

cERLにおける バンチ圧縮・復元シミュレーション

ビームダイナミクス打ち合せ
2014年10月16日(水)

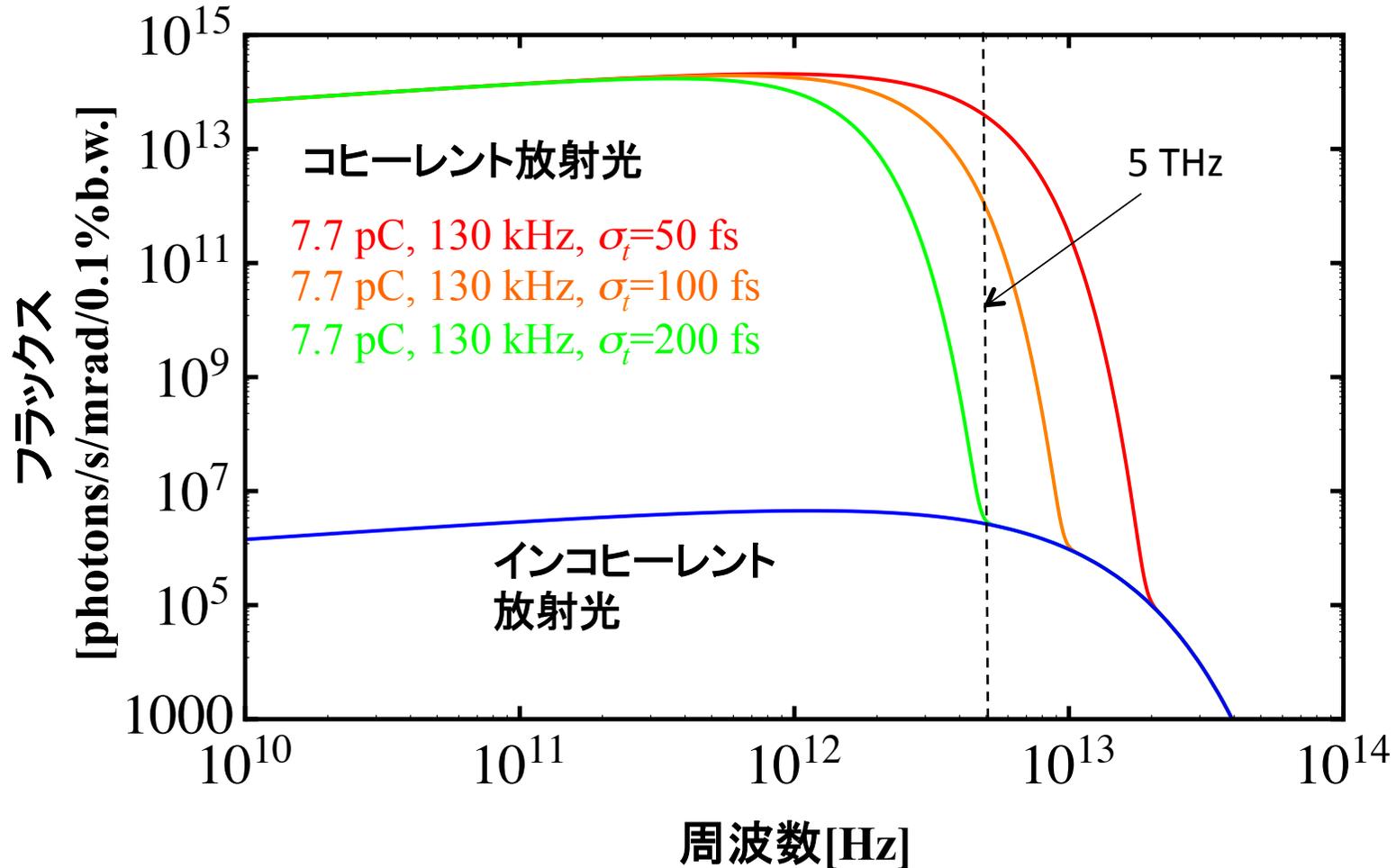
加速器研究施設・第7研究系
中村 典雄

目的

- 前回、コヒーレントテラヘルツ光 (THz-CSR) 発生のために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第1アーク部の六極電磁石の要件(台数と仕様)を調べた。
- 圧縮後のバンチ復元(エネルギー圧縮)のシミュレーションを同様に行って、第2アーク部での六極電磁石の要件(台数と仕様)を調べる。

コヒーレント放射光スペクトル

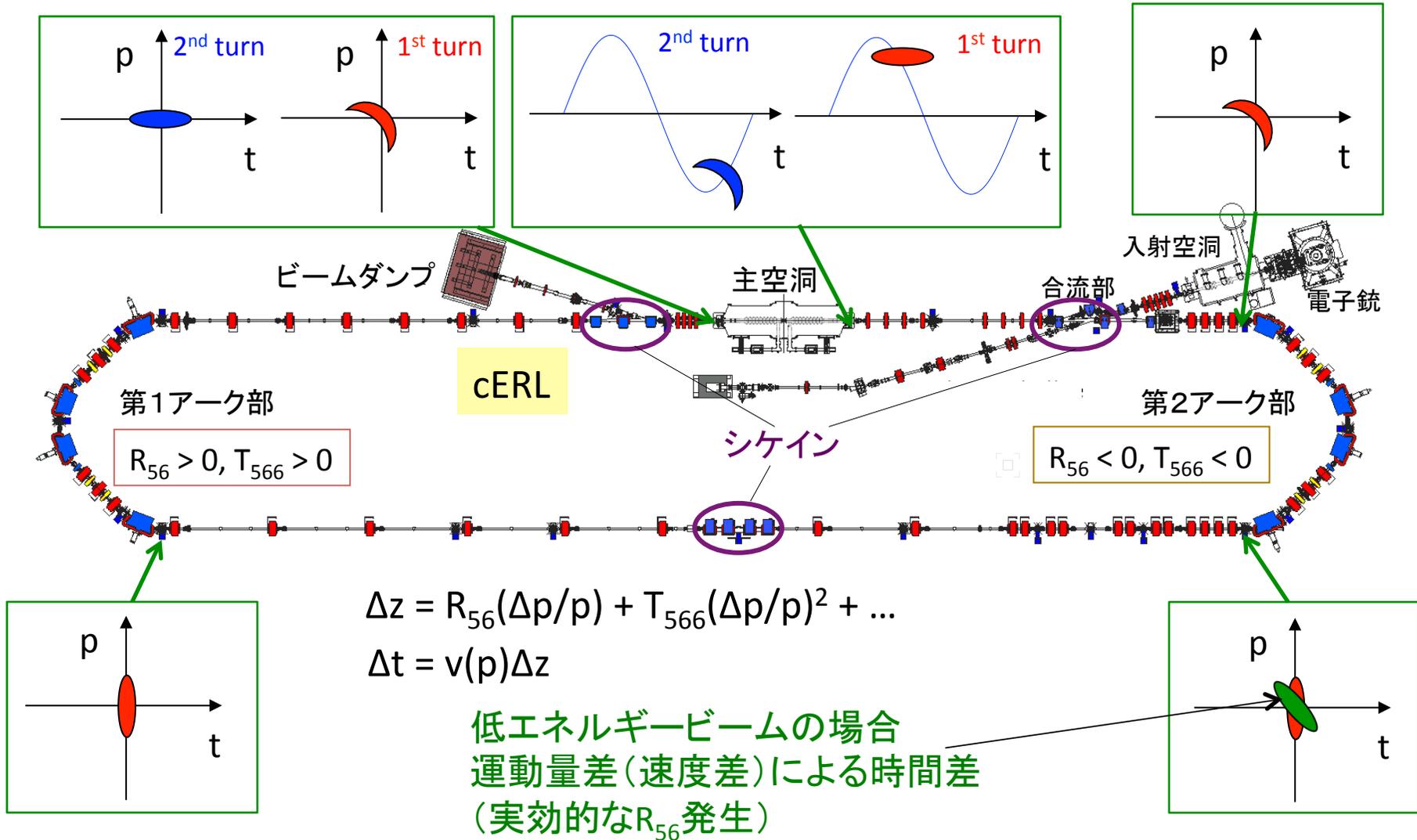
アーク部偏向電磁石からの放射光スペクトルの例 (20MeV)



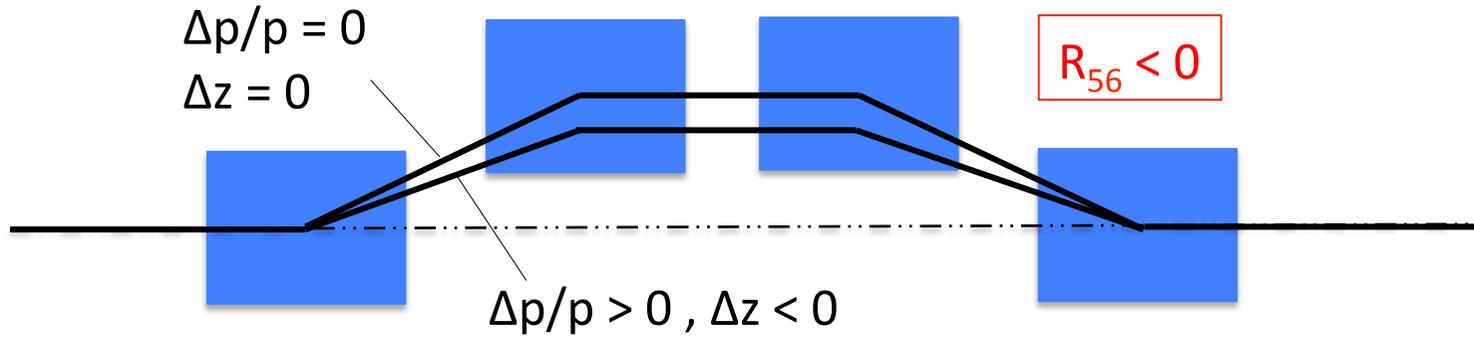
5THzまでのコヒーレント放射光発生には、100fs以下のバンチ長が要求される。

cERLにおけるバンチ圧縮・復元方式

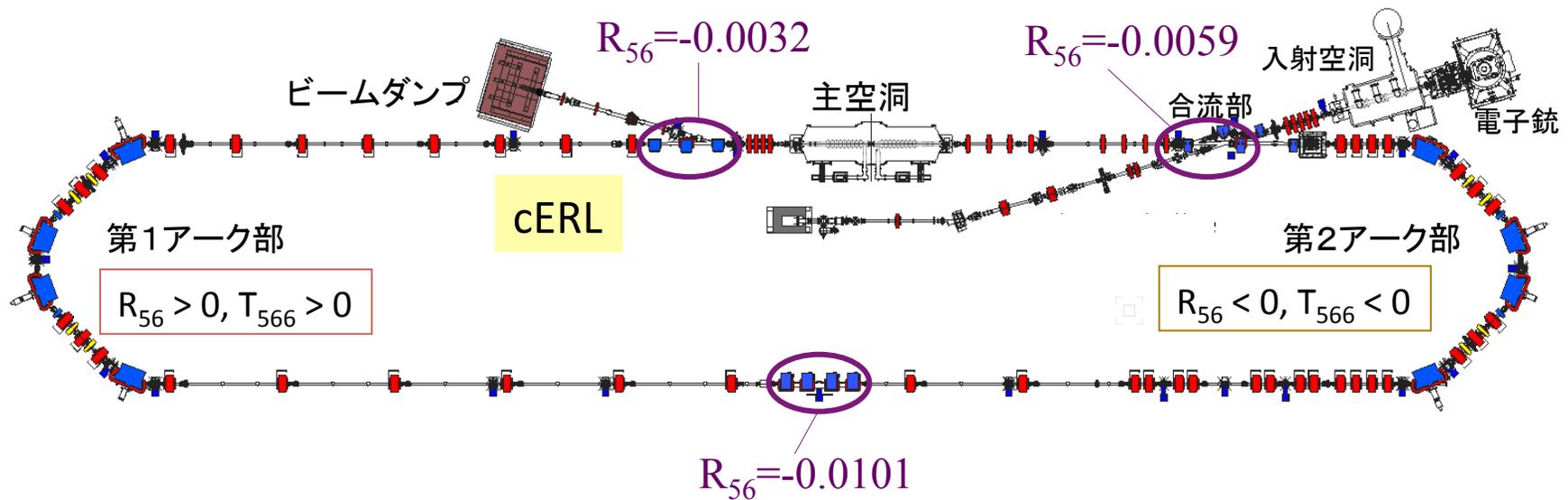
主空洞のoff-crest加速・減速 + アーク部での磁氣的圧縮・復元



シケインによる影響



シケイン(バンパ)による軌道



シケインによる R_{56} 値(加速後)

運動量差による時間差の影響

運動量差による時間差(軌道長 L)

$$\Delta t = L \left(\frac{1}{v + \Delta v} - \frac{1}{v} \right) = -L \frac{\Delta v}{v^2} = -\frac{L}{v} \frac{\Delta \beta}{\beta}$$

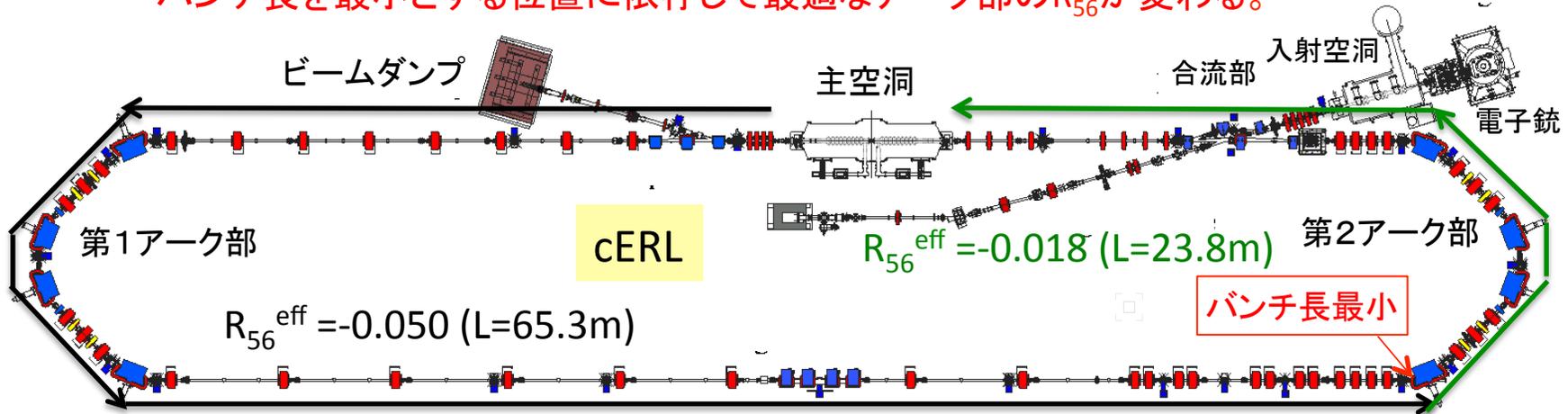
$$\frac{\Delta \beta}{\beta} = \frac{1}{\gamma^2} \frac{\Delta p}{p}$$

$$\Delta z = v \Delta t = -\frac{L}{\gamma^2 \beta} \frac{\Delta p}{p}$$

運動量差によって生じる実効的な R_{56}

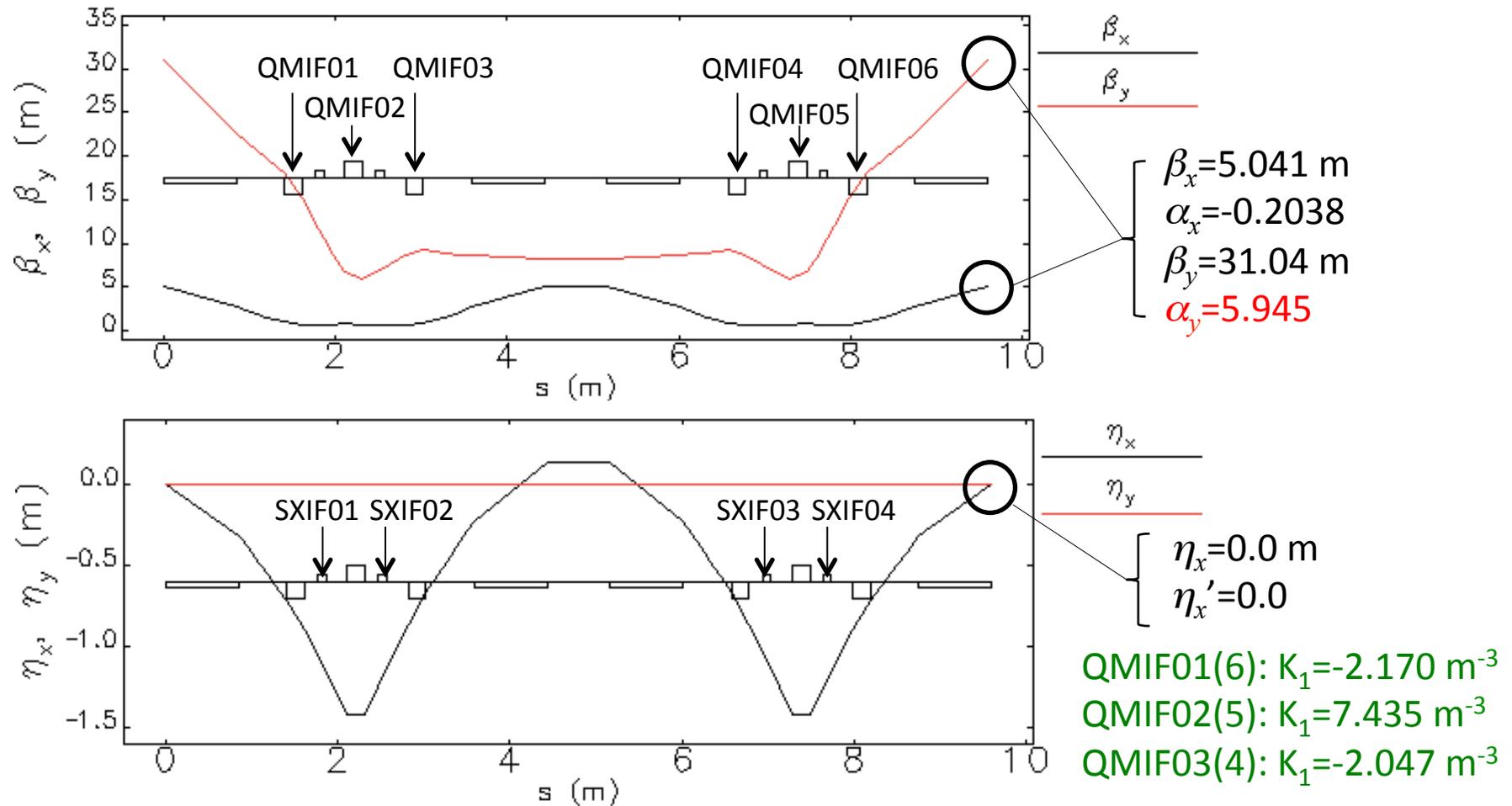
$$R_{56}^{eff} = -\frac{L}{\gamma^2 \beta}$$

バンチ長を最小とする位置に依存して最適なアーク部の R_{56} が変わる。



第1アーク部オプティクス ($R_{56}=0.15$)

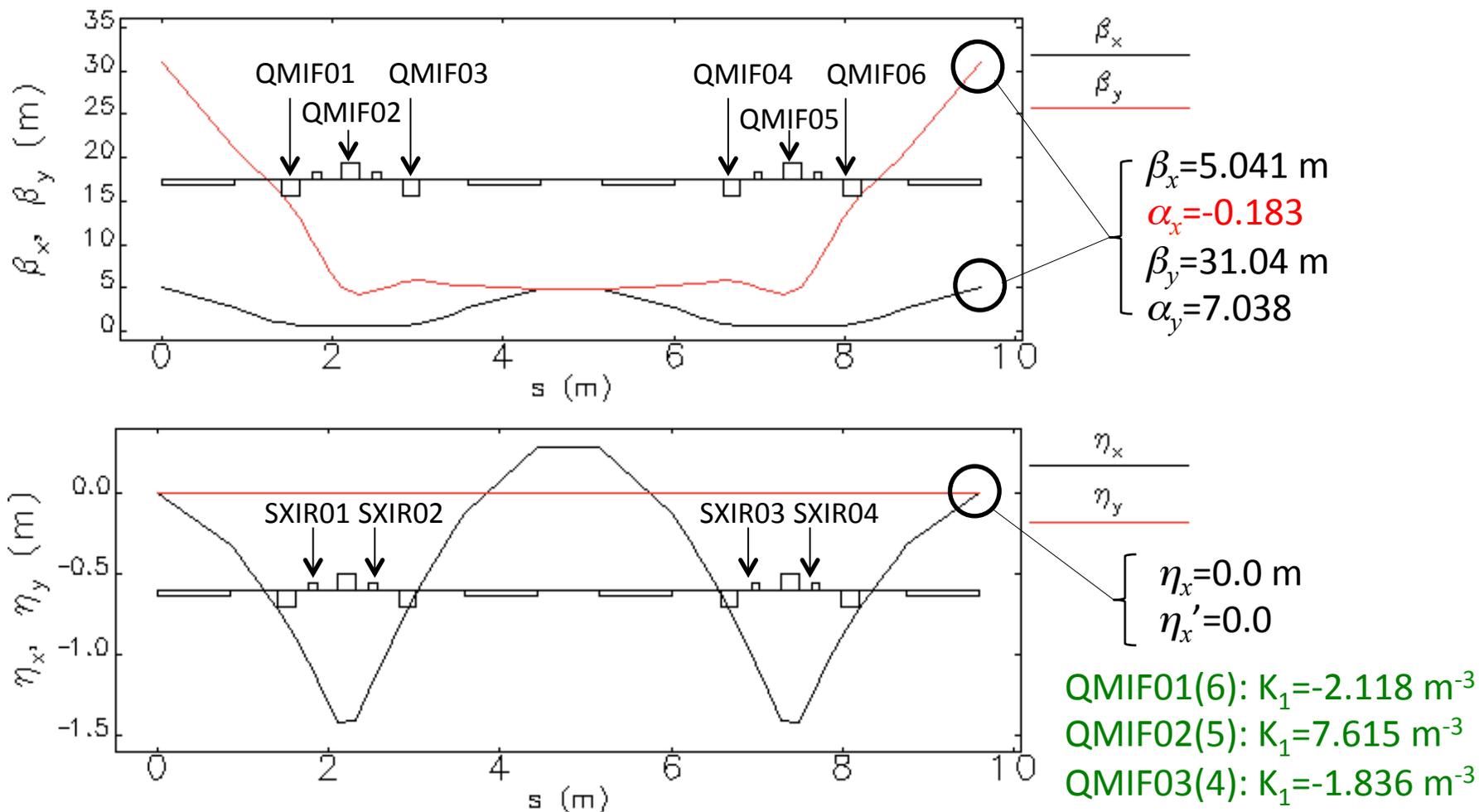
$\beta_x = 5.07$ m, $\beta_y = 8.21$ m, $\alpha_x = \alpha_y = 0$, $\eta_x = 0.134$ m, $\eta_x' = 0$ at center, $R_{56} = 0.1505$ m



前回のバンチ圧縮シミュレーションと同じオプティクスを使用した。

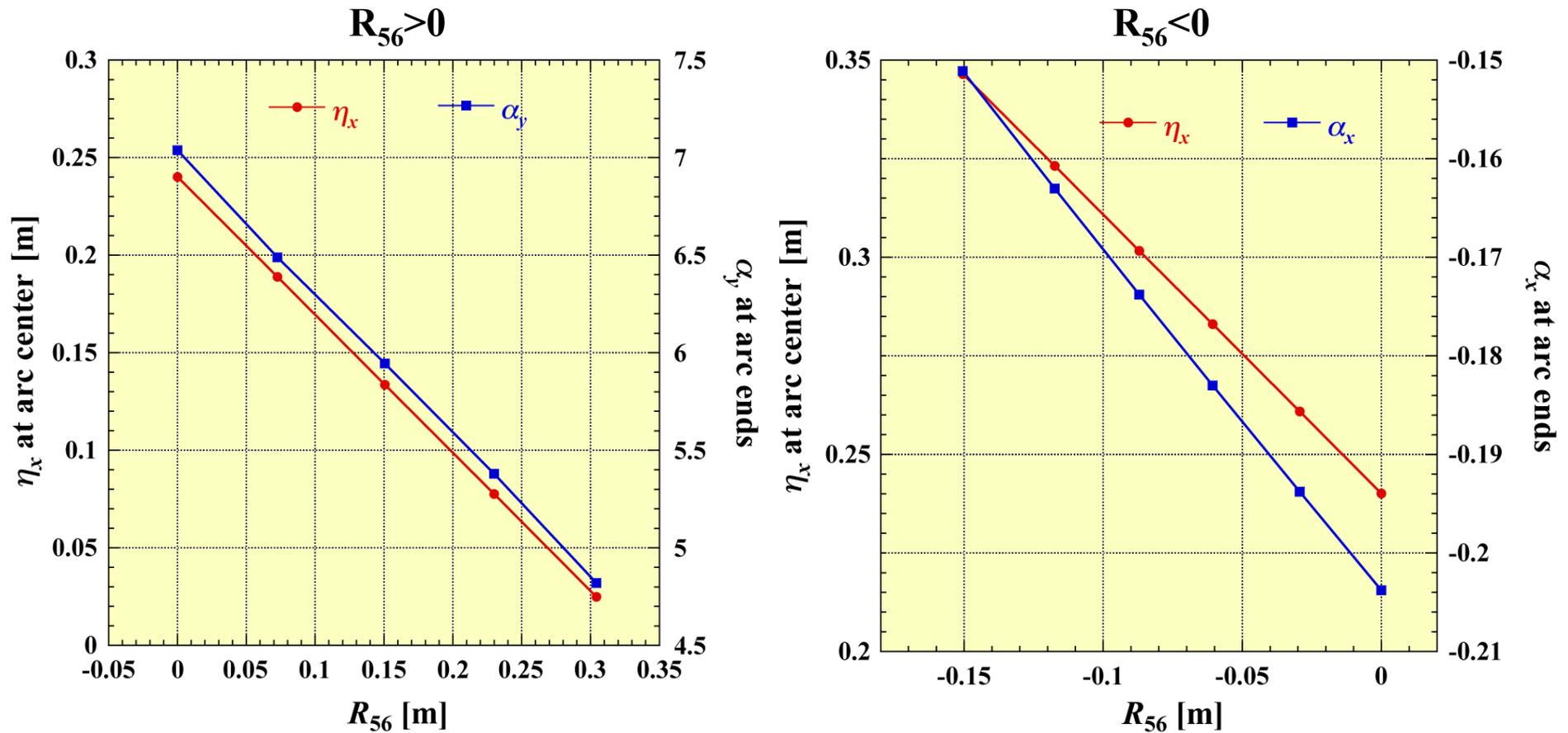
第2アーク部オプティクス ($R_{56} = -0.06$)

$\beta_x = 4.95$ m, $\beta_y = 4.80$ m, $\alpha_x = \alpha_y = 0$, $\eta_x = 0.283$ m, $\eta_x' = 0$ at center, $R_{56} = -0.0607$ m



第1アーク、シケイン、運動量の差による R_{56} を考慮して第2アークの R_{56} 値を設定した。

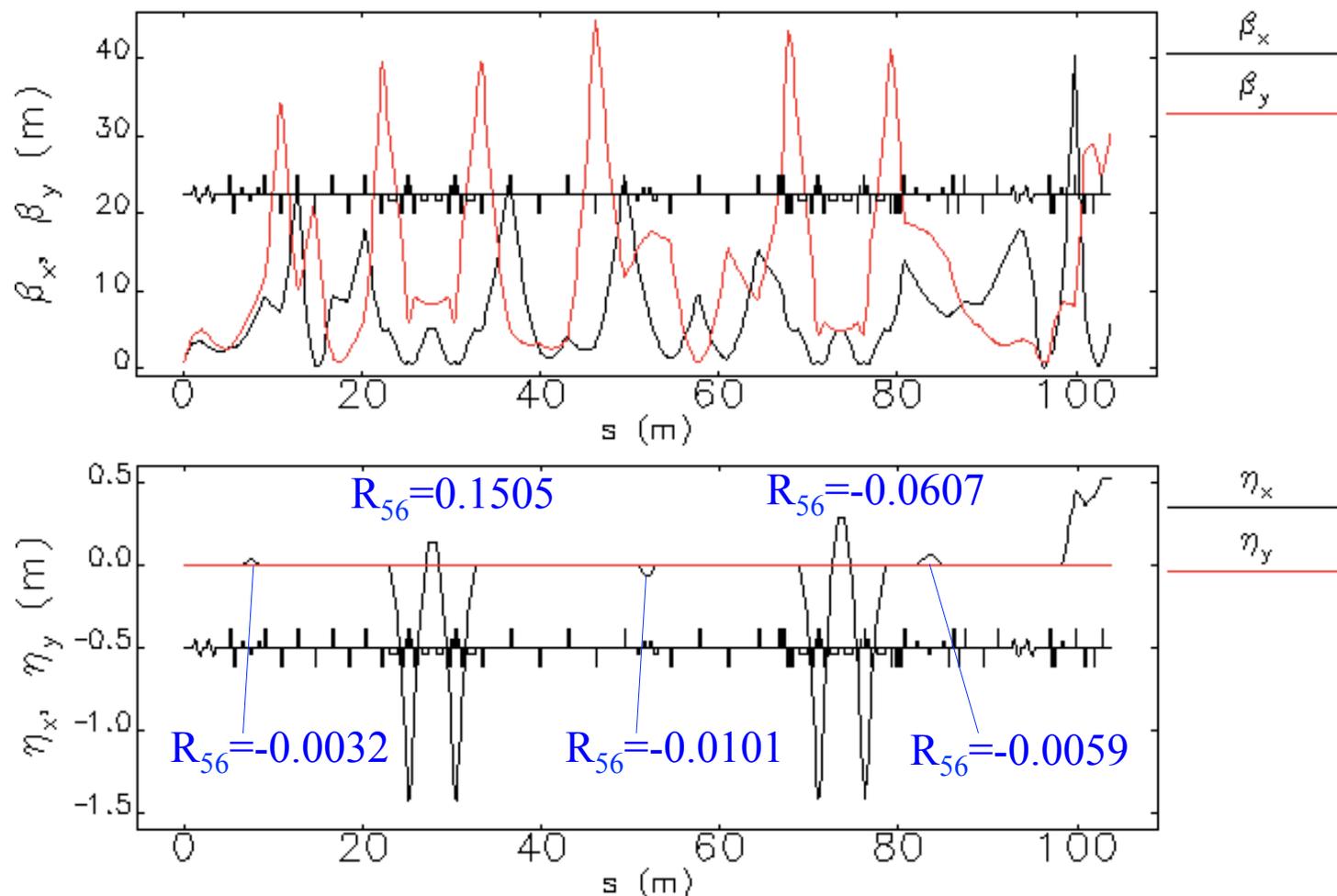
R_{56} vs. η_x vs. $\alpha_{x,y}$



拘束条件として、アーク中央で対称とし、アーク両端の β_x, β_y を通常モードと同じ値とした。
 $R_{56} > 0$ ($R_{56} < 0$) ではアーク両端の α_x (α_y) を変えず、 α_y (α_x) だけを変えた。

バンチ圧縮・復元オプティクス (SX2&4, 1ps)

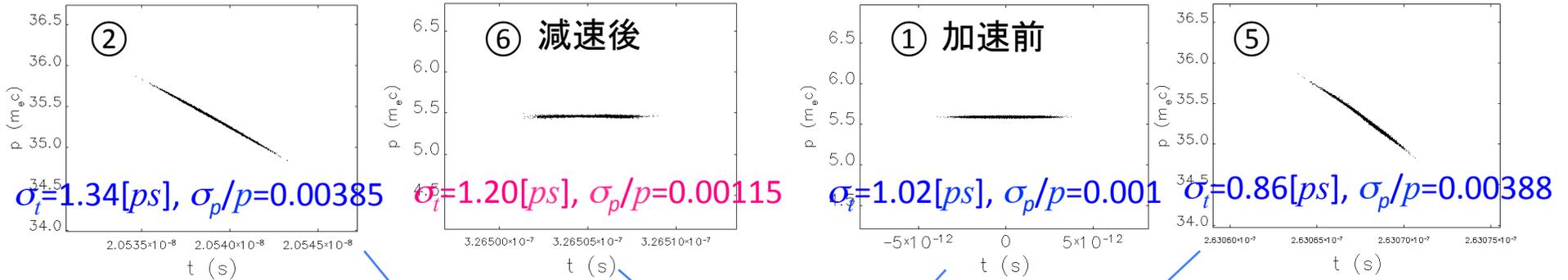
アーク部六極電磁石各2台使用 (SXIF2&4, SXIR2&4)



入射エネルギー: 2.9 MeV, 初期値: $\beta_x=0.948$ m, $\alpha_x=-0.477$, $\beta_y=0.760$ m, $\alpha_y=-0.683$
加速電圧: 8.549MV/cavity, 加速/減速位相: 約 $25^\circ/205^\circ$ (バンチ圧縮・復元で最適化)

バンチ圧縮・復元 (SX2&4 ON, 1ps)

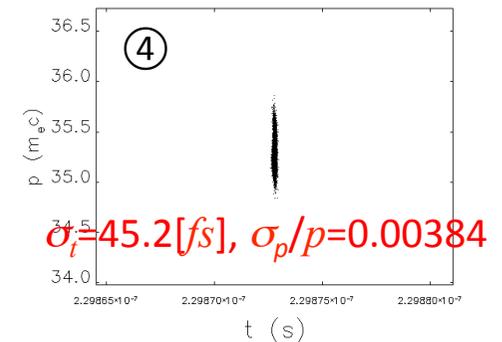
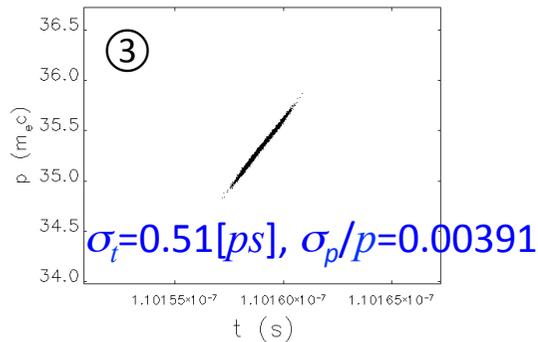
- (1) 第2アーク入口でバンチ長を最小にするように、第1アークの六極電磁石強度とRF加速位相を最適化。
- (2) 減速空洞出口で運動量幅を最小にするように、第2アークの六極電磁石強度とRF減速位相を最適化。



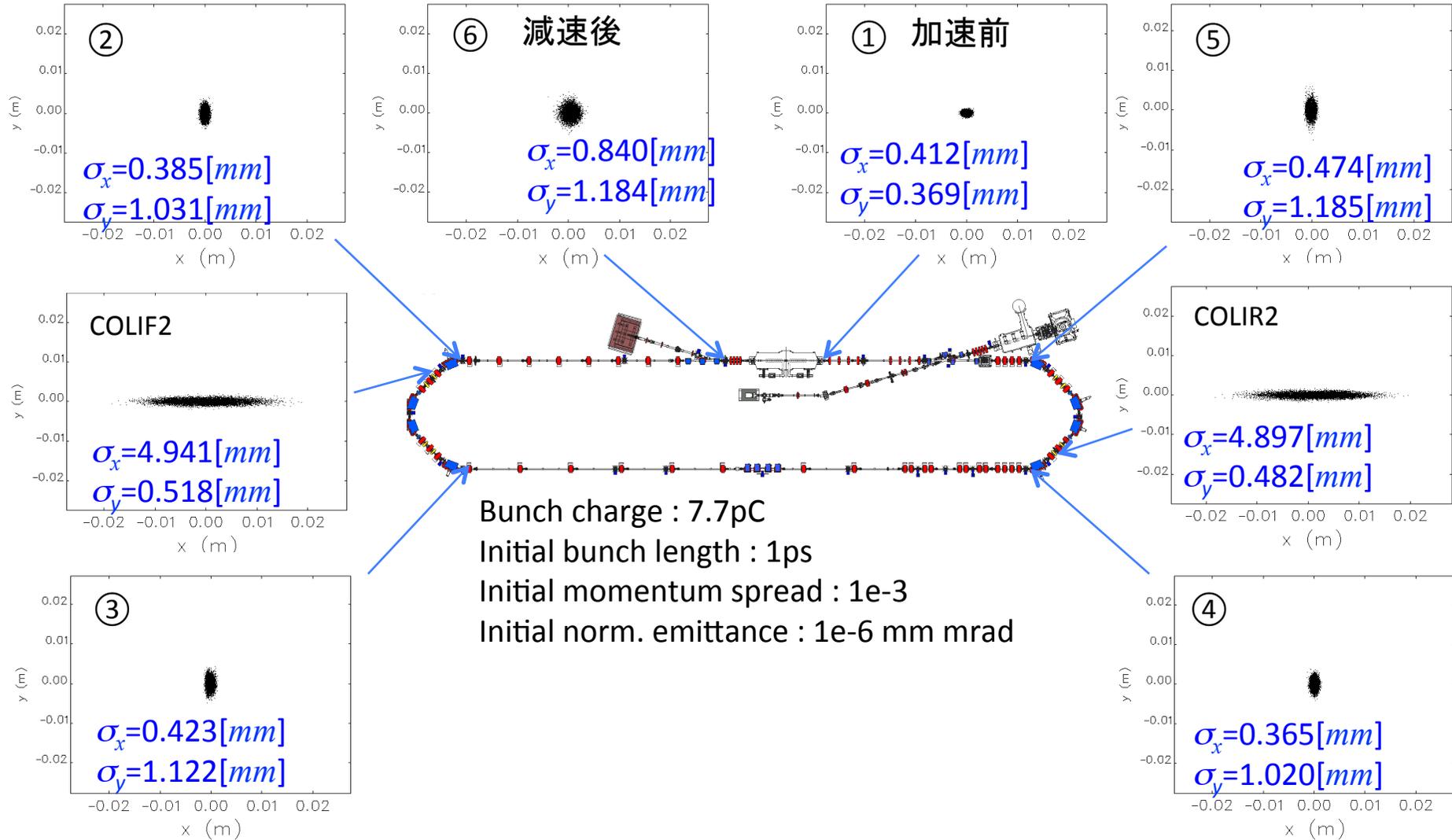
$K_2(SXIF2)=-52.29 [m^{-3}]$
 $K_2(SXIF4)=-34.97 [m^{-3}]$
 $\phi_{RF}(ACC)=24.62 [deg]$

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

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

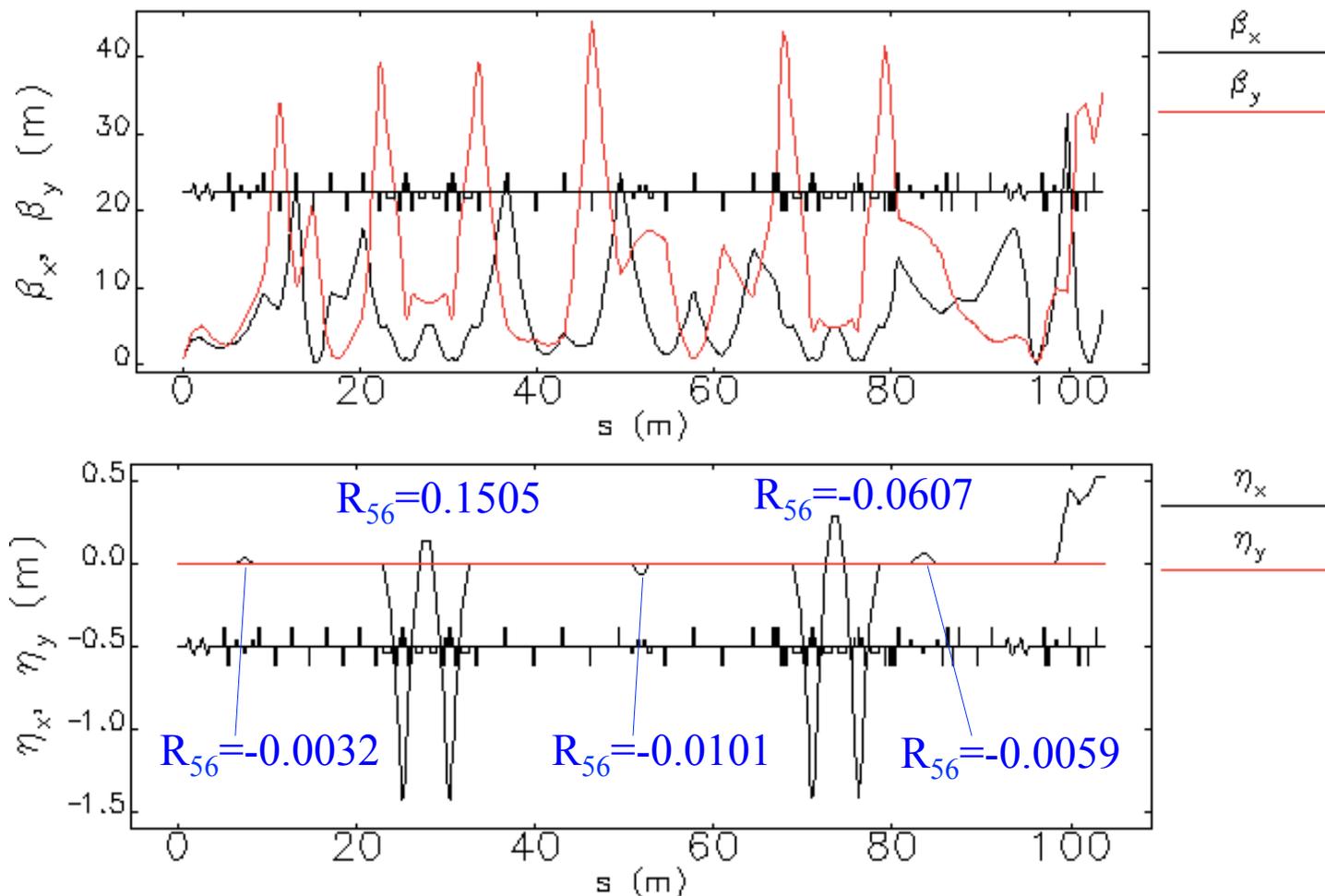


ビームサイズ (SX2&4 ON, 1ps)



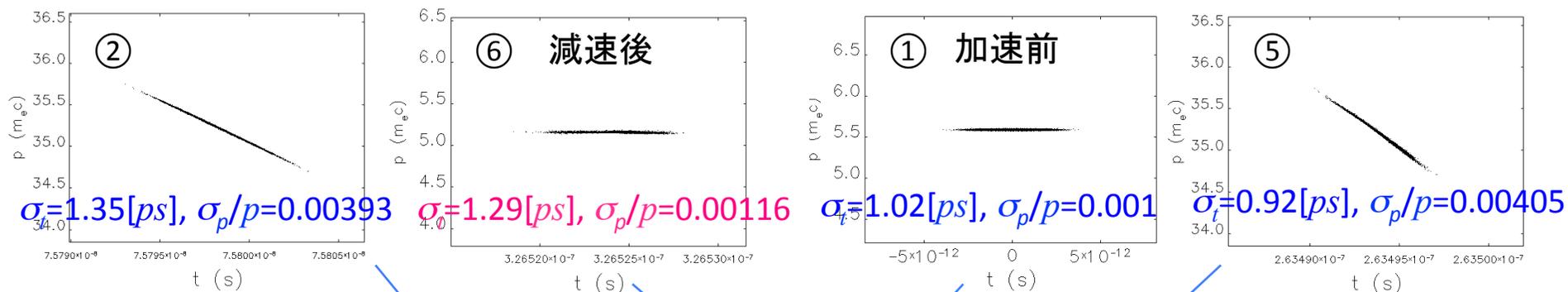
バンチ圧縮・復元オプティクス (SX2, 1ps)

アーク部六極電磁石各1台使用 (SXIF2, SXIR2)



初期エネルギー: 2.9 MeV, 初期値: $\beta_x = 0.948$ m, $\alpha_x = -0.477$, $\beta_y = 0.760$ m, $\alpha_y = -0.683$
加速電圧: 8.549 MV/cavity, 加速/減速位相: 約 $25^\circ/205^\circ$ (バンチ圧縮・復元で最適化)

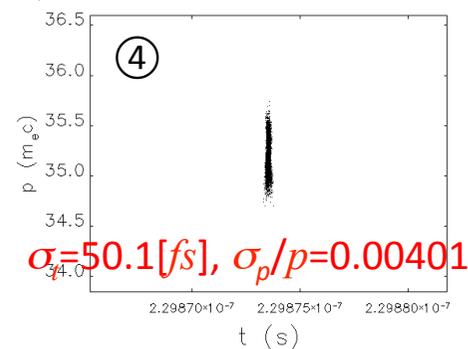
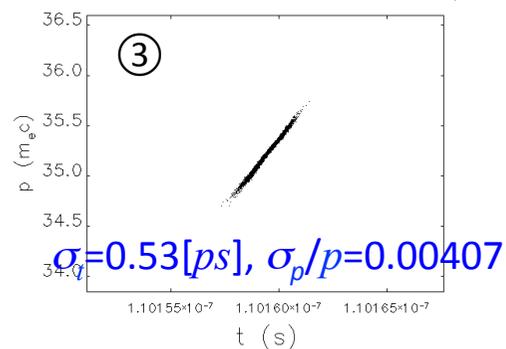
バンチ圧縮・復元 (SX2 ON, 1ps)



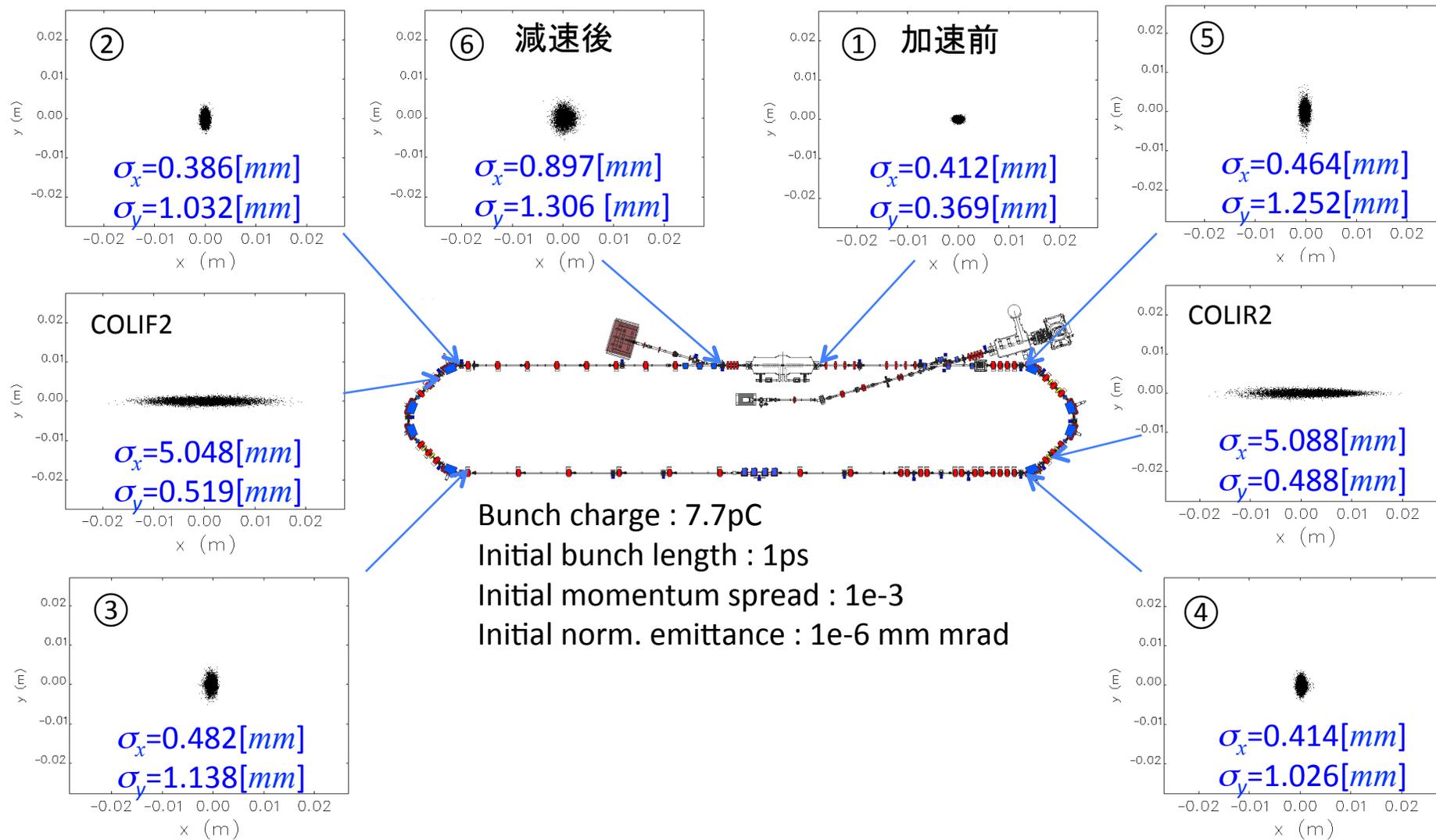
$K_2(\text{SXIF2}) = -89.84 [m^{-3}]$
 $\phi_{RF}(\text{ACC}) = 25.11 [deg]$

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

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

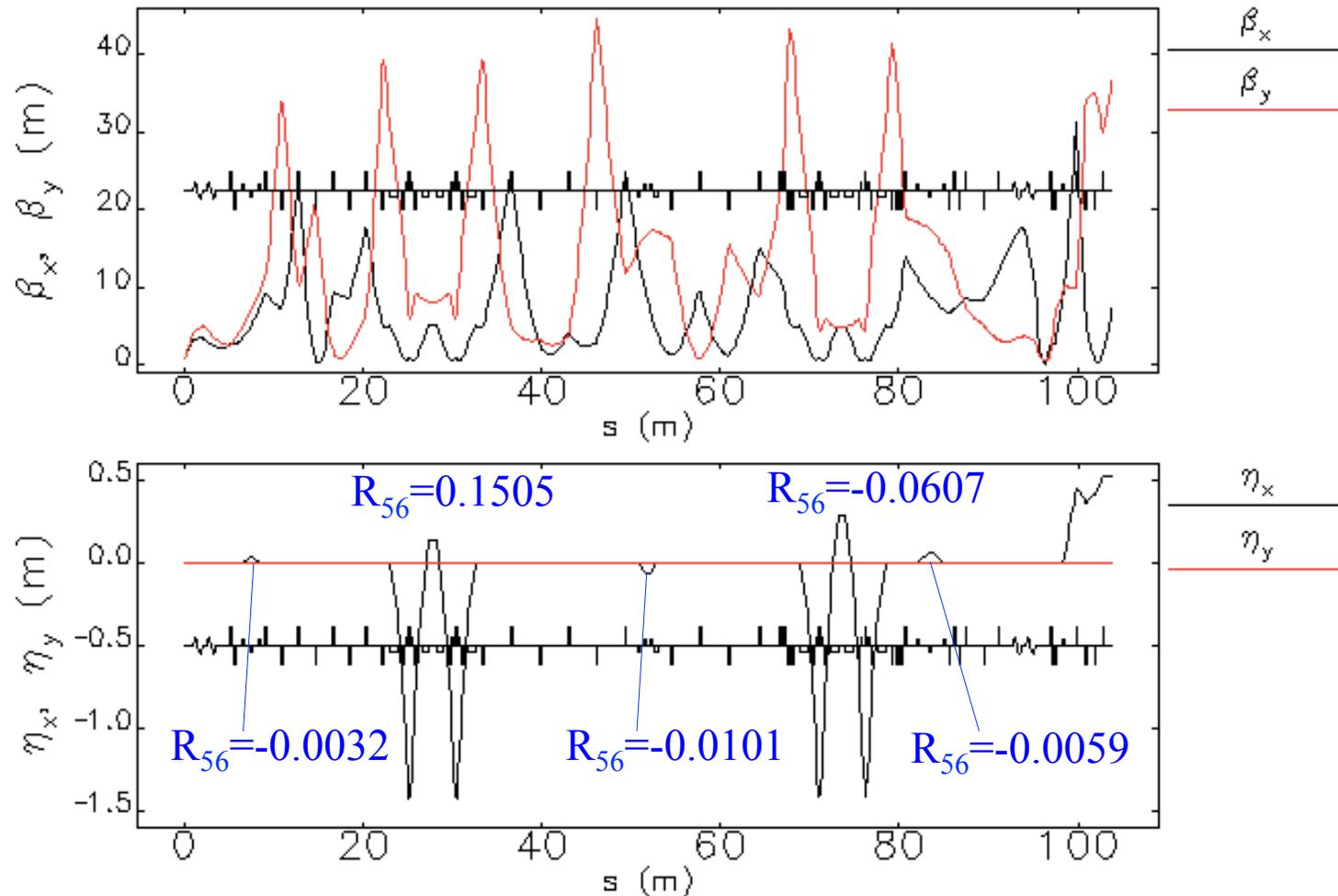


ビームサイズ (SX2 ON, 1ps)



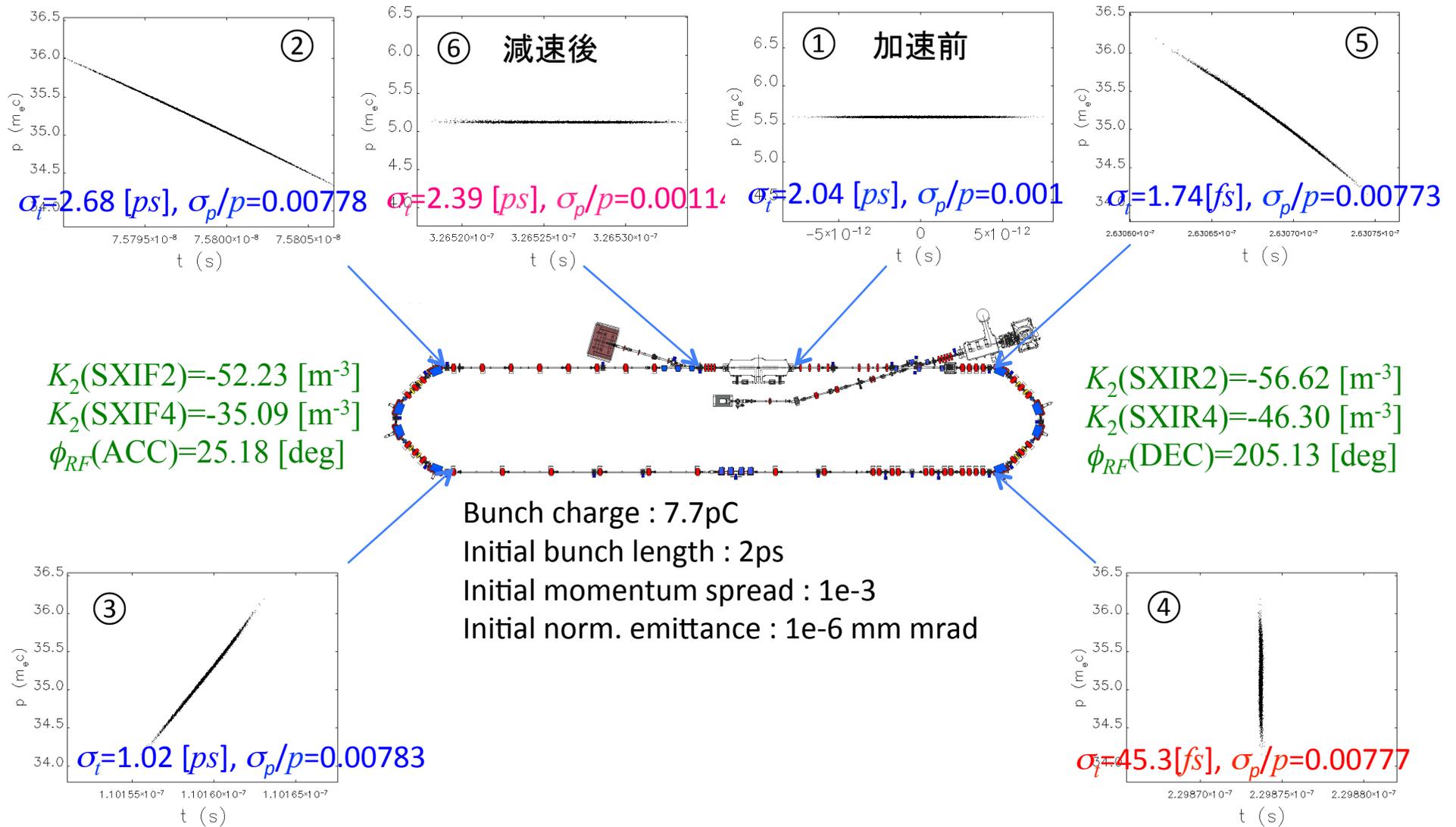
バンチ圧縮・復元オプティクス (SX2&4, 2ps)

アーク部六極電磁石各2台使用 (SXIF2&4, SXIR2&4)

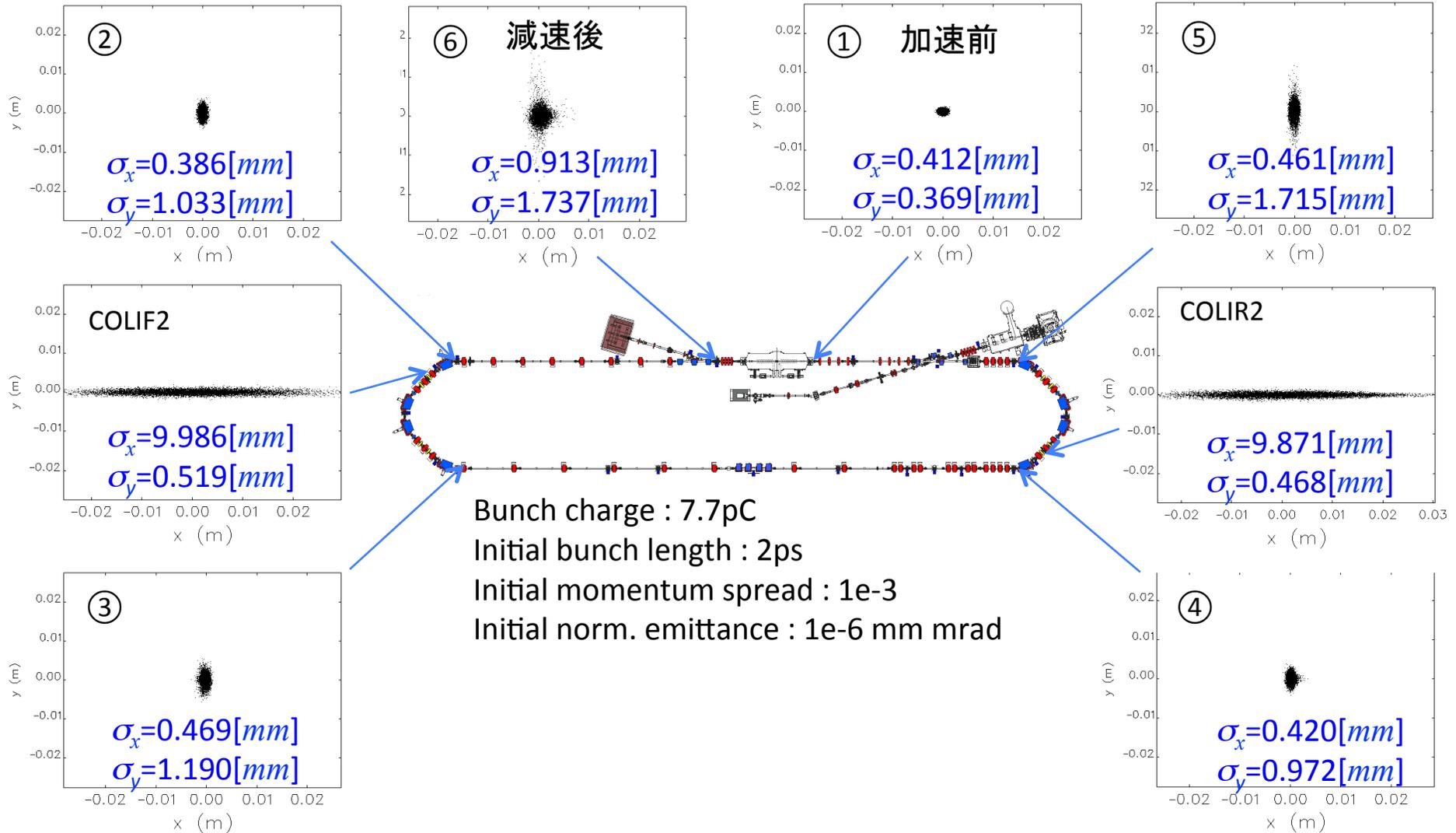


初期エネルギー: 2.9 MeV, 初期値: $\beta_x = 0.948$ m, $\alpha_x = -0.477$, $\beta_y = 0.760$ m, $\alpha_y = -0.683$
加速電圧: 8.549 MV/cavity, 加速/減速位相: 約 $25^\circ/205^\circ$ (バンチ圧縮・復元で最適化)

バンチ圧縮・復元 (SX2&4 ON, 2ps)

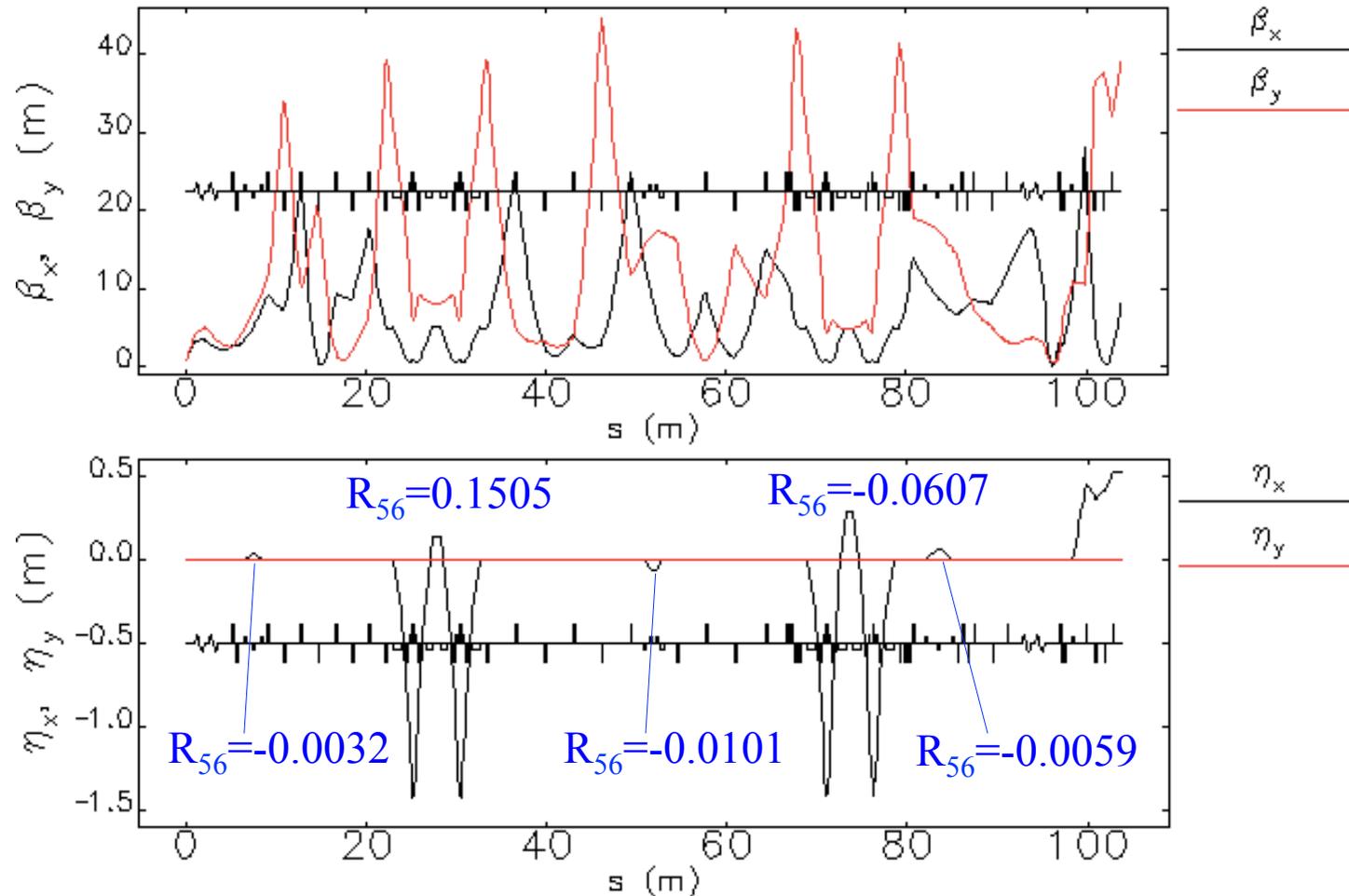


ビームサイズ (SX2&4 ON, 2ps)



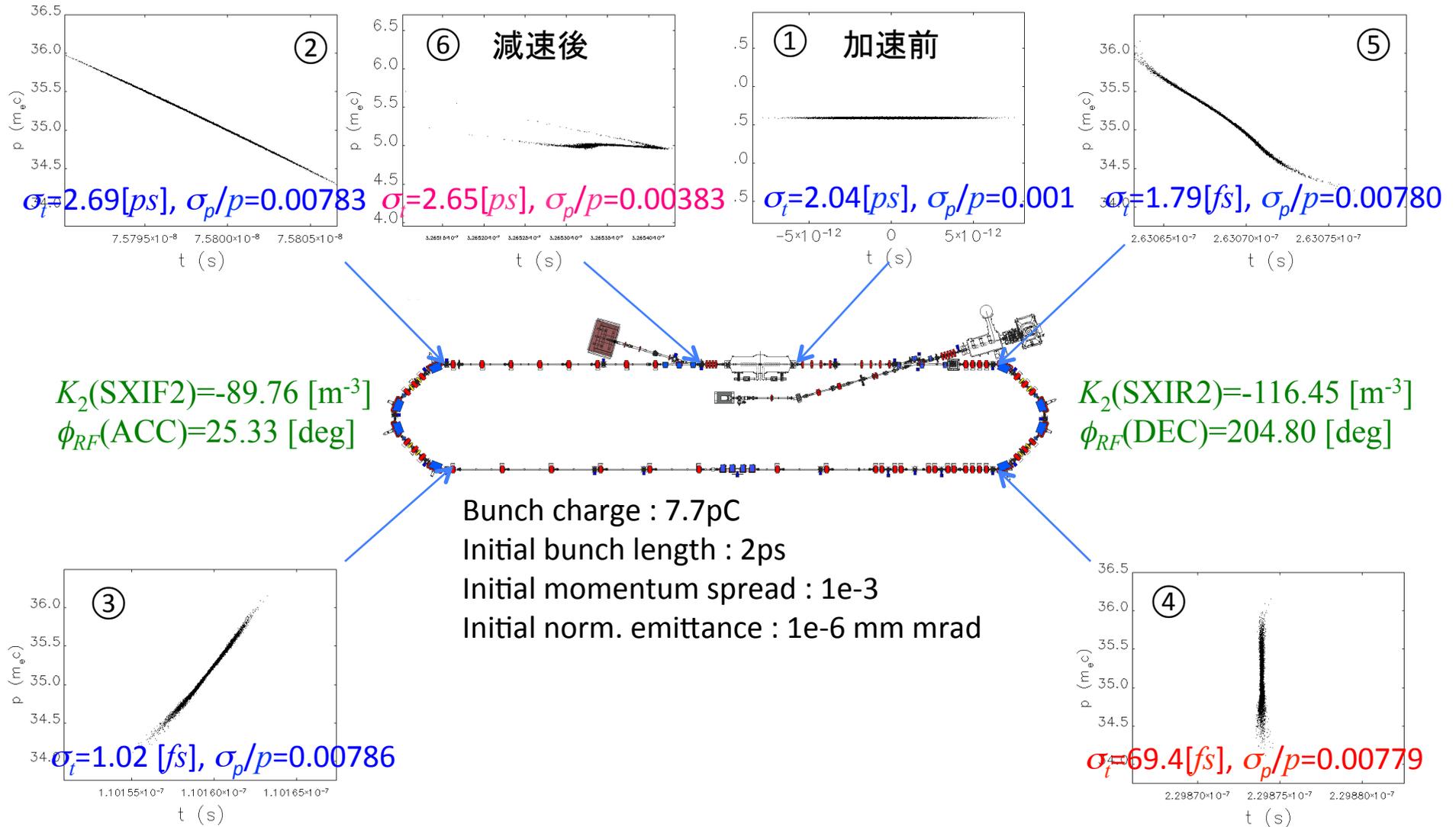
バンチ圧縮・復元オプティクス (SX2, 2ps)

アーク部六極電磁石各1台使用 (SXIF2, SXIR2)

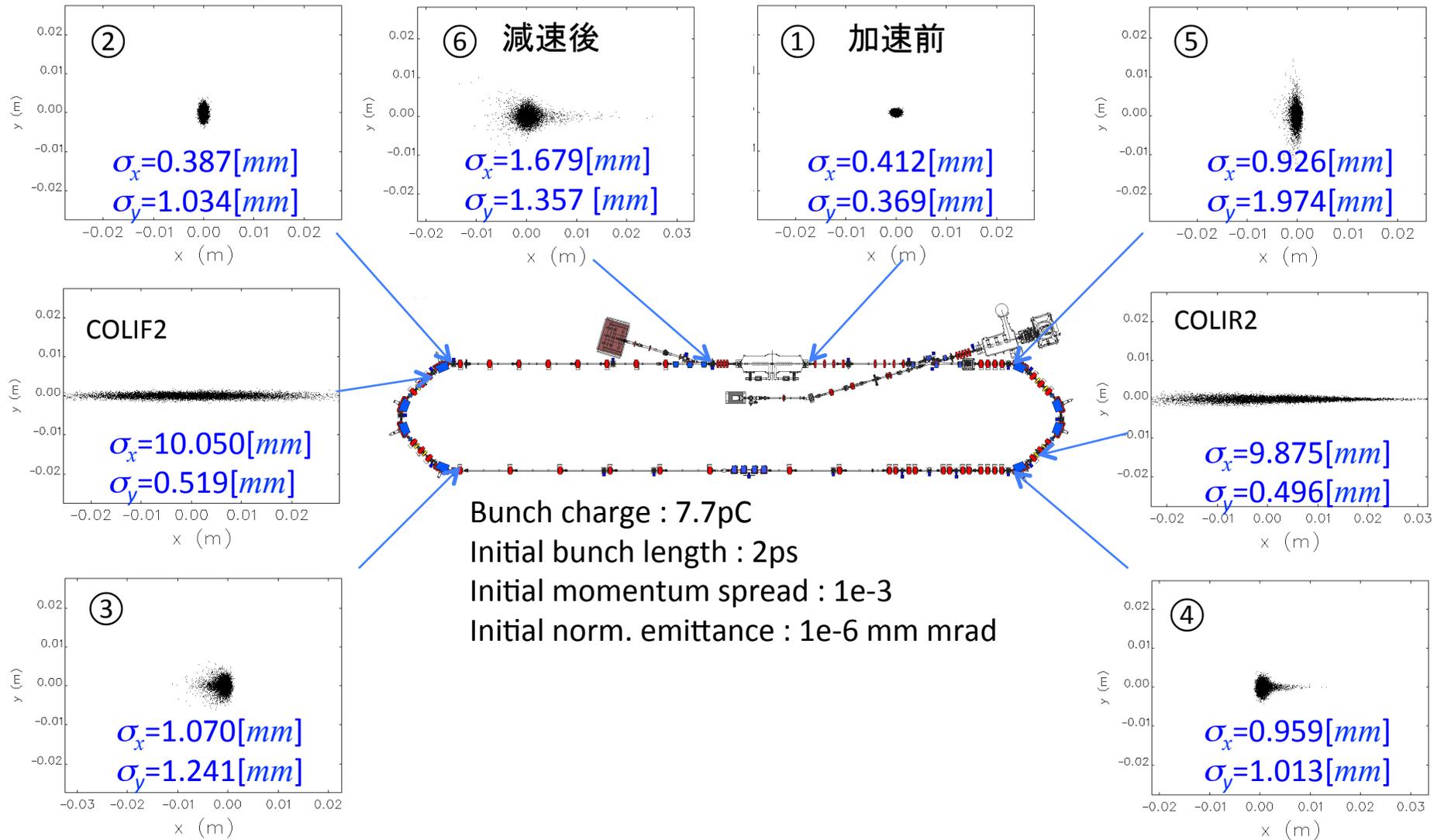


初期エネルギー: 2.9 MeV, 初期値: $\beta_x = 0.948$ m, $\alpha_x = -0.477$, $\beta_y = 0.760$ m, $\alpha_y = -0.683$
加速電圧: 8.549 MV/cavity, 加速/減速位相: 約 $25^\circ/205^\circ$ (バンチ圧縮・復元で最適化)

バンチ圧縮・復元 (SX2 ON, 2ps)



ビームサイズ (SX2 ON, 2ps)



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 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 ⁻²]	RF位相 ϕ_{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	0.00384	1.16, 1.20	-52.3, -35.0	24.62	0.053	-2.85	0.08
	1195	0.00115	1.15, 1.19	-64.4, -40.8	205.95	-0.438	-3.84	-0.01
SX2 ON	50.1	0.00401	1.34, 1.20	-89.8	25.11	-0.048	-12.0	0.22
	1287	0.00116	1.18, 1.28	-109.7	205.30	-0.515	-14.4	-0.22
SX2&4 ON Q → 0.77 pC	42.7	0.00390	1.03, 1.20	-51.3, -35.7	25.07	0.066	-2.64	0.08
	1242	0.00103	1.01, 1.19	-62.7, -40.8	204.84	-0.309	-3.63	-3e-3
SX2 ON Q → 0.77 pC	48.9	0.00391	1.25, 1.19	-88.6	25.10	0.055	-11.8	0.21
	1252	0.00104	1.04, 1.27	-109.2	204.74	-0.476	-14.3	-0.22
SX2&4 ON $\sigma_{t0} \rightarrow 2\text{ps}$	45.3	0.00777	1.34, 1.54	-52.2, -35.1	25.18	0.047	-2.83	0.08
	2387	0.00114	1.21, 1.82	-56.6, -46.3	205.13	-0.297	-2.22	-0.03
SX2 ON $\sigma_{t0} \rightarrow 2\text{ps}$	69.4	0.00779	4.90, 1.56	-89.8	25.33	-0.041	-12.0	0.22
	2648	0.00383	2.42, 1.75	-116.5	204.80	-1.062	-15.2	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)。

まとめ

- $R_{56}=0.15\text{m}, -0.06\text{m}$ の第1,2アーク部オプティクスを用いてバンチ圧縮・復元シミュレーションを試みた。今回は、バンチ長最小とする場所を第2アーク入口に設定し、加速前の初期のバンチ長と運動量幅を1ps、0.001と仮定した。
- シミュレーションの結果、六極電磁石は第1、2アーク部に1-2台ずつでも100fs以下のバンチ圧縮とその復元が可能であることがわかった。必要な磁場強度は長さ10cmの六極電磁石に対して $K_2=200\text{m}^{-3}$ 以下であった。
- 初期のバンチ長が2psに伸びると、分散によるビームサイズが大きくなり、エミッタンスがやや劣化する。さらに、六極電磁石1台ずつの場合ではエミッタンスの劣化や T_{166}, T_{266} などの2次の分散の影響が顕著になった。