

# 合流部を含んだビームシミュレーション 5k粒子での最適化とエンベロップ

2009年3月11日(水)14時～  
第325回cERL入射器打ち合わせ  
KEK 3号館7F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

# 合流部出口までの最適化計算

- 目的: cERL入射器の合流部出口でエミッタンスが最小かつバンチ長が小さくなるような運転パラメタを見つけること
- 合流部: 分散関数がノンゼロであり、縦方向空間電荷効果によるバンチ内の粒子のエネルギー変化によって、射影エミッタンスの増大が発生する
- 合流部手前の4極電磁石を用いて、縦方向空間電荷効果によるスライスエミッタンスのずれる方向と、(x,px)位相空間での分布の長軸が一致するようにする必要がある
- 今回の計算
  - 電子銃から合流部出口から1mまでを計算
  - なるべく短い時間でパラメタを見つけるために、5k粒子で粗くパラメタを探索する(その後に、50k, 100kと粒子数を増やして、エミッタンスの粒子数依存性を小さくする)
  - 合流部出口から1mの地点で物理量を計算する
  - 制限: 水平・垂直方向のビームサイズが1.5mm以下になるように制限をかける(制限をかけないと、垂直方向ベータatron関数が1000m以上になるため)
- 合流部: 2通りを計算
  - セクター型偏向電磁石を使用した合流部
  - 矩形型偏向電磁石を使用した合流部
- 計算の条件
  - 5 k particles, -80 pC
  - 合流部出口から1mの地点で、 $en_x$ と $en_y$ の大きい方と、バンチ長が最小になるようにパラメタを最適化する
- ビームエンベロープの計算
  - 5k粒子で最適化した運転パラメタを用いて、5k 粒子、200 k粒子の両方を計算

# 合流部の形式

- 2つの合流部の形式について計算
- 2つの形式ではの入射角:ともに16度

## (1) セクター型合流部

セクター型偏向電磁石3台を使用

角度:-19度、22度、-19度

2番目の偏向電磁石にエッジ角を与えて、分散関数を補正

利点:Qがいらない、スペースの確保がまだ楽

欠点:オプティクス調整の自由度がない

## (2) 矩形型合流部

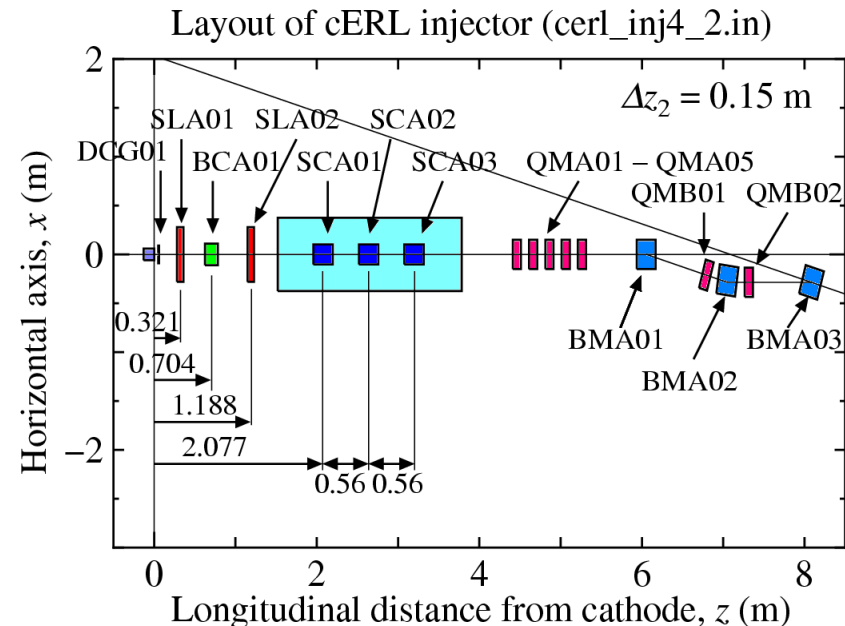
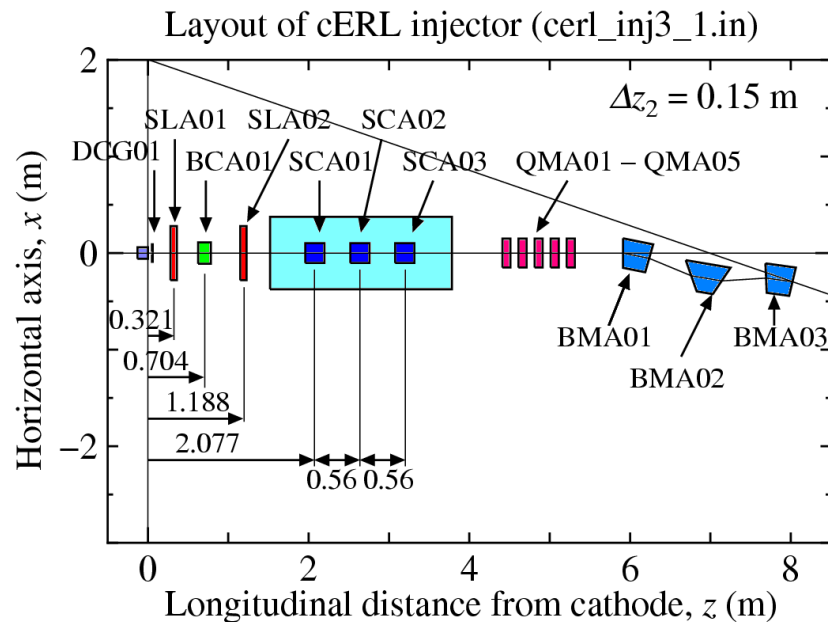
矩形型偏向電磁石3台を使用

角度:-16度、16度、-16度

偏向電磁石の間に四極電磁石を設置して、分散関数を補正

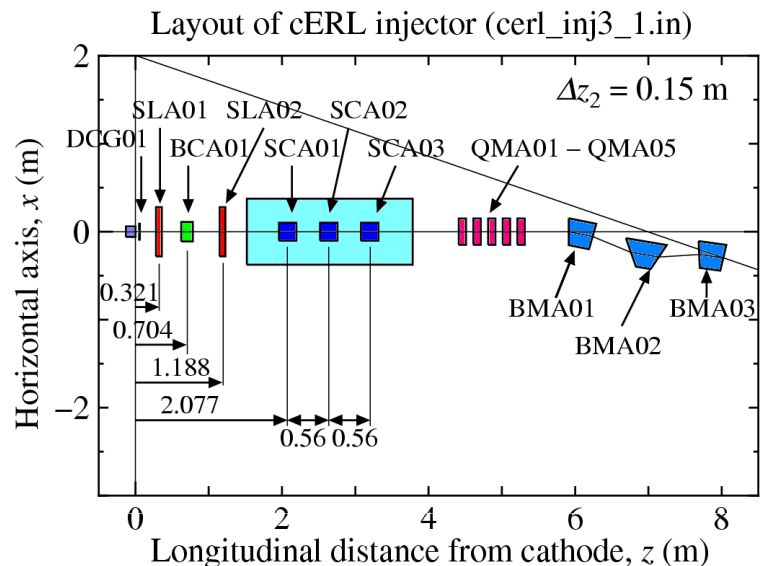
利点:Qによるオプティクスの自由度がある

欠点:Qが周回部軌道に干渉しやすい



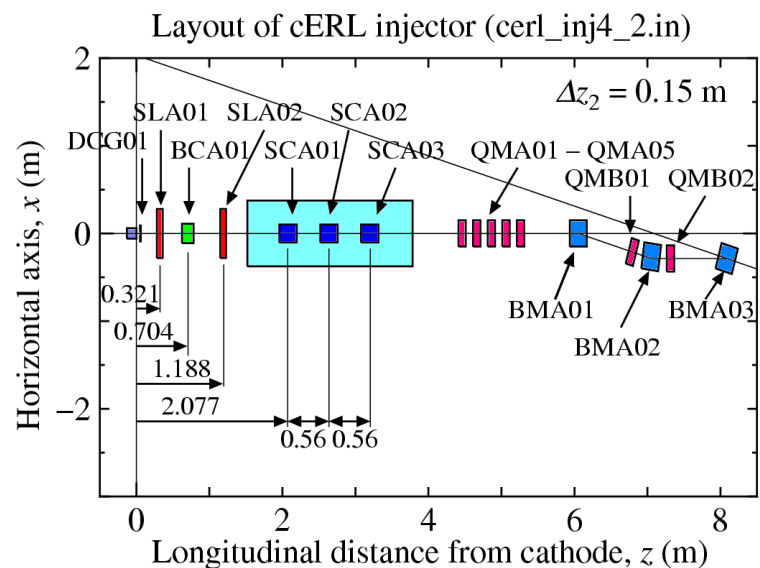
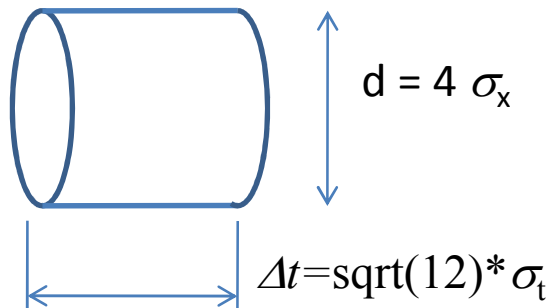
# パラメタ探索での自由度

- 初期rmsビームサイズ
- 初期レーザーパルス幅
- ソレノイド1(SLA01)の強さ
- ソレノイド2(SLA02)の強さ
- バンチャー空洞(BCA01)の加速勾配
- 超伝導空洞1(SCA01)の加速勾配と位相
- 超伝導空洞2(SCA02)の加速勾配と位相
- 超伝導空洞3(SCA03)の加速勾配と位相
- SLA01, SLA02, BCA01の位置
- 四極電磁石5台(QMA01 – QMA05)



- 矩形型合流部の場合のみ
- 四極電磁石2台(QMB01-QMB02)の強さ

カソード表面での初期粒子分布: ビア缶

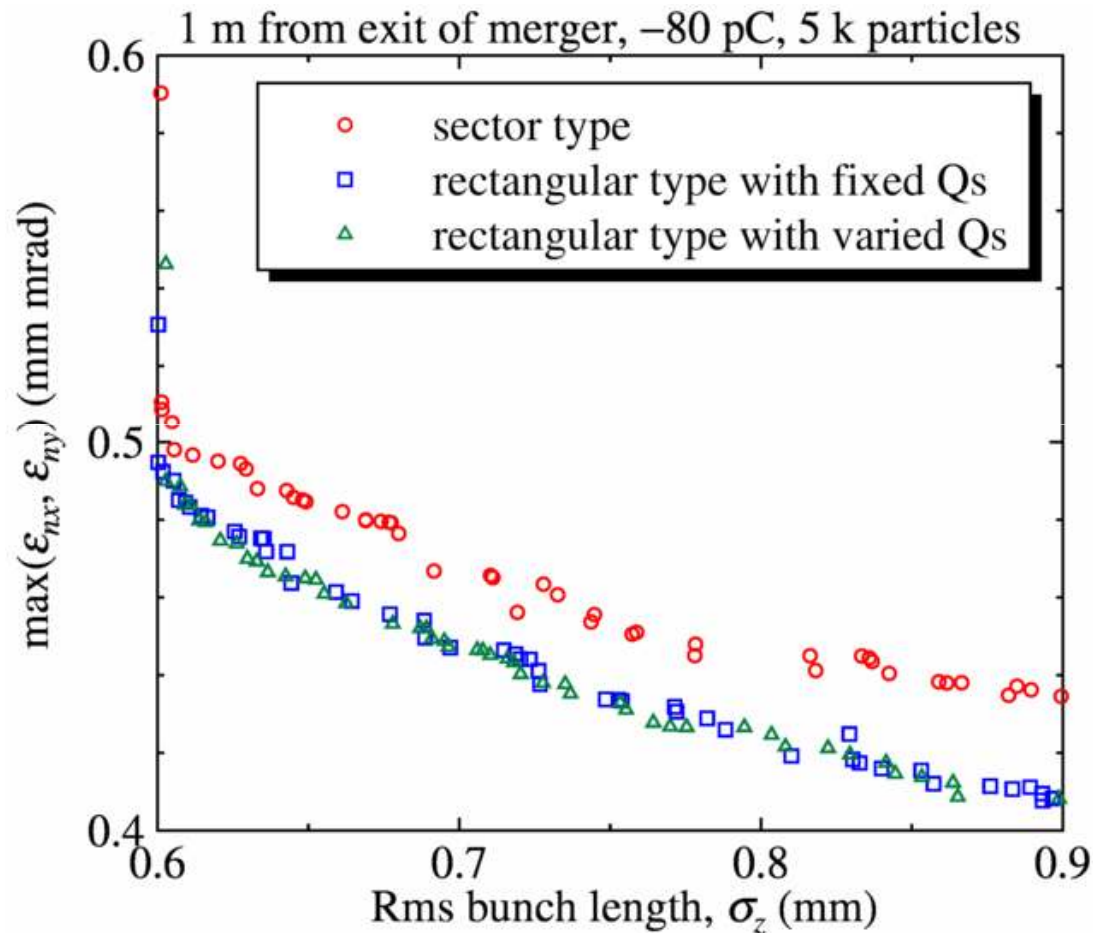


# 5k粒子でのパラメタ探索の結果

合流部出口から1mの位置で物理量を計算  
全てのグラフで横軸にバンチ長をとる

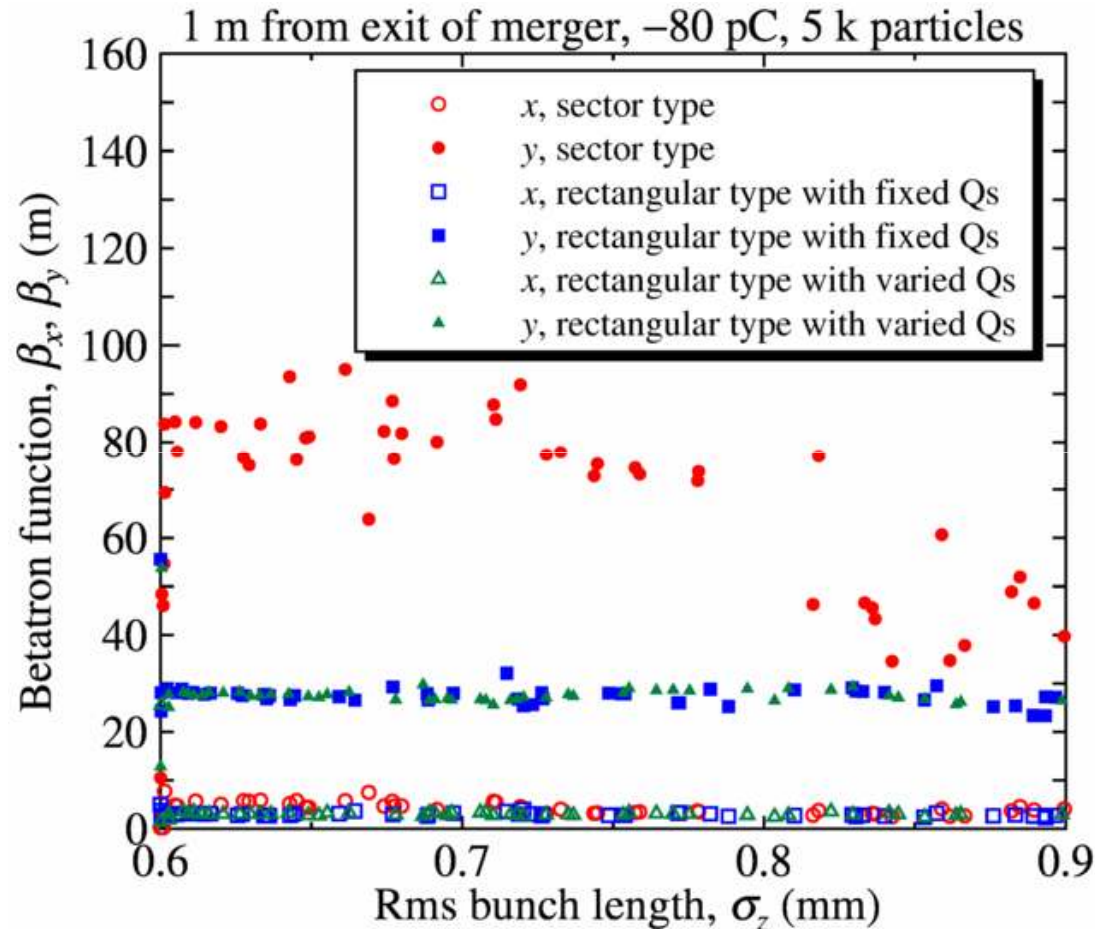
5k粒子での計算なので、エミッタンス等のパラメタは精度が高い  
訳ではないが、傾向はつかめる  
(このあとに、5k計算での結果を初期値にして、粒子数を増やしてさらにパラメタ探索を行う)

# バンチ長 vs. エミッタンス



- 3つの場合について計算
  - セクター型
  - 矩形型(合流部内の2台の四極電磁石は線形なパラメータで固定)
  - 矩形型(合流部内の2台の四極電磁石を可変にする)
- 矩形型の方がエミッタンスがわずかに下がった
- セクター型での合流部の曲げ角が19度と22度なのに対して、矩形型では16度で浅いためか？
- 矩形型で四極電磁石を可変にした影響はほぼなし(コーネルのビームラインでは可変にした方がより小さいエミッタンスが得られたが、今回はそうはならなかった。現在調査中)

# バンチ長 vs. ベータトロン関数

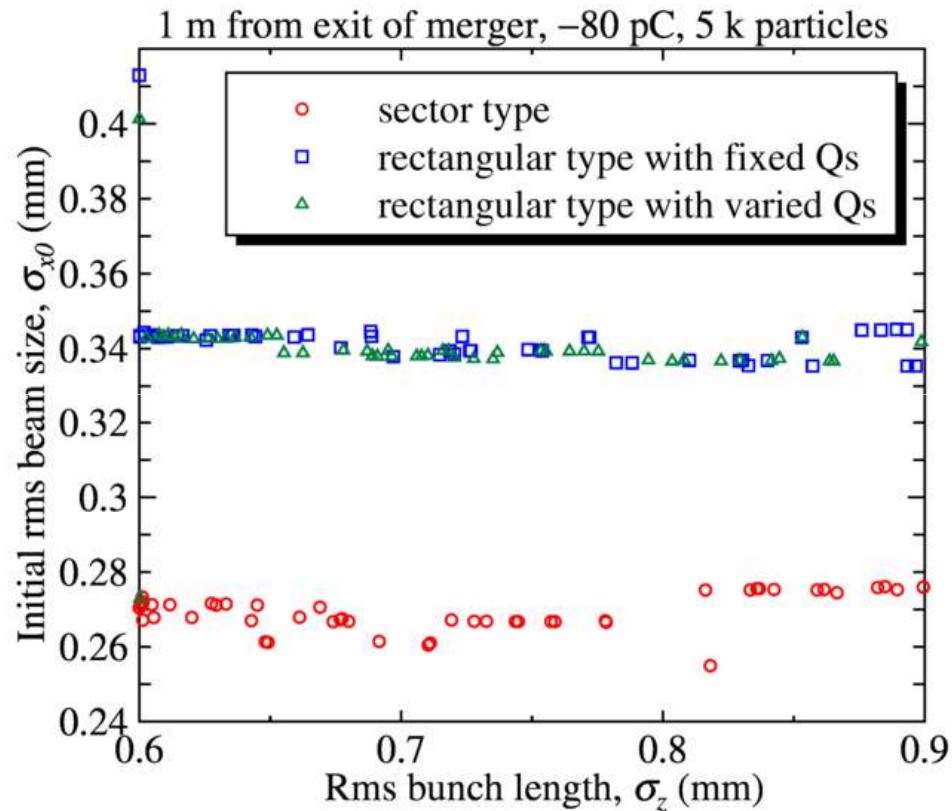


- 何の制限なしでパラメタ探索を行うと、合流部出口での垂直ベータトロン関数が1000mを超えてしまった
- 今回の計算では、rmsビームサイズが1.5mm以下になるように制限して、ベータトロン関数が増大するのを抑制
- 水平方向
  - セクター型、矩形型ともに5m以下になった
- 垂直方向
  - セクター型:  $\beta_y = 40 - 100$  m
  - 矩形型:  $\beta_y = 20 - 30$  m

ベータトロン関数  $\beta_{cs,x} = \frac{\bar{\beta}_x \sigma_x^2}{\bar{\gamma} \epsilon_{nx}}$

$$\bar{\beta}_x = \frac{\bar{v}_x}{c} \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

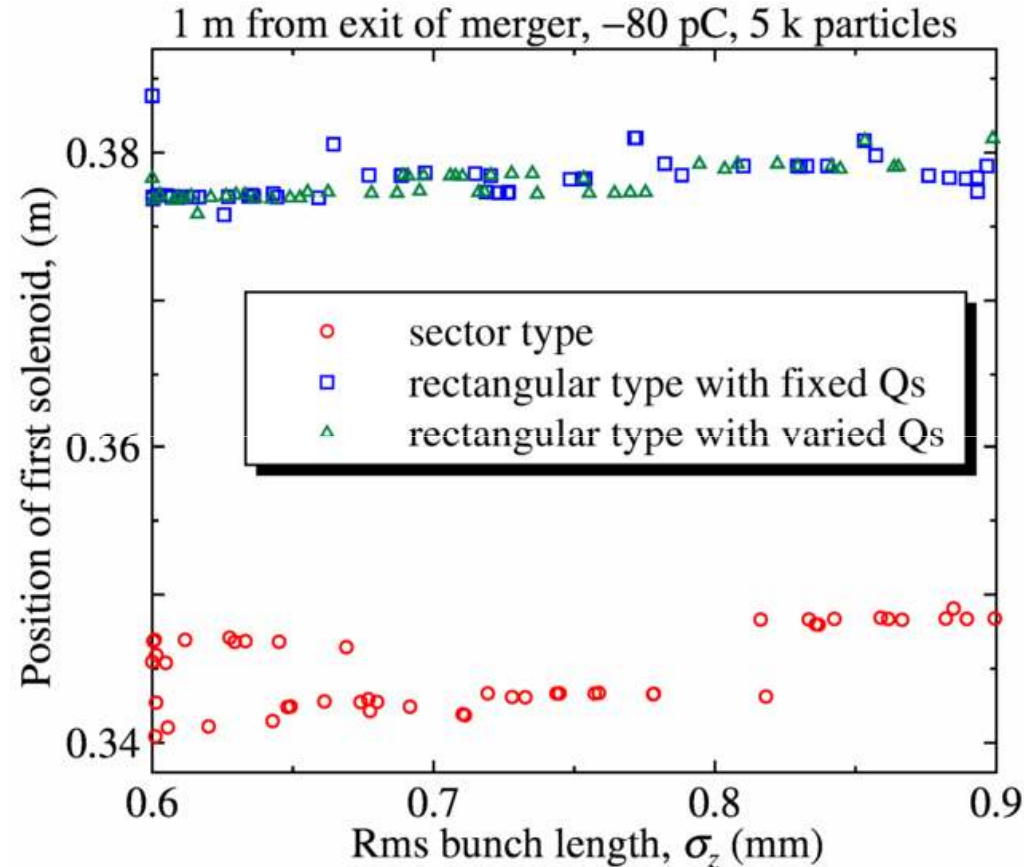
# バンチ長 vs. 初期rmsビームサイズ



- カソード表面での初期rmsビームサイズ
- セクター型 : 0.27 mm
- 矩形型 : 0.34 mm
- 入射器全体で考えると、以前に検討していた超伝導空洞出口で最適化した結果の0.5mmよりも、小さくした方が良さそう

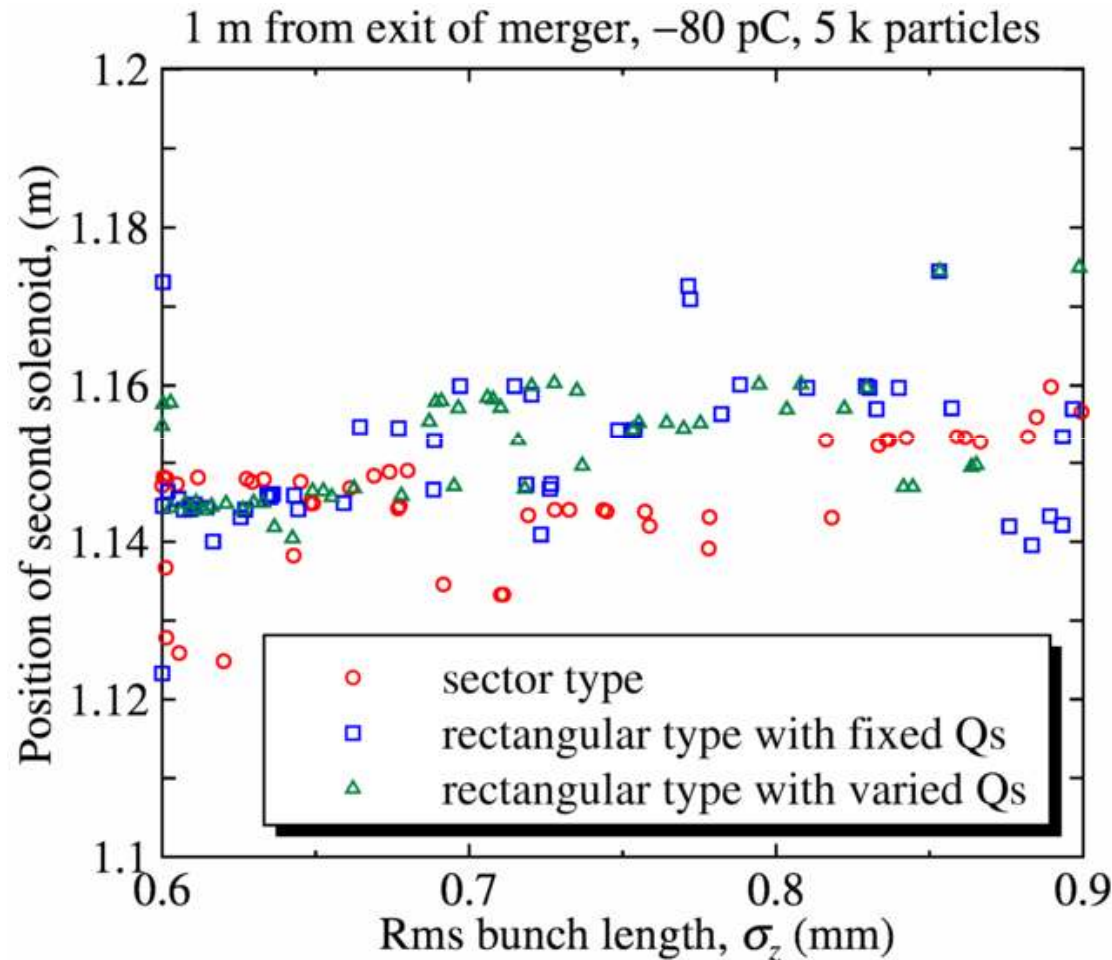


# バンチ長 vs. ソレノイド1の位置



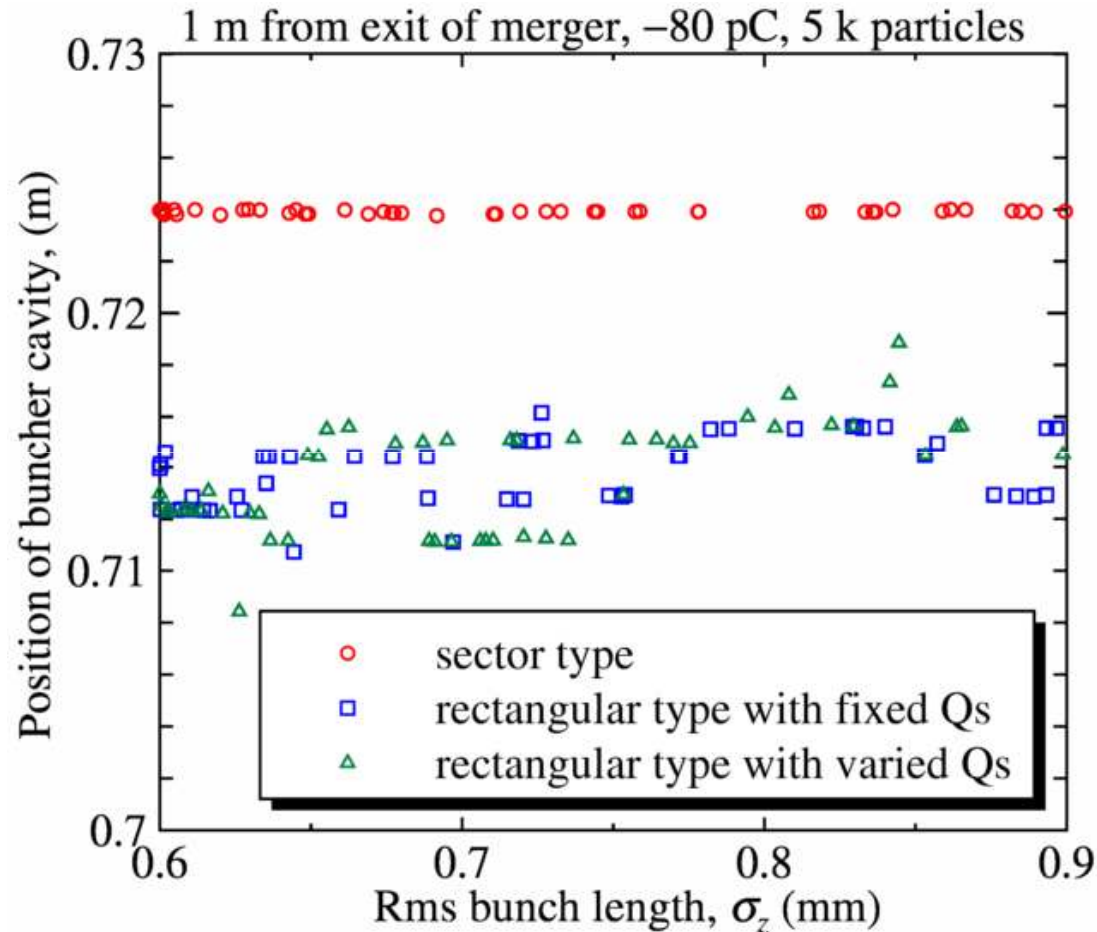
- カソード表面からソレノイド1の中心の位置
- セクター型: 0.34 m から 0.35 m
- 矩形型: 0.38 m
- 入射器全体で最適化すると、ソレノイド1の位置は、以前の値(0.32 m)より後ろに持っていた方がよさそう
- cERL入射器の設計では、とりあえず中間をとって0.36mでデザインし、合流部の型式を決めた後に、最終的に決定する

# バンチ長 vs. ソレノイド2の位置



- カソード表面からソレノイド2の中心の位置
- セクター型: 1.12 m から 1.16 m
- 矩形型: 1.12 m から 1.17m
- 入射器全体で最適化するとソレノイド2の位置は、以前の値(1.18 m)より少し手前に持ってこれそう(モニター用スペース確保の上で有利になる)
- cERL入射器の設計では、とりあえず中間をとって1.15 mでデザインし、合流部の型式を決めた後に、最終的に決定する

# バンチ長 vs. バンチャー空洞の位置



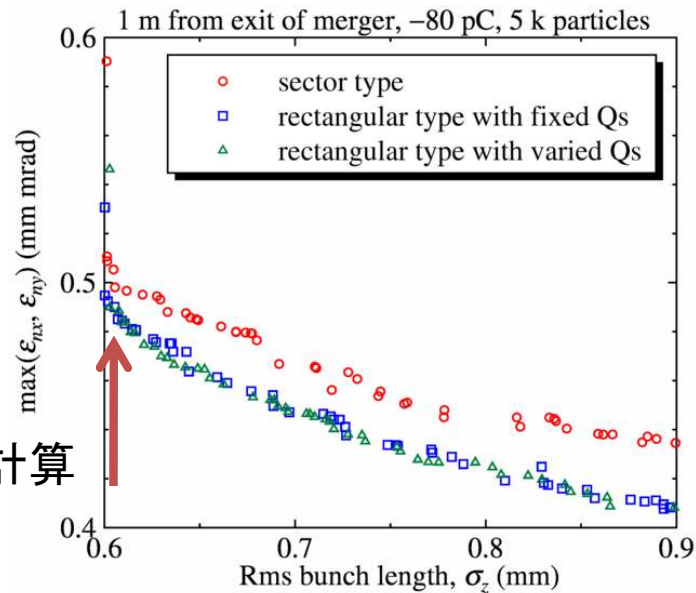
- カソード表面からバンチャー空洞の中心の位置
- セクター型: 0.724 m
- 矩形型: 0.712 m から 0.716 m
- 入射器全体で最適化するとバンチャー空洞の位置は、以前の値(0.704 m)より少し後ろに持っていった方がよさそう
- といっても、微小な範囲なので無視しても良いか
- cERL入射器の設計では、とりあえず中間をとって0.72 mでデザインし、合流部の型式を決めた後に、最終的に決定する

# 5kパラメタ探索のまとめ

- 2つの型式の合流部(セクター型、矩形型)を含んだ入射器全体に対して、運転パラメタの探索を行った
- 探索では、合流部出口から1mの位置でエミッタンスとバンチ長が最小になるようにした
- 粒子数は5k
  
- エミッタンスの違い
  - 矩形型(Q固定) = 矩形型(Q可変) < セクター型
  - ただし、違いは大きくても0.03 mm mrad程度(0.4 mm mradに対して)
  - 従って、合流部の形式は配置の自由度とオプティクス自由度から決めればよさそう
  
- ベータatron関数: 出口でのビームサイズに制限をかけることによって、垂直方向のベータatron関数を100m以下に抑えられる
  
- ソレノイドとバンチャー空洞の位置
  - cERL入射器の設計ではとりあえず、下記の値を採用する
  - ZSLA01 = 0.36 m, ZSLA02 = 1.15 m, ZBCA01 = 0.72 m
  - 合流部の形式が決まり次第、モニターなどの配置を含めて最終的な配置を決定する

# ビームエンベロープの計算

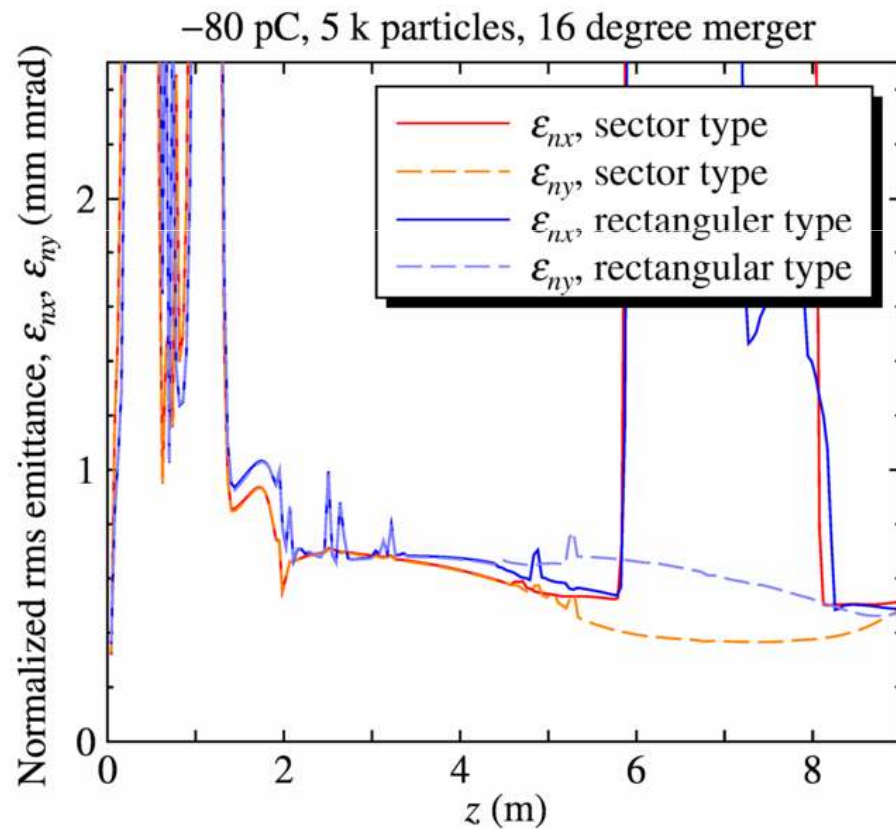
5k 粒子での最適化結果で、バンチ長=0.6 mm付近のパラメタを用いて、ビームエンベロープを計算  
合流部の形式の違いによる影響を見る  
また、粒子数を5kと200kとして、粒子数の違いによる影響を見る



このパラメタに対して計算

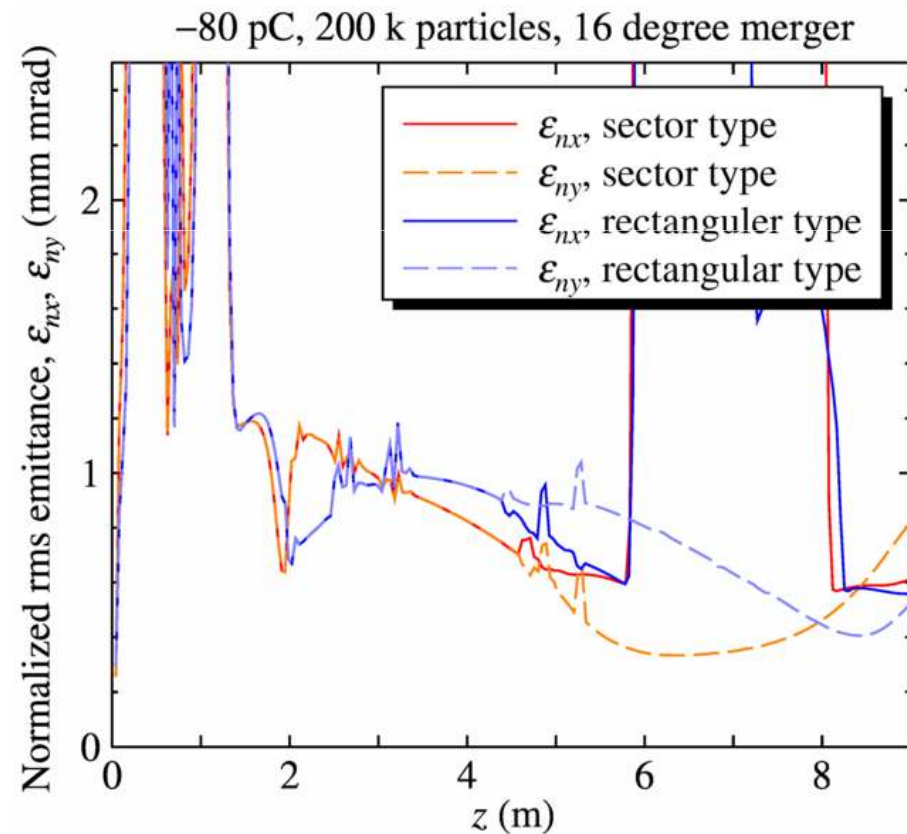
# 規格化rmsエミッタンスの変化

NPS = 5 k



NPS = 200 k

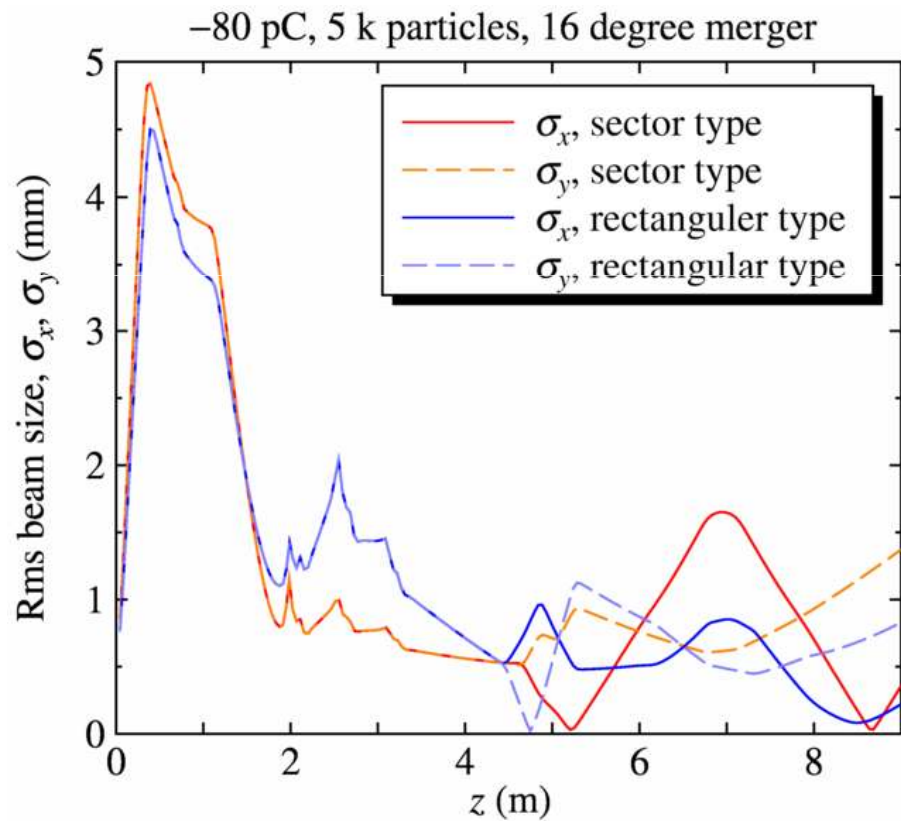
セクター型、矩形型ともに、垂直方向の値が5kの場合に比べて大きくなる





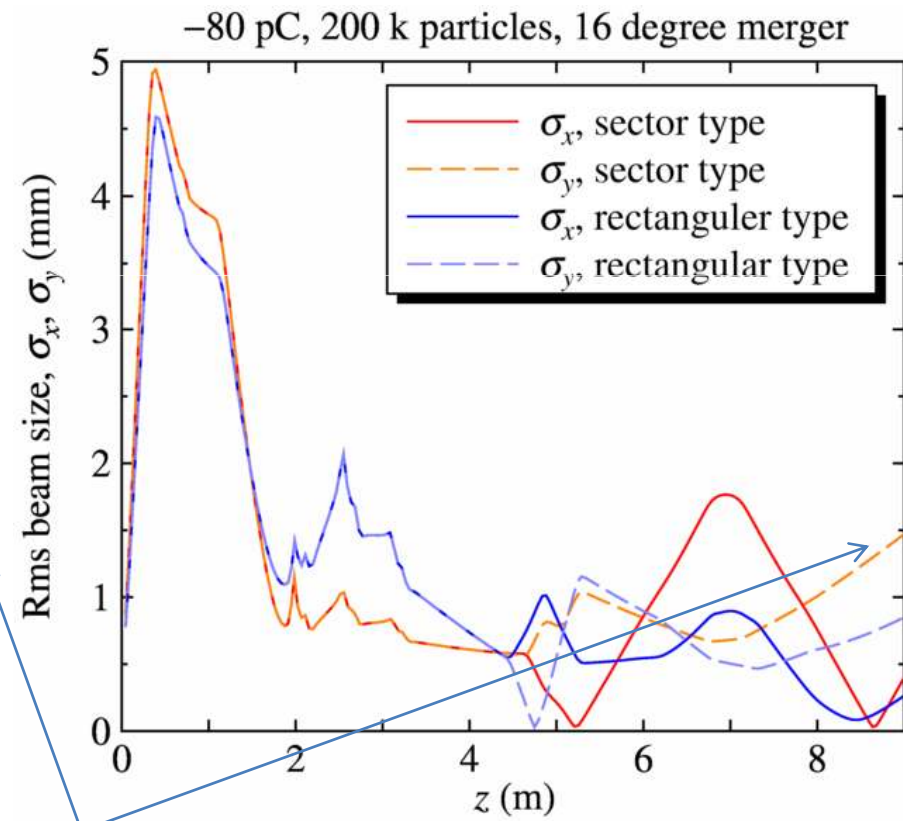
# Rmsビームサイズの変化

NPS = 5 k



NPS = 200 k

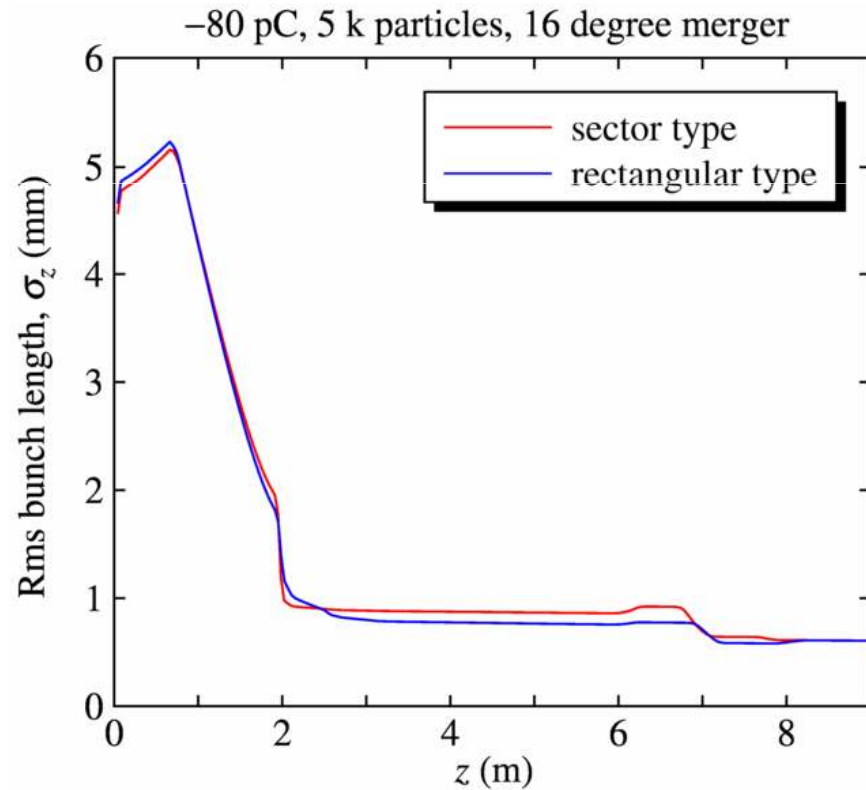
ビームサイズの粒子数による変化は  
エミッタンスの変化に比べると小さい  
が、零ではない



出口でのビームサイズは1.5mm以下になるよう  
に制限している

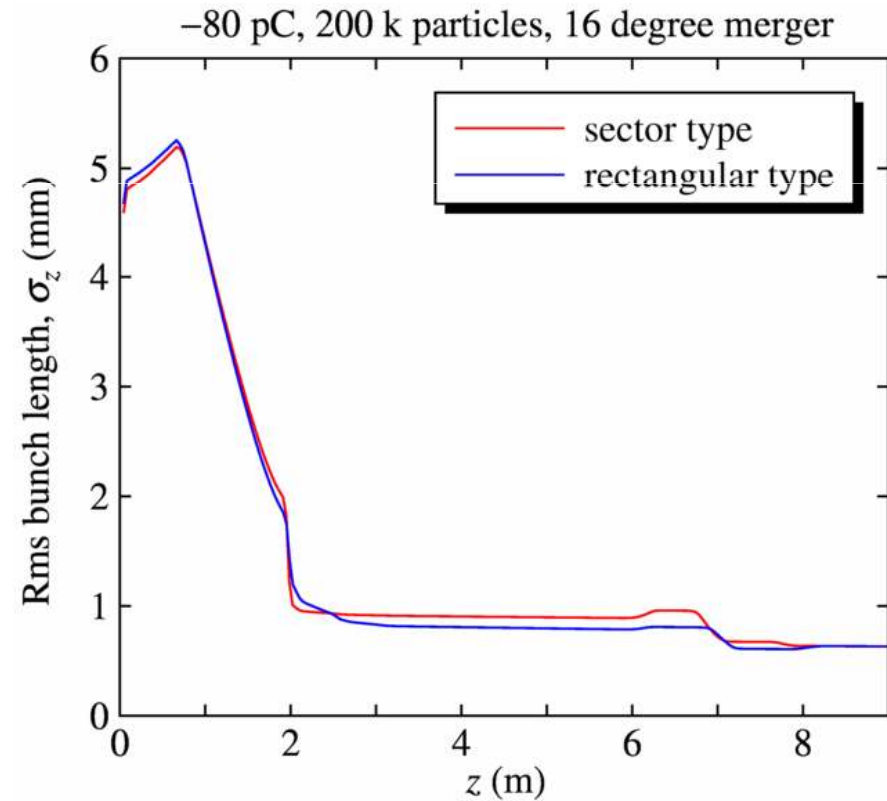
# バンチ長の変化

NPS = 5 k



NPS = 200 k

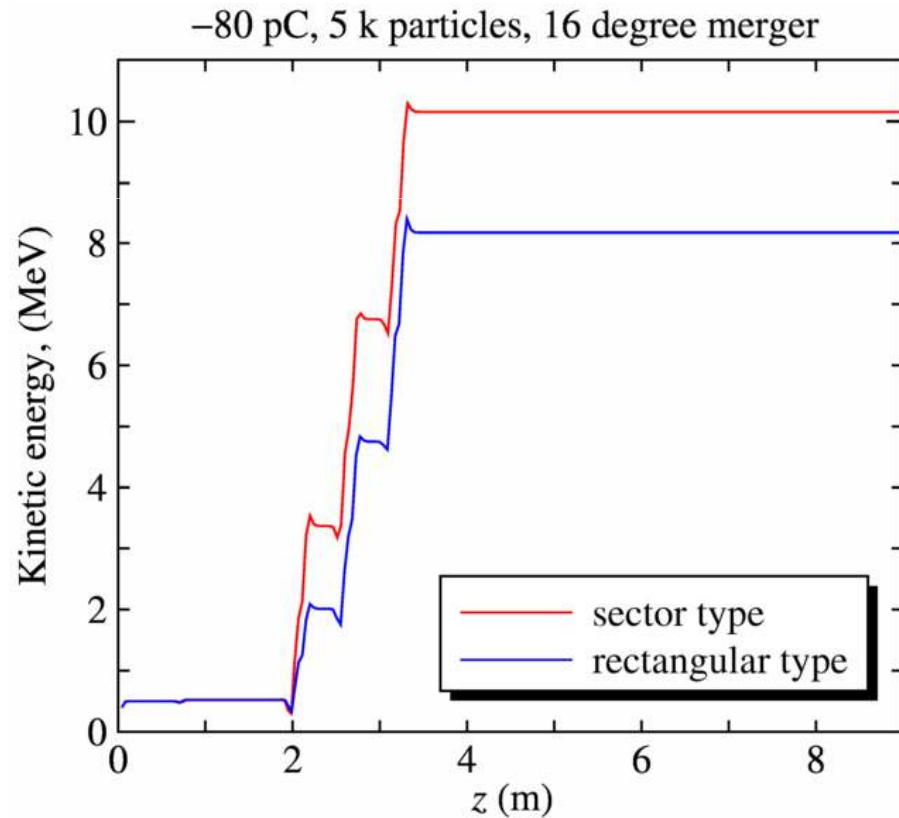
粒子数による変化はあまり大きくない





# 運動エネルギーの変化

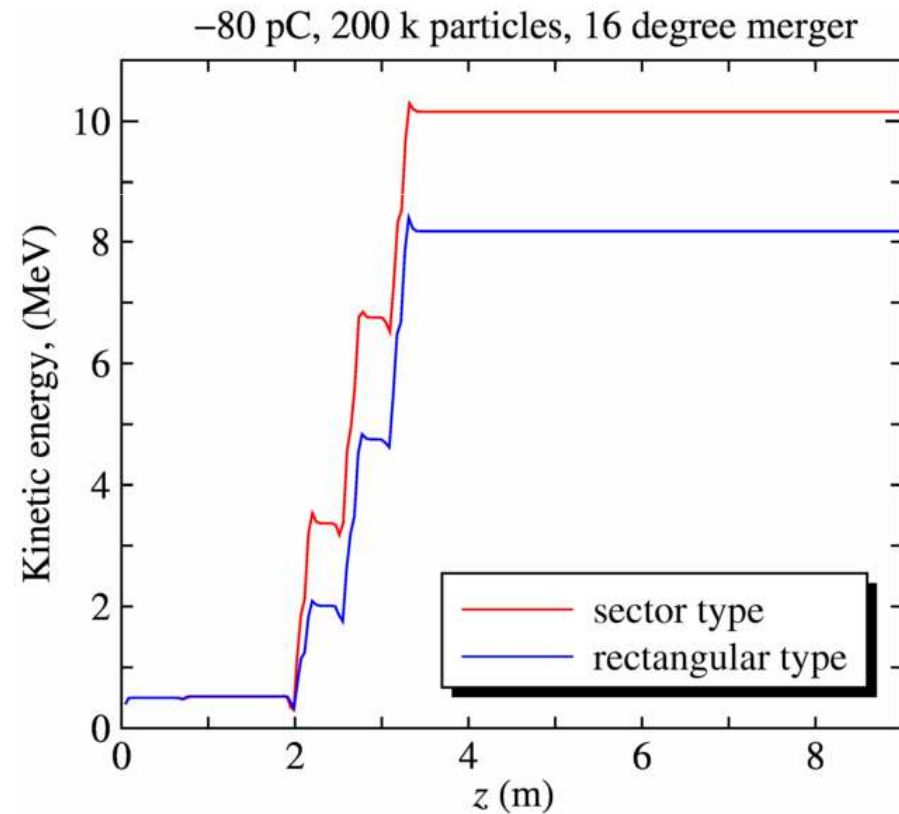
NPS = 5 k



NPS = 200 k

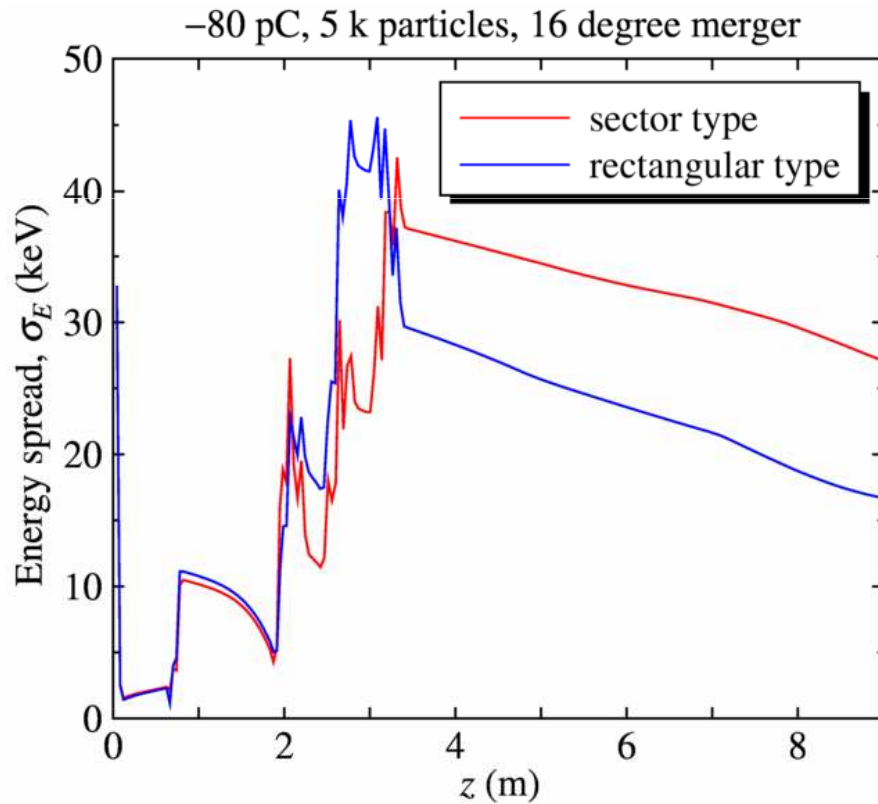
粒子数による違いはほぼなし

最後のエネルギーの違い: 矩形型の方が、SCA01での加速勾配が小さいことによる



# エネルギー拡がりの変化

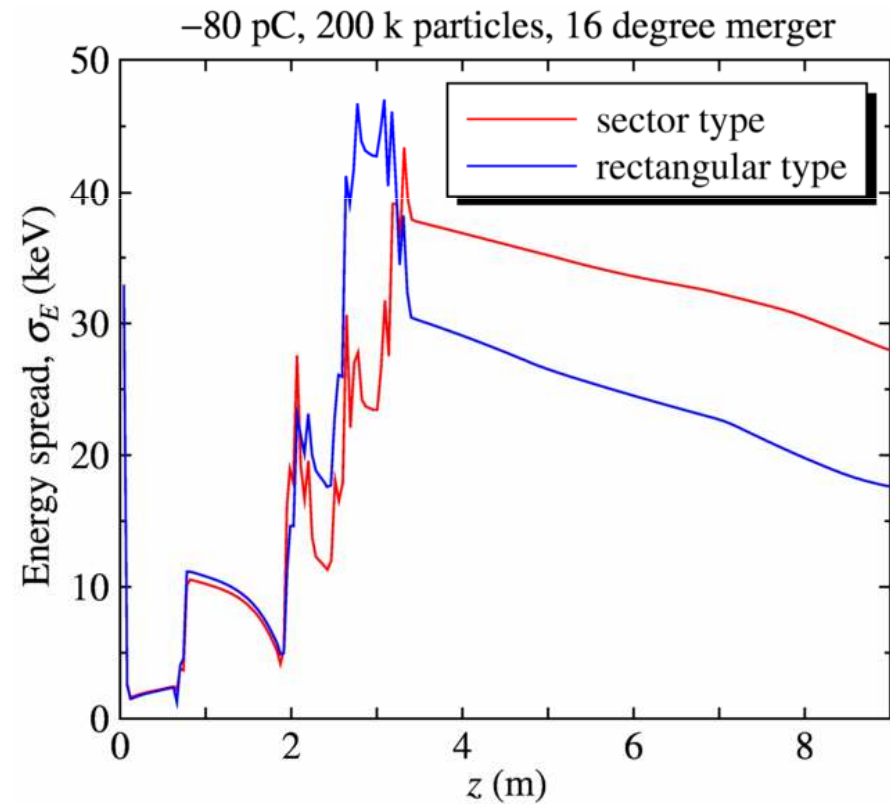
NPS = 5 k



NPS = 200 k

SCA03出口以降、エネルギー拡がりが減少傾向

粒子数の違いによる影響が見える



# ビームエンベロープのまとめ

- 規格化エミッタンス: 粒子数依存性が大きい(最終的には100kとか200kで計算する必要がある)
- Rmsビームサイズ: 制限なしだと、垂直方向が大きくなる傾向にあったが、制限( $\text{std}_x, \text{std}_y < 1.5 \text{ mm}$ )を入れることで回避できることがわかった
- 運動エネルギー: セクター型で10MeV, 矩形型は8MeV程度となった(原因はSCA01での加速勾配の違い)
- エネルギー拡がり: 空洞を出た後に、減少する方向にある
- エミッタンス以外の物理量であれば、少ない粒子数でもそこそこの精度が得られそう
- 課題: エミッタンスを小さく保ったまま、合流部出口での運動エネルギーを変化させるにはどのようにするか?(5 MeVパラメタ、10 MeVパラメタを作るため)