エネルギー回収型リニアック(ERL) を用いた高出力EUV光源の開発

高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設 小林幸則

> 高エネルギー加速器科学研究奨励会・特別講演会 2015年10月16日@アルカディア市ヶ谷(私学会館)

講演内容

- (1)はじめに
- (2)エネルギー回収型リニアック(ERL)
 - 加速器構成の簡単な紹介
- (3) KEKにおけるERL開発の現状
 - 次世代放射光源ERLの実証器としてのコンパクトERL開発
- (4) 高出力EUV光源に向けて
 - ERLとFELの技術の利用
- (5) おわりに

(1)はじめに

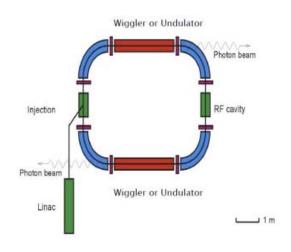
EUV-FEL 光源検討の背景(2014年2月頃)

- ・半導体微細加工のためリソグラフィ用光源の短波長化が望まれている。
- ・次世代光源には、波長 13.5nm(135Å)、EUV(Extreme Ultraviolet:極端紫外線)領域の高出力(10kW以上)光源が必要とされている。
- 現状、LPP(レーザー励起型プラズマ)光源が開発されている ものの、高出力化が困難な状況が続いている。
- そのため、加速器をベースにした高出力光源ができないかとの期待が高まってきている。
 - 2005年頃提案されていたERLをベースにした自由電子レーザ (FEL)光源が見直されはじめた。
- ・この加速器が技術的に実現可能なのか、実現するとすれば その実現可能な時期等についてKEKにおいて検討を行ってき た。

加速器ベースのEUV光源の検討

G. Dattoli et al., NIM-A (2001)

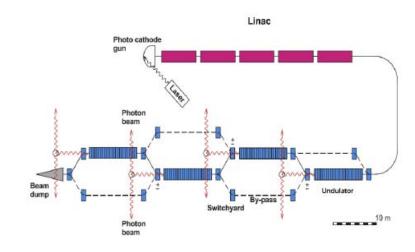
13.5 nm, 50 W, 2% BW の光源を検討 羽島良一、「半導体リソグラフィのためのEUV-FELの提案」、第21回FELとHigh-Power Radiation 研究会



蓄積リング放射光

バンド内のパワーが足りない バンド外のパワーが強すぎる → 利用不可

1Wにも届かない。



常伝導リニアック FEL

500 MeV, 30 µA のリニアックで FEL を動作 → 仕様を満たす (ただし、50 W)

10kWにするには平均電流を200倍 にあげる必要がある。

ERLの特徴

- Energy Recovery Linac (ERL、エネルギー回収型線形加速器)の名の通り、線形加速器
- 線形加速器: 電子源から電子を生成し加速、電子ビームを利用したのちに、ダンプに捨てる



- 線形加速器の特徴:
 - ビームは一度きりの使い捨て(ビーム品質は電子源によって決まる)

$$\varepsilon = \frac{\mathcal{E}_n}{\gamma \beta}$$
 加速すればするほど幾何学エミッタンスは減少

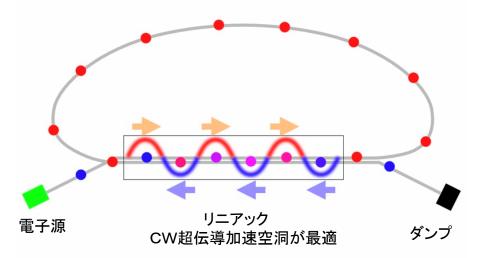
- でも、出力は「電流×加速エネルギー」 なので、大電流化するとどんどん必要な 電力が増加(ついでに捨てる時の放射 線も増大)



電流増強・加速すればするほど必要な電力も増える

• Energy Recovery Linac (ERL、エネルギー回収型線形加速器):加速した電子ビームをもう一度加速空洞に通して減速。そのエネルギーを次のビームに与える(回収する)。

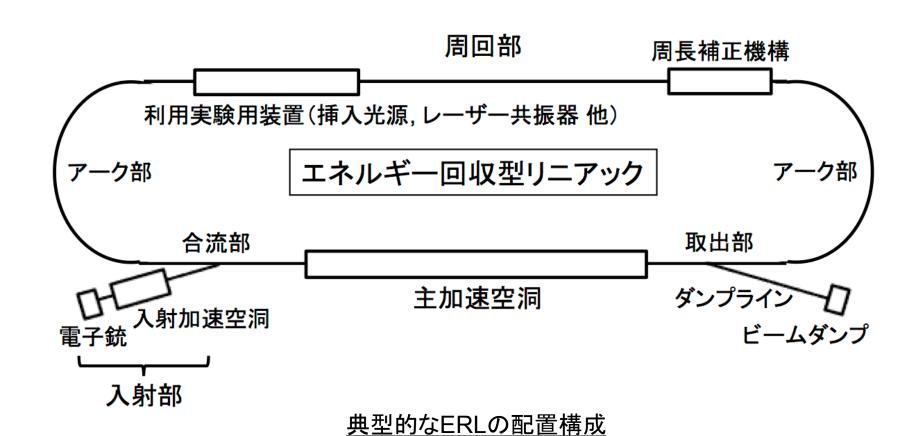
- メリット
 - エネルギーを回収するため、省エネ
 - 低いエネルギーでビームを捨てるため、放射化が低減
 - 大電流ビームを扱うことが可能



(2)エネルギー回収型リニアック(ERL)

加速器構成の簡単な紹介

ERLの構成

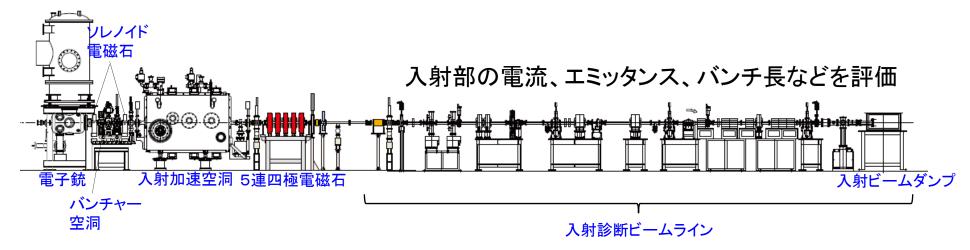


入射部

役割(cERLを例に)

- ・ソレノイド電磁石
- バンチャー空洞
- 入射加速空洞
- 四極電磁石 との整合

- 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
 - 空間電荷効果の補正
 - バンチ長の調整
 - ビームの加速
 - ビームの収束、合流部

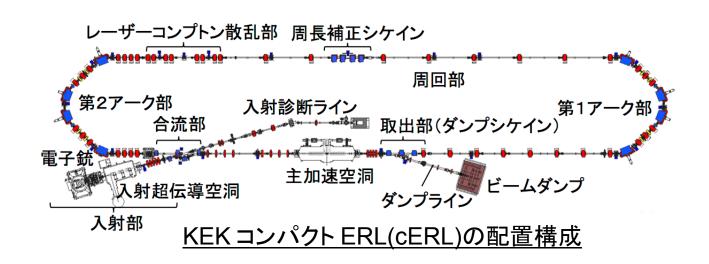


cERL入射部・入射診断ラインの配置構成

周回部

役割:

- ・主加速空洞 ---- ビーム加速と減速
- ・偏向、四極電磁石 ---- ビーム輸送、バンチ圧縮・伸長
- ・ 周長補正シケイン ----- エネルギー回収調整
- 各種モニター ---- ビーム診断(位置、サイズ測定)

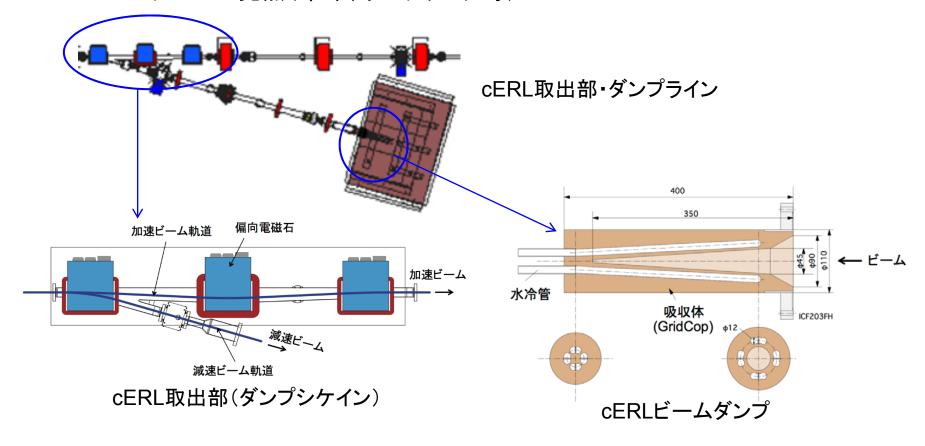


取出部・ダンプライン

役割:減速ビームを周回部から取出してビームダンプに捨てる。

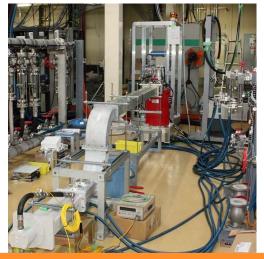
- 周回部とダンプラインの干渉
- ダンプ前でのビームロス抑制
- 周回ビームへの影響抑制(分散、軌道)
- ビームダンプの発熱(冷却、ラスタリング等)

考慮すべき事項



RFシステム

役割:空洞に高周波電力を供給する装置。すべて1.3GHz CWで動作



<u>cERLの例</u>



入射空洞#1用30kW クライストロン

入射空洞#2,3用300kW クライストロン



主空洞用30kW IOT

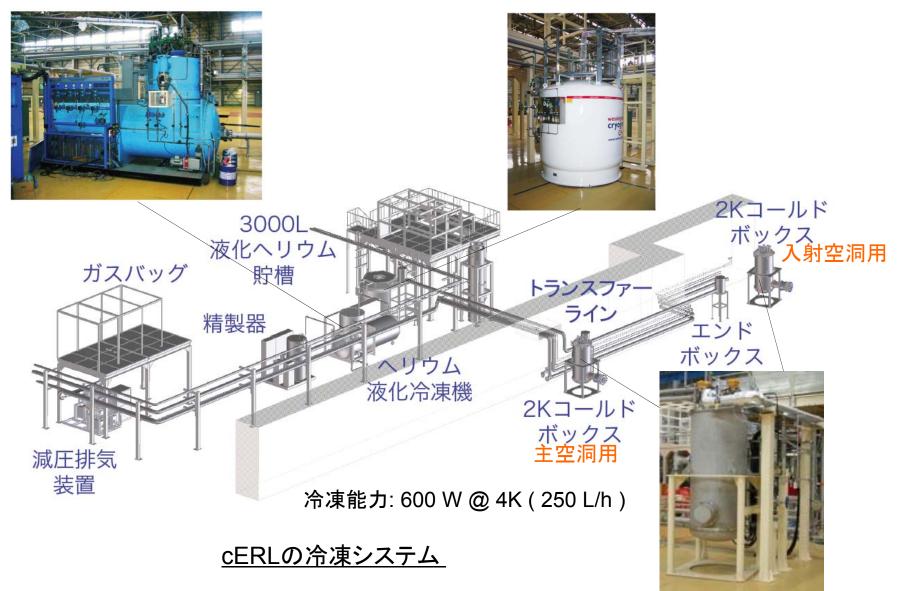




主空洞用8,16kW半導体增幅器

冷凍システム

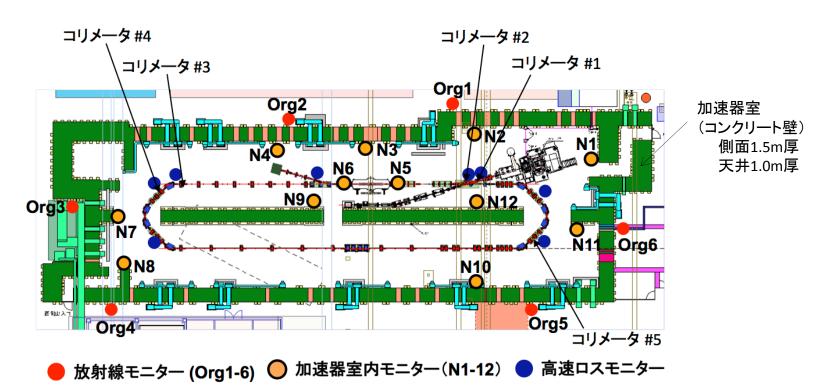
役割:空洞が超伝導状態になるように冷却する装置。 1.3GHzの周波数では、2Kにする必要がある。



ビームロス・放射線関連

役割:放射線遮蔽、ビームロス・放射線の監視、マシン防護。

- ・ 加速器室(放射線遮蔽壁): 放射線の遮蔽
- 放射線モニタ:加速器室外での放射線監視
- 加速器室内モニタ: 加速器室内でのビームロス・放射線監視
- 高速モニタ:ビームロスの高速検知とマシン防護
- ・コリメータ:ビームロスの局在化



(3) KEKにおけるERL開発の現状

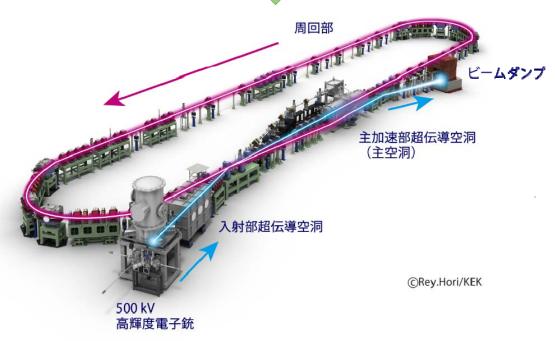
次世代放射光源ERLの実証器としての コンパクトERL開発

実証機としてのコンパクト ERL (cERL)



コンパクト ERLの目的

- ・主要な装置のR&Dと安定な運転の実証
- 超低エミッタンスビームの生成・加速
- エネルギー回収の実証
- 加速器総合性能の確認



ERLを構成する基本要素をすべて含む

Parameters of the Compact ERL

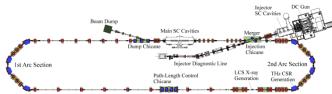
	Parameters
Beam energy (upgradability)	35 MeV 125 MeV (single loop) 245 MeV (double loops)
Injection energy	5 MeV
Average current	10 mA (100 mA in future)
Acc. gradient (main linac)	15 MV/m
Normalized emittance	0.1 mm·mrad (7.7 pC) 1 mm·mrad (77 pC)
Bunch length (rms)	1 - 3 ps (usual) ~ 100 fs (with B.C.)
RF frequency	1.3 GHz

コンパクトERLの解説動画



cERLを構成する装置(電子銃・入射器)

- <u>光陰極DC電子銃 (JAEAで開発): 500 kV, 10 mA</u>
 - 高電圧印加試験を経て、390 kVで運転
- 入射器超伝導空洞
 - 2-cell 空洞3台
 - 大電力試験を経て、最大 7 MV/m で運転
- 入射器診断ライン
 - 入射器で生成されたビームの品質(エミッタンス、バンチ 長等)を診断







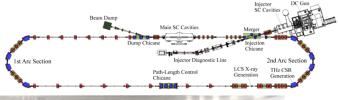


cERLを構成する装置(主空洞、周回部)

- 主空洞(周回部超伝導空洞) エネルギー回収する部分
 - 9-cell空洞2台(性能評価試験では、16 MVに到達)
 - He lossの増大、およびfield emissionによる放射線増大を 考慮し、1台あたり8.57MVで運転
 - 加速後のエネルギー: 19.4 MeV
- 周回部

周回部

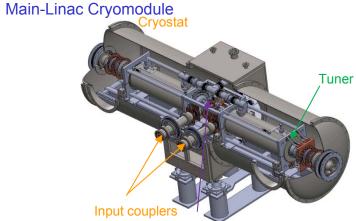
- 加速されたビームをもう一度主空洞まで輸送する
- LCS光源やTHz光源の発光点が配置される
- 主ダンプライン
 - 減速ビームを捨てる





主空洞









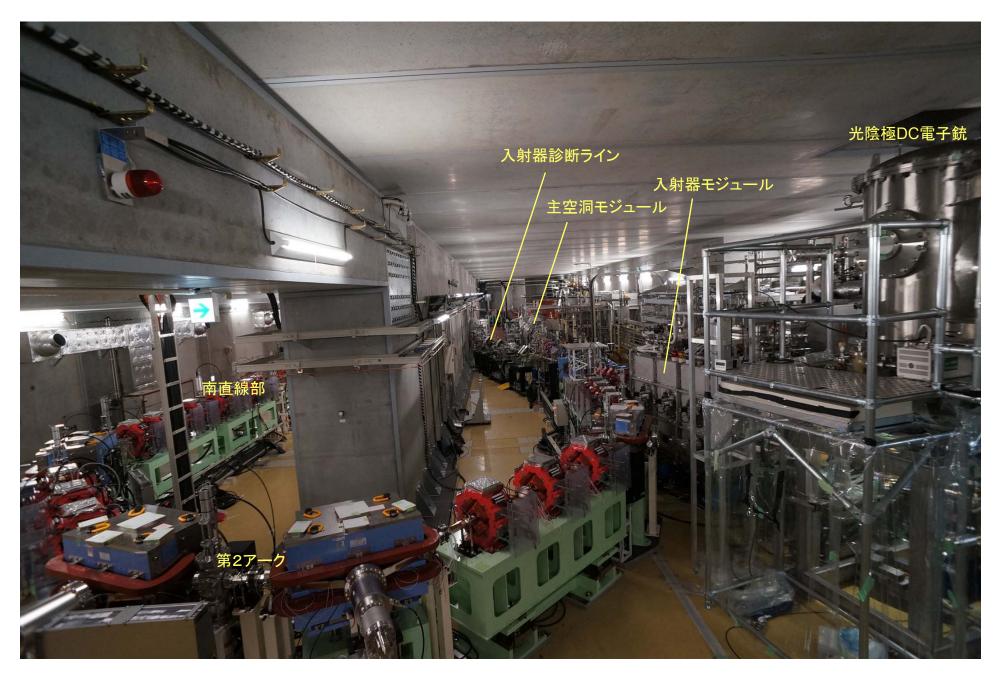




コンパクトERLの建設と立ち上げ

2008年度	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
ERI	 ∟開発棟改修 -	│ │ 放射化物片付	 け 放射約 	 			
				入射部建設			
				入射部コミ	l ミッショニング(! I	ι 5 MeV, 1 μA) ι	
				ļ ļ	自回部建設		
				,,			
				周	回部コミッショ. 	ニング (20 Me)	V, 10 μA)
						LCS建設	
					電流増強	 ὰ(100 μA)、L0	 CS立ち上げ

完成したコンパクトERL



コンパクトERLのビーム運転の経過

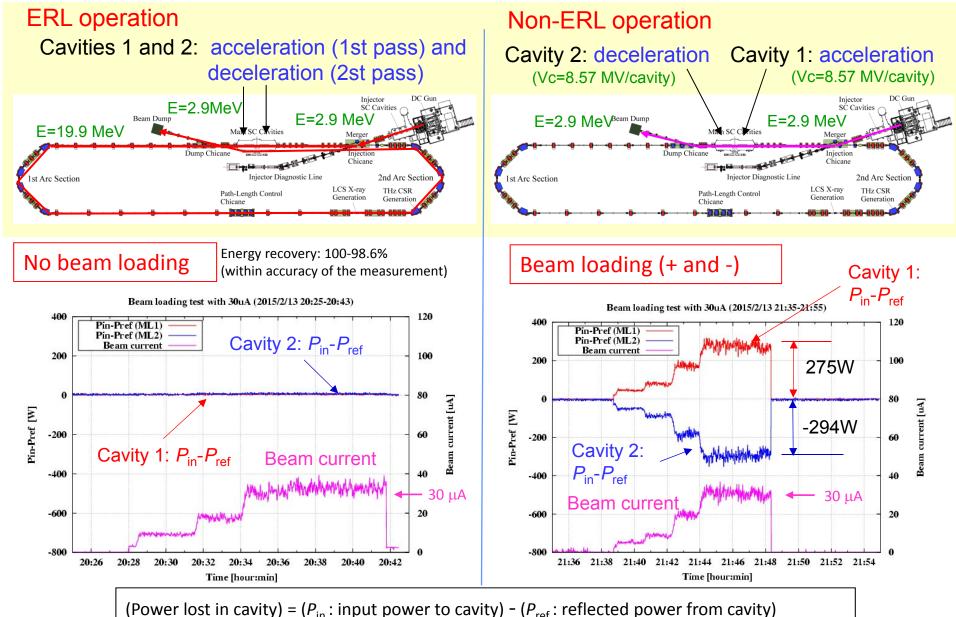
各機器の性能試験結果を元にビーム運転計画を定めた

- 段階的に試験を実施(上流から性能検証を実施、電流も段階的に上げていく)
- 電流増強の度に、放射線申請変更と施設検査が必要 ⇒ これまで、着実に合格してきている
 - 短い運転時間で、着実に放射線施設検査を合格できるような運転計画を作る
 - 残された時間で、効率的に機器の性能検証、ビーム調整法の確立を行う

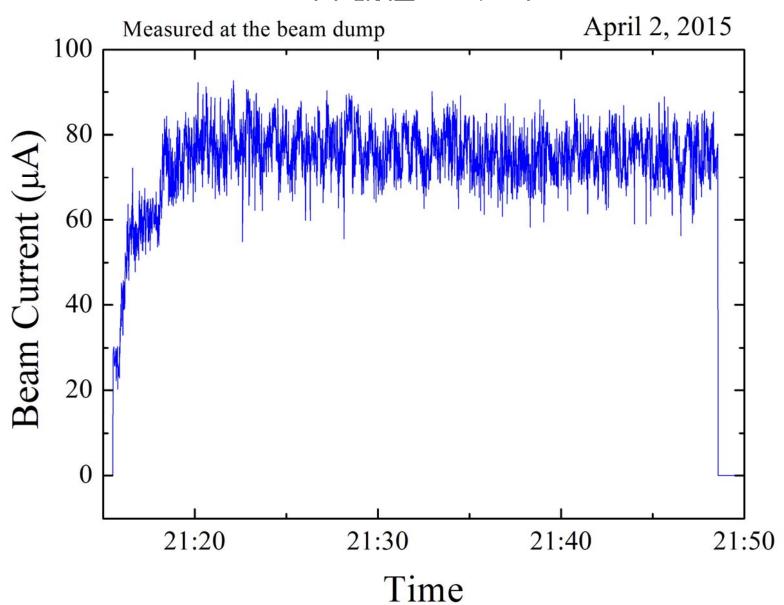
2013年 1月~6月	7月~12月	2014年 1月~6月	7月~12月	2015年 1月~6月	7月~12月	2016年 1月~6月	7月~12月
	電子生成•加	<mark>式験(4月~6月</mark> 速(5.6 MeV)に 冒流10 mA相当	成功	ad以下の規格	化エミッタンス		
		主空派		~3月)、最大: 认功(19.4 MeV) 认功			
			ビーム光学の	<mark>素(5月~6月)、</mark>)基本情報の取 nm mrad(周回	文 得		
			•	LCS月	< 線生成試験 (☆ 月ビーム光学調 <線の観測		大100 μA
	空間電荷	<mark>シンス調整(5月</mark> 行補償のための 生成試験の続き	基礎データを	· /			

エネルギー回収の実証 (I_0 = 30 μ A)

S. Sakanaka, IPAC15, TUBC1



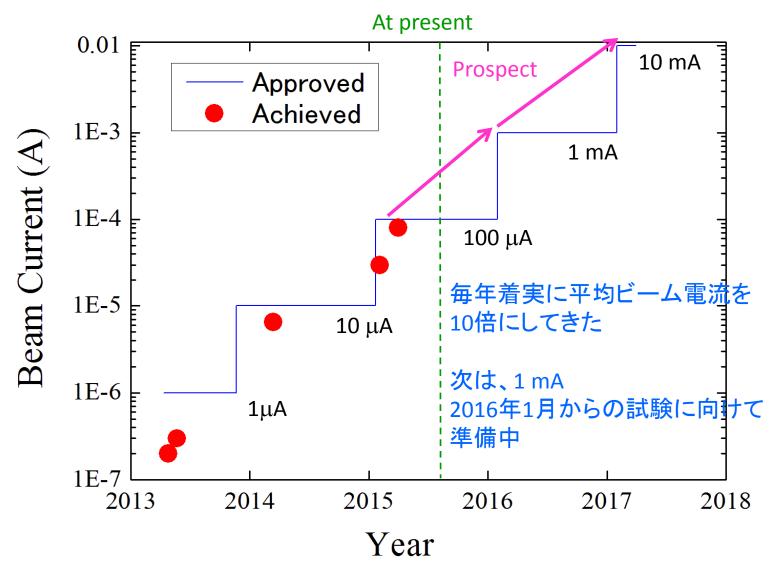
平均ビーム電流 約80 µA の安定な運転を達成 (申請値100 µA)



cERLを用いた平均ビーム電流の実証経過

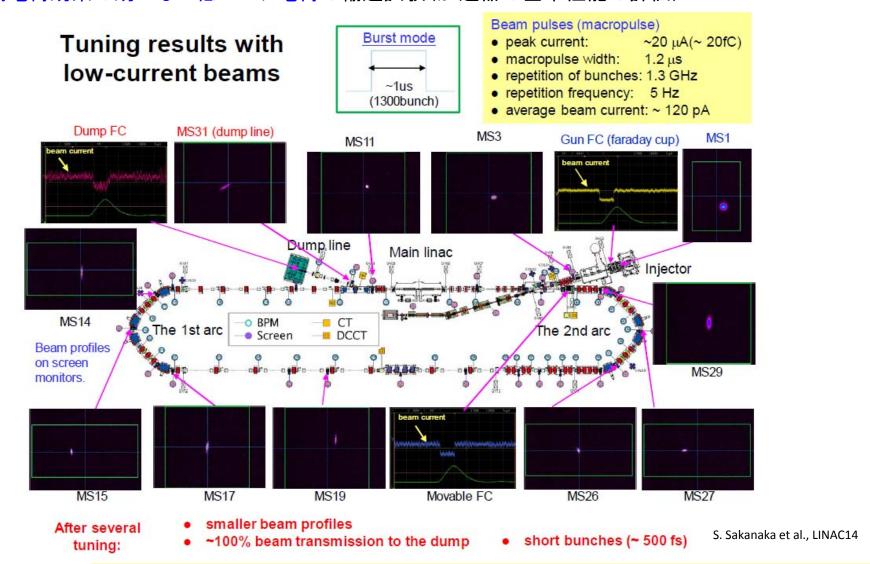
・ 今のところ、1年に10倍のペースで電流を増強

S. Sakanaka, IPAC15, TUBC1



高輝度電子ビームの輸送(低バンチ電荷)

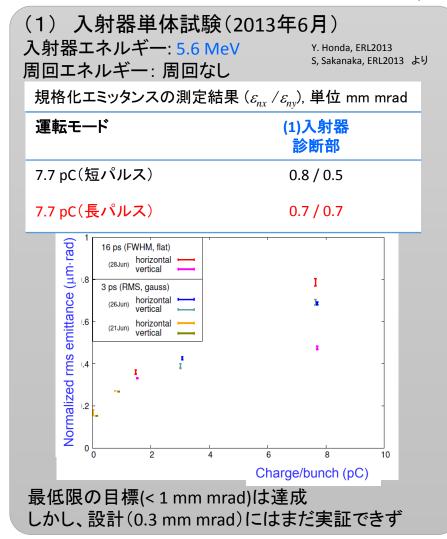
空間電荷効果の効かない低バンチ電荷の輸送試験(加速器の基本性能の評価)



低バンチ電荷(空間電荷効果が効かない)では、ほぼ初期エミッタンスを保持して輸送

高輝度電子ビームの輸送(高バンチ電荷)

空間電荷効果が支配的な高バンチ電荷(7.7 pC/bunch, 10 mAピーク)の輸送試験(これまで3回実施)



		部輸送試 ルギー: 2.4 (2015年	注:運動 , 4.5 MeV)	エネルギーを値	吏用			
周回	周回エネルギー: 19.4 MeV							
冷 微少電荷(< 0.05 pC/bunch) ε _x / ε _y [um]								
		主空洞前	主空洞後	第1アーク後	LCS前			
	2014/6/13	0.15/0.14	0.14/0.12	0.14/0.14	0.13/0.15			
	2015/2/17			0.24/0.25				
	2015/2/19				0.17/0.19			
>	▶ 中電荷(0.5 pC/bunch)							
	2015/3/25			0.32/0.28	0.41/0.30			
>	高電荷(7.7	pC/bunch)						
	2014/6/19 42/15							
	2014/6/20		2.9/2.4	5.8/4.6				
	2015/6/15		1.9/2.4	4.5/4.5				
	2015年6月17日(水)高井さん資料より							
低バンチ電荷: ほぼ初期エミッタンスを保持して輸送 中バンチ電荷: 設計(0.25 mm mrad)に近い 高バンチ電荷: 設計(0.6 mm mrad)よりかなり大きい								

(4)高出力EUV光源に向けて

ERLとFELの技術を利用

高出力EUV-FEL発振に重要なパラメータ

- 最適なビームエネルギー (γ)
- 最適なアンジュレータの周期長(λυ)、磁場(Bυ)、長さ(Lυ)
- ・ 高いピーク電流 (Ipeak)~ 短いバンチ長(σt) ← バンチ圧縮
- 低エミッタンス(ε),低エネルギー分散(σε) かつ 高い平均電流(I) ← ERL

FEL共鳴条件

$$\lambda_{ph} = \frac{\lambda_U}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} \right), \quad K = e\lambda_U B_U / 2\pi mc^2$$

FEL関連パラメータ(ゲイン長LG、FELパラメータρ)

$$L_{G} = \frac{\lambda_{u}}{4\sqrt{3}\pi\rho}, \quad \rho = \left(\frac{1}{16} \frac{I_{peak}}{I_{A}} \frac{K^{2}[JJ]^{2} \lambda_{u}^{2}}{\gamma^{3} \sigma_{x} \sigma_{y} (2\pi)^{2}}\right)^{1/3}, \quad I_{peak} = Q_{b} / \sqrt{2\pi\sigma_{t}}, \quad I_{A} = 17kA$$

FEL出力の飽和に至るアンジュレータの長さ(ゲイン長)を短くするため、ρを大きくしたい → ピーク電流が高くかつ高品質のビームが必要。

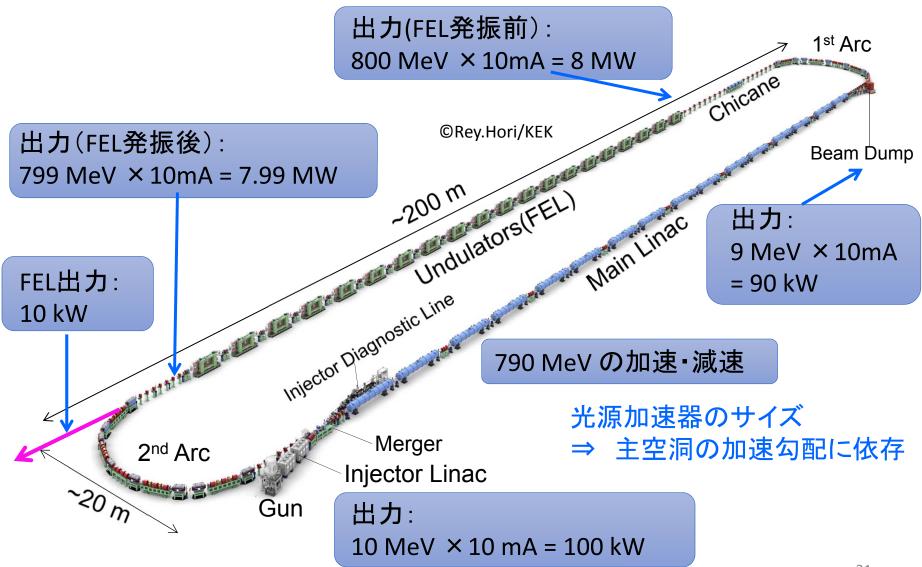
これまでに検討された EUV-FEL光源加速器の設計仕様

項目	設計仕様
波長	13.5 nm
出力	10 kW
バンチ電荷	60 pC
ビームエネルギー	800 MeV
超伝導空洞の加速勾配	12.5 MV/m
超伝導空洞の数	9-cell 空洞×64
ビーム繰り返し周波数	162.5 MHz
平均ビーム電流	9.75 mA

超伝導空洞の周波数: 1.3 GHz

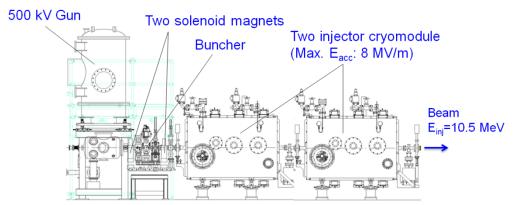
コンパクトERLで実証してきた性能をベースに設計

ERLを用いたEUV-FEL光源の概要



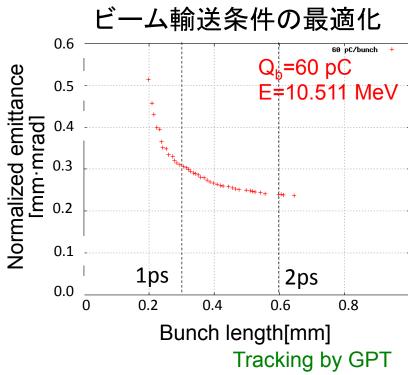
EUV-FEL 光源用の入射器

・要求: 平均電流 10 mA の高輝度ビームの生成・加速



cERLでの入射器超伝導空洞の実績 7 MV/m 付近で安定に運転 (5 MeVに加速)

⇒ 10 MeV 加速用に入射器空洞を2倍にして 安定な運転を確保する



60pC/bunch

1 ps : 0.30 mm mrad, 0.25 % $\rightarrow \varepsilon_n$ = 0.60 mm·mrad, σ_p/p = 0.25 % @ merger exit

2 ps : 0.25 mm mrad, 0.25 % $\rightarrow \varepsilon_n$ = 0.55 mm·mrad, σ_p/p = 0.25 % @ merger exit

このビーム条件を初期値として、バンチ圧縮シミュレーションを実施

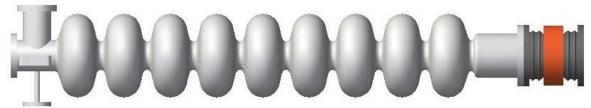
EUV-FEL光源用の超伝導加速空洞(主空洞)

• 要求: 12.5 MV/m で 10 mA ビームの安定な加速・減速

cERL 空洞 (Model 2) – stably operated at ~8.5 MV/m (現時点での実績)



ERL-EUV 空洞 (Model 1) – TESLA-type 9-cell cavity + 108 peam pipe



Under design. A large-aperture beam pipe will be also applied to the left side.

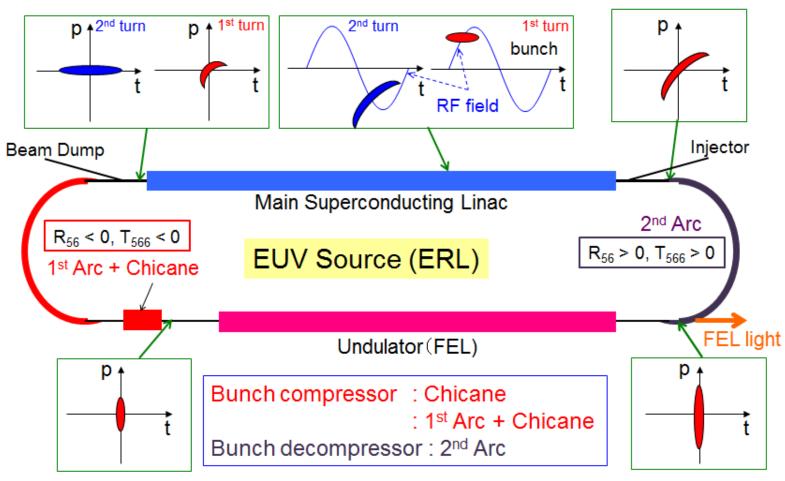
加速モードのパラメタ

	Model 2	Model 1		Model 2	Model 1
Frequency	1300 MHz	1300 MHz	Iris diameter	80 mm	70 mm
R _{sh} /Q	897 Ω	1007 Ω	$Q_o \times R_s$	289 Ω	272 Ω
E _p /E _{acc}	3.0	2.0	H _p /E _{acc}	42.5 Oe/(MV/m)	42.0 Oe/(MV/m)

E_D/E_{acc}の低減によって、12.5 MV/m での安定な運転が目標

バンチ圧縮と復元(伸長)

要求: FEL発振のためにピーク電流を高める(50 fs以下)エネルギー回収のために、バンチ長を復元(伸長)する



バンチ長を43 fs程度まで圧縮できることをシミュレーションで確認した

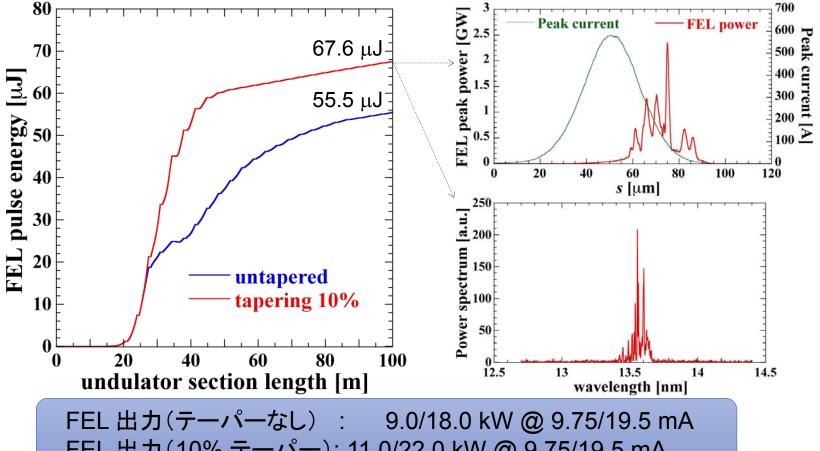
N. Nakamura et al., "Design Work of the ERL-FEL as the High Intense EUV Light Source", ERL2015, MOPCTH010.

FELの性能

• 要求: 10 kW のFEL出力

加藤龍好氏による計算

電子ビームの条件: E=800 MeV, Q_b=60 pC, f_b=162.5/325 MHz ヘリカルアンジュレータの条件: K=1.652, $\lambda_{\rm u}$ =28 mm, L $_{\rm u}$ =2.8m x 40 バンチ圧縮法: 第一弧部 + シケイン



FEL 出力(10% テーパー): 11.0/22.0 kW @ 9.75/19.5 mA

(5) おわりに

高出力EUV光源について

- 10kWクラスのEUV-ERL-FEL光源は、KEKで行ってきた加速器要素技術開発およびコンパクトERLのコミッショニングの経験から、実現可能であり、概念検討段階では大きな問題はないと予想しているが、出力の十分なマージンを確保するために、今後も最適化のシミュレーションが重要である。
- 加速器については、2015年度(今年度)から主要コンポーネント(EUV用の電子銃、主超伝導空洞)のR&Dを開始し、2016年度から建設予算が付けば、3~4年間で建設・設置を行って、2019年度内にビームコミッションニングを経て、最初の10kWの高出力EUV光を得ることが、ぎりぎり可能と考えている。

ERL Development Team in Japan



High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

S. Adachi, M. Adachi, M. Akemoto, D. Arakawa, S. Asaoka, K. Enami, K. Endo, S. Fukuda, T. Furuya,

K. Haga, K. Hara, K. Harada, T. Honda, Y. Honda, H. Honma, T. Honma, K. Hosoyama, K. Hozumi,

A. Ishii, E. Kako, Y. Kamiya, H. Katagiri, H. Kawata, Y. Kobayashi, Y. Kojima, Y. Kondou,

O. Konstantinova, T. Kume, T. Matsumoto, H. Matsumura, H. Matsushita, S. Michizono, T. Miura,

T. Miyajima, H. Miyauchi, S. Nagahashi, H. Nakai, H. Nakajima, N. Nakamura, K. Nakanishi, K. Nakao,

K. Nigorikawa, T. Nogami, S. Noguchi, S. Nozawa, T. Obina, T. Ozak i, F. Qiu, H. Sakai, S. Sakanaka,

S. Sasaki, H. Sagehashi, K. Satoh, M. Satoh, T. Shidara, M. Shimada, K. Shinoe, T. Shioya, T. Shishido,

M. Tadano, T. Takahashi, R. Takai, T. Takenaka, Y. Tanimoto, M. Tobiyama, K. Tsuchiya, T. Uchiyama,

A. Ueda, K. Umemori, K. Watanabe, M. Yamamoto, Y. Yamamoto, Y. Yano, M. Yoshida



Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

R. Hajima, S. Matsuba, R. Nagai, N. Nishimori, M. Sawamura, T. Shizuma



The Graduate University of Advanced Studies (Sokendai)

E. Cenni



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

H. Takaki



UVSOR, Institute for Molecular Science

M. Katoh



Hiroshima University

M. Kuriki, Y. Seimiya



Nagoya University

Y. Takeda, Xiuquang Jin, M. Kuwahara, T. Ujihara, M. Okumi



National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

D. Yoshitomi, K. Torizuka



JASRI/SPring-8

H. Hanaki



Yamaguchi University

H. Kurisu

・ 謝辞 ~運転を支えて頂いた方へ~



コンパクトERLのコミッショニング運転では、建設・コミッショニングチームだけでなく、機器を安定に運転するために多くの方の協力がなければ進めることができませんでした。

大前提として、冷凍機の安定な運転が欠かせませんでした。冷凍機運転員の方に感謝します。 また、コミッショニング運転では機器の迅速な立ち上げ・立ち下げ、そして運転に必要なソフトウェア の迅速なサポートが欠かせませんでした。支援していただいた東日本技術研究所やNATの方々に感 謝します。

高エネルギー加速器セミナー

OHO'15

エネルギー回収型リニアックの加速器基盤技術と応用

2015 9.1 Tue. ~ 9.4 Fri.

高エネルギー加速器研究機構3号館セミナーホール

参加者墓集

詳しくは WEB をご覧下さい。 http://www.heas.ip http://accwww2.kek.jp/oho/

讃義に関するお問い合わせ

小林 幸則 高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 TEL: 029-864-5632 E-mail: oho15@milk.kek.jp

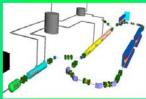
共催

公益財団法人 高エネルギー加速器科学研究奨励会 KEK: 高エネルギー加速器研究機構 〒305-0801 つくば市大穂 1-1 高エネルギー加速器研究機構内 総合研究大学院大学 高エネルギー加速器科学研究科

高エネルギー加速器セミナー **OHO '08**

次世代加速器技術としての可能性を秘めたERL その原理と応用を学ぶ







2008年 9月2日(火)-9月5日(金) 高エネルギー加速器研究機構:3号館セミナーホール

参加者募集

ttp://www.heas.jp, http://accwww2.kek.jp/oho/index.htm

申込書送付先 8月10日 (金) 必着

〒305-0801 つくば市大穂1-1 高エネルギー加速器研究機構気付

(財) 高エネルギー加速器科学研究奨励会

Tel/fax: 029-879-0471

E-mail: info@heas.jp

講義内容に関するお問い合わせ

古屋 書音

高エネルギー加速器研究機構加速器研究施設

Tel 029-864-5234

E-mail: oho08@milk.kek.jp

(財)高エネルギー加速器科学研究奨励会 KEK:高エネルギー加速器研究機構

総合研究大学院大学・高エネルギー加速器科学研究科

OHO セミナーのテキスト

加速器の勉強には大変有用なテキスト(教科書)です。 ぜひ購入またはダウンロードして勉強してみてください!

- ERL関連
 - 2015年、2008年
- FEL関連
 - 2013年、1998年
- ILC(超伝導空洞開発)関連
 - 2014年、2006年

ホームページ

http://accwww2.kek.jp/oho/OHOtxt1~4.html

ご清聴ありがとうございました。