

cERLバンチ圧縮シミュレーション と六極電磁石の要件

ビームダイナミクス打ち合せ
2014年9月3日(水)

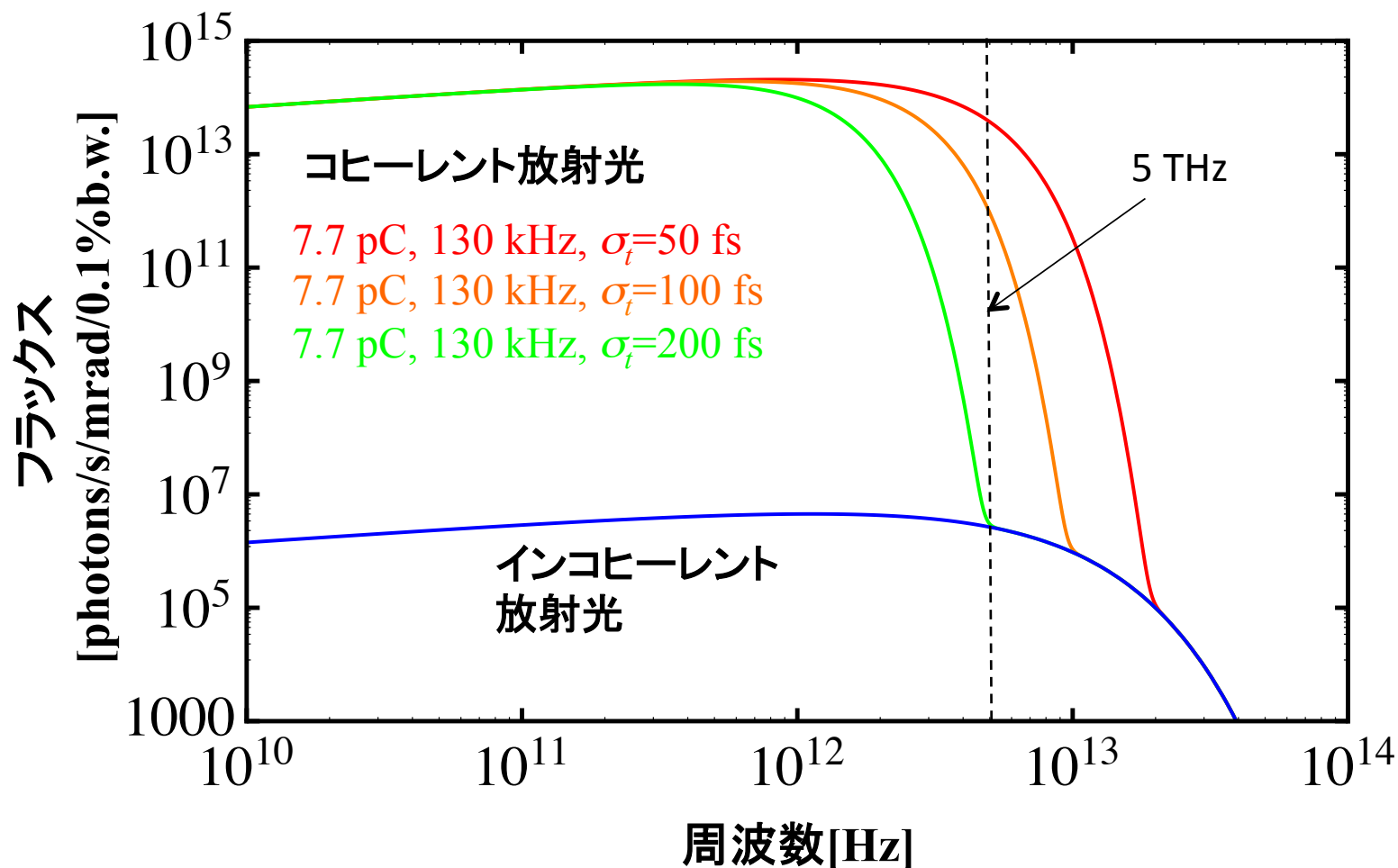
加速器研究施設・第7研究系
中村 典雄

目的

- コヒーレントテラヘルツ光 (THz-CSR) 発生・利用実験において、アーク部でのバンチ圧縮が必要である。
- 短期的には当初予定した六極電磁石8台全てをアーク部に設置することは予算状況を考慮すると困難であると思われる。
- バンチ圧縮シミュレーションを行って、バンチ圧縮に対する六極電磁石の要件(台数と仕様)を調べる。

コヒーレント放射光スペクトル

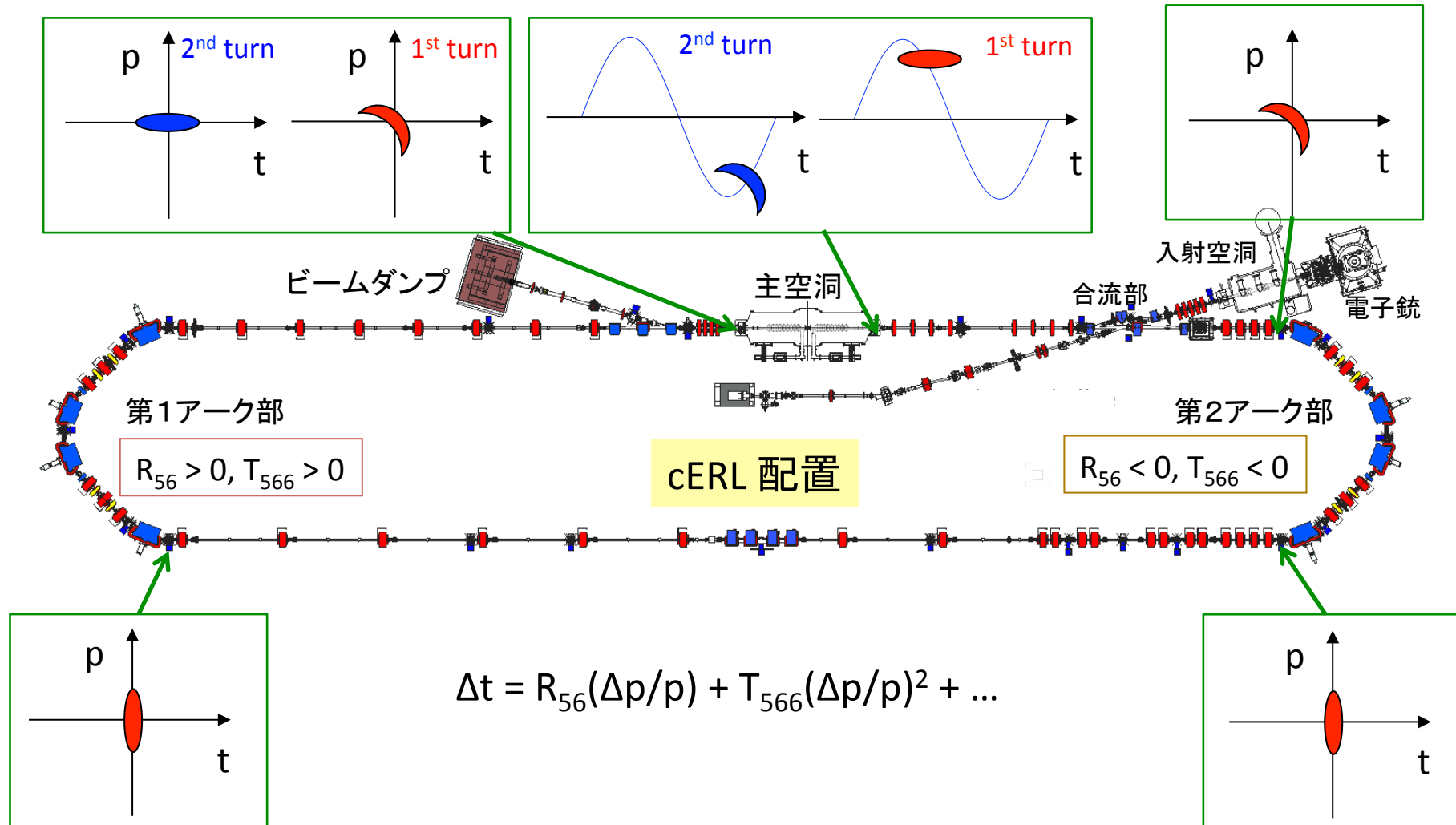
アーク部偏向電磁石からの放射光スペクトルの例 (20MeV)



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におけるバンチ圧縮・復元方式

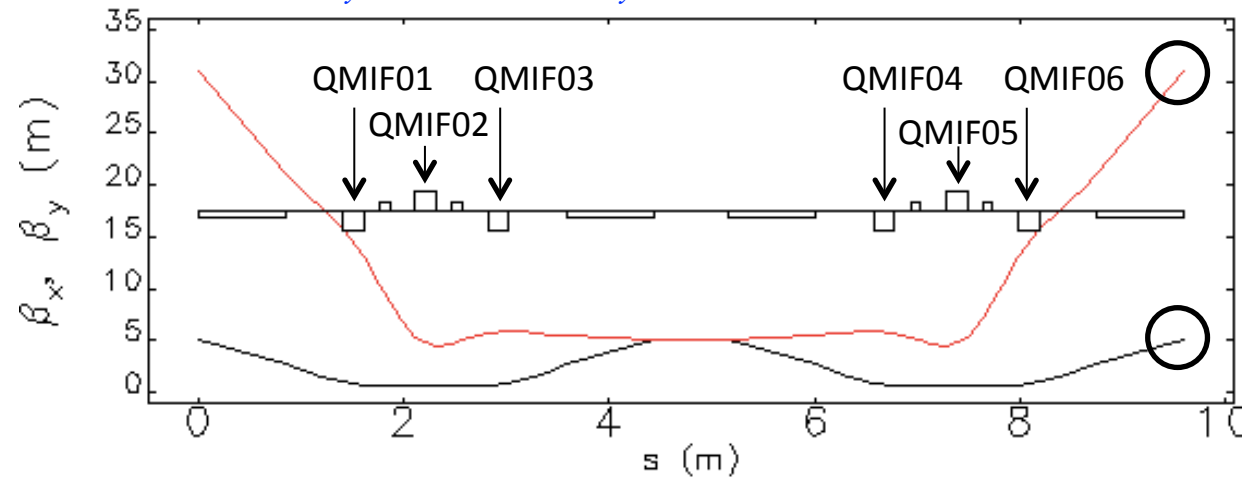
主空洞のoff-crest加速・減速 + アーク部での磁氣的圧縮・復元



アーク部のオプティクス(通常モード)

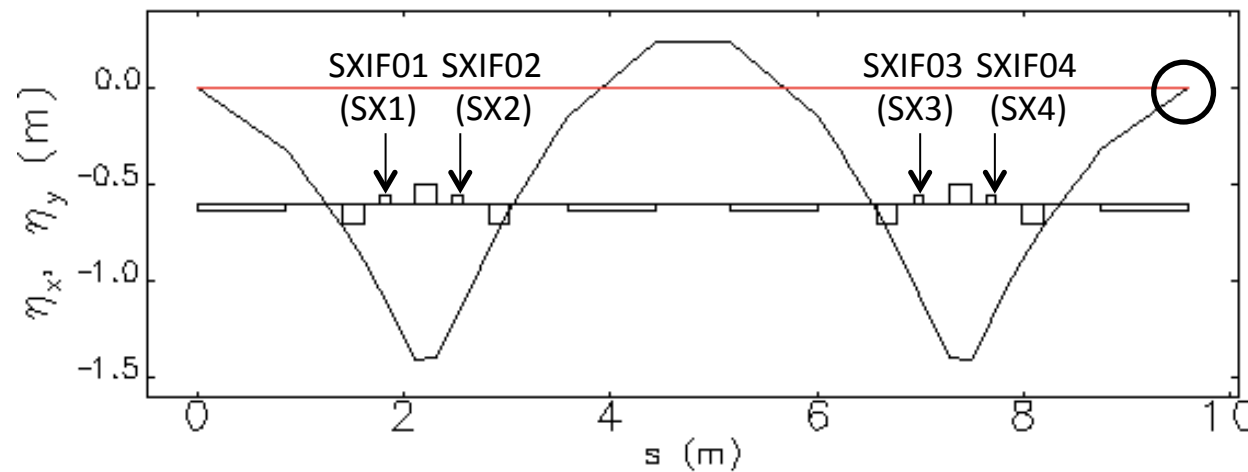
by M. Shimada

$$\beta_x = \beta_y = 5 \text{ m}, \alpha_x = \alpha_y = 0 \text{ at center, } R_{56} = 0 \text{ m}$$



β_x
 β_y

$\beta_x = 5.041 \text{ m}$
 $\alpha_x = -0.2038$
 $\beta_y = 31.04 \text{ m}$
 $\alpha_y = 7.038$



η_x
 η_y

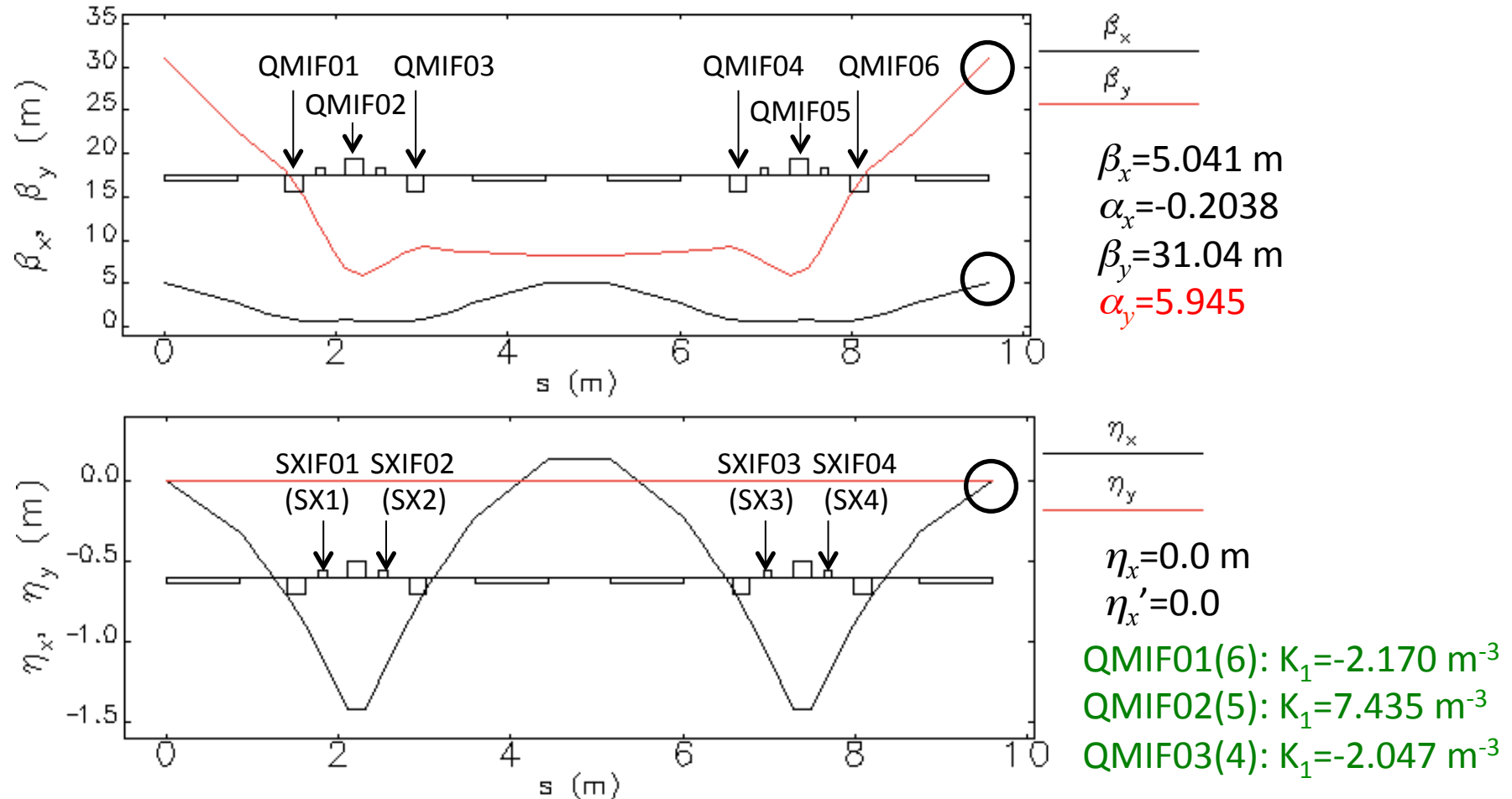
$\eta_x = 0.0 \text{ m}$
 $\eta_x' = 0.0$

QMIF01(6): $K_1 = -2.079 \text{ m}^{-3}$
QMIF02(5): $K_1 = 7.531 \text{ m}^{-3}$
QMIF03(4): $K_1 = -1.840 \text{ m}^{-3}$

通常モードのオプティクスを大きく変えずにバンチ圧縮オプティクスを探す。

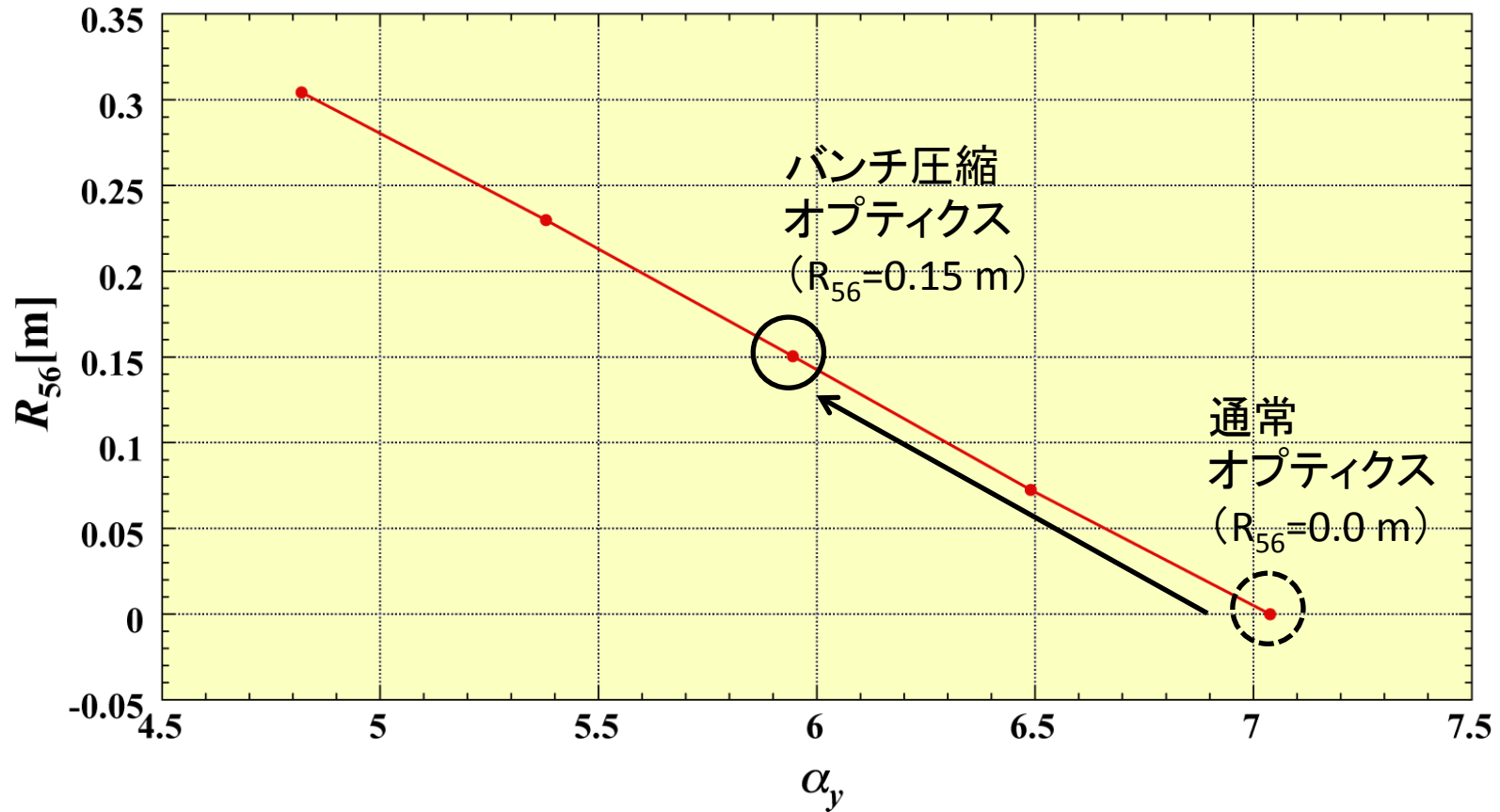
第1アーク部オプティクス ($R_{56}=0.15$)

$\alpha_x = \alpha_y = 0, \eta_x' = 0$ at center, $R_{56} = 0.15$ m $\rightarrow \beta_x = 5.07$ m, $\beta_y = 8.21$ m at center



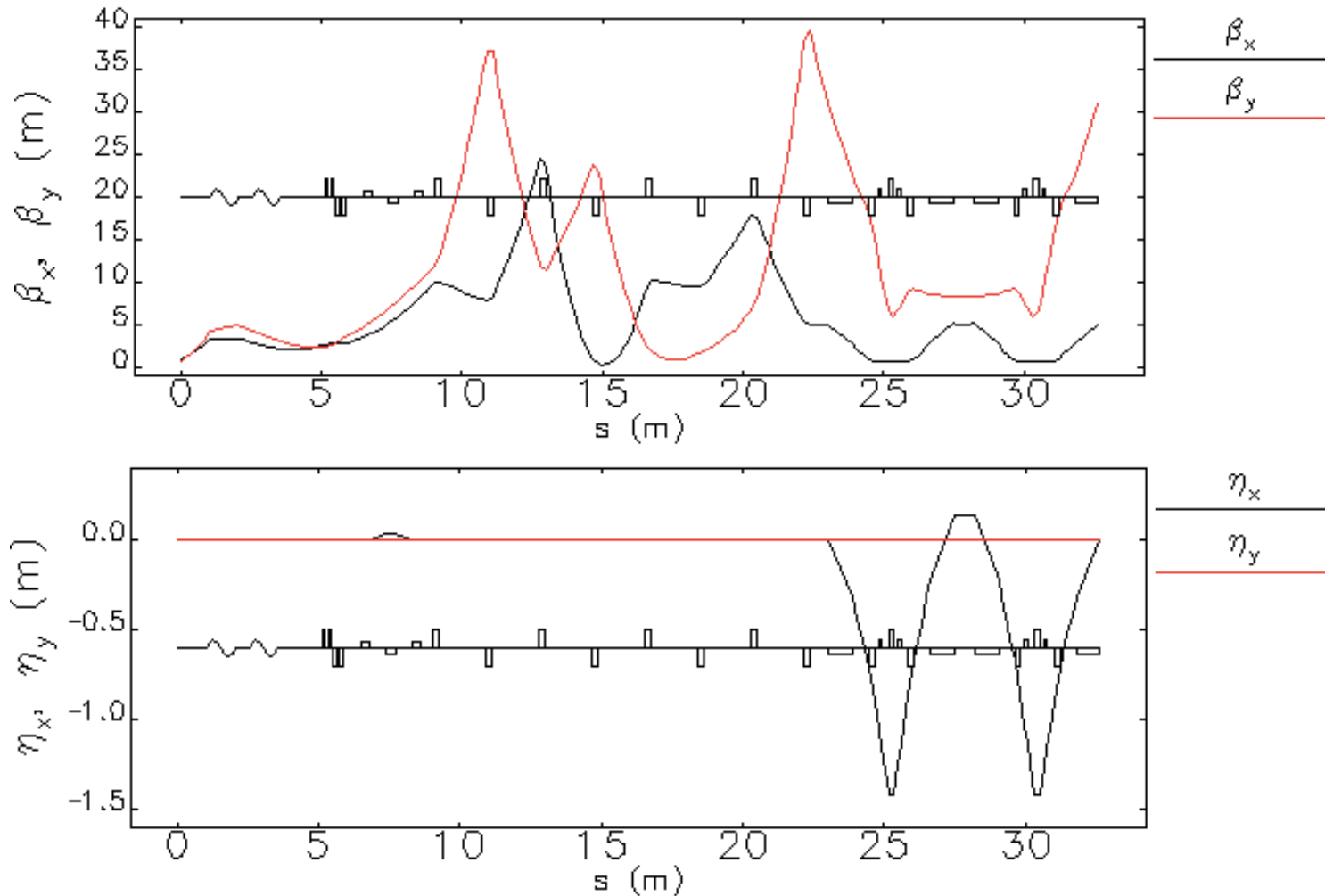
第1アーク部入口の α_y を変えてバンチ圧縮オプティクスを設計した。
 アーク中央でのオプティクスの対称性は残した(ただし、六極の位置は対称でない)。

R_{56} vs. α_y



$R_{56}=0.15$ オプティクスをまずはバンチ圧縮シミュレーションとして使用する。

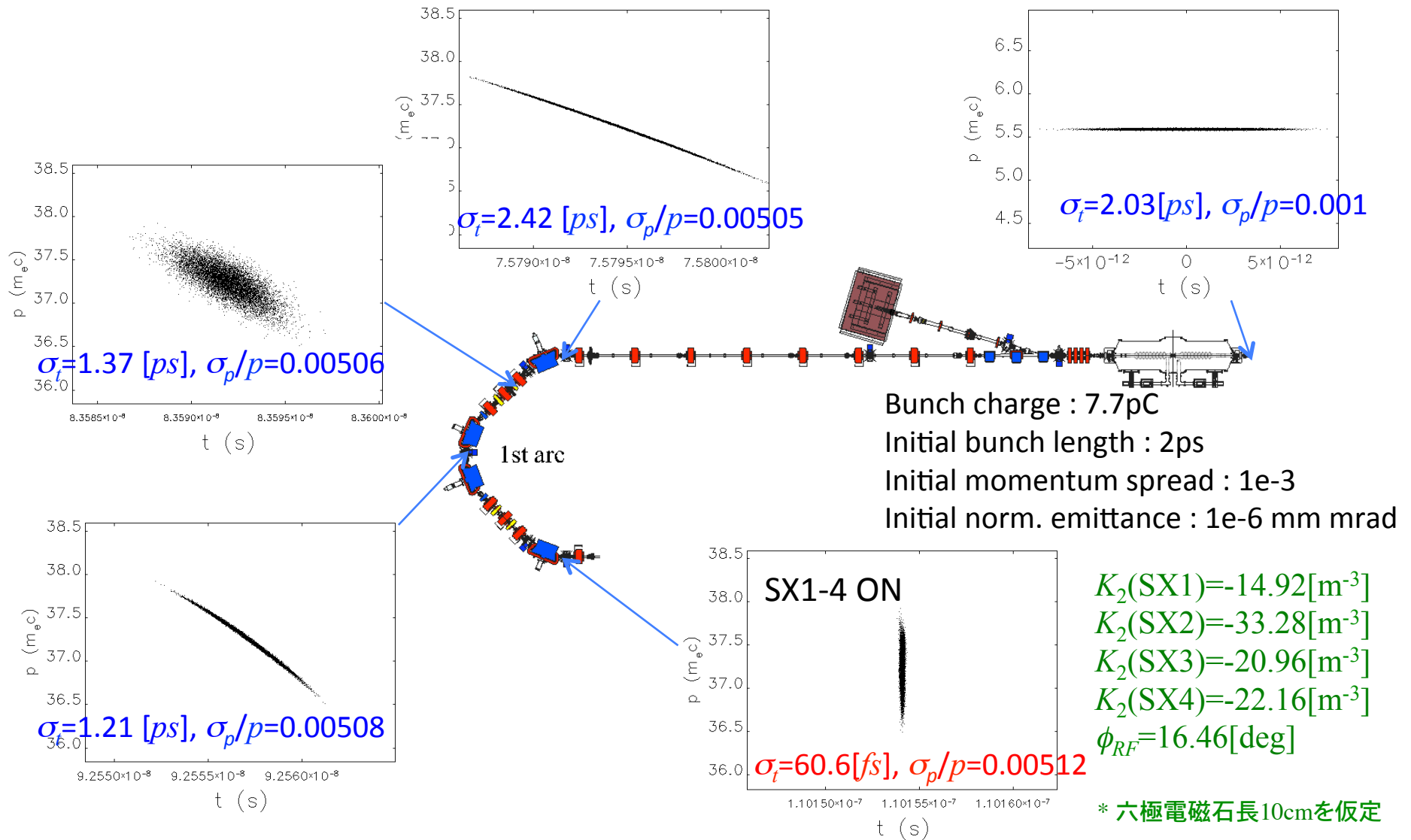
主空洞を含むバンチ圧縮オプティクス



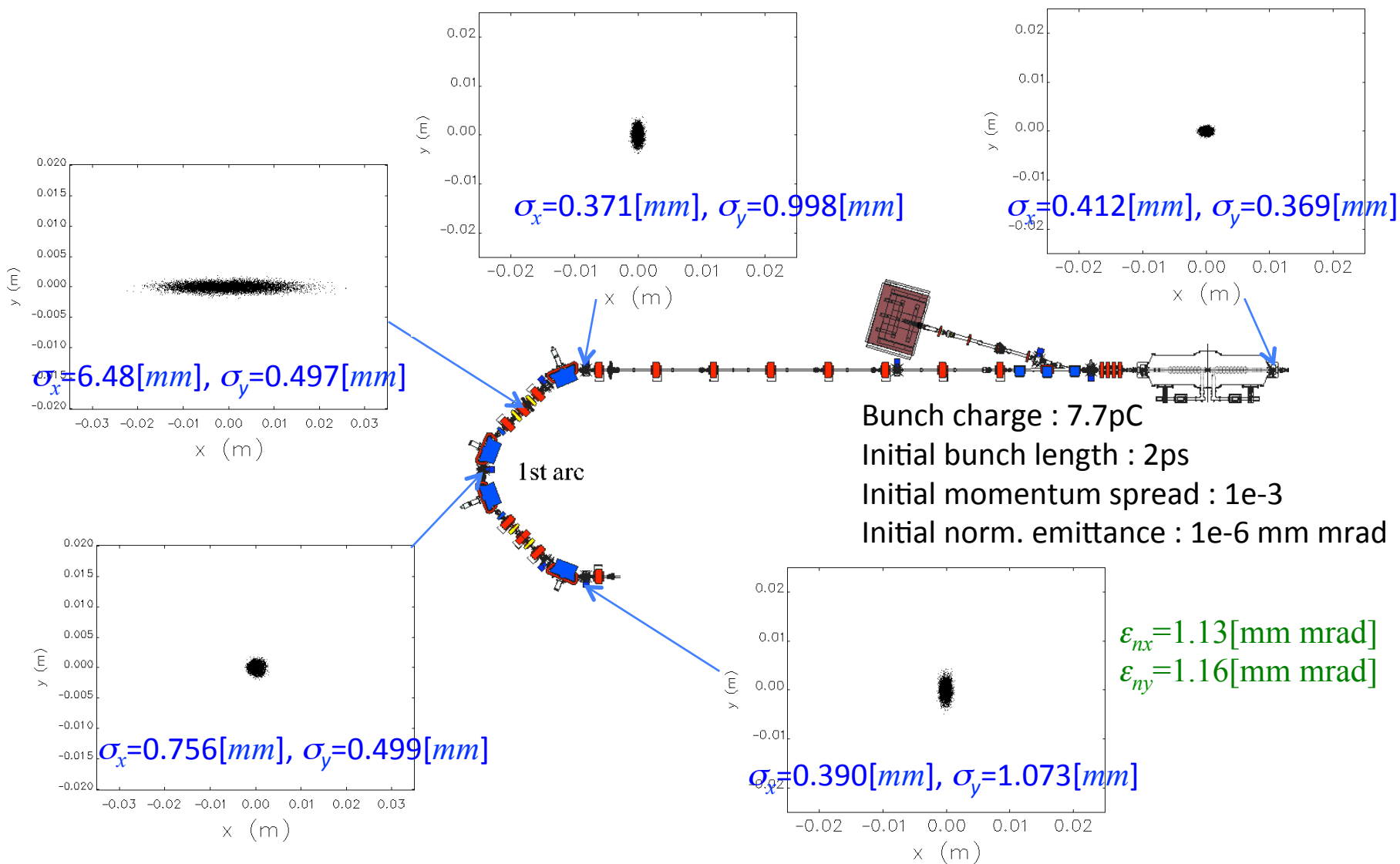
加速空洞直前の初期のtwiss parameter値を仮定して第1アーケ部とマッチングをとった。
(off-crest加速: 加速空洞での位相を 15° に設定した場合)

バンチ圧縮 (All SX ON)

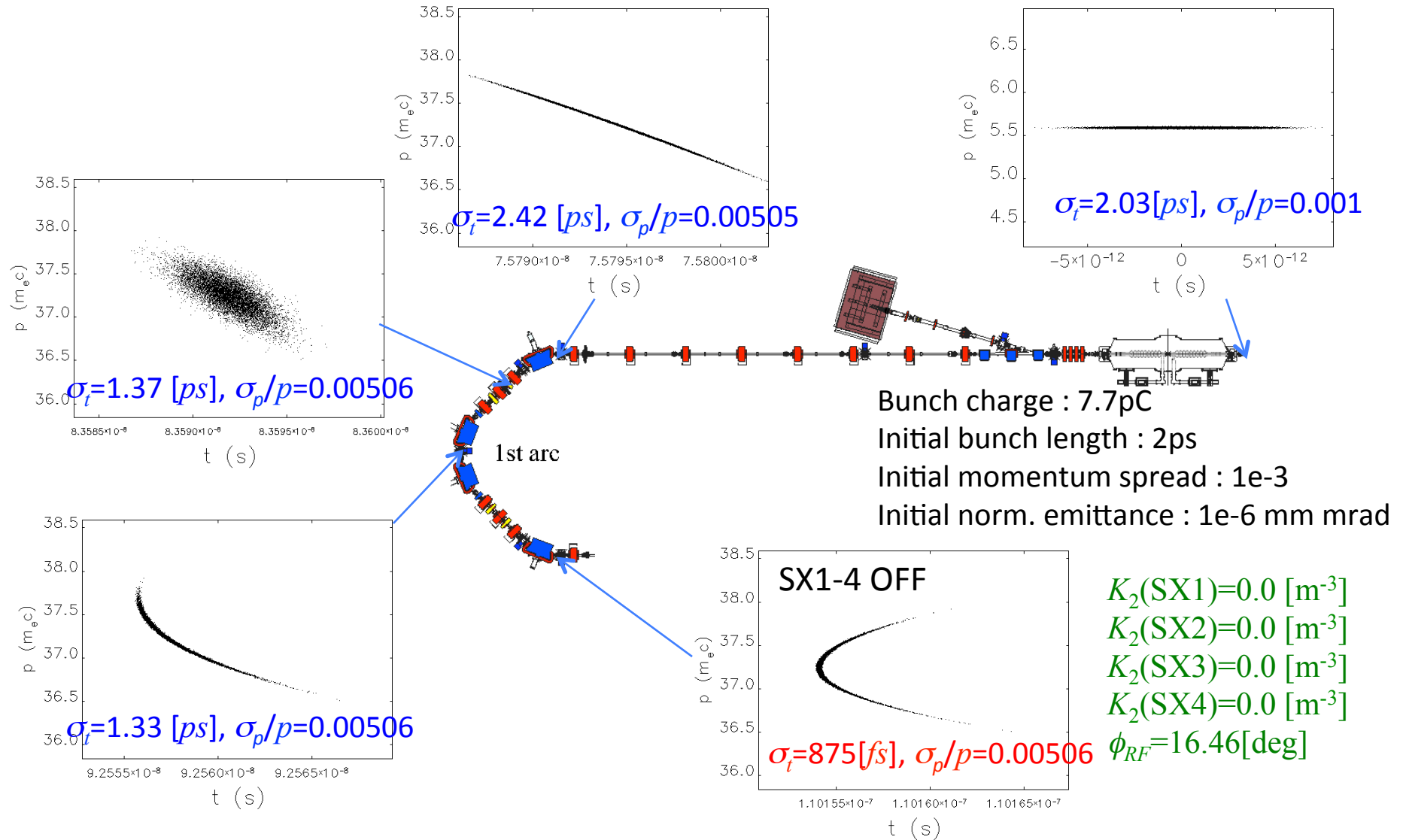
アーク出口 (SCMIM01) でのバンチ長を最小にするように、六極電磁石強度とRF位相を最適化。



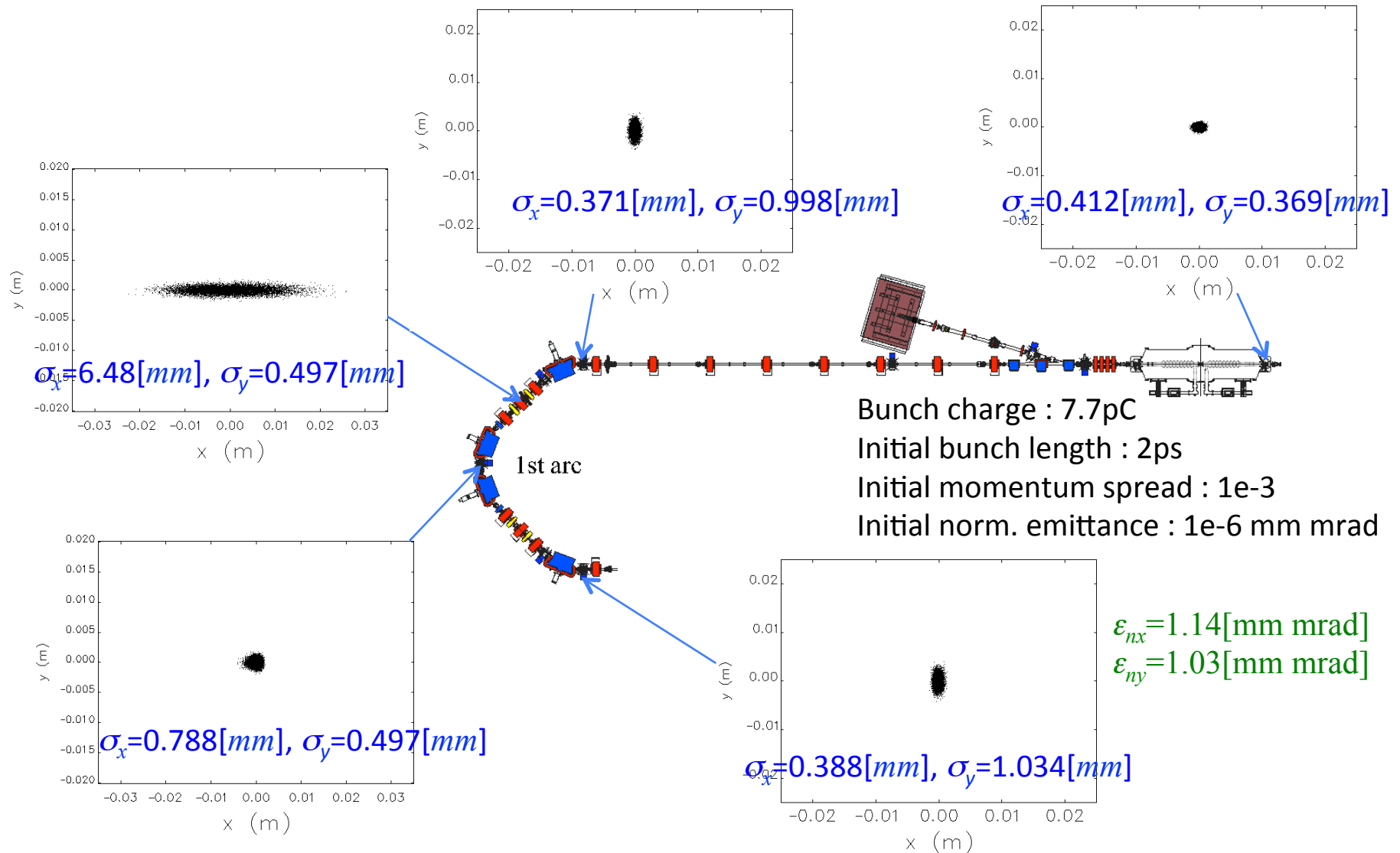
ビームサイズ (All SX ON)



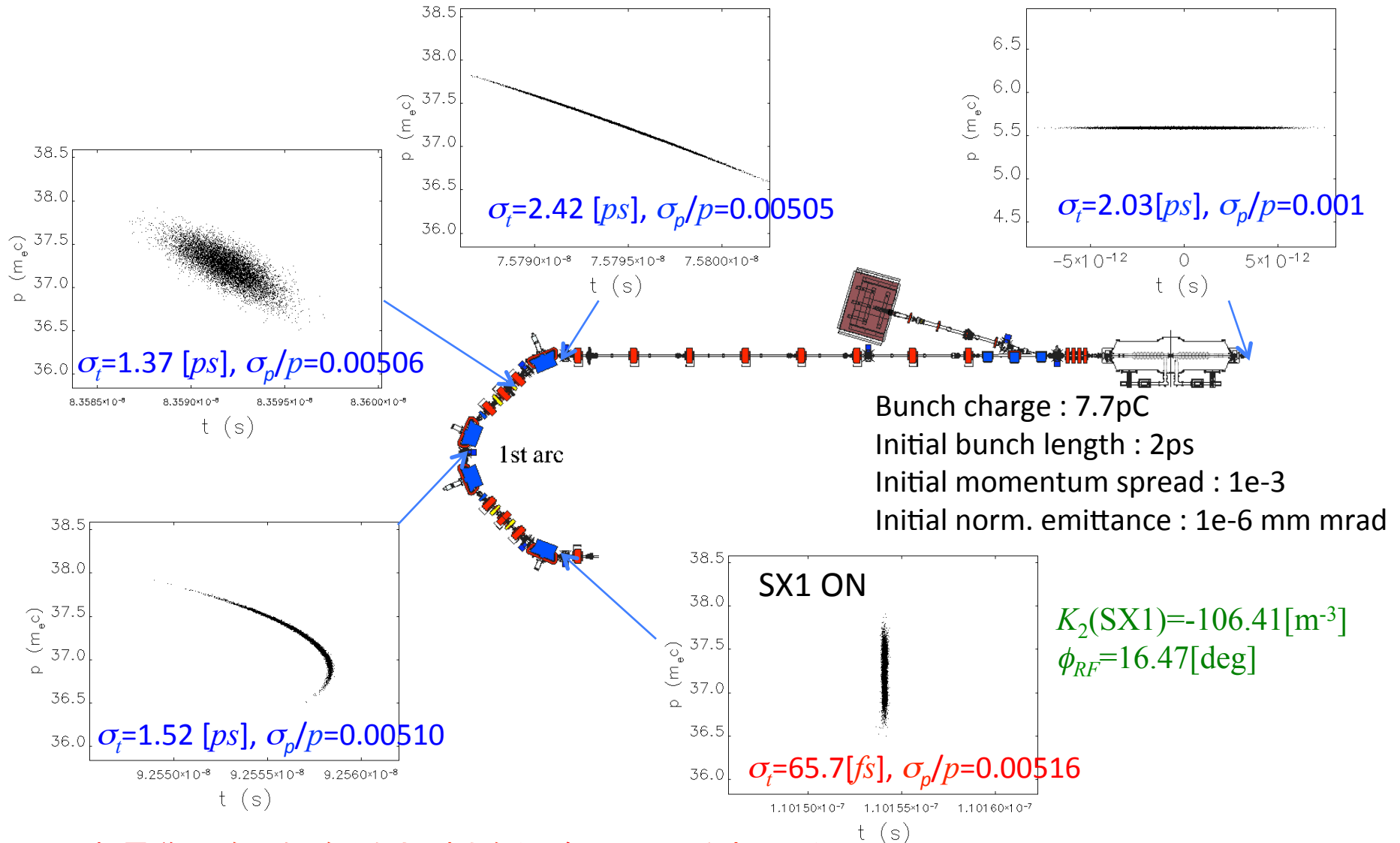
バンチ圧縮 (All SX OFF)



ビームサイズ (All SX OFF)

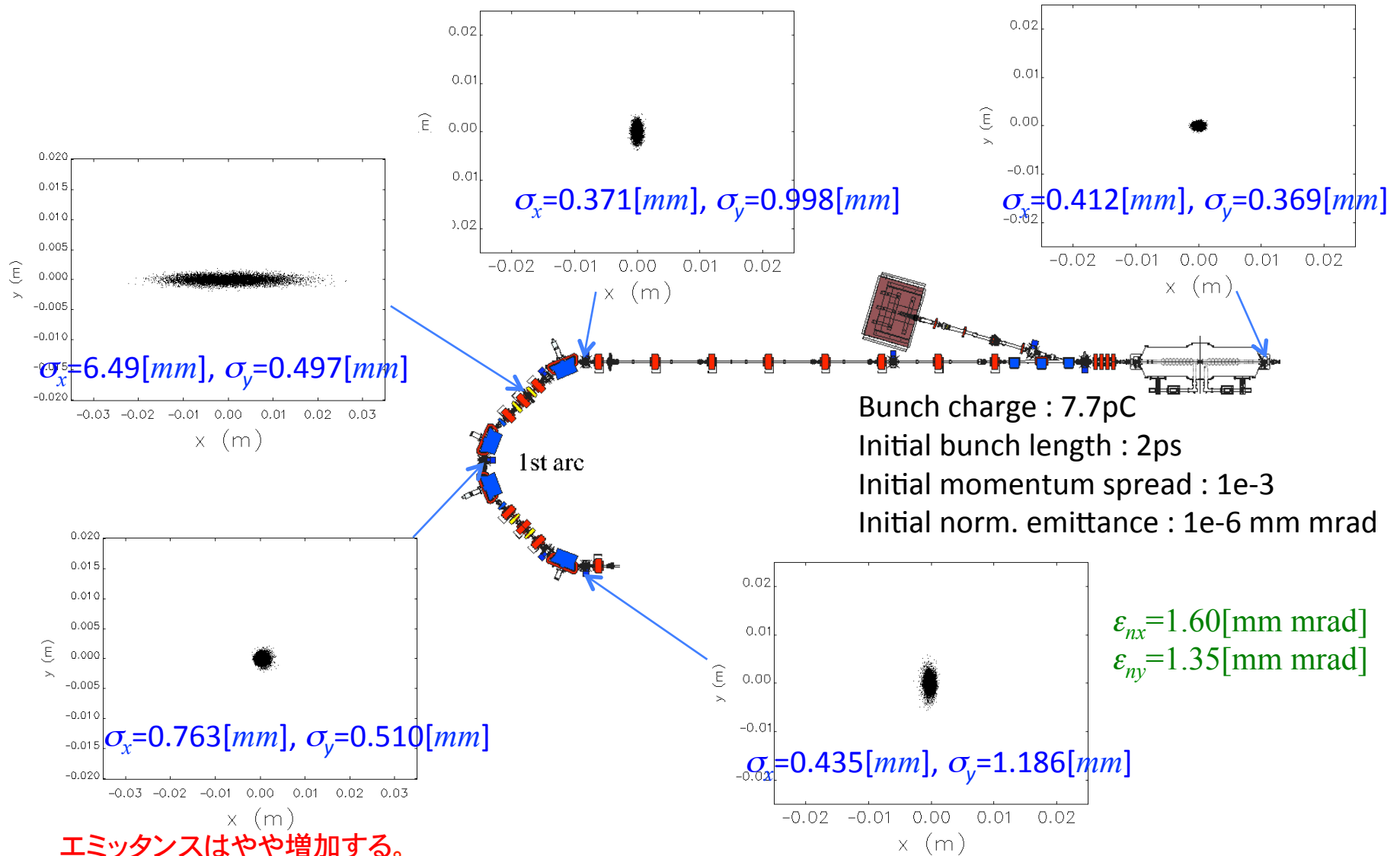


バンチ圧縮 (SX1 ON)



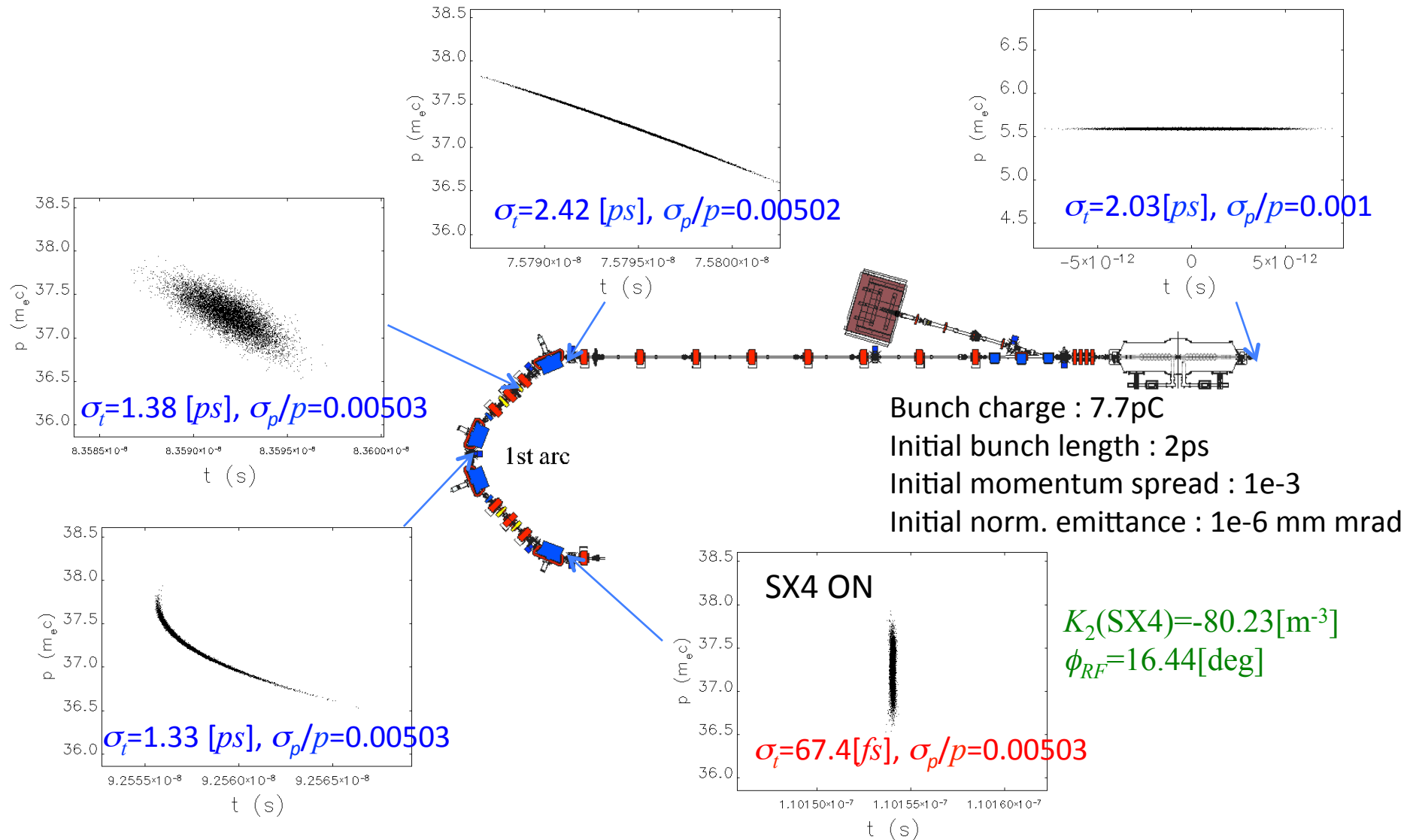
六極電磁石1台でも4台とあまり変わらない短バンチ長を実現できる。

ビームサイズ (SX1 ON)

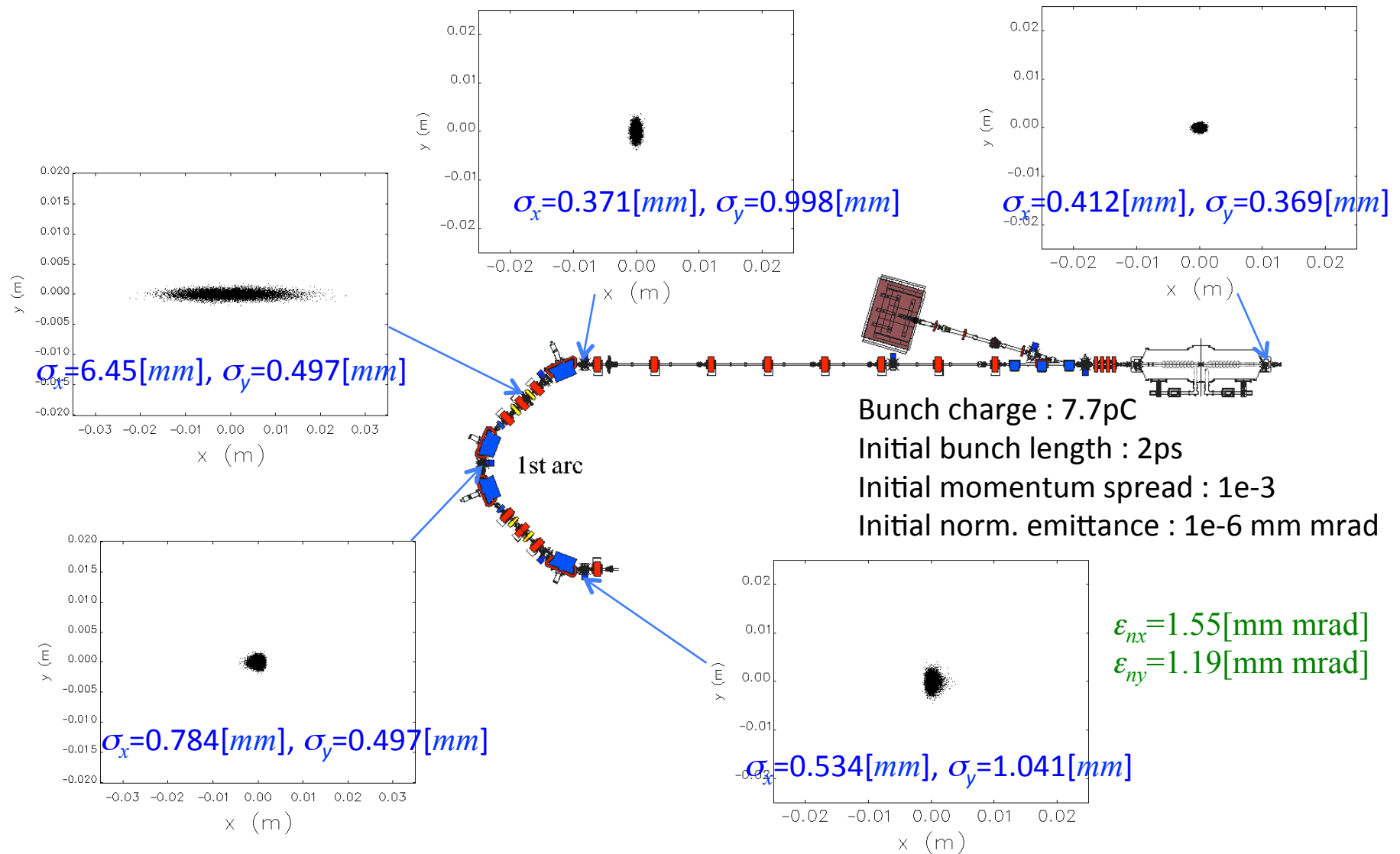


エミッタンスはやや増加する。

バンチ圧縮 (SX4 ON)

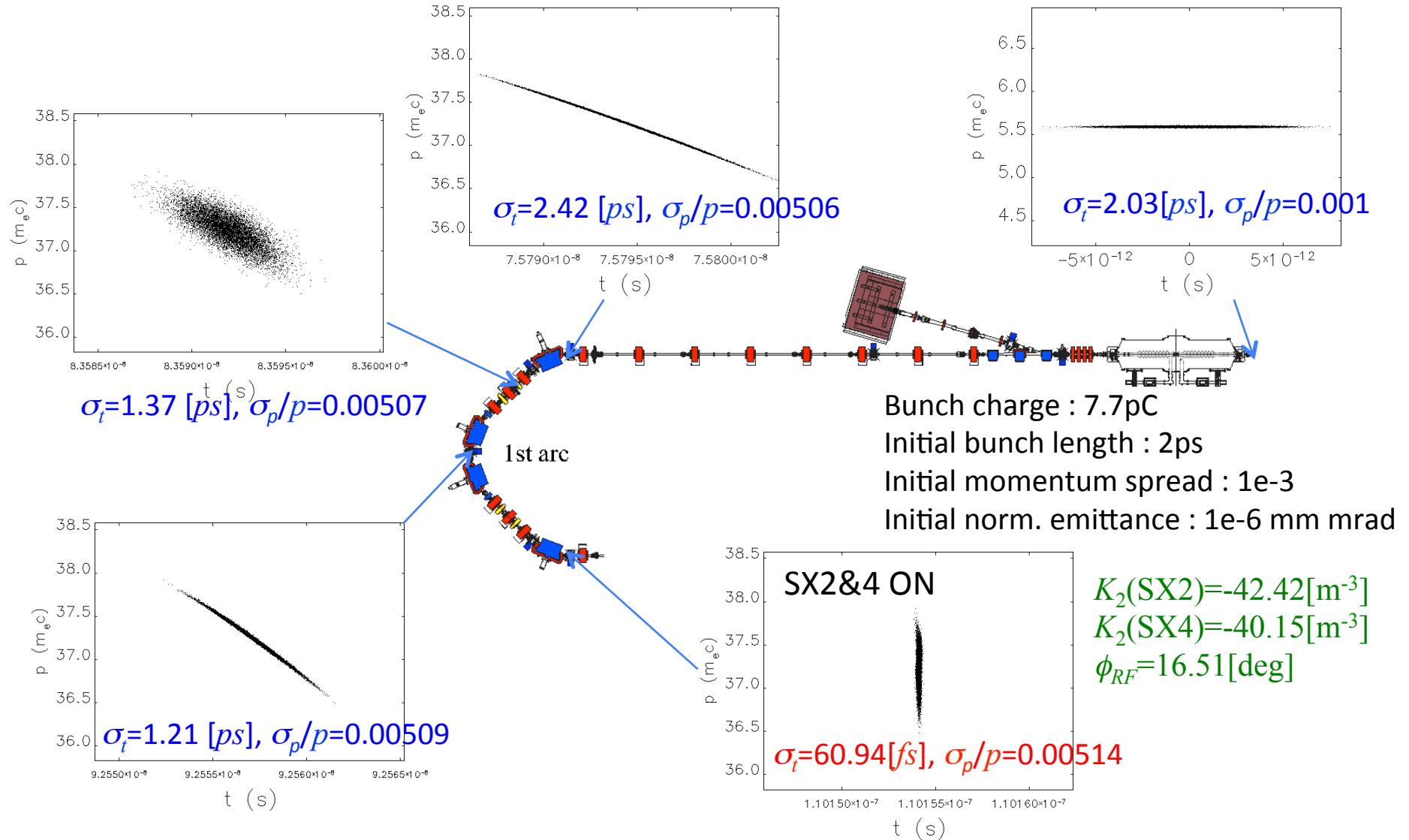


ビームサイズ (SX4 ON)

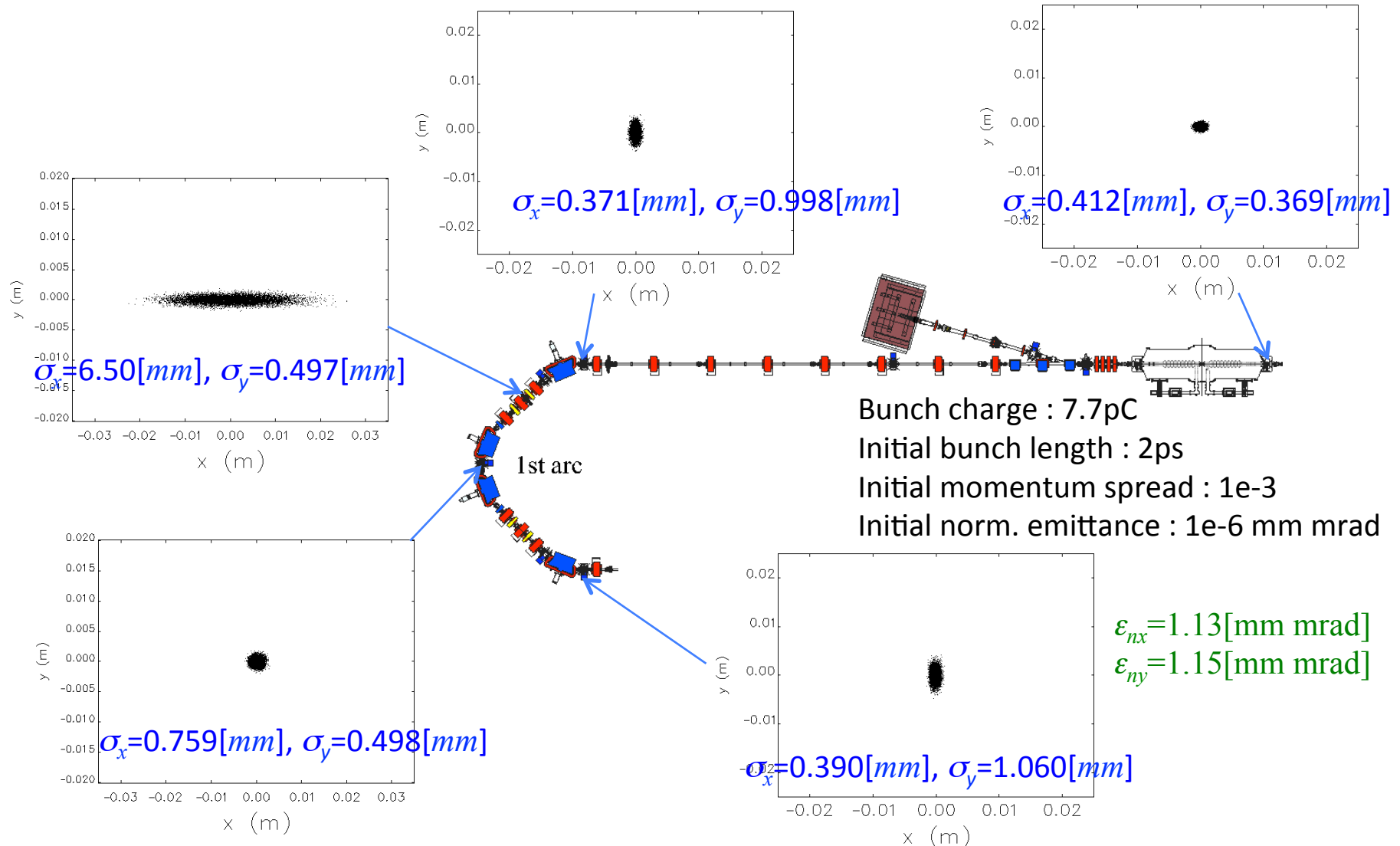


アーク部直後に2次の分散の影響が見られる。

バンチ圧縮 (SX2&4 ON)

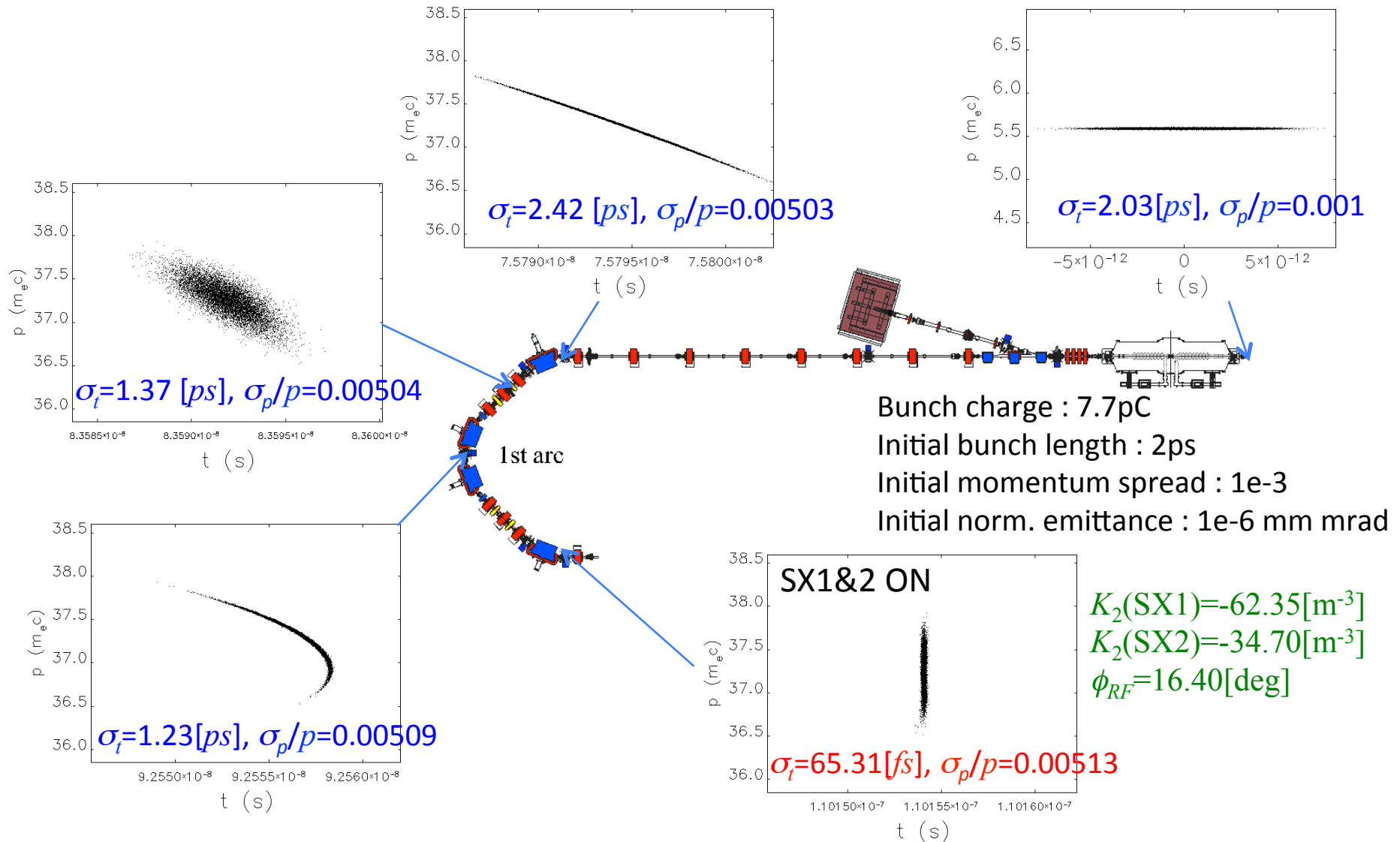


ビームサイズ (SX2&4 ON)

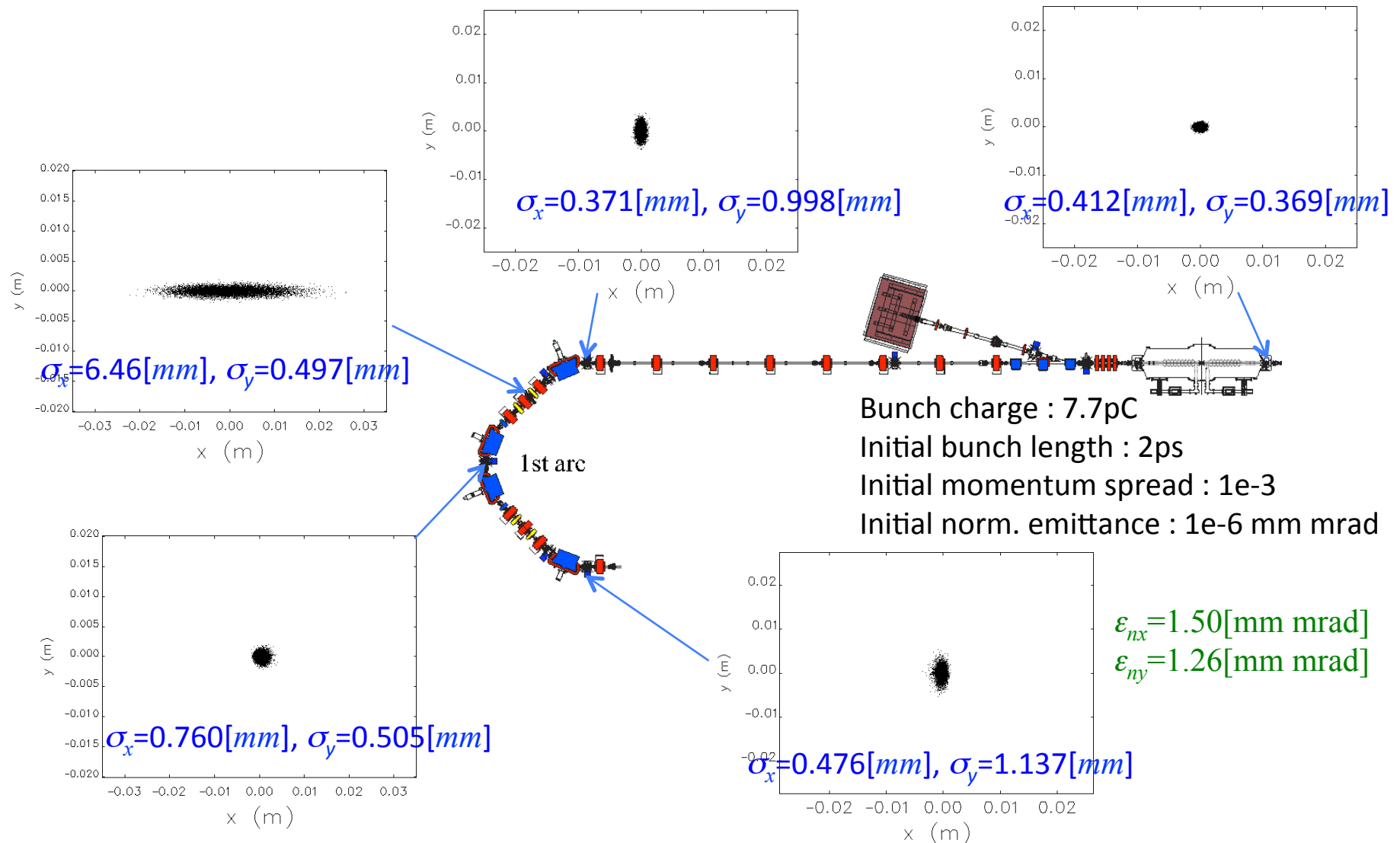


エミッタンスの劣化がSX1台に比べて改善した(2台のSX間のベータatron位相差3.63[rad]が π に近い)。

バンチ圧縮 (SX1&2 ON)



ビームサイズ (SX1&2 ON)



エミッタンスの改善は小さい(2台のSX間のベータatron位相差0.96[rad]が小さいせい)。

シミュレーション結果 (1)

六極電磁石台数依存性

	バンチ長 σ_t [fs]	運動量幅 σ_p/p	規格化エミッタンス $\varepsilon_{nx}, \varepsilon_{ny}$ [mm mrad]	六極磁場* K_2 [m ⁻³]	RF位相 ϕ_{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。

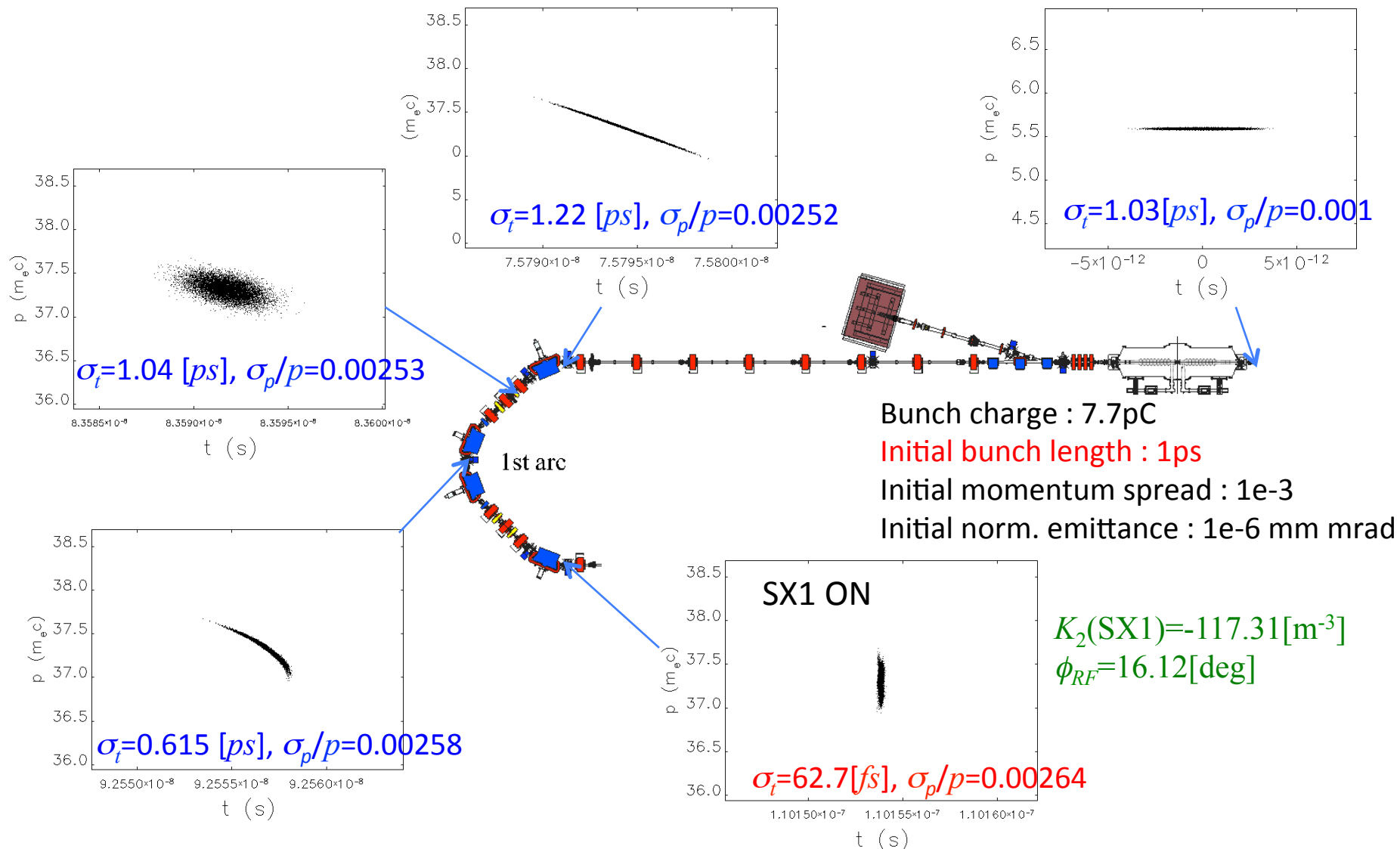
シミュレーション結果 (2)

初期パラメータ依存性

	バンチ長 σ_t [fs]	運動量幅 σ_p/p	規格化エミッタンス $\varepsilon_{nx}, \varepsilon_{ny}$ [mm mrad]	六極磁場 K_2 [m ⁻³]	RF位相 ϕ_{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>$\sigma_{t0} \rightarrow 1$ps</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>$\sigma_{p0}/p_0 \rightarrow 0.002$</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>$\sigma_{t0} \rightarrow 1$ps</u>	62.72	0.00253	1.28, 1.12	-117.3	16.12	-0.300	-7.03	2.07
<u>$\sigma_{p0}/p_0 \rightarrow 0.002$</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>$\sigma_{t0} \rightarrow 1$ps</u>	61.54	0.00261	1.20, 1.05	-63.2, -28.0	16.07	-0.253	-5.10	0.14
<u>$\sigma_{p0}/p_0 \rightarrow 0.002$</u>	117.53	0.00517	1.13, 1.15	-47.2, -35.5	16.43	0.437	-2.15	0.04

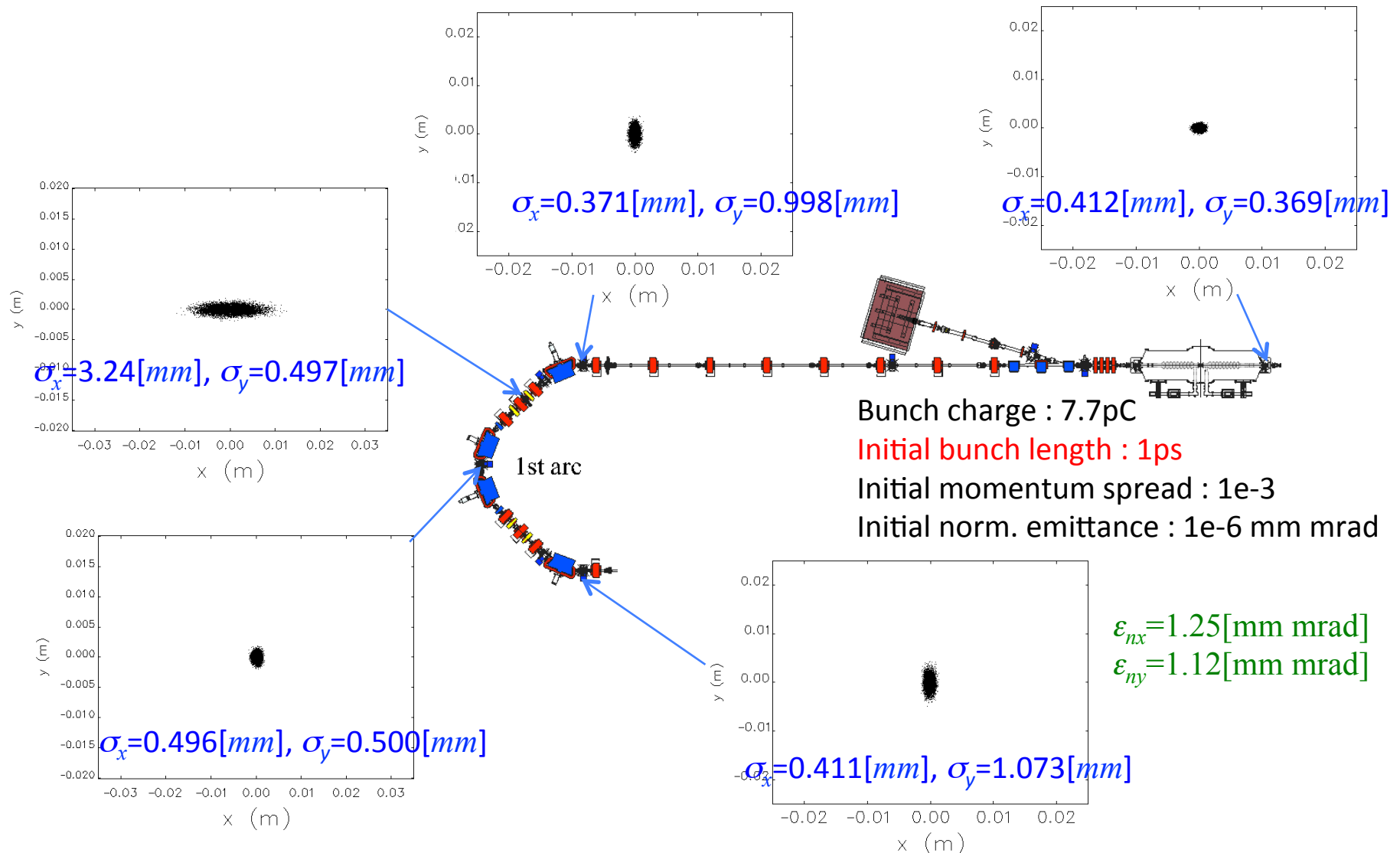
バンチ電荷7.7pC、バンチ長2psではCSR wakeの影響は大きくない(0.77pCと大きな差はなかった)。

バンチ圧縮 ($\sigma_{t0} \rightarrow 1\text{ps}$, SX1 ON)



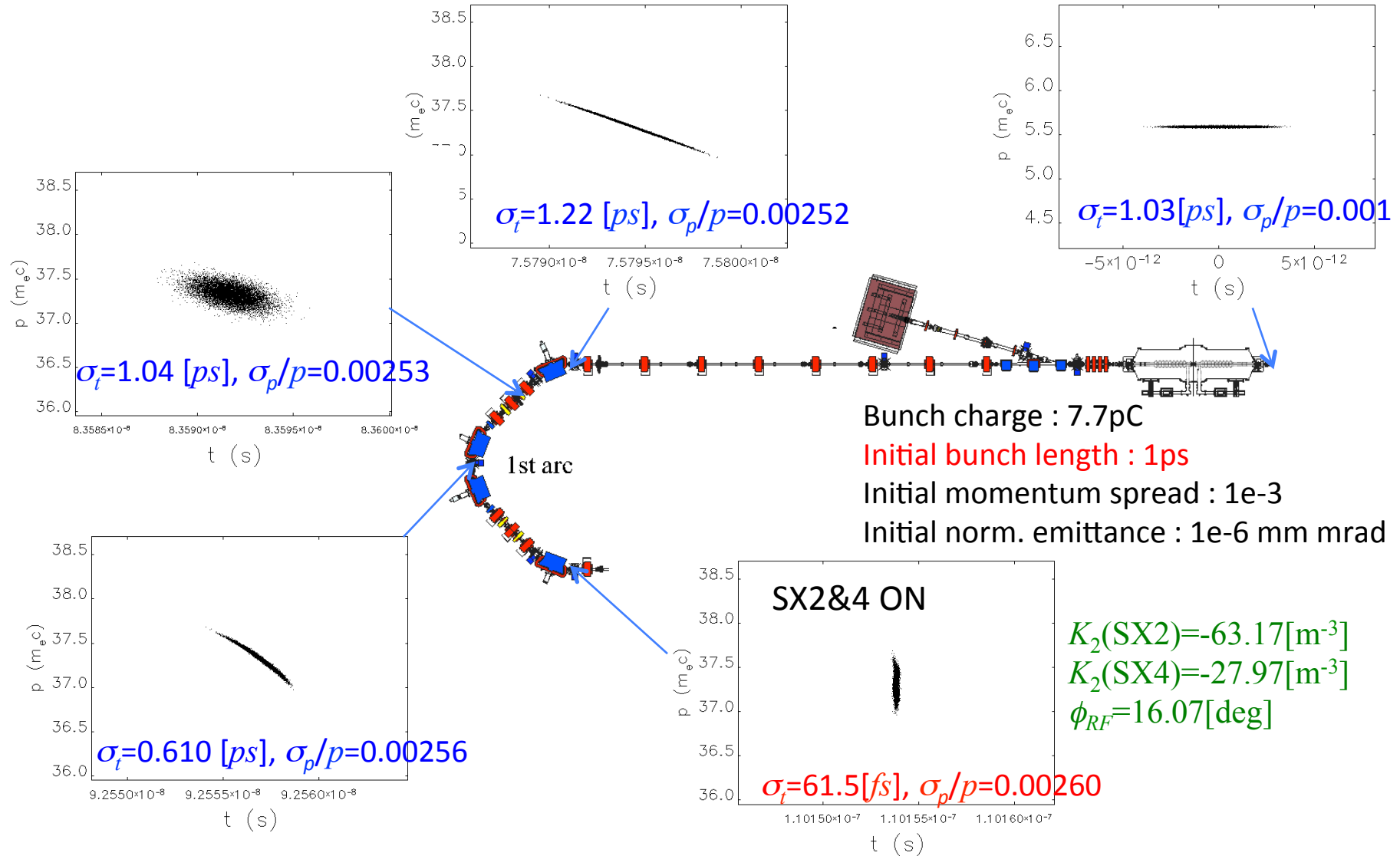
初期バンチ長2psの場合と同程度のバンチ長を得ることはできる。運動量幅はほぼ比例して減少する。

ビームサイズ ($\sigma_{t0} \rightarrow 1\text{ps}$, SX1 ON)

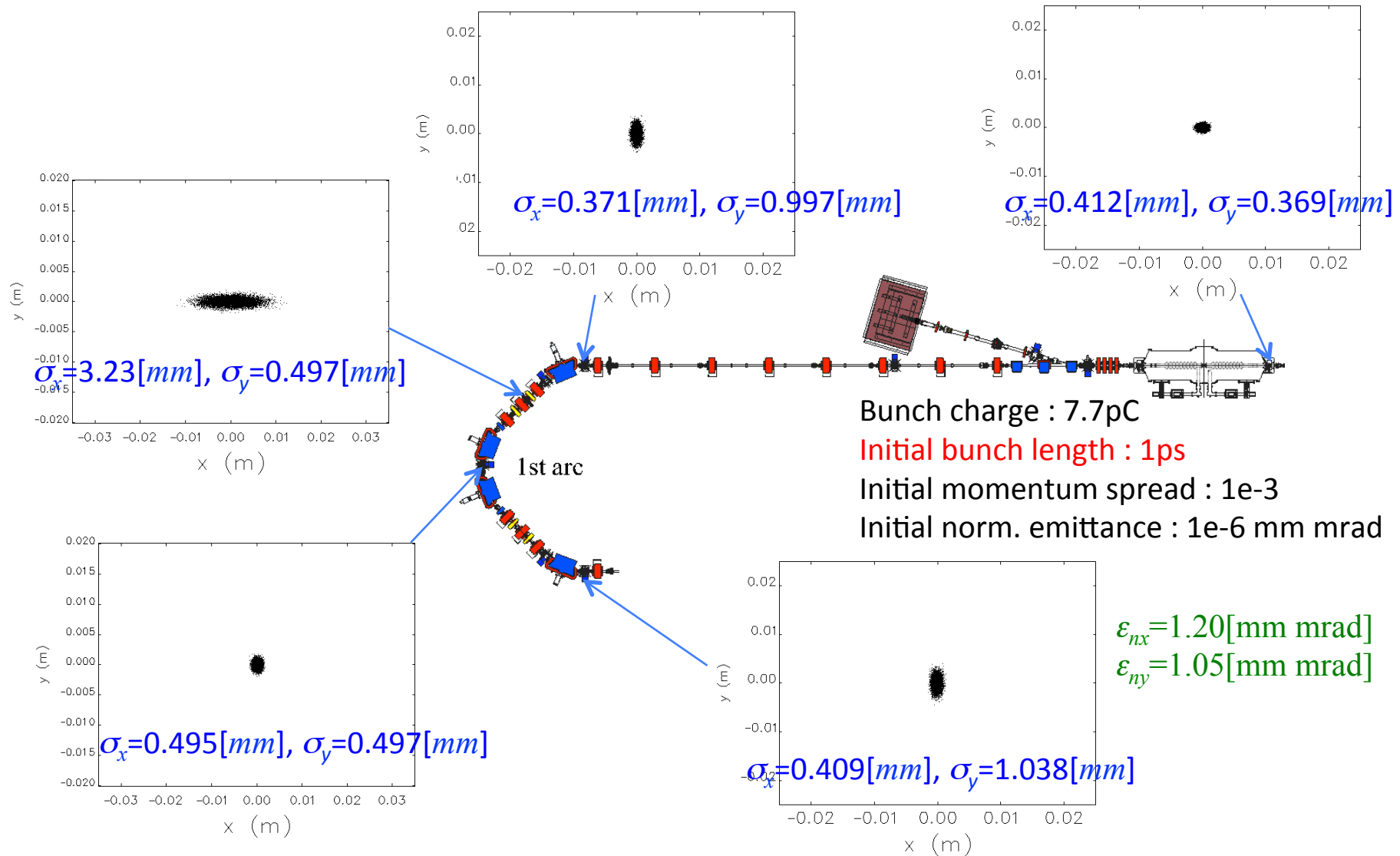


運動量幅が小さくなるので、2psに比べて分散部でのビームサイズが小さくなってビームロスが起こりにくい。

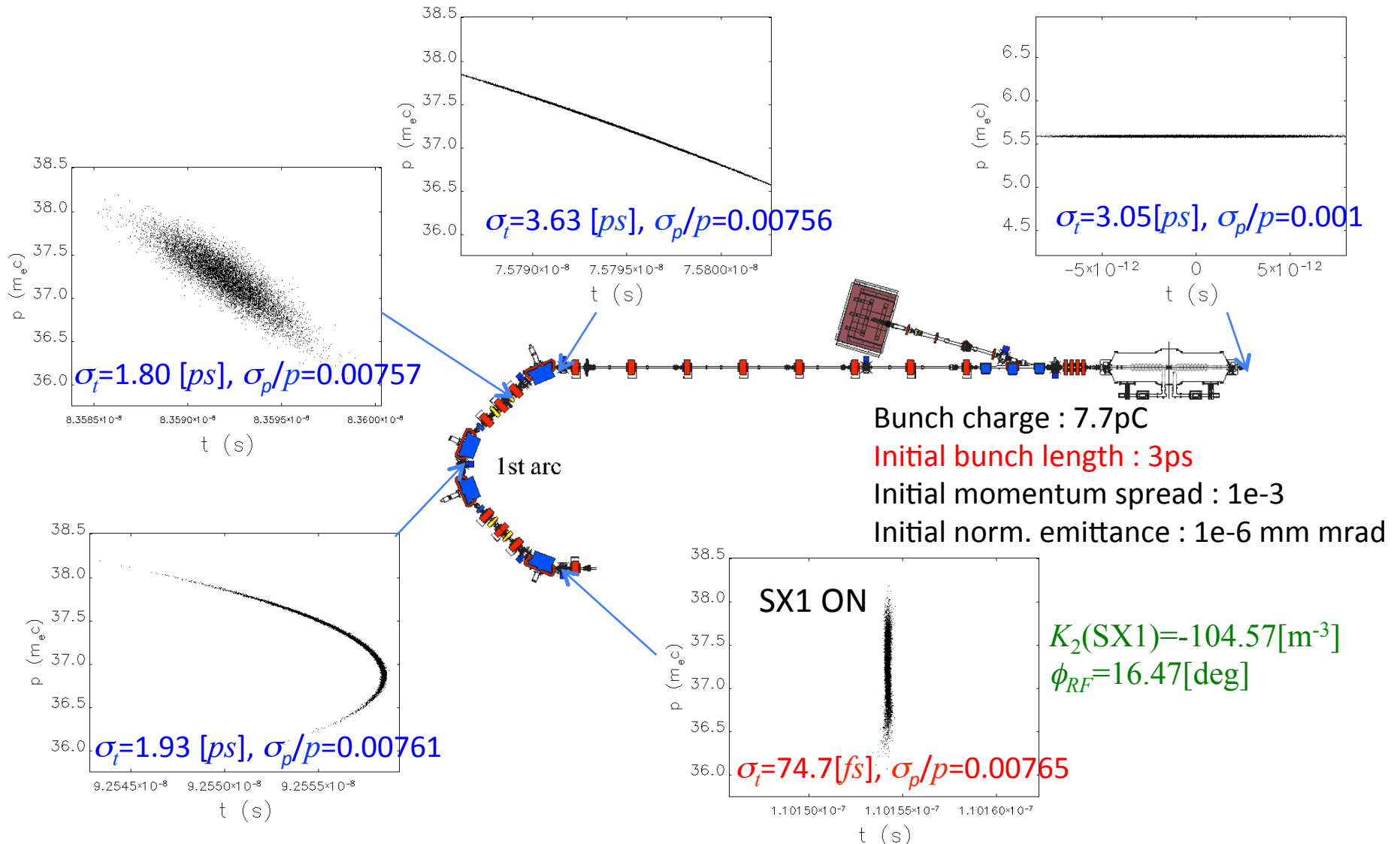
バンチ圧縮 ($\sigma_{t0} \rightarrow 1\text{ps}$, SX2&4 ON)



ビームサイズ ($\sigma_{t0} \rightarrow 1\text{ps}$, SX2&4 ON)

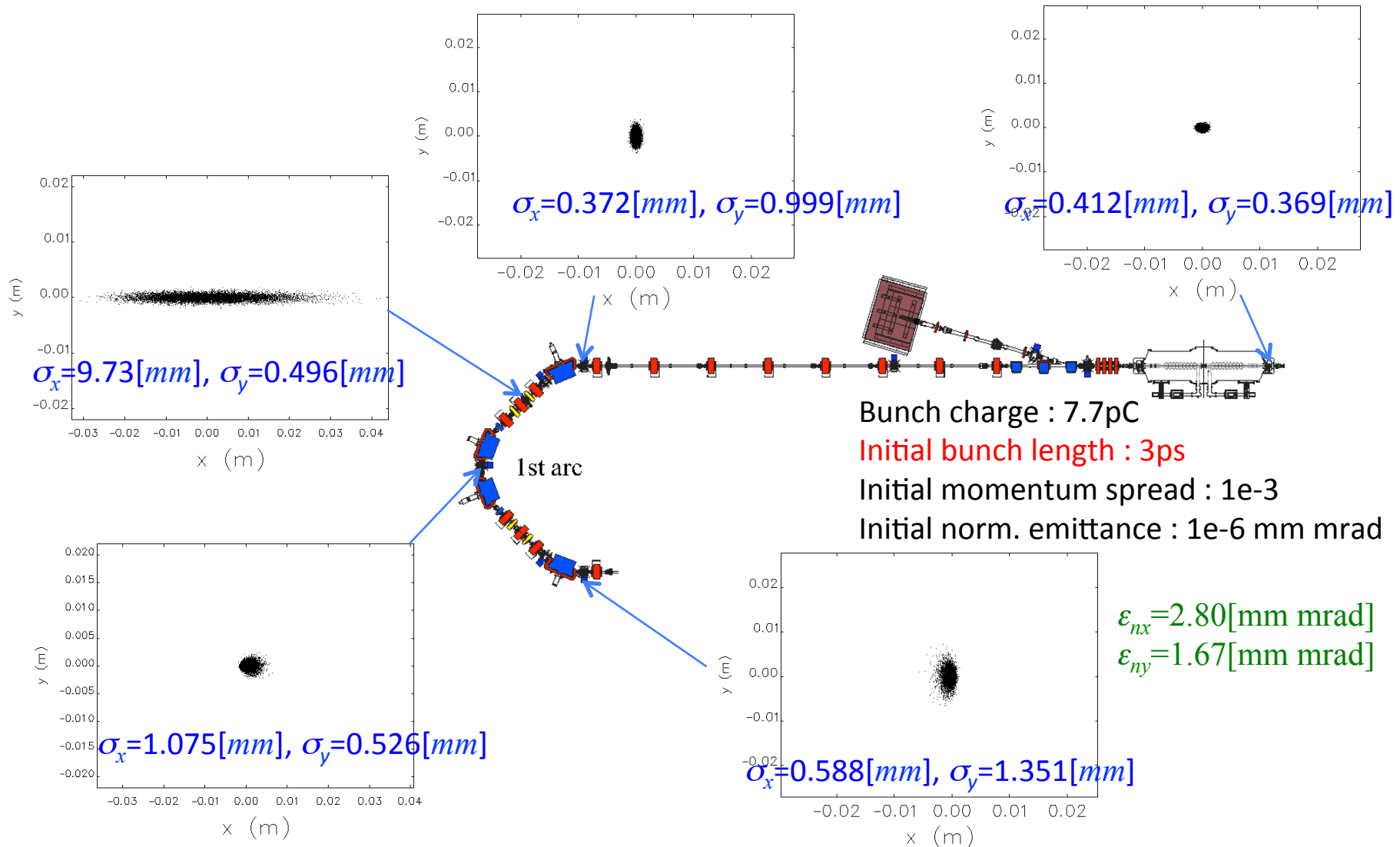


バンチ圧縮 ($\sigma_{t0} \rightarrow 3\text{ps}$, SX1 ON)



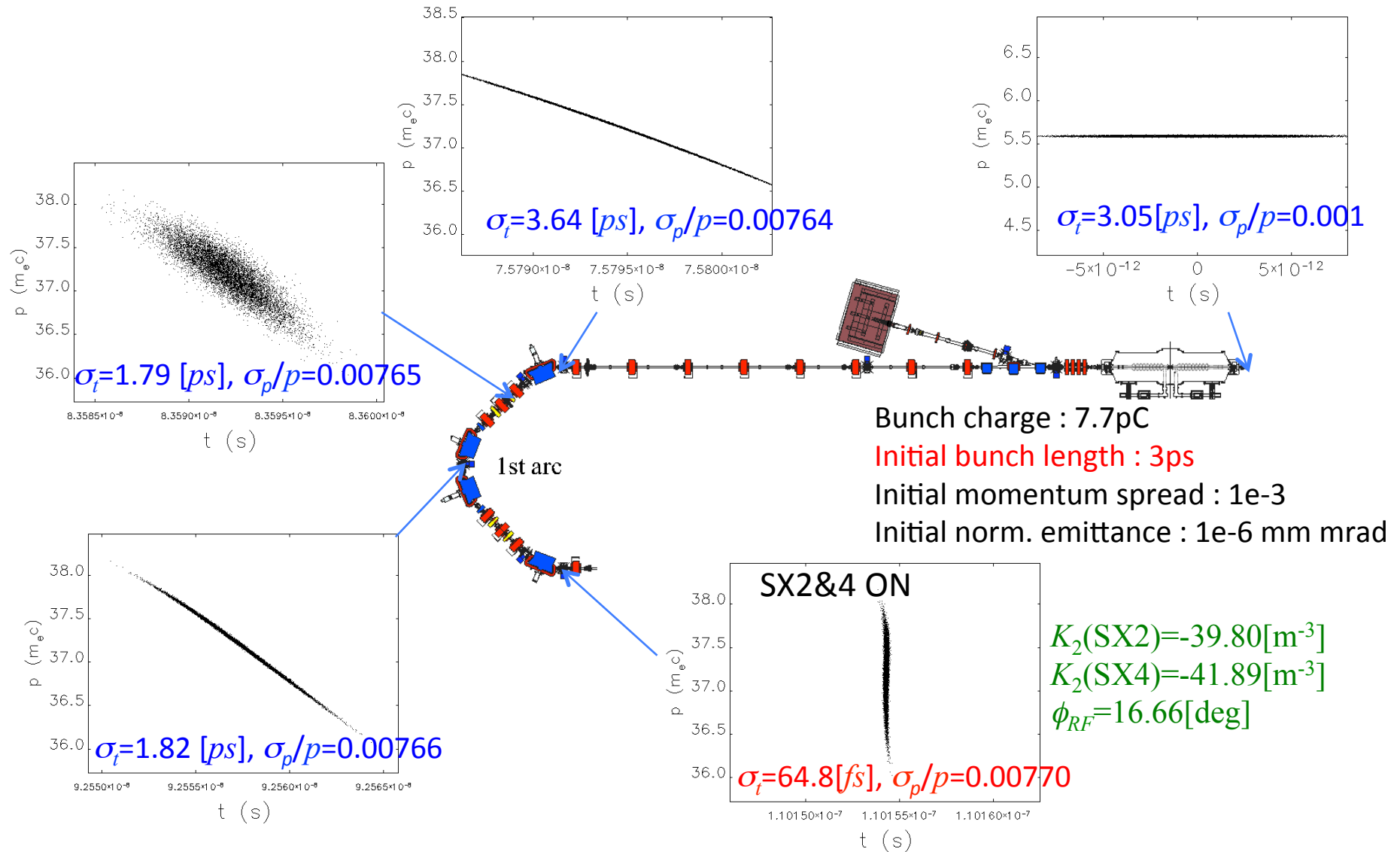
バンチ長は大きくは変わらないが、運動量幅が初期バンチ長にほぼ比例して大きくなる。

ビームサイズ ($\sigma_{t0} \rightarrow 3\text{ps}$, SX1 ON)

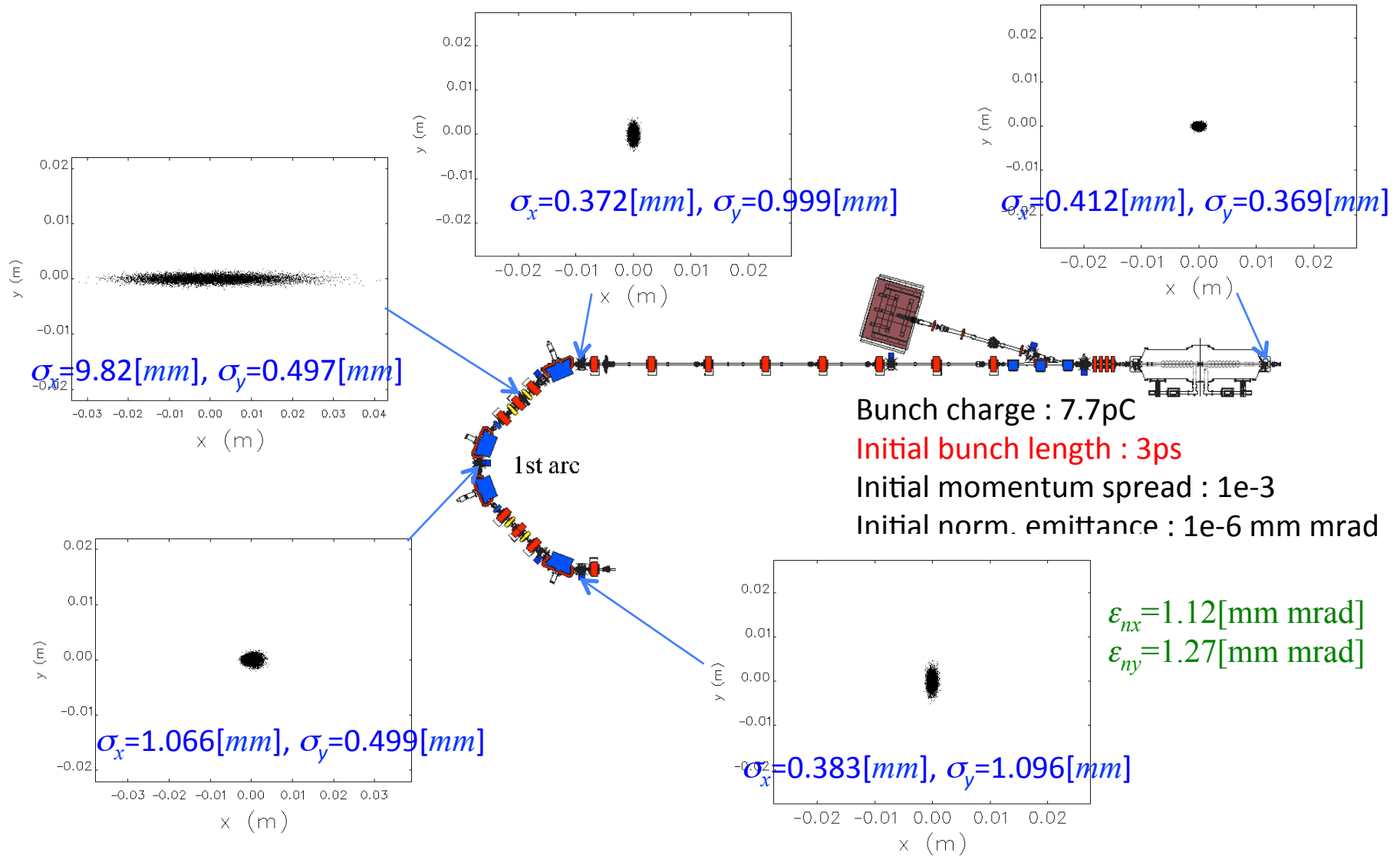


運動量幅が大きくなるので、2psに比べて分散部でのビームロスやエミッタンス増大が大きくなる。

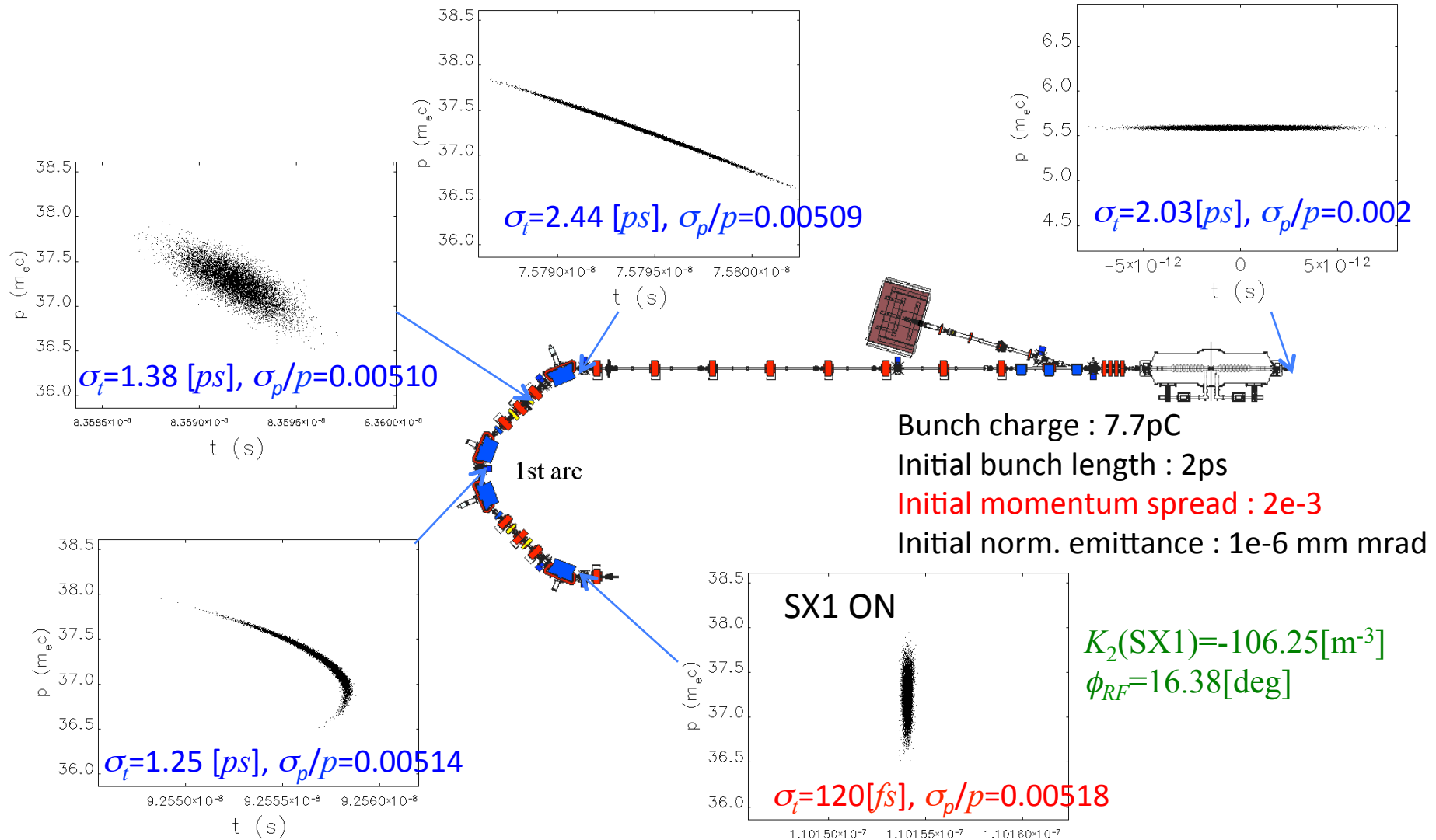
バンチ圧縮 ($\sigma_{t0} \rightarrow 3ps$, SX2&4 ON)



ビームサイズ ($\sigma_{t0} \rightarrow 3\text{ps}$, SX2&4 ON)



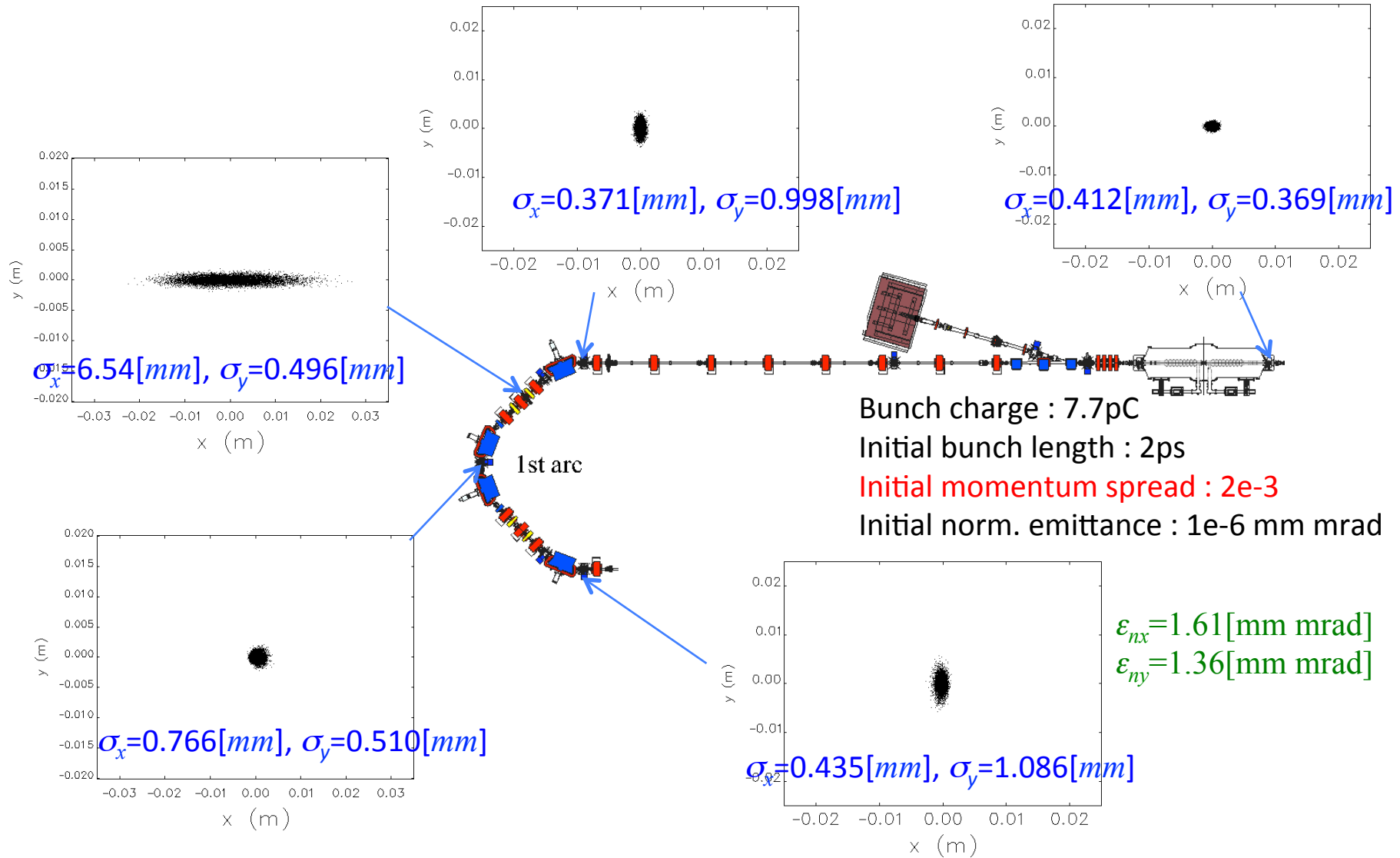
バンチ圧縮 ($\sigma_{p0}/p_0 \rightarrow 0.002$, SX1 ON)



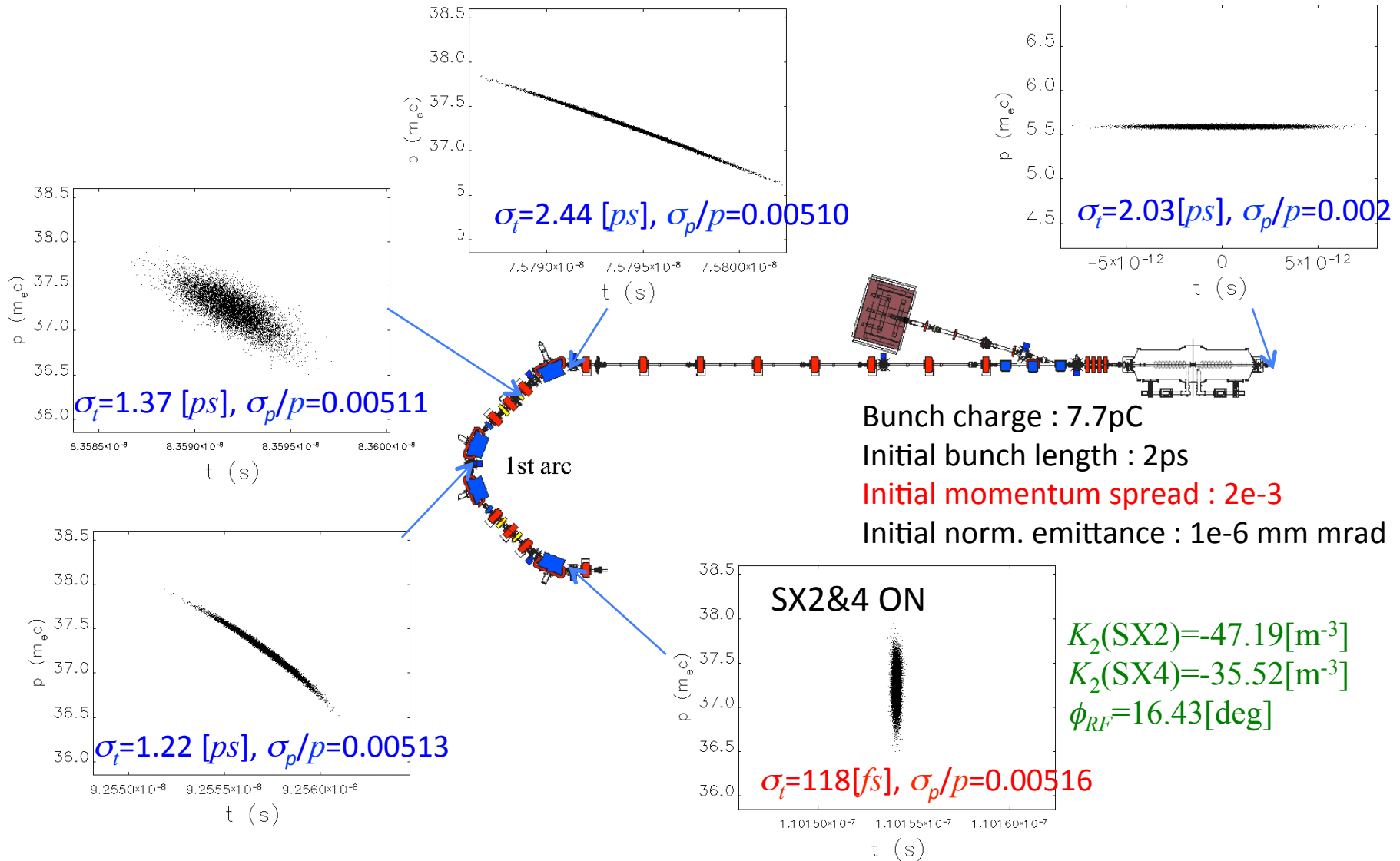
Bunch charge : 7.7pC
 Initial bunch length : 2ps
 Initial momentum spread : 2e-3
 Initial norm. emittance : 1e-6 mm mrad

初期運動量幅の増加によってバンチ圧縮後のバンチ長がほぼ比例して長くなる。

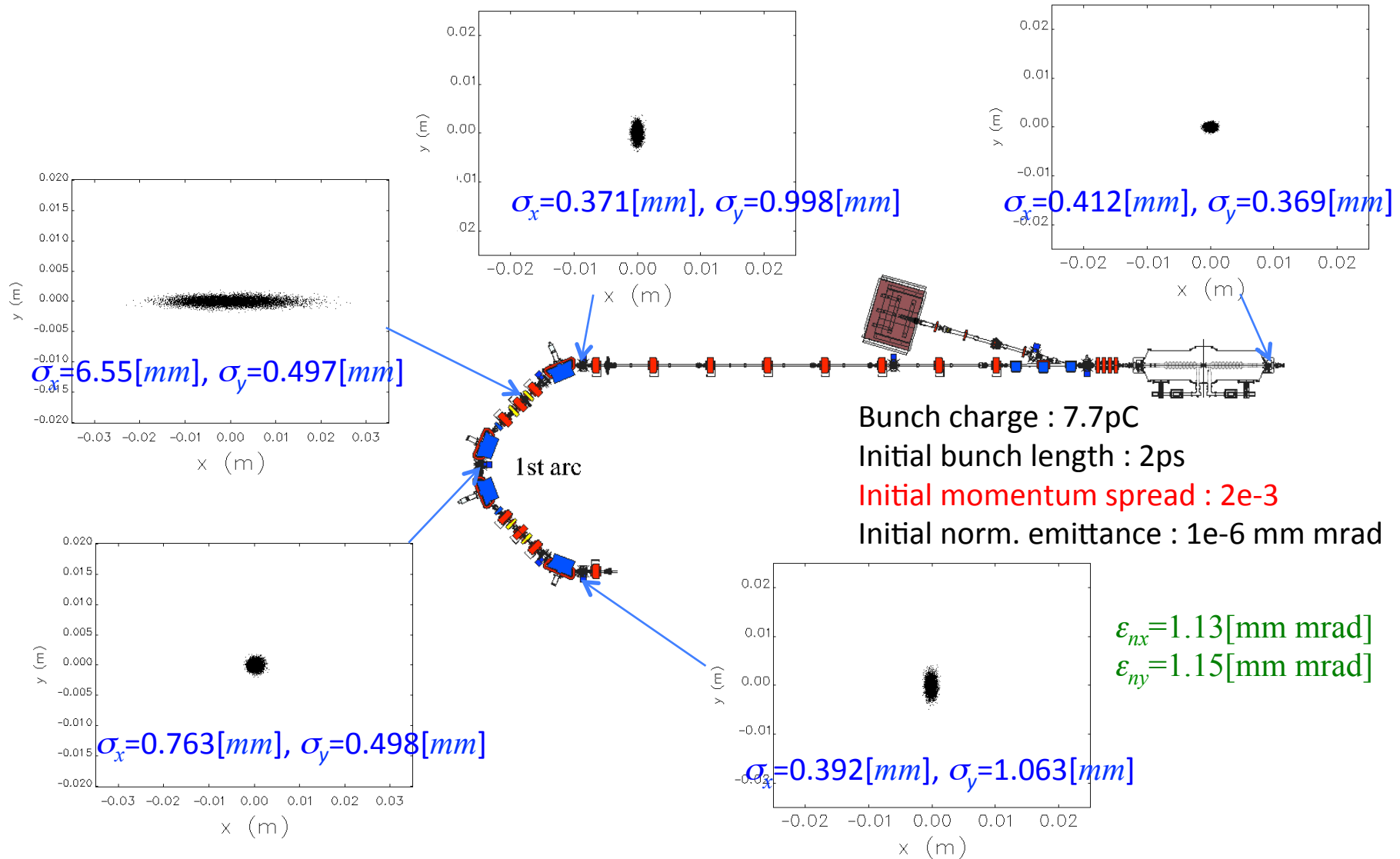
ビームサイズ ($\sigma_{p0}/p_0 \rightarrow 0.002$, SX1 ON)



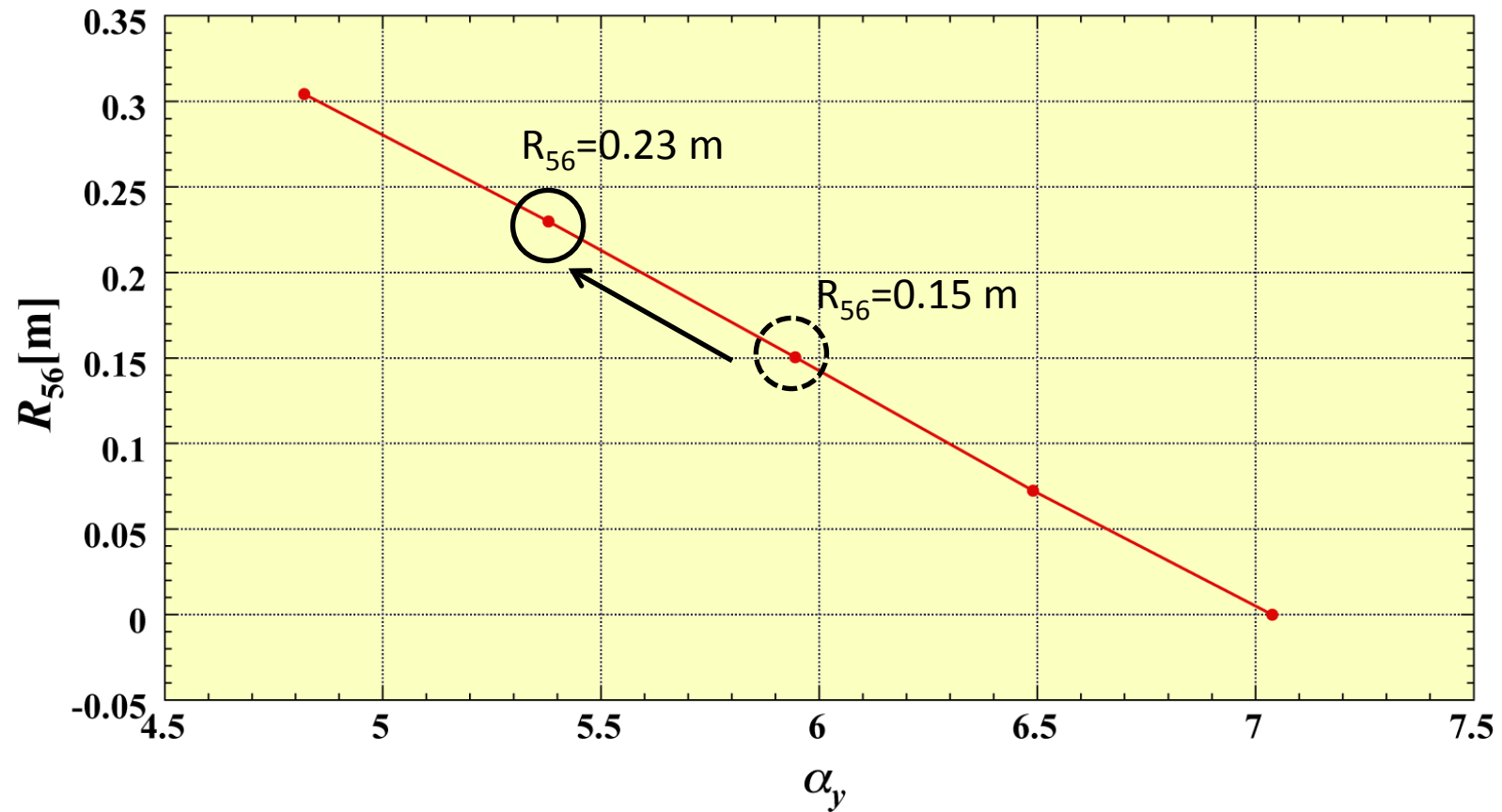
バンチ圧縮 ($\sigma_{p0}/p_0 \rightarrow 0.002$, SX2&4 ON)



ビームサイズ ($\sigma_{p0}/p_0 \rightarrow 0.002$, SX2&4 ON)



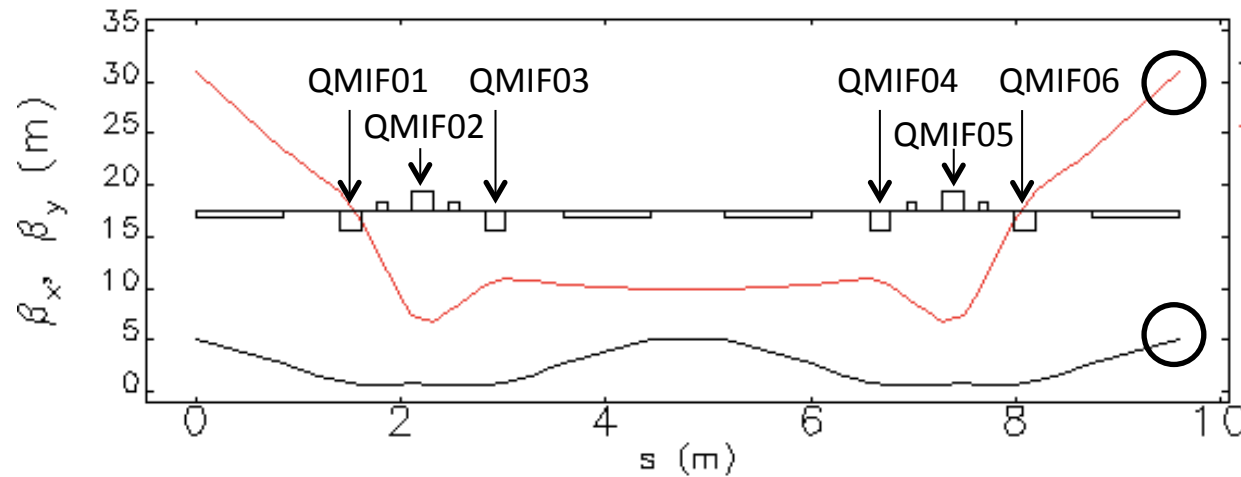
R_{56} 依存性



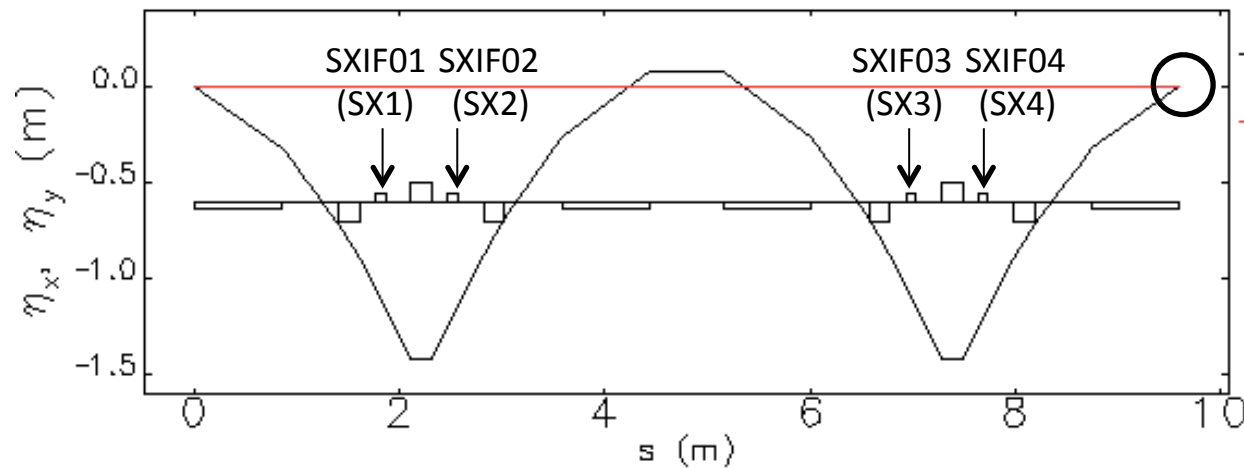
第1アーク部入口の α_y を変えて $R_{56}=0.23$ となるオプティクスを試す。

第1アーチ部オプティクス ($R_{56}=0.23$)

$\alpha_x = \alpha_y = 0, \eta_x' = 0$ at center, $R_{56} = 0.23 \rightarrow \beta_x = 5.10$ m, $\beta_y = 9.97$ m at center



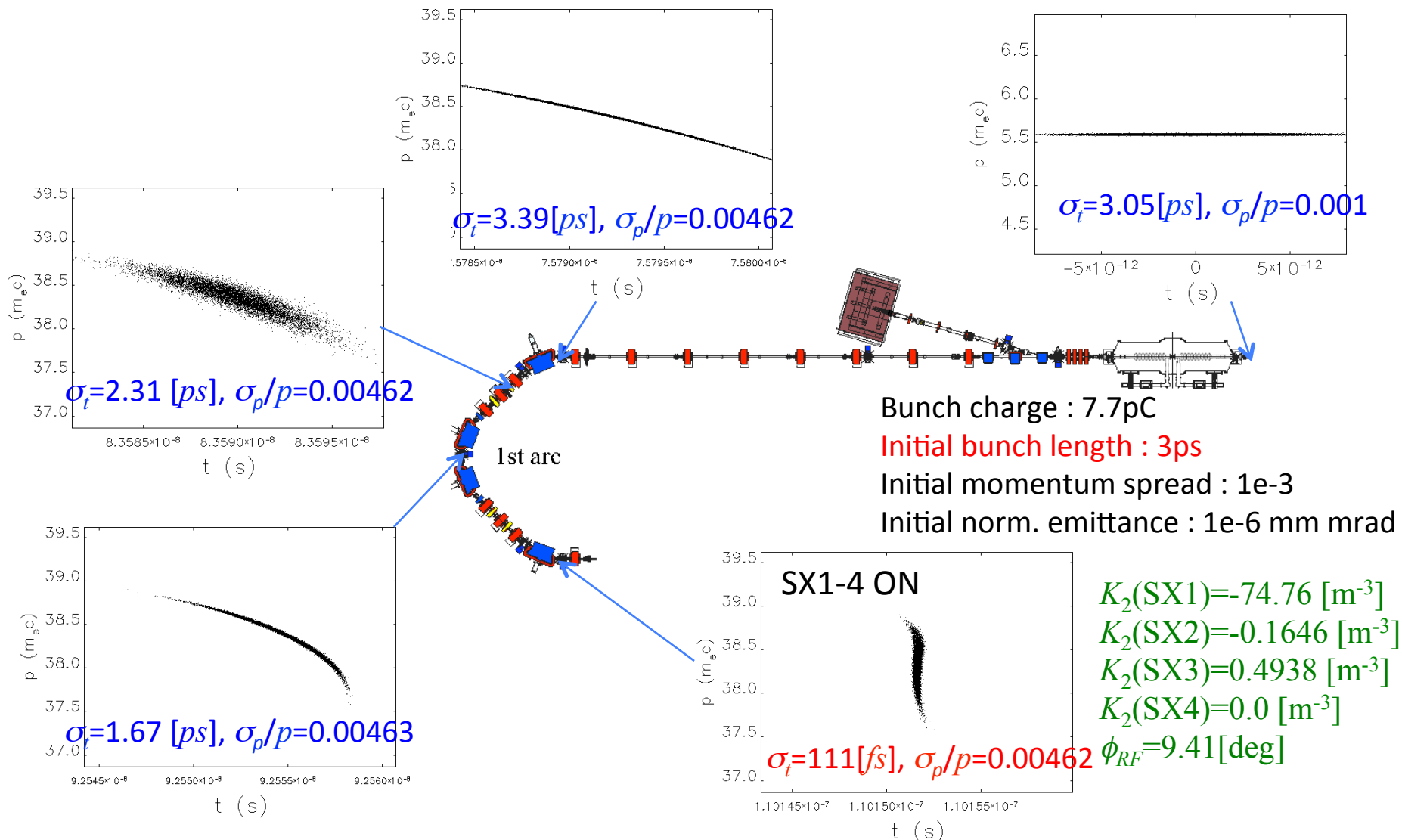
β_x
 β_y
 $\beta_x = 5.041$ m
 $\alpha_x = -0.2038$
 $\beta_y = 31.04$ m
 $\alpha_y = 5.380$



η_x
 η_y
 $\eta_x = 0.0$ m
 $\eta_x' = 0.0$

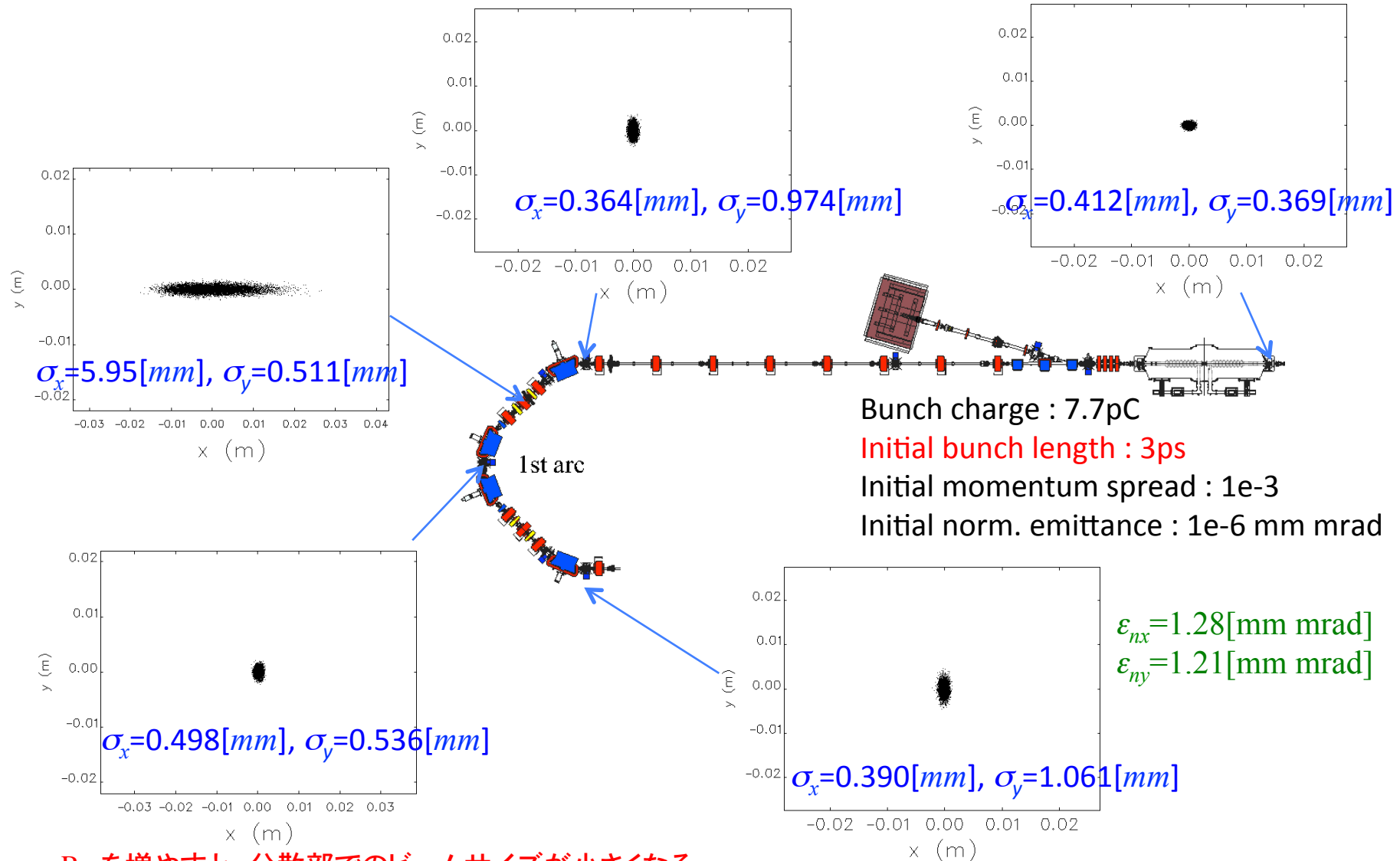
QMIF01(6): $K_1 = -2.220$ m⁻³
 QMIF02(5): $K_1 = 7.386$ m⁻³
 QMIF03(4): $K_1 = -2.151$ m⁻³

バンチ圧縮 ($R_{56}=0.23$, All SX ON)



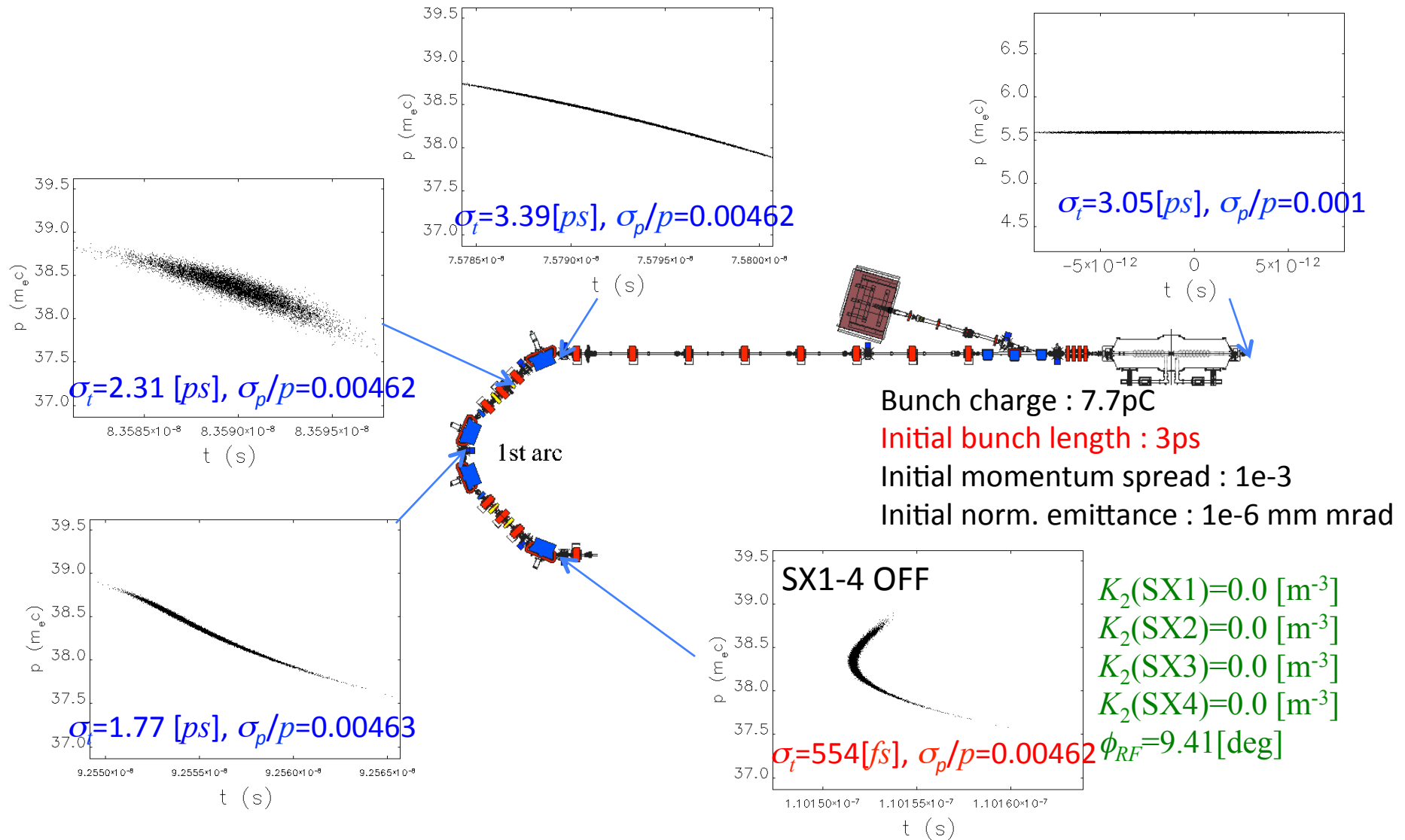
R_{56} を増やすと運動量幅が小さくなるが、バンチ圧縮後のバンチ長が長くなる。

ビームサイズ ($R_{56}=0.23$, All SX ON)

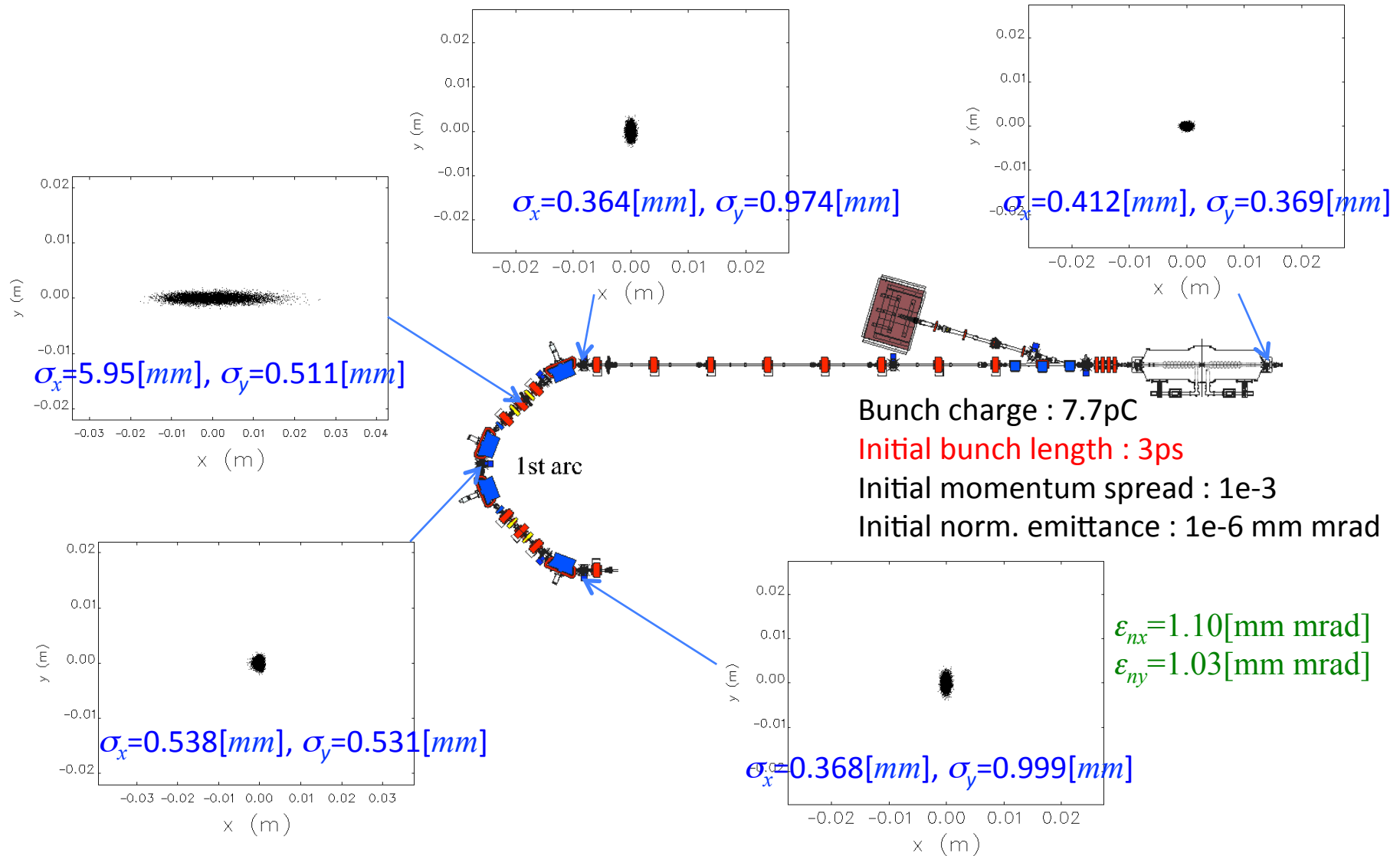


R_{56} を増やすと、分散部でのビームサイズが小さくなる。

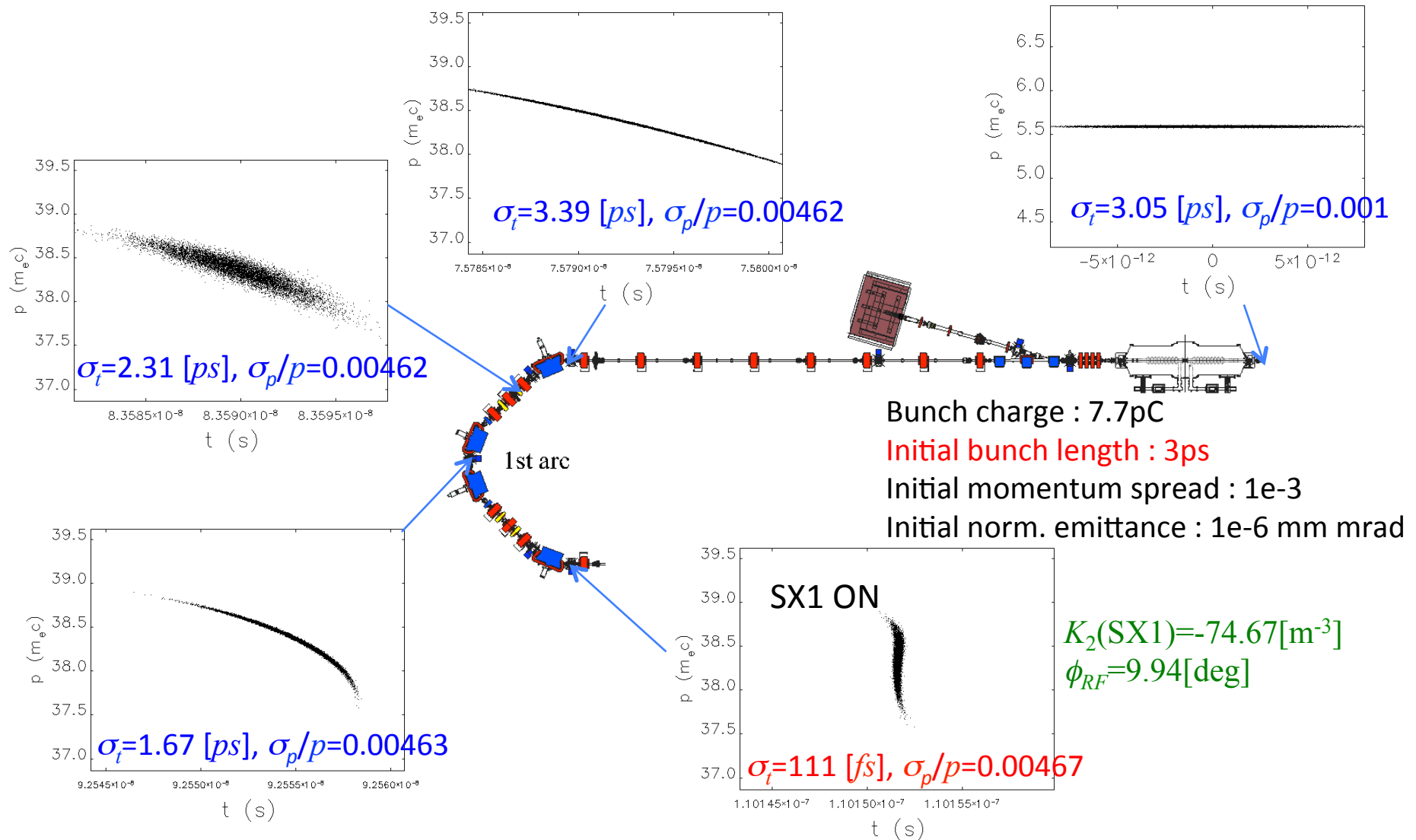
バンチ圧縮 ($R_{56}=0.23$, All SX OFF)



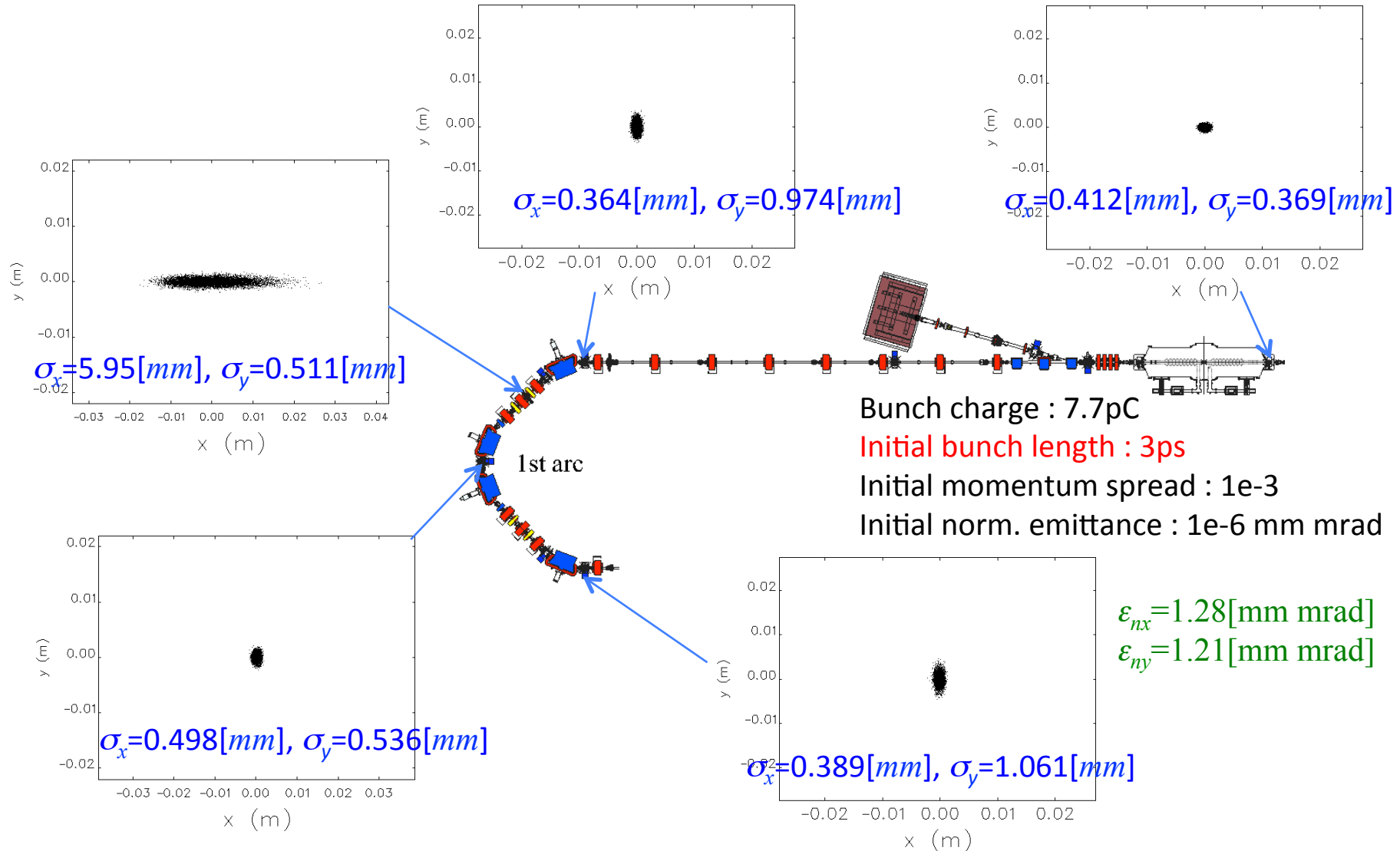
ビームサイズ ($R_{56}=0.23$, All SX OFF)



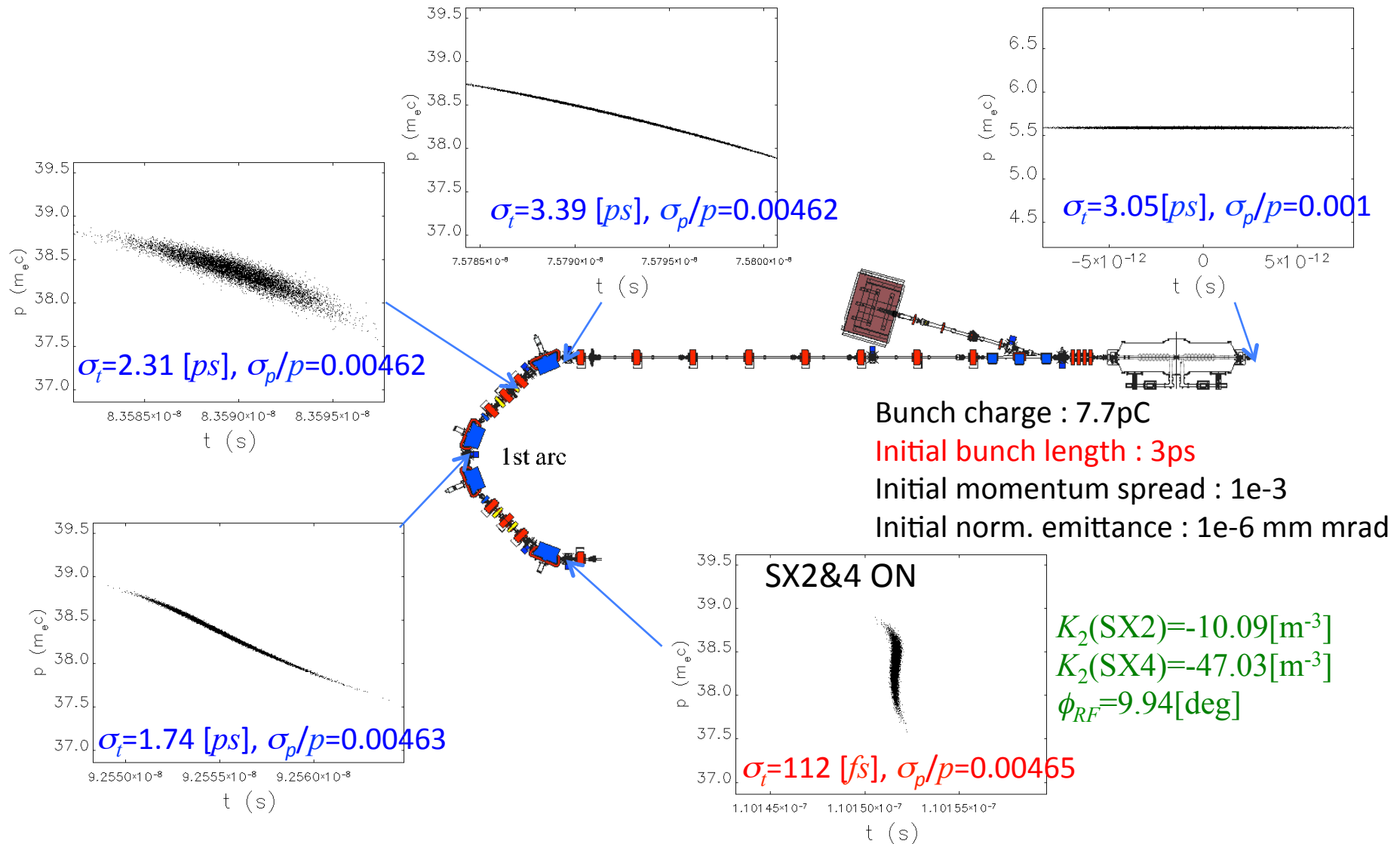
バンチ圧縮 ($R_{56}=0.23$, SX1 ON)



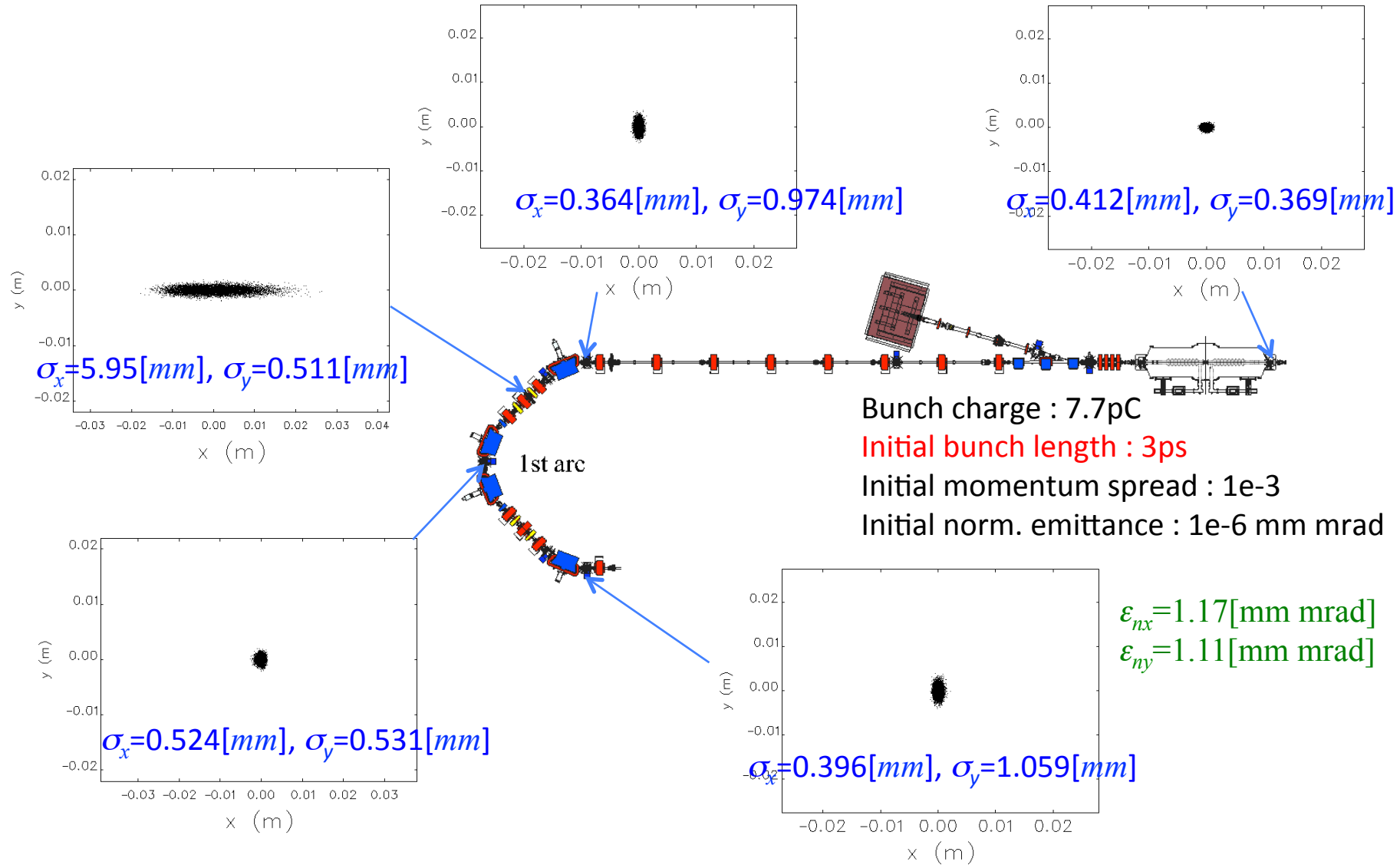
ビームサイズ ($R_{56}=0.23$, SX1 ON)



バンチ圧縮 ($R_{56}=0.23$, SX2&4 ON)



ビームサイズ ($R_{56}=0.23$, SX2&4 ON)



シミュレーション結果 (3)

初期パラメータ値: $Q=7.7\text{pC}$, $\sigma_{t0}=3\text{ps}$, $\sigma_{p0}/p_0=0.001$

R_{56} 依存性

	バンチ長 σ_t [fs]	運動量幅 σ_p/p	規格化エミッタンス $\varepsilon_{nx}, \varepsilon_{ny}$ [mm mrad]	六極磁場 K_2 [m ⁻³]	RF位相 ϕ_{RF} [deg]	T566 (arc)	T166 (arc)	T266 (arc)
All SX OFF $R_{56}=0.15$	2000	0.00758	1.28, 1.05	0, 0, 0, 0	16.55	7.584	-1.16	-0.16
All SX OFF $R_{56}=0.23$	554	0.00462	1.10, 1.03	0, 0, 0, 0	9.41	7.371	-0.59	-0.40
All SX ON $R_{56}=0.15$	61.57	0.00766	1.13, 1.31	-18.7, -28.2 -25.2, -20.2	16.55	0.546	-0.63	-0.15
All SX ON <u>$R_{56}=0.23$</u>	110.85	0.00467	1.28, 1.21	-74.8, -1.6 4.9, 0.0	9.41	2.332	-4.90	1.23
SX1 ON $R_{56}=0.15$	74.70	0.00765	2.80, 1.67	-104.5	16.47	0.563	-6.34	1.79
SX1 ON <u>$R_{56}=0.23$</u>	110.87	0.00467	1.28, 1.21	-74.7	9.41	2.320	-4.83	1.22
SX2&4 ON $R_{56}=0.15$	64.76	0.00770	1.13, 1.15	-39.8, -41.9	16.66	0.503	-0.42	0.01
SX2&4 ON <u>$R_{56}=0.23$</u>	112.38	0.00465	1.17, 1.11	-10.1, -47.0	9.41	0.465	-0.81	0.02

R_{56} を増やすと運動量幅が小さくなるが、バンチ圧縮後のバンチ長が長くなる。

まとめ

- $R_{56}=0.15\text{m}$ の第1アーク部のバンチ圧縮オプティクスを設計して、バンチ圧縮シミュレーションを試みた。
- シミュレーションの結果、10cmの六極電磁石に対して $K_2=200\text{m}^{-3}$ あれば、1台でも100fs程度のバンチ圧縮は可能であることがわかった。ただし、エミッタンスの劣化や T_{166} , T_{266} などの影響を抑えるためには2台配置した方が良い。
- 初期の運動量幅とバンチ長は、各々バンチ圧縮後のバンチ長と運動量幅に大きく影響する。バンチ電荷7.7pC@2psではCSR wakeの影響は小さい。
- $R_{56}=0.23\text{m}$ とすると、初期バンチ長3psでも運動量幅とビームサイズを低減できるが、バンチ長が長くなる。
- 第2アーク部におけるバンチ復元(伸長)での六極電磁石の要件についても同様に調べる。