



入射器: Phase I 運転実績と 今後の課題

Masanori Satoh (KEK Acc. Lab. Div. V)
On behalf of Linac Commissioning Group



報告内容

1. 概要
2. SuperKEKB 入射器への要求
3. Phase I コミッショニング
4. Phase II コミッショニングに向けての課題
5. まとめ

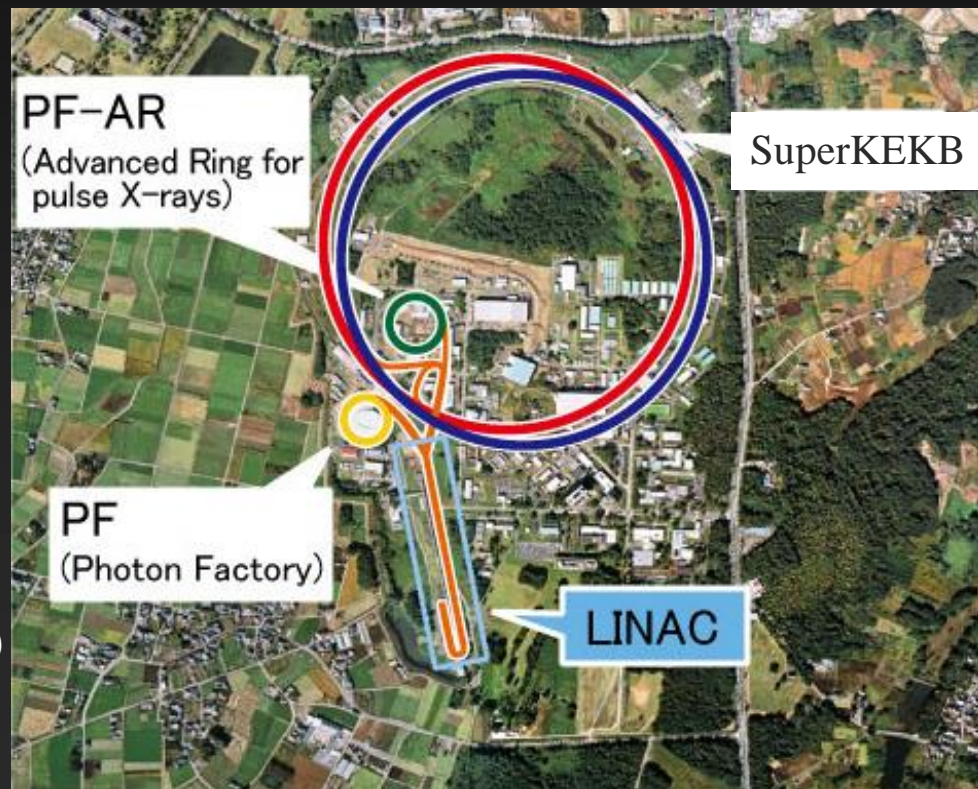
概要

- 入射器
 - 4リングヘビーム(e-/e+)供給
 - 600 m長, ビーム繰り返し: 25 Hz (最大: 50 Hz)
 - 2バンチ運転 (96 ns間隔)

- SuperKEKB MR:
 - HER: e-, 7 GeV, 1 nC
 - LER: e+, 4 GeV, 0.4 nC

- 放射光リング:
 - PF: e-, 2.5 GeV, 0.3 nC
1日3回入射(場合によりトップアップ)
 - PF-AR: e-, 3 GeV, 0.3 nC
1日3回入射

(*入射後6.5 GeVまで加速)



SuperKEKB 入射器への要求

- 低エミッタンス e^-/e^+ ビーム供給:
 - e^- : 1 nC, 300 mm·mrad (KEKB) => 5 nC, 50 (H)/20 (V) mm·mrad (Phase III)
 - e^+ : 1 nC, 1500 mm·mrad (KEKB) => 4 nC, 100 (H)/20 (V) mm·mrad (Phase III)
 - (*) Phase I: 1 nC, 低エミッタンス不要, Phase II: 2 nC, 低エミッタンス
 - 低エミッタンス光陰極RF電子銃 (Ir5Ce, 擬似進行波空洞)
 - 陽電子ダンピングリング
 - 精密機器アライメント (0.1 mm – 0.3 mm (σ))
 - 精密軌道測定および制御に基づくエミッタンス保存
- 大強度 e^+ : フラックスコンセントレータ, 大口徑Sバンド加速管
- イベントタイミングシステム (バケット選択 MR/DR)
- 高速RFモニタ, 高精度BPM読み出し系, パルスQuad, パルスステアリング
- 同時トップアップ入射 (短ビーム寿命)
 - HER/LER (+ ダンピングリング), PF, およびPF-AR



主要パラメータ

	KEKB (final)		SuperKEKB (Phase-I)		SuperKEKB (Phase-III)	
	e+	e-	e+	e-	e+	e-
ビーム	e+	e-	e+	e-	e+	e-
エネルギー (GeV)	3.5	8.0	4.0	7.0	4.0	7.0
蓄積電荷量 (A)	1.6	1.1	1	1	3.6	2.6
寿命 (分)	150	200	100	100	6	6
バンチ電荷量 (nC)	Primary e-10 → 1	1	Primary e- 8 → 0.4	1	Primary e-10 → <u>4</u>	<u>5</u>
規格化エミッタンス (mm·mrad)	1400	310	1000	130	<u>100/20</u> (Hor./Ver.)	<u>50/20</u> (Hor./Ver.)
エネルギー広がり (%)	0.125	0.125	0.5	0.5	<u>0.1</u>	<u>0.1</u>
バンチ数	2	2	2	2	2	2
ビーム繰り返し (Hz)	50		25		50	
トッパアップ	3 rings (KEKB e-/e+, PF)		n/a		<u>4+1 rings</u> (SuperKEKB e-/e+, DR, PF, PF-AR)	

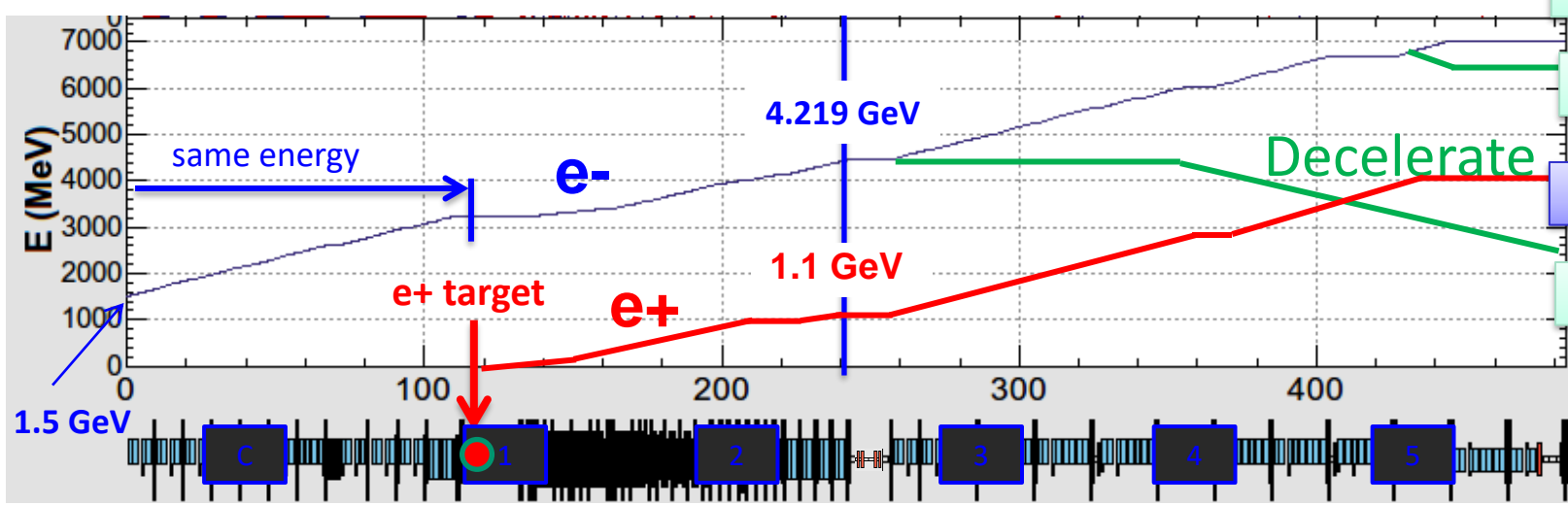
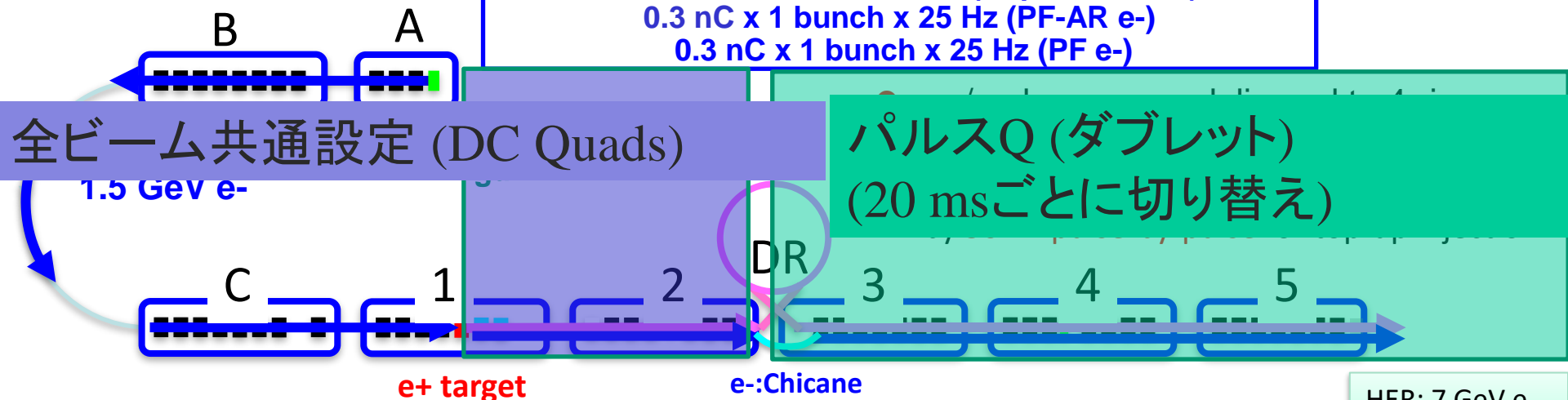


入射運転方式

4 nC (10 nC) x 2 bunches x 50 Hz (SuperKEKB e+)
 5 nC x 2 bunches x 50 Hz (SuperKEKB e-)
 0.3 nC x 1 bunch x 25 Hz (PF-AR e-)
 0.3 nC x 1 bunch x 25 Hz (PF e-)

全ビーム共通設定 (DC Quads)

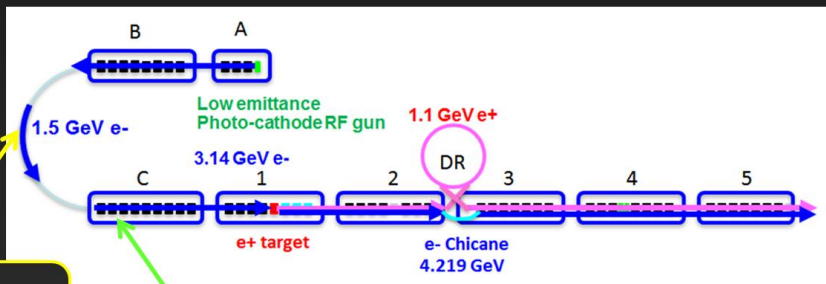
パルスQ (ダブレット)
(20 msごとに切り替え)



- HER: 7 GeV e-
5 nC x 2
- PF-AR: 6.5 GeV e-
0.3 nC x 1
- LER: 4 GeV e+
4 nC x 2
- PF: 2.5 GeV e-
0.3 nC x 1

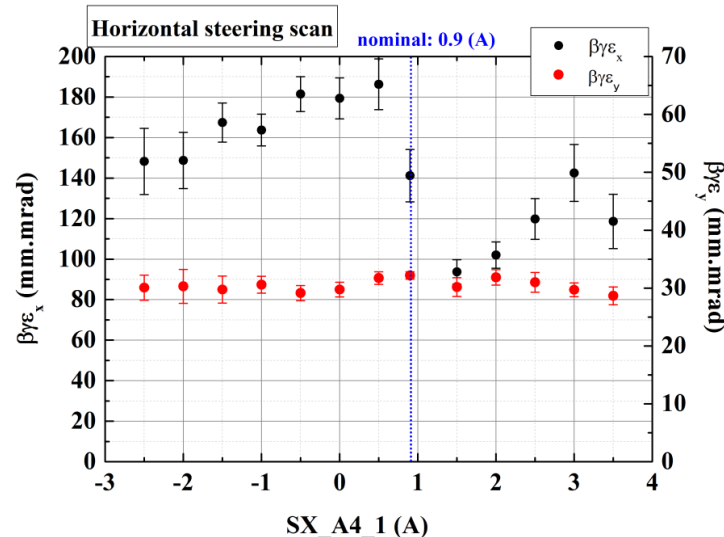
低エミッタンス保存

- 低エミッタンス電子ビーム輸送 (ダンピングリングなし)
- 精密ビーム軌道操作によるエミッタンス保存
- 計算機シミュレーションおよびビームによるフィージビリティスタディ
- ビームジッタの抑制が重要



Bunch compression

Offset injection

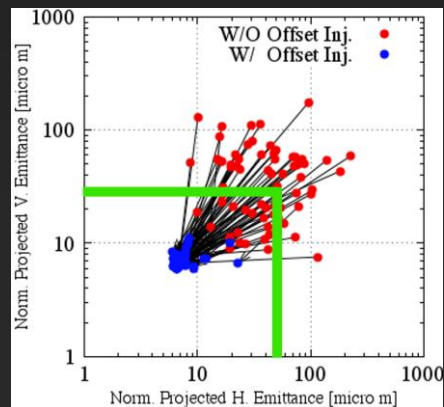


- ビームスタディ -

- 熱電子銃
- Aセクタにけるステアリング制御
- Bセクタ終端においてエミッタンス測定

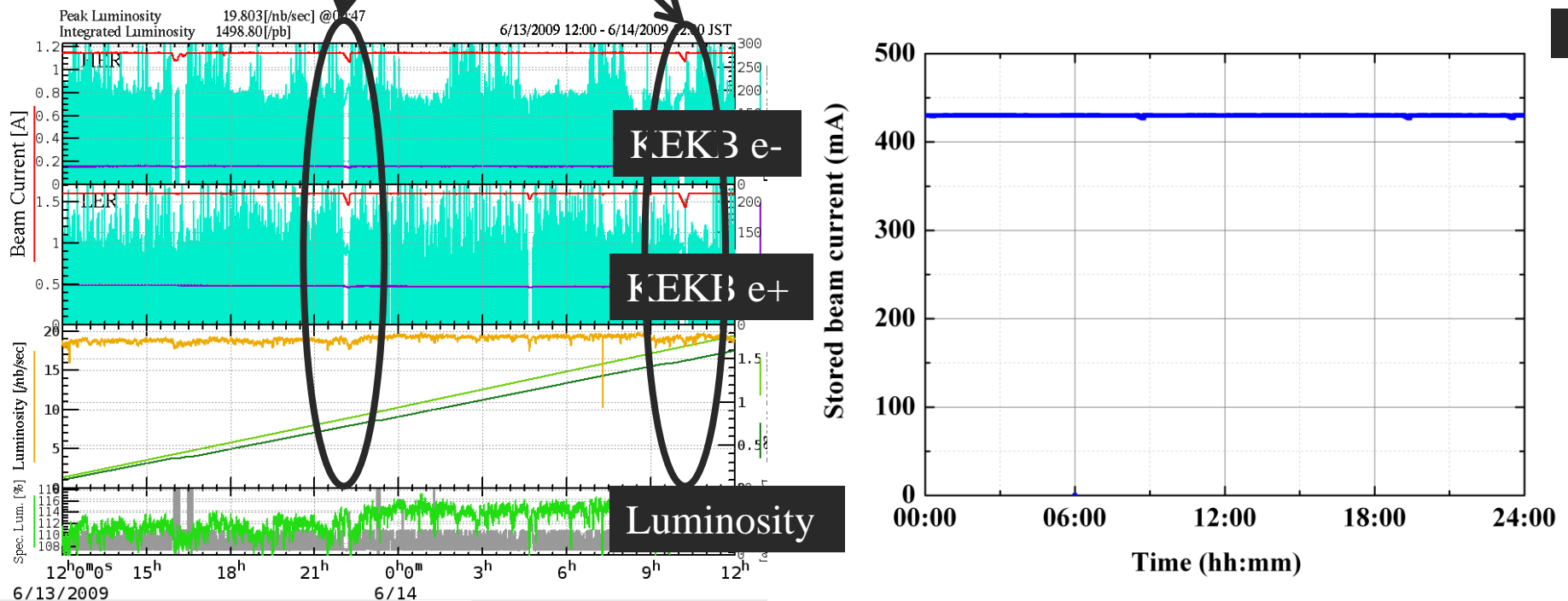
- 計算機シミュレーション -

- Q, 加速管ミスアライメント: 0.3 mm (σ)
- 50種の異なるミスアライメント
- 全種補正可能



同時トップアップ入射 (3リング)

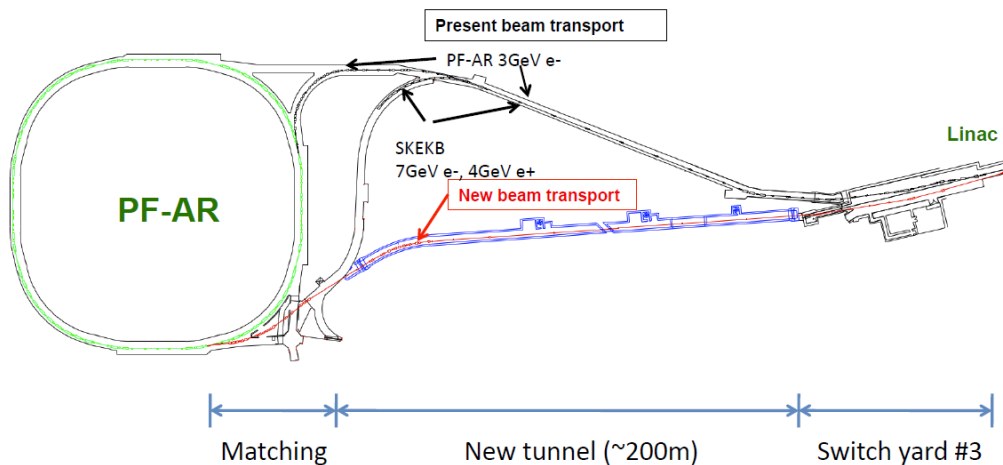
- PF-AR入射中(1日2回,各20分)KEKBトップアップが中断される
- 短ビーム寿命のSuperKEKBでは大きな問題になる



PF-ARを含めた同時トッパアップ入射

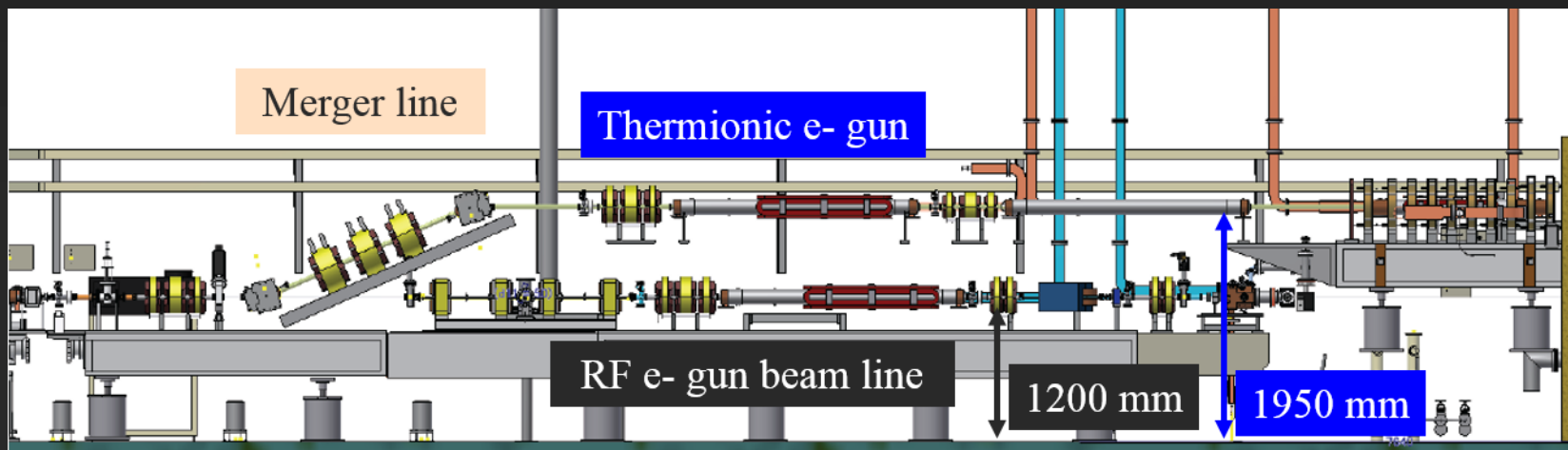
- PF-AR/KEKBは, ビーム輸送路を共有
- 既存のトンネルスペースの問題
- PF-AR直接入射路は, 2014年5月にトンネル工事完了
- 振り分けライン(入射器第3スイッチヤード)の工事
- 2017年2月にコミッショニング予定

New beam transport for PF-AR



入射器 Phase I コミッショニング

- 熱電子銃の再インストール(2015年4月)
 - 陽電子生成用1次電子生成(10 nC)のため
 - RF電子銃での最大生成電荷量は 5.6 nC
 - RF電子銃ラインはそのまま保持 (1200 mm)
 - 熱電子銃用ビームラインを新設 (1950 mm)
 - 熱電子銃コミッショニングは2015年5月に完了
 - SuperKEKB MR (HER/LER) Phase Iコミッショニングは, 熱電子銃を用いて開始
 - 6/8(金) ~ 6/18(土):
 - **RF電子銃を用いたHER入射** (LER入射は熱電子銃のまま)
- (*) 6/18(土) 13:30: 空調機からの水漏れにより, 発信器が停止した。

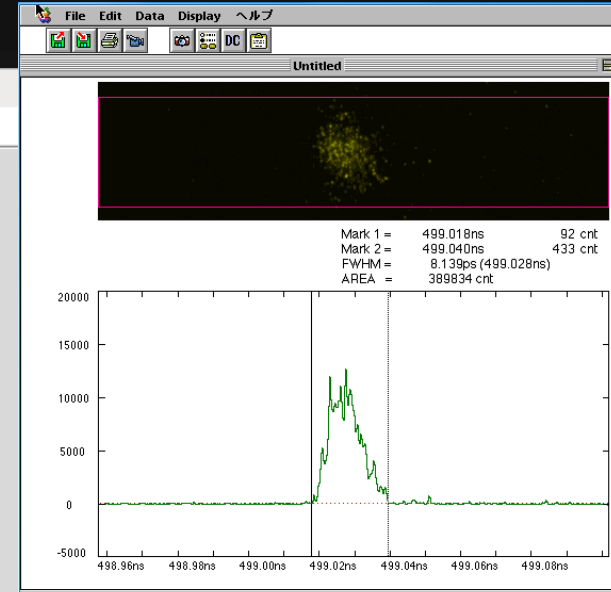
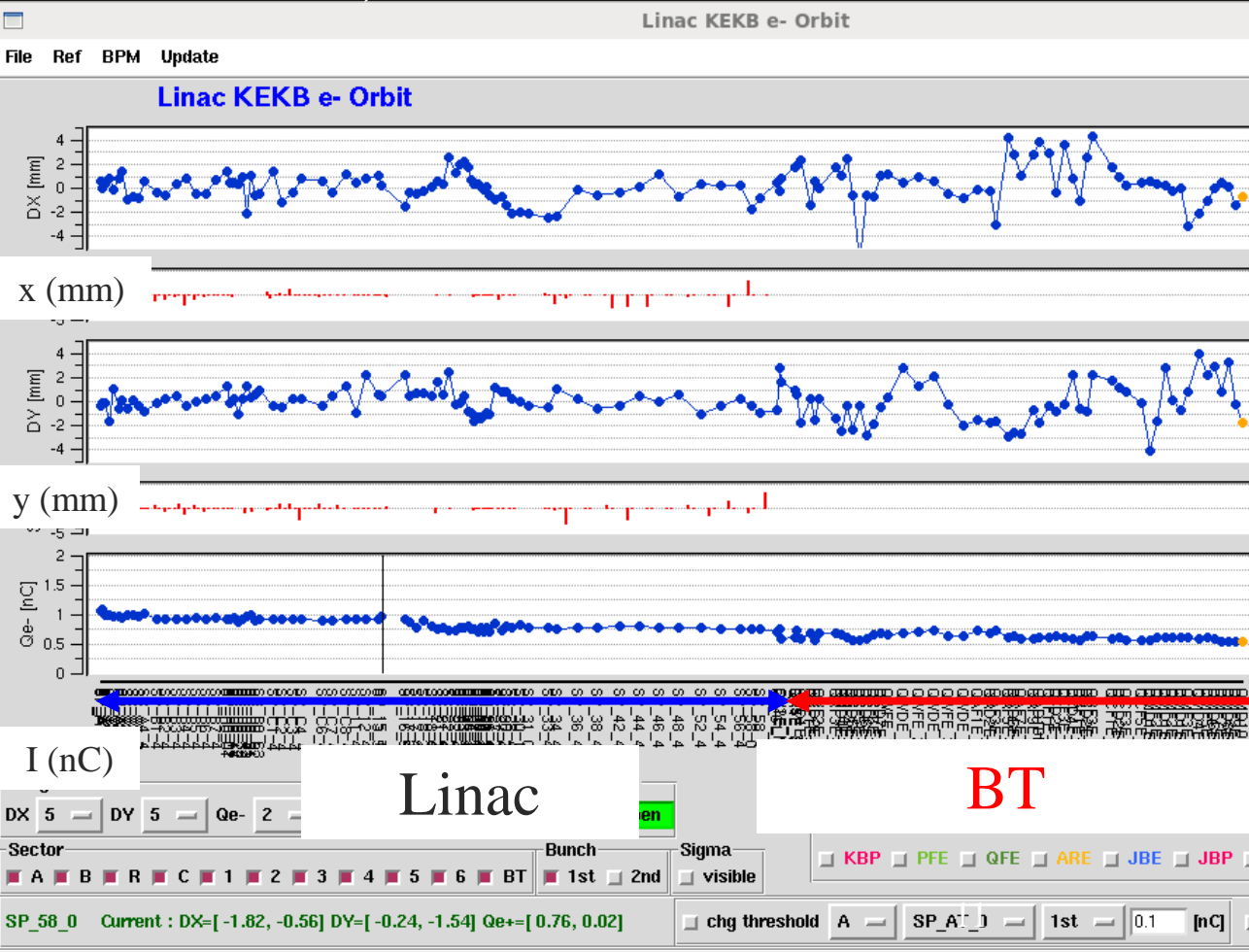




熱電子銃 (HER入射)

運転例:

- 1 nC (電子銃), 1 nC (入射器終端), 0.5 nC (BT終端)
- 12.5 Hz, 1バンチ



First bunch
~ 8 ps
(streak camera measurement)

Q(1st): 0.536 nC
Q(2nd): 0.024 nC

Average10 2016/05/21 03:26:14

KBP PFE QFE ARE JBE JBP RFE SFE ZRE Set Ref

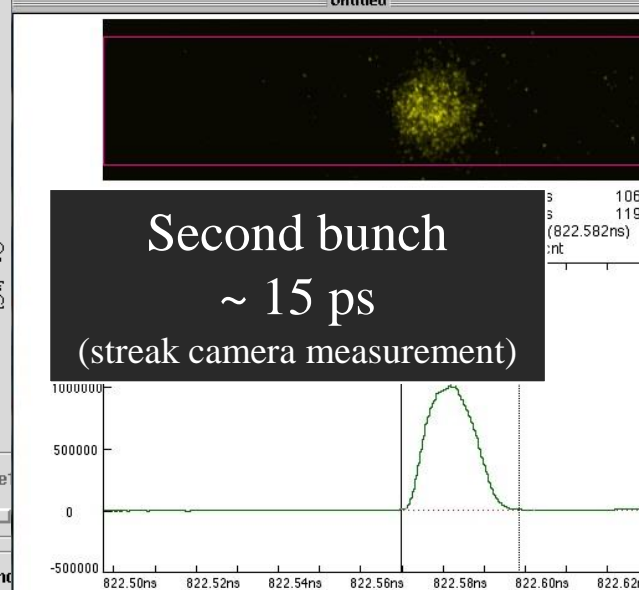
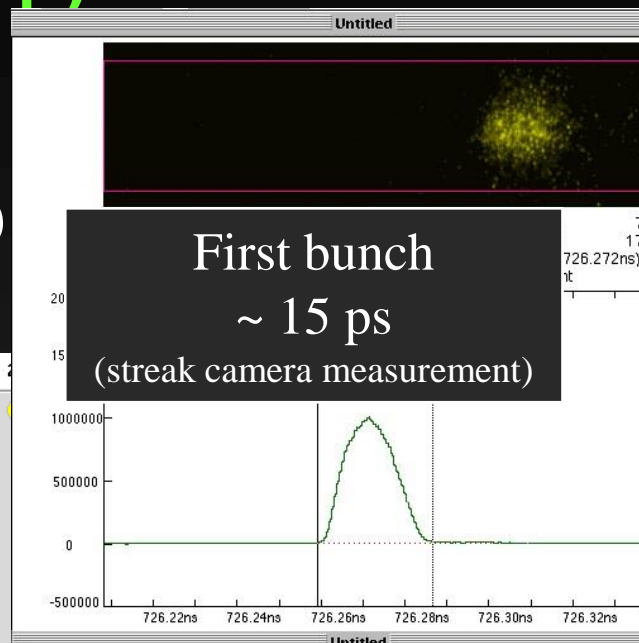
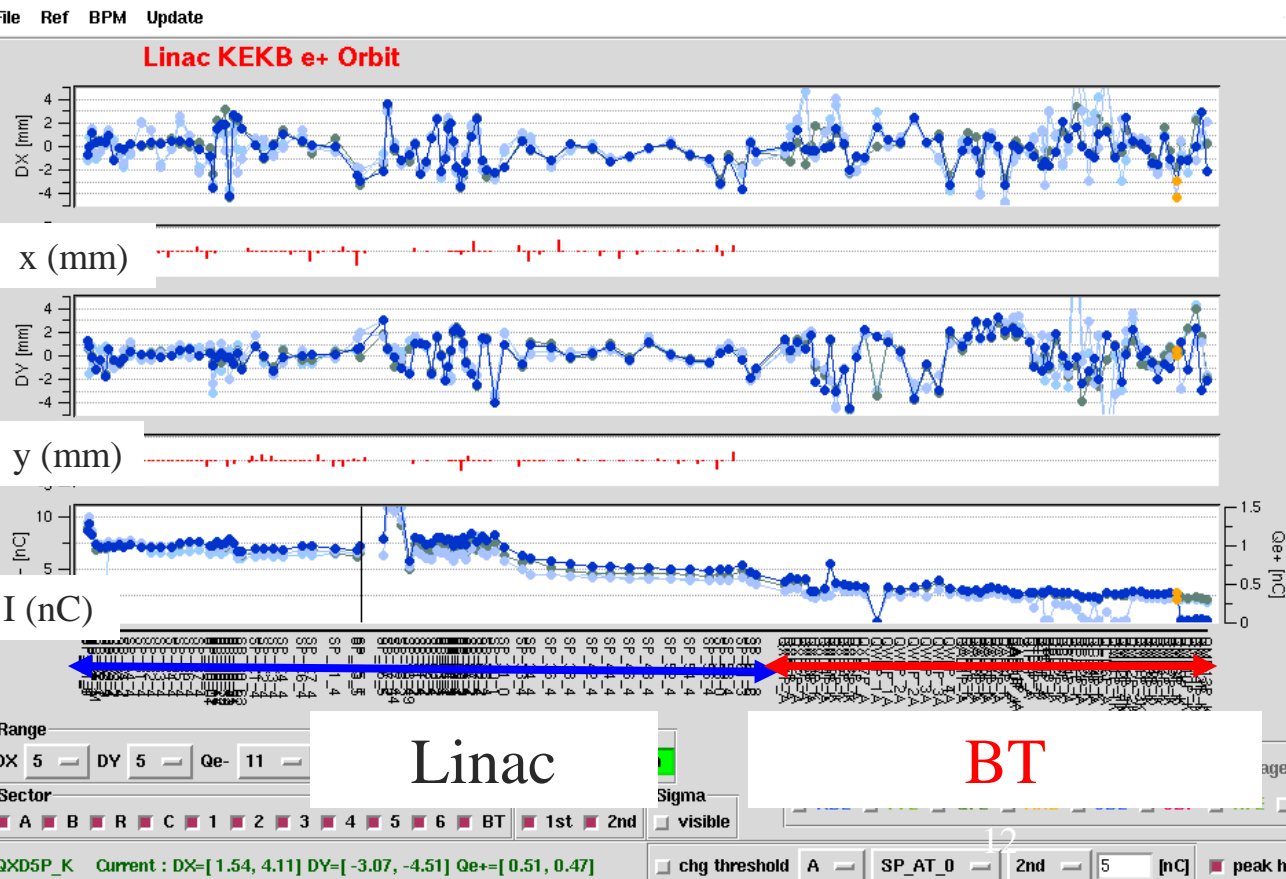
SP_58_0 Current : DX=[-1.82, -0.56] DY=[-0.24, -1.54] Qe+=[0.76, 0.02] chg threshold A SP_A_'_ 1st 0.1 [nC] peak hold (60sec) resize



熱電子銃 (LER入射)

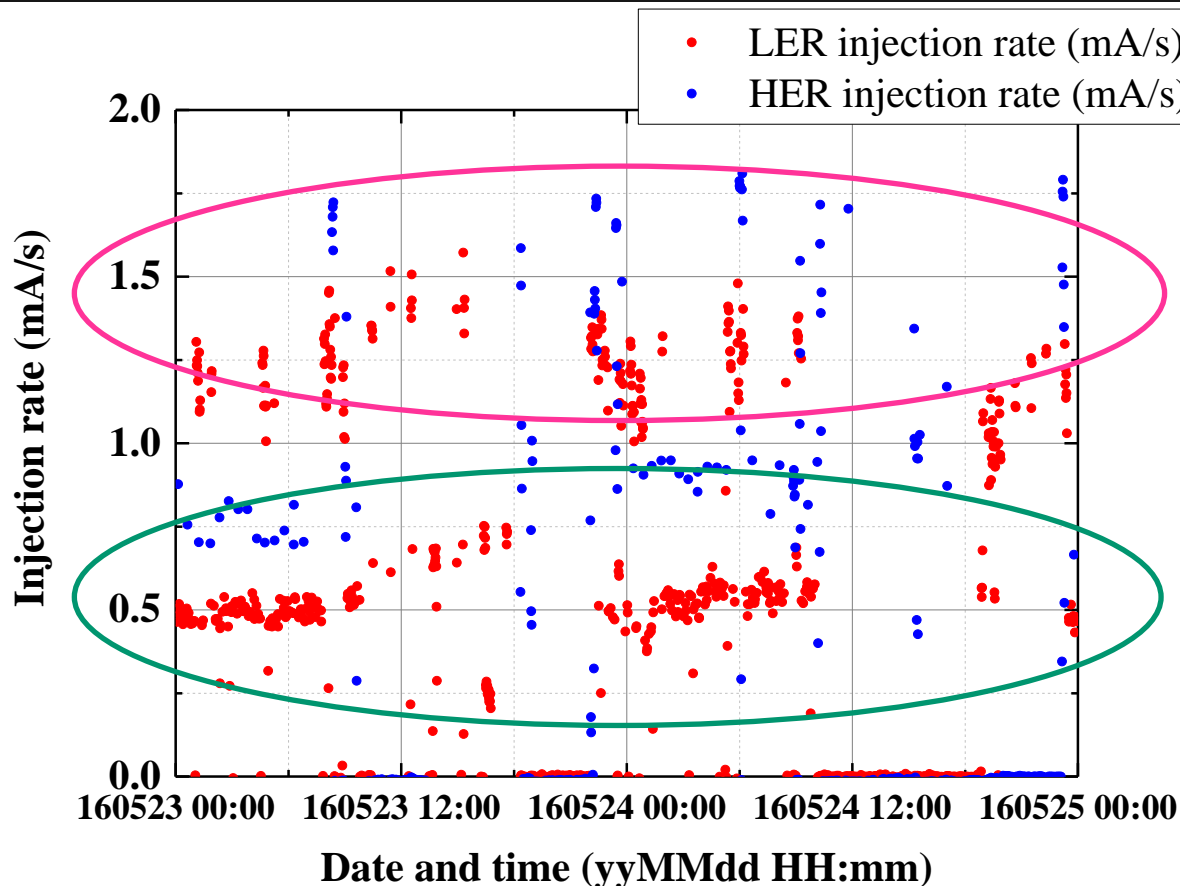
運転例:

- 1次 e⁻: 10 nC (電子銃), 7 nC (e⁺標的)
- e⁺: 0.7 nC (入射器終端), 0.4 nC (BT終端)
- 25 Hz, 2バンチ



熱電子銃 (MR入射)

- LER:
 - 入射率: ~ 0.5 mA/s, 入射効率: 70% \sim 100%
- HER:
 - 入射率: ~ 0.8 mA/s, 入射効率: 80% \sim 100%



2バッチ入射

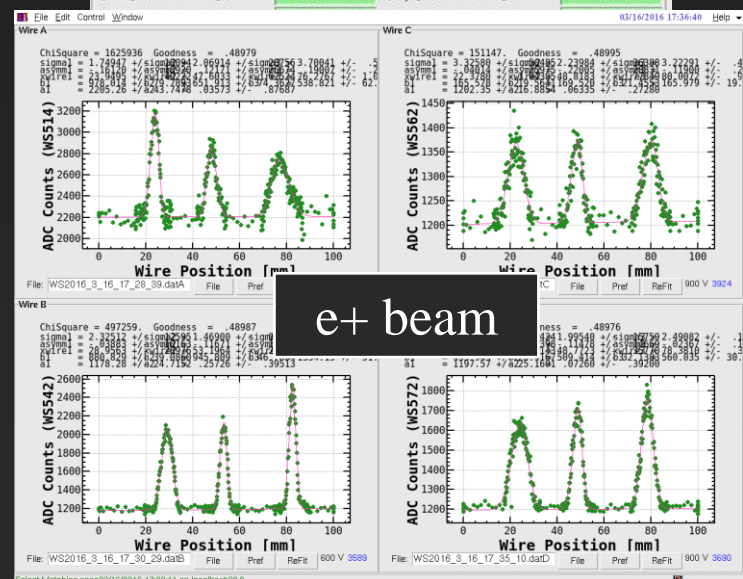
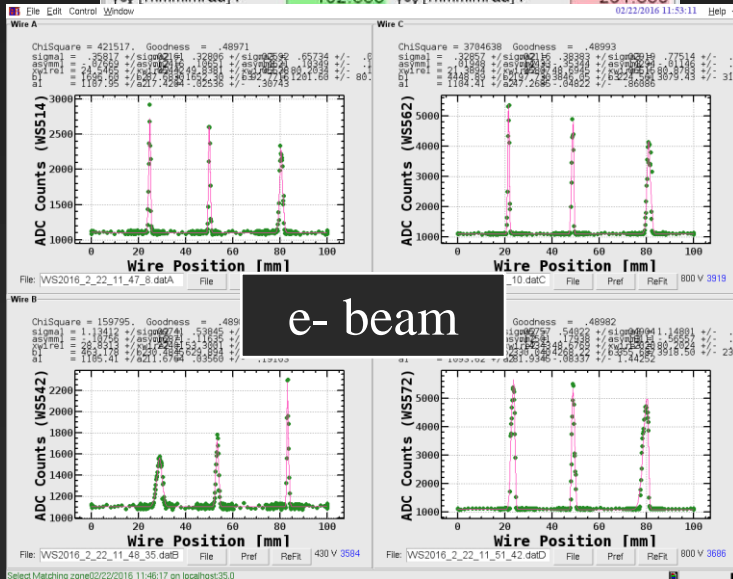
1バッチ入射

熱電子銃 (エミッタンス測定)

- マルチワイヤスキャナ (5セクタ)
- e-ビーム: $\epsilon_{nx} \sim 160$, $\epsilon_{ny} \sim 300$ (mm·mrad)
- e+ビーム: $\epsilon_{nx} \sim 1000$, $\epsilon_{ny} \sim 1200$ (mm·mrad)

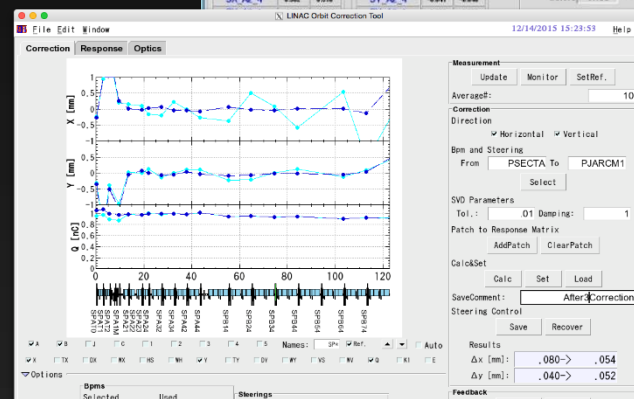
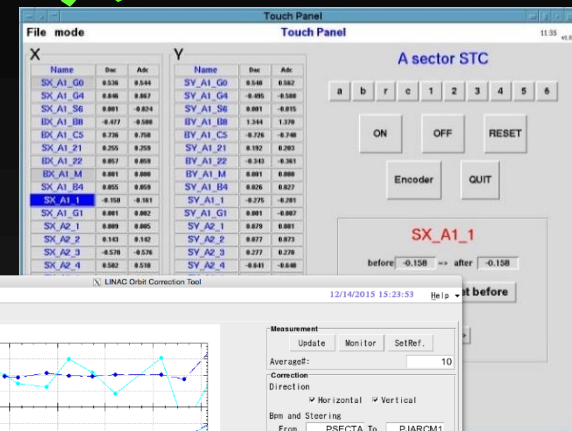
β_x @GV584 [m] :	44.420	β_y @GV584 [m] :	13.575
α_x @GV584 :	2.902	α_y @GV584 :	1.019
ϵ_x [m] :	1.1866E-8	ϵ_y [m] :	2.1267E-8
$\Delta\epsilon_x$ [m] :	2.2352E-9	$\Delta\epsilon_y$ [m] :	5.2326E-9
$\gamma\epsilon_x$ [π.mm.mrad] :	162.553	$\gamma\epsilon_y$ [π.mm.mrad] :	291.330

β_x @GV584 [m] :	15.334	β_y @GV584 [m] :	7.462
α_x @GV584 :	1.044	α_y @GV584 :	.386
ϵ_x [m] :	1.3245E-7	ϵ_y [m] :	1.4993E-7
$\Delta\epsilon_x$ [m] :	2.2202E-7	$\Delta\epsilon_y$ [m] :	2.4355E-8
$\gamma\epsilon_x$ [π.mm.mrad] :	1036.782	$\gamma\epsilon_y$ [π.mm.mrad] :	1173.614



コミッショニングツール

- 全パラメタはEPICS PV経由にて制御可能
 - ~ 150 IOC_s
- パラメタロギング: Channel Archiver, CSS Archiver
 - 42000 PV_s
 - CLIおよびWebベースデータブラウザ
- EPICS CSSアラームによる異常データ監視
- SAD, Python, CSSベースのツール群
- パラメタ管理ツール
- モデルおよび測定レスポンスを基にした軌道補正/FB
- エネルギーFB用 EPICS IOC
- エネルギー広がリモニタおよびFB
- 同期BPM測定ツール (Shot ID)
- 高速RFモニタによる同期測定ツールの開発および同期BPM測定との連携
- オンライン解析ツール

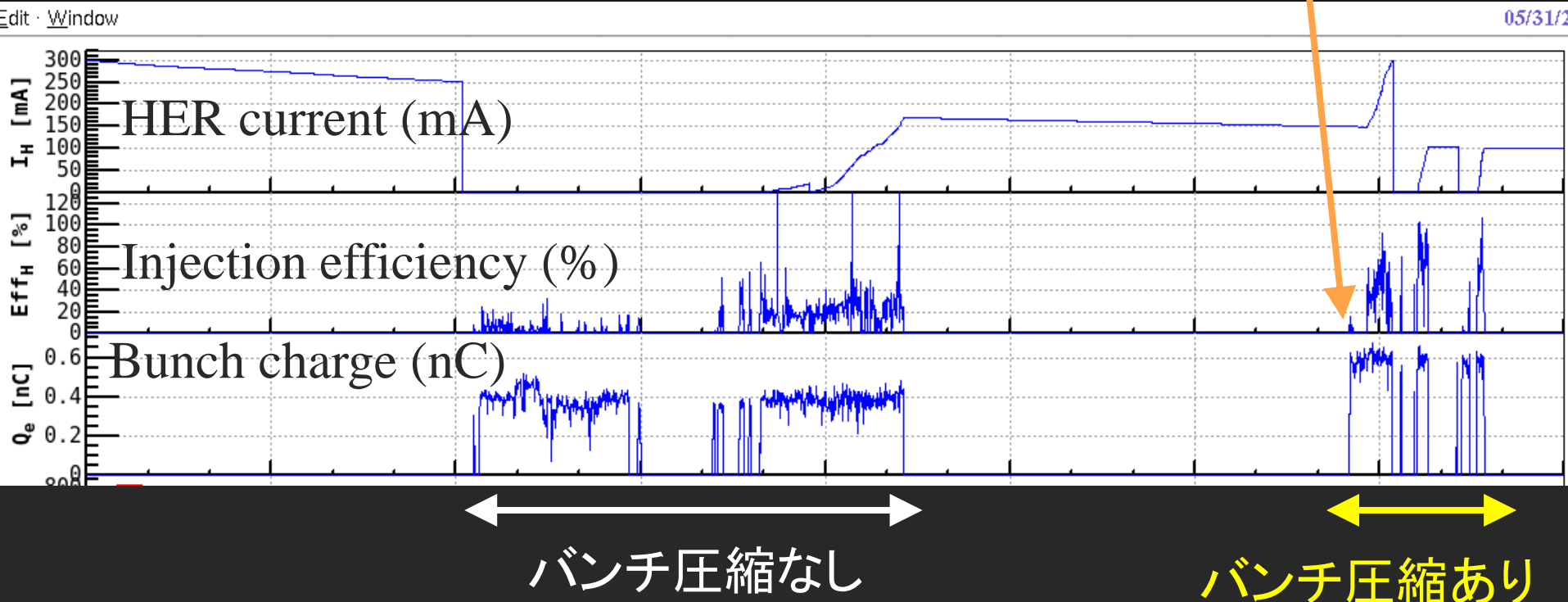




RF電子銃によるMR入射

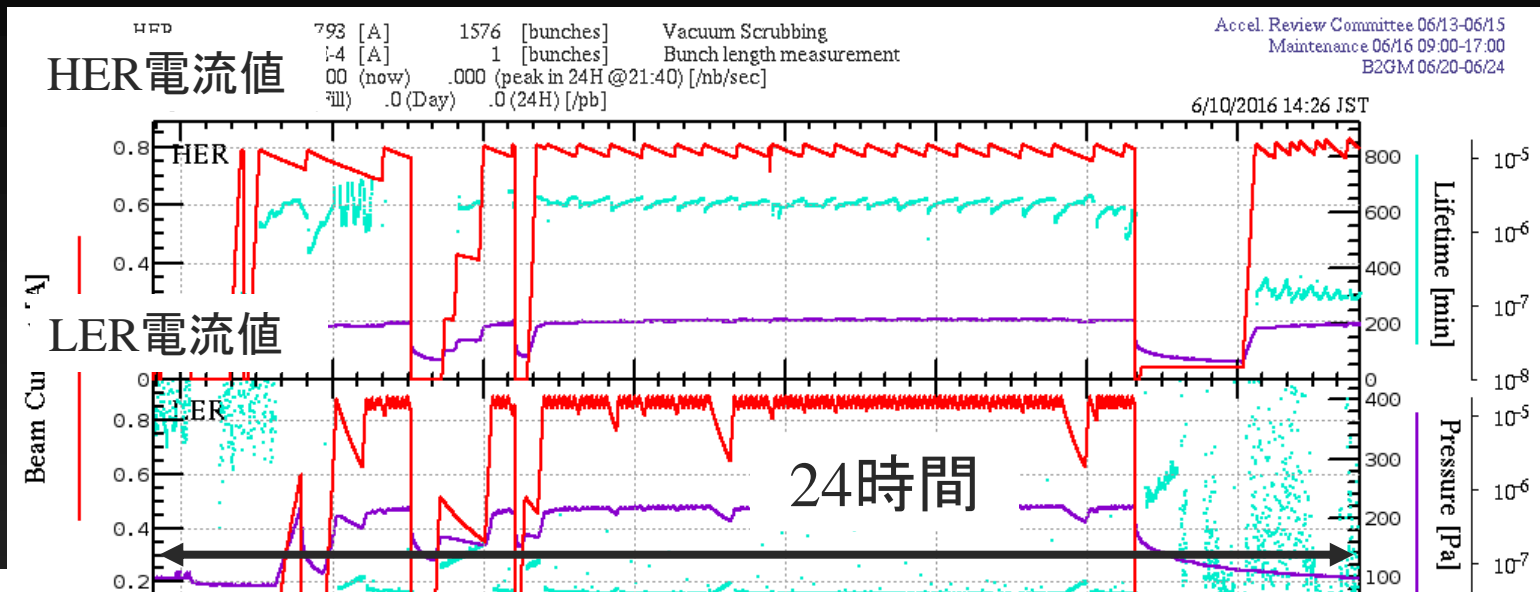
- A1ユニット試験でのバンチ圧縮後, 入射効率はほぼ100%を達成した。

Injection tuning

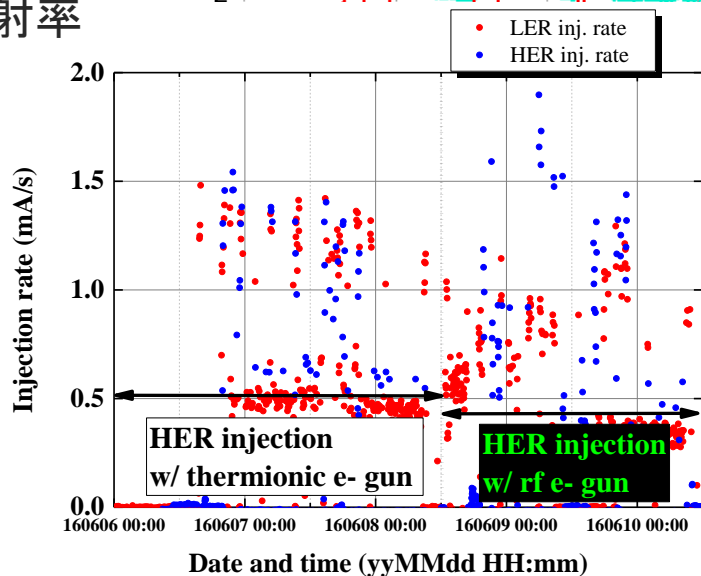




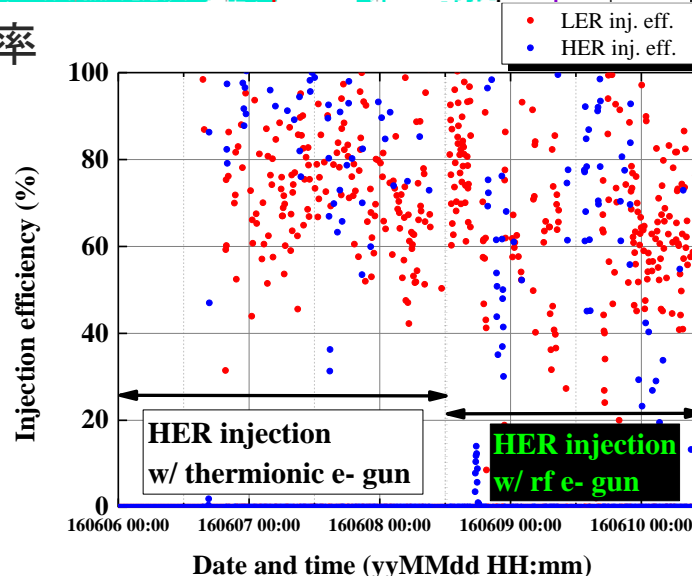
RF電子銃による安定なHER入射



入射率



入射効率

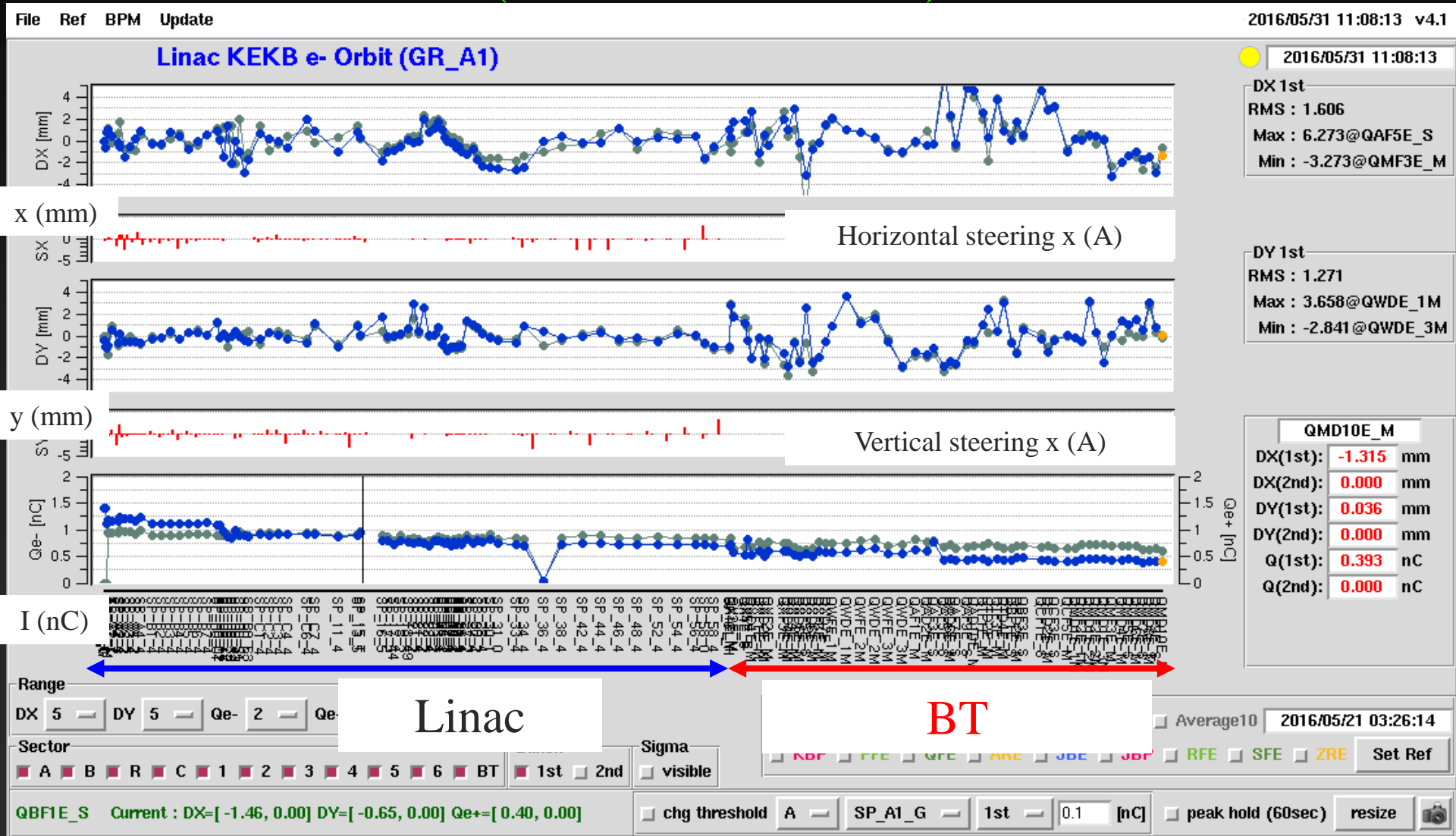




入射器: Phase I 運転実績と今後の課題



RF電子銃によるビーム軌道 (バンチ圧縮なし)

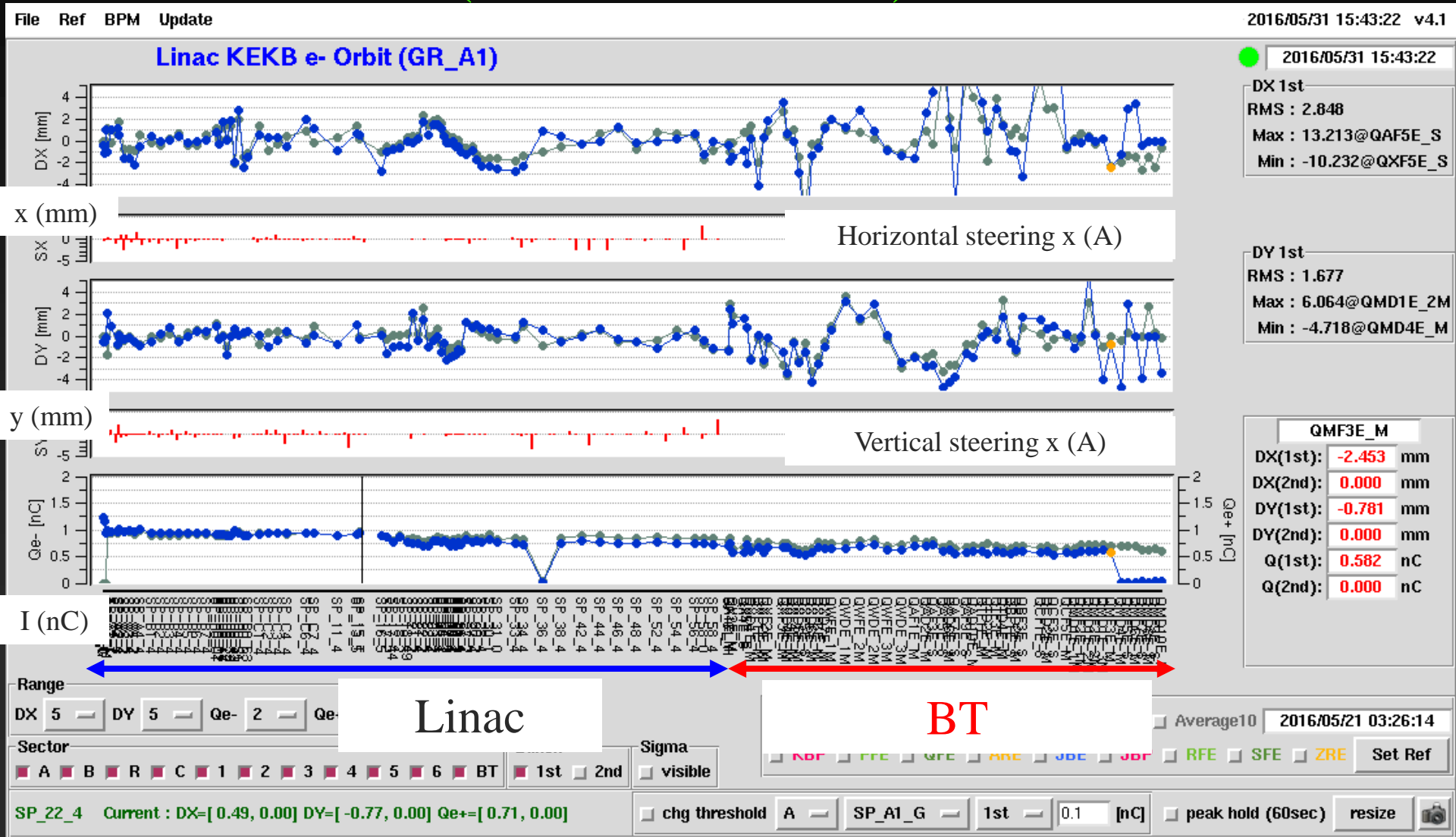




入射器: Phase I 運転実績と今後の課題



RF電子銃によるビーム軌道 (バンチ圧縮あり)



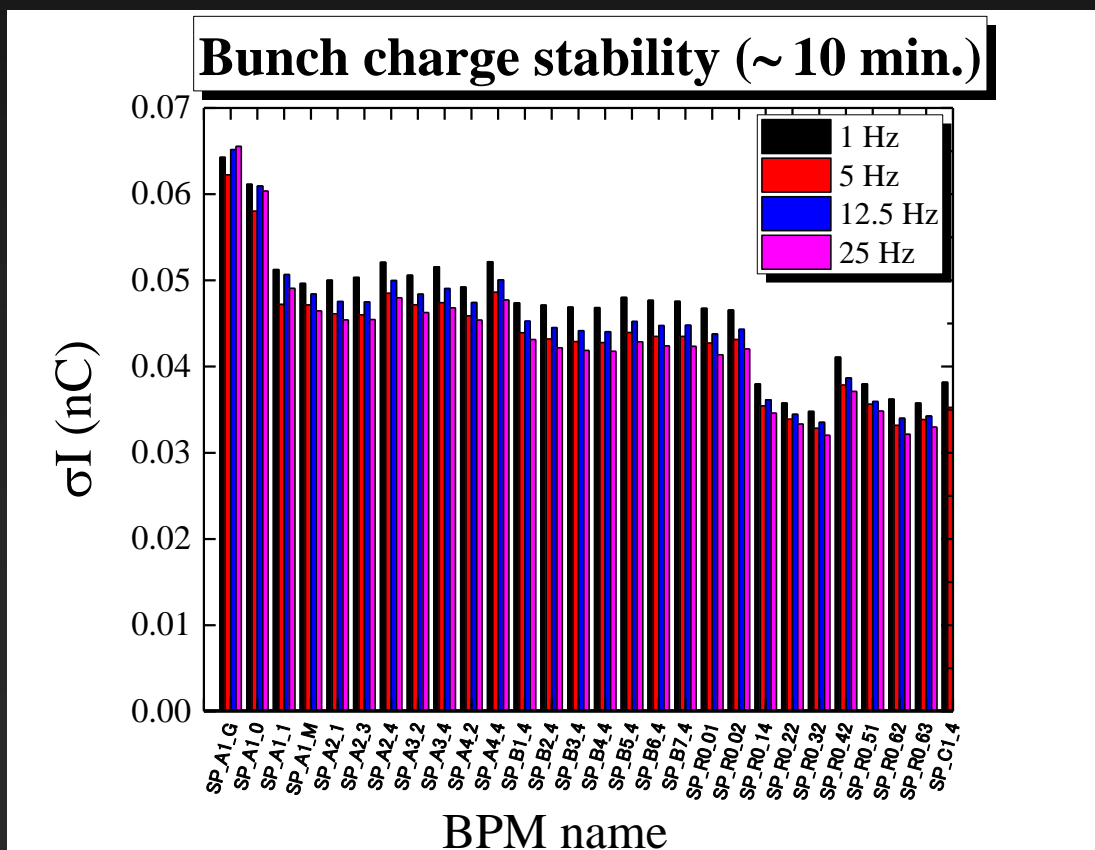
エミッタンス (RF電子銃)

- RF電子銃を用いたMR入射 (2016年5月31日(金))
- バンチ電荷量 1 nC (エミッタンス保存無し)
- Qスキャン(Qscan)およびマルチワイヤスキャナ(WS)によるエミッタンス測定
- Qスキャン測定は, プロファイルモニタおよびトリガ同期機能付きGbEネットワークカメラを使用

測定場所	水平方向 $\epsilon_{n,x}$ (mm·mrad)	垂直方向 $\epsilon_{n,y}$ (mm·mrad)
A1ユニットシケイン (Qscan)	28.3	26.4
A1_M (Qscan)	20.3	17.7
Bセクタダンプ (Qscan)	48.5	21.7
Cセクタ (WS)	100 ± 138	34.2 ± 16.5
5セクタ (WS)	106 ± 24.9	76.5 ± 38.9
BT (WS)	211 ± 110.6	133 ± 22.2

バンチ電荷量安定性 (RF電子銃)

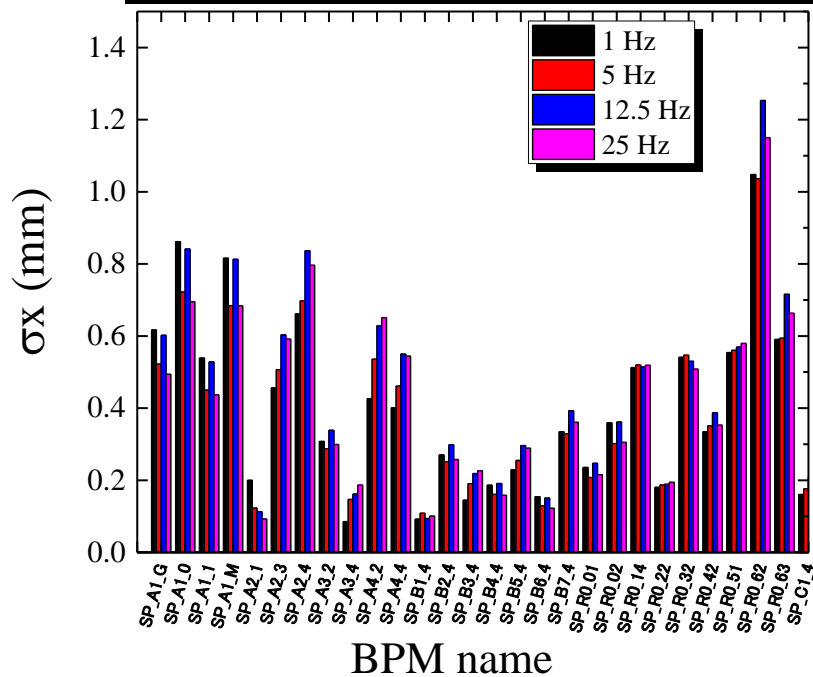
- RF電子銃を用いたHER入射: 7/8(金)~
- バンチ電荷量の変動は4% ~ 5%. (~ 20% in 2014)
 - 1% ~ 2% (熱電子銃)
- バンチ電荷量の変動は, ビーム繰り返しに依存しない



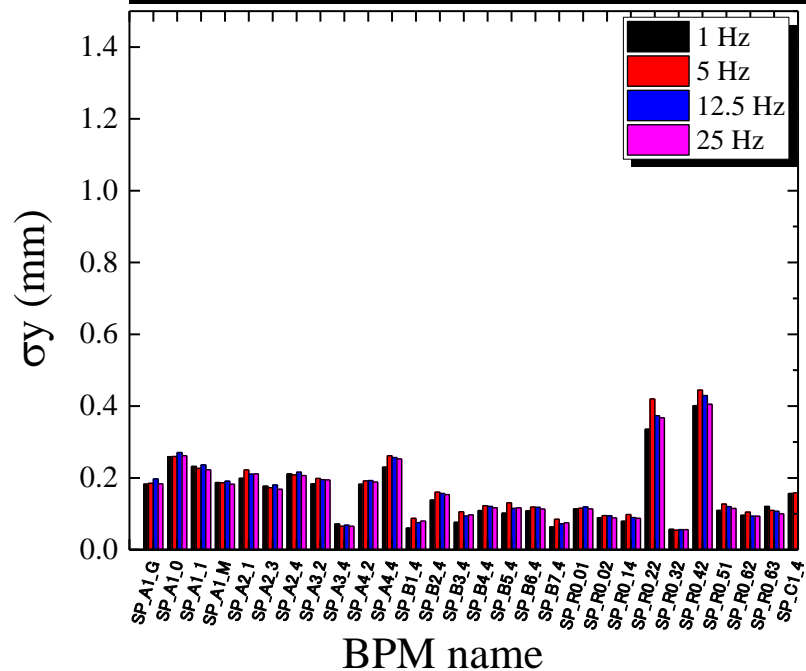
ビーム位置安定性 (RF電子銃)

- 位置安定性は, ほぼ熱電子銃ビームと同等
- 水平方向は垂直方向より変動が大きい
- $\sigma_{x,y}$: 0.1 mm ~ 0.2 mm (熱電子銃)

Horizontal position stability (~ 10 min.)



Vertical position stability (~ 10 min.)



Phase II コミッショニングに向けての課題

- 低エミッタンスビームの確立 (2 nC, 20 mm·mrad)
 - RF電子銃 (2 nC, 10 mm·mrad)
 - プレアライメントおよび床変動への対抗策
 - 低エミッタンス保存
 - 高精度BPM読み出し系への更新 (91台中36台更新). $\sigma \sim 50 \mu\text{m} \Rightarrow 5 \mu\text{m}$)
 - 低エミッタンス軌道探索
 - **ビームジッタ源の特定および除去**
 - コミッショニングツールの整備
- 大強度陽電子生成
 - 12 kA運転に向けた新フラックスコンセントレータ (ワークハードニング処理) の設置 (2016年秋)
- 同時トップアップ運転 (HER, LER (+ damping ring), PF, PF-AR)
 - 新PF-ARビーム輸送路のコミッショニング (2017年2月)
 - パルスQ (30台), パルスステアリング (36台) の設置 (2017年夏)
 - 安全系システムの改修 (同時トップアップ運転に向けて)

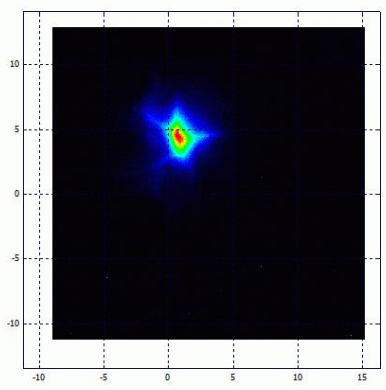
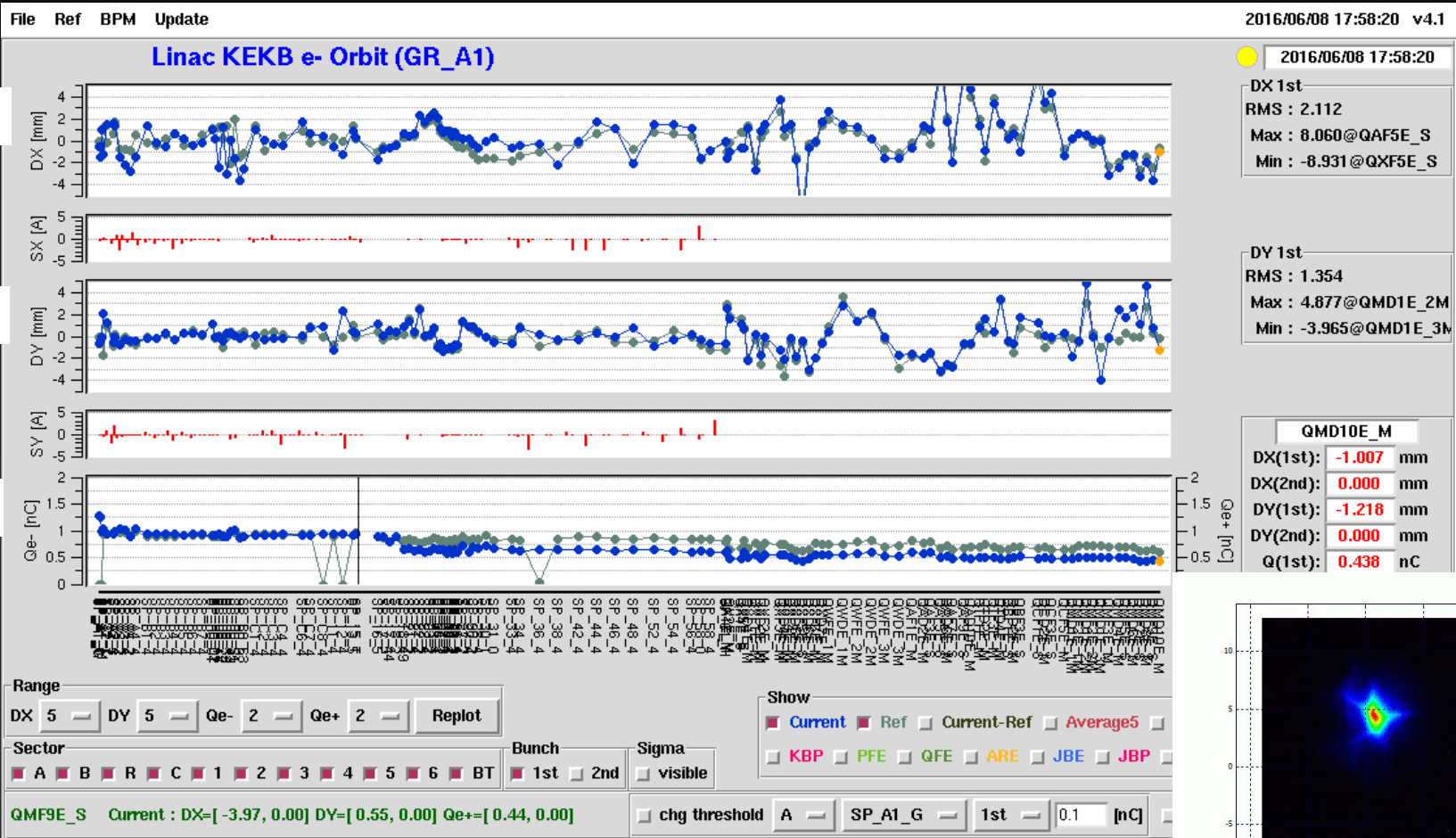


軌道不安定性 (RF電子銃)

x (mm)

y (mm)

I (nC)



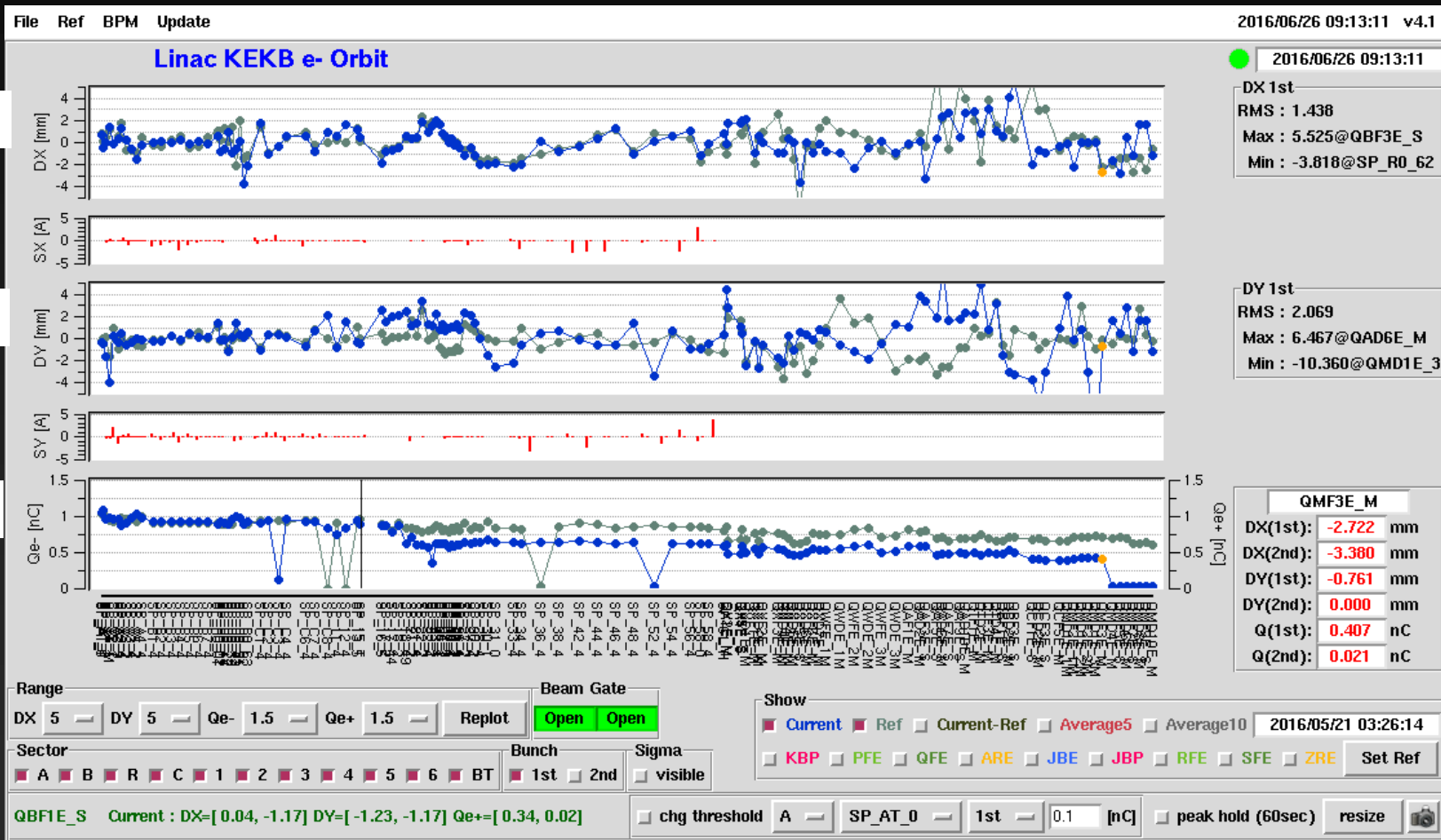


軌道不安定性 (熱電子銃)

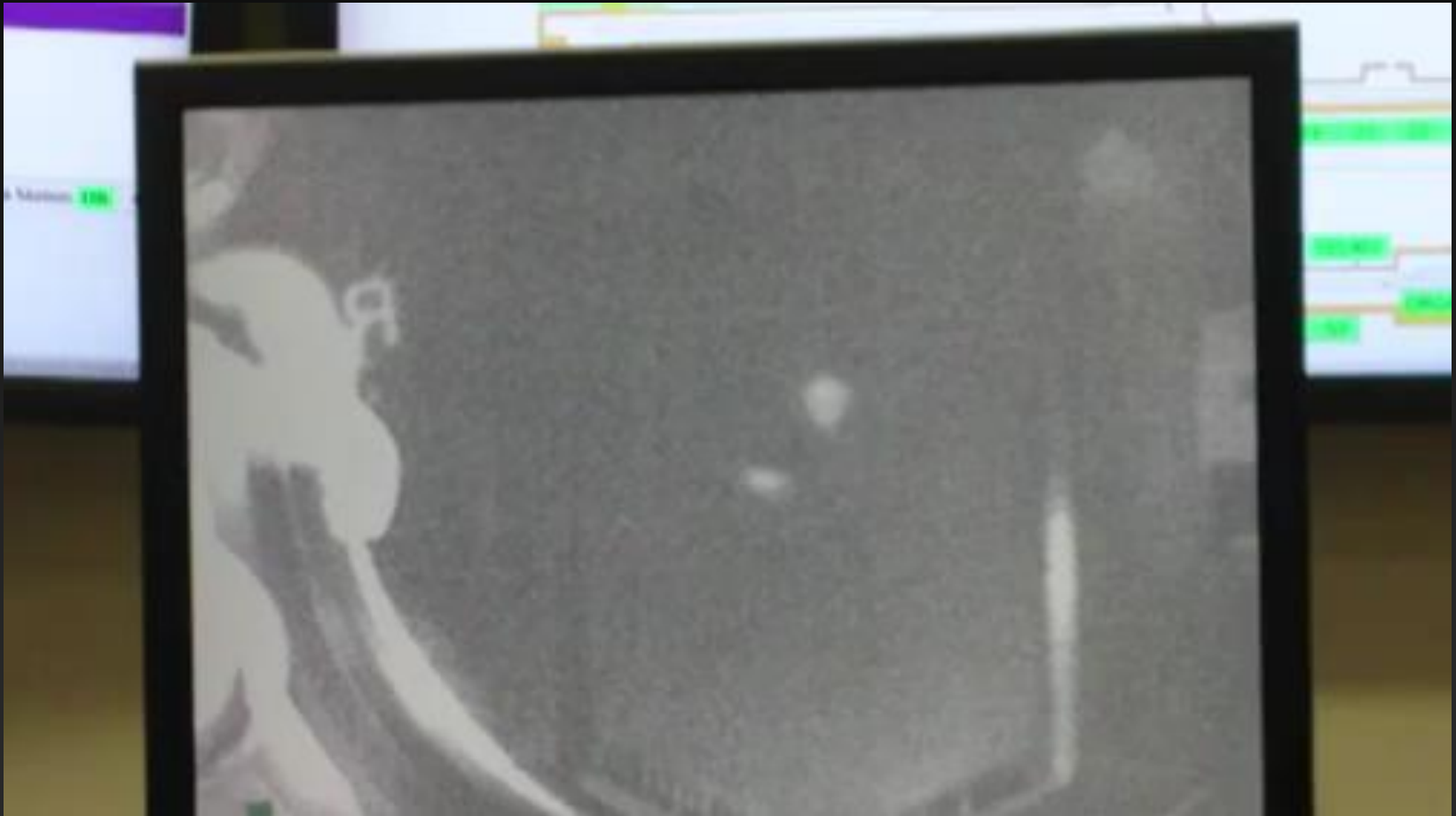
x (mm)

y (mm)

I (nC)



パルスQビーム試験



まとめ

- Phase I コミッショニングに向けた熱電子銃の再設置をおこなった。
(2015年5月)
- SuperKEKB MR Phase I コミッショニングは, HER/LER入射ともに熱電子銃を用いて開始し, 大きな問題も無く終了した。
- RF電子銃を用いたMR入射に初めて成功し (2016年5月31日(火)), 連続的に入射をおこなった。
- Phase II コミッショニングに向けて, 残された課題を一つずつ解決していく。

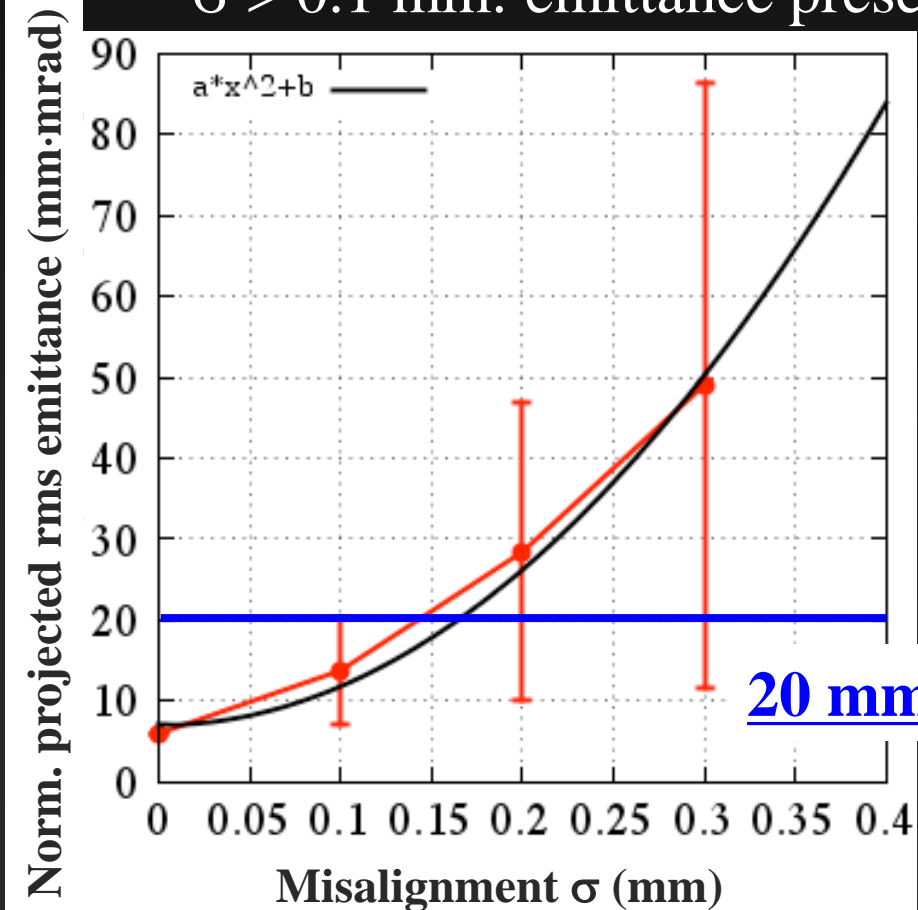


Backup



Emittance growth due to component misalignment

- Simulation results from 100 different seeds.
- Misalignment of Quadrupole magnets and Accelerating structure:
 - $\sigma < 0.1$ mm: $\beta\gamma\epsilon$ 20 mm·mrad is almost satisfied.
 - $\sigma > 0.1$ mm: emittance preservation is required by some methods.



<Emittance growth>

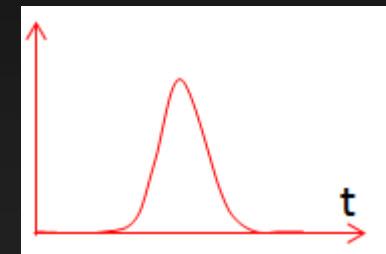
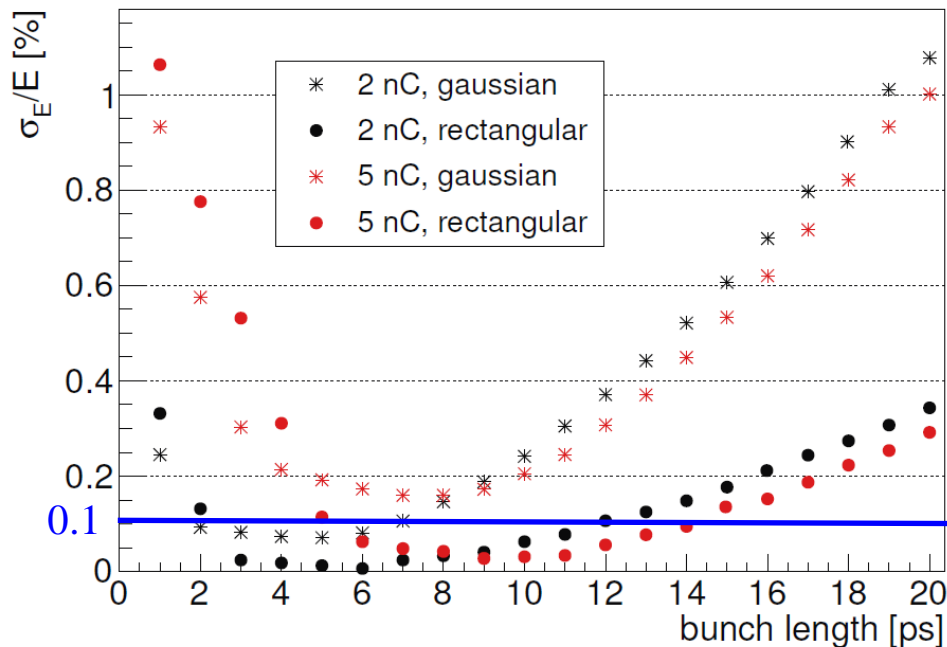
- quadratic curve as a function of misalignment
- final emittance depends on error seed

Simulation

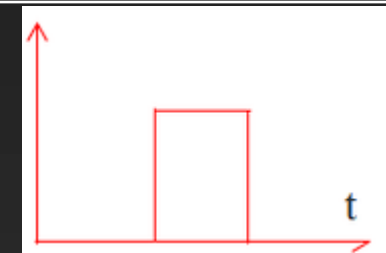
SAD code, Elegant
Initial bunch charge: 5 nC
Initial emittance: 6 mm·mrad
Initial bunch length: 10 ps (FWHM)
Initial energy spread : 0.4%
Initial beam energy: 20 MeV
Uniform longitudinal beam distribution

Energy spread requirement

- For the synchrotron phase space injection, small energy spread (0.1%) is required.
- A rectangular beam distribution in the longitudinal direction is required for the beam with bunch charge of 5 nC (Phase III).
- Laser shaping technique (temporal manipulation)



Gaussian shape



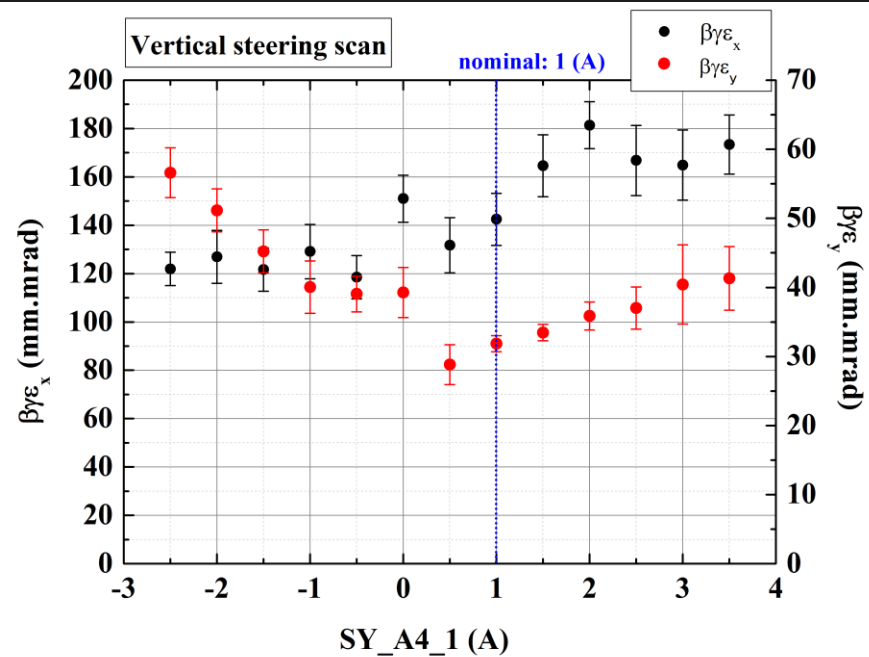
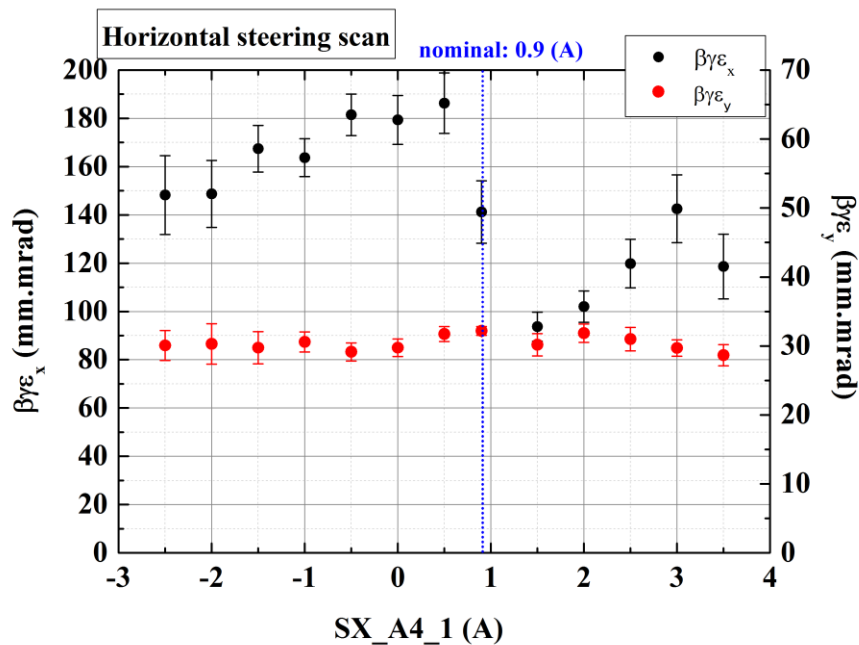
Rectangular shape

Figure 7: Energy spread at the end of 5-sector as a function of the bunch length with optimal RF phase.



Offset injection (experiment)

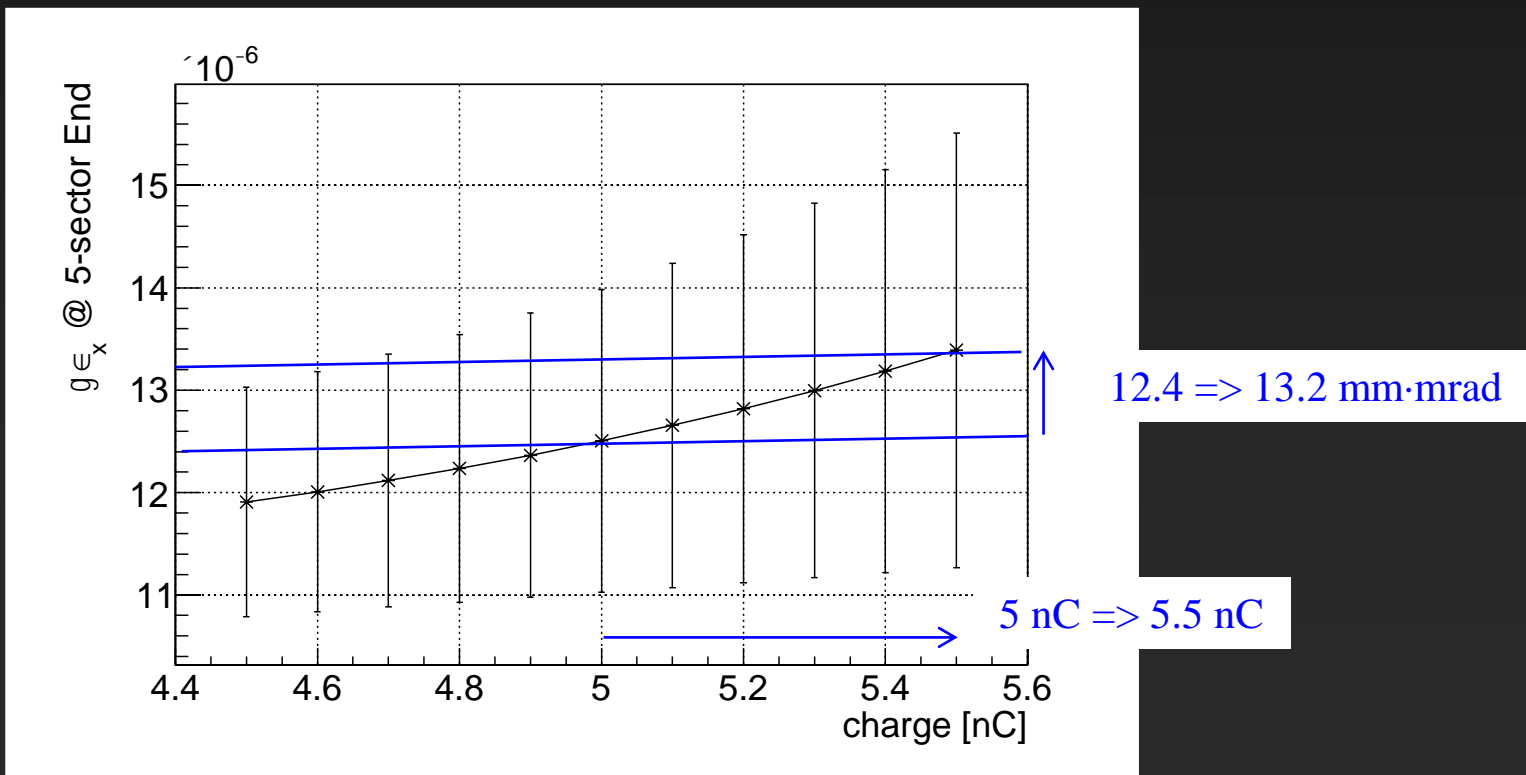
- Feasibility of offset injection was studied w/ bunch charge of 0.3 nC (thermionic gun).
- Changing the excitation current of steering magnet at Unit A4.
- Emittance was measured multiple wire scanner at Sector B end.
- We will conduct this measurement w/ rf gun.





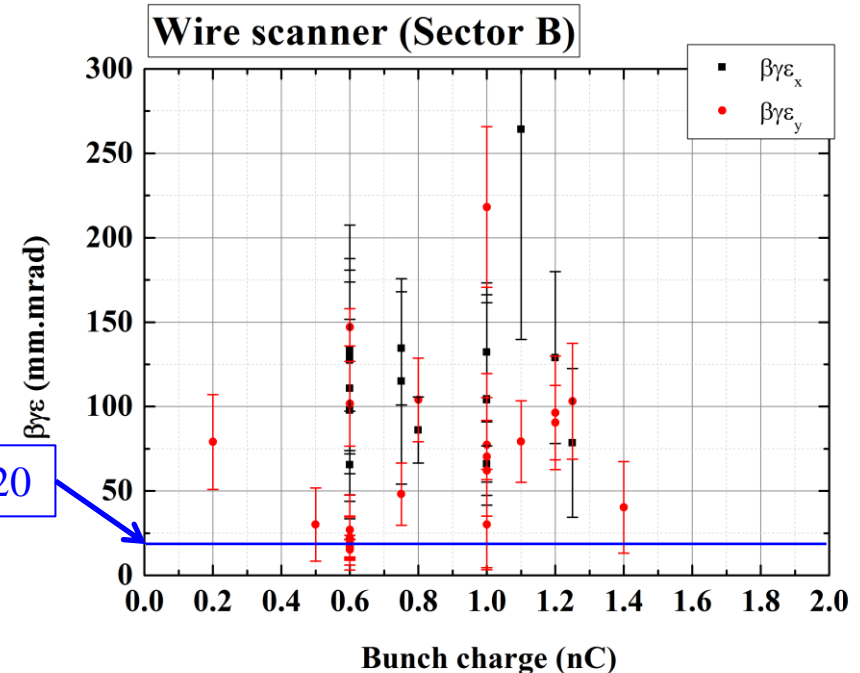
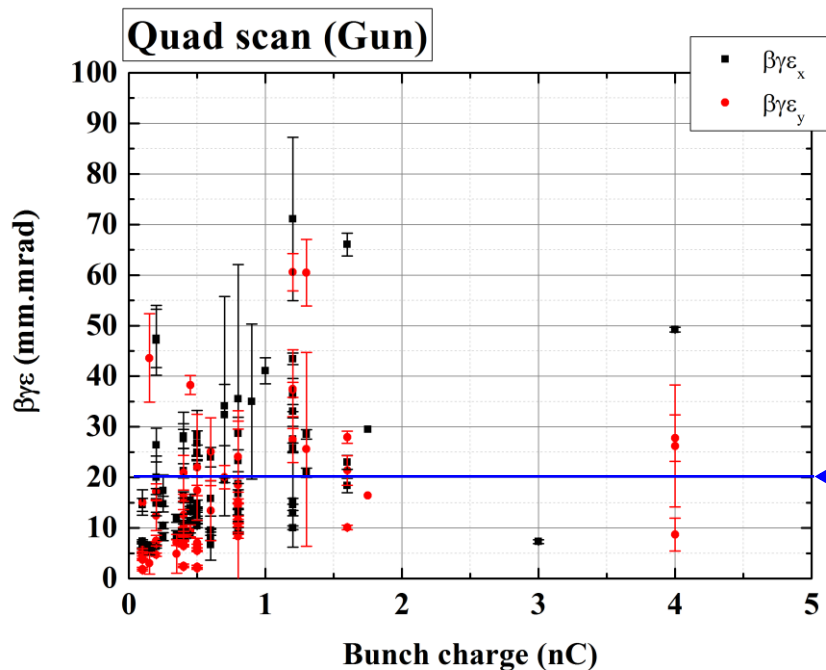
Emittance w/ bunch charge fluctuation

- Emittance simulation w/ 10 misalignment seeds (accelerating structure).
- Sector C to Sector 5 (Linac end)
- Assuming 5 nC, initial emittance of 10 mm·mrad (SectorC)
- When bunch charge increases by 10%, emittance increases by 6.5%.
- Try simulations w/ measured component misalignment, dynamic beam line movement, energy jitter.



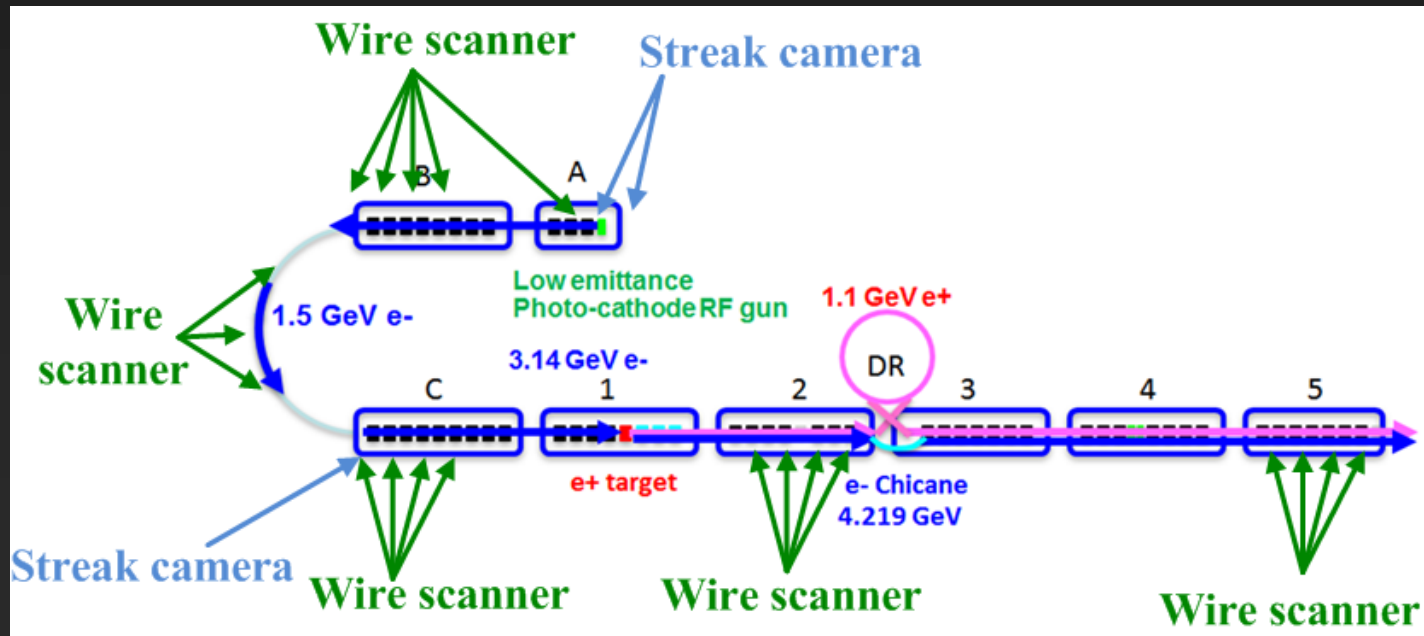
Emittance measurement

- Emittance as function of bunch charge (drop the results w/ large error)
- Small bunch charge (< 1 nC) shows good emittance at injector section.
 - < 10 mm·mrad (Vertical), < 15 mm·mrad (Horizontal)
- Results at SectorB show larger emittance than our goal.



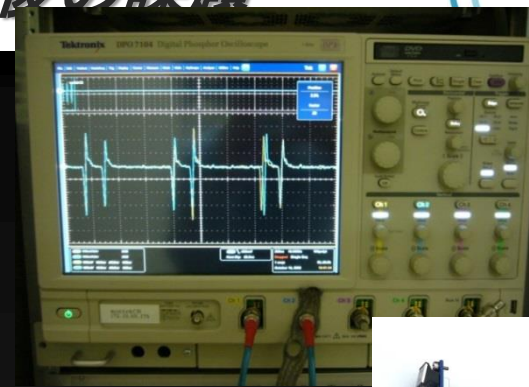
Beam diagnostics

- Beam position measurement
 - BPMs x 91 (strip-line type electrodes)
- Beam profile/Emittance measurement
 - Fluorescent screen monitors x100
 - Single wire scanner x1
 - Multiple wire scanner x5
- Bunch length measurement
 - Streak camera x3

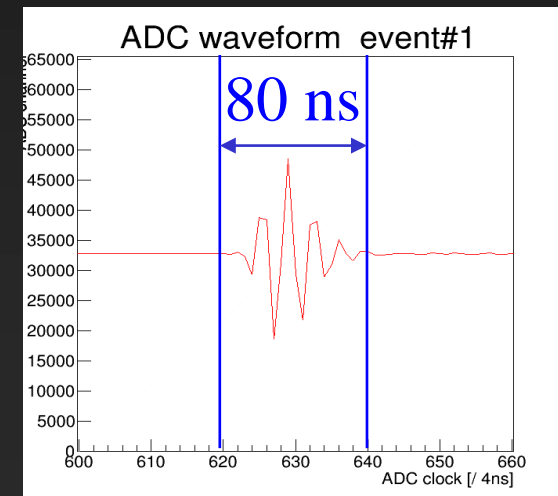




New BPM readout system



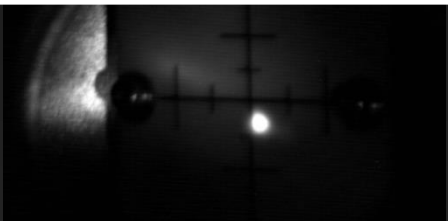
- Current system:
 - Windows-based digital oscilloscope
 - 10 GSa/s, 8 bit, 1 GHz bandwidth, 4 channels
 - Twenty four systems process the signals from 92 BPMs
 - Position measurement precision: 25~50 μm (3-BPM method)
 - New system:
 - VME module w/ band-pass sampling scheme
 - 250 MSa/s, 16 bit ADC,
 - BPF (f_c : 180 MHz, BW: 60 MHz, 22 MHz)
 - Signal can be well damped within 80 ns
(first and second bunch interval: 96 ns)
 - Measurement precision: **3 μm**
- 104 modules have been manufactured.
12 modules have been successfully utilized for daily operation.



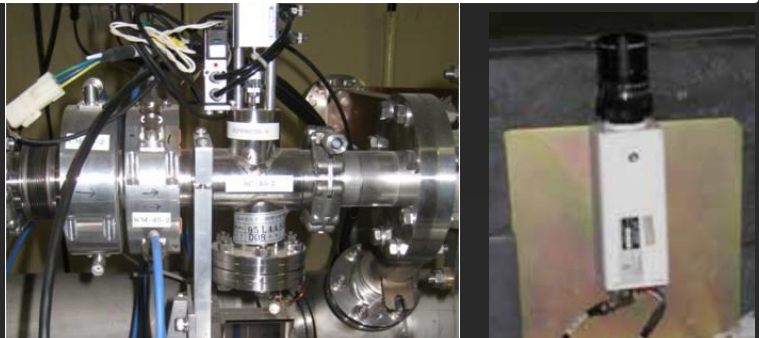
Profile monitor

- Screen material is made of 99.5% Al_2O_3 and 0.5% CrO_3 (AF995R, Demarquest Co.). (t: 1 mm)
- Linux/PLC (x31) control profile monitor (insert/remove, video signal select, limit switch, LED illumination, pneumatic air pressure).
- EPICS IOC is running on Linux/PLC. HLA is implemented by Python.

Beam profile



Monitor and CCD camera



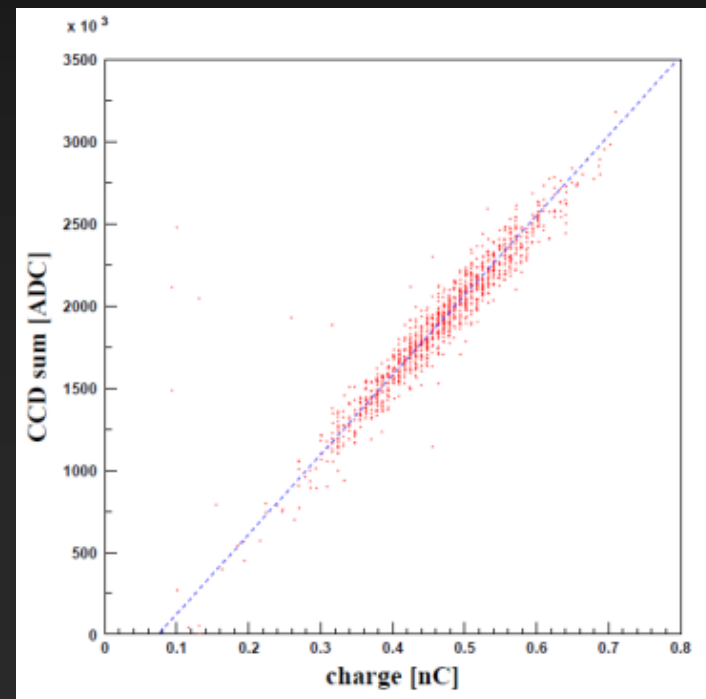
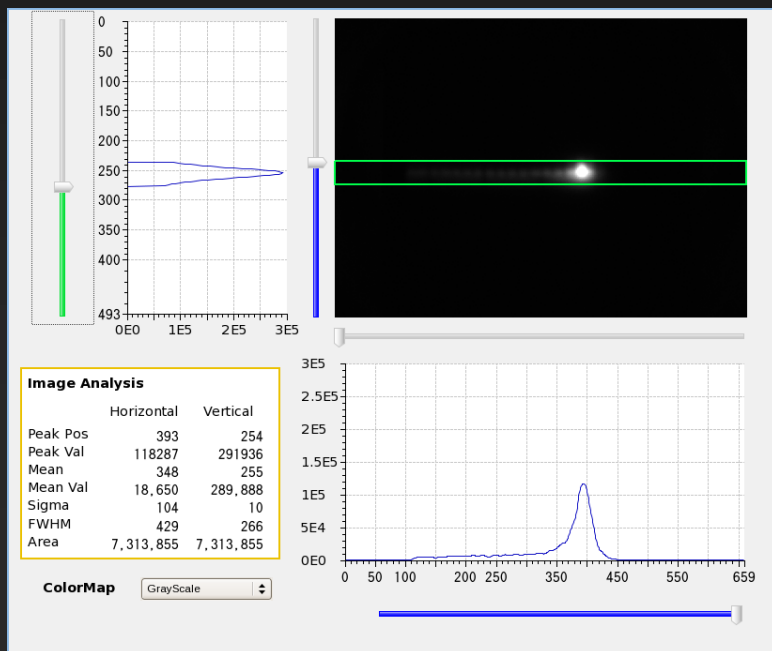
Controller and HLA



Component	Status	Action	Shutter	lit-off	camera	InsertOnly
SC_A1_G1	●●●	Remove		lit-off	camera	InsertOnly
SC_A1_G5	●●●	Remove		lit-off	camera	InsertOnly
SC_A1_C5	●●●	Remove	Shutter	lit-off	camera	InsertOnly
SC_A1_1	●●●	Remove		lit-off	camera	InsertOnly
SC_A1_2	●●●	Remove		lit-off	camera	InsertOnly
SC_A1_M	●●●	Remove		lit-off	camera	InsertOnly
SC_A1_MS	●●●	second Remove				InsertOnly
SC_A2_1	●●●	Remove		lit-off	camera	InsertOnly
SC_A2_2	●●●	Remove		lit-off	camera	InsertOnly
SC_A2_3	●●●	Remove		lit-off	camera	InsertOnly
SC_A2_4	●●●	Remove		lit-off	camera	InsertOnly
SC_A3_2	●●●	Remove		lit-off	camera	InsertOnly
SC_A3_4	●●●	Remove		lit-off	camera	InsertOnly
SC_A4_2	●●●	Remove		lit-off	camera	InsertOnly
SC_A4_41	●●●	Remove		lit-off	camera	InsertOnly
SC_A4_42	●●●	Remove		lit-off	camera	InsertOnly

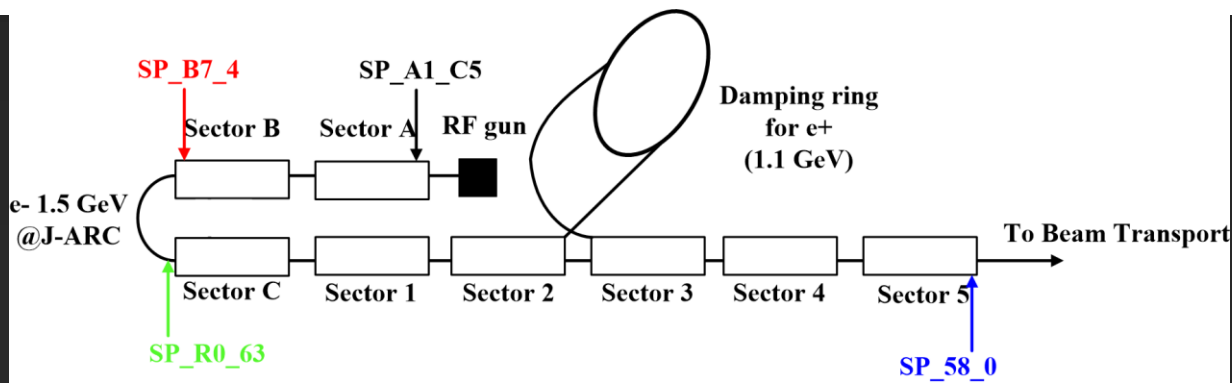
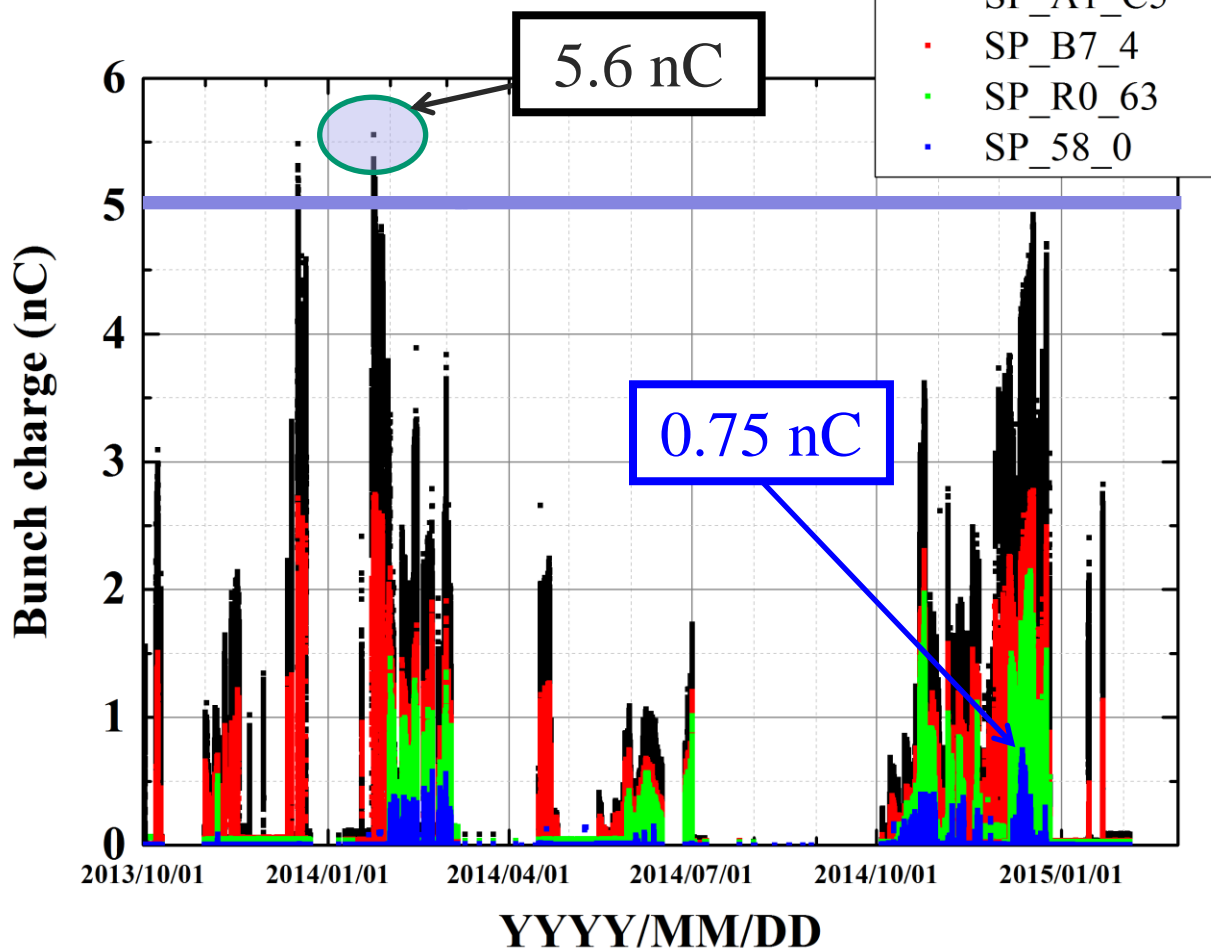
Profile monitor (cont'd)

- 7/97 were replaced by 30- μm -thick one for precise beam size/emittance measurement (Quadrupole scan)
- CCD cameras have been replaced by new one.
 - Allied Vision: GC650 w/ GbE
 - Ext. trigger input
 - EPICS IOC, CSS for HLA





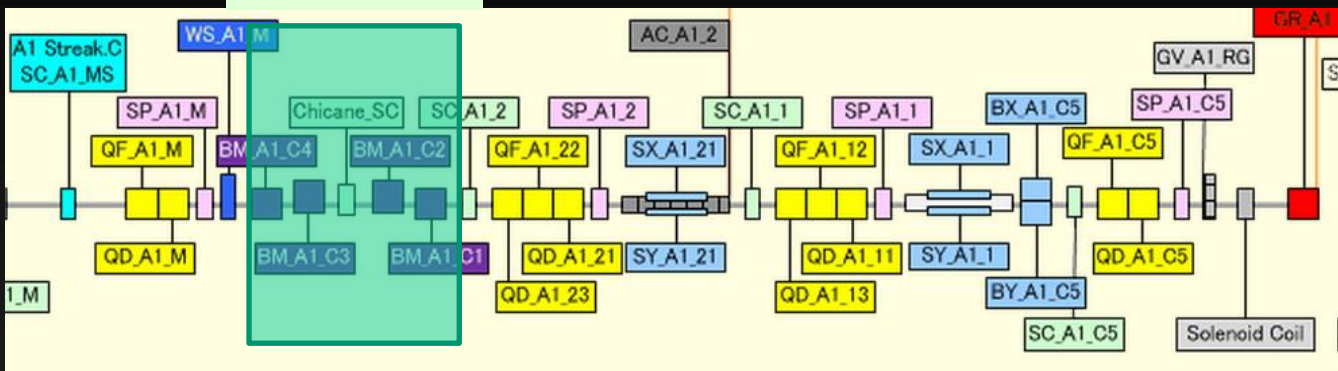
Bunch charge history (rf gun)





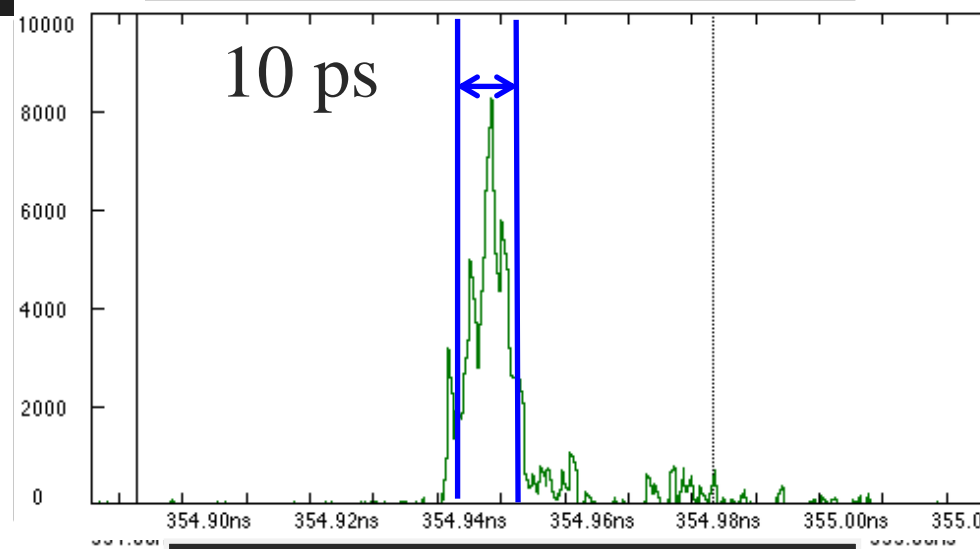
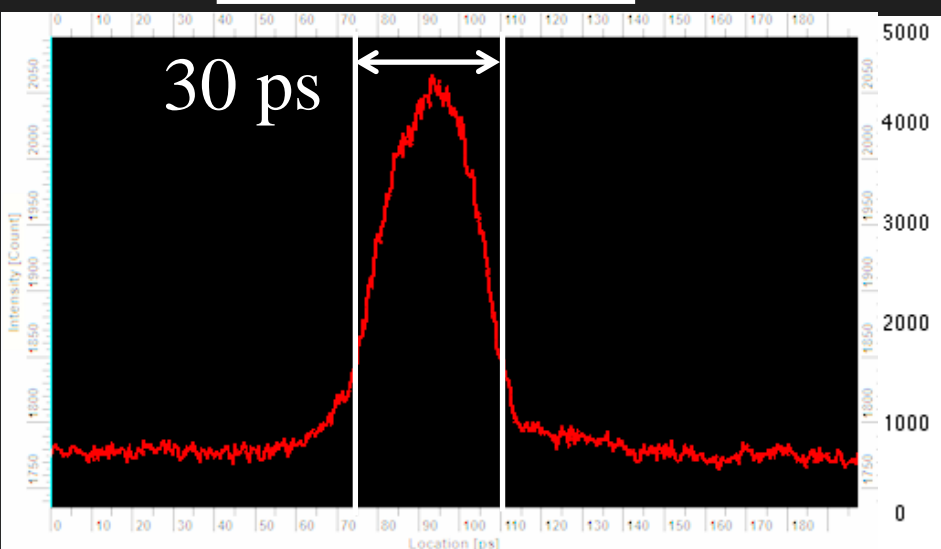
Bunch compression at Unit-A1

Chicane



Laser length

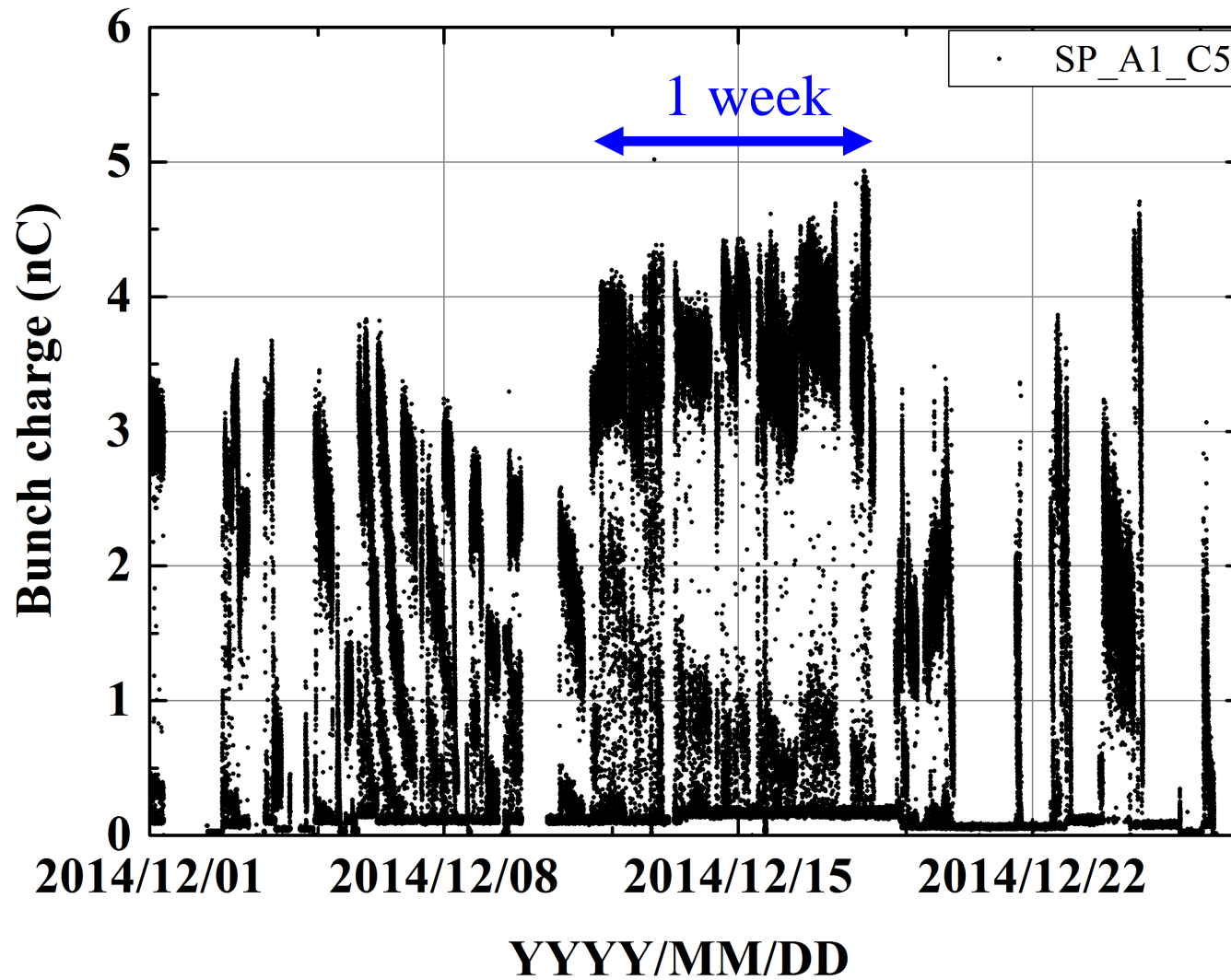
w/ bunch compression



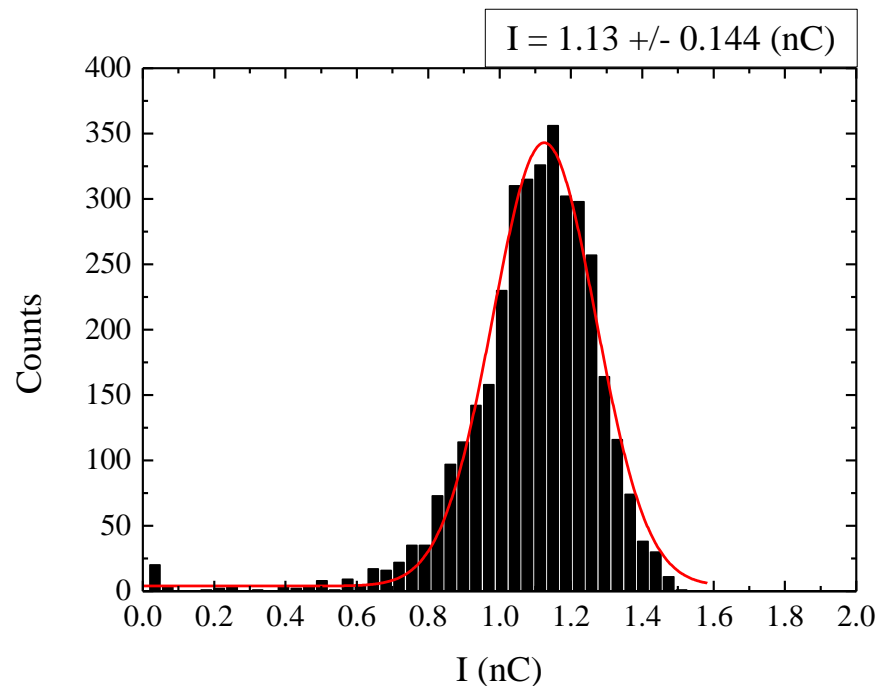
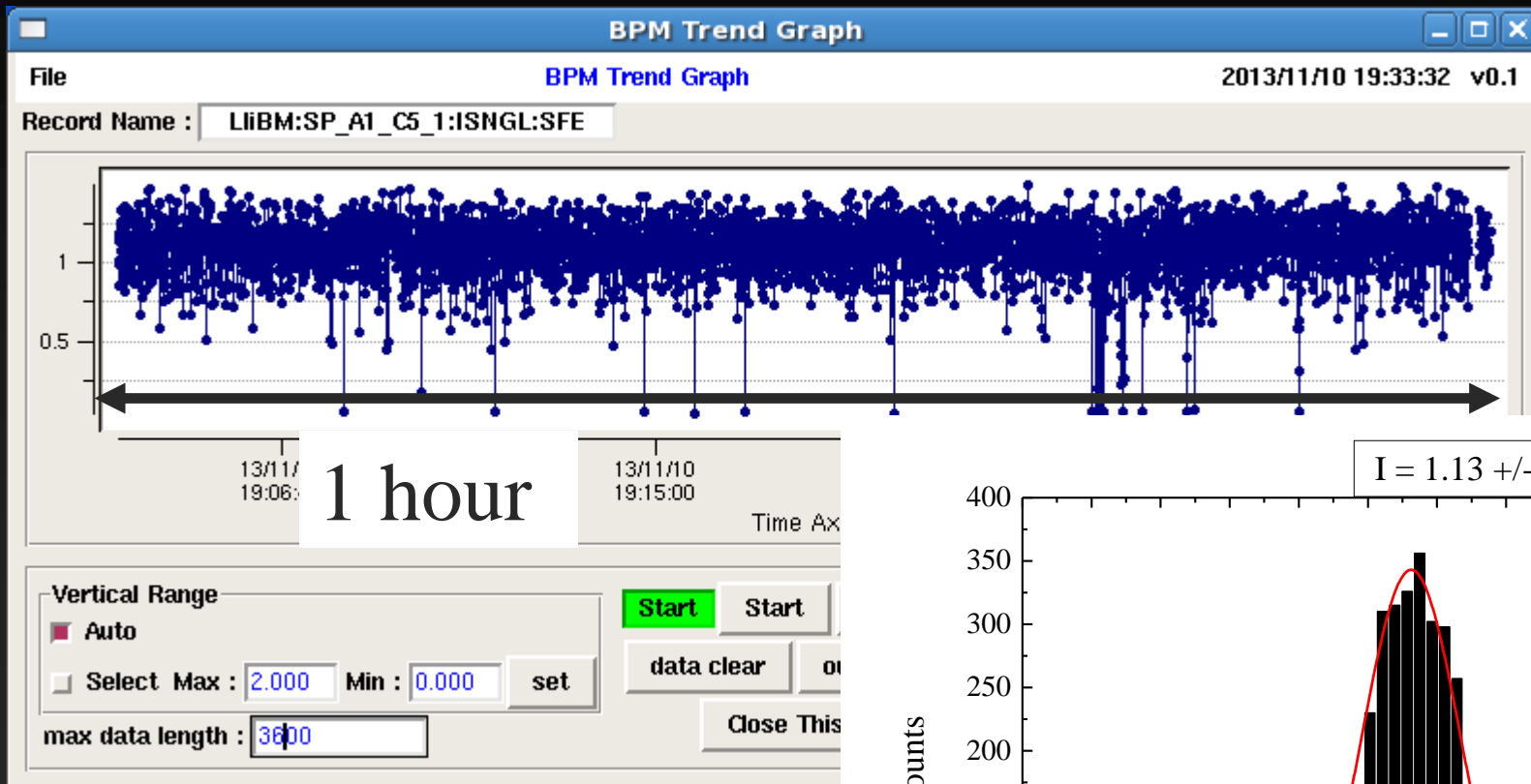
A1 RF $\Phi -30^\circ$: 10 ps



Bunch charge from rf gun in last Dec.



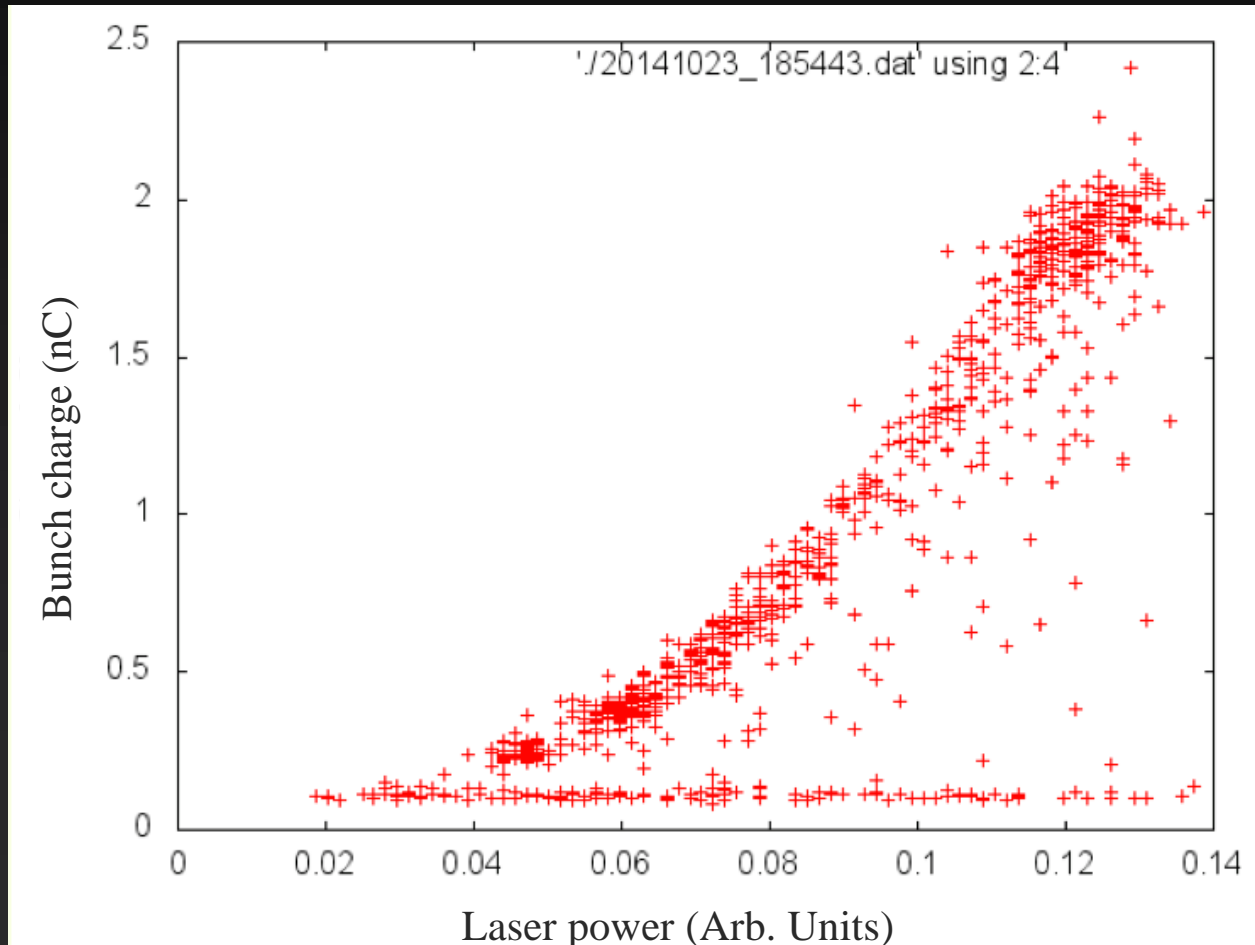
Typical beam charge stability



σ_I : 10% ~ 20%
~ 2.5% (KEKB operation)

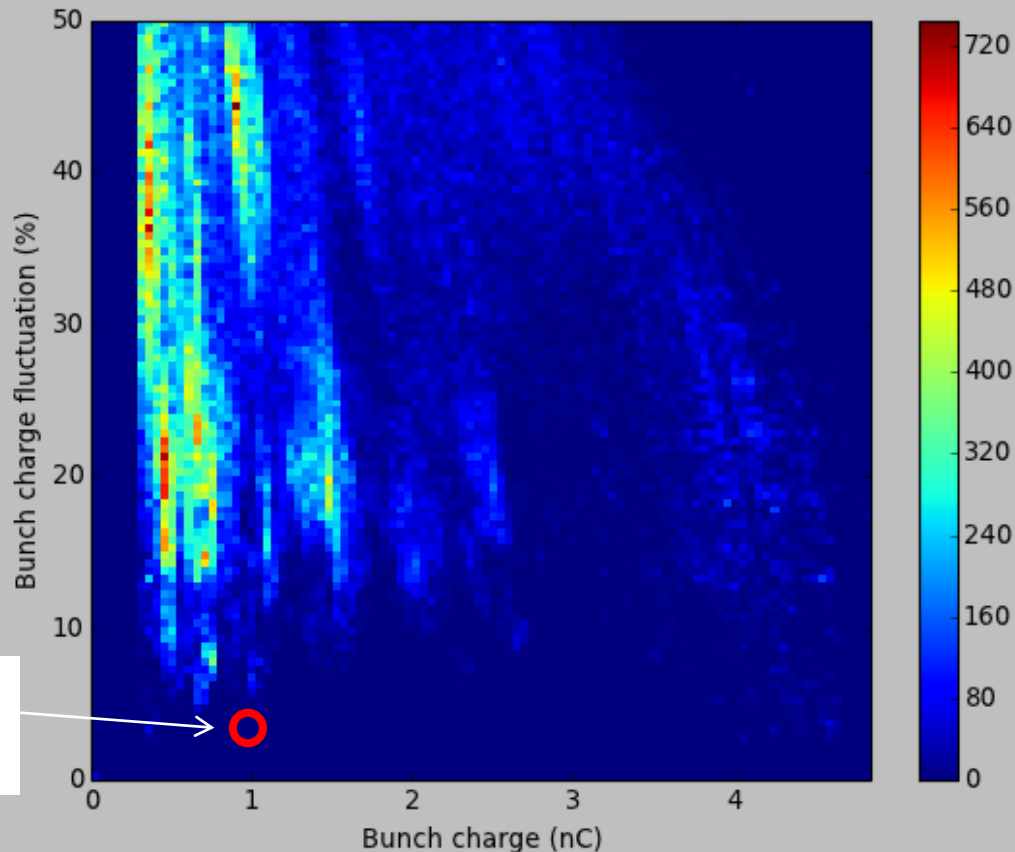
Bunch charge and laser power

- Bunch charge (1st BPM) as a function of laser power.
- Clear correlation between them



Bunch charge fluctuation

- Bunch charge fluctuation as a function of bunch charge (2D histogram)
- Oct. of 2013 – Dec. of 2014



Requirement
for Phase-I



e- beam parameters

	SuperKEKB	KEKB
Energy (GeV)	7.0	8.0
HER stored current (A)	2.6	1.1
HER beam lifetime (min.)	6	200
Maximum beam repetition (Hz)	50	50
Max. # of bunch in an rf pulse	2	2
Emittance (mm·mrad)	50/20 (Hor./Ver.)	310
Charge (nC)	5	1
Energy spread (%)	0.1	0.05
Bunch length σ_z (mm)	1.3	1.3
Damping ring	-	-
Simultaneous top-up injection	4 rings (SuperKEKB e-/e+, PF, PF-AR)	3 rings (KEKB e-/e+, PF)

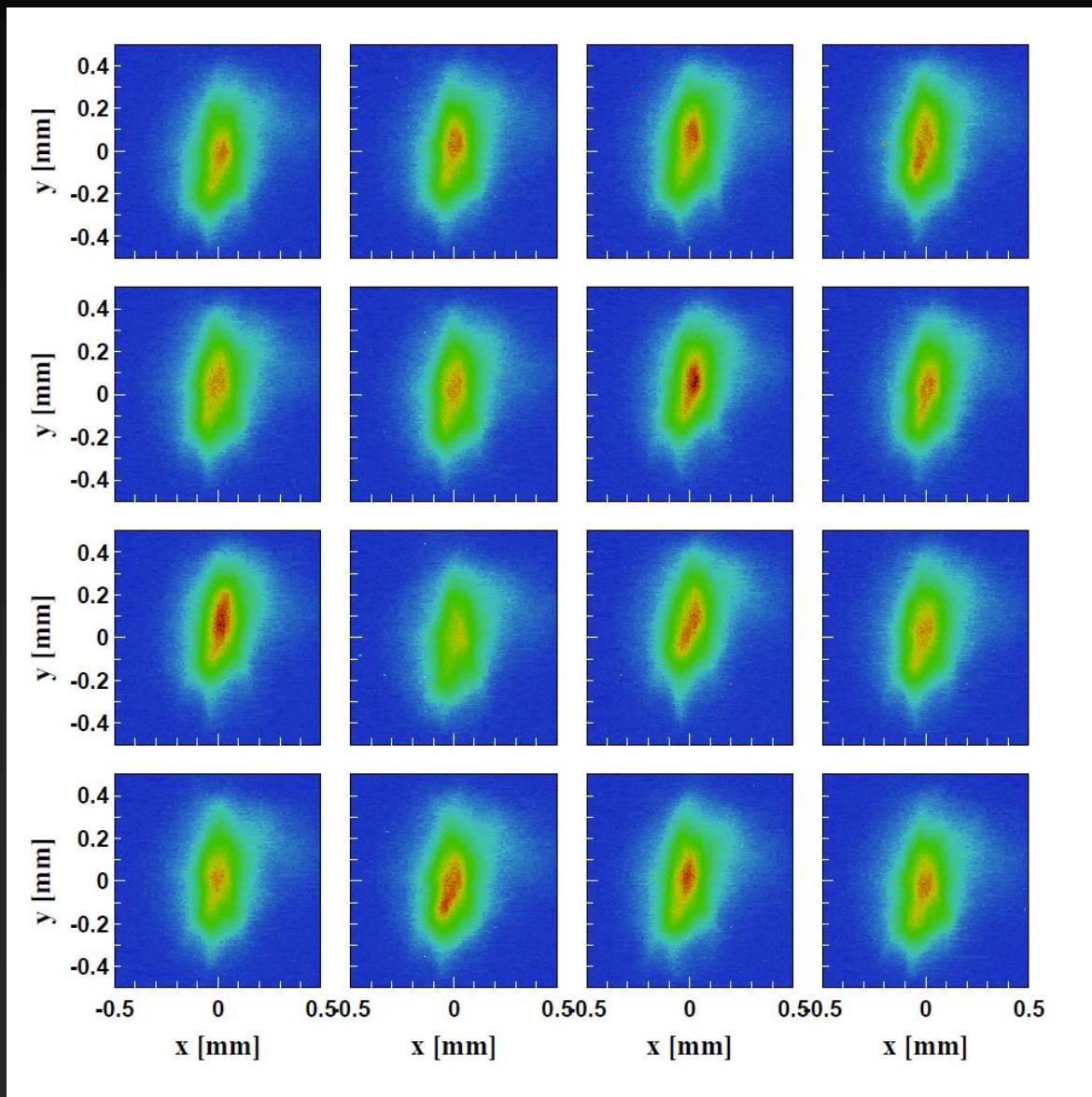


e⁺ beam parameters

	SuperKEKB	KEKB
Energy (GeV)	4	3.5
LER stored current (A)	3.6	1.6
LER beam lifetime (min.)	6	133
Maximum beam repetition (Hz)	50	50
Max. # of bunch in an rf pulse	2	2
Emittance (mm·mrad)	100/20 (Hor./Ver.)	1400
Charge (nC)	4	1
Energy spread (%)	0.07	0.125
Bunch length σ_z (mm)	0.7	2.6
Damping ring	○	-
Simultaneous top-up injection	4 rings (SuperKEKB e-/e+, PF, PF-AR)	3 rings (KEKB e-/e+, PF)



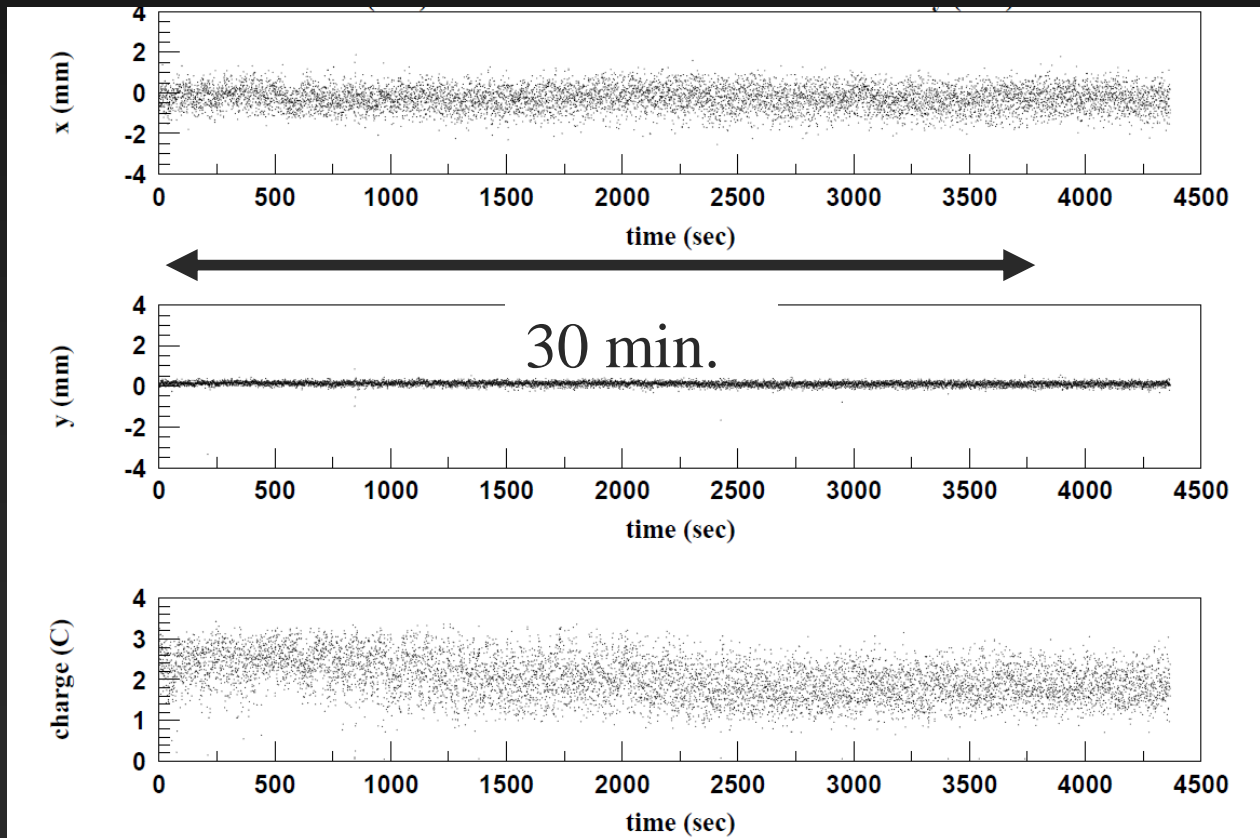
Shot-by-shot beam profile stability





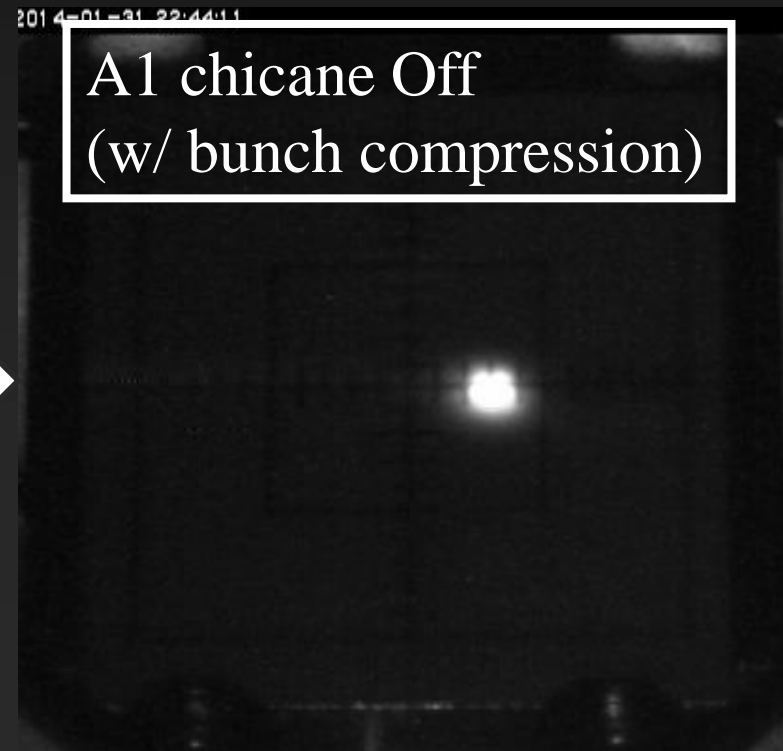
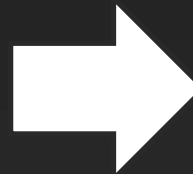
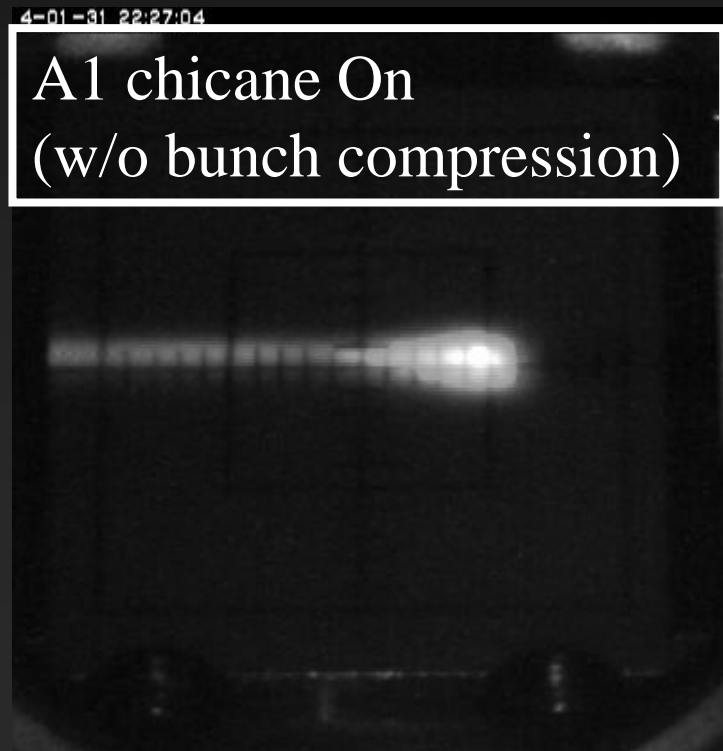
Beam position stability @ SP_A1_C5

- Measured beam position at first BPM (SP_A1_C5)
 - $\sigma_x \sim 0.57$ mm
 - $\sigma_y \sim 0.11$ mm
- Fluctuation of horizontal beam position is larger than vertical one.



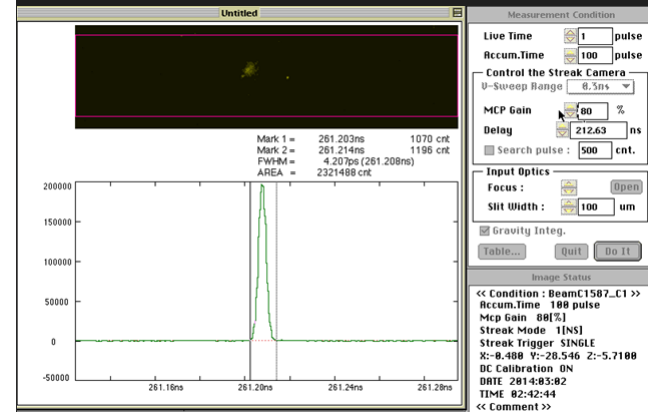
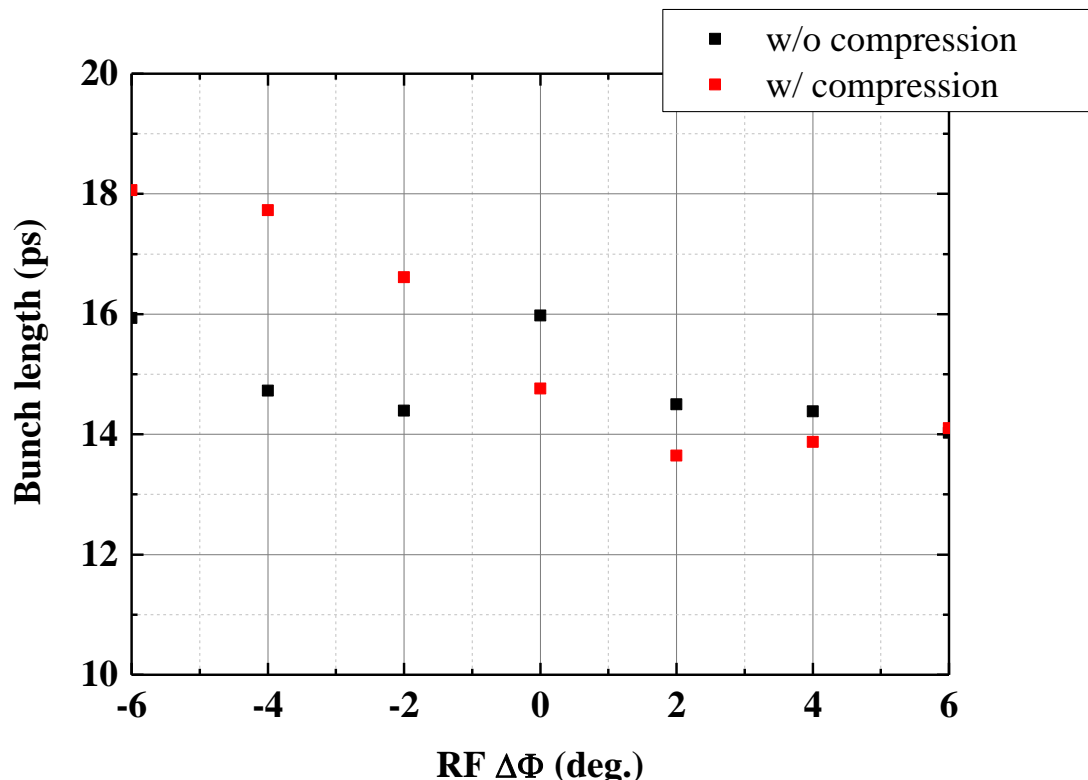
Energy spread measurement @ J-ARC

- Measure beam energy spread by screen monitor (middle of J-ARC) w/ and w/o bunch compression at A1 chicane.
- Bunch compression at A1 unit is effective for energy spread compensation.



Bunch compression @ J-ARC

- Isochronous (w/o bunch compression), $R_{56} = -0.3$ m (w/ bunch compression) w/ different RF Φ in Sector A/B
- Clear bunch compression has not yet been measured.
- Emittance measurement by multiple wire scanner at Sector 2 w/ and w/o J-ARC bunch compression.

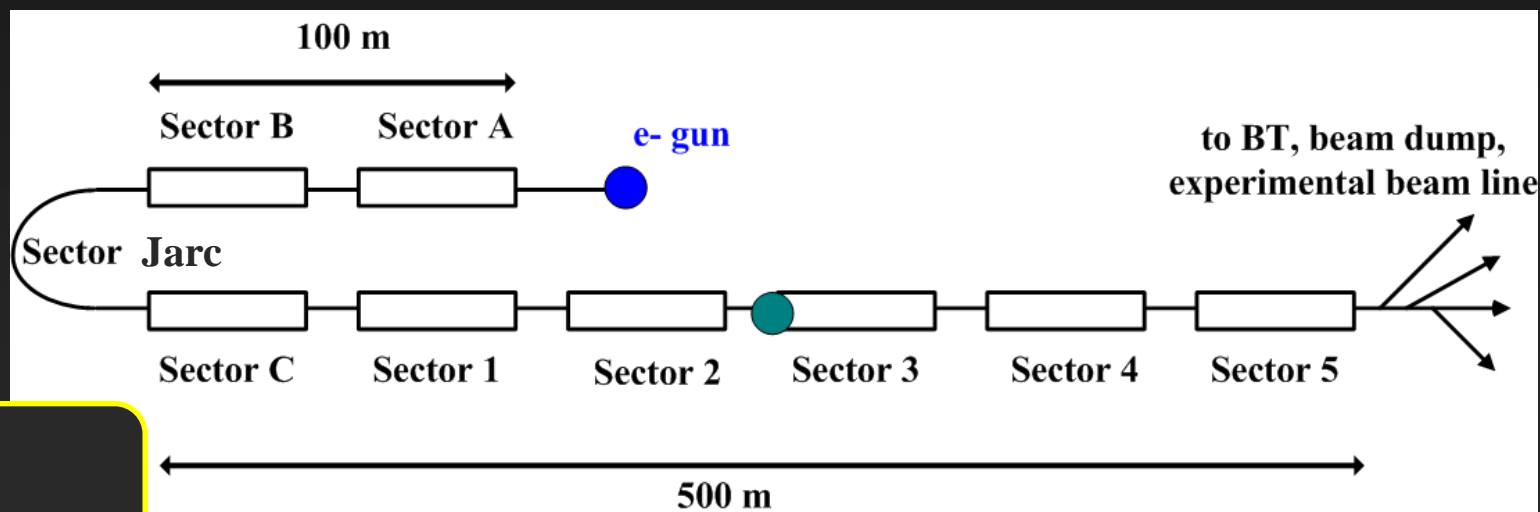


Streak camera at Sector C



Bunch compression at J-ARC

- Mitigate transverse wakefield and emittance growth
- Initial bunch length 10 ps \Rightarrow 5 ps (bunch compression at J-ARC)
 - First stage compression at A1 unit (30 ps \Rightarrow 10 ps)
- Control R56 and energy spread at J-ARC



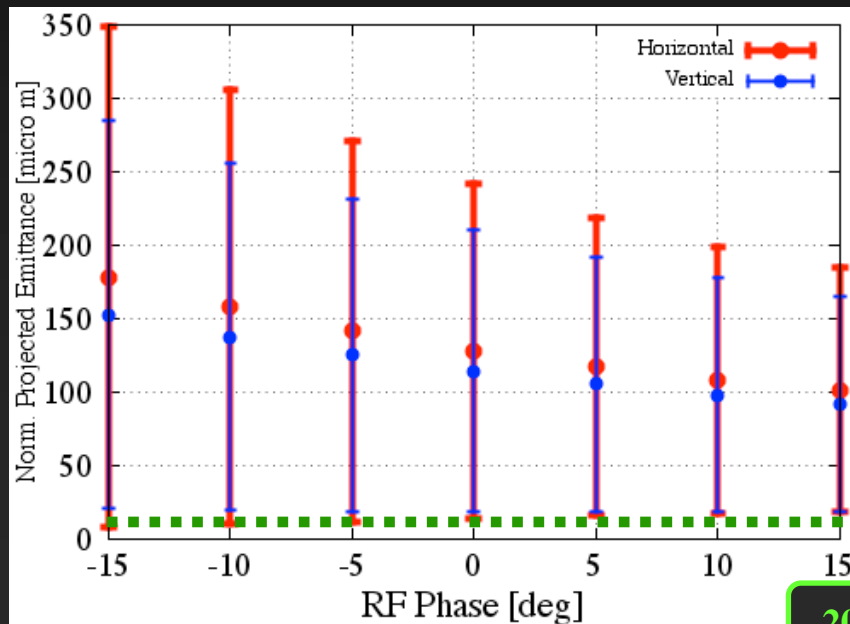
**Bunch
compression**



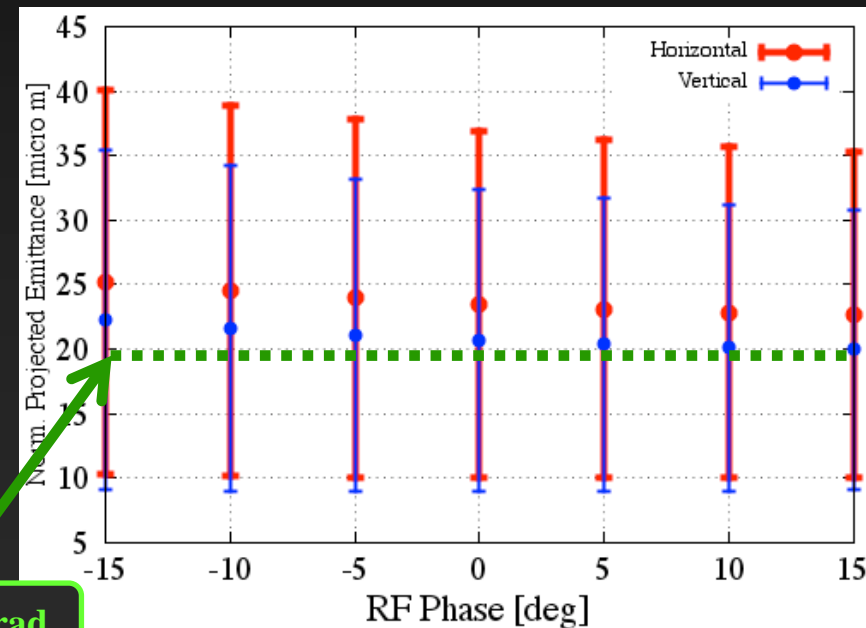
Emittance (misalignment $\sigma = 0.3$ mm)

- Bunch compression is effective.
- However, still not enough for 20 mm·mrad.

R56 = 0 (w/o compression)



R56 = -0.30 (w/ compression)



20 mm·mrad

Bunch compression at A1 unit

- To mitigate space charge effect, bunch length is compressed from 30 ps to 10 ps.

