

5GeV ERL光源 およびその開発の状況

坂中章悟

高エネルギー加速器研究機構(KEK)
加速器研究施設

ERLサイエンスワークショップ, 2009年7月9-11日, KEK

1. 5 GeV ERL光源の概要

ERL放射光源の概要

蓄積リング型光源の技術は確立してきている。
イノベーションをもたらす技術が期待されている。

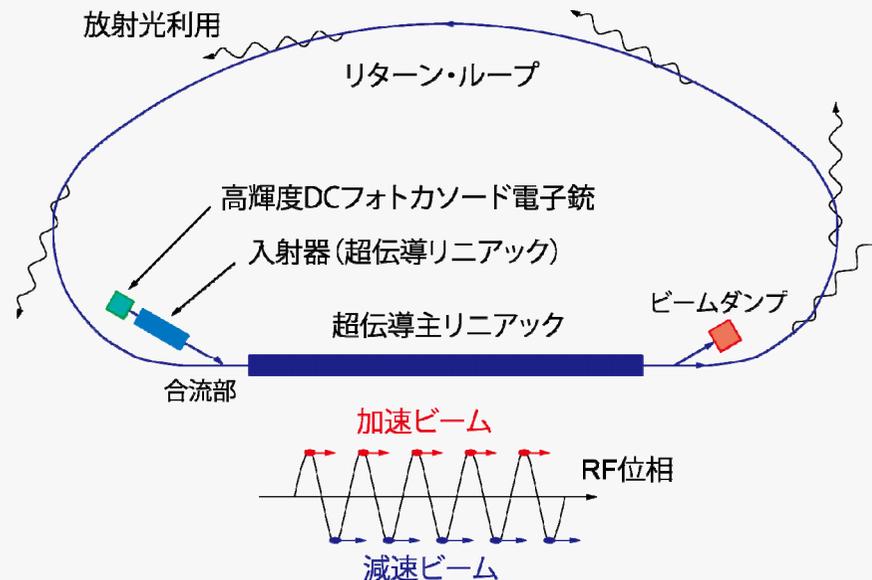


エネルギー回収リアック
(ERL)に対する期待

革新的な技術を応用

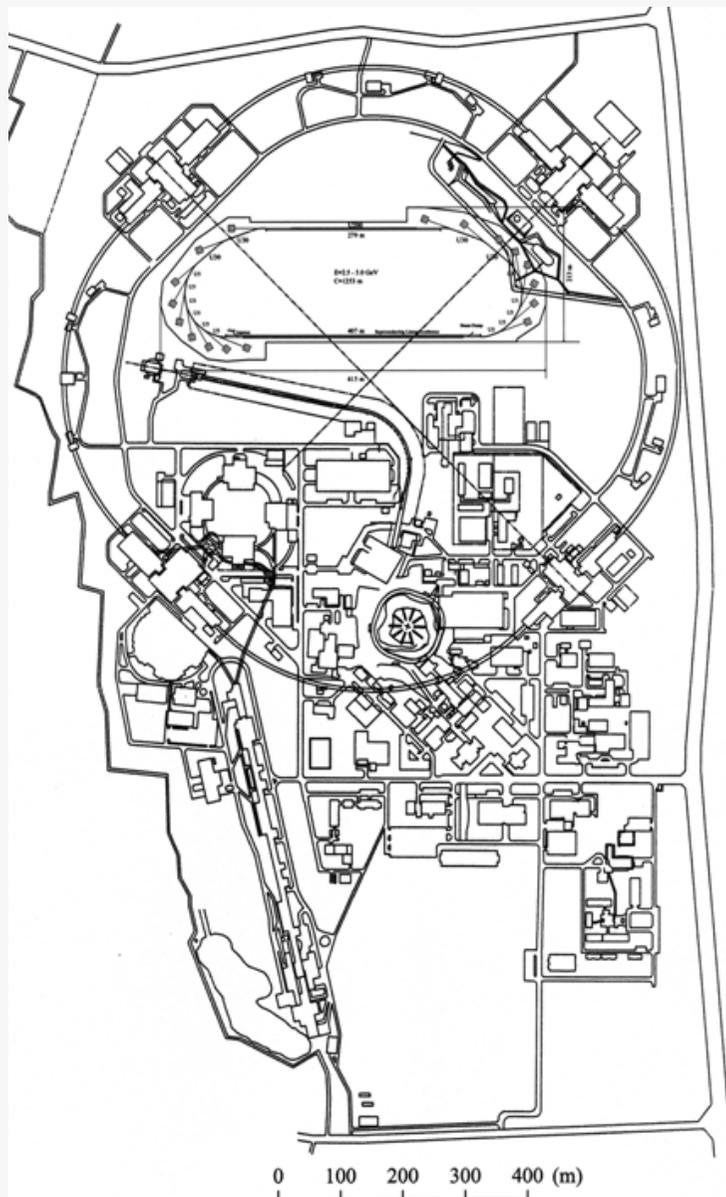
- ・ 高輝度フォトカソード電子銃
- ・ 超伝導加速空洞

- 超低エミッタンス・ビーム
(10 - 100 pm·rad)
- 超短パルスX線源
(~ 100 fs r.m.s.)
- 共振器型X線FELへの応用



自由電子レーザーとは
相補的な役割を担う

5 GeV ERL放射光源の概要



加速器の主要なパラメータ

	パラメータ
ビームエネルギー	5 GeV
平均ビーム電流	10 - 100 mA
規格化エミッタンス	0.1 - 1 mm·mrad
エネルギー幅 (rms)	$(0.5 - 2) \times 10^{-4}$
バンチ長 (rms)	1 - 3 ps (通常モード) ~ 100 fs (バンチ圧縮時)
加速周波数	1.3 GHz

光源の代表的なパラメータ

	パラメータ
スペクトル範囲	30 eV - 30 keV
挿入光源からの平均輝度	$10^{21} - 10^{23}$ ph/s/mm ² /mrad ² /0.1%bw
平均フラックス	$> 10^{16}$ phs/s/0.1%bw
挿入光源台数	20 - 30 台

5 GeV ERLの運転モード(例)

高輝度

超短パルス光

	High coherence (HC) mode	High flux (HF) mode	Ultimate mode	Ultra short-pulse mode
Beam energy	5 GeV			
Beam current	10 mA	100 mA	100 mA	77 μ A ¹⁾
Charge/bunch	7.7 pC	77 pC	77 pC	77 pC
Bunch repetition rate	1.3 GHz	1.3 GHz	1.3 GHz	1 MHz ¹⁾
Beam emittance at 5 GeV ($\epsilon_x = \epsilon_y$)	10 pm·rad	100 pm·rad	10 pm·rad	100 pm·rad
Beam energy spread (rms)	2×10^{-4}	2×10^{-4}	2×10^{-4}	3.4×10^{-3}
Bunch length (rms)	2 ps	2 ps	2 ps	100 fs

5

1) very flexible

挿入光源のパラメータ(例)

L = 5 m

L = 30 m

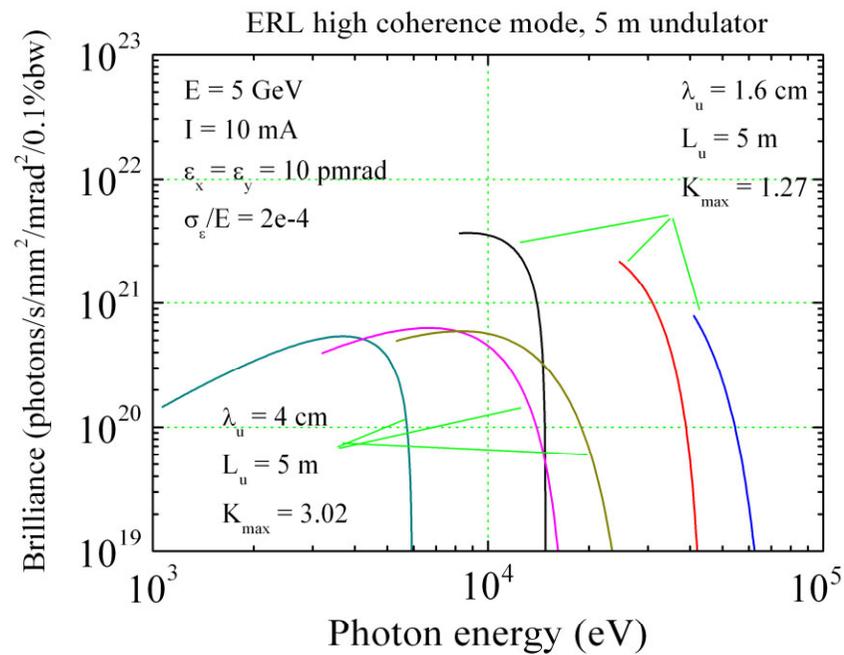
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
磁石長さ L	5 m	5 m	30 m	30 m
周期長 λ_u	1.6 cm	4 cm	1.6 cm	4 cm
K_{\max}	1.27	3.02	1.27	3.02
最小ギャップ g_{\min}	4.5 mm	10 mm	4.5 mm	10 mm
β_x (at center of ID)	5 m	5 m	20 m	20 m
β_y (at center of ID)	5 m	5 m	20 m	20 m

(注)「放射光将来計画検討報告 - ERL光源と利用研究 -」(2003) 3.8 節と同じパラメータを使用。

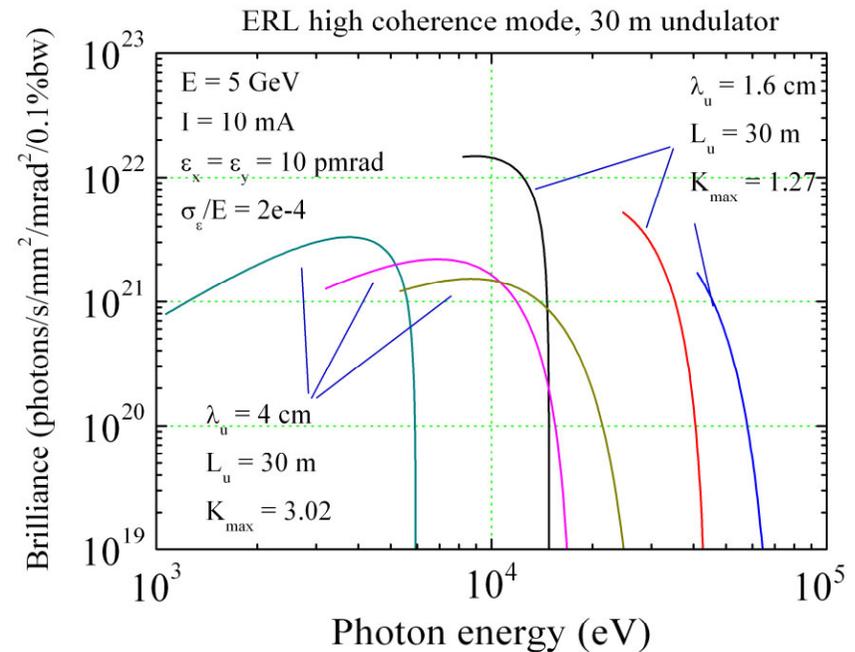
Higi coherence mode: 輝度

$$I = 10 \text{ mA}, \varepsilon_{x,y} = 10 \text{ pm}\cdot\text{rad}$$

5 m アンジュレータ



30 m アンジュレータ

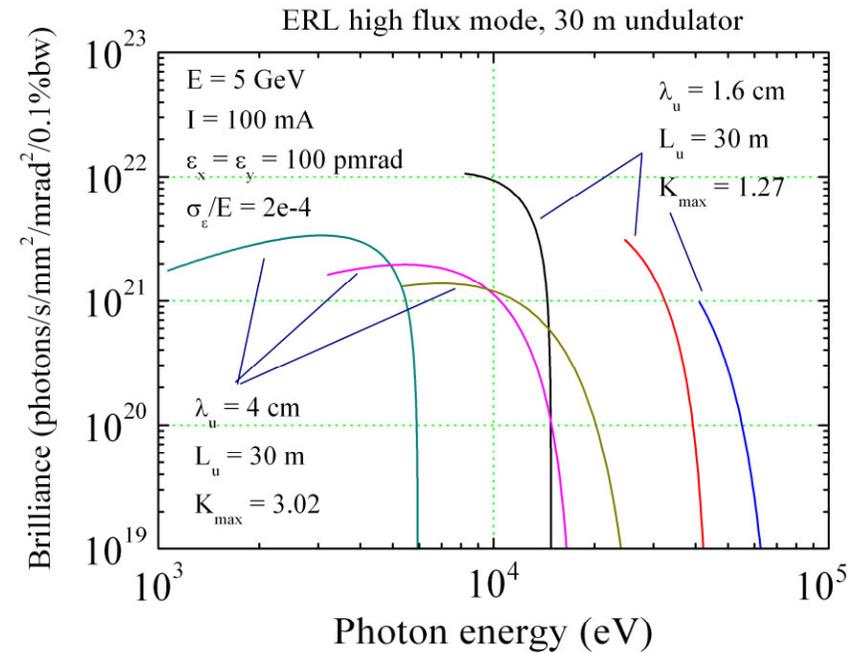
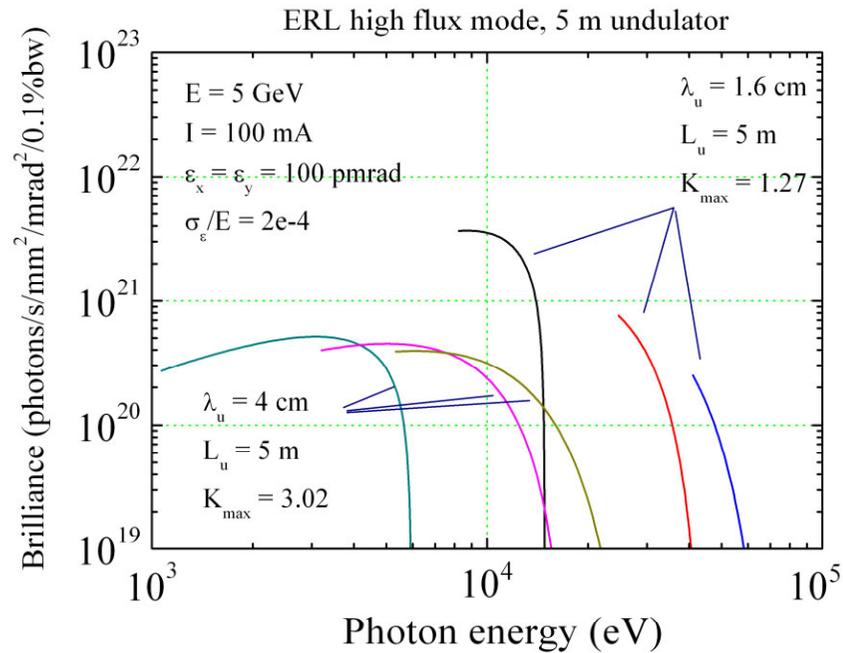


Higi flux mode: 輝度

$I = 100 \text{ mA}$, $\varepsilon_{x,y} = 100 \text{ pm}\cdot\text{rad}$

5 m アンジュレータ

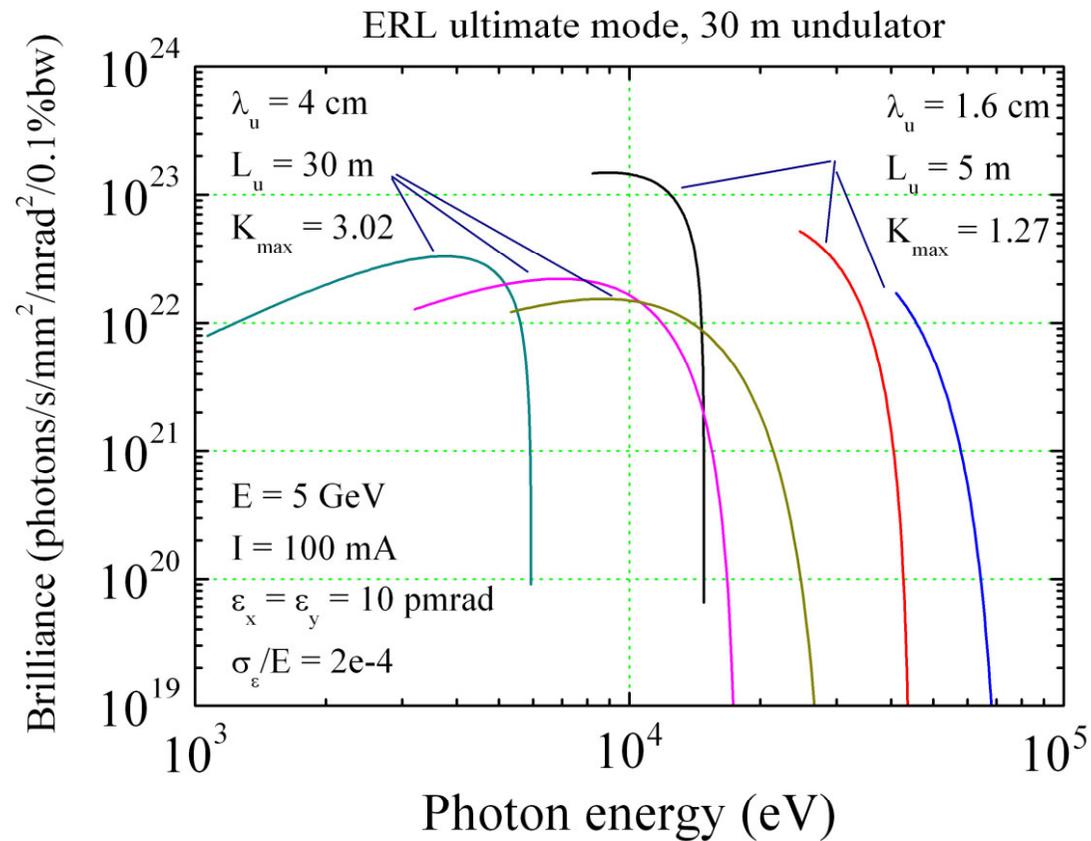
30 m アンジュレータ



Ultimate mode: 輝度

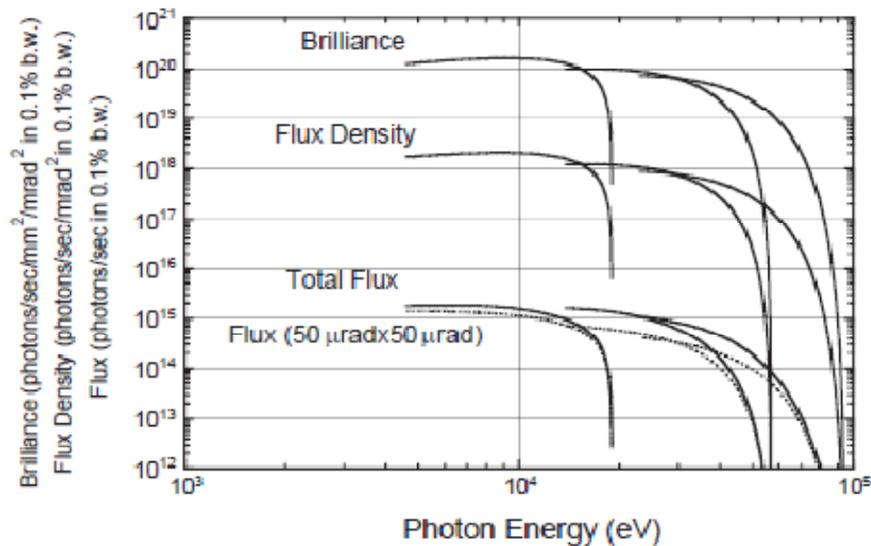
$$I = 100 \text{ mA}, \varepsilon_{x,y} = 10 \text{ pm}\cdot\text{rad}$$

30 m アンジュレータ

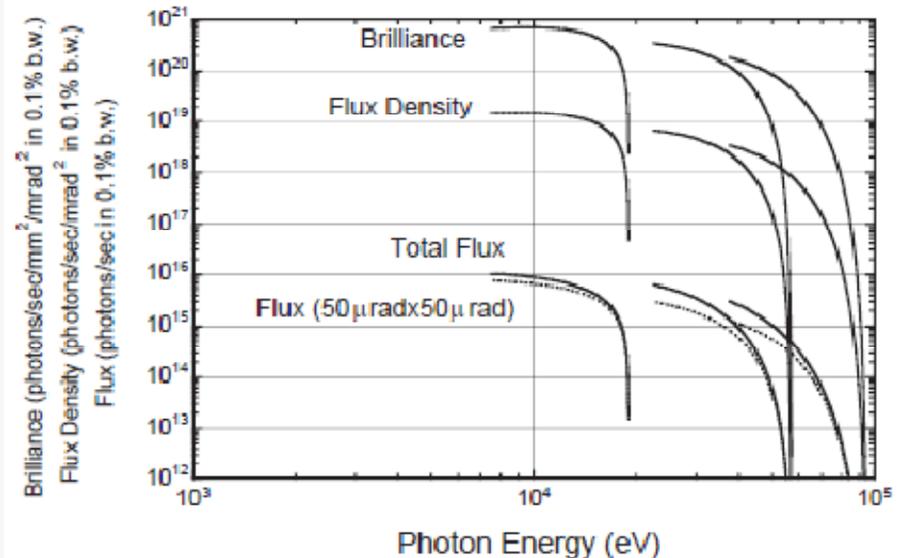


(参考) SPring-8 の輝度の例

5 m 標準アンジュレータ
(BL09 等)



25 m アンジュレータ
(BL19LXU)



Standard-undulator beamline (BL09,10,11,12,13,29,35,37,39,41,44,47XU)

Note: The minimum gap is assumed to be 8 mm.

Type	In-vacuum	Tunable energy range	4.4 ~ 18.5 keV(1 st)
Undulator period	32 mm		13.2 ~ 51 keV(3 rd)
Number of periods	140		22 ~ 75 keV(5 th)
Length	4.5 m		
Maximum field	0.86 T	Maximum total power	13 kW
Maximum K value	2.5	Maximum power density	510 kW/mrad²

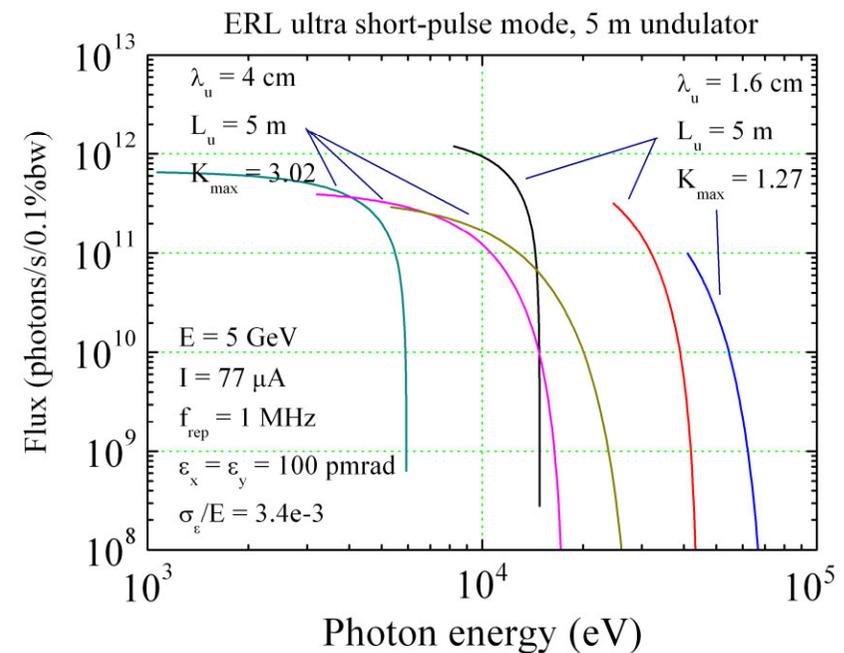
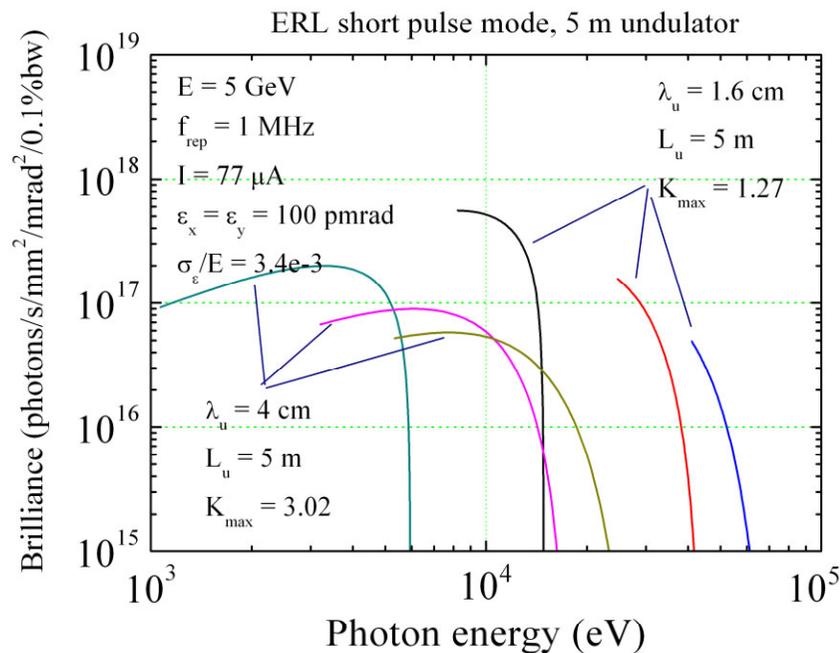
Type	In-vacuum	Tunable energy range	7.5 ~ 18.5 keV(1 st)
Undulator period	32 mm		22.5 ~ 51 keV(3 rd)
Number of periods	781		37.5 ~ 75 keV(5 th)
Length	25 m		
Maximum field	0.55 T	Maximum total power	34.9 kW
Maximum K value	1.7	Maximum power density	1970 kW/mrad²

Ultra short-pulse mode: 輝度とフラックス

$$\sigma_t = 100 \text{ fs}, f_{\text{rep}} = 1 \text{ MHz}, I = 77 \text{ } \mu\text{A}, q_b = 77 \text{ pC/bunch}, \varepsilon_{x,y} = 100 \text{ pm}\cdot\text{rad}$$

輝度 (5 m アンジュレータ)

フラックス(5 m アンジュレータ)



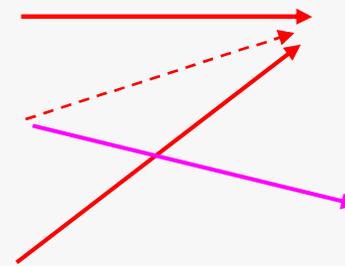
$$F \sim 10^6 \text{ photons/pulse/0.1\%bw}$$

パルス当たりの光子数は、増やすことが可能(バンチ電荷を上げる、アンジュレータ周期数増やす、など)

ERL光源の特長を活かす利用は？

ビームの6次元エミッタンスが小さい

1. 水平、垂直方向のエミッタンスが小さい
2. ビームのエネルギー幅、バンチ長がそれぞれ(蓄積リングより)約1桁小さい
3. エネルギー回収により、リニアック光源でありながら高い平均電流が可能



高平均輝度

超短パルス

1,2,3 の全ての特長を活かす利用は？

1. 共振器型X線FEL (羽島良一氏、明日の発表)
2. 高ピーク輝度かつ高繰り返しを利用できないか？

光源のパラメータ(例)

	ERL high coherence	SPring-8 BL19 ¹⁾	SASE FEL (LCLS) ²⁾
Total flux F (photons/s/0.1%bw)	9.2×10^{14}	3.2×10^{15}	2.4×10^{14}
Brilliance B (photons/s/mm ² /mrad ² /0.1%bw)	4.8×10^{22}	1.5×10^{21}	4.2×10^{22}
Peak brilliance \hat{B} (photons/s/mm ² /mrad ² /0.1%bw)	7.4×10^{24}	5.8×10^{22}	1.2×10^{33}
Bose degeneracy δ_D	10	0.023	3.3×10^9
Repetition rate f_{rep} (Hz)	1.3×10^9	5×10^8	120
$\delta_D \times f_{\text{rep}}$ (?)	1.3×10^{10}	1.2×10^7	4.0×10^{11}
Undulator parameters	$\lambda_u = 1.6$ cm K = 1.27, L=30 m	$\lambda_u = 3.2$ cm K = 1.03, L=25 m	$\lambda_u = 3$ cm K = 3.9, L=100 m
1st harmonic $\varepsilon_{1\text{st}}$ (keV)	8.2	12.4	8.3

1) SPECTRA 8.0.10 添付データ使用

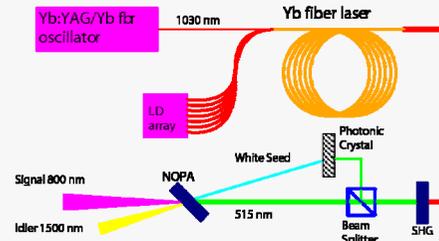
2) Qun Shen, CHESS Technical Memo 01-002, 2001, Table 1.

2. 加速器のR&Dの現状

ERL加速器要素のR&D

5 GeV ERLのパラメータ

	Parameters
Beam energy	5 GeV
Average current	10 - 100 mA
Beam emittance (5 GeV)	10 - 100 pm·mrad
Normalized emittance	0.1 - 1 mm·mrad
Bunch length (rms)	1 - 3 ps (usual mode) ~ 100 fs (with B.C.)
RF frequency	1.3 GHz

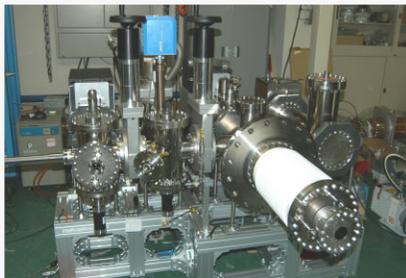
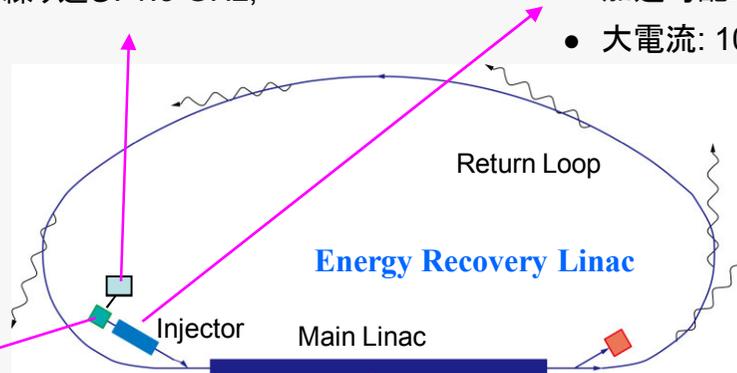


電子銃用ドライブレレーザー

- 平均出力: 15 W CW, $\lambda \sim 800$ nm
- 繰り返し: 1.3 GHz,

入射器用超伝導空洞

- 入力パワー: 170 kW/coupler
- 加速勾配: 15 MV/m
- 大電流: 100 mA (CW)



高輝度フォトカソード電子銃

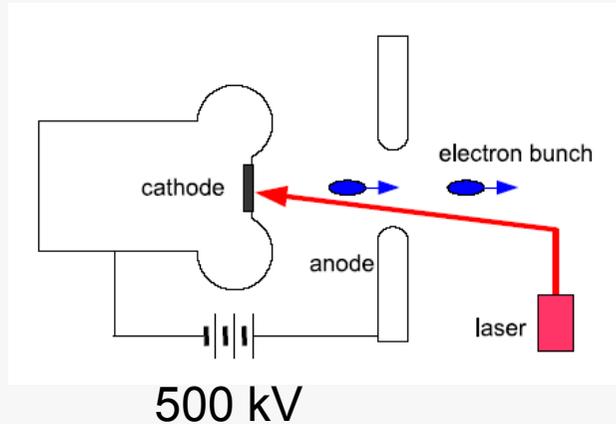
- 500 kV, 100 mA
- Normalized emittance: 0.1 - 1 mm·mrad



主リニアック用超伝導加速空洞

- 加速勾配: 15-20 MV/m (CW)
- 大電流対応: 200 mA
- 高次モードの減衰

ERL用電子銃：光陰極DC電子銃の開発



開発の目標

- 電圧500 kV, ビーム電流 10-100 mA
- 規格化エミッタンス: 0.1 - 1 mm·mrad
- Negative Electron Affinity (NEA) GaAs カソード
- 光陰極の長寿命化(極高真空、低暗電流など)

JAEA, KEK, 広島大学、名古屋大学等の共同研究

現状

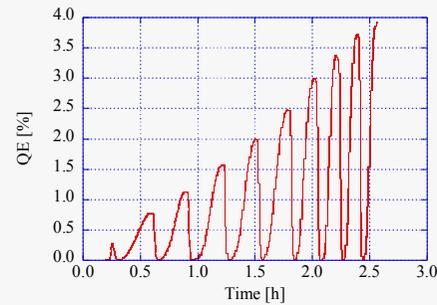
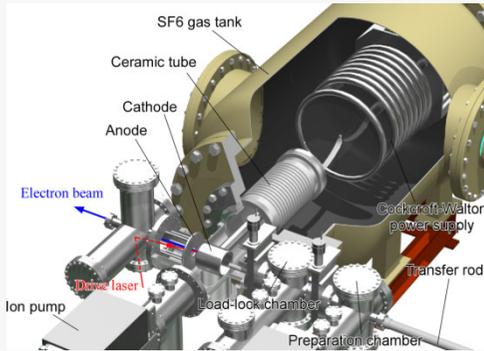
- 250 kV電子銃(JAEA) : NEA表面からのビーム引き出し(230 kV、8 μ A)
 - 150 keV, 1 μ A で最初のエミッタンス測定(\sim 0.13 mm·mrad) [1]
- 500 kV電子銃1号機の組み立て中(JAEA) [2]
 - 多段積層式セラミック管を採用
- 500 kV電子銃2号機的设计開始(KEK)

[1] R. Nagai et al., PAC 09.

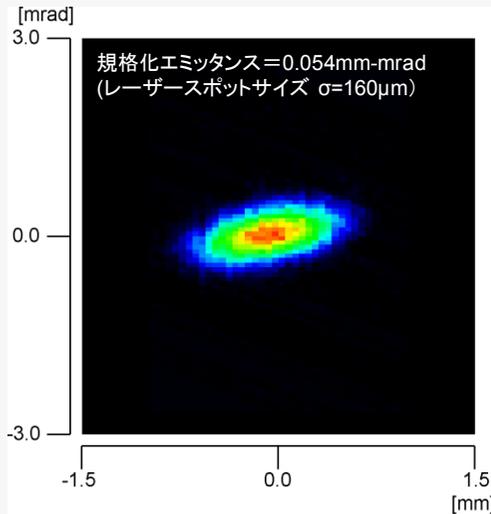
[2] R. Hajima et al., PAC09.

フォトカソードDC電子銃の開発状況

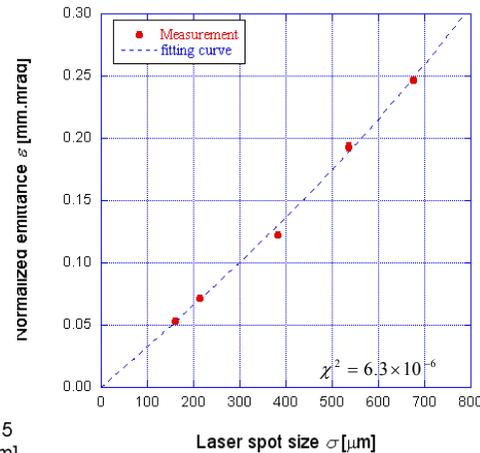
250kV, 50mA Gun (JAEA)



NEA表面の作成

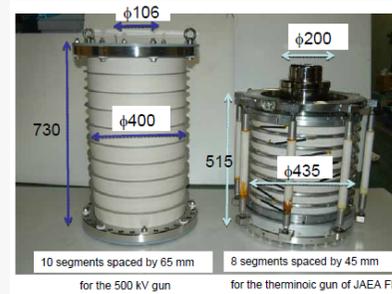
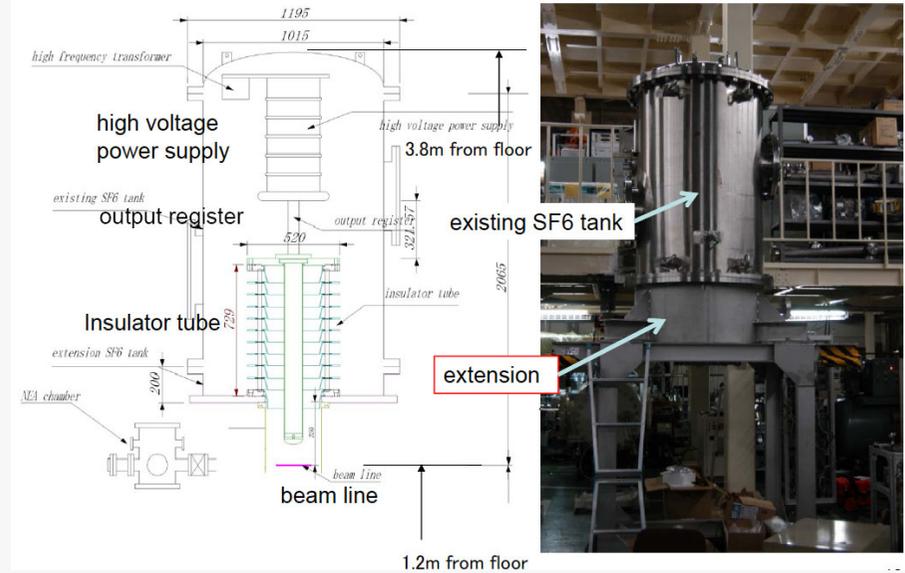


初期エミッタンスの測定(He-Neレーザー)

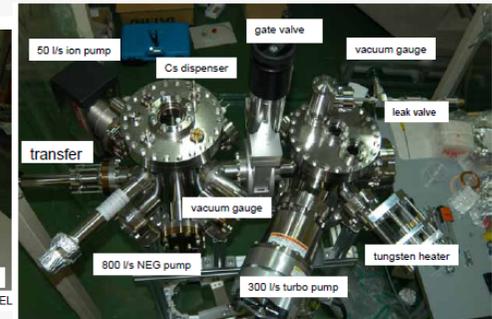


R. Nagai et al., PAC09.

500kV, 10mA Gun (JAEA)



多段積層式絶縁セラミック



フォトカソード作成用真空槽

R. Hajima et al., PAC09.
N. Nishimori et al., ERL09.

超伝導加速空洞の開発

入射器用空洞

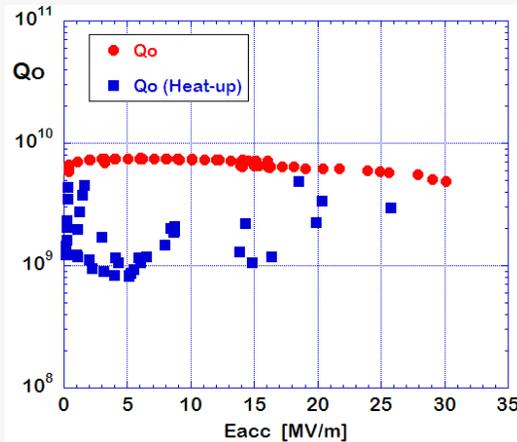
- 2セル空洞を3台使用
- 加速勾配: 7.5 - 15 MV/m
- 入力RF電力: 85-170 kW/coupler
- 改良型HOMカップラー(TESLA型より改良)

現状:

- 試作空洞の最初の性能試験を行った
- 加速勾配として、30 MV/m (短時間)、15 MV/m (長時間)を達成



性能試験用空洞



最初の縦測定の結果

S. Noguchi et al., PAC09.

主リニアック用空洞

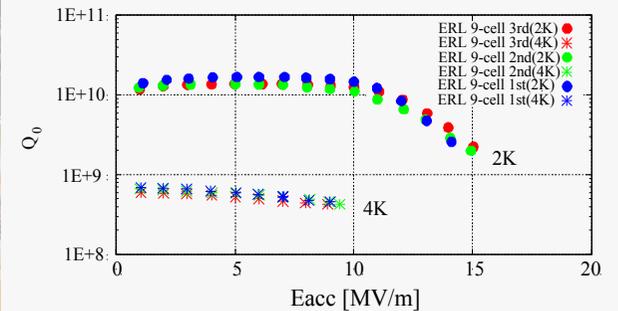
- 9セル空洞
- ビームパイプのマイクロ波吸収体による高次モード減衰
- 大ビーム電流(200 mA)に対応
- 加速勾配: 15 - 20 MV/m (CW)

現状:

- 試作空洞の最初の性能試験を行った。
- 加速勾配 15 MV/m を達成。



性能試験の準備



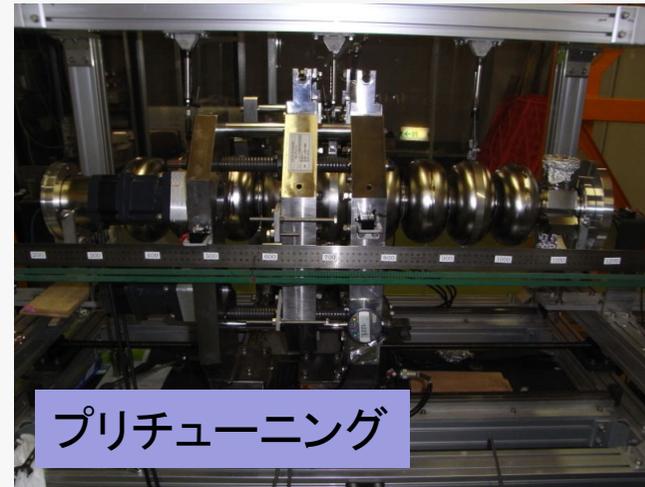
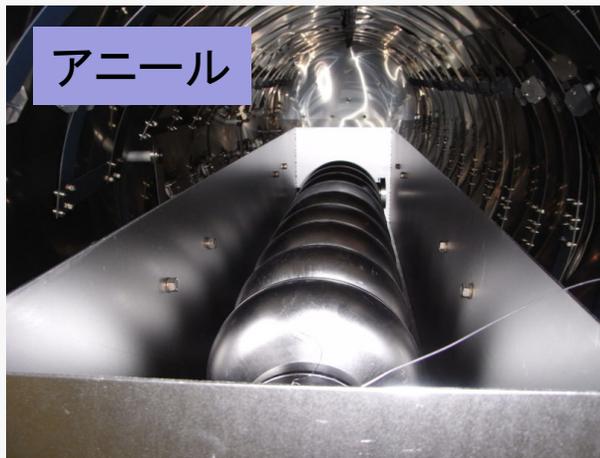
最初の縦測定試験の結果

18

T. Furuya et al., to be presented at SRF2009.

主リニアック用超伝導空洞の開発(写真)

製作 → 電解研磨 → アニール → プリチューニング
→ 仕上げ電解研磨 → アセンブリ → ベーキング → 縦測定



コンパクトERLによる実証計画

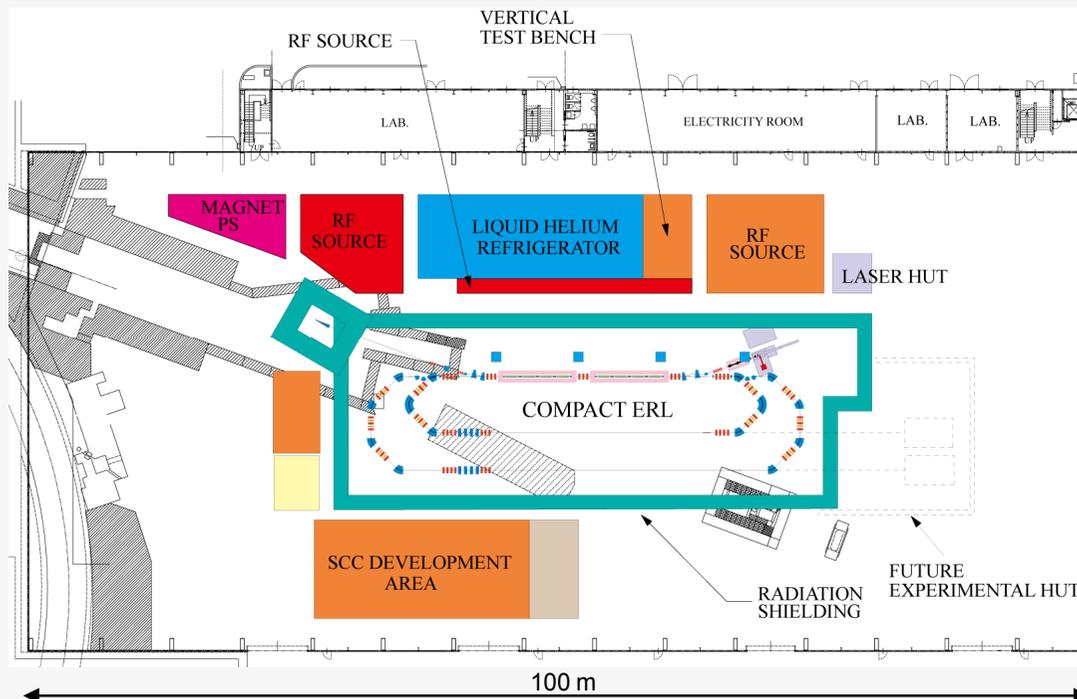
Compact ERL のパラメータ

	Parameters
Beam energy	35 - 245 MeV
Average current	10 - 100 mA
Normalized emittance	0.1 - 1 mm·mrad
Bunch length (rms)	1 - 3 ps (usual) ~ 100 fs (with B.C.)
RF frequency	1.3 GHz

現状:

- ラティス設計、ビーム力学の検討を進めた。当初1ループで建設し、2ループに拡張可能な設計とする
- 平成20年度補正予算で、東カウンターホールの改修、設備更新中
- 陽子ビームライン用のコンクリートシールド(10,000トン)の片付け中(素核研)
- 液体ヘリウム冷凍機(冷凍能力 600 W)を整備中。2010年3月に完成予定。

建設スケジュール(目標)

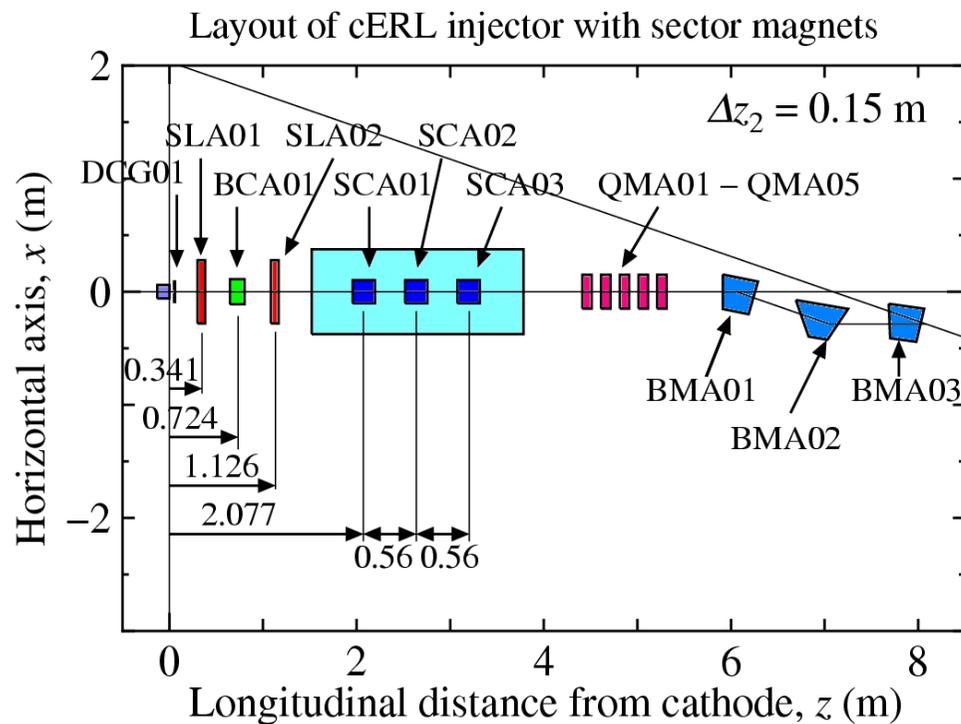


ERL入射器の最適化設計

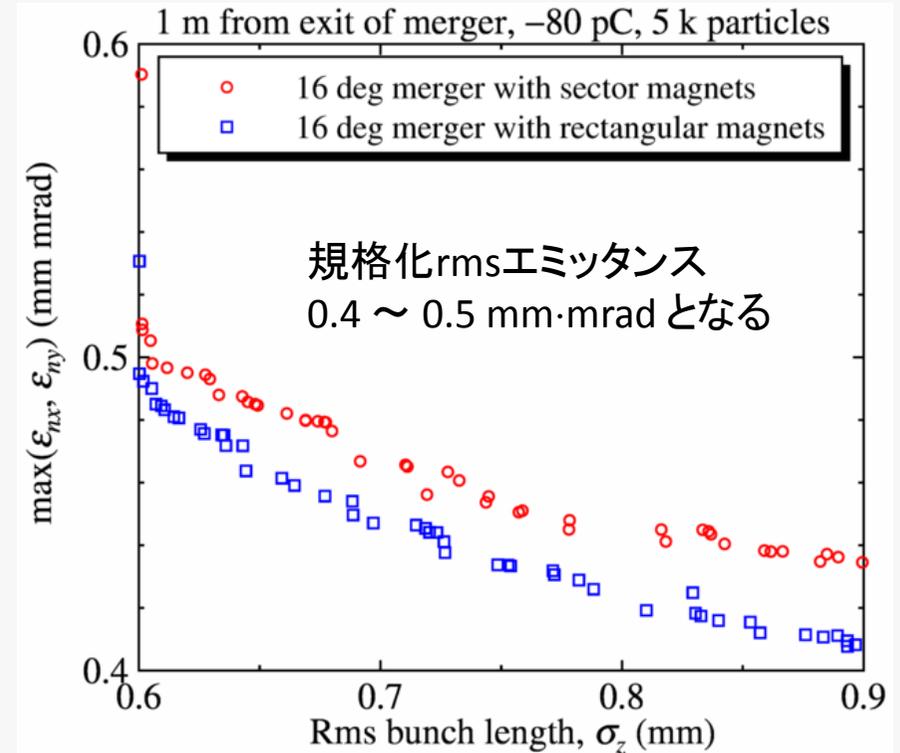
T. Miyajima et al., PAC09.

- cERL入射器の構成
 - 光陰極DC電子銃(電子ビームの生成、加速)
 - ソレノイド電磁石(ビームの収束、エミッタンス補償)
 - バンチャー空洞(バンチ長の圧縮)
 - 超伝導RF空洞(電子ビームの加速)
 - 4極電磁石5台(ビーム光学関数のマッチング)
 - 合流部(周回部軌道へビームを合流させる)

- 遺伝的アルゴリズムを用いた多パラメータ最適化
- 入射器のビーム物理学的理解

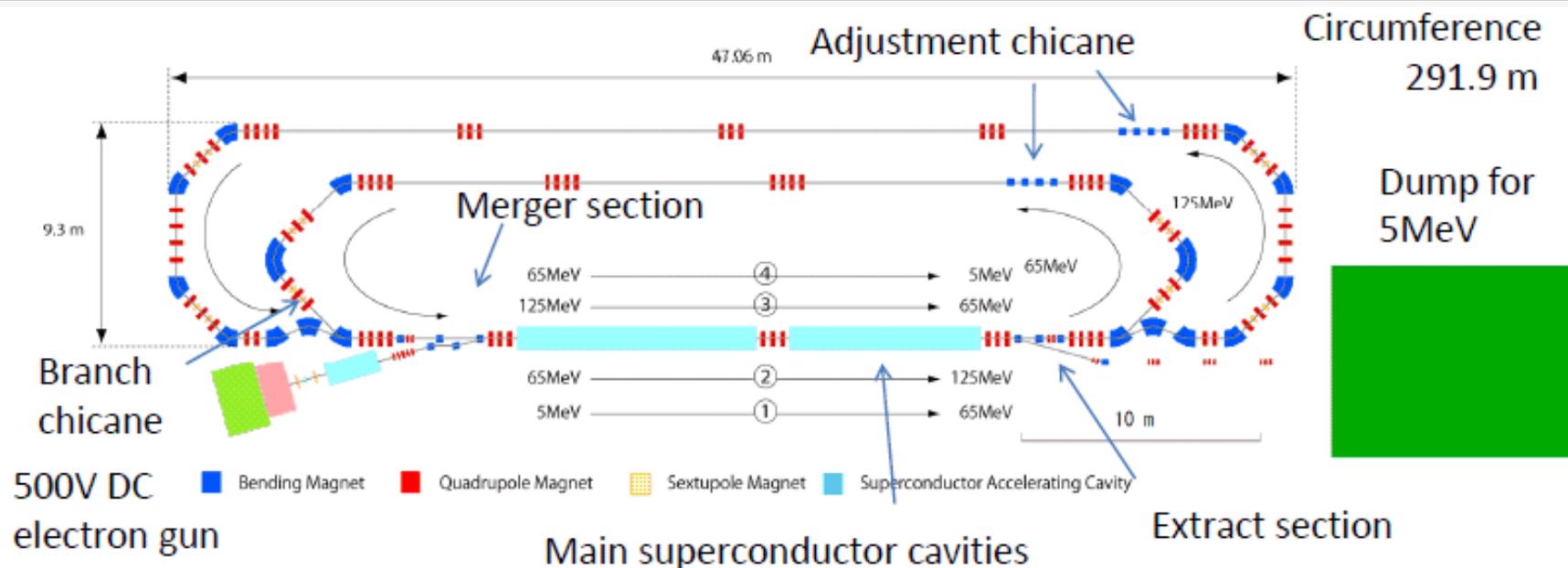


入射器の配置

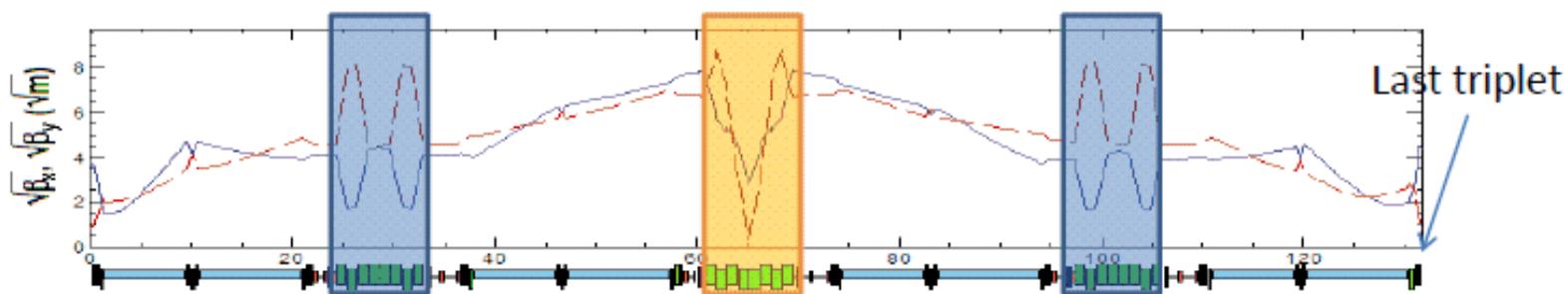


最適化結果の例(バンチ長 vs エミッタンス)

コンパクトERLのラティス設計(2ループ)



Lattice design result 2



- Maximum horizontal betatron function at the last triplet is suppressed down to 20 m if using dummy loops.

■ Dummy inner loop ■ Dummy outer loop

東カウンターホールの改修状況

建屋改修に向けた、コンクリートシールドの片付け作業が進行中(素核研)



昨年(2008/11/18)



最近(2009/06/26)

まとめ

ERL放射光源の特長

- ビームの6次元エミッタンスが小さいと同時に大電流が可能
- 超高輝度光源、超短パルス光源、共振器型XFEL光源などに期待される。

開発の現状

- フォトカソード電子銃: 250 kV電子銃からの低電流のビーム引き出し。500 kV電子銃を組み立て中。
- 超伝導空洞は、入射器用、主リニアック用の試作品を製作し、性能試験で高電界性能を確認。
- 高周波源も開発が進む。
- コンパクトERLの加速器設計。
- 東カウンターホールの改修中。