

# 全体設計・ 到達目標と達成度[抜粋]

高エネルギー加速器研究機構  
加速器研究施設  
中村 典雄

2017年10月27日 コンパクトERL評価専門委員会

# 発表内容

---

1. cERLの概要
2. 入射部
3. 周回部
4. ビーム損失
5. 到達目標と達成度[抜粋]
6. まとめ

# 発表内容

---

## 1. cERLの概要

2. 入射部

3. 周回部

4. ビーム損失

5. 到達目標と達成度[抜粋]

6. まとめ

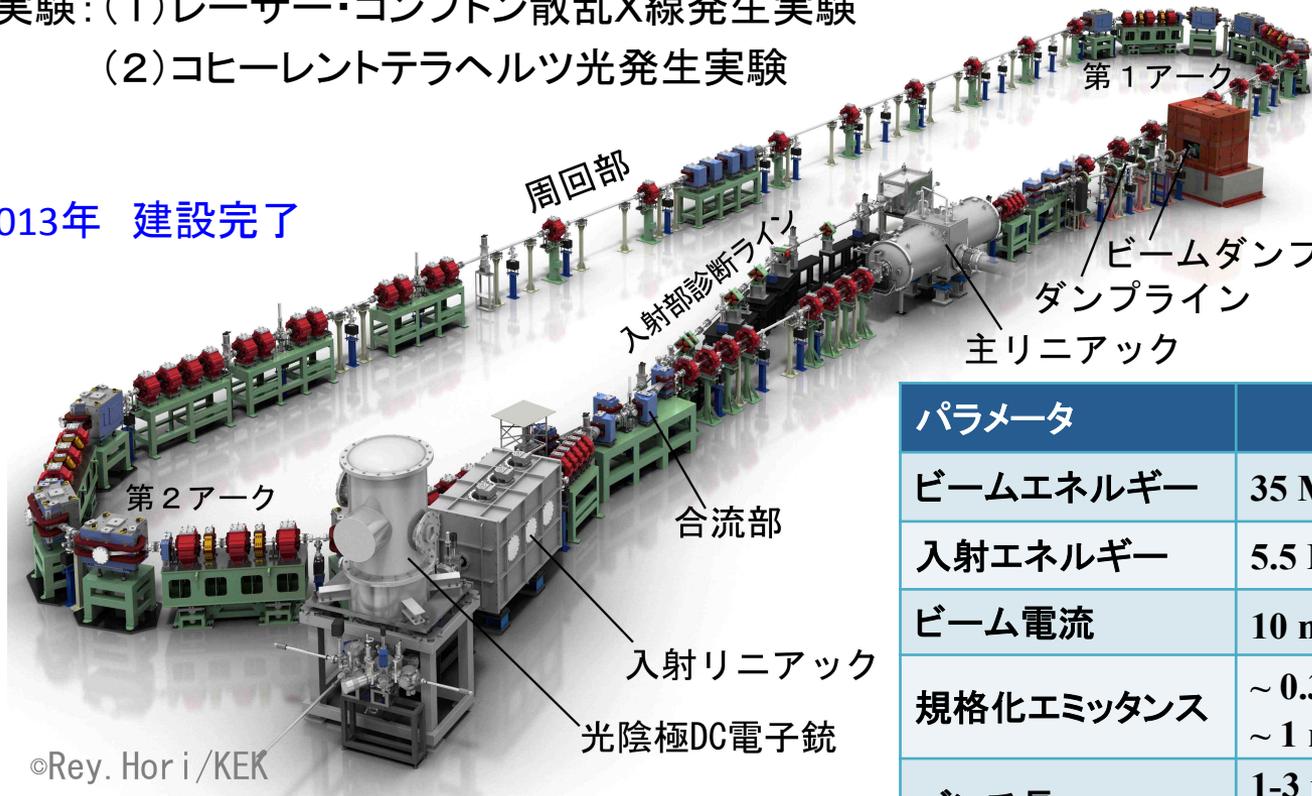
# 概要

- 目的: (1) ERL光源性能(大電流、低エミッタンス、短バンチ等)の実証  
(2) 鍵となる要素(電子銃、超伝導空洞等)の開発と安定な運転  
(3) 性能達成に関するビームダイナミクスの研究

- 利用実験: (1) レーザー・コンプトン散乱X線発生実験  
(2) コヒーレントテラヘルツ光発生実験

2013年 建設完了

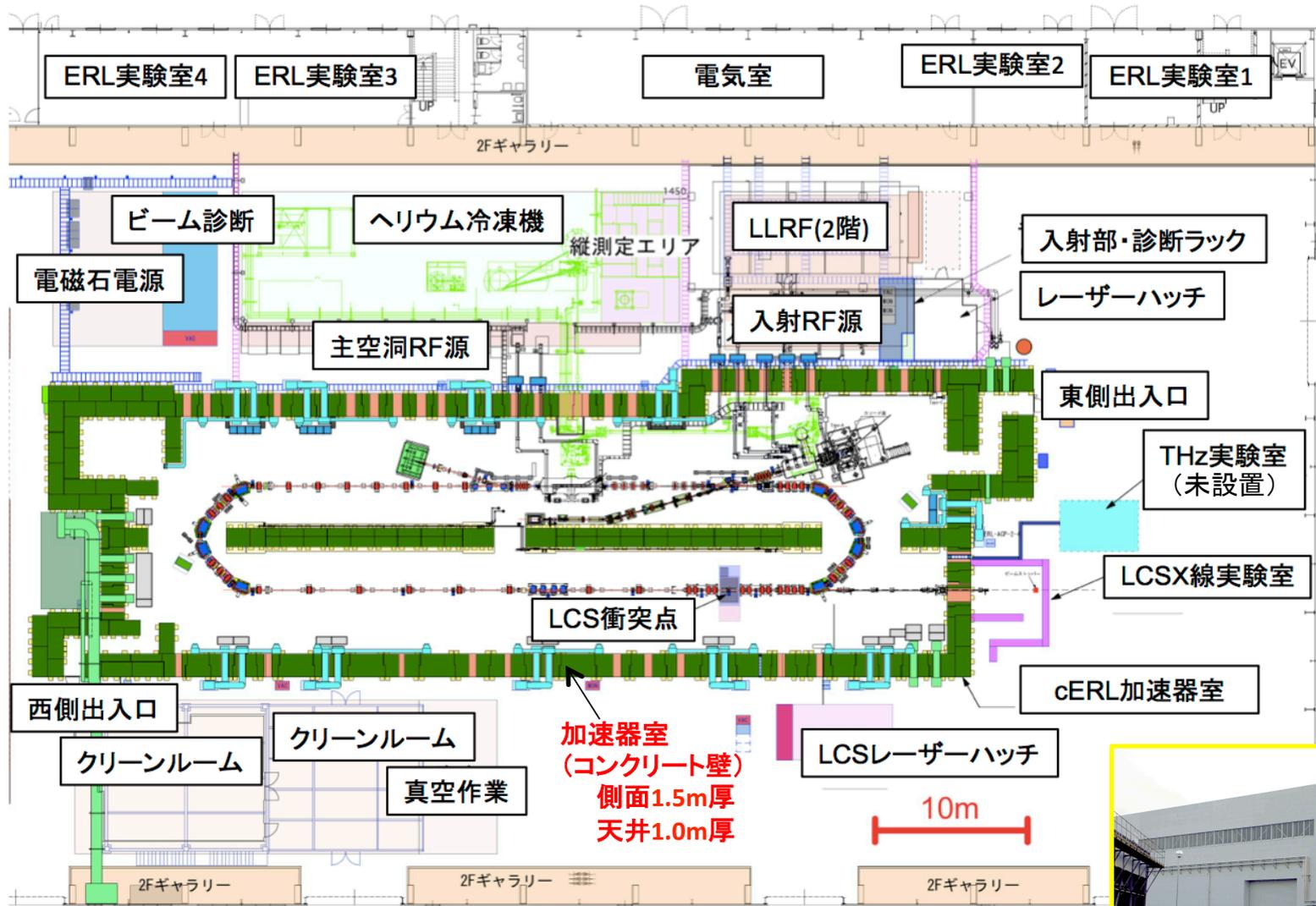
現状 20 MeV運転



パラメータ	設計値
ビームエネルギー	35 MeV (20 MeV)
入射エネルギー	5.5 MeV (2.9 MeV)
ビーム電流	10 mA (7.7 pC @1.3 GHz)
規格化エミッタンス	~ 0.3 mm·mrad (7.7 pC) ~ 1 mm·mrad (77 pC)
バンチ長	1-3 ps (通常運転) ~100 fs (バンチ圧縮)
RF周波数	1.3 GHz

当面の目標: 1 mm·mrad @ 10 mA

# ERL開発棟



KEK cERL建物(ERL開発棟)内配置



# 関係写真



cERL加速器



cERL制御室



cERL加速器室  
と関係者

# 発表内容

---

1. cERLの概要

2. 入射部

3. 周回部

4. ビーム損失

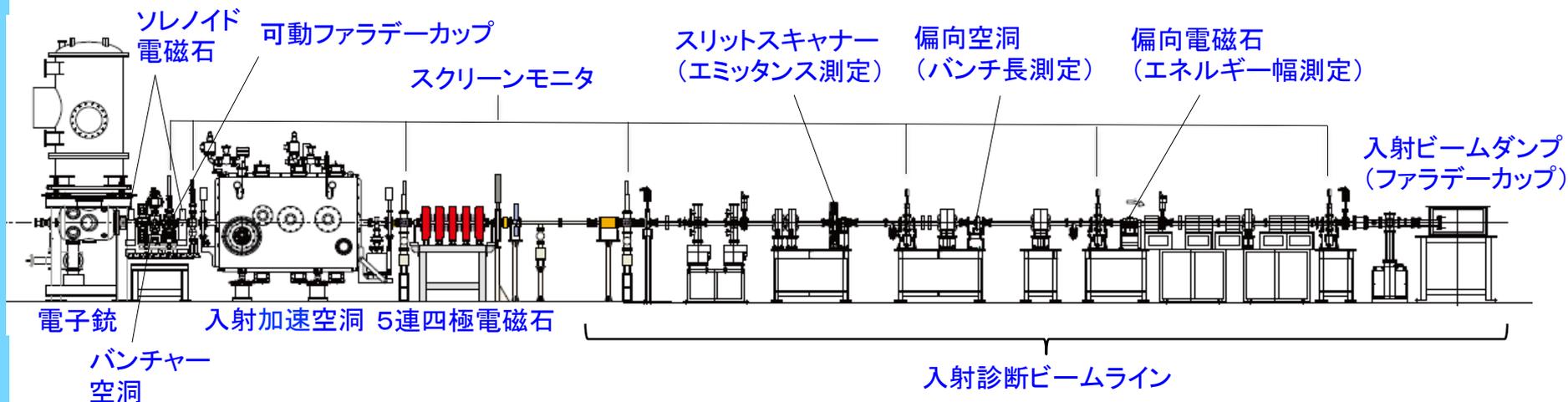
5. 到達目標と達成度[抜粋]

6. まとめ

# 入射部の配置・構成

## 入射部＋入射診断ビームラインの構成要素と役割

- 電子銃＋励起レーザー --- 大電流・低エミッタンスビームの生成
- ソレノイド電磁石 --- 空間電荷効果の補正
- バンチャー空洞 --- バンチ長の調整
- 入射加速空洞 --- ビームの加速(最大6 MeV)
- 四極電磁石(5連) --- ビームの収束、合流部との整合
- モニタ類 --- ビームプロファイル、ビーム位置、電流の測定
- 入射診断ビームライン --- 入射ビームの診断  
(エミッタンス、バンチ長、エネルギー幅等の測定)



cERL入射部・入射診断ラインの配置・構成

# 入射部の設計と最適化(1)

## 入射部設計の基本設定

- カソード: NEA-GaAs
- レーザー波長: 532 nm
- 電子銃電圧: 500 kV
- 入射エネルギー: 5.5 MeV

初期エミッタンス  
 $\epsilon_{nx} = 0.13 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$   
 @  $\sigma_{x,L} = 0.275 \text{ mm}$ ,  
 $\langle E_{kx} \rangle = 60 \text{ meV}$

$$\epsilon_{nx} = \sigma_{x,L} \sqrt{\frac{2\langle E_{kx} \rangle}{mc^2}}$$

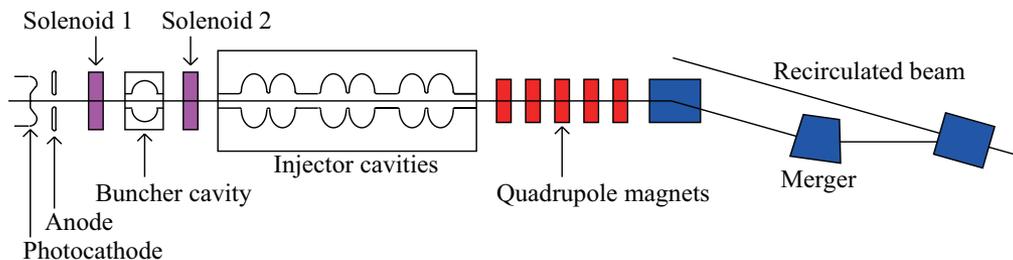
$\epsilon_{nx}$ : normalized emittance

$\sigma_{x,L}$ : laser spot size (rms)

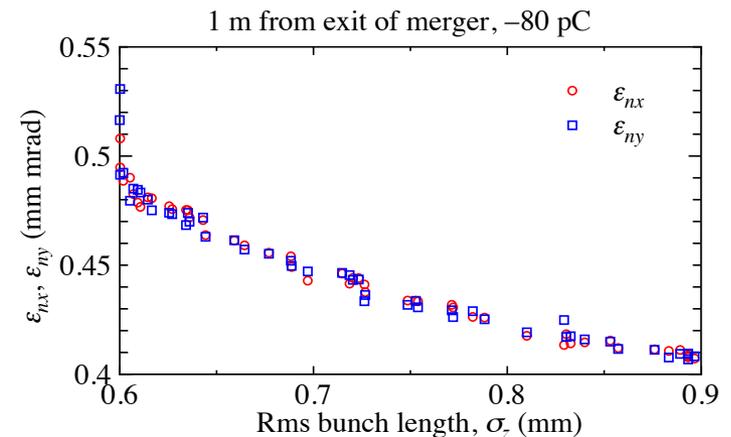
$\langle E_{kx} \rangle$ : mean transverse energy

## トラッキングコードGPTと遺伝的アルゴリズムによる最適化

- 第1段階: 80 pC/bunchでの最適化 → 入射部機器の位置決定
- 第2段階: 7.7 pC/bunchでの最適化 → 10 mAでのパラメータ値決定

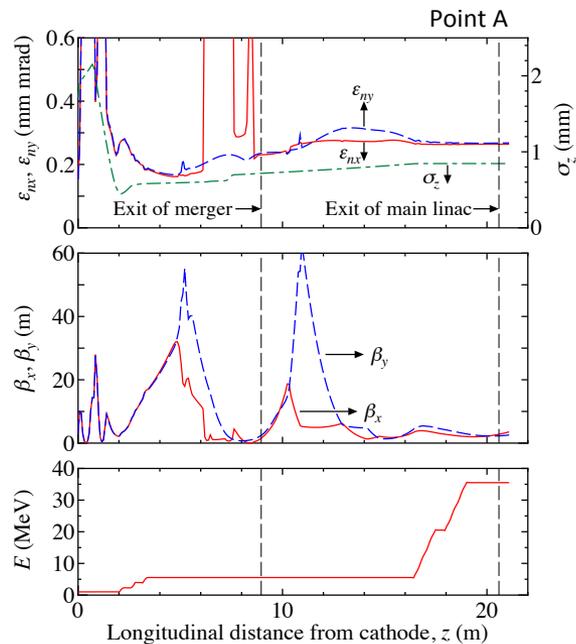


cERL入射部(合流部含む)の配置概念図



エミッタンス vs バunch長(合流部出口, 80 pC/bunch)

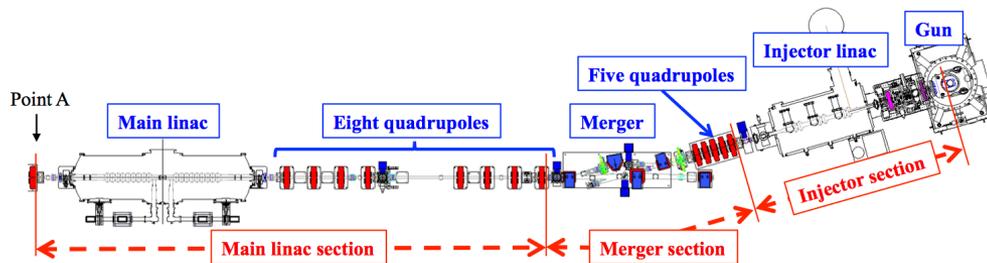
# 入射部の設計と最適化(2)



最適化された入射部構成要素パラメータ(7.7 pC/bunch)

Parameter	Value
Gun DC voltage	500 kV
Beam energy of injector	5.5 MeV
Charge/bunch (Current)	7.7 pC (10mA)
Full width of laser pulse	16 ps
Spot diameter of laser	0.525 mm
Magnetic fields of solenoids #1, #2	0.036, 0.015 T
Voltage of buncher cavity	105 kV
Field gradient of cavity 1, 2, 3	6.8, 7.53, 7.03 MV/m
Phase of cavity 1, 2, 3	29.9, -9.8, -10.0 deg

入射部シミュレーション結果(7.7 pC/bunch)



cERL入射部から主空洞出口までの配置・構成

当面の目標 (1 mm·mrad @ 10 mA)は実現可能

ビームパラメータ(主空洞出口、7.7 pC/bunch)

parameter	2 k particles	100 k particles
$\epsilon_{nx}$ (mm·mrad)	0.262	0.307
$\epsilon_{ny}$ (mm·mrad)	0.261	0.361
$\sigma_z$ (mm)	0.846	0.873
$\gamma$	69.5014	69.497
$\sigma_\gamma$	0.0290783	0.0192432
$\beta_x$ (m)	2.67319	2.59521
$\beta_y$ (m)	2.11744	2.03121
$\alpha_x$	-0.601	-0.945
$\alpha_y$	-0.179	0.305

# 発表内容

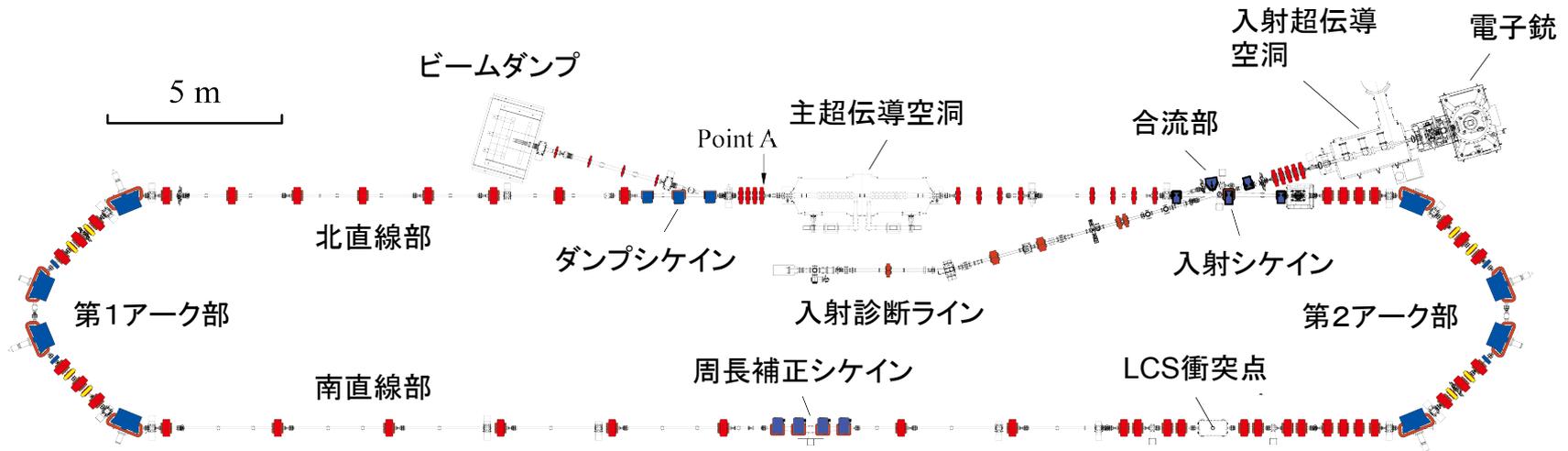
---

1. cERLの概要
2. 入射部
- 3. 周回部**
4. ビーム損失
5. 到達目標と達成度[抜粋]
6. まとめ

# 周回部の配置・構成

## 周回部の構成要素と役割

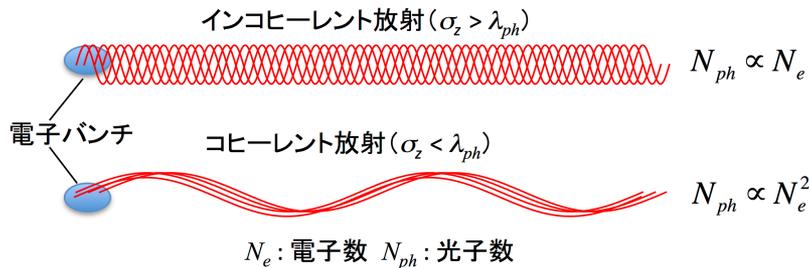
- 入射シケイン・合流部 --- 周回・入射ビームの合流
- 主超伝導空洞 --- ビーム加速、エネルギー回収
- アーク部 --- ビーム周回、周長補正、バンチ圧縮・伸長
- 周長補正シケイン --- 周長補正
- LCS衝突点・収束部 --- 電子ビーム収束とレーザーとの衝突
- ダンプシケイン --- 加速・減速ビームの分岐
- ビームダンプ --- 減速ビームの廃棄



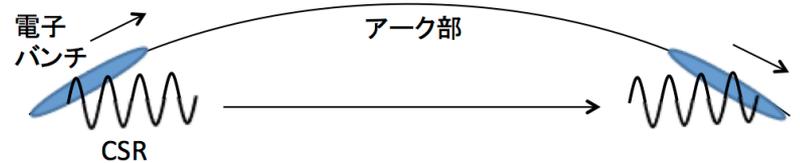
cERL周回部(入射部含む)の配置・構成

# アーク部の設計と最適化

## (1) アーク部におけるコヒーレント放射光(CSR)の影響



強い電磁場



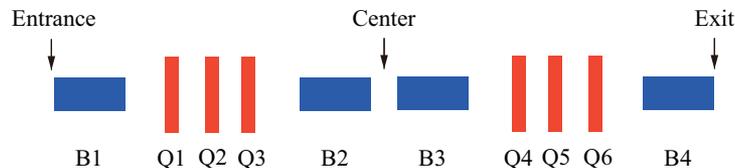
バンチ後方のCSRが前方に影響を与える  
 → **運動量幅、エミッタンスの悪化**  
 CSRの影響を抑制するオプティクス設計

短バンチ長・高電荷で強いCSR発生

## (2) 縦方向分散の制御(バンチ長の制御)

TBA(Triple-Bend Achromat)ラティスの採用

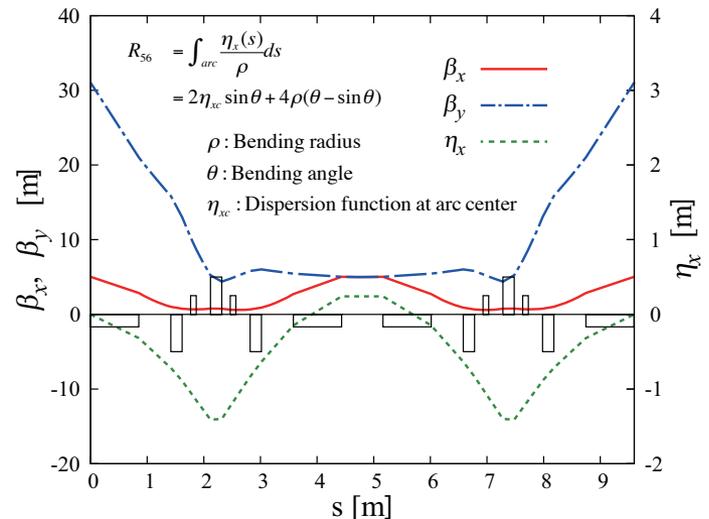
→  $R_{56}$ を正・負・ゼロに変えられる



$R_{56}=0$ : バンチ長一定(等時性)

$R_{56} > 0, R_{56} < 0$ : バンチ圧縮, バンチ伸長

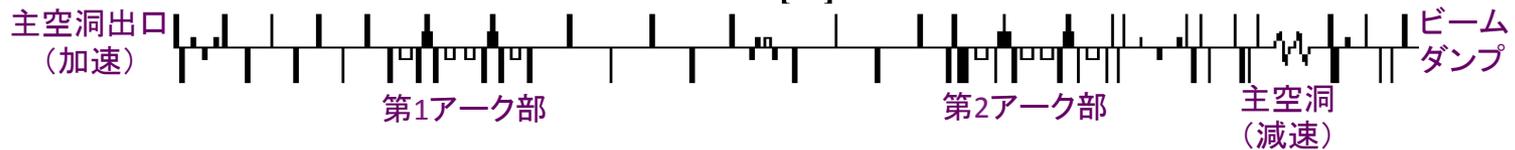
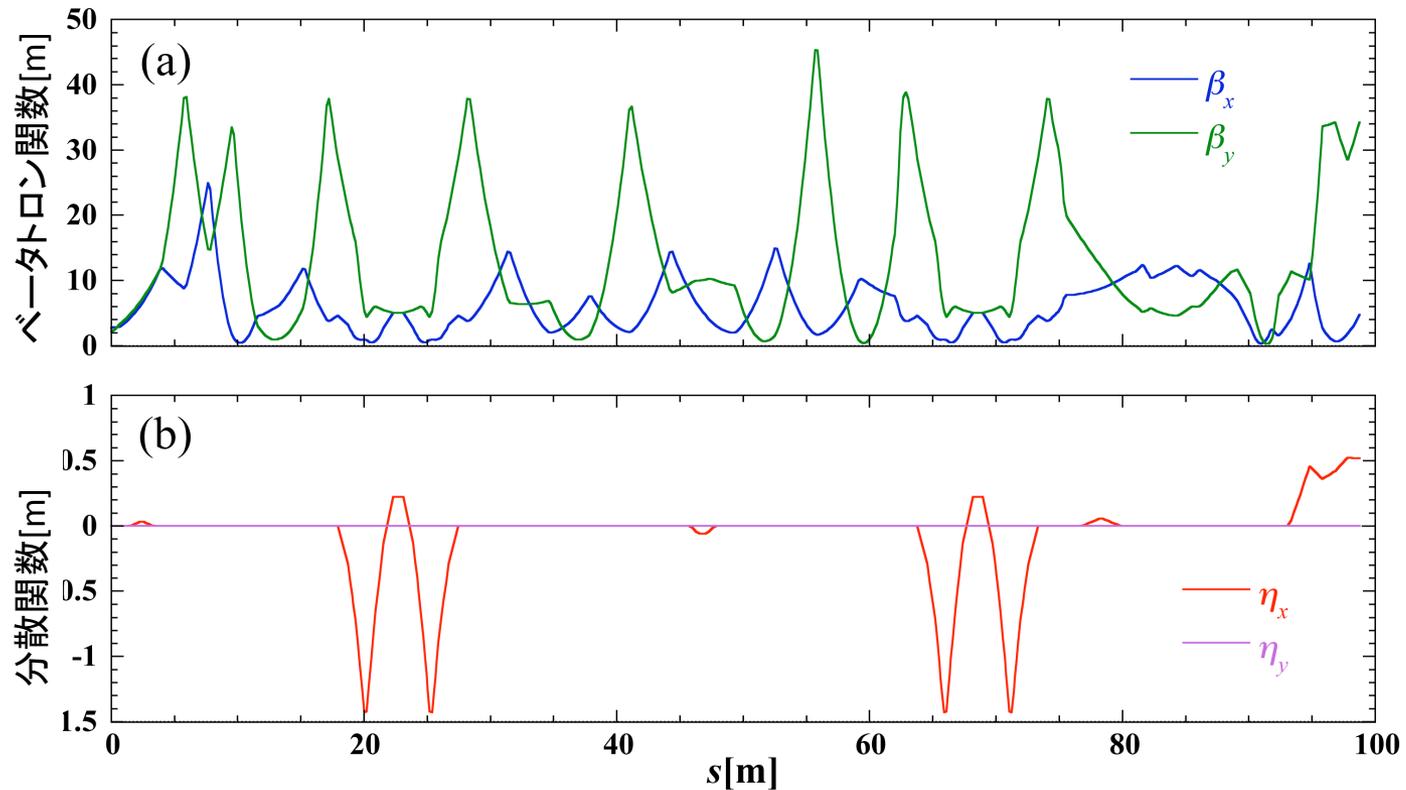
$$\Delta z (= c\Delta t) = R_{56}\delta + T_{566}\delta^2 + U_{5666}\delta^3 + \dots \quad \left( \delta = \frac{\Delta p}{p} \right)$$



アーク部のオプティクス( $R_{56}=0$ の場合)

# 周回部オプティクス

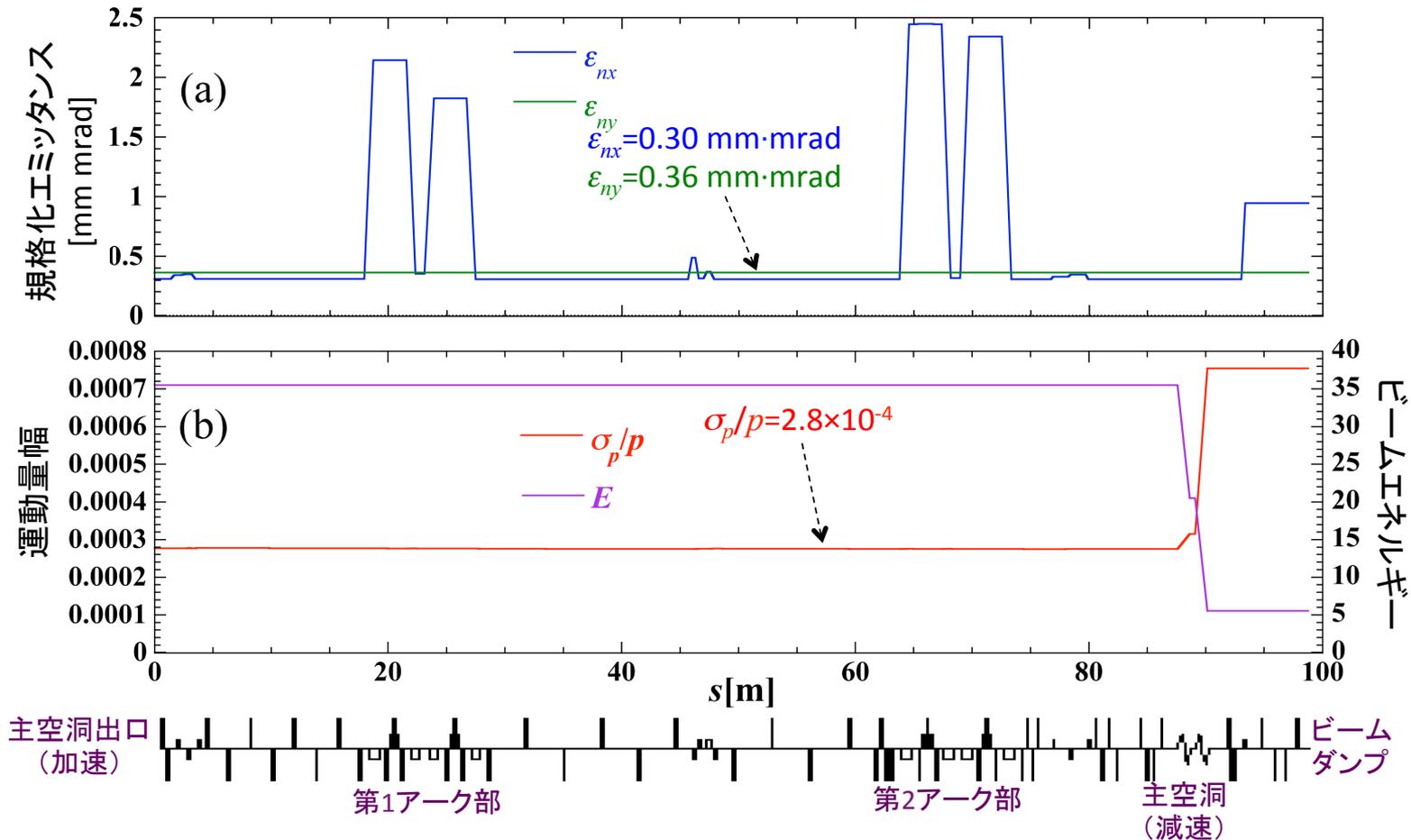
通常運転モード(主空洞出口からビームダンプ)



アーク部: コヒーレント放射(CSR)効果抑制、バンチ長一定 ( $R_{56}=0$ )

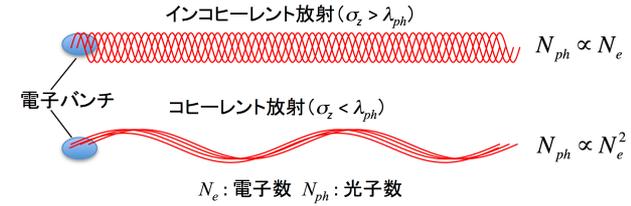
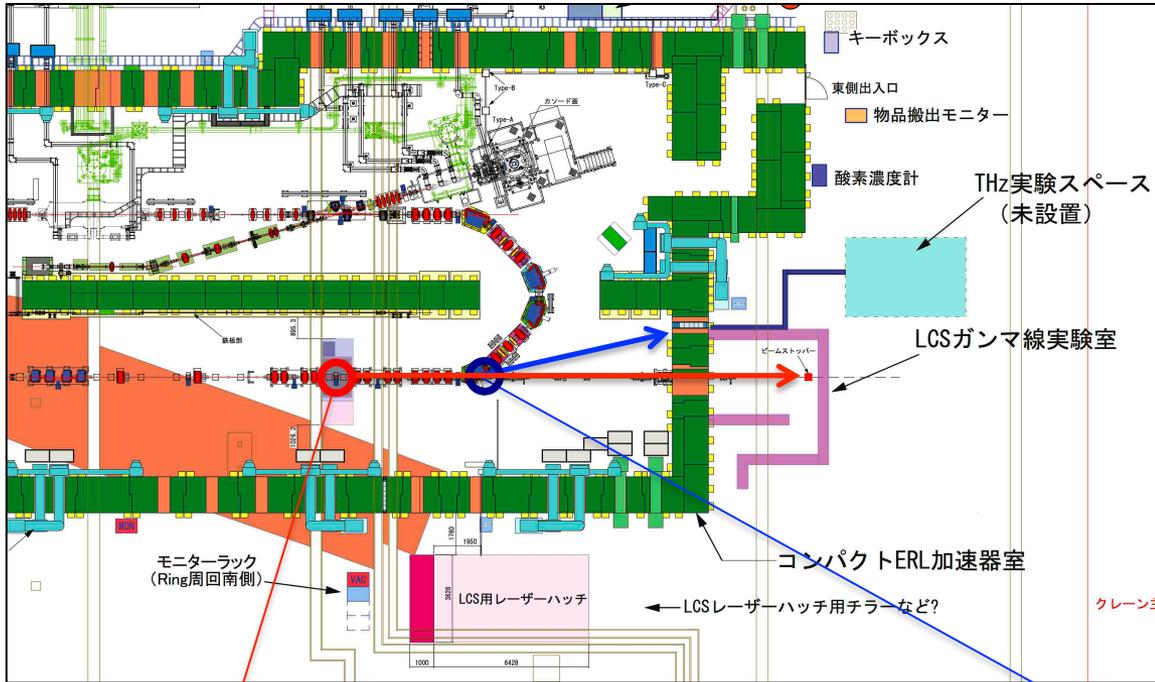
# ビーム品質の保持

ビームパラメータの変化 (35MeV, 7.7 pC/bunch)

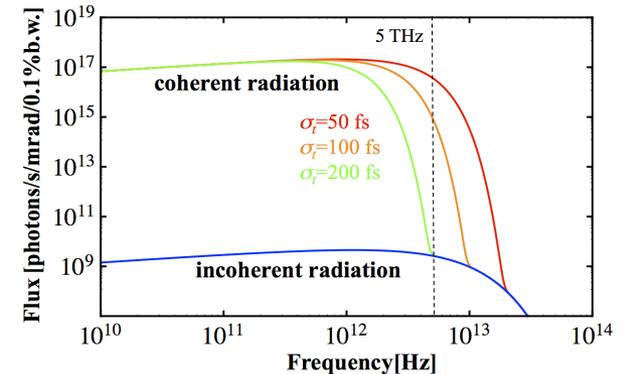


周回部でCSRなどによる初期ビーム品質の劣化はほとんどない。

# 利用実験



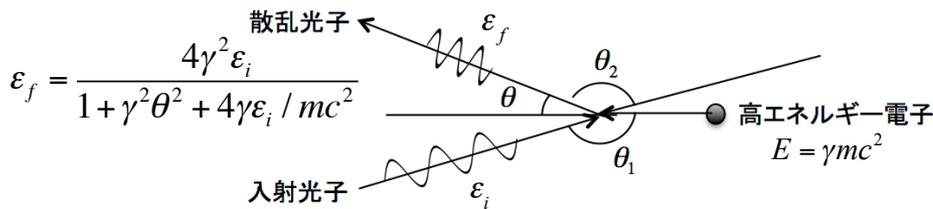
## コヒーレント放射光(CSR)の発生



## コヒーレント放射光のスペクトル

## レーザー・コンプトン散乱(LCS)X線の発生

- 極小電子ビームの生成
- 電子ビームとレーザーとのコンプトン散乱X線



## レーザー(逆)コンプトン散乱の原理

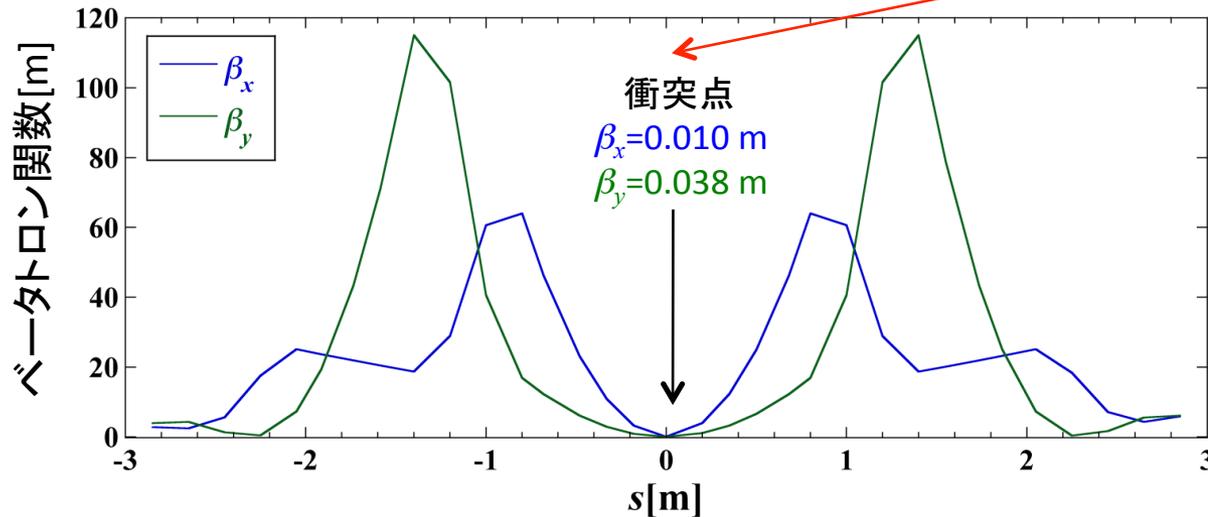
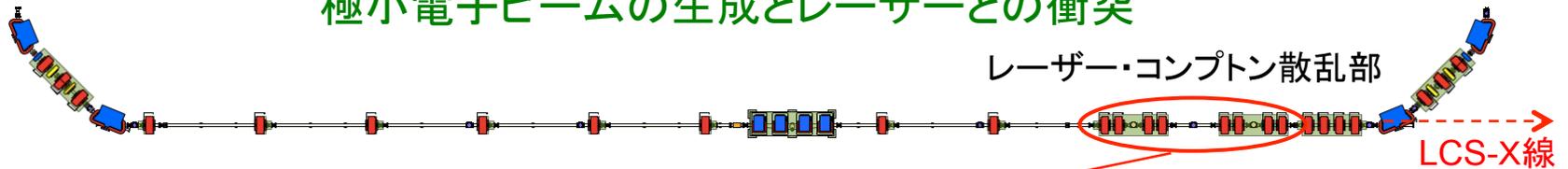
## コヒーレント・テラヘルツ光の発生

- 超短バンチ電子ビームの生成
- 第2アーク部偏向電磁石からのコヒーレント放射

# LCSモードのオプティクス設計

## レーザーコンプトン散乱(LCS)X線発生運転モード

### 極小電子ビームの生成とレーザーとの衝突



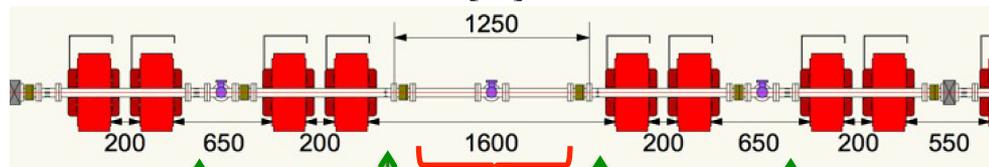
ビームサイズ(衝突点)

$$\sigma_x = 8.8 \mu\text{m}$$

$$\sigma_y = 17.1 \mu\text{m}$$

$$@ \varepsilon_{nx} = \varepsilon_{ny} = 0.3 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$$

$$E = 20 \text{ MeV}$$



BPM  
SCM

BPM

BPM

BPM  
SCM

BPM: ビーム位置モニタ  
SCM: スクリーンモニタ

レーザー共振器

# バンチ圧縮モードのオプティクス設計

## コヒーレントTHz光発生実験運転モード(バンチ圧縮モード)

### 磁氣的バンチ圧縮による短バンチ生成

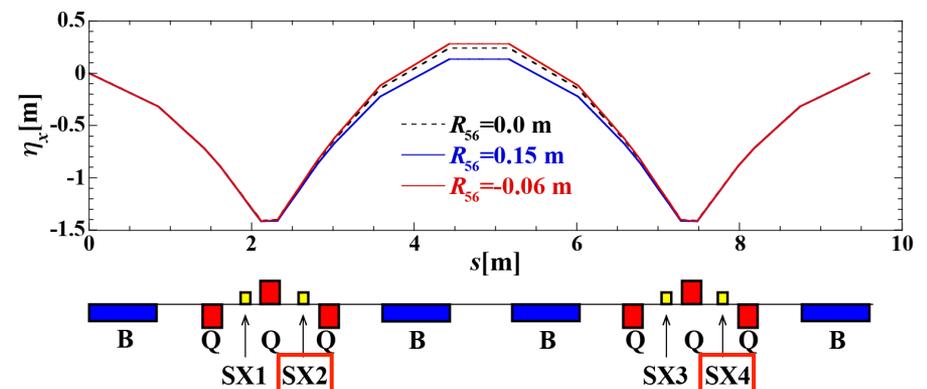
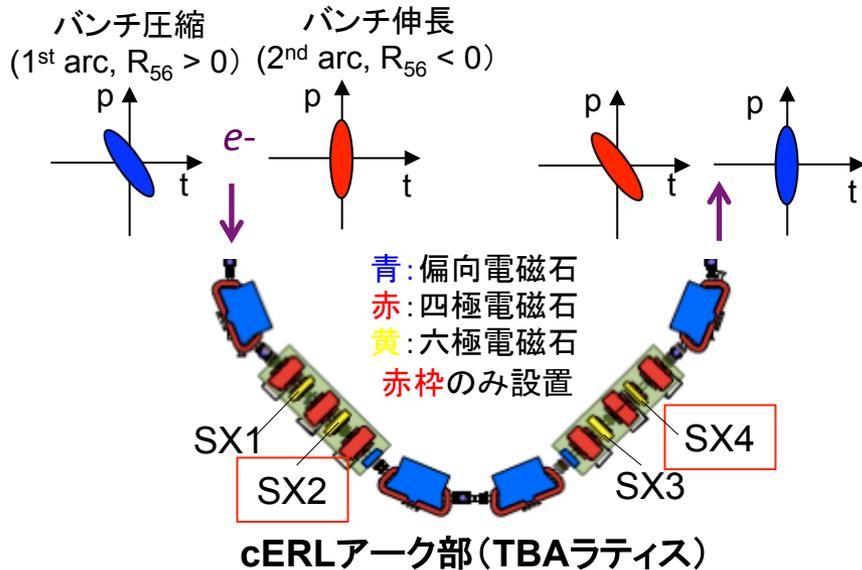
- 1) 主空洞off-crest加速 → 時間(縦方向位置)と運動量の相関の生成
- 2) 第1アーク部 ( $R_{56} > 0, T_{566} > 0$ ) → 縦方向分散によるバンチ圧縮
- 3) 第2アーク部 ( $R_{56} < 0, T_{566} < 0$ ) → 圧縮されたバンチの伸長(復元)
- 4) 主空洞off-crest減速 → 時間(縦方向位置)と運動量の相関の解消

$R_{56}$ : 四極電磁石による調整  $T_{566}$ : 六極電磁石による調整

軌道長の運動量差による変化

$$\Delta z = c\Delta t = R_{56} \delta + T_{566} \delta^2 + \dots$$

$\delta$ : 中心運動量からのずれ

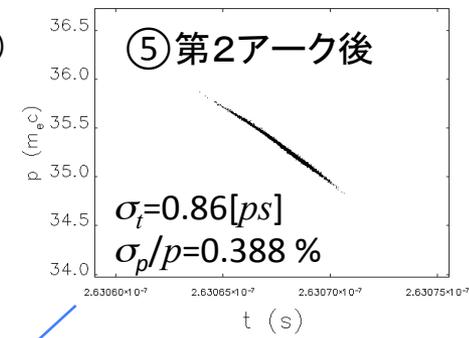
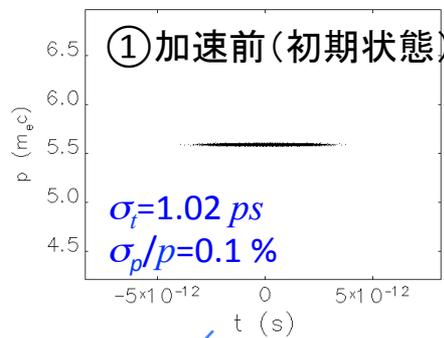
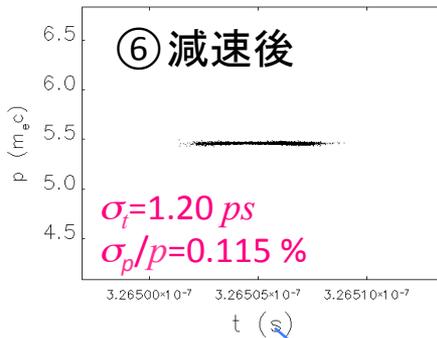
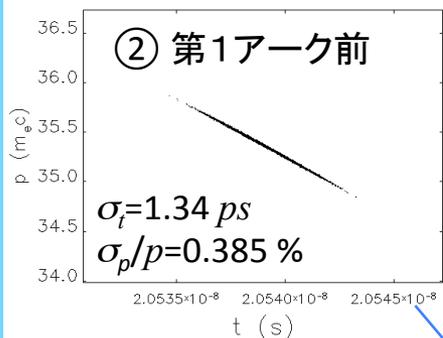


### アーク部の配置構成と分散関数

- 第1アーク:  $R_{56} = 0.15$  m (バンチ圧縮),  $R_{56} = 0$  m (通常)  
 第2アーク:  $R_{56} = -0.06$  m (バンチ伸長),  $R_{56} = 0$  m (通常)

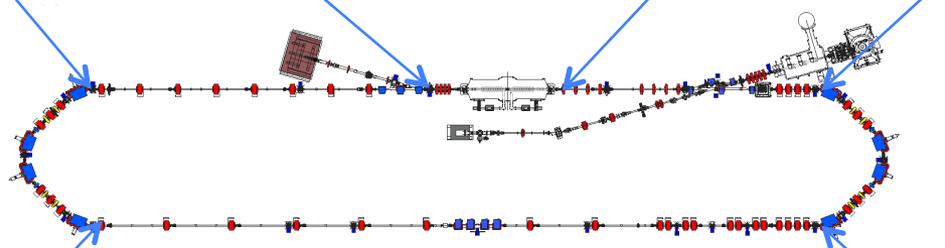
# バンチ圧縮・復元シミュレーション

## バンチ圧縮・復元シミュレーション結果

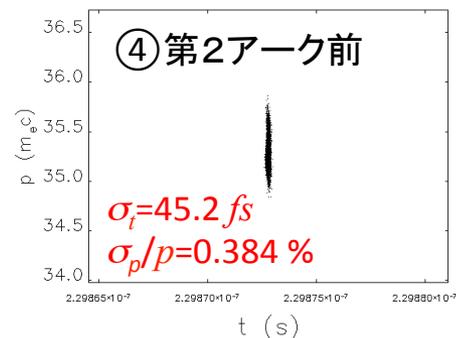
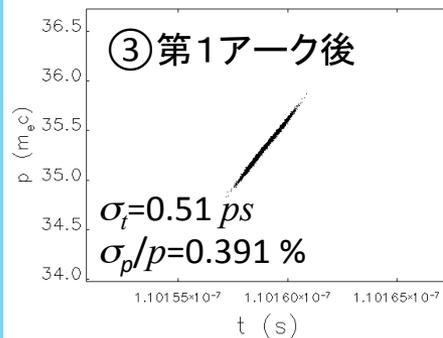


$K_2(\text{SXIF2}) = -52.29 \text{ [m}^{-3}\text{]}$   
 $K_2(\text{SXIF4}) = -34.97 \text{ [m}^{-3}\text{]}$   
 $\phi_{RF}(\text{加速}) = 24.62 \text{ [deg]}$

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



ビームエネルギー : 20 MeV  
 入射エネルギー : 2.9 MeV  
 バンチ電荷 : 7.7 pC  
 初期バンチ長 : 1 ps  
 初期運動量幅 : 0.1 %  
 初期規格化エミッタンス : 1 mm·mrad



# 発表内容

---

1. cERLの概要
2. 入射部
3. 周回部
4. **ビーム損失**
5. 到達目標と達成度[抜粋]
6. まとめ

# ビームサイズとアパーチャ

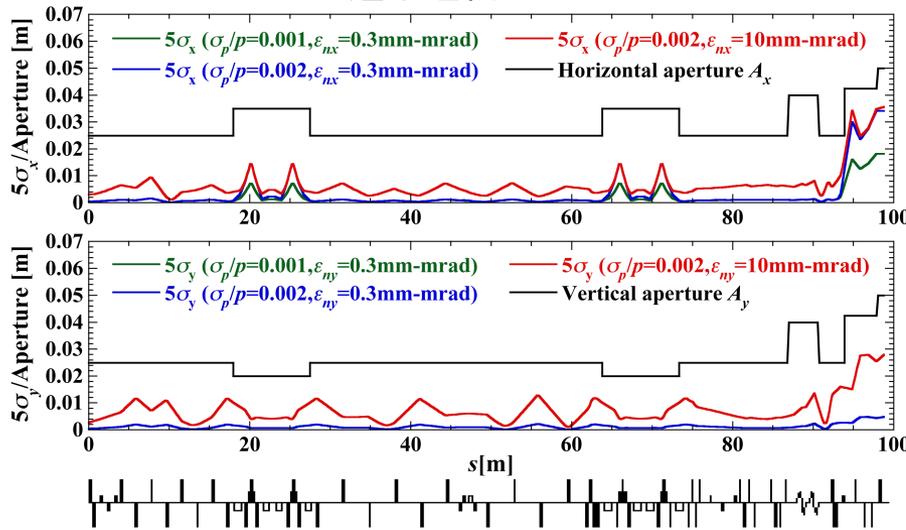
cERL加速器室(放射線遮蔽)

ERL開発棟の床耐荷重 → コンクリート厚: 側面 1.5 m, 天井 1.0 m

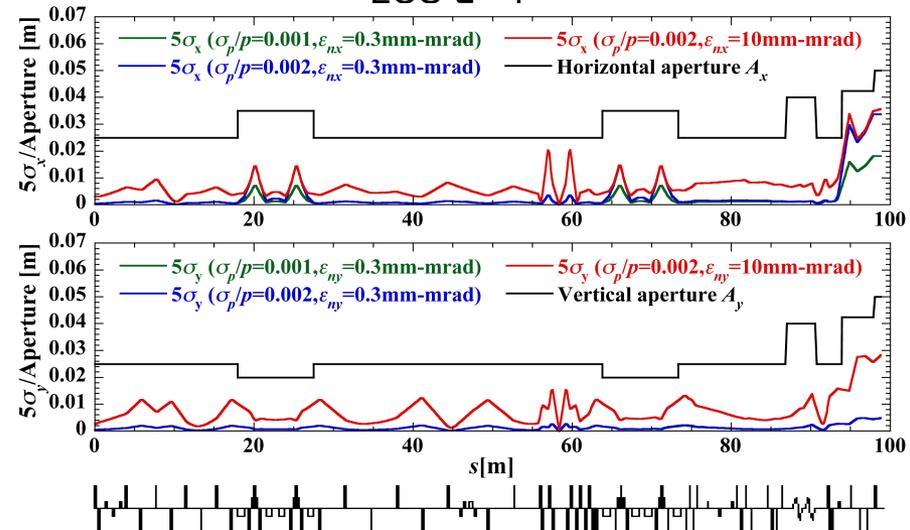


ビーム損失率の目標・目安:  $< 10^{-6}$  (ビーム損失  $< 10$  nA @ 35 MeV, 10 mA)  
 → 真空ダクトのアパーチャ  $A_{x,y} >$  ビームサイズの5倍  $5\sigma_{x,y}$  (ガウス分布仮定)

通常運転モード



LCSモード



ビームサイズ5倍とアパーチャ

$\sigma_p/p=2 \times 10^{-3}$ ,  $\epsilon_{nx}=\epsilon_{ny}=10$  mm·mradでも  $A_{x,y} > 5\sigma_{x,y}$  を満足する。

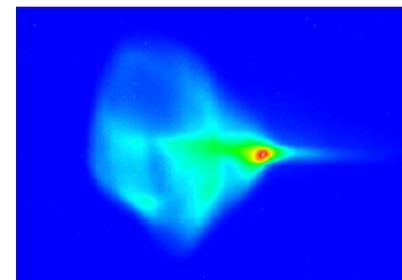
# ビームハローとコリメータ設置

## ビームハロー

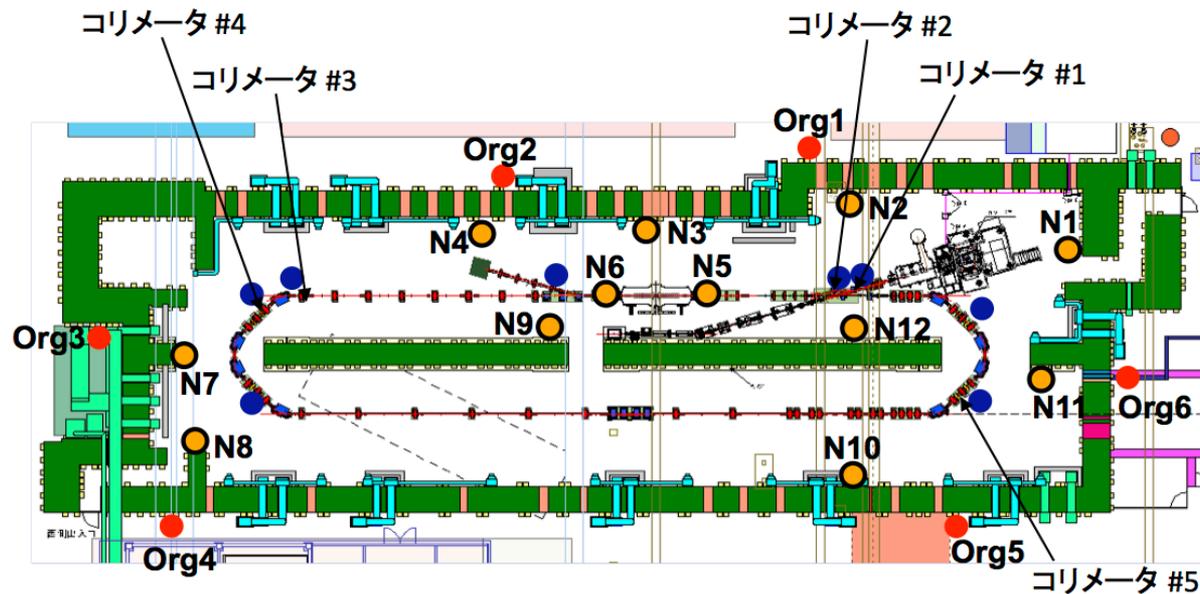
- 電子銃、空洞電界放出、Touschek&残留ガス散乱などに起因して発生
- 他施設での観測例

## コリメータ

- ビームハローの除去とビーム損失の局在化
- 入射部2ヶ所(コリメータ#1,#2)
- 周回部3ヶ所(コリメータ#3,#4,#5)

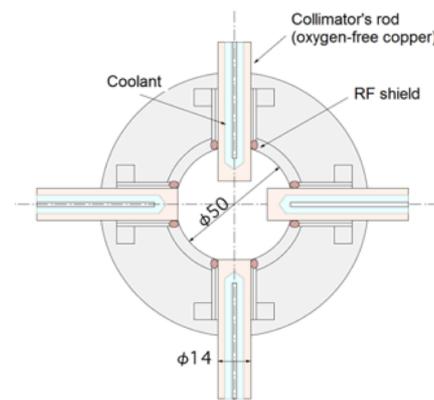


ビームハロー@J-LAB



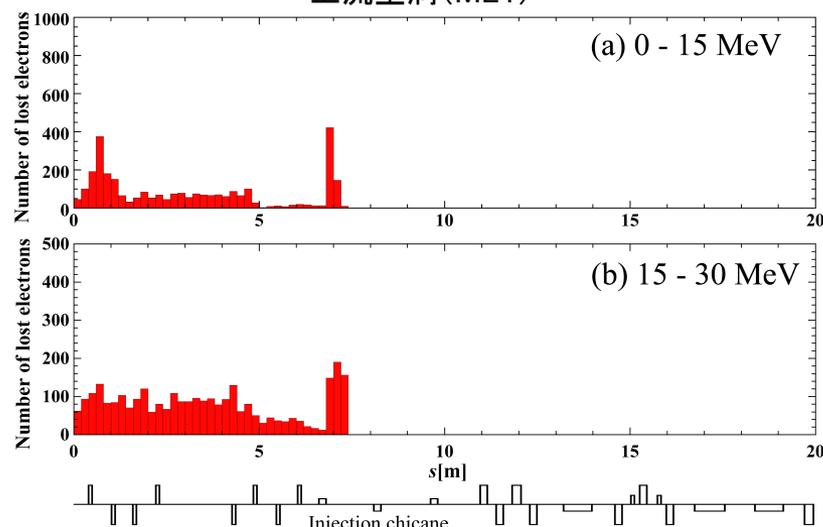
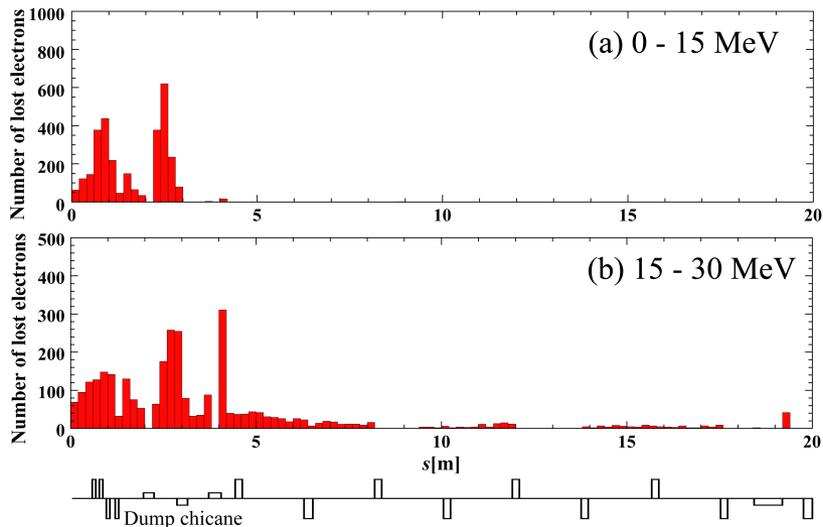
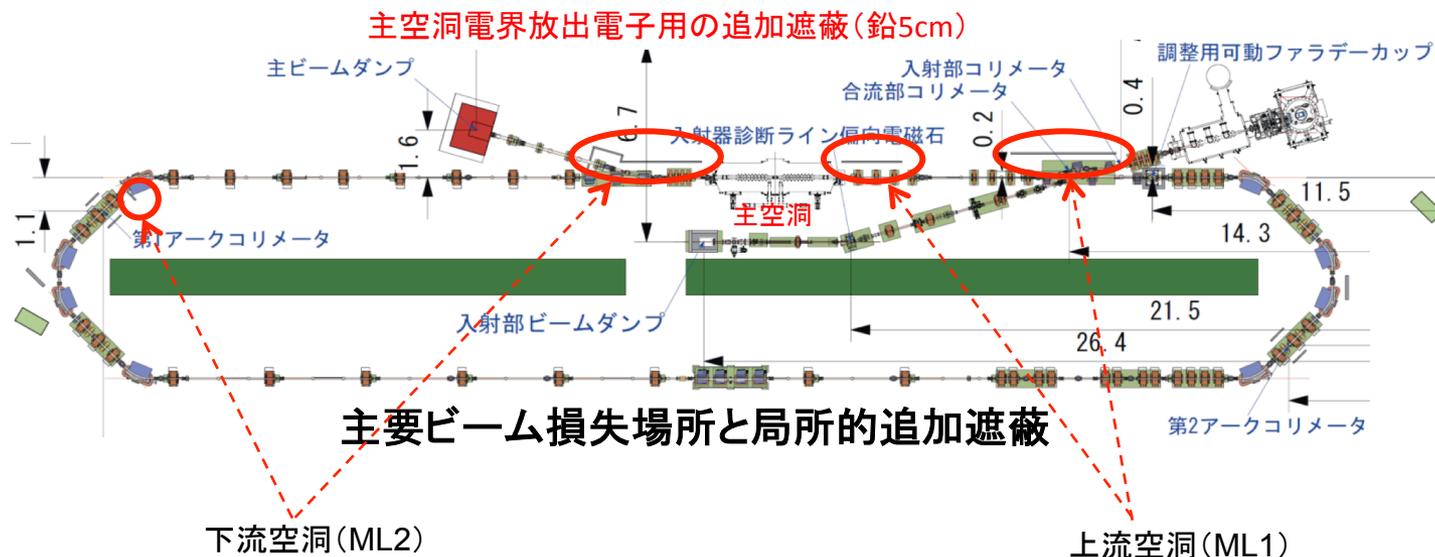
- 放射線モニター (Org1-6)
- 加速器室内モニター (N1-12)
- 高速ロスモニター

## コリメータの配置



コリメータ構造(直線部)

# 主空洞電界放出電子の損失



主空洞電界放出電子の損失分布シミュレーション( $E_{acc}=15$  MV/m)

# 発表内容

---

1. cERLの概要
2. 入射部
3. 周回部
4. ビーム損失
5. 到達目標と達成度[抜粋]
6. まとめ

# 目標値と達成値(入射部)

Parameter	Achievement	Target value	Remark
Beam kinetic energy $T$	5.6 MeV (typ.), 5.9 MeV (max.)	5 MeV	achieved
DC voltage for DC gun	500 kV 450 kV in operation	500 kV	achieved almost achieved
Injector accelerating gradient	7 MV/m	7 MV/m	achieved
Normalized emittance (Low bunch charge 1)	$\approx 0.07$ mm·mrad (@~0.01 pC/bunch, $T=390$ keV)	$\sim 0.1$ mm·mrad	achieved
Normalized emittance (Low bunch charge 2)	$\approx 0.17$ mm·mrad (@0.02 pC/bunch, $T=5.6$ MeV)	$\sim 0.1$ mm·mrad	almost achieved
Normalized emittance (Medium bunch charge)	$\approx 0.8$ mm·mrad (@7.7 pC/bunch, $T=5.6$ MeV)	1 mm·mrad (1 <sup>st</sup> target) $\sim 0.3$ mm·mrad (design)	achieved still not achieved
Normalized emittance (High bunch charge)	1.5~3 mm·mrad (@40 pC/bunch)	1 mm·mrad	still not achieved
Momentum spread	$< 10^{-3}$ ( $< 1$ pC/bunch) (1.5 - 2.5) $\times 10^{-3}$ (@7.7 pC/bunch)	$\leq 10^{-3}$	achieved still not achieved

# 目標値と達成値（周回部）

Parameter	Achievement	Target value	Remark
Beam energy $E$ ( $E_{inj}$ )	20 MeV (2.9 MeV)	35 MeV (5.5 MeV)	still not achieved
ML accelerating gradient	8.3 MV/m	15 MV/m	still not achieved
Average current	1 mA	10 mA	still not achieved
Normalized emittance (Very low bunch charge)	$\approx 0.13$ mm·mrad (@~0.05 pC/bunch)	$\sim 0.1$ mm·mrad	achieved
Normalized emittance (Medium bunch charge)	1.0 - 1.6 mm·mrad (@7.7 pC/bunch)	1 mm·mrad (1 <sup>st</sup> target) $\sim 0.3$ mm·mrad (design)	almost achieved still not achieved
Normalized emittance (High bunch charge)	2 - 10 mm·mrad (@40 pC/bunch)	1 mm·mrad (@77 pC/bunch)	still not achieved
Momentum spread	$1.2 \times 10^{-4}$	$\sim 10^{-4}$	almost achieved
RF amplitude stability (ML)	0.003 %	$\leq 0.01$ %	achieved
RF Phase Stability (ML)	0.0090 – 0.0094 °	$\leq 0.01$ °	achieved
Momentum jitter	$3 \times 10^{-5}$	$< 10^{-4}$	achieved
Bunch length (compression)	$\sim 0.25$ ps @ 2pC/bunch	0.1 ps @ 7.7 pC/bunch	still not achieved

ML: main linac

# 発表内容

---

1. cERLの概要
2. 入射部
3. 周回部
4. ビーム損失
5. 到達目標と達成度[抜粋]
6. まとめ

# まとめ

- cERLでは、入射部、周回部共に輸送中のビーム品質の劣化を抑えるように最適化設計を行った。
- 3つの運転モード(通常運転、LCS、バンチ圧縮)に対応できる設計とした。
- ビーム損失を抑えるべく真空ダクトのアーチャーチャを決定し、コリメータと局所的な追加遮蔽による効率的な放射線対策を施した。
- 多くのパラメータで目標値を達成している。他方、達成度がまだ十分でなく、ビーム調整や技術開発などが必要なものもある。