

7.7 pC/bunch, 主空洞直後(点A)での 最適化計算結果(1k 粒子)

2011年6月10日(金)

ERLビームダイナミクスワーキンググループ

高エネルギー加速器研究機構

宮島 司

概要

- cERLの35 MeV運転に向けたオプティクス設定のための計算を進めている。
- 入射器の計算は77 pC/bunchのビームに対して進めていたが、cERLの初期運転状態を想定して、7.7 pC/bunchの計算を進めることになった。
- 35 MeV運転では、入射器空洞出口での全エネルギーを最大で5.6 MeV程度とし、主空洞出口(点A)でエミッタンス、バンチ長を最適化する必要がある。さらに、点Aでは周回部とのマッチングのために、CSパラメタ(Courant-Snyderパラメタ)にも制限が加えられる。
- 7.7 pC/bunchビームについての点Aにおける最適化に向けて、まず、入射器空洞出口(点B)での最適化を行った。
- 次に、点Bまで最適化計算で得られたパラメタセット(ここでは、レーザースポット径、レーザーパルス長、ソレノイドの強さ、バンチャー電圧、入射器空洞の加速電場と位相の値の集まりを一つのパラメタセットとしている)を初期パラメタとして、電子銃から点Aまでの最適化計算を行っている。
- その後、島田さんと点AでのCSパラメタについて、周回部とのマッチングを考慮して検討した。入射部計算から得られる点AでのCSパラメタの範囲を制限し(今回の計算では3つの制限範囲を設定)、周回部とのマッチングがしやすいように最適化を行っている。
- また、S2Eシミュレーション(ここでは、Gunからダンプまで)の準備として、GPTの計算結果をelegantで読み込むテストを行った。

目次

1. 電子銃から点B(入射器空洞出口)までの計算結果
2. 電子銃から点A(主空洞出口)までの計算結果(CSパラメタの制限範囲1)
3. 電子銃から点Aまでの計算結果(CSパラメタの制限範囲2)
4. 電子銃から点Aまでの計算結果(CSパラメタの制限範囲3)
5. GPTの計算結果をelegantで読み込ませる方法

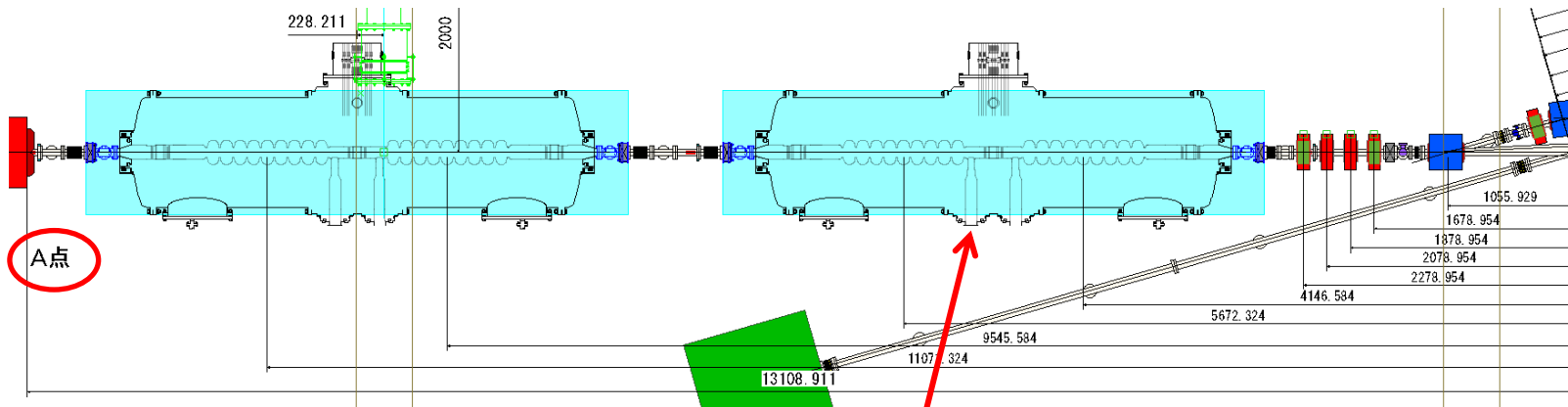
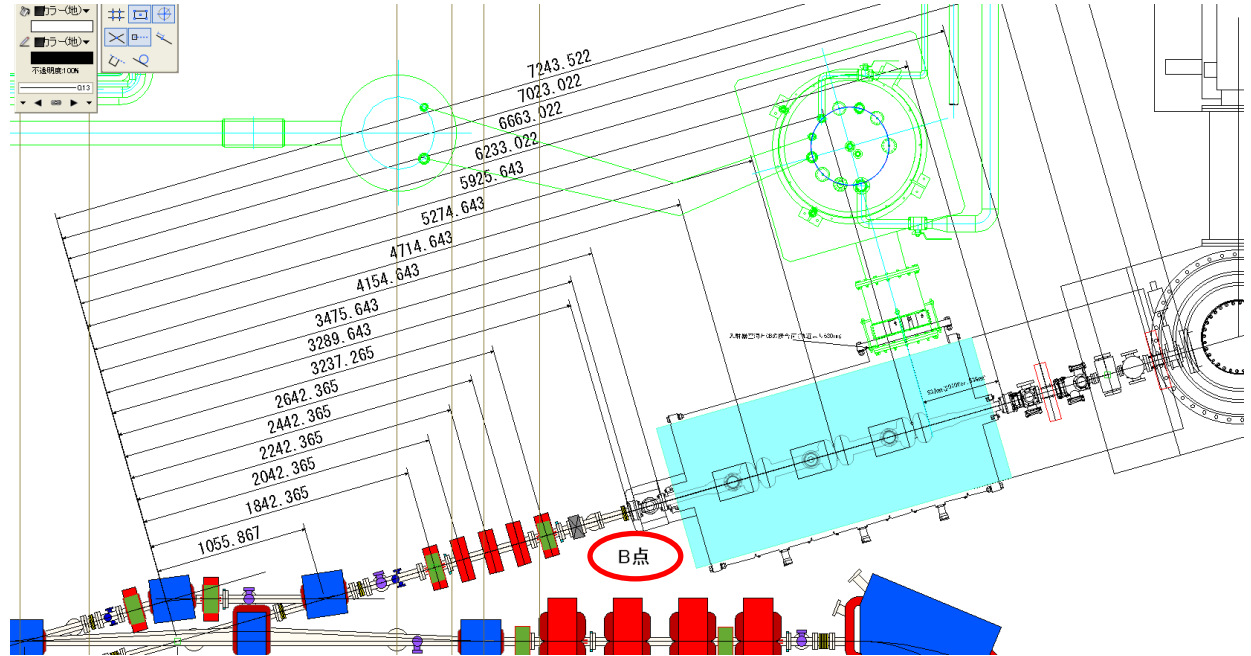
レイアウト

入力ファイル: cerl_inj8_1.in
(主空洞の位置が最新の配置と少し異なるが、とりあえずこの配置を採用)

最適化する点

- (1) A点(主空洞下流)
- (2) B点(入射部空洞下流)

今回の最適化では、B点でエミッタンスとバンチ長を最小化するように最適化した。



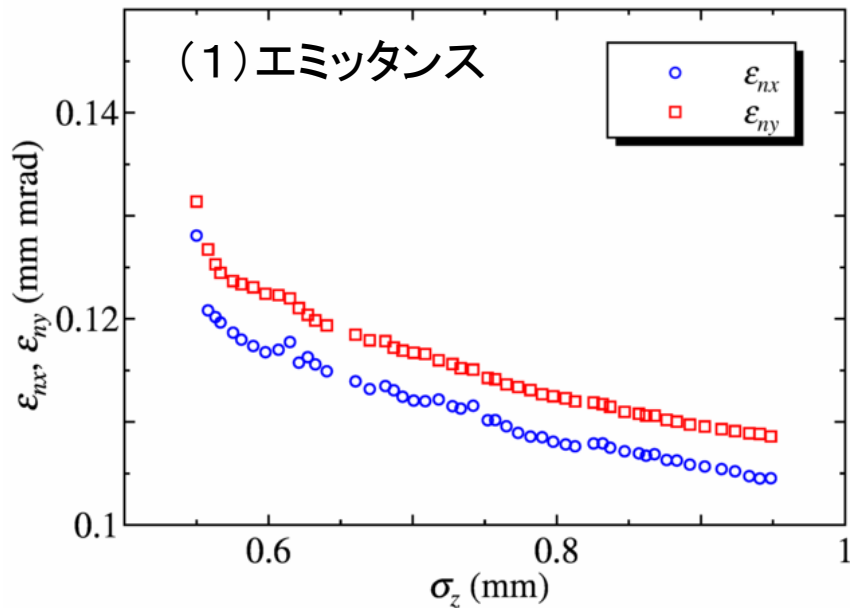
注: 今回の計算(35MeV)ではこの空洞は入れていない

1. 最適化計算の条件(点Bまで)

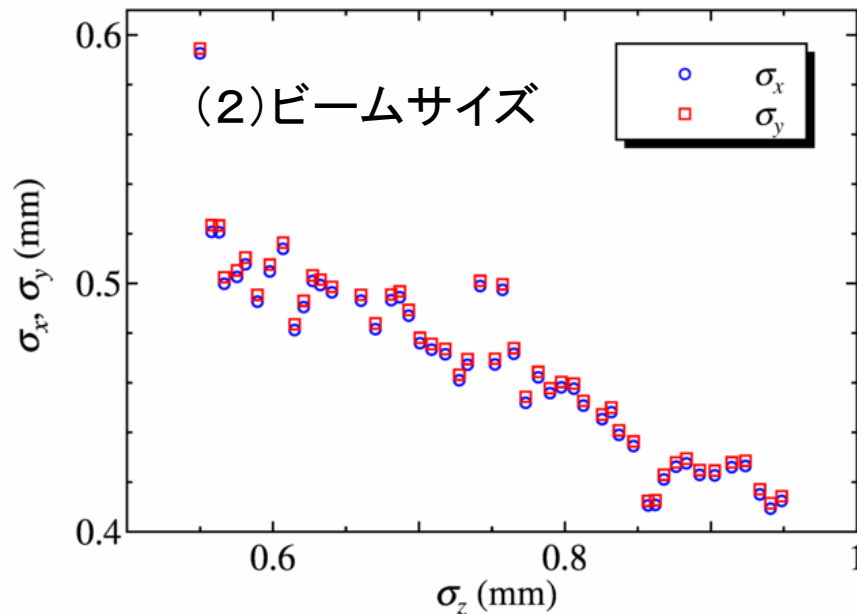
- 点Bでのエミッタンスとバンチ長がともに最小になるように各機器の設定値を最適化した。
- 点B(入射器空洞出口)での全エネルギーを最大で5.6 MeVに制限
- 粒子数: 1k particles(初期の最適化では、粒子数を減らして計算を高速化。ある程度値が決まったら、粒子数を段階的に増やして精度を上げる)
- 計算する部分: カソード面から点B(入射部空洞出口)
- 最適化した設定値
 - レーザー直径: dLAGA01[m] 可変範囲 0.2e-3 4.0e-3
 - レーザー時間全幅: tlenLAGA01[s] 可変範囲 2.0e-12 60.0e-12
 - ソレノイド1の強さ: BSLGA01set[T] 可変範囲 0.02 0.05
 - ソレノイド2の強さ: BSLGA02set[T] 可変範囲 0.01 0.05
 - バンチャー電場: ECBGA01set[MV/m] 可変範囲 0.5 2.0
 - 空洞1電場: ECSGB01set[MV/m] 可変範囲 10.0 15.0
 - 空洞2電場: ECSGB02set[MV/m] 可変範囲 10.0 15.0
 - 空洞3電場: ECSGB03set[MV/m] 可変範囲 10.0 15.0
 - 空洞1位相: PCSGB01off[deg] 可変範囲 -30.0 30.0
 - 空洞2位相: PCSGB02off[deg] 可変範囲 -10.0 10.0
 - 空洞3位相: PCSGB03off[deg] 可変範囲 -10.0 10.0
- 点Bでエミッタンス等のビームの値が計算される
- 50個の設定値のセットを計算

点Bでの結果

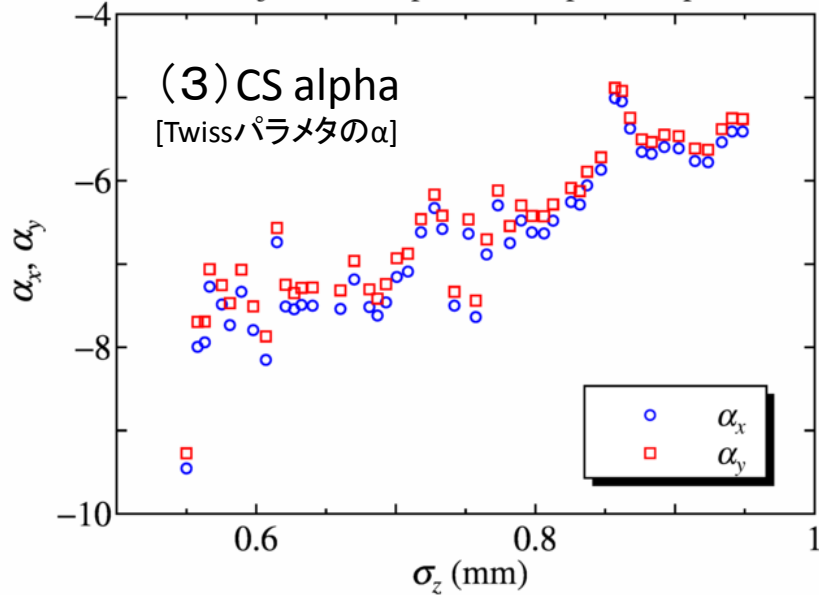
cerl_inj8_1.in, 7.7 pC/bunch, nps = 1 k, point B



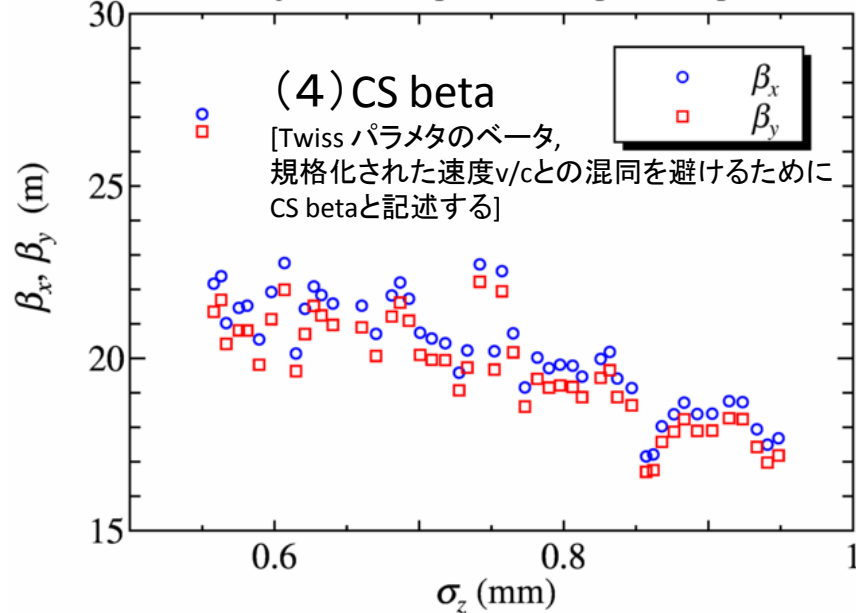
cerl_inj8_1.in, 7.7 pC/bunch, nps = 1 k, point B



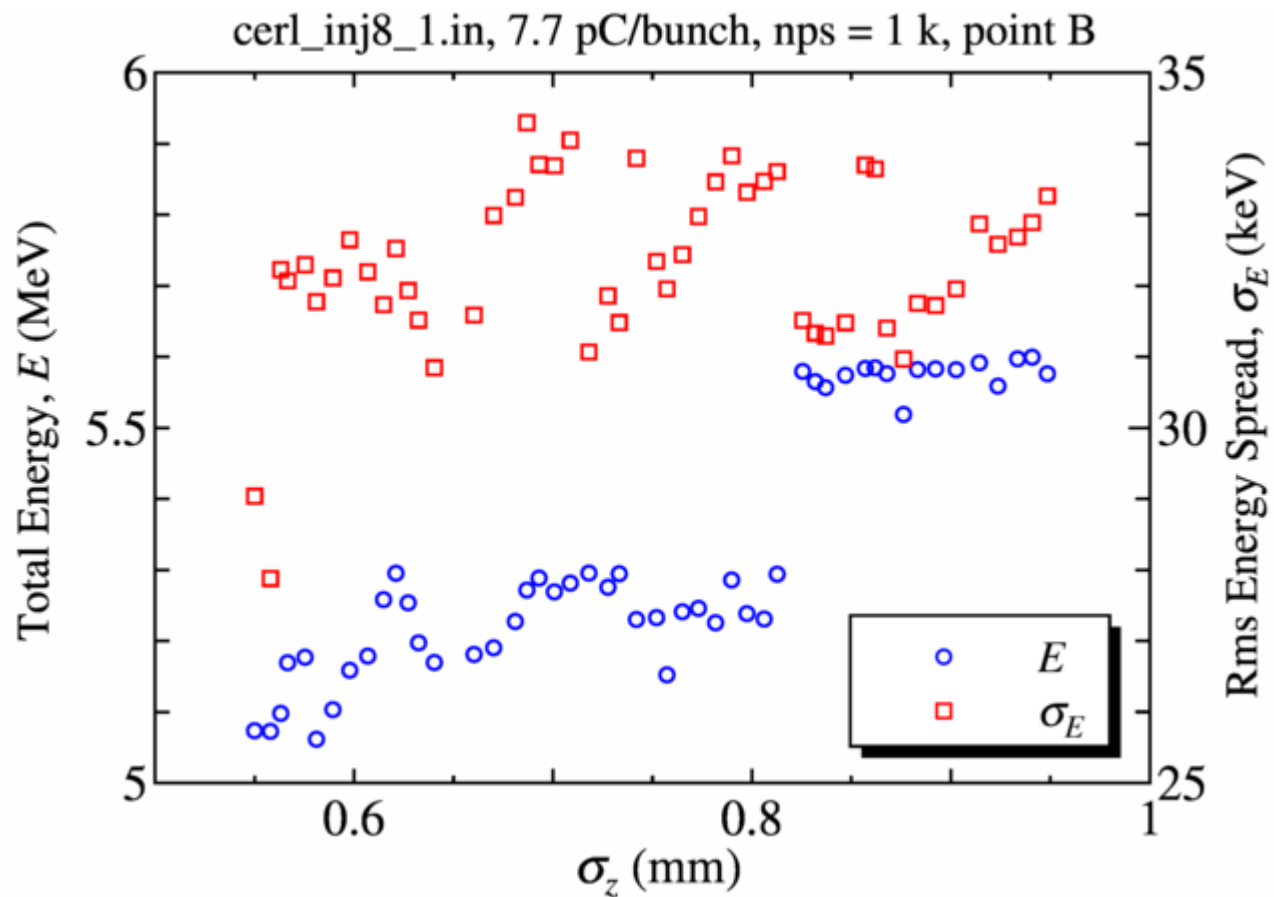
cerl_inj8_1.in, 7.7 pC/bunch, nps = 1 k, point B



cerl_inj8_1.in, 7.7 pC/bunch, nps = 1 k, point B



(5) 全エネルギーとエネルギー拡がり



点Bにおける最適化結果まとめ

- エミッタンス: 0.13 – 0.12 mm mrad (0.6 – 0.9 mm バンチ長に対して)
- CS alpha: -8 から -4
- CS beta: 17 から 23 m

- 7.7 pC/bunchの電荷に対して、それなりに小さいエミッタンスが得られている。
- これを如何にエミッタンス増大を抑制して周回部まで運ぶかということが次の課題となる。

- 次は、この点Bから受け渡し点であるA点までのトラッキングを行う。

点Aまでの最適化計算の方針

- 方針: 周回部とのマッチング条件を満たすように、点Bから点Aまでelegantで線形オプティクス(SCなし)で計算する。そのオプティクスを元にして、SCを入れてGPTで最適化する。
- ただし、この方法ではまだあまりうまくいっていない。
- とりあえず、77 pC/bunchの最適化計算結果を元にして、電子銃から点Aまで計算した結果を次に示す。
- 今回の報告では、周回部とのマッチング条件に合わせて、点AでのCSパラメタに制限を設けている。制限範囲は3つ設定してあるので、3つの結果について示す。
- 点Aでの制限事項
 - 全エネルギー: 35.5 MeV 以下
 - CSパラメタ(周回部とのマッチング条件に合わせて、3つの制限範囲を設定)
- その他
 - 主加速空洞はすべてon crestで加速する(位相調整はなし)。

最適化計算の条件

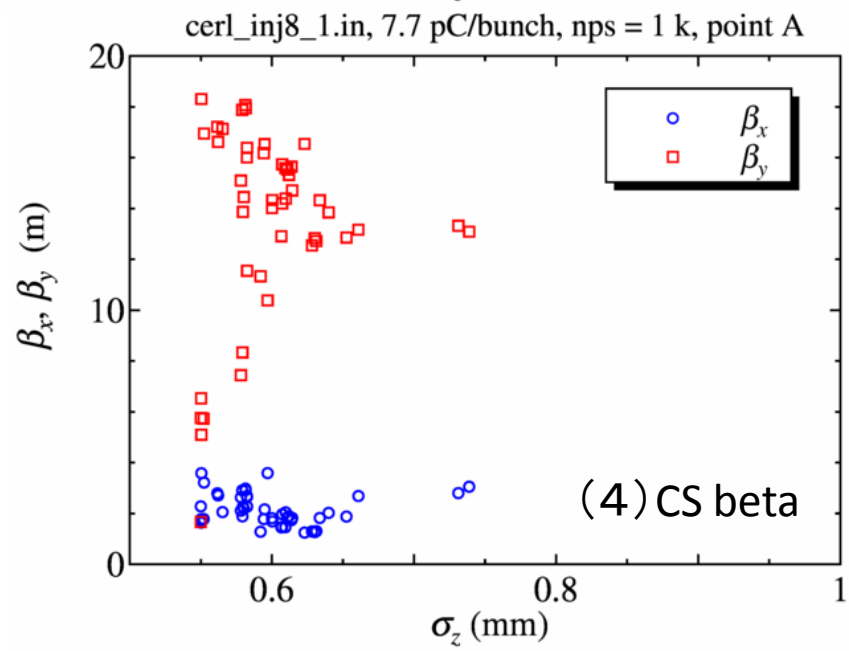
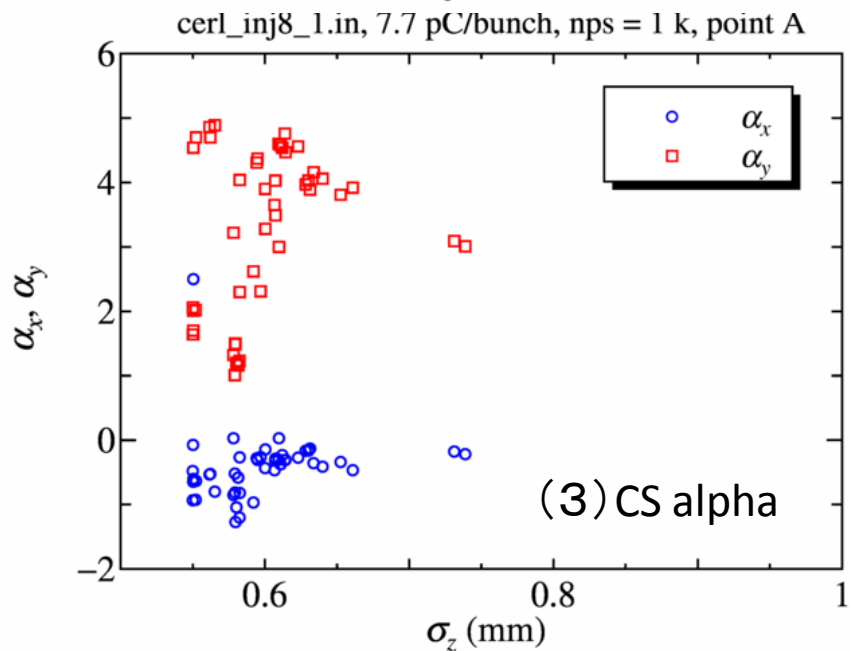
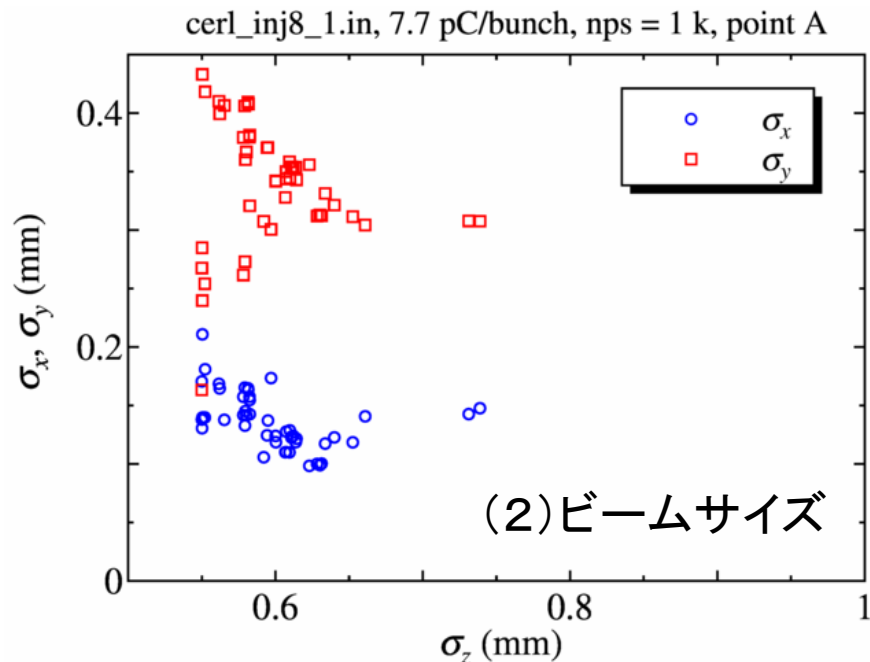
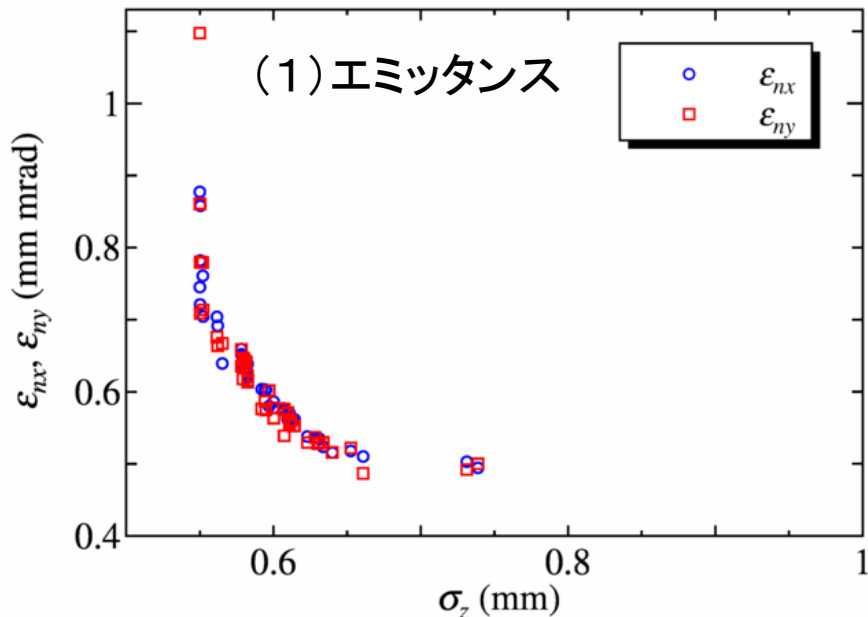
- 粒子数: 1k particles (初期の最適化では、粒子数を減らして計算を高速化。ある程度値が決まったら、粒子数を段階的に増やして精度を上げる)
- 計算する部分: カソード面から点A
- 最適化した設定値
 - レーザー直径: dLAGA01[m] 可変範囲 0.2e-3 4.0e-3
 - レーザー時間全幅: tlenLAGA01[s] 可変範囲 2.0e-12 60.0e-12
 - ソレノイド1の強さ: BSLGA01set[T] 可変範囲 0.02 0.05
 - ソレノイド2の強さ: BSLGA02set[T] 可変範囲 0.01 0.05
 - バンチャー電場: ECBGA01set[MV/m] 可変範囲 0.5 2.0
 - 空洞1電場: ECSGB01set[MV/m] 可変範囲 10.0 15.0
 - 空洞2電場: ECSGB02set[MV/m] 可変範囲 10.0 15.0
 - 空洞3電場: ECSGB03set[MV/m] 可変範囲 10.0 15.0
 - 空洞1位相: PCSGB01off[deg] 可変範囲 -30.0 30.0
 - 空洞2位相: PCSGB02off[deg] 可変範囲 -10.0 10.0
 - 空洞3位相: PCSGB03off[deg] 可変範囲 -10.0 10.0
 - 4極電磁石のK値(合流部手前5台、周回部直線8代)[m-2]: 可変範囲 -40 40
- 点Aでエミッタンス、バンチ長、ビームサイズ、CSパラメタ、エネルギー拡がり、全エネルギーが計算される
- 50個の設定値のセットを計算

2. 点AでのCSパラメタの制限範囲1

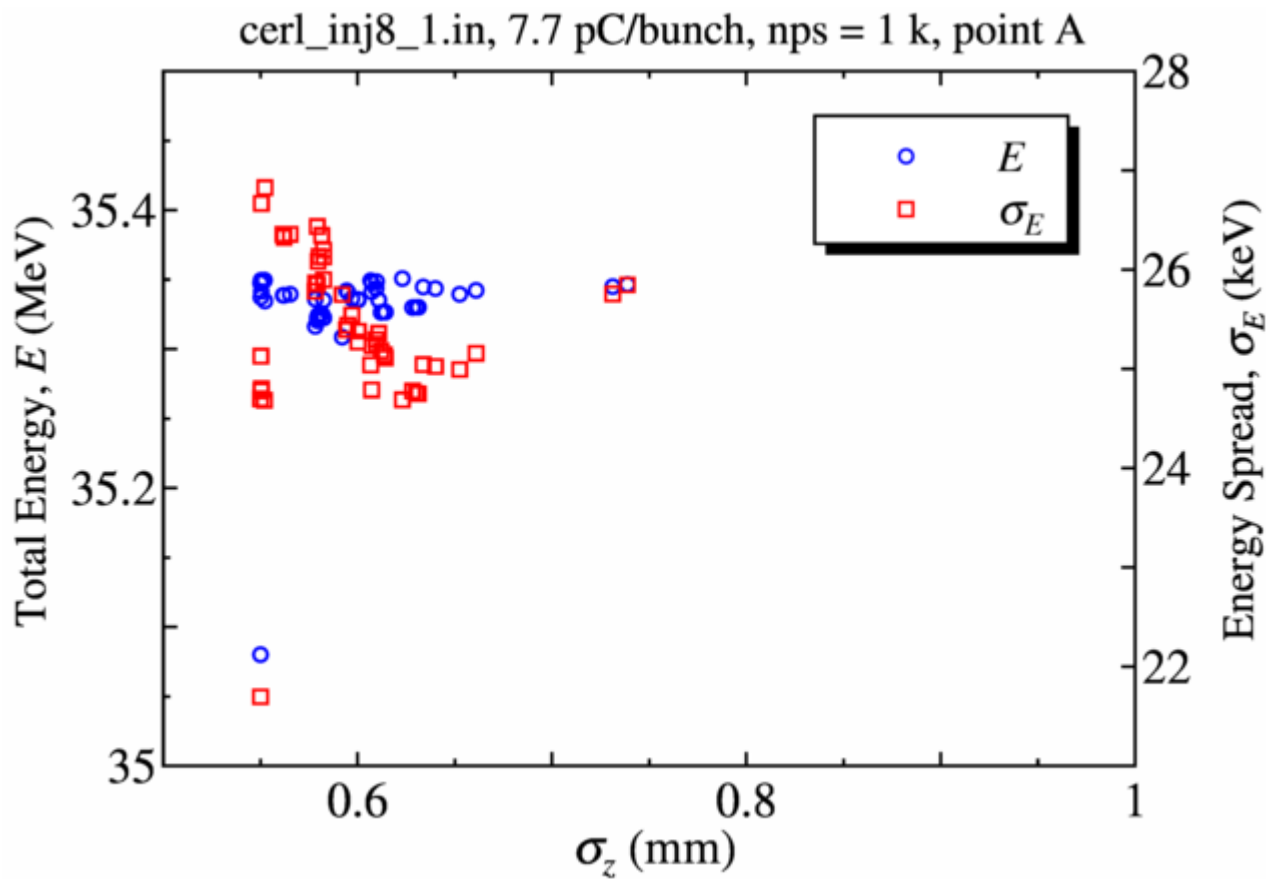
- 77 pC/bunchの計算のときに、島田さんから教えていただいたCSパラメタの範囲を適用して計算した。(注:7.7 pC/bunch用に最適化はされていないことに注意)
- CSパラメタの制限範囲1
 - $-5.0 < \text{alphax} < 5.0$
 - $-5.0 < \text{alphay} < 5.0$
 - $0.1 \text{ m} < \text{betax} < 20.0 \text{ m}$
 - $0.1 \text{ m} < \text{betax} < 20.0 \text{ m}$

A点での結果 (CSパラメタ範囲制限1)

cerl_inj8_1.in, 7.7 pC/bunch, nps = 1 k, point A



(5) 全エネルギーとエネルギー拡がり



A点での最適化結果 (CSパラメタ範囲制限1)

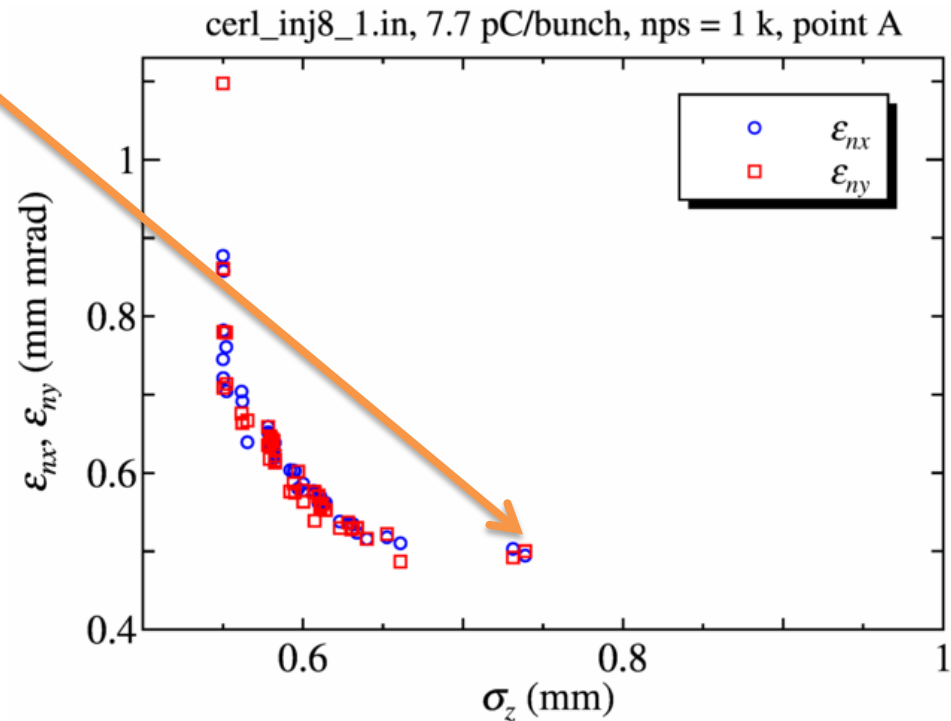
- エミッタンス: 0.5 – 0.6 mm mrad (0.6 – 0.7 mm バンチ長に対して)
- CS alpha: -1 から 5
- CS beta: 1 から 19 m
- CS alpha, CS betaともに制限範囲内に入っている。

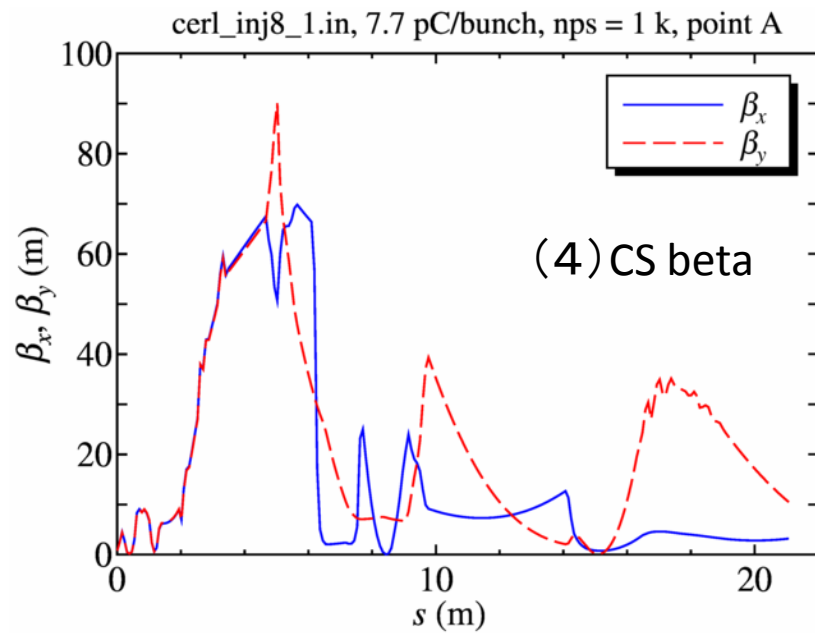
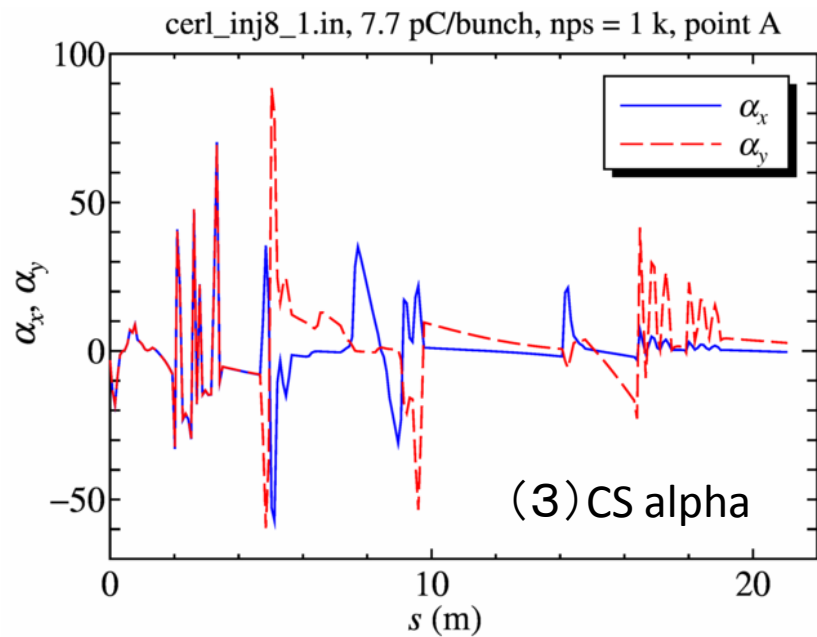
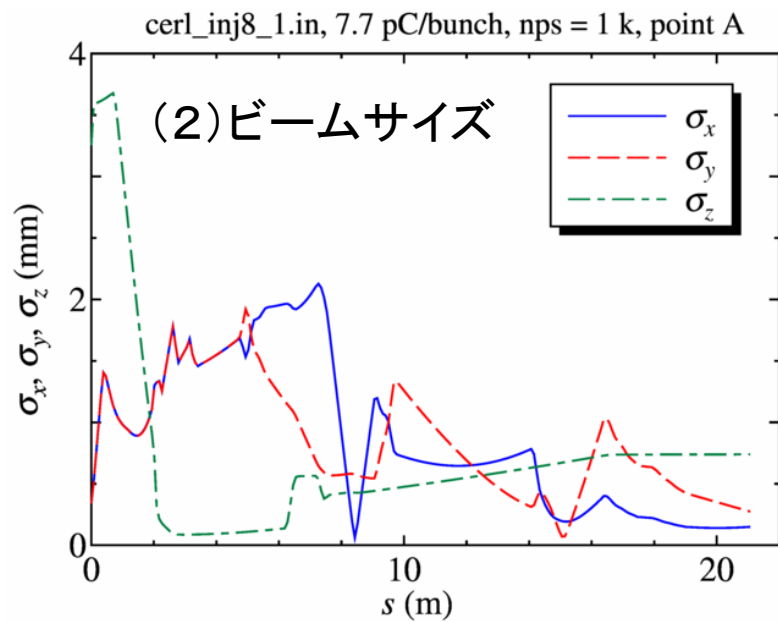
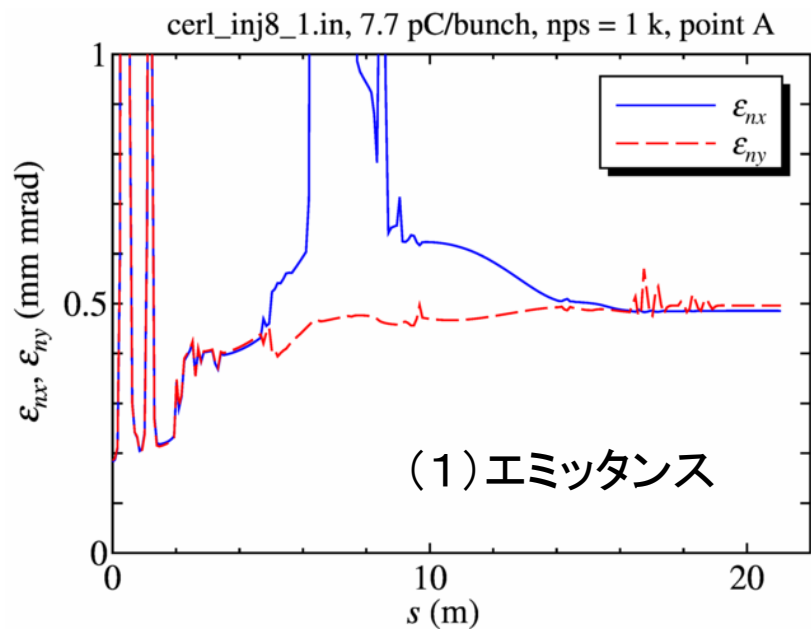
- 77 pC/bunchで点Aまで最適化したときの設定値を元にして、バンチ電荷を7.7 pC/bunchに変更して、A点でのビームの値を最適化した結果を示した。
- 最適化計算の結果は、初期条件に強く依存するため、この計算結果はまだ不十分なものである。

- 次に、この計算結果から得られた設定値のセットについて、エンベロープ、エミッタンスの時間発展を計算する。

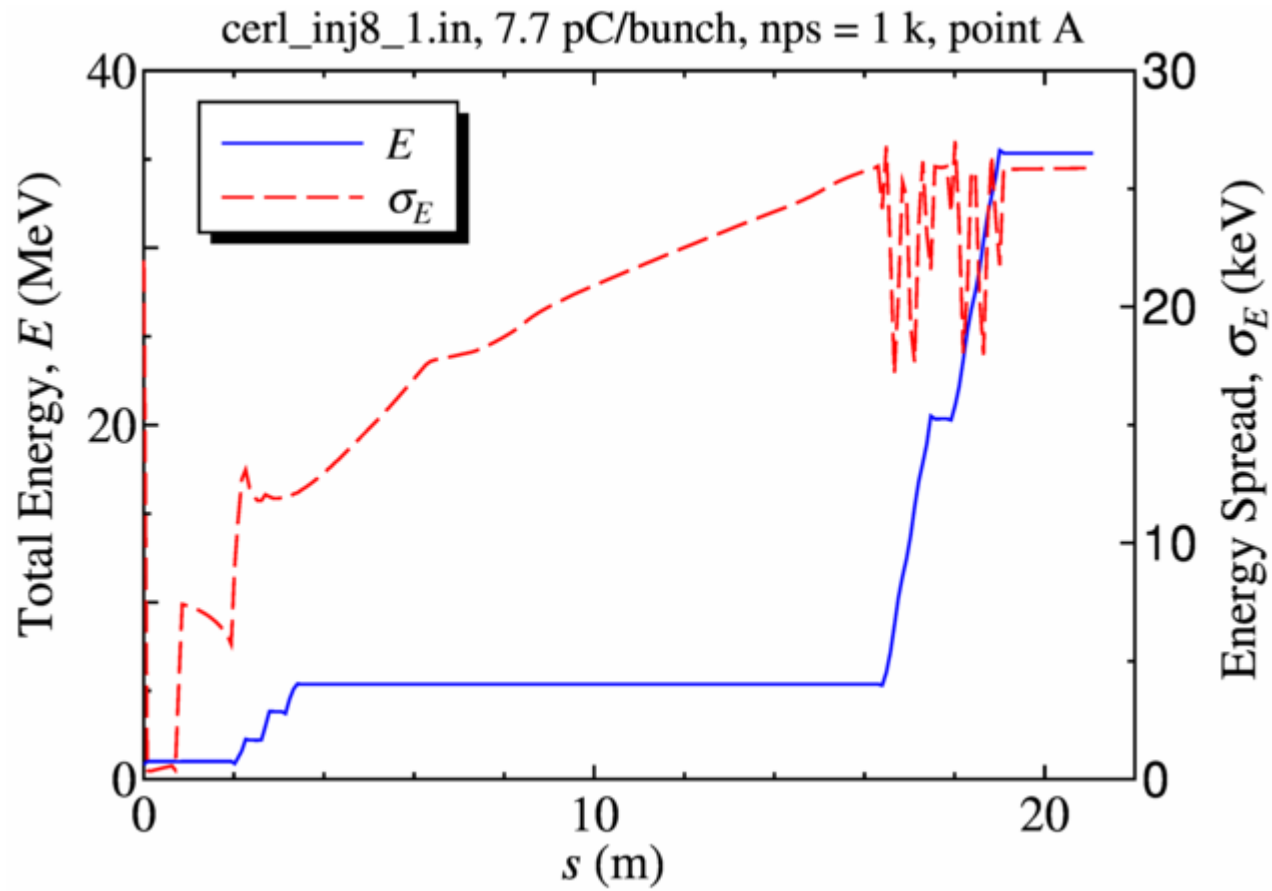
エンベロープの計算

- (不十分であるが)先の最適化した結果から、最小エミッタンスを与える設定値のセットについてエンベロープを計算した。
- 点Aでの値
 - エミッタンス: 0.5 mm mrad
 - バンチ長: 0.74 mm
 - Betax: 3.05173 (m)
 - Betay: 13.0891 (m)
 - Alphax: -0.22
 - Alphay: 3.01





(5) 全エネルギーとエネルギー拡がり



CSパラメタ制限範囲1のまとめ

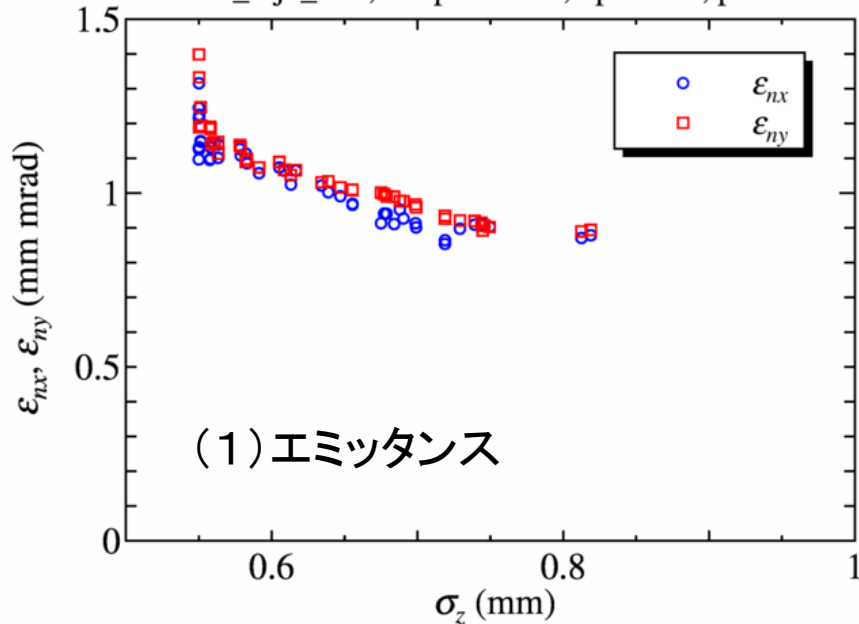
- 7.7 pC/bunchの電荷をもつビームの電子銃から主空洞出口(点A)までのシミュレーションを行った。
- 点Aまでの最適化をとりあえず開始した。初期条件として、77 pC/bunchの設定値から開始して、0.5 – 0.6 mm mradのエミッタンスを点Aで得ている。しかしながらこれではまだ不十分。
- 点Aで0.5 mm mradのエミッタンスを与える設定値についてエンベロープを計算した。点Aでの値は次のようになった。
 - エミッタンス: 0.5 mm mrad
 - バンチ長: 0.74 mm
 - Betax: 3.05173 (m)
 - Betay: 13.0891 (m)
 - Alphax: -0.22
 - Alphay: 3.01
- CSパラメタは制限範囲内に収まっている。ただし、このCSパラメタの値では、周回部でのマッチングが取りにくいことが判明した(後に、Qの配置を変えることによって制限範囲1でもマッチングできることがわかった)。
- 次に、CSパラメタ制限範囲2(x,y方向に対して丸ビームに近づくように設定)の結果について紹介する。

3. 点AでのCSパラメタの制限範囲2

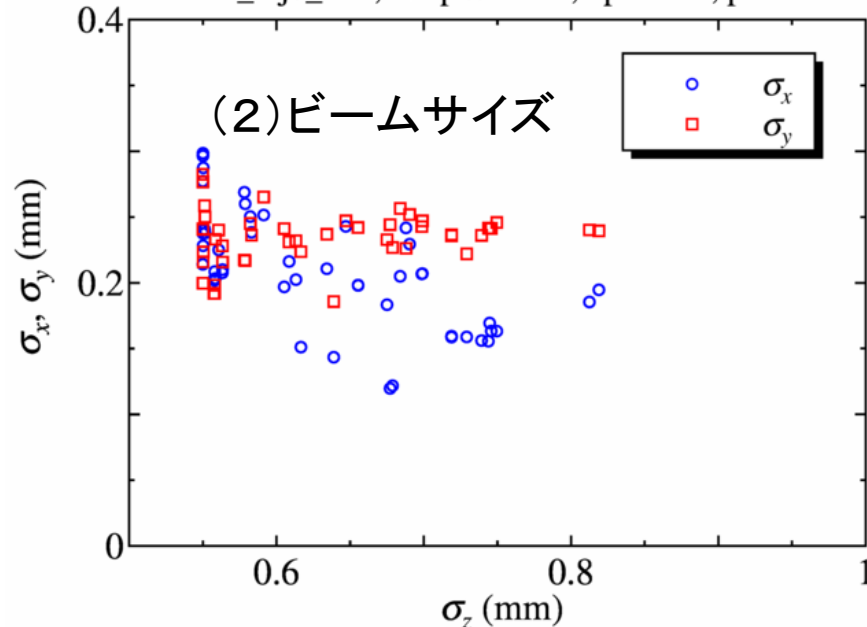
- 制限範囲1の結果を用いて、周回部とのマッチングを行ったところ、主空洞後のQの配置が4連Q×2セットの場合、うまくいかないことが分かってきた(後に、Qを均等配置にするとマッチングできることがわかった)。
- そこで、島田さんにマッチングに有利な点AでのCSパラメタの範囲を計算していただいた。
- 点Aでx, y方向に比較的丸ビームに近い形状が有利であるということであった。
- CSパラメタの制限範囲2
 - $-1.0 < \text{alphax} < 0.0$
 - $-1.0 < \text{alphay} < 0.0$
 - $1.0 \text{ m} < \text{betax} < 5.0 \text{ m}$
 - $1.0 \text{ m} < \text{betay} < 5.0 \text{ m}$

A点での結果 (CSパラメタ範囲制限2)

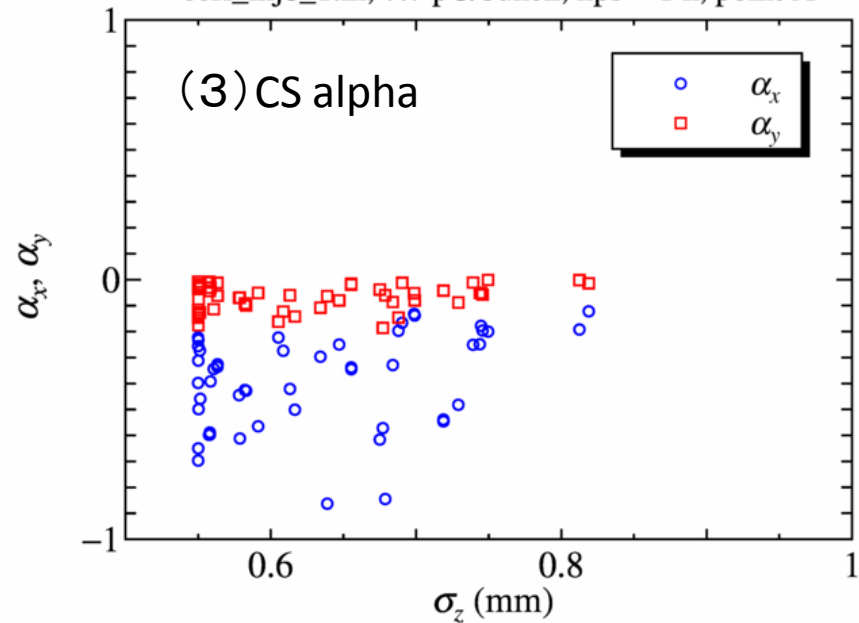
cerl_inj8_1.in, 7.7 pC/bunch, nps = 1 k, point A



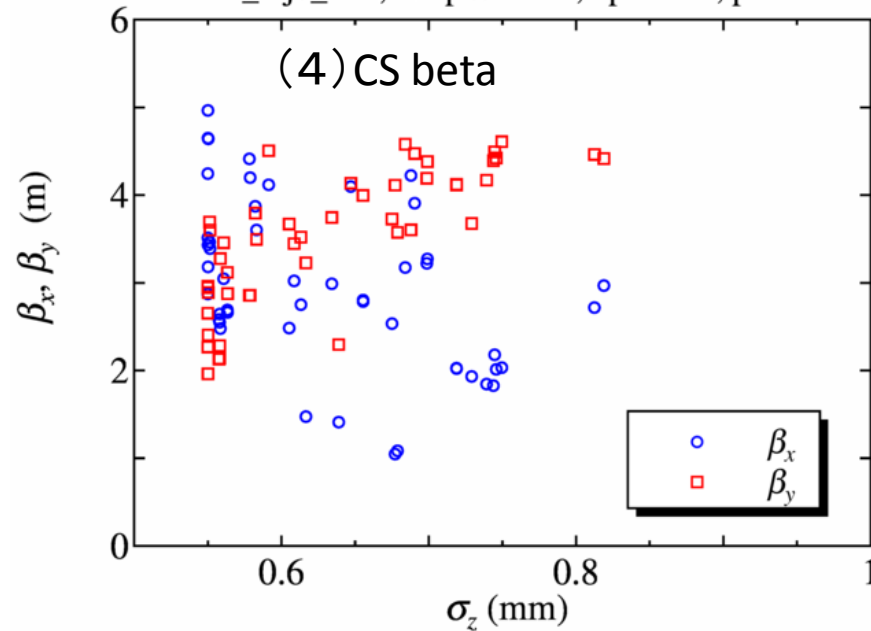
cerl_inj8_1.in, 7.7 pC/bunch, nps = 1 k, point A



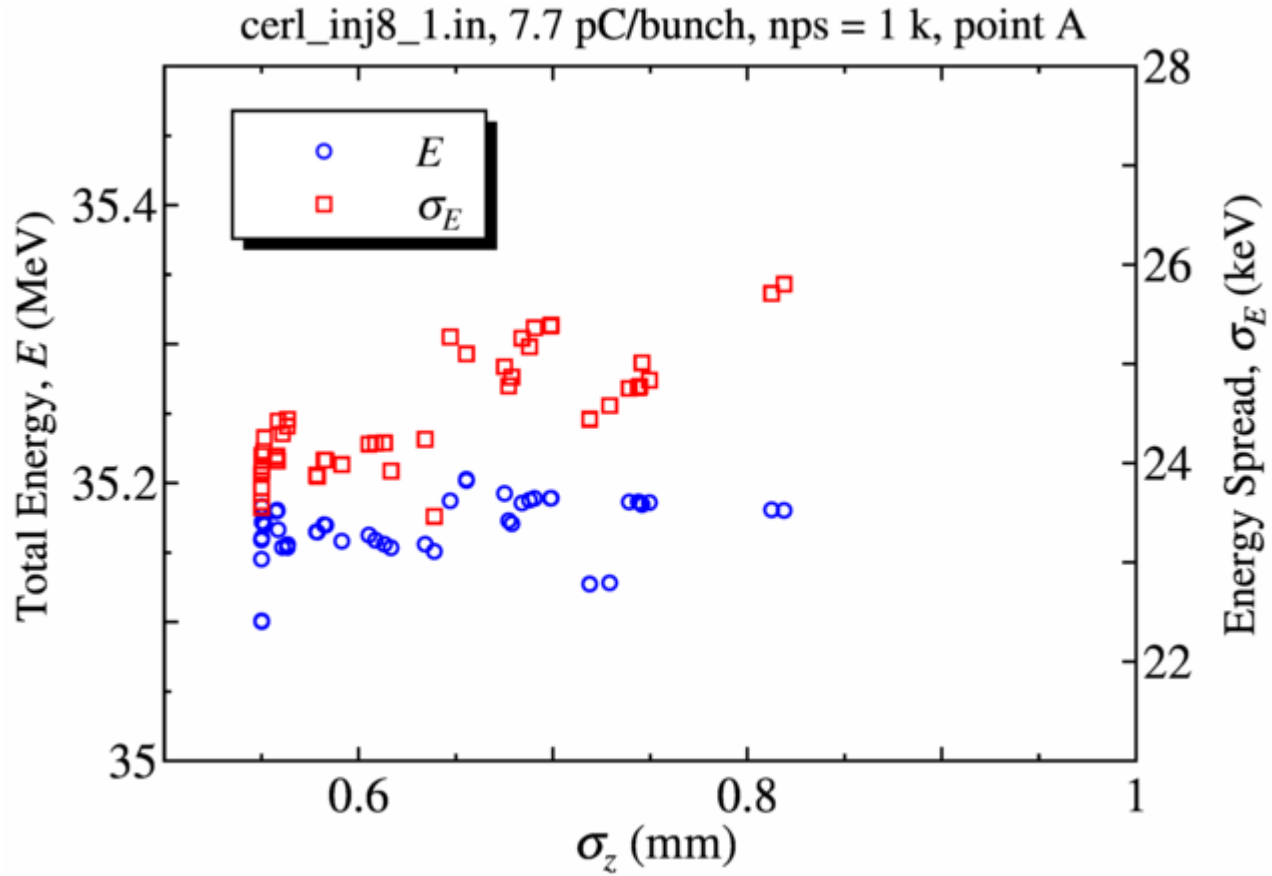
cerl_inj8_1.in, 7.7 pC/bunch, nps = 1 k, point A



cerl_inj8_1.in, 7.7 pC/bunch, nps = 1 k, point A



(5) 全エネルギーとエネルギー拡がり



点Aでの最適化結果 (CSパラメタ制限範囲2)

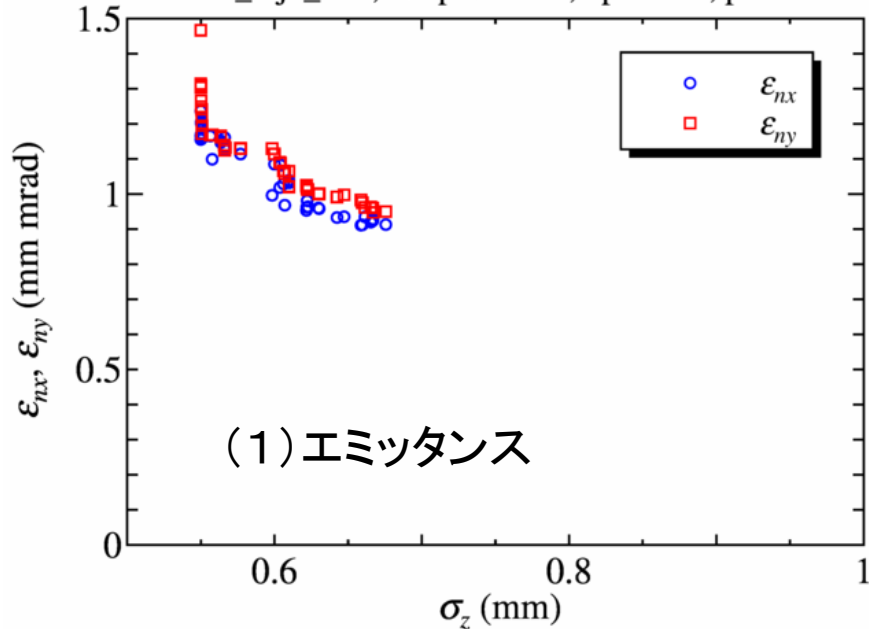
- エミッタンス: 0.9 – 1.1 mm mrad (0.5 – 0.9 mm バンチ長に対して)
- CS alpha: -0.8 から 0
- CS beta: 1 から 5 m
- 点AにおけるCSパラメタは制限範囲に収まっている。
- 完全な丸ビームにはならないが、50個のパラメタセットの中に、比較的丸ビームに近いビームを与えるものがある。
- 制限範囲1の場合と比較して、エミッタンスは思いの外下がらなかったが、とりあえず 1 mm mrad は切っている。
- オプティクス打合せで島田さんより、さらに詳細な点AでのTwissパラメタの範囲の報告があった。次の計算からはTwissパラメタに対して下記の制限 (CSパラメタ制限範囲3) を設けるようにする。
 - $-1.0 < \alpha_{\text{ax}} < -0.2$
 - $-1.0 < \alpha_{\text{ay}} < -0.2$
 - $3.0 \text{ m} < \beta_{\text{ax}} < 7.0 \text{ m}$
 - $3.0 \text{ m} < \beta_{\text{ay}} < 7.0 \text{ m}$

4. 点AでのCSパラメタの制限範囲2

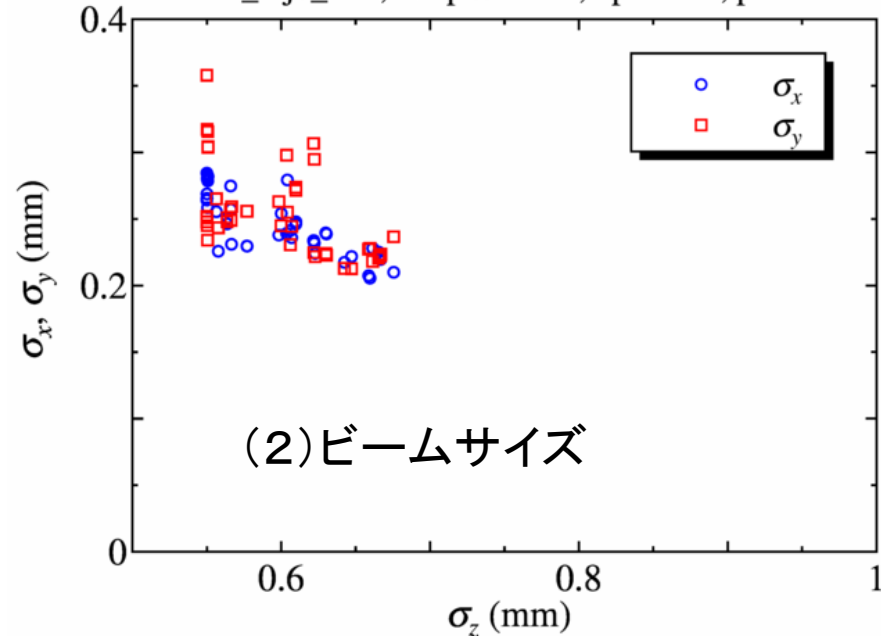
- オプティクス打合せで島田さんより、さらに詳細な点AでのTwissパラメタの範囲の報告があった。次の計算からはTwissパラメタに対して下記の制限(CSパラメタ制限範囲3)を設けるようにする。
- CSパラメタの制限範囲3
 - $-1.0 < \alpha_x < -0.2$
 - $-1.0 < \alpha_y < -0.2$
 - $3.0 \text{ m} < \beta_x < 7.0 \text{ m}$
 - $3.0 \text{ m} < \beta_y < 7.0 \text{ m}$

A点での結果 (CSパラメタ制限範囲3)

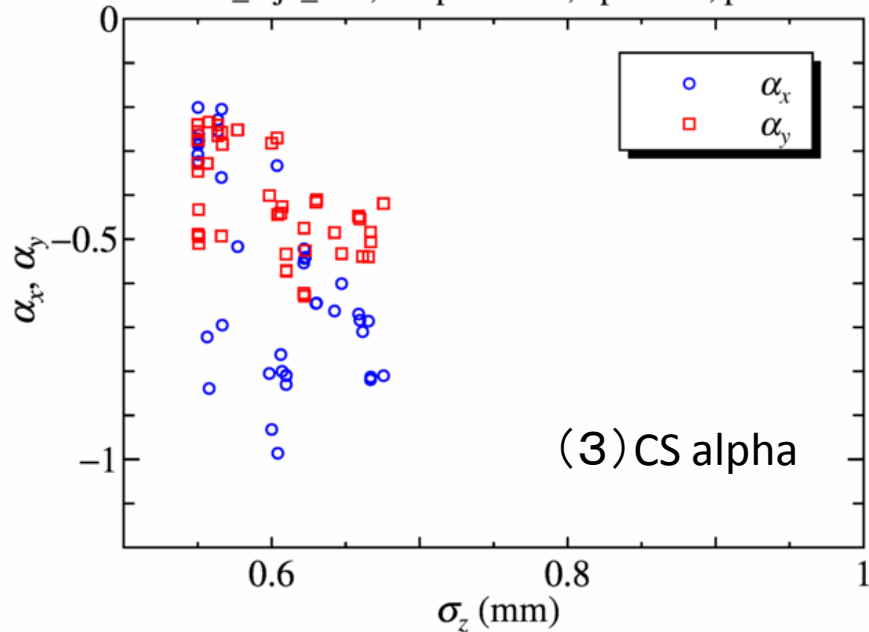
cerl_inj8_1.in, 7.7 pC/bunch, nps = 1 k, point A



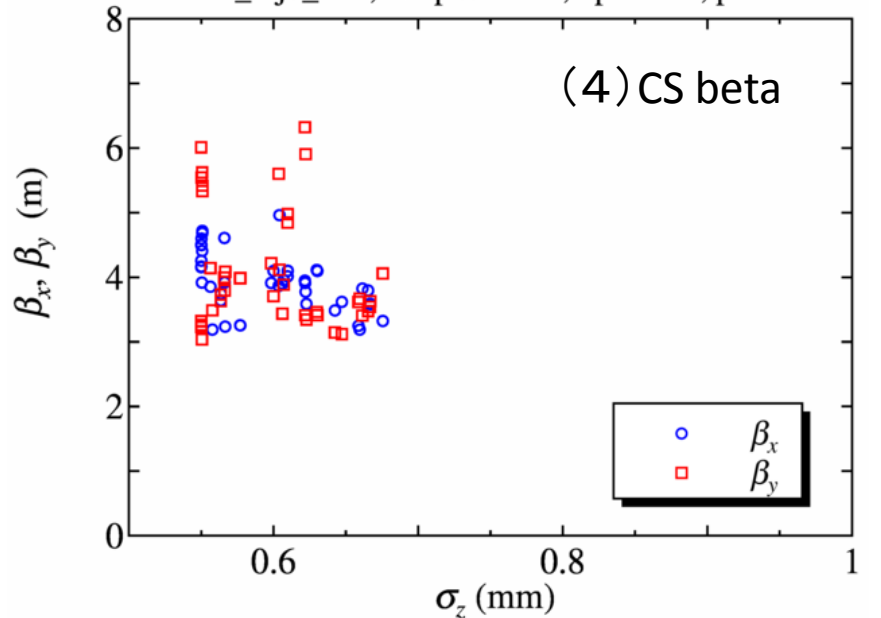
cerl_inj8_1.in, 7.7 pC/bunch, nps = 1 k, point A



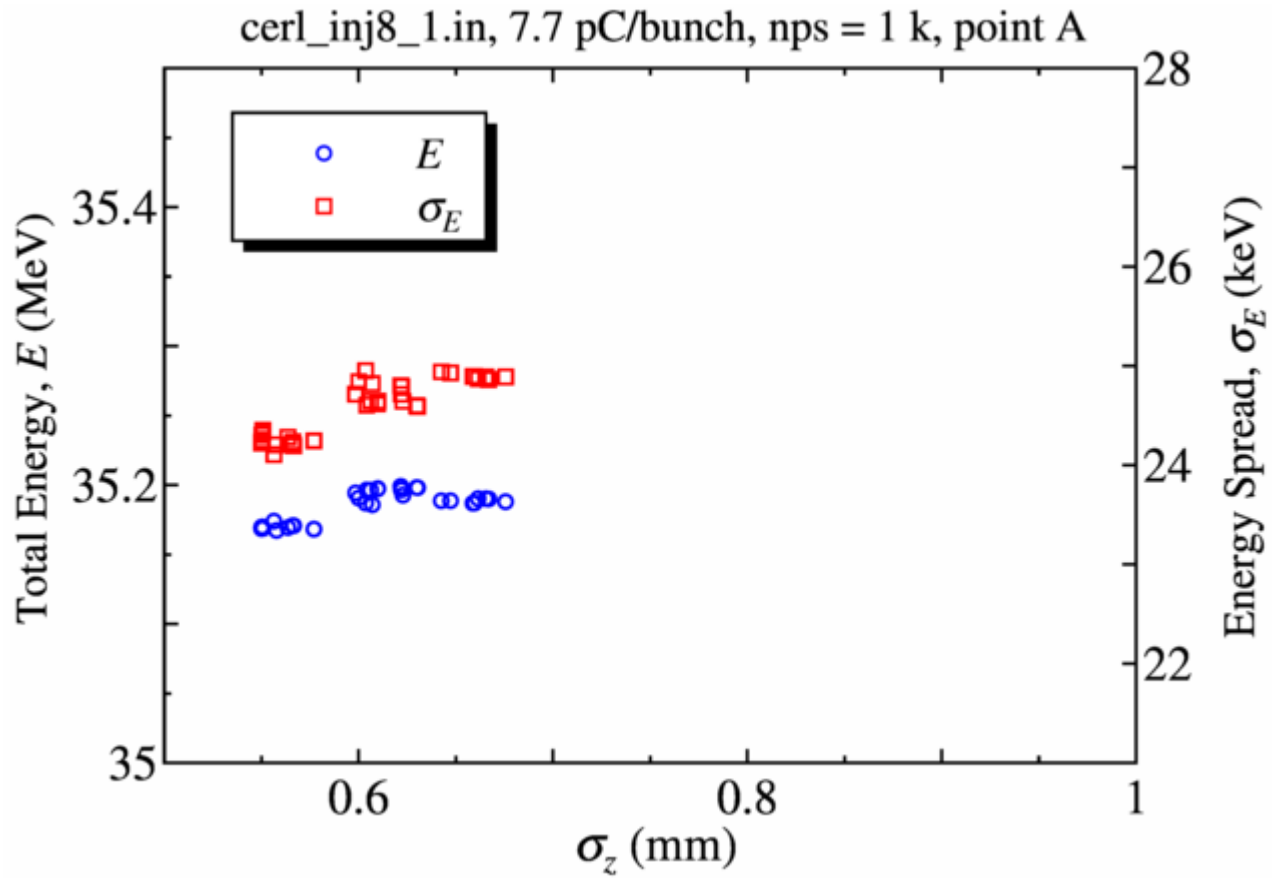
cerl_inj8_1.in, 7.7 pC/bunch, nps = 1 k, point A



cerl_inj8_1.in, 7.7 pC/bunch, nps = 1 k, point A



(5) 全エネルギーとエネルギー拡がり



A点での最適化結果 (CSパラメータ制限範囲3)

- エミッタンス: 0.9 – 1.1 mm mrad (0.5 – 0.7 mm バンチ長に対して)
- CS alpha: -1.0 から -0.2
- CS beta: 3 から 6 m
- 点AでのCSパラメータはとりあえず、制限範囲内に収まっている。

- エミッタンスは、とりあえず1 mm mradは切っている。
- 今回の計算で最小エミッタンスを与える場合のA点でのTwissパラメータ (詳細なデータは、“output_20110514_1039_1k.xlsx”を参照)
 - stdz = 0.000666922 m
 - betax = 3.58085 m
 - betay = 3.63035 m
 - alphax = -0.813
 - alphay = -0.506
 - enx = 9.29E-07 m rad
 - eny = 9.48E-07 m rad

- x, y面に対してほぼ丸ビームになっているが、エミッタンスは制限範囲1の場合に比べると2倍近く大きい。
- 幾つかのパラメータセットに対して、周回部とマッチングできることがわかった。

点Aでの最適化計算のまとめ

- 7.7 pC/bunchの電荷をもつビームの電子銃から主空洞出口(点A)までのシミュレーションを行った。
- 周回部とのマッチング条件を満たすために、点AでのCSパラメタに対して制限を掛けた。
- CSパラメタの制限範囲は3つ設定した。
 - 制限範囲1: $-5.0 < \alpha_{hx} < 5.0$, $-5.0 < \alpha_{hy} < 5.0$, $0.1 \text{ m} < \beta_{hx} < 20.0 \text{ m}$, $0.1 \text{ m} < \beta_{hy} < 20.0 \text{ m}$
 - 制限範囲2: $-1.0 < \alpha_{hx} < -0.2$, $-1.0 < \alpha_{hy} < -0.2$, $3.0 \text{ m} < \beta_{hx} < 7.0 \text{ m}$, $3.0 \text{ m} < \beta_{hy} < 7.0 \text{ m}$
 - 制限範囲3: $-1.0 < \alpha_{hx} < -0.2$, $-1.0 < \alpha_{hy} < -0.2$, $3.0 \text{ m} < \beta_{hx} < 7.0 \text{ m}$, $3.0 \text{ m} < \beta_{hy} < 7.0 \text{ m}$
- 最適化計算結果とマッチング
 - 制限範囲1: エミッタンス0.5 – 0.6 mm mrad, マッチングは4連Q×2の配置では思わしくない。
 - 制限範囲2: エミッタンス0.9 – 1.1 mm mrad, 丸ビームに近い。
 - 制限範囲3: エミッタンス0.9 – 1.1 mm mrad, 幾つかのパラメタセットでマッチングが取れた。
- マッチングについては、主空洞後のQのレイアウト変更によって、点AでのCSパラメタの範囲が広く取れることが分かってきた(詳細は島田さん、中村さんの報告で)。
- 最後に、GPTの計算結果(粒子分布)をelegantで読み込ませる方法について紹介する。

5. GPTの出力をelegantで読み込むテスト

- Elegantには"sdds_beam"というコマンドがあり、これを用いると"track"の初期分布をsddsファイルから読み込むことができる。
- また、GPTには、"gdf2sdds"というコマンドがあり、GPTの出力結果(gdfフォーマット)をsdds形式に変換可能。
- これらを組み合わせて、GPTで計算された粒子分布をelegantで読み込ませるテストを行った。
- 主な流れ
 - (1) GPTで粒子分布を生成(ファイル形式GDF)
 - (2) gdf2sddsでSDDSフォーマットに変換する(ファイル形式SDDS)
 - (3) elegantの"sdds_beam"コマンドを用いて読み込む

(1) GPTで粒子分布を生成

- GPTでは粒子分布を出力するコマンドとして、“screen”と“tout”の2つのコマンドが用意されている。
 - “screen”は仮想スクリーンを設置して、粒子がそのスクリーンを通過する時刻(t)と位置(x, y)と速度(betax=vx/c, betay=vy/c, betaz=vz/c)を出力する。
 - “tout”は設定した時刻での粒子の位置(x, y, z)と速度(betax, betay, betaz)を出力する。
- Elegantの“sdds_beam”では、一つの粒子について(x, xp, y, yp, t, p)の6つの値が要求される。ここで、xp=dx/ds, yp=dy/ds, p=gamma*betaである。
- “sdds_beam”のフォーマットに合わせるには、GPTの“screen”コマンドが有効であるので、GPTの入力ファイル内では、“screen”を使用する。
- GPT入力ファイル内での出力例
 - screen("wcs", "l", ZpointA);

(2) gdf2sddsでSDDSフォーマットに変換

- “gdf2sdds”コマンドを用いて、GPTで計算された粒子分布(GDFフォーマット)をSDDSフォーマットに変換する。
- 変換例
 - `gdf2sdds -o cerl_inj8_1_DtoA_tmp.sdds cerl_inj8_1_DtoA.out.gdf`
- 上記の変換を実行すると、“cerl_inj8_1_DtoA_tmp.sdds”というSDDSフォーマットのファイルが生成される。ここで、“cerl_inj8_1_DtoA.out.gdf”はGPTの“screen”コマンドで生成された粒子分布のファイル。
- ただし、“cerl_inj8_1_DtoA_tmp.sdds”は、(x, betax, y, betay, t, gamma)という形式のデータであるため、“sdds_beam”が要求する(x, xp, y, yp, t, p)という形式にはなっていない。そこで、sddsを利用して、データ形式を“sdds_beam”用に変換する。
- 6次元データの変換例(sddsを利用)
 - `sddsprocess cerl_inj8_1_DtoA_tmp.sdds tmp.sdds -define=column,xp,"Bx Bz /" -define=column,yp,"By Bz /" -define=column,p,"G G * 1 - sqrt",units="mbenc" -convertunits=column,x,m,"",1.0 -convertunits=column,y,m,"",1.0 -convertunits=column,z,m,"",1.0 -convertunits=column,t,s,"",1.0`
- 上記のままだと、時間tがreference particleからの時間の遅れ(reference particleでは0になる)ではないので、次のコマンドで変換する。
 - `sddsbaseline tmp.sdds cerl_inj8_1_DtoA.sdds -columns=t -select=endpoints=1000e3 -method=average`
- 最後に生成されるファイルは、“cerl_inj8_1_DtoA.sdds”。次にこのファイルを“sdds_beam”コマンドを用いてelegantで読み込む。

(3) elegantの"sdds_beam"コマンド

- "sdds_beam"でのファイルの読み込み
- "run_setup"の後に次のように記述
 - &sdds_beam
 - input = cerl_inj8_1_DtoA.sdds,
 - input_type = "elegant"
 - &end
- これで、"track"コマンドを使った時に、"cerl_inj8_1_DtoA.sdds"ファイルに含まれる粒子分布が読み込まれる。
- 正しく読み込まれているかのテスト
- GPTでの結果
 - $S_x=1.967535891e-004$, $S_y=1.962131077e-004$, $S_z=6.124501001e-004$
 - $en_x=8.767991851e-007$, $en_y=8.768493158e-007$
- "sdds_beam"での結果
 - $S_x=1.967547e-004$, $S_y=1.962132e-004$, $S_s=6.124501e-004$
 - $en_x=8.768037e-007$, $en_y=8.768501e-007$
- 以上の結果より、"sdds_beam"コマンドでGPTの粒子分布を正しく読み込めていることが確認できた。
- 課題: elegantではTwissパラメタを計算するときに、"twiss_output"コマンドが使用されているが、"sdds_beam"は"track"用のコマンドであるらしく、Twissパラメタの計算では反映されていなさそう。これについてはこれからチェックする。

まとめ

- 7.7 pC/bunchの電荷をもつビームの電子銃から主空洞出口(点A)までのシミュレーションを行った。
- 点Aまでのシミュレーションの前段階として、入射器空洞出口(点B)までの最適化を行い、0.13 – 0.12 mm mradのエミッタンスを得た。
- 周回部とのマッチングのために、点AでのCSパラメタに制限を設けて最適化計算を行った。制限範囲は今回3つ設定している。
- 最適化計算結果とマッチング
 - 制限範囲1: エミッタンス0.5 – 0.6 mm mrad, マッチングは4連Q×2の配置では思わしくない。
 - 制限範囲2: エミッタンス0.9 – 1.1 mm mrad, 丸ビームに近い。
 - 制限範囲3: エミッタンス0.9 – 1.1 mm mrad, 幾つかのパラメタセットでマッチングが取れた。
- GPTの粒子分布をelegantで読み込ませるテストを行い、正しく読み込めていることを確認した。