

周回部とのマッチングをとるための ERL入射器の最適化

2011年8月31日(水) 13時30分から
第61回ビームダイナミクスWG
3号館7階会議室

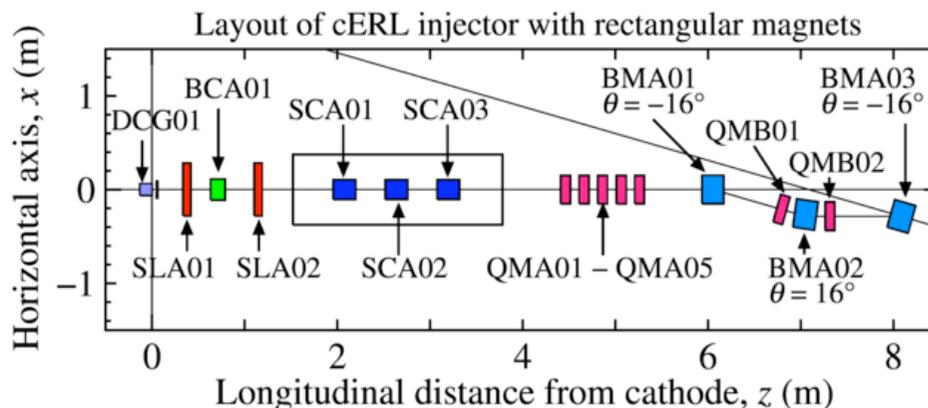
高エネルギー加速器研究機構
宮島 司、島田 美帆

はじめに

- ERLの電子銃からビームダンプまでのstart-to-end(S2E)シミュレーションは、ERLのビームダイナミクスの研究のための重要な手法である。
- 入射器では、電子銃より500 keVのビームが生成され、入射器空洞で5-10 MeVまで加速される。
- その後、入射ビームは合流部を通過して、直線部にある主加速空洞まで輸送される。
- この間、エネルギーは入射エネルギー(5-10 MeV)のままであり、入射器空洞から主空洞まで如何に空間電荷(SC)効果によるエミッタンス増大等を抑えるかが重要となる。
- 主空洞以降は35 – 65 MeVまで加速されるため、空間電荷(SC)効果によるエミッタンス増大の効果はかなり小さくなる(エンベロープの変形まで考慮すると、125 MeV以上ではほぼSCの効果を見捨てる)
- 入射器空洞-主空洞間でエミッタンス増大が最も顕著に発生する箇所が合流部である。
- 合流部では、分散関数とSCによるエネルギー変化の結合によって位相空間内でのスライスがずれが生じ、エミッタンス増大が引き起こされる。
- これを補償するには、空間電荷分散関数から計算される位相空間楕円の軸と、ビーム分布の軸を合わせる必要がある。
- また、入射器の最適化では、エミッタンス補償だけに留まらず、周回部とのオプティクスとのマッチングも重要となってくる。
- 特に、ERLの場合には、周回部は加速・減速ビームが同じ場所を通過するため、入射部ビームと周回部ビームのマッチングを取る点において、任意のTwissパラメータを取ることが許されない。
- このため、入射器の最適化では、マッチング点において、エミッタンスを補償しつつ、Twissパラメータも周回部の許容範囲内に納めなければならない。
- 今回の発表では、入射器パラメータの最適化計算を中心として、(1) 周回部とのマッチングを考慮しない場合、(2) 周回部とのマッチングを考慮した場合の2つについて紹介する。

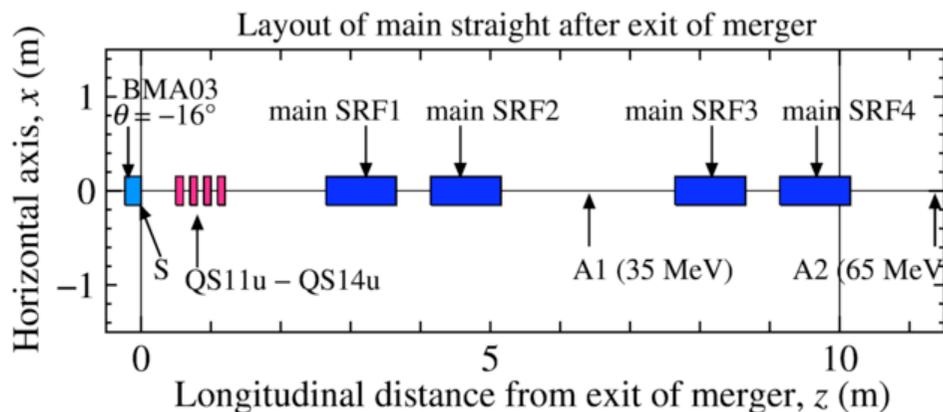
レイアウト

- 最適化計算では、基本的に compact ERL(cERL)の入射器レイアウトを使用している。
- しかし、最高性能時(エネルギー10 MeVまで可、レーザーパルス長可変)とコミショニング時(エネルギーは5 MeVに制限、レーザーパルス長16 psに固定)の2通りの場合について計算を行っている。
- さらに、エミッタンスを最小化する点も35 MeV地点(A1点)と65 MeV地点(A2点)の2通りで行っている。
- バンチ電荷は全て 77 pC/bunch



1. 電子銃から合流部までのレイアウト

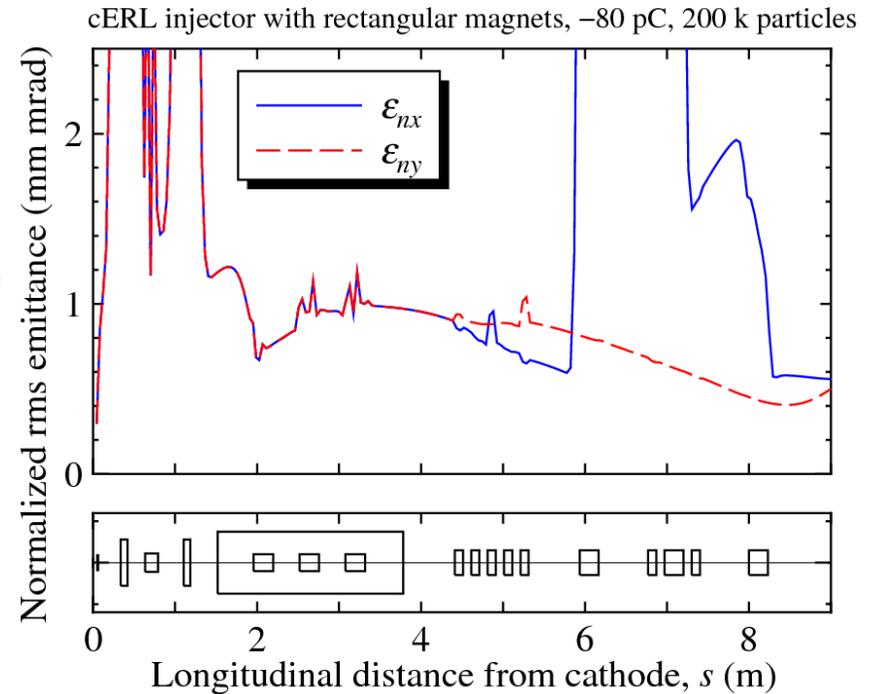
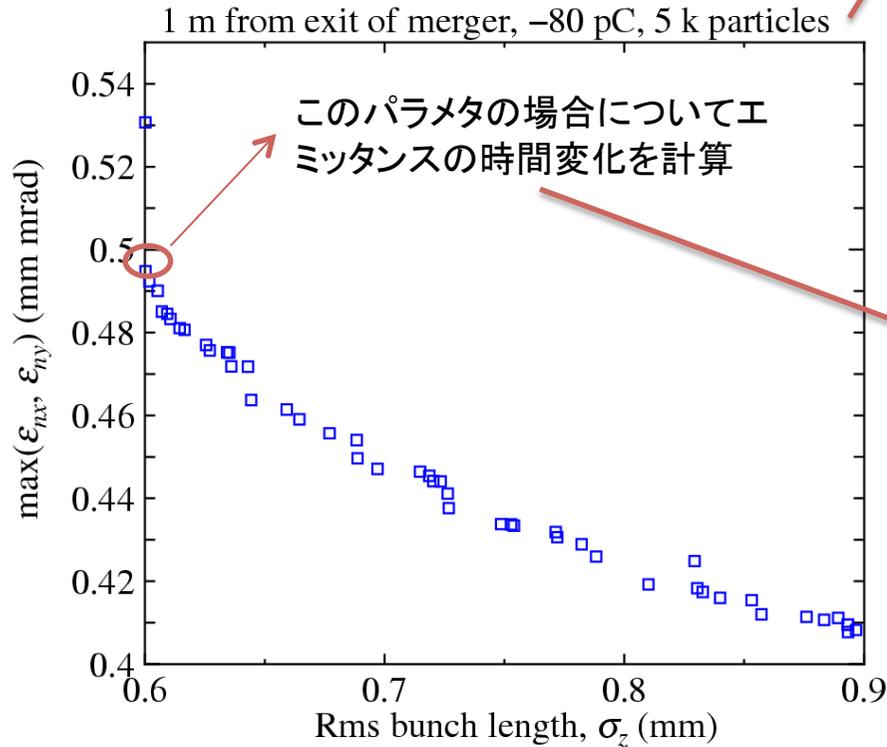
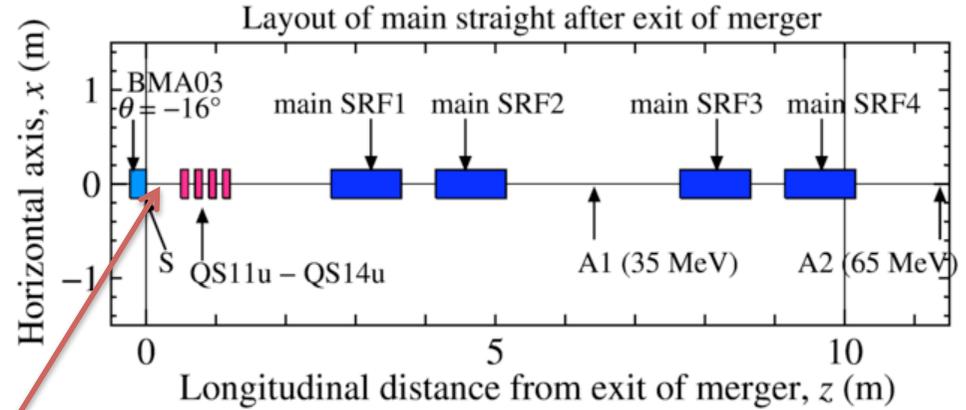
- 計算したケース
 - (1) 最高性能でS点でエミッタンス最小
 - (2) コミショニング時性能でA1点でエミッタンス最小化+オプティクスマッチング
 - (3) 最高性能でA2点でエミッタンス最小+オプティクスマッチング



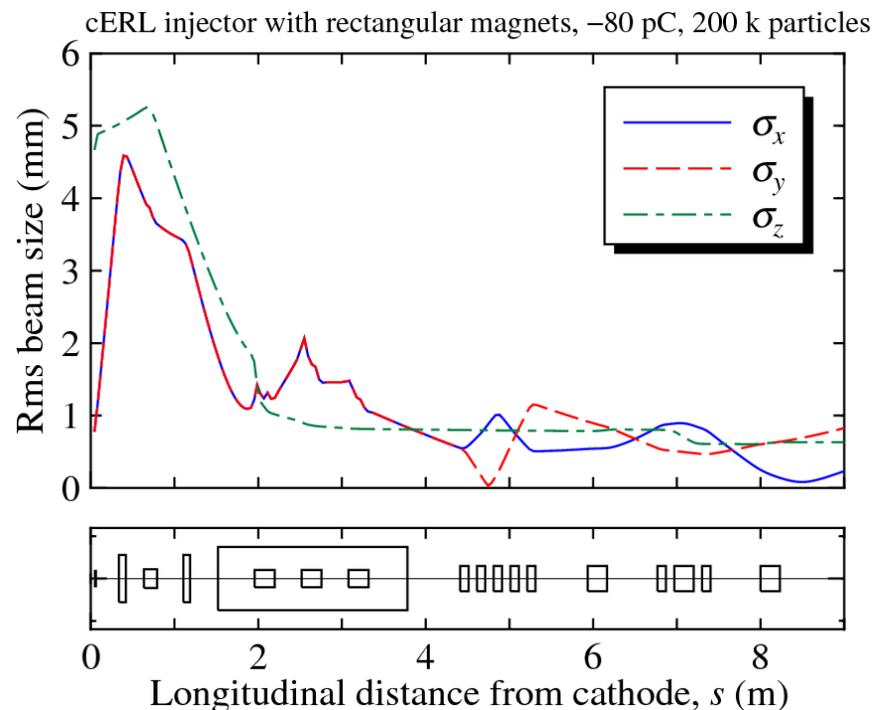
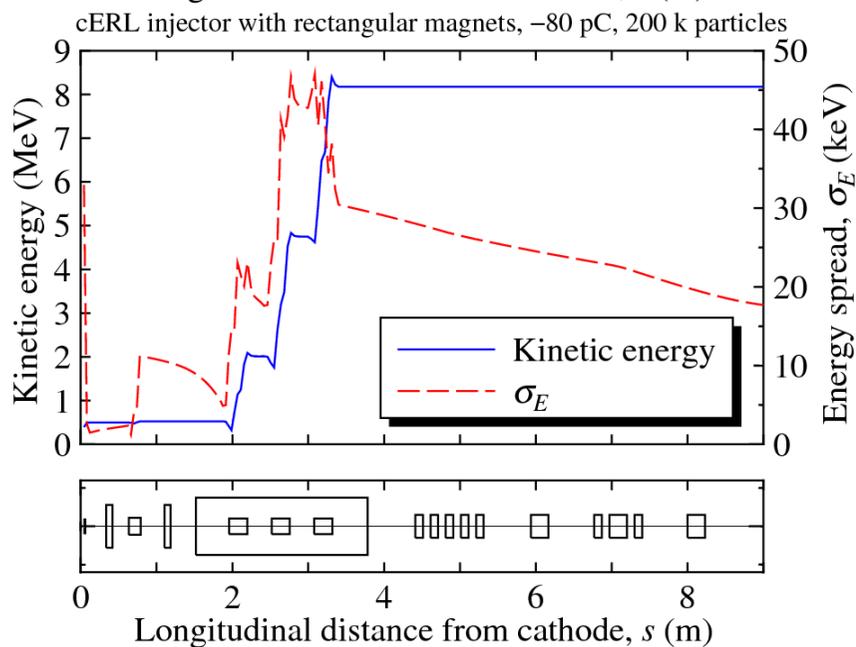
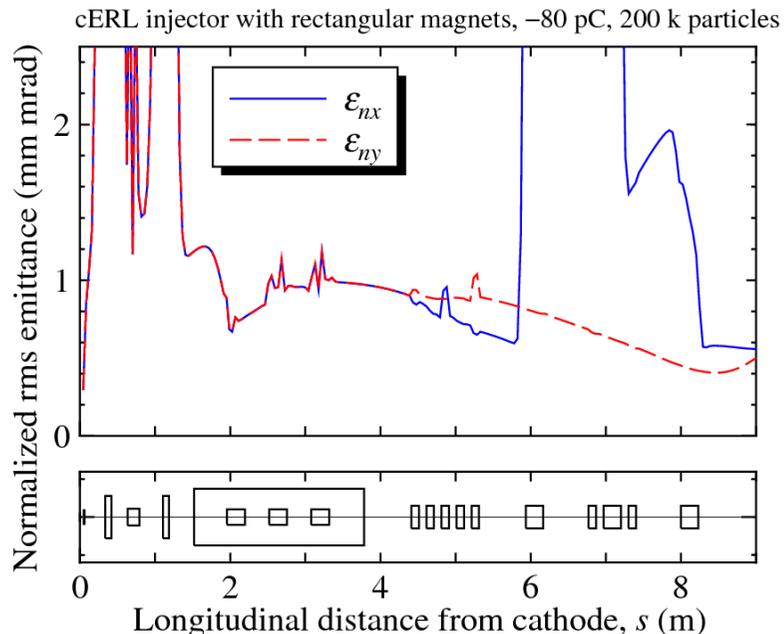
2. 合流部出口から直線部のレイアウト

(1) 最高性能時、S点

- 最高性能時、S点 (注: 厳密には合流部出口から1m下流) でエミッタンス最小化した場合
- S点でのTwiss パラメタの制限はなし
- S点でのエミッタンスは、0.4 – 0.5 mm mradの範囲に入っており、十分に最適化されている

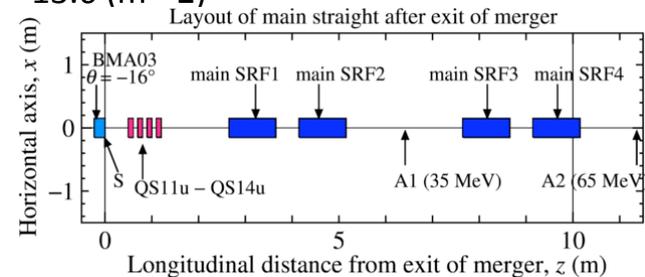


エミッタンス、ビームサイズ、エネルギーの時間変化

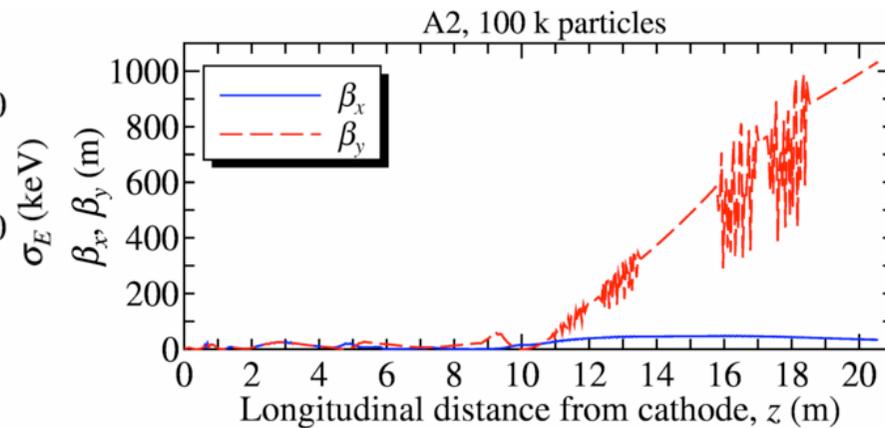
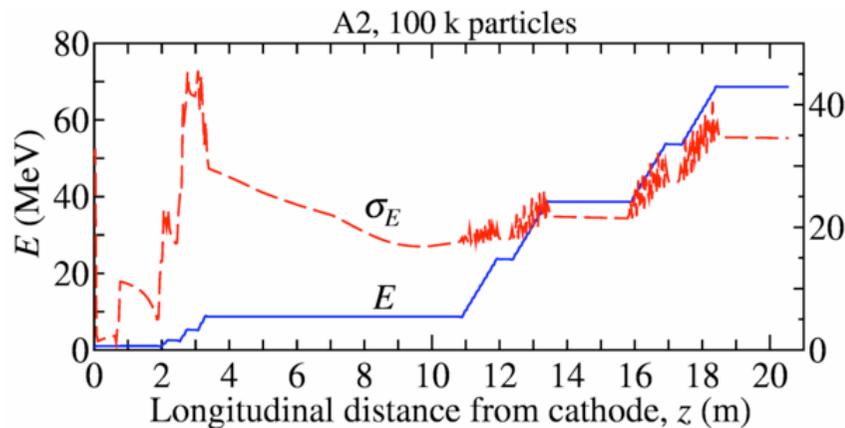
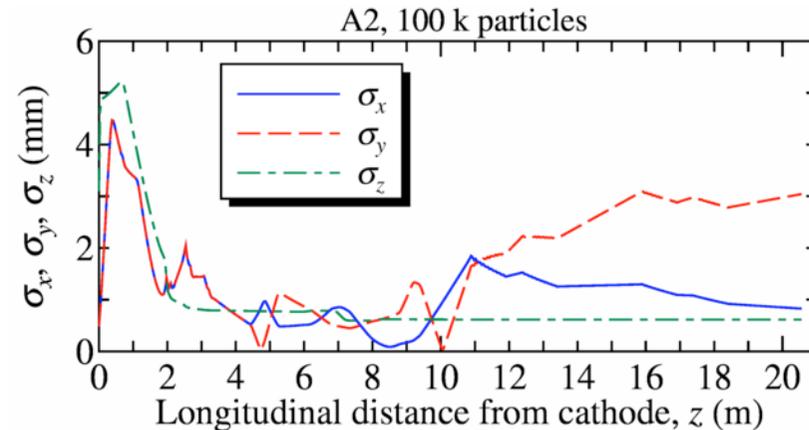
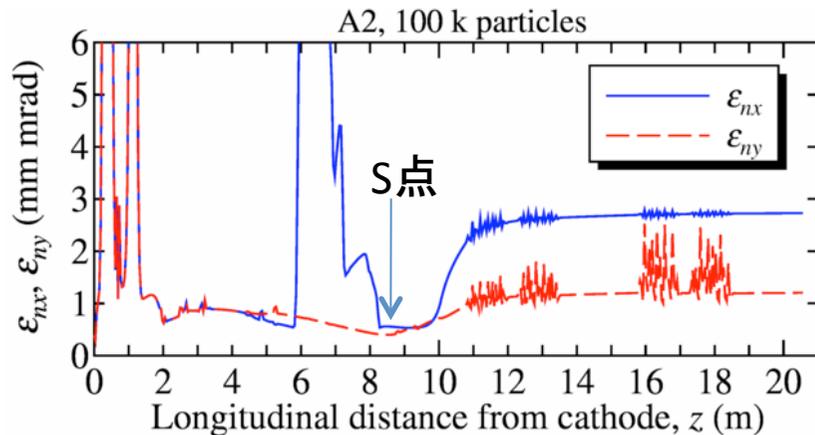


次に、このケースについて、周回部オプティクスとして適しているQS11u-QS14uのK値を用いて、A2点まで時間発展を計算してみる。

- K1QS11u = 15 (m⁻²)
- K1QS12u = 1.33 (m⁻²)
- K1QS13u = -14.4 (m⁻²)
- K1QS14u = -13.6 (m⁻²)



- 単純に、QS11u – QS14uを追加してA2点まで時間発展を計算

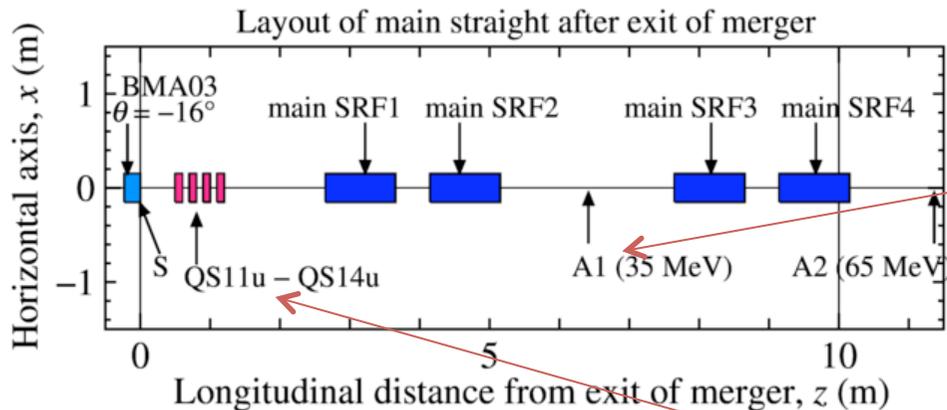


エミッタンスは、S点までは0.5 mm mrad程度であるが、その後の直線部で増大してしまっている。
 また、ベータatron関数もオプティクスマッチングをしていないので、1000 mを超えてしまう。
 以上のように、単に合流部出口でエミッタンスを最小化するだけではマッチングできない。
 従って、周回部とのマッチングを取るためには、次の3つを同時に行う必要がある。

- (1) 主空洞近傍でエミッタンスの最小点をもってくる
- (2) 直線部のQ(QS11u – QS14u)を周回部に適した値にする
- (3) マッチング点(A1点 or A2点)において、Twissパラメタを周回部に適した値にする

(2) コミッショニング時性能、A1点

- S点で最適化しただけでは、そのまま周回部とマッチングできないことが前の計算でわかった。
- ここでは、まずコミッショニング時の性能(入射エネルギー5 MeV, レーザーパルス長16 ps)の入射器に対して、A1点でエミッタンスをバンチ長を最小化する。
- このとき、周回部とのマッチング条件として
 - A1点でのTwissパラメタに制限を設ける
 - QS11u-QS14uは周回部に最適化値に固定として計算を行った。



(1) A1点でのTwissパラメタの制限

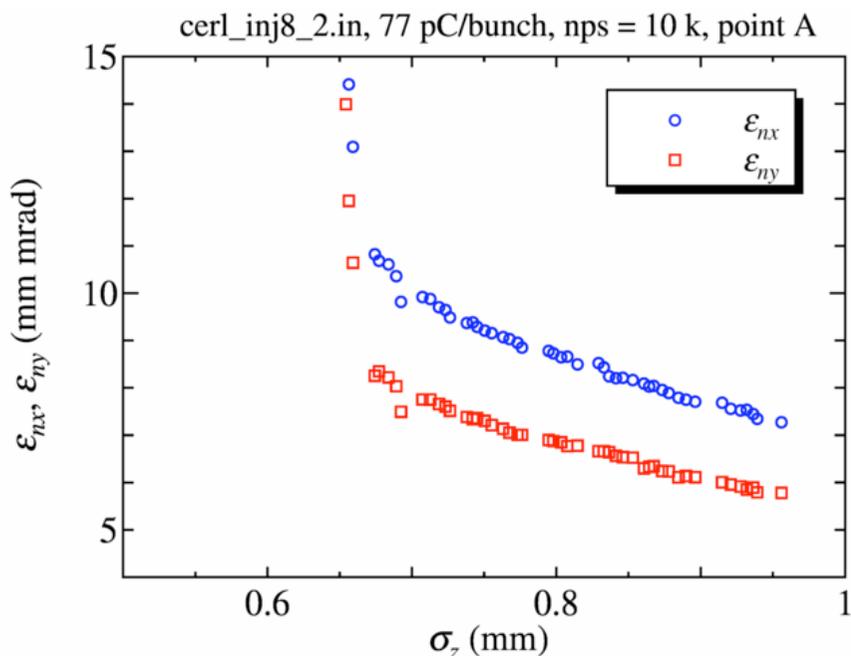
$$\begin{aligned} -2.0 < \alpha_{\text{ax}} < -0.36 \\ -0.33 < \alpha_{\text{ay}} < 0 \\ 2.63 \text{ m} < \beta_{\text{ax}} < 9.6 \text{ m} \\ 10.2 \text{ m} < \beta_{\text{ay}} < 29.28 \text{ m} \end{aligned}$$

(2) QS11u-QS14uのK値の固定

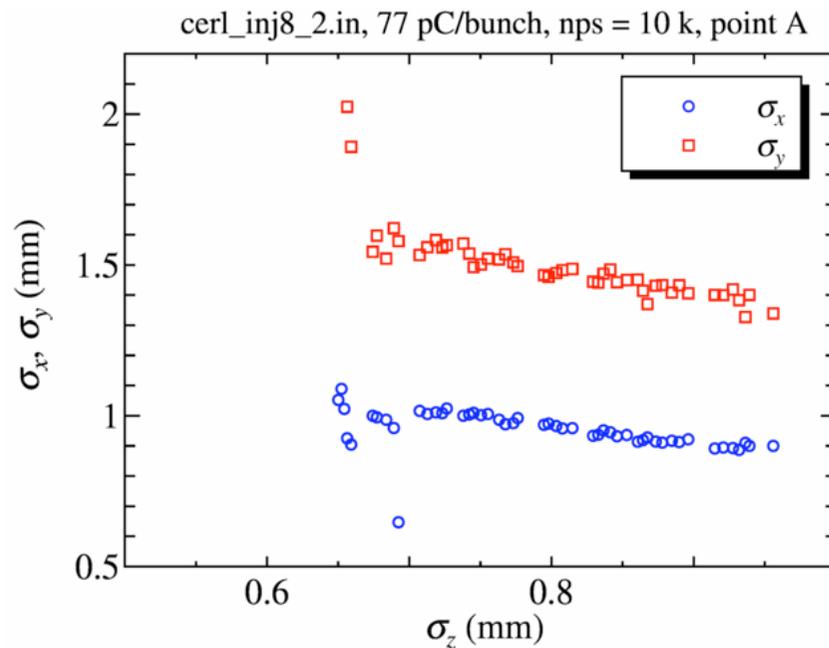
$$\begin{aligned} K1_{\text{QS11u}} &= 15 \text{ (m}^{-2}\text{)} \\ K1_{\text{QS12u}} &= 1.33 \text{ (m}^{-2}\text{)} \\ K1_{\text{QS13u}} &= -14.4 \text{ (m}^{-2}\text{)} \\ K1_{\text{QS14u}} &= -13.6 \text{ (m}^{-2}\text{)} \end{aligned}$$

A1点での結果(粒子数10 kで計算)

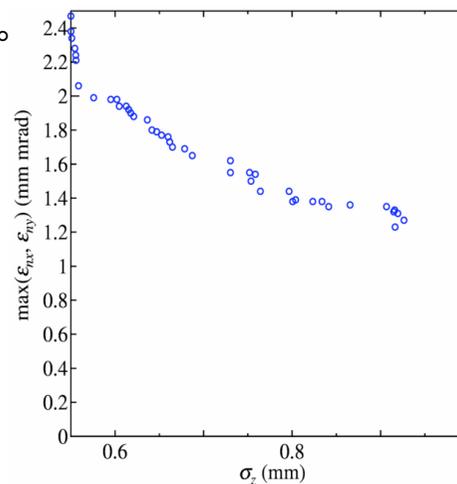
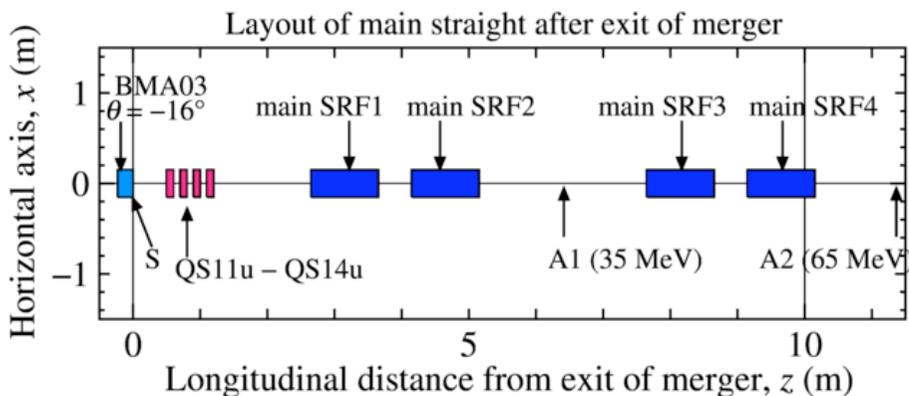
(1) エミッタンス



(2) ビームサイズ

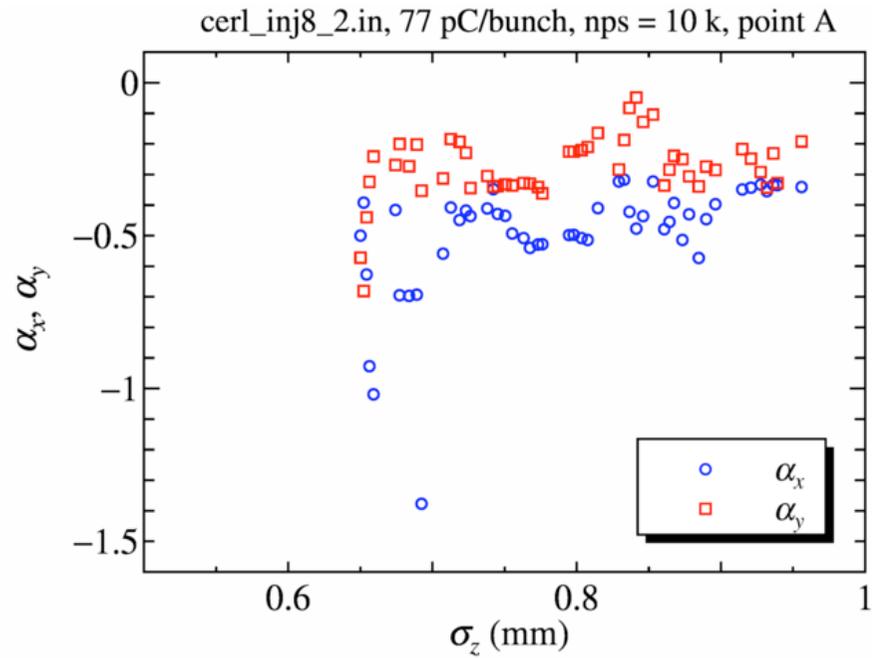


A1点でのエミッタンスは、6 – 10 mm mradと非常に大きい。
 Twissパラメタの制限を設けずに、S点で最適化すると、1.25 – 2.0 mm mrad程度なので、マッチングのために設定したA1点での制限が大きく影響していると思われる。

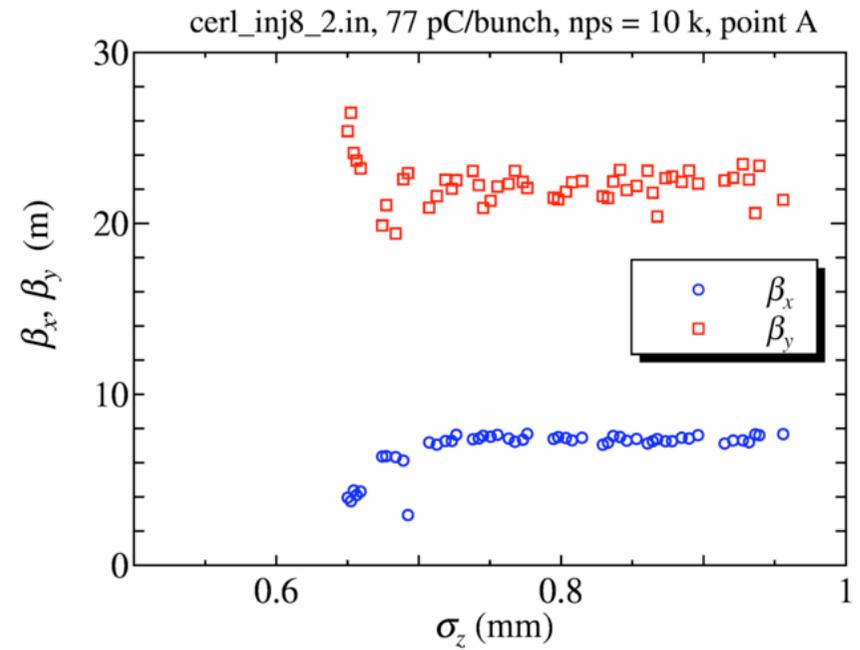


S点での最適化した場合の結果。
 エネルギーは5 MeVに制限。
 1.25 – 2.0 mm mrad程度が得られている。

(3) CS alpha



(4) CS beta

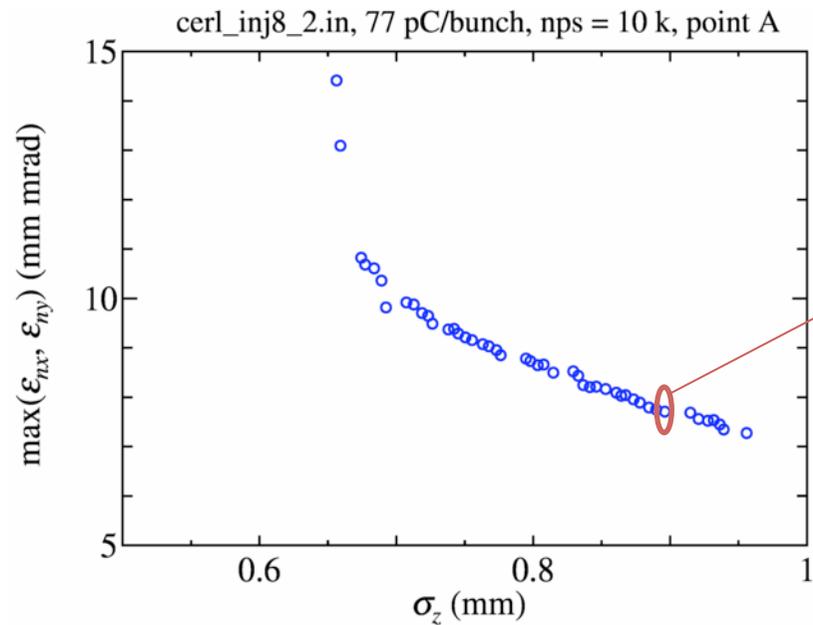
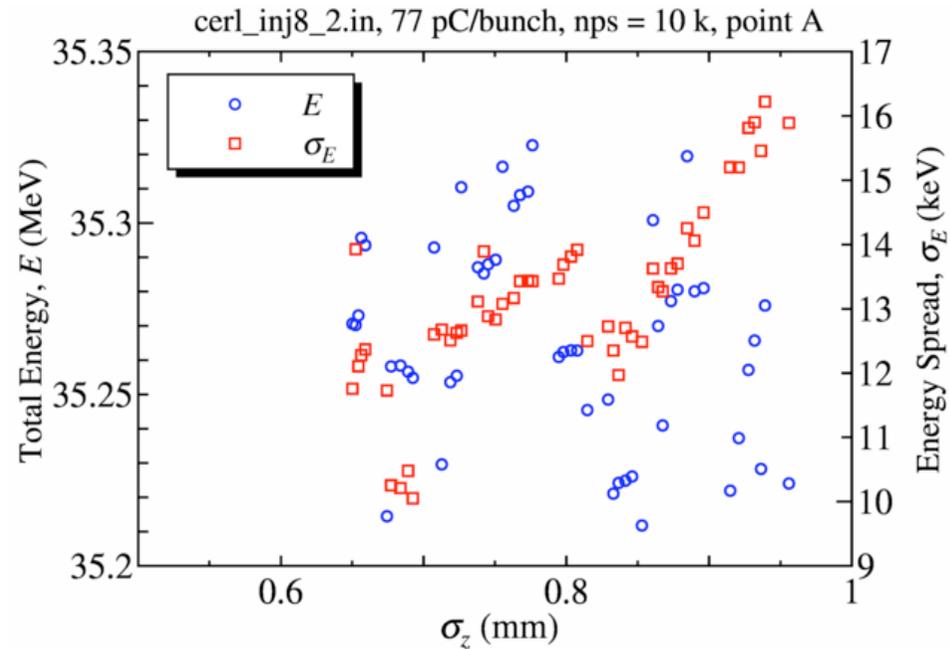


A1点でのTwissパラメタの制限

- 2.0 < α_x < -0.36
- 0.33 < α_y < 0
- 2.63 m < β_x < 9.6 m
- 10.2 m < β_y < 29.28 m

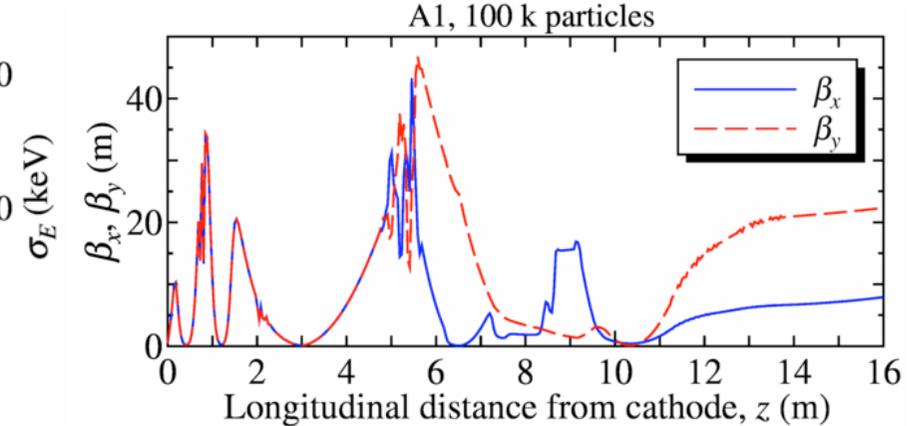
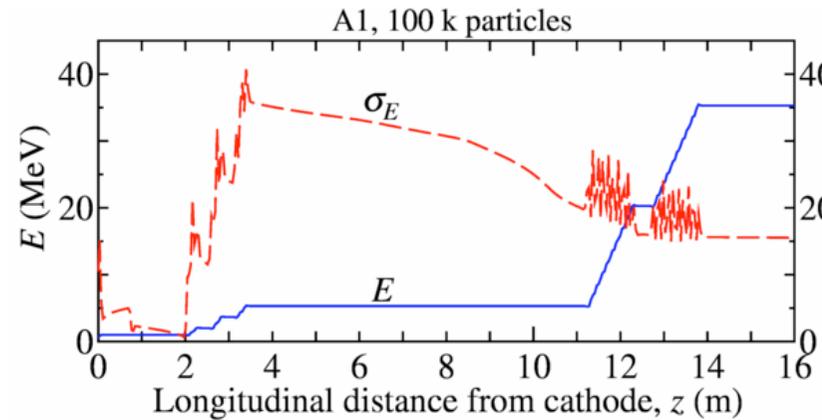
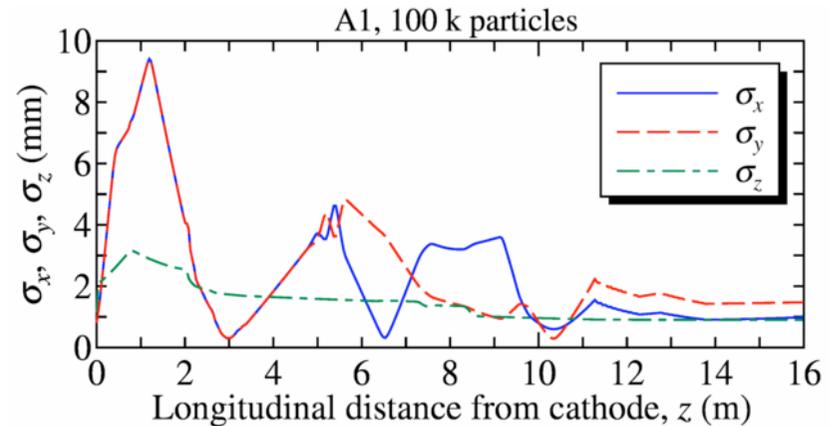
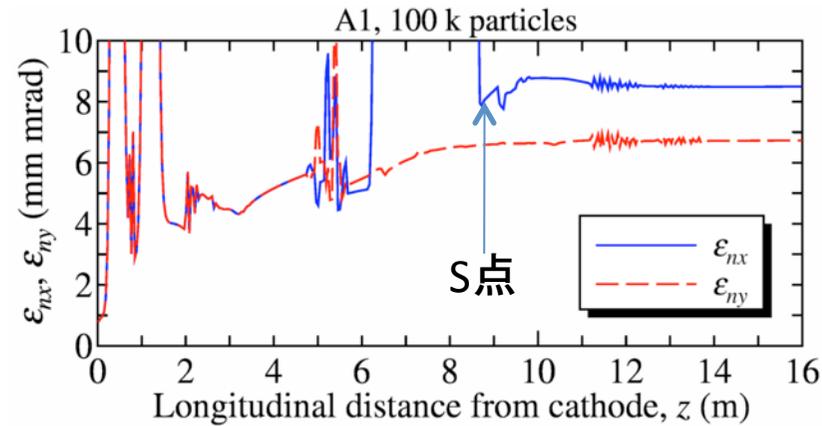
計算結果はalpha, betaともに制限範囲に内に入っていることが確認できる。

(5) 全エネルギーとエネルギー拡がり



次に、バンチ長0.9 mmのケースについて、エミッタンス、
ビームサイズ、Twissパラメタの時間発展を計算する。

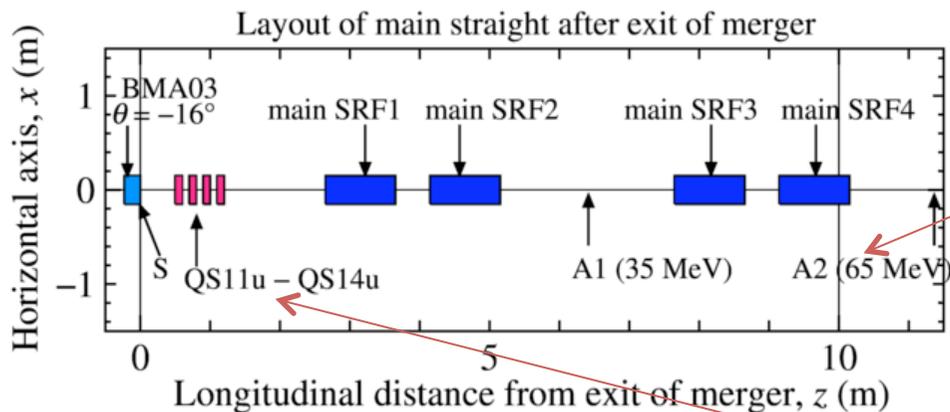
- バンチ長0.9 mmの時の時間発展



エミッタンスは、S点でほぼエミッタンスは増大しきっている。その後はほぼ一定値を保持。
 ベータatron関数は、制限内に入っており、全体としてもそれほど大きな値は取っていない。
 合流後のQS11u-QS14uのK値は固定となっており、A1点でのTwissパラメタを制限内に納めようとする、合流部手前の5台のQを調整しなければならない。
 しかし5台のQは合流部でのエミッタンス補償に使われるものであり、A1点でのTwissパラメタを合わせようすると、エミッタンス補償が成り立たなくなってしまう。⇒できれば、QS11u-QS14uは可変の方が良い。
 次に、入射器最高性能時、A2点での最適化計算の紹介をする。この計算では、A2点でのTwissパラメタの制限範囲を緩くして、さらにQS11u-QS14uのK値を大きくなり過ぎない範囲で可変としている。

(3) 最高性能時(最大10 MeV)、A2点

- A1点でのコミショニング時性能の最適化計算では、エミッタンスを十分に下げることができなかった。
- 原因としては、QS11u-QS14uのK値が固定のため合流部のエミッタンス補償とA1点でのTwissパラメタの制限が両立しなかったことが考えられる。
- そこで、マッチング点(A2)でのTwissパラメタの制限を緩くし、かつQS11u-QS14uのK値を可変とすることで、エミッタンス補償とマッチングの両立点を調べることにした。
- 最小エミッタンスを調べるために、最高性能時(最大10 MeV)の時の入射器に対して、65 MeV地点で最適化計算を行った。



(1) A1点でのTwissパラメタの制限

$-2.0 < \alpha_{px} < 2.0$
 $-2.0 < \alpha_{py} < 2.0$
 $\beta_{px} < 100$ m
 $\beta_{py} < 100$ m

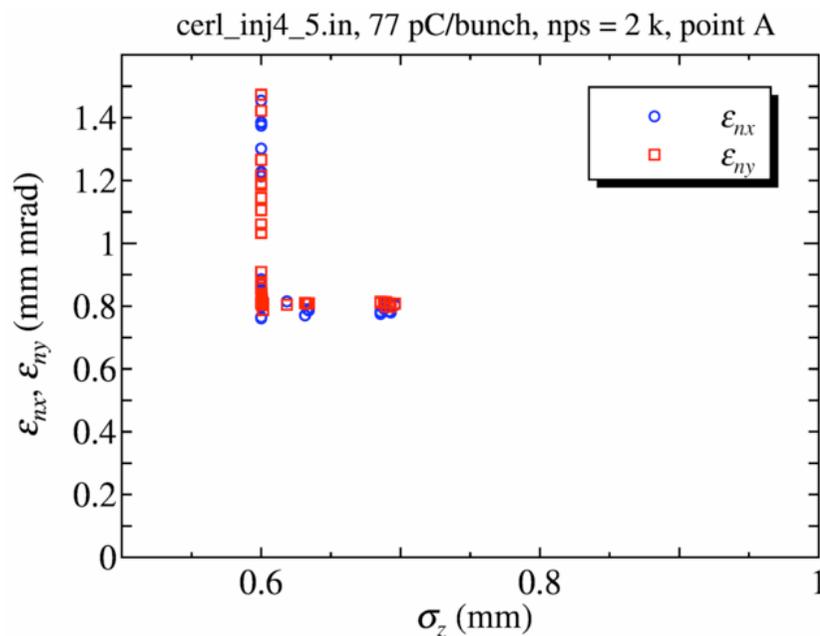
(2) QS11u-QS14uのK値の可変

可変範囲: $-15.0 < K1 < 15.0$

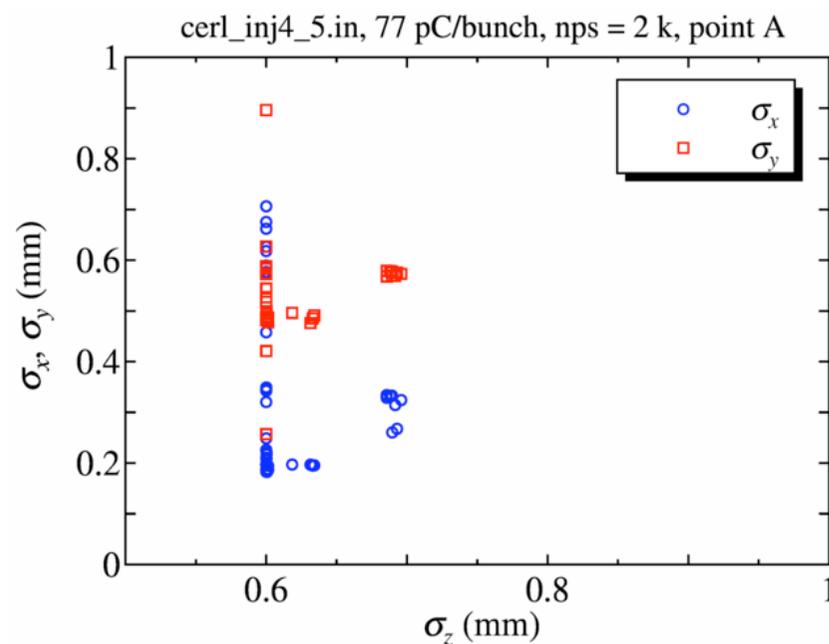
減速ビームに大きな影響を与えないように、
最大値を制限する。

A2点での結果(粒子数2 kで計算)

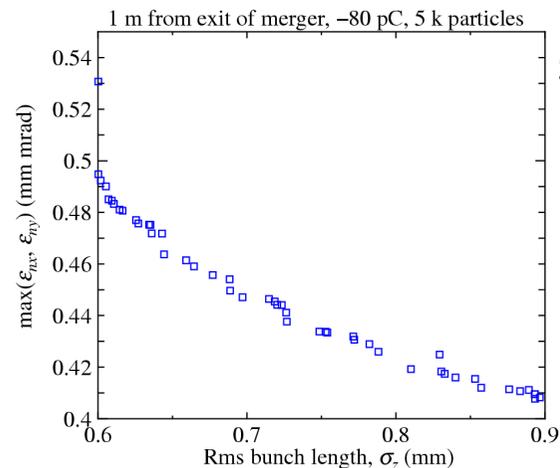
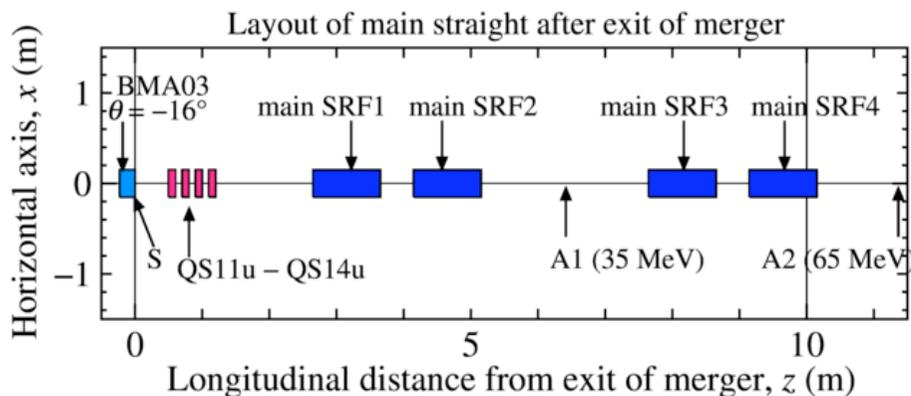
(1) エミッタンス



(2) ビームサイズ



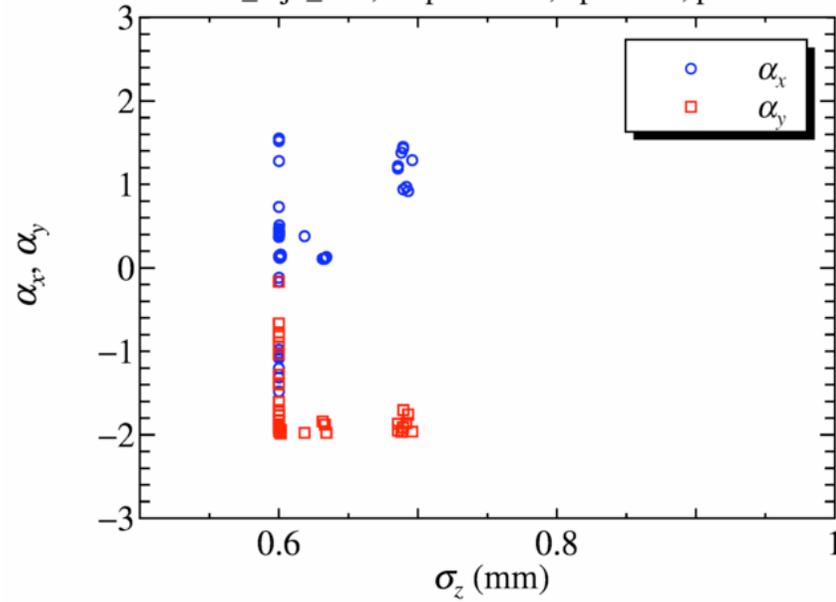
A1点でのエミッタンスは、0.8 mm mrad程度
Twissパラメタの制限を設けずに、S点で最適化すると、0.4 – 0.5 mm mrad程度である、2倍程度は大きく
なっているが、1 mm mrad以下となっている。



S点での最適化
した場合の結果。

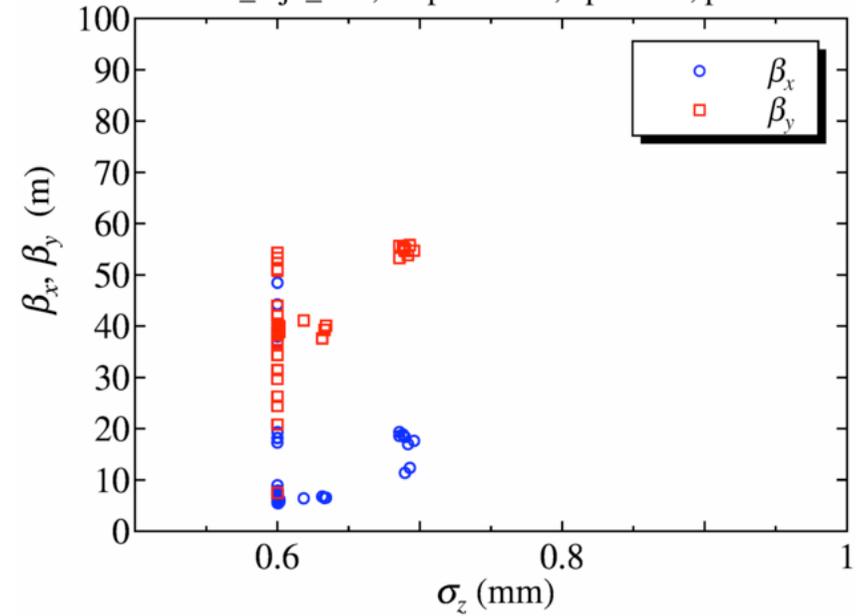
(3) CS alpha

cerl_inj4_5.in, 77 pC/bunch, nps = 2 k, point A



(4) CS beta

cerl_inj4_5.in, 77 pC/bunch, nps = 2 k, point A



A1点でのTwissパラメタの制限

$$-2.0 < \text{alphax} < 2.0$$

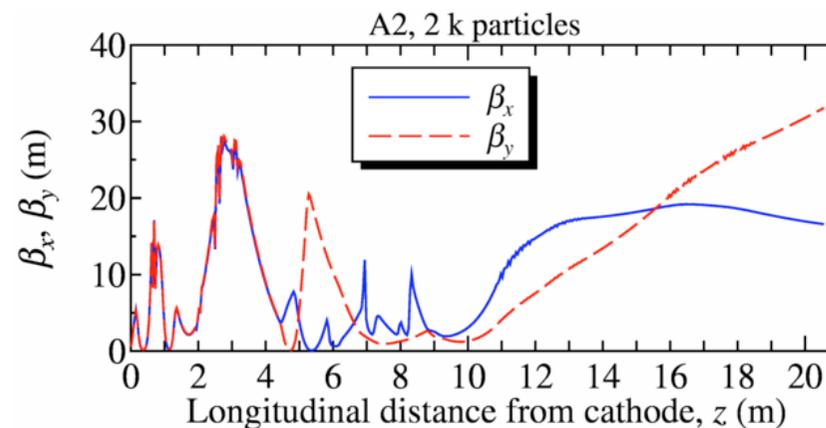
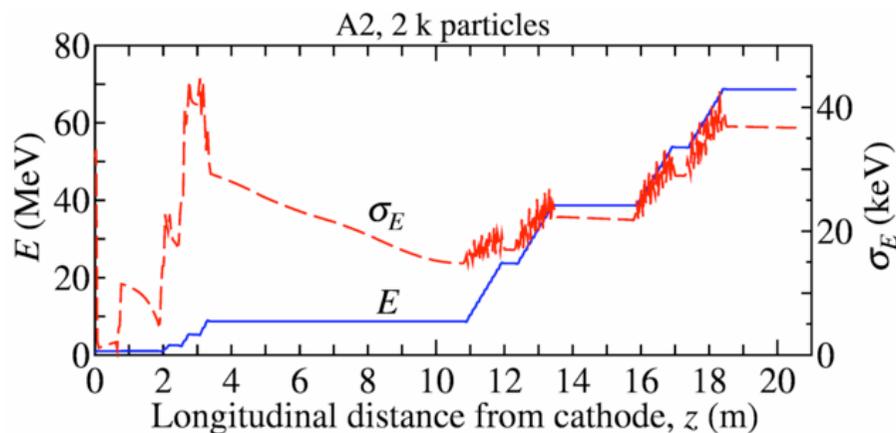
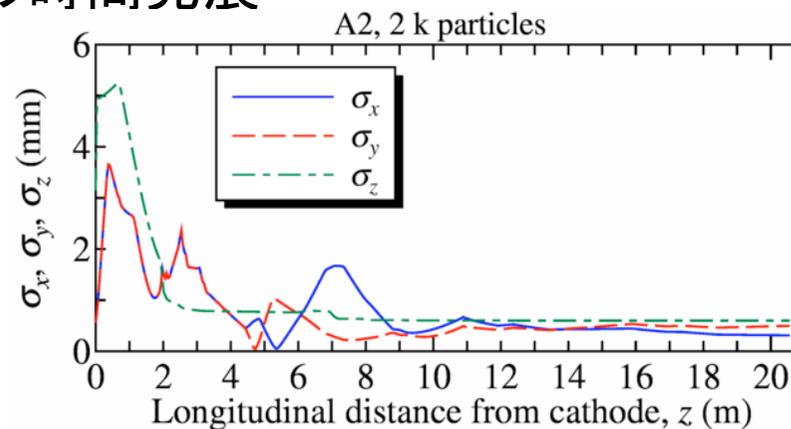
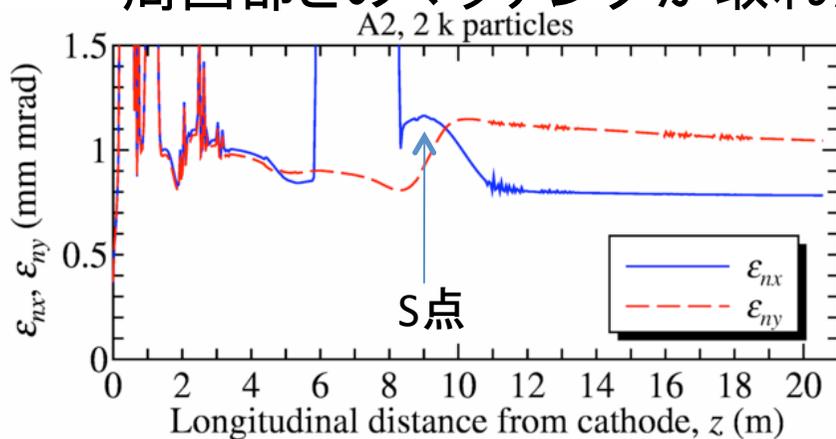
$$-2.0 < \text{alphay} < 2.0$$

$$\text{betax} < 100 \text{ m}$$

$$\text{betay} < 100 \text{ m}$$

計算結果はalpha, betaともに制限範囲に内に入っていることが確認できる。

- 周回部とのマッチングが取れた時の時間発展



エミッタンスは、S点での値からそれほど増大せずに、A2点まで輸送できている。
 ベータatron関数は、制限内に入っており、全体としてもそれほど大きな値は取っていない。

全てのケースにおいて、周回部とのマッチングが取れたわけではないが、とりあえず1例マッチング出来る条件を見つけることができた。

まとめ

- ERLのS2Eシミュレーションのために、入射器の最適化計算を行った。
- S2Eシミュレーションのためには、入射器単独で小さいエミッタンスを得られても意味がないため、周回部とのマッチング条件を考慮して計算を進めた。
- 入射器単独で最適化した場合には、周回部とのマッチングが難しいことが再確認された。
- 周回部とのマッチングを考慮して、合流部以降の4極電磁石のK値を固定し、さらにマッチング点でTwissパラメタを制限すると、周回部とのマッチングがとれることがわかった。しかしながら、この場合には合流部手前の4極電磁石をマッチング点での条件に合わせるために使わざるを得ず、合流部でのエミッタンス補償と両立しにくいことがわかった。
- これを回避するために、合流部以降の4極電磁石を可変にして、さらにTwissパラメタの制限を緩めて最適化計算を行うと、1 mm mradに近いエミッタンスが 77pC/bunchの場合にも得られることがわかった。
- 今後の計算では、空間電荷分散関数の導入などによって、より効率的なマッチング条件を探すための手法を確立してきたい。