

バンチ圧縮・復元について

— THz-CSRとEUV光源に向けて —

cERLミニワークショップ
2015年1月19日(月)

加速器研究施設・第7研究系
中村 典雄

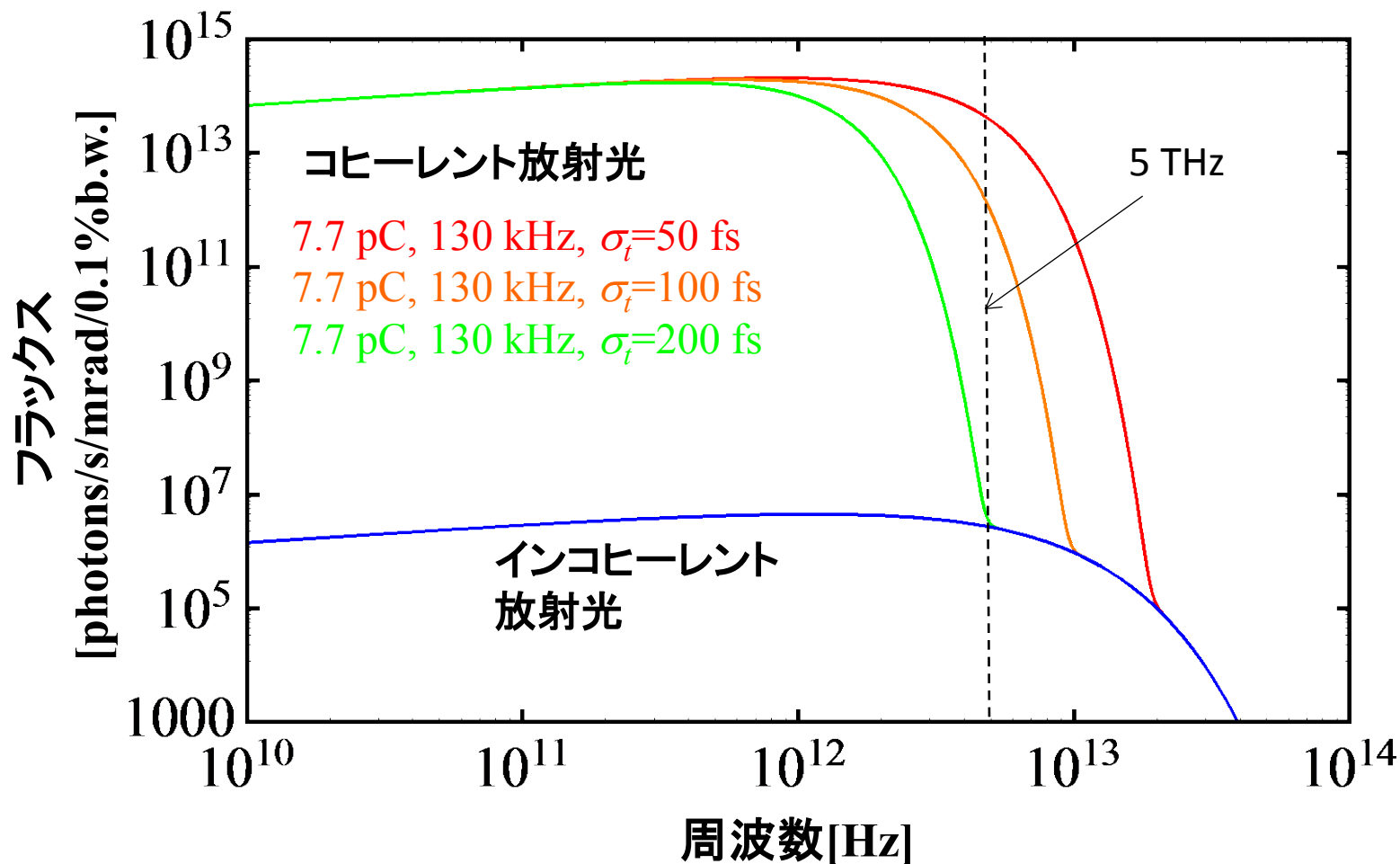
目的

- cERLにおけるコヒーレントテラヘルツ光 (THz-CSR) の発生
- EUV光源への応用

THz-CSR発生@cERL

コヒーレント放射光スペクトル

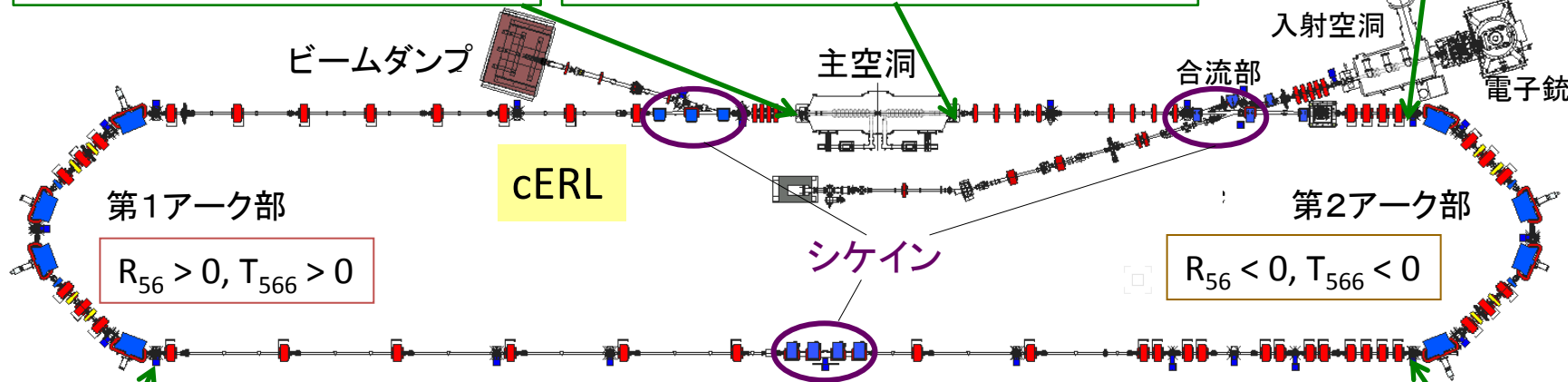
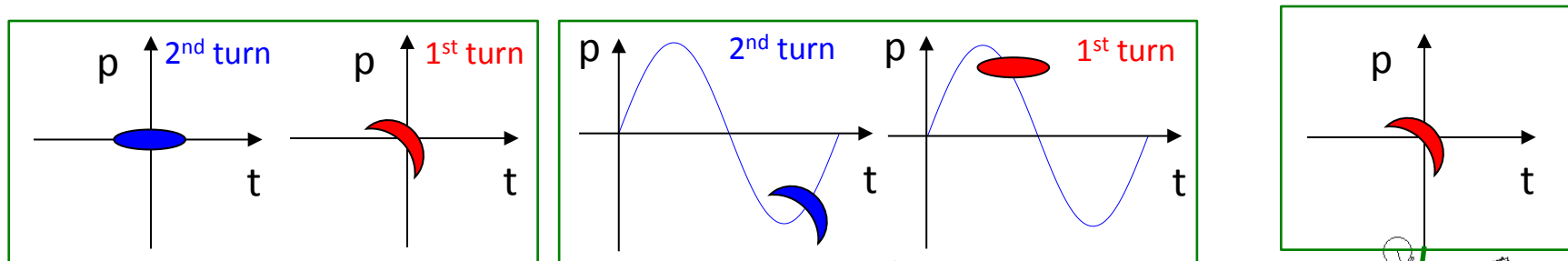
アーク部偏向電磁石からの放射光スペクトルの例(20MeV)



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

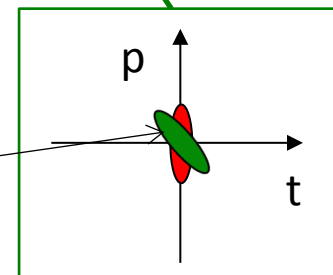
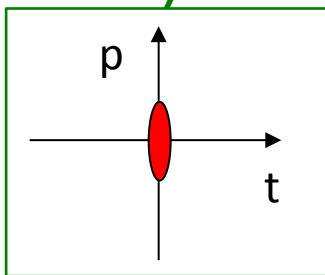
主空洞のoff-crest加速・減速 + アーク部での磁氣的圧縮・復元



$$\Delta z = R_{56}(\Delta p/p) + T_{566}(\Delta p/p)^2 + \dots$$

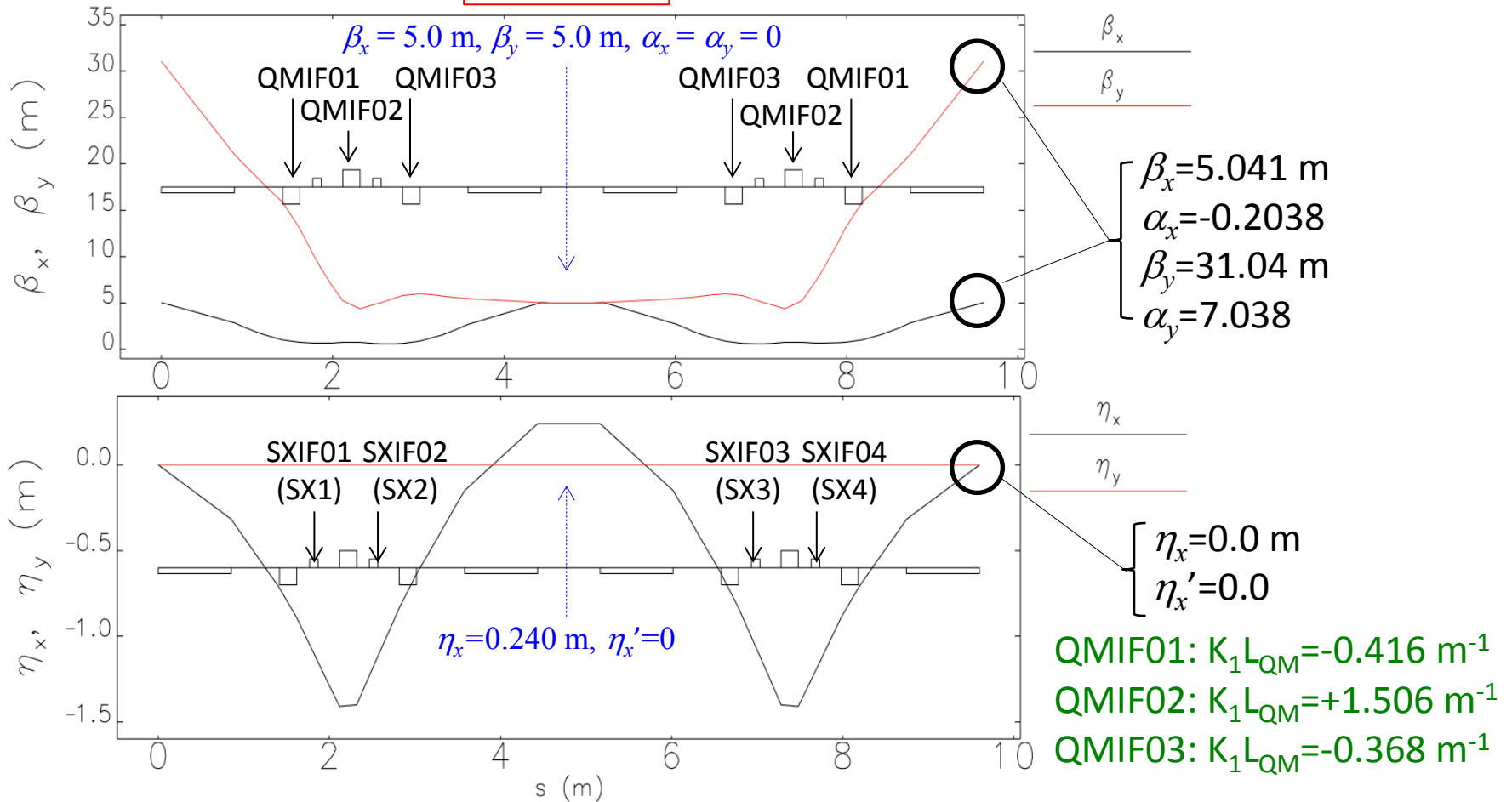
$$\Delta t = v(p)\Delta z$$

低エネルギービームの場合
運動量差(速度差)による時間差
(実効的な R_{56} 発生)



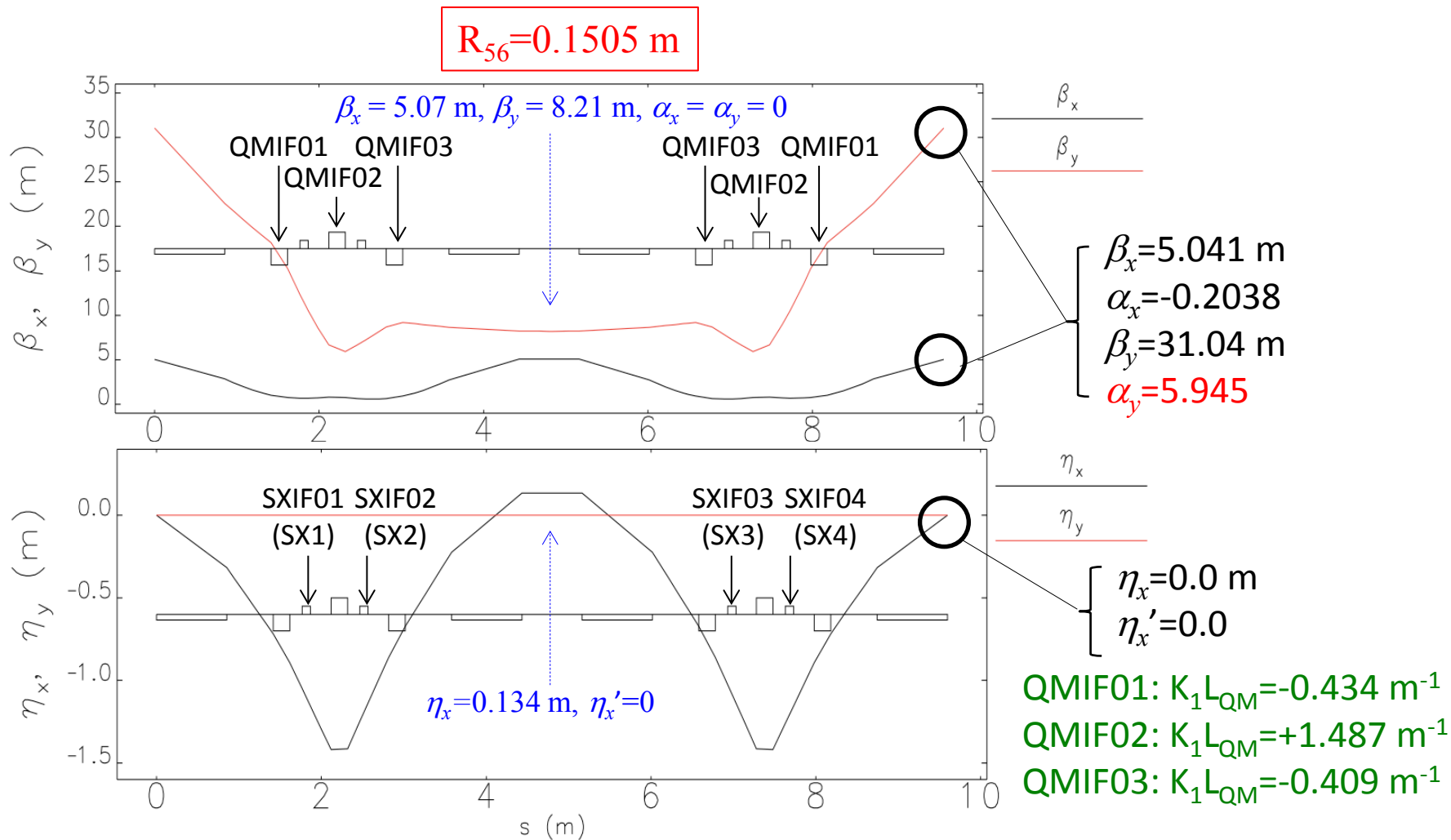
アーク部オプティクス (通常モード)

$$R_{56} = 0.0 \text{ m}$$



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。

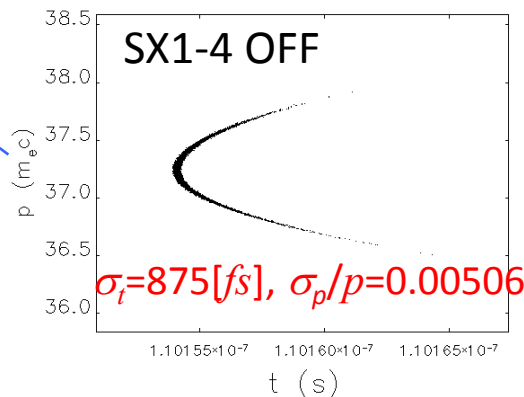
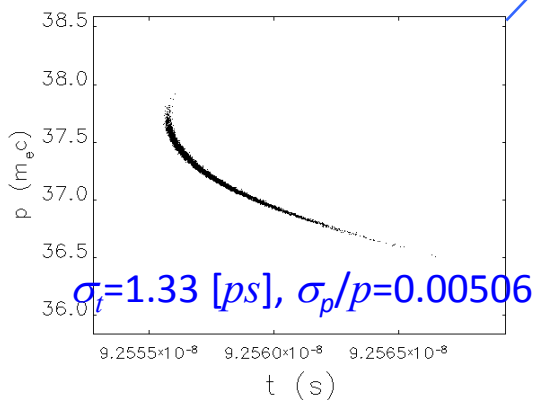
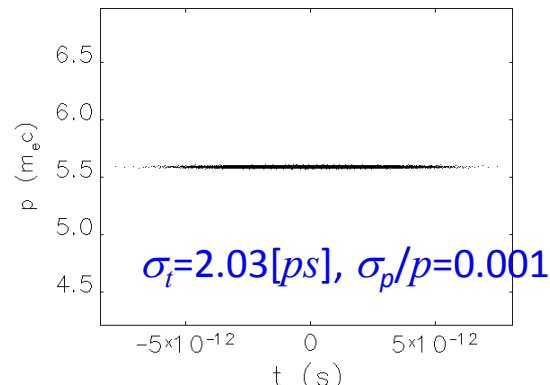
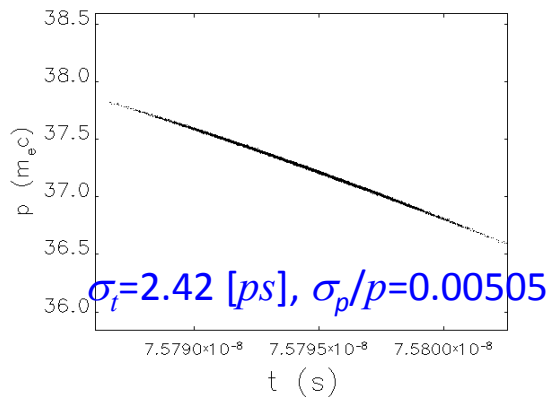
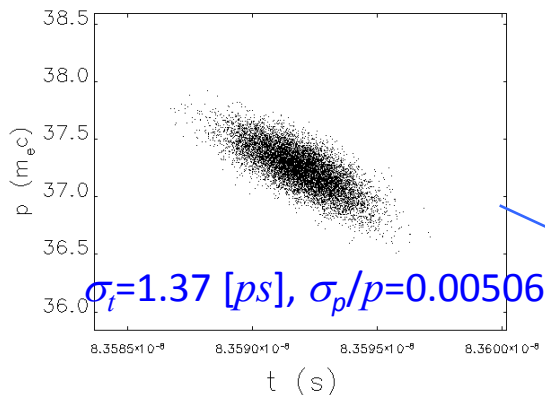
第1アーク部オプティクス(バンチ圧縮)



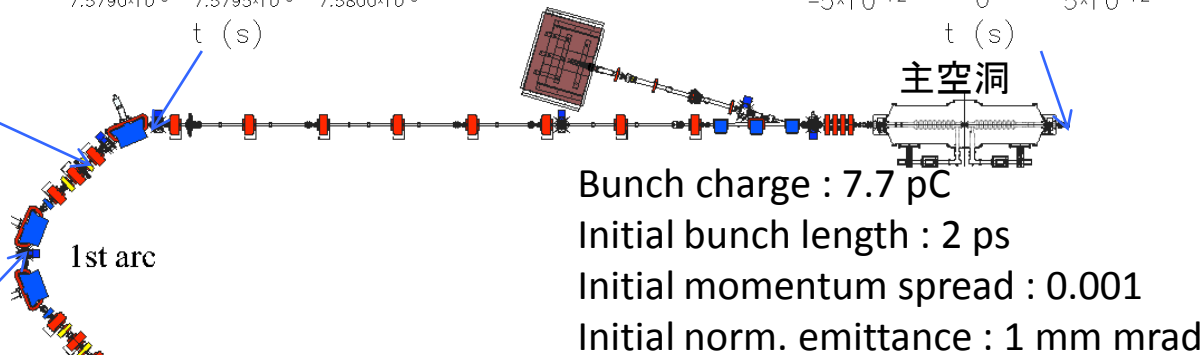
第1アーク部入口の α_y を変えてバンチ圧縮オプティクスを設計した。
 アーク中央でのオプティクスの対称性は残した(ただし、六極の位置は対称でない)。

バンチ圧縮 (All SX OFF)

主空洞加速前: 2.9 MeV
主空洞加速後: 20 MeV

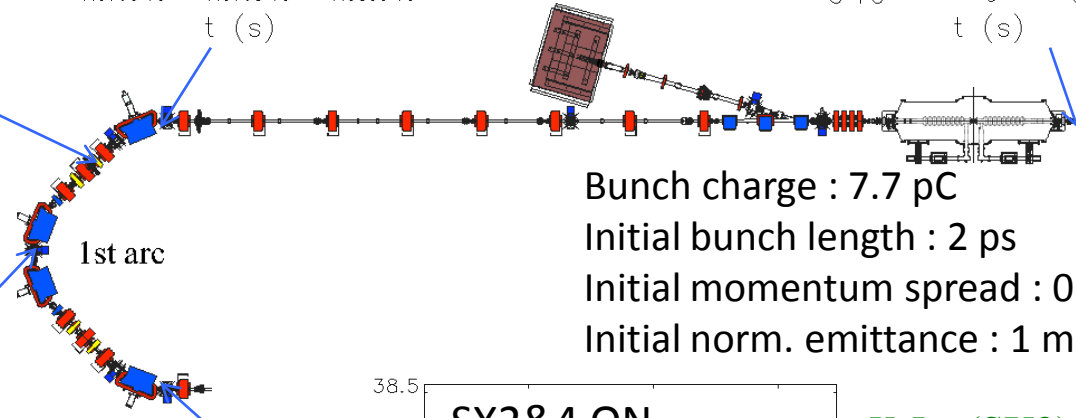
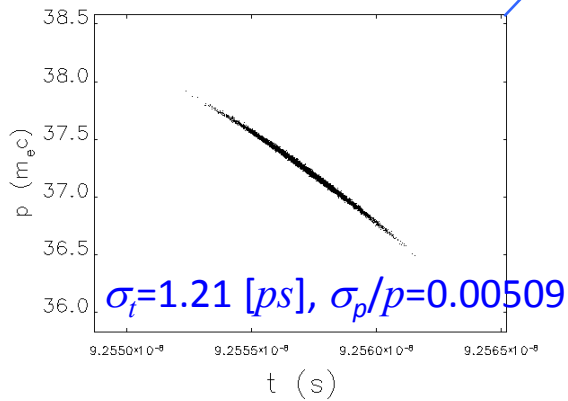
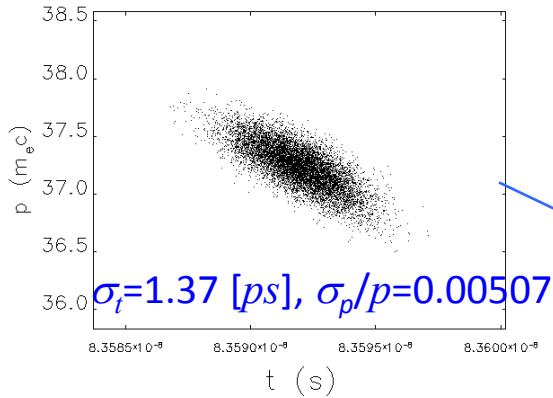
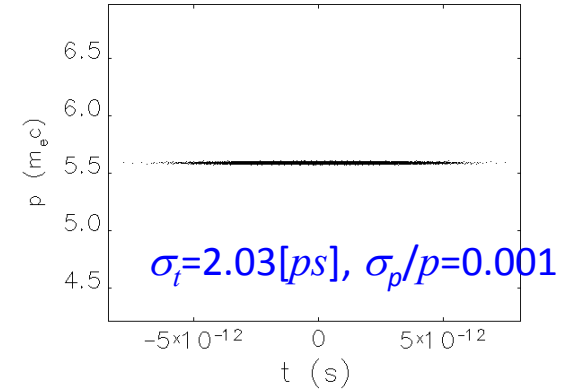
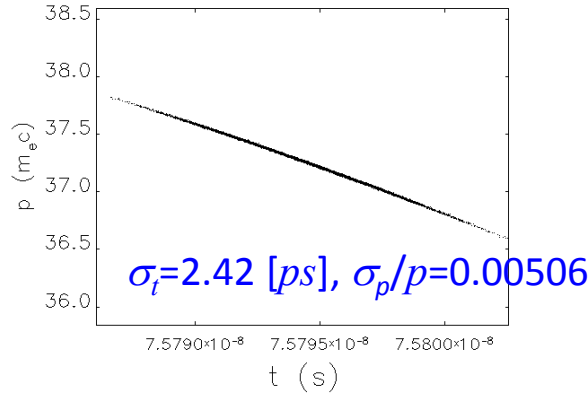


$K_2 L_{SX} (SX1) = 0.0 [m^2]$
 $K_2 L_{SX} (SX2) = 0.0 [m^2]$
 $K_2 L_{SX} (SX3) = 0.0 [m^2]$
 $K_2 L_{SX} (SX4) = 0.0 [m^2]$
 $\phi_{RF} = 16.46 [deg]$

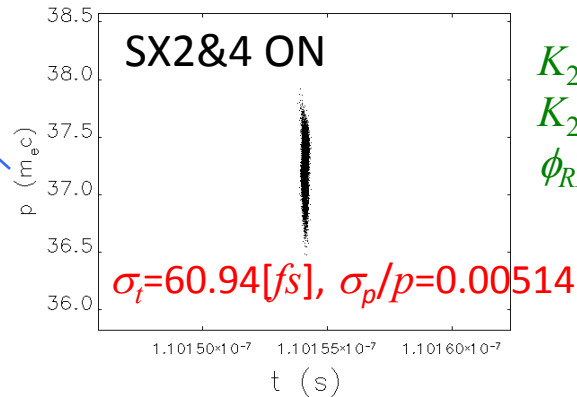


バンチ圧縮 (SX2&4 ON)

主空洞加速前: 2.9 MeV
主空洞加速後: 20 MeV



Bunch charge : 7.7 pC
Initial bunch length : 2 ps
Initial momentum spread : 0.001
Initial norm. emittance : 1 mm mrad



$K_2 L_{SX}(SX2) = -4.24 \text{ [m}^{-2}\text{]}$
 $K_2 L_{SX}(SX4) = -4.02 \text{ [m}^{-2}\text{]}$
 $\phi_{RF} = 16.51 \text{ [deg]}$

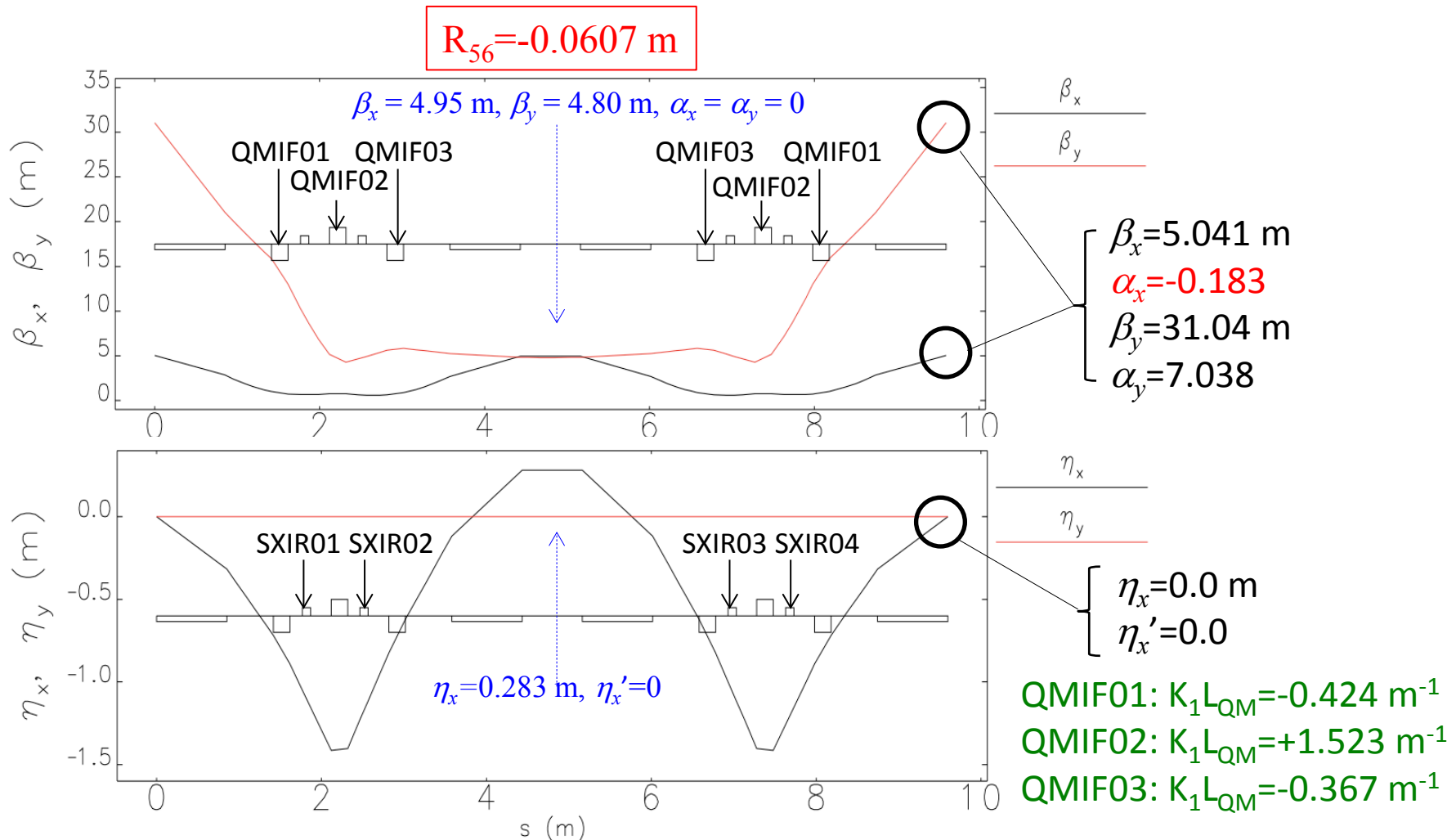
バンチ圧縮シミュレーション結果

* 六極電磁石の長さ $L_{SX}=10\text{cm}$

	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* $K_2 L_{SX}$ [m ⁻²]	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	-1.49, -3.33 -2.10, -2.22	16.46	0.466	-1.16	-0.12
SX1 ON	65.74	0.00516	1.60, 1.35	-10.64	16.47	0.433	-6.44	1.83
SX2 ON	66.40	0.00517	1.59, 1.16	-8.46	16.58	0.396	-11.33	0.18
SX3 ON	74.43	0.00506	1.95, 1.20	-11.22	16.50	0.466	8.55	-2.17
SX4 ON	67.42	0.00503	1.55, 1.19	-8.02	16.36	0.497	9.42	-0.13
SX1&3 ON	61.36	0.00516	1.18, 1.25	-6.98, -3.88	16.53	0.431	-1.27	0.45
SX2&4 ON	60.94	0.00514	1.13, 1.15	-4.24, -4.01	16.51	0.434	-0.96	0.03
SX1&2 ON	65.31	0.00513	1.50, 1.26	-6.24, -3.47	16.40	0.445	-8.43	1.15
SX2&3 ON	62.17	0.00513	1.27, 1.15	-6.06, -3.15	16.49	0.439	-5.71	-0.48
SX3&4 ON	68.45	0.00502	1.65, 1.19	-5.43, -4.10	16.32	0.513	8.95	-1.12
SX1&4 ON	62.62	0.00517	1.32, 1.23	-6.94, -2.82	16.55	0.424	-0.88	1.15

予算とエミッタンス維持等の観点から、六極電磁石はSX2&SX4の組み合わせを選択する。

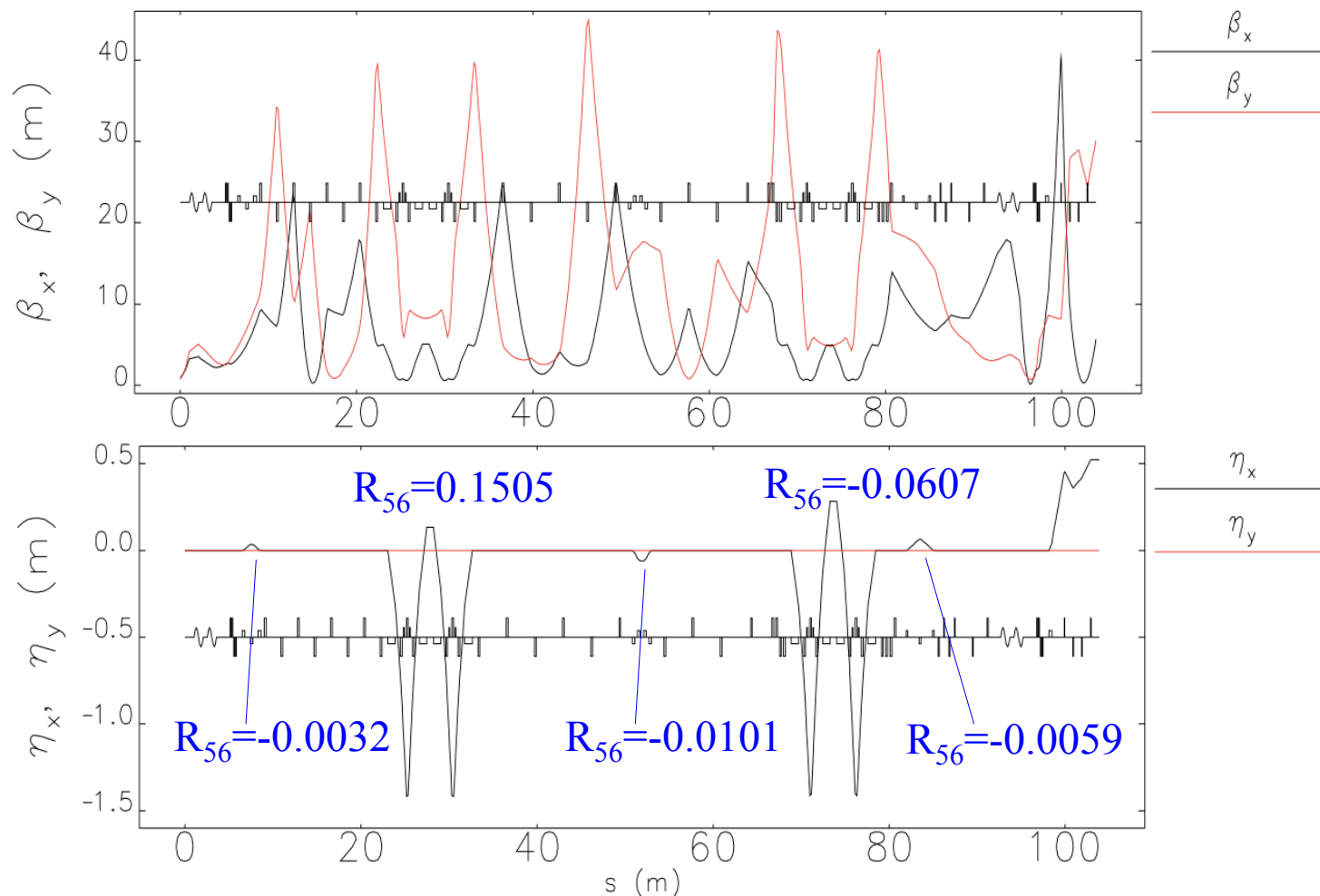
第2アーチ部オプティクス (バンチ復元)



第1アーチ部入口の α_x を変えてバンチ圧縮オプティクスを設計した。
 第1アーチ、シケイン、運動量の差による R_{56} を考慮して第2アーチの R_{56} 値を設定した。

バンチ圧縮・復元オプティクス

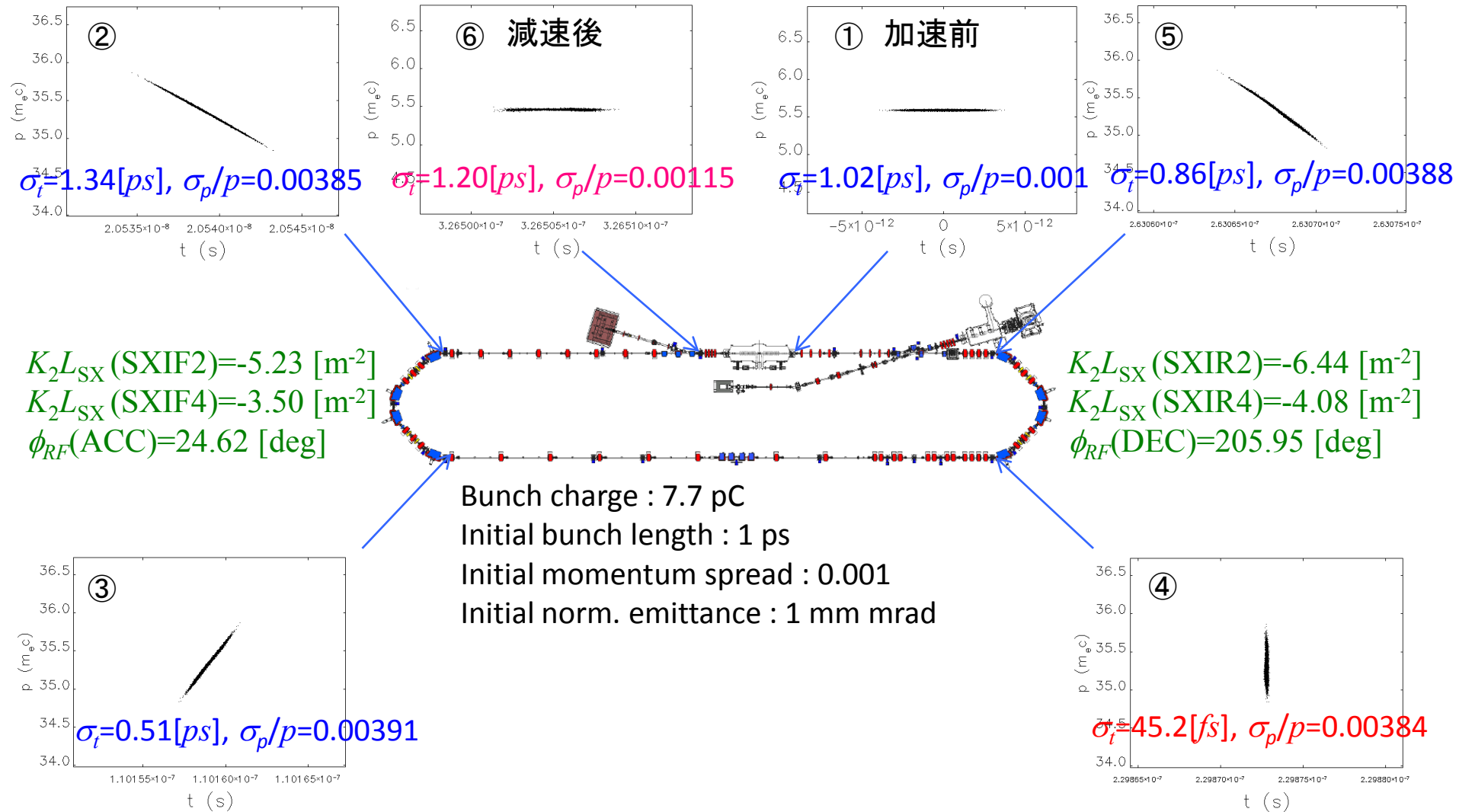
アーク部六極電磁石各2台使用(SXIF2&4, SXIR2&4)、初期バンチ長1ps



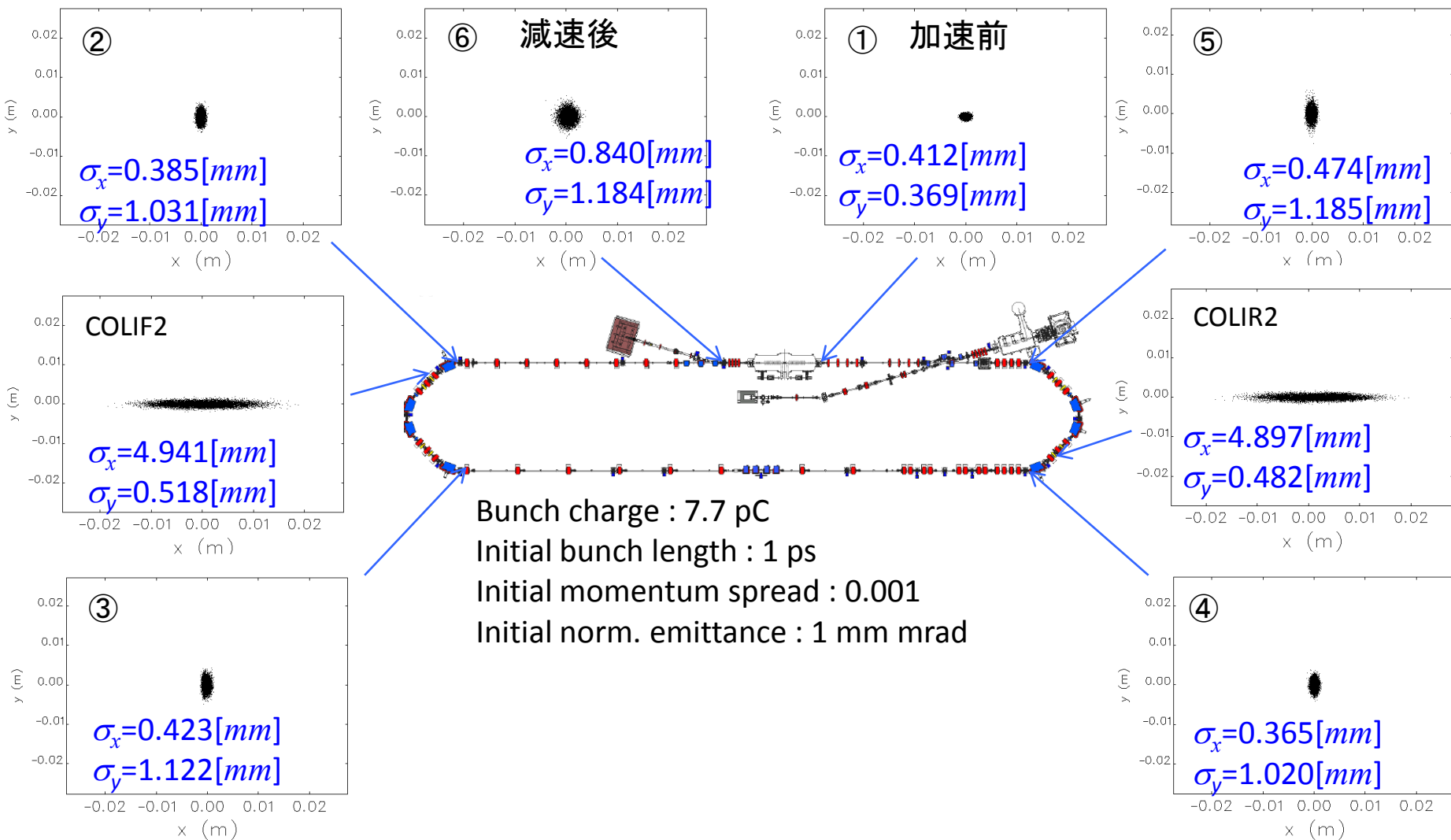
入射エネルギー: 2.9 MeV, 初期値: $\beta_x = 0.948$ m, $\alpha_x = -0.477$, $\beta_y = 0.760$ m, $\alpha_y = -0.683$
加速電圧: 8.549 MV/cavity, 加速/減速位相: 約 $25^\circ / 205^\circ$ (バンチ圧縮・復元で最適化)

バンチ圧縮・復元 (SX2&4 ON, 1ps)

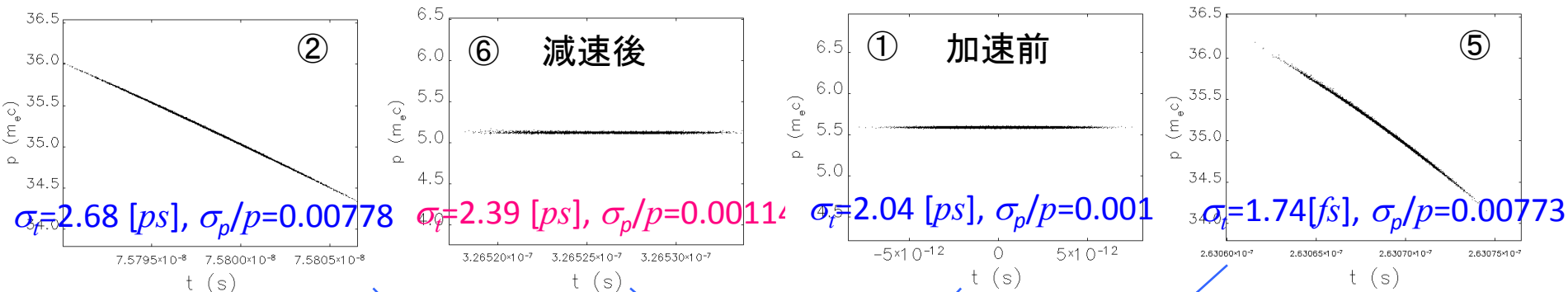
- (1) 第2アーク入口でバンチ長を最小にするように、第1アークの六極電磁石強度とRF加速位相を最適化。
 (2) 減速空洞出口で運動量幅を最小にするように、第2アークの六極電磁石強度とRF減速位相を最適化。



ビームサイズ (SX2&4 ON, 1ps)



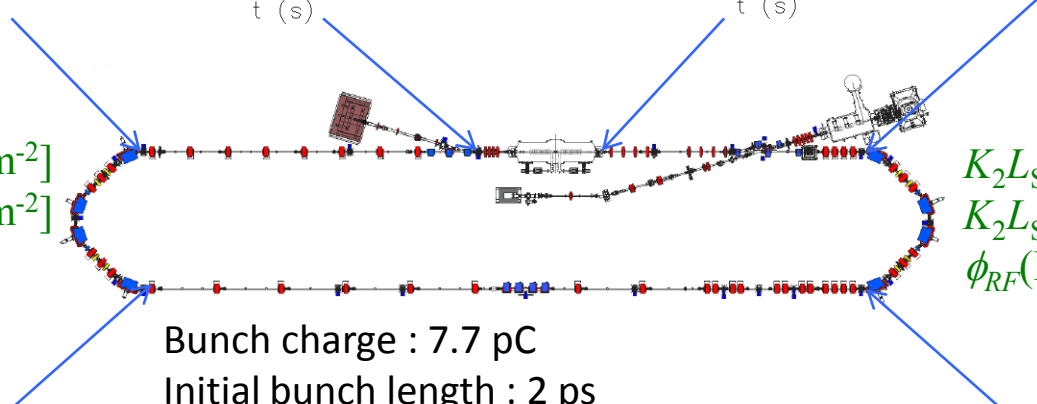
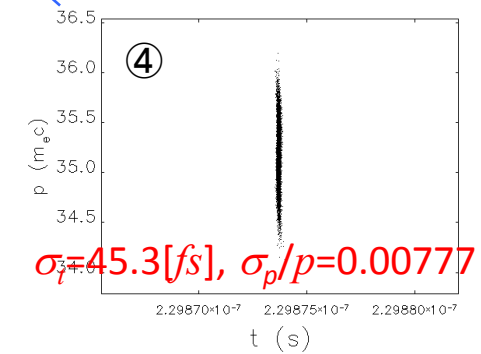
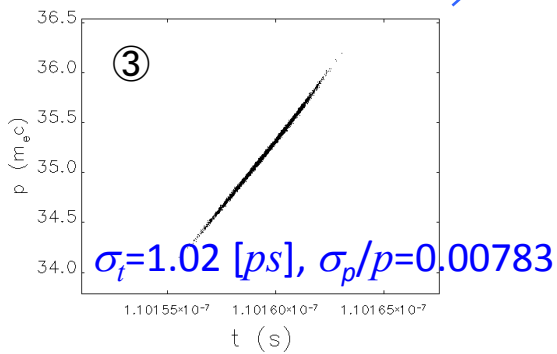
バンチ圧縮・復元 (SX2&4 ON, 2ps)



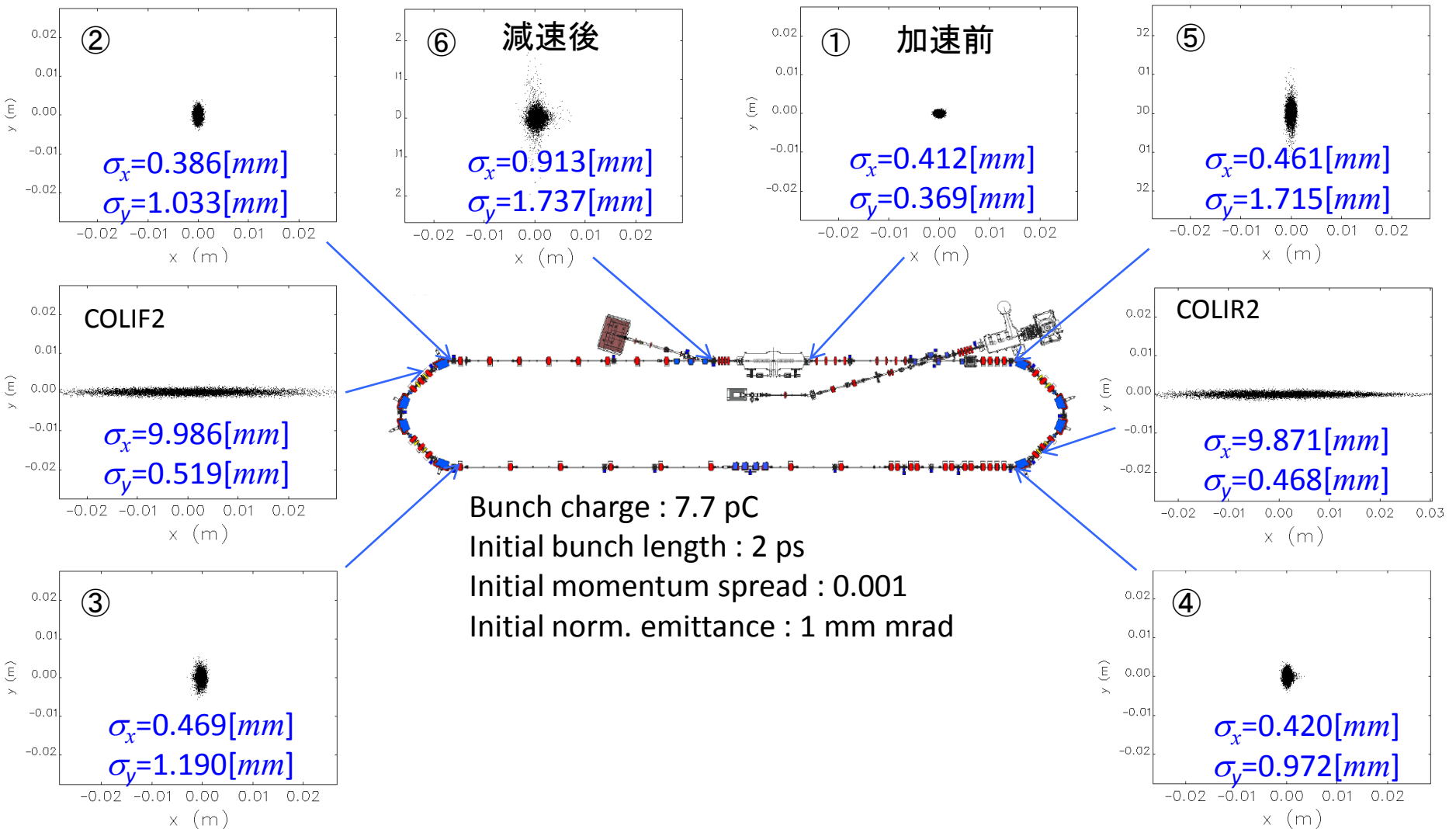
$K_2 L_{SX} (SXIF2) = -5.22 [m^{-2}]$
 $K_2 L_{SX} (SXIF4) = -3.51 [m^{-2}]$
 $\phi_{RF} (ACC) = 25.18 [deg]$

$K_2 L_{SX} (SXIR2) = -5.66 [m^{-2}]$
 $K_2 L_{SX} (SXIR4) = -4.63 [m^{-2}]$
 $\phi_{RF} (DEC) = 205.13 [deg]$

Bunch charge : 7.7 pC
 Initial bunch length : 2 ps
 Initial momentum spread : 0.001
 Initial norm. emittance : 1 mm mrad



ビームサイズ (SX2&4 ON, 2ps)



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 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_2L_{SX} [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 1195	0.00384 0.00115	1.16, 1.20 1.15, 1.19	-5.23, -3.50 -6.44, -4.08	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	-8.98 -10.97	25.11 205.30	-0.048 -0.515	-12.0 -14.4	0.22 -0.22
SX2&4 ON Q \rightarrow 0.77 pC	42.7 1242	0.00390 0.00103	1.03, 1.20 1.01, 1.19	-5.13, -3.57 -6.27, -4.08	25.07 204.84	0.066 -0.309	-2.64 -3.63	0.08 -3e-3
SX2 ON Q \rightarrow 0.77 pC	48.9 1252	0.00391 0.00104	1.25, 1.19 1.04, 1.27	-8.86 -10.92	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	-5.22, -3.51 -5.66, -4.63	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	-8.98 -11.65	25.33 204.80	-0.041 -1.062	-12.0 -15.2	0.22 0.28

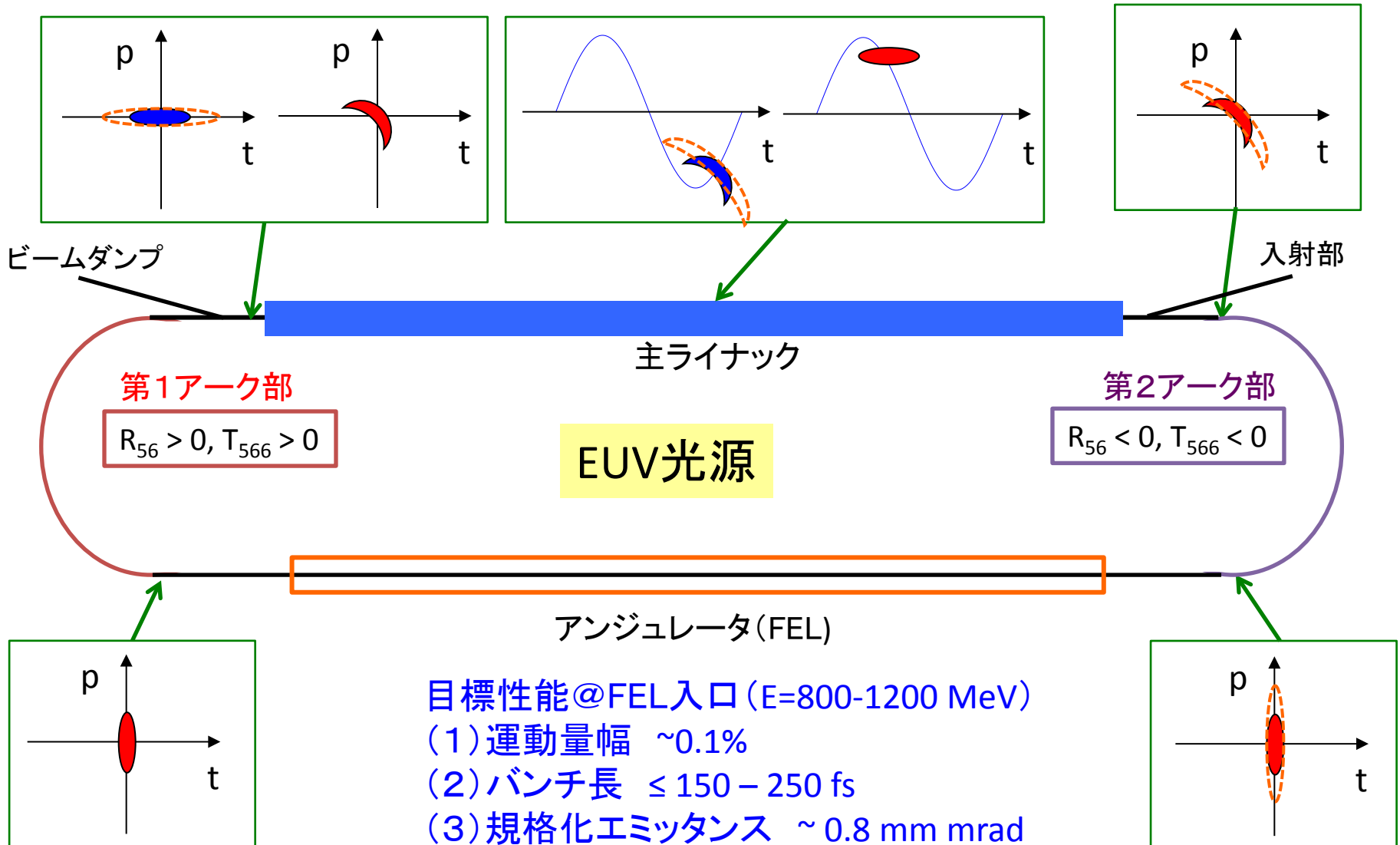
SX2&4の組み合わせでは、バンチ圧縮 & バンチ復元（運動量幅圧縮）は3つの場合全てで達成できたのみでは、バンチ復元の失敗や2次の分散やエミッタンスの顕著な増加が見られた。

まとめ (THz-CSR)

- THz-CSR発生実験に向けて、 $R_{56}=0.15\text{m}, -0.06\text{m}$ の第1,2アーク部オプティクスを設計してバンチ圧縮・復元シミュレーションを行った。
- シミュレーションの結果、六極電磁石を第1、2アーク部に2台ずつ組み合わせを考慮して配置すると、ビーム品質を大きく損なうことなく100fs以下のバンチ圧縮と復元を行うことができた。
- 今後、cERLの運転を通じてバンチ圧縮・復元を実証する。

EUV光源への応用

EUV光源におけるバンチ圧縮・復元



アーク部の要件

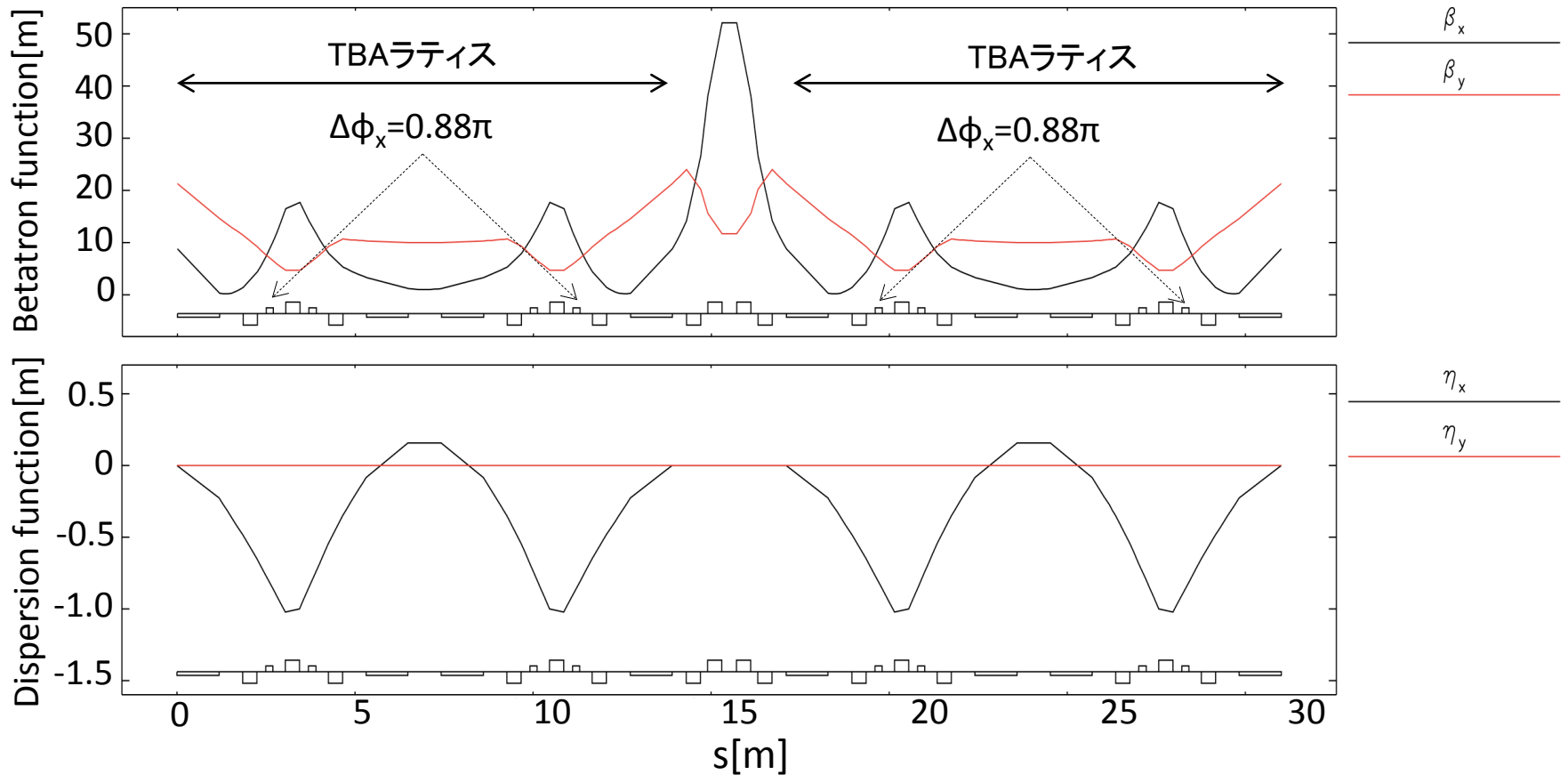
- 1) Off-crest加速後の運動量幅を0.1%程度に抑えるために、正負の広い範囲で R_{56} を変えられるオプティクスである。また、 T_{566} も広く変えられる。
$$\sigma_p / p \approx c\sigma_{ti} / R_{56} \approx 0.001 \rightarrow R_{56} \approx 0.3m @ \sigma_{ti} = 1ps \quad (R_{56} \approx 0.6m @ \sigma_{ti} = 2ps)$$
- 2) 六極電磁石励磁によるエミッタンス等のビーム品質の劣化が小さい(六極電磁石間のベータatron位相等の選択)。
- 3) アーク部偏向電磁石でのコヒーレント放射による運動量幅やエミッタンスの劣化が小さい(曲率半径等の選択)。
- 4) FEL通過後の電子ビームの運動量幅劣化(全運動量幅2.6%程度?)で深刻なビームロスを起こさない(最大分散関数やアパーチャ等の選択)。
- 5) エネルギー800MeV(あるいはそれ以上)に対応した電磁石の仕様(磁場、磁極長、磁極ギャップ、ボア径等)である。コンパクトである。

→ 2セル/3セルTBAラティスの設計検討

2セルTBAオプティクス設計(1)

2セルTBAラティスのオプティクス例 ($R_{56}=0.0\text{m}$)

$\rho_B=3\text{ m}$, $\theta_B=\pi/8\text{ rad}$, $L_B=1.17\text{ m}$, $L_{QM}=0.4\text{ m}$, $L_{SX}=0.2\text{ m}$



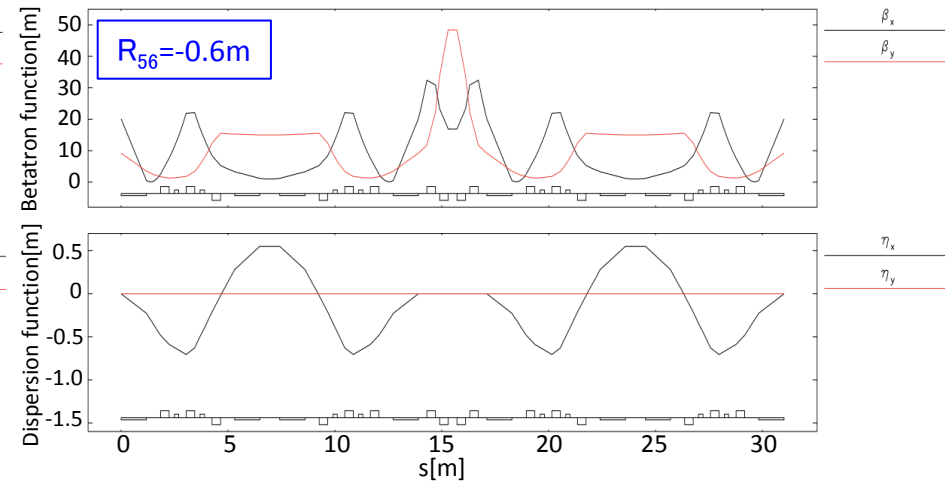
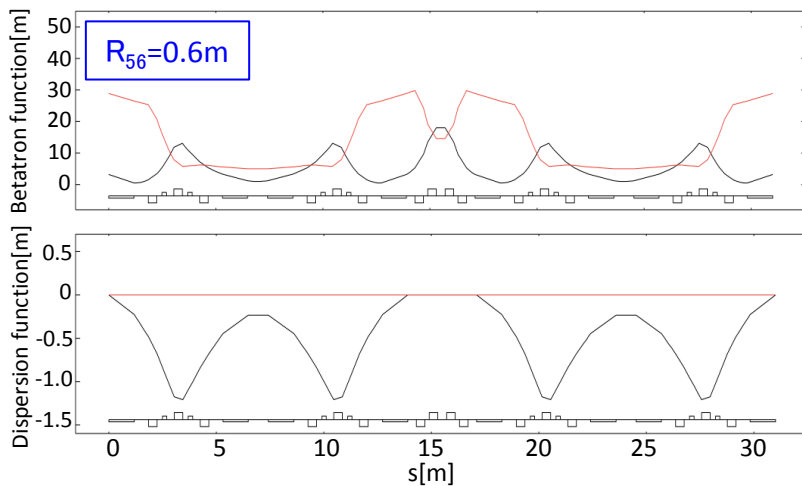
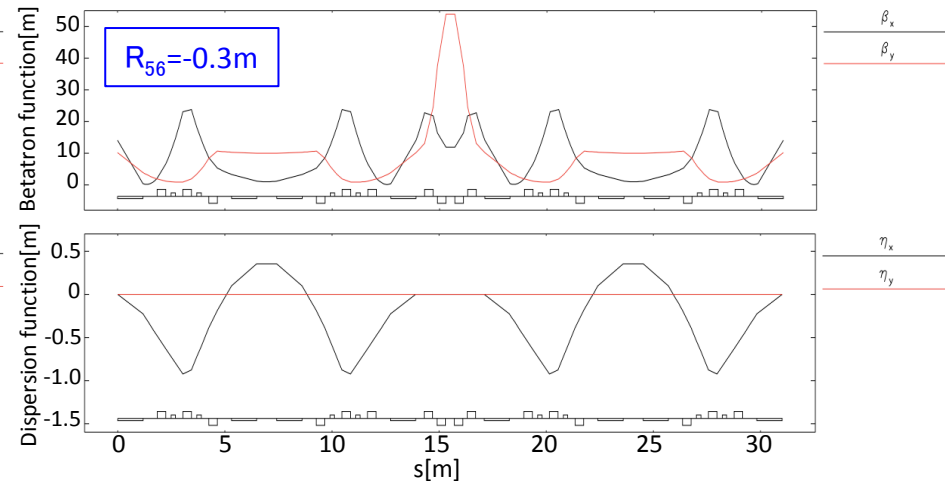
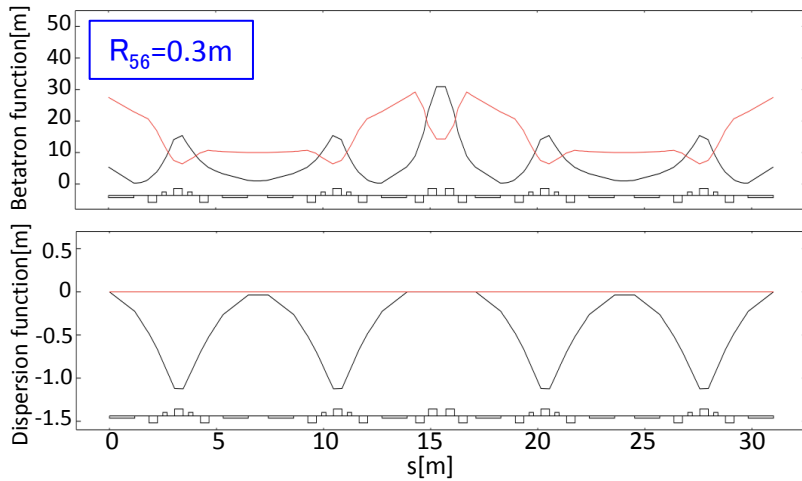
アーク部の幅: 21.3 m

2セルTBAオプティクス設計(2)

2セルTBAラティスのオプティクス例

バンチ圧縮

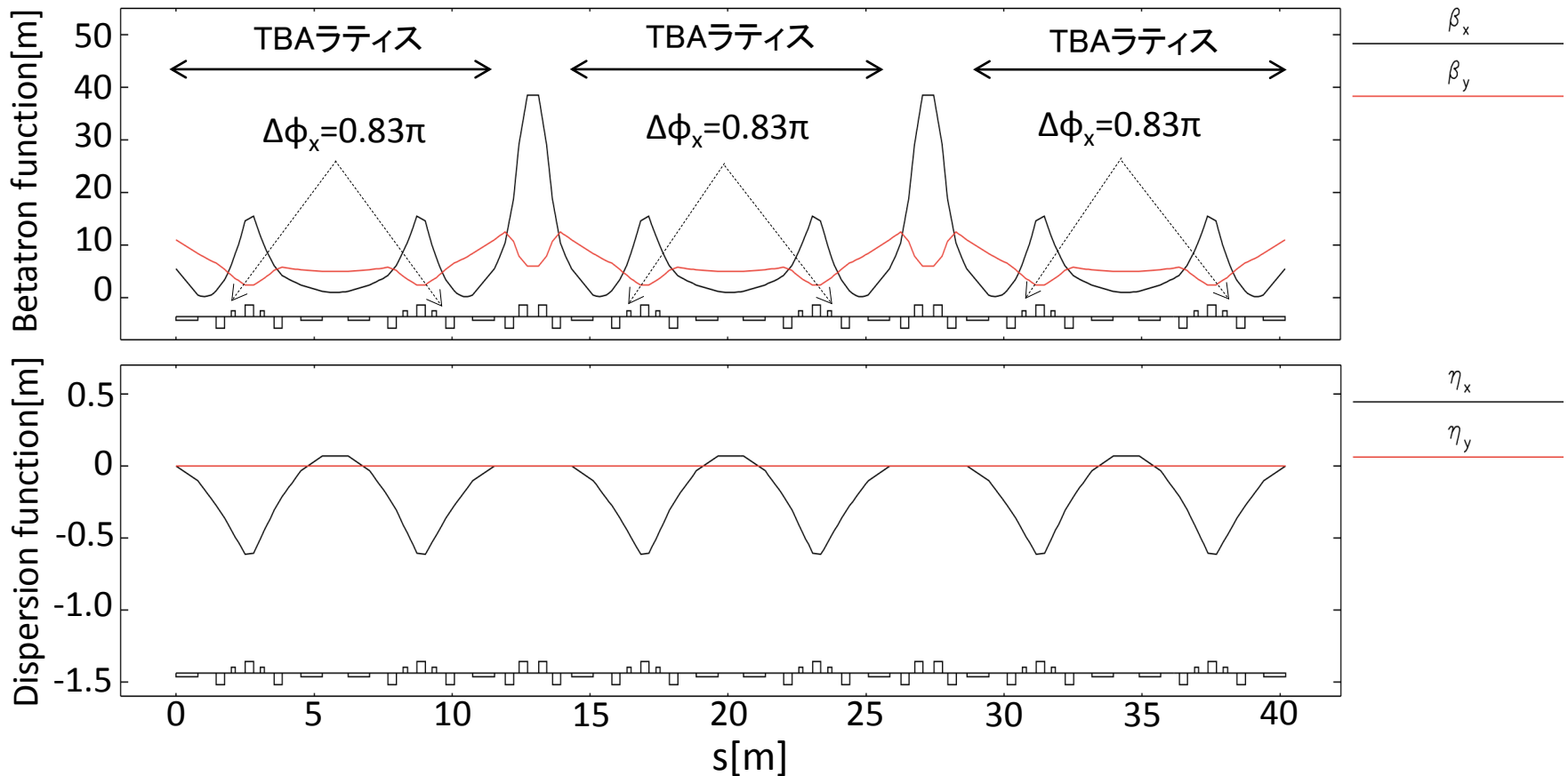
バンチ復元



3セルTBAオプティクス設計(1)

3セルTBAラティスのオプティクス例 ($R_{56}=0.0\text{m}$)

$\rho_B=3\text{ m}$, $\theta_B=\pi/12\text{ rad}$, $L_B=0.785\text{ m}$, $L_{QM}=0.3\text{ m}$, $L_{SX}=0.15\text{ m}$



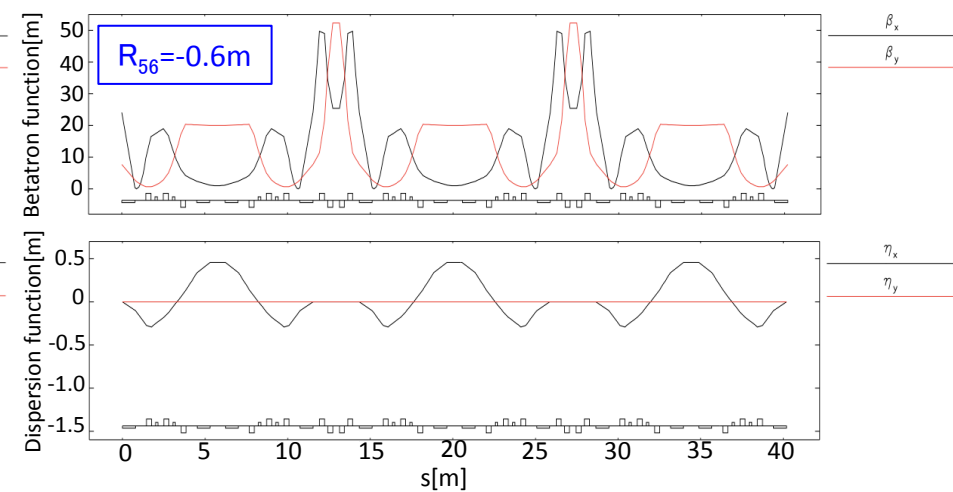
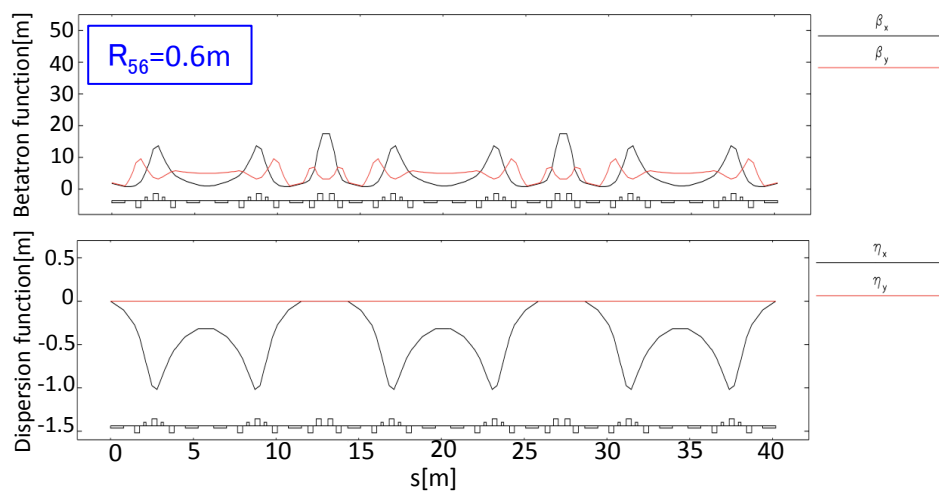
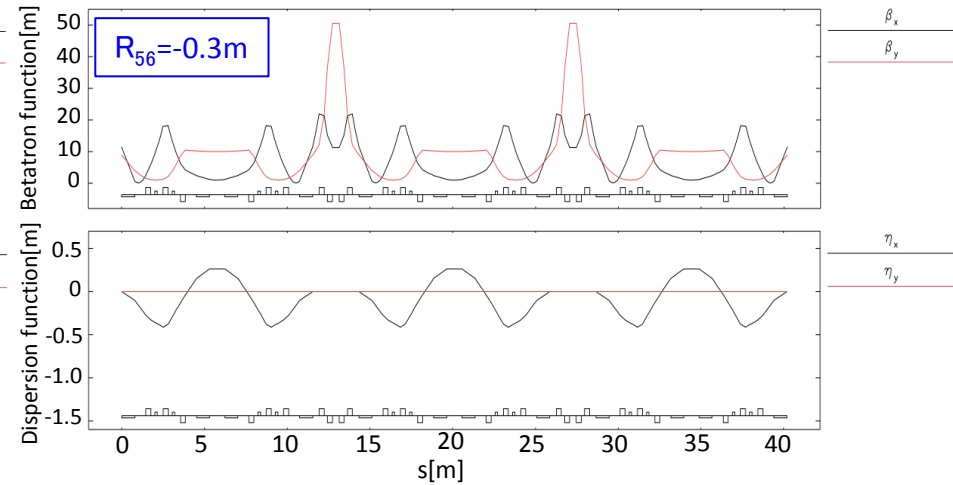
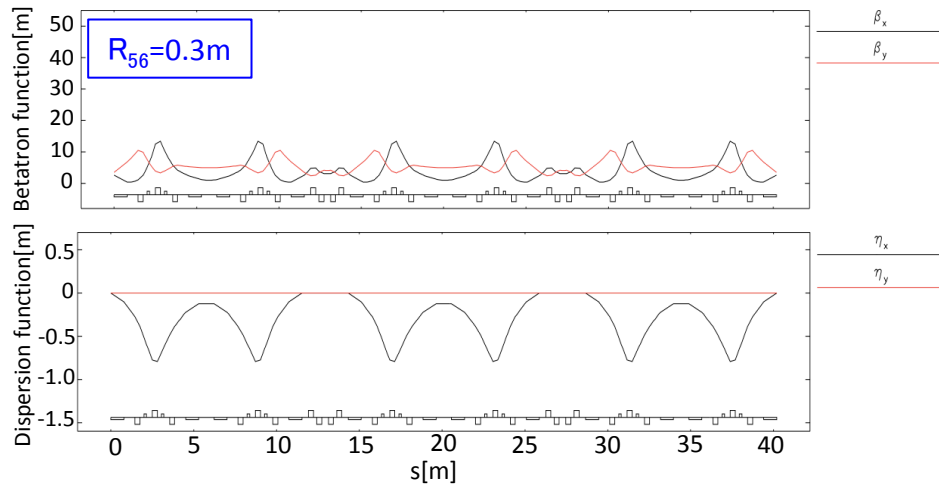
アーク部の幅: 27.1 m

3セルTBAオプティクスの設計(2)

3セルTBAラティスのオプティクス例

バンチ圧縮

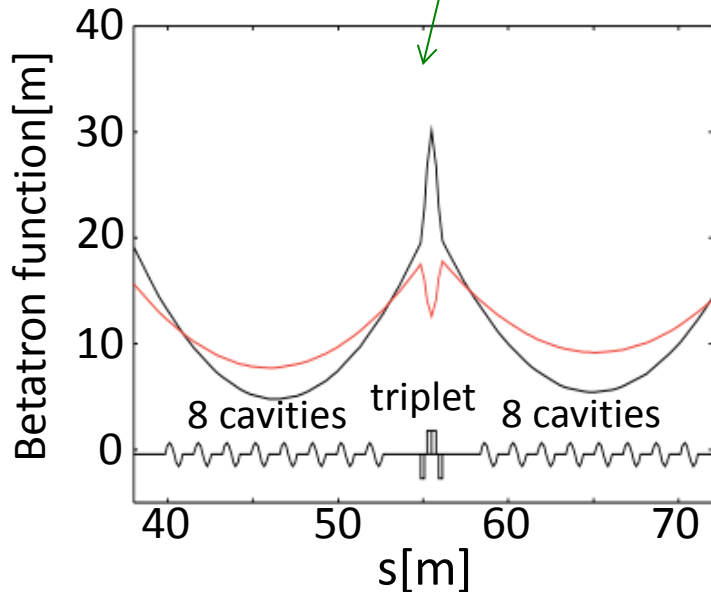
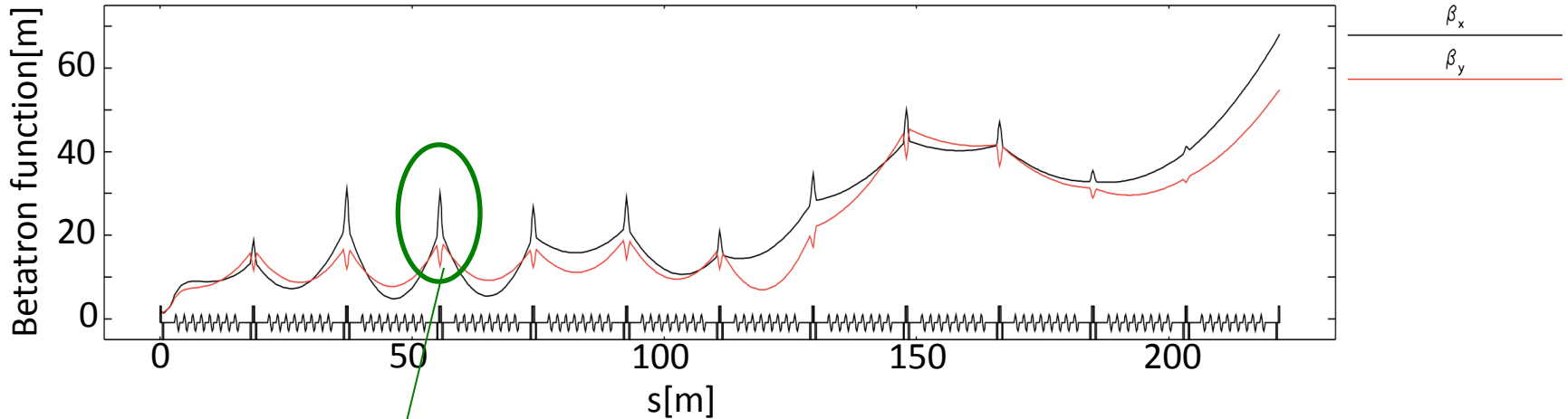
バンチ復元



主ライナックのオプティクス設計

1.2GeVライナックの例

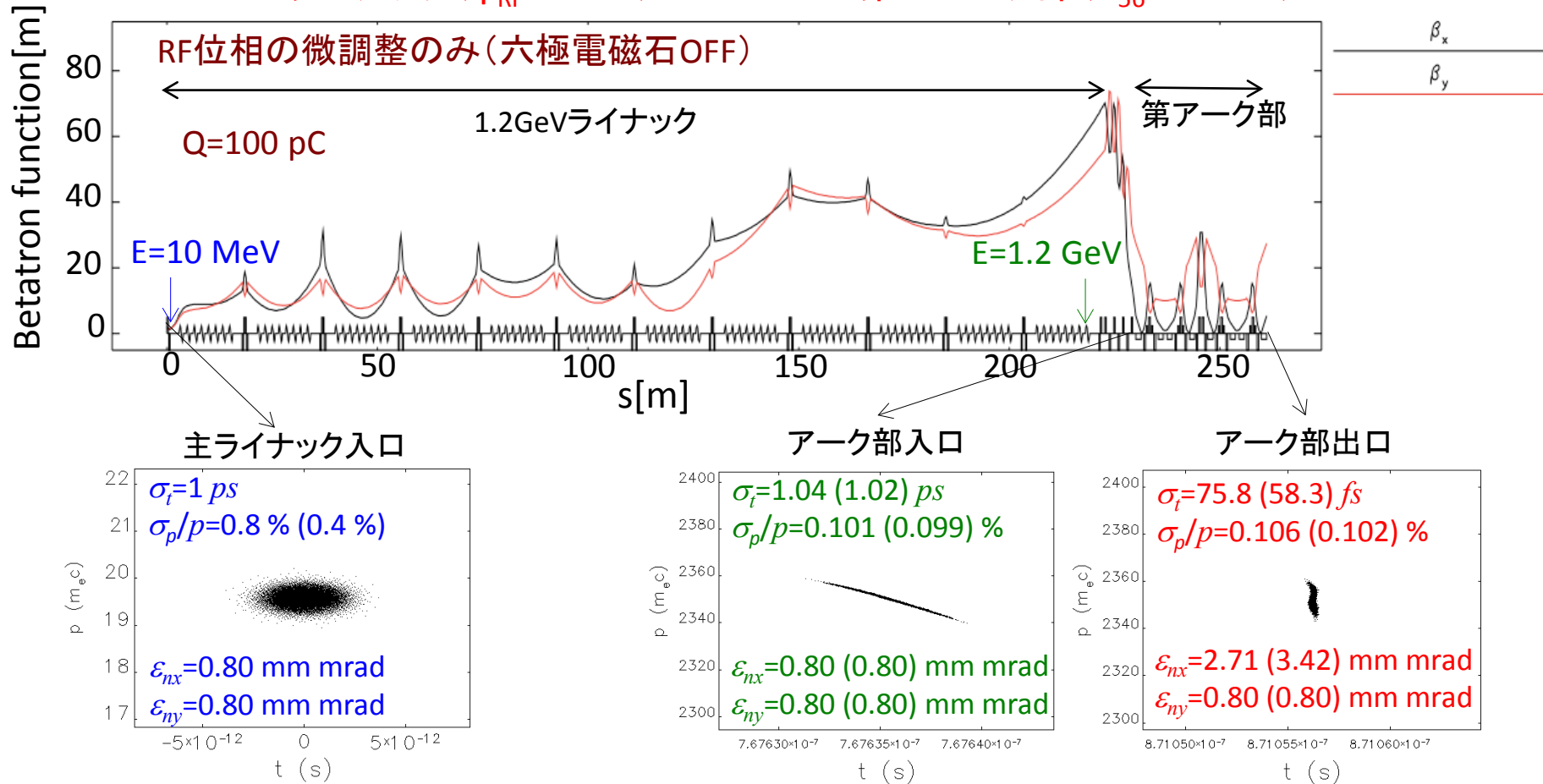
Calculated by M. Shimada



- 主超伝導空洞
 - 8空洞/クライオモジュール
 - 加速勾配 12.5 MV/m
 - 12クライオモジュール
- オプティクス
 - トリプレット四極電磁石による収束
 - 空洞収束力の取り込み
 - ベータatron関数の抑制 (HOM BBU対策)
 - 加速・減速オプティクスの対称性

バンチ圧縮 ($R_{56}=0.30\text{m}$) (1)

1.2GeVライナック ($\phi_{RF}\approx 6.4^\circ$) + 2セルTBA第1アーク部 ($R_{56}=0.30\text{ m}$)

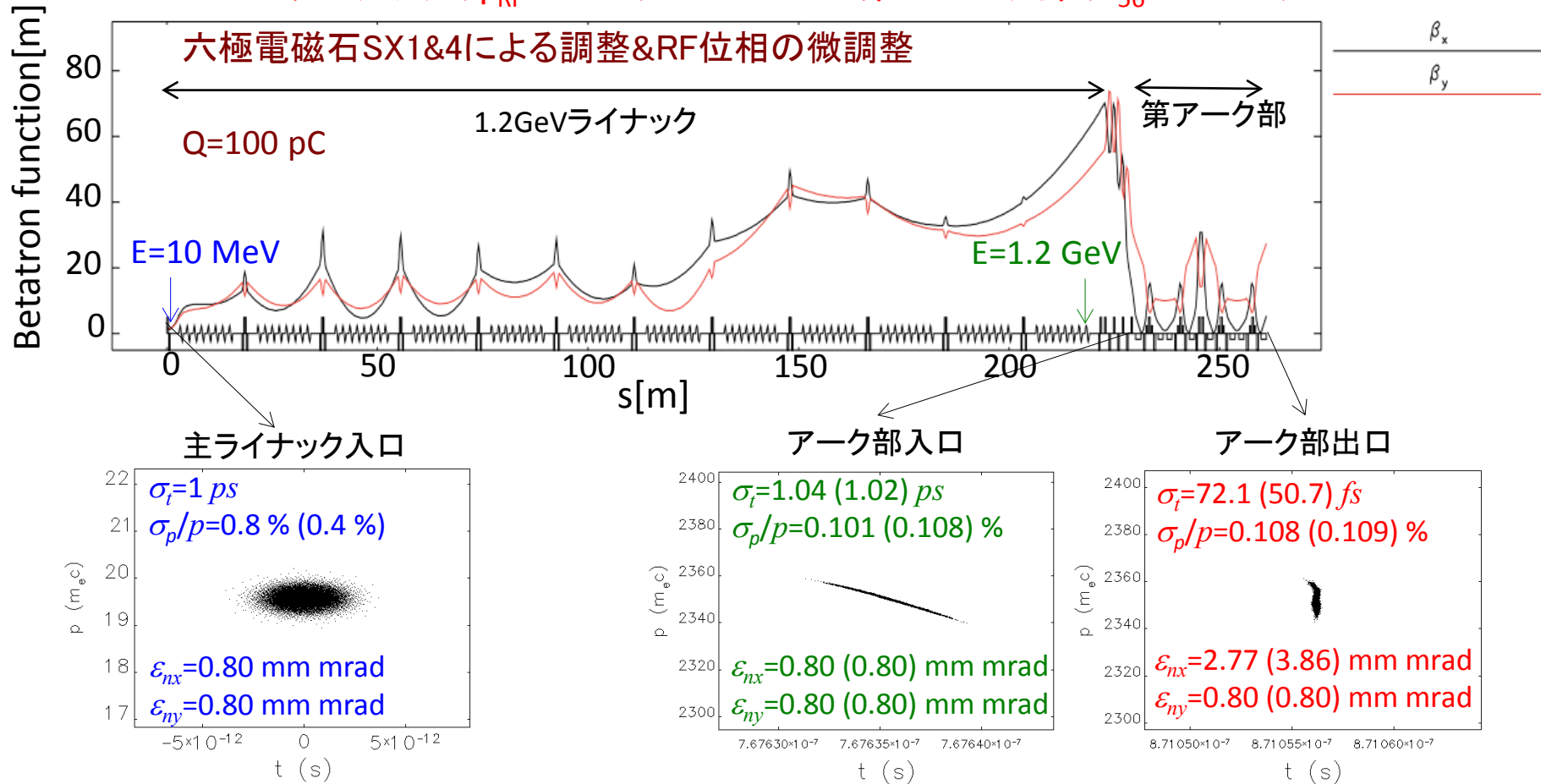


CSRによるエミッタンス増大が顕著である。

初期運動量幅が小さくなると、バンチ長は短くなるが、エミッタンスが増大した。

バンチ圧縮 ($R_{56}=0.30\text{m}$) (2)

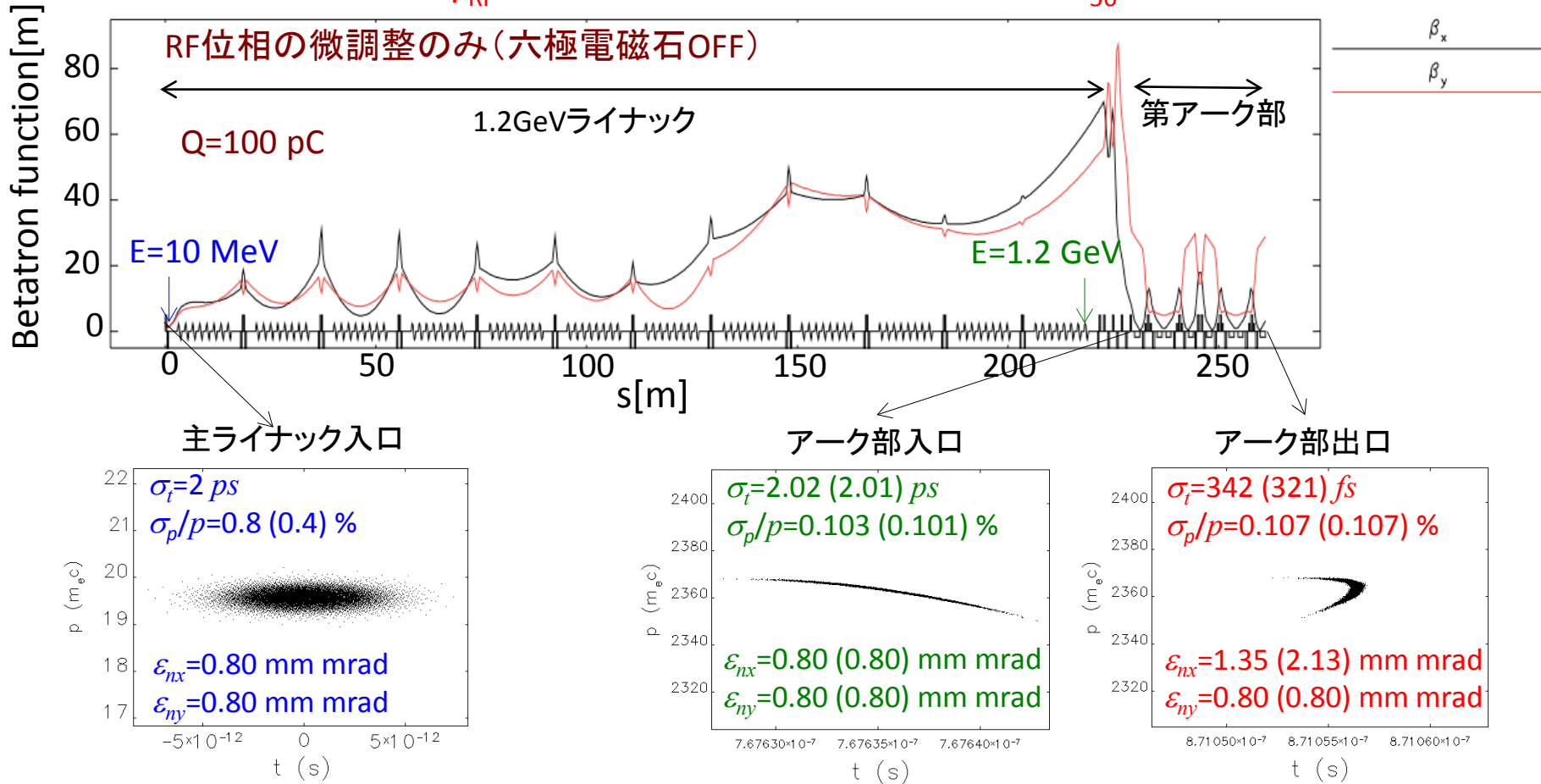
1.2GeVライナック ($\phi_{RF}\approx 6.4^\circ$) + 2セルTBA第1アーケ部 ($R_{56}=0.30\text{ m}$)



六極電磁石による調整でバンチ長が少しだけ短くなる(エミッタンスはやや増大する)。

バンチ圧縮 ($R_{56}=0.60\text{m}$) (1)

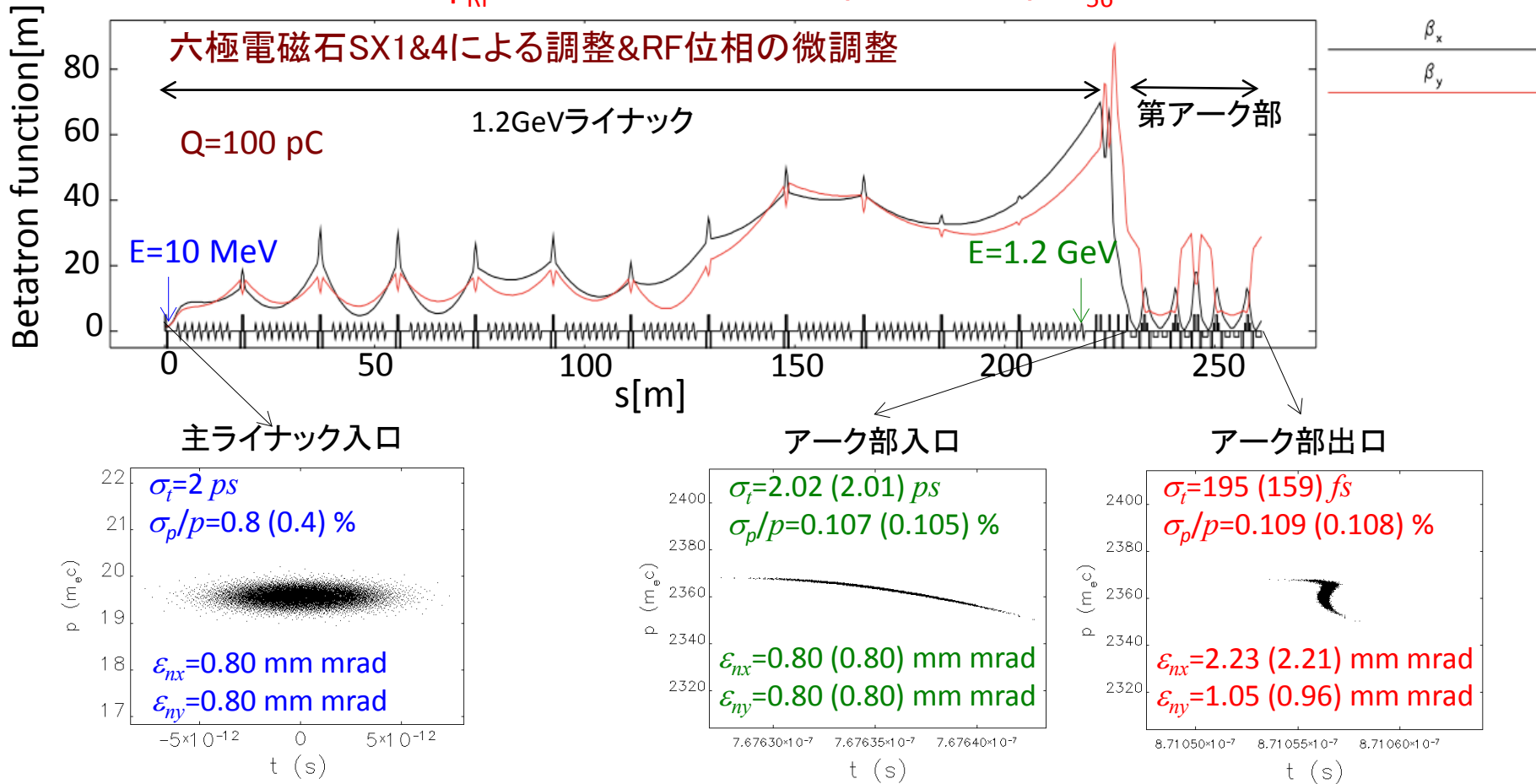
1.2GeVライナック ($\phi_{\text{RF}} \approx 3.3^\circ$) + 2セルTBA第1アーク部 ($R_{56}=0.60\text{ m}$)



初期バンチ長を2psに長くすると、バンチ長は長くなる(エミッタンスは減少する)。

バンチ圧縮 ($R_{56}=0.60\text{m}$) (2)

1.2GeVライナック ($\phi_{RF}\approx 3.5^\circ$) + 2セルTBA第1アーケ部 ($R_{56}=0.60\text{ m}$)



六極電磁石による調整でバンチ長を短くできる(エミッタンスは増大する)。

まとめ (EUV光源)

- EUV光源でのバンチ圧縮・復元のために、アーク部用TBA2セル/3セルラティス ($R_{56}=0, \pm 0.3, \pm 0.6 \text{ m}$) を設計した。また、1200 MeV主ライナックのオプティクスと組み合わせて、バンチ圧縮シミュレーションを試みた。
- 最大分散関数 (0.5-1.0 m) と水平アパーチャ (35-40 mm) を仮定すると、設計した第2アーク部の許容エネルギー幅 (片幅) は4%以上と期待される。ただし、ハードウェアの仕様と整合性をチェックしていく必要がある。
- 今後は、アーク部と主ライナックの設計とバンチ圧縮シミュレーションを引き続き進め、FELの観点からバンチ圧縮後のビーム性能を最適化する。