

EUV光源の設計検討

2015年11月10日

ERLビームダイナミクスWGミーティング

高エネルギー加速器研究機構

中村 典雄

EUV光源設計グループ



(KEK) 河田洋、小林幸則、古屋貴章、芳賀開一
羽入勇、原田健太郎、本田融、本田洋介、加古永治
神谷幸秀、加藤龍好、道園真一郎、宮島司、仲井浩孝
中村典雄、帯名崇、生出勝宣、阪井寛志、坂中章悟
島田美帆、土屋公央、梅森健成、山本将博
Si Chen、許斐太郎、久保毅幸



(JAEA) 羽島良一、西森信行

EUV光源の設計検討は(株)東芝と共同で行った。

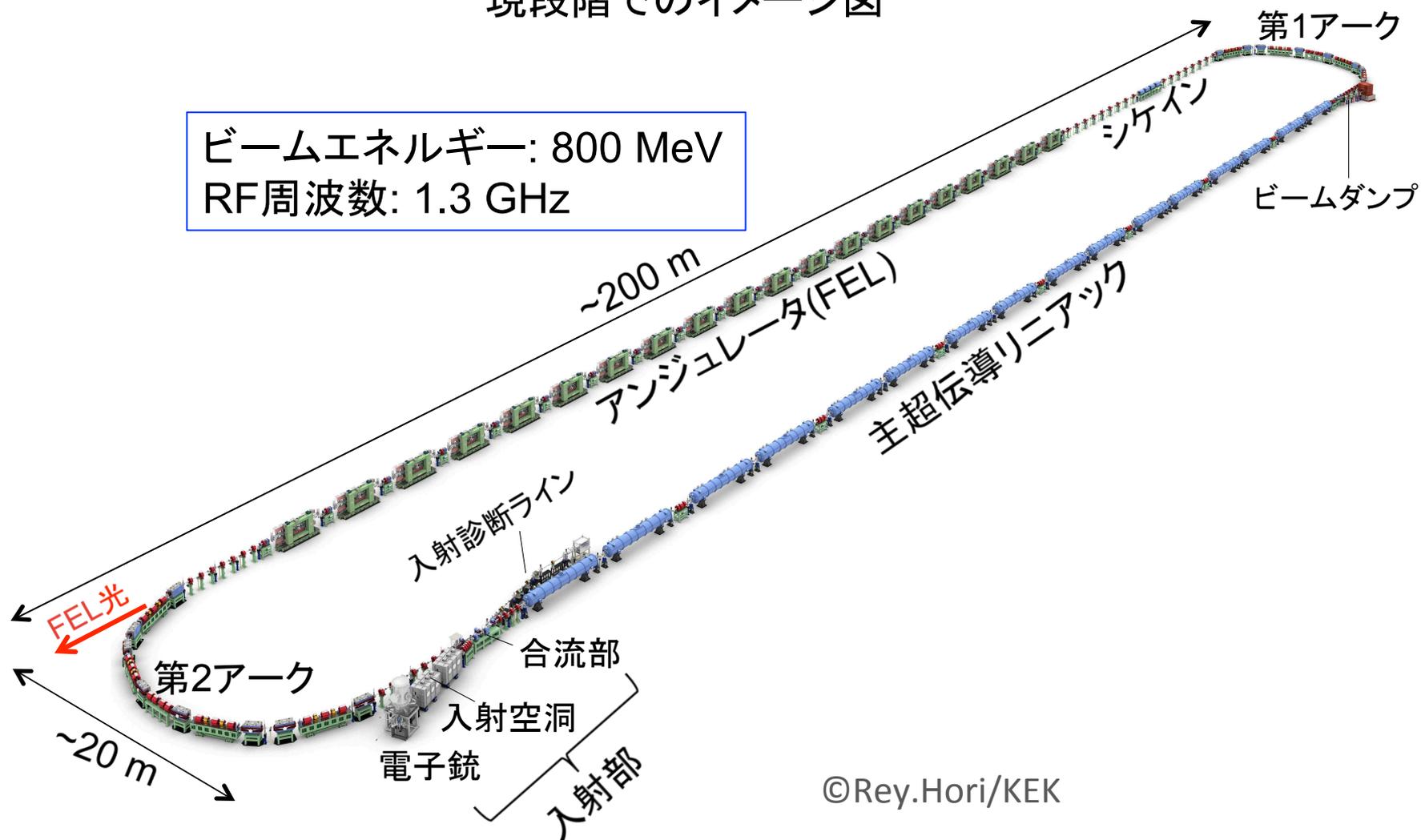
グループメンバーは適宜、追加・変更する。

設計方針(当面)

- 目標 : 10kW FEL @ 13.5 nm
- 800 MeV エネルギー回収型リニアック(ERL)
- 比較的短期に準備可能な技術の利用
- cERL資産(設計、技術、運転経験等)の活用

EUV光源イメージ図

現段階でのイメージ図



FELパラメータ

SASE-FEL出力(飽和時)

$$P_{sat} \approx \rho_{FEL} P_{electron}, \quad P_{electron} = EI_{av} \quad E, I_{av} : \text{電子ビームのエネルギーと平均電流}$$

ピアースパラメータ

$$\rho_{FEL} = \left[\frac{1}{16} \frac{I_p}{I_A} \frac{K^2 [JJ]^2 \lambda_u^2}{\gamma^3 \sigma_x \sigma_y (2\pi)^2} \right]^{1/3} \quad \begin{array}{l} I_p : \text{ピーク電流} \quad \sigma_{x,y} : \text{電子ビームサイズ} \\ \gamma : \text{ローレンツ因子} \end{array}$$

$$I_p = \frac{Q_b}{\sqrt{2\pi\sigma_t}}, \quad I_A = 17kA, \quad \sigma_x = \sqrt{\varepsilon_{nx}\beta_x/\gamma}, \quad \sigma_y = \sqrt{\gamma\varepsilon_{ny}\beta_y/\gamma}, \quad K = \frac{eB_0\lambda_u}{2\pi mc}$$

$\varepsilon_{nx,ny}$: 規格化エミッタンス $\beta_{x,y}$: ベータatron関数

B_0, λ_u : アンジュレータのピーク磁場と磁場周期

$[JJ] = J_0(\xi) - J_1(\xi) (\leq 1), \quad \xi = K^2 / (4 + 2K^2)$ 直線偏光アンジュレータの場合

$[JJ] = 1$ 円偏光アンジュレータの場合

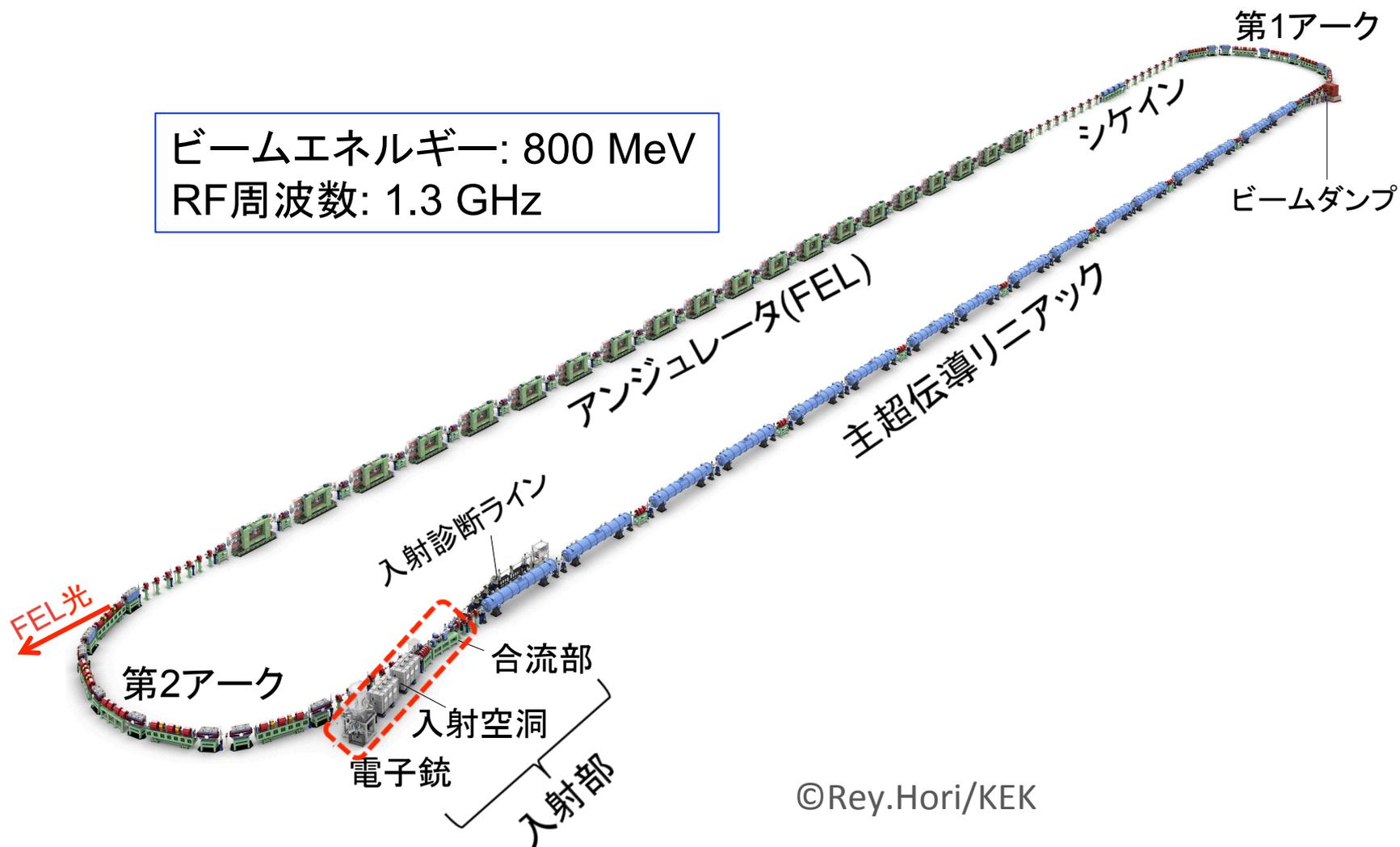
光の波長とアンジュレータパラメータの関係(FEL共鳴条件)

$$\lambda = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} \right)$$

高いFEL出力には高いピーク電流と低エミッタンスが重要になる。

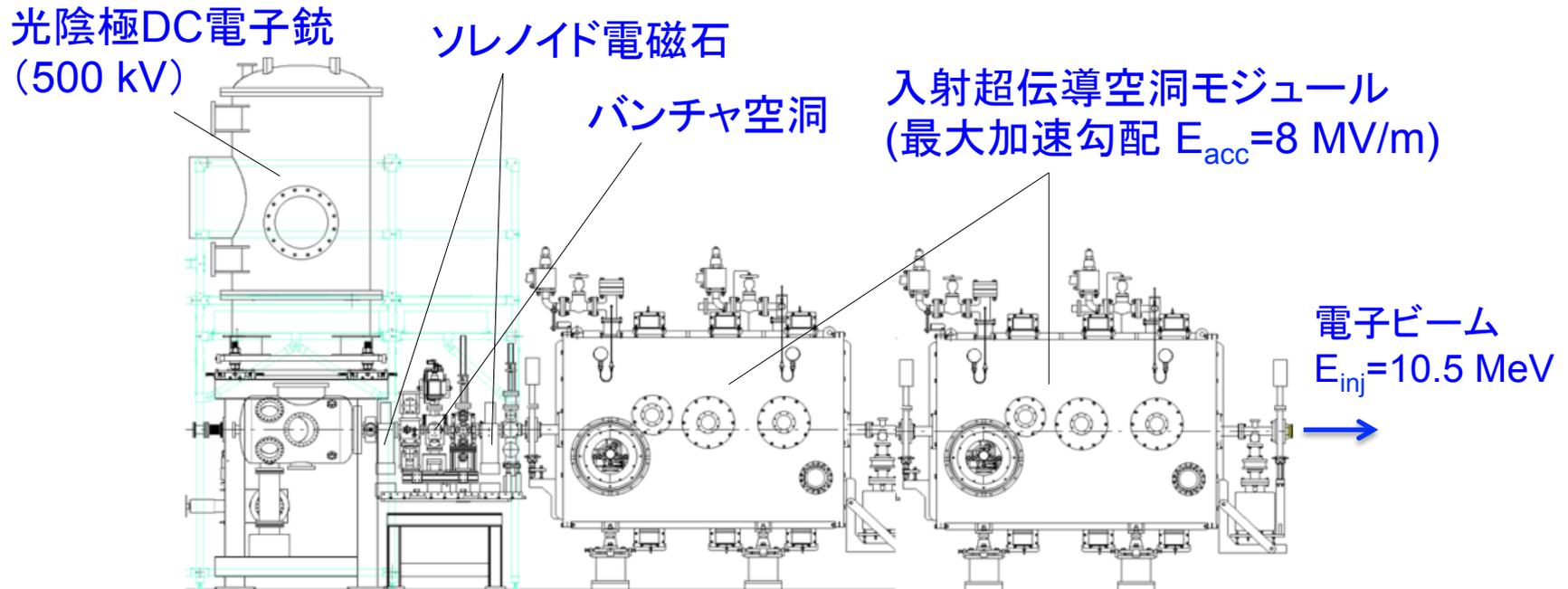
入射部

ビームエネルギー: 800 MeV
RF周波数: 1.3 GHz



入射部設計

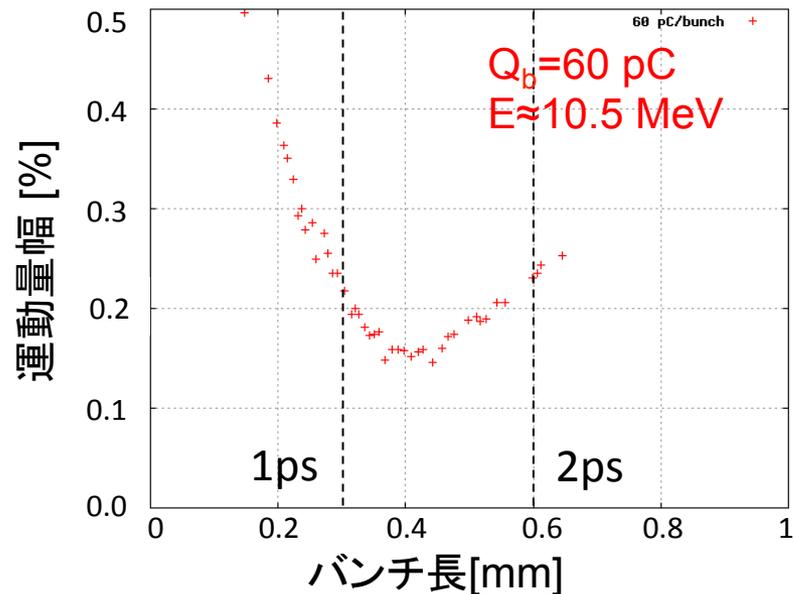
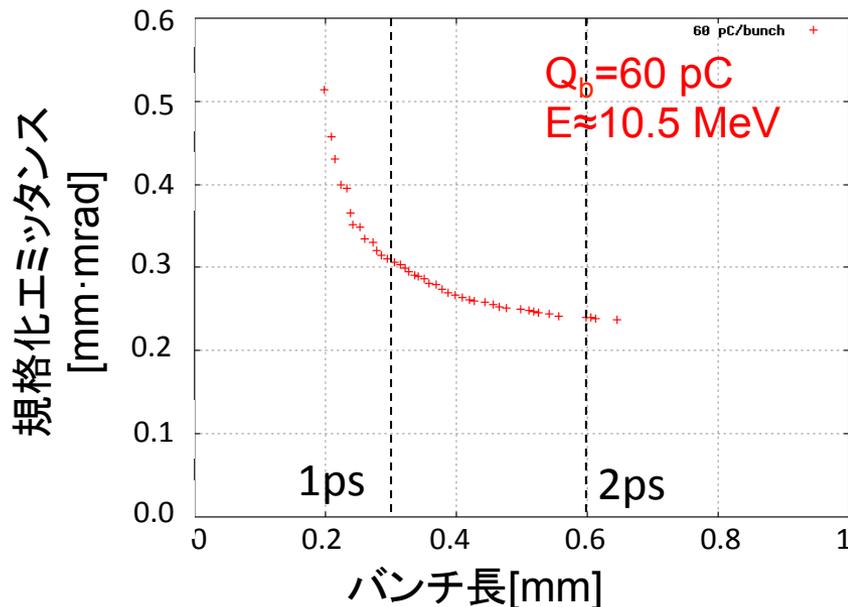
- 光陰極DC電子銃：開発中のcERL第2電子銃と同一構造
- 入射超伝導空洞：cERLモジュール×2(2セル空洞×6台)
- ソレノイド電磁石2台、常伝導バンチャ空洞1台(cERLと同じ構成)
- 新しい合流部＋入射・合流部マッチング (設計中)



EUV光源の入射部 (合流部は含まれない)

入射パラメータ

入射部ビームパラメータの最適化(入射空洞出口)



GPTを使ったシミュレーション(宮島氏計算)

上の結果に合流部(設計中)によるエミッタンス増加を仮定 → 粗い見積り@合流部出口

バンチ電荷: $Q_b = 60 \text{ pC}$

1 ps : 0.30 mm mrad, 0.25 % → $\epsilon_n = 0.60 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$, $\sigma_p/p = 0.25 \text{ \%}$ @ 合流部出口

2 ps : 0.25 mm mrad, 0.25 % → $\epsilon_n = 0.55 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$, $\sigma_p/p = 0.25 \text{ \%}$ @ 合流部出口

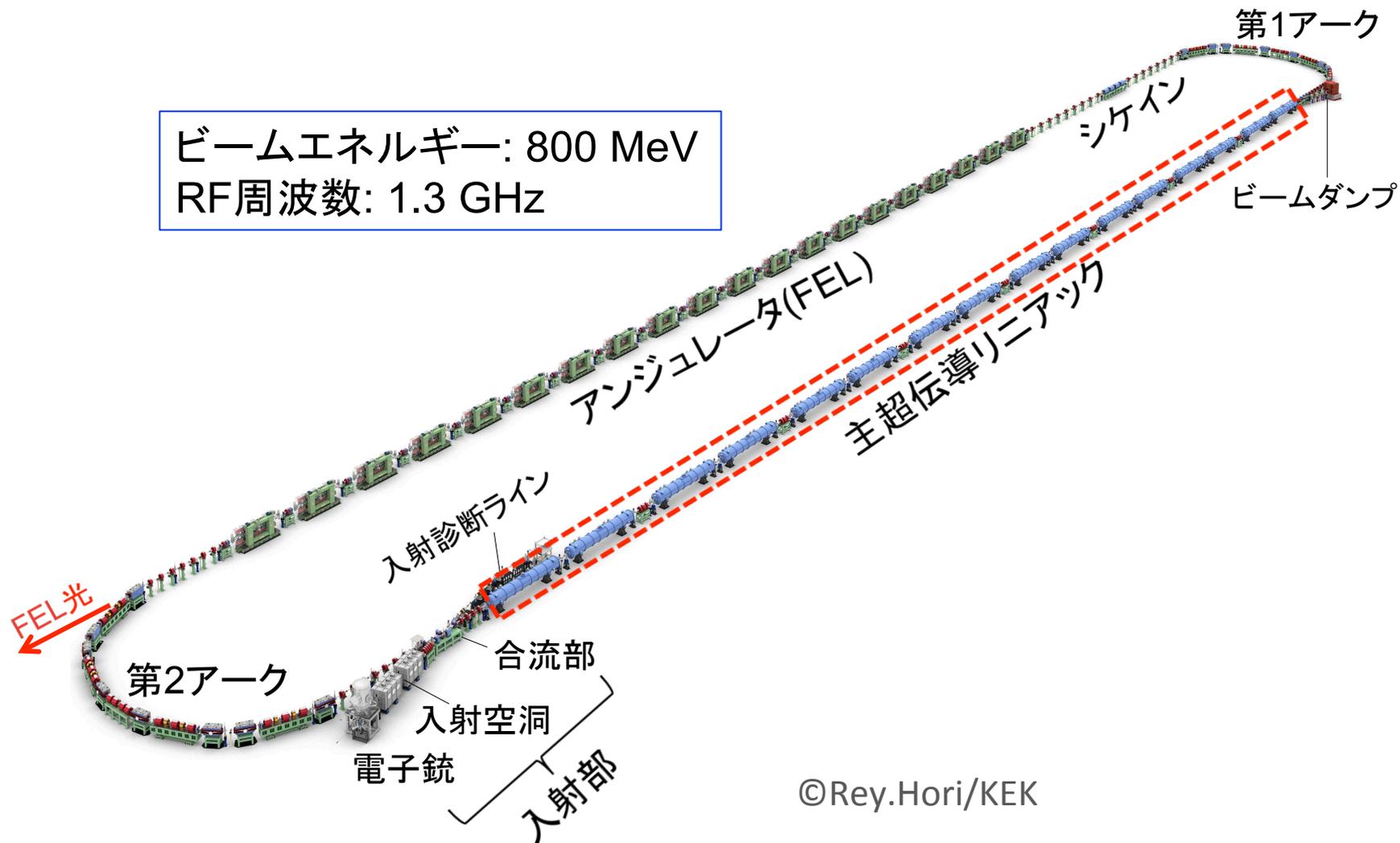
($Q_b = 100 \text{ pC}$ での計算結果も有り)



これらの値を主空洞入口での初期パラメータ値として下流でのシミュレーションで使用した。

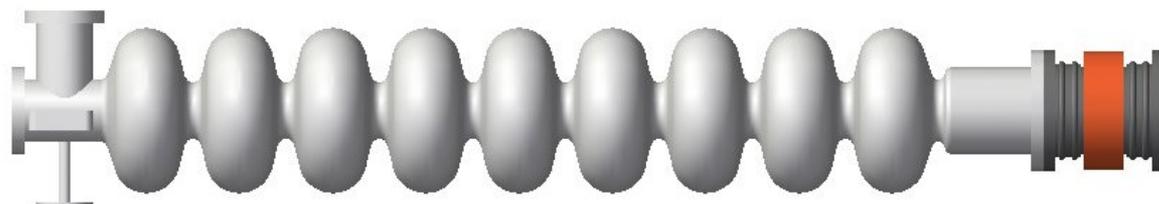
主リニアック

ビームエネルギー: 800 MeV
RF周波数: 1.3 GHz



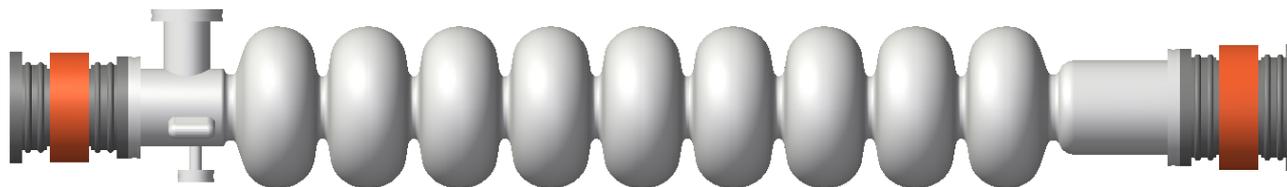
主超伝導加速空洞の設計

EUV光源空洞 – TESLA型 9セル空洞 + 広いビームパイプ(108φ)



詳細設計中。反対側にも吸収体を付ける可能性有り。

cERL主空洞 – ~8.5 MV/m運転(加速勾配増加 → フィールドエミッション増大)



加速モードのパラメータ

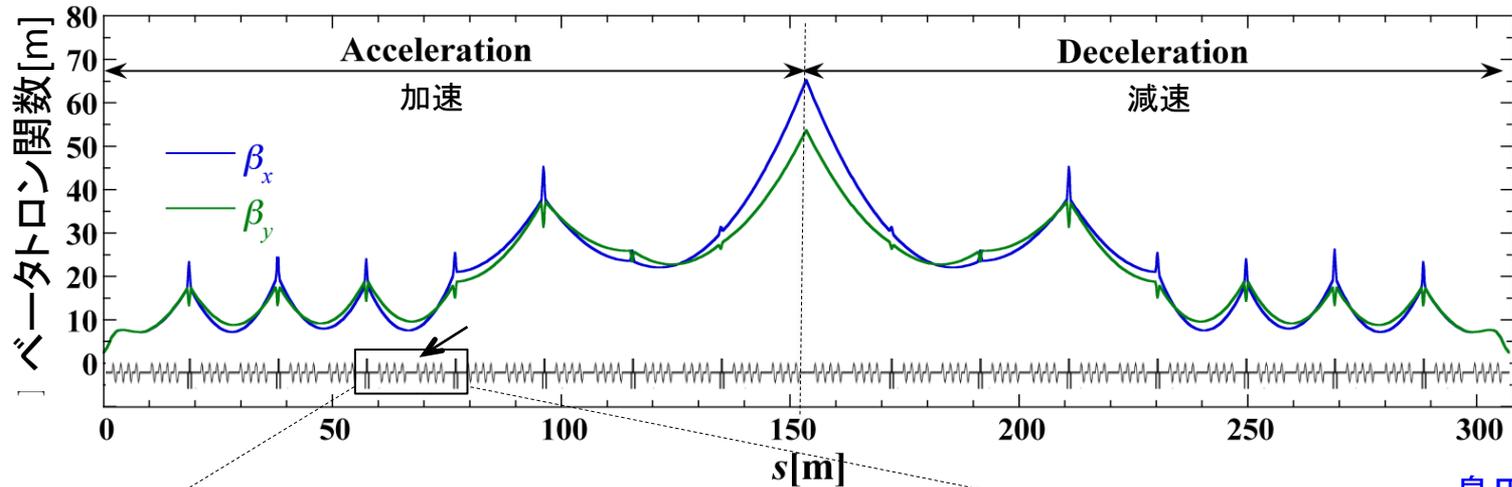
超伝導空洞グループデータ提供

	cERL	EUV		cERL	EUV
RF周波数	1300 MHz	1300 MHz	アイリス直径	80 mm	70 mm
R_{sh}/Q	897 Ω	1007 Ω	$Q_o \times R_s$	289 Ω	272 Ω
E_p/E_{acc}	3.0	2.0	H_p/E_{acc}	42.5 Oe/ (MV/m)	42.0 Oe/ (MV/m)

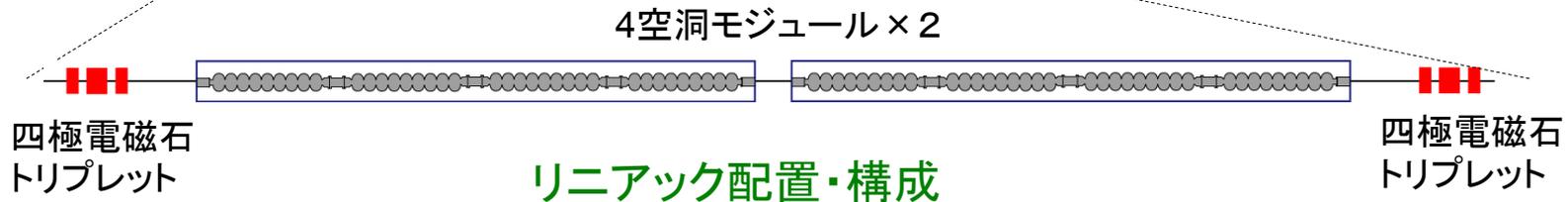
E_p/E_{acc} の緩和 → 加速勾配12.5 MV/mでの安定な運転を目指す。

主リニアックの設計

主リニアックのオプティクス設計



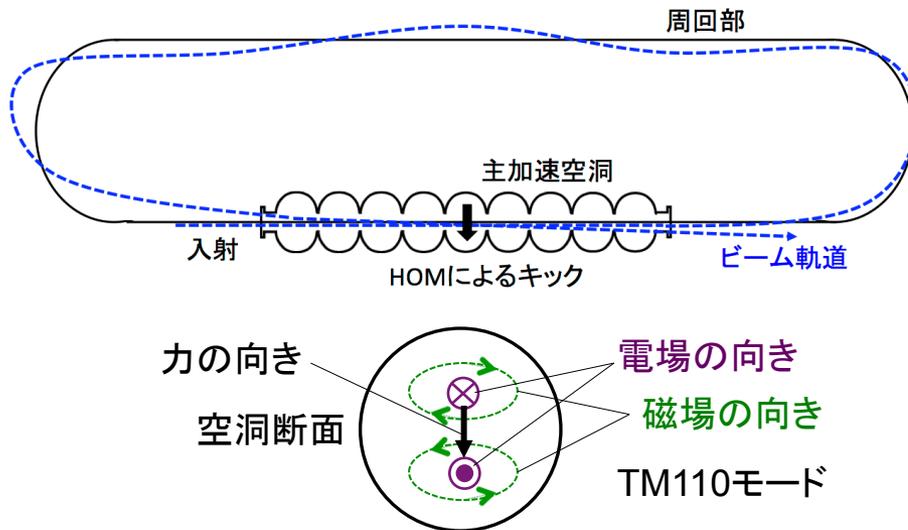
島田氏計算



- 空洞の加速勾配 $E_{acc} \approx 12.5$ MV/m
- 64空洞/16クライオモジュール (4空洞/1クライオモジュール)
- 2クライオモジュール毎に収束用四極電磁石トリプレットを設置
- 加速・減速で同じ電子ビーム光学系

空洞によるビーム不安定性 (HOM BBU)

HOM BBUの原理



HOM: 空洞の高次モード BBU: Beam Breakup

シミュレーションコード *bi* によるBBU閾値電流の評価

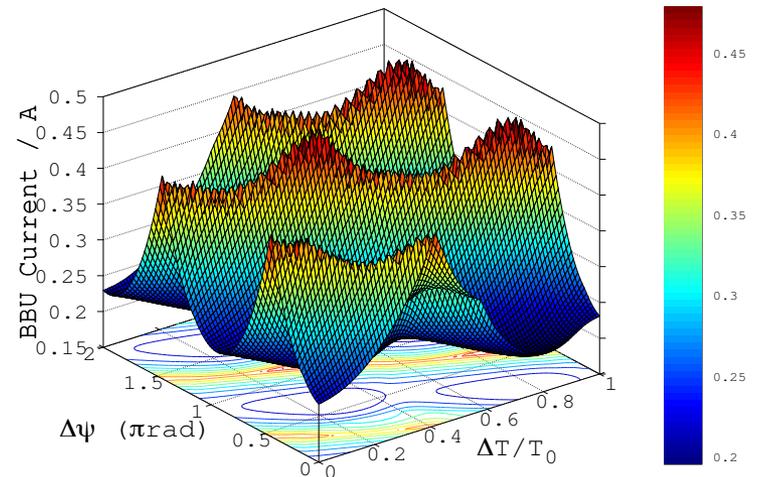
主リニアックの設計をもとにベータatron位相(0-2 π)と周回部の長さを1周期分スキャンして計算した。

最小閾値電流: 195 mA. 最大閾値電流: 478mA

Chen Si氏計算

EUV空洞の高次モード(HOM)パラメータ

f [GHz]	Q_e	R/Q [Ω/cm^2]	$(R/Q) Q_e/f$ [$\Omega/cm^2/GHz$]	ModeType
1.866	7732	6.43	26659	TM_{110} $6\pi/9$
1.874	11655	8.77	54526	TM_{110} $5\pi/9$
1.879	18360	1.95	19089	TM_{110} $4\pi/9$
2.575	4899	21.32	40557	TE_{121} $\pi/9$
3.082	33608	0.98	10676	TM_{121} $5\pi/9$



BBU閾値電流はEUV光源で使用する電流(数十mA以下)よりも高い。

ビームによる空洞の発熱

ビームによる発熱(非共振)

空洞のHOM吸収体での発熱量

$$P_{loss} = k_{loss} Q_b^2 f_b$$

k_{loss} : ロスパラメータ, Q_b : バンチ電荷
 f_b : バンチ周波数

ロスパラメータの評価

$$k_{loss} \sim 20 \text{ V/pC @ } 1 \text{ ps}$$

$$\sim 15 \text{ V/pC @ } 2 \text{ ps}$$

発熱量の見積り例

Bunch length @cavity	9.75mA x 2 60pC 162.5MHz	19.5mA x 2 60pC 325MHz
1 ps	23.4 W	46.8 W
2 ps	17.6 W	35.2 W

HOM吸収体の最大吸収熱量:

30 W (first target), 100 W (final goal)

ビームによる発熱(HOMとの共振)

モノポールHOM周波数とバンチ周波数整数倍の差

monopole f_{HOM} [MHz]	Bunch frequency f_b [MHz]						
	325	260	162.5	135.4	130	100	81.25
2393	207	207	118	44	53	7	45
2427	173	173	152	10	87	27	11
2442	158	158	158	5	102	42	5
2447	153	153	153	10	107	47	10
2452	148	148	148	15	112	52	15
2453	147	147	147	16	113	53	16
2459	141	141	141	22	119	59	22
3848	52	208	52	57	52	48	52
3851	49	211	49	60	49	51	49
3852	48	212	48	61	48	52	48
3853	47	213	47	62	47	53	47

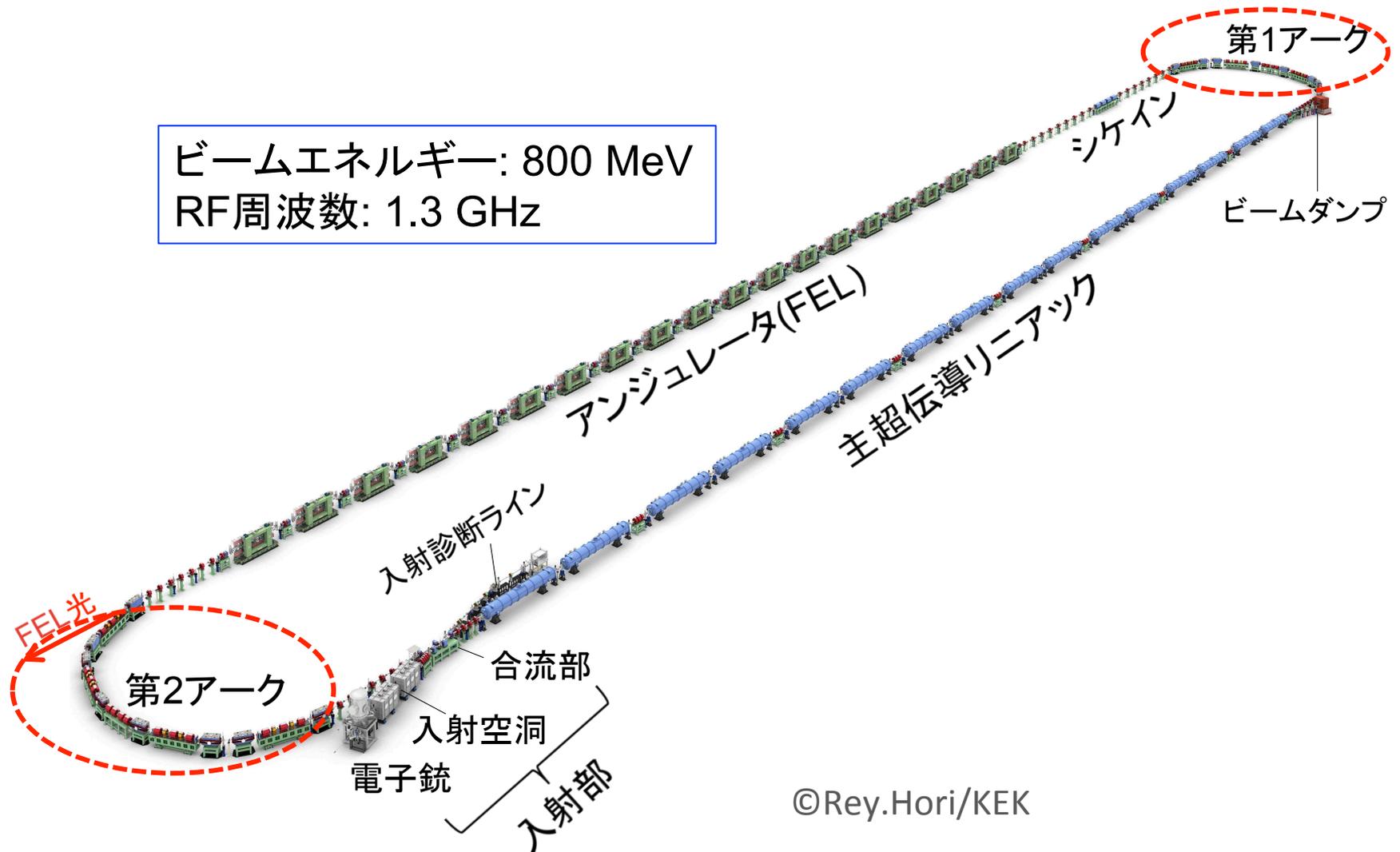
黄色 : 周波数差10 MHz以内

HOM吸収体の吸収可能な最大熱量はバンチ長、バンチ電荷、バンチ周波数に制限を与える。

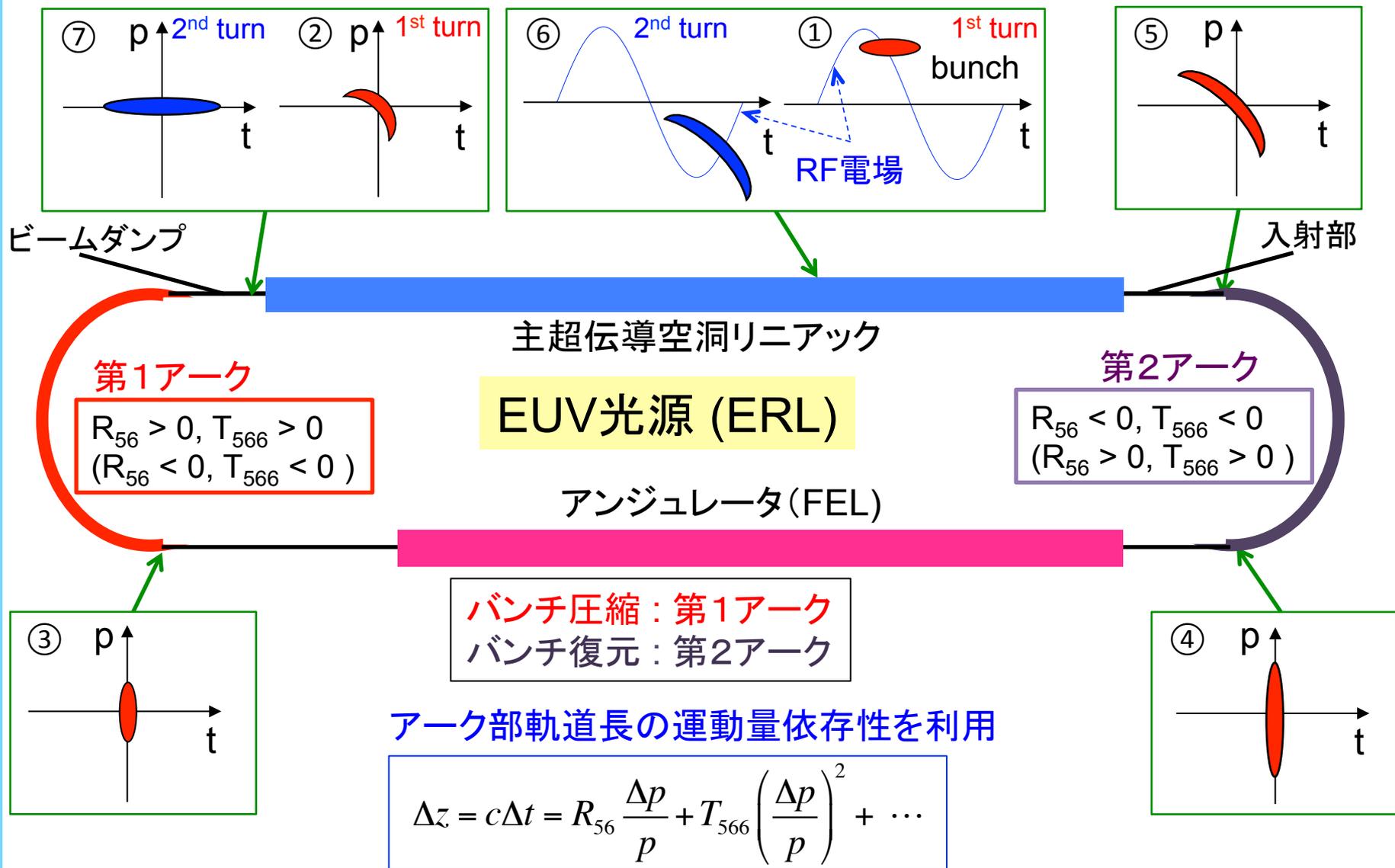
バンチ周波数は共振による発熱を避けるように選択されるべきである。

超伝導空洞グループデータ提供

アーク部



バンチ圧縮・復元方法 (1)



バンチ圧縮(1)

バンチ圧縮におけるパラメータ(i :主空洞加速前、 f :バンチ圧縮後)

$$E_f = E_i + \frac{E_{f0} - E_{i0}}{\cos \varphi_0} \cos(\varphi_0 + 2\pi\Delta t_i / T_{RF}) \quad \Delta t_f = \Delta t_i + R_{56} \delta_f / c$$

$$\delta_f \approx \delta_i \frac{E_{i0}}{E_{f0}} + \left(1 - \frac{E_{i0}}{E_{f0}}\right) \left[\frac{\cos \varphi_0 - (2\pi\Delta t_i / T_{RF}) \sin \varphi_0}{\cos \varphi_0} - 1 \right]$$

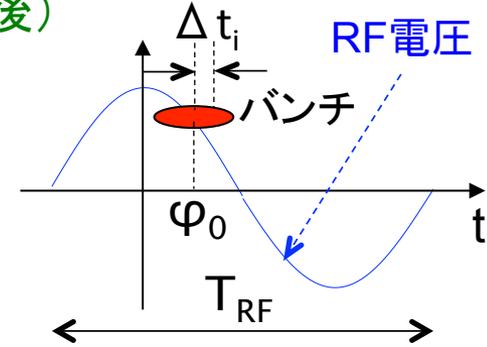
$$\delta_f \equiv (E_f - E_{f0}) / E_{f0} \approx (p_f - p_{f0}) / p_{f0}, \quad \delta_i \equiv (E_i - E_{i0}) / E_{i0} \approx (p_i - p_{i0}) / p_{i0}$$

$$\sigma_{\delta f} \approx \sqrt{k^2 \sigma_{\delta i}^2 + \sigma_{\delta i}^2 (E_{i0} / E_{f0})^2} \quad \sigma_{t f} \approx \sqrt{R_{56}^2 \sigma_{\delta i}^2 (E_{i0} / E_{f0})^2 / c^2 + (1 + k R_{56} / c)^2 \sigma_{\delta i}^2}$$

$$k \equiv \frac{\partial \delta_f}{\partial \Delta t_i} = -\frac{2\pi}{T_{RF}} \left(1 - \frac{E_{i0}}{E_{f0}}\right) \tan \varphi_0$$

初期バンチの時間と運動量の無相関仮定

$$\langle \delta_i \Delta t_i \rangle = 0$$



最小バンチ長 ($E_{f0}=800\text{MeV}$, $E_{i0}=10.5\text{MeV}$)

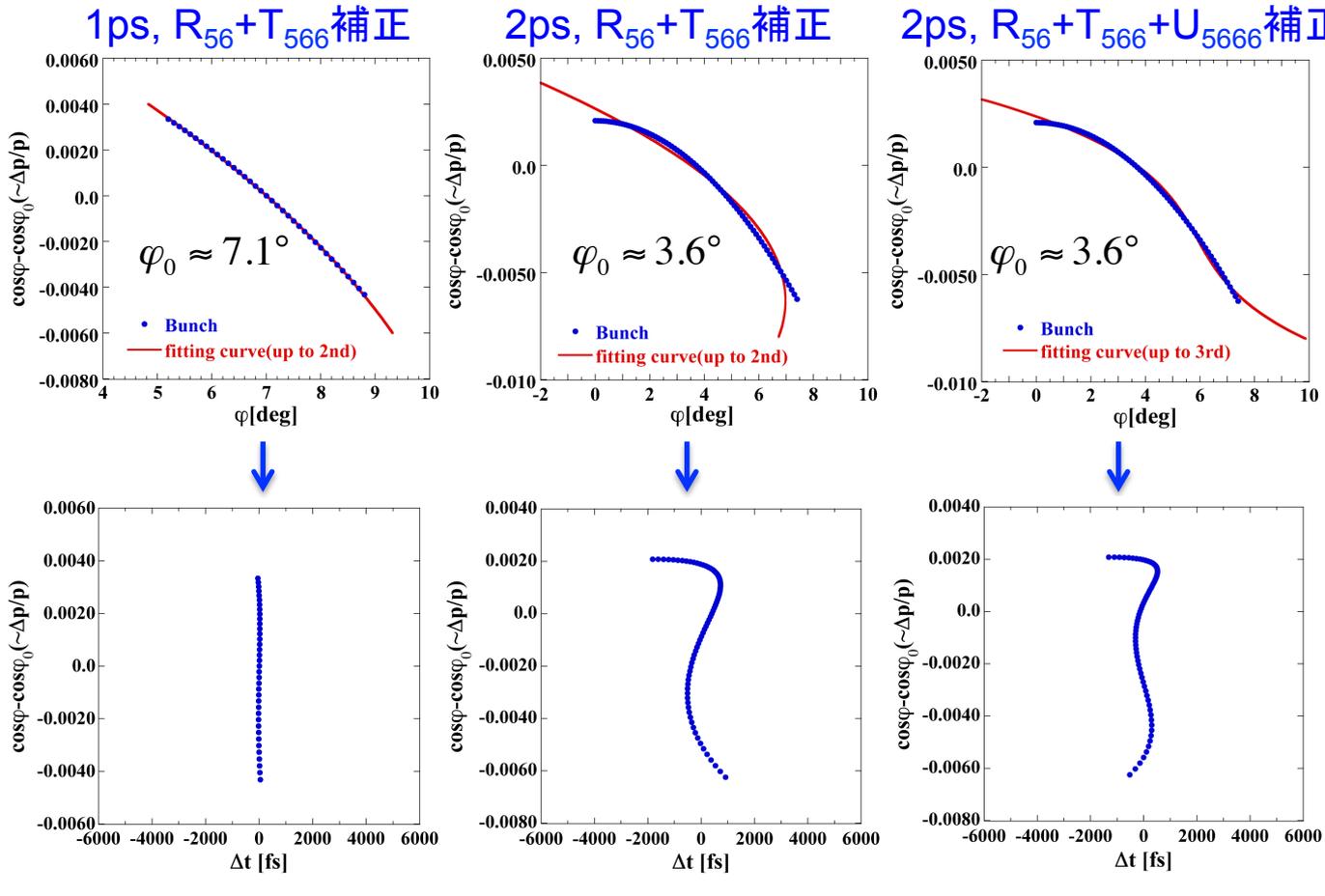
$$R_{56} = -c / k \rightarrow \sigma_{t f} \approx |R_{56}| \sigma_{\delta i} (E_{i0} / E_{f0}) / c, \quad \sigma_{\delta f} \approx c \sigma_{\delta i} / |R_{56}|, \quad \tan \varphi_0 = \frac{c T_{RF}}{2\pi R_{56}} \left(1 - \frac{E_{i0}}{E_{f0}}\right)^{-1}$$

$$\sigma_{\delta f} \approx 0.001 \rightarrow \begin{cases} R_{56} \approx 0.3\text{m}, \sigma_{\delta i} = 1\text{ps}, \sigma_{\delta i} = 0.0025 \rightarrow \sigma_{t f} = 33\text{fs}, \varphi_0 = 7.1^\circ \\ (\sigma_{\delta f} \leq \rho_{FEL}) \rightarrow \begin{cases} R_{56} \approx 0.6\text{m}, \sigma_{\delta i} = 2\text{ps}, \sigma_{\delta i} = 0.0025 \rightarrow \sigma_{t f} = 66\text{fs}, \varphi_0 = 3.6^\circ \end{cases} \end{cases}$$

実際は、RF電圧形状の高次の影響とCSR効果が加わってバンチ長は伸びる。

バンチ圧縮(2)

RF電圧形状高次成分の効果 - (t,p)相関が直線ではない



注) CSR効果は含まれていない。

初期バンチ長が長いと、RF電圧形状の高次効果が大きくなって補正が困難になる。

cERLアーク部



cERLアーク部
(1セルTBAラティス)

TBA: Triple Bend Acromat

- 青: 偏向電磁石 4台
- 赤: 四極電磁石 6台
- 黄: 六極電磁石 4台 (2台設置予定)

TBAラティスは R_{56} を正負に変えることができる。→ バンチ圧縮&復元
六極電磁石の設置 → T_{566} の補正

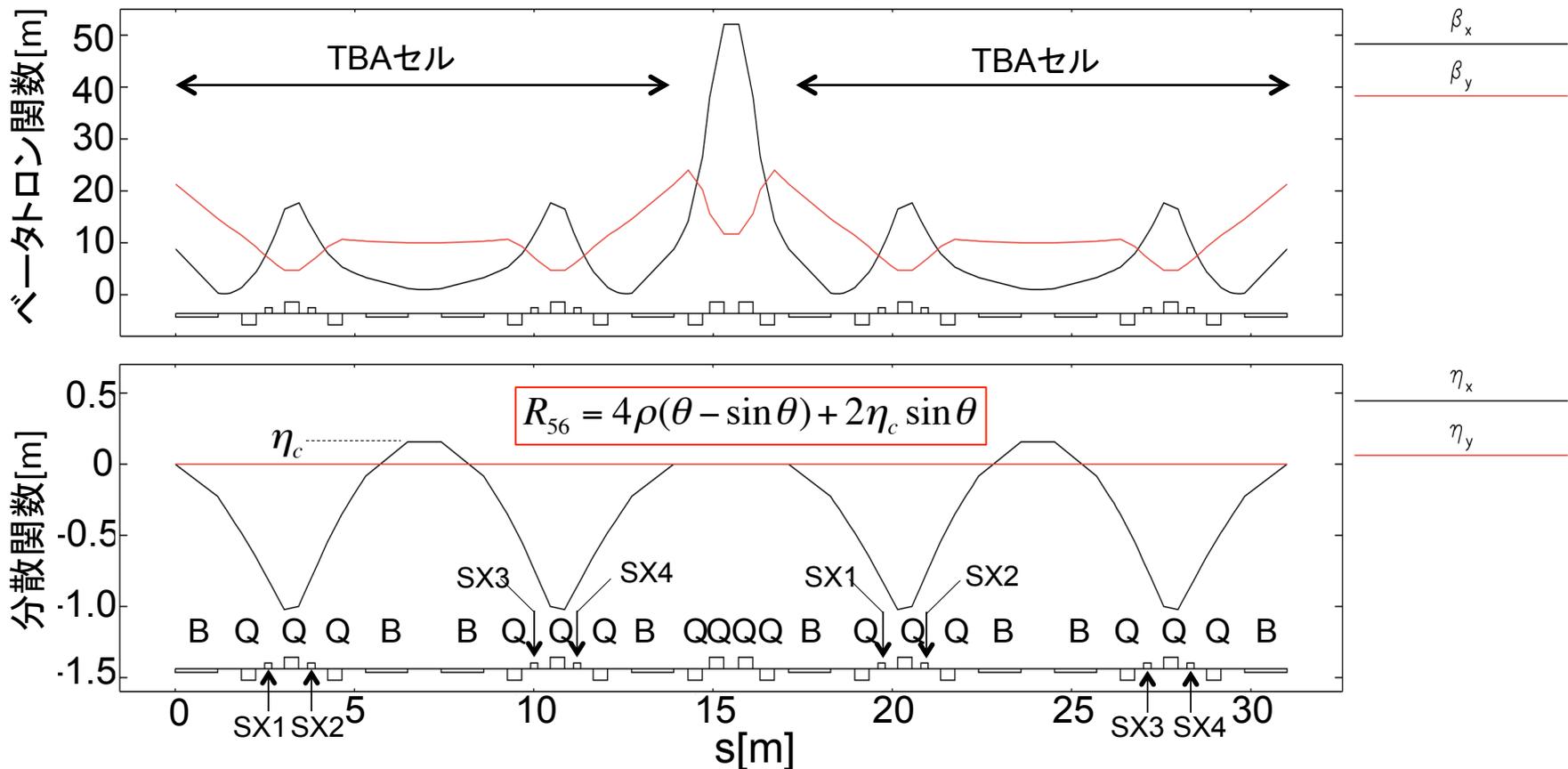


cERLアーク部(写真)

アーク部の設計 (1)

2セルTBAラティスとそのオプティクス例 ($R_{56}=0.0$ m)

$\rho=3$ m, $\theta=\pi/8$ rad, $L_B=1.178$ m, $L_Q=0.4$ m, $L_{SX}=0.2$ m

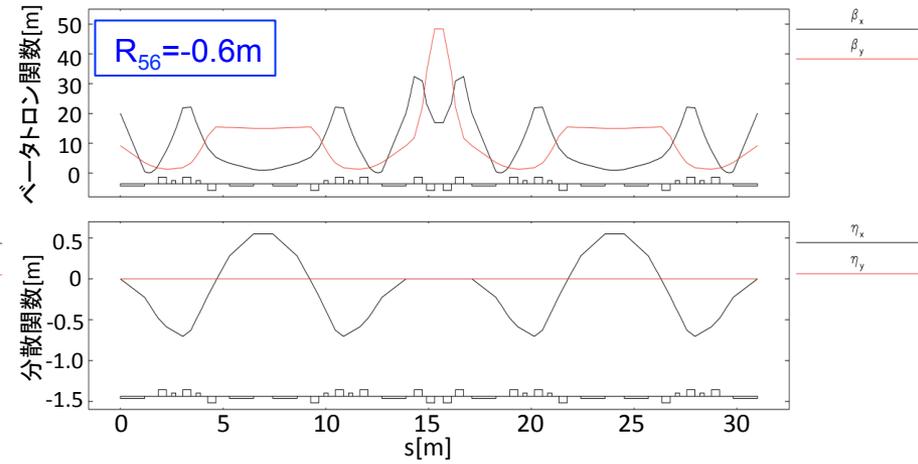
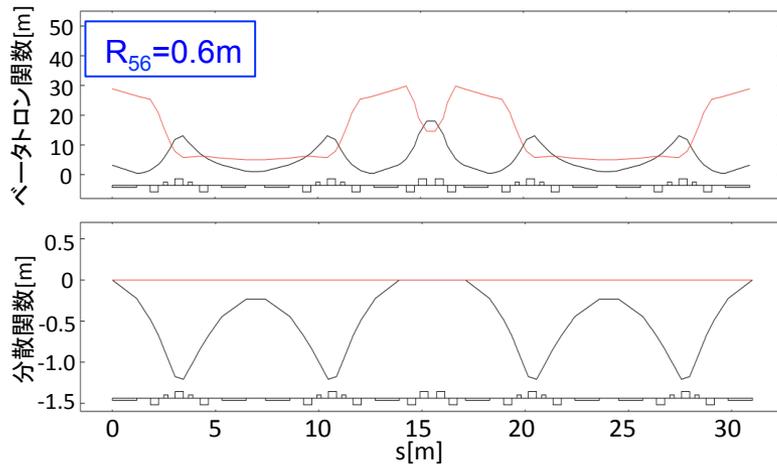
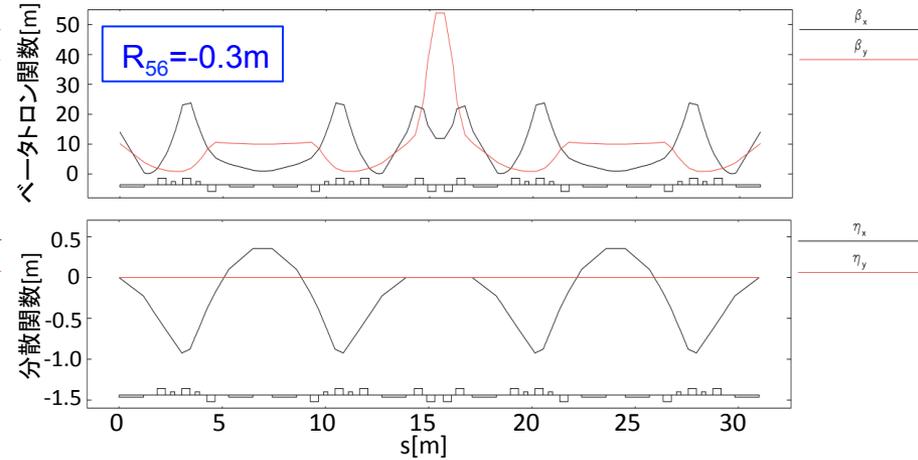
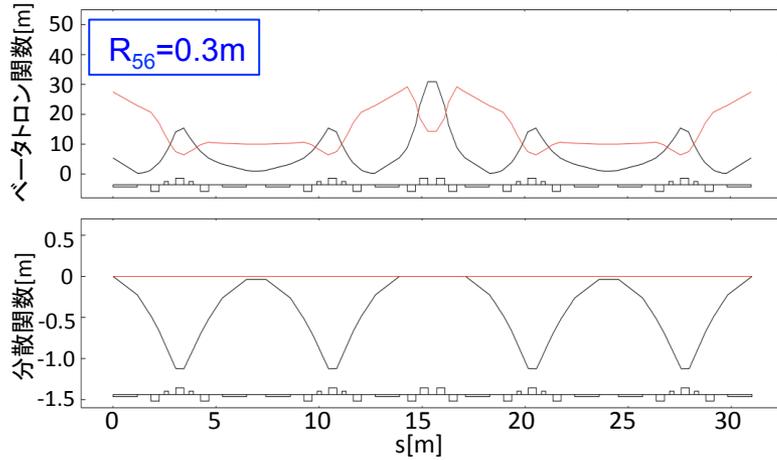


B: 偏向電磁石, Q: 四極電磁石, SX: 六極電磁石

セル数の増加と電磁石長の伸長でEUV光源 ($E=800$ MeV) に対応

アーク部の設計 (2)

2セルTBAラティスのオプティクス例 ($R_{56} = \pm 0.3, \pm 0.6$ m)

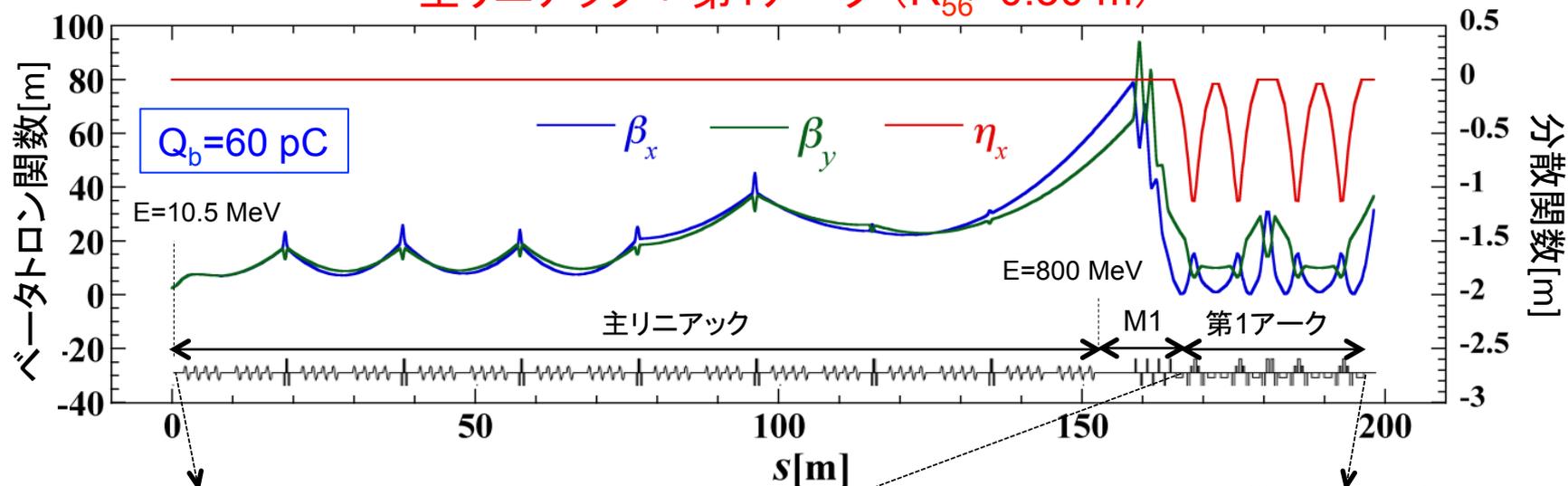


バンチ圧縮後の運動量幅を約0.1%にする場合

$$\sigma_p / p \approx c \sigma_{t,init} / R_{56} \approx 0.001 \rightarrow R_{56} \approx 0.3 \text{ m} @ \sigma_{t,inj} = 1 \text{ ps}, R_{56} \approx 0.6 \text{ m} @ \sigma_{t,inj} = 2 \text{ ps}$$

アーク部によるバンチ圧縮(1)

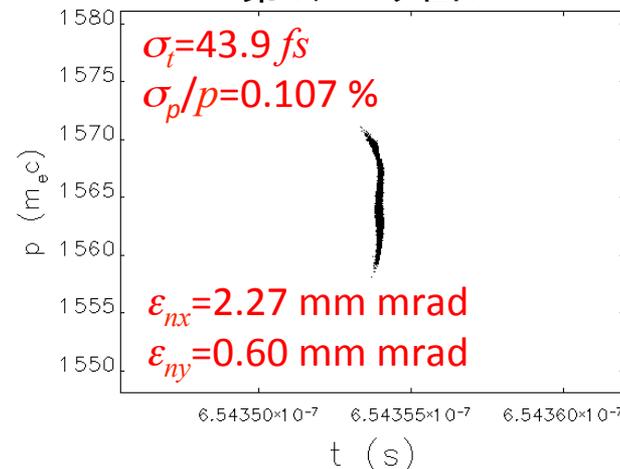
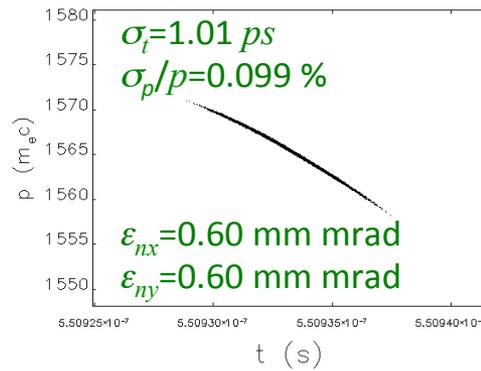
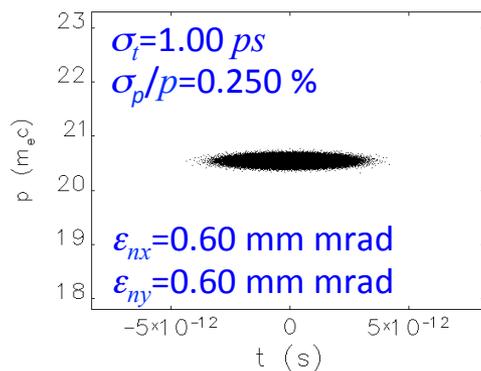
主リニアック + 第1アーク ($R_{56}=0.30$ m)



主リニアック入口

第1アーク入口

第1アーク出口



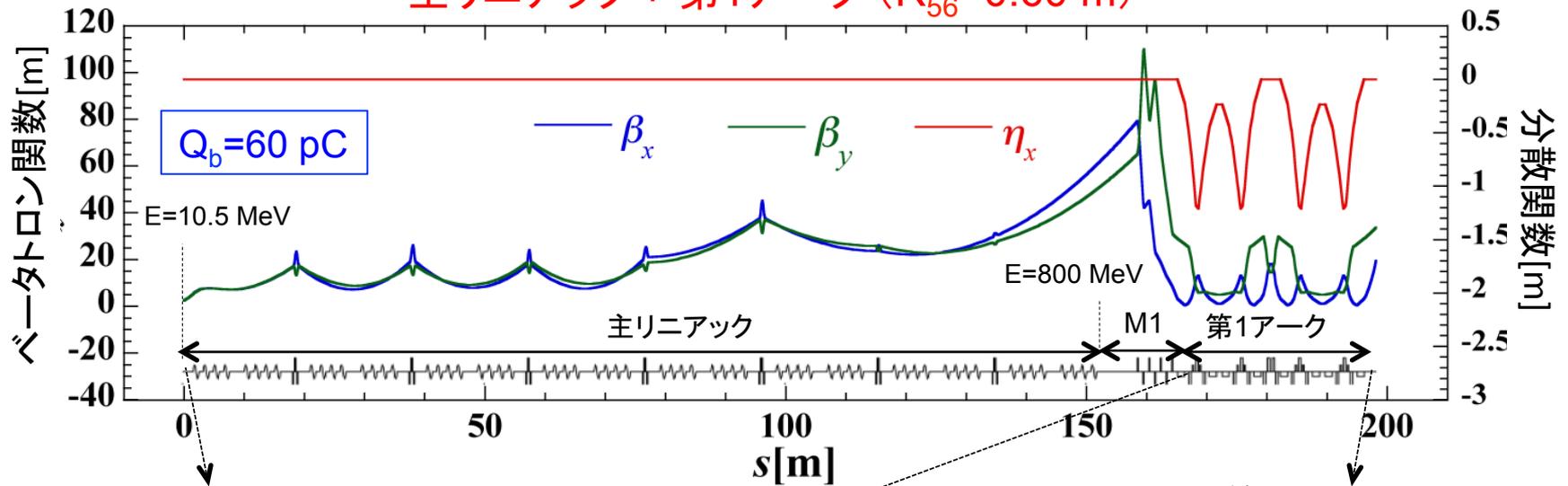
RF位相と六極電磁石によるピアースパラメータの最小化

K_2 (SX1)=-54.6 [m^{-3}], K_2 (SX4)=26.4 [m^{-3}], ϕ_{RF} =96.7 [deg]

elegantによるシミュレーション

アーク部によるバンチ圧縮(2)

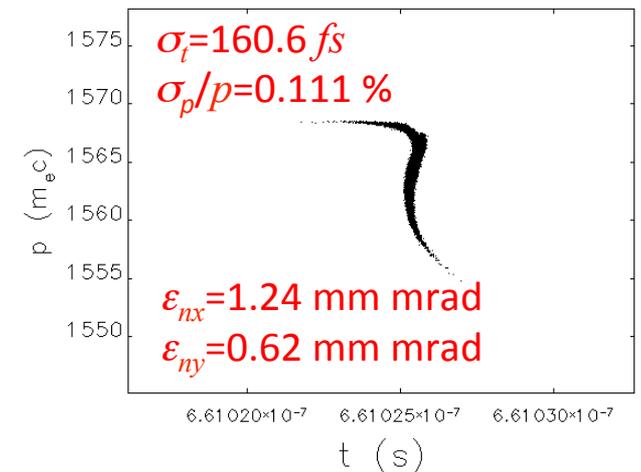
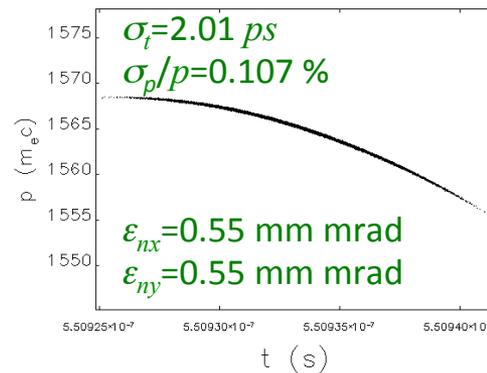
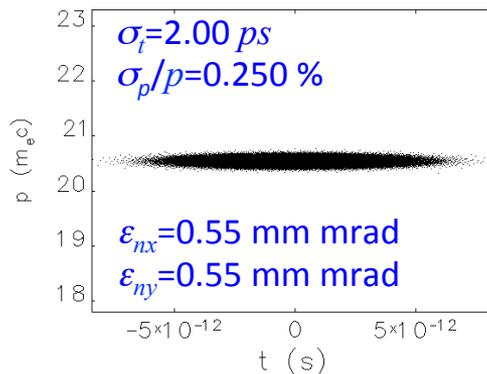
主リニアック + 第1アーク ($R_{56}=0.60$ m)



主リニアック入口

第1アーク入口

第1アーク出口



RF位相と六極電磁石によるピアースパラメータの最小化

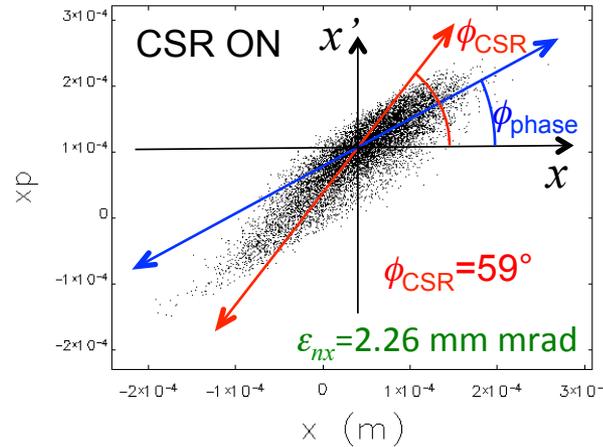
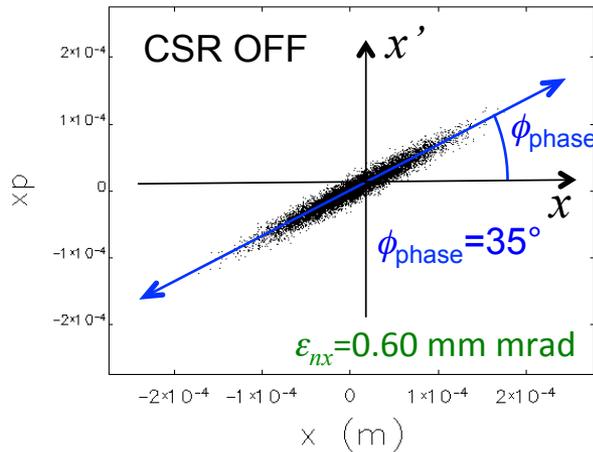
$K_2(\text{SX1})=-150.0$ [m^{-3}], $K_2(\text{SX4})=135.2$ [m^{-3}], $\phi_{RF}=93.6$ [deg]

elegantによるシミュレーション

CSRによるエミッタンス増大と補正

CSRによるエミッタンス増大(第1アーク出口)

初期バンチ長1psの場合

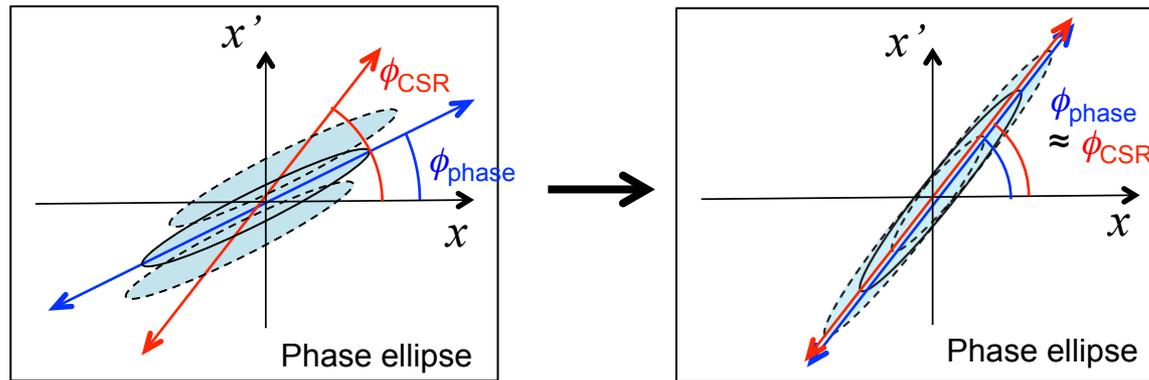


$$\tan 2\phi_{\text{phase}} = \frac{2\alpha_x}{\gamma_x - \beta_x}$$

$$\tan \phi_{\text{CSR}} = \frac{\sin \theta}{\rho(1 - \cos \theta)}$$

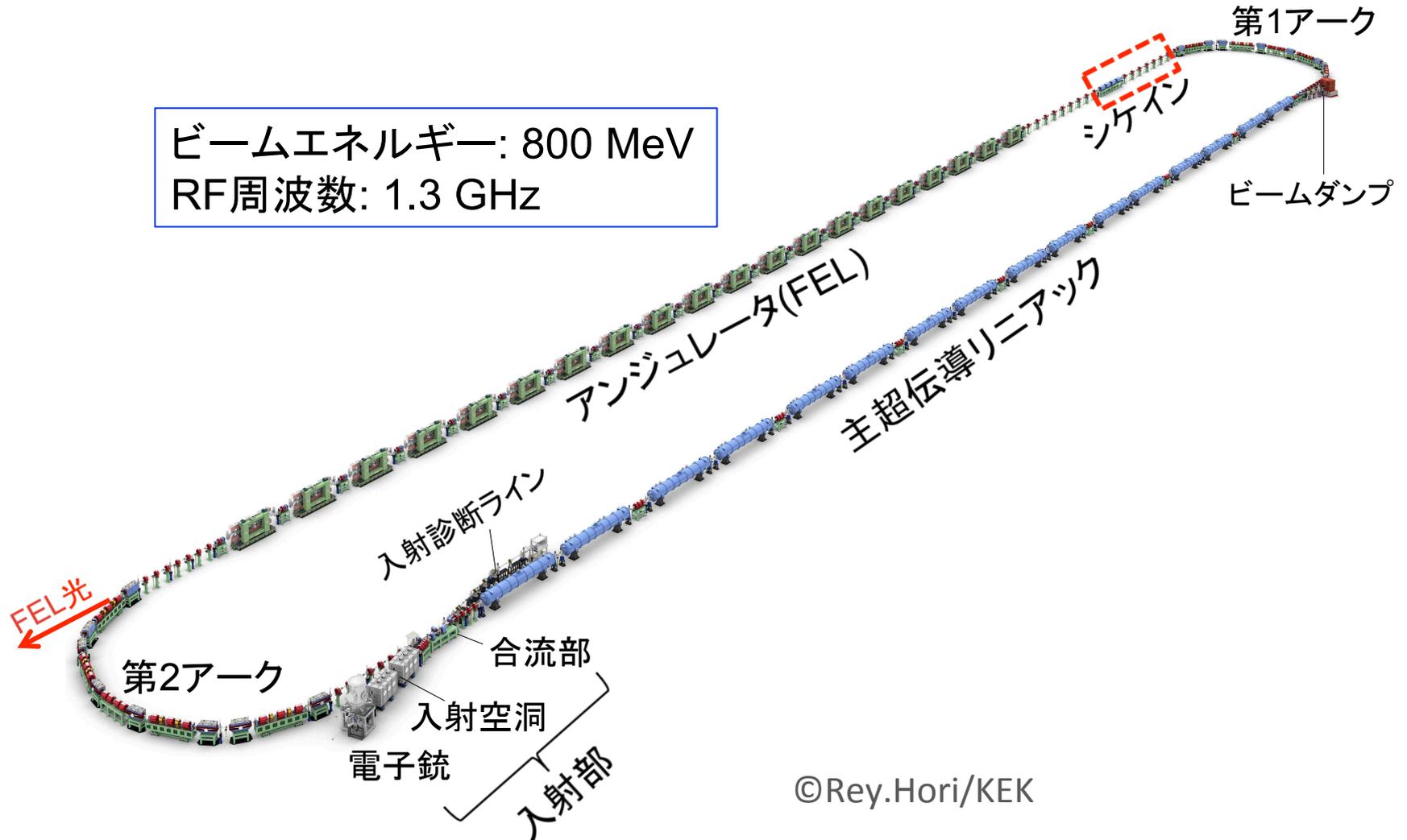
(sector magnet)

CSR効増大抑制のためのオプティクス最適化

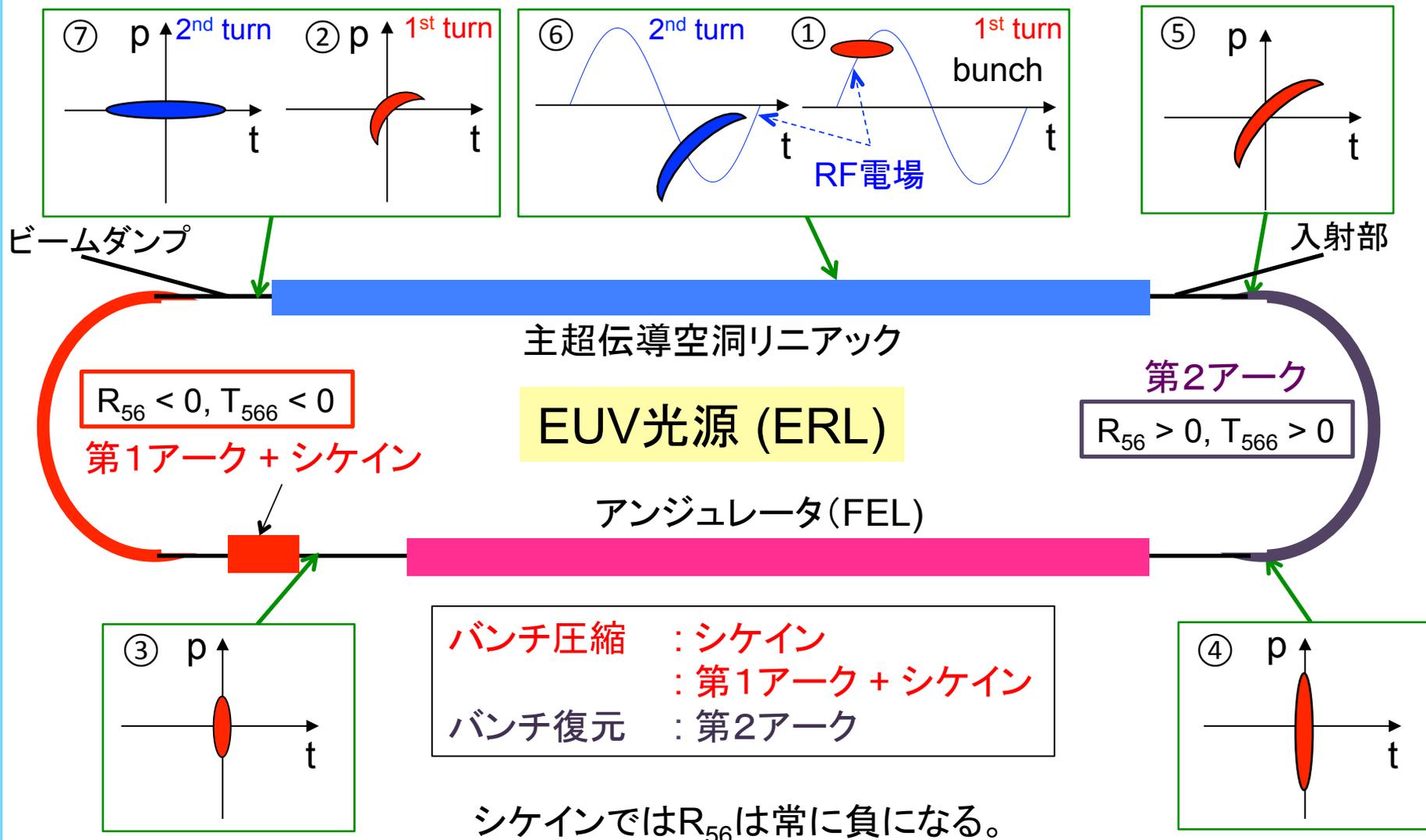


設計したTBAアーク部では楕円の傾き角 ϕ_{phase} の調整が困難である。

シケイン

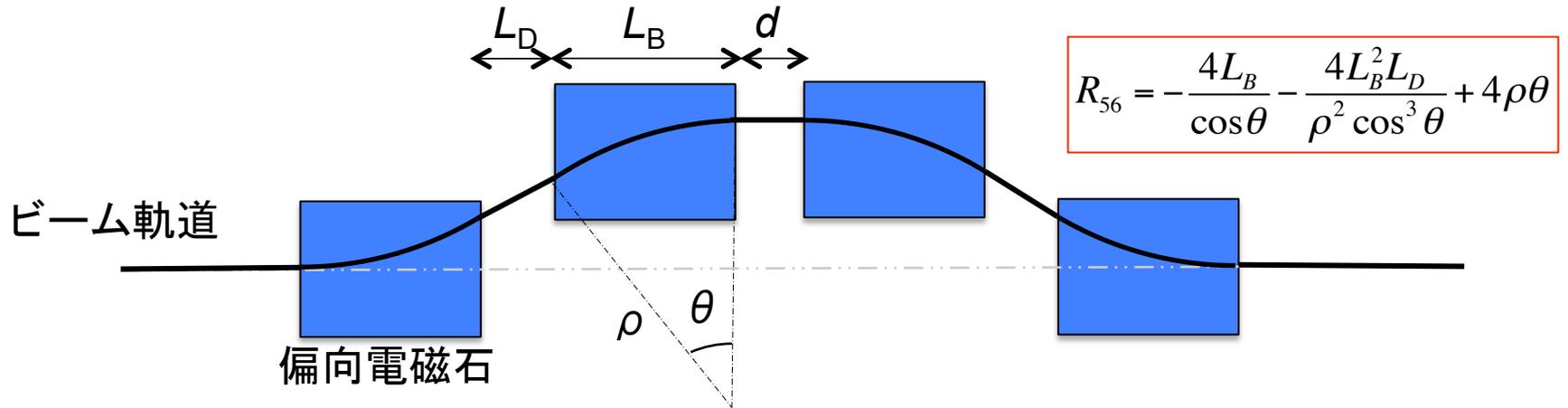


バンチ圧縮・復元方法 (2)

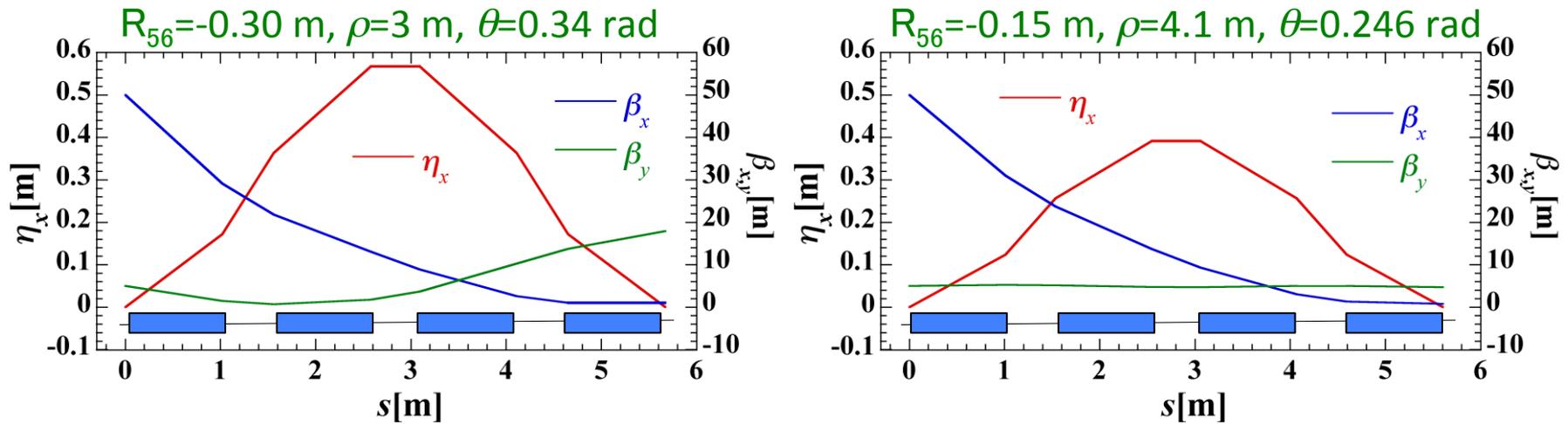


シケイン設計

4つの偏向電磁石によるシケイン



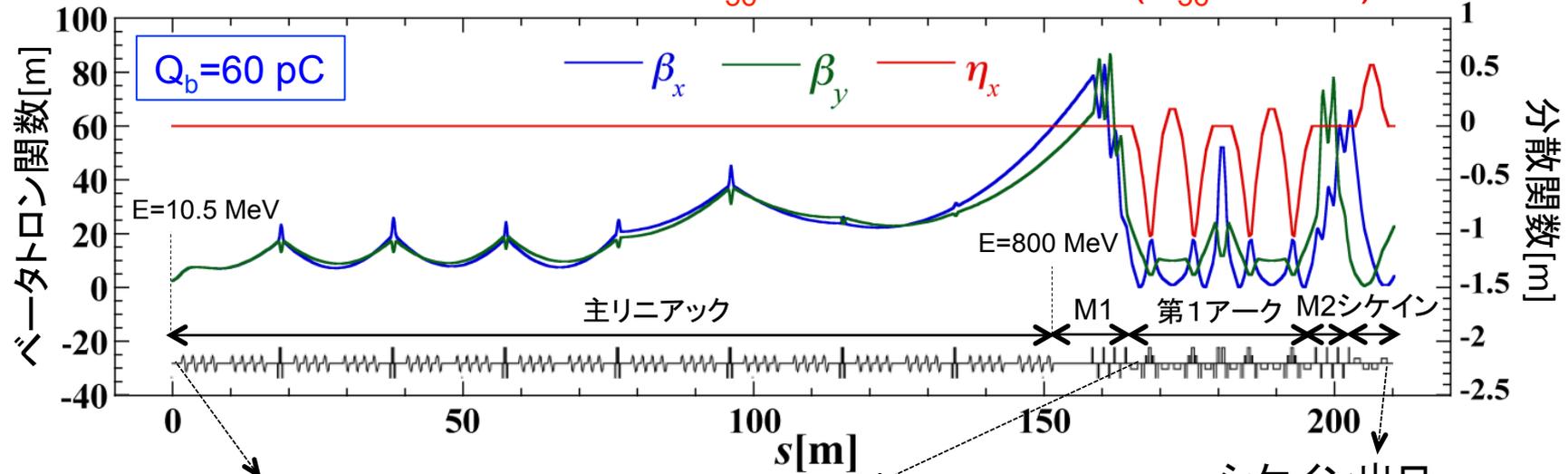
シケインのオプティクス ($L_B=1\text{m}$ and $L_D=d=0.51\text{m}$)



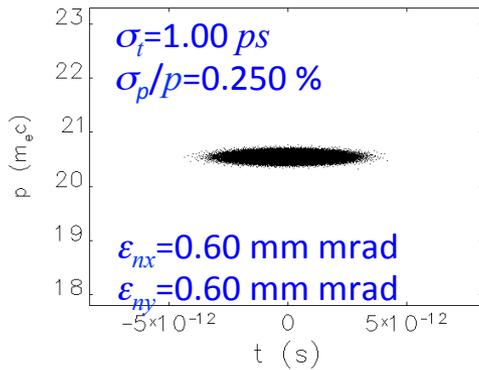
シケイン入口の光学パラメータを調整して出口のパラメータをCSRに対して最適化する。

シケインによるバンチ圧縮(1)

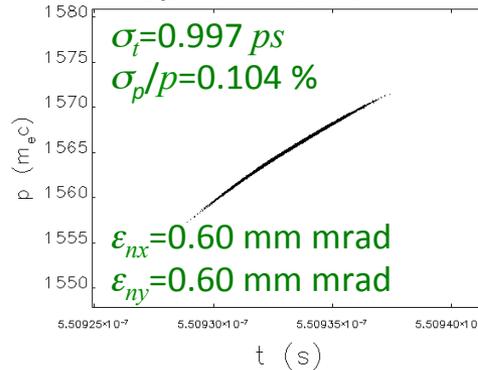
主リニアック + 第1アーク ($R_{56}=0.0$ m) + シケイン ($R_{56}=-0.3$ m)



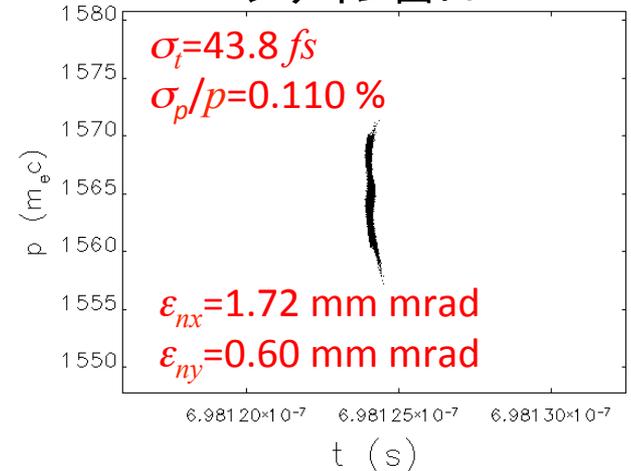
主リニアック入口



第1アーク入口



シケイン出口



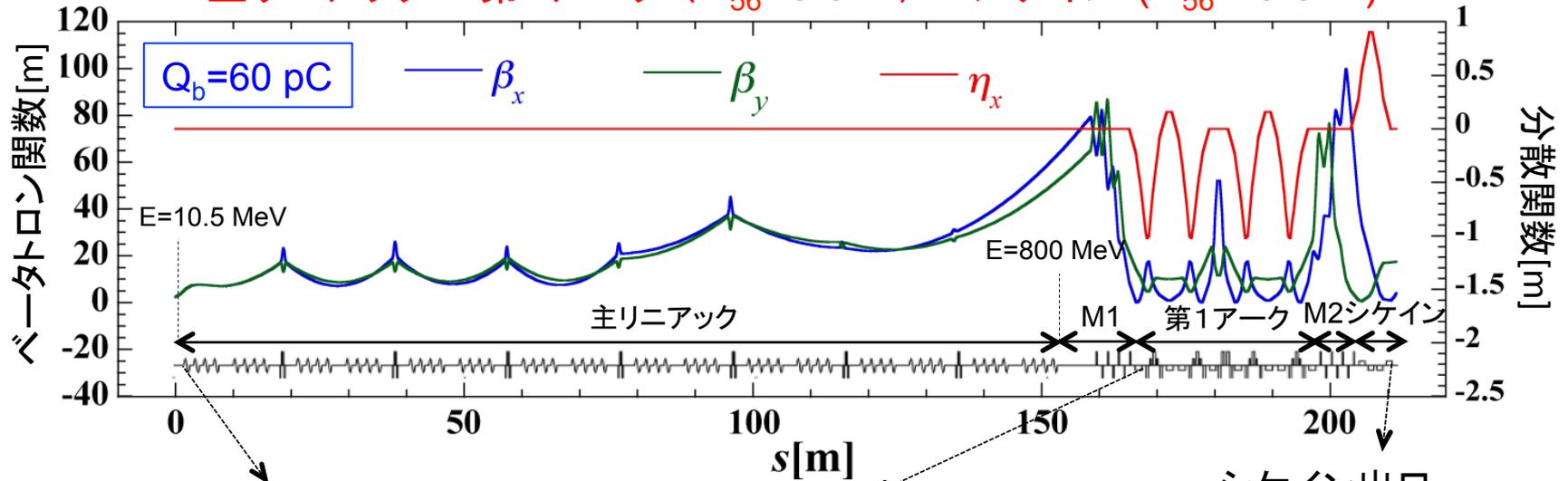
RF位相と六極電磁石によるピアースパラメータの最小化

$$K_2(\text{SX1}) = -91.2 \text{ [m}^{-3}\text{]}, K_2(\text{SX4}) = 23.6 \text{ [m}^{-3}\text{]}, \phi_{RF} = 82.4 \text{ [deg]}$$

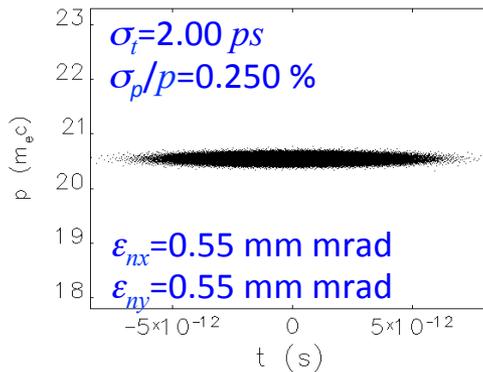
elegantによるシミュレーション

シケインによるバンチ圧縮(2)

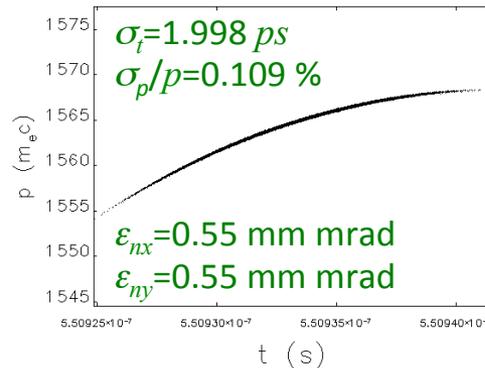
主リニアック + 第1アーケ ($R_{56}=0.0$ m) + シケイン ($R_{56}=-0.6$ m)



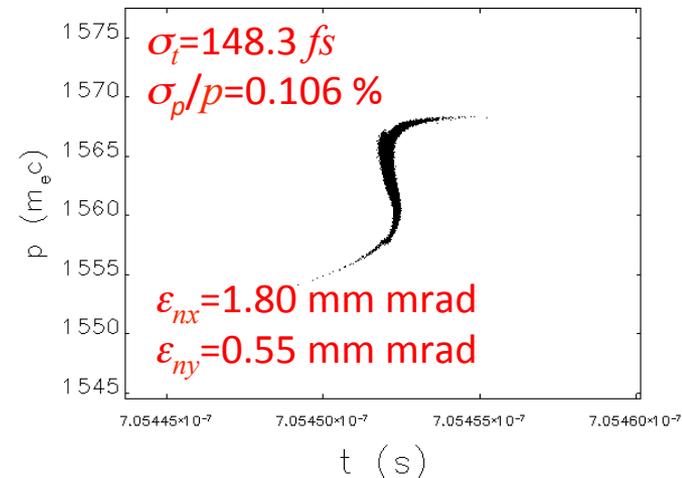
主リニアック入口



第1アーケ入口



シケイン出口



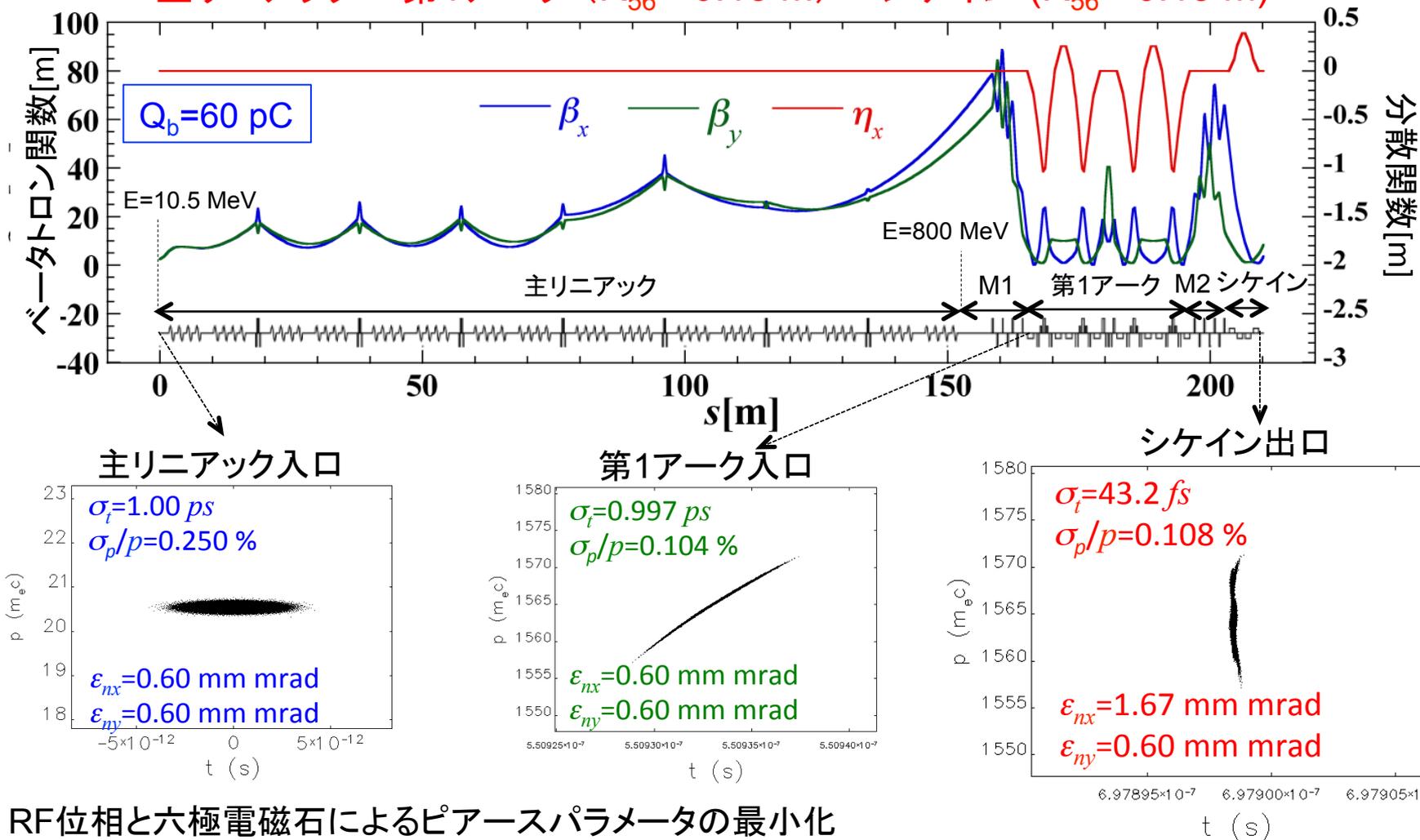
RF位相と六極電磁石によるピアースパラメータの最小化

K_2 (SX1) = -199.4 [m^{-3}], K_2 (SX4) = 152.9 [m^{-3}], ϕ_{RF} = 86.1 [deg]

elegantによるシミュレーション

アーク部 + シケインによるバンチ圧縮

主リニアック + 第1アーク ($R_{56} = -0.15 \text{ m}$) + シケイン ($R_{56} = -0.15 \text{ m}$)

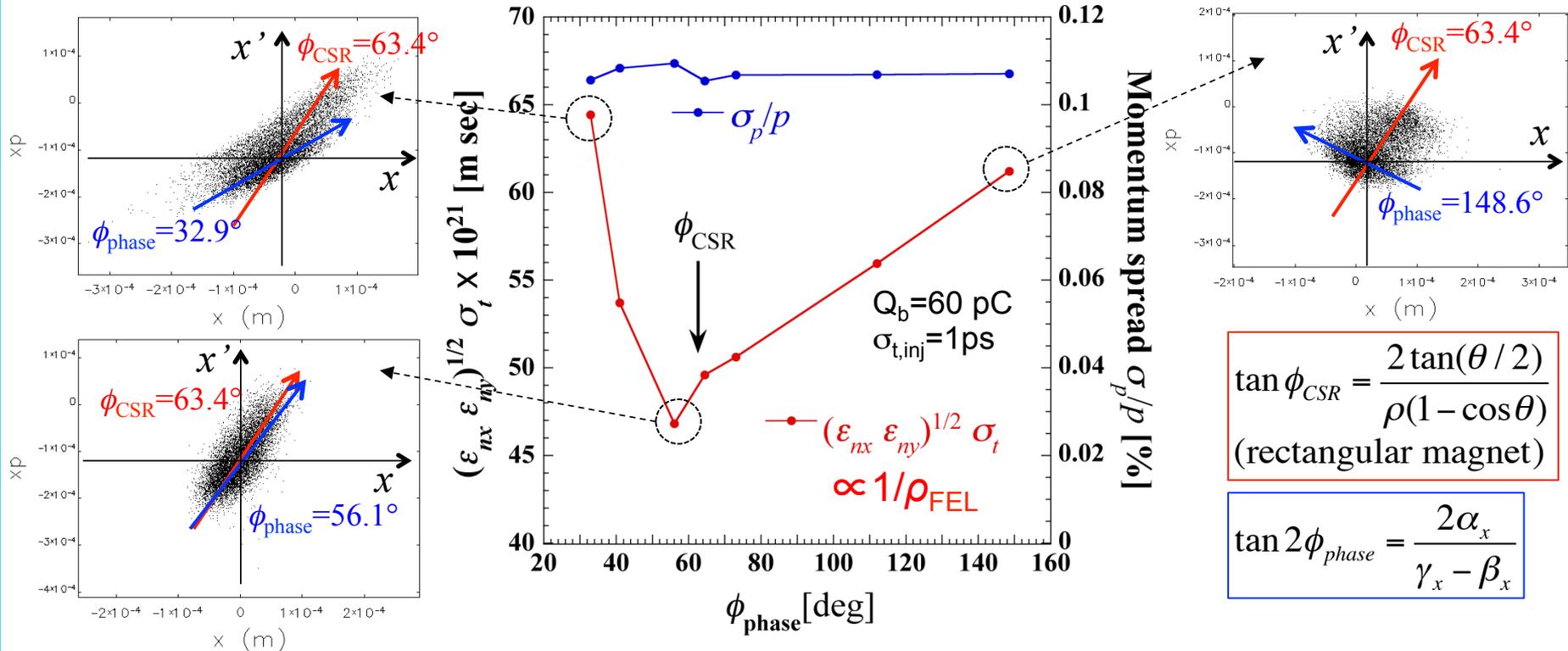


elegantによるシミュレーション

CSR効果の補正 (1)

CSRによる水平エミッタンス増加の補正
シケインによるバンチ圧縮(初期バンチ長1ps)

位相空間上の楕円分布の傾き角 vs ピアースパラメータ @ シケイン出口



$$\tan \phi_{\text{CSR}} = \frac{2 \tan(\theta/2)}{\rho(1 - \cos \theta)}$$

(rectangular magnet)

$$\tan 2\phi_{\text{phase}} = \frac{2\alpha_x}{\gamma_x - \beta_x}$$

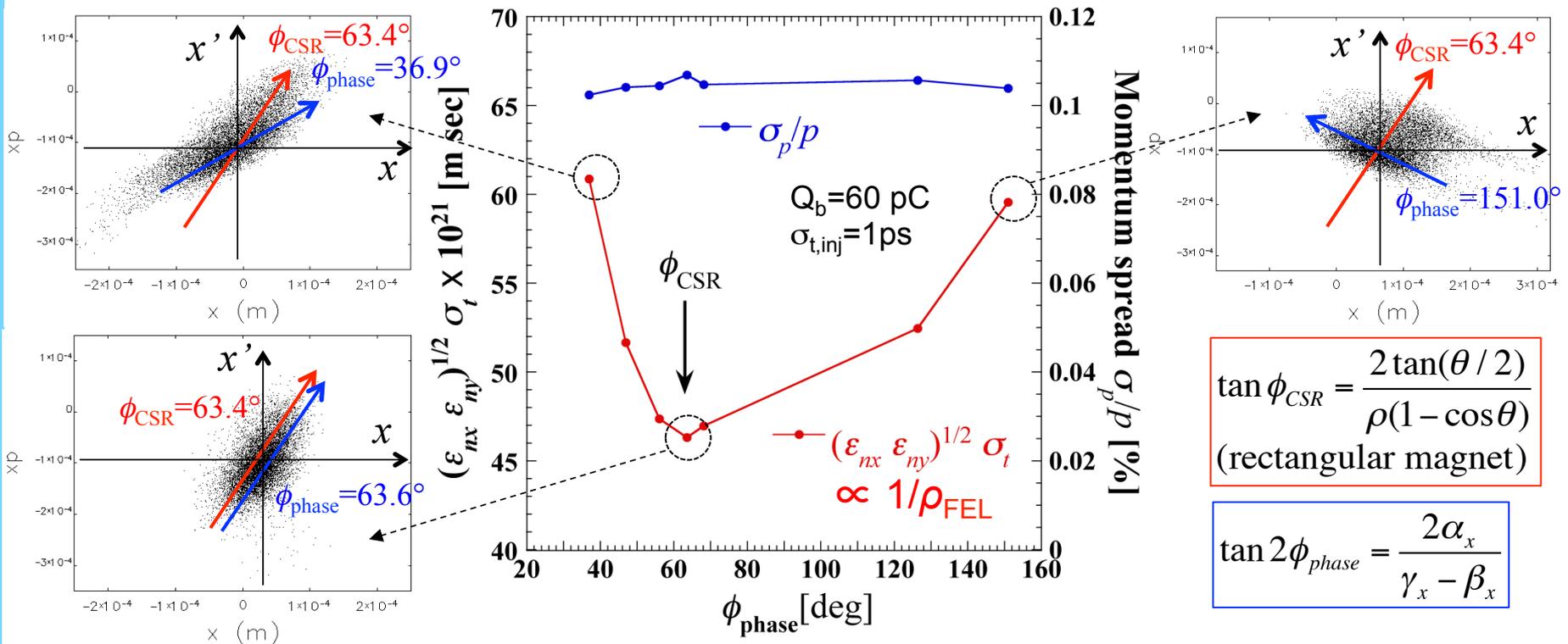
楕円分布の傾き ϕ_{phase} とCSRキックの方向 ϕ_{CSR} をシケイン出口で揃えた。
→ ピアースパラメータ値が最大になる。

CSR効果の補正 (2)

CSRによる水平エミッタンス増加の補正

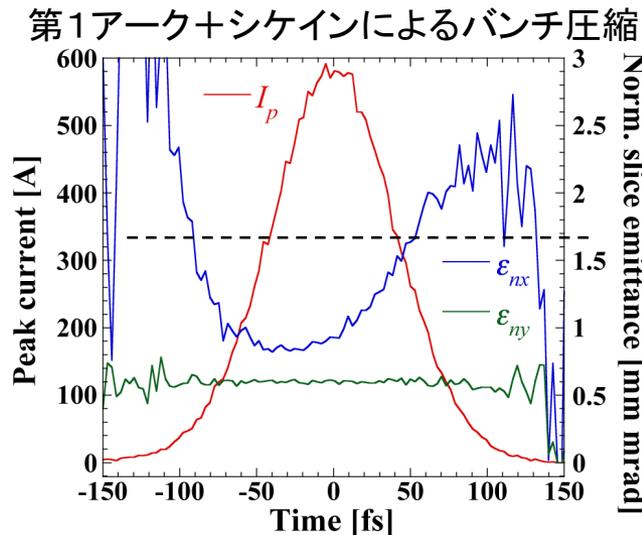
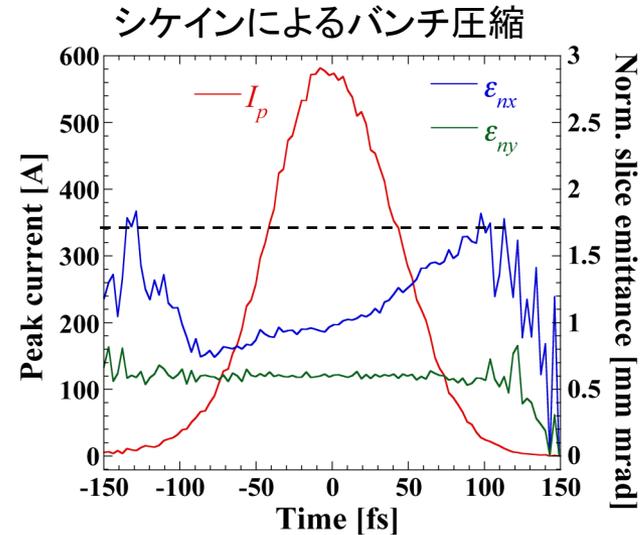
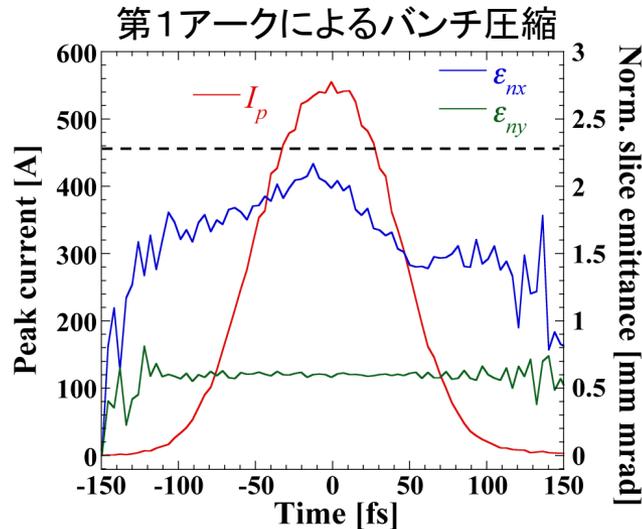
第1アーク+シケインによるバンチ圧縮(初期バンチ長1ps)

位相空間上の楕円分布の傾き角 vs ピアースパラメータ @ シケイン出口



楕円分布の傾き ϕ_{phase} とCSRキックの方向 ϕ_{CSR} をシケイン出口で揃えた。
 → ピアースパラメータ値が最大になる。

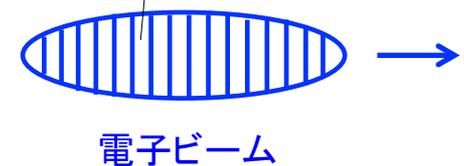
ピーク電流&スライスエミッタンス(1)



$Q_b = 60 \text{ pC}$
 $\sigma_{t, inj} = 1 \text{ ps}$

----- 射影水平エミッタンス
 (規格化)

CSRの影響によって
 スライス毎にエミッタンスが異なる

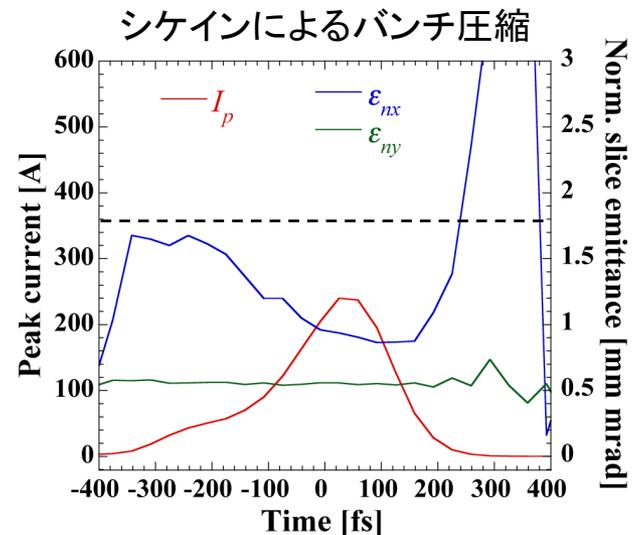
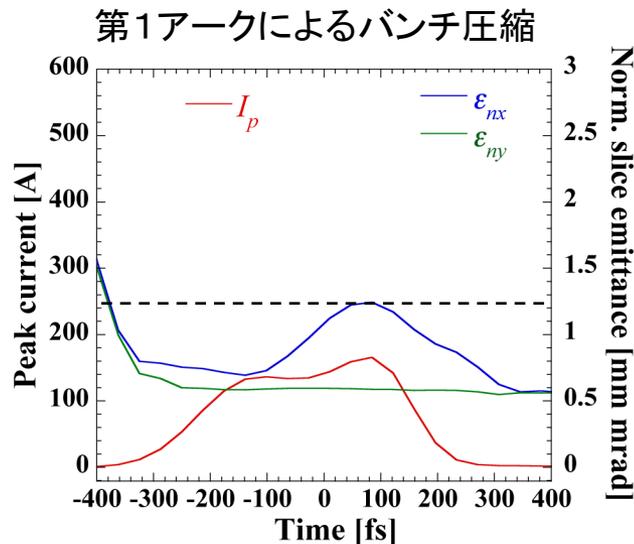


注) 図は時間の定義がelegantと逆である。
 正の時間がバンチの前方になっている。

高いピーク電流での水平のスライスエミッタンスは射影エミッタンスよりも低い。

ピーク電流&スライスエミッタンス(2)

$$Q_b = 60 \text{ pC}$$
$$\sigma_{t, \text{inj}} = 2 \text{ ps}$$



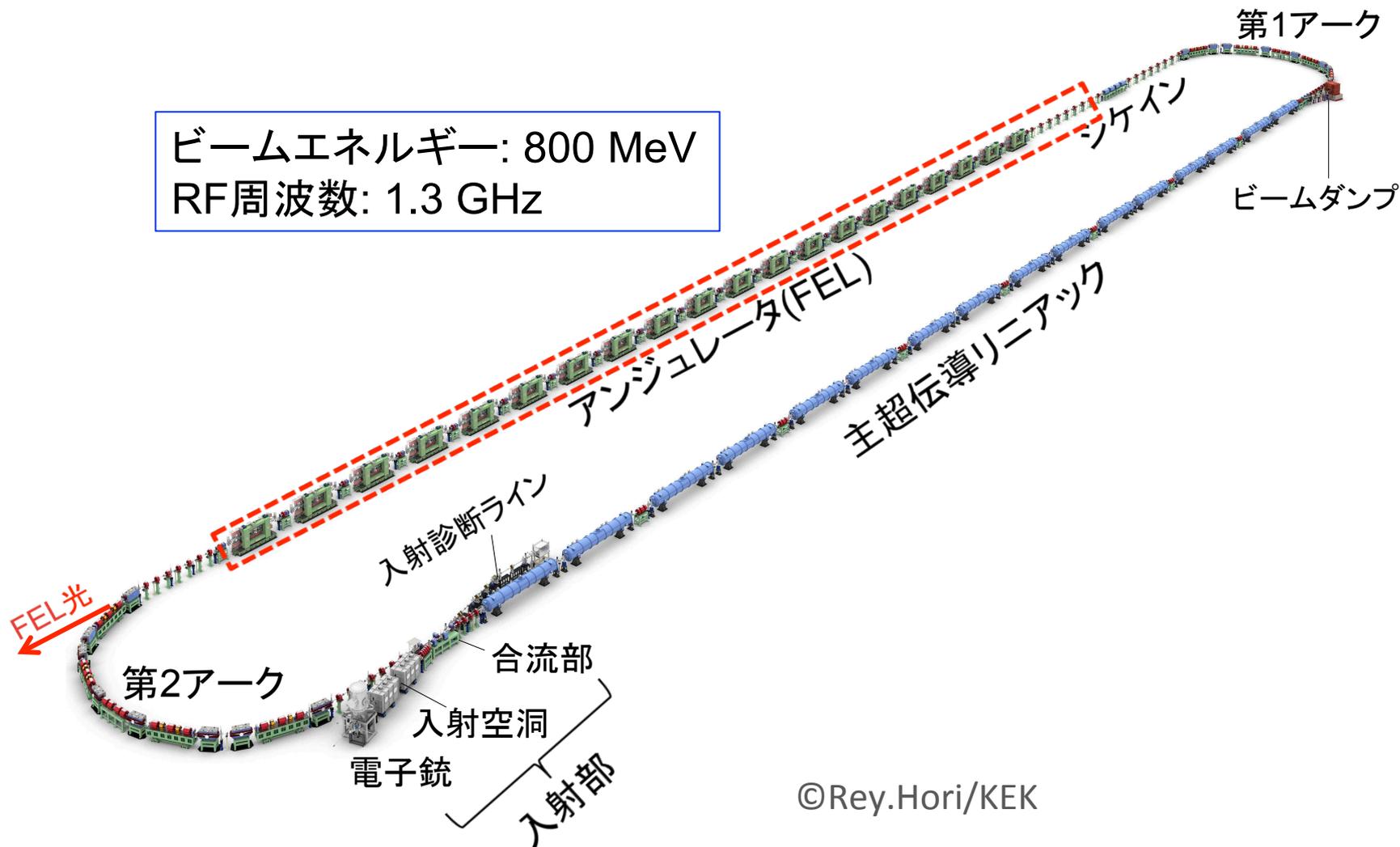
注) 図は時間の定義が elegant と逆である。
正の時間がバンチの前方になっている。

----- 射影水平エミッタンス(規格化)

初期バンチ長2psではバンチが広がって、ピーク電流が1/2-1/3以下になった。
(ピアースパラメータの減少)

アンジュレータ (FEL) システム

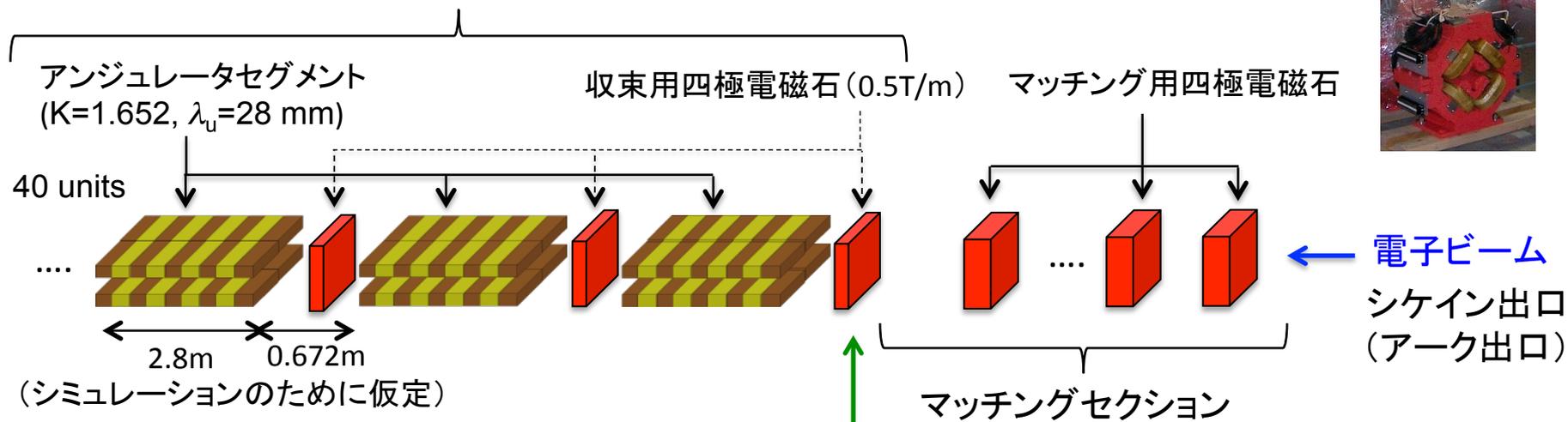
ビームエネルギー: 800 MeV
RF周波数: 1.3 GHz



アンジュレータシステムの構成

アンジュレータシステム (マッチングセクション含む)

アンジュレータ (FEL) システム



円偏光 (偏光可変) アンジュレータの例

FEL入口での電子ビームの光学パラメータ $\beta_{x,y}, \alpha_{x,y}$ 調整 (FEL出力の最適化のため)

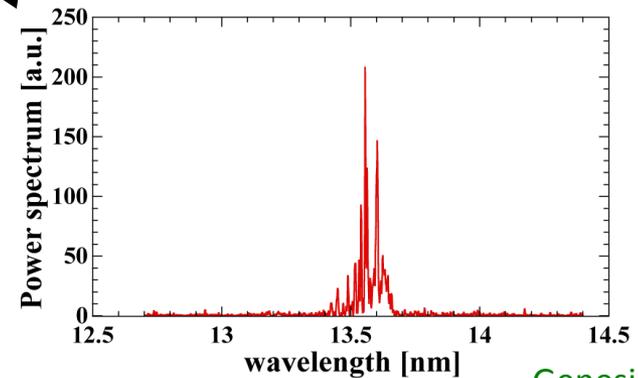
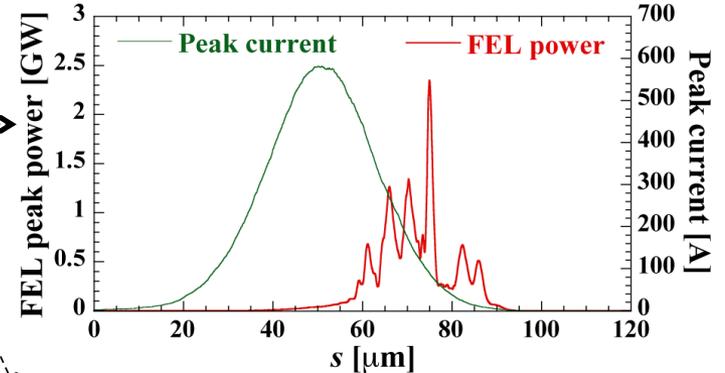
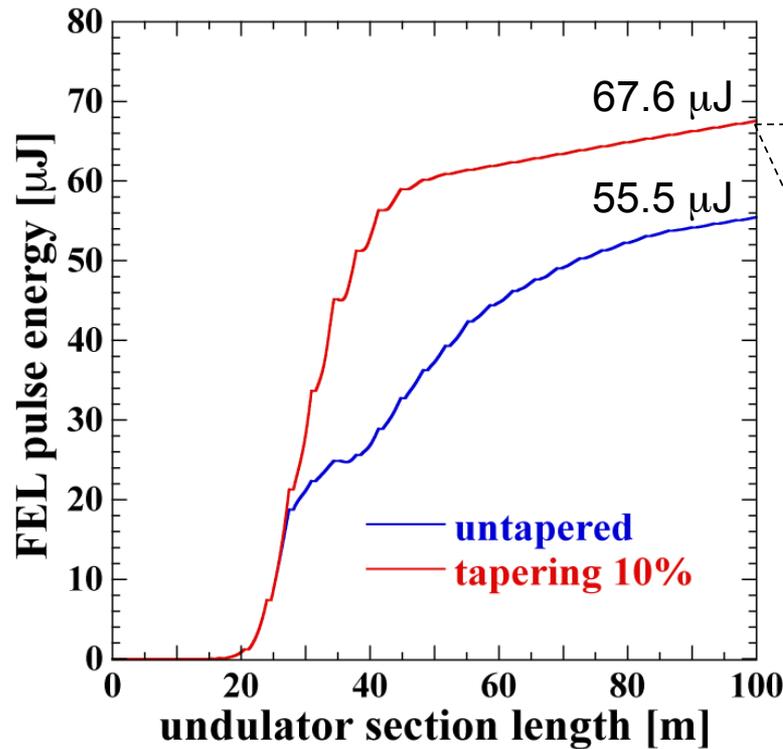
アンジュレータシステムの最適化

- (1) テーパリング (K値をセグメント毎に微調整)
- (2) 収束用四極電磁石の磁場強度
- (3) セグメント長 & セグメント間隔
- (4) アンジュレータ周期 & K値 (磁極ギャップに依存)

アンジュレータシステムの設計と最適化は今後の検討課題の1つである。

FELシミュレーション (1)

電子ビームパラメータ: $E=800$ MeV, $Q_b=60$ pC, $f_b=162.5/325$ MHz
 $\varepsilon_{nx,inj}=\varepsilon_{ny,inj}=0.6$ mm mrad, $\sigma_{t,inj}=0.25$ %, $\sigma_{t,inj}=1$ ps
 円偏光アンジュレータパラメータ: $K=1.652$, $\lambda_u=28$ mm, $L_u=2.8$ m (x 40)
 バンチ圧縮方式: 第1アーク + シケイン $\beta_x=\beta_y=10$ m, $\alpha_x=\alpha_y=0$ @FEL入口

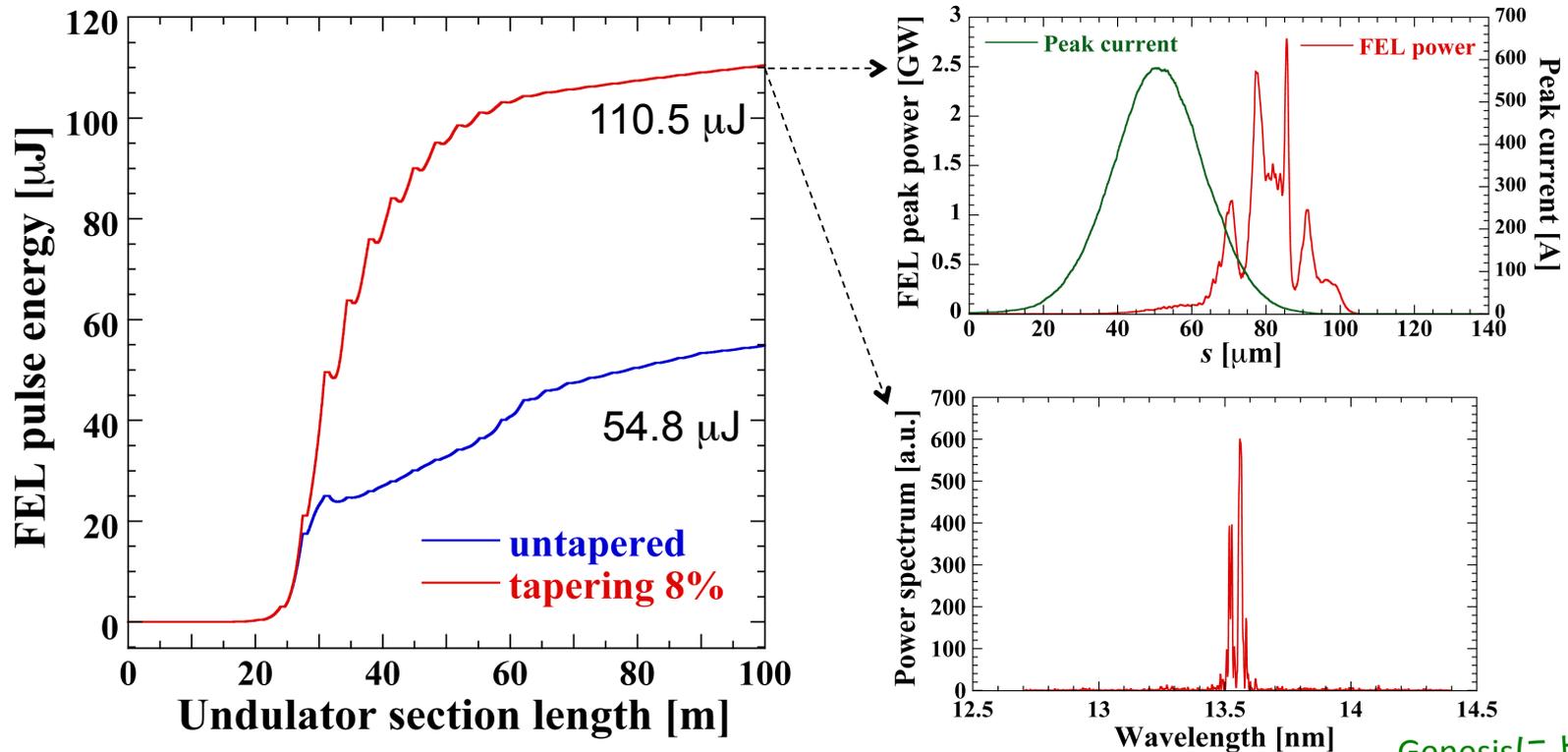


Genesisによる計算
(加藤氏データ提供)

FEL出力(線形テーパーリング無): 9.0/18.0 kW @ 9.75/19.5 mA
 FEL出力(線形テーパーリング有): 11.0/22.0 kW @ 9.75/19.5 mA

FELシミュレーション (2)

電子ビームパラメータ: $E=800$ MeV, $Q_b=60$ pC, $\sigma_{t,init}=1$ ps, $f_b=162.5/325$ MHz
 $\varepsilon_{nx,inj}=\varepsilon_{ny,inj}=0.6$ mm mrad, $\sigma_{t,inj}=0.25$ %, $\sigma_{t,inj}=1$ ps
 円偏光アンジュレータパラメータ: $K=1.652$, $\lambda_u=28$ mm, $L_u=2.8$ m (x 40)
 バンチ圧縮方式: 第1アーク + シケイン $\beta_x=4$ m, $\beta_y=6$ m, $\alpha_x=\alpha_y=0$ @FEL入口

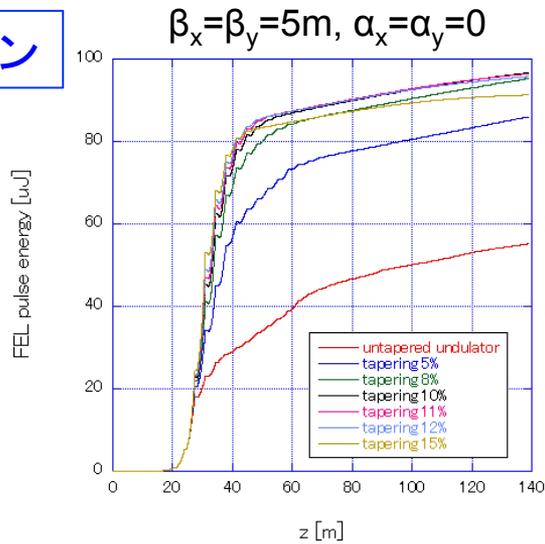


Genesisによる計算
(加藤氏データ提供)

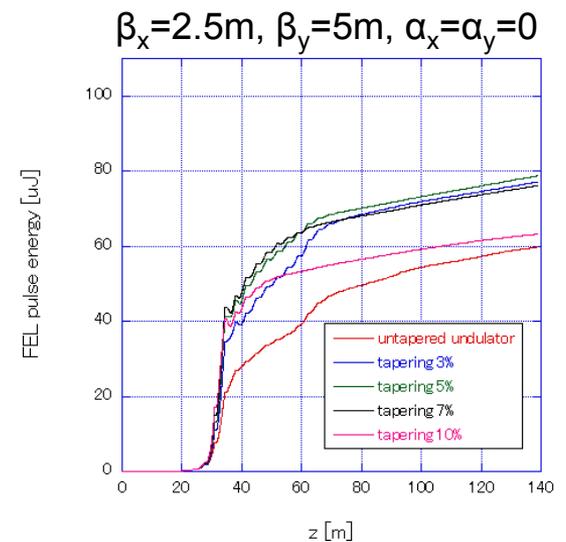
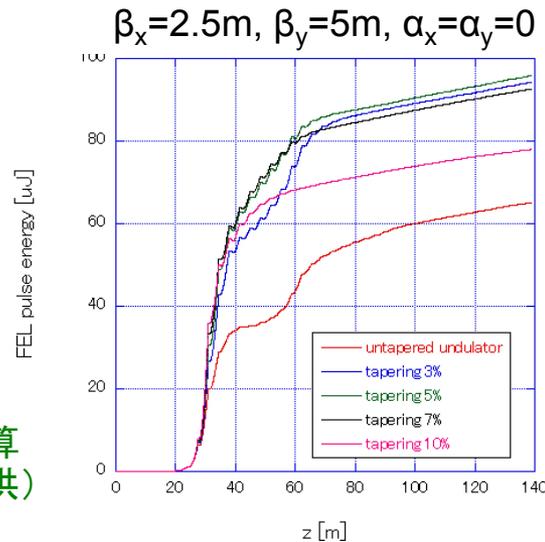
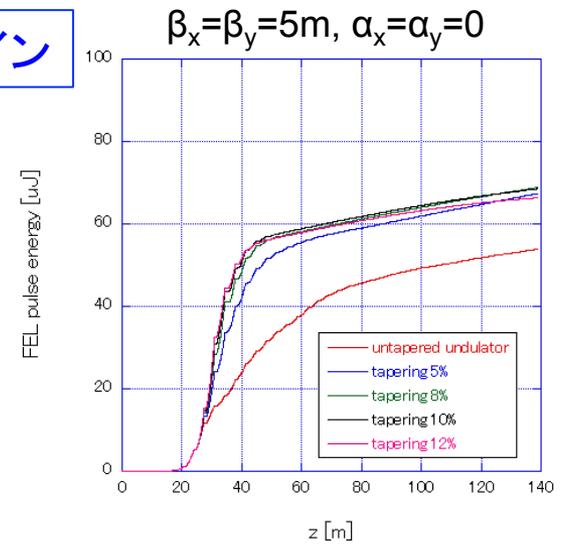
FEL出力(線形テーパーリング無): 8.9/17.8 kW @ 9.75/19.5 mA
 FEL出力(線形テーパーリング有): 18.0/36.0 kW @ 9.75/19.5 mA

FELシミュレーション (3)

アーク+シケイン



シケイン



Genesisによる計算
(加藤氏データ提供)

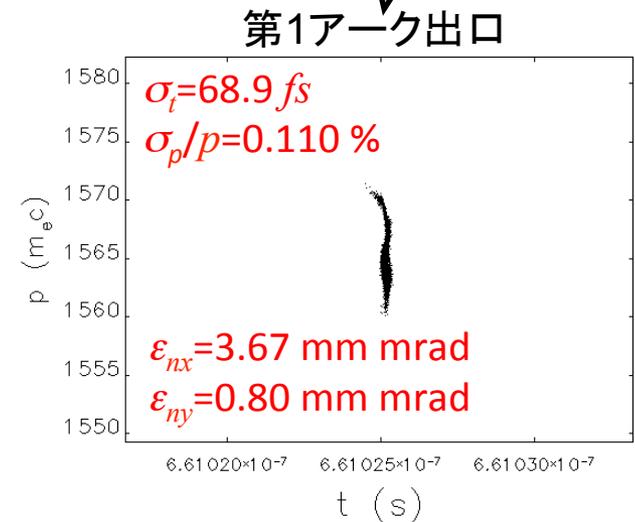
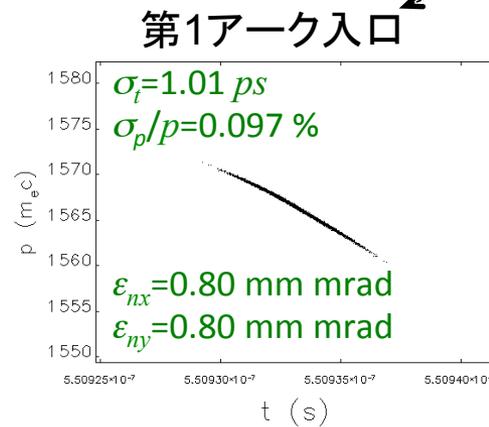
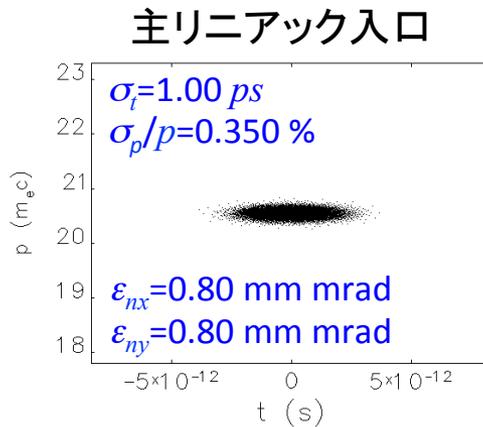
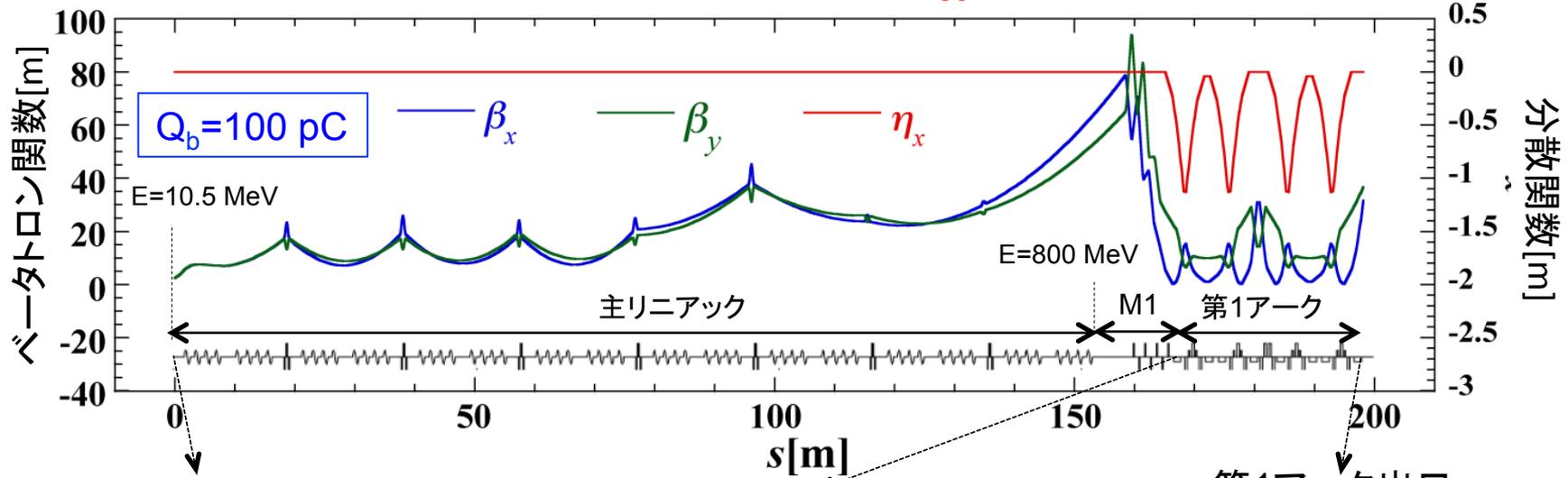
アーク+シケインの方がシケインによるバンチ圧縮よりも出力が高い。

まとめ

- EUV-FEL光源の設計検討
 - 入射部(電子銃, 入射超伝導空洞)
 - 主リニアック(空洞, オプティクス, HOMの影響)
 - アーク部&シケイン
 - バンチ圧縮シミュレーション
 - FELシミュレーション(線形テーパーリング含む)
- 今後の課題
 - 合流部設計 → バンチ圧縮シミュレーション
 - バンチ復元シミュレーション
 - アンジュレータシステムの設計・最適化
 - 総合的な調整&最適化 → 必要に応じて再設計

アーク部によるバンチ圧縮(3)

主リニアック + 第1アーク ($R_{56}=0.30$ m)



RF位相と六極電磁石によるピアースパラメータの最小化

$K_2(\text{SX1}) = -28.8$ [m^{-3}], $K_2(\text{SX4}) = 36.2$ [m^{-3}], $\phi_{RF} = 96.3$ [deg]

elegantによるシミュレーション