

SuperKEKB-LER 陽電子用ダンピングリング 入出射路の コミッショニング

2018.8.9

第15回加速器学会

高エネルギー加速器研究機構 (KEK)

飯田 直子

for SuperKEKB and LINAC Commissioning Group

ダンピング・リング (DR) : SuperKEKB-LERに入射するためのe⁺ビームの
エミッタンスを小さくする

目次

0. DR

1. The DR Complex

- Positron Damping Ring(DR)
- Linac To Ring(LTR) : DRへの入射路
- Ring To Linac(RTL) : DRからの出射路

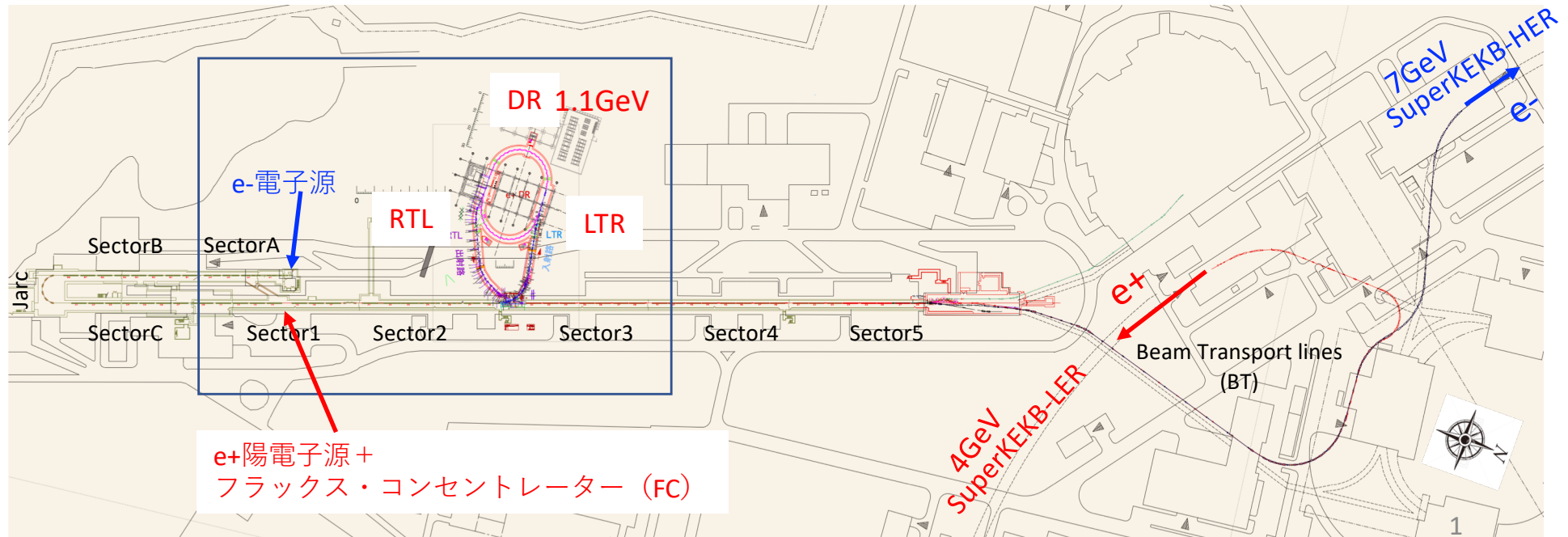
2. LTRのコミッショニング

3. RTLのコミッショニング

4. まとめ

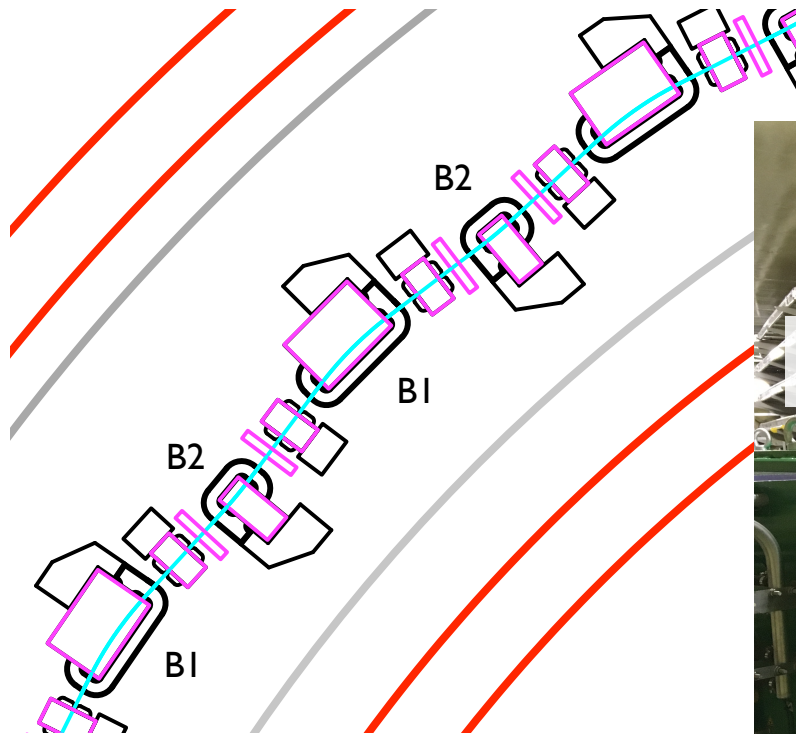
SuperKEKB-LERから 入射ビームへの要求値

	Phase 2	Phase3 -
	2018年	2019年～
$\gamma\epsilon_x$ [μm]	< 200	< 100
$\gamma\epsilon_y$ [μm]	< 40	< 15
σ_δ [%]	0.16	0.1
電荷量 [nC]	1.5	4.0



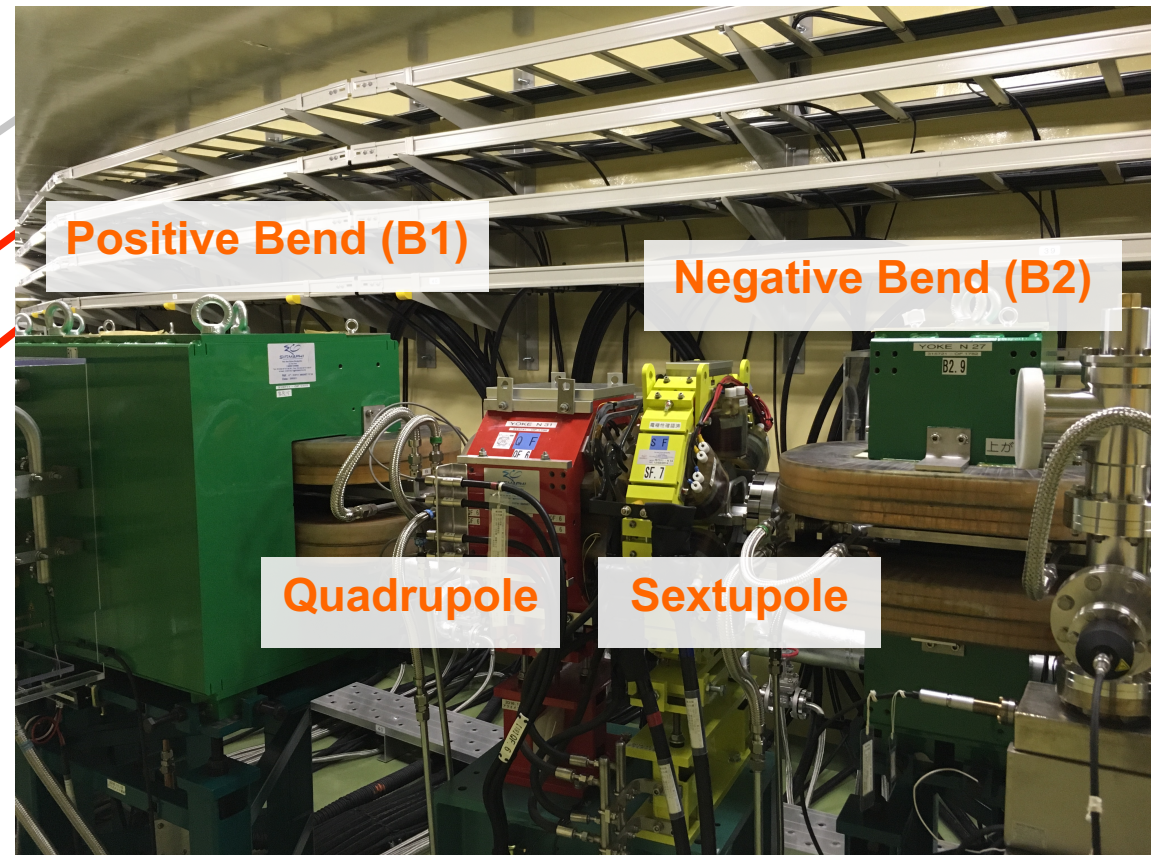
FODO Cell with Negative Bend

Radiation Damping Timeを短くするため、Negative Bendを採用した(M. Kikuchi)



- B1 : Positive Bend (angle >0)
- B2 : Negative Bend (angle <0)

Dipole field ~ 1.3 T



DR Parameters

Parameters	New Model	Unit
Energy	1.1	GeV
Circumference	135.498295	m
# of bunch	2	
# of bunch / train	2	
Max. stored current	11	mA
Energy loss per turn	0.0847	MV
Damping time ($\tau_x / \tau_y / \tau_z$)	11.5 / 11.7 / 5.8	msec
Emittance ($\epsilon_x / \epsilon_y / \epsilon_z$)	29.2 / 1.5 / 3630	nm
ϵ_y / ϵ_x	5	%
$\nu_x / \nu_y / \nu_s$	8.830 / 6.280 / -0.018	
Energy spread	0.055	%
Bunch length	6.6	mm
Mom. Comp. factor	0.0100	
# of cells	32	
Total RF voltage	1.0	MV
RF frequency	509	MHz
Bucket Height	1.5	%

$$\gamma\epsilon_x / \gamma\epsilon_y (\mu\text{m}) = 64.3 / 3.2$$

	DRへの入射	DR設計値
$\gamma\epsilon_x(\mu\text{m})$	2800	64.3
$\gamma\epsilon_y(\mu\text{m})$	2600	3.2
$\sigma_z(\text{mm})$	$\pm 30^*$	6.6
$\sigma_\delta(\%)$	$\pm 1.5^*$	0.055

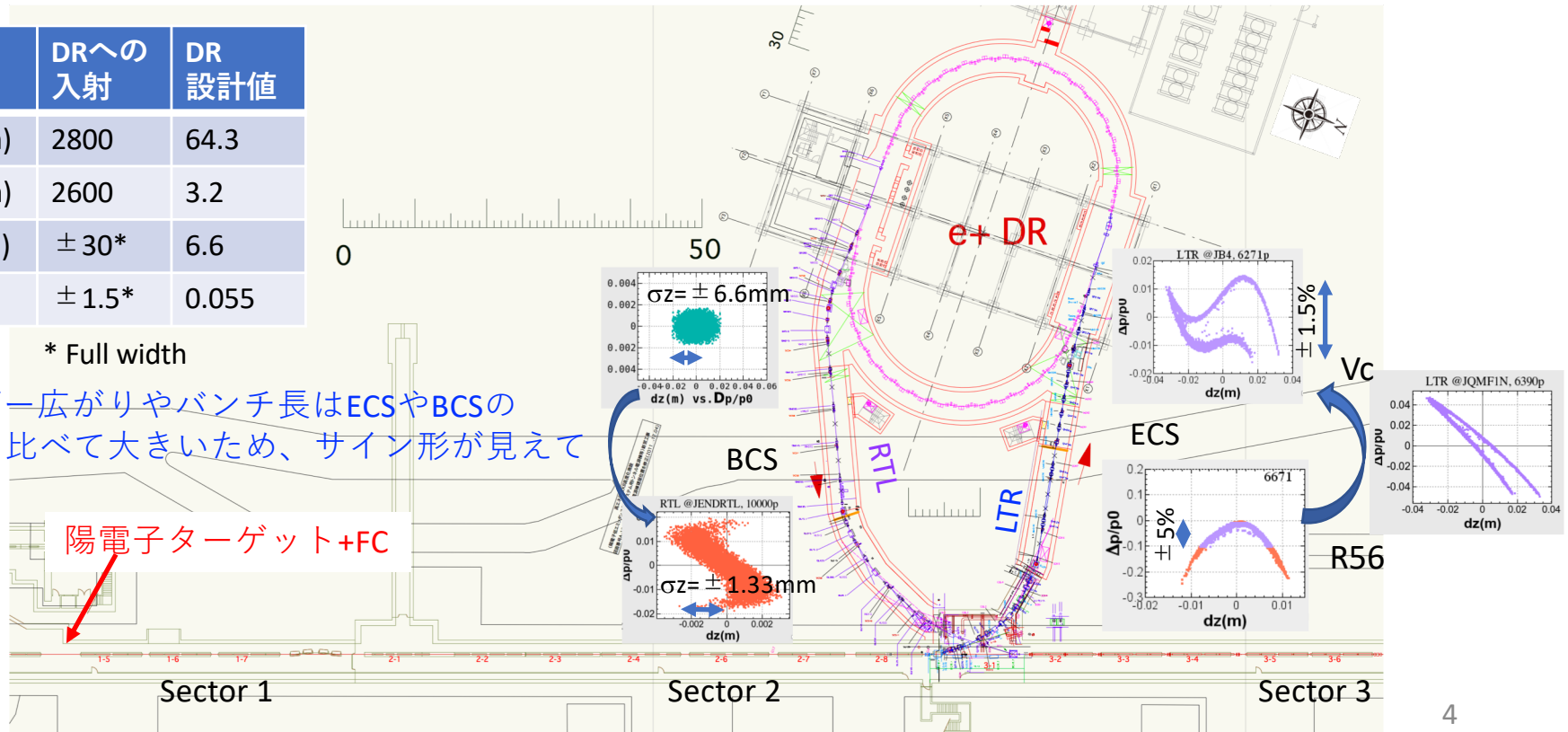
1. DR complex

- LTR: 入射路
 - フラックスコンセントレーター(FC)(MOP063, Y. Enomoto, 他)からの陽電子は進行方向に 巨大な広がりがある。ロスに注意！
 - DRのエネルギーアクセプタンス1.5%以内に納めるため、LTRでは入射ビームのエネルギー広がりを小さくしなければならない。→ Energy Compression System(ECS)
 - R56= - 0.6 m, Vc=41 MV
- RTL: 出射路
 - DRで 小さくなったエミッタンスを増大させずに、下流まで輸送する。
 - DRからのバンチ長は6.6mmと長いので、LINACのS-bandに乗せるために短くしなければならない。→ Bunch Compression System(BSC)
 - R56= - 1.05 m, Vc=21.5 MV

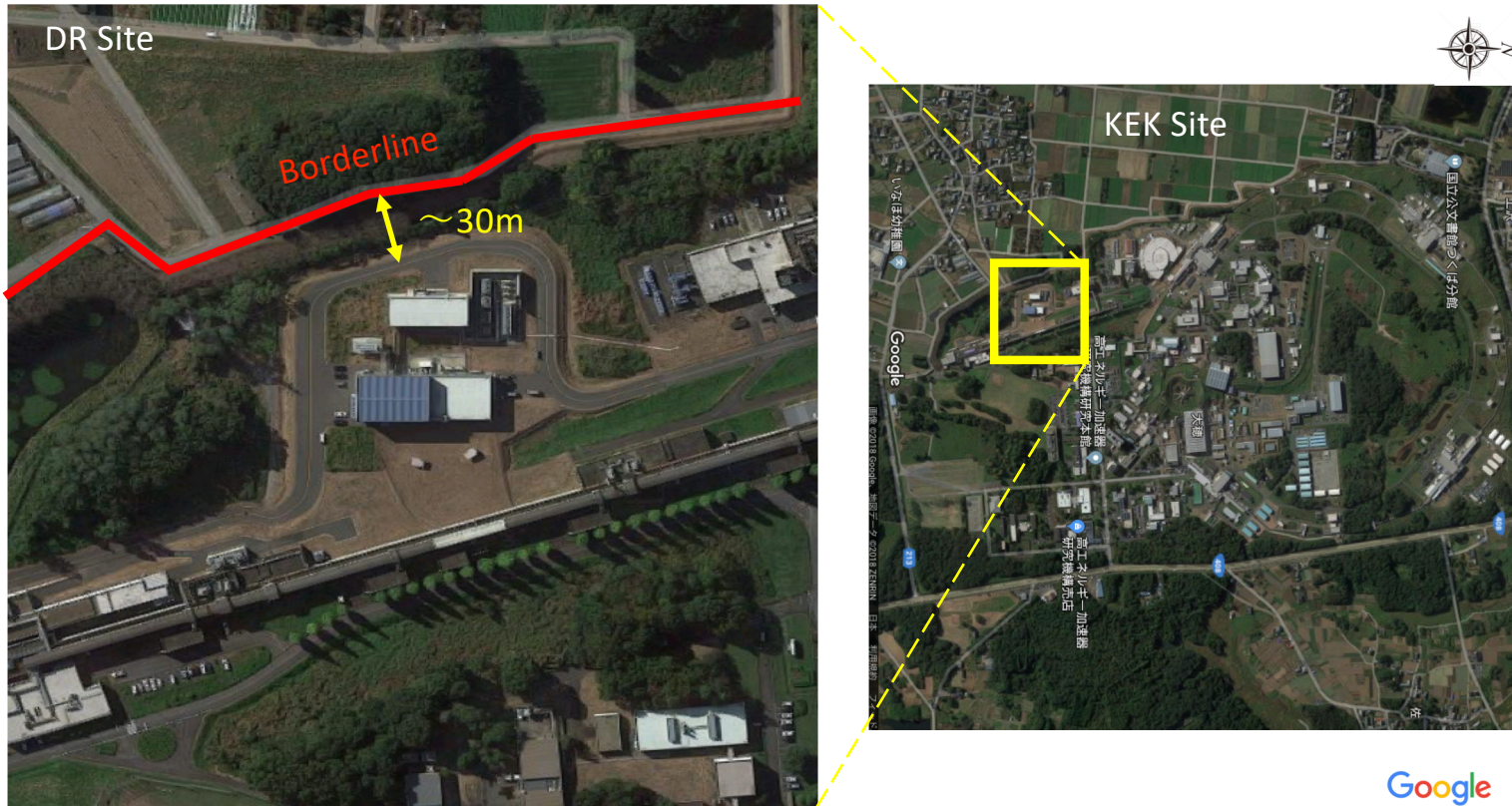
	DRへの入射	DR設計値
$\gamma\epsilon_x(\mu\text{m})$	2800	64.3
$\gamma\epsilon_y(\mu\text{m})$	2600	3.2
$\sigma_z(\text{mm})$	$\pm 30^*$	6.6
$\sigma_\delta(\%)$	$\pm 1.5^*$	0.055

* Full width

エネルギー広がりやバンチ長はECSやBCSのS-bandに比べて大きいので、サイン形が見えている。



Site of the DR



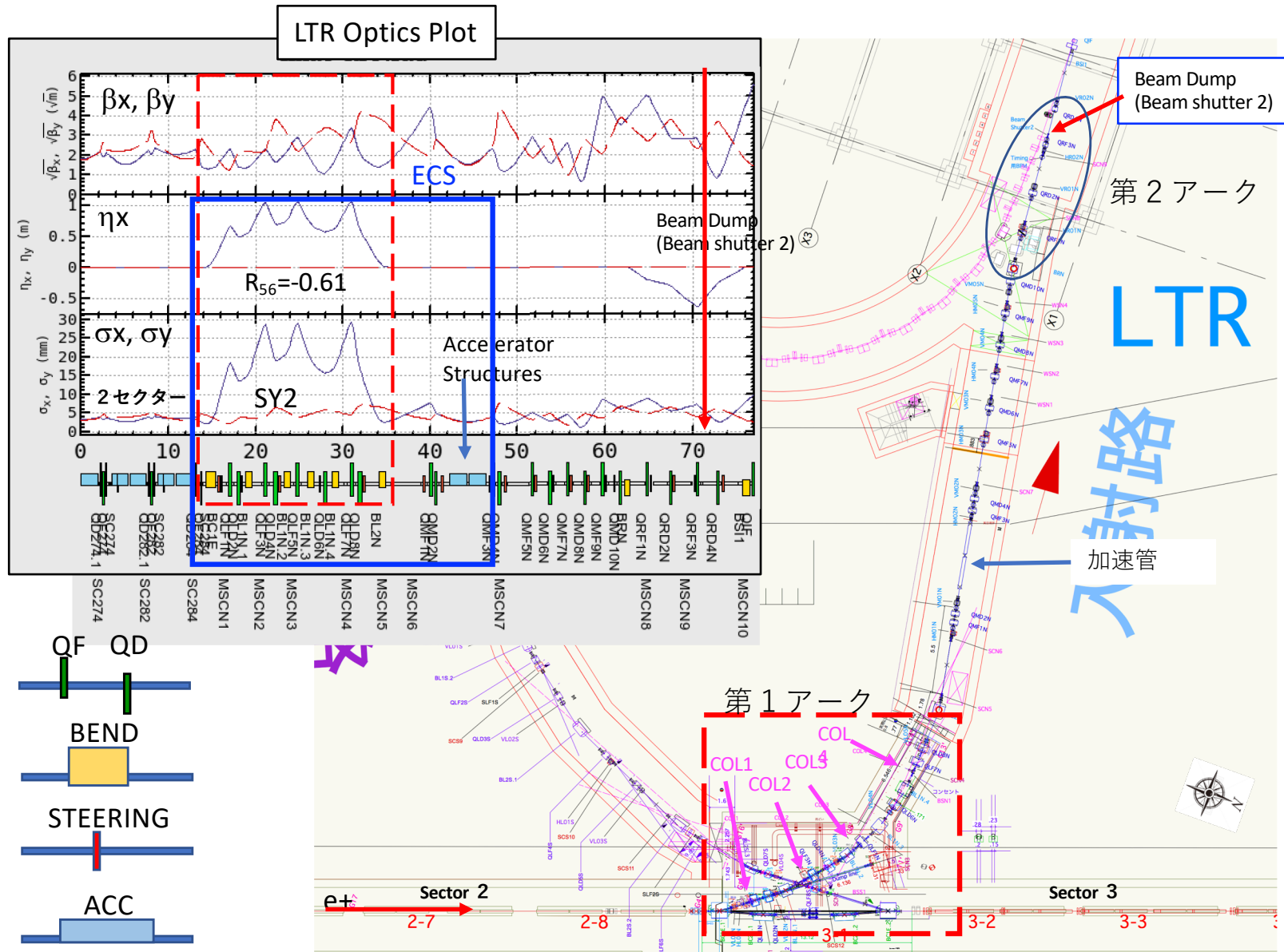
DRはKEKの敷地境界に近い。

2. LTRのコミッショニング

- 2018年1月23日
 - LTRコミッショニング開始
 - 1月24日には、LTR終端までビームが到達した。
- 当初はFCなしの0.75nC/bunchで運転
- DRはKEKの境界領域に近いいため、**ビームロス**は**低く抑え**なければならない。
- LTR調整
- LTR、RTLの電磁石はDRのエネルギーに合わせてセット

ロスに注意!

LTR レイアウトとOptics



2. LTRコミッションング

LTR調整

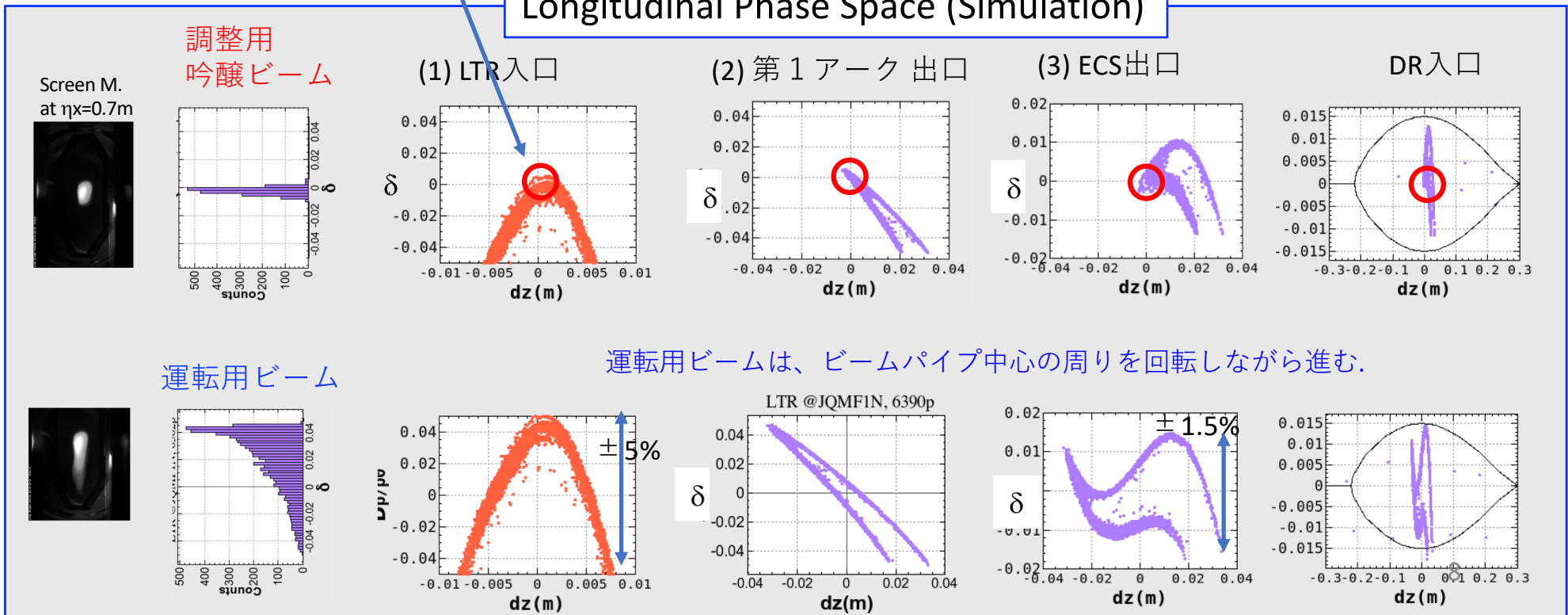
精米歩合60%?

久保田「百寿」



- 吟醸（コア）ビームを作って調整
 - 吟醸ビームは、第一アーク内のコリメーターで、“磨く”。
 - ECS Offで、そのビームがビームパイプの真ん中を通るように調整。
 - 吟醸ビームでECSの位相調整をする（ゼロクロスを探す）
- DR入射調整も、吟醸ビームを使って行う。
 - 飽くまで、進行方向位相空間中心で合わせる。
- コリメーターを開ける
- 最後に、運転ビームに戻す。
- これ以降、運転ビームで上記の調整をしてはならない。

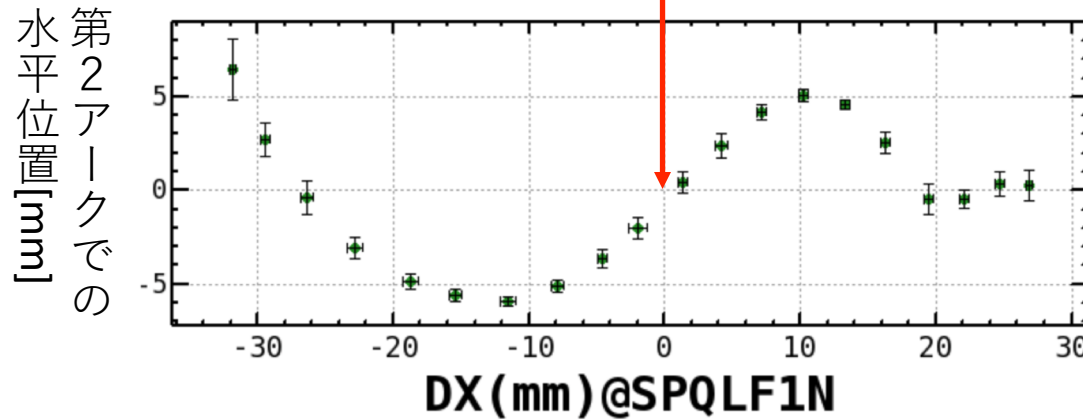
Longitudinal Phase Space (Simulation)



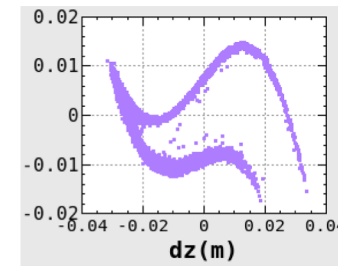
吟醸ビームでECS調整

Y. Seimiya, N. Iida

ECS加速管のゼロクロス

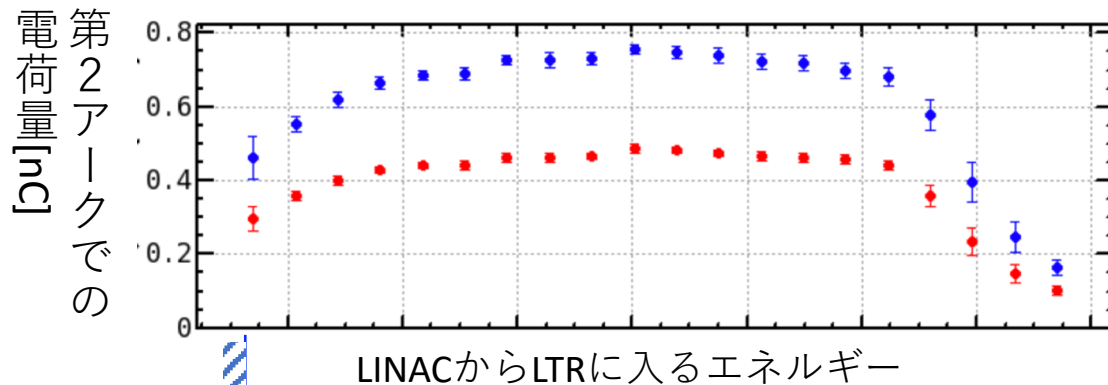


通常のECSだと、真横になるが、



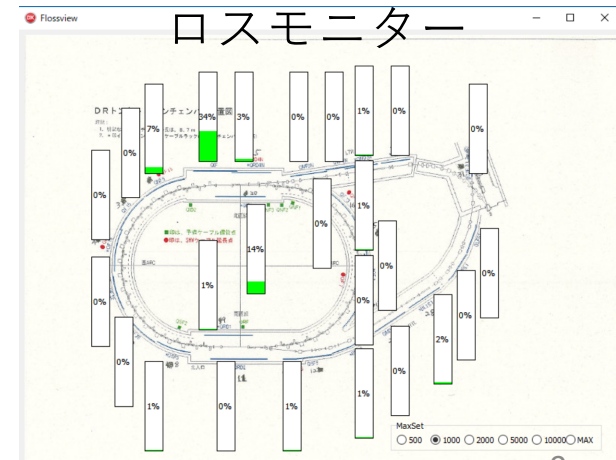
(Simulation)

S-bandのカーブがあるが、 $\pm 1.5\%$ 以内に収めるため、傾きをつけた



コリメーターでカット

LTRのエネルギーアクセプタンス： $\pm 5\%$

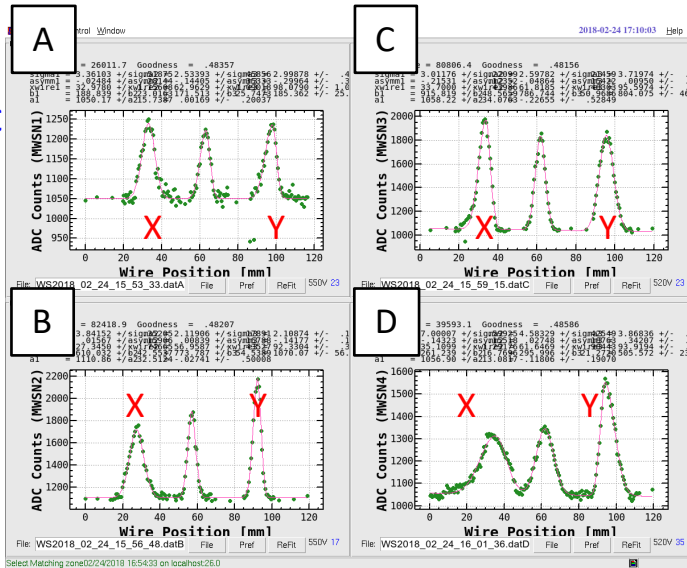


ビームロスは無事なく通せた

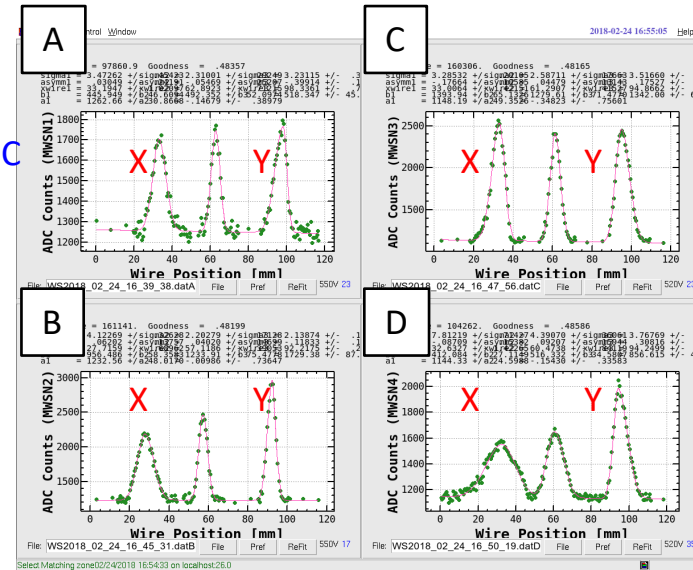
LTRのワイヤースキャナー(WS)でエミッタンスを測定

4台1組(ABCD)のワイヤースキャナーをLTR直線部に設置、ビームサイズ測定に使用。

FC
Stb
0.75nC



FC
Acc
5kV
1.5nC



設計値

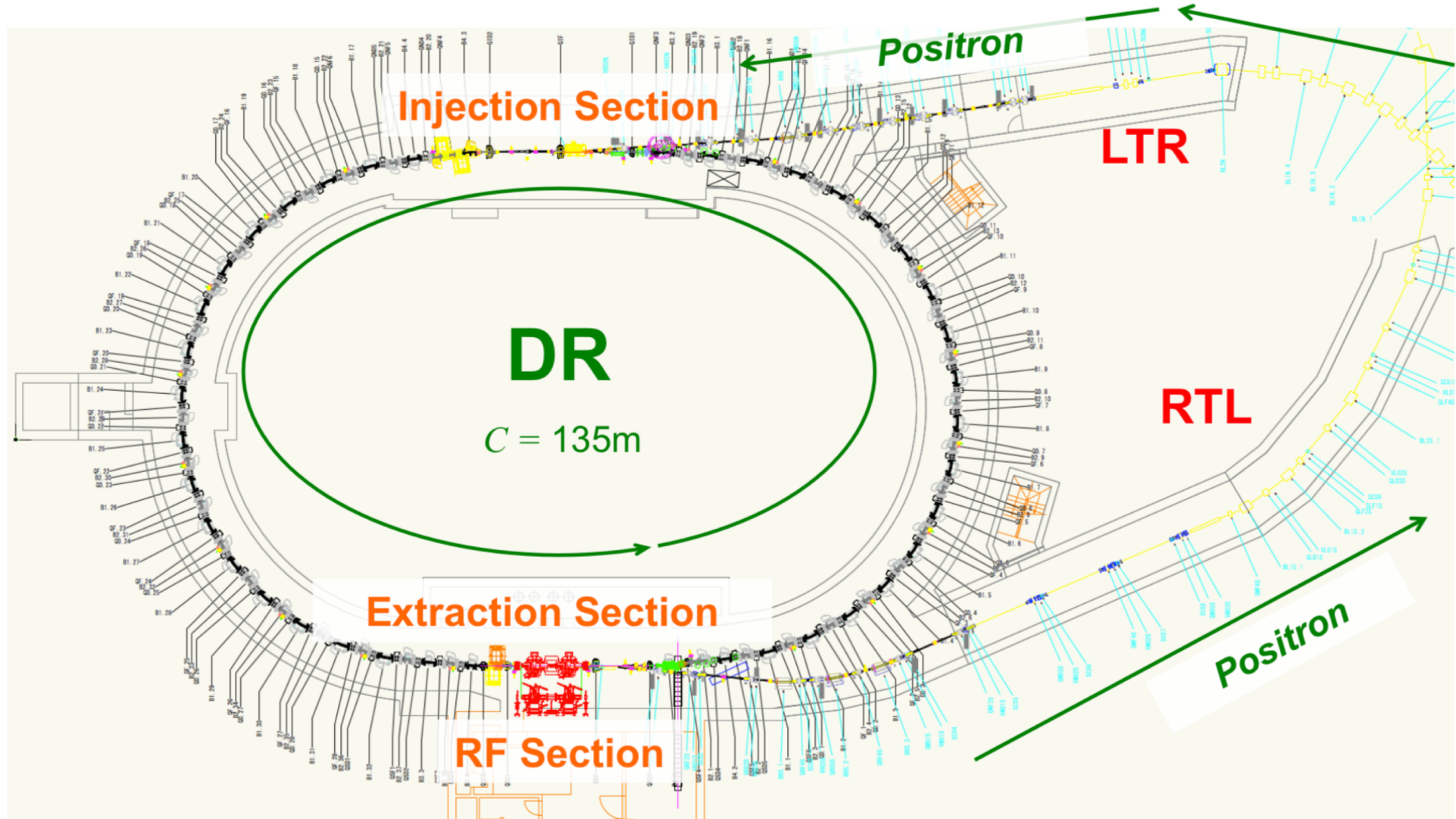
	4nC	
DR 設計	入射路	出射
γ_{Ex} (μm)	2800	89.3
γ_{Ey} (μm)	2600	4.5
σ_z (mm)	$\pm 30^*$	6.6
σ_δ (%)	$\pm 1.5^*$	0.055

測定値

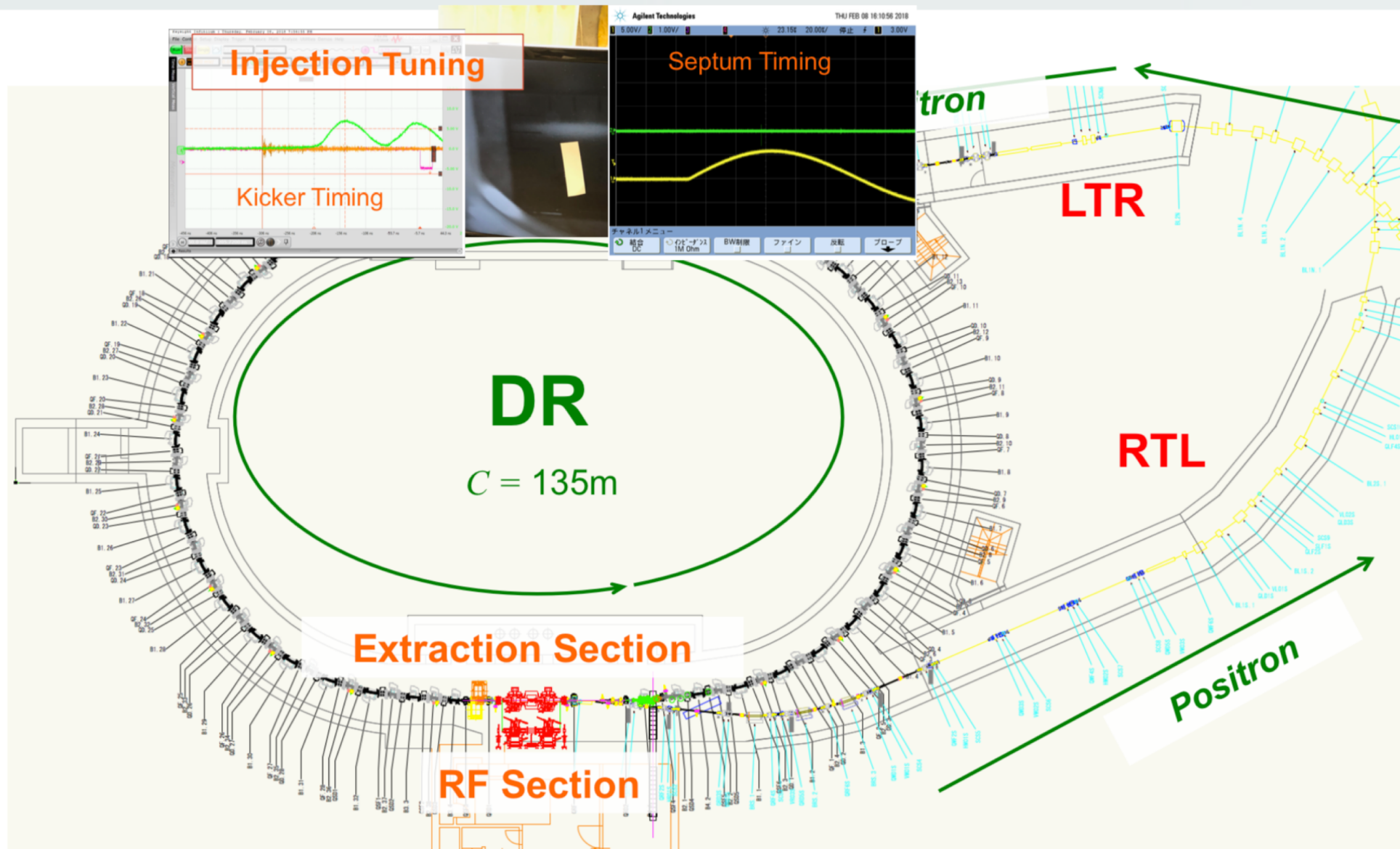
	0.75nC	1.5nC
測定	FC : Stand-by	FC : 5kV
γ_{Ex} [μm]	2350	2760
γ_{Ey} [μm]	2310	2450
BMAGx	1.58	1.53
BMAGy	1.00	1.01

FCのOn/Offで、測定されたエミッタンスに大きな違いはなかった。

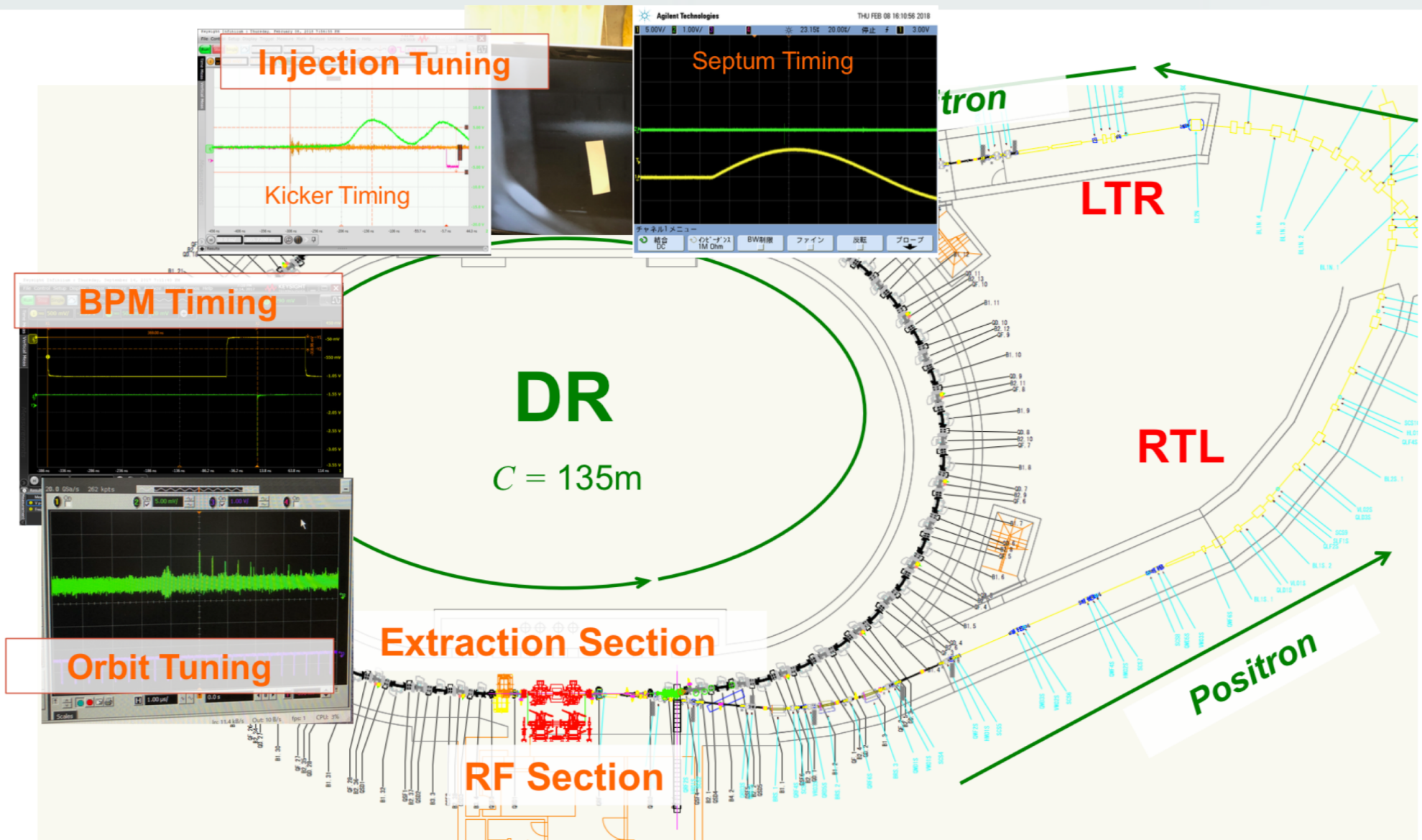
The First 3 Days



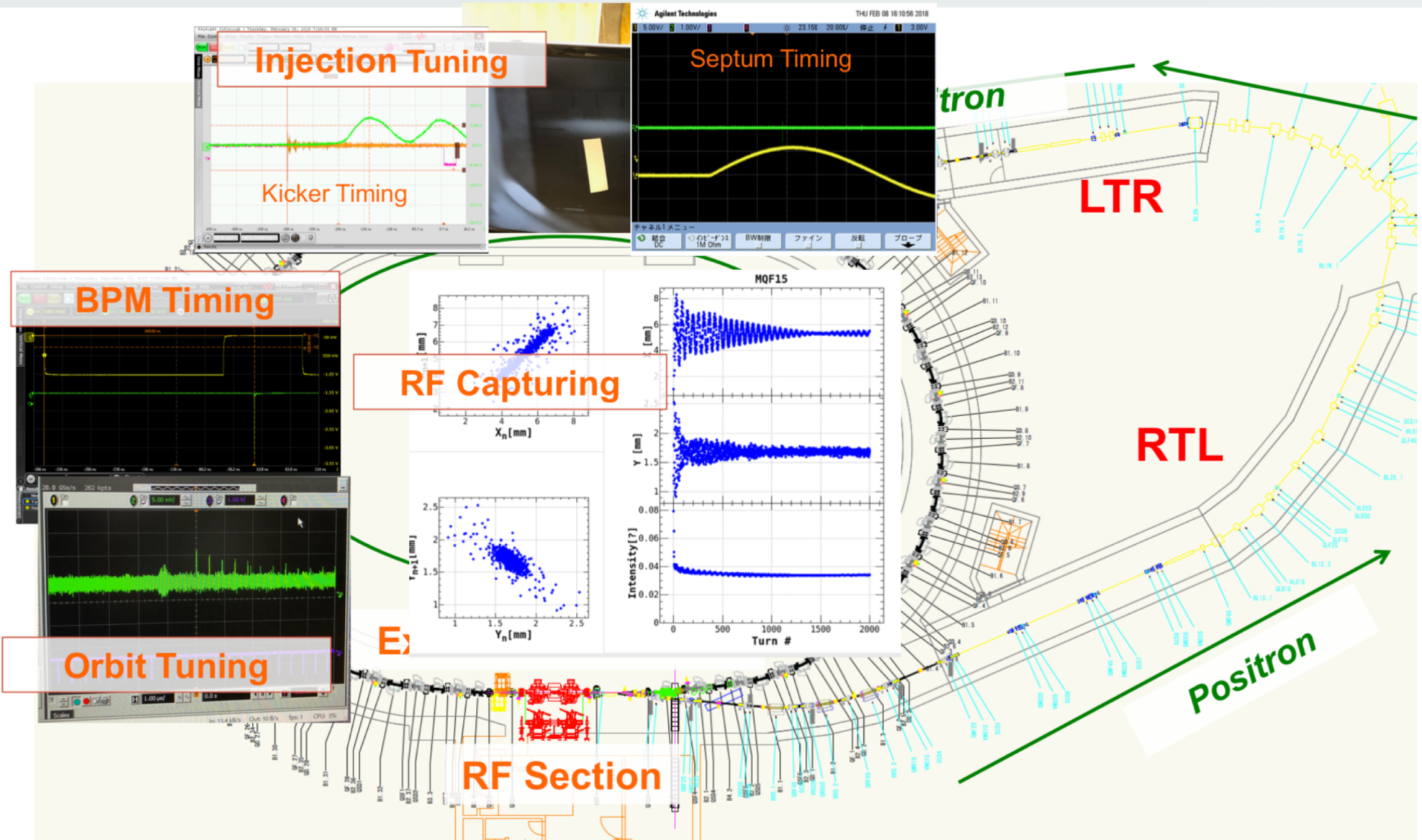
The First 3 Days



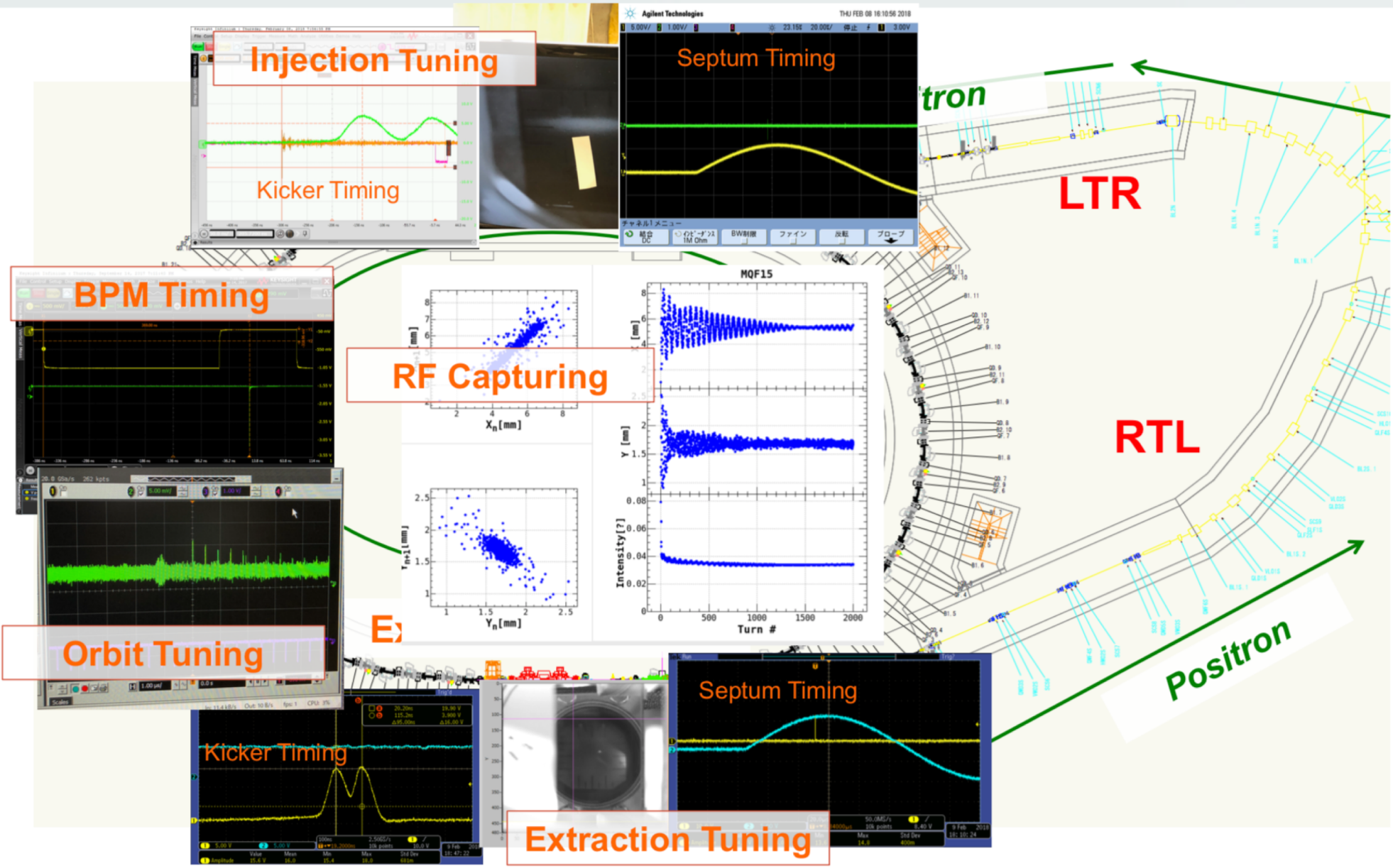
The First 3 Days



The First 3 Days



The First 3 Days



The First 3 Days

atron

LTR

POSITIVE

Injection Tuning

Kicker Timing

Septum Timing

BPM Timing

Orbit Tuning

RF Capturing

RTL Tuning

Extraction Tuning

Kicker Timing

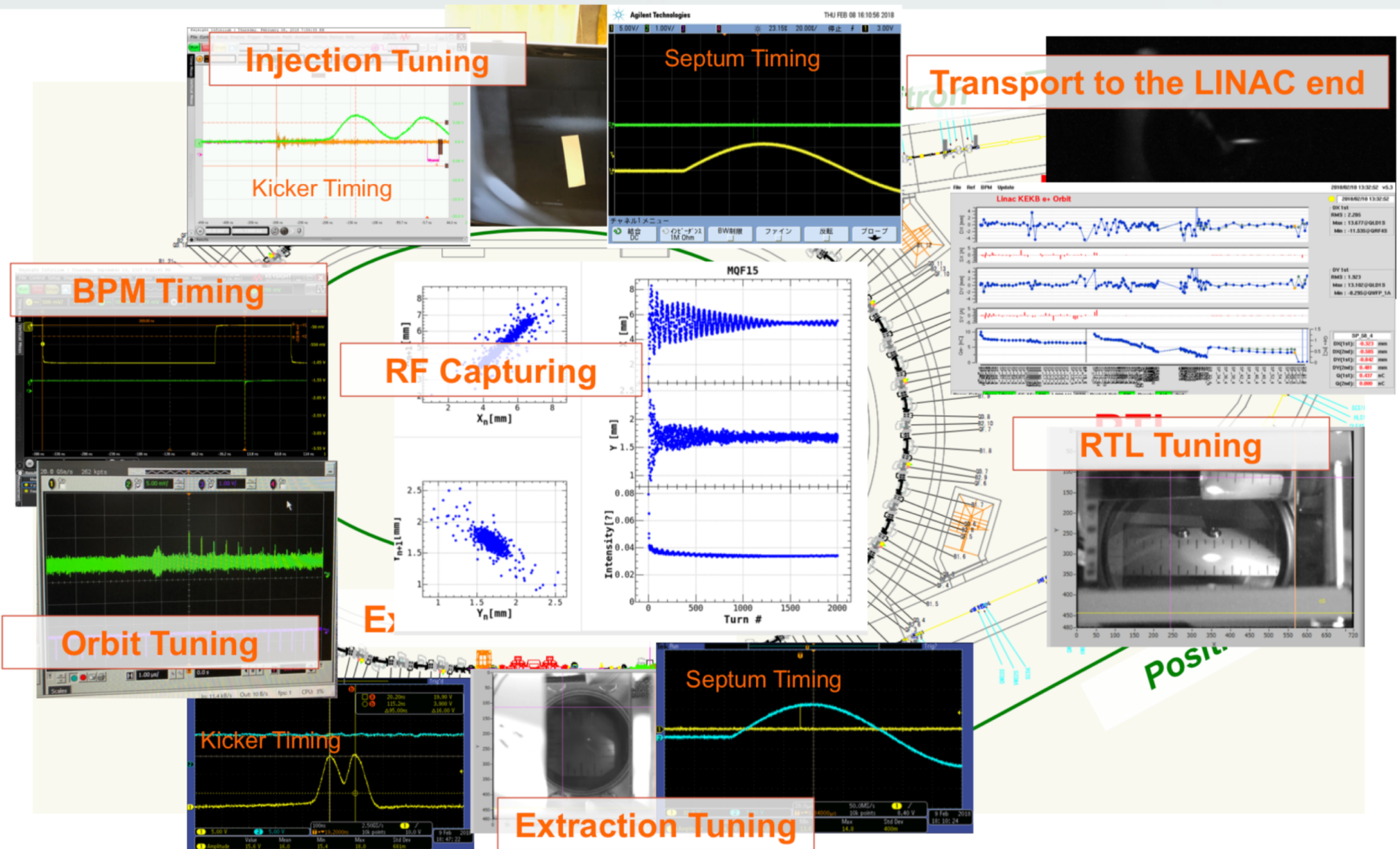
Septum Timing

atron

LTR

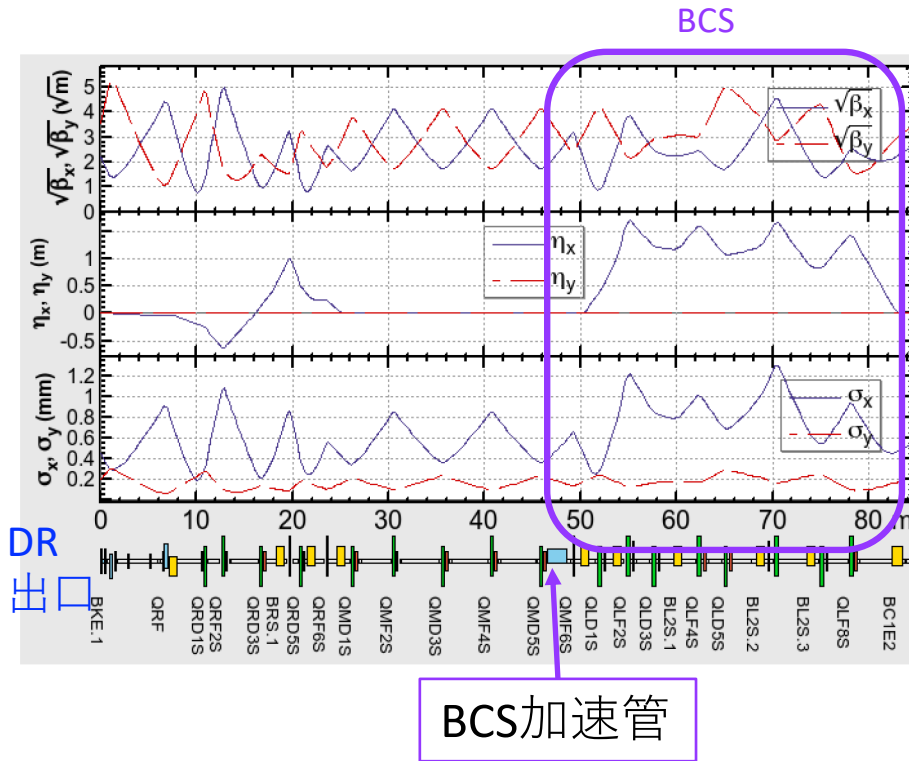
POSITIVE

The First 3 Days



低エミッタンスを保持して輸送

RTL 調整



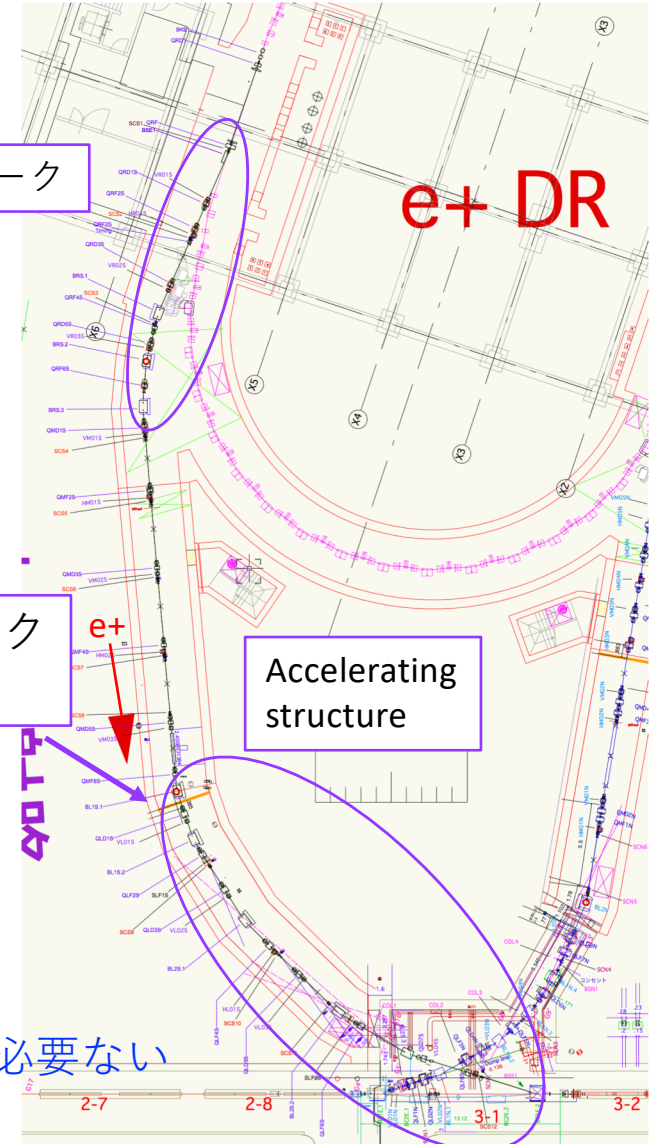
第1 アーク

e+ DR

第2 アーク
R₅₆ = -1.05

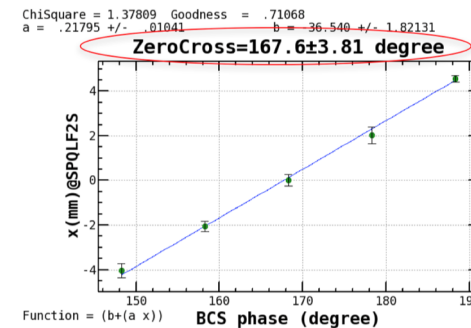
Accelerating structure

LINACへ
戻り



リングからのビームはきれいなガウシアンなので、吟醸ビームは必要ない

1. 軌道調整は、BCS加速管をStand-byにして行う
2. BCS加速管のゼロクロスを測定.
3. 0 か、 π かは、LINAC下流の水平Dispersionのある場所で判定。

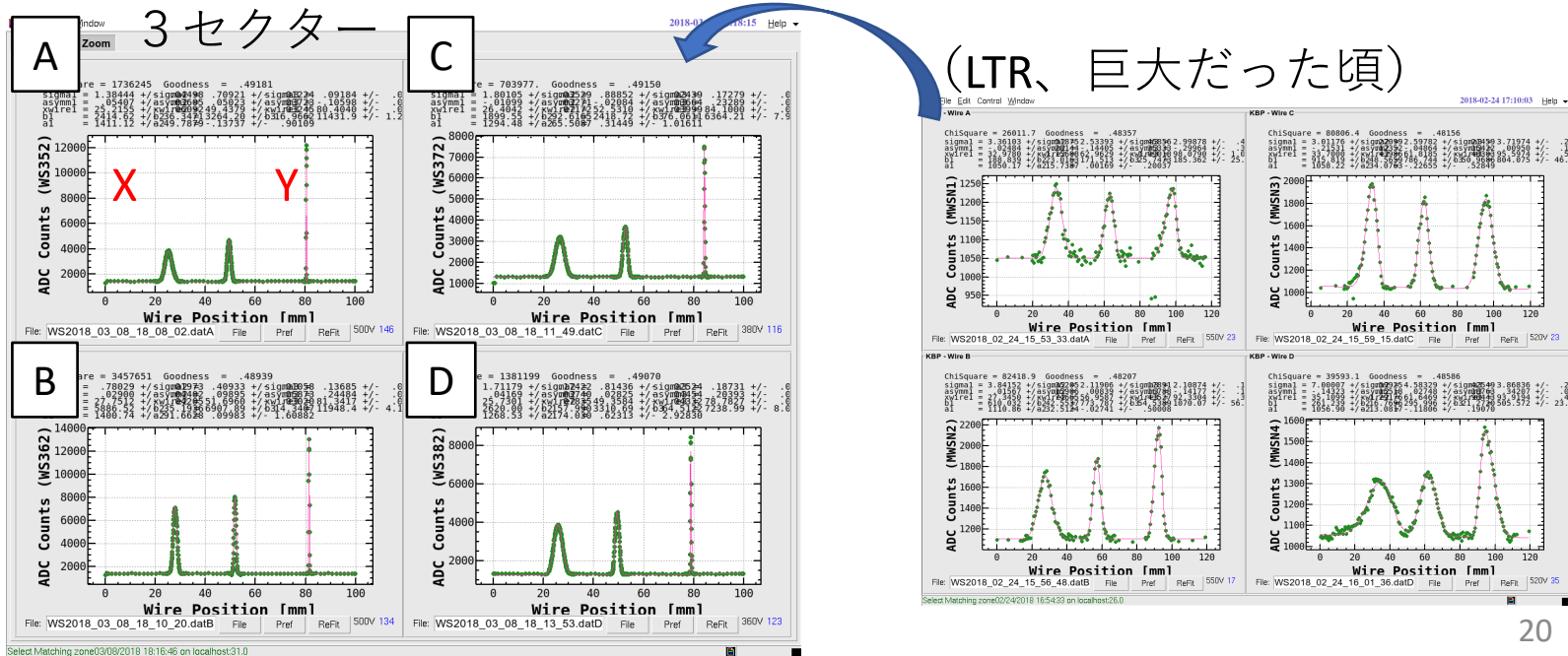


3セクターのワイヤースキャナーでエミッタンスを測定

0.7 [nC]	Sector 3			DR(Optics Calculation)
	補正前	第2アーク補正後	第1アーク補正後	
γ_{ex} [μm]	293 ± 44.5	192 ± 22.4	126 ± 8.2	> 64.3
γ_{ey} [μm]	1.84 ± 0.163	2.01 ± 0.363	1.5 ± 0.1	XY coupling at DR = $1.5/64.3$ $\leq 2.3 \pm 0.2\%$

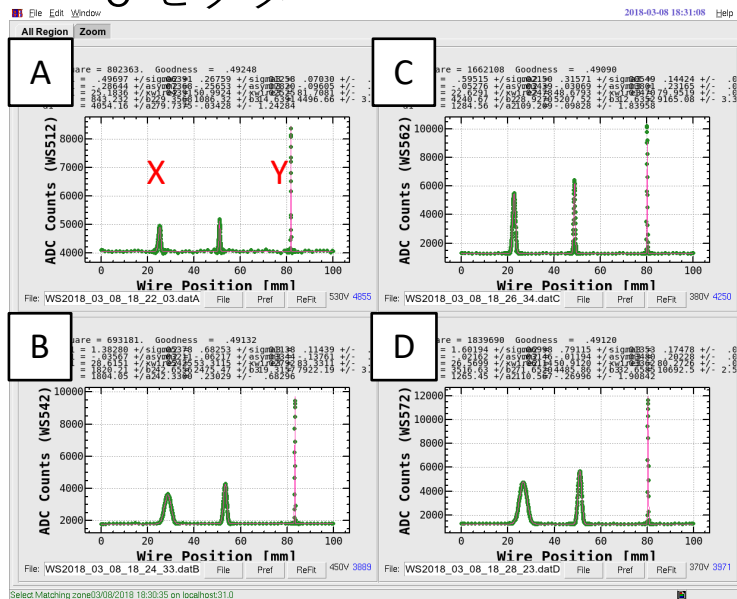
水平Dispersionは半分以下に。

DRのXY Couplingは2.3%以下と推定される。



5セクターのワイヤースキャナーで エミッタンスを測定

5セクター



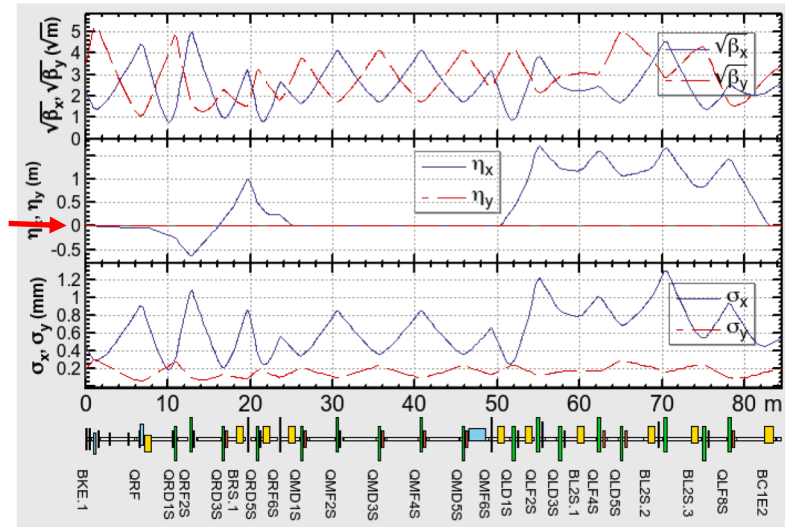
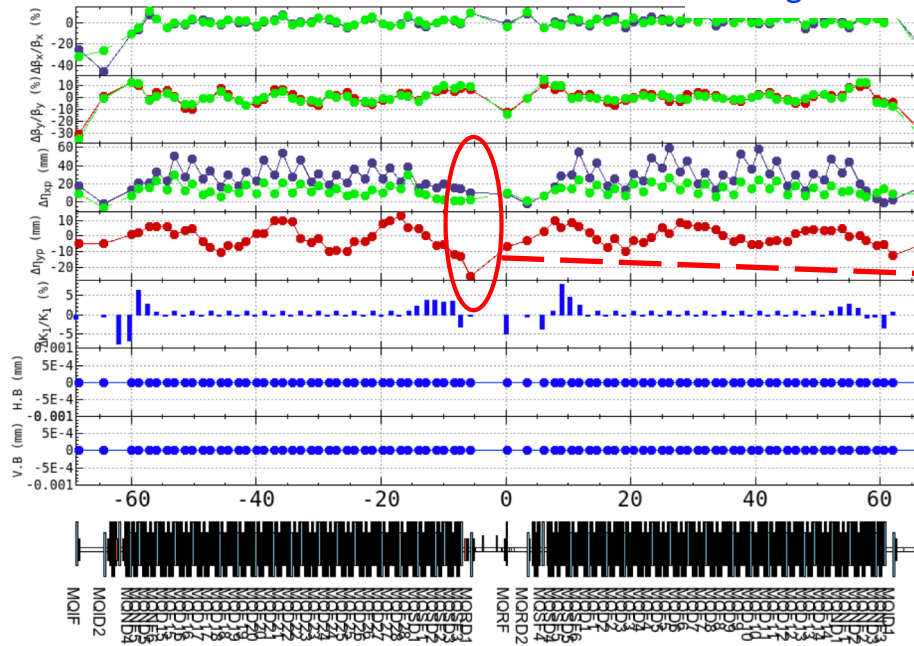
0.7 [nC]	WSによる測定値		SuperKEKB-LERからの要求値	
	Sector 3	Sector 5	Phase-2	Phase-3
γ_{ex} (μm)	126 ± 8.2	189 ± 64	< 200	< 100
γ_{ey} (μm)	1.5 ± 0.1	1.9 ± 0.3	< 40	< 15

DR 設計	入射	出射
$\gamma_{ex}(\mu\text{m})$	2800	64.3
$\gamma_{ey}(\mu\text{m})$	2600	3.2
$\sigma_z(\text{mm})$	$\pm 30^*$	6.6
$\sigma_\delta(\%)$	$\pm 1.5^*$	0.055

- 3～5セクターでエミッタンス増大が観測されている。
 - Transverse Wake Fieldの問題。
 - Offset 軌道によるWake FieldのCancelを行う予定。
- 水平エミッタンスについては、Phase-3以降のSuperKEKB-LERからの入射ビーム条件が満たされない。

DR内のDispersion測定値からの寄与

H. Sugimoto



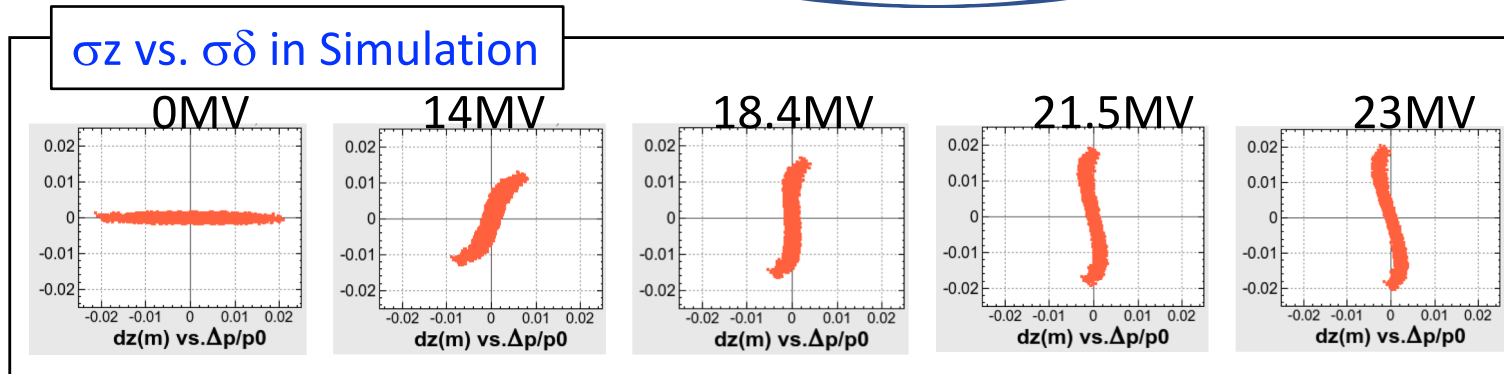
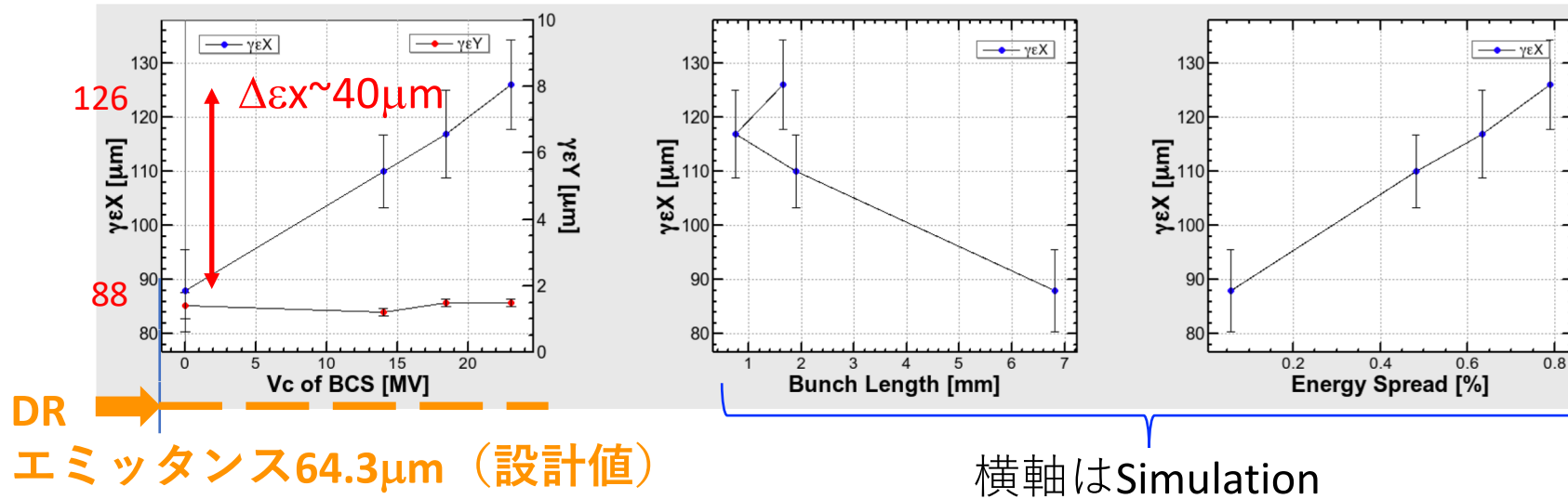
	\mathcal{H} [m]	δ	$\Delta\epsilon$ [nm]	$\Delta\gamma\epsilon$ [μm]	ϵ [μm]	$\Delta\epsilon/\epsilon$
X	6.08e-5	5.5e-4	1.84e-2	0.04	64.3 (from DR Optics calculation)	6.2e-4
Y	4.49e-5		1.36e-2	0.03	1.9 (from WS measurement)	1.5e-2

DR出射点で測定された水平DispersionからRTLへのエミッタンスの寄与は、RTLでのエミッタンスに対して無視できるほど小さい。

水平エミッタンスのBCS-Vc依存測定

0.7nC 3セクターのWire Scanner測定

Y. Seimiya, M. Kikuchi, N. Iida



DRからのバンチ長は設計値 (6.6mm) とした。

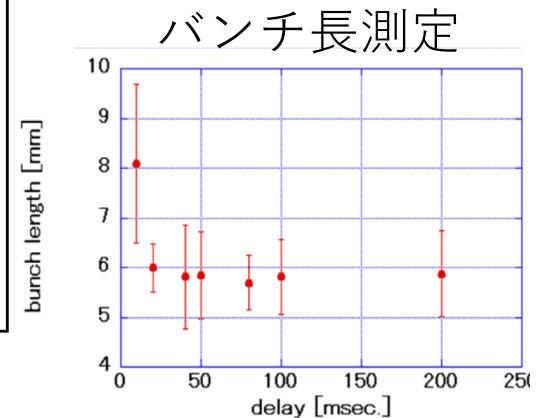


Figure 6: Measured bunch length after injection.

水平エミッタンスの電荷量依存測定

電荷量 (nC)	加速電圧(MV)	$\gamma\beta\varepsilon_x$ (μm)	$\gamma\beta\varepsilon_y$ (μm)
0.7	0	88 ± 7.6	1.4 ± 0.4
1.5	0	104 ± 7.4	3.7 ± 0.5

- 測定された水平エミッタンスについて
 1. BCSのVc依存性がある。
 - バンチ長：CSR??
 - 3セクターでのバンチ長測定が必要
 - エネルギー広がり：水平分散の残留漏れ？
 2. 電荷量依存性がある。
 - CSR??
 - 3セクター-Transverse Wake？
- DRのエミッタンス測定が必要

インスタビリティの概算

Handbook of Accelerator Physics and Engineering

CSR

$$Z_{\parallel}(k) = \frac{1}{c} \int_0^{\infty} dz W_{\parallel}(z) e^{-ikz}$$

$$= \frac{Z_0}{2\pi} \frac{e^{I\pi/6}}{3^{1/3}} \Gamma\left(\frac{2}{3}\right) \frac{k^{1/3}}{R^{2/3}}$$

$$dE = Z(k)L \cdot I/E$$

$$d\epsilon x = (\eta x \cdot dE)^2 / \beta x$$

$$\Delta\gamma\epsilon x = \text{Sum} \sum d\epsilon x)_i = 0.81 \mu\text{m} < 40 \mu\text{m}$$

Z0=377

R=3.35m

sz=1~7mm

L=0.7938m

cc=1nC,

E=1.1GeV

l=cc/σz*c

材質：SUS316L

Resistive wall

$$\frac{Z_m^{\parallel}}{L} = \frac{\omega}{c} = \frac{Z_m^{\perp}}{L}$$

$$= \frac{Z_0 c / (\pi b^{2m})}{[1 + \text{sgn}(\omega)i](1 + \delta_{m0})bc \sqrt{\frac{\sigma_c Z_0 c}{2|\omega|}} - \frac{ib^2\omega}{m+1} + \frac{imc^2}{\omega}}$$

$$\Delta\gamma\epsilon x = \text{Sum} \sum d\epsilon x)_i = 0.0012 \mu\text{m} \ll 40 \mu\text{m}$$

いずれも概算では影響は小さそうであるが、さらにCSRのTracking simulationを検討中
(D. Zhou and Y. Seimiya)

まとめ

- SuperKEKB-LER用陽電子入射ビームのエミッタンスを小さくするためのDRへの入出射コミッションングを行った。
- 2018年2月、入射(LTR)、出射(RTL)共に順調に立ち上がり、7月までSuperKEKB-LERに入射した。
- 今後の課題
 - DRから出射路されたビームのエミッタンスは、SuperKEKB-Phase2(2018年運転)の要求を満たしているが、今後SuperKEKBの性能向上につれて、対策が必要である。
 - RTLエミッタンス増大の原因については検討中
 - DR内のエミッタンス(ビームサイズ)測定
 - 3セクターでのバンチ長測定
 - (BT下流でのエミッタンス増大)