

40pCでのビーム輸送設計 バンチ長測定

2017.4.12. Wed.

第105回 ERL検討会

報告者: 布袋 貴大

概要

- 2017年3月cERLで40pCのビームコミッショニングを行った。
 - 目的: 40pCで低エミッタンスかつ短バンチ長の実現
 - もともとは60pCの予定であったが、レーザー出力の都合で40pCに変更
- 実際のビーム試験で測定された初期バンチ長や加速されたエネルギーなどをフィードバックし、シミュレーションによるビーム輸送条件の改善を行った。
- また入射器診断ラインを用いて、下流でのバンチ長やエネルギー拡がりを測定し、計算結果との比較を行った。
- 本報告ではシミュレーションによる輸送設計の詳細と、縦方向のビームパラメータに関する測定結果を紹介する。

実験からモデルへフィードバックできた項目

- 電子銃収束力
 - 新しい電子銃の電場モデルを作成
 - カソード据え付け誤差を0.4mmから0.8mmに変更
- スタックされたレーザー長
 - 観測値FWHM=31ps(入射器空洞を用いて測定)
 - 観測値に合わせたフラットトップのモデルを作成
- 入射器空洞電圧
 - 入射器空洞で加速された後のエネルギー $E_{\text{tot}} = 5.12 \text{ MeV}$

電子銃収束力測定

- 大崎さんのスライドより

試験目的

cERL最上流部であるカソード形状を正確に把握し
実験的に下流側でのビーム制御を行いやすくする

手順

1. フォトカソード上でレーザー照射位置を変化させ、出射される電子ビームのxy平面位置を1.02m下流のモニタで測定。
2. Super Fish でカソードが形成する電場分布を計算。
3. 電場分布をGPTで読み込み単粒子ビーム軌道を計算。
(外力はカソードからの電場のみ考慮)
4. 実験の測定値と計算結果を比較。

電子銃収束力測定

- 大崎さんのスライドより

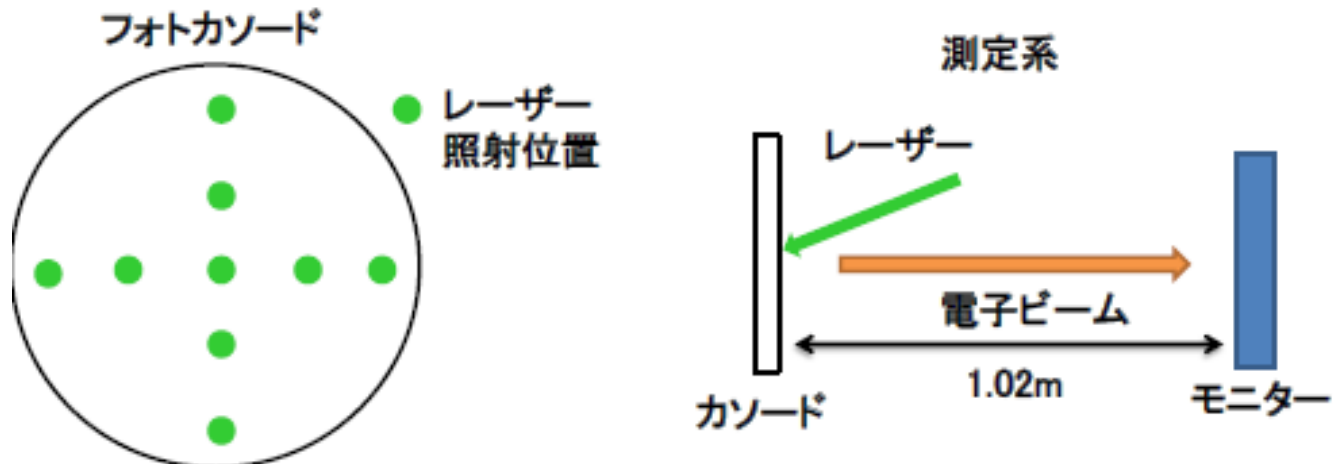
ビーム位置測定(実験)

下記Parameterで電子ビームを生成し
1.02m下流のモニターでビーム位置を測定

Parameter

レーザー照射位置 : $X = 0$ で固定、 $Y = -4.0\text{mm}$ から 4.0mm
 : $Y = 0$ で固定、 $X = -4.0\text{mm}$ から 4.0mm

印加電圧 : 200kV, 300kV, 400kV, 450kV

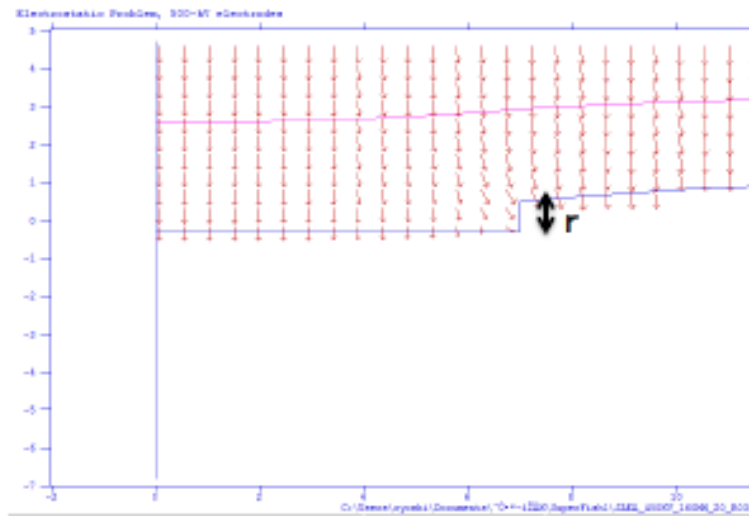


電子銃収束力測定

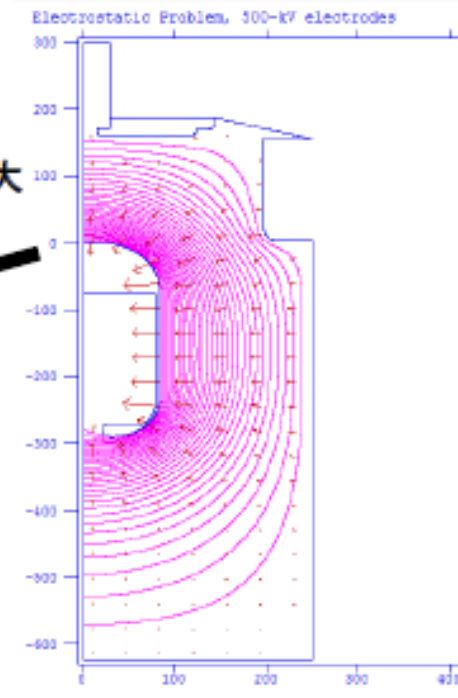
- 大崎さんのスライドより

電場計算(Super Fish)

- カソード周辺の形状を入力
- カソードの進行方向の据え付け誤差" r "を0.4mmから0.8mmまで変化させ電場計算



拡大



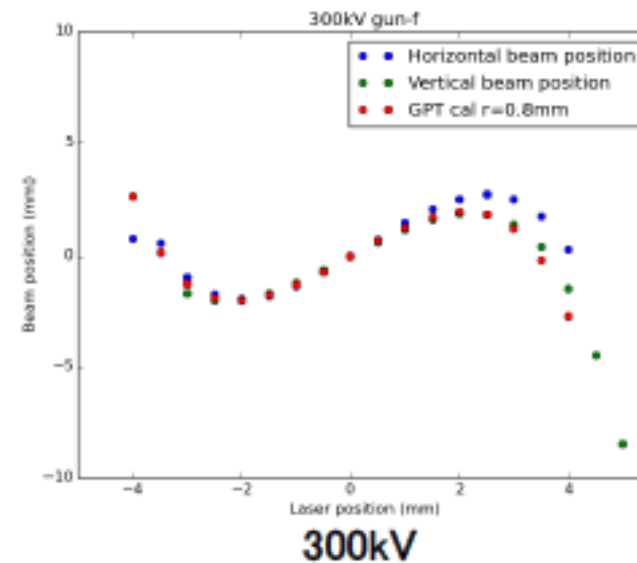
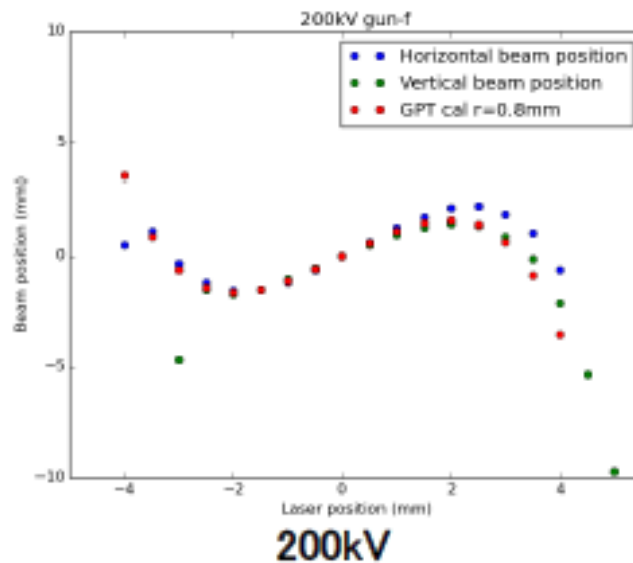
電子銃収束力測定

- 大崎さんのスライドより

実験と計算の比較

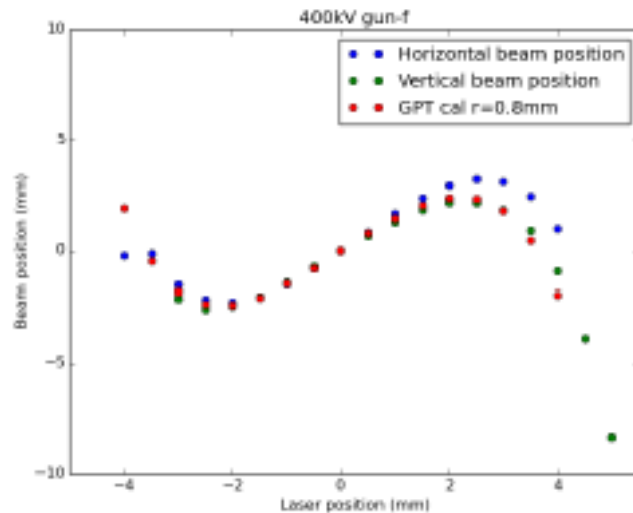
- カソードの据え付け誤差が0.8mmの場合の計算結果と実験結果がよく合うことを確認。
- 印加電圧 200kV ~ 450kVの範囲でよく一致している。

青点・・・Y = 0, X = -4.0mm~4.0mm 緑点・・・X = 0, Y = -4.0mm~4.0mm 赤点・・・GPT計算結果

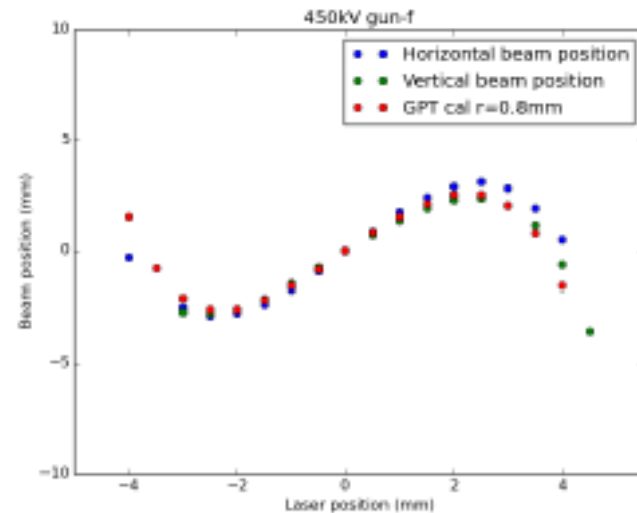


電子銃収束力測定

- 大崎さんのスライドより



400kV



450kV

- 印加電圧の広い範囲でよく一致している。SuperFishの電子銃構造は実機のカソード周辺の構造を再現していると思われる。
- 実験でレーザー照射位置をカソード中心からずらすとモニターでのxy方向のビーム位置のずれが大きくなる。カソードが傾いている??

電子銃収束力測定

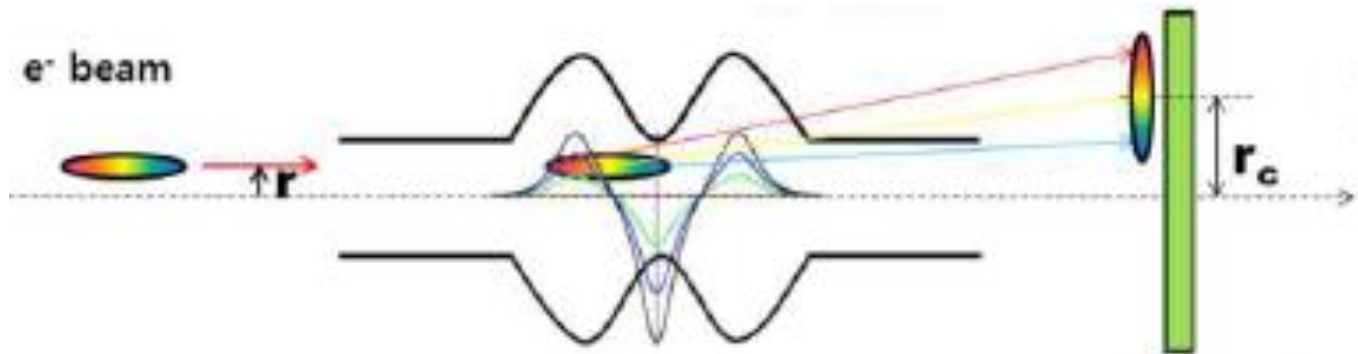
- ・大崎さんのスライドより

まとめ

- ・カソードから出射されるビーム位置を実験的に測定し、計算結果と比較。
- ・カソードの進行方向の据え付け誤差“ r ”が0.8mmのモデルで計算結果と実験結果がよく合うことを確認
- ・印加電圧 200kV ~ 450kVの広い範囲でよく一致しており
Super Fishの電子銃構造はカソード周辺の構造を再現していると期待
- ・実験でレーザー照射位置をカソード中心からずらすとxy方向のビーム位置のずれが大きくなる。カソードが傾いている??

レーザー長測定

- 最上流の入射器空洞を用いて、バンチ長を測定した。
 - 偏向空洞を用いたバンチ長測定では、下流までの輸送中に様々な影響を受けるが、上流部で測定することで、ほとんどダイレクトに初期レーザー長を測定することができる。
 - 低電荷で測定
- 原理
 - ビームが空洞の中心を通らないとき、半径方向の電場の影響を受ける。
 - 影響の受け方は乗っている位相で変化し、キック量とスクリーンまでの距離を調整することで、時間構造を横方向に射影できる。



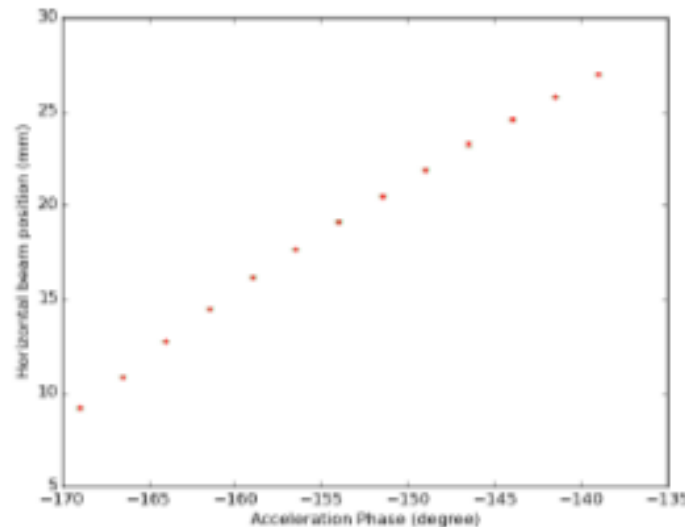
宮島さんのスライドより

レーザー長測定

- 大崎さんのスライドより、校正係数決め

バンチ長計算step1 (X方向)

空洞周波数: 1.3GHz → 空洞の位相1度は2.14psec

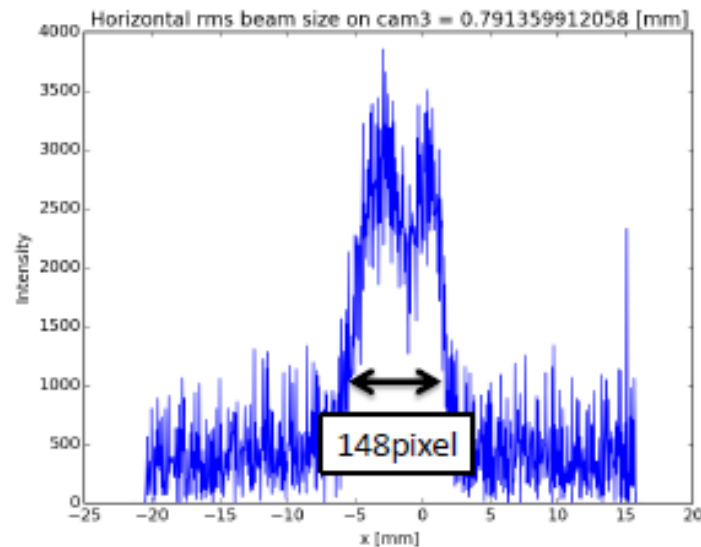


図(steering-2.0A)よりcam3上で1度 : $310/30 = 10.3$ pixelに対応

レーザー長測定

- 大崎さんのスライドより、測定結果

バンチ長計算step2とstep3 (X方向,FWHM)



図よりcam3でのビームサイズは148pixelと求まる。

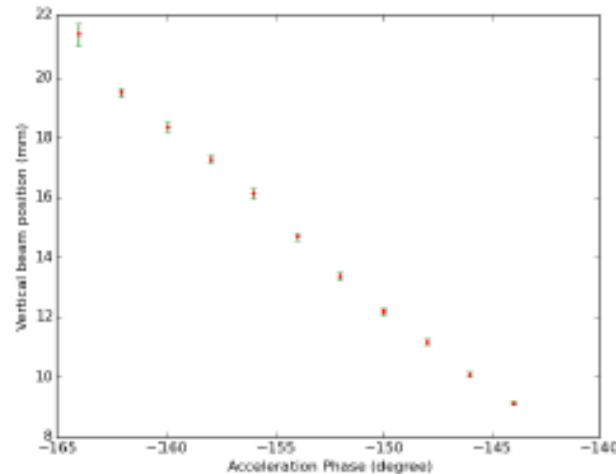
$$\text{バンチ長} : 2.14\text{psec} * 148 / 10.3 = 30.8\text{psec}$$

レーザー長測定

- 大崎さんのスライドより、校正係数決め

バンチ長計算step1(Y方向)

空洞周波数: 1.3GHz → 空洞の位相1度は2.14psec

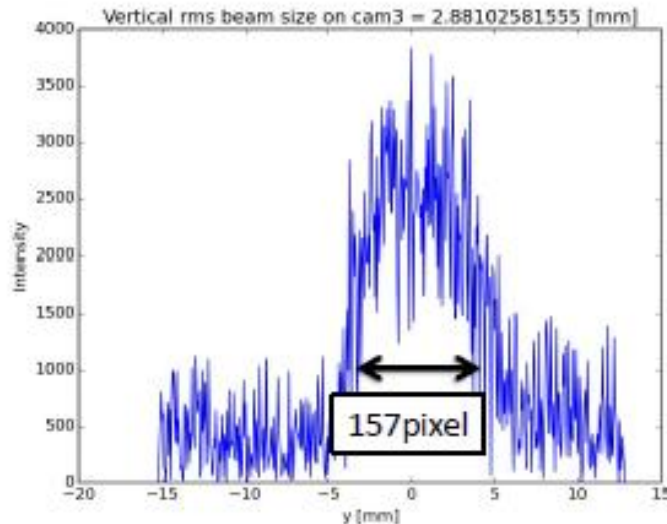


図(stearing-2.0A)よりcam3上で1度 : $213/20 = 10.7$ pixelに対応

レーザー長測定

- 大崎さんのスライドより、測定結果

バンチ長計算step2とstep3 (Y方向,FWHM)

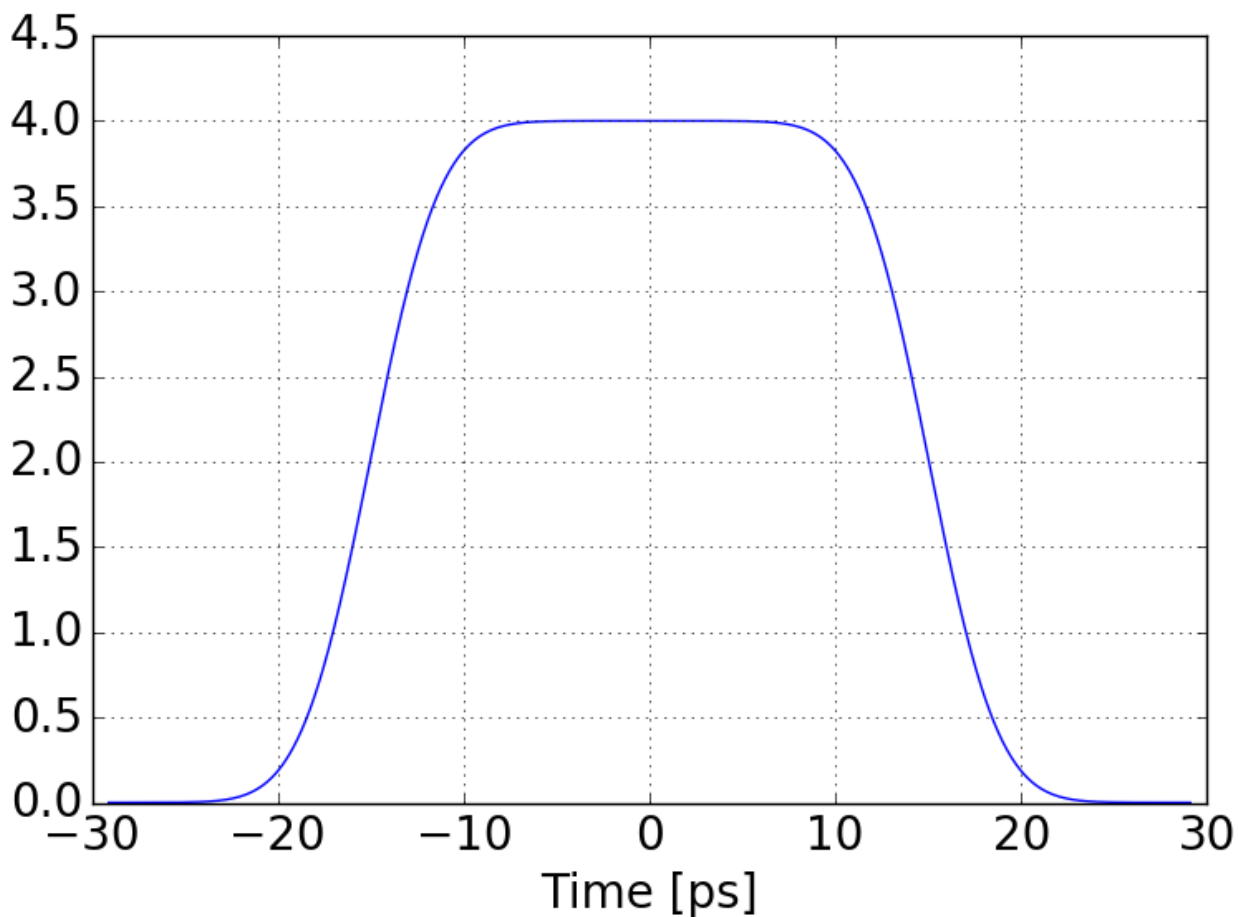


図よりcam3でのビームサイズは157pixelと求まる。

$$\text{バンチ長} : 2.14\text{psec} * 157 / 10.7 = 31.4\text{psec}$$

レーザー時間分布のモデル化

- モデル計算に用いているGPTに取り込めるようにレーザー分布作成。
- モデルはフラットトップとしたが、実際にはきれいに作るの難しい。



ビームエネルギー測定

- 周回部へ入射する合流部の偏向電磁石を用いてエネルギーを測定した。
 - 軌道(曲げ角)は決まっているので、設計通りに曲げるときの磁場からエネルギーが分かる。

- モデルのEacc

- inj #1 = 6.22 MeV
- inj #2 = 6.8 MeV
- inj #3 = 6.5 MeV

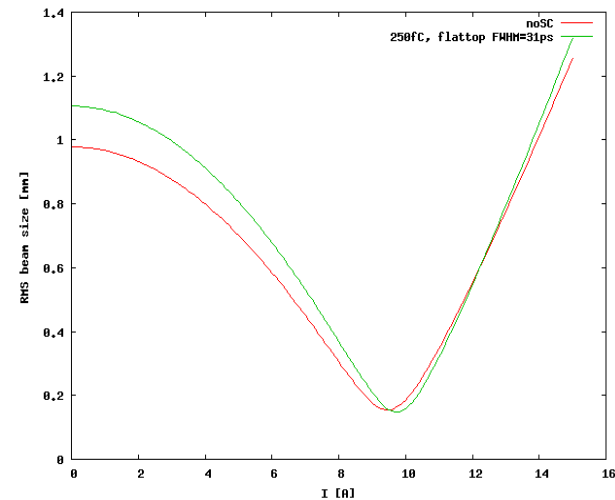
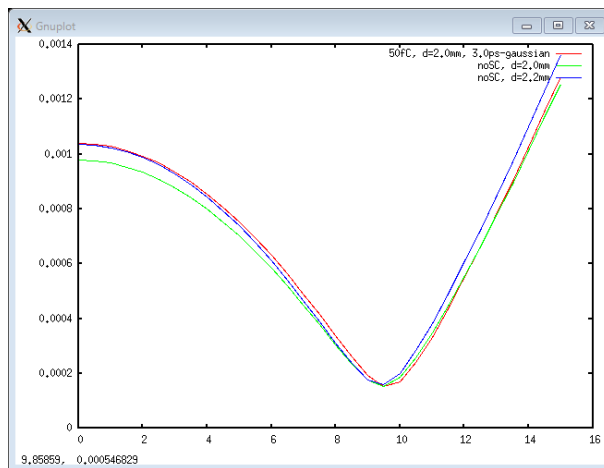
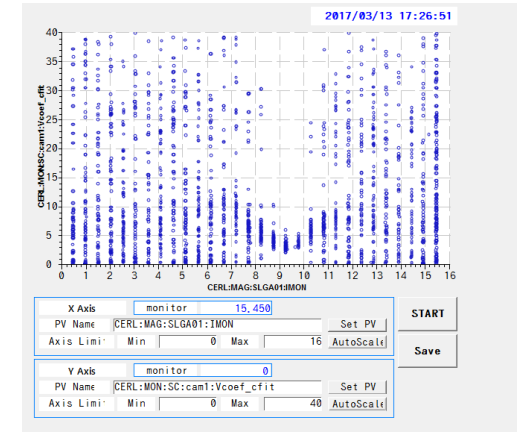
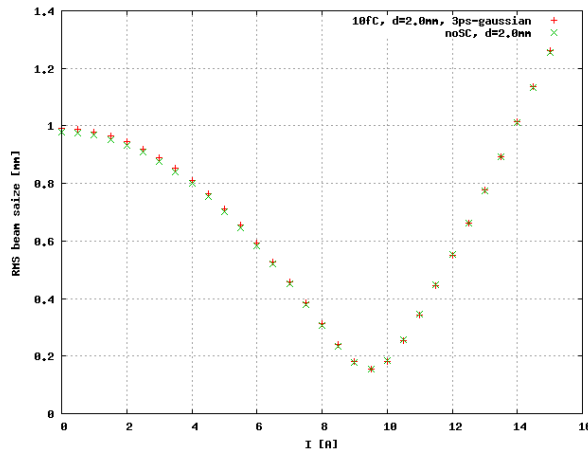
Bending Magnet Energy	
CAM14	
ROI	328 pixel
PeakPos	0 pixel
um/pixel	64.50 um/pixe
current	52.150 A
	-21.188250 mm
Peak Position	-21.1883 mm
Current	52.150 A
P	20.83890 MeV/C
P0	19.99457 MeV/C
E	20.84517
E0	20.00110
CAM8	
ROI	334 pixel
PeakPos	334 pixel
um/pixel	56.60 um/pixe
current	5.214 A
	0.028300 mm
Peak Position	0.0283 mm
Current	5.214 A
P	5.09512 MeV/C
P0	5.09473 MeV/C
E	5.12068
E0	5.12029
CAM31	
ROI	342 pixel
PeakPos	0 pixel
um/pixel	99.00 um/pixe
current	2.370 A
	-33.858000 mm
Peak Position	-33.8580 mm
Current	2.370 A
P	2.25259 MeV/C
P0	2.64492 MeV/C
E	2.30983
E0	2.69383

今回フィードバックしきれなかった項目

- レーザースポットサイズ
 - 初期のビームサイズに対応
 - SLscanからフィードバックする予定だった。
 - $d=2.0\text{mm}$ では低電荷ではビームサイズが大きくノイズに負けるが、測定できる領域では空間電荷効果を見逃しきれなかった。
 - レーザーの時間構造がフィードバックできたので、空間電荷があっても合わせこめるか...？(課題)

スポットサイズ修正に関して

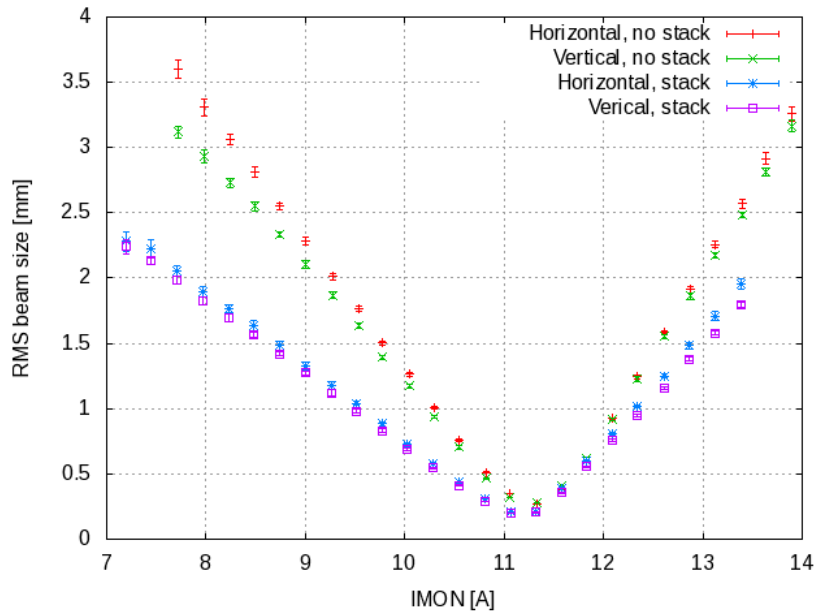
- 空間電荷効果を完全に無視できる10fCが理想的であったが、ノイズが大きくてまともに測定できず。
- 50fC, スタックパルスでの250fCではスポットサイズ修正には至らなかった。



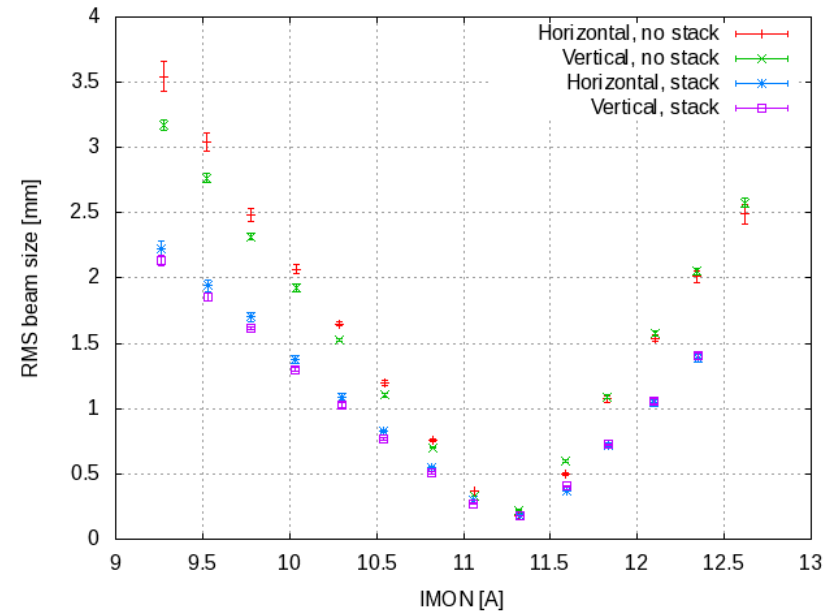
パルススタックによる空間電荷効果の緩和

- 7.7pC, 20pCについてスタック前後でソレノイドスキャンを実施。
- 空間電荷効果の緩和が確認できた。

7.7pC



20pC



エミッタンス算出

- 目的

- 高電荷では低電荷と比べ電子銃直下の低エネルギー一部でどれだけエミッタンスが悪化するかの大きさをあたり付け。
- あとせっかくデータをとったので。

- 原理

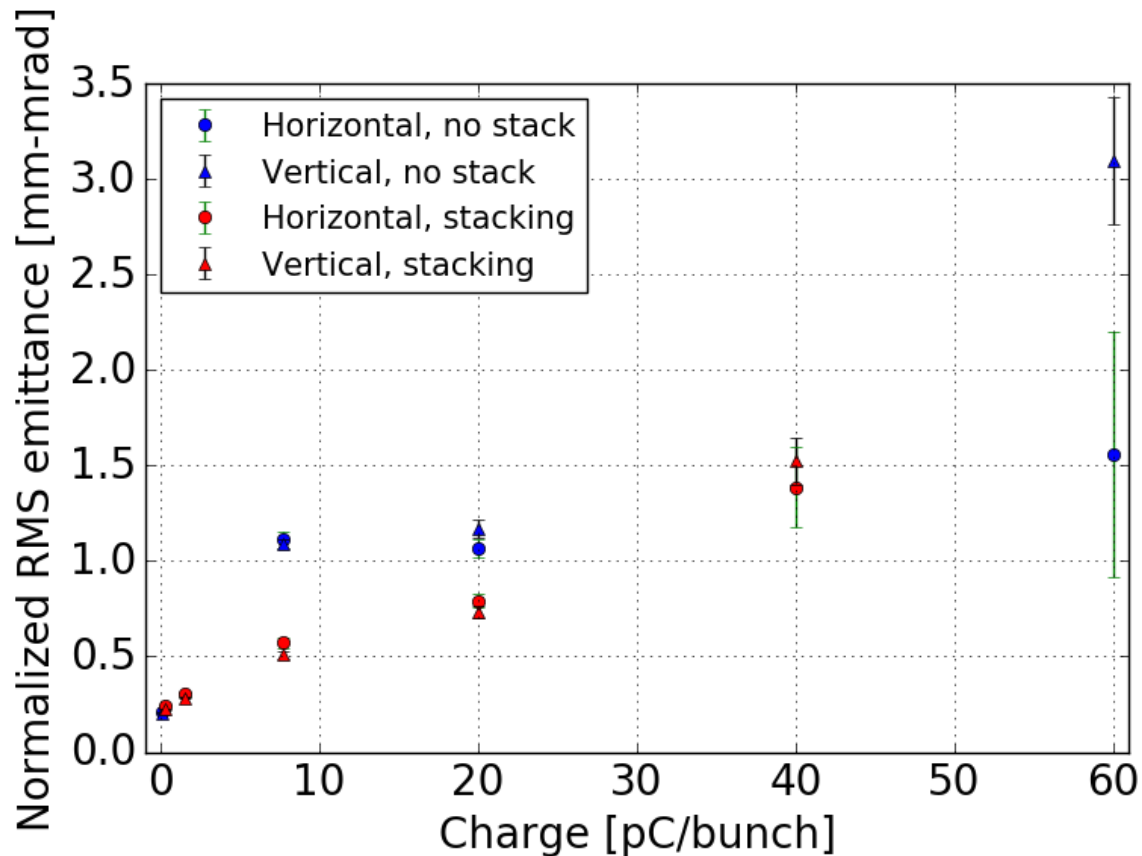
- 収束力を変えながら、下流スクリーンでのビームサイズを測定

$$\sigma_{MS} = \sqrt{L\sigma \left(k - \left(\frac{1}{L} - \frac{\alpha}{\beta} \right) \right)^2 + \frac{L^2 \varepsilon^2}{\sigma^2}}$$

- この関数形で測定結果をフィッティングし、エミッタンスを求める。
- リニアな関係に基づく式なので、今回の結果はあくまで目安程度のもの。

電荷 vs エミッタンス

- 基本的には電荷が大きくなるほどエミッタンスも悪くなっている。
- パルススタックによりエミッタンスの悪化も抑えられている。
- ソレノイドによる回転はあまり考えず、スクリーンでの水平・垂直をそのまま使用。

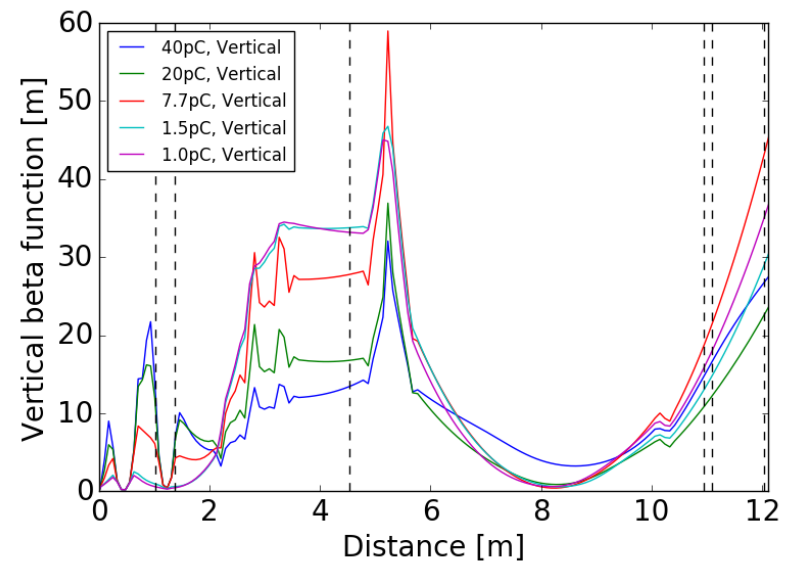
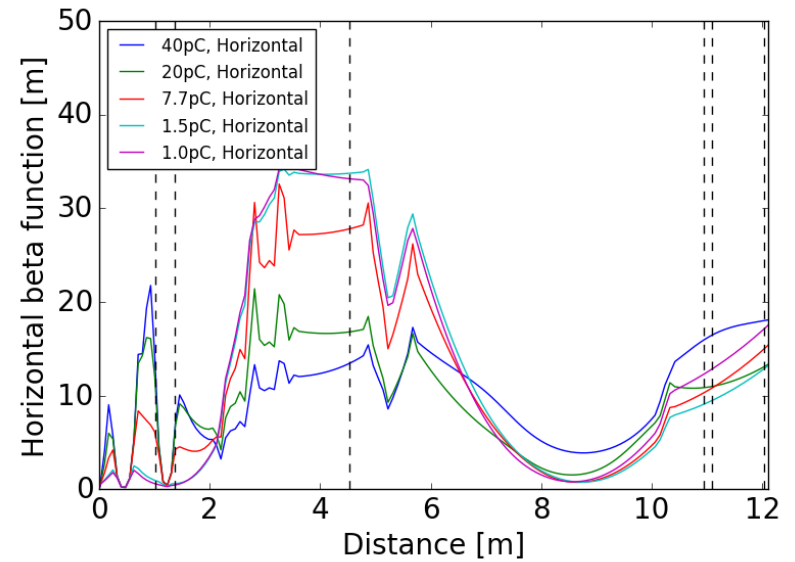
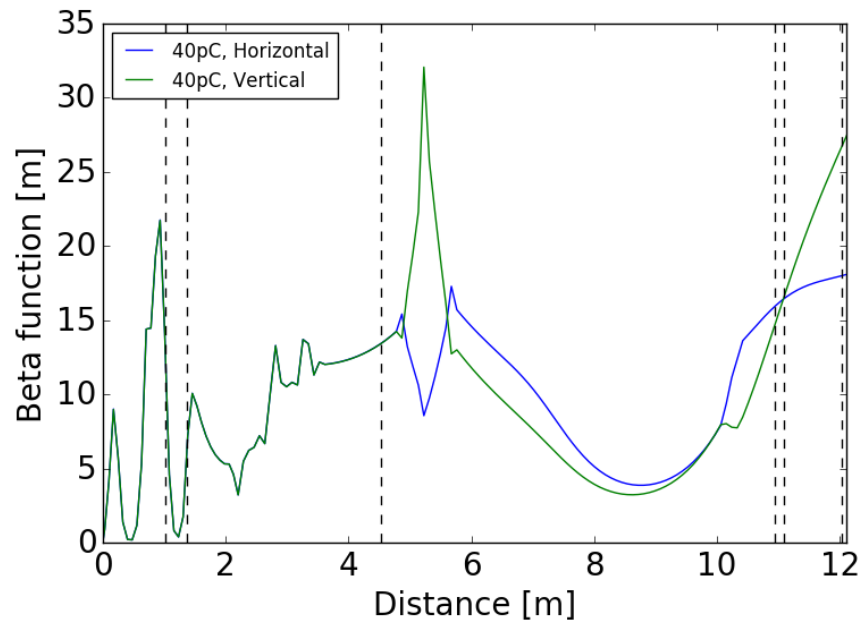


輸送設計

- ベースとしてはエミッタンス及びバンチ長を最小化するようにMOGAによって多目的最適化
- ビーム試験の結果を素早く反映するために、ある程度の最適化の後には、GAによらず手動で微調整
- 計算には粒子トラッキングコードGPTを使用
 - マクロ粒子数25000で計算

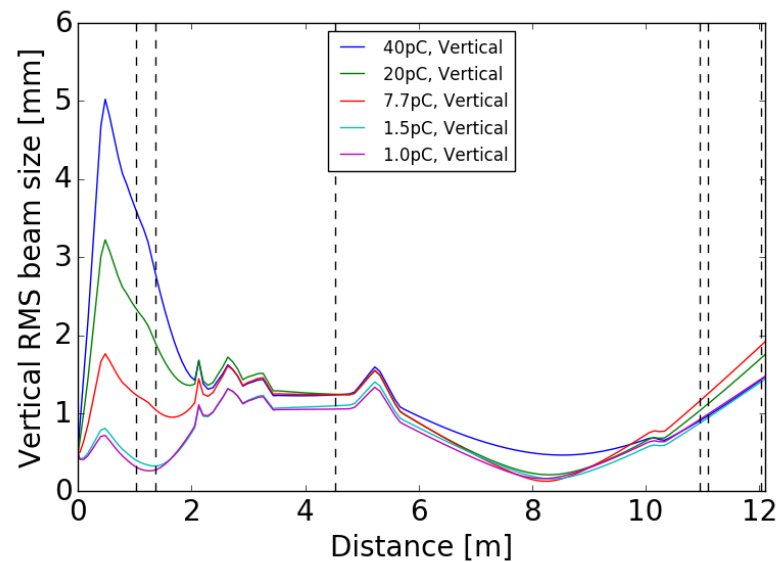
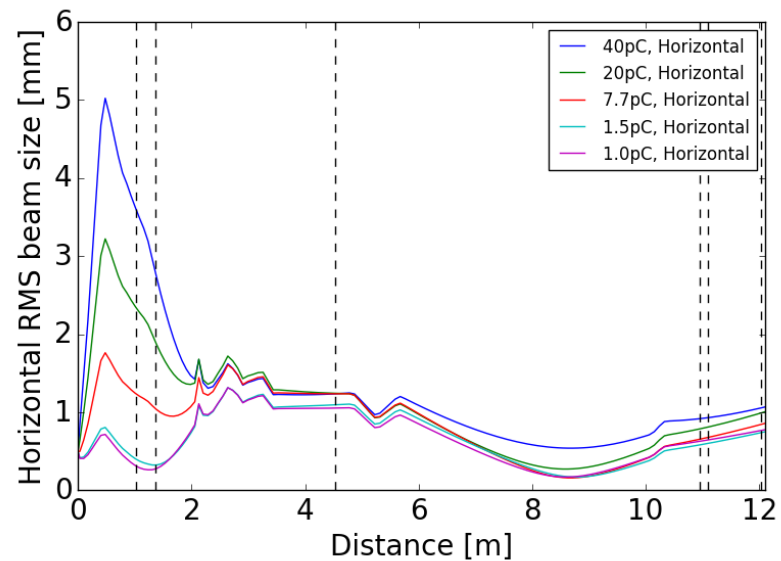
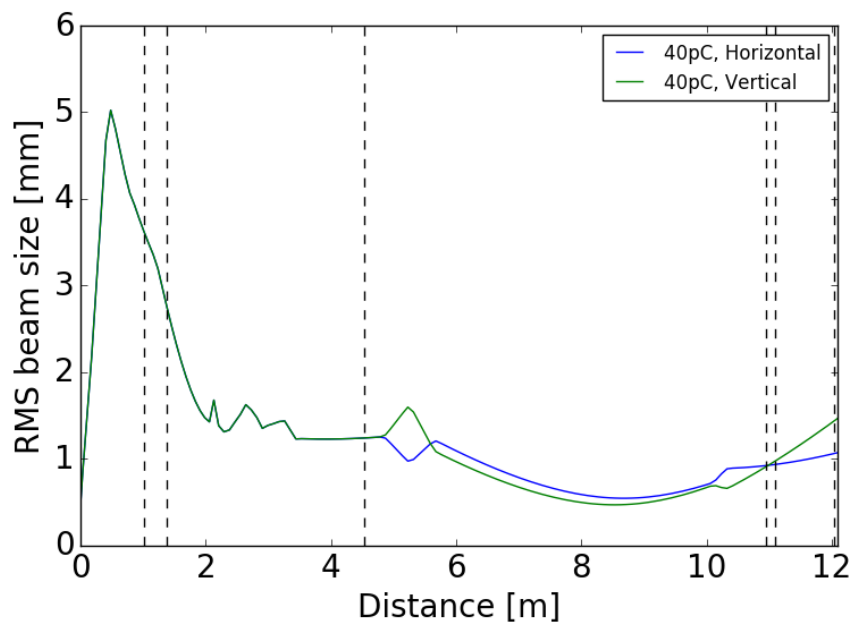
入射器診断ラインエンベロップ発展

- cam5までのエンベロップ発展



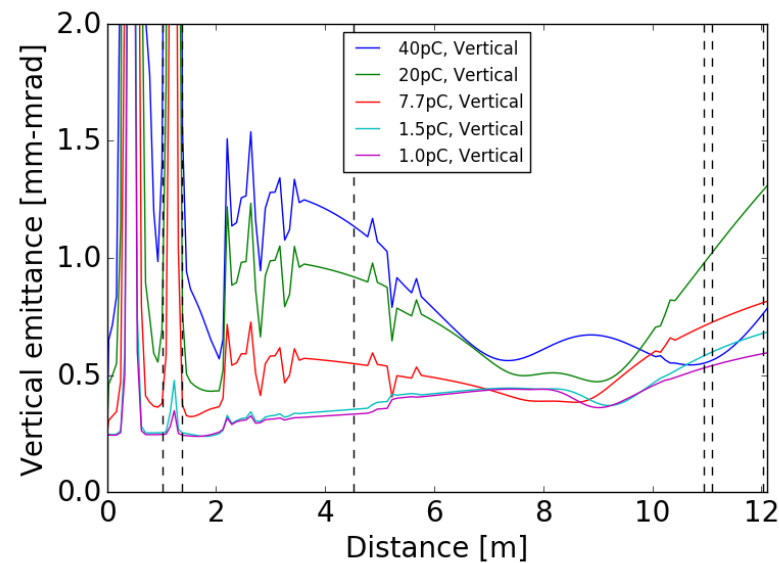
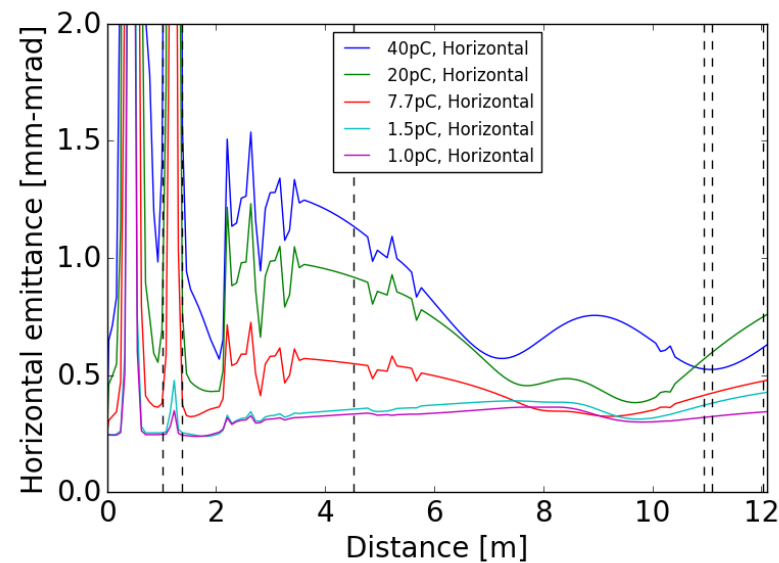
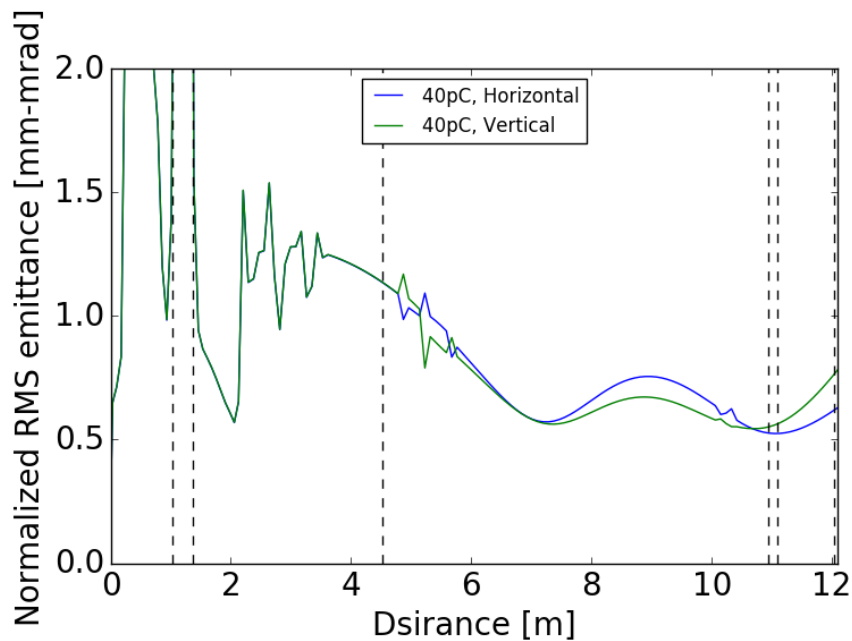
入射器診断ラインRMSビームサイズ発展

- cam5までのビームサイズ発展



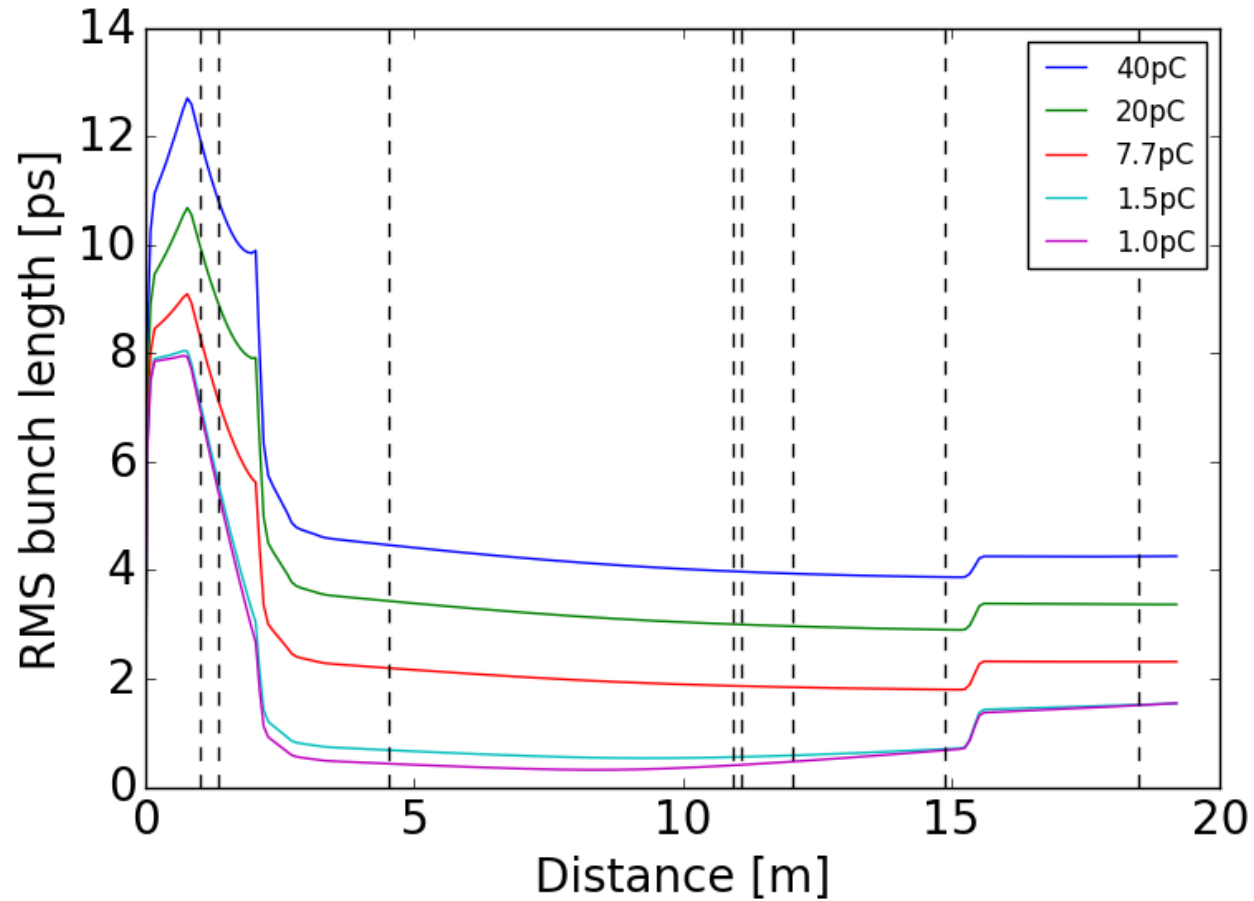
入射器診断ラインRMSエミッタンス発展

- cam5まで輸送



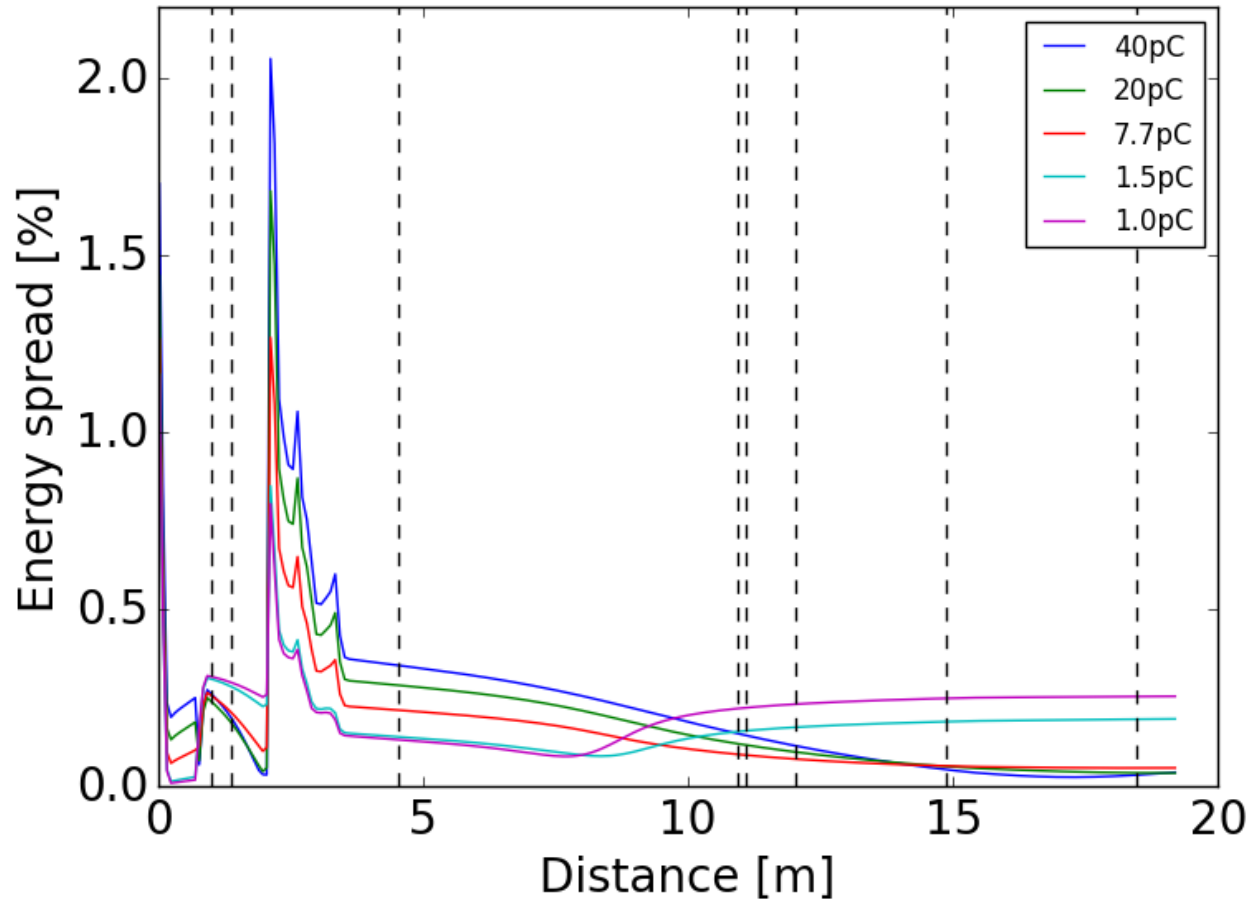
入射器診断ラインRMSバンチ長発展

- cam7まで輸送



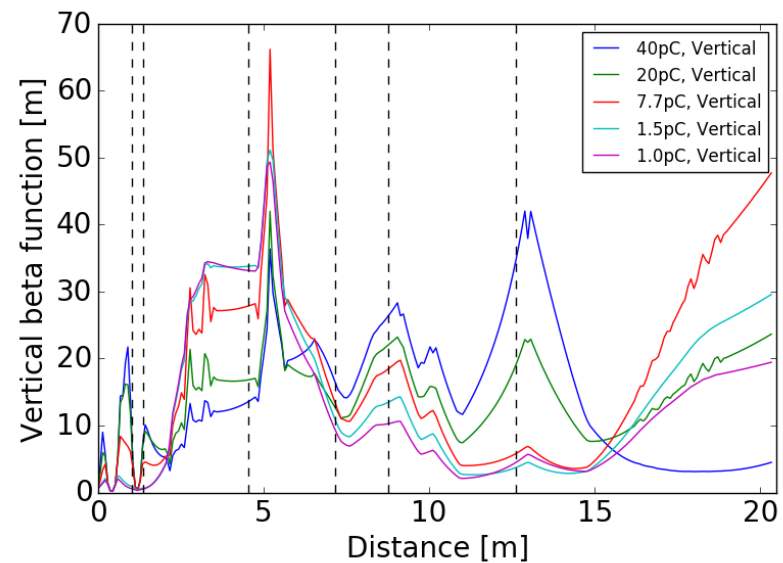
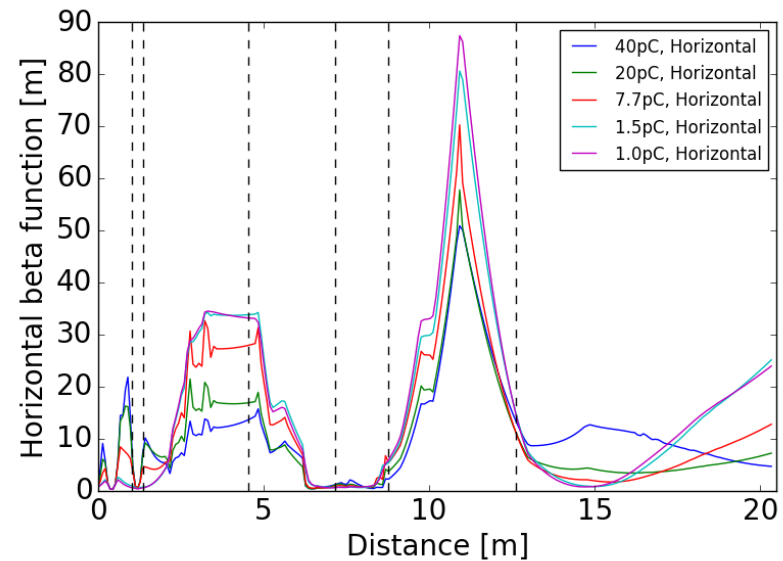
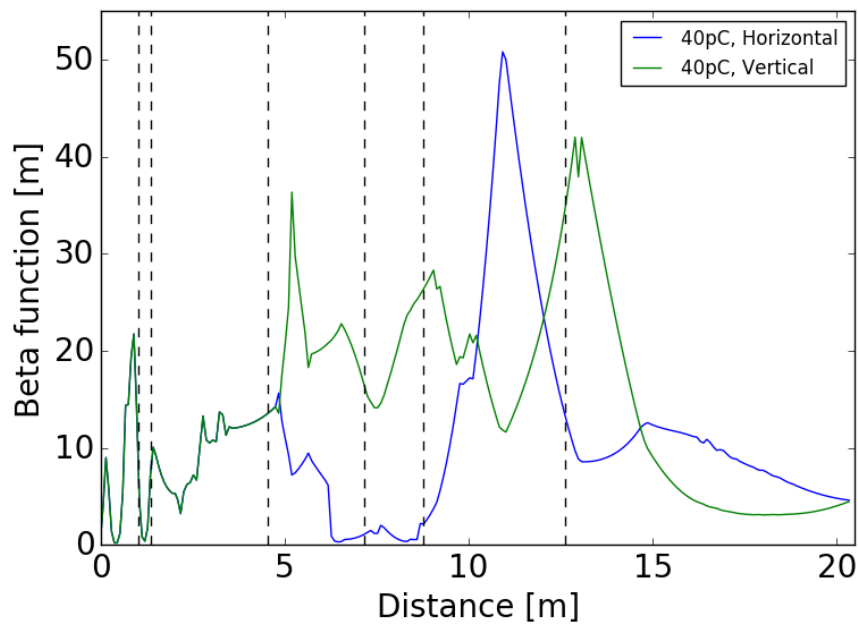
入射器診断ラインエネルギー拡がり発展

- cam7まで輸送



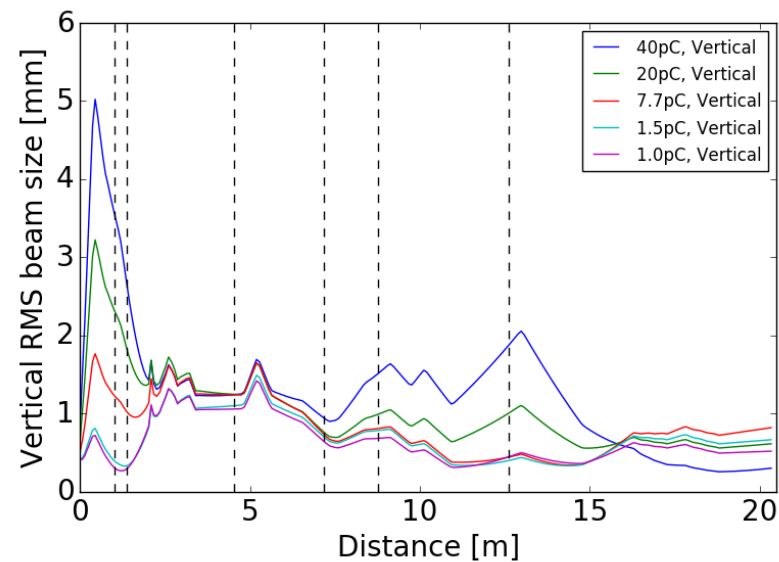
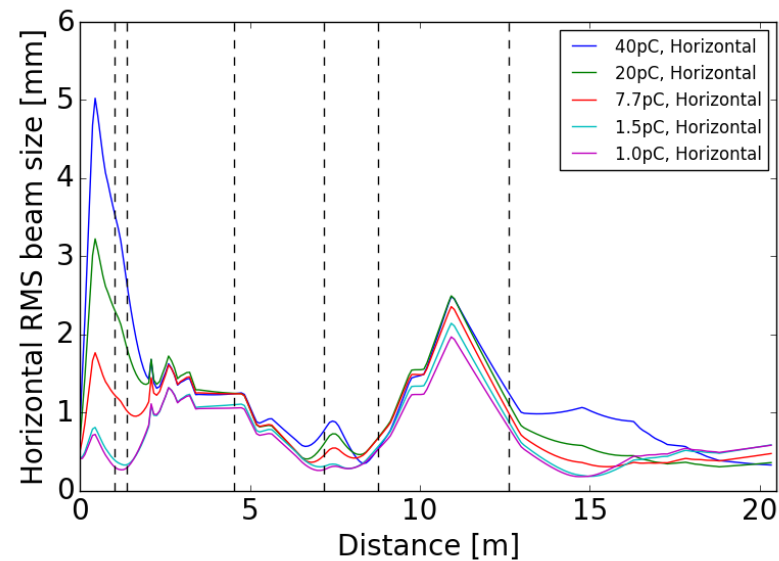
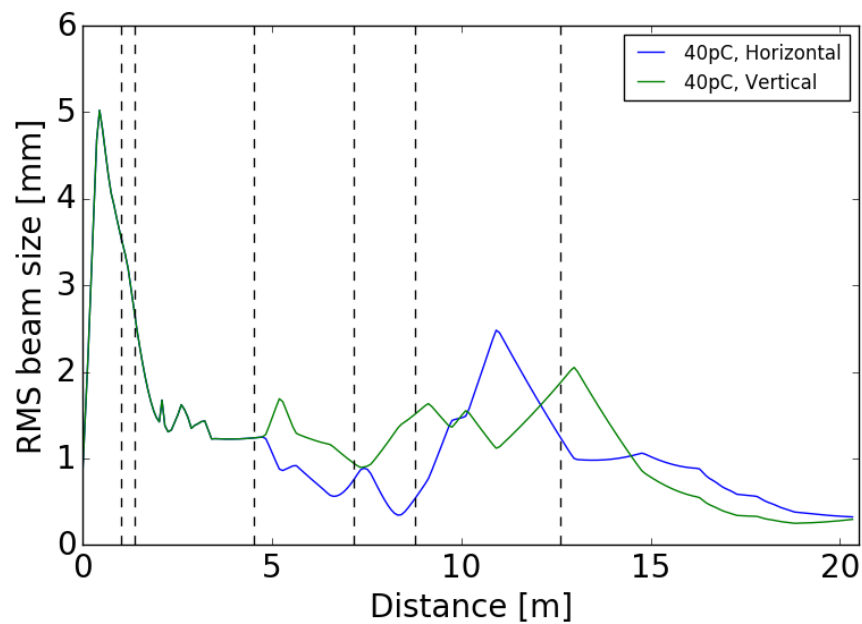
周回部入射エンベロープ発展

- 主空洞出口まで輸送



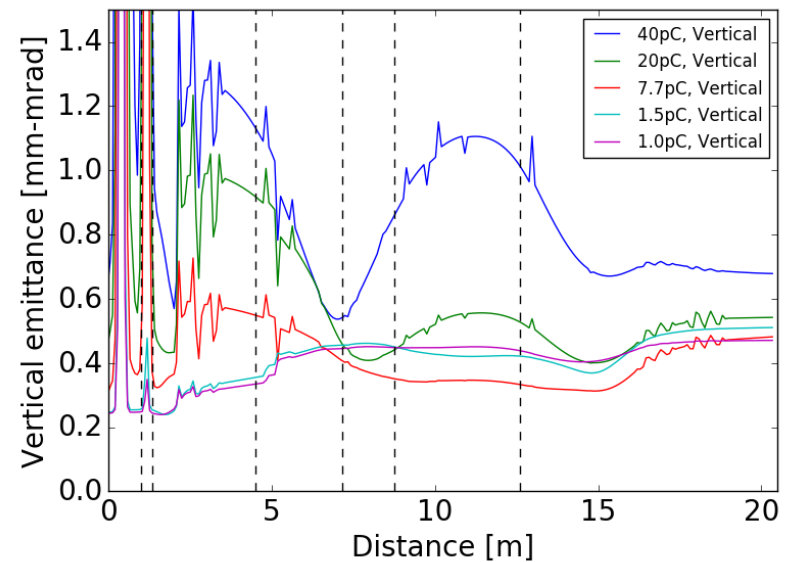
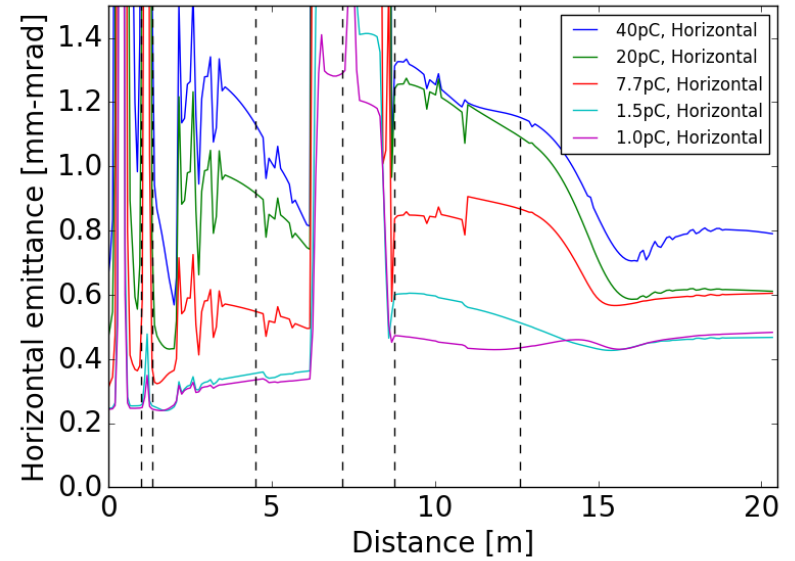
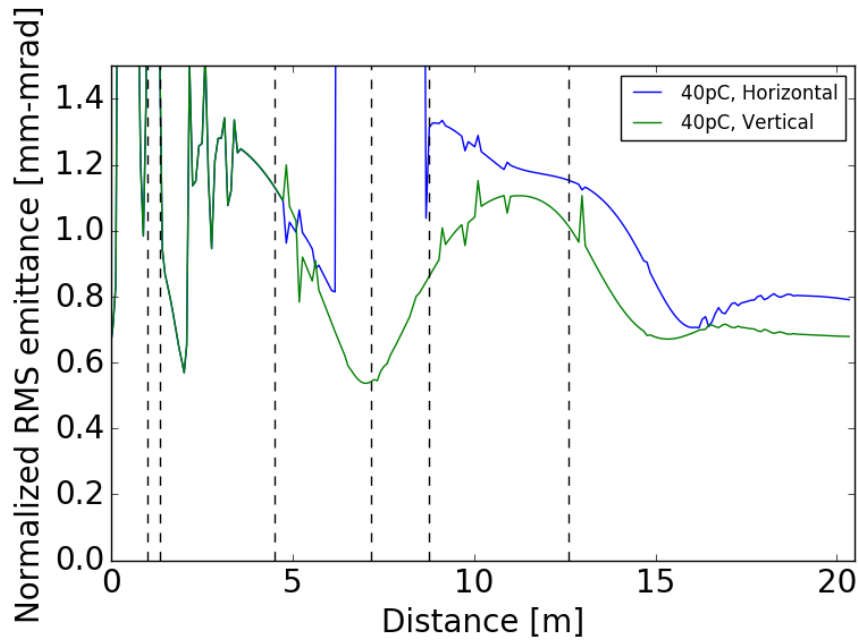
周回部入射RMSビームサイズ発展

- 主空洞出口まで輸送



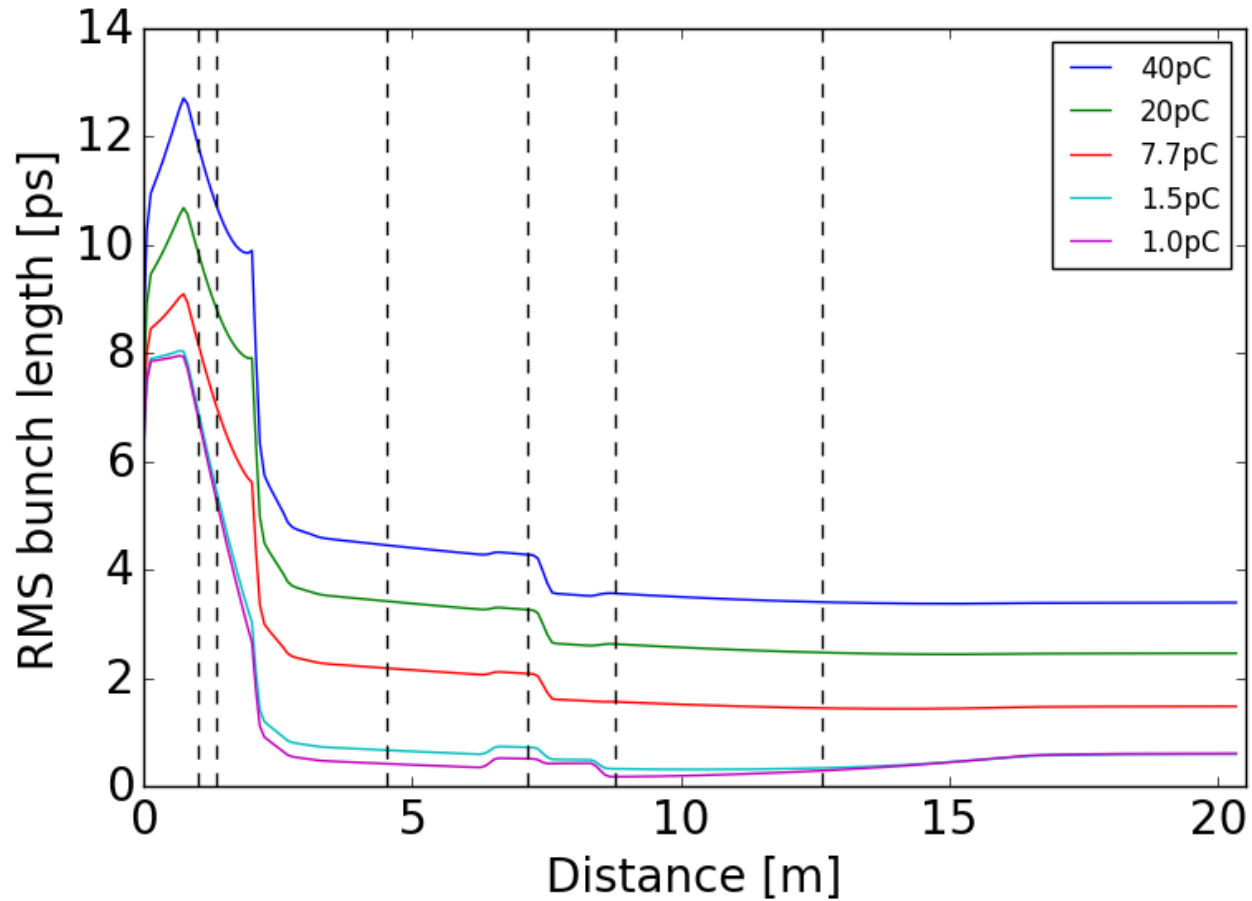
周回部入射RMSエミッタンス発展

- 主空洞出口まで輸送



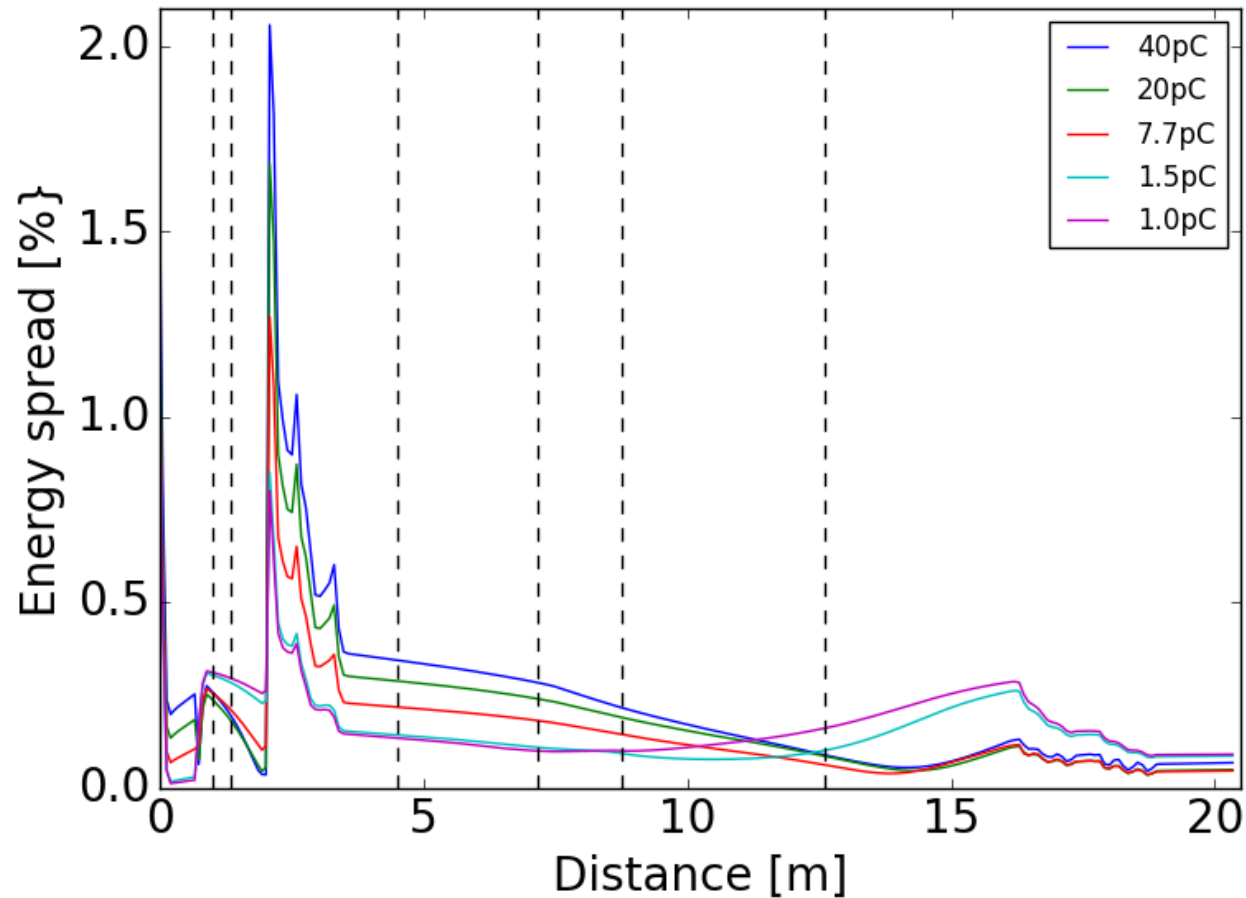
周回部入射RMSバンチ長発展

- 主空洞出口まで輸送



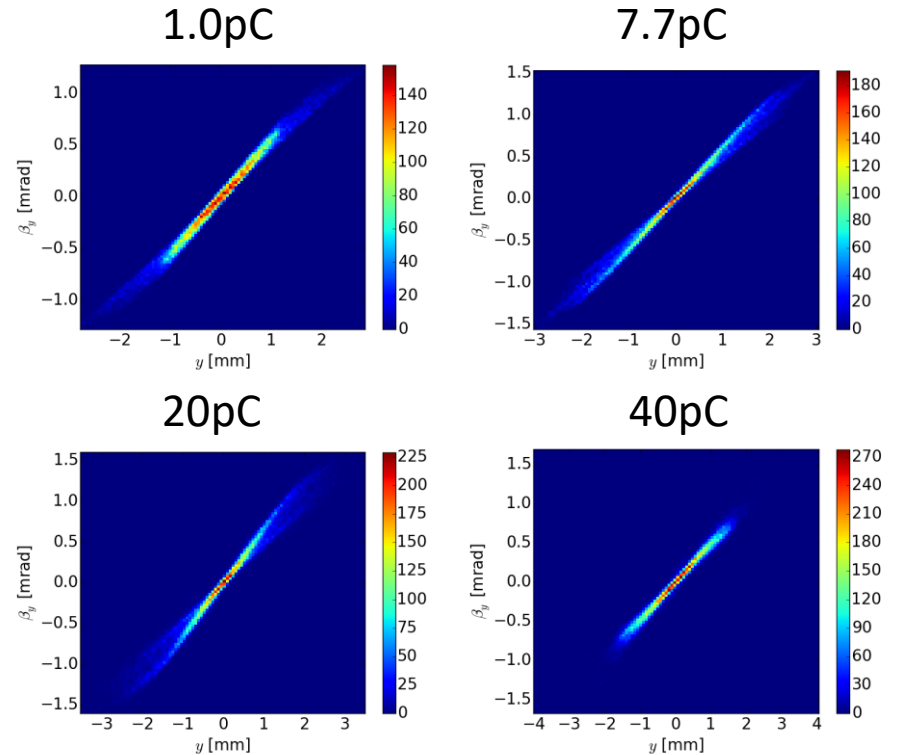
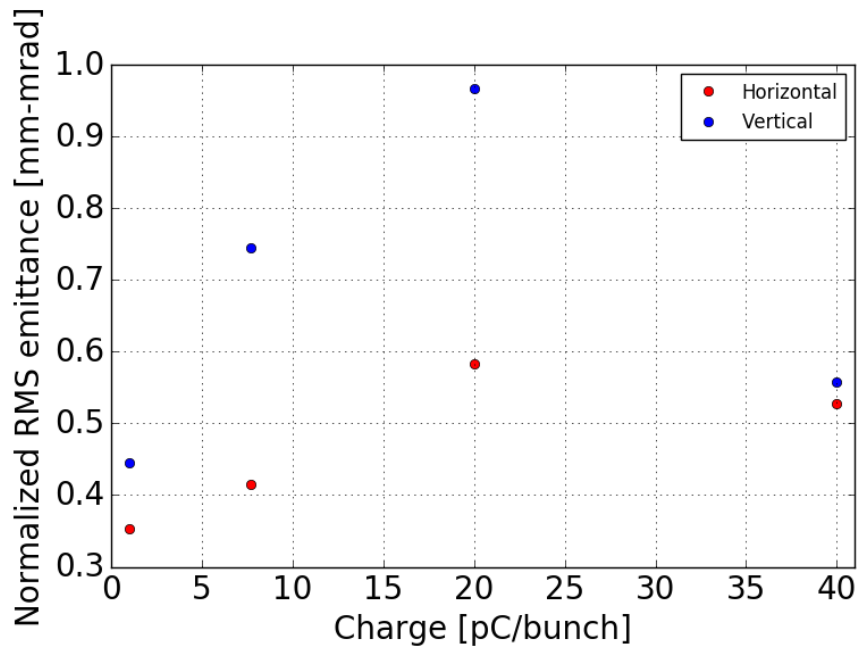
周回部入射エネルギー拡がり発展

- 主空洞出口まで輸送



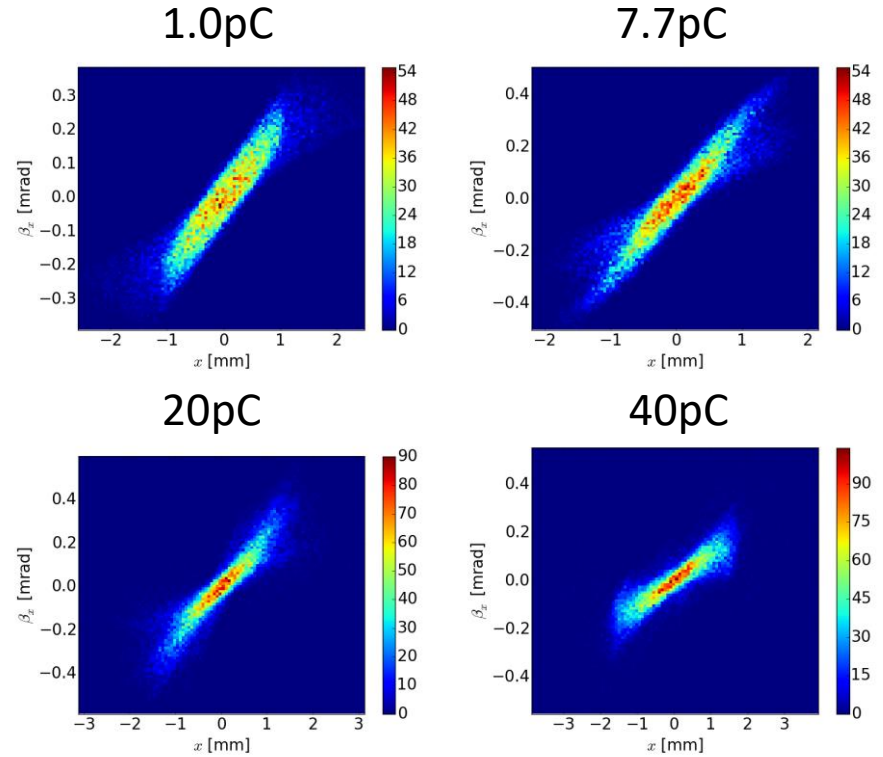
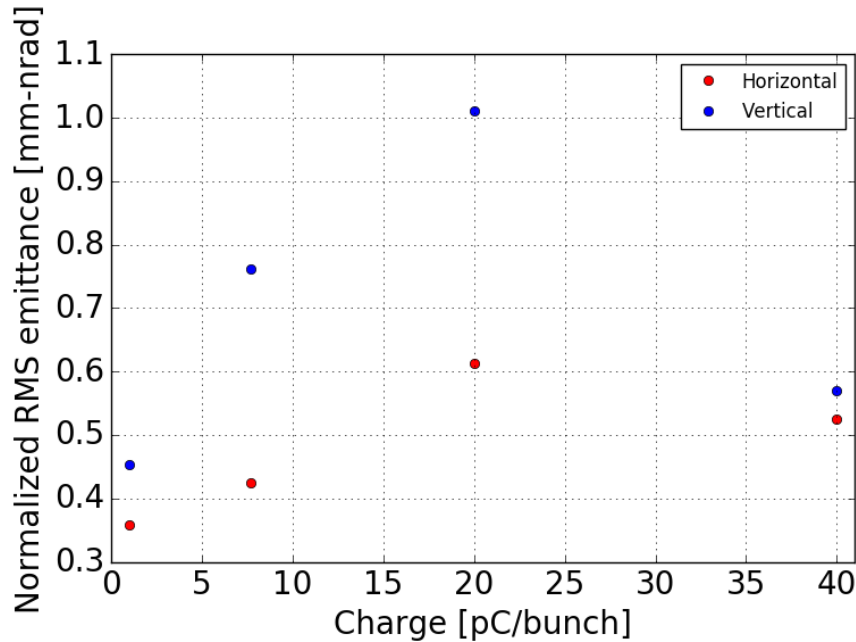
スリット(V)スキャンで期待されるエミッタンス

- V方向スリット位置での電荷ごとのエミッタンス比較
 - d=2.0mm: 1.0pC, 7.7pC, 20pC, 40pC



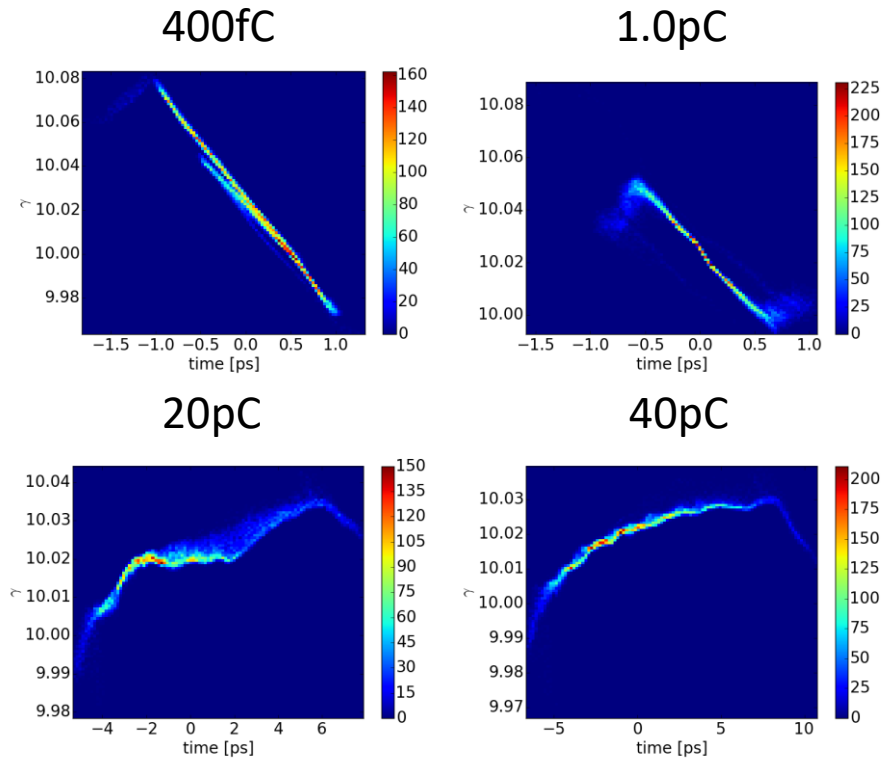
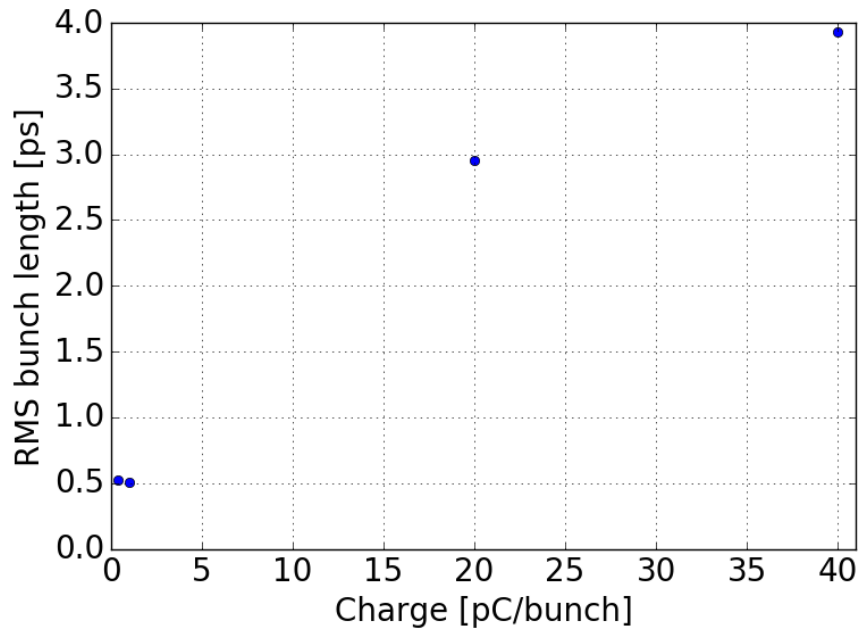
スリット(H)スキャンで期待されるエミッタンス

- H方向スリット位置での電荷ごとのエミッタンス比較
 - d=2.0mm: 1.0pC, 7.7pC, 20pC, 40pC



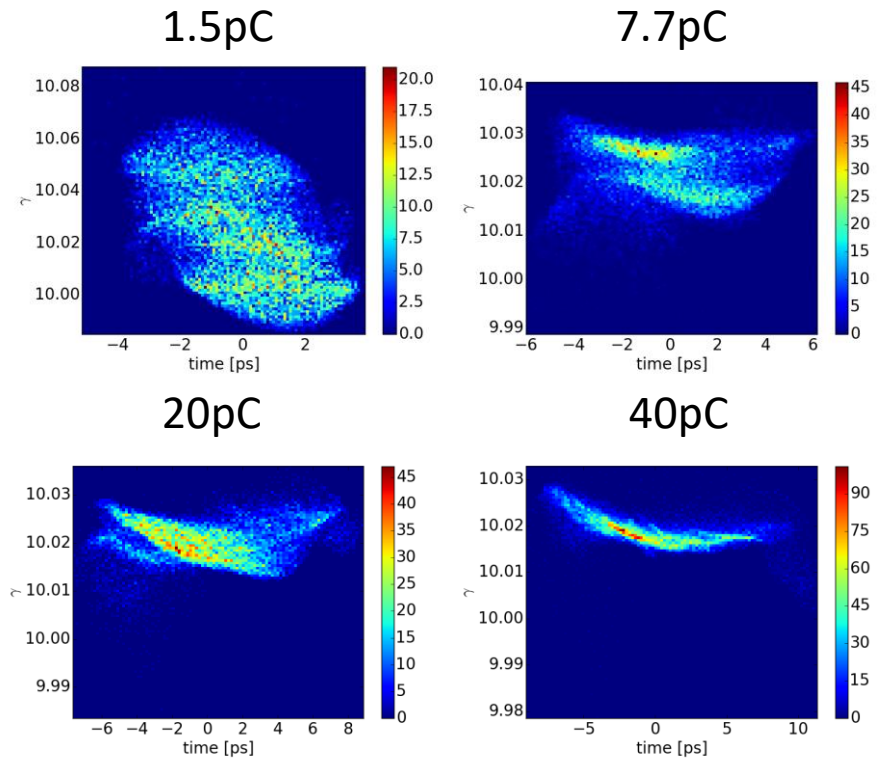
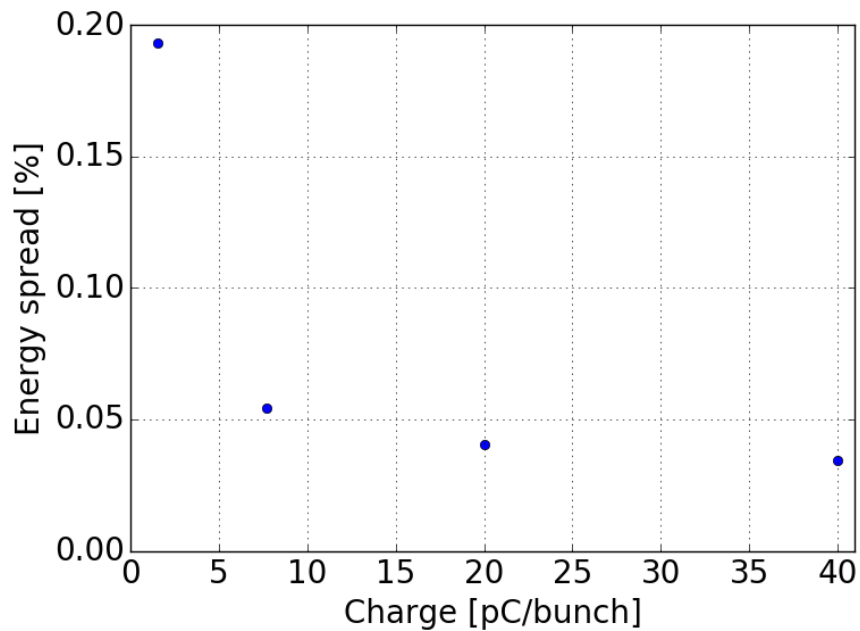
入射器診断ライン下流でのバンチ長

- 偏向空洞位置での電荷ごとのバンチ長
 - d=1.0mm: 400fC, 1.0pC
 - d=2.0mm: 20pC, 40pC



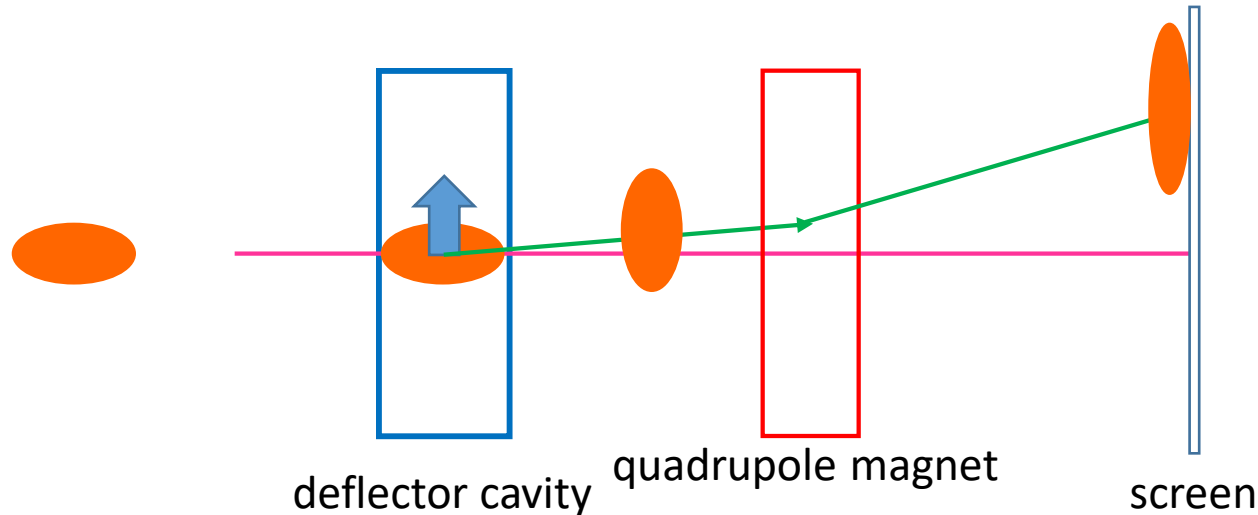
cam7でのエネルギー拡がり

- 偏向空洞位置での電荷ごとのバンチ長
 - d=2.0mm: 1.5pC, 7.7pC, 20pC, 40pC



偏向空洞を用いたバンチ長測定

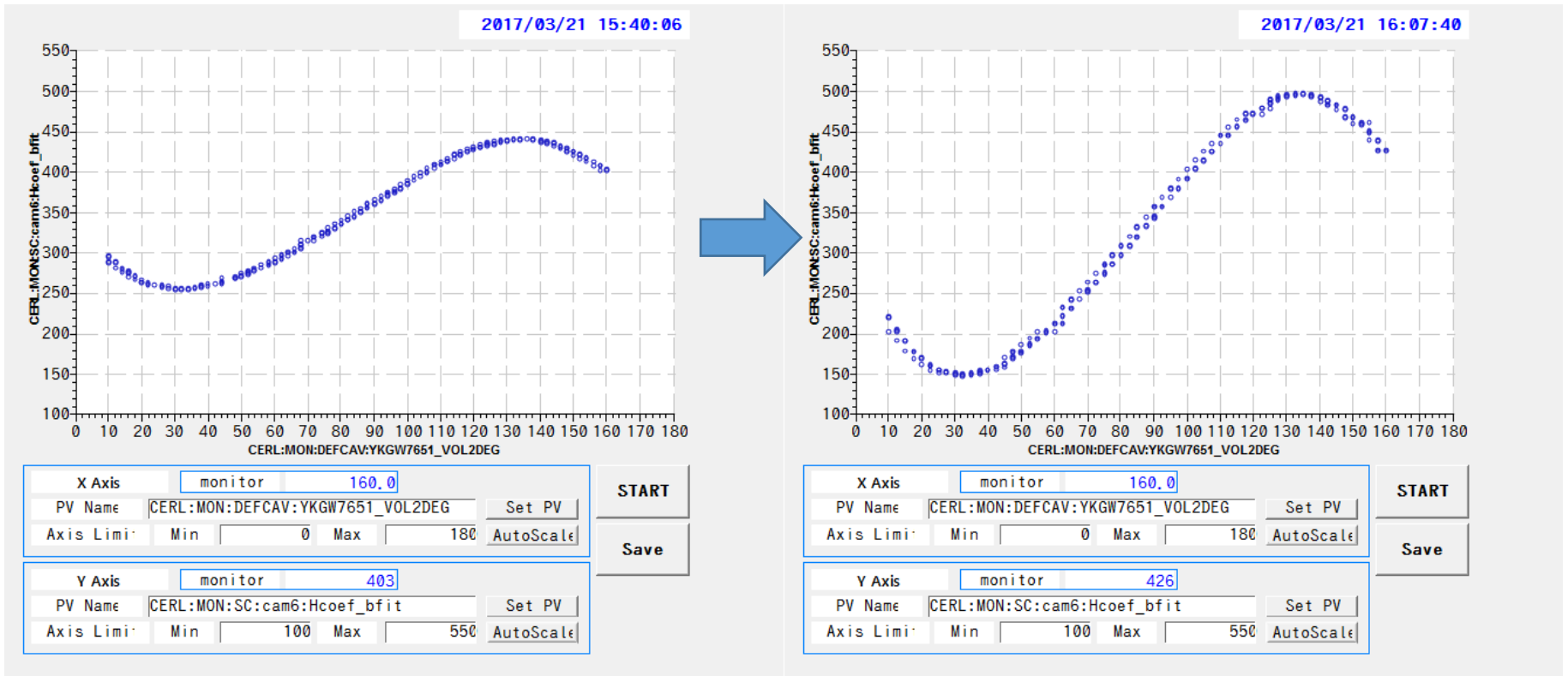
- 入射器診断ライン下流の偏向空洞を用いて、バンチ長測定を行った。
 - 目的: 設計通りにバンチ長を縮められているかの確認
- 原理
 - 直方体型空洞のダイポールモード(2.6 GHz)を利用し、ビーム軸上の磁場で垂直方向にビームをキック。
 - キック量と光学系を調整してスクリーンに時間構造を射影する。



校正係数の測定

- 空洞の周波数 2.6 GHz -> 約 1.1 ps/deg
- スクリーン上のビーム位置の変化 2.5 pixel/deg
- 校正係数 0.44 ps/pixel

垂直拡大系にセットアップ



400fC測定

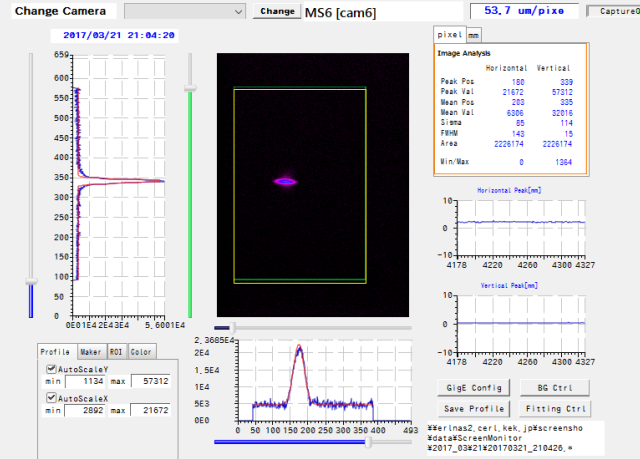
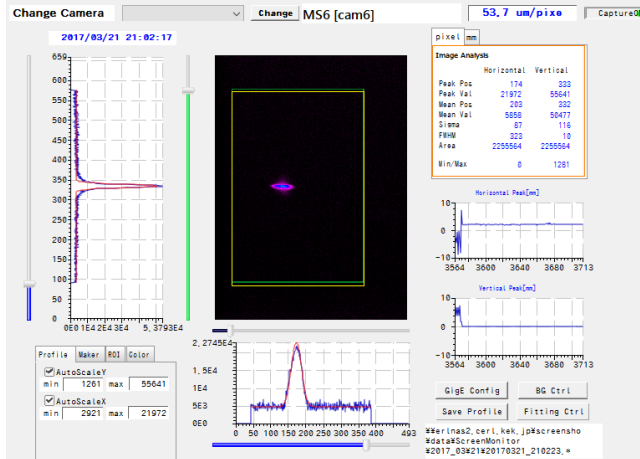
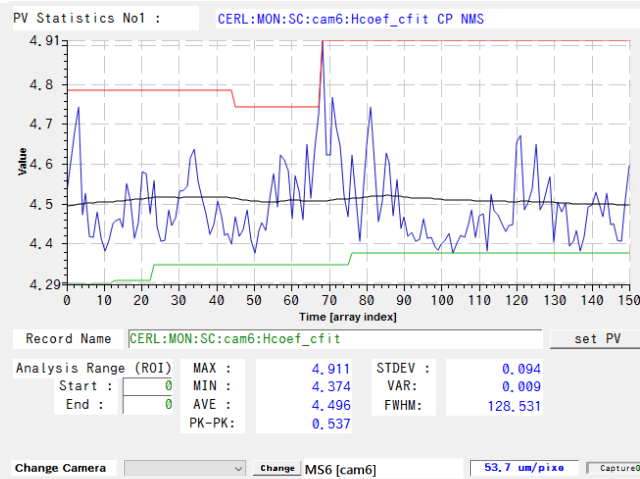
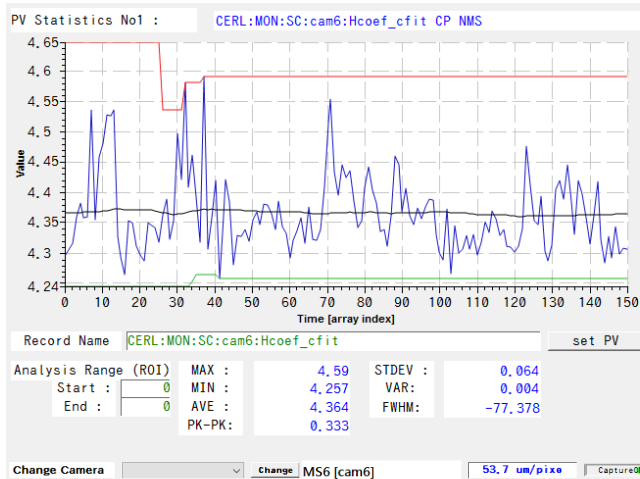
- 分解能の寄与を差し引いて計算

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{\text{on}}^2 - \sigma_{\text{off}}^2}$$

偏向空洞オフ

$$\sigma_t = 0.4758 \pm 0.2061 \text{ ps}$$

偏向空洞オン



1.0pC測定

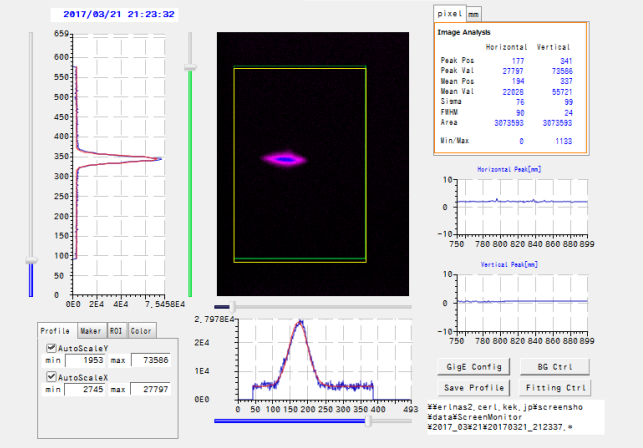
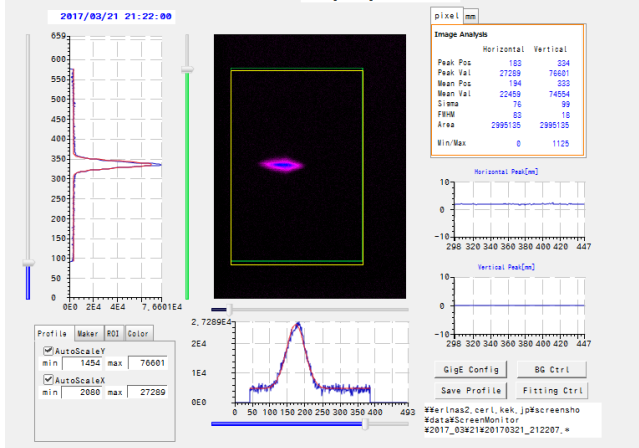
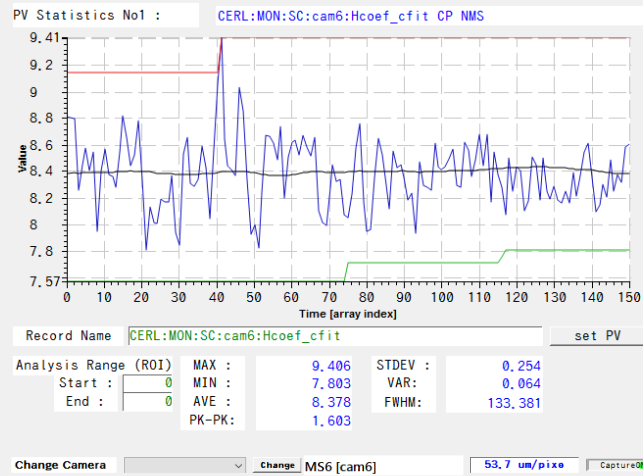
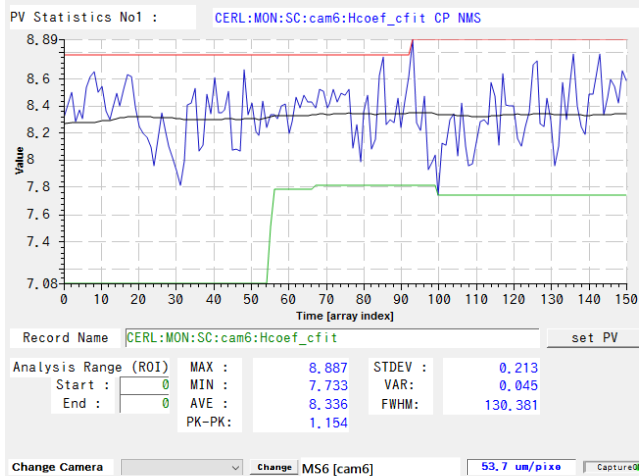
- 分解能の寄与を差し引いて計算

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{\text{on}}^2 - \sigma_{\text{off}}^2}$$

偏向空洞オフ

$$\sigma_t = 0.3687 \pm 1.4554 \text{ ps}$$

偏向空洞オン



20pC測定

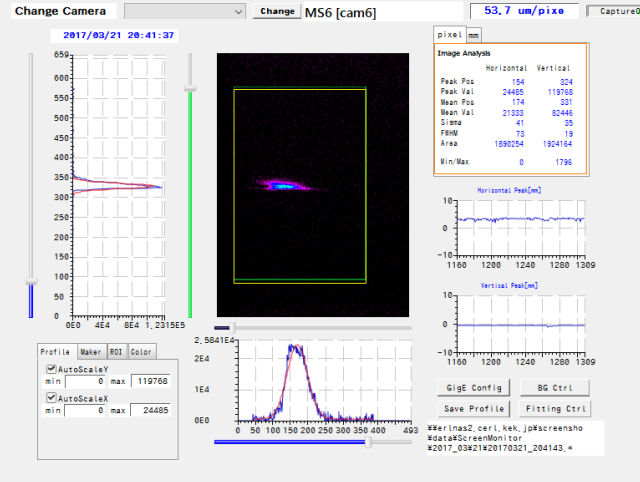
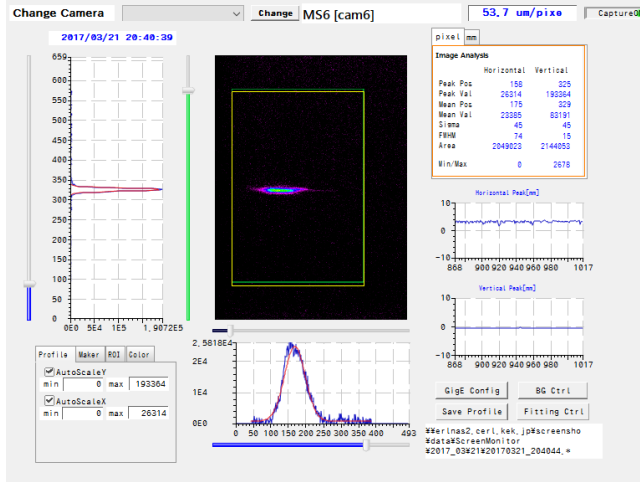
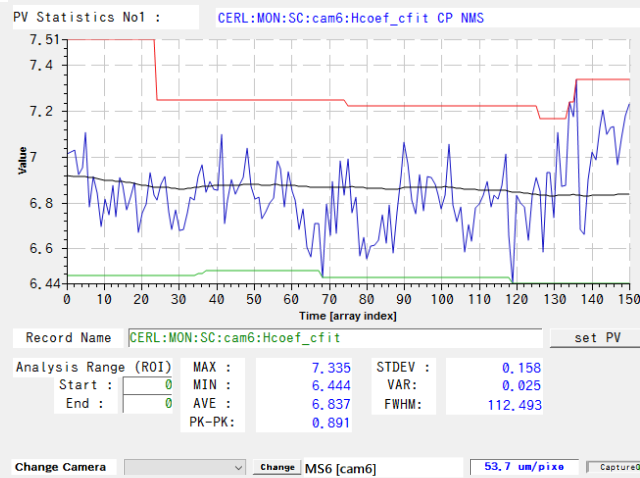
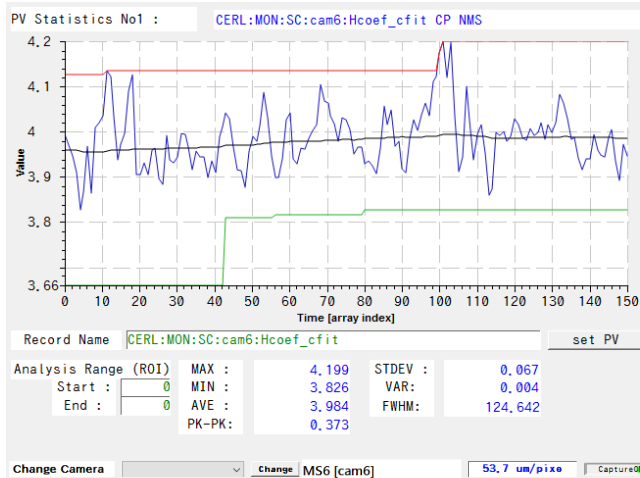
- 分解能の寄与を差し引いて計算

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{\text{on}}^2 - \sigma_{\text{off}}^2}$$

偏向空洞オフ

$$\sigma_t = 2.445 \pm 0.088 \text{ ps}$$

偏向空洞オン



40pC測定

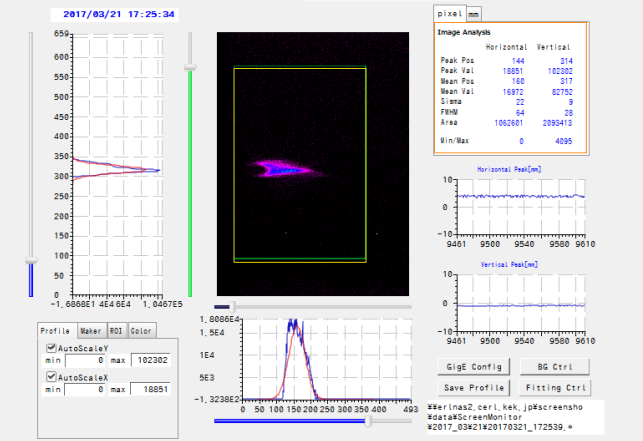
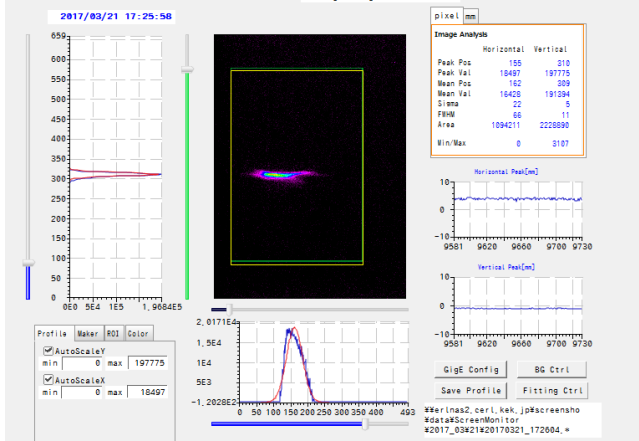
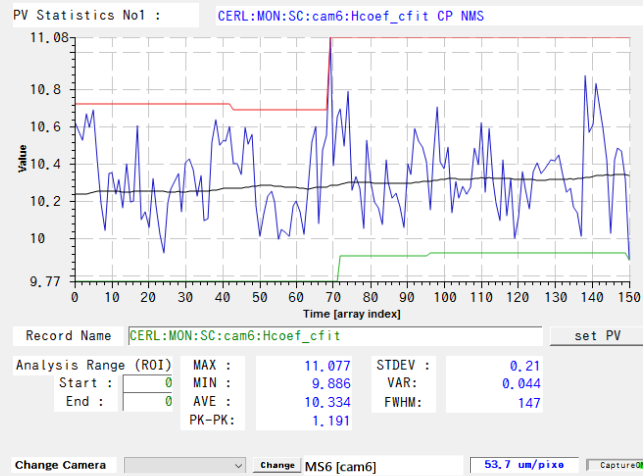
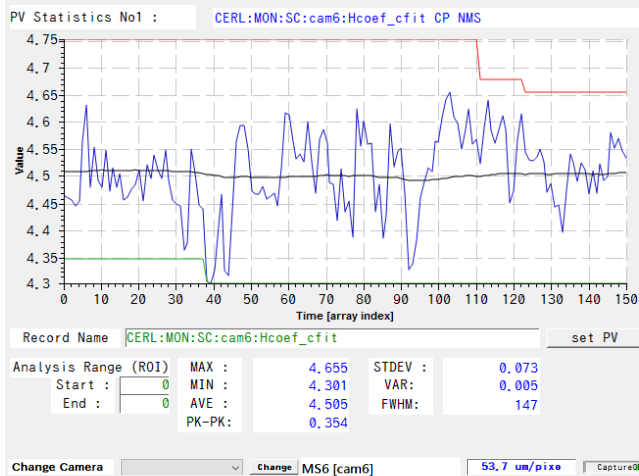
- 分解能の寄与を差し引いて計算

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{\text{on}}^2 - \sigma_{\text{off}}^2}$$

偏向空洞オフ

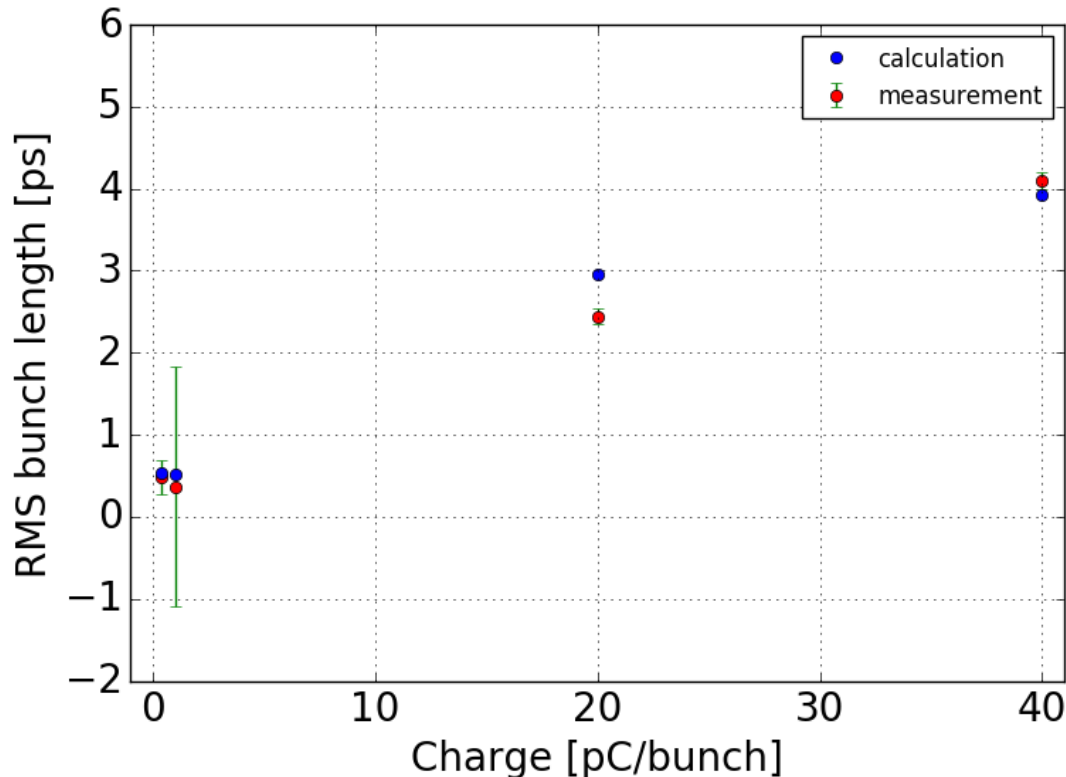
$$\sigma_t = 4.092 \pm 0.104 \text{ ps}$$

偏向空洞オン



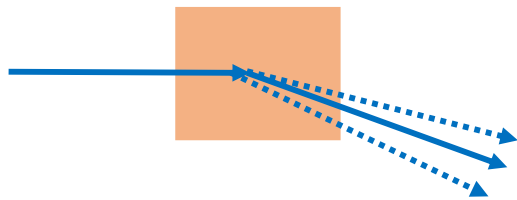
モデルとの比較

- 値に少しずれはあるものの、傾向は良く一致。
- 40pCでもほぼ設計通りの値が得られている(わずかに誤差の外)。
- フィッティングエラーのみでなく、校正係数の見積もり誤差や測定系の誤差などを考慮すれば、20pCも誤差の範囲で一致するかもしれない。



エネルギー拡がりの測定

- 入射器診断ライン下流の偏向電磁石とスクリーンを用いてエネルギー拡がりの測定を行った。
 - 目的: 計算との比較のため
- 原理
 - 一様磁場中での電子の軌道はエネルギーに依存
 - 偏向電磁石で曲げることにより、エネルギーの拡がりに応じた横方向の拡がりが生じる
 - ビームサイズをスクリーンで測定することで、エネルギー拡がりを算出
 - cam7での分散関数は0.825m

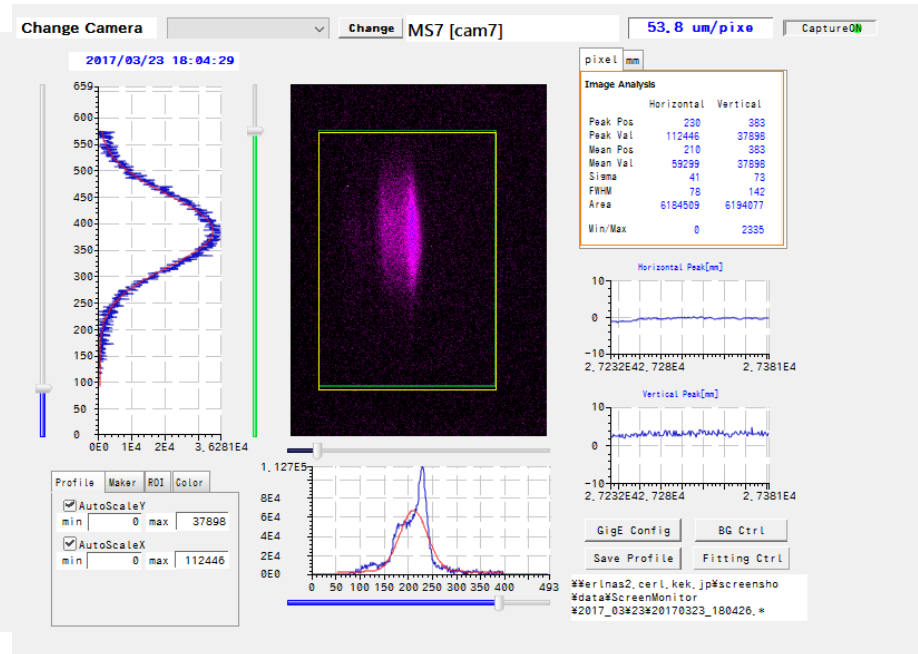
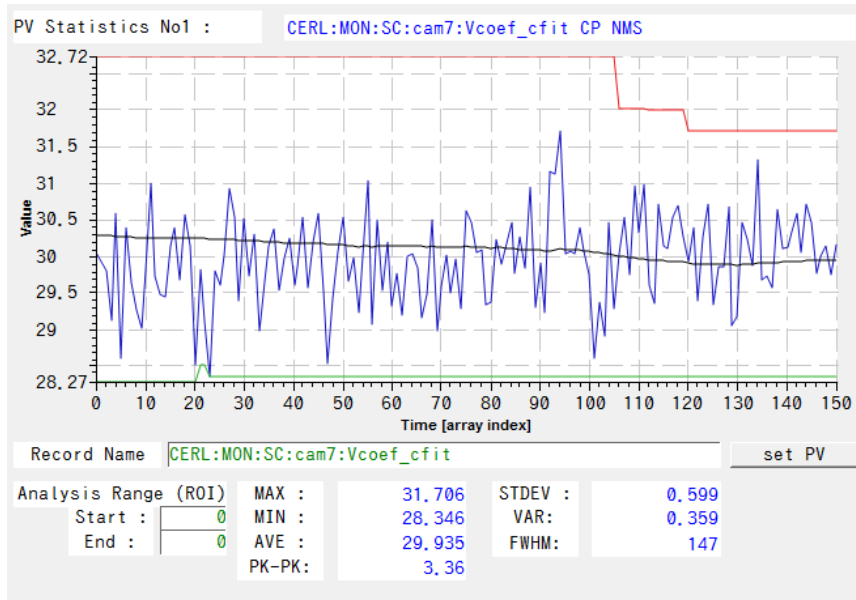


$$\sigma = \sqrt{\beta\varepsilon + (\eta\delta)^2} \longrightarrow \sigma = \eta\delta$$

$$\eta = L\theta, \delta = \frac{\sigma_p}{p}$$

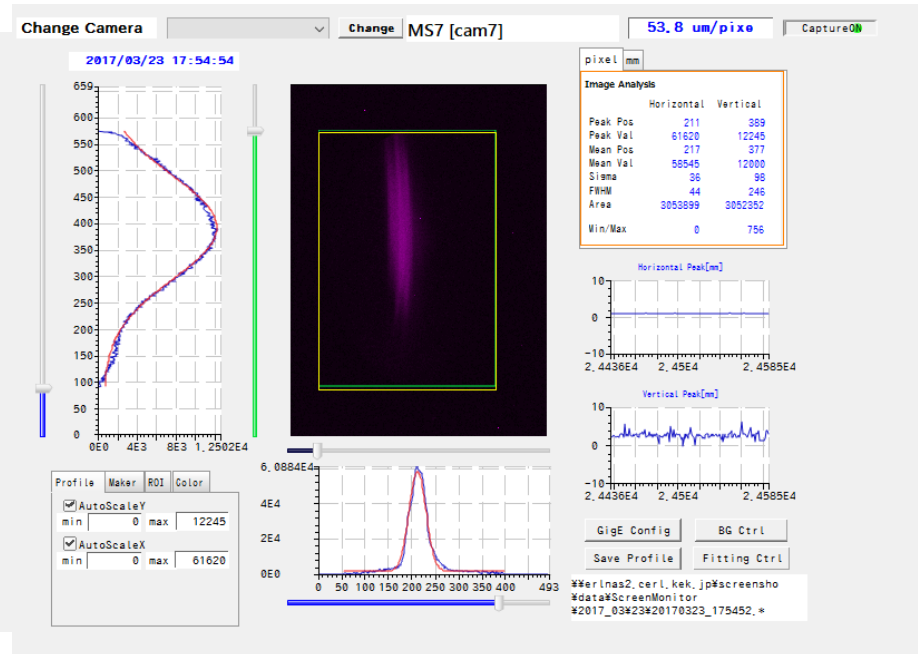
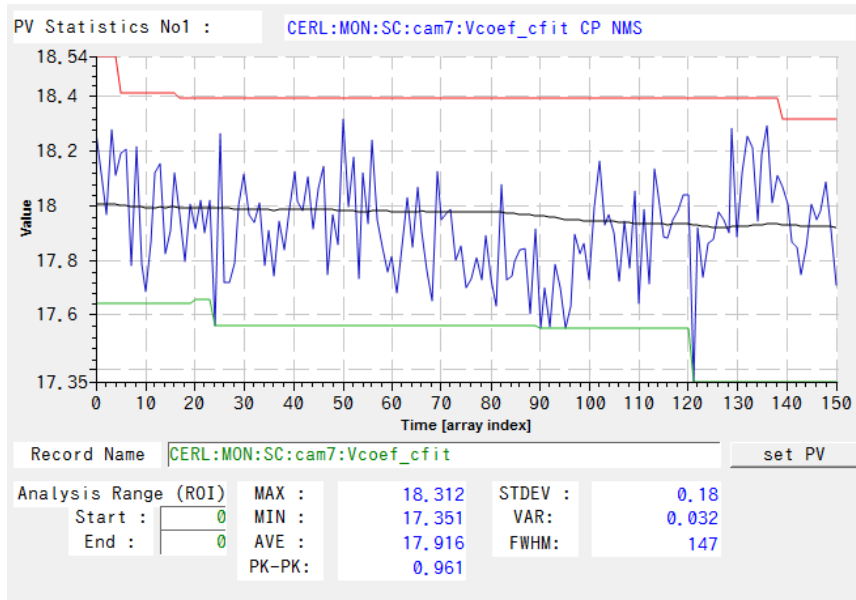
1.5pC測定

• $\delta = 0.1952 \pm 0.0039 \%$



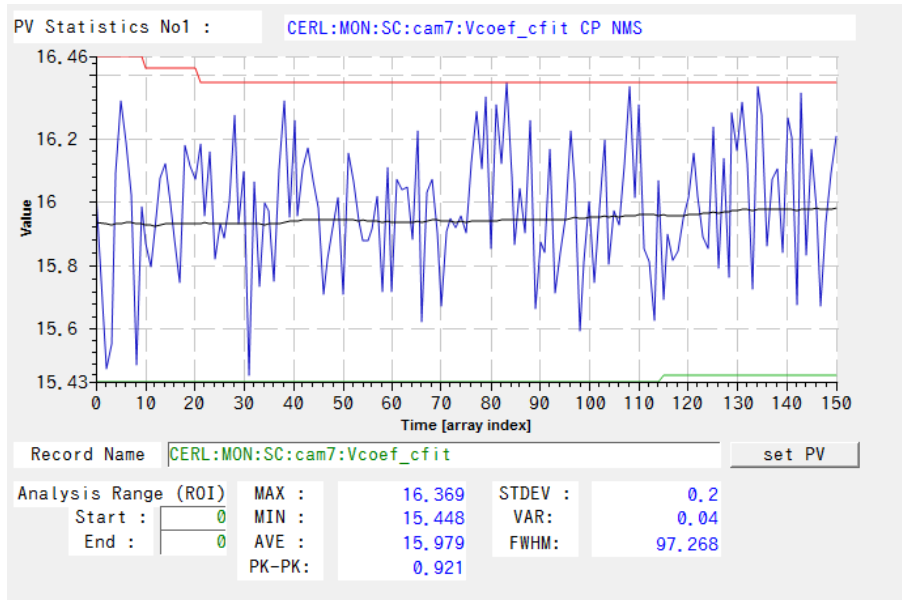
7.7pC測定

• $\delta = 0.1168 \pm 0.0012 \%$



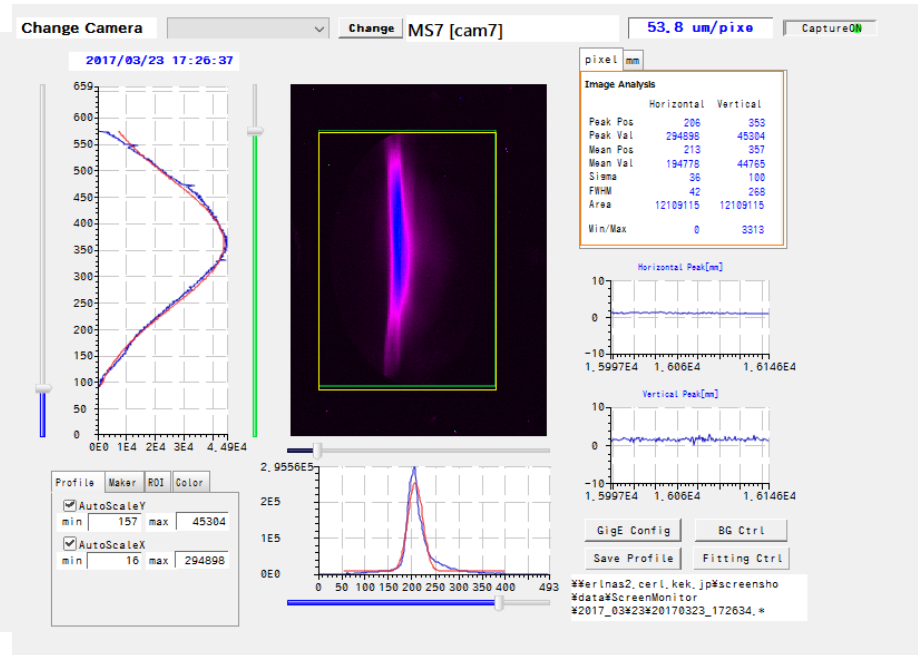
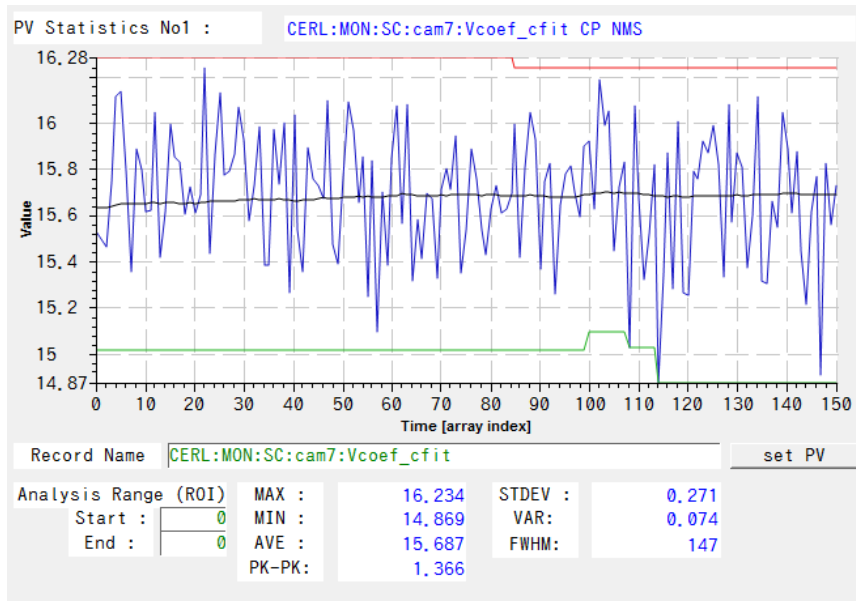
20pC測定

- $\delta = 0.1042 \pm 0.0013 \%$
- プロファイル保存し忘れ。



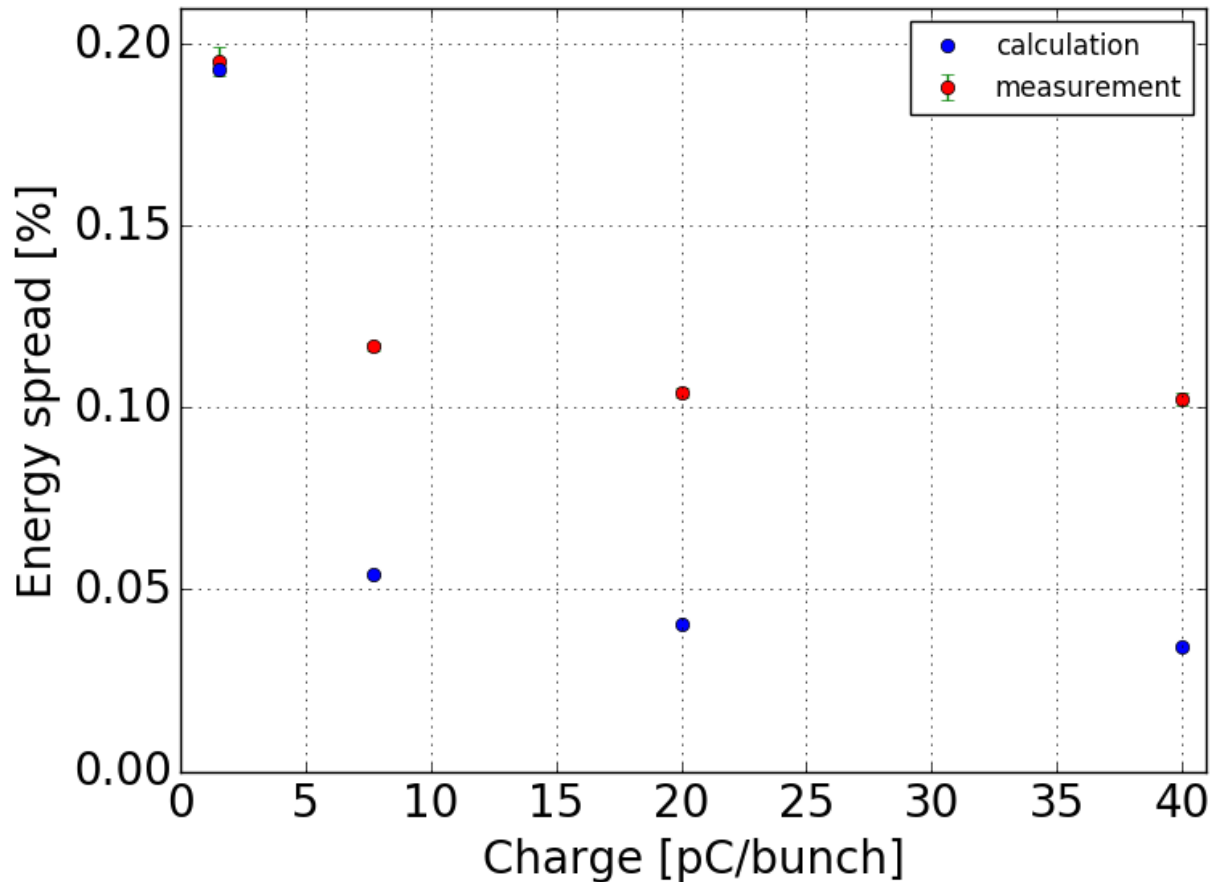
40pC測定

• $\delta = 0.1023 \pm 0.0018 \%$



モデルとの比較

- 傾向は一致していると言ってもよいのではないか。
- 電荷の高いところでズレが大きいのは、ビームサイズを絞り切れなかったり、エミッタンスが大きめなせいかな。



まとめ

- ビーム試験の結果を反映させながら、低エミッタンス・短バンチを実現できるような輸送設計を行った。
- 縦方向のビームパラメータに関しては、初期バンチ長、空洞の加速電圧のフィードバック、慎重な位相調整のおかげか、バンチ長はほぼ設計通り、エネルギー拡がりも傾向としては一致しているように見える。
- スポットサイズのフィードバックは叶わずモデル上ではQMを通るまで完全に円筒対称であるという条件付きだが、約0.5mm.mradのエミッタンスが設計値
 - しかし実際には空洞で垂直方向に伸ばされるなど、まだまだ横方向はモデルの改善余地がある。