

cERL入射器の 高バンチ電荷運転

2015年4月15日(水)14時00分から
第95回ビームダイナミクスWGミーティング
PF研究棟2階会議室

宮島 司

概要

- 2015年1月～4月の運転では、空間電荷効果の効き始める電荷量での運転を実施した
- LCS実験用: 0.5 pC/bunch (1.3 GHzで、1 mAピーク電流に相当) ⇒ ある程度設計に近い状態で運転できた
- 7.7 pC/bunch (1.3 GHzで、10 mAピーク電流に相当) ⇒ 入射部での基礎データを取得。XYプロファイルの円筒対称性のずれが残る

2015年1月～4月の入射器運転条件

- 次の3つの運転モードで入射器を運転した
- 施設検査に向けて
 - 低バンチ電荷運転 (**23 fC/bunch**、1.3 GHz、平均電流30 μ A)
 - 基本的にはこれまでの運転条件の再現 \Rightarrow 2/12に施設検査実施
- LCS運転に向けて
 - レーザー繰り返し: 1.3 GHz \Rightarrow 162.5 MHz
 - バンチ電荷: **0.5 pC/bunch**に増強 (1.3 GHzでは1 mAの電流に相当し、空間電荷効果が効き始める)
- 10 mA運転に向けて (1.3 GHzで、**7.7 pC/bunch**)
 - 2013年の6月と、2014年の6月に実施している
 - 2013年6月: 入射器5.6 MeV、入射器診断ラインで規格化エミッタンス0.8 mm mrad以下
 - 2014年6月: 入射器2.4 MeV、周回部で規格化エミッタンス5 mm mrad
 - 今回は、入射器のエネルギーを5 MeV上げた状態で、周回部に輸送してエミッタンスの低減を図りたい (エネルギー回収は行わない)
 - 5 MeV輸送の前段階の基礎データ取得で終了

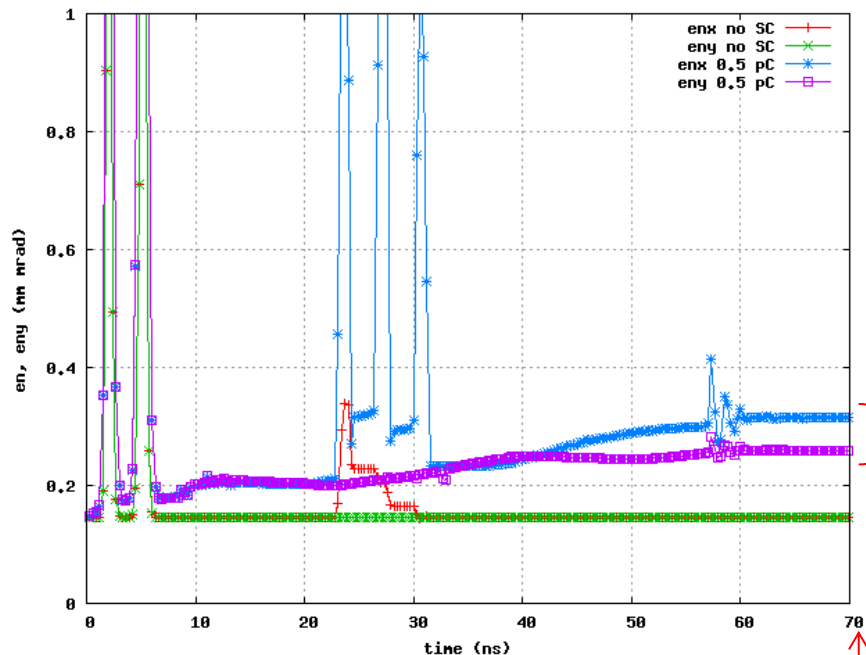
LCS用0.5 pC/bunch運転

○結果

- 入射器調整から、周回調整、衝突実験まで一通り行えた

0.5 pC/bunch用入射器パラメタ

- 施設検査前までの運転では、1.3 GHzで平均電流30 μ Aでもバンチ電荷は23 fC/bunch \Rightarrow 空間電荷効果は無視しても良かった
 - LCS用運転では、バンチ電荷0.5 pC/bunchであり、空間電荷効果が無視できなくなる
 - そこで、0.5 pC/bunch用の入射器パラメタ設計を行った
 - 設計の手順
 1. これまでの通常運転パラメタ(空間電荷なし)をベースにバンチ電荷が増えたときの影響を評価
 2. RF空洞(バンチャー、入射器空洞両方)の設定は変えずに、ビームサイズを低減し、かつバンチ長3 psになるように調整。調整項目はソレノイド1と2の磁場の強さと四極電磁石
1. これまでの通常運転パラメタでバンチ電荷を増やした場合
- $E_{inj} = 2.4$ MeV (入射器空洞後の運動エネルギー)
 - buncher = 30 kV
 - original directory:
 - ~/GPT/CERL/Injector/Phase2/Einj_2.9MeV/Buncher/Matching_30kV
 - directory: 0.5pC/normal_30kV
 - comparing SC effect.
 - nps = 2000;
 - 通常運転時のオプティクス(バンチャー 30 kV)で何も変更しない
 - バンチ電荷のみをzero(空間電荷なし)から0.5 pC/bunchに増強したときの影響を計算する



○規格化エミッタンス

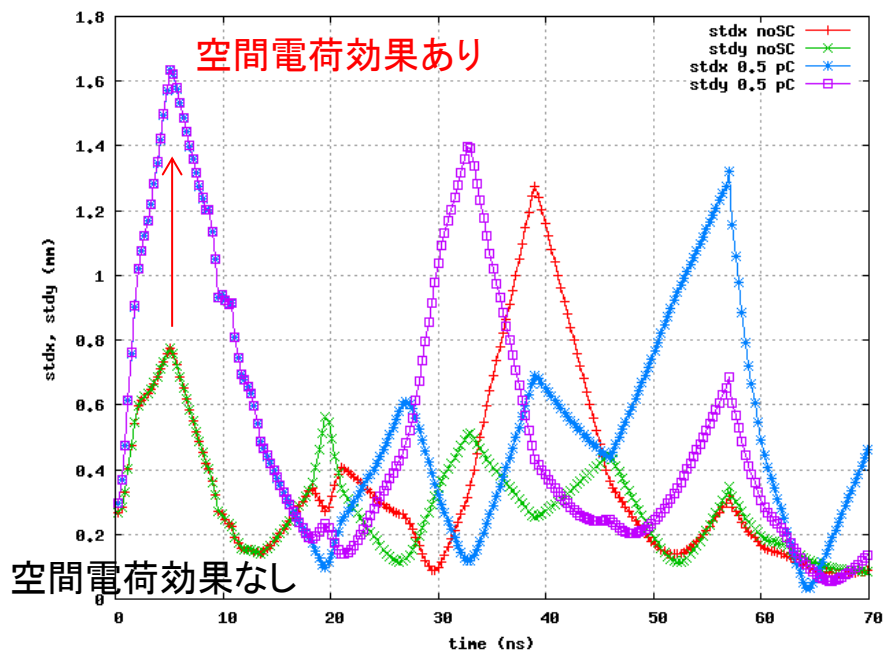
- 2倍程度になる
- が、激増するわけではない

空間電荷効果あり

空間電荷効果なし

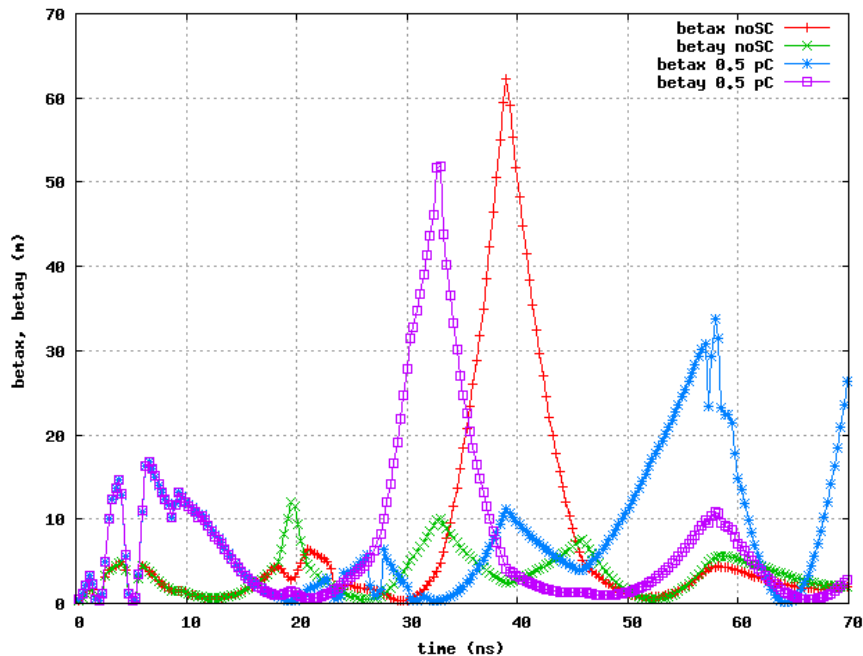


ここが周回部とのマッチングポイント(主空洞出口)
ここで、Twissパラメタを設計値にする必要がある



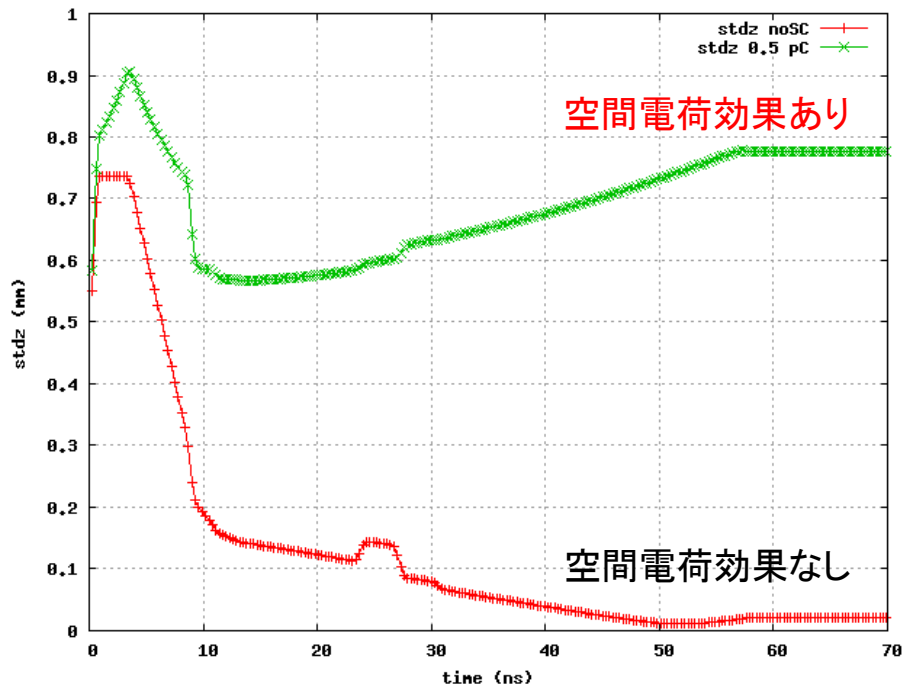
○Ormsビームサイズ

- 電子銃直後で空間電荷効果によりビームサイズが増大
- ここでのサイズ増大は、環境磁場等による磁場の非一様性の影響を受けやすくなるため、可能な限り小さくしたい
- 方法 ⇒ ソレノイド1、2の磁場の調整



○Betatron function

- マッチング点で大きくずれているので、このままでは周回部に輸送できない
- 再マッチングが必要
- 方法 ⇒ 5連Q(QMGC)と8連Q(QMAG)の調整



○バンチ長

- バンチ長は0.8 mm程度に伸びる(2.7 ps rms)
- おおよそ設計目標の 3 psに近い
- バンチャー空洞の電圧を大きく変えなくても良さそう

次の調整

SL1, SL2を調整(入射部のビームサイズを小さくする)

マッチング(周回部への輸送条件を空間電荷効果なしと同じにする)

2. 0.5 pC/bunch用の調整(SL1, 2と四極電磁石)

- RF空洞の設定(変更なし)

- $E_{inj} = 2.4 \text{ MeV}$ (入射器空洞後の運転エネルギー)
- buncher = 30 kV

- ソレノイドの強さ(ビームサイズを小さくするために増強)

- SL1 = 5.83 \Rightarrow 7.0A
- SL2 = 4.95 \Rightarrow 5.3A

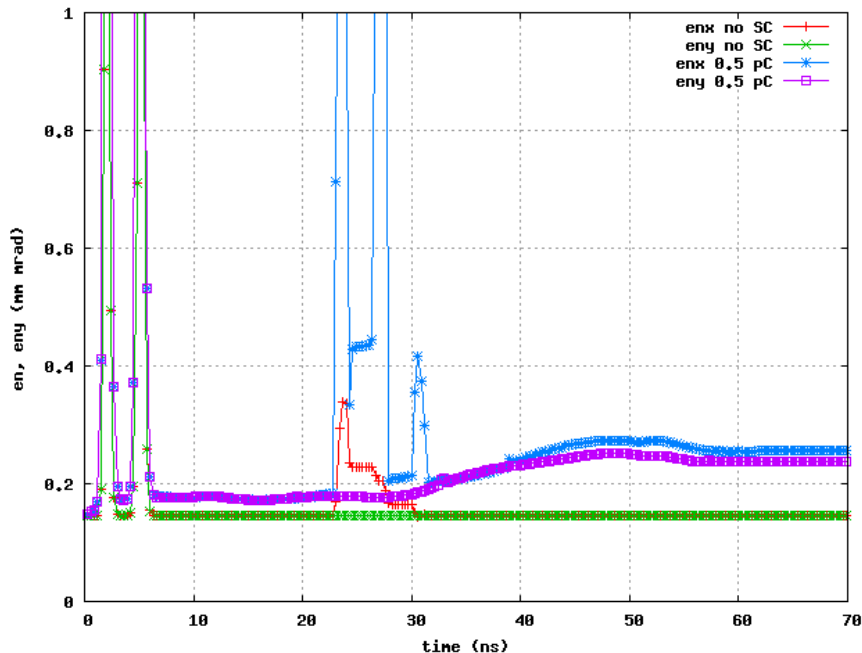
- SL1, SL2を変更してビームサイズを小さくしてから、主空洞出口でのオプティクスマッチングを実施

- QのK値: QMGC01, QMGC03, QMGC05, QMAG01, 02, 03, 04, 05, 08
- 8.88 -21.9 11 -6.79 0.0227 -0.533 8.39 -5.93 2.94

- マッチング後のTwissパラメタ(マッチング点)

- position 1.175500100e+01
- Betax: 2.67 m (ターゲット: 2.673 m)
- Betay: 2.12 m (ターゲット: 2.117 m)
- Alphax: -0.601 (ターゲット: -0.601)
- Alphay: -0.180 (ターゲット: -0.179)

ほぼ設計通りに値に調整できた

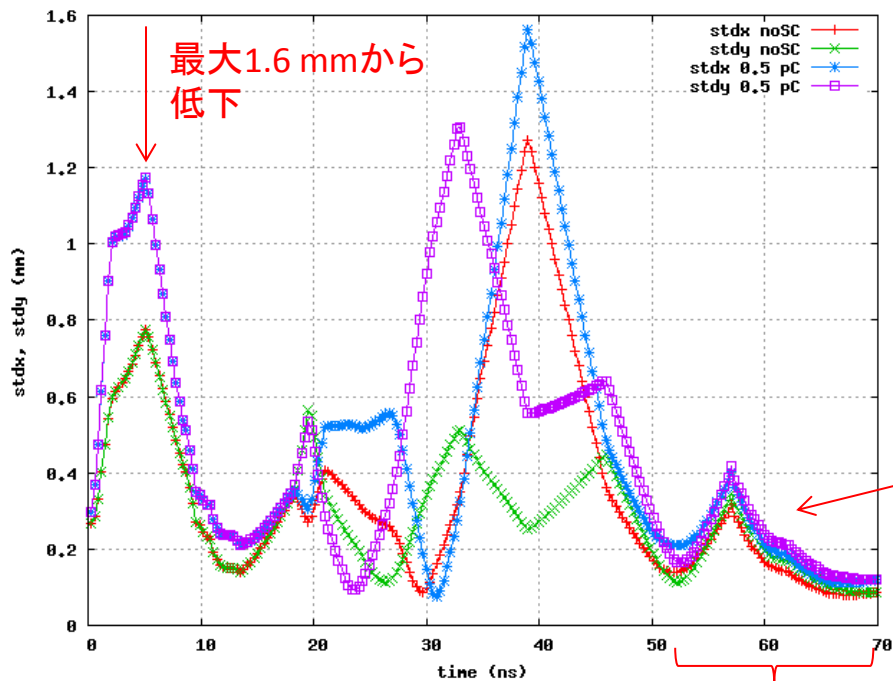


○規格化エミッタンス

- 調整前より僅かに下がった
- 激増とかはないので、これで良しとする

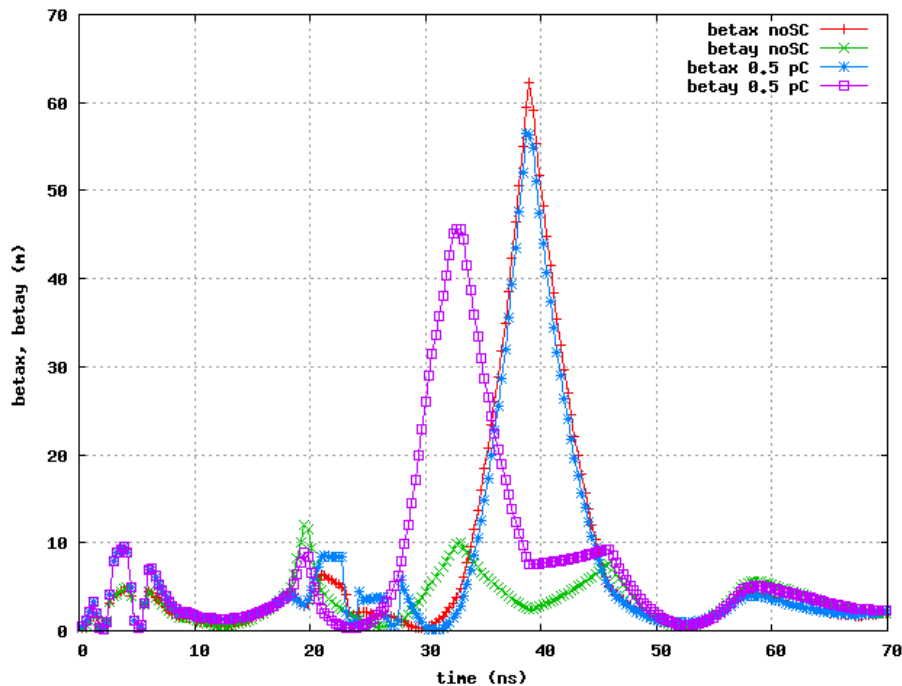
空間電荷効果あり

空間電荷効果なし



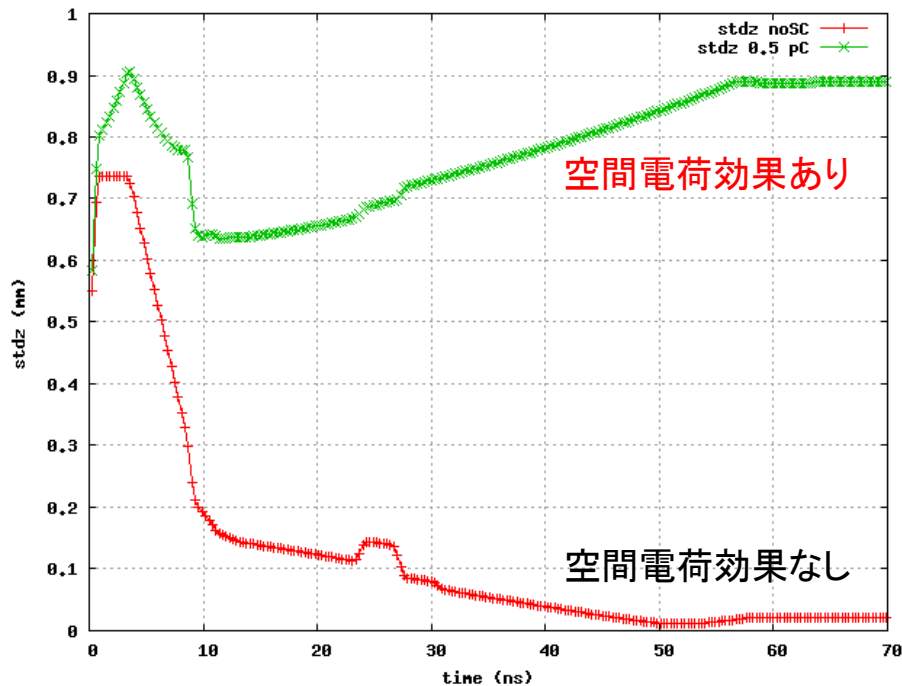
○rmsビームサイズ

- 電子銃直後のビームサイズ増大を低減 (1.6 mm \Rightarrow 1.2 mm)
- マッチング点近傍では、空間電荷効果なしの場合の変化と同じような傾向にできた (Twissパラメタが一致するには、サイズ自体は異なってもこの傾向が一致する必要がある)



○Betatron function

- マatching点でほぼ設計通りの値にできた



○バンチ長

- バンチ長は0.8 mm から 0.9 mmに伸びた
(横方向をソレノイドで絞ったので、その分縦方向に伸びた)
- おおよそ設計目標の 3 psになった

調整の結果(マatching点)

- 規格化エミッタンス: 0.25 mm mrad
- バンチ長: 3 ps rms
- Twissパラメタ: 周回部条件を満たした

0.5 pC/bunch用入射器調整の実施

- 目標:レーザー位相調整(1.3 GHz -> 162.5 MHz)
0.5 pC/bunch 用のオプティクス調整、周回
- 2/23(月)に0.5 pC/bunch用入射器調整を実施した
 - レーザー位相調整
 - 0.5 pC/bunchに電荷増強、マッチング(MP1、MP2)、周回調整
- 結果
 - レーザー位相調整 ⇒ 162.5 MHz用の位相を確認
 - 2/20(金)の条件の再現 ⇒ LCS部入口でプロフィールが縦長...
 - LCS部調整・周回調整 ⇒ 衝突点で絞れた、主ダンプまで輸送できた
 - 0.5 pC/bunch運転 ⇒ 合流部入口(MP1)、主空洞入口(MP2)でオプティクスマッチングを実施。ある程度補正できた。周回調整に移るが第一アークのZHBMIF04をゼロで回す調整で周長がずれている。これを治すために、BPSを調整を試みる。第一アークの軌道調整で終了
- 本日の開始点
 - 第一アークまでの軌道の再現
 - 南直線部軌道調整
 - そのあとは、南直線部のオプティクス調整、第二アーク・周回調整(第二アークでプロフィールがおかしい場合には、第二アーク入口(MP7)のマッチングを行ってもよい)

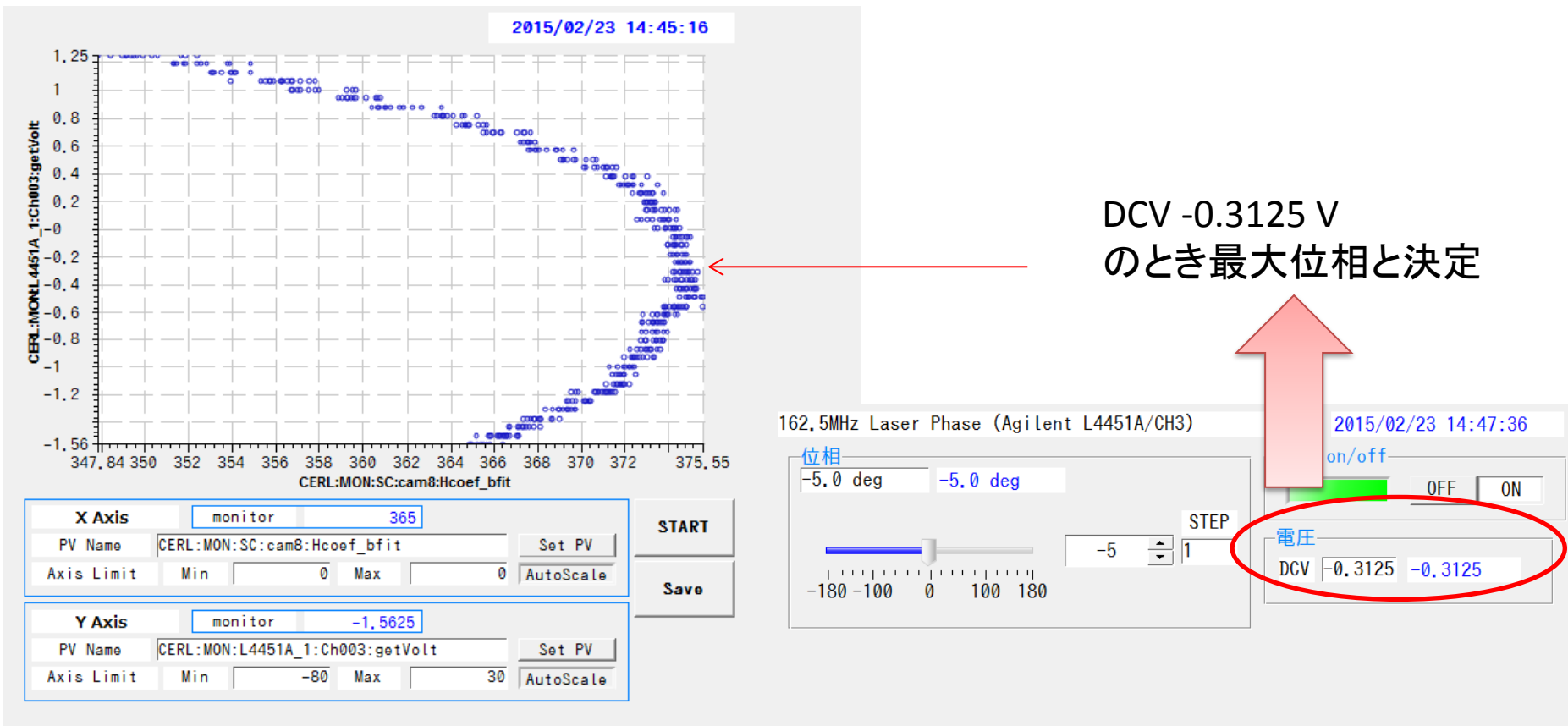
レーザー位相調整

- 励起レーザー: 1.3 GHzから162.5 MHzに切り替え
- 位相がわからなくなるので調整する必要がある
- 目的: 162.5 MHzのレーザーの位相を決めること
- 方法: レーザー位相のみを変更、RF空洞間の位相は変えない
- 条件: 通常通りの空間電荷効果の効かない条件でまずは加速位相調整を実施
 - ステップ1: 入射器空洞#1のみを1.6 MV/m(通常の半分)で立ち上げて、最大加速位相をラフに決める(ビームの逆流を防ぐため)
 - ステップ2: すべてのRF空洞を立ち上げる。
 - ステップ3: 合流部で一つ曲げた位置(cam8)での軌道から、最大加速位相を詳細に決定する。

ステップ3

RF空洞全て通常設定で立ち上げる

合流部のBを一つ曲がったあと(cam8)で詳細位相調整を実施

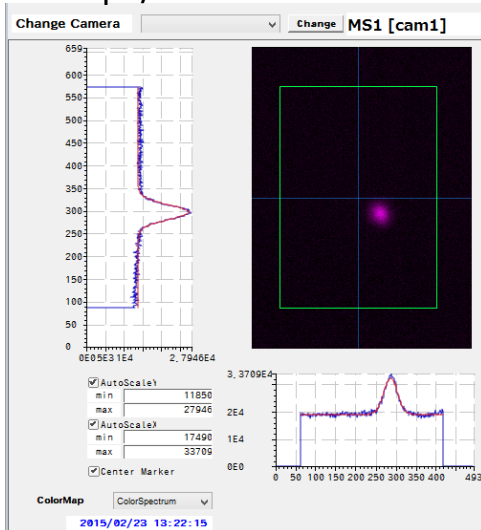


以上の手順で、162.5 MHz用の位相を確認した
このあと、バンチ電荷を0.5 pC/bunchに増強し、調整に移る

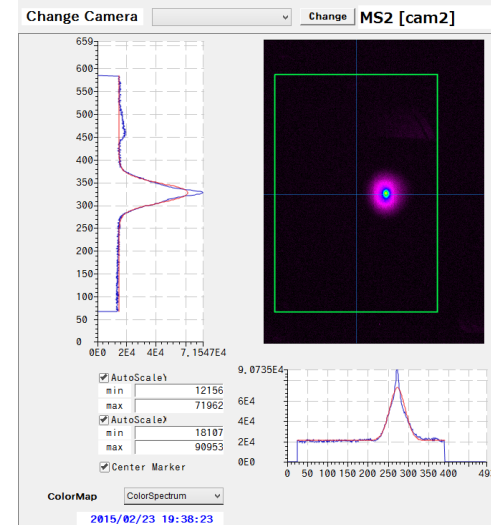
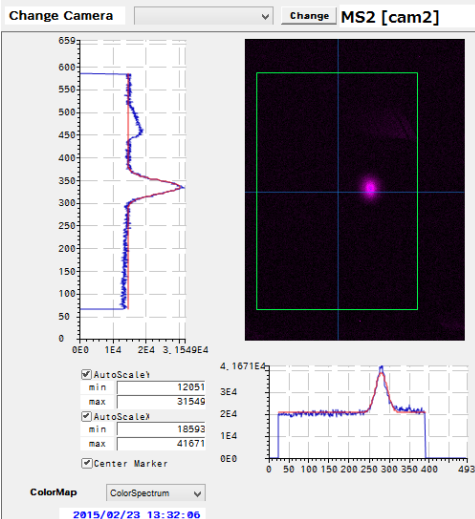
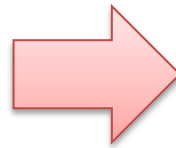
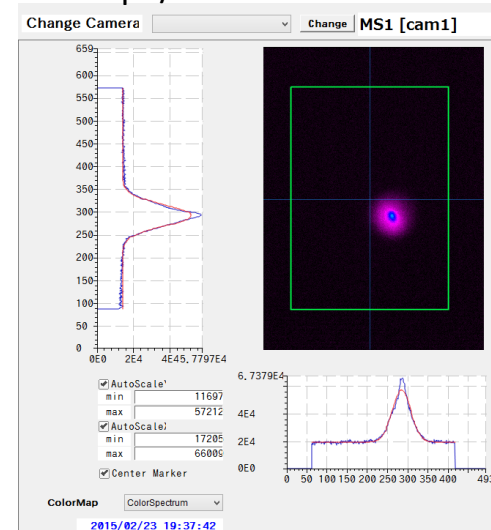
0.5 pC/bunchへ電荷増強

- LCS運転用のバンチ電荷0.5 pC/bunchに電荷を増強した
- 併せて、輸送条件も変更した(SL1, SL2の値を変更して収束力を強める)

0.15 pC/bunch

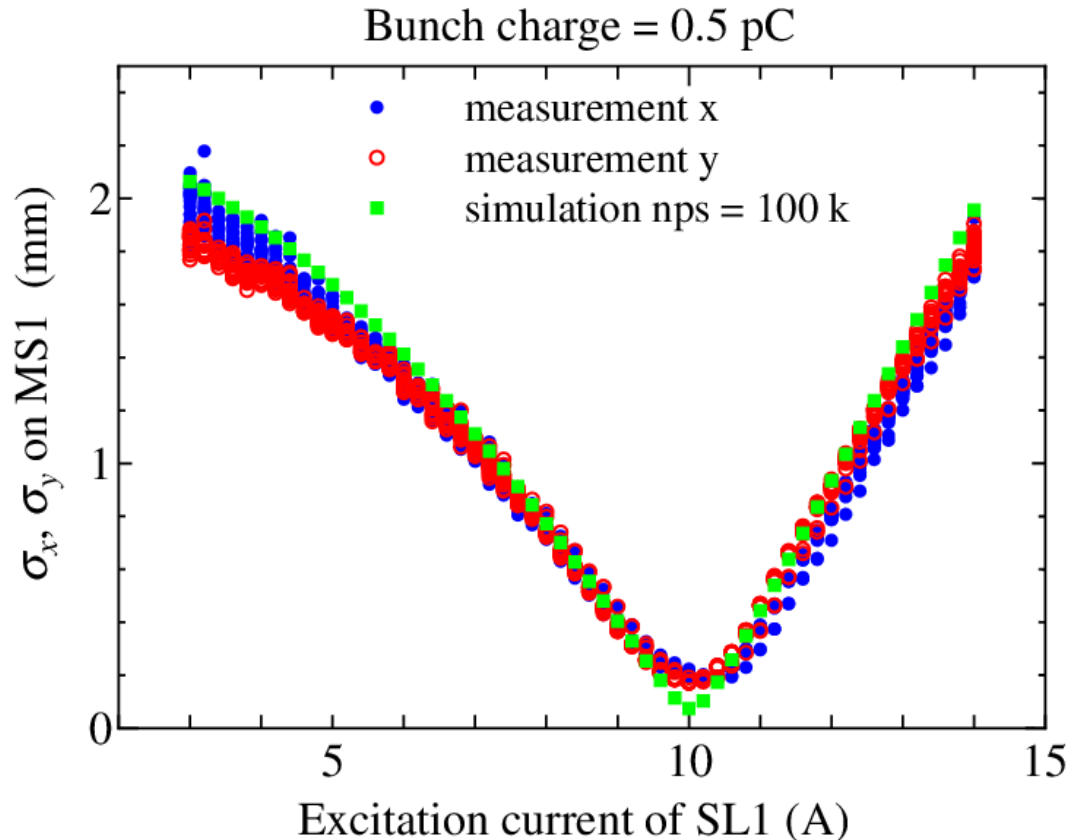


0.5 pC/bunch



0.5 pC/bunchでのSL1-scan

- 0.5 pC/bunchでのSL1-scanを実施し、モデル計算(GPT)と比較
- ビームサイズの測定: cam1を使用

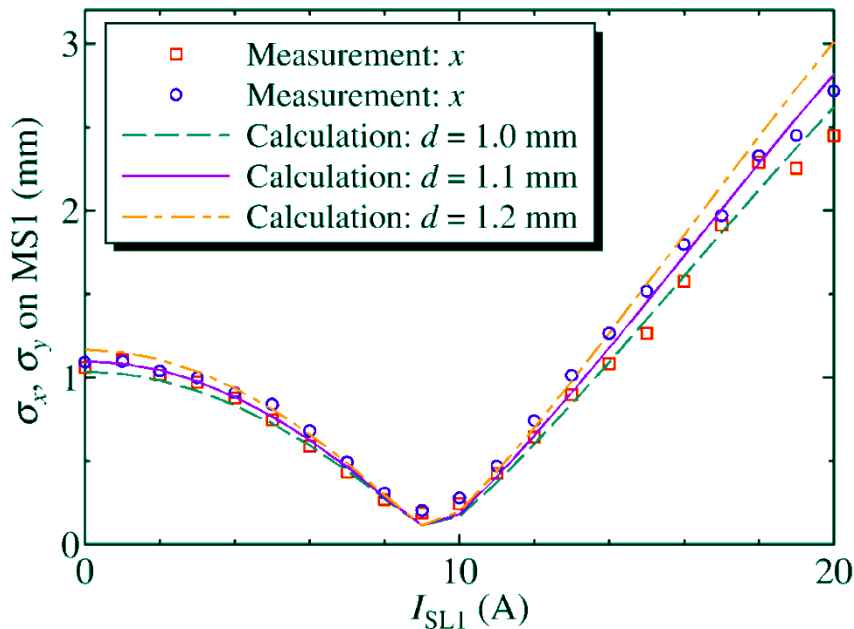


- ビームサイズが大きい部分では、xとyの非対称性が見えている \Rightarrow バunch電荷をさらに上げた時に悪化することが懸念される
- モデル計算との一致はそれほど悪くないが、完全に合っているわけでもない(どちらかといえば、空間電荷の発散力が弱い傾向 \Rightarrow バunch電荷が低いのか？初期バunch長が長いのか？)

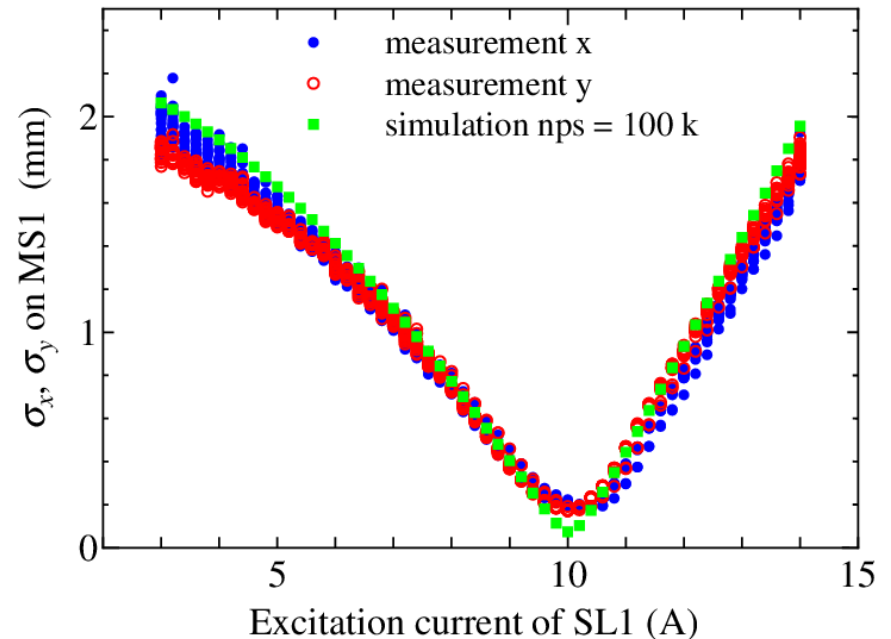
空間電荷なしの場合と比較

- 2013年に測定した空間電荷効果なしでのSL1スキャン結果との比較
- 電子銃電極形状モデルの修正、レーザースポット直径の修正によって、ほぼ実験結果を再現できるようになった
- このときと同じ条件で、0.5 pC/bunchのモデル計算を行っている

空間電荷効果なし(2013年測定)
 $k_B T = 120$ meV



空間電荷効果あり(2015年2月測定)
Bunch charge = 0.5 pC



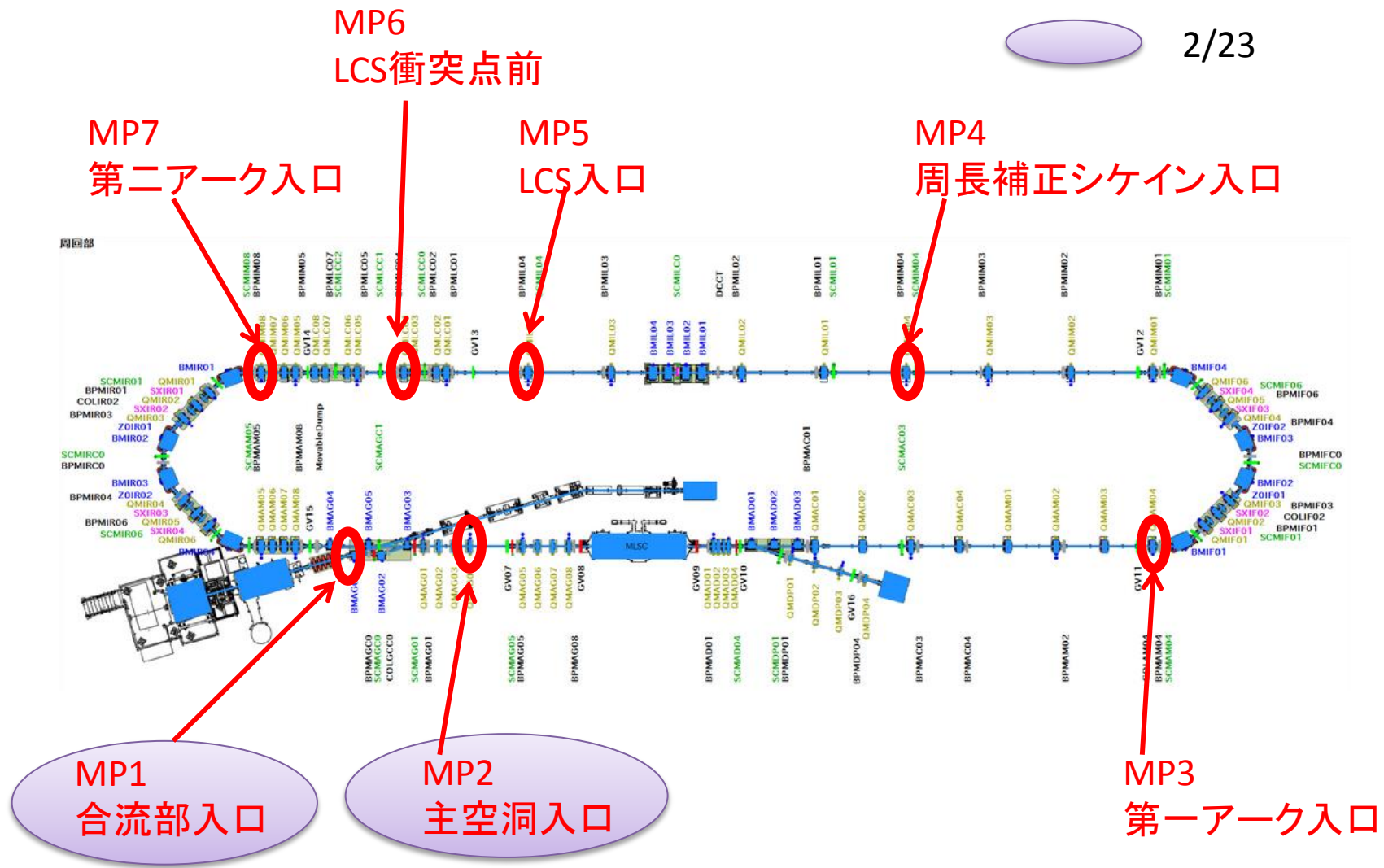
- バンチ電荷を上げて変わるのは空間電荷効果なので、それに影響するパラメタ(バンチ電荷、初期サイズ、初期バンチ長、分布形状)をまだ抑えきれていないのかもしれない \Rightarrow 7.7 pC/bunchの結果を含めて調査する

2/23運転におけるマッチング箇所

0.5 pC/bunch運転用に入射器のパラメタを変更
2か所でオプティクスマッチングを実施

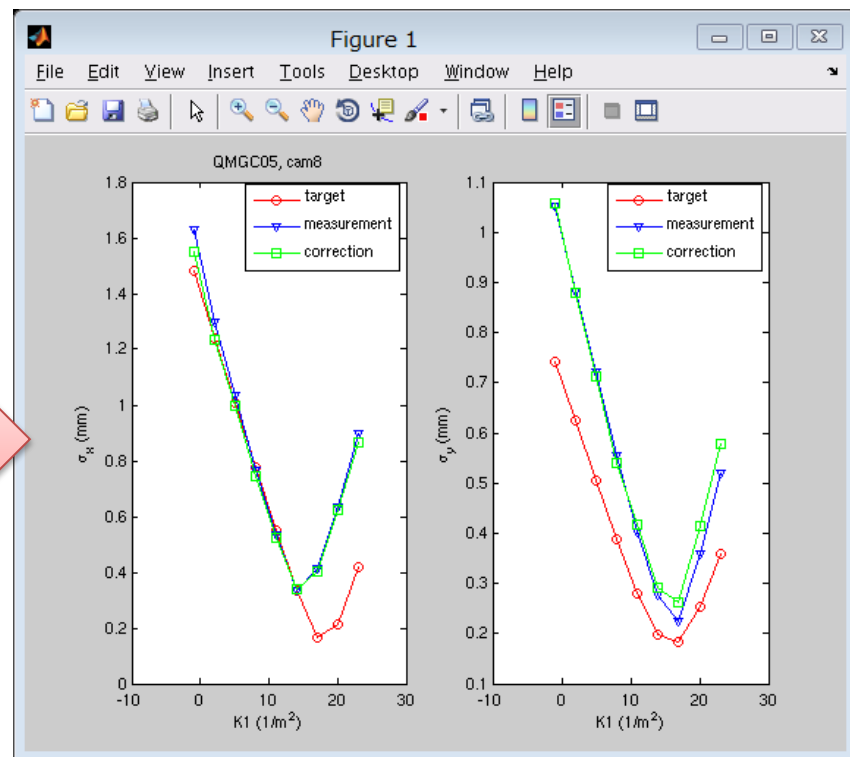
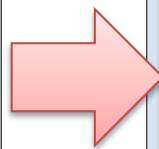
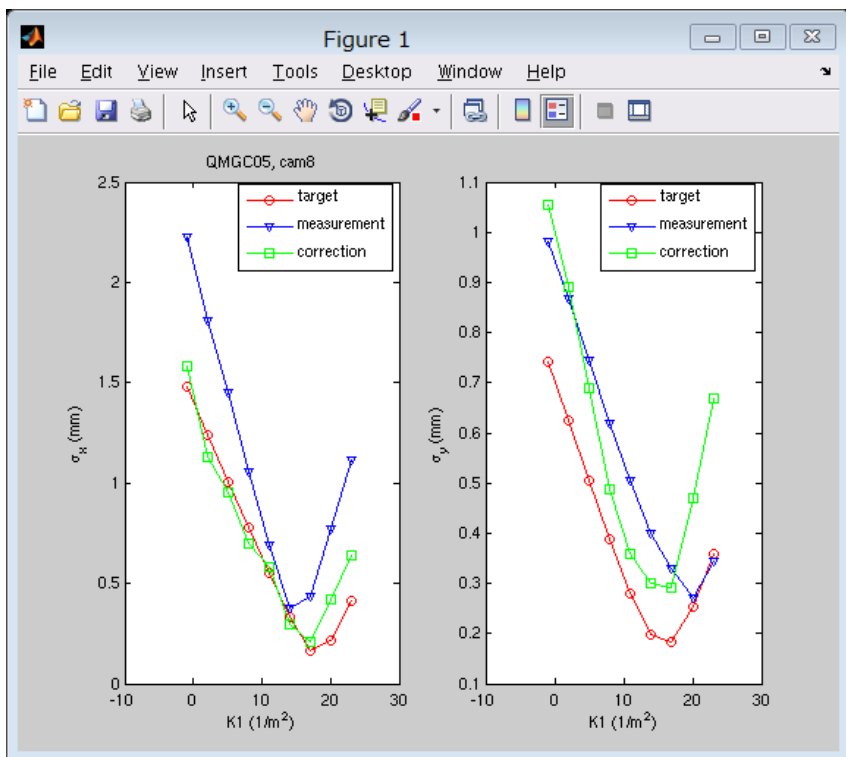


2/23



合流部入口 (MP1) マッチング

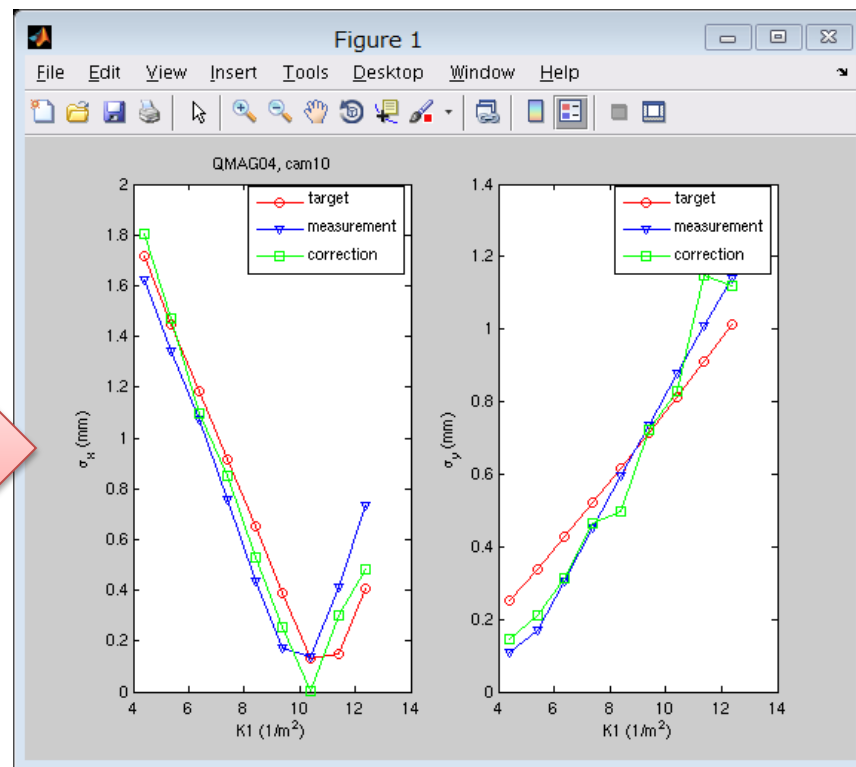
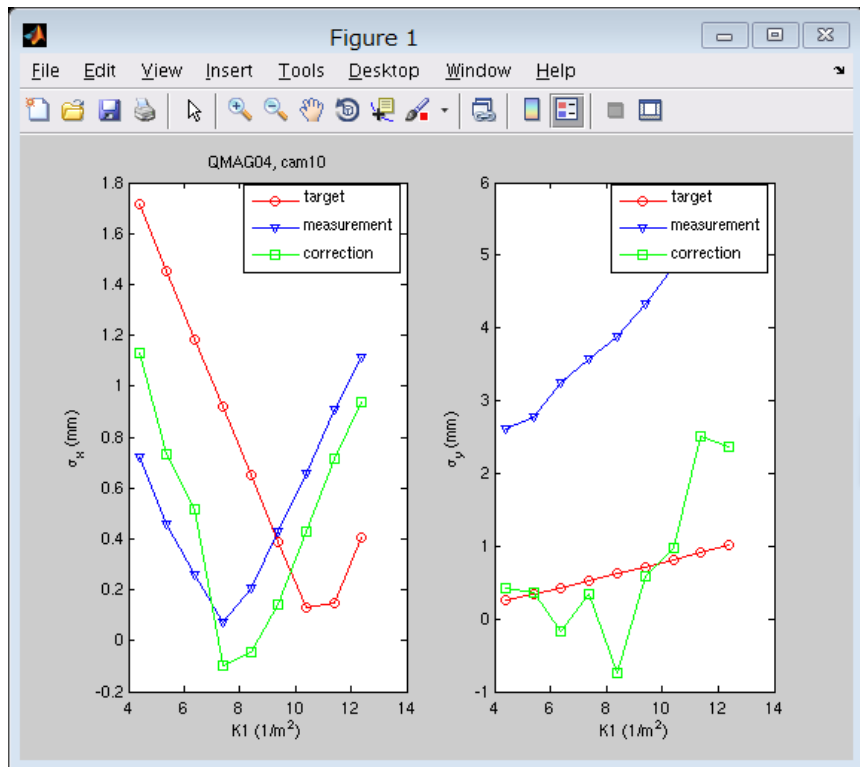
- 0.5 pC用入射器オプティクスに変更
- MP1でマッチングを実施



2回補正を実施
これ以上直らないので、次のマッチングに移る

主空洞入口 (MP2) マッチング

- 0.5 pC用入射器オプティクスに変更
- MP2でマッチングを実施



2回補正を実施
ある程度設計値に近づけられた

0.5 pC/bunch運転まとめ

- 空間電荷交換なしのこれまでの運転条件を基礎として、0.5 pC/bunch用の入射器運転パラメタを設計した
- 設計方針としては、ソレノイドと四極電磁石以外のパラメタは変更しない方針としている
- レーザー繰返しを1.3 GHz から 162.5 MHzに変更して調整
- 0.5 pC/bunchのソレノイドスキャンを実施し、モデルと大きくずれていないことを確認した
- その後、合流部入口(MP1)、主空洞入口(MP2)においてマッチングを実施し、周回部の条件を変更せずに輸送できることを確認した
- 今後の課題
 - 入射器診断ラインでのエミッタンス測定
 - バンチ長、エネルギー拡がりの調整
 - CW運転時に合流部コリメタ付近で軌道変動が起きていそうなので、これの調査
 - よりエミッタンスを低減させる運転条件の設計と、調整方法(初期バンチ長を伸ばした時の位相調整)
 - このあたりを、7.7 pC/bunch運転と併せて行っていく

7.7 pC/bunch運転の準備

○結果

- 主に入射空洞手前までの領域で基礎データを取得
- 7.7 pC/bunchになるとX・Yの非対称性がより大きくなる

加速後(5.6MeV)のエミッタンス測定(高バンチ電荷)

空間電荷効果が顕著に現れる電荷領域

Y. Honda, ERL2013
S, Sakanaka, ERL2013 より

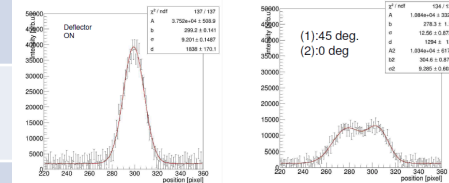
Conditions of measurements

| Meas. Date | Bunch charge (pC) | Width of laser pulse | Buncher Vc (kV) | Solenoids (SL1, SL2) |
|--------------|-------------------|-------------------------|-----------------|----------------------|
| 21-June-2013 | 0.02, 0.77 | 3 ps (rms, Gaussian) | 40 | 7.8/8.7, 3.0 |
| 26-June-2013 | 3.1, 7.7 | 3 ps (rms, Gaussian) | 50 | 8.3, 4.99 |
| 28-June-2013 | 1.5, 7.7 | 16 ps (FWHM, semi-flat) | 50 | 8.3, 4.99 |

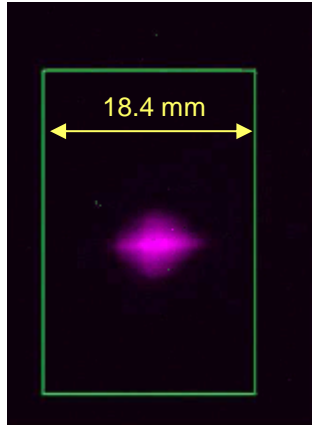
Bunch lengths

3-ps laser

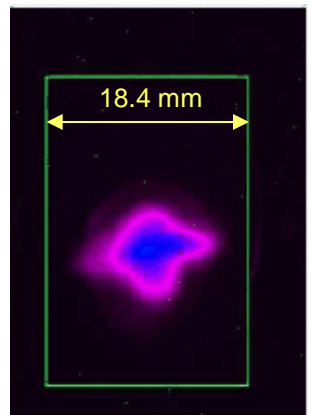
16 ps semi-flat



Beam profiles at screen monitor MS6

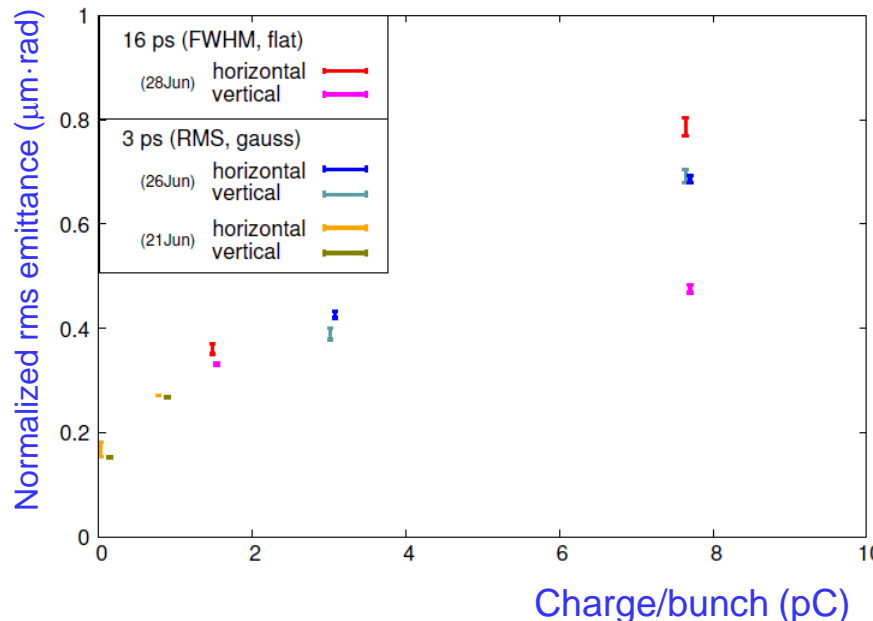


1.5 pC/bunch



7.7 pC/bunch

Summary of measurements



Tentative result:

$$\varepsilon_n \approx 0.8 \mu\text{m}\cdot\text{rad at } 7.7 \text{ pC}$$

(not fully optimized yet)

最低限の目標(< 1 mm mrad)は達成した。

しかし、数値計算ではコミッションの制約条件下でも、0.3 mm mradのエミッタンスが得られると予想されている。

位相調整、空洞内のビーム位置調整等が不十分であり、現在対策を検討している

ビーム性能開発の現状と今後の課題(2)

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2回実施)

(1) 入射器単体試験(2013年6月)

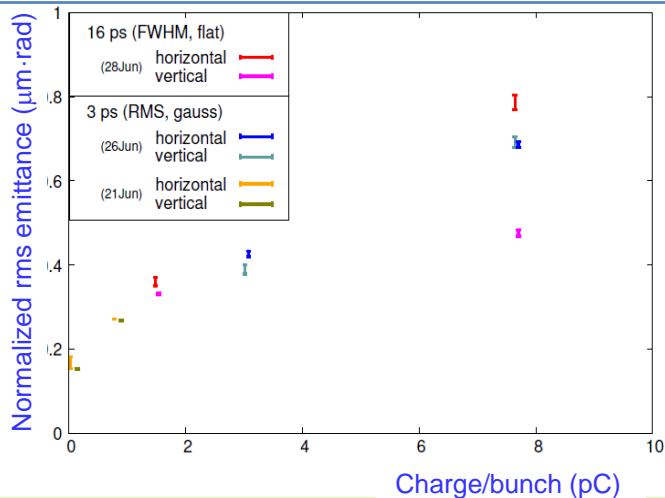
入射器エネルギー: 5.6 MeV

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

エミッタンスが設計に到達していない原因: 入射器エネルギーの低下、軌道・位相の詳細調整がまだできていない

高バンチ電荷での基礎情報の測定・調整法の確立 ⇒ 2015年5月から開始予定

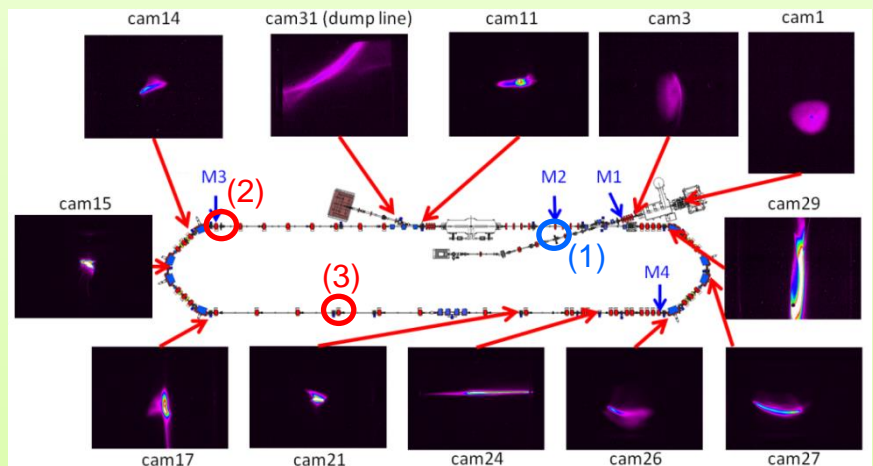
(2) 周回部輸送試験(2014年6月)

入射器エネルギー: 2.4 MeV

周回エネルギー: 19.4 MeV

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 | (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 |



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

基礎データ取得の目的

- 7.7 pC/bunch(ピーク電流 10 mA相当)において、エミッタンス低減を図りたい
- 現状:
 - 入射器診断ライン < 0.8 mm mrad (Inj: 5.6 MeV)
 - 周回部: < 5.8 mm mrad(Inj: 2.4 MeV, Circ: 20 MeV)
- エミッタンスを増大させる原因の可能性
 - X-Y平面のプロファイルの非対称(空間電荷によってプロファイルが増大した結果、プロファイルが歪む?)
 - RF空洞による進行方向のX-Y面への射影(RF空洞の中心を通過しないと、射影が生じる)
- 今回は、まずX-Y面のプロファイルの非対称性の原因を探したい
- 方法: シングルキック応答を取る(入射器空洞手前の領域: 電子銃収束力、補正コイル、バンチャー空洞、ソレノイド) ⇒ 軌道中心からずれたところで線形からずれたキック力が生じていないか?
- 他には、レーザープロファイルの一様性も確認していきたい(これは、バンチ電荷を上げるときでOK)
- 初期レーザーパルス長は 3 ps gaussianで調整する(これで、ある程度モデルと実験を合わせられるようになってきたら、スタッキングを行って長いレーザーパルスにする)
- 2015年3月17日に実施

7.7 pC, 5 MeV 入射器診断ライン輸送

- 2015年3月30日に実施
- ピーク電流 10 mA相当 (バンチ電荷 7.7 pC) で入射器5 MeVビームを診断ラインに輸送
- 以前は初期レーザーパルス長を伸ばしていたが、今回は 3 ps rms gaussianで輸送する (エミッタンスは悪化するが、初期バンチ長が明確になる)
- 設定
 - SI1 = 8.95 A
 - SL2 = 3.05 A
 - Vbuncher = 90 kV
 - Injector Eacc = 7 mV/m
 - スリットスキャナ位置でのビームサイズ: 1.4 mm
 - スリットスキャナ位置でのバンチ長; 2 ps
 - スリットスキャナ位置での規格化エミッタンス: 0.37 mm mrad
 - 5連Q、診断ラインQはオフ
- 結果
 - 7.7 pC/bunch, 3.85 pC/bunch, 0.77 pC/bunchの3つのバンチ電荷でソレノイドスキャン
 - プロファイルが可能な限り丸くなるように調整 ⇒ プロファイルの歪みは残る
 - 入射器でE = 5.46 MeVになるように調整 ⇒ 合流部Bで最大 5 A 制限に掛かる
 - E = 4.92 MeVで位相調整完了
 - 3/31に向けて、合流部入口のマッチングを実施

- 準備

- MS1, MS2, MS3, MS5, MS6にフィルターを追加(カメラが飽和しないように)

- 手順

1. バンチャーオフで立ち上げ、MS1, MS2のプロファイルの対称性を確認。
2. SL1のsolenoid scan (MS1, MS2)
3. 入射器空洞CAV#1を7 MV/mで立ち上げ(合流部を使って、エネルギー調整)
4. 入射器空洞CAV#2-3を7 MV/mで立ち上げ(合流部を使って、エネルギー調整)
5. バンチャー空洞立ち上げ(合流部で位相調整)
6. 合流部をオフにして、診断ラインへ輸送
7. バンチ電荷を上げて、エミッタンス測定(スリットスキャン)、バンチ長測定
8. バンチャー電圧を変えた時のバンチ長測定、各空洞の位相を変えた時のバンチ長測定



ここまでで終了

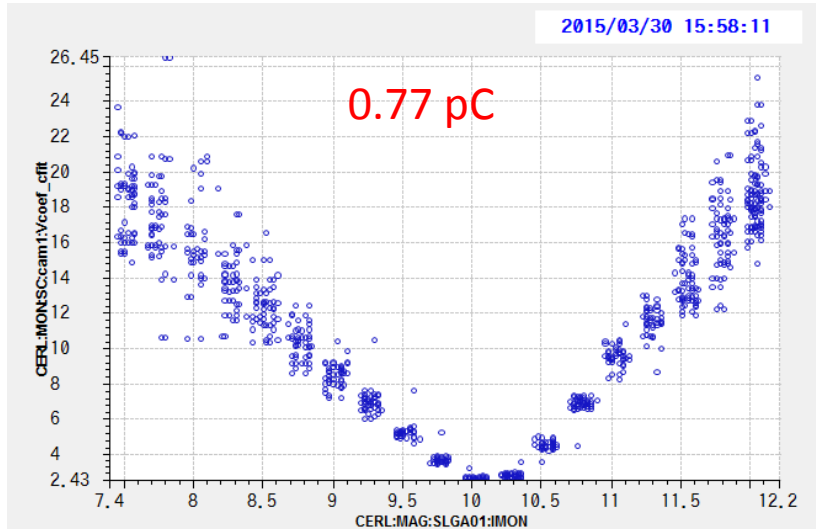
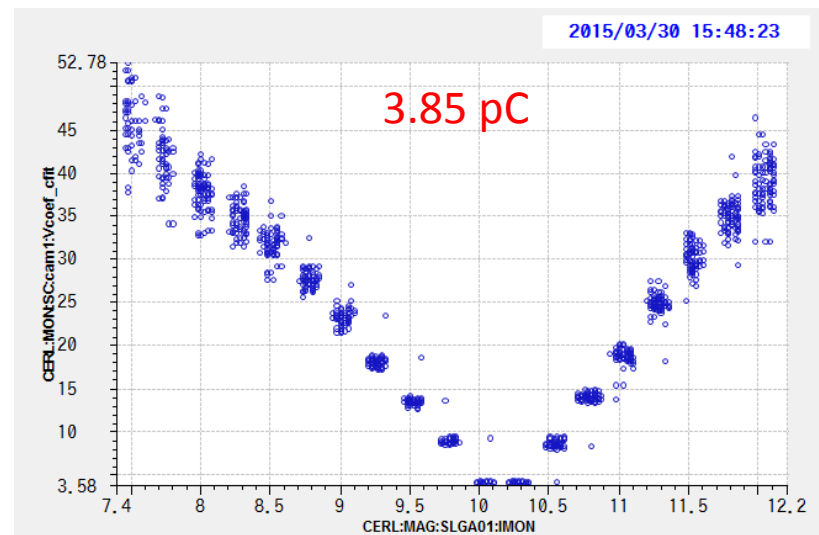
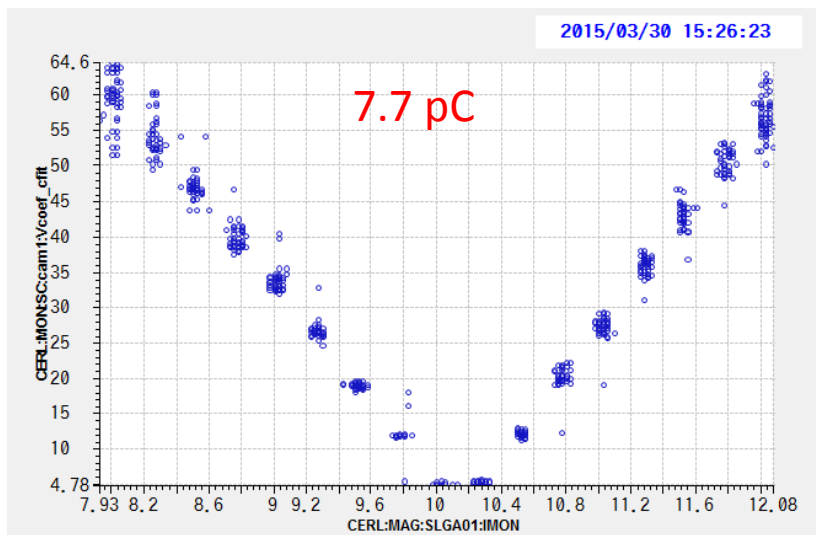
注: cam1, 2, 3にフィルターが入ったままなのでプロファイルが位です
中心通しにはもないないはず、
ただし、cam3で垂直方向のテイルが確認できない

ソレノイドスキャン時のピーク電流($f = 162.5$ MHzの場合)

7.7 pC/bunch \rightarrow 1.25 mA

3.85 pC/bunch \rightarrow 0.625 mA

0.77 pC/bunch \rightarrow 0.125 mA

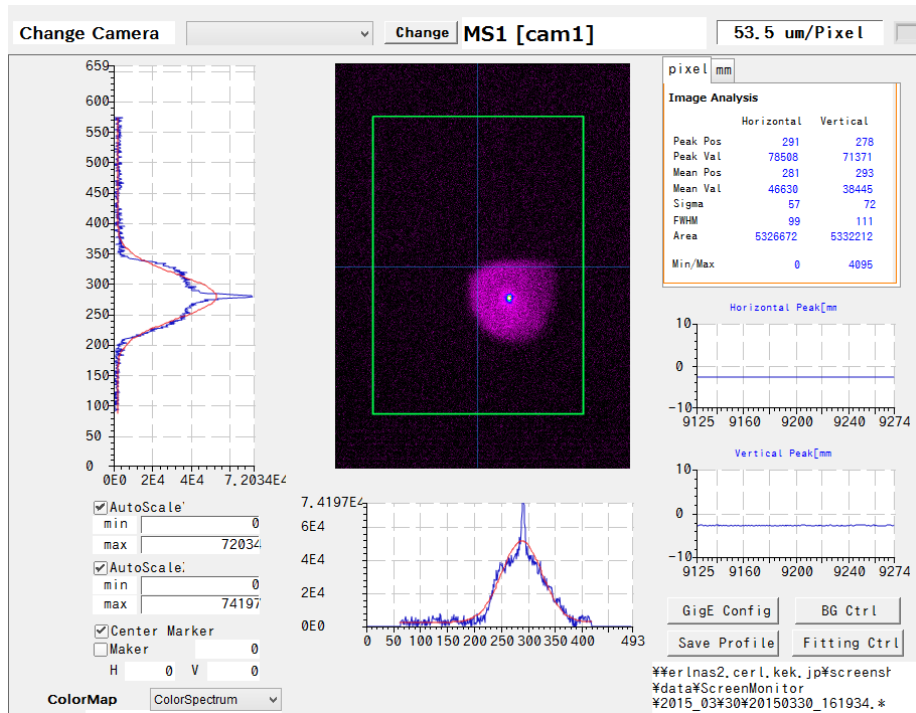


初期レーザーパルス長を伸ばさない場合の空間電荷効果の基礎データを取れた。これを元に、数値計算モデルの比較・修正を行う。
XY対称性のずれの調査も引き続き行う

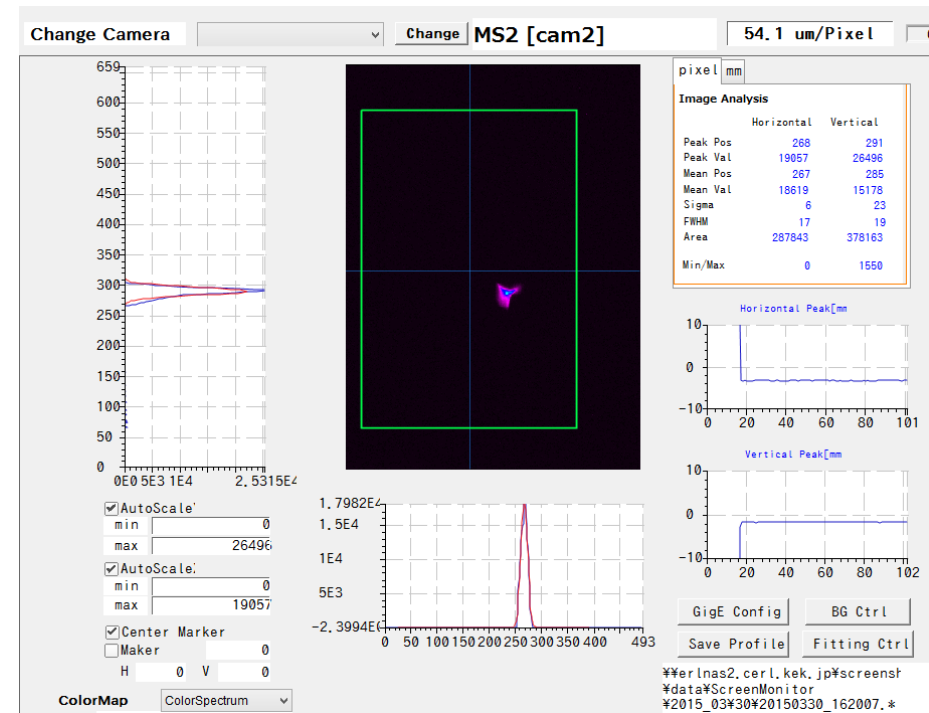
プロファイルの歪みの調査

SL1とSL2の中心を通して、プロファイルの歪みを小さくなるように調整した

CAM1



CAM2



レーザープロファイルを3/27に調整してもらい、少し改善したように見える
ただし、まだプロファイルの歪みが残っている

これまでに取得した、マッピングデータ(電子銃、ソレノイド、ステアリング)からこれらの結果を再現できるか検証する予定。

入射器空洞 5 MeV調整

5 MeV診断ライン輸送用に入射器の調整を実施した

調整結果(全エネルギー、E)

| | ターゲット | 調整結果(cam8) |
|------------|-------|------------|
| 入射器空洞CAV#1 | 2.29 | 2.29 |
| 入射器空洞CAV#2 | 3.86 | - |
| 入射器空洞CAV#3 | 5.46 | 4.93 |

BMAGPS1 = 5 A

全エネルギー 4.93 MeVに対応

現場で確認したところ、BMAGPS1 は最大 5A と判明。

最初は10A max だったはずだが、故障のため交換した電源のスペックが最大5A だったと思われる。

次の機会には、10 A電源に交換してほしい