

将来リソグラフィ用EUV-FEL光源

中村 典雄^{A)}, 加藤 龍好^{A)}, 阪井 寛志^{A)}, 土屋 公央^{A)}, 谷本 育律^{A)}, 本田 洋介^{A)}, 宮島 司^{A)}
島田 美帆^{A)}, 山本 将博^{A)}, 谷川 貴紀^{A)}, 田中 織雅^{A)}, 帯名 崇^{A)}, 河田 洋^{A)}

^{A)} 高エネルギー加速器研究機構 (KEK)

関連するポスター発表（本学会）

- TWSP27, 島田 美帆他, 「KEKコンパクトERLの現状」
- TUP27, 坂本 文人他, 「光伝搬に外部境界条件を組み込んだ自由電子レーザーのシミュレーション」
- THP25, 谷川 貴紀他, 「Compact ERLにおけるFEL強度増強に向けた光共振器型FELのシミュレーション」
- THP27, 加藤 龍好他, 「EUV-FELへの超伝導アンジュレータの導入可能性の検討」
- THP46, 本田 洋介他, 「バンチエネルギーチャープとテーパーアンジュレータによるFEL発振制御の試験にむけて」
- THP57, ナマ プラギヤ他, 「1.3 GHz cERL入射器空洞用試作カップラーを用いた大電力試験結果の報告」
- FRP26, 谷川 貴紀他, 「次世代EUVリソグラフィー用高出力EUV-FELにおける偏光制御シミュレーション」
- FRP27, 加藤 龍好他, 「EUV-FELの再生増幅化に必要な光フィードバックと光取り出しの検討」

発表内容

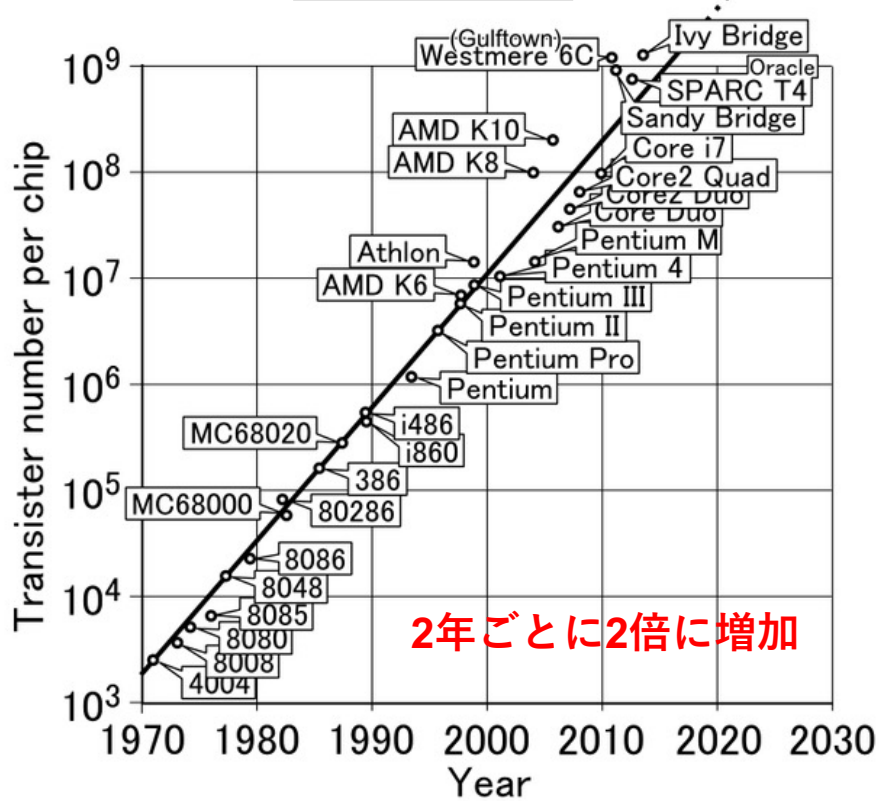
- 背景
- EUV-FEL光源の概要と特長
- cERLを用いたEUV-FEL光源の概念実証
- まとめ

発表内容

- 背景
- EUV-FEL光源の概要と特長
- cERLを用いたEUV-FEL光源の概念実証
- まとめ

半導体リソグラフィ

ムーアの法則



$NA = n \sin \theta$
 n : 屈折率 ($n=1$ for air)
 θ : レンズ開口角の1/2

光源の波長

Hg lamp g-line 436 nm



Hg lamp i-line 365 nm



KrF laser 248 nm

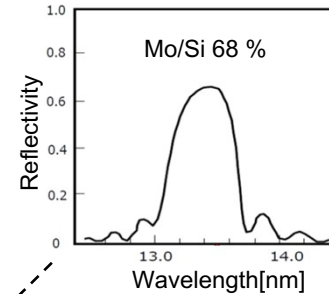


ArF laser 193 nm (+immersion)



EUV 13.5 nm

Mo/Si多層膜ミラーの反射率曲線



分解能

$$R = k_1 \frac{\lambda}{NA}$$

λ : 光源の波長
 NA : 開口数
 k_1 : プロセスパラメータ

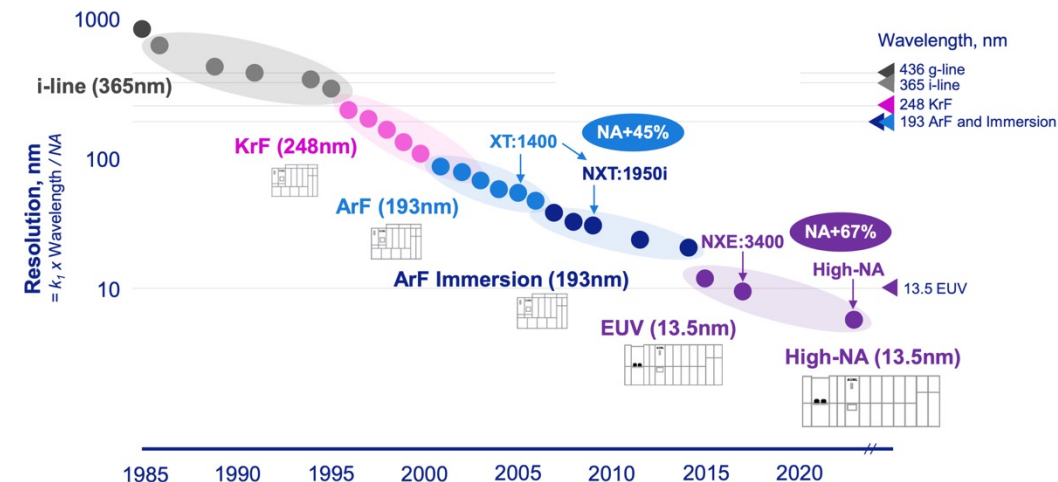
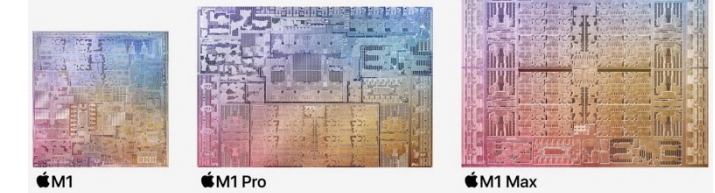
EUVによる先端半導体チップ

2019年頃から既に量産化されている。

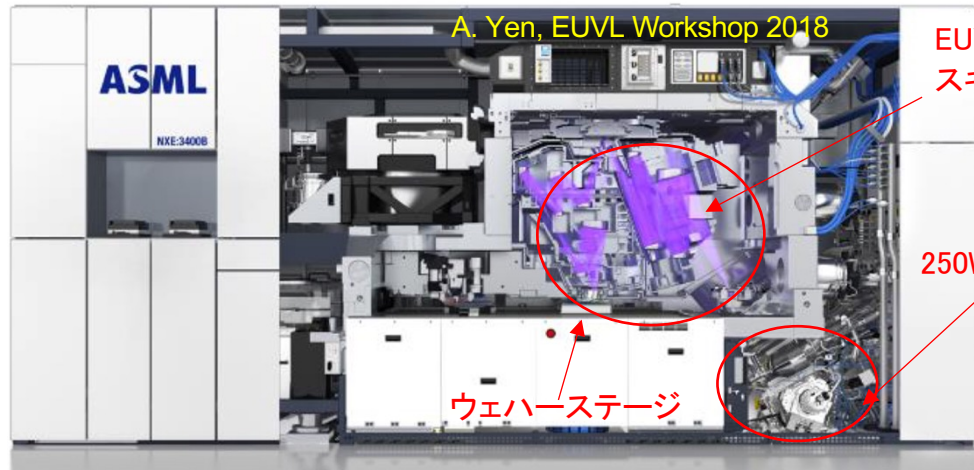


<https://semiconductor.samsung.com/processor/mobile-processor/exynos-9825/>

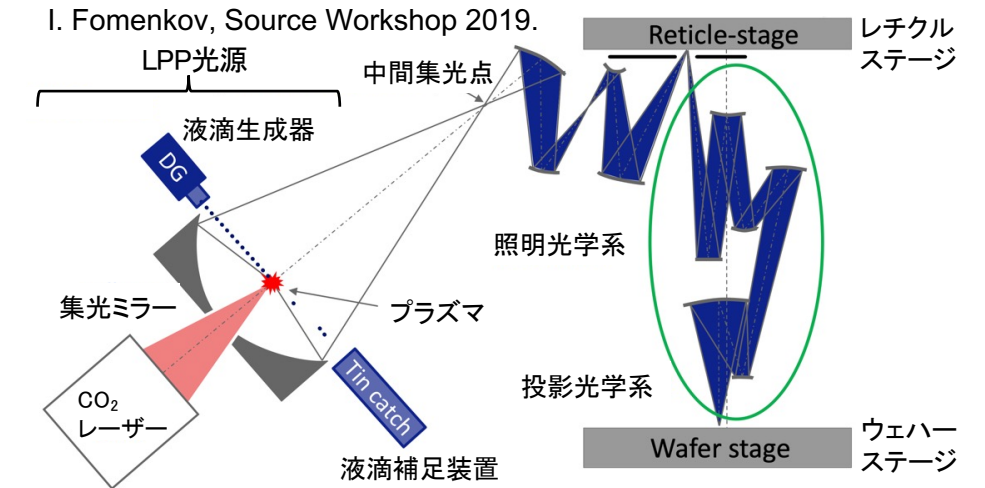
Apple computer chips 5 nm node



EUVリソグラフィの現状と課題



EUVリソグラフィ用露光装置 (NXE3400B from ASML)



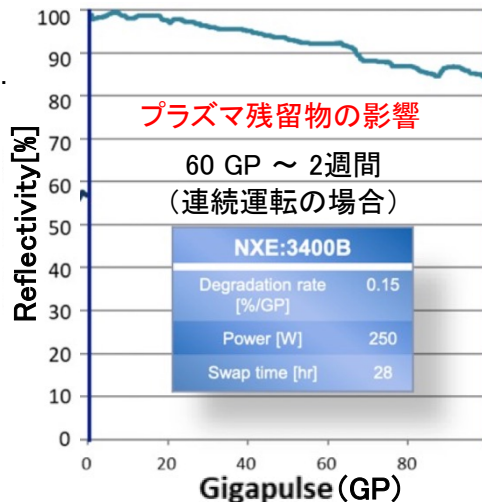
レーザー生成プラズマ(LPP)光源とEUVスキャナーシステム

I. Fomenkov,
Source Workshop 2019.

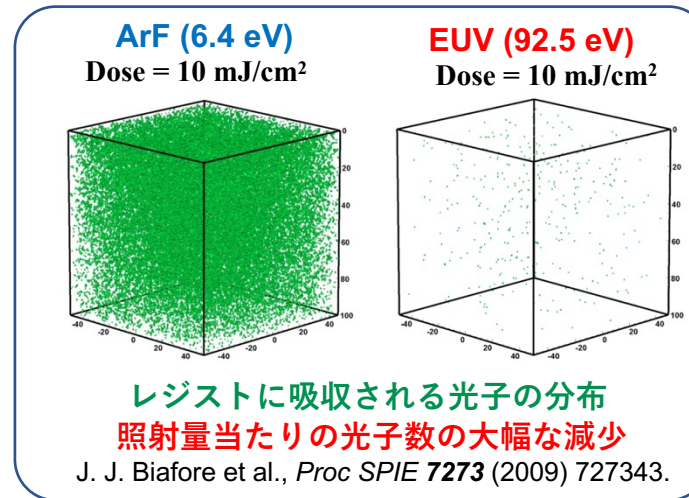
劣化率: 0.15%/GP
交換時間: 28時間
(NXE:3400B)



劣化率: 0.05%/GP
交換時間: 8時間
(NXE:3400C,3600D)
顕著な改善はあるが、
1年に6回程度交換

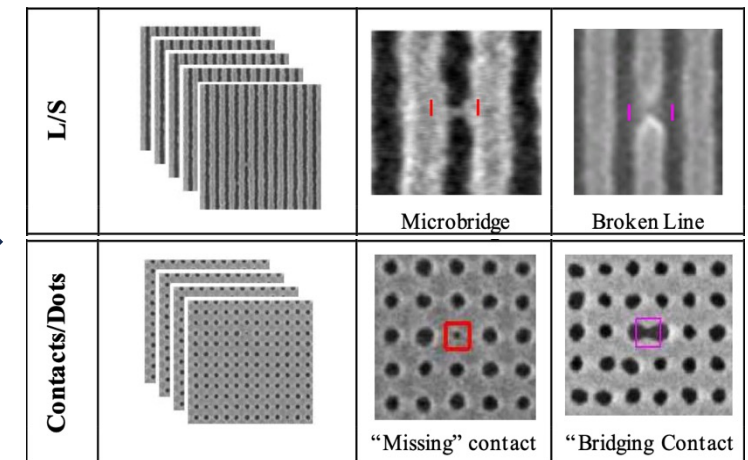


EUV集光ミラーの反射率劣化



ストカスティック効果とそれによるパターン欠陥例

P. De Bisschop et al., Proc SPIE 9048 (2014) 904809.



ストカスティック効果を抑えて高スループット・高分解能を実現するために将来より強力な光源が求められる。

国内の動向



次世代半導体プロジェクトの体制

<https://www.meti.go.jp/press/2022/11/20221111004/20221111004-1.pdf>

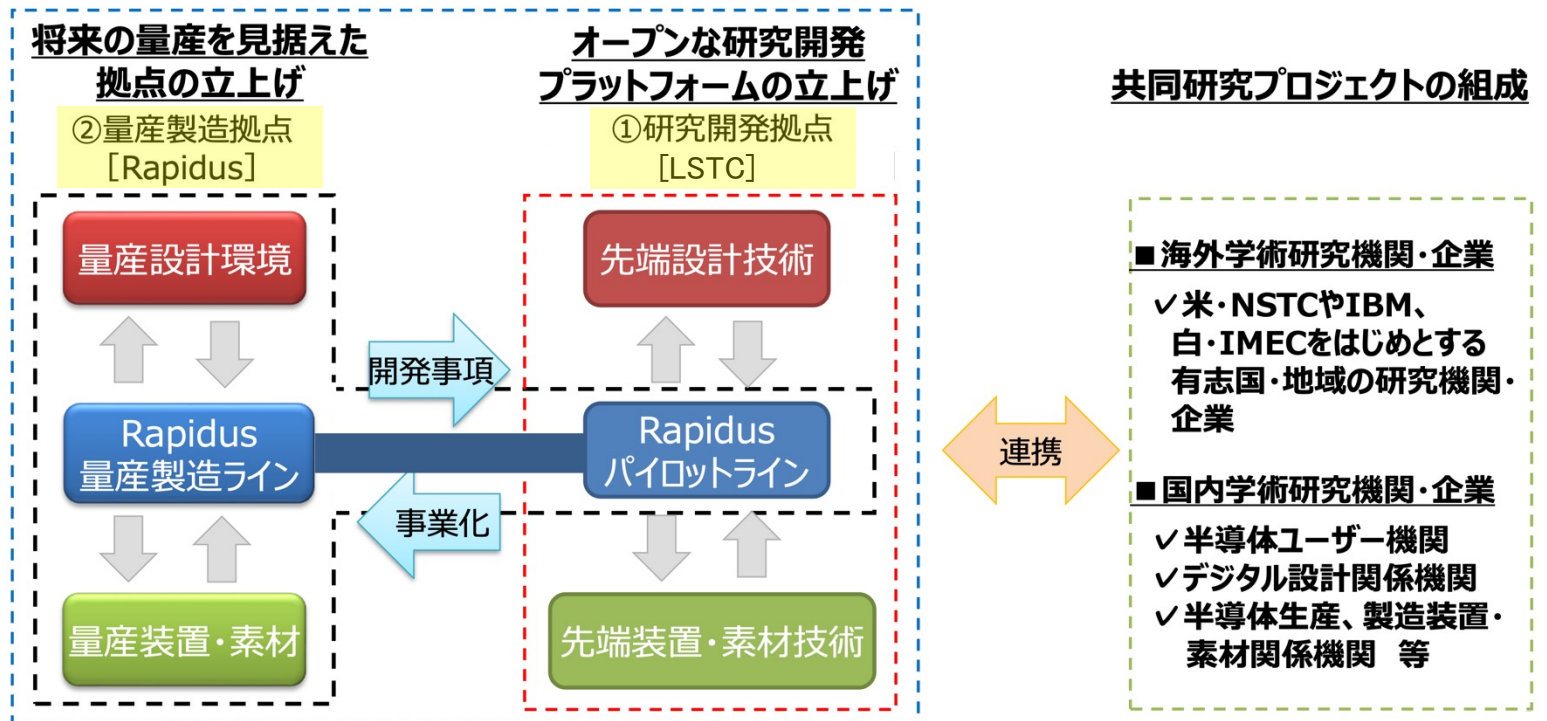
- 次世代半導体 (Beyond 2nm) の短TAT量産基盤体制の構築実現に向け、
 - ① 先端設計、先端装置・素材の要素技術に係るオープンな研究開発拠点を立ち上げる。
[日本版NSTC (LSTC) ※] ※Leading-edge Semiconductor Technology Center (最先端半導体技術センター)
 - ② 将来の量産体制の立上げを見据えた量産製造拠点を立ち上げる。[Rapidus (株)]

Rapidus (株) の設立 (2022.8.10)
5年後に2nmの先端半導体の受託生産を開始することが目標。国内8社から出資を受ける。

<https://www.sankei.com/article/20221111-OGNQOL3KWNJ7VKRSXWNUUDXYUI/>



東・小池両氏のcERL見学 (2021.6.14)



<LSTC参加機関>

(国研)物質・材料研究機構、(国研)理化学研究所、(国研)産業技術総合研究所、東北大学、筑波大学、東京大学、東京工業大学、大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構、Rapidus株式会社

高エネルギー加速器研究機構(KEK)はLSTC参加機関の1つになっている。

発表内容

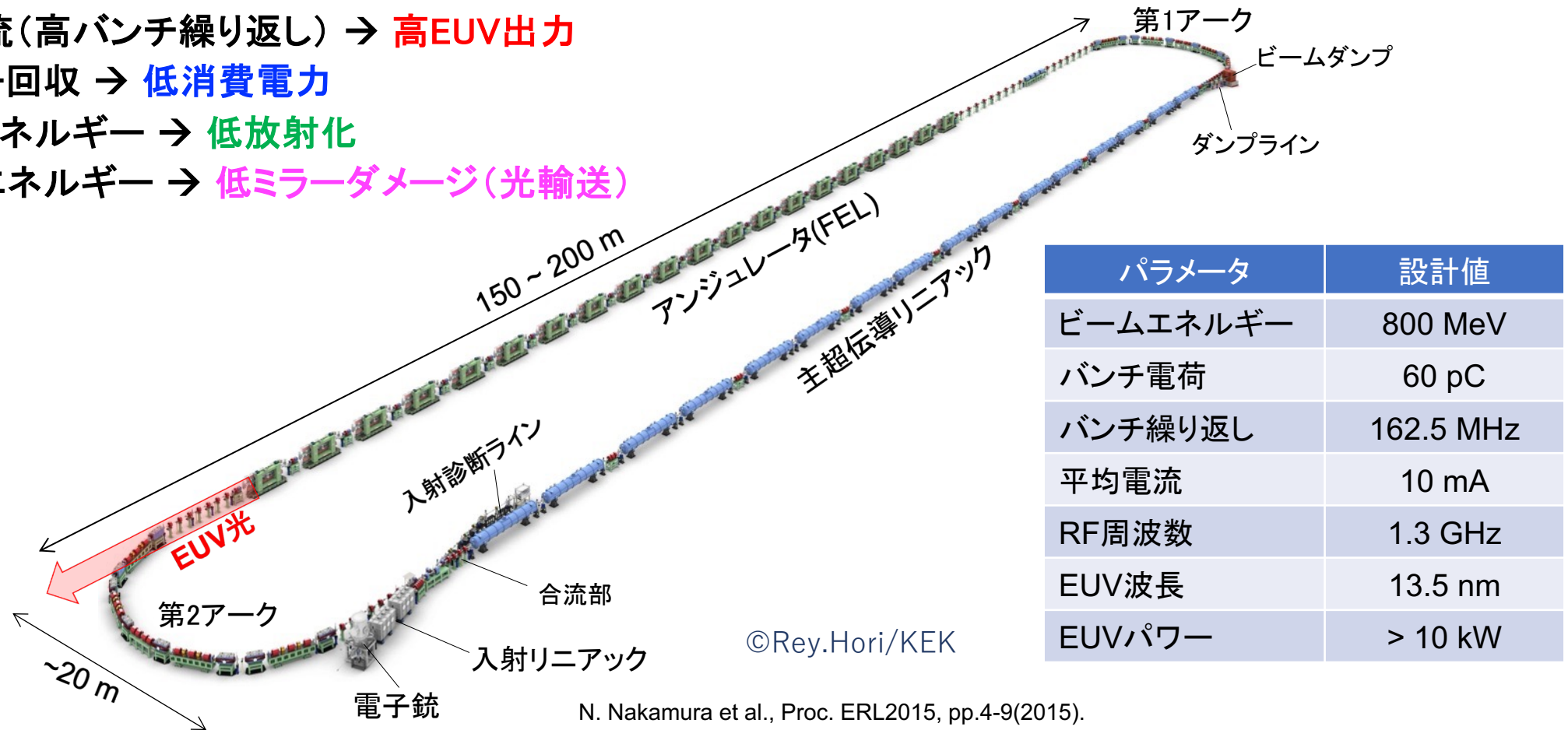
- 背景
- EUV-FEL光源の概要と特長
- cERLを用いたEUV-FEL光源の概念実証
- まとめ

EUV-FEL光源

エネルギー回収リニアック(ERL)を用いたEUV-FEL光源

ERL-FELを用いる理由(利点)

- (1) 高平均電流(高バンチ繰り返し) → **高EUV出力**
- (2) エネルギー回収 → **低消費電力**
- (3) 低ダンプエネルギー → **低放射化**
- (4) 中パルスエネルギー → **低ミラーダメージ(光輸送)**



パラメータ	設計値
ビームエネルギー	800 MeV
バンチ電荷	60 pC
バンチ繰り返し	162.5 MHz
平均電流	10 mA
RF周波数	1.3 GHz
EUV波長	13.5 nm
EUVパワー	> 10 kW

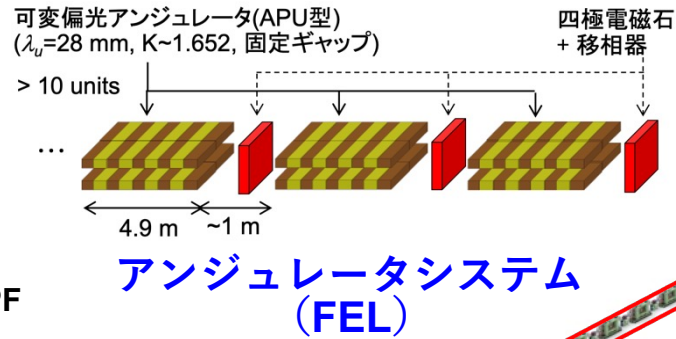
N. Nakamura et al., Proc. ERL2015, pp.4-9(2015).

H. Kawata et al, J. Micro/Nanopattern Mater. Metrol. **212**(2), 021210 (2022).

EUV-FEL光源の主要コンポーネント



偏光可変アンジュレータ@PF

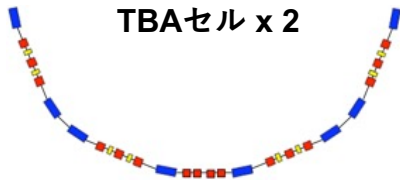


第1アーク部 バンチ圧縮

DBAセル x 3
青: 偏向電磁石
赤: 四極電磁石
黄: 六極電磁石

N. Nakamura et al,
J. Phys.: Conf. Ser.
874(1), 012013 (2017).

第2アーク部 バンチ伸長 TBAセル x 2

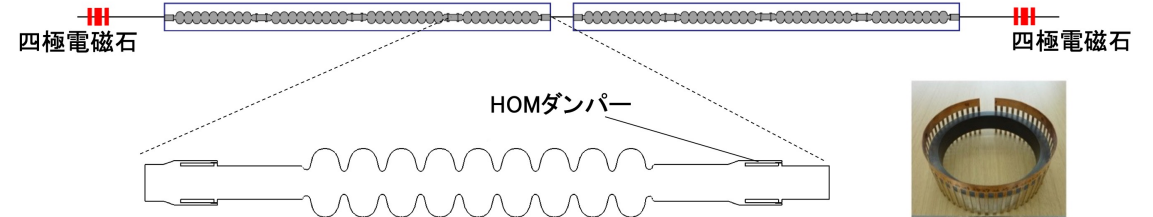


主超伝導リニアック

64空洞 (16クライオモジュール)

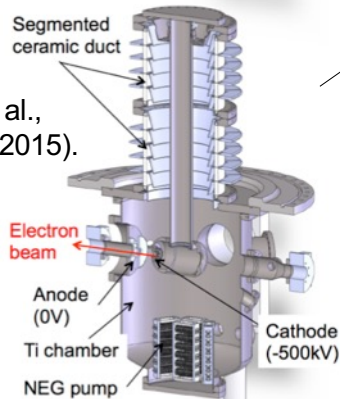
2クライオモジュール拡大図 (4空洞 x 2)

T. Konomi et al., Proc.
ERL2022 (2022).



加速勾配 $E_{acc}=12.5\sim 15$ MV/mでの安定運転@10mA

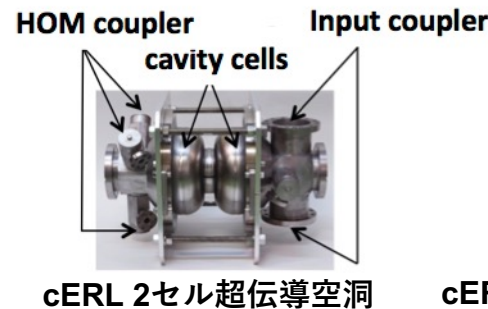
光陰極DC電子銃



M. Yamamoto et al.,
Proc. ERL2015 (2015).

KEKで開発された第2電子銃

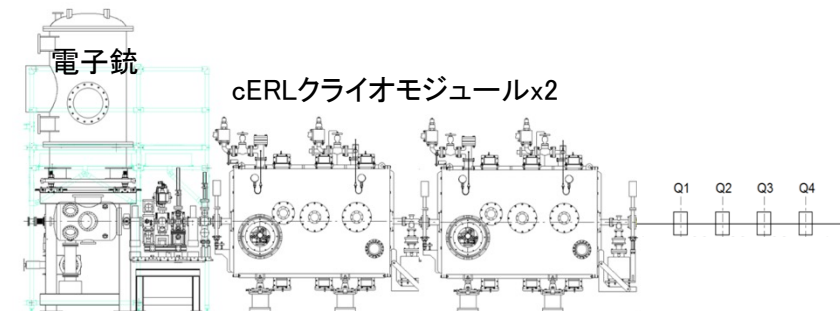
入射超伝導リニアック



E. Kako et al., Proc. IPAC2012, (2012); Watanabe et al., NIM A714, 67(2013).



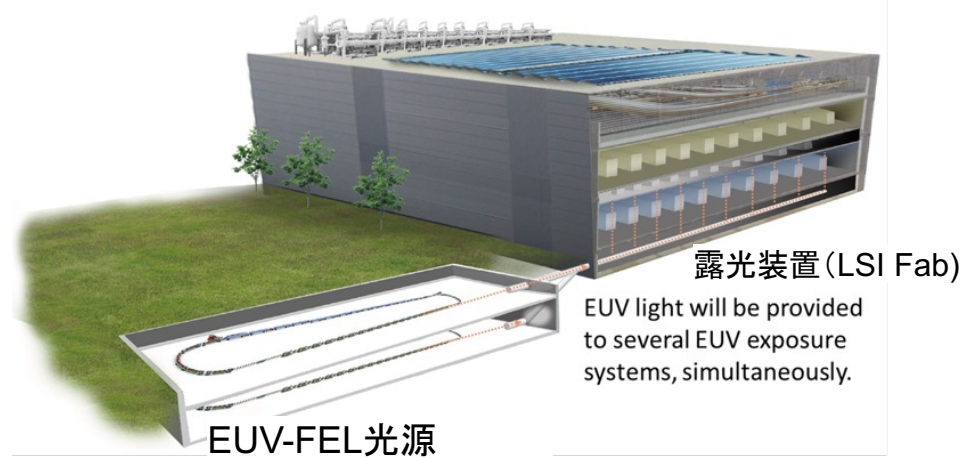
cERL入射クライオモジュール



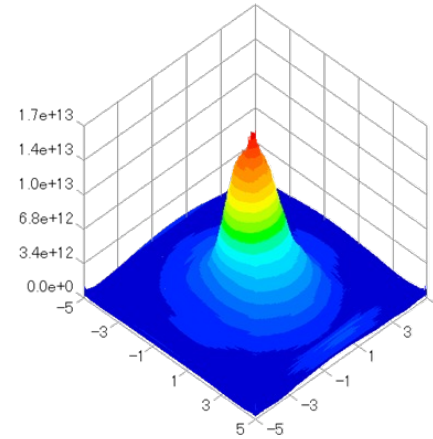
EUV-FEL入射部配置

光ビームライン

EUV-FEL光源と露光装置間の光ビームライン配置



EUV-FEL光のエネルギー密度とアブレーション閾値



EUV光のパルスエネルギー密度 (光源出口から3mの位置) : $\sim 10 \text{ mJ/cm}^2/\text{pulse}$

c.f. Mo/Si多層膜及びシリコンのアブレーション閾値 : $\sim 20 \text{ mJ/cm}^2/\text{pulse}$ ($< 10 \text{ ps}$)

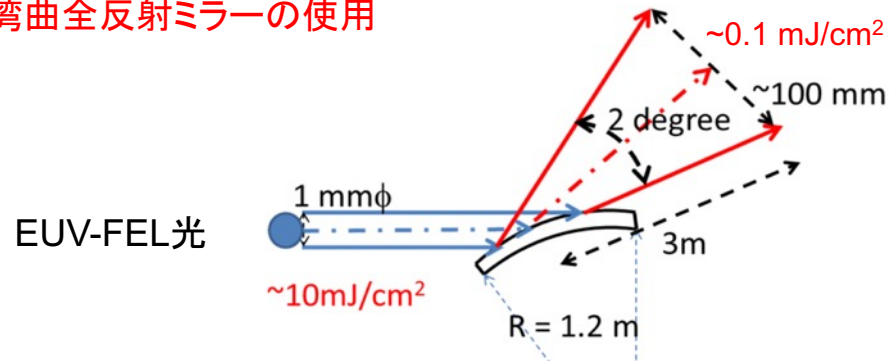
M. Nishikino et al., Proc. 2018 Source Workshop (2018).

光ビームラインの概念設計

H. Kawata et al, J. Micro/Nanopattern Mater. Metrol. **212**(2), 021210 (2022).

(1) 垂直サイズの拡大

湾曲全反射ミラーの使用

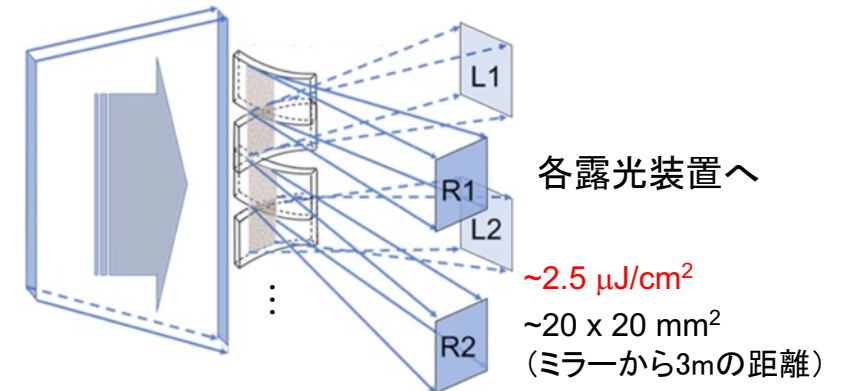


(2) 水平サイズの拡大と分岐

分割型湾曲全反射ミラーの使用

垂直に広げられた EUV-FEL光の入射

$\sim 0.1 \text{ mJ/cm}^2$



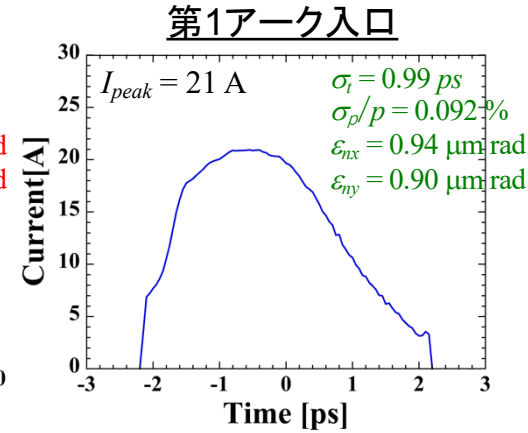
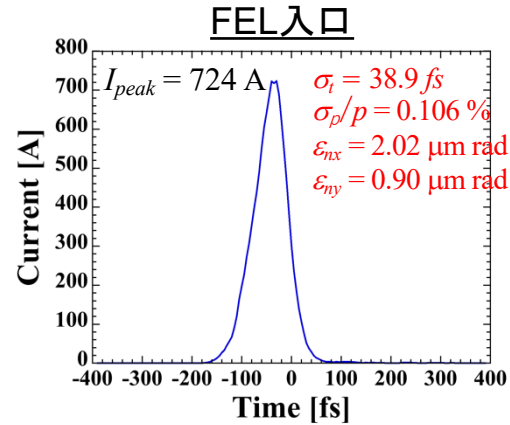
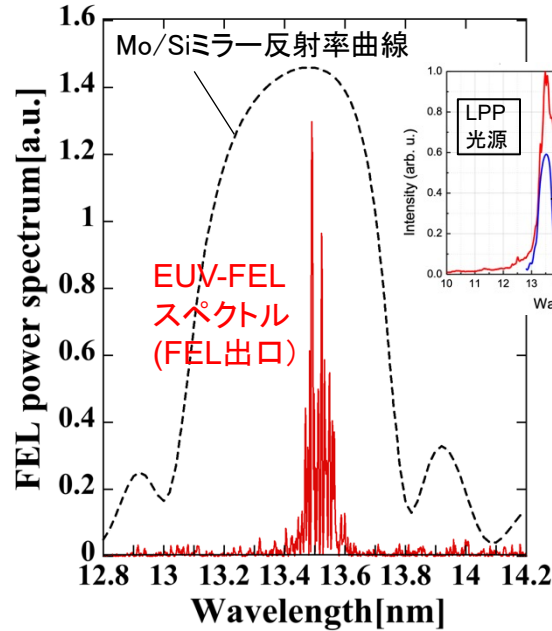
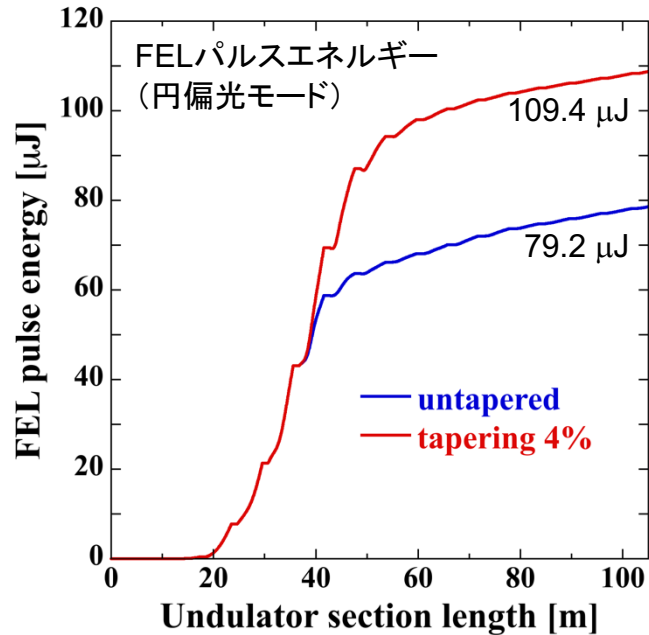
(3) 露光装置の第1ミラーに最適な光サイズの調整

全反射ミラーの使用

EUV光の大きなロスとミラーの損傷なく各露光装置まで輸送することが可能である。

高EUV出力

EUV-FEL光源のS2Eシミュレーション



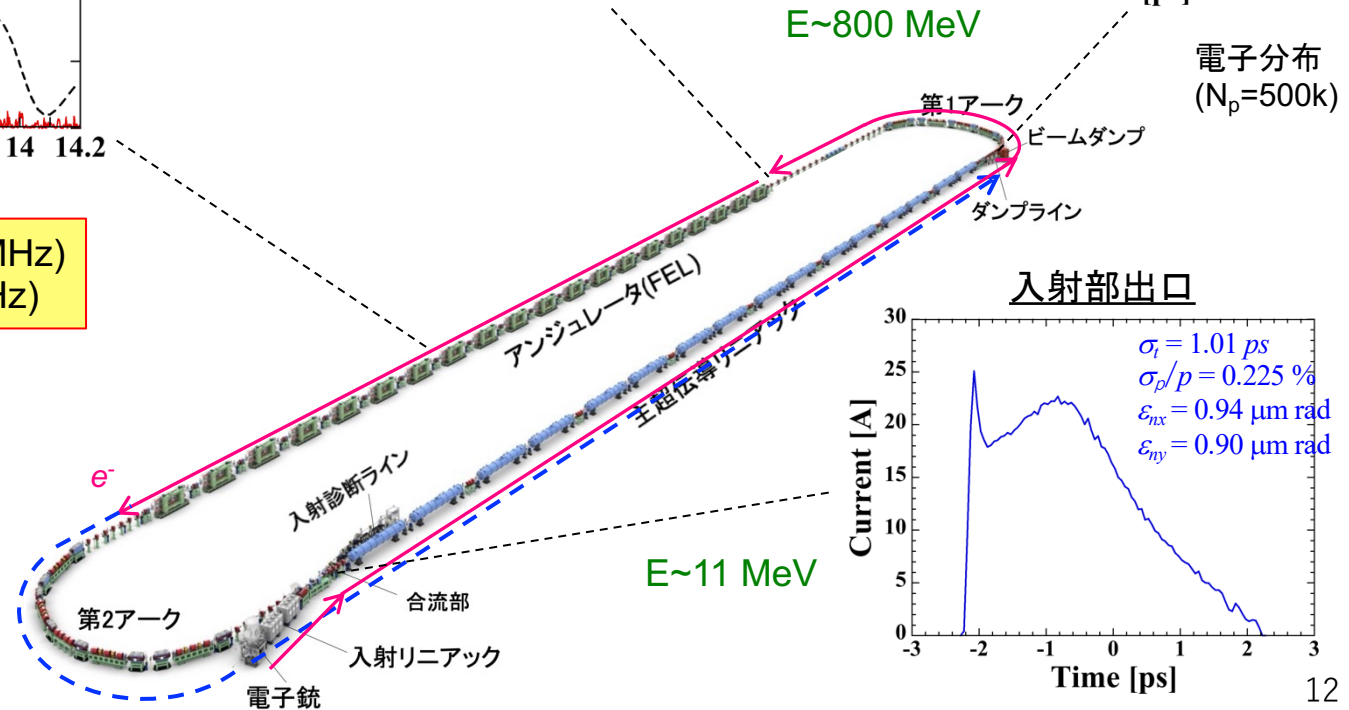
FELパワー(テーパー最適化) : 17.8 kW @ 9.75 mA (162.5 MHz)
35.5 kW @ 19.5 mA (325 MHz)

EUV-FEL光源は非常に高いEUV出力性能を有する。

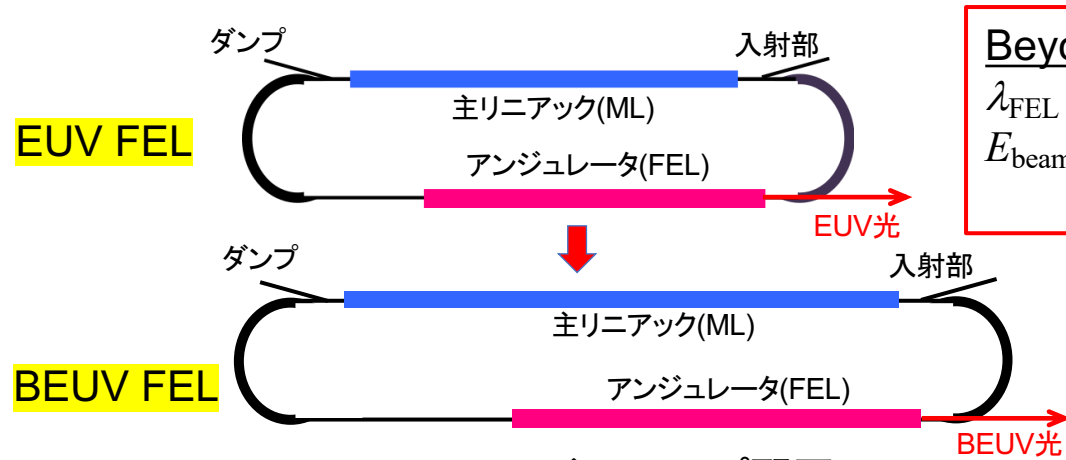
EUV-FELスペクトルの幅はMo/Si多層膜ミラーの反射率曲線の幅よりも十分に狭い。

FEL発振後もビームはロスなくダンプラインまで到達。

未考慮の物理や誤差の影響を入れてさらに精度を高めていく予定。

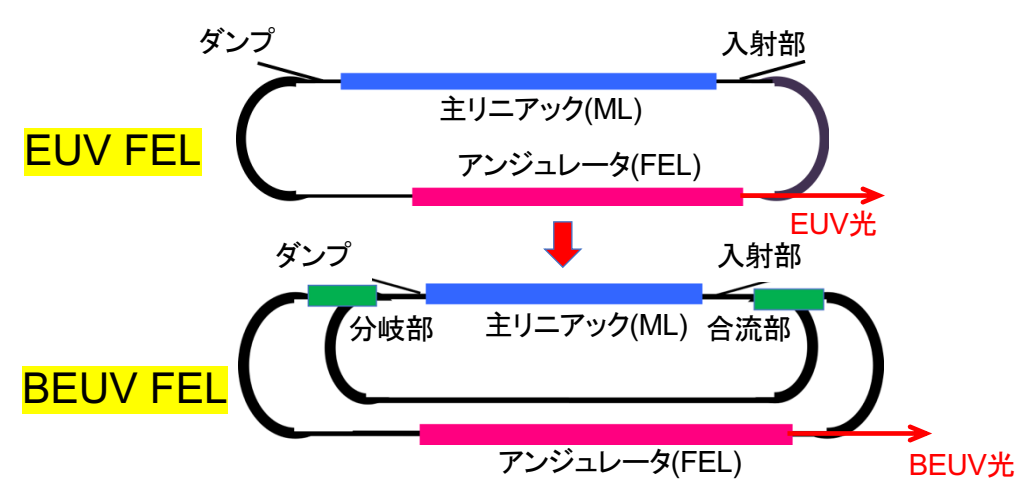


Beyond EUV(BEUV)光源へのアップグレード

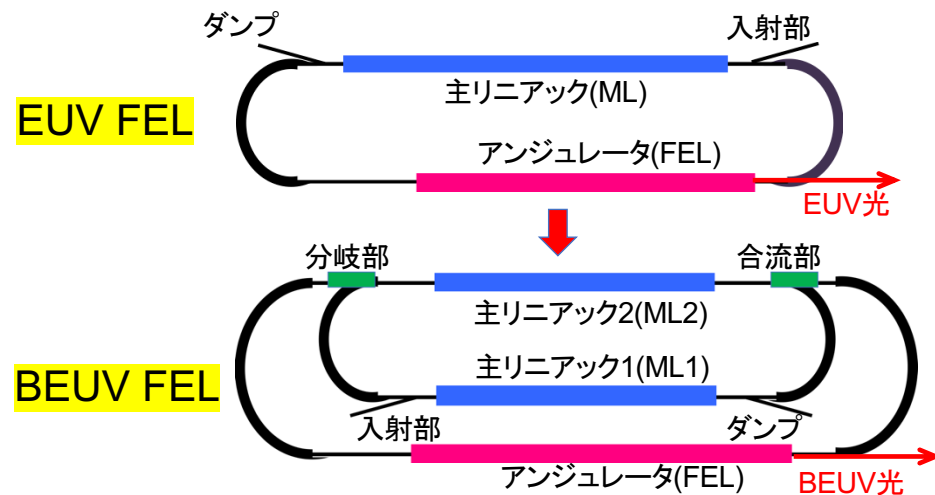


(A) シングルループ配置

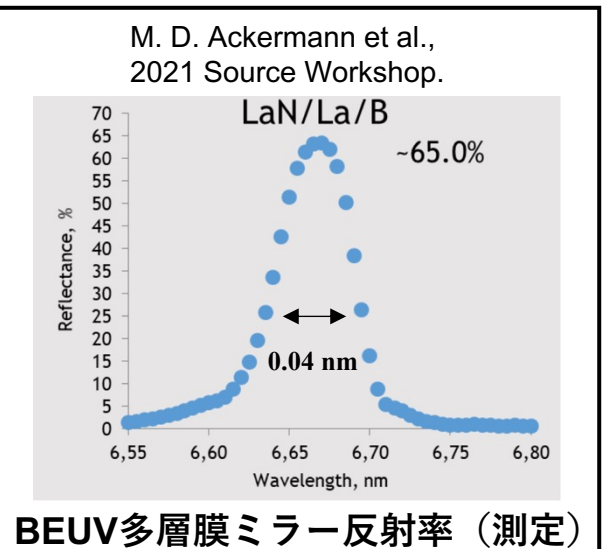
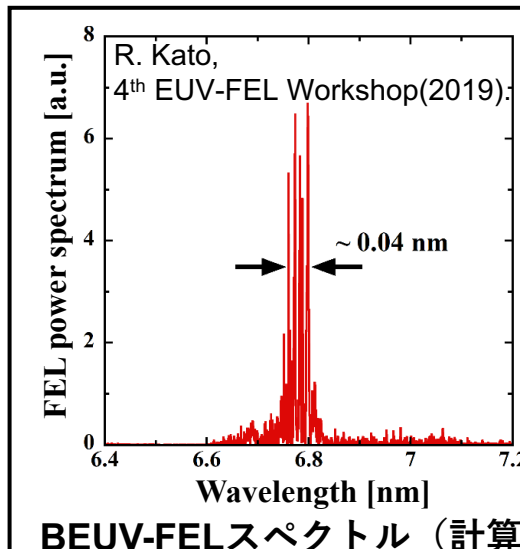
Beyond EUV(BEUV)
 $\lambda_{FEL} : 13.5 \rightarrow 6.7 \text{ nm}$
 $E_{beam} : 0.8 \rightarrow 1.14 \text{ GeV}$
 $(\lambda_{FEL} \propto E_{beam}^{-2})$



(C) ダブルループ配置 2

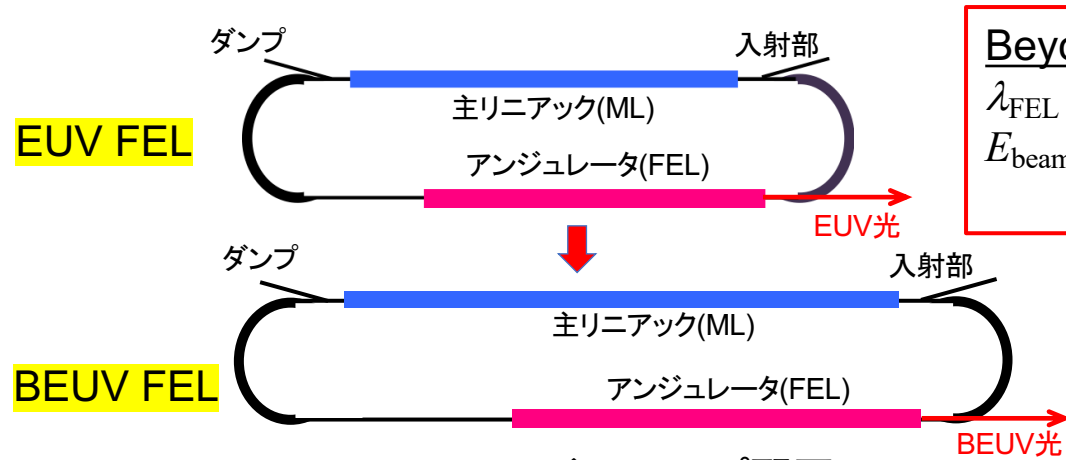


(B) ダブルループ配置 1



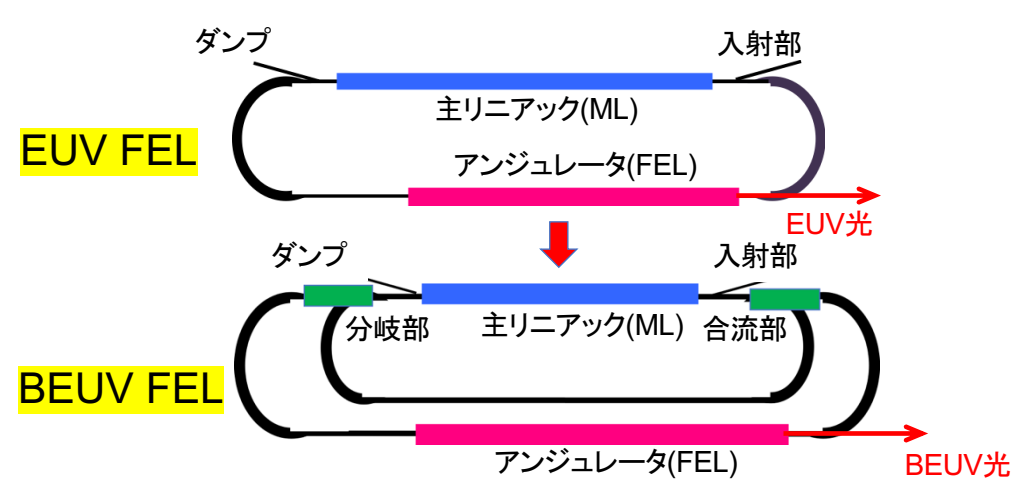
ERLを用いたFEL光源はより高分解能を目指すBEUVリソグラフィでも有望な光源である。

Beyond EUV(BEUV)光源へのアップグレード

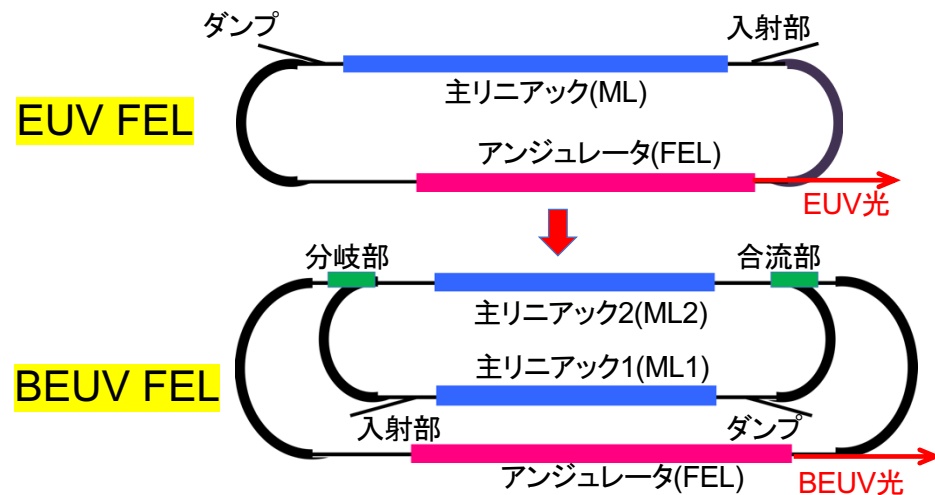


(A) シングルループ配置

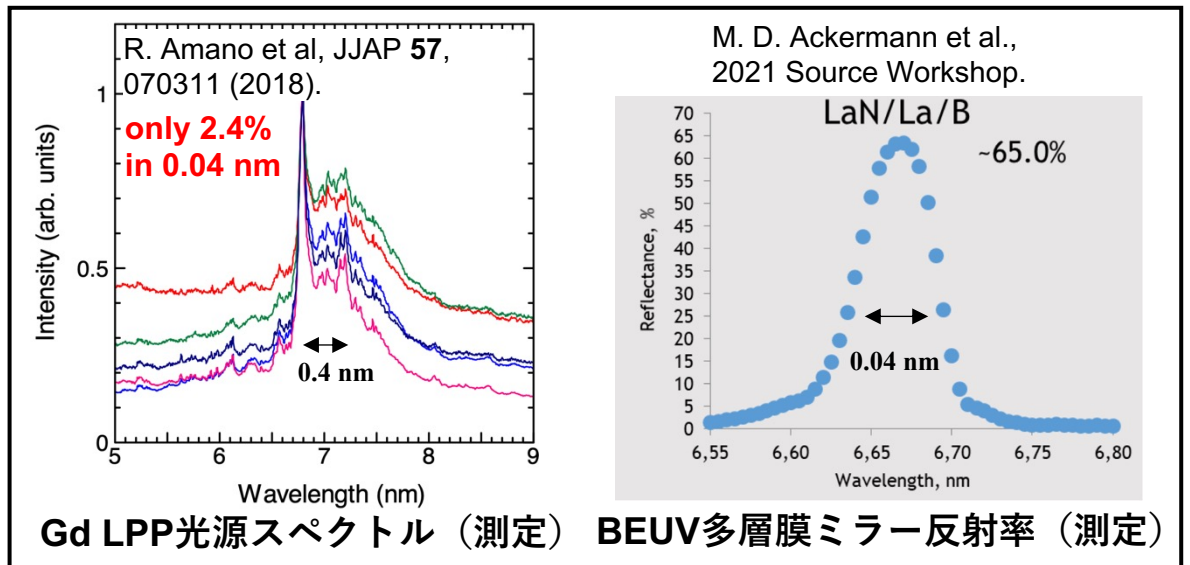
Beyond EUV(BEUV)
 $\lambda_{FEL} : 13.5 \rightarrow 6.7 \text{ nm}$
 $E_{beam} : 0.8 \rightarrow 1.14 \text{ GeV}$
 $(\lambda_{FEL} \propto E_{beam}^{-2})$



(C) ダブルループ配置 2



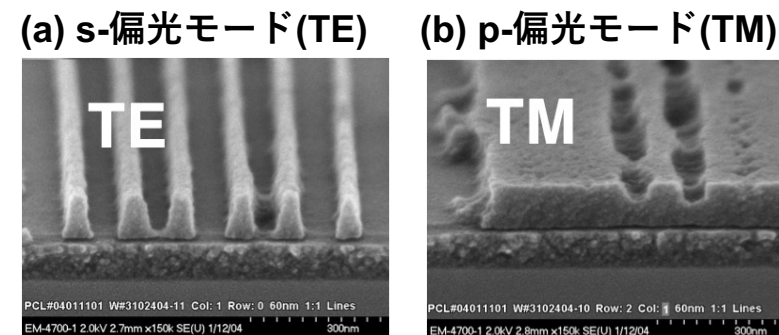
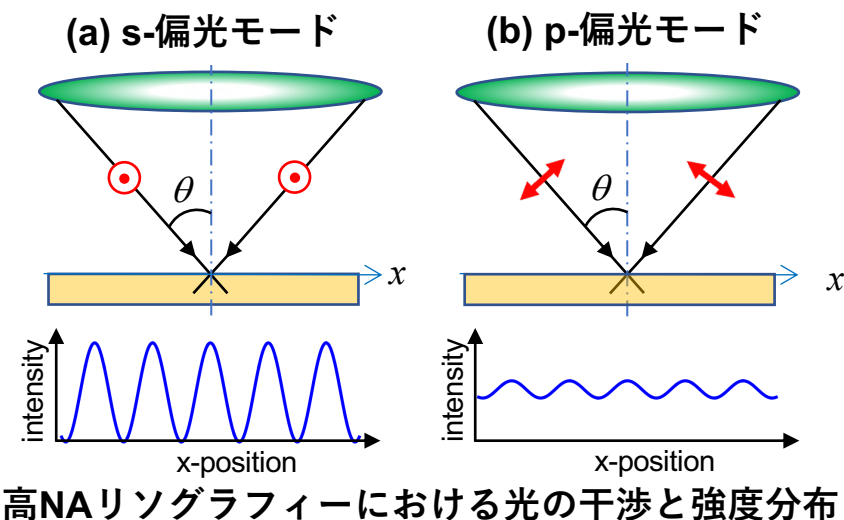
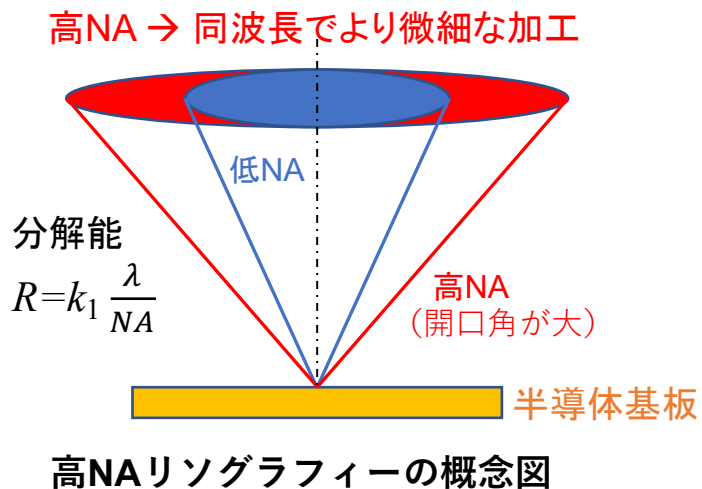
(B) ダブルループ配置 1



ERLを用いたFEL光源はより高分解能を目指すBEUVリソグラフィでも有望な光源である。

偏光の利用と制御

高NAリソグラフィーにおける偏光の効果



157-nm light, NA=0.85, 60nm half-pitch
高NAリソグラフィーでの偏光利用実験
B. W. Smith et al., Proc. of SPIE 5377, 68-79 (2004).

偏光制御スキーム (検討中)

(1) 全数円偏光モード
パワー重視(低NA)



(2) 全数直線偏光モード
偏光重視(高NA)



(3) ハイブリッドモード
偏光重視(高NA)



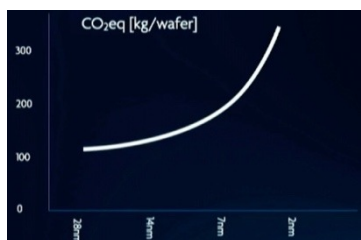
ポスター発表
谷川貴紀他
FRP26

EUV/BEUV-FEL光源は高NAリソグラフィーのための偏光制御が可能である (LPP光源は無偏光)。

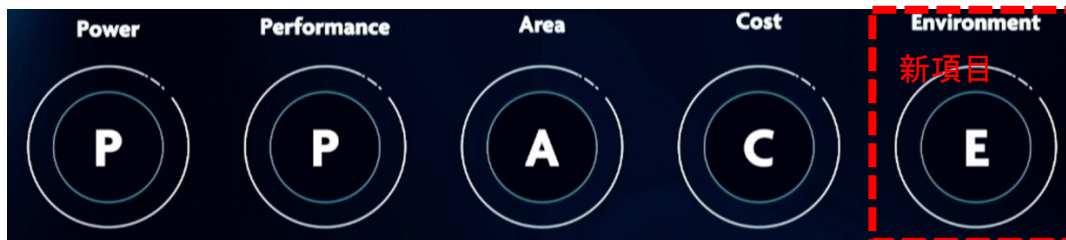
消費電力

持続可能な半導体製造技術・システム

- 半導体製造の微細化に伴ってCO₂排出量や電力消費が急増し、環境への配慮(グリーン化)が求められつつある。



CO₂排出量 vs 微細化



半導体チップ開発における要求項目

L. V. den Hove, Proc. SPIE **PC12053**, PC1205301(2022).

EUV光源の消費電力

- EUV-FEL : ~7.0 MW/10-kW EUV ⇒ ~0.7 MW/1-kW EUV(or 露光装置)
- LPP : ~1.1 MW/250-W EUV ⇒ ~4.4 MW/1-kW EUV(or 露光装置)

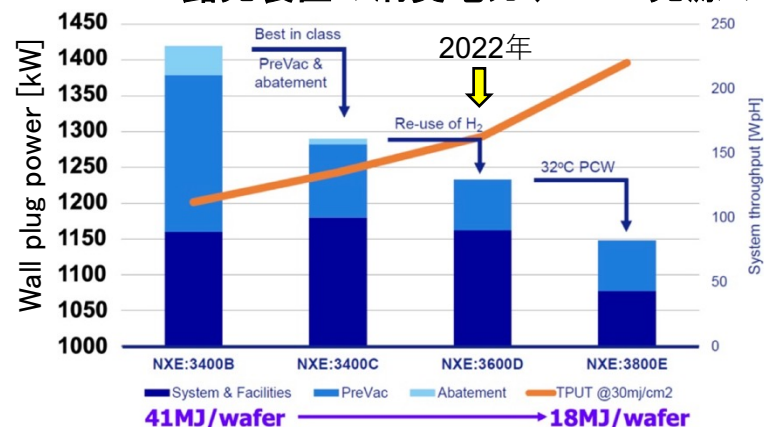
EUV-FEL光源は露光装置1台あたりの消費電力を大幅に下げることができる。

EUV-FEL光源の必要電力

項目	電力 [MW]
冷凍機システム	3.2 *1)
RF源	1.3 *2)
電磁石・真空・制御他	1.0
ユーティリティ	1.5
合計	7.0

- *1) 主リニアック超伝導空洞仕様:
 $Q_0=1 \times 10^{10}$, $E_{acc}=12.5$ MV/m
50%のマーヅン含む
- *2) 変換効率30%を仮定

EUV露光装置の消費電力(≈ LPP光源の消費電力)



M. V. den Brink, ITF USA (2020).

EUV-FEL光源は露光装置1台あたりの建設・運転コストも下げられる可能性がある。 → N. Nakamura et al., Jpn. J. Appl. Phys. **62**, SG0809 (2023).

発表内容

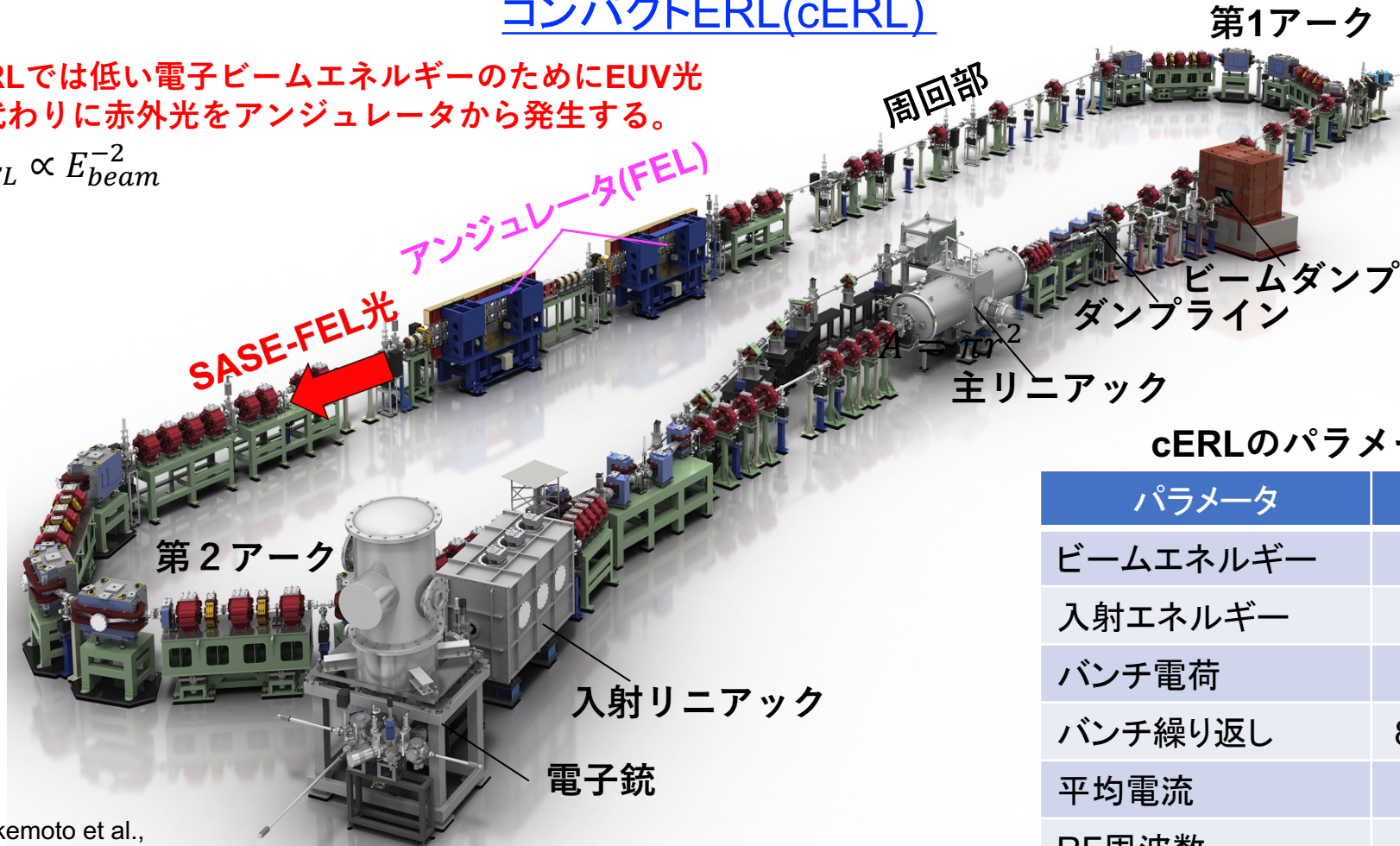
- 背景
- EUV-FEL光源の概要と特長
- cERLを用いたEUV-FEL光源の概念実証
- まとめ

EUV-FEL光源の概念実証 (PoC)

コンパクトERL(cERL)

cERLでは低い電子ビームエネルギーのためにEUV光の代わりに赤外光をアンジュレータから発生する。

$$\lambda_{FEL} \propto E_{beam}^{-2}$$



cERLの写真

cERLのパラメータ (現状)

パラメータ	現在値
ビームエネルギー	17.5 MeV
入射エネルギー	3 - 5 MeV
バンチ電荷	60 pC (最大)
バンチ繰り返し	81.25/1300 MHz
平均電流	1 mA (最大)
RF周波数	1.3 GHz

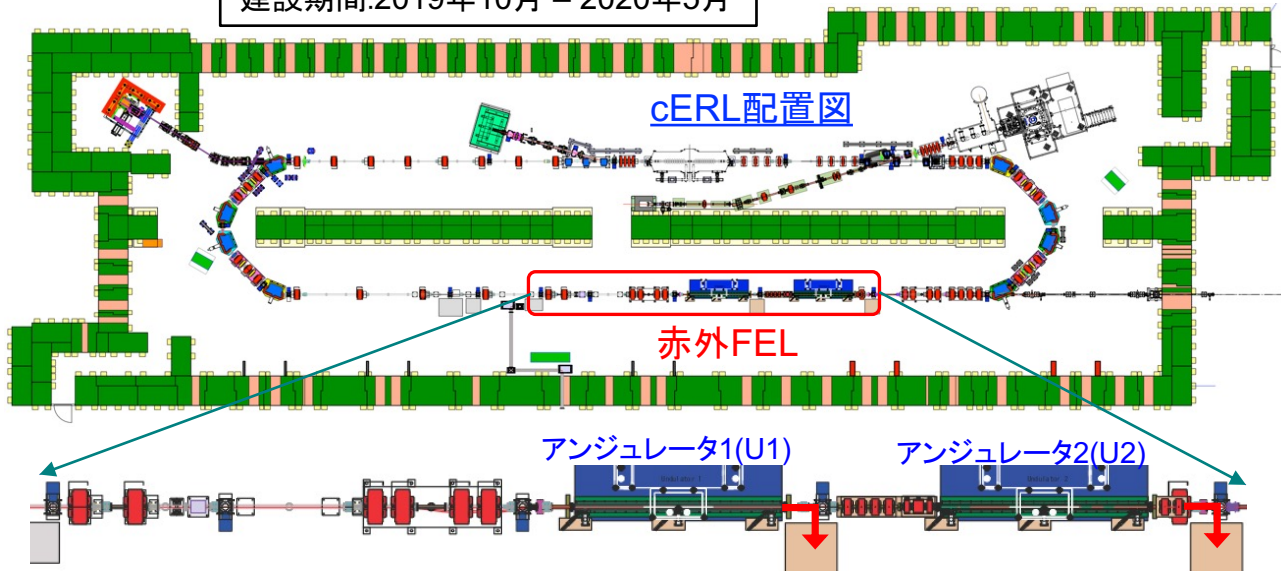
M. Akemoto et al.,
Nucl. Instrum. Methods **A877**, 197–219 (2018).

cERLでのSASE-FEL光の生成 → ERLを用いたEUV-FEL光源の概念実証
 → 世界初のERL配置でのSASE-FEL光源

cERL赤外FELの建設とコミッショニング

NEDOプロジェクト：分子振動遷移に基づく光吸収を利用した高効率レーザー加工のための中赤外FELの開発

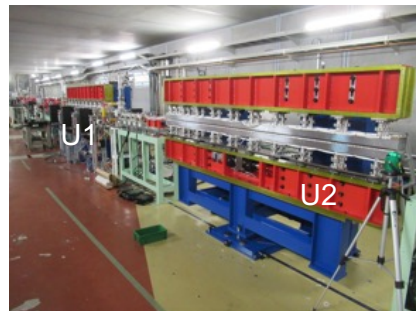
建設期間:2019年10月 - 2020年5月



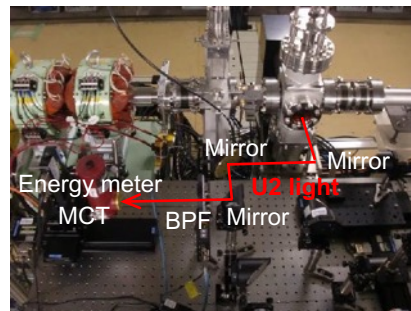
Y. Honda et al., *Rev. Sci. Instrum.* **92**, 113101 (2021). 阪井寛志他, 第18回日本加速器学会 (2021年).

パラメータ

- エネルギー: 17.5 MeV
- バンチ電荷: 60 pC
- バンチ繰り返し: 81.25 MHz
- IDタイプ: 水平偏光APU
- ID長: 2.976 m x 2
- ID磁場周期 λ_u : 24 mm
- FEL波長 λ : 10 - 20 μm

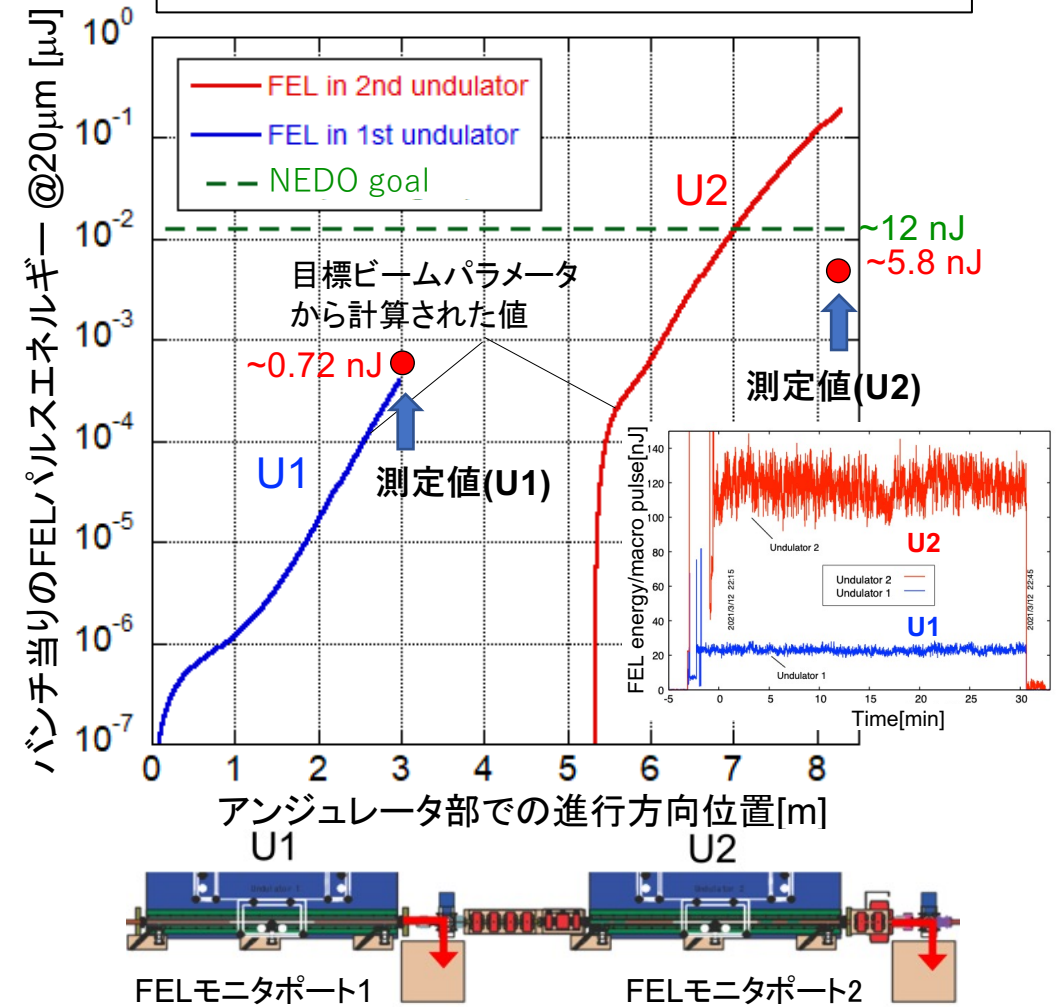


アンジュレータ(U1, U2)



FELモニタポート2

コミッショニング期間: 2020年6月~7月, 2021年2月~3月

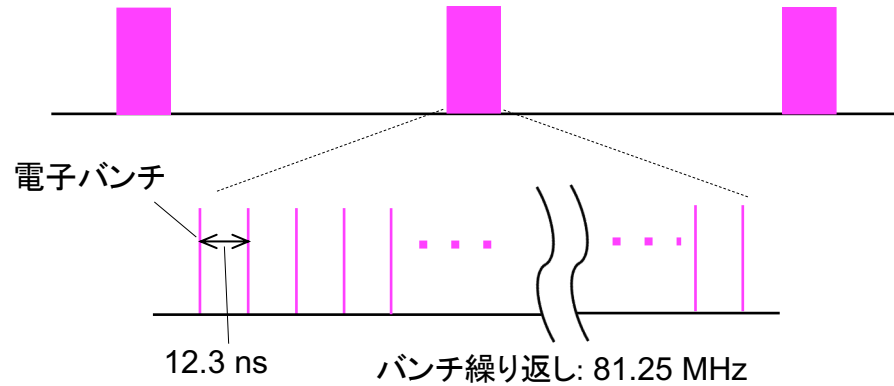


cERLでのSASE-FEL光の発生が確認され、EUV-FEL概念実証として重要なステップとなった。

高出力FEL運転に向けて

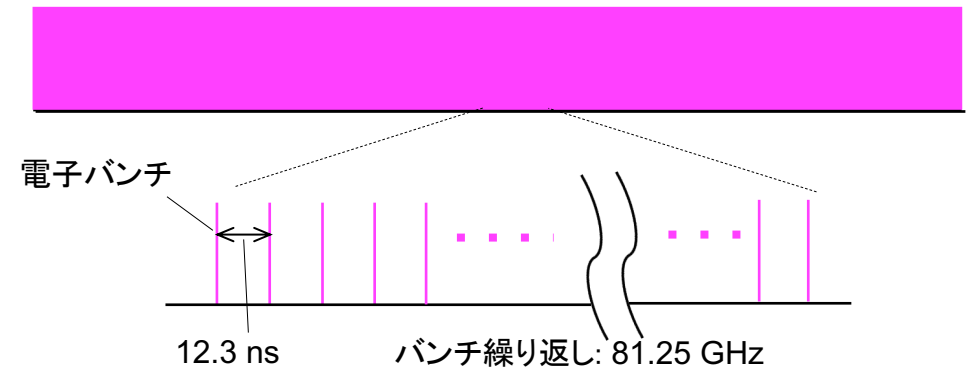
FELコミッショニング/ビーム調整(バーストモード)

マクロパルス(パルス幅 ~1 μs) @ 1 - 5 Hz



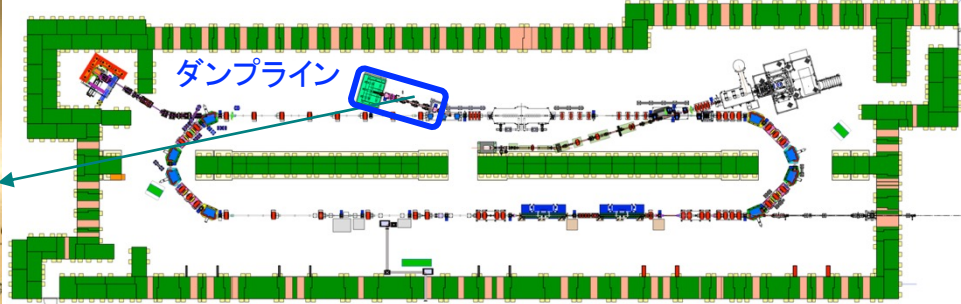
高出力FEL運転 (CWモード)

$$P_{\text{CWモード}} = P_{\text{バーストモード}} \times (10^5 - 10^6)$$



N. Nakamura et al., *J. Phys.: Conf. Ser.* **2420**, 012029.

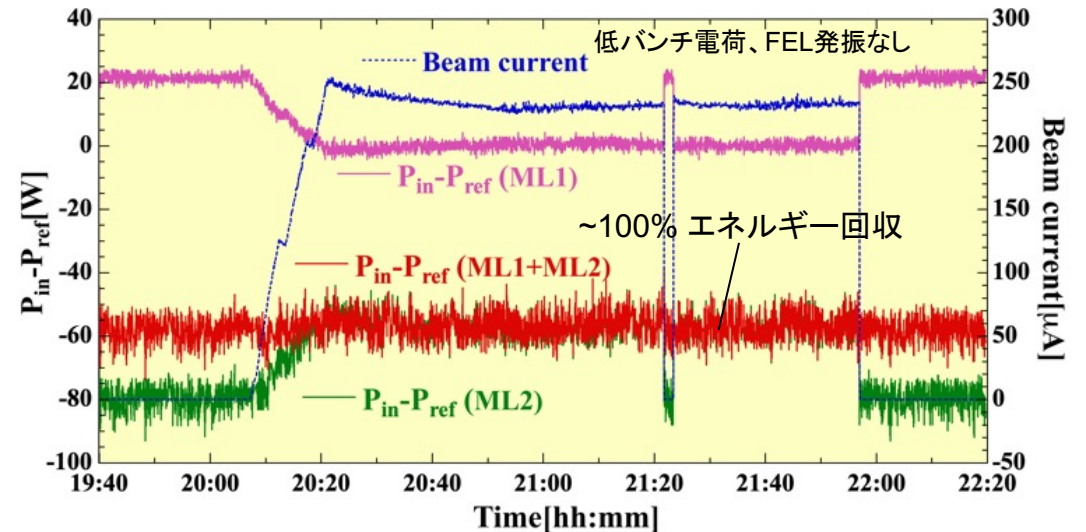
cERL 配置



ビームロスを抑えるためにエネルギーアクセプタンスを70%以上改善させた。

高出力運転に向けたcERLダンプラインの改造

高出力FEL運転に向けて準備(ダンプライン改造、FEL建設後最初の大電流運転など)が行われた。



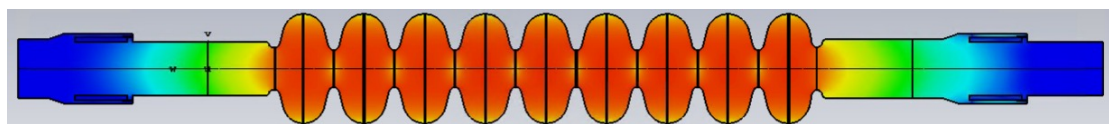
FEL建設後の最初の大電流運転(~250uA)

T. Tanikawa et al., IPAC2023.

今後取り組むべき課題

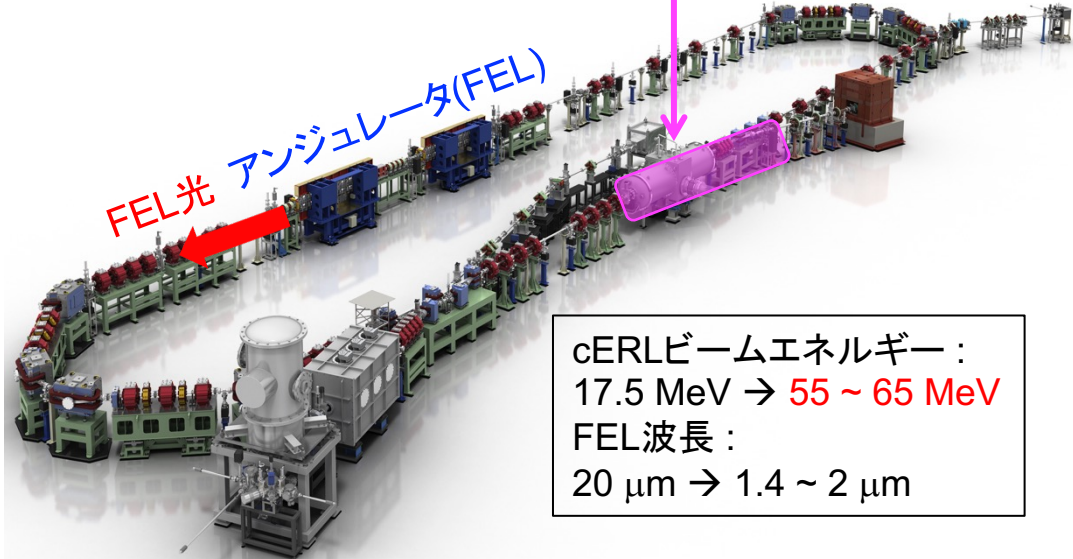
(1) EUV-FEL空洞の製作・試験

EUV-FEL 空洞 (高加速勾配、高いQ値)



$E_{acc} = 8.5 \rightarrow 12.5 \sim 15 \text{ MV/m}$
 $Q_0 > 2 \times 10^{10}$

4空洞 (1モジュール)



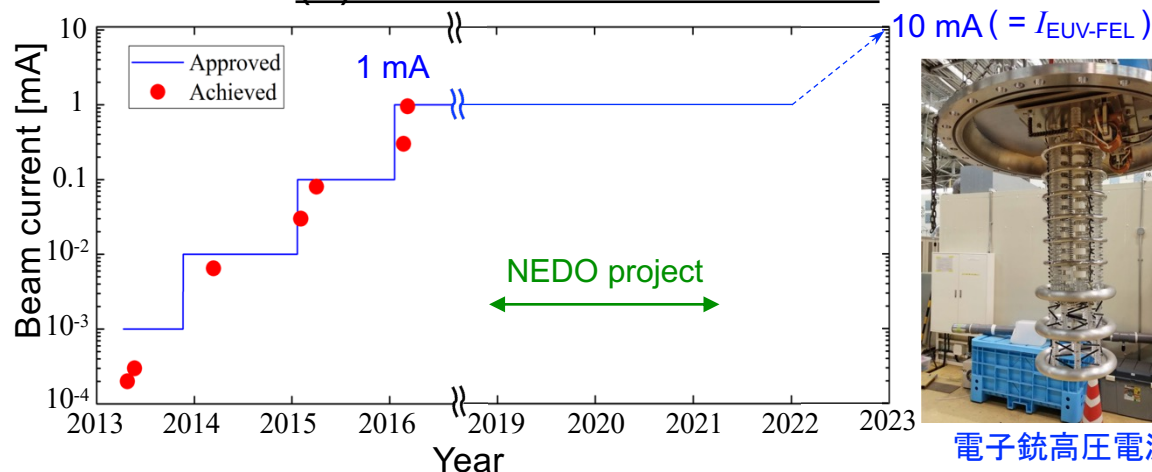
cERLビームエネルギー:
 17.5 MeV \rightarrow 55 ~ 65 MeV
 FEL波長:
 20 μm \rightarrow 1.4 ~ 2 μm

cERL ビームエネルギー増加

\rightarrow 空間電荷効果の軽減 + 縦・横エミッタンス改善

EUV-FEL空洞の性能評価とcERLのビーム品質向上が期待される。

(2) 10 mAビーム運転の実現



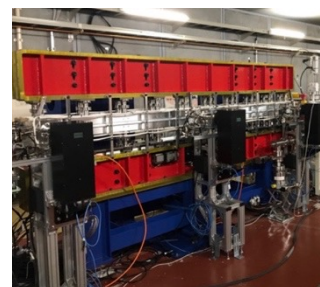
電子銃高圧電源

cERL最大ビーム電流の歴史

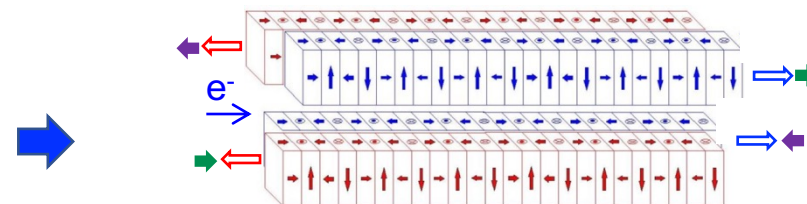
電子銃高圧電源と放射線遮蔽の改善によって実現可能である。

(3) EUV-FEL光源用アンジュレータの製作・試験

固定ギャップで波長と偏光を制御可能



水平偏光APU (cERL)



\Rightarrow 対角ペア磁石列の位相シフトによる偏光制御
 \Leftarrow 左右ペア磁石列の位相シフトによる波長制御

APU型可変偏光アンジュレータの磁石構造の例

コスト削減のためのギャップ固定式可変偏光APUを開発する。

発表内容

- 背景
- EUV-FEL光源の概要と特長
- cERLを用いたEUV-FEL光源の概念実証
- **まとめ**

まとめ

- ストカスティック効果等を克服しつつ、より高スループット・高分解能を実現するためにより強力なリソグラフィー用光源が将来必要とされる。
- 我々のグループでは、ERLを用いた高出力のEUV-FEL光源を設計し、主要コンポーネントの開発研究を行ってきた。
- EUV-FEL光源はLPP光源と比べて、高EUV出力、ミラー汚染の有無、BEUVへのアップグレード、スペクトル幅、偏光制御、露光装置1台あたりの消費電力等で優れている。
- cERLでの赤外SASE-FEL光の発生に成功し、EUV-FEL光源の概念実証として重要な一步を得た。CWのFEL運転の準備も行われている。
- EUV-FEL光源は将来有望なリソグラフィー用光源であり、産業化に向けて研究開発をさらに推進していきたい。

謝辞 (1)

EUV-FEL光源産業化研究会 (2015年設立)

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
渡邊 健夫

企業群

 早稲田大学
鷲尾 方一

 大阪大学
古澤 孝弘

KIOXIA

 日立金属株式会社
Materials Maglc

 三菱重工機械システム

 大陽日酸
The Gas Professionals

 MITSUBISHI ELECTRIC
Changes for the Better

 NTT AT

KEKのERL技術、QSTのFEL
技術をベースに産業化を検討

TOSHIBA

 SIGAPHOTON


HITACHI


TOYAMA


 Canon
キヤノン電子管デバイス株式会社

 日本高周波株式会社

リソテックジャパン株式会社
Litho Tech Japan

 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
河田 洋他

 産業技術総合研究所
清 紀弘

これまでの活動・イベント

EUV-FELワークショップ(7回)

1st EUV-FEL Workshop(2016)

2nd EUV-FEL Workshop(2017)

3rd EUV-FEL Workshop(2018)

4th EUV-FEL Workshop(2019)

5th EUV-FEL Workshop(2021)

6th EUV-FEL Workshop(2022)

7th EUV-FEL Workshop(2023)

研究会全体会議(13回)

各分科会会合

セミナー

その他の会合

謝辞 (2)

cERL Collaboration Team

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

M. Adachi, D. Arakawa, H. Araki, M. Egi, S. Eguchi, M. Fukuda, T. Furuya, K. Haga, K. Harada, N. Higashi, T. Honda, Y. Honda, T. Honma, X. Jin, E. Kako, Y. Kamiya, R. Kato, H. Kawata, Y. Kobayashi, Y. Kojima, M. Kurata, H. Matsumura, S. Michizono, C. Mitsuda, T. Miura, T. Miyajima, H. Miyauchi, Y. Morikawa, S. Nagahashi, D. Naito, H. Nakajima, N. Nakamura, K. Nakanishi, K. Nigorikawa, T. Nogami, T. Obina, H. Sagehashi, H. Sakai, M. Shimada, T. Shioya, M. Shiozawa, M. Tadano, T. Tahara, T. Takahashi, R. Takai, H. Takaki, O. Tanaka, T. Tanikawa, Y. Tanimoto, K. Tsuchiya, T. Uchiyama, A. Ueda, K. Umemori, M. Yamamoto, G. Yoshida

National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology (QST)

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

Michigan State University T. Konomi

Hiroshima University M. Katoh, M. Kuriki, A Kano

National Institute of Technology, Akita College F. Sakamoto

Collabolation Team for NEDO Project (IR-FEL)

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

T. Sato, M. Kakehata, H. Yashiro

Tokyo University of Science (TUS) K. Tsukiyama, T. Kawasaki

Hamamatsu Photonics T. Edamura, N. Akikusa

ご清聴ありがとうございました。