

# バンチ圧縮のための六極電磁石 の設置について

高エネルギー加速器研究機構

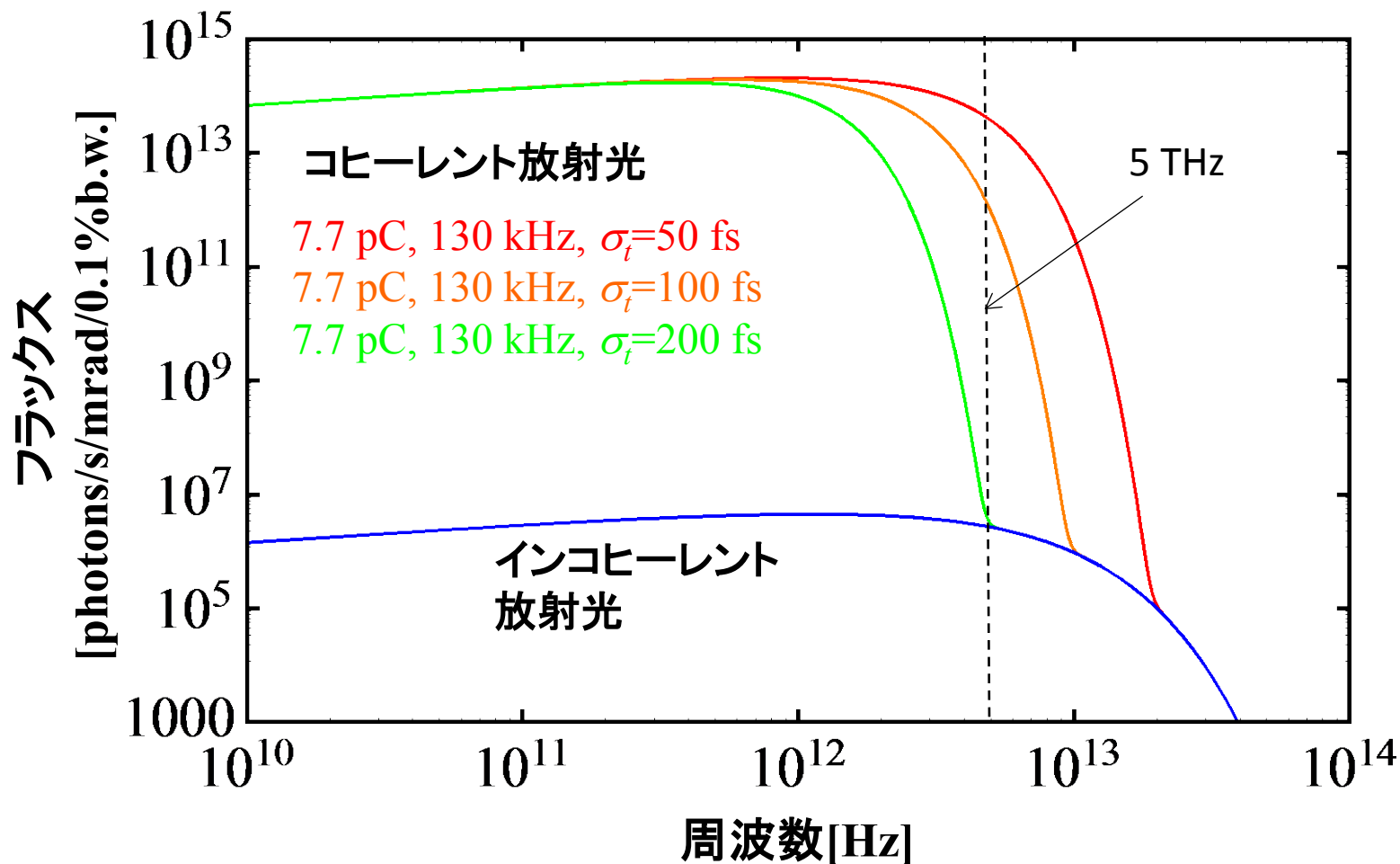
中村典雄, 原田健太郎, 上田 明, 島田美帆

# 目的

- バンチ圧縮
  - 2次の縦方向分散 $T_{566}$ の補正
  - 超短バンチの生成 (< 100 fs)
- コヒーレントTHz放射の発生
  - ~5THzまでコヒーレント放射の発生
  - 高出力化
- バンチ復元
  - 2次の縦方向分散 $T_{566}$ の補正
  - 低ビームロス & 高エネルギー回収効率

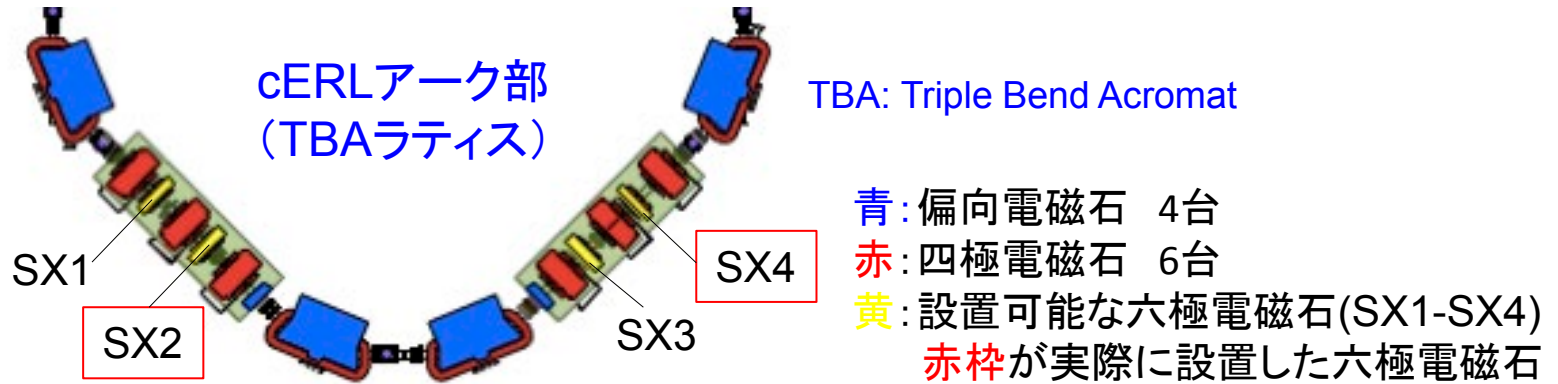
# コヒーレント放射光スペクトル

アーク部偏向電磁石からの放射光スペクトルの例(20MeV)



5THzまでのコヒーレント放射光発生には、100fs以下のバンチ長が要求される。

# cERLアーク部



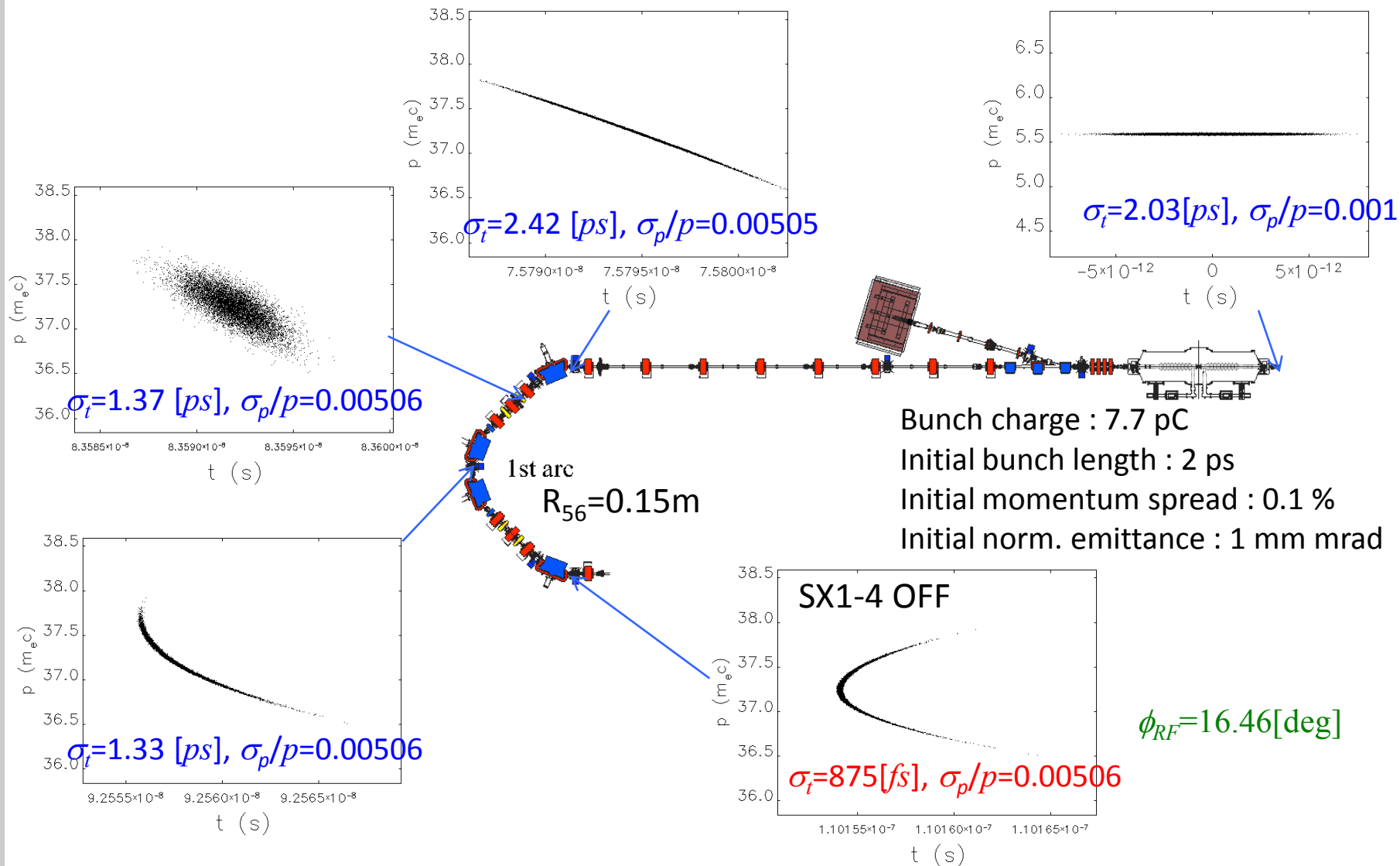
- (1) 四極電磁石による1次の縦方向分散 $R_{56}$ の設定  
(2) 六極電磁石による2次の縦方向分散 $T_{566}$ の補正 } → バンチ圧縮&復元



六極電磁石設置前のcERLアーク部(写真)

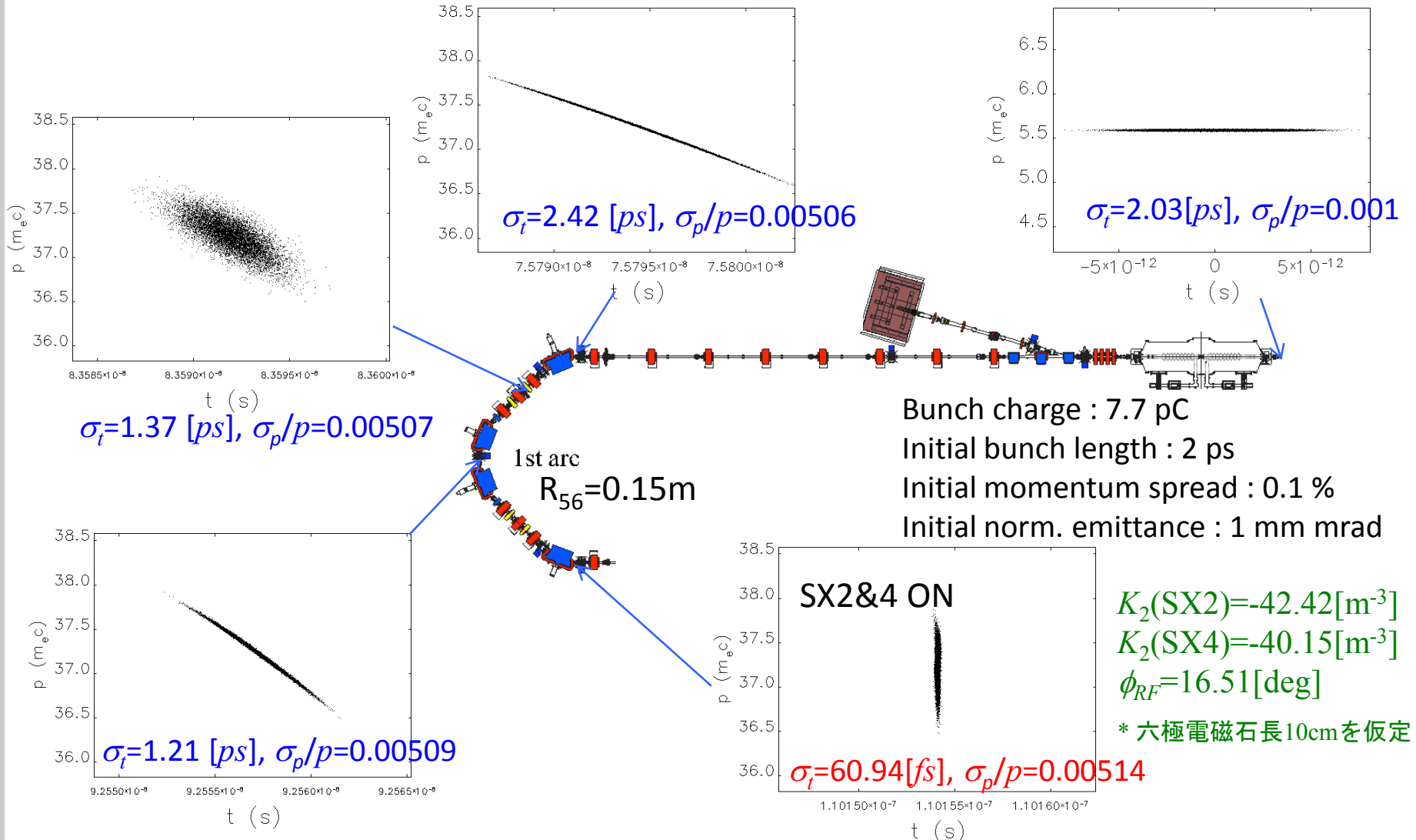
# バンチ圧縮 (SX OFF)

第1アーク出口 (SCMIM01) でバンチ圧縮した場合 (六極電磁石なし)。



# バンチ圧縮 (SX2&4 ON)

第1アーク出口でバンチ圧縮した場合 (六極電磁石SX2,SX4によるバンチ長の最適化)



六極電磁石の励磁によってバンチ長が1桁以上改善される。

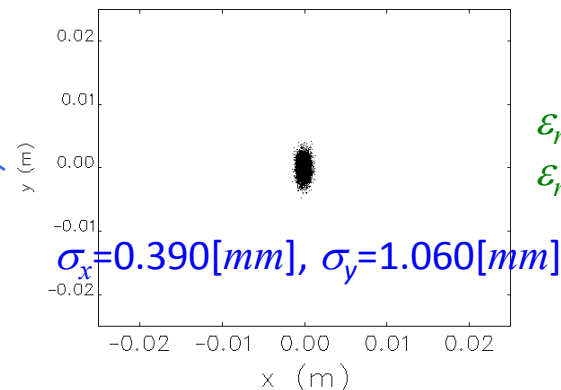
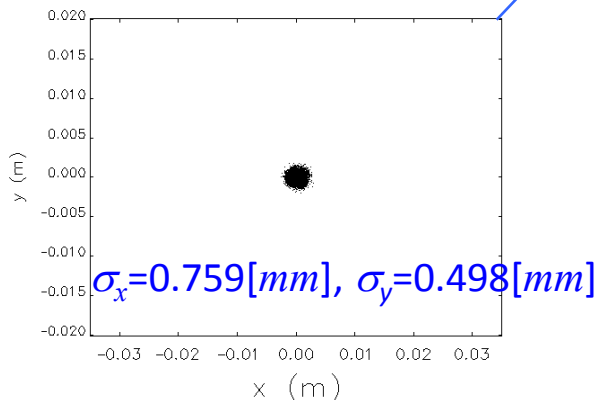
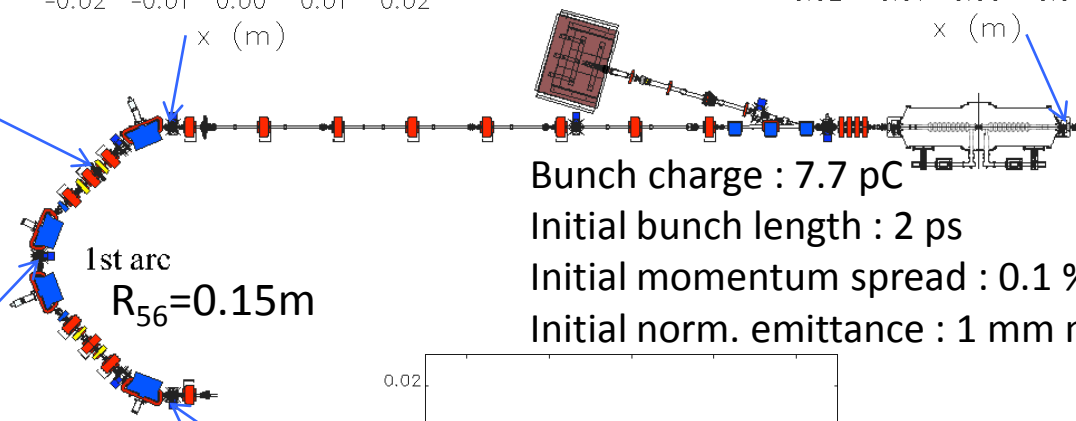
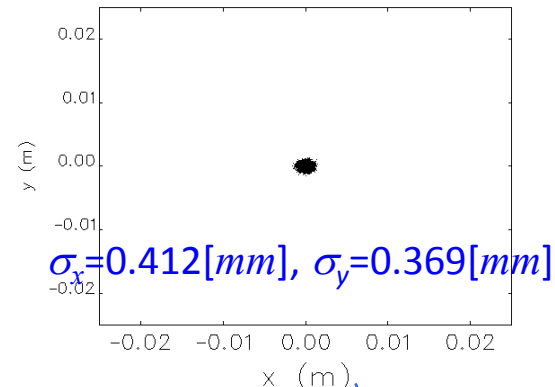
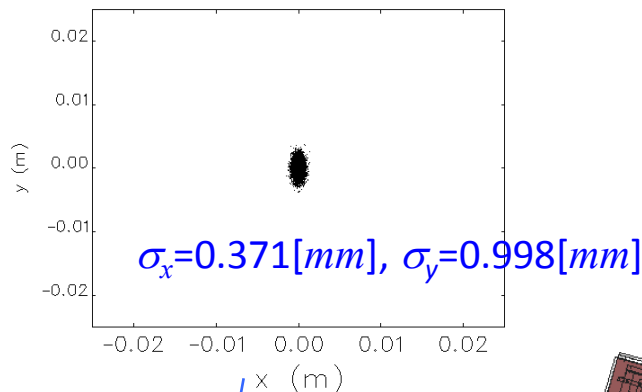
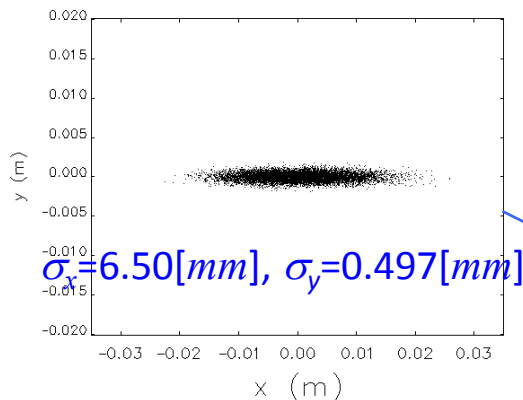
# ビームサイズ (SX2&4 ON)

第1アーク出口でバンチ圧縮した場合 (六極電磁石SX2,SX4によるバンチ長の最適化)

六極電磁石設置予定場所で  
ビームサイズが大きくなる。



六極磁場の広い一様性確保



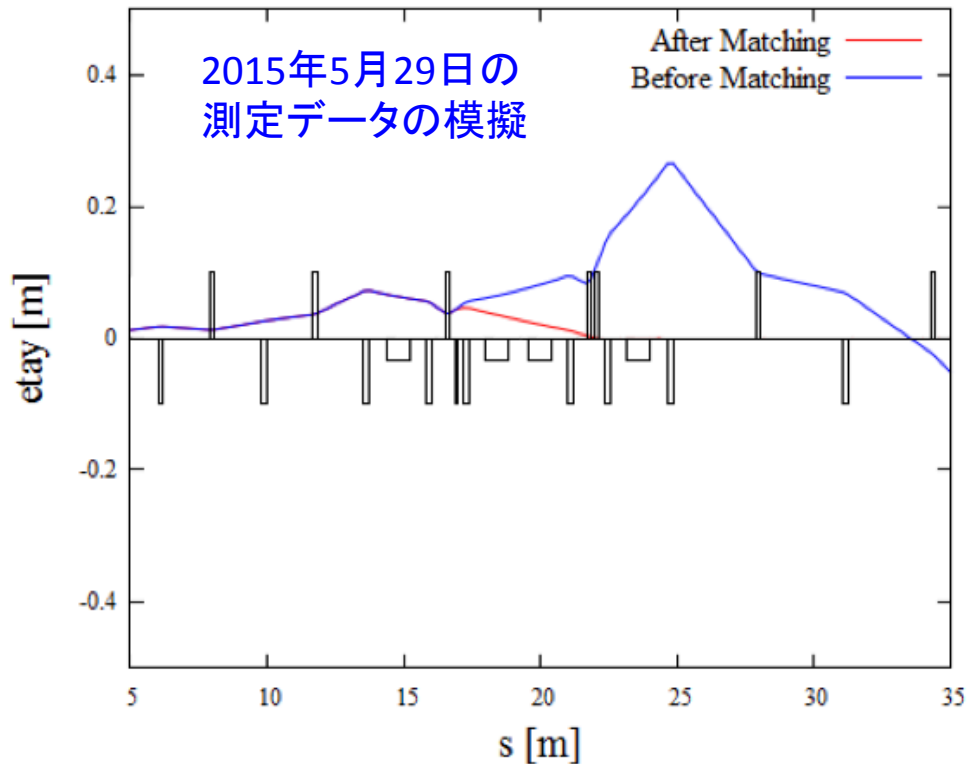
$\epsilon_{nx} = 1.13 [mm \text{ mrad}]$   
 $\epsilon_{ny} = 1.15 [mm \text{ mrad}]$

SX2&SX4は、エミッタンス維持の観点からSX 1台や他の2台のSXの組み合わせの中で最善であった。

# Skew四極用コイルの追加

六極電磁石にskew四極磁場を発生できるサブコイルを追加  
→ 入射部や直線部等で発生するカップリング等の補正

垂直分散の補正シミュレーション(第1アーク)



マッチング前後の分散関数の変化(20MeV)

	K [m <sup>-2</sup> ]	B' [T/m]
SXIF02	-0.19	-0.012
SXIF04	0.070	0.0047

Skew四極電磁石のK値(L=0.1 m)

2カ所のskew四極磁場でアーク出口の垂直分散とその傾きを補正可能



# 六極電磁石の製作

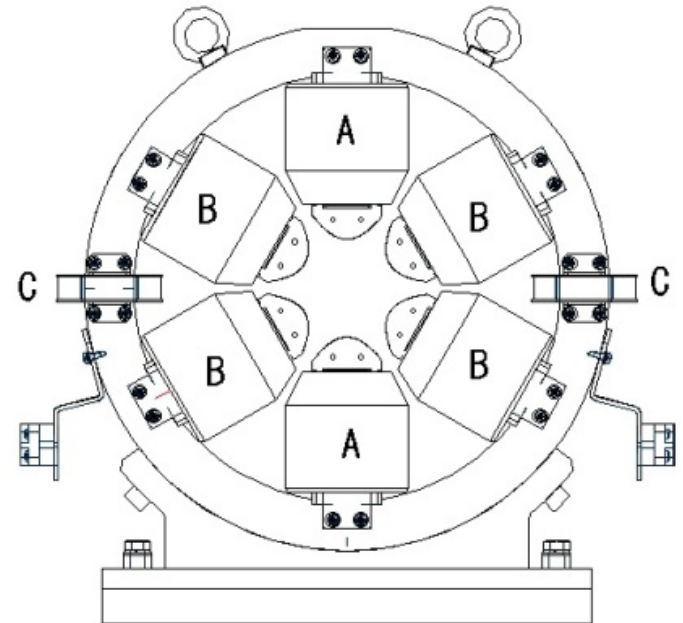


## 六極電磁石の仕様

鉄芯	電磁軟鉄
ボア径	70mm(直径)
磁極長	100mm
最大磁場勾配	166.78 T/m <sup>2</sup>
主コイル	100 turns
A,B,Cサブコイル	20,10,20 turns (A,B:skew四極, C:水平軌道補正)
最大電流	10 A

## 六極電磁石のスケジュール

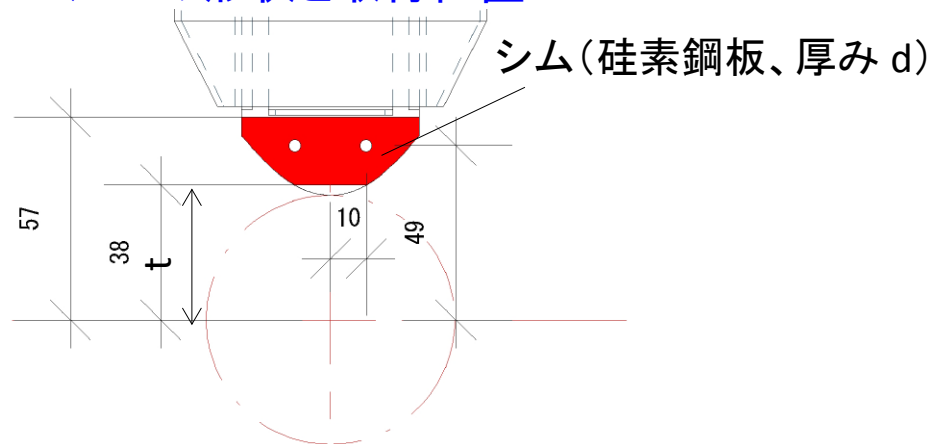
2015年3月	先行2台納入
2015年6月	残り2台入札
2015年9月	残り2台納入 (スキューコイル追加含む)
2015年11月	六極電磁石4台設置・配線



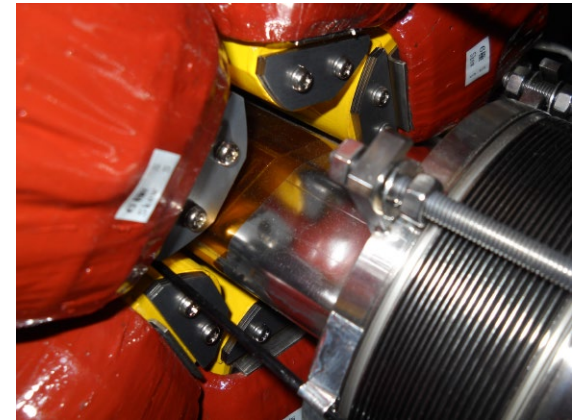
# シムの設計・製作

六極磁場の広い一様性の確保 → エンドシムによる補正

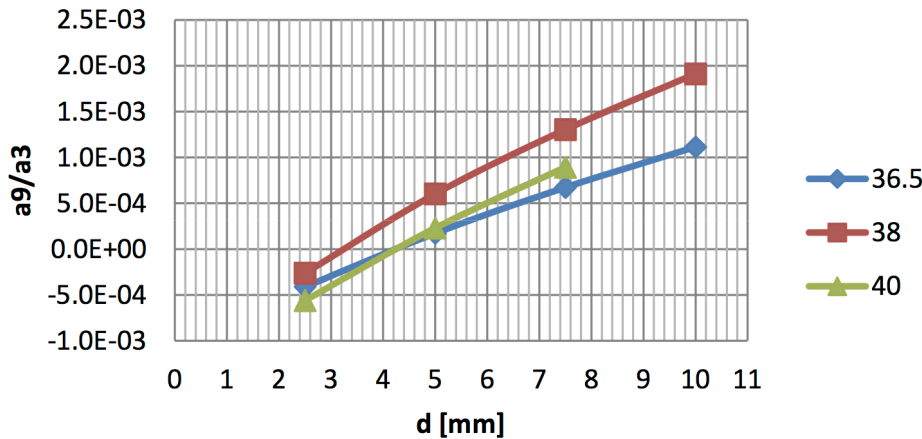
シムの形状と取付位置



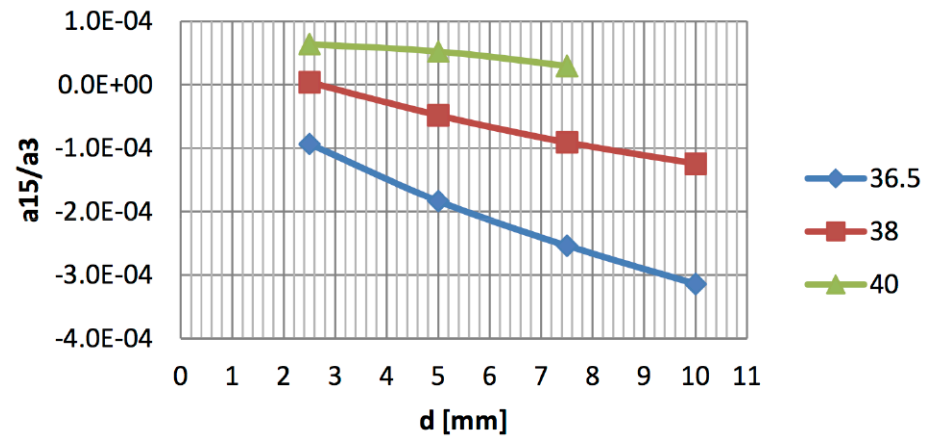
取付られたシム



18極成分/6極成分(計算)



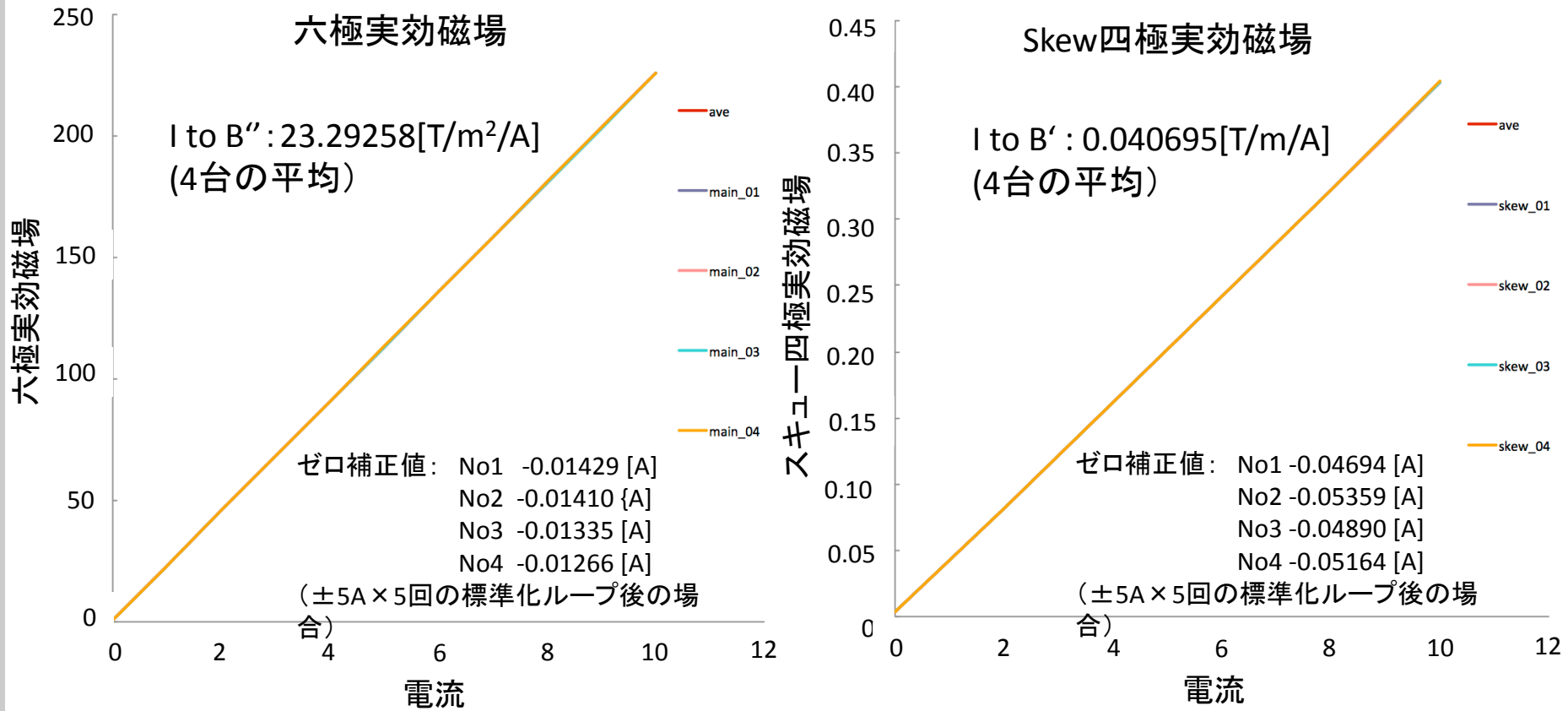
30極成分/6極成分(計算)



→ 磁場中心からの距離 $t=38\text{mm}$ , 厚み $d=3.5\text{mm}$

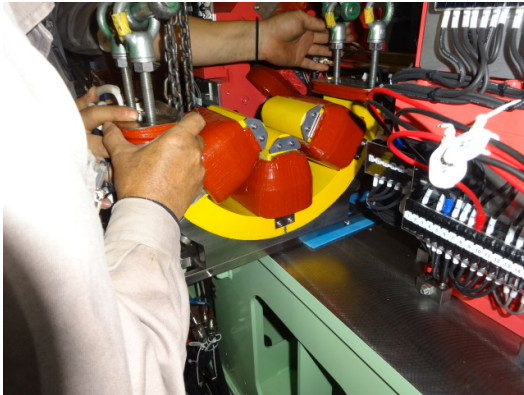
# 六極電磁石磁場測定

## 磁場測定結果



# 六極電磁石の設置作業

作業期間: 2015年11月18-20日



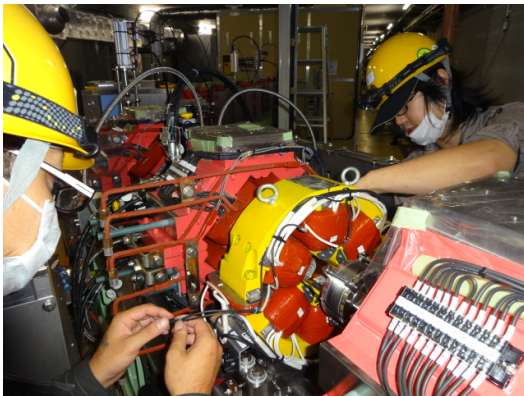
半割下部設置作業



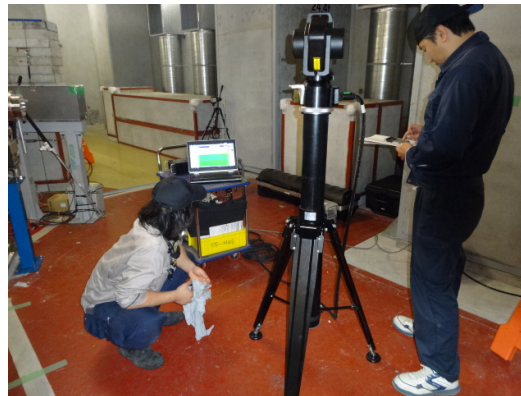
高さ調整 (NA2, シム)



半割上部設置作業



配線接続



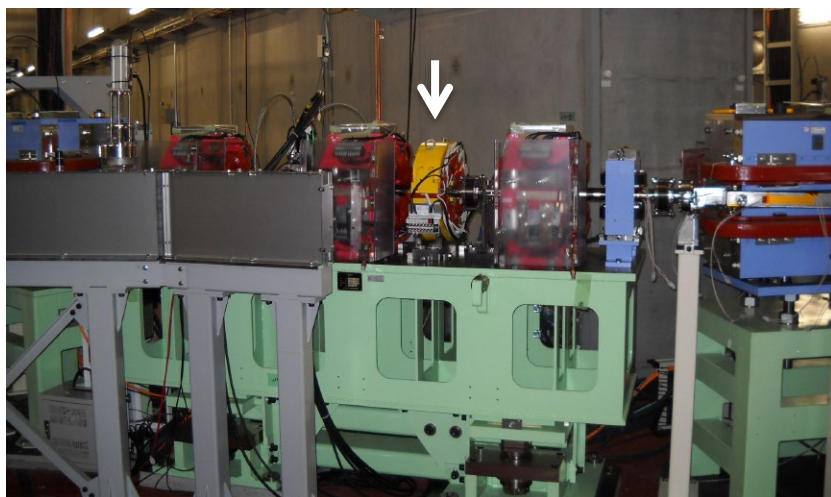
3次元測量 (API T3, 水準器)



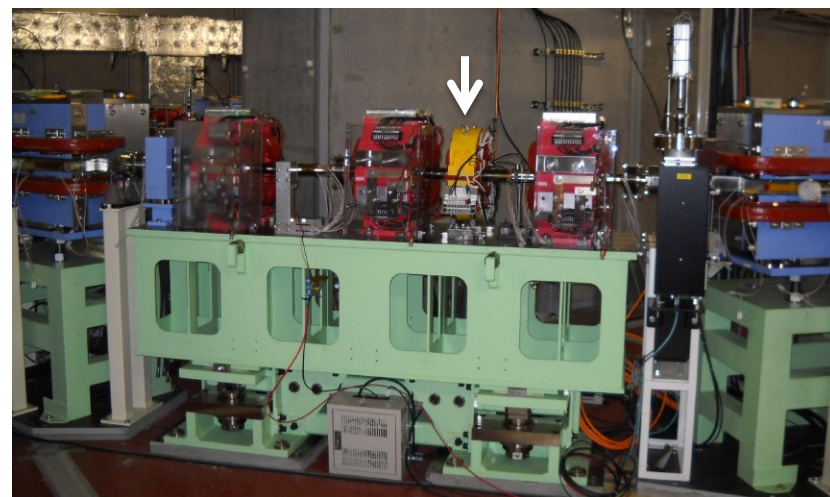
アライメント調整

アライメント結果: 高さ 0.1mm以下, 水平XZ位置 0.1mm以下, 傾き 0.4mrad以下

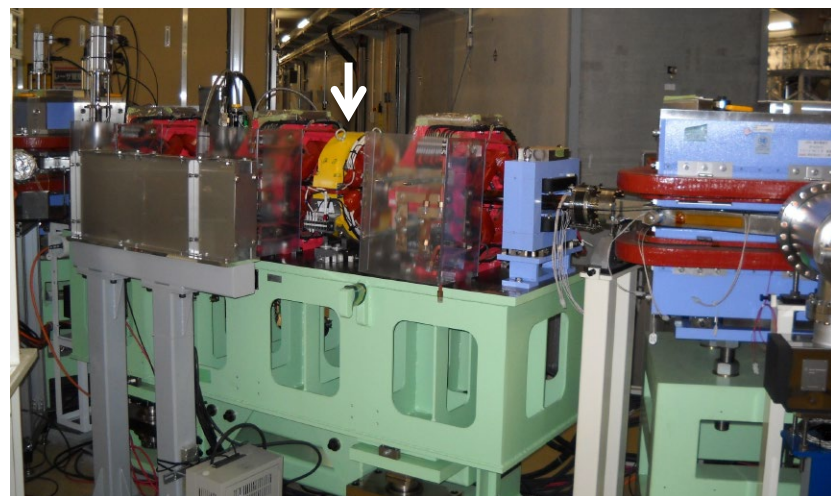
# 六極電磁石(写真)



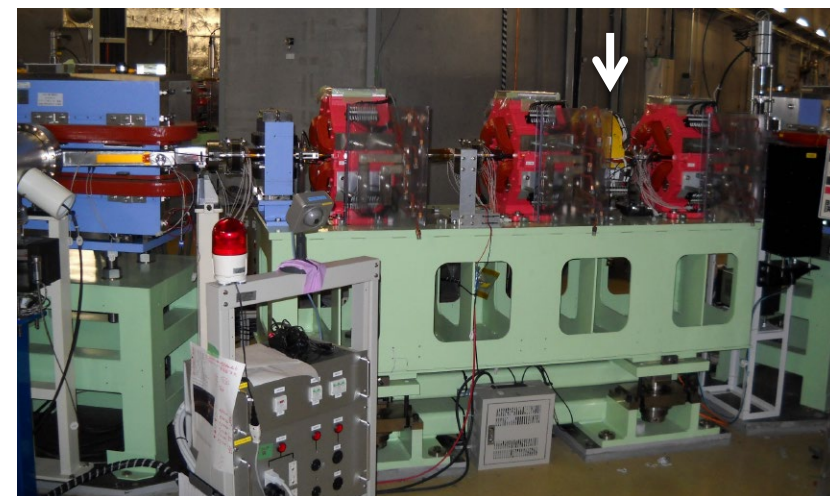
SXIF02(第1アーク前半)



SXIF04(第1アーク後半)



SXIR02(第2アーク前半)



SXIR04(第2アーク後半)

# 制御パネルの作成

アーク部電磁石制御用パネル

Section 3

Choise: Section 3

	Q			H			V			ITO ALL	
	K set	I set	I mon	K set	I set	I mon	K set	I set	I mon		
QMIF01	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected
QMIF02	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected
QMIF03	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected
QMIF04	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected
QMIF05	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected
QMIF06	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected
ZEMF01	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected
ZEMF02	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected
ZEMF03	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected
ZEMF04	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected
ZQIP01	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected
ZQIP02	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected
ZQIP03	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected
ZQIP04	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected
ZQIP04	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected	0.00	Disconnected

set current: 0 SET  
ON OFF RESET Auto

imin: 0.005  
dec(min): 0.002  
set: 0.002  
target: 0

R56調整用パネル

Longitudinal Dispersion Control

QMIF02-05(I) QMIR02-05(I) QMIF01-06(K) QMIR01-06(K)

$\Delta$  R56[m] 0.000

IncVal[A] 0.01 Reset

Name	Ratio	Base	Delta	I[A]
Disconnected				
Disconnected				
Disconnected				
Disconnected				
Disconnected				
Disconnected				

バンチ圧縮関連マシンスタディ  
(3月、1週間程度予定)

六極電磁石の及びskew四極コイルの操作パネルを追加した。

# まとめ

- バンチ圧縮・復元及びコヒーレントTHz放射の発生に向けて各アーク部に2台の六極電磁石を設置した。
- エンドシムによって六極磁場の一様性を高め、3種類のサブコイルによって水平軌道補正とskew四極によるカップリング補正を可能にした。
- 今後の予定
  - 通電試験と配線チェック
  - バンチ圧縮関連のマシンスタディ(1週間程度)

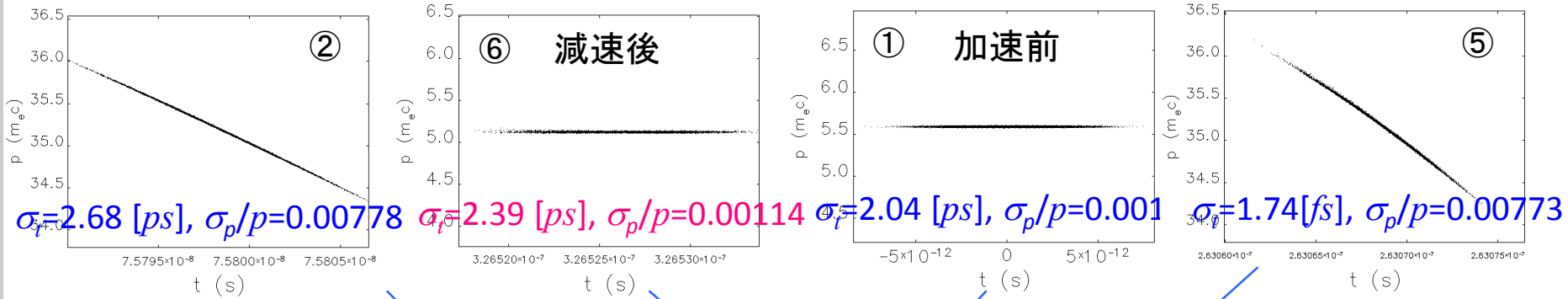
# Backup Slides

(参考資料)



# バンチ圧縮・復元 (SX2&4 ON, 2ps)

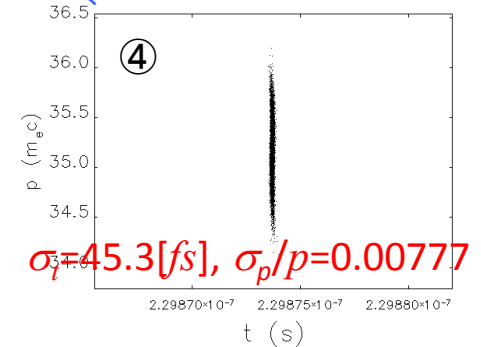
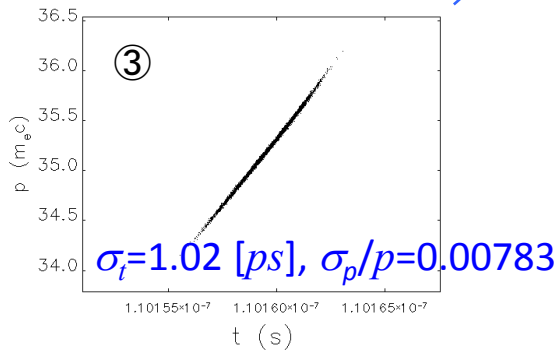
- (1) 第2アーク入口でバンチ長を最小にするように、第1アークの六極電磁石強度とRF加速位相を最適化  
 (2) 減速空洞出口で運動量幅を最小にするように、第2アークの六極電磁石強度とRF減速位相を最適化



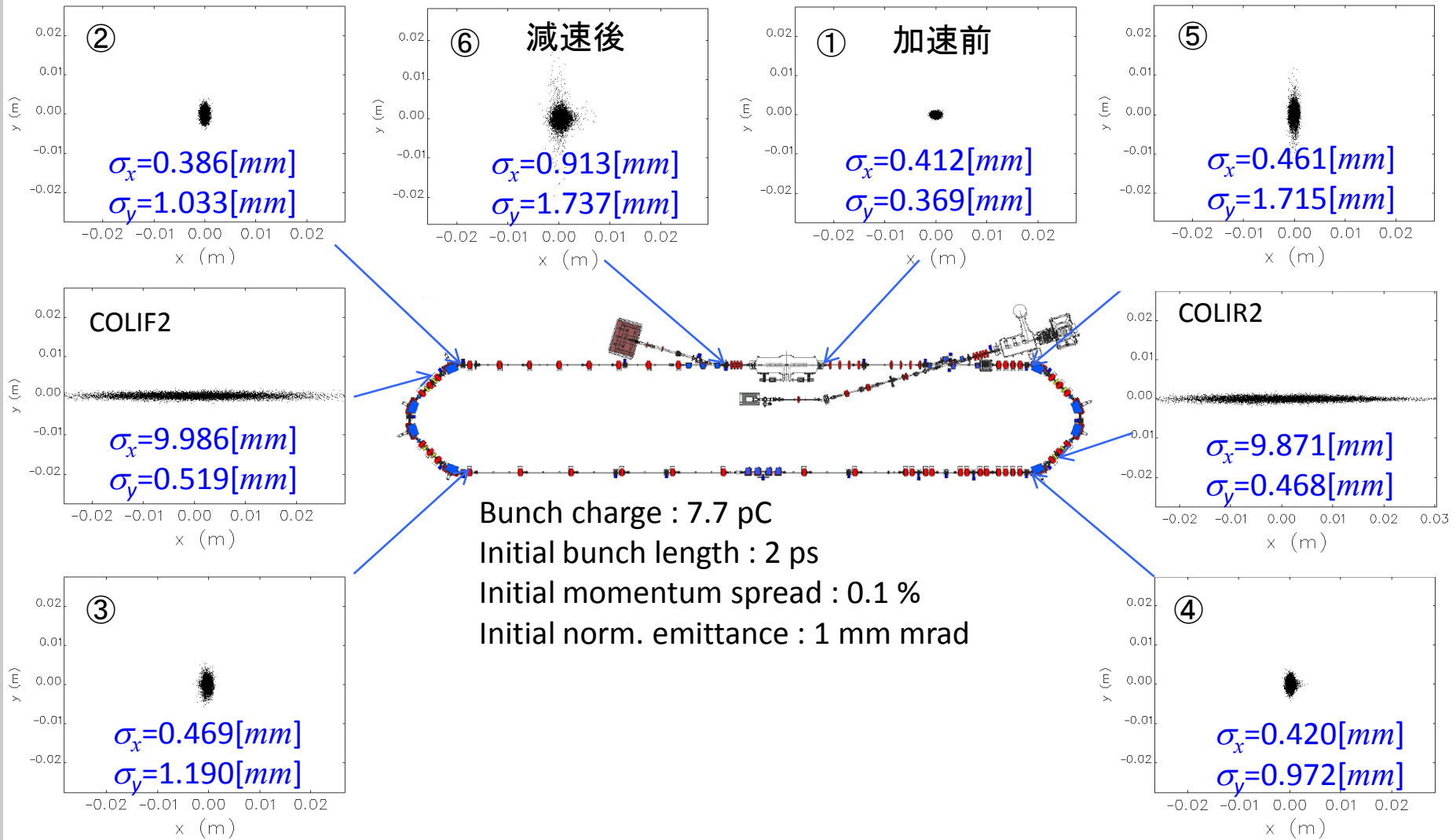
$K_2(SXIF2) = -52.23 [m^{-3}]$   
 $K_2(SXIF4) = -35.09 [m^{-3}]$   
 $\phi_{RF}(ACC) = 25.18 [deg]$

$K_2(SXIR2) = -56.62 [m^{-3}]$   
 $K_2(SXIR4) = -46.30 [m^{-3}]$   
 $\phi_{RF}(DEC) = 205.13 [deg]$

Bunch charge : 7.7 pC  
 Initial bunch length : 2 ps  
 Initial momentum spread : 0.1 %  
 Initial norm. emittance : 1 mm mrad

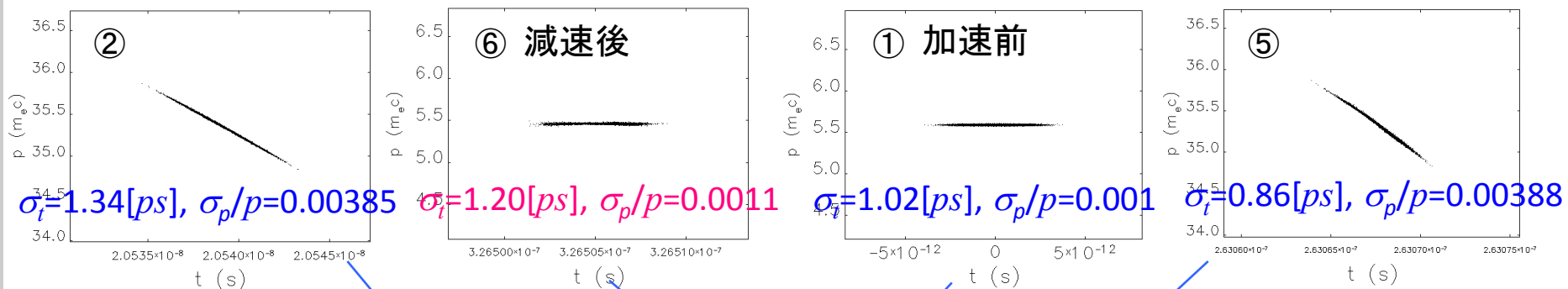


# ビームサイズ (SX2&4 ON, 2ps)



# バンチ圧縮・復元 (SX2&4 ON, 1ps)

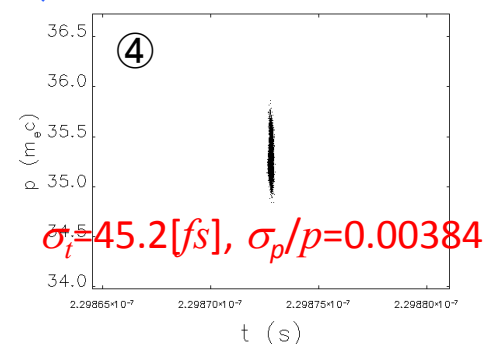
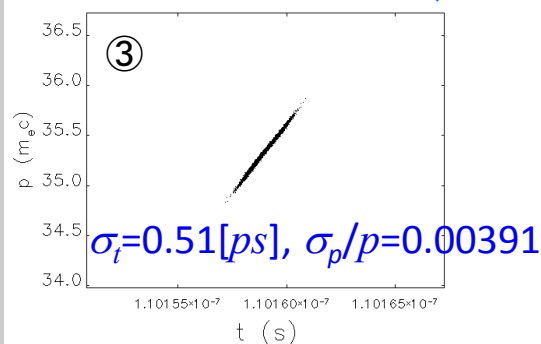
- (1) 第2アーク入口でバンチ長を最小にするように、第1アークの六極電磁石強度とRF加速位相を最適化。  
 (2) 減速空洞出口で運動量幅を最小にするように、第2アークの六極電磁石強度とRF減速位相を最適化。



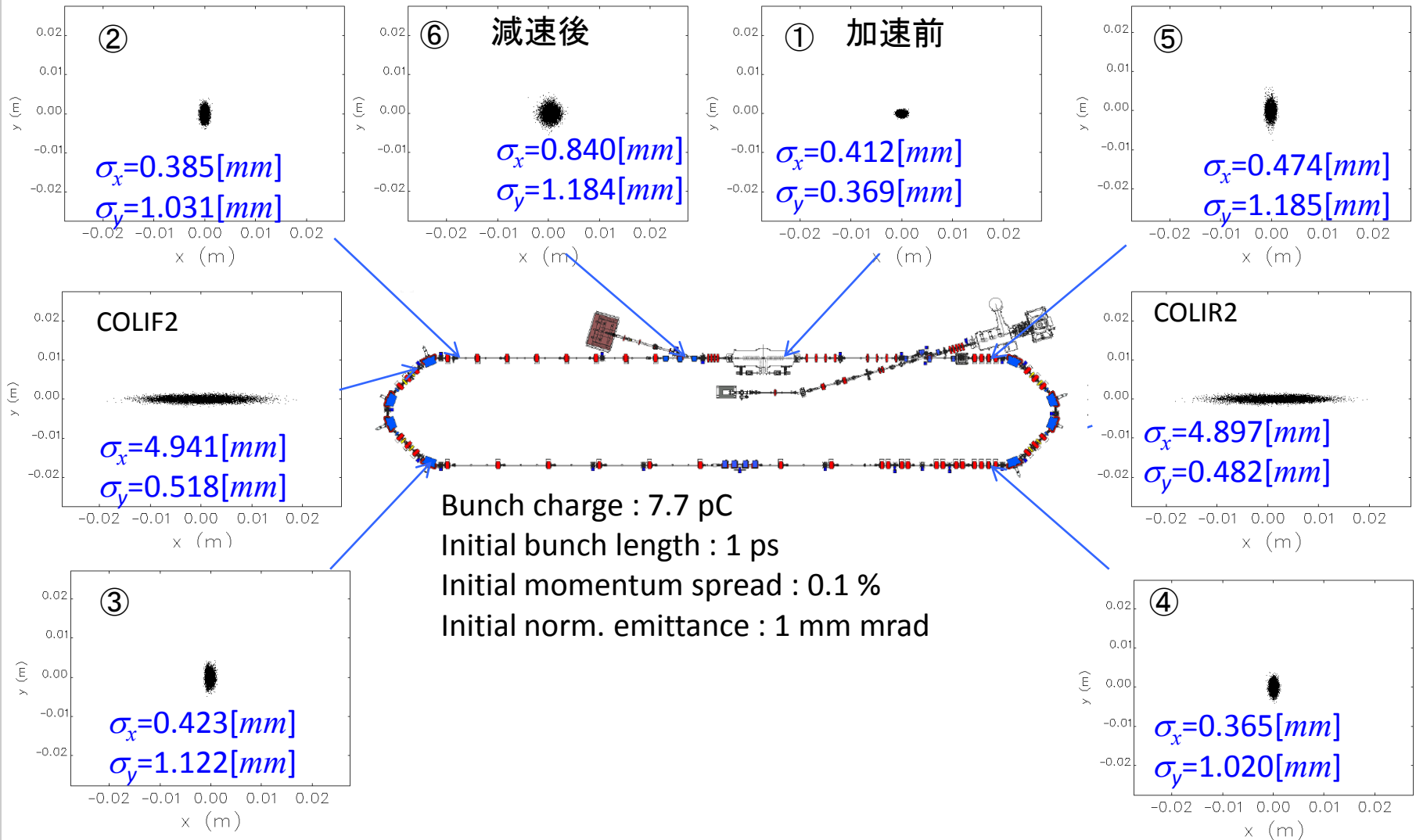
$K_2(SXIF2) = -52.29 [m^{-3}]$   
 $K_2(SXIF4) = -34.97 [m^{-3}]$   
 $\phi_{RF}(ACC) = 24.62 [deg]$

$K_2(SXIR2) = -64.41 [m^{-3}]$   
 $K_2(SXIR4) = -40.76 [m^{-3}]$   
 $\phi_{RF}(DEC) = 205.95 [deg]$

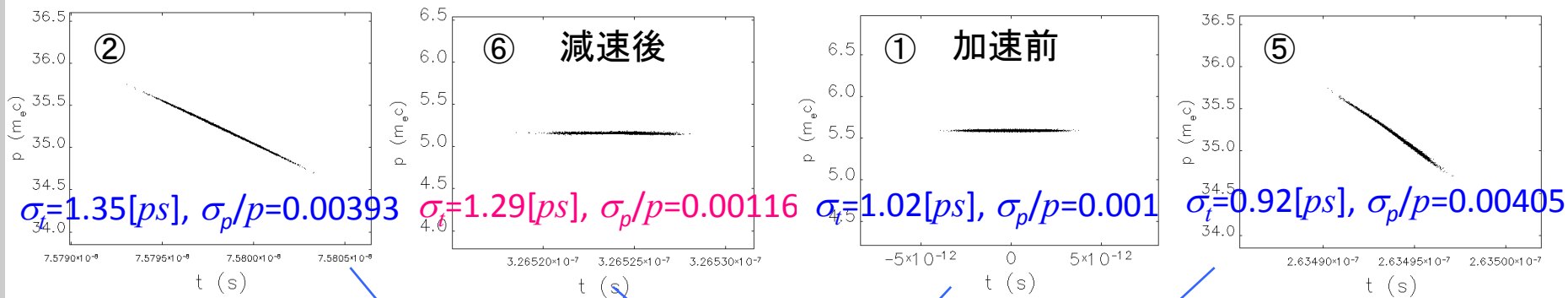
Bunch charge : 7.7 pC  
 Initial bunch length : 1 ps  
 Initial momentum spread : 0.1 %  
 Initial norm. emittance : 1 mm mrad



# ビームサイズ (SX2&4 ON, 1ps)

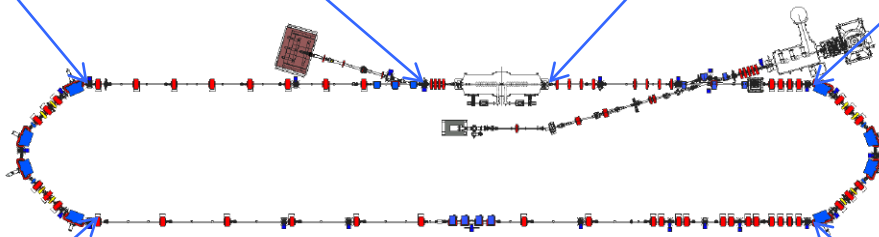


# バンチ圧縮・復元 (SX2 ON, 1ps)

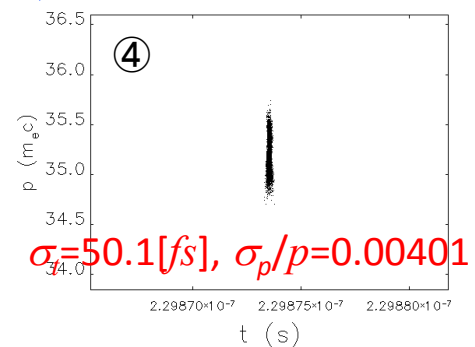
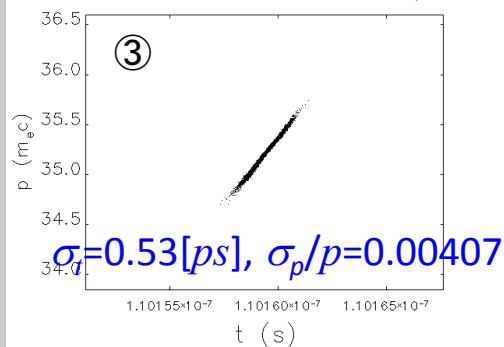


$K_2(SXIF2) = -89.84 [m^{-3}]$   
 $\phi_{RF}(ACC) = 25.11 [deg]$

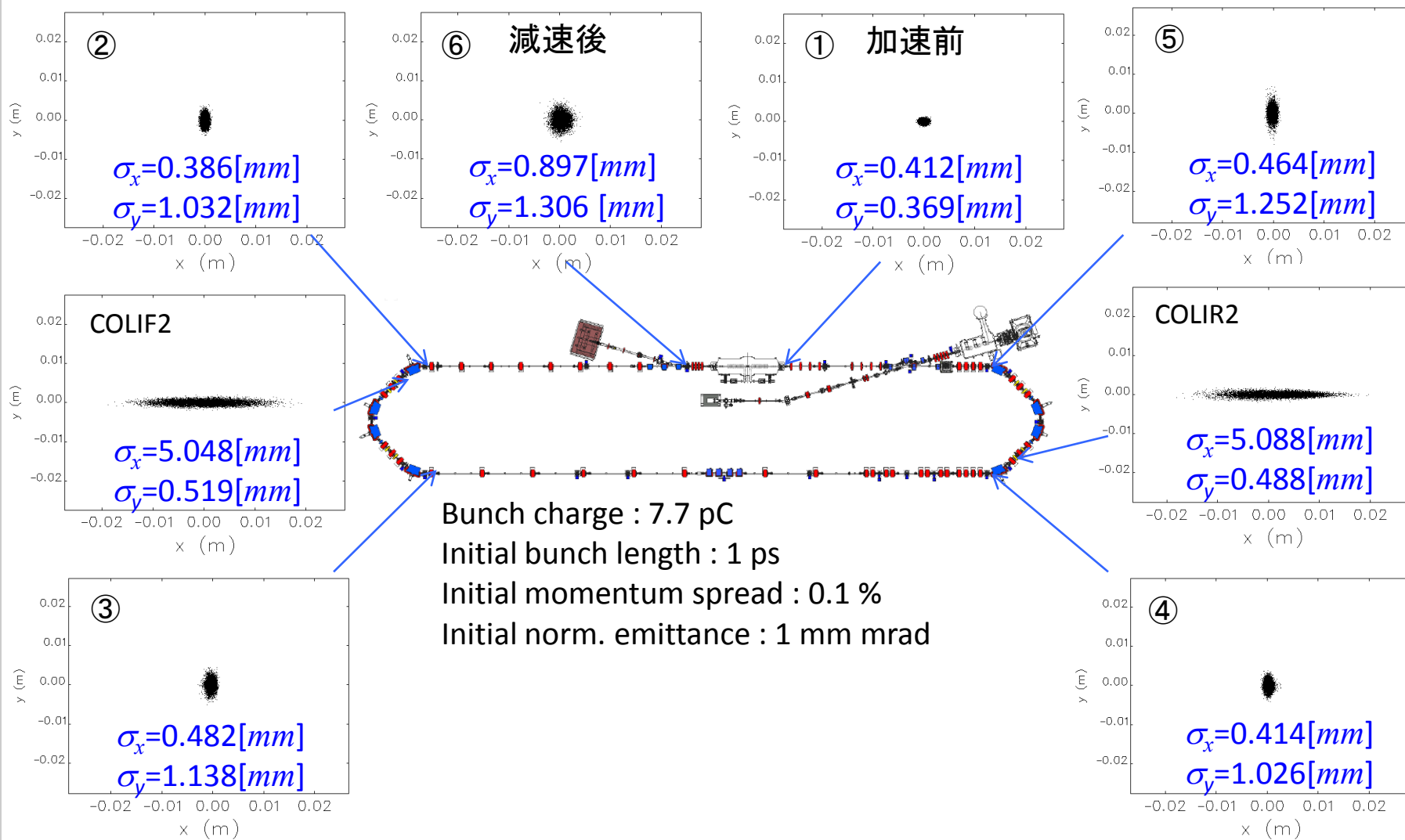
$K_2(SXIR2) = -109.66 [m^{-3}]$   
 $\phi_{RF}(DEC) = 205.30 [deg]$



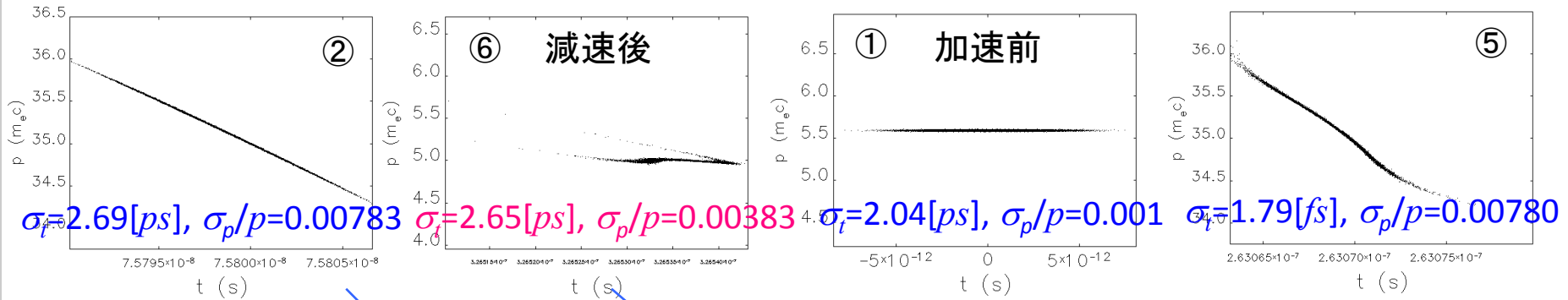
Bunch charge : 7.7 pC  
 Initial bunch length : 1 ps  
 Initial momentum spread : 0.1 %  
 Initial norm. emittance : 1 mm mrad



# ビームサイズ (SX2 ON, 1ps)



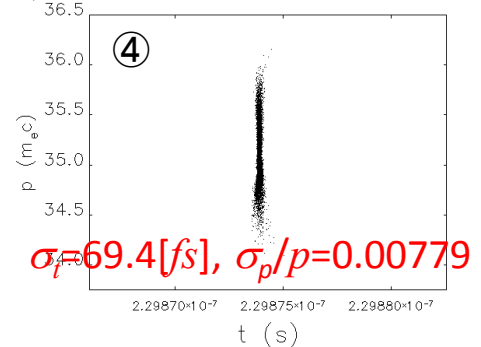
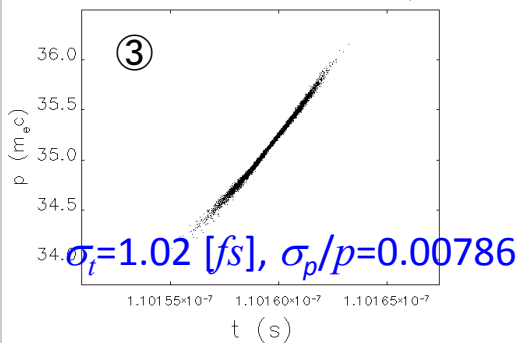
# バンチ圧縮・復元 (SX2 ON, 2ps)



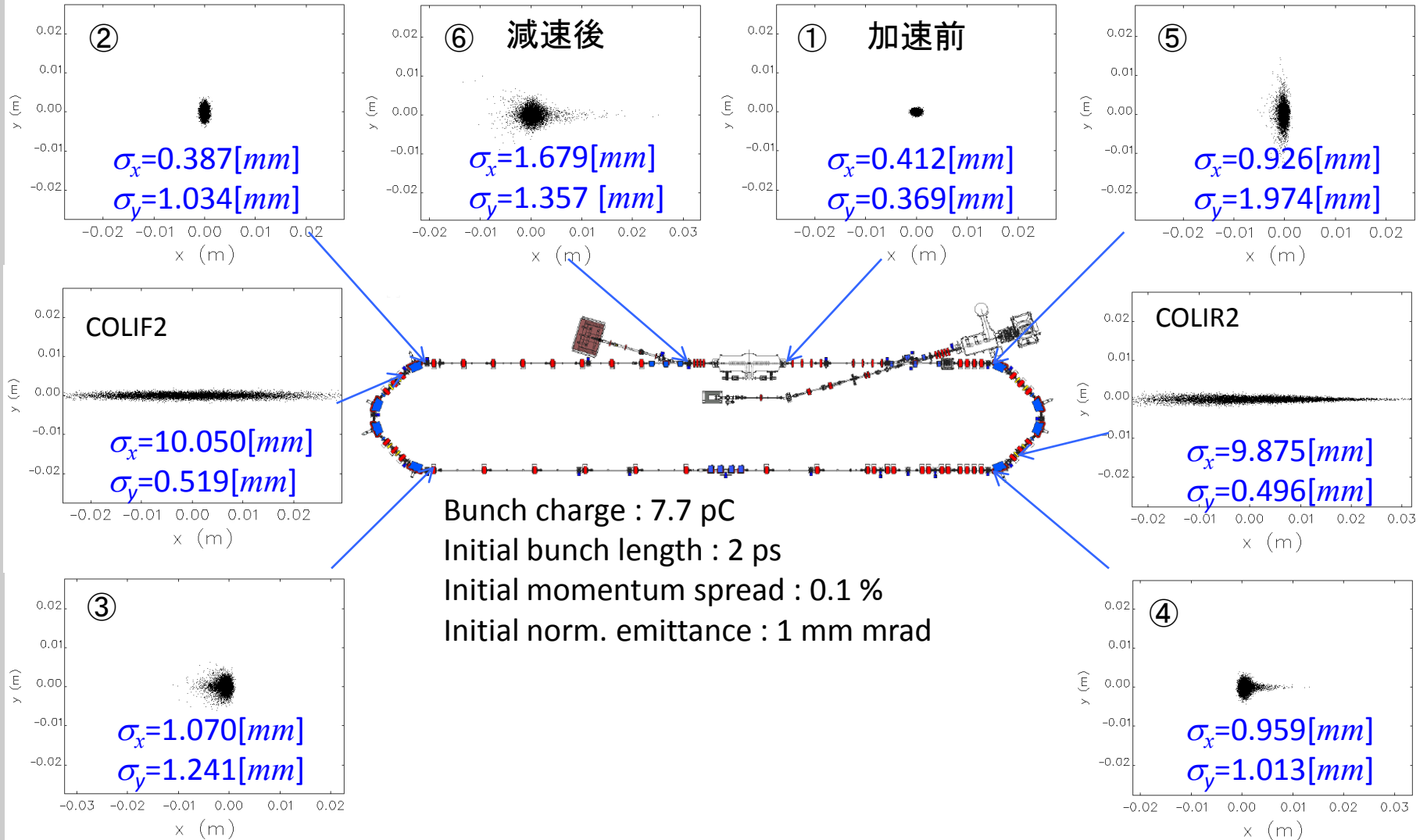
$K_2(SXIF2) = -89.76 [m^{-3}]$   
 $\phi_{RF}(ACC) = 25.33 [deg]$

$K_2(SXIR2) = -116.45 [m^{-3}]$   
 $\phi_{RF}(DEC) = 204.80 [deg]$

Bunch charge : 7.7 pC  
 Initial bunch length : 2 ps  
 Initial momentum spread : 0.1 %  
 Initial norm. emittance : 1 mm mrad



# ビームサイズ (SX2 ON, 2ps)





# バンチ圧縮シミュレーション結果 (1)

初期パラメータ値:  $Q=7.7\text{pC}$ ,  $\sigma_{t0}=2\text{ps}$ ,  $\sigma_{p0}/p_0=0.001$

六極電磁石台数依存性

	バンチ長 $\sigma_i$ [fs]	運動量幅 $\sigma_p/p$	規格化エミッタンス $\varepsilon_{nx}, \varepsilon_{ny}$ [mm mrad]	六極磁場* $K_2$ [m <sup>-3</sup> ]	RF位相 $\phi_{RF}$ [deg]	T566 (arc)	T166 (arc)	T266 (arc)
Normal	2110	0.00070	1.03, 1.02	0, 0, 0, 0	0.0	8.027	-1.15	-0.65
All SX OFF	875	0.00506	1.14, 1.03	0, 0, 0, 0	16.46	7.584	-1.16	-0.16
All SX ON	60.64	0.00512	1.13, 1.16	-14.9, -33.3 -21.0, -22.2	16.46	0.466	-1.16	-0.12
SX1 ON	65.74	0.00516	1.60, 1.35	-106.4	16.47	0.433	-6.44	1.83
SX2 ON	66.40	0.00517	1.59, 1.16	-84.6	16.58	0.396	-11.33	0.18
SX3 ON	74.43	0.00506	1.95, 1.20	-112.2	16.50	0.466	8.55	-2.17
SX4 ON	67.42	0.00503	1.55, 1.19	-80.2	16.36	0.497	9.42	-0.13
SX1&3 ON	61.36	0.00516	1.18, 1.25	-69.8, -38.8	16.53	0.431	-1.27	0.45
SX2&4 ON	60.94	0.00514	1.13, 1.15	-42.4, -40.1	16.51	0.434	-0.96	0.03
SX1&2 ON	65.31	0.00513	1.50, 1.26	-62.4, -34.7	16.40	0.445	-8.43	1.15
SX2&3 ON	62.17	0.00513	1.27, 1.15	-60.6, -31.5	16.49	0.439	-5.71	-0.48
SX3&4 ON	68.45	0.00502	1.65, 1.19	-54.3, -41.0	16.32	0.513	8.95	-1.12
SX1&4 ON	62.62	0.00517	1.32, 1.23	-69.4, -28.2	16.55	0.424	-0.88	1.15

\* 六極電磁石の長さは10cmとした。

# バンチ圧縮シミュレーション結果（2）

初期パラメータ依存性

	バンチ長 $\sigma_i$ [fs]	運動量幅 $\sigma_p/p$	規格化エミッタンス $\varepsilon_{nx}, \varepsilon_{ny}$ [mm mrad]	六極磁場 $K_2$ [m <sup>-3</sup> ]	RF位相 $\phi_{RF}$ [deg]	T566 (arc)	T166 (arc)	T266 (arc)
All SX ON	60.64	0.00512	1.13, 1.16	-14.9, -33.3 -21.0, -22.2	16.46	0.466	-1.16	-0.12
<u>Q→0.77 pC</u>	59.93	0.00509	1.03, 1.16	-17.7, -29.1 -22.1, -22.2	16.59	0.552	-0.69	-0.11
<u><math>\sigma_{i0} \rightarrow 1ps</math></u>	59.25	0.00256	1.02, 1.05	-4.55, -43.4 -17.3, -22.7	16.46	0.495	-2.12	-0.20
<u><math>\sigma_{p0}/p_0 \rightarrow 0.002</math></u>	117.95	0.00512	1.04, 1.16	-13.8, -33.2 -20.9, -22.2	16.49	0.554	-1.08	-0.14
SX1 ON	65.74	0.00516	1.60, 1.35	-106.4	16.47	0.433	-6.44	1.83
<u>Q→0.77 pC</u>	65.23	0.00507	1.44, 1.35	-104.3	16.53	0.575	-6.33	1.78
<u><math>\sigma_{i0} \rightarrow 1ps</math></u>	62.72	0.00253	1.28, 1.12	-117.3	16.12	-0.300	-7.03	2.07
<u><math>\sigma_{p0}/p_0 \rightarrow 0.002</math></u>	119.52	0.00518	1.61, 1.36	-106.3	16.38	0.443	-6.44	1.83
SX2&4 ON	60.94	0.00514	1.13, 1.15	-42.4, -40.1	16.51	0.434	-0.96	0.03
<u>Q→0.77 pC</u>	60.02	0.00510	1.03, 1.14	-41.2, -40.2	16.64	0.536	-0.81	0.02
<u><math>\sigma_{i0} \rightarrow 1ps</math></u>	61.54	0.00261	1.20, 1.05	-63.2, -28.0	16.07	-0.253	-5.10	0.14
<u><math>\sigma_{p0}/p_0 \rightarrow 0.002</math></u>	117.53	0.00517	1.13, 1.15	-47.2, -35.5	16.43	0.437	-2.15	0.04

バンチ電荷7.7pC、バンチ長2psではCSR wakeの影響は大きくない（0.77pCと大きな差はなかった）。

# バンチ圧縮・復元シミュレーション結果

初期パラメータ値:  $Q=7.7\text{pC}$ ,  $\sigma_{t0}=1\text{ps}$ ,  $\sigma_{p0}/p_0=0.001$

	バンチ長 $\sigma_t$ [fs]	運動量幅 $\sigma_p/p$	規格化エミッタンス $\varepsilon_{nx}, \varepsilon_{ny}$ [mm mrad]	六極磁場 $K_2$ [m <sup>-2</sup> ]	RF位相 $\phi_{RF}$ [deg]	T566 (arc)	T166 (arc)	T266 (arc)
	上:バンチ圧縮時 下:バンチ復元時			上: SXIF 下: SXIR	上: 加速 下: 減速	上: 第1アーク 下: 第2アーク		
SX2&4 ON	45.2 1195	0.00384 0.00115	1.16, 1.20 1.15, 1.19	-52.3, -35.0 -64.4, -40.8	24.62 205.95	0.053 -0.438	-2.85 -3.84	0.08 -0.01
SX2 ON	50.1 1287	0.00401 0.00116	1.34, 1.20 1.18, 1.28	-89.8 -109.7	25.11 205.30	-0.048 -0.515	-12.0 -14.4	0.22 -0.22
SX2&4 ON Q → 0.77 pC	42.7 1242	0.00390 0.00103	1.03, 1.20 1.01, 1.19	-51.3, -35.7 -62.7, -40.8	25.07 204.84	0.066 -0.309	-2.64 -3.63	0.08 -3e-3
SX2 ON Q → 0.77 pC	48.9 1252	0.00391 0.00104	1.25, 1.19 1.04, 1.27	-88.6 -109.2	25.10 204.74	0.055 -0.476	-11.8 -14.3	0.21 -0.22
SX2&4 ON $\sigma_{t0} \rightarrow 2\text{ps}$	45.3 2387	0.00777 0.00114	1.34, 1.54 1.21, 1.82	-52.2, -35.1 -56.6, -46.3	25.18 205.13	0.047 -0.297	-2.83 -2.22	0.08 -0.03
SX2 ON $\sigma_{t0} \rightarrow 2\text{ps}$	69.4 2648	0.00779 0.00383	4.90, 1.56 2.42, 1.75	-89.8 -116.5	25.33 204.80	-0.041 -1.062	-12.0 -15.2	0.22 0.28

上表の全ての場合に、バンチ圧縮は可能であった ( $K_2 < 200[\text{m}^{-2}]$ ,  $L_{SX}=10[\text{cm}]$ )。

上表のほとんどの場合、バンチ復元は可能であった ( $K_2 < 200[\text{m}^{-2}]$ ,  $L_{SX}=10[\text{cm}]$ )。

$Q=7.7\text{pC}$ 、 $\sigma_{t0}=2\text{ps}$ では分散によるビームサイズが大きくなり、エミッタンスも増加する。

六極電磁石各アーク部 1台の場合は、2次の分散やエミッタンスの増加が見られた (特に $\sigma_{t0}=2\text{ps}$ の場合)。