

2016年2月～3月期の cERL ビーム調整

2016年4月12日(火)13時30分～
ERL開発棟会議室

加速器第七研究系 宮島 司

概要

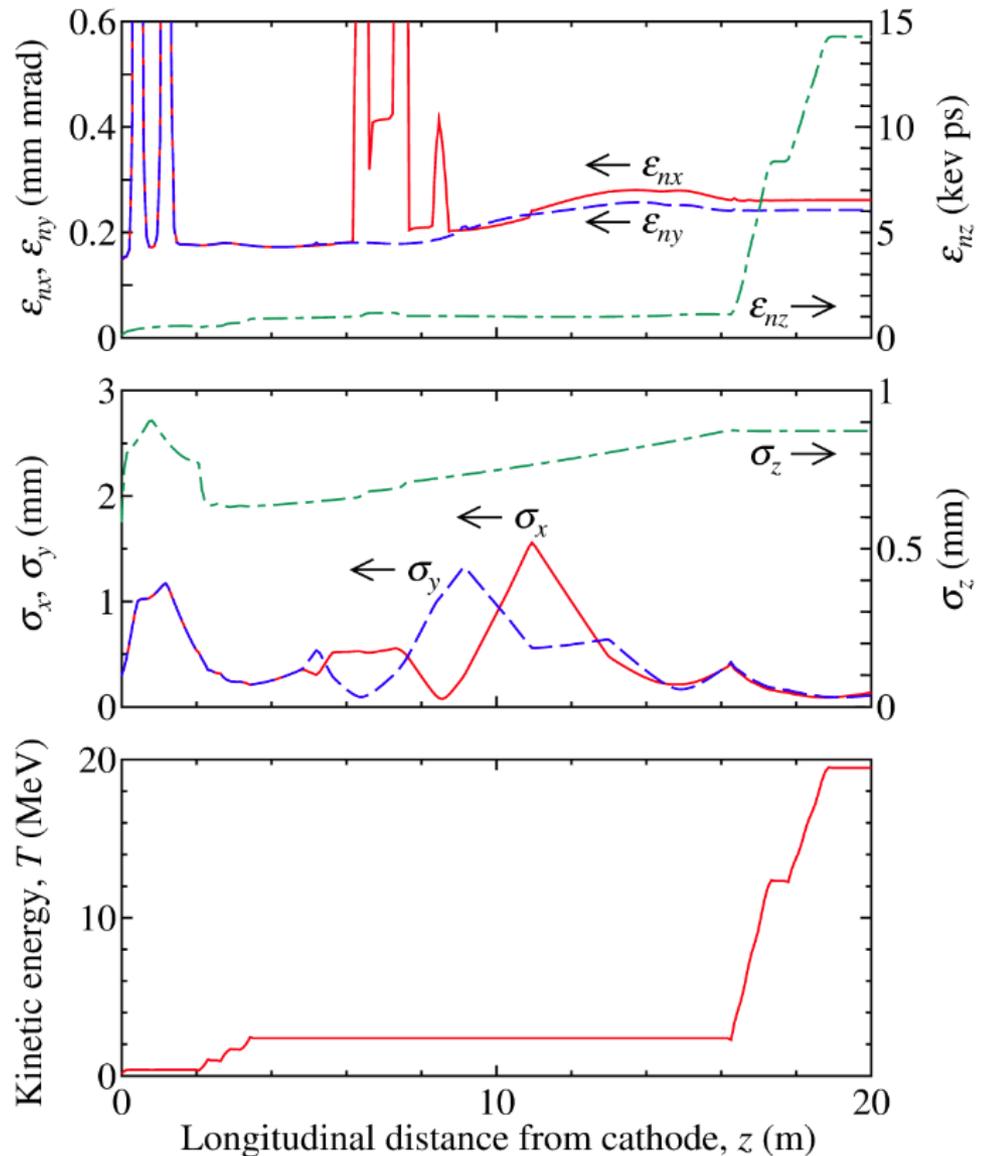
- 2016年2月から3月に行われたcERLビーム運転において実施した、ビーム輸送条件の調整について報告する
- 今期の目標
 - 放射線施設検査を通すこと(300 μ A CW運転)
 - 調整時間短縮のための方法の確立(電磁石初期化の徹底、BPMを用いた軌道補正)
 - 平均ビーム電流を上げたとき(1 mA)のビーム損失の低減(平均10 mA CW運転の見通しを立てる)
 - バンチ電荷7.7 pCにおける損失のないビーム周回と、エミッタンス低減
 - 電子銃電圧を上げた運転 (390 kV \Rightarrow 450 kV)
- 実施項目
 - 電子銃近傍の軌道調整法の確立
 - 入射器空洞の軌道調整(低エミッタンス化に向けた調整)
 - 入射器空洞出口から第二アーク出口までの軌道補正法の確立
 - アーク部転送行列の補正(水平・垂直分散関数の補正)
 - バンチ電荷 6 ~ 7.7 pC の周回部輸送、CW運転
 - 電子銃電圧 450 kV でのビーム周回運転

運転条件

- 今期の運転では、下記の4つの運転条件を使用
 1. 電子銃390 kV + 0.5 pC 輸送条件
 2. 電子銃390 kV + 7.7 pC輸送条件(エミッタンス優先、コリメタの影響は考慮せず)
 3. 電子銃390 kV + 0.5 pC輸送条件(バンチ電荷を7.7 pCに上げる)
 4. 電子銃450 kV + 7.7 pC新輸送条件(コリメタ位置のビームサイズを考慮)
 - 1. はレーザー繰り返し 1.3 GHz
 - 2. 以降は、レーザー繰り返し 162.5 MHz
- 方針
 - 当面 1. の運転条件で調整し、施設検査を合格できる条件を確立する
 - 施設検査後の早い段階で、1 mA CW運転を実証する
 - バンチ電荷を上げ、7.7 pC で低エミッタンスに向けた調整を実施する(CW 運転を見据えて、入射器のエネルギーは 2.9 MeVのままとする)
 - 繰り返し 162.5 MHz で 1 mA CW 運転可能な状態を確立すること

電子銃390 kV + 0.5 pC 輸送条件

- 計算条件
 - 入力ファイル:
cerl_inj11_4.in
 - nps = 2 k particles
 - 初期サイズ: $d = 1.2$ mm
(実験で使用したピンホールサイズを推定した値)
 - 初期パルス: 3 ps gaussian
- 主空洞出口の値
 - $\epsilon_{nx} = 0.26$ mm mrad
 - $\epsilon_{ny} = 0.24$ mm mrad
 - $\text{stdz} = 0.87$ mm (2.9 ps)



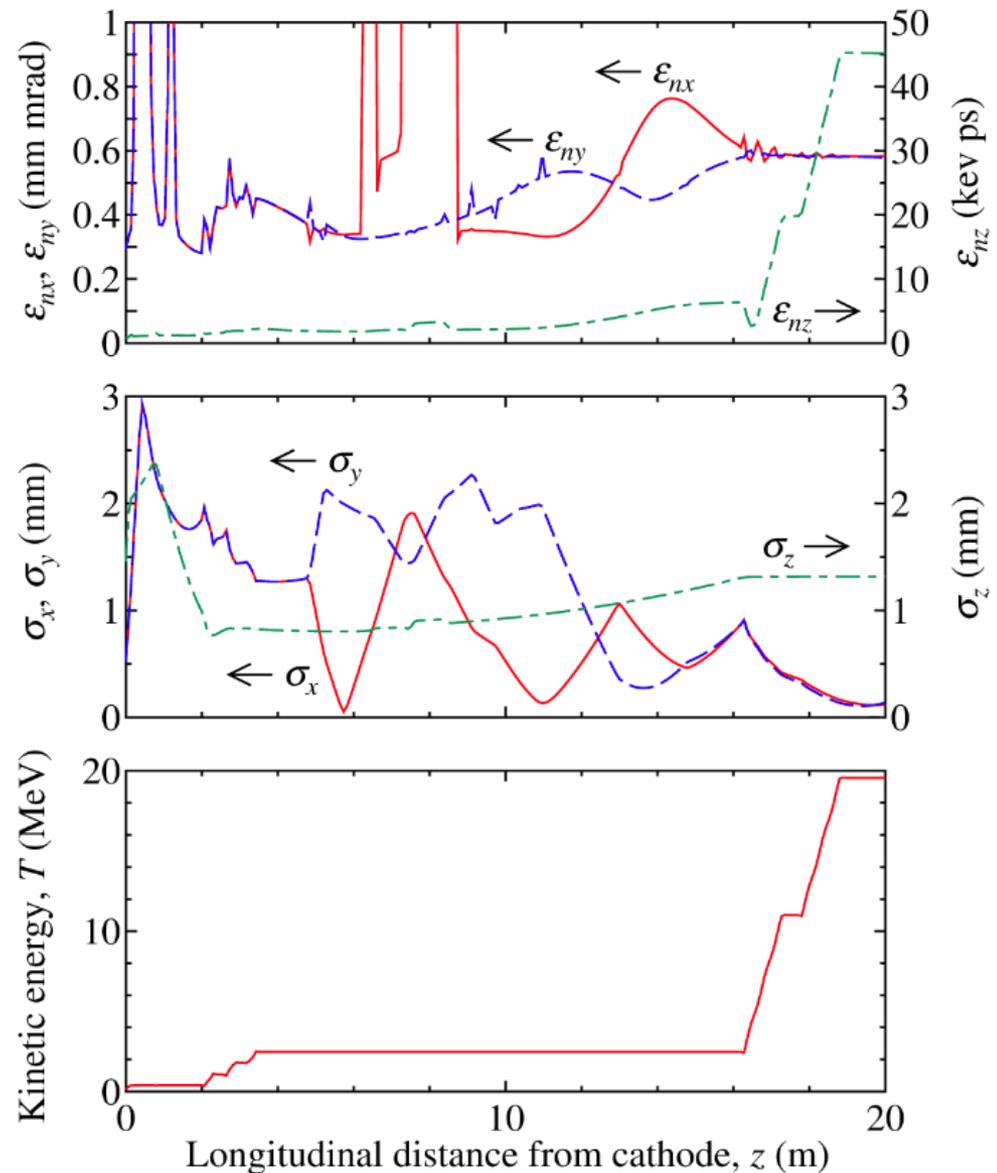
電子銃390 kV + 7.7 pC輸送条件

- 計算条件

- 入力ファイル:
cerl_inj13_5_g2a.in
- nps = 20 k particles
- 初期サイズ: $d = 1.5$ mm
- 初期パルス: 3 ps
gaussian の8スタック

- 主空洞出口の値

- $\epsilon_{nx} = 0.58$ mm mrad
- $\epsilon_{ny} = 0.58$ mm mrad
- $\text{stdz} = 1.32$ mm (4.4 ps)



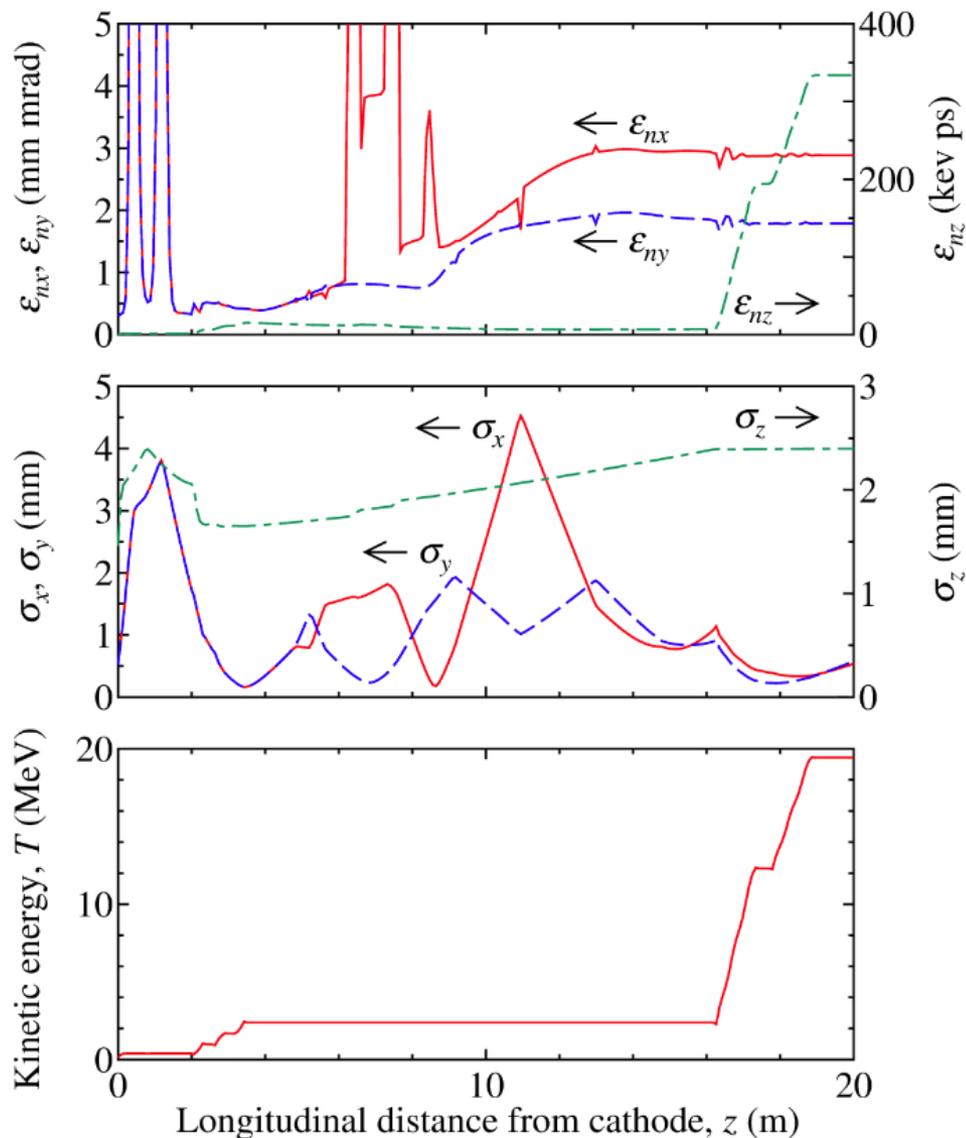
電子銃390 kV + 0.5 pC輸送条件 (バンチ電荷を7.7 pC)

- 計算条件

- 入力ファイル:
cerl_inj11_4_8stack_d1.5
mm.in
- nps = 20 k particles
- 初期サイズ: $d = 1.5$ mm
- 初期パルス: 3 ps gaussian
の8スタック

- 主空洞出口の値

- $\epsilon_{nx} = 2.9$ mm mrad
- $\epsilon_{ny} = 1.8$ mm mrad
- $\text{stdz} = 2.4$ mm (8.0 ps)



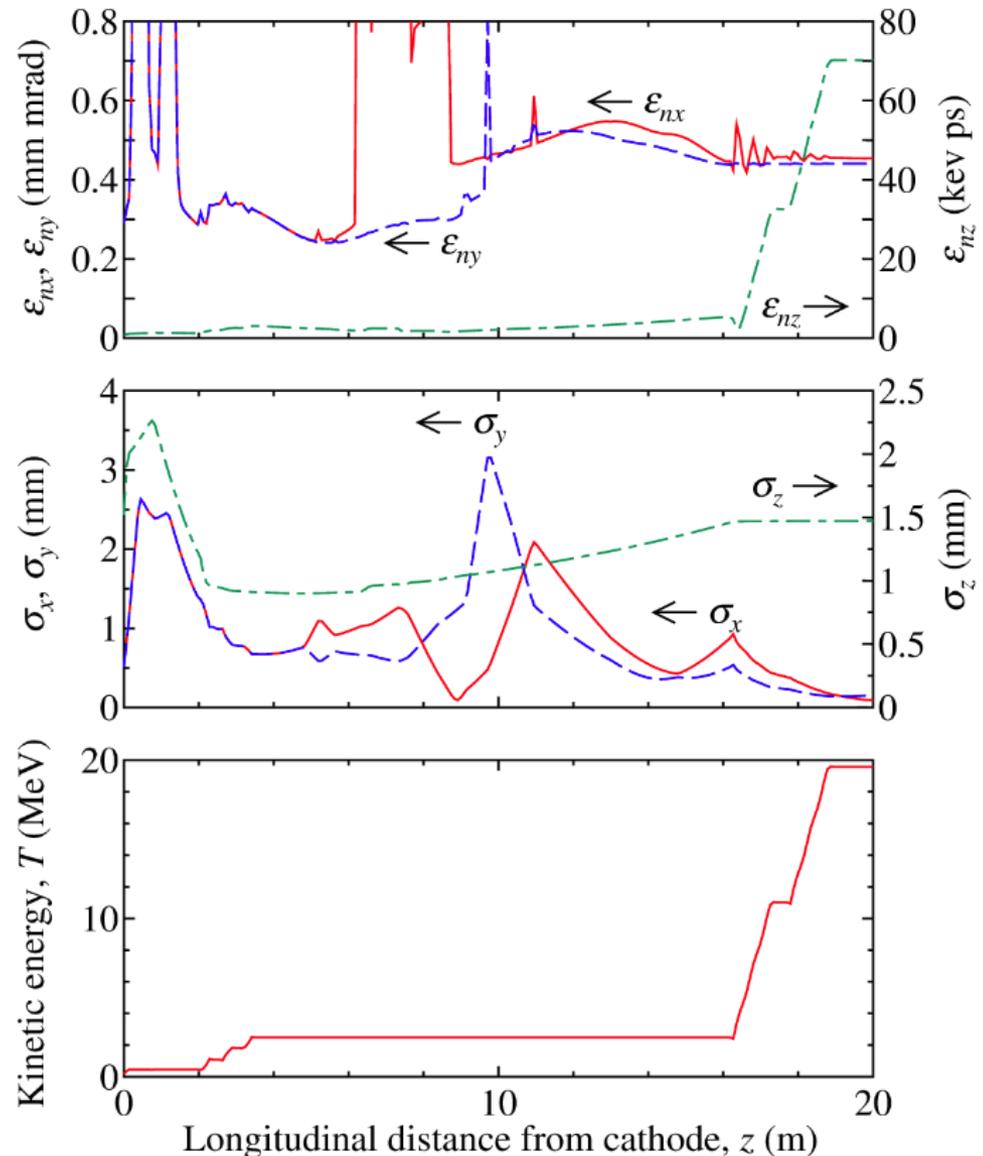
電子銃450 kV + 7.7 pC新輸送条件

- 計算条件

- 入力ファイル:
cerl_inj14_6_g2a.in
- nps = 20 k particles
- 初期サイズ: $d = 1.5$ mm
- 初期パルス: 3 ps
gaussian の8スタック

- 主空洞出口の値

- $\epsilon_{nx} = 0.45$ mm mrad
- $\epsilon_{ny} = 0.44$ mm mrad
- $\text{stdz} = 1.47$ mm (4.9 ps)



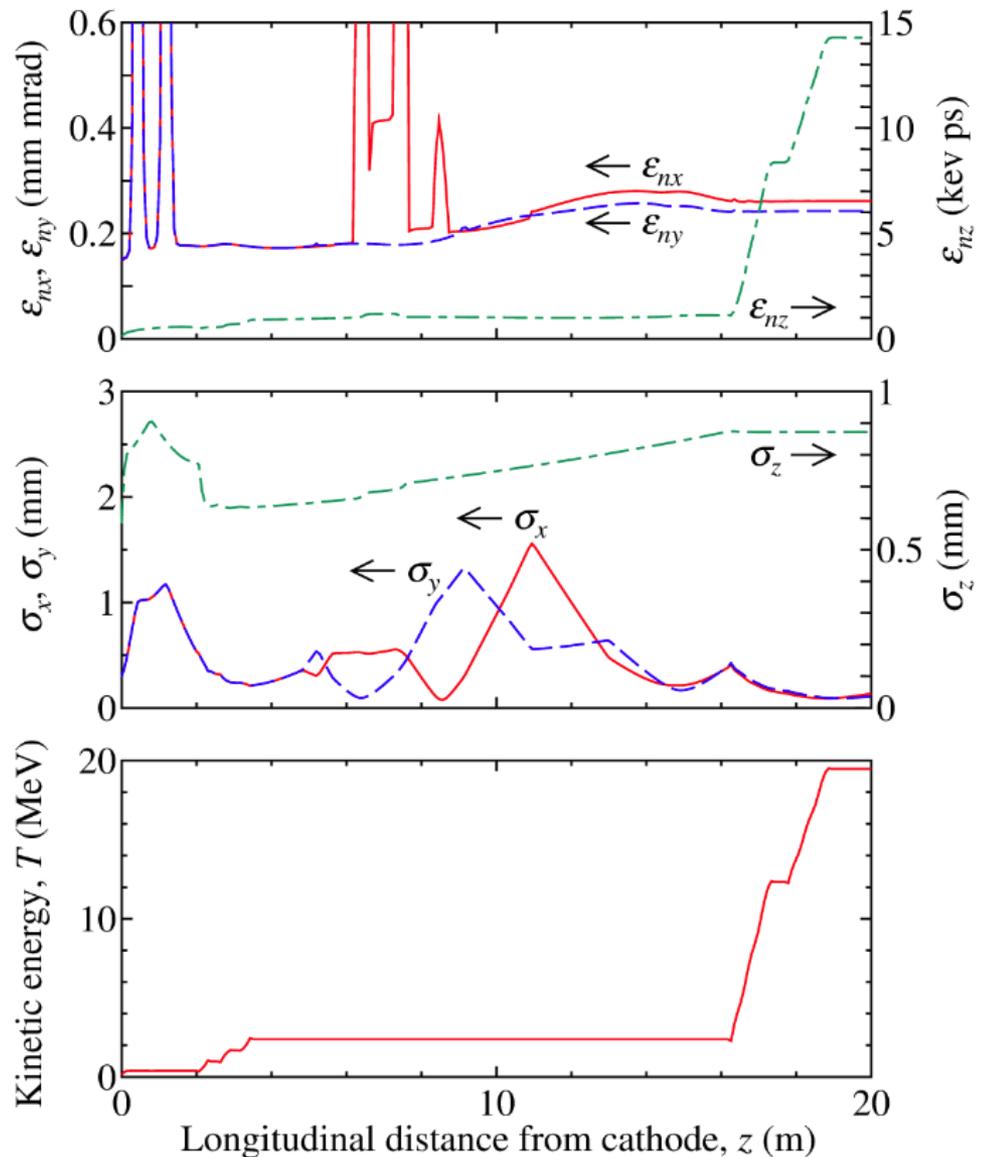
施設検査までの調整

電子銃390 kV + 0.5 pC 輸送条件で設計条件に近づける

電子銃390 kV + 0.5 pC 輸送条件

- 計算条件
 - 入力ファイル:
cerl_inj11_4.in
 - nps = 2 k particles
 - 初期サイズ: $d = 1.2$ mm
(実験で使用したピンホールサイズを推定した値)
 - 初期パルス: 3 ps gaussian
- 主空洞出口の値
 - $\epsilon_{nx} = 0.26$ mm mrad
 - $\epsilon_{ny} = 0.24$ mm mrad
 - $\text{stdz} = 0.87$ mm (2.9 ps)

2015年6月に使用した輸送条件
これを元に調整する



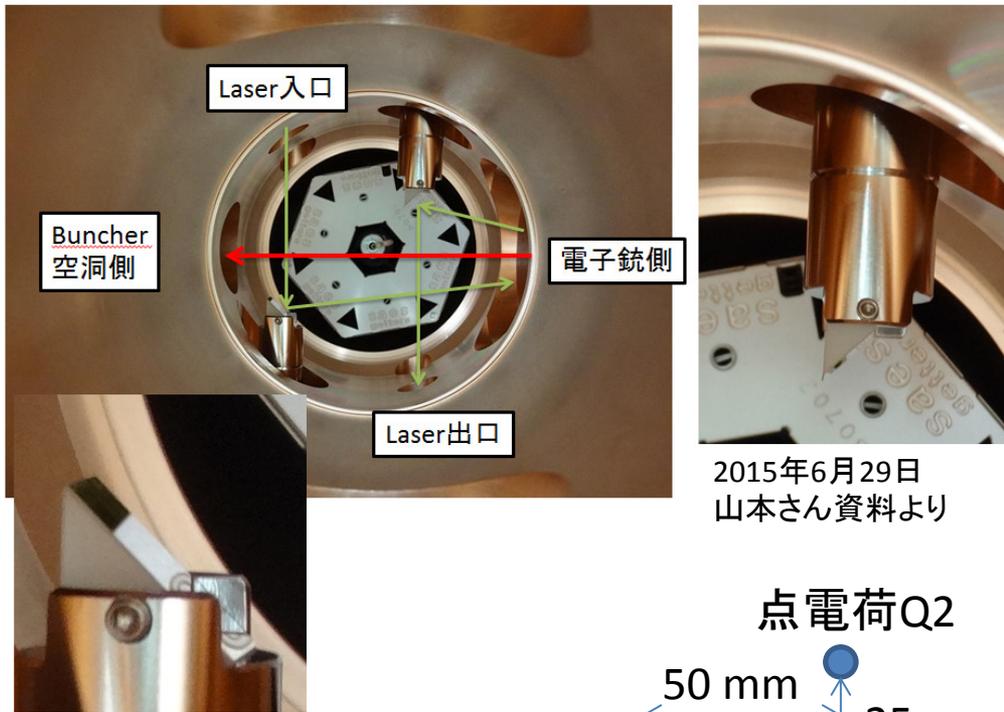
0.5 pC輸送における課題

- 2015年6月に実施した、LCSに向けた0.5 pC周回CW運転で問題になったこと
 - CW運転中の軌道変動: CW運転を開始すると徐々に軌道がずれ始めて、時間の経過とともに下流のビーム損失が大きくなる
 - Cam1, cam2(電子銃から入射器空洞の間)のプロファイルの非対称: 0.5 pCだとまだ良いがバンチ電荷を上げて7.7 pCにするとプロファイルの円筒対称性が大きく崩れる
 - 再現性が悪い: 何か電磁石を調整(軌道調整やQ-scan)を実施すると輸送条件が再現しない、またそれをリカバーするのに時間が掛かる
 - 周回部のオプティクス: シングルキック応答を取れるのでそれを活用してオプティクスを補正したい
- ここでの課題は、0.5 pC輸送だけに留まらず、よりバンチ電荷を上げた7.7 pC輸送ではもっと悪い影響を及ぼす
- 今期の立ち上げ
 - 上記の項目に対して、(施設検査までの時間は限られているが)0.5 pC輸送の段階から対策を取っていく方針とする(7.7 pC輸送調整時にも役に立つし、方法が確立できれば時間短縮にも繋がる)
 - 基本は、2015年6月のLCS用0.5 pC輸送条件を再現することを目指しつつ、上記の項目について改善していった

レーザー導入ミラーの影響

- CW大電流運転での課題
 - CW大電流運転を開始して少し経ってから生じる軌道変動とビーム損失の増加

Laser導入部内部(真上から見た写真)



2015年6月29日
山本さん資料より

一つの可能性が、
レーザー導入ミラーのチャージ
アップによる影響

徐々にミラーに電荷が蓄積し、
ビーム軌道・プロファイルをやが
める原因になっているのでは？

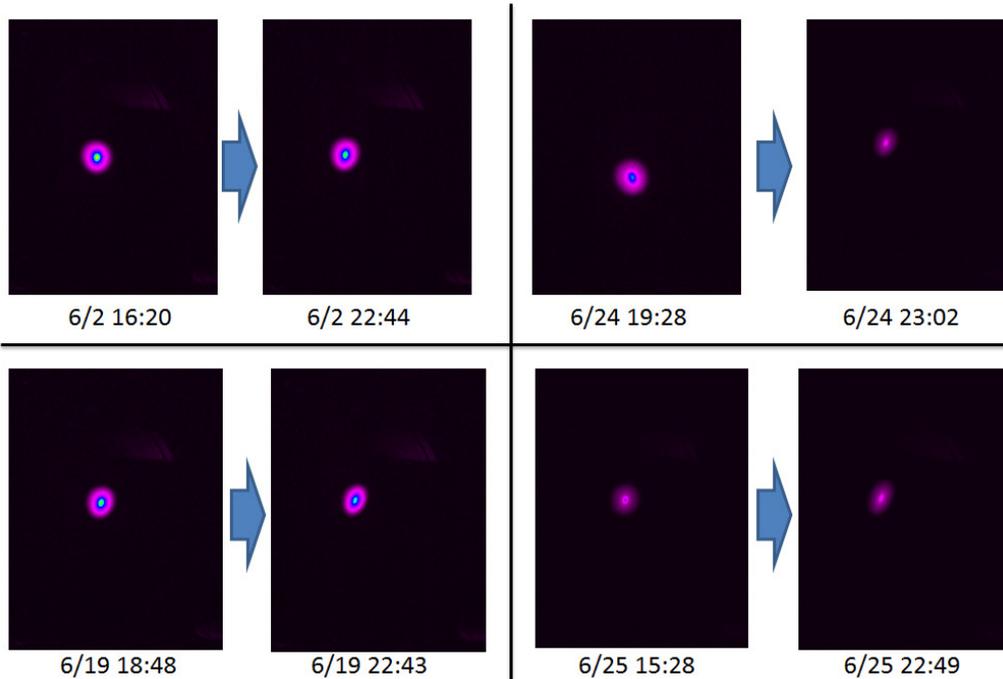
点電荷モデルで、ビームに対する
影響を数値計算で調べた



注: 今回の計算では、電荷の配置が実際のレーザーミラーの逆だった
プロファイルの非対称の向きが逆になる

2015年6月CW運転前後のビームプロフィール

CW運転前後のcam2位置でのビーム位置変化(1)



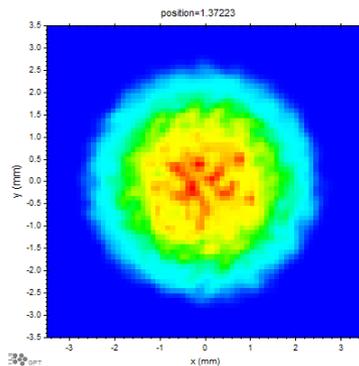
(a) CW運転前後のプロファイル変化
位置とプロファイルが変化

実際の運転：徐々に軌道変化・プロファイル変化が見えてくる
⇒ 電荷の蓄積とともに、変化が起きているのではと考えている

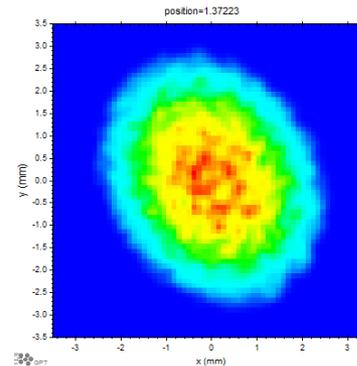
2015年6月29日
山本さん資料より

(b) 数値計算結果

100 pC



2 nC



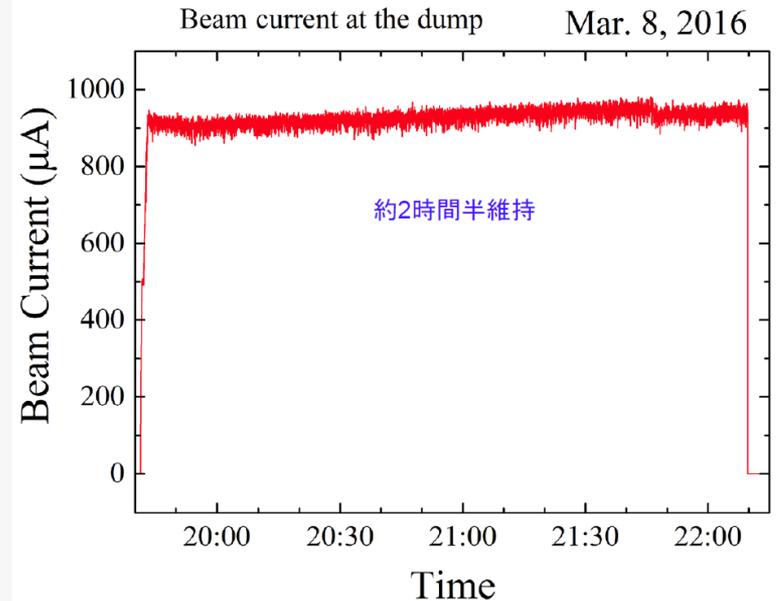
数値計算でも、チャージアップが生じるとプロファイルが歪むことが示された。

2015年夏にミラーをガラス製から金属製に交換した

ミラー交換の効果

- 2015年夏から秋の間に、レーザー導入ミラーをガラス製から金属製に交換した
- 効果
 - CW運転が極めて安定になった
 - CW 0.9 mA 運転を2時間30分続けても、ビーム損失が増大する等の影響はなかった
- 結論
 - ミラー交換の効果は絶大であった
 - 軌道の安定度については後でBPMのデータを検証した方が良い

平均ビーム電流 900 μ Aの周回に成功



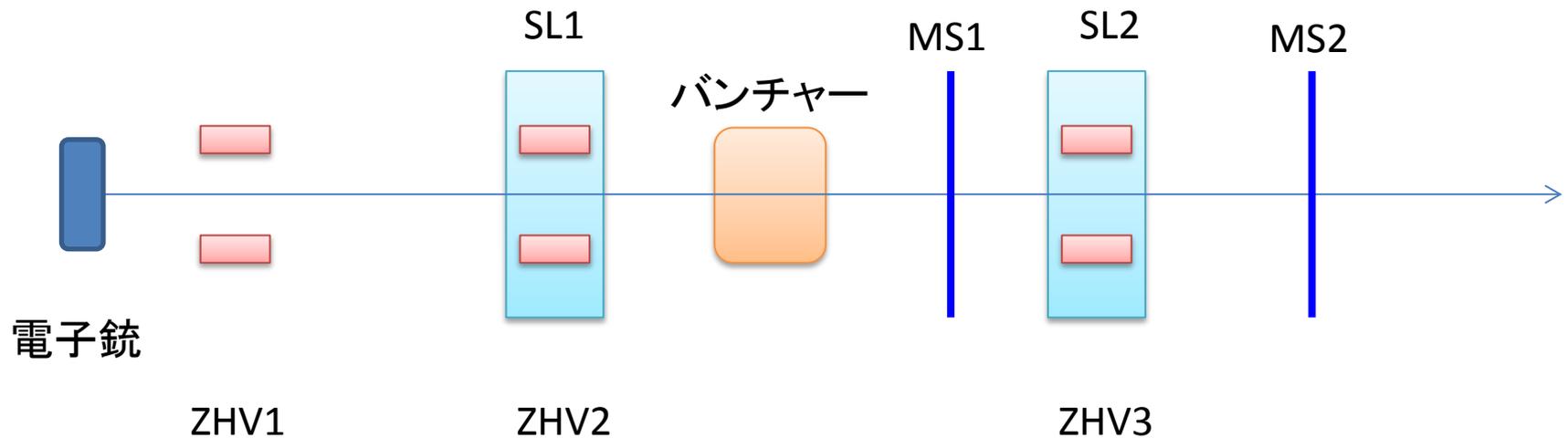
10

坂中さん、2016PFシンポジウム資料より

電子銃-入射器区間の新しい軌道調整法

- 従来の調整法

- SL1, SL2の中心を通すために、一つ上流のステアリング(ZT)を調整していた
- 中心の確認法として、SLの磁場を変えても下流の軌道が変化しないようにしていた
- メリット: SLの強さを変えても下流の軌道が影響を受けない
- デメリット: 軌道調整用のステアリングの磁場がかなり大きくなる

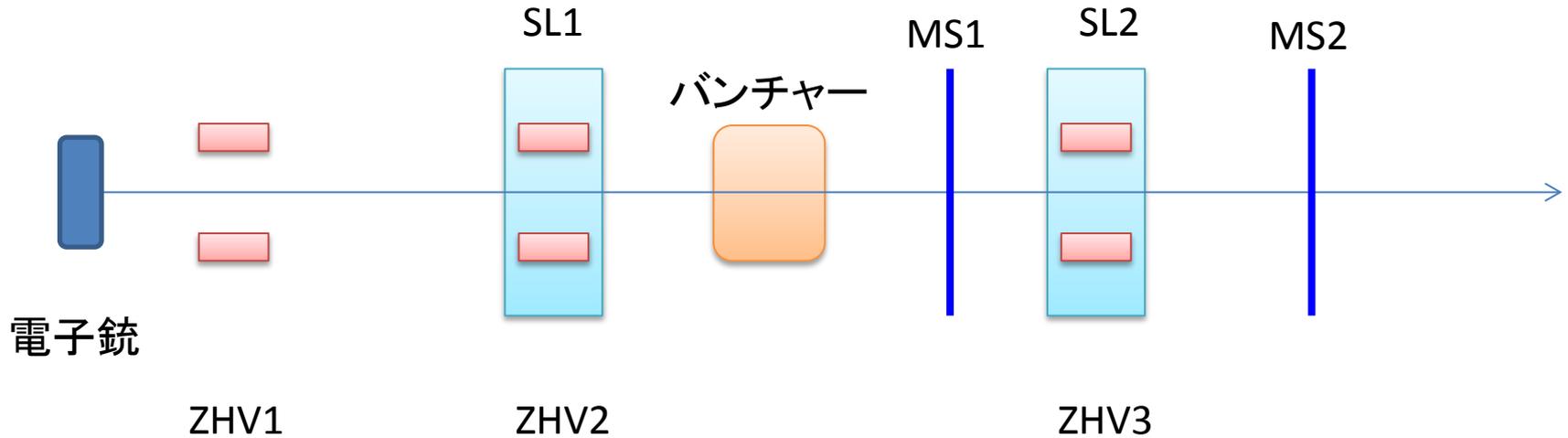


ZHV2, ZHV3 はソレノイドの中に設置されており、磁場が大きくなるとプロフィールが歪むことがわかってきた

電子銃単独運転での軌道調整法の確認

- 2016年2月2日に電子銃単独運転を行えたので、このときにソレノイドの位置ずれ量を推定するための測定(ソレノイドスキャンによる位置変化の応答測定)と、新しい方法での軌道調整を試した
- ソレノイドの位置ずれの推定
 - ソレノイドスキャン結果をシミュレーションに当てはめたところ、ラフに1 mm 程度のずれと推定された
 - ラフなシミュレーションの結果、1 mm 程度なら現状ではソレノイドの位置を動かさなくても良さそうなので、ソレノイド位置は以前のままとすることにした(それでも駄目なら、運転期間中に位置変更を行う)
- 新しい軌道補正方法
 - 今までの補正方法では、「ソレノイド磁場+ステアリング磁場」を通過してきた軌道に対して、ソレノイド磁場を変えた時に軌道変化しないように上流のステアリングを調整していた(これをソレノイドの中心を通すとしていた)
 - 今回の方法
 - ソレノイド内のステアリングの磁場をなるべく弱くする
 - ソレノイド磁場を変えた時に生じる下流の軌道変動を許容する

新しい軌道補正の手順



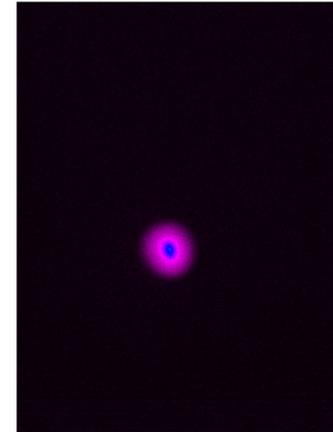
• 手順

1. SL1, ZHV2, SL2, ZHV3をゼロに設定
2. ビームがMS1の中心に来るようにZHV1を微調整
3. ビームがMS2の中心に来るようにZHV2を微調整
4. SL1, SL2の磁場を設定

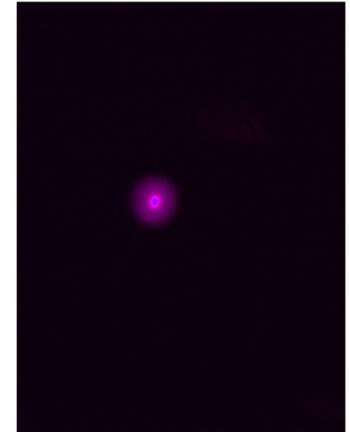
4. のSL1, SL2の磁場を設定した段階でMS1, MS2の中心からビーム位置はずれるが、それほど大きくないのでこの条件で下流へ輸送することにした

新しい軌道調整方法の結果

- Cam1, cam2ともにプロファイルはほぼ円筒対称
- 2015年6月のプロファイル(右図)に比べてかなり対称性が改善した
- 注意事項: SL1とSL2の中心を通していないので、ソレノイドを変える時は軌道変化に注意すること

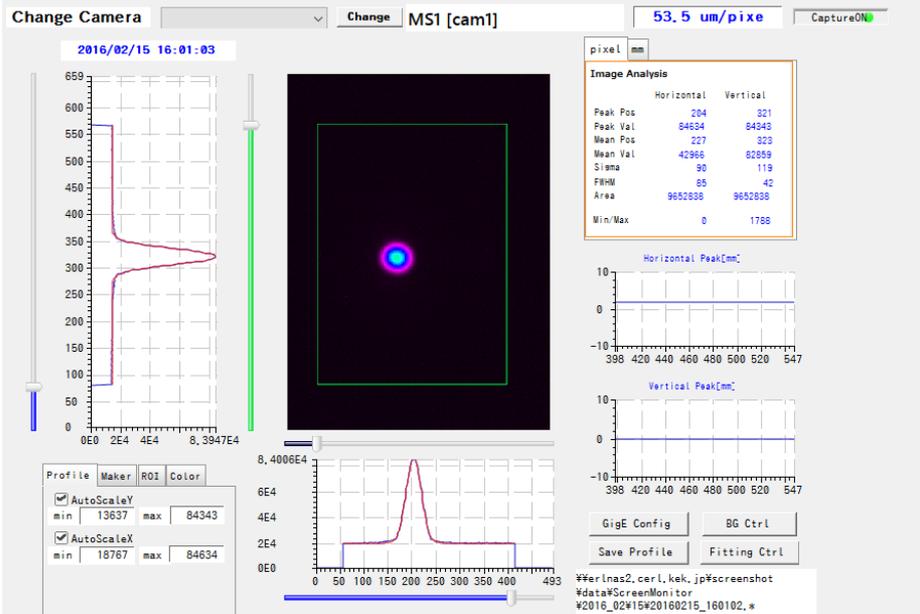


[20150626_202657_cam1.png](#)

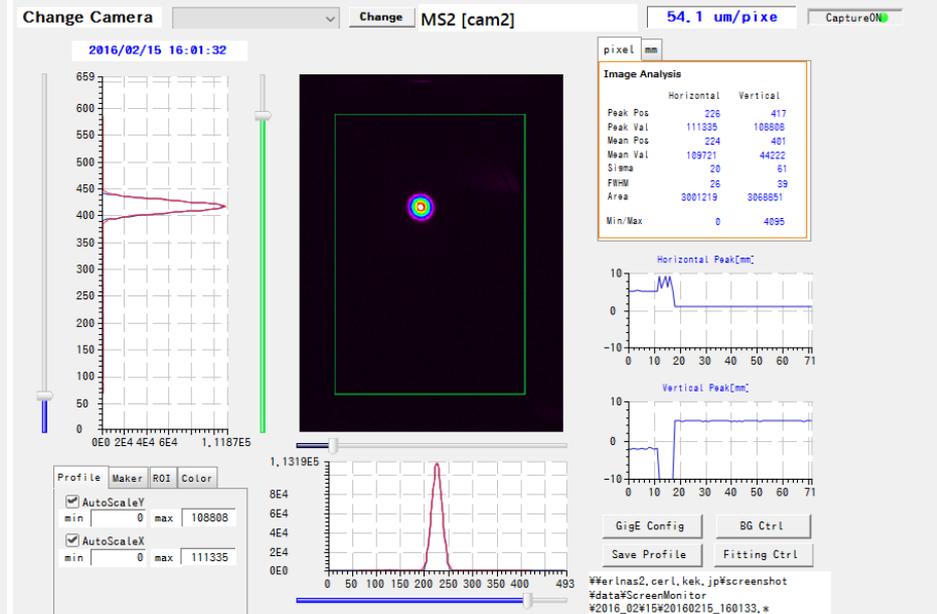


[20150626_202657_cam2.png](#)

Cam1

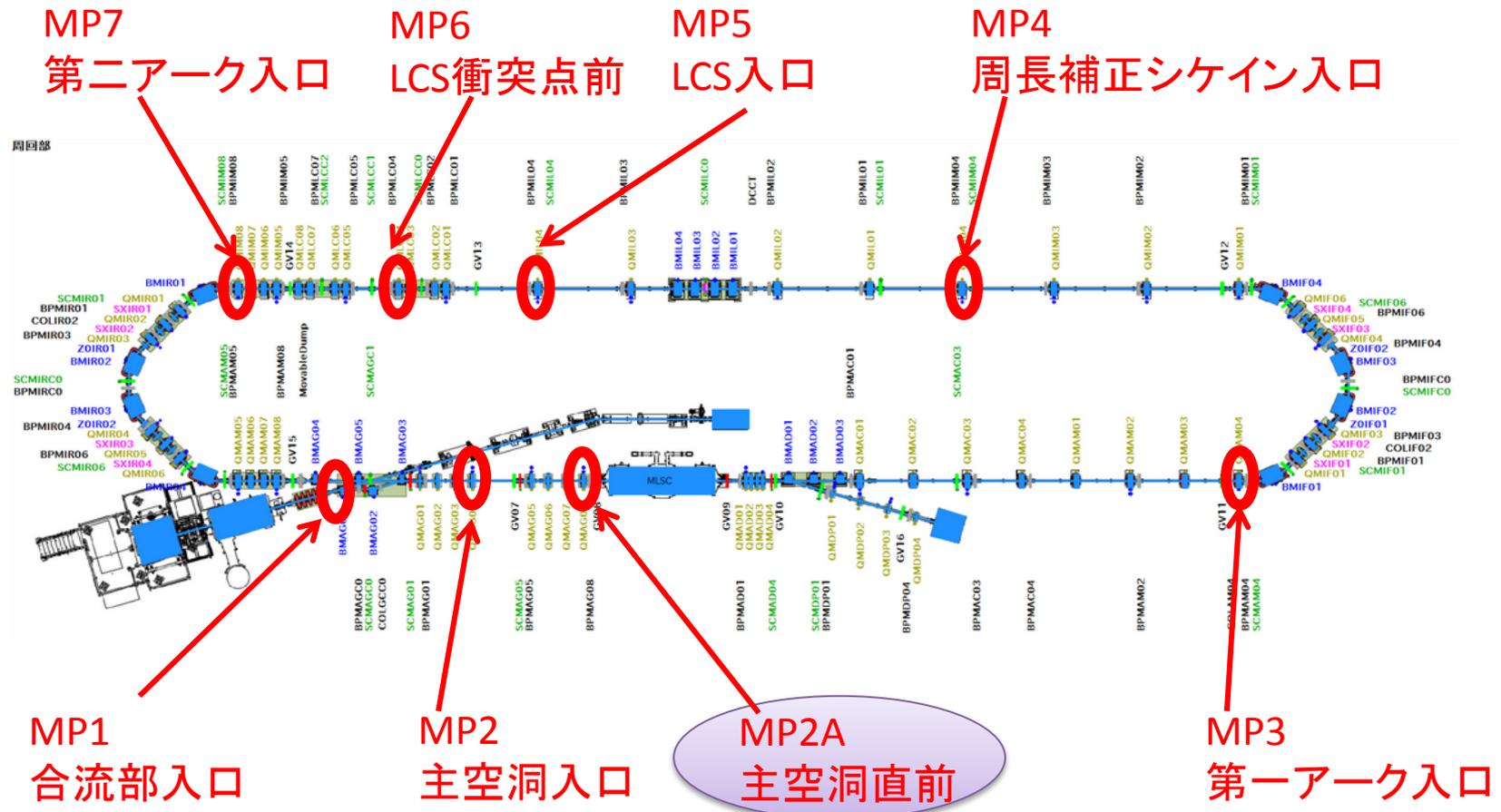


Cam2



新しいマッチングポイントの追加

- 従来にマッチング点に加えて、主空洞直前のマッチング点(MP2A)を追加した
- この結果、周回部への輸送条件を改善することができ(cam11のビームサイズ低減)、また再現性も上げることができた



再現性が悪いことへの対処

- 電磁石のパラメタ管理は、管理プログラムによって管理できるようになっている
- ただし、cERLは現状の運転エネルギーに比べて電磁石の磁場のスペックがかなり上回っているため磁場の履歴の影響が極めて大きい
- なので、電磁石パラメタ管理だけでなく磁場の履歴管理も重要となる

- これまで
 - 立ち上げ時等は電磁石の初期化(ここでは標準化と同義)を実施しているが、その後の調整段階では徹底されていなかった
 - 例えば、四極電磁石を調整するとき初期化時点から開始していない場合、その前の履歴を引きずって再現できないことが多かった

- 今回の方針
 - 何はともあれ、調整の前には初期化を徹底することにした
 - オプティクスマッチング、Qの微調整を行う前に初期化を実施して、調整開始地点を明確にした
 - ある程度調整が進んだ後は、Q-scanもOKとし、Q-scan後は初期化を実施するようにした(あるいはどのQをスキャンしたかを伝えるようにした)
 - ただし、電子銃から主空洞区間はより低エネルギーのため履歴の影響が大きく、施設検査まではステアリングによる軌道調整のみを実施することとし、Qは変えない方針とした

BPMを用いた軌道補正の実用化

- 従来の調整では、Qの中心を通すのに、Q-scanによる方法を用いていた（Qの中心を通ったときは下流の軌道が乱れないことを利用）
- これは、BBA(Beam Based Alignment)を毎回行っていることに対応する
- しかし、デメリットとしては毎回Q-scanを行ってしまうため、Qの磁場の再現性を乱す原因にもなる

- 今回の方針
 - 立ち上げ最初にQ-scanによるBBAで基準軌道を確認したあとは、BPMを用いた軌道補正を行い、Q-scanは実施しない
 - メリット： Q-scanを行わないので磁場が乱れることを避けられる、Qの中心通しの時間短縮
 - デメリット： 最初に基準軌道を決める必要がある（Q-scanによるBBA）、補正には軌道の応答行列が必要

- 今回の実施項目
 - 入射器空洞出口から第二アーク出口までBPMを用いた軌道補正
 - Pythonスクリプトで、コマンドラインから軌道補正を行えるようにした
 - アーク部の分散関数による軌道変化を主空洞の電圧調整で補正する部分は実装できなかった

BPMを用いた軌道補正

- 方法

- 軌道に対する各ステアリングのシングルキック応答を測定
- 手動でQの中心を通して基準軌道を定める
- 基準軌道と現在の軌道の差分を求める
- 差分をゼロにするようなステアリング量をSVDによる疑似逆行列から求める

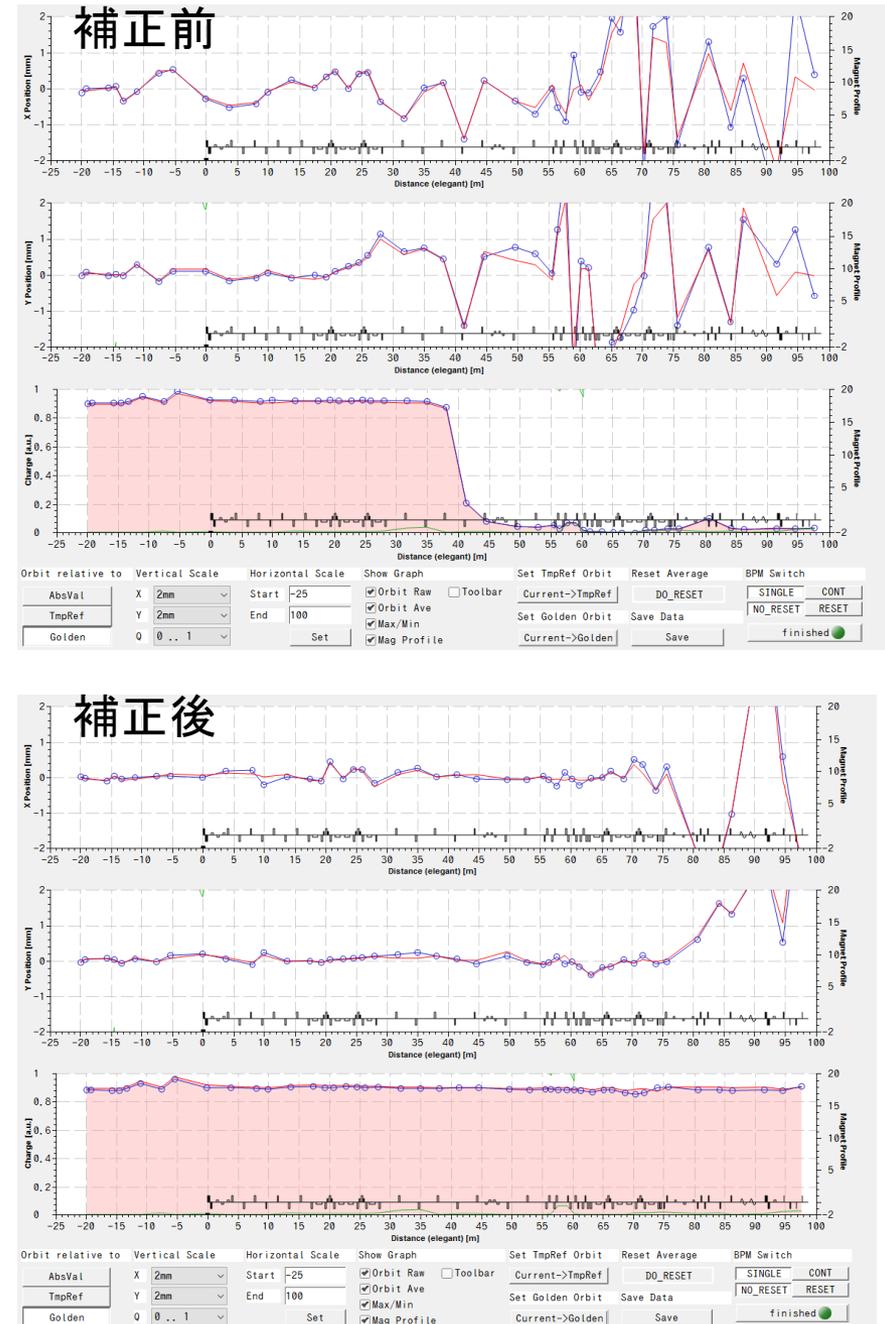
- 補正区間

- 一気に上流から下流まで補正すると誤差の影響が積み上がるので、区間分けして上流から補正する
- 入射器空洞出口から第二アーク出口までを9つの区間に分割 (section 0 - 8)

軌道補正の結果

結果

- 大きいところで、0.5 mm 程度のずれが残るが、概ね0.2 mm 程度の範囲内に収まった
- 補正時間: 今はコマンドラインから行っているので1区間、1分程度
- 注意: オプティクスを変えた時は、変更した区間の応答の再測定が必要
- 施設検査前から実用化した
- 軌道調整の精度を上げるとともに、Q-scanによる軌道補正に比べて大幅に調整時間を短縮することができた(1時間 ⇒ 10分程度)

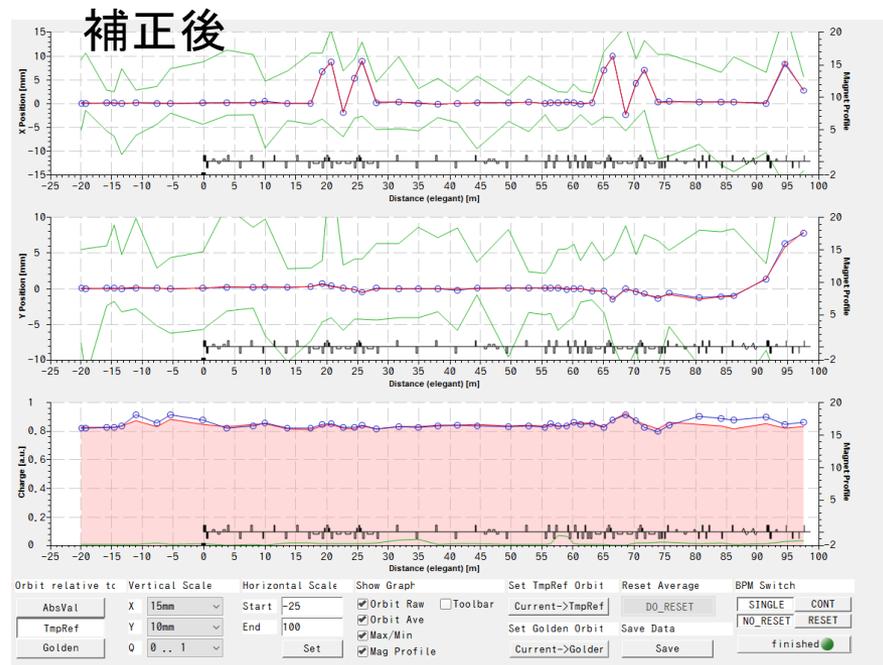
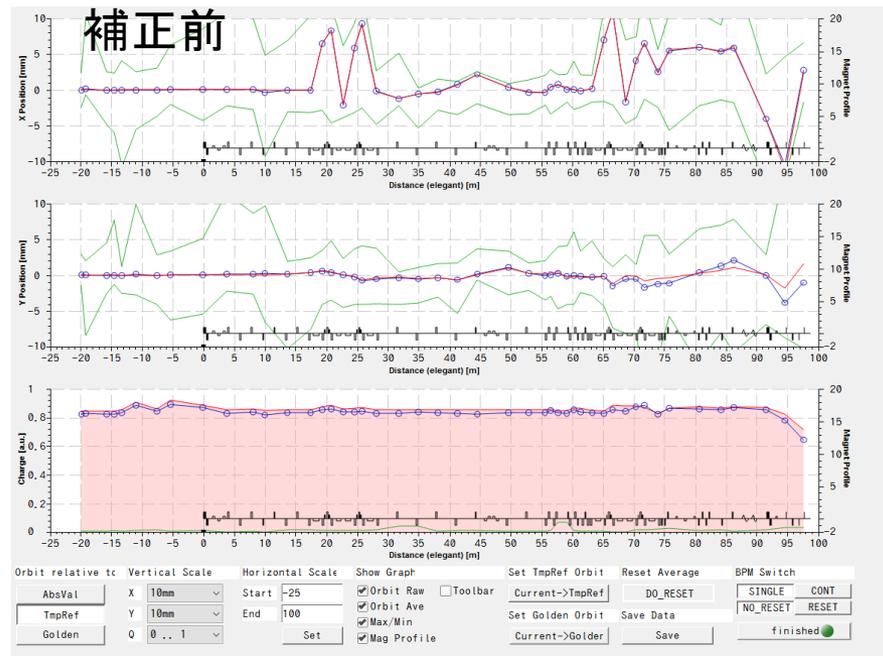


周回部のオプティクス補正

- これまでの状態
 - 日々手動で調整していた
 - シングルキック応答を何回か測定したことはあったが、実用化にはつながらなかった
- 今回の目的
 - 明確な手順(応答測定⇒疑似逆行列の計算⇒補正)でオプティクスを補正すること
 - 補正精度を向上させるとともに、調整時間を短縮すること
- 今回の実施項目
 - アーク部の転送行列(水平・垂直方向分散関数)の補正
- 方法
 - アーク部の分散関数に対するアーク部内の四極電磁石の応答をBPMで測定する
 - 現在の分散と設計の分散の差分を求める
 - 実測した応答行列からSVDで疑似逆行列を求め、差分をゼロにする補正量を求める
 - 水平方向:アーク部内の6台の四極電磁石を使用
 - 垂直方向:アーク部内の2台のskewを使用

分散補正の結果

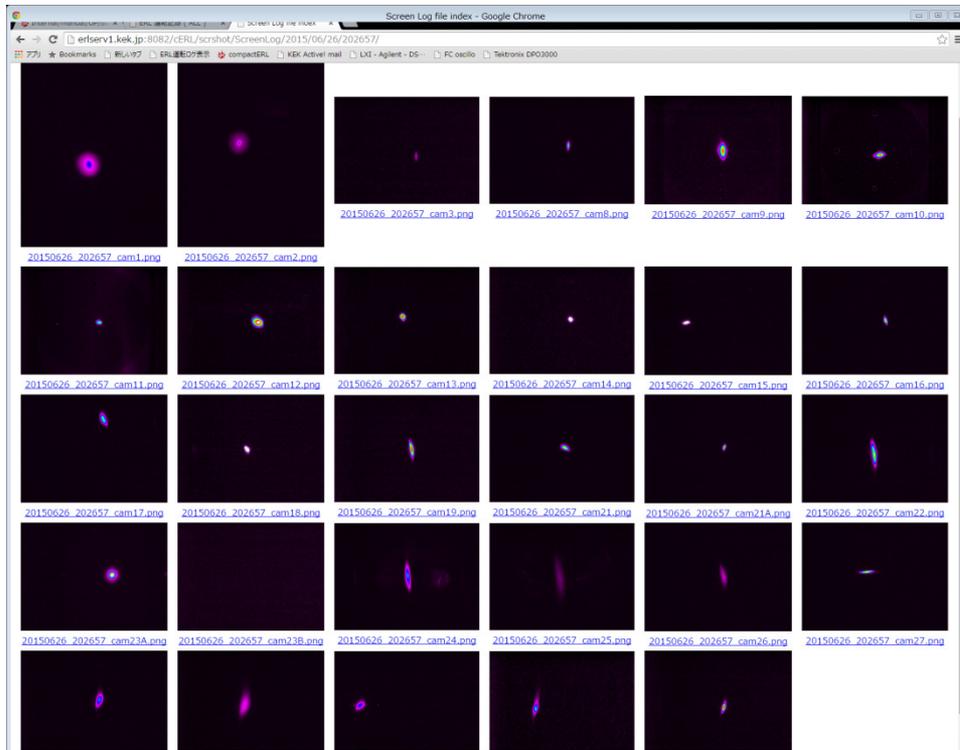
- 第一アーク、第二アークともに水平・垂直分散関数を補正できた
- 補正時間は10分程度(応答測定、補正)
- 補正の結果、プロファイルも改善できた
- 課題:
 - 固有値を使い過ぎると発散するので、少な目にする必要があった
 - BPMの位置に応じて重みを付けるなどして補正精度を上げたい



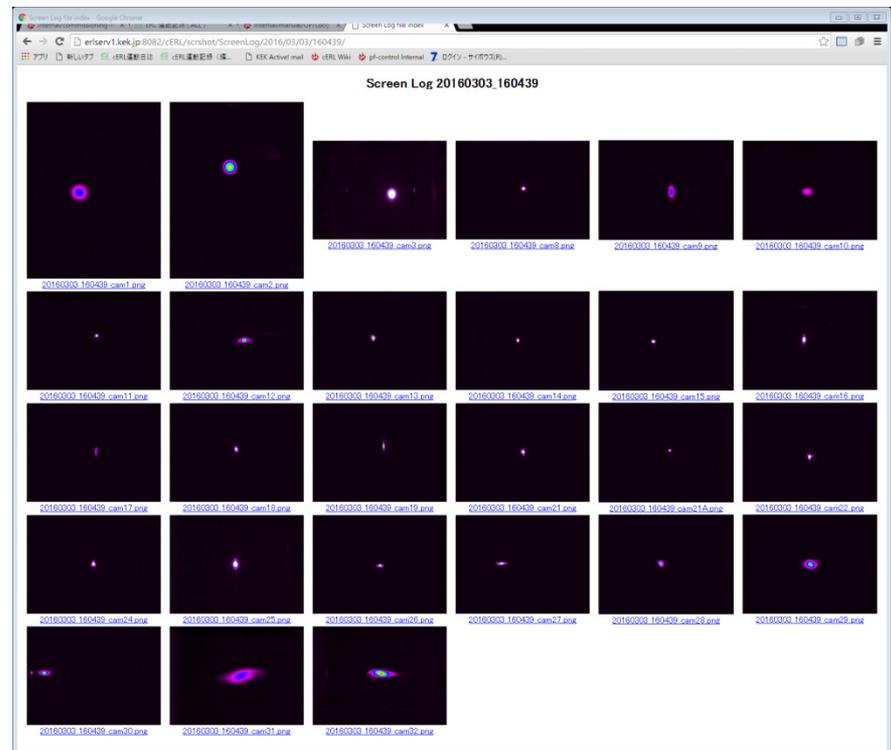
0.5 pC輸送時のプロファイル比較

- 2015年6月に比べてかなり設計に近づけることができ、ビームサイズを小さく輸送することができた

2015年6月26日



2016年3月3日



0.5 pC輸送まとめ

- 時間が許す範囲で新しい調整手法を試し、輸送条件を設計に近づけることができた
 - 電子銃-入射器区間の軌道調整
 - 主空洞直前のマッチング点(MP2A)の追加
 - BPMを用いた軌道補正
 - アーク部水平・垂直分散関数の補正
- これらの調整により、これまで課題であった第二アークのビームサイズが増大する問題も改善することができた(間接的にはロス低減に繋がったはず)
- CW運転に向けては、上記の調整の他に2015年6月と同様に、入射器空洞の垂直軌道をわざとずらして、COL1 COL2でテイルを引くような調整を引き続き実施した
- これらの結果、CW 0.9 mA でも十分にビーム損失を小さく抑えることができた

7.7 pC周回調整

バンチ電荷7.7 pCのビームの周回輸送

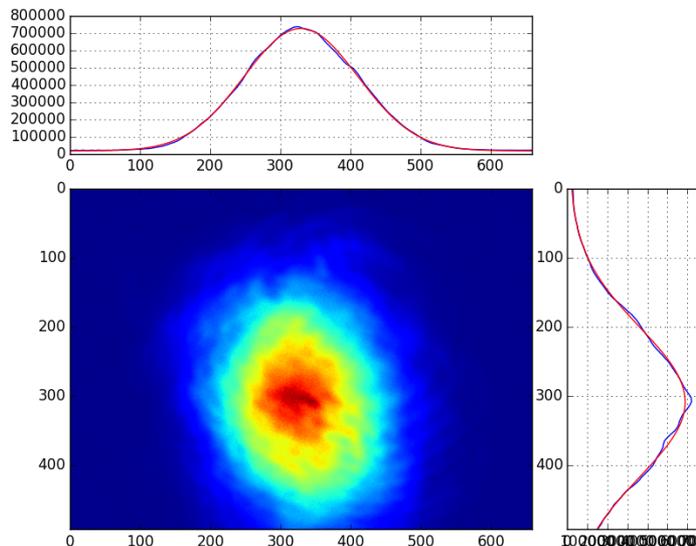
- エミッタンス低減
- 損失のない周回
- CW 運転(162.5 MHz で最大 6.15 pC)

7.7 pC用初期分布の生成

2016年3月9日(水)

宮島 司

- 目的: 今期の運転で使用する7.7 pC運転用のGPT初期分布生成
- 条件:
 - 横方向: 1.1 mm rms gaussian + d = 1.5 mm pinhole (2016年3月1日に測定したレーザープロファイルから求めた)
 - 時間方向: 8 stacked 3 ps rms gaussian (2014年6月19日 long pulse 運転の実験データから推定)



ピンホールなしでのレーザープロファイル

モニターの解像度: mm/pixel = 0.0134339605664 f

(2) gaussian rms of open laser profile

rms_x = 81.2863747975 pixel, 1.09199795361 mm

rms_y = 108.170501336 pixel, 1.45315824939 mm

ピンホールなしの rms サイズ (GPT用)

1.1 mm

GPTの入力(初期粒子分布生成)

```
setparticles("beam", nps, me, qe, Qtot );
```

```
#-----
```

```
# set radius of macro particle
```

```
#-----
```

```
setrmacrodist("beam", "u", 1e-100, 0);
```

```
#-----
```

```
# distribution of x, y (radial. gaussian)
```

```
#-----
```

```
nsigmaLAGA01 = dLAGA01 / (2.0 * stdrLAGA01);
```

```
setrxydist( "beam", "g", 0.0, stdrLAGA01, 0, nsigmaLAGA01) ;
```

```
setphidist( "beam", "u", 0, 2*pi ) ;
```

```
#-----
```

```
# set distribution of t (stacked gaussian pulse)
```

```
#-----
```

```
settailgaussstack("beam", stdtLAGA01, sleft, sright, npulse, interval, tail, tcut, "-dist", "-pdf");
```

```
dLAGA01 = 1.5e-3; # pinhole diameter  
stdrLAGA01 = 1.1e-3; # gaussian rms  
without pinhole
```

```
stdtLAGA01 = 3.0e-12;
```

```
sleft = 5.0;
```

```
sright = 5.0;
```

```
npulse = 8;
```

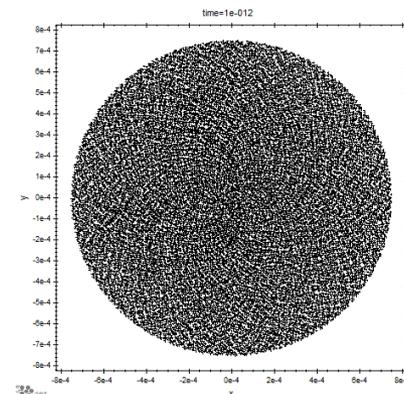
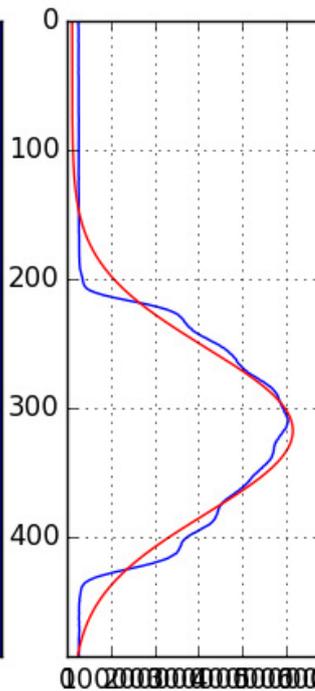
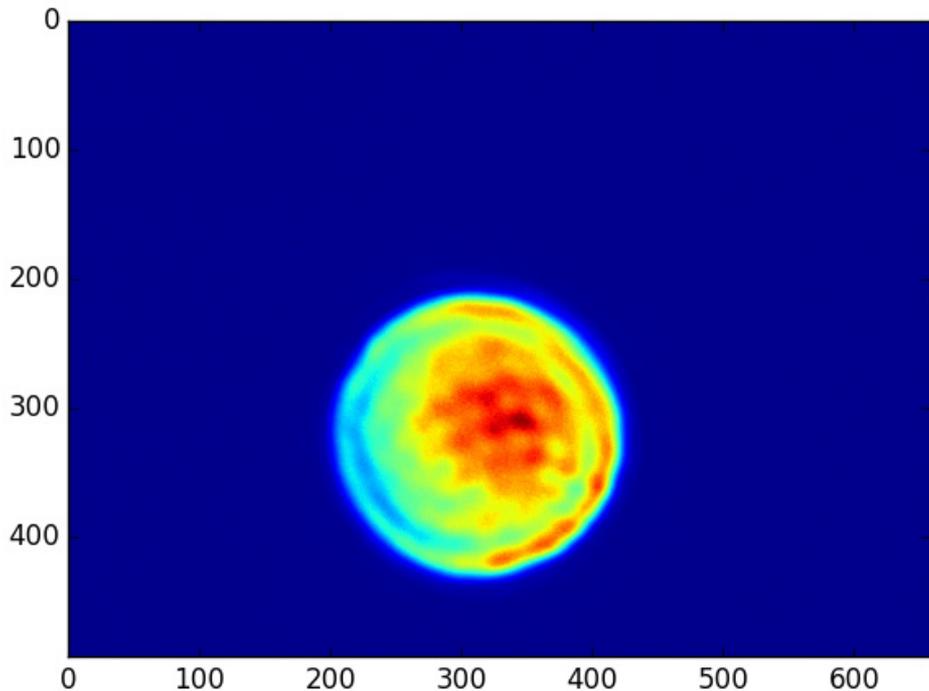
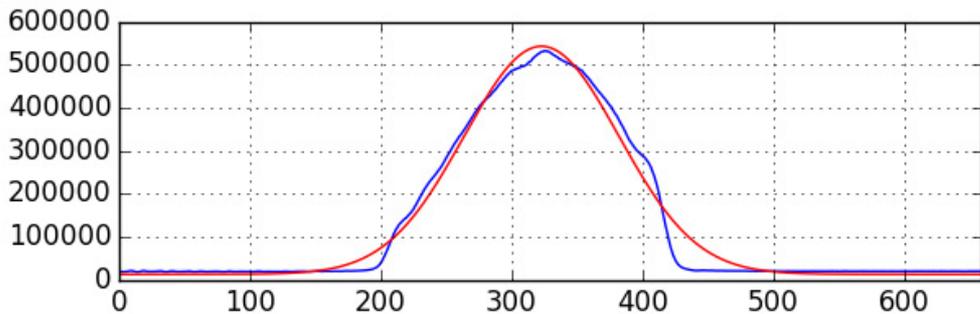
```
interval = 8.56e-12;
```

```
tail = 0.0e-12;
```

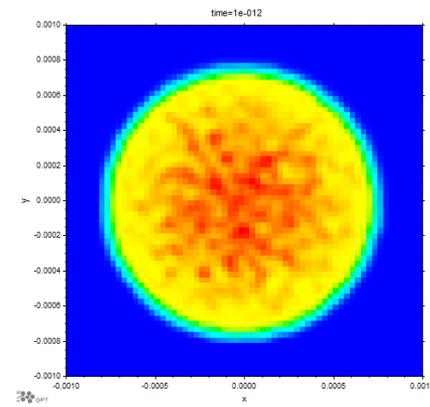
```
tcut = 0.0e-12;
```

横方向の分布

ピンホール直径 1.5 mm のプロファイル(測定結果)



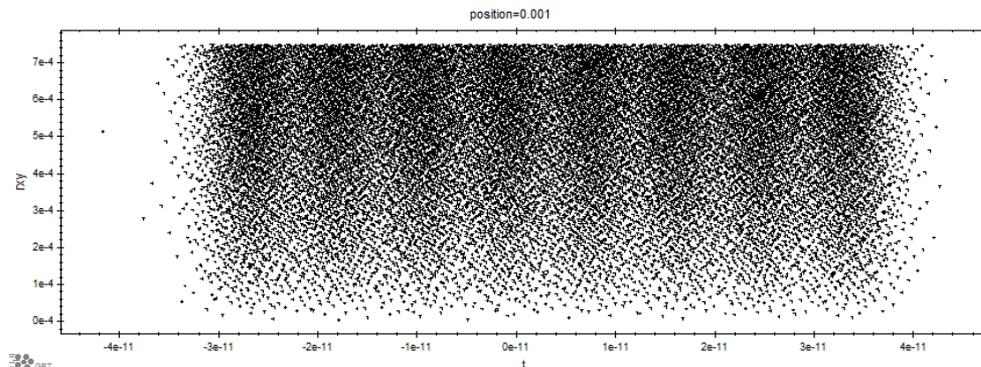
GPTで再現した初期分布
中心付近はほぼ同じ
エッジ付近の干渉はなし



時間方向の分布

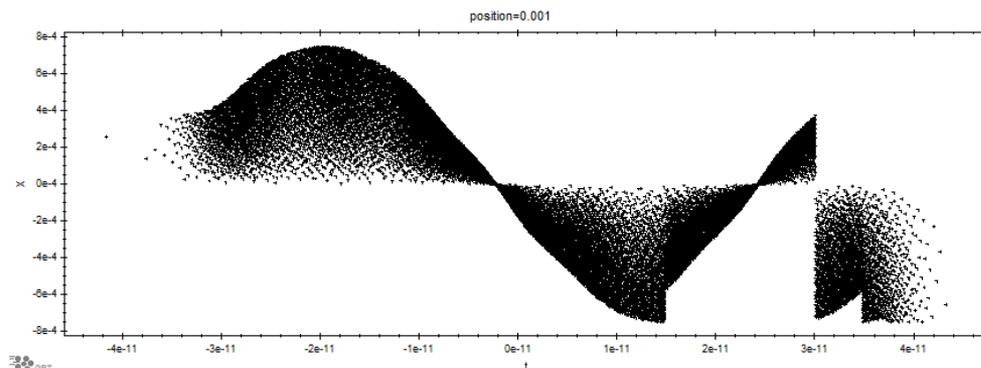
時間 vs. 半径

時間と半径の相関はない



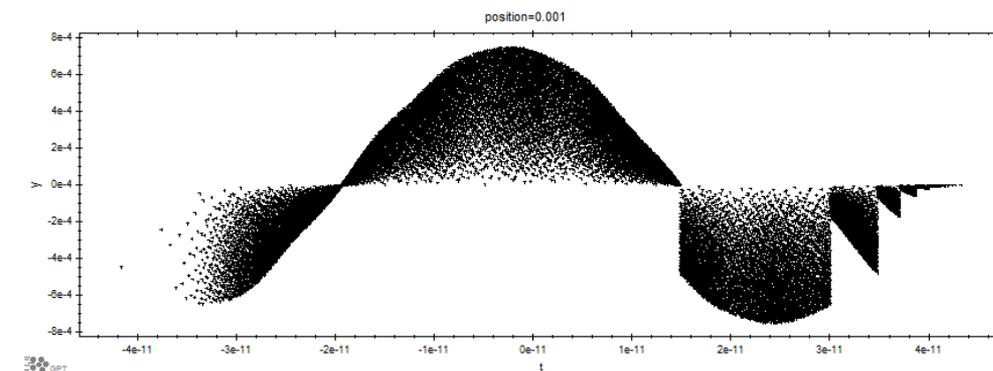
時間 vs. 水平位置

⇒ 一様になっていない...



時間 vs. 垂直位置

⇒ 一様になっていない...



横方向はGPTのオリジナルコマンドを使っているが、時間方向はカスタムエレメントを使っているので、相関が生じているか？

時間とx, y 分布の相関の調査

- `settailgaussstack()`はカスタムエレメントなので、横方向との相関が考慮されていない
- `Setshuffle()`の使用 ⇒ 相関は変わらず
- `settailgaussstack()`で作った分布"tfunc.out"をgdf形式に変換して、"F"で読み込む
⇒ 時間とx, y 分布の相関がなくなった

```
#-----
```

```
# set distribution of t (stacked gaussian pulse)
```

```
#-----
```

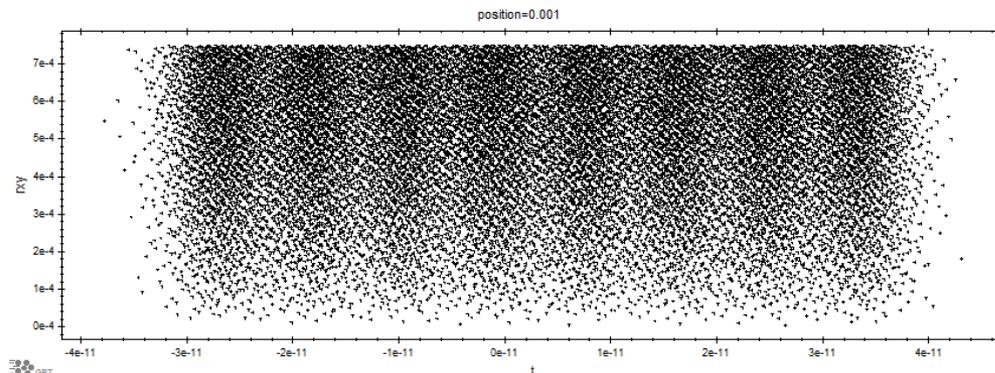
```
#settailgaussstack("beam", stdtLAGA01, sleft, sright, npulse, interval, tail, tcut, "-dist", "-pdf");
```

```
settdist("beam", "F", "tfunc.gdf", "t", "Pt", 1, 0);
```

時間方向の分布

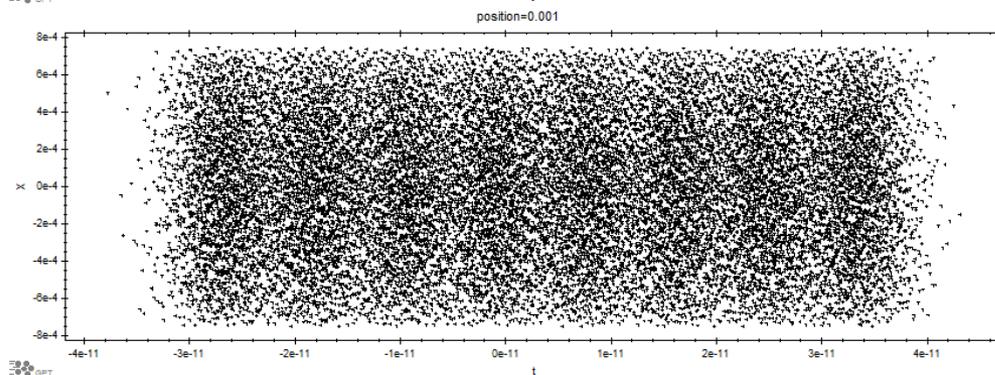
時間 vs. 半径

時間と半径の相関はない



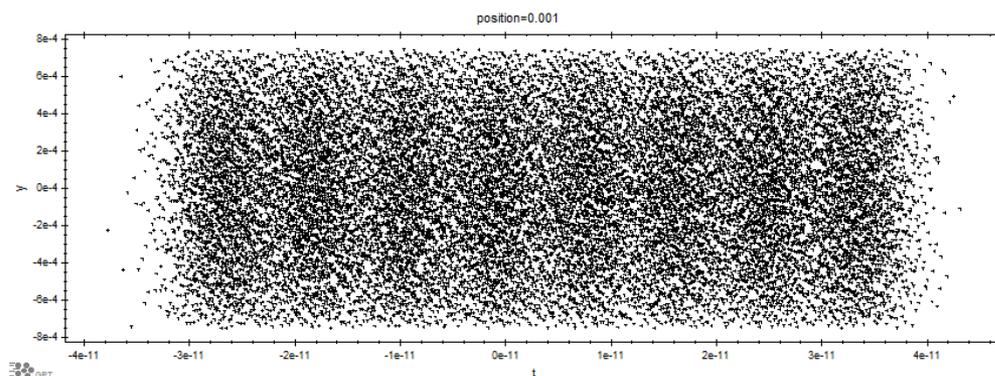
時間 vs. 水平位置

⇒ 一様になった



時間 vs. 垂直位置

⇒ 一様になった



一度分布ファイルを生成して、gdf形式に変換したあとに、“F”で読み込むため手間はかかるが、相関はないのでこれを使って最適化を実施

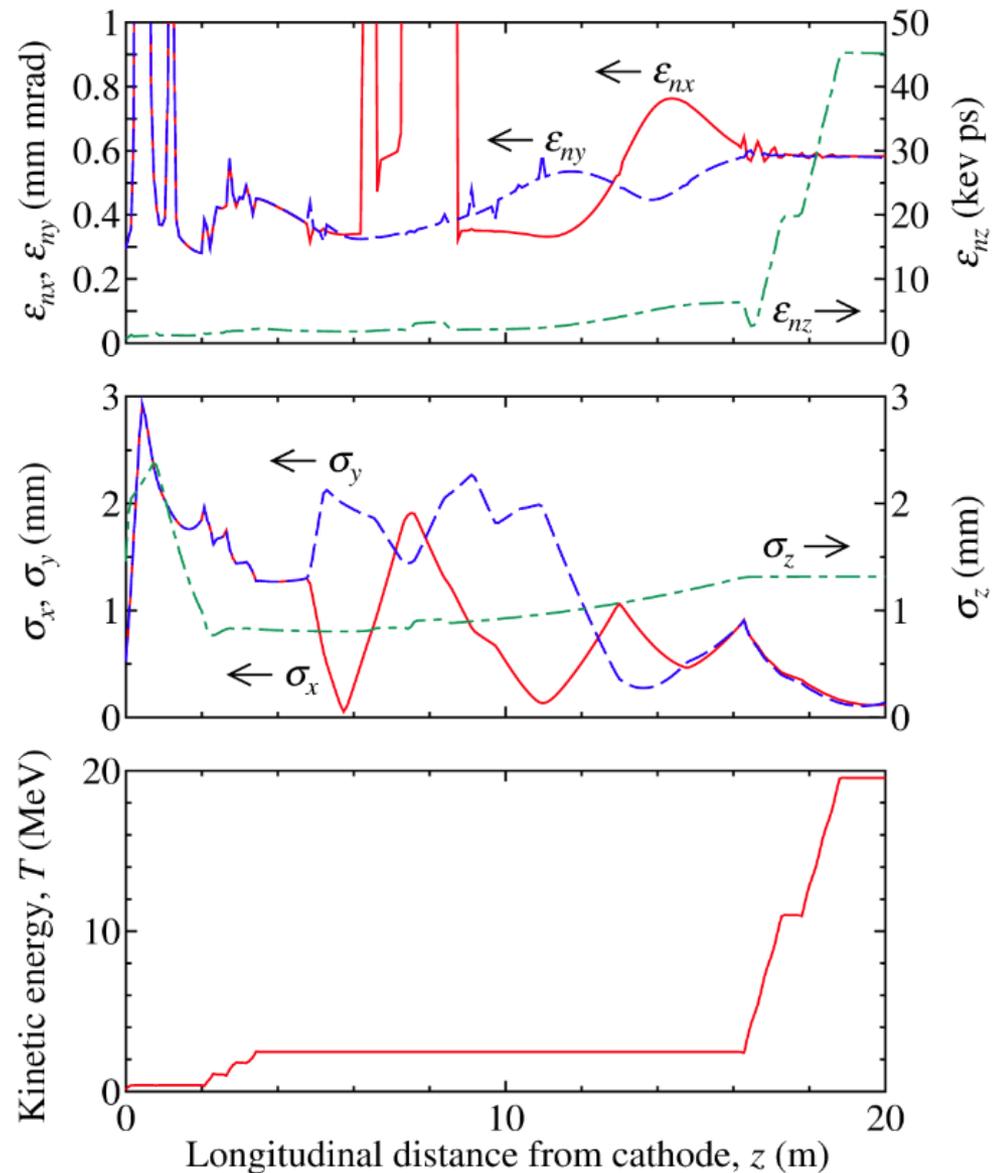
電子銃390 kV + 7.7 pC輸送条件

- 計算条件

- 入力ファイル:
cerl_inj13_5_g2a.in
- nps = 20 k particles
- 初期サイズ: $d = 1.5$ mm
- 初期パルス: 3 ps
gaussian の8スタック

- 主空洞出口の値

- $\epsilon_{nx} = 0.58$ mm mrad
- $\epsilon_{ny} = 0.58$ mm mrad
- $\text{stdz} = 1.32$ mm (4.4 ps)



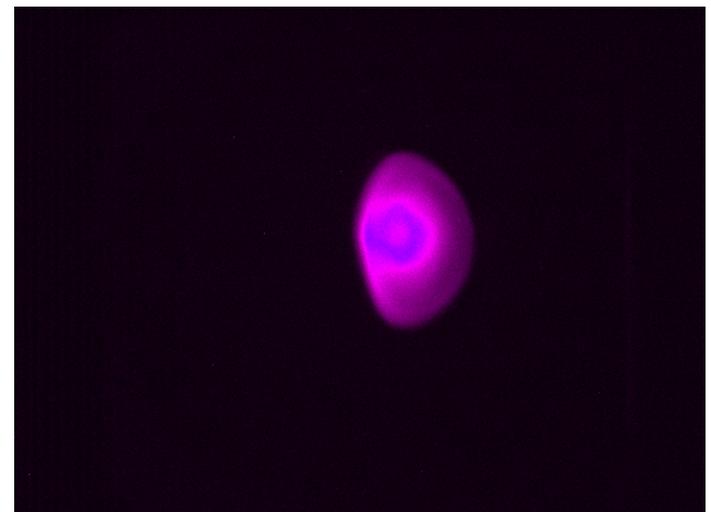
電子銃390 kV + 7.7 pC輸送条件

- 7.7 pC運転の最初にこの条件を試した
- 合流部のビームサイズが大きい条件なので、COL1, COL2はあまり効かない可能性がある
- 合流部のビームサイズが大きいため、合流部内のcam8でのプロファイルをより詳細に観察することができた
- その結果、入射器空洞内軌道とcam8の軌道に相関があることが確認できた
- 入射器空洞内の垂直軌道を調整することにより、cam8の垂直プロファイルを改善することができた(下流のプロファイルも改善された)
- 入射器空洞のより精密な調整をすることでエミッタンス低減に繋がることが確認できた

Cam8(入射器軌道補正前)



Cam8(入射器軌道補正後)



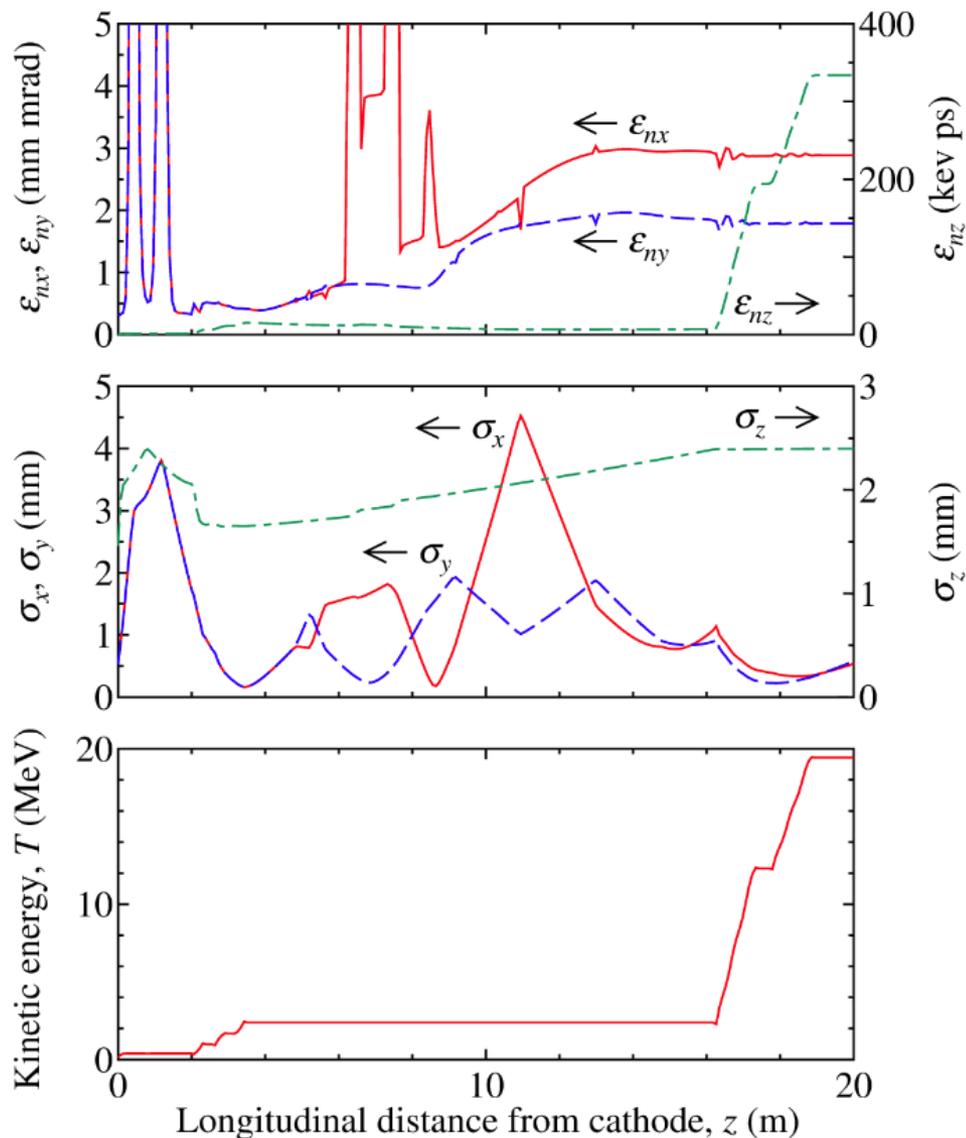
電子銃390 kV + 0.5 pC輸送条件 (バンチ電荷を7.7 pC)

- 計算条件
 - 入力ファイル:
cerl_inj11_4_8stack_d1.5
mm.in
 - nps = 20 k particles
 - 初期サイズ: $d = 1.5$ mm
 - 初期パルス: 3 ps gaussian
の8スタック

主空洞出口の値

- $\epsilon_{nx} = 2.9$ mm mrad
- $\epsilon_{ny} = 1.8$ mm mrad
- $\text{stdz} = 2.4$ mm (8.0 ps)

CW 0.83 mA 運転を実施
ビーム損失も問題ないレベルとなった
これで、LCS実験を行う



電子銃450 kV + 7.7 pC新輸送条件

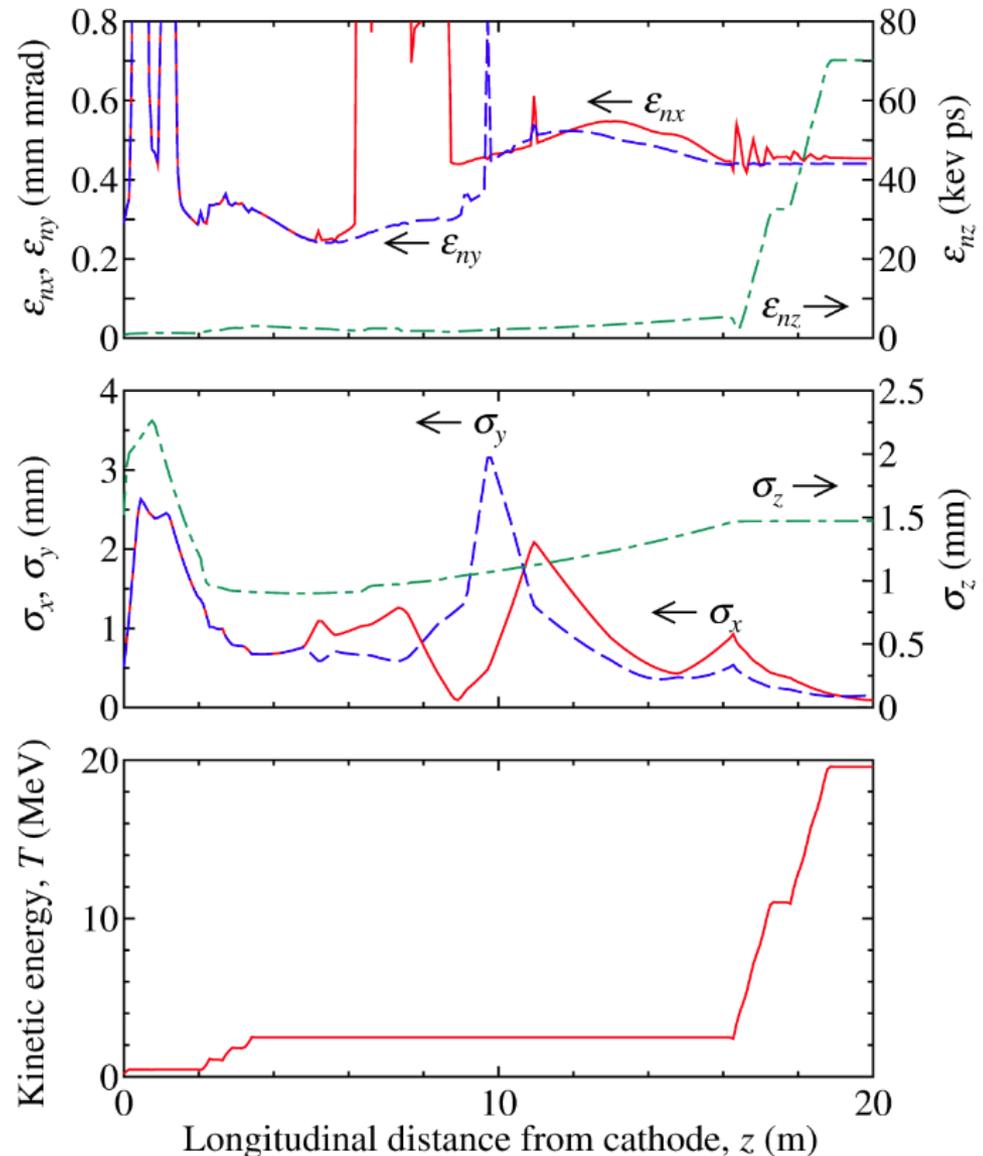
• 計算条件

- 入力ファイル:
cerl_inj14_6_g2a.in
- nps = 20 k particles
- 初期サイズ: $d = 1.5$ mm
- 初期パルス: 3 ps
gaussian の8スタック

• 主空洞出口の値

- $\epsilon_{nx} = 0.45$ mm mrad
- $\epsilon_{ny} = 0.44$ mm mrad
- $\text{stdz} = 1.47$ mm (4.9 ps)

1.5 日間実施
とりあえず、損失なく周回できた



7.7 pC輸送まとめ

- 0.5 pC輸送で可能な限り設計に近づける調整を実施したのち、7.7 pC輸送試験を行った
- 次の3つの条件でビーム輸送試験を行った
 - 電子銃 390 kV + 7.7 pC輸送条件
 - 電子銃 390 kV + 0.5 pC輸送条件(バンチ電荷7.7 pC)
 - 電子銃 450 kV + 7.7 pC新輸送条件
- エミッタンスを設計値まで下げるには至らなかったが、2015年5月～6月に比べてかなり改善することができた
- 効果のあったこと
 - 電子銃-入射器空洞間の軌道調整
 - 入射器空洞内の軌道調整
 - マッチング点の追加
 - 周回部のオプティクス調整
- 課題
 - CW 運転に向けて、エミッタンス低減とコリメタ条件の両立
 - より詳細な入射器空洞の軌道調整
 - 主空洞後にエミッタンスが増大しているので、合流部から主空洞に掛けての軌道調整