



cERLとERLプロジェクト

坂中章悟

高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

ERL評価専門委員会, 2010年4月22日, KEK

ERL Collaboration Team



High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

M. Akemoto, T. Aoto, D. Arakawa, S. Asaoka, A. Enomoto, S. Fukuda, K. Furukawa, T. Furuya, K. Haga, K. Hara, K. Harada, T. Honda, Y. Honda, T. Honma, T. Honma, K. Hosoyama, M. Isawa, E. Kako, T. Kasuga, H. Katagiri, H. Kawata, Y. Kobayashi, Y. Kojima, T. Matsumoto, H. Matsushita, S. Michizono, T. Mitsuhashi, T. Miura, T. Miyajima, H. Miyauchi, S. Nagahashi, H. Nakai, H. Nakajima, E. Nakamura, K. Nakanishi, K. Nakao, T. Nogami, S. Noguchi, S. Nozawa, T. Obina, S. Ohsawa, T. Ozaki, C. Pak, H. Sakai, S. Sakanaka, H. Sasaki, Y. Sato, K. Satoh, M. Satoh, T. Shidara, M. Shimada, T. Shioya, T. Shishido, T. Suwada, T. Takahashi, R. Takai, T. Takenaka, Y. Tanimoto, M. Tobiyaama, K. Tsuchiya, T. Uchiyama, A. Ueda, K. Umemori, K. Watanabe, M. Yamamoto, Y. Yamamoto, S. Yamamoto, Y. Yano, M. Yoshida



Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

R. Hajima, R. Nagai, N. Nishimori, M. Sawamura



Institute for Solid State Physics (ISSP), University of Tokyo

N. Nakamura, I. Ito, H. Kudoh, T. Shibuya, K. Shinoe, H. Takaki



UVSOR, Institute for Molecular Science

M. Katoh, M. Adachi



Hiroshima University

M. Kuriki, H. Iijima, S. Matsuba



Nagoya University

Y. Takeda, T. Nakanishi, M. Kuwahara, T. Ujihara, M. Okumi



National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

D. Yoshitomi, K. Torizuka



JASRI/SPRING-8

H. Hanaki

内容

1. ERLプロジェクトの概要
2. コンパクトERL (cERL) 計画
3. まとめ



1. ERLプロジェクトの概要

ERLを用いる新型放射光源

最先端の加速器技術

- ・ 高輝度フォトカソード電子銃
- ・ 高勾配・超伝導加速空洞

+

Energy Recovery Linac (ERL) のコンセプト

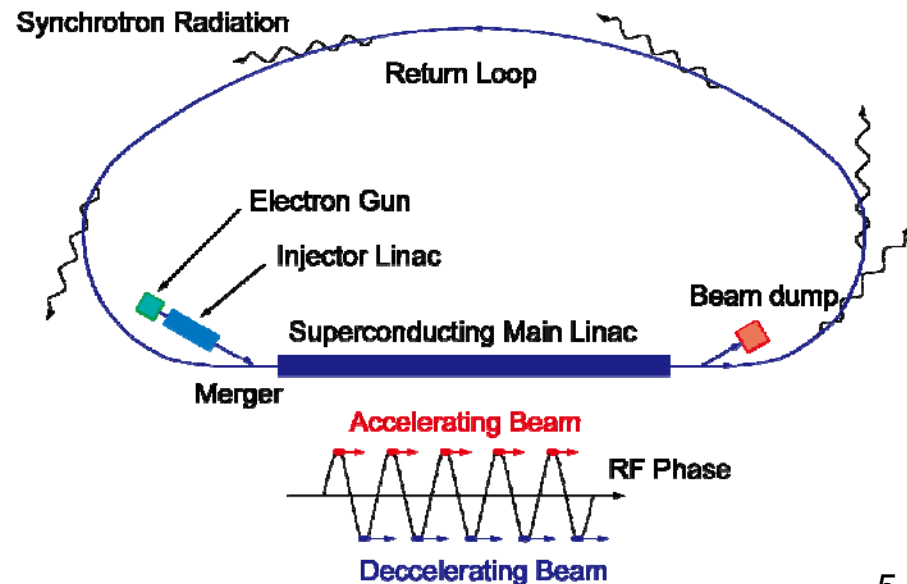
放射光源としての魅力

- ・ 回折限界X線光源:
 $\varepsilon_{x,y} = 10 - 100 \text{ pm}\cdot\text{rad}$
 $I = 10 - 100 \text{ mA}$
- ・ 超短パルスX線光源
(繰り返し周波数を任意に可変)
 $\sigma_\tau < 100 \text{ fs rms}$
 $T_{\text{rep}} = 0.8 \text{ ns} \sim \infty$
- ・ 共振器型X線自由電子レーザー(X-FELO)
Fully-coherent CW X-ray laser

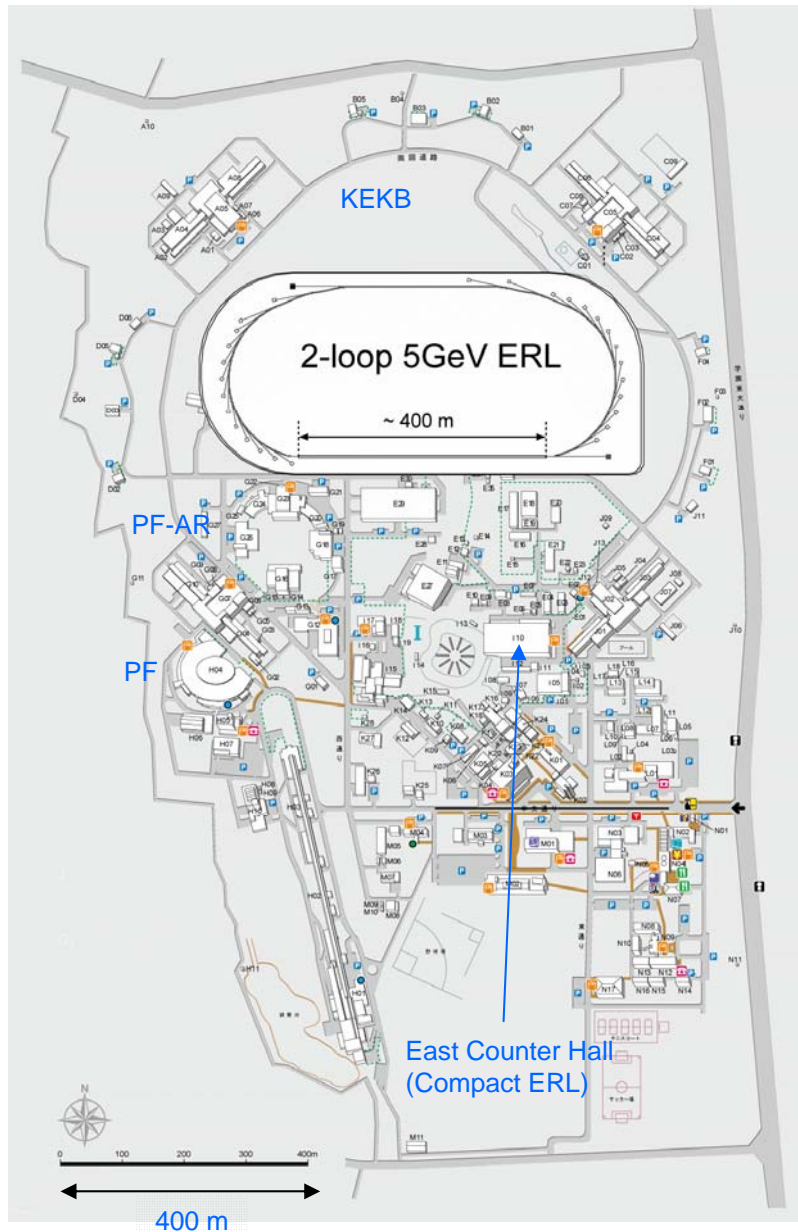
cf. K.-J. Kim et al., PRL 100, 244802 (2008).

リニアックFELで要求される高品質なビームを、CW運転で供給可能.

- ・ 極めて小さな横方向エミッタンス、縦方向エミッタンスを同時に実現可能
- ・ 高繰り返しにより、ビームの大電流化



KEKにおける5-GeV ERL計画



Parameters of the ERL

	Parameter
Beam energy	5 GeV
Average current	10 - 100 mA
Normalized emittance	0.1 - 1 mm-mrad
Energy spread (rms)	$(0.5 - 2) \times 10^{-4}$
Bunch length (rms)	1 - 3 ps (usual mode) ~ 100 fs (bunch compression)
RF frequency	1.3 GHz

Parameters of the light sources

	Parameter
Spectral range	30 eV - 30 keV
Average brilliance from insertion devices	$10^{21} - 10^{23}$ ph/s/mm ² /mrad ² /0.1%bw
Average flux	$> 10^{16}$ phs/s/0.1%bw
Number of ID's	20 - 30

ERLの運転モードの例

High Brilliance

Short Pulses

	High coherence (HC) mode	High flux (HF) mode	Ultimate mode (in future)	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

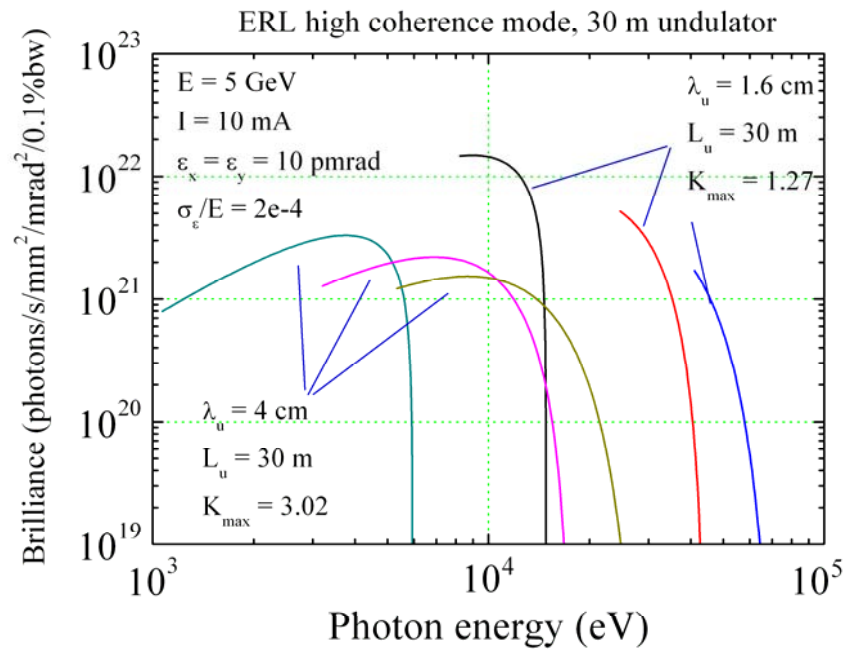
7

1) flexible

平均輝度

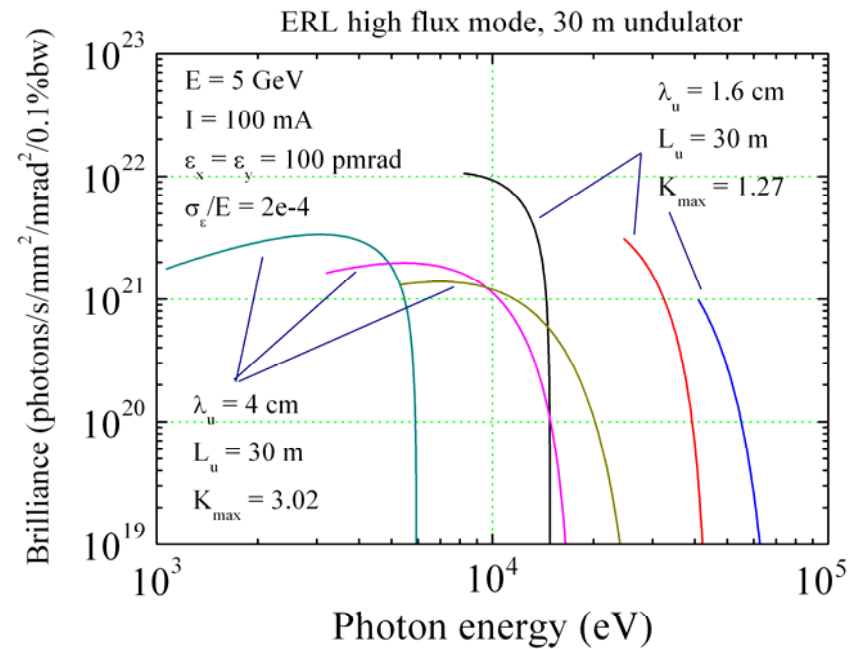
High coherence mode

$I = 10 \text{ mA}$, $\varepsilon_{x,y} = 10 \text{ pm}\cdot\text{rad}$, $L_u = 30 \text{ m}$



High flux mode

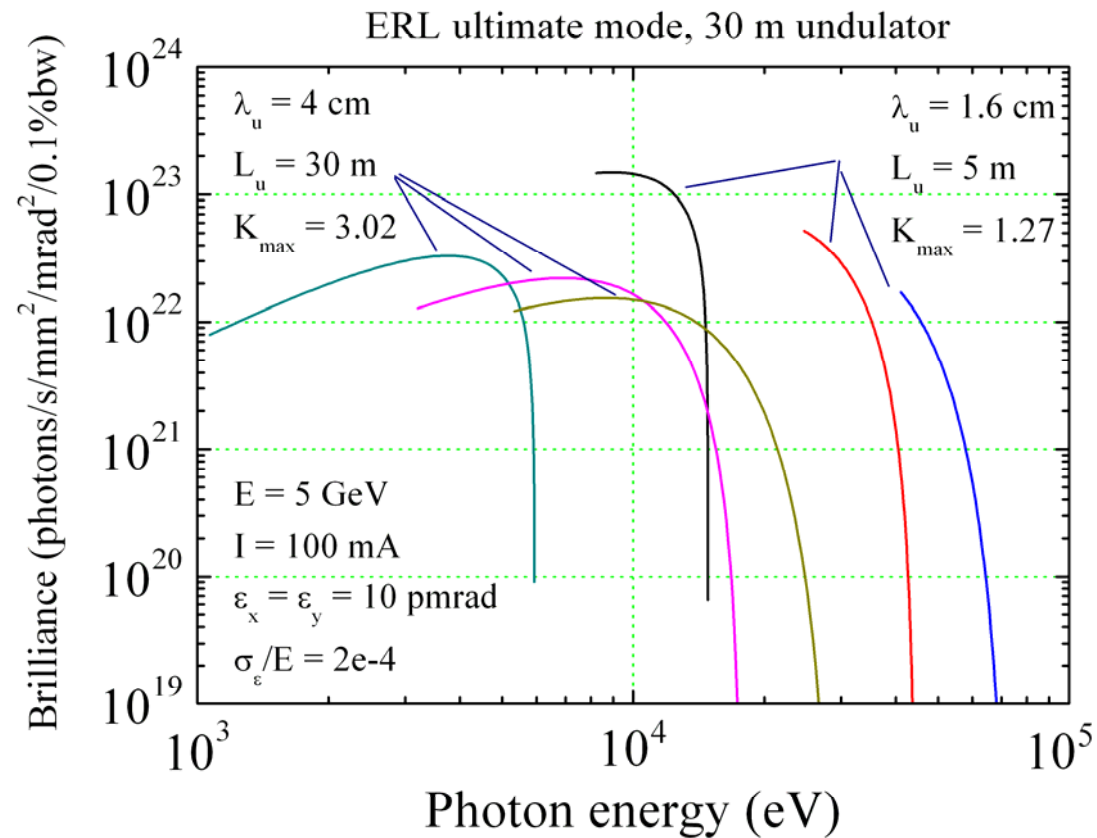
$I = 100 \text{ mA}$, $\varepsilon_{x,y} = 100 \text{ pm}\cdot\text{rad}$, $L_u = 30 \text{ m}$



平均輝度: ultimate mode

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

30 m undulator

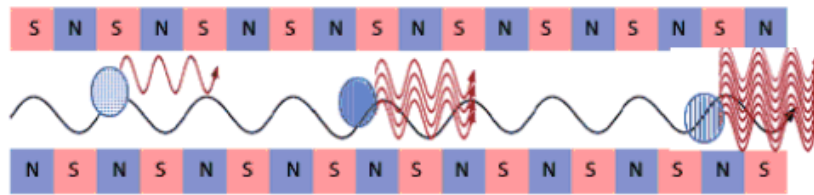


X-ray FEL Oscillator (X-FELO) の可能性

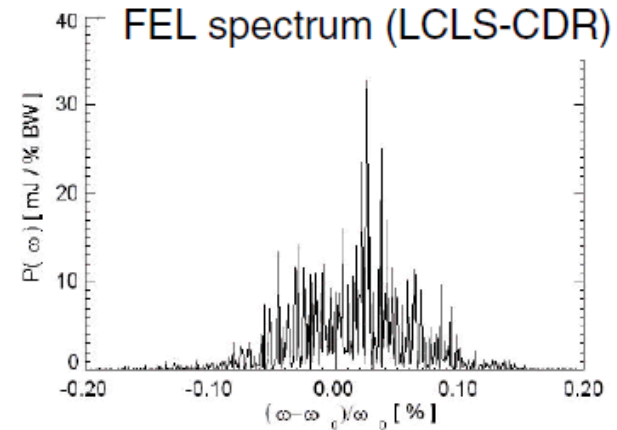
R. Hajima and N. Nishimori (JAEA), Proc. FEL2008, pp. 87-89.

Comparison of SASE-FEL and X-FELO

SASE = Self-Amplified Spontaneous Emission

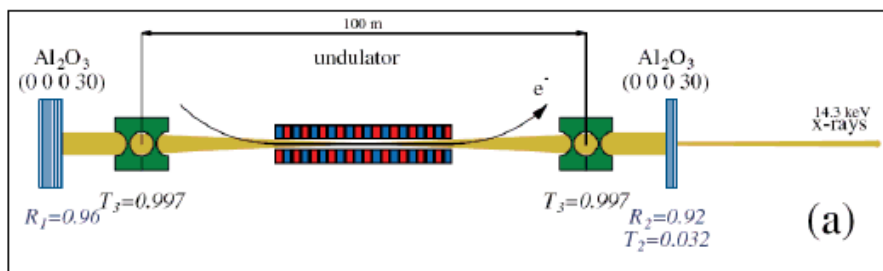


1パスでノイズから飽和まで ($>10^7$ 倍) 増幅
電子バンチ = 1nC, 100fs, 1mm-mrad, 10^{-4}

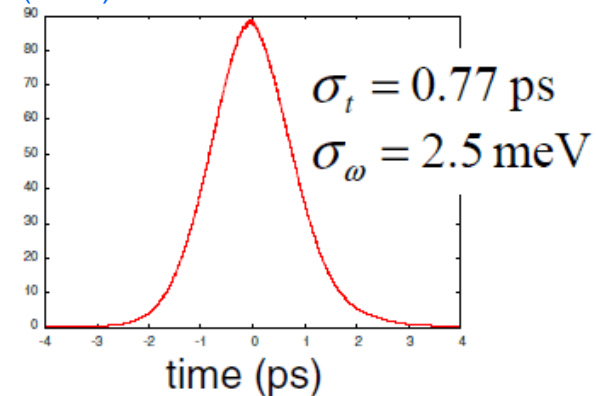


XFEL- Oscillator

cf. K.-J. Kim et al., PRL 100, 244802 (2008).



1パスの増幅率 > 1 (損失 $<$ 増幅の条件)
電子バンチ = 20pC, 2ps, 0.1mm-mrad, 10^{-4}

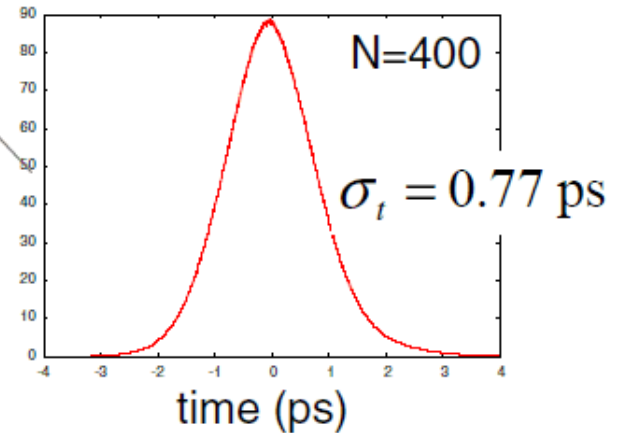
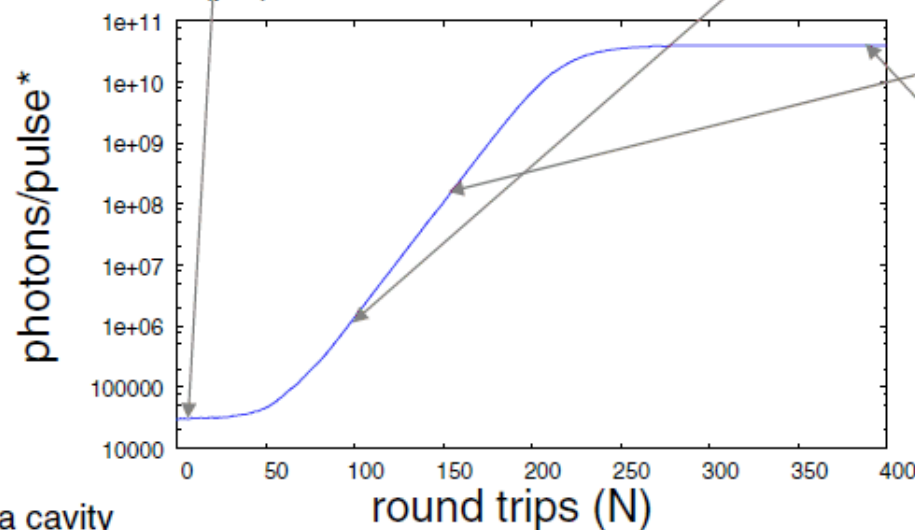
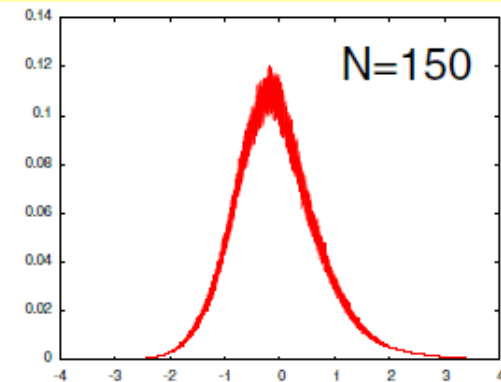
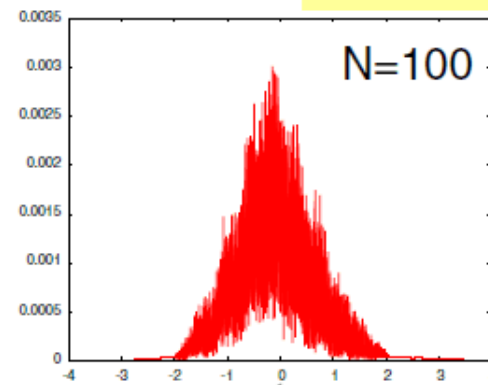
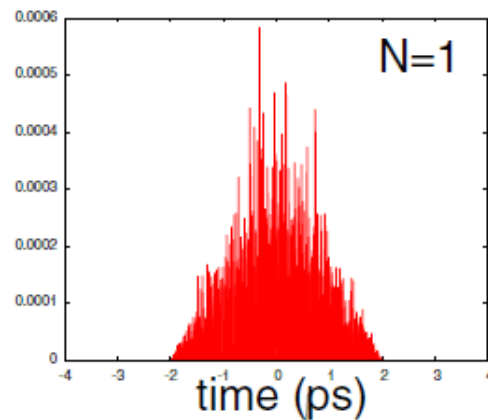


X-ray FEL Oscillator (X-FELO) のシミュレーション

R. Hajima and N. Nishimori (JAEA), Proc. FEL2008, pp. 87-89.

Darwin curve に基づく位相シフトを考慮
共振器長 $\delta L = -100 \mu\text{m}$

パルスの増幅と狭帯域化が同時に起こる。
飽和後は Gaussian-like な時間波形

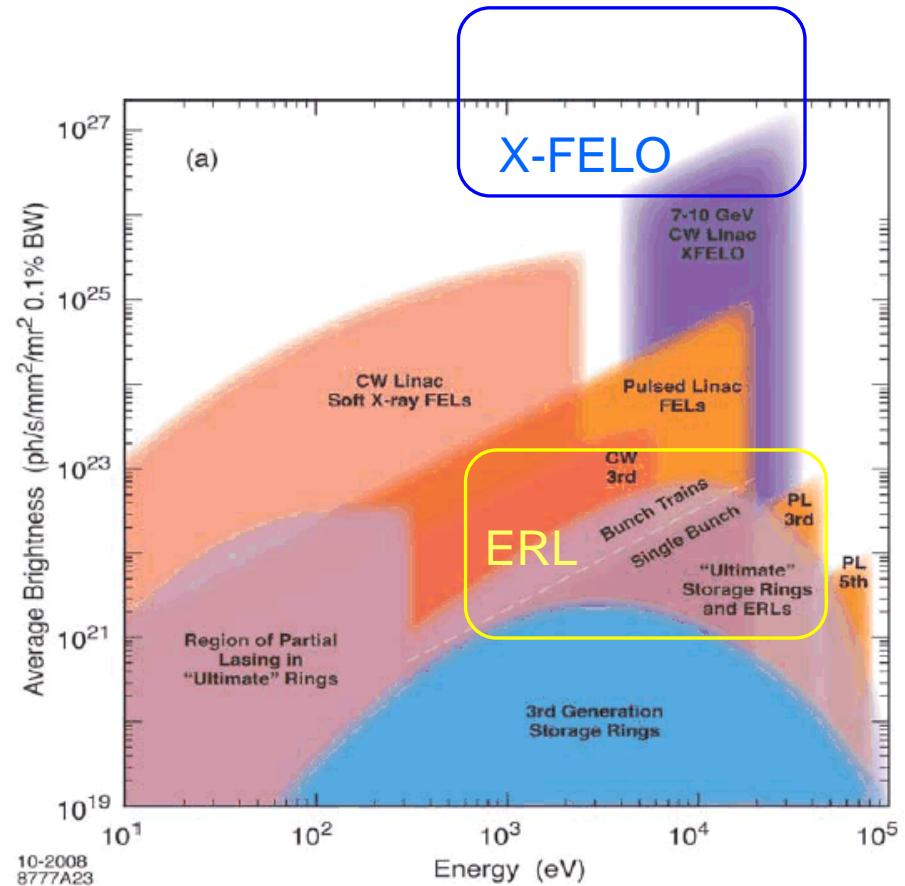
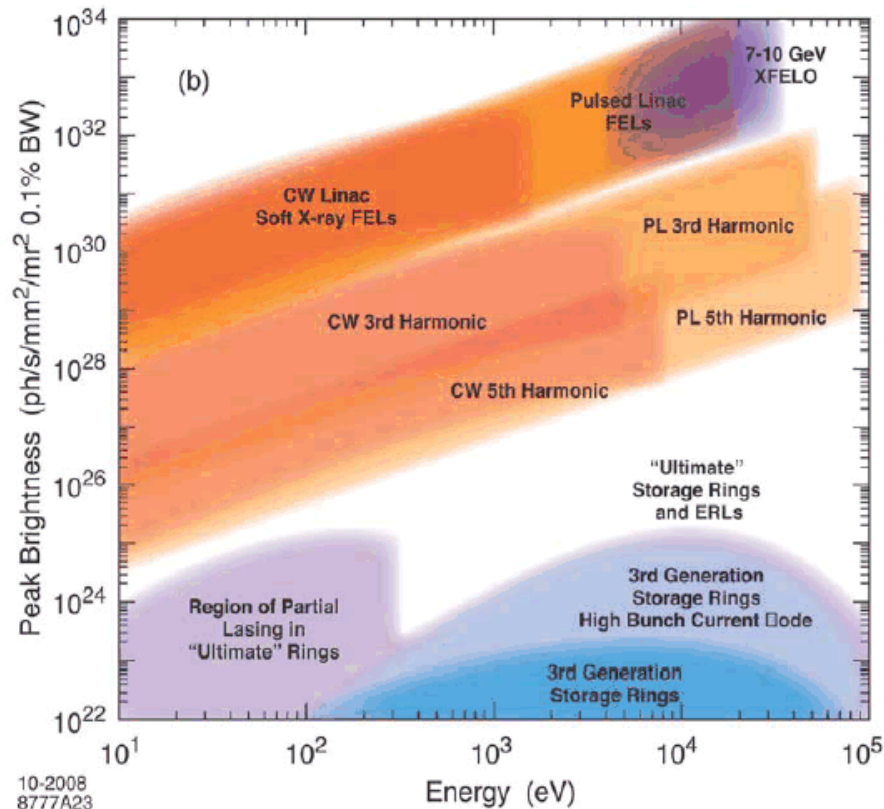


* intra cavity

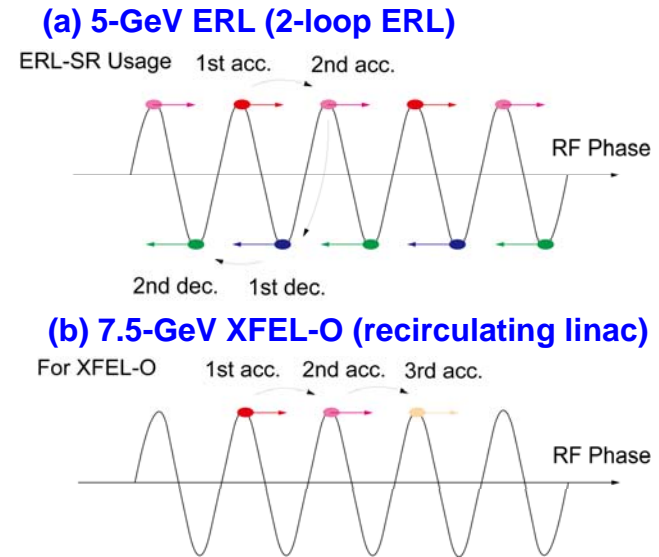
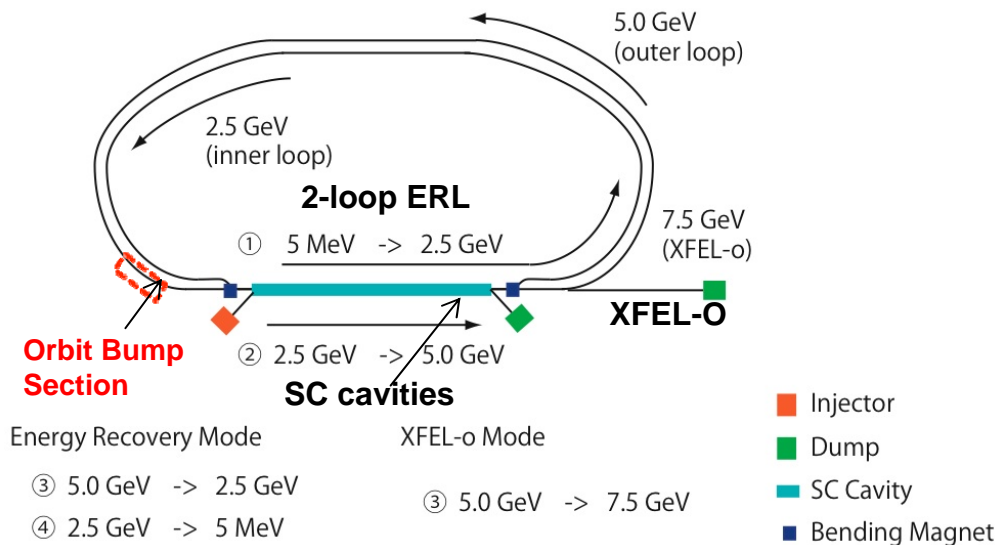
異なる放射光源の比較

	ERL	X-FELO	3 rd -SR	SASE FEL
Beam energy (GeV)	5	7	6 - 8	15 - 25
Average Brilliance B (photons/s/mm ² /mrad ² /0.1%bw)	$10^{21} - 10^{23}$	$10^{26} - 10^{28}$	$10^{20} - 10^{21}$	$10^{22} - 10^{24}$
Peak brilliance \hat{B} (photons/s/mm ² /mrad ² /0.1%bw)	$10^{23} - 10^{25}$	10^{33}	$\sim 10^{22}$	$\sim 10^{33}$
Repetition rate f_{rep} (Hz)	1.3×10^9	$10^6 - 10^8$	5×10^8	$10^2 - 10^4$
Coherent fraction	0.52 - 20%	100%	0.1%	100%
Bunch length (ps)	2 - 0.1	1 ps	~ 20 ps	0.1
Number of beamlines	20 - 30	Few	~ 30	Few
Typical undulator parameters	$\lambda_u = 1.6$ cm K = 1.27 L=30 m	$\lambda_u = 1.88$ cm K = 1.414 L=56 m	$\lambda_u = 3.2$ cm K = 1.03 L=25 m	$\lambda_u = 3$ cm K = 3.9 L=100 m
Typical 1st harmonic $\varepsilon_{1\text{st}}$ (keV)	8.2	12	12.4	8.3

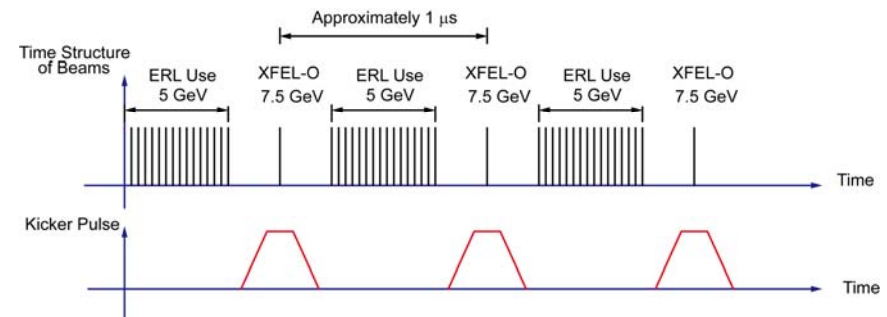
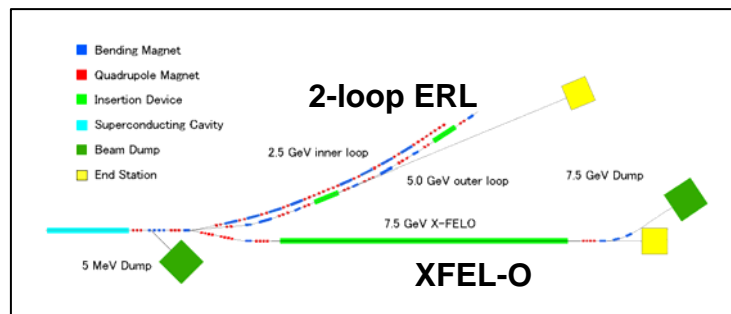
Spectral Brightness



ERL と XFEL-O の両立の可能性



Possible scheme for compatibility of 2-loop ERL and XFEL-O



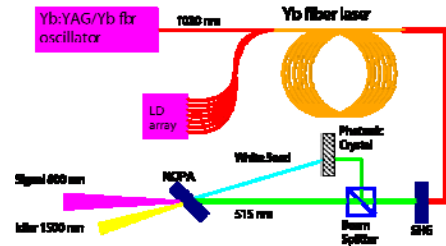
Bunch train and pulsed bump for hybrid operation

- RF半波長分の軌道バンプを入れることで、2ループERLを2つのモードで運転可能
- 5-GeV ERL (2回加速、2回減速)
 - 7.5-GeV recirculating linac (3回加速) → XFEL-O



2. コンパクトERL計画

ERLの主要な要素のR&Dが進行中



電子銃ドライブレザー:

- 平均電力が高い: 15 W CW
- 繰り返し周波数: 1.3 GHz, $\lambda \sim 800$ nm

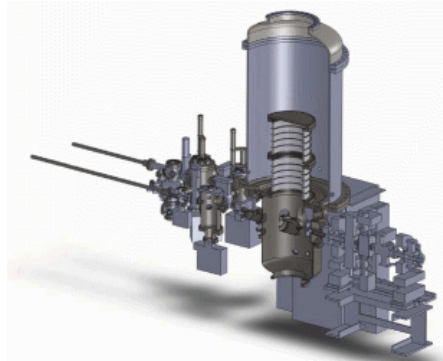


超伝導空洞(入射器用)

- 大電力カップラー: 170 kW/coupler
- 加速勾配: 15 MV/m
- 大電流ビームを加速: 100 mA (CW)

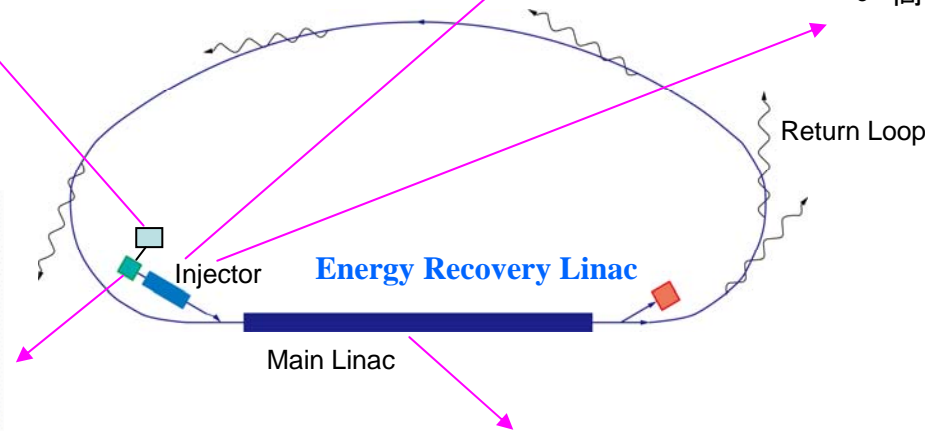
大電力RF源

- 1.3 GHz, 300 kW (CW) クライストロン
- 高精度デジタル・ローレベル制御系



高輝度フォトカソードDC電子銃

- 500 kV, 10-100 mA
- 規格化エミッタンス: 0.1 - 1 mm-mrad



超伝導空洞(主リニアック)

- 加速勾配: 15-20 MV/m (CW)
- 大電流: 200 mA (energy recovery)
- 高次モードの減衰 (HOM-BBU対策)



コンパクトERLで技術の総合的な実証

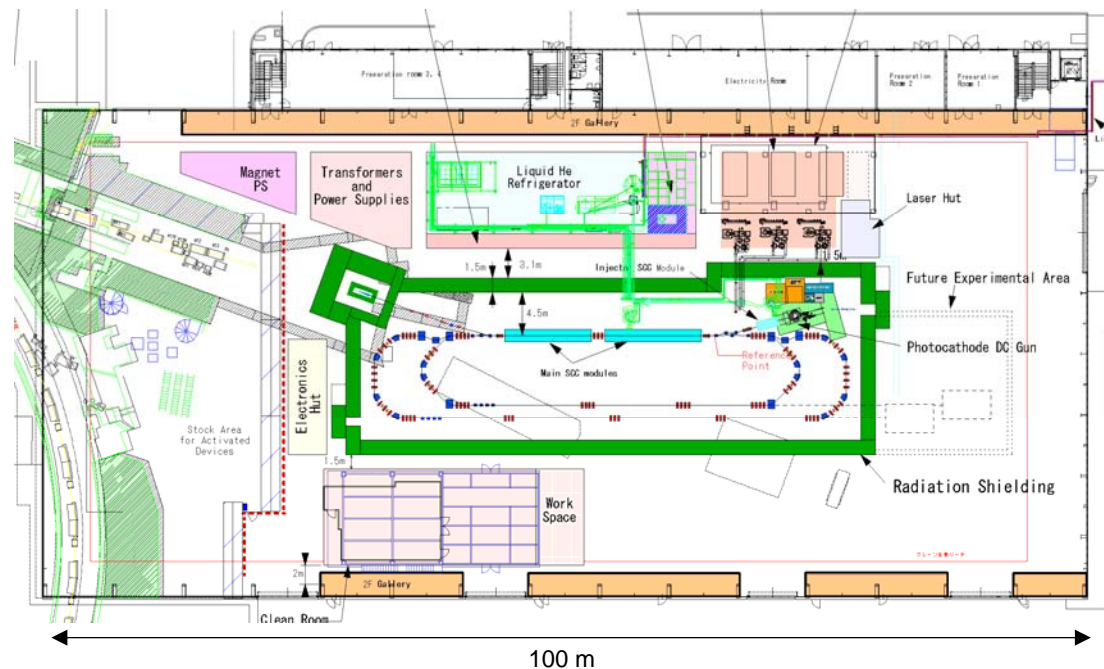
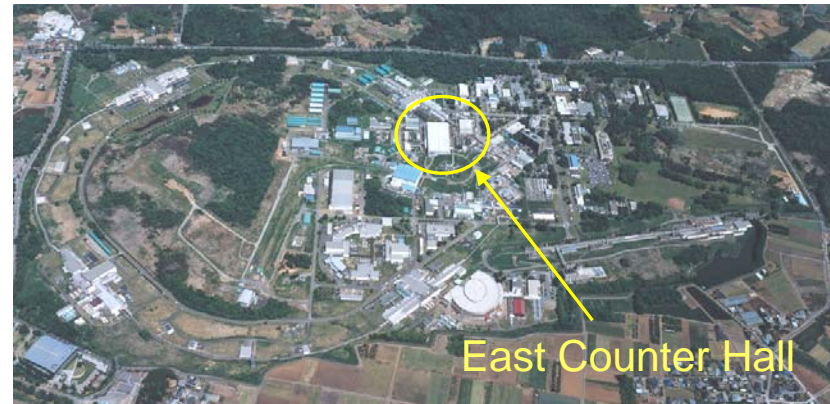
大規模なERLを建設する前に、ERLで用いられる先端技術を実証
ビーム物理上の隠れた問題点等がないか研究



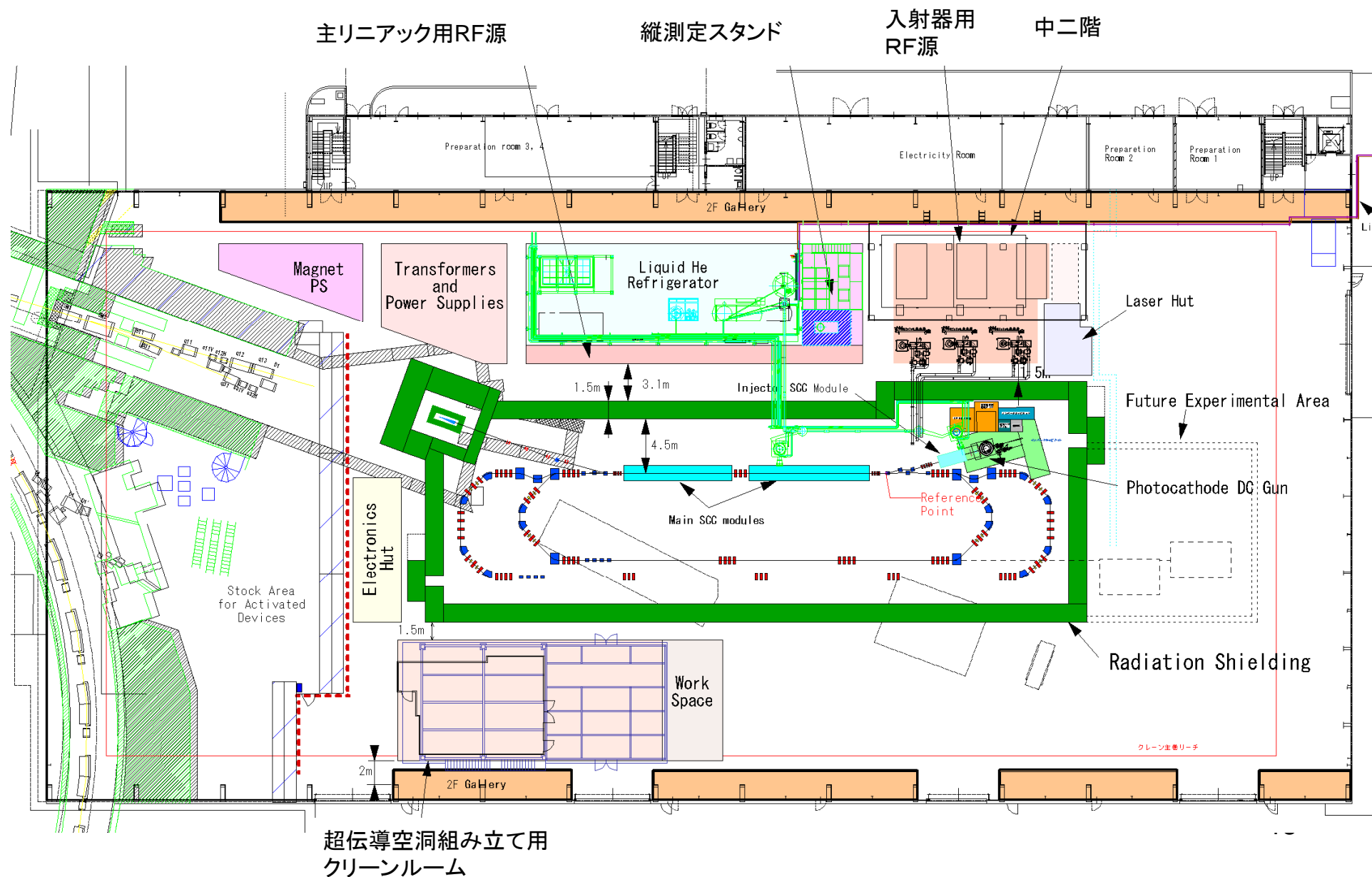
Compact ERL

Parameters of the Compact ERL

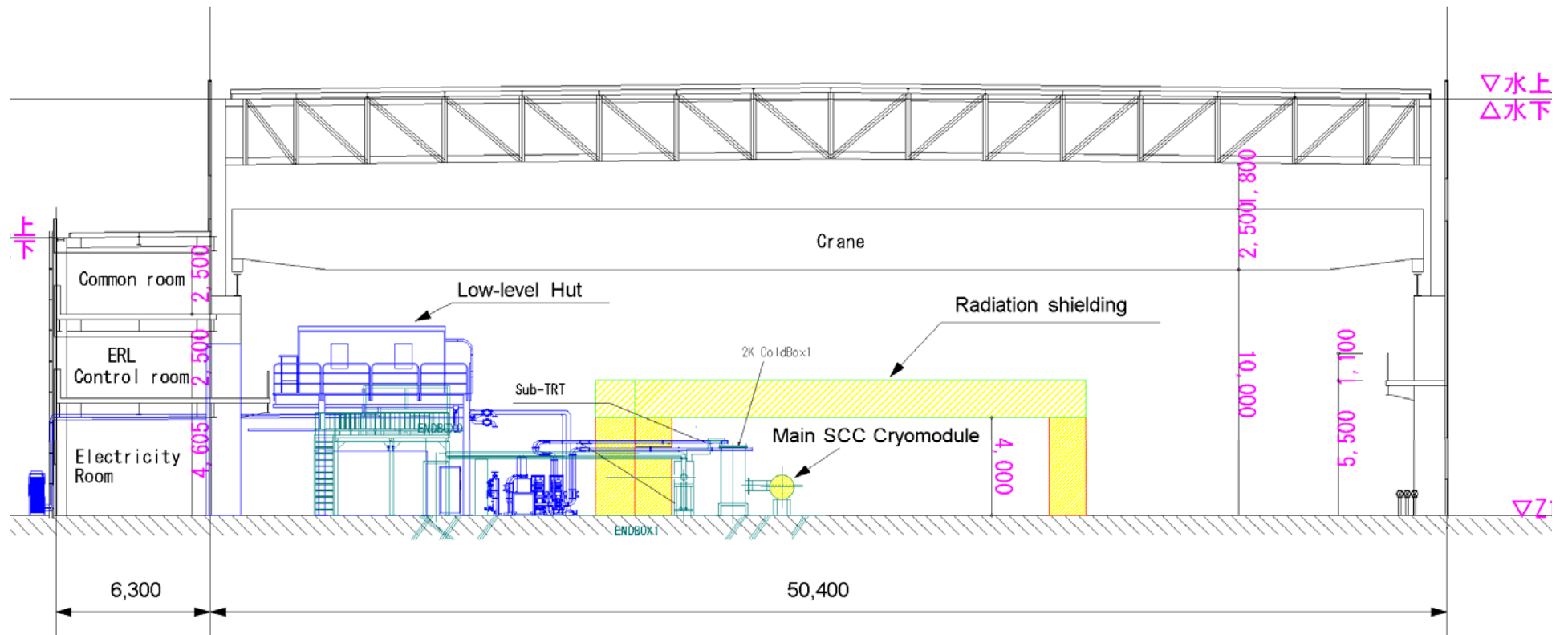
	Parameters
Beam energy	35 - 245 MeV
Injection energy	5 MeV
Average current	10 - 100 mA
Acc. gradient (main linac)	15 MV/m
Normalized emittance	0.1 - 1 mm·mrad
Bunch length (rms)	1 - 3 ps (usual) ~ 100 fs (with B.C.)
RF frequency	1.3 GHz



コンパクトERLのレイアウト(2ループの場合)

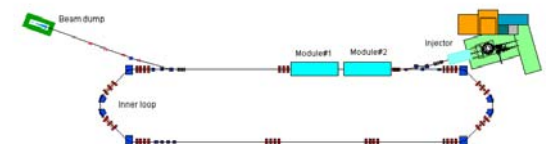
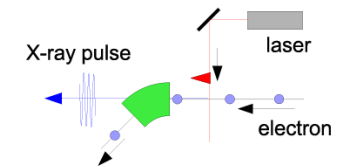
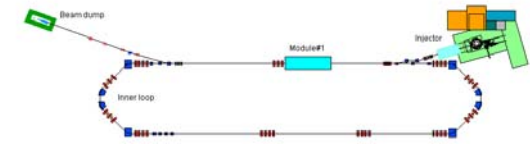


cERLのレイアウト(側面図)



cERLの将来のアップグレード・シナリオ

1. 1ループERL: 35 MeV, 10 mA (or lower)
 - ・ 主リニアック: 9セル空洞 × 2台
 - ・ 入射器: 2セル空洞 × 3台 (入射 5 MeV)
2. コミッショニング、試験運転
 - ・ 加速器のスタディ
 - ・ 十分立ち上がった時点で、利用実験も可能:
 - ・ Compton backscatteringを用いた超短パルスX線源
 - ・ CSRを用いる大強度テラヘルツ光源
3. エネルギーアップ: 65 MeV
 - ・ 主リニアックに9セル × 2台入りモジュールを追加
4. 2ループ化: 125 MeV
5. エネルギーアップ: 245 MeV
 - ・ 9セル × 4台入りモジュールを追加

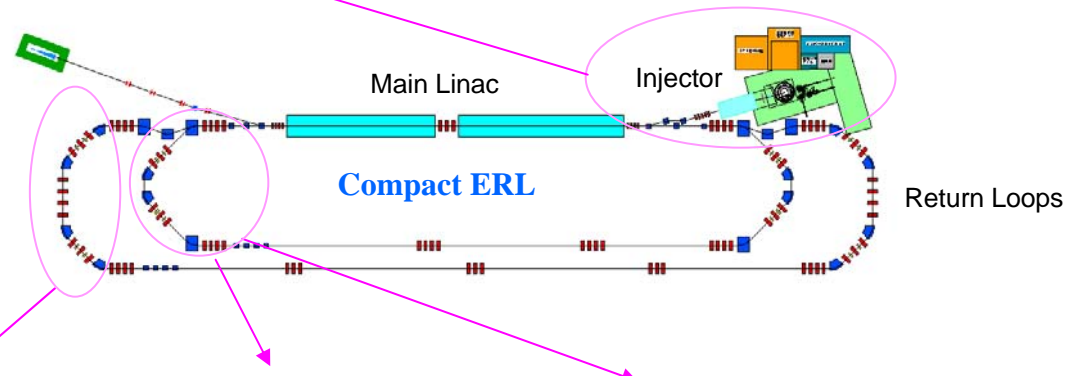
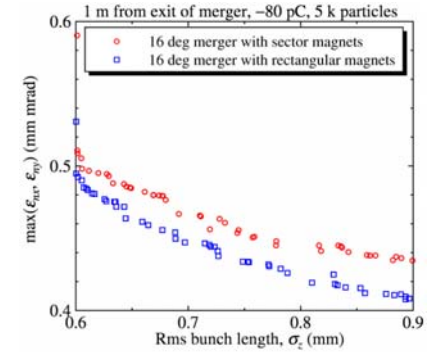
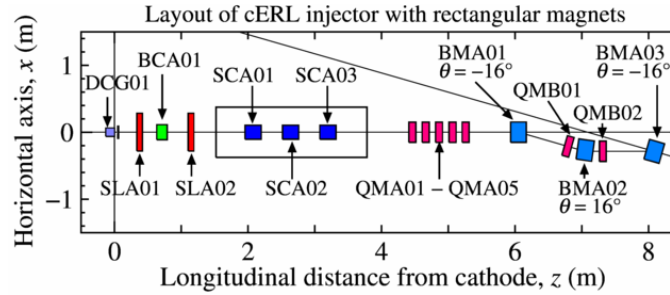


E > 100 MeV におけるFELの可能性も今後検討したい

コンパクトERLのビーム工学上のポイント

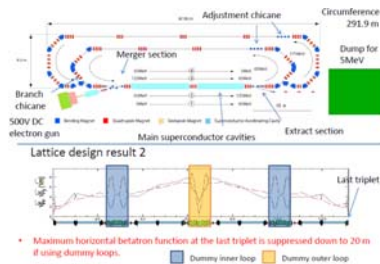
Injector

- Optimized design using multi-objective method
- Emittance compensation under space-charge effect and rf-focusing



Design study of 2-loop ERLs

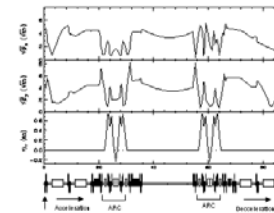
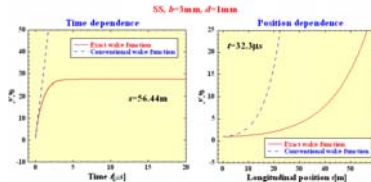
- Establishing the design strategy



Beam instabilities due to:

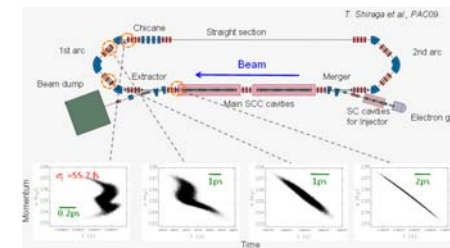
- cavity HOMs
- resistive-wall impedances
- ion trapping

Simulation of the compact ERL (3)



Beam optics in the return loop

- Optics optimization under influence of coherent-SR effects
- Efficient bunch compression while preserving beam emittance

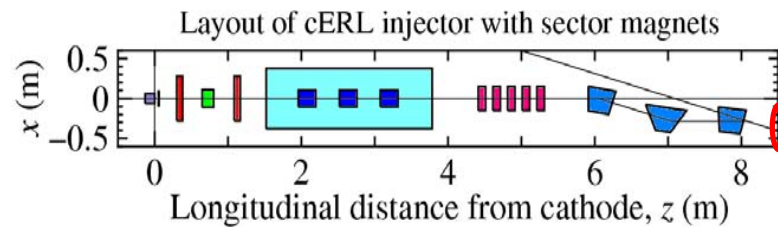


cERL 入射部の設計

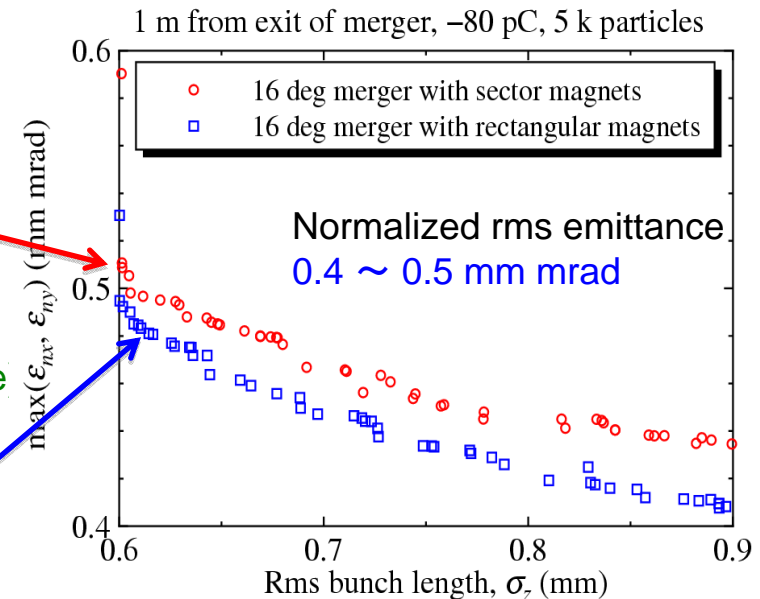
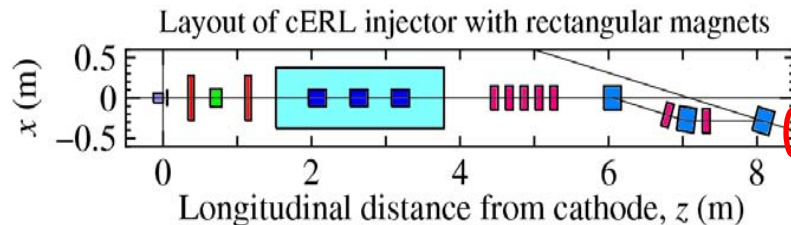
- Injector components of cERL
 - Photocathode DC gun
 - Two solenoids
 - Bunching cavity (Buncher)
 - Three SC cavities
 - Five quadrupole magnets
 - Merger (using three bending magnets)
- Initial Conditions
 - Electron distribution on cathode: beer-can shape
 - Initial charge: 80 pC

- Parameters optimization
 - Generic algorithm
 - Tracking code GPT
 - Space charge effects included
 - No CSR in merger
- Optimization result
 - Rectangular type gives smaller emittance than the sector type.
 - Normalized emittance 0.4 – 0.5 mm mrad for 2 – 3 ps bunch length.

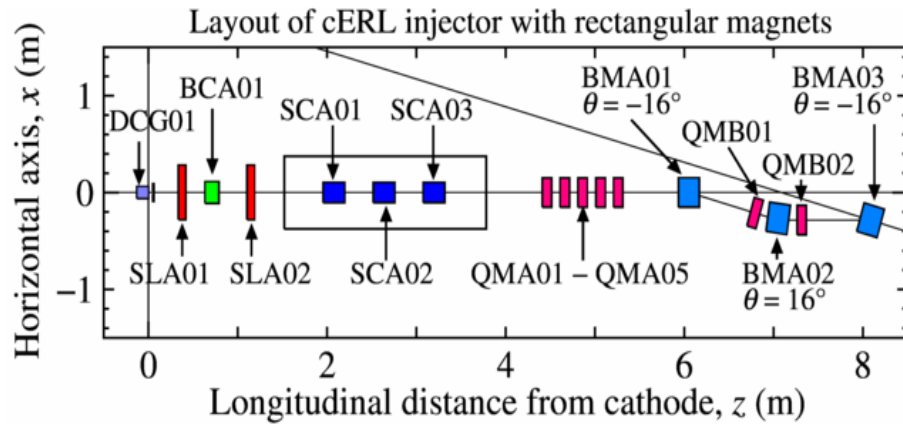
(1) Sector type (bending angles: -19, 22, -19 degree)



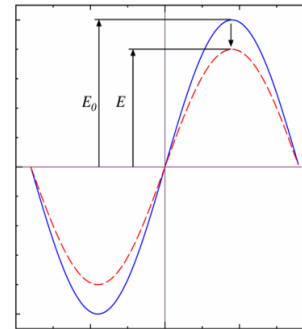
(2) Rectangular type (bending angles: -16, 16, -16 degree)



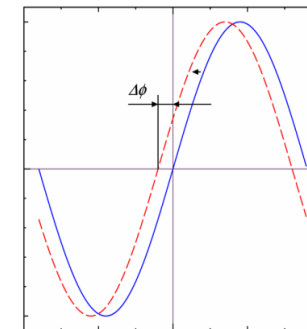
cERL 入射器に要求される各種エラーの仕様



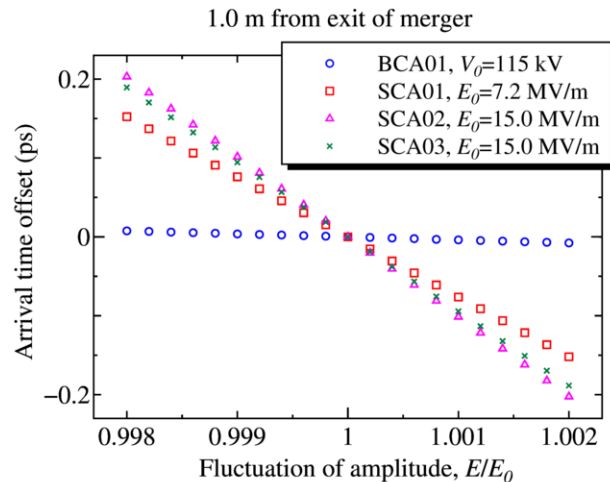
Amplitude error in RF cavity



Phase error in RF cavity



シミュレーションによるエラーへの要求値の検討

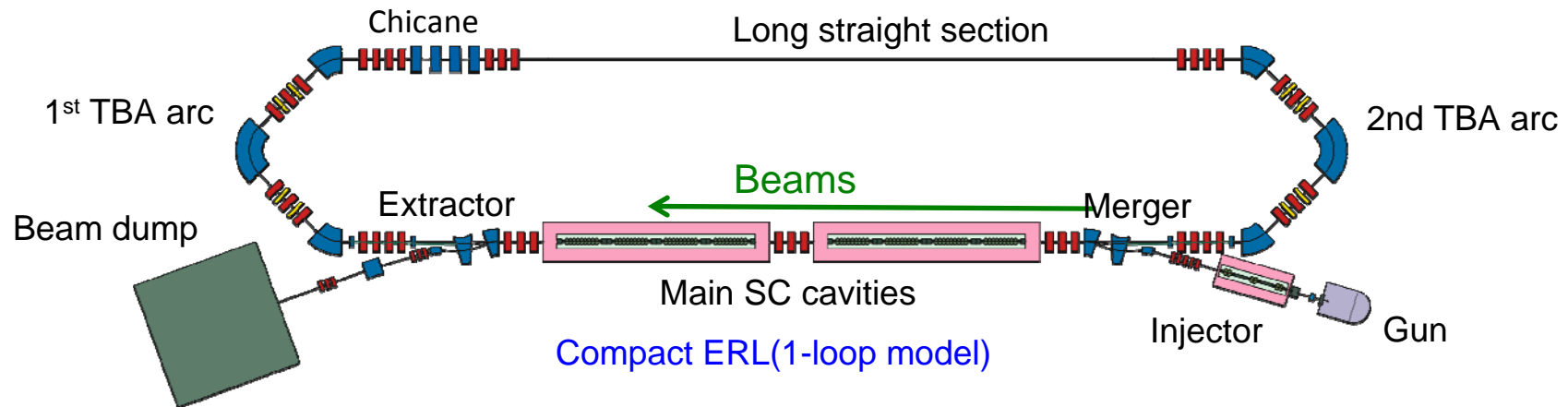


An example of error analysis results (Arrival time offset vs RF amplitude error)

	Gun ripple	RF amplitude	RF phase
Error	0.1 %	0.1 %	0.1 degree
Difference of arrival time	-120 fs	-100 fs	-120 fs
Kinetic energy	99.96 %	100.05 %	99.98 %
Emittance	3.5 % (for $\pm 0.1\%$ error)	1.5 % (for $\pm 0.1\%$ error)	2.5 % (for ± 0.1 degree error)

Gun ripple < 0.1 %, RF amplitude error < 0.1 %, RF phase error < 0.1 °

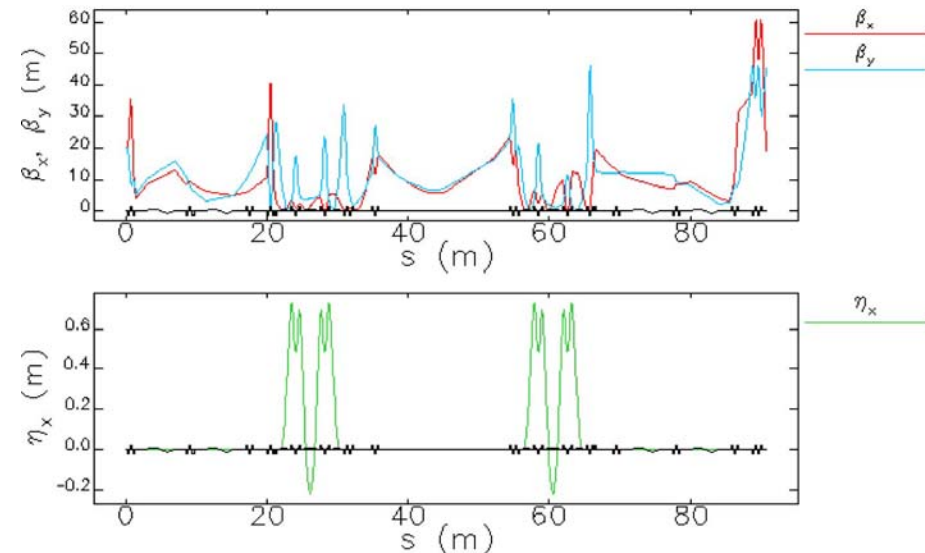
1-loop cERLのビーム光学系



Basic parameters

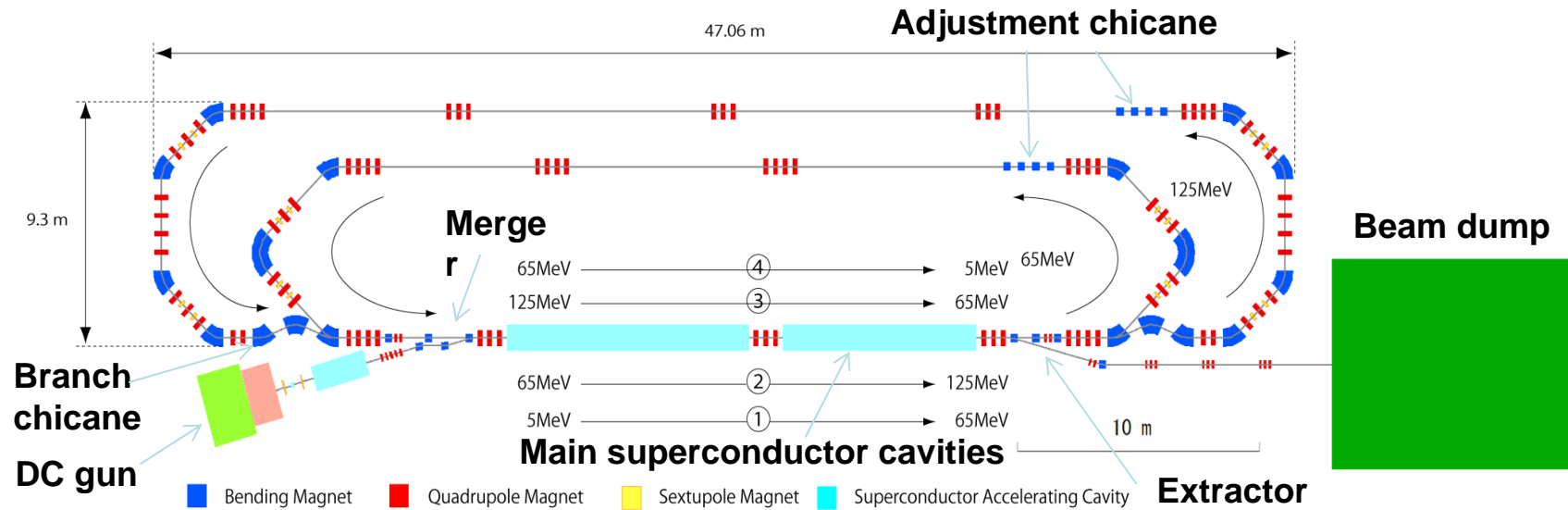
Beam energy	125 MeV
Beam current	10 – 100 mA
Normalized emittance $\epsilon_n = \epsilon/(\gamma\beta)$	1 mm·mrad (77 pC/bunch) 0.1 mm·mrad (7.7 pC/bunch)
Energy spread (rms)	$< 3 \times 10^{-4}$
Bunch length (rms)	1 – 3 ps (normal recirculation) ~ 100 fs (bunch compression)

- High current mode: 100 mA, 1 mm mrad
- Low emittance mode: 10 mA, 0.1 mm mrad
- Emittance almost preserved
- CSR effects included

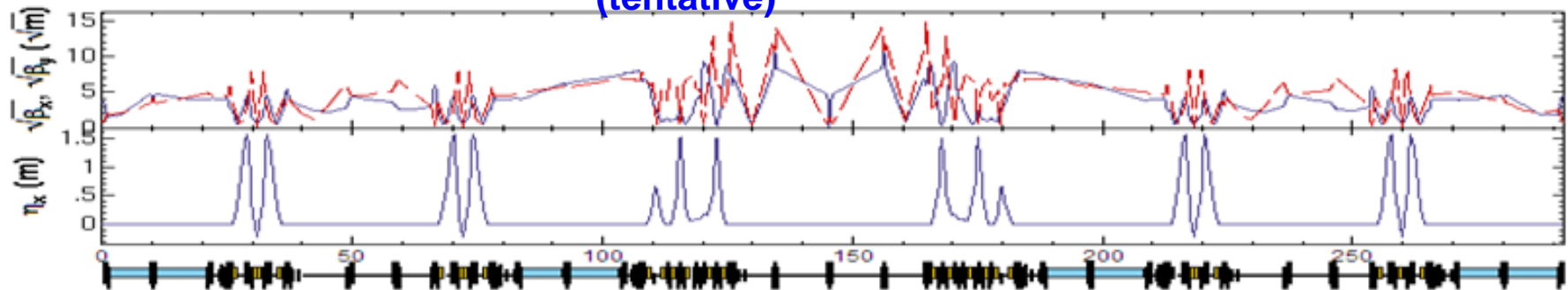


Optics functions
(in high-current and low-emittance modes)

2-loop cERLのデザインスタディ



Layout of 2-loop cERL (tentative)



Optics of 2-loop cERL (tentative)

Optics design of 2-loop cERL in progress

M. Shimada et al., ERL09.

これまでの検討の主な資料

ERL検討会

- 2006年～現在（計41回）
- ERL全般に関する報告・議論
- 議事録、資料をウェブで公開

<http://pfwww.kek.jp/ERLoffice/index.html>

ERLビームダイナミクスWG

- 2006年～現在（計47回）
- 主にビーム光学、ビーム力学に関する議論
- 議事録、資料をウェブで公開

「コンパクトERLの設計研究」

- 2008年2月出版（188頁）
- KEK Report 2007-7

ERL 計画推進室 Energy Recovery Linac Project Office		
ERL検討会議事録・関係資料集 (March 31, 2010)		
議事録	関係資料	発着者
・第41回ERL検討会 3月16日(火) 14:00～ KEK PF研究棟2階会議室	「FLS2010報告」 「主加速部超伝導空洞の報告」 「東ファンターホールの現状」 「ERL推進室報告」	中村 典雄 (ISSP) 梅森 健成 (KEK) 芳賀 闌一 (KEK) 河田 洋 (KEK)
・第40回ERL検討会 2月17日(水) 14:00～ KEK PF研究棟2階会議室	「東ファンターホール改修状況」 「ERL推進室報告」	多田野 幹人 (KEK) 河田 洋 (KEK)
・第39回ERL検討会 1月20日(水) 14:00～ KEK PF研究棟2階会議室	「東ファンターホール改修の進捗状況」 「主加速部超伝導空洞開発の現状」 「ERL推進室報告」	海間 聖二 (KEK) 梅森 健成 (KEK) 河田 洋 (KEK)
・第38回ERL検討会 12月09日(水) 14:00～ KEK PF研究棟2階会議室	「e-ERLの制御系」 「新たな条件での放射線遮蔽計算」 「東ファンターホールの作業状況およびスケジュール」 「ERL推進室報告」	帯名 崇 (KEK) 芳賀 闌一 (KEK) 坂中 章悟 (KEK) 河田 洋 (KEK)
・第37回ERL検討会 11月11日(水) 14:00～ KEK PF研究棟2階会議室	「放射線科学センターとの打合せ」 「e-ERL入射器の進捗状況」 「電子銃進捗状況」	芳賀 闌一 (KEK)
・第36回ERL検討会 10月14日(水) 14:00～ KEK PF研究棟2階会議室	「入射器の放射線遮蔽について」 「ダラスベリール研究所のERL(ALICE)の現状」 「WSA(accelerator Physics of Future Light Source)報告」 「ERL推進室報告」	芳賀 闌一 (KEK) 原田 健太郎 (KEK) 帯名 崇 (KEK) 河田 洋 (KEK)
・第35回ERL検討会 9月2日(水) 14:00～ KEK PF研究棟2階会議室	「e-ERLビームラインに対する同期システムの設計」 「JAEAにおける500kV電子銃の高電圧印加試験」	野村 修介 (KEK) 永井 良治 (JAEA) 河田 洋 (KEK)

ERL 計画推進室 Energy Recovery Linac Project Office		
ERLビームダイナミクスWGミーティングメモ・関係資料集 (March 24, 2010)		
WGミーティングメモ	資料名	作者名
第47回 2010. 3. 17 ミーティングメモ	「XFEL-Oに向けたe-ERL入射器での最小エミッタンスの評価(1)」	宮島 司 (KEK)
第46回 2010. 2. 16 ミーティングメモ	「空洞数減少時のオフティクス・マッチング」	原田 健太郎 (KEK)
第45回 2010. 2. 2 ミーティングメモ	「束縛条件付き固有ベクトル法のERL軌道補正への応用」 「e-ERL 2ループ周回部の検討」 「e-ERLのオフティクス設計の続き」	中村 典雄 (東大物性研) 原田 健太郎 (KEK) 島田 美帆 (KEK)
第44回 2009. 12. 24 ミーティングメモ	「e-ERLラティス設計のつづき」 「e-ERLビーム診断系」	島田 美帆 (KEK) 帯名 崇 (KEK)
第43回 2009. 11. 25 ミーティングメモ	「主加速空洞アライメント誤差の影響(3)」 「ラティス設計の進捗状況」	中村 典雄 (東大物性研) 島田 美帆 (KEK)
第42回 2009. 10. 27 ミーティングメモ	「主加速空洞アライメント誤差の影響(2)」 「ラティス設計の続き」	中村 典雄 (東大物性研) 島田 美帆 (KEK)
第41回 2009. 9. 29 ミーティングメモ	「主加速空洞アライメント誤差の影響」 「ラティス設計の進捗状況」	中村 典雄 (東大物性研) 島田 美帆 (KEK)
第40回 2009. 9. 1 ミーティングメモ	「バンチャー空洞の入力カッパラー関連の計算」 「ラティス設計に関する報告」 「X-FELO (5-GeV ERL) のための速度集束の提案」	梅森 健成 (KEK) 島田 美帆 (KEK) 羽島 良一 (JAEA)
第39回 2009. 7. 23 ミーティングメモ	「バンチャー空洞形状の影響(1)」 「バンチャー空洞による横方向キックの検討」 「5GeV-ERLの案案」	宮島 司 (KEK) 坂中 章悟 (KEK) 島田 美帆 (KEK)



cERL建設の年次計画(2010～2012年度)

最終更新日 2010/4/16	cERL長期スケジュール	2010年度												2011年度												2012年度											
		2010年度												2011年度												2012年度											
		4月	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4月	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4月	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
グループ	工程																																				
全体予定	cERLビーム運転	ビーム運転																																			
建物・インフラ・安全	放射線シールド	設計											入札手続き		シールド建設																						
	付帯設備(空調等)設置	仕様検討											入札手続き		付帯設備設置																						
	安全インターロック等	検討・設計													製作									設置・試験													
	放射線申請																																				
電子銃・入射部	500kV第2電子銃本体	本体組立・試験											高圧試験									ビーム試験(AR南)			東CH移設												
	電子銃用高圧電源	電源製作																							東CH移設												
	診断用ビームライン	設計・製作・振付(AR南棟)																							東CH移設												
	ドライブレザー	開発(10mA用)																							東CH移設												
入射器SO空洞	2セル超伝導空洞(3台)	空洞3台製造											縦測定		ジャケット溶接									入射部への設置、完成検査、冷却開始													
	入力カップラー(6台)	製作											大電力試験		空洞組込									冷却試験(低電力) 冷却試験(大電力) 運転可能													
	クライオモジュール																																				
	設置・試験																																				
主SO空洞	高圧ガス申請	申請																				完成検査			申請												
	空洞2台製作	空洞2台製作											縦測定		ジャケット																						
	クライオスタット等製作	クライオスタット等製作											縦測定											全体組立													
	振付																																				
RF	HLLRF(H20補正予算分)	設置・調整											試運転																								
	HLLRF(H20補正以外)																																				
	LLRF	ケーブル温度特性評価											ビーム運転用ソフトウェア開発									ケーブル敷設															
	LLRF	ソフトウェア評価・開発											入射空洞への配線・総合試験									運転 ラック組み込み・総合試験															
ヘリウム冷凍機	完成検査・試験	完成検査											試運転(断続的)																								
電磁石	電磁石・電源	設計											製作									磁場測定									振付・アライメント			試験			
真空	真空系	設計											製作									振付															
ビーム診断・制御	ビーム診断系	設計											製作									設置															
	制御系(ハードウェア)	設計											製作									設置															
	制御系(ソフトウェア)	設計											開発									試験															

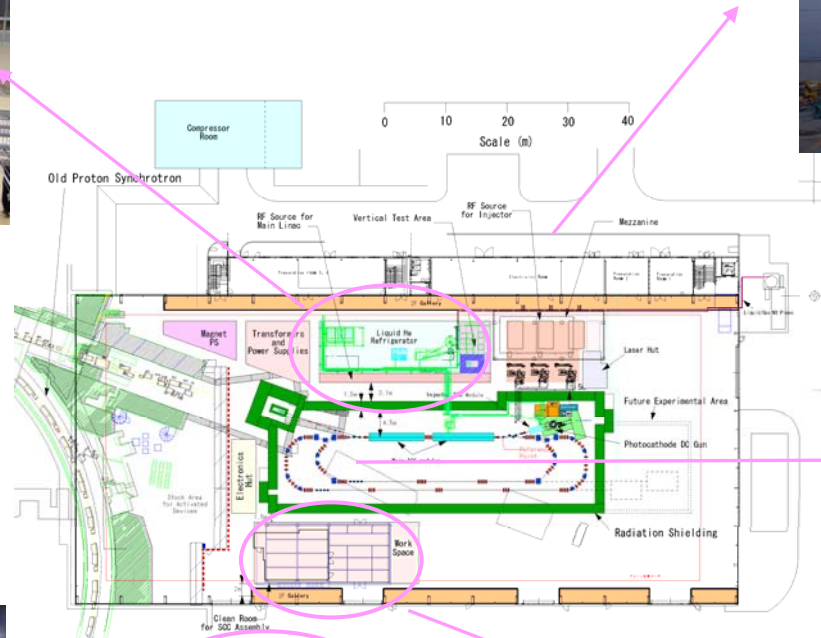
建物等のインフラ整備が完了(H20年度補正予算)

液体ヘリウム冷凍機(設置後)

- 冷凍能力: 600 W (at 4K)



建物の改修 (作業中の写真)



塗り床(作業中の写真)



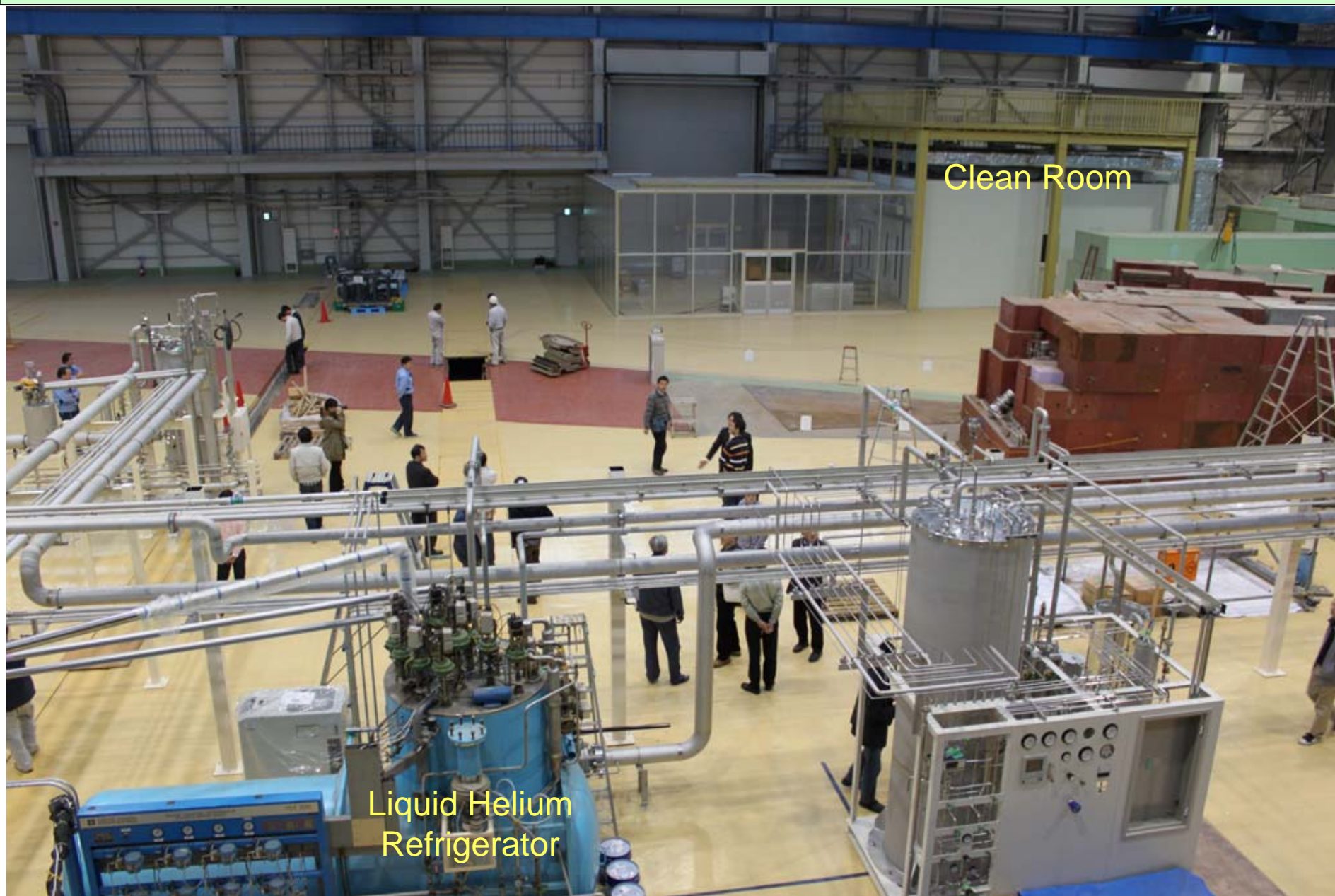
冷却水設備の更新(設置後)



空洞組み立て用 クリーンルーム (設置後)



2010年4月(見学会)の東カウンターホール内



Clean Room

Liquid Helium
Refrigerator



3. まとめ

まとめ

ERLプロジェクト

- 5-GeV ERLにより、超高輝度、超短パルス放射光源を実現。将来は共振器型X線自由電子レーザーに発展させる構想。
- 2ループ方式を用いることにより、低コスト化を目指す。
(予想される性能次第では、1ループ方式とする可能性もあり)。

コンパクトERL

- 2012年度中に、35 MeV, 10 mA でのコミッショニングを目指す。
- 当初、周回部1ループ、主加速空洞9セル×2台で運転開始。加速空洞を増設可能(最大9セル×8台) → 125 MeV(1ループ)
- 周回部を2ループ化することで、ビームエネルギーを2倍にすると同時に、2ループERLの諸問題をスタディ可能。
- 主要なインフラは既に整備された:
 - 建物改修、ヘリウム冷凍機、クリーンルーム、RF源の一部)