の線形解析の目的

- 合流部の軌道長が伸びたときに、エミッタンス悪化に寄与する空間電荷分散関数 $\epsilon_x$ がどれくらいになるかを見積もる



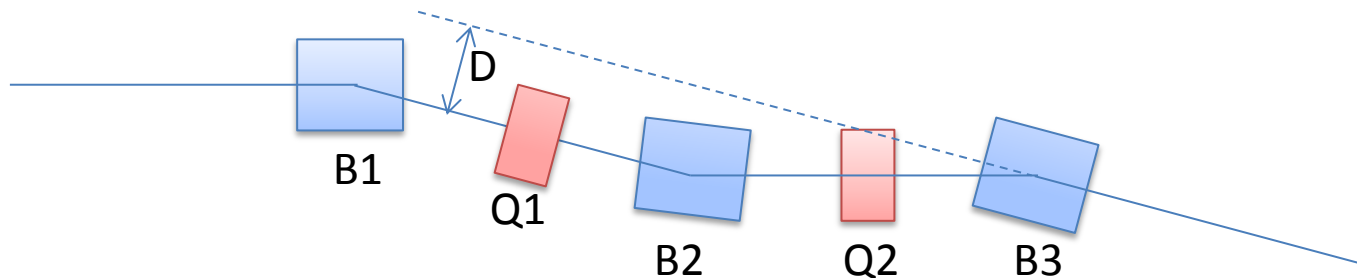
cERL入射器  
角度: 16 deg  
D = 292 mm

この軌道間隔をDとする



# 解析の初期条件

- 合流部の基本形状: 3 dipoles + 2 quadrupoles とする
- 合流角を 15 deg に固定して、軌道間隔を変えた時の分散関数、SC分散を計算する
- 固定するパラメタ
  - 曲率半径: 1 m (B1, B3 の値、B2は同じ磁石長とするので、rhoは変わる)
  - B-Q の端面間の距離: 300 mm
  - 合流bの角度: 15 deg
- 可変パラメタ
  - 軌道間隔: 200 mm, 300 mm, 400 mm, 500 mm
  - これに合わせて、偏向電磁石間の距離が変化する



## 合流部の基本形式

- 3つの矩形型偏向電磁石を配置
- 2つの四極電磁石で分散関数を閉じる(分散の制御を容易にするためにQを使用)

# 合流部でのエミッタンス悪化の原因

- 入射器ではまだエネルギーが低いため(～10 MeV)、空間電荷効果が残っている
- 進行方向の空間電荷効果によって、バンチ前後のスライスでエネルギーが変化
- これが分散関数(エネルギーが設計がずれたときの軌道の変化量)と結合して、合流部出口でスライス毎の位相空間のずれを生じさせる ⇒ 射影エミッタンスの増加

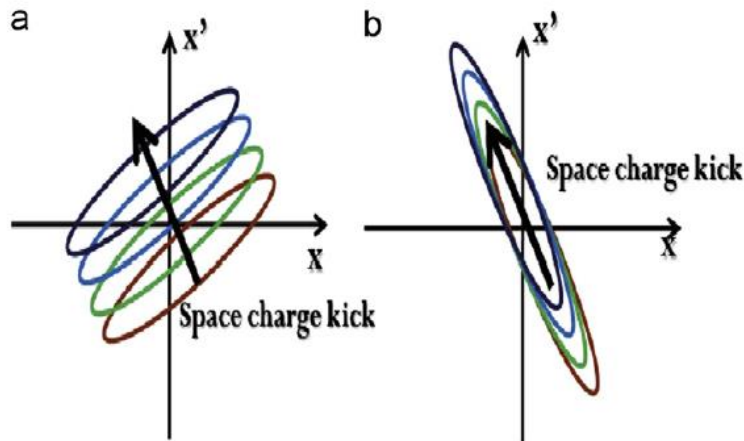


Fig. 4. Growth of projected emittance due to the SC effect in merger section. (a) Maximum case of projected emittance growth. (b) Minimum case of projected emittance growth.

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A684(2012)18–26

空間電荷効果による進行方向電場

これが、スライス毎のエネルギー変化を作る

$$E_z(z) = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 a^2} \left[ -\left| \frac{1-z}{2-L} \right| + \left| \frac{1+z}{2+L} \right| + \sqrt{\left( \frac{z-1}{L-2} \right)^2 + A^2} - \sqrt{\left( \frac{z+1}{L+2} \right)^2 + A^2} \right] \quad (1)$$



合流部出口でbの条件になれば、エミッタンス悪化を最小化できる

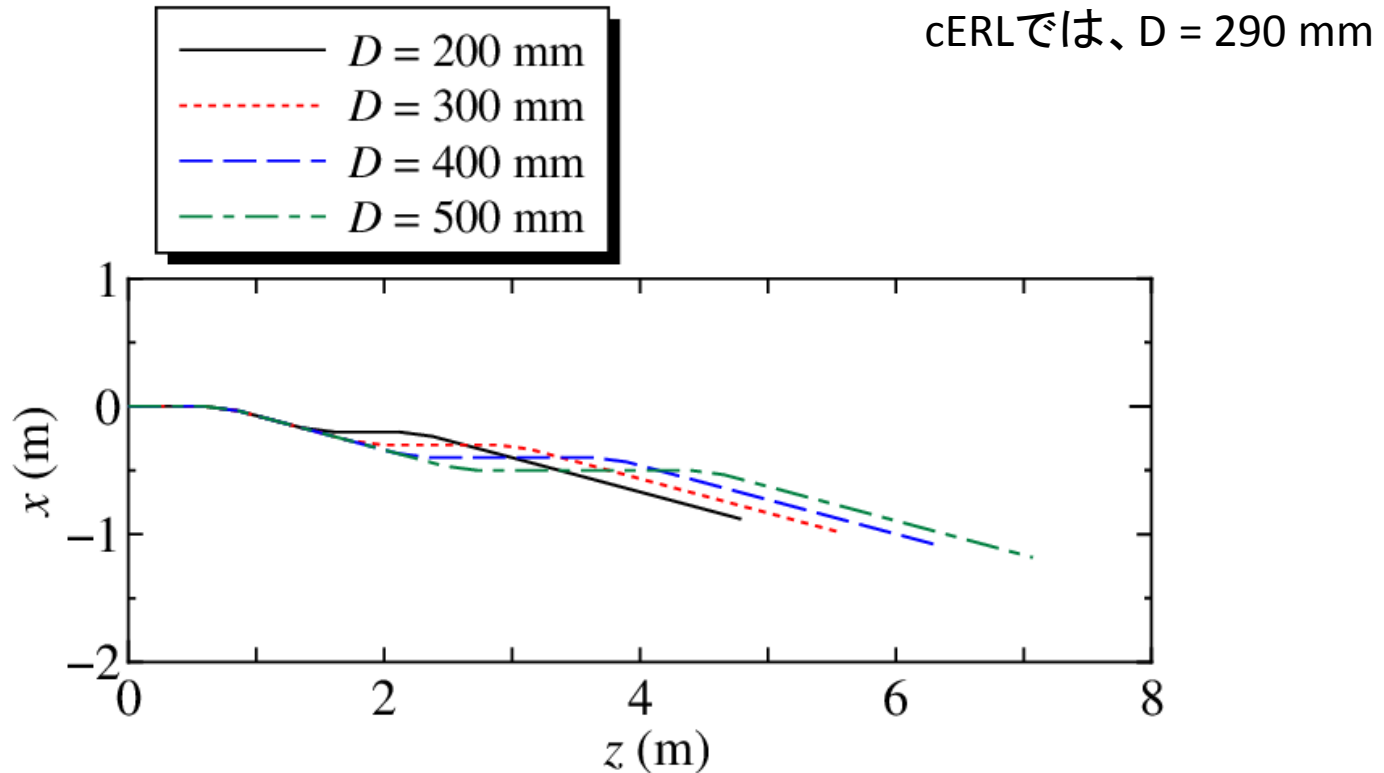
が、そもそもキック量がどれくらいになるか？

線形解析(空間電荷分散関数)の大きさを見積もる

注: 実際にはバンチ長が変わった密度変化が起きるので、線形解析からずれる ⇒ 数値計算が必要

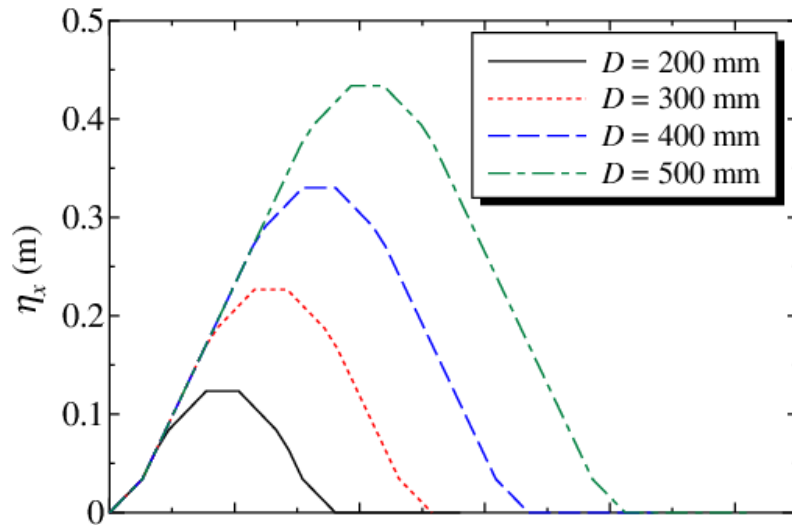
# 解析の流れ

1. excell で機器配置の計算
2. elegant で分散関数を閉じる Q1 (Q2) の K 値を計算
3. octave で空間電荷分散関数の計算

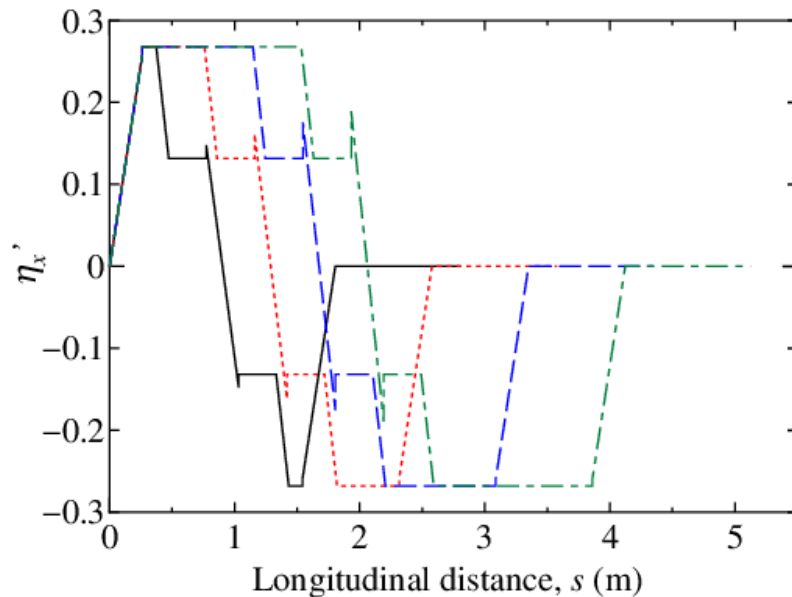


Dを変えたときの合流部軌道の変化

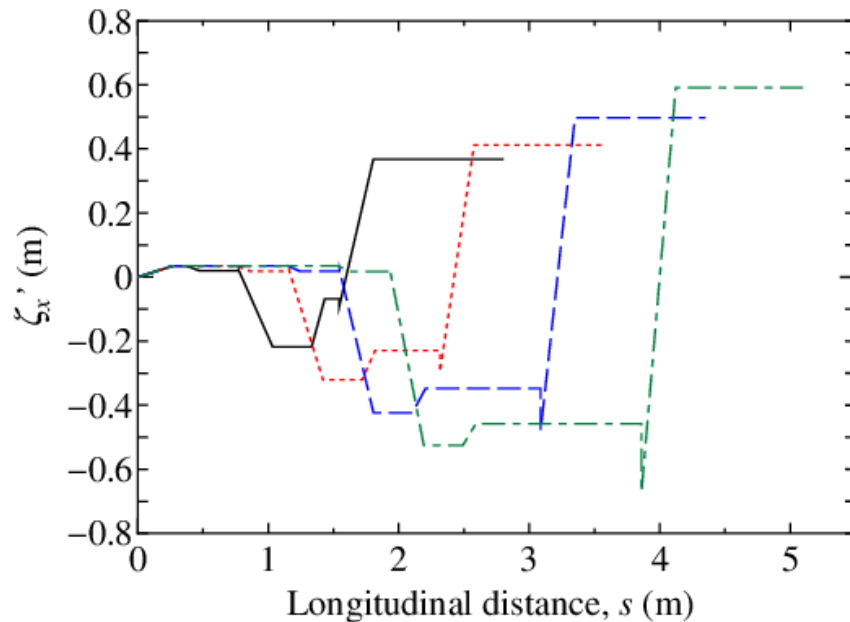
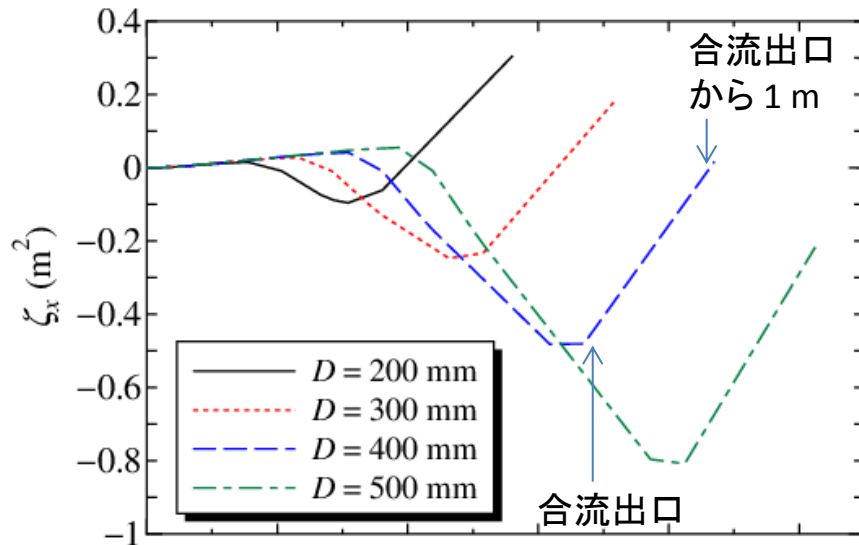
# 解析結果 (分散関数)



- (当然ながら)  $D$ を大きくすると、分散関数の最大値が大きくなる  $\Rightarrow$  エネルギーがずれたとき軌道のずれが大きくなる

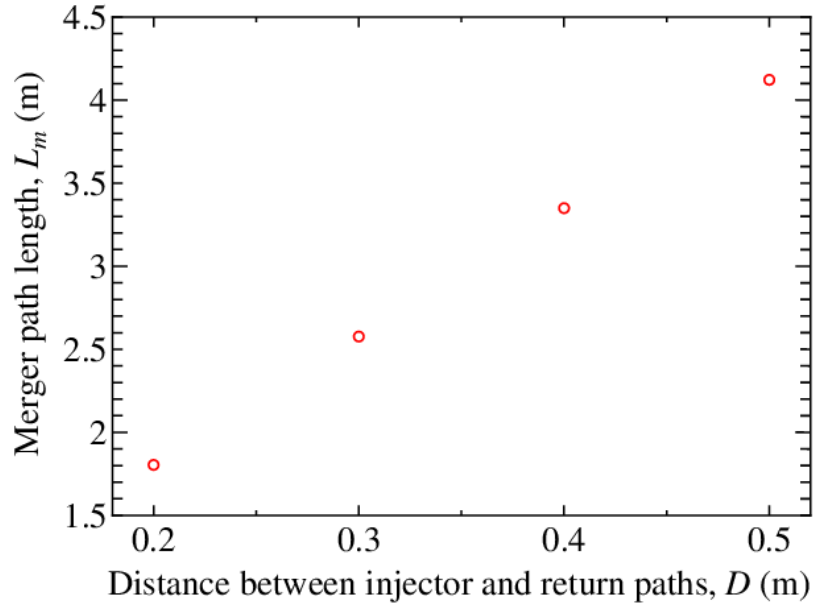


# 解析結果 (空間電荷分散関数)

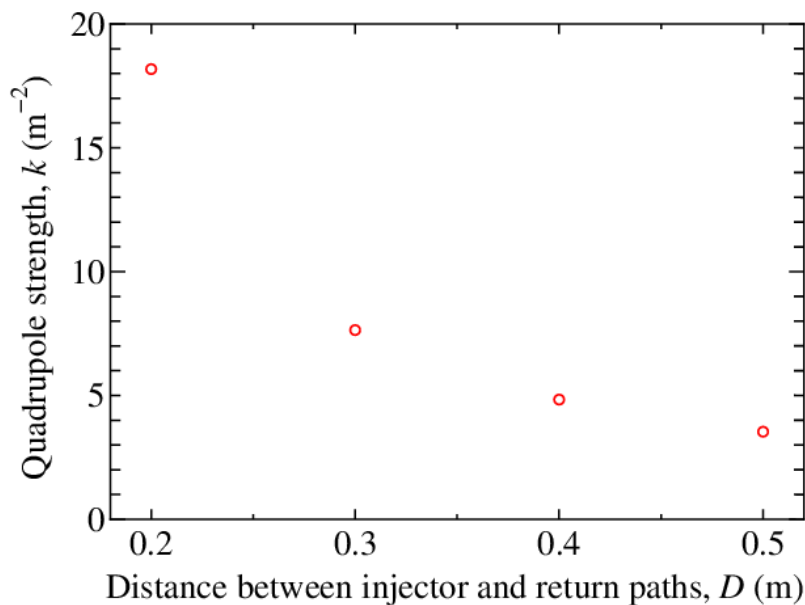


- 空間電荷分散関数(上図)も、Dが大きくなると合流部出口で絶対値が大きくなる
- これは空間電荷効果によるキック量が大きくなることを示している
- ただし、空間電荷分散関数の微分係数(傾き)は、合流部を出たあとは一定になる ⇒ 合流部出口以降は、空間電荷分散関数はリニアに増加
- 位相空間で見たとき、キックとして働くのは  $\zeta_x$  と  $\zeta_x'$  の二乗和の平方根となるので、 $\zeta_x$  が小さくなる位置に主空洞入口を配置するのが良い(加速されるとそれ以降のエミッタンス悪化が抑えられるため)
- D = 400 mm の場合には、合流部出口から 1 m 程度の位置で空間電荷分散関数がゼロ付近になる
- 合流部出口から、主空洞入口までを 1 m 程度と考えると D = 400 mm は悪くなさそう
- ただし、主空洞までの距離もその区間に配置する機器によって変化するので、それに合わせて最終的には最適化する必要あり

# 解析結果 (軌道長、QのK値)

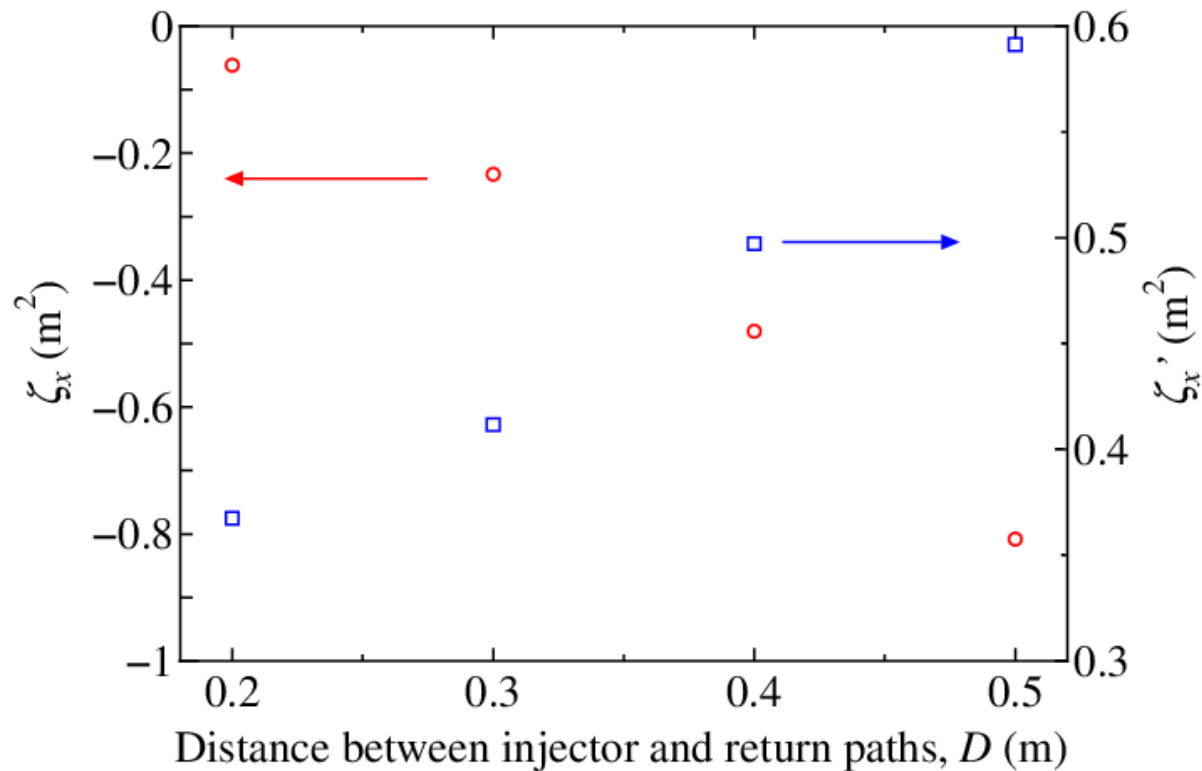


- 上図: 合流部の軌道長(入口から出口まで電子が走る軌道の長さ)
- $D$ を伸ばすとリニアに上昇



- 下図: 分散を閉じる条件のK値
- $D$ を大きくすると減少
- ある程度 $D$ が大きくなると、変化量は小さくなる

# 解析結果（出口における空間分散関数）



- $\zeta_x$ は $D$ を大きくすると減少していく
- ただし、 $\zeta_{x'} > 0$ なので、合流部出口から距離が離れると、 $\zeta_x$ が増加していく
- $\zeta_{x'}$ は $D$ とともに上昇。あまり大きくなりすぎると良くない。⇒ なるべく $D$ を小さくして合流部を小さく設計したい理由。
- 機器配置を考慮して、 $D = 400$  mm のときの合流部配置を用いて、次のステップの最適化計算を行う

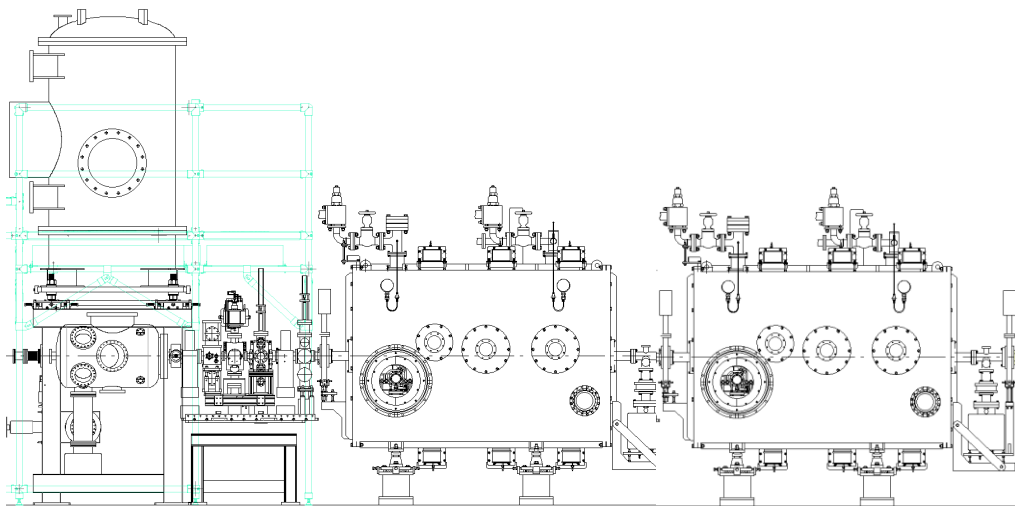
# 合流部まとめ

- 合流角15 deg に固定して、入射器と周回軌道間隔Dを変えた時の分散関数、空間電荷分散関数の計算を行った
- Dを上げると、合流部出口で $\zeta_{x'}$ が上昇することを確認。(  $\zeta_{x'}$ をなるべくゼロにしたいが、zig-zag mergerにしないとこの条件は満たせない)
- ただし、Dを大きくすると合流部出口の $\zeta_x$ は負側に進むので、合流部出口からある程度離れた位置になる主空洞入口では、 $\zeta_x$ をほぼゼロにできそう
- 合流部出口から1 m の位置に主空洞入口を置くことを想定すると、 $D = 400$  mm は悪くなさそう
- 機器配置の余裕を見て、 $D = 400$  mm の配置に対して入射器全体の最適化計算を次のステップで行う

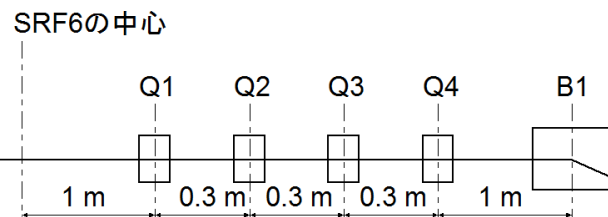


# 合流部を加えた条件での最適化

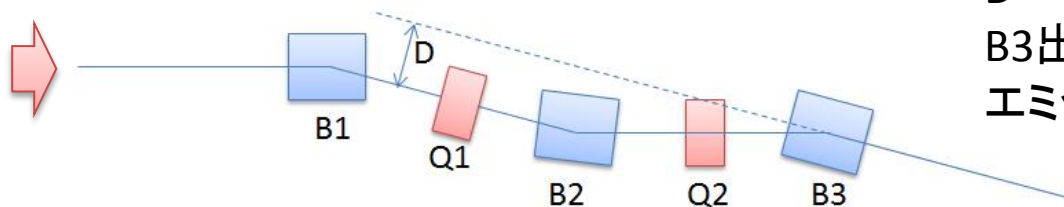
- 2 cell × 6 空洞の下流に、四極電磁石4台と合流部を配置
- この配置で、合流部出口から 0.3 m 地点での最適化を行う
- 最小化するパラメタ: 規格化エミッタンス(水平・垂直方向)、バンチ長



注: スケールはあっていません・・・



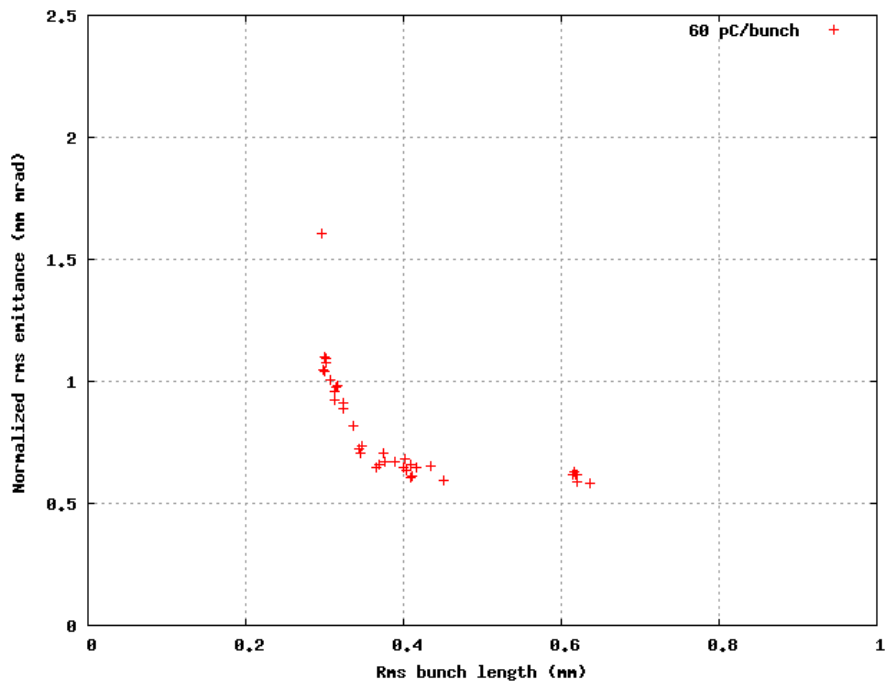
先ほどの自由変数に加えて、  
この4台のK値も自由パラメタとして追加



D = 400 mmの合流部  
B3出口から 0.3 m の位置で  
エミッタンスとバンチ長を最小化

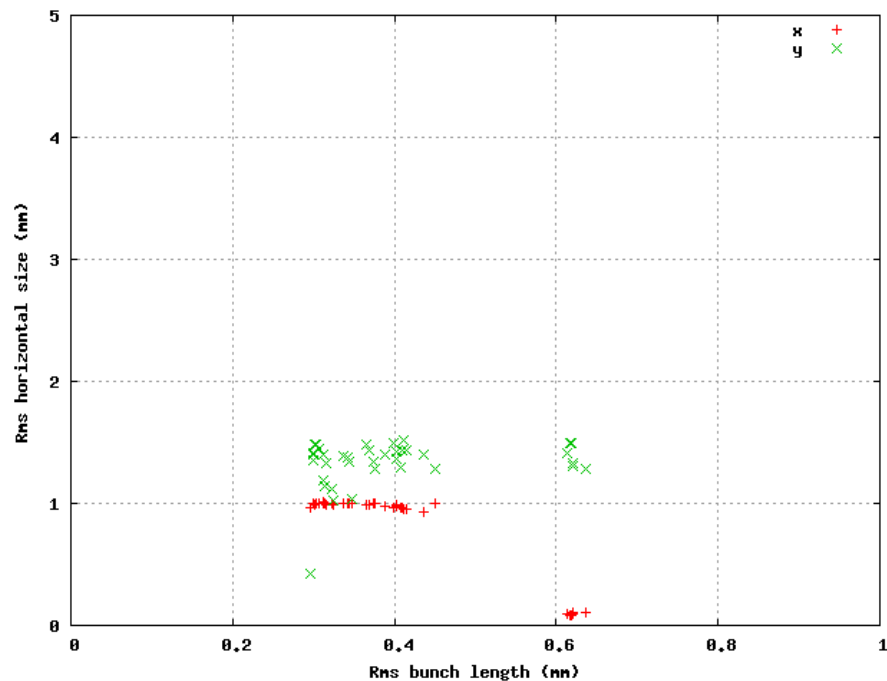
# 100 k 粒子の結果 (合流部出口)

## 規格化rmsエミッタンス



バンチ長 2 ps で 0.6 mm mrad

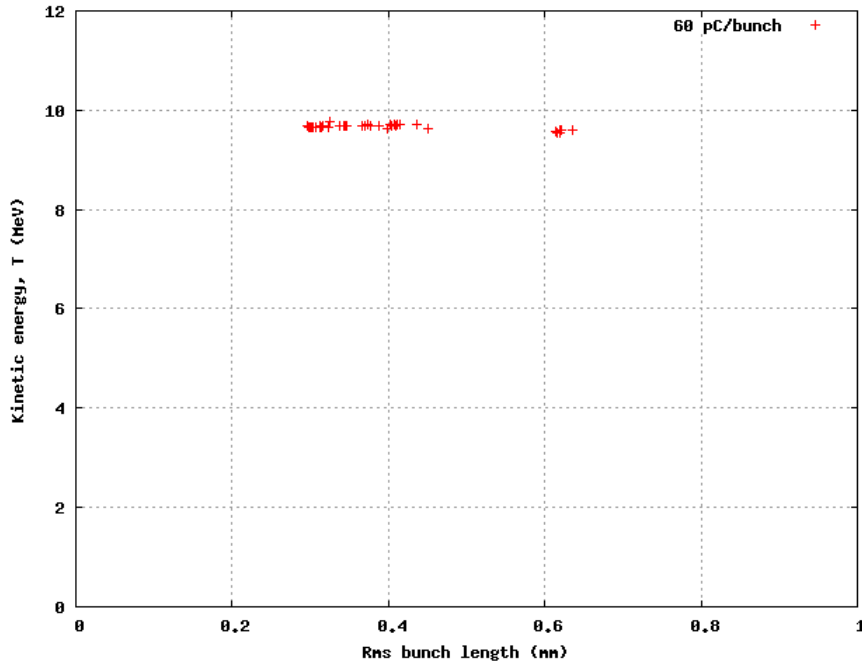
## Rms ビームサイズ



バンチ長 2 ps で 1.5 mm 以下

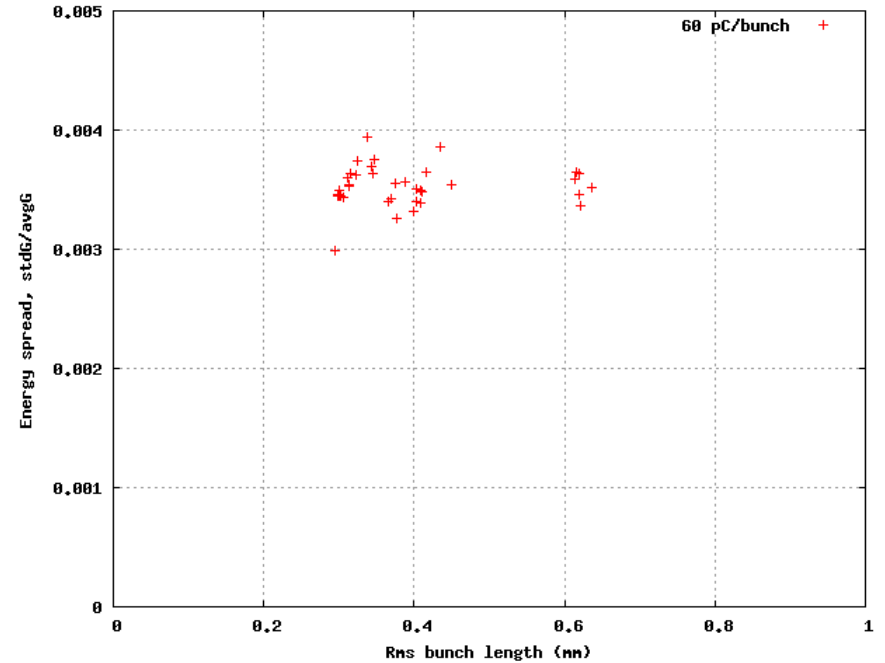
# 100 k 粒子の結果 (合流部出口)

運動エネルギー



運動エネルギー 10 MeV弱

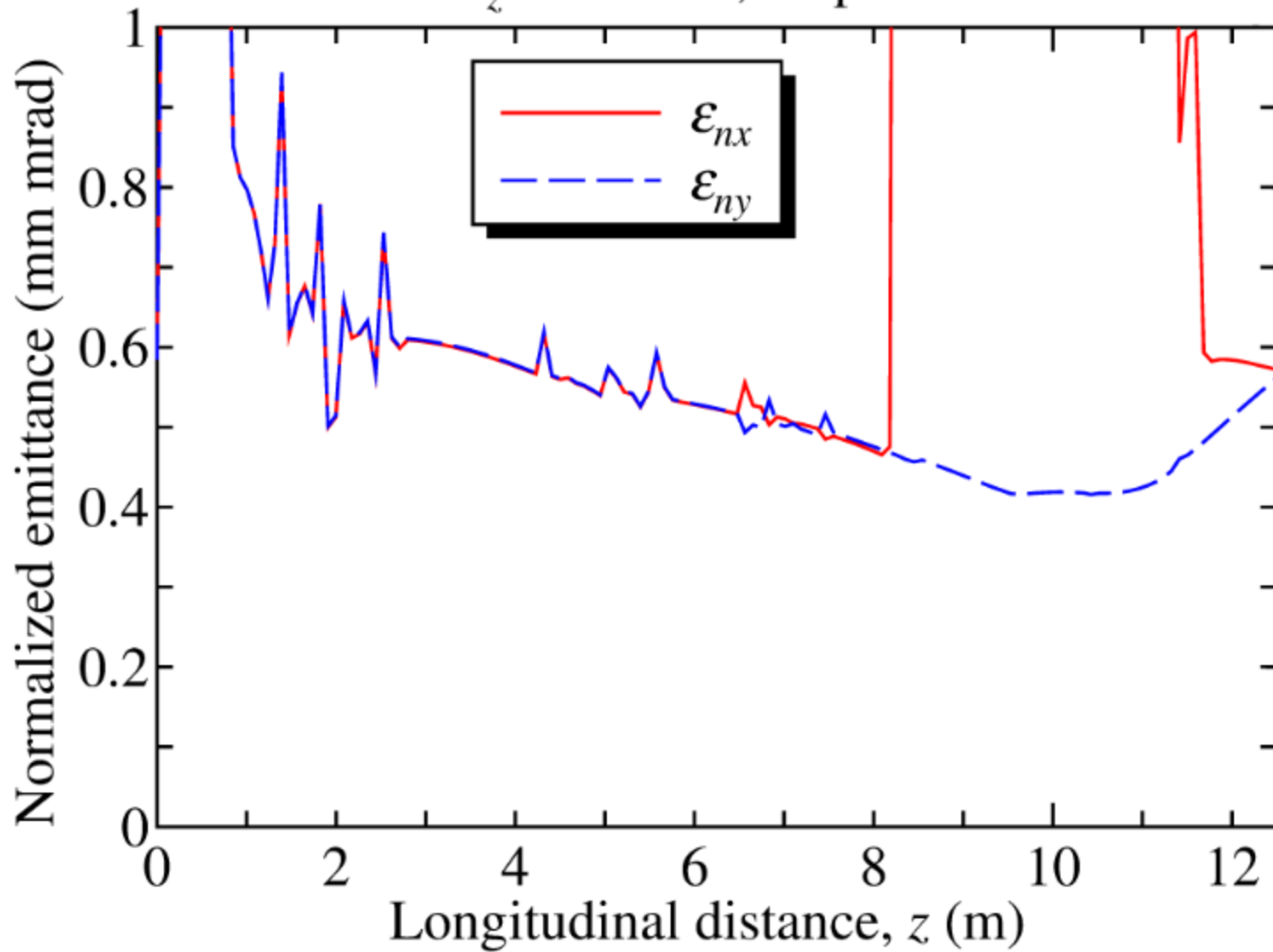
Rmsエネルギー拡がり



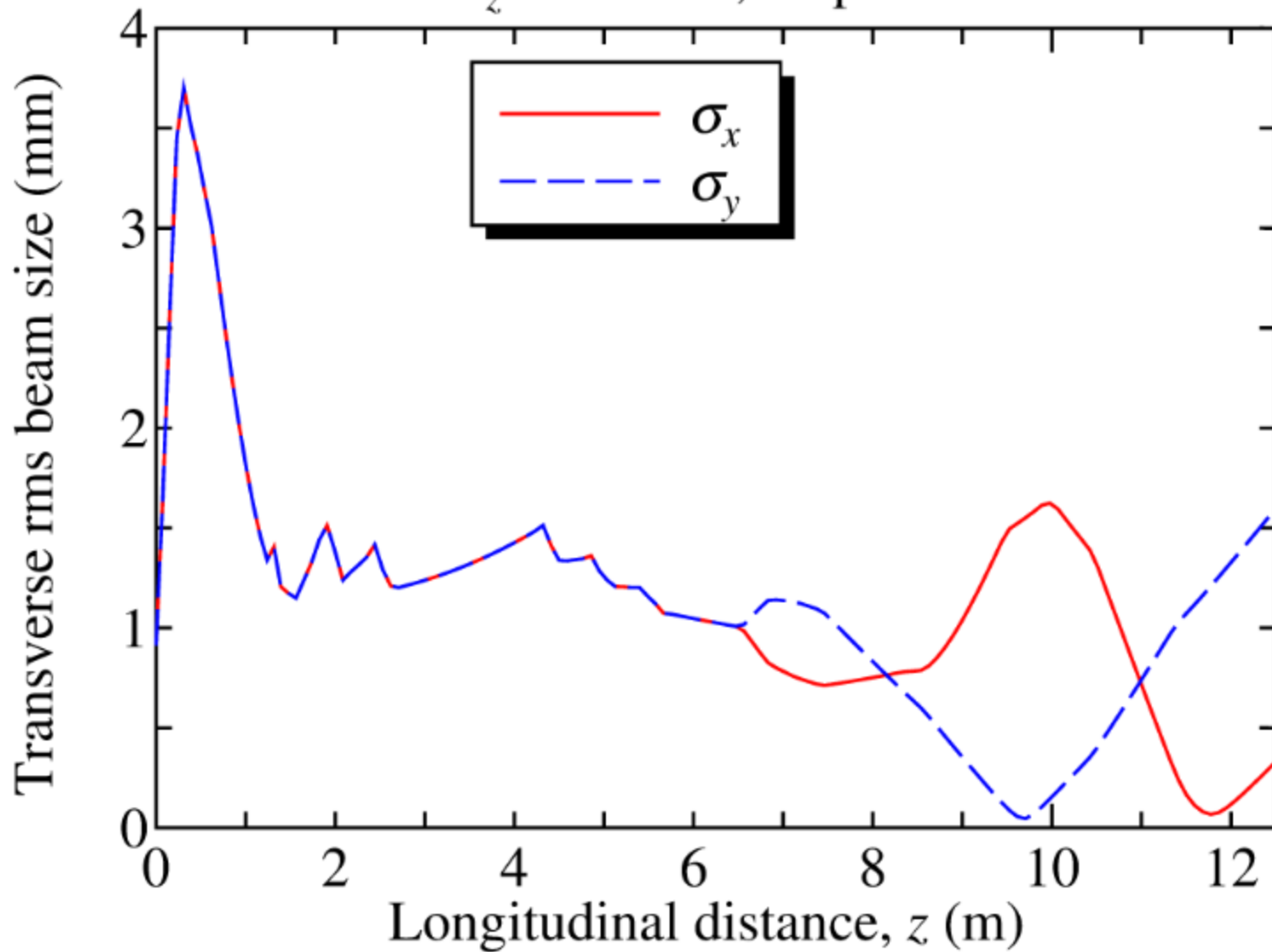
バンチ長 2 ps で 0.35 % 程度

バンチ長 2 ps の条件を基に時間発展を計算

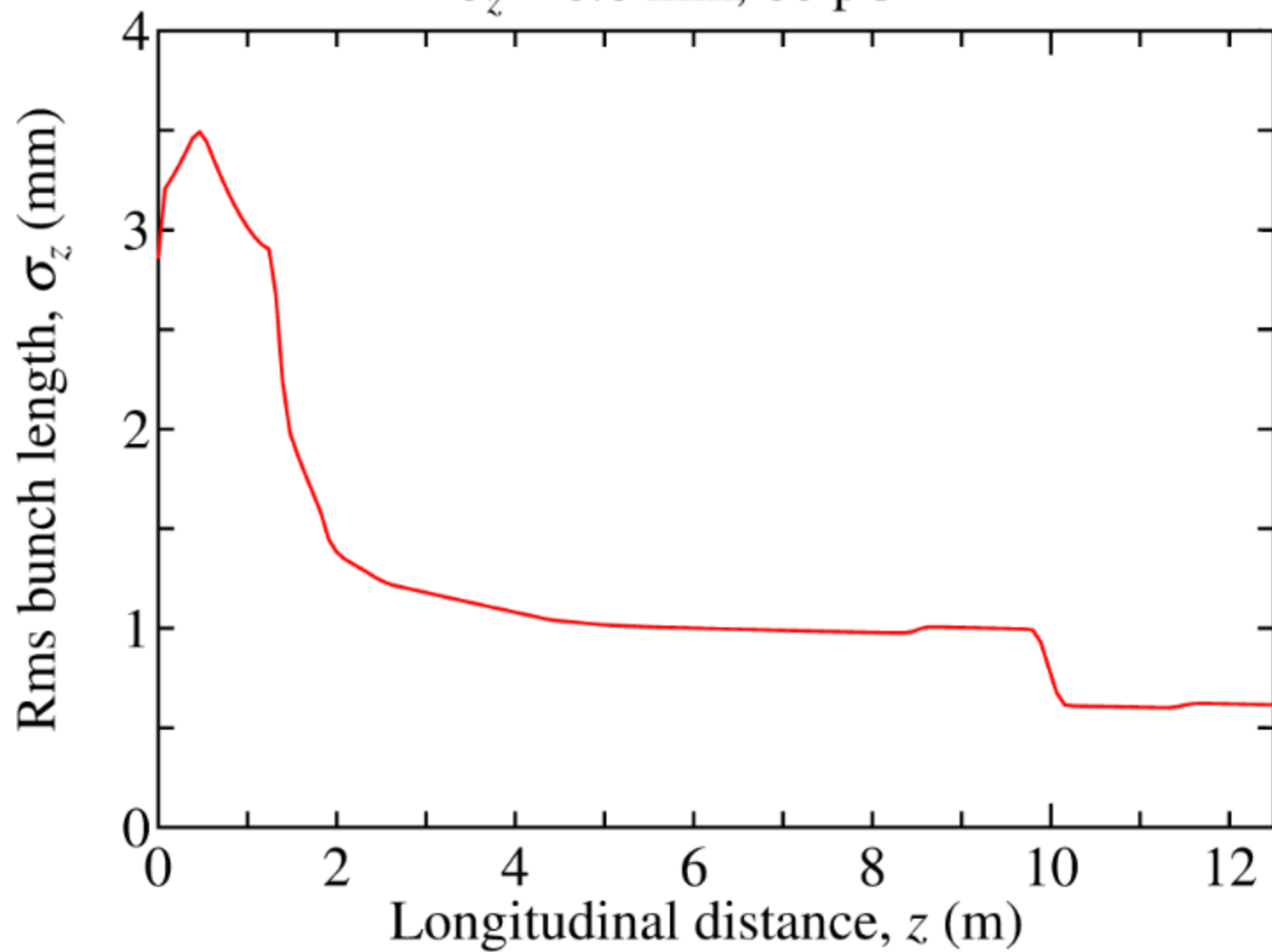
$\sigma_z = 0.6 \text{ mm}, 60 \text{ pC}$



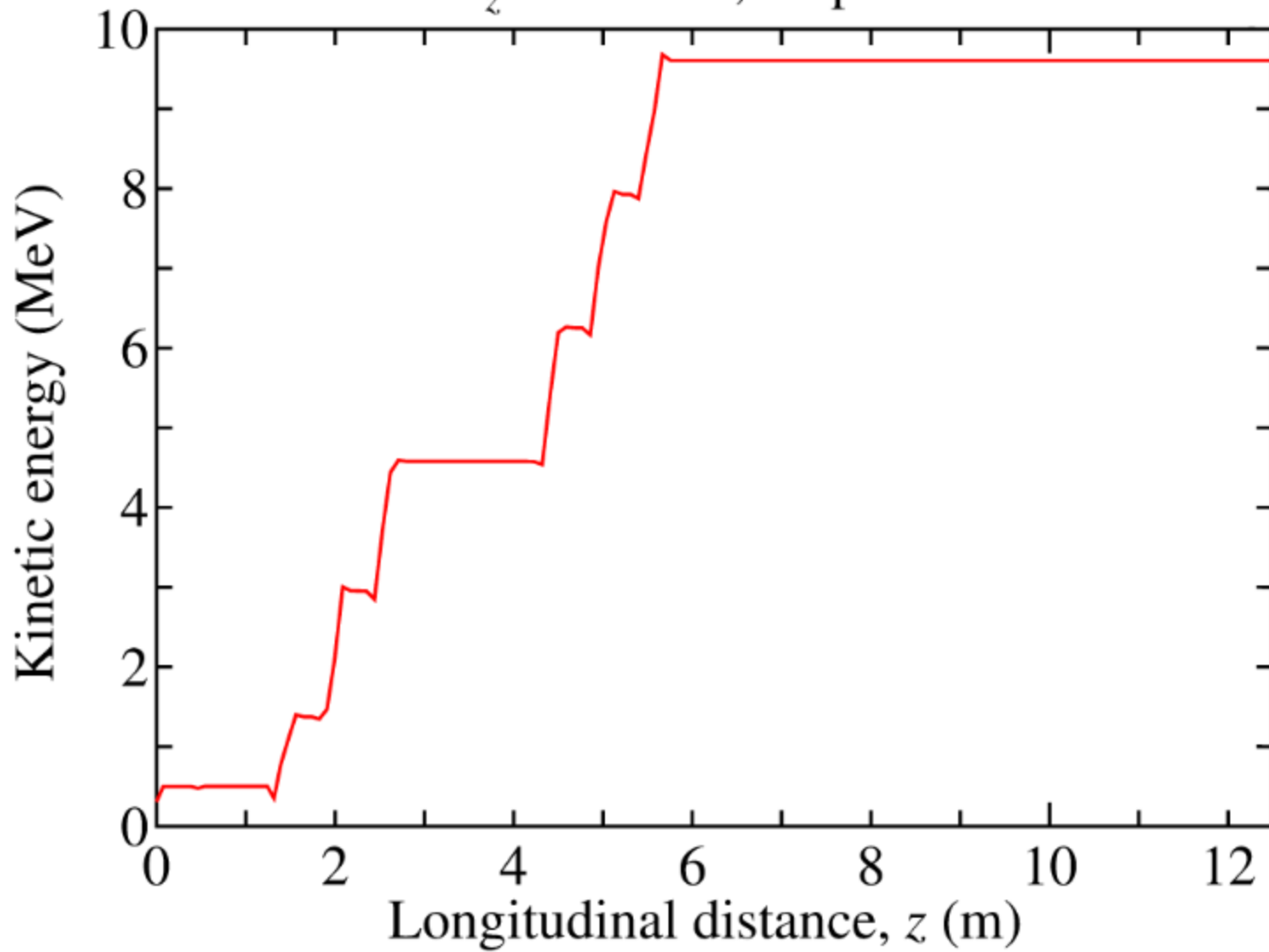
$\sigma_z = 0.6 \text{ mm}, 60 \text{ pC}$



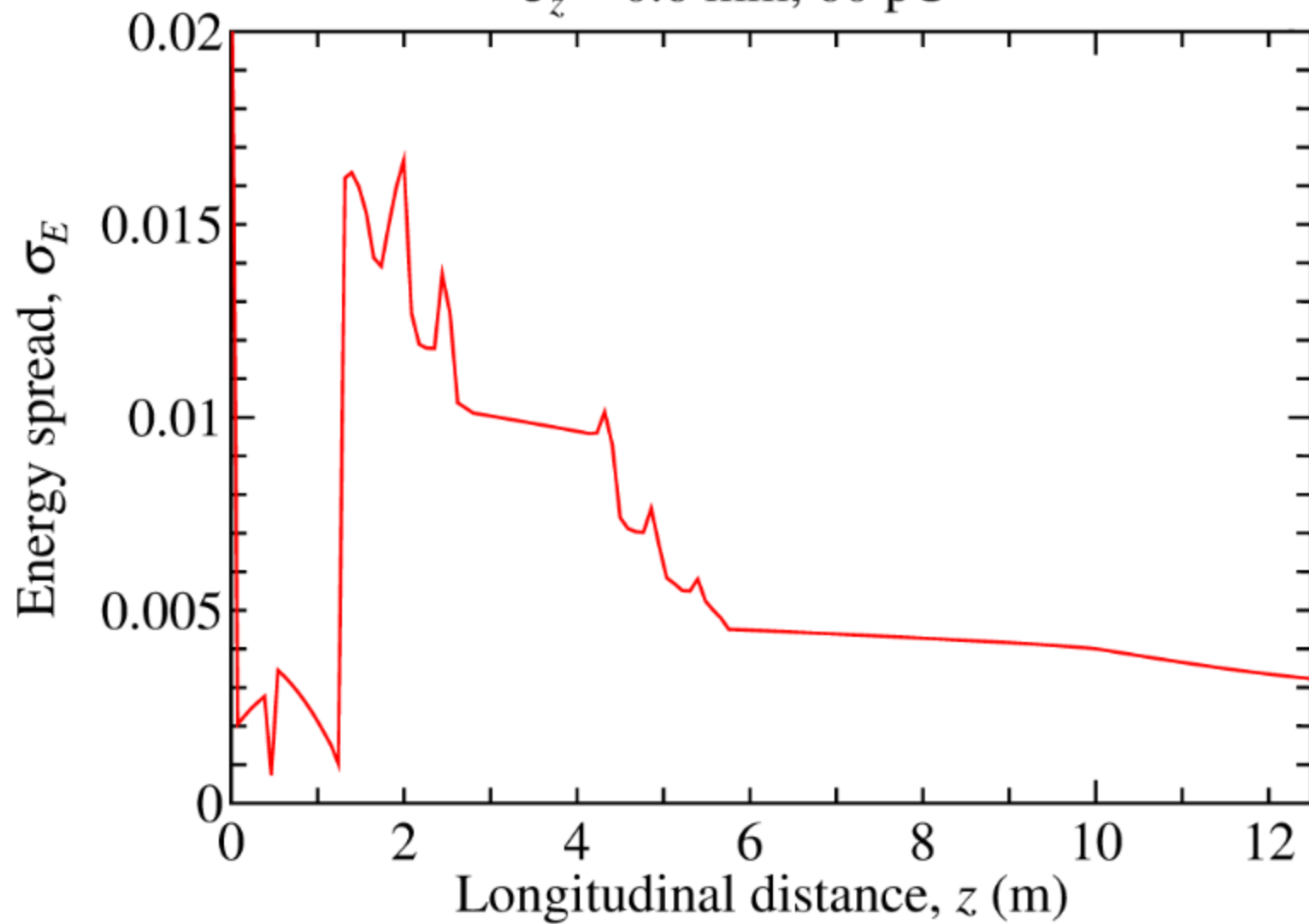
$\sigma_z = 0.6 \text{ mm}, 60 \text{ pC}$



$\sigma_z = 0.6 \text{ mm}, 60 \text{ pC}$

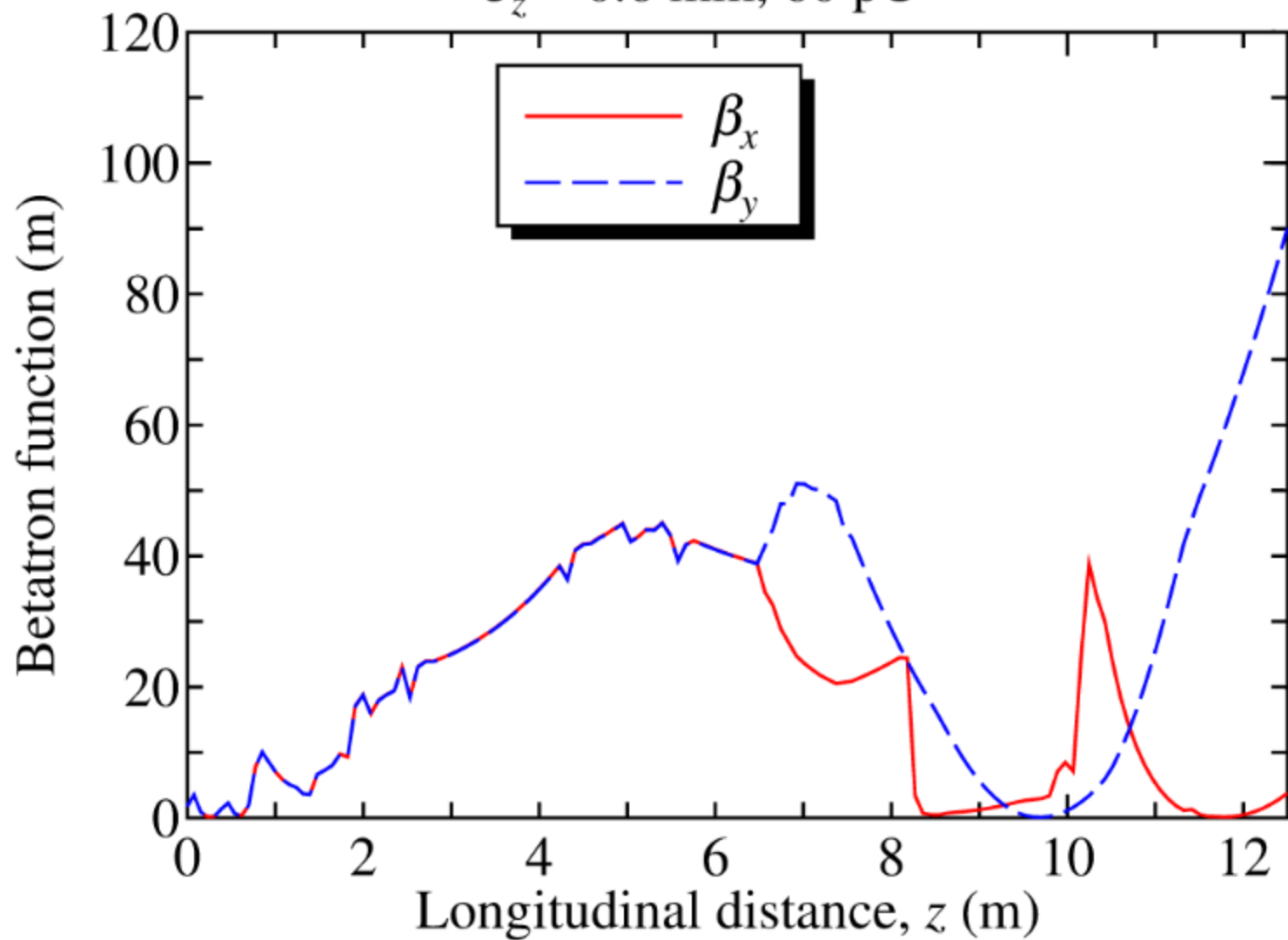


$\sigma_z = 0.6 \text{ mm}, 60 \text{ pC}$





$\sigma_z = 0.6 \text{ mm}, 60 \text{ pC}$



# まとめ

- EUV-FEL用入射器の最適化計算を実施した
- バンチ電荷は60 pC
- 入射器空洞出口までを最適化した結果、2 ps バンチ長で、0.3 mm mrad
- 合流部の配置を検討した。
  
- 軌道間距離  $D = 400$  mm の合流部を付け加えた入射器全体の最適化を実施した。
- 2 ps で 0.6 mm mradの規格化rmsエミッタンスとなった。
- とりあえず、ターゲットとなるエミッタンスを下回ることを確認できた。
  
- これから、より良い輸送条件の探索、誤差解析の実施