

入射器の現状

B推進委員会

2019年10月3日(木) 15:00~

4号館1階セミナーホール

加速器第5系 清宮裕史

目次

1. 入射器概要
2. 入射器の主要課題
 - A) エミッタンス増大
 - B) 入射ビームによるBelle II へのBackground
 - C) 入射ビームによるRing Abort
 - D) 陽電子の収量
3. 最近の入射器の進展
4. 今後の課題と主な対策

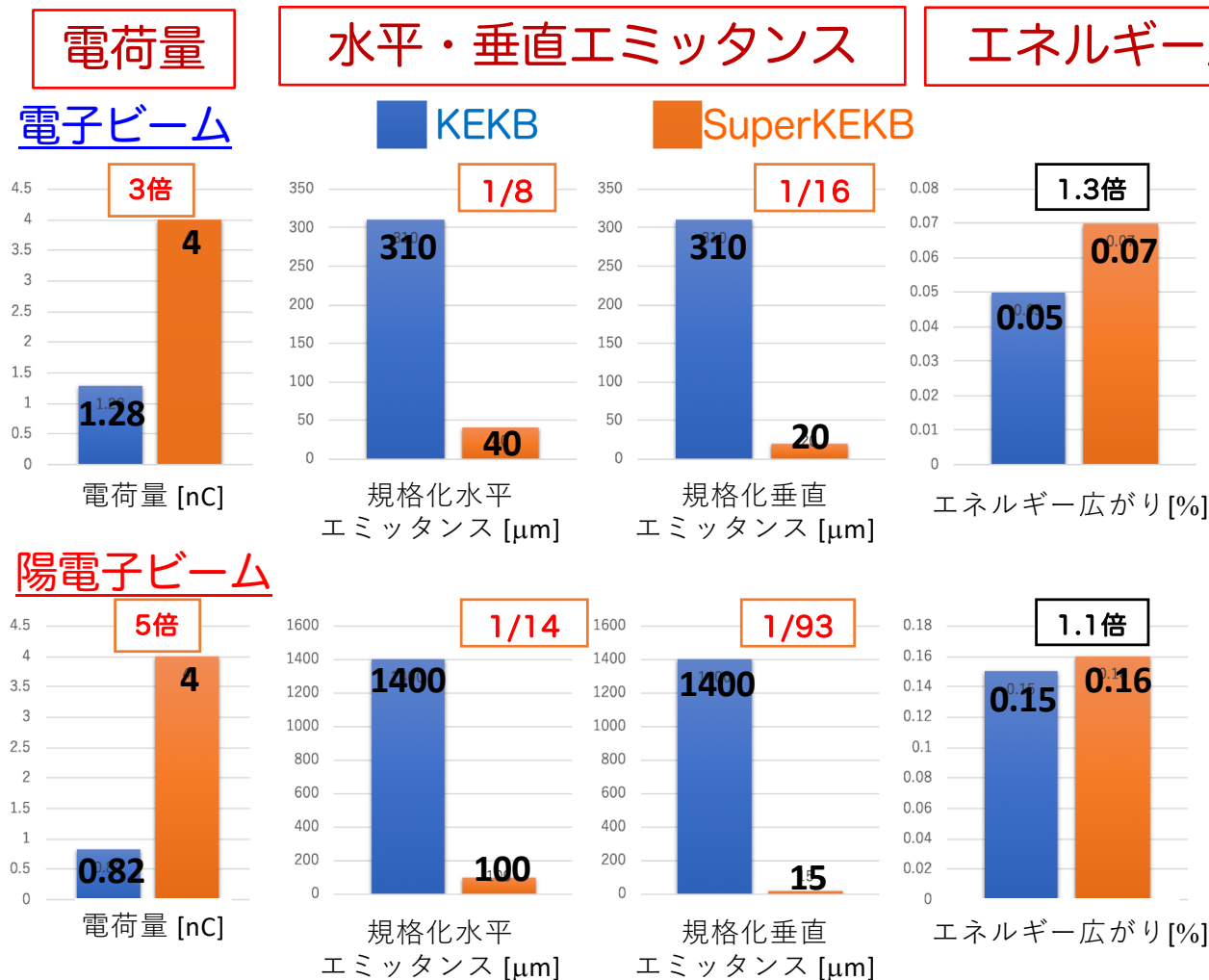
目次

1. 入射器概要
2. 入射器の主要課題
 - A) エミッタンス増大
 - B) 入射ビームによるBelle II へのBackground
 - C) 入射ビームによるRing Abort
 - D) 陽電子の収量
3. 最近の入射器の進展
4. 今後の課題と主な対策

1. 入射器概要

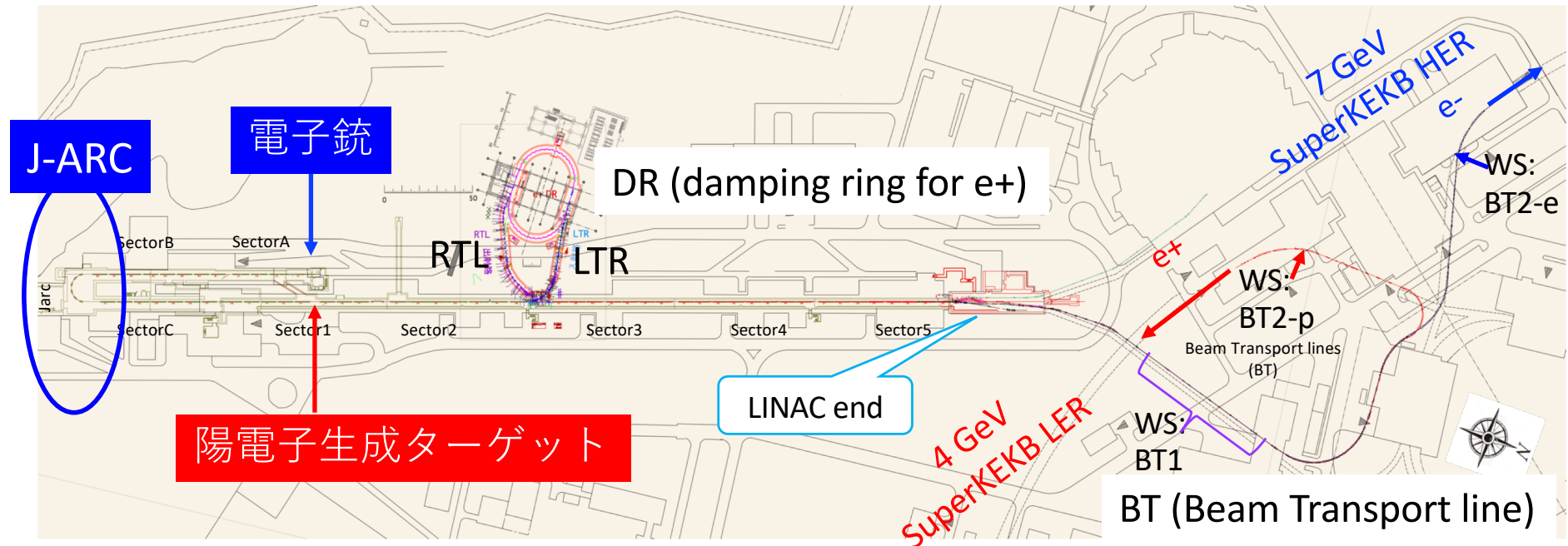
KEKBとSuperKEKBとの比較

- エミッタンスが増大すると、入射効率が悪化しリングに必要なビーム電流に到達できない可能性が高まり、backgroundも増大する。
- 「エミッタンス \propto 電荷量の2乗」であるため、約100倍の性能向上が必要。



1. 入射器概要

LINAC+BTのfootprint



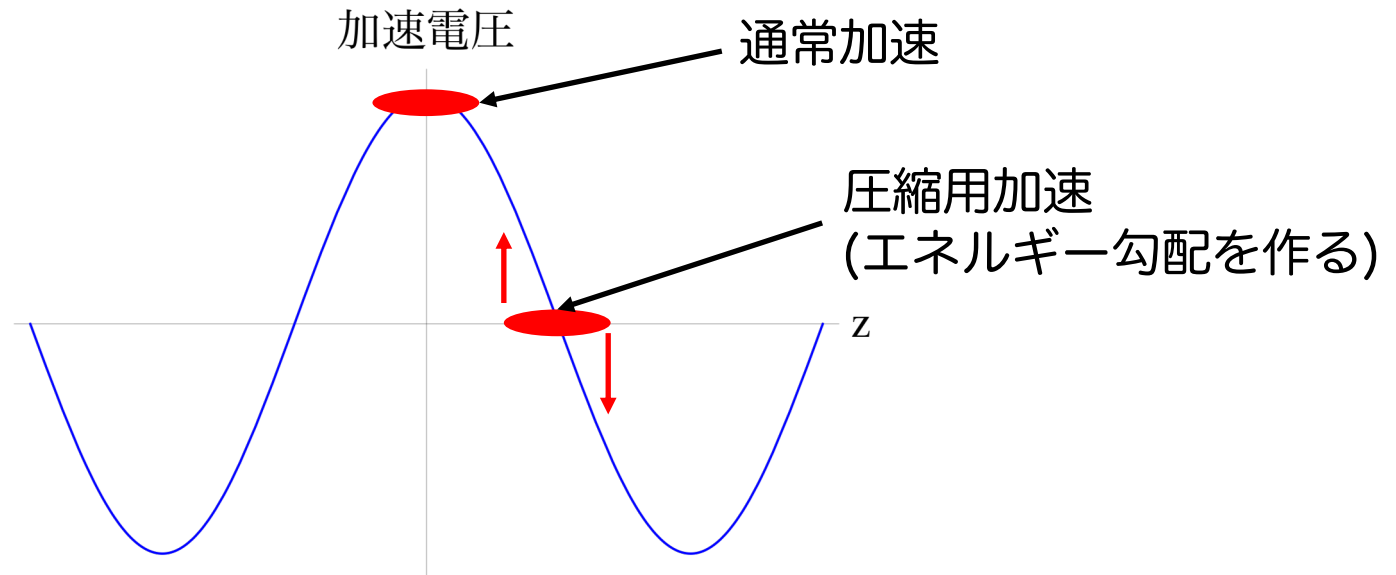
目次

1. 入射概要
2. 入射器の主要課題
 - A) エミッタンス増大
 - B) 入射ビームによるBelle II へのBackground
 - C) 入射ビームによるRing Abort
 - D) 陽電子の収量
3. 最近の入射器の進展
4. 今後の課題と主な対策

エミッタンス増大の主な原因

◆ ディスパージョン漏れ

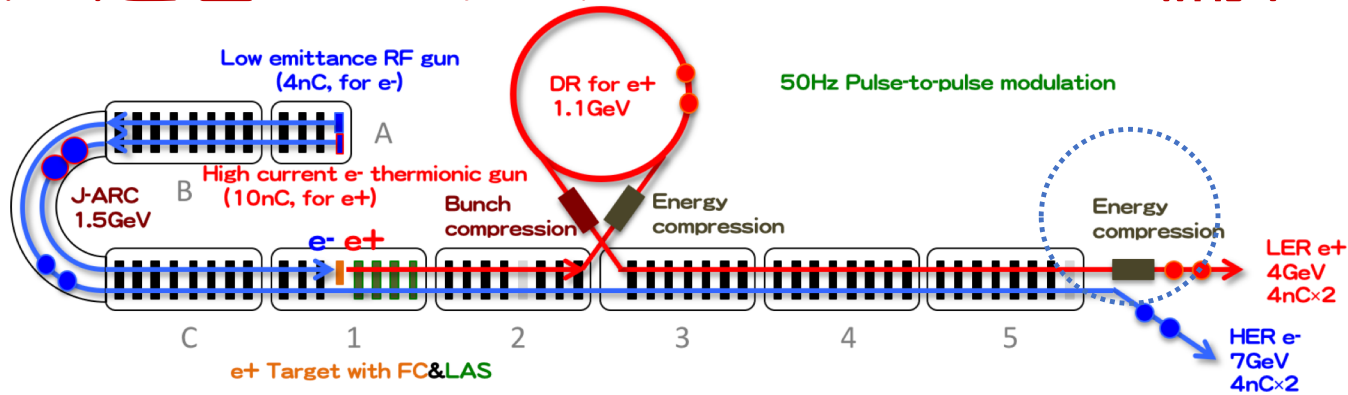
1. ARC後ディスパージョンが漏れていると、ディスパージョンを通してエネルギー広がり(δ)がビームサイズ(x)を増大させる。
2. バンチ圧縮やエネルギー圧縮で用いられる圧縮用加速管の位置にディスパージョンが存在すると、バンチ長(z)に依存した量がエネルギー広がり(δ)を通してビームサイズ(x)を増大させる。



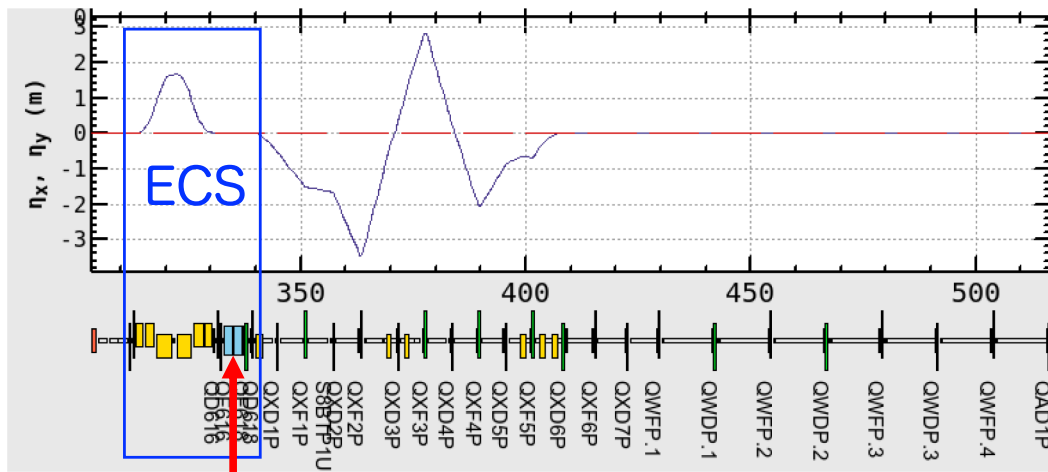
➡ ディスパージョンを閉じれば解決

A) エミッタンス増大

圧縮用加速管でのディスパージョン漏れ



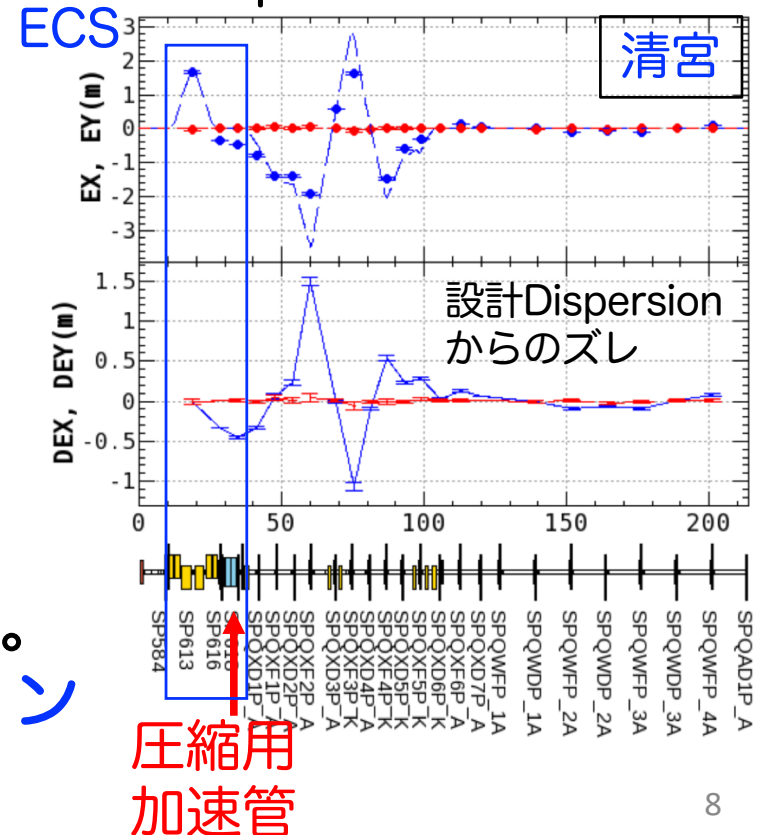
設計Optics



圧縮用加速管

- 設計上、加速管でのディスパージョンは0。
- 実測では、加速管でディスパージョンが漏れている。

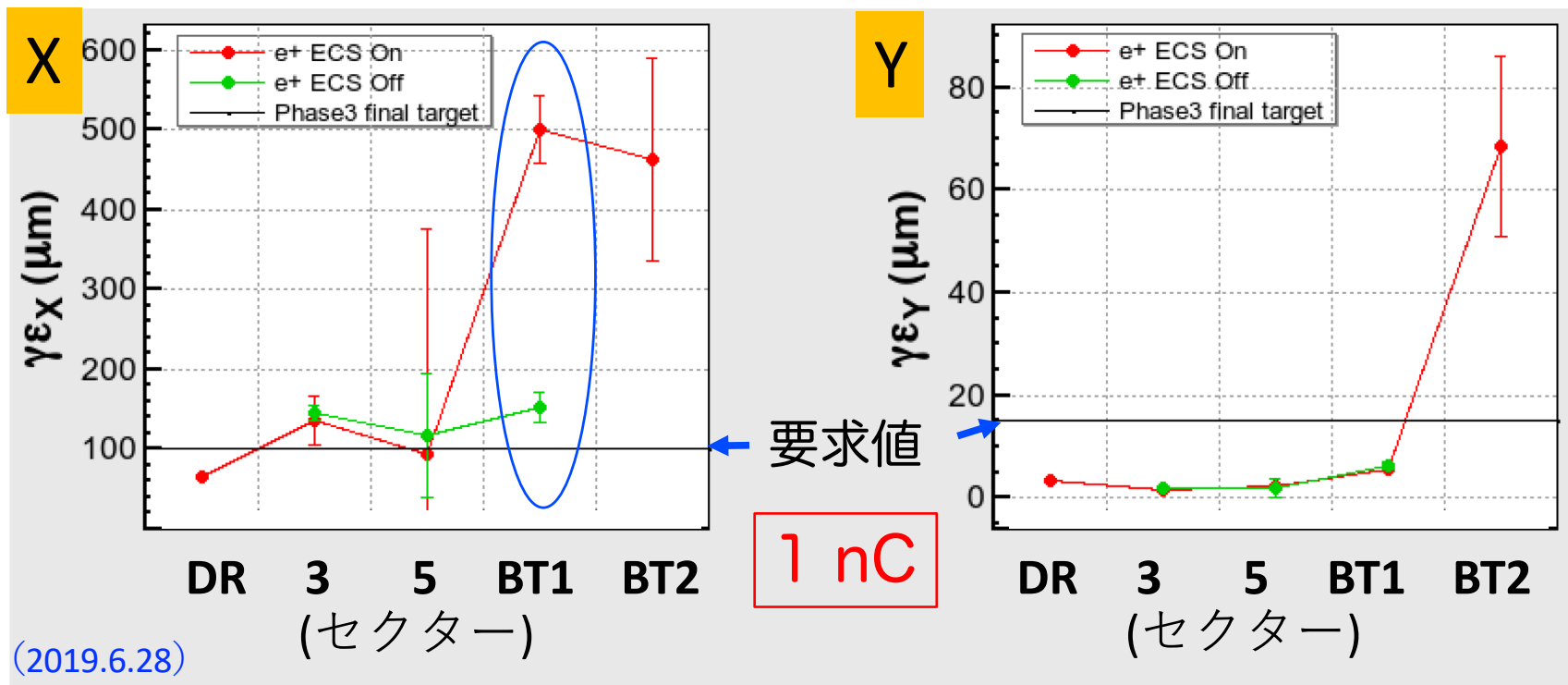
Dispersion測定結果



圧縮用加速管

エミッタンス測定結果 (LER用ビーム)

- X方向に圧縮用加速管ON/OFFでエミッタンスに約4倍程度の違いが発生。
- Y方向はBT endにてエミッタンスが増大しており、別途ディスパージョン漏れ、軌道ジッタを改善する必要がある。



飯田
菊池
森

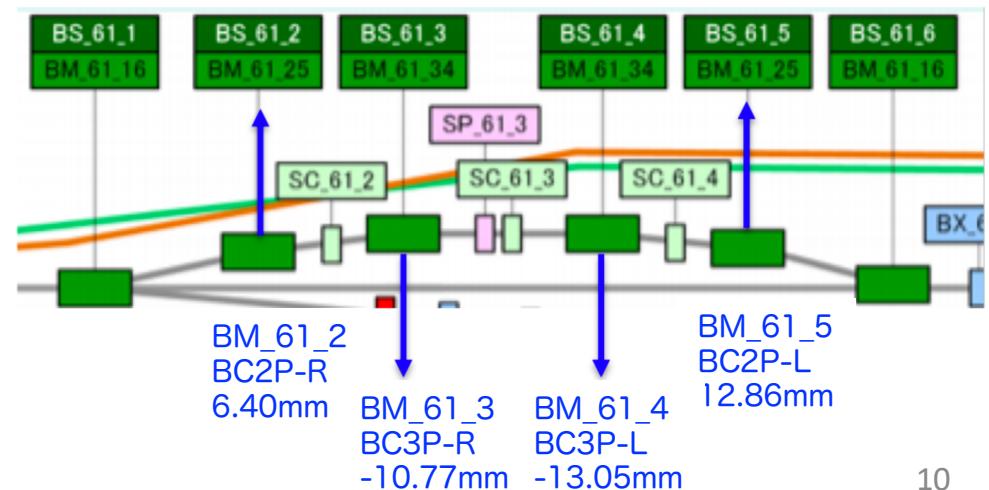
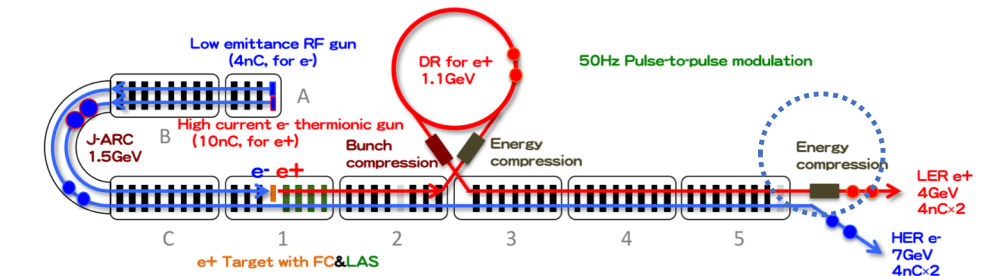
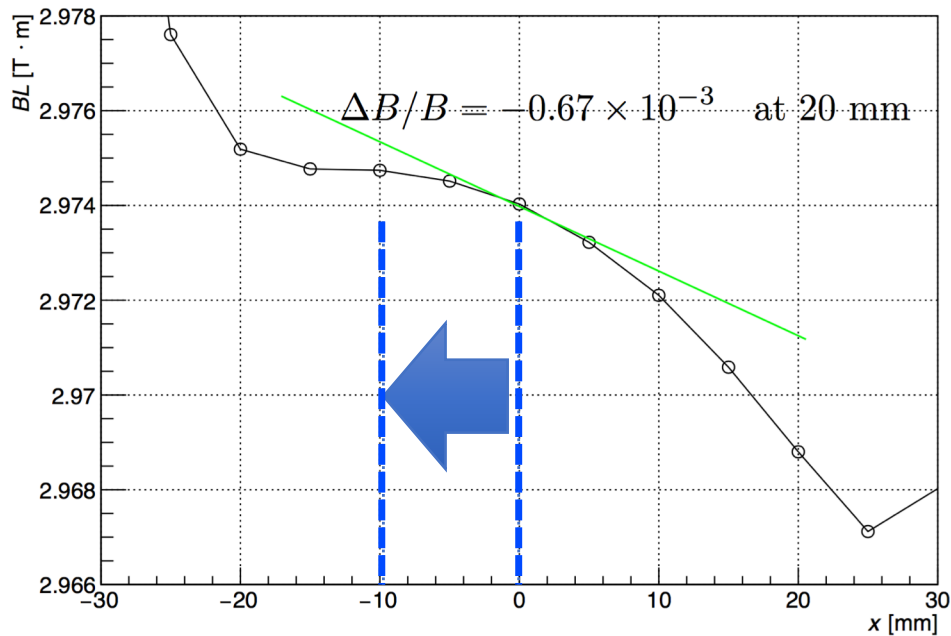
(2019.6.28)

ディスパージョン漏れの原因と対策

- Bendの積分磁場測定から、設計軌道上に4極磁場が存在することが判明。
- 4極磁場の小さい領域にビームを通せるようにBendを移動済。

森

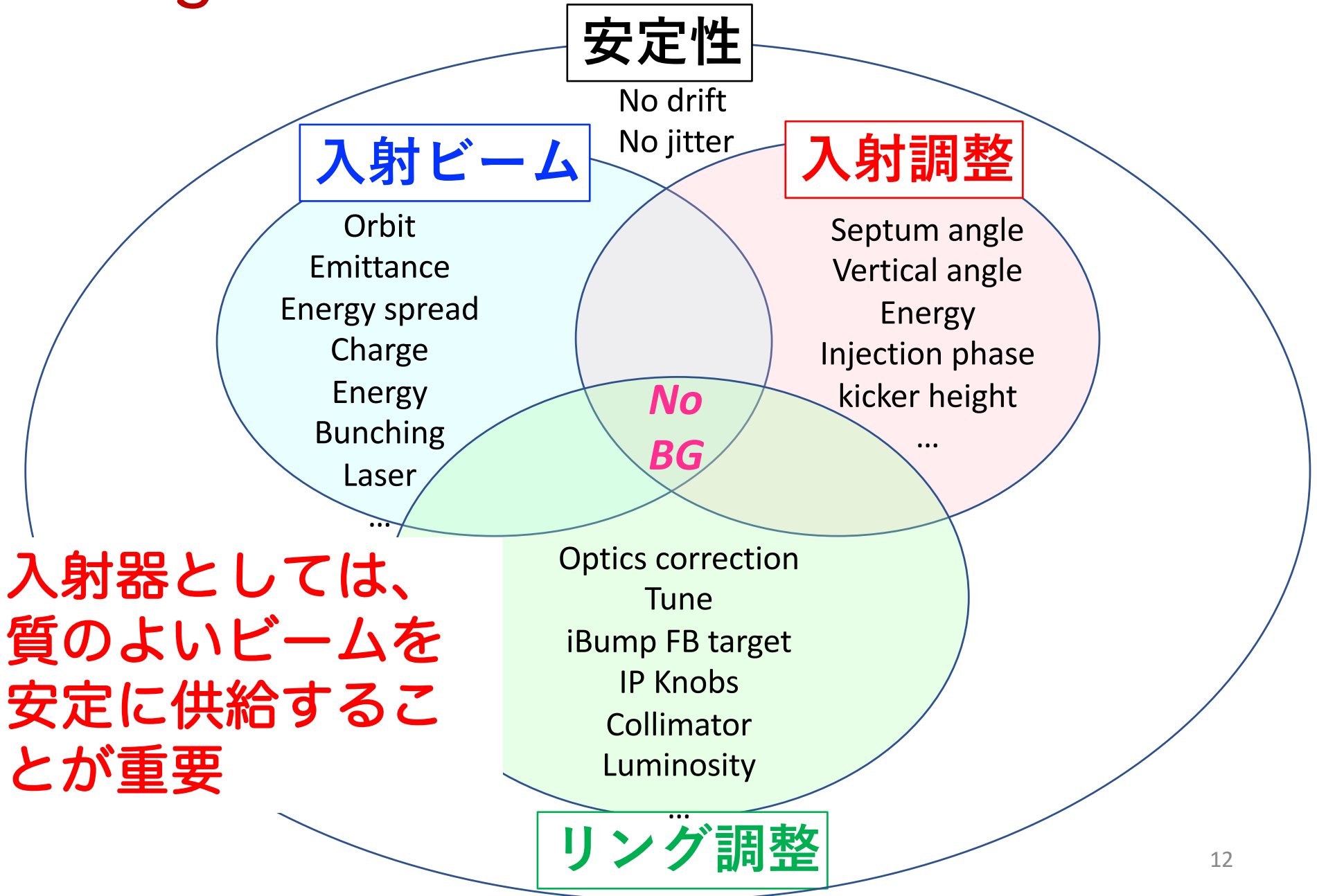
ECS bend@SY3の積分磁場



目次

1. 入射概要
2. 入射器の主要課題
 - A) エミッタンス増大
 - B) 入射ビームによるBelle II へのBackground**
 - C) 入射ビームによるRing Abort
 - D) 陽電子の収量
3. 最近の入射器の進展
4. 今後の課題と主な対策

Backgroundに寄与するパラメータ

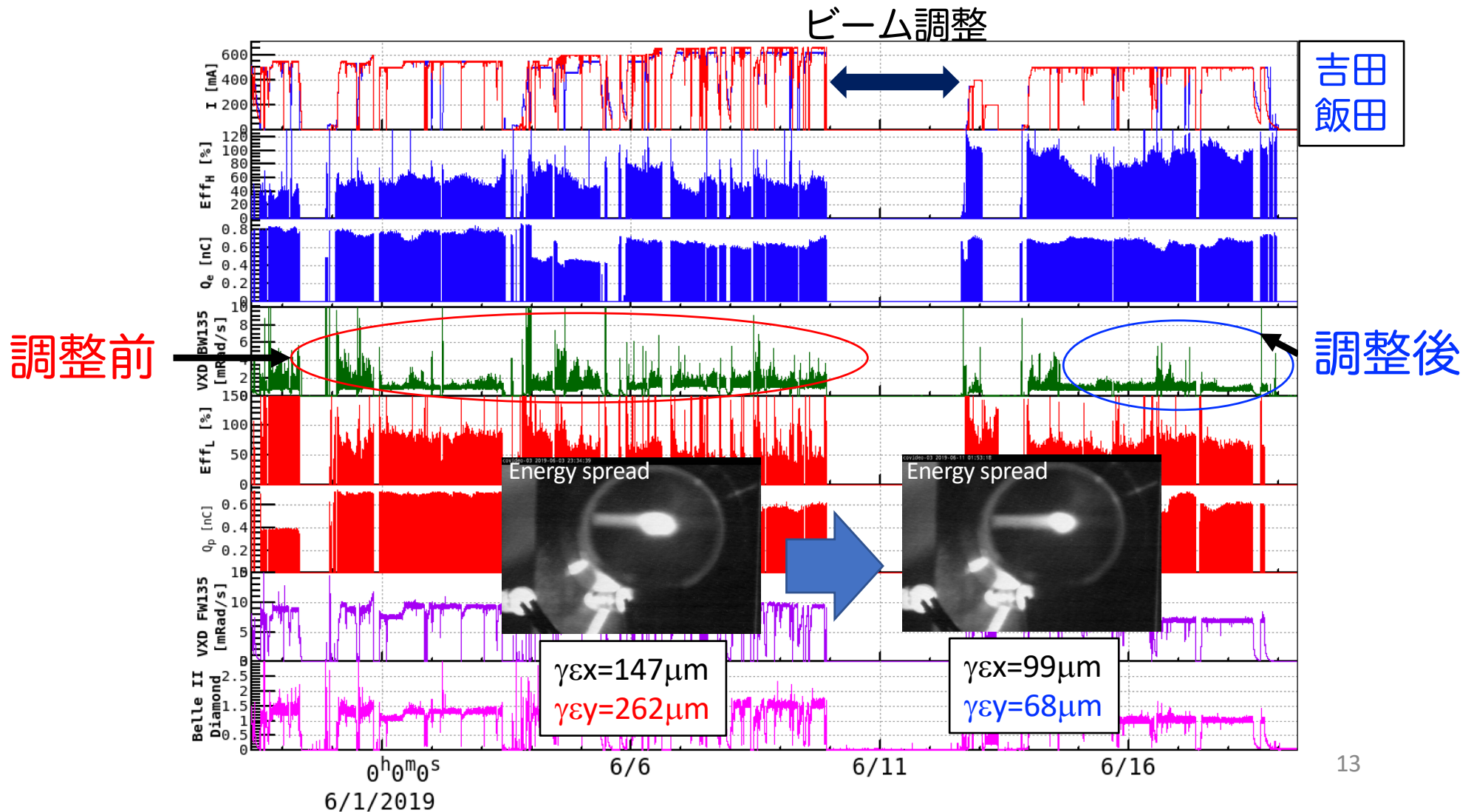


入射器としては、
質のよいビームを
安定に供給するこ
とが重要

B) 入射ビームによるbackground

ビーム調整によるBackgroundの減少

- 軌道、エネルギー広がり、エミッタンスを調整。
- 調整後はBackgroundが減少。次はこの安定化が必要。



B) 入射ビームによるbackground

入射ビーム安定化に向けて

	道具	場所	達成度	フィードバック
エネルギー	エネルギーフィードバック	J-ARC, DR, BT	○	○
エネルギー広がり	Sub Harmonic Buncher 1 (SHB1) for LER beam	Thermionic Gun	○	—
	SHB2		未	—
	RFモニター	LINAC	○	未
	誘起波モニター	LINAC	△	—
	8極BPM	J-ARC	△	未
		BT	未	未
	ギャラリーの温度調整	LINAC	△	
軌道	軌道フィードバック	LINAC	○	○
		End of BT	○	○
軌道ジッタ	パルス電磁石電源	Sector 3-5	○	—
エネルギージッタ	エネルギーノブ位相	Sector B, 2, 5	△	—
	RF位相	LINAC	△	—
入射位相	FB of Master oscillator	LINAC and MR	○	○
エミッタンス	RF gun用レーザー	RF Gun	△(安定性)	未
	e+ DR	DR	○	—
	ワイヤースキャナ	LINAC, BT	○	—
		End of BT	△	—

目次

1. 入射概要
2. 入射器の主要課題
 - A) エミッタンス増大
 - B) 入射ビームによるBelle II へのBackground
 - C) 入射ビームによるRing Abort
 - D) 陽電子の収量
3. 最近の入射器の進展
4. 今後の課題と主な対策

C) 入射ビームによるRing Abort

- 突発的な入射ビームの変調によるAbort

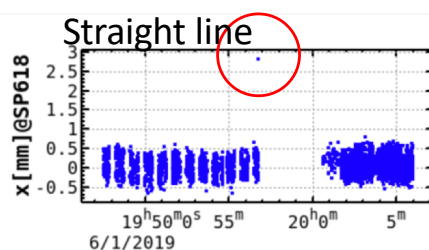
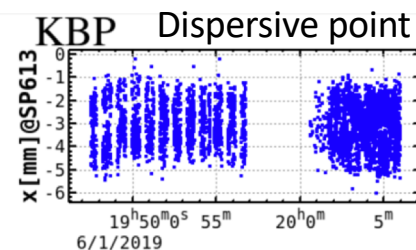
電源のトリガー抜け

LER用ビーム

クライストロンダウン

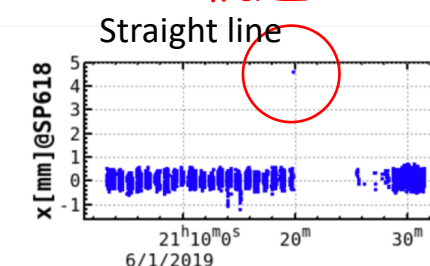
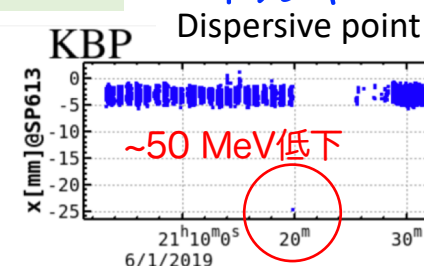
実測 エネルギー

軌道

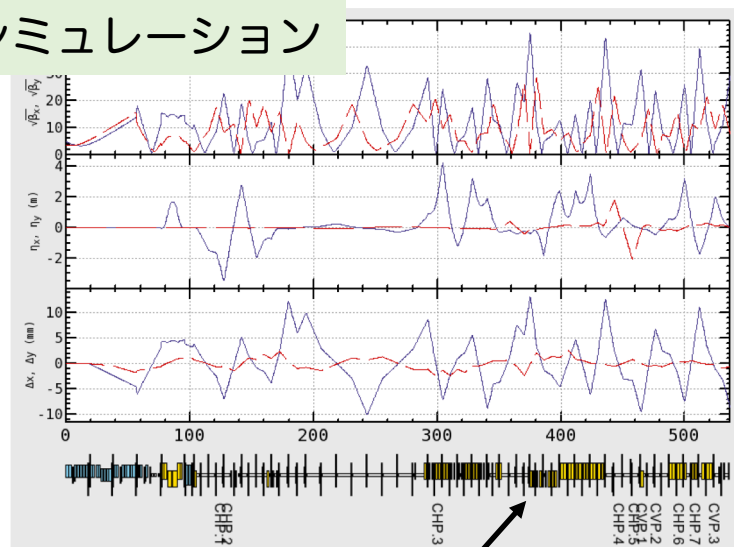


実測 エネルギー

軌道



シミュレーション

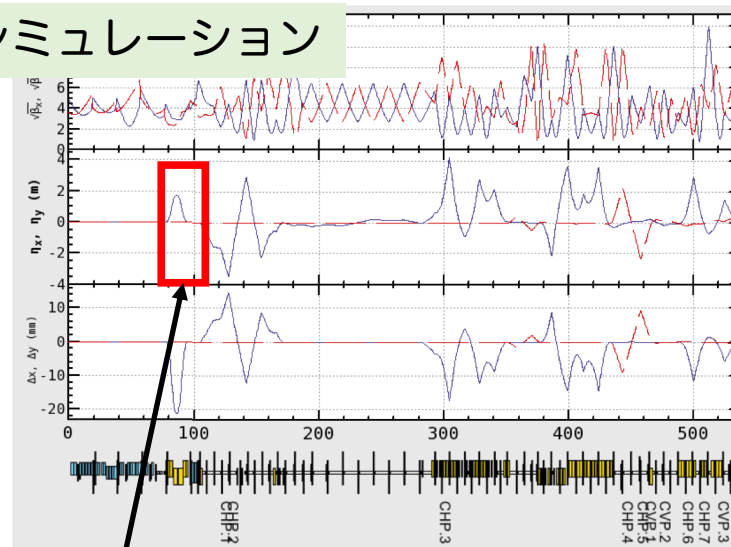


BT line

設置済みのコリメータを入れて対処

HERに関して、コリメータのインストールを予定

シミュレーション



BT line

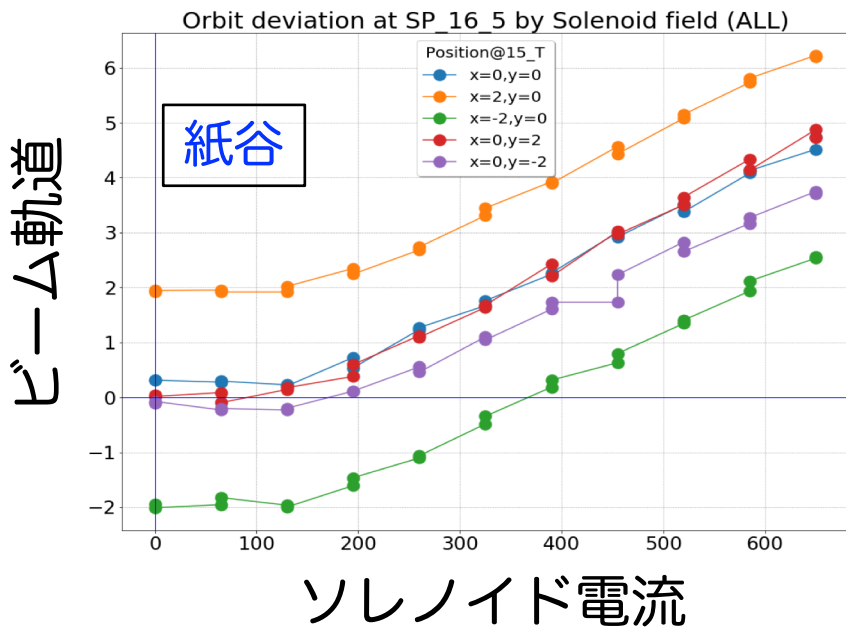
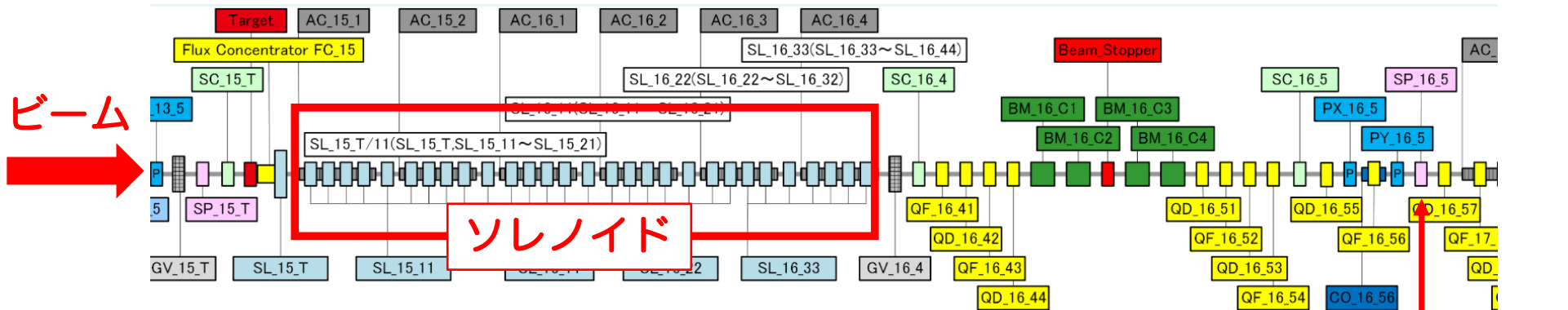
新たにコリメータを設計、設置予定

目次

1. 入射概要
2. 入射器の主要課題
 - A) エミッタンス増大
 - B) 入射ビームによるBelle II へのBackground
 - C) 入射ビームによるRing Abort
 - D) 陽電子の収量**
3. 最近の入射器の進展
4. 今後の課題と主な対策

D) 陽電子の収量

- 現状、シミュレーションと比較して収量が3割程度低い。
- ソレノイドに通すビーム軌道を変えて、ビーム軸に対してソレノイドがoffsetしていないか、傾いていないかを調査。
- ソレノイド磁場をかけた際の軌道変化が同じ方向。

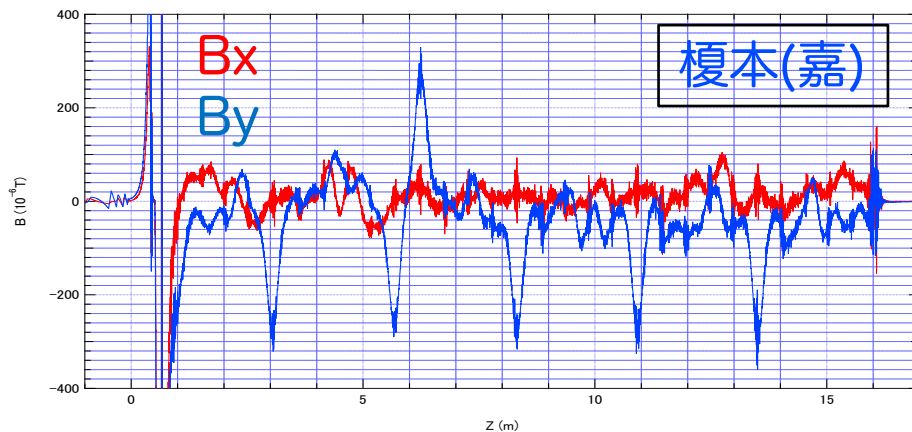
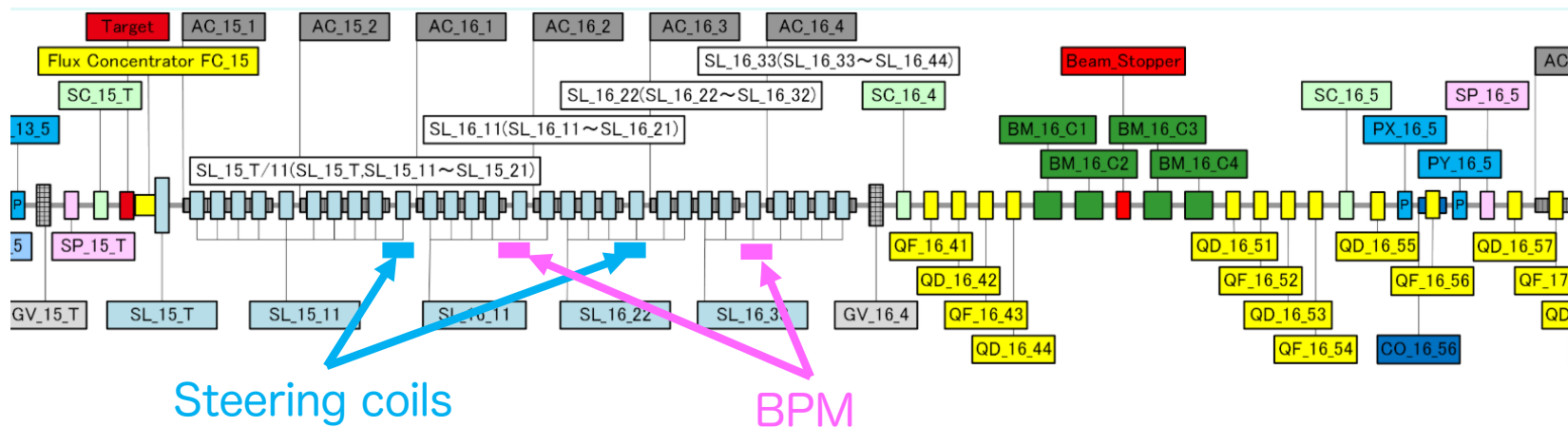


ソレノイド磁場が傾いている

- BPM間の電磁石関連を全て切り、ビームが真っ直ぐ進んでいることを確認後、測定。
- 2 mm程度軌道を変えているため、ソレノイドの軸がずれているとは考えにくい。
- ソレノイドが物理的に傾いているとすると、20 mm程度のミスアライメントがあることになるため非現実的。

陽電子収量問題への対策

- 来年の夏を目標に、ソレノイドセクション内にSTコイルとBPMのインストールを予定（現象の理解とビームロス低減のため）。
- リターンヨークや周囲の構造体（鉄など）の情報を含めた詳細なシミュレーション(CST)が現在行われている（榎本(嘉)



考えられる原因：

- DCソレノイドのリターンヨークに導波管や加速管のサポートを通すための切り欠きがあり、対称性が損なわれているため。
- DCソレノイドコイルのワイヤーが太く、立体的な経路に軸対象でない電流が流れてしまうため。
- ブリッジコイルには、ヨーク形状の非対称性があり、且つリターンヨークヘッド部の材質の問題から磁場の飽和が起きているため。

目次

1. 入射概要
2. 入射器の主要課題
 - A) エミッタンス増大
 - B) 入射ビームによるBelle II へのBackground
 - C) 入射ビームによるRing Abort
 - D) 陽電子の収量
3. 最近の入射器の進展
4. 今後の課題と主な対策

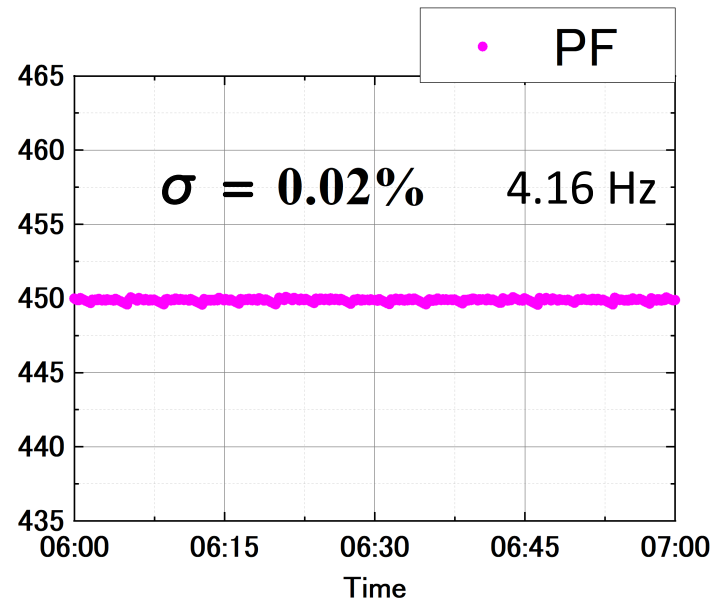
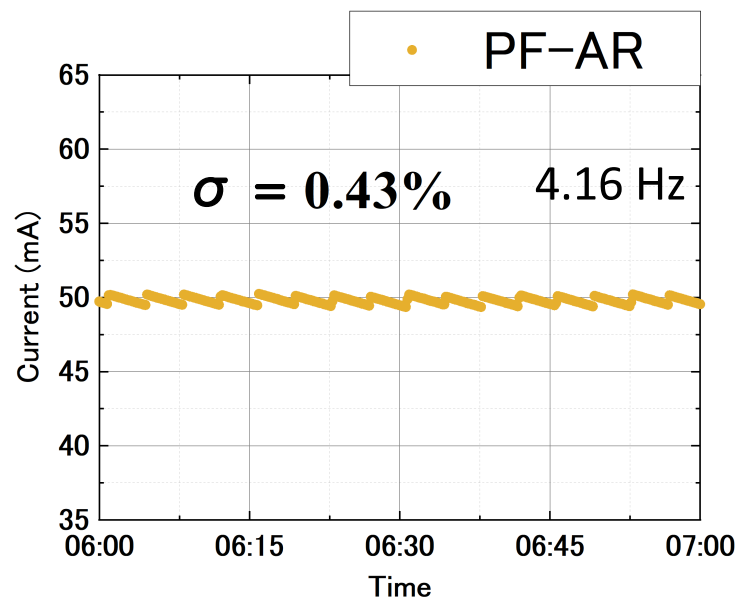
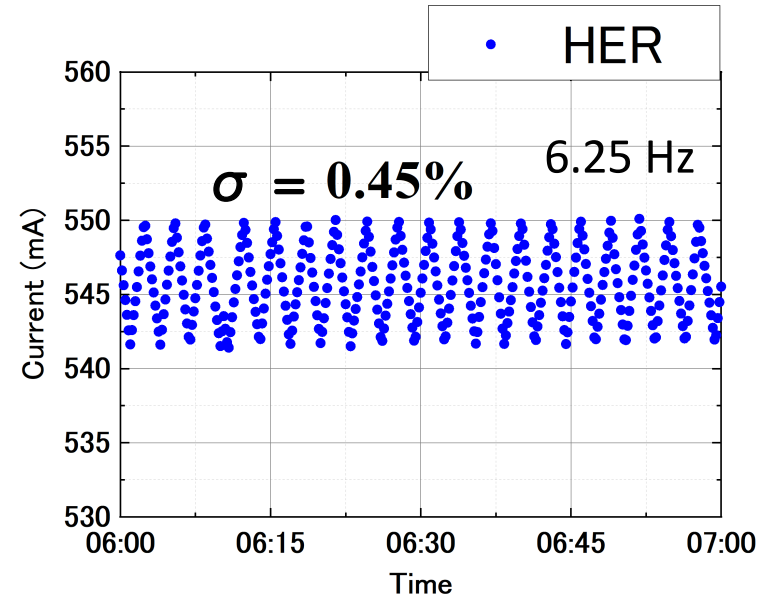
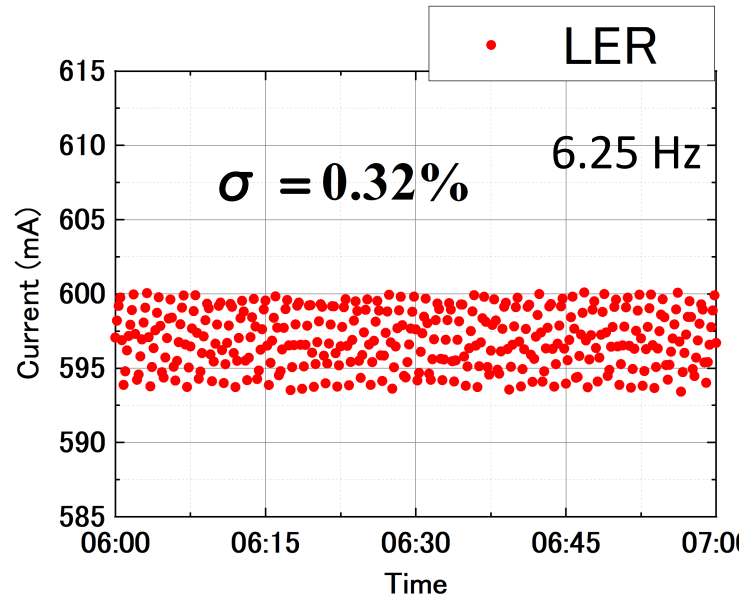
3. 最近の入射器の進展

- 4リング同時トップアップの実現
- RF電子銃の長期連続運用
- 夏期保守中の作業
 - RF電子銃
 - レーザー導波路の真空排気
 - レーザーハット空調機更新 (7 kW => 13 kW) ・断熱材追加
 - バックアップRF電子銃用レーザーライン整備
 - ビームライン
 - アライメント
 - 加速管ユニット架台 ムーバー取り付け (4ユニット分)
 - モニタ
 - 高精度プロファイルモニタの追加 (2カ所. OTR, YAG)

3. 最近の入射器の進展

4リング同時トップアップ

関係者多数



今後の課題と主な対策

A) エミッタンス増大

- ディスパージョン漏れをなくすような調整が必要。
- 特に圧縮用加速管。

B) 入射ビームによるBackground

- ビーム品質、安定度を高める。
- 特にエミッタンス、エネルギー広がり。

C) 入射ビームによるRing Abort

- 突発的なビーム変調に耐えられるように、コリメータの整備が進行中。

D) 陽電子の収量

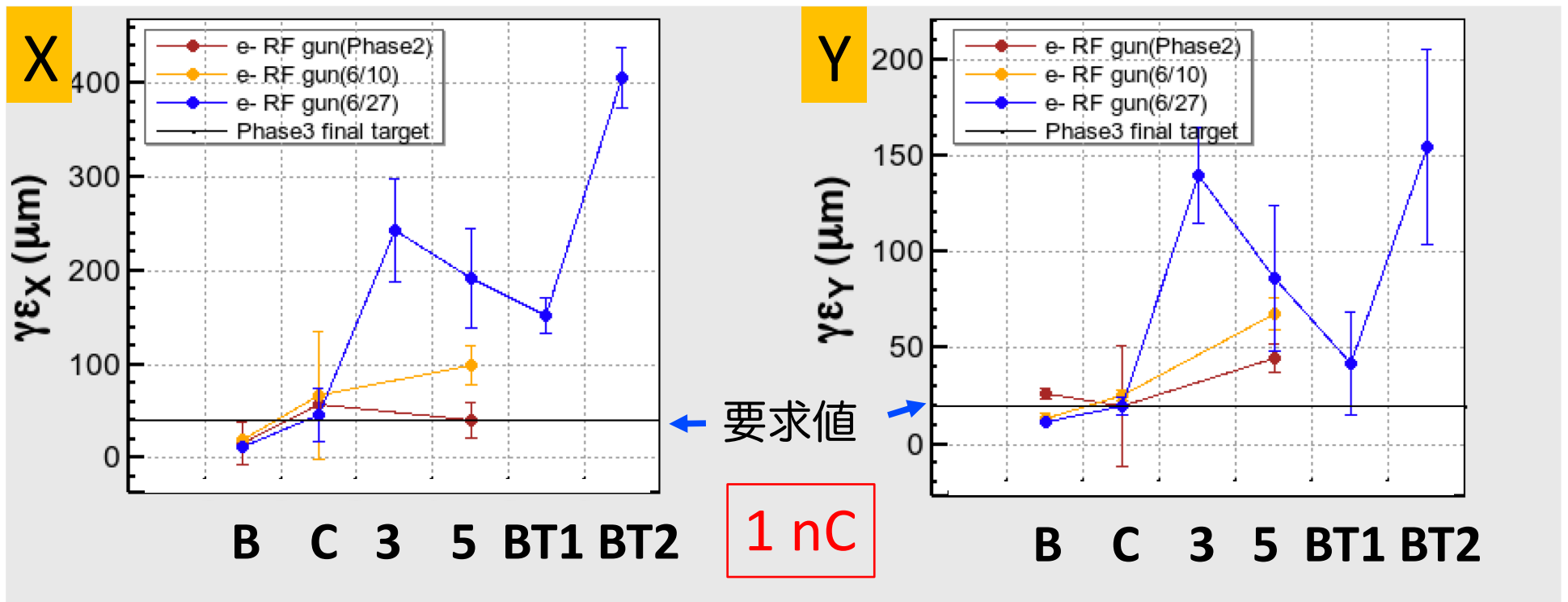
- ソレノイド磁場の傾きの原因調査を進める。
- ソレノイドセクション内にSTコイル、BPMのインストールを予定中。
- 2バンチ運転、primary e-を増やす、ビームロスを減らす、FC電流を上げる。

back up

エミッタンス測定結果 (HER用ビーム)

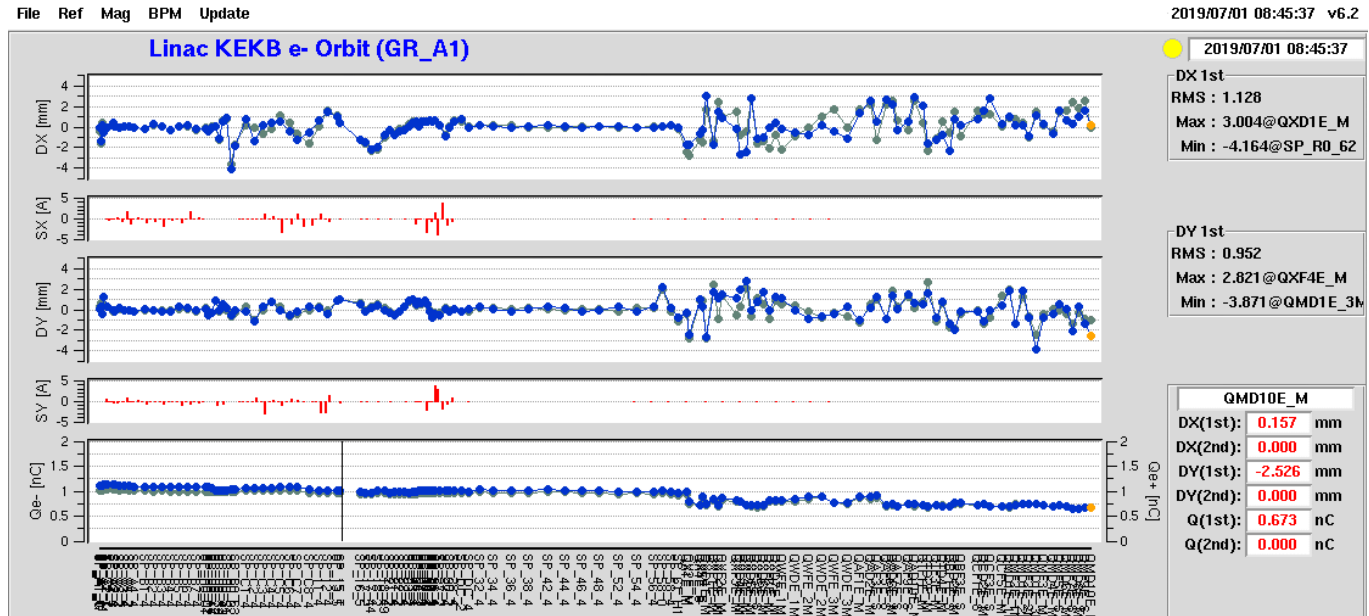
- 調整時間が限られていたため、Phase 2よりもエミッタンスが悪い。
- C-5セクターでエミッタンスが増大している原因は、wakefieldと思われる。
- 調整時間短縮のため、今期自動でエミッタンス増大を抑えるような軌道補正プログラムを試験する。

飯田
菊池
森

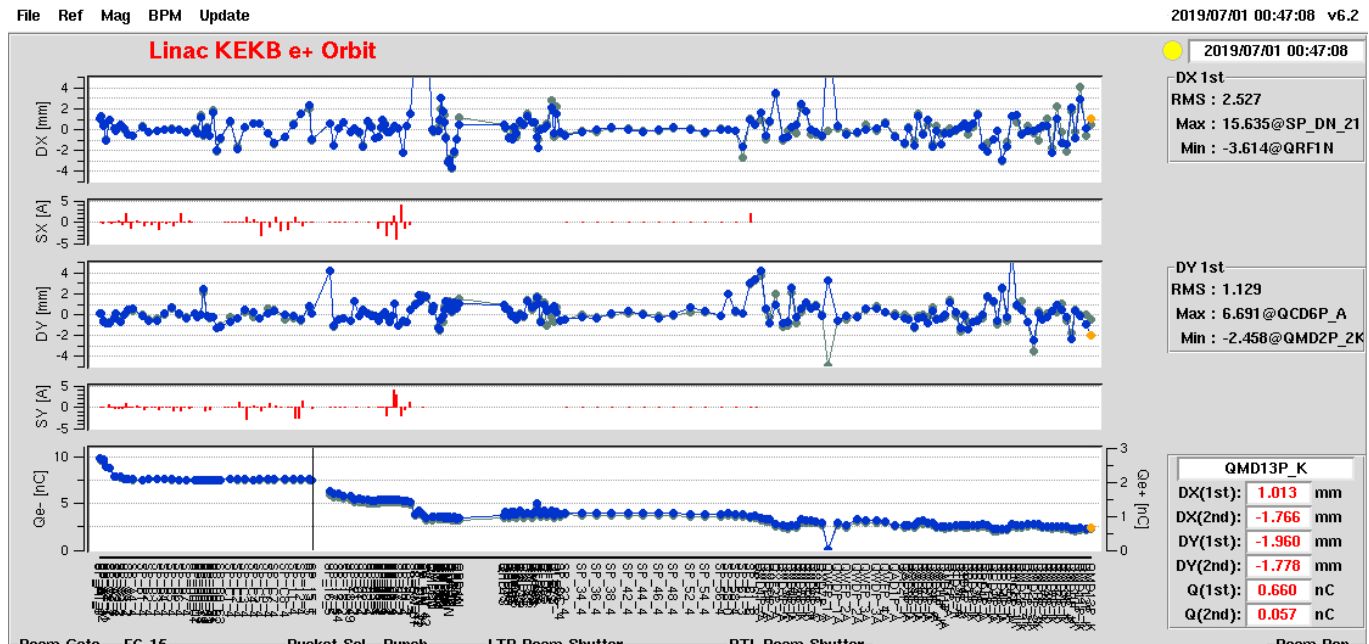


Phase 3での典型的な電荷量

HER用ビーム
 1 nC @Linac end
 0.7 nC @BT end



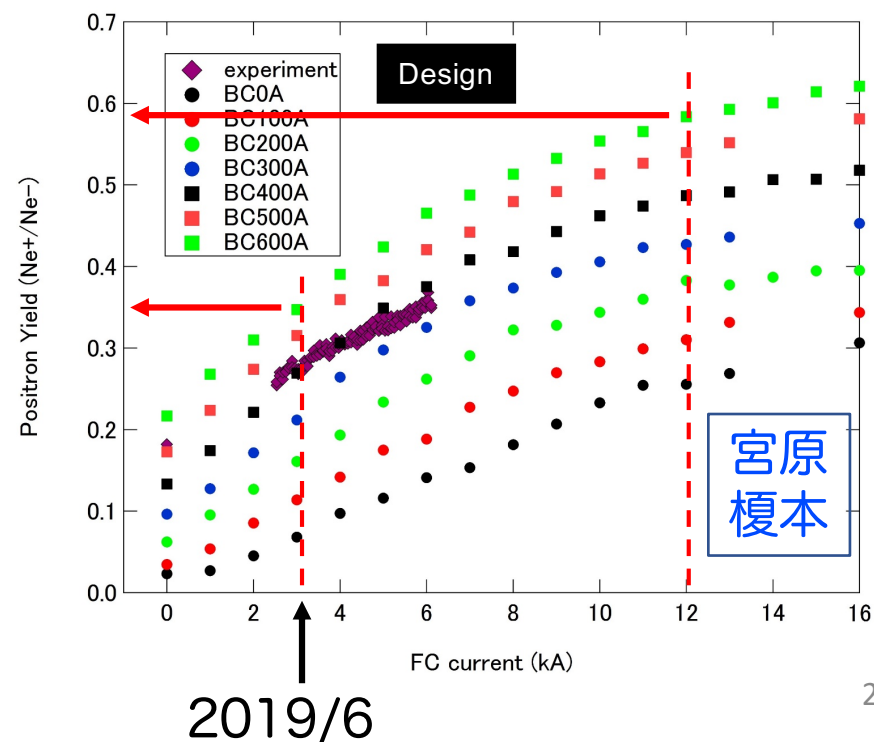
LER用ビーム
 1 nC @Linac end
 0.7 nC @BT end



Phase 3での陽電子収量と予想値

	primary e- (nC)	FC (kA)	Yield (シミュレーション)	Yield比 (実測/シミュレーション)	e+ (nC) @LTR前	e+ (nC) @Linac end	e+ (nC) @BT end
2019/6	7.5	3	0.34	0.7	1.5 (実測)	1 (実測)	0.7 (実測)
ビームロス以外を最適化できた場合	10	12	0.58	1	4.9 (概算値)	3.2 (概算値)	2.3 (概算値)

ビームロスを減らす努力が必要



エミッタンス増大の原因

◆ ディスパーション漏れ

1. ARC後ディスパーションが漏れていると、ディスパーションを通してエネルギー広がり(δ)がビームサイズ(x)を増大させる。
2. 圧縮用加速管内にディスパーションが存在すると、バンチ長(z)に依存した量がエネルギー広がり(δ)を通してビームサイズ(x)を増大させる。

◆ 加速構造内のwakefield (ビームが構造体内を通過した際に生じる電磁場)

- ビーム先頭から生じたwakefieldは、ビーム後方に影響を与える。
- ビームが加速構造の中央を通過しない限り、wakefieldによってエミッタンスが増大する。

◆ ビーム位相空間ジッタ

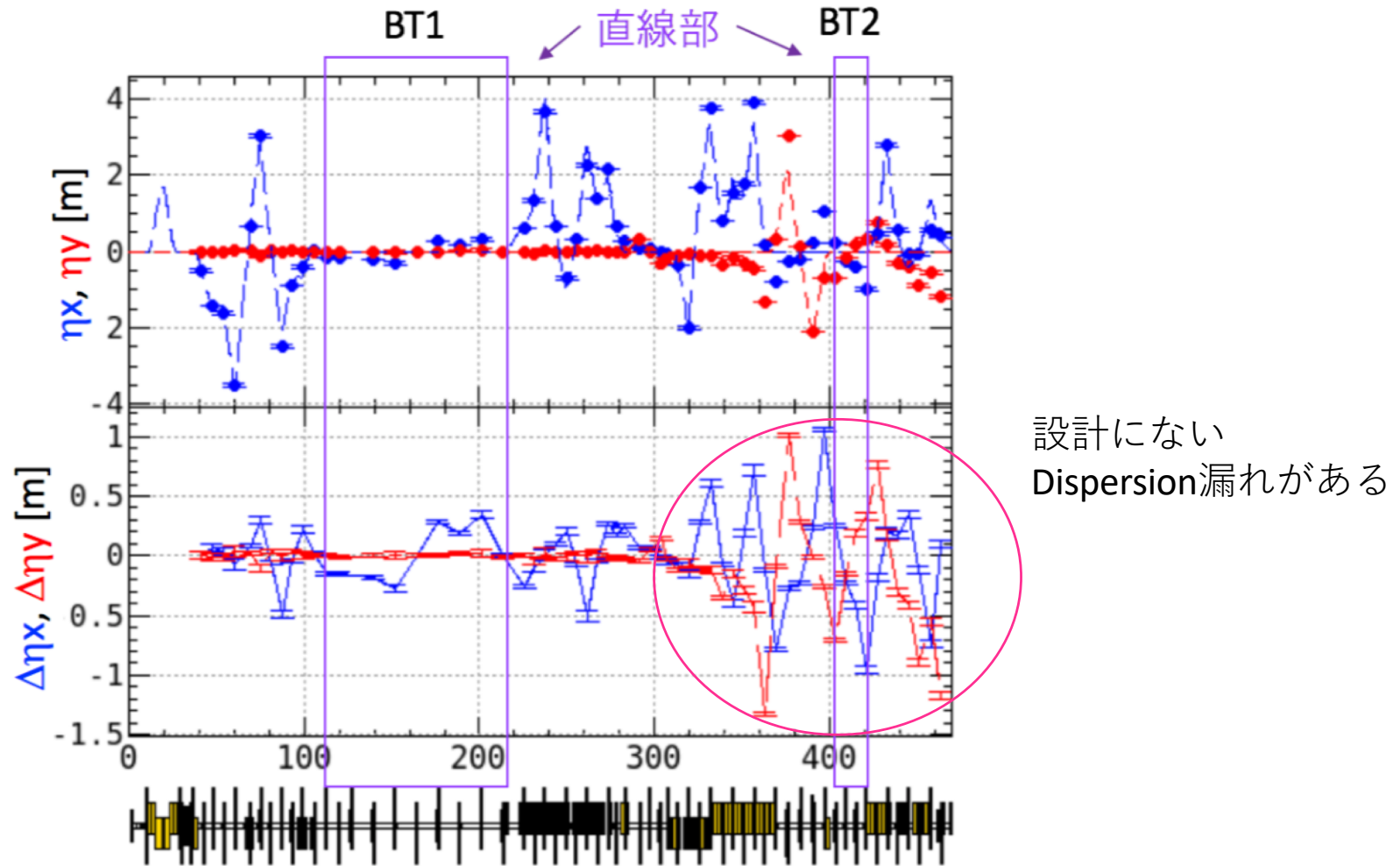
- ビーム位相空間がショットバイショットで揺らいでいると実効的なエミッタンスが増大する。SuperKEKBの要求は有効エミッタンスに対して満たされる必要がある。

◆ 放射励起

- エミッタンスへの影響はローレンツ γ の5乗、曲率半径の3乗に反比例。
- HER(e-)の水平エミッタンスへの影響が大きいですが、致命的な問題にはならないと考えられている。

BT全域の分散の漏れ測定

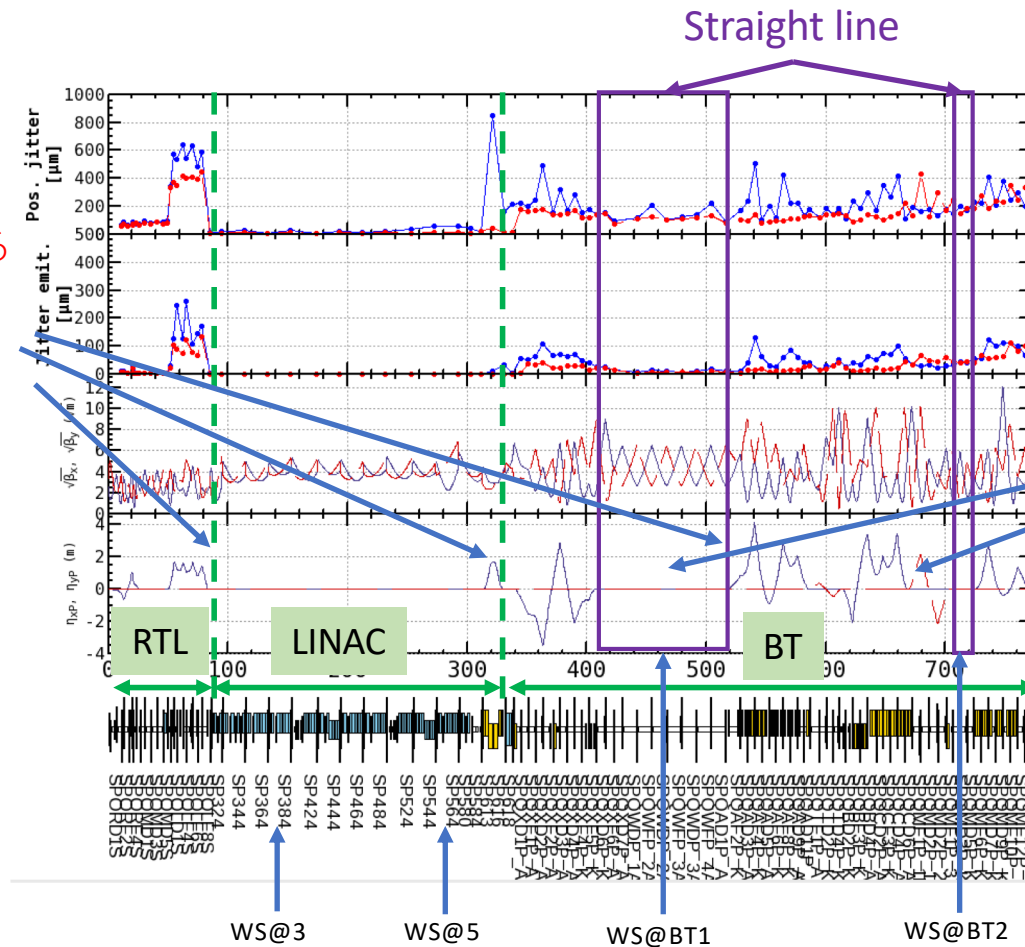
Y. Seimiya



設計にない
Dispersion漏れがある

Dispersionの漏れから来る エネルギージッターによるエミッタンス増大

Dispersionのある
場所でジッター
が大きいのは、
エネルギージッ
ターがあるから



Y. Seimiya

Dispersionのない場所で
ジッターが大きいのは
Dispersion漏れていて、
エネルギージッターが
あるから

コリメータ

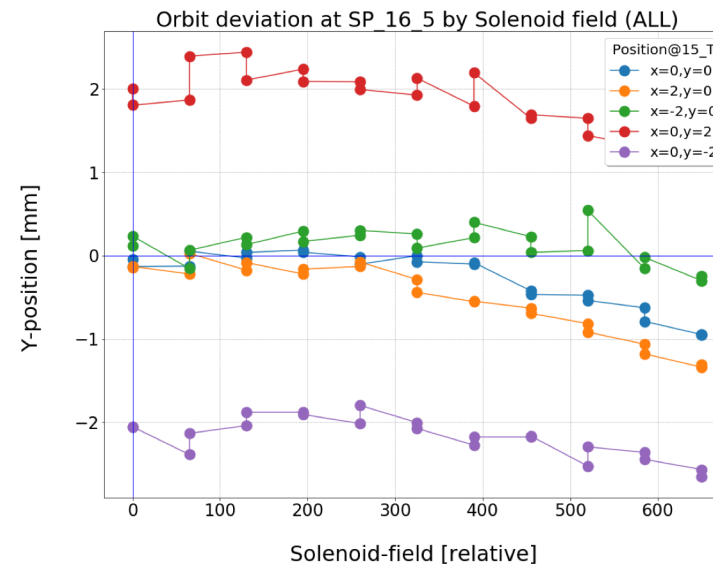
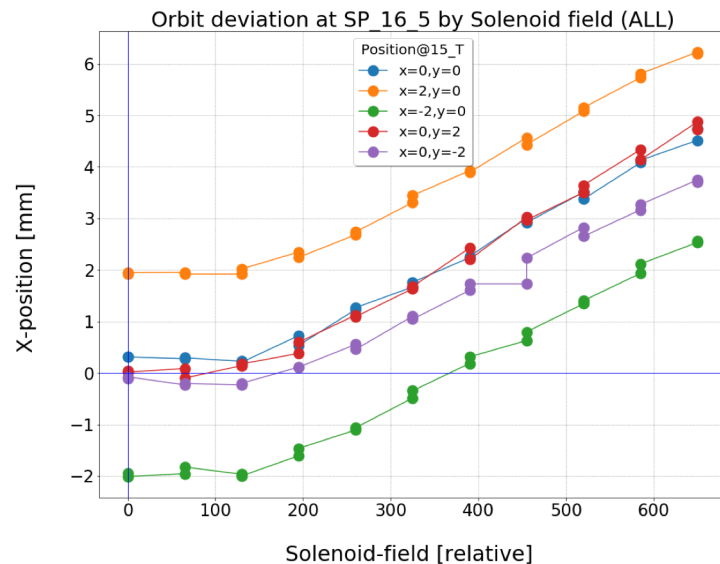
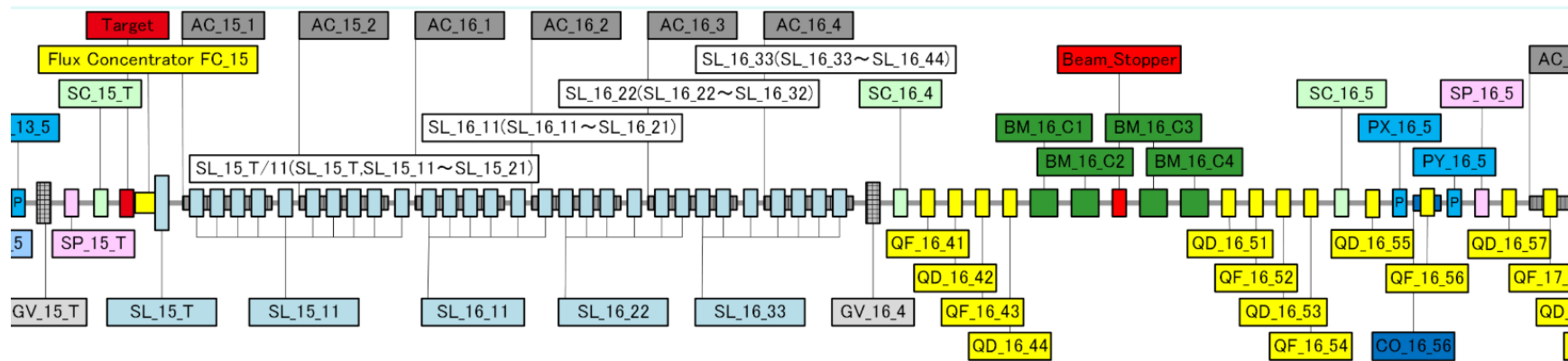
- e-: エネルギーで切れるようにBTコリメータを移動
- e+: SY3 ECS内に設置するコリメータの設計、インストールを計画中

8極BPM

- e-: 今年の冬に8極BPMを移動予定。近くに確認用のスクリーンをインストール予定。
- e+:

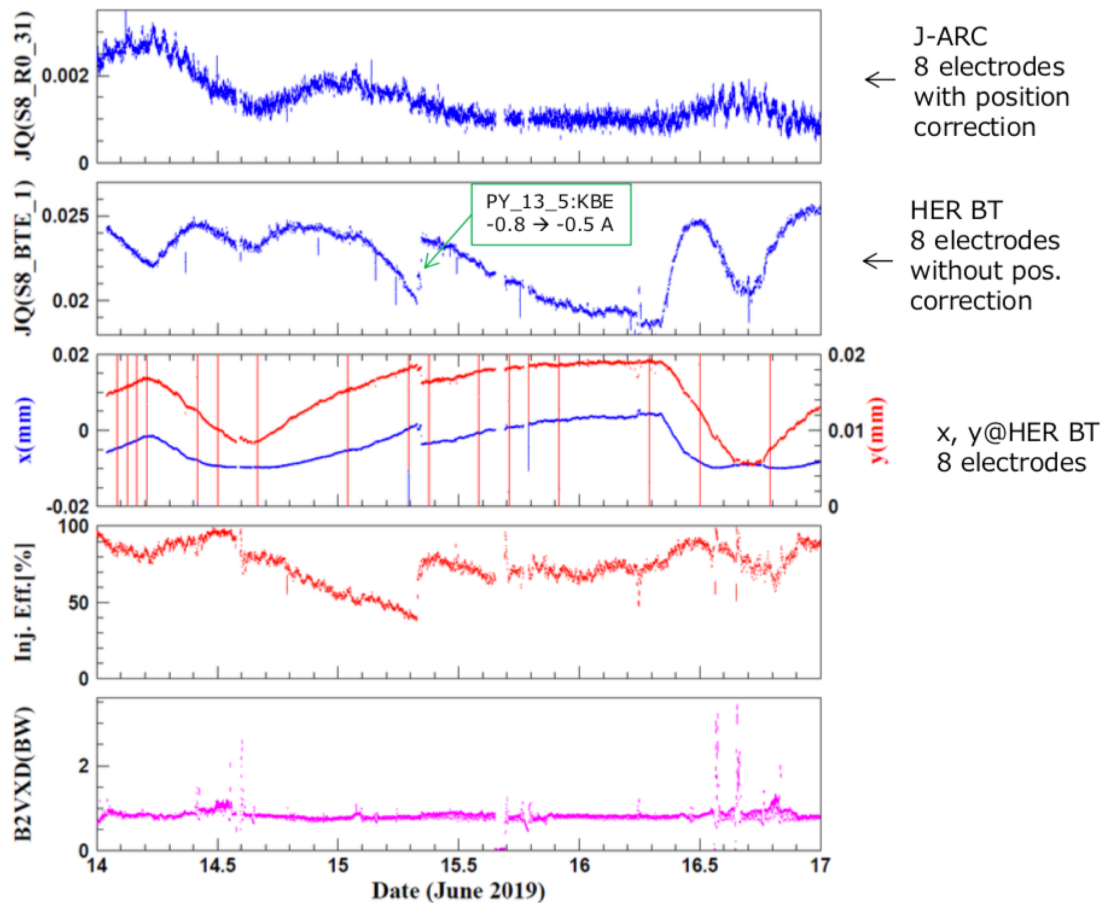
D) 陽電子の収量

- ソレノイド磁場を徐々に増やして、ビームへの影響を調査。
- 測定前にBPM間の電磁石関連を全て切り、ビームが真っ直ぐ進んでいることを確認。
- ソレノイドに通す軌道を変えても、



HER BT 8電極での Quadrupole Momentと入射効率

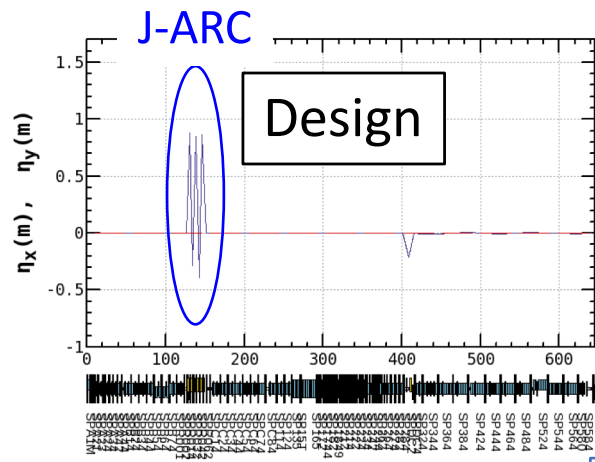
2019/7/12 宮原



S8_R0_31、HER BTの8電極で測定したQuadrupole Moment
とHER_BT 8電極での位置、入射効率、B2V_XD_FWの1分間平均

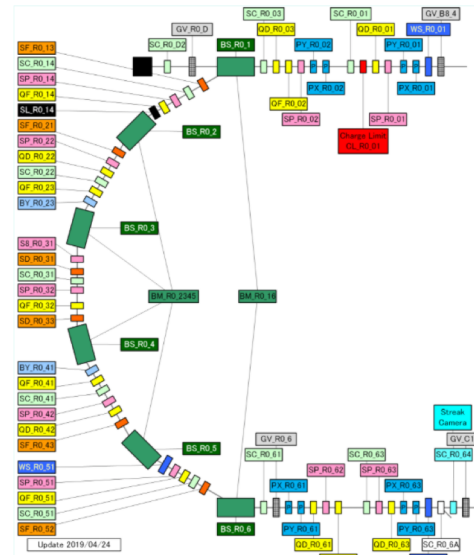
A) Residual Dispersion in LINAC

- Large residual dispersion had been observed at the J-ARC before dispersion correction.
- By tuning the strength of quadrupole magnets, residual dispersion became small.

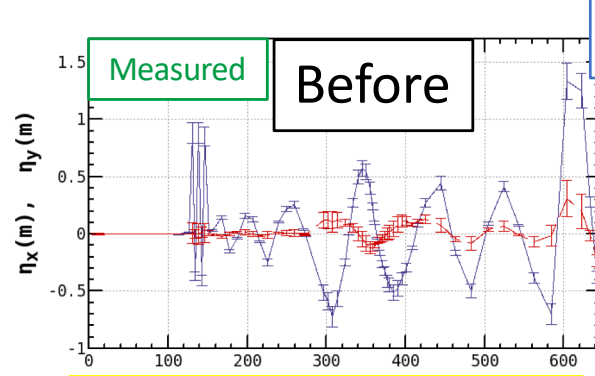
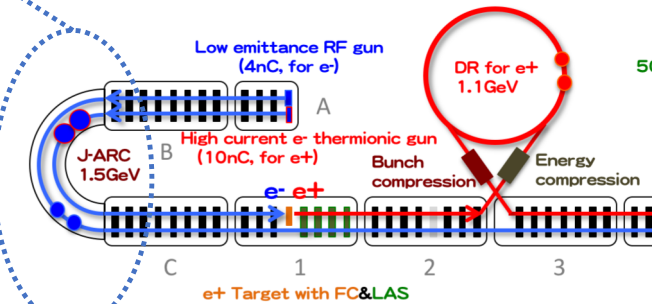


$$x = \eta \frac{\Delta p}{p}$$

$$= \eta \delta$$

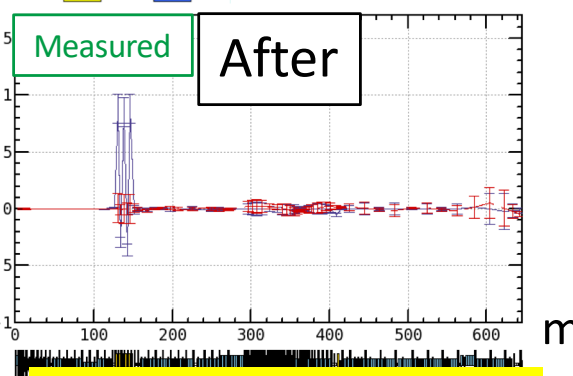


J-ARC



Thermionic gun

Dispersion correction



RMS $\Delta\eta_x = 0.43$ m
 $\gamma\beta\epsilon_x = 187 \pm 27$ μm

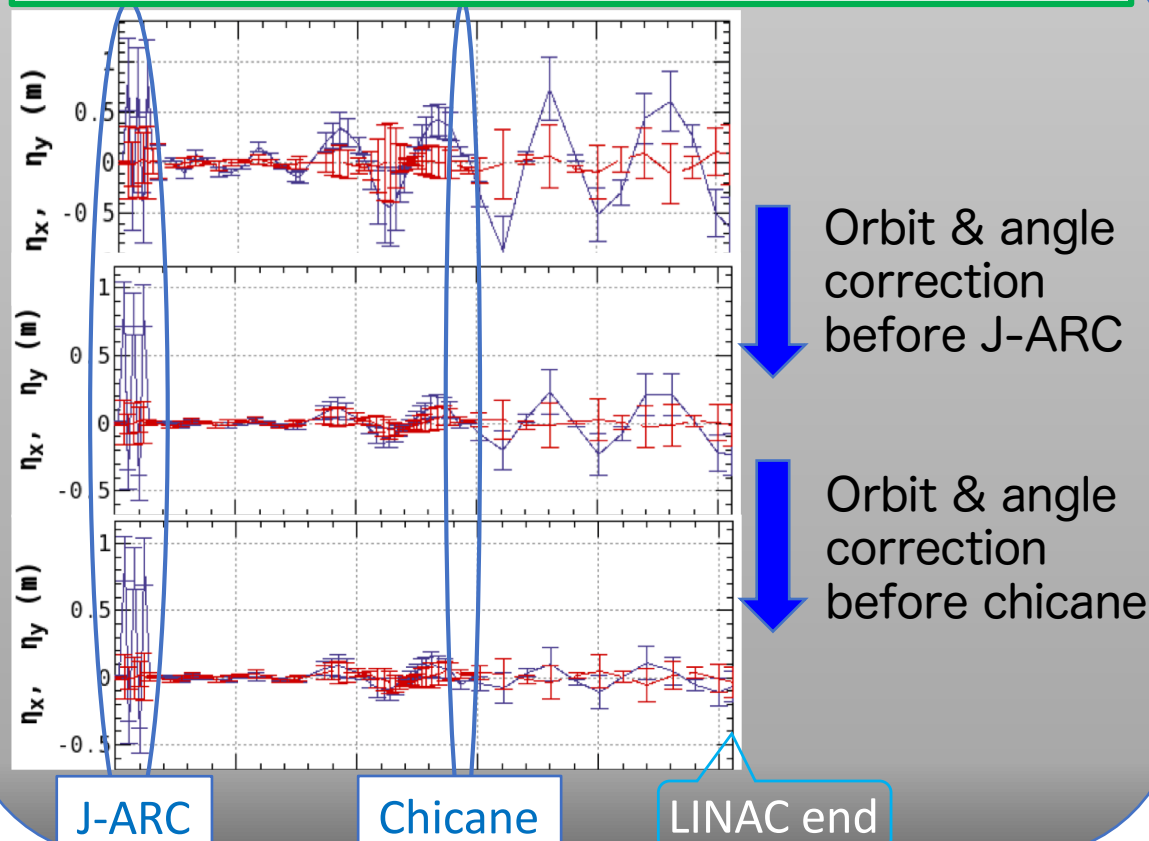
$\Delta\gamma\beta\epsilon_x = -47$ μm

RMS $\Delta\eta_x = 0.02$ m
 $\gamma\beta\epsilon_x = 140 \pm 33$ μm

A) Other sources of Residual Dispersion

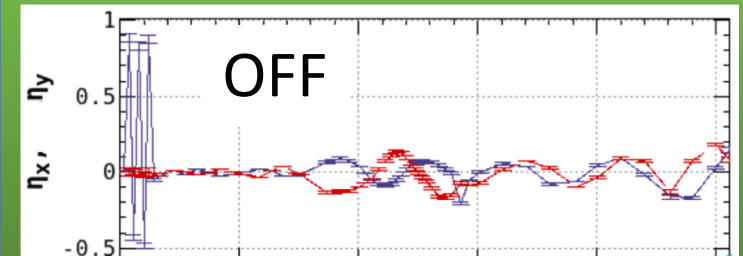
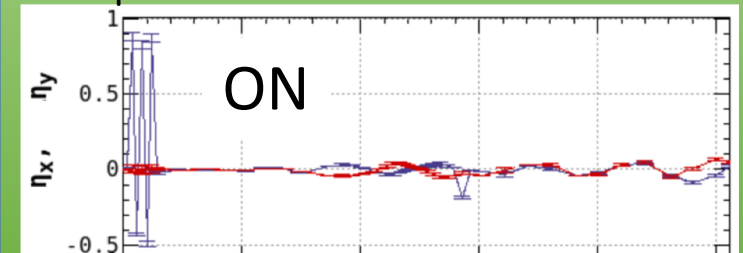
- Both orbit and angle of a beam which pass through bending magnets.
 - Orbit displacement at quadrupole magnets that have a large strength creates a sizable dispersion.
 - Orbit of a beam which pass through sextupole magnets.
- To keep residual dispersion minimized, orbit feedback is necessary.

Dependence between orbit+angle and dispersion



Effect of sextupole magnets

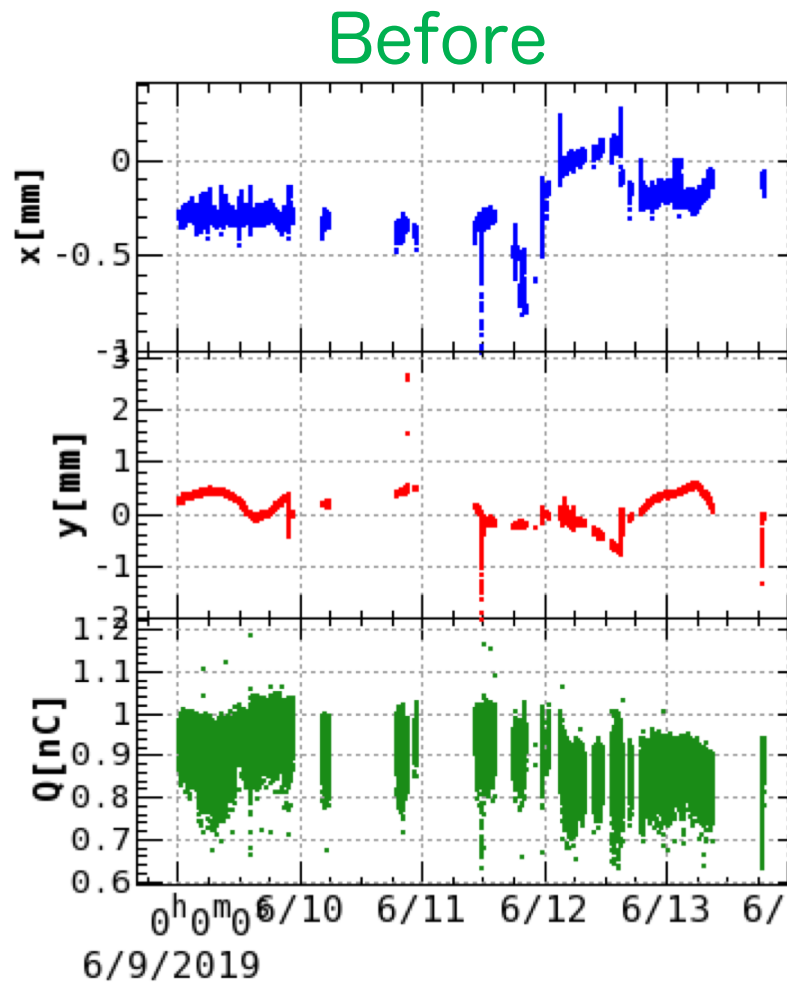
- There are 6 sextupole in J-ARC.
- Orbit displacement cause quadratic force.



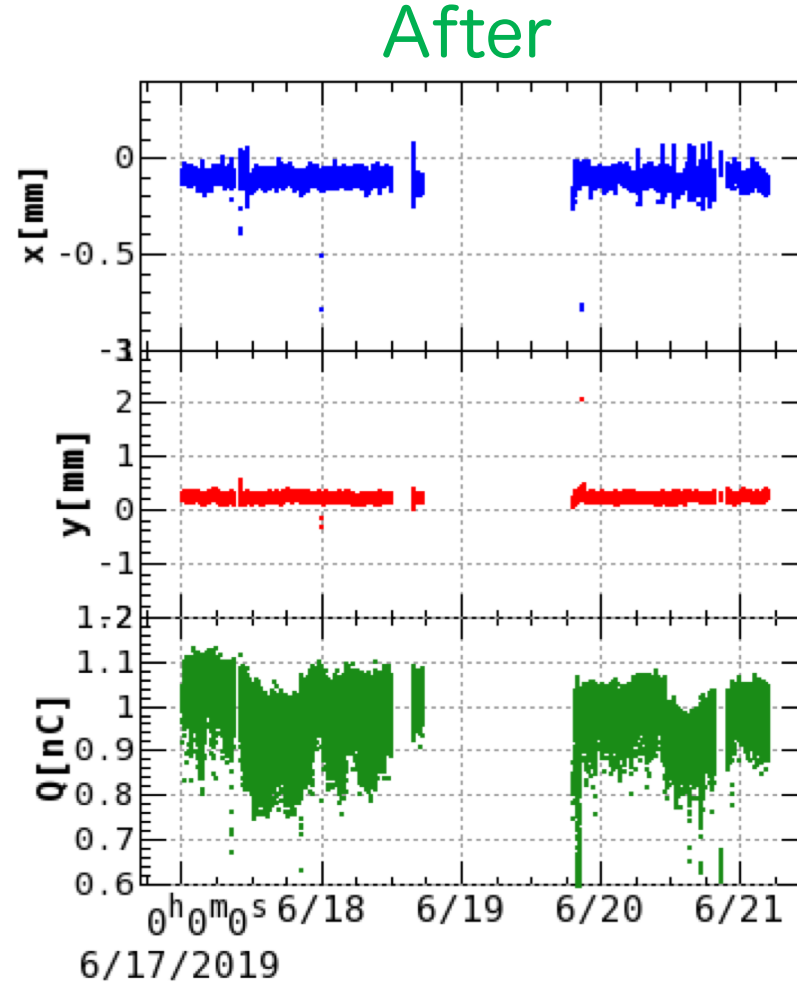
LINAC end

A) Orbit Feedback

- An example of orbit FB (Shown BPM place in the LINAC end)
- Orbit FB at the end of LINAC was operated correctly.
- Orbit FB of J-ARC upstream will be performed next run.



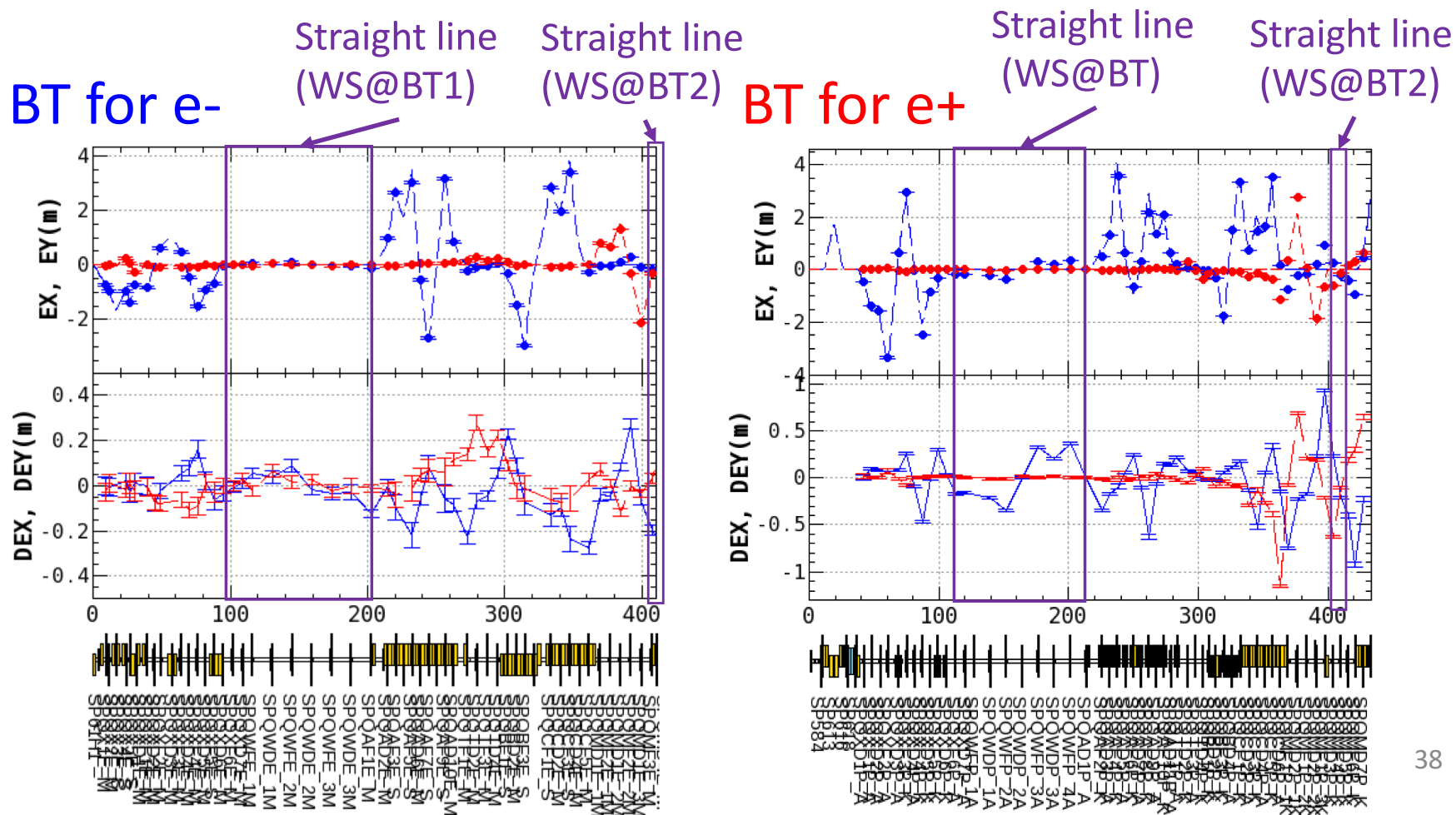
SP584



SP584

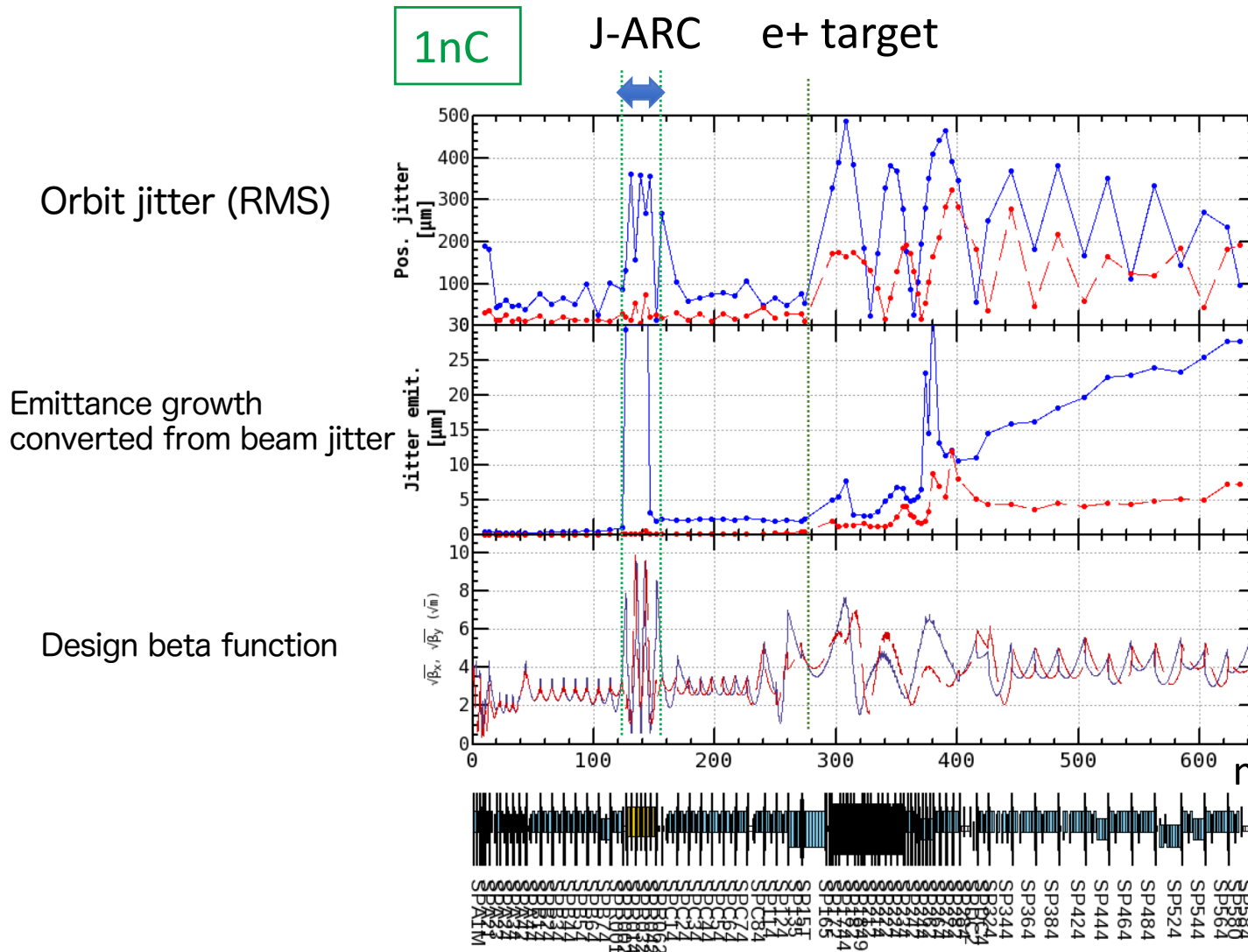
A) Residual Dispersion at BT line

- We had corrected dispersion of each BT ARC one by one.
- After that dispersion of the BT overall was measured changing the beam energy.
- Non-negligible residual dispersion was still observed.
- We will minimize $\Delta \eta$ and $\Delta \eta'$ at the end of BT in the autumn run.



B) Beam Phase Space Jitter

- In 2018, large orbit jitter was measured (1000 shots).
- Emittance estimated from beam jitter, called jitter emittance, was not negligible.



Phase 3 final	
Bunch charge (nC)	4
Emit. @BT end ($\gamma\beta\epsilon$) (μm)	40/20 (Hor./Ver.)

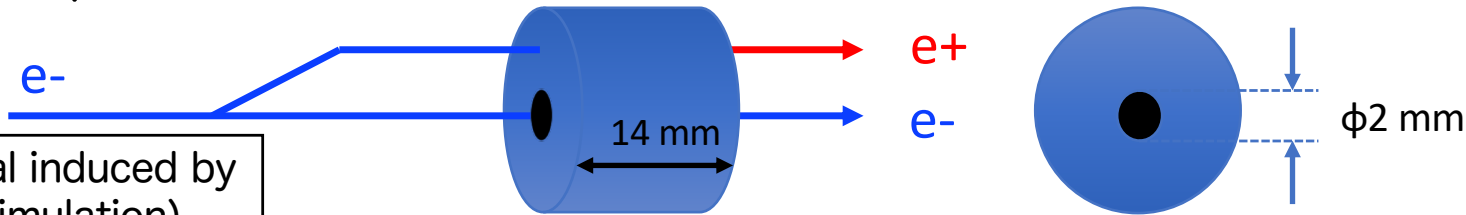
Linac end:
28/7 μm
 (Hor./Ver.)

$$\epsilon_{eff} = \sqrt{\epsilon_0^2 + \epsilon_j^2 + 2\epsilon_0\epsilon_j B_{jmag}} \geq \epsilon_0 + \epsilon_j$$

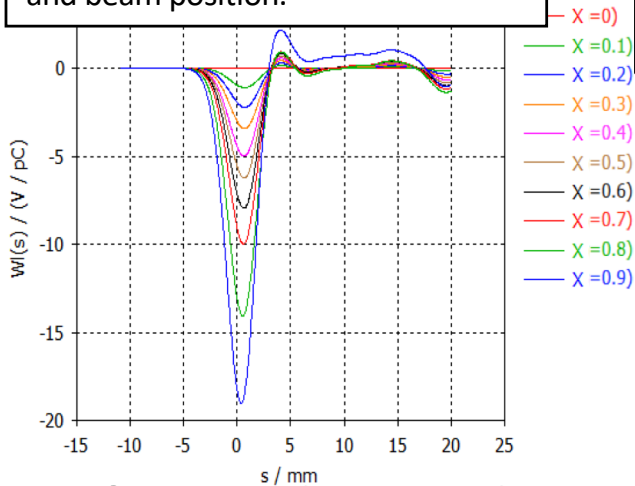
$B_{jmag} (\geq 1)$ express amount of mismatching between beam optics and the jitter optics.

B) Wakefield effect and Beam Phase Space Jitter

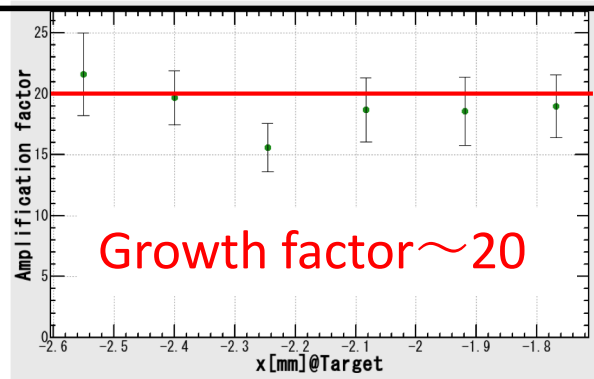
- Electron beam straightly pass through the positron generation target hole, whose diameter is 2 mm.
- We suspected wakefield effect as a orbit jitter source.



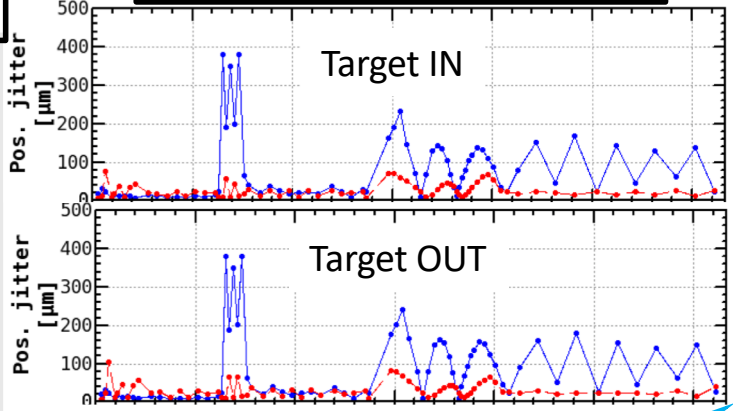
wake potential induced by target hole (simulation)
Color differences show differences of distance between center of hole and beam position.



From the beam position before and after target, amplification factor are derived.



Comparison of orbit jitter



LINAC end

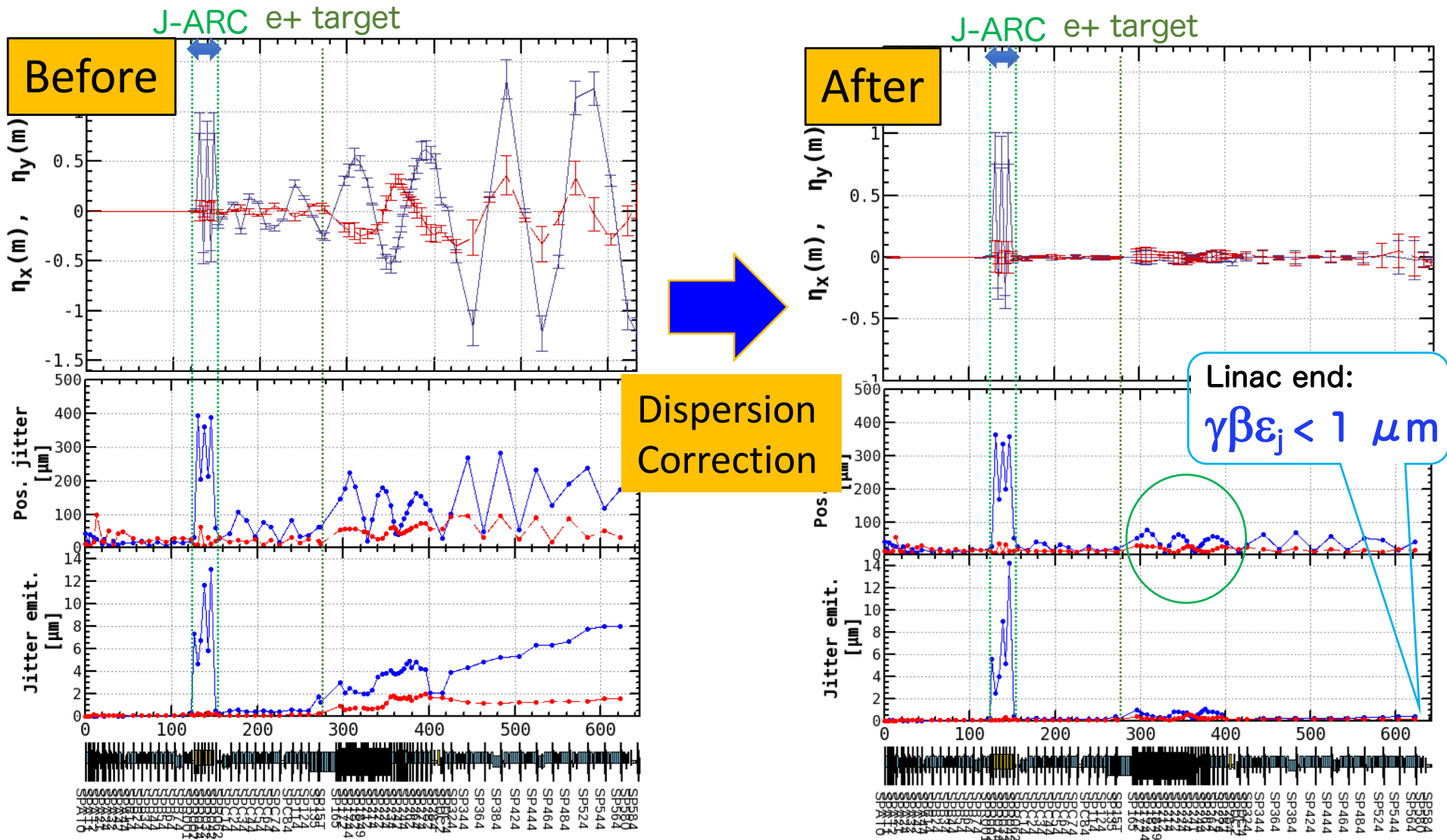
Growth factor of beam phase space jitter:

$$R_j = \frac{\beta \Delta y'}{\Delta y} = \frac{Q}{E_0} k_T \beta_y < 0.1 @ 1 \text{ nC} \ll \text{Measured growth factor}$$

Wakefield effect of target hole is negligibly small.

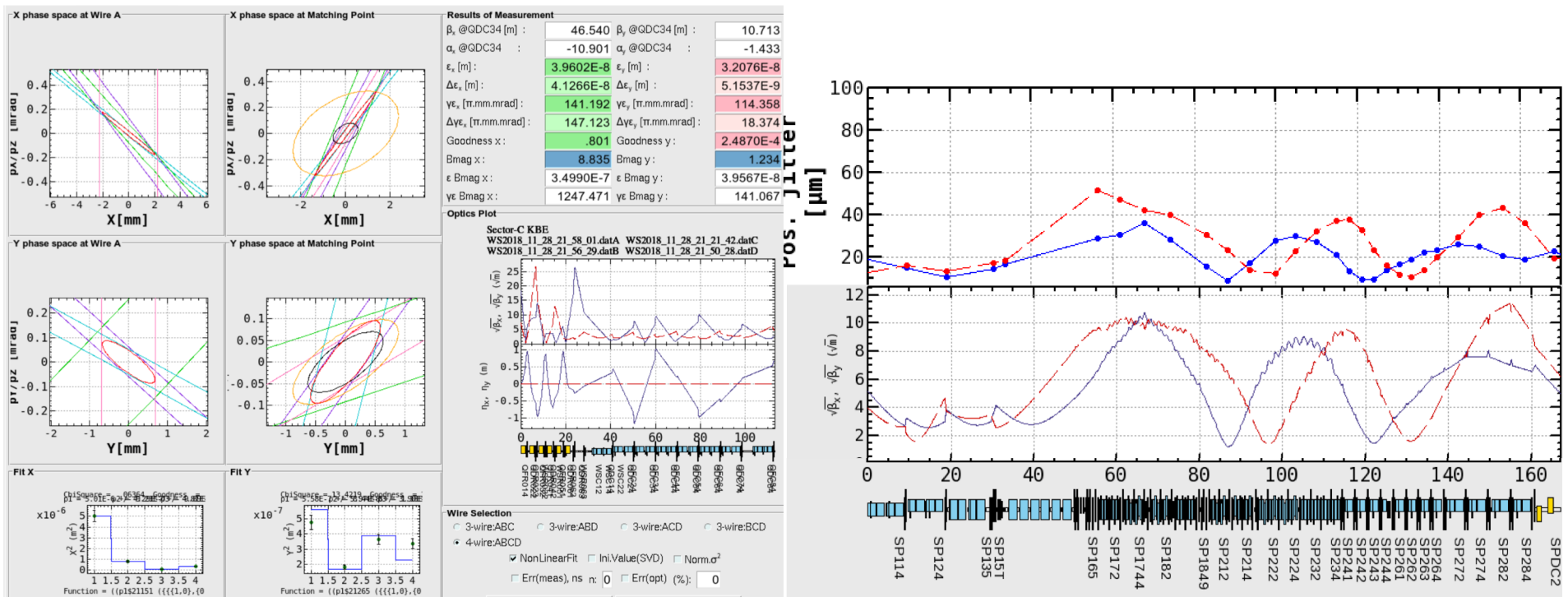
B) Dispersion and Beam Phase Space Jitter

- We focus on dispersion which convert to orbit jitter through energy jitter.
- By dispersion correction, jitter emittance become less than $1 \mu\text{m}$.



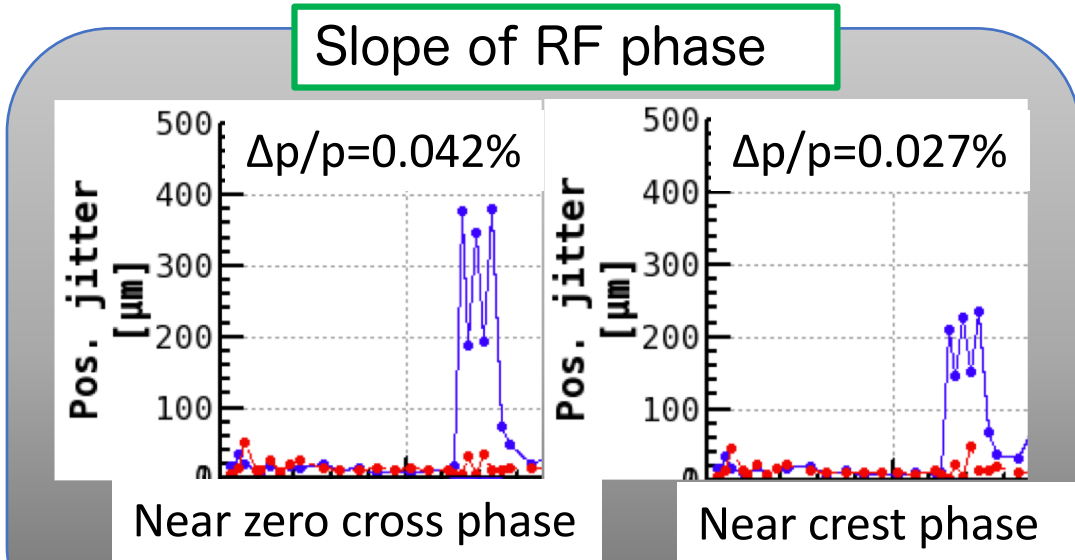
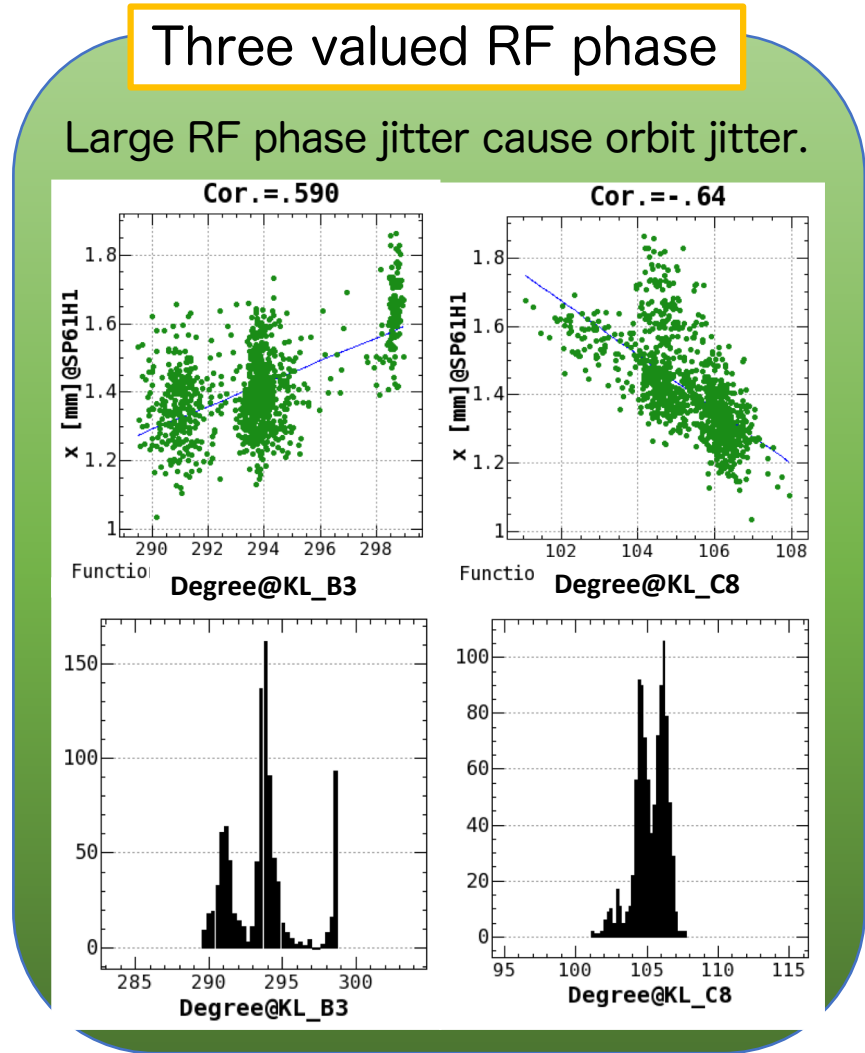
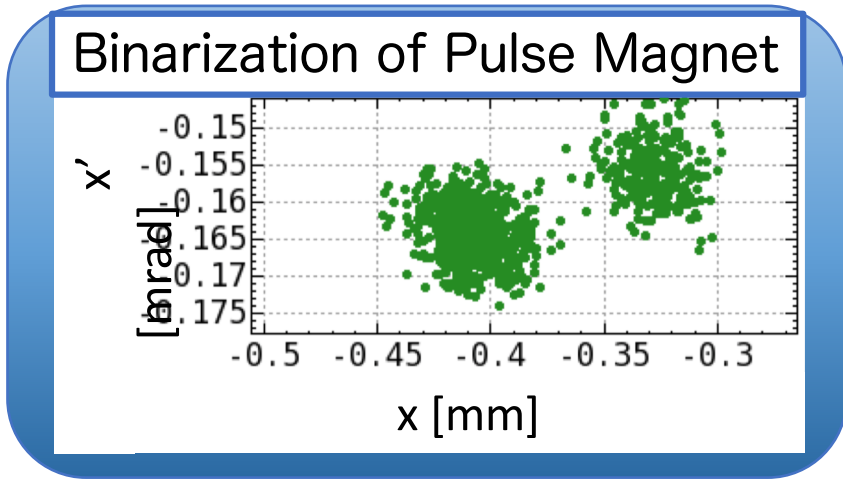
B) β Function and Orbit Jitter

- Remain orbit jitter can be explained by β function.
- Using Twiss parameters measured by WS at C sector, β function near target is derived.
- β function is highly correlated with orbit jitter.
- We conclude that large orbit jitter sources are mainly both residual dispersion and β function.



B) Other Sources of Beam Phase Space Jitter

- By further investigation, we found that following items were sometimes sources of jitter. Pulse magnet and RF phase jitter was almost resolved by person in charge.
- To identify the jitter source, monitoring beam jitter is important.

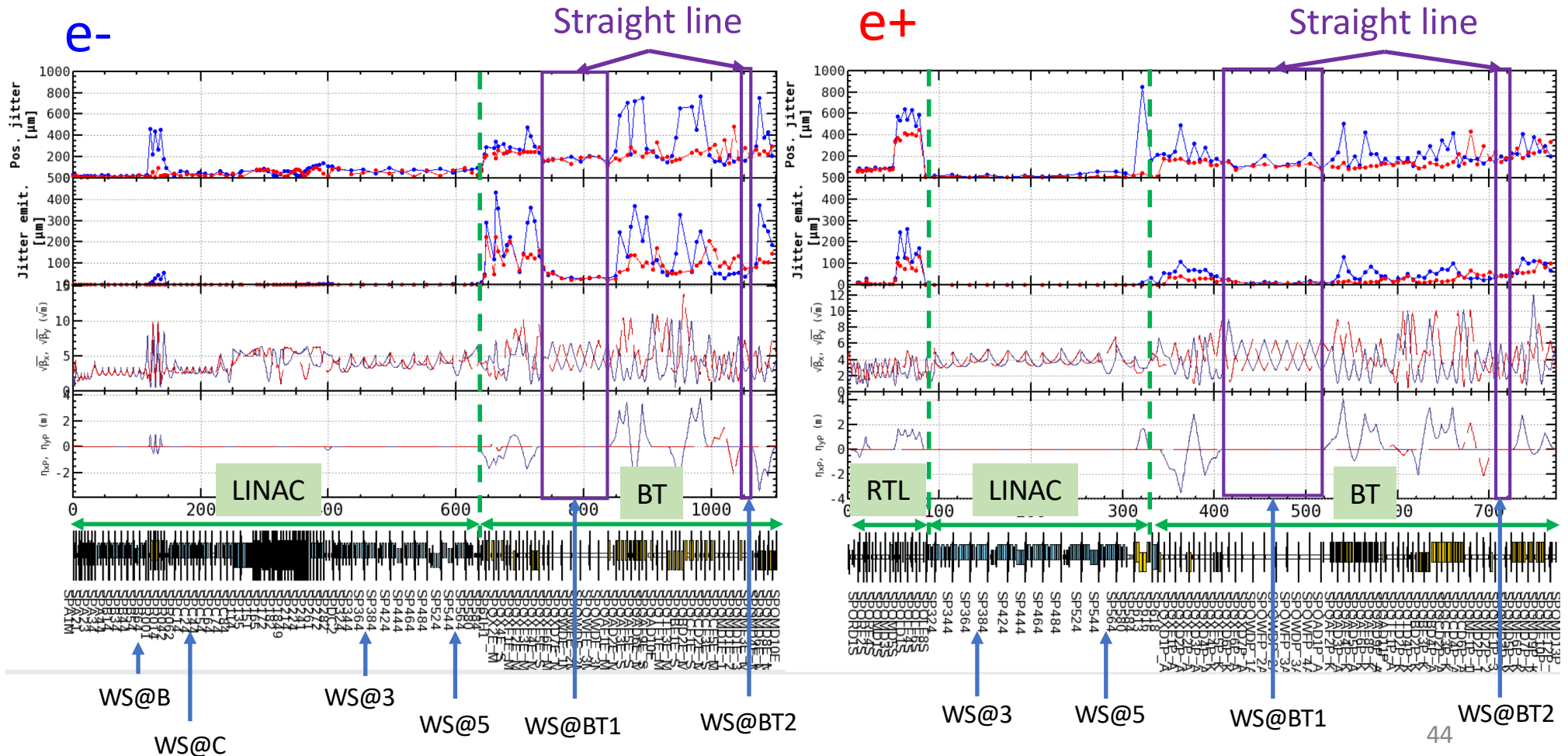


If RF phase is near zero cross, energy jitter is enlarged by the slope of phase.

B) Beam Phase Space Jitter

B) Beam Phase Space Jitter at BT line

- In the RTL and BT, orbit jitter is much larger than that in LINAC, partly because BPM resolution is poor.
- Orbit jitter of first straight line in BT is about $\sim 150 \mu\text{m}@1\sigma$. This value is probably BPM resolution.
- Assumed that calculated jitter emittance at the first straight line came from BPM resolution, jitter emittance at second straight line is estimated as following:
 - e- beam: $\gamma\beta\epsilon_{jx}/\gamma\beta\epsilon_{jy}$ @BT end $\sim 40/50 \mu\text{m}$
 - e+ beam: $\gamma\beta\epsilon_{jx}/\gamma\beta\epsilon_{jy}$ @BT end $\sim 30/30 \mu\text{m}$
- High resolution BPM is strongly desirable at BT. An upgrade of some BPMs for higher resolution is planned.



C) Wakefield in Acceleration Structure

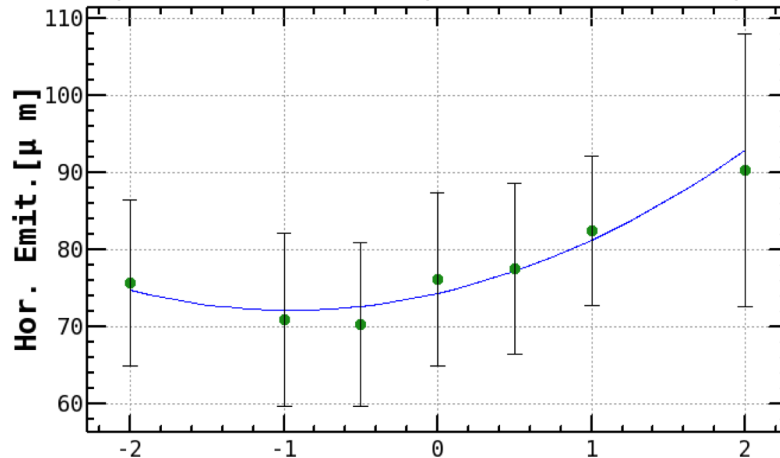
- Using a steering magnet, we searched an orbit so as to minimize emittance.
- Emittance highly depends on beam charge and orbit.
- Wake free steering will be performed using RF gun in the next run.

Thermionic gun

1nC

Min. Emit. = $72.1 \pm 3.03 \mu\text{m}$ @ $x = -.96 \text{ mm}$

ChiSquare = .13237 Goodness = .99790
 $a = 2.36119 \pm 5.75662$ $b = 4.54961 \pm 7.58800$ $c = 74.3310 \pm 10.6088$

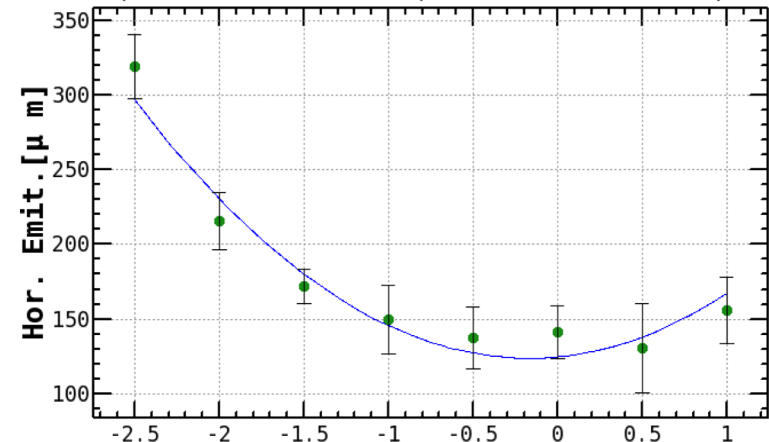


Function = $(c+(a(x^2))+(b x))x$ [mm]@SPA23

4nC

Min. Emit. = $123. \pm 3.77 \mu\text{m}$ @ $x = -.16 \text{ mm}$

ChiSquare = 3.61640 Goodness = .60585
 $a = 31.7899 \pm 11.9746$ $b = 10.7473 \pm 21.4634$ $c = 124.683 \pm 18.3893$



Function = $(c+(a(x^2))+(b x))x$ [mm]@SPA23

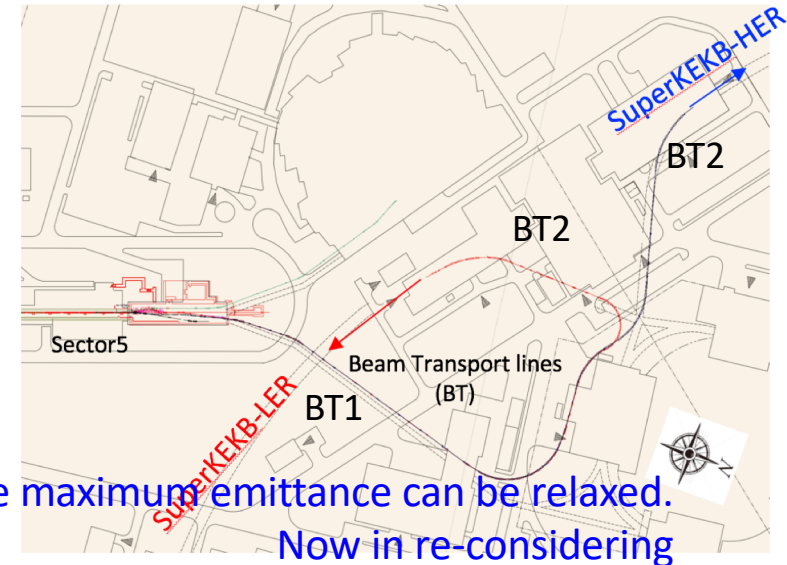
E) Emittance growth induced by radiation excitation in BT

Theoretical emittance growth induced by radiation excitation:

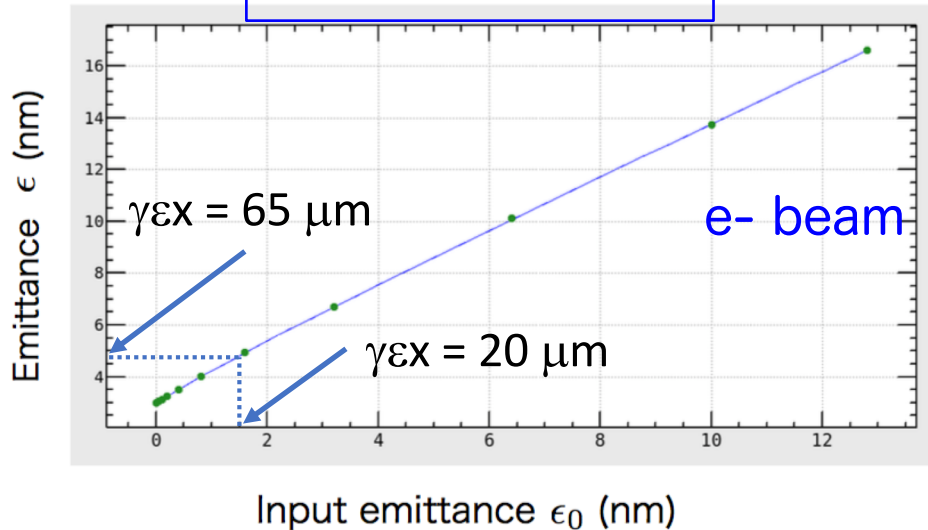
$$\Delta\epsilon = \frac{55}{48\sqrt{3}} \frac{\hbar r_e}{mc} \gamma^5 \int \frac{H}{\rho^3} ds \propto \gamma^5, 1/\rho^3$$

Particle tracking simulation was performed from the end of LINAC to the end of BT.

Simulation	Initial particles	With Radiation	Phase-III final requirement
e- (7 GeV) $\gamma\beta\epsilon_x$ [μm]	20	65	40 -> The maximum emittance can be relaxed.
e+ (4 GeV) $\gamma\beta\epsilon_x$ [μm]	64	74	100



M. Kikuchi Simulation Result



- Radiation excitation has little dependence on initial emittance.
- By the radiation excitation, emittance growth of e-/e+ beam is about 48/10 μm .
- The beam size at the injection septum is **0.31 mm**, assuming $\beta_x = 20 \text{ m}$. The required injection aperture is still dominated by the septum width of **2.5 mm**. Although the emittance growth due to synchrotron radiation is very big, it **plays only a minor role on the injection aperture itself**.