

# Beam Dynamicsに関する報告

高エネルギー加速器研究機構

中村 典雄

2012年10月11日 第65回ERL検討会

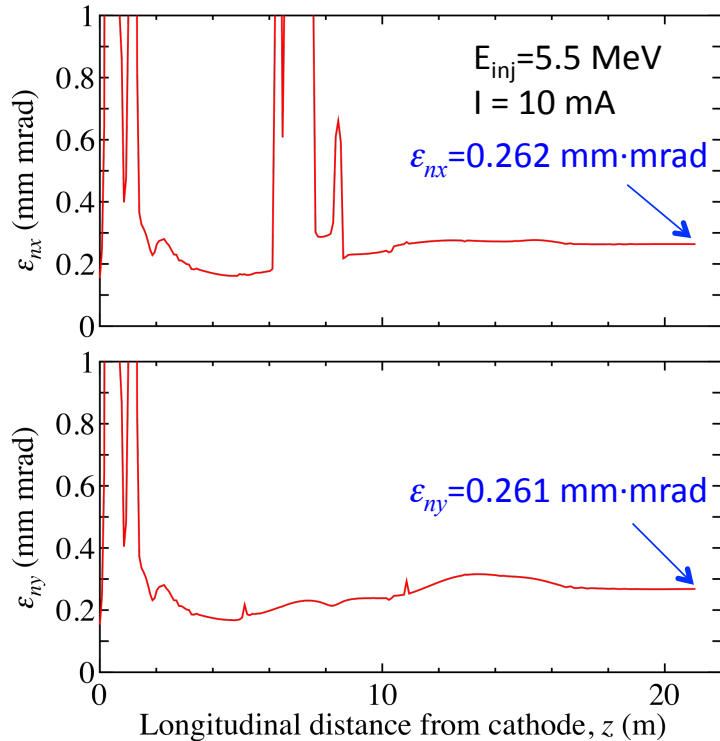
# 報告内容

1. cERL入射部 & 周回部
2. cERLレーザーコンプトン散乱(LCS)X線発生用オプティクス
3. バンチ圧縮
4. 3GeV ERL光源

第54回のERL検討会(2011.7.14)の発表(島田氏)以降の活動報告が主である。

# cERL入射部 & 周回部

# 入射部の設計(1)

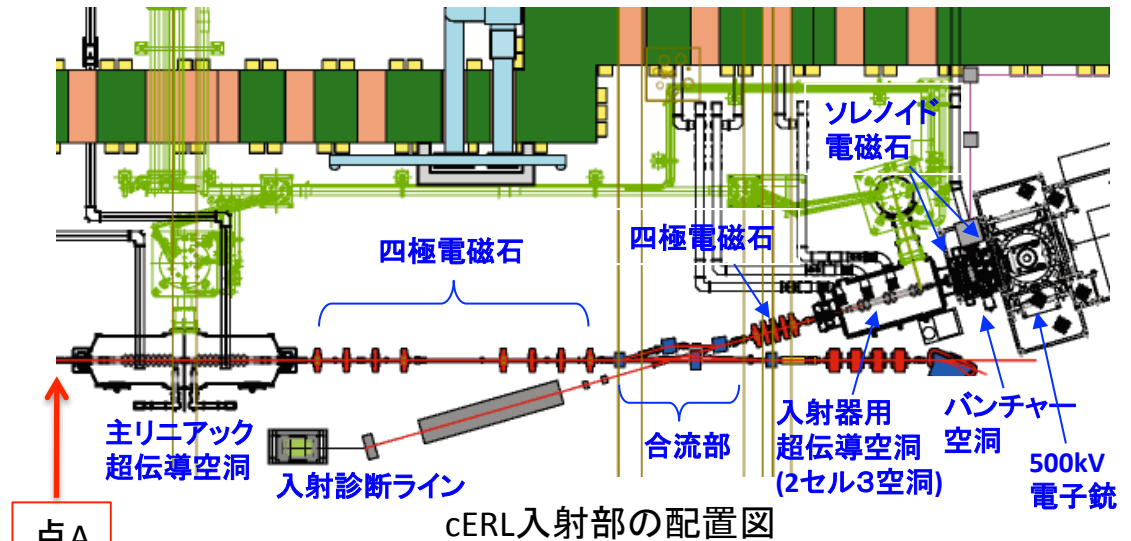


電子銃から主加速空洞出口までの規格化エミッタンスの変化(多変数最適化シミュレーション結果、トラッキングマクロ粒子数2k)

宮島氏計算



**第1目標(1 mm·mrad@10 mA)の実現可能**



入射部パラメータ表

パラメータ	値
DC電子銃加速電圧	500 kV
入射ビームエネルギー	5.5 MeV
バンチャ電荷(電流)	7.7 pC/bunch (10mA)
レーザーパルス全幅	16 ps
レーザースポットサイズ	0.53 mm
ソレノイド磁場(1号、2号)	0.0364, 0.0146 T
バンチャー空洞電圧	105 kV
入射超伝導空洞の加速勾配	6.84, 7.53, 7.07 MV/m
入射超伝導空洞の加速位相	29.9, -9.83, -9.99 deg.

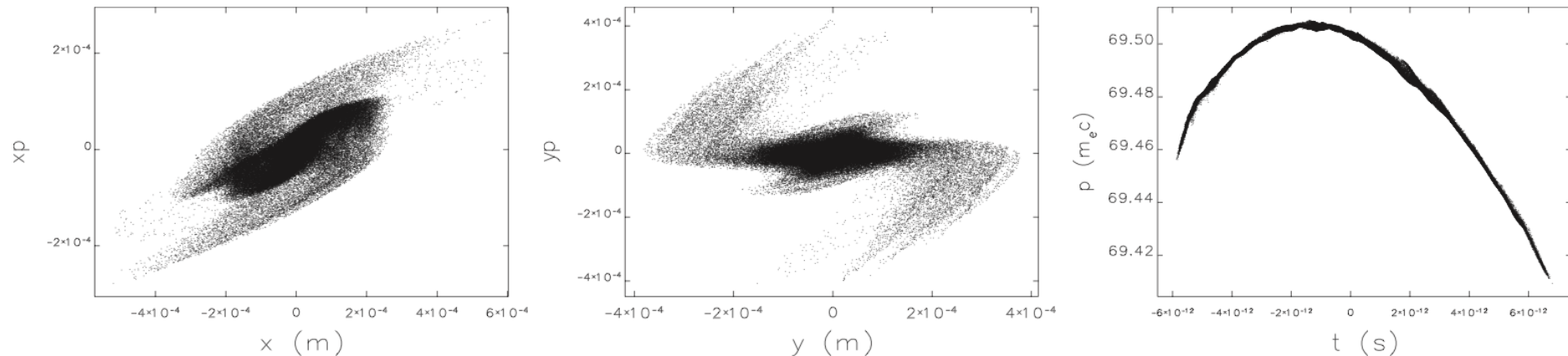
# 入射部の設計(2)

## 引き渡し点Aでのビームパラメータ

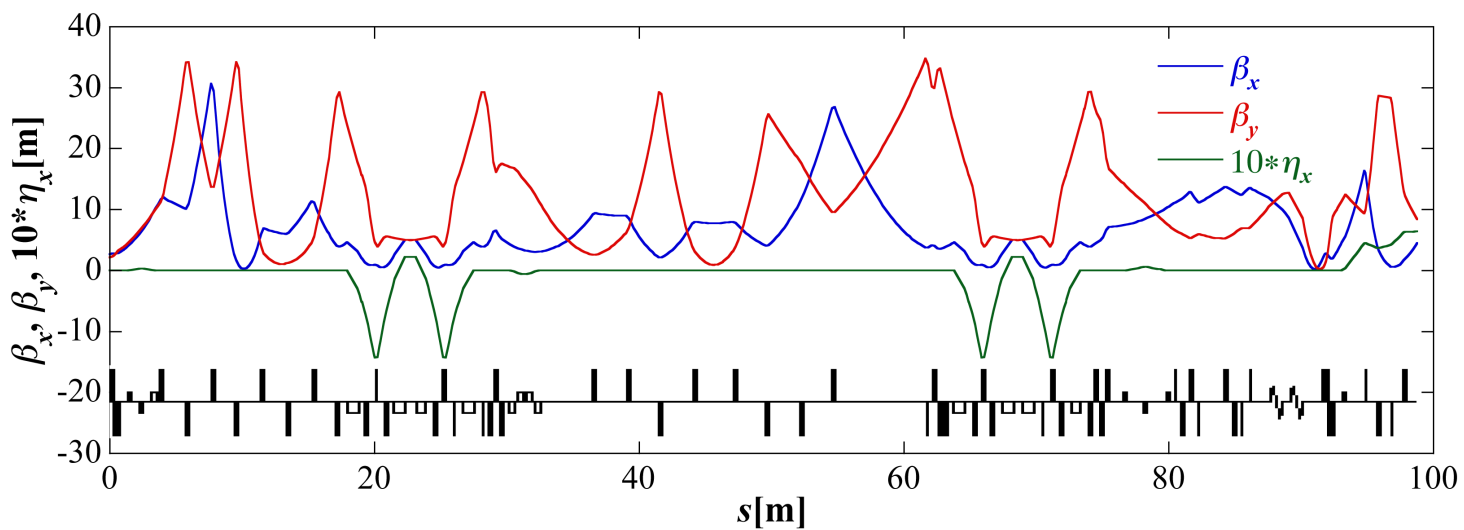
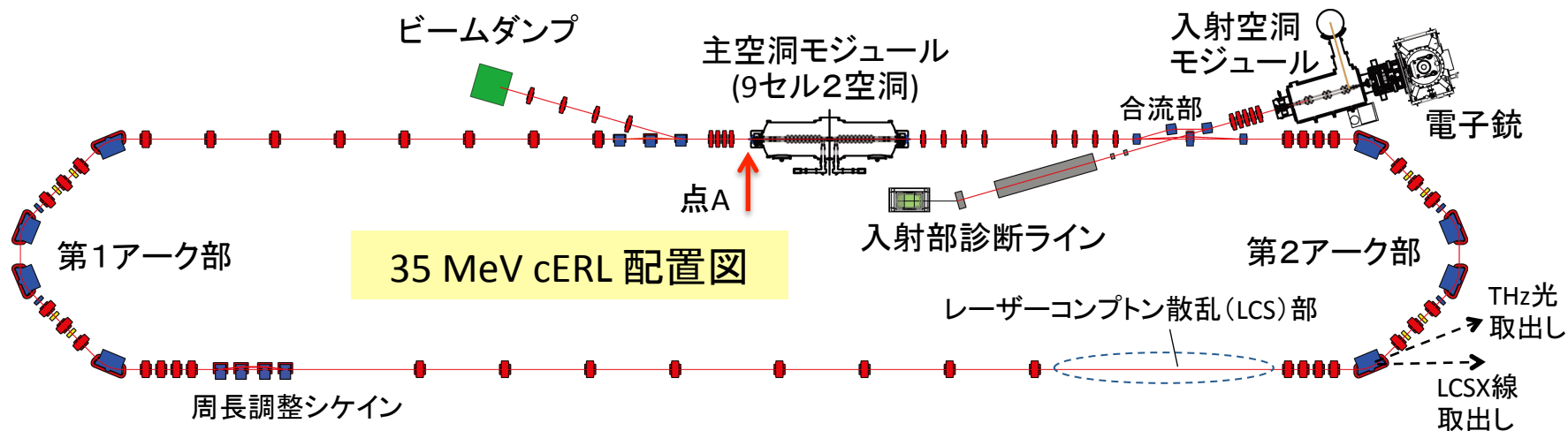
パラメータ	マクロ粒子数 2k	マクロ粒子数 100k
規格化エミッタンス(水平) $\epsilon_{nx}$ [mm-mrad]	0.262	0.307
規格化エミッタンス(垂直) $\epsilon_{ny}$ [mm-mrad]	0.261	0.361
ビームサイズ(水平) $\sigma_x$ [mm]	0.846	0.873
エネルギー $E$ [MeV]	35.515	35.513
エネルギー広がり $\sigma_E/E$	0.02908	0.01924
ベータatron関数(水平) $\beta_x$ [m]	2.673	2.595
ベータatron関数(垂直) $\beta_y$ [m]	2.117	2.031
ベータatron関数(水平) $\alpha_x$	-0.601	-0.945
ベータatron関数(垂直) $\alpha_y$	-0.179	0.305

## 引き渡し点Aでの粒子の位相空間分布(100k)

宮島氏計算



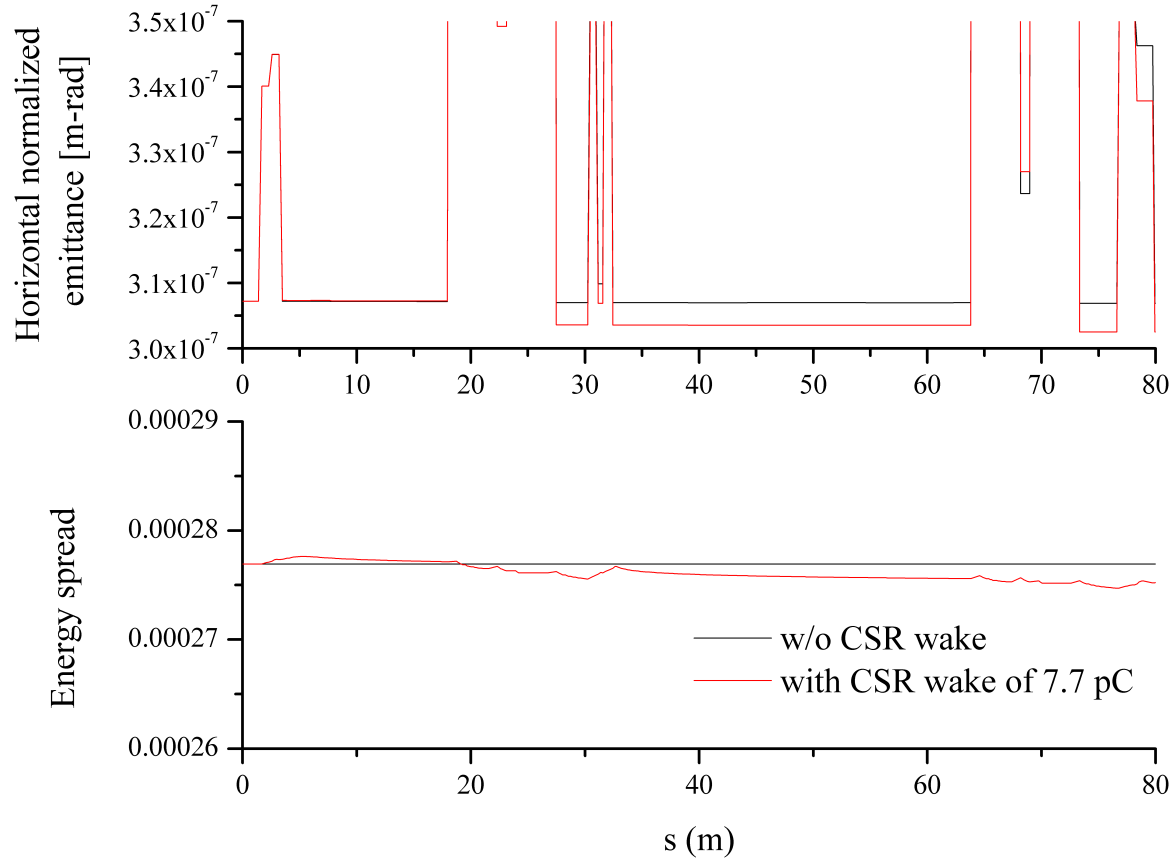
# 周回部リニアオプティクス



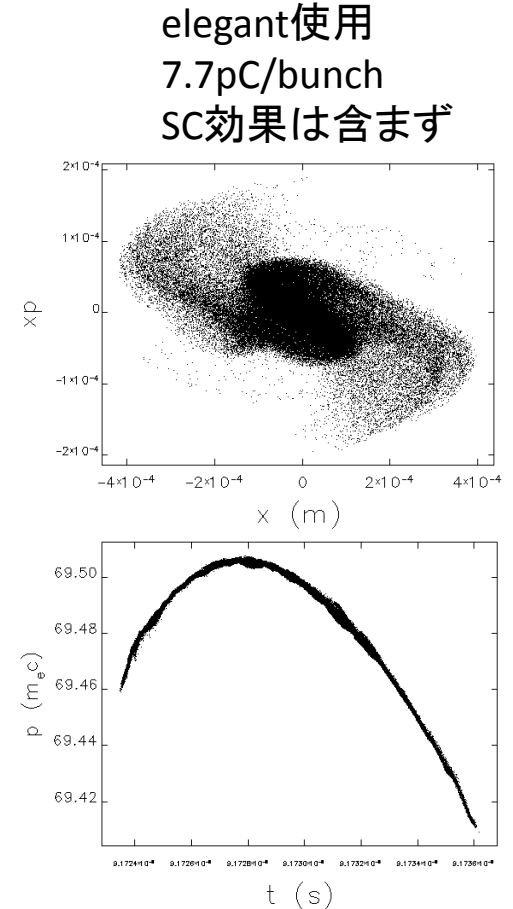
ベータatron関数 $\beta_{x,y}$ 及び分散関数 $\eta_x$ (主空洞出口点Aからビームダンプまで)

# CSR Wakeの影響

## S2E simulation



エミッタンス&エネルギー幅の変化



第1アーク出口の位相空間分布

島田氏計算

CSR wakeによって、エミッタンスとエネルギー幅は大きく変化しない。

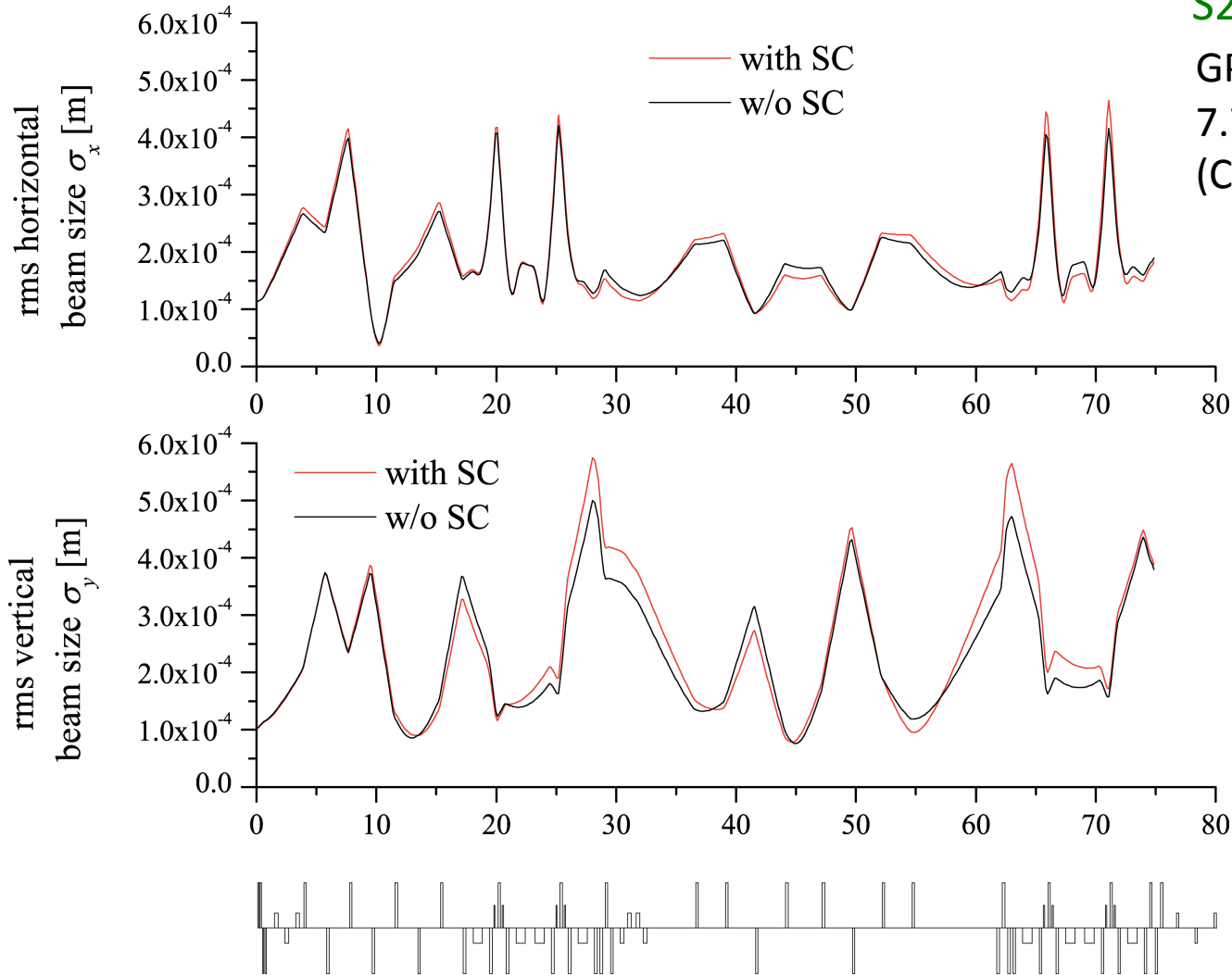
# 空間電荷効果(SC)の影響

S2E simulation

GPT使用

7.7pC/bunch

(CSRは含まず)

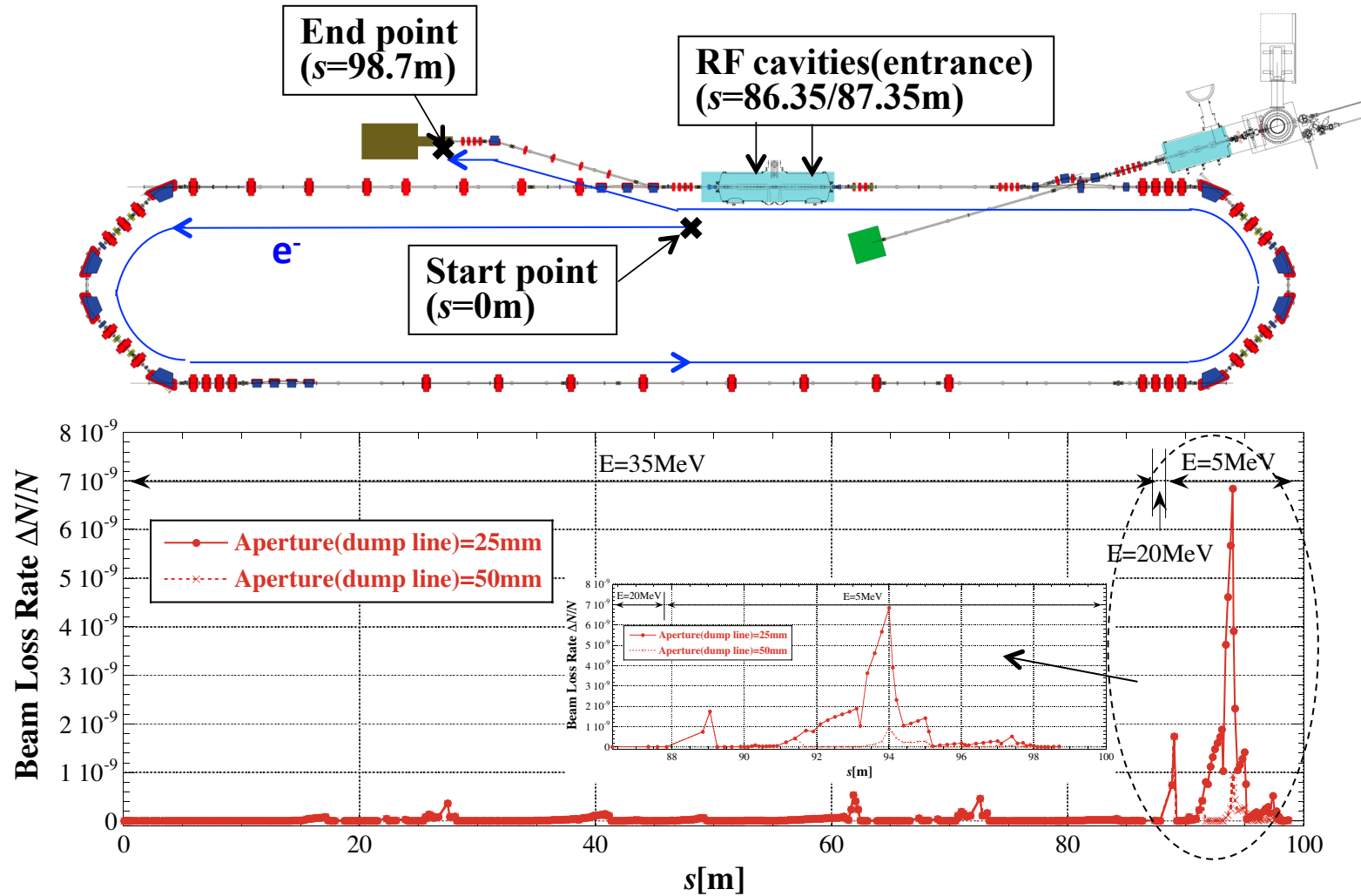


島田氏計算

7.7pCでは空間電荷効果の効果は限定的である。



# 残留ガス散乱によるビームロス



ビームロス(35MeV領域, L=86.35m) :  $\Delta I=0.11$ [nA] @  $I=10\text{mA}$

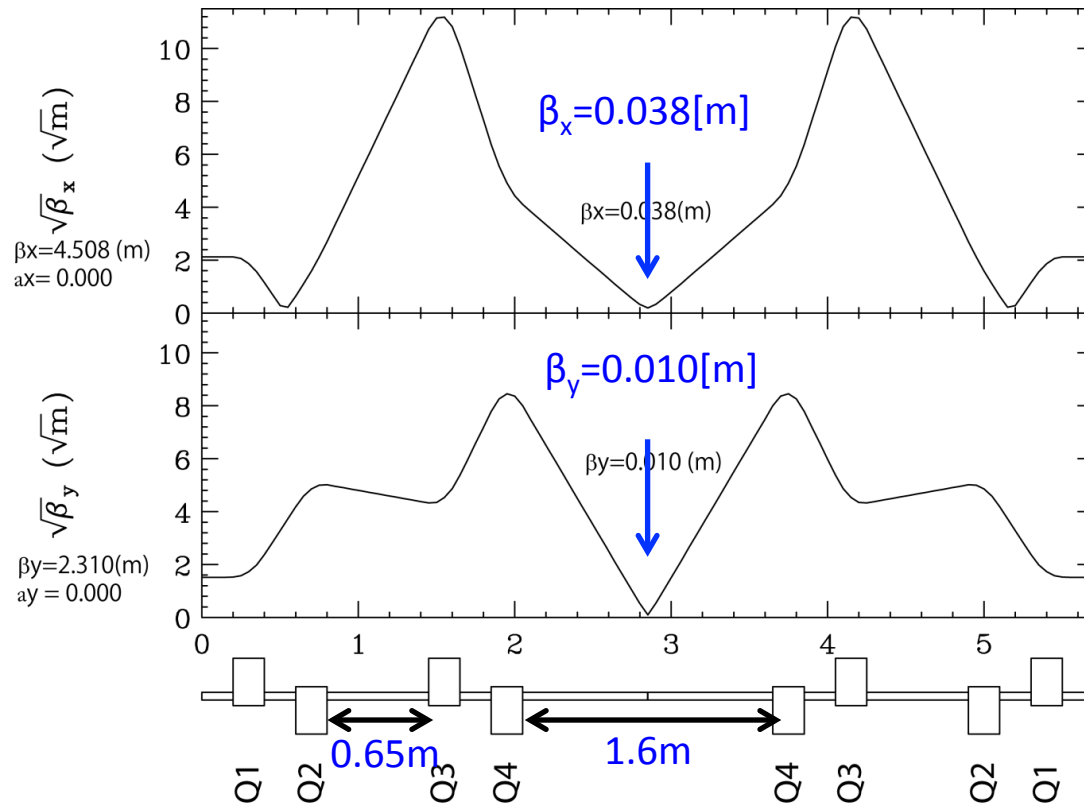
ビームロス(5MeV領域, L=11.12m) :  $\Delta I=0.51/0.078$ [nA] @  $I=10\text{mA}$ , aperture=25/50mm

## まとめと課題

- 入射部のオプティクス最適化を行い、周回部オプティクスとのマッチングをとった。
- S2Eシミュレーションを行い、入射部から減速空洞前までの空間電荷効果とCSRの影響を調べた。バンチ電荷7.7pCでは大きなビーム品質の劣化は見られない。
- JAEAの電子銃構造と機器配置の微修正を入れた入射部オプティクスの最適化を行う予定である。
- ビームロスの評価も1つの課題である (field emission, 各種散乱など)。

# cERLレーザーコンプトン散乱(LCS) X線発生用オプティクス

# LCSオプティクス



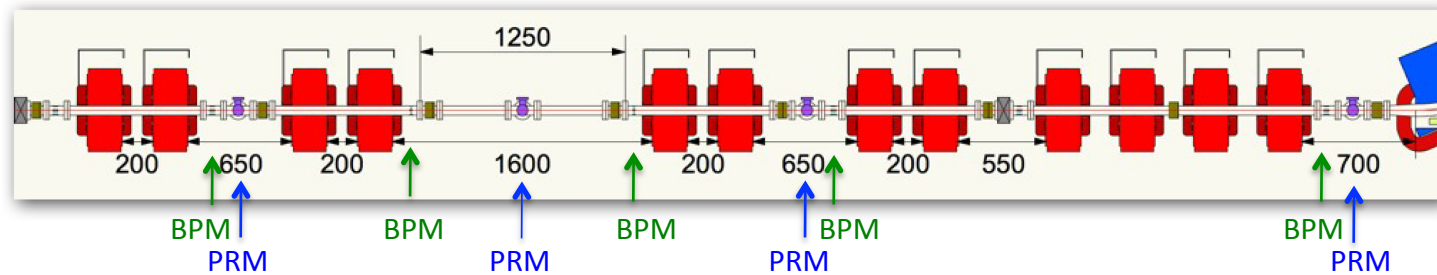
- Q1 = (L = .2 K1 = 4.996924 )
- Q2 = (L = .2 K1 = -2.127496 )
- Q3 = (L = .2 K1 = 2.827092 )
- Q4 = (L = .2 K1 = -2.668010 )
- DRIFT LQ = (L = .2 )

$\beta_x = 4.508$  (m)  
 $a_x = 0.000$

$\beta_{x,max} = 125.8$  [m]  
 $\sigma_{x,max} = 4.25$  [mm]  
 @  $\epsilon_{nx} = 10$  mm mrad

$\beta_y = 2.310$  (m)  
 $a_y = 0.000$

小林氏計算



BPM: ビーム位置モニタ (ボタンorストリップ) PRM: プロファイルモニタ(スクリーンモニタ)

# 運動量変動による影響

LCS直前でのパラメータ値

$E = 35.51 \text{ MeV}$  ( $\gamma\beta = 69.4942$ ),  $\varepsilon_{nx} = \varepsilon_{ny} = 0.3 \text{ mm mrad}$ ,  $\sigma_t = 3 \text{ ps}$

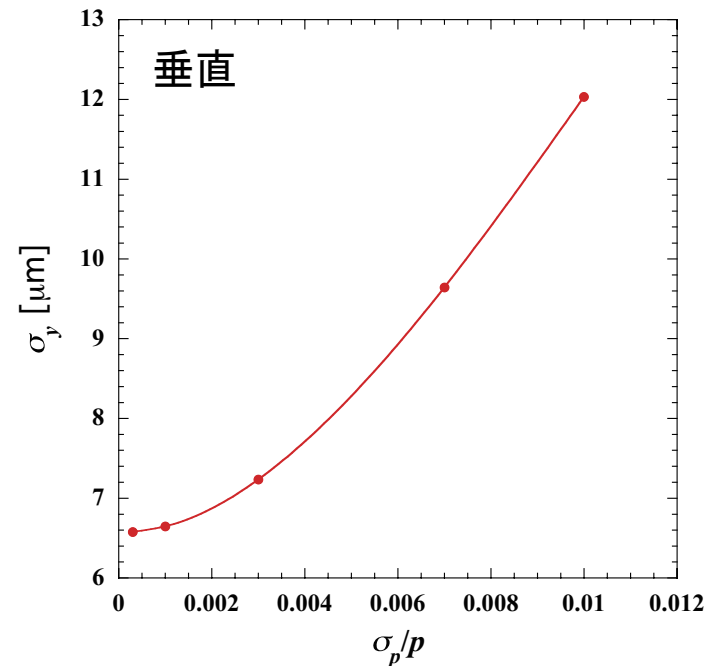
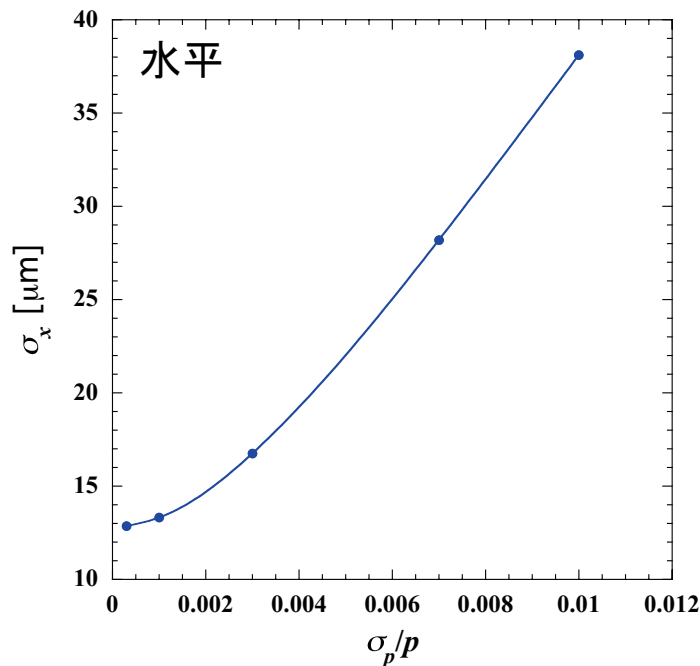
$\sigma_p/p = 0.0003$  (運動量変動が無い場合)

衝突点でのパラメータ(ビームサイズ、2次の転送行列)

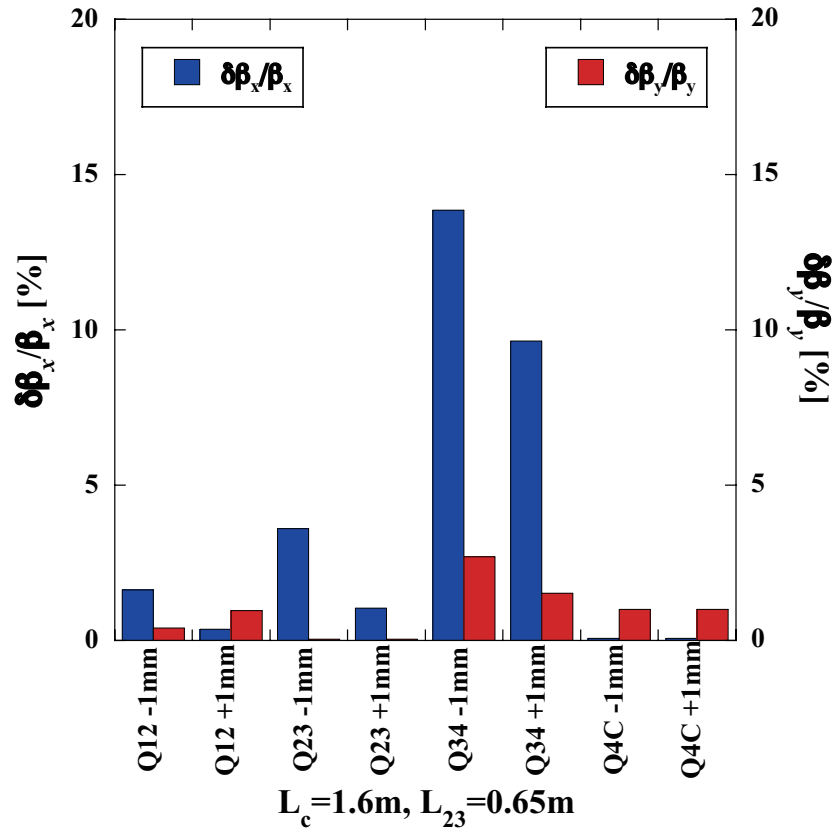
$\sigma_x = 12.81 \text{ um}$ ,  $\sigma_y = 6.57 \text{ um}$  ( $\sigma_p/p = 0$ の場合)

$T_{116} = -25.6034$ ,  $T_{126} = 0.9065$ ,  $T_{336} = 9.8574$ ,  $T_{346} = 5.2039$

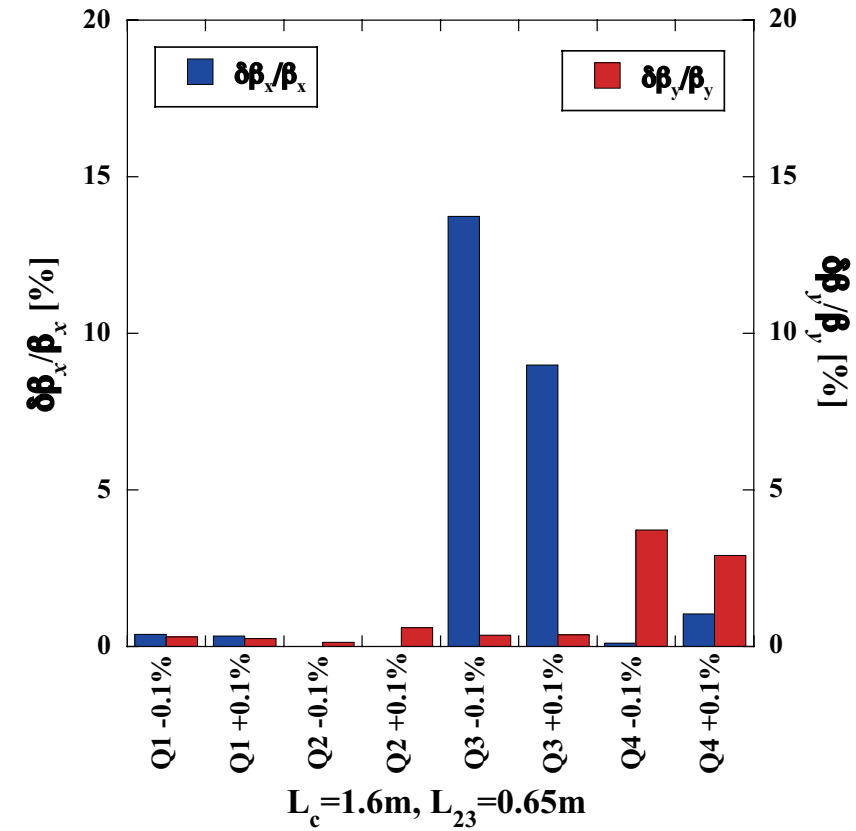
衝突点でのビームサイズの運動量広がり依存性(シミュレーション結果)



# 誤差の影響



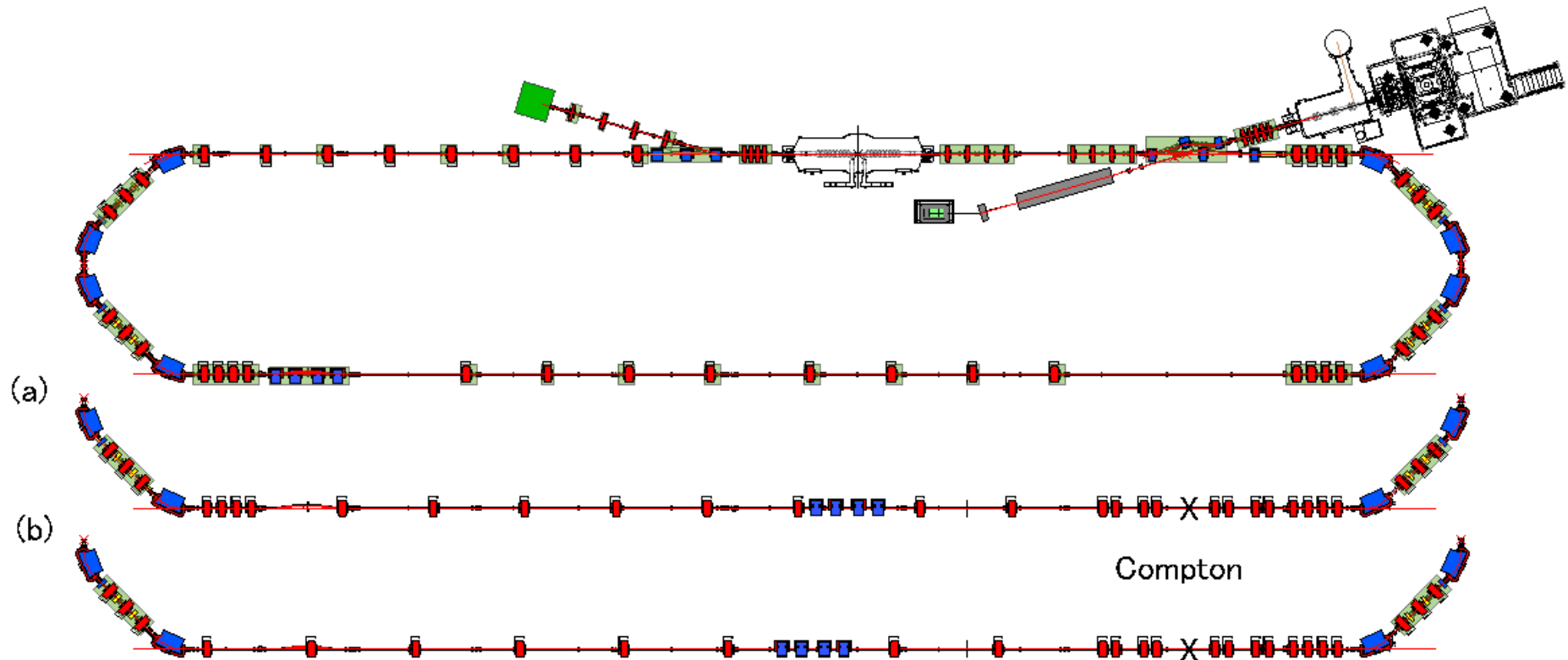
設置誤差 ( $\Delta z = \pm 1\text{mm}$ ) の影響



磁場誤差 ( $\pm 0.1\%$ ) の影響

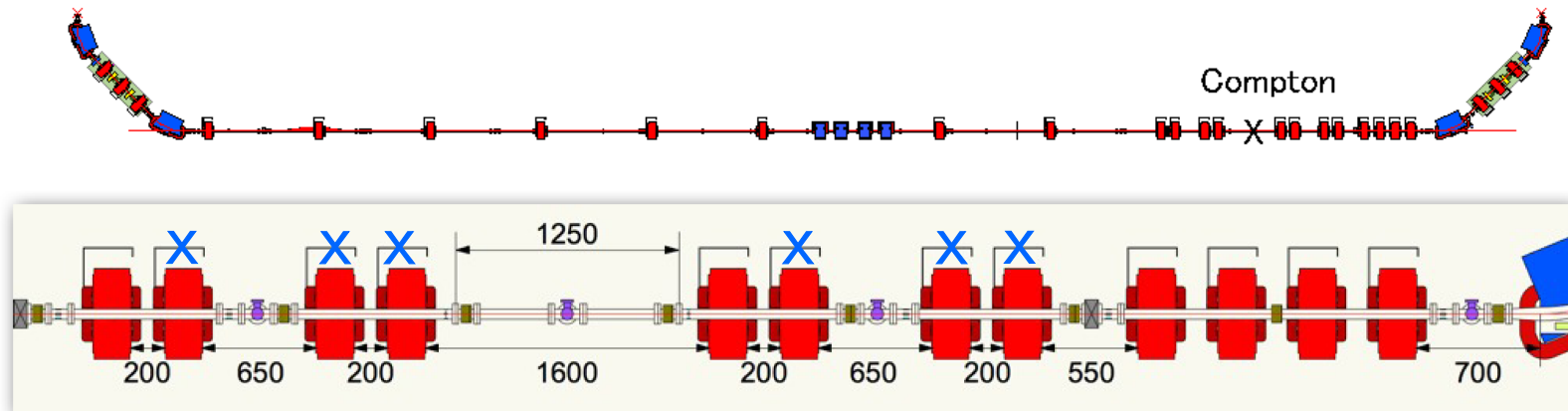
ベータatron関数で最大15%以下 (ビームサイズで約7%以下)

# 南直線部の電磁石配置案

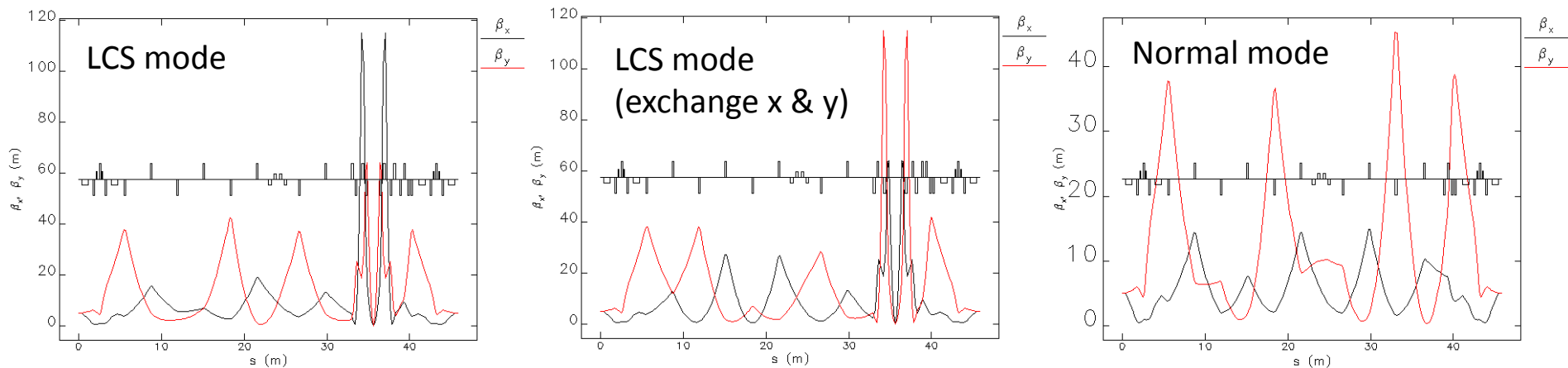


- 2つのラティスでLCSオプティクスとのマッチングに成功した。
  - a. 追加の可能性がある四極電磁石4台を加えた場合
  - b. 現有の台数(追加の四極電磁石4台を含まない。)

# LCSオプティクスへのマッチング



X: 通常運転モードでは使用しない。



島田氏計算

- 衝突部のxとyのoptics交換(共振器設置面の変更)をしてもマッチングはとれる。
- 衝突させない通常運転モードでもマッチングはとれる。

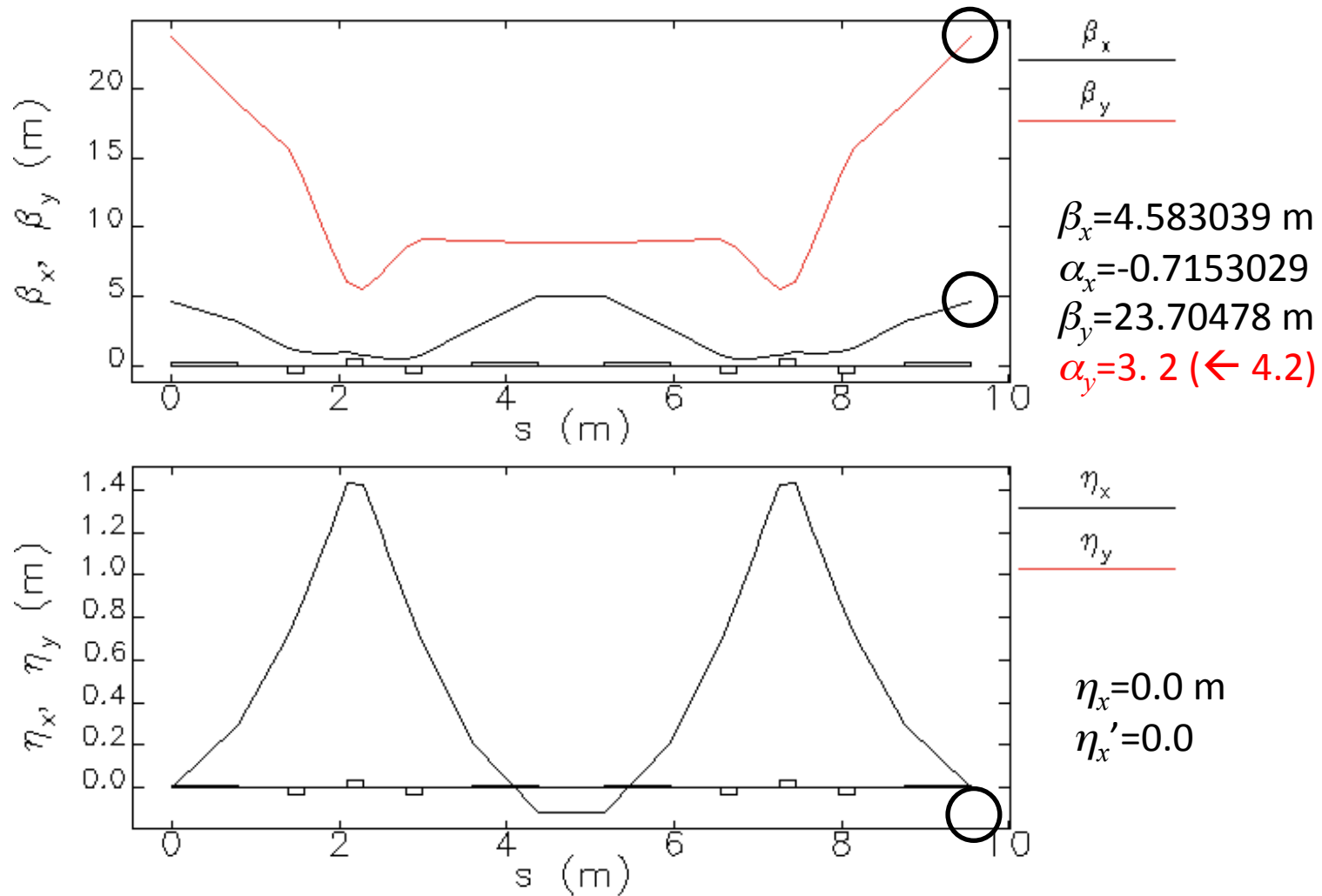


## まとめと課題

- レーザーコンプトン散乱(LCS)X線発生用の共振器レーザーとの衝突部を含むcERL南直線部のオプティクス設計を行った。
- 運動量変動及び設置誤差・磁場誤差の影響も調べた。特に大きな問題はない。
- 第1及び第2アーク部とのマッチングに成功した。

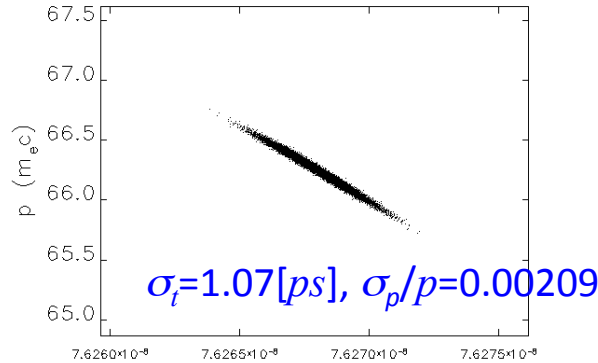
# バンチ圧縮

# 第1アーケ部オプティクス ( $R_{56}=0.15$ )

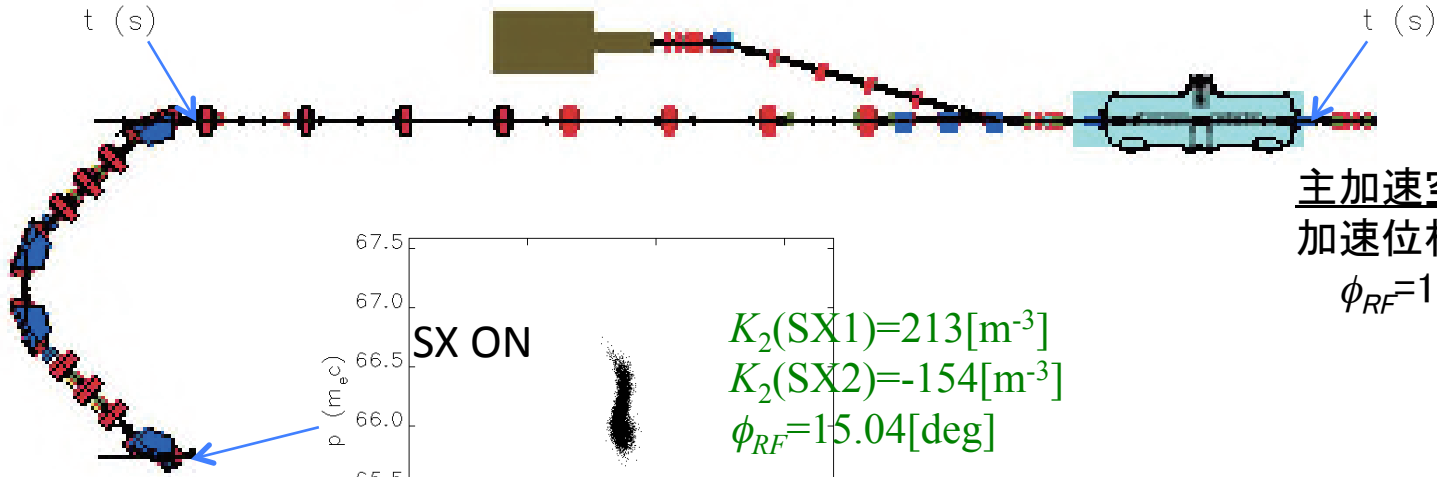
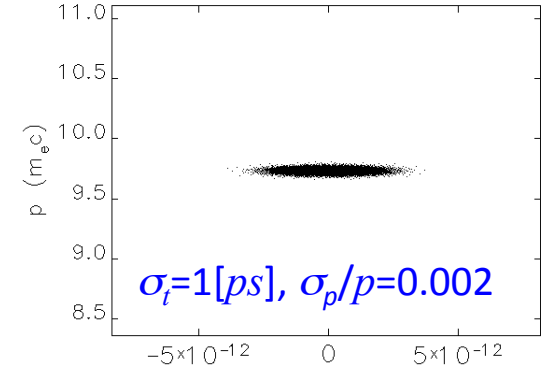


バンチ圧縮用に第1アーケ部オプティクスを $R_{56}=0$ から $R_{56}=0.15$ に変更した。

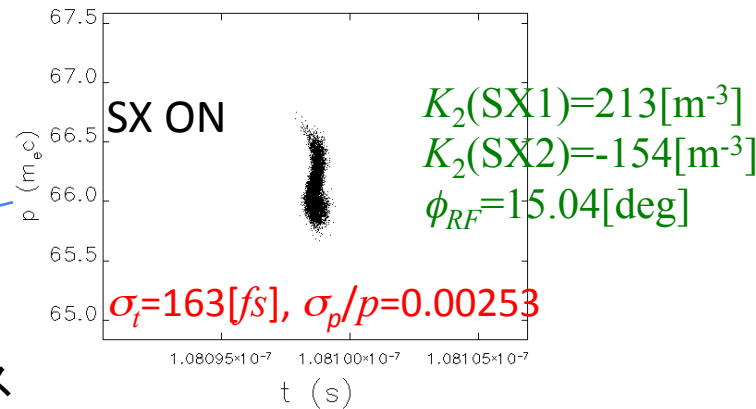
# バンチ圧縮 ( $R_{56}=0.15, 1ps$ )



バンチ電荷: 77pC  
 初期バンチ長: 1ps  
 初期運動量幅:  $2e-3$   
 CSR on



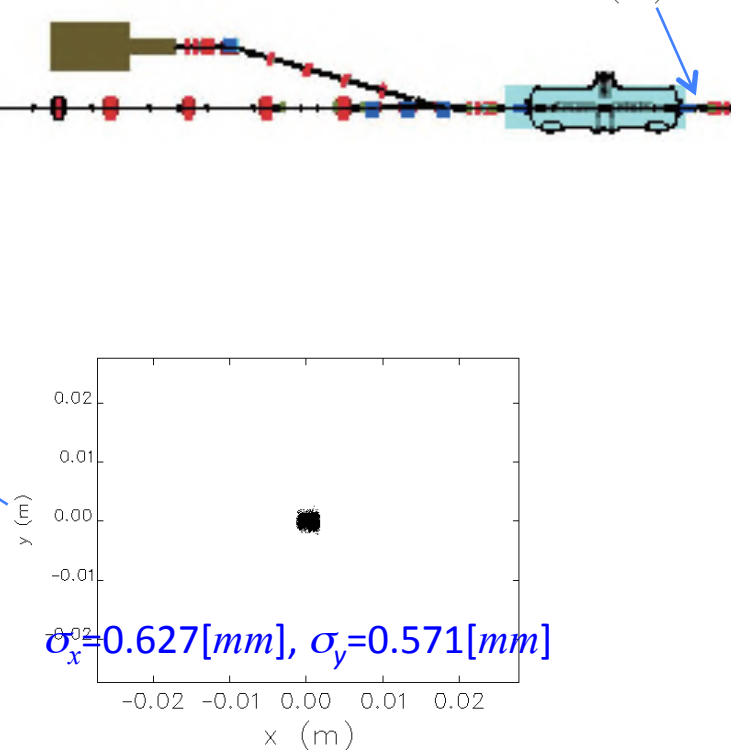
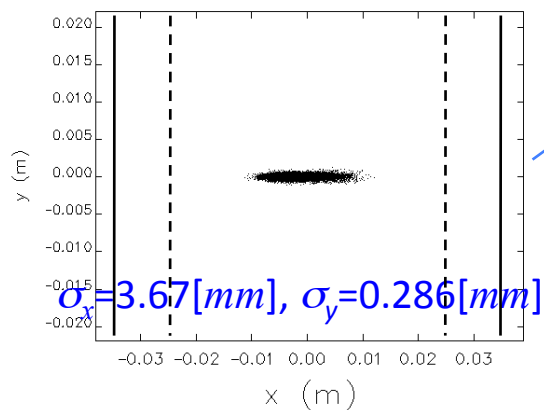
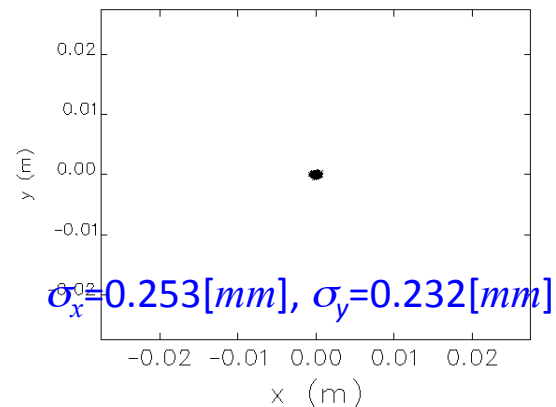
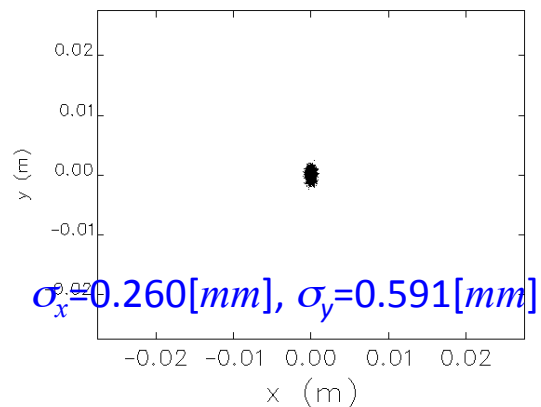
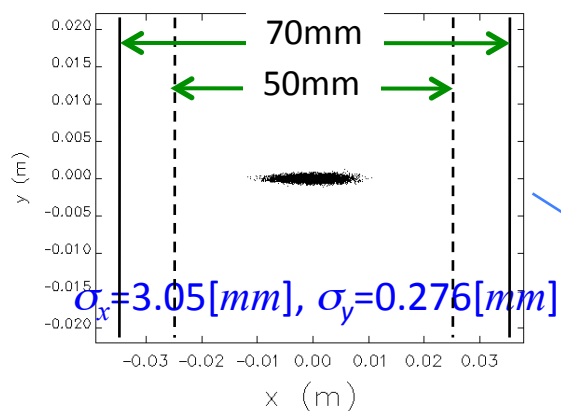
主加速空洞  
 加速位相  
 $\phi_{RF}=15.04[deg]$



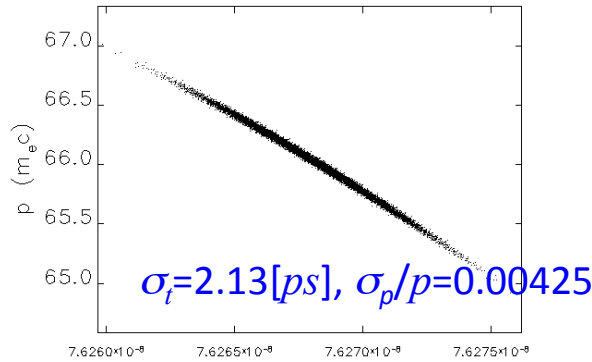
第1アーク部  
 四極電磁石  
 非等時性オプティクス  
 $R_{56}=(\Delta L/L)/(\Delta p/p)=0.15$   
 六極電磁石ON

# ビームサイズ ( $R_{56}=0.15, 1ps$ )

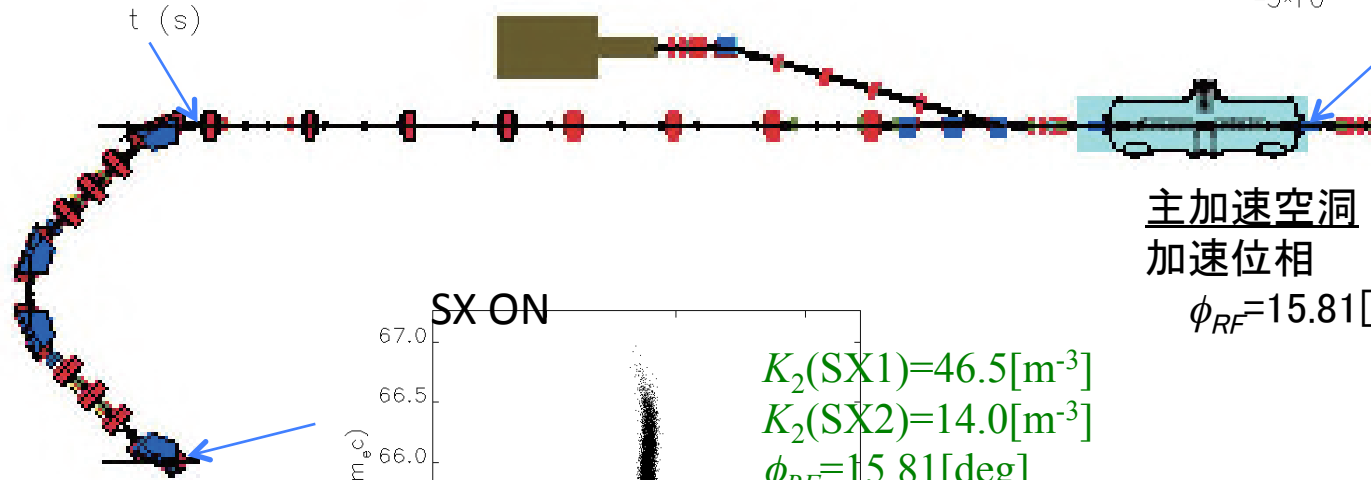
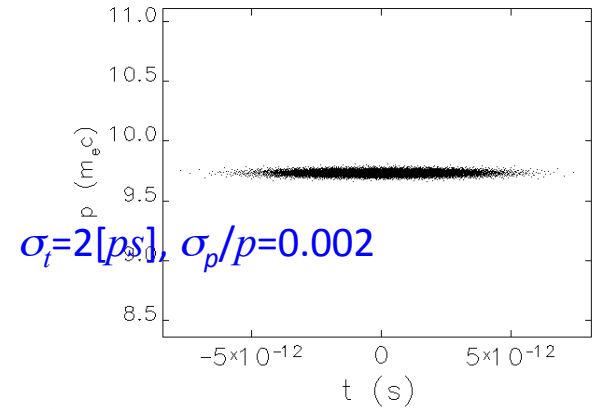
バンチ電荷: 77pC  
初期バンチ長: 1ps  
初期運動量幅:  $2e-3$   
CSR on



# バンチ圧縮 ( $R_{56}=0.15, 2ps$ )

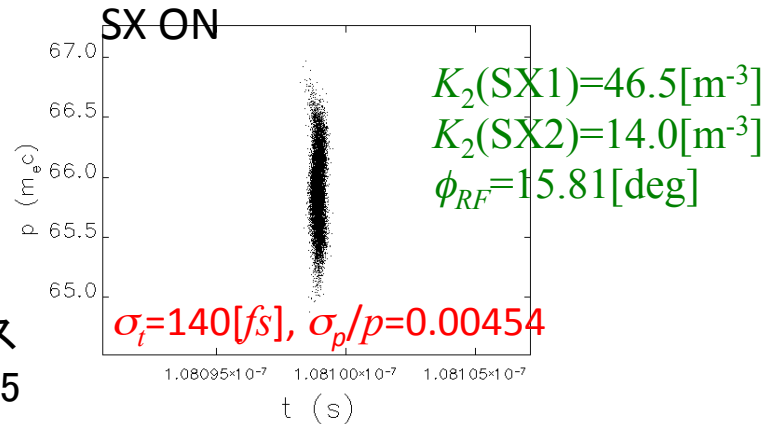


バンチ電荷: 77pC  
 初期バンチ長: 2ps  
 初期運動量幅:  $2e-3$   
 CSR on



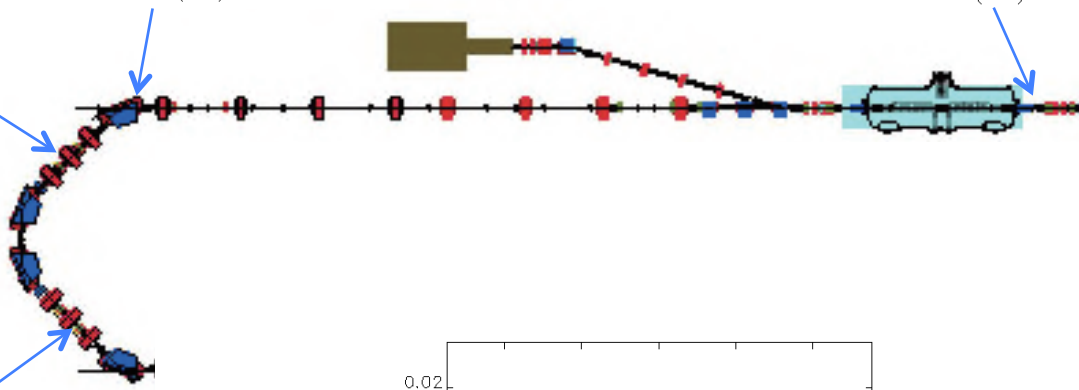
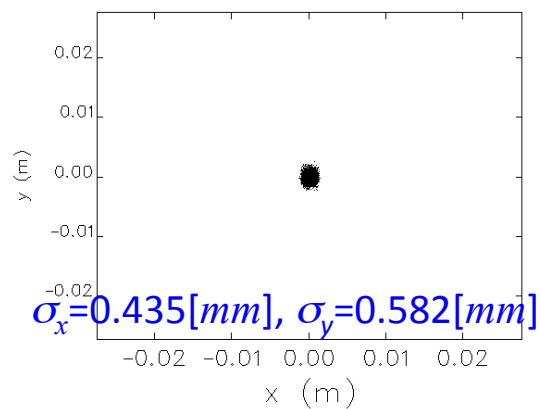
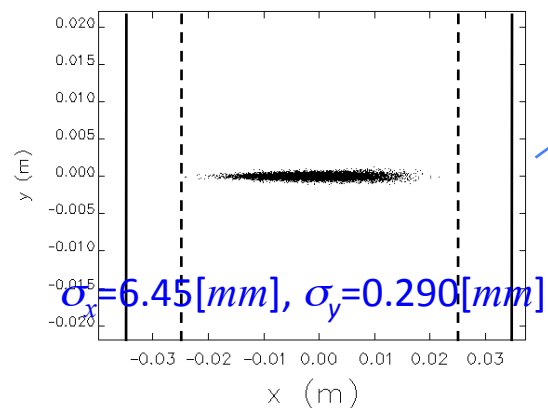
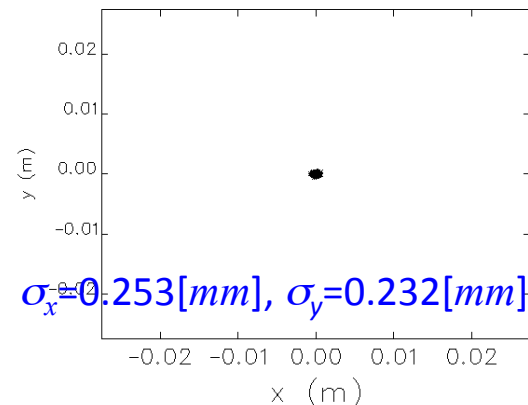
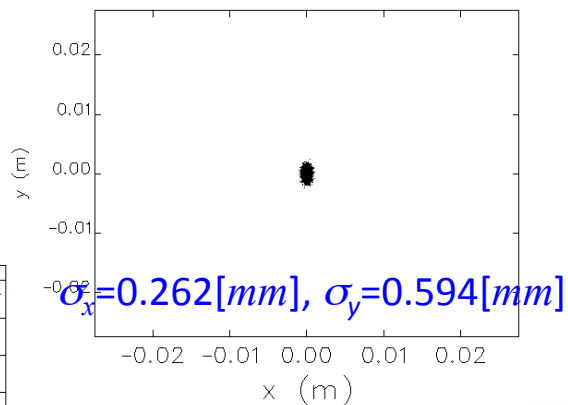
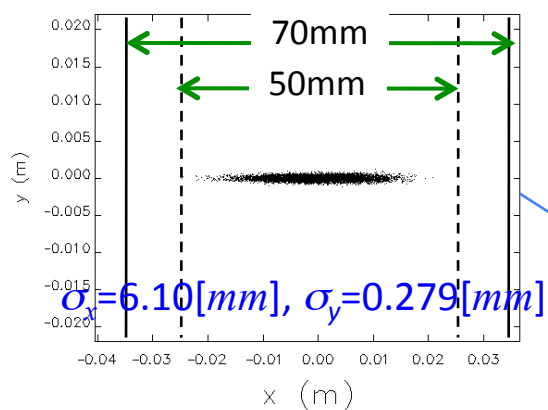
主加速空洞  
 加速位相  
 $\phi_{RF}=15.81[deg]$

第1アーク部  
 四極電磁石  
 非等時性オプティクス  
 $R_{56}=(\Delta L/L)/(\Delta p/p)=0.15$   
 六極電磁石ON



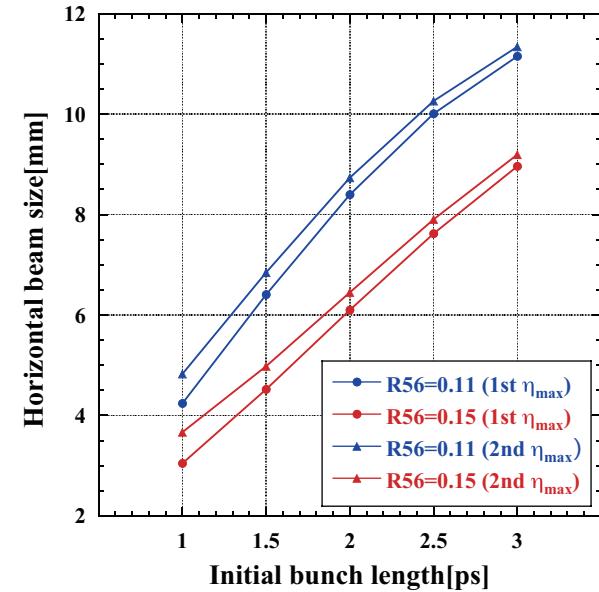
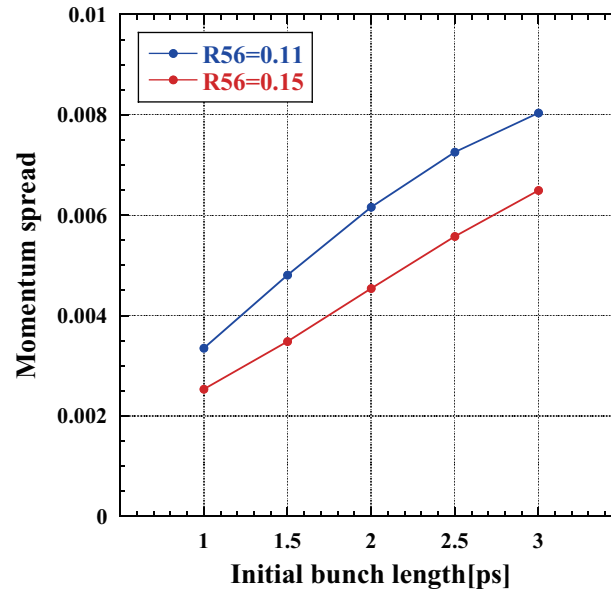
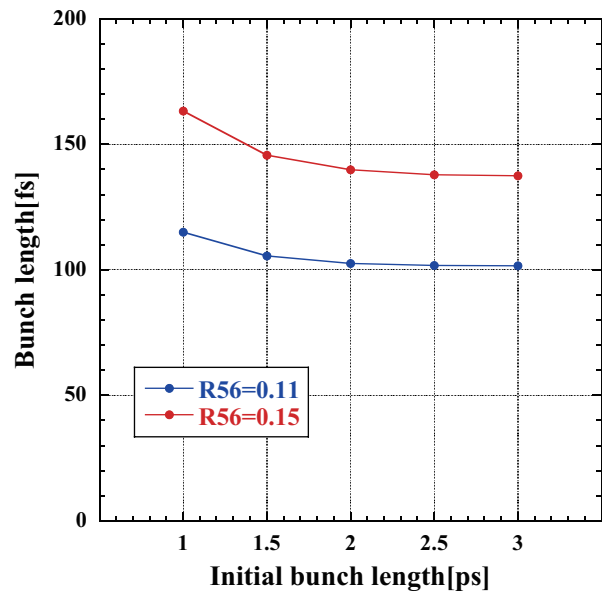
# ビームサイズ ( $R_{56}=0.15, 2ps$ )

バンチ電荷: 77pC  
初期バンチ長: 2ps  
初期運動量幅:  $2e-3$   
CSR on



# $R_{56}$ & 初期バンチ長依存性

バンチ電荷: 77pC/bunch, 初期運動量: 0.002, 初期規格化エミッタンス: 1 mm-mrad



- $R_{56}$  が小さいとバンチ長は短くなるが、運動量幅が大きくなってビームロスにつながる。
- 初期バンチ長が大きい場合も、アーク部でのビームロスに注意する必要がある。



## まとめと課題

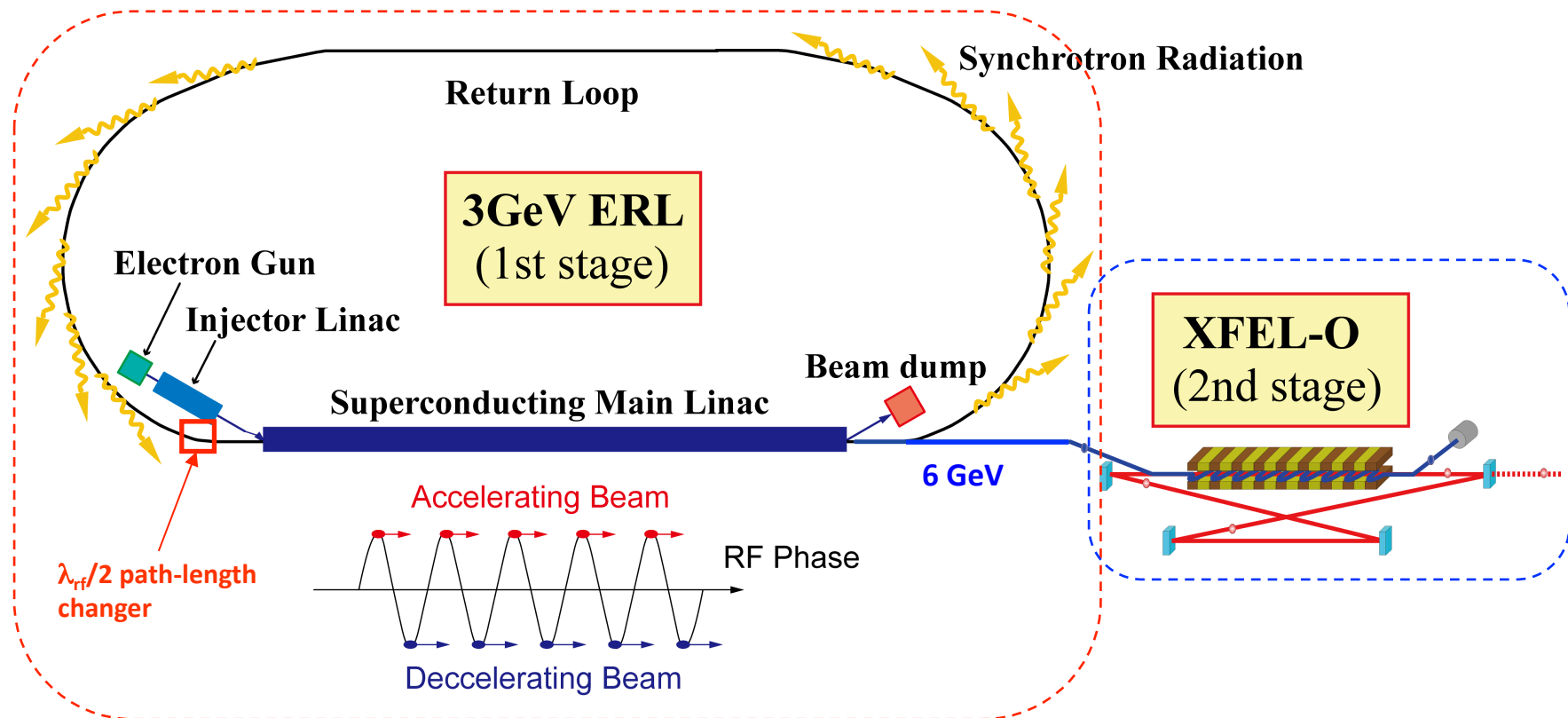
- 第1アーク部までのバンチ圧縮モードのオプティクス設計を行い、シミュレーションで150fs以下のバンチ長を達成できた。
- 初期バンチ長が2psを越えると、運動量広がりが大きくなるので、アーク部でのビームロスに注意が必要である。
- 第1アーク部以降のオプティクス設計が未検討である。特に、第2アーク部では、バンチ復元(伸長)を行う( $R_{56} < 0$ )。CSRによるビーム品質の劣化とそれによるビームロスに注意が必要である。

# 3GeV ERL光源

# 3GeV-ERL光源計画

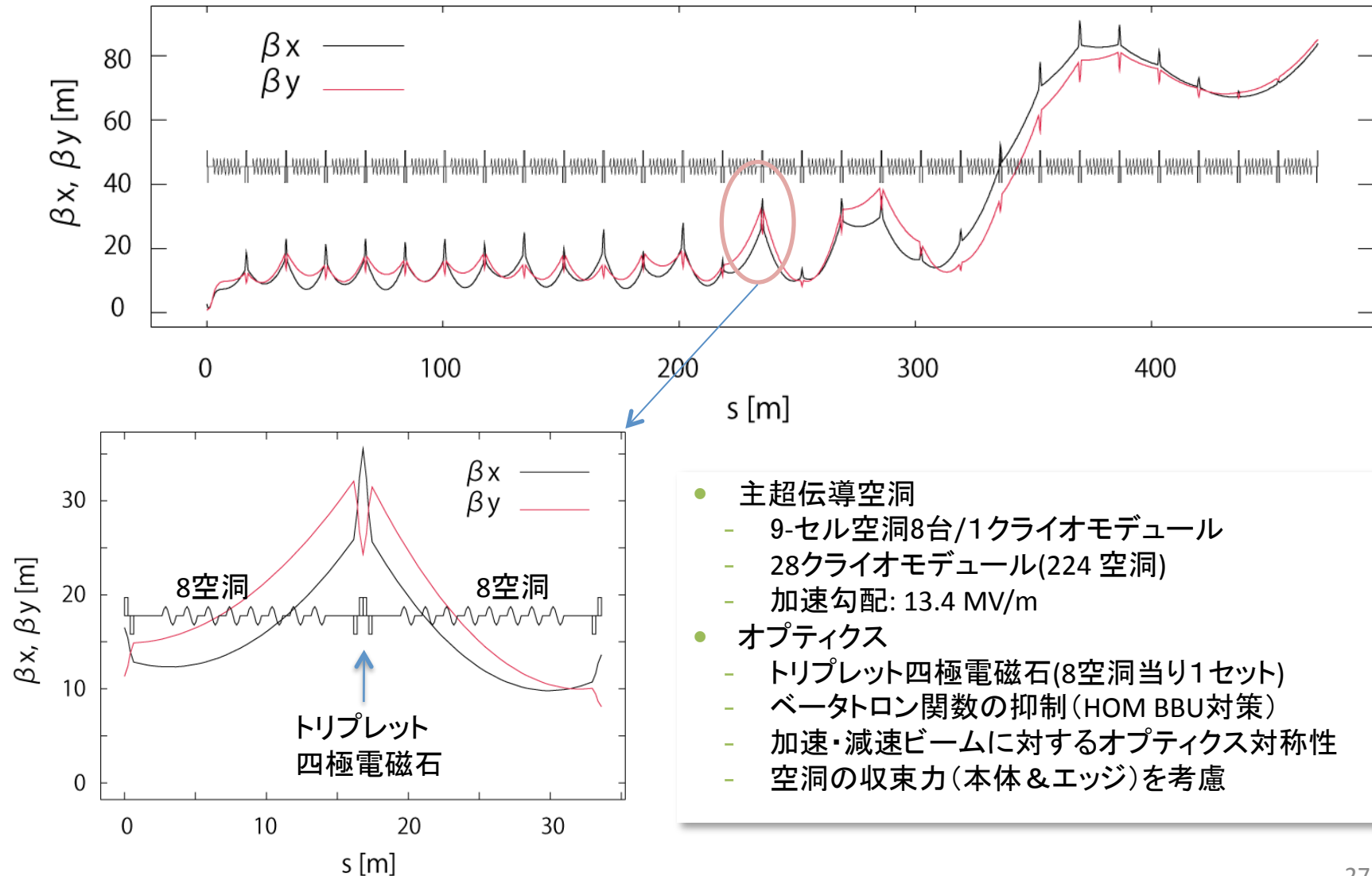
## KEK-ERL光源計画

1. **3-GeV ERL** (VUV・X線放射光源)
2. **6-GeV X線自由電子レーザー共振器**



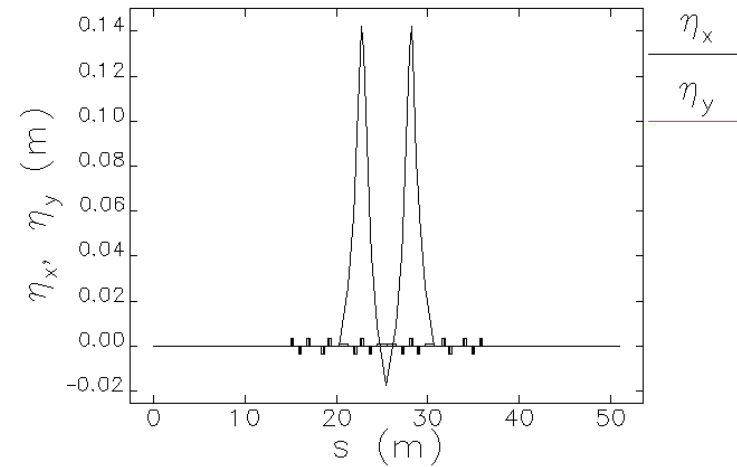
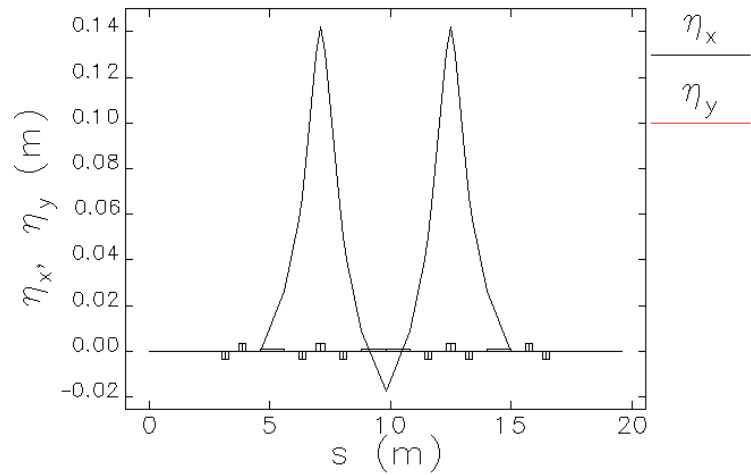
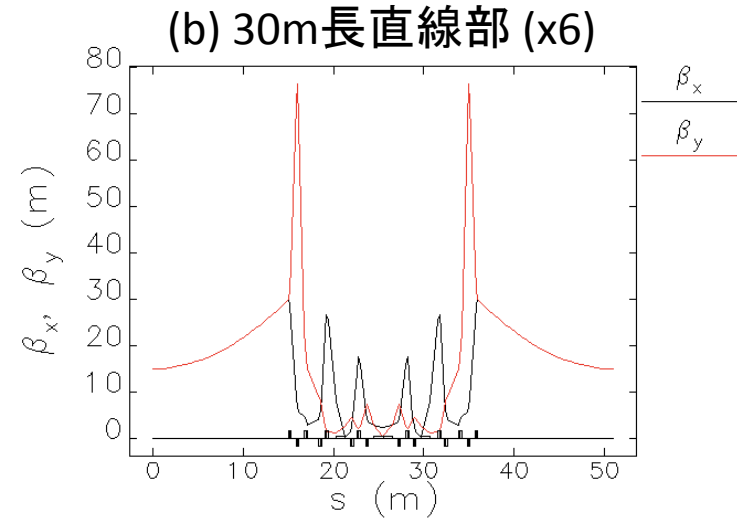
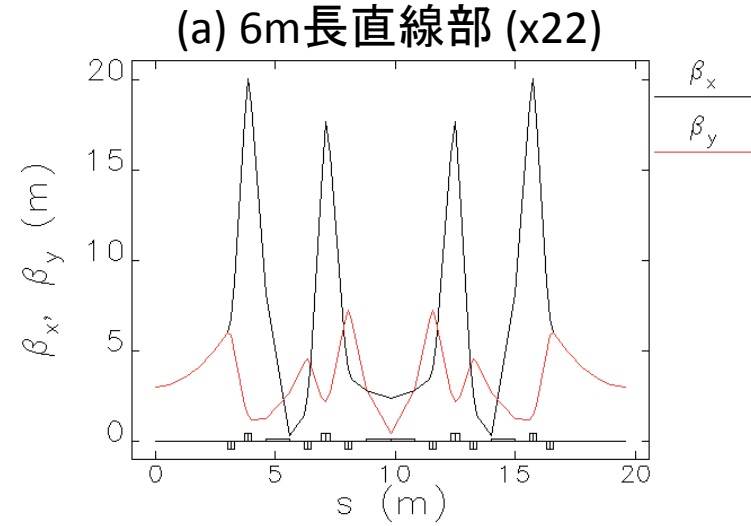
KEK-ERL光源計画の概念図

# 主ライナックのオプティクス



- 主超伝導空洞
  - 9-セル空洞8台/1クライオモジュール
  - 28クライオモジュール(224 空洞)
  - 加速勾配: 13.4 MV/m
- オプティクス
  - トリプレット四極電磁石(8空洞当り1セット)
  - ベータatron関数の抑制(HOM BBU対策)
  - 加速・減速ビームに対するオプティクス対称性
  - 空洞の収束力(本体&エッジ)を考慮

# 周回部TBAセル

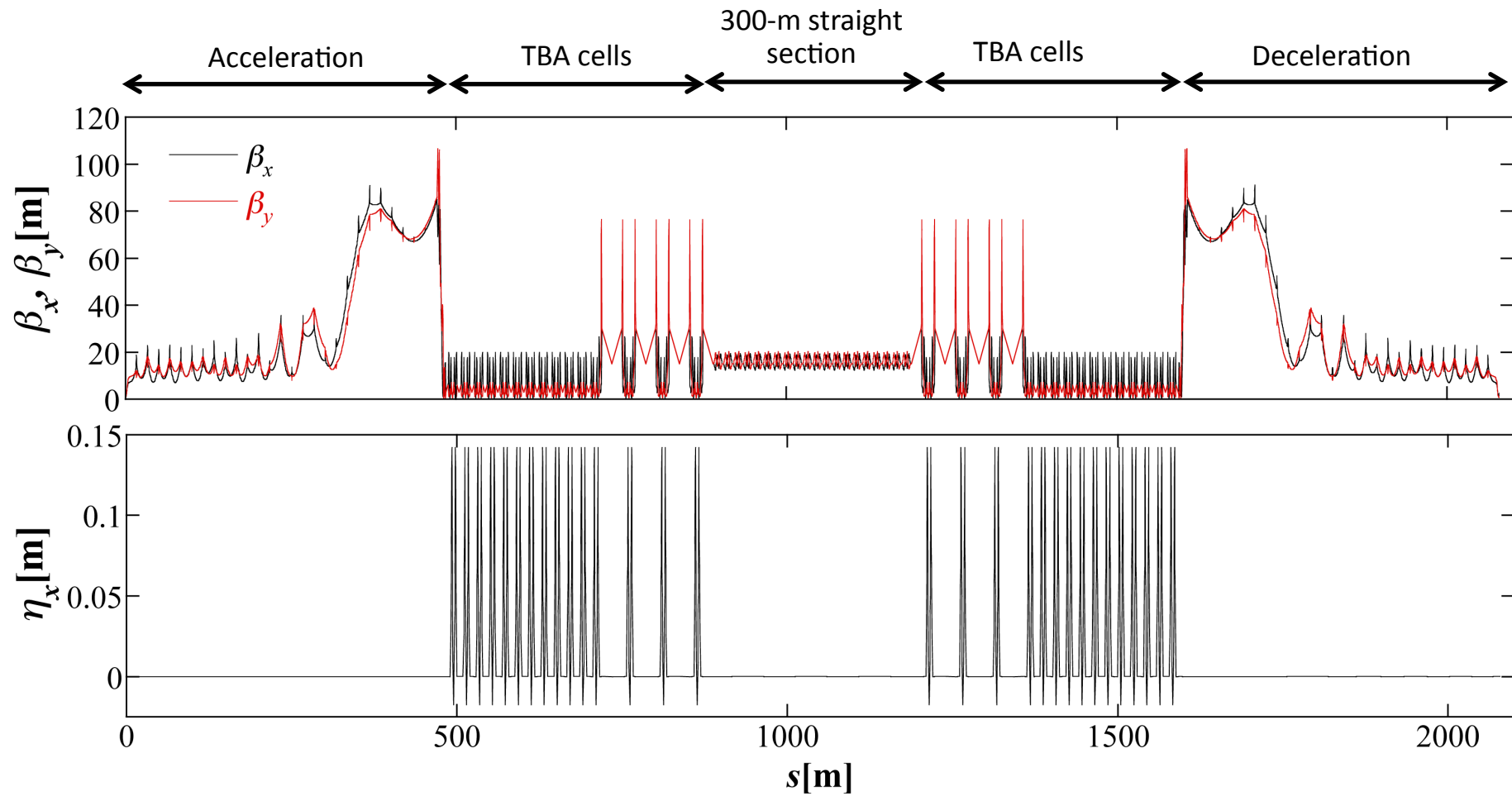


小林氏計算

$$\rho = 19.1 \text{ m}, \quad \langle H_x \rangle \approx 3 \text{ mm} \left( H_x = \beta_x \eta^2 + 2\alpha_x \eta \eta' + \gamma_x \eta'^2 \right)$$

# 3GeV ERLオプティクス

ERL1周のオプティクス(合流部後～ダンプライン前)

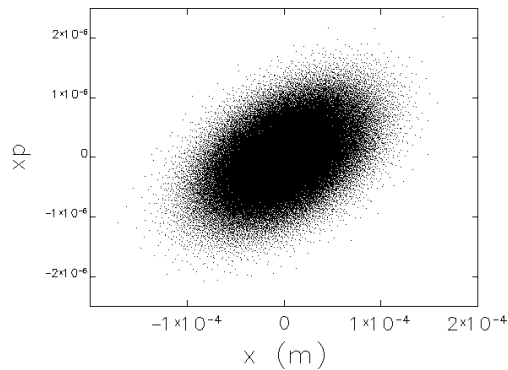


# 粒子トラッキング (通常モード)

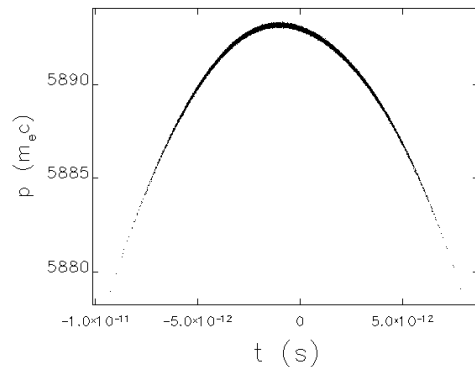
初期値:  $(\epsilon_{nx}, \sigma_E/E@10\text{MeV}, Q, \sigma_z) = (1 \times 10^{-7} \text{ m-rad}, 2 \times 10^{-3}, 77\text{pC}, 2 \text{ ps})$   
ISR/CSR/主空洞wakeの効果を含む (挿入光源の効果は含まない)

elegant使用

1回目の加速後 (3 GeV)

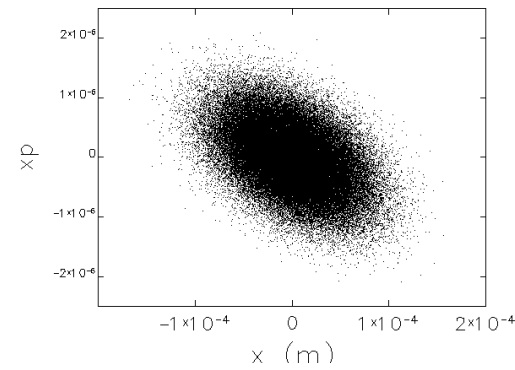


$\epsilon_{nx} : 0.997 \times 10^{-11} \text{ [m-rad]}$

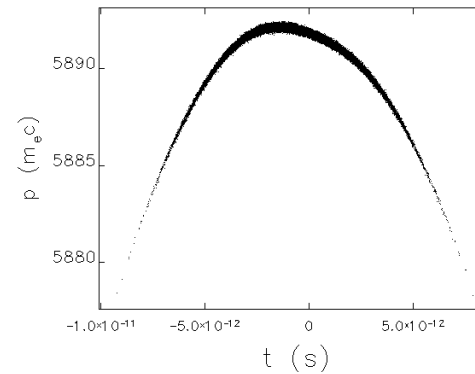


$\sigma_E/E : 1.867 \times 10^{-4}$

周回部通過後 (3 GeV)



$\epsilon_{nx} : 1.013 \times 10^{-7} \text{ [m-rad]}$



$\sigma_E/E : 1.731 \times 10^{-4}$

島田氏計算

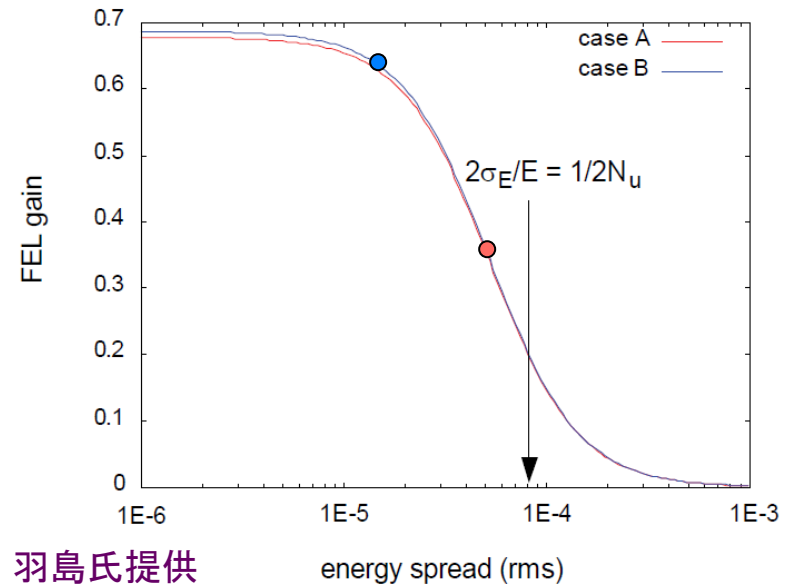
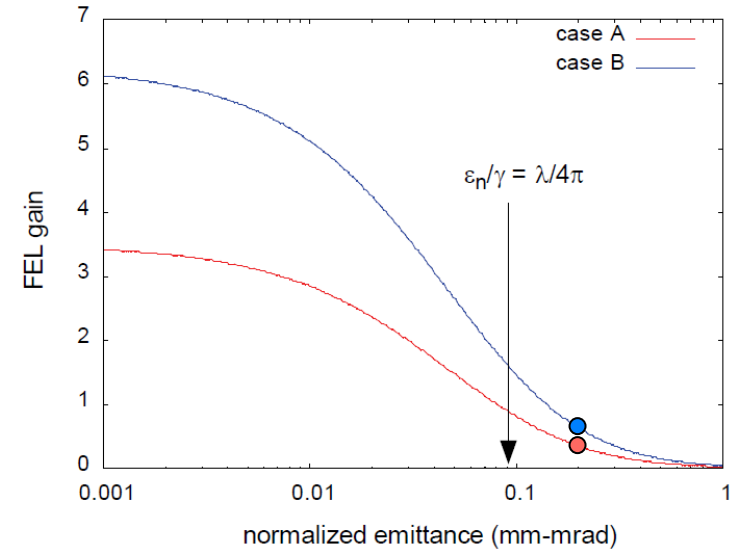
# 6-GeV XFEL-O のパラメータ例

X線共振器の損失(取り出しを含めて) ~ 10% を想定  
損失を上回るFELゲインが得られるパラメータを選んだ

表 1. XFEL-O のパラメータ例

Electron Beam	Case A	Case B
Energy	6 GeV	6 GeV
Charge	20 pC	7.7 pC
$\sigma_t$	1 ps	0.38 ps
$\sigma_E/E$	5E-5	1.5E-5
$\epsilon_n$	0.2 mm-mrad	0.2 mm-mrad
$\beta^*$	17 m	17 m
Repetition	1 MHz	1 MHz
Undulator		
Pitch	1.94 cm	
$a_w$	0.65	
$N_u$	3000	
FEL		
Wavelength	1 Å	
Gain	35%	63%

アンジュレータは永久磁石Halbach型とすれば、  
gap = 8mm に対応する設計



羽島氏提供

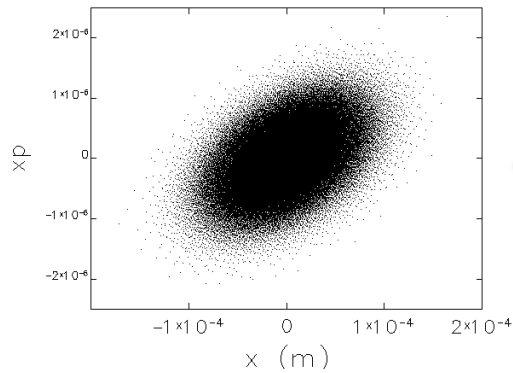


# 粒子トラッキング (XFELモード)

初期値 @10 MeV:  $(\epsilon_{nx}, \sigma_E/E, q, \sigma_z) = (1 \times 10^{-7}, 2 \times 10^{-3}, 20 \text{ pC}, 1 \text{ ps})$  **CaseA**  
 ISR/CSR/主空洞wakeの効果を含む(挿入光源の効果は含まない)

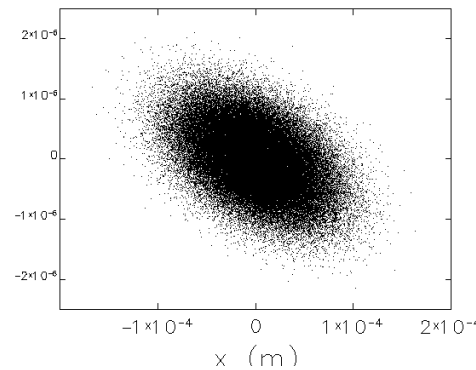
elegant使用

1回目の加速後 (3 GeV)



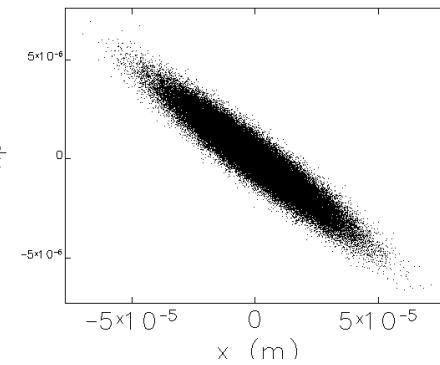
$\epsilon_{nx} : 1.001 \times 10^{-7} \text{ [m-rad]}$

周回部通過後 (3 GeV)

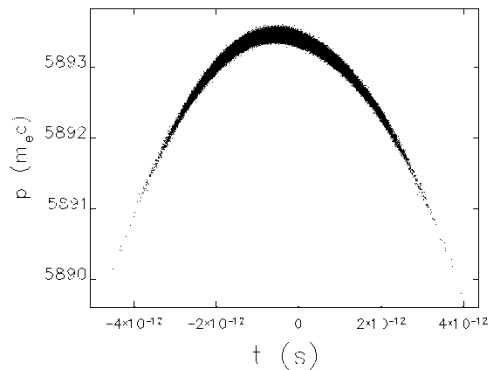


$\epsilon_{nx} : 1.015 \times 10^{-7} \text{ [m-rad]}$

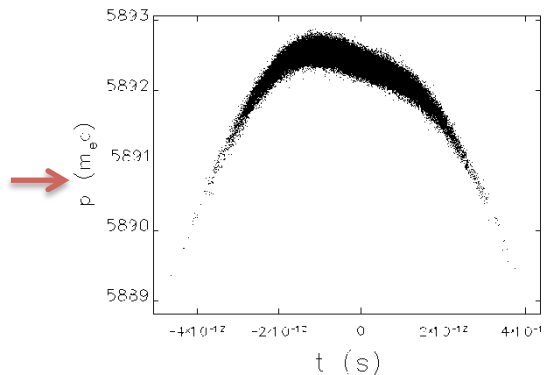
2回目の加速後 (6 GeV)



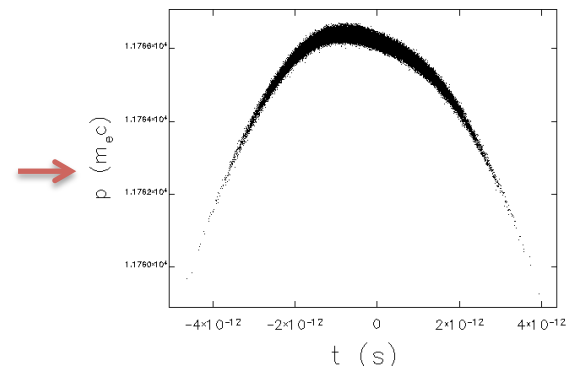
$\epsilon_{nx} : 1.015 \times 10^{-7} \text{ [m-rad]}$



$\sigma_E/E : 4.799 \times 10^{-5}$



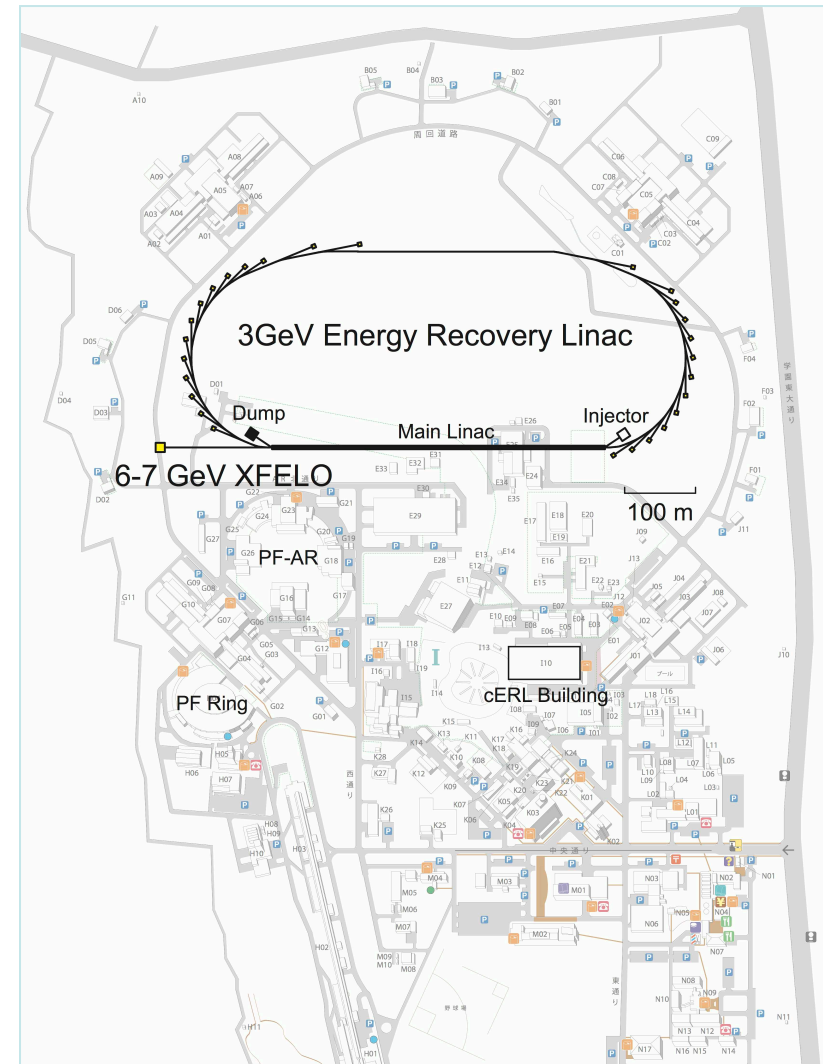
$\sigma_E/E : 4.341 \times 10^{-5}$



$\sigma_E/E : 4.390 \times 10^{-5}$

# 3GeV ERL光源のレイアウト

- ビームエネルギー
  - 周回部: 3 GeV
  - 入射&ダンプ部 :10 MeV
  - XFEL-O: 6 GeV
- 周長 : ~ 1600 m
- 主超伝導ライナック
  - 9-セル空洞8台/1クライオモジュール
  - 28クライオモジュール(224 空洞)
  - 加速勾配: 13.4 MV/m
  - トリプレット四極(クライオモジュール間)
  - 全長 : ~ 470 m  
(平均加速勾配 : 6.4 MV/m)
- TBAセル(挿入光源用)
  - 22 x 6 m 直線部
  - 6 x 30 m 直線部
- 300-m長直線部
  - EEHG
  - Harmonic Generation of XFEL-O



Tentative Layout at KEK Tsukuba Campus

## まとめと課題

- 3GeV ERL光源のラティス及びオプティクス設計を行い、その第0次案を作成した。
- このオプティクスでは、電子ビームへのインコヒーレント及びコヒーレント放射光の影響は無視できる。
- 10%の共振器損失に対して、XFEL-Oの発振に必要な利得は確保可能である。
- 今後、バンチ圧縮などの必要な機能を追加しつつ、まだ未検討なビームダイナミクスの課題に取り組む。
- 機器に必要なスペースの精度を高め、アパーチャを決めていく。
- ビームダイナミクスの観点から、加速器要素や建屋・設備等への要件を提示する。