

ERL計画推進室報告

2016年11月29日

河田洋

- cERLの運転について
- JSTへの訪問
- EUVLシンポジウム
- EUV source workshop と関係企業訪問
- EUV-FEL Workshop

cERLの運転について

cERL建設打合せで集中議論

cERL建設打合せ(第131回)

日時: 11月30日(水) 13:30 ~ 15:00

場所: 3号館7階会議室

議題:

1. cERL運転スケジュールについて
2. 2017年2-3月期cERL運転で検証すべき事項について(仮題)
3. 運転再開に向けての各グループの準備状況、必要作業、必要経費について

JSTへの訪問

- 日時:

11月17日 10～11時、JST東京本部別館

- 「大電流先端加速器技術要素開発 -コンパクトERLをベースにした将来の新しいイノベーションを見据えた加速器要素開発-」の内容を河田から説明 ⇒ 内容に関して悪い印象は無く、興味を持って対応して頂いた。

JST 関係各位

大電流先端加速器技術要素開発

- コンパクトERLをベースにした将来の
新しいイノベーションを見据えた加速器要素開発 -

2016年11月17日

高エネルギー加速器研究機構

ERL 計画推進室・室長

河田 洋

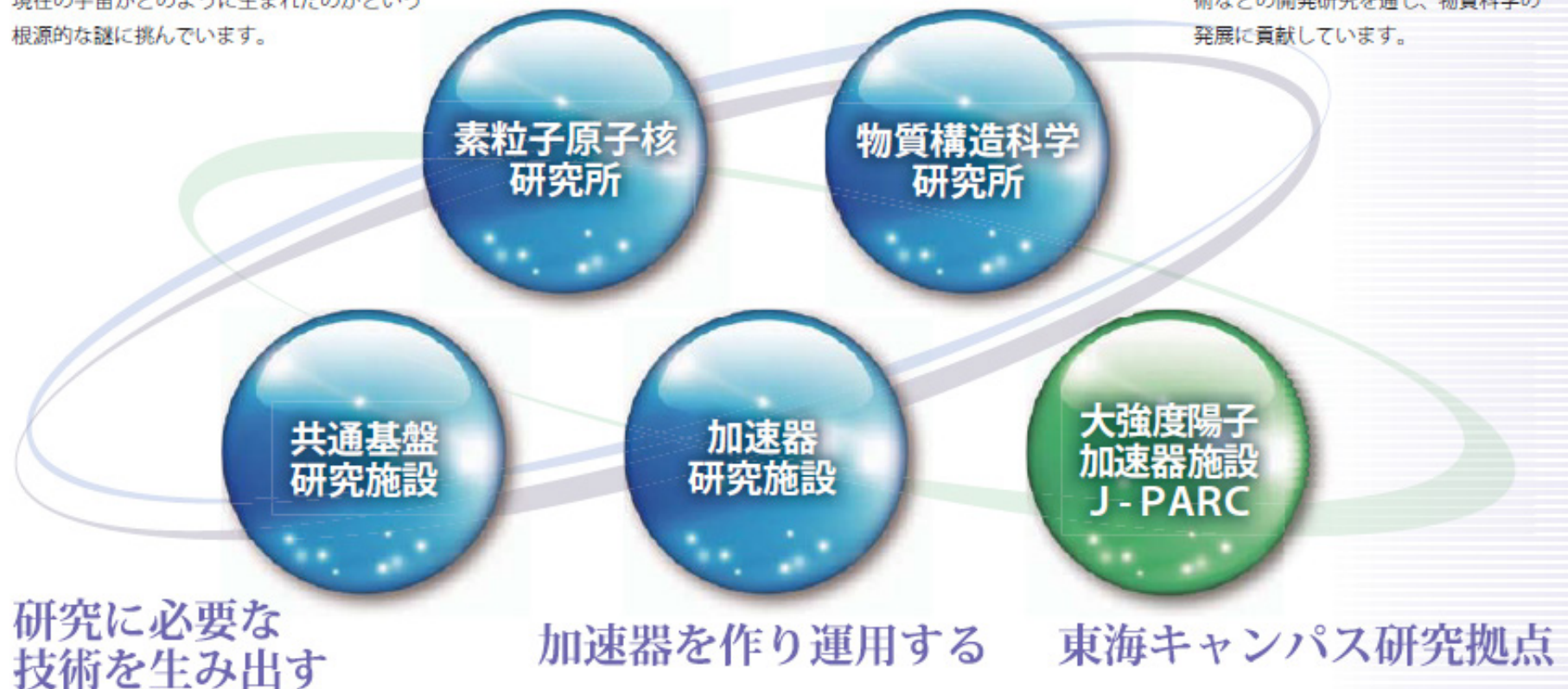
KEKとは

宇宙創成の謎を解く

素粒子原子核研究所では、素粒子や原子核のふるまいを探るため、素粒子物理学・原子核物理学の研究を実験、理論の両面から幅広く行っています。こうした研究により、私たち人間を含むありとあらゆる物質を形作る素粒子をはじめとした極微の世界の謎を解明するとともに、現在の宇宙がどのように生まれたのかという根源的な謎に挑んでいます。

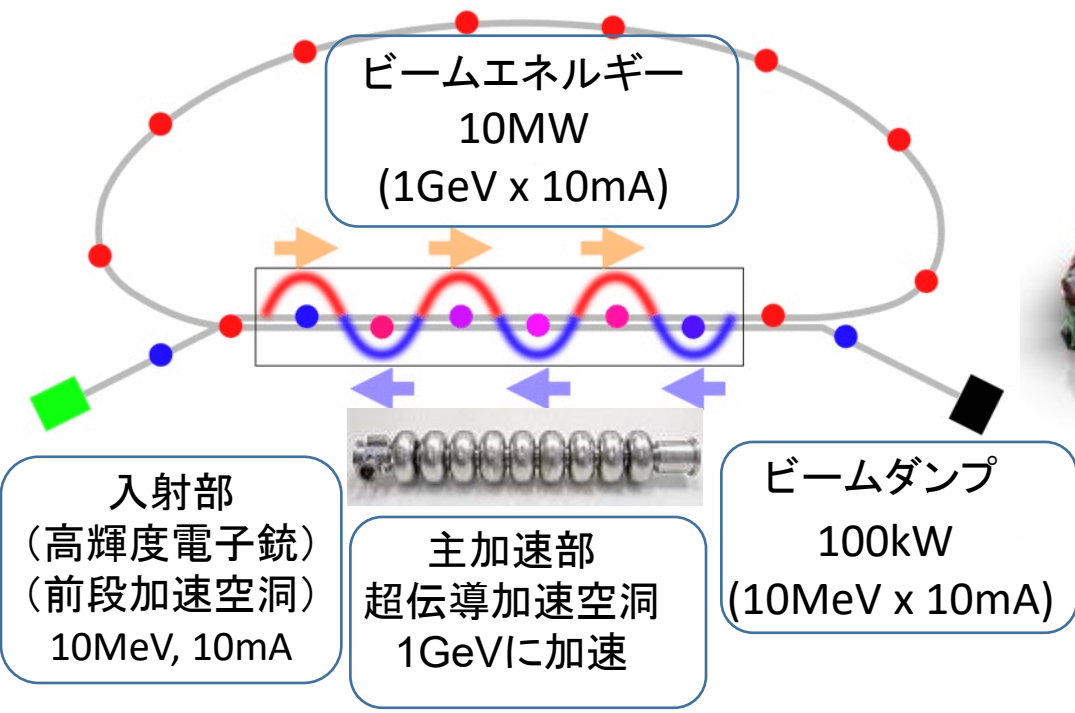
物質や生命の機能としくみを探究する

物質構造科学研究所は、加速器から発生する放射光・中性子・ミュオン・低速陽電子を利用し、原子レベルから高分子、生体分子レベルにいたる幅広いスケールの物質構造と機能を解明し、物質科学・生命科学の基礎から応用に至る研究をしています。また、ビーム生成、利用技術などの開発研究を通じ、物質科学の発展に貢献しています。



ERL(エネルギー回収ライナック)とは

- エネルギー回収による電力効率の高いライナック
- 大電流ライナックが実現できる
ビームダンプ電力の大幅な低減、
放射化問題の解決



ビームダンプ
3kW
(3MeV x 1mA)

主加速部
超伝導加速空洞
20MeVに加速

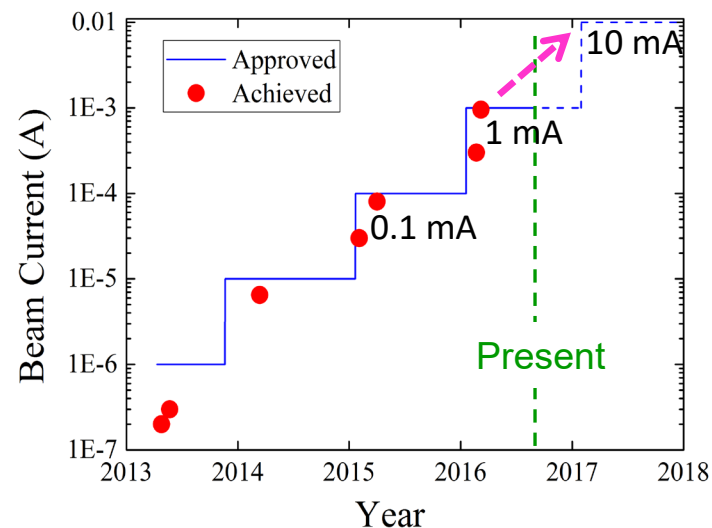
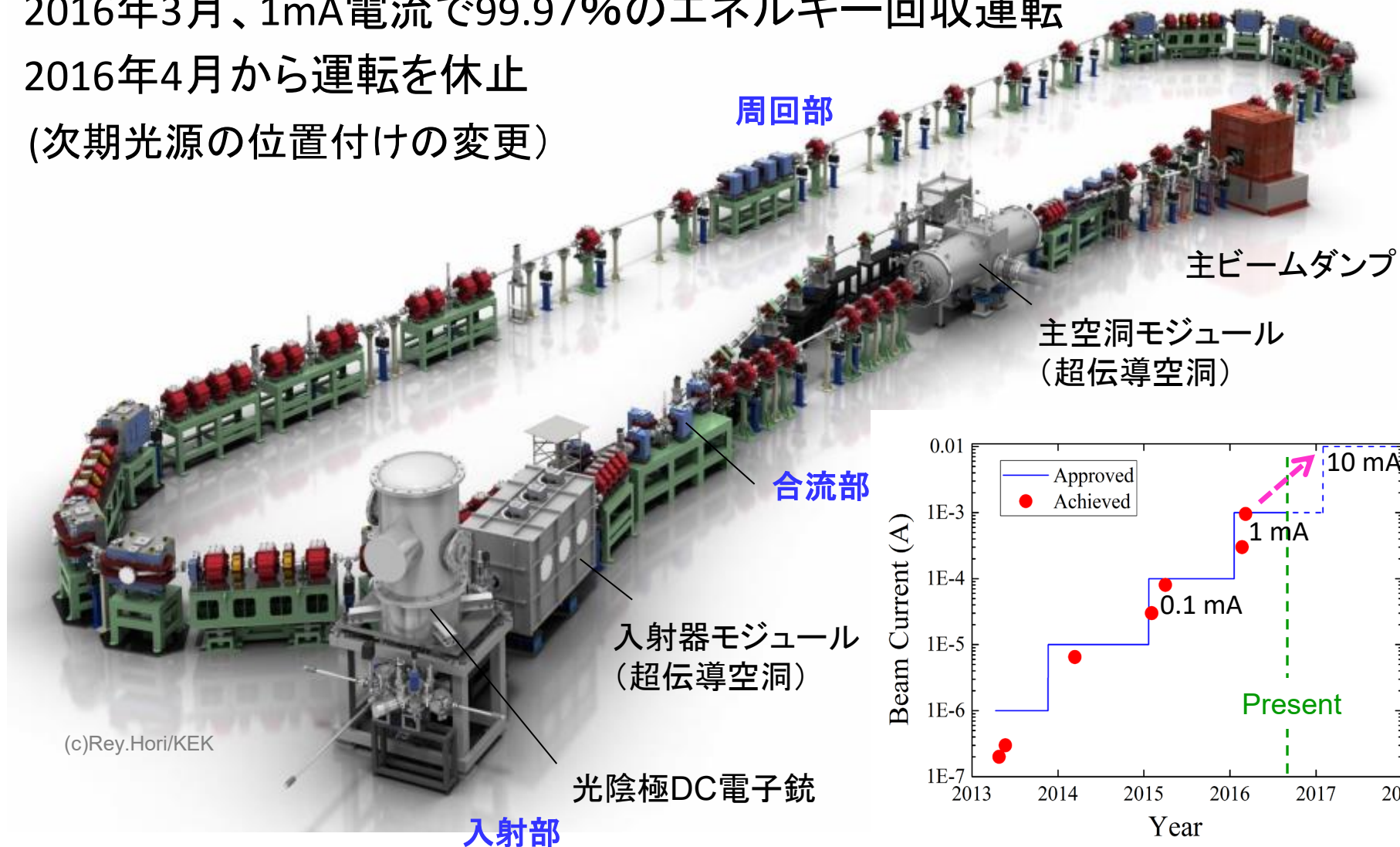
入射部
(高輝度電子銃)
(前段加速空洞)
3MeV, 1mA

既にKEKで稼働を開始
しているコンパクトERL

主加速部超伝導空洞は、戻ってきた電子を減速
フェーズで受け止める(エネルギー回収)

コンパクトERLとは？

- 10マイ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99.97%のエネルギー回収運転
- 2016年4月から運転を休止
(次期光源の位置付けの変更)



コンパクトERLの開発が導くイノベーション

項目	現在の達成値	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 医療用超高精細
X線撮像装置

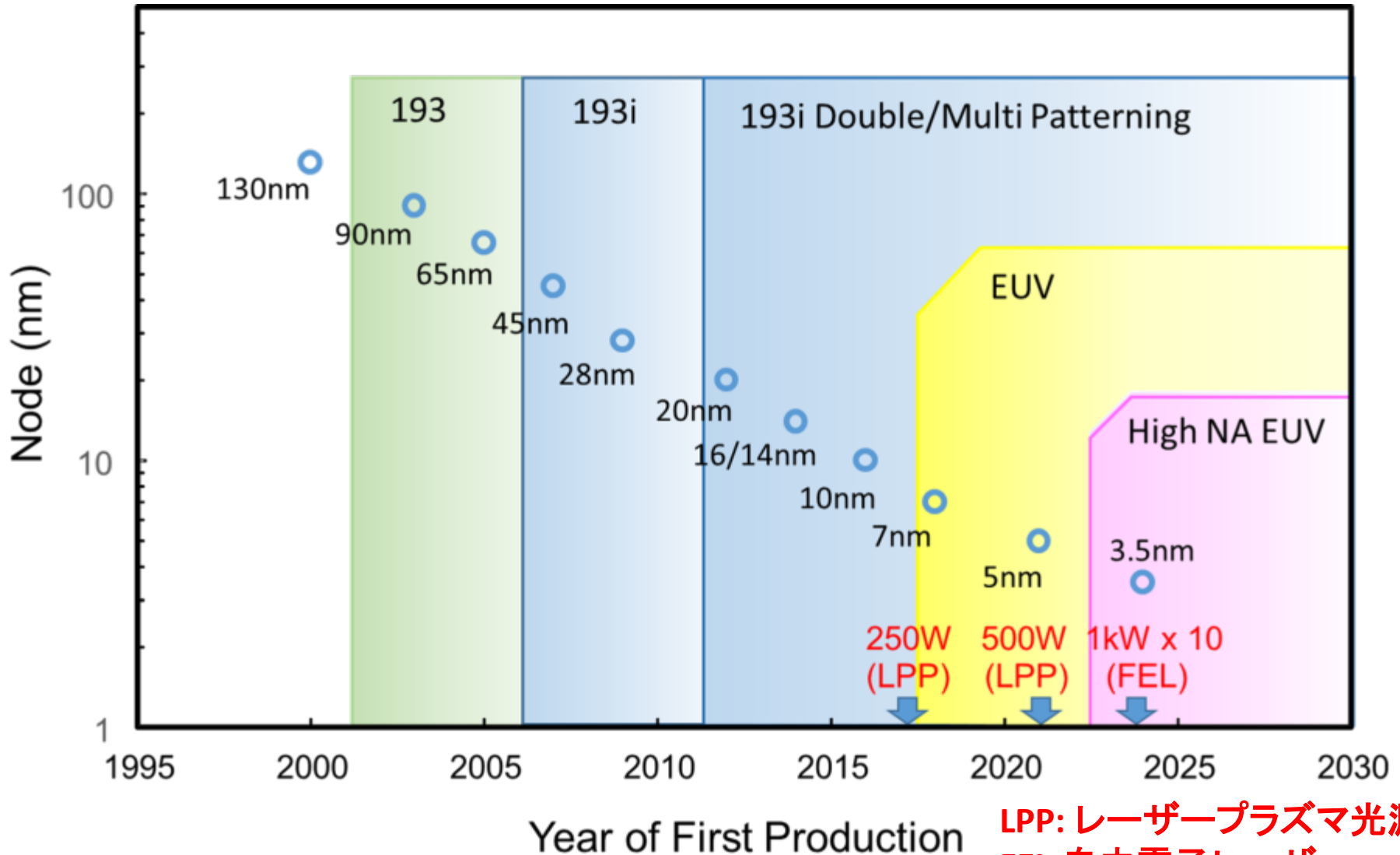
③ 核セキュリティ
関連システム

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

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

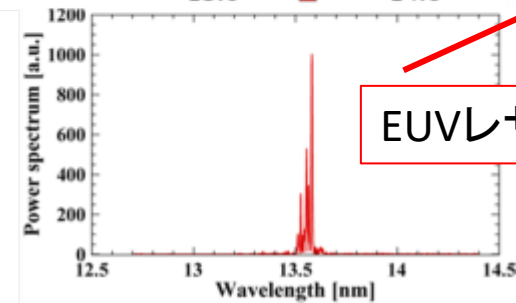
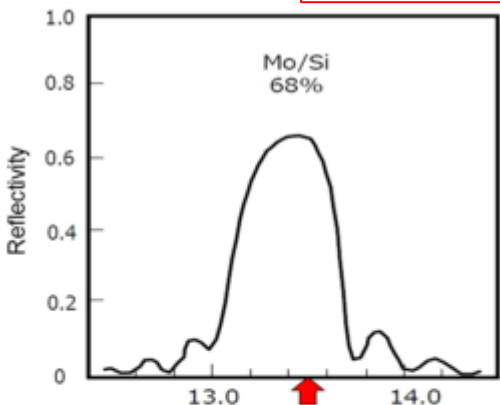


LPP: レーザープラズマ光源
FEL: 自由電子レーザー

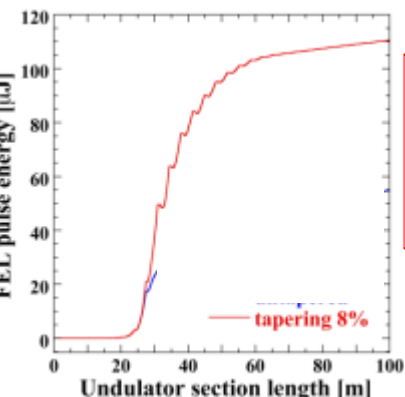
1. EUVリソグラフィ用大強度光源

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



加速器のパラメータ

項目	本計画目標値	EUV-FEL設計値
入射部エネルギー	6 MeV	10.5 MeV
ビームエネルギー	50 MeV	800 MeV
バンチ電荷	60 pC	60 pC
パルス数/秒	162.5 M	162.5 M
平均電流	10 mA	10 mA
電子ビームの輝度	<1 mm mrad	0.6 mm mrad
加速勾配	12.5 MV/m	12.5 MV/m
EUVの波長	/	13.5 nm
EUVの強度	/	>10 kW

1. EUVリソグラフィ用大強度光源

代表的な現在稼働・建設・計画中FELの中での位置付け

	LCLS	SACLA	FLASH	Euro-XFEL	LCLSII	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	
建設国	米国	日本	ドイツ	ドイツ	米国	日本
エネルギー回収	無	無	無	無	無	有
パルス数/秒	120	30~60	<5000	<27000	1M	162.5M
加速エネルギー (MeV)	14300	6000~ 8000	1250	17500	4000	800 0.01@入射部
最短レーザー波 長(nm)	0.15	0.08	4.2-52	0.05	~0.3	13.5
光エネルギー/ パルス(mJ)	~1	~1	<0.5	~1	~1	~0.1
光エネルギー/ 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	~0.5M	~1M	~0.1M
稼働開始/建設 中/計画中	開始 2009	開始 2011	開始 2004	建設中 2017予定	建設中 2020予定	計画中

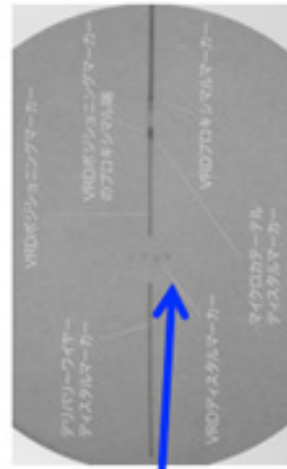
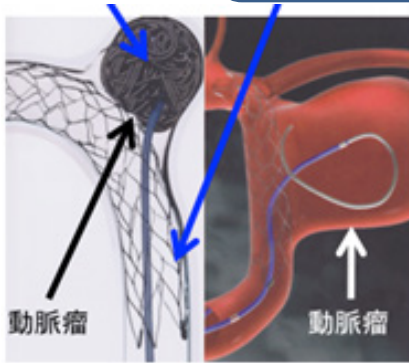
2. 医療用超高精細X線撮像装置

脳神経外科での現場から

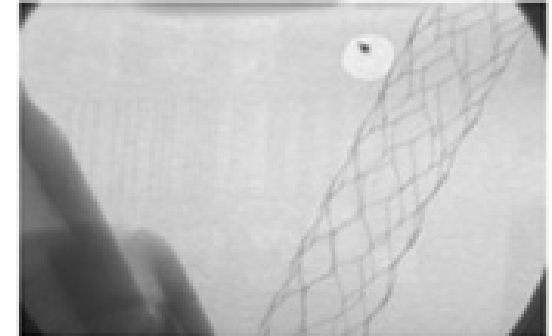
脳神経外科の血管内手術

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



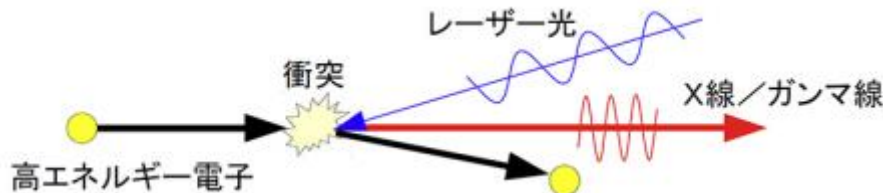
大型放射光施設を用いると



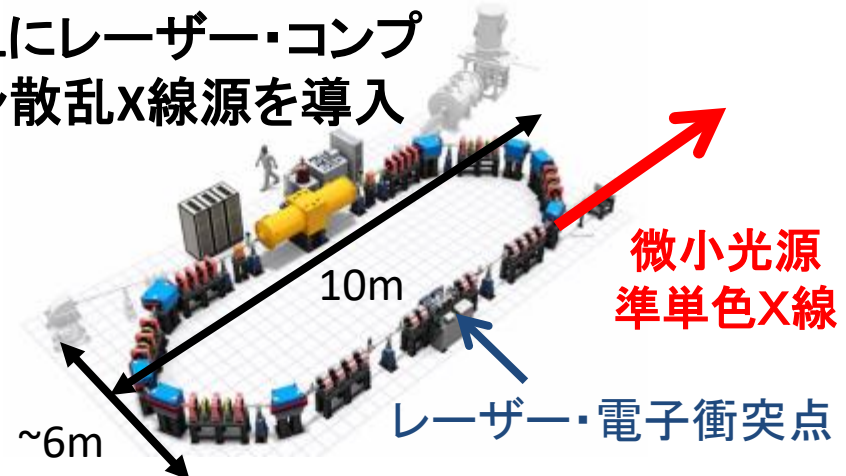
筑波大学脳神経外科グループ提供

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



2. 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 μ m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

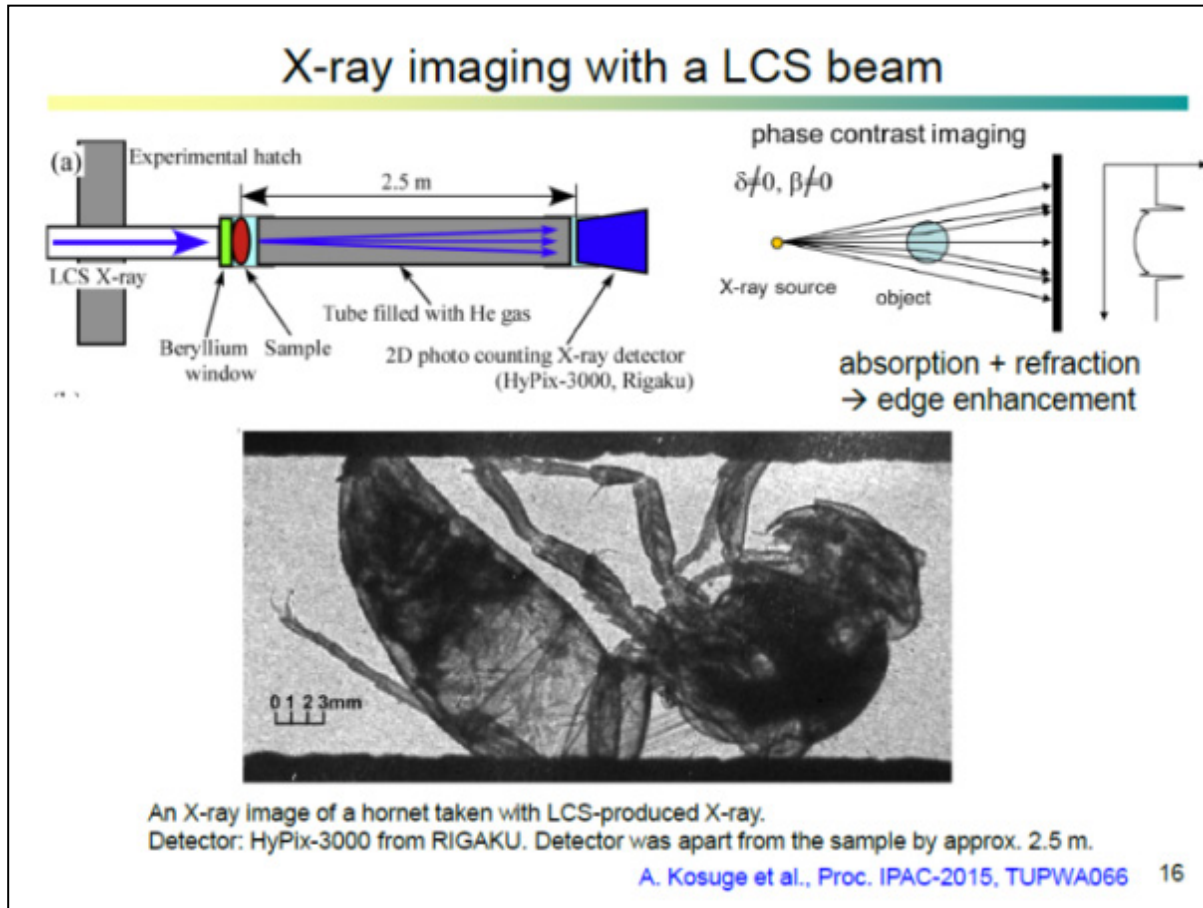
2014年3月の実績

X線波長 0.18nm
露光時間 600秒
@20 MeV, 0.1mA

本開発

X線波長 0.03nm
露光時間 1秒
@50 MeV, 10mA

医学応用研究の開始



3.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

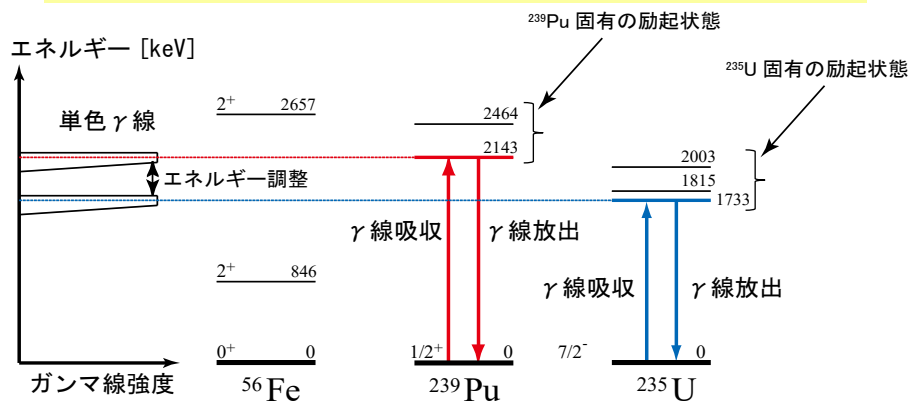
- ・福島原発から溶融燃料が2021年から取り出される予定
- ・溶融燃料の核物質測定が必須



核物質の非破壊検知

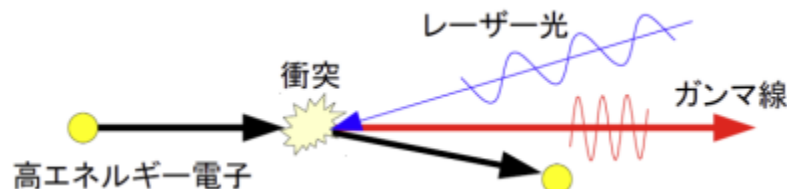
核物質の非破壊測定

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

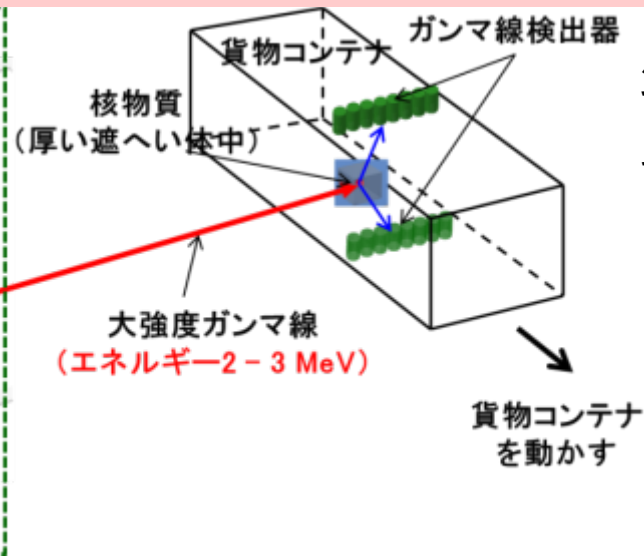
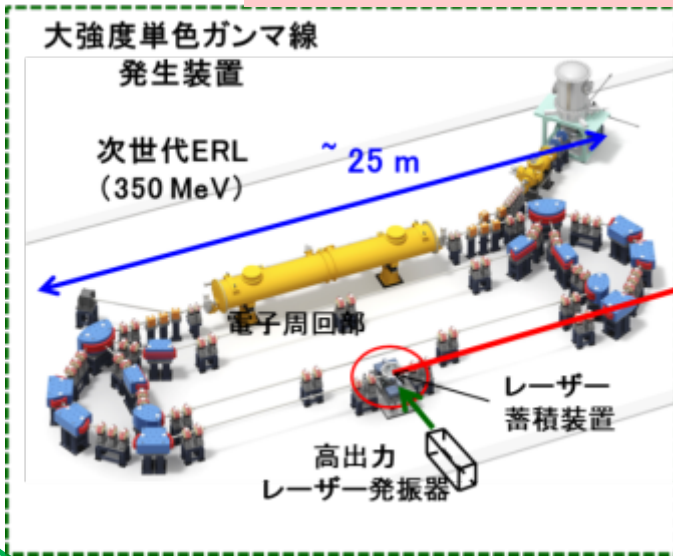
レーザーコンプトン散乱(γ 線発生)



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

3. 核セキュリティ関連システム

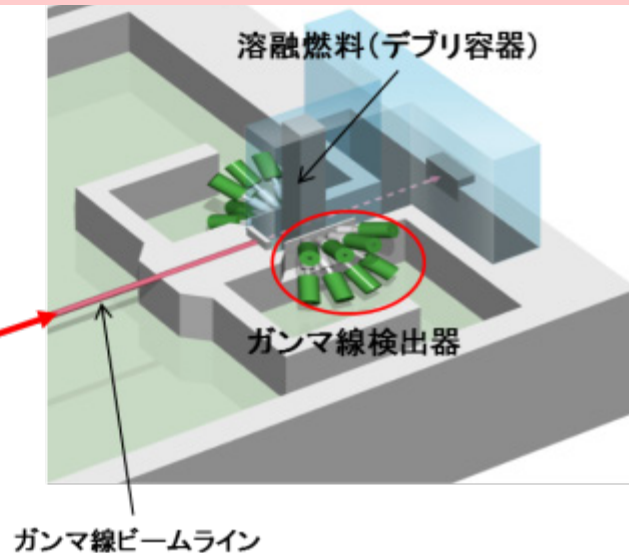
核物質非破壊検知装置を港湾に設置(核テロに対する水際作戦)



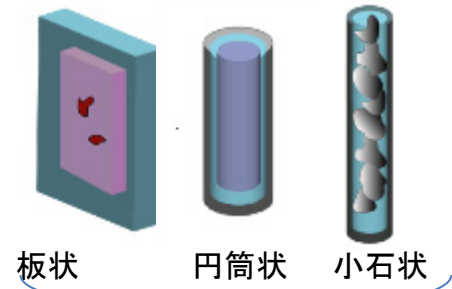
- 核物質の存在が疑われるコンテナの部位にガンマ線を照射
- 共鳴散乱により核物質識別して検知する



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)

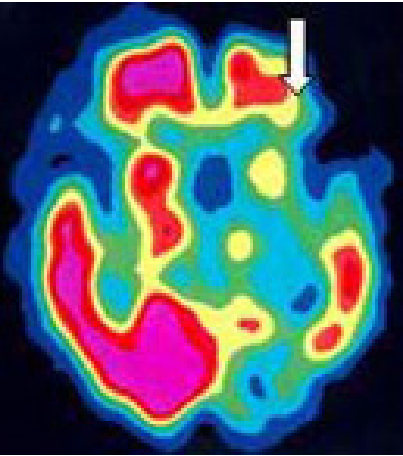


想定される取り出し形態

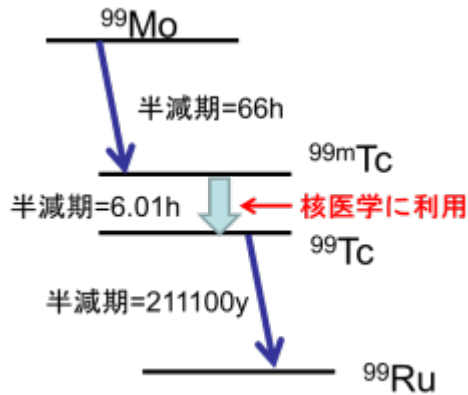


どの形状でもPu/Uの質量測定可能

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

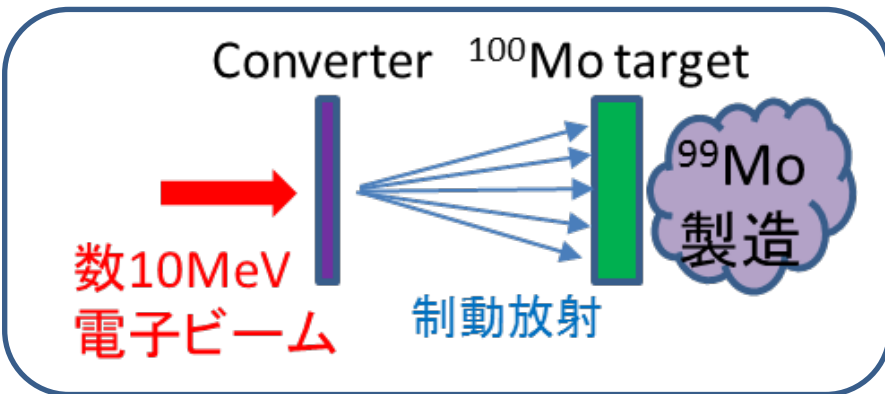
- ^{99}Mo は核医学診断にて利用件数が最も多いTc製剤の原料、100%を輸入に依存
- 空路安定輸送への不安 (過去に火山噴火により問題発生)
- ほとんどの ^{99}Mo は高濃縮ウランの原子炉で製造
- 原子炉の老朽化により、今後の安定供給が大きな課題

安定供給に向けた加速器による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



本研究開発目標値の実現は、
大電流先端加速器が拓く
新しいイノベーションの入り口

イノベーションを実現する体制

- 例えば、EUV-FELに関して以下の研究会を既に組織している

EUV-FEL光源産業化研究会



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)

医療用超高精細X線撮像装置

医学応用小型
高精細X線源

(50MeV, 10mA)

超高精細X線
イメージング技術

核セキュリティ関連システム

単色高強度 γ 線
発生装置

(7 x 50MeV, 10mA)

原子核共鳴散乱
 γ 線検出システム

核医学検査用RI製造施設

核医学検査用
RI製造機

(20-50MeV, 数~10mA)

RI品質管理技術/
供給体制

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

(16 x 50MeV, 10mA)

EUVリソグラフィ用
大強度光源要素技術

半導体製造プロセス用量
産機開発・製造

EUVL Symposium

<http://euvl2016.org/>

2016 International Symposium on
Extreme Ultraviolet Lithography

Hiroshima, Japan 24 - 26 October, 2016



<印象>

- EUVLはいよいよ量産体制の一步前に到達
(夜明け前)
- LPPは100W程度で80%の稼働率を上げている

Keynote / Invited Speakers

Keynote Speakers



Obert Wood is a Principal Member of Technical Staff in the Strategic Lithography Technology Department at GLOBALFOUNDRIES. He was a Member of Technical Staff at Bell Laboratories for 34 years and has extensive experience in extreme-ultraviolet lithography, ultra-high intensity lasers and laser surgery. Obert received his B.S., M.S. and Ph.D. Degrees from the University of California at Berkeley in Electrical Engineering in 1964, 1965 and 1969. He is author or co-author of 271 technical papers and inventor or co-inventor of 27 patents and is a fellow of the Optical Society of America and SPIE, a senior member of IEEE, and a member of the AAAS, the American Physical Society, and the American Vacuum Society.

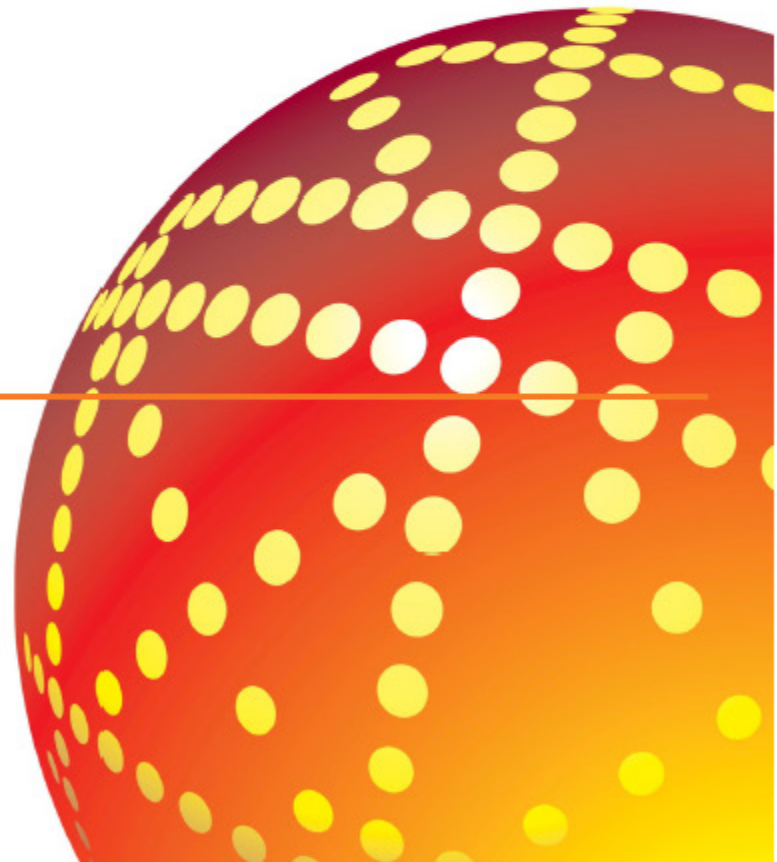
EUV Lithography: Past, Present & Future



GLOBALFOUNDRIES

Obert R Wood II

International Symposium on EUV Lithography
Hiroshima, Japan
26 October 2016

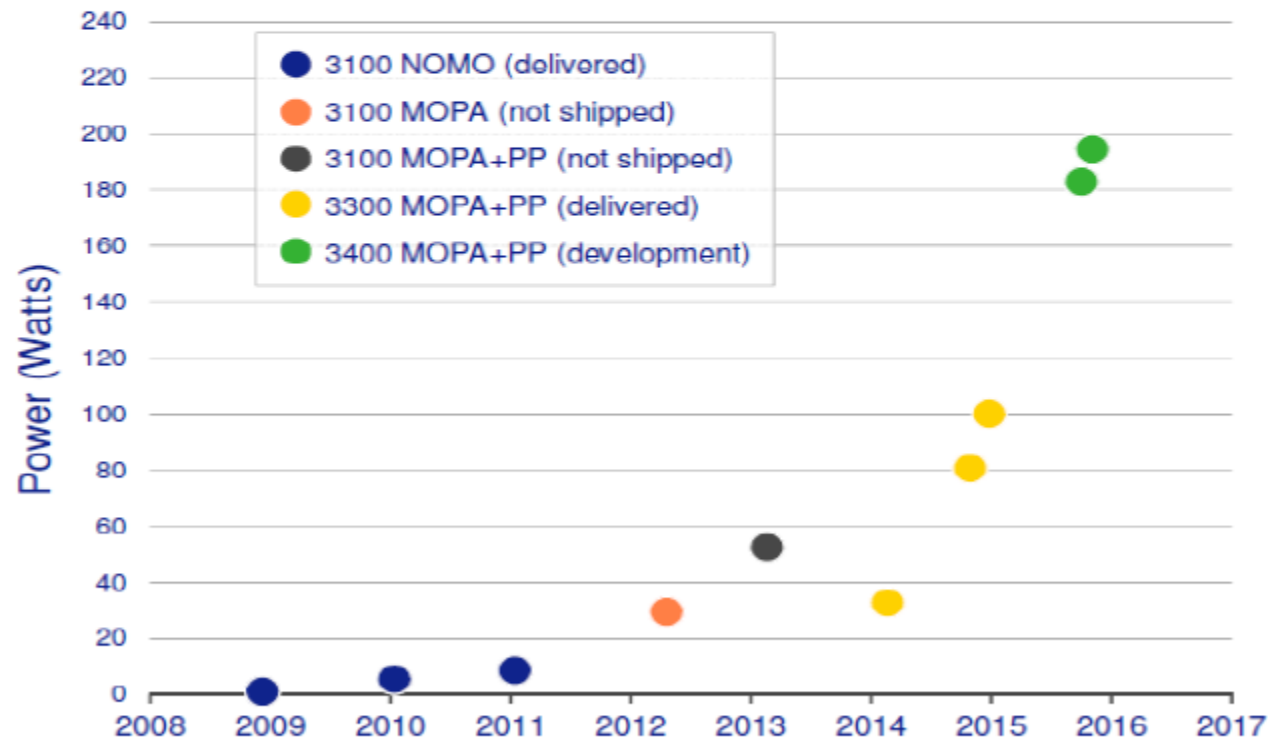




EUV Source Power Progress

- 7 nm node HVM Source Power Requirement: 250 W at IF (~1000 wafers per day @ Product Dose)

Progress in LPP EUV source power at IF since 2009

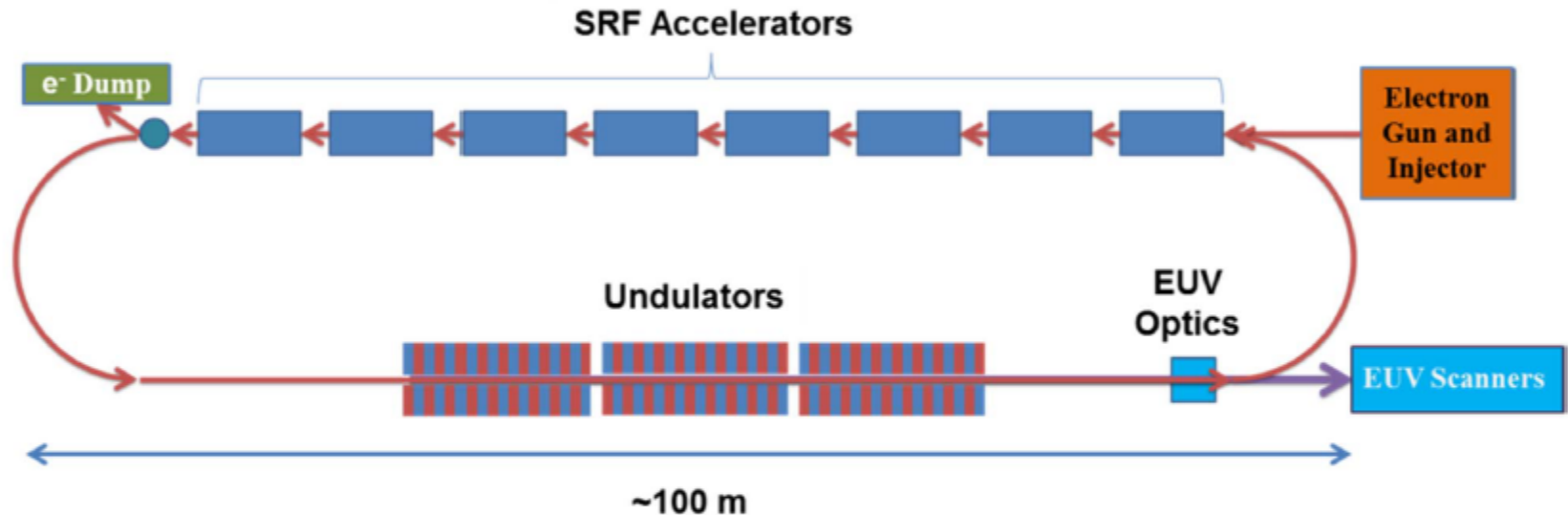


Ref: A. Pirati, "EUV lithography performance for manufacturing: status and outlook," SPIE Advanced Lithography, 9776-10, San Jose, CA, 23 Feb. 2106.



More Powerful & Efficient EUV Source

- Key components of a free-electron laser (FEL) EUV source



Item	Target	Motivation/Implication
Power	>20 kW	Ten 1kW scanners (50% transport loss)
Availability	>99%	Some redundant system hardware required
CoO	~\$250M CapEx, ~\$20M OpEx	2x better than CoO for 10 LPP sources
General Configuration	Energy Recovery LINAC @ ~2K SASE Output	Maximize efficiency & minimize cost
Timing	TBD	To intercept high-NA EUV scanner insertion

Ref. E. Hosler et al., "Considerations for a free-electron-laser based extreme-ultraviolet lithography program," Proc. SPIE 9422, 94220D (2015).

EUV Source Workshop とASML訪問

- 11月7-9日： アムステルダムでEUV Source Workshop
<http://campaign.r20.constantcontact.com/render?m=1101919912805&ca=8ad06445-cdc7-4a60-97db-67f536695d65>
プロシーディングは上のサイトに公開されている。
- 11月10日： 関係企業訪問

EUV-FEL Workshop

日時: 12月13日(火曜日)

場所: 秋葉原UDX 4F NEXT1

http://pfwww.kek.jp/PEARL/EUV-FEL_Workshop/

参加申し込み締め切り

12月9日15:00まで



The poster features a dark background with a bright light source on the right, creating a lens flare effect. The title 'EUV-FEL WORKSHOP' is prominently displayed at the top in white, with 'ワークショップ' (Workshop) written in smaller characters above 'WORKSHOP'. Below the title, the main theme is written in white: '加速器科学が拓く革新的イノベーション' (Innovations opened by accelerator science) and '～半導体 LSI 製造プロセス用 EUV 光源をめざして～' (Aiming for EUV light sources for semiconductor LSI manufacturing processes). A yellow banner across the middle contains the event details: '参加費 無料' (Free participation fee, 120 seats) and '開催 2016 12.13 Tue 10:00-17:00'. The bottom section is divided into two columns. The left column lists 'web 申込み' (web registration) with a QR code and deadline, '開催場所' (venue) with another QR code, and 'お問い合わせ' (contact information). The right column lists '基調講演' (keynote) by Shintaro Yamachi and '招待講演' (invitation lecture) by Hidemi Ehtushi. At the bottom, a speaker for 'EUV Lithography Industrialization and future outlook' is listed as Junji Miyazaki. The footer contains the organizing institutions and logos.

ワークショップ
EUV-FEL WORKSHOP

加速器科学が拓く革新的イノベーション
～半導体 LSI 製造プロセス用 EUV 光源をめざして～

参加費 無料
定員 120 名

開催 2016 12.13 Tue 10:00-17:00

web 申込み
申込み締切 12月7日(水)まで
QRコード
UDX access
http://www.kek.jp/PEARL/EUV-FEL_Workshop/

開催場所
秋葉原 UDX 4F 「NEXT-1」
QRコード
UDX access
<http://www.udx.jp/access.html>

お問い合わせ
高エネルギー加速器研究機構
研究支援戦略推進部
大学・産業連携推進室
TEL.029-879-6239

基調講演
「Big Data時代のCognitive Computingに向けたNeuromorphic Device」
"Neuromorphic devices for Cognitive Computing in Big Data era"
日本 IBM 東京基礎研究所 サイエンス&テクノロジー 部長 新川博幸氏 山道 新太郎 氏
IBM Japan Senior Manager Shintaro Yamachi

招待講演
「半導体集積回路の微細化とEUVリソグラフィー」
"Scaling of Semiconductor Integrated Circuits and EUV Lithography"
[産] 先端プロセス基盤技術センター 代表取締役社長 石内 秀美氏
IMEC President Hidemi Ehtushi

"EUV Lithography Industrialization and future outlook"
エーエスエムエー(株)テクノロジープロパゲーションセンター ディレクター 宮崎 順二 氏
ASML Japan Co., Ltd. Technology Development Center Director Junji Miyazaki

主催: EUV-FEL 光源産業化研究会、高エネルギー加速器研究機構 共催: 産業界総合研究所 後援: TIA

