

大バンチ電荷スタディー

2015年7月30日(木)9時30分～9時50分
KEKつくばキャンパス 4号館2階輪講室1

宮島 司

高エネルギー加速器研究機構 (KEK)
加速器研究施設

Outline

1. 高バンチ電荷スタディーの目標設定
2. 2015年1月～6月までの高バンチ電荷スタディー結果
3. 性能向上に向けた対策

cERL mini WS における議題

- cERLを構成する各要素について
 - これまでの進捗状況
 - cERLの運転を通して、何が達成できたのか？
 - 今後の残された課題は？
 - その課題を克服するための見通しは？

- 今回の報告事項
 - **大バンチ電荷運転**について、上記の項目を紹介する

高バンチ電荷スタディの目標設定

□空間電荷効果について

- エネルギーが低いと顕著になる
- バンチ電荷密度が上がると強くなる

□2014年6月までの高バンチ電荷スタディ

- 入射器単体 (5.6 MeV): < 1 mm mrad のエミッタンス
- 周回運転 (2.9 MeV): 5 mm mrad 程度まで悪化

□今回の目標

- 低エネルギー領域: 輸送条件の徹底した調査
- 周回部輸送: 入射エネルギーを上げて、エミッタンス低減

ERL加速器のビーム性能目標

- 3 GeV ERL光源で想定される運転モード

	High-coherence mode	High-flux mode
Beam energy	3 GeV	
Average beam current	10 mA	100 mA
Bunch charge	7.7 pC	77 pC
Repetition rate of bunch	1.3 GHz	
Normalized emittance	0.1 mm mrad	1 mm mrad
Emittance at full beam energy	17 pm rad	170 pm rad
Energy spread	2×10^{-4}	2×10^{-4}
Bunch length	2 ps	2 ps

挑戦的な値はどれか？

- 平均ビーム電流 100 mA
- 規格化エミッタンス 0.1 mm mrad

平均ビーム電流 100 mA

- これだけの電流を生成し続ける電子源開発が必要
- さらにこれを加速し続ける加速空洞開発が必要

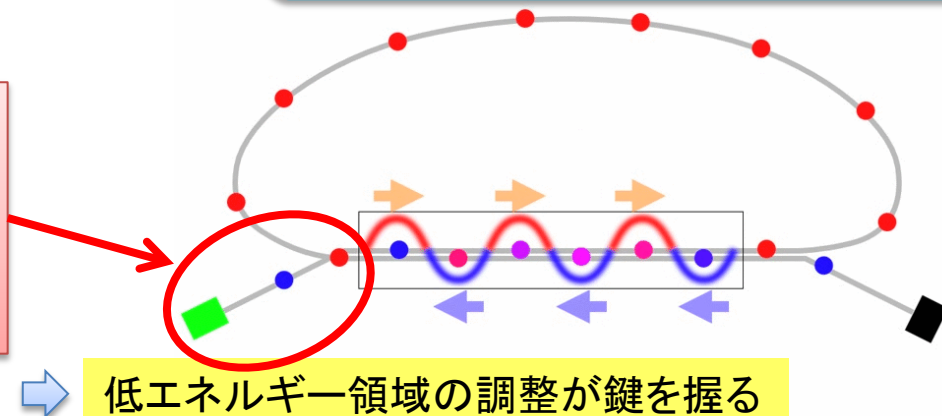
0.1 mm mradのエミッタンス

- この小さい初期エミッタンスを実現するカソード材質
- これを悪化させない輸送法(空間電荷効果:クーロン斥力の補償が鍵)

- ERL加速器のビーム性能

上流(電子銃、入射器)で高品質ビームを生成し、悪化させないことが本質

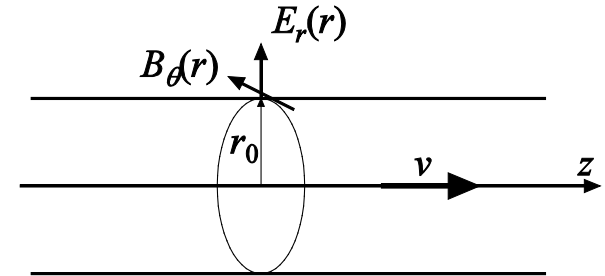
- 線形加速器なので入射器のビーム品質が、加速器全体のビーム品質に影響
- エネルギーが低いので空間電荷効果の補償が鍵



空間電荷効果（エネルギーとバンチ電荷）

空間電荷効果（単純な円筒モデルの場合で説明）

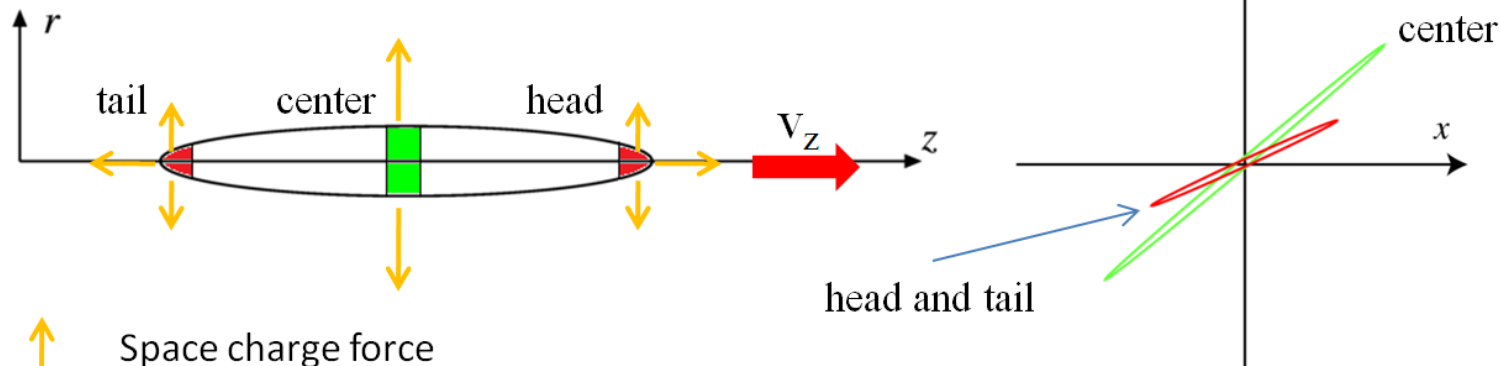
$$F_r = e(E_r - vB_\theta) = \frac{1}{2} \frac{e}{\epsilon_0} \frac{\rho_0}{\gamma^2} r$$



➡ $1/\gamma^2$ に比例： 低エネルギー領域で影響が大きい
電荷密度に比例： 電荷密度を上げると影響が大きくなる

- 低バンチ電荷： 空間電荷効果がないので2次元面（水平、垂直方向）と時間方向は独立
 - 高バンチ電荷： 空間電荷効果を通してお互いが独立ではなくなる
- ⇒ 高バンチ電荷では3次元形状を精密に制御しなければならない

空間電荷効果による射影エミッタンスの増大



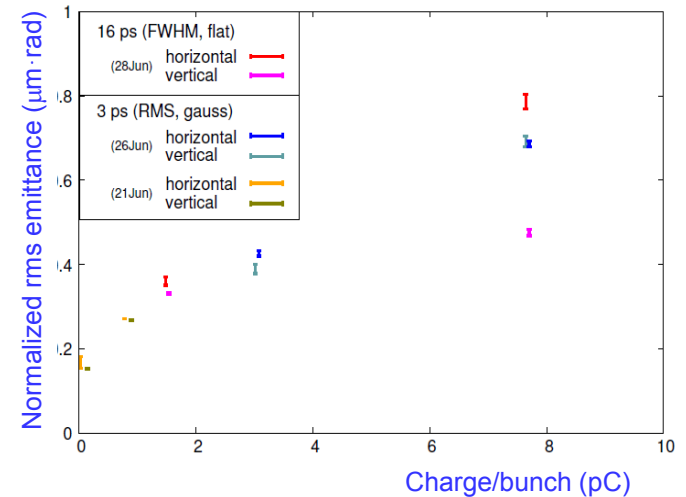
バンチ長を上げる ⇒ 電荷密度上昇 ⇒ 空間電荷力による発散大 ⇒ エミッタンス増加

空間電荷効果の効かない低バンチ電荷ではかなり設計条件に近づけられている
次は、空間電荷効果を含めた輸送調整

2014年6月までの高バンチ電荷運転

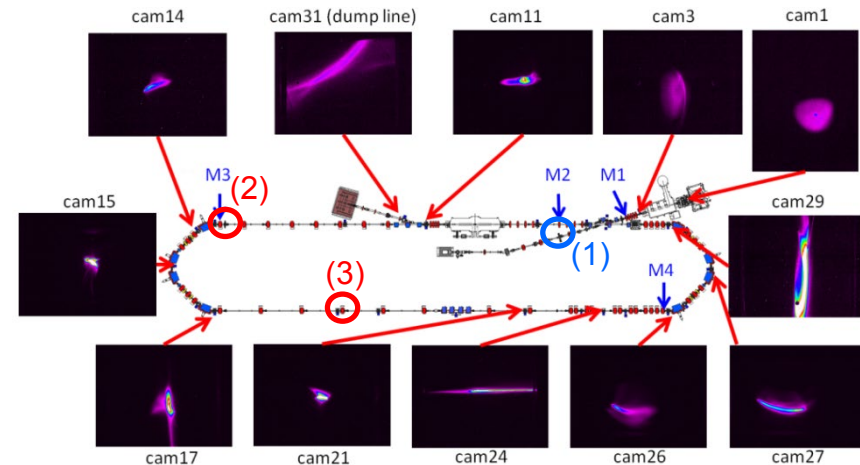
- 2013年6月
 - 入射器単体(5.6 MeV)、診断部輸送
 - 規格化エミッタンス(測定値): 0.8 mm mrad以下
- 規格化エミッタンスの測定結果 ($\varepsilon_{nx} / \varepsilon_{ny}$), 単位 mm mrad

運転モード	(1)入射器 診断部
7.7 pC(短パルス)	0.8 / 0.5
7.7 pC(長パルス)	0.7 / 0.7



- 2014年6月
 - 入射器(2.9 MeV)、周回部(20 MeV)、周回部輸送
 - 規格化エミッタンス(測定値): 2.4 – 5.8 mm mrad
- 規格化エミッタンスの測定結果 ($\varepsilon_{nx} / \varepsilon_{ny}$), 単位 mm mrad

運転モード	(1)入射器 診断部	(2)主空洞 出口	(3)第一 アーク後
20 fC	-	0.14 / 0.12	0.14 / 0.14
7.7 pC	2.5 / 2.9	2.9 / 2.4	5.8 / 4.6



➡ 入射器単体(5.6 MeV): ある程度低いエミッタンスが得られている
 周回部輸送(2.9 MeV): エミッタンスの悪化が顕著

高バンチ電荷スタディの目標設定

これまでの結果

- 入射器 5.6 MeV 運転:
エミッタンス増加は小さい
- 入射器 2.9 MeV 運転:
エミッタンス増加がかなり大きい

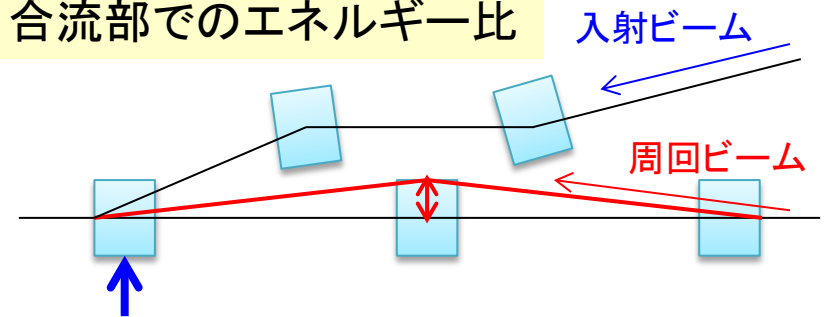
そもそもなぜ入射器2.9 MeV運転か？

- エネルギー回収運転のためには、入射シケインを通すために、入射エネルギーを下げる必要があった

今回の方針

- 電子銃から入射器入口の低エネルギー区間 (T = 390 keV) での徹底した調査 (輸送条件はどのようになっているか?)
- 入射器エネルギーを 5.4 MeV に上げて周回部に輸送し、周回部のエミッタンスが下がることを確認する (ただし、エネルギー回収はできないため、周回部FCでビームを止める)

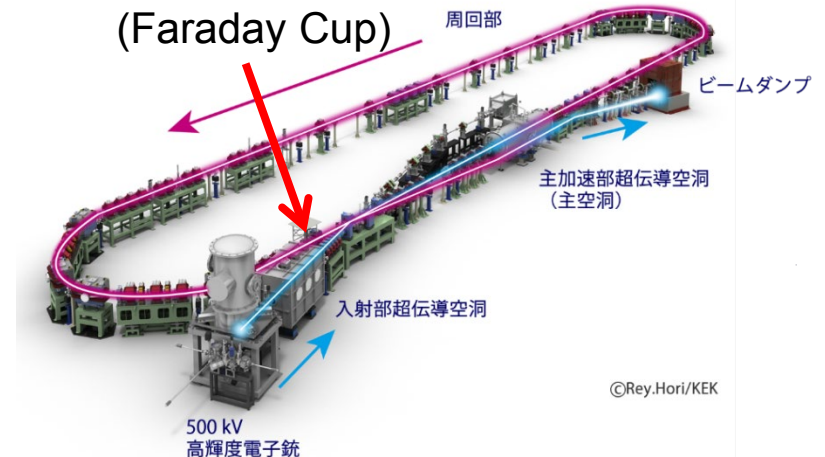
合流部でのエネルギー比



この磁石を入射(エネルギー低)、周回(エネルギー高)の2つのビームが通過。
エネルギー比が近いと周回ビームのバンプがどんどん高くなり、チェンバー内壁に当たる。
主空洞が下がると、入射空洞も下げざるをえない。
現状は1:6が下限(これより大きくしたい)

周回部FC

(Faraday Cup)



©Rey.Hori/KEK

2015年1月～6月までの高バンチ電荷スタディ結果 ～運転全般について～

□運転全般：高バンチ電荷スタディ実施日

- 2015年3月に2日間
- 2015年6月に2週間

□入射器エネルギーの増強

- 2.9 MeV \Rightarrow 5.4 MeV
- 開始当初は問題なかったが、空洞のフィールドエミッションが増加
- 最終的に 2.9 MeV までエネルギーを下げた

高バンチ電荷スタディの運転経過

- 2015年3月
 - 3/17, 3/30 の2日間スタディを実施、低エネルギー領域の輸送条件の調査
- 2015年6/8の週
 - 6/8(月) : INJ#1-3: 7 MV/mで $E_{inj} = 5.45$ MeVまで加速
 - 6/9(火) : 診断部へ輸送、プロフィールの歪み調査
 - 6/10(水) : 主空洞位相調整、周回部輸送調整、プロフィールの回転が問題
 - 6/11(木) : INJ_CAV#3で放電発生、FB2: 7 MV/m \rightarrow 5.5 MV/m へ下げる ($E_{inj} = 4.89$ MeV)
 - 6/12(金) : $E_{inj} = 4.89$ MeVで周回部輸送、周回部FCまで到達
- 2015年6/15の週
 - 6/15(月) : 周回部でエミッタンス測定 (2-4 mm mrad)、バンチャー付近で放電が見られる
 - 6/16(火) : 周回部バンチ長測定 (3 ps), cam1, cam2 でのプロフィール変化の調査を実施
 - 6/17(水) : INJ_CAV#1からも放電が発生、 $E_{inj} = 2.9$ MeVに下げる調整を実施
 - 6/18(木) : レーザー直径 $d = 1 \Rightarrow 2$ mmに変更した条件を計算、0.5 pCのCW調整を実施
 - 6/19(金) : 0.5 pC, CW 運転調整
- 2015年6/22の週
 - 6/22(月) : $d = 2$ mm, $E_{inj} = 2.9$ MeV, 7.7 pC診断部輸送、エミッタンスとバンチ長応答を測定
- 2013年3月の運転では問題なかったが、今回は入射器 $E_{acc} = 7$ MV/m運転を継続できなかった
- 一度空洞で放電が始まると、Gun-FCの絶縁セラミックでチャージアップ \Rightarrow 放電が起き、それがまた空洞の放電を引き起こすという悪循環となった
- 加速器を総合的に考えて、運転調整を行わないといけないと痛感

2015年1月～6月までの高バンチ電荷スタディ結果 ～低エネルギー領域の輸送条件の測定～

□低エネルギー領域の輸送条件

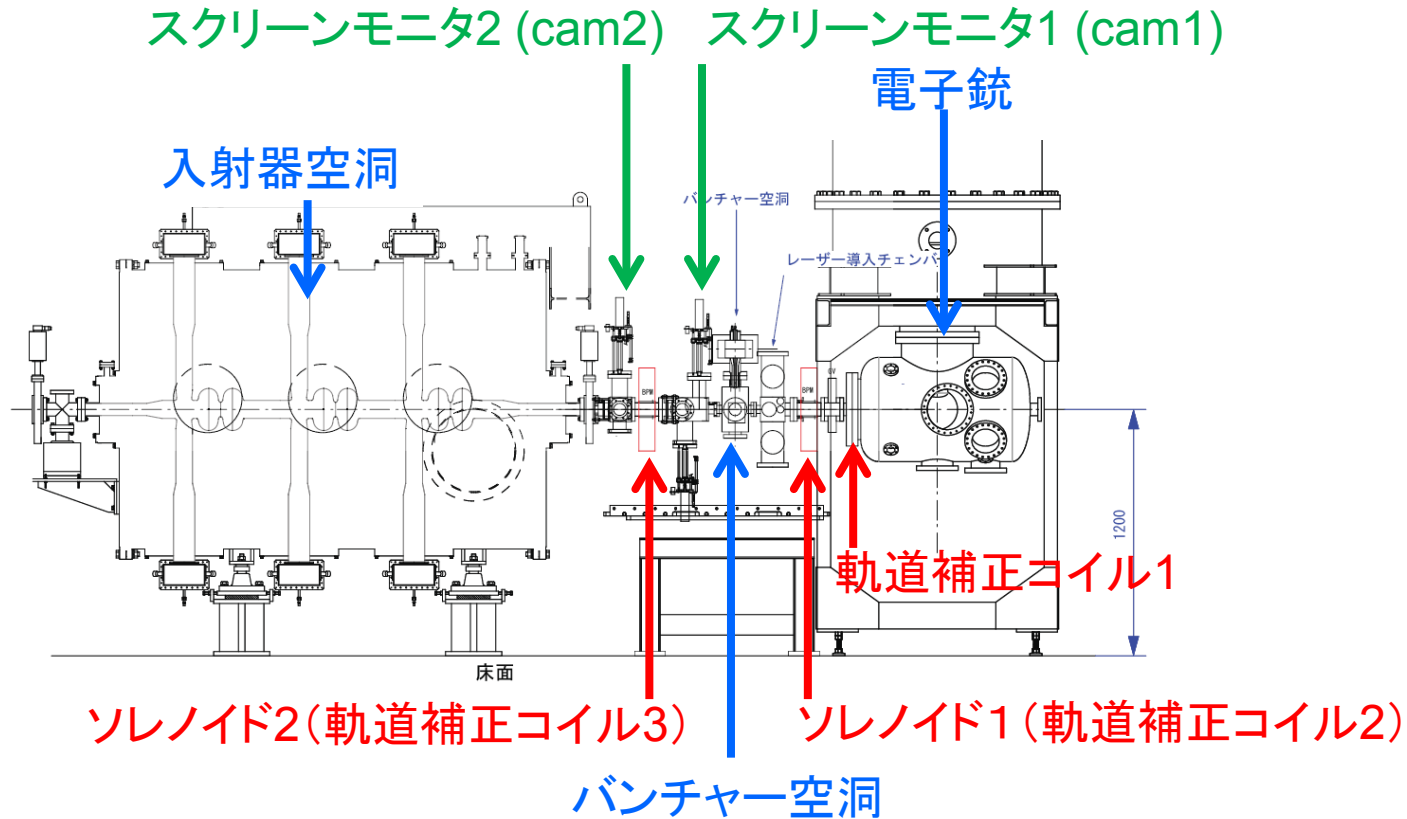
- 電子銃から入射器空洞までの輸送条件を調査
- ソレノイド電磁石、軌道補正電磁石の応答を測定
- バンチ電荷を上げるとプロフィールが歪む

電子銃から入射器空洞までの輸送条件の測定

- この区間の運動エネルギーは 390 keV
- エネルギーが低いため、空間電荷効果だけでなく、環境磁場等の外乱に影響されやすい



目的: この区間の輸送条件を設計条件に近づける(あるいはモデルを修正する)



バンチ電荷を増強したときのプロフィール変化の観測
ソレノイド、軌道補正コイルを変えた時の応答関数の測定 } これらを実施

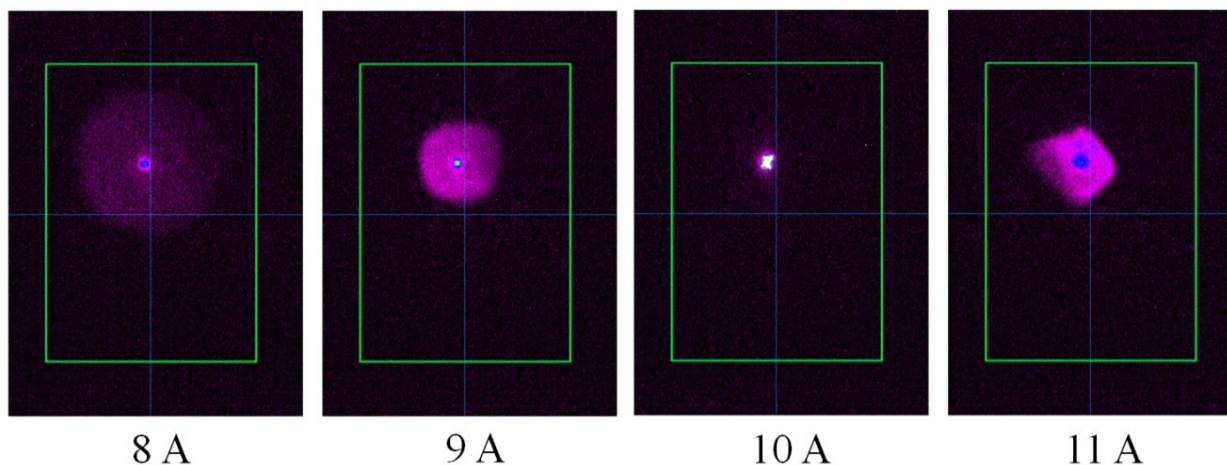
高バンチ電荷におけるプロファイルの歪み

- バンチ電荷 7.7 pC でプロファイルを測定
- Cam1でプロファイルの非対称性が観測された(本来は軸対称がある)
- これが、cam2まで行くと拡大されて四角いプロファイルになる
- さらに、入射器空洞下流でのプロファイルの回転の原因にもなる

バンチ電荷を上げた結果、空間電荷効果によってプロファイルが拡がり、環境磁場等の非一様磁場の影響を受け、プロファイルが歪んでいると推測される

- ソレノイドの中心通し、ステアリングの磁場を下げる調整によって、可能な限り丸いプロファイルに近づけた

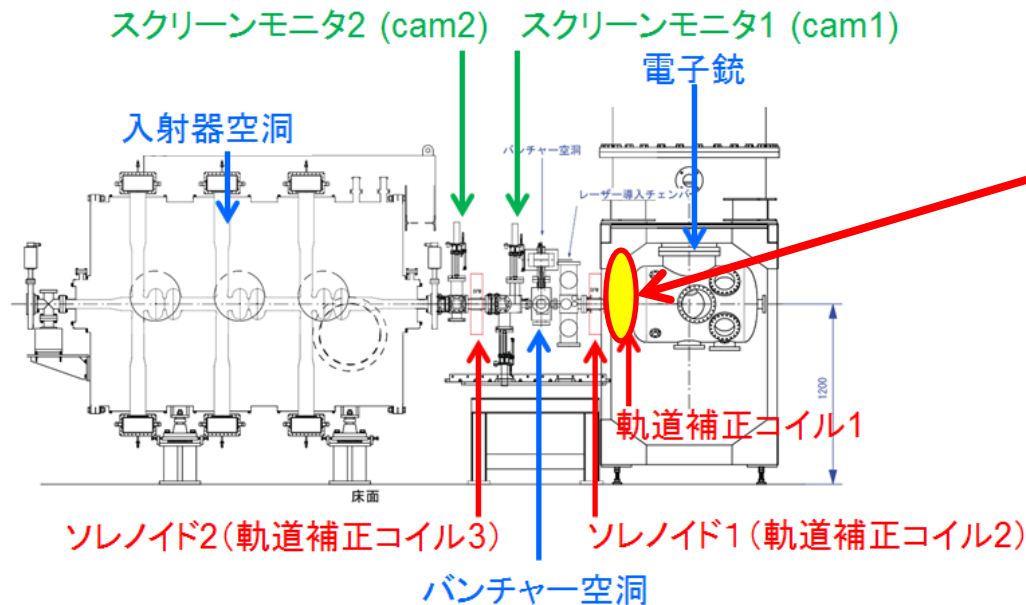
Cam1のプロファイル(SL1の)電流をかえたとき



7.7 pCでは、8-9 Aの励磁電流を使うので、そんなに悪くない状態まで持ってこれた

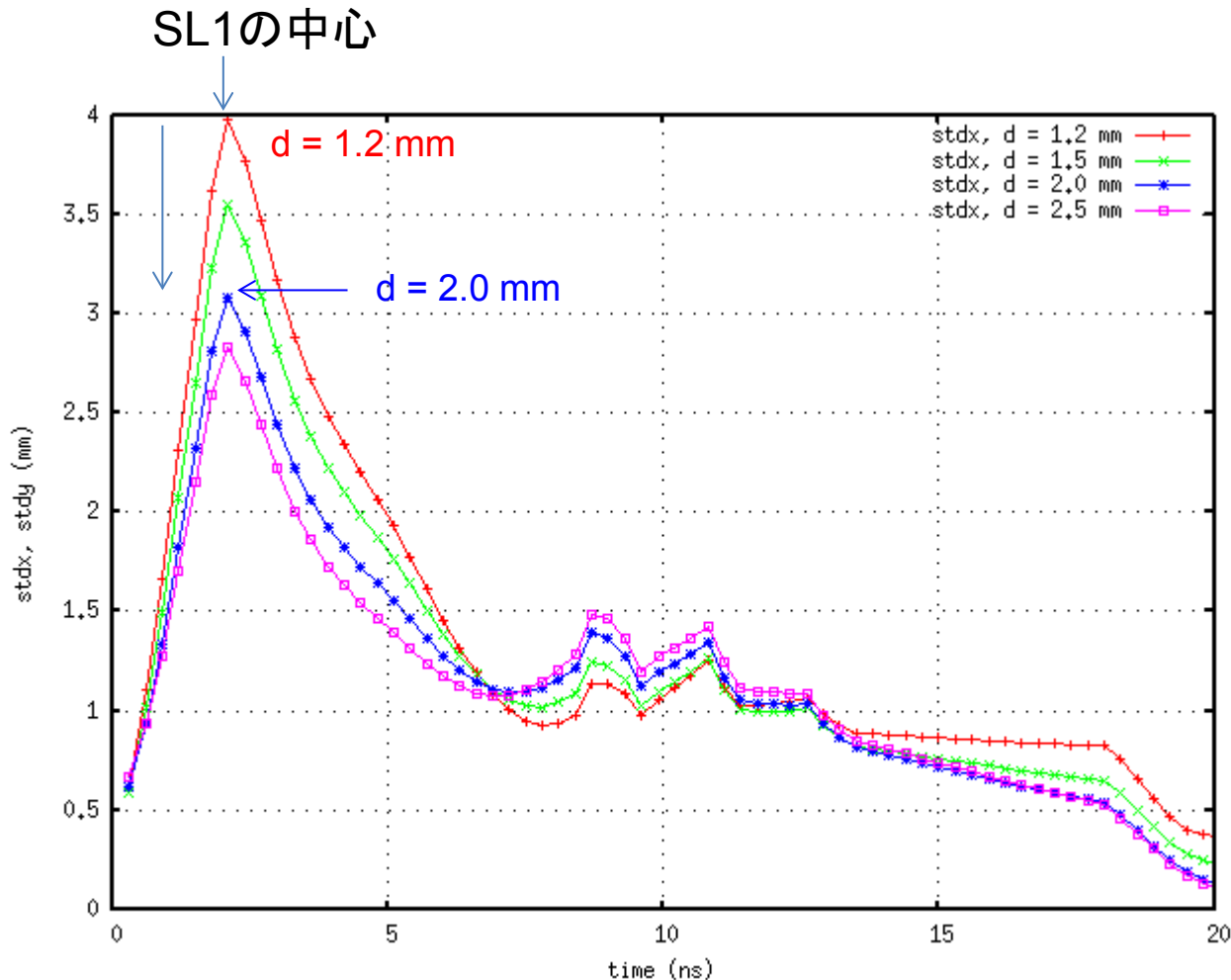
プロフィールの歪みへの対策

- 磁場の非対称性に起因する場合、中心軸からずれるとその影響が強くなると推測される
- 電子銃からSL1までの区間のビームサイズは、空間電荷効果による発散力に支配されるため、ソレノイド等で修正することができない
- 代わりに、励起レーザー直径を大きくして空間電荷力を弱めて、この区間のビームサイズを下げた場合に、プロフィールの非対称性がどうなるかを測定したい
- ただし、初期エミッタンスが増加するというデメリットがある
- 励起レーザー直径 $d = 1.2 \text{ mm}$ (通常設定), 1.5 mm , 2.0 mm , 2.5 mm について粒子トラッキングコードGPTを用いてビームサイズを計算した



ソレノイド1に入るまではビームサイズを絞ることができない

励起レーザー直径の影響



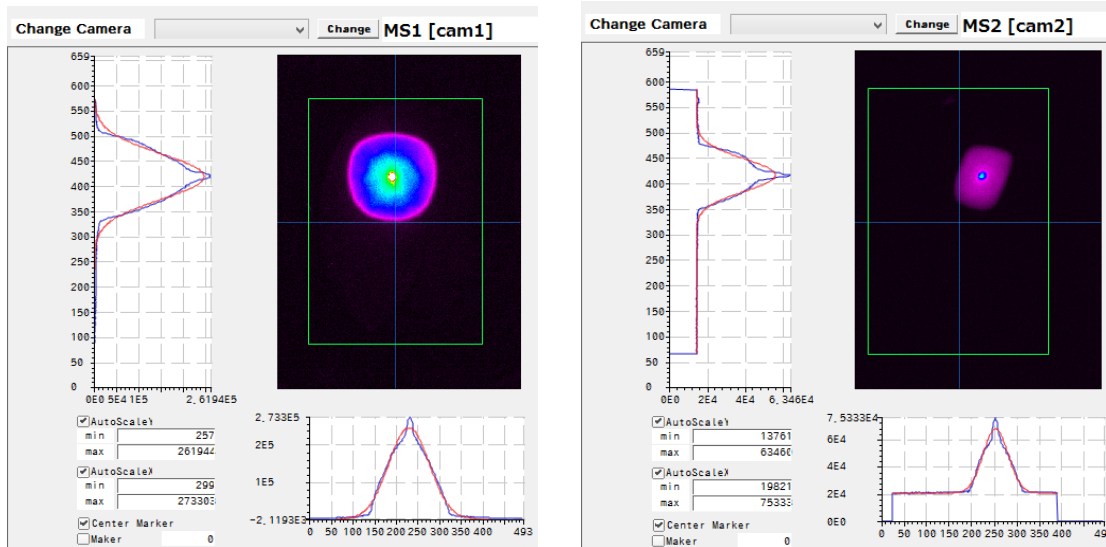
初期エミッタンスの変化

d (mm)	en(mm mrad)
1.2	0.145
1.5	0.182
2.0	0.242
2.5	0.303

d = 1.2 mm \Rightarrow 2.0 mm にした場合、SL1の位置でstdx = 4 mm \Rightarrow 3 mm と小さくなる
d = 2.0 mm の場合について、非対称性が改善されるか見てみたい

レーザー直径 2 mm 運転のプロファイル

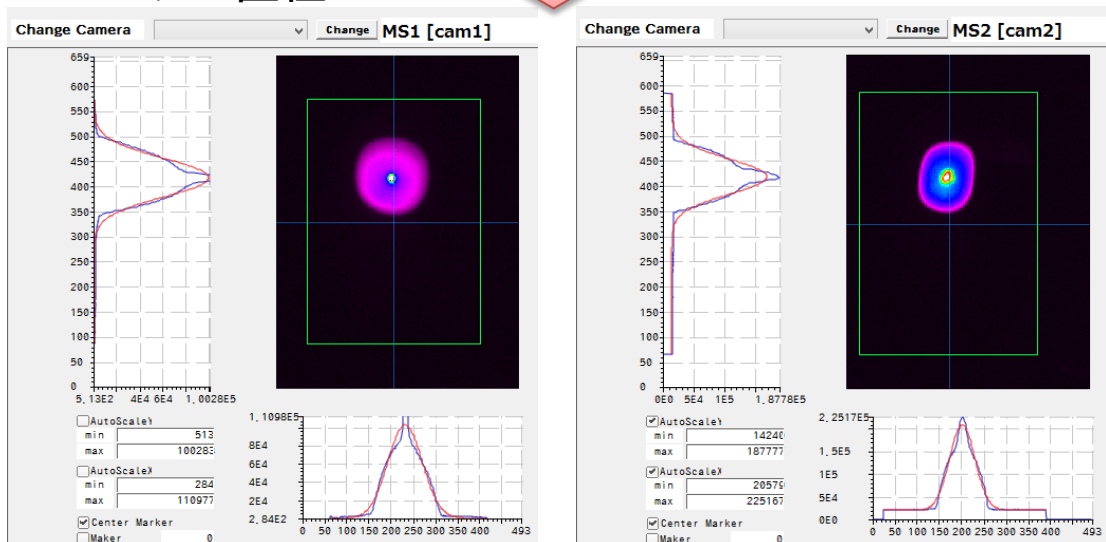
レーザー直径 1 mm



- 2 mm に変えた結果、プロファイルの非対称性は改善された ⇒ 電荷密度を下げてビームサイズを抑えることは効果がある

- ただし、完全に軸対称になっていないので、まだ影響が残っている

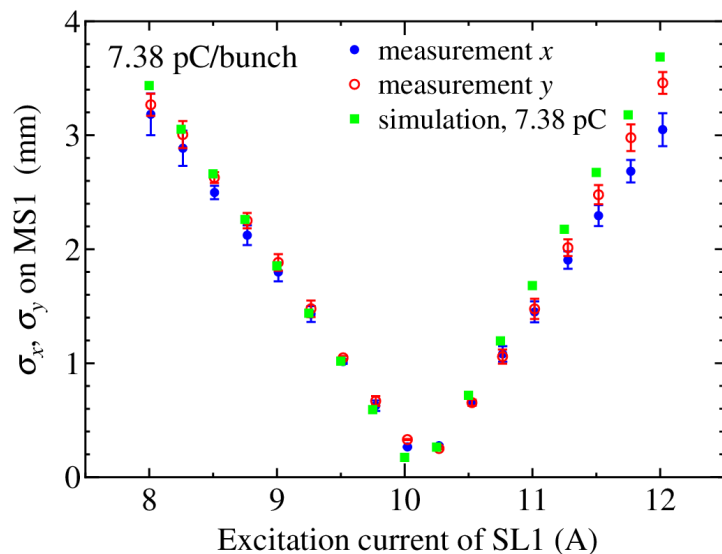
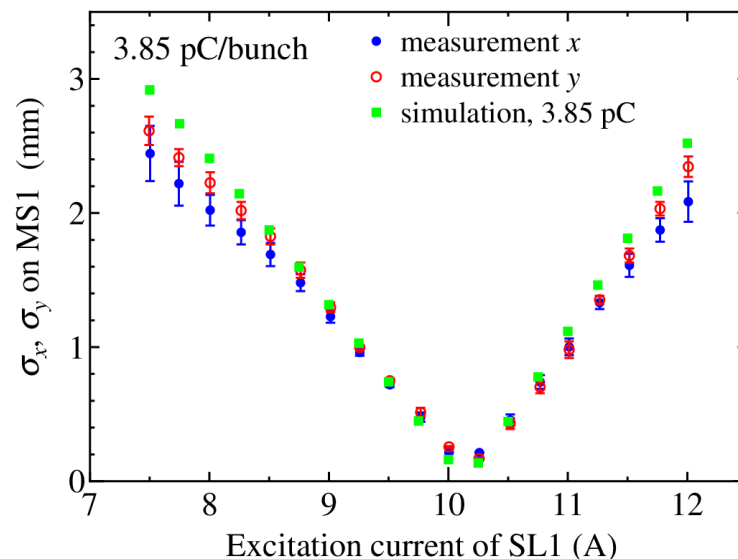
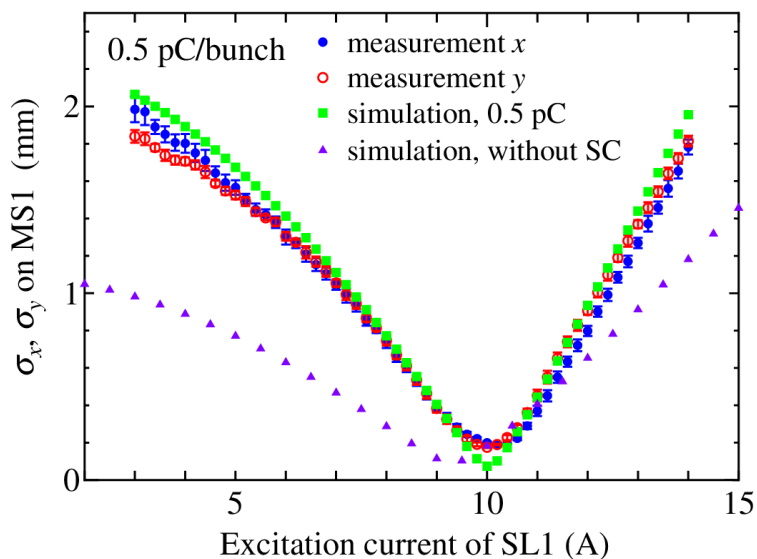
レーザー直径 2 mm



- 今後の対策
 - 電荷密度の低減(時間方向にバンチ長を伸ばして、電荷密度を下げる)
 - 軌道補正コイルの応答測定結果から、非対称性の磁場を見積もり、それを補正する方法を検討する

空間電荷効果のモデルの検証 (d = 1 mm)

- バンチ電荷を変えてソレノイドスキャンを実施
- モデルとの比較を実施した



- 初期レーザー時間形状
 - 3 ps, Gaussian (スタッキングなし)
 - 使用しているモデルは、低バンチ電荷で電子銃収束力を補正したもの
 - 補正モデルで、空間電荷力が込みの場合でも実験をかなり良く再現できている
- ↓
- 入射器空洞前までは、ある程度調整できるようになってきている

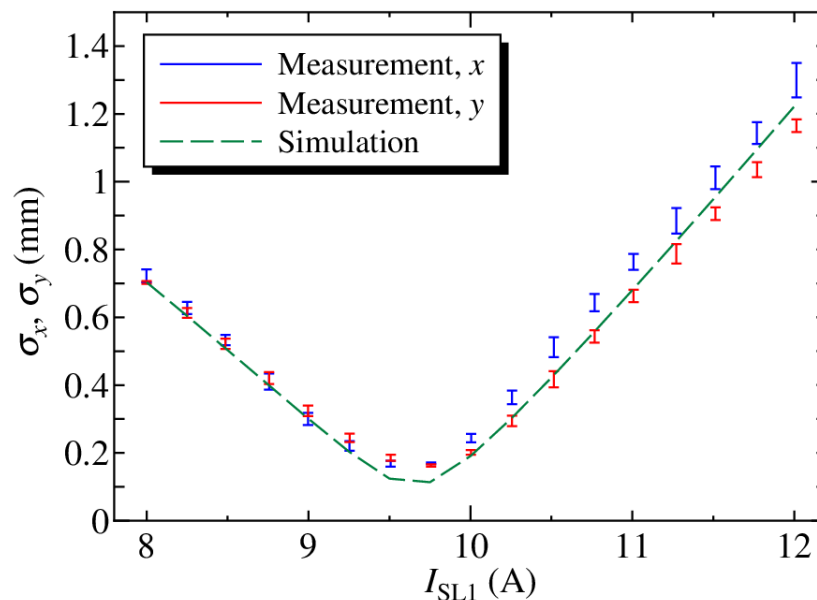
空間電荷効果のモデルの検証 ($d = 2 \text{ mm}$)

0.54 pC/bunch

初期レーザーパルス長: 3 ps

レーザー直径: 2 mm

ほぼモデルで実験結果を再現できている
過収束したあと、XYの非対称性が見える

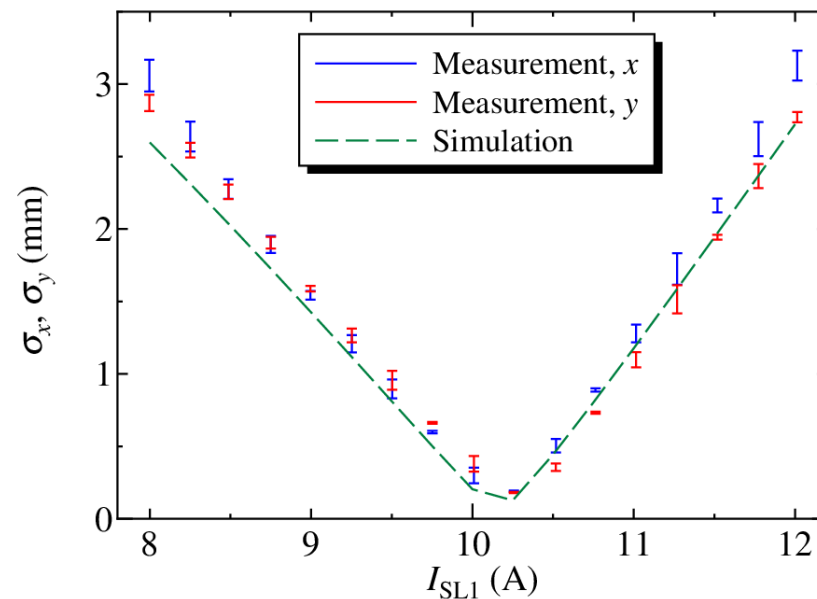


7.6 pC/bunch

初期レーザーパルス長: 3 ps

レーザー直径: 2 mm

空間電荷効果のビームサイズに対する影響
⇒ モデルで再現できることが確認された



次は、プロフィールを含めて設計条件に
合わせるように調整していくことが必要

2015年1月～6月までの高バンチ電荷スタディ結果 ～周回部輸送調整～

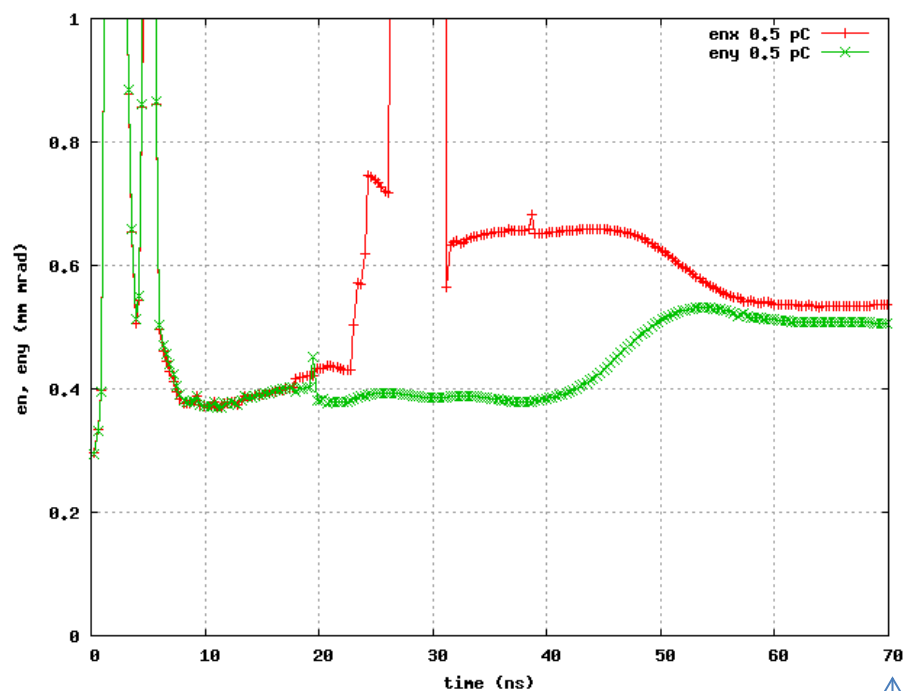
□周回部輸送調整

- 入射エネルギー: 2.9 MeV \Rightarrow 5.4 MeV へ増強
- スタディ途中で、入射器空洞のフィールドミッション発生
- 5.4 MeV \Rightarrow 4.9 MeV に下げて、周回部輸送(エミッタンス測定)
- 入射器空洞フィールドエミッションが悪化、2.9 MeV に戻した

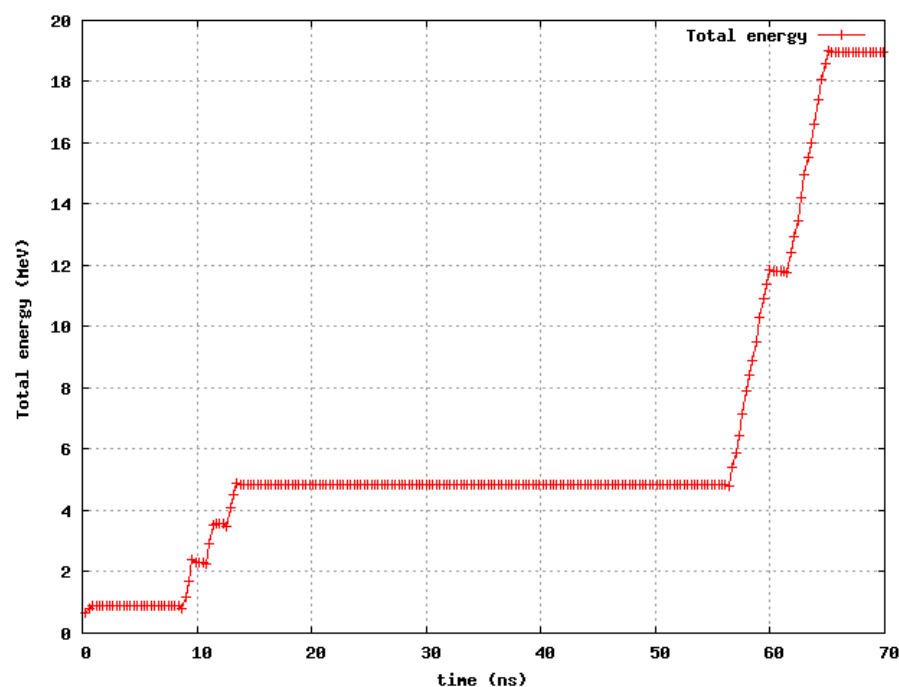
入射エネルギー 4.9 MeV 周回部輸送条件

入射器4.89 MeV、周回部輸送(電子銃から主空洞出口までの輸送条件)

規格化 rms エミッタンス



全エネルギー



↑
主空洞出口

主空洞出口のビーム条件

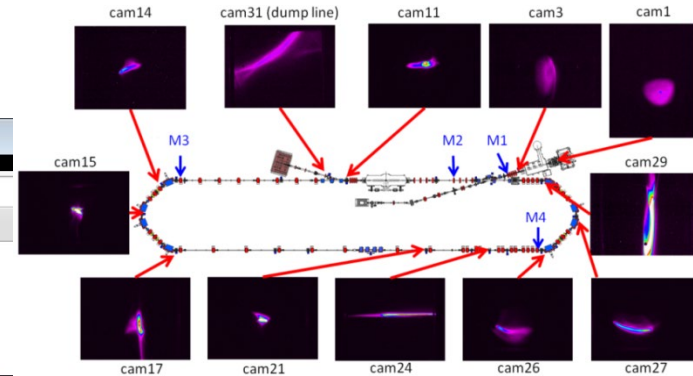
規格化 rms エミッタンス(設計値): 0.5 mm mrad

rms バンチ長: 3 ps

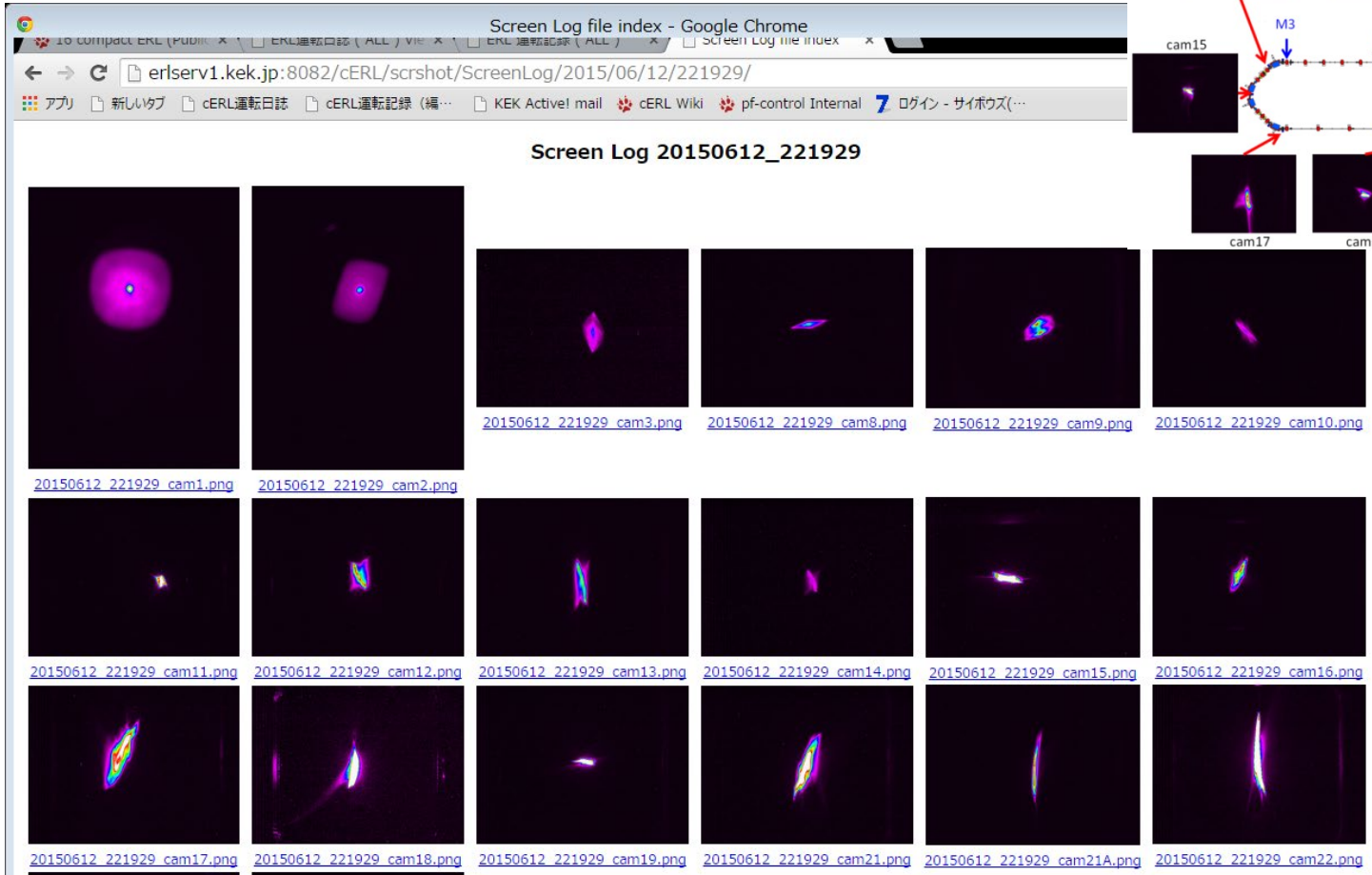
周回部ビーム輸送(周回部FCまで)

周回部FCまで到達したときのプロファイル

Einj = 4.9 MeV



Einj = 2.9 MeV時
のプロファイル

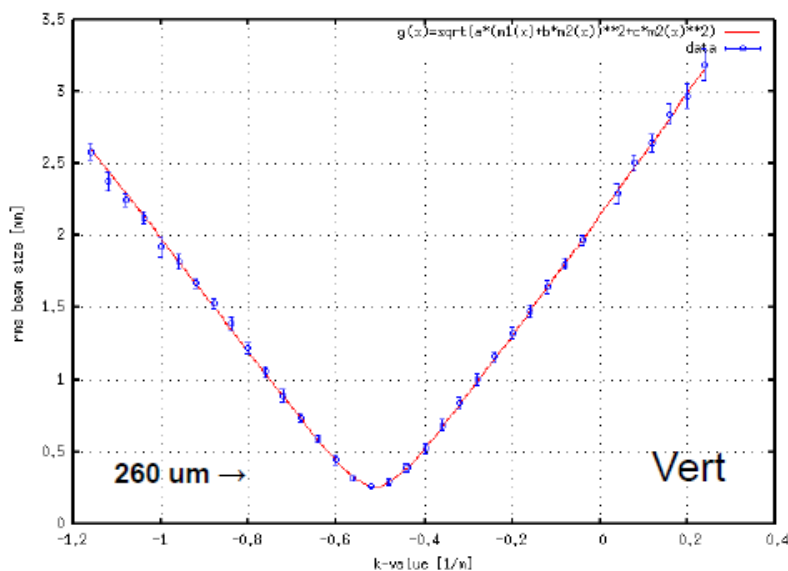
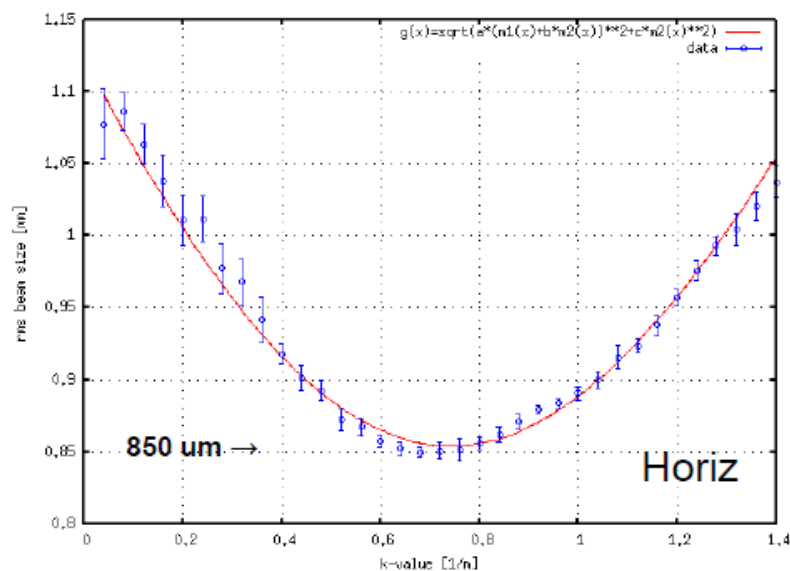


Einj = 2.9 MeV のときよりもプロファイルがまとまっている
上流から、詳細なマッチング・軌道調整を行えば、さらに改善の
余地あり

周回部エミッタンス測定(第一アーク手前)

測定結果 ②主空洞後～第1アーク

- QMAM02 と MS13 を使用 (Gain0, ND4, BG補正)
- 57.5 um/pix, QMAM02～MS13: 4053 mm (thick lens), 19.4 MeV
- 規格化エミッタンス $\Rightarrow \underline{\varepsilon_x = 1.90 \pm 0.02 \text{ um}, \varepsilon_y = 2.39 \pm 0.03 \text{ um}}$
- 途中プロファイルが回転したり2ピークになることがあった
- 第1アーク後よりは小さい傾向?

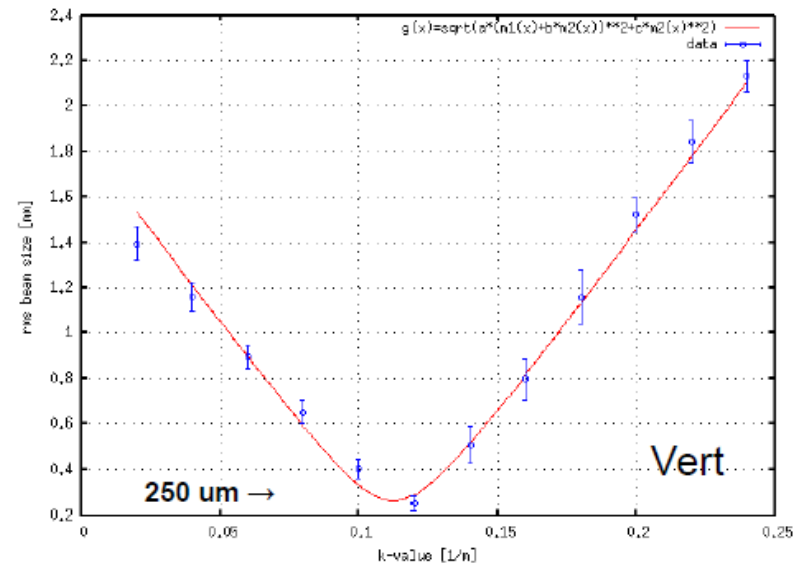
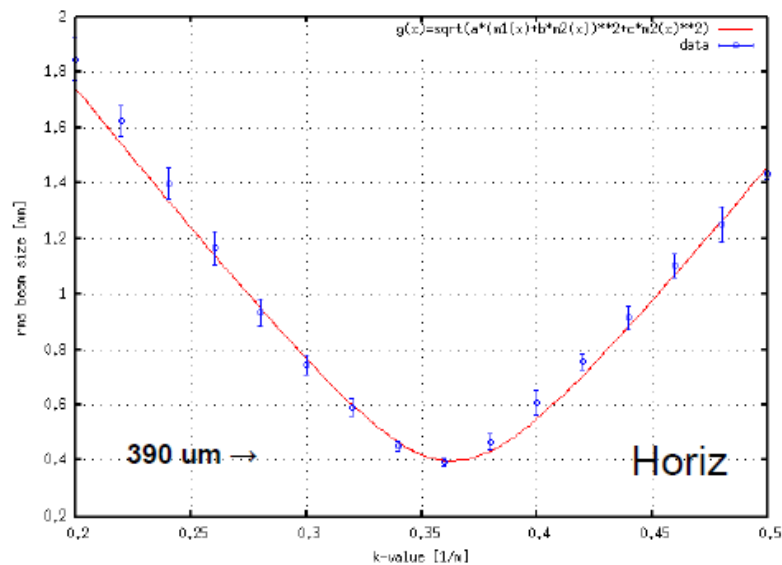


2015年6月17日(水)高井さん資料より

周回部エミッタンス測定(周長補正シケイン手前)

測定結果 ①第1アーク～周長補正シケイン

- QMIM02 と MS18 を使用 (Gain0, ND4, BG補正)
- 57.7 $\mu\text{m}/\text{pix}$, QMIM02～MS18: 5888 mm (thick lens), 19.4 MeV
- 規格化エミッタンス $\Rightarrow \underline{\varepsilon_x = 4.5 \pm 0.1 \mu\text{m}}, \varepsilon_y = 4.5 \pm 0.6 \mu\text{m}}$
- 前回(2014/6)よりは素直な応答



2015年6月17日(水)高井さん資料より

高輝度電子ビームの輸送(高バンチ電荷)

空間電荷効果が支配的な高バンチ電荷(7.7 pC/bunch, 10 mA^{ピーク})の輸送試験(これまで3回実施)

(1) 入射器単体試験(2013年6月)

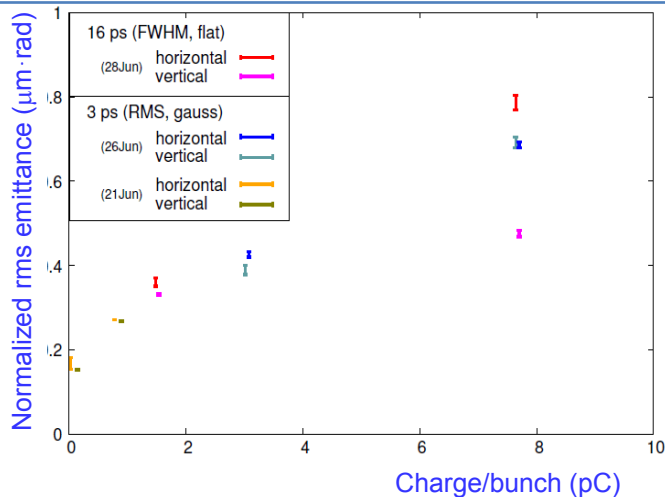
入射器エネルギー: 5.6 MeV

Y. Honda, ERL2013
S. Sakanaka, ERL2013 より

周回エネルギー: 周回なし

規格化エミッタンスの測定結果 ($\epsilon_{nx} / \epsilon_{ny}$), 単位 mm mrad

運転モード	(1)入射器 診断部
7.7 pC(短パルス)	0.8 / 0.5
7.7 pC(長パルス)	0.7 / 0.7



最低限の目標(< 1 mm mrad)は達成
しかし、設計(0.3 mm mrad)にはまだ実証できず

空間電荷効果の補償が鍵となる: 6次元位相空間で電子ビームを制御しなければならない

エネルギーを上げたおかげでエミッタンスは下がったが、まだ調整は十分ではない

(2) 周回部輸送試験

注: 運動エネルギーを使用

入射器エネルギー: 2.4 MeV

(2015年6月のみ、4.5 MeV)

周回エネルギー: 19.4 MeV

➤ 微少電荷(< 0.05 pC/bunch)

ϵ_x / ϵ_y [um]

	主空洞前	主空洞後	第1アーク後	LCS前
2014/6/13	0.15/0.14	0.14/0.12	0.14/0.14	0.13/0.15
2015/2/17	---	---	0.24/0.25	---
2015/2/19	---	---	---	0.17/0.19

➤ 中電荷(0.5 pC/bunch)

2015/3/25	---	---	0.32/0.28	0.41/0.30
-----------	-----	-----	-----------	-----------

➤ 高電荷(7.7 pC/bunch)

2014/6/19	---	---	42/15	---
2014/6/20	---	2.9/2.4	5.8/4.6	---
2015/6/15	---	1.9/2.4	4.5/4.5	---

2015年6月17日(水)高井さん資料より

低バンチ電荷: ほぼ初期エミッタンスを保持して輸送
中バンチ電荷: 設計(0.25 mm mrad)に近い
高バンチ電荷: 設計(0.6 mm mrad)よりかなり大きい

性能向上に向けた対策

□低エネルギー領域のプロファイル補正

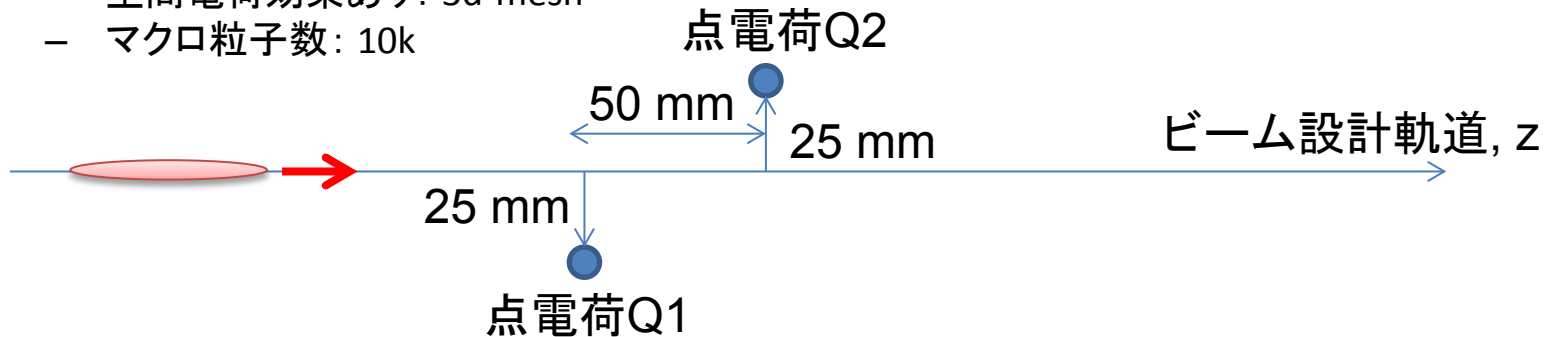
- レーザー導入ミラーのチャージアップ対策
- 環境磁場の非一様性の補正
- バンチ電荷密度の低減(初期バンチ長の伸長)

□入射器空洞下流

- 入射器空洞の電磁場モデルの修正(3次元+非対称性)
- 入射器空洞CAV#1の加速勾配の上昇(エミッタンス補償)
- (入射エネルギー増強試験の続き)

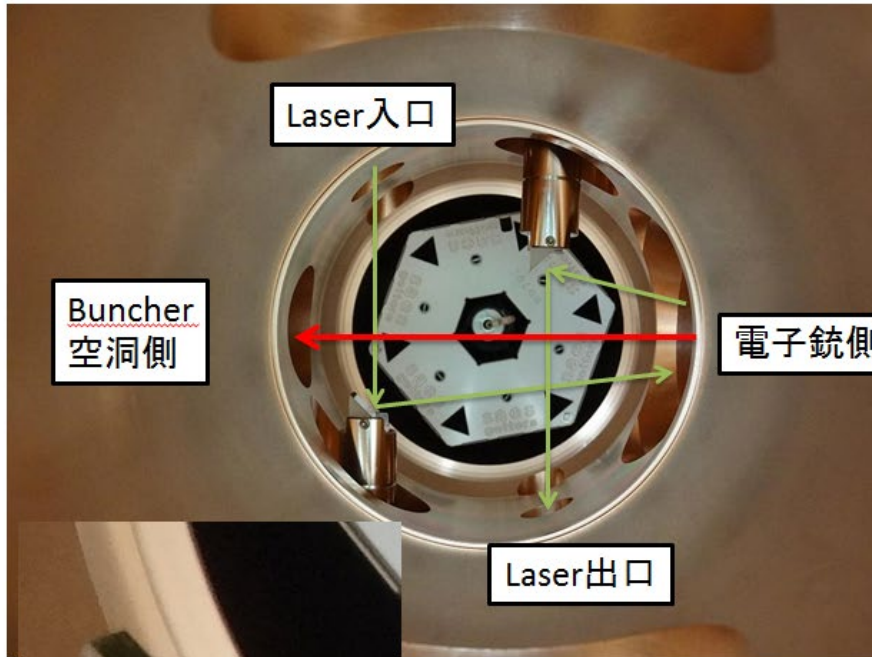
レーザー導入ミラーのチャージアップの可能性

- 80 μA CW 運転を継続していると、徐々にビーム位置がドリフトしていることが確認された \Rightarrow レーザー導入ミラーが徐々にチャージアップして、低エネルギービームに影響を与えている可能性があることが指摘された
- レーザー導入ミラーがチャージアップしたと過程して、cam1, cam2のビームプロファイルにどのような影響があるかをシミュレーション(GPT)で評価した
- レーザーミラーの位置付近に点電荷を配置(Q1, Q2)
- 今回は、 $Q = Q1 = Q2$ ($Q < 0$)として、 Q を変えた時の影響を計算
- レーザー直径 $d = 1.2$ mm
- 輸送条件
 - 0.5 pC 輸送
 - 7.7 pC輸送
- 計算条件
 - 空間電荷効果あり: 3d-mesh
 - マクロ粒子数: 10k

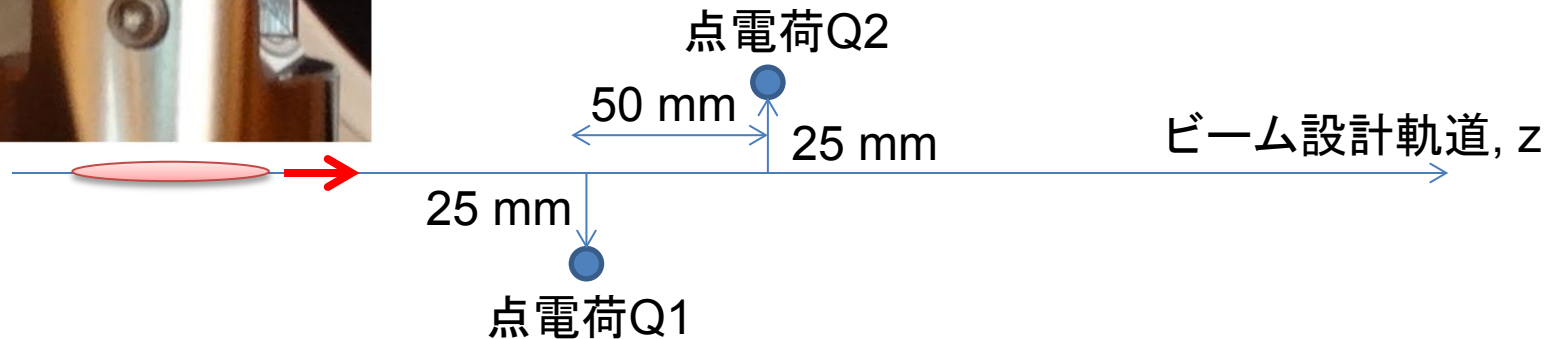
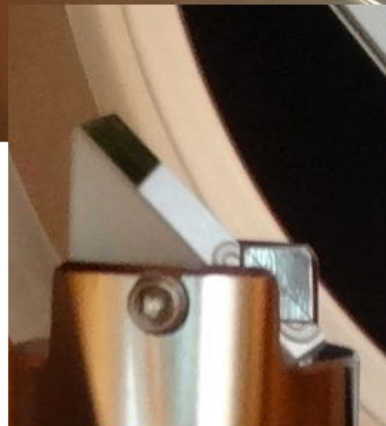


注: 今回の計算では、電荷の配置が実際のレーザーミラーの逆だった...

Laser導入部内部(真上から見た写真)

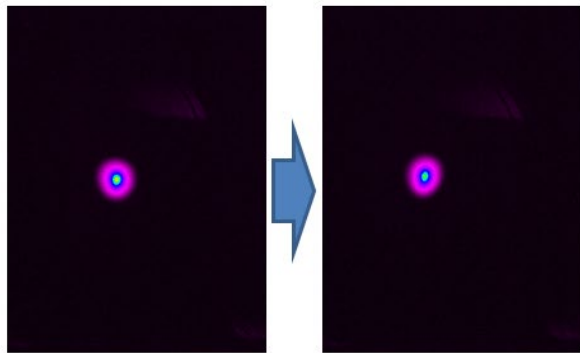


2015年6月29日
山本さん資料より



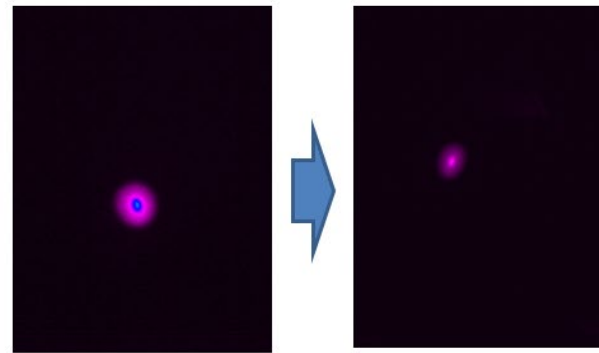
注: 今回の計算では、電荷の配置が実際のレーザーミラーの逆だった・・・
プロファイルの非対称の向きが逆になる・・・

CW運転前後のcam2位置でのビーム位置変化(1)



6/2 16:20

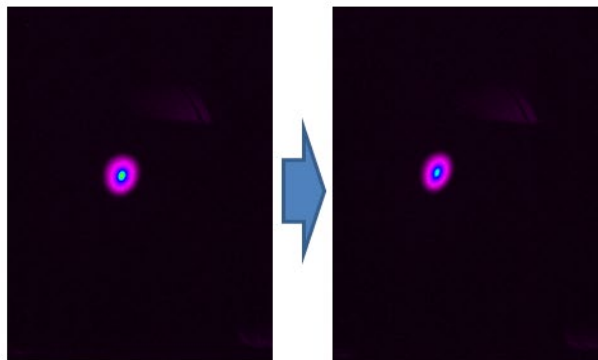
6/2 22:44



6/24 19:28

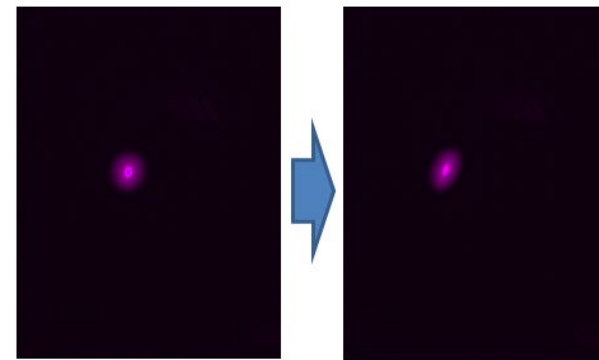
6/24 23:02

0.5 pCのとき



6/19 18:48

6/19 22:43

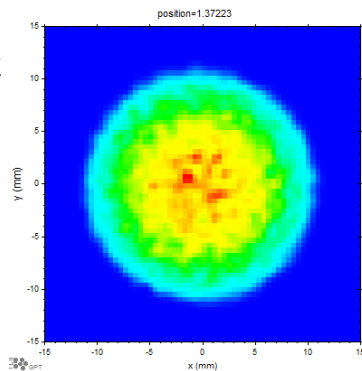


6/25 15:28

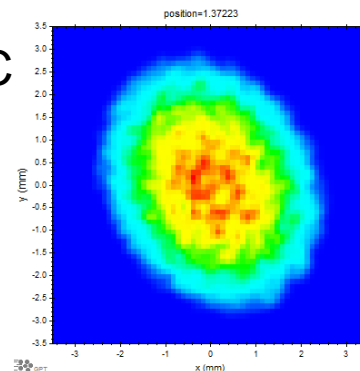
6/25 22:49

2015年6月29日
山本さん資料より

100 pC



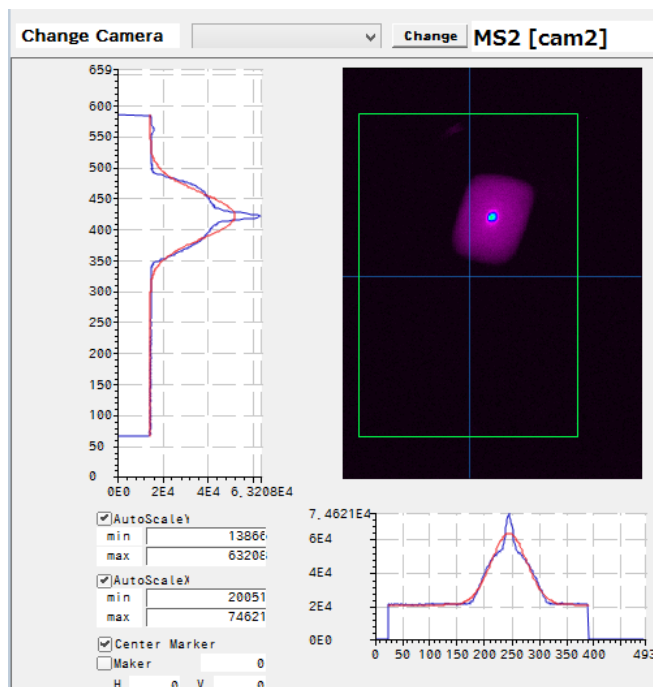
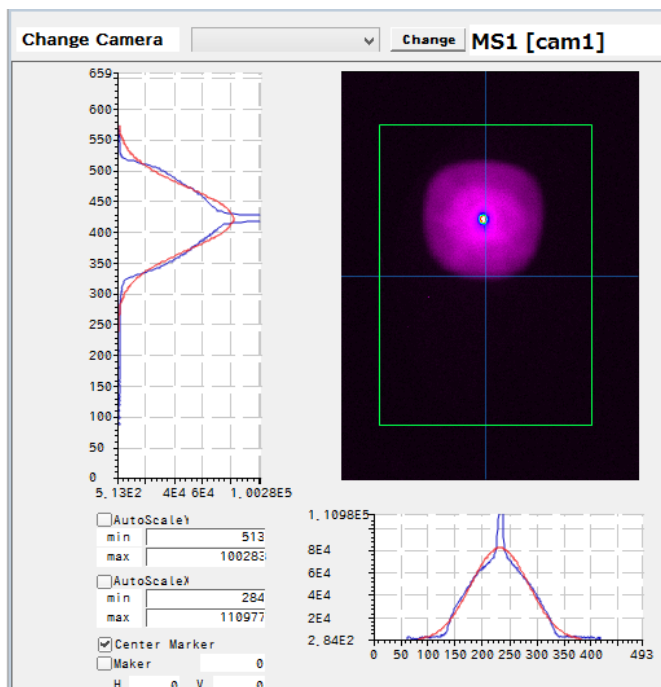
2 nC



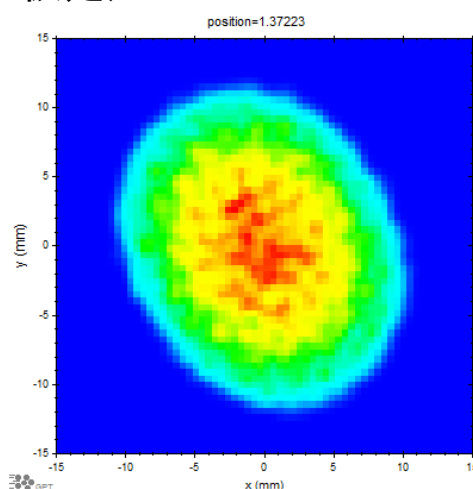
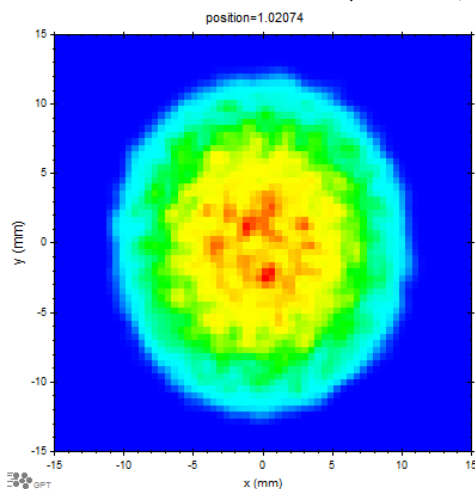
実際のチャージアップ量はまだ見積もれていないが、電荷がいることによってプロファイルが歪むことは確認できた。
次、楕円の縦横比で比較してみる

7.7 pCのとき (d = 1.2 mm)

実験結果



シミュレーション (2 nCチャージアップと仮定)



7.7 pCの場合にも、チャージアップによってプロファイルが影響を受けることが示された

ただし、単純にチャージアップだけではなく、磁場の非一様性による非線形効果も絡んでいると思われる

性能向上に向けた対策

• 課題

- 電子銃～入射器空洞入口間(cam1, cam2)のプロファイルの歪み
 - 夏に金属ミラーへ交換し、チャージアップを抑制
 - この区間の望まない磁場の推定と補正方法(追加コイル、あるいはコイルの有効範囲の拡大)の検討
 - 外部磁場の遮蔽(どのように対策するか?)
 - エネルギー増強(390 kV ⇒ 500 kV、現在改造中)
 - 電荷密度を下げる対策(RF位相をある程度制御できそうなことが確認できたので、パルススタッキングを導入する)
- 入射器空洞出口でのプロファイルの増大
 - 入射器空洞の3次元電磁場計算(現在は2次元分布で計算)
 - CAV#1の加速勾配の上昇: 3.3 MV/m ではエミッタンス補償とビームサイズ制御の両立が難しい、4 MV/m 程度で良い輸送条件がないか検討する(以前に、CAV#1では勾配を下げた方がエミッタンス補償に良いという結果を示したが、15 MV/m に比べて下げた方が良いというはなしで、3.3 MV/m では低すぎる)
 - SL1, バンチャー, SL2の軌道調整
 - (加速勾配の上昇による、エネルギー増強)

まとめ

まとめ

- 2015年1月～6月に、高バンチ電荷 (7.7 pC) スタディを実施した
- 低エネルギー領域の輸送条件 (390 keV 領域)
 - バンチ電荷 7.7 pC ビームのソレノイドスキャンを実施し、モデルで再現できることを確認した
 - プロファイルが円形状からずれる ⇒ 電荷密度を下げることで緩和できることを確認した
- 周回部輸送調整
 - 入射エネルギー 5.4 MeV に増強して輸送試験を試みる
 - が、入射器空洞のフィールドエミッションにより、エネルギーを下げることになった
 - 4.9 MeV 運転で、規格化 rms エミッタンス 4.5 mm mrad
- 性能向上に向けた対策
 - プロファイルの歪み：
 - レーザー導入ミラーを金属製に交換
 - 軌道補正コイルの応答測定からプロファイルを歪める磁場の推定
 - 電子銃電圧増強 (390 ⇒ 500 kV)
 - 周回部輸送でのエミッタンス悪化
 - 入射器空洞モデルの3次元化によるモデル化精度の向上 (XY非対称を再現できるように)
 - エミッタンス補償条件の改善: 入射器空洞CAV#1の加速勾配の増強 (フィールドエミッションが増大しない範囲で)

Buck up slides

ミラーのチャージアップまとめ

- 0.5 pC, CW運転の前後でプロファイルが変化するのを再現できるか、シミュレーションで検証してみた
- nC 程度チャージアップするとプロファイルが歪むことがわかった
- 次は、測定結果から楕円の縦横比を計算してシミュレーションからチャージアップ量を見積もってみる

- 7.7 pCのときにも同様の計算を行ってみた(ただし、レーザー直径は $d = 1.2 \text{ mm}$)
- 7.7 pCの場合も、nC程度チャージアップすると、プロファイルが歪むことが確認できた
- 仮に電荷量を上げるためにレーザー強度を上げた結果、ミラーのチャージアップが起きているとしたら、7.7 pCのときにもミラーを交換した効果によって、プロファイルの非対称性が改善される可能性がある
- ただし、単純にチャージアップだけでは実験のプロファイルは再現できないため、これに磁場の非一様性による非線形が絡んでいると思われる
- ステアリングの応答測定等から、非線形成分を推定して、シミュレーションを行ってみる