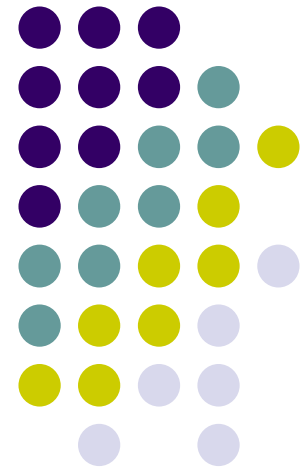


# コンパクトERLにおけるバンチ圧縮の可能性 に関して

分子科学研究所, UVSOR  
島田美帆  
日本原子力研究開発機構, JAEA  
羽島良一

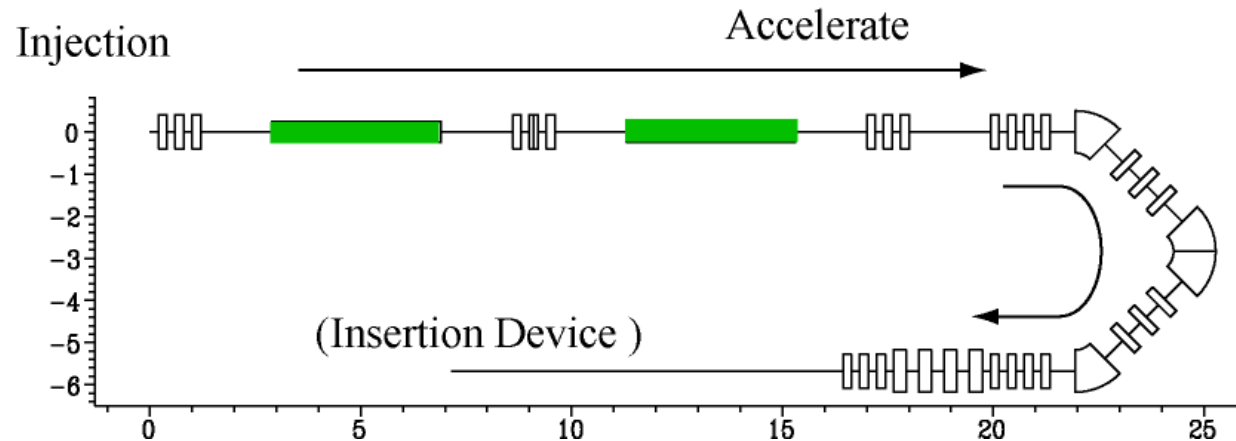
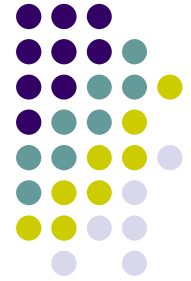




# Outline

- Beam dynamics studies for the 5 GeV ERL
  - 規格化エミッタンス0.1 mm mradを維持する周回部の設計
- Towards user experiment at the compact ERL
  - Short bunch for THz radiation (CSR)
    - 165MeV電子エネルギーにおけるバンチ圧縮
  - Femtosecond X-ray from Laser Compton Scattering
    - 65MeV電子エネルギーにおけるバンチ圧縮

# Layout from merger section to insertion devices section

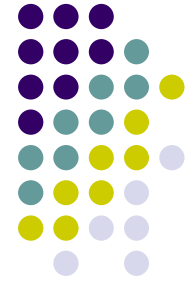


## •Test Facility Main Parameter

基本的な配置案は原田健太郎氏による

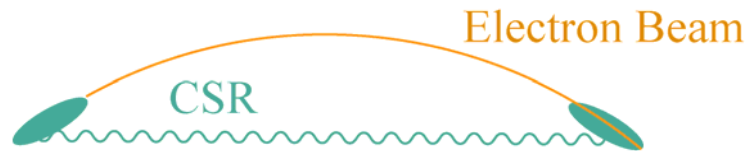
- Injection energy 5 -10 MeV
- Full energy 65 – 205 MeV
- Injection bunch length 1 -3 psec
- Bunch length after compression 0.1 psec
- Initial projected emittance 0.1 -1 mm•mrad
- Energy Spread  $0.002 \times 5$  MeV

緑文字:トラッキングシミュレーションで使用した初期値



## Preservation of low emittance

# CSR wakeと偏向磁石における エミッタンスの増加



(1) バンチ後方から発生したCSRは直進し、バンチ先頭に追いつく。

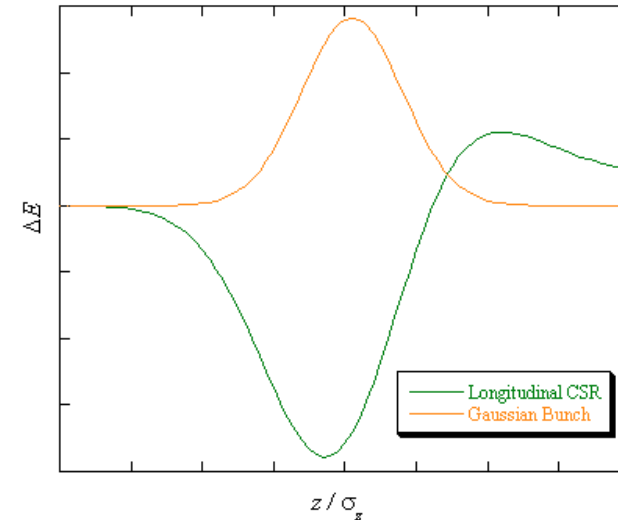


(3) バンチスライスによって軌道にずれが生じる。

**エミッタンスの増加**

- CSR wakeは短バンチで電子エネルギーが小さいほど影響が大きい。

(2) バンチ内にエネルギーの変化を引き起こす



Bunch tail

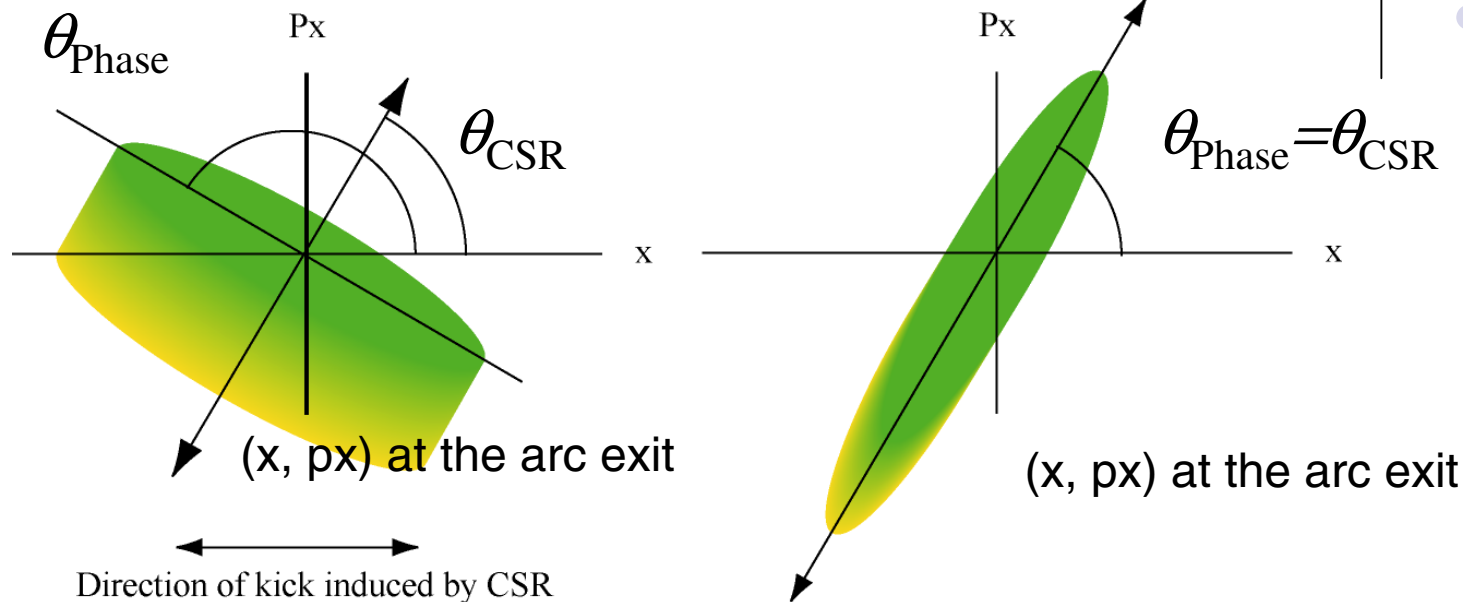
Bunch head

$$\frac{dE(z)}{dz} = -\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{2Ne^2}{(3\rho^2\sigma_z^4)^{1/3}} F(z/\sigma_z),$$

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{d\xi}{(x-\xi)^{1/3}} \frac{\partial}{\partial \xi} e^{-\xi^2/2},$$

Y. S. Derbenev *et al* , TESLA-FEL

# Minimization of the emittance growth due to the CSR wake



**Large emittance growth**

**Minimized emittance growth**

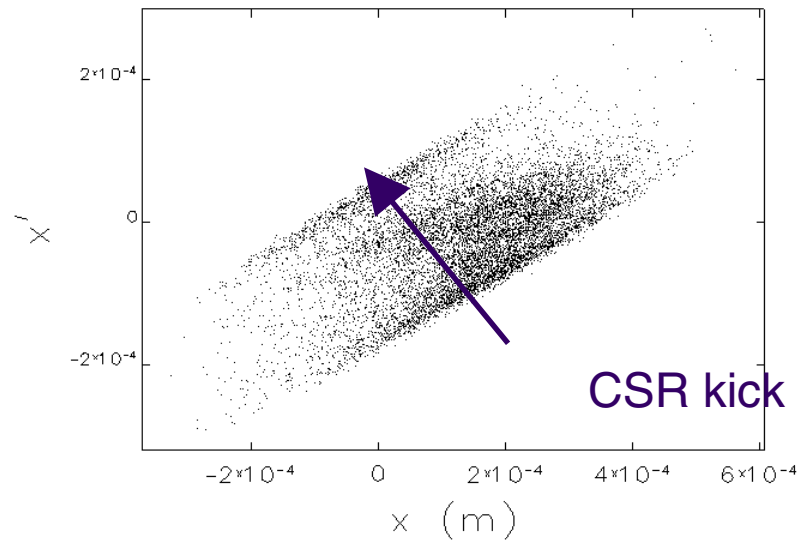
The emittance growth is minimized when  $\theta_{Phase}$  coincides with  $\theta_{CSR}$  (direction of CSR kick).

R. Hajima, Nuclear instruments and Methods in Physics Research A 528 (2004) 335-339

$$\tan 2\theta_{Phase} = 2\alpha / (\gamma - \beta) \quad \tan \theta_{CSR} = \sin \phi / \rho(1 - \cos \phi)$$

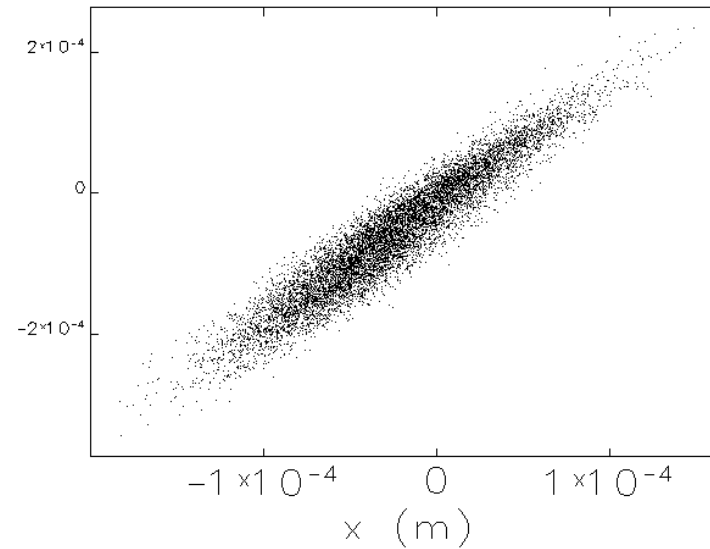
$\alpha, \beta, \gamma$ : Twiss parameter,  $\phi$ : bending angle

# 周回部出口の位相空間分布(85MeV)

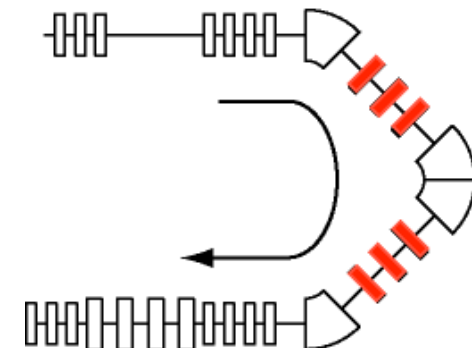


**Not Optimized**  
**1.45 mm·mrad**

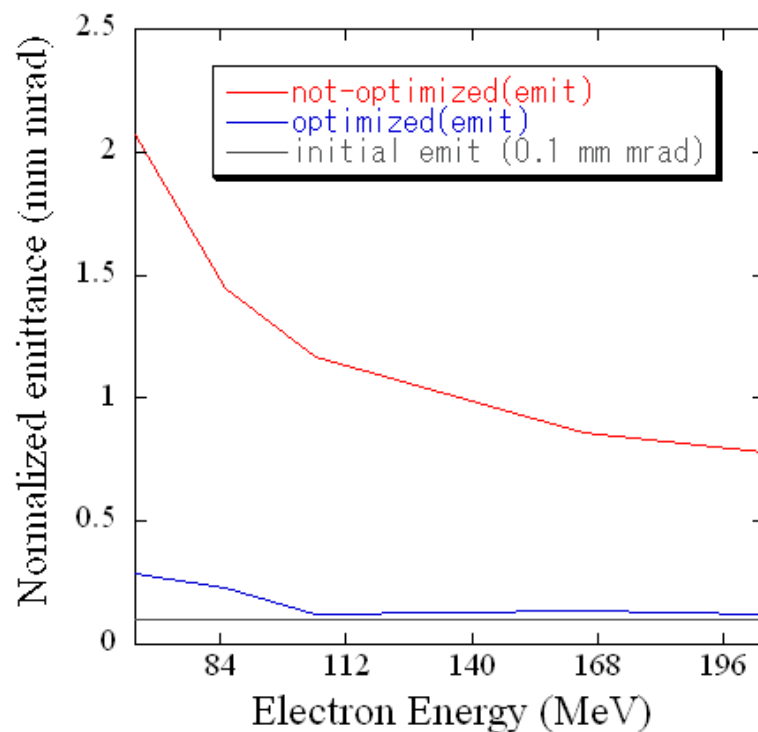
- CSRは周回部中央で大きく発生。
- 周回部の中にある3つの4極磁石を最適化 (elegant)
- 最適化によって、およそ1/6までエミッタンスを減少 (6極磁石は有効ではなかった。)



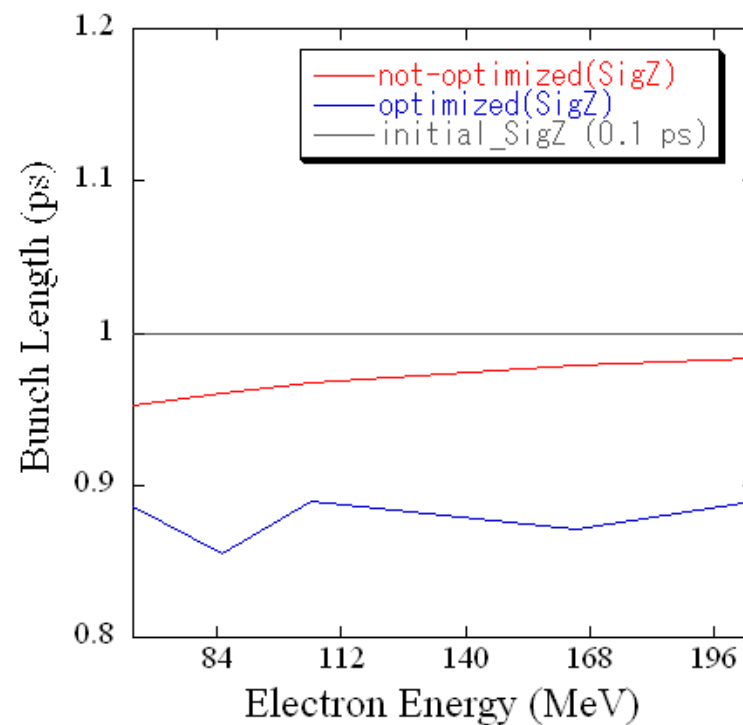
**Optimized**  
**0.27 mm·mrad**



# エミッタンスの最適化



周回部出口の規格化エミッタンス



周回部出口のバンチ長

- 4極磁石の最適化によって、1/5から1/15までエミッタンスを小さくすることが可能。
- 100MeV以上ではほぼ0.1 mm・mradを満たしている。
- エミッタンスの最適化によって、若干バンチ長も短くなった。
- エネルギースプレッドも若干小さくなったことを確認した。



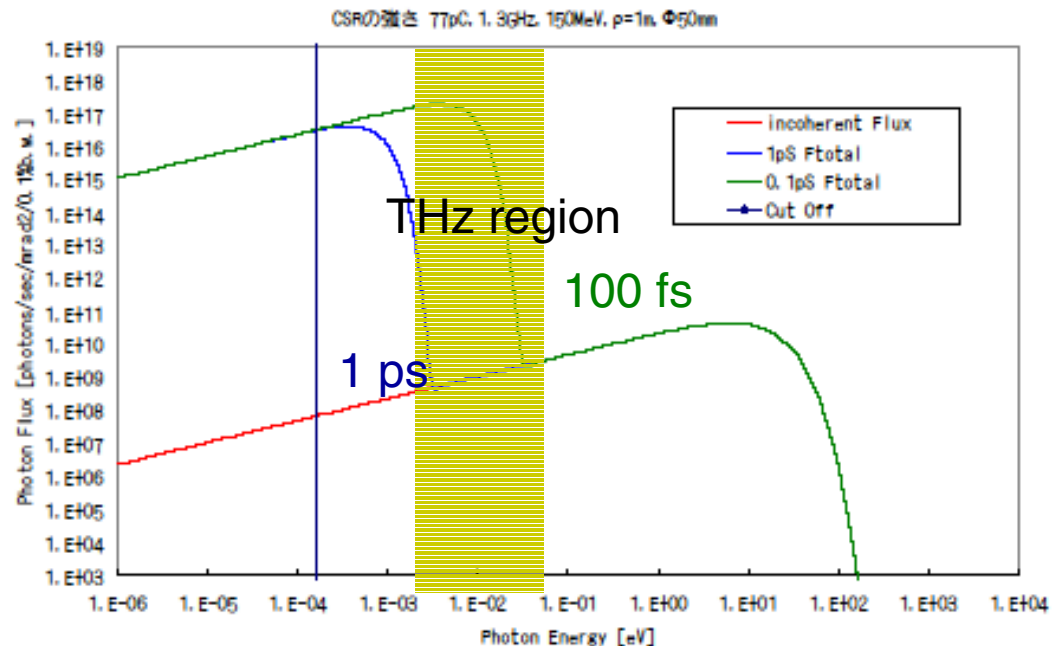


# Bunch compression

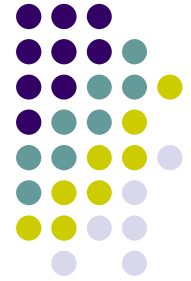
# For what the compact ERL can be used?



- **Terahertz coherent radiation**
  - SR of terahertz region, from 1THz to 10 THz, is enhanced by coherent radiation, when the rms electron bunch length is **shorter than 1ps**.
  - Transverse beam size should be less than the wavelength to keep the coherent enhancement -- (un-normalized  $\epsilon_x < 100 \text{ mm mrad}$ )



# For what the compact ERL can be used?



- Laser Compton Xrays

フェムト秒のX線を発生するにはレーザーとともに、電子バンチもサブピコ秒の長さを持つ必要がある。

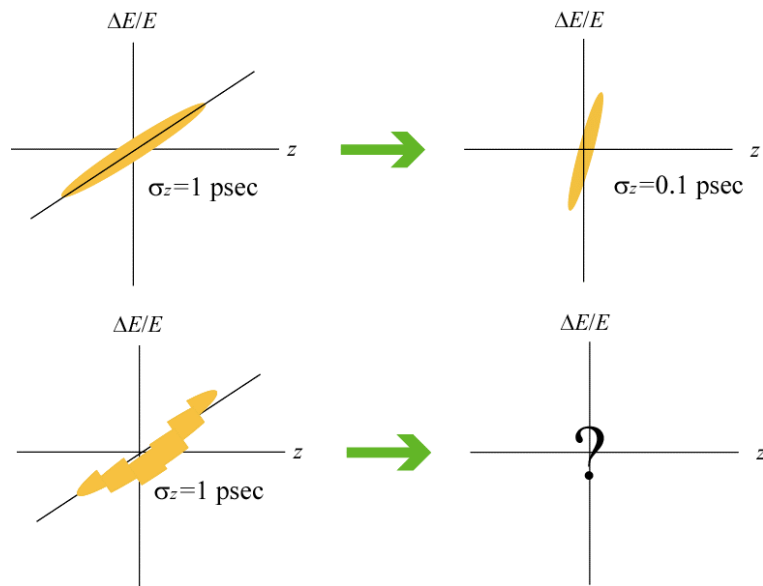
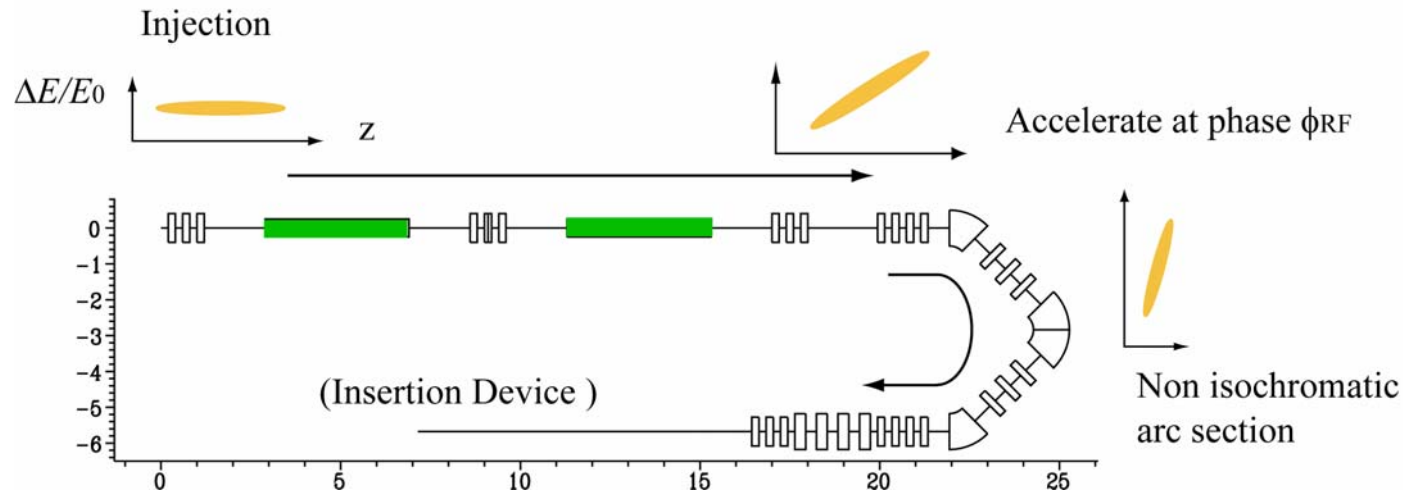
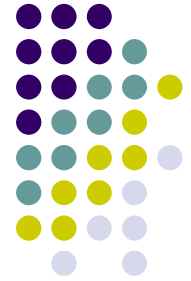
$$E_{x-Ray} \approx 2\gamma^2 E_{Laser}$$

$$\lambda_{Laser} = 800nm \quad (Ti : SaLaser)$$

50keV以下のX線 → 電子ビームがおおよそ65MeV ( $\gamma=130$ )以下

しかし、CSRによる影響は電子エネルギーが小さいほど大きい

# Bunch compression at the arc section



- Rough estimation of  $\phi_{RF}$  corresponding to  $R_{56}$

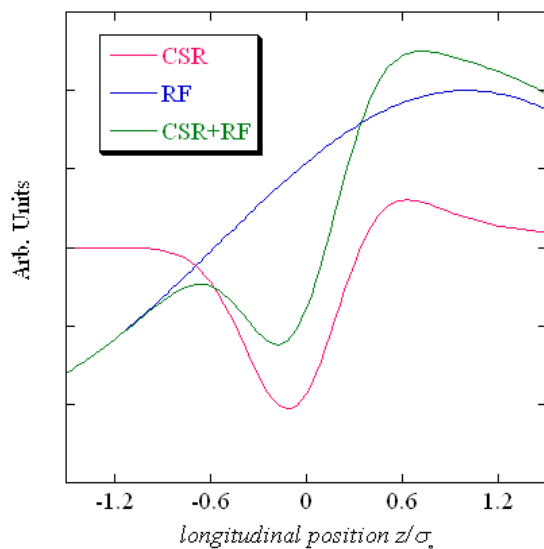
$$\Delta z = R_{56} \frac{\Delta E}{E_0} \quad R_{56} = \frac{(1-0.1)\text{psec}}{1\text{psec}}$$

$$\tan \phi_{RF} = -\frac{cR_{56}}{2\pi f_{RF} R_{56}}$$

- $\phi_{RF}$  と  $R_{56}$  を調整し、0.1ps バンチ圧縮の最適化を行う。
- CSR wakeなどによるエネルギー分布の変化によってバンチ圧縮の効率が悪化する場合もある。

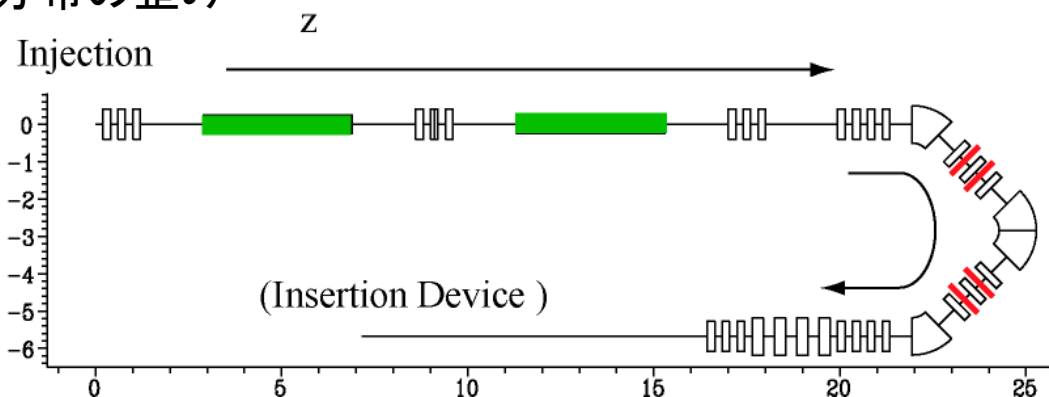


# 6極磁石の導入



- RFカーブとCSR wakeによるエネルギー分布の歪みを補正するために使用。
- テールの影響を抑え、効率的にバンチ圧縮することを目的とする。
- 2組の6極磁石を周回部に配置

## 縦方向のエネルギー分布の歪み



6極磁石の配置図

# Comparison between with and without sextupole magnets

charge 77pC, 1ps (rms), 0.1mm-mrad R56= -0.1m

with CSR, **without sextupole**

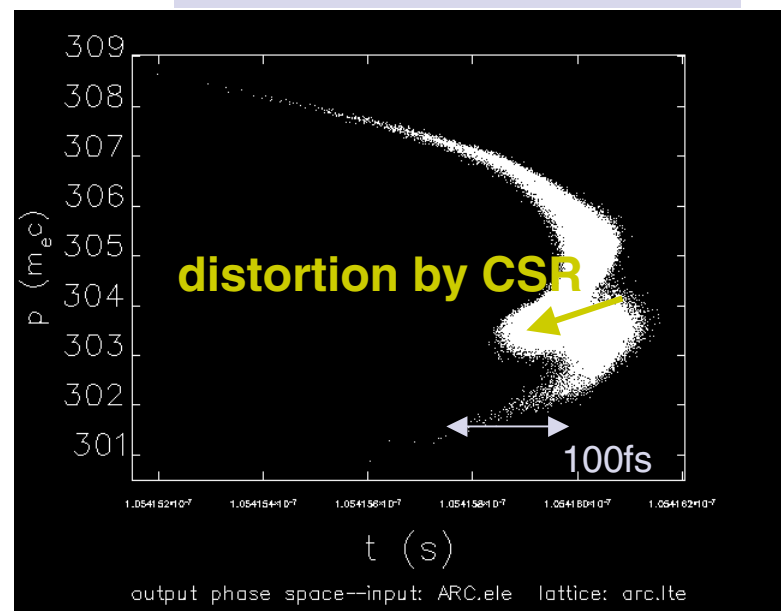
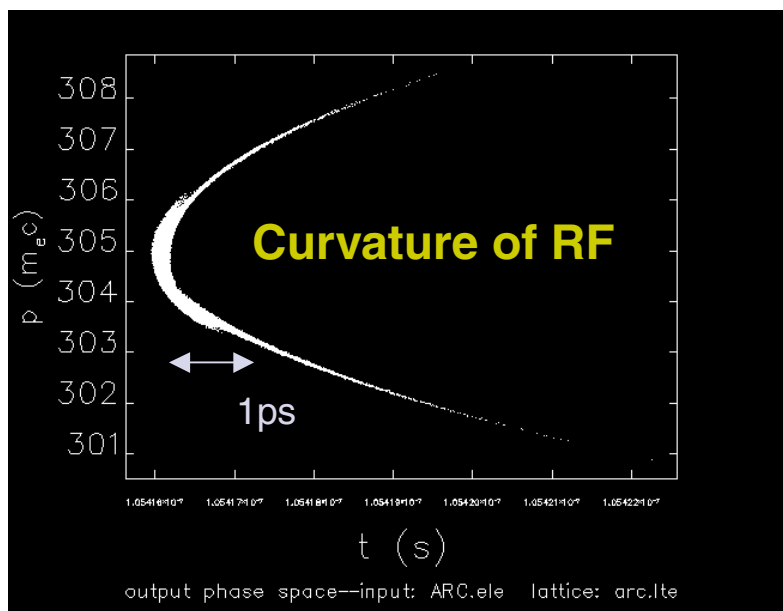
with CSR, **with sextupole**



390 fs (rms), 6.9mm-mrad

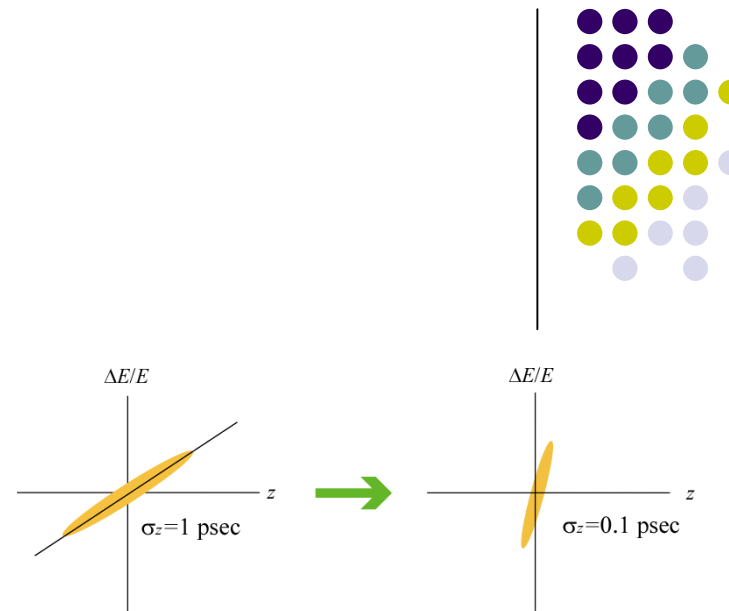
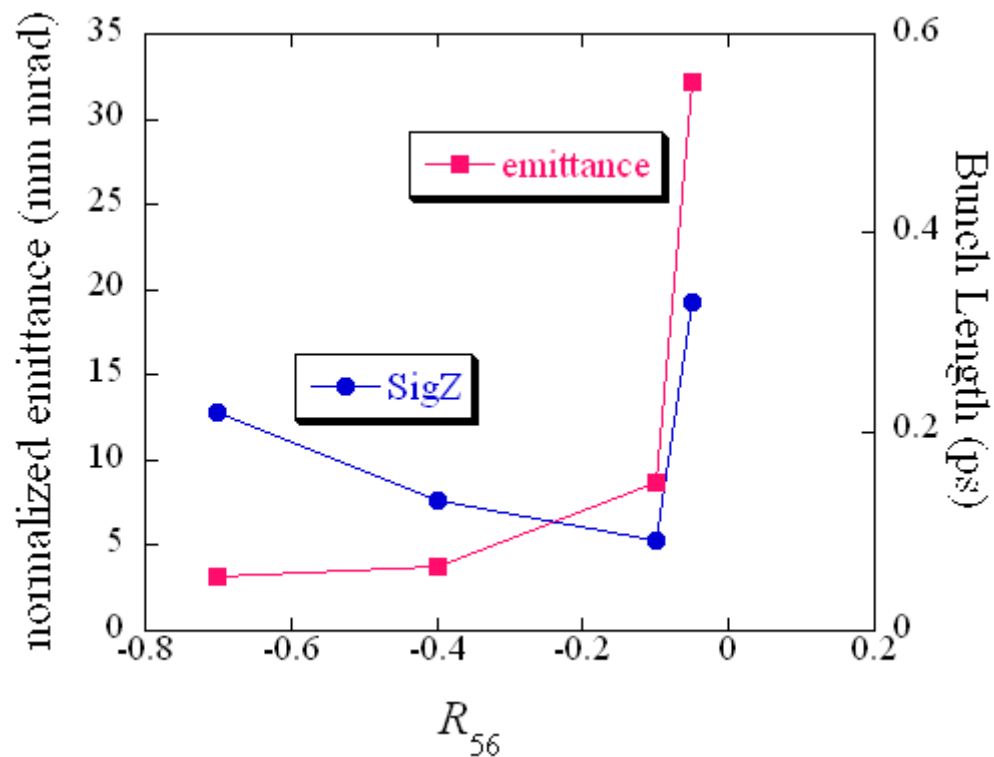
T566 < 0 helps the bunch compression  
With CSR

59 fs (rms), 5.6mm-mrad



optimized by R. Hajima

# 周回部の $R_{56}$ の最適化

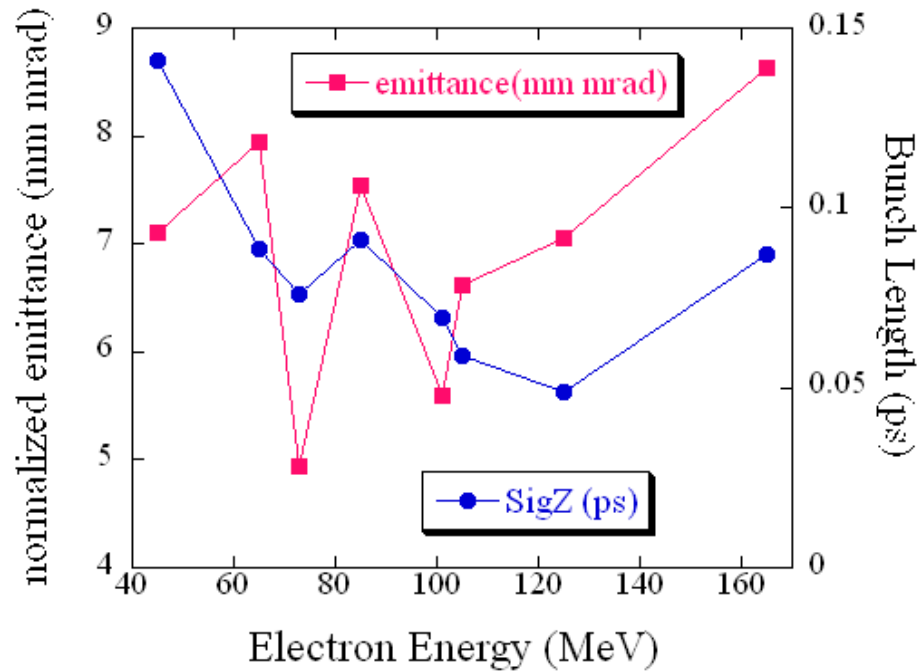


$$\Delta z = R_{56} \frac{\Delta E}{E_0} \quad R_\sigma = \frac{(1-0.1)\text{psec}}{1\text{psec}}$$

$$\tan \phi_{RF} = -\frac{cR_\sigma}{2\pi f_{RF} R_{56}}$$

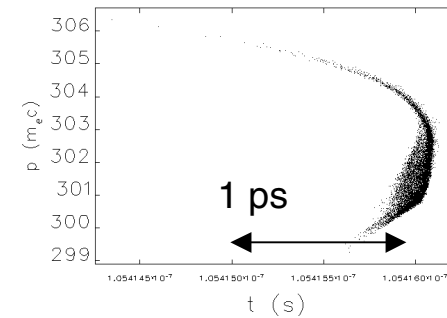
- $R_{56}$  がそれぞれ-0.05から-0.7である周回部において、 $\phi_{RF}$ と6極磁石を最適化
- $R_{56} = -0.1$ 付近がバンチ圧縮には最適

# エネルギーによるバンチ圧縮の効果の変化 (77pC, $R_{56} = -0.1$ )

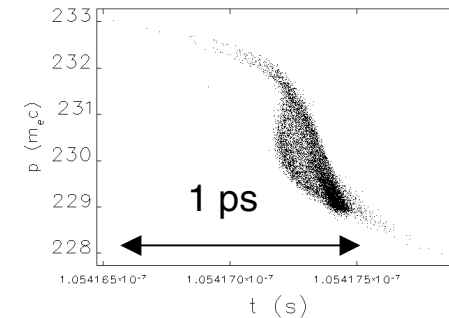


- 165MeV の最短バンチ長が65MeVとほぼ同じであるのは、テールの発生が原因。
- テールの形成は電子エネルギーによって非線形に変化する。
- テールを除くと、エネルギーが大きいほどバンチ圧縮しやすい

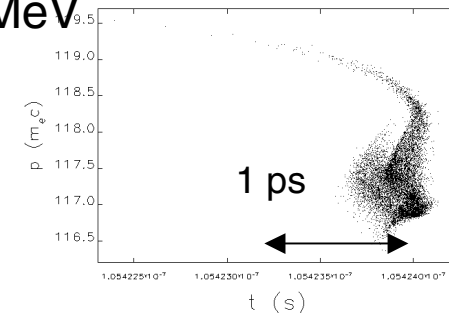
165 MeV



125 MeV

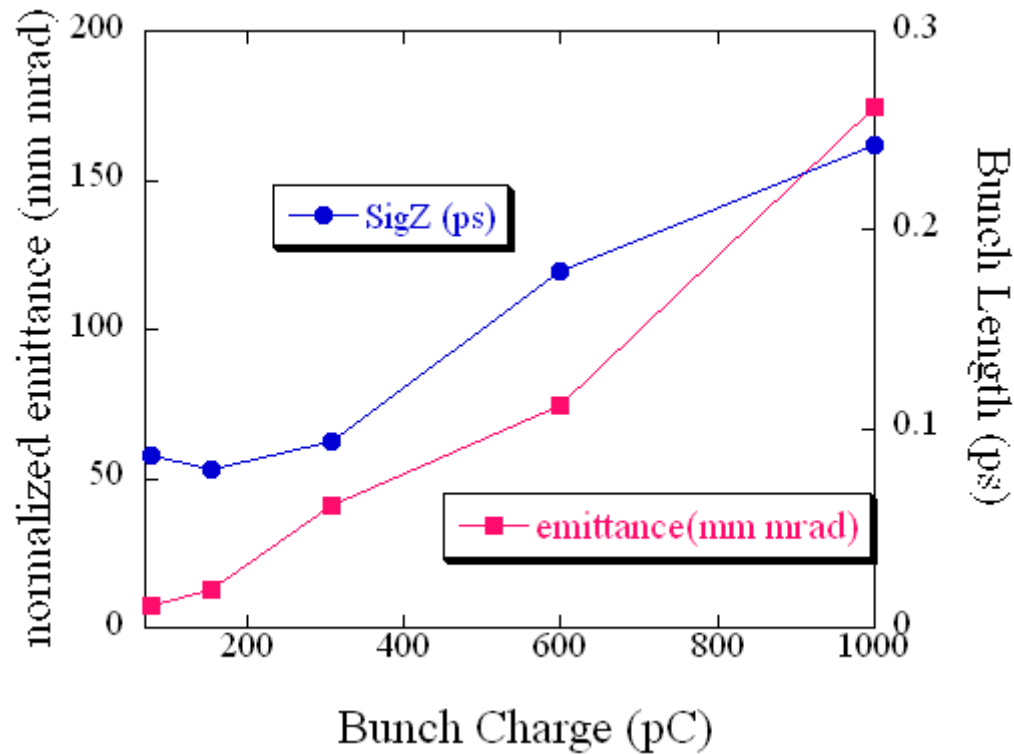
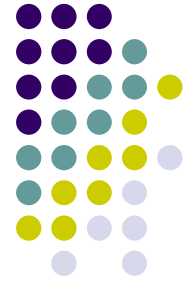


65 MeV

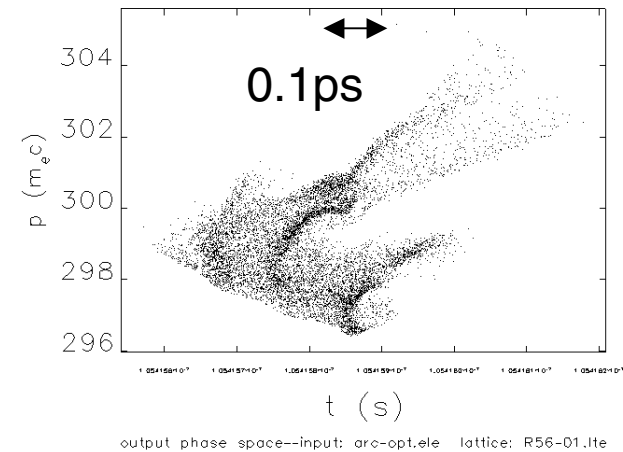




# 165MeVにおけるバンチ圧縮 (テラヘルツ光発生源)

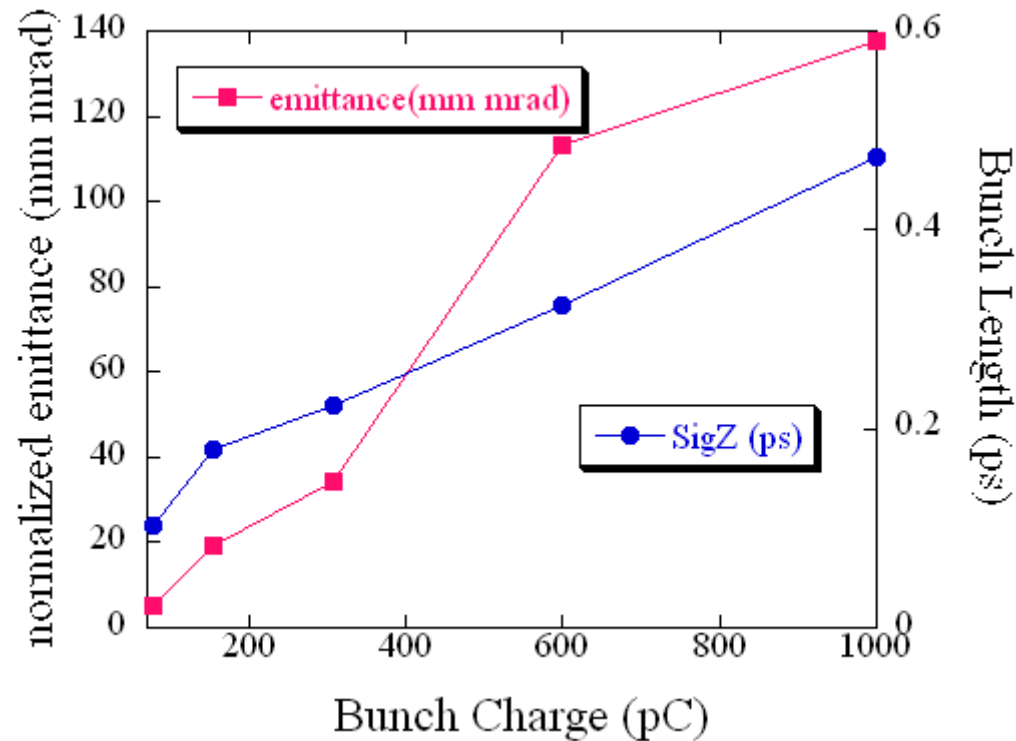


308pC 縦方向の位相分布  
(縦軸:エネルギー、横軸:時間)

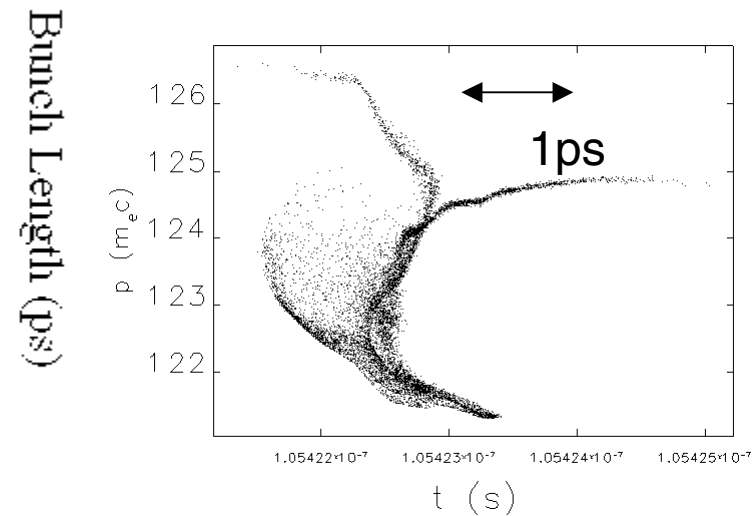


- およそ400pC以下であれば、規格化エミッタンス $<100$  mm mradかつバンチ長 $<0.1$ psを実現可能である。

# 65MeVにおけるバンチ圧縮 (Compton散乱によるフェムト秒X線)



1nC 縦方向の位相分布  
(縦軸:エネルギー、横軸:時間)



- 1nCでは0.6ps程度まで圧縮可能である。しかし、規格化エミッタンスは100mm mradを超えてしまう。
- 0.5 nC以下では容易に0.2ps以下まで短くすることが可能。

# まとめ



- **バンチ長1ps、低エミッタンスビームの実現**
  - 周回部の4極磁石の最適化により、1/5から1/15まで規格化エミッタンスを小さくすることができた。
  - 100MeV以上では、ほぼ0.1 mm mradを数十%の増加程度に抑えることができる。
- **バンチ圧縮**
  - **$R_{56}$ の最適化 (77pC, 165MeV)**
    - バンチ長をできる限り短くするには、 $R_{56}=-0.1$ が最適である。
    - エミッタンスの増加も抑える必要がある場合は $R_{56}$ の絶対値を大きくすると効果的である。
  - **エネルギーによるバンチ圧縮の効果**
    - テールの形成はエネルギーに依存し、その影響は予測困難である。
    - テールを除いた部分のバンチ長はエネルギーが大きいほど短くすることができる。
  - **165MeV電子ビームのバンチ圧縮**
    - およそ400pC以下であれば、規格化エミッタンス<100 mm mradかつバンチ長<0.1psを実現化なのである。
  - **65MeV電子ビームのバンチ圧縮**
    - 1nCでは0.6ps程度まで圧縮可能である。しかし、規格化エミッタンスは100mm mradを超えてしまう。
    - 0.5 nC以下では容易に0.2ps以下まで短くすることが可能。