

将来展望

KEK・超伝導加速器利用推進チーム

河田 洋

コンテンツ

- 現在のcERLの位置付けと今後
- ERL技術産業化への取り組み
- EUV-FELをはじめとした産業化の出口
- 他の産業応用とその課題
- CW-FEL等の学術応用における位置付け
- まとめ

現在のcERLの位置付けと今後

- KEKロードマップからERLの次期光源の位置付けが削除
- KEK Project Implementation Plan (KEK-PIP)
<http://www.kek.jp/ja/NewsRoom/Release/20160802141100/>

その中に、ERL に関しては、以下の記述

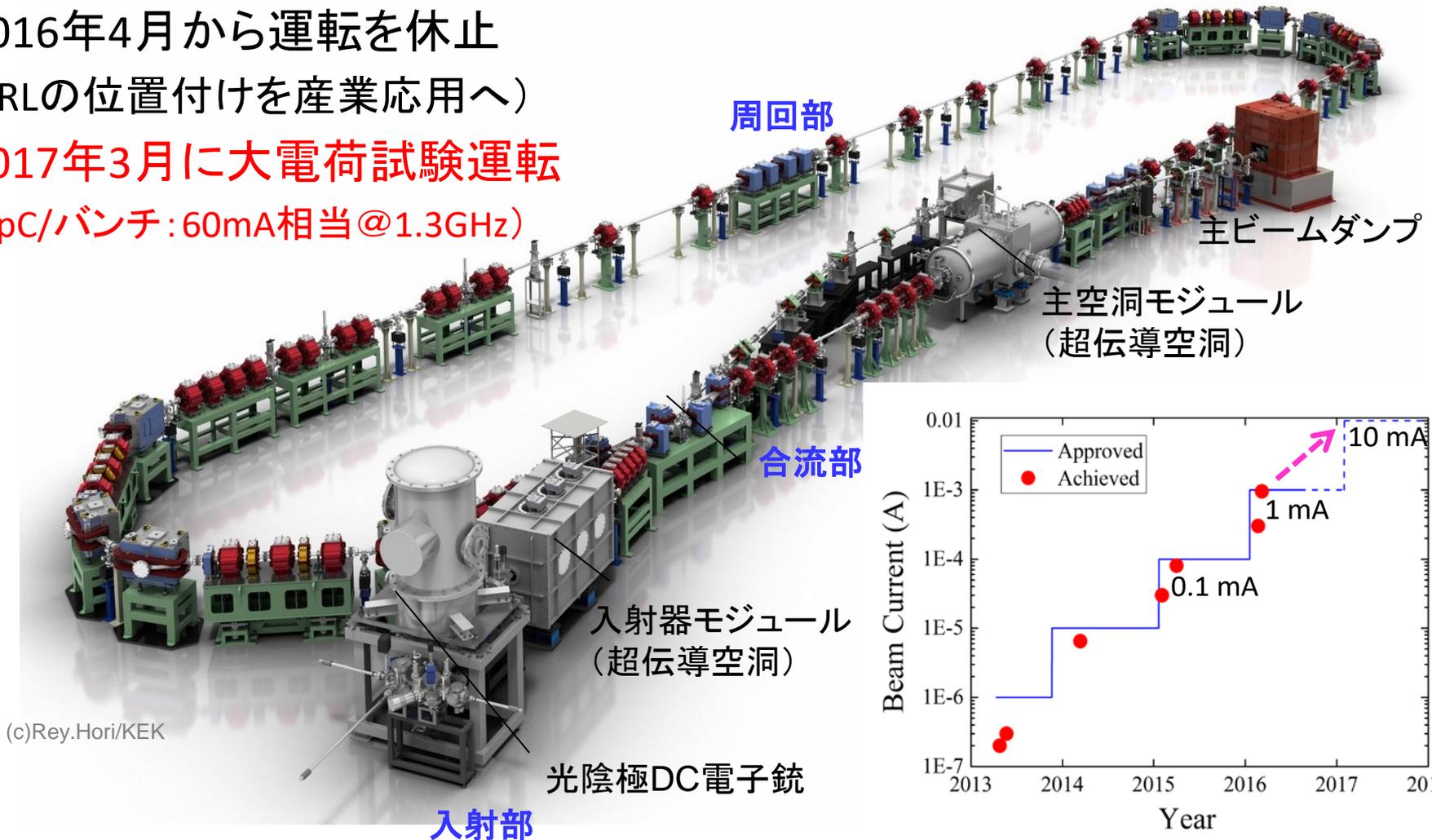
3-2. Other research projects carried out using general funds of KEK

The following projects have up to now been conducted mainly using general funds of KEK. They will be continued on the condition that greater efforts are made to obtain external funding.

- Simulation studies with the existing supercomputer (only up to summer of 2017)
- Industrial application of ERL technology
- Participation in CERN LHC/ATLAS
- etc..

コンパクトERL

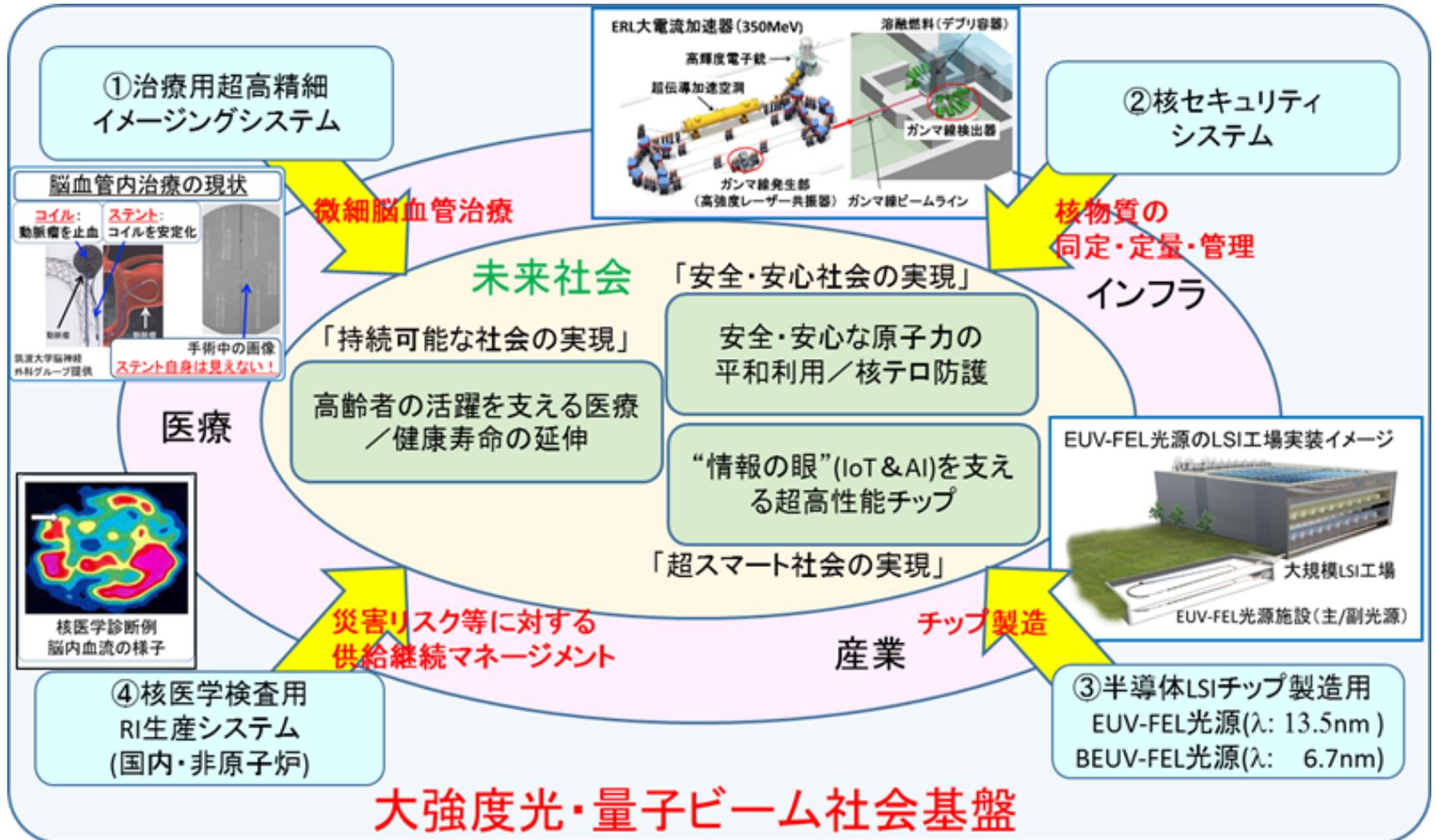
- 10ミクロンサイズの電子ビーム(光源サイズ)を目指す将来放射光源の試験加速器
- 2016年3月、1mA電流で $100.00^{+0.00}_{-0.03}$ %のエネルギー回収運転
- 2016年4月から運転を休止
(ERLの位置付けを産業応用へ)
- **2017年3月に大電荷試験運転**
(40pC/バンチ: 60mA相当@1.3GHz)



(c)Rey.Hori/KEK

未来社会創造事業重点公募テーマ提案

みえないものを「見る・診る・観る・造る」新しい社会基盤の創成
 - 未来社会を拓く大強度光・量子ビーム -



「みえないものを”ミル“」社会基盤の想定する出口例

産業化に向けた経緯

－ EUV-FEL光源産業化研究会の発足と活動状況 －

- 2012秋 EUV Source WorkshopにてEUV光源としてのFELに言及 (ASML)
- 2014.2 SPIE Advanced LithographyにてASMLグループが発表 (13.5nm, 6.7nm)
- 2014.4頃～ EUV-FEL光源の可能性検討をKEK／東芝で開始。
ギガフォトン／早大はFEL光の利用技術について検討開始
- 2014.5 ASML がKEKを訪問 (技術検討の協力依頼) with 東芝
- 2015.6 EUV-FEL光源実現に向け産学の結集を図るため研究会を企画。
- 2015.8 EUV-FEL光源産業化研究会を発足 (企業6社、コンソ1社、大学等6機関)
- 2016.1 研究開発プロジェクト立案のため光源分科会を設置
- 2016.4～ 産業化に向けた競争的資金獲得を目指して、国、JSTへの
アプローチを開始
- 2016.6 TIA連携プログラム調査研究 (かけはし) の資金を得て半導体業界への
浸透活動を強化
- 2017.4 産総研、東大、EIDEC、KEKの4者でEUV-FEL実現に向けた検討を開始
- 2017.5 TIA連携プログラム調査研究 (かけはし) の資金を得て浸透活動を強化
- ～現在 参加機関： 企業 10、コンソーシア 1、大学・研究機関 7
(内、光源分科会： 企業8、大学・研究機関7)

EUV-FEL光源産業化研究会

代表：  東京大学 THE UNIVERSITY OF TOKYO 石原 直

 東京大学 THE UNIVERSITY OF TOKYO

 松田 巖

 宇都宮大学 UTSUNOMIYA UNIVERSITY
東口 武史

 兵庫県立大学
木下 博雄

企業群

TOSHIBA
Leading Innovation >>>

 三菱重工メカトロシステムズ株式会社

 日立金属株式会社
Materials Magic

 GIGAPHOTON

 EIDEC

TOYAMA

KEKのERL技術、QSTのFEL
技術をベースに産業化を検討

 大陽日酸
The Gas Professionals

HITACHI

TOSHIBA Leading Innovation >>> 東芝電子管デバイス株式会社

 MITSUBISHI ELECTRIC
Changes for the Better

 **NTT AT**

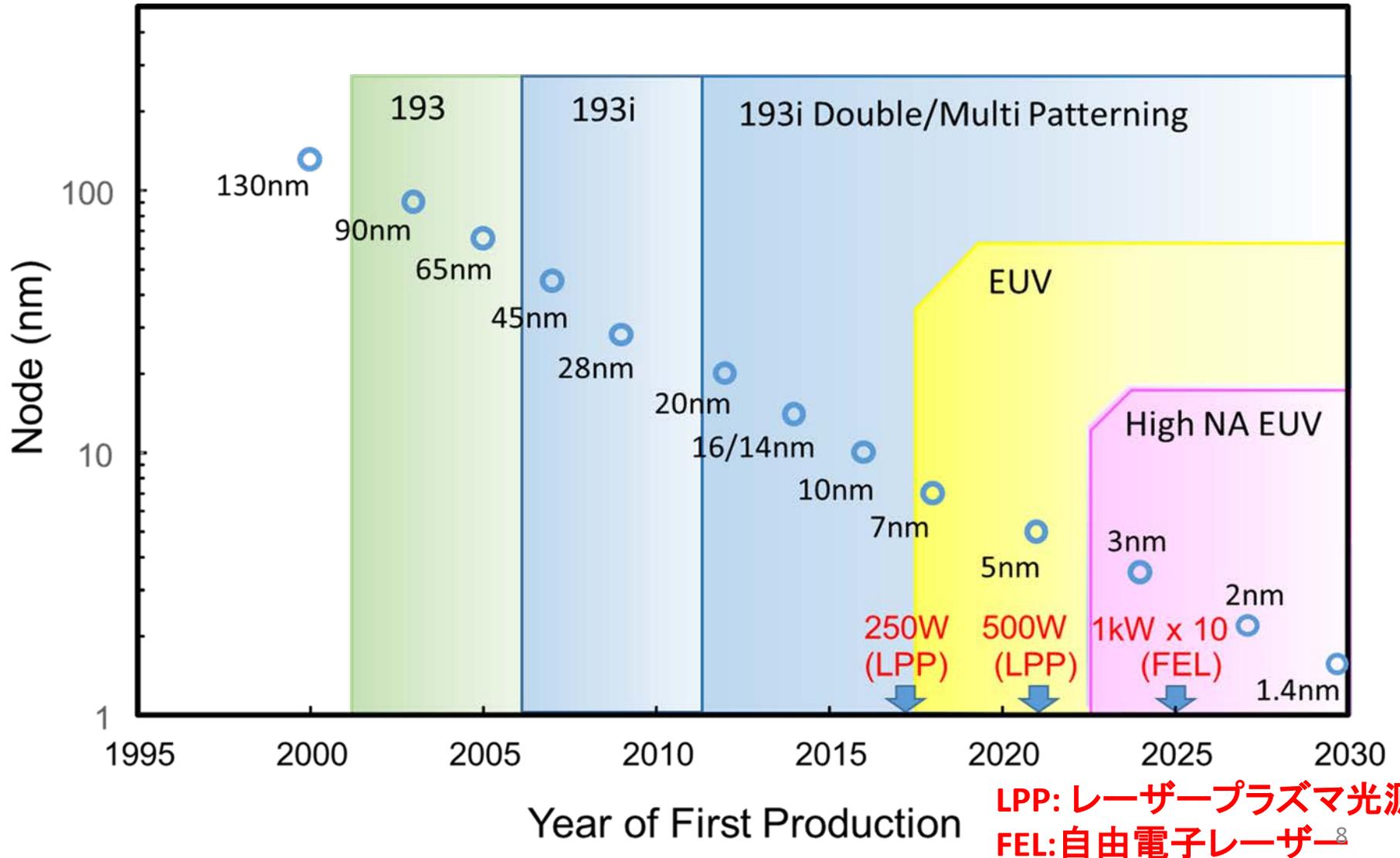
 量子科学技術研究開発機構
羽島 良一

 高エネルギー加速器研究機構
KEK 河田 洋他

 産業技術総合研究所
清 紀弘

1. EUVリソグラフィ用大強度光源

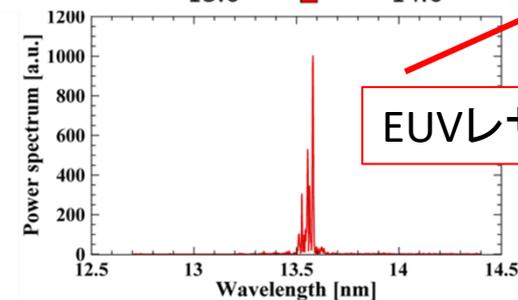
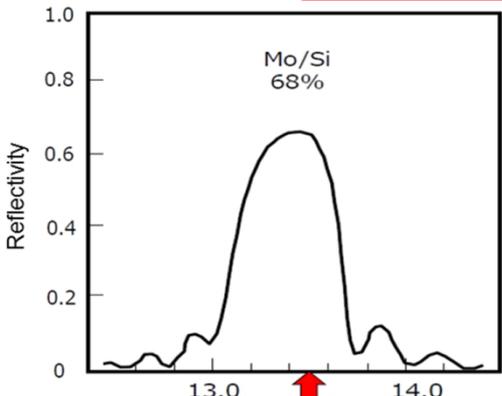
ロジックLSIの微細加工と光源強度の期待される年次傾向



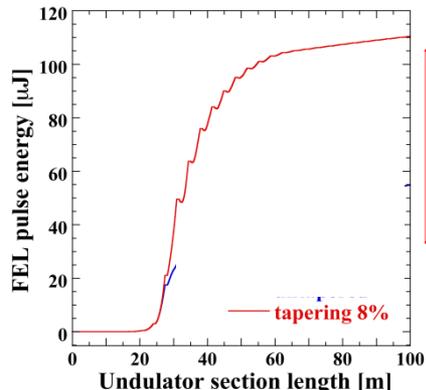
1. EUVリソグラフィ用大強度光源

ERL-FELによるEUV大強度光源概要

多層膜ミラーの反射率
(すべてのレーザー波長を反射)



EUVレーザーの波長分布



アンジュレーターの進行
方向におけるパルス当
たりのレーザーパワー

超高出力EUV光

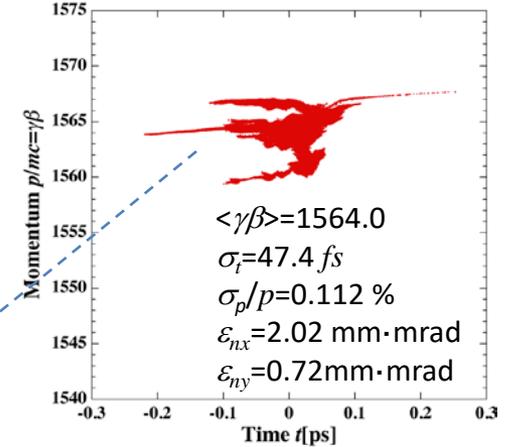
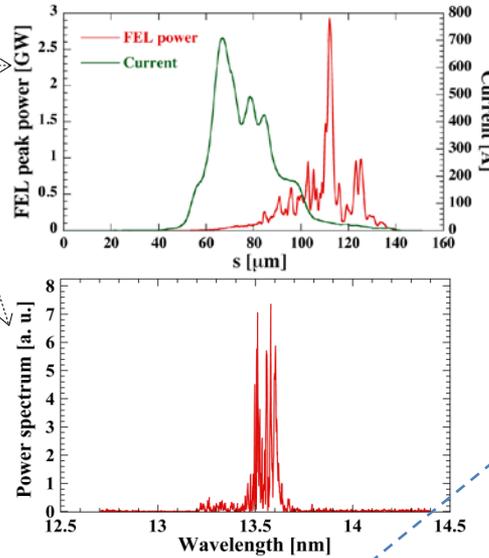
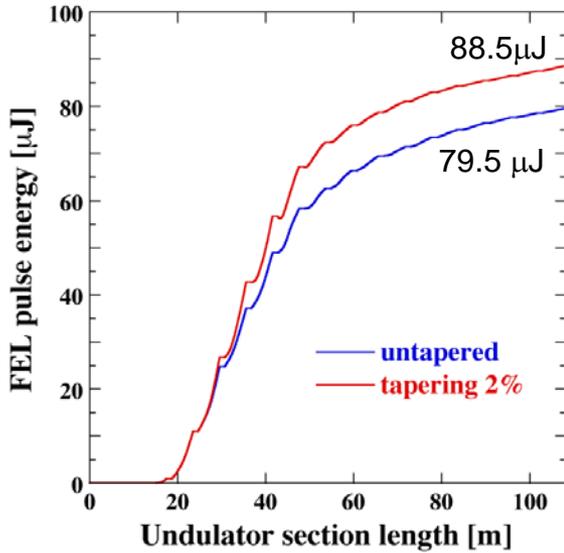


加速器のパラメータ

項目	EUV-FEL設計値
入射部エネルギー	10.5 MeV
ビームエネルギー	800 MeV
バンチ電荷	60 pC
パルス数/秒	162.5 M
平均電流	10 mA
電子ビームの輝度	0.6 mm mrad
加速勾配	12.5 MV/m
EUVの波長	13.5 nm
EUVの強度	>10 kW

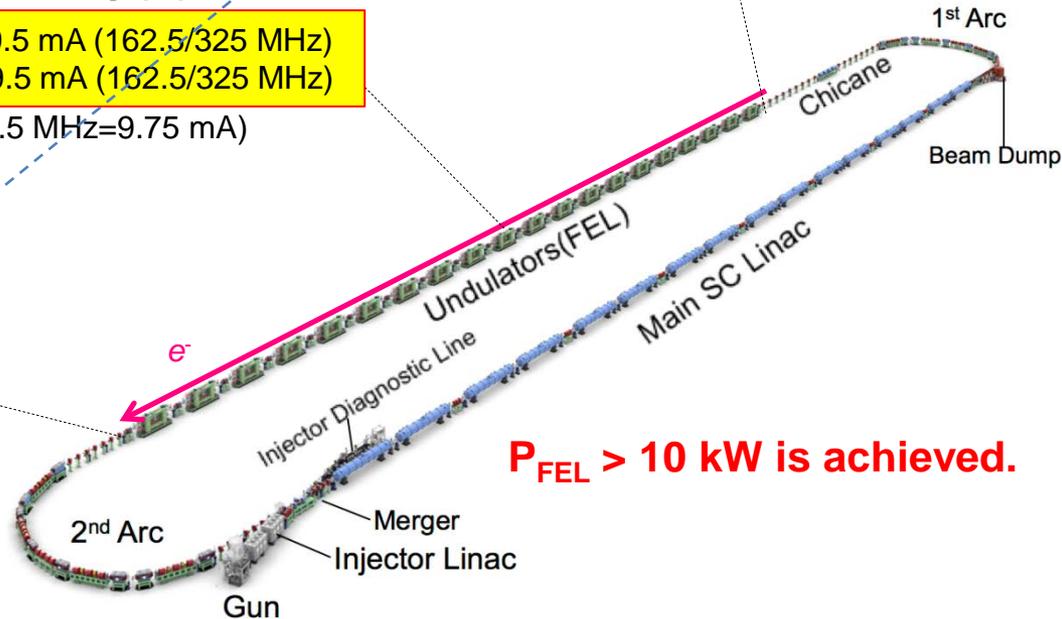
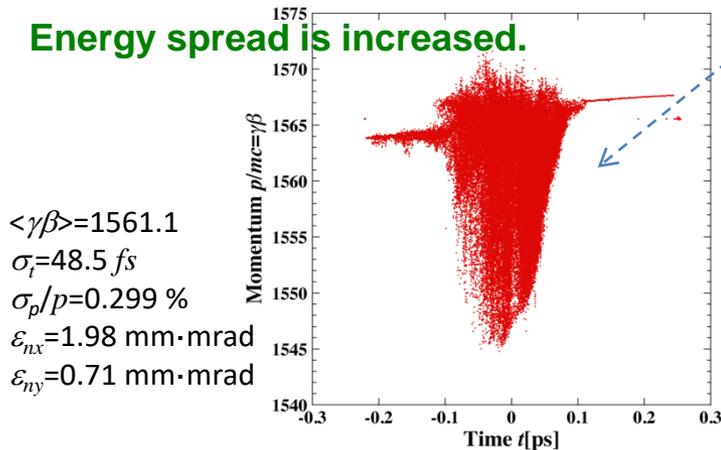
FEL Performance

Courtesy of N. Nakamura



FEL power without tapering: 12.9/25.8 kW @ 9.75/19.5 mA (162.5/325 MHz)
 FEL power with 2% tapering: 14.4/28.8 kW @ 9.75/19.5 mA (162.5/325 MHz)
 ($P_{FEL} = 88.5 \mu J \times 162.5 \text{ MHz} = 14.4 \text{ kW}$, $I_{av} = 60 \text{ pC} \times 162.5 \text{ MHz} = 9.75 \text{ mA}$)

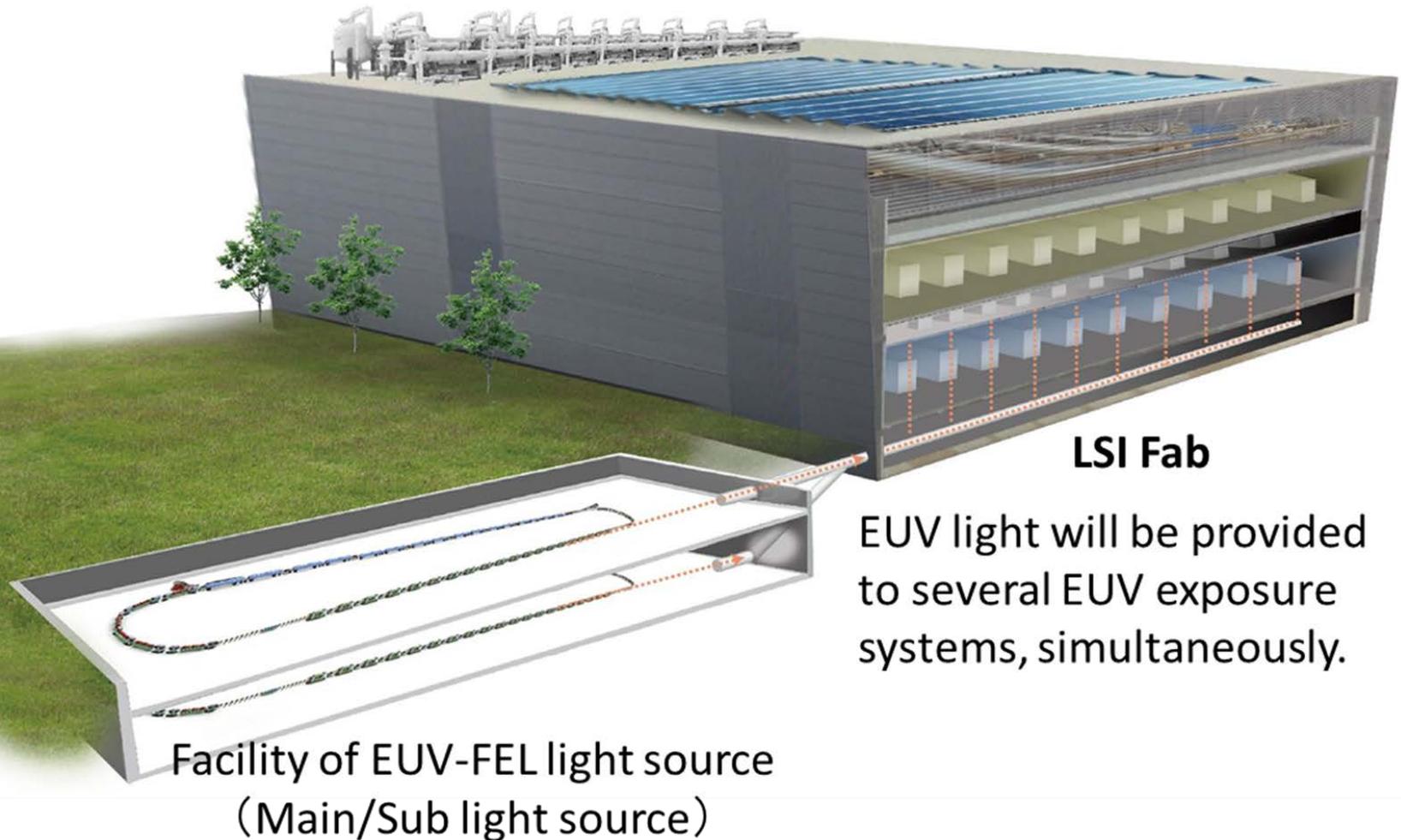
Energy spread is increased.



$P_{FEL} > 10 \text{ kW}$ is achieved.

EUV-FEL光源のLSI工場の実装イメージ

EUV-FEL光源施設から複数台の露光機にEUV光を供給



LSI Fab
EUV light will be provided to several EUV exposure systems, simultaneously.

半導体関連業界への浸透活動

- 2014年)
- 11月9-11日: Workshop on EUV and Soft X-Ray Sourcesで発表(ダブリン)
- 2015年)
- 6月15-19日: EUVL Workshopで発表(ハワイ)
 - 7月6-7日: NGL ワークショップにて発表(東京)
 - 11月9-11日: Workshop on EUV and Soft X-Ray Sourcesで発表(ダブリン)
- 2016年)
- 6月13-16日: EUVL Workshopで発表(バークレー)
 - 10月11日: TIAシンポジウムで調査研究の内容と現状を報告
 - 10月24-26日: EUVL Symposiumで大強度光源および実現戦略を発表(広島)
 - 10月27日: OSA Workshop on Compact EUV & X-ray light sourcesで発表(広島)
 - 11月7-9日: EUV Source Workshop で発表(アムステルダム)
 - 11月10日: ASML訪問(Veldhoven) → FELの必要性調査と情報交換
 - 12月13日: EUV-FELワークショップを開催 → 参加者102名(内、約70%が企業から)
- 2017年)
- 6月12-15日: EUVL Workshopで産業化に向けての小型化を発表(バークレー)
 - 7月18-19日: NGLワークショップで発表(東京)
 - 9月11-14日: EUVL Symposiumで加速器小型化検討結果を発表(モンレー)
 - 12月12日: 第2回EUV-FEL ワークショップを中央大学駿河台記念館で開催予定
- 2018年)
- 3月26-28日: OSA Congress (Strasbourg)で招待講演

コンパクトERLの加速器技術が導くイノベーション

項目	現在の達成値	最低限の開発目標値	開発効果
入射部エネルギー	2.9 MeV	6 MeV	空間電荷効果・減少
ビームエネルギー	20 MeV	50 MeV	エネルギー増強
バンチ電荷	5 pC	60 pC	電流増強
パルス数/秒	162.5 M	162.5 M	
平均電流	1 mA	10 mA	電流増強
電子ビームの輝度	~1 mm mrad	<1 mm mrad	大電流・高輝度の実現
加速勾配	8.2 MV/m	>12.5 MV/m	産業化へ前進



エネルギー増強 ⇒ 空間電荷効果・減少 ⇒ 大電流・高輝度の実現 ⇒ 電流増強



① EUVリソグラフィ用
大強度光源

② 核セキュリティ
関連システム

③ 医療用超高精細
X線撮像装置

④ 核医学検査用
RI製造施設

大電流先端加速器が拓く新しいイノベーション

2.核セキュリティ関連システム

(レーザー・コンプトン散乱ガンマ線による核種の非破壊検知・測定)

核物質非破壊検知・測定の必要性

1) 核物質を使ったテロの抑止

- ・国際的な枠組み (核セキュリティーサミット) でテロに対峙
- ・核テロに対する水際作戦が必須



2) 核不拡散・保障措置

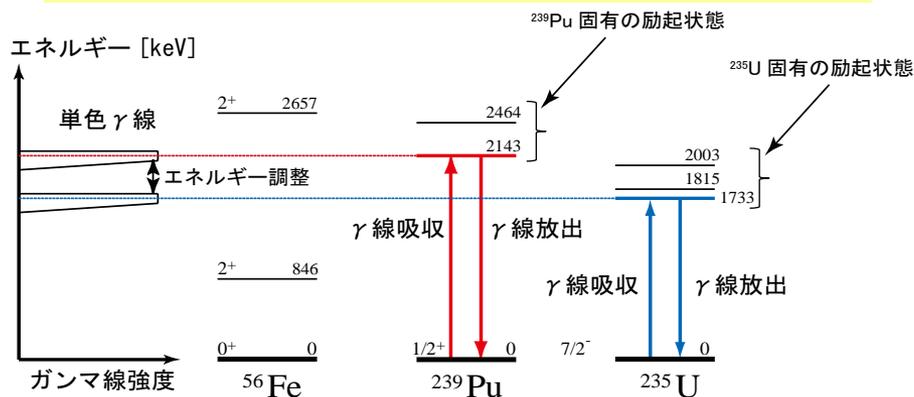
- ・福島原発から溶融燃料が2021年から取り出される予定
- ・溶融燃料の核物質測定が必須



核物質の非破壊検知

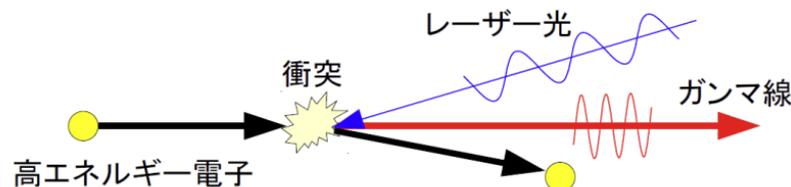
核物質の非破壊測定

原子核共鳴蛍光散乱で核種を同定



2MeV領域でエネルギー可変な大強度単色ガンマ線が必要

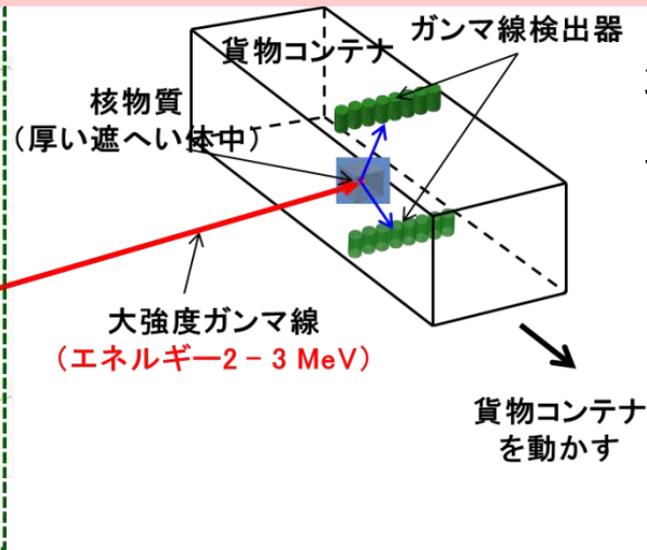
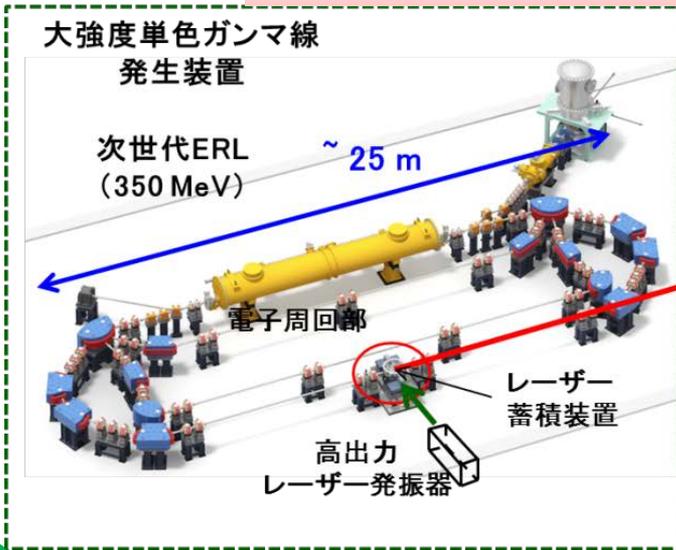
レーザーコンプトン散乱



高輝度電子ビームの350 MeVクラスのERLは2MeV領域の大強度単色ガンマ線を供給

2. 核セキュリティ関連システム

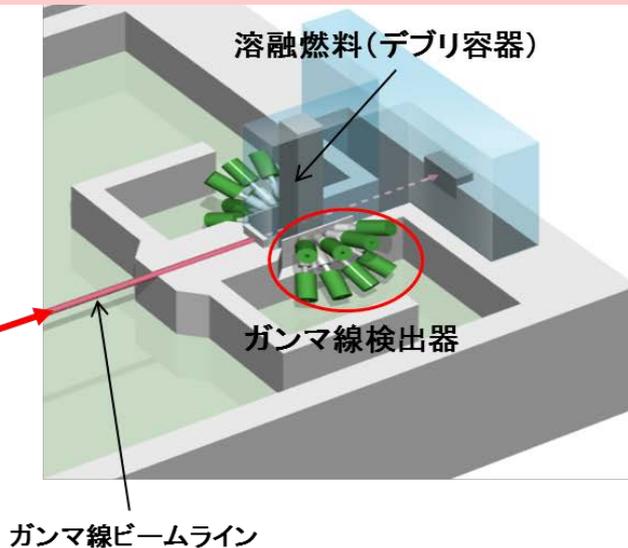
核物質非破壊検知装置を港湾に設置(核テロに対する水際作戦)



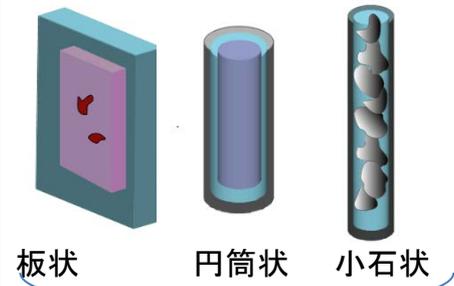
- 核物質の存在が疑われるコンテナの部位にガンマ線を照射
- 共鳴散乱により核物質識別して検知する



核物質非破壊測定装置を福島サイトに設置(U-235, Pu-239の非破壊測定)



想定される取り出し形態



どの形状でもPu/Uの質量測定可能

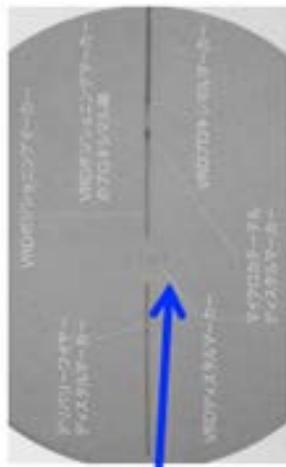
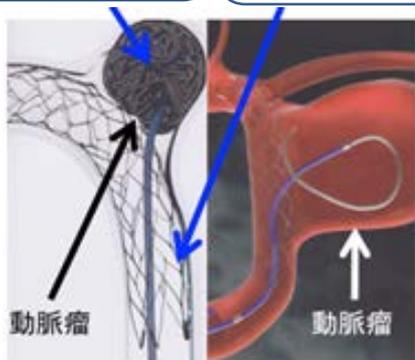
3. 医療用超高精細X線撮像装置

脳神経外科での現場から

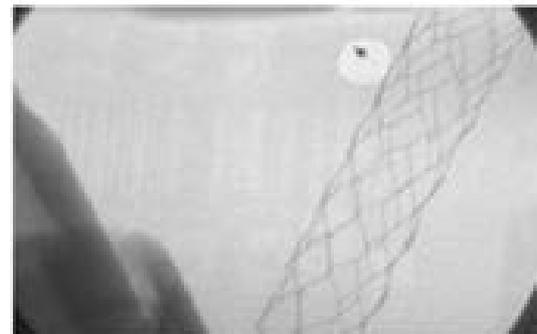
脳神経外科の血管内手術

コイル: 動脈瘤を詰めて止血

ステント: コイルを支持安定化



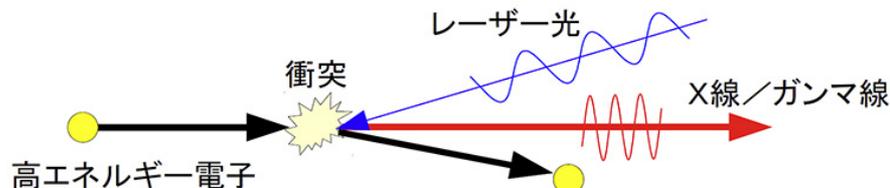
大型放射光施設を用いると



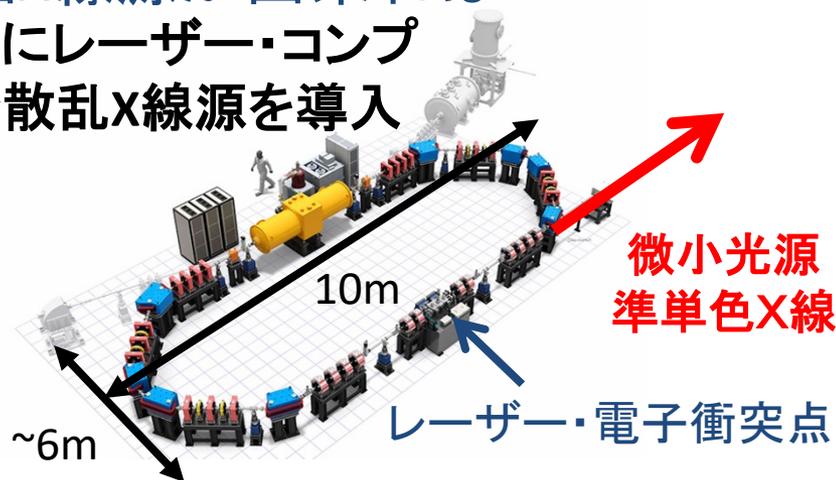
筑波大学脳神経外科グループ提供

病院設置が出来る小型高精細X線源が出来れば！

ERLにレーザー・コンプトン散乱X線源を導入



レーザ・コンプトン散乱(LCS)X線源による微小光源準単色X線の可能性



3.医療用超高精細X線撮像装置

コンパクトERLでのイメージング実験

- 2014年3月にLCS発生に成功(30 μm の光源サイズ)

<http://www.kek.jp/ja/NewsRoom/Release/20150427150000/>

医療応用への主な課題

- 1) 撮影(露光)時間の短縮
- 2) 人体を透視できるX線の短波長化

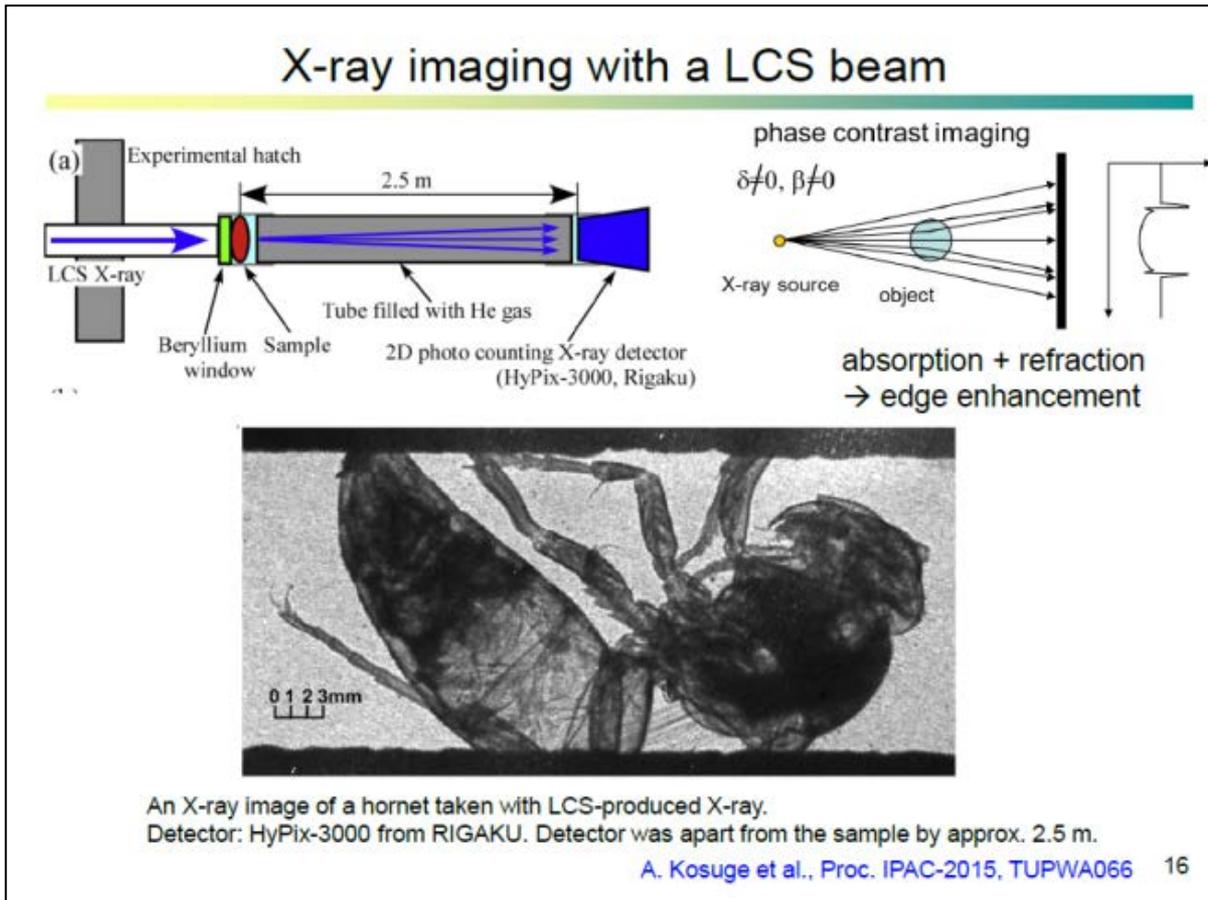
2014年3月の実績

X線波長 **0.18nm**
露光時間 **600秒**
@20 MeV, 0.1mA

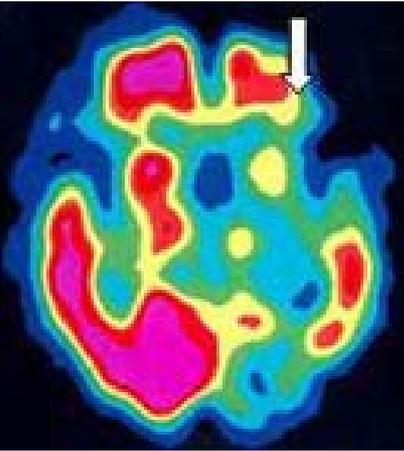
10mA化
+
レーザー蓄積
パワー増強

X線波長 **0.03nm**
露光時間 **<0.1秒**
@50 MeV, 10mA

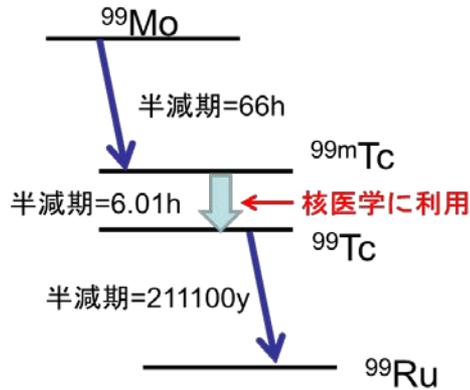
医学応用への適用



4. 核医学検査用RI製造施設 ($^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$)



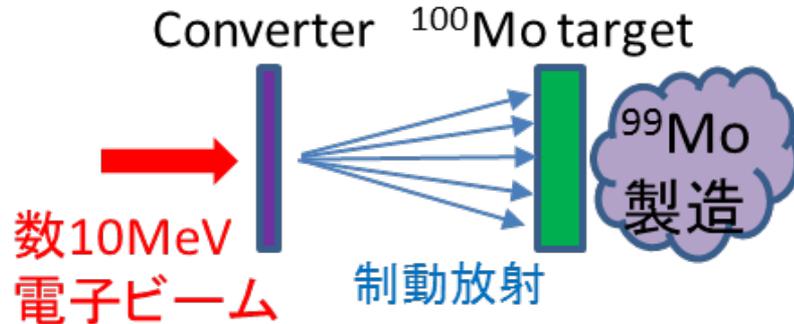
$^{99\text{m}}\text{Tc}$ による核医学診断で明らかとなる脳内血流の様子



$^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ の安定供給への懸念

- ^{99}Mo は核医学診断にて利用件数が最も多いTc製剤の原料、100%を輸入に依存
- 空路安定輸送への不安 (過去に火山噴火により問題発生)
- ほとんどの ^{99}Mo は高濃縮ウランの原子炉で製造
- 原子炉の老朽化により、今後の安定供給が大きな課題

安定供給に向けた加速によるRI製造($^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$)の開発

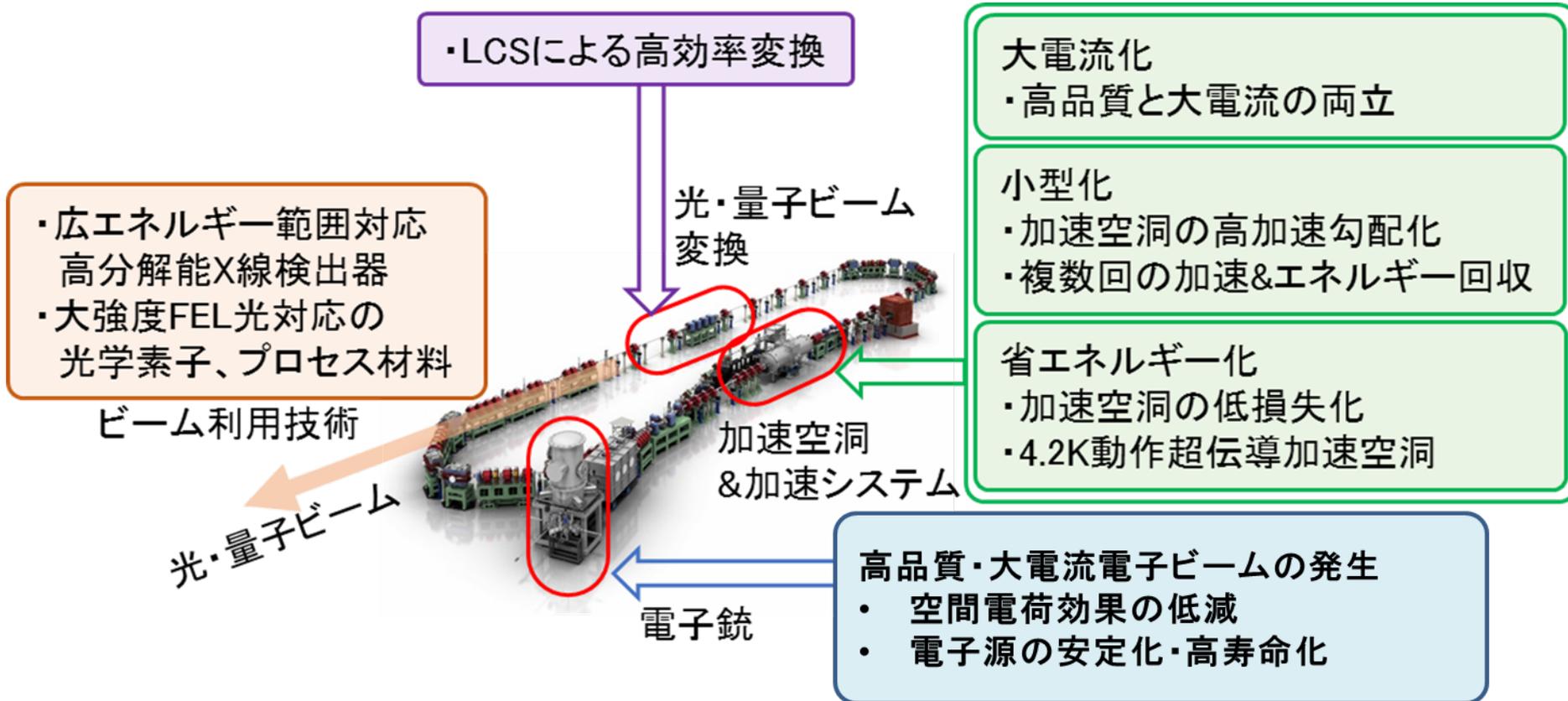


- 制動放射による ^{99}Mo 製造
- 電子ビームからの制動放射を
- ^{100}Mo ターゲットに照射
- 8~20MeVのガンマ線が反応に寄与

加速器に要求される仕様

- 20~50MeV 電子ビーム
- 数mA~10mA
- 本計画で加速器要素を確認

産業化に向けた技術的な課題



開発技術の産業への展開

開発の出口

本開発の展開先

他に必要な
技術等

大電流先端加速器技術
要素開発
(50MeV, 10mA)

治療用超高精細イメージングシステム

医学応用小型
高精細X線源

超高精細X線
イメージング技術

(50MeV, 10mA)

核セキュリティシステム

単色高強度γ線
発生装置

原子核共鳴散乱
γ線検出システム

(7 x 50MeV, 10mA)

核医学検査用RI生産システム

Mo⁹⁹製造施設

RI品質管理技術/
供給体制

(20-50MeV, 数~10mA)

EUVリソグラフィ用大強度光源プロトタイプ実証

大強度光源プロトタイプ機試作

EUVリソグラフィ用
大強度光源要素技術

(16 x 50MeV, 10mA)

半導体製造プロセス用量
産機開発・製造

段階的な開発シナリオの提案 (EUV-FELの場合)

第1ステップ (要素技術の確立)

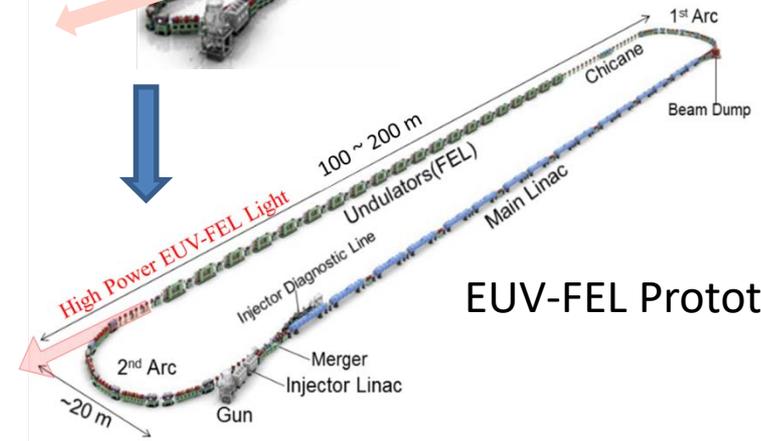
- cERLを用いたERL+FELの加速器要素技術開発と検証(KW級の近赤外のFEL光発生)
- 尖頭値の高いFEL光のハンドリング技術の基礎開発と検証(QSTおよびSACLAとの協力)



cERL

第2ステップ・フェーズ1 (EUV-FELの確立)

- EUV-FELプロト機による10kWクラスのFEL光発生
- FEL光対応光学素子技術の確立、光分配システムの設計、ハンドリングの基礎実証

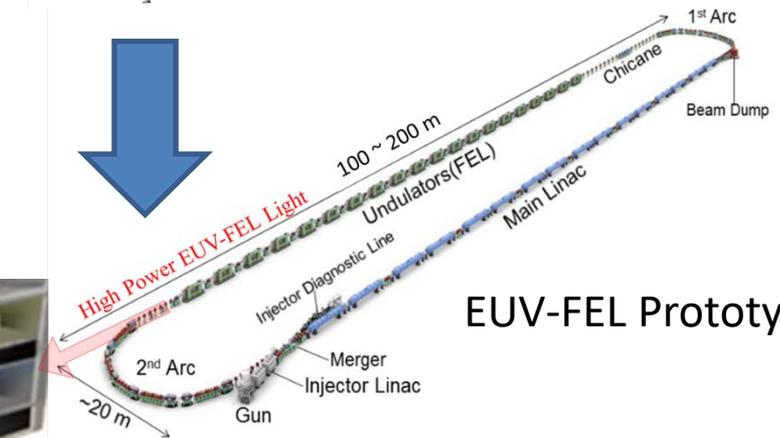


EUV-FEL Prototype

第2ステップ・フェーズ2

(EUV-FELリンググラフィの確立 (国際拠点化))

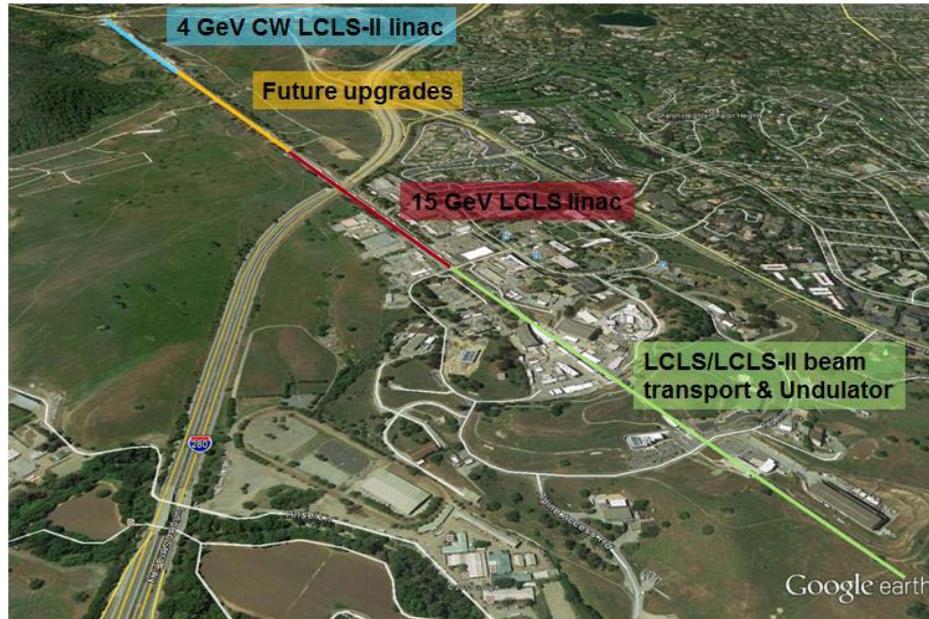
- プロト機による光分配システム試作と露光機導入による全体システム検証
- レジスト材料開発並びにプロセス開発とそれらの最適化



EUV-FEL Prototype

Clean room with EUV exposure system

世界のCW-FEL計画



LCLSII Concept by Tor Raubenheimer

SNAP 中国科学院上海应用物理研究所
Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences

Hard X Ray Free Electron Laser Facility



By Qiang Gu, Zengong Jiang,
Xudong Li at ERL17

世界のFEL計画の中のEUV-FELの位置付け

	LCLS	SACLA	FLASH	Euro-XFEL	LCLSII	上海 CW-XFEL	EUV-FEL
常・超伝導	常伝導ライナック		超伝導ライナック				
運転形態	パルス運転		ロングパルス運転		CW運転		CW運転
建設国	米国	日本	ドイツ	ドイツ	米国	中国	—
エネルギー回収	無	無	無	無	無	無し	有
パルス数/秒	120	30~60	<5000	<27000	1M	1M	162.5M
加速エネルギー(MeV)	14300	~8000	1250	17500	4000	8000	800
最短レーザー波長(nm)	0.15	0.08	4.2-52	0.05	~0.3	?	13.5
パワー/パルス(mJ)	~1	~1	<0.5	~1	~1	?	~0.1
レーザーパワー/秒(W)	~0.1	~0.1	<0.6	~30	~1000	?	>10000
ビームダンプパワー(W)	~1.5k	~0.5k	~6k	~0.3M	~1M	?	~0.1M
稼働開始/建設中/計画中	開始 2009	開始 2011	開始 2004	調整運転開始 2017	建設中 2020予定	予算化済 建設開始	計画中

See LCLSII-1.1-PR-0133

LCLS-II (SCRF) Baseline Parameters

SLAC

Parameter	symbol	nominal	range	units	EUV-FEL
Electron Energy	E_f	4.0	2.0 - 4.14	GeV	0.8
Bunch Charge	Q_b	100	10 - 300	pC	60
Bunch Repetition Rate in Linac	f_b	0.62	0 - 0.93	MHz	162.5
Average e ⁻ current in linac	I_{avg}	0.062	0.0 - 0.3	mA	10.0
Avg. e ⁻ beam power at linac end	P_{av}	0.25	0 - 1.2	MW	0.1
Norm. rms slice emittance at undulator	$\gamma\epsilon_{\perp-s}$	0.45	0.2 - 0.7	μm	0.7
Final peak current (at undulator)	I_{pk}	1000	500 - 1500	A	700
Final slice E-spread (rms, w/heater)	σ_{Es}	500	125 - 1500	keV	-
Final bunch length (rms)	τ_b	8.5	3 - 50	μm	15
Avg. CW RF gradient (powered cavities)	E_{acc}	16	-	MV/m	12.5
Photon pulse length (FWHM)	τ_{xray}	70	10 - 350	fs	100
Photon energy range of SXR (SCRF)	E_{phot}	-	0.2 - 1.3	keV	0.092
Photon energy range of HXR (SCRF)	E_{phot}	-	1 - 5	keV	
Photon energy range of HXR (Cu-RF)	E_{phot}	-	1 - 25	keV	

by Tor Raubenheimer

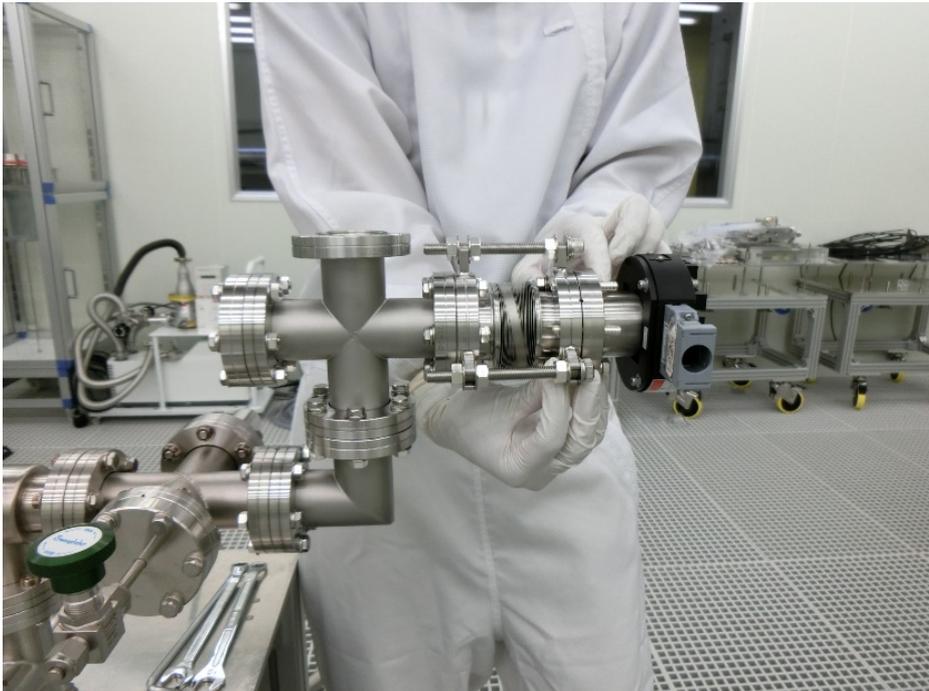
By N. Nakamura

SRF Challenges for Higher-Gradient

Key issue to achieve higher gradient in SRF cavities of CW operation is to **suppress field emission** caused by dust particles and so on.

Improvement for clean environments with dust free

Set-up of particle measurements in vacuum by using a vacuum particle counter



Test bench to confirm the higher gradient performance of SRF

Horizontal cryostat to improve particle contamination during assembly work



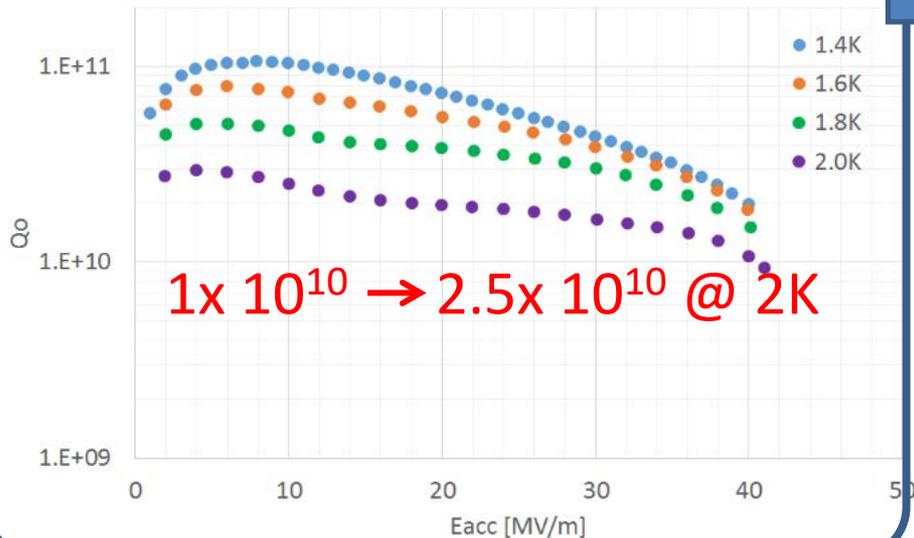
SRF for Higher-Q

$$\text{power consumption} \propto E_{\text{acc}}^2/Q$$

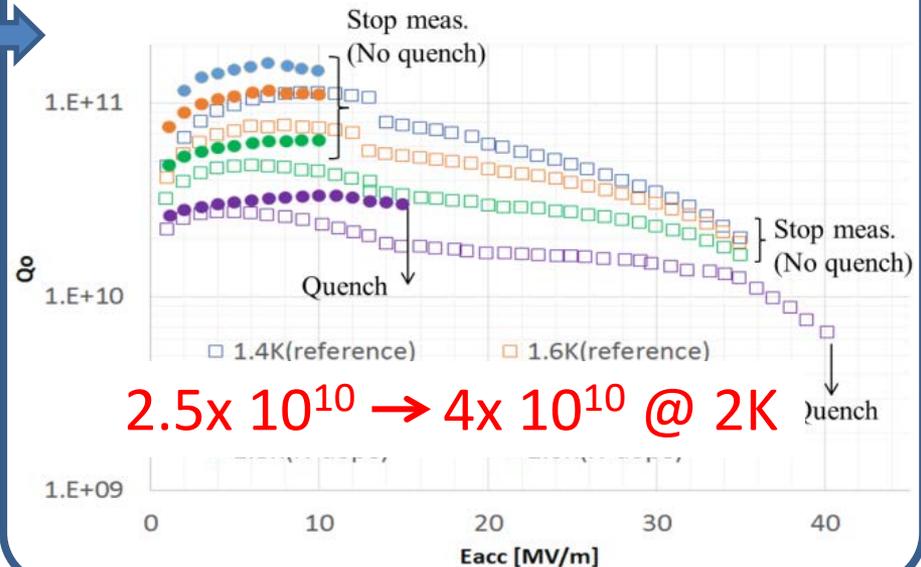
One of essential factors to achieve higher Q values is to reduce a residual magnetic field around a cavity.

A solenoid coil for cancelling the residual magnetic field

R-2(Tokyo-Denaki FG, single-cell) VT11



Improvement of Q values from normal processing to nitrogen doping treatment



まとめ

- cERLで開発されている大電流($\sim 10\text{mA}$)のライナックベースの高輝度電子ビームは以下の特徴的な産業応用への展開が考えられる。
 - EUV-FEL大強度光源(次世代半導体リソグラフィ)
 - 核セキュリティのための大強度高輝度 γ 線源
 - 医療用超高精細X線撮像装置
 - 核医学用検査用RI製造施設
- EUV-FEL光源開発に関して段階的な開発シナリオを他機関と協力して検討
- 世界で進められているCW-FEL光源の加速器仕様はEUV-FEL光源の要素技術開発で充当可能